

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性	刘 波, 郑雪芳, 孙大光, 等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应	尹 红, 王 靖, 刘洪滨, 等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程	李海波, 李英华, 孙铁珩, 等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划	肖 燧, 陈圣宾, 张 路, 等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例	鲁春霞, 刘 铭, 冯 跃, 等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征	许倍慎, 周 勇, 徐 理, 等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响	李宁云, 袁 华, 田 昆, 等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例	宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力	韩道瑞, 曹广民, 郭小伟, 等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究	张 杰, 张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价	孙才志, 杨 磊, 胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性	黄 静, 崔胜辉, 李方一, 等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析	钟林生, 王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者	褚福印, 唐思贤, 潘虎君, 等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响	朱俊霞, 王 勇, 张美文, 等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统	祁 君, 苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究	张 琳, WANG Baode, 许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系	杨忠岐, 王小艺, 王 宝, 等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响	李 乐, 万冬梅, 刘 鹤, 等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究	宋 伦, 杨国军, 李 爱, 等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征	王海梅, 李政海, 乌 兰, 等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响	兰春剑, 江 洪, 黄梅玲, 等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理	赵风华, 王秋凤, 王建林, 等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较	巩国丽, 陈 辉, 段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响	雍石泉, 仝 川, 庄晨辉, 等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性	谢彩香, 索风梅, 贾光林, 等 (7551)
芑对黑麦草根茎几种低分子量有机分泌物的影响	谢晓梅, 廖 敏, 杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定	张丽珍, 樊晶晶, 牛 伟, 等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响	安 娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建	楼 波, 徐 毅, 林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响	张远东, 刘世荣, 顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展	胡广录, 赵文智, 王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物	高 东, 何霞红, 朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征	刘 刚, 沈守云, 闫文德, 等 (7625)
氯氟菊酯和溴氟菊酯对蓼花臂尾轮虫生殖的影响	黄 林, 刘昌利, 韦传宝, 等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等	(I)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境, 同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中, 但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变, 形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭, 绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬, 远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

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

张远东, 刘世荣, 顾峰雪. 西南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响. 生态学报, 2011, 31(24): 7601-7608.

Zhang Y D, Liu S R, Gu F X. The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7601-7608.

西南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响

张远东¹, 刘世荣¹, 顾峰雪²

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091;

2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要:国内曾有许多研究认为, 长江上游亚高山地区的森林具有增加流域年径流量的作用, 所以多年来一直以此来指导该区域的森林恢复与经营实践。将以往的径流场和集水区的观测数据结合起来, 应用加权平均插值方法, 建立了森林采伐后产水量变化的时间序列; 使用 SEBAL 模型、液流测定结果和水量平衡方程, 根据以往研究结果, 计算了各森林植被类型的年蒸散量和年产水量。分析结果表明: 西南亚高山老龄暗针叶林蒸散低, 具有较高的产水量; 老龄林采伐后产水量增加, 但随着次生植被的快速恢复, 产水量增加的持续时间很短, 6a 后即恢复到原有水平; 之后伴随着演替进入灌丛、次生阔叶林、针阔混交林或人工云杉林阶段, 产水量会进一步下降并长期处于相对较低的水平, 而且会持续百年以上。以往研究中该区森林可以增加年径流量的结论, 只适用于其所研究的老龄暗针叶林, 不适用于原始林采伐后恢复起来的天然次生林和人工营造的云杉林。在天然次生林和人工林占主导的区域, 森林覆盖率增加导致产水量减少, 人工林减少尤甚。为深入认识西南亚高山森林的生态水文功能, 应采用配对集水区试验长期观测研究, 才能为亚高山森林的恢复和经营管理提供决策支持。

关键词:森林采伐; 产水量; 配对集水区试验; 西南亚高山

The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China

ZHANG Yuandong¹, LIU Shirong¹, GU Fengxue²

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Forest harvest increases annual water yield, which is a general conclusion from paired catchment experiments in forest hydrology. However, there have been many studies suggesting that the subalpine forests harvest decreased annual water yield in Yangtze River upper reaches, these conclusions was used to guide forest restoration and management practices in the region for many years.

In this study, meta-analysis for compiling data from many former studies was used to analyze annual water yield changes resulting from change in vegetation in the subalpine region of southwestern China. Data from previous runoff plots and catchment runoff studies were combined to setup the time series of annual water yield after forest harvest, the absent value were interpolated with weighted average method. The annual evapotranspiration (ET) and annual water yield of all vegetation types in the Miyaluo sub-alpine forest region were calculated by using the Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model, sap flow measurements, and water balance equation.

