

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

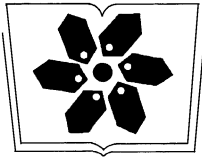
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第6期 Vol.33 No.6 **2013**

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 33 卷 第 6 期

2013 年 3 月 (半月刊)

目 次

专论与综述

- 基于遥感技术的森林健康研究综述..... 高广磊,信忠保,丁国栋,等 (1675)
Agent 农业土地变化模型研究进展..... 余强毅,吴文斌,杨 鹏,等 (1690)

个体与基础生态

- 辽东湾北部近海沙蜃的动态分布..... 王 彬,秦宇博,董 婧,等 (1701)
口虾蛄 proPO 基因全长 cDNA 的克隆与组织表达..... 刘海映,刘连为,姜玉声,等 (1713)
中缅树鼯头骨及下臼齿几何形态与环境的关系..... 朱万龙,贾 婷,黄春梅,等 (1721)
亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响..... 季晓燕,江 洪,洪江华,等 (1731)
浙北地区常见绿化树种光合固碳特征..... 张 娇,施拥军,朱月清,等 (1740)
两种高质牧草不同生育期光合生理日变化及光响应特征..... 郭春燕,李晋川,岳建英,等 (1751)
基于 WOFOST 作物生长模型的冬小麦干旱影响评估技术..... 张建平,赵艳霞,王春乙,等 (1762)
基于线粒体 DNA 控制区的斑翅草螽不同地理种群遗传分化研究..... 周志军,尚 娜,刘 静,等 (1770)
圈养尖吻蝾螈雌体大小、窝卵数和卵大小之间的关系..... 胡明行,谭群英,杨道德 (1778)
应用寄生蜂和不育雄虫防控田间橘小实蝇..... 郑思宁,黄居昌,叶光禄,等 (1784)
青蒿素对外生菌根真菌化感效应..... 李 倩,袁 玲,王明霞,等 (1791)

种群、群落和生态系统

- 海湾生态系统健康评价方法构建及在大亚湾的应用..... 李纯厚,林 琳,徐姗姗,等 (1798)
上升流和水团对浙江中部近海浮游动物生态类群分布的影响..... 孙鲁峰,柯 昶,徐兆礼,等 (1811)
半干旱区生态恢复关键生态系统识别——以内蒙古自治区和林县为例.....
..... 彭 羽,高 英,冯金朝,等 (1822)
太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应..... 金冠一,赵秀海,康峰峰,等 (1832)
重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应..... 王轶浩,王彦辉,于澎湃,等 (1842)

景观、区域和全球生态

- 城市典型水域景观的热环境效应..... 岳文泽,徐丽华 (1852)
外来树种桉树引种的景观生态安全格局..... 赵筱青,和春兰 (1860)
基于耕地生态足迹的重庆市耕地生态承载力供需平衡研究..... 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1872)
大气 CO₂ 浓度升高对稻田根际土壤甲烷氧化细菌丰度的影响..... 严 陈,许 静,钟文辉,等 (1881)

资源与产业生态

- 基于可变模糊识别模型的海水环境质量评价..... 柯丽娜,王权明,孙新国,等 (1889)
亚热带养殖海湾皱瘤海鞘生物沉积的现场研究..... 闫家国,齐占会,田梓杨,等 (1900)
黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征..... 张丽娜,李 军,范 鹏,等 (1907)

旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应..... 张丁辰,蔡典雄,代 快,等 (1916)

商洛低山丘陵区农林复合生态系统中大豆与丹参的光合生理特性..... 彭晓邦,张硕新 (1926)

外源油菜素内酯对镉胁迫下菊芋幼苗光合作用及镉富集的调控效应..... 高会玲,刘金隆,郑青松,等 (1935)

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正 刘庆新,孟 平,张劲松,等 (1944)

研究简报

湿地自然保护区保护价值评价方法..... 孙 锐,崔国发,雷 霆,等 (1952)

干热河谷印楝和大叶相思人工林根系生物量及其分布特征..... 高成杰,唐国勇,李 昆,等 (1964)

海滨沙滩单叶蔓荆对沙埋的生理响应特征..... 周瑞莲,王 进,杨淑琴,等 (1973)

宁夏贺兰山、六盘山典型森林类型土壤主要肥力特征 姜 林,耿增超,张 雯,等 (1982)

学术争鸣

小兴安岭十种典型森林群落凋落物生物量及其动态变化..... 侯玲玲,毛子军,孙 涛,等 (1994)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2002)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 328 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说: 亭亭玉立的白桦树——白桦为落叶乔木,可高达 25m,胸径 50cm。其树冠呈卵圆形,树皮白色,纸状分层剥离;叶三角状、卵形或菱状卵形;花单性,雌雄同株。白桦树喜光,耐严寒,对土壤适应性强,喜酸性土,沼泽地、干燥阳坡及湿润阴坡都能生长。常与红松、落叶松、山杨、蒙古栎混生。白桦的天然更新好,生长较快,萌芽强,在人为的采伐迹地或火灾、风灾等自然损毁的迹地里,往往由白桦首先进入,为先锋树种,而形成白桦次生林。白桦分布甚广,我国大、小兴安岭及长白山均有成片纯林,在华北平原和黄土高原山区、西南山地亦为阔叶落叶林及针叶阔叶混交林中的常见树种。

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

DOI: 10.5846/stxb201112221954

刘庆新, 孟平, 张劲松, 高峻, 孙守家, 任迎丰. 基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式系数进行校正. 生态学报, 2013, 33(6): 1944-1951.

