

次降雨对马尾松低效林改造初期坡面产流产沙的影响

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, 四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室, 成都 611130;

2. 泸州市水务局水利管理站, 四川 泸州 646000)

摘要: 森林更新或改造是林地极易发生水土流失的关键时期。通过对四川省宜宾市高县马尾松低效林不同改造模式的5个人工径流小区不同降雨量条件下产流产沙数据分析, 探索改造初期(3 a)降雨与产流、产沙特征的关系及随植被恢复的演变规律。结果表明: 2014年I~V号径流小区因不同降雨量条件下导致的产流总量较2012年同期分别降低-6.44%, -10.51%, 20.95%, 13.28%, 12.73%; 产沙总量降低58.4%, 56.38%, 77.72%, 78.16%, 79.68%。产流量与产沙量随降雨量增加呈指数增长趋势, 但产沙量在森林改造当年增长幅度更大。不同改造模式径流小区产沙量第2年和第3年显著低于第1年, 而第2年、第3年差异不显著, 不同改造模式与产流、产沙量无显著相关性, 改造模式不同并不是导致水土流失加剧的主要因素。改造时间与产流量、产沙量存在显著差异性。皆伐径流小区在改造初期恢复效果更佳, 但随着林木生长及森林环境的形成后不同改造模式与产流、产沙量的关系可能会出现差异。

关键词: 低效林; 改造模式; 次降雨; 产流量; 产沙量

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)03-0051-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.03.009

Effects of Single Rainfall on Slope Runoff and Sediment Yield of Low-efficiency *Pinus massoniana* Lamb. Forest in the Initial Stage of Reconstruction

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

(1. Soil and Water Conservation & Desertification Combating Key Laboratory, Sichuan Agricultural University, Chengdu, 611130; 2. Luzhou Water Conservancy Water Management Station, Luzhou Sichuan, 646000)

Abstract: Forest regeneration or transformation is a critical period for forest land to be prone to soil erosion. In this paper, through the analysis of single rainfall and runoff and sediment yield data of five artificial runoff plots in different transformation models of low-efficiency *Pinus massoniana* Lamb. forest in Yibin City, Sichuan Province, the relationship between rainfall, runoff and sediment characteristics was explored. The results showed that, with the vegetation evolution, the total runoff of I—V in 2014 decreased by -6.44%, -10.51%, 20.95%, 13.28%, and 12.73%, respectively, compared with that in the same period of 2012; the total sediment yield decreased by 58.4%, 56.38%, 77.72%, 78.16%, and 79.68%, respectively. The runoff and sediment yield increased exponentially with the increase of rainfall, but the amount of sediment yield increased more. The sediment yield of runoff plots in the second and third year was significantly lower than that in the first year, but the difference between the second and third year was not significant, and there was no significant correlation between the runoff and sediment yield. The different patterns were not the main factors leading to the aggravation of soil erosion. There were significant differences between the time of reconstruction and the runoff and sediment yield. The results showed that the restoration effect of the clear cutting plot was better at the early stage of the reconstruction, but with the growth of the forest and the formation of the forest environment, the relationship between the transformation model and the runoff and sediment yield might be different.

Keywords: low-efficiency forest; transformation model; single rainfall; runoff; sediment yield

收稿日期: 2016-12-11

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划重大项目“长江上游低山丘陵区生态综合整治技术与示范”(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

第一作者: 张海涛(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事林业生态工程方面研究。E-mail: vasilievski@163.com

通信作者: 宫渊波(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和生态恢复方面研究。E-mail: gyb@sicau.edu.cn

在自然状态下,地表径流多来源于降雨,因此径流量大小主要取决于降雨强度。相同雨量条件下,降雨强度越大,就越容易产生径流^[1];其次,地表植被覆盖状况对径流量大小也有一定影响^[2-3]。森林能对降雨进行再分配^[4],所以通过改善植被是防止水土流失的主要措施之一^[5-6]。杨春霞等^[7]对裸坡坡面、人工草地坡面和自然修复坡面的产流产沙特征研究发现,随着植被覆盖度的增加,产沙和径流的相关性在减少。张晶晶等^[8]对坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析得出,降雨量、雨强、植被盖度对径流量和产沙量有显著影响。申震州等^[9]对延安市燕沟流域不同下垫面小区的降雨量、径流量、产沙量、入渗率等数据进行分析,发现其随次降雨变化呈现规律性变化。艾宁等^[10]通过对陕北黄土高原吴起县退耕地 5 个不同植被类型径流小区降雨对径流产沙影响的分析,研究了退耕还林后初期不同植被类型的水土保持效益。

