

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

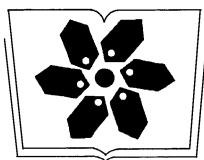
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第12期 Vol.31 No.12 **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 12 期

2011 年 6 月 (半月刊)

目 次

基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例	李 昊, 蔡运龙, 陈睿山, 等 (3255)
扩散对破碎化景观上宿主-寄生种群动态的影响	苏 敏 (3265)
湿地功能评价的尺度效应——以盐城滨海湿地为例	欧维新, 叶丽芳, 孙小祥, 等 (3270)
模拟氮沉降对杉木幼苗养分平衡的影响	樊后保, 廖迎春, 刘文飞, 等 (3277)
中国东部森林样带典型森林水源涵养功能	贺淑霞, 李叙勇, 莫 菲, 等 (3285)
山西太岳山油松群落对采伐干扰的生态响应	郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等 (3296)
长期施用有机无机肥对潮土微生物群落的影响	张焕军, 郁红艳, 丁维新 (3308)
云南元江干热河谷五种优势植物的内生真菌多样性	何彩梅, 魏大巧, 李海燕, 等 (3315)
塔里木河中游洪水漫溢区荒漠河岸林实生苗更新	赵振勇, 张 科, 卢 磊, 等 (3322)
基于 8hm 样地的天山云杉林蒸腾耗水从单株到林分的转换	张毓涛, 梁凤超, 常顺利, 等 (3330)
古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应	周晓兵, 张元明, 陶 冶, 等 (3340)
Pb 污染对马蔺生长、体内重金属元素积累以及叶绿体超微结构的影响	原海燕, 郭 智, 黄苏珍 (3350)
春、秋季节树干温度和液流速度对东北 3 树种树干表面 CO ₂ 释放通量的影响	王秀伟, 毛子军, 孙 涛, 等 (3358)
云南南部和中部地区公路旁紫茎泽兰土壤种子库分布格局	唐樱殷, 沈有信 (3368)
利用半球图像法提取植被冠层结构特征参数	彭焕华, 赵传燕, 冯兆东, 等 (3376)
黑河上游蝗虫与植被关系的 CCA 分析	赵成章, 周 伟, 王科明, 等 (3384)
额尔古纳河流域秋季浮游植物群落结构特征	庞 科, 姚锦仙, 王 昊, 等 (3391)
九龙江河口浮游植物的时空变动及主要影响因素	王 雨, 林 茂, 陈兴群, 等 (3399)
东苕溪中下游河岸类型对鱼类多样性的影响	黄亮亮, 李建华, 邹丽敏, 等 (3415)
基于 RS/GIS 公路路域水土流失动态变化的研究——以榆靖高速公路为例	陈爱侠, 李 敏, 苏智先, 等 (3424)
流域景观结构的城市化影响与生态风险评价	胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (3432)
基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析	高 宾, 李小玉, 李志刚, 等 (3441)
若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响	李晋昌, 王文丽, 胡光印, 等 (3451)
施用鸡粪对土壤与小白菜中 Cu 和 Zn 累积的影响	张 妍, 罗 维, 崔晓勇, 等 (3460)
基于 GIS 的宁夏灌区农田污染源结构特征解析	曹艳春, 冯永忠, 杨引禄, 等 (3468)
底墒和种植方式对夏大豆光合特性及产量的影响	刘 岩, 周勋波, 陈雨海, 等 (3478)
不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究——以南四湖过水区粮田为例	谭德水, 江丽华, 张 骞, 等 (3488)
丛枝菌根真菌对低温下黄瓜幼苗光合生理和抗氧化酶活性的影响	刘爱荣, 陈双臣, 刘燕英, 等 (3497)
外源半胱氨酸对铜胁迫下小麦幼苗生长、铜积累量及抗氧化系统的影响	彭向永, 宋 敏 (3504)
专论与综述	
水平扫描技术及其在生态学中的应用前景	胡自民, 李晶晶, 李 伟, 等 (3512)
研究简报	
昆仑山北坡 4 种优势灌木的气体交换特征	朱军涛, 李向义, 张希明, 等 (3522)
不同比例尺 DEM 数据对森林生态类型划分精度的影响	唐立娜, 黄聚聪, 代力民 (3531)
苏南丘陵区毛竹林冠截留降雨分布格局	贾永正, 胡海波, 张家洋 (3537)
外来种湿地松凋落物对土壤微生物群落结构和功能的影响	陈法霖, 郑 华, 阳柏苏, 等 (3543)
深圳地铁碳排放量	谢鸿宇, 王习祥, 杨木壮, 等 (3551)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 304 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-06



封面图说: 自然奇观红海滩·辽宁省盘锦市——在辽河入海口生长着大片的潮间带植物碱蓬草, 举目望去, 如霞似火, 蔚为壮观, 人们习惯地称之为红海滩。粗壮的根系加快着海滩土壤的脱盐过程, 掉下的茎叶腐质后肥化了土壤, 它是大海的生态屏障。

彩图提供: 段文科先生 中国鸟网 <http://www.birdnet.cn> E-mail: dwk9911@126.com

中国东部森林样带典型森林水源涵养功能

贺淑霞^{1,2}, 李叙勇^{1,*}, 莫菲¹, 周彬³, 高广磊³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国林业科学研究院华北林业实验中心, 北京 102300; 3. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要:通过对我国东部森林样带 4 个森林生态系统定位研究站(长白山站、北京站、会同站和鼎湖山站)的 9 种森林类型水源涵养监测数据的分析,研究了水热梯度下不同森林生态系统水源涵养功能。结果表明:在生长季的 5—10 月份,各森林类型的水源涵养特性表现出较大差异。林冠截留率的大小依次为:阔叶红松林>杉木林>常绿阔叶林>针阔混交林>季风常绿阔叶林>落叶阔叶混交林>马尾松林>落叶松林>油松林,最高的长白山站阔叶红松林的截留率是最低的北京站油松林的 2.2 倍。森林降雨截留量与林外降雨量呈显著的正相关,林冠截留率与降雨量呈显著负相关。枯落物最大持水深(5—10 月份)以北京站落叶阔叶林最大,为 6.0 mm;鼎湖山站的季风常绿阔叶林最小,为 1.0 mm。0—60 cm 土层蓄水量最大的是会同站的人工杉木林,为 247 mm;最小的是北京站的落叶松林,仅为 45.5 mm;林分总持水量依次为:杉木林>阔叶红松林>常绿阔叶林>针阔混交林>季风常绿阔叶林>落叶阔叶混交林>马尾松林>落叶松林>油松林。各林分总持水量主要集中在土壤层,占总比例的 90% 以上。

关键词:东部森林样带;水源涵养;冠层截留;凋落物;土壤蓄水量

The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of eastern China

HE Shuxia^{1,2}, LI Xuyong^{1,*}, MO Fei¹, ZHOU Bin³, GAO Guanglei³

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

2 Forestry Experiment Center of North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China

3 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: A forest ecosystem consists of forest coenosis and environment, which are affected and interacted each other, with the function of energy transformation and storage. The forest ecosystem builds a perfect environment for rainfall interception and storage with its lush canopy, shrub layer and herb layer of undergrowth vegetation, forest floor litter, loose and deep soil layer. The forest ecosystem strongly affects rainfall redistribution and storage and thus plays its role as the unique function of water conservation. However, different forest ecosystems in different climate zones could exhibit big differences in characteristics of their water conservation functions due to different forest structure, topology, and soil properties. We selected four long-term forest ecosystem sites (Changbaishan, Beijing, Huitong, and Dinghushan sites) in our study. These study sites are located in the forest transect of eastern China across the semi-arid monsoon climate in the temperate zone, semi-humid warm temperate zone and subtropical monsoon climatic zone from north to south, with obvious thermal gradient and hydrologic gradient. We analyze stem flow, canopy interception of rainfall, rainfall through the forest, water holding capacity in forest litter layers and mineral soil layers, and overall forest water conservation capacity of nine forest ecosystem types across four study sites in the growing season during May to October. The results showed that: canopy interception varied significantly across different forest types from May to October. The retention rate were in order of Korean pine forest>firs>evergreen broadleaved forest>mixed coniferous and broad-leaved forest>monsoon evergreen broad-leaved

