

DOI: 10.5846/stxb201312102927

柳思勉, 田大伦, 项文化, 闫文德, 刘云国, 胡新将. 间伐强度对人工杉木林地表径流的影响研究. 生态学报, 2015, 35(17): - .

Liu S M, Tian D L, Xiang W H, Yan W D, Liu Y G, Hu X J. The impacts of thinning intensity on overland flow in a Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

间伐强度对人工杉木林地表径流的影响研究

柳思勉^{1,2}, 田大伦³, 项文化³, 闫文德³, 刘云国^{1,2,*}, 胡新将^{1,2}

1 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082

2 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082

3 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

摘要:在湖南会同生态站的人工杉木林集水区, 对比研究了不同间伐强度对地表径流影响。结果表明: 降雨量大小是形成地表径流的主要原因, 即地表径流随降雨量上升而增大。在不出现大暴雨及特大暴雨的情形下, 间伐样地产生的地表径流比对照样地小, 其中, 30% 的间伐强度更利于减小地表径流。通过对不同月份的降雨量与地表径流的关系研究, 证明了单次降雨量, 而非降雨总量, 才是导致地表径流形成的主要原因。通过地表径流与林下植被、土壤特性的多元相关分析可知, 地表径流与枯落物量、灌木草本层盖度、土壤非毛管孔隙、水稳性土壤团聚体粒径呈显著负相关, 与土壤容重呈显著正相关。间伐正是通过改变上述因子而增强了水土保持能力, 减小了地表径流的形成。在本文研究的人工杉木林条件下和间伐强度范围内, 30% 的间伐强度下的影响更显著, 更有助于减小地表径流。

关键词: 间伐强度; 地表径流; 杉木林; 降雨量; 林下植被; 土壤

The impacts of thinning intensity on overland flow in a Chinese fir plantation

LIU Simian^{1,2}, TIAN Dalun³, XIANG Wenhua³, YAN Wende³, LIU Yunguo^{1,2,*}, HU Xinjiang^{1,2}

1 College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2 Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China

3 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

Abstract: Thinning can significantly change the biomass and soil properties of forest ecosystems, thus affecting the development of overland flow. To estimate the effects of thinning intensity, overland flow plots were established in a Chinese fir plantation in the Huitong State Ecosystem Research Station. The rainfall intensity results showed that, in the absence of downpours and super rainstorms, the overland flow after thinning was less than that in the control plots. Additionally, the overland flow increased with increasing rainfall intensity. However, during downpours and super rainstorms, there were no significant differences between the thinned and control states. Therefore, we suggest that thinning could significantly reduce overland flow only in the absence of downpours and super rainstorms. Subsequently, we investigated the monthly changes in rainfall and overland flow. During the dry season (from November to March), low precipitation (light and moderate rain) was prominent, and the corresponding overland flow was very low. However, during the rainy season (from April to October), heavy rain was dominant, resulting in a greater overland flow. Although the total rainfall in May was greater than that in July, the corresponding overland flow was lower; this may be explained by increased frequency of super rainstorms in July, directly leading to a greater overland flow. Consequently, it can be concluded that individual rainfall events rather than total rainfall, was the primary reason for the formation of overland flow in the forest ecological system. Moreover, the

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271332); 湖南省自然科学基金项目(11JJ2031); 湖南省科技计划项目(2012SK2021)

收稿日期: 2013-12-10; **网络出版日期:** 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyunguo@hnu.edu.cn

overland flow decreased with increasing the thinning intensity, and a thinning intensity of 30% was the most effective in reducing the overland flow. The results of an analysis of vegetation and soil properties under different thinning intensities indicated that thinning could significantly increase the growth of undergrowth vegetation as well as improve soil fertility. Thus, the undergrowth and litter biomass, coverage of the undergrowth plant layer, and plant species richness increased to 786.2 kg/hm², 786.2 kg/hm², 7.7%, and 0.56, respectively, with 15% thinning intensity, whereas the values increased to 1658.9 kg/hm², 1796.4 kg/hm², 14.9%, and 0.94, respectively, with 30% thinning. Thinning promotes faster growth of undergrowth plants by increasing light availability throughout the vegetation structure. Additionally, the noncapillary porosity, capillary porosity, average particle size of the water stability soil aggregate (APSWSSA), organic carbon, rapidly available potassium, rapidly available phosphorus, and rapidly available nitrogen under 15% thinning intensity were, respectively, 1.22, 1.04, 1.28, 1.33, 1.10, 1.46, and 1.35 times the control values, whereas they were 1.33, 1.10, 1.81, 1.90, 1.24, 1.92, and 2.24 times the control values under 30% thinning intensity. The soil bulk density decreased with increasing thinning intensity, from 1.27 to 1.11, and to 1.02 under the control, 15%, and 30% thinning conditions, respectively. The analysis of overland flow, vegetation, and soil factors indicated that leaf litter, coverage, noncapillary porosity, and particle size of water-stable aggregates were significantly negatively correlated with overland flow. In contrast, soil bulk density was significantly positively correlated. Thinning improved soil and water conservation by changing the abovementioned factors. Additionally, under the experimental conditions, 30% thinning intensity had a more significant effect on reducing overland flow.