马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)是广泛种植于我国南方的一类先锋树种,它具有耐贫瘠、速生、适应性强、经济价值高等特点。然而受多种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,生物多样性丧失,生态功能低下,已成为我国南方森林面积最大的退化类型之一^[11]。针对长江上游低山丘陵区存在的人工林生态安全以及生态工程建设中遇到的科学技术等问题,以川南低山区马尾松低效林为示范区,对马尾松低效人工林进行改造,以达到提升水土保持功能的目的。森林更新改造初期由于人为干扰较大,是防止水土流失的关键时期。本文根据建立的 5 个人工径流小区 3 a 不同量级侵蚀性降雨产流产沙资料,分析马尾松低效人工林改造初期不同改造模式下自然降雨与产流、产沙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林改造及经营管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市高县来复镇,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,有少部分的紫色土。全年平均日照

1 107.7 h,积温 6 523.1 ℃,年平均气温 18 ℃,1 月平均气温 8 ℃,7 月平均气温 27 ℃。年平均降水量 1 037.9 mm,平均无霜期 346.2 d。该区马尾松人工林主要是上世纪 80 年代中期进行长防林建设时期营造,经过长期人为干扰及抚育间伐,林分密度分布不均,林下灌草植被主要以芒(*Miscanthus sinensis*)、芒萁(*Dicranopteris dichhotoma*)、梨叶悬钩子(*Rubus piriifolius*)和野桐(*Mallotus japonicus*)等为主。

1.2 研究方法

于 2012 年初在研究区选择坡度约 22°,东西走向的坡地,建立 5 个长 20 m、宽 5 m 的标准径流小区,每个径流小区出口处均设有一个径流及泥沙收集池。同时在林外空地设置雨量计,用于测量降雨量。5 个径流小区采用不同的林下更新方式,分别用 I、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、V 标识。I 号为马尾松低效林下植被自然恢复,Ⅱ号为马尾松低效林下更新香樟,Ⅲ、Ⅳ号为马尾松低效林皆伐后更新香樟,V 号为马尾松低效林皆伐后第 2 年同期更新香樟。小区内香樟为当年生幼苗,株高约 30 cm,按 1.5 m 间距种植。试验开始前各径流小区内地表灌草及枯落物均已进行清理,以保持各小区地表状况相对一致。Ⅲ、Ⅳ、V 号皆伐时间为 2012 年 3 月,V 号更新香樟时间为 2013 年 3 月。由于研究区水热条件优越,Ⅲ、Ⅳ、V 号更新造林后林地很快被灌草植被覆盖。I、Ⅱ号小区由于受马尾松林冠层影响,林下灌草植被自然恢复不均,盖度约为 80%。

以 24 h 为单位收集自然降水并计算降雨量,用次降雨表示;量取径流桶内径流水深,换算成径流量;将径流桶内泥沙过滤,烘干后称其重量,换算成单位面积产沙量。根据气象学对降雨量的定义进行分类,即 24 h 降雨量<10 mm 为小雨,10~24.9 mm 为中雨,25~49.9 mm 为大雨,50~99.9 mm 为暴雨。本研究以具有侵蚀性的中雨、大雨、暴雨为基础,根据不同植被恢复年限选取能代表各级别降雨特征、并且降雨量近似、日期接近的各 3 次次降雨(表 1),分析不同改造模式随植被恢复的产流产沙特征及演变规律。

数据处理及统计学分析采用 EXCEL 2007 和 SPSS 19.0 软件。

表 1 马尾松低效林改造初期次降雨

中雨		大雨		暴雨	
时间(年-月-日)	降雨量/mm	时间(年-月-日)	降雨量/mm	时间(年-月-日)	降雨量/mm
2012-07-28	20.8	2012-07-15	42.1	2012-09-01	83.6
2013-08-25	20.1	2013-08-29	39.2	2013-08-08	78.9
2014-08-11	21.2	2014-08-08	45.5	2014-09-18	93.8

2 结果与分析

2.1 马尾松低效林改造初期降雨及产流产沙特征

由表 2 可知,试验期内选取的 3 种类型共 9 次代表性降雨条件下 I~V 号径流小区的产流、产沙特征。9 次降雨累计降雨量达到 445.2 mm,平均单次降雨量 49.47 mm。中雨、大雨、暴雨累计降雨量分别为 62.1、126.8、256.3 mm,平均单次降雨量分别为 20.7、42.27、85.43

