

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 **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 4 期 2012 年 2 月 (半月刊)

目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响·····	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价·····	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征·····	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟·····	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应·····	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应·····	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素·····	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应·····	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程·····	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系·····	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状·····	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征·····	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响·····	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅·····	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应·····	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局·····	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较·····	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性·····	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响·····	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境·····	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系·····	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性·····	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局·····	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立·····	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较·····	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表·····	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响·····	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别·····	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO ₂ 通量的季节特征·····	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例·····	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
专论与综述		
湿地退化研究进展·····	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评·····	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
问题讨论		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性·····	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响·····	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
研究简报		
祁连山典型灌丛降雨截留特征·····	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法·····	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



封面图说: 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新的鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

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

DOI: 10.5846/stxb201012261845

田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 彭守璋, 彭焕华. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. 生态学报, 2012, 32(4): 1066-1076.

Tian F X, Zhao C Y, Feng Z D, Peng S Z, Peng H H. Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1066-1076.

祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素

田风霞^{1,3}, 赵传燕^{2,*}, 冯兆东¹, 彭守璋², 彭焕华¹

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学干旱与草地农业生态教育部重点实验室, 兰州 730000;
3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041)

摘要:以位于祁连山中段大野口关滩森林站的青海云杉林为研究对象,利用 2008 年观测期间(6 月 12 日至 10 月 8 日)34 场降雨的大气降雨量、穿透雨量和树干茎流量观测资料,对青海云杉林的降雨再分配特征及其影响因素进行综合分析。结果表明:青海云杉林的总穿透雨量、截留量和干流量分别为 212.6、64.5 mm 和 3.4 mm,分别占大气降雨量的 75.8%、23.0% 和 1.2%;穿透雨在林内具有较大的空间变异性,其变异程度随降雨量的增大而减小,叶面积指数和冠层郁闭度在一定程度上也影响穿透雨的空间分布,且降雨量越小其影响效果越明显;青海云杉林的总干流量为 3.4 mm,平均干流率为 0.58%,雨前林冠的湿润程度对树干流的产生有很大影响,导致当降雨量为 5.6 mm 时就开始产生树干茎流;青海云杉林冠截留率的大小主要取决于降雨量,且随着降雨量的增大先减小并逐渐趋于稳定,林冠截留量总体上随冠层郁闭度和叶面积指数的增大而增大,但当观测点位于树冠边缘或多个树冠重叠处时出现负截留现象。所以,就特定林分而言,冠层结构特征对于其林冠生态水文效应起着重要的作用。

关键词:青海云杉;穿透雨;树干茎流;林冠截留;生态水文效应

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains

TIAN Fengxia^{1,3}, ZHAO Chuanyan^{2,*}, FENG Zhaodong¹, PENG Shouzhang², PENG Huanhua¹

1 MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

2 MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract: Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) is a main constructive species of water conservation forest in the Qilian Mountains, and it plays an important role in regulating the hydrological processes of this mountainous region. Therefore, rationally analyzing and evaluating eco-hydrological effects of Qinghai spruce canopy is important for understanding the water cycle and water balance of Qilian Mountains. Based on canopy interception data observed at Guantan Forest Station (100° 15' 0.8" E, 38° 32' 1.3" N) within the Qilian Mountains, this study aims at analyzing characteristics of rainfall redistribution of the Qinghai spruce forest and its influence factors. In order to study characteristics of canopy interception of the Qinghai spruce forest, home-made rain gauges, rainfall containers and stemflow devices were carried out in the 3rd sub-plot at Guantan Forest Station in 2008 by Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute of CAS. During the whole observation period (from June 12 to October 8 in 2008), throughfall, stemflow, and canopy interception of 34 rain events were observed. Meanwhile, we extracted the mean canopy closure and leaf area index (LAI) of the 3rd sub-plot

基金项目:国家自然科学基金重点项目(91025015)

收稿日期:2010-12-26; 修订日期:2011-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

from hemispherical images taken by Nikon digital camera fish eye (D80). The mean canopy closure and leaf area index (LAI) of the 3rd sub-plot were 77.07% and 3.41 m²/m², respectively. Then, we analyzed the characteristics of throughfall, stemflow, and canopy interception of 34 rain events and their influence factors. The results showed that the total throughfall, rainfall interception and stemflow of the Qinghai spruce forest during the observed period were 212.6 mm, 64.5 mm and 3.4 mm, and accounted for 75.8%, 23.0% and 1.2% of the total atmospheric precipitation, respectively. Throughfall in the forest had great spatial variability and the variation decreased with the increase of rainfall. When rainfall was 0.6 mm, the coefficient of variation of throughfall was up to 100%. With the increase of rainfall, the spatial variation of throughfall decreased sharply and the coefficient of variation of throughfall basically fluctuated around 20% when rainfall was greater than 10 mm. Furthermore, tree canopy structure (e.g. canopy closure and leaf area index) also affected the spatial distribution of throughfall, and its impacts were more significant under the smaller rainfall conditions than under the higher rainfall conditions. When it had no rains before a rain event, the stemflow in the Qinghai spruce forest began to yield only when the rainfall reached 5.6 mm and the stemflow increased with the increase of rainfall. During the whole study period, the total stemflow and average stemflow rate of the Qinghai spruce forest were 3.4 mm and 0.58%, respectively. The moisture degree of tree canopy before a rain event greatly influenced the stemflow yielding as a result almost the same stemflow was yielded under different rainfall amount conditions (e.g. 11.5 mm and 3.7 mm). Canopy interception rate mainly depended on rainfall, and it gradually decreased and finally stabilized with the increase of rainfall. Generally speaking, the capacity of canopy interception linearly correlated with canopy closure and leaf area index. However, the negative canopy interception was observed when the devices were installed under the edge of tree crown or canopy overlaps of a few trees. Therefore, we concluded that for a specific stand, canopy structure has an important role in the canopy eco-hydrological effects.

