



黄河水利出版社

人工汇集雨水

利用技术研究

吴普特 黄占斌 高建恩 杨新民 编著



人工汇集雨水利用技术研究

吴普特 黄占斌 高建恩 杨新民 编著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书基于雨水资源开发的可持续利用观点,主要阐述了人工方式汇集雨水及高效利用的技术体系。主要内容包括:雨水的汇集、存贮、净化及雨水高效利用技术;区域降水资源潜力与开发利用模式;雨水集蓄利用工程的规划设计指南及对发展雨水集蓄利用若干战略问题的探讨等。全书较系统地总结了我国特别是黄土高原半干旱地区的集雨经验及国家“九五”科技攻关专题:人工汇集雨水利用技术研究(96-006-02-04)的成果,具有较强的实用性和可操作性。本书主要供从事雨水集蓄利用工程的规划、设计、施工和管理工作的工程技术人员及基层水利技术人员使用,亦可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

人工汇集雨水利用技术研究/吴普特等编著. —郑州:
黄河水利出版社, 2002.4
ISBN 7-80621-538-7

I. 人… II. 吴… III. ①降水—蓄水②蓄水—利
用—研究 IV. S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 020262 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail: yrcp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄委会设计院印刷厂

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

印张:14.25

字数:362 千字

印数:1—1 500

版次:2002 年 4 月第 1 版

印次:2002 年 4 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-538-7 /S·35

定价:28.00 元

序

水是生命之源。雨水是陆地水源之本,它自天而降,是一种洁净的水资源。然而,由于降水时空分布的不均匀性,往往造成干旱、洪涝、水土流失等自然灾害,进而引发一系列诸如生态环境恶化和农业生产力降低等问题。这在我国北方旱区,特别是黄土高原半干旱地区,尤为突出。

雨水是宝贵的,是缺水地区农业生产的重要水分来源。如何有效地收集利用雨水资源,是干旱半干旱地区农业发展的重要课题。世界上许多国家和地区,已将雨水收集利用作为干旱地区人畜饮水的重要手段,并在雨水收集的农业利用方面进行了有益的探索。以雨水收集系统为主题的国际会议已召开 10 届,我国也召开过 3 次专门会议研讨雨水收集和利用问题,并在中国水利学会中设立雨水利用专业委员会。

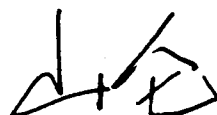
20 世纪 80 年代以来,随着干旱加剧和水资源紧缺问题的突出,我国甘肃省率先在国内开展了雨水集蓄利用研究,实施“集雨补灌”工程,随后,陕西、宁夏、内蒙古、山西和南方一些省(区)也相继开展类似的农业工程,逐步形成以雨水汇集利用为特点的集雨农业。这不但为我国旱区农业发展开辟了新途径,也为世界雨水收集利用的广泛实践提供了宝贵经验。但是,对雨水汇集利用技术的系统性研究和应用方面,以及对雨水汇集利用的认识与理论化方面,还存在诸多问题,需要研究解决。为此,国家“九五”科技攻关项目中设立了“人工汇集雨水利用技术研究”专题。通过科研人员和地方政府的合作,进行了大量调查和试验研究,取得了一系列可喜的成果,并编撰成书。该书是对这些研究成果以及黄土高原半干旱地区集雨经验的系统总结。

该书针对发展雨水集蓄利用工程生产中的实际问题,在集流系统方面,深入地研究了不同集流材料的集流效率及其影响因素,提出了多种集流效率高的集流新材料及施工技术,建立了雨水汇集的规划设计体系,制定了雨水汇集工程设计图表,提出了人工汇集雨水规划设计技术指南;在存贮系统方面,对多种窖型结构及其设计进行研究,解决了雨水集流工程的沉沙问题,并对坡地活动式集雨做了深入研究,效果良好;在雨水的高效利用方面,提出多种集雨补灌系统,组装小流量、中扬程汽油机泵,研制出抗旱施水播种机具。在研究小麦、玉米等作物需水规律及其生理生态基础上,研究了集雨补灌节水技术及配套的农

艺综合措施,提出了小麦玉米地膜集雨补灌技术规程。该书还对雨水资源的潜力及雨水资源利用的战略等方面的问题进行了深入探讨。所有上述成果,对集雨利用工程建设和生态环境建设,以及进一步完善雨水资源利用体系具有重要的现实意义。

《人工汇集雨水利用技术研究》是一部既有较大实用价值又颇具见解的专著,相信该书的出版将对我国雨水利用技术的发展,特别是“集雨补灌”农业的发展起到积极的推动作用。

中国工程院院士



2001 年 12 月

前 言

随着世界范围内的干旱加剧及水资源的日益紧缺,开发利用雨水资源已成为缺水国家和地区解决用水危机的新途径,受到普遍重视。目前,在世界6大洲都有收集利用雨水解决生活和生产用水的例子,发达国家更是将雨水资源的收集利用与自然及人类生态系统领域联系起来,进行更广泛的综合开发利用。