表 2 马尾松低效林改造初期次降雨及产流产沙特征

时间 (年-月-日)	降雨量/ mm	I		II		III		IV		V	
		产流量/ m ³	产沙量/ kg	产流量/ m ³	产沙量/ kg	产流量/ m ³	产沙量/ kg	产流量/ m ³	产沙量/ kg	产流量/ m ³	产沙量/ kg
2012-07-28	20.8	0.05	0.18	0.06	0.20	0.17	1.52	0.21	1.60	0.16	1.22
2013-08-25	20.1	0.20	0.65	0.22	0.15	0.20	0.10	0.16	0.11	0.19	0.20
2014-08-11	21.2	0.23	1.26	0.25	1.03	0.22	0.85	0.27	0.77	0.21	0.83
2012-07-15	42.1	0.70	10.21	0.76	12.62	1.00	25.60	0.93	22.38	0.95	23.60
2013-08-29	39.2	0.51	2.22	0.49	1.52	0.53	1.22	0.61	1.26	0.55	1.43
2014-08-08	45.5	0.72	3.82	0.81	4.06	0.75	3.03	0.83	3.26	0.71	2.99
2012-09-01	83.6	2.20	60.16	2.13	58.15	2.60	82.56	2.55	80.11	2.19	76.88
2013-08-08	78.9	1.90	18.12	2.00	20.26	1.90	15.66	1.96	16.01	1.82	16.82
2014-09-18	93.8	2.19	24.27	2.20	25.87	2.01	20.56	2.10	18.70	1.96	16.85
合计	445.2	8.70	120.89	8.92	123.86	9.38	151.10	9.62	144.20	8.74	140.82

由图 1 和图 2 可知,暴雨虽然占全年降雨总次数比极小,但其导致的产沙量则可占全年总产沙量的 80% 以上,原因在于坡面在强降雨条件下特别是地表经过扰动植被较少或破坏严重时更易由面蚀发展为细沟侵蚀,水流不断下切、侧蚀,使得地表径流中泥沙含量极大。由于 2012 年处于改造初期,土壤局部扰动且地表植被和枯落物破坏严重,次暴雨导致的各径流小区产沙量分别比植被得到一定恢复后的 2013 年和 2014 年高出 2.32、1.87、4.27、4.00、3.57 倍和 1.48、1.25、3.02、3.28、3.56 倍。进而证明在退化生态系统中尤其是暴雨易发生的南方地区,暴雨是导致地表泥沙流失的主要因素,也说明对退化生态系统进行植被恢复的重要性。

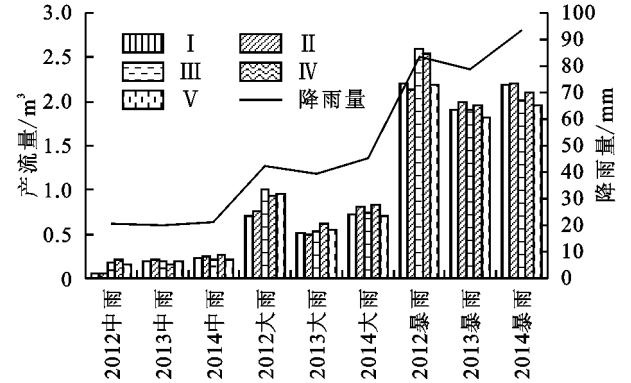


图 1 马尾松改造初期不同降雨条件下产流特征

对 9 次降雨和产流、产沙量之间的关系进行拟合,结果显示,降雨量与产流量之间拟合效果较好, R^2 达到 0.953 6,表明降雨量与产流量存在极显著相关关系。降雨量与产沙量拟合后 R^2 则为 0.464 7,

mm。各级别降雨条件下 5 个径流小区的产流和产沙总量分别为 2.8、10.85、31.71 m^3 和 10.67、119.22、550.98 kg。其中大雨和暴雨时降雨量分别是中雨时降雨量的 2.04、4.13 倍;产流量分别是 3.88、11.33 倍;产沙量分别是 11.17、51.64 倍。随着降雨量增加,产流量和产沙量也呈倍数增加,但产沙量增长速率远高于产流量。

拟合程度一般,主要原因在于暴雨状态下产沙量波动较大,且影响产沙量大小的因素较多。而产流量与产沙量之间同样存在一定的线性关系,表明二者间显著关联,与刘芝芹等^[12]研究结论相吻合,说明降雨量大小是影响坡面产流产沙量的重要因子。

