

摘要

济南市南部山区为泰山余脉,是济南城区地下水源的重要补给区,具有调节济南市生态环境和保泉补源等多重生态功能。济南市南部山区多年平均降水量为 648mm,雨水资源丰富,雨水利用潜力巨大。充分利用南部山区的雨水资源,对改变南部山区的生态功能,保障城乡供水,实现水资源的可持续利用,改善济南市的水环境状况,实现泉水常年喷涌具有重要意义。因此,对济南市南部山区降雨特性及雨水利用进行研究有很重要的理论和经济意义。

论文分析了南部山区的降雨特性,采用皮尔逊Ⅲ型曲线法建立降雨频率模型,模拟南部山区降雨量与频率之间的关系。模型中理论频率曲线和实际情况拟合较好,误差在 $\pm 10\%$ 以内。模拟结果表明,该区年降雨量分布规律基本符合 $\bar{x}=648\text{mm}$ 、 $C_v=0.27$ 、 $C_s=0.16$ 的皮尔逊Ⅲ型频率曲线,从而得出了该区的降雨规律,即南部山区年降雨量在 1000mm 以上的频率是 2%、年降雨量在 640mm 以上的频率是 50%。并在此基础上,选择仲宫镇某一典型丘陵山体,在自然降雨条件下采用一维坡地径流模型计算产流量,坡地径流计算值与实测值相对误差在 $\pm 15\%$ 以内,模型计算结果可靠。依据该模型来计算某一具体的丘陵山体产流量,为有效利用南部山区的雨水资源、制定雨水蓄积及其利用方法提供理论依据。

论文还探讨了南部山区降水量与城区地下水位动态的关系。依据南部山区 1987-2003 年历年各月降水量资料和大涧沟以及七贤镇 1987-2003 年历年各月地下水水位资料,用最小二乘法线性回归进行分析,得出南部山区降雨量直接影响城区南郊地下水水位,进一步影响城区泉群地下水的水位。同时,从分析中得出南部山区 2~9 月份降雨量与城区地下水水位的升降关系密切,汛期降雨量影响更为明显,两者呈正比性规律变化。因此,应合理开发利用南部山区 2~9 月份的雨水资源,对保持城区地下水水位,维持城区泉群的正常喷涌有重要意义。

论文对南部山区雨水积蓄利用措施如生物蓄水措施、工程调蓄措施、非工程性控制措施三种方式进行了初步探讨。

关键词: 雨水利用, 降雨特性, 皮尔逊Ⅲ型曲线, 最小二乘法, 蓄存措施

Analysis of rainfall characteristic and research of rain water use in south mountainous area of Jinan

Yu Xiaojing (Municipal Engineering) Directed by Li Mei

ABSTRACT

The south mountainous area of Jinan is Taishan -odd arteries, it is the important supplies area of Jinan underground water source. It has the ecology function of adjusting the Jinan ecological environment and making up the source to the spring group and other actions. The average precipitation of the south mountainous area is 648 mm, is rich in water resources and it has huge potential of rainwater use. It has important significance which it use fully rainwater resources of south mountainous area to adjust the ecology function of south mountainous area, safeguard the water supply of city and countryside, realize the sustainable use of water resources, improves Jinan's water environmental aspect and maintenance water seepage spout year to year of Jinan. So, the research of rainfall characteristic and rainwater use has important theory and economic significance.

The model of rainfall frequency is built by Pearson-III-Curve to analysis the relations of rainfall amount and frequency. In the model, the fitting of the theory frequency curve and the actual situation is good and the error is smaller than 10%. The rainfall characteristic of south mountainous area's conforms to the Pearson-III-Curve of $C_s=0.16$, $C_v=0.27$, $\bar{x}=648\text{mm}$. The frequency is 2% of rainfall amount which has surpassed 1000mm and the frequency is 50% of rainfall amount which has surpassed 640mm. And based on this, with the nature rainfall situation, utilizes univariate-land on slopes runoff model computation port ditch town some massif to produce the current capacity in some typical hill mountain massif of Zhonggong Town, the land on slopes runoff predicted value and the actual value relative error is less than 15 in the computation, the model computed result is reliable. The utilizes univariate-land on slopes runoff model have the important meaning to calculates the producing current capacity of some concrete hill mountain massif in south mountainous area, it can make measures and methods about storing up and using the rainwater with the calculated producing current capacity.

The relations of the south mountainous area precipitation and the city subsoil water level dynamic are discussed in the paper. With the data from 1987 to 2003 of rainfall material in Jinan south Wuhu mountainous, the material of Ground water level of Dajiangou areas and Qixian town areas, it makes the linear regression model to analysis and finds that the rainfall amount of WoHushan influence immediately the ground water level of Dajiangou, further influence the ground water level of the urban district spring group. Simultaneously, It finds that the rainfall of the southern mountainous areas from feb. to sep, specially flood season rainfall amount, has better relevance to the urban district subsoil water level. So, the rational use of rainwater from feb. to sep. can maintain a certain urban water table level and ensure that the normal urban springs spewing.

The measures of rainwater savings and use which includes biological storage measure, the project stores and regulates the measure and non-project regulatory measures are also discussed in the paper.

Key words: rainwater use, rainfall characteristics, Pearson-III-Curve, linear regression model, saving measures

原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，论文中不含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得山东建筑大学或其他教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

学位论文作者签名： 于晓晶 日期 08.6.18

学位论文使用授权声明

本学位论文作者完全了解山东建筑大学有关保留、使用学位论文的规定，即：山东建筑大学有权保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权山东建筑大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其它手段保存、汇编学位论文。

保密论文在解密后遵守此声明。

学位论文作者签名： 于晓晶 日期 08.6.18

导师签名： 李海 日期 08.6.18

第1章 绪论

1.1 课题的背景和意义

水是生命之源，是人类赖以生存和发展的最基本要素，也是社会发展的重要经济资源^[1]，人们的生产生活和国民经济各部门都离不开水。但是随着城市化的发展，水资源短缺日益严重，这已成为人类在 21 世纪所面临的最大的，也是一个全球性的难题。

随着城市规模的不断扩大、城市人口的急剧增加和经济的迅速发展，城市需水量不断增加，大量污水产生，造成了水体污染和水资源的短缺。污水回用、海水淡化和雨水利用均成为城市解决水资源短缺的重要途径。其中雨水是继中水、海水之后，作为“第三水源”加以开发利用的。自上世纪 70 年代起，世界各国开始注重城市雨水利用技术的开发和应用，并建成了不同规模的示范工程。总的来说，雨水利用发展可分为解决生活用水的初级阶段，解决生产用水的中级阶段和解决生态用水的高级阶段。三个阶段中雨水的收集、蓄存以及处理技术一直是雨水利用研究的重点。

素有“家家泉水，户户垂杨”美誉的济南因遍布市区的泉水而被称为“泉城”，泉水对济南的经济发展和人民生活水平起到了重要的作用^[2]。元代于钦曾以地理学家的眼光评价道：“济南山水甲齐鲁，泉甲天下”。金代有人立了《名泉碑》，列举了济南境内的七十二名泉。此后，济南七十二泉之说不胫而走。其实，济南涌泉远远不止七十二处^[3]。其中仅正式命名的泉水就有一百四、五十之多。但是近年来，济南市的水资源短缺日益严重，水质污染加剧，泉水停喷现象时有发生，解决济南市水资源利用的可持续性问题已迫在眉睫。济南雨水资源丰富，利用充足的雨水资源可缓解水资源匮乏，水质污染严重，泉水停喷这一问题。

济南市南部山区面积广阔，雨水资源丰富，但植被覆盖率较低，地形起伏较大，是水土流失严重的地区。但是南部山区是济南市地下水源的重要补给区，是济南泉群泉水的地下补给区，是济南市的饮用水源保护区，生态功能很重要，具有调节济南市生态环境和给泉水补源等多重作用：

（1）南部山区雨水利用可维持自然界水循环

雨水作为自然界水循环系统中的重要环节，对调节、补充地区水资源量和改善及保护本地区的生态环境起着极为关键的作用。

济南市南部山区是城区地下水的补给区,但是随着城市化的进程,城区一再南扩,南部山区的面积越来越小,大面积的地面硬化改变了原来的水文特性,干扰了自然界的水文循环,造成大量雨水流失,易产生洪涝灾害却不能回灌地下,使地下水从降水获得的补给量逐年减少。南部山区面积广阔,多年平均降雨量丰富,如能充分利用该地区的雨水资源回灌地下,提高地下水的补给量,可维持自然界水循环的需要。

(2) 南部山区雨水利用可抑制城市洪涝灾害

城区一再南扩,不透水地面面积增大。大雨或暴雨时,雨水加速向城区各条河道汇集,洪峰流量迅速形成。同样的降雨,导致洪水总量增加。济南市降雨量和降雨类型相似的条件下进行比较,1956年6月21日与1991年7月28日两次洪水的降雨量分别为53.2mm和57mm,前期雨量也相近,而1991年洪水洪峰明显增大,滞时明显减小,两次洪水的洪峰相差1.6倍,洪量相差2.1倍,洪峰滞时相差8-9h。

因此,如对南部山区雨水所形成的径流进行有效的蓄集、储存、利用,可以减少南部山区进入城区的雨水径流量,减轻城市排水的压力。

(3) 南部山区雨水利用可以减少自来水的用量,达到节水目地

建设节水型社会是解决我国水资源供需矛盾最根本有效的战略措施。2002年修订的《水法》中,将“建设节水型社会”作为法律形式固化下来,并将“全面推进节水型社会建设”放在了相当重要的位置。

济南水资源极度紧缺,已严重影响到城市的发展和人民生活水平的提高。戚爱萍等对南部山区水质检测,共检出70余种有机污染物,已经影响到当地居民的生活用水水质。但南部山区雨水可成为低水质用水的水源,充分利用雨水来节约有限的水资源,以缓解供需矛盾,还可以有效增大入渗量以补充地下水。我们必须采取一定的措施,来合理、有效、充分、可持续的对南部山区的雨水进行集蓄、储存、利用、回灌地下等,以达到节水与开源的需要^[4-7]。

(4) 南部山区雨水利用对保泉有极其重要的作用

济南市由于独特的水文地质条件^[8],形成了著名的4大泉群,其中市区2.6km²范围内的名泉有150多处^[9]。泉水是济南的灵魂,但最近20年,美誉中外^[10]的“泉城”泉水停喷时有发生,保泉成了政府极为关注的问题。南部山区是城区重要的水源涵养地,是泉域地下水的补给区。将南部山区丰富的雨水资源回灌补源,即可实现人工补给大气降水与泉水出流的动态平衡。南部山区雨水资源的充分利用是济南泉涌和供水的重要保证。

(5) 南部山区雨水利用可为建设生态城市、保护城市水环境提供保障

生态城市建设是济南城市发展的目标,很好地利用雨水资源,达到人与自然的和谐,人与水的和谐,营造一个融山、泉、湖、河、城为一体的生态城市。

随着城市化的发展,大面积的硬化地面使济南市土壤含水量减少,热岛效应加剧,水分蒸发量下降,空气干燥,城市生态环境恶化。南部山区降雨有明显的季节性,河道常年干涸^[11,12],区内植被绿化覆盖率不高,水土保持和涵养水源的能力很差,水土流失严重,暴雨时易造成洪涝灾害。

如采取一定的措施来改变南部山区的生态环境,有效利用南部山区丰富的雨水资源,增大城区地下水补给量,将雨水径流变“排放”为“生态循环”,对实现济南市水资源的可持续利用,涵养地下水源^[13],改善济南市的水环境状况,实现泉水常年喷涌,提升泉城形象具有重要意义。

(6) 南部山区雨水利用有明显的工程效益:

- ①充分利用南部山区雨水回灌地下以补充地下水源,可保证南部山区居民的部分生活和生产用水,从而减少自来水的使用量,可节约相应的自来水费。
- ②南部山区的雨水就地集蓄回灌利用可减少进入城区的雨水径流量,每年可减少市政管网排放的雨水量,减轻市政管网的压力。这可减少市政管网和城市排水设施的建设和维护费用。
- ③南部山区如不采用拦蓄雨水工程,降雨量较大较急时,易造成洪水在较短时间内迅速形成,洪峰流量明显增加,使城市面临巨大的防洪压力,洪灾风险加大,水涝灾害损失增加。汛期发生强暴雨时通过雨水渗透、回用等措施,可延缓南部山区洪峰径流形成的时间,削减洪峰流量,减少进入城区的径流量和径流强度,从而减小城区雨水管道系统的防洪压力,减少洪灾造成的损失。
- ④如雨水集蓄利用工程能在整个南部山区推广,将有利于改善济南市水环境和生态环境,增进人民健康,减少医疗费用,增加旅游收入等。尤其针对有“泉城”之称的济南来说,利用南部山区雨水回补地下水可增加泉水出涌效果,来吸引更多的游客,带来更大旅游效益。

1.2 南部山区雨水利用的可行性

(1) 城市发展蓝图给南部山区雨水利用带来契机

2006-2026年济南市城市总体规划要求的五条原则中,第二条是坚持生态优先的原

则。以建设环境友好型社会为目标,坚持保护优先、开发有序,以资源保护为重点,强化对水源、土地、自然保护区、山林绿地水系等自然资源的保护与管制。第四条是坚持节约的原则。按照建设节约型城市的要求,坚持开发与节约并重、节约优先,按照减量化、再利用、资源化的要求,发展循环经济,大力推进节能、节水、节地、节材,加强资源综合利用,合理确定城乡建设标准。从这几条规划原则中我们可以看出济南市对资源的重视,其中对环境的重视可以加大南部山区绿化面积,这样就能缓解雨洪来临的速度,减慢峰值形成的时间,加大雨洪水的下渗,减小径流;而对水资源节约的重视,可以为雨水的利用提供前提和依据。

新的规划中要求严格控制中心城建设向南部山区的蔓延,该区以生态保护为主导、积极发展生态农业和生态旅游的综合性生态功能区。其中生态保护,主要指水资源涵养、地下水补给、地表水资源保护、水土保持、自然地质结构保护和生物多样性保护;发展生态农业,主要是积极发展林果、蔬菜等绿色有机农产品和农副产品精深加工业;发展生态旅游,是在环境容量许可条件下,利用其自然与人文景观发展旅游业,适度发展休闲、观光、度假产业。就南部山区的发展蓝图而言,建设雨洪拦蓄、雨水回灌地下水源、生态湿地等一系列雨洪控制利用设施必不可少。因为南部山区是济南城区的后花园,只有解决了此处雨水拦截下渗的问题,才能防止给济南市带来大量的下泄洪水;也只有使此处更多的雨水补给地下水,才能让济南市的泉水“重焕生机”,使得作为济南未来支柱产业的旅游业重新拥有得天独厚的条件和无限光明的前景,这既是济南经济和社会发展的客观要求,又符合可持续发展的大趋势。

(2) 成熟的雨洪控制与利用技术

雨水收集是指利用天然或人工修筑的汇流面,收集雨水形成的地表径流以备高效利用。

对于雨水收集,国内外都有不同程度的利用,在北京、上海、甘肃等地都有试点,技术已经比较成熟。在技术支持和参数方面容易获得适合济南南部山区本地特点的技术条件,而且经过调研,在济南市 32% 的住宅区都有市民潜意识的通过水桶收集屋面雨水用于涮洗拖把和冲厕,这就从侧面反应了市民在思想上不难接受雨水收集技术的应用,这有利于技术的推广。

据不完全统计,世界上已有 20 多个国家和地区设计和修建了地下水人工补给工程,其中包括:美国,日本,德国,荷兰,澳大利亚,南非,中国等。地下水的补给具有悠久历史。美国亚利桑那州 Tucson 市自 80 年代初建造人工地下水回灌工程,回灌场处理

能力为 $2 \text{ 万 m}^3/\text{d}$; 20 世纪 60 年代中期修建的加利福尼亚州 21 水厂, 采用 81 口深井回灌, 为城市提供 50% 的供水。德国柏林市每年回灌水量达到 $1.35 \times 10^8 \text{ t}$ 。我国上海市于 1965 年开展了深井人工回灌项目, 利用江水直接回灌补给深层地下水含水层。1984 年北京市在潮白河流域建造了人工回灌工程项目, 每年回灌水量达到 $40 \times 10^6 - 80 \times 10^6 \text{ m}^3$, 截至 1990 年该地区地下水水位提高了 2-3m。上述国内外人工回灌工程的正常运转, 积累了大量宝贵的回灌技术经验与标准。

(3) 南部山区雨水资源有可利用的潜力

南部山区的雨水资源丰富, 不管是理论潜力还是可实现潜力都相当大。这为南部山区雨水的利用提供了可行性的依据^[14]。

①理论潜力

鉴于下垫面的地形、地质、岩性等对径流的影响特别显著, 而南部山区地处鲁中台背斜, 高大的泰山山体构成水气输送的屏障, 迎风坡易凝云致雨。南部山区雨水资源理论潜力应为该流域的降水总量, 由公式 $R_t = P \times A \times 10^3$ 可得理论潜力。南部山区多年平均降水量为 648mm, 面积为 1500 km^2 , 则南部山区多年平均雨水理论潜力为 $0.97 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

②可实现潜力

一定区域的可实现潜力与区域的降水特性(雨量、雨强、降雨历时等)、地形、土壤特性、降水前的土壤含水量、作物种类及生育阶段、耕作措施等因素有关, 同时也与社会的科学技术、经济水平有关。南部山区雨水资源可实现潜力可由公式

$R_a = \lambda_R \times P \times A \times 10^3$ 来计算, 南部山区多年平均降水量为 648mm, 面积为 1500 km^2 , λ_R 取 0.7, 则南部山区多年平均雨水理论潜力为 $0.68 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(4) 南高北低的地形条件, 巨大的地下储存空间, 有利于雨水的收集

济南市南部山区为泰山山地, 地势南高北低。济南市城区地势同样也是南高北低, 在降雨季节, 南部山区汇集的雨水形成强大的雨水径流, 主要由南向北流泻。这种南部地势高、北部地势低的特点使雨水走向明显, 方向性强, 易于收集。

南部山区地质主要为低丘陵区的凤山组—奥陶系, 由南向北依次呈单斜展布, 总厚度大于 1000m, 由于受断裂作用和火成岩体侵入的影响, 各层接触关系发生变化。寒武系凤山组至奥陶系含水层, 岩性为厚层灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩等, 岩溶裂隙发育, 彼此连通, 导水性强。这种岩性特点有利于地下水的补给、径流、富集。而且, 南部山

区面积广阔，地下储水空间巨大。

(5) 良好的土壤渗透性能

南部山区的土壤主要为褐土，是在暖温带、半干旱及高温高湿同时发生的生物气候条件下，发育在石灰岩(青石山)山地和丘陵地区的地带性土壤。此土壤，通体有较强的石灰反应，PH 值 7-7.5，呈微碱性。此外，土壤具有明显的粘化作用、钙化作用以及微弱的生物积累作用，还有潮化作用和旱耕熟化作用。

在南部山区，从上而下，从南到北，分布着褐土性土和普通褐土等几类。普通褐土面积最大，其土壤土层深厚，质地适中，养分含量较丰富，是济南市粮食的主要生产基地。但部分土壤由于多次洪积的结果，土体较浅的部位出现砾石、砂层或砂姜及厚层粘土等障碍层次。该地区地质情况良好，土壤渗透性能较强，有利于南部山区雨水的集蓄、存储。

(6) 南部山区雨水水质较好

回灌地下水的水质应符合以下 3 个条件：①水质应优于原地下水水质或达到生活饮用水水质标准；②回灌不会引起区域地下水的水质变化和污染；③不会引起井管或滤水管的腐蚀和堵塞。

2007 年济南雨洪控制与利用课题组做了济南市雨水水质的分析实验，发现济南市雨水水质较好，各项指标基本符合杂用水水质标准，只有个别指标是因下垫面的不同性质有所超标，对照城市杂用水水质标准和景观环境用水水质控制指标标准，可知济南市雨水水质依据回用用途不同稍加处理即可回用，在经济和技术上可行。而南部山区由于工业化发展程度不如城区，南部山区的雨水水质明显优于城区雨水水质，可不加任何处理蓄集利用或回灌地下，补充地下水源。

(7) 南部山区雨水利用经济效益明显

由济价格字(2003)180 号可得济南市自来水的价格：①居民生活用水每立方米 2.95 元；②工业生产用水每立方米 3.80 元；③经营服务业用水，每立方米 5.40 元；④特种行业用水，每立方米 16 元；⑤旅游宾馆、饭店用水每立方米 4.75 元。

由此，从经济上来说用自来水来回灌地下是不可行的，并且济南市水资源匮乏，现在已成为全国十大严重缺水城市之一，自来水价格一直不断上调。但南部山区雨水资源丰富，雨水利用空间巨大，雨水利于蓄积，而且水质较好。因此，通过实施合适的雨水工程将南部山区的雨水转化为可利用的水资源或回灌于地下来保持济南市地下水位，不管是在技术上还是在经济上都是可行的，这样可以缓解济南市当前用水紧张的局面。

1.3 国内外雨洪利用研究现状及进展

雨水是自然界水循环系统中的重要环节,对调节、补充地区水资源和改善当地生态环境都起着极为关键的作用。雨水利用是水资源开发最早的方式,几千年以前就被人们采用,并一直在缺水国家和地区广泛应用^[15]。

1.3.1 国外雨洪利用现状及发展趋势

雨水利用已成为国际上普遍重视的课题,国际研究的共识是:雨水利用将成为解决 21 世纪水资源短缺的重要途径^[16]。近年来,由于全球范围内水资源紧张和暴雨洪水灾害频繁,德国^[17]、北欧^[18]、美国、加拿大、意大利、法国、墨西哥、印度、土耳其、以色列、日本、泰国、澳大利亚、韩国^[19]等五大州约 40 多个国家和地区开展了不同规模的雨洪利用研究,并召开过若干届国际会议^[20]。

(1) 德国是欧洲极力主张广泛进行雨水利用的国家之一。先后制定了有关雨水利用的法律法规。如目前德国在新建小区之前,无论是工业、商业还是居民小区,均要设计雨水利用设施,若无雨水利用设施,政府将征收雨水排放设施费和雨水排放费。这种政策既有利于环境改善,又可减轻雨水径流对污水处理厂的压力。

德国的汉诺威市的《水保护法》、《废水条例》、《建筑规定》中都有系统的法律条文对如何建设雨水经济设施、如何减免雨水处理费等进行了详细的规定。自 2001 年 1 月 1 日起汉诺威市开始征收雨水费和污水费。如建筑房屋、硬化地面因雨水不能渗入地面而流入城市雨水管网,则要交纳雨水费。雨水费按此房屋和硬化地面的面积计算,目前费用为 0.63 欧元/平方米年。如果建筑房屋的雨水可以完全渗入地下的话,就可以省去雨水费,在雨污分流的系统中还可以省去连接管网费。

德国的其它市,如汉堡市早在 1988 年就颁布对建筑雨水利用系统的资助政策,在以后的 7 年里有 1500 多个私有住宅的雨水利用系统得到州政府的资助。黑森州在 1992 年开始征收地下水税,并依此资助包括雨水利用在内的节水项目,1993 年又颁布了新的建筑法规,给市政当局或地方团体以权利来推行雨水利用。接下来巴登州、萨尔州、不来梅、汉堡等都修改了他们涉及到雨水利用的建筑法规。到 90 年代后期,又有一些州或市政府出台了对雨水利用的资助和鼓励政策。

