

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

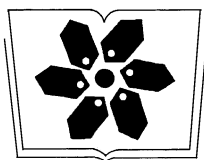
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第4期 Vol.33 No.4 **2013**

中国生态学会
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 4 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 王晓学,沈会涛,李叙勇,等 (1019)
- 植物叶片水稳定同位素研究进展 罗伦,余武生,万诗敏,等 (1031)
- 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展 陈利顶,孙然好,刘海莲 (1042)
- 城市生物多样性分布格局研究进展 毛齐正,马克明,邬建国,等 (1051)
- 基于福祉视角的生态补偿研究 李惠梅,张安录 (1065)

个体与基础生态

- 土著菌根真菌和混生植物对羊草生长和磷营养的影响 雷垚,郝志鹏,陈保冬 (1071)
- 干旱条件下 AM 真菌对植物生长和土壤水稳定性团聚体的影响 叶佳舒,李涛,胡亚军,等 (1080)
- 转 *mapk* 双链 RNA 干扰表达载体黄瓜对根际土壤细菌多样性的影响 ... 陈国华,弭宝彬,李莹,等 (1091)
- 北京远郊区臭氧污染及其对敏感植物叶片的伤害 万五星,夏亚军,张红星,等 (1098)
- 茅苍术叶片可培养内生细菌多样性及其促生潜力 周佳宇,贾永,王宏伟,等 (1106)
- 低温对蝶蛹金小蜂卵成熟及其数量动态的影响 夏诗洋,孟玲,李保平 (1118)
- 六星黑点豹蠹蛾求偶行为与性信息素产生和释放的时辰节律 刘金龙,荆小院,杨美红,等 (1126)
- 氟化物对家蚕血液羧酸酯酶及全酯酶活性的影响 米智,阮成龙,李姣蓉,等 (1134)
- 不同温度对脊尾白虾胚胎发育与幼体变态存活的影响 梁俊平,李健,李吉涛,等 (1142)

种群、群落和生态系统

- 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估 吕一河,马志敏,傅伯杰,等 (1153)
- 不同端元模型下湿地植被覆盖度的提取方法——以北京市野鸭湖湿地自然保护区为例 崔天翔,官兆宁,赵文吉,等 (1160)
- 基于光谱特征变量的湿地典型植物生态类型识别方法——以北京野鸭湖湿地为例 林川,官兆宁,赵文吉,等 (1172)
- 浮游植物群落对海南小水电建设的响应 林彰文,林生,顾继光,等 (1186)
- 菹草种群内外水质日变化 王锦旗,郑有飞,王国祥 (1195)
- 南方红壤区 3 种典型森林恢复方式对植物群落多样性的影响 王芸,欧阳志云,郑华,等 (1204)
- 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征 胡会峰,刘国华 (1212)
- 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型 李晓炜,赵刚,于秀波,等 (1219)

景观、区域和全球生态

- 快速城市化地区景观生态安全时空演化过程分析——以东莞市为例 杨青生,乔纪纲,艾彬 (1230)
- 海岸带生态系统健康评价中能质和生物多样性的差异——以江苏海岸带为例 唐得昊,邹欣庆,刘兴健 (1240)
- 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响 欧阳扬,李叙勇 (1251)

西部地区低碳竞争力评价..... 金小琴,杜受祜 (1260)

基于 HEC-HMS 模型的八一水库流域洪水重现期研究 郑 鹏,林 韵,潘文斌,等 (1268)

基于修正的 Gash 模型模拟小兴安岭原始红松林降雨截留过程 柴汝杉,蔡体久,满秀玲,等 (1276)

长白山北坡不同林型内红松年表特征及其与气候因子的关系..... 陈 列,高露双,张 赞,等 (1285)

资源与产业生态

河西走廊绿洲灌区循环模式“农田-食用菌”生产系统氮素流动特征 李瑞琴,于安芬,赵有彪,等 (1292)

施肥对旱地花生主要土壤肥力指标及产量的影响..... 王才斌,郑亚萍,梁晓艳,等 (1300)

耕作措施对土壤水热特性和微生物生物量碳的影响..... 庞 绪,何文清,严昌荣,等 (1308)

基于改进 SPA 法的耕地占补平衡生态安全评价 施开放,刁承泰,孙秀锋,等 (1317)

学术争鸣

基于生态-产业共生关系的林业生态安全测度方法构想 张智光 (1326)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿须知 (I)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 34 * 2013-02



封面图说: 石羊河——石羊河流域属大陆性温带干旱气候,气候特点是:日照充足、温差大、降水少、蒸发强、空气干燥。石羊河源出祁连山东段,河系以雨水补给为主,兼有冰雪融水成分。上游的祁连山区降水丰富,有雪山冰川和残留林木,是河流的水源补给地。中游流经河西走廊平地,形成武威和永昌等绿洲,下游是民勤,石羊河最后消失在腾格里沙漠中。随着石羊河流域人水矛盾的不断加剧,水资源开发利用严重过度,荒漠化日趋严重,民勤县的生态环境已经相当恶化,继续下去将有可能变成第二个“罗布泊”。

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/stxb201206130852

王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 景峰. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.

Wang X X, Shen H T, Li X Y, Jing F. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1019-1030.

森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法

王晓学^{1,3}, 沈会涛², 李叙勇^{1,*}, 景 峰⁴

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域国家重点实验室, 北京, 100085;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄, 050021;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国国际工程咨询公司, 北京 100048)

摘要:近年来国内森林生态系统服务功能研究较多,但应用价值不高,其科学性受到诸多质疑。从森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程以及其计量方法出发,对国内外研究动态和发展趋势进行了总结分析,重新审视森林水源涵养功能的研究意义,探讨森林水源涵养功能的多尺度特征。从森林水源涵养功能作用的空间尺度上看,其拦蓄洪水削减洪峰的功能仅在较小尺度上有效,而调节径流的功能只有当森林土壤的入渗量超过蒸散量时,才可能有更多地下水补给河道径流,进而增加旱季河道流量。同时森林水源涵养功能也具有明显的时间尺度特征,具体表现为在次降水事件中,由于蒸散发量较小,森林水源涵养功能的物质质量等于森林不同层次的截留量,在功能上表现为拦蓄降水;在长时间尺度上,由于林地蒸散要耗去大量水分,森林水源涵养功能的物质质量等于森林不同层次的截留量减去林地蒸散发量,在功能上表现为净化水质和调节径流。大多数研究仅对单一林分的个别层次蓄水功能进行研究,缺乏流域尺度或者更大空间尺度的森林水源涵养功能研究。建议从区域降尺度到流域或将坡面尺度上推到流域,集中在流域尺度解决森林水源涵养空间异质性将是解决森林水源涵养功能尺度外推的有效办法。就目前国内流行的森林水源涵养功能计量方法而言,其与尺度及研究目的有较大相关性,在研究中应根据研究目的、研究尺度和可获得的数据情况选择合适的计量方法。研究突出了不同尺度作用下森林水文过程的复杂性及重要性,并结合森林与水关系的争论问题,分析目前国内对森林水源涵养功能研究的一些误区,提出森林水源涵养功能研究的一些关键科学问题及未来可能的发展方向,主要包括:1)明确界定森林水源涵养功能的边界,探索森林水源涵养功能计量的新方法;2)加强不同时空尺度关联的森林水源涵养功能研究,包括正确评价森林水源涵养功能的时空变异规律,森林生态系统水源涵养功能的尺度效应,森林水源涵养与下游水生态安全,森林水源涵养研究范式转变等核心问题。

关键词:森林水源涵养功能; 多尺度; 生态水文; 水量平衡; 生态系统服务功能

Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales

WANG Xiaoxue^{1,3}, SHEN Huitao², LI Xuyong^{1,*}, JING Feng⁴

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

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

4 China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China

Abstract: Forest water conservation as an important ecosystem function has caused a rising interests in the scientific community in recent years. However, there remain some arguments in several aspects regarding the forest water conservation function. For the concept of the forest water conservation, there is no clear definition about its connotation. Another concern

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目计划课题(2009CB421104); 中国科学院国际合作创新团队项目(KZCX2-YW-T13)