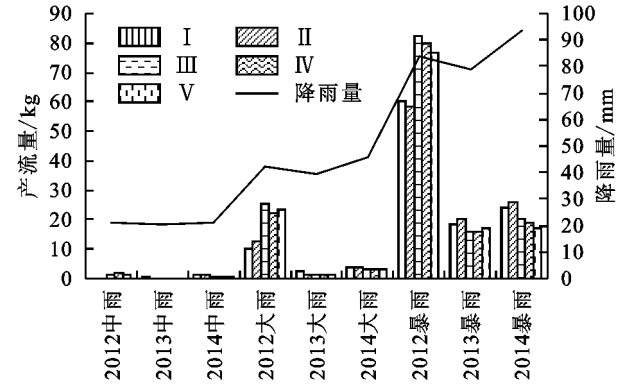


图 2 马尾松改造初期不同降雨条件下产沙特征

表 3 降雨和产流产沙之间关系		
拟合关系	拟合方程	R^2
降雨量与产流量	$Y=0.0297X_1-0.4619$	0.9536
降雨量与产沙量	$Y=0.551X_2-12.125$	0.4647
产流量与产沙量	$X_1=21.179X_2-6.2178$	0.6356

注:Y 为降雨量(mm); X_1 为产沙量(kg); X_2 为产流量(m^3)。

2.2 不同降雨等级下不同改造模式对产流产沙的影响

除降雨条件外,下垫面类型是另外一个影响坡面产流、产沙量的重要因子。由图 3 和图 4 可知,I~V 号径流小区 3 a 次降雨累计产流量分别为 8.7、8.92、9.38、9.62、8.74 m^3 ,大小排序为 IV>III>II>V>I;累计产沙总量分别为 120.89、123.86、151.1、144.2、140.82 kg,大小排序为 III>IV>V>II>I。不同改造模式下产

流与产沙总量大小排序规律近似,均表现出 2 个皆伐更新模式(Ⅲ号、Ⅳ号)高于皆伐后第 2 年更新模式(Ⅴ号),而未改造模式Ⅰ号和林下补植阔叶树模式Ⅱ号最低。其原因可能是皆伐更新模式对地表植被和土壤破坏最大,导致第 1 年产流产沙量剧增,因此次降雨的产流、产沙总量也为最高;Ⅴ号径流小区第 1 年经过砍伐及地表枯落物清理,但未扰动土壤,虽然第 2 年进行了造林,但地表已被灌草覆盖,造林仅是对极小局部进行了扰动,未对地表植被及土壤产生严重破坏所致,因此少于Ⅲ、Ⅳ号。Ⅰ号和Ⅱ号由于未进行更新改造或进行了林下补植,地表破坏程度相对较小,加之有林冠层拦截部分降雨,在各级次降雨的侵蚀下土壤流失总量最小。

对产流、产沙量汇总分析,随着植被的恢复,各雨量级次降雨产流产沙除中雨条件下产流量无明显规律外,均呈现出产流量和产沙量年限增加而降低的规律。其中产沙量的降低在第 2 年就表现出显著的变化(虽然 2013 年有次降雨总量较小的原因,但不影响其规律性)。其中 2014 年Ⅰ~Ⅴ号径流小区各雨量级次降雨产流量与 2012 年相比,Ⅰ和Ⅱ号分别增加 6.44%和 10.51%,Ⅴ、Ⅳ、Ⅲ号分别降低 20.95%,13.28%,12.73%;Ⅰ~Ⅴ号小区 2014 年产沙量比 2012 年分别降低 58.4%,56.38%,77.72%,78.16%,79.68%。说明不同改造模式并不是导致水土流失加剧的主要因素,在进行林分改造时严重扰动土壤并去除地表植被和枯落物才是导致水土流失的主要原因,如造林时采用全垦和炼山等方式。在四川省南部地区由于林地水热条件优越,造林或林地清理后地表能迅速被灌草植被覆盖;而未砍伐的林地尽管也进行了阔叶树补植,但林下植被受林冠层影响恢复差,降低了其保