在技术标准方面,德国在 1989 年就制定了屋面雨水利用设施标准,屋面雨水利用技术在德国已经广泛的应用^[21]。对住宅、商业和工业领域雨水利用设施的设计、施工和运行管理、过滤、储存、控制与监测四个方面制定了标准。到 1992 年已出现“第二代”雨

水利用技术。又经过近 10 年的发展与完善,到今天“第三代”雨水利用技术已成熟,新的标准也正在审批中。德国城市雨水利用技术已进入标准化、产业化阶段,并逐步向集成化、综合化方向发展。德国的汉诺世博会^[22]也是世界上比较有名的雨水利用建筑。

德国在雨水资源化研究方面,已走在世界科技的前沿。在上个世纪初期就已经发布了“对未受污染雨水的分散回灌系统建设和测量”。德国利用公共雨水管收集雨水并经简单的处理后达到杂用水水质标准,可用于街区公寓的厕所冲洗和庭院浇洒,部分地区利用雨水可节约饮用水达 50%^[23]。德国已经形成了一整套较为成熟的雨水资源利用的实用性技术、行业标准和管理条例。

(2) 日本政府,特别是地方政府近年来积极推行积蓄雨水、利用雨水的节水政策。20 世纪 60 年代,日本开始收集利用路面雨水,70 年代修筑集流面收集雨水^[24],80 年代开展了对城市雨水利用与管理的研究,提出“雨水抑制型下水道”并纳入国家下水道推进计划,制定相应的政策。90 年代初日本就有 10 多个城市推广雨水综合利用系统,建有专门的雨水库以供利用。现在已有大量的工程实施。如日本福冈体育场和国技馆^[25],建筑面积 69130m²,屋顶面积 50000m²,而雨水收集面积为 25900m²,设计雨水蓄水池总容积 2900m³,福冈体育场通过雨水利用每年可节约 12 万美元的费用。

目前,东京都、大阪府、福冈市、千叶县等不少地方政府都相继制定了“条例”、“纲要”或“方针”等通过这种办法积极来促进对雨水的利用。1992 年,日本政府颁布了“第二代城市雨水总体规划”,正式将雨水渗沟、渗塘及透水地面作为城市总体规划的组成部分,要求新建的和改建的大型公共建筑群必须设置雨水就地下渗设施。

(3) 美国的雨水利用常以提高天然入渗能力为目的^[26]。美国不但重视工程措施,而且还制定了相应的法律法规对雨水利用给予支持。如科罗拉多州、佛罗里达州和宾夕法尼亚州分别制定了《雨水利用条例》。这些条例规定新开发区的暴雨洪水洪峰流量不能超过开发前的水平。所有新开发区(不包括单独住户)必须实行强行的“就地滞洪蓄水”。

(4) 英国的蓄水地面系统,是把局部地域内收集到的雨水径流,用人工方式贮存起来,成为城市中水道的重要水源,缓解城市水资源危机。英国的世纪穹顶^[27]是比较有名的雨水利用建筑。

以色列是一个干旱缺雨少淡水的国家,雨水资源的利用率竟高达 98%^[28]。索马里采用塑料薄膜、金属板等作为集水面集水效果也很好^[29]。

综上所述,国外雨水资源利用的应用范围广、设施齐全、利用方法多种多样,并且制定了一系列关于雨水利用的政策法规,建立了比较完善的雨水收集和雨水渗透系统。

1.3.2 国内雨洪利用现状及进展

我国对雨水资源的利用自古即有，但大多应用于农业方面，主要集中于干旱半干旱地区的人畜饮水和集雨水灌溉问题上，如 1995 年在甘肃省东部干旱地区实施了“121 雨水集流工程”，在内蒙古则实行了“112 集雨节水灌溉工程”。直到现在我国的干旱、半干旱山区仍然采用人工集雨来满足生活用水及农田灌溉方面的需要。

我国对城市雨水资源化及其应用方面的研究尚处于起步阶段^[30]，我国城市雨水利用的研究和应用始于上世纪 80 年代。90 年代以后，特大城市的许多建筑物已建有较完善的雨水收集系统，但由于对待城市雨水问题在整体上还停留在老的观念上，倾向依靠“排与疏”、“雨污分流”等措施来解决雨洪控制与污染问题，因而基本没有与雨水收集系统相配套的雨水的处理与回用系统。但我国雨水资源丰富，如果这些雨量能被有效地处理和加以利用，比处理轻污染的生活污水更经济，简便易行。

目前，建设部和部分城市已经颁布了雨水利用的相关法律条文，如建设部颁布的“绿色生态住宅小区的建设要点和技术导则”、北京市规委颁布的“关于加强建设工程用地内雨水资源利用的暂行规定”等，这一系列措施对雨水利用和雨水径流污染控制步入法制轨道起到了重要的推动作用。但随着雨水利用项目的不断增多和建设的进一步深入，新的问题（如过分追求经济效益、管理部门多头而且效率低下、时有应付做法等）不断出现，亟待完善相关政策法规，对雨水利用和雨水径流污染控制等工作加以规范。因此，应尽快出台“雨水管理条例”、“雨水径流污染控制规范及其实施细则”等，对雨水管理的目标、任务、使用范围；责、权、利进一步划分，对污染材料的限制使用；控制废物倾倒等做出明确规定。

北京市由于缺水形势严峻，开展雨水利用的步伐较快^[31]。1995 年 6 月北京举办了第七届国际雨水集流系统大会。2000 年，北京正式启动“城市雨洪控制与利用”工程，城市雨水利用已进入示范与实践阶段，可望成为我国城市雨水利用技术的龙头。中德合作研究项目“北京市水资源可持续利用—城区雨洪控制及利用”已开始实施，并在北京水利水电学校、双紫小区、丰台体育场等地建立了雨水利用的示范基地。

1.4 课题研究内容和技术方法

1.4.1 本课题的来源

据统计，济南市雨水利用潜力巨大，雨水资源丰富，并且雨水水质较好。积极开辟、

充分利用雨水资源,对改变济南市大雨大涝、小雨小淹、无雨干旱的问题;对保障城乡供水,实现水资源的可持续利用;对减轻城市洪涝灾害,改善济南市的水环境状况,实现泉水常年喷涌,提升泉城形象具有重要意义。

鉴于此,迫切需要针对济南市具体情况进行针对性的研究,提出符合济南市实际情况下的雨洪控制与利用对策。本课题组在济南市建委和济南市公用事业管理局的支持下,从2006年8月开始开展了“济南市雨洪控制与利用”项目的研究。研究目标是为市政府制定雨洪控制与利用政策和措施提供直接的技术指导和政策建议。通过实施合理有效的雨洪控制与利用措施,充分利用雨水资源,实现洪水资源化,削减洪峰流量,确保济南防洪安全,实现泉水常年喷涌。雨洪利用是实现山、泉、湖、河、城融为一体魅力泉城的重要举措,是实现人水和谐、落实“以人为本,全面、协调、可持续的”科学发展观的具体体现。

本课题是“济南市雨洪控制与利用”的子课题。通过对济南市南部山区降雨特性、南部山区降雨与城区地下水位的关系、地表水、地下水等等一系列情况进行分析研究,为南部山区雨水的利用提出切实可行的方法、措施和建议。

1.4.2 课题研究内容

本课题的研究方法参考国外雨洪利用的先进经验,吸取国内雨洪利用的经验和教训,在总结提炼的基础上充分结合济南市南部山区的实际情况,从政策、技术、管理三个层面,分析南部山区雨水利用过程中的关键因素,并且提出合理有效的针对性对策和建议,以指导南部山区下一步的雨水利用。

研究内容:

(1) 南部山区雨水利用的现实意义

从维护与修复自然界水文循环、抑制城市洪涝灾害、节水、保护地下水资源、保泉等方面进行研究,探讨雨水利用的现实意义。

(2) 国内外雨水利用发展概况

分别从国内外雨水利用的政策、技术、典型工程等方面论述现状与未来的发展趋势,为济南市南部山区雨水利用对策分析奠定基础。

(3) 南部山区雨洪特性分析

对南部山区的降雨量,降雨特性进行分析研究,采用了皮尔逊Ⅲ型曲线,选取南部山区西起马山断裂,东至东坞断裂,南部以长城岭地表分水岭为界,北至南外环,总面积为 1500km^2 的地区,从1956年到2005年总共50年的降雨资料进行分析研究降雨量和

频率之间的关系，同时用一维坡地径流模型来分析南部山区内的典型丘陵产流量。

（4）南部山区降雨和南部山区地下水位、城区地下水位的关系分析

对城区泉水的成因，影响泉水喷涌的因素、泉水喷涌历史等方面进行分析，并采用线性回归的方法对南部山区降雨量与城郊地下水位、城区地下水位之间分别进行年变化和月变化关系的线性分析，对城郊和城区地下水位年变化和月变化进行线性分析。提出可合理开发南部山区 2-9 月份，特别是汛期雨水资源的建议。

（5）南部山区雨水利用的措施

从南部山区雨水利用的生物措施、工程措施和非工程措施几个方面提出具体利用的方式和方法。

1.4.3 研究方法技术路线

本课题采用的方法主要有研究降雨量—频率关系的皮尔逊Ⅲ型曲线，在考虑风对降雨的影响和降雨动量对径流的影响条件下的一维坡地径流模型，对降雨量和地下水位之间，两地地下水位之间进行线性回归分析的最小二乘法计算。

第 2 章 济南市南部山区环境与社会经济概况

2.1 自然地理状况

2.1.1 位置与范围

济南市南部山区为泰山余脉，原指经十路以南，现指南外环以南的区域。此区域地处鲁中山地北缘单斜山地丘陵区，自南往北为山谷丘陵和冲积平原，高差达 900m。以断层划分的南部山区，西起马山断裂，东至东坞断裂，南部以长城岭地表分水岭为界，北至南外环，总面积 1500km^2 ^[32]（见图 2.1），是济南泉水的源头，其中直接补给区 550km^2 ，间接补给区 950km^2 。

2.1.2 地形地貌

南部山区现在的地貌形态，是长期经受内外营力作用演变的结果，特别是在白垩纪燕山运动期，基性至中性岩浆岩大量侵入，运动活跃，伴随着岩浆岩的侵入与火山岩的喷发，产生了大面积的升降、较大的断裂与局部的穹状隆起，其中以大幅度的上升为主^[33]。喜马拉雅运动在本区对燕山运动有继承性，进一步破坏并改造了原有形态，基本形成今日该区之地貌。

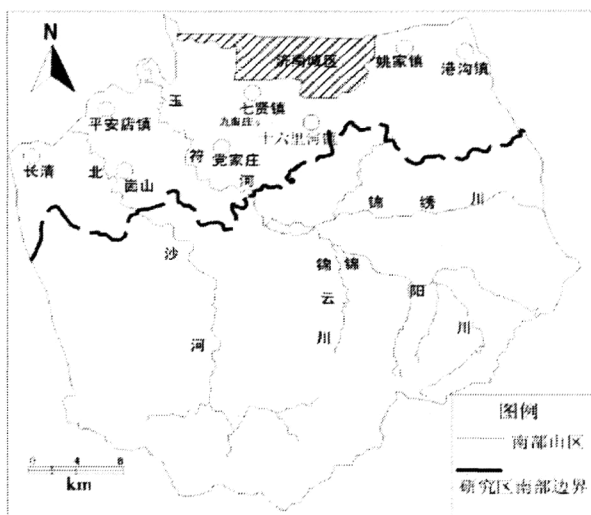


图 2.1 济南市南部山区区域

后来地壳活动加强，继续产生断裂与大面积的上升运动，断裂使鲁中期地面进一步变形，而上升幅度不均匀，上升量约 500-1000m。到第三纪末期或第四纪初期，升降渐缓，直至最后稳定。这次运动使地面强烈剥蚀堆积，又形成一个夷平面，即临城期地面，此地面与后来的两级阶地两者很难区分，多数留有残丘。

更新世中、晚期以来的外力作用，使该区表面广泛发育残积层和冲洪积物，厚度可达近百米。辖内地貌可分为侵蚀低山和剥蚀丘陵。侵蚀低山区海拔在 500-988.8 m，切割深度在 200-500 m，主要分布在长清、历城南部。剥蚀丘陵区分布在侵蚀低山区的外围，海拔在 500 m 以下，切割深度在 200 m 以内，山麓有残积、坡积物。

2.1.3 南部山区气候

南部山区地处中纬度内陆地带，由于受太阳辐射、大气环流和地理环境的影响，属暖温带大陆性季风气候。其主要气候特征是：季风明显，四季分明，冬冷夏热，雨量集中。

该区域冬天被变性极地大陆气团所控制，常受来自北方冷空气侵袭，寒冷晴朗，雨雪稀少，多偏北风。夏季受热带、副热带海洋气团影响，盛行来自海洋的暖湿气流，天气炎热，雨量充沛，光照充足，多偏南风。春季和秋季是冬季转夏季、夏季转冬季的过渡季节，风向多变。一年之中，在不同季节，该地区处在不同大气环流控制之下，构成了春暖、夏热、秋爽、冬寒四季变化分明的气候。其中，冬季长达 136-157d，一般在 11 月上旬至次年 3 月下旬；夏季为 105-120d，一般在 5 月下旬至 9 月上旬；春、秋季最短，都不足两个月。

2.1.4 南部山区土壤状况

南部山区的土壤主要有棕壤和褐土，这两类土土层浅薄、质地较粗、结构松散、结构力差、砾石较多，保水保土性差，水土流失严重。强烈的水土流失不仅导致土地中 N、P、K 和有机质等养分流失，土层愈加瘠薄，土地面积减少且质量下降，进而危及农、林业生产；而且还淤积河流、水库，生态平衡遭到严重破坏。

棕壤主要分布在南部砂石低山丘陵区，海拔一般在 200-988.8 m 之间。此土体通体无石灰反应或表层有微石灰反应，PH 值为 6.5-7，一般呈微酸性，有明显的的淋溶作用、粘化作用和生物积累作用。

褐土是在暖温带、半干旱及高温高湿同时发生的生物气候条件下，发育在石灰岩(青石山)山地和丘陵地区的地带性土壤。该土壤占全区可利用土地 75.5%，平均深度在 35 cm 左右，以中层粗骨土为主，深层壤质土少，暂难利用土地多。此土壤通体较强的石灰反应，PH 值 7-7.5，呈微碱性，具有明显的粘化作用、钙化作用以及微弱的生物积累作用，还有潮化作用和旱耕熟化作用。这类土壤在南部山区主要有三种：

①褐土性土广泛分布于石灰岩或砂页岩以及基性岩组成的低山丘陵的中上部，多为荒草坡或岭坡梯田，受侵蚀影响，成土母质为岩石风化的残、坡积物，土层厚度均小于 30 cm，并含有大量的母岩碎石，薄层砾多特征明显。

②普通褐土广泛分布于石灰岩山地丘陵和山前倾斜缓平地上。该土壤层次发育完全，粘化作用和钙化作用都较明显，石灰反应较强，PH 值 7.5 左右，呈微碱性。此土壤土层深厚，质地适中，养分含量较丰富，是济南市粮食的主要生产基地。该区部分土壤由于多次洪积的结果，土体较浅的部位出现砾石、砂层或砂姜及厚层粘土等障碍层次，影响

作物根系下扎，对作物生长不利。

③石灰性褐土主要分布于石灰岩山地丘陵山体的中部及下部的近山阶地上。成土母质是钙质岩坡洪积物及黄土母质，区别于普通褐土的主要性状是土壤剖面通体石灰反应强烈，耕作层下的土壤中都有大量的假菌丝体，土体碳酸钙含量较高。因土壤所处地形部位较高，坡度大，水土流失严重，部分土壤体仅厚 60 cm 左右，而分布于近山阶地上的土壤，虽土体深厚，质地适中，但土壤含有较多的砾石，对耕种管理不便。

2.1.5 南部山区植被状况

建国后，几十年林业的发展到现在南部山区植被覆盖率已达到 25.9%，除部分国有林场保存有较完备单一的林分外，大部分山体以次生灌丛和灌草丛占绝对优势，少数山体已呈现由荒草地向裸岩山地演替的趋势。林地以针叶林为主，主要由松林纯林和侧柏纯林组成，松林主要分布在砂石山区；侧柏主要分布在青石山区；阔叶林面积较少，大多为刺槐，还有泡桐、国槐、香椿等。在张夏、五峰山和武家庄等地有刺槐和松林混交林。

区内原生森林已被严重破坏，现有森林主要以人工林、次生林为主，林地质量差，其中幼林、疏林及残次林占较大比例，树种结构单一，林相简单，以针叶纯林居多，且密度过高，病虫害严重，近几年来，研究区内侧柏树上发生严重小蠹虫害，受害严重的侧柏，平均每株有虫 20 头，多的 100 头以上^[34]，再加上管理不够，林分生长不良。果木品种较多，主要有梨、桃、杏、山楂、核桃和板栗等^[35]。现有林分构造不太合理，构成单一，森林的生态效益远远没有得到充分发挥，生态稳定性差，不易抵抗外界干扰。

2.2 水资源状况

2.2.1 降水

由于受季风影响，南部山区降水量的季节分配极不均匀。春季干燥少雨，夏季炎热多雨，多年平均降雨量为 647.97mm。

春季降水量一般在 80 mm 左右，占全年降水总量的 12.0-12.8%。4 月份以后，暖气团势力开始增强，降水量有所增多。夏季由于东南季风盛行，暖湿气团活跃，季降水量在 400 mm 以上，占年降水总量的 65%以上；7 月份东南季风达到盛期，降水比较集中，月降水量达 200 mm 以上。秋季北方冷空气开始南下，暖湿气团势力随之减弱，降水量明显减少，季降水量平均在 110-130 mm，占年总量的 18.0-18.7%。冬季受北方干冷空气的侵袭，西北风盛行，雨雪稀少，季降水量一般在 20-25 mm 之间，占年降水总量的 4%

以下。

2.2.2 地表水

南部山区内河流主要有玉符河和北沙河及其支流。

(1) 玉符河^[36]为黄河的支流，发源于南部泰山北麓的长城岭，上游有锦绣川、锦阳川、锦银川三条支流，河道由东南向西北，主要流经宅科、寨而头、西渴马、催马、潘村、周王庄，最后注入黄河。在汛期或水库放水时，下游河道有水，流经催马附近强烈渗漏，成为岩溶水的主要补给源之一。玉符河历史上最大年径流量 3.759 亿 m^3 ，河水径流量在年内分配有很大差异，多年平均有流时间在 7-10 月份，枯水期河水断流，河床干涸，为季节性河流。

(2) 北大沙河发源于武家庄乡南部的摩天岭西南脚下，小支流 20 余条，主干流经万德、张夏、崮山、城关、平安店五镇，于老王府村南流入黄河。流域形状狭长，河道弯曲较多。上游是变质岩山区，中游为石灰岩丘陵，下游是黄河滩区；河道上游冲刷，中、下游淤积严重。两河流具体情况见表 2.1。

表 2.1 玉符河与北大沙河

河流名称	河长 (km)	流域面积 (km^2)	年径流量 (亿 m^3)	拦蓄利用量 (亿 m^3)	拦蓄利用率 (%)
玉符河	85.4	751	1.3	0.75	57.7
北大沙河	54.3	584	0.78	0.21	27.7

(3) 泉泸河源于十六里河镇的义和、小侯家，流向西北，至涝坡村转向西南，在仲宫镇东与锦绣川水汇合，流向卧虎山水库。河长 20 km，集流面积 60 km^2 。

南部山区内已建有各类拦蓄工程 290 多座，大型水库有卧虎山水库、锦绣川水库等，中小型水库有崮头水库、钓鱼台水库、石店水库等，总库容 2.02 亿 m^3 ，兴利库容 1.31 亿 m^3 ，最大拦蓄能力为 2.63 亿 m^3 ，控制流域面积 748.3 km^2 。

(1) 卧虎山水库建于 1958 年，后经 1966、2002 年几次修建，距离济南市区 25km。该水库位于玉符河上游三川会合处，锦绣川、锦阳川、锦云川三条大川经仲宫镇并渡口村汇入卧虎山水库。卧虎山水库为黄河水系，其地下又多为基岩裂隙含水层，有着丰富的水资源。目前该水库已成为济南市南部地区居民生活饮用水重要的水源基地，是一座综合型的大型水库。

(2) 锦绣川水库位于玉符河支流锦绣川河道上，属于玉符河水系，水质较好，在丰水年份经卧虎山水库调蓄向济南市供水。两水库具体情况见表 2.2。

表 2.2 卧虎山水库和锦绣川水库

水库名称	流域面积 (km ²)	总库容 (亿 m ³)	兴利库容 (亿 m ³)	死库容 (亿 m ³)
卧虎山水库	557	1.164	0.62	0.61
锦绣川水库	116	0.41 万	0.36 万	0.01

2.2.3 地下水

南部山区的变质岩区，基岩裸露，表层普遍存在风化带，含孔隙—裂隙潜水，一般富水性不大。因处于岩溶水系统的至高部位，地下水位往往仅表现为降水补给，浅部循环，短途排泄，雨后以地表径流和地下径流形式流入岩溶水分布区，成为岩溶水的间接补给区。南部山区的石灰岩区为寒武系—奥陶系地层，呈东北—西南条带状分布。南侧的山地丘陵石灰岩裸露，且降水量较大，地表溶蚀现象明显，溶沟、溶槽、溶蚀裂隙普遍发育，地下岩溶裂隙发育亦较好，而且连通性强，主要为大气降水补给，赋存裂隙岩溶地下水，为地下水直接补给区。

南部山区地下水水质主要分三类：（1）变质岩山区地下水属重碳酸盐水^[37]，矿化度小于 0.5 g/L，PH 值在 7.4 左右，为弱碱性水，总硬度在 3-8 德国度，属软水。但局部地区如孙家崖、杨而庄深层地下水含 SO₄²⁻达 1500mg/L，不能饮用。（2）石灰岩地区裂隙岩溶水属重碳酸盐水，矿化度小于 0.5g/L，PH 值在 7.2-7.6 上下，为弱碱性水，总硬度 3—12 德国度，属软水或微硬水，一般水温 18℃左右，是比较理想的水资源。（3）山前斜倾平原区的地下水属重碳酸盐水，矿化度 0.5-1g/L，PH 值在 7-8 左右，总硬度 10-20 德国度，属微硬水。一般水温 18℃左右，适宜农业灌溉。

2.3 生态环境状况

2.3.1 南部山区的生态优势

（1）南部山区是济南泉水的源头

南部山区是济南泉水的源头，改善南部山区生态环境来提高其水源涵养能力，是济南市保泉的根本措施。据测定：修筑 1hm² 水平梯田每年可增加蓄水量 600m³，营造 1hm² 水土保持林每年可增加蓄水量 300m³，营造 1hm² 经济林每年可增加蓄水量 600m³。通过这些措施使雨水经过转化，形成岩溶地下水补给济南诸泉。