基金项目:国家 973 计划课题(2009CB421104);中国科学院重大方向性项目(KZCX2-YW-T13);国家自然科学基金(41071323)

收稿日期:2010-06-12; **修订日期:**2011-01-25

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

forest>defoliate broad-leaved mixed forest>pinus massoniana forest>larix plantation forest>pinus tabulae-formis forest. The highest retention rate was Korean pine forest which was 2.2 times than the lowest, pinus tabulae-formis forest. The interception had significantly positive correlation to rainfall outside of the forest stands; canopy interception rate had significantly negative correlation to precipitation. We also found that the highest water-capacity of forest litter was deciduous broad-leaved forest in Beijing site, 6.0mm from May to October; the lowest water-capacity was monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan site, 1.0mm from May to October. The maximum water-capacity of the soil layer from 0 to 60cm depth was artificial fir in Huitong site, 247mm; the lowest was the larch in Beijing site, 45.5mm. Total water storage capacity of the forest ecosystem were in order of firs>Korean pine forest>evergreen broadleaved forest>mixed coniferous and broad-leaved forest>monsoon evergreen broad-leaved forest>defoliate broad-leaved mixed forest>pinus massoniana forest>larix plantation forest>pinus tabulae-formis forest. The total water storage capacity of different forest ecosystems fluctuated between 40—250mm during growing season. All of the subtropical forest ecosystems had higher values of water storage capacity, more than 100mm except the Pinus massoniana forest, 99.74mm; all forest ecosystems in semi-arid area of Beijing site had lower values of water storage capacity, less than 100mm. More than 90% of total water were stored in soil, followed by forest litter layer, about 8%, and then followed by forest canopy interception, about 2%. Our findings could promote the water conservation practice of forest ecosystems in eastern China.

Key Words: forest transect of eastern China; forest water conservation; canopy interception; litter; soil water capacity

水源涵养功能是森林生态系统的重要功能之一^[1],大气降水经过林冠时产生重新分配,一部分形成茎流,一部分形成穿透降雨(包括穿过林冠的和不穿过林冠而直接到达林地表面的),还有一部分被林冠截留。穿越冠层的水分被凋落物截持,然后渗透进入土壤,完成由大气到土壤的转化过程^[2-3]。森林生态系统的水源涵养功能主要与植被类型及盖度^[4-7]、枯枝落叶层组成及现存量^[8-10]、土壤孔隙度及土层厚度^[8,11-12]等因素密切相关。但由于林分结构和树种生物学特性等不同,不同森林生态系统水源涵养功能也有差异^[13]。

我国东部南北样带是国际地圈生物圈计划于2000年划定的第15条国际标准样带。本文的研究区域就在此样带范围内,从北至南跨越了半干旱中温带季风气候带、半湿润暖温带季风气候带和亚热带季风气候带,具有明显的热量梯度和水热组合梯度变化;自20世纪中叶,我国开始森林水源涵养功能研究之初至今,该区域开展了大量有关森林水源涵养功能的研究,但多数研究针对一个气候带或单一林分类型^[2]。本文旨在全面总结我国东部森林样带4个森林生态系统定位研究站近年来大量观测数据的基础上,较为系统地阐述了东部样带典型森林生态系统的林冠截持降雨、枯落物蓄水、土壤蓄水以及综合水源涵养调节能力,为开展区域和全国大尺度的森林生态系统水源涵养功能对比研究奠定基础,增强对我国东部森林水文功能的认识,从而为我国东部森林生态系统水源涵养和水土保持实践提供重要依据。

1 研究区概况

本研究4个森林生态系统定位研究站的森林生态系统分别代表了中温带、暖温带、亚热带不同类型的森林生态系统。长白山站(E128°28',N42°24')位于吉林省安图县二道白河镇,属中温带地区,海拔736 m,年均温3.5℃,5—10月份多年平均降雨量599 mm。主要林分类型是阔叶红松林,树种组成主要有红松(*Pinus koraiensis*)和多种阔叶树如枫桦(*Betula costata*)、春榆(*Ulmus propinqua*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、色木(*Acer mono*)等。北京站(E115°26',N39°58')位于北京市门头沟区齐家庄乡小龙门林场,地处东灵山暖温带落叶阔叶林区,海拔1050—1250 m,年均温2—8℃,5—10月份多年平均降水量498 mm。主要林分类型为落叶阔叶混交林、油松人工林和落叶松人工林。落叶阔叶混交林乔木层以辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)、棘皮桦(*Betula dahurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)占优势;油松人工林林下灌木层和草本层较贫乏。落叶松人工林灌木和草本层稀疏。会同站(E109°30',N26°48')位于中亚热带地区,海拔300—500 m,年均温16.5℃,5—10月份多年平均降雨量628 mm。地带性植被类型为典型的亚热带常绿阔叶

林。自然植被主要是以多种槲(*Castanopsis sclerophylla*)、栲(*Castanopsis*)和石栎(*Lithocarpus*)属为主的亚热带常绿阔叶林以及杉木人工林。鼎湖山站(E112°30', N23°11')位于南亚热带地区,海拔100—700 m,年均温20.9℃,5—10月份多年平均降雨量1216 mm。季风常绿阔叶林分布于海拔30—400 m,是本区最主要的森林类型,约占森林总面积的18%。次生季风常绿阔叶林和针阔叶混交林分布于海拔100—450 m;马尾松林分布于海拔300 m以下丘陵区。研究区森林生态系统样地特征见表1。

表1 研究区基本概况

Table 1 Features of study sites

站点名称 Site	林分类型 Forest	林龄 Age/a	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean breast diameter /cm	平均冠幅 Mean crown width/m	密度 Density /(株/hm ²)	郁闭度 Canopy density	盖度(灌) Cover degree/%	叶面积 指数 Leaf area index	坡度 Slope/(°)	坡向 Slope aspect	坡位 Slope location
长白山站	阔叶红松林	125—250	27	42.37	—	2224	0.8	50	1.97	2	北坡	中坡
北京站	落叶阔叶混交林	—	8.9	20.9	27.1	2333	0.85	90	2.92	30	西北	中坡
	油松林	36	10.5	17.5	13.6	1800	0.75	90	2.18	34	东西	下坡
	落叶松林	—	9.7	16	8.9	2500	0.8	90	2.35	29	南北	下坡
会同站	杉木	27	20.3	21.5	—	1080	0.7	56	4.12	20	东南	中坡
	常绿阔叶林	—	10.5	15.72	—	1312	0.8	52	4.60	32	东北	下坡
鼎湖山站	马尾松林	56	8.5	20.67	14.7	3470	0.90	16.4	2.61	15—25	东南	中坡
	季风常绿阔叶林	—	14.5	24.6	29.8	4688	0.90	20.5	5.27	25—35	东北	中坡
	针阔混交林	50—60	10.7	25.5	28.7	3208	0.95	11.7	3.78	30—45	东南	上坡

由于研究区内森林生态系统跨越3个气候带,而森林水源涵养功能主要受水、热气候因素调节^[14],以下总结研究期内(2005—2007年)生长季(5—10月)各森林生态站的降雨量、水面蒸发量以及5—10月的平均温(图1)。北京站生长季的蒸发量大于降雨量,其余各站同期蒸发量小于降雨量;长白山站5—10月平均温14.09℃,北京站同期14.19℃,两站比较接近;会同站同期平均温22.98℃,鼎湖山站同期平均温26.86℃,在4站最高。研究区5—10月总降雨量、总蒸发量、平均温度见图1。

