

干旱半干旱区集雨绿化系统优化模拟模型的设计

成六三¹, 李小雁^{1,2}, 肖洪浪¹

(1. 中国科学院 寒区旱区与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 北京师范大学 资源学院 沙漠与沙区资源研究所, 北京 100875)

摘要: 从土壤水资源的角度对集雨绿化系统进行了初步的分析, 建立了绿化系统模型。该系统以集雨、提高雨水利用效率为核心, 运用种植区水量平衡方程初步解决了干旱半干旱区绿化缺水的问题。以中国科学院寒区旱区环境与工程所野外实验站为例, 针对抗旱树种柽柳进行集雨绿化的问题进行实例分析。在可靠的理论和方法的基础上建立模拟模型, 对造林具有一定的通用性、实用性和指导性, 为干旱半干旱区进行集雨绿化提供了理论依据、系统模式及规划设计的实用性。

关键词: 集雨绿化; 系统优化; 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2005)02-0027-04

中图分类号: S157.1

Optimizing Model of Rainwater Harvesting System for Afforestation

CHENG Liu-san¹, LI Xiao-yan^{1,2}, XIAO Hong-lang¹

(1. Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute,

Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, Gansu Province, China; 2. China Center of

Desert Research College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The system of rainwater harvesting for afforestation (SRHA) are analyzed based on soil water resources. The system focused on rainwater harvesting and improvement of rainwater use efficiently. Model of SRHA was established using water balance equation of the planted area to solve water shortage for afforestation in the arid and semi-arid regions. Taking *Tamarix ramosissima* as an example, we explored main problems in the SRHA. The model has a reliable theoretical base and provides guidance for afforestation in the arid and semi-arid regions.

Keywords: system of rainwater harvesting for afforestation; system optimizing; model

我国干旱半干旱地区总面积约占全国土地面积的 52.5%, 其中降雨量 200~250 mm 以下为没有灌溉就没有农业的干旱区, 约占国土总面积的 30.8%; 年均降雨量 250~600 mm, 农业生产和环境植被建设低而不稳的半干旱区占全国土地面积的 21.7%^[1]。这些地区是我国经济发展的滞后区, 也是生态环境治理的重点区。必须首先抓好生态环境建设, 走治理与开发结合之路。从长远的战略定位看, 西北地区生态环境的改善与优化也在很大程度上有赖于对草地植被的保护、发展与建设^[1]。而集雨绿化系统模型在国外研究较多, 且都是针对某地的具体特点所做出的, 基本上多以农作物进行模拟, 大多都以某一方面进行设计, 在生态植被建设中不具有通用性^[2-4]。本文针对常见的耐旱植物——柽柳, 进行集雨系统的设计, 以期为干旱半干旱区进行生态植被建设提供一种具有通用性和实用性的思路和方法。

1 集雨绿化系统模拟模型的设计

1.1 基本原理

集雨绿化系统以径流利用为基础, 以降水资源的合理时空分配为手段, 在干旱的气候环境中, 为树木生长创造出相对较适宜的土壤水环境, 使用有限的降水资源建立在自然状态下难以达到的人工林生态系统。在这个新的生态系统中, 降水资源的合理、有效利用是核心, 对降水资源的时空分配的工程措施和促进林木吸收利用径流的生物措施相结合, 构成了全系统水分循环的主通道。在林地上接受辐射平衡相同的条件下, 通过降雨的空间分配措施使不同微区域的蒸散产生较大差异, 即形成高含水量和低含水量区, 从而起到增加和抑制蒸散的作用^[5]。

在某一特定区域, 降水条件一定, 集雨区和种植区的面积的合理设计对调节降雨分配和雨水的高效

收稿日期: 2004-09-30

资助项目: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所“西部之光”; “兰州南北两山集雨绿化示范试验”; 国家自然科学基金(40101004)

作者简介: 成六三(1979-), 男(汉族), 陕西蒲城人, 硕士, 主要研究干旱区水文。E-mail: sslcc2002@163.com。

利用非常关键。对整个绿化系统而言,集雨区的面积设计和相应的种植区面积,决定了绿化的成活率和效果。集雨区面积大,能截流更多的雨水径流。但植物需水量不是很大,对植物生长很不利。面积小的话,在干旱年雨水不能满足植物需要,同样对植物生长不利。故绿化系统模型需要解决的核心问题就是确定集雨区和种植区的面积优化比例。