（2）南部山区是济南市的天然氧吧

济南是一个污染严重的城市，南部山区是城区的“空气净化器”，是济南居民的天

然氧吧。南部山区有大面积的绿色植物，而绿色植物进行光合作用时，吸收二氧化碳，释放氧气，使空气中的二氧化碳和氧气保持相对平衡与稳定。同时，绿色植物能吸附粉尘和二氧化硫等有毒有害气体，对空气起到净化作用。

（3）南部山区是省城后花园

南部山区地处济南城郊，交通便利、景点众多，是省城居民休闲、娱乐、赏花、游玩的好去处，是省城的后花园。历城区仲宫镇九顶塔民族风情园、梨花观赏区、柳埠镇四门塔景区、锦绣川乡红叶谷等已成为山东省著名风景区^[38]。

2.3.2 南部山区存在的问题

（1）生态环境遭破坏

由于南部山区经济落后，所以采石、采矿、挖砂就成为山区致富的一条重要途径，但是盲目开发已使南部山区许多山岭和河道面目全非，千疮百孔，造成严重的人为水土流失。近年来，房地产经济发展迅速，如历城区仲宫镇的“加州花园”以及十六里河镇的连片开发，规模巨大。这些建筑都位于岩溶水补给区，大量的硬化面积侵吞了岩溶水的补给区面积，岩溶水的补给量大大减少。

（2）植被破坏严重

南部山区由于水土流失严重，植被覆盖率较低。同时，由于南部山区的牧业发展，也严重的破坏了南部山区的植被。2002 年末，南部山区实有山羊 66.72 万只，以上山放牧为主，每年新造林地有一半左右遭到啃食破坏，天然植被也处于逆向演替状态。

（3）水源涵养能力低

南部山区是济南市重要的水源涵养地，但目前水土流失面积占山区总面积的 50%以上。林地虽然具有涵养水源的功能，但随着林地状况的不同，其涵养水源的能力差别很大。南部山区不仅荒山面积大，而且疏林、幼林及残次林占较大比例，林下地表植被覆盖很低。同时，由于人为干扰和羊群的践踏，枯枝落叶层保存不完整，因此水源涵养能力低下。

2.4 社会经济

济南市南部山区区域范围内共有农业人口近 60 万人，分布于历城区、市中区和长清区。区内有党家庄镇、十六里河镇、姚家镇、七贤镇、港沟镇、仲宫镇、柳埠镇、西营镇、平安店镇、崮山镇、张夏镇、马山镇、万德镇、武家庄乡、高而乡和锦绣川乡十六个乡镇。乡镇企业不发达，居民主要收入以农业耕作和经济林果品销售，人均年收入在

3000 元以下，居全市中等水平。

区内经济发展以农副业为主，农业主要为种植业、林果业、养殖业等，副业有采矿业、建筑业和运输业等。农村经济活动以农业生产及采石、烧砖等副业为主，而农业生产主要在山沟和低洼地中进行，条件较差，技术含量不高，农业机械化水平低。区内有几个水泥厂，数量众多的养猪场、采石场和砖瓦厂等，产业技术总体水平十分落后。同时，区内群众文化水平较低，高素质人才缺乏，在一定程度上限制了山区的快速发展。由于区内个体和乡镇企业，不惜以环境的破坏为代价换取微小利益，严重危害到当地居民生活，破坏了周围环境状况，甚至给当地环境造成不可恢复的景观损坏。

但该区处泰山北麓，南高北低，群山环抱，空气清新，景色怡人，是维持济南市生态环境建设的主体。境内经几十年的林业生态建设，果林密集，森林覆盖率已达到 25.9%，极少部分地区已形成较稳定的生态系统，是济南市的绿色屏障和生态经济区。

第3章 济南市南部山区雨洪特性分析

3.1 资料的选取

南部山区为泰山余脉，地处鲁中山地北缘单斜山地丘陵区，地势南高北低，海拔高度在 30~990m 之间，自南往北为山谷丘陵和冲积平原，高差达 900m。以断层划分的济南市南部山区，西起马山断裂，东至东坞断裂，南部以长城岭地表分水岭为界，北至南外环，总面积 1500km²，本文要分析的就是整个南部山区的降雨特性，选取从 1956 年到 2005 年总共 50 年降雨资料。对这 50 年的降雨资料进行年降雨特性、月降雨特性分析，计算降雨频率。

对产流计算，降雨资料主要是选取南部山区仲宫镇内某一典型丘陵山自 2007 年 5 月至 10 月之间总共 8 次降雨的产流量。

3.2 研究方法

对于降雨特性的分析，在水文学中，研究主要集中在对大暴雨、洪水的预报方面，采用年最大暴雨、次最大暴雨等方法分析暴雨发生的频率，用皮尔逊Ⅲ型曲线拟合频率曲线，确定频率累计曲线从而对大暴雨、洪水进行预报。本文研究的目的是为了了解南部山区雨水特性以在不同下垫面上收集、利用雨水，因此在统计降雨量的基础上，了解降雨特征，用皮尔逊Ⅲ型曲线拟合以确定频率累计曲线，了解南部山区多年降雨规律和特征，为雨水利用工程措施的设计提供依据。

产流量的计算是采用自然降雨下的一维坡地径流模型来分析南部山区内的典型丘陵产流量。

3.3 降雨分布概况及特性分析

3.3.1 降雨的多年分布概况

南部山区多年平均降水量为 648mm，但南部山区年降雨量季节性明显，夏季由于暖气团的影响，雨量充沛，季降水量在 400 mm 以上，占年降水总量的 65%以上，夏季中又以 7 月份降水最为集中，月降水量达 200 mm 以上。而春、秋和冬季降雨量相对较少，三季的降雨总量一般为 210-250mm，特别是冬季降雨量最少，一般在 20-25mm，占

全年降雨量的以下 4%以下。南部山区的这种降雨特性不利于直接对雨水进行蓄存利用，需要采取一定的措施进行雨水的收集、蓄存和利用。

对南部山区 50 年降雨资料进行频率计算统计，得表 3.1，由表可知，南部山区的年降雨量主要集中在 450mm-850mm 之间，累计频率为 72%。年降雨量低于 450mm 的累计频率为 14%，年降雨量高于 850mm 的累计频率为 14%。

表 3.1 年降雨量累积频率

年降雨量（mm）	350-400	400-450	450-500	500-550	550-600	600-650	650-700
累计频率（%）	10	4	8	12	10	6	10
年降雨量（mm）	700-750	750-800	800-850	850-900	900-950	950-1100	
累计频率（%）	10	8	8	6	6	2	

定量的描述南部山区历年降雨情况，见图 3.1。从图上可以看出南部山区历年降雨情况，1964 年降雨量最大，为 1075mm；1968 年降雨量最小，为 355mm。由此可见，南部山区降雨量年际变化较大，降雨量最大年份几乎是最小年份的三倍，年降雨量没有规律性，但年降雨量多集中在 500-800mm 之间。按降雨量由大到小排列见图 3.2。

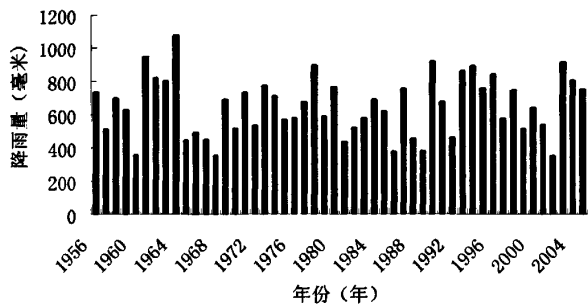


图 3.1 年降雨量变化趋势图

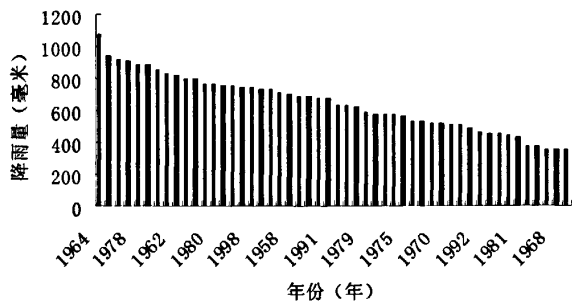


图 3.2 年降雨量统计图

3.3.2 降雨的月分布特性

由南部山区多年月平均降雨量可知（图 3.3），降雨主要集中在 6-8 月份，这三个月的降雨量超过了 420mm，占全年降雨量的 65%以上。12-3 月的降雨量较少，这四个月的降雨量不超过 40 mm，不超过全年降雨量的 6%。

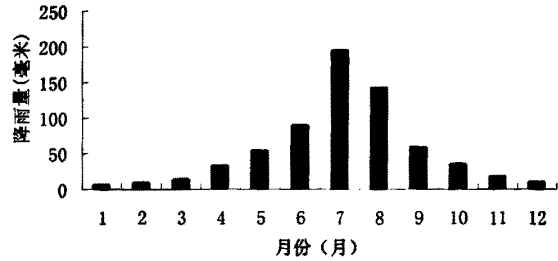


图 3.3 月平均降雨量图

对月降雨情况进行频率分析，可见表 3.2。从表

中可以定量的看出南部山区每个月的降雨分配情况。7 月份降雨量最大，占全年降雨量的 30%以上，而 11 月到次年 3 月五个月的降雨量才占全年降雨量的 8.6%，说明济南市南部山区月降雨情况分配严重不均衡。

南部山区的降雨特性存在明显的季节性，夏季是降雨的集中期，而其余三季降雨量不大。这种降雨特性使南部山区在夏季极易产生洪涝灾害，大量的雨水集中形成径流冲刷区内河道，造成河道下游及水库淤积严重。对济南市区的排洪管网也产生极大的压力，威胁到城区居民的生命财产安全，如 2007 年的 7.18 雨洪事件就是一个典型事例。而其他三季雨水补给不足，缺水严重。区内河流成为季节性河道，水土流失严重，这对南部山区内居民的生产、生活和工业发展也产生不利的影响。这种降雨特性不利于南部山区林木、植被的生长，影响区内的粮食产量和居民的生活水平，也在一定程度上破坏了南部山区的生态环境。

表 3.2 月降雨量比例表

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月平均降雨量 (mm)	5.7	8.8	13.5	32.8	53.8	89.7	194.9	143.2	59.0	35.0	17.2	9.6
月降雨量百分比 (%)	0.9	1.4	2.1	5.1	8.3	13.8	30.1	22.1	9.1	5.4	2.7	1.5

3.4 降雨频率的模型及模拟结果分析

3.4.1 模型的建立

3.4.1.1 模型的介绍

1985 年, 英国生物学家皮尔逊根据许多经验资料的统计分析, 提出一种概括性的曲线族, 包括 13 种分布曲线, 其中第Ⅲ型曲线被引入水文计算中, 成为当前水文计算中常用的频率曲线。皮尔逊Ⅲ型曲线对降雨频率分析具有一定的优势。皮尔逊Ⅲ型曲线是一条一端有限一端无限的不对称单峰曲线, 其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \quad (3.1)$$

式中 $\Gamma(\alpha)$ 为 Γ 函数, 有表可查; e 为自然对数的底; a_0 为皮尔逊Ⅲ型曲线零点与系列零点的距离。

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{4}{C_s^2} \\ \beta &= \frac{2}{\bar{x} C_v C_s} \\ a_0 &= \bar{x} \left(1 - \frac{2C_v}{C_s}\right) \end{aligned} \quad (3.2)$$

工程水文计算中, 一般需求出指定频率 P 所相应的随机变量取值 x_p , 即求出的 x_p 满足下述等式:

$$P = P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} dx \quad (3.3)$$

显然, x_p 取决于 P 、 α 、 β 、 a_0 四个参数, 并且当 α 、 β 、 a_0 三个参数为已知时, 则 x_p 只取决于 P 。由于 α 、 β 、 a_0 与分布曲线 $\bar{x}$ 、 C_v 、 C_s 有关, 因此只要 $\bar{x}$ 、 C_v 、 C_s 三个参数一经确定, x_p 仅与 P 有关。也就是说, 可由 P 唯一地来计算 x_p 。令 $\phi = \frac{x - \bar{x}}{\bar{x} C_v}$,

则

$$x = \bar{x}(1 + C_v \phi) \quad dx = \bar{x} C_v d\phi \quad (3.4)$$

这时, ϕ 的均值为零, 均方差为 1, 便于制表, 水文中通常称 ϕ 为离均系数。

$$P(\phi > \phi_p) = \int_{\phi_p}^{\infty} f(\phi, C_s) d\phi \quad (3.5)$$

式中被积函数只含有一个待定参数 C_s 。

在频率计算时, 由已知的 C_s 值, 查 ϕ 值表得出不同的 P 和 ϕ_p 值, 然后利用已知的 $\bar{x}$ 、

C_v 值通过公式 3-4 求出与不同 P 相对应的 x_p ，因此就可绘制频率曲线。

3.4.1.2 参数的含义

(1) 平均值 $\bar{x}$

设某水文变量的观测系列（样本）为 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，则其平均值为：

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.6)$$

均值表示系列的平均情况，可以说明这一系列总水平的高低。

(2) 均方差 σ

因为随机变量的取值有些是大于 $\bar{x}$ 的，有些是小于 $\bar{x}$ 的，故离差有正有负，其平均值为零。为了使离差的正值和负值不致相互抵消，一般取 $(x - \bar{x})^2$ 的平均值的开方为离散程度的计量标准，并称为均方差，即

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.7)$$

均方差取正号，它的单位与 x 相同，不难看出，如果各变量取值 x_i 距离 $\bar{x}$ 较远，则 σ 大，即此变量分布较分散，如果 x_i 离 $\bar{x}$ 较近，则 σ 小，变量分布比较集中。

(3) 累积频率 P

频率只能预示实测系列中个别水文特征值未来出现的机率特征，但不能预示多个水文特征值未来出现几率的综合特性。因此提出了累积频率的概念。累积频率指等量或超量值的累计频数 $m(x \geq x_i)$ 与总观测次数 n 之比，以 $P(x \geq x_i)$ 表示。它是机率相加原理的应用。

(4) 离差系数 C_v

离差系数表示系列数值相对平均数的相对平均离散程度的特征常数，采用下式计算：

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.8)$$

令 $K_i = \frac{x_i}{\bar{x}}$ ，称之为模比系数。

则公式可变为：

$$C_v = \sqrt{\frac{(K_i - 1)^2}{n}} \quad (3.9)$$

参数意义同均方差。

(5) 偏差系数 C_s

偏差系数是用于区别系列数值正偏差和负偏差分布情况的特征参数。为避免平均值的数学性质影响，按下式无量纲数计算：

$$C_s = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} = \frac{\sum (K_i - 1)^3}{nC_v^3} \quad (3.10)$$

参数意义同上。

3.4.1.3 参数的确定

对南部山区 1956 年-2005 年降雨资料进行计算求得平均值 $\bar{x}$ 、均方差 σ 、离差系数 C_v 和偏差系数 C_s 。

表 3.3 各年的降雨量及求解参数

年份	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965
降雨量(mm)	732.8	515.3	696.6	628.3	361.1	945.4	820.8	802.6	1075.1	447.0
年份	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
降雨量(mm)	489.7	450.8	355.3	688.4	517.8	731.9	535.1	771.2	708.2	569.9
年份	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985
降雨量(mm)	577.9	675.8	893.8	588.3	766.0	438.5	521.4	80.8	689.9	621.0
年份	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
降雨量(mm)	380.5	754.2	454.5	382.8	920.0	675.4	461.4	859.1	890.9	757.9
年份	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
降雨量(mm)	838.7	577.2	744.1	513.3	636.2	538.1	351.5	912.1	804.6	749.4

由表 3.3 可求得： $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 647.9\text{mm}$, $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} = 174.79$,

$$C_v = \sqrt{\frac{(K_i - 1)^2}{n}} = 0.27, \quad C_s = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} = \frac{\sum (K_i - 1)^3}{nC_v^3} = 0.16$$

由求出的 $\bar{x}$ 、 C_v 、 C_s 可以求出 α 、 β 、 a_o ，当 α 、 β 、 a_o 三个参数为已知时，则 x_p 只取决于 P。也就是说，可由 P 唯一地来计算 x_p 。代入公式 3.2 可得：

$$\alpha = \frac{4}{C_s^2} = \frac{4}{0.157^2} = 162.278, \quad \beta = \frac{2}{xC_v C_s} = \frac{2}{647.97 \times 0.27 \times 0.157} = 0.073,$$

$$a_o = \bar{x}(1 - \frac{2C_v}{C_s}) = 647.970 \times (1 - \frac{2 \times 0.270}{0.157}) = -1580.717$$

则指定频率 P 所相应的随机变量 x_p 满足:

$$P = P(x \geq x_p) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} \int_{x_p}^{\infty} (x - a_o)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_o)} dx =$$

$$\frac{0.073^{162.3}}{\Gamma(162.3)} \int_{x_p}^{\infty} (x + 1580.7)^{161.3} e^{-0.073(x+1580.7)} dx$$

3.4.2 模拟结果

3.4.2.1 经验频率曲线的绘制

现在有代表性的经验频率公式为 $P = \frac{m}{n+1} \times 100\%$ 。现以南部山区 1956-2005 年 50 年的实测降雨量资料来计算频率，并绘制经验频率图。首先，将逐年实测的年降雨量填入表 3.4。

表 3.4 南部山区年降雨量经验频率计算表

年 份	年降雨量(mm)	序号	由大到小的排列的降雨量 (mm)	经验频率 $P = \frac{m}{n+1} \times 100\%$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1956	732.8	1	1075.1	2
1957	515.3	2	945.4	3.9
1958	696.6	3	920.1	5.9
1959	628.3	4	912.1	7.8
1960	361.1	5	893.8	9.8
1961	945.4	6	890.9	11.8
1962	820.8	7	859.1	13.7
1963	802.6	8	838.7	15.7
1964	1075.1	9	820.8	17.6
1965	446.9	10	804.6	19.6
1966	489.7	11	802.6	21.6

1967	450.8	12	771.2	23.5
1968	355.3	13	766.0	25.5
1969	688.4	14	757.9	27.5
1970	517.8	15	754.2	29.4
1971	731.9	16	749.4	31.4
1972	535.1	17	744.1	33.3
1973	771.2	18	732.8	35.3
1974	708.2	19	731.9	37.2
1975	569.9	20	708.2	39.2
1976	577.9	21	696.6	41.2
1977	675.8	22	689.9	43.1
1978	893.8	23	688.4	45.1
1979	588.3	24	675.8	47.1
1980	766.0	25	675.4	49.0
1981	438.5	26	636.2	51.0
1982	521.4	27	628.3	52.9
1983	580.8	28	621.0	54.9
1984	689.9	29	588.3	56.9
1985	621.0	30	580.8	58.8
1986	380.5	31	577.9	60.8
1987	754.2	32	577.2	62.7
1988	454.5	33	569.9	64.7
1989	382.8	34	538.1	66.7
1990	920.0	35	535.0	68.6
1991	675.4	36	521.4	70.6
1992	461.4	37	517.8	72.5
1993	859.1	38	515.3	74.5
1994	890.9	39	513.3	76.5
1995	757.9	40	489.7	78.4

1996	838.7	41	461.4	80.4
1997	577.2	42	454.5	82.4
1998	744.1	43	450.8	84.3
1999	513.3	44	447.0	86.3
2000	636.2	45	438.5	88.2
2001	538.1	46	382.8	90.2
2002	351.5	47	380.5	92.2
2003	912.1	48	361.1	94.1
2004	804.6	49	355.3	96.1
2005	749.4	50	351.5	98.0

3.4.2.2 理论频率曲线的绘制

由已求出的偏差系数 $C_s=0.16$ ，根据皮尔逊Ⅲ型频率曲线的离均系数 ϕ_p 值表由内差法来求不同频率下的 ϕ_p 值。

表 3.5 $C_s=0.16$ 下的皮尔逊Ⅲ型频率曲线的离均系数 ϕ_p 值表

$\begin{matrix} P(\%) \\ C_s \end{matrix}$	0.01	0.1	0.2	0.33	0.5	1	2	5
0.2	4.16	3.38	3.12	2.92	2.76	2.47	2.16	1.7
0.1	3.94	3.23	3	2.82	2.67	2.4	2.11	1.67
0.16	4.07	3.32	3.07	2.88	2.72	2.44	2.14	1.69
$\begin{matrix} P(\%) \\ C_s \end{matrix}$	10	20	50	75	90	95	99	
0.2	1.3	0.83	-0.03	-0.69	-1.26	-1.59	-2.18	
0.1	1.29	0.84	-0.02	-0.68	-1.27	-1.62	-2.33	
0.16	1.30	0.83	-0.026	-0.69	-1.26	-1.60	-2.24	

再根据离均系数 ϕ 的公式 $\phi=\frac{x-\bar{x}}{\sigma C_v}$ 可得 $x_p=\phi\sigma C_v+\bar{x}$ ，把表 3.5 中所求的 ϕ_p 值代入，计算结果见表 3.6。

表 3.6 由 ϕ_p 求得 x_p -P 的关系表

ϕ_p	4.1	3.3	3.1	2.9	2.7	2.4	2.1	1.7
x_p	1360.4	1228.8	1185.4	1151.8	1124.5	1075	1022.4	943.3
P (%)	0.01	0.1	0.2	0.33	0.5	1	2	5
ϕ_p	1.3	0.8	-0.02	-0.7	-1.3	-1.6	-2.2	
x_p	874.7	793.9	643.4	528.0	420.8	367.7	256.1	
P (%)	10	20	50	75	90	95	99	

3.4.2.3 模型验证和误差检验

把实际频率（表 3.4）曲线和理论频率（表 3.6）曲线在皮尔逊频率表里面采用描点法绘制出来，比较实际频率曲线和理论频率曲线的拟合情况。如果拟合不好，可调整离差系数 C_v ，再做一组理论频率曲线，直到和实际频率曲线拟合较好为止。现在的理论频率曲线和实际情况拟合较好（见图 3.4），误差在 $\pm 10\%$ 以内。对降雨频率分析在水文学上主要是用来预报暴雨洪水，对南部山区进行皮尔逊III型频率曲线分析主要是为了研究南部山区的降雨特性和降雨规律，为进一步利用该地区的雨水资源提供依据。年降雨量在 1000mm 以上的频率是 2%，这需要采用工程性措施，比如修建堤坝、水库等拦蓄雨水；年降雨量在 640mm 以上的频率是 50%，这说明南部山区降雨量比较丰富，可采用工程性措施，也可采用生物蓄水蓄措，按降雨强度来决定蓄存雨水的方式和方法。

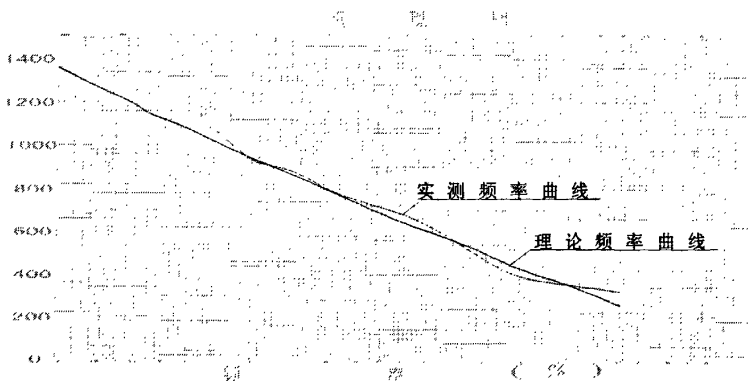


图 3.4 实际频率曲线和理论频率曲线拟合

3.5 产流特性研究

最早的产流理论是霍顿(R. E. Horton)1933 年提出的,当雨强小于下渗能力时,所有降雨都被土壤吸收,而当雨强大于下渗能力时,吸收率等于下渗能力,其余部分就是产流量。由此土壤表面对降雨起到一种“筛子”作用,将其筛分成两部分,一部分形成坡面流以后进入河道;另一部分先渗入土壤,然后进一步渗透成为地下水,或者经蒸散发重新进入大气。

