

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

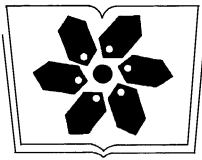
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第3期 Vol.32 No.3 **2012**

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 32 卷 第 3 期

2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

夏季可可西里雌性藏原羚行为时间分配及活动节律	连新明, 李晓晓, 颜培实, 等 (663)
热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 张禹, 张衡, 等 (671)
洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应	卢碧林, 严平川, 田小海, 等 (680)
广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程	刘亮, 范航清, 李春千 (690)
高浓度 CO ₂ 引起的海水酸化对小珊瑚藻光合作用和钙化作用的影响	徐智广, 李美真, 霍传林, 等 (699)
盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响	邹维娜, 袁琳, 张利权, 等 (706)
基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例	栾晓峰, 孙工棋, 曲艺, 等 (715)
城市化对本土植物多样性的影响——以廊坊市为例	彭羽, 刘雪华, 薛达元, 等 (723)
利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种	刘芳, 李迪强, 吴记贵 (730)
基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型	李海奎, 宁金魁 (740)
千岛湖社鼠种群遗传现状及与生境面积的关系	刘军, 鲍毅新, 张旭, 等 (758)
气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响	顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等 (767)
中国西北典型冰川区大气氮素沉降量的估算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等 (777)
植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响	童春富 (786)
黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征	邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等 (796)
云南中南部季风常绿阔叶林恢复生态系统萌生特征	苏建荣, 刘万德, 张志钧, 等 (805)
筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化	肖德荣, 袁华, 田昆, 等 (815)
三峡库区马尾松根系生物量的空间分布	程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等 (823)
兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异	王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等 (833)
内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力	何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞 (844)
不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系	葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等 (852)
不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响	彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等 (863)
不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程	刘目兴, 聂艳, 于婧 (871)
不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间	田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等 (879)
外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响	肖志华, 张义贤, 张喜文, 等 (889)
温度和盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼鳃 Na ⁺ -K ⁺ -ATPase 活力的联合效应	王海贞, 王辉, 强俊, 等 (898)
基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究	王晓学, 李叙勇, 吴秀芹 (907)
边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响	蔡妙珍, 王宁, 王志颖, 等 (915)
川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应	龚固堂, 黎燕琼, 朱志芳, 等 (923)
基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价	翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等 (931)
基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析	王翠平, 王豪伟, 李春明, 等 (942)
生态旅游资源非使用价值评估——以达赉湖自然保护区为例	王朋薇, 贾竞波 (955)
专论与综述	
基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建	袁菲, 张星耀, 梁军 (964)
硅对植物抗虫性的影响及其机制	韩永强, 魏春光, 侯茂林 (974)
研究简报	
光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例	占峰, 杨冬梅 (984)
Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响	陈小文, 祁鑫, 王海永, 等 (993)
汶川大地震灾后不同滑坡体上柏木体内非结构性碳水化合物特性	陈博, 李志华, 何茜, 等 (999)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-02



封面图说: 难得的湿地乔木——池杉池杉为落叶乔木, 高达 25 米, 主干挺直, 树冠尖塔。树干基部膨大, 常有屈膝状吐吸根, 池杉为速生树, 强阳性, 耐寒性较强, 耐干旱, 更极耐水淹, 多植于湖泊周围及河流两岸, 是能在在水里生长的极少数的大乔木之一, 故有湿地乔木之称。池杉原产美国弗吉尼亚沼泽地, 中国于本世纪初引种到江苏等地, 之后大量引种南方各省, 尤其是长江南北水网地区作为重要造树和园林树种而大量栽种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201103300412

刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程. 生态学报, 2012, 32(3): 871-878.

Liu M X, Nie Y, Yu J. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 871-878.

不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程

刘目兴^{1,*}, 聂艳¹, 于婧²

(1. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079; 2. 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062)

摘要: 土壤入渗是降雨渗入土体形成土壤水的基本水文过程, 土壤渗透能力影响着地表径流和土壤侵蚀强度。土壤初始含水量决定了入渗初期的土水势, 是影响土壤入渗过程的重要因素。利用环刀法, 观测了三峡库区林地和草地的土壤入渗过程, 对比分析了不同初始含水率下土壤入渗率和常用入渗模型的适宜性。结果表明, 随土壤初始含水率的增大, 林地和草地下土壤初始入渗率减小, 入渗趋于稳定所需时间缩短, 累积入渗量和稳定入渗率增大。土壤含水率为 12% 的林地初始入渗率为 8.95 mm/min, 是含水率 40% 林地初始入渗率的 4 倍, 但 1h 累积入渗量仅是含水率 40% 林地的 2/3。有机质含量丰富的草地土壤入渗过程对初始含水率的敏感性较弱, 干湿草地相比较入渗参数的差异不如林地明显。随时间的延长, 土壤入渗率逐渐降低, 入渗曲线渐趋平缓, 最小二乘法拟合结果显示 Horton 模型对林地和草地下土壤入渗过程的拟合效果较好, 且模型参数具有物理意义, 是分析和预测三峡库区林草覆盖下土壤入渗过程的适宜模型。

关键词: 土壤入渗; 土壤含水量; 累积入渗量; 入渗模型; 三峡库区

The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents

LIU Muxing^{1,*}, NIE Yan¹, YU Jing²

1 College of City and Environmental Science, Central China Normal University, Wuhan, 430079, China

2 College of Resource and Environmental Science, Hubei University, Wuhan, 430062, China

Abstract: Soil infiltration is the basic hydrological process for water penetrating into the soil, and the amount of water infiltrating the soil surface directly affects the quantity of surface runoff and soil erosion, even the recharge of both soil and underground water. The initial soil water content is an important factor to soil infiltration, and its role in runoff controlling and soil erosion prevention has been taken into account by many researches. In this study, the double-ring infiltration method was used to quantitatively measure the infiltrability of surface soil (0—5 cm depth) covered with forestland and grassland, which were under two antecedent soil water contents of 12% and 40%, respectively. In addition, the changes of soil infiltration process over time were estimated with different infiltration models.