Key Words: Qinghai spruce (*Picea crassifolia*); throughfall; stemflow; canopy interception; eco-hydrological effects

林冠是森林与外界环境相互作用最直接和最活跃的界面层,通过遮荫、截留降水和蒸腾蒸发等作用参与森林生态系统水分循环。大气降水在输入森林生态系统时,由于林冠的影响被分配为截留量、透流量和干流量3部分^[1],这3部分在森林生态系统的水文循环和水量平衡中占有极其重要的地位^[2-4]。所以,林冠对降水的再分配功能是森林生态系统水文生态功能之一,具有重要的水文生态意义^[5]。

林冠对降水的再分配是水分输入森林的第一个环节,其过程涉及到森林生态、森林水文、森林气象及水土保持等诸多方面,国内外很多学者对全球不同气候带森林生态系统的截留量^[6-10]、透流量^[11-13]和干流量^[14-16]进行观测研究,并对其影响因素进行了分析^[12-13, 17-18]。研究发现,林冠截留受降水特征、林分结构、树木特征、雨前林冠的湿润程度、风速、地形等多种因素的影响^[19]。不同森林类型的林冠截留率明显不同,一般来说针叶林大于阔叶林^[1]。我国学者对地跨我国南北不同气候带森林截留率的研究表明,针叶林和阔叶林林冠截留率的变动范围分别为14.5%—50.0%和11.2%—26.17%^[20]。而且,同一地区、相同森林类型的林冠截留率在不同季节的变化差异很大,一般旱季的截留率要大于雨季^[13],且林冠截留率随降雨量的增加逐渐减小且趋于稳定^[20-21]。穿透雨的大小受大气降雨量和降雨强度的制约,随大气降雨量和雨强的增加而增加。此外,林冠结构特征被认为是影响林内穿透雨分布格局的重要因素,故多数研究发现穿透雨在林内存在明显的空间异质性^[22-23]。对同一场降雨而言,穿透雨量的大小主要取决于研究点上方的林冠盖度及其距离树干的远近^[22],在树冠边缘或多个树冠重叠处经常出现穿透雨量大于林外大气降雨量的现象^[21]。干流量一般只占降雨量的很少部分,且不同树种间的差异十分明显。针叶林的干流量最低仅占降雨量的0.018%^[17],而阔叶林可占降雨量的13.9%^[24]。干流量还与树种的形态结构密切相关,何常清等^[25]的研究表明干流量与树干面积呈明显的指数关系。曹云等^[13]的研究显示干流量与树木胸径和冠层面积呈显著正相关。

祁连山区为黑河、石羊河和疏勒河等内陆河流域的主要水源涵养区域,现有水源涵养林43.61万hm²,青

青海云杉 (*Picea crassifolia*) 是其主要的建群树种, 其面积占水源涵养林总面积的 24.74%, 占乔木林总面积的 75.72%^[26], 其生态水文服务功能举足轻重。目前, 有关青海云杉林的林冠水文作用已有较多研究^[27-29], 且发现不同研究区、不同降雨量以及不同郁闭度下的林冠截留率差异显著^[20-21, 29], 但是关于同一研究区内, 林冠结构特征对降雨的再分配影响方面, 很少深入探讨。所以, 本文以祁连山中段大野口关滩森林站样方尺度的青海云杉林为研究对象, 在对其林冠结构特征提取的基础上, 对其林冠截留、穿透雨和树干流的水文效应进行监测, 探讨青海云杉林冠降雨再分配的变化特征和影响因素, 研究林内水分输入的空间异质性, 用于定量评价青海云杉这一建群种的水源涵养能力和生态水文效应, 为青海云杉林地的水量平衡以及祁连山森林生态系统水文功能机理研究提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所祁连山中段建立的大野口关滩森林站内 (100°15'0.8" E, 38°32'1.3" N; 海拔 2835 m)。气候类型属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候。年均气温 0.5 °C, 年均降水量 368 mm, 年平均水面蒸发量 1051 mm, 平均相对湿度 60% (1994—2004 年)^[30]。森林站内设有一个大样方 (图 1), 其大小为 100 m × 100 m, 且下垫面地势平坦。为方便试验, 大样方被划分为 16 块 25 m × 25 m 的子样方。样方内主要生长着高约 15—20 m 的青海云杉纯林, 林地表面覆盖有厚约 10 cm 的苔藓, 植被生长情况良好。土壤类型为森林灰褐土。

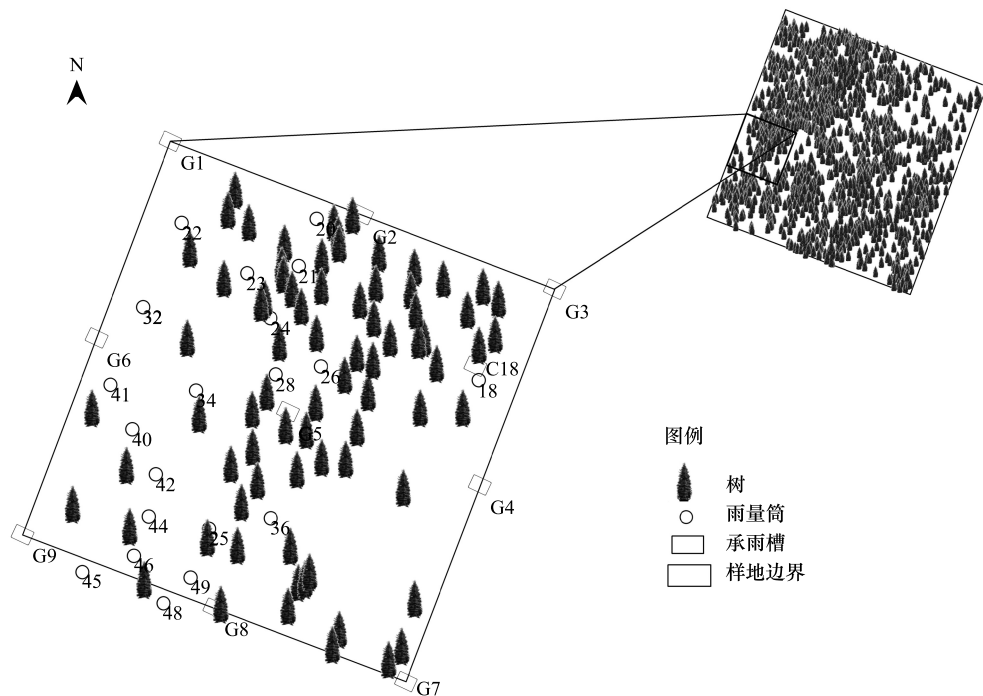


图 1 3 号子样方在大样方内的相对位置及雨量筒、承雨槽的布设

Fig. 1 Relative location of the 3rd sub-plot, rain gauges and man-made rainfall containers in the plot

