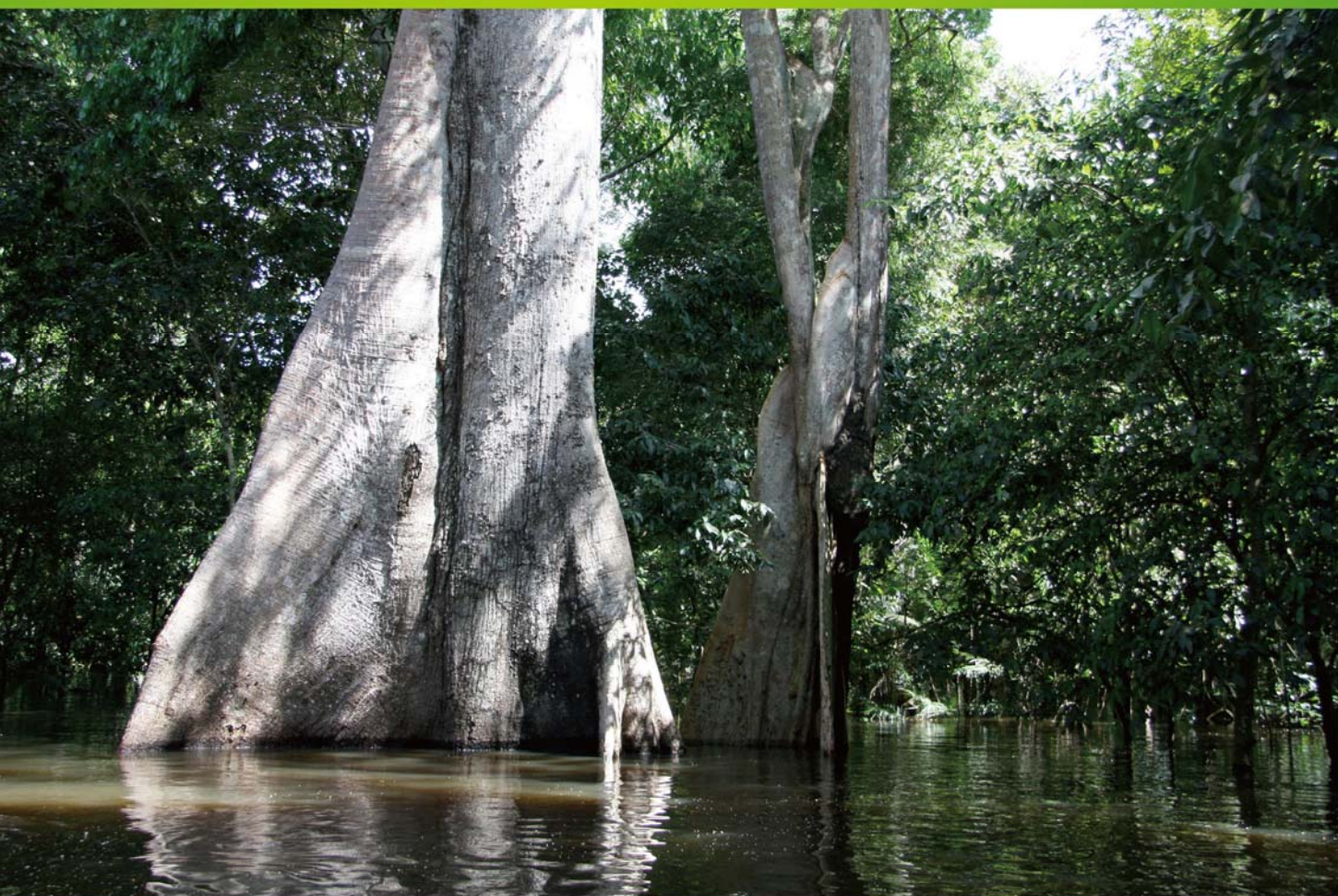


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

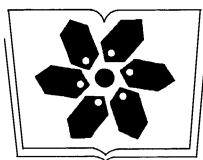
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第8期 Vol.31 No.8 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 8 期

2011 年 4 月 (半月刊)

目 次

塔里木河下游胡杨径向生长与地下水的关系·····	安红燕,徐海量,叶 茂,等 (2053)
冲积平原区高程因子对土壤剖面质地构型的影响——以封丘县为例·····	檀满枝,密术晓,李开丽,等 (2060)
臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响·····	王俊力,王 岩,赵天宏,等 (2068)
重要理化因子对小球藻生长和油脂产量的影响·····	张桂艳,温小斌,梁 芳,等 (2076)
北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应·····	程瑞梅,封晓辉,肖文发,等 (2086)
亚热带沟叶结缕草草坪土壤呼吸·····	李熙波,杨玉盛,曾宏达,等 (2096)
UV-B 辐射对马尾松凋落叶分解和养分释放的影响·····	宋新章,张慧玲,江 洪,等 (2106)
干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响·····	韩 荣,李 夏,任安芝,等 (2115)
蜜环菌对锌的耐性和富集特性·····	朱 林,程显好,李维焕,等 (2124)
干旱荒漠区狭叶锦鸡儿灌丛扩展对策·····	张建华,马成仓,刘志宏,等 (2132)
黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响·····	王春阳,周建斌,夏志敏,等 (2139)
内蒙古典型草原克氏针茅与冰草的生存策略·····	孙 建,刘 苗,李胜功,等 (2148)
荒漠沙柳根围 AM 真菌的空间分布·····	贺学礼,杨 静,赵丽莉 (2159)
开放式昼夜不同增温对单季稻影响的试验研究·····	董文军,邓艾兴,张 彬,等 (2169)
醉马草免培养内生细菌的多样性·····	张雪兵,史应武,曾 军,等 (2178)
河南生态足迹驱动因素的 Hi_PLS 分析及其发展对策·····	贾俊松 (2188)
禹城市耕地土壤盐分与有机质的指示克里格分析·····	杨奇勇,杨劲松,余世鹏 (2196)
旋覆花提取物对朱砂叶螨的生物活性及酶活性的影响·····	段丹丹,王有年,成 军,等 (2203)
白洋淀湖滨湿地岸边带氨氧化古菌与氨氧化细菌的分布特性·····	叶 磊,祝贵兵,王 雨,等 (2209)
干旱胁迫条件下 6 种喀斯特主要造林树种苗木叶片水势及吸水潜能变化·····	王 丁,姚 健,杨 雪,等 (2216)
桉树人工林物种多样性变化特征·····	刘 平,秦 晶,刘建昌,等 (2227)
海河流域湿地生态系统服务功能价值评价·····	江 波,欧阳志云,苗 鸿,等 (2236)
芦苇在微咸水河口湿地甲烷排放中的作用·····	马安娜,陆健健 (2245)
云南不同土壤铅背景值下大叶茶种群对铅的吸收积累特征及其遗传分化·····	刘声传,段昌群,李振华,等 (2253)
长江口和杭州湾凤鲚胃含物与海洋浮游动物的种类组成比较·····	刘守海,徐兆礼 (2263)
江西大岗山地区 7—9 月降水量的重建与分析·····	乔 磊,王 兵,郭 浩,等 (2272)
山核桃免耕经营的经济效益和生态效益·····	王正加,黄兴召,唐小华,等 (2281)
基于 GIS 的广州市中心城区城市森林可达性分析·····	朱耀军,王 成,贾宝全,等 (2290)
专论与综述	
土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性·····	杨庆朋,徐 明,刘洪升,等 (2301)
植物代谢速率与个体生物量关系研究进展·····	程栋梁,钟全林,林茂兹,等 (2312)
耕地生态补偿实践与研究进展·····	马爱慧,蔡银莺,张安录 (2321)
问题讨论	
元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性·····	刘 洁,李贤伟,纪中华,等 (2331)
研究简报	
中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响·····	胡 坤,喻 华,冯文强,等 (2341)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 296 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 33 * 2011-04



