

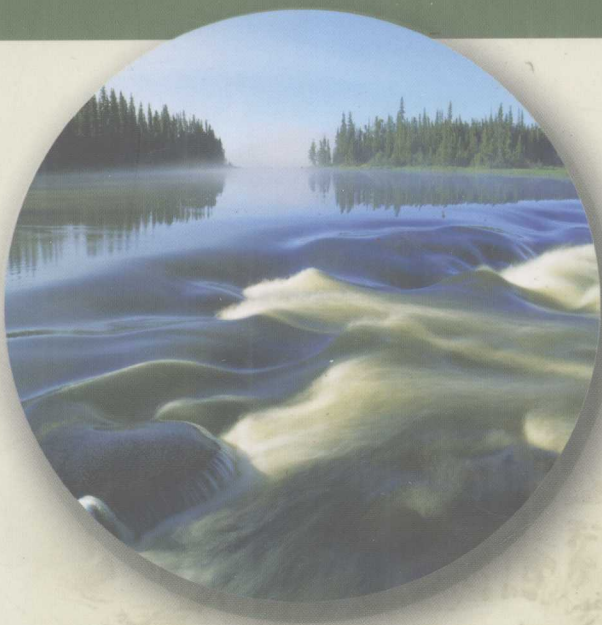
“十一五”国家重点图书出版规划项目

国家高技术研究发展计划（863 计划）和国家支撑计划项目资助

中国

雨水利用

吴普特 冯 浩 主编



黄河水利出版社

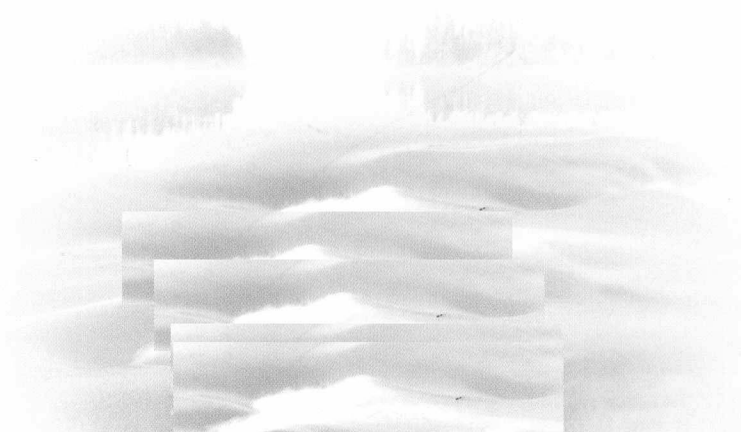
ZHONGGUO YUSHUI LIYONG

“十一五”国家重点图书出版规划项目

国家高技术研究发展计划（863 计划）和国家支撑计划项目资助

中国雨水利用

吴普特 冯 浩 主编



TV213/6082

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国雨水利用/吴普特,冯浩主编. —郑州:黄河水利出版社,
2009.6

“十一五”国家重点图书出版规划项目 国家高技术研究
发展计划(863 计划)和国家支撑计划项目资助

ISBN 978 - 7 - 80734 - 647 - 0

I. 中 … II. ①吴… ②冯… III. 降雨 - 水资源利用 -
研究 - 中国 IV. P426.62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 074588 号

组稿编辑:雷元静 电话:0371 - 66024764

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:63.25

插页:8

字数:1 460 千字

印数:1—2 000

版次:2009 年 6 月第 1 版

印次:2009 年 6 月第 1 次印刷

定价:185.00 元

《中国雨水利用》主要编写人员名单

主 编 吴普特 冯 浩

各章编写人员

理论篇

第一章	吴普特	冯 浩	赵西宁
第二章	吴普特	冯 浩	牛文全
第三章	吴普特	冯 浩	赵西宁
第四章	赵西宁	王万中	吴普特
第五章	余海龙	冯 浩	汪有科
第六章	吴普特	赵西宁	吴淑芳