收稿日期:2012-06-13; **修订日期:**2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xyli@rcees.ac.cn

is the scaling issue. It is a challenge to scale up the estimation for the forest water conservation from the plot scale to larger scale, e. g., watershed scale or regional scale. Many quantification methods have been developed, but their suitability, performance, advantages and disadvantages are unknown. Many of such argument issues are significant limits of the forest water conservation in science and management. On the basis of the literature review, we clarify the important role of the water conservation in forest ecosystem function. We also summarize and analyze the concepts of the forest water conservation and its multi-scale connotation, processes and quantification methods. On the spatial scale, function of the forest in mitigating peak flow is effective at a smaller scale but not necessarily at a larger scale. More groundwater recharges into stream flow when forest soil infiltration exceeds evapotranspiration, thus increasing stream flow in the dry season. During a rainfall event, forest water conservation has different features at different temporal scales. For example, the amount of the forest conservation during a rainfall event dominates by the forest canopy interception and most water is stored in the forest due to less evapotranspiration in the rainfall event scale. At the longer temporal scale, the forest water conservation can be determined by the forest canopy interception subtracting evapotranspiration. The functional roles of the forest water conservation at longer temporal scale dominate by purifying water from natural rainfall and mitigating seasonal flow peaks of the river discharges. Most previous studies of the forest water conservation focused on water storage function at the plot scale, but lack better understanding in the forest water conservation function at the watershed or regional scales. We suggest the approach that combines downscaling from the regional to watershed scales and upscaling from the hillside to the watershed scales can an effective way of the scale extrapolation. This idea can be used to address the heterogeneity issue of the forest water conservation function at different spatio-temporal scales. Among the existing quantification approaches of the forest water conservation function, each one highly relies on the temporal and spatial scales and its application goal. An appropriate calculation method should be carefully evaluated and considered based on the objectives, data availability, temporal and spatial scales of each study case. The suitability difference in different calculation methods of the forest water conservation demonstrates the complexity and importance of the multi-scale consideration in forest hydrological processes. In the context of the long-term debates about the relationship between the forest and water, we figure out a few confusing points in the current studies of the forest water conservation function. We also propose the critical scientific questions that should be addressed and a few directions in future studies of forest water conservation function including: 1) to clearly define the connotation and boundary of the forest water conservation function, and develop innovatory methods for determining the forest water conservation function; 2) to pay more attentions on the forest water conservation function studies associated with the different spatial and temporal scales, including evaluation of the spatio-temporal variations in forest water conservation function, the scaling effects on estimation of the water conservation function, the trade-off relationship between the upstream forest water conservation and the downstream ecological water need, and the development of the innovatory ways of forest water conservation practices.

Key Words: forest water conservation function; multiple scales; ecohydrology; water balance; ecosystem service

自 1997 年生态系统服务概念引进我国以后,国内关于生态系统服务功能研究的文章数量呈现指数级上升,其中以森林生态系统研究居多。目前,生态系统服务功能的评估大多仅限于套用公式简单换算,对其中存在问题缺乏深层次探讨(如森林水源涵养功能在内涵上是否就等同于森林保持水分?森林水源涵养功能研究的意义何在?小尺度上森林水源涵养功能研究结果是否可直接上推至大尺度?森林水源涵养功能计量评价方法是否对所有地区有一样适用?其有效性如何?等等),致使评估结果的科学性和有效性受到质疑^[1]。尽管众多学者从不同角度对森林水源涵养功能做了研究,但并没有将森林水源涵养功能的研究成果有效地纳入生态系统服务功能评估过程中来,导致森林生态系统服务功能评价往往缺乏森林水文学的基础认知。因此,有必要重新审视森林水源涵养功能的研究意义,明确界定其内涵,深入分析森林水源涵养功能的多尺度特

征及其计量方法的适用性,规范森林水源涵养功能评估过程。

目前国内普遍存在质疑森林生态系统服务功能评价,迫切需要对其研究的重要性进行重新定位。森林水源涵养研究的意义主要体现在以下 3 个方面:1) 预测区域水资源变化,为水资源调配决策提供科学依据。准确的理解不同尺度影响森林水源涵养功能的关键过程及其主导因子,有助于开发多尺度生态水文模型,并与大气环流模式相结合,可用于预测区域水资源变化,为气候变化背景下的水资源配置决策提供科技支撑;2) 森林生态系统服务功能间的权衡与优化。森林生态系统提供诸多生态系统服务功能,但并非所有森林都具备良好的水源涵养功能,可能有些森林更强调其防风固沙效应,碳汇功能等,因此根据生态需求强调其某种生态系统服务功能有待于深入研究;3) 为森林生态补偿机制研究提供基础。对森林水源涵养功能的研究和探索有利于规范其研究,促进森林生态系统服务功能研究的不断完善和发展,推动森林生态效益价值评估理论与方法。

本文主要从森林水源涵养功能的内涵、过程尺度性及计量问题展开,结合森林与水关系的争论,分析目前国内对森林水源涵养功能研究的一些误区,提出当前森林水源涵养功能研究亟需解决的关键科学问题及未来可能的发展方向,进一步推动森林水源涵养功能研究。

1 森林水源涵养功能的内涵

森林涵养水源功能包括拦蓄洪水、调节径流和净化水质等方面。拦蓄洪水是指森林通过减少洪水发生危险提供的一种效益。在山区,雨季高强度降雨事件经常引发洪灾、泥石流和滑坡,森林通过植被冠层、枯落物层和土壤层截留一部分雨水,从而减少降水直接落在森林地表,从而大大减少洪灾、泥石流和滑坡的发生几率。这种服务的核算通常是分析气象资料,整理多年最大降雨量、年降雨次数及对应的森林类型各层次截留量^[2-3],或者通过室内模拟多雨强情景及对应层次降雨截留来估算^[4]。国内学者也有采用综合蓄水量法来估算这种服务,但因对这种服务的认识不清,各层次累加的内涵完全不一致,如用某次降雨的林冠最大截留量代替该地区平均雨强下对应的林冠截留量,枯落物最大持水量并没有考虑枯落物自然持水能力等都导致估算值与真实值相差较大。调节径流是指森林通过雨季存储降雨在旱季补给河道,从而稳定河道旱季流量^[5]。这种服务的核算通常是利用水量平衡原理,然而由于需要数据量大,人为扰动对水量分配的影响等使核算变得困难。净化水质服务是指森林通过河流、湖泊和含水层来过滤、保持和存储水资源^[6]。这是狭义的概念,而广义上的净化水质服务还应包括森林依其强大的蒸发散,在地形雨和对流雨中增加降水的部分,亦即森林在降水事件中不同层次的实际截留量,在净化水质服务的核算中应予以考虑。

从森林水源涵养功能作用的空间尺度上看,其拦蓄洪水削减洪峰的功能仅在较小尺度上有效^[7],其调节径流的功能只有当森林土壤的入渗量超过森林的蒸散量时,才可能有更多地下水补给河道径流,进而增加旱季河道流量。同时,森林水源涵养功能也具有明显的时间尺度性特征,具体表现在:1) 在降水事件中,由于蒸散发较小,森林水源涵养功能的物质质量等于森林不同层次的截留量,在功能上表现为拦蓄洪水;2) 在长时间尺度上,由于林地蒸散要耗去大量水分,森林水源涵养功能的物质质量等于森林不同层次的截留量减去林地蒸散发,在功能上表现为净化水质和调节径流。

从上述的分析不难看出,森林涵养水源功能表现出的各类服务之间存在重叠部分,或者说每类服务都是通过森林不同层次截留降水过程实现的,即不同服务的实际内涵仅仅是不同时空尺度森林截持蓄留降水。因此,不能通过累加上述服务作为森林水源涵养功能的物质质量。由于对水源涵养内涵理解的不一致性,经常导致不同地区甚至同一个地区的研究案例没有可对比性,严重限制了森林水源涵养功能研究的应用价值^[8]。建议在森林水源涵养功能评估时应根据研究区森林表现出的主导水源涵养功能确定核算方法,保证核算内容在机理上的准确性。

2 森林水源涵养功能的尺度问题

由于水文要素(如地形地貌、土壤类型、植被条件、植被类型和不同层次前期储水特征)的空间异质性和水文通量(如降水、蒸发散、径流等)的时空异质性,小尺度的研究结论难以上推至更大尺度^[9]。即当一个系

统划分为多个单元或者多个单元构成时,系统规律不是单元机理的直接外延,单元与单元之间存在能流、物流交换,水文响应单元在不同水文要素作用下表现出完全不同的临界阈值特征,如不同植被类型其林冠层最大截留率、枯落物最大持水量、植被根系及土壤动物作用下的土壤最大持水量和水力传导度等都有较大的差异,图1是不同时空尺度森林水源涵养功能示意图。

