

# 北京土石山区4种典型林分的水文效应研究

牛勇<sup>1</sup>, 汪滨<sup>1</sup>, 王玲<sup>2</sup>, 蔡永茂<sup>2</sup>, 张志强<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市八达岭林场, 北京 102112)

**摘要:**以北京土石山区4种典型林分的林冠层、枯落物层、土壤层3个水文作用层为研究对象,采用浸水法等传统测量方法,测定了不同林分的冠层截留量、树干径流量、穿透降雨量以及土壤和枯落物层的水力学参数,并分析了其水文效应。结果表明:不同林分的林冠截留能力相差较大,其中侧柏—黄栌混交林的冠层截留率最大为29.1%,其余依次为侧柏林、油松纯林和元宝枫纯林,油松纯林的树干径流量占降雨比例最大(5.8%),其余依次为侧柏—黄栌混交林、元宝枫纯林和侧柏林,各项林冠截留率与大多数在干旱半干旱地区取得结果较为一致。从月份尺度的变化趋势来看,不同林分的截留量均为6月最大,7月、8月、9月、10月和5月依次减小,即截留量与降雨量呈正比关系。4种林分枯落物总蓄积量范围为26.3~246.0 t/hm<sup>2</sup>,其中油松纯林的枯落物储量显著大于其他林分类型( $p < 0.05$ ),侧柏纯林、侧柏—黄栌混交林、元宝枫纯林依次次之,不同林分枯落物的最大持水量和有效持水量的大小排序与之一致。受土壤的物质构成、机械组成、根系的发育状况等因素影响,侧柏纯林的土壤孔隙度和饱和入渗速率( $K_s$ )依次大于侧柏—黄栌混交林、油松纯林和元宝枫纯林。

**关键词:**冠层截留; 枯落物; 水力学参数; 土石山区; 水文效应

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)05-0113-05

## Study of Hydrological Functions of Four Types of Forest Stands in Rocky and Earthy Area of Beijing

NIU Yong<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>2</sup>, CAI Yongmao<sup>2</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Badaling Forest Farm, Beijing 102112, China)

**Abstract:** Hydrological functions of three hydrological function layers of four forest types were investigated in forest stands of rocky and earthy area in Beijing. The traditional measurement methods were used to monitor throughfall, stemflow, interception loss, hydraulics parameters of forest litter and soil. The results indicated that the interception capacity of different vegetation was significantly different, with the maximal canopy interception of stand of mixed *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Cotinus coggygria* Scop. (29.1%), followed by stands of *Platycladus orientalis* (L.) Franco, *Pinus tabulaeformis*, *Acer truncatum*. The stem flow ratio of stand *Pinus tabulaeformis* was the highest (5.83%), which fitted the results obtained in arid and semi-arid region well. At the monthly scale, the maximal interception ratio appeared in June, followed July, August, October and May, and there was a positive correlation between interception and rainfall. The forest litter quantity of four stands ranged from 26.3 t/hm<sup>2</sup> to 246.0 t/hm<sup>2</sup>, and the forest litter quantity of stand *Pinus tabulaeformis* was much greater than the others ( $p < 0.05$ ), followed by stands of mixed *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Cotinus coggygria* Scop., *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Acer truncatum*, as the same order of the maximum water holding capacity and available interception amount of forest litter. The soil porosity and  $K_s$  of stand of mixed *Platycladus orientalis* (L.) Franco and *Cotinus coggygria* Scop. were greater than the other stands with the influence of material composition, mechanical composition, root, etc.

**Keywords:** canopy interception; forest litter; hydraulics parameter; rocky and earthy area; hydrological functions

森林与水的关系问题一直是森林生态研究的中心议题,也是水文循环探索的重要内容,森林生态系统对水分的时空分配、传输转换以及水文循环机制的影响问题是其核心<sup>[1]</sup>,特别是在干旱半干旱地区,有关森林生态系统一降雨作用机制的认识对于森林生态系统的可持续经营管理和水资源的合理开发利用具有重要的意义<sup>[2]</sup>。