技术篇

第七章	吴淑芳	吴普特	冯 浩
第八章	张万军	曹建生	冯学赞
第九章	冯 浩	吴普特	李巧珍
第十章	高建恩	吴普特	
第十一章	张万军	曹建生	冯学赞
第十二章	樊恒辉	高建恩	吴普特
第十三章	樊恒辉	高建恩	吴普特
第十四章	高建恩	朱德兰	
第十五章	吴淑芳	吴普特	冯 浩
第十六章	员学锋	汪有科	吴普特
第十七章	牛文全	李书琴	

实践篇

第十八章	杨新民	高建恩	杨世伟
第十九章	刘学军	刘 平	赵世伟
第二十章	程满金	马兰忠	郑大玮
第二十一章	高建恩	吴普特	蒋定生
第二十二章	武继承	徐建新	王志和
第二十三章	张万军	曹建生	冯学赞
第二十四章	刘永红	周 芸	刘定辉
第二十五章	卢光辉		
第二十六章	张书函	丁跃元	刘洪禄

附 录

高建恩	娄宗科	牛文全
-----	-----	-----

序

干旱缺水已成为危及全球粮食安全、人类健康和自然生态系统的重大问题。根据联合国有关组织的统计资料,目前约占世界人口总数 40% 的 80 个国家和地区都严重缺水;全球约有 90% 的自然灾害都与水有关。进入 20 世纪 90 年代,伴随着全球气候变暖趋势加剧,我国干旱缺水发生更加频繁,全国正常年份缺水量 400 亿 m^3 ,其中农业缺水 300 亿 m^3 ,年均受旱面积上升至 2 700 万 hm^2 ,年均损失粮食 250 亿 ~ 350 亿 kg,约占各种自然灾害粮食损失总量的 60%。

充分利用当地自然降水,发展节水型农业是解决干旱缺水的必由之路。降水作为一种宝贵的自然资源,具有进一步开发利用的巨大潜力。我国多年平均降水总量为 61 900 亿 m^3 ,是水资源总量(地表水和地下水)的 2 倍多,然而在半干旱区降水分配上,5% ~ 10% 以地表径流的形式流失,35% ~ 40% 为植物有效蒸腾,60% ~ 65% 被无效蒸发。如果能对降水进行合理开发和有效利用,将十分有利于缓解我国农业生产面临的水资源紧缺和干旱频繁等瓶颈问题。降水合理开发和有效利用包含多方面的内容,当前在干旱缺水地区更多受到关注的则是通过拦蓄径流加以富集利用这一技术途径。

我国雨水就地集蓄利用的生产实践历史悠久,特别是 20 世纪 80 年代以来,由于干旱缺水日趋严重,雨水利用作为解决干旱缺水地区人畜饮水的新途径而得到进一步重视。在我国西北、华北、西南有关省区的缺水地区以及沿海岛屿兴建了大量的雨水集蓄利用工程,在解决生活用水的同时,对发展集雨补灌高效农业以及城市雨水资源利用积累了许多有益的经验。尤其是“九五”以来,我国先后在雨水利用领域实施了“人工汇集雨水利用技术研究”、“雨水高效集蓄利用技术”等一系列国家级重大科研项目,极大地推动了雨水利用技术的进步及生产实践应用,取得了一系列令人振奋的科研成果。《中国雨水利用》一书既是对我国“九五”和“十五”期间雨水利用理论、技术等相关研究成果及实践经验的系统总结,同时又是对我国近中期雨水利用技术研究的进一步思考和探索,具有重要的参考应用价值。

研究和实践表明,充分利用雨水是今后农业可持续发展的基础和重要方向,也是当前解决我国农业灌溉用水紧缺、地下水过量开采、生态用水被挤占等问题的重要途径。相信该书的出版能够使更多的人关注雨水利用的发展,进一步推动全国雨水利用技术的研究和实践。特别希望雨水利用技术在解决山区群众生活用水和集雨补灌农业增收以及农业可持续发展方面发挥更重要的作用。

A handwritten signature in black ink, consisting of two stylized Chinese characters: '山' (Shan) on the left and '仑' (Lun) on the right.