封面图说:巴西热带雨林——美丽的巴西北部玛瑙斯热带雨林景观。位于南美洲的亚马逊河是世界上流域最广、流量最大的河流,孕育了世界面积最大的热带雨林,雨林中蕴藏着极丰富的生物资源。

彩图提供:中国科学院生态环境研究中心徐卫华博士 E-mail:xuweihua@rcees.ac.cn

元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性

刘洁¹, 李贤伟^{1,*}, 纪中华², 张健¹, 张良辉¹, 周义贵¹

(1. 四川农业大学 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川雅安 625014;

2. 云南省农科院热区生态农业研究所, 云南元谋 651300)

摘要:采用双环法及主成分分析法、Pearson 相关分析法,对云南省元谋干热河谷小跨山流域 3 种植被恢复类型(以裸地为对照)的土壤入渗与贮水特征进行了研究。结果表明:(1)3 种植被类型与裸地的饱和贮水量表现为:最大滞留贮水量和最大吸持贮水量均表现为罗望子+百喜草(1317.0, 118.5, 1198.5 t/hm²)>银合欢林(1152.0, 99.0, 1053.0 t/hm²)>扭黄茅(1108.5, 89.5, 1029.0 t/hm²)>裸地(954.0, 66.0, 888.0 t/hm²),且植被对土壤滞留贮存功能的改善作用大于土壤吸持贮存功能。(2)3 种植被类型与裸地间土壤入渗特征值均表现出初渗率(罗望子+百喜草:7mm/min;银合欢林:8.37mm/min;扭黄茅:6.01mm/min;裸地:0.62mm/min)>平均入渗率(5.93, 5.06, 3.94, 0.53mm/min)>稳渗率(4.94, 2.88, 3.29, 0.27mm/min)的规律。不论旱季还是雨季,根据主成分分析法,得出土壤渗透性能综合判断值(F)的综合方程,综合评价 3 种植被类型与裸地土壤渗透性优劣,表现为:罗望子+百喜草(F :1.2271)>扭黄茅(F :0.5365)>银合欢林(F :0.2688)>裸地(F :-2.0323)。(3)Pearson 相关分析法表明,3 种植被类型与裸地的土壤渗透性与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤有机质含量呈极显著($P<0.01$)或者显著正相关($P<0.05$),与土壤容重呈极显著($P<0.01$)或显著负相关($P<0.05$),并在此基础上建立了主导因子方程。(4)对土壤入渗过程模拟得出通用经验方程是用于描述该流域土壤入渗过程的最优模型。

关键词:干热河谷;植被恢复;土壤贮水量;土壤入渗;元谋

Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou

LIU Jie¹, LI Xianwei^{1,*}, JI Zhonghua², ZHANG Jian¹, ZHANG Lianghui¹, ZHOU Yigui¹

1 Sichuan Provincial Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Upper Reaches of Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

2 Institute for Tropical Eco-Agriculture of Yunnan Academy of Agricultural Science, Yuanmou 651300, Yunnan China

Abstract: Hot-dry Valley of Jinsha River is one of the typical serious degenerated regions, The area has abundant sunshine, rich heat resource, low precipitation but high evaporation which leads to severe soil water deficit during the dry season. The adverse environment resulted in lower biological productivity and difficulty in vegetation. A lot of studies proved that vegetation restoration is an effective approach of ecosystem restoration in the dry-hot valleys of Jinsha River. Using double-rings method, principal component analysis and Pearson correlation analysis, the characteristics of soil infiltration and water-holding capacity of three kinds of vegetation restoration models(taking bare land for comparison) were studied in Xiaokuashan watershed of Yuanmou Dry-hot Valley, Yunnan Province. The results indicated that: ① Soil saturated water storage, water-holding capacity of non-capillary porosity and water-holding capacity of capillary porosity were all shown as the sequence of *Tamarindus indica* L. + *Paspalum notatum* Flugge (1317.0, 118.5, 1198.5 t/hm²) > *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit (1152.0, 99.0, 1053.0 t/hm²) > *Heteropogon contortus* (L.) Beauv. (1108.5, 89.5, 1029.0 t/hm²) > bare land (954.0, 66.0, 888.0 t/hm²). The improvement function played by each model on water-holding capacity of non-capillary porosity was greater than that played by corresponding model on water-holding

基金项目:国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC01A11);国家自然科学基金面上项目(30771717)和四川农业大学长江上游植被恢复与重建创新项目共同资助

收稿日期:2010-03-02; 修订日期:2010-07-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxw@scau.edu.cn

capacity of capillary porosity. ②Infiltration eigenvalues of three models and bare land were shown as initial infiltration rate (*T. indica* L. + *P. notatum* Flugge: 7mm/min; *H. contortus* (L.) Beauv.: 8.37mm/min; *L. leucocephala* (Lam.) de Wit: 6.01mm/min; bare land: 0.62mm/min) > average infiltration rate (*T. indica* L. + *P. notatum* Flugge: 5.93mm/min; *H. contortus* (L.) Beauv.: 5.06mm/min; *L. leucocephala* (Lam.) de Wit: 3.94mm/min; bare land: 0.53mm/min) > stable infiltration rate (*T. indica* L. + *P. notatum* Flugge: 4.94mm/min; *H. contortus* (L.) Beauv.: 2.88mm/min; *L. leucocephala* (Lam.) de Wit: 3.29mm/min; bare land: 0.27mm/min). Whether in dry season or rainy season, we can integrate estimation about soil permeability values (F) by principal component analysis, soil permeability of different models was presented as *T. indica* L. + *P. notatum* Flugge (F : 1.2271) > *H. contortus* (L.) Beauv. (F : 0.5365) > *L. leucocephala* (Lam.) de Wit (F : 0.2688) > bare land (F : -2.0323). ③Pearson correlation analysis showed that permeability of three models and bare land had a significant positive linear correlation with soil total porosity, non-capillary porosity and the organic matter content, and a significant negative linear correlation with soil bulk density. Based on which dominant-factor equations were established. ④General empirical model was the best one to describe the soil infiltration processes of this area.

Key Words: dry-hot valley; vegetation restoration models; soil water-holding capacity; soil infiltration; Yuanmou

土壤水分入渗和水分贮存作为森林植被的主要水文过程和功能,是反映森林植被保持水土和涵养水源作用的重要水文参数^[1]。水分渗入土壤是一个复杂的水文过程,与地表径流、表土结构、土壤密度、土壤持水量及植被特征等多种因素有关,是评价植被层水分调节能力的重要内容^[2]。由于土地利用和种植方式不同,即使是同一类型的土壤,其渗透性能也会有很大的差异^[3-4]。研究不同植被覆盖下的土壤贮水量及水分入渗规律是探讨流域产流机制的基础和前提,对研究不同植被类型水文过程的调节机制具有重要意义^[5]。干热河谷是我国西南地区的特殊生态环境类型。由于自然、历史和人为的原因,生态系统严重退化到极度脆弱的状态,植被恢复困难,覆盖率低,导致这一特殊区域以水土流失为主的土壤退化问题相当突出。元谋县是金沙江干热河谷区的典型地段,该区域森林覆盖率仅为 3.4%—6.3%^[6]。自 20 世纪 80 年代以来,以植被建设为主的水土保持技术的研究与实践得到长期实施,以退化土地治理为目的的植被恢复与重建也在近 10a 内逐步开展。迄今为止,对该区的研究主要集中于适宜树种(草种)选择、造林技术措施、树种抗旱性机理以及土壤水分动态等方面^[7],而不同植被恢复模式水文生态效应的研究较少,特别是对土壤入渗的研究仅局限于入渗速率的比较以及土壤入渗过程的简单模拟,缺乏对土壤入渗影响因子的系统性研究。为了了解金沙江元谋县不同植被恢复模式土壤入渗影响因子,探求植被类型与涵养水源功能的关系,研究了不同植被恢复模式土壤贮水特性及水分入渗特征。为该区域水土流失的综合治理、植被恢复技术措施的合理制定以及适宜恢复模式的选择提供科学理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

