

云南省自然科学基金(1999D0062M)
云南省自然科学基金(1999D0013G) 资助
云南省中青年学术和技术带头人后备培养基金

集水造林与水分生态

王克勤 著

中国林业出版社



云南省自然科学基金 (1999D0062M)
云南省自然科学基金 (1999D0013G) 资助
云南省中青年学术和技术带头人后备培养基金

集水造林与水分生态

王克勤 著

中国林业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

集水造林与水分生态 / 王克勤著, —北京: 中国林业出版社,
2002. 5

ISBN 7-5038-3041-7

I. 集... II. 王... III. ①造林—影响—土壤水—研究②
土壤水—作用—植被—研究 IV. S718. 51

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 015502 号

出版: 中国林业出版社 (100009 北京西城区刘海胡同 7 号)

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话: 66184477

发行: 中国林业出版社

印刷: 北京地质印刷厂

版次: 2002 年 5 月第 1 版

印次: 2002 年 5 月第 1 次

开本: 850mm×1168mm 1/32

印张: 10.875

字数: 292 千字

印数: 1~1500 册

定价: 28.00 元

序

水土流失是目前我国生态环境问题的一个焦点。全国轻度侵蚀以上的水土流失面积达 492.4 万 km^2 (不含干旱、季节性干旱和单纯的土壤水分亏缺), 占全国总面积的 50% 以上。尤其是我国西部地区处于各大江大河的中上游和源头, 河流切割、地形破碎, 气候多变、环境恶劣, 使这一地区生态系统极为脆弱, 加之对水土资源的利用不合理, 水土流失不断加剧, 已经影响到该地区乃至各大流域的可持续发展。为了实现我国西部大开发的战略目标, 生态环境的保护和水土流失的治理是当务之急。

生态环境的保护和治理, 植被建设仍是行之有效的根本措施。但纵观几十年来我国生态环境建设历程, 以植被恢复为主的生态环境的研究与治理尽管从引种和选择耐旱树种、培育抗旱新品种、乔灌草结合配置等方面作了很大的努力, 但仍徘徊于常规造林这一传统的技术和模式之中, 使植被建设陷入进退维谷之境地。径流林业作为植被恢复技术的新生事物在我国黄土高原的植被建设中已取得成效, 为少雨缺水的干旱半干旱地区植被恢复提供了新的思路和方法。为使现有径流林业中的集水造林技术得到进一步更广泛地推广和应用, 仅限于技术上的研究是不够的。

集水造林与水分生态一书在采用集水造林技术的基础上, 对于旱半干旱地区的关键因子(水分)的运行机制、生态作用及生产力进行了系统探索和研究, 研究内容系统, 富于创新, 其特点突出表现在: ①分析了人工森林生态系统土壤退化的成因, 揭示了目前水土保持生物工程措施难以发挥其应有的重大作用的根本性原因, 对今后生物工程措施的具体实施中避免同类问题的发生具有指导意义; ②在生态重建的植被恢复中, 将影响植被恢复的主导因子——

水分与人工植物群落结构与功能相联系，为解决人工植被出现的生态问题提供了理论依据；③确定了提高水分利用效率，有利于林木生长的最适土壤水分指标，为节水农林业的发展提供了理论基础。

21 世纪，对于人类不仅仅是新时代的开始，从某种意义上说意味着进入一个决定自身命运的关键时期。恰逢此时，我国针对东部沿海地区与西部地区之间经济差距的逐渐拉大已影响到我国经济的协调发展和 21 世纪的发展前景，拟定了实施西部大开发战略。江泽民在谈到我国西部大开发、改善西部地区生态环境问题时指出“……西部地区自然环境不断恶化，……这不仅对西部地区，而且对其他地区的经济社会发展也带来不利的影 响。改善生态环境，是西部地区的开发建设必须首先研究和解决的重大课题。”因此，本书的出版将对于我国水土流失地区的植被恢复起到指导作用，愿为之序。