3.5.1 影响产流的因素

霍尔顿把下渗理论与流域实际情况结合起来,形成了完整的流域产流理论:超渗雨形成地面径流,田间缺水量补足后的稳定下渗量形成地下径流。这一理论成为我国 20 世纪 60 年代初“蓄满产流”与“超渗产流”两种产流方式提出的理论基础。事实上,从土壤水分运动理论来看,“蓄满产流”是“超渗产流”的特例。一个流域水文过程除受降水蒸发等因素影响外,还受流域的地形地貌、土壤质地、土地利用等影响,前者可归为气象因素,后者可统称为下垫面因素。

(1) 气象因素

形成济南市降雨的天气系统主要有气旋、台风、冷峰和切变线四种,每种天气系统均有产生暴雨和大暴雨的可能,如有两种以上天气系统共同影响时则可能产生特大暴雨。而济南市南部山区的降雨特性一般为:

① 突发性强、历时短。

7.18 暴雨从 7 月 18 号下午两点至 19 日零点时结束,实际历时 10h,单小时降雨量是济南市气象记录以来历史最大值。

② 时程分布非常集中,雨型恶劣。

夏季降水占全年降水量的 65%以上,且暴雨雨量集中在 12h 内,一般占暴雨量的 80%以上。7~8 月份发生频率较高。

③ 暴雨量大,强度高。

不论是丰水年还是干旱年,均可产生小范围大暴雨。

(2) 下垫面因素

该区地形分为侵蚀低山区,海拔在 20-988.8m,切割深度在 200-500m,山麓有残积、坡积物。一般靠南部连续性强,靠北部无明显的脉络走向,坡度多在 15-35 度,水系密度 $1-3\text{km}/\text{km}^2$ 。

该区土壤主要为棕壤土和褐土，棕壤土是在暖温带湿润半湿润，落叶阔叶林下形成的地带性土壤，海拔一般在 200-988.8m 之间，pH 值为 6.5-7，一般呈微酸性，有明显的淋溶作用、粘化作用和生物积累作用。土壤无石灰反应，颜色随岩性不同而异，质粗砾多，孔隙大，疏松，不抗旱，保水保肥能力差，养分贫瘠，是山地丘陵区最瘠薄的土壤。

褐土是在暖温带、半干旱及高温高湿同时发生的生物气候条件下，发育在石灰岩(青石山)山地和丘陵地区的地带性土壤。此土壤，通体较强的石灰反应，PH 值 7-7.5，呈微碱性。此外，土壤具有明显的粘化作用、钙化作用以及微弱的生物积累作用，还有潮化作用和旱耕熟化作用

南部山区植被覆盖率为 25%，林木覆盖率低，30°坡以上山地导水条件差，天然林木难以成活，树林多为人工林，能形成规模的林区数量很少。除兴隆山及南部山体植被覆盖较好外，多数山体林木生长不良。主要树种为侧柏，且主要分布在高坡处，林地蓄水保水能力差。

3.5.2 雨水产流计算方法概述

雨水产、汇流计算是建立在雨水径流计算模型的基础上，在雨水产流计算方面，早期一般用径流系数法，径流系数根据当地地表状况选用一个常数，一般在 0.3-0.8 之间。由于径流系数随降雨量、地表前期湿度等因素而变，为了提高精度，常建立一些经验关系，如原苏联的白洛夫公式^[39]。Yoon 等^[40]将坡面径流看作流量沿程增加的空间变量流，采用空间变量流的基本微分方程及连续方程来描述和求解坡面径流水力学问题。考虑到降雨对坡面径流的影响，结合动量原理，Yen 等^[41]推导出了有降雨情况下的一维坡面径流运动方程，但方程推导形式复杂。

目前被国内外广泛采用的模拟坡面径流过程的数学模型是 Saint Venant^[42,43]方程，该方程只适用于缓坡条件下，求解有相当困难。吴长文等^[44]推导出既适合于缓坡，又适合于陡坡，既适合于裸地，又适合于有植被坡面的坡面径流模型。李占斌等^[45]在此基础上推导了试验条件下考虑净雨强随时间变化的坡面流运动波方程近似解析解，但和吴长文推导的方程一样，也没有考虑降雨动量和风对坡面径流运动的影响。

实际上，坡面通常是不平整的，需要对其进行特殊的模拟或二维流动模拟。但由于坡面径流水深很小，在实际模型的运算中把坡面当成平面来看待。Govindaraju^[46]、Tayfur^[47]、Scoging^[48]等采用这一思想都分别建立了各自的坡面径流计算模型。张国华^[49]等在此基础上推导出自然降雨(即考虑风对降雨的影响和降雨动量对径流的影响)下的一维坡

地径流基本方程。济南市南部山区面积较大，多为丘陵山地，集雨面沟坡、沟间地块、沟底、农田分布区等大多是坡面。而且缺少部分资料，所以可用该数学模型来对产流进行分析。

3.5.3 雨水产流模型建立

首先假定降雨过程中风向不变，水流为正坡明渠流而且不可压缩，雨滴与水流接触瞬间重量不计，坡面径流是一维的，即把坡面看作是无宽度的平整面，在横向上各水力要素不变(降雨和入渗在宽度方向无空间变异)，压强沿水深符合静水压强分布规律。

假设水流沿着坡角为 θ 的坡面流动，以沿着坡面方向向下为 x 轴，垂直于坡面上为 y 轴建立直角坐标系。雨滴落到水面时的终速 $v_m(x,t)$ 与水流方向的夹角为 φ ，坡面取为单宽坡面，取 1-1、2-2 断面（见图 3.4），以其间距为 dx 的微小单元体作为隔离体，在轴向上建立连续方程和动量方程。质点在运动过程中，所受合外力的冲量等于物体动量的增量，如式 3.11 所示。

$$\sum F_x = \frac{d(mv)}{dt}, \quad (3.11)$$

$$du = \frac{\partial u}{\partial t} dt + \frac{\partial u}{\partial x} dx = \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right] dt$$

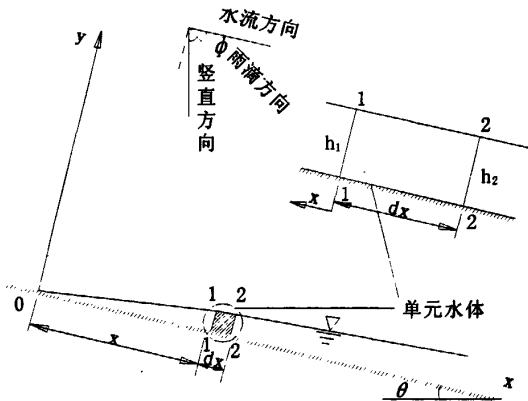


图 3.5 坡面径流运动体图

3.5.4 雨水产流模型公式

如图 3.4 所示，假设微小单元体 dx 的质量为 $M = \rho h dx$ ，(其中 ρ 为水的密度， h 为水深)，在时间 dt 内，这种质量以速度 $u(x,t)$ 移动了距离 $dx = u dt$ 。在推导过程中将该单元体和质量为 dM 的雨滴作为一个系统。由于降雨的影响，该单元体在 dt 时间内质量的变化 $dM = \rho i(x,t) \cos(90^\circ - \varphi) dx dt$ ， $i(x,t)$ 为净降雨强度。增加的质量为 x 方向的初始动量为 $\rho P(x,t) \cos(90^\circ - \varphi) dx dt \times v_m(x,t) \cos \varphi$ ， $P(x,t)$ 为自然降雨强度。于是系统动量的变化率

为：

$$\frac{d(mv)}{dt} = \frac{(M + dM)(u + du) - (Mu + \rho_p(x, t) \cos(90^\circ - \varphi) dx dt \times v_m(x, t) \cos \varphi)}{dt} \quad (3.12)$$

将 dM 、 M 和 du 带入式 (3.12)，化简得

$$\frac{d(mv)}{dt} = \rho u_i(x, t) \sin \varphi dx + \rho h \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right] dx - \rho p(x, t) v_m(x, t) \cos \varphi \sin \varphi dx \quad (3.13)$$

作用在系统上的合外力 $\sum F_x$ 包括作用在两过水断面上的动水压强、重力在 x 轴上的分量、坡面的切应力、薄层水流的表面张力。

根据基本假定， $\sum F_x$ 的表达式如下：

$$\begin{aligned} \sum F_x &= P_1 + P_2 + G_x + T_x + T_o = \frac{1}{2} \rho g \left[h - \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} dx \right]^2 - \frac{1}{2} \rho g \left[h + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} dx \right]^2 + \frac{1}{2} \rho g h S_o dx - \frac{1}{2} \rho g h S_f dx - \sigma dx \\ &= \rho g h \left[\frac{\partial h}{\partial x} + S_o - S_f \right] dx - \sigma dx \end{aligned} \quad (3.14)$$

式中： P_1 为作用在断面 1-1 上的动水压力； P_2 为作用在断面 2-2 上的动水压力； T_x 为坡面切应力； G_x 为重力在 x 轴方向的分力； S_o 为坡比； T_o 为表面张力； S_f 为阻力坡度；

$S_o = \sin \theta$ ， θ 为坡面的坡角；根据水力学原理， $S_f = \frac{n^2 u}{h^{4/3}}$ ； σ 为表面张力系数； n 为曼宁糙率系数。

将式 (3.13) 和式 (3.14) 带入到式 (3.11) 并整理得既考虑雨强的变化，又考虑降雨动量和风的影响下的缓坡和陡坡都适用的坡面径流的动量方程：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_o - S_f) - \frac{\sigma}{\rho h} + \frac{p(x, t)}{2h} v_m(x, t) \sin 2\varphi - \frac{i(x, t)}{h} u \sin \varphi \quad (3.15)$$

对不可压缩的坡面薄层水流，在 dt 时间内，由单元体的水量平衡得

$$\frac{\partial h}{\partial t} dx dt = [i(x, t) \cos(90^\circ - \varphi) dx dt + uh dt] - [uh + \frac{\partial(uh)}{\partial x} dx] dt \quad (3.16)$$

式中： $\frac{\partial h}{\partial t} dx dt$ 为该单元体体积增加的值； $[uh + \frac{\partial(uh)}{\partial x} dx] dt$ 为流出该单元体的水的体积；

$uh dt$ 为流入该单元体的水的体积； $i(x, t) \cos(90^\circ - \varphi) dx dt$ 为由于降雨而增加的体积。

化简式 (3.16) 得描述坡面水流的连续方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = i(x, t) \sin \varphi$$

对于入渗过程的计算, 首先将降雨分成若干个计算时段, 然后对每个计算时段将地表状态分为 4 种情况: ①始无积水, 结束无积水; ②始无积水, 结束有积水; ③始有积水, 结束有积水; ④始有积水, 结束无积水。以此来进行计算, 最后在每个时段中针对某种情况应用 G-A 模型进行计算, 从而可以得到整个降雨过程的入渗规律^[50]。

净雨强 $i(x, t) = p(x, t) - C(t) - f(x, t)$, C_m 、 C_o 、 k 分别为植物截留量、初始持水量和衰减指数。

对于雨滴终速 $v_m(x, t)$, 吴长文用理论方法求得:

$$v_m(x, t) = v_m(x, t) [1 - (1 - \eta^2) \exp(-2gH / v_m^2(x, t))]^{1/2} \quad (3.17)$$

式中: η 为雨滴初速和终速 $v_m(x, t)$ 的比值;

$v_m(x, t)$ 采用牟金泽^[51]提出的终速计算方法紊流区公式计算。

由此可以列出同时考虑变雨强、降雨动量和风影响下的一维坡面径流的基本方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_o - S_f) - \frac{\sigma}{\rho h} + \frac{p(x, t)}{2h} v_m(x, t) \sin 2\varphi - \frac{i(x, t)}{h} u \sin \varphi \\ \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = i(x, t) \sin \varphi \\ i(x, t) = p(x, t) - C(t) - f(x, t) \\ v_m(x, t) = v_m(x, t) [1 - (1 - \eta^2) \exp(-2gH / v_m^2(x, t))]^{1/2} \end{cases} \quad (3.18)$$

比较式 (3.18) 与 Saint Venant 方程, 可以看出当 $\varphi = 90^\circ$ 时, 方程组 (3.18)

和 Saint Venant 方程一致。

3.5.5 模型的数值求解

式 (3.18) 实际上属于拟线性双曲型方程组, 采用在明渠非恒定流计算中应用广泛的 Preissmann 隐式格式^[52, 53]对式 (3.18) 进行数值求解。考虑的初始条件和边界条件:

$$\begin{aligned} h(x, t) \Big|_{t=0} &= h_o(x) \\ u(x, t) \Big|_{t=0} &= u_o(x) \end{aligned} \quad (0 \leq x \leq L) \quad (3.19)$$

边界条件为:

$$\begin{aligned} h(x, t) \Big|_{x=0} &= h_1(t) \\ u(x, t) \Big|_{x=0} &= u_1(t) \end{aligned} \quad (t > 0, 0 \leq x \leq L) \quad (3.20)$$

式中：L 为坡长。

Preissmann 关于因变量和其导数的差分格式为：

$$\begin{aligned} f(x,t) &\approx \bar{f} = \frac{\theta}{2}(f_{j+1}^{k+1} + f_j^{k+1}) + \frac{1-\theta}{2}(f_{j+1}^k + f_j^k) \\ \frac{\partial f}{\partial x} &\approx \frac{f_x}{\Delta x} = \theta \frac{f_{j+1}^{k+1} + f_j^{k+1}}{\Delta x} + (1-\theta) \frac{f_{j+1}^k - f_j^k}{\Delta x} \\ \frac{\partial f}{\partial t} &\approx \frac{f_t}{\Delta t} = \frac{f_{j+1}^{k+1} + f_j^{k+1} - f_{j+1}^k - f_j^k}{2\Delta t} \end{aligned} \quad (3.21)$$

式中： θ 为加权系数； f 为 y 、 Q 、 A 、 B 和 R_w 变量； j 、 k 分别为计算断面节点号和计算时段节点号。

将式(3.21)代入式(3.18)中的前两式：

$$\begin{aligned} A_{1j}\Delta u_j + B_{1j}\Delta h_j + C_{1j}\Delta u_{j+1} + D_{1j}\Delta h_{j+1} &= E_{1j} \\ A_{2j}\Delta u_j + B_{2j}\Delta h_j + C_{2j}\Delta u_{j+1} + D_{2j}\Delta h_{j+1} &= E_{2j} \end{aligned} \quad (3.22)$$

式(3.22)构成一组有 4 个独立未知量 Δu_j 、 Δh_j 、 Δu_{j+1} 、 Δh_{j+1} 的 2 个非线性代数方程，这些未知量对于任何 2 个临近断面的共有的。当坡地分为 N 计算断面时，对每个断面 $j(1 \leq j \leq N)$ 可以写出 2 个类似的方程，这样的方程共有 $2N$ 个，再加上坡地进、出口 2 个边界条件方程，可以解出 $2(N+1)$ 个未知量的唯一解。

3.5.6 模型的验证及误差分析

试验点选在仲宫镇一典型丘陵山体上，地质为下古生界寒武—奥陶系。海拔为 10-100 m 之间，坡度小于 30° ，具有典型代表意义。

表 3.7 坡地径流的计算值与实测值的比较

降雨日期	实测产流量(m^3)	计算产流量(m^3)	相对误差 (%)	降雨日期	实测产流量(m^3)	计算产流量(m^3)	相对误差 (%)
2007-5-24	0.409	0.417	-1.96	2007-7-29	1.217	1.255	-0.812
2007-6-20	0.632	0.614	0.163	2007-8-2	0.954	0.846	11.32
2007-6-27	0.097	0.108	-11.34	2007-8-9	0.099	0.089	10.1
2007-6-29	0.741	0.731	1.35	2007-10-3	0.123	0.141	-14.63

试验点选择在山坡的中下部坡地上,坡长为 20m,宽为 5m,坡向为北偏东 27° ，地表植被覆盖率约为 38%。由于水平投影面积不大($100m^2$)，不考虑降雨和参数沿坡度方向的变化。计算中涉及到的参数根据已有的资料及假定为:土壤渗透系数 $k=4.31 \times 10^{-7} m/s$ 、土壤饱和导水率 $\theta_s=0.493$ 、土壤初始含水率 $\theta_i=0.124$ 、土壤吸力 $S=0.04 m$ 和 Manning 糙率系数 $n=0.02$ 。对 2007 年的 8 次形成径流的降雨资料对模型进行验证，从表中可以看出坡

地径流的计算值与实测值相对误差在 $\pm 15\%$ 以内, 故模型计算结果是可靠的。

一维坡地径流对计算南部山区内具体的丘陵山体产流量具有重要意义, 可依据计算出的产流量来制定具体山体雨水蓄积及其利用的措施和方法。

3.6 雨水汇流概述

降落在流域上的雨水, 从流域各处向流域出口断面汇集的过程称为流域汇流, 包括坡面汇流和河网汇流两个阶段。

坡地汇流指降雨产生的水流从它产生地点沿坡地向河槽的汇集过程。坡地是产流的场所, 也是径流输移的场所。坡地汇流包括坡面、表层和地下三种径流成份的汇流。坡面上的水流多呈沟状或片状, 从产流地点到河网的流程不长, 因此汇流历时较短。由于坡面糙率大, 坡度陡, 水流惯性作用可以忽略。表层汇流和地下汇流均属有孔介质中的水流运动。它们的运动都比地面流缓慢。表层汇流速度比地下汇流高得多, 地下汇流的速度最低。

在水文学中, 通常采用水量平衡方程与坡地水流的蓄泄关系来描述水流在坡地上汇流的运动规律。坡面流的出流量过程可用包含有坡地汇流曲线的径流成因公式来推求, 或用运动波来描述。表层流的出流变化, 为简化, 通常采用线性的蓄泄关系(见洪水预报)来描述。地下径流的流动规律, 可用土壤中非饱和及饱和水流方程解算。

河网汇流是由许多大小不同的河槽构成相互贯通的、完整的泄水系统, 称为河网。水流沿着河槽向下游的运动过程称河槽汇流。在这个系统中各级河槽的水流向下游的流动称为河网汇流。河槽汇流实际上就是洪水波在河槽中的运动过程, 其水流运动规律可用不稳定流的圣维南方程组描述。在天然河槽, 特别是在河网中, 沿程旁侧入流的加入、干支流水流的相互影响和沿程水力特性的差异等, 使洪水波的运动更为复杂。在水文学中, 常采用水流连续定理和蓄泄关系来描述河网汇流, 也就是应用径流成因公式来求其出流过程。随着流域面积增大, 河网汇流时间越来越大, 以致河网在径流的时程再分配上起主要作用。但当流域面积减小时, 坡地汇流对径流时程再分配的作用, 则逐渐变得显著。

在水文学中, 并不要求掌握水流在流域空间上和时程上变化的全部发展过程, 实际需要的是由降雨所形成的流域出口断面的流量过程。因此, 流域汇流是研究流域上的地面净雨、表层流净雨和地下净雨转化为流域出口断面的流量过程。

雨水汇流计算方法较多, 总体上可划分为水文学和水力学方法。水文学方法多采用如下

方法:

(1) 推理法。推理法是最简单的方法, 只需考虑计算点的汇水时间, 应用较广, 但存在许多缺陷性。

(2) 等流时线法。等流时线法在城市雨水汇流中也有应用, 其等流时线可根据流域形状和管渠分布划分。

(3) 单位线法。单位线法也是城市雨水汇流计算的常用方法, 多采用 J.E.Nash 提出的瞬时单位线, 如周玉文等在北京百万庄小区地面汇流中的应用^[54], 但单位线的参数须由实测降雨径流资料反推来确定, 并在地区综合后才能用于无资料流域。

对南部山区进行汇流研究是为进一步利用该区的雨水资源提供更多的依据, 但由于济南市南部山区面积大, 地形复杂, 就不细化进行汇流计算。

3.7 本章小结

对南部山区从 1956 年到 2005 年 50 年降雨资料进行分析, 多年平均降雨量为 648mm, 雨水资源丰富。年降雨量主要集中在 450mm 到 850mm 之间, 累计频率为 72%。区内降雨季节性明显, 月降雨量主要集中在汛期, 6-8 月三个月份的降雨量超过了 400mm, 占全年降雨量的 65% 之上。

采用皮尔逊 III 型频率曲线对南部山区进行降雨量-频率分析发现南部山区年降雨量分布规律基本符合 $\bar{x}=648\text{mm}$ 、 $C_v=0.27$ 、 $C_s=0.16$ 的皮尔逊 III 型频率曲线。在考虑风对降雨的影响和降雨动量对径流的影响情况下采用一维坡地径流模型对区内典型丘陵进行产流量的模拟计算, 发现拟合结果较好。

第4章 济南市南部山区降雨量与市区地下水水位关系研究

4.1 南部山区地质构造及含水层的划分

4.1.1 南部山区地质情况

济南市南部山区从南往北大致分三个区，南部为绵延起伏的山区，山势陡峻，深沟峡谷剥蚀强烈，绝对标高在 500-900m；中部为低山丘陵区，地形坡度变缓，沟谷宽阔，冲沟发育，标高在 250-500m；北部为山前倾斜平原，绝对标高在 20-200m，占面积最广。南部山区地质主要由石灰岩组成，随着高度的增加而地面愈加崎岖。

(1) 南部山区地质构造

南部山区的地质构造是一个以古生界地层为主的北倾单斜构造，单斜构造的北部处于鲁西隆起和鲁西北断陷的过渡带，受新华夏及晚期东西向构造的影响，有广泛的岩浆活动。古生界地层受北北西向构造体系的影响和新华夏系的影响，断裂发育，自东向西发育多条横穿全区的大断裂^[55]。

南部山区的断裂主要有北北西向的：千佛山断裂、石马断裂、平安店断裂、马山断裂；近南北向的炒米店断裂；北东向的港沟断裂。这些断裂早期是东西向的构造，后来受到多次构造作用力，南北方向上产生了一定的差异。这些断裂的发育分布情况对南部山区的地质含水层分布、地下水的运动情况有决定性的影响。

(2) 南部山区补给区的划分

在南部山区按泉水与其母体岩溶地下水形成过程中起不同作用的地段划分可分为直接补给区、间接补给区。①直接补给区是指大气降水直接入渗补给泉水汇流系统的地区。主要分布在大涧沟—涝坡以北的裸露石灰岩山区、北沙河前大彦及玉符河渴马一带的地表水强渗漏段。②间接补给区是指靠大气降水补给形成的地表水、地下水，均以地表径流形式补给直接补给区的地区。主要分布在玉符河、北沙河流域的上游地区，包括仲宫—西营—高而—万德等地区。