1.2 模型的计算公式

1.2.1 面积比值 对集雨绿化系统,技术上要求主要是种植区的水量平衡关系的计算和确定^[6]。

$$M_2/M_1 = D_{EF}/P_i \times r$$

式中: M_2 ——集雨区面积(m^2); M_1 ——种植区面积(m^2); P_i ——降雨量(mm); D_{EF} ——土壤水分亏缺量(mm); r ——有效产流系数。

1.2.2 土壤亏缺水量的确定

(1) 潜在蒸散 P_E 的计算。¹ 修正的彭曼公式^[7];

④桑斯维特法; ④布德科法。

(2) 植物最大实际需求量 E_{TC} :

$$E_{TC} = K_C \times P_E$$

式中: E_{TC} ——植物实际蒸散需求量(mm/d); K_C ——植物系数; P ——降雨量(mm)。

$$D_{EF} = E_{TC} - P$$

在干旱半干旱区的黄土高原地区,土层深厚,采取就近拦蓄雨水就地入渗的造林技术,没有径流损失,只有单一的降雨入渗、上移蒸发和植物蒸腾的过程。一定时间、一定地区内土壤水分收支平衡为^[6]:

$$\Delta W = P + R - E_t$$

式中: ΔW ——土壤储水变动量(mm); R ——集雨区的汇集径流量(mm); P ——降雨量(mm); E_t ——蒸散量(mm)。

2 系统模型的组成和求解

系统模型的流程图如图 1 所示。(1) 基本资料的输入: 研究区的气象资料,主要为降雨量、土壤的田间持水量和凋萎系数。(2) 根据基本资料,估算潜在的蒸散量和土壤的亏缺量。(3) 根据亏缺量初步确定集雨区和种植区的面积比例。(4) 应用水量平衡对设计的面积比例进行调整到最优化的比例。

集雨绿化系统的思路是通过上述基础物理模型的计算公式的建立,即可得到降雨量、集水量和植物需水量的基本信息。然后首先从植物的亏缺量计算出植物在理论上需要多大的集雨面积,根据这个面积在和某一年的降雨量代入计算,看是否符合当地被确定的某一植物的需水最低面积。即使降雨量的选择

有高低,但有许多集雨绿化树种往往能够在极端条件下正常生长,如本试验区供试耐旱植物——柺柳。那么这个基本的集雨绿化系统设计面积是以植物的生长需水量为核心的,最终的目的是在进行生态植被恢复建设中,首先考虑林木的成活率和保存率。从这方面考虑对绿化的目标具有科学的指导性。最优化的面积比值也是从某一地确定的绿化植物的最大成活率和保存率出发的。