元谋干热河谷位于金沙江流域干热亚区,最显著的特点是蒸发量高和降雨量少,干湿季分明,干旱现象严重,生态环境脆弱,气候垂直分异明显,植被生产力水平低,载蓄量低。该区光热资源丰富,年日照时数 2670h,日照百分率 62%,全年太阳总辐射量 641.8kJ/cm²,年均气温 21.9℃,≥10℃年积温 7786℃,持续天数 350d,终年基本无霜,年降雨量 624.0mm,6—10 月份占年降雨量的 90%;年蒸发量 3507.2mm,为降雨量的 5.6 倍^[8]。旱坡地是该区主要的土地类型,未开垦荒坡地占土地面积的 56%。地带性土壤以燥红土分布最为广泛,土层薄,石砾含量较高,保水性差,有效养分缺乏,由砂页岩、砾岩及少量花岗岩、花岗片麻岩和石英岩风化形成。植被呈半萨王纳(Semi-Savanna)景观^[9],优势群落为车桑子-扭黄茅(*Dodonaea angustifolia*-*Heteropogon contortus*)群落,旱生禾草植物为优势种类。20 世纪 80 年代以来,采取自然禁封、改善立地条件、雨季撒播种子等技术措施,实施退化土地治理的植被恢复与重建,人工和自然植被得到了很大的恢复。目前,

已初步形成相对稳定的植物群落,水土流失得到有效控制。

1.2 研究材料

本研究选取的3种植被恢复模式:银合欢(*Leucaena leucocephala*)林(乔木)、罗望子(*Tamarindus indica*)+百喜草(*Paspalum natatum*)(乔-草)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)(自然草被)都属于雨养生态系统治理模式,另设裸露地作为对照。银合欢林营建于1995年,株行距为4m×4m,速生且萌发能力强,13a后林分密度已达2325株/hm²。罗望子林种植于2000年,株行距6m×8m。百喜草于1999年从江西引入,系具有很强抗逆性的多年生暖季型匍匐草本植物,在罗望子人工林生长3a后开始在林下种植。扭黄茅是元谋典型的乡土草种,主要通过自然禁封进行恢复。百喜草和扭黄茅旱季(11月—翌年5月)经历枯萎后于雨季到来时再生。

1.3 研究方法

在地形条件基本一致的区域选择具有代表性的各植被模型样地,大小为:20m×20m,各样地的土壤均为燥红土。样地基本情况见表1。

表1 样地基本概况

Table 1 Characteristics of sample plots

植被类型 Vegetation type	林/草龄 Age/a	林分密度 Density/(株/hm ²)	平均胸径/地径 DBH/cm	平均树/草高 Height/m
A	13	2325	4.54(胸径)	6.14
B	8/5	208	22.72(地径)	6.64/0.40
C	—	—	—	0.15
D	—	—	—	—
郁闭度/盖度 Canopy density/%	枯落物厚度 Litter thickness/cm	坡度枯落物厚度 Slope/(°)	pH	有机质 Organic matter/%
85	2.1	9	6.81	0.610
38/100	—	4	7.26	0.685
90	—	0	7.32	0.445
—	—	3	7.98	0.355

A:新银合欢林 *Leucaena leucocephala*; B:罗望子+百喜草 *Tamarindus indica*+*Paspalum natatum*; C:扭黄茅 *Heteropogon contortus*; D:裸地 Bare land;下同

分别在旱季中期(3月中旬)、旱季末期(5月中旬)、雨季中期(7月中旬)和雨季末期(9月中旬)的同一天并保证各季天气基本一致测定各模式的入渗情况,以保证测定天气状况一致。每个样地挖土壤剖面1个,根据土壤剖面信息,各植被恢复模式的土层厚度为30—50cm,为便于比较,仅以0—30cm土层作为采集层次。利用容积100cm³环刀在各模式中分别随机取土,分别采集0—15cm和15—30cm层次中间原状土测定土壤渗透性能。另外分别在采集原状土半径10cm的范围内采集0—15cm和15—30cm的土壤1000g作室内测定土壤有机质、pH和土壤的自然含水量。以上取样均作3次重复单独测定。

土壤容重和土壤孔隙度测定采用环刀法^[10],土壤有机质含量测定采用重铬酸钾氧化—外加热法^[11],土壤pH值测定采用pH计测定^[12]。

入渗过程的测定采用双环刀法。

初始含水量测定采用烘干法:在采集原状土半径10cm的范围内用铝盒采集0—15cm、15—30cm土层的土壤带回室内测定。

有关土壤水分入渗的数学模型有许多种,其适用条件各异^[13]。参照相关研究结果^[13-15],按不同植被恢复模式的特点,选出4个常用的入渗模型拟合森林植被的土壤水分下渗过程:

(1) Kostiakov 模型: $f(t) = at^{-n}$, $f(t)$ 为入渗速率, t 为入渗时间, a 、 n 为拟合参数;

(2) Horton 模型: $f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$, $f(t)$ 为入渗速率, t 为入渗时间, f_0 和 f_c 分别为初渗率和稳渗率, k 为经验参数;

(3) 通用经验公式: $f(t) = at^{-n} + b$, $f(t)$ 为入渗速率, t 为入渗时间, a 、 b 为经验参数, n 为拟合参数;

(4) Philip 模型: $f(t) = (1/2)st^{-1/2} + A$, $f(t)$ 为入渗速率, t 为入渗时间, S 为土壤吸水率, A 为稳渗率。

1.4 数据处理与统计分析

初渗率 = 最初入渗时段内渗透量 / 入渗时间; 平均渗透速率 = 达稳渗时的渗透总量 / 达稳渗时的时间;

本研究取最初入渗时间为 5 min; 稳渗率为单位时间内的渗透量趋于稳定 (单位时间入渗水量相等) 的渗透速率; 因各个模式的渗透速率在 1 h 内已达稳定, 为了便于比较, 渗透总量统一取前 60 min 内的渗透量。

土壤饱和贮水量: $W_t = W_c + W_n$;

最大吸持贮水量 (mm) $W_c = 1000 P_c h$;

最大滞留贮水量 (mm): $W_n = 1000 P_n h$;

式中, W_c 、 W_n 和 W_t 分别为土壤水分最大吸持贮水量 (mm)、最大滞留贮水量 (mm) 和饱和贮水量 (mm); P_c 、 P_n 分别为毛管孔隙度 (%)、非毛管孔隙度 (%); h 为计算土层深度 (m)。

采用 Microsoft Excel2007 软件对测定数据进行处理分析及作图, 用 SPSS11.5 软件对不同模式土壤渗透性能进行主成分分析、对不同模式土壤渗透性与土壤理化性质进行 Pearson 相关分析、逐步回归分析和土壤渗透数学模型的建立和回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式的土壤贮水特征

土壤贮水量是评价植被涵养水源功能最主要的指标之一, 对流域径流量和产沙量具有重要影响, 主要就是由孔隙状况以及土层深度决定的。在 30 cm 土层厚度内, 不同植被恢复模式之间土壤贮水量差异明显, 3 种植被类型的土壤贮水总体能力均高于裸露地。饱和贮水量表现为罗望子+百喜草 (1317.0 t/hm²) > 新银合欢林 (1152.0 t/hm²) > 扭黄茅 (1108.5 t/hm²) > 裸地 (954.0 t/hm²), 分别比裸地高 38.10%、20.75% 和 16.19% (图 1), 这表明植被恢复具有较好的改良土壤、提高土壤蓄水能力的功能。土壤最大滞留贮水量表现为罗望子+百喜草 (118.5 t/hm²) > 新银合欢林 (99.0 t/hm²) > 扭黄茅 (89.5 t/hm²), 表明罗望子+百喜草对土壤水分滞留贮存的改善作用最好, 比裸地 (66.0 t/hm²) 高 79.55%, 而其余 2 种恢复类型土壤滞留贮存能力稍差。土壤最大吸持贮水量的高低顺序也表现出与土壤饱和贮水量和最大滞留贮水量一致的变化规律, 罗望子+百喜草 (1198.5 t/hm²)、新银合欢林 (1053.0 t/hm²)、扭黄茅 (1029.0 t/hm²) 的最大吸持贮水量分别比裸地 (888.0 t/hm²) 高 34.97%、18.58% 和 15.88%。

