

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

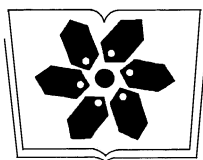
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **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 17 期 2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 翀,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203190374

王艳萍, 王力, 卫三平. Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用. 生态学报, 2012, 32(17): 5445-5453.

Wang Y P, Wang L, Wei S P. Modeling canopy rainfall interception of a replanted *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5445-5453.

Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨 截留研究中的应用

王艳萍^{1,2}, 王 力^{1,2,*}, 卫三平^{2,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3. 山西省吕梁市水利局, 离石 033001)

摘要: 为了验证 Gash 林冠截留解析模型在黄土高原人工林中的适用性, 基于 2009 年黄土丘陵沟壑区吕梁市王家沟小流域刺槐林样地降雨观测数据, 采用 Gash 模型对林冠截留进行了模拟。所选刺槐林分为人工纯林, 林龄约 30a, 阴坡, 坡度 24°, 密度为 990 株/hm², 平均树高 10.8 m, 平均胸径 12.4 cm, 郁闭度 0.76。根据回归方法确定了 Gash 模型中的主要参数, 包括饱和林冠的平均蒸发速率($\bar{E}$)、林冠枝叶部分的持水能力(S)、自由穿透降雨系数(p)、树干持水能力(S_t)和树干茎流系数(P_t)。结果显示, 2009 年 5 月至 10 月人工刺槐林样地实测降雨量为 366.9 mm, 穿透降雨量为 317.5 mm, 树干茎流为 10.2 mm, 林冠截留量为 39.2 mm。模型模拟的林冠截留量为 42.4 mm, 高于实测值 3.2 mm, 相对误差为 8.2%。敏感性分析表明, S 、 $\bar{E}$ 、 S_t 和 p_t 每增加 10%, 林冠截留量分别增加 4.7%、3.1%、1.7% 和 0.5%; p 增加 10%, 林冠截留量则减少 2.6%。说明树干持水能力(S_t)和树干茎流系数(p_t)两个参数对黄土高原人工刺槐林冠截留量的预测值影响程度较小。模拟值与实测值有较好的一致性, 显示 Gash 模型适用于黄土高原人工刺槐林冠的截留计算。

关键词: Gash 模型; 刺槐林; 林冠截留; 自由穿透降雨系数; 树干持水能力

Modeling canopy rainfall interception of a replanted *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau

WANG Yanping^{1,2}, WANG Li^{1,2,*}, WEI Sanping^{2,3}

1 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

3 Bureau of Water Conservancy in Luliang City, Lishi 033001, China

Abstract: Scientific understanding about the effects of afforestation on the water balance in catchment areas has been significantly enhanced by studies on the interception and evaporation of rainfall. In order to reduce severe soil erosion on the Loess Plateau, a policy of reforestation has changed land use from cropland to planted forests. However, this has been found to lead to a reduction in water yield, partly because of an increase in loss through rainfall interception by the forest canopy, which is of critical importance to the water budgets of forests. The Gash analytical model has been widely used throughout the world for estimating rainfall interception by the forest canopy. In order to verify its applicability to the Loess Plateau, we compared the modeling results of the Gash model with those of field data collected from a monoculture *Robinia*

基金项目: 中国科学院“西部之光”人才计划项目(2007YB02); 西北农林科技大学基本科研业务费项目(QN2009084)资助

收稿日期: 2012-03-19; **修订日期:** 2012-06-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangli5208@nwsuaf.edu.cn; wangli5208@163.com

pseudoacacia forest stand in 2009. The studied *Robinia pseudoacacia* were located on the north-facing slope (24°) in the Wangjiagou Watershed, which covers an area of 9.1 km^2 , near the city of Lvliang in the north of Shanxi province, China ($N 37^{\circ}33'$, $E 110^{\circ}09'$). The age of the *Robinia pseudoacacia* forest was 30 years at the time of the study. The mean tree height was 10.8 m, the mean stem diameter at breast height was 12.4 cm, and the planting density was about 990 trees/ hm^2 with the coverage being 0.76. We studied the principal components of rainfall interception loss and estimated forest structure parameters, including the mean evaporation rate ($\bar{E}$), the canopy storage capacity at saturation (S), the free throughfall coefficient (p), the rainfall fraction diverted to the trunks (p_t), and the trunk storage capacity (S_t), by using the intercepts and slopes obtained from regression analyses of the measured interception loss, throughfall, and stemflow versus gross rainfall. The results showed that the total estimated interception loss during the period of observation was 8.2% higher than that calculated on the basis of measurements of the gross rainfall, throughfall, and stemflow. Compared with the previous studies in other ecosystems, the performance of the Gash analytical model in the Loess Plateau region was reasonable. Sensitivity analysis indicated that the canopy interception by the Gash model was affected most by the canopy storage capacity at saturation (S), the mean evaporation rate during rainfall ($\bar{E}$), and the free throughfall coefficient (p), while interception was neither sensitive to trunk storage capacity (S_t) nor to the rainfall fraction diverted to the trunks (p_t) since these two parameters only had a small effect on the total interception. The good agreement between the estimated and measured values indicated that Gash's analytical model is suitable for estimating interception losses in forests on the Loess Plateau of China. This study will contribute new information about the applicability of the original Gash analytical model to a new geographic location. It is predictable that, in the future, the area of planted forests will increase rapidly due to the government policy of converting cropland to forest on the Loess Plateau, and our study will provide forest plantation managers with valuable information for estimating the interception losses and assessing the hydrological impacts of land-use modifications.