Liu Q X, Meng P, Zhang J S, Gao J, Sun S J, Ren Y F. Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 1944-1951.

基于侧柏液流的测定对 Granier 原始公式 系数进行校正

刘庆新^{1,2,3}, 孟平^{1,2,3,*}, 张劲松^{2,3}, 高峻^{2,3}, 孙守家^{2,3}, 任迎丰⁴

(1. 中国林业科学研究院, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

3. 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 4. 济源市国有大沟河林场, 济源 454650)

摘要:为研究 Granier 原始公式计算单株树木蒸腾耗水量的准确性,以侧柏作为研究对象,采用热消散法测定在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度形成不同压力梯度下的树干液流通量密度,并以称重法作为对照,利用回归分析方法拟合称重法测定的液流通量密度与热消散法测定的树干液流温差系数(K 值),进而建立校正公式。结果表明:基于侧柏校正的 Granier 公式为 $F_d = 0.0115K^{0.5581}$ ($R^2 = 0.8319$)。与称重法测定的液流通量密度相比,校正的 Granier 公式计算的结果略高 ($6.70 \pm 0.02\%$),而 Granier 原始公式计算的则低估 ($78.53 \pm 0.04\%$)。由此可知,采用校正的 Granier 公式计算侧柏的液流通量密度具有较高的精度。

关键词:Granier 原始公式; 液流; 热消散法; 侧柏

Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis*

LIU Qingxin^{1,2,3}, MENG Ping^{1,2,3,*}, ZHANG Jinsong^{2,3}, GAO Jun^{2,3}, SUN Shoujia^{2,3}, REN Yingfeng⁴

1 Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

4 Dagouhe National Forest Farm of Jiyuan, Jiyuan 454650, China

Abstract: Thermal dissipation method has important advantages over other techniques for measuring tree and bush transpiration, which can distinguish between plant and soil evaporation, and can be used to measure transpiration of different species in a mixed plant stand. Hence, the method has been widely applied by tree physiologists and forest hydrologists. An important potential limitation, however, is that the calibration of the Granier's experiential formula is based on an empirical relationship between temperature difference and sap flux density, rather than on the physical properties of heat transfer in sapwood.

In order to study the accuracy of Granier's empirical formula in calculating transpiration water consumption of individual tree, eight *Platycladus orientalis* trees were selected as representative diffuse-porous to validate the accuracy of Granier's empirical formula in Xiaolangdi forest ecosystem research station of state forestry administration from May to June in 2011. The sap flux densities of *P. orientalis* under different pressure at water column heights of 15, 30, 50, 70 and 90

基金项目:国家“十二五”科技支撑课题(2011BAD38B06); 林业公益性行业科研专项(201104009-04); 林业科技创新平台项目(2012-LYPT-DW-004)资助

收稿日期:2011-12-22; 修订日期:2012-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mengping@caf.ac.cn

cm were measured by thermal dissipation method and compared with weighing method. The relationship between sap flux density of *P. orientalis* and temperature difference's coefficient (K) obtained using regression analysis method was established. The results showed that corrected Granier formula was $F_d = 0.0115K^{0.5581}$ ($R^2 = 0.8319$) based on individual *P. orientalis*. the calibrated Granier formula was obviously different from Granier's original formula ($F_d = 0.0119K^{1.231}$ ($R^2 = 0.96$)). The coefficient α (0.0115) of corrected Granier formula was similar to that of the Granier's original formula, but the coefficient β (0.5581) of the corrected Granier formula was one order of magnitude smaller than that of Granier's empirical formula, and their quantitative difference was 54.66%. Compared with the sap flux density measured by weighing method under different pressure at water column heights of 15, 30, 50, 70 and 90 cm, the average values of the corrected Granier formula was $(6.70 \pm 0.02)\%$ higher, while the average values of original Granier formula was $(78.53 \pm 0.04)\%$ lower, indicating that estimations of sap flux density of individual *P. orientalis* by corrected Granier formula were of higher precision.

Therefore, the corrected Granier formula would be apply to calculate sap flux density of *P. orientalis*. Nevertheless, an error-modified formula based on thermodynamics theory must be provided to ensure the accuracy of sap flux density derived from the original Granier empirical formula.

Key Words: Granier original formula; sap flow; thermal dissipation method; *Platycladus orientalis*

作为一种较为理想的定量测定树木蒸腾的方法,热消散液流测定系统不仅能很好地区分树木蒸腾和土壤蒸发,还能区分混交林中不同树种的蒸腾量^[1-2],其操作简单,成本较低,具有能够实现连续或任意时间间隔液流速率自动化测定等优点。因此,该方法被从事树木生理学和森林水文学研究的学者广泛采用。但利用热消散法测定的树干温差系数和液流通量密度,推导出的 Granier 原始公式来计算树木液流量有一定的局限^[2-5]。

