

马尾松低效人工林不同改造模式下降雨及产流特征

张海涛¹, 宫渊波¹, 付万权², 陈耀嘉¹, 徐云岩¹, 崔亚潇¹

(1. 四川农业大学 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川 成都 611130; 2. 四川省泸州市水务局水利管理站, 四川 泸州 646000)

摘要: 为探究马尾松 *Pinus massoniana* 低效人工林不同模式改造初期降雨及地表径流特征, 以四川省高县来复镇 5 个相邻径流小区内的马尾松低效人工林为研究对象, 采用林下补植樟树 *Cinnamomum camphora* (II 号小区)、马尾松皆伐后更新樟树 (III 号小区和 IV 号小区)、马尾松皆伐后第 2 年更新樟树 (V 号小区) 3 种不同林下更新改造方式以及马尾松纯林为对照 (I 号小区), 分析降雨量、不同改造模式产流量以及它们之间的关系。结果表明: 研究区降雨主要集中于每年 6-9 月。在低效林改造初期 2.5 a 内, 24 h 累计最大降雨量为 93.6 mm, 最小产流降雨量 6.9 mm; 最大产流量 3.002 0 m³, 最小产流量 0.006 4 m³。5 个径流小区在小雨条件下几乎无地表径流产生, 平均单次产流量大小排序为 III 号小区 > IV 号小区 > V 号小区 > II 号小区 > I 号小区, 与受人为干扰强度一致; 2014 年下半年径流系数比 2012 年下半年分别下降 29.36%, 26.30%, 47.37%, 41.54% 和 43.97%。对降雨量与径流量进行相关性分析表明, 其相关系数均大于 0.905。3 个皆伐径流小区在改造初期对地表径流的减滞效果更为明显。表 7 参 13

关键词: 森林水文学; 低效人工林改造; 降雨; 产流量; 径流系数

中图分类号: S715 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)01-0029-06

Rainfall and runoff in low efficiency *Pinus massoniana* forests with different silvicultural prescriptions

ZHANG Haitao¹, GONG Yuanbo¹, FU Wanquan², CHEN Yaojia¹, XU Yunyan¹, CUI Yaxiao¹

(1. Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China; 2. Water Management Station, Luzhou Water Conservancy, Luzhou 646000, Sichuan, China)

Abstract: To determine characteristics of rainfall and runoff with differing initial silvicultural prescriptions for a low efficiency *Pinus massoniana* forest, five adjacent runoff areas of Gaoxian County were studied. Five silvicultural prescriptions: *Cinnamomum camphora* planted under a *P. massoniana* forest (II), *C. camphora* planted after clear cutting *P. massoniana* (III, IV), *C. camphora* planted the second year after clear cutting *P. massoniana* (V), and a *P. massoniana* forest as a control (I) were used to analyze rainfall, different modes of flow, and the relationship between them using a correlation analysis. Results showed that total rainfall each year was mostly concentrated from June to September. In a 24 h period, the maximum rainfall was 93.6 mm, and the minimum runoff rainfall was 6.9 mm. The maximum runoff volume was 3.002 0 m³, and the minimum was 0.006 4 m³. For the five runoff plots, with light rain almost no surface runoff was found with the average single runoff ranked in the order of III > IV > V > II > I. This was consistent with the human disturbance intensity. Compared to the second half of 2012, the runoff coefficient in the second half of 2014 for runoff areas I - V decreased 29.36%, 26.30%, 47.37%, 41.54%, 43.97%. The correlation analysis for rainfall and runoff showed that the correlation coefficient between them were more than 0.905. Thus, the result of the three clear cut

收稿日期: 2017-01-06; 修回日期: 2017-03-31

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划重大项目(2011BAC09B05); 四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目

作者简介: 张海涛, 博士研究生, 从事林业生态工程研究。E-mail: vasilievski@163.com。通信作者: 宫渊波, 教授, 博士生导师, 从事水土保持和生态恢复研究。E-mail: gyb@sicau.edu.cn

runoff areas on surface runoff was better at the initial stage of reconstruction. [Ch, 7 tab. 13 ref.]