Key Words: Gash analytical model; *Robinia pseudoacacia* forest; canopy interception; free throughfall coefficient; trunk storage capacity

林冠截留降雨作为对输入森林生态系统水分的调节起点,是森林水文循环的一个重要环节,影响着地表—大气能量循环过程和水量平衡。林冠截留降雨模型对于理解林分截持降雨的作用和估计林冠的截留量具有重要作用^[1-2],因此根据野外试验实测资料,建立、检验和优化林冠截留模型至今仍然是森林水文学研究的重要内容和热点^[1]。目前,国内外学者根据影响林冠截留的各种因子和林冠截留量的关系建立了许多经验、半经验和理论模型^[2-6]。早期的降雨截留模型如 Horton 模型^[7]因没有考虑降雨强度、林分特征等因素对截留的影响,难以推广到试验地以外的其他林分^[1]。Rutter 等^[8-9]基于 Horton 模型的截留机制,根据水量平衡原理,提出了微气象截留模型,采用 Penman-Monteith 公式计算附加截留量,能够估计截留的不同组分如降雨期间和降雨停止后的截留损失。Rutter 模型的突出特点是用蒸发理论来处理附加截留问题,克服了用经验公式计算附加截留的弊端,但气象要素的测定和计算比较繁琐,给实际应用带来不便^[10]。刘家冈^[11]根据林冠分配降雨规律与光线在林冠中辐射传播的相似性,建立了林冠截留降雨的理论模型,该模型推导合理,是我国比较成功的理论模型^[12];但该模型从机理的角度来描述截留过程,计算复杂。Gash 模型在 Rutter 微气象理论模型基础上保留了经验模型的简单性,是以 Rutter 模型基本的物理推理方法为基础而建立的林冠截留解析模型^[13]。对比经验模型和理论模型,结合理论推导和经验参数的 Gash 解析模型更具实用性。由于模型简单的特点,目前广泛应用到世界各个地区的各种不同气候类型或林分类型的林冠截留研究,如海洋性气候森林^[13-14]、热带或亚热带森林^[15-17]、干旱半干旱地区森林^[18]、地中海气候地区的森林^[19-20]、山地寒带气候和温带大陆性气候森林^[21-22]等。

相对而言,Gash 模型在中国森林林冠截留中的应用还比较少,有学者研究了 Gash 模型在热带季节雨

林^[17]、华北油松人工林^[23]、辽东山区落叶松人工林^[24]的适用性,但目前对黄土高原半干区人工林林冠截留模拟的应用还未见公开报道。因此,本文通过对黄土高原丘陵沟壑区人工刺槐林降雨截留的试验研究,确定人工刺槐林对降雨的再分配特征,推导和计算 Gash 模型应用于人工刺槐林冠时的相关参数值,探讨 Gash 模型在黄土高原半干区人工林中的适用程度,以期对黄土区森林生态水文过程及影响机理研究提供理论依据。

1 研究区概况

试验地位于吕梁市王家沟流域(东经 110°09′、北纬 37°33′),距吕梁市区 4 km,为三川河流域北川河支流左岸的一级支沟。流域面积 9.1 km²,属黄土丘陵沟壑区,海拔最高 1330 m,最低 1000 m。土壤类型主要有栗褐土和红粘土,栗褐土主要分布于梁峁顶、梁峁坡及部分沟坡,面积 663.5 hm²,占流域面积的 72.9%;红粘土主要分布于沟坡下部,面积 246.5 hm²,占流域面积的 27.1%。流域属典型的暖温带大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季酷热多雨,秋季温凉适中,冬季严寒少雪。最高气温 38.9℃,最低气温 -27.2℃,年均 8.9℃, >10℃ 积温为 3298.3℃。年均日照时数 2592 h,无霜期 150—180 d,年平均风速 2.1 m/s,冬春多西北风,夏秋多东南风。据 40 多年实测资料,流域年均降水量 479.2 mm,降水变率大,年际和年内分配不均是本流域降水的主要特点。年内降水集中在 6—9 月份,该期降水量约占年降水量的 72.5%;年最大降水量为 756.3 mm (1964 年),年最小降水量为 230.7 mm (1999 年)。年均蒸发量为 1850 mm,流域内地带性原始植被破坏殆尽,流域生态系统严重退化,零星残存天然次生林覆盖率不足 10%,现有人工林主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*),经济林主要为苹果(*Malus pumila*)、杏(*Prunus armeniaca*)等^[25]。