中国工程院院士

吴若蔚 北京林业大学

2000 年 2 月 1 日

前 言

“空山新雨后，天气晚来秋；明月松间照，清泉石上流。……”这朴素华美、清新隽永的诗句是古人对山林秋夜雨后恬静、优美、清静的大自然的赞美和热爱。时至今日，人类所赖以生存的环境却遭到了严重破坏，使现代之人再也没有了古人那般心旷神怡的感受。

西部地区是我国重要的生态屏障。由于千百年来多少次战乱、多少次自然灾害和各种人为因素，使西部地区生态环境不断恶化，特别是水资源短缺，水土流失严重，荒漠化加剧，并不断向东推进，大面积的森林被砍伐，天然植被遭到破坏，生态防护功能丧失。日益恶化的生态环境带来了严重的生态灾难，1998年历史上罕见的特大洪灾；连年多次的沙尘暴肆虐横行；严重的富营养化导致众多湖泊提前衰老；……。恶化的生态环境也加剧了贫困程度，贫困人口90%以上集中在生态环境比较恶劣的西部地区；生态环境的破坏不仅对西部地区，而且对其他地区的经济和社会发展带来不利影响。因此，改善生态环境，是西部大开发中必须首先研究和解决的一个重大课题。

如何才能使西部地区的生态环境得到根本性改善？植被恢复作为生态重建的一项根本措施，在改善西部地区生态环境中仍将发挥决定性作用。在我国干旱半干旱地区几十年生态环境建设中普遍采用常规的植树造林措施，但效果不十分显著。本人经过多年试验研究，认为其根本原因是没有协调好生态退化地区水分与林木生长之间的关系。本书首先基于集水造林这一新型的造林技术对水分产生的再分配作用，对水分在人工林系统中的传输规律进行研究。与已出版的同类书籍相比，不仅是对集水造林技术的

研究，更侧重于研究采取集水造林后，水分在人工植被中所发挥的生态作用，从而为集水造林合理模式的选择提供了一定的理论依据。

20 世纪带着辉煌与沉重渐行渐远；21 世纪带着希望与挑战疾步走来。面对书稿，我的心总是难以平静。似感滔天浊浪仍在耳边轰鸣；满天沙尘似在眼前弥漫；充满恶臭的滇池污水在脑中泛着绿色泡沫……。生态环境建设任重而道远。但愿该书的出版能为生态环境建设尽一点微薄之力，本人将倍感欣慰。

涉足集水造林这一目前还尚年轻的领域，探讨的许多问题也许还不甚成熟，有待进一步研究，敬请各位有识之士予以指正！

笔 者

2002 年 2 月 2 日

[作者简介] 王克勤,男,1964年10月出生于陇东黄土高原。1983~1987年在北京林业大学水土保持专业读本科,获学士学位;1987~1992年在甘肃农业大学林学院从事教学和科研工作;1992~1997年12月,师从王斌瑞教授,在北京林业大学攻读硕士和博士学位,从事以径流林业为主的植被恢复理论与技术研究,获博士学位。1998年赴云南工作,在西南林学院从事教学与科研工作,研究方向为退化生态系统植被恢复的理论与技术研究。1999年被评选为云南省跨世纪学术和技术带头人后备人才。2001年10月,师从慈龙骏先生,在中国林业科学研究院做博士后研究工作。曾到美国等国家进行短期科学考察和学术交流。现被西南林学院聘为副教授、环境科学与工程系主任、学术委员会委员。

近年以第一作者在核心期刊上发表有关植被恢复的研究论文20余篇,参编专著2部。参加国家“八五”科技攻关课题(85-019-02-08)“黄土高原径流林业合理配套技术措施的研究”、国家“九五”攻关项目(95-007-02-03)“长江上游干热干旱岩溶石质山地植被恢复技术研究”等科研项目多项。现主持有云南省自然科学基金资助项目“云南干热河谷典型地段植被恢复中的水分生态研究”和“云南干热河谷集水造林技术对林分水分生产力的影响研究”、云南省自然科学基金重点项目“云南干热河谷农林业微区域集水系统结构与模式研究”和国家自然科学基金项目“金沙江干热河谷微区域集水造林技术及其水分生产力研究”等4项科研项目。