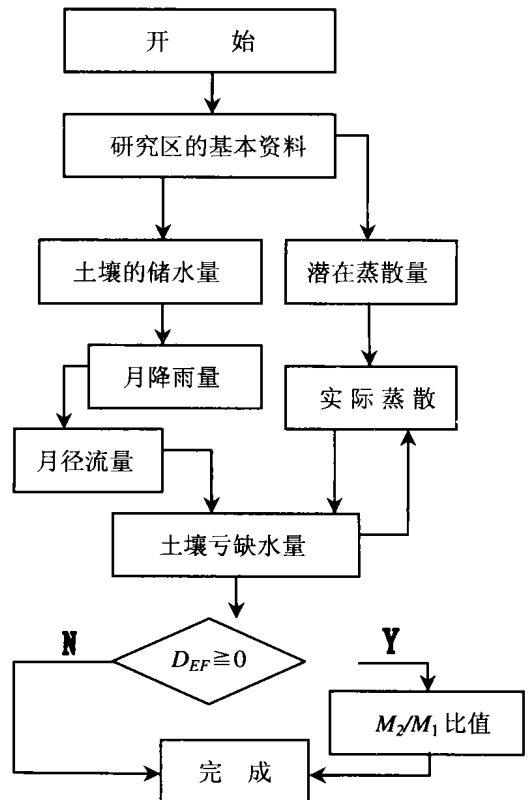


图 1 集雨绿化系统优化模型原理流程图

3 典型绿化系统设计与分析

3.1 试验区概况

以甘肃省兰州市北山皋兰县忠和镇的中国科学院寒区旱区环境与工程研究所皋兰农业生态研究站作为典型集雨绿化系统模型的设计研究。该区属于水土流失比较严重的地区。土壤的机械组成中,在剖面 0—200 cm 的深度,粉砂粒占 60% 左右,物理性黏粒只占 24% ~ 35%。年平均降雨量为 263.4 mm (1963—1980,甘肃省气象局),降水变化很大,70% 的降雨分布在 6—9 月,最大年降雨量为 392 mm,最小年降雨量为 154.9 mm。年蒸发量为 1500 mm,是降雨量的 5 倍多,年平均气温为 7℃,最低气温为 -9.1℃。最高气温 20.7℃。年平均风速为 2.0 m/s,最大风速为 17 m/s,年平均大风日数为 4.3 d,最多日

数为 13 d, 年平均沙尘暴日数 2.6 d, 最多日数为 9 d。柽柳的生长期在 4 月开始, 到 11 月基本上停止生长。

3.2 绿化系统优化设计

3.2.1 实验材料 试验区有集雨措施的不同集雨面积的径流场和 3 a 生的柽柳, 集雨区的面积有 50, 30, 15, 5 m², 其中的柽柳(径粗均为 1.5 cm, 冠幅为 50 cm, 高为 120 cm)。有集雨区的柽柳径粗平均为 3 cm, 高为 200 cm, 冠幅平均为 200 cm。集雨方法为每一个集雨绿化模式有一个集水区 and 入渗区。这个集水区的边界用水泥切成, 高度为 20 cm, 集水区的水不会流到另一个集水区, 每个入渗区种植有柽柳, 柽柳的树冠投影在水平方向面积为 5 m², 每个集雨区相隔的距离为 3 m, 即所谓的每一不同的集雨面积。有一个种植区, 而种植区内只有一株柽柳, 每个模式有 8 个重复。这是针对单株集雨造林试验。集雨区中主要有自然生的红砂(*Reaumna soongorica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、戈壁针毛(*S. gobica*)和碱蓬(*Suaeda glauca*)。这些草本植物是集雨区内自然生的, 随其降雨的变化而发生变化, 其实质是不同大小的集雨面是黄土坡面原始地表, 其坡度约为 10°, 上下地形均匀。本次研究是定时和定点分层(每层 0—20 cm)采取土壤样品, 采用烘干法测定土壤水分含水量。以重量百分数表示, 利用土钻取土, 每月取土一次。在根际区 2 m 的深度进行取土样。本试验区的田间持水量为 22%, 凋萎系数为 7%, 径流系数为 0.1^[5]。

3.2.2 计算和验证 根据赵文智^[8]的干旱区乔木林最低降雨量 400 mm 才能生存的理论, 而研究区年平均降雨量 264 mm, 则需要 140 mm(在认为是土壤的最低亏缺量)的水量补给, 计算集雨区与种植区面积比例为: $M_2/M_1 = 140/264 \times 0.1 = 4 \square 1$, 而研究区有 50 m² 集雨区的为 10 \square 1; 30 m² 集雨区的为 6 \square 1; 15 m² 集雨区的为 3 \square 1; 5 m² 集雨区的为 1 \square 1。那么各个比例种植区内 2003 年在柽柳生长期的土壤水分含量如图 2 所示。

从 a—d 是不同集雨面积下的土壤水分含量分配, 曲线的总体趋势向含水率高的方向靠近, 在 0—100 cm 的深度, 土壤含水率基本上保持在 7% 以上, 但集雨面积越大, 土壤水分含量越高, 在 50 m² 集雨区土壤曲线幅宽较大, 在 180 cm 的土壤深度含水率才接近 7%, 30 m² 集雨区 11%~14% 的土壤含水率大都集中在 0—140 cm 的深度, 15 m² 集雨区 8%~12% 的土壤含水率基本上处在 0—130 cm 的土层深度, 5 m² 集雨区 7%~10% 的土壤含水率集中在 0—110 cm 的土壤深度。根据土壤水分对植物生长有效