在王家沟流域北边林峁坡上布设样地 3 块,每块面积均为 20 m×20 m。样地为 1979—1980 年栽植的刺槐纯林,林龄约 30a,阴坡,坡度 24°,密度为 990 株/hm²,林分平均树高 10.8 m,平均胸径 12.4 cm,郁闭度 0.76。林下植被生长良好,灌木有黄刺玫(*Rosa xanthina*)、杠柳(*Periploca sepium*)等,草本以禾本科、野菊花(*Flos chrysanthemi*)和悬钩子(*Rubus corchorifolius*)等为主。试验进行时间为 2009 年 5 月至 10 月。

2 研究方法

2.1 Gash 模型介绍

Gash 模型^[13]描述的是一系列彼此分离的降雨事件,每个降雨事件都包含林冠加湿、林冠饱和、以及降雨停止后林冠干燥的过程,且假定每次降雨事件之间有足够的让林冠完全恢复到降雨前的干燥程度。模型采用分项求和的形式,将林冠在整个降雨过程中各个阶段的截留损失相加得到总的林冠截留量。Gash 模型的基本形式为:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_t)P'_c + (\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_c) + (1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj} \quad (1)$$

式中, I_j 为林冠截留量(mm), n 为林冠达到饱和的降雨次数, m 为林冠未达到饱和的降雨次数, p 为自由穿透降雨系数,即不接触林冠直接降落到林地的降雨比率, p_t 为树干茎流系数, $\bar{E}$ 为饱和林冠的平均蒸发速率(mm/h), $\bar{R}$ 为平均降雨强度(mm/h), P_{Gj} 为单次降雨事件的降雨量(mm), P'_c 为使林冠达到饱和的降雨量(mm), q 为树干达到饱和产生树干茎流的降雨次数, S_t 为树干持水能力(mm)。

使林冠达到饱和所必需的降雨量 P'_c 由下式来确定:

$$P'_c = (-\bar{R}S/\bar{E}) \ln[1 - (\bar{E}/\bar{R})(1-p-p_t)^{-1}] \quad (2)$$

式中, S 为林冠枝叶部分的持水能力(mm)。

饱和林冠的平均蒸发速率 $\bar{E}$ (mm/h) 由 Penman-Monteith 公式来计算和验证:

$$\lambda E = (\Delta R_n + \rho C_p D/r_a)(\Delta + \gamma)^{-1} \quad (3)$$

式中, λ 为水的汽化潜热(20℃时,2.435×10³ J/g), Δ 为饱和水汽压曲线(随气温变化)的斜率(hPa/℃), R_n 为大气净辐射(W/m²), ρ 为空气密度(20℃时,1.184×10³ g/m³), c_p 为空气在常压下的比热(1.010 J·g⁻¹·℃⁻¹), D 为饱和水汽压差(hPa),即气温(T)对应的饱和水汽压(E_T)与同温度对应的实际水汽压(e_T)之差($D=E_T-e_T$), r_a 为空气动力学阻力(s/m), γ 为干湿计常数(0.0664 kPa/℃)。

饱和水汽压和与气温对应的实际水汽压都是温度 T 的函数, RH 为空气相对湿度(%) ,计算公式如下:

$$E_T = 6.11 \times 10^{\frac{7.457T}{T+237.3}} \quad (4)$$

$$e_T = RH \cdot E_T \quad (5)$$

空气动力学阻力计算如下:

$$r_a = \frac{\{\ln[(z-d)/z_0]\}^2}{k^2 U} \quad (6)$$

式中, z 为风速观测高度(m), 本文风速计高度 $z=12.8 \text{ m}(h+2)$, h 为平均树高 10.8 m, d 为零位移高度(m), $d=0.75h$, z_0 为粗糙长度(m), $z_0=0.10h$, k 为 vonKannan 常数($k=0.4$), U 为 z 高度的风速(m/s)。

2.2 野外观测

2.2.1 气象要素

在样地内架设高度为 14 m 的简易移动塔, 安装相关仪器, 测定本研究所需的气象要素。净辐射用辐射计(KIPP&ZONEN, CNR-1)测定, 风速用风速计(R. M., Young Wind Sentry, 03101, Michigan, USA)测定, 空气温湿度用安装在辐射计上的传感器(Vaisala, HMP60, Helsinki, Finland)测定, 林外降雨量由林外荒草地上安装的 1 台美国 Davis 仪器设备公司生产的便携式小气候站(vantage pro weather station)测定, 并用标准雨量筒进行校正。

2.2.2 林内穿透降雨

由于林冠疏密程度不均, 样点选择具有一定难度。为使观测更具代表性, 通过增大集水面积来弥补林冠的不均匀性。具体操作时在每块标准地刺槐林下随机均匀地各安置 10 个简易雨量桶, 用于收集林内降水, 每日称其总量, 换算为水深。简易雨量桶用铁皮制作, 内径 20 cm、高 30 cm。

2.2.3 树干茎流

在每块样地中以径阶各选择 10 株刺槐(中间径阶选 2 株, 其他径阶选 1 株)。将聚乙烯或胶皮管从直径处剖开, 在树干上(树皮被修整光滑)螺旋形围绕 2—3 圈, 用万能胶和玻璃泥密封, 下部接入塑料桶(20 L)收集干流。根据测定结果, 将单株样树的茎流体积换算为林分样地面积上的茎流深(即计算样地的总茎流体积后除以样地面积得到茎流深度)。