我国是一个水资源十分短缺的国家,被联合国列为世界13个贫水国之一。我国水资源量2.8万亿 m^3 ,按1997年人口统计,我国人均水资源量为2220 m^3 ,不足世界平均水平的1/4,预测到2030年我国人口达到16亿时,人均水资源量将降低到1760 m^3 。水资源不但短缺,而且时空分布不均。例如,黄河、海河、淮河三流域的土地面积占全国的13.4%,耕地占39%,人口占35%,国民生产总值(GDP)占32%,而水资源量仅占7.7%,人均水资源量不到500 m^3 ,耕地每公顷平均水资源少于6000 m^3 ,是我国水资源最为紧张的地区。水资源日益紧缺,已经对我国经济和社会发展构成了严重威胁,甚至成为经济发展的“瓶颈”。

我国多年平均降水总量为6.2万亿 m^3 ,可利用的雨水资源量巨大。在雨水利用的生产实践方面历史悠久,特别是20世纪80年代以来,由于干旱日益严重,雨水集蓄利用得到进一步重视,在西北、华北、西南有关省区的缺水山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,对发展集雨高效农业积累了许多有益的经验。但在发展雨水集蓄利用实践中存在认识不统一、发展不平衡、技术缺乏系统性、集流设施性能不稳定等问题。为此,国家在“九五”重点科技攻关计划中,安排了“人工汇集雨水利用技术研究”项目,就雨水利用的理论、技术及实践进行了专题研究。该研究于2000年12月通过水利部组织的鉴定,成果总体上达到国际先进水平。本书是该项目研究的系统总结。

本书第一章、第十章由吴普特撰写,第二章由冯浩撰写,第三章、第八章由蒋定生撰写,第四章由高建恩、岳宝蓉、冯浩撰写,第五章由杨新民撰写,第六章由黄占斌、李秧秧撰写,第七章由张汉雄、杨新民、陈云明、张富撰写,第九章由高建恩撰写。全书由吴普特、高建恩统稿。部分插图由高建恩绘制。由于水平所限,加之对有些问题的认识仍需不断深化,书中难免有错误与不当之处,敬请读者指正。

参加本专题研究的科技人员还有付国岩、范兴科、李少斌、张正斌、徐炳成、赵克玉、陈涛、杨世伟、张小卫、周晓东、高鹏、尚新明、李登贵及郭彦彪等。山仑院士、乔玉成教授、蒋定生研究员对本专题研究始终给予关注和指导。另外,本研究在执行过程中得到科技部、水利部及中国科学院的关怀与大力支持,也得到甘肃省定西地区行署、定西地区水土保持研究所及陕西省富平县水利局的大力支持;本书的出版得到了国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心的资助。在此一并表示感谢!

编 者

2001年11月28日

目 录

序	山 仑
第一章 绪论	(1)
第一节 雨水利用技术的发展和应	(1)
第二节 雨水利用的有关概念与研究动态	(5)
第三节 雨水利用研究存在的问题与主要研究内容	(13)
第二章 小流域雨水资源潜力与供需分析	(16)
第一节 小流域雨水资源潜力及计算方法	(16)
第二节 黄土高原小流域雨水资源供需分析	(21)
第三章 区域降水资源潜力与供需状况分析	(27)
第一节 水资源特征	(27)
第二节 水资源的供需状况分析	(34)
第三节 水资源的承载力	(46)
第四章 雨水汇集方式与配套技术	(49)
第一节 不同下垫面材料的产流特征	(49)
第二节 雨水汇集工程基本参数及其确定	(57)
第三节 集流场地表处理技术研究	(72)
第五章 雨水存贮与净化技术	(83)
第一节 雨水存贮设施的结构设计	(83)
第二节 雨水存贮设施的施工技术	(88)
第三节 雨水存贮设施的保鲜净化技术	(94)
第六章 汇集雨水的高效利用技术	(101)
第一节 集雨灌溉机具	(101)
第二节 作物需水规律与集雨节灌技术	(107)
第三节 集雨补灌的综合配套技术	(119)
第四节 雨水高效利用技术评述与应用	(125)
第七章 典型地区雨水集蓄利用技术发展状况	(130)
第一节 甘肃省集雨节水灌溉工程调研与分析	(130)
第二节 定西地区雨水集流工程发展动态仿真预测	(134)
第三节 渭北旱塬雨水汇集参数与灌溉模式	(143)
第八章 雨水资源开发利用模式	(155)
第一节 山坡降水资源的开发利用技术	(155)
第二节 沟道水资源的开发利用模式	(172)
第三节 支毛沟内泉水开发利用模式与示范	(176)
第四节 沟道坝系工程建设与水源的保护利用	(177)

第五节	坡地活动式集雨节灌模式研究	(183)
第九章	雨水利用工程规划设计指南	(184)
第一节	资料收集调研	(185)
第二节	雨水利用工程的规划	(189)
第三节	雨水集流利用工程系统的设计	(199)
第十章	关于雨水集蓄利用若干问题的思考	(216)
第一节	雨水集蓄利用技术的概念	(216)
第二节	雨水集蓄利用技术研究重点	(218)
第三节	对于几个问题的思考	(220)
第四节	现代雨水利用工程的几个研究方向	(223)
参考文献		(227)

第一章 绪 论

长期以来,水资源开发主要着力于河川径流和地下水。一般认为我国水资源总量就是河川径流和与河川径流不重复计算的并可得到降雨补充的地下水,总量每年约 2.81 万亿 m^3 ,与全国年平均降水量 6.19 万亿 m^3 (即年平均降水量 648.4mm)相比,仅占 45%。在我国干旱的西北内陆地区,年降水总量达 5 113 亿 m^3 ,而计算的年水资源总量仅 1 064 亿 m^3 ,仅占年降水量的 21%;黄土高原地区计算的水资源总量仅占年降水总量的 11%。绝大部分年降水量变为无效蒸发,损失浪费。由于河川径流大部分以洪水形式出现,调节利用困难;地下水的分布和开采条件往往难以适应利用对象的需要。因此,按照计算的水资源总量,进行开发利用,也存在很大的局限性。

