

天童山常绿阔叶林不同演替阶段水源涵养功能评价

沈会涛^{1,2}, 王化儒³, 由文辉²

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

2. 华东师范大学 环境科学系, 上海 200062; 3. 黄河水资源保护科学研究所, 河南 郑州 450004)

摘要: 以位于浙江省东部天童国家森林公园内的常绿阔叶林为研究对象, 从林冠层、林下枯落物层和土壤层 3 个生态作用层入手, 采用层次分析法综合评价了天童山常绿阔叶林 3 个不同演替阶段(常绿阔叶林灌丛、木荷林、栲树林)的水源涵养功能, 并进行了排序。结果表明, 该区水源涵养功能随演替进程逐渐增加, 处于演替初级阶段的常绿阔叶林灌丛水源涵养功能最低(0.200 9), 演替中后期阶段的木荷林居中(0.363 2), 演替顶级阶段的栲树林最强(0.436 0)。

关键词: 天童山; 常绿阔叶林; 演替; 水源涵养功能; 层次分析法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0170-06

中图分类号: S715.7

Evaluation on Water Conservation Capacity of Evergreen Broad-leaved Forests Through Succession in Tiantong Mountain

SHEN Hui-tao^{1,2}, WANG Hua-ru³, YOU Wen-hui²

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese

Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Department of Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 3. Yellow River Water Resources Protection Institute, Zhengzhou, He'nan 450004, China)

Abstract: The forest ecosystem plays a critical role in water conservation in mountain area. In order to study the water conservation functions, the present research investigated the hydrological effects of the forest ecosystem from forest canopy, litter, and soil layer in subtropical evergreen broad-leaved forest (EBLF) in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province. Chronosequence method was used in this study. We chose secondary shrubs, *Schima superb*-dominated forest, and *Castanopsis fargesii*-dominated forest to represent early succession (SS), sub-climax EBLF (SE), and climax EBLF (CE), respectively. The values of evaluation indices were calculated based on weights determined by the method of analytical hierarchy process (AHP). The results showed that water conservation functions increased through succession. The CE stand had the best water conservation function (0.436 0) among three successional stages of EBLFs, followed by SE (0.363 2), and SS had the worst (0.200 9). This study highlighted that AHP was an effective quantitative method for evaluating forest water conservation functions.

Keywords: Tiantong Mountain; evergreen broad-leaved forest; succession; water conservation function; analytical hierarchy process method

森林水源涵养功能作为森林生态系统服务功能的重要组成部分之一^[1], 是森林三个垂直层次(林冠层、枯落物层和土壤层)共同作用的复杂过程^[2]。不同森林类型由于其林分结构和树种生物学特征等不同, 其水源涵养功能在整体上存在差异^[3]。在以往的研究中, 森林水源涵养功能评价多针对某一特定作用层的指

标进行定性评价^[4], 然而, 森林作为一个整体, 在某些指标上表现较好, 而在其他指标上却不一定优秀^[5], 因而需要对多个指标同时进行较为全面的综合评价。莫菲等^[6]使用综合评定法分析了东灵山不同林分涵养水源的功能及其差异; 黄进等^[7]采用 Topsis 优劣解距离法比较了江宁小流域主要森林类型的综合水

收稿日期: 2012-07-17

修回日期: 2012-09-17

资助项目: 高等学校博士学科点专项科研基金“台风对我国东部沿海常绿阔叶林水文过程影响研究”(20090076110021); 天童野外台站开放课题“天童常绿阔叶林植被—大气界面水碳通量耦合模型与研究”(79642061), “常绿阔叶林中大气降水再分配的研究”(51X1412B)

作者简介: 沈会涛(1980—), 男(汉族), 河北省保定市人, 博士, 主要从事森林生态学研究。E-mail: shenhuitao80@126.com。

通信作者: 由文辉(1964—), 男(汉族), 山东省黄县人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文学研究。E-mail: youwenhui1964@126.com。

源涵养功能;陈引珍等^[8]根据坐标综合评定法对重庆缙云山天然林水源涵养和保持水土功能进行了综合评价。由此可见,综合评价方法对于从整体上评价和理解森林水源涵养功能具有重要的意义。