Granier 原始公式并不是基于热量在边材传导过程中所具有的物理性质而建立的理论公式,而是在测定 3 个树种 (*Pseudo tsugamenziesii*、*Pinus thunbergii* 和 *Quercus robur*) 的基础上推导出的经验公式^[6]。因此,一些学者应用热消散法在其他树种^[7-17]以及由木屑压缩成的茎干^[18]和填充着合成纤维的 PVC 管^[19]等材料上进行校准,证实 Granier 原始公式适合所有测试过的树种和材料。甚至,在定量评价林地水汽通量时,热消散法与热平衡法^[20]、热脉冲法^[21]、整树容器法^[21]、风调室法^[22]、涡度相关法^[22]、水量平衡法^[23]、微气象法^[22]等测定的结果也较为一致,这也证实 Granier 原始公式的准确性。然而,基于欧洲白蜡树 (*Fraxinus*) 的校准公式却不同于 Granier 原始公式,这可能是由于最外侧 2 个早材的厚度狭窄,导致树干液流沿着靠近边材里面的探针部分流动造成的结果^[13-14]。Bush 等^[24]研究表明 4 个环孔材 (*angustifolia*, *triacanthos*, *gambelii*, *japonica*) 的校准公式与 Granier 原始公式明显不同。而 Steppe^[25] 和 Hultine^[26] 对山毛榉 (*Fagus grandifolia*) 和多枝怪柳 (*Tamarix ramosissima*) × 腊梅 (*chinensis*) 进行校准表明,Granier 原始公式计算的液流通量密度比称重法最高低估达 46%。由此可知,Granier 原始公式并不适合所有的树种。Smith 等^[2] 建议对每个树种进行 Granier 公式系数校准,而 Lu 等^[3] 只建议对有怀疑的树种进行重新校准。侧柏 (*Platycladus orientalis*) 为常绿乔木树种,其生长年轮类型属于散孔材。侧柏作为主要园林绿化针叶树种之一,在世界范围内广为栽植。因此,本文选择侧柏作为实验材料,利用热消散法测定其树干的液流通量密度,同时以称重法作为对照,通过对称重法测定的液流通量密度与热消散法测定的树干液流温差系数 (K 值) 进行幂指数回归拟合,建立校正的 Granier 公式,为侧柏蒸腾量的准确测量及林分灌溉管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地位于河南省济源市黄河小浪底森林生态系统定位研究站 (35°01'N, 112°28'E)。该研究站地处太行山南麓,黄河流域北缘,属暖温带大陆性季风气候。多年平均日照时数为 2367.7 h, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的多年平均积

温 4847 °C, 多年平均降水量 641.7 mm, 其中 6—9 月占全年降水量的 68.3%。乔木以人工栽植的侧柏、栓皮栎 (*Quercus variabilis*) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 为主, 灌木以荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、小花扁担杆 (*Grewia biloba* var. *parviflora*) 和酸枣 (*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*) 等为主。土壤主要为石灰岩风化母质淋溶性褐色土及棕壤土。

1.2 实验材料

2011 年 5—6 月, 在研究站南山上选择树干通直且生长健康的侧柏, 截取胸高处 50 cm 长的树干 (标记其形态学上端), 浸入装有蒸馏水的塑料桶内带回实验室。然后将树干放入装有蒸馏水的水槽中, 截取长度为 30 cm 的中间部位, 用木工刨子将树干两个截面刮平。将树干形态学上端 2 cm 宽度的环形树皮刮掉, 均匀涂上防水玻璃胶, 用密封胶带紧密缠绕涂胶部位, 而树干形态学下端 2 cm 处只用密封胶带紧密缠绕, 然后将处理好的树干固定在校正系统中。

1.3 热消散法校正系统

根据马氏瓶原理设计的热消散法校正系统可以保证供给树干的水柱保持恒定。将 2 根长度相同的玻璃管以相同的深度插入装有蒸馏水的密封玻璃瓶中。其中一根玻璃管作为通气管, 另一根玻璃管用橡胶软管与第 3 根玻璃管相连组成虹吸管。将插有第 3 根塑料管的底端与等径直通对接管①上半部拧紧, 而异径直通对接管②的下部分与尖嘴吸管的粗口拧紧。实验时, 将预先准备好的树干形态学上端与等径直通对接管下半部分连接、拧紧, 而下端与异径直通对接管上半部分相连、拧紧 (图 1)。

1.4 液流测定

Granier 采用自制的热消散传感器的加热探针是在 0.2 W 恒定功率下测定 *Pseudo tsugamenziesii*、*Pinus thunbergii* 和 *Quercus robur* 3 个树种的液流, 推导出液流通量密度与温差系数 (K 值) 相关联的经验公式为:

$$F_d = \alpha K^\beta = 119.99 \times 10^{-5} \{ (\Delta T_{\max} - \Delta T) / \Delta T \}^{1.231} \quad R^2 = 0.96$$

式中, F_d 为液流通量密度 ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $\Delta T_{\max}$ 为零通量时两探针间最大温差 ($^{\circ}\text{C}$); ΔT 为两探针间的瞬时温差 ($^{\circ}\text{C}$); K 为无量纲单位; α 和 β 为依赖于热量的系数^[4,6]。

本文采用探针长度为 10 mm 的商业型热消散传感器 (Dynamax 公司, 美国) 遵循 Granier 热消散传感器的设计原理。该传感器上探针加热丝的电阻为 55Ω , 为保持恒定功率为 0.2 W, 其所加电压为 3.32 V。实验期间的室温控制在 $(15.5 \pm 0.7) ^{\circ}\text{C}$ 。

实验之前开始, 将水柱调整为 1 m 高度维持 30 min, 减少侧柏树干的栓塞程度。通过升降折叠椅调整通气管底端与树干形态学上端的高度, 从而使树干的水柱高度分别在 15、30、50、70 和 90 cm 保持至少 2 h。由于蒸馏水瓶直径较大可以忽略在恒定水柱下瓶内水面高度的微小变化。通过一组热消散探针测量树干的液流通量密度, 利用 AR224CN 型电子天平 (OHAUS 公司, 美国) 同步称重测定的液流速率除以边材面积即为实测的液流通量密度。数据采集器为 CR10X (Campbell 公司, 美国), 每 30 s 采集 1 次, 每 2 min 输出 1 组温差平