2 研究方法

本研究使用的4个生态站的监测数据来自于中国生态系统研究网络(CERN),CERN各野外试验站均以中国生态系统研究网络科学委员会编著的《陆地生态系统生物观测规范》的统一要求为观测指标体系和观测规范,开展长期试验观测和联网综合研究,建立生态系统优化管理的示范模式。统一规范的观测方法是本研究不同站点数据的可比性的重要基础,表2总结了本研究相关观测项目的指标、频度和样本数^[15]。

2.1 冠层对降水截留作用的观测

本研究使用的水文观测数据主要集中在2005—2007年5—10月。在每一标准地中,对降雨量、林内穿透雨、树干径流量进行观测,所有测定方法参见《陆地生态系统生物观测规范》^[15]。在每一标准地内均匀布置简易穿透雨收集器测定林内穿透雨;根据标准地乔木胸径调查结果,选取能够代表样地范围所有乔木胸径径级的标准木,在离地面1.3 m处用聚氯乙烯胶管蛇形环绕树干,接引到树干茎流收集器中。最后计算单位面积的树干径流量(mm)。树冠截留量按公式: $P_i = P - P_s - P_t$ 计算,式中, P_i 为树冠截留量; P 为大气降雨量; P_s

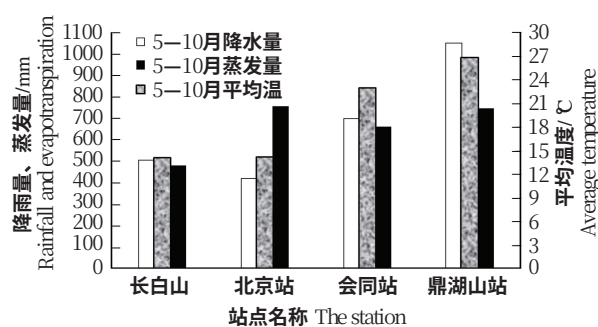


图1 研究区5—10月平均温度、总降水量、总蒸发量

Fig. 1 Average temperature, rainfall and evapotranspiration from May to October in the study sites

为乔木树干径流量; P_s 为穿透雨量。

表 2 监测项目的观测指标及样本数
Table 2 Indicators and sample numbers of observational items

观测项目 Observational items	指标 Indicators	频度 Frequency	样本数 Sample numbers
乔木种类组成与群落特征	每木调查:植物种、胸径、高度 基于每木调查:优势种、密度 按样方观测:群落郁闭度	1 次/2a 或 1 次/3a 轮换观测	样地内的全部树木;
凋落物 水文特性	枝干重、叶干重、花果干重、皮干重 苔藓地衣干重、杂物干重、倒木干重、 立枯木干重	现存量:1 次/a,在凋落物最少时期观 测(植物生长盛期); 含水率:每月测定 1 次,每次测 3 组 数据;	研究区内,各生态站根据实际情况每个 样地设置 20—25 个Ⅱ级样方,每个Ⅱ级 样方内设 4 个点观测凋落物现存量;
土壤物理性质及 水文特征	土壤容重、质量含水量、体积含水量、 饱和含水量、总孔隙度、非毛管孔隙	1 次/a,在生长期测定	每个样地内选定 6 个样方测定相关指 标,每个样方内测 10 组数据; 中子仪法测土壤含水量:1 次/10d,降雨 后加测 1 次;
降雨、蒸发	水面蒸发 雨水采集器(大气降雨、林内穿透降 雨、树干茎流)	水面蒸发,每天或每小时观测 1 次; 大气降雨、林内穿透降雨、树干茎流 在每次降雨后观测;	穿透降雨:每个Ⅱ级样方内观测 2 组 数据; 树干茎流:每个样地内按茎级观测 6— 20 棵具有代表性的优势树种茎流数据; 水面蒸发:用蒸发皿观测,每天 20:00 观 测或每小时观测 1 次,研究区内各站 不同

2.2 凋落物层现存量及持水能力测定

凋落物贮量的测定按林分类型设置小样方,即在标准样地内随机或系统放置 20 个面积为 1m²的带编号的枯枝落叶收集框,定期量测凋落物层的厚度并收取样方中所有的凋落物(由于凋落物现存量季节变化很大,一般在现存量最少时期:即植物生长盛期观测),清除土壤颗粒,按枝、叶、花、果、皮苔藓地衣、杂物等分开,在 65℃ 下烘干至恒重后称重,测得凋落物的自然含水率与干重,以此推算单位面积的凋落物贮量;凋落物最大持水率的测定用“浸水法”,是将收集的凋落物浸入水中 24h 后称重与其干重之比^[16]。

2.3 土壤物理性质及持水能力测定

在各种林分下,用 100 cm² 环刀按 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60cm 土层取样,带回室内测定土壤容重、孔隙度、持水能力等物理性质。本研究中一定土层厚度的土壤蓄水量,用下式计算: $T_w = T_s \times \theta_v$,式中, T_w 为土壤蓄水量(mm), T_s 为土层厚度(mm), θ_v 为该土层的体积含水量。

3 结果分析

3.1 各森林生态系统冠层的生态水文功能

大气降水、茎流和穿透雨这三者的关系及其影响因素是森林水文生态功能研究的重要内容^[17];其中,树干茎流是森林冠层水量平衡中的重要组成部分^[18]。2005—2007 年的 5—10 月期间,南北样带各站点森林生态系统冠层生态水文功能在水热梯度下没有明显的规律性。南北样带各站点森林生态系统冠层生态水文功能如表 3 所示。

3.1.1 森林生态系统的林冠截留量与截留率

研究区 9 种林分类型的林冠截留量差异较大,平均值介于 71.2—245 mm 之间,变异系数为 2.1%—37.0%。从平均值分析,截留量最大的是鼎湖山站的针阔混交林为 245 mm,因该林分具有较高的冠层密度、较高的植株密度,使得与雨滴接触的枝叶表面积相应增大,增加了冠层的截留量;研究区森林生态系统的林冠截留率的平均值变动在 14.3%—31.6% 之间,变动系数为 6.3%—36.8% 之间;林冠截留率最高的为阔叶红松林 31.6%,因长白山站同期大气降雨量少、雨强相对小,而阔叶红松林枝叶较为茂密,林冠截留率相对较

高。各森林生态系统截留量与截留率如表 4 所示。

表 3 研究区森林生态系统冠层生态水文功能
Table 3 The ecohydrological functions of forest canopy of typical ecosystems in the study sites

站点名称 Site	林分类型 Forest	降水量 Rainfall/mm	穿透量 Throughfall /mm	穿透率 Throughfall rate /%	树干茎流量 Stemflow /mm	干流率 Stemflow rate /%	截留量 Interception /mm	截留率 Interception rate /%
长白山站	阔叶红松林	599.13	313.99	52.41	95.18	15.89	189.95	31.70
北京站	落叶阔叶混交林	498.31	393.38	78.94	10.02	2.01	94.91	19.05
	油松林	498.31	419.61	84.21	7.50	1.51	71.20	14.28
	落叶松林	498.31	415.50	83.38	9.59	1.93	73.22	14.69
	杉木	627.87	474.70	75.61	13.94	2.22	139.23	22.17
会同站	常绿阔叶林	627.87	472.32	75.23	25.58	4.07	129.97	20.70
	马尾松林	1216.27	1009.50	83.00	19.01	1.56	187.76	15.44
	季风常绿阔叶林	1216.27	908.22	74.67	71.15	5.85	236.90	19.48
鼎湖山站	针阔混交林	1216.27	903.66	74.30	67.53	5.55	245.08	20.15

表 4 森林生态系统林冠截留量与截留率
Table 4 Canopy interception amount and interception rate of forest ecosystems