2009 年 3 月

前 言

我国是一个严重缺水的国家,人均水资源占有量仅为世界平均水平的1/4,居世界121位。此外,我国水资源时空分布极为不均,与国民经济发展的区域布局严重错位,占国土面积65%、人口40%和耕地面积51%的长江淮河以北地区拥有的水资源量仅占全国的19%,人均水资源量只有501 m³,是全国平均水平的1/5,仅为世界平均水平的1/16,其中华北和西北地区的区域性缺水问题更加严重。由于水资源短缺,部分地区工业与城市生活、农业生产及生态环境争水矛盾日益突出;部分地区江河断流,地下水位持续下降,生态环境恶化。水资源短缺已成为严重制约我国经济社会可持续发展的瓶颈。

与此同时,在我国干旱半干旱地区,由于降水量小且年内分配不均,降水的利用率仅为30%~40%,降水生产效率也仅为0.3~0.6 kg/m³,60%~70%的降雨以地表径流和无效蒸发的方式损失,雨水利用的潜力很大。特别是西北地区人口稀少,人均土地面积较大,且多为丘陵坡地,坡度大于7°的坡地占土地面积的55%,这就给建造雨水集流场和实现雨水资源化提供了有利条件。通过集雨技术拦蓄径流,实现雨水资源化及其富集叠加利用,不仅可以解决降水分布与农作物生长不同步的问题,还可缓解山区与丘陵区水资源的不足,减少水土流失。

雨水利用作为一项亟待开发的水资源高效利用技术,不仅可以缓解我国水资源短缺状况,而且对于干旱半干旱地区农业发展起到极大推动作用,目前已受到我国政府的特别关注与重视。20世纪80年代以来,我国在雨水资源利用应用基础研究、雨水资源高效利用技术,以及在解决干旱山区人畜饮水困难和发展集雨节灌、促进农业增产方面取得了显著成效。尤其是在近10年来,我国在雨水资源利用研究领域实施了一系列重大研发项目和示范项目,广大水利和农业专家、学者在雨水利用理论体系的建立、雨水资源评价方法、雨水利用类型分区、雨水利用模式、水质改善及标准制定和新型防渗材料等方面进行了广泛研究与理论探索,取得了非常重要和有价值的研究成果,丰富、发展和完善了雨水利用的技术理论体系,很好地指导了雨水利用的实践过程,提高了我国雨水利用技术水平,推广了先进实用的技术。同时,随着雨水利用领域不断扩大,已从最初阶段单纯的用来解决人畜饮水、回补城市地下水,发展到利用雨水进行大田作物、经济作物、设施农业生产和林草植被恢复及城市雨水的综合利用。

在雨水利用应用基础理论研究方面,已较为系统地探讨了雨水利用的相关概念和技术类型,分析了典型区域可开发利用的雨水资源化潜力,评价了雨水利用后所产生的环境效应,从宏观角度考虑初步建立了中国雨水利用的空间分区图,为雨水资源利用技术应用提供了有力的基础理论支持。在雨水高效利用技术与新材料方面,研发出面喷涂高分子、固化土、生物集雨等一系列新型的绿色环保雨水集流新材料,开发出新型橡塑雨水存储设施和小流域雨水利用智能决策系统软件,提出黄土坡地和石质山区等不同区域适宜的雨水利用技术,为雨水规模化应用提供了一定的技术支撑。在我国陕西、内蒙古、河北、四川、甘肃、宁夏、北京以及台湾等不同省市和地区进行了雨水利用技术示范与推广,产生了明显的经济、生态效益和社会效益。

为了系统总结我国雨水利用研究成果与生产实践经验,探索雨水利用的发展前景和方向,为发展雨水资源化和促进水土资源可持续利用,我们组织近年来一直从事雨水利用研究和实践的科技工作者编写了《中国雨水利用》一书,力求全面反映我国雨水资源利用研究状况,以及“十五”以来的最新进展和生产实践经验,供有关专业技术人员参考,以促进我国雨水利用研究的进一步发展。

