

天然次生林和人工毛竹林水文生态特征比较*

孔维健, 周本智, 安艳飞, 王小明

(中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要:对浙江庙山坞自然保护区天然次生林和人工毛竹林的水文生态特征进行了定位观测研究。结果表明:天然次生林具有较高的林冠截留作用。总林冠截留是人工毛竹林的2.40倍,林冠截留率和产生穿透雨与茎流的最小次降雨量都大于人工毛竹林;天然次生林枯枝落叶层具有较高的截持水能力,其最大蓄水潜力是人工毛竹林的1.88倍;天然次生林的水土保持能力较好,其中人工毛竹林的地表径流是天然次生林的1.92倍,径流泥沙含量高达3.82倍;天然次生林和人工毛竹林降雨分配情况都可以用数学模型模拟,具有较高的相关性与显著性水平。

关键词:水文生态特征;天然次生林;人工毛竹林;林冠截留;地表径流和泥沙;降雨分配

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)01-0113-04

Comparison of Eco-hydrological Characteristics of Natural Secondary Forest and Artificial Bamboo Forest

KONG Wei-jian, ZHOU Ben-zhi, AN Yan-fei, WANG Xiao-ming

(Research Institute of Subtropical Forestry, CAF, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

Abstract: The eco-hydrological characteristics of natural secondary forest and artificial bamboo forest in Miaoshanwu Nature Reserve were observed and studied. The results showed as follows: The effect of canopy interception of natural secondary forest was better, which was 2.40 times as that of artificial bamboo forest. The canopy interception percentage and the minimum rainfall that emerging throughfall and stemflow was higher than that of artificial bamboo forest too. The water-holding capacity of floor litter of natural secondary forest was greater, which was 1.88 times as that of artificial bamboo forest. The effect of soil and water conservation of natural secondary forest was also better. The surface runoff and sediment of artificial bamboo forest were 1.92, 3.82 times as that of natural secondary forest. It was very good fit to simulate the laws of precipitation partitioning by Mathematical model, and it had a higher relevance and significance level.

Key words: eco-hydrological characteristics; artificial bamboo forest; canopy interception; surface runoff and sediment; precipitation partitioning

陆地植被尤其是森林,作为陆地生态系统的主体和核心,在维护水资源供需平衡、改善生态环境和维持生态平衡中起着根本的、至关重要的作用^[1]。森林水文生态特征揭示森林对降雨分配、水分循环及水土保持等生态功能,是森林生态系统的重要功能特征^[2],具有重要的水文生态意义^[3-6]。

常绿阔叶林主要分布在亚热带地区的大陆东岸,以我国分布的面积最大^[7],为亚热带地带性植被类型。由于对木材、薪材的需求和农业的发展,天然

阔叶林大多遭到破坏,目前多为次生林。天然次生林是我国亚热带地区重要的群落类型之一,是森林群落演替过程重要的过渡类型^[8]。毛竹(*Phyllostachys pubescens*),广泛分布在我国亚热带地区,是我国最重要的竹种之一,是我国森林资源的重要组成部分。毛竹具有生长迅速、生物量大、适应性广等特点^[9],是集经济、生态、社会效益于一体的优良树种,是竹产区人民经济收入的重要来源,也是人们安居乐业的生态屏障^[10]。

* 收稿日期:2009-07-11

基金项目:国家“十一五”科技支撑重大项目专题(2006BAD03A1806);中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB20080006);中国林科院亚热带林业研究所中央级公益性科研院所基本业务费专项基金重点项目(RISF060701)