The results indicated that the initial soil infiltration rate of forestland and grassland tended to decrease with increasing initial soil water content. And an increase in initial soil water content results in an increase in steady infiltration rate and cumulative infiltration rate. Whether forestland or grassland, soil infiltration process with higher initial soil water content reaches the steady infiltration stage earlier than that with lower initial soil water content. For forestland with initial soil gravimetric water content rate of 12%, the initial soil infiltration rate was 8.95 mm/min, which was four times to the initial infiltration rate for forestland soil with gravimetric water content rate of 40%. However, its steady infiltration rate 0.24 mm/min was only one eighth of the forestland with initial soil gravimetric water content rate of 40%, and the cumulative infiltration in an hour was only two thirds of that. This phenomena may attribute to the faster wetting rate of drier soil in

基金项目: 国家自然科学基金项目(41001125, 40801078); 湖北省自然科学基金(2010CDB01205); 武汉市晨光计划(201150431112)

收稿日期: 2011-03-30; **修订日期:** 2011-08-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liumuxing@yahoo.cn

infiltration process, which cause stronger slaking forces of the soil and severe aggregates breakdown, enhance surface sealing or promote the destruction of soil structure, and then significantly decrease the soil infiltrability.

For grassland surface soil with ample organic matter, soil infiltrability and infiltration process suggested lower sensitivity to initial soil water content. Initial infiltration rate, steady infiltration rate, and one hour cumulative infiltration of grassland with 12% soil water content were 2.21 mm/min, 0.62 mm/min, 59.16 mm, respectively. And these parameters of grassland with 41% soil water content were 2.07 mm/min, 1.7 mm/min, 110.27 mm, which suggested less significant difference than that of forestland. Whether covered with forestland or grassland, soil instant infiltration rate decreased rapidly at the beginning of the infiltration process, and then decreased approximately linearly with time until approached to constant, especially under the condition of the initial soil water content to be 12%. The least square method was used to simulate the infiltration rate changes with time, and the results indicated that soil infiltration process of forestland and grassland were all fitted better by Horton and Kostikov infiltration models than by Philip infiltration model. Besides, Horton infiltration model was the best model to describe soil infiltration process, which made it suitable to describe the soil infiltration process of forestland and grassland in the Three Gorges Reservoir area.

Key Words: soil infiltration; soil water content; cumulative infiltration; infiltration model; Three Gorges Reservoir area

土壤入渗是降雨或灌溉水再分配的重要过程,提高表层土壤入渗量是植被涵养水源、调蓄径流,防止土壤侵蚀发生的关键^[1-2]。土壤含水量尤其是初始含水率是影响水分入渗和传导过程,改变土壤入渗速率的重要因子^[3]。研究不同初始含水量下土壤入渗过程有利于揭示降雨产流机制,为防治水土流失提供理论依据。20 世纪 50 年代,国外学者已开始研究降雨入参与土壤初始含水量的关系。Philip 在分析土壤初始含水量对土水势、瞬时入渗率、累积入渗量、土壤水分剖面及湿润峰的影响时,发现入渗初期土壤入渗率随土体含水量的增加而减小,随着时间的延续,含水量对入渗率的影响越来越弱,直至可以忽略^[4]。这一理论与 Bodman 等对入渗过程中土壤湿度和势能特征的研究结论一致^[5]。Hillel 在对初育土地表结皮的研究中,发现随着土壤初始含水率的增加,土壤非饱和阶段的入渗速率迅速降低,趋于稳定入渗速率的时间缩短^[6]。

近年来,国内学者也对降水入参与土壤含水量的关系进行了诸多研究,贾志军等、王全九等、解文艳等、陈洪松等、刘金涛等、曹辰等、刘汗等分别在野外坡地或室内模拟环境下,利用径流-入流-产流法、双环法或环刀法,对地表水入渗参数及入渗过程与土壤初始含水率的关系进行了研究,评价了常用入渗模型的适宜性^[7-13]。在土壤初始含水量对初始入渗率和趋于稳定入渗时间的影响上取得了一致的结果,即随初始含水率的增高,初始入渗率减小,趋于稳定入渗的时间缩短。但是,在初始含水量对稳定入渗率、累积入渗量、饱和及非饱和导水率的影响,以及入渗模型的适宜性评价上,存在不同的研究结果^[13]。解文艳等^[9]认为累积入渗量、稳定入渗率和饱和导水率随土壤初始含水量的增加而降低,但余新晓等^[14]对长江上游亚高山暗针叶林的研究发现,土壤非饱和导水率随初始含水量的增加呈指数关系递增,王全九等^[8]利用环刀法测定入渗时发现,土壤饱和导水能力随初始含水率增加而增大,湿润土壤的饱和导水能力明显大于干燥土壤的饱和导水能力。此外,曹辰等^[12]发现土壤质地也会影响累积入渗量与初始含水量的关系,初始含水率较低时偏砂性的砂黄土累积入渗量比偏黏重的壤土大,但随着初始含水率的增加二者差异逐渐缩小,砂质土壤累积入渗量随初始含水量的增大衰减更快。王全九等^[8]对微咸水入渗的研究发现,初始含水量低时累积入渗量随着初始含水量增加而增加,并归因于土壤胶体所吸附钠离子被盐离子代换后土壤大孔隙的增加。其实,除盐离子的化学代换作用外,入渗过程中土壤孔隙结构的改变还与土壤物理性质有关。入渗过程中土壤颗粒遇水膨胀的现象也会改变土壤孔隙结构,膨胀幅度与土壤初始干湿状况有关,但目前相关研究较少^[15]。环刀法是室内测量土壤入渗率的常用方法,比双环法和径流-入流-产流法更为简便易行,更易控制和观测受水后不同阶段的入渗特征及土壤结构的变化。本研究使用室内环刀法,观测三峡库区林地和草地表土的动态入渗过程,对初始含水率影响土壤入渗性能的机制进行分析和模拟,期望从物理过程上揭示土壤含水量影响降水入渗的机制。