开发利用雨水资源并不是新技术,它是一项古老的传统技术。无论是降水稀少的以色列内盖夫沙漠地带,还是年降水量在 4 000mm 以上的西太平洋诸岛,几千年来,那里的人民正是依靠雨水资源的收集和利用顽强地生存下来的。近年来,雨水利用技术能够得到复兴,客观上存在两方面原因:一是已有的水资源开发规模和能力难以满足人口增长、城市化、工业化和灌溉面积发展等巨大的需水要求,开辟新的水源,建设跨流域调水工程是解决缺水问题的重要途径,但跨流域调水将引起一系列自然环境和社会经济问题,而且工程造价高,年运行费用大,解决问题有限,很多地区水资源的开发已达到或超过允许开采值,造成严重的环境和生态问题;二是技术本身的优越性。雨水自天而降,遍布 7 大洲、4 大洋,分布极广;水质良好,无污染,转化为土壤水后,植物可直接吸收利用,收集、存贮后可直接供给生活、灌溉和工业利用;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和新型材料的应用,使得雨水利用技术得到迅速普及并为更多的人所接受。雨水资源的利用不但可以缓解干旱缺水问题,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,消除了水土流失的动力,减少了水土流失危害。雨水调控和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。

基于上述目的,国家在“九五”期间,将“人工汇集雨水利用技术研究”列入国家科技攻关计划,本书正是我们五年研究结果的总结和概括。

第一节 雨水利用技术的发展和运用

本节主要介绍雨水利用技术的发展,以及该技术的应用范畴和应用状况。

一、雨水利用技术的发展

雨水利用是一项曾被广泛应用的古老传统技术。据墨西哥的一份报告指出,雨水利用可追溯到公元前 6000 多年的阿兹泰克(Aztec)和玛雅文化时期,那时人们已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,供应印加人的太阳帝国和现已消失的马丘比城,使数十万人在此生活。在哥伦比亚、厄瓜多尔、苏里南沿海和秘鲁南部高原,3 000 多年前的村居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。公元前 2000 多年的中东地区,典型的中产阶级家庭都有雨水收集系统用于生活和灌溉。阿拉伯人收集雨水,种植了无花果、橄榄树、葡萄、大麦等。在利比亚的干燥河谷内,人们用堤坝、涵管把高原上的水引至谷底使用。埃及人用集流槽收集雨水作为生活之用。2 000 年前,阿拉伯闪米特部族的纳巴泰人在降雨仅 100 余毫米的内盖夫(Negev)沙漠,创造了径流收集系统,利用这样少量的雨水种出了庄稼,这种纳巴泰技术直到现在仍在应用。20 世纪 70 年代从卫星照片上发现了埃及北部的径流收集系统和非洲撒哈拉东南部存在的集水灌溉系统(Gawan, Caag, Teras)。印度西部的塔尔沙漠,人们通过水池、石堤、水坝、水窖等多种形式收集雨水,获得足够的水量来支持世界上人口最稠密的沙漠,每平方公里达 60 人。几百年前,在美国亚利桑那州的印地安人用漏斗状的长堤,把雨水集中到几公顷的土地上,种植玉米、甜瓜等。500 多年前,科罗拉多州的阿那萨基人建造数以千计的小坝截留雨水种植玉米、豆子和蔬菜。可以毫不夸张地说,雨水利用曾经有力地支撑了古代许多地方的灿烂文明。

我国雨水利用也是由来已久,早在 4 000 年前的周朝,农业生产中就利用中耕等技术增加降雨入渗,提高作物产量。秦汉时期在一些地方修建涝池塘坝拦蓄雨水进行灌溉;而修筑梯田利用雨水的方式则可以追溯到东汉。在生活用水方面,干旱地区的农民用水桶、瓦盆等收集降雨时屋面滴檐水饮用;水窖修筑历史也有数百年,在甘肃会宁有一清朝末年修筑的水窖至今仍在使使用。20 世纪 50 年代,人们利用窖水点浇玉米、蔬菜等,突破了原来只用窖水作为生活饮用水的观念。在 80 年代后期,这一思路得到迅速发展,人们将收集的雨水用于发展庭院经济和大田作物需水关键期的补充灌溉。1988 年以来,甘肃省在中东部干旱缺水地区开展了雨水利用试验示范研究,并将其成果进行推广;1995 年在干旱半干旱地区实施了“121 雨水集流工程”,1997 年制定并出版了《甘肃省雨水集蓄利用工程技术标准》。同一时期,宁南山区实施“窑窖农业”,内蒙古自治区在准格尔旗和清水河县进行了“112 集雨节水灌溉工程”试验示范研究,陕西、山西、河南、河北、江苏、浙江、贵州等省亦进行了雨水利用试验研究。1995 年 6 月,北京举办了第七届国际雨水集流系统大会;1996 年 11 月,在兰州召开了第一届全国雨水利用学术讨论会暨国际学术研讨会;1998 年 9 月和 2000 年 9 月分别在徐州和大连举行第二和第三届全国雨水利用学术研讨会。会议的召开,极大地推动了我国雨水集蓄利用的研究。目前,我们国家的研究主要集中在干旱半干旱地区生活饮水、集流节灌和生态环境建设等问题上,同时对集蓄雨水补灌地下水及城市集流等问题也展开了研究。