1.2 数据收集与处理

1.2.1 数据收集

2008 年 6 月, 由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所承担的西部行动计划项目 (黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设) 小组, 对大样方进行了每木检尺, 测量了胸径、树高、冠幅和枝下高。在 3 号子样方内布置了自制雨量筒、承雨槽和树干茎流装置, 观测林内穿透雨和树干茎流, 用于研究青海云杉林的降雨截留特征。观测时间为 2008 年 6 月 12 日至 2008 年 10 月 8 日, 每次降雨结束后都及时进行观测^[31]。试

验观测期间,本文作者在 3 号子样方内,利用日本 Nikon 公司生产的鱼眼数码相机(D80)获取了青海云杉林冠层的半球图像,用于提取其冠层郁闭度和叶面积指数(LAI)(表 1)。

表 1 大野口关滩森林站 3 号子样方内青海云杉林的林分特征

Table 1 Stand characteristics of Qinghai spruce forest in the 3rd sub-plot of Guantan Forest Station

径级 DBH ranges/cm	株数 No. of trees/棵	平均胸径 Mean DBH /cm	平均树高 Mean height of trees/m	平均枝下高 Mean under- branch height/m	平均冠幅 Mean crown diameter/m	冠层郁闭度 Mean canopy closure/%	叶面积指数 Mean LAI /(m ² /m ²)
3.1—10.0	29	6.0	4.6	2.5	1.6		
10.1—15.0	10	12.0	10.3	4.8	2.7		
15.1—20.0	12	17.6	14.9	6.5	3.1		
20.1—25.0	13	22.6	16.7	6.7	3.8		
>25.0	13	32.8	17.3	5.9	6.0		
总体平均值 Total mean value		18.2	12.8	5.3	3.4	77.07	3.41

1.2.2 林外降雨量的测定

在试验样地临近的林外空地上布设 2 个标准雨量筒(直径 20 cm),用于人工观测对照大气降雨量。

1.2.3 林内穿透雨的测定和计算

依据冠层郁闭度,在试验样地内随机布设 20 个自制雨量筒(直径为 20 cm,与标准雨量筒的规格一致),用于观测林内穿透雨。为使穿透雨的观测更具代表性,在样地内还布设了 10 个自制承雨槽(100 cm × 20 cm × 20 cm)收集穿透降雨(图 1),通过增大集水面积弥补林冠的不均匀性。每次降雨结束后,用标准雨量筒的专用量雨器测量雨量筒和承雨槽中的集水量。承雨槽测得的集水量通过公式转换,转换为雨量深(mm)。

1.2.4 树干茎流的观测和计算

依据试验样地内青海云杉林的径级和数目,选择代表性的树木 5 株,在树干基部 50—130 cm 处,将剖开的聚乙烯塑料管螺旋状嵌入树干四周,并将其导入下部的容器(容量为 10 L 的塑料桶),收集树干茎流。然后,根据每次测量的树干茎流量和胸径的关系,计算样地内青海云杉林的干流量 S (mm),计算公式如下^[25]:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{S_p \times 1000} \quad (1)$$

式中, n 为树干径级数; C_i 为观测的径级为 i 的树干茎流体积(mL); M_i 为径级为 i 的树木株数; S_p 为样地面积(625 m²)。

1.2.5 林冠截留量的计算

采用水量平衡法计算林冠截留量 I (mm),公式为:

$$I = P - (T + S) \quad (2)$$

式中, P 为大气降雨量(mm); T 为穿透雨量(mm); S 为干流量(mm)。

1.2.6 冠层郁闭度和叶面积指数的提取

在各个自制雨量筒和承雨槽的正上方,利用日本 Nikon 公司生产的鱼眼数码相机(D80)获取青海云杉林冠层的半球图像,用于提取其冠层郁闭度和叶面积指数。具体步骤如下:(1)将鱼眼数码相机置于林地 1.0 m 高处,用水平仪调至水平,将相机变焦镜头拉至最远后摄取林分半球图像(为保证半球图像的质量,照片于全阴天进行拍摄);(2)利用 GLA (Gap Light Analyzer Version 2.0) 软件(<http://www.ecostudies.org>)对获取的半球图像进行图像所需分析范围的确定并保存;(3)利用 Sidelook 软件(<http://www.appleco.ch>)计算上述已保存图像的阈值;(4)将 Sidelook 界定的阈值输入到 GLA 软件中,运行“Calculate”命令获得林冠层的叶面积指数(LAI)和冠层开阔度等。由于青海云杉林针叶的集聚效应,导致提取的 LAI 值偏低,本文采用赵传燕等^[32]的调整系数法对其进行校正,冠层郁闭度 = (1-冠层开阔度) × 100%。所提取的自制雨量筒和承雨

槽上方的冠层郁闭度和叶面积指数,如图 2 所示。

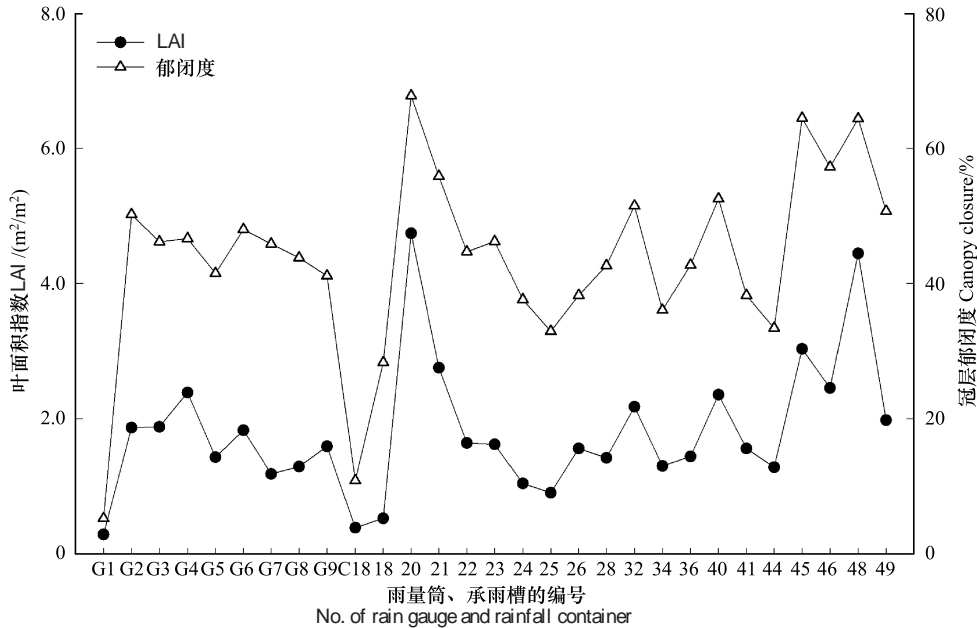


图 2 不同雨量筒、承雨槽上方的冠层郁闭度和叶面积指数

Fig. 2 Canopy closure and leaf area index (LAI) above each rain gauge and rainfall container