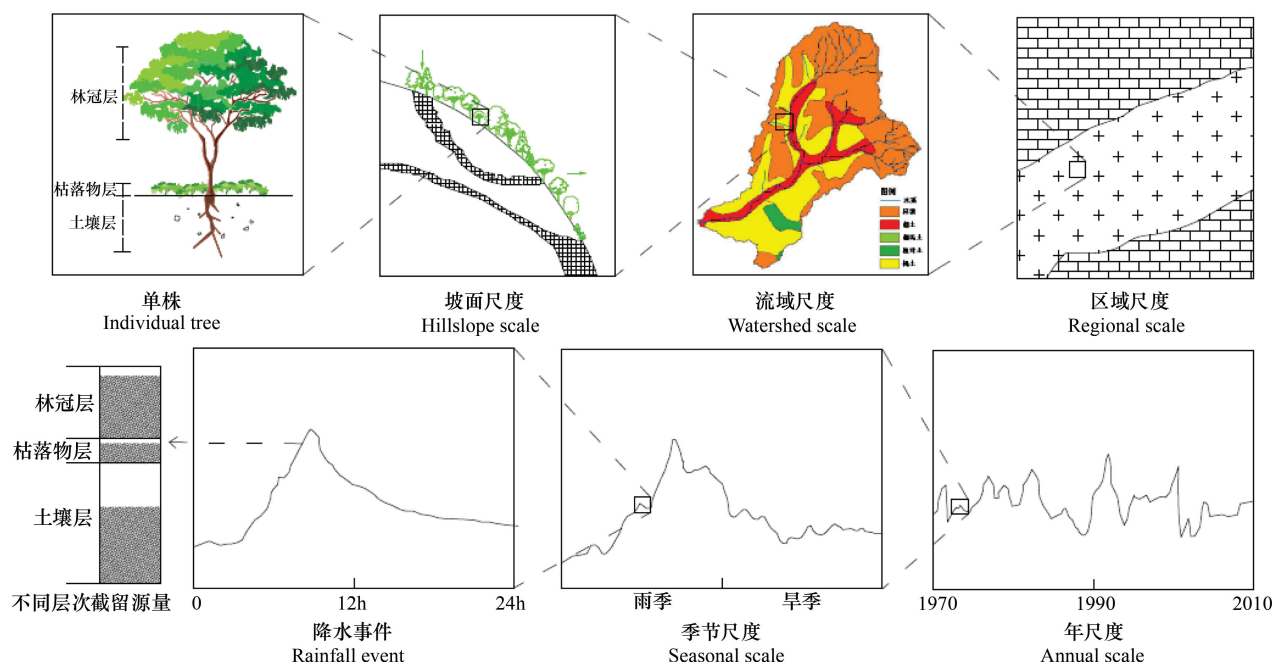


图1 森林水源涵养功能的时空异质性

Fig.1 Temporal and spatial heterogeneity of forest water conservation function

2.1 空间尺度

在单株尺度上,冠层结构(叶面粗糙度、枝叶量、枝叶空间分布情况等特征)影响林冠的截留能力,枝叶表面粗糙的林分较枝叶表面光滑的林分林冠截留能力强^[10],而林冠枝叶空间分布越均匀,枝叶量越多、截留量越大^[11];由于土壤冻融交替、根系的伸展和腐烂、土壤动物的运动等,土壤中普遍存在一些大孔隙,这些孔隙可以运移大量水分,因此大孔隙发达的土壤持水能力更强^[12-13]。林冠和林下层(包括林下植被、枯落物、土壤等)的蒸散受不同驱动因素制约,一般地,林冠层受水分因素制约,而林下层受能量(风、太阳辐射等)因素制约^[14]。在此尺度上所获取的降水截留过程参数通常只具有点尺度特征,往往不能直接用于大尺度。

在坡面尺度上,林冠截留主要与郁闭度、冠层厚度有关,林冠层郁闭度不同,枝叶量不同,所产生的总表面张力就不同,进而导致林冠层截留量差异较大。枯落物截留量主要与植被类型、坡度、坡向有关,一般来说,枯落物越厚,蓄积量越大,枯落物层持水量越大,但枯落物持水量与蓄积量并非线性关系^[15-16]。枯落物分解程度对持水能力也有较大影响,半分解层持水能力最大。在坡面上,由于土壤优先流及重力作用,上坡的土壤水分低于下坡。枯落物中的水分会沿坡向下运动,因此下坡枯落物含水量高于上坡,而阴坡高于阳坡^[16-17]。坡度、坡向、土壤含水量、气温及植被盖度是影响坡面蒸发的主导因子。坡度主要是通过影响坡面接受的净辐射来影响蒸散发。在一次降雨事件后,一般阳坡蒸发量远大于阴坡,但长时间干旱后,阳坡土壤含水量很小,表面蒸发阻力大,则不利于蒸散发;而阴坡在相同时段内土壤含水量较大,蒸散发强度保持较高^[18]。植被盖度影响坡面蒸散发的情况较为复杂。一方面,植物盖度高,叶面积指数大,植物的蒸腾强度大;而植被盖度高,地面粗糙度大,风速小,太阳净辐射量少,会降低林下层水分蒸散发速率^[19],因此在坡面尺度上植被盖度对蒸散发的影响机理需要进一步研究。目前在此尺度上,已取得大量的实验数据,如何将这些数据在较大尺度上应用已经成为当前森林水文研究的重要内容。

在流域尺度上,森林水源涵养量主要跟流域的地形、林龄、林源、土壤类型和质地、枯落物厚度等有关。流域相对平坦,枯落物厚度较厚,可以减少地表径流,延长汇流时间,增加水分入渗土壤^[20]。流域尺度的蒸散主要取决于气象因素和流域下垫面特征(如森林植被状况、土壤类型和质地,枯落物量等)^[21]。

在区域尺度上,森林类型显著的影响林冠截留和林下枯落物量。在相似植被盖度条件下不同气候带森林林冠截留为针叶林>针阔混交林>阔叶林^[22-23],枯落物截留是阔叶林>针阔混交林>针叶林^[23-24]。地质因素通过影响成土过程(母质)来影响林下土壤的持水量。贺淑霞等的研究发现,森林水源涵养量并没有呈现出与水热梯度对应的规律性^[25]。尽管降水呈现出明显的从北向南增加的趋势,但在此梯度上蒸散发的制约因素却明显不同,在北方受水分因素制约,在南方受能量因素制约。因此,在区域尺度上森林水源涵养是一个受多因素影响的复杂的水文调节过程。

2.2 时间尺度

现有研究对时间尺度的界定非常模糊,尽管有部分研究明确为具体年份的森林水源涵养量,但数据大多采用多年平均的结果,对具体年份降雨特征及立地条件的特殊性均没有体现,因此缺乏时效性意义。

在降水事件中,森林水源涵养量主要受降水特征(降水量、降水强度、降水持续时间等)、森林郁闭度、降雨前不同层次持水状态以及邻近单元间水量交换特点(侧向流)的影响。一般来说,截留量随雨量的增大而增加,趋近饱和截留量时,增加速度减缓。截留与雨强的关系十分密切,雨强越小,截留量愈大,截留率越高,林冠对雨水的截留时间越长;雨强越大,截留量越小,截留率越低,截留作用的时间越短^[22]。对于产生径流的降水事件而言,枯落物层有减少径流,增加水分入渗土壤的功能,其效能与枯落物量、分解程度有关。

在季节尺度上,森林水源涵养量主要受降水季节性分配(降水频次)、蒸散发、叶面积变化等因素影响。无论是有野外实验还是模型模拟,都表明在生长季截留率与叶面积指数成正比。降水的季节性分配对林冠截留的影响较为明显,如常绿针叶林对降雪的截留要比降雨的截留高很多。枯落物能调整不同季节林地蒸散,赵鸿雁等的研究表明枯落物层抑制土壤蒸发量与枯落物层厚度和土壤含水量有关^[26],而土壤含水量受降水的季节分配明显^[27],枯落物蓄积量具有随季节变化的波动性^[28]。

在长时间尺度上,物候变化、气候变化、人类活动(如森林经营方式等)等影响森林水源涵养功能。Asdak等对印度尼西亚砍伐和未砍伐的林区对比研究发现,当单位植株密度减少一半时,林冠截留率下降5%左右^[29]。