基金项目:国家自然科学基金项目 (30590383, 31070398); 林业公益性行业重大科研专项 (201104006, 200804001); “十一五”科技支撑项目 (2006BAD03A04) 资助

收稿日期: 2011-06-16; 修订日期: 2011-09-14

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

Our results showed that old dark coniferous forests have a lower annual ET and a higher annual water yield, compared with shrubs, naturally regenerated forests and spruce plantations after harvests. In naturally regenerated areas, water yield increased rapidly in the first three years after the harvest of old growth forests, and returned to the original level at the 6th year, and then declined continuously to a relatively lower level over a long-period that was corresponding to the vegetation succession into the shrubs, secondary broad-leaved forests, mixed forests with broad-leaved and conifer or spruce plantations. The period with a relatively lower annual water yield could sustain more than a century. Our results suggested that the conclusion that forest increased the annual water yield might only apply to old growth forests dominant by firs, and might not apply to the naturally regenerated forests and spruce plantations in the harvested areas. In the catchment covered with the naturally regenerated forests and spruce plantations, annual runoff decreased with increasing forest coverage, especially for spruce plantations. We thus recommend that the paired catchments experiment should be carried out to improve our understanding on the hydrological functions of the sub-alpine forests, and thus provide effective decision support for forest restoration and management practices in the region.

Key Words: forest harvest; water yield; paired catchment experiment; subalpine region of southwest China

研究森林植被变化对流域产水量的影响,国际上通常采用配对集水区的试验方法。Bosch 和 Hewlett^[1]在总结 94 个配对集水区试验结果的基础上,得出了较为普遍性的规律,即森林采伐导致流域产水量增加的结论。Brown 等^[2]在总结 166 个配对集水区试验研究的基础上,将其分为四类,分别是造林试验、毁林试验、再生长试验和森林转换试验。毁林(森林采伐后转换为农田或草场)将导致产水量不断增加,直到 4—6 a 后达到新的平衡^[3-4]。森林再生长是指试验集水区森林采伐后又自然恢复为原有状态,这种情况下采伐初期产水量将会增加,但随着恢复时间的推移,这种增加将会逐渐消失,并于 7—15 a 后在原产水量附近达到新的平衡^[5-7]。森林转换是指森林采伐后优势树种发生了变化,这种情况下采伐初期产水量也会增加,增量也随时间逐渐减少并达到新的平衡,但平衡时的产水量与更换树种的水分利用特征有关^[8]。总体说来,森林采伐初期产水量会增加,但产水量增加随着森林的恢复而逐渐减少,最终达到新的平衡状态,这成为森林采伐及恢复过程中产水量变化的一般性规律^[6]。

国内研究的多数结论也是如此。刘世荣等^[9]对我国森林集水区研究做了比较全面细致的总结和对比,从地跨我国寒温带、温带、亚热带、热带的集水区试验结果来看,除川西亚高山林区外,森林覆盖率的减少会不同程度地增加河川年径流量。石培礼等^[10]对国内森林植被变化对水文过程和径流的影响效应进行了综述,认为不同地区森林植被变化对径流的影响幅度相差较大,但比较一致的结论是:除长江上游外,森林砍伐会降低植被层的蒸发散,增加河川径流;反之,会减少河川径流量。由此看来,除长江上游外,国内的研究结论与国际上是一致的。

长江上游位于青藏高原东缘,地形复杂,新构造运动活跃,岩体松散,地震频繁,是一个生态环境非常脆弱的地区。亚高山暗针叶林是该区主要的森林类型,这些森林集中分布于金沙江、雅砻江、岷江等流域及其支流,是我国西南亚高山水源涵养林的重要组成部分。早在 20 世纪 60 年代,中国林科院和四川林科院就在川西米亚罗林区开展了森林水文试验研究,得到的主要结论是:亚高山森林具有增加年径流量的作用,即采伐森林,导致流域年径流量减少^[11-13]。李荣昌等^[14]对长江上游几组流域的对比分析表明,多林流域径流系数较无林或少林流域大。程根伟^[15]使用统计学方法,对四川境内长江上游各支流 60—80 年代的径流数据进行了分析,结果表明随森林覆盖率的增加,年径流量和径流系数增加。国内关于长江上游森林水文效应的结论主要来自上述文献,这些文献中的结论与国际普遍性规律及国内其它地区的研究结果相驳。长江上游森林水文效应具有其特殊性吗?以往研究的试验设计是否存在不足之处?本文采用元分析方法,综合分析以往的研究案例和数据,深入剖析该区森林植被变化与流域产流量的关系,以期给出更加科学的解释。