作者简介:孔维健(1980-),男,山东曲阜人,硕士生,主要从事森林生态与森林水文研究。E-mail: yilucanlan@yahoo.com.cn

通信作者:周本智(1969-),男,安徽宿松人,副研究员,主要从事森林培育和森林生态研究。E-mail: benzhi_zhou@126.com

影响森林水文生态特征的因素众多,包括自然条件、降雨特征、植被特点等。但在同一研究地点,其影响因素主要取决于植被特点。鉴于此,选择在中国亚热带地区分布较典型的天然次生林和人工毛竹林两种森林类型,从水文生态功能的角度出发,即林冠截留、林下植被截留、枯枝落叶截持、地表径流和径流泥沙等方面,在同一地点同步进行定位监测,来研究不同植被类型对森林生态系统水文生态特征的影响,为不同森林类型涵养水源和水土保持等功能的客观评价提供依据,亦可为天然林和人工林的可持续经营和改造提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究在浙江庙山坞自然保护区(119°56′ - 120°02′ E, 30°03′ - 30°06′ N)进行。该自然保护区位于浙江省富阳市境内,地形属浙西低山丘陵区天目山系余脉,山体主脉呈东西走向,由主脉延伸的多条南北向支脉为本区主体,峡谷相间,谷向朝南,濒临富春江。气候属中亚热带季风气候,季风显著,四季分明,降水充沛,温暖湿润。区内气候温和,夏季炎热,冬少严寒;年平均气温 16.2℃(极端最高气温 40.2℃,极端最低-14.4℃);年平均降水量 1 464 mm。保护区总面积 816.8 hm²,其中天然次生林面积 465 hm²,占总面积的 56.9%。除天然森林资源外,还营造了一大批人工林和科研试验林、示范林等。主要植被类型包括天然次生林、人工毛竹林、人工杉木林、人工松林和灌丛地等,植物种类较为丰富。

1.2 样地选择和群落调查

在庙山坞自然保护区,天然次生林和人工毛竹林各选取一块面积为 400 m²(20 m × 20 m)的标准样地(两块样地相邻 1 000 m 内),采用每木检测的方法分别测定样地内树木的胸径和树高,对胸径 ≥ 2 cm 的所有树木调查种类和数量。天然次生林样地坡度 35°左右,坡向西南,海拔 181 m。乔木层主要树种为青冈,占 56.1%,此外还有白栎、杉木、含笑、冬青、野柿树、红树等。乔木层下含有大量的灌木和草本,地表覆盖大量枯枝落叶,平均厚度约 3.0 cm。树冠层盖度为 75%,群落总盖度约为 95%,胸径大于 2 cm 的树木密度为 1 025 株/hm²,样地内树木(胸径大于 2 cm)的平均胸径为 14.2 cm,平均树高为 14.5 m;人工毛竹林样地坡度 20°左右,坡向正南,海拔 169 m。样地内竹林密度为 3 875 株/hm²,林冠层盖度为 95%,竹株胸径分布在 4.0~13.6 cm,平均胸径为 9.8 cm,平均竹高 13.2 m,林下几

乎没有灌木和草本,但地表覆盖较多枯枝落叶,平均厚度约 2.5 cm。

1.3 水文生态特征的观测方法

1.3.1 穿透雨及大气降雨的观测 在天然次生林和人工毛竹林样地内规律性安置 5 个由白铁皮制成的集水槽(收集面积为 1.5 m × 0.5 m),样地内得到平均为穿透雨量值(T)。同时在林外空旷地上安置 1 个集水槽作为对照(林外降雨 P),为了避免灌木及草本植物对穿透雨的影响,使集水槽距离地面的高度不低于 100 cm,并与地面保持约 0.5°的倾角,集水槽较低的一端底部开口,连接到一个地面上的集水器中,人工观测林内穿透雨量。天然次生林样地内杂灌下面规律性布设 5 个直径为 0.208 m(面积 0.034 m²)的塑料圆形漏斗,漏斗下接塑料水桶,人工观测杂灌下穿透雨量。为了避免枯枝落叶等落物对测量结果的影响,降雨前把集水槽和漏斗内的凋落物等物质清理干净。

1.3.2 树干茎流观测 根据样地内的树木种类、径级、树冠形状等,用径级标准木法各选择标准木(天然次生林内 8 株,人工毛竹林内 9 株)观测树干茎流。具体方法为在选定的每株标准木上,将剖开的聚乙烯塑料管(直径 2 cm)螺旋形地围绕在树干上 2~3 圈,用玻璃胶将接缝处封严,做成截水槽,塑料管的下端接到一个地面上的集水器,用于收集树干茎流。然后,将标准木茎流量按林木径阶及其权重进行统计,利用加权平均法推算出单位面积林分的茎流量(S)。天然次生林下灌丛因为其植株平均胸径很小,所以本研究中未测量其树干茎流。