水固土的能力。因此在进行低效人工林改造或森林更新时,不管采用哪种模式,只要尽可能减少对土壤的扰动,保护灌草植被和地表枯落物就能有效减少水土流失。

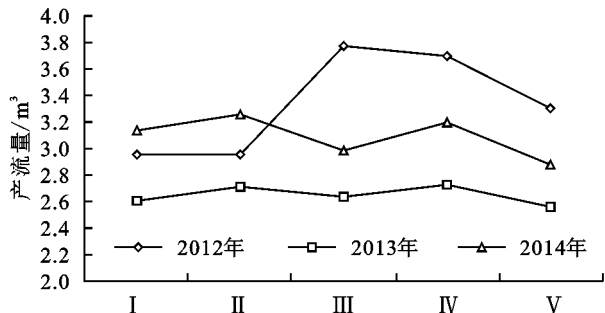


图 3 不同改造模式次降雨产流特征

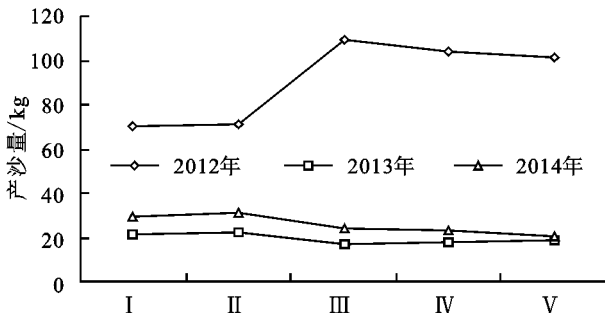


图 4 不同改造模式次降雨产沙特征

对不同改造模式下次降雨的产流量、产沙量进行差异性分析,结果表明, p 值均大于 0.05(表 4),表明Ⅰ~Ⅴ号径流小区间产流量和产沙量差异均不显著。低效林经历改造后会有一个漫长的生态恢复过程,由于试验时间较短,所以造成差异不显著;但根据试验结果分析推测,3 个皆伐径流小区在减少径流和泥沙含量方面变化较Ⅰ、Ⅱ号径流小区幅度更大,随着时间推移,其差异性可能会逐渐显著。

表 4 不同改造模式下产流产沙量方差 p 值

径流 小区	Ⅰ		Ⅱ		Ⅲ		Ⅳ		Ⅴ	
	产流量	产沙量	产流量	产沙量	产流量	产沙量	产流量	产沙量	产流量	产沙量
Ⅰ	—	—	0.953	0.976	0.856	0.761	0.806	0.815	0.991	0.841
Ⅱ	—	—	—	—	0.902	0.784	0.852	0.838	0.962	0.864
Ⅲ	—	—	—	—	—	—	0.949	0.945	0.864	0.918
Ⅳ	—	—	—	—	—	—	—	—	0.814	0.973

2.3 不同降雨等级下随植被恢复年限对产流产沙的影响

由表 2 可知,在马尾松低效林改造初初期,5 个径流小区各雨量级次降雨条件下的产沙量都非常高,尤其是大雨和暴雨条件下更为明显。2012 年、2013 年、2014 年 5 个径流小区在次降雨下产流总量分别为 16.66,13.24,15.46 m^3 ,产沙总量分别为 456.99,95.73,128.15 kg。2013 年和 2014 年产流量和产沙量分别是 2012 年的 0.79,0.93 倍和 0.21,0.28 倍。数据分析表明,随着植被恢复年限增加,产沙量显著

降低,第 2 年与第 3 年显著低于第 1 年,而第 2 年、第 3 年差异不显著(表 5)。其中 2013 年低于 2014 年是因为其次降雨量较小,地表径流和产沙量均较低。可以看出虽然降雨量增加产流量和产沙量也都增加,但降雨量与产流量相关性明显,而与产沙量之间的相关性不明显,这是因为如果地表植被状况相对稳定,产流量主要受降雨量影响,但产沙量除受降雨量大小影响外,与径流小区内的植被组成、盖度、土壤物理性质、土壤水分状况等因子密切相关。随着地表植被覆盖度的增加,产沙量和降雨量、径流量相关性在减少。

本试验也证明,在低效林改造初期,由于土壤和地表植被破坏较大,产流量和产沙量也较大,第 2 年由于地表迅速被灌草植被覆盖,是导致产沙量急剧下降的原因,第 3 年更新林地仍属幼林,植被也以灌草为主,产沙量与第 2 年差异并不明显。但从改造模式看,I、II 号径流小区高于 III、IV、V 号小区。表明在更新初期,灌草植被能有效减少林地土壤侵蚀。但随着林木的生长达到郁闭成林后,这种差异是否存在需进一步研究。

对不同年限条件下径流小区产流、产沙量进行统计学分析,结果表明,2012 年产流量与 2013 年产流量差异极显著,与 2014 年产流量差异不显著;2013 年与 2014 年产流量差异极显著。2012 年产沙量与 2013 年、2014 年产沙量差异极显著,2013 年产沙量与 2014 年产沙量差异不显著。