Key words: forest hydrology; silvicultural on inefficient forest; rainfall; runoff; runoff coefficient

森林是陆地生态系统的主体,起着调节大气、涵养水源、为人类提供生产资料等作用。截至2009年,中国人工林栽植面积已达5 300万 hm^2 ,约占全世界人工林面积的40%^[1],但受人为因素或诱导自然因素所致^[2],中国人工林普遍存在地力衰退、生物多样性差、水土流失严重等问题,对林地生态安全造成了一定的隐患^[3],因此,恢复和重建退化人工林生态系统势在必行。健康的森林生态系统功能,能够提高林地土壤肥力以及水土保持能力^[4]。植被的存在能有效减少地表径流量,同时不同林地类型的减滞能力也不尽相同^[5-6]。因此,降雨与径流及植被、土壤等因子之间的关系是目前研究的热点及难点问题^[7-8]。近年来国内针对南方红壤区^[9]和黄土高原^[10]等区域坡地不同经营、利用方式下水土流失研究较多,针对川南地区的研究则鲜见报道。马尾松 *Pinus massoniana* 是广泛分布于中国南方的先锋树种,它具有耐贫瘠、速生、适应性强、经济价值高等特点,然而受不合理经营方式及人为活动的影响,长江流域低山丘陵区马尾松人工林普遍生长较差,生物多样性低,生态功能不强,已成为中国南方森林面积最大的退化类型之一。笔者针对长江上游低山丘陵区存在的生态安全以及生态工程建设中遇到的科学技术等问题,在前期研究工作的基础上,以川南低山丘陵区马尾松低效人工林为示范区,引入珍贵乡土树种,改造马尾松低效人工林,提升森林生态及经济功能,减少水土流失。本研究根据设立于四川省宜宾市高县来复镇的5个人工径流小区,分析马尾松低效人工林改造初期自然降雨与产流特征的关系及随植被恢复的演变规律,以期对川南马尾松低效人工林改造及经营管理提供参考。

1 试验研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市高县来复镇毛颠坳(28°11'~28°47'N, 104°21'~104°48'E)。该地区地处四川盆地与云贵高原的过渡地带,宜宾市中南部,属乌蒙山余脉。地貌以平坝、丘陵、低山为主。土壤多为山地黄壤,间断分布有少量紫色土。全年平均日照时数为1 107.7 h,大于等于10℃以上年积温为6 523.1℃,年平均气温为18.0℃,1月平均气温为8.0℃,7月平均气温为27.0℃。年平均降水量为1 037.9 mm,年平均无霜期为346.2 d。

1.2 研究方法

2012年初在试验区选择坡度约22°,东西走向并栽植有马尾松纯林的坡地,建立5个相邻规格为20 m × 5 m的标准径流小区,各径流小区出口处均设有一个径流收集室。5个径流小区采用不同的改造更新方式,分别用Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ标识。Ⅰ号径流小区为马尾松低效人工林下植被自然生长恢复,Ⅱ号径流小区为马尾松低效人工林下空隙更新樟树 *Cinnamomum camphora*,Ⅲ和Ⅳ号径流小区为马尾松低效人工林皆伐后当年更新樟树,Ⅴ号径流小区为马尾松低效人工林皆伐后第2年更新樟树(由于有时会出现因为工期或者苗木原因不能当年更新造林的情况,因此,将Ⅴ号径流小区设计为皆伐后第2年更新樟树)。小区内樟树为当年生幼苗,株高约30 cm,按1.5 m × 1.5 m间距种植。2012年3月对Ⅲ,Ⅳ,Ⅴ号径流小区进行皆伐,随即在Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ号内更新樟树;Ⅴ号径流小区则自然恢复后于2013年3月更新樟树。试验开始前5个径流小区内地表灌草及凋落物均清理完毕。试验分为3个时段,分别为2012年7-12月、2013年1-12月、2014年1-12月。在每次自然降雨后收集降水、计算24 h降雨量,并量取径流桶内径流水深,换算成径流量。雨量级别根据气象学上对于降雨量的定义判定,即24 h降雨量小于10 mm为小雨,10.1~24.9 mm为中雨,25.0~49.9 mm为大雨,50.0~99.9 mm为暴雨。