1.3.3 林冠截留(I)的计算 利用公式 $I = P - T - S$ 计算林冠截留量。

1.3.4 地表径流(R)和径流泥沙观测 天然次生林和人工毛竹林样地内分别建立一个径流场(10 m × 20 m),径流场下坡面建一集水池(容积 1 m³),集水池底面建一沉沙池(40 cm × 20 cm × 10 cm),每次降雨后及时测量蓄水池中地表径流量,并从沉沙池中用 600 ml 的水瓶取满泥沙和水的混合水样。水样先用滤纸过滤,然后把滤纸和泥沙一起放置在 105℃的电烘箱内 12~24 h,取出冷却后称重。记录每次径流的泥沙含量。

1.3.5 枯枝落叶层枯落物现存量及蓄水量的调查

在天然次生林和人工毛竹林内各布设 5 个 1 m × 1 m 的小样方,分别将样方内的所有枯落物装入封口袋中,带回实验室立即称重(G_1)。然后将枯落物在水中浸泡 24 h 后取出置于筛网中,等枯落物没有明显水滴滴落时立即称重(G_2)。然后将枯落物烘干后置于烘箱中烘干至恒重(一般在 105℃下烘 16~24 h),立

即称重(G_0)。然后分别计算出枯落物的自然含水率 $[(G_1 - G_0)/G_0 \times 100\%]$ 与最大含水率 $[(G_2 - G_0)/G_0 \times 100\%]$,并计算出其蓄水能力。

1.4 数据分析

使用 SPSS 17.0 统计软件对数据进行分析。

2 结果与分析

本实验观测记录了 2009 年 3 月 10 日 - 2009

表 1 天然次生林与人工毛竹林水文生态特征的比较

类型	穿透雨		茎流		林冠截留		地表径流		径流泥沙		枯枝落叶层		
	量/ mm	率/ %	量/ mm	率/ %	量/ mm	率/ %	量/ mm	系数/ %	流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	平均/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	蓄积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最大持 水率/%	最大蓄 水潜力/mm
天然 次生林	319.6	58.7	33.0	6.1	192.0	35.3	0.51	0.09	13.16	0.242	5475.2	305	1.725
人工 毛竹林	280.1*	51.4*	39.4	7.2	39.5*	7.2*	96.4	17.7	50.32	0.924	4258.7	215	0.916

标注★为天然次生林内灌木层下的降雨分配数据。

2.1 林冠截留作用比较

降落到森林中的雨滴,由于受到林冠层的截留作用,发生了到达地面过程的第一次水量分配,将大气降雨分配为穿透雨、树干茎流和林冠截留三部分^[11]。数据分析结果显示,人工毛竹林内穿透雨高于天然次生林,分别是乔木层的 1.28 倍、灌木层的 1.46 倍;人工毛竹林茎流同样高于天然次生林,是 1.18 倍;而林冠截留(包括灌木截留)恰好相反,天然次生林远高于人工毛竹林,是 2.40 倍,其中乔木层截留 2.0 倍。产生茎流和穿透雨的最小次降雨量,天然次生林是 3.3 mm,人工毛竹林是 2.3 mm。

2.2 枯枝落叶层截持水作用比较

降水通过林冠后,到达枯枝落叶层,进行到达地面过程的第二次水量分配。森林枯枝落叶层具有较大的水分截持能力,从而影响到穿透降雨对土壤水分的补充和植物的水分供应。森林枯枝落叶层的水文生态效应取决于其蓄水能力,而蓄水能力由枯落物蓄积量和持水率决定^[6,12]。天然次生林枯枝落叶的现存量略高于人工毛竹林,为 1.29 倍,而最大持水率是 1.42 倍,林分枯枝落叶层的最大蓄水潜力是 1.88 倍。

2.3 地表径流和径流泥沙比较

通过林冠和枯落物层的拦截和消能作用,可以有效减少地表径流量及径流速度,减弱雨水对地表的直接冲击和侵蚀,林地表层土壤不会迅速流失,减少了径流泥沙含量^[13-14]。分析结果显示,观测期内,人工毛竹林的地表径流是天然次生林的 1.92 倍,径流泥沙含量却达到 3.82 倍,另外研究发现,天然次

