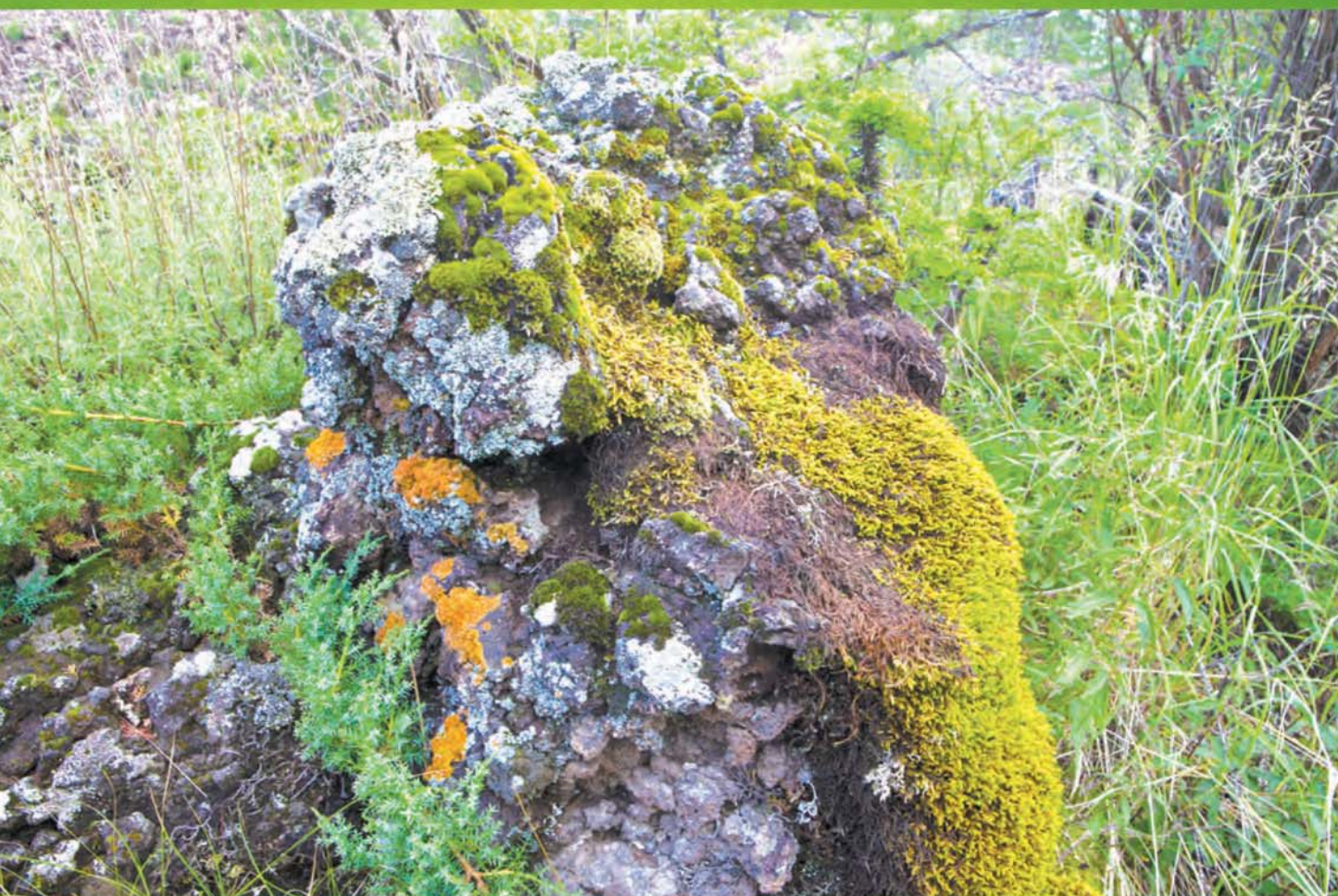


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

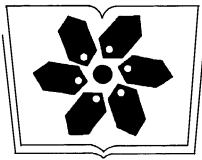
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第6期 Vol.32 No.6 **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 6 期

2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

高原草被退化程度的遥感定量监测——以甘肃省玛曲县为例·····	周坚华,魏怀东,陈芳,等 (1663)
基于着生藻类的太子河流域水生态系统健康评价·····	殷旭旺,渠晓东,李庆南,等 (1677)
哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用·····	杞金华,章永江,张一平,等 (1692)
青岛沿岸水体原生生物群落与水质状况的关系·····	杨金鹏,姜勇,胡晓钟 (1703)
增温对青藏高原高寒草甸生态系统固碳通量影响的模拟研究·····	亓伟伟,牛海山,汪诗平,等 (1713)
三峡水库消落带植物叶片光合与营养性状特征·····	揭胜麟,樊大勇,谢宗强,等 (1723)
三峡库区澎溪河鱼类时空分布特征的水声学·····	任玉芹,陈大庆,刘绍平,等 (1734)
强壮前沟藻化感物质分析·····	冀晓青,韩笑天,杨佰娟,等 (1745)
饥饿对中间球海胆 MYP 基因转录表达的影响·····	秦艳杰,孙博林,李霞,等 (1755)
贺兰山牦牛冬春季的生境选择·····	赵宪南,苏云,刘振生,等 (1762)
利用元胞自动机研究一类捕食食饵模型中的斑块扩散现象·····	杨立,李维德 (1773)
转 <i>Cry1Ab</i> 和 <i>Cry1Ac</i> 融合基因型抗虫水稻对田间二化螟和大螟种群发生动态的影响·····	李志毅,隋贺,徐艳博,等 (1783)
光谱和光强度对西花蓟马雌虫趋光行为的影响·····	范凡,任红敏,吕利华,等 (1790)
荧光素对舞毒蛾核型多角体病毒不同地理品系的增效与光保护作用·····	王树娟,段立清,李海平,等 (1796)
不同利用强度下绿洲农田土壤微量元素有效含量特征·····	李海峰,曾凡江,桂东伟,等 (1803)
稻田温室气体排放与土壤微生物菌群的多元回归分析·····	秦晓波,李玉娥,石生伟,等 (1811)
黄土高原典型区域土壤腐殖酸组剖面分布特征·····	党亚爱,李世清,王国栋 (1820)
紫色土菜地生态系统土壤 N_2O 排放及其主要影响因素·····	于亚军,王小国,朱波 (1830)
中国亚热带典型天然次生林土壤微生物碳源代谢功能影响因素·····	王芸,欧阳志云,郑华,等 (1839)
基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图·····	刘鹏飞,宋轩,刘晓冰,等 (1846)
淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征·····	杨志敏,陈玉成,张赞,等 (1854)
推迟拔节水对小麦氮素积累与分配和硝态氮运移的影响·····	王红光,于振文,张永丽,等 (1861)
江苏省冬小麦渍害的风险区划·····	吴洪颜,高苹,徐为根,等 (1871)
草原植物根系起始吸水层深度测定方法及其在不同群落状态下的表现·····	郭宇然,王炜,梁存柱,等 (1880)
亚热带 6 种树种细根序级结构和形态特征·····	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (1888)
高寒草原植物群落种间关系的数量分析·····	房飞,胡玉昆,张伟,等 (1898)
菊花近缘种属植物幼苗耐阴特性分析及其评价指标的确定·····	孙艳,高海顺,管志勇,等 (1908)
南方菟丝子寄生对喜旱莲子草生长及群落多样性的影响·····	王如魁,管铭,李永慧,等 (1917)
基于 cDNA 克隆的亚热带阔叶林和针叶林生态系统担子菌漆酶基因多样性及其群落结构研究·····	陈香碧,苏以荣,何寻阳,等 (1924)
细柄阿丁枫和米槠细根寿命影响因素·····	黄锦学,凌华,杨智杰,等 (1932)
基于 TM 遥感影像的森林资源线性规划与优化配置研究·····	董斌,陈立平,王萍,等 (1943)
基于 CFD 的城市绿地空间格局热环境效应分析·····	刘艳红,郭晋平,魏清顺 (1951)
专论与综述	
生态补偿效率研究综述·····	赵雪雁 (1960)
研究简报	
黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响·····	陈凯,肖能文,王备新,等 (1970)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 34 * 2012-03	

封面图说: 植物生命演进石——这不是一块普通的火山岩,而是一块集中展示植物“原生演替”过程最有价值的石头。火山熔岩冷却后的玄武岩是无生命无土壤的真正“裸石”,风力使地衣的孢子传入,在一定温湿度环境下,开始出现了壳状地衣,壳状地衣尸体混合了自然风化的岩石碎屑提供的条件使叶状、枝状地衣能够侵入,接着苔藓侵入,是它们启动了土壤的形成,保持了土壤的湿度,并使营养物质反复循环。于是蕨类定居,草丛长了起来,小灌木出现,直到树木生长,最终形成森林。

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

DOI: 10.5846/stxb201103030259

纪金华, 章永江, 张一平, 刘玉洪, 杨秋云, 宋亮, 巩合德, 鲁志云. 哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其在应对西南干旱中的作用. 生态学报, 2012, 32(6): 1692-1702.