2 结果与分析

在试验观测期间(2008 年 6 月 12 日至 2008 年 10 月 8 日),共观测到 36 场降雨的林冠截留。其中有 2 场降雨,由于其降雨强度大且前期有降雨导致多个雨量筒和承雨槽观测到的穿透雨量大于林外降雨量,所以这 2 场降雨观测到的样方林冠截留量出现负值,与通常所定义的林冠截留量不相符,故这 2 场降雨的观测数据舍去。加之,观测期间其中 2 个雨量筒的丢失和 2 个雨量筒观测数据的不完善。所以,本文只对 16 个雨量筒与 10 个承雨槽,34 场降雨的林冠截留数据进行分析。

2.1 青海云杉林内穿透雨特征

为了研究青海云杉林内穿透雨的空间异质性,采用变异系数(C_v)来衡量不同降雨特征条件下穿透雨的变异程度,其计算公式为:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, s 为标准差, \bar{x} 为平均值。 C_v 值越大代表数据的变异程度越高。

由于本试验中大气降雨量的观测采用人工观测方法,对于降雨强度和降雨历时不能非常精确的观测,故本文仅分析次降雨林内穿透雨的变异系数与其对应大气降雨量的关系(图 3)。由图 3 可知,两者呈显著幂函数关系,且穿透雨变异系数随着降雨量的增加先显著减小而后逐渐趋于稳定。当降雨量为 0.6 mm 时,林内穿透雨的变异系数高达 100%,说明林内穿透雨的空间变化很大;而后,随着降雨量的增加,穿透雨变异系数急剧减小,当降雨量大于 10 mm 时,其值基本在 20% 上下波动,表明此降雨量条件下林内各观测点穿透雨的空间变

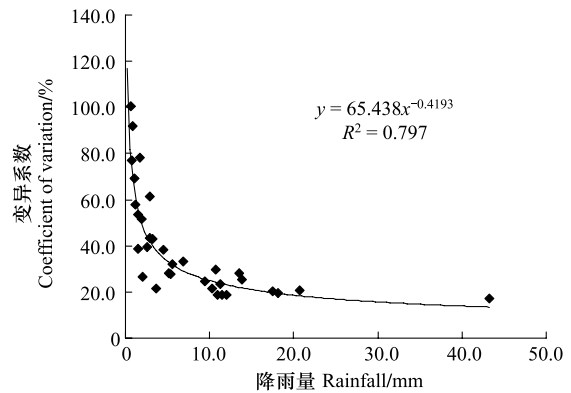


图 3 林内穿透雨变异系数与降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between rainfall and the coefficient of variation of throughfall

化已趋稳定。这主要是因为,当降雨量较小时,降雨主要用于林冠截留,此时林分的冠层结构特征(比如:郁闭度和叶面积指数)是影响林内穿透雨的主要因素;当降雨量较大时,林冠达到饱和且截留量仅占降雨量的很少部分,其余的降雨几乎全部转化为穿透雨,此时林内穿透雨的大小主要取决于降雨量,受林冠结构特征的影响较小,因此其空间变化趋于稳定(图4)。

图4展示了不同降雨量等级条件下,林内穿透雨量与其上方冠层郁闭度和叶面积指数的关系。由图4可知,林内穿透雨量不仅随大气降雨量的增大而增多,而且冠层结构特征在不同降雨量等级条件下对其影响不同。当降雨量 ≤ 10 mm时,穿透雨量随着冠层郁闭度和叶面积指数的增加而减小,且该关系在降雨量小于5 mm时比在5—10 mm雨量级时显著,而当降雨量大于10 mm时,随冠层郁闭度和叶面积指数的增加,穿透雨量的变化趋势不明显。

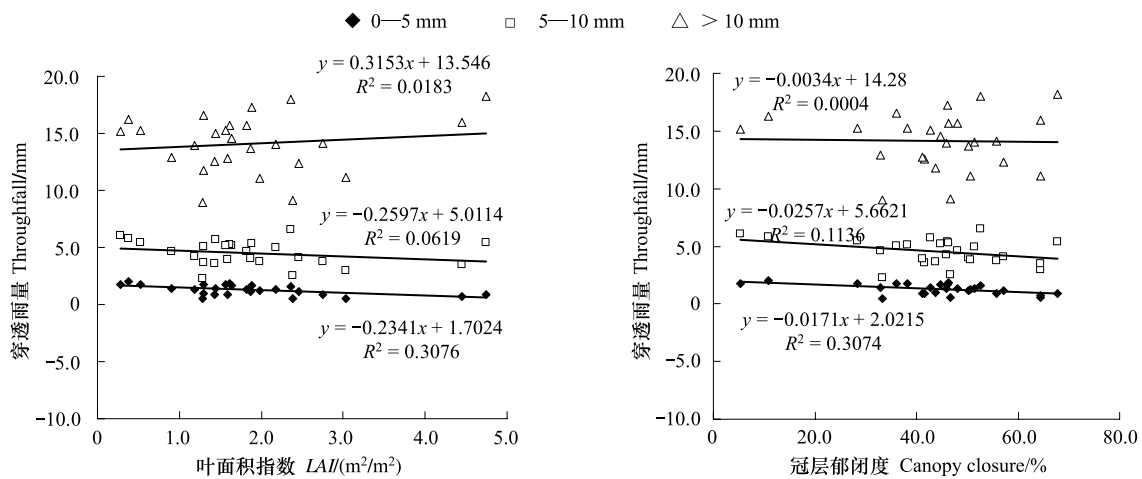


图4 不同雨量级下林内穿透雨量与冠层郁闭度、LAI的关系

Fig. 4 Relationships between throughfall and canopy closure and LAI under different rainfall ranges