站点 Site	林分类型 Forest	郁闭度 Canopy density	降水量 Rainfall			截留量 Interception			截留率 Interception rate		
			平均值 Mean	标准差 STDEV	CV/%	平均值 Mean	标准差 STDEV	CV/%	平均值 Mean	标准差 STDEV	CV/%
长白山站	阔叶红松林	0.80	599.13	82.24	13.73	189.95	27.02	14.25	31.70	1.99	6.30
北京站	落叶阔叶混交林	0.85	498.31	110.53	22.18	94.91	14.28	12.11	19.05	1.87	9.82
	油松林	0.75	498.31	110.53	22.18	71.2	11.93	16.75	14.29	3.85	26.94
	落叶松林	0.80	498.31	110.53	22.18	73.22	9.13	12.47	14.69	4.54	30.91
会同站	杉木	0.70	627.87	93.12	14.83	139.22	22.83	16.40	22.37	3.76	16.83
	常绿阔叶林	0.80	627.87	93.12	14.83	129.97	2.68	2.06	21.02	3.26	15.53
鼎湖山站	马尾松林	0.90	1216.27	274.12	22.54	217.76	67.53	31.01	18.76	6.91	36.82
	季风常绿阔叶林	0.90	1216.27	274.12	22.54	236.9	87.53	36.95	19.40	6.39	32.92
	针阔混交林	0.95	1216.27	274.12	22.54	245.08	40.87	16.68	20.74	4.73	22.79

3.1.2 林冠截留量与降水量相关分析

大量研究证明,林冠截留量与降雨量存在着紧密正相关关系,但各种森林,两者相关的线形是不同的^[2]。对本研究区的各森林类型的林冠截留量与同期大气降雨量做相关分析,结果如表 5 所示:阔叶红松林、常绿阔叶林、针阔混交林的林冠截留量与降雨量表现为较好的幂函数关系,其余的林分除杉木林外,都表现为显著直线相关;不同森林的林冠截留量存在显著差异。

3.1.3 林冠截留率与降水量相关分析

表 6 是不同森林林冠截留率与降水量的回归方程及相关系数。从表 6 可以看出,和林冠截留量相反,各种森林林冠截留率与降水量呈紧密负相关,其线形为幂函数式。且不同森林生态系统的截留率也存在较大差异。

表 5 林冠截留量与降水量相关分析
Table 5 Correlation between canopy interception amount and precipitation

站点名称 Site	林分类型 Forest	回归方程 Regressive equation	相关系数 Correlation
长白山站	阔叶红松林	$I = 0.195P^{1.075}$	0.926 **
北京站	落叶阔叶混交林	$I = 0.221P - 2.312$	0.881 **
	油松林	$I = 0.068P + 2.258$	0.784 **
	落叶松林	$I = 0.139P + 2.211$	0.939 **
会同站	杉木	$I = 14.70P^{0.353}$	0.788
	常绿阔叶林	$I = 5.796P^{0.482}$	0.914 **
鼎湖山站	马尾松林	$I = 0.0541P + 1.9234$	0.758 *
	季风常绿阔叶林	$I = 0.323P + 1.1320$	0.852 *
	针阔混交林	$I = 3.284P^{0.517}$	0.881 **

* 表示显著性水平为 5%, ** 表示其显著性水平为 1%

3.2 凋落物储量及持水能力

由于气候条件和森林生长量的不同,凋落物量有很大差别^[19]。森林凋落物层疏松多孔,有着重要的水源涵养功能^[2],主要体现在拦蓄降雨^[20]、降低雨滴动能、防止土壤溅蚀、保持水土^[21]、抑制林地土壤水分蒸发^[22]、阻延地表径流,从而减少水土流失^[22],其水文效应的强弱主要取决于凋落物的现存量 and 持水率的大小。研究表明,在研究区内凋落物的贮量由北向南大体呈现递减变化趋势,亚热带水热环境适宜、凋落物分解迅速,死地被物积累较少,因此凋落物的现存量相对较少;根据各林分的地理分布可总结为:研究区内凋落物贮量由高纬度、高海拔森林向低纬度、低海拔森林递减的规律。本研究区内最大持水率没有明显的变化规律,各林分持水率最大的是落叶阔叶混交林为 455.8%,最小的是杉木林为 249.7%;最大持水量与凋落物蓄积量、最大持水率紧密相关,本研究区内持水量最大的是北京站的落叶阔叶混交林,为 6.0 mm,最小的是鼎湖山站的季风常绿阔叶林,为 1.0 mm(表 7)。

表 6 林冠截留率与降水量相关分析

Table 6 Correlation between canopy interception rate and precipitation

站点 Site	林分类型 Forest	回归方程 Regressive equation	相关系数 Correlation
长白山站	阔叶红松林	$I\% = 0.658P^{-0.27}$	-0.674 *
北京站	落叶阔叶混交林	$I\% = 1.136P^{-0.42}$	-0.759 **
	油松林	$I\% = 2.432 P^{-0.92}$	-0.697 **
	落叶松林	$I\% = 1.434 P^{-0.57}$	-8.230 **
会同站	杉木	$I\% = 14.70 P^{-0.64}$	-0.960 **
	常绿阔叶林	$I\% = 5.796 P^{-0.51}$	-0.835 *
鼎湖山站	马尾松林	$I\% = 74.704 P^{-0.122}$	-0.896 *
	季风常绿阔叶林	$I\% = 58.1046 P^{-0.4554}$	-0.988
	针阔混交林	$I\% = 2.720 P^{-0.44}$	-0.755 **

* 表示显著性水平为 5%, ** 表示其显著性水平为 1%

表 7 凋落物蓄积量及贮水能力

Table 7 Storage and water capacity of forest litter

站点 Site	林分类型 Forest	凋落物层厚度 Thickness of litter /cm	凋落物蓄积量 Storage /(t/hm ²)	最大持水率 Maximum moisture content/%	最大持水量 Maximum water storage/mm
长白山站	阔叶红松林	3.45	4.90	268.32	1.31
北京站	落叶阔叶混交林	5.20	13.16	455.80	6.00
	油松林	3.10	7.44	362.63	2.70
	落叶松林	3.40	8.39	377.35	3.17
会同站	杉木	2.20	9.96	249.70	2.49
	常绿阔叶林	4.10	9.35	339.60	3.18
鼎湖山站	马尾松林	2.70	5.58	329.15	3.24
	季风常绿阔叶林	4.30	2.83	295.10	1.03
	针阔混交林	3.70	3.72	313.50	2.41

3.3 土壤物理性质及贮水能力

土壤的蓄水能力与土壤的空隙状况密切相关^[23];即最大蓄水量与土壤的总孔隙度密切相关,土壤的非毛管空隙是土壤重力水移动的主要通道,因此土壤对降雨的贮存能力与土壤的非毛管孔隙亦密切相关;另外,土壤容重、土壤水分渗透性也是土壤水文生态功能的重要方面,是影响地表径流、林地土壤水分调节能力的重要因素。研究表明,在各森林生态系统中,随着土层深度的增加,土壤的总孔隙度、非毛管孔隙度均逐渐降低;而土壤容重随土层增加呈增大趋势,如表 8 所示。

森林土壤是森林群落最主要的涵养水源的贮库,其涵养水源的能力,主要取决于土壤和森林的综合状况。由表 8 可知,研究区内各林分土壤的 0—60cm 总蓄水量在 45.5—247mm 之间,天然林分的土壤平均容重(0—60cm)大于人工林分;天然林分的平均非毛管孔隙度(0—60cm)也大于人工林分;就表层土壤来说,阔叶红松林的容重最小为 0.50 g/cm³,这主要因为长白上阔叶红松林林龄较高、土壤表层腐殖质层较厚,较多的腐殖质也有利于贮存更多的水分;从 0—60 cm 土层的总蓄水量来看,天然林的总蓄水量大于人工林,总体趋势是亚热带的常绿阔叶林、针阔混交林的土壤蓄水量相对较高。长白山站阔叶红松林总蓄水量高达 202 mm,主要与该森林生态系统林龄比较大、林下枯枝落叶和腐殖质层厚度等因素有关。