植被恢复对土壤滞留贮存功能的改善作用明显大于土壤吸持贮水功能。新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的土壤最大吸持贮水量分别为裸地的 119%、135% 和 116%; 而它们的滞留贮存量则分别为 150%、180% 和 136%。通过对新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的最大吸持水量、最大滞留贮水量和饱和贮水量与裸地的 3 种贮水特性分别进行对应方差分析, 结果表明新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的 3 种贮水特征量与裸地的 3 种贮水特性差异极显著 ($P < 0.01$)。另外, 土壤最大吸持贮存量的差别较小, 最大 (罗望子+百喜草) 与最小 (裸地) 之间的差别只有 35.0%; 而不同植被恢复模式间土壤最大滞留贮存量的差别较大, 最大 (罗望子+百喜草) 与最小 (裸地) 之间的差别为 80.0%。

植被恢复对土壤滞留贮存功能的改善作用明显大于土壤吸持贮水功能。新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的土壤最大吸持贮水量分别为裸地的 119%、135% 和 116%; 而它们的滞留贮存量则分别为 150%、180% 和 136%。通过对新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的最大吸持水量、最大滞留贮水量和饱和贮水量与裸地的 3 种贮水特性分别进行对应方差分析, 结果表明新银合欢林、罗望子+百喜草和扭黄茅的 3 种贮水特征量与裸地的 3 种贮水特性差异极显著 ($P < 0.01$)。另外, 土壤最大吸持贮存量的差别较小, 最大 (罗望子+百喜草) 与最小 (裸地) 之间的差别只有 35.0%; 而不同植被恢复模式间土壤最大滞留贮存量的差别较大, 最大 (罗望子+百喜草) 与最小 (裸地) 之间的差别为 80.0%。

2.2 不同植被恢复模式的土壤入渗特征

土壤渗透性能是描述土壤入渗快慢极为重要的土壤物理特征参数之一。3 个土壤入渗特征值在不同植

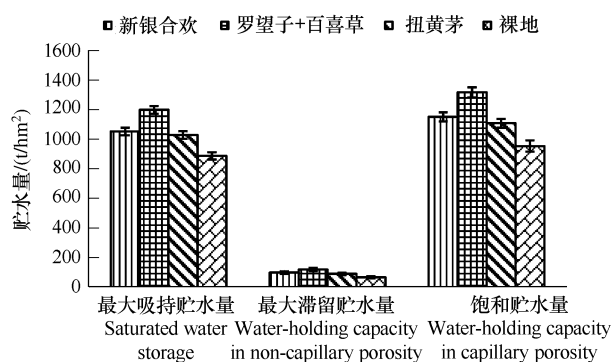


图 1 不同植被恢复模式土壤贮水特征参数

Fig. 1 Soil water holding parameters of different vegetation restoration models

被模式之间变化较大,表现出初渗率>平均入渗率>稳渗率的规律。初渗率、平均入渗率和稳渗率最小都出现在裸地,分别为 0.62、0.22、0.19 mm/min。相对于裸地而言,3 种植被恢复模式都不同程度地改善了土壤的渗透性能。土壤水分入渗时间与 60min 累积入渗量也能在一定程度上反映土壤水分入渗能力。研究表明,3 种植被模式与裸地在不同季节到达稳渗阶段需要的时间最长为 42min(新银合欢林),最短仅为 22min(罗望子+百喜草);3 种植被恢复模式土壤到达稳渗阶段的 60min 累积入渗量在不同气候季节的值均大于裸地(图 2)。

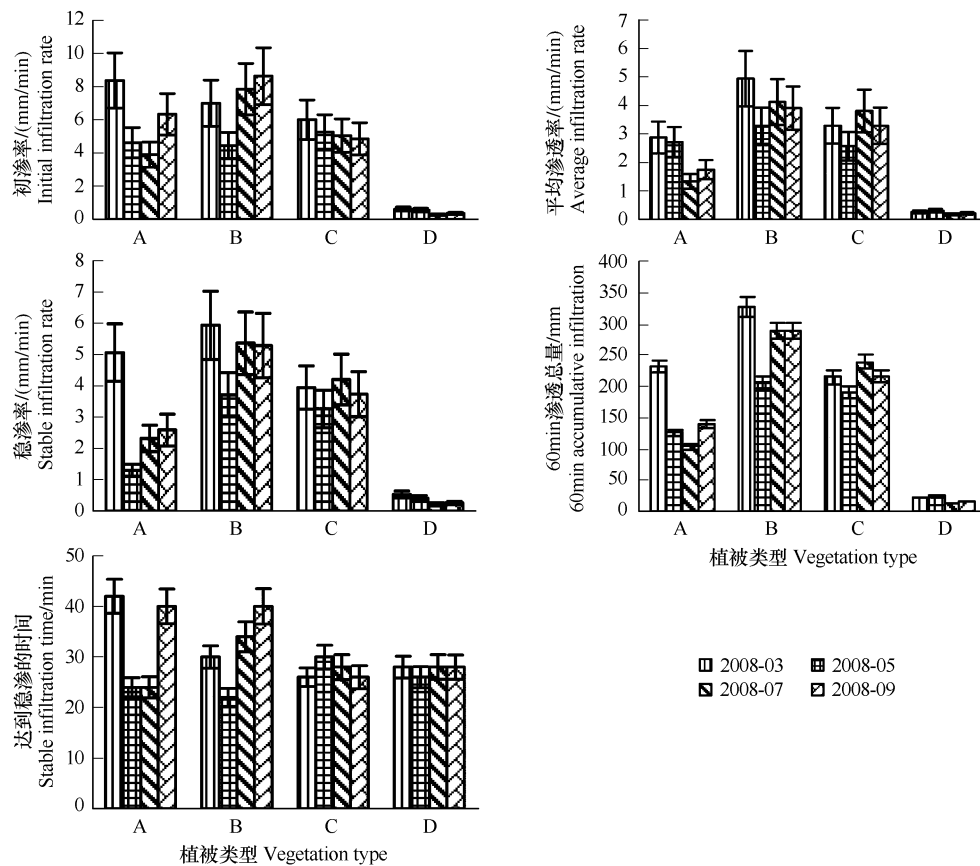


图 2 不同植被恢复模式的土壤入渗率

Fig. 2 Soil infiltration rates of different vegetation restoration models

2.3 土壤渗透性能的综合评价与分析

主成分分析多用于从多个实测的原变量中提取少数的、互不相关的、抽象的综合指标以达到对对象定性评价的作用。为比较 3 种植被恢复模式土壤渗透性优劣顺序,现以初始(前 5min)入渗率(X_1)、稳定入渗率(X_2)、平均渗透率(X_3)和前 60min 渗透总量(X_4)等指标进行主成分分析。提取的 2 个主成分,方差累计贡献率高达 99.691% (表 2),几乎解释了整个总方差,信息损失量非常少。显然,第一个成分与稳定入渗率(X_2)、平均渗透率(X_3)和前 60min 渗透总量(X_4)关系密切,而第二个成分与初始入渗率(X_1)关系密切。表 3 为主成分分析过程中旋转以后得到的因子得分系数矩阵。根据该表得到因子得分函数:

$$P_1 = -0.452 \times X'_1 + 1.026 \times X'_2 + 0.228 \times X'_3 - 0.014 \times X'_4$$

$$P_2 = 1.275 \times X'_1 - 0.313 \times X'_2 - 0.119 \times X'_3 - 0.056 \times X'_4$$