1.3 数据处理

径流系数是地表径流量与降雨量的比值,表示有比例的降水变成了径流,它能够一定程度反映该区域植被和土壤的水源涵养能力以及水土流失状况。可利用公式 $r=R_n/P \times 10^{-3}A_n$ 计算径流系数。其中: r 为径流系数, R_n 为径流量(m^3), P 为降雨量(mm), A_n 为径流小区面积(m^2)^[11]。

利用Excel 2007和SPSS 19.0软件进行数据处理及统计学分析。

2 结果与分析

2.1 川南马尾松低效人工林改造初期降雨特征

试验期年平均降雨总量约 1 000 mm(表 1), 与当地多年平均降雨量数据基本吻合。试验区降雨明显呈现夏季多、冬季少的特点。2013 年和 2014 年全年多集中于每年 6-9 月, 分别占全年降雨总量的 73.23%和 69.50%; 1 月、2 月、11 月、12 月降雨极少, 分别占全年降雨总量的 3.72%和 6.19%。

表 1 马尾松低效人工林改造初期降雨量及分布特征

年份	各月份降雨量/mm												合计/ mm
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
2012							250.3	114.0	277.2	49.4	14.1	7.6	712.6
2013	3.2	8.1	23.0	85.9	92.1	130.8	279.4	231.7	137.8	44.4	12.7	15.6	1 064.7
2014	5.3	14.5	88.2	17.7	45.9	137.9	104.2	236.3	168.9	74.6	20.8	17.0	931.3

2012-2014 年 24 h 最小降雨量分别为 1.8, 1.5 和 1.2 mm(表 2), 最大降雨量分别为 83.6, 88.7 和 93.8 mm。2012 年 7-12 月期间共出现 5 次暴雨天气, 24 h 最大降雨量为 83.6 mm, 累计降雨 341.6 mm; 大雨仅出现 2 次。2013 年累计降雨 73 次, 其中小雨 47 次, 中雨 16 次, 大雨 6 次, 暴雨 4 次。2014 年累计降雨 78 次, 其中小雨 47 次, 与 2013 年相同, 降雨量减少 28.8 mm; 暴雨次数比 2013 年少 2 次, 降雨量减少 133.4 mm。纵观整个试验期, 降雨次数以小雨和中雨居多, 占 85.56%, 但雨量仅占 49.05%; 大雨和暴雨次数占 14.44%, 降雨量占比却达到 50.95%。表明在 1 年中大到暴雨的次数比例虽然很低, 但降雨量大且集中, 是导致夏季地表产流较多的主要原因。

表 2 马尾松低效人工林改造初期雨量特征

年份	总降雨量/mm	总降雨次数/次	小雨			中雨			最大降雨量/mm	最小降雨量/mm
			雨量/mm	占总降雨量比例/%	次数/次	占总降雨次数比例/%	雨量/mm	占总降雨量比例/%		
2012 下半年	712.6	36	97.4	13.67	17	47.22	199.7	28.02	12	33.33
2013 年	1 064.7	73	238.2	22.37	47	64.38	275.0	25.83	16	21.92
2014 年	931.3	78	209.4	22.48	47	60.26	309.0	33.18	21	26.92
合计	2 708.6	187	545.0	20.12	111	59.36	783.7	28.93	49	26.20

年份	大雨			暴雨			最大降雨量/mm	最小降雨量/mm
	雨量/mm	占总降雨量比例/%	次数/次	雨量/mm	占总降雨量比例/%	次数/次		
2012 下半年	73.9	10.37	2	341.6	47.94	5	83.6	1.8
2013 年	240.7	22.61	6	310.8	29.19	4	88.7	1.5
2014 年	262.8	28.22	8	150.1	16.12	2	93.8	1.2
合计	577.4	21.32	16	802.5	29.63	11	266.1	4.5