邮 编: 650224

通信地址: 昆明市西南林学院资源学院

电 话: (0871) 3862307 (H), 3862778 (O)

13619653107

E-mail: Kqwang@public.km.yn.cn

目 录

序

前 言

1 概 述	1
1.1 国内外农林业集水技术的研究.....	1
1.2 农林业水分利用的研究现状.....	11
1.3 土壤水分运动的研究.....	20
1.4 集水造林水分生态研究的意义.....	22
2 集水造林试验区的建立.....	28
2.1 试验区自然概况.....	28
2.2 试验区设计所考虑的因素.....	41
2.3 试验区设计原理.....	45
2.4 试验区建立.....	58
2.5 试验区布设及处理.....	66
3 集水区坡面产流	70
3.1 集水区坡面产流规律.....	70
3.2 植树带汇流量.....	75
3.3 集水区坡面土壤水分状况.....	80
4 集水造林对林分环境的影响.....	88

4.1 光.....	88
4.2 温度.....	99
4.3 土壤水分.....	109
5 集水造林对林分群落结构的影响.....	127
5.1 研究方法.....	127
5.2 试验区 I 植物群落结构.....	130
5.3 试验区 II 植物群落结构.....	136
6 土壤水分运动规律	141
6.1 干旱半干旱地区人工林土壤水分特点.....	141
6.2 土水势.....	145
6.3 研究材料和方法.....	155
6.4 土壤水分运动基本理论.....	157
6.5 集中降雨期土壤水分运动规律.....	164
7 汇集径流的水分利用.....	197
7.1 水分转化效率与提高途径.....	199
7.2 林地土壤蒸发量.....	202
7.3 林木蒸腾量.....	208
7.4 汇集径流的利用率.....	212
8 水分利用效率	220
8.1 土壤—植物—大气连续体.....	221
8.2 试验材料及研究方法.....	228
8.3 蒸腾速率.....	232

8.4 光合作用.....	253
8.5 水分利用效率.....	271
9 水分生产力.....	288
9.1 林木生长分析.....	289
9.2 林木的水分生产力.....	308
9.3 林分的水分生产力.....	317
参考文献.....	324

后 记

1 概述

水是维持生态系统的基本物质条件, 虽然也是地球上最为丰富的自然资源, 但随着生产和经济的发展、人们生活水平的提高, 人类所面临的全球性水资源短缺问题日益严重, 水的利用也越来越引起了许多国家、政府和科学家的关注。而目前摆在人类面前的是, 世界上 1/3 的陆地面积, 涉及到 50 多个国家和地区, 约占世界总耕地面积 43% 的耕地处于干旱半干旱地区 (张兴权等, 1992)。大约 1/2 左右的陆生植物群落常常处于水分胁迫状态, 每年由于缺水造成的粮食生产的损失几乎等于其他所有环境因子灾害所造成损失的总和 (卢从明等, 1994)。水的缺乏严重阻碍着这些地区的经济发展。我国西北、华北和青藏高原的绝大部分处于干旱半干旱区, 常年干旱少雨即使半湿润区和湿润区, 也由于年内雨量分布不均, 存在明显的干旱季节, 严重影响了农业生产。据 1980 年统计 (林世皋, 1992), 全国中等干旱年可供水量为 4735 亿 m^3 , 其中地表水为 4.144 亿 m^3 , 占全国多年平均河川径流量的 15.3%, 地下水开采量 591 亿 m^3 , 占多年平均地下水资源的 32%。考虑现阶段技术经济水平和节约用水后, 年总需水量估计为 5124 亿 m^3 , 缺水达 389 亿 m^3 , 其中农业用水通常要占总用水量的 80% 以上, 而作物吸收水量的 95% 左右消耗于蒸腾 (罗远培, 1986), 因此, 减少农业耗水、提高农业水的利用效率、发展节水农业是合理利用水资源、解决水资源短缺的有效途径。对于雨养农林业, 降雨是唯一的水资源, 对降水的合理高效利用是节水的主导思想, 采取集水、蓄水和提高水利用效率则是实现节水的基本途径。