4.1.2 南部山区地下含水层情况

根据地矿部门水文地质专业对含水岩组的划分原则^[56]，南部山区地下水含水岩组主要分以下几类^[55]：

(1) 山前坡洪积孔隙潜水含水层

山前坡洪积孔隙潜水含水层主要分布在南部山区的东部地区，由粘土、粉质粘土、

粘上夹砾石组成坡洪积物，厚度小于 20m，富水性能差，单井出水量小于 $100\text{m}^3/\text{d}$ 。在这个含水层地带，大气降水入渗补给是其主要补给来源，它与岩溶地下水无明显的水力联系，蒸发和居民用水是主要排泄方式。

(2) 承压含水层

承压含水层主要分布在北大沙河、玉符河冲洪积扇构成的山前倾斜平原地带，面积大约 130km^2 ，地形自南向北微倾。玉符河冲洪积扇由罗而庄、殷家林向北偏西方向伸展，首部在罗而庄、殷家林一带，延伸至潘村段时沉积厚度变为 10-35m，上部为粉质粘土，中部为砂砾石、卵石层，下部为砂质粘土夹卵砾石，但局部缺失；到双庙、杜庙一带则变成多层结构，厚度 35-140m，局部基岩与含水砂层直接接触；杜庙至北潘庄，轴部厚度变为 140-250m，向两侧变薄，呈多层结构。纵剖面图见图 4.1。

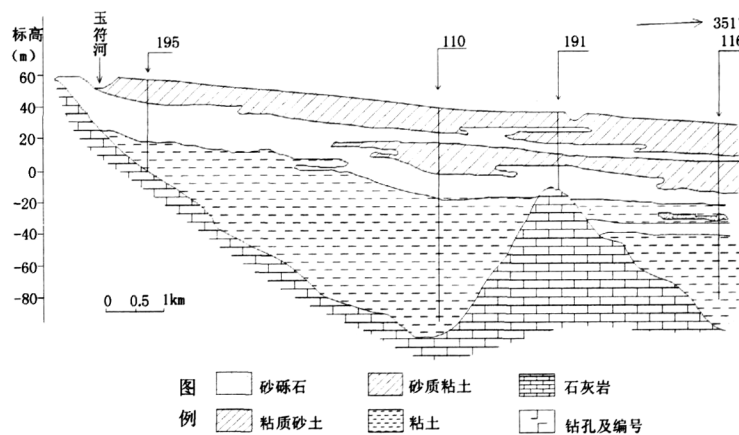


图 4.1 玉符河冲积扇纵剖面示意图

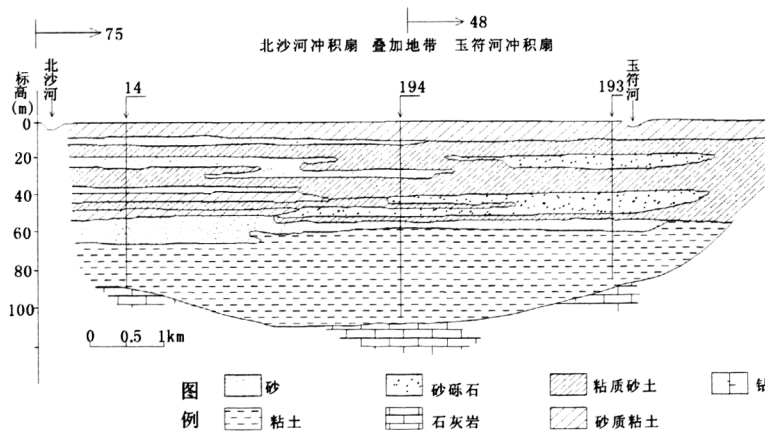


图 4.2 玉符河、北大沙河冲积扇横剖面示意图

北沙河冲洪积扇首部在魏庄、张桥一带，两冲洪积扇在小丁庄—后朱一线叠加。轴部通过王宿铺、前升、前隆一线，沉积物除首部外均为多层结构，厚度在 40-145m 之间。从藤屯往北，两冲洪积扇的迭加地带为多层结构，含水颗粒较细，主要是中细砂，含水

层底部分布有卵砾石，见图 4.2。

(3) 寒武系张夏组裂隙岩溶水含水层

张夏组含水层主要分布在涝坡、催马、前大彦庄以南的地区。含水层顶底板分别为具有相对起隔水作用的固山组页岩和徐庄组页岩。大气降水入渗补给、河流渗漏补给是该地区的主要补给来源，在锦绣川的西营至九曲河段、玉符河的东渴马至催马河段、北沙河的固山至前大彦河段，由于地质关系，大量的河水下渗补给地下水。

该裂隙岩溶水通过断裂与上覆裂隙岩溶水发生水力联系，是裂隙岩溶水的重要补给来源之一。在该地区的裸露区单井出水量小于 $100\text{m}^3/\text{d}$ ，隐伏区单井出水量一般 $100\text{--}500\text{m}^3/\text{d}$ ，在有利的地形、构造和补给条件下，富水性大大增强，单井出水量则可大于 $1000\text{m}^3/\text{d}$ 。

(4) 寒武系凤山组—奥陶系裂隙岩溶水含水层

凤山组—奥陶系主要分布在南部低丘陵区 and 北部山前平原区，由南向北依次呈单斜展布，总厚度大于 1000m ，由于受断裂作用和火成岩体侵入的影响，各层接触关系发生变化，将南部山区划分为三大断块：东坞断裂~千佛山断裂、千佛山断裂~炒米店断裂、炒米店断裂~马山断裂。

寒武系凤山组至奥陶系含水层，岩性为厚层灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩等，岩溶裂隙发育，彼此连通，导水性强。这种岩性特点有利于地下水的补给、径流、富集。但由于该地区面积广，其分布位置、地层结构、地形、补给条件、埋藏条件的不同将会影响其富水性。该含水层主要分三个区：①山前平原地区，该区岩溶裂隙发育，其补给条件、埋藏条件、储存条件、含水层连通性都较好，尤其是火成岩体边缘地带，富水性很强，是泉城地下水的直接补给区。单井出水量一般 $1000\text{--}6500\text{m}^3/\text{d}$ ，水位埋深一般小于 10m ，年变幅一般为 $3\text{--}5\text{m}$ 。②低山丘陵和山前平原的交接地带，该区灰岩呈半裸露状态，富水性能中等，单井出水量 $500\text{--}950\text{m}^3/\text{d}$ 。③低山丘陵区灰岩裸露地表，岩溶裂隙发育，有利于大气降水入渗补给，为泉城的间接补给径流区，但由于富集条件较差，单井出水量一般小于 $500\text{m}^3/\text{d}$ ，水位埋深 $50\text{--}150\text{m}$ ，年变幅较大，一般在 $20\text{--}50\text{m}$ 之间。

4.2 城区泉水的成因及喷涌历史

4.2.1 泉水的成因

济南市由于其独特的水文地质条件，形成了著名的 4 大泉群^[57]，其中市区 2.6km^2

范围内的名泉有 150 多处。“家家泉水，户户垂杨”是刘鹗在《老残游记》中对济南的描写。

济南泉水是济南地区特有的地形、地貌、地层岩性、地质构造、水文地质条件等因素综合作用的产物，是裂隙岩溶水的一种天然排泄方式^[58]。泉水的成因：

（1）地形

济南南部山区为泰山余脉，最南部为低山丘陵区，最高的山丘高度达 900m 以上，中部为低山丘陵和山前平原的交接地带，北部为山前平原地带，整个南部山区的地势呈有规律的南高北低走向。南部山区分布着大面积的寒武、奥陶系石灰岩，其产状与地形基本一致，由南向北呈单斜构造至市区一带隐伏于地下。这有利于南部山区地下、地表径流由南向北汇流至济南市城区^[59]。

（2）地质条件

①南部山区的地质因素

济南南部山区有厚度达 1000 余米的寒武-奥陶系石灰岩，裸露灰岩区和北部隐伏灰岩区岩溶、裂隙均很发育。南部裸露区地表，溶沟、溶槽以及岩溶裂隙的发育，为地下水接受大气降水入渗和上游河水渗漏补给，形成岩溶地下水创造了重要条件；北部隐伏区岩溶发育有利于岩溶水的储存、运动，并形成地下水的富集区；在地下，发育的溶洞、溶孔、溶隙及裂隙连通起来有如许多隧道，为岩溶地下水的储存运移提供了空间与通道。根据区域地下水水动力场分析，地下水接受补给后，受地形、地层产状、构造因素控制，水流由南向北流至市区。

②济南市城区地质因素

来自南部补给区的岩溶地下水流至老城区附近，由于受文化桥和千佛山断裂的作用，普利门以东、文化桥以西石灰岩地层向北突出，来自南部山区的地下水在这一带受西、北、东三面火成岩的阻挡，水位抬高，那里拦蓄起来的地下水越积越多，由于不能前进，在较高的水头压力下在低洼地段，沿灰岩裂隙岩溶通道和局部火成岩裂隙穿过不厚的松散层或被溶蚀的砾石层涌出地面，就形成济南市诸泉。

（3）补给源

济南的泉水之所以会特别多，除了上面所说的地形、地质条件因素外，还因为南部山区有充沛的雨水资源，南部山区多年平均降雨量在 648mm，大量的雨水资源汇入到玉符河、北大沙河、卧虎山水库和锦绣川水库等，渗入地下形成丰富的地下水资源，成为济南泉水的天然水塔。

4.2.2 泉水的喷涌历史

根据实测资料,将1959年以来的泉水动态划分为几个阶段。每个阶段因动态影响因素的变化,岩溶地下水位、泉水流量也随之有不同的变化^[60]。

(1) 1959-1967 年阶段

这九年期间是泉群的高水位大流量常年喷涌阶段。这主要有两个原因:一是降水量非常丰沛,有时年降水量达1000mm以上;二是济南市区地下水开采量较小,一般情况下平均每天开采量为10-15万 m^3 。因此市区地下水水位保持在较高水平,年均水位标高达28.5-31.5m,平均每天泉流量为30-50万 m^3 。

(2) 1968-1975 年阶段

这八年期间是泉群的较高水位中等流量常年喷涌阶段。这期间降水量一般在550-750mm。地下水的开采量达到35-50万 m^3/d 。地下水保持着平均28.0m以上的较高水位,泉水保持着平均15-20万 m^3/d 相对稳定的中等流量。

(3) 1976-1980 年阶段

这五年期间是泉群中等水位较小流量季节性出流阶段。该阶段降水最一般为500-700mm。地下水开采量达到50-55万 m^3/d 。地下水年均水位下降到27m左右,泉水流量逐渐衰减,平均流量下降到5万 m^3/d 左右。

(4) 1981-1998 年阶段

这十八年期间是泉群低水位长期性断流阶段。1986-1989年,中国北方遭受了百年不遇的连续枯水年。济南市除1987年降水量较大外,其他年份降水量极小,只有400mm左右。在1986、1988、1989年泉水出现断流现象,1989年平均地下水位24.11m、年最低水位22m,均达到历史最低,泉水长期性断流。该阶段除了降雨量的减少,济南市地下水开采量并没有减少,并且由于降雨量的减少使城市用水、农田灌溉用水都大大增加了。1992-1998年,泉水出流与断流交替出现,泉水年平均流量2-10万 m^3/d ,年平均地下水位为26-27m。

(5) 1999-2002 年阶段

这四年期间是泉群持续低水位泉水枯竭阶段。该阶段降水量偏小,为400-600mm,虽然市区及郊区地下水集中开采量并没有增加,但是因降水偏少,农作物需水得不到满足,必须大量抽取地下水进行农田灌溉,而农田灌溉用水的范围遍布整个南部山区,必然减少南部山区对市区泉水的补给,进而影响到泉水的出流。1999年3月-2002年3月,趵突泉出流标高26.8m以下,创泉水持续断流900多天的最高记录。这是历史上泉水断

流持续时间最长、跨越年份最多的一次。

(6) 2002-2007 年阶段

这五年期间是泉群恢复阶段。2003 年 9 月 6 号趵突泉在停喷了 548 天后再次喷涌。2004 年 7 月 21 号水位达到 28.95m, 为 28 年来的最高。这主要是因为近几年降雨量都较高, 尤其是 2004、2005、2007 年济南市都发生过暴雨事件。降雨量的增加为地下水的补充提供了保障。另一方面是政府采取了一系列“封井、置采、补源、节水”的保泉措施, 到 2007 年趵突泉已持续 4 年喷涌。

4.2.3 影响泉水喷涌的因素

济南泉水动态与自然因素、人为因素等密切相关, 从多年水位动态观测资料分析, 影响泉水喷涌的因素有^[61]:

(1) 补给区的因素

随着泉水补给区面积的减少, 地下水补给和涵蓄能力将大大降低。近年来, 由于济南城市规模的不断扩大, 南部补给区的大片林地、果园变成高楼小区, 地面硬化面积增多, 2000 年道路占地面积是 1970 年的 9.2 倍^[62]。同样的降水量, 产生的补给量却不一样, 路面的硬化降低了泉水的补给能力。

(2) 降雨量的影响

大气降水量与泉水动态的关系十分密切, 降水量的大小与泉水水位高低、泉水流量大小呈正比关系。水文年内枯水季节, 泉水位较低, 泉流量少, 进入降水季节, 随着降水量的增大, 泉水水位逐渐升高, 泉水流量也逐渐增大, 多年呈现规律性的变化。同时大量资料证实, 泉水水位、泉流量的变化与当年、前一年甚至前两年的降水量、泉域内开采量等因素密切相关。前两年的降雨量大, 则泉水水位较高, 泉水流量大; 前两年的降雨量小则反之。

(3) 开采量的影响

地下水开采量的多少也将明显影响到泉水动态, 尤其是市区开采量的大小对泉水动态的影响作用更为明显, 地下水的超量开采是导致泉水断流的重要原因。1959 年, 地下水日开采量为 7.28 万 m^3 , 泉水水位全年一般都在 30m 以上, 泉水保持常年喷涌根本不成问题。到了 1993 年, 地下水日开采量达 76.89 万 m^3 , 地下水年平均水位只有 25.22m。

(4) 规划因素的影响

水厂规划因素影响, 最初水厂的建设缺乏长远规划, 使市区内的水厂抽水对泉群的影响非常大, 如日供水 10 万 m^3 的解放桥水厂和日供水 3-4 万 m^3 的泉城路水厂, 都距泉

群非常近，水厂开采形成的漏斗使泉区水位下降。另外西郊水厂、东郊工业区的开采量过大也对泉群造成明显的影响。

泉水动态变化是自然因素和人为因素综合作用的反映，在自然因素不易改变的情况下，为保证济南泉水的常年喷涌，必须对人为因素的作用进行调整和改变，特别是开采量及开采布局的调整，做到既充分保证泉水常年喷涌，又能最大限度的利用地下水资源，实现水资源的可持续利用。

4.3 南部山区降雨量和市区地下水位特性分析

现在用南部山区卧虎山 1987-2003 年历年各月降水量资料，卧虎山下游大涧沟和济南市区靠近泉群的七贤镇附近（以后简称七贤）1987-2003 年历年地下水位资料来分析南部山区降雨量和泉群地下水水位之间的关系。大涧沟位于济南市南郊，卧虎山水库下游，济南市区诸泉上游；七贤镇附近紧靠济南诸泉，可以此地下水位做为泉群地下水位。

4.3.1 卧虎山降雨量的年变化和月变化

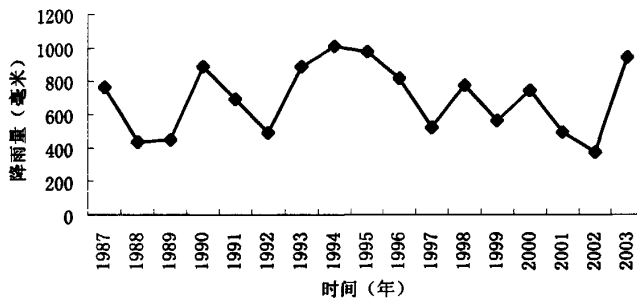


图 4.3 卧虎山年降雨量变化曲线

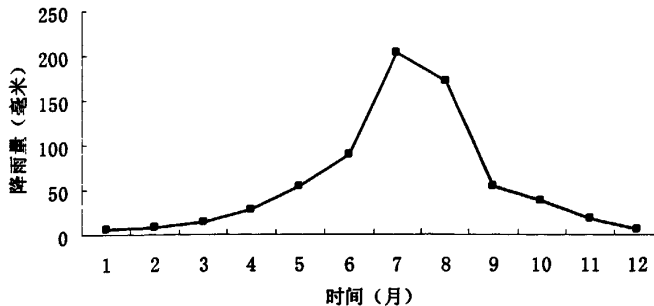


图 4.4 卧虎山月降雨量变化曲线

由图 4.3 和图 4.4 可以看出，卧虎山降雨量年变化曲线呈多峰变化，降雨量非常丰富。

降雨量最大的年份是 1994 年的 1005.5mm，降雨量最少的年份是 2002 年的 373.5 mm，多年的平均降雨量为 694.4 mm。卧虎山月变化曲线呈单峰变化，最大值出现在 7 月为 203.4 mm，其中 6-8 月降雨量占全年降雨量的 65%以上，而 11 月到次年 3 月的降雨量都很少。

4.3.2 地下水位的年变化

图 4.5 和图 4.6 分别是大涧沟地下水位年变化曲线图和七贤地下水位年变化曲线图：

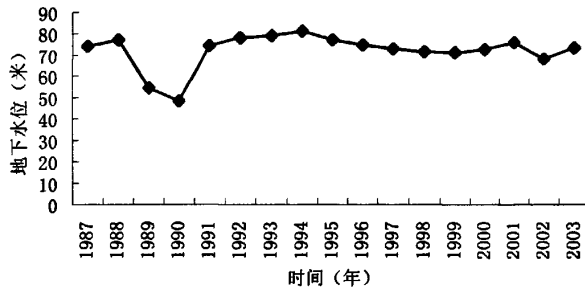


图 4.5 大涧沟地下水位年变化曲线

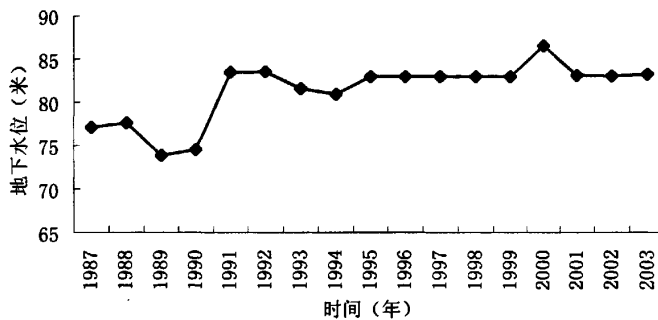


图 4.6 七贤地下水位年变化曲线

由此可见，七贤的地下水位受大涧沟地下水位的影响明显，当大涧沟地下水位较高时，由于地形和地质因素的影响，大涧沟的地下水以地下径流的形式补给七贤地下水，两者水位呈正比性的规律变化。由图 4.5 和图 4.6 可以看出，两处地下水位年变化曲线均呈多峰变化，变化规律除个别年份有差异外，基本上呈同步变化，大涧沟最高水位出现在 1994 年，为 81.42m，最低水位出现在 1990 年，为 48.4m；七贤最高水位出现在 2000 年，为 86.51m，最低水位出现在 1989 年，为 73.9m。大涧沟 17 年地下水位变化幅度比较大，最大振幅为 33.02m；而市区地下水位变化幅度比较小，年际变化值为 12.61m。

4.3.3 地下水位的月变化

图 4.7 和图 4.8 分别是大涧沟地下水位月变化曲线图和七贤地下水位月变化曲线图：

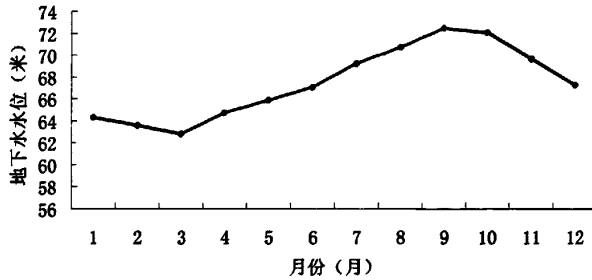


图 4.7 大涧沟地下水水位月变化曲线

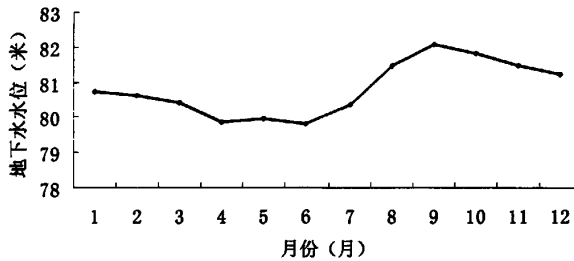


图 4.8 七贤地下水位月变化曲线

由图 4.7 可见，1 至 3 月份，地下水位呈下降趋势，在 3 月份达到最低值，为 62.8m；4 月份开始水位持续上升，6 月份以后上升速度加快，9 月份达到最大值为 72.5m；然后水位又开始下降，12 月份时水位降到 67.2m。

由图 4.8 可见 1 至 4 月份，市区地下水位一直下降，4 月份到达次低值，为 79.9m；4-5 月份有所回升，但是 6 月份又下降到最低值，为 79.8m，从 6 月份，地下水水位快速回升，到 9 月份达到最大值，为 82.1m，从 9 月以后，地下水位又开始下降，到 12 月份再次降到 81.2m。

两处地下水位变化基本一致，最高值都出现在 9 月份，这进一步证实了大涧沟地下水补给七贤地下水。为了进一步探求南部山区大涧沟地下水位和市区地下水位的相关程度采用最小二乘法，对资料进行线形回归分析。

4.4 模型的建立及模拟结果分析

4.4.1 模型的介绍

在直角坐标系中，以其中一组地下水位 x_i 为横轴，另外一组地下水位 y_i 为纵轴，把数

据画在这个坐标系上，可以看出两者的变化有近似于直线的关系，因此，可以用一元线性回归方程，以其中一组地下水位为自变量，以另外一组地下水位为因变量来描述它们之间的关系。即：

$$y_i = a + b x_i + e_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4.1)$$

其中： y_i 是因变量Y的第*i*个观察值， x_i 是自变量X的第*i*个观察值， a 与 b 是回归系数， n 是样本容量， e_i 是随机误差，这是为对应于Y的第*i*个观察值的一个随机变量。

在上述线性模型中，自变量X是个非随机变量，对于X的第*i*个观察值 x_i ，Y的观察值 y_i 是由两个部分所组成的： b 和 e_i ，前者是一个常数，后者是一个随机变量。

对于上述回归模型中的随机误差 e_i 要求满足如下的假设条件：

- 1、应当是服从正态分布的随机变量，即 e_i 满足“正态性”的假设。
- 2、 e_i 的均值为零，即 $E(e_i) = 0$ ，我们称 e_i 满足“无偏性”的假设。
- 3、 e_i 的方差等于 $\sigma^2(e_i) = e_i^2$ ，这就是说，所有 e_i 分布的方差都相同，即满足“共方差性”的假设。
- 4、各个 e_i 间相互独立，即对于任何两个随机误差 e_i 和 e_j ($i \neq j$) 其协方差等于零，即， $\text{Cov}(e_i, e_j) = 0$, ($i \neq j$) 这称之为满足“独立性”的假设。