2.2 川南马尾松低效人工林改造初期降雨与产流关系分析

从表 3 可以看出: 并非每次降雨都能引起地表径流。一般情况下, 在达到最小产流降雨量后, 才能产生地表径流。2012 年下半年降雨 36 次, 产流 20 次, 产流次数占降雨次数比例为 55.60%; 2013 年下半年与 2014 年下半年降雨次数相同, 均为 42 次, 产流次数占降雨次数比例分别为 33.33%和 45.24%, 可见下半年产流降雨比例在不同年份间有较大变化。从全年看, 2013 年和 2014 年分别降雨 73 次和 78 次, 产流 25 次和 29 次, 产流次数占降雨次数比例为 34.25%和 37.18%, 比较接近。对比表 2 和表 3 可以看出, 2013 年和 2014 年小雨都是 47 次, 仅有 1 次产流, 可见 24 h 降雨量小于 10 mm 时一般不会产生地表径流。而 24 h 降雨量达到中雨时, 产流几率达到了 85.00%以上, 下半年甚至可能高于 90.00%; 在大雨及暴雨状态下, 每次均有产流。

同时可以看出,观测时期内,24 h 最小产流降雨量为 6.9~14.0 mm。造成这种差异的原因可能为该次小雨前有降雨发生,地表凋落物及土壤持水能力趋近于饱和,小雨过后就能形成蓄满产流;若前期降雨较少,凋落物和表层土壤含水率低,在中雨条件雨水填洼、入渗等较多,降雨过后土壤仍未达到饱和,因此,无地表径流产生。当 24 h 降雨量达到大雨或暴雨条件时,5 个径流小区皆有地表径流产生。

表 3 马尾松低效人工林改造初期降雨及产流次数

Table 3 Times of rainfall and runoff under the early of transformation on low efficiency *Pinus massoniana* forests

年份	降雨次数/次	产流次数/次	产流降雨比 例/%	降雨量/mm	最小产流降 雨量	小雨及产流 次数/次	中雨及产流 次数/次	大到暴雨及 产流次数/次
2012 下半年	36	20	55.56	712.6	6.9	2(17)	11(12)	7(7)
2013 下半年	42	14	33.33	721.6	14.0	0(26)	7(8)	7(7)
2014 下半年	42	19	45.24	621.8	8.3	1(22)	11(13)	7(7)
2013 年	73	25	34.25	1 064.7	12.8	0(47)	15(16)	10(10)
2014 年	78	29	37.18	931.3	8.3	1(47)	18(21)	10(10)

说明:表中括号内数字表示降雨次数,括号外表示产流次数。

2.3 川南马尾松低效人工林不同模式改造初期产流特征

由表 4 看出: I ~ V 号小区最大径流量均出现在下半年,2013 年最大径流量比 2012 年分别增加 18.21%, 35.62%, 15.42%, 13.66% 和 33.13%。鉴于 2013 年和 2012 年下半年降雨量仅相差 9 mm,说明改造初期地表径流量差异主要由植被恢复状况及地被物覆盖变化等因素导致。其原因在于进行不同模式低效人工林改造后,植被生长、更替和人为干扰直接影响林冠层和地表层,影响了雨水拦截、入渗能力,更多的降雨转变为地表径流。说明在低效人工林改造开始阶段,林地水土保持功能体现并不明显,水土流失现象反而有可能加剧,因此,该时期应是水土流失重点监测、保护期。该结果与廖承彬等^[12]研究结论相似。5 个径流小区 2014 年最大量与 2013 年同期相比分别降低 32.25%, 26.49%, 22.26%, 25.08% 和 25.22%; 其中 III, IV, V 号小区最大径流量低于 2012 年同期水平,呈波状变化。造成这一现象的原因主要有:一是 2014 年 7-12 月降雨量比 2013 年同期减少近 100 mm,更少降雨导致更少径流;二是改造后随着人为扰动减少,乔-灌-草体系逐渐恢复,凋落物增加,凋落物和土壤持水能力进一步增强。各径流小区间最小产流量差异不大,当降雨量为大雨到暴雨时,前期短时间内降水经过林冠截留、凋落物截留、地表填洼等阶段后,易形成超渗产流,这时降雨强度成为影响产流量大小的主导因子。