1.1 国内外农林业集水技术的研究

早在几千年前, 人们为了在干旱半干旱及荒漠地区生存, 就采

用了一系列巧妙的措施合理利用和管理必不可少但又十分紧缺的水资源 (Myers, 1975; Back, 1981)。大型水利工程早在夏商时期就已出现, 黄河流域的“沟洫”排灌系统, 春秋魏国西门豹的引漳灌溉, 四川的“都江堰”(公元前 256 年), 陕西的郑国渠(公元前 246 年), 宁夏的秦渠、汉渠、唐渠(公元 140 年)、新疆的坎儿井、天车等, 都是远古时期对径流收集利用的例证。微小型集水技术也出现于 4000 多年前, 中东涅杰夫沙漠地区农民通过集水进行农业生产 (Evenari 等, 1971), 我国北方的旱井、水窖及涝池长期以来解决着一些干旱半干旱地区的人畜饮水问题 (王礼先等, 1989)。近几十年来古老的集水技术仍在全世界范围内普遍用于解决生活及农林生产的缺水问题。根据 1971~1995 年间的文献报道, 除美国、澳大利亚外, 还有以以色列为典范的中东地区 (Hardan 等, 1975; Agarwal 等, 1977)、印度 (Ryan 等, 1979)、墨西哥 (Cluff, 1979; Smith, 1978)、中国 (王斌瑞等, 1996) 及非洲撒哈拉沙漠南部诸国都采用各种集水技术措施用于人畜饮水、粮食生产、抗旱造林、发展畜牧业、圣诞树等商品树的生产、盐碱地的改造及城市生活和工业用水等不同的目的 (Fink 等, 1983; Kowsar 等, 1982; Schreiber 等, 1978; Tabor 等, 1995)。

1.1.1 雨水收集系统——集水系统

1.1.1.1 集水的含义 Myers (1974) 首先对集水作了定义, 他认为: “集水是对降雨地表径流和小河或小溪的收集和贮存。”他也引用了 Currier 的定义从已处理的流域收集自然降水并合理利用的过程。最后所下的定义是: “从一个为了增加降雨和融雪径流而处理过的区域收集水的实践活动。”表明了集水措施包含着产流、收集和贮存方法及对水的利用。所采取的方法完全取决于当地条件、对水的利用目的和所选择材料的不同, 如是在干河床阶地发展农业 (Evenari 等, 1971) 还是在微型集水系统中植树 (National Academy of Sciences, 1974), 是用薄膜材料集水 (Chiarella 等, 1975) 还是进

行地下水的开采 (Smith, 1978; Agarwal, 1977), 是用水坝蓄水 (Bowler 等, 1977) 还是用其他方式都决定着产流、收集、贮存的方式方法。

不管采用何种方法, 集水系统有 3 个共同的特征: ①应用于具有间歇性径流的干旱半干旱地区。地表径流来源于降雨和季节性流出的地下水。由于径流历时短暂, 贮存是集水系统中必需的组成成分; ②由于水源主要是地表径流、小溪流、泉水和渗出水等当地水 (Burdass, 1975), 所以集水系统不包括大型水库和地下水开采; ③集水系统在集水区面积、蓄水容积和投资上的规模都比较小, 这一特点由以上两点所决定。

1.1.1.2 集水系统的分类 集水系统尽管具有以上 3 个共同的特点, 但具体对地表径流的收集和利用方法有很多种类型 (National Academy of Sciences, 1974)。根据系统的规模及采取的蓄水方式, 将它们分为两大类: 微型集水系统 (Micro-Catchment Water Harvesting—MCWH) 和径流农场集水系统 (Runoff Farming Water Harvesting—RFWH)。