1 研究区概况

西南亚高山林区位于青藏高原东南缘, 为中国林业区划一级分区。该区主要地貌是高山峡谷。受地形的影响, 气温和降水空间差异显著, 植被垂直成带明显, 其类型和生境随海拔与坡向分异。原生森林分布于海拔 2400—4200 m 之间, 以亚高山暗针叶林为主, 优势树种为冷杉(*Abies* spp) 和云杉(*Picea* spp)。西南亚高山林区是我国南部和东南亚主要河流(包括长江、怒江和湄公河等)的水源区, 素有“中华水塔”之称, 同时也是我国的重点伐区, 20 世纪 50—80 年代曾是我国第二大木材生产基地。新中国成立之前, 亚高山森林以林龄 200a 以上的老龄暗针叶林为主, 占森林面积的 80% 以上^[16]。50 年代中期至 90 年代末, 老龄暗针叶林被大面积采伐, 伐后部分迹地上陆续进行了以粗枝云杉(*Picea asperata*)、川西云杉(*Picea balfouriana*)、峨眉冷杉(*Abies fabri*) 为主的人工更新^[17]。无论是在迹地还是人工云杉林内, 都普遍出现了大量的桦木(*Betula* spp.) 等阔叶先锋树种的天然更新^[18]。目前, 西南亚高山森林正处于大规模的自然与人工恢复过程之中, 天然更新的次生阔叶林、针阔混交林和人工云杉林是该区域的主要森林类型。

2 研究方法

西南亚高山森林生态站和森林水文试验站开展森林植被与水文过程的关系研究, 包括川西岷江上游的米亚罗、卧龙、大渡河流域的贡嘎山 3 个站点。米亚罗森林水文试验开始于 1960 年, 包括配对集水区试验、径流场试验和森林生态系统降水分配测定。卧龙森林水文试验开始于 20 世纪 90 年代, 包括单一集水区观测、径流场试验和森林生态系统降水分配测定。贡嘎山森林水文试验开始于 80 年代后期, 包括嵌套集水区观测和森林生态系统降水分配测定。由于卧龙和贡嘎山站均在其所属的国家级自然保护区范围之内, 不能进行森林采伐作业, 其观测数据不能分析森林采伐对产水量的影响。

米亚罗配对集水区试验^[11-12]中, 对照集水区面积 3.31 km², 平均坡度 30°; 森林覆盖率为 70%, 流石滩 20%, 其余为草甸、农耕地。森林以老龄冷杉林占绝对优势, 林龄在 200a 以上, 疏密度 0.6—0.8, 林下灌木为箭竹和杜鹃。处理集水区面积 2.905 km², 平均坡度 35°, 森林面积 1.25 km², 以老龄冷杉林占绝对优势, 1954—1962 年采伐 0.81 km², 采伐方式为块状皆伐, 串坡集材, 木滑道运材, 林线和山脊附近设有保留带; 伐后植被恢复繁茂, 1—3a 为草本阶段, 4—10a 为悬钩子灌丛阶段, 10a 之后逐渐进入桦木林阶段。对照集水区测定时段为 1961、1962、1965、1966、1967 年生长季, 处理集水区测定时段为 1965、1966、1967 年生长季。特别需要指出的是, 处理集水区 1965 年开始测定时, 迹地已进入悬钩子灌丛的自然演替阶段, 并同时伴随着桦、杨等幼树的天然更新。

米亚罗径流场试验包括 2 个径流场^[19]。在毗邻的马尔康林区, 森林类型和气候水文条件与米亚罗相近^[19-20], 该处 3 个径流场的测定结果也用于本分析^[21]。上述径流场试验均包括处理和对照径流场, 对照径流场为老龄暗针叶林, 处理径流场为面积相同或相近的皆伐迹地。

由于米亚罗森林集水区测定时间短、不连续, 尤其是缺乏采伐后紧邻数年的观测数据, 本文将集水区和径流场试验结果结合起来, 使用加权平均插值方法, 建立森林采伐后产水量变化的时间序列。考虑到径流场试验仅测定地表径流, 不包括渗透量, 其径流系数远低于集水区径流系数, 本研究使用径流系数变化的相对量(%)表示, 其计算公式如下:

$$VR = (RO_T - RO_C) / RO_C \times 100\%$$

式中, VR 、 RO_T 、 RO_C 分别为径流系数变化率、处理区径流系数和对照区径流系数。缺失年份使用前后两年的平均值, 当前一年或后一年数据也缺失时, 则使用再前(后)一年的数据, 并赋予 1/3 权重, 另一侧紧邻年份赋予 2/3 权重。

米亚罗林区不同森林植被类型的蒸散量和产水量, 使用 SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) 模型和水量平衡方程计算^[22]; 其中的针叶林包括老龄暗针叶林和人工云杉林, 没有进行区分。本文根据米亚罗老龄暗针叶林和人工云杉林的面积^[23], 结合张雷^[24]使用液流方法测定的该区主要林分冠层蒸腾量, 使用以下方程组计算老龄暗针叶林和人工云杉林的年蒸散量; 并通过水量平衡方程计算二者的年产