表 8 土壤水文物理性质及持水能力

Table 8 Soil hydro-physical characteristics and water-hold capacity

站点 Site	林分类型 Forest	土层 Soil depth /cm	自然含水率 Water content/%	饱和持水率 Saturated water content/%	非毛管 孔隙度 Non-capillary porosity/%	总孔隙度 Total porosity /%	容重 Bulk density /(g/cm ³)	蓄水量 Water storage /mm	0—60cm 总蓄水量 Total water storage/mm
长白山站	阔叶红松林	0—10	70.24	140.24	29.70	69.35	0.50	35.12	202.3
		10—20	27.60	49.03	27.56	56.97	1.25	34.5	
		20—60	20.60	29.53	24.63	47.24	1.61	132.68	
北京站	落叶阔叶混交林	0—20	19.26	61.92	16.25	70.00	0.78	19.78	64.7
		20—60	14.25	43.30	8.5	62.31	0.98	44.92	
		油松林	0—20	27.41	42.70	14.06	1.04	18.82	
	落叶松林	20—60	19.11	38.34	10.3	54.23	1.19	60.6	79.42
		0—20	11.66	39.58	12.39	65.00	0.91	11.78	
		20—60	9.05	36.17	6.6	56.92	1.12	33.72	
会同站	杉木	0—20	31.87	60.93	15.5	62.14	1.23	78.4	246.96
		20—60	33.99	53.99	8.2	56.22	1.24	168.56	
		常绿阔叶林	0—20	31.47	56.37	13.30	1.18	74.26	
		20—60	29.57	55.23	8.67	56.62	1.31	154.96	229.22
		0—20	8.91	41.82	22.72	39.05	1.60	28.52	
		20—60	10.58	39.46	17.25	35.17	1.56	66.0	
鼎湖山站	马尾松林	0—20	8.91	41.82	22.72	39.05	1.60	28.52	94.52
		20—60	10.58	39.46	17.25	35.17	1.56	66.0	
		季风常绿阔叶林	0—20	25.68	54.83	35.81	1.11	57.0	
		20—60	14.03	47.15	33.56	50.51	1.42	79.68	136.68
		0—20	16.21	51.64	27.90	40.75	1.24	40.2	
		20—60	14.44	46.09	16.54	33.49	1.29	74.52	

3.4 不同森林生态系统总的持水能力

林分总持水量由地上部分持水量和土壤持水量组成,林分总持水量越大,表明林分涵养水分的能力越强。各森林生态系统总的持水能力随时空变化而改变。由表 9 可知,研究区内各森林生态系统的综合调节能力在 49.6—252 mm 之间,由于所处环境不同,综合调节能力也有所差异。总体来说,亚热带的各林分的综合调节能力除马尾松林 99.7 mm,其余的都在 100 mm 以上,其中阔叶林和针阔混交林的综合调节能力相对稳定且较高;而处于暖温带的北京站的 3 种林分的综合调节能力都在 100 mm 以下;从表 9 也可以看出林分总持水量主要集中在土壤层,其能力占综合调节能力的 90% 以上,地上部分所占的比例不到 10%;其次是枯枝落叶层的调节,约为 1—6mm,森林冠层的调节能力相对较弱,均在 3 mm 以内。然而土壤的调节能力受制于森林的作用,只有在保持良好森林和地被物覆被下,土壤的调节功能才可能得到最大限度的发挥^[1]。

表 9 各生态系统总的持水能力

Table 9 Total water storage capacity of forest ecosystems

站点 Site	林分类型 Forest	纬度 Latitude /(°)	经度 Longitude /(°)	海拔 Elevation /m	林冠一次降 水截留量 Canopy interception /mm	凋落物最 大持水量 Maximun water storage of forest litter/mm	60cm 土壤 总贮水量 Total soil water-hold capacity/mm	林分总持水量 Total forest water-hold capacity /mm
长白山站	阔叶红松林	42.40	128.08	784	2.02	1.31	202.30	205.63
北京站	落叶阔叶混交林	39.95	115.40	1264	1.17	6.00	64.70	71.87
	油松林	39.95	115.42	1253	0.88	2.70	79.42	83.00
	落叶松林	39.95	115.42	1256	0.90	3.17	45.50	49.57
会同站	杉木	26.85	109.60	520	2.11	2.49	246.96	251.56
	常绿阔叶林	26.83	109.60	358	1.97	3.18	229.22	234.37
鼎湖山站	马尾松林	23.17	112.53	100	1.98	3.24	94.52	99.74
	季风常绿阔叶林	23.17	112.53	290	2.49	1.03	136.68	140.2
	针阔混交林	23.17	112.53	200	2.58	2.41	114.72	119.71

4 讨论

森林的水源涵养功能是指森林生态系统通过林冠层、枯落物层和土壤层拦截滞蓄降水^[24],从而有效涵蓄土壤水分和补充地下水、调节河川流量的功能^[25-26]。林分地上部分持水量的大小对森林生态系统水源涵养功能的发挥具有积极作用。但由于林分结构不同,不同森林生态系统水源涵养功能有很大差异。本研究表明,大气降雨同各林分林冠截留量存在显著的正相关关系,而林冠截留率存在显著的幂函数负相关关系,表明林冠截留量和林冠截留率依赖于研究时间内降水量的波动。同时也依赖于森林林冠的郁闭度,树种的影响相对较小。

本研究中,长白山站阔叶红松林总穿透降雨、树干径流和截留量分别占大气降水的 52.4%、15.9% 和 31.7%;高于我国阔叶红松林截留率平均值 28.92%^[2],亦高于黑龙江凉水自然保护区阔叶红松林林冠截留率 27%^[2];暖温带各种森林类型的林冠截留率多介于 14%—27%^[2],本研究中北京站的落叶阔叶混交林林冠截留率 19.05%、油松林 14.29%,落叶松林 14.69%;落叶阔叶混交林的截留率明显高于油松林和落叶松林,可能是由于落叶阔叶混交林的冠幅和叶面积指数都高于油松和落叶松林;杉木林广泛分布于亚热带地区的 16 个省区,在郁闭度接近 0.7—0.9 的条件下,各地杉木林截留率广西岑溪为 14.64%^[2],湖南株洲为 9.6%^[2],贵州德江为 3%^[2],江西千烟洲为 10.35%^[27],本研究中湖南会同为 22.18%;常绿阔叶林遍及整个亚热带地区,由于分布广,环境变化明显,常绿阔叶林的林型、组成和结构表现出明显的地带性差异及其复杂的层次结构使其林冠截留率具明显差异:云南哀牢山为 15.8%^[28],江西九连山为 16%—17.5%^[29],缙云山自然保护区为 11.76%^[30],广西龙胜 9.95%^[2],浙江天童公园 22.52%^[2],广东鼎湖山 19.95%^[2],本研究湖南会同常绿阔叶林林冠截留率为 20.7%。国内各地杉木和常绿阔叶林林冠截留率差异很大,是由于不同地区受气候条件、环境因素的影响群落结构、冠层结构及叶面积指数等的差异影响。马尾松林是亚热带地区森林的典型代表之一,其分布具明显地理替代现象,水文特征差异显著。各地马尾松林林冠截留率,湖南张家界 55.4%^[31],广西宜山 15.34%^[2],南京紫金山 27.28%^[2],本研究广东鼎湖山马尾松林林冠截留率为 15.44%;上述各地马尾松林林冠截留率差异显著;同地区的季风常绿阔叶林林冠截留率为 19.48%,针阔混交林林冠截留率为 20.15%,和马尾松林林冠截留率相比略有差异,三者同为本地地区的地带性植被,林分结构复杂程度的差异、冠层结构不同以及叶面积指数的差异是造成林冠截留率显著差异的主要因素。