2.2 青海云杉林树干茎流特征

从34场降雨的试验结果来看,在没有前日降雨的情况下,只有当降雨量达到5.6 mm时,青海云杉林才开始产生树干茎流,且随降雨量的增大而增多。根据公式(1)计算的样地内青海云杉林的总干流量为3.4 mm,平均干流率为0.58%。

曹云等^[13]的研究显示马尾松的干流量与其胸径和冠层面积呈显著正相关,但是本文发现青海云杉的干流量并不随其胸径和冠幅的增加一直增大,而是先增大后减小,并且其胸径越大产生树干茎流的次数越少(表2)。这主要是由树种的生态学特性决定的,胸径和冠幅的增加使得树干茎流的汇水面积增加,致使产生的干流量相应增多。但是,青海云杉树皮比较粗糙常龟裂呈片状,树干吸附水量较多,并且在树木胸径增加的同时,其树冠枝条在增多和增粗,其树枝分支角也相应地在增大,使得林冠截留能力和树干枝条吸水能力增大,故

表2 5株测树干茎流的树木特征

Table 2 Characteristics of five Qinghai spruce trees that stemflow was measured

树牌号 No. of tree	胸径 DBH /cm	冠幅 Crown diameter/m	枝下高 Under-branch height/m	树高 Height of tree/m	产生树干流的次数 Times of yielding stemflow/次	每毫米降雨量的树干流量 Stemflow of per 1 mm rainfall/mL
0218	30.7	7.1	4.4	19.0	8	1.84
0253	17.1	4.1	5.0	13.7	18	132.54
0257	10.1	2.0	3.6	7.8	19	103.84
0300	16.2	2.4	4.2	11.7	18	211.90
0309	7.7	2.1	4.4	6.4	18	75.23

导致干流量并不随胸径和冠幅的增加一直增大。此外,雨前树冠的湿润程度对树干流的产生有很大影响。以 7 月 27 日和 7 月 28 日两场降雨为例,虽然 7 月 27 日的降雨量(11.5 mm)远大于 7 月 28 日的降雨量(3.7 mm),但是两场降雨产生的样方干流量几乎相同,分别为 0.12 mm 和 0.11 mm,相应的树干茎流率分别为 1.05% 和 2.94%。

2.3 青海云杉林冠截留特征

林冠截留的降水主要用于林冠(枝、叶和树干)蓄水和降水期间的林冠蒸发。林冠截留能力通常采用截留率(林冠截留量与降雨量的比值)表示。经统计分析知,34 场降雨的平均林冠截留率为 33.9%,随着降雨量的增大,林冠截留率先急剧减小后逐渐趋于稳定(图 5)。当降雨量小于 0.25 mm 时,林冠截留率可达 100%,随着降雨量的增加,截留率逐渐减小,当降雨量接近或超过 10.0 mm 时,林冠截留率基本趋于稳定。

当降雨量空间变化不大时,林冠截留率在很大程度上取决于林冠结构特征。冠层郁闭度和叶面积指数越大,树木枝、叶、干吸附的水量越多,即拦截降雨量的能力越大,如图 6(图 6 a、b 代表了所有观测点的林冠截留率随其上方冠层郁闭度和叶面积指数的变化)。然而,树木枝叶体的排列分布在空间上存在较大差异,当观测点处于树冠边缘或多个树冠重叠处时,冠层枝叶对林内穿透雨产生集聚效应,导致即使冠层郁闭度、叶面积指数相同的观测点却产生不同的截留效果,甚至出现负截留现象。而且,当林内穿透雨观测设备的承雨面积比较小时(比如自制雨量筒),上述现象突出,致使林冠截留率并不随着冠层郁闭度和叶面积指数的增大而显著增大(图 6 e、f),当林内穿透雨观测设备的承雨面积增大时(比如自制承雨槽),上述现象有所减缓(图 6 c、d)。

2.4 青海云杉林对降雨的再分配

试验观测期间,34 场降雨的总截留量、穿透雨量、干流量分别为 64.5 mm、212.6 mm 和 3.4 mm。从青海云杉林对降雨的再分配状况可以看出(表 3),对于不同雨量级,在降雨次数最多的 <5.0 mm 的雨量级中,穿透雨量(21.5 mm)、穿透率(64.4%)、干流量(0.1 mm)以及干流率(0.3%)都是最小,但其林冠截留率达到最大值,可高达 35.3%;在降雨量最多的 >20.0 mm 雨量级中,青海云杉林的干流量(1.8 mm)和干流率(1.9%)均达到最大值;林内穿透雨率在降雨次数最少的 15.0—20.0 mm 的雨量级中达到最大,平均值为 87.1%,这表明降雨量亦是影响降雨再分配的关键因子。

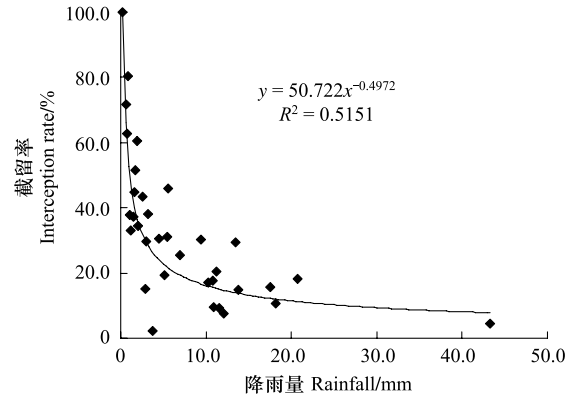


图 5 林冠截留率与降雨量的关系

Fig. 5 Relationship between canopy interception rate and rainfall

表 3 不同雨量级降雨在青海云杉林内的分配

Table 3 Rainfall distribution under different rainfall ranges in Qinghai spruce forest

雨量级/mm Rainfall ranges	总雨量/mm Total rainfall	降雨次数 No. of rains /次	穿透雨 Throughfall		林冠截留 Interception		树干流 Stemflow	
			穿透雨量/mm Throughfall	比率/% Ratio	截流量/mm Interception	比率/% Ratio	干流量/mm Stemflow	比率/% Ratio
≤5.0	33.4	17	21.5	64.4	11.8	35.3	0.1	0.3
5.1—10.0	32.5	5	22.6	69.5	9.7	29.9	0.2	0.6
10.1—15.0	83.2	7	69.2	83.2	13.1	15.7	0.9	1.1
15.1—20.0	35.6	2	31.0	87.1	4.2	11.8	0.4	1.1
>20.0	95.8	3	68.3	71.3	25.7	26.8	1.8	1.9