在我国东部温暖湿润区广泛分布的常绿阔叶林,其面积大、类型复杂多样,是全球常绿阔叶林的主体^[9]。我国常绿阔叶林因其丰富的物种多样性及巨大的生态效应,受到了人们的广泛关注^[10]。但在不同人类干扰方式和干扰强度的影响下,导致这类森林日益减少,取而代之的是处于不同退化程度的次生林、灌丛和人工林等^[11]。本研究针对位于浙江省东部的天童山常绿阔叶林不同演替阶段的林冠层、枯落物层和土壤层水文特征进行测定,分析常绿阔叶林退化过程中的水文特征变化,并结合层次分析法,对比分析原生林和原生林破坏后形成的次生林及灌丛在水源涵养方面的功能特征,旨在为常绿阔叶林的生态恢复和可持续经营提供科学参考。

1 研究区概况

本研究位于浙江省天童国家森林公园生态系统定位

研究站(29°48'N,121°47'E)。该地区全年温暖潮湿,气候属典型的亚热带季风气候,年均气温 16.2℃,年平均降雨量 1 374.7 mm。山峰海拔多为 300 m,最高峰太白山海拔 653.3 m。土壤主要为山地红黄壤,pH 值为 4.01~4.79,偏酸性,有机质含量丰富^[12]。

由于不同历史阶段干扰强度的差异和受保护年限长短的不同,自森林公园外围至玲珑岩一带发育着处于不同演替阶段的次生常绿阔叶林,形成了以铁芒萁(*Dicranopteris pedata*)—五节芒(*Miscanthus floridulus*)灌草丛为初始阶段的次生演替系列,其它阶段主要包括:演替前期的柃木(*Loropetalum chinense*)—石栎(*Lithocarpus glaber*)灌丛,演替中期的针叶林马尾松(*Pinus massoniana*)群落和针阔混交林木荷(*Schima superba*)—马尾松群落,演替中后期的木荷群落以及顶极阶段的栲树(*Castanopsis fargesii*)群落^[11]。

本研究利用空间代替时间法,选取天童生态站常绿阔叶林灌丛、木荷林、栲树林分别代表常绿阔叶林演替初期、中后期和顶极阶段。各演替阶段样地概况详见表 1。

表 1 天童常绿阔叶林不同演替阶段样地特征

林分类型	林龄/ a	海拔/ m	高度/ m	郁闭度	叶面积指数 (LAI)	胸径断面积/ (m ² ·hm ⁻²)	主要植物种类
常绿阔叶林灌丛	17	164	5	0.93	3.4	17.1	石栎、柃木、木荷等
木荷林	90	163	20	0.94	3.6	32.4	木荷占优势,其他种类有石栎等
栲树林	150	196	25	0.89	2.8	31.9	栲树占优势,其他种类有木荷等

2 研究方法

2.1 林冠截留的测定

采用的水文观测数据的时间段为 2009 年 3—10 月。在研究样地外的空旷地设立一个自动气象站记录各次降水量,在每次降雨后测定大气降雨量、穿透雨和树干茎流。

林冠截留按常规方法测定,在不同演替阶段林内分别设置 25 m×25 m 样方测定穿透雨和树干茎流量。各样地内按每 5 m×5 m 间距机械布设 25 个自制雨量筒来测定穿透雨量,自制雨量筒上部为直径 23 cm 的漏斗,下面接塑料桶,漏斗表面距地面高度 30 cm。降雨后,测量塑料桶内的雨水体积(ml),然后换算成雨量深(mm)。各样地内按植株胸径的径级分布,分别选择代表性植株 8 株测定树干茎流,在树干基部 100~130 cm 处,采用缠绕式(胸径 DBH≥15 cm)或漏斗式(DBH<15 cm)方法收集树干茎流,最终换算成降雨量统一单位(mm)。树干茎流量 SF

(mm)的计算公式为:

$$SF = \sum_{i=1}^N \frac{C_i \times M_i}{S \times 1000}$$

式中:SF——样地树干茎流量(mm);N——树干径级数; C_i ——径级*i*的树干茎流体积(ml); M_i ——径级*i*的树木株数;S——样地面积(m²)。

林冠截留计算公式为:

$$I = P - (TF + SF)$$

式中:I——林冠截留量(mm);P——大气降雨量(mm);TF——林内穿透雨量(mm)。

2.2 凋落物层现存量及持水能力测定

枯落物现存量的调查选择未经人为干扰的样地,在 3 种不同演替类型内,按上、中、下坡面布设 3 个小样方,每个样方各取样 2 次,取样面积为 31.6 cm×31.6 cm,测量其枯落物厚度,样品带回实验室后称重,在烘箱中 85℃烘干至恒重后,计算枯落物储量及自然含水率。将烘干枯落物浸水 24 h 后的含水率视为最大持水率^[13]。