Qi J H, Zhang Y J, Zhang Y P, Liu Y H, Yang Q Y, Song L, Gong H D, Lu Z Y. Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1692-1702.

哀牢山常绿阔叶林水源涵养功能及其 在应对西南干旱中的作用

纪金华^{1,2}, 章永江^{1,3,*}, 张一平^{1,2}, 刘玉洪^{1,2}, 杨秋云¹, 宋 亮^{1,4},
巩合德^{1,4}, 鲁志云^{1,2}

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 勐仑 666303; 2. 中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站, 景东 676200;

3. 迈阿密大学生物系, 美国迈阿密 33124; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 为了解云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林在 2010 年初西南地区特大干旱中是否遭遇水分胁迫, 及其水源涵养功能在应对干旱中的作用, 测定了该森林土壤和主要树种在 2010 年旱季的水分状况, 并对比研究了原生林和森林经砍伐烧垦后形成的毛蕨菜-玉山竹群丛的土壤持水、凋落物持水、水面蒸发和土壤水分季节动态。结果表明: 常绿阔叶林主要树种在 2010 年初西南特大干旱中并未遭受水分胁迫 (最早月叶片凌晨水势高于 -0.4 MPa)。虽然常绿阔叶林土壤含水量和地下水位在最早月都达到了有观测以来的最低点, 但主要根系分布区的土壤水势仍不低于 -0.5 MPa, 并高于毛蕨菜-玉山竹群丛。森林较好的水分状况和原生常绿阔叶林较好的水源涵养功能有关。常绿阔叶林的土壤总持水量尤其是非毛管持水量要显著大于毛蕨菜-玉山竹群丛, 同时也大于云南地区的一些次生林和人工林。常绿阔叶林地表丰富的凋落物通过持水和抑制土壤蒸发也对水源涵养有一定作用。哀牢山常绿阔叶林良好的水源涵养功能, 充足的土壤地下水储存弥补了旱季和特大干旱中降水的不足。结果指示原生林在水源涵养中不可替代的作用, 以及加强原生林保护在提高区域抗干旱能力中的重要意义。

关键词: 西南特大干旱; 孔隙度; 水势; 蒸发量; 水源涵养; 凋落物

Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought

QI Jinhua^{1,2}, ZHANG Yongjiang^{1,3,*}, ZHANG Yiping^{1,2}, LIU Yuhong^{1,2}, YANG Qiuyun¹, SONG Liang^{1,4}, GONG Hede^{1,4}, LU Zhiyun^{1,2}

1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China

2 Ailaoshan Station for Subtropical Forest Ecosystem Studies, Chinese Academy of Sciences, Jingdong 676200, China

3 Department of Biology, University of Miami, Miami, FL 33124, USA

4 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Southwest China experienced the most severe drought in 100 years in the late 2009 and early 2010. The effects of this severe drought event on forest ecosystems in this region were un-assessed. The aims of this study were (1) to assess if the evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain, Southwest China, experienced water deficits in the 2010 rainfall anomaly event; (2) to understand the contribution of forest water storages in mitigating the effects of rainfall anomaly events; and (3) to assess the effects of logging on the water-holding capacity of an ecosystem. Water status of soils and major tree

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30670320)

收稿日期: 2011-03-03; **修订日期:** 2011-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyj@xtbg.ac.cn

species from a primary evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain were monitored in the 2010 dry season. Soil and litter water-holding capacities of a primary forest and a secondary *Yushania-Pteridium* shrub-land formed after logging and burn were compared. Inter-annual and seasonal variations in soil groundwater table and relative water content of the forest and the *Yushania-Pteridium* shrub-land were also analyzed. Trees in the evergreen broadleaf forest did not experience water deficits even in the driest month (predawn leaf water potential was higher than -0.5 MPa), and the photosynthetic performance of the trees did not show symptom of long-term depression (predawn maximum quantum efficiency of Photosystem II was higher than 0.80). Soil water content and groundwater table depth of the forest reached an historical minimum during the 2010 Southwest China rainfall anomaly event, however enough soil water was still available for plants during the driest month of 2010 (water potential of the soil layer where the roots were growing was still higher than -0.5 MPa). The soil water potential of the evergreen broadleaf forest was higher than the *Yushania-Pteridium* shrub-land, suggesting better water availability for plants in the primary forest compared to the secondary *Yushania-Pteridium* shrub-land. The relatively high soil water availability of the primary evergreen broadleaf forest during the rainfall anomaly event is because of its good water-holding capacity, which allows sufficient rainfall in the wet season to be stored in the soil, and to be available to plants in the dry season. The soil water-holding capacity, especially noncapillary water-holding capacity of the evergreen broadleaf forest soils in Ailao Mountain was higher than that of the *Yushania-Pteridium* shrub-land soils, and higher than those of some other secondary forests in this region. In addition, the abundant litters in the forest floor also contribute to the water storage function of the forest through holding water, preventing evaporation, and decreasing surface runoff. The seasonal dynamics in ground water table and soil relative water content also suggest a larger soil water-storage-pool size of the forest than that of the *Yushania-Pteridium* shrub-land. In conclusion, the evergreen broadleaf forests in Ailao Mountain possess a strong water storage function, and the sufficient ground water and soil water storages mitigated the shortage of rainfall in dry seasons and in severe rainfall anomaly events. Therefore, our study suggests the irreplaceable role of primary forests in mitigating the effects of rainfall anomaly events, and the importance of protecting primary forests in enhancing the capacity of this region in coping with rainfall anomaly events.

Key Words: Southwest China severe drought; porosity; water potential; evaporation; soil water storage; litter

干旱是影响生态系统初级生产力和碳汇功能的重要环境因子^[1-3],也是影响农业生产的最主要气象灾害之一^[4-5]。在2009年底和2010年初,我国西南地区5省市(云、贵、川、桂、渝)遭遇百年一遇的特大干旱,耕地受旱面积达633万 hm^2 ,有1893万人和1173万头牲畜饮水困难,出现了作物干枯、河道断流等现象^[6-8],而该地区森林生态系统所受影响尚未得到评估。根据气候变化模型,虽然全球总降水量将有所增加,但因降雨强度的增加和频度的减少,这种极端干旱事件的频度将增加,干旱期时间将延长,干旱强度将加重^[9-12]。因此了解不同森林类型对极端干旱事件的响应及其水源涵养功能在应对干旱中的作用,对制定有效地干旱应对和森林及水资源保护策略有重要的指导意义。

水源涵养是森林生态系统的重要功能之一^[13-14]。而森林土壤是森林涵养水源的主要载体,林木地上部分持水量仅占林分水源涵养能力的15%左右^[15-16]。植物的根系和枯枝落叶可以提高土壤孔隙度,尤其是非毛管孔隙度,并为雨水的下渗和储存提供了通道和贮存空间,具有良好的水文效应^[17-18]。不同的植被类型的水源涵养功能也存在着一定的差异^[19]。国内外对森林植被土壤的水源涵养报道较多^[20-23],但对于森林和森林被砍伐或烧垦后形成的灌木林地或草地的土壤水源涵养的对比研究,以及水源涵养在应对极端干旱事件中作用的研究却较少。对比研究原生林和原生林遭砍伐烧垦后形成的灌木林或草地将有利于了解原生林在水源涵养方面的重要作用以及森林砍伐对地区水文带来的负面影响。