表 4 马尾松低效人工林不同模式改造初期产流量特征

Table 4 Characteristics of runoff under different transformation patterns of low efficiency *Pinus massoniana* forests

径流小区	产流量/m ³									
	2012 年下 半年最小	2012 年下 半年最大	2013 年下 半年最小	2013 年下 半年最大	2013 年 最小	2013 年 最大	2014 年下 半年最小	2014 年下 半年最大	2014 年 最小	2014 年 最大
I	0.010	2.202	0.098	2.603	0.018	2.603	0.022	2.185	0.008	2.185
II	0.008	2.125	0.102	2.882	0.004	2.882	0.003	2.200	0.003	2.200
III	0.012	2.601	0.086	3.002	0.006	3.002	0.006	2.006	0.006	2.006
IV	0.005	2.547	0.075	2.895	0.012	2.895	0.005	2.102	0.005	2.102
V	0.010	2.092	0.070	2.785	0.012	2.785	0.018	1.956	0.018	1.956

表 5 显示了 2.5 a 内 5 个径流小区累计产流量状况。由于 III 号和 IV 号径流小区改造模式相同,其累计产流量十分接近,分别为 36.339 m³ 和 36.369 m³; 而 I 号由于郁闭度较高,林冠截留作用好于其他径流小区,且受人为扰动最小,因此,累计产流量最低,为 31.315 m³, 试验期内变化幅度最小。而平均单次产流量大小排序为 III > IV > V > II > I, 排序规律与径流小区所受扰动强度一致。

2.4 川南马尾松低效人工林不同模式改造初期径流系数分析

对 2012-2014 年下半年各径流小区径流系数进行比较。由表 6 可看出:除 II 号径流小区呈现先增大后减小的变化以外,其他径流小区径流系数均呈逐年减小趋势。与 2012 年下半年相比,各径流小区 2014 年下半年径流系数分别减少 29.36%, 26.30%, 47.37%, 41.54% 和 43.97%。2012 年,5 个径流小

区径流系数大小排序为 III > IV > V > II > I，2014 年则变化为 IV > II > I > III > V。2014 年与 2013 年相比，5 个径流小区径流系数都有明显下降，均在 25% 以上，特别是 III 和 V 小区，径流系数下降更为明显，达 36%，超出 I 号小区 10%。随着时间推移，效果会更加明显。从径流系数来看，I 号径流小区虽然在改造初期郁闭度最高，林冠截留能力最强，但由于林下缺乏凋落物，导致对于林内降雨的拦滞能力较弱；其他径流小区由于拥有更好的光照、水热条件，植被生长较快，生物多样性更为丰富，因此，随着改造进行 I 号小区的径流系数可能会逐渐高于其他径流小区。而 V 号径流小区由于在 2012 年未更新樟树，有 1 a 自然更新时间，土体扰动少于 III 和 IV 号径流小区，因此，其径流系数在 3 个皆伐小区最小。

2.5 川南马尾松低效人工林不同模式改造初期降雨量与径流量相关性分析

利用 SPSS 19.0 软件进行降雨量与各径流小区径流量相关性分析。由表 7 可以看出：降雨量与径流量之间相关系数均大于 0.905，径流量大小随降雨量变化而变化。与刘芝芹等^[13]对 30 场降雨观测中得出的研究结论相吻合，说明降雨量是影响地表径流大小的重要因子。

3 结论

试验区年均降水量约为 1 000 mm，集中于 6-9 月，季节性分布不均。2013 年与 2014 年 6-9 月降雨量分别占全年降雨总量的 73.23% 和 69.50%；1, 2, 11, 12 月降雨量则仅占 3.72% 和 6.19%。

试验期内 24 h 最小降雨量为 1.2 mm，最小产流降雨量为 6.9 mm，最大降雨量为 93.8 mm。全年产流次数约占降雨次数的 30%~40%，雨量以中到暴雨为主，偶有小雨下产流和中雨下无产流状况发生。各径流小区最大径流量均呈现先增大后减小的情况，说明在低效人工林改造初期有水土流失加剧现象，是水土流失监测、治理的关键期。