然而,从 19 世纪末、20 世纪初开始,随着现代技术的兴起,先是地下水的开采在许多地方逐渐取代了雨水利用技术。接着,以控制洪涝灾害、利用河川径流和开采地下水为目标的当代水利工程的修建,又为社会经济的发展,特别是农业的持续稳定增长,发挥了很大的作用,取得了巨大的效益。雨水利用渐渐被人们遗忘。但是,人类社会经济的进一步发展,人口的不断增长,对有限的水资源提出了越来越高的要求,水资源的紧缺已成为许多地方制约经济发展的因素,同时,大型水利工程引发越来越多的生态环境问题也迫使人们思考和寻找其他出路。因此,近 20 年来,雨水利用重又引起了人们的注意。特别是联合国 1981~1990 年“国际供水与卫生十年”(IDWSSD)开展以来,这一技术迅速在世界各国复兴和发展,成为

许多国家解决水资源不足,特别是农村人口生活用水困难的一个重要途径。

我国的雨水利用发展可以概括为三个阶段:利用雨水解决生活用水为主的初级阶段、利用雨水解决生产用水的中级阶段和利用雨水解决生态用水的高级阶段。1980 以前利用雨水主要解决缺水地区生活用水问题;从 1980 年开始一直到 1997 年,主要注重于收集雨水用于发展农业生产;从 1997 年开始直到现在,雨水利用已逐渐由解决生活和生产用水的基础上,向生态供水方向发展,其中林草植被建设生态需水和城市地下水位下降区雨水回补是生态用水阶段的重点。

二、雨水利用技术的应用

雨水利用技术应用范围很广,在这里我们重点介绍人类利用雨水解决生活和农业生产方面的需求。

(一)利用雨水解决生活用水

目前,在世界 6 大洲都有收集雨水解决生活用水的例子。包括发达国家如日本、澳大利亚、加拿大、美国、德国、瑞典等,发展中国家的泰国、印度、尼泊尔、斯里兰卡、孟加拉国、菲律宾、伊朗、巴勒斯坦、肯尼亚、突尼斯、南非、博茨瓦纳、纳米比亚、津巴布韦、乌干达、赞比亚、坦桑尼亚、埃及以及巴西、墨西哥、哥伦比亚等国,都在发展这一技术。地区年降雨量从 100 ~ 4 000mm。利用雨水解决生活用水的包括城市和农村。在城市中,日本是开展规模最大的地方。雨水主要用于冲洗厕所、浇灌草坪,也用于消防和发生灾害时应急用水。另外,存储雨水的水池还用作调节城市雨洪的设施,在洪水季节要留出约 1/3 的容积存放洪水以减少城市下水道的负担。除了在一般住房中建蓄水池外,在有些大型建筑物如相扑馆、大会场、机关大楼下建有容积达数千立方米的地下水池来存蓄雨水。日本不少城市对雨水利用进行资金补助。对于蓄雨水的水池,每 100L 容积政府补助 40 ~ 120 美元不等;对雨水下渗坑补助 120 ~ 160 美元;对雨水净化器,补助 290 ~ 620 美元或 1/3 ~ 2/3 的设备价。安装雨水收集系统的人或单位可从网址上查到申请此种补助的住址和联系人。

美国从 20 世纪 80 年代初就开始研究用屋顶雨水集流系统解决家庭供水问题,1983 ~ 1993 年,USAID 资助了一项面向全球的雨水收集系统计划(RWCS)以后,又建立了雨水收集信息中心(RWIC)和一个通讯网。美国的关岛、维尔金岛广泛利用雨水作为冲洗、洗衣服和草地灌溉用水,但提醒人们不要把雨水作为盥洗用。

在农村利用雨水规模最大的是泰国。20 世纪 80 年代以来开展的泰缸(Tai jar)工程,建造了 1 200 多万个 2m³ 的家庭集流水泥水缸,解决了 300 多万农村人口的吃水问题。澳大利亚在农村及城市郊区的房屋旁,普遍建造了用波纹钢板制作的圆形水仓,收集来自屋顶的雨水。这种建筑甚至成为澳大利亚的一种特色风光而出现在 1999 年昆明的世博会上。据南澳大利亚的一项抽样问卷调查表明,使用雨水的居民比用城镇集中供水系统的要多。加勒比海地区雨水也是许多地方居民生活用水的主要来源,百慕大群岛 80% 以上的居民用水来自雨水收集系统。在非洲,肯尼亚的许多地方,UNDP 和世行的农村供水和卫生项目,把雨水存贮罐作为项目的一个重要内容,在学校、医院建造了许多 10 ~ 100m³ 的贮水罐。这种技术后来传到博茨瓦纳、纳米比亚、坦桑尼亚等地,带动了非洲的雨水集蓄工程的发展。在拉丁美洲的墨西哥和巴西,雨水利用也开展得比较普遍。墨西哥的 Chiapas 高原有较完善的雨水收集系统,由铝制屋顶、梯形地下水池、过滤池、水泵等组成。巴西东北部靠近赤道的半干