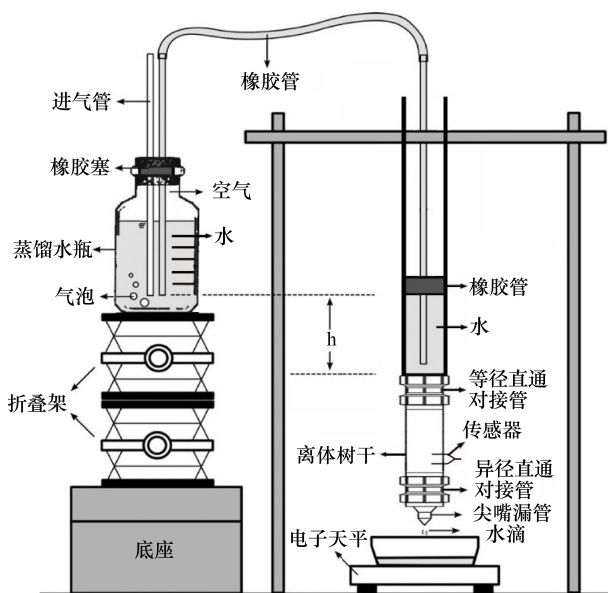


图 1 热消散法校正系统示意图

Fig. 1 The sketch map of calibration system on thermal dissipation method

① 等径直通对接管: 主要用于相同直径塑料水管的对接; 由上下两部分本体、螺母、胶圈、管卡、平垫、防脱环组合而成; 可以承受 16.8 Pa 水压

② 异径直通对接管: 主要用于直径不同的两个塑料管的对接, 配件与等径直通对接管一致

均值。将电子天平与电脑相连,利用 LPMV100P 软件每隔 20 s 自动记录天平数据,并直接换算成液流速率。实验结束后,将树干在无水压的情况下放置 8 h,确定树干的 $\Delta T_{\max}$ 。

1.5 树干边材面积的测定

试验结束后,将取下的树干安装到另一套简化的校正系统中,用浓度为 0.1% 的番红溶液代替蒸馏水,将树干水柱高度控制在 90 cm 保持 8 h。而后在加热探针处截取木盘,利用游标卡尺根据染色程度测量边材直径,进而计算边材面积(表 1)。

表 1 侧柏的基本特征(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 1 Basic characteristics of *Platycladus orientalis* (Mean $\pm$ SE)

树种 Species	木材类型 Wood type	林龄 Stand age/a	胸径 DBH/cm	边材厚度 Sapwood diameter/mm	数量 N
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	散孔材 Diffuse-porous	12	44.30 $\pm$ 0.49	16.86 $\pm$ 0.17	8

1.6 数据处理与分析

采用 SPSS17.0 统计分析软件对随机选取的 7 株侧柏的液流通量密度数据进行分析。利用 Person 简单相关分析法对称重法与 Granier 原始公式计算的液流通量密度进行相关分析;利用回归分析方法对称重法测定的液流通量密度与热消散法测定的 K 值进行幂指数回归拟合。

2 结果与分析

2.1 比较称重法与 Granier 原始公式计算的液流通量密度

在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度压力下,称重法测定的 7 株侧柏树干液流通量密度与 Granier 原始公式计算的具有极显著正相关关系($P < 0.001, n = 35$),其相关系数为 0.946。但在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度下,Granier 原始公式计算的侧柏树干液流通量密度均比称重法测定的真实值低,分别相差(92.81 $\pm$ 0.02)%、(86.23 $\pm$ 0.02)%、(80.68 $\pm$ 0.03)%、(79.72 $\pm$ 0.04)%和(79.74 $\pm$ 0.03)% (图 2)。因此,有必要对 Granier 原始公式的系数进行重新校正。

2.2 校正 Granier 原始公式的系数

称重法测定的液流通量密度与热消散法测定的温差系数(K 值)进行回归分析,得到的侧柏校正公式为: $F_d = 0.0115K^{0.5581}$ ($R^2 = 0.8319$),其不同于 Granier 原始公式(图 3)。该校正公式的系数 α (0.0115) 与 Granier 原始公式的系数 α (0.0119) 非常接近,这说明校正的 Granier 公式的斜率与 Granier 原始公式的斜率几乎一致,而系数 β (0.5581) 却比 Granier 原始公式的系数 β (1.231) 小 54.66%,且两者相差一个数量级。

侧柏树干在 5 个不同压力梯度下的 K 值范围为 0.01—0.15 (图 3),而在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度下,称重法测定的侧柏树干液流通量密度分别为 0.00136 $\pm$ 0.00032、0.00181 $\pm$ 0.00042、0.00246 $\pm$ 0.00056、0.00305 $\pm$ 0.00072 和(0.00362 $\pm$ 0.00087) g cm⁻²s⁻¹,与采用校正的 Granier 公式计算的液流通量密度分别相差(16.87 $\pm$ 0.12)%、(10.00 $\pm$ 0.08)%、(10.10 $\pm$ 0.10)%、(7.42 $\pm$ 0.06)%和(15.95 $\pm$ 0.14)%。结合前面对液流通量密度的比较分析可知,采用校正的 Granier 公式计算侧柏的液流通量密度比 Granier 原始公式计算的更接近实际值。

2.3 验证校正的 Granier 公式系数

在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度下,将称重法测定的第 8 株侧柏的液流通量密度与校正的 Granier 公式和 Granier 原始公式计算的液流通量密度进行分析。校正的 Granier 公式计算的液流通量密度在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度下略高于 1:1 直线,与称重法测定的液流通量密度分别相差 4.08%、6.14%、2.34%、8.52%、12.48% (图 4)。而 Granier 原始公式计算的液流通量密度在 5 个水柱压力梯度下均明显低于 1:1 直线,与称重法测定的液流通量密度分别相差 88.45%、84.18%、79.80%、73.64%、66.61% (图 4)。从液流通量密度平均值来看,校正的 Granier 公式计算的侧柏液流通量密度与实际值相差(6.70 $\pm$ 0.02)%,处于该校正