水量^[22]:

$$\begin{cases} ET_{OG}/ET_{SP} = T_{OG}/T_{SP} \\ a_1ET_{OG} + a_2ET_{SP} = ET_{CF} \end{cases}$$

式中, ET_{OG} 、 ET_{SP} 、 ET_{CF} 分别为老龄暗针叶林、人工云杉林和全部针叶林的年蒸散量, ET_{CF} 为 SEBAL 模型计算结果; T_{OG} 、 T_{SP} 分别为老龄暗针叶林和人工云杉林的林分冠层蒸腾量, 来自于液流测定估算结果; a_1 、 a_2 分别为老龄暗针叶林和人工云杉林占全部针叶林面积的比例。

3 结果与讨论

3.1 配对集水区森林采伐对径流量的影响

从图 1 可以看出, 亚高山老龄暗针叶林皆伐后产水率大幅上升, 但是伴随着迹地植被自然恢复过程而迅速下降, 大约 5—6a 后就与对照持平, 之后产水率随植被恢复和演替继续下降。按照 Brown 等^[2] 对配对集水区研究的分类, 米亚罗老龄林采伐后产生的植被变化表现为优势树种的更换, 即老龄冷杉林转换为天然次生灌丛及桦木林。按照 Brown 等^[2] 的归纳结论, 这种情况下一般规律是森林采伐初期产水量会增加, 增量随时间逐渐减少并达到新的平衡, 但平衡时的产水量与新树种的水分利用特征有关^[8]。作为最节水的树种之一, 冷杉单位干重叶片的蒸腾速率只有桦木的九分之一^[25]。老龄暗针叶林生长缓慢, 心腐率高达 47%^[16]。这些都导致老龄暗针叶林的蒸散很低。在全国主要森林类型中, 老龄暗针叶林的蒸散占降水量的比例是最低的, 在生长季为 30%—40% 左右^[11,13], 非生长季会更低。因此, 老龄暗针叶林采伐后迹地植被的快速恢复导致产水量增加的持续时间很短, 进入灌丛阶段后产水量很快就与对照持平了, 并随着桦木等先锋树种的天然更新而持续下降。根据张雷^[22] 对川西米亚罗、卧龙林区 3 种主要树种液流的测定, 液流速率粗枝云杉 (30a) > 桦木 (30a) > 冷杉 (200a); 按照边材面积折算的林分最大冠层蒸腾量 30 年生人工云杉林 (3.17 mm/d) > 30 年生次生桦木林 (2.08 mm/d) > 老龄冷杉林 (1.69 mm/d)。Zhang 等^[22] 使用 SEBAL 模型计算了 2000 年川西米亚罗林区针叶林、阔叶林、针阔混交林和灌丛的年蒸散量, 其中的针叶林包括老龄暗针叶林和人工云杉林; 根据米亚罗老龄暗针叶林和人工云杉林的面积^[23], 结合张雷^[24] 使用液流方法测定的主要林分冠层蒸腾量, 可计算出老龄暗针叶林和人工云杉林的年蒸散量 (图 2)。从图 2 可以看出, 年蒸散量由小至大为老龄暗针叶林、灌丛、针阔混交林、落叶阔叶林和人工云杉林, 年产水量则正好相反。人工云杉林由于高的耗水性, 对流域产水量下降的影响最为显著。在川西米亚罗林区, 落叶阔叶林为次生桦木林和山杨桦木林, 针阔混交林主要为桦木冷杉林^[23], 都属于该区森林演替的前期阶段^[26]。由于桦木林属先锋群落, 从演替初

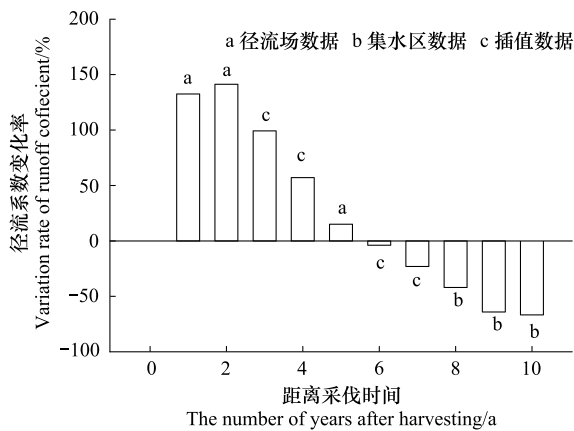


图 1 亚高山老龄暗针叶林皆伐后径流系数的相对变化
Fig.1 The relative variation of runoff coefficient after clear-cut harvesting in subalpine old growth dark coniferous forests
a 径流场数据; b 集水区数据; c 插值数据