(1) 微型集水系统 (MCWH)。微型集水系统是从一个不大于 100m^2 的集水区 (CA) 收集地表径流并通过邻近的入渗池 (IB) 贮存于根系区土壤中供植物吸收利用。集水区 (CA) 和入渗池 (IB) 是微型集水系统 (MCWH) 的两个最基本的组成成分。在入渗池 (IB) 中可以栽植一株树 (Evenari 等, 1971)、一丛灌木 (Fink 等, 1979) 或 1 年生作物 (Gardner, 1975)。根据这一特点, MCWH 系统有以下几种类型: 等高蓄水沟集水 (Mehdezadeh 等, 1978)、隔坡带状种植、等高带状种植 (Jones 等, 1975; Smith, 1978) 和小水池蓄水种植 (王斌瑞等, 1996)。非洲撒哈拉沙漠东南部的 “gawan”、“caag” 及 “teras” 等集水系统收集的径流由蓄水池贮存加以利用 (Critechley, 1989), 它们是微型集水系统在非洲的典型代表。

MCWH 系统的一个主要优点是有高的径流率, 系统内每平方

米的作物产量较高但单位总面积的产量却比较低，这主要是单位土地上的种植面积较小，然而，在水和陆地缺乏的沙漠地区，采用 MCWH 系统使植物对降水能高效利用。

(2) 径流农场集水系统 (RFWH)。径流农场集水系统 (RFWH) 由集水区 (CA) 收集地表径流，用水渠、管道等输水系统将水流引向地面贮水设备 (SR) 蓄积或引向种植区 (FA) 作物的根系分布层进行直接利用。从 CA 收集的径流贮存在地面水库 (SR) 常用于家畜饮用或农地灌溉 (Frasier, 1980)，有很多文献介绍了这方面的应用，不再一一赘述。

RFWH 系统是包括区域范围较大的集水系统，一般以一个坡面或一个小流域为单元进行集水、蓄水和利用，印度 Khadin 集水系统与我国“淤地坝”相似，就是将山坡地表径流和所冲刷的土壤拦蓄在低洼沟谷的水坝中，在坝未淤满之前进行灌溉等方面的利用，淤满之后则可种植农作物或造林，土壤肥沃、水分状况良好 (Kolarkar 等, 1983; 王礼先, 1989)。典型的 RFWH 系统是在流域的坡面以 $(0.75 \pm 0.2)\text{m}$ 的垂直间距、 $0.4\% \pm 0.2\%$ 的比降筑垄开沟，形成沟垄网络，将坡面分割成 $(0.75 \pm 0.5)\text{hm}^2$ 的小区，在沟垄的末端修建蓄水池，为旱季所利用 (Vittal 等, 1988)。

RHWH 系统从 CA 集水，在 SR 蓄积的水量要比土壤断面层多，使有限的水在时间和空间上更合理地分配以便使用者更有效地利用。但具有小水库的 RFWH 系统涉及的范围较大，水库及蓄水系统的一次性投资太大，只能用于经济能够承受或有外援投资的地区。SR 的淤积问题也有待于进一步解决。

1.1.2 集水系统的设计

集水系统的设计将直接影响到水利用效率、作物产量、土壤侵蚀、施工量和农林业生产 (Gardner, 1975; Shanani 等, 1976)。必须依据当地气候、土壤、水文和农业生产等具体情况，因地制宜，合理设计。

1.1.2.1 MCWH 系统的设计

(1) 系统尺寸的确定。设计中首先要考虑的因素是系统的大小及各组成部分的尺寸。据研究,年均降雨在 100~650 mm (Evenari 等, 1971; Anaya 等, 1975) 的地区,为了满足栽培植物对水的需求,可以考虑的尺寸一般在 $0.5\sim 1000\text{m}^2$ 之间 (Aldon 等, 1975)。