公式的置信区间,也符合其校正公式的系数。而 Granier 原始公式计算的液流量密度与实际值相差 $(78.53 \pm 0.04)\%$,这说明 Granier 原始公式计算的侧柏液流量密度严重低估其真实值。因此,建议在实际应用中采用校正的 Granier 公式计算侧柏液流量密度,以保证测定结果的可靠性。

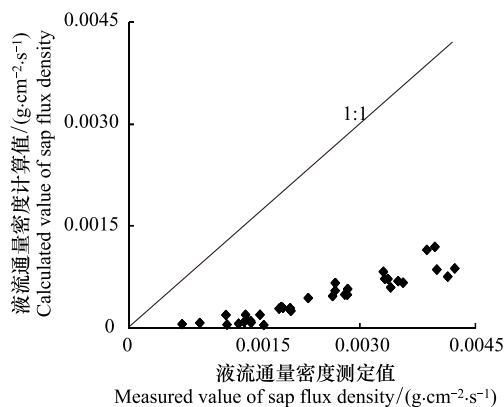


图2 称重法和 Granier 探针系统测定的液流量密度的比较

Fig. 2 Comparison of sap flux density obtained from weighing methods and Granier's probe

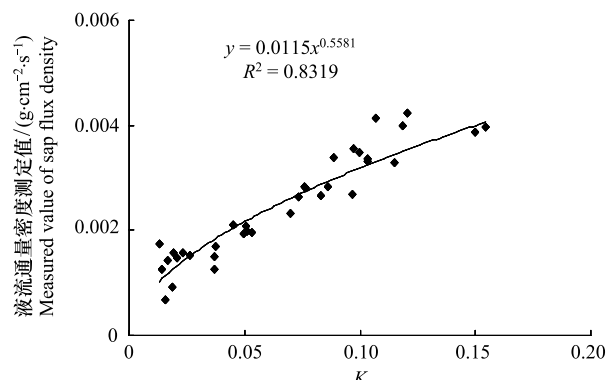


图3 侧柏的液流测定值校正公式

Fig. 3 Calibration formula of sap flow measurement for *Platycladus orientalis*

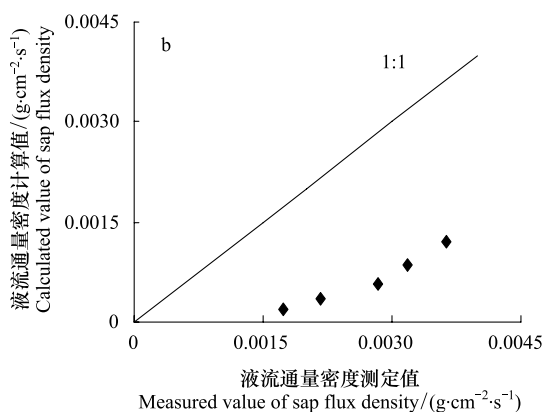
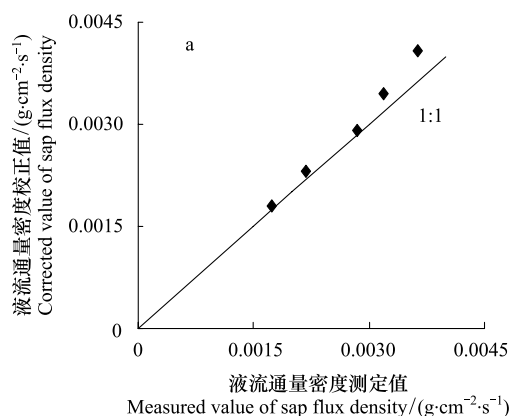


图4 验证校正的 Granier 公式

Fig. 4 Verification of Grainer's formula

3 讨论

3.1 与其他树种校正的公式系数比较

本文对侧柏校正的 Granier 公式不同于 Granier 原始公式。但其系数 α 均与其他学者报道的 8 个树种^[6,13,14,17,19,24]校正公式的系数 α 处于一个数量级,而系数 β 却小于其他所有校正公式的系数 β ,并与其相差一个数量级(表 2)。

Lu 等^[3]研究认为重新校正公式与 Granie 原始公式计算的液流量密度在 $K=1$ 时相差小于 15.00%,即认为重新校正公式计算的液流量密度处于 Granier 原始公式计算的正常测量范围。本文研究表明重新校正的 Granier 公式在 $K=1$ 时计算的液流量密度仅比 Granier 原始公式计算的小 3.34%,但在 $K=0.01$ 、0.05、0.10 和 0.50 时,分别比 Granier 原始公式计算的液流量密度高 95.33%、86.22%、78.02% 和 35.09%。由此可知,Granier 原始公式低估了侧柏的液流量密度。如果采用 Granier 原始公式计算侧柏的液流量密度,需要建立基于热传导理论的误差修正公式去解决其测量的精度。