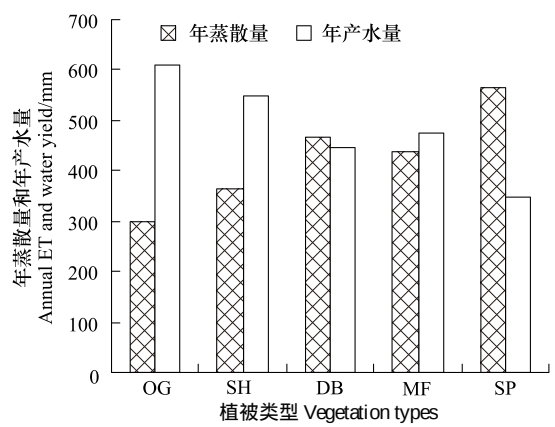


图 2 米亚罗林区 2000 年主要植被类型的年蒸散量和年产水量
Fig.2 Annual ET and annual water yield of main vegetation types in Miyaluo in 2000
OG 老龄暗针叶林; SH 灌丛; DB 落叶阔叶林; MF 针阔混交林; SP 人工云杉林

期阶段发展到顶级群落的老龄暗针叶林将需要百年以上的漫长时间, 所以这一过程引起的产水率下降也将持续相对长的时间。

国际配对集水区试验中也发现, 老龄林采伐后短期内产水量大幅低于对照集水区的若干案例。在澳大利亚东南部, 王桉老龄林 (*Eucalyptus regnans*) 试验集水区于 1972 年采伐, 之后自然恢复, 产水量 5a 后就与对照集水区持平, 之后持续下降^[27] (图 3)。Vertessy 等^[28] 分析了王桉林龄与集水区水量平衡之间的关系, 发现采伐后迅速更新林分的冠层较旺盛的蒸腾作用是试验集水区产水量大幅下降的主要原因 (图 4)。该研究结果表明, 王桉老龄林采伐后产水量的降低将会持续较长的时间, 将会从伐后第 6 年后开始一直持续 150a 以上, 直到再次演替成老龄林。Roberts 等^[29] 对不同林龄 *Eucalyptus sieberi* 林分的蒸腾研究也表明, 随着林龄增加, 森林的蒸腾量同样会有较大的降低, 并由此推断, 如果没有未知因子对该类森林的水分平衡施加显著影响, 那么与王桉林一样, 该老龄林的采伐也会引起产水量的长期持续减少。另外, Hornbeck 等^[5] 研究 Hubbard Brook 各种森林作业对产水量的长期影响时, 其中有一个老龄林集水区 (HB2) 试验, 在采伐 15a 后产水量开始持续低于对照区, 并认为其缘于更新恢复的次生林蒸散量高于原来生长缓慢的老龄林的蒸散量。

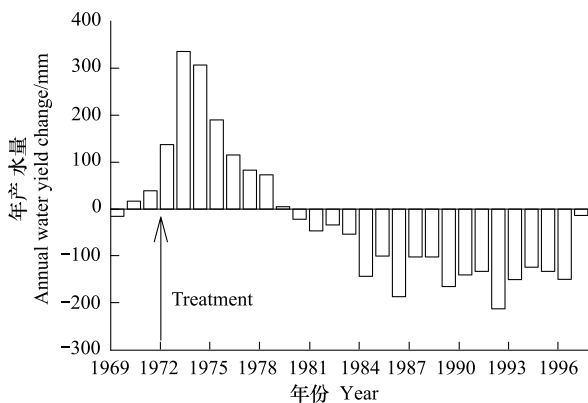


图 3 王桉老龄林集水区 78% 皆伐后的年产水量变化^[27]

Fig. 3 Variation of annual water yield after 78% clear-cut harvest in a *Eucalyptus regnans* catchment^[27]

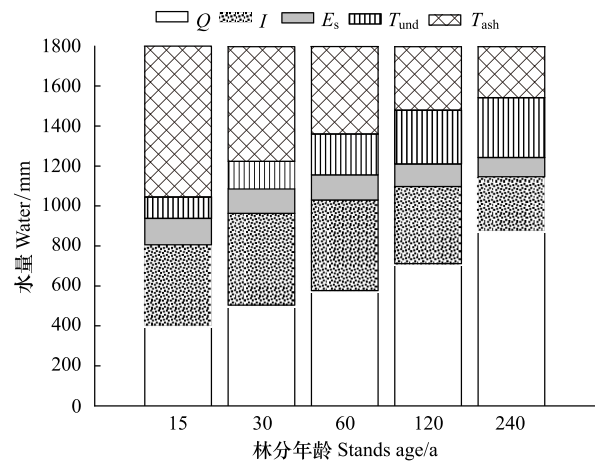


图 4 不同林龄王桉林的水量平衡^[28]