单株树木干流量不仅取决于树木的大小,而且取决于树冠结构;由于树干特性和林冠结构不同,直径较大的树木其干流量反而较小^[32],长白山阔叶红松林干流率为 15.9% 明显高于凉水保护区的 6.3%^[2],这些差异可能主要是由于林分结构、密度及降雨差异所致;北京站落叶阔叶混交林、油松林、落叶松林的干流率分别为 2.0%、1.5%、1.9%,站内各森林类型的干流率较为接近;而宁夏六盘山的油松林干流率 1.36%^[1],落叶松林的干流率 0.63%^[1],低于北京站同种森林类型的干流率;湖南会同站杉木和常绿阔叶林的干流率分别为 2.2% 和 4.0%,研究区杉木林的树高、胸径也都大于常绿阔叶林;广东鼎湖山站季风常绿阔叶林、马尾松林、针阔混交林的干流率分别为 5.9%、1.6%、5.6%,由于冠层结构、胸径等的不同此 3 种森林类型的干流率差异显著;与本地地区的其他森林类型的干流率的差异也很明显;本地区桉树林干流率为 3.6%^[5],毛竹林为 6.8%^[5],这些差异可能主要是由于林分结构、密度以及降雨差异等所致。

凋落物最大持水量反映了凋落物调蓄降水能力的大小。一般凋落物蓄积量越大、持水率越高,其截留降水的能力就越大。长白山阔叶红松林凋落物最大持水率 268.32%,低于该地区各森林类型凋落物持水率平均值 296.17%^[2],在本研究中,除鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物最大持水量为 1.03 mm 外,其余森林类型凋落物最大持水量均高于阔叶红松林 1.31 mm;北京站油松林、华北落叶松林凋落物蓄积量、最大持水量分别低于五台山油松林凋落物蓄积量 19.88 t/hm²^[33]、最大持水量 3.63 mm^[33],华北落叶松林凋落物蓄积量 51.3 t/hm²^[33]、最大持水量 9.13 mm^[33];亦分别低于宁夏六盘山油松林凋落物蓄积量 24.69 t/hm²^[6]、最大持水量 7.8 mm^[6],落叶松林凋落物蓄积量 24.23 t/hm²^[6]、最大持水量 10.0 mm^[6];亚热带地区,常绿阔叶林凋落物蓄积量、最大持水量分别值介于 4.15—24.60 t/hm²^[2]、2.33—5.47 mm^[2]之间;本研究中会同站常绿阔叶林凋落

物蓄积量、最大持水率分别为 9.35 t/hm^2 、 3.18 mm ,在上述范围之内;会同站杉木林凋落物蓄积量、最大持水量分别为 9.96 t/hm^2 、 2.49 mm ,在亚热带地区杉木林凋落物蓄积量、最大持水量 $1.20\text{—}15.86 \text{ t/hm}^{2[2]}$ 、 $0.4\text{—}4.09 \text{ mm}^{[2]}$ 范围之内;亚热带地区马尾松林凋落物蓄积量、最大持水量分别值介于 $3.51\text{—}25.47 \text{ t/hm}^{2[2]}$ 、 $1.27\text{—}5.12 \text{ mm}^{[2]}$ 之间;广东鼎湖山站马尾松林凋落物蓄积量、最大持水量分别为 5.58 t/hm^2 、 3.24 mm ,亦在上述范围之内;鼎湖山站针阔混交林凋落物蓄积量 3.72 t/hm^2 低于该地区针阔混交林凋落物蓄积量范围 $7.70\text{—}26.21 \text{ t/hm}^{2[2]}$ 的最小值,最大持水量 2.41 mm 在该地区该林分类型最大持水量范围 $2.3\text{—}7.64 \text{ mm}^{[2]}$ 之内;造成同种森林类型在不同地区、或不同森林类型在同一地区林内凋落物最大蓄积量、最大持水量差异明显的原因可能是:各种森林类型凋落物分解速率快慢不一、蓄积量差异显著,各地降雨量也不同。

森林土壤是森林生态系统涵养水源的主要场所和调节器,森林土壤的蓄水能力与土壤空隙状况密切相关。研究区 $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤蓄水量在 $45.5\text{—}247 \text{ mm}$ 之间变动;阔叶红松林 $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤持水深高达 202 mm , $0\text{—}60 \text{ cm}$ 平均总孔隙度为 57.9% ,中温带地区阔叶红松林总空隙度介于 $49.7\%\text{—}64.2\%^{[2]}$ 之间,平均为 $56.5\%^{[2]}$ 。本研究阔叶红松林 $0\text{—}60 \text{ cm}$ 总空隙度在此范围之内且略高于平均值;油松林、落叶松林、马尾松林、杉木林都为人工林或人工半自然林, $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤总贮水量依次为: 79.42 、 45.5 、 94.52 、 246.96 mm ;阔叶红松林、落叶阔叶混交林、常绿阔叶林、季风常绿阔叶林、针阔混交林都为天然林或天然次生林, $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤总贮水量依次为: 202.3 、 64.7 、 229.22 、 136.68 、 114.72 mm 。天然林林下土壤 $0\text{—}60 \text{ cm}$ 总贮水能力强于人工林 $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤总贮水能力,主要是由于天然林土壤受破坏程度较小,土壤空隙度较大,因此贮水量高于人工林土壤贮水量。

本研究中,4个不同的森林生态系统定位研究站的森林生态系统的水源涵养功能分别代表了中国东部4种不同气候带的森林生态系统水源涵养功能。由图1和表9可知,除北京站,其余各站生长季的平均降雨量、平均蒸发量由北向南呈递增趋势,而各站森林生态系统总持水量并非由北向南递增。中亚热带的会同站的各森林生态系统的总持水量 485.93 mm 明显高于南亚热带的鼎湖山站各森林生态系统总持水量 359.65 mm ;森林水源涵养功能除主要受水热气候因素调节外,还受到年积温、森林类型、林分组成、林下植被等多种因素综合作用。地处暖温带的北京站受季风气候的影响,夏季湿热高温,冬季干冷、多大风天气,年积温较高,年蒸发量大于同期降水量,相对北京站的各森林生态系统总持水量较低。各森林生态系统总的持水能力随时空变化而改变。

5 结论

(1)不同森林生态系统之间的林冠截留量存在较大波动,平均值介于 $71.2\text{—}245 \text{ mm}$ 之间,变异系数为 $2.1\%\text{—}37.0\%$,林冠截留率平均值的大小依次为:阔叶红松林>杉木林>常绿阔叶林>针阔混交林>季风常绿阔叶林>落叶阔叶混交林>马尾松林>落叶松林>油松林;(2)各森林生态系统类型林地内凋落物蓄积量差异较大,平均产量介于 $2.83\text{—}13.16 \text{ t/hm}^2$ 之间,林地凋落物产量高低依次为:季风常绿阔叶林>针阔混交林>阔叶红松林>马尾松林>油松林>落叶松林>常绿阔叶林>杉木林>落叶阔叶混交林,林地凋落物现存量的多少是林地凋落物截持降水作用中的主导因素;(3)不同森林生态系统类型下的土壤蓄水差异显著, $0\text{—}60 \text{ cm}$ 土壤蓄水量为 $45.5\text{—}247 \text{ mm}$,亚热带地区森林土壤蓄水量高于同期暖温带地区森林土壤蓄水量;(4)森林生态系统的蓄水功能随水热梯度变化而变化。杉木林的总蓄水量最高,为 252 mm ,是蓄水量最低的落叶松林的 5.07 倍。林分蓄水主要集中在土壤层,占总蓄水量 90% 以上,其次是凋落物层持水量,约占 8% ,森林冠层截留水量最低,占 2% 左右;(5)森林水源涵养功能主要受水、热气候因素调节,但本研究中国东部森林样带典型森林生态系统水源涵养功能在水热梯度下并没有明显的规律性,不因该地区降雨量、蒸发量的增减而增减;森林的水源涵养是一个复杂的、受多因素影响的综合调节过程。

References:

- [1] Shi Z J, Wang Y H, Yu P T, Xiong W, Guo H, Guo M C. Study on different forestry vegetation's eco-hydrological function in Liupan Mountain of Ningxia China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 134-138.