森林生态系统对降雨的分配过程主要包括:一是地上部分的降雨截留,包括乔<sup>[3]</sup>、灌、草冠层截留<sup>[3-5]</sup>和树干蓄留<sup>[6]</sup>;二是地被物对降雨的蓄留,例如地表苔藓、枯枝落叶层的降雨蓄留<sup>[7-9]</sup>;三是土壤层对降雨的蓄留<sup>[10-11]</sup>、入渗<sup>[12-13]</sup>等。相较于灌木和草本截留,林冠截留损失大,其原因为林冠具有较大的截留容量和空气动力学阻力<sup>[14]</sup>。国外一般研究认为温带针叶林林冠截留率为 20%~40%<sup>[15-16]</sup>。我国学者研究表明,不同气候带截留率范围为 11.4%~34.3%<sup>[17]</sup>。森林枯枝落叶层较大的水分截持能力对土壤水分的补充有着不利的影响<sup>[18]</sup>,但枯落物较高的含水量有利于提高森林植被的养分供应<sup>[19]</sup>。整体来看,森林土壤的入渗率高于其他土地类型,部分森林土壤的稳定入渗率可达 8 cm/h<sup>[20]</sup>,林地较大的土壤孔隙率是其主要原因<sup>[21]</sup>。已有的国内相关研究,多采用有效含水量、初渗速率和稳渗速率对土壤的水文作用进行评价<sup>[12-13]</sup>。目前针对华北土石山区森林生态系统水文过程的研究多为针对某一水文作用层所开展的研究,虽然这类研究可以较好地说明某一水文作用层的水文效应,但典型植被群落整体的水文效应分析可以更好、更全面地指导林业生产实践。

华北土石山区位于中国海河流域上游,是北京、天津等特大城市的重要水源地。其气候属于暖温带大陆性季风气候,年均温 8~12℃,多年平均降水量 400~800 mm,其中 6—9 月降水量占全年降水量的 85%以上<sup>[22]</sup>。该地区偏少的降雨量,使得合理的森

林经营措施的制定更加需要森林—水文作用机理的理论支撑。

本文在北京市西北部土石山区选取 4 种典型林分,通过野外监测、室内试验分析等手段,系统研究了典型林分的 3 个水文作用层的水文效应特征,以期为该地区的植被恢复和森林经营提供理论和数据支撑。

1 研究区概况

本研究在北京市八达岭国家森林公园内展开,北京市八达岭国家森林公园位于北京西北部延庆县境内。该地区属于中山地形区,平均海拔 780 m,最高海拔 1 238 m,最低海拔 450 m,相对高差 788 m<sup>[23]</sup>。气候类型为半湿润半干旱暖温带气候,年平均气温 10.8℃,最高月平均气温 26.9℃(7 月),最低月平均气温-7.2℃(1 月)。无霜期短,仅 160 d 左右。年均降水量 454 mm,其中 7 月、8 月份的降雨量约占全年总降水量的 59%。自 20 世纪 50 年代建场(园)以来,逐年营造的人工林现已大部分郁闭成林,树种主要有油松(*Pinus tabulaeformis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、侧柏[*Platycladus orientalis* (L.) Franco]、华山松(*Pinus armandii* Franch.)、云杉(*Picea asperata* Mast.)、刺槐(*Robinia pseud-oacacia*)、山杨(*Populus davidiana*)、山杏[*Armeniaca sibirica* (L.) Lam.]、黄栌(*Cotinus coggygia* Scop.)等<sup>[24]</sup>。

2 试验材料与方法

2.1 样地设置

在森林资源二类清查资料分析的基础上,选定 4 种典型植被,分别为油松纯林、元宝枫纯林、侧柏纯林、侧柏—黄栌混交林,并在相应小班内设置观测样地 20 m×20 m(主要尺寸)。对样地进行详细调查,测定样地的坡度、坡向、林分密度等生境因子(表 1)。

表 1 样地基本概况

树种组成	坡度/(°)	坡向	林分密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m
油松纯林	27	阳坡	1444	49	14.4±5.2	7.1±1.2
元宝枫纯林	22	阳坡	1090	41	18.0±6.1	9.7±3.1
侧柏纯林	18	阳坡	2700	33	3.8±1.7	2.4±0.2
侧柏—黄栌混交林(1.45:1)	15	阳坡	1605	33	3.6±1.2	2.5±0.5