1 材料与方法

研究区位于湖北省宜昌市夷陵区(110°57' E, 30°59' N), 地处鄂西山地向江汉平原的过渡地带, 下游紧邻三峡大坝, 海拔 418—925 m, 具有亚热带季风气候特征, 年平均气温 16.7 °C, 平均降水量 1101.1 mm, 平均蒸发量 950 mm, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温 5403.7 °C, 无霜期 283 d。土壤以酸性结晶岩黄壤为主, 母质为花岗岩风化物, 质地较粗, 易于流失。植被为亚热带山地常绿、落叶针阔混交林带, 乔木有樟树(*Cinnamomum camphora*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、茅栗(*Castanea seguinii*)等。草本植物有艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、禾草、车前草等。

在研究区内选取 3 块樟树林地和 3 块禾草草地, 林地盖度为 40%—68%, 草地盖度为 65%—82%。林地和草地土壤为砂粘壤土和粘壤土, 粘粒($< 0.002\text{ mm}$)含量 20%—30%, 林地砂粒($2\text{—}0.05\text{ mm}$)含量大于 50%, 草地砂粒含量 35%—40%。表层土壤入渗性能对地表径流影响最大, 也最易受降雨特征和土壤含水量的影响。因此, 分别在前 30 d 内无降雨和前 1—2 d 内有间歇性降雨的天气下, 用环刀采集林地和草地表层 0—5 cm 的原状土样品。为降低边际效应的影响, 采样前在环刀内侧涂石蜡, 防止入渗过程中边缘漏水。实验在华中师范大学水土环境分析实验室进行, 用烘干法测定土样的重量含水率, 用环刀法测量土壤入渗率。环刀法测量土壤入渗是在装有原状土的环刀上方对接一个空环刀, 从外侧用玻璃胶密封两个环刀间的缝隙(石蜡密封效果不理想), 利用铁架台固定粘结后的双环刀, 保持环刀口水平, 在土体下方放置漏斗和烧杯, 收集穿透土体的水分, 试验用环刀高 5 cm, 体积为 100 cm^3 (图 1)。



图 1 环刀法测量土壤入渗

Fig. 1 Soil infiltration measurement with double-ring method

试验装置固定后, 向空环刀内加水至与环刀口水平, 待漏斗下方滴下第一滴水开始计时, 根据水分流出的快慢, 每隔 2、3、5 min 更换漏斗下的烧杯, 并分别测量渗水量。试验过程中, 加水保持水层厚度在 5 cm 处, 用温度计测定入渗水温度, 将测得的渗透速率 K_{θ} 值, 换算为 10°C 时的渗透速率 K_{10} 值^[16]。

$$K_{10} = \frac{K_{\theta}}{0.7 + 0.03 \times \theta} \quad (1)$$

式中, θ 为渗透测定时的水温($^{\circ}\text{C}$), K_{θ} 是水温为 θ 时的渗透速率(mm/min)。

试验对持续干旱、间歇性降雨后的林地、草地等 4 种处理下的原状土进行了入渗观测, 每个处理下重复 3 次, 共进行了 12 次入渗过程测量。利用 SPSS13.0 统计软件进行方差分析和土壤入渗过程模拟。

2 实验结果与分析

2.1 初始含水量对土壤初始入渗率的影响

初始入渗率是降雨或灌溉初期土壤水分的瞬时入渗率。除包气带蓄满产流外, 地表径流的发生还存在超渗产流的可能^[17]。经植被截流后, 降水强度超出表层土壤入渗能力也会产生地表径流, 超渗产流的发生与表层土壤初始入渗率密切相关。本研究采集林地和草地表层 0—5 cm 的土壤进行入渗观测。土壤初始含水率为 11.5% 时, 林地的初始入渗率达到 $8.95\text{ mm}/\text{min}$, 约为含水率 40% 林地初始入渗率的 4 倍(表 1)。而含水率为 12% 和 41% 时, 草地的初始入渗率分别为 $2.21\text{ mm}/\text{min}$ 和 $2.07\text{ mm}/\text{min}$, 两者相差不大(表 1)。林地

和草地土壤初始入渗率均随初始含水率的增大而降低,这与贾志军等^[7]对土壤入渗初损值的研究结果一致。草地和林地土壤入渗对初始含水率大小的响应不同,干湿林地的初始入渗率存在较大差异,而草地的初始入渗率对含水率的敏感性较弱。

表 1 不同初始含水率的林地和草地土壤入渗参数

Table 1 Soil infiltration parameters of forestland and grassland with different soil water contents

土地类型 Land types 土壤含水率 Soil water content	林地 Forestland		草地 Grassland	
	11.5%	40%	12%	41%
初始入渗率 Initial infiltration rate/ (mm/min)	8.95	2.66	2.21	2.07
稳定入渗率 Steady infiltration rate/ (mm/min)	0.24	1.82	0.62	1.7
1h 累积入渗量 One hour cumulative infiltration /mm	82.55	126.12	59.16	110.27
瞬时入渗率标准差 Standard deviation of instant infiltration rate/mm	2.14	0.32	0.48	0.10