综上所述，随机误差必须服从独立的相同分布。

基于上述假定，随机变量的数学期望和方差分别是：

$$E(y_i) = a + b x_i \quad (4.2)$$

$$\sigma^2(e_i) = e_i^2 \quad (4.3)$$

由此： $y_i \sim N(a + b x_i, e_i^2)$

这就意味着，当 $X = x_i$ 时， y_i 是一个服从正态分布的随机变量的某一个取值。如果不考虑式中的误差项，我们就得到简单的公式：

$$\hat{y}_i = a + b x_i \quad (4.4)$$

这一公式称为Y对X的回归方程。依据这一方程在直角坐标系中所作的直线就称为回

归直线。

对回归直线分析首先要估计模型参数和平均误差：

1、回归参数的估计

回归模型中的参数 a 与 b 在一般情况下都是未知数，必须根据样本数据 (x_i, y_i) 来估计。确定参数 a 与 b 值的原则是要使得样本的回归直线同观察值的拟合状态最好，即要使偏差最小。为此，可以采用“最小二乘法”的办法来验证。

对应于每一个 x_i ，根据回归直线方程可以求出一个 $\hat{y}_i$ ，它就是 y_i 的一个估计值。估计值和观察值之间的偏差 $e_i = (y_i - \hat{y}_i)$ 。有 n 个观察值就有相应的 n 个偏差。要使模型的拟合状态最好，就是要使 n 个偏差的总和最小。但为了计算方便起见，我们以误差的平方和最小为标准来确定回归模型。这就要求 Q 是个极小值。

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (4.5)$$

根据微积分中的极值定理，要使上式取极值，其对 a 与 b 所求的偏导数应为 0，即：

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial a} &= -2 \sum (y_i - a - bx_i) = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial b} &= -2 \sum (y_i - a - bx_i) x_i = 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

经整理后可得：

$$\begin{aligned} \sum y_i &= na + b \sum x_i \\ \sum x_i y_i &= a \sum x_i + b \sum x_i^2 \end{aligned}$$

解上式，可得：

$$\begin{aligned} b &= \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i) (\sum y_i)}{\sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2} \\ a &= \frac{\sum y_i}{n} - b \frac{\sum x_i}{n} \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\text{记 } \bar{X} = (\sum x_i) / n, \quad \bar{Y} = (\sum y_i) / n$$

$$\begin{aligned}
 S_{XX} &= \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 \\
 S_{XY} &= \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i)(\sum y_i) \\
 S_{YY} &= \sum (y_i - \bar{y})^2 = \sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

于是, 得到参数 a 与 b 的简单表达形式如下:

$$\begin{aligned}
 b &= S_{XY} / S_{XX} \\
 a &= \bar{y} - b\bar{x}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

求出参数 a 与 b 以后, 就可以得到回归模型:

$$\hat{y} = a + bx \tag{4.10}$$

由此, 只要给定了一个 x_i 值, 就可以根据回归模型求得一个 $\hat{y}_i$ 来作为实际值 y_i 的预测值。

2、估计平均误差的计算

对于给定的 x_i , 根据回归模型就可以求出 y_i 的预测值。但是用 $\hat{y}_i$ 来预测 y 的精度如何, 产生的误差有多大是统计上所关心的。统计上用估计平均误差这个指标来度量回归方程的可靠性, 对回归方程进行评价。估计平均误差可以用度量一组观察值的离差的方法来度量。但是这次估计平均误差是根据观察值与回归直线的偏离来计算的。一个回归模型的估计平均误差或剩余标准离差由下式定义:

$$S_e = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{4.11}$$

值得注意的是上式中分母是用 $(n-2)$ 而不是 $(n-1)$ 或 n 去除, 这是因为 n 个观察值的数据点用于计算参数 a 与 b 时失去了 2 个自由度, 还余下 $(n-2)$ 个自由度。

运用估计平均误差可以对回归方程的预测结果进行区间估计。若观察值围绕回归直线服从正态分布, 且方差相等, 则有 68.27% 的点落在 $\pm S_e$ 的范围内, 有 95.45% 的点落在 $\pm 2S_e$ 的范围内, 有 99.73% 的点落在 $\pm 3S_e$ 的范围内。

4.4.2 回归模型的检验

回归方程建立以后还需要检验变量之间是否确实存在线性相关关系, 因为对回归参数的求解过程并不需要事先知道两个变量一定存在相关关系。对一元线性回归模型的统计检验包

括两个内容：一是线性回归方程的显著性检验，二是对回归系数进行统计推断^[63]。

1、方差分解

回归分析中需要分析使用 Y 与 X 之间的线性相关关系的估计模型 $\hat{y} = a + bx$ 来估计 y 时所产生的误差和所减少的误差，这称为回归中的方差分析。若没有利用 Y 与 X 之间的相关关系来估计总体的均值，选择 y_i 的平均值 $\bar{y}$ 作为总体的估计值。由此而产生的误差是 $\sum (y_i - \bar{y})^2$ ，称之为“总离差平方和”，记为 SST。若利用 Y 与 X 之间的线性相关关系的估计模型去估计总体均值，则所产生的误差是： $\sum (y_i - \hat{y}_i)^2$ ，我们称之为残差平方和，记为 SSE。为了说明 SST 与 SSE 之间的关系，对 SST 进行分解。

$$\begin{aligned}
 SST &= \sum (y_i - \bar{y})^2 \\
 &= \sum [(\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i)]^2 \\
 &= \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + 2\sum (\hat{y}_i - \bar{y})(y_i - \hat{y}_i) \\
 &= \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 + 0 \\
 &= \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum (y_i - \hat{y}_i)^2
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

$$\begin{aligned}
 \text{若记 } SSR &= \sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 \quad SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ 则} \\
 SST &= SSR + SSE
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

SSR 反映了由于利用 Y 和 X 之间的线性回归模型 $\hat{y}_i$ 来估计 Y 的均值时，而不是简单地利用 $\bar{y}$ 来估计 Y 的均值时，使得总误差 SST 减少的部分，因此统计上称之为“可解释误差”。

SSE 是利用 Y 与 X 之间的线性回归模型来估计 Y 的均值时仍然存在的误差，因此称之为“不可解释误差”。于是，上式实际上就表示：

总误差 = 可解释误差 + 不可解释误差

2、相关分析

对于任何给定的一组样本 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, n)$ 都可以用最小二乘法建立起一个线性回归模型，相应地就可以得到一条回归直线。但是，这样的一条回归直线并不是总有意义的。只有当变量 X 与 Y 之间确实存在某种因果关系时，其回归直线才有意义。统计学中要确定变量 X 和 Y 之间是否确实存在线性相关，通常利用相关系数来检验。相关系数记作 r 或 r^2 ，

它能够较精确地描述两个变量之间线性相关的密切程度。

相关系数可以定义为可解释误差 SSR 和总误差 SST 之比，即：

$$r^2 = SSR / SST = 1 - SSE / SST \quad (4.14)$$

它反映了由于使用了 Y 与 X 之间线性回归模型来估计 y_i 的均值而使离差平方和 SST 减少的程度，从而表明 Y 与 X 之间线性相关程度及拟合模型的优良程度。 r^2 与 SSR 成正比。 r^2 越大，说明 Y 与 X 之间的线性相关程度越高，也就说明模型的拟合性能较优； r^2 越小，说明 Y 与 X 之间的线性相关程度越低，说明模型的拟合性能较差

4.4.3 大涧沟和七贤二者历年、月地下水位回归模型及检验

(1) 对大涧沟与市区年地下水水位回归模型及检验

选用 1987 年至 2003 年 17 年年地下水水位资料。

表 4.1 大涧沟与市区年地下水水位

年份	1987	1988	1989	1990	1991	1992
大涧沟地下水位 (m)	74.34	77.16	54.41	48.4	74.39	78.13
市区地下水位 (m)	77.12	77.66	73.9	74.52	83.51	83.53
年份	1993	1994	1995	1996	1997	1998
大涧沟地下水位 (m)	79.32	81.42	77.41	75.04	73.18	71.76
市区地下水位 (m)	81.6	80.91	82.97	82.94	82.94	82.99
年份	1999	2000	2001	2002	2003	
大涧沟地下水位 (m)	71.39	72.82	76.18	68.5	73.37	
市区地下水位 (m)	82.98	86.51	83.06	83	83.24	

以大涧沟年地下水位为横坐标，七贤年地下水位为纵坐标进行线性回归分析，由公式 4.8 得：

$$\bar{X} = (\sum x_i) / n = 72.2, \quad \bar{Y} = (\sum y_i) / n = 81.4$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = 1156.1, \quad S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i) (\sum y_i) = 301.7$$

于是，由公式 4.7 可得参数 a 与 b 如下：

$$b = S_{xy} / S_{xx} = 0.26, \quad a = \bar{y} - b\bar{x} = 81.4 - 0.26 \times 72.2 = 62.6$$

求出参数 a 与 b 以后, 由公式 4.10 就可以得到回归线性方程:

$$\hat{y} = a + bx = 62.6 + 0.26x$$

回归模型的检验, 由公式 4.13 得:

$$SSR = \sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 107.5, \quad SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 201.7$$

$$\text{则 } SST = SSR + SSE = 309.2$$

$$\text{相关系数: } r^2 = SSR / SST = 1 - SSE / SST = 0.65$$

计算可得相关系数为 $r^2 = 0.65$, 超过 $r^2_{0.05} = 0.576$ 的显著水平, 表明大涧沟与市区年地下水水位之间线性相关拟合程度较好。

(2) 大涧沟与市区月地下水水位回归模型及检验

选用 1987 年至 2003 年 17 年月地下水水位资料。

表 4.2 大涧沟与市区月地下水水位

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
大涧沟地下水水位 (m)	64.3	63.6	62.8	64.7	65.9	67.1	69.2	70.7	72.5	72.1	69.6	67.2
市区地下水水位 (m)	80.7	80.6	80.4	79.9	79.9	79.8	80.4	81.5	82.1	81.8	81.5	81.2

以大涧沟月地下水水位为横坐标, 七贤月地下水水位为纵坐标进行线性回归分析, 由公式 4.8 得:

$$\bar{X} = (\sum x_i) / n = 67.5, \quad \bar{Y} = (\sum y_i) / n = 80.8$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = 121.9$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i) (\sum y_i) = 21.3$$

于是, 得到参数 a 与 b 的简单表达形式如下:

$$b = S_{xy} / S_{xx} = 0.175$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 80.8 - 0.175 \times 67.5 = 69.0$$

求出参数 a 与 b 以后, 由公式 4.10 就可以得到回归线性方程:

$$\hat{y} = a + bx = 69.0 + 0.175x$$

回归模型的检验，由公式 4.13 可得：

$$SSR=\sum(\bar{y}_i-\hat{y}_i)^2=3.74 \quad SSE=\sum(y_i-\hat{y}_i)^2=2.74$$

则 $SST=SSR+SSE=6.48$

$$r^2=SSR/SST=1-SSE/SST=0.58$$

计算可得相关系数为 0.58，超过 $r^2_{0.05}=0.576$ 的显著水平，表明大涧沟与市区月地下水水位之间线性相关拟合程度较好。

进行两者年、月水位线行分析主要是为了研究南部山区地下水位与城区地下水位的
关系，以便采取措施来更好的利用南部山区的地下水补充城区地下水。

4.4.4 南部山区降雨量与市区地下水位回归模型及检验

表 4.3 南部山区降雨量和市区（七贤）地下水位关系分析

年份	2-9 月降水（mm）	汛期降水（mm）	汛期百分比（%）	9 月水位（m）	10 月水位（m）
1987	664.4	563.2	73.9	83.9	82.6
1988	420.1	313.1	71.9	80.3	79.0
1989	427.1	305.3	68.1	72.2	71.6
1990	828.8	620.4	70.0	81.8	82
1991	651.6	472.5	68.4	83.9	83.6
1992	421.8	315.5	64.3	82.7	82.6
1993	738.2	430.4	48.5	81.4	81.1
1994	894.2	804.5	80.0	82.5	82.2
1995	917.6	789.7	80.8	83.2	83.0
1996	756.1	699.2	86.0	82.9	82.9
1997	460.2	190.1	36.5	83.2	83
1998	739.5	568.3	73.4	83.1	82.8
1999	513.2	326.2	58.0	83.1	83.1
2000	616.6	473.4	63.7	83.1	83.2
2001	439.4	367.6	74.5	83.1	83.1
2002	345.3	200.5	53.7	82.9	82.9
2003	790.9	477	50.7	83.5	83.4

选用 1987-2003 年期间卧虎山 2-9 月、汛期降雨量资料以及七贤 9、10 月地下水水

位资料，见表 4.3。

(1) 以南部山区 2-9 月降雨量为横坐标，市区 9 月份地下水位为纵坐标来分析两者的相关关系，由公式 4.8 得：

$$\bar{X} = (\sum x_i) / n = 625, \quad \bar{Y} = (\sum y_i) / n = 77.5$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = 547359$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i)(\sum y_i) = 6701.1$$

于是，得到参数 a 与 b 的简单表达形式如下：

$$b = S_{xy} / S_{xx} = 1.22 \times 10^{-2}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 77.5 - 1.22 \times 10^{-2} \times 625 = 69.9$$

求出参数 a 与 b 以后，由公式 4.10 就可以得到卧虎山 2-9 月降雨量和七贤 9 月份地下水位的回归线性方程：

$$\hat{y} = a + bx = 69.9 + 1.22 \times 10^{-2} x$$

回归模型的检验，由公式 4.13 可得：

$$SSR = \sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 2168.6 \quad SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 504.8$$

$$\text{则 } SST = SSR + SSE = 2673.4$$

$$r^2 = SSR / SST = 1 - SSE / SST = 0.81$$

计算可得相关系数为 $r^2 = 0.81$ ，相关置信度超过 $r_{0.05}^2 = 0.666$ 的显著水平，表明市区地下水位与卧虎山 2-9 月份降雨量之间线性相关程度较好。由于 9-10 月份是全年地下水位最高的月份，这说明卧虎山 2-9 月份降雨量的多少与市区地下水位最高值有很大关系。

(2) 以南部山区汛期降雨量为横坐标，市区 10 月份地下水位为纵坐标来分析两者的相关关系，由公式 4.8 可得：

$$\bar{X} = (\sum x_i) / n = 465.7, \quad \bar{Y} = (\sum y_i) / n = 81.9$$

$$S_{xx} = \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum x_i)^2 = 566673.4$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum x_i)(\sum y_i) = 2070.4$$

于是，得到参数 a 与 b 的简单表达形式如下：

$$b = S_{xy} / S_{xx} = 3.65 \times 10^{-3}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} = 81.9 - 3.65 \times 10^{-3} \times 465.7 = 80.2$$

求出参数 a 与 b 以后, 由公式 4.10 就可以得到南部山区汛期降雨量和市区 10 月份地下水位的回归线性方程:

$$\hat{y} = a + bx = 80.2 + 3.65 \times 10^{-3}x$$

回归模型的检验, 由公式 4.13 得:

$$SSR = \sum (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2 = 107.5 \quad SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 23.6$$

$$\text{则 } SST = SSR + SSE = 131.1$$

$$r^2 = SSR / SST = 1 - SSE / SST = 0.82$$

相关系数为 0.82, 超过 $r_{0.05}^2 = 0.798$ 的显著水平, 表明市区地下水位与南部山区汛期降雨量之间线性相关程度及拟合模型较好。表明一年中降水越集中, 地表径流越大, 地表径流通过溶隙渗漏转化为地下水越多。

综上所述, 南部山区 2-9 月份降雨量特别是汛期降雨量与市区地下水位的升降关系密切, 相关性较好。南部山区 2-9 月份雨水资源可使市区地下水位保持在一定水平, 保证市区泉群的正常喷涌。采用工程性措施或生物性措施集蓄南部山区 2-9 月雨水, 特别是汛期雨水资源有重要意义。

4.5 本章小结

南部山区的地质构造和地下含水层情况有利于地表水和地下水向城区汇集, 这是济南泉水的主要成因之一。采用线性回归模型对城郊和城区的年、月地下水水位进行线性相关性分析, 发现模型拟合度较好。两者存在正比性规律变化, 这说明南部山区地下水因地势原因流向城区。

对南部山区 2-9 月降雨量与城区 9 月份地下水位之间、南部山区汛期降雨量与城区 10 月份地下水位之间都采用最小二乘法进行线性回归分析, 发现两者的相关性很高, 这充分说明南部山区降雨通过地表径流和地下水径流等不同形式补充城区地下水。

因此, 合理开发利用南部山区汛期大量的雨水资源是维持整个济南市水资源可持续利用的一条有效途径。

第5章 雨水的积蓄利用措施

水是生命之源，是社会发 展重要的不可替代的资源。随着国民经济的不断发展，尤其是工业化和城市化的迅猛发展，水资源短缺日益严重。水的问题越来越成为制约社会经济发展的一个重要因素。水资源危机已成为世界性问题，引起世界各国的普遍关注。地球上 70%的面积是海洋，因而水资源总量中 97.5%是不可以直接利用的海水，淡水资源只占 2.5%，而可以直接利用的河流、湖泊和水库的淡水资源，仅为淡水资源总量的 0.26%。

我国水资源总量达 28040 亿 m^3 ，居世界各国第六位，占世界水资源总量的 7%，是一个水资源大国，但我国人均占有水资源量约为 2200 m^3 ，居世界 109 位，仅占世界人均占有量的 1/4，属于水资源紧缺的 13 个贫水国之一（按 1998/1999 年世界银行统计数据）。加上其时空分布的不均匀性，我国将近一半的国土处于降水量少于 400mm 的干旱地带^[64]。另一方面，雨水资源充沛的地区雨水多是任其排放，未加以充分利用。以北京市为例，北京市城区以年平均降雨量 595 mm 计算，1998 年雨水资源流失量为 21 亿 m^3 ，占全部降雨量的 66%。我国有效降雨量在 250mm 以上的地区很广，且降雨集中在 6-9 月，这为利用丘陵山坡、路面、场院和屋顶等设施聚集雨水、开发利用雨水资源创造了有利条件。近年来，雨水作为一种资源正被越来越多的人所认识，雨水资源化的概念也逐步形成，使水资源利用的领域大为拓宽。

将济南市南部山区的雨水汇集、储存用于当地的生产、生活，回灌地下以补充城区地下水，对南部山区及城区生态环境的改善意义重大，同时还可带来巨大的社会和经济效益。

5.1 生物蓄水措施

由第三章可知，南部山区年降雨量在 360mm 以上的频率高达 95%，雨水资源丰富，因此在南部山区采用生物蓄水措施非常有效。生物蓄水措施主要包括以下几种：

5.1.1 通过增加入渗集水

由于济南市南部山区水土流失严重，土壤植被生态系统的蓄水保水能力弱，可通过地表微地形的改变，尽可能多的将降雨形成的地表径流蓄积起来，提高雨水利用程度。

区内雨水的直接利用是根据雨水的可储性通过地表微地形的改变，人工修建集流拦蓄工程，增加地表土壤入渗能力，通过“土壤水库”的储蓄调节功能，使雨水径流就地

拦蓄入渗,减少地表径流损失,提高植物根区的土壤含水量和水分利用效率,达到雨水资源的高效利用^[65]。这种技术的理论依据在于通过对地表坡度即地表径流水力坡度的降低,截短径流流径长度,减缓径流运移速度,从而增加地表径流在一定区域的滞留时间,达到增加土壤入渗的目的。如在南部山区的西营镇、柳埠镇、仲宫镇和高而乡等地修建大面积的水土保持梯田,水平阶、水平槽和鱼鳞坑等。

土壤入渗量的增加,一方面可以提高土壤中的贮水容量,以供地表植物吸收利用,另一方面还可以补充地下水储量;同时还可降低坡面径流冲刷作用力,达到减缓耕地水土流失的目的。

5.1.2 富集雨水,叠加利用

由第三章降雨特性分析知南部山区降雨量较大,雨量集中,降水分配不均匀、不稳定,降水量年际变化大,丰枯悬殊,多寡不均,而且南部山区地形复杂,雨水不容易直接集蓄利用。因此,在南部山区对雨水进行间接集蓄利用就比较重要。通过雨水的间接叠加利用来提高农作物的产量,增加土壤的含水量、保持水土,增加植被覆盖率、排洪防洪、调节气候,保护地区的水资源。

根据降水的再分配性和可移动性,利用自然和人工创造的集流面进行雨水资源的再叠加,即把多个地块的雨水径流叠加于一个地块上或把多个时段的雨水径流叠加在一个时段上,拓展雨水利用的时空限制,减少集流区水分无效消耗,增加农田区水分供应,提高雨水资源的利用率,从而达到农田生态系统的稳产高产。由于这种技术不仅利用区域本身所直接接收的天然降水,而且利用区域相邻部位的地表径流,事实上是一种雨水资源的富集叠加,故称之为雨水叠加利用技术。

秋季塑膜覆盖土壤保墒技术(简称秋覆膜保墒技术)^[66]是结合秋耕而采用的一种土壤覆膜保墒技术,是将蓄存在土壤水库中的秋季降水,通过塑膜覆膜,最大限度地加以保护,以减少秋冬初春土壤水分蒸发损失的一种措施;塑料大棚雨水高效利用技术是采用了以塑料大棚棚面集雨、棚外水窖蓄水、棚内高效灌溉用水的自给灌溉新技术,从而解决了大棚内作物的灌溉用水问题。这一技术的重点有集流、贮水和高效利用3个方面。

生产中常见的形式还有“集流场+存贮设施+利用方式”所组合而成的集流灌溉系统^[67],而集流场目前多以自然坡面、水泥路面、房顶以及其它各种硬地面。水土保持中的淤地坝系统,通过在沟道中修建筑水坝,将沟道两边山坡上的径流蓄集在塘坝中,可以直接灌溉坝地,或者将澄清水引入下面的窑池中,作为发展高效农业的水源,这也是一种典型的雨水异地集蓄利用技术。在万德镇、崮山镇、平安店镇和马山镇等地可大力发

展异地叠加雨水蓄集利用技术。

5.1.3 防止蒸发，增加雨水利用

在济南市南部山区，由于植被覆盖率低，蒸发能力很强（见表 5.1），而降雨却集中在 6-9 月份，在雨水被土壤接纳成为土壤水分后，受光、热和风力作用会产生蒸发，耕作或播种后，如在地表附加一层覆盖物，可降低地表蒸发所损耗的水分，保持土壤含水率，为农作物的生长提供保障，提高土壤蓄水保墒效果^[68]，同时，某些覆盖物还能增加土壤有机质含量，培肥地力。常用的覆盖材料主要有塑料薄膜、秸秆、麦糠、野草、绿肥、牧草及作物残茬等。王斌瑞等^[69]用植物秸秆导流技术有效的解决了覆盖塑料薄膜之后水分入渗太慢的问题。南部山区大部分是丘陵山区，大面积的农田，由于区内地形坡度较大，冲沟纵横，降水入渗能力大，境内又缺乏有效的蓄水工程，沟道内长时间干涸，地表水严重缺乏。除少数地段因断层构造富水外，其余均为贫水区，这对农田作物生长非常不利，利用覆盖抑制蒸发，延长水份在土壤水库中的集蓄时间，是一条提高雨水资源利用的有效途径^[70]。