Fig. 4 Water balance among *Eucalyptus regnans* forests with different stand age^[28]

Q 为年均产水量; I 为年均截留量; E_s 为地表年均蒸发量; T_{und} 为灌草层年均蒸腾量; T_{ash} 为冠层年均蒸腾量

在米亚罗集水区试验中, 处理集水区缺乏采伐前后的连续观测数据。当最初的采伐开始 11a 后才进行观测, 迹地已经进入灌丛演替阶段, 并伴随桦、杨幼树的天然更新。所以, 马雪华^[11] 和黄礼隆^[12] 得出的森林能够增加年径流量的结论, 只能适用于老龄暗针叶林的演替阶段。从长期分析看, 天然次生林演替阶段将会使产水量下降维持较长的时间。另外, 川西地区人工造林多采用速生的针叶树种—粗枝云杉, 其液流速率和冠层蒸腾量又大于天然次生的桦木林^[24], 因此, 人工云杉林的产水量将会下降更多 (图 2)。

3.2 大流域森林覆被率变化对径流量的影响

李荣昌等^[14]、程根伟^[15] 对长江上游 1960—1980 年各支流的统计分析结果表明, 随森林覆盖率的增加, 年径流量和径流系数增加。这一结论与其分析的时段密切相关。建国初期, 西南亚高山林区作为中国主要的木材生产基地之一, 实施了大规模的森林采伐利用 (图 5), 导致了长江上游亚高山地区占主导地位的老龄暗针叶林被采伐, 森林景观发生了巨变, 取而代之的是各种天然次生植被或人工林。由于地形复杂, 木材运输困难, 林区开发遵循由近及远、先易后难、便利生产、方便生活的原则^[30]。50 年代, 森林开发主要在东部的四川岷江上游、大渡河流域的云冷杉林和云南南盘江的云南松林; 60 年代中期后, 陆续向西开发雅砻江、金沙江和澜沧江林区。1949—1980 年间, 先后在四川和云南高山林区建立了 40 个国有森工企业 (四川 23 个, 云南 17

个),成为西南亚高山森林经营的主体。50 年代建立的森工企业,在 60 年代中期就出现可采资源不足,70 年代末基本殆尽。以岷江上游较早建立的川西森工局为例,1953—1965 年共采伐 428.2 万 m^3 ,占全部可采资源的 73% (图 6)。由于 1960—1980 年间正是西南亚高山老龄暗针叶林大规模采伐期,采伐后从草本阶段很快进入次生灌丛阶段,繁茂的次生灌丛植被的耗水高于老龄暗针叶林(图 1,图 2),但由于该时期灌丛还没有演替至森林阶段,未统计为森林;因此,在大规模采伐期,该地区年径流系数随森林覆被率增加而增加。在这一时期,森林仍然以老龄暗针叶林占主体。但随着演替时间的延长,次生灌丛陆续演替进入天然次生林或人工云杉林阶段,由于这些次生森林类型耗水量高于灌丛(图 2),所以原有结论不会再成立。在森林恢复期,随着天然次生林和人工林面积的增加,流域产水量和径流系数都将减少。