生林与人工毛竹林产生明显地表径流(0.5 mm)的最小次降雨量分别为 20.7 mm、36.7 mm。

年 7 月 1 日的 29 次降雨数据,平均每 3.9 d 一次降雨。观测期内总降雨量 544.5 mm,次降雨量分布在 0.1~78.7 mm,降雨时间分布在 0.1~72 h。其中小雨(0~10 mm)12 次,占降雨总次数的 41.4%,中雨(10~25 mm)9 次,占 31.0%,大雨(25~50 mm)7 次,占 24.1%,暴雨(50~100 mm)1 次,占 3.5%。天然次生林与人工毛竹林水文生态特征各数值列于表 1。

表 1 天然次生林与人工毛竹林水文生态特征的比较

类型	穿透雨		茎流		林冠截留		地表径流		径流泥沙		枯枝落叶层		
	量/ mm	率/ %	量/ mm	率/ %	量/ mm	率/ %	量/ mm	系数/ %	流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	平均/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	蓄积量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	最大持 水率/%	最大蓄 水潜力/mm
天然 次生林	319.6	58.7	33.0	6.1	192.0	35.3	0.51	0.09	13.16	0.242	5475.2	305	1.725
人工 毛竹林	280.1*	51.4*	39.4	7.2	39.5*	7.2*	96.4	17.7	50.32	0.924	4258.7	215	0.916

标注★为天然次生林内灌木层下的降雨分配数据。

2.4 降雨分配模型比较

在分别检测了各降雨分量与降雨量之间的几种回归模型后,根据最大 R^2 值选择最佳的拟合方程,列于表 2。分析发现,天然次生林和人工毛竹林降雨空间分配情况都可以用数学模型模拟,均具有较高的相关性与显著性水平。其中穿透雨量、茎流量、地表径流量与降雨量之间用线性方程拟合最好;林冠截留量、穿透雨率、茎流率、地表径流系数与降雨量之间用对数函数拟合最好;林冠截留率与降雨量之间用幂函数拟合最好。

3 结论与讨论

(1) 天然次生林具有较高的林冠截留作用。总林冠截留是人工毛竹林的 2.40 倍,林冠截留率和产生穿透雨与茎流的最小次降雨量都大于人工毛竹林。天然次生林乔木层盖度虽然低于毛竹林,但由于其冠层高度较高,其枝叶层厚度、叶面积指数远远高于毛竹林,林冠截留作用本身就较强,再加上林下灌木层截留,总的截留效果显著^[11]。不仅如此,毛竹秆、枝、叶部表面光滑,且被有坚硬透水性很差的硅化蜡质层,吸持水能力较弱,从而决定了林冠、竹秆、竹枝达到饱和和所需的降水量相对较小^[9]。因此林冠截留率和产生穿透和茎流的最小降雨量都小于天然次生林。

(2) 天然次生林枯枝落叶层具有较高的截持水能力,其最大蓄水潜力是人工毛竹林的 1.88 倍。但两种生态系统的枯枝落叶现存量和最大蓄水潜力都

比较小^[12]。其原因可能是 2008 年的雪灾,使植被林冠层受到一定的破坏,林内光线较充足,再加上本

地区一直以来降雨量较大,温湿度较高,加快了枯枝落叶的分解,枯落物现存量 and 最大蓄水潜力较小。

表 2 天然次生林和人工毛竹林降雨分配拟合方程

类型	天然次生林	人工毛竹林
穿透雨量	$T = 0.663P - 1.429 (R^2 = 0.980, P < 0.01)$ $T = 0.604P - 1.689 (R^2 = 0.967, P < 0.01)$ ★	$T = 0.839P - 1.650 (R^2 = 0.990, P < 0.01)$
穿透雨率	$T\% = 0.154\ln(P) + 0.064 (R^2 = 0.793, P < 0.01)$ $T\% = 0.137\ln(P) + 0.042 (R^2 = 0.780, P < 0.01)$ ★	$T\% = 0.194\ln(P) + 0.102 (R^2 = 0.811, P < 0.01)$
茎流量	$S = 0.068P - 0.140 (R^2 = 0.936, P < 0.01)$	$S = 0.073P - 0.014 (R^2 = 0.918, P < 0.01)$
茎流率	$S\% = 0.016\ln(P) + 0.006 (R^2 = 0.683, P < 0.01)$	$S\% = 0.022\ln(P) + 0.005 (R^2 = 0.879, P < 0.01)$
林冠截留量	$I = 2.933\ln(P) + 0.402 (R^2 = 0.718, P < 0.01)$ $I = 3.622\ln(P) + 0.301 (R^2 = 0.749, P < 0.01)$ ★	$I = 1.163\ln(P) + 0.894 (R^2 = 0.758, P < 0.01)$
林冠截留率	$I\% = 0.914P^{-0.29} (R^2 = 0.752, P < 0.01)$ $I\% = 0.944P^{-0.24} (R^2 = 0.727, P < 0.01)$ ★	$I\% = 0.849P^{-0.49} (R^2 = 0.779, P < 0.01)$
地表径流量	$R = 0.0012P - 0.005 (R^2 = 0.867, P < 0.01)$	$R = 0.0025P - 0.007 (R^2 = 0.900, P < 0.01)$
地表径流系数	$R\% = 0.0003\ln(P) - 0.000001 (R^2 = 0.490, P < 0.01)$	$R\% = 0.0006\ln(P) + 0.00005 (R^2 = 0.630, P < 0.01)$