3 结论与讨论

研究期间内(2008 年 6 月 12 日至 2008 年 10 月 8 日),青海云杉林的总穿透雨量、截留量和干流量分别

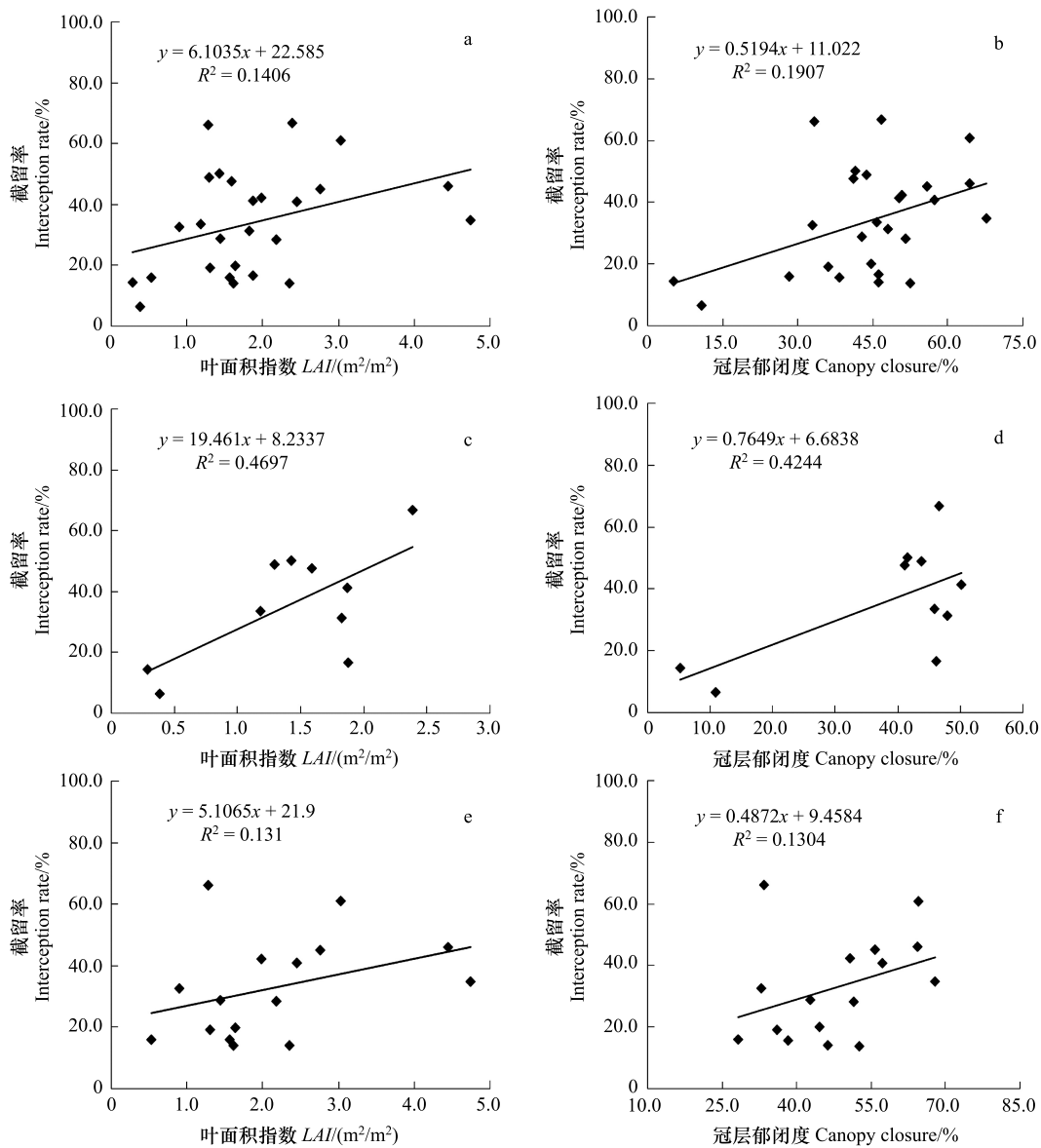


图 6 林冠截留率与冠层郁闭度和 LAI 的关系

Fig. 6 Relationships between canopy interception rate and canopy closure and LAI

为 212.6、64.5 mm 和 3.4 mm, 分别占大气降雨量的 75.8%、23.0% 和 1.2%。

分析发现, 林内穿透雨随大气降雨量的增大而增多, 且在空间分配上具有异质性。当降雨量较小时, 由于冠层结构特征的影响林内穿透雨的空间异质性显著; 随着降雨量的增大, 冠层结构特征的影响作用逐渐削弱, 林内穿透雨的空间变化逐渐变小并趋于稳定。分析还发现, 有些观测点的穿透雨量高于林外大气降雨量, 甚至一场降雨可有 13 个观测点的穿透雨量高于林外降雨量。彭焕华等^[20]在祁连山东段旺腰沟流域观测青海云杉林冠截留特征时, 也发现了类似现象, 在其观测样地 89 个雨量筒中其中有 6 个的穿透雨量高于林外降雨量。国外研究者也曾发现过这种现象, Lloyd 等^[33]对亚马逊雨林的研究发现, 29% 的测点的穿透降雨大于林外降雨量。Sinun 等^[34]的研究也发现, 在马来西亚热带雨林的 123 个测点中, 其中有 101 个测点收集的穿透雨量比林外降雨量高, 他们分析认为其原因是降雨在冠层结构特征的影响下发生了聚集效应, 与本研究结果比较相似。