降雨初期土壤水处于非饱和状态,入渗率受土水势和土壤大孔隙流的控制。初始含水率越小,土水势越低,对水分子的吸力更大,土壤水分下渗更快,这是干燥土壤的初始入渗率均高于湿润土壤的初始入渗率的原因^[4-5]。由于土壤颗粒的收缩,土壤结构发生变化,干燥土壤团聚体间出现裂隙或裂缝,降雨后表层土壤快速漏水,土壤初始入渗率远高于稳定入渗率。土壤越干燥,入渗初期土水势越低,团聚体间裂隙越多,初始入渗率越高。随着水分的渗入,土壤含水率增大,土水势升高,团聚体膨胀后裂隙减少,入渗率降低,这也是间歇降雨试验中,后期降雨入渗率远低于初次降雨入渗率的主要原因^[11]。此外,观测过程中发现,在地表腐殖质含量较低的林地,表层土壤结构的大孔裂隙导水效应更为明显,而须根系发达、腐殖质丰富的草地土壤内裂隙较少,导水效应较弱。大孔裂隙导水效应的不同,导致草地与林地下初始入渗率对土壤含水量的响应存在较大差异。

2.2 不同初始含水量下土壤入渗过程

环刀法测量土壤入渗时,瞬时入渗率在 60 min 后趋于稳定^[16]。林地和草地下土壤入渗曲线均随入渗时间的延长渐趋平缓,初始入渗率最大,随着时间的推移,逐渐减小,最终达到稳定入渗(图 2)。土壤入渗过程可以划分为 3 个阶段,即渗透初期分子力作用下的入渗率瞬变阶段,毛管力和重力作用下的渗漏阶段,及重力作用下的稳定入渗阶段^[18]。初始含水量的高低对土壤入渗曲线影响明显:初始含水量较低时林草地土壤入渗率随时间降低迅速,曲线坡度大,瞬变、渗漏和稳定入渗 3 个阶段区别清晰,林地和草地分别在 70—80 min 和 57—60 min 进入稳定入渗阶段;初始含水率较高的湿润土壤入渗率随时间降低幅度较小,入渗阶段的变化不明显,趋于稳定的时间缩短,林地和草地在 32—34 min 和 38—42 min 进入稳定入渗阶段(图 2)。在相近初始含水率下,林地和草地土壤入渗过程曲线差异较小,林地入渗曲线的坡度比草地入渗曲线稍陡。可见,相同植被覆盖下不同初始含水率的土壤入渗过程差异明显,而初始含水率相近时不同植被覆盖下土壤入渗曲线近似,植被类型对入渗过程的影响弱于初始含水率。

初始含水率不仅改变了土壤趋于稳定入渗的时间,而且对稳定入渗率影响明显。由表 1,土壤初始含水率为 12% 时,林地和草地的稳定入渗率为 0.24 mm/min 和 0.62 mm/min,而初始含水率为 40% 时,林地和草地的稳定入渗率为 1.82 mm/min 和 1.7 mm/min。可见,初始含水率 12% 与 40% 相比,土壤稳定入渗率相差一个数量级。这与 Hillel^[6] 和陈洪松等^[10] 的研究结论不同,原因在于含水率较低的土壤遇水快速湿润过程中,土壤团聚体迅速膨胀崩解,加之原状土表面细颗粒的堵塞,土壤孔隙度和孔隙连通性变差,透水的物理孔隙减少,稳定入渗率明显减小^[15]。