- [2] Liu S R, Wen Y G, Wang B. Ecohydrological Functions of Forest Ecosystems in China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1996.
- [3] Yin G C, Zhou G Y, Liu J S, Zhang D Q, Wang X. Hydrological effects of coniferous and broadleaved mixed forest ecosystem in Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(3): 195-201.
- [4] Yu X X, Gan J. Research and Demonstration on Water Conservation Forest. Beijing: Chinese Forestry Press, 2007: 277-287.
- [5] Yu X X, Zhang Z Q, Chen L H, Xie B Y, Wang L X. Forest Ecological Hydrology. Beijing: Chinese Forestry Press, 2004: 11.
- [6] Zhao C Y, Feng Z D, Liu Y. Study on one of ecological services of forest ecosystem in arid region water resource conservation. *Journal of Mountain Science*, 2003, 21(2): 157-161.
- [7] Wen Y G, Liu S R. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(4): 289-298.
- [8] Zhang Z M, Yu X X, Niu J Z, Lu S W, Song W F, Liu X P, Zhang Y. Ecohydrological functions of litter on different forest stands. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(3): 139-143.
- [9] Shi Z J, Zhang N N, He C Q, Qiu Z J, Xu D P, Gao J X, Hu Z S. Eco-hydrological effect of the canopy, litter and soil of a eucalyptus plantation in South China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1932-1939.
- [10] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, Xiong W, Yu P T, Guo H, Zhang L Y. Hydrological functions of litter layer of typical forest types in the Liupan Mountain of Ningxia, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(1): 91-99.
- [11] Cheng J H, Zhang H J, Yu X X, Zhang D S, Zhao Y T. Water holding capacity characteristic of ground cover and soil under pure *Abies fabir* forest on the Gongga Mountain. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, 24(3): 45-49.
- [12] Wang B, Yang X S, Li Z C, Geri L. Comparison of hydrological functions of four typical zonal vegetations in different climatic zones. *Forest Resources Management*, 2009, (6): 84-90.
- [13] Wang H. Ecosystem services of several Typical plantation forest Ecosystems in Subtropical Region. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.
- [14] Sun H L. China's Ecological System. Beijing: Science Publishing House, 2005.
- [15] Council for Science of Chinese Ecosystem Research Network. Protocols for Standard Biological Observation and Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing: China Environment Science Press, 2007: 32-98.
- [16] Ma X H. Forest hydrology. Beijing: Chinese Forestry Press, 1993.
- [17] Mo J M, Fang Y T, Feng Z N, Kong G H, Meng Z. Ecohydrological functions of a human-disturbed *Pinus massoniana* forest in Dinghushan Biosphere Reserve. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10(2): 99-104.
- [18] Wan S Q, Chen L Z. Characteristics of precipitation and forest stemflow of Dongling Mountainous area. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 61-67.
- [19] Liu Y, Han S J, Lin L. Dynamic characteristics of litterfalls in four forest types of Changbai Mountains, China. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(1): 7-11.
- [20] Chen D L, Yu X X, Liao B H. Analysis on the function of conservation water of the Chinese forest ecosystem. *World Forestry Research*, 2005, 18(1): 49-54.
- [21] Xin Y, Zhao Y S. Advances in studies of water conservation forest's ecohydrological effects. *Protection Forest Science and Technology*, 2004, 3(2): 23-26.
- [22] Chen J L, Mou C C. Hydrological Function of Typical Forest Catchments of Changbai Mountain. Harbin: Heilongjiang Northeast Forestry University, 2005.
- [23] Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2003, 27(1): 16-22.
- [24] Sun L D, Zhu J Z. Benefit evaluation on water and soil conservation forest. Beijing: Science Press, 1995: 362-377.
- [25] Mu C L, Gong G T. Quantification and valuation of comprehensive benefits of protection forest in the middle and upper reaches of the Changjiang River. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2001, 22(1): 15-23.
- [26] 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.
- [27] Chen Y R, Lin Y M, Li J Y, Liu Y F, Yang R R. Rainfall process and nutrient dynamics of artificial Chinese fir plantation in Jiangxi Qianyanzhou experimental station. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 74-76.
- [28] Gong H D, Zhang Y P, Liu Y H, Yang G P, Lu Z Y, Lu H Z. Interception capability in an evergreen broad-leaved forest of AiLaoshan, Yunnan Province. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2008, 25(4): 469-474.
- [29] Li C H, Masakazu S, Liu S G, Tang M C. The estimation of the crown interception of the evergreen broad-leaved forest in the Jiu-Lian Mountainous

district, Jiangxi Province. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(3): 233-242.

- [30] Song J H, Zhang H J, Sun C, Wang Z C. Canopy interception of different forest types in the Three Gorges Region of Yangtze River. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(3): 71-75.
- [31] Cao Y, Huang Z G, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Miao H. Eco-hydrological effect of pinus massoniana canopy and its influence factors in Zhangjiajie of Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(12): 13-20.
- [32] Helvey J D. A summary of rainfall interception by Certain conifers of North America. *Proceeding of the International Symposium for Hydrology Professers. Biological Effects in the Hydrological Cycle*. Lafayette, Indiana: Purdue University, 1971: 103-112.
- [33] Zhang F X. Study of water conservation benefit for different type standing forest of Wutai Mountain. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 136-139.

参考文献:

- [1] 时忠杰, 王彦辉, 于彭涛, 熊伟, 郭浩, 郭明春. 宁夏六盘山林区几种主要森林植被生态水文功能研究. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 134-138.
- [2] 刘世荣, 温远光, 王兵. 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.
- [3] 尹光彩, 周国逸, 刘景时, 张德强, 王旭. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统水文效应研究. *热带亚热带植物学报*, 2004, 12(3): 195-201.
- [4] 余新晓, 甘敬. 水源涵养林研究与示范. 北京: 中国林业出版社, 2007: 277-287.
- [5] 余新晓, 张志强, 陈丽华, 谢宝元, 王礼先等. 森林生态水文. 北京: 中国林业出版社, 2004, 11.
- [6] 赵传燕, 冯兆东, 刘勇. 干旱区森林水源涵养生态服务功能研究进展. *山地学报*, 2003, 21(2): 157-161.
- [7] 温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析. *林业科学*, 1995, 31(4): 289-298.
- [8] 张振明, 余新晓, 牛健植, 鲁绍伟, 宋维峰, 刘秀萍, 张颖. 不同林分枯落物层的水文生态功能. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 139-143.
- [9] 时忠杰, 张宁南, 何常清, 邱志军, 徐大平, 高吉喜, 胡哲森. 桉树人工林冠层、凋落物及土壤水文生态效应. *生态学报*, 2010, 30(7), 1932-1939.
- [10] 时忠杰, 王彦辉, 徐丽宏, 熊伟, 于彭涛, 郭浩, 张雷燕. 六盘山主要森林类型枯落物的水文功能. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 91-99.
- [11] 程金华, 张洪江, 余新晓, 张东升, 赵玉涛. 贡嘎山冷杉纯林地被物及土壤持水特性. *北京林业大学学报*, 2002, 24(3): 45-49.
- [12] 王斌, 杨校生, 李正才, 格日勒图. 不同气候区 4 种典型地带性植被土壤水文功能比较. *林业资源管理*, 2009, (6): 84-90.
- [13] 王华. 亚热带区域几种典型人工林生态系统服务功能研究. 湖南农业大学, 2007.
- [14] 孙鸿烈. 中国生态系统. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统生物观测规范. 北京: 中国环境科学出版社, 2007: 32-98.
- [16] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [17] 莫江明, 方运霆, 冯肇年, 孔国辉, 孟泽. 鼎湖山人为干扰下马尾松林水文生态功能. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(2): 99-104.
- [18] 万师强, 陈灵芝. 东灵山地区大气降水特征及森林树干茎流. *生态学报*, 2000, 20(1): 61-67.
- [19] 刘颖, 韩士杰, 林鹿. 长白山四种森林类型凋落物动态特征. *生态学杂志*, 2009, 28(1): 7-11.
- [20] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [21] 辛颖, 赵雨森. 水源涵养林水文生态效应研究进展. *防护林科技*, 2004, 3(2): 23-26.
- [22] 陈加利, 牟长城. 长白山典型森林集水区的水文功能研究. 东北林业大学, 2005.
- [23] 刘世荣, 孙鹏森, 温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究. *植物生态学报*, 2003, 27(1): 16-22.
- [24] 孙立达, 朱金兆. 水土保持林体系综合效益研究与评价. 北京: 科学出版社, 1995: 362-377.
- [25] 慕长龙, 龚固堂. 长江中上游防护林体系综合效益的计算与评价. *四川林业科技*, 2001, 22(1): 15-23.
- [26] 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.
- [27] 陈永瑞, 林耀明, 李家永, 刘允芳, 杨汝荣. 江西千烟洲试区杉木人工林降雨过程及养分动态研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 74-76.
- [28] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 杨国平, 鲁志云, 卢华正. 哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征. *浙江林学院学报*, 2008, 25(4): 469-474.
- [29] 李昌华, 铃木雅一, 刘曙光, 唐茂聪. 江西九连山区常绿阔叶林林冠截留量的估算. *自然资源学报*, 1997, 12(3): 233-242.
- [30] 宋吉红, 张洪江, 孙超, 王志超. 缙云山自然保护区不同森林类型林冠的截留作用. *中国水土保持科学*, 2008, 6(3): 71-75.
- [31] 曹云, 黄志刚, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 湖南省张家界马尾松林冠生态水文效应及其影响因素分析. *林业科学*, 2006, 42(12): 13-20.
- [32] 张复兴. 五台山不同林分类型水源涵养功能研究. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 136-139.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 12 June, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Effect assessment of the project of grain for green in the karst region in Southwestern China: a case study of Bijie Prefecture	LI Hao, CAI Yunlong, CHEN Ruishan, et al (3255)
The effect of dispersal on the population dynamics of a host-parasite system in fragmented landscape	SU Min (3265)
The effect of spatial scales on wetland functions evaluation: a case study for coastal wetlands in Yancheng, Jiangsu Province	OU Weixin, YE Lifang, SUN Xiaoxiang, et al (3270)
Effects of simulated nitrogen deposition on nutrient balance of Chinese fir (<i>Cunninghamia lanceolata</i>) seedlings	FAN Houbao, LIAO Yingchun, LIU Wenfei, et al (3277)
The water conservation study of typical forest ecosystems in the forest transect of eastern China	HE Shuxia, LI Xuyong, MO Fei, et al (3285)
The ecological responses of <i>Pinus tabulaeformis</i> forests in Taiyue Mountains of Shanxi to artificial Harvesting	GUO Donggang, SHANGGUAN Tielang, BAI Zhongke, et al (3296)
The influence of the long-term application of organic manure and mineral fertilizer on microbial community in calcareous fluvo-aquic soil	ZHANG Huanjun, YU Hongyan, DING Weixin (3308)
Endophytic fungal diversity of five dominant plant species in the dry-hot valley of Yuanjiang, Yunnan Province, China	HE Caimei, WEI Daqiao, LI Haiyan, et al (3315)
Seedling recruitment in desert riparian forest following river flooding in the middle reaches of the Tarim River	ZHAO Zhenyong, ZHANG Ke, LU Lei, et al (3322)
Scaling up for transpiration of <i>Pinaceae schrenkiana</i> stands based on 8hm permanent plots in Tianshan Mountains	ZHANG Yutao, LIANG Fengchao, CHANG Shunli, et al (3330)
Responses of soil enzyme activities and microbial biomass N to simulated N deposition in Gurbantunggut Desert	ZHOU Xiaobing, ZHANG Yuanming, TAO Ye, et al (3340)
Effects of Pb on growth, heavy metals accumulation and chloroplast ultrastructure of <i>Iris lactea</i> var. <i>Chinensis</i>	YUAN Haiyan, GUO Zhi, HUANG Suzhen (3350)
Effects of temperature and sap flow velocity on CO ₂ efflux from stems of three tree species in spring and autumn in Northeast China	WANG Xiuwei, MAO Zijun, SUN Tao, et al (3358)
The soil seed bank of <i>Eupatorium adenophorum</i> along roadsides in the south and middle area of Yunnan, China	TANG Yingyin, SHEN Youxin (3368)
Extracting the canopy structure parameters using hemispherical photography method	PENG Huanhua, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (3376)
The CCA analysis between grasshopper and plant community in upper reaches of Heihe River	ZHAO Chengzhang, ZHOU Wei, WANG Keming, et al (3384)
Community structure characteristics of phytoplankton in argun River Drainage Area in autumn	PANG Ke, YAO Jinxian, WANG Hao, et al (3391)
Spatial and temporal variation of phytoplankton and impacting factors in Jiulongjiang Estuary of Xiamen, China	WANG Yu, LIN Mao, CHEN Xingqun, et al (3399)
Effect of bank type on fish biodiversity in the middle-lower reaches of East Tiaoqi River, China	HUANG Liangliang, LI Jianhua, ZOU Limin, et al (3415)
Study on dynamic changes of soil and water loss along highway based on RS/GIS: an example of Yujing expressway	CHEN Aixia, LI Min, SU Zhixian, et al (3424)
The urbanization effects on watershed landscape structure and their ecological risk assessment	HU Hebing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (3432)
Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern	GAO Bin, LI Xiaoyu, LI Zhigang, et al (3441)
Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau	LI Jinchang, WANG Wenli, HU Guangyin, et al (3451)
Effect of chicken manure application on Cu and Zn accumulation in soil and <i>Brassica sinensis</i> L.	ZHANG Yan, LUO Wei, CUI Xiaoyong, et al (3460)
GIS analysis of structural characteristics of pollution sources in irrigable farmland in Ningxia China	CAO Yanchun, FENG Yongzhong, YANG Yinlu, et al (3468)
Effects of pre-sowing soil moisture and planting patterns on photosynthetic characteristics and yield of summer soybean	LIU Yan, ZHOU Xunbo, CHEN Yuhai, et al (3478)
<i>In situ</i> study on influences of different fertilization patterns on inorganic nitrogen losses through leaching and runoff: a case of field in Nansi Lake Basin	TAN Deshui, JIANG Lihua, ZHANG Qian, et al (3488)
Effects of AM fungi on leaf photosynthetic physiological parameters and antioxidant enzyme activities under low temperature	LIU Airong, CHEN Shuangchen, LIU Yanying, et al (3497)
Effects of exogenous cysteine on growth, copper accumulation and antioxidative systems in wheat seedlings under Cu stress	PENG Xiangyong, SONG Min (3504)
Review and Monograph	
The horizon scanning technology and its application prospect in Ecology	HU Zimin, LI Jingjing, LI Wei, et al (3512)
Scientific Note	
The gas exchange characteristics of four shrubs on the northern slope of Kunlun Mountain	ZHU Juntao, LI Xiangyi, ZHANG Ximing, et al (3522)
Effect of DEM data at different scales on the accuracy of forest Ecological Classification system	TANG Lina, HUANG Jucong, DAI Limin (3531)
Canopy interception of rainfall by Bamboo plantations growing in the Hill Areas of Southern Jiangsu Province	JIA Yongzheng, HU Haibo, ZHANG Jiayang (3537)
Effects of exotic species slash pine (<i>Pinus elliottii</i>) litter on the structure and function of the soil microbial community	CHEN Falin, ZHENG Hua, YANG Bosu, et al (3543)
The carbon emission analysis of Shenzhen Metro	XIE Hongyu, WANG Xixiang, YANG Muzhuang, et al (3551)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 12 期 (2011 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 12 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@csppg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@csppg.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