34 场降雨的观测结果显示, 在没有前日降雨的情况下, 当降雨量达到 5.6 mm 时, 青海云杉林才开始产生

树干茎流,且随降雨量的增大而增多。整个研究期间内,青海云杉林的总干流量为 3.4 mm,占总降雨量的 1.21%,34 场降雨的平均干流率为 0.58%。党宏忠等^[17]在祁连山东段旱泉沟流域的观测结果显示,只有当降雨量达到 6.5 mm 时青海云杉才开始有树干茎流出现,其树干茎流率在 0.01%—0.28% 之间。常学向等^[35]在祁连山寺大隆林区定位站 1975—2000 年的研究表明,当降雨量超过 12.0 mm 时青海云杉才开始产生树干茎流,平均树干茎流量占降雨量的 0.51%。经对比分析,本文作者认为导致研究结果存在差异的原因,除树龄及冠层郁闭度之外,其主要原因是雨前林冠的湿润程度。本研究区在 2008 年 6—10 月期间,降雨频繁,平均大气相对湿度为 62.5%,树木长期处于湿润环境下,所以导致树干产生茎流的降雨量比较小,相应干流率也较高。一般而言,干流率一般介于 0.1%—6.68%。由此可见,虽然本文的平均干流率高于同类树种已有的研究结果,但仍明显低于其它针叶树种(研究表明,红松、华北落叶松和油松的干流率分别为 5.65%、3.7% 和 2.84%^[20])。

经统计分析知,34 场降雨的平均林冠截留率为 33.9%。国外学者普遍认为温带针叶林树冠截留率在 20.0%—40.0% 之间^[9-10],金博文等^[36]的研究表明,青海云杉林冠截留率在 22.6%—34.5% 之间,均与本文的观测结果相符合。与我国其它地区林冠对降雨的截留状况相比,本研究区青海云杉林冠截留率仅比油松林(36.97%)和油松-华山松混交林(50.0%)小,比杉木人工林(18.97%)、常绿阔叶林(24.16%)、落叶阔叶林(18.01%)、热带季雨林(21.1%)以及针阔混交林(18.87%)的都大^[20]。

Sinun 等^[34]认为叶尖滴水是影响林内穿透雨的主导因素, van Dijk 等^[4]发现,叶面积对林冠截留和林内穿透雨有重要的影响。本研究发现,冠层结构特征虽影响穿透雨的空间变异,但当林下观测设备的承雨面积比较小时,其对穿透雨的影响不显著,其中以冠层郁闭度的影响较小。这可能与林冠层截留降雨的生态学机制有很大关系,大气降雨到达林冠层后,部分降雨被枝叶层所吸附,因此叶面积指数越大,其截留能力就越大;而冠层郁闭度通常是指从林地一点向上仰视被树木枝体所遮挡的天空球面的比例,由于其本身并不能直接反映枝叶对降雨的截留作用,故其对林冠降雨再分配的作用不明显。然而,冠层的截留能力也是有一定限度的,当降雨量超过其最大截留能力时,叶面积将不再发挥其主导作用。此外,青海云杉的叶形为针形,截留的降雨并不能均匀分布在叶表面,而是主要聚集于叶尖或叶柄处,加之,树冠边缘或多个树冠重叠处枝条的汇集作用,致使林冠下的穿透雨量高于林外大气降雨量。所以,在今后的林冠截留观测研究中,应该适当增大林下观测穿透雨设备的承雨面积。

致谢: 本文所用青海云杉林降雨截留观测数据来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn),特此致谢。

References:

- [1] Ma X H. Forest Hydrology. Beijing: China Forestry Press, 1993: 11-39.
- [2] Deng S Z, Wei B E. A study on the redistribution of atmospheric precipitation in different types of forest canopy. *Scientia Silvae Sinicae*, 1990, 26 (3): 271-276.
- [3] Domingo F, Puigdefábregas J, Moro M J, Bellot J. Role of vegetation cover in the biogeochemical balances of a small afforested catchment in southeastern Spain. *Journal of Hydrology*, 1994, 159(1/4): 275-289.
- [4] van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modeling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part I. Model description. *Journal of Hydrology*, 2001, 247(3/4): 230-238.
- [5] Zhou G Y. Eco-hydrological functions of tropical forest, China. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(5): 47-50.
- [6] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979, 105(443): 43-55.
- [7] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, 1995, 170(1/4): 79-86.
- [8] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology*, 1971, 9: 367-384.

- [9] Teklehaimanot Z, Jarvis P G, Ledger D C. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing. *Journal of Hydrology*, 1991, 123(3/4): 261-278.
- [10] Viville D, Biron P, Granier A, Dambrine E, Probst A. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment (Vosges, France). *Journal of Hydrology*, 1993, 144(1/4): 273-282.
- [11] Fan S X, Jiang D M, A L M S, Li X H, Liu Z M. Studies on throughfall model in forest area. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1403-1407.
- [12] Hao S, Zhang Y T, Liu D, Zhang H L, Li X. Characteristics of canopy interception and throughfall of *Picea schrenkiana* var. *tianschanica* (Rupr.) Chen et Fu. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 917-923.
- [13] 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.
- [14] Dong S R, Guo J T, Man R Z. Throughfall, stemflow and canopy interception in a *Pinus tabulaformis* plantation of North China. *Journal of Beijing Forestry University*, 1987, 9(1): 58-68.
- [15] Yang M R. Interrelations of forest precipitation, crown interception and trunk stemflow in sub-tropical plantations of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana*. *Forest Research*, 1992, 5(2): 158-162.
- [16] Liu S H, Yu X X. Hydrological properties of the canopy of water resource protection stands in the Miyun reservoir watershed, Beijing. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 194-197.
- [17] Dang H Z, Zhou Z F, Zhao Y S. Study on forest interception of *Picea crassifolia*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4): 60-64.
- [18] Gonzalez A, Plamondon A P. Urea fertilization of natural forest: effects on water quality. *Forest Ecology and Management*, 1976-1977, 1: 213-221.
- [19] Gong H D, Wang K Y, Yang W Q, Wang Q, Zhang Y B. Throughfall and stemflow in a primary spruce forest in the subalpine of western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(1): 198-201.
- [20] Peng H H. Study on Canopy Rainfall Interception of Qinghai Spruce (*Picea crassifolia*) Forest in North Slope of Qilian Mountains. Lanzhou: Lanzhou University, 2010.
- [21] Tan J L, Ma M G, Che T, Bai Y J. A study of interception of *Picea crassifolia* based on different canopy closure. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 825-833.
- [22] Jackson N A. Measured and modeled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2000, 100(4): 323-336.
- [23] Schroth G, da Silva L F, Wolf M A, Teixeira W G, Zech W. Distribution of throughfall and stemflow in multi-strata agroforestry, perennial monoculture, fallow and primary forest in central Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes*, 1999, 13(10): 1423-1436.
- [24] Ren Y, Xue J H. Characteristics of precipitation in *Castanopsis eyrei* broad-leaved evergreen forest of Wuyi Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(2): 23-27.
- [25] He C Q, Xue J H, Wu Y B, Zhang L Y, Liu C, Liu X L. Rainfall redistribution in subalpine *Quercus aquifolioides* forest in upper reaches of Minjiang River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9): 1871-1876.
- [26] Wang J Y, Liu X D, Jin B W, Wang Y L, Liu Z J. Research on change law of hydrologic of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(Supplement): 43-45.
- [27] Wang J Y, Wang Y L, Jin B W, Che K J. Studies on regulating function of forest hydrology and microclimate in arid and semi-arid area of west China. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 120-125.
- [28] Zhang X L, Luo L F, Jing W M, Wang S L, Wang R X, Che Z X. Study on the distribution effect of canopy interception of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(6): 678-683.
- [29] Liu M X. The relationship between rainfall and interception by canopy of *Picea crassifolia* forest. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(3): 341-344.
- [30] Niu Y, Liu X D, Zhang H B, Ge S L. The water balance of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains based on spatial data structure. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(4): 344-348.
- [31] Che T, Bai Y J, Li J C, Tan J L. WATER: Dataset of precipitation and canopy interception observations around the Dayekou Guantan forest station. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2008. doi:10.3972/water973.0052. db.
- [32] Zhao C Y, Shen W H, Peng H H. Methods for determining canopy leaf area index of *picea crassifolia* forest in Qilian Mountains, china. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5): 860-869.
- [33] Lloyd C R, Marques A De O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 42(1): 63-73.