此外,林地与草地间土壤稳定入渗率也存在差异。初始含水率较低时,草地的稳定入渗率比林地的稳定入渗率更高;初始含水率较高时,林地与草地的稳定入渗率相差不大。

2.3 土壤累积入渗量和入渗率标准差

累积入渗量是降水或灌溉过程中土壤入渗总量,即地表水转化为土壤水的总量,其随入渗时间增加逐渐

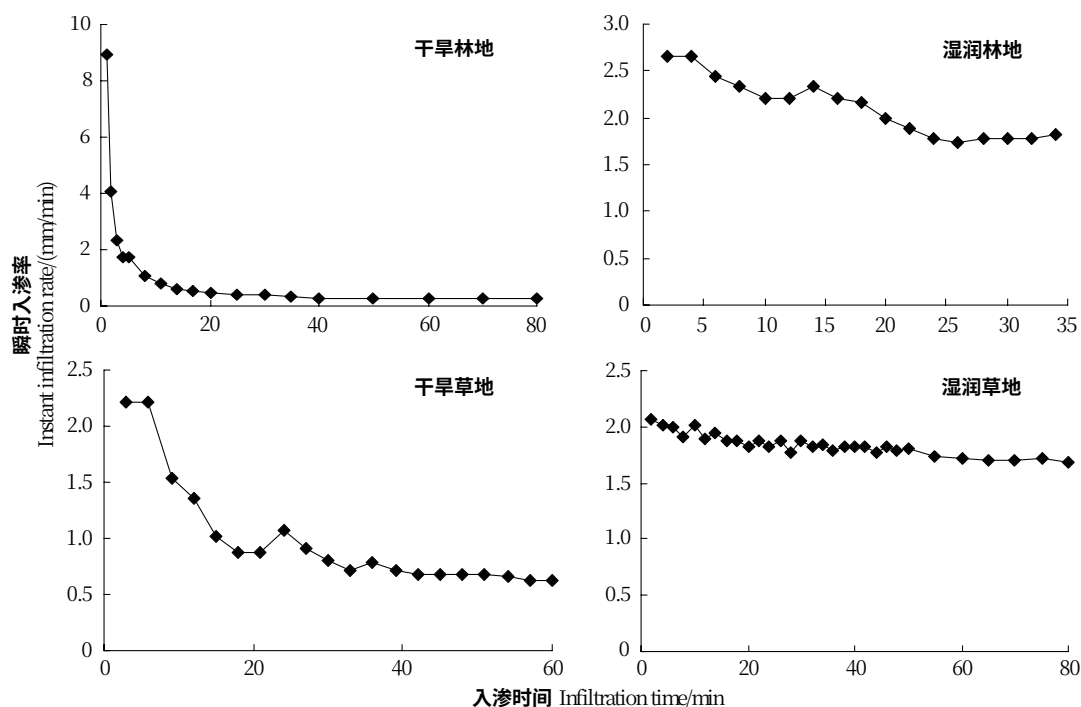


图2 不同初始含水率下林地和草地土壤入渗过程

Fig.2 Soil infiltration process of forestland and grassland with different soil water contents

受控于稳定入渗率,受初始入渗率的影响减弱^[19]。本研究用1 h 累积入渗量分析林地和草地的入渗总量,评价不同初始含水率下土壤入渗性能和地表产流的快慢。由表1,初始含水率为12%时,林地和草地1 h 累积入渗量为82.55 mm 和59.16 mm,初始含水率为40%时为126.12 mm 和110.27 mm。可见,虽然干燥土壤的初始入渗率高于湿润土壤,但1 h 累积入渗量均低于湿润土壤。与稳定入渗率相同,土壤累积入渗量也与土壤含水率成正相关关系。林地和草地下湿润土壤的1 h 累积入渗量分别是干燥土壤的1.5 倍和1.9 倍。该结果与曹辰等对砂黄土和壤土的研究结果不同,这与实验中对入渗量的测定方法和土壤干密度有关^[12,20]。环刀法是通过收集土样渗透出水量计算土壤入渗率,而曹辰等使用注入水量计算入渗率,除渗透出水量外,后者还包括土壤达到饱和持水量前需吸收的水量。干燥土壤与湿润土壤相比较,入渗过程中被土体吸收并保持的水量更多,故使用注入水量测定入渗性能时干燥土壤的累积入渗量更大。

土壤初始含水量改变了入渗曲线的坡度,缩短或延长了土壤达到饱和入渗阶段的时间,同时改变了瞬时入渗率的波动幅度,这在入渗初期尤为明显。标准差分析显示,林地和草地土壤入渗过程在低初始含水率时波动更强,瞬时入渗率标准差分别是高初始含水率土壤的6.7 倍和4.8 倍。

2.4 土壤入渗过程模拟

国内外学者在土壤入渗研究中建立了许多入渗模型,模拟土壤入渗率随时间的变化过程。根据模型中参数是否具有明确物理意义分为两类,一类是经验模型如 Kostiakov 模型,另一类是物理模型包括 Horton 方程和 Philip 入渗模型等^[21]。本研究选择上述3 种模型,用最小二乘法对实验数据进行拟合,探讨其模拟林地、草地土壤入渗过程的适宜性和准确度,结果表2。

Kostiakov 模型:

$$I(t) = at^{-n} \quad (2)$$

式中, $I(t)$ 为入渗率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); a 和 n 为模型的参数。

Horton 模型:

$$I(t) = I_f + (I_i - I_f)e^{-at} \quad (3)$$

式中, $I(t)$ 为入渗率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); I_i 为初始入渗率 (mm/min); I_f 为稳定入渗率 (mm/min); c 为模型的参数。

Philip 模型:

$$I(t) = A + bt^{-0.5} \quad (4)$$

式中, $I(t)$ 为入渗率 (mm/min); t 为入渗时间 (min); A 为稳定入渗率 (mm/min); b 为模型的参数。

表 2 林地和草地土壤入渗模拟方程

Table 2 Simulation equations of soil infiltration process covered with forestland and grassland

土地类型 Land types	初始含水率/% Initial soil water content	Kostiakov 方程 Kostiakov model		Horton 方程 Horton model		Philip 方程 Philip model	
		$I(t) = at^{-n}$	R^2	$I(t) = I_f + (I_i - I_f)e^{-ct}$	R^2	$I(t) = A + bt^{-0.5}$	R^2
林地	11.5	$I(t) = 6.27t^{-0.813}$	0.98	$I(t) = 0.24 + 9.587e^{-0.448t}$	0.98	$I(t) = 3.958t^{-0.5} + 0.24$	0.92
Forestland	40	$I(t) = 3.295t^{-0.172}$	0.85	$I(t) = 1.82 + 1.128e^{-0.095t}$	0.87	$I(t) = 1.165t^{-0.5} + 1.82$	0.61
草地	12	$I(t) = 4.095t^{-0.469}$	0.94	$I(t) = 0.62 + 2.237e^{-0.091t}$	0.95	$I(t) = 2.159t^{-0.5} + 0.62$	0.66
Grassland	41	$I(t) = 2.194t^{-0.055}$	0.87	$I(t) = 1.69 + 0.364e^{-0.033t}$	0.87	$I(t) = 0.67t^{-0.5} + 1.69$	0.76