旱带 Petrolina 地区,在国际组织的资助下,帮助贫苦居民修建2 000多个用铁丝网水泥、预制混凝土板、石灰衬砌和砖砌的贮水罐。

(二)利用雨水解决农业生产用水

20 世纪中叶以来,国外兴起了对径流农业(Runoff Agriculture)的研究和实践。以色列政府制定了为期 30 年的庞大径流农业计划,在内盖夫地区建立可持续发展的农业生态系统。联合国有关组织把发展适合当地条件的径流农业技术作为援助非洲的一项重要内容,组织发达国家科技人员在非洲许多地区作了大量试验示范。以色列通过多年努力,重新起用和改进了古代的纳巴泰系统,并被中东、非洲及美洲的一些国家的干旱地区效法。在技术方面还研究了集流面材料和集流效果,提出了设计方法和发展农业的基本技术措施。

径流农业是指对降雨产生的径流进行收集、储存和利用,发展农业生产的措施。在国外大致可以分为以下几种类型:

(1)以“集流区+种植区”为特征的微集水农业系统。由微型集流区和利用径流的种植区组成,在集流区收集的径流直接集中到种植区,为农业系统增加水分。径流区和种植区的面积比例取决于降雨量和作物需水量。例如,在巴西的 Petrolina 地区进行了利用田间土壤富集雨水的试验和示范,对比试验表明,此种措施可使作物增产 17%~58%。在墨西哥、博茨瓦纳等地也有过此种实践,并导出了根据当地雨量、径流系数和作物需水量计算作物间距的公式。微集水技术也应用在造林上,称为径流林业,在林带之间设集水区,把径流集中到林带上。

(2)以“集流区+蓄水设施+输水设施”为特征的集雨蓄水技术。集雨蓄水技术是收集雨水产生的径流并储存于蓄水池或蓄水罐内,再通过输水设施供给农业灌溉。收集径流的区域可以大到几至十几平方公里的小流域,小到几百平方米。例如,印度对 Andhra Pradesh 地区 8.9hm² 的小流域研究认为,修建 6 处由 1hm² 集流面、300m³ 蓄水池组成的系统,即可为该流域农田提供充足的补充灌溉用水。在印度许多省份,采取修建小型水池、塘坝、谷坊等拦蓄雨水,进行灌溉。在墨西哥,采用淤地坝、谷坊等来收集贮存雨水。肯尼亚莱基比亚(Laikipia)地区示范项目在年雨量 600mm 的情况下,资助居民修建容积为 100m³ 的地下水池,其中 25m³ 用于家庭生活及牲畜饮水,75m³ 用于灌溉庭院。雨水收集面为铁皮屋顶,项目收到很好效果。玉米产量从项目实施前的 1 800kg/hm² 提高到 2 700kg/hm²,增产 50%。由于粮食的增加和有了水的保证,畜牧业也得到发展。项目鼓励农民在房前屋后、田块四周和荒山上栽树,从而改善了环境。

(3)以“平整土地+增加入渗+拦蓄雨洪”为特征的拦截雨水措施。包括修整梯田、台地、水平沟等以增加土壤含水量等多种措施。前面所说的纳巴泰方法也是一种拦截雨水的技术,在中东和北非有着广泛的应用。该方法是沿着山坡修建浅的沟网,把洪水引入干旱河谷。在河谷中则修筑梯田,或者修建小水坝、堰,把土地截成小块,以拦蓄引过来的雨洪。伊朗北部阿塞拜疆省在年降水 250mm 的条件下,修建水平沟和台地,植树种草,增加植被,取得了一定效果。在布基纳法索试验了一种用植物障碍拦截雨洪的方法,可以增加在障碍前后的土壤含水量,由于植物障碍的透水性,又不至于造成上游被水淹没。这种形式在伊朗、墨西哥的干旱地区也有采用。

(4)引洪漫地和回补地下水。伊朗许多地方采取引洪漫地来恢复植被和回补地下水。或采取筑坝蓄积径流,对地下水进行回灌,增加井的出水量。由于城市化所带来的大面积不

透水层,使得日本首府东京从1967~1987年20年间地下水的自然补给率下降了37%,由此造成地下水位下降,泉水枯竭,河水减少。从1990年开始,东京地区启动了一项利用下渗坑回补地下水的计划,在房前屋后埋设直径为350mm、高为600mm周围全为入渗孔的下渗坑,到1995年共安装了180 000套下渗坑。观测结果表明,与项目实施前相比,在同样的降水量情况下,泉水断流期缩短了35%,利用雨水入渗进行地下水回补效果十分显著。

径流农业技术带来了很大的经济效益。博茨瓦纳年降雨500mm的地方,使用微集水技术使高粱的产量提高了2~3倍。印度半湿润区进行了集水技术和农林复合系统的试验,采用微集水技术的地栗荳蔻和水稻套种,每公顷纯收益增加了1.3倍。Jodhpur地区微集水措施使绿豆产量从每公顷1.98t提高到2.7t,增加36.4%。在半干旱的Andra Pradesh区对高粱、蓖麻分别灌溉15mm和50mm,每公顷产量增加251kg和523kg。微集水技术使年降雨仅100mm的内盖夫地区,获得每公顷桃6~12t,葡萄12~15t,杏3~8t的收成。美国亚利桑那州Avra谷地使用微集水技术栽种牧豆树的成活率达到38%,而对照区只有2.5%;有两种树木的成活率甚至达到81%。美国得克萨斯州用小水池蓄存径流一年补充两次灌溉,成本每英亩约为60美元,而总收入可达80~100美元。集流农业技术所花的代价比一般工程要低。据美国新墨西哥州的试验,微集水技术的费用仅为水泵抽水工程的1/3~1/2。国外的经验,径流收集技术不仅可以用在发展干旱、半干旱地区的农业生产,而且能建立新的农业生态系统,起到改善生态环境的作用。这在以色列、非洲、美洲有很多成功经验。