2.3 公式(1)中参数的确定

饱和林冠的平均蒸发速率 $\bar{E}$ (mm/h) 由降雨量(P_G)和截留量(I_f)之间的回归关系确定。Gash 认为, 降雨量和截留量回归关系的斜率等于 $\bar{E}/\bar{R}$, 模型假定降雨期间 $\bar{E}/\bar{R}$ 保持稳定, 因此平均降雨强度($\bar{R}/\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)乘以斜率就可确定 $\bar{E}$ 。

林冠枝叶部分的持水能力(S)由 Leyton 等^[26]所用的方法确定, 根据穿透雨量与降雨量关系方程, 在 x 轴的截距即为林冠枝叶部分持水能力(S)。Zinke^[27]认为, 该方法可能会高估 S 值。

自由穿透降雨系数(p)由小于 1 mm 的降雨量确定。统计小 1 mm 的降雨量次数, 回归穿透雨量与降雨量关系方程, 其斜率即为自由穿透降雨系数^[13,18]。

树干持水能力(S_t)和树干茎流系数(P_t)根据树干茎流量与林外降雨量的关系方程确定。 S_t 为树干茎流量与降雨量关系回归方程在 y 轴的截距, P_t 为斜率^[19]。

3 结果与分析

3.1 林外降雨、林内穿透降雨和树干茎流特征

试验于 2009 年 5 月上旬开始至 10 月中旬结束, 试验期间共发生 43 次降雨, 林外降雨总量为 366.9 mm, 平均场降雨量为 8.5 mm。其中 7—9 月的降雨量为 219.4 mm, 占总降雨量约 59.8%, 符合黄土高原地区降雨集中的特征。单场降雨的雨量最小为 0.2 mm, 最大为 71.3 mm, 变异系数达 157.6%。最小雨强为 0.11 mm/h, 最大雨强为 8.12 mm/h, 平均雨强为 2.72 mm/h; 雨强小于 1 mm/h 的频度达到了 57.2%, 雨强小于 2 mm/h 的频度达到了 75.6%, 雨强大于 4 mm/h 的频度为 16.9%。

试验期间的林内穿透降雨量为 317.5 mm, 占总降雨量的 86.5%, 单场降雨的穿透降雨率变化范围为 10.0%—95.5%, 平均为 71.9%。降雨量小时穿透雨量亦小, 最小的场降雨量为 0.2 mm, 穿透雨量仅占降雨量的 10% 左右; 随着降雨量增大, 林内穿透降雨也增加, 本研究最大的场降雨量为 71.3 mm, 其穿透雨量 66.4 mm, 穿透雨率为 93.1%。穿透雨量与林外降雨量的回归关系为 $y = 0.88x - 0.67$ ($R^2 = 0.99$, $n = 43$; y 为林外降雨量, x 为穿透雨量)。

试验期间共有 19 场降雨观测到树干茎流, 总树干茎流量为 10.2 mm, 占总降雨量的 2.9%, 平均树干茎流量为 0.54 mm。每次降水开始至林冠蓄水饱和之前, 一般不产生树干茎流, 但在连续降雨过程中, 刺槐林冠达到饱和所要求的降水量相对较少, 在降雨量 $P_c > 3.5$ mm 时便会产生树干茎流。其中, 降雨量 $P_c < 10$ mm 时的平均树干茎流量仅为 0.10 mm; $10 \text{ mm} < P_c < 20$ mm 时, 平均茎流量为 0.42 mm; $P_c > 20$ mm 时, 平均茎流量为 1.71 mm。树干茎流量与林外降雨量存在如下线性关系: $y = 0.048x - 0.21$ ($R^2 = 0.95$, $n = 19$; y 为林外降雨量, x 为树干茎流量)

3.2 饱和林冠的平均蒸发速率($\bar{E}$)

图 1 显示了 43 场降雨量和截留量之间的回归关系, 其斜率为 0.037。43 场降雨的实际平均降雨强度为 2.72 mm/h, Gash 模型假定降雨期间饱和林冠的平均蒸发速率和平均降雨强度的比值 ($\bar{E}/\bar{R}$) 保持稳定, 并等于降雨量和截留量回归方程的斜率。因此, 可以估算出饱和林冠的平均蒸发速率为 0.10 mm/(0.037×2.72)。用 Penman-Monteith 公式计算得饱和林冠的平均蒸发速率为 0.09 mm/, 降雨期间所测得平均净辐射为 65.1 W/m², 相对应的蒸发速率介于 0.09—0.10 mm/之间, 说明用降雨量和截留量回归关系估算的 $\bar{E}$ 值和实测值有较好的一致性, 表示二者之间的误差是可接受的。Návar 等^[18]认为用图 1 的方法通常会高估饱和林冠的平均蒸发速率, 主要原因是: (1) 在降雨过程中, 雨滴降到林冠枝叶表面后会有少部分溅落损失; (2) 在干旱条件下, 林冠枝叶可能吸收部分降雨来补偿内部的水分亏缺, 而图 1 所用的方法估算饱和林冠的平均蒸发速率时没有考虑这些降雨的损失。

3.3 林冠枝叶部分的持水能力(S)