由表 2, 使用 Kostiakov 经验方程对土壤入渗过程拟合结果显示, 参数 a 值在 2.194—6.27 之间, a 值越大入渗曲线的斜率越大, 瞬时入渗率衰减越快。林地和草地土壤初始含水率较低时 Kostiakov 方程的 a 值明显大于初始含水率较高的土壤。相同初始含水率下林地入渗率衰减速度快于草地, 这与图 2 中入渗曲线的变化趋势一致, 而参数 n 没有实际物理意义。将实测的稳定入渗率代入 Horton 模型, 拟合求得初始入渗率 I_i , 干燥、湿润林地和干燥、湿润草地的初始入渗率分别为 9.83、2.95、2.86、2.05 mm/min, 与表 1 中观测结果基本一致, 能够反映土壤含水量对初始入渗率的影响, 以及林地与草地间土壤入渗的差异。Philip 入渗模型中 A 为土壤稳定入渗率, 将 A 带入方程拟合求得参数 b , b 在一定程度上反映了初始入渗率的大小。由表 2 中 Philip 拟合方程推算, 除干燥林地外, 其余 3 种土壤的初始入渗率与实际观测值相差 0.29—0.57 mm/min。

不同模型对入渗过程的拟合效果可以用回归方程的决定系数 R^2 表示, R^2 越大, 拟合效果越好。由表 2 中拟合结果可以看出, Horton 方程和 Kostiakov 方程对林地和草地下土壤入渗过程拟合效果较好, 回归方程的决定系数 R^2 均高于 0.85。除干燥林地外, Philip 方程对其余 3 种土地类型的土壤入渗过程拟合效果较差, 决定系数低于 0.76。对所研究的 4 种地表的土壤入渗过程, Horton 模型拟合的决定系数均最高, 且模型参数具有物理意义, 是描述研究时段入渗的较好模型。虽然 Kostiakov 模型对 4 种地表土壤的入渗拟合效果也较好, 但是有 $t \rightarrow 0$ 时 $I(t) \rightarrow \infty$, $t \rightarrow \infty$ 时 $I(t) \rightarrow 0$, 不符合实际情况。而 Philip 模型虽具有物理基础, 但适宜性较差。由分析可见, Horton 模型对三峡库区粘质土壤入渗过程的模拟效果最好, 这与赵景波等对洛川黄土、魏恒等对塔里木河上游典型地表, 朱冰冰等对长江中上游典型土壤、武敏等对北京市大兴区砂质壤土, 雷廷武等对黄土高原黏黄土的入渗模型适应性研究结果一致^[13,19,22-24]。此外, 初始含水率也会影响入渗模型拟合土壤入渗过程的效果。Horton 模型和 Kostiakov 模型在拟合初始含水率为 12% 的林地和草地土壤入渗时, 回归方程的决定系数 R^2 在 0.94—0.98 之间, 而对初始含水率 40% 的土壤拟合方程的决定系数 R^2 在 0.85—0.87 之间。

3 结果与讨论

通过环刀法, 对三峡库区林地和草地的土壤入渗过程进行了观测, 分析了初始含水量对土壤入渗性能的影响, 评价了常用入渗模型的适宜性。

(1) 随土壤含水率的增大, 林地和草地土壤的初始入渗率减小, 入渗过程趋于稳定的时间缩短, 这与前人的研究结果一致^[7-12]。Liu 等^[25] 将其归因于土壤含水率越高, 入渗过程中湿润峰前缘的水力学梯度越小, 入渗速率越低。在质地更粗、土体裂隙较大的林地土壤表层, 土壤含水量对初始入渗率的影响较大, 而有机质含量丰富的草地土壤入渗率对含水率的敏感性较弱, 干湿草地土壤趋于稳定入渗的时间相差不大。曹辰等^[12] 也发现土壤质地对入渗率有相同的影响, 初始含水率较低时砂土入渗率比壤土大, 但随含水率的增大二者差异逐渐减小, 砂质土壤的初始入渗率比黏重的壤土对初始含水率的变化更为敏感。

(2) 林地和草地下土壤入渗曲线均随时间的延长渐趋平缓,土壤入渗过程可以划分为入渗率瞬变阶段、渗漏阶段和稳定入渗阶段 3 个阶段。累积入渗量和平均入渗率随入渗时间的延长逐渐与稳定入渗率呈正相关关系,这与 Liu 等^[25]利用径流-入流-产流法研究入渗过程时累积入渗量的变化趋势一致。实验中林地和草地在 60 min 以后进入稳定入渗阶段,累积入渗量、稳定入渗率均随土壤初始含水率的增大而增大,这与王全九等^[8]和余新晓等^[14]的研究结果一致,与解文艳等^[9]的研究结果不同。Liu 等^[25]认为土壤入渗速率不仅受湿润峰前缘的水力学梯度的控制,而且与入渗过程中土壤结构的变化有关。土壤团聚体遇水湿润时会膨胀崩解,土壤孔隙度降低,形成不透水的结皮,土壤入渗率降低。Lado 等^[26]的研究也发现土壤团聚体的快速湿润会产生致使团聚体破碎的崩解力,而崩解力的大小决定于土壤初始含水率,土壤越干燥,团聚体崩解对透水孔隙结构的堵塞和挤压越强,渗透能力降低幅度越大^[15]。可见,土壤初始含水率的降低,一方面增大了湿润峰前缘的水力梯度,利于水分下渗,另一方面加剧了土壤团聚体遇水后的崩解挤压作用,堵塞孔隙抑制土壤下渗。实验过程中两方面作用的差异,致使不同学者对累积入渗量与初始含水率关系的研究结果不同。

(3) 土壤入渗过程曲线的拟合结果显示,物理模型 Horton 方程和经验模型 Kostiakov 方程对林地和草地下土壤入渗过程拟合效果较好。虽然 Philip 模型的参数也具有物理意义,但是对入渗过程的拟合效果较差,这与许多学者对土壤入渗过程模拟的结果一致。其中,Horton 模型拟合的决定系数最高,且模型参数具有物理意义,适宜描述三峡库区林地和草地的土壤入渗过程。