2.3 尺度外推

目前大多数研究仅对单一林分的个别层次蓄水功能进行研究,缺乏流域尺度或者更大空间尺度的森林水源涵养功能研究。李海军等采用流域实验和水量平衡样地相结合的办法,实现了干旱区从样地观测到流域尺度山地森林生态系统雨季水源涵养量估算^[30]。

关于森林水源涵养功能研究的时间尺度研究文献较少。de Groenh 和 Savenije 通过分析将日尺度的降雨统计特征耦合进月尺度的降雨截留模型,用有限站点的日降水截留数据推算更大时空尺度上降雨与不同层次的截留关系,从而实现了降水不同截留的时空尺度外推^[14]。Guo 等按照降雨强度划分年内降雨,将其标准化为某个常见雨强的若干场次降雨,并观测不同植被-土壤-坡面复合体不同层次截留能力,从而实现了森林水源涵养量由降雨事件向年尺度,坡面尺度向县级尺度的转换^[3]。

森林涵养水源功能在时空尺度上变异性较大,对森林涵养水源功能的准确计量带来诸多困难。图2是森林水源涵养的基本生态水文过程概化图,对影响这些过程的关键因素应得到体现,同时还要反映垂直层次和水平层次森林涵养水源能力的差异性及其阈值特征,因此区域降尺度到流域,将坡面尺度上推到流域,集中在流域尺度把握森林水源涵养的空间异质性将是解决森林水源涵养功能尺度外推的有效办法。模型模拟是定量评价森林水源涵养的重要途径^[31]。

3 森林水源涵养功能计量问题

3.1 森林水源涵养功能计量方法及其基本假设

张彪等人对森林水源涵养功能计量方法的优缺点做了较为详细的论述^[7],但这些评价可能忽略了森林

水源涵养功能的内涵及其尺度特征,本研究认为该文中列举方法的不足其实质内容可以归纳为3个方面:1)降水事件中不同层次截留量在长时间尺度上将有大部分蒸散,是否将这部分算作森林水源涵养量?2)森林雨季截留量在旱季补充河道径流是否算作森林水源涵养量?3)不同森林水源涵养功能的不同表现形式对应的计量方法?可以看出,计量方法某些不足并非是其本身缺陷,而是与尺度及研究目的有较大相关性。据此对这些方法进行重新评价。表1列出了各常用方法的基本假设、公式及适宜的研究尺度,并没有将较少用的模型方法(如 Mashayekhi 等^[32],Guo 等^[2])或者对这些方法的改进列出^[33-37]。

3.2 森林水源涵养功能计量的数据问题

森林水源涵养量的计算方法主要利用两种类型的参数,一是气象数据,如降水量、温度等;另一种参数与立地条件有关,如森林覆盖度、土层厚度、土壤非毛管孔隙度等。一般前者是研究区附近相对开阔的气象站监测得到的数据;后者一般通过以下3种方法获得:1)引用其他文献;2)直接办法:实地试验;3)间接办法:通过测量其他相对较易的参数,然后通过经验公式进行转换。

(1)尽管从相关文献中获得的参数可以得到一些稳定且可比较的结果,但是通常不同地区间气象、立地条件差异较大(图3)^[40-42]。比如,不同森林类型或者同一森林类型对不同雨强的截留能力有显著差别。再者这种途径算出的不同地方的森林水源涵养量的差异仅仅体现在生态系统属性(如森林面积)或降水量的差异,而不是立地条件差异引起的森林生态水文过程的差别。另外,对森林水源涵养功能研究的文献缺少对立地情况的描述。

(2)如果两个参数都是源自同一个监测数据,误差补偿就十分有限。如径流系数、蒸散发等的计算。另外,如果没有研究地所需时相和位置的数据时,通常的办法是采用多年平均值或者附近资料丰富地区的数据,然而近年来气候变化的强度和频度都远远超出经验范围,用均值或者代替值很难体现某一具体年份森林涵养水源的实际量,再如蒸散量,很多时候采用附近裸地的最大水面蒸发量,明显高估了林区蒸散量^[39]。尺度上推也是一个问题。

(3)直接实验获取是一种经常采用的办法,但采样数据对比实验一般较少,样点缺乏代表性,现有研究较少讨论数据变异程度。目前对大尺度森林水源涵养功能的评价,多采用监测数据,对于监测站点的分布情况、数据本身质量等信息阐述较少,造成大尺度森林涵养量计算为0甚至为负值的情况^[38]。在尺度外推时就存在很多问题。

3.3 森林水源涵养功能物质质量计量方法的可靠性及其适用性

目前对森林水源涵养功能研究的方法很多,但因为森林水源涵养功能物质质量无法通过实验或者其他手段直接验证。因此,对各方法准确性如何鲜有文献报道,造成目前研究缺乏对比,影响了森林水源涵养功能研究的应用价值,亟待开展计量方法的评价研究。需要开展的研究主要包括:

1)不同复杂程度(参数个数、对不同尺度森林水文过程细节的考虑等)的计量方法对森林水源涵养量核算的影响;

2)这些方法的可塑性(这里将模型的可塑性定义为将模型应用于不同情景时模拟结果的变异性^[43])。通过敏感性分析不同地理位置和年份参数的模拟结果进行量化如何?对森林水源涵养功能研究的不确定性分析,包括森林水源涵养功能内容(不同尺度驱动机制的复杂性)、输入参数、输入数据(监测手段不确定性)、计量方法的不确定性。

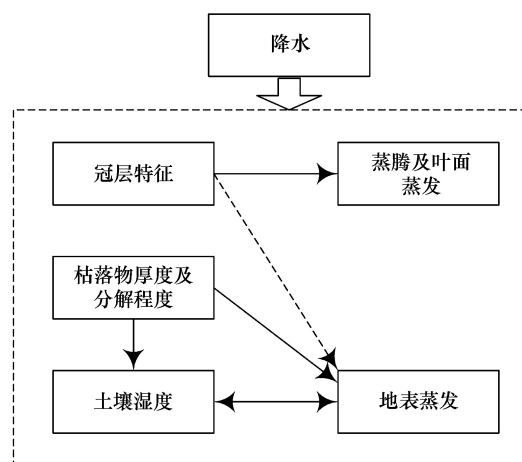


图2 森林水源涵养的基本生态水文过程概念图

Fig.2 The concept model of eco-hydrological processes of forest water conservation

表 1 常用森林水源涵养功能计量方法的基本假设、公式及适宜尺度
Table 1 The assumptions, formulas and appropriate scale of the commonly used measurement methods of forest water conservation function

计量方法	基本假设	公式	对 1 问题的 回答	对 2 问题 的回答	对 3 问题 的回答	计算的最优尺度 时间尺度 空间尺度	参数个数
降水储存 量法*	在林区分冠和树干蒸腾和扩散约占降水量的 30%, 树木在蒸腾过程中又占 15%, 因而森林涵养水源量只占林区降水量的 55%, 而林区降水量可以通过平均降水量与森林覆盖率计算 ^[33]	$W = P\alpha \times 0.55$	将林下部分的 蒸散发算作森林 水源涵养量	—	净化水质	月尺度 所有尺度	2
水量平衡法	把水-土壤-森林视为一个综合体, 以水量的输入和输出为着眼点, 从水量平衡的角度, 降水量与森林蒸散量以及其他消耗之差即为水源涵养量 ^[34]	$W = \sum_{i=1}^i A_i(P - E - C) \times 10$	各层次蒸散都 不算做森林水 源涵养量	—	净化水质	所有尺度 所有尺度	4
林冠截留量法	在降雨过程中, 未被林冠层(包括灌木层)截留而落到地表的雨水, 由于重力的作用不断向土壤下渗, 而森林土壤通常不会因水分饱和而产生地表径流, 因此林冠截留剩余的水量就是森林的水源涵养量 ^[35]	$W = \sum P A_i(1 - i_i) \times 10$	将林下部分的 蒸散发算作森林 水源涵养量	—	净化水质	月尺度 所有尺度	3
多因子回 归法*	森林水源涵养功能是经度、纬度、海拔、森林覆盖率等多因素综合作用的结果, 可以用数学函数关系建立这些因素与森林水源涵养量之间的关系式, 进而全面的反应这些因素变化对森林水源涵养的影响 ^[36]	$W = \sum_{i=1}^3 (a_i + \sum_{j=1}^{n_i} b_{ij} \delta_{ij})$	各层次蒸散都 算做森林水源 涵养量	—	拦蓄洪水	降雨事件 小流域尺度	10 个以上
综合蓄水 量法*	在所有的降雨截留都是理想的情况下, 森林不同层次截留降雨的最大量	$W = IP + (0.85Rm - R_o)M + DP_n$	各层次蒸散都 算做森林水源 涵养量	—	拦蓄洪水	降雨事件 小流域尺度	7
土壤蓄水 能力法*	在森林生态系统中, 植物根系和土壤微生物增加了土壤孔隙度, 从而增加了氧气交换和土壤涵养能力。因此, 森林土壤能够保持在雨季保持很大一部分水分, 然后在旱季缓慢的释放出来以维持植物生长所需要的土壤水分。土壤蓄水占森林生态系统总涵养水源量的 90% 以上 ^[23] , 因此用土壤蓄水来近似的替代森林涵养的水源量	$W = DP_n$	只将土壤蒸散 算作森林水源 涵养量	算	调节径流	年尺度 流域及以上	2
年径流量法	森林涵养水源量等于林区内年径流量, 林地与其他土地类型(如耕地、荒山等)每年蒸散耗水量相同	$W = \sum_{i=1}^i A_i P k (R_o - R_g)$	—	算	调节径流	年尺度 流域尺度	5
地下径流 增长法	森林水源涵养价值应是指其为社会提供的实际效用, 即通过影响地表降水的径流量, 使其渗入地下, 变为地下径流, 从而均化洪水过程, 调节合川径流量。那么表现在生态水文过程中应是地下径流的增加。所以森林水源涵养量是无林地相比林下地地下径流的增加量 ^[37]	$W = \sum_{i=1}^i A_i (h_f - h_s) \frac{\beta}{\alpha}$	各层次蒸散都 不算做森林水 源涵养量	—	调节径流	月、年尺度 流域尺度	5