图 2 显示了 43 场降雨量和穿透降雨量之间的回归关系, 表明林冠枝叶部分的持水能力 S 值为 0.67 mm。这一数值与角树人工林冠(0.64 mm)^[27]和松树人工林冠的 S 值(0.75 mm)^[14]相接近, 但显著高于亚热带人工雨林林冠的 S 值(0.35—0.51 mm)^[17]和低于腰果树林冠的 S 值(0.80 mm)^[28]。 S 值主要由林冠结构、树种组成、枝叶表面积指数以及叶、枝、树干的表面持水能力决定, 因此难以通过上述比较确定用图 2 方法估算的 S 值是否可靠。为了验证 S 值, 用文献^[17]所表示的方法测定了人工刺槐林冠的枝叶部分的持水能力, 实测值介于 0.51—0.69 mm 之间, 平均为 0.59 mm(± 0.06 , 样本数为 30)。图 2 方法估算的 S 值高于实测值, 这与 Zinke^[27]的报导研究一致, 主要是由于刺槐林冠下的灌木层也截持了部分降雨, 而实测值忽略了灌木层的影响。

3.4 自由穿透降雨系数(p)

自由穿透降雨系数(p)由小于 1 mm 的降雨量和其穿透雨量间的回归关系确定, 图 3 显示了二者的回归方程为 $y = 0.55x - 0.06$ ($R^2 = 0.66$, y 为降雨量, x 为穿透雨量), 表明自由穿透降雨系数等于 0.55。当没有

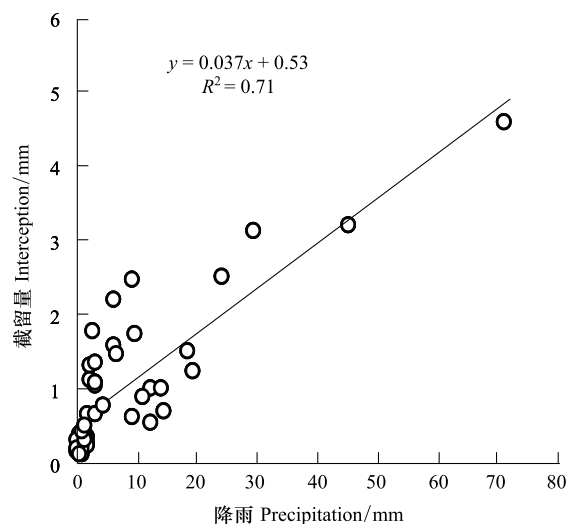


图 1 降雨量与截留量的回归关系(43 场降雨)

Fig. 1 The relationship between measured interception loss and gross rainfall. In total 43 rainfall events were observed

小于 1 mm 降雨的情况发生时,自由穿透系数可通过最小降雨量与其穿透降雨量之反比来确定^[19]。本研究 中,除小于 1mm 的降雨之外,最小的一次降雨量及其穿 透雨量分别为 1.38 和 0.68 mm,由此估算的 p 值为 0.49(0.68/1.38)。由于仅考虑了一场降雨,所以该方 法估算的 p 值要低于图 3 方法确定的 p 值。

3.5 树干持水能力(S_t)和树干茎流系数(P_t)

图 4 显示了降雨量与树干茎流量间的回归关系为 $y=0.048x-0.21$ ($R^2=0.95$, y 为降雨量, x 为干流量), 表明树干持水能力 S_t 为 0.21 mm,树干茎流系数 p_t 为 0.048。Rutter 等^[8-9]研究认为树干茎流量占总降雨量 的比例相对较低,不会显著的影响林冠水量平衡,对截 留模型也产生相对较小的影响。本研究中,树干茎流量 仅占总降雨量的 2.8%。

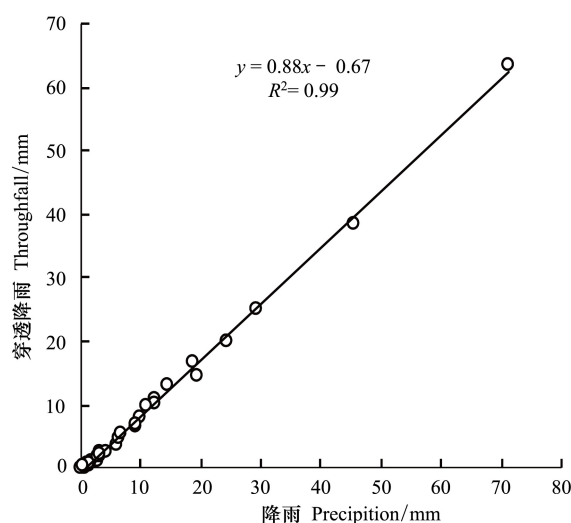


图 2 降雨量和穿透降雨量的回归关系(43 场降雨)

Fig. 2 The relationship between measured throughfall and gross rainfall (Method for estimating canopy saturation). In total 43 rainfall events were observed