由于编者水平、时间有限,对本专业领域的最新进展了解不是十分全面,对有些问题的认识和判断还有待于进一步深化,书中错误和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2009年3月

目 录

序
前 言

山 仑

第一篇 理论篇

第一章 引 论	(3)
第一节 中国雨水资源概况	(3)
第二节 雨水利用发展历史与现状	(4)
第三节 雨水利用发展态势	(15)
第四节 雨水利用目标与任务	(20)
参考文献	(26)
第二章 雨水利用概念与技术类型	(29)
第一节 雨水利用概念	(29)
第二节 雨水利用技术类型	(35)
第三节 雨水利用研究与相关学科的关系	(42)
参考文献	(44)
第三章 雨水利用的理论基础	(45)
第一节 雨水利用的土壤学基础	(45)
第二节 雨水利用的水文学基础	(53)
第三节 雨水利用的工程学基础	(57)
第四节 雨水利用的生物学与生态学基础	(59)
第五节 雨水利用的经济学基础	(73)
参考文献	(75)
第四章 区域雨水资源化潜力评价	(77)
第一节 雨水资源化潜力概念及其表示方法	(77)
第二节 区域雨水资源化潜力评价指标	(81)
第三节 区域雨水资源化潜力评价模型	(84)
第四节 黄土高原雨水资源化潜力空间分布格局	(89)
第五节 黄土高原雨水资源化可实现潜力评价	(99)
第六节 不同量级降雨集蓄潜力分析	(108)
参考文献	(112)
第五章 雨水利用环境效应评价	(114)
第一节 雨水利用环境效应概述	(114)
第二节 环境效应计算与评价方法研究现状	(118)

第三节 环境效应评价指标选择	(123)
第四节 环境效应评价模型与指标量化方法	(129)
第五节 评价实例	(139)
参考文献	(141)
第六章 中国雨水利用分区	(145)
第一节 中国雨水利用分区原则	(146)
第二节 中国雨水利用分区	(147)
参考文献	(153)

第二篇 技术篇

第七章 强化降雨入渗技术	(157)
第一节 强化降雨入渗技术研究现状与进展	(157)
第二节 研究内容与试验设计	(159)
第三节 强化入渗型高分子聚合物径流调控功能	(162)
参考文献	(172)
第八章 生物集雨技术	(175)
第一节 集雨材料应用现状和发展趋势	(175)
第二节 生物集雨材料特点和生物集雨面营建	(178)
参考文献	(197)
第九章 面喷涂集雨材料与施工技术	(200)
第一节 面喷涂集雨材料发展现状与趋势	(200)
第二节 技术内容与特点	(205)
第三节 主要作用及效果	(211)
参考文献	(232)
第十章 坡地分段雨水利用技术	(235)
第一节 坡地雨水利用现状与存在问题	(235)
第二节 坡地径流分段利用的理论基础	(241)
第三节 坡地分段集蓄雨水径流调控优化试验	(244)
参考文献	(268)
第十一章 山地雨水渗流集蓄技术	(271)
第一节 山地雨水渗流集蓄利用的可行性分析	(271)
第二节 山区雨水渗流发生机制	(272)
第三节 石质山区雨水渗流补给特性	(282)
第四节 太行山雨水渗流集蓄技术	(290)
第五节 山区雨水渗流集蓄与利用中存在的问题和发展对策	(300)
参考文献	(301)
第十二章 固化土集流面新材料	(309)
第一节 土壤固化剂研究进展	(309)