径流系数反映了降雨转变为地表径流的比例。改造后第 1 年下半年 I 号和 II 号径流小区由于较好的植被覆盖以及相对较少的人为干扰，径流系数低于 III, IV, V 号径流小区；但 2013 年和 2014 年 I 号和 II 号径流小区径流系数降低均超过 30%，而 III, IV, V 号径流小区降低 50% 左右，基本与 I 号和 II 号径流小区持平或更低。表明各径流场水土保持功能均在恢复中。2012 年与 2013 年 I 号径流小区径流系数均为最小，2014 年则逐渐接近甚至高于皆伐小区；III, IV 与 V 号径流小区在试验期内产流变化过程相似。目前来看，皆伐径流小区水源涵养功能恢复速度快于 I 号和 II 号径流小区，减滞径流效果更佳。

对降雨量和各径流小区径流量进行相关性分析发现，其相关系数均大于 0.905。因此，减少林内降雨以及增强林地水源涵养能力是减少坡面径流的关键。由于试验尚处于改造初期，时间较短，相信随着改造的深入以及林地生态系统的恢复，樟树等阔叶林的水源涵养能力会显著优于马尾松低效纯林。

表 5 马尾松低效人工林不同模式改造初期累计产流量特征

Table 5 Characteristics of cumulative runoff under different transformation patterns of low efficiency *Pinus massoniana* forests

径流小区	不同年份产流量/m ³			累计产流次数/次	累计产流量/m ³	平均单次产流量/m ³
	2012 年下半年	2013 年	2014 年			
I	10.077	13.166	8.072	69	31.315	0.453 8
II	10.165	14.355	8.562	72	33.082	0.459 5
III	13.341	15.068	7.930	72	36.339	0.504 7
IV	13.045	14.768	8.556	74	36.369	0.491 5
V	11.662	13.675	7.299	69	32.636	0.473 0

表 6 马尾松低效人工林不同模式改造初期径流系数

Table 6 Runoff coefficient under different transformation patterns of low efficiency *Pinus massoniana* forests

时间	I	II	III	IV	V
2012 年下半年 (r ₁)	0.139 3	0.140 7	0.184 1	0.180 3	0.161 7
2013 年下半年	0.136 9	0.148 4	0.152 4	0.150 6	0.142 2
2014 年下半年 (r ₂)	0.098 4	0.103 7	0.096 9	0.105 4	0.090 6
2013 年 (r ₃)	0.117 1	0.127 7	0.134 7	0.131 9	0.122 9
2014 年 (r ₄)	0.086 7	0.091 9	0.085 2	0.091 9	0.078 4
r ₁ /r ₂ %	29.36	26.30	47.37	41.54	43.97
r ₃ /r ₄ %	25.99	28.03	36.75	30.33	36.21

表 7 马尾松低效人工林改造初期降雨量与各径流小区径流量相关性分析

Table 7 Correlation coefficients of rainfall and runoff under different transformation patterns of low efficiency *Pinus massoniana* forests

年份	I	II	III	IV	V
2012	0.971**	0.971**	0.988**	0.988**	0.986**
2013	0.916**	0.909**	0.905**	0.913**	0.906**
2014	0.947**	0.957**	0.959**	0.960**	0.951**