表 2 比较不同树种校正的 Granier 公式

Table 2 Comparison on calibrated Granier formula among different tree species

树种 Species	校正公式 Calibrated formula		K				
	$F_d = \alpha K^\beta / (\text{g cm}^{-2} \text{s}^{-1})$						
	系数 α Coefficient α	系数 β Coefficient β	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00
英国栎 <i>Quercus pedunculata</i> ^[6] , 黑松 <i>Pinus nigra</i> ^[6] , 花旗松 <i>Pseudotsuga menziesii</i> ^[6] , 三角叶杨 <i>Populus fremontii</i> ^[24] , 菩提树 <i>Tilia cordata</i> ^[24]	0.0119	1.232	0.00004	0.00030	0.00070	0.00507	0.01190
欧洲白蜡树 <i>Fraxinus excelsior</i> ^[13]	0.02023	0.428	0.00428	0.02145	0.04300	0.21906	0.44823
枫树 <i>Acer campestre</i> ^[14]	0.0129	1.460	0.00002	0.00016	0.00045	0.00469	0.01290
英国山楂树 <i>Crataegus monogyna</i> ^[14]	0.0204	1.387	0.00003	0.00032	0.00084	0.00780	0.02040
枫树 <i>Acer grandidentatum</i> ^[17]	0.055	1.02	0.00050	0.00259	0.00525	0.02712	0.05500
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.0115	0.5581	0.00088	0.00216	0.00318	0.00781	0.01150
苹果树 <i>Malus pumila</i> ^[19] , 橡树 <i>Quercus palustris</i> ^[19] , 欧洲栗 <i>European chestnut</i> ^[19]	0.01368	1.2997	0.00003	0.00028	0.00069	0.00556	0.01368
橡树 <i>Quercus gambelii</i> ^[17]	0.579	1.38	0.00101	0.00927	0.02414	0.22246	0.57900
国槐 <i>Sophora japonica</i> ^[24]	1.19	1.24	0.00394	0.02899	0.06848	0.50381	1.19000
根柏栎 <i>Quercus gambelii</i> ^[24]	5.81	1.88	0.00101	0.02081	0.07659	1.57848	5.81000
沙枣树 <i>Elaeagnus angustifolia</i> ^[24]	0.93	1.65	0.00047	0.00663	0.02082	0.29634	0.93000
美国皂荚树 <i>Gleditsia triacanthos</i> ^[24]	3.07	1.40	0.00487	0.04631	0.12222	1.16331	3.07000

3.2 分析不同校正公式的实验方案

枫树^[14]、英国山楂树^[14]、苹果树^[19]、欧洲栗^[19]、橡树^[19]在进行校正实验前均未对其树干栓塞进行冲洗,实验测定的液流量密度范围为 0.001—0.032 g cm⁻²s⁻¹,包含了 Granier 对英国栎^[6]、黑松^[6]、花旗松^[6]测定的液流量密度范围(0.001—0.014 g cm⁻²s⁻¹)。以上树种的校正公式系数 α 与 Granier 原始公式的系数较为接近(表 2);而校正实验开始前用 0.02 mol/L KCl 溶液对橡树^[17]、国槐^[24]、根柏栎^[24]、沙枣树^[24]、美国皂荚树^[24]树干冲洗 30 min,实验所测得的液流量密度范围为 0.01—3 g cm⁻²s⁻¹,远远大于未冲洗树干测定的液流量密度。这些树种校正公式的系数 α 也都大于 Granier 原始公式系数 α 一到两个数量级。然而,冲洗与未冲洗处理的树干校正公式系数 β 都处于 1.02—1.65 之间(表 2)。在校正实验前,将侧柏树干水柱保持在 1 m 高度维持 30 min,便于一些填充物质随水流被带走而减小树干的栓塞程度,以保证在改变水柱高度条件下保持树干结构尽量不变。在 15、30、50、70 和 90 cm 水柱高度的压力下,称重法测定的侧柏树干液流量密度范围为 0.00068—0.00423 g cm⁻²s⁻¹,其最大值介于未冲洗处理和冲洗处理的树干之间。由此可知,树干液流量密度的增加可能与树干冲洗处理有关,树干冲洗可能导致树干阻力减小而使液流的流动速率加快。表 3 显示,校正的 Granier 公式系数 α 和 β 随着压力的增加呈增大趋势,致使侧柏树木液流量密度也变得越来越大。Steppe 等^[25]研究表明,随着液流速率的增加,热消散法与称重法测定的液流量密度差异也明显增大。因此,建议以树干木质部的压力值作为实验压力的上限,并设置不同的压力梯度,这样拟合其真实液流量密度与探针测定的温差系数而得到的校正公式更具有代表性,也有助于揭示液流速率快慢是否会影响液流量密度与 K 值的关系。

表 3 不同压力梯度下的校正公式

Table 3 Calibration formula under different pressure

树种 Species	压力 Pressure				
	≤15 cm 水柱 ≤15 cm water head	≤30 cm 水柱 ≤30 cm water head	≤50 cm 水柱 ≤50 cm water head	≤70 cm 水柱 ≤70 cm water head	≤90 cm 水柱(全部数据) ≤90 cm water head(All data)
	$F_d = 0.0029K^{0.7807}$ ($r^2 = 0.6395$)	$F_d = 0.0095K^{0.5128}$ ($r^2 = 0.6287$)	$F_d = 0.0099K^{0.5281}$ ($r^2 = 0.7698$)	$F_d = 0.0116K^{0.5741}$ ($r^2 = 0.8455$)	$F_d = 0.0115K^{0.5581}$ ($r^2 = 0.8319$)
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>					