第二节	MBER 土壤固化剂固土机理研究	(315)
第三节	MBER 土壤固化剂固土机理分析	(343)
第四节	MBER 土壤固化剂与水泥的区别和联系	(347)
第五节	结 论	(349)
参考文献	.....	(350)
第十三章	固化土集流面成型技术	(353)
第一节	固化土集流面成型技术研究进展	(353)
第二节	研究目的、内容与方法	(356)
第三节	MBER 土壤固化剂土质适宜性研究	(363)
第四节	MBER 土壤固化剂固化土性能研究	(385)
第五节	固化土集流面设计与成型技术研究	(405)
参考文献	.....	(414)
第十四章	新型橡塑雨水存储设施	(418)
第一节	雨水存储设施发展现状与存在问题	(418)
第二节	现有水窖受力结构分析	(421)
第三节	新型橡塑窖体设计与制造	(449)
参考文献	.....	(454)
第十五章	坡地降雨径流调控效应	(455)
第一节	问题的提出	(455)
第二节	研究内容与试验设计	(455)
第三节	非调控坡面产流产沙过程	(464)
第四节	调控坡面产流产沙过程	(468)
第五节	调控坡面的土壤储水效应	(476)
第六节	调控坡面的水沙效应	(494)
参考文献	.....	(501)
第十六章	农田降水高效利用技术	(505)
第一节	PAM 在农业中的应用现状及研究进展	(505)
第二节	研究内容和试验设计	(510)
第三节	PAM 对土壤物理性状的影响	(517)
第四节	PAM 对土壤养分淋溶效果的影响	(528)
第五节	PAM 的节水增产效应研究	(534)
参考文献	.....	(543)
第十七章	雨水利用智能决策技术	(548)
第一节	雨水利用智能决策技术的提出	(548)
第二节	雨水利用智能决策系统开发	(549)
第三节	系统应用	(568)
参考文献	.....	(572)

第三篇 实践篇

第十八章	甘肃定西干旱丘陵区雨水综合利用模式与示范	(575)
第一节	示范区自然社会经济现状	(575)
第二节	示范区任务、目标和主要技术内容	(576)
第三节	示范效果与评价	(595)
参考文献	.....	(597)
第十九章	宁夏彭阳黄土丘陵沟壑区雨水综合利用模式与示范	(599)
第一节	示范区自然社会经济现状	(600)
第二节	示范区雨水资源高效利用技术模式	(603)
第三节	雨水高效利用模式应用	(621)
第四节	示范区集雨节灌技术集成模式应用监测与效益评价	(628)
参考文献	.....	(636)
第二十章	内蒙古准格尔旗生态脆弱区雨水综合利用模式与示范	(638)
第一节	示范区自然社会经济与发展战略	(638)
第二节	示范区建设与雨水利用技术模式	(643)
第三节	示范效果评价	(682)
参考文献	.....	(708)
第二十一章	陕西延安半干旱丘陵区雨水综合利用模式与示范	(710)
第一节	示范区自然社会经济现状	(710)
第二节	示范区的任务、目标和主要技术内容	(711)
第三节	示范效果评价	(750)
参考文献	.....	(755)
第二十二章	河南辉县雨水综合利用模式与示范	(756)
第一节	示范区自然社会经济现状	(756)
第二节	农业雨水综合利用模式的思路和主要技术内容	(757)
第三节	示范效果与评价	(760)
参考文献	.....	(788)
第二十三章	河北石质山区水资源高效利用模式与示范	(790)
第一节	示范区自然社会经济现状与发展战略	(790)
第二节	模式的目标、思路、框架结构和主要技术内容	(800)
第三节	示范效果评价	(821)
参考文献	.....	(824)
第二十四章	四川简阳缓坡丘陵区雨水综合利用模式与示范	(827)
第一节	示范区自然社会经济现状与发展战略	(827)
第二节	模式的目标、思路、框架结构和主要技术内容	(830)
第三节	示范效果评价	(852)
第四节	存在问题与发展思路	(860)