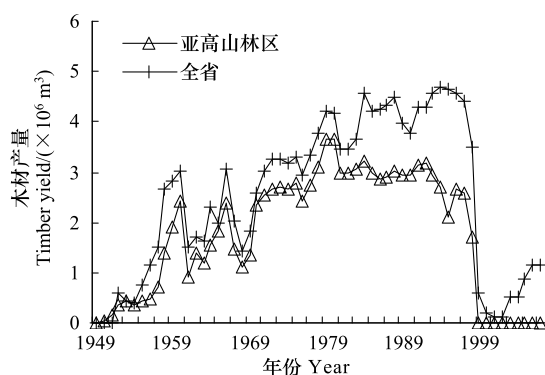


图 5 四川全省与川西高山林区木材产量

Fig. 5 Timber yield in subalpine region of west Sichuan and in Sichuan

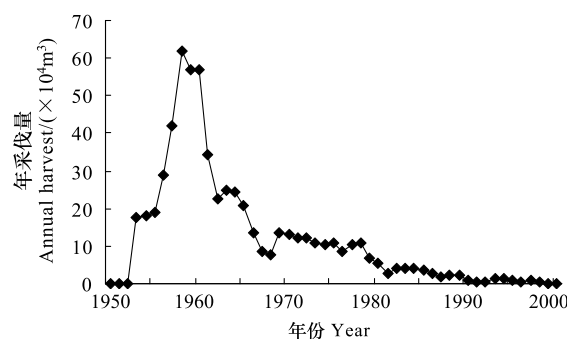


图 6 川西森工局森林采伐进程

Fig. 6 Annual harvest of forest in Chuanxi Forest Industrial Enterprise

4 结论

西南亚高山老龄暗针叶林蒸散量低,具有较高的产水量;老龄暗针叶采伐后,流域产水量增加,但是,由于采伐迹地植被恢复很快,产水量增加所持续的时间很短,6a 后即恢复到原有水平。伴随着恢复演替进入灌丛、次生阔叶林、针阔混交林或人工云杉林阶段,产水量进一步下降,长期处于较低的水平,这种状态应当会持续百年以上的时间。西南亚高山森林采伐所引起的径流变化,实际上与国际上公认的普遍性规律是一致的,并非特例,属老龄林采伐后的树种转换。在西南亚高山地区以往研究中,所得到的森林可以增加年径流量的结论,只适用于森林处于老龄暗针叶林阶段的情况。由于老龄暗针叶林蒸散低于灌丛,在森林以老龄暗针叶林占主导的大规模采伐期,森林覆被率增加导致径流增加;但随着植被演替,次生灌丛陆续进入天然次生林或人工林阶段,这些森林类型占主导地位,出现了树种更换和森林类型的变化,则仍然会出现森林覆盖率增加导致流域径流减少的现象。

川西米亚罗森林集水区试验前后只有 5a,1967—1979 年因试验区森林划归森工企业采伐利用,配对集水区试验被迫停止,西南亚高山林区唯一仅有的配对集水区试验就此结束。20 世纪 80 年代后期开始的单一或嵌套集水区观测均为自然保护区中的老龄林集水区。目前,西南亚高山林区处于大规模的自然或人工恢复过程中,同时受到气候变暖的影响而产生明显的响应,亟待采用配对集水区试验长期观测研究,才能为西南亚高山天然林保育、恢复和多目标可持续经营提供科学的决策支持。

References:

- [1] Bosch J M, Hewlett J D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 1982, 55(1/4): 3-23.
- [2] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, Western A W, Vertessy R A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 2005, 310(1/4): 28-61.

- [3] Ruprecht J K, Schofield N J. Analysis of streamflow generation following deforestation in southwest Western Australia. *Journal of Hydrology*, 1989, 105(1/2): 1-17.
- [4] Silberstein R P, Adhitya A, Dabrowski C. Changes in flood flows, saturated area and salinity associated with forest clearing for agriculture. CRC for Catchment Hydrology, Technical Report. Monash: Monash University, 2003.
- [5] Hornbeck J W, Adams M B, Corbett E S, Verry E S, Lynch J A. Long-term impacts of forest treatments on water yield: a summary for northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 1993, 150(2/4): 323-344.
- [6] Stednick J D. Monitoring the effects of timber harvest on annual water yield. *Journal of Hydrology*, 1996, 176(1/4): 79-95.
- [7] Swank W T, Vose J M, Elliott K J. Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143(1/3): 163-178.
- [8] Bren L, Hopmans P. Paired catchments observations on the water yield of mature eucalypt and immature radiata pine plantations in Victoria, Australia. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(3/4): 416-429.
- [9] Liu S R, Wen Y G, Wang B, Zhong G Y. *Ecohydrological Functions of Forests Ecosystems in China*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 203-206.
- [10] Shi P L, Li W H. Influence of forest cover change on hydrological process and watershed runoff. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 481-487.
- [11] Ma X H. Preliminary study on hydrological function of fir forest in Miyaluo region of Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1987, 23(3): 253-265.
- [12] Huang L L. Preliminary studies on water conservative functions of alpine forest in western Sichuan//Li C B, ed. *Ecological Research of Sichuan Forest*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1990: 109-126.
- [13] Liu S R, Sun P S, Wang J X, Chen L W. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 451-456.
- [14] Li C R, Tu L B. The influence of forests on the annual flow in rivers and its significance. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1983, (3): 31-43.
- [15] Cheng G W. An approach to the relationship between runoff characters and forest in the basin of Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 5(1): 48-52.
- [16] Yang Y P. The analyses of harvest and regeneration problems in alpine forest region of western Sichuan//Sichuan Institute of Forestry Science, ed. *Collected Papers of research materials of alpine forestry in Sichuan. Volume II*. 1979: 1-4.
- [17] The Editorial Board of Forests in Sichuan. *Forests in Sichuan*. Beijing: China Forestry Publishing House, 1990: 1348-1352.
- [18] Zhou D Z, Yang Y P. Preliminary studies on regeneration characteristic of birch in alpine forest of western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1980, 16(2): 154-156.
- [19] Ma X H. Effect of harvesting on forest soil and water in alpine dark coniferous forests in west Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 1963, 8(2): 149-158.
- [20] Jiang Y X. Community characteristic and classification principle of alpine dark coniferous in Miyaluo, west Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1963, 1(1/2): 42-50.
- [21] Chen Y K, Huang L L. Preliminary studies on soil erosion by water on different slash in Maerkang forest region of western Sichuan//Sichuan Institute of Forestry Science, ed. *Collected Papers of research materials of alpine forestry in Sichuan. Volume I*. 1972: 86-91.
- [22] Zhang Y D, Liu S R, Wei X H, Liu J T, Zhang G B. Potential impacts of afforestation on water yield in the subalpine region of southwestern China. *Journal of the American Water Resources Association*, 2008, 44(5): 1144-1153.
- [23] Zhang Y D, Liu S R, Zhao C M. Spatial pattern of sub-alpine forest restoration in west Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(9): 1706-1710.
- [24] Zhang L. Spatial-Temporal Variations of Water Use of Indigenous Tree Species in Upstream Catchment of Minjiang — A Case Study of Sapflow Measurement [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2008: 31-52.
- [25] Zhou X F, Zhao H X, Sun H Z. Proper assessment for forest hydrological effect. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 420-426.
- [26] Shi L X, Wang J X, Su Y M, Hou G W. Earlier-stage succession of vegetation on the clear-cuts in Miyaluo forest district in western Sichuan. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1988, 12(4): 306-313.
- [27] Watson F G R, Vertessy R A, McMahon T A, Rhodes B G, Watson I S. The hydrologic impacts of forestry on the Maroondah catchments. Report No 99/1. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Monash: Monash University, 1999: 80-80.
- [28] Vertessy R A, Fred G R, Watson F G R, O'Sullivan S K. Factors determining relations between stand age and catchment water balance in mountain ash forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143(1/3): 13-26.
- [29] Roberts S, Vertessy R A, Grayson R G. Transpiration from *Eucalyptus sieberi* (L. Johnson) forests of different age. *Forest Ecology and*