2.2 冠层截留观测

在山地开阔地设置 HOBO 自动气象站(Onset, 美国)观测生长季林外降雨。林内穿透雨、树干径流采用传统的人工方法观测<sup>[25]</sup>,观测结果见表 2。由于样地内郁闭度较高,灌木层较少,而且草地截留量在林分截持中所占比例较小,故忽略灌木和草本植被的

降雨截持影响。

2.3 枯落物持水量测定

枯落物储量调查时间为 2014 年 7 月中旬。在每块标准样地内设定 4 块 10 m×10 m 的小区,在每个小区内随机布置 3 个 30 cm×30 cm 的样方。根据枯落物状况将枯落物分为两层:半分解层,由树枝、

针叶、果实和树皮等分解而成,颜色为黑褐色,用肉眼已无法分辨其原有形状;未分解层,其颜色与新鲜状态时发生较大变化,物理外形不完整,但仍能分辨出原型<sup>[26]</sup>。

表 2 穿透雨量、树干径流量、林冠截留量月份动态变化

月份	降雨/ mm	林分							
		元宝枫纯林		油松纯林		侧柏纯林		侧柏—黄栌混交林	
		穿透雨量/mm	占比/%	穿透雨量/mm	占比/%	穿透雨量/mm	占比/%	穿透雨量/mm	占比/%
5	8.4	7.2	86.2	5.2	61.54	6.3	75.3	6.1	73.0
6	208.3	182.0	87.4	163.4	78.44	154.8	74.3	129.8	62.3
7	180.6	150.6	83.3	130.6	72.33	132.5	73.3	125.8	69.7
8	137.4	111.9	81.4	87.4	63.65	111.3	81.0	99.9	72.7
9	88.3	57.1	64.6	56.1	63.57	66.5	75.4	57.6	65.2
10	6.3	5.9	93.9	2.3	36.68	3.4	53.9	2.6	41.7
合计	629.3	514.7	81.8	445.1	70.72	474.8	75.5	421.8	67.0

月份	降雨/ mm	树干径 流量/mm	占比/%	树干径 流量/mm	占比/%	树干径 流量/mm	占比/%	树干径 流量/mm	占比/%
5	8.4	0.3	3.1	0.2	2.02	0.1	1.6	0.0	0.1
6	208.3	6.3	3.1	13.8	6.62	4.5	2.2	6.0	2.8
7	180.6	5.8	3.2	12.7	7.03	4.6	2.6	10.4	5.8
8	137.4	6.4	4.7	6.5	4.71	2.8	2.1	5.7	4.2
9	88.3	2.9	3.3	3.3	3.75	1.1	1.2	2.3	2.6
10	6.3	0.2	2.6	0.2	3.96	0.1	1.8	0.1	1.4
合计	629.3	21.9	3.5	36.7	5.83	13.3	2.1	24.5	3.9

月份	降雨/ mm	冠层截 留量/mm	占比/%	冠层截 留量/mm	占比/%	冠层截 留量/mm	占比/%	冠层截 留量/mm	占比/%
5	8.4	0.9	10.7	3.1	36.4	1.9	23.1	2.3	27.0
6	208.3	19.9	9.6	31.1	14.9	49.0	23.5	72.6	34.8
7	180.6	24.2	13.4	37.3	20.6	43.5	24.1	44.4	24.6
8	137.4	19.1	13.9	43.5	31.6	23.3	16.9	31.8	23.1
9	88.3	28.3	32.1	28.9	32.7	20.7	23.4	28.4	32.2
10	6.3	0.2	3.6	3.7	59.4	2.8	44.3	3.6	56.8
合计	629.3	92.6	14.7	147.5	23.4	141.2	22.4	183.0	29.1

本研究中,将每个样方中按未分解层、半分解层分层测定枯落物层厚度,并分别用 100 目纱网收集,称其鲜重。在实验室内对采集的枯落物样品进行烘干(85℃)至恒重,计算得到对应样地枯落物储量和自然含水量。将收集到的枯落物的样品烘干后,连同纱网一同置入盛有清水的容器中,并使容器内水面略高于纱网上沿。测定样品浸泡时长为 24 h,再将样品从水中取出静置 5 min,使称量时样品内不再有重力水滴落释放,并称样品重量。为减少误差,剔除纱网的持水量。枯落物的自然含水量、最大持水率、最大持水量分别由下式计算得到:

$$R_0=(G_0-G_d)/G_d\times 100\%$$
$$R_{\max}=(G_{24}-G_d)/G_d\times 100\%$$
$$W_{\max}=R_{\max}M$$