哀牢山纵贯云南中南,是我国云贵高原、横断山地和青藏高原的结合部,是云南亚热带北部与亚热带南部的过渡区,也是植物区系地理成分荟萃之地,因而,具有十分重要的保护和研究价值。中山湿性常绿阔叶林是

哀牢山分布面积较广、面积最大的植被类型,是该山东西两侧江河的重要水源林之一。该地区气候干湿交替明显,因而中山湿性常绿阔叶林的水文调控功能显得尤为重要。哀牢山常绿阔叶林在提供该地区的生产用水上也有十分重要的作用^[24]。鉴于哀牢山常绿阔叶林在水文调节和区域用水供应方面的重要作用,研究该森林对 2010 年初西南地区重大干旱的响应,以及原生常绿阔叶林的水源涵养功能具有十分重要的意义。

本文以哀牢山中山湿性常绿阔叶林(以下简称常绿阔叶林)和砍伐烧垦后形成的毛蕨菜-玉山竹群丛为研究对象,探讨常绿阔叶林的水源涵养功能及其在应对干旱中的作用。旨在于:1)了解哀牢山常绿阔叶林是否在 2010 年初西南地区特大干旱中遭遇水分胁迫;2)评估两种植被水源涵养功能并和该地区人工次生林比较以讨论原生林的重要作用和原生林破坏的影响;3)了解森林水源涵养功能在应对干旱中的作用;4)探讨森林资源保护和森林恢复在提高区域抗干旱能力中的作用。本研究将加深对森林水源涵养功能的科学认识,并为该区域的森林资源保护和管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

本研究在哀牢山国家级自然保护区境内的景东县徐家坝开展,地理位置为 24°32'N,101°01'E,海拔 2450 m。本区属西南季风性气候,终年温凉潮湿。年平均温度为 11.3℃,最热月(7 月)平均气温 15.3℃,最冷月(1 月)平均气温 5.0℃,极端最高气温 25.0℃,极端最低气温-8.3℃。该区年降水量为 1931.1 mm,雨季(5—10 月)降水量占年降水总量的 85%左右。年平均相对湿度为 83%。高于 10.0℃的积温达 3420℃,全年无霜期约 180 d,日照时数为 1239 h。林地土壤为山地黄棕壤^[24]。

原生的常绿阔叶林和次生的毛蕨菜-玉山竹群丛是徐家坝地区的两大植被类型。以木果柯(*Lithocarpus xylocarpus*)、硬斗柯(*L. jingdongensis*)、变色锥(*Castanopsis wattii*)和南洋木荷(*Schima noronhai*)等为优势种的原生常绿阔叶林约占本区域总面积的 80%。该植被的垂直分布为乔木层、灌木层和草本层,乔木高 25—30 m,平均盖度达 90%以上。乔木层除木果柯、硬斗柯、变色锥和南洋木荷之外,还有黄心树(*Machilus bombycina*)、滇润楠(*Machilus yunnanensis*)、大花八角(*Illicium macranthum*)、红花木莲(*Manglietia insignis*)、珊瑚冬青(*Ilex corallina*)、薄叶马银花(*Rhododendron leptothrium*)和舟柄茶(*Hartia sinensis*)等;灌木层以箭竹(*Sinarundinaria nitida*)为优势种,盖度达 75%左右;草本层优势种有细梗苔草(*Carex teinogyne*)、粗齿冷水花(*Pilea sinofasciata*)、金凤仙(*Impatiens cyathiflora*)、滇西瘤足蕨(*Plagiogyria communis*)、平卧蓼(*Polygonum strindbergii*)、球序蓼(*Polygonum wallichii*)和紫花沿阶草(*Ophiopogon wallichianus*),盖度约 40%左右。

毛蕨菜-玉山竹群丛是常绿阔叶林在遭受不同强度的干扰和破坏,经过反复砍伐或烧垦后在排水良好的坡地上形成的次生植被。目前,该植被类型主要分布在保护区边缘和徐家坝水库周围^[25]。其群落高度 50—120 cm,上层盖度为 90%,以玉山竹(*Yushania nittakayamensis*)、毛蕨(*Pteridium revolutum*)、芒种花(*Hypericum uralum*)、地檀香(*Gaultheria forrestii*)和朝天罐(*Osbeckia opipara*)为优势种;下层盖度为 60%—70%,由白果草莓(*Fragaria nilgeerensis*)、鞭打绣球(*Hemiphragma heterophyllum*)、大籽簕芽菜(*Swertia macrosperma*)、滇龙胆草(*Gentiana rigescens*)、狭叶兔儿风(*Ainsliaea angustifolia*)、簕姑草(*Stellaria vestita*)和巨序剪股颖(*Agrostis gigantea*)等物种组成。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择

常绿阔叶林样地选在哀牢山森林生态系统研究站以南的原生林内,沿东西方向各设置 20 m × 20 m 的样地 16 块,每块间隔 50 m。在每块样地内沿对角线挖取 3 个深度为 150 cm 的土壤剖面。毛蕨菜-玉山竹群丛样地选在站区以北的徐家坝水库周围,以同样的方法设置样地和挖取土壤剖面。于 2009 年 8—10 月对以上两种植被类型的物种进行调查,调查参照高贤明等^[26]的方法。

1.2.2 叶片凌晨水势测定

于 2010 年旱季最早的月份(3 月)选取哀牢山常绿阔叶林 5 个便于凌晨采样的主要常绿树种,于日出前

(6:30—7:30)在不同个体上采 6 片完全成熟阳生叶用于测定水势。叶片采集后立即放置于有湿纸球的密封袋中,并将密封袋储存于保温箱中。样品采集完成后立即运送至生态站实验室进行测定。叶片水势由压力室水势仪(PMS, Corvallis, OR, USA)测定。

1.2.3 叶片凌晨荧光的测定

用便携式脉冲调制荧光仪 FMS-2(英国 Hansatech 公司)测定哀牢山常绿阔叶林 5 个主要常绿树种凌晨荧光。19:00 左右在树上剪下枝条迅速放到水中,在水下剪掉 5—10 cm。带回实验室后用黑色塑料袋围住,放在无灯光的室内。第 3 天 6:00 用便携式荧光仪测定光系统 II(PS II)光化学效率(F_v/F_m)。用弱测量光测定初始荧光(F_0),随后给一个强闪光($5000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,脉冲时间 0.7 s)测得最大荧光 F_m 。光系统 II 的光化学效率 F_v/F_m 由仪器自动给出^[27]。

1.2.4 凋落物持水量和蓄积量的测定

在所选样地每块(20 m × 20 m)对角线上的 10 个位置,按 20 cm × 20 cm 的小样方调查凋落物的厚度,按未分解层、半分解层和完全分解层 3 个层次进行取样。凋落物的蓄积量、最大持水率和持水量参照魏强等^[16]的方法进行测定。凋落物最大持水率计算为:

$$L = (W_w - W_d) / W_d \times 100\% \quad (1)$$

式中, L 为凋落物最大持水率(%); W_w 为凋落物浸水后的重量(kg); W_d 为凋落物干重(kg)。

凋落物持水量计算为:

$$V = LC$$

式中, V 为凋落物持水量(t/hm^2); C 为凋落物蓄积量(t/hm^2); L 为凋落物最大持水率。

1.2.5 土壤孔隙度及持水量的测定

在所选林内外样地各个剖面分别按土壤层(0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm、40—50 cm、50—70 cm、70—90 cm、90—110 cm、110—130 cm、130—150 cm)用不锈钢环刀取样,每土壤层 3 个重复。采用中国生态系统研究网络陆地生态系统水环境观测规范^[28]中的方法测定土壤含水量、土壤容重及土壤孔隙度;采用孙红艳等^[29]的方法计算出土壤最大持水量、毛管持水量和非毛管持水量,计算公式为:

$$W_t = 10000P_t h \quad (2)$$

$$W_0 = 10000P_0 h \quad (3)$$

$$W_c = 10000P_c h \quad (4)$$

式中, W_t 为土壤最大持水量(t/hm^2); W_0 为土壤非毛管持水量(t/hm^2); W_c 为土壤毛管持水量(t/hm^2); P_t 为土壤总孔隙度(%); P_0 为土壤非毛管孔隙度(%); P_c 为土壤毛管孔隙度(%); h 为土层厚度(m)。