2.3 土壤物理性质及持水能力测定

在不同演替样地内选择代表性地点挖掘土壤剖面,由于研究地的自然情况所限,本研究所挖剖面深度均为 30 cm,用 100 cm³ 的环刀按照土层深度 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 分层次取土,重复 3 次,带回实验室测定土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量等土壤指标。土壤蓄水量的计算公式为:土壤蓄水量(mm)=体积含水量(%)×土层厚度(mm)。

2.4 各植被类型水源涵养能力评价方法

森林水源涵养功能是林冠层、枯落物层和土壤层具体作用的综合反映^[6]。不同评价指标对水源涵养功能的影响程度不同,难以直接基于多个指标综合分析森林水源涵养功能。因此,本研究采用层次分析法(AHP)比较各指标对森林水源涵养功能的权重,根据权重值的大小对森林水源涵养功能进行评价。

2.4.1 建立评价体系 层次分析法是一种定性定量相结合的系统化、层次化的分析方法。应用层次分析法分析问题,首先要将问题条理化、层次化,构造出一个有层次的结构模型。这些层次可以分为 3 类:(1)目标层是分析问题的预定目标,本研究将常绿阔叶林不同演替阶段水源涵养功能作为层次结构模型的目标层(A层);(2)准则层包含了为实现目标所涉及的中间环节,本研究选取与森林水源涵养功能密切相关的冠层截留、枯落物层和土壤层的 9 个项目指标作为准则层(B₁—B₉层);(3)方案层是为实现目标可供选择的各种措施、方案等,本研究选取常绿阔叶林灌丛、木荷林和栲树林作为方案层来评价常绿阔叶林的水源涵养功能。依据上述途径所建立的常绿阔叶林水源涵养功能的 AHP 模型由图 1 所示。

2.4.2 确定各评价指标权重值 利用层次分析法对评价指标进行两两比较,判断每 2 个指标间的相对重要性(各因子的重要性采用 1—9 级标度法确定)并构造矩阵,并对该矩阵标准化特征向量进行一致性检

验,再转为对这些元素的整体权重值进行排序判断,最后确定各元素权重^[14]。

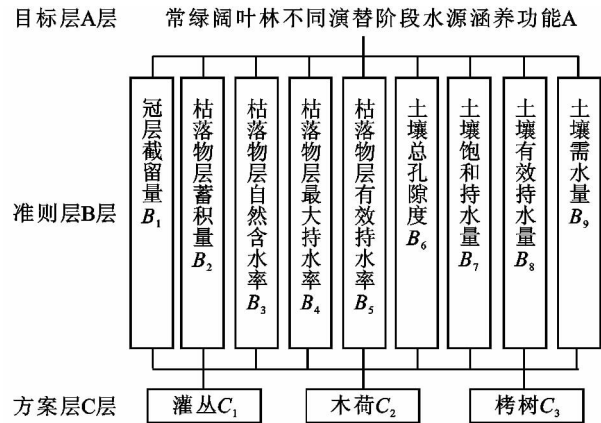


图 1 常绿阔叶林水源涵养功能的 AHP 模型

2.4.3 加权综合指数计算 根据综合指数数值大小,可得到各林型水源效益的排序,值越大水源涵养功能越强。综合指数的计算公式为:

$$I = \sum_{i=1}^9 w_i y_i$$

式中: w_i ——各指标权重; y_i ——原始数据指数化后的数值。

3 结果与分析

3.1 不同演替阶段冠层截留分析

林冠截留降低雨滴速度,削弱雨水对地面的溅蚀能力,从而起到消弱洪峰流量、防止土壤侵蚀和涵养水源的生态功效^[15-16]。研究期内,常绿阔叶林降雨再分配特征详见表 2。截留量最大的是处于演替中期的木荷林,为 429 mm,主要是由于该林分叶面积指数、冠层郁闭度和植株密度都较大,增加了冠层截留量。尽管演替被认为影响截留量,但有关研究较少^[15]。由于全球变暖的影响,而导致植被顶极阶段发生变化,进而影响大区域的水文作用,所以关于演替阶段降雨再分配的研究十分重要。