Management, 2001, 143(1/3): 153-161.

[30] Wang J G. Sichuan Forestry Annals. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1994: 381-383.

参考文献:

- [9] 刘世荣, 温远光, 王兵, 周光益. 中国森林生态系统水文生态功能规律. 北京: 中国林业出版社, 1996: 203-206.
- [10] 石培礼, 李文华. 森林植被变化对水文过程和径流的影响效应. 自然资源学报, 2001, 16(5): 481-487.
- [11] 马雪华. 川西米亚罗地区高山冷杉林水文作用的研究. 林业科学, 1987, 23(3): 253-265.
- [12] 黄礼隆. 川西高山林区森林水源涵养性能的初步研究//李承彪. 四川森林生态研究. 成都: 四川科学技术出版社, 1990: 109-126.
- [13] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 陈林武. 长江上游森林植被水文功能研究. 自然资源学报, 2001, 16(6): 451-456.
- [14] 李荣昌, 屠六邦. 关于森林对河川年流量的影响及其意义. 南京林产化工学院学报, 1983, (3): 31-43.
- [15] 程根伟. 四川盆地江河经流特征与森林关系的探讨. 水土保持学报, 1991, 5(1): 48-52.
- [16] 杨玉坡. 川西高山林区采伐更新问题的剖析//四川省林业科学研究所. 四川高山林业研究资料集刊. 第二集. 1979: 1-4.
- [17] 四川森林编辑委员会. 四川森林. 北京: 中国林业出版社, 1992: 1348-1352.
- [18] 周德彰, 杨玉坡. 四川西部高山林区桦木更新特性的初步研究. 林业科学, 1980, 16(2): 154-156.
- [19] 马雪华. 川西高山暗针叶林区的采伐与水土保持. 林业科学, 1963, 8(2): 149-158.
- [20] 蒋有绪. 川西亚高山暗针叶林的群落特点及其分类原则. 植物生态学与地植物学丛刊, 1963, 1(1/2): 42-50.
- [21] 陈永锟, 黄礼隆. 川西马尔康林区不同迹地水土流失的初步观测//四川省林业科学研究所. 四川高山林业研究资料集刊. 第一集. 1972: 86-91.
- [23] 张远东, 刘世荣, 赵常明. 川西亚高山森林恢复的空间格局分析. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1706-1710.
- [24] 张雷. 基于液流技术的岷江上游典型乔木树种水分利用的时空变异性研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008: 31-52.
- [25] 周晓峰, 赵惠勋, 孙慧珍. 正确评价森林水文效应. 自然资源学报, 2001, 16(5): 420-426.
- [26] 史立新, 王金锡, 宿以明, 侯广维. 川西米亚罗地区暗针叶林采伐迹地早期植被演替过程的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(4): 306-313.
- [30] 王继贵. 四川林业志. 成都: 四川科学技术出版社, 1994: 381-383.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《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 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 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