式中: $R_0$ , $R_{\max}$ ——枯落物自然含水量、最大含水量; $G_0$ , $G_d$ , $G_{24}$ ——枯落物的自然重、烘干重和 24 h 泡水重; $M$ , $W_{\max}$ ——枯落物储量和最大持水量。

实际降雨过程中,枯落物不可能处于浸泡状态,

最大持水量仅能用来表征枯落物的最大拦蓄能力。目前国内学者多引用 Lee Richard(1980 年)提出的相关结论来计算枯落物有效持水量:即当降雨量达到 20~30 mm 以后,各类林分类型对降雨的有效拦蓄量约为最大持水量的 85%,公式如下:

$$W=(0.85R_{\max}-R_0)M$$

式中: $W$ ——枯落物有效持水量。

### 2.4 土壤水力学参数的推求

用环刀在各样地内分 5 层(0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm)取土,每层 3 次重复,在实验室测定土壤样品容重、机械组成,并将测试数据输入 RetC 6.02 软件<sup>[27]</sup>推求土壤样品的饱和含水量 $\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ 、入渗速率 $K_s(\text{cm}/\text{d})$ 等土壤水力学参数。通过换算,可以推求土壤孔隙度(%)。

## 3 结果与分析

### 3.1 林冠对降雨的截留

2013 年生长季(5—10 月份)研究区降雨量为

629.3 mm,降雨量最大的 3 个月依次为 6 月、7 月、8 月,其降雨量占生长季总降雨量的 80%。由表 2 可知,穿透降雨量的大小表现为:元宝枫纯林(514.7 mm)>侧柏纯林(474.8 mm)>油松纯林(445.1 mm)>侧柏—黄栌混交林(421.8 mm),即在本研究的林分范围内,阔叶林穿透降雨量大于针叶林。综合分析月尺度穿透降雨量与降雨量的关系发现,穿透降雨量与降雨量呈正比关系,4 种典型林分的穿透降雨量占降雨比例与降雨量的关系可较好地用对数函数表示。

不同植被群落生长季的树干径流量占降雨量的比例范围为 2.1%~5.8%,其中生长季油松纯林的树干径流量最大,为 36.7 mm,占降雨总量的 5.8%,侧柏—黄栌混交林(24.9 mm)、元宝枫纯林(21.9 mm)、侧柏纯林(13.3 mm)依次次之,其大小主要受树皮的吸水性能、树木胸径、树干枝角与冠型结构、降雨量及降雨强度的影响<sup>[28]</sup>。不同植被群落的树干径流量占降雨比例和树干截留量在年内生长季内的动态变化依次为 6 月>7 月>8 月>9 月>5 月>10 月,即树干径流量占降雨比例和树干截留量与月降雨量呈正比。

由表 2 可知,侧柏—黄栌混交林降雨截留量最高,其截留率达 29.1%,油松纯林(23.4%)、侧柏纯林(22.4%)、元宝枫纯林(14.7%)依次次之,结果整体符合乔木树种间的截留率大小规律,即针叶林大于阔叶林。不同植被群落的林冠截留率的年内变化趋势为:10 月份的 4 种典型植被群落的平均林冠截留率依次大于 9 月、6 月、5 月、7 月、8 月,而且可以发现降水量大的时间段内,林冠截留量相对较大,截留率的大小顺序则与其相反。这是在因为降水量大的月份中,叶片表层长期处于湿润状态,尽管在该月份

中由于降水量大、降雨场次多的缘故,其在整个月份时间段内的截留量较大,但场均降水截留量相对较小,导致植被冠层在该时间段的截留率偏小。对于降水量偏小的时间段,冠层叶片相对干燥,可以滞留较多的大气降水,其林冠截留率较大。另外发现,由于混交,侧柏—黄栌混交林较之侧柏纯林(两林分内侧柏密度一致),截留量提高了近 30%,但穿透降雨量则相应减少了 11%,即在不改变现有林分密度的基础上混交其他树种,会降低土壤层所能获得的降雨补给。