表 2 天童常绿阔叶林不同演替阶段降雨再分配特征

林分类型	降水量/	穿透雨		树干茎流		林冠截留	
	mm	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%	数值/mm	比例/%
常绿阔叶林灌丛	1 384	905	65	125	9	354	26
木荷林	1 384	764	55	191	14	429	31
栲树林	1 384	1 060	77	83	6	241	17

3.2 不同演替阶段枯落物层持水能力

枯落物层能够防止降雨对土壤表面的击溅,具有很强的吸水能力和透水性,能减缓地表径流的发生,从而减少水土流失^[17],因而枯落物层持水量是评价植被

水源涵养功能的重要指标。根据测定,不同演替阶段植被类型枯落物层蓄积量和自然含水率差别不大(表 3)。在最大持水率(量)和有效拦蓄率(量)方面,常绿阔叶林灌丛最大,木荷林次之,栲树林最少,主要原因

可能是由于常绿阔叶林灌丛内植物种类丰富,相对于单一的木荷林和栲树林的枯落物层,能吸收更多的水量。常绿阔叶林灌丛枯落物层的水文功能并不落后于木荷林和栲树林两种植被类型,但在人类长期的干扰

下,常绿阔叶林灌丛会进一步退化为草地甚至落地,造成群落结构趋于简单,涵养水源能力降低^[18]。因此,应有效地控制常绿阔叶林的退化过程,提高林分的稳定性,从而提高森林生态系统涵养水源的功能。

表 3 天童常绿阔叶林不同演替阶段枯落物层持水能力特征

林分类型	厚度/ cm	蓄积量/ (t·hm ⁻²)	自然含水 率/%	最大持水率(量)		有效拦蓄率(量)	
				率/%	量/(t·hm ⁻²)	率/%	量/(t·hm ⁻²)
常绿阔叶林灌丛	4.5	6.4	51	209	13.4	126	8.1
木荷林	5	6.5	54	185	11.9	103	6.6
栲树林	3.5	5.7	52	164	9.4	88	5.0

3.3 土壤物理性质及贮水能力

土壤水源涵养性能主要受植被类型、土壤性质、枯落物等因素影响^[19-20]。在土层厚度一定时,群落的水源涵养性能主要取决于土壤的孔隙特性,土壤总孔隙度与最大持水量有关,土壤毛管孔隙度与土壤有效持水量有关^[6]。

本研究以土壤总孔隙度状况、饱和持水量、有效持水量以及蓄水量作为评价土壤水源涵养潜力的重要指标。

由于植物通过枯落物分解和土壤中根系的分布

来影响土壤理化性质,导致不同植被类型的土壤调节水分的差异。表 4 为天童常绿阔叶林不同演替阶段土壤(0—30 cm)的物理性质。从演替阶段来看,土壤容重随着演替进程而呈减少趋势。处于演替顶极阶段的栲树林总孔隙度最大,土壤层的饱和持水量和蓄水量最高,表明栲树群落对土壤的改良作用较强,有利于水分的传输和储存。有效持水量反映了土壤的调蓄能力,常绿阔叶林灌丛土壤层的有效持水量高于木荷林和栲树林,表明次生常绿阔叶林灌丛在持水性能方面也发挥着较大的作用。

表 4 天童常绿阔叶林不同演替阶段 0—30 cm 土层土壤物理性质

林分类型	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	饱和持水量/ mm	有效持水量/ mm	蓄水量月平均值/ mm
常绿阔叶林灌丛	1.17	46.8	140	17	84
木荷林	0.99	43.9	132	13	81
栲树林	0.99	48.3	145	13	93

3.4 不同演替阶段水源涵养能力评价

3.4.1 目标层 A—准则层 B 之间层次单排序 根据准则层 B(B₁—B₉)的研究结果,利用判断矩阵 1—9 级标度关系列出 A 层指标合成权重(表 5),运用 Excel 软件计算出指标体系各层归一化权重系数 W_i,一致性检验指数 CI,随机一致性比率 CR。

计算结果表明,随机一致性比率 CR=0.095 694

<0.10,判断矩阵具有满意的一致性,无需调整。

3.4.2 准则层 B—方案层 C 之间层次单排序 利用相同的方法可以列出 B 层 9 个指标合成权重(表 6)和计算出 B 层的一致性指标 CI,随机一致性比率 CR。