标注★为天然次生林内灌木层下的降雨分配拟合方程。

(3)天然次生林的水土保持能力较好,其中人工毛竹林的地表径流是天然次生林的 1.92 倍,径流泥沙含量高达 3.82 倍。这一方面是因为天然次生林林冠截留和枯枝落叶层截持水作用更强,另一方面是因为天然次生林下存在灌木草本层及较多的根系,进一步削弱了穿透雨对地表的冲刷,其保水固土能力自然更强。

(4)天然次生林和人工毛竹林降雨空间分配情况都可以用数学模型模拟,具有较高的相关性与显著性水平。这与多数学者的研究结果^[6,11,15-23]相同,降雨分配规律相似,仅常数不同。笔者认为这主要是由森林生态系统的结构和功能决定的,常数的不同只是由研究地自然条件、降雨特征和植被特点差异造成的。温远光等^[12]也已对中国主要森林生态系统类型降雨截留模型进行了较深入的归纳整理,本文不再赘述。

参考文献:

[1] 周晓峰. 中国森林与生态环境[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 102-104.

[2] 刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 157-243.

[3] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. *Hydrological Process*, 2000, 14: 2903-2920.

[4] Gash J H C, Wright I R, Lloyd C R. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain[J]. *J. Hydro.*, 1980, 48: 89-105.

[5] Jetten V G. Interception of tropical rain-forest: Per-

formance of a canopy water balance model [J]. *Hydrological Process*, 1996, 10(5): 671-685.

[6] 徐小牛, 王勤, 平田永二. 亚热带常绿阔叶林的水文生态特征[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1570-1574.

[7] 周本智, 傅懋毅, 李正才, 等. 浙西北天然次生林群落物种多样性研究[J]. *林业科学研究*, 2005, 18(4): 406-411.

[8] 周云龙. 植物生物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 503-504.

[9] 陈双林, 萧江华, 薛建辉. 竹林水文生态效应研究综述[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(3): 399-404.

[10] 周本智, 傅懋毅. 庙山坞自然保护区毛竹林细根生产和周转研究[J]. *江西农业大学学报*, 2008, 30(4): 239-245.

[11] 李振新, 欧阳志云, 郑华, 等. 岷江上游两种生态系统降雨分配的比较[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(5): 723-731.

[12] 温远光, 刘世荣. 中国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析[C]// 蒋有绪. 中国森林生态系统结构与功能规律研究. 北京: 中国林业出版社, 1996: 23-33.

[13] 张建军, 贺康宁, 朱金兆. 晋西黄土区水土保持林林冠截留的研究[J]. *北京林业大学学报*, 1995, 17(2): 27-31.

[14] 张建军, 毕华兴, 张宝颖. 坡面水土保持林地地表径流挟沙能力研究[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(5): 25-28.

[15] 万师强, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林冠层对降水的分配作用[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(6): 557-561.

[16] 赵鸿雁, 吴钦孝. 黄土高原人工油松林林冠截留动态过程研究[J]. *生态学杂志*, 2002, 21(6): 20-23.