参考文献	(862)
第二十五章 台湾海岛雨水利用模式与示范	(864)
第一节 台湾水资源供需背景	(864)
第二节 台湾雨水利用沿革	(865)
第三节 台湾地区雨水利用推广成效	(866)
第四节 雨水储集系统在径流削减方面的应用	(888)
第五节 雨水储集系统在水资源保育方面的应用	(890)
第六节 雨水水质及适用范围	(893)
第七节 雨水储集系统设计技术	(896)
第八节 台湾地区雨水利用相关补助办法	(902)
第九节 台湾地区雨水储集利用未来展望	(903)
参考文献	(904)
第二十六章 城市雨洪集蓄与绿地灌溉技术	(906)
第一节 城市化对降水径流的影响	(906)
第二节 城市不同下垫面产汇流规律研究	(913)
第三节 城市不同下垫面径流水质变化特征研究	(923)
第四节 城市绿地消纳雨洪的试验研究	(934)
第五节 城市小区雨洪集蓄系统设计	(948)
第六节 城市雨洪集蓄利用技术模式	(960)
参考文献	(965)

附 录

集雨工程设计图	(969)
---------------	-------

第一篇 理论篇

第一章 引 论

第一节 中国雨水资源概况

中国是一个水资源贫乏的国家,全国水资源占有量仅为 28 000 亿 m^3 ,人均水资源占有量为世界平均水平的 1/4,而且水资源时空分布极为不均,占国土面积 65%、人口 40% 和耕地 51% 的北方地区水资源总量只占全国的 1/5,干旱半干旱地区分布面积占国土面积的 50% 以上,且大部分干旱半干旱地区地下水资源分布也极为贫乏。例如黄土高原地区,面积 64 万 km^2 ,但由于深厚的黄土覆盖层达几十到几百米,丧失了地下水赋存的有利条件,地下水资源含量极为贫乏,加之复杂的地形条件,使得仅有的少量地下水也难以开发利用。同时,中国降水资源相对丰富,据统计,全国多年平均降水资源总量高达 61 900 亿 m^3 ,是传统水资源总量的 2.2 倍。因而,如何开发利用如此巨大的降水资源,实现降水资源化,并提高降水资源的利用率与利用效率,就成为一项重要的水资源开发利用研究课题,也是目前建设资源节约型和环境友好型社会的重要任务所在。

我国位于北半球欧亚大陆的东南部,濒临西太平洋,南北跨 50 多个纬度,东西共跨 60 多个经度,国土面积 960 万 km^2 。境内地势西高东低,山地多、平原少,高差极为悬殊,地貌类型多样,季风气候显著,这就决定了我国降水资源在地区分布和时程分配上的不均匀性。受季风影响,我国降水空间分布存在着东南多、西北少、夏秋多、冬春少、丰枯年悬殊的特点。若以 400 mm 等雨量线为界,以东为东南季风和西南季风控制的湿润部分,是我国的主要农业区;以西为中亚干旱区和高原干旱区,均比较干旱,是我国主要的牧业与灌溉农业区。

全国年降水量的分布大致如下:东南与华南沿海平原均在 1 600 ~ 2 000 mm 以上,台湾山地迎风坡更高达 3 000 mm 以上,而背风坡台湾海峡均在 1 000 mm 左右;江南地区为 1 400 ~ 1 600 mm,长江流域为 1 000 ~ 1 400 mm,汉水、淮河流域为 800 ~ 1 000 mm,华北平原 500 ~ 700 mm,东北平原 500 ~ 600 mm,小兴安岭以西 300 ~ 500 mm,内蒙古一带不足 250 mm;云贵高原除滇北为 750 ~ 1 000 mm 外,大部分在 1 000 ~ 1 500 mm,四川盆地内部低于 1 000 mm,其周围地区则为 1 000 ~ 1 200 mm;青藏地区东南部雅鲁藏布江出境处山麓地带高达 4 000 mm 以上,向高原内部迅速减少,至藏北高原东为 400 mm 左右,藏北高原内部则不到 100 mm,至柴达木盆地竟降至 25 mm 以下;新疆大部分地区为 100 ~ 300 mm,南疆则在 100 mm 以下,吐鲁番盆地还不到 50 mm。