总的来看,国外雨水集蓄技术在解决生活用水和农业生产上都有广泛的应用,特别在干旱、半干旱地区,是解决缺水问题、发展农业生产、建设生态系统的有效措施。这些经验对我国类似地区有重要的借鉴作用。

第二节 雨水利用的有关概念与研究动态

本节主要讨论雨水利用的有关概念,并简要介绍与雨水利用有关的研究动态。

一、雨水利用的有关概念

雨水利用事实上是一个非常广泛的概念,可以说对雨水的一切利用方式都可界定为雨水利用,在此,我们仅简单说明雨水利用的几个概念和利用的类型。

(一)雨水利用概念及其类型的划分

所有形式的水资源,从根本上来说都来自雨水,因而雨水利用不仅仅是指雨水集流的家庭利用和雨养农业利用,而且还包括人工增雨、水土保持、水源地涵养、城市防洪和生态环境的改善等水资源利用的各个方面。就这种广义的雨水利用而言,其外延几乎囊括了水的所有利用方式,具有极大的广泛性。

由于各人对雨水利用的理解及划分的依据不同,现有的划分类型不尽相同。牟海省从水资源与雨水资源之间的派生关系出发,认为雨水集流的家庭利用和雨养农业应用属于雨水的直接利用或雨水一级利用,河流、湖泊、水库、地下水等雨水派生资源的开发利用,称之为雨水利用或间接利用,雨水资源可以进行多次派生和多次利用。蔡焕杰等人将农业雨水利用分为雨水自然利用(等高耕作、水平梯田、覆盖保墒等),雨水叠加利用(小区集水、隔坡梯田等)和雨水聚集利用(蓄水池、水窖等)。

(二) 雨水利用的内涵

作为具有特定含义的雨水利用,是指对雨水的原始形式和最初转化为径流或地下水、土壤水阶段的利用,即所谓的一次利用,也可将其称雨水的直接利用。就雨水的直接利用而言,至少应包括以下内容:

- (1) 解决人畜饮水的家庭利用;
- (2) 集流补灌的农业雨水利用;
- (3) 用于消防、城市绿地灌溉的城市雨水利用;
- (4) 雨水的地下水补给利用。

目前一般文献中提到的雨水利用即指这种雨水的直接利用,也称狭义的雨水利用。

(三) 农业雨水利用

农业雨水利用,指通过自然过程或人类活动过程将雨水用于农业生产以提高作物产量和改善农业生态系统的利用。蔡焕杰等人将农业雨水利用分为雨水自然利用(等高耕作、水平梯田、覆盖保墒等)、雨水叠加利用(小区集水、隔坡梯田等)和雨水聚集利用(蓄水池、水窖等)。笔者认为可将其分为:①雨水的原始利用或自然利用,即雨水到土壤水到植物吸收利用,也就是植物对没有人为活动影响的、自然水文循环过程中的雨水利用;②雨水的被动利用,即通过一定的工程措施增加拦蓄入渗(如梯田、水平阶、鱼鳞坑等)或减少蒸发(如覆盖)来利用雨水;③雨水的主动利用,指通过一定的汇流面将雨水汇集并蓄存,到作物缺水的需水关键期进行补灌。和被动利用相比,主动利用中须使用灌溉手段,使作物不完全依赖于降水,从而提高了可控性。

(四) 雨水集蓄利用

广义的雨水集蓄利用是指经过一定的人为措施,对自然界中的雨水径流进行干预,使其就地入渗或汇集蓄存并加以利用;狭义的则指将汇流面上的雨水径流汇集在蓄水设施中再进行利用。雨水集蓄利用中强调了对正常水文循环的人为干预,如前所述的主动利用和被动利用就属于雨水集蓄利用的范畴。

二、有关研究动态

如前所述,雨水利用是一个非常广泛的概念,关于雨水利用的研究事实上也是一个非常复杂的问题。从某种角度考虑它可能是一个技术问题,但技术的实施与资源的数量、评价,以及存在形式均有着密切的关系,因此,在介绍雨水利用研究动态时,我们非常有必要首先介绍与此有关的资源研究状况。

(一) 雨水资源评价

雨水资源的正确评价对其合理开发利用具有十分重要的意义。据估算,我国多年平均降水量为 6.19 万亿 m^3 ,年降水最大的地方超过 6 000mm,而约有 1/3 的面积降水量低于 200mm。可见,降水总量丰富,但分布不均匀且差异悬殊。考虑雨水资源的情况下,刘昌明提出用下式评价区域水资源总量。

$$T_w = W + R_s = (P_e + R + G) - R_g = (R + W) - (R_g + F) \quad (1-1)$$

式中: T_w 为年水资源总量; R 为河川径流量; W 为总入渗量; R_s 为地表径流量; G 为总地下水补给量; P_e 为年有效降雨量; F 为壤中流; R_g 为地下径流量。