系统设计考虑的另一关键因子是 CA/IB 比例大小。根据试验, CA/IB 的比例一般在 1~6 (Luebs 等, 1975; Rawity 等, 1975), 但 Anaya (1975) 认为,在澳大利亚这一比例可达 25。一般情况下,如果 CA/IB 比例太大将产生土壤深层渗漏 (Gardner, 1975)、要求较大规格的边界尺寸贮存较大暴雨,在黏性土壤中还由于水在入渗池 (IB) 中滞留时间太长造成作物根系缺氧腐烂等问题 (Fangmeier, 1975)。另一方面,较大的 CA/IB 比例会增大入渗量,减少直接的蒸发损失 (Gardner, 1975)。由于天然降雨的随机性,最适的 CA/IB 比例还要根据当地的具体情况而定。

在系统尺寸和 CA/IB 比例确定好之后,要进行的重要设计是集水区 (CA) 和入渗池 (IB) 的长/宽比例。一般长与水流方向一致,宽与水流方向垂直,具体比例尺寸要根据降雨特征、地形条件和水在土壤中的扩散能力才能确定。CA 的长/宽比太大,在施工上困难较大,并且容易造成土壤侵蚀;IB 太长将有一部分不能供水 (Gardner, 1975)。

(2) 系统的总布局。合理的系统布局,能提高所集水的利用效率。MCWH 系统的布局决定于地形,一般的布局格局有以下几种:在 MC 的一个角上布设方形的 IB (Evenari 等, 1971);在辐射状 MC 的中心布设 IB (Aldon 等, 1975)、在三角形 MC 的一个角上布设 IB (Ehrler 等, 1978)、从坡面集水 IB 位于水平阶上 (Jones 等, 1975) 以及从具有两个坡面的集水区集水 IB 位于低洼处 (Fairbourn, 1875) 等。

1.1.2.2 RFWH 系统的设计 RFWH 系统的设计首先确定的是集水

区 (CA) 和水库 (SR) 的大小, 径流农场集水系统设计上的文献以前不是很多。但随着科学技术的发展, 计算机的普及和应用学科的相互渗透, 集水系统的设计发生了日新月异的变化, 尤其在 RFWH 系统的设计中采取了新的手段和方法, 主要表现在遥感技术、数学模型和计算机在设计中的应用。

Tauer 等 (1991) 应用遥感技术进行集水系统的设计和评价, 用地面调查、航空照片判别分析和卫星图像处理相结合的方法对径流农场的潜力进行分析, 从收集的资料估测可利用径流的数量、作物对水的需求和土壤对水的贮存能力。通过这种方法可以获得设计所需要的基本数据和资料, 还可以分析一个地区采取系统的适应性及影响因子, 其中最重要的限制因子是土壤的蓄水能力, 因为在干旱季节, 只有根区的土壤水分是唯一的水源。

近几年来, 数学模型在集水系统设计中的应用比较广泛。由于降雨强度在两个方面对于集水系统的设计特别重要, 首先, 集水系统的产流效率与影响入渗速率的降雨强度有关, 这样, 降雨强度在干旱沙漠地区对于植物生长比降雨总量更为重要; 其次, 降雨强度决定着集水系统结构的最长寿命, 影响工程的结构尺寸。为此, 通过对一系列强度历时关系曲线的研究, 建立了沙漠条件下的降雨模型 (Button 等, 1983)。根据降雨量、降雨强度和历时及分配情况, 考虑到影响入渗的坡度和土壤表面的不均匀性, 可建立确定性径流预测模型 (Zaslavsky 等, 1981)。根据采取集水系统的不同, 可用不同方法建立产流模型, 对于 RFWH 系统, 在沙漠条件下, 用单位过程线方法比较适合 (Fink 等, 1983); 采用 MCWH 系统, 应用运动波方程和动力方程更为方便 (Hillel 等, 1979)。这些模型对于进行 RFWH 和 MCWH 系统的选择有很大帮助。同时, 它们都是根据影响产流、汇流及其利用的气象、土壤和水文等因子进行实地模拟所建立的, 尤其是受到降雨随机性和土壤、地形复杂性的影响, 所以这些数学模型的通用性不是很强, 但毕竟为设计提供了一条有效