通过计算表明,随机一致性比率 CR 均<0.10,判断矩阵具有满意的一致性,无需调整。

表 5 目标层 A 指标合成权重

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	权重 W _i
B ₁	1	1/5	1/4	1/3	1/3	1/4	1/4	1/3	1/2	0.034 8
B ₂	5	1	1/3	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1	0.072 5
B ₃	4	3	1	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1	0.086 1
B ₄	3	2	3	1	1	3	3	4	5	0.224 6
B ₅	3	2	3	1	1	4	2	2	5	0.198 3
B ₆	4	3	2	1/3	1/4	1	1/3	1/2	1/2	0.085 7
B ₇	4	2	2	1/3	1/2	3	1	1/2	4	0.124 7
B ₈	3	2	1	1/4	1/2	2	2	1	3	0.115 1
B ₉	2	1	1	1/5	1/5	2	1/4	1/3	1	0.058 3

表 6 准则层 B 指标合成权重

项目	C ₁	C ₂	C ₃	权重	项目	C ₁	C ₂	C ₃	权重		
B ₁	C ₁	1	3	1/3	0.272 1	B ₆	C ₁	1	1/3	2	0.2519
	C ₂	1/3	1	1/4	0.119 9		C ₂	3	1	3	0.588 9
	C ₃	3	4	1	0.608 0		C ₃	1/2	1/3	1	0.159 3
B ₂	C ₁	1	1	1/2	0.240 9	B ₇	C ₁	1	1/4	2	0.201 4
	C ₂	1	1	1/3	0.210 6		C ₂	4	1	5	0.680 6
	C ₃	2	3	1	0.548 5		C ₃	1/2	1/5	1	0.117 9
B ₃	C ₁	1	3	2	0.524 7	B ₈	C ₁	1	1/4	1/3	0.126 3
	C ₂	1/3	1	1/3	0.141 6		C ₂	4	1	1	0.457 7
	C ₃	1/2	3	1	0.333 8		C ₃	3	1	1	0.416 0
B ₄	C ₁	1	1/3	1/5	0.106 2	B ₉	C ₁	1	1/3	5	0.282 8
	C ₂	3	1	1/3	0.260 5		C ₂	3	1	7	0.643 4
	C ₃	5	3	1	0.633 3		C ₃	1/5	1/7	1	0.073 8
B ₅	C ₁	1	1/2	1/4	0.137 3						
	C ₂	2	1	1/3	0.239 5						
	C ₃	4	3	1	0.623 2						

3.4.3 各方案层对总目标层的层次总排序 利用层次单排序的结果,计算得到各方案层(C₁—C₃)对于目标的排序权重(表 7)。结果表明,水源涵养综合能力最

强的林型是处于演替顶极阶段的栲树林,权重值为 0.436 0;其次为木荷林,权重值为 0.363 2;最弱的为处于演替初期阶段的常绿阔叶林灌丛,权重值为 0.200 9。

表 7 天童常绿阔叶林不同演替阶段林型水源涵养功能综合评价结果

准则层 (权值)	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	总排序 (权值)	
方案层											
单排序	C ₁	0.2721	0.240 9	0.524 7	0.106 2	0.137 3	0.251 9	0.201 4	0.126 3	0.282 8	0.200 9
权值	C ₂	0.119 9	0.210 6	0.141 6	0.260 5	0.239 5	0.588 9	0.680 6	0.457 7	0.643 4	0.363 2
	C ₃	0.608 0	0.548 5	0.333 8	0.633 3	0.623 2	0.159 3	0.117 9	0.416 0	0.073 8	0.436 0

4 结论

(1) 从林冠层、枯落物层和土壤层 3 个生态层面上,对天童常绿阔叶林不同演替阶段各生态层涵养水源功能进行了研究。

林冠截留能力大小依次为木荷林、常绿阔叶林灌丛、栲树林;不同植被类型枯落物层最大持水量为 9.4~13.4 t/hm²,其中,常绿阔叶林灌丛最大,栲树林最小;不同演替阶段土壤层蓄水量月平均值为 81~93 mm,蓄水能力最大的为栲树林,最小的为木荷林。