在讨论有效降水基础上,刘昌明提出有效降雨系数 K_e 的概念:

$$K_e = [P(1 - a_r - \alpha(1 - a_g))]/p \quad (1-2)$$

式中: a_r 为雨水对地下水补给系数; α 为径流系数; a_g 为地下径流占总径流的比例。

从此式中可以看出, 可通过减小 a_r 和 α 来增加有效降雨系数。

蒋定生在分析降水资源的适量、适时和有效度的基础上, 利用模糊评判对陕北地区的降水资源潜力进行了分析, 他提出山坡地降水资源潜力可用降水对作物的满足程度表示。评价结果表明: 延安地区种植在梯田上的农作物依靠降水基本上能满足其水分需求, 而栽植在坡地上的牧草灌木和乔木, 降水无法满足其水分需求。另外, 蒋定生采用水资源负载指数来评价区域水资源潜力。由于黄土高原的降水绝大部分消耗于无效蒸发, 因此有人认为黄土高原的雨水资源花在农业上, 很大程度上就是降低农田无效耗水过程。徐学选等人通过分析陕西北部不同作物棵间蒸发及休闲期蒸发发现, 陕西北部地区粮田的年总无效耗水达 33 亿 m^3 , 另外居民工矿和交通用地年可汇集雨水 6 亿 m^3 , 无效蒸发和居民地雨水汇集是雨水资源潜力开发的主要内容。

雨水资源评价中, 除对其总量进行评价外, 更重要的是对可开发利用的雨水资源潜力进行合理评价, 估算出雨水总量中的地下水补给量、供给下游的水量及环境用水量等自然水文循环过程中的用水量, 再确定合理的开发量, 也就是估算出由于目前人们认识、技术等限制而浪费掉的或没有发挥最佳效益的那部分雨水资源量。雨水资源的评价应引起人们的重视, 以防止过度利用而产生的环境问题。

(二) 水资源可持续开发利用及其承载力

1992 年世界环境与发展大会召开以来, 可持续发展思想已成为世界各国制定社会经济发展战略的主要依据, 我国政府将可持续发展战略作为社会经济发展总体战略, 纳入了国家经济与社会发展规划。按照联合国环境与发展委员会的解释, 可持续发展的定义为: “既能满足当代人的需要, 又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展模式。”可持续发展强调三个主题: 代际间发展的公平性、区域间发展的公平性和社会经济发展与人口、资源、环境的协调性。

水资源是人类生产与生活活动的重要物质基础, 随着社会的不断进步和经济的不断发展, 人们对水的质量和数量的需求也会越来越高。而自然界所能提供的可用水资源量是有一定限度的, 需求与供给间的矛盾将日趋尖锐。

水资源承载能力是指在某一历史发展阶段, 以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据, 以可持续发展为原则, 以维护生态环境良性发展为条件, 在水资源得到合理的开发利用下, 该地区人口增长与经济发展的最大容量。资源承载力研究着重从资源可能性出发回答: 一个地区的水资源数量、质量, 在不同时期的可利用水量、可供水量, 用这些可利用的水量能够生产出多少工农业产品, 人均占有工农业产品的数量, 生活水平可以达到的程度, 合理的人口承载量等; 与此同时, 分析水资源的开发利用程度、开发利用效率、投入产出关系、生态环境状况等问题, 并提出有关对策。

影响水资源承载能力的主要因素包括水资源的数量、质量及开发利用程度、生产力水平、社会消费水平与结构、科学技术、人口与劳动力等。

随着科学技术的不断发展, 人类适应自然、改造自然的能力逐渐增强, 人类生存的环境正在发生重大变化。尤其是近年来, 变化的速度渐趋迅速, 变化本身也更为复杂。与此同时, 人类对于物质生活的各种需求不断增长。因此, 李令跃认为, 水资源承载能力在概念上

具有动态性、相对极限性、模糊性以及被承载模式的多样性。

动态性是指水资源承载能力与具体的历史发展阶段有直接的关系,不同的发展阶段有不同的承载能力。这体现在两个方面,一是不同的发展阶段人类开发水资源的技术手段不同。二是不同的发展阶段人类利用水资源的技术手段不同。随着节水技术的不断进步,水的重复利用率不断提高,人们利用单位水量所生产的产品也逐渐增加。

相对极限性,是指在某一具体历史发展阶段水资源承载能力具有最大、最高的特性,即可能的最大承载指标。

模糊性是指由于系统的复杂性和不确定因素的客观存在,以及人类认识的局限性,决定了水资源承载能力在具体的承载指标上存在着一定的模糊性。

被承载模式的多样性也就是社会发展模式的多样性。人类消费结构不是固定不变的,而是随着生产力的发展而变化的。尤其是在现代社会中,国与国、地区与地区之间的经贸关系弥补了一个地区生产能力不足,使得一个地区可不必完全靠自己的生产能力生产自己的消费产品,因此社会发展模式不是惟一的。如何确定利用有限的水资源支持适合地区条件的社会发展模式,则是水资源承载能力研究不可回避的决策问题。

水资源承载能力的动态性说明了事物总是处于不断发展变化的历史过程中,相对极限性和模糊性则反映了相对真理和绝对真理的辩证统一关系,而被承载模式的多样性则决定了水资源承载能力研究是一个复杂的决策问题。