3.2 枯落物层的持水能力

各典型林分中,油松纯林的枯落物储量显著大于其他林分类型( $p<0.05$ ),侧柏纯林、侧柏—黄栌混交林、元宝枫纯林依次递减,即针叶林的枯落物储量大于阔叶林,这主要是由于针叶林枯落物中的角质叶片的分解速率远小于阔叶林所造成的。

元宝枫枯落物单位重量的最大含水量最大,达 3.7 t/t,分别是侧柏、油松枯落物的 2.8、2.1 倍,表明不同树种枯落物在单位重量条件下的持水能力不同,且阔叶树种枯落物单位重量的持水能力大于针叶树种,这种差异由枯落物质地、储量、分解程度等因素共同作用所致。考虑到枯落物储量的影响,油松纯林的最大持水量在各林分中最大,侧柏—黄栌混交林、侧柏纯林、元宝枫纯林依次减小。

为消除自然含水量的影响,枯落物的有效拦蓄能力可由有效拦蓄深表示。由表 3 可知,各林分的有效拦蓄深范围为 6.0~12.9 mm,说明在不考虑相邻场降雨之间相互影响的情况下,由于林冠层和枯落物层的截留作用,小雨级别的降雨(0~10 mm)对本研究中所涉及的 4 种典型林分水分补给的作用均有限。

表 3 4 种林分枯落物层水力学参数

林分类型	枯落物储量/(t·hm <sup>-2</sup> )	最大持水量/mm	最大含水量/(t·t <sup>-1</sup> )	有效拦蓄深/mm
油松纯林	246.0±61.0b	32.94±23.82	1.34±0.88	12.95±1.61
元宝枫纯林	26.3±23.0a	9.72±2.25	3.70±0.96	8.81±2.19
侧柏纯林	66.9±22.3a	11.98±3.75	1.79±0.55	6.00±1.36
侧柏—黄栌混交林	61.4±24.3a	15.06±1.56	2.45±0.07	7.35±2.11

注:不同小写字母代表差异显著( $p<0.05$ ),下表同。

3.3 土壤的持水能力及入渗速率

林地的蓄水能力是评价森林涵养水源的重要指标,主要受土壤层深度和孔隙度的影响<sup>[29]</sup>,本研究各样地取样深度均达到 1 m,已接近基岩或强风化岩石层,因此采用 1 m 土层内土壤孔隙度的平均值来评价不同林分土壤的蓄水能力(表 4)。4 种典型林分中,侧柏纯林的土壤孔隙度最大,为 47.1%,侧柏—黄栌混交林的孔隙度略小,为 46.7%,通过显著性分析,两者的土壤孔隙度显著大于元宝枫纯林和油松纯

林( $p<0.05$ )。

1 m 深度内土壤各层饱和入渗速率的平均值大小依次为侧柏纯林、侧柏—黄栌混交林、油松纯林、元宝枫纯林,其中元宝枫纯林的平均饱和入渗速率显著小于其他 3 种林分。在不同深度上,总体上有上层土壤饱和入渗速率大于下层土壤饱和入渗速率的趋势(图 1)。现有研究认为土壤饱和入渗速率主要与有机质含量、孔隙度、机械组成和初始含水量有关<sup>[1]</sup>,本文涉及到的 4 种林分中,元宝枫纯林的枯落物储量最

低,其表层土壤易受到雨水冲刷的作用,导致土壤相对密实(见土壤容重)且有机质含量偏低,而且相对于其他树种,元宝枫的根系密度较小(取样时观测发现)<sup>[29-30]</sup>,不利于在土壤中形成较大孔隙,因此水分在土壤中的渗透和扩散能力有限,即元宝枫纯林地的入渗速率相对于其他样地较低,同时这也是本研究所有样地中只有元宝枫纯林样地可以观测到地表径流的重要原因。

表 4 4 种林分土壤水力学参数

植被类型	孔隙度/%	各层平均/ (cm·d <sup>-1</sup> )	各层平均容重/ (cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> )
元宝枫纯林	43.8±3.1a	44.6±21.8a	1.34±0.14a
油松纯林	44.1±2.9a	124.8±34.3b	1.31±0.06a
侧柏纯林	47.1±5.3b	164.3±37.1b	1.31±0.11a
侧柏—黄栌混交林	46.7±5.1b	125.7±16.6b	1.23±0.17a