根据表 2 可知,主成分 P_1 的权重为 0.564,主成分 P_2 的权重为 0.436。由此得出代表土壤渗透性能综合判断值(F)的计算公式: $F = 0.564 \times P_1 + 0.436 \times P_2$,并进一步得出土壤渗透性能综合判断值(F)的综合方程: $F = 0.811 \times X'_1 + 0.442 \times X'_2 + 0.077 \times X'_3 - 0.032 \times X'_4$ (X'_i 表示各指标标准化数据)。土壤渗透性能综合

判断值及排序见表4。从 F 值排序来看,不同植被恢复模式土壤的渗透性能优劣如下:罗望子+百喜草>扭黄茅>新银合欢林>裸地(表4)。

表2 土壤渗透性主成分分析

Table 2 Principal component analysis of soil infiltration

参数 Parameter	主分量 Principal component	
	P_1	P_2
X_1	0.342	0.939
X_2	0.956	0.294
X_3	0.810	0.583
X_4	0.749	0.657
特征值 Eigen value	2.248	1.740
贡献率 Proportion	56.191	43.500
累积贡献率 Cumulative proportion	56.191	99.691

表3 主成分因子得分系数矩阵

Table 3 Component Matrix

参数 Parameter	主分量 Component	
	P_1	P_2
X_1	-0.452	1.275
X_2	1.026	-0.313
X_3	0.228	-0.119
X_4	-0.014	-0.056

表4 不同植被恢复模式土壤渗透性排序

Table 4 Evaluation table of soil infiltration of different vegetation restoration models

植被类型 Vegetation type	P_1	P_2	F	排序 Ordination
A	-0.8361	1.1049	0.2688	3
B	1.3041	-0.0770	1.2271	1
C	0.2617	0.2748	0.5365	2
D	-0.7297	-1.3026	-2.0323	4

2.4 土壤入渗影响因子

设土壤容重为 A_1 ,总孔隙度为 A_2 ,毛管孔隙度为 A_3 ,非毛管孔隙度为 A_4 ,土壤有机质含量为 A_5 ,土壤 pH 值为 A_6 ,土壤初始含水量为 A_7 ;初始(前 5min)入渗率为 X_1 、稳定入渗率为 X_2 、平均渗透率为 X_3 、前 60min 渗透总量为 X_4 为进行相关分析,土壤渗透性与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤有机质含量极显著或者显著正相关,与土壤容重极显著或显著负相关(表5)。根据分析结果,选择与土壤渗透性指标均极显著或显著相关的因子:平均土壤容重(A_1),平均总孔隙度(A_2),平均非毛管孔隙度(A_4),平均土壤有机质含量(A_5)等作为自变量,以最初 5min 渗透率(X_1),稳渗率(X_2),平均渗透率(X_3),总渗透量(X_4)为因变量,进行共线性检验并无多重共线性现象。逐步回归分析,得到土壤水分初渗率、稳渗率、平均渗透率以及前 60min 的主导因子方程(表6),均达极显著水平。

表5 土壤理化性质与土壤渗透性相关系数

Table 5 Correlation coefficients between soil permeability and soil and chemical properties

土壤渗透性 Permeability	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7
X_1	-0.687 **	0.612 *	0.154	0.718 **	0.684 **	-0.383	-0.175
X_2	-0.670 **	0.745 *	0.458 *	0.704 **	0.717 **	-0.028	-0.098
X_3	-0.714 **	0.755 *	0.086	0.646 **	0.745 **	-0.222	-0.136
X_4	-0.644 *	0.807 *	0.146	0.676 **	0.772 **	-0.260	-0.071

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; A_1 :土壤容重; A_2 :总孔隙度; A_3 :毛管孔隙度; A_4 :非毛管孔隙度; A_5 :土壤有机质含量; A_6 :土壤 pH 值; A_7 :土壤初始含水量

2.5 不同植被恢复模式的土壤入渗过程模拟

4 种土壤入渗模型回归拟合结果,土壤水分入渗 4 个估测模型的拟合精度存在差异(表7、表8)。其中,拟合精度以通用经验方程最高,Kostiakov 方程次之,Philip 模型较差,Horton 方程拟合效果最差。通用经验方程拟合相关系数为 0.9411—0.9958,平均相关系数为 0.9740;Kostiakov 方程拟合的相关系数为

表 6 土壤渗透性主导因子方程

Table 6 Dominant factor equations of soil permeability

主导因子方程 Dominant factor equations	R	P
$X_1 = 115.1435 - 68.0033A_1 + 1.0031A_2 - 13.4806A_4$	0.977	0.004
$X_2 = -41.6160 + 15.7760A_1 - 0.5170A_2$	0.897	0.000
$X_3 = -12.2520 + 0.5627A_2 - 10.7439A_5$	0.949	0.003
$X_4 = -2688.4721 + 997.306A_1 + 34.490A_2$	0.921	0.000

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; A_1 :土壤容重; A_2 :总孔隙度; A_3 :毛管孔隙度; A_4 :非毛管孔隙度; A_5 :土壤有机质含量; A_6 :土壤 pH 值; A_7 :土壤初始含水量

表 7 不同植被恢复模式 Kostiakov 模型及 Horton 模型回归分析结果

Table 7 The regression analysis of Kostiakov and Horton models of different vegetation restoration models

植被类型 Vegetation type	时间 Time	Kostiakov 模型 Kostiakov Model				Horton 模型 Horton Model				
		a	n	R^2	P	f_c	f_0	k	R^2	P
A	2008.3	14.166	0.4216	0.9842	**	2.88	7.49	0.1715	0.8938	**
	2008.5	3.5494	0.4584	0.9921	**	0.72	2.63	0.2208	0.8272	**
	2008.7	5.5955	0.4516	0.9185	**	1.34	2.57	0.1826	0.9134	**
	2008.9	8.8026	0.4554	0.9952	**	1.75	4.59	0.1418	0.9592	**
B	2008.3	8.0535	0.1459	0.9216	**	4.94	2.06	0.1487	0.8751	**
	2008.5	6.4814	0.2374	0.8089	*	3.29	4.45	0.1554	0.7701	*
	2008.7	10.819	0.2662	0.9915	**	4.12	3.74	0.1324	0.8916	**
	2008.9	11.598	0.2993	0.9837	**	3.91	4.73	0.1653	0.8148	**
C	2008.3	9.0259	0.3322	0.9594	**	3.29	2.72	0.1906	0.8669	**
	2008.5	7.5058	0.4233	0.9097	**	2.57	2.70	0.3249	0.9188	**
	2008.7	7.2246	0.2077	0.9598	**	3.81	1.25	0.1381	0.7800	*
	2008.9	6.3602	0.2359	0.8548	**	3.29	1.57	0.1855	0.8851	**
D	2008.3	6.0763	0.7748	0.8884	**	0.62	1.48	0.1642	0.7509	*
	2008.5	2.2519	0.2109	0.7893	**	1.34	0.39	0.1737	0.7735	*
	2008.7	3.3841	0.2879	0.9912	**	1.24	0.20	0.0565	0.0379	*
	2008.9	7.2476	0.2993	0.9255	**	2.88	4.57	0.1802	0.7787	*

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

表 8 不同植被恢复模式通用经验方程及 Philip 模型回归分析结果

Table 8 Regression analysis of General experienced and Philip model of different models