(三)土壤水资源评价

土壤水是地球水体的重要组成部分之一,陆地上植物所利用的水分主要是从土壤中直接汲取的。土壤水的存在、补给、更新和平衡,对农业、牧业、林业、自然生态环境和水资源平衡有极其重要的意义。土壤水虽然不像地表水、地下水那样集中分布或聚集,也不能由人工直接提取、运输和作各种用途的运用,但是,人们能够通过间接的方法利用它,例如可以通过作物(植物)来直接汲取利用它,从而使它变成了人类生产资料和生活资料的天然来源的重要组成部分。

土壤水是四水转化的中枢。无论是灌溉水还是天然降水,都要转化为土壤水后才能被作物根系吸收。可被作物根系吸收利用的地表浅层土壤空隙中的水称为土壤水资源。

土壤水资源的提法曾有争议。随着人们对土壤水研究的深入以及土壤水作为资源的客观存在,越来越多的学者认识到土壤水的资源属性。自 20 世纪 70 年代苏联学者李沃维奇(M Nputotulu)提出土壤水资源的概念后,苏联学者 Budagovskii 和 Busarova 发表了关于土壤水资源的论述。我国学者近 10 多年来对土壤水资源也作了一定的研究。

目前,国内外在土壤水和土壤水资源评估计算方面,还没有统一的计算方法。在国际水文十年苏联国家委员会出版的《世界水平衡与地球水资源》中,利用贮水层厚度和贮水系数估算出了世界土壤水常年储量为 165 000 亿 m^3 。这一储量达到世界河流中常年储水量(21 200 亿 m^3)的 7.8 倍,是世界大气水的 1.27 倍。然而,迄今为止土壤资源评价尚未被列入水资源评价之中,土壤水资源评价的内容与方法更未得到公认。以贮水层厚度和贮水系数评估土壤水资源,忽视了资源的可利用性和土壤水的调节作用。沈振荣采用土壤水总补给量、土壤水天然补给量和土壤有效天然补给量作为评价区域土壤水资源的指标;由懋正等提出用区域土壤水资源表示一个地区土壤水的多少。区域土壤水资源是从流域水量平衡的角度给出土壤水资源的区域平均值,反映土壤水区域规律。其计算公式为

$$W_{sr} = P - R_s - R_g \quad (1-3)$$

式中: W_{sr} 为区域土壤水资源; P 为年降水量; R_s 为降水产生的地表径流量; R_g 为降水对地下水的补给。

这一方法无疑为流域土壤水资源计算提供了较为简便的计算方法,但尚不能反映一个流域不同地貌单元、不同岩性、不同土地利用情况下的土壤水资源量的差异。为此,靳孟贵提出土壤水资源年补给量的概念,用以表示特定土壤水条件和特定土地利用条件下的土壤水资源,也可用来进行区域水均衡分析。地下水位埋深很大的条件下土壤水资源年补给量按下式计算:

$$W_r = P + C - P_{int} - R_s - R_g \quad (1-4)$$

式中: P 为年降水量; C 为凝结水量; P_{int} 为作物截留量; R_s 为地表产流量; R_g 为降水对地下水的补给量。均以 mm 水柱高度计。

灌溉条件下应加上灌溉水量 I ,在地下水位埋深较浅的情况下,上式中还应加上地下水对土壤水的补给。土壤水资源年补给量既可按点计算,也可按区域计算。

作物生长期土壤水资源可利用量 (W_c) 由作物全生长期土壤水补给量 (W_{cr}) 及作物播种时土壤水可利用量 (W_a)^[1] 组成:

$$W_c = W_{cr} + W_a \quad (1-5)$$

以作物全生长期计算,则 W_{cr} 为

$$W_{cr} = P + C - P_{int} - R_s - R_g \quad (1-6)$$

$$W_a = \int_0^d [(\theta_0(z) - \theta_{wp}(z))] dz \quad (1-7)$$

式中: $\theta_0(z)$ 为作物播种时含水量分布函数; $\theta_{wp}(z)$ 为根层土壤水达到凋萎含水量时的土壤水分布函数; d 为作物对土壤水的潜在可利用深度; R_s 为地表产流量;灌溉条件下上式应加上灌溉水量 I 。

用式(1-6)按作物生长阶段计算,则得到作物生长阶段土壤水资源可利用量,可为田间灌溉管理提供依据。

(四) 水资源林草生态承载力

森林植被的覆盖率和降水量密切相关。在年降水量 400mm 以下的地区,由于干旱缺水,种树成活率很低,即使成活,如没有足够的水灌溉,保存率也很低。树是多年生植物,根系扎得深,吸收和调控土壤中水分的能力很强,它对缺水的敏感性不如农作物明显。但树的蒸腾耗水量为 1 300 ~ 1 500mm,最低需 700mm;灌木林如沙棘林为 400 ~ 600mm,最低需 200mm;草地耗水量一般为 500 ~ 800mm,以上林、灌、草的耗水说明在干旱区如仅依靠天然降雨是无法满足其正常生长需要的。特别是林木需水,远大于天然降雨,只有在地下水位埋深较浅的河滩和河间洼地,或丘陵坡地土层深厚,能从深部不断提供林木水分时,才能生长茂密葱郁。

尽管我国进行了大规模的林业生态建设,广大干旱地区植树造林,主要依赖于降水资源的雨养林业,尽管采用营养钵育苗、覆盖和径流林业等多种技术,但仍未注意由于在植被类型选择不当,群落密度过大和群落生育力过高等原因,人工林普遍存在地力衰退和人工植被土壤干化问题。

人工林植被自身生长环境中水分条件的不断恶化,导致了土壤理化性质的恶化和植物