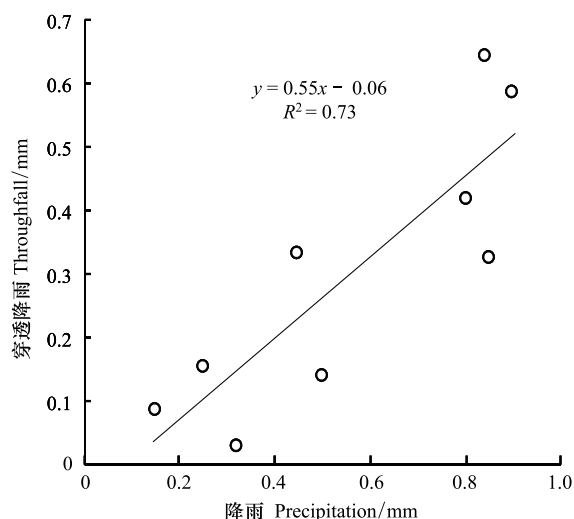


图 3 小于 1 mm 的降雨量和穿透降雨量间的回归关系(43 场降 雨中 9 场降雨小于 1 mm)

Fig. 3 The relationship between net rainfall and gross rainfall for rainfalls smaller than 1 mm. In total 43 rainfall events were observed and 9 rainfall events were smaller than 1 mm

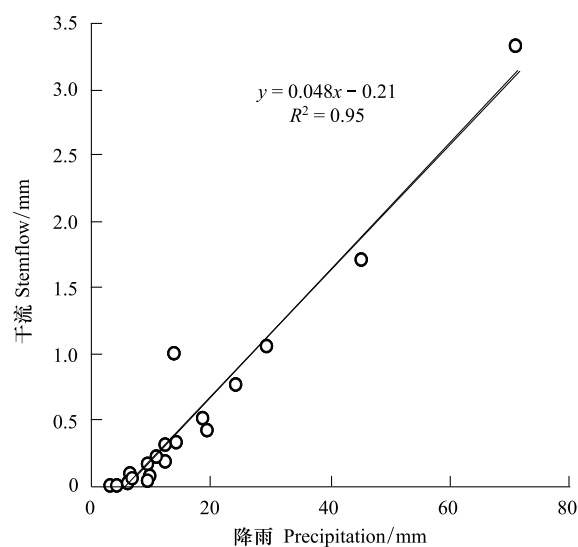


图 4 降雨量与干流量的回归关系(43 场降雨中有 19 场降雨产生 干流)

Fig. 4 The relationship between stemflow and gross rainfall. In total 43 rainfall events were observed and 19 rainfall events had stemflow

3.6 林冠截留模拟结果

基于以上估算的 Gash 模型各参数($\bar{E}=0.10$ mm/h, $S=0.67$ mm, $p=0.55$, $S_t=0.21$ mm, $p_t=0.048$),用 公式(2)计算得 $P'_c=1.75$ mm。根据 2009 年 5 月到 10 月 43 场次的降雨数据对黄土高原沟壑区人工刺槐林 冠截留进行模拟,对于小于 1.75 mm 的降雨直接计入林冠未饱和的部分,试验期间林冠各部分截留值见表 1, 其中 $m=14$, $n=29$, $q=19$,小于 1.75 mm 降雨量为 12.6 mm。Gash 模型估算的截留量为 42.4 mm,其中降雨 停止后的林冠蒸发是林冠截留的主要组成部分,占总截留量的 45.8%;其次为降雨停止前饱和和林冠的蒸发,

占总截留量的 26.2%;树干截留占林冠截留的 13.8%,是林冠截留不可忽视的组成部分;而林冠加湿过程仅占林冠截留的 2.4%。对于雨量较小的降雨($P_G < P'_G$)而言,对截留起主要作用的是林冠郁闭度;对于雨量较大的降雨而言,截留受到诸如林冠蒸发强度、林冠饱和程度及林冠郁闭度等较多因素的影响。

与降雨截留实测值(39.2 mm)相比,Gash 模型模拟值高出约 8.2%。根据 Gash 模型在其他地区的应用,显示我们的模拟结果是可接受的,也表明该模型可适用于黄土高原人工刺槐林冠的截留模拟。例如,Pearce 等报道 Gash 模型模拟值高于实测值 3.4%,王馨等报导模拟值高于实测值 4.5%,Sambasiva 研究模拟值高于实测值 10.0%,Šraj 等报导模拟值高于实测值 15.2%。

对 Gash 模型中的相关参数 $\bar{E}$ 、 S 、 p 、 S_t 和 p_t 对林冠截留量的影响进行敏感性分析,结果如表 2。5 个参数中对模型模拟林冠截留量影响最大的是林冠枝叶部分的持水能力(S),其次是饱和林冠的平均蒸发速率($\bar{E}$),再次为自由穿透降雨系数(p)和树干持水能力(S_t),影响最小的是树干茎流系数(p_t)。 S 、 $\bar{E}$ 、 S_t 和 p_t 每增加 10%,林冠截留量分别增加 4.7%、3.1%、1.7% 和 0.5%; p 每增加 10%,林冠截留量则减少 2.6%。研究说明,对于黄土高原人工刺槐林而言,树干持水能力(S_t)和树干茎流系数(p_t)两个参数对林冠截留量的预测值影响程度较小。