由此可以看出,尽管我国降水量在时间和空间上分布极为不均,但降水资源总量仍是十分可观的,是一笔较为丰富的自然资源,在水资源日益短缺的今天,开发和利用这部分

资源就显得尤为重要。但我国目前对这部分资源的开发和利用并不十分有效,资源的利用率还较低。我国约有依靠降水满足作物生长的旱作耕地 8 000 万 hm^2 , 70% 分布在年降水 250 ~ 600 mm 的北方地区, 由于粗放经营, 农业生产利用的降水只有总量的 56%, 而这其中还有 26% 的水分消耗于田间的无效蒸发, 作物真正利用的降水只有总量的 30%。

而在水多地少的南方地区, 降水的有效利用率更低。如果我们采取有效的措施, 通过集雨、覆盖、增蓄扩容土壤水库等措施, 减少休闲期和生育期蒸发失水 10%, 按平均 400 mm 降水计算, 我国北方地区 3 400 万 hm^2 耕地可多利用降水 40 mm, 折水量 136 亿 m^3 。按全国降水和耕地面积计算, 降水利用率提高 10%, 则 12 330 万 hm^2 耕地可多利用降水 800 亿 m^3 , 完全可以满足 2030 年粮食生产对水资源的需求, 这是一个巨大的潜力。实践证明, 大力发展微型雨水集蓄利用工程, 集蓄天然雨水, 发展节水灌溉是这些地区农业和区域可持续发展的唯一出路, 也是一种可持续的发展措施。雨水利用技术简单易行, 工程投资小, 维护管理方便; 尤其是近年来, 雨水收集、输送、存储和利用技术体系研究的深化及新型环保绿色材料的广泛应用, 使得雨水利用技术得到迅速普及并为更多的人所接受; 雨水资源的高效利用不但可以有效缓解干旱缺水问题, 而且由于对雨水进行直接调控, 减少了降雨所产生的地表径流, 消除了产生水土流失的动力, 减少了水土流失危害。雨水调控和高效利用被认为是该区旱地农业提高生产力和治理水土流失的结合点, 是该区旱地农业未来发展的方向, 也是从根本上解决水土流失与干旱缺水的重要途径。

第二节 雨水利用发展历史与现状

一、雨水利用发展历史

雨水利用作为水资源最古老的利用方式, 已有几千年的历史。根据墨西哥的一份报告, 雨水利用可追溯到公元前 6 000 多年的阿兹泰克 (Aztec) 和玛雅文化时期, 那时人们已经把雨水用于农业生产和生活所需。在墨西哥、秘鲁和南美的安第斯山脉上, 建有大片梯田和数百公里精巧的渠道, 供印加人的太阳帝国和现在已消失的马丘比城居民使用, 使数十万人生活在此。在哥伦比亚、苏里南沿海和秘鲁南部高原, 3 000 多年前的不少村庄就成功地利用不同地形, 修筑台地种植玉米, 在沟底种植水稻。在公元前 2 000 年的中东地区, 典型的中产阶级家庭都有雨水收集系统存储雨水, 用于灌溉、生活、私人洗浴及公共卫生。在利比亚的干燥河谷里, 雨洪在高原边缘被石墙和涵洞导入谷底, 由另外或宽或窄的石墙加以控制; 在高原上也是一样, 雨洪由石墙引入淤积的浅滩来改善放牧条件, 阿拉伯人汇集雨水以保障干谷中的农业, 种植无花果、橄榄树、葡萄和大麦等, 曾以罗马帝国的粮仓而著名。《利比亚研究》杂志 1989 年发表的一份 UNESCO 报告总结指出: 没有一滴水被浪费。公元前 47 年, 亚历山大的埃及人使用集水槽供水, 使用前加热杀菌和防止气味。公元 8 世纪, 希腊人的房子备有储水槽、淋浴室和卫生间等, 并且有陶土管建成的排水系统。

在以色列的 Negev 沙漠中, 雨水是唯一的水源, 而且年降水量仅为 100 mm。约 1 500