综上所述,土壤入渗是一个受土壤结构、土壤质地、降水强度及地表植被等多因素影响的物理过程。土壤含水量不仅控制水分下渗过程中湿润峰前缘的水力梯度,而且影响土壤团聚体遇水崩解的强度,改变土壤孔隙结构。因此,研究中需要基于相同的供水条件和实验方法比较实验结果,同时加强各入渗观测方法的对比实验,揭示土壤入渗的物理机制,提出促进土壤入渗、降低地表产流的有效措施。

References:

- [1] Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, Zhao Z J, Wu Y, Chen L. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [2] Lei T W, Liu H, Pan Y H, Zhao J, Zhao S W, Yang Y H. Measurement methods and models of rainfall runoff-inflow of sloping soil infiltration properties. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 35(12): 1180-1186.
- [3] Yuan J P, Jiang D S, Gan S. Factors affecting rainfall-runoff duration on sloping land. *Journal of Mountain Research*, 1999, 17(3): 259-264.
- [4] Philip J R. The theory of infiltration: 5. the influence of the initial moisture content. *Soil Science*, 1957, 84(4): 329-339.
- [5] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1944, 8(2): 166-182.
- [6] Hillel D. Crust formation in Lassies soils. *International Soil Science*, 1960, 29(5): 330-337.
- [7] Jia Z J, Wang G P, Li J Y, Wang X P. Study on the effect of soil moisture on runoff and infiltration into cropland on slopes. *Soil and Water Conservation in China*, 1987, (9): 25-27.
- [8] Wang Q J, Ye H Y, Shi X N, Su Y. Influence of initial water content on slight saline water infiltration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 51-53.
- [9] Xie W Y, Fan G S. Influence of moisture content on infiltration characteristics in field soils. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2004, 35(3): 272-275.
- [10] Chen H S, Shao M A, Wang K L. Effects of initial water content on hillslope rainfall infiltration and soil water redistribution. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(1): 44-47.
- [11] Liu J T, Li X P, Chen X, Ma C. Distribution characteristics of initial soil water content in profile during hiatus rainfall-infiltration events and its effects on infiltration. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(5): 96-100.
- [12] Zeng C, Wang Q J, Fan J. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 24-30.
- [13] Liu H, Lei T W, Zhao J. Effects of initial soil water content and rainfall intensity on Loess infiltration capacity. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(2): 1-6.
- [14] Yu X X, Zhao Y T, Zhang Z Q, Cheng G W. Characteristics of soil water infiltration in sub-alpine dark coniferous ecosystem of upper reaches of

- Yangtze River. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1):15-19.
- [15] Fan Y T, Lei T W, Cai Q G. Effects of wetting rate and cumulative rainfall on crust formation. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(5): 764-771.
- [16] Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science. Method of Soil Physical Properties. Beijing: Science Press, 1978: 140-148.
- [17] Guan J W. Principles of Soil and Water Conservation. Beijing: Beijing Forestry University Press, 1996.
- [18] Xia J B, Xie W J, Lu Z H, Jia Q, Dong L J. Effects of different irrigation modes with reclaimed water on soil eco-hydrological characteristics of reed land. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4137-4143.
- [19] Wei H, Zhao C Y, Sun D Y. Infiltration properties of the typical land surface soil in the oasis of upper Tarim River. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 837-843.
- [20] Wu Z G, Zhang H. Experimental study of influences of initial water content, dry density and cohesive particles content on soil infiltration rate. Journal of Chian Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(5): 48-51.
- [21] Shao M A, Wang Q J, Huang M B. Soil Physics. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [22] Zhao J B, Zhang Y, Chen B Q, Dong Z B. Law of Water infiltration of lower part of middle Pleistocene loess in Luochuan of Shaanxi. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(6): 965-972.
- [23] Zhu B B, Zhang P C, Ding W F, Ren H Y. Infiltration process in the middle and upper reaches of the Yangtze River. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(4): 43-47.
- [24] Wu M, Feng S Y, Sun C Y, Huo Z L. Field experimental study on soil infiltration process of Daxing district, Beijing. Journal of China Agriculture University, 2009, 14(4): 98-102.
- [25] Liu H, Lei T W, Zhao J, Yuan C P, Fan Y T, Qu L Q. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [26] Lado M, Ben-Hur M, Shainberg I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1992-1999.

参考文献:

- [1] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 赵占军, 吴云, 陈林. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [2] 雷廷武, 刘汗, 潘英华, 赵军, 赵世伟, 杨永辉. 坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, 35(12): 1180-1186.
- [3] 袁建平, 蒋定生, 甘淑. 影响坡地降雨产流历时的因子分析. 山地学报, 1999, 17(3): 259-264.
- [7] 贾志军, 王贵平, 李俊义, 王小平. 土壤含水率对坡耕地产流入渗影响的研究. 中国水土保持, 1987, (9): 25-27.
- [8] 王全九, 叶海燕, 史晓南, 苏莹. 土壤初始含水量对微咸水入渗特征影响. 水土保持学报, 2004, 18(1): 51-53.
- [9] 解文艳, 樊贵盛. 土壤含水量对土壤入渗能力的影响. 太原理工大学学报, 2004, 35(3): 272-275.
- [10] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响. 农业工程学报, 2006, 22(1): 44-47.
- [11] 刘金涛, 李晓鹏, 陈喜, 马灿. 间歇降雨中土壤含水量分布及其对入渗的影响. 水土保持学报, 2009, 23(5): 96-100.
- [12] 曹辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24-30.
- [13] 刘汗, 雷廷武, 赵军. 土壤初始含水率和降雨强度对黏黄土入渗性能的影响. 中国水土保持科学, 2009, 7(2): 1-6.
- [14] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 程根伟. 长江上游亚高山暗针叶林土壤水分入渗特征研究. 应用生态学报, 2003, 14(1): 15-19.
- [15] 范云涛, 雷廷武, 蔡强国. 湿润速度和累积降雨对土壤表面结皮发育的影响. 土壤学报, 2009, 46(5): 764-771.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 140-148.
- [17] 关君蔚. 水土保持原理. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [18] 夏江宝, 谢文军, 陆兆华, 贾琼, 董立杰. 再生水浇灌方式对芦苇地土壤水文生态特性的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4137-4143.
- [19] 魏恒, 赵成义, 孙栋元. 塔里木河上游绿洲典型地表特征土壤水分入渗性能研究. 冰川冻土, 2010, 32(4): 837-843.
- [20] 吴争光, 张华. 土体类型、干密度和初始含水量对土体入渗率影响的试验研究. 三峡大学学报: 自然科学版, 2010, 32(5): 48-51.
- [21] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 赵景波, 张允, 陈宝群, 董治宝. 陕西洛川中更新统下部黄土入渗规律研究. 土壤学报, 2009, 46(6): 965-972.
- [23] 朱冰冰, 张平仓, 丁文峰, 任红玉. 长江中上游地区土壤入渗规律研究. 水土保持通报, 2008, 28(4): 43-47.
- [24] 武敏, 冯绍元, 孙春燕, 霍再林. 北京市大兴区典型土壤水分入渗规律田间试验研究. 中国农业大学学报, 2009, 14(4): 98-102.

CONTENTS

Behavioural time budgets and diurnal rhythms of the female Tibetan gazelles in the Kekexili National Nature Reserve	LIAN Xinming, LI Xiaoxiao, YAN Peishi, et al (663)
The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) and thermocline characteristics in the tropic Indian Ocean	YANG Shenglong, ZHANG Yu, ZHANG Heng, et al (671)
Characteristics of algous facies of planktonic algae in lake honghu and its response to habitat	LU Bilin, YAN Pingchuan, TIAN Xiaohai, et al (680)
Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China	LIU Liang, FAN Hangqing, LI Chungan (690)
Effects of CO ₂ -induced seawater acidification on photosynthesis and calcification in the coralline alga <i>Corallina pilulifera</i>	XU Zhiguang, LI Meizhen, HUO Chuanlin, et al (699)
Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant <i>Cabomba caroliniana</i>	ZOU Weina, YUAN Lin, ZHANG Liquan, et al (706)
Prioritizing biodiversity in conservation planning based on C-Plan: a case study from northeast China	LUAN Xiaofeng, SUN Gongqi, QU Yi, et al (715)
Effects of urbanization on indigenous plant diversity: a case study of Langfang City, China	PENG Yu, LIU Xuehua, XUE Dayuan, et al (723)
Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve	LIU Fang, LI Diqiang, WU Jigui (730)
Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups	LI Haikui, NING Jinkui (740)
Population genetics of <i>Niviventer confucianus</i> and its relationships with habitat area in Thousand Island Lake region	LIU Jun, BAO Yixin, ZHANG Xu, et al (758)
Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia	GU RunYuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al (767)
Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (777)
Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh	TONG Chunfu (786)
The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province	XING Dan, LIU Hongyan, YU Pingping, et al (796)
Sprouting characteristic in restoration ecosystems of monsoon evergreen broad-leaved forest in south-central of Yunnan Province	SU Jianrong, LIU Wande, ZHANG Zhijun, et al (805)
Distribution patterns and changes of aquatic communities in Lashihai Plateau Wetland after impoundment by damming	XIAO Derong, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (815)
Spatial distribution of root biomass of <i>Pinus massoniana</i> plantation in Three Gorges Reservoir area, China	CHENG Ruimei, WANG Ruili, XIAO Wenfa, et al (823)
Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in <i>Larix gmelinii</i> plantations in Northeast China	WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (833)
Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (844)
Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged <i>Pinus massoniana</i> stands	GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (852)
Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure	PENG Sili, SHEN Hong, ZHANG Yuting, et al (863)
The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents	LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing (871)
Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems	TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, CHI Shuyun, et al (879)
Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes	XIAO Zhihua, ZHANG Yixian, ZHANG Xiwen, et al (889)
Combined effect of temperature and salinity on the Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity from the gill of GIFT tilapia juveniles (<i>Oreochromis niloticus</i>)	WANG Haizhen, WANG Hui, QIANG Jun, et al (898)
Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata	WANG Xiaoxue, LI Xuyong, WU Xiuqin (907)
The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls	CAI Miaozen, WANG Ning, WANG Zhiying, et al (915)
The suitable stand structure and hydrological effects of the cypress protection forests in the central Sichuan hilly region	GONG Gutang, LI Yanqiong, ZHU Zhifang, et al (923)
Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method	ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al (931)
Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images	WANG Cuiping, WANG Haowei, LI Chunming, et al (942)
Evaluation of non-use value of ecotourism resources: a case study in Dalai Lake protected area of China	WANG Pengwei, JIA Jingbo (955)
Review and Monograph	
Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance	YUAN Fei, ZHANG Xinyao, LIANG Jun (964)
Role of silicon in regulating plant resistance to insect herbivores	HAN Yongqiang, WEI Chunguang, HOU Maolin (974)
Scientific Note	
Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in <i>Osmanthus fragrans</i> and <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	ZHAN Feng, YANG Dongmei (984)
Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings	CHEN Xiaowen, QI Xin, WANG Haiyong, et al (993)
Studies of non-structural carbohydrates of <i>Cupressus funebris</i> in different landslides after Wenchuan Earthquake	CHEN Bo, LI Zhihua, HE Qian, et al (999)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

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 32 卷 第 3 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 3 2012

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