- [34] Sinun W, Meng W W, Douglas I, Spencer T. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1992, 335(1275): 389-395.
- [35] Chang X X, Zhao A F, Wang J Y, Chang Z Q, Jin B W. Precipitation characteristic and interception of forest in the Qilian Mountain. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(3): 274-280.
- [36] Jin B W, Wang J Y, Chang Z Q, Ge S L. A study on hydrologic function of canopy of *Picea crassifolia* in the Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(Supplement): 39-42.

参考文献:

- [1] 马雪华. 森林水文学. 北京: 中国林业出版社, 1993: 11-39.
- [2] 邓世宗, 韦炳斌. 不同森林类型林冠对大气降雨量再分配的研究. *林业科学*, 1990, 26(3): 271-276.
- [5] 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.
- [11] 范世香, 蒋德明, 阿拉木萨, 李雪华, 刘志民. 林内穿透雨量模型研究. *生态学报*, 2003, 23(7): 1403-1407.
- [12] 郝帅, 张毓涛, 刘端, 张洪亮, 李翔. 不同郁闭度天山云杉林林冠截留量及穿透雨量特征研究. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 917-923.
- [13] 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.
- [14] 董世仁, 郭景唐, 满荣洲. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留. *北京林业大学学报*, 1987, 9(1): 58-68.
- [15] 杨茂瑞. 亚热带杉木、马尾松人工林的林内降雨、林冠截留和树干茎流. *林业科学研究*, 1992, 5(2): 158-162.
- [16] 刘世海, 余新晓. 北京密云水库库区水源涵养林冠层水文特征研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 194-197.
- [17] 党宏忠, 周泽福, 赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究. *水土保持学报*, 2005, 19(4): 60-64.
- [19] 巩合德, 王开运, 杨万勤, 王乾, 张远彬. 川西亚高山原始云杉林内降雨分配研究. *林业科学*, 2005, 41(1): 198-201.
- [20] 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林冠截留过程研究. 兰州: 兰州大学, 2010.
- [21] 谭俊磊, 马明国, 车涛, 白云洁. 基于不同郁闭度的青海云杉冠层截留特征研究. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 825-833.
- [24] 任引, 薛建辉. 武夷山甜槠常绿阔叶林分降水分量特征. *林业科学*, 2008, 44(2): 23-27.
- [25] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 张雷燕, 刘冲, 刘兴良. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1871-1876.
- [26] 王金叶, 刘贤德, 金博文, 王艺林, 刘志娟. 祁连山青海云杉林调节林内水分变化研究. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊): 43-45.
- [27] 王金叶, 王艺林, 金博文, 车克钧. 干旱半干旱区山地森林的水分调节功能. *林业科学*, 2001, 37(5): 120-125.
- [28] 张学龙, 罗龙发, 敬文茂, 王顺利, 王荣新, 车宗玺. 祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应. *山地学报*, 2007, 25(6): 678-683.
- [29] 刘旻霞. 青海云杉林林冠截留与大气降水的关系. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(3): 341-344.
- [30] 牛赞, 刘贤德, 张宏斌, 葛双兰. 基于空间数据结构的祁连山青海云杉林水量平衡. *遥感技术与应用*, 2006, 21(4): 344-348.
- [31] 车涛, 白云洁, 李建成, 谭俊磊. 黑河综合遥感联合试验: 大野口关滩森林站超级样地降雨截留观测数据. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2008. doi:10.3972/water973.0052.db.
- [32] 赵传燕, 沈卫华, 彭焕华. 祁连山区青海云杉林冠层叶面积指数的反演方法. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 860-869.
- [35] 常学向, 赵爱芬, 王金叶, 常宗强, 金博文. 祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用. *高原气象*, 2002, 21(3): 274-280.
- [36] 金博文, 王金叶, 常宗强, 葛双兰. 祁连山青海云杉林冠层水文功能研究. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊): 39-42.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)
CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique SUN Caizhi, YANG Lei (1016)

Nitrogen flows in intensive "crop-livestock" production systems typically for the peri-urban area of Beijing HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)

The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)

Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)

Analysis of a dust case using lidar in Shanghai MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)

Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)

Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* LI Hui, WANG Jiangtao (1115)

Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)

On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)

Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)

The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)

The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)

Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)

Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)

The evaluation system of strength of winteriness in wheat WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)

Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)

Seasonal characteristics of CO₂ fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)

Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)

Review and Monograph

Recent advances in wetland degradation research HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)

Discussion

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

Scientific Note

Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)

Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

《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)

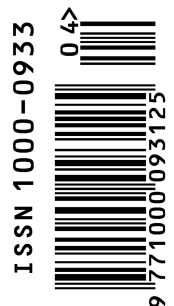
第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 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:100071	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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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