(下转第 139 页)

中, 荒漠与交错带都比较相似, 两者平均气温仅相差 0.98℃, 地温前者仅高出后者 0.2℃(表 1)。这与两者下垫面性质相似有着直接的关系, 荒漠地表光秃, 而交错带的植被稀疏且矮小, 性质接近于荒漠, 因此, 两者的小气候因子特征相似。

绿洲平均气温比荒漠低 3.78℃, 相对湿度分别是荒漠和交错带的 1.75 倍和 1.30 倍。风速仅为荒漠的 1/4。可见绿洲内茂密的植被、湿润的土壤及四周宽阔的防护林在极端干旱区内具有很好的降温、保湿、屏风等效应。

荒漠、交错带及绿洲下垫面各小气候因子之间存在着相互联系, 如气温与风速、地温、蒸发力呈正相关, 而与相对湿度呈反相关, 风速与蒸发力呈正相关等, 这些小气候因子之间的具体关系有待于继续讨论。

参考文献:

[1] 王健, 桑长青, 何清. 塔克拉玛干沙漠公路中段两侧不同下垫面的小气候分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 577-580.

[2] 刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展[M]. 北京: 商务印书馆, 2001: 256-261.

[3] 卜永芳, 韩明娟. 气象学与气候学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987: 168-176.

[4] 金志凤, 沈朝栋, 黄寿波. 我国农业小气候学研究特点及发展趋势[J]. 浙江大学学报, 2003, 29(3): 471-478.

[5] 冯起, 司建华, 张艳武, 等. 极端干旱地区绿洲小气候特征及其生态意义[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 99-108.

[6] 张强, 周毅. 敦煌绿洲夏季典型晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征[J]. 植物生态学报, 2002, 26(6): 717-723.

[7] 谭灵芝, 刘玲, 张玉进. 新疆于田绿洲荒漠交错带土地利用及覆盖遥感研究[J]. 资源调查与评价, 2004, 17(5): 17-24.

[8] 丁建丽, 塔西甫拉提·特依拜, 努尔巴衣·阿布都沙勒克. 荒漠交错带开发利用研究: 以新疆于田绿洲为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2002, 12(6): 78-85.

[9] 张强, 王胜. 绿洲与荒漠背景夏季近地层大气特征的对比分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 282-289.

[10] 左洪超, 胡隐樵. 黑河地区绿洲和戈壁小气候特征的季节变化及其对比分析[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 246-254.

[11] 张凯, 王润元, 张强, 等. 绿洲荒漠过渡带夏季晴天地表辐射和能量平衡及小气候特征[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 1055-1061.

[12] 张艳武, 冯起, 吕世华, 等. 额济纳绿洲夏末典型晴天小气候特征分析[J]. 高原气象, 2005, 24(4): 516-521.

[13] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 荒漠河岸林胡杨和柽柳群落小气候特征研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 668-674.

[14] 王根绪. 干旱荒漠绿洲景观空间格局及其受水资源条件的影响分析[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 363-368.

[15] 王君厚, 周士威, 陆兆明, 等. 乌兰布和荒漠人工绿洲小气候效应研究[J]. 干旱区研究, 1998, 15(1): 27-34.

[16] 肖彩虹, 郝玉光, 郭承德. 乌兰布和沙区人工绿洲小气候的变化[J]. 中国农业气象, 2003, 24(2): 31-34.

(上接第 116 页)

[17] Toba T, Ohta T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests[J]. J. Hydro1., 2005, 313: 208-220.

[18] Llorens P, Poch R, Latron J, et al. Rainfall interception by a *Pinus sylvestris* forest patch overgrown in a Mediterranean mountainous abandoned area I. Monitoring design and results down to the event scale[J]. J. Hydro1., 1997, 199: 331-345.

[19] Lin T C, Hamburg S P, King H B, et al. Throughfall patterns in a subtropical rain forest of northeastern Taiwan[J]. J. Environ. Qual., 2000, 29: 1186-1193.

[20] 巩合德, 王开运, 杨万勤, 等. 川西亚高山白桦林穿透雨和茎流特征观测研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(4): 17-20.

[21] 常志勇, 包维楷, 何丙辉, 等. 岷江上游油松与华山松人工混交林对降雨的截留分配效应[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 37-40.

[22] 鲍文, 包维楷, 何丙辉, 等. 岷江上游油松人工林对降雨的截留分配效应[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(5): 10-16.

[23] 巩合德, 王开运, 杨万勤, 等. 川西亚高山原始云杉林内降雨分配研究[J]. 林业科学, 2005, 41(1): 198-201.