1.2.6 地下水埋深和水面蒸发量的测定

地下水埋深和蒸发量为哀牢山生态站的常规监测。常绿阔叶林和毛蕨菜-玉山竹群丛地下水位观测井各一口,井深 8 m,水埋深每日 14:00 观测 1 次。水面蒸发量用常绿阔叶林和毛蕨菜-玉山竹群丛距地面 1 m 的口径为 20 cm 的蒸发皿观测,每日 20:00 观测 1 次,采用中国生态系统研究网络陆地生态系统水环境观测规范^[28]中的方法计算出日蒸发量。

1.2.7 土壤质量含水量的测定和土壤水势的计算

通过对常绿阔叶林和毛蕨菜-玉山竹群丛土壤剖面的 5 个土壤层(0—10 cm、10—30 cm、30—50 cm、50—100 cm、100—150 cm)土壤质量含水量的动态观测,利用本地不同深度土壤的水分特征曲线计算出各层的土壤水势(MPa)。

1.2.8 数据处理

本研究采用单因素方差分析(One-way Anova)判定常绿阔叶林和毛蕨菜-玉山竹群丛土壤孔隙度、质量含水量、水势、水面蒸发、凋落物特征之间的差异是否显著。统计分析在 SPSS 17.0 软件中进行。

2 结果

2.1 树木水分状况和最大光系统 II 光化学效率

在 2010 年旱季,常绿阔叶林 5 个主要树种的叶片凌晨水势值介于 -0.2 MPa 和 -0.4 MPa 之间,叶片最大

(凌晨)光系统Ⅱ光化学效率介于 0.80 和 0.84 之间(表 1)。

表 1 哀牢山常绿阔叶林主要常绿树种 2010 年旱季的凌晨叶片水势(Ψ_L)和光系统Ⅱ最大量子效率(F_v/F_m)

Table 1 Predawn leaf water potential (Ψ_L) and predawn PSII quantum efficiency (F_v/F_m) of 5 major evergreen tree species from evergreen broadleaf forest of Mount. Ailao in dry season of 2010

	硬斗柯 <i>L. jingdongensis</i>	南洋木荷 <i>S. noronhai</i>	红花木莲 <i>M. insignis</i>	大花八角 <i>I. macranthum</i>	舟柄茶 <i>H. sinensis</i>
凌晨水势 Predawn Ψ_L /MPa	-0.33 ± 0.06	-0.21 ± 0.03	-0.24 ± 0.05	-0.37 ± 0.04	-0.37 ± 0.05
凌晨 F_v/F_m Predawn F_v/F_m	0.83 ± 0.01	0.80 ± 0.02	0.83 ± 0.01	0.84 ± 0.01	0.80 ± 0.01

平均值±标准误(6个重复)

2.2 2010 年 1—4 月和 2011 年 7 月土壤水势特征

在 2010 年旱季,常绿阔叶林和毛蕨菜-玉山竹群丛不同层次的土壤水势在 3 月出现最低值,而 4 月 50 cm 以上土层水势有所升高,50 cm 以下土层变化不大(图 1)。表层土在最早月水势分别为-0.8 MPa(毛蕨菜-玉山竹群丛)和-0.7 MPa(常绿阔叶林)。在 1 和 2 月,常绿阔叶林不同层次的土壤水势均高于毛蕨菜-玉山竹群丛的相应层次。而在 3 月,前者除 0—10 cm 土层水势和后者无差异,其它层次水势远高于后者。在水势最低的 3 月,常绿阔叶林在 10—30 cm 及以下各层的土壤水势均不低于-0.5 MPa,而毛蕨菜-玉山竹群丛的土壤水势在 10—50 cm 各层水势在-0.8 MPa 左右,在 50 cm 以下的各土壤层里其水势均不低于-0.6 MPa。在雨季,两种植被类型各土层水势都高于-0.2 MPa(毛蕨菜-玉山竹群丛的 100—150 cm 土层除外)。

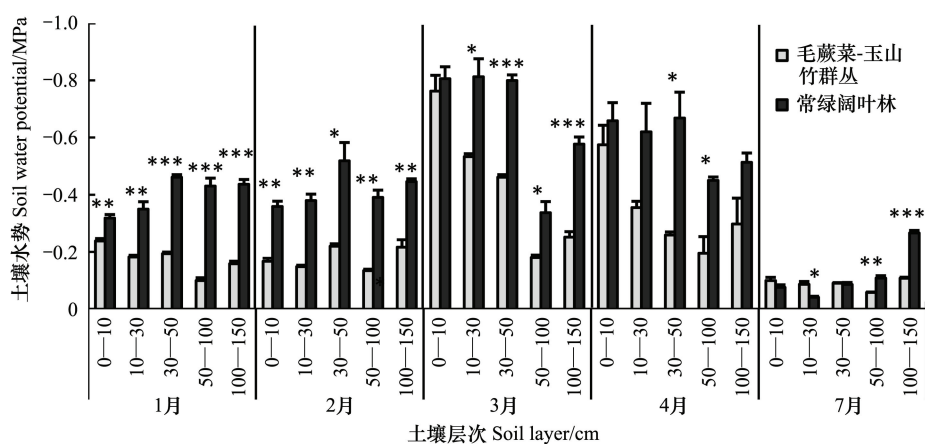


图 1 2010 年旱季(1—4 月)和 2011 年雨季(7 月)不同土壤层水势

Fig. 1 Soil water potentials of different soil layers in 2010 dry season (January to April) and 2011 wet season (July)

平均值-标准误,星号表示两种植被类型间差异显著(*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$)

2.3 不同土壤层次的土壤质量含水量特征

常绿阔叶林 2010 年旱季不同深度(除 110—150 cm 两土层)的土壤质量含水量都显著高于对应深度的毛蕨菜-玉山竹群丛(图 2)。前者含水量随着土壤层的加深而降低,而后者含水量先升高后降低,在 30—40 cm 土壤层含水量最高。两种植被类型表层(0—10 cm)质量含水量差别最大。值得指出的是,常绿阔叶林相对含水量随土壤深度增加而降低,而水势却随土壤深度增加而升高。这是由于不同层次土壤不同的物理特性造成的,深层土由于孔隙较少在同样含水量状态下水势较高。在雨季,常绿阔叶林 40 cm 以上土层质量含水量低于毛蕨菜-玉山竹群丛,而其 40 cm 以下土层质量含水量显著高于后者。

2.4 土壤总孔隙度和非毛管孔隙度

常绿阔叶林大部分层次的土壤总孔隙度(除最深的一层)和非毛管孔隙度(除最深的两层)都显著高于毛蕨菜-玉山竹群丛(图 3)。常绿阔叶林的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度随着土壤层次的加深而减小(图 3),

而毛蕨菜-玉山竹群丛的土壤总孔隙度和非毛管孔隙度随着土壤层次的加深虽呈减小趋势,但在 30—40 cm 层总孔隙度要高于表层。

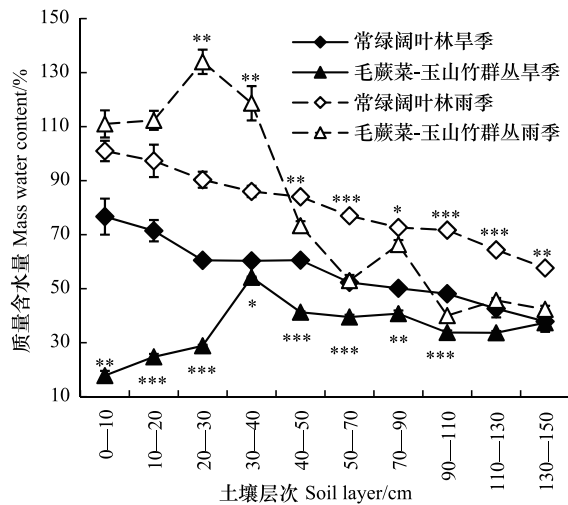


图2 旱季和雨季不同土壤层次的质量含水量对比

Fig. 2 Soil mass water content in different layers in the dry season and wet season

平均值±标准误,星号表示同一深度两种植被类型间差异显著 (* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$)