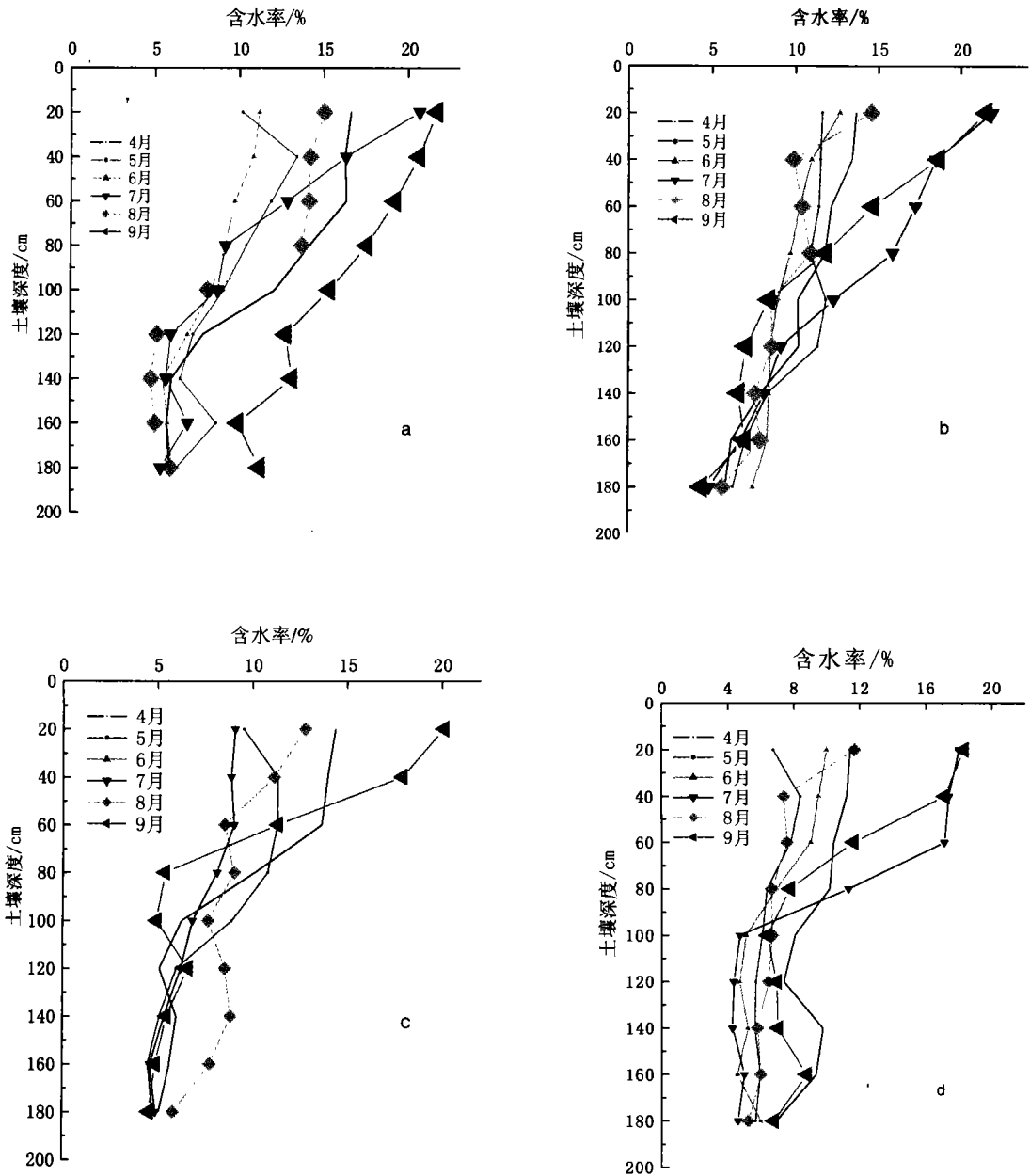
性原理, 按照凋萎湿度生长阻滞含水量和田间持水量对土壤水分进行分析, 当土壤含水量降至田间持水量 60%~70% 以下时, 根系从土壤中吸取水分所消耗的能量将大幅度增加, 大部分植物的生理代谢就会受到影响。由此对植物生长而言, 当土壤含水量为田间持水量的 60%~80% 时属于中效水, 80%~100% 时为易效水, 低于 60% 时属于难效水^[9-10]。15 m² 集雨区在 0—100 cm 土层深度的土壤含水率在 12% 以上, 也就是中效水的范围, 故集雨区与种植区比较合理的比例为 3 \square 1。50 m² 集雨区和 30 m² 集雨区在土层深度—100 cm 的范围为易效水。而 5 m² 集雨区在 60~100 cm 处为难效水。