(2) 运用层次分析法确定水源涵养评价指标的权重值,运用综合指数法来评价不同演替阶段林型的水源涵养功能,定量反映了不同评价对象的优劣情况,结果直观明确。

从综合水源涵养功能来看,随演替的进程,处于演替顶极阶段的栲树林具有最强的水源涵养能力,表明其在增加土壤水分入渗、减少地表径流等水源涵养方面优于其它两种演替阶段。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Biao, Li Wenhua, Xie Gaodi, et al. Water conservation of forest ecosystem in Beijing and its value[J]. Ecological Economics, 2010, 69(7):1416-1426.
- [2] Crockford R H, Richardson D P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: Effect of forest type, ground cover and climate[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(16/17):2903-2920.
- [3] 徐洪亮,满秀玲,盛后财. 大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):92-96.
- [4] 秦嘉海,魏淑莲,金自学,等. 不同针叶林对祁连山森林灰褐土理化性质和水分涵养功能的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(5):84-87.
- [5] 贺淑霞,李叙勇,莫菲,等. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能[J]. 生态学报,2011,31(12):3285-3295.
- [6] 莫菲,李叙勇,贺淑霞,等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价[J]. 生态学报,2011,31(17):5009-5016.
- [7] 黄进,张金池,陶宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵

- 养功能研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):182-186.
- [8] 陈引珍,程金花,张洪江,等. 缙云山几种林分水源涵养和保土功能评价[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2):66-70.
- [9] 宋永昌,陈小勇,王希华. 中国常绿阔叶林研究的回顾与展望[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2005(1):1-8.
- [10] 徐小牛,邓文鑫,张赧齐,等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林不同林龄阶段土壤特性及其水源涵养功能的变化[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1):177-181.
- [11] Shen Huitao, Wang Xiaoxue, Jiang Yue, et al. Spatial variations of throughfall through secondary succession of evergreen broad-leaved forests in eastern China[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(11):1739-1747.
- [12] 宋永昌,王祥荣. 浙江天童国家森林公园的植被和区系[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1995.
- [13] 刘少冲,段文标,赵雨森. 莲花湖库区几种主要林型枯落物层的持水性能[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):81-86.
- [14] 张伟,杨新兵,张汝松,等. 冀北山地不同林分枯落物及土壤的水源涵养功能评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3):208-212.
- [15] Iida S, Tanaka T, Sugita M. Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak[J]. Journal of Hydrology, 2005, 315(1/4):154-166.
- [16] Ziegler A D, Giambelluca T W, Nullet M A, et al. Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in Northern Thailand: Comparison of mobile and stationary methods[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(2):373-384.
- [17] Neary D G, Ice G G, Jackson C R. Linkages between forest soils and water quality and quantity[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(10):2269-2281.
- [18] 沈会涛,由文辉,蒋跃. 天童常绿阔叶林不同演替阶段枯落物和土壤水文特征[J]. 华东师范大学学报:自然科学版, 2010(6):35-44.
- [19] Jost G, Heuvelink G, Papritz A. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatio-temporal kriging[J]. Geoderma, 2005, 128(3/4):258-273.
- [20] Buttler J M, McDonald D J. Soil macroporosity and infiltration characteristics of a forest podzol[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(5):831-848.

(上接第 169 页)

- [5] 陈安安,孙林,胡北,等. 近 10 a 黄土高原地区 NDVI 变化及其对水热因子响应分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5):215-219.
- [6] 杜加强,舒俭民,张林波. 1982—2006 年黄南州 NDVI 年际变化及其与气候的关系[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4):229-234.
- [7] 李廷勇,刘建宇,王建力. 全球气候变化背景下的区域气候变化:以重庆市近代以来气候变化为例[J]. 重庆师范学院学报:自然科学版, 2002, 19(2):64-69.
- [8] 刘海隆,杨晓光,王玲. 重庆三峡库区农业气候变化的研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4):144-147.
- [9] 王玲,塔依尔. 气候变化对重庆岩溶地区水文水资源的
影响[J]. 石河子大学学报:自然科学版, 2006, 24(5):599-604.
- [10] 李来胜. 重庆麦类作物主要生态气候灾害类型分析[J]. 西南农业大学学报, 1994, 16(5):453-455.
- [11] 王玲,刘海隆. 重庆岩溶地区气候变化对植被的影响[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(1):6-11.
- [12] 张军以,苏维词. 三峡库区农业发展现状及农田 CH₄ 和 N₂O 排放与减排对策[J]. 土壤通报, 2012, 43(2):501-505.
- [13] 张翀,任志远,袁鑫. 西北地区 NDVI 对水热条件年内变化的响应及其空间特征[J]. 资源科学, 2011, 33(12):2356-2361.