* 经验方法, 其他为理论方法;
 P 为降水量, A_i 为第 i 类森林类型的面积 (hm^2); P 为降水量 (mm); E 为林分蒸散量 (mm); C 为地表径流量 (mm); i_i 是第 i 类森林的林冠截留率, Rm 是最大持水率 (%); R_o 为枯落物自然持水率 (%); M 为枯落物厚度 (mm); P_n 是非毛管孔隙度 (%); I 是林冠截留率 (%); W 为与裸地相比较, 森林生态系统涵养水分的增加量; k 为计算区产流降雨量占降雨总量的比例; R 为与裸地(或皆伐迹地)比较, 森林生态系统减少径流的效益系数; R_o 为产流降雨条件下裸地降雨径流量; R_g 为产流降雨条件下林地降雨径流量; β 是土壤覆盖率, α 是森林覆盖率, h_f 是有林地林下径流高度, h_s 是无林地林下径流高度; a_i, b_{ij} 为第 i, j 类对影响不同层次截留的因素, δ_{ij} 为待估参数

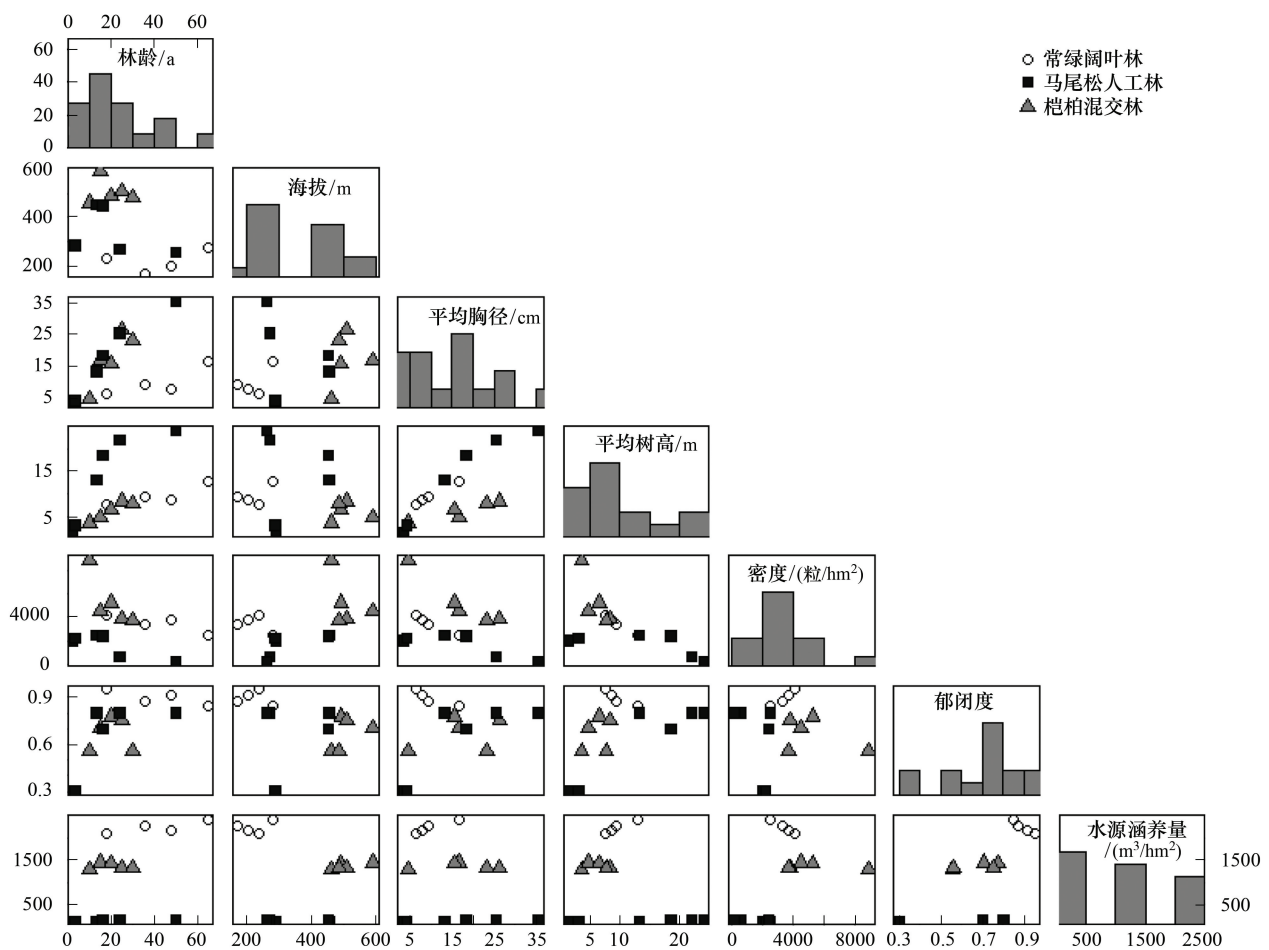


图3 不同气候、立地条件影响的森林水源涵养量对比^[40-42],森林水源涵养量计算方法为不考虑林冠截留的综合蓄水量法;气候、立地条件差异较大,不同森林类型的水源涵养量也存在较大差异,不能简单的根据森林类型引用其不同层次的截留量

Fig. 3 The comparison of forest water conservation under different climate and site conditions

3)如果森林水源涵养量是受各水文通量直接作用的结果,那么这些计量方法应该都存在区域适用性。首先,不同地理位置上雨强和降雨频度有较为明显的差异,而各类森林不同层次对降水截留有明显不同的阈值特征;再者,不同地理位置有明显不同的制约蒸散机制的因素,这些制约因素对蒸散受能量或者水量限制地区的影响差异也较大,如风速对受能量限制流域的影响比水量限制流域大^[44];此外,我国湿润地区的产流方式以蓄满产流为主,而在干旱的黄土高原地区则以超渗产流为主,土壤作为森林涵养水源的主体如何根据蓄水产流特点选择合适的计量方法是森林水源涵养功能研究的关键问题。司今等对森林水源涵养功能计量方法的区域适用性做了初步探讨,综合蓄水能力法适用于降水充沛地区,降水储存量法在半干旱区计算结果较为稳定,而水量平衡法在半干旱区适应性较差。未来研究需要进一步量化各计量方法的区域适用性^[45]。