表 5 不同年限条件下产流产沙量方差 p 值

年份	2012 年		2013 年		2014 年	
	产流量	产沙量	产流量	产沙量	产流量	产沙量
2012 年	—	—	0.01	0.000	0.151	0.000
2013 年	—	—	—	—	0.015	0.385

3 结 论

(1)降雨提供了坡面侵蚀的源动力,是地表径流的主要来源。试验结果显示,降雨量与产流量之间线性关系拟合程度较好($R^2=0.953\ 6$);与产沙量之间拟合程度一般($R^2=0.464\ 7$)。表明降雨量是影响坡面径流的重要因子,而产沙量大小则是由多种因素共同决定。对产流量与产沙量进行拟合($R^2=0.635\ 6$),结果表明,二者存在较密切关系。产流量与产沙量随降雨量增加呈指数增长趋势,但产沙量在土壤扰动或地表植被及枯落物破坏严重的情况下增长幅度更大。因此在夏季大雨、暴雨易发生地区短时强降雨是导致坡地大量水土流失的重要因素,同时也是山洪、泥石流等地质灾害发生的主要诱因。

(2)改造模式不同并不是导致水土流失加剧的主要因素,在进行林分改造时严重扰动土壤并去除地表植被和枯落物才是导致水土流失的主要原因。试验数据分析表明,随着植被恢复年限增加,不同植被恢复模式产沙量显著降低,第 2 年和第 3 年显著低于第 1 年;而第 2 年、第 3 年差异不显著,不同改造模式与产流、产沙量无显著相关性。随着植被恢复,由于 I、II 号径流小区因林冠层的因素影响了林下植被的生长,其产沙量高于 III、IV、V 号,表明在进行森林更新初期,灌草植被能有效减少林地土壤侵蚀,并且随着林木的生长这种差距可能有增加的趋势。但阔叶林郁闭成林后,这种差异是否存在需进一步研究。

(3)以时空演变为研究对象,5 个径流小区产流量、产沙量变化趋势均为随时间推移先减少后增加,但整体仍呈下降趋势。2012 年产流量与 2013 年产流量存在极显著差异关系,与 2014 年产流量差异不显著;2013 年与 2014 年产流量差异极显著。2012 年产沙量与 2013 年、2014 年产沙量极显著差异,2013 年产沙量与 2014 年产沙量差异不显著。低效林改造初始阶段受人工扰动较多影响,坡面产沙量普遍较高,因此低效林改造初期是水土流失监测与治理的关键阶段。

(4)水土流失是一个极其复杂的过程,其影响因子涉及降雨、植被、坡度、土壤类型等多方面。单一考虑其中任意因子都不能准确预测坡面产流、产沙量。本研究因尚处于马尾松低效林改造初期,时间周期较短,随着林木生长及林地生态系统的逐步恢复,改造效果可能会进一步体现。而经历长时间低效林改造后对土壤物理性质以及养分的影响,则需进一步探究。

参考文献:

[1] 据彤军,刘普灵,徐学选,等.不同次降雨条件对黄土区主要地类水沙动态过程的影响及其机理研究[J].泥沙研究,2007(4):65-71.

[2] 梁娟姝.南方红壤区不同植被措施坡面的水土流失特征[J].水土保持研究,2015,22(4):95-99.

[3] 黄志刚,曹云,欧阳志云,等.南方红壤丘陵区杜仲人工林产流产沙与降雨特征关系[J].生态学杂志,2008,27(3):311-316.

[4] 余新晓.森林生态水文研究进展与发展趋势[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(3):391-400.

[5] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.

[6] 郭明春.六盘山叠叠沟小流域森林植被坡面水文影响的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2005.

[7] 杨春霞,肖培青,甄斌,等.野外不同被覆坡面产流产沙特征[J].水土保持学报,2012,26(4):28-31,36.

[8] 张晶晶,王力.坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析[J].水土保持通报,2011,31(2):159-162.

[9] 申震洲,刘普灵.不同下垫面径流小区土壤水蚀特征试验研究[J].水土保持通报,2006,26(3):6-9.

[10] 艾宁,魏天兴,朱清科.陕北黄土高原不同植被类型下降雨对坡面径流侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2013,27(2):26-30,35.

[11] 胡庭兴,李贤伟,张健,等.低效林恢复与重建[M].北京:华文出版社,2002,291-292.

[12] 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.