在种植区面积相等的情况, 集雨面积大小的不同, 在同一年降雨量的条件下, 可以明显看出土壤水分含量的变化。比例越大, 土壤水分越大, 但并不是集雨区面积和种植区面积一直越大越好, 这要由土壤和绿化树种生长适应性决定。这说明集雨区面积越大, 所集雨量越大, 并不是雨水利用效率最高的。根据水量平衡方程和土壤的含水量计算见表 1。

表 1 3 a 生的柽柳植树带水量平衡 mm

集雨区	要素	5月	6月	7月	8月	合计	D_{EF}
50 m ²	R	65	64	38	106	273	
	ΔW	-16	45	-15	52	17	108
	E_t	132	78	88	125	323	
30 m ²	R	39	35	32	64	170	
	ΔW	-18	67	-66	40	16	90
	E_t	107	25	133	49	305	
15 m ²	R	20	19	12	32	82	
	ΔW	-23	57	6	57	77	25
	E_t	92	50	41	46	230	
5 m ²	R	7	6	4	11	27	—
	ΔW	-2	64	-60	12	7	5
	E_t	59	12	100	50	220	—

从表 1 可见, 2003 年 5—8 月集雨绿化区土壤水分都无亏缺, 但是不同集雨区的土壤剩余量不同, 50 m² 集雨区的最大, 其量随着集雨区的增大而增大, 土壤水分变化以 15 m² 集雨区的土壤贮水量在 0—100 cm 最大, 为 77.18 mm。故可知集雨区与种植区的合理比例为 3 \square 1。因 2003 年 5—8 月的降雨量 285.5 mm 高于多年平均降雨量 260 mm, 所以亏缺量不是很大, 而一般干枯年份土壤亏缺水分在 250 mm 左右^[8]。这也说明柽柳在不同水分供应条件下的蒸腾差异很大, 而目前造林的林木都在水分胁迫下生长。在水分胁迫的条件下植物的蒸腾和处于不同含水率下的蒸腾需进一步研究。



a. 50 m² 集雨区的 10□1 b. 30 m² 集雨区的 6□1 c. 15 m² 集雨区的 3□1 d. 5 m² 集雨区的 1□1

图 2 不同集雨区处理的土壤水分平均的变化

从长期时间来看,本研究区桉柳成活率和保存率的比例应该是 3□1~ 6□1 之间,从 2003 年土壤的储水量和土壤水分的含量可以得出,在同一的降雨量下,桉柳保存率和成活率高,最优化的比例为为 3□1。而其它比例 10□1,虽然比例大,汇集的雨量也最大,但是植物的蒸腾量也最大,这对在缺水的干旱半干旱地区无疑是不可取的,而对于最小比例 1□1,在降雨量大的年份,即可以基本满足植物的水分需求,但是在干旱年份土壤会出现很严重的亏缺,故也不是最好的比例。所以选取 3□1 的比例是最优化的。

3 讨论

本研究集雨绿化系统的建立和检验均依据可靠的理论基础和方法,而模型具体运用所采用的基础数据和参数具有地区特点,因而所得结论仅能用于特定地区。本研究区的土壤水分亏缺量的选取也有一定的局限性,因时间和经济的原因不能把它更具体化地计算,但所提出的绿化系统优化方法具有一定实用性和参考性,对解决土壤干层、林木成活率和保存率上有一定的指导性。

(下转第 43 页)