3.3 分析不同校正公式的实验材料

与侧柏同属散孔材的欧洲白蜡树^[13]、枫树^[14,17]、英国山楂树^[14]、三角叶杨^[24]、菩提树^[24]的校正公式的系数 α 与 Granier 原始公式的处于同一数量级。而国槐^[24]、根柏栎^[24]、沙枣树^[24]、美国皂荚树^[24]属于环孔材,校正公式的系数 α 与 Granier 原始公式的相差一到两个数量级(表 2)。橡树属于环孔材,以其树干^[19]作为实验材料校正的 Granier 公式系数与原始公式较为接近,而以其树枝^[17]作为实验材料校正的公式系数与 Granier 原始公式相差较大(表 2),这可能是由于树枝具有斜向上生长的特点,木材结构存在径向差异,致使液流速率产生差异而造成测量误差。因此,有必要进一步分析不同树种或者同一树种不同部位的木材结构对 Granier 原始公式校正的影响。

综合以上分析表明,开展 Granier 原始公式的校正实验,应考虑生境、林龄、木材结构等因素对校正结果的影响。同时为了减小树干栓塞对测定结果的影响,建议实验前用蒸馏水在低压条件下冲洗树干,而且要设置不同的水压梯度,以便获得准确的校正公式。

致谢:写作过程中得到中国林业科学研究院林业新技术研究所白坤栋老师的帮助,特此致谢。

References:

- [1] Wullschlegel S D, Meinzer F C, Vertessy R A. A review of whole-plant water use studies in tree. *Tree Physiology*, 1998, 18(8/9): 499-512.
- [2] Smith D M, Allen S J. Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 1996, 47(12): 1833-1844.
- [3] Lu P, Urban L, Zhao P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(6): 631-646.
- [4] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 1987, 3(4): 309-320.
- [5] Regalado C M, Ritter A. An alternative method to estimate zero flow temperature differences for Granier's thermal dissipation technique. *Tree Physiology*, 2007, 27(8): 1093-1102.
- [6] Granier A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annals of Forest Science*, 1985, 42(2): 193-200.
- [7] Ford C R, McGuire M A, Mitchell R J, Teskey R O. Assessing variation in the radial profile of sap flux density in *Pinus* species and its effect on daily water use. *Tree Physiology*, 2004, 24(3): 241-249.
- [8] Vertessy R A, Hatton T J, Reece P, O'Sullivan S K, Benyon R G. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique. *Tree Physiology*, 1997, 17(12): 747-756.
- [9] Braun P, Schmid J. Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.) 2. Granier measurements. *Plant and Soil*, 1999, 215(1): 47-55.
- [10] Chu C R, Hsieh C I, Wu S Y, Phillips N G. Transient response of sap flow to wind speed. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(1): 249-255.
- [11] Liu H J, Cohen S, Tanny J, Huang G H. Transpiration of banana plant measured by Granier method. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 35-40.
- [12] Clearwater M J, Meinzer F C, Andrade J, Goldstein G, Holbrook N M. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 1999, 19(10): 681-687.
- [13] Herbst M, Robert J M, Rosier P T W, Taylor M E, Gowing D J. Edge effects and forest water use: a field study in a mixed deciduous woodland. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3): 176-186.
- [14] Herbst M, Roberts J M, Rosier P T W, Gowing D J. Seasonal and interannual variability of canopy transpiration of a hedgerow in southern England. *Tree Physiology*, 2007, 27(3): 321-333.
- [15] Lu P, Woo K C, Liu Z T. Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(375): 1771-1779.
- [16] Lu P, Chacko E. Evaluation of Granier's sap flux sensor in young mango trees. *Agronomie*, 1998, 18(7): 461-471.
- [17] Taneda H, Sperry J S. A case-study of water transport in co-occurring ring-versus diffuse-porous trees: contrasts in water-status, conducting capacity, cavitation and vessel refilling. *Tree Physiology*, 2008, 28(11): 1641-1651.
- [18] Do F, Rocheteau A. Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 2. Advantages and calibration of a noncontinuous heating system. *Tree Physiology*, 2002, 22(9): 649-654.
- [19] Cabibel B, Do F. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. Analyse théorique

- des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. *Agronomie*, 1991, 11(8): 669-678.
- [20] Tournebize R, Boistard S. Comparison of two sap flow methods for the estimation of tree transpiration. *Annals of Forest Science*, 1998, 55(6): 707-713.
- [21] Granier A, Anfodillo T, Sabatti M, Cochard H, Dreyer E, Tomasi M, Valentini R, Bréda N. Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 1994, 14(12): 1383-1396.
- [22] Saugier B, Granier A, Pontailler J Y, Dufrêne E, Baldocchi D D. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 1997, 17(8/9): 511-519.
- [23] Ford C R, Hubbard R M, Kloeppel B D, Vose J M. A comparison of sap flux-based evapotranspiration estimates with catchment-scale water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(3/4): 176v185.
- [24] Bush S E, Hultine K R, Sperry J S, Ehleringer J R, Phillips N. Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring-and diffuse-porous trees. *Tree Physiology*, 2010, 30(12): 1545-1554.
- [25] Steppe K, de Pauw D J W, Doody T M, Teskey R O. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7/8): 1046-1056.
- [26] Hultine K R, Nagler P L, Morino K, Bush S E, Burtch K G, Dennison P E, Glenn E P, Ehleringer J R. Sap flux-scaled transpiration by tamarisk (*Tamarix spp.*) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1467-1475.