说明：**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

4 参考文献

- [1] 侯淑艳. 北京市低山区低效人工林结构特征与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
HOU Shuyan. *Study on the Assessment and Structure Feature of Low Function Plantation in the Low Mountain of Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [2] 韩蕾. 新形势下低效林改造设计意义及基本要求[J]. 黑龙江科技信息, 2009(10): 119.
HAN Lei. Design significance and basic requirements of low function forest reconstruction under new situation [J]. *Heilongjiang Sci Technol Inf*, 2009(10): 119.
- [3] 冯大兰, 陈道静, 李彬, 等. 三峡库区万州区马尾松低效林改造对土壤养分的影响[J]. 贵州农业科学, 2012, **40**(4): 121 – 125.
FENG Dalan, CHEN Daojing, LI Bin, *et al.* Effect of different management pattern on soil nutrients of low efficient *Pinus massoniana* forest in Wanzhou District of the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Guizhou Agric Sci*, 2012, **40**(4): 121– 125.
- [4] KOBAYASHI S. Landscape rehabilitation of degraded tropical forest ecosystems: case of the CIFOR/Japan project in Indonesia and Peru [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **201**(1): 13 – 22.
- [5] 周国逸, 闫俊华, 申卫军, 等. 马占相思人工林和果园地表径流规律的对比研究[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(4): 451 – 458.
ZHOU Guoyi, YAN Junhua, SHEN Weijun, *et al.* Surface flow in an *Acacia mangium* plantation and an orchard in Heshan, Guangdong Province, China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **24**(4): 451 – 458.
- [6] 张喜, 薛建辉, 许效天, 等. 黔中喀斯特山地不同森林类型的地表径流及影响因素[J]. 热带亚热带植物学报, 2007, **15**(6): 527 – 537.
ZHANG Xi, XUE Jianhui, XU Xiaotian, *et al.* Forest surface runoff and its influence factors in Karst mountainous area in center of Guizhou Province, China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2007, **15**(6): 527 – 537.
- [7] 宫渊波, 陈林武, 张健, 等. 嘉陵江上游低山暴雨区植被恢复对小流域产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2011, **25**(1): 11 – 15.
GONG Yuanbo, CHEN Linwu, ZHANG Jian, *et al.* Effect of vegetation restoration on runoff and sedimentation in small river basins in the upper reaches of Jialing River [J]. *J Soil Water Conserv*, 2011, **25**(1): 11 – 15.
- [8] 刘芝芹, 王克勤. 人工植被坡面产流问题研究进展[J]. 西南林学院学报, 2004, **24**(2): 65 – 69.
LIU Zhiqin, WANG Keqin. Research advances on slope runoff generation by artificial vegetation [J]. *J Southwest For Coll*, 2004, **24**(2): 65 – 69.
- [9] 吕殿青, 刘小梅, 王辉, 等. 红壤坡面降雨侵蚀与水文过程研究[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2013, **36**(5): 81 – 85.
LÜ Dianqing, LIU Xiaomei, WANG Hui, *et al.* Research on rainfall erosion and hydrological processes of red soil land-slope [J]. *J Nat Sci Hunan Norm Univ*, 2013, **36**(5): 81 – 85.
- [10] 王占礼, 黄新会, 张振国, 等. 黄土裸坡降雨产流过程试验研究[J]. 水土保持通报, 2005, **25**(4): 1 – 4.
WANG Zhanli, HUANG Xinhui, ZHANG Zhenguo, *et al.* Experimental study of runoff processes on bare loess hillslope [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2005, **25**(4): 1 – 4.
- [11] 李元寿, 王根绪, 沈永平, 等. 长江源区不同植被覆盖下产流产沙效应初步研究[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(6): 869 – 875.
LI Yuanshou, WANG Genxu, SHEN Yongping, *et al.* Impacts of land coverage on runoff production and sediment yield in the headwaters of the Yangtze River, China [J]. *J Glaciol Geocryol*, 2005, **27**(6): 869 – 875.
- [12] 廖承彬, 魏天儒. 红壤坡地不同树种林下水土流失特征研究[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(2): 198 – 202.
LIAO Chengbin, WEI Tianru. Characteristics of soil and water loss on red soil slop land under forest with different tree species [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2013, **33**(2): 198 – 202.
- [13] 刘芝芹, 王克勤, 李艳梅, 等. 金沙江干热河谷坡面降雨产流特征的分析[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, **28**(2): 227 – 231.
LIU Zhiqin, WANG Keqin, LI Yanmei, *et al.* Analysis of characteristics of precipitation and runoff production on slop land in dry-hot valley of Jinshajiang River [J]. *J Shihezi Univ Nat Sci*, 2010, **28**(2): 227 – 231.