表 1 Gash 模型的组成部分

Table 1 The components of the total interception loss estimated by the analytical model of Gash for 43 rainfall events in 2009		
林冠截留损失的组成部分 Components of interception loss	表达式 Analytical form	截留量/mm Value of interception
林冠未饱和的 m 次降雨 Small rainfall events when $P_G < P'_G$	$(1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	5.1
林冠达到饱和的 n 次降雨的林冠加湿过程 Wetting-up the canopy when $P_G \geq P'_G$	$n(1 - p - p_t)P'_G - nS$	1.0
降雨停止前饱和和林冠的蒸发 Evaporation from saturation until rainfall ceases	$(\bar{E}/\bar{R}) \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	11.1
降雨停止后的林冠蒸发 Evaporation after rainfall ceases	nS	19.4
蒸发来自树干 树干蒸发,其中 q 次降雨树干达到饱和,其余 $m+n-q$ 次树干未饱和 Evaporation from trunks 树干蒸发,其中 q 次降雨树干达到饱和,其余 $m+n-q$ 次树干未饱和	$qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	5.8
总截留量 Total interception loss	I	42.4

表 2 Gash 模型参数敏感性分析

Table 2 Sensitivity of the analytical model of total rainfall interception				
模型参数 Interception loss parameters	原始值 Original values	增加 10% New values	绝对误差/mm Absolute error	相对误差/% Relative error
林冠枝叶部分的持水能力(S) Canopy storage coefficient	0.67	0.74	2.0	4.7
饱和林冠的平均蒸发速率($\bar{E}$) Average evaporation rate	0.10	0.11	1.3	3.1
自由穿透降雨系数(p) Free throughfall coefficient	0.55	0.61	-1.1	2.6
树干持水能力(S_t) Trunk storage capacity	0.21	0.23	0.7	1.7
树干茎流系数(p_t) Proportion of rainfall that is stemflow	0.048	0.053	0.2	0.5

4 结论与讨论

本研究采用次降雨的资料模拟了黄土高原沟壑区人工刺槐林冠的截留量,Gash 模型中参数的确定方法经过了许多学者的验证^[13,18,26,28],得到了较合理的模拟结果。由于模型本身一些假定的适用性,模拟值一般都会高估实测截留量。比如,模型假定只要 $P_G \geq P'_G$ 林冠就达到饱和,但实际的截留过程中,林冠可能是随着穿透降雨或树干茎流的产生而逐渐达到饱和的,因而会造成模型对截留量的高估。在估算 $\bar{E}$ 值时,模型假定降雨期间饱和和林冠的平均蒸发速率和平均降雨强度的比值($\bar{E}/\bar{R}$)保持稳定,但在实际过程中,二者的比值可能不是一个定值,因此在模型应用过程中对 $\bar{E}$ 值的验证尤为重要。本研究用 Penman-Monteith 公式和实测

得平均净辐射对 $\bar{E}$ 值进行了验证,证明估计的饱和林冠的平均蒸发速率较可靠。另外,模型对截留量的估算是以林冠枝叶部分的持水能力 S 值为基础的,但实测 S 值时,仅考虑林冠乔木层的枝叶,忽略了林下灌木层也截持了部分降雨的影响,而模型包括这部分截留水量,造成对 S 值以及截留量的高估。

尽管 Gash 模型涉及到较多的参数,且影响模型模拟精度的因素相应较多,但本研究采用了较成熟的参数获取方法和适当的验证,综合对比实测值和模拟值,模拟取得了可靠的结果,表明 Gash 模型适用于黄土高原人工刺槐林冠的截留模拟,研究结果可为预测黄土高原人工林林冠截留量和评估其水文效应提供明确的科学参考。应用 Gash 模型在模拟和预测林冠截留是目前比较常用和有效的降雨截留模型,模型综合了降雨和空气动力学的特征,具有较好的物理学基础,把林冠截留量划分成几个组成部分,对降雨截留的过程能够有充分的理解;即使是在不同的气候、地理位置或是林分类型的条件下,国内外不少研究已证明 Gash 模型在模拟林冠截留时仍然是简单有效的。此外,由于本研究仅使用了 2009 年 5 月至 10 月 43 场降雨的数据进行模拟验证,可能代表性还有所欠缺,需要利用其他年份或其他人工林的观测资料来进一步检验 Gash 模型在黄土高原地区的适用性。

References:

- [1] Wang Y H, Yu P T, Xu D Y, Zhao M S. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation. *Journal of Beijing Forestry University*, 1998, 20(6): 25-30.
- [2] Chen S J, Chen C G, Zou B C, Zhang S X, Wang D X, Hou L. Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 1142-1150.
- [3] Liu J G. Theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modeling*, 1988, 42(2): 111-123.
- [4] Liu S G. A new model for the prediction of rainfall interception in forest canopies. *Ecological Modeling*, 1997, 99(2/3): 151-159.
- [5] Liu J G, Wan G L, Zhang X P, Wang B N. Semi-theoretical model of rainfall interception of forest canopy. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(2): 2-5.
- [6] Zhang G C, Liu X, Zhao M. On rainfall interception models. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(1): 64-68.
- [7] Horton R E. Rainfall interception. *Month Weather Review*, 1919, 47(9): 603-623.
- [8] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, (9): 367-384.
- [9] Rutter A J, Morton A J, Robins P C. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology*, 1975, 12(1): 367-380.
- [10] Diao Y W, Pei T F. Research advances in dynamic mechanism and its simulation of eco-hydrological process in forest catchment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(12): 2369-2376.
- [11] Liu J G. Intercepted process of rainfall in forest canopy. *Journal of Beijing Forestry University*, 1987, 9(2): 140-144.
- [12] Zhou G Y. *Water and Heat Principles and Applications of Ecosystem*. Beijing: Meteorological Press, 1997: 72-73.
- [13] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception in forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105(443): 43-55.
- [14] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, Gowing D J. Measuring and modelling the rainfall interception loss by hedgerows in Southern England. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 141(2/4): 244-256.
- [15] Carlyle-Moses D E, Price A G. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. *Journal of Hydrology*, 1999, 214(1/4): 103-110.
- [16] Wallace J, McJannet D. On interception modelling of a lowland coastal rainforest in northern Queensland, Australia. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3/4): 477-488.
- [17] Wang X, Zhang Y P, Liu W J. Modeling canopy rainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbana, Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 722-729.
- [18] N  var J, Bryan R B. Fitting the analytical model of rainfall interception of Gash to individual shrubs of semi-arid vegetation in northeastern Mexico. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1994, 68(93): 133-143.
- [19] Llorens P, Poch R, Latron J, Gallart F. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area. I. Monitoring design and results down to the event scale. *Journal of Hydrology*, 1997, 199(3/4): 331-345.

- [20] Šraj M, Brilly M, Mikoš M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(1): 121-134.
- [21] Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, Fereres E. Rainfall concentration under olive trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 55(1): 53-70.
- [22] Ji D. Modeling Canopy Rainfall Interception of Dark Coniferous Ecosystem in Gongga Mountain. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [23] Dong S R, Guo J T, Man R Z. Throughfall, stemflow and canopy interception in a *Pinus tabulaeformis* plantation of north China. *Journal of Beijing Forestry University*, 1987, 9(1): 58-68.
- [24] Sheng X J, Wang S G, Guan D X, Jin C J, Wang A Z, Wu J B, Yuan F H. Canopy interception in larch plantations: measurement and modeling in Eastern Liaoning Mountainous Region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 2(12): 3021-3028.
- [25] Chen H, Fang H Y, Cai Q G, Lei T W, Liang G L. Comparison of different aspect of erosion evolvement in the Loess Hilly Area: A case study of Wangjiagou Catchment of western Shanxi Province. *Resources Science*, 2006, 28(5): 176-184.
- [26] Leyton L, Reynolds E R C, Thompson F B. Rainfall interception in forest and moorland // Sopper W E, Lull H W, eds. *International Symposium on Forest Hydrology*. Toronto: Pergamon Press, 1967: 163-178.
- [27] Zinke P J. Forest interception studies in the United States // Sopper W E, Lull H W, eds. *International Symposium on Forest Hydrology*. Toronto: Pergamon Press, 1967: 137-161.
- [28] Sambasiva R A. Interception losses of rainfall from cashew trees. *Journal of Hydrology*, 1987, 90(3/4): 293-301.

参考文献:

- [1] 王彦辉, 于澎涛, 徐德应, 赵茂盛. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究. *北京林业大学学报*, 1998, 20(6): 25-30.
- [2] 陈书军, 陈存根, 邹伯才, 张硕新, 王得祥, 侯琳. 秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应. *生态学报*, 2012, 32(4): 1142-1150.
- [5] 刘家冈, 万国良, 张学培, 王本楠. 林冠对降雨截留的半理论模型. *林业科学*, 2000, 36(2): 2-5.
- [6] 张光灿, 刘霞, 赵玫. 树冠截留降雨模型研究进展及其述评. *南京林业大学学报*, 2000, 24(1): 64-68.
- [10] 刁一伟, 裴铁璠. 森林流域生态水文过程动力学机制与模拟研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2369-2376.
- [11] 刘家冈. 林冠对降雨的截留过程. *北京林业大学学报*, 1987, 9(2): 140-144.
- [12] 周国逸. 生态系统水热原理及其应用. 北京: 气象出版社, 1997: 72-73.
- [17] 王馨, 张一平, 刘文杰. Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用. *生态学报*, 2006, 26(3): 722-720.
- [22] 季冬. 贡嘎山暗针叶林林冠截留的 Gash 模型. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [23] 董世仁, 郭景唐, 满荣洲. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. *北京林业大学学报*, 1987, 9(1): 58-68.
- [24] 盛雪娇, 王曙光, 关德新, 金昌杰, 王安志, 吴家兵, 袁凤辉. 辽宁东部山区落叶松人工林林冠降雨截留观测及模拟. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3021-3028.
- [25] 陈浩, 方海燕, 蔡强国, 雷廷武, 梁广林. 黄土丘陵沟壑区沟谷侵蚀演化的坡向差异—以晋西王家沟小流域为例. *资源科学*, 2006, 28(5): 176-184.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 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:1000717	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