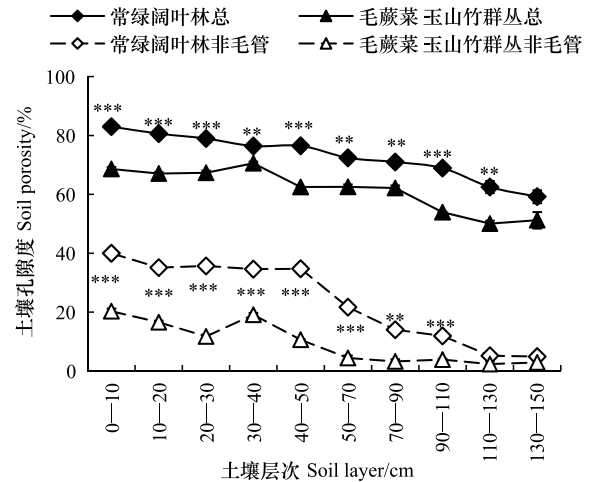


图3 不同土壤层次的土壤孔隙度

Fig. 3 Soil porosity in different soil layers

平均值±标准误,星号表示同一深度两种植被类型间差异显著 (* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$)

2.5 土壤容重和持水

哀牢山两种植被类型不同深度土壤(0—20 cm、20—50 cm)容重均小于 1.00 g/cm^3 (表2),而金沙江流域5种人工或次生林地^[30]的土壤容重均大于 1.00 g/cm^3 。哀牢山常绿阔叶林表层土壤(0—20 cm)的容重在所有类型 and 土壤层次中最小,为 0.48 g/cm^3 。哀牢山常绿阔叶林的土壤最大持水量要显著大于哀牢山毛蕨菜-玉山竹群丛,并大于云南金沙江流域5种林地。云南金沙江流域5种林地和哀牢山毛蕨菜-玉山竹群丛土壤

表2 哀牢山和云南金沙江流域不同植被类型的土壤容重和持水量

Table 2 Bulk density and water-holding capacity among different vegetations in Ailao Mountains and Jinshajiang watershed in Yunnan

植被类型 Vegetation type	土壤层次 Soil layer/cm	容重 Bulk density /(g/cm^3)	最大持水量 Maximum water holding capacity /(t/hm^2)	毛管持水量 Capillary water holding capacity /(t/hm^2)	非毛管持水量 Noncapillary water holding capacity /(t/hm^2)
哀牢山常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	0—20	$0.48 \pm 0.01a$	$1636 \pm 11a$	$885 \pm 1a$	$751 \pm 13a$
	20—50	$0.60 \pm 0.01A$	$2318 \pm 10A$	$1268 \pm 8A$	$1050 \pm 17A$
哀牢山毛蕨菜-玉山竹群丛 Yushania-Pteridium association	0—20	$0.85 \pm 0.01b$	$1357 \pm 4b$	$988 \pm 4b$	$369 \pm 4b$
	20—50	$0.88 \pm 0.01B$	$2004 \pm 3B$	$1589 \pm 2B$	$415 \pm 2B$
云华混交林* Pinus mixed forest	0—20	1.17	1124	927	197
	20—50	1.35	1309	1114	195
华旱混交林* Pinus-Alnus mixed forest	0—20	1.35	1177	980	197
	20—50	1.28	1302	1101	201
云南松纯林* Pinus yunnanensis forest	0—20	1.21	922	781	140
	20—50	1.13	1221	1113	108
华山松纯林* Pinus armand forest	0—20	1.33	834	730	104
	20—50	1.39	1018	932	85
旱冬瓜纯林* Alnus nepalensis forest	0—20	1.31	676	558	118
	20—50	1.17	945	811	134

* 植被数据引自文献^[30],同一列中不同大写或小写字母表示两种植被类型间差异显著($P < 0.05$)

的最大持水量基本相当。哀牢山常绿阔叶林土壤的非毛管持水量显著大于哀牢山毛蕨菜-玉山竹群丛,并远大于金沙江流域 5 种林地。哀牢山毛蕨菜-玉山竹群丛的非毛管持水量略大于金沙江流域 5 种林地。

2.6 水埋深和土壤质量含水量的季节动态

毛蕨菜-玉山竹群丛的最大水埋深出现在 3 月,而常绿阔叶林的最大水埋深出现在 4 月或 5 月(图 4)。常绿阔叶林土壤剖面平均质量含水量随着水埋深的增大而降低,在 3 月或 4 月达到最低,比最大水埋深的出现早 1 个月。常绿阔叶林的水埋深在 2010 年的 3 月达观测以来最大,水位观测井内流动水枯竭。常绿阔叶林在 2010 年旱季水埋深的增大幅度(同雨季相比)大于毛蕨菜-玉山竹群丛。因两口水位观测井所处位置地形和海拔高度略有差异,两者最大水埋深绝对值有约 1.5m 的差异。

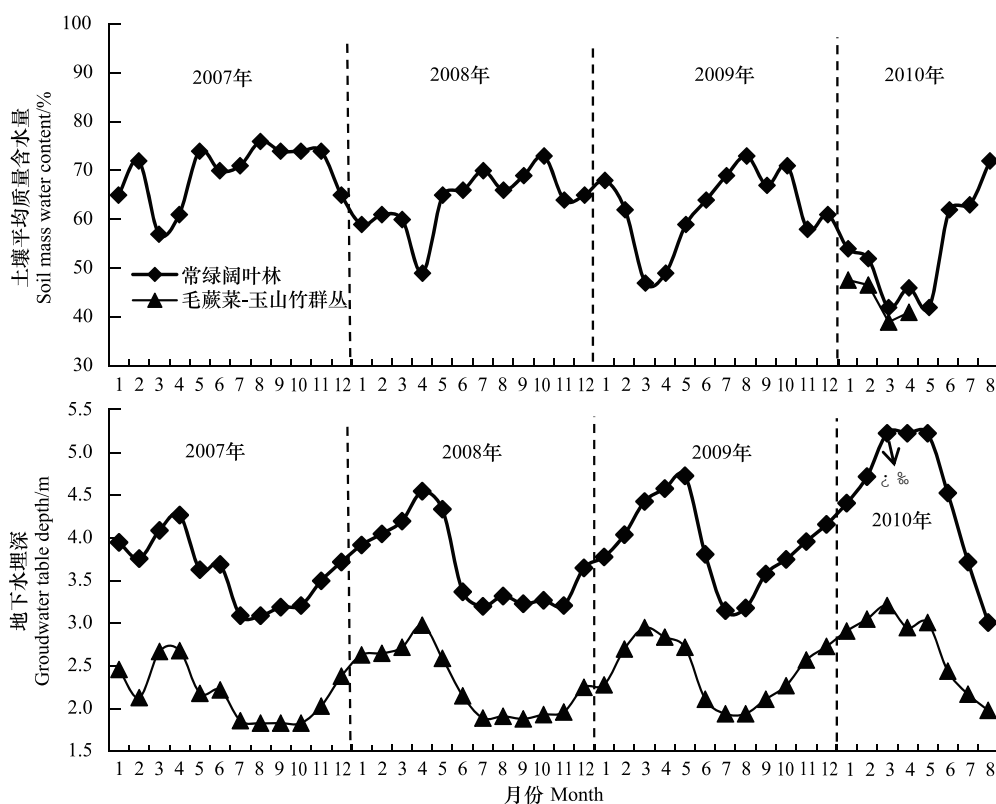


图 4 土壤不同层次平均质量含水量和地下水埋深的季节动态

Fig. 4 Seasonal dynamics of soil mass water content and groundwater table depth

2.7 水面蒸发量月变化特征

毛蕨菜-玉山竹群丛的水面蒸发量显著高于常绿阔叶林。在旱季(3—5 月)二者的差异最大(图 5),前者水面蒸发量是后者的 4 倍多。

2.8 凋落物特性

常绿阔叶林凋落物的厚度、蓄积量、最大持水量和持水率都显著大于毛蕨菜-玉山竹群丛(表 3)。常绿阔叶林的凋落物蓄积量是毛蕨菜-玉山竹群丛的两倍多,而其最大持水量(42.57 t/hm^2)则是毛蕨菜-玉山竹群丛(13.15 t/hm^2)的 3 倍多。