植被类型 Vegetation type	时间 Time	通用经验方程 General Experienced Model				Philip 模型 Philip Model				
		a	b	n	R^2	P	S	A	R^2	P
A	2008.3	15.806	1.8527	0.3256	0.9866	**	25.027	1.3813	0.8817	**
	2008.5	3.1847	1.6008	0.8085	0.9411	**	6.424	0.2579	0.9790	**
	2008.7	4.6524	1.1840	0.9579	0.9892	**	14.366	0.6922	0.9551	**
	2008.9	8.1623	1.2528	0.5996	0.9900	**	16.45	0.4832	0.9963	**
B	2008.3	4.5419	3.522	0.3237	0.9422	**	7.0708	4.5313	0.8420	**
	2008.5	3.2102	3.1205	0.8082	0.9704	**	10.456	1.7840	0.9002	**
	2008.7	10.597	3.2516	0.2773	0.9958	**	16.417	3.0599	0.7867	*
	2008.9	11.189	3.4980	0.3254	0.9808	**	17.820	2.8719	0.9316	**
C	2008.3	6.4507	2.716	0.7183	0.9821	**	15.005	1.6863	0.7838	*
	2008.5	5.1253	2.395	1.1355	0.9613	**	14.409	0.5140	0.8140	*
	2008.7	4.0281	3.2541	0.5758	0.9354	**	8.2458	3.0905	0.8754	**
	2008.9	3.1215	3.2001	0.9964	0.9880	**	9.6322	1.9189	0.9423	*
D	2008.3	5.8426	0.5714	1.3590	0.9494	**	18.464	1.9655	0.7423	*
	2008.5	0.9043	1.2710	0.8197	0.9554	**	3.0421	0.8321	0.8863	**
	2008.7	3.8507	0.5120	0.2290	0.9541	**	5.076	0.9182	0.8714	**
	2008.9	4.8794	1.6620	0.9741	0.9741	**	12.196	1.4843	0.9071	**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

0.7893—0.9952, 平均相关系数为 0.9296; Philip 方程拟合的相关系数为 0.7423—0.9963, 平均相关系数为 0.8957; Horton 方程拟合相关系数为 0.0379—0.9592, 平均相关系数为 0.7961。16 个土壤水分入渗最优模型中, 通用经验方程 11 个, Kostiakov 方程 4 个, Philip 模型 1 个, 没有 Horton 方程。表明通用经验方程是用于描述该流域土壤入渗过程的最优模型, Horton 方程基本不适于该流域土壤水分入渗过程的模拟。

3 讨论

不同植被恢复模式对土壤贮水能力均较裸地有较大提高, 这与刘霞^[16]研究小流域土壤入渗与贮水特征结果较为一致。3 种植被与裸地之间土壤贮水量差异明显, 乔木或乔草恢复模式(新银合欢林、罗望子+百喜草)对土壤的贮水能力具有较好的改善作用, 主要原因是银合欢林内地表枯落物层平均厚度达 1.92cm, 最高达 3.43cm^[17], 枯落物的分解增加了土壤有机质含量; 底土的钙质也因根系的吸收而积聚于表层, 以及强大根系的穿透、挤压及根系分泌物对钙的活化, 改善了土壤的结构, 增加了土壤的孔隙度; 百喜草是“多用型”水土保持植物, 引入干热河谷后, 覆盖度可达 100%, 由于草层密布, 可以防止雨滴直接打击地面, 以免土表结成块; 同时其根系量大, 须根密集, 茎叶枯落物和衰老退化的根系腐烂后可有效改善土壤的物理性状, 提高土壤的蓄水保水能力, 水土保持效应不断加强^[18]。它与罗望子搭配形成的恢复模式, 不仅蓄水能力较强, 同时也具有良好的景观效果, 与干热河谷典型的脆弱生境破碎化形成了鲜明对比。

罗望子+百喜草的入渗性能优于其余 2 种模式和裸地类型, 是因为该模式的草本层密布且覆盖率高, 可极其有效防止雨滴直接打击地面; 同时, 表层土壤所聚集的植物根系发育好, 根量多, 能够提供较丰富的枯茎、腐根, 对土壤均有巨大的改良作用, 有利于土壤水分的迅速下渗。新银合欢林的入渗性能较差主要是因为银合欢的根系有较强的抗逆生长能力, 不仅主根发达, 侧根也生长旺盛。发达的根系与枯落物形成强化的根土作用层, 一方面体现在其透水性和蓄水性等土壤物理性状和结构的改善, 另一方面表现为根系对土壤的固持作用, 减弱地表开裂。但是, 由于银合欢繁殖力极强, 初植后没有科学管理, 林分密度不断增大, 林内个体之间的竞争激烈, 生长状况呈现灌木的状态, 这样不仅耗费地力, 而且在雨季和旱季分明的情况下, 容易造成林地深层土壤干化^[19]。已有研究表明, 云南元谋干热河谷造林区林地草、灌生物量与土壤渗透性无相关性, 这反映了草、灌的生长对水分在量上的要求并不太高, 该区种植扭黄茅便是其典型^[20]。在元谋干热河谷区, 只要无放牧和人为践踏, 以扭黄茅为主的草本总是生长茂密, 地表覆盖度大于 90%。扭黄茅的入渗性能强于新银合欢林, 是因为扭黄茅容易覆盖地表, 且毛根稠密, 能改良土壤, 利于水分下渗。裸地因为没有植被覆盖, 容易形成地表结皮, 土壤坚实, 入渗性能最弱。陈奇伯等的研究金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应表明乔木林地和草地的稳渗速率及不同时段的人渗总量都高于荒地^[21]。这也说明草地和乔木林地的土壤透水性均好于荒地, 植被对土壤入渗性能的改良调节作用明显, 且草被优于乔木林。

不同植被恢复模式下土壤理化特性存在差异, 直接或间接影响着土壤入渗性能(表 6); 在考虑土壤理化性质的基础上, 文章选取 16 个土壤水分入渗模型, 其中, 通用经验方程 11 个, Kostiakov 方程 4 个, Philip 模型 1 个, 没有 Horton 方程。Philip 模型的拟合结果较差, 这与 Philip 模型中 t 的指数为一固定常数 $(-1/2)$, 难以适应各种土壤在不同前期含水量条件下的入渗曲线变化有关^[16]。对于 Kostiakov 方程, 从公式形式可以发现, 在起始时的入渗速率是无穷大, 但当时间无限增大时, 入渗速率将趋近于 0。但从土壤水分动力学角度出发, 对于水平入渗, 由于没有重力势的作用, 随着入渗时间的延长, 水流运动的动力势梯度逐渐为零, 因此其入渗速率有可能接近于零, 但在垂直入渗的情况下, 最终的入渗速率不可能为零^[2]。通用经验方程正是对 Kostiakov 方程在垂直入渗的情况下进行修正, 方程增加了常数项 b , 反映了在时间无限长时在重力作用下达到了稳定入渗, 参数与稳定入渗速率几乎相等也证明了这一点。从拟合的稳渗率参数看, 通用经验模型的拟合结果比 Kostiakov 模型更接近于实测值; 而且通用经验方程的 b 值与 fc 值非常接近, 因此通用经验方程更适合于模拟该流域不同植被恢复模式的土壤水分入渗过程。经 F 检验, 其相关系数 R 均在 0.01 水平上显著。对土壤水分入渗过程进行模拟的结果表明, 拟合精度以通用经验方程最高, Kostiakov 方程次之, Horton 方程拟合效果最差。这反映了 Horton 方程基本不适于该流域土壤水分入渗过程的模拟。根据相关系数大小得出,

通用经验方程对该流域土壤入渗过程的模拟效果最优。且通用经验方程的拟合结果比 Kostiakov 方程更接近于实测值,因此通用经验方程是用于描述该流域土壤入渗过程的最优模型。