4 我国森林水源涵养功能研究未来可能的发展方向

4.1 明确界定森林水源涵养功能的边界,探索森林水源涵养功能计量的新方法。

自 Constaza 等提出对水源涵养等 17 种生态系统功能评估以来^[46],我国森林水源涵养功能研究发展迅速,《森林生态系统服务功能评估规范》^[47]的发布,为森林生态系统服务评估方法的规范标准化研究作出了有益的尝试,但该规范中关于森林水源涵养功能物质质量评价方法并未考虑下垫面特征,如林龄、林源、林下层状态等因素,而对这些因素的忽视在很多程度上造成国内对水源涵养功能的核算研究缺乏科学性。目前中国正面临天然林的大面积退化消失和人工林的大面积种植,简单的通过几个水文通量(蒸散、降水)很难准确反映森林生态系统功能变化,这种粗放的计算方法显然已经不能满足决策需求,也制约了森林生态补偿机制的

研究工作^[48]。再者,对森林水源涵养功能的评估存在重复计算的问题。如森林调节水量和净化水质的物质质量全部都采用水量平衡法计算,然后累加计算森林涵养水源功能的价值量,诚然调节水量和净化水质都是通过森林的不同层次拦截降水的生态水文过程所表现出来的不同服务价值,直接累加缺乏可靠的生态水文学理论基础,可能会重复计算森林水源涵养功能。因此,一方面对森林水源涵养常用计量方法开展区域适用性评价,提高大尺度研究森林水源涵养核算方法的准确性;同时根据政策需求还应探索符合研究区实际的森林水源涵养功能计量的新方法,进一步提高评估的准确性和有效性。

4.2 森林水源涵养功能研究在不同区域、不同时间空间尺度关联的核心科学问题。

对于森林水源涵养功能的研究,亟需解决的关键科学问题主要表现在:

(1) 根据研究目的和研究区实际情况选择评价森林水源涵养功能的服务形式

不同区域、不同时间空间尺度上可能包含着完全不同的森林水源涵养功能的服务形式。认为应该根据研究目的和研究区实际情况选择评价森林水源涵养功能的服务形式,比如在水源地的森林则强调净化水质的服务,在北方石质山区,强降雨事件经常造成的泥石流、滑坡频繁,森林的水源涵养功能更强调拦截洪水、调节径流的服务。因此,明确研究区域的森林水源涵养功能的服务形式是未来研究是未来研究亟需解决的问题,也是避免重复评价的根本。

(2) 面对天然林的大面积退化消失和人工林的大面积种植状况,如何正确评价由此引起的森林水源涵养功能的变化?

目前,森林水源涵养功能评估研究并没有正确认识到中国目前的天然林的大面积退化消失和人工林的大面积种植现状,以及由此引发的水量分配格局的变化。高森林覆盖率并非就等同于森林提供高质量的水源涵养功能。如 2006 年福建建瓯市森林覆盖率达 80.05%,然而却几次遭到洪涝灾害的袭击。因此如何根据立地实际情况正确评价森林水源涵养功能是日前亟需解决的一个问题。

(3) 如何从森林生态水文效应的角度,把中国不同水热梯度上对针叶林、阔叶林和灌木林等森林水源涵养功能研究成果统一起来客观地评价其空间变异规律?

仅从知网数据库以“森林水源涵养、林冠截留、枯落物蓄水、森林土壤蓄水、森林生态系统功能”等关键词搜索,有约 3000 篇以上的论文从森林不同层次来研究森林的降水截留特征。尽管也有研究对森林降水截留做了有意义的综述,但从森林生态系统功能角度出发,系统的对目前研究做计量综述鲜见。因此,根据地理位置、林型、林龄、林源、海拔、年均降水量、温度、蒸发量、土壤、森林面积、郁闭度、密度、不同层次降雨截留量、发表年份、评估方法等指标来评价不同水热梯度上针叶林、阔叶林和灌木林等的森林水源涵养功能的空间变异规律。

(4) 森林生态系统水源涵养功能的尺度效应

从森林水源涵养功能的尺度特征综述部分中可以看出,目前研究只是解决了不同尺度上影响森林生态系统水源涵养功能的主导因子,缺乏这些因子如何共同耦合的定量评价。如何从不同时空尺度上揭示不同森林生态系统水源涵养功能的变异规律,发展尺度转换方法,明确区域不同尺度森林生态系统水源涵养功能的异质性、尺度特征和多尺度关联,为区域森林生态系统水源涵养功能的保育和区域生态安全的可持续管理提供理论依据将是未来研究的一个重要方向。

(5) 干旱半干旱地区上游大规模植树造林与下游水生态安全

干旱半干旱地区大规模植树造林可能引起下游水生态安全。如永定河上游的植树造林是造成永定河流域 20 多年干枯的重要原因之一^[49]。那么如何权衡上游涵养水源与下游生态需水关系,并基于此提出不同地区森林适宜盖度。

(6) 从静态研究向动态研究的转变

生态系统服务功能和价值评估要综合生态系统的现状、构成及其时空变化^[50],森林植被在陆地生态水文循环过程中不是孤立的、静态的水文景观要素,森林生长、结构和功能的动态变化直接影响森林截持蓄留降水

的整个过程。忽略森林物候、结构及其演替变化的影响,难以真正体现森林植被空间格局及其结构动态变化对水文过程的影响。李士美等根据多年定位监测数据,研究年内森林水源涵养功能的演变特征,为森林水源涵养功能由静态研究向动态研究转变做了有益的尝试。未来研究应加大对不同林龄、林源、扰动等多因素复合情景下森林的水源涵养功能研究,加快森林水源涵养功能研究由静态单一要素向动态多元要素的转变,深入对森林水源涵养功能的认识。

References:

- [1] Yang G M, Li W H, Min Q W, Zhen L, Lucas M. Reflection on the Limitation of Ecological Service Studies in China and suggestion for Future Research. *China Population, Resources and Environment*, 2007, 17(1): 85-91.
- [2] Guo Z W, Xiao X M, Li D M. An assessment of ecosystem services: water flow regulation and hydroelectric power production. *Ecological Applications*, 2000, 10(3): 925-936.
- [3] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Ecosystem function for water retention and forest ecosystem conservation in a watershed of the Yangtze River. *Biodiversity and Conservation*, 2002, 11, 599-614.
- [4] Wang A Z, Liu J M, Pei T F, Jin C J. An experiment and model construction of rainfall interception *nypicea koraiensis*. *Jouranl of Beijing Forestry University*, 2005, 27(2): 38-42.
- [5] Zhou G Y, Wei X H, Luo Y, Zhang M F, Li Y L, Qiao Y N, Liu H G, Wang C L. Forest recovery and river discharge at the regional scale of Guangdong Province, China. *Water Resources Research*, 2010, 46, W09503.
- [6] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value, *Ecological Economics*, 2010, 69(7): 1416-1426
- [7] Calder I. R. Forests and water-Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251: 110-120.
- [8] Zhang B, Li W H, Xie G D, Xiao Y. Water conserva tion function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(3): 529-534.
- [9] Liu X Z. Discussion on Problem of Scale in Hydrology. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 61-65.
- [10] Liu X D, Wu Q X, Su N H. Studies on rainfall interception in canopy, litter, and soil hydrological characteristics of forests in liupanshan mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 1989, 25(3): 220-227.
- [11] Fan S X, Pei T F, Jiang D M, Cao Y C, Alamusa. Rainfall interception capacity of forest canopy between two dif ferent stands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(5): 671-674.
- [12] Chen R S, Kang E S, Yang J P, Zhang J S, Wang S G. Some Arguments on the Forest Ecohydrological Effects. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(6): 799-805.
- [13] Li W L, Jin C J, Wang A Z, Pei T F, Guan D X. Amount and vertical distribution of macropores in forest soils in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(10): 2179-2184.
- [14] de Groen M. M., Savenije H. H. G. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resoure Research*. 2006, 42, W12417.
- [15] Li H Y, Yang J H, Bao Y H, Zong P P, Yu H T. Study on the Water Conservation Function of Different Hydrology Arrangements of Forest. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(5): 175-177.
- [16] Wang Y M, Summary of Researches on Water and Soil Conservative Function of Litter in Forestland in China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 108-113.
- [17] Zhang L H, Li C Z, Yang L W. A study on Functions of the Vegetation Cover in Water and Soil Conservation in Jiulong Hill, BeiJing. *Journal of Northwest Forestry College*, 1994, 9(1): 18-21.
- [18] Hu Z H, Wang Z G. Daily evapotranspiration models for slopes of Loess Gully Area in Western Shan Province. *Science of Soil and water conservation*, 2003, 1(1): 95-98.
- [19] Wang A J, Zhang W B. Reviews of Vegetation Interception of Rainfall. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(4): 55-59.
- [20] Chen Q B, Zhang H J, Xie M S. Study on runoff velocity retardation by forest litter and moss. *Jouranl of Beijing Forestry University*, 1996, 18(1): 55-59.
- [21] Zhang D C, Yin M F, Bai D Y, Wei J H, Zhu X J, Ding L N. Account Evapo-Transporation of Some Important Forest Types in Liaoning Eastern Mountainous Area. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(4): 25-29.
- [22] Wang Y M. Summary of Study on Redistribution of Precipitation by Canopies in China. *Journal of Northwest Forestry University*, 2000, 15(3): 1-7.
- [23] Liu S R. The Regularity of Hydro-ecological Function of Forest Ecosystem in China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1996: 107-203.
- [24] Yang W L. Water holding capacity of litter in different types of stand. *Journal of Nanchang Institute of Technology*, 2007, 26(6): 70-73.
- [25] He S X, Li X Y, Mo F, Zhou B, Gao G L. The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of eastern China. *Acta*

- Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [26] Zhao H Y, Wu Q X, Liu X D, Han B. Study on restraining soil evaporation by forest litter. Journal of Northwest Forestry University, 1992, 7(2): 14-20.
- [27] Niu Y, Zhang H B, Liu X D, Zhang X L, Ge S L. Dynamic Characteristic on Space-time of Soil Water of Main Vegetation in Qilian Mountains. Journal of Mountain Science, 2002, 20(6): 723-726.
- [28] Shi S, Guo J X. Ecohydrological functions of litter in three main plant communities on Songnen grassland. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(8): 1722-1726.
- [29] Asdak C, Jarvis P G, van Gardingen P, Fraser A. Rainfall interception loss in unlogged and logged forest areas of Central Kalimantan, Indonesia. Journal of Hydrology, 2006: 237-244.
- [30] Li H J, Zhang X P, Zhang Y T, Han Z T, Lu J J. Study on Water Resource Conservation of Natural Spruce Forest Ecosystem Based on Month Water Balance in the Middle Tianshan Mountains. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 227-232.
- [31] Wang X X, Li X Y, Mo F, Jiang Y. Exploration of a new modeling method for forest water conservation based on cellular automata: concept and theoretical framework. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(20): 5491-5500.
- [32] Mashayekhi Z, Panahi M, Karami M, Khalighi S, Malekian A. Economic valuation of water storage function of forest ecosystems (case study: Zagros Forests, Iran). Journal of Forestry Research, 2010, 21(3): 293-300.
- [33] Zhang S H, Zhao G Z, Tian Y Z, Xuan L Y. Study on value the ecological environment valuation of forestry resources for case by Hunchun forestry in Changbai Mountain. Journal of Yanbian University (Natural science), 2001, 27(2): 126-134.
- [34] Xiao H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, Wang X K. Forest ecosystem services and their ecological valuation A case study of tropical forest in Jianfengling of Hainan island. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 481-484.
- [35] Deng K M, Shi P L, Xie G D. Water conservation of forest ecosystem in the upper reaches of Yangtze river and its benefits. Resources Science, 2002, 24(6): 68-73.
- [36] Lang K J, Li C S, Yin Y, Lang P M, Wang W F, Liu P, Liu G. The measurement theory and method of 10 forest ecological benefits for forestry ecological engineering. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(1): 1-7.
- [37] Li J C. Ecological value theory. Chongqing: Chongqing university press, 1999, 132-134.
- [38] Zhang Y. Calculation on water conservation price of forest with optimal control method in China. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(3): 6-12.
- [39] Yu X X, Qin Y S, Chen L H, Chen S. The Forest Ecosystem Services and Their Valuation of Beijing Mountain Areas, Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 783-786.
- [40] Li H F, Fan Z W, Yan P D, Yang Z Q, Tan F J. Comparison of water-holding capability of Pinus massoniana plantations at different ages. Journal of Fujian College of Forestry, 2011, 31(4): 320-323.
- [41] Xu X N, Deng W X, Zhang Y Q, Wang Q, Ding Z F. Changes in Soil Properties and Water Conservation Function of Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forest along a Chronosequence at Laoshan, Anhui. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 177-181.
- [42] Wu P F, Zhu B. Water conversation function of the mixed Alnus cremastogyne and Cupressus funebris stand ecosystem at different stand age. Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(3): 94-101.
- [43] Confalonieri R, Bregaglio S, Acutis M. Quantifying plasticity in simulation models. Ecological Modelling, 225, 31: 159-166.
- [44] McVicar T R, Roderick M L, Donohue R J, Ling T L, Van Niel T G, Thomas A, Grieser J, Jhajharia D, Himri Y, Mahowald N M, Mescherskaya A V, Kruger A C, Rehman S, Dinpashoh Y. Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation, Journal of Hydrology, 2012, 416-417: 182-205.
- [45] Si J, Han P, Zhao C L. Review of Water Conservation Value Evaluation Methods of Forest and Case Study. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 2100-2109.
- [46] Costanza R, d'Arge R, Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Belt M v. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 386: 253-2601.
- [47] Wang B, Yang F W, Guo H, et al. Specifications for assessment of forest ecosystem services in the PRC (LY/T 1721—2008), Beijing: China Standard Press, 2008
- [48] Li W H, Li F, Li S D, Liu M C. The Status and Prospect of Forest Ecological Benefit Compensation. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 677-688.
- [49] Cheng D Z, Chen M, Shi S P, Ma Z Z. The relationship between human activities of Yongding River upstream and the Rainfall-Runoff. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 20(2): 19-21.
- [50] Li W H, Zhang B, Xie G D. Research on Ecosystem Services in China: Progress and Perspectives. Journal of Natural Resources, 2009, 24(1): 2-10.

参考文献:

- [1] 杨光梅, 李文华, 闵庆文, 甄霖, Mario Lucas. 对我国生态系统服务研究局限性的思考及建议. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(1): 85-91.