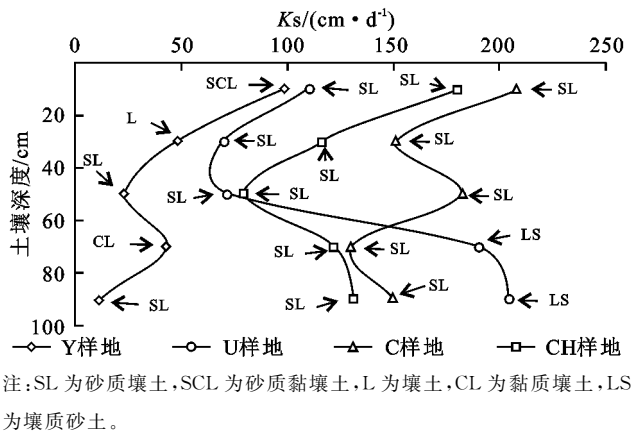


图 1 4 种林分及土壤深度的 Ks 变化

4 结 论

(1) 冠层降雨截留量排序为侧柏—黄栌混交林>油松纯林>侧柏纯林>元宝枫纯林;树干径流量排序为油松纯林>侧柏—黄栌混交林>元宝枫纯林>侧柏纯林。

(2) 4 种林分枯落物总储量范围为 26.3~246.0 t/hm<sup>2</sup>,其中油松纯林的枯落物总储量显著大于其他林分类型( $p<0.05$ ),侧柏纯林、侧柏—黄栌混交林和元宝枫纯林的枯落物总储量依次小于油松纯林。

(3) 阔叶树种枯落物单位重量的持水能力大于针叶树种,油松纯林的枯落物的最大持水量在各林分中最大,侧柏—黄栌混交林、侧柏纯林、元宝枫纯林依次次之。

(4) 受土壤的物质构成、机械组成、根系发育等因素影响,侧柏纯林的土壤孔隙度和饱和入渗速率(Ks)依次大于侧柏—黄栌混交林、油松纯林和元宝枫纯林。

参考文献:

[1] 赵海涛,程根伟,于新晓.山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M].北京:科学出版社,2004.

[2] 王爱娟,章文波.林冠截留降雨研究综述[J].水土保持研究,2009,16(4):55-59.

[3] Rutter A J, Morton A J. A predictive model of rainfall interception in forests: III. sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables[J]. The Journal of Applied Ecology,1977,14(2):567-588.

[4] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1979,105(443):43-55.

[5] Gash J H C, Lloyd C R, Lachaud G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model[J]. Journal of Hydrology,1995,170(1/4):79-86.

[6] 裴铁璠,刘家冈,韩绍文,等.树干径流模型[J].应用生态学报,1990,1(4):294-300.

[7] 叶吉,郝占庆,姜萍.长白山暗针叶林苔藓枯落物层的降雨截留过程[J].生态学报,2004,24(12):2859-2862.

[8] 刘兴明,刘贤德,车宗玺,等.祁连山青海云杉林区苔藓层对流域水文的影响[J].干旱区地理,2010,31(6):962-967.

[9] 朱兴武,张鸿昌,陈选,等.大通宝库林区森林枯枝落物层水文特征研究[J].青海农林科技,1993(4):1-6.

[10] 王金叶,田大伦,王彦辉,等.祁连山林草复合流域土壤水文效应[J].水土保持学报,2005(3):144-147.

[11] 吕刚,吴祥云,雷泽勇,等.辽西半干旱低山丘陵区人工林地表层土壤水文效应[J].水土保持学报,2008(5):204-208.

[12] 彭舜磊,陈昌东,刘沛松,等.豫西低山丘陵区不同植被恢复类型表层土壤入渗规律[J].湖北农业科学,2013,52(7):1549-1552.

[13] 黄茹,黄林,何丙辉,等.三峡库区不同林草治理措施下土壤入渗特征研究[J].西南大学学报:自然科学版,2013,35(9):119-126.

[14] 张焜,张洪江,程金花,等.重庆四面山三种人工林林冠截留效应研究[J].水土保持研究,2011,18(1):201-204.

[15] Teklehaimanot Z, Jarvis P G, Ledger D C. Rainfall interception and boundary layer conductance in relation to tree spacing[J]. Journal of Hydrology,1991,123(3/4):261-278.