4 结论

新银合欢林、罗望子+百喜草这两种模式对土壤的贮水力具有较好的改善作用。饱和贮水量、最大滞留贮水量和最大吸持贮水量都表现为罗望子+百喜草>新银合欢林>扭黄茅>裸地,且植被对土壤滞留贮存功能的改善幅度明显大于土壤吸持贮存功能。相对于裸露地,3种植被恢复模式都不同程度地改善了土壤的渗透性能。不论是在旱季还是雨季,不同植被类型土壤的渗透性能都表现为:罗望子+百喜草>扭黄茅>新银合欢林>裸地。经过主成分分析得出3种植被恢复与裸地模式土壤的渗透性能优劣如下:罗望子+百喜草>扭黄茅>新银合欢林>裸地。对土壤入渗主要影响因子进行分析得出不同植被模式的土壤渗透性与总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤有机质含量极显著或者显著正相关,与土壤容重极显著或显著负相关,并依此分析建立了影响土壤渗透性的主导因子方程。对土壤入渗过程模拟得出通用经验方程的拟合结果比 Kostiakov 方程更接近于实测值,表明其是用于描述该流域土壤入渗过程的最优模型。

罗望子+百喜草模式具有良好的土壤渗透性和贮水性,是优异的植被恢复模式。银合欢林的贮水性较好,应在造林初期控制林分密度,或实施抚育间伐,利于其他草、灌进入,使物种多样性增大,加速生态系统的恢复^[22]。扭黄茅耐旱性强,只要地表有一定的水分条件便能满足生长需求,因此,在植被恢复实施中可以利用这一特点,在造林区先种灌、草,利用其根系强化土壤入渗的特点,增大土壤水贮量,或实行封闭管理,在自然条件下让草灌迅速生长覆盖地面,再行植树。这一方法,在其它地区如岷江干旱河谷等已有应用,取得了满意的效果^[6,23]。

土壤水分入渗4个估测模型的拟合精度存在差异,其中,拟合精度以通用经验方程最高,Kostiakov 方程次之,Philip 模型较差,Horton 方程拟合效果最差。Kostiakov 模型是所有入渗公式中最简单的,属于经验性公式,适用于入渗率较高的情况。Philip 模型是在水分运动基本方程式的基础上推得的,适用于表层土壤含水量接近或达到饱和且垂直渗入一个均质土壤中的情况。Horton 模型在描述流域入渗规律有一定的局限性,但作为对单点降雨入渗的模型在实际应用中很有效。通用经验方程是用于描述该流域土壤入渗过程的最优模型,Horton 方程基本不适于该流域土壤水分入渗过程的模拟。

References:

- [1] Zhang Z Q, Yu X X, Zhao Y T, Qin Y S. Advance in researches on the effect of forest on hydrological process. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (1): 113-116.
- [2] Han B, Wu Q X, Li Y Y, Ma Y H, He B M, Liang Z. Study on the characteristics of soil infiltration of *Pinus tabulaeformis* stand in the loess hilly areas. Protection Forest Science and Technology, 2004, (5): 1-3, 49.
- [3] Azooz R H, Arshad M A. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage system. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76: 143-152.
- [4] Singh B, Chanasyk D S, McGill W B. Soil hydraulic properties of an Orthic Black Chernozem under long-term tillage and residue management. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76: 63-71.
- [5] Qi L H, Zhang X D, Zhou J X, Zhou X L, Tian Y X, Wei Y, Wu J P, Ke Y Z. Soil water holding capacities and infiltration characteristics of vegetation restoration communities in watershed, Northwest Hunan. Scientia Silvae Sinica, 2007, 43(4): 1-8.
- [6] Yang Z, Zhang X B, Wang D J, Chen Y D. Vegetation rehabilitation in the arid-hot valleys of Jinshangjiang River. Journal of Mountain Science, 1999, 17 (2): 152-156.
- [7] Ma J M, Li K. Effects of plantation on soil nutrient and evaluation in Yuanmou Dry-hot valley. Forest Research, 2006, 19(4): 467-471.
- [8] Ji Z H, Yang Y X, Bai D Z, Fang H D, Liao C F, Pan Z X, Sha Y C. The study on the ecological adaptability the degraded mountain of *Cajanus cajan* (L.) *Milispough* in land of dry-hot valley. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25 (3): 158-162, 202.
- [9] Jin Z Z, Ou X K. Vegetation of Dry-hot valley. Kunming: Yunnan University Press, Yunnan Science and Technology Press, 2000.
- [10] Soil Research Lab of Forest Research Institute of Chinese Academy of Forestry Science. LY/T 1215—1999 Determination of Forest Soil Permanent Wilting Water Content. Beijing: Chinese standard Press, 1999.
- [11] Soil Research Lab of Forest Research Institute of Chinese Academy of Forestry Science. LY/T 1237—1999 Determination of Organic Matter in Forest Soil and Calculation Carbon-nitrogen Ratio. Beijing: Chinese standard Press, 1999.

- [12] Soil Research Lab of Forest Research Institute of Chinese Academy of Forestry Science. LY/T 1239—1999 Determination of pH Value in Forest Soil. Beijing: Chinese standard Press, 1999.
- [13] Murray C D, Buttle J M. Infiltration and soil water mixing on forested and harvested slopes during spring snowmelt, Turkey Lakes Watershed, central Ontario. *Journal of Hydrology*, 2005, 306(1/4): 1-20.
- [14] Yang H L, Zhu J Z, Bi L D. Soil permeability capability research on Yangtze River Three Gorges Reservoir Area forest watershed ecosystem. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(3): 63-65, 69.
- [15] Zhao X N, Wu F Q. Developments and reviews of soil infiltration research. *Journal of Northwest Forestry University* 2004, 19(1): 42-45.
- [16] Liu X, Zhang G C, Li X L, Xing X S, Zhao M. Characteristics of soil infiltration and water-holding of different forest vegetation in ecological rehabilitation of small watershed. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(6): 1-5.
- [17] Ji Z H, Fang H D, Yang Y X, Pan Z X, Sha Y C. Assessment of system functions after vegetation restoration of the degraded ecosystem in arid hot valleys of Jinsha River: a case study on small watershed of Yuanmou. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4): 1383-1389.
- [18] Liu S Y, Zuo C Q, Zhu J Z. Effects of artificial vegetation of *Paspalum notatum* flugge on slope runoff. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(5): 16-20.
- [19] Bai D Z, Ji Z H, Yang Y X, Fang H D, Liao C F. Effect study of water and soil conservation on *Leucaena* harnessing area in rushing gully. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 226-228.
- [20] Zhang J H, Li Y, Yang Z, Xu J Z. Soil water properties of afforested land as affected by livestock grazing in Yuanmou Dry-hot valley, Yunnan Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(2): 41-45.
- [21] Chen Q B, Wang K Q, Li Y M, Wang J P, Wang P L, Da Q. Effect of different vegetation types on soil amelioration in dry-hot valley of Jinshajiang river basin. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 17(2): 67-70, 113.
- [22] Fang H D, Ji Z H, Yang Y X, Bai D Z, Liao C F. The study on species diversity of *Leucaena leucocephala* plantation in Jinsha River hot and dry valley. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(1): 135-137.
- [23] Zhang J H. Protective utilization of forest land in protective forest areas of Chuanjiang basin, Sichuan Province. *Journal of Mountain Science*, 1993, 11(4): 257-260.