参考文献:

- [11] 刘海军, Cohen S, Tanny J, 黄冠华. 应用热扩散法测定香蕉树蒸腾速率. *应用生态学报*, 2007, 18(1): 35-40.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 6 March, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Review and Monograph

- Forest health studies based on remote sensing: a review GAO Guanglei, XIN Zhongbao, DING Guodong, et al (1675)
- Progress of agent-based agricultural land change modeling: a review YU Qiangyi, WU Wenbin, YANG Peng, et al (1690)

Autecology & Fundamentals

- Dynamic distribution of *Nemopilema nomurai* in inshore waters of the northern Liaodong Bay, Bohai Sea WANG Bin, QIN Yubo, DONG Jing, et al (1701)
- Full length cDNA cloning and tissue expression of prophenoloxidase from *Oratosquilla oratoria* LIU Haiying, LIU Lianwei, JIANG Yusheng, et al (1713)
- Morphometrics investigation of the skulls, mandibles and molar in *Tupaia belangeri* from Yunnan, Guizhou, Guangxi ZHU Wanlong, JIA Ting, HUANG Chunmei, et al (1721)
- Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, et al (1731)
- The photosynthetic carbon fixation characteristics of common tree species in northern Zhejiang ZHANG Jiao, SHI Yongjun, ZHU Yueqing, et al (1740)
- Diurnal changes in the photosynthetic characteristics of two high yield and high quality grasses during different stages of growth and their response to changes in light intensity GUO Chunyan, LI Jinchuan, YUE Jianying, et al (1751)
- Evaluation technology on drought disaster to yields of winter wheat based on WOFOST crop growth model ZHANG Jianping, ZHAO Yanxia, WANG Chunyi, et al (1762)
- Genetic diversity of *Conocephalus maculatus* of different geographic populations based on mitochondrial DNA control region analysis ZHOU Zhijun, SHANG Na, LIU Jing, et al (1770)
- Relationships among female body size, clutch size, and egg size in captive *Deinagkistrodon acutus* HU Minghang, TAN Qunying, YANG Daode (1778)
- The field control of *Bactrocera dorsalis* (Hendel) with parasitoid and sterile male ZHENG Sining, HUANG Juchang, YE Guanglu, et al (1784)
- Allelopathic effects of artemisinin on ectomycorrhizal fungi LI Qian, YUAN Ling, WANG Mingxia, et al (1791)

Population, Community and Ecosystem

- Establishment of integrated methodology for bay ecosystem health assessment and its application in Daya Bay LI Chunhou, LIN Lin, XU Shannan, et al (1798)
- The influence of upwelling and water mass on the ecological group distribution of zooplankton in Zhejiang coastal waters SUN Lufeng, KE Chang, XU Zhaoli, et al (1811)
- Identification of key ecosystem for ecological restoration in semi-arid areas: a case study in Helin County, Inner Mongolia PENG Yu, GAO Ying, FENG Jinzhao, et al (1822)
- The great rainfall effect on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain JIN Guanyi, ZHAO Xiuhai, KANG Fengfeng, et al (1832)
- The litter-fall characteristics and their response to drought stress in the Masson pins forests damaged by acid rain at Chongqing, China WANG Yihao, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al (1842)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Thermal environment effect of urban water landscape YUE Wenze, XU Lihua (1852)
- Landscape ecological security pattern associated with the introduction of exotic tree species *Eucalyptus* ZHAO Xiaoqing, HE Chunlan (1860)
- Ecological balance between supply and demand in Chongqing City based on cultivated land ecological footprint method SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1872)
- Effect of elevated CO₂ on methanotrophs in the rhizosphere of rice plant YAN Chen, XU Jing, ZHONG Wenhui, et al (1881)

Resource and Industrial Ecology

- The seawater environment quality evaluation research base on variable fuzzy pattern recognition model KE Lina, WANG Quanming, SUN Xinguo, et al (1889)
- An *in situ* study on biodeposition of ascidian (*Styela plicata*) in a subtropical aquaculture bay, southern China YAN Jiaguo, QI Zhanhui, TIAN Ziyang, et al (1900)
- Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau ZHANG Lina, LI Jun, FAN Peng, et al (1907)
- Soil respiration and its responses to soil moisture and temperature under different tillage systems in dryland maize fields ZHANG Dingchen, CAI Dianxiong, DAI Kuai, et al (1916)
- Photosynthetic characteristics of soybean and salvia in an agroforestry system in the Hilly Region, Shangluo, China PENG Xiaobang, ZHANG Shuoxin (1926)
- Regulation of exogenous brassinosteroid on growth and photosynthesis of *Helianthus tuberosus* seedlings and cadmium biological enrichment under cadmium stress GAO Huiling, LIU Jinlong, ZHENG Qingsong, et al (1935)
- Calibration coefficients of Granier original formula based on sap flow of *Platycladus orientalis* LIU Qingxin, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (1944)

Research Notes

- An evaluation index system classifying the conservation value of wetland nature reserves based on AHP SUN Rui, CUI Guofa, LEI Ting, et al (1952)
- Root biomass and its distribution of *Azadirachta indica* and *Acacia auriculiformis* plantations in the Dry-hot Valley GAO Chengjie, TANG Guoyong, LI Kun, et al (1964)
- Physiological response of *Vitex trifolia* to sand burial in the sand coast ... ZHOU Ruilian, WANG Jin, YANG Shuqin, et al (1973)
- Soil fertility under different forest types in the Helan and Liupan Mountain ranges of Ningxia Province JIANG Lin, GENG Zengchao, ZHANG Wen, et al (1982)

Opinions

- Dynamic of litterfall in ten typical community types of Xiaoxing'an Mountain, China HOU Lingling, MAO Zijun, SUN Tao, et al (1994)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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)

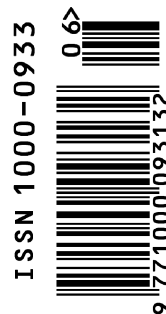
第 33 卷 第 6 期 (2013 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 6 (March, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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 90.00 元