- [4] 王安志, 刘建梅, 裴铁璠, 金昌杰. 云杉截留降雨实验与模型. 北京林业大学学报, 2005, 27(2): 38-42.
- [8] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学报, 2009, 28(3): 529-534.
- [9] 刘贤赵. 论文文尺度问题. 干旱区地理, 2004, 27(1): 61-65.
- [10] 刘向东, 吴钦孝, 苏宁虎. 六盘山林区森林林冠截留、枯枝落叶层和土壤水稳性质的研究. 林业科学, 1989, 25(3): 220-227.
- [11] 范世香, 裴铁璠, 蒋德明, 曹成有, 阿拉木萨. 两种不同林分截留能力的比较研究. 应用生态学报, 2000, 11(5): 671-674.
- [12] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 张济世, 王书功. 森林水文生态效应若干争论问题讨论. 冰川冻土, 2002, 24(6): 799-805.
- [13] 李伟莉, 金昌杰, 王安志, 裴铁璠, 关德新. 长白山主要类型森林土壤大孔隙数量与垂直分布规律. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2179-2184.
- [15] 李红云, 杨吉华, 鲍玉海, 宗萍萍, 于洪泰. 森林不同层次蓄水功能研究. 水土保持研究, 2005, 12(5): 175-177.
- [16] 王佑民. 中国林地枯落物持水保土作用研究概况. 水土保持学报, 2000, 14(4): 108-113.
- [17] 张理宏, 李昌哲, 杨立文. 北京九龙山不同植被水源涵养作用的研究. 西北林学院学报, 1994, 9(1): 18-21.
- [18] 胡振华, 王治国. 晋西黄土残源区坡面的日蒸散模型. 中国水土保持科学, 2003, 1(1): 95-98.
- [19] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59.
- [20] 陈奇伯, 张洪江, 解明曙. 森林枯落物及其苔藓层阻延径流速度研究. 北京林业大学学报, 1996, 18(1): 55-59.
- [21] 张德成, 殷明放, 白冬艳, 魏进华, 朱学静, 丁丽娜. 测算辽东山区主要林分类型的蒸发散量. 西北林学院学报, 2007, 22(4): 25-29.
- [22] 王佑民. 我国林冠降水再分配研究综述(I). 西北林学院学报, 2000, 15(3): 1-7.
- [23] 刘世荣. 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: 107-203.
- [24] 杨文利. 不同林分枯落物层持水特性研究. 南昌工程学院学报, 2007, 26(6): 70-73.
- [25] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. 生态学报, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [26] 赵鸿雁, 吴钦孝, 刘向东, 韩冰. 森林枯枝落叶层抑制土壤蒸发的研究. 西北林学院学报, 1992, 7(2): 14-20.
- [27] 牛云, 张宏斌, 刘贤德, 张学龙, 葛双兰. 祁连山主要植被下土壤水的时空动态变化特征. 山地学报, 2002, 20(6): 723-726.
- [28] 施爽, 郭继勋. 松嫩草原三种主要植物群落枯落物层生态水文功能. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1722-1726.
- [30] 李海军, 张新平, 张毓涛, 韩占涛, 李翔, 芦建江. 基于月水量平衡的天山中部天然云杉林森林生态系统蓄水功能研究. 水土保持学报, 2011, 25(4): 227-232.
- [31] 王晓学, 李叙勇, 莫菲, 江燕. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法——概念与理论框架. 生态学报, 2010, 30(20): 5491-5500.
- [33] 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 玄莲玉. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究. 延边大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 126-134.
- [34] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 王效科. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481-484.
- [35] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究. 资源科学, 2002, 24(6): 68-73.
- [36] 郎奎建, 李长胜, 殷有, 郎璞玫, 王维芳, 刘鹏, 刘刚. 林业生态工程 10 种森林生态效益计量理论和方法. 东北林业大学学报, 2000, 28(1): 1-7.
- [37] 李金昌. 生态价值论. 重庆: 重庆大学出版社, 1999, 132-134.
- [38] 张颖. 采用最优控制方法计算我国森林涵养水源的价格. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 6-12.
- [39] 余新晓, 秦永胜, 陈丽华, 刘松. 北京山地森林生态系统服务功能及其价值初步研究. 生态学报, 2002, 22(5): 783-786.
- [40] 李海防, 范志伟, 颜培栋, 杨章旗, 零天旺, 覃富健. 不同年龄马尾松人工林水源涵养能力比较研究. 福建林学院学报, 2011, 31(4): 320-323.
- [41] 徐小牛, 邓文鑫, 张赞齐, 王勤, 丁增发. 安徽老山亚热带常绿阔叶林不同林龄阶段土壤特性及其水源涵养功能的变化. 水土保持学报, 2009, 23(1): 177-181.
- [42] 吴鹏飞, 朱波. 不同林龄段档柏混交林生态系统的水源涵养功能. 中国水土保持科学, 2008, 6(3): 94-101.
- [45] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究. 自然资源学报, 2011, 26(11): 2100-2109.
- [47] 王兵, 杨锋伟, 郭浩, 等. 森林生态系统服务评估规范(LY/T 1721—2008). 北京: 中国标准出版社. 2008
- [48] 李文华, 李芬, 李世东, 刘某承. 森林生态效益补偿的研究现状与展望. 自然资源学报, 2006, 21(5): 677-688.
- [49] 程大珍, 陈民, 史世平, 马志尊. 永定河上游人类活动对降雨径流关系的影响. 水利水电工程设计, 2001, 20(2): 19-21.
- [50] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 2-10.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 4 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales WANG Xiaoxue, SHEN Huitao, LI Xuyong, et al (1019)
- Advances in the study of stable isotope composition of leaf water in plants LUO Lun, YU Wusheng, WAN Shimin, et al (1031)
- Eco-environmental effects of urban landscape pattern changes: progresses, problems, and perspectives CHEN Liding, SUN Ranhao, LIU Hailian (1042)
- An overview of advances in distributional pattern of urban biodiversity MAO Qizheng, MA Keming, WU Jianguo, et al (1051)
- Ecological compensation boosted ecological protection and human well-being improvement LI Huimei, ZHANG Anlu (1065)

Autecology & Fundamentals

- Effects of indigenous AM fungi and neighboring plants on the growth and phosphorus nutrition of *Leymus chinensis* LEI Yao, HAO Zhipeng, CHEN Baodong (1071)
- Influences of AM fungi on plant growth and water-stable soil aggregates under drought stresses YE Jiashu, LI Tao, HU Yajun, et al (1080)
- The effect of transgenic cucumber with double strands RNA of *mapk* on diversity of rhizosphere bacteria CHEN Guohua, MI Baobin, LI Ying, et al (1091)
- The ambient ozone pollution and foliar injury of the sensitive woody plants in Beijing exurban region WAN Wuxing, XIA Yajun, ZHANG Hongxing, et al (1098)
- Diversity and plant growth-promoting potential of culturable endophytic bacteria isolated from the leaves of *Atractylodes lancea* ZHOU Jiayu, JIA Yong, WANG Hongwei, et al (1106)
- Effects of the low temperature treatment on egg maturation and its numerical dynamics in the parasitoid *Pteromalus puparum* (Hymenoptera: Pteromalidae) XIA Shiyang, MENG Ling, LI Baoping (1118)
- Circadian rhythm of calling behavior and sexual pheromone production and release of the female *Zeuzera leuconotum* Butler (Lepidoptera: Cossidae) LIU Jinlong, JING Xiaoyuan, YANG Meihong, et al (1126)
- Influence of fluoride on activity of carboxylesterase and esterase in hemolymph of *Bombyx mori* MI Zhi, RUAN Chenglong, LI Jiaorong, et al (1134)
- Effects of water temperature on the embryonic development, survival and development period of larvae of ridgetail white prawn (*Exopalaemon carinicauda*) reared in the laboratory LIANG Junping, LI Jian, LI Jitao, et al (1142)

Population, Community and Ecosystem

- Diversity of ecosystem services and landscape multi-functionality: from scientific concepts to integrative assessment LÜ Yihe, MA Zhimin, FU Bojie, et al (1153)
- Research on estimating wetland vegetation abundance based on spectral mixture analysis with different endmember model: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing CUI Tianxiang, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1160)
- Identifying typical plant ecological types based on spectral characteristic variables: a case study in Wild Duck Lake wetland, Beijing LIN Chuan, GONG Zhaoning, ZHAO Wenji, et al (1172)
- Responses of phytoplankton community to the construction of small hydropower stations in Hainan Province LIN Zhangwen, LIN Sheng, GU Jiguang, et al (1186)
- Diurnal variation of water quality around *Potamogeton crispus* population WANG Jinqi, ZHENG Youfei, WANG Guoxiang (1195)
- Effects of three forest restoration approaches on plant diversity in red soil region, southern China WANG Yun, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (1204)
- Dynamics of soil physical-chemical properties and organic carbon content along a restoration chronosequence in *Pinus tabulaeformis* plantations HU Huifeng, LIU Guohua (1212)
- Probability models of forest fire risk based on ecology factors in different vegetation regions over China LI Xiaowei, ZHAO Gang, YU Xiubo, et al (1219)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Landscape ecological security dynamics in a fast growing urban district: the case of Dongguan City YANG Qingsheng, QIAO Jigang, AI Bin (1230)
- The difference between exergy and biodiversity in ecosystem health assessment: a case study of Jiangsu coastal zone TANG Dehao, ZOU Xinqing, LIU Xingjian (1240)
- Impacts of drying-wetting cycles on CO₂ and N₂O emissions from soils in different ecosystems OUYANG Yang, LI Xuyong (1251)
- Evaluation of low-carbon competitiveness in Western China JIN Xiaoqin, DU Shouhu (1260)
- Flood return period analysis of the Bayi Reservoir Watershed based on HEC-HMS Model ZHENG Peng, LIN Yun, PAN Wenbin, et al (1268)
- Simulation of rainfall interception process of primary korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains by using the modified Gash model CHAI Rushan, CAI Tiju, MAN Xiuling, et al (1276)
- Characteristics of tree-ring chronology of *Pinus koraiensis* and its relationship with climate factors on the northern slope of Changbai Mountain CHEN Lie, GAO Lushuang, ZHANG Yun, et al (1285)

Resource and Industrial Ecology

- Nitrogen flows in "crop -edible mushroom" production systems in Hexi Corridor Oasis Irrigation Area LI Ruiqin, YU Anfen, ZHAO Youbiao, et al (1292)
- Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut WANG Caibin, ZHENG Yaping, LIANG Xiaoyan, et al (1300)
- Effect of tillage and residue management on dynamic of soil microbial biomass carbon PANG Xu, HE Wenqing, YAN Changrong, et al (1308)
- Evaluation of eco-security of cultivated land requisition-compensation balance based on improved set pair analysis SHI Kaifang, DIAO Chengtai, SUN Xiufeng, et al (1317)

Opinions

- Methodology for measuring forestry ecological security based on ecology-industry symbiosis: a research framework ZHANG Zhiguang (1326)

《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 4 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 4 (February, 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