参考文献:

- [1] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 秦永胜. 森林对水文过程影响研究进展. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 113-116.
- [2] 韩冰, 吴钦孝, 李秧秧, 马雁宏, 贺百宏, 梁哲. 黄土丘陵区人工油松林地土壤入渗特征的研究. *防护林科技*, 2004, (5): 1-3, 49.
- [5] 漆良华, 张旭东, 周金星, 周小玲, 田育新, 魏远, 吴建平, 柯裕洲. 湘西北小流域典型植被恢复群落土壤贮水量与入渗特性. *林业科学*, 2007, 43(4): 1-8.
- [6] 杨忠, 张信宝, 王道杰, 陈玉德. 金沙江干热河谷植被恢复技术. *山地学报*, 1999, 17(2): 152-156.
- [7] 马姜明, 李昆. 元谋干热河谷人工林的土壤养分效应及其评价. *林业科学研究*, 2006, 19(4): 467-471.
- [8] 纪中华, 杨艳鲜, 拜得珍, 方海东, 廖承飞, 潘志贤, 沙毓沧. 木豆在干热河谷退化山地的生态适应性研究. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(3): 158-162, 202.
- [9] 金振洲, 欧晓昆. 干热河谷植被. 昆明: 云南大学出版社, 云南科技出版社, 2000.
- [10] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1215—1999 森林土壤水分-物理性质的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [11] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1237—1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究室. LY/T 1239—1999 森林土壤 pH 值的测定. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [14] 杨海龙, 朱金兆, 毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 63-65, 69.
- [15] 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 42-45.
- [16] 刘霞, 张光灿, 李雪蕾, 邢先双, 赵玫. 小流域生态修复过程中不同森林植被土壤入渗与贮水特征. *水土保持学报*, 2004, 18(6): 1-5.
- [17] 纪中华, 方海东, 杨艳鲜, 潘志贤, 沙毓沧. 金沙江干热河谷退化生态系统植被恢复生态功能评价. *生态环境学报*, 2009, 18(4): 1383-1389.
- [18] 刘士余, 左长清, 朱金兆. 百喜草人工植被对坡面径流的影响. *中国水土保持科学*, 2007, 5(5): 16-20.
- [19] 拜得珍, 纪中华, 杨艳鲜, 方海东, 廖承飞. 银合欢冲沟治理水土保持效益研究. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 226-228.
- [20] 张建辉, 李勇, 杨忠, 徐建忠. 云南元谋干热河谷区放牧对人工幼林地土壤水分性质的影响. *水土保持学报*, 2000, 14(2): 41-45.
- [21] 陈奇伯, 王克勤, 李艳梅, 王建英, 王平里, 达琼. 金沙江干热河谷不同类型植被改良土壤效应研究. *水土保持学报*, 2003, 17(2): 67-70, 113.
- [22] 方海东, 纪中华, 杨艳鲜, 拜得珍, 廖承飞. 金沙江干热河谷新银合欢人工林物种多样性研究. *水土保持研究*, 2005, 12(1): 135-137.
- [23] 张建辉. 川江流域防护林区林地的保护性利用. *山地学报*, 1993, 11(4): 257-260.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 8 April, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

The relationship between <i>Populus euphratica</i> 's radial increment and groundwater level at the lower reach of Tarim River	AN Hongyan, XU Hailiang, YE Mao, et al (2053)
Influence of elevation factor on soil profile texture configuration: a case study of the alluvial plain of Fengqiu County	TAN Manzhi, MI Shuxiao, LI Kaili, et al (2060)
Effects of ozone on AsA-GSH cycle in soybean leaves	WANG Junli, WANG Yan, ZHAO Tianhong, et al (2068)
The effects of physical and chemical factors on the growth and lipid production of <i>Chlorella</i>	ZHANG Guiyan, WEN Xiaobin, LIANG Fang, et al (2076)
Response of net productivity of masson pine plantation to climate change in North Subtropical Region	CHENG Ruimei, FENG Xiaohui, XIAO Wenfa, et al (2086)
Soil respiration of <i>Zoysia matrella</i> turfgrass in subtropics	LI Xibo, YANG Yusheng, ZENG Hongda, et al (2096)
Effect of UV-B radiation on the leaf litter decomposition and nutrient release of <i>Pinus massoniana</i>	SONG Xinzhang, ZHANG Huiling, JIANG Hong, et al (2106)
Physiological ecological effect of endophyte infection on <i>Achnatherum sibiricum</i> under drought stress	HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, et al (2115)
Zinc Tolerance and Accumulation Characteristics of <i>Armillaria mellea</i>	ZHU Lin, CHENG Xianhao, LI Weihuan, et al (2124)
Expansion strategies of <i>Caragana stenophylla</i> in the arid desert region	ZHANG Jianhua, MA Chengchang, LIU Zhihong, et al (2132)
Effects of mixed plant residues from the Loess Plateau on microbial biomass carbon and nitrogen in soil	WANG Chunyang, ZHOU Jianbin, XIA Zhimin, et al (2139)
Survival strategy of <i>Stipa krylovii</i> and <i>Agropyron cristatum</i> in typical steppe of Inner Mongolia	SUN Jian, LIU Miao, LI Shengdong, et al (2148)
Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in <i>Salix psammophila</i> root-zone soil in Inner Mongolia desert	HE Xueli, YANG Jing, ZHAO Lili (2159)
An experimental study on the effects of different diurnal warming regimes on single cropping rice with Free Air Temperature Increased (FATI) facility	DONG Wenjun, DENG Aixin, ZHANG Bin, et al (2169)
Endophytic bacterial diversity in <i>Achnatherum inebrians</i> by culture-independent approach	ZHANG Xuebing, SHI Yingwu, ZENG Jun, et al (2178)
Hierarchical Partial Least Squares (Hi_PLS) model analysis of the driving factors of Henan's Ecological Footprint (EF) and its development strategy	JIA Junsong (2188)
Evaluation on spatial distribution of soil salinity and soil organic matter by indicator Kriging in Yucheng City	YANG Qiyong, YANG Jinsong, YU Shipeng (2196)
The toxicity of lupeol of <i>Inula britannica</i> on <i>Tetranychus cinnabarinus</i> and its effects on mite enzyme activity	DUAN Dandan, WANG Younian, CHENG Jun, et al (2203)
Abundance and biodiversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in littoral wetland of Baiyangdian Lake, North China	YE Lei, ZHU Guibing, WANG Yu, et al (2209)
Changes of leaf water potential and water absorption potential capacities of six kinds of seedlings in Karst mount area under different drought stress intensities: Taking six forestation seedlings in karst Mountainous region for example	WANG Ding, YAO Jian, YANG Xue, et al (2216)
Comparison of structure and species diversity of <i>Eucalyptus</i> community	LIU Ping, QIN Jing, LIU Jianchang, et al (2227)
Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands	JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al (2236)
Effects of <i>Phragmites australis</i> on methane emission from a brackish estuarine wetland	MA Anna, LU Jianjian (2245)
Genetic differentiation and the characteristics of uptake and accumulation of lead among <i>Camellia sinensis</i> populations under different background lead concentrations of soils in Yunnan, China	LIU Shengchuan, DUAN Changqun, LI Zhenhua, et al (2253)
Comparison of zooplankton lists between <i>Coilia mystus</i> food contents and collections from the Yangtze River Estuary & Hangzhou Bay	LIU Shouhai, XU Zhaoli (2263)
Reconstruction and analysis of July-September precipitation in Mt. Dagangshan, China	QIAO Lei, WANG Bing, GUO Hao, et al (2272)
Analysis on economic and ecological benefits of no-tillage management of <i>Carya cathayensis</i>	WANG Zhengjia, HUANG Xingzhao, TANG Xiaohua, et al (2281)
GIS-based analysis of the accessibility of urban forests in the central city of Guangzhou, China	ZHU Yaojun, WANG Cheng, JIA Baoquan, et al (2290)
Review and Monograph	
Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration	YANG Qingpeng, XU Ming, LIU Hongsheng, et al (2301)
The advance of allometric studies on plant metabolic rates and biomass	CHENG Dongliang, ZHONG Quanlin, LIN Maozi, et al (2312)
Practice and the research progress on eco-compensation for cultivated land	MA Aihui, CAI Yinying, ZHANG Anlu (2321)
Discussion	
Soil water holding capacities and infiltration characteristics of three vegetation restoration models in dry-hot valley of Yuanmou	LIU Jie, LI Xianwei, JI Zhonghua, et al (2331)
Scientific Note	
Effects of secondary, micro- and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake	HU Kun, YU Hua, FENG Wenqiang, et al (2341)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任:孔红梅

执行编辑:刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 8 期 (2011 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 8 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元