表 5.1 不同降水地带水分运动方向的变化

降水量（mm）	水分水平运动	水分垂直运动	备注
小于 400	微弱	强烈	蒸发能力远远大于降水量
400-800	逐渐增加	仍占主导	蒸发能力一直大于降水量
800-1200	增加	减缓	水平与垂直水分交换相等
1200-1500	强烈	稳定	土壤饱和、产流增加
大于 1500	绝对优势	稳定	降水量远远大于蒸发能力

5.1.4 山区屋面雨水收集

济南市南部山区多数为农村，聚集区房屋都是独立的住宅，可利用屋面来收集雨水作为每家每户的生活杂用水。屋面雨水收集系统特点：屋面雨水收集系统主要适用于较为独立的住宅或公共建筑，工程投资占整个建筑的投资比例很小，通过屋面收集的雨水污染程度轻，雨水的 PH 值呈中性，含盐量很少，硬度很低，无需进行软化，可直接回用于浇灌、冲洗厕所、洗车等。南部山区实行屋面雨水收集利用可节约自来水用水量，缓解济南市南部山区的水资源短缺^[71]状况。

屋面雨水收集方式：屋面雨水外收集系统一般由檐沟、收集管、水落管、连接管等组成。屋面内收集系统由雨水斗、连接管、悬吊管、立管、横管等组成。在屋面雨水收

集系统沿途中还可设置一些拦截树叶等大的污染物的截污装置或初期雨水的弃流装置。屋面雨水收集的方式按雨水管道的位置分为外收集系统和内收集系统，雨水管道的位置通常由建筑设计确定。在一般情况下，大多采用外收集方式或两种收集方式综合应用的情况。

储水设施体积与集水面积以及可以收集到的雨量有关。集水面积只与屋顶的水平投影面积和屋顶排水沟的设置有关。屋面雨水收集系统可收集雨量由下式来确定：

$$Q_s = A \times (\text{降雨量} - B) \times \text{集水面积} \quad (5.1)$$

式中：A——收集效率系统，考虑下雨初期湿润屋面及蒸发的雨水损失，通常取 0.8-0.9；B——初期弃流量（mm），通常取 2.0-2.5，或者根据初期分流量确定。

储水设施的体积必须满足全年包括汛期和早期所有的用水量要求。首先确定每个月的雨水利用量 Q_d ，然后通过上式计算出每月可收集雨量 Q_s ，由下式计算每月末储水设施内的雨水量：

$$V_t = V_{t-1} + (Q_s - Q_d) \quad (5.2)$$

式中： V_t ——月末储水设施中剩余的雨水量； V_{t-1} ——月初储水设施中剩余的雨水量。

假设在降雨最大月份开始时储水设施内雨水量为 0，然后计算出每月的 V_t 值，如果任一月份的 V_t 值超出储水设施体积，则将发生溢流；如果 V_t 值出现负值，则收集的雨水量不能满足用水量要求。 V_t 值越大，安全系数越高，其设施建造的投资费用也越大。

5.1.5 植树造林，蓄积雨水

南部山区面积 1500km^2 ，如果森林覆盖率由现在的 25.9% 提高到 30%，则贮蓄雨水的功能将提高 185 万 m^3 ，相当于 2 个大明湖的水量，可减轻 7.18 暴雨汇入市区径流量的 0.3%。贮蓄调洪功能相当明显。

南部山区保护林建设应以生态型保护林建设为重点，特别是搞好禁伐型水源涵养林和禁伐型水土保持林的建设。

（1）大力发展本地林种，提高林种的成活率。

在山头沟谷、公路沿线、河流两边、城镇周围、屋前房后等重点地段进行植树造林。在不同地段可选用不同的适宜树种，在坡面上适宜种植培育侧柏与沙棘混交林或国槐、刺槐、香椿等片林；沟头或无水河道内可栽植酸枣、柠条、紫穗槐、花椒等灌木树种；道路两侧以刺槐、侧柏为主；庭院内栽植果木、花卉及药材等。

（2）按照不同坡度及地形选用适宜林种进行造林。

造林依坡度进行：5-10°发展退耕还林还果，发展以经济林为主的林地建设；大于 10°的山坡，建设以针、阔、乔、灌、草混交的防护林林系，多种林木混交以提高成活率；渗漏区与主要河流及其集水区、沟头和坡度大于 25°的地段，发展禁伐型水源涵养林；坡度大于 35°，土层较薄且土壤侵蚀潜在危险性较大的陡坡地带，发展禁伐型水土保持林，并尽量采用本地宜生林种。在这些地区，采用封山育林措施保护现有植被，使乔灌草相结合，提高森林植被的覆盖率。

在山顶地区要大量种植侧柏林，山腰处以刺槐混交林为主，采用林-灌-草一体化的模式，避免单一林种，要在本地林为主的基础上，多引进适合本区存活的落叶阔叶树种。

（3）因地制宜的进行植树造林

东泉泸村至大涧沟一带、邵而庄至党家庄一带、万粮峪至道沟一带、陡沟冲沟南岸等南部山区大部分地区集中分布的大片基本农田和坡耕地。在其周围种植坡地农田防护林，发展生态经济型水源保护林。并保留区内大部分果园，并逐步发展成经济生态型水源保护林。

（4）综合治理进行造林

在南部山区内可与水土保持林、经济林、风景林建设结合，将防洪保土与美化绿化结合起来。通过实施以上的绿化措施，到 2010 年，使占补给区面积 30%的荒草地转变为林地。

同时，应减少南部山区大规模的开发建设，禁止城区向直接补给区扩展；对于开采山石土方造成的地貌破坏，应加大复垦、植绿力度；可通过实施生物工程、增加植树造林面积、保护自然植被、逐步调整南部山区农业生产结构、进行小流域治理等措施，以达到保护土壤表层、涵养水源、实现资源开发与环境保护协调发展的目的。

5.1.6 增加草地覆盖率，增加雨水入渗

济南市区内的一些工业、商业及文教科研等单位逐渐向南扩展，而南部山区内的水泥厂、采石场、砖瓦厂等也有相当比例，除兴隆山和南部少数山体外，均有采石场成片分布，较大的采石场分布在九曲老虎洞山、马武寨及大涧沟村东、村北的山体上。各个乡镇均有规模大小不一的垃圾场存在，该区用地结构不甚合理。区内各业占地杂乱无章，缺乏统一的规划布局，这造成南部山区大面积的水土流失，土地贫瘠，蓄水能力极差。

南部山区植被绿化覆盖率较低，水土保持和涵养水源的能力很差，暴雨时易造成山洪暴发，水泥沙石顺坡而下，冲毁村庄农田，破坏交通，淤积库塘河道等排灌设施，使库塘容积变小，效益降低。如在水土流失严重的裸岩石砾地分布区以荆条、酸枣、胡枝

子等灌木和黄背草、葱草、白杨草等草本植物为主进行封山绿化，可使裸岩石砾地逐步转化为荒草地。再进一步通过植树造林，转化为林地。

南部山区的平均地表渗透率为 0.23，占总区面积 30%的荒草地建设转变为林地后，这部分区域的地表渗透率将提高 100%。对整个补给区地表渗透率的提高为 Δu ，就可以计算出由此带来的地下水的增加量 ΔQ ^[72]：

$$\Delta Q = \Delta u \times F \times P \times 10^6 \quad (5.3)$$

$$\Delta u = 100\% \times u \times w = 100\% \times 30\% \times 0.23 = 0.069 \quad (5.4)$$

式中： ΔQ 为地下水渗透增加量(m^3 /年)； Δu ：渗透系数改变量； u ：地表渗透率； W ：荒草地改变面积占全区的比例(%)，30%； F ：计算面积(Km^2)，1500 Km^2 ； P ：年平均降雨量(m)，648 mm。

由公式 5-3 可得 $\Delta Q=6706.8$ 万 m^3 /年。

如将占补给区 30%的荒草地转化为林地后，则每年可增加的地下水量 6706.8 万 m^3 。

如将占补给区面积 20%的裸岩石砾地转变为草地，这部分区域的地表渗透率将提高 50%。

对整个补给区地表渗透率的提高为由公式 5-4 可得：

$$\Delta u = 50\% \times 20\% \times 0.23 = 0.023 \quad (5.5)$$

w ：裸岩石砾地改变面积占全区的比例(%)，20%；根据公式 5-3，占补给区面积 20%的裸岩石砾地转变为草地，每年可增加的地下水量约为 2235.6 万 m^3 。

实施生态建设，占补给区面积 30%的荒草地转变为林地；占补给区面积 20%的裸岩石砾地转变为草地后，可增加的地下水量共约 8942.4 万 m^3 /年。

结合南部山区的生态条件，增加植被覆盖率、改善生态环境，大力营造水土保持林、水源涵养林，以生态效益为重点，生态效益与经济效益、社会效益相结合，绿化与美化相结合，建成“生态经济型”综合防护林体系来防止水土流失。全区建成完整的绿化体系之后，每年可增加蓄水能力 4 亿 m^3 。

5.2 工程调蓄措施

5.2.1 坡面集水

坡面水是济南市南部山区需要重点开发的水源，由第四章可知南部山区降雨量与城区地下水位之间存在的密切关系。可根据地形在降雨径流集中的坡面下部或林草地中部

和下部修建截留渠,拦截坡面降雨径流,并通过导引渠将径流引至水窖中(可采用粘土、柔性薄膜、沥青、土壤分散剂和混凝土进行表面处理,控制侧壁和池底的渗透)储存:坡面或沟道拦水→引水渠→沉砂池→蓄水池→管网输水。在作物需水时利用手压泵、电潜泵、小型离心泵提水或人工提水,采用小管浇灌、坐水补灌来解决南部山区的生产、生活用水。

南部山区内山多坡陡,坡面截流可以促进雨水入渗,避免径流冲刷。坡长较短的坡面以鱼鳞坑、竹节沟、水平阶等造林整地措施为主,坡长较长的坡面还要增设截流沟。截流沟在坡面均匀布置,其间距以坡度增大而减少,研究区内一般以 12-14m 的为宜。此外,截流沟还要与纵向的排水沟相连,把径流引入蓄水设施或强渗漏地段内。这些措施在增加坡面入渗的同时,还为坡面林木生长提供了必要的水分。

南部山区北部和西部广泛分布的自然冲沟、山间洼地及断层带两侧的强渗漏区,如九曲沟、大涧沟、邵而-展村、陡沟,是地表径流的汇水区,也是地下水的集中渗漏补给区,对这些地段,应着重加强对其雨水集蓄的功能,在这些地段,大力植树种草,搞好生态恢复与建设,修建适宜当地的坡面工程来保证汇水区地表来水对研究区地下水的补给量。

5.2.2 沟道工程

由皮尔逊Ⅲ曲线分析,南部山区年降雨量在 790mm 以上的频率为 20%,降雨量大且集中,而区内沟壑纵横,如果充分利用其自身的地形对雨水进行集蓄利用,可发挥南部山区的地形优势,沟道是降雨汇集和洪水排泄的场所,也是截流促渗的最佳位置,沟道蓄水主要包括以下几点:

(1) 现在南部山区内的大量沟壑由于水土流失严重使沟头前进和扩张愈加剧烈,因此沟头防护对于控制土壤流失具有重要意义。沟头防护应将生物措施与工程措施结合起来,在区内的小型沟头上可修建临时性谷坊并培育水土保持灌木林,树种有酸枣、花椒、柠条等适合生长的多年木本植物;而如大涧沟、道沟等大型沟头则应修建永久性防护工程,可根据来水量、地形及地理位置等因素选择蓄水式或泄水式(跌水式)防护工程措施。

(2) 对南部山区内的沟道要进行治理,区内沟道断面宽窄不一,水流条件差,泄洪时对沟岸冲刷剧烈,为此要采取沟道整治措施改善水流条件以更好的利用沟道进行雨水的收集蓄存。沟道整治主要包括:①道疏通,沟道疏通是按照水利计算确定的设计断面清除沟道淤积物和障碍物。如根据计算,文庄至九曲沟和兴济河支沟底宽以 20-40m、上口宽 35-65m 为宜;②弯取直,裁弯取直是在维持沟道原流向的基础上,对沟道急弯处加以取

直以减少雨水的冲刷作用，方式主要有内裁和外裁两种方式。典型的如八达岑、姬家峪沟段，沟道窄而多急弯，应适当裁弯取直以改善水流条件；对沟头、沟道整治之后，水流条件有所改善，但汛期大量雨水仍对沟岸进行冲刷。沟道护岸工程可根据沟道所处的位置不同而有所差异。为了保护护坡工程的安全，在坡度较陡急的区段还应增建护基工程，坡度较缓的区段虽然可以免建护基工程，但护坡工程应有足够的埋深。通过对沟道陡坡一系列的整治措施，可最大限度的保护和增加地表径流向地下径流的转化。使大量汛期雨水转化为地下水，以补充市区泉群的地下水位。

在渗漏较为强烈的地段建设拦蓄工程，把丰水期白白流失的地表径流蓄积起来，来增加渗漏量，加大补给区对地下水的补给以保证城区的地下水位。比如在南部山区的北部地区可根据其地形特点，布设 2 个骨干坝，12 个拦河坝。

(1) 在合适地段建设骨干坝

由于汛期降雨量占全年降雨量的 65% 以上，所以汛期地面径流汇流迅速，为达到防洪、拦淤、蓄水、促渗、保泉等多项目的，在大涧沟文庄段、陡沟邵而庄段适当位置各建一座骨干坝，见表 5.2。

表 5.2 修建工程设计

工程名称	拦水坝	骨干坝
坝高 (m)	2-2.5	4-5
平均低宽 (m)	50	50
纵坡降 (%)	10	5-8
复蓄系数	3.0-50	2.0-5.0
年蓄水量 (万 m ³)	3-4.5	20-35

骨干坝和拦水坝地址选择应充分利用地形、地质条件，并与沟道内拦河坝防洪回补构成一个工程体系。在大坝的两侧应建造标准较高的防护林和隔离带以确保大坝的安全运行。按照洪水评价中的洪峰流量计算，设计大涧沟骨干坝洪峰流量 500m³/s 以上，陡沟骨干坝洪峰流量在 350m³/s 以上。

(2) 拦水坝的建造

拦水坝的建造要按照自然汇流规律来划分为区段，以选择最佳的控制断面，在适宜位置修建不同规模的拦河坝，拦蓄残余径流、减小河道坡降。并且坝址选择应尽量与沟道内强烈漏段的分布结合起来，以利于雨水迅速下渗。现选出几个渗漏点为例，见表 5.3。

表 5.3 拦水坝的选址

地区	拦水坝所选沟段
陡沟	邵而庄沟段
	蛮子庄沟段
	党家庄沟段
大涧沟	徐家庄沟段
	东泉泸村沟段
	西仙庄沟段
	南康沟段
	文庄沟段
	大涧沟源头沟段
高而沟	南高而沟段
	北南而沟段
	八达岑沟段

5.2.3 河道拦蓄工程

济南市南部山区内有两大河流，分别为玉符河与北大沙河，两大河流在研究区的中西部。充分利用这两大河流集蓄汛期的雨水回灌地下，是南部山区雨水利用的重点。

玉符河为黄河的支流，发源于泰山北麓的长城岭，上游有锦绣川、锦阳川、锦银川三条支流，可根据三条支流各自的特点进行雨水的集蓄工程。这三条支流在卧虎山水库汇合为玉符河主流，主河道呈蛇曲状由东南向西北延伸，主要流经宅而头、西渴马、崔马、周王庄，最后在槐荫区吴家堡镇北店子流入黄河。河水径流量在年内分配有很大差异，多年平均有流时间在 7-10 月份，枯水期河水断流，河床干涸，为季节性河流。

玉符河多年平均年径流量 1.3 亿 m^3 ，拦蓄利用量 0.75 亿 m^3 ，拦蓄利用率 57.7%。在仲宫、党家庄、段店、平安店、吴家堡等 5 镇地区根据当地地形进行沟道洼地引水工程，把汛期大量的雨水引入玉符河内，增加河道的有流时间。在整个河道内要进行河堤植被种植工程，减少河底的下渗速度。在河岸上选择适合当地生长的树木和植被如荆条、酸枣、胡枝子和黄背草等，对河岸进行加固，减小汛期洪水对河底河道的冲刷作用。由于砾石、粗砂覆盖，河道渗漏严重，在崔马附近强烈渗漏，多年平均渗漏量 $7.3 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ ，是岩溶水的重要补给源之一。在此地区要进行河底的修复工程，在每年的河底无流时间

里大量种植黄背草、葱草、白杨草等草本植物，以减慢其渗漏速度。

(1) 锦绣川源于西营镇的佛峪、葫芦峪和天晴峪一带山泉，自东向西接纳了梯子山、藕池、逻伽、黄泉峪几处的雨水，可在枣林西部地区加修小型水库或堤坝以提高雨水的蓄集量，在仲宫镇的郭而与泉泸河相汇，在邱家庄附近要增建护基工程，修直河道，以减小汛期大量雨水水流对河道的冲刷力，河道汇流后入卧虎山水库。

(2) 锦阳川源于长城岭之阴的长峪，由西南流向东北，连黄巢水库，经窝铺村东折转西北而行，可在窝铺村加修河道，使河道的流向平滑以减少冲刷。该川与东北峪的桃科水、南来的开城水及西南峪水汇合，在柳埠镇也要加修小型蓄水工程，以增加汛期雨水的接纳能力。流水汇合后注入卧虎山水库，该川长 32 km，流域面积 181.9km²。

北大沙河发源于武家庄乡南部的摩天岭西南脚下，小支流 20 余条，年径流量 0.78 亿 m³，拦蓄 0.21 亿 m³，利用率 26.9%。流域形状狭长，河道弯曲较多。

北大沙河上游是变质岩山区，中游为石灰岩丘陵，下游是黄河滩区，其中上游位于南部山区。河道上游冲刷，中游淤积严重。该河流长度 54.3 km，汇流面积 584 km²，流域面积较大，如充分发挥其优势可在汛期大量蓄集雨水，用来做旱季的农田灌溉用水等。对于河道的上游，因冲刷严重，则应该在上游河道的河底进行植被种植工程，选择本地宜生的河底水草、藻类；在河岸上种植树木和植被如荆条和酸枣等，对河岸进行加固，减小汛期洪水对河底河道的冲刷作用。中游淤积严重就会影响到该河的蓄水能力，应在汛期前进行大规模的河底清淤，在该区旱季在河底种植水草等水生植物，以防止下个汛期雨水带来的泥沙沉在河低。宜采用生物治河和工程治河相结合，使其形成良性循环。这样即可通过改善河道的生态环境来增加河道的蓄水能力，又可通过河道蓄水能力的提高来灌溉更多的农田、植被、树林以改善河道周围的生态环境。

同时，由于该区部分河流是季节性河，对于众多由南向北流向的季节性河道，从高向低分梯次修建可控拦水坝（可控是指：既可在汛期来临前放空，腾出的空间可以对来临的洪水拦蓄）。把下泻的洪水尽可能多地截流在现有的泄洪沟内。使得它们既是泄洪沟，又是蓄洪沟，改变现在只发挥泄洪单一作用的现状，增加它们的功能，更好的发挥作用。具体的拦蓄位置、坝的类型、高度应视河的比降、宽度、岩性、下渗等具体情况确定。

5.2.4 水库调蓄工程

现在南部山区已建有各类拦蓄工程 296 座，这些工程措施与生态林业相结合，其拦蓄洪水资源方面重义重大。特别是南部山区的年降雨量在 870mm 以上的频率是 10%，采用水库来蓄存雨水非常重要。南部山区大型水库有卧虎山水库、锦绣川水库等，中型

水库有崮头水库、钓鱼台水库、石店水库等，小型水库有岩棚水库、南高而水库、坡里庄水库等，总库容 2.02 亿 m^3 ，兴利库容 1.31 亿 m^3 ，最大拦蓄能力为 2.63 亿 m^3 ，控制流域面积 748.3 km^2 。

1958 年在卧虎山、黄花山之间，筑起一条长 985m，高 37m 的大坝，拦截玉符河水，落成卧虎山水库，距济南市区 25km。水库北为卧虎山，形似猛虎雄踞，翘首东望，水库因此得名。锦绣川、锦阳川、锦云川三条大川经仲宫镇渡口村汇入卧虎山水库。该水库是一座以防洪、城市供水、农田灌溉为主要功能的综合型大型水库

锦绣川水库位于卧虎山水库上游，属于玉符河水系。两水库雨水利用主要有两方面：

(1) 在水库周围建水厂，提高雨水的利用率，提供更大的库容为汛期蓄水提供保障。除了这两座大型水库，南部山区还有 120 多座中小型水库，利用这些水库来蓄集南部山区汛期大量的雨水，不但可以减少洪涝灾害的发生几率，而且还可以根据水库的具体情况建立不同处理能力的水厂，以向济南市区供水，缓解济南市水资源短缺的危机。济南市雨水水质较好，而南部山区的雨水水质比市区的雨水水质更好一些，除个别指标外均达到生活杂用水的标准。卧虎山水库已成为济南市南部地区生活饮用水重要的水源基地。而锦绣川水库由于位于玉符河支流锦绣川河道上，所以水质要优于卧虎山水库的水质，在丰水年份经卧虎山水库调蓄向济南市供水。水库向市区供水可调整济南市的供水格局，这样不仅保障了城市供水，而且为节水保泉、恢复泉涌奠定基础。

(2) 目前大多数小型水库仍存在不同程度的安全隐患，达不到国家规定的防洪标准。今后要重点对病、险水库采取加固扩容工程，提高它们的拦蓄能力，为南部山区汛期的雨水蓄集提供保障。在对水库、塘坝除险加固的同时，应制定科学合理的洪水调度方案，积极开展水库的预蓄预泄、汛限水位设计与研究工作，实现由控制洪水向管理洪水的转变，充分发挥水库防洪和兴利作用，在确保水库工程运行安全的前提下，尽可能的拦洪削峰，减少流入干流的洪峰流量，以免影响干流排泄。

所谓汛限水位是防洪调度的起调水位，概念上是主汛期允许兴利蓄水的上限水位。比如邯郸东武仕水库经过漫坝风险分析，汛限水位研究成果表明，汛限水位由 102.8m 提高到 104.0m，安全可靠度为 99.999% 以上，水库可多蓄水 1233.7 万 m^3 。这样根据来水情况，在水库安全运行情况下，充分利用洪水资源，多拦蓄洪水量，为汛后乃至来年供水提供相当的水量^[72]。

5.2.5 雨洪回灌工程

济南市南部山区的雨水回灌主要是来补充地下水源，提高地下水水位。由第四章南

部山区降雨量与南部山区地下水水位、城区地下水水位之间的线性关系可得,采用雨水回灌工程对提高城区地下水水位是非常必要的。现在在区内已禁止开辟新的水源地;对现有的自备水井也要实行统一管理,并逐步予以封存;区内居民生活用水、工业用水等各行业用水应以城市供水管网为主,辅以各自庭院雨水收集利用;农业用水推行计量收费制度,改变农井开凿和使用管理混乱的状态。同时,采用新技术和新工艺,节约用水提高区内水资源的重复利用率,以减少用水总量。

南部山区的雨水回灌地下,可以补充济南市区的地下水位,为泉城的泉群喷涌提供保障。吴兴波^[73]通过对济南玉符河人工回灌补源试验资料的分析与研究,得出了以下结论:

(1)在玉符河上游,东渴马—潘村段是河水的强渗漏段,河水与岩溶地下水有密切的水力联系,玉符河渗漏对张夏组灰岩含水层与奥陶系灰岩含水层都有强烈的补给作用,沿玉符河两岸及炒米店地堑内,接受补给明显,水位上升幅度快,济南东南部山区地带没有受到影响。

(2)玉符河人工回灌补源对济南市区泉水有明显的补给作用。不但可以阻止城区地下水水位的下降趋势,而且还使泉水位明显回升。

因此,南部山区的雨水回灌具有重要意义。雨水的回灌不是独立存在的,可与生物蓄水、工程蓄水相结合,可达到事半功倍的效果。

5.3 非工程性控制措施

5.3.1 制定相关的法规与政策

近两届国际雨水利用大会对雨水利用的相关法规和政策进行了专题讨论,交流一些发达国家与发展中国家的经验。少数国家或地区建立了有关法规和政策。但更普遍的是缺乏法规政策,这对雨水利用的推广是很大的阻碍。

政策法规具有指引、规范乃至强制人们行为的作用。雨洪控制与利用是解决济南市节水、保泉、防洪和环境保护等系列问题的一项重要措施,人们要从开发资源、城市防汛、生态补偿与城市可持续发展的高度加以重视。但雨洪控制与利用不仅是水利和城建系统的任务,也牵涉到防洪、环保以及雨水利用的发生主体等许多部门,受市场经济条件的影响,人们的行为往往受到利益的驱使,雨水利用对发生主体来说,由于偏低的自来水价格和心理因素等影响,没有很大的吸引力,因而在现行政策法规的基础上,制定

雨洪控制与利用的政策法规，以此来规范和促进雨洪控制与利用。

(1) 在“山东省实施《中华人民共和国水法》办法”、“山东省实施《中华人民共和国防洪法》办法”、《山东省节约用水办法》以及《济南市水资源管理办法》中，要加强雨洪控制与利用方面的内容。

首先，制定优惠政策，设立专项基金，鼓励雨水利用。政府应加大资助力度，建立积极的激励机制，通过各种优惠政策和利益机制调动各单位、开发商的积极性，并将效果明显的雨水利用技术尽快推广应用，推动城市雨水利用的快速发展；建立雨水排污费（税）制度、实施雨水排放许可证制度，按照雨水排出量或径流中污染物总量收取环境资源费等。充分利用经济杠杆的作用。通过建立雨水排污费制度，实施雨水排放许可证制度，收取环境资源费等经济手段和措施，促进雨水利用的开展和实施。

其次，将雨洪控制与利用规划纳入城市总体规划，合理充分地利用雨水涵养地下水源，增加地表水面积，既能缓解城市水资源危机，又能增加土壤中的含水量，调节气候，从而改善城市的生态环境，还能减少城市雨水系统的容量，雨水管网的投资和运行费用，同时减轻城市水涝危害和水体污染。

(2) 济南市政府应结合本市情况制定出台《济南市雨水收集利用设施建设管理办法》。明确雨水利用的基本原则是“保证开发建设项目建成前后降水径流系数不能增加，新开发区的暴雨洪水洪峰流量不能超过开发前的水平。”，规定新建小区，无论是工业、商业还是居民小区，均要设计雨水利用设施，以加强雨水的利用。

(3) 根据济南市雨洪特点出台《济南市雨洪控制与利用管理办法》，制定雨洪控制与利用工程建设与运行的相应政策和规范，并委派具体部门来实施和监督。

5.3.2 转变治水思路，善待雨水，实施雨洪水资源化

大家应转变“以排为主，尽快把洪水送走”的治水思路，建立人水和谐的理念，善待雨水，在科学防洪、保证防洪安全的前提下，最大限度地挖掘雨洪水的利用潜力，多蓄水，不让宝贵的水资源白白流走，实施雨洪水资源化。

目前，各种雨洪控制与利用技术已很成熟，能否善待雨水，实现雨洪水资源化，关键在于理念转变、治水思路的转变

5.3.3 从研究与示范工程向标准化、产业化发展

现代意义上的雨水利用是从 80 年代到 90 年代约 20 年时间里发展起来。它主要是随着城市化带来的水资源紧缺和环境与生态问题而引起人们的重视。许多国家开展了相

关的研究并建成一批不同规模的示范工程。中国雨水利用起步虽晚，但北京已进入雨水利用实施推广阶段，可望成为我国雨水利用技术的龙头，以带动我国其他地区实现雨水利用的标准化和产业化。

南部山区的雨水利用要以国内外的先进经验技术为基础，进行研究和示范工程，并逐步转向标准化和产业化。

5.3.4 因地制宜，注重地区和项目的特殊性

雨水的利用要特别注意地区与地区之间各种条件的差异。甚至在一个地区内的不同项目之间，各种因素和条件的不同都能决定采用完全不同的方案。雨水利用技术应避免生搬硬套，应该充分体现因地制宜、针对性强、灵活多样的特点。正确的设计思想是最重要的。

南部山区面积广阔，地形复杂，要实施雨水利用需要根据具体的地形、地质等因素来确定具体的工程措施和技术方法。

5.3.5 加强雨洪控制与利用的智能决策系统研究

智能决策系统主要是以计算机和网络技术为基本手段和平台，利用先进专业技术和现代高新信息化技术，分析区域的自然特征、降水特征，利用气象资料、地形资料、土地利用资料，计算出区域的雨水资源化潜力，并根据该区域的水资源利用特点，通过优化决策计算，合理分配雨水资源，提出雨水资源规划利用方案，满足生产、生活以及生态用水需求，实现雨水资源的高效与安全利用。

5.3.6 加大宣传力度，鼓励民众参与

与节水措施一样，雨水的利用与民众的生活息息相关，也必须有民众的广泛参与和支持才可能取得成效。因此，需要通过各种方式进行教育，来提高人们的理解和自觉的参与意识，如组织对示范工程的参观、公益性广告、展览及社区活动等。

比如 2007 年 7 月 18 号，尽管当天下午 3 点气象台发布了暴雨黄色预警信号；下午 5 点，省气象局与国土资源厅联合发布了地质灾害预报。但并没有多少普通市民能够从有效的渠道得到这些信息，他们甚至不了解“黄色预警信号”的涵义。

因此，今后应运用先进的信息传播技术，改善汛情发布手段，拓宽发布渠道，保证气象灾害信息发布渠道畅通，通过广播、电视、报纸、气象声讯台等途径经常播出，发放预警防洪手册，宣传暴雨预警信号及涵义，设立洪水热线电话服务，通过广泛的宣传，提高公众对洪水风险的认识和理解，帮助人们加强对洪水的准备与防范，以提前采取措

施蓄积雨水，减少洪水灾害。

5.4 本章小结

南部山区雨水资源的利用主要包括三大部分：一是在南部山区的地形、植被、土壤等一系列先天条件的基础上对雨水进行生物蓄水利用，这种方法比较简单，而且具有一定的可持续性；二是在南部山区地形、地质条件下采取一系列人工方式进行工程性蓄水。工程储存和利用雨水存在一定的风险性，必须做好工程前的考察、工程建设的合理规划以及工程的后期维护工作；三是从政策法规、经济方法、宣传教育等一系列方面在主观上改变人们治水用水的思路。

第 6 章 结论与建议

6.1 结论

论文通过对济南市南部山区的降雨特性分析和对南部山区降水量与城区泉水水位动态关系的探讨,得出以下结论。

(1) 南部山区多年平均降雨量为 648mm, 区内降雨季节性明显, 降雨主要集中在夏季 6-9 月份, 4 个月降雨量占全年降雨量的 65%以上。采用皮尔逊Ⅲ型频率曲线对南部山区降雨量与频率之间的关系进行分析, 发现南部山区年降雨量分布规律基本符合 $\bar{x}=648\text{mm}$ 、 $C_v=0.27$ 、 $C_s=0.16$ 的皮尔逊Ⅲ型曲线。从而得出了该区的降雨规律, 年降雨量在 1000mm 以上的频率是 2%、年降雨量在 640mm 以上的频率是 50%。

(2) 在自然降雨条件下采用一维坡地径流模型对仲宫镇某典型丘陵进行产流计算, 坡地径流计算值与实测值相对误差在 $\pm 15\%$ 以内, 模型计算结果可靠。一维坡地径流对计算南部山区内具体的丘陵山体产流量具有重要意义, 可依据计算出的产流量来制定具体山体雨水蓄积及其利用的措施和方法。

(3) 采用线性回归模型对济南市南部山区降雨量、郊区和城区的年、月地下水水位分别进行线性相关性模拟分析, 发现模型拟合度较好。南部山区的降雨量直接影响到南部山区和城区的地下水水位高低, 降雨量和地下水水位成正比关系。在 6-9 月降雨量较大的月份, 南部山区和城区地下水水位均较高。因此, 可采取适当的措施对 6-9 月份特别是汛期多余的雨水加以蓄积利用。

(4) 针对该地区的实际情况和存在的问题, 尝试提出了南部山区雨水利用的措施及方法。

- ①根据南部山区的地形、植被、土壤等基础条件对雨水进行生物蓄水利用;
- ②在南部山区地形、地质条件允许的地方采取一系列人工方式进行工程性蓄水;
- ③在政策法规、经济方法、宣传教育等方面从主观上改变人们的治水用水思路。

6.2 建议

由于时间和条件的限制, 以及缺少更详细准确的第一手资料等原因, 无论是在模型模拟还是在实际应用方面, 该研究都有待于进一步的充实和完善。

(1) 降雨频率模型应该对今后的降雨进行预测, 用预测值与实际降雨量进行比较, 以检验模型的正确性、实用性。并利用预测值来为拦洪修坝工程、引洪导排集蓄雨水工程的实施提供依据。

(2) 该地区面积广阔, 雨水收集测点少, 无法准确测其雨水水质, 只能用济南市雨水水质来推测南部山区的雨水水质。应实测南部山区雨水水质, 以便在雨水蓄积利用时提出具体的雨水水质处理方案。

(3) 在产流计算时, 由于未做土壤渗水试验, 无法确定当地土层的渗透系数, 只能采用经验数值。在以后的研究中, 测定土层的渗透系数, 求得更准确的数据, 配合有关部门为政府制定雨水利用政策法规和规划提供参考。

(4) 济南市尽快出台《济南市雨洪控制与利用管理办法》, 制定雨洪控制与利用工程建设与运行的相应政策和规范, 并委派具体部门来实施和监督。雨水利用与民众的生活息息相关, 要加大宣传力度, 鼓励民众参与。

参考文献

- [1]张天曾:中国水利与环境[M],科学出版社,2~3,1990.
- [2]工明浩,刘健:人求水,水求谁?[M]中国城市出版社,1~10,2002.
- [3]姜宝港,崔建春,滕荣丰.济南七十二名泉[M],山东人民出版社,1~2,1986.
- [4]张杰,宋玉琴.济南市的保泉措施[J].水资源保护,2004,1(1):49-50.
- [5]吴兴波,宋星原,李景煜,等.济南市供水保泉水资源对策探讨[J].节水灌溉,2004,23(3):23-25.
- [6]王少东,钱伯宁.济南城市水资源可持续利用研究[J].水资源与水工程学报,2004,15(3):71~73.
- [7]戚爱萍,侯继梅.济南地区岩溶地下水有机物污染状况调查[J].预防医学文献信息,2001,7(6):637-638.
- [8]奚德荫,李祥芝,邵卓,等.山东省济南市保泉供水水文地质勘探报告[R].济南:山东省地矿局801队,1989:26-54.
- [9]山东省地矿局.济南泉水[M].济南:黄河出版社,2003:1-3.
- [10]山东省地矿局.济南泉水[M].济南:黄河出版社,2003:1-3.
- [11]张华玲,首建国,高焰.济南市南部山区生态环境状况调查与保护对策[J].科学与管理.2005,(4)
- [12]济南市环境保护科学研究所.济南市南部山区水源涵养重要生态功能区规划研究.[M].2004,5.
- [13]王兴杰,张林泉,岳书平.济南市保持名泉常年喷涌的战略选择[J].山东行政学院山东省经济管理干部学院学报,2004,61(3)49-51.
- [14]赵世伟,黄占斌,苏静,等.宁南山区水流域雨水资源潜力与供需分析[J].水土保持通报,2004(24)6:94-98.
- [15]孙晓英,牛争鸣,赵廷红.城市雨水资源化问题研究[J].西安理工大学学报,2001,17(2):203-207.
- [16]刘树坤,21世纪的中国水问题[A].全国城市水利学术讨论论文集[C].1998.
- [17]U. Dorfler, I. Scheunert. S-triazine herbicides in rainwater with special reference to the situation in Germany. Chemosphere,1997,35(1-2):77-85.
- [18]C Reimann, P D Caritat, H Halleraker.Rainwater composition in eight arctic catchment in northern Europe (Finland, Norway, and Russia).Atmospheric Environment, 1997,31(2):159-170.
- [19]R H Kim. Rainwater utilization for urban establishment of new paradigm. In A Joint Conference with Korea Society of Water and Wastewater and Korea Society on Water Quality,2002.
- [20]姜凌.利用土壤层净化城市雨水人工补给地下水的研究[D].长安:长安大学,2002.
- [21]李俊奇,车武.德国城市雨水利用技术考察分析[J].城市环境与城市生态,2002,15(1):47-49.
- [22]Modell Kronsberg-Eeologiela opitmnization at kronsberg[EB/OL].www.hnanover.de/deutsch

/ doku / kronseng. Nf.

- [23] 张书函,丁跃元,陈建刚,等.德国的雨水收集利用与调控技术[J].北京水利,2002, (3) :39-41.
- [24]Shizuo Shindo. Rainfall harvesting in Volcanic Islands of Japanese studies of the Izu Islands [A]. Proceeding of International Symposium & 2nd Chinese National conference on Rainwater Utilization [C].Xuzhou, Jiansu Province, China,1998,131-133.
- [25] M. Zaizen, T. Urakawa, Y. Matsumoto, etc. The eoHeefon of rainwater from dome stadiums in Japna[J]. Urbna Water, 1999, 1: 355~359.
- [26] 王浩,杨爱民.发达国家的城市雨水利用[J].人民长江报,200 (006) :1-2.
- [27]Alan Smith, Ju khow, Sian Hills, etc. water reuse at the UK's Millennium Dome[J]. Membrane Technology:118.
- [28]马乃喜,尹怀庭,马俊杰,等.西安生态环境建设研究[M].西安:西安地图出版社.1998, 172-174.
- [29]Anaya M G. Tovar Js. Different soil treatments for harvesting water for radish production in the Mexico valley[M].Pro. water Harvesting Symp. Phonemis AZ.ARS.W-22USDA,1975:315-320.
- [30]刘小勇, 吴普特.雨水资源蓄集利用研究综述[J].自然资源学报, 2000, 15 (2): 189-193.
- [31]李俊奇,车武.城市雨水利用方案设计与技术经济分析员[J].给水排水,2001 (12) :25-28.
- [32]王立红, 秦艳红.济南市地下水补给区景观格局研究[J].山东师范大学学报, 2005 (20), 4: 58-61.
- [33] 赵承忠, 李炳, 马宇熹.济南市雨洪资源利用的思考[J].山东水利, 2006, 8: 92-93.
- [34] 李光伟.近年柏树小蠹在济南市长清区侧柏上发生严重[J].植保技术与推广,2003,23(7):14.
- [35] 赵建兰, 王立红.济南市南部山区生态环境分析及对策[J].太原师范学报, 2005 (4) 3: 88-91.
- [36]吴兴波, 牛景涛, 牛景霞.玉符河大型人工回灌补给地下水保泉试验研究[J].水电能源科学, 2003 (21) 4: 53-55.
- [37] 周保华, 李大秋, 吕华.济南市地下水保护与合理利用[J].给水排水, 2006 (32), 9: 4-7.
- [38] 时启磊, 郭连玲, 李伟.关于济南市南部山区生态建设的思考[J].林业调查规划, 2004 (29) 4: 48-50
- [39]M.B 莫洛可夫等.雨水道与合流水道.建筑工程出版社.1956.
- [40]Yoon Y V, Brater E F. Spatially varied flow from controlled rainfall. Journal of the Hydraulics Division[J].ASCE,1962,97(HY9):1367-1386.
- [41]Yen B C, Wenzel HU. Dynamic equations for steady spatially varied flow. Journal of the hydraulics Division [J].ASCE,1970,96(HY3):801-814.
- [42]Morris EM. The effect of the small-slope approximation and lower boundary condition on the solution of the Saint Venant equation[J].J. Hydrol,1978,(40):31-47.
- [43]Vieira J H D. Conditions governing the use of approximations for the Saint Venant equations for

shallow surface water flow[J].J. Hydrol,1983,(60):43-58.

[44] 吴长文,王礼先.陡坡坡面流的基本方程及其近似解析解[J].南昌水专学报,1994,(增刊),142-149.

[45] 李占斌,鲁克新.透水坡面降雨径流过程的运动波近似解析解[J].水利学报,2003,(6):8-14.

[46] Govindaraju R S, Kavvas ML, Tayfur G. A simplified model for two-dimensional overland flows[J].Advances in Water Resources,1992,15:133-141.

[47] Tayfur G, Kavvas ML, Govindaraju R S, Storm D E. Applicability of St Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltration surfaces[J].Journal of Hydraulic Engineering,1993,119(1):51-63.

[48] Scoging Helen. Modelling overland-flow hydrology for dynamic hydraulics[A].In:Parsons A J, Abrahams A D, eds.Overland Flow[C]. London:UCL Press,1992.89-103.

[49]张国华,张展羽,左长清,等.坡地自然降雨入渗产流的数值模拟[J].水利学报,2007(38)6: 668-673

[50]SHU TUNG CHU.Infiltration during an unsteady rain[J].Water Resour. Res., 1978,14(3):461-466.

[51] 牟金泽.雨滴速度计算公式[J].中国水土保持,1983,(3):42-43.

[52] 杨开林,白正裕.调水渠网非恒定流的线性变换求解方法[J].水利学报,2004(3):35-41.

[53]李义天.河网非恒定流隐式方程组的叉点分组解法[J].水利学报,1997,(8):49-57.

[54]周玉文.城市雨水口流域降雨径流等流时线法模拟模型,沈阳:沈阳建筑工程学院学报.No3, 1995.

[55]吴兴波,济南人工回灌补源保泉试验研究[D],武汉大学,2004.

[56]陆敏.济南地区水文环境的演化及其规律研究[J].人文地理,1999(14)3:65-69.

[57]张杰,茅樵,宋玉琴.济南市玉符河回灌补源保泉研究[J].水利水电科技进展,2002(22)3: 19-21.

[58]张茂国.影响济南市区泉群流量的因素分析[J].山东水利,2005,2: 43-44.

[59]李建江.济南泉水保护研究[J].水土保持研究,2003(10)3: 142-144.

[60]赵增文,济南市保泉供水研究[D],西安建筑科技大学,2004.

[61]毛晓平.影响济南市区名泉停涌的主要因素分析[J].山东气象,2002(22)88: 6-8.

[62]张保祥,孙学东,刘青勇.济南泉群断流的成因与对策探析[J].地下水,2003(25): 6-9.

[63]迟竹萍,边道相,张连云.济南市南部山区人工增雨保泉工程可行性分析[J].山东气象,2001(21)83: 31-33.

[64]张茂国,城市周边山丘区雨水集蓄利用模式研究[M],山东大学,2006.

[65]于晓晶,李梅,张学杨.济南市南部山区雨水资源化途径探讨[J].青岛理工大学学报.2007(28)10 (增刊),388-390.

[66]吴普特.中国西北地区水资源开发战略与利用技术[M].中国水利水电出版社,2001. 251—259.

- [67]吴敬东, 闫兆成, 侯旭峰.北京山区雨水渠流联合调蓄利用途径研究[J].水资源, 2004, 2: 43-44.
- [68]张广英, 田久茹.干旱山区雨水资源高效利用途径和技术措施探讨[J].河北水利水电技术.2004, 2: 9-11.
- [69] G L Smith. Water harvesting technology applicable to semi-arid subtropical climates[J]. Colorado State University Fort Collins. CO.1978.95:84-90.
- [70]张晓虎, 闫玉厚, 李栓民, 等.浅论商洛山区的蓄水保墒农业[J].商洛师范专科学校学报, 2000 (14) 2: 85-88.
- [71]张茂国, 邓云青, 张昭拥.浅论济南市雨洪水的开发利用[J].山东水利, 2009, 9: 18-19.
- [72]王敏.济南市南部山区水环境现状评价及保护性开发影响研究[M].山东师范大学, 2002.
- [73]吴兴波, 济南人工回灌补源保泉试验研究[M].武汉大学, 2004.

后 记

光阴荏苒，岁月如梭，三年紧张、充实的研究生生活即将结束，在硕士论文完成之际，谨向所有给予我支持、帮助和鼓励的老师、同学和朋友表示最诚挚的谢意！

感谢我的导师李梅副教授。三年来，李老师在学习、生活方面给了我无微不至的关怀。李老师严谨的治学态度、孜孜不倦的工作精神以及乐观豁达、积极向上的人生态度使我在研究生求学生涯中受益匪浅，并必将对我今后的工作和学习产生深远的影响。在论文的选题、酝酿和写作过程中，李老师均倾注了巨大的心血，特别是对论文的修改，李老师耐心细致、精益求精，每一行文字都浸透着她的心血和希望。感谢陈淑芬老师、张克峰老师，他们在课题研究上给了我许多指导和帮助，并提了许多宝贵的意见。我由衷的感谢他们。

同时对在完成本论文的研究过程中给予大力支持和帮助的李娜、从会悦、隋涛、张学杨等同学的帮助表示诚挚的谢意。

最后感谢家人及其他所有关心和支持我的朋友！

攻读硕士学位期间发表学术论文

- [1]于晓晶, 李梅, 李娜。城市雨水利用模式探讨。节能,2007, 26 (11): 26-28.
- [2]于晓晶, 李梅, 张学杨。济南市南部山区雨水资源化途径探讨。青岛理工大学学报(增刊), 2007, 28 (10): 318-320.
- [3]于晓晶, 孙力, 张凤英。城市雨水利用工艺及经济评价探讨[J]。能源与环境, 2008, (2): 48-50.
- [4]孙力, 于晓晶, 张凤英。济南市雨水收集利用。水资源与水工程学报, 2008, (19), 2: 102-105.
- [5]李娜, 于晓晶。农村污水生态处理工艺分析。水科学与工程技术, 2008, 142 (1): 73-74.
- [6]李梅 于晓晶。济南市雨水径流水质变化趋势及回用分析. 环境污染与防治. (已录用, 2008 年第 4 期, 4 月份发表)。
- [7]李梅, 李佩成, 于晓晶。城市雨水收集模式和处理技术。山东建筑大学学报, 2007, 22 (6) 517-520.
- [8]李梅, 李佩成, 于晓晶。济南市南部山区雨水利用模式探讨。节水灌溉, 2008, (3): 36-39.
- [9]孙力, 张凤英, 于晓晶。城市雨水利用措施探索。企业科技与发展, 2007, 218 (14): 179-181.
- [10]张学杨, 张志斌, 于晓晶。浅层湖泊沉积物中磷的释放及影响因素探讨。青岛理工大学学报(增刊), 2007, 28 (10): 395-397.