3 讨论

我们的结果表明,在 2010 年初西南地区特大干旱中^[6-8],哀牢山中山湿性常绿阔叶林的主要树种并未遭受水分胁迫。较高的叶片凌晨水势(高于 -0.4 MPa)表明常绿树种维持了较好的水分状态,并有足够的水分供应来弥补树木日间的蒸腾失水。哀牢山植被的根系主要分布在 12—45 cm 土壤层^[31],而哀牢山常绿阔叶林在 10—30 cm 和 30—50 cm 及以下的土壤层次里,水势均不低于 -0.5 MPa ,表明树木能够从土壤中得到足

够的水分。土壤水势反映了土壤水对植物的有效性,与植物光合作用、干物质的积累以及植物生长密切相关^[32]。较高的土壤水势也使得植物光合系统没有受到胁迫(凌晨光系统Ⅱ光化学效率高于0.80)。哀牢山常绿阔叶林在西南干旱中较好的土壤水分状况跟原生常绿阔叶林较好的水源涵养功能有关。

哀牢山原生常绿阔叶林有较大的土壤孔隙度和较好的储水能力,以保证旱季和极端干旱事件中树木的供水。土壤储水能力与土壤总孔隙度,尤其非毛管孔隙度密切相关。非毛管孔隙能较快地容纳降水并及时下渗,对水源涵养十分有利,而不同的植被类型由于土壤特性和非毛管孔隙度不同,其水源涵养功能也存在差异^[19, 29, 33]。森林群落具有显著提高土壤孔隙度、土壤储水量和土壤入渗速率等作用^[34],而常绿阔叶林的土壤孔隙发育好,储水能力也比其它群落强^[35]。哀牢山

原生常绿阔叶林各土壤层的总孔隙度和非毛管孔隙度都要大于次生毛蕨菜-玉山竹群丛,从而使其储水和下渗水能力大于后者。哀牢山原生常绿阔叶林的水源涵养能力也显著高于云南金沙江流域的各种次生人工林。决定土壤储水能力的土壤孔隙度主要和凋落物分解和根系生长发育相关^[36],哀牢山常绿阔叶林高的孔隙度和良好的储水能力跟原生林较好的凋落物分解和根系生长状况相关。毛蕨菜-玉山竹群丛在30—40 cm的土壤层储水量也较高,是因为其根系主要分布于该层^[37]。在雨季,毛蕨菜-玉山竹群丛浅层土含水量高于常绿阔叶林,而深层土含水量却显著低于后者,表明常绿阔叶林具有更好的下渗雨水的能力。原生常绿阔叶林较好的下渗雨水的能力也是其有很好水源涵养的原因之一。因此,原生林在水源涵养上有不可替代的作用,西南地区原生林的大量破坏也加剧了2010年初西南地区的干旱^[7]。

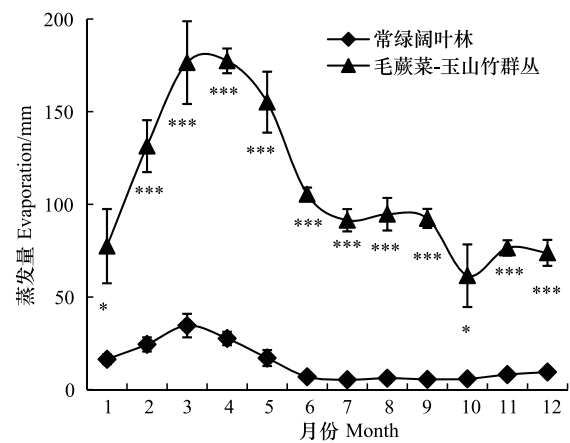


图5 水面蒸发量季节动态

Fig.5 Seasonal variations in water surface evaporation

平均值±标准误,星号表示同一月份两种植被类型间差异显著(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$)

表3 哀牢山两种植被类型凋落物特性

Table 3 Comparisons of characteristics of litter between two vegetations in Ailao Mountain

植被类型 Vegetation type	厚度 Depth /cm	蓄积量 Mass /(t/hm ²)	最大持水率 Maximum water holding ratio /%	最大持水量 Maximum water holding capacity /(t/hm ²)
常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	4.26±0.06a	11.87±0.52a	358.66±6.55a	42.57±2.01a
毛蕨菜-玉山竹群丛 Yushania-Pteridium shrub-land	2.18±0.16b	5.25±0.25b	250.49±9.93b	13.15±0.87b

同一列中不同小写字母表示两种植被类型间差异显著($P < 0.05$)

土壤含水量和地下水位的季节动态也反映了哀牢山常绿阔叶林较好的水源涵养功能。在旱季(11—4月),哀牢山降水稀少而森林蒸腾作用仍在继续,致使土壤含水量降低,并使地下水位下降,水埋深增大。2010年初旱季哀牢山常绿阔叶林的土壤含水量和水埋深已经达到有观测以来的最低点,但是其土壤含水量依然维持在较高水平并能给树木提供充足的水分。这说明2010初的极端干旱尚在哀牢山常绿阔叶林调节范围之内。地下水动态反映了地下水资源的补给、损失,不同的植被覆盖和降雨量分配会对地下水产生影响^[38-40]。常绿阔叶林2010年旱季地下水位下降幅度(同雨季相比)比毛蕨菜-玉山竹群丛大,表明森林生态系统更大的蒸腾耗水。但是其土壤相对含水量却高于后者,表明其更好的地下水利用能力和土壤保水能力。不同于毛蕨菜-玉山竹群丛(水埋深最大值出现在3月或4月),常绿阔叶林的地下水位最低值比毛蕨菜-玉山竹群丛推迟1个月(出现在4月或5月),这也表明了常绿阔叶林土壤储水库更大并需要更多的降水和更长的

时间补充,也说明地下水在3月以后继续发挥补充土壤失水和植被蒸腾失水的作用。常绿阔叶林土壤含水量从3月或4月已经开始回升,而地下水位继续下降,表明这个时候的降雨主要用于补充土壤储水库,而地下水继续被土壤吸收和用于植被蒸腾。因此,哀牢山常绿阔叶林利用储存的土壤水和地下水弥补了旱季降水的不足,在应对干旱中有“以丰补枯”的作用,并且足以应对百年一遇的区域性干旱。

哀牢山常绿阔叶林较厚的凋落物层也有更好的储水、减少土壤蒸发和地表径流以提高森林水源涵养的作用。土壤蒸发发生在表层,而林冠和凋落物对地表的蔽护作用可使林地土壤蒸发大大减少^[41-42]。此外,凋落物层还有减少地表径流和补给土壤水分的功能^[43]。常绿阔叶林林地比毛蕨菜-玉山竹群丛更好的遮阴条件使其水面蒸发量极显著小于毛蕨菜-玉山竹群丛,另外更多更厚的地表覆盖(凋落物的蓄积量更大)也会减少其土壤蒸发失水和地表径流。这些都使得常绿阔叶林较毛蕨菜-玉山竹群丛有更好的水源涵养功能,并保证了其旱季较高的土壤含水量。

综上所述,哀牢山常绿阔叶林具有良好的水源涵养功能。尽管森林有较大的蒸腾耗水,其充足的地下水和土壤水储存使得常绿阔叶林中的树木在百年一遇的干旱中依然有足够的水分供应。哀牢山中山湿性常绿阔叶林的水源涵养和水文调节功能要显著高于砍伐烧垦后形成的次生毛蕨菜-玉山竹群丛和一些人工或次生林。原生林良好的水源涵养能力可能是由于其发达的植物根系有效改善了土壤结构,是森林长期演替发育的结果。原生林丰富的地表凋落物层也通过持水、降低土壤表面蒸发和减少地表径流提高了其土壤保水能力。因此,为提高区域的水源涵养和应对干旱能力,为周边的生物和居民的生产生活提供良好和充足的水源,应让大众了解原生林在涵养水源方面的重要作用,并加强对原生林的保护力度。

致谢:哀牢山亚热带森林生态系统研究站和中国科学院版纳植物园植物生理生态组提供了相应的气象、水文和生物观测数据,杨石建和迈阿密大学 Guillermo Goldstein 教授对写作给予帮助,李小双和李达文协助野外工作,在此一并致谢。

References:

- [1] Krishnan P, Black T A, Grant N J, Barr A G, Hogg E T H, Jassal R S, Morgenstern K. Impact of changing soil moisture distribution on net ecosystem productivity of a boreal aspen forest during and following drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139(3/4): 208-223.
- [2] Granier A, Reichstein M, Bréda N, Janssens I A, Falge E, Ciais P, Grünwald T, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Facini O, Grassi G, Heinesch B, Ilvesniemi H, Keronen P, Knohl A, Köstner O B, Lagergren F, Lindroth A, Longdoz B, Loustau D, Mateus J, Montagnani L, Nys C, Moors E, Papale D, Peiffer M, Pilegaard K, Pita G, Pumpanen J, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Seufert G, Tenhunen J, Vesala T, Wang Q. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143(1/2): 123-145.
- [3] Hao Y B, Wang Y F, Cui X Y. Drought stress reduces the carbon accumulation of the *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 898-906.
- [4] Tao F, Hayashi Y, Zhang Z, Sakamoto T, Yokozawa M. Global warming, rice production, and water use in China: developing a probabilistic assessment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(1): 94-110.
- [5] Lu L P, Cheng C L, Liu W D, Qin Z H. Effect of the agricultural meteorological disasters on agricultural production and its spatial distribution characteristics during the last 30 years in China. *Ecology and Environment*, 2009, 18(4): 1573-1578.
- [6] Wang X J. System thinking for drought management in Southwest China. *China Water Resources*, 2010, (7): 11-13.
- [7] Qiu J. China drought highlights future climate threats. *Nature*, 2010, 465(7295): 142-143.
- [8] Stone R. Severe drought puts spotlight on Chinese dams. *Science*, 2010, 327(5971): 1311-1311.
- [9] Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 327-339.
- [10] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. *Climate Change 2001: The Scientific Basis: Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [11] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, Changnon S A, Karl T R, Mearns L O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [12] IPCC. *Fourth Assessment Report of Working Group III: Summary for Policymakers*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [13] Jiang Z L. Forest Ecology (5): soil and water conservation functions of forest ecosystems (1). *Chinese Journal of Ecology*, 1984, (6): 58-63.

- [14] Gao C D, Yu X X. Review on researches of water conservation forest. Journal of Beijing Forestry University, 2000, 22(5): 78-82.
- [15] Zhu X M, Tian J Y. The study on strengthening anti-scourability and penetrability of soil in loess plateau. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(3): 1-10.
- [16] Wei Q, Zhang Q L, Dai H Y, Guo X. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Daqing Mountain. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 111-115.
- [17] Zhou G Y. Eco-hydrological functions of tropical forest China. Chinese Journal of Ecology, 1997, 16(5): 47-50.
- [18] Li W Y, Man X L, Zhang Y W. Soil properties and water conservation function of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 63-69.
- [19] Wang Q, Zhang Z Y, Xu X N. Soil properties and water conservation function of different forest types in Dabieshan district, Anhui. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(3): 59-62.
- [20] Burt T P, Swank W T. Flow frequency responses to hardwood-to-grass conversion and subsequent succession. Hydrological Processes, 1992, 6(2): 179-188.
- [21] Chen S S. The water holding capacity and soil fertility in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Altingia gracilides*. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 957-961.
- [22] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Characteristics of water conservation of forest ecosystem in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [23] Liu J B. Studies on the water conservation functions of *Cunninghamia lanceolata* natural forest and plantation. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2003, 30(3): 19-22.
- [24] Qiu X Z, Xie S C. Studies on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains Yunnan, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1998.
- [25] You C X. Classification of vegetation in Xujiaba region in Ailao Mountains//Wu Z Y, Qu Z X, Jiang H Q. Studies on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains Yunnan, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1983.
- [26] Gao X M, Wang W, Du X J, Ma K P. Size structure, ecological significance and population origin of *quercus wutaishanica* forest in Beijing Mountainous area. Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25(6): 673-678.
- [27] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence-a practical guide. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659-668.
- [28] CERN Science Commission. Protocols for Standard Water Environmental Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [29] Sun Y H, Zhang H J, Cheng J H, Wang Y J, Shi J, Cheng Y. Soil characteristics and water conservation of different forest types in Jinyun Mountain. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 106-109.
- [30] Peng M J, Lang N J, Wen S L, Guo Y Q, Jiang Q C, Yang X, Zheng K, Guo Y H, Zhang L X. Soil properties and water conservation function of different forest types in Jinshajiang River watershed. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 106-109.
- [31] Deng C Z, Xue J Y, Zhao H K. The vertical distribution of the soil on the western slope at the northern part of the Ailao Mountains//Wu Z Y, Qu Z X, Jiang H Q. Studies on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains Yunnan, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1983.
- [32] Cui X Y, Song J F, Zhang Y H. Some photosynthetic characteristics of *fraxinus mandshurica* seedlings grown under different soil water potentials. Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(6): 794-802.
- [33] Zhao Y Y, Wang Y J, Wang Y Q, Zhao Z J, Wu Y, Chen L. Effects of structures of plantation forests on soil infiltration characteristics in source water protect areas in northern Chongqing City. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [34] Wang M J, Zhang G C, Liu X, Yao X Y. Characteristics of soil water infiltration and water-holding under different forest community in Yimeng Mountainous forest area. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(6): 26-31.
- [35] Zhu Z Y, Ji Y H. A general discussion on research current situation and developing tendency of forest hydrology in china. Journal of Jiangsu Forestry Science and Technology, 2001, 28(2): 42-45.
- [36] Li W Y, Man X L, Zhang Y W. Soil properties and water conservation function of *Betula platyphylla* secondary forest with different stand ages. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(5): 63-69.
- [37] Jiang Y S, Ning S J, Tang R Q. Study on the water conservation benefit of forest vegetation in Jiuwanshan Natural Reserve. Guihaia, 2004, 24(5): 396-401.
- [38] Zhang Y P, Zhang K Y, Ma Y X, Liu Y H, Liu W J. Runoff characteristics of different vegetation covers in tropical region of Xishuangbanna, Yunnan. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1997, 3(4): 25-30.
- [39] Liu Y H, Ma Y X, Liu W J, Zhang Y P, Sha L Q. Study on runoff of man-made plant community in Xishuangbanna. Journal of Soil Water Conservation, 1999, 5(2): 30-34.
- [40] Liu R G, Wang W. Analysis on relation between groundwater level changes and precipitation. Ground Water, 2009, 31(5): 42-44.
- [41] Xiang C H, Jiang J M, Chen Z M. A study on forest hydrological effects in the pingtonghe catchment. Journal of Nanjing Forestry University, 1999, 23(3): 79-82.
- [42] Zhu J Z, Liu J J, Zhu Q K, Wu Q X. Hydro-ecological functions of forest litter layers. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5): 30-34.
- [43] Huang Y L, Fu B J, Chen L D. Advances in ecohydrological process research. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(3): 580-587.

参考文献:

- [3] 郝彦宾, 王艳芬, 崔骁勇. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积. 植物生态学报, 2010, 34(8): 898-906.
- [5] 卢丽萍, 程丛兰, 刘伟东, 覃志豪. 30 年来我国农业气象灾害对农业生产的影响及其空间分布特征. 生态环境学报, 2009, 18(4): 1573-1578.
- [6] 王小军. 应对西南干旱的思考. 中国水利, 2010, (7): 11-13.
- [13] 姜志林. 森林生态学(五): 森林生态系统蓄水保土的功能(1). 生态学杂志, 1984, (6): 58-63.
- [14] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 78-82.
- [15] 朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1-10.
- [16] 巍强, 张秋良, 代海燕, 郭鑫. 大青山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2008, 22(2): 111-115.
- [17] 周光益. 中国热带森林水文生态功能. 生态学杂志, 1997, 16(5): 47-50.
- [18] 李文影, 满秀玲, 张阳武. 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 63-69.
- [19] 王勤, 张宗应, 徐小牛. 安徽大别山区不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2003, 17(3): 59-62.
- [21] 陈绍栓. 杉木细柄阿丁枫混交林涵养水源功能和土壤肥力的研究. 生态学报, 2002, 22(6): 957-961.
- [22] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 北京市森林生态系统的水源涵养功能. 生态学报, 2008, 28(11): 5619-5624.
- [23] 刘剑斌. 杉木天然林和人工林涵养水源功能研究. 福建林业科技, 2003, 30(3): 19-22.
- [24] 邱学忠, 谢寿昌. 哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社, 1998.
- [25] 游承侠. 哀牢山徐家坝地区的植被分类//吴征镒, 曲仲湘, 姜汉桥. 云南哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社, 1983.
- [26] 高贤明, 王巍, 杜晓军, 马克平. 北京山区辽东栎林的径级结构、种群起源及生态学意义. 植物生态学报, 2001, 25(6): 673-678.
- [28] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统环境观测规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [29] 孙艳红, 张洪江, 程金花, 王玉杰, 石健, 程云. 缙云山不同林地类型土壤特性及其水源涵养功能. 水土保持学报, 2006, 20(2): 106-109.
- [30] 彭明俊, 郎南军, 温绍龙, 郭永清, 江期川, 杨旭, 郑科, 郭玉红, 张立新. 金沙江流域不同林分类型的土壤特性及其水源涵养功能研究. 水土保持学报, 2005, 19(6): 106-109.
- [31] 邓纯章, 薛敬意, 赵恒康. 哀牢山北段西坡的土壤垂直分布//吴征镒, 曲仲湘, 姜汉桥. 云南哀牢山森林生态系统研究. 昆明: 云南科技出版社, 1983.
- [32] 崔晓阳, 宋金凤, 张艳华. 不同土壤水势条件下水曲柳幼苗的光合作用特征. 植物生态学报, 2004, 28(6): 794-802.
- [33] 赵洋毅, 王玉杰, 王云琦, 赵占军, 吴云, 陈林. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2010, 30(15): 4162-4172.
- [34] 王梦军, 张光灿, 刘霞, 姚孝友. 沂蒙山林区不同森林群落土壤水分贮存与入渗特征. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 26-31.
- [35] 祝志勇, 季永华. 我国森林水文研究现状及发展趋势概述. 江苏林业科技, 2001, 28(2): 42-45.
- [36] 李文影, 满秀玲, 张阳武. 不同林龄白桦次生林土壤特性及其水源涵养功能. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 63-69.
- [37] 将运生, 宁世江, 唐润琴. 九万山自然保护区森林植被涵养水源效益的初步研究. 广西植物, 2004, 24(5): 396-401.
- [38] 张一平, 张克映, 马友鑫, 刘玉洪, 刘文杰. 西双版纳热带地区不同植被覆盖地域径流特征. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4): 25-30.
- [39] 刘玉洪, 马友鑫, 刘文杰, 张一平, 沙丽清. 西双版纳人工群落林地径流量的初步研究. 水土保持学报, 1999, 5(2): 30-34.
- [40] 刘瑞国, 王文. 地下水位变化与降水的关系分析. 地下水, 2009, 31(5): 42-44.
- [41] 向成华, 蒋俊明, 陈祖铭. 平通河流域的森林水文效应. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1999, 23(3): 79-82.
- [42] 朱金兆, 刘建军, 朱清科, 吴钦孝. 森林凋落物层水文生态功能研究. 北京林业大学学报, 2002, 24(5): 30-34.
- [43] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 生态水文过程研究进展. 生态学报, 2003, 23(3): 580-587.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 6 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Quantitatively monitoring undergoing degradation of plateau grassland by remote sensing data; a case study in Maqu County, Gansu Province, China	ZHOU Jianhua, WEI Huaidong, CHEN Fang, et al (1663)
Using periphyton assemblages to assess stream conditions of Taizi River Basin, China	YIN Xuwang, QU Xiaodong, LI Qingnan, et al (1677)
Water-holding capacity of an evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain and its functions in mitigating the effects of Southwest China drought	QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (1692)
The relationship between protistan community and water quality along the coast of Qingdao	YANG Jinpeng, JIANG Yong, HU Xiaozhong (1703)
Simulation of effects of warming on carbon budget in alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau	QI Weiwei, NIU Haishan, WANG Shiping, et al (1713)
Features of leaf photosynthesis and leaf nutrient traits in reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir, China	JIE Shenglin, FAN Dayong, XIE Zongqiang, et al (1723)
Spatio-temporal distribution of fish in the Pengxi River arm of the Three Gorges reservoir	REN Yuqin, CHEN Daqing, LIU Shaoping, et al (1734)
Analysis on allelochemicals in the cell-free Filtrates of <i>Amphidinium carterae</i>	JI Xiaoqing, HAN Xiaotian, YANG Baijuan, et al (1745)
Effect of starvation on expression patterns of the MYP gene in <i>Strongylocentrotus intermedius</i>	QIN Yanjie, SUN Bolin, LI Xia, et al (1755)
Habitat selection of feral yak in winter and spring in the Helan Mountains, China	ZHAO Chongnan, SU Yun, LIU Zhensheng, et al (1762)
Using cellular automata to study patchy spread in a predator-prey system	YANG Li, LI Weide (1773)
Effects of insect-resistant transgenic <i>Bt</i> rice with a fused <i>Cry1Ab+Cry1Ac</i> gene on population dynamics of the stem borers, <i>Chilo suppressalis</i> and <i>Sesamia inferens</i> , occurring in paddyfield	LI Zhiyi, SUI He, XU Yanbo, et al (1783)
Effect of spectral sensitivity and intensity response on the phototaxis of <i>Frankliniella Occidentalis</i> (Pergande)	FAN Fan, REN Hongmin, LU Lihua, et al (1790)
The synergistic action and UV protection of optical brightener on three different geographic isolates of Asian Gypsy Moth Nucleopolyhedrovirus (LdMNPV)	WANG Shujuan, DUAN Liqing, LI Haiping, et al (1796)
The availability of trace elements in an oasis soil under different utilization intensity in an arid area in China	LI Haifeng, ZENG Fanjiang, GUI Dongwei, et al (1803)
Multivariate regression analysis of greenhouse gas emissions associated with activities and populations of soil microbes in a double-rice paddy soil	QIN Xiaobo, LI Yu'e, SHI Shengwei, et al (1811)
Distribution characteristics of humus fraction in soil profile for the typical regions in the Loess Plateau	DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong (1820)
N ₂ O emissions from vegetable farmland with purple soil and the main factors influencing these emissions	YU Yajun, WANG Xiaoguo, ZHU Bo (1830)
Relationships between carbon source utilization of soil microbial communities and environmental factors in natural secondary forest in subtropical area, China	WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1839)
Numerical soil classification using fuzzy K-means algorithm and predictive soil mapping at regional scale	LIU Pengfei, SONG Xuan, LIU Xiaobing, et al (1846)
Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition	YANG Zhimin, CHEN Yucheng, ZHANG Yun, et al (1854)
Effects of delayed irrigation at jointing stage on nitrogen accumulation and its allocation, and NO ₃ -N migration in wheat	WANG Hongguang, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (1861)
Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province	WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al (1871)
Determination of the initial depth of water uptake by roots of steppe plants in restored and overgrazed communities, Inner Mongolia, China	GUO Yuran, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1880)
Fine root architecture and morphology among different branch orders of six subtropical tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (1888)
Numerical analysis of inter-specific relationships in Alpine steppe community in Bayanbulak	FANG Fei, HU Yukun, ZHANG Wei, et al (1898)
Analysis of shade-tolerance and determination of evaluation indicators of shade-tolerance in seedlings of <i>Chrysanthemum grandiflorum</i> and its closely related genera	SUN Yan, GAO Haishun, GUAN Zhiyong, et al (1908)
Effect of the parasitic <i>Cuscuta australis</i> on the community diversity and the growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i>	WANG Rukui, GUAN Ming, LI Yonghui, et al (1917)
Diversity and community structure of basidiomycete laccase gene from subtropical broad-leaved and coniferous forest ecosystems based on cDNA cloning	CHEN Xiangbi, SU Yirong, HE Xunyang, et al (1924)
Fine root longevity and controlling factors in subtropical <i>Alingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (1932)
Linear programming and optimal distribution of the forest resources based on TM remote sensing images	DONG Bin, CHEN Liping, WANG Ping, et al (1943)
Urban green space landscape patterns and thermal environment investigations based on computational fluid dynamics	LIU Yanhong, GUO Jinping, WEI Qingshun (1951)
Review and Monograph	
Review of the ecological compensation efficiency	ZHAO Xueyan (1960)
Scientific Note	
The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying	CHEN Kai, XIAO Nengwen, WANG Beixin, et al (1970)

《生态学报》2012 年征订启事

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

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

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

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

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

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

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 6 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 6 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