[16] Viville D, Biron P, Granier A, et al. Interception in a mountainous declining spruce stand in the Strengbach catchment(Vosges, France)[J]. Journal of Hydrology,1993,144(1/4):273-282.

[17] 张志强.森林水文:过程与机理[M].北京:中国环境科学出版社,2002.

[18] Putuhen W M, Cordery I. Estimation of interception capacity of the forest floor[J]. Journal of Hydrology, 1996,180(1/4):283-299.

- following deforestation and cultivation in wet tropical forests[J]. *Applied Soil Ecology*, 2003, 24(1): 17-26.
- [10] Powers J S. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 134-146.
- [11] 张洁, 姚宇卿, 金轲, 等. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 126-129.
- [12] Chilima J, Huang C Y, Wu C F. Microbial biomass carbon trends in black and red soils under single straw application: effect of straw placement, mineral N addition and tillage[J]. *Pedosphere*, 2002, 12(1): 59-72.
- [13] 侯化亭, 张丛志, 张佳宝, 等. 不同施肥水平及玉米种植对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 163-166.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [16] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量碳的改进[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(2): 63-66.
- [17] 王晓凌, 陈明灿, 张雷. 不同耕作方式对土壤微生物量和土壤酶活性的影响[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(12): 28-30.
- [18] 牛新胜, 张宏彦, 王立刚, 等. 玉米秸秆覆盖冬小麦免耕播种对土壤微生物量碳的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(1): 64-68, 73.
- [19] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4112-4118.
- [20] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96.
- [21] 何电源. 中国南方土壤肥力及栽培作物施肥[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [22] 何莹莹, 张海林, 伍芬琳, 等. 不同耕作方式对双季稻田土壤微生物量碳、氮的影响[C]// 高旺盛, 孙占祥. 中国农作制度研究进展 2008, 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2008: 329-332.
- [23] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2792-2798.
- [24] 盛浩, 周萍, 袁红, 等. 亚热带不同稻田土壤微生物生物量碳的剖面分布特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1576-1582.
- [25] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 750-757.
- [26] 刘守龙, 苏以荣, 黄道友, 等. 微生物商对亚热带地区土地利用及施肥制度的响应[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1411-1418.
- [27] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [28] 张俊民, 蔡凤岐, 何同康. 中国的土壤[M]. 北京: 商务印书馆, 1995.

(上接第 117 页)

- [19] Tietema A, Warmerdam B, Lenting E, et al. Abiotic factors regulating nitrogen transformations in the organic layer of acid forest soils: Moisture and pH[J]. *Plant and Soil*, 1992, 147(1): 69-78.
- [20] Dunne T. Field studies of hillslope flow processes[M]// Kirkby. *Hillslopehydrolog*. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [21] 何东宁, 王占林, 张洪勋. 青海乐都地区森林涵养水源效能研究[J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1991, 15(1): 71-78.
- [22] 王贺年, 余新晓, 贾国栋, 等. 华北土石山区流域森林覆盖率对径流影响的定量分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2013, 21(3): 432-441.
- [23] 蔡永茂, 许兰霞, 张咏. 八达岭林场的分类经营评价[J]. *北京林业大学学报*, 2003, 25(S1): 57-62.
- [24] 姚永刚, 王玲, 张立, 等. 北京市八达岭风景区树木物候研究[J]. *林业实用技术*, 2006(1): 7-9.
- [25] 刘千, 王平, 熊伟, 等. 六盘山北侧叠叠沟小流域几种典型植被群落的水文功能研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(4): 193-199.
- [26] 高开通, 胡淑萍, 刘鹏举, 等. 北京九龙山自然保护区典型林分枯落物水文效应研究[J]. *水土保持研究*, 2013(5): 160-164.
- [27] 王薇, 孟杰, 虎胆·吐马尔白. RETC 推求土壤水动力学参数的室内试验研究[J]. *河北农业大学学报*, 2008, 31(1): 99-102.
- [28] 黄承标, 梁宏温. 广西亚热带主要林型的树干茎流[J]. *植物资源与环境*, 1994, 3(4): 10-17.
- [29] 陈波, 孟成生, 赵耀新, 等. 冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3): 216-221.
- [30] 赵忠, 李鹏, 王乃江. 渭北黄土高原主要造林树种根系分布特征的研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(1): 38-40.