- [11] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 808—816.
- [12] Ebbert J C, Kim M H. Soil processes and chemical transport[J]. Environ Qual. 1998(27): 372—380.
- [13] Stow C A, Borsuk M E, Stanley D W. Long-term changes watershed nutrient input and river export in the Neuse River, North Carolina[J]. Water Research, 2001, 35(6): 1489—1499.
- [14] 朱有为, 段丽丽. 浙江省畜牧业发展的生态环境问题及其控制对策[J]. 环境污染与防治, 1998, 21(1): 40—43.
- [15] Teira Esmatges M R, Flotats X. A method for livestock waste management planning in NE Spain[J]. Waste Management, 2003, 23: 917—932.
- [16] 晏维金, 尹澄清, 孙濮, 等. 磷氮在水田湿地中的迁移转化及径流流失过程[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 312—316.
- [17] 倪九派, 傅陶, 卢玉东, 等. 缓冲带在农业非点源污染防治中的应用[J]. 环境污染与防治, 2002, 24(4): 229—232.
- [18] Roberston J G, Eknert B, Ihse M. Habitat analysis from infrared aerial photographs and the conversion of birds in Swedish agricultural landscapes[J]. A Mbio, 1990, 19: 195—203.
- [19] Bren L J. A case study in the threshold measures of hydrologic loading in the design of stream buffer strips[J]. For Ecol Manage, 2000, 132: 243—257.
- [20] Dillaha T A, Reneau R B, Mostaghimi S, et al. Vegetative filter strips for agricultural non-point source pollution control[J]. Trans Am Soc Agric Eng, 1989(32): 513—519.
- [21] 尹澄清, 毛战坡. 用生态工程技术控制农村非点源水污染[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 229—230.
- [22] 李芳柏, 吴启堂. 无土栽培美人蕉等植物处理生活废水的研究[J]. 应用生态学报, 1997, 19(4): 36—39.
- [23] 王小璠, 徐青山, 葛滢. 人工湿地对西湖非点源污染源的治理研究[J]. 2001, 18(6): 6—10.
- [24] Lu L- K. Soil science and plant nutrition principles and fertilizer application, Beijing [M]. Chemical Industry Press(in Chinese). 1998.
- [25] 王明珠. 我国南方低丘陵红壤区立体农业模式[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(4): 263—266.
- [26] 刘经荣, 石庆华, 谢国强, 等. 草—牛—沼生态系统中氮的循环和沼气综合利用的探讨[J]. 江西农业大学学报, 2003, 25(2): 267—269.
- [27] 陈随军, 潘伟光. 农业结构调整中区域优势的正确认识与发挥[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(6): 221—225.
- [28] 许学工. 黄河三角洲的适用生态农业模式及农业地域结构探讨[J]. 地理科学, 2000, 20(1): 27—33.
- [29] 王继增, 李定强, 等. 扬子坑流域水土流失综合治理开发模式初探[J]. 水土保持研究, 1996, 3(6): 77—82.
- [30] 吴文良. 我国不同类型区生态农业县建设的基本途径与典型模式[J]. 生态农业研究, 2000, 8(2): 6—9.
- [31] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰. 农业非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 56—59.

(上接第30页)

由于绿化系统优化的目的是提高雨水的利用效率, 依据微观的理论解决宏观的问题, 涉及的学科很多, 有生态的、水文的和气候的等多个方面。因此本研究仅仅是对抗旱树种桉柳进行集雨绿化系统优化模式的初步分析和探讨, 重在理论分析和模型上, 实例分析仅仅具有方法运用的参考。

[参 考 文 献]

- [1] 山 仑, 陈国良. 黄土高原旱地农业的理论与实践[M]. 科学出版社, 1993. 1—10
- [2] 王百田. 干旱半干旱地区集流造林工程设计[J]. 水土保持通报, 1993, 13(7): 60—66.
- [3] Th. M. Boers, Degraaf M. A linear regression mode combined with a soil water balance mode to design micro-catchments for water harvesting in arid zones[J]. Agricultural Water Management, 1986(11): 187—203.
- [4] Ali Reza Sepaskhah, Hamid Reza Fooladmand. A computer model for design of micro-catchment water harvesting systems for rain-fed vineyard[J]. Agricultural Water Management, 2003(6): 1—18.
- [5] 李小雁. 干旱半干旱过渡雨水集流实验与微型生态集雨模式[C]. 全国百篇优秀博士论文, 2000. 31—35.
- [6] 王斌瑞, 王百田. 黄土高原径流林业[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996. 97—300.
- [7] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与计算[M]. 高原气象出版社, 1989. 58—63.
- [8] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2002, 46(22): 1850—1856.
- [9] 余新晓. 黄土地区防护林体系根际区土壤水分平衡研究[C]. 中国水土保持学会青年学术研究会, 水土保持科学研究与发展. 北京: 中国林业出版社, 1993. 41—50.
- [10] 韩仕峰, 黄旭. 黄土高原的土壤水分利用与生态环境的关系[J]. 生态学杂志, 1993, 12(1): 25—28.