Key Words: thinning intensity; overland flow; Chinese fir plantation; rainfall; vegetation; soil

湖南会同林区是我国著名的杉木中心产区,属中亚热带气候,为云贵高原向长江中下游过渡地带。森林在保护区域生物多样性、维持土壤肥力、碳吸存、水源涵养等生态服务功能方面起着十分重要的作用。特别是其水源涵养功能一直是社会关注的热点^[1-2]。地表径流行为是衡量森林保持水土、涵养水源的重要指标^[3],其影响因素很多,可概括为降雨和环境因素两类。降雨因素包括降雨强度、降雨历时和降雨量;环境因素包括地质、土壤、地形和植被等,它们的综合作用影响着径流形成^[4]。间伐作为主要营林措施,对森林土壤和林下植被生长有着显著影响^[5-6],Gundale^[5]等研究发现,间伐能显著增加土壤中有机和无机 N 的含量,促进林下植被的生长;冉然等^[6]亦发现,间伐加快了土壤中有机质的分解,使土壤速效养分增加,从而提高了林地土壤肥力。成向荣等^[7]认为,林分间伐后郁闭度降低,林下光照增强,地表植物覆盖度增加。因此,间伐可以通过改变上述因素,进而影响地表径流形成。对此已有较多研究^[8-10],但只是分析了单一间伐强度的情况,很少研究不同间伐强度的影响。因此,本文以湖南会同县人工杉木林为对象,从降水因素和间伐强度对林下植被及土壤影响的两个方面,分析不同间伐强度下的地表径流形成和发展过程,旨在揭示间伐强度对人工杉木林水土保持能力的影响。

1 研究区概况

试验区设在中南林学院的国家林业局会同杉木林生态系统定位研究站,该站为国家重点野外科学观测试验站,地理位置为东经 109°45',北纬 26°50'。海拔 270—400 m,相对高度在 150 m 以下。属典型的亚热带湿润性气候,年均气温 16.8℃,年均相对湿度 80%以上,年降水量 1100—1400 mm。土壤系震旦纪板溪系灰绿色板岩发育的山地黄壤,非常适合杉木生长。生态站的 8 个试验集水区的自然地理状况基本相似,彼此相距不超过 100 m。本次试验在生态站 I, IV, V 号集水区进行,其中 I 号集水区为长期定位观测的对照试验;IV 号和 V 号集水区为间伐强度分别为 15% 和 30% 的试验。三个集水区的面积均约为 2 hm²,立地类型以山谷为主。间伐年为 1996 年,距本调查年(2006 年)10 年。2006 年不同间伐强度下样地的林分概况如表 1 所示。

表 1 实验林分的基本状况
Table 1 Basic status of the experiment stands

区组 Group	间伐强度 Thinning intensity/%	林龄 Age of stand	密度 Density/ (株/hm ²)	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average diameter at breast height/cm	郁闭度 Canopy
I	0	25—38	2216	10.65	9.83	0.88
IV	15	23—39	1873	11.31	10.22	0.72
V	30	22—40	1515	12.17	10.85	0.61

2 材料与方法

2.1 降水量和径流量的测定

在集水区山坡和山洼建立观测铁塔(高于林冠),上置一台 SL-I 型遥测雨量计和标准雨量筒测定降水。在集水区出口地表水测流堰安装 SW40 型日记水位计,自动记录地表水并推算地表径流量。

2.2 林下植被生物量和枯落物生物量的测定

采用全收获法测定林下植被生物量。分别称量和记录样方内灌木和草本各部分的鲜质量,并分别对灌木的叶、枝茎、根和草本的地上部分、地下部分取样,然后尽快带回实验室测定含水率。最后推算出每块样地的林下植被平均生物量。将各组样品先称量,然后置于 105 ℃ 烘箱中进行 30 min 杀青处理,然后将烘箱温度调至 80 ℃ 烘干至恒量,计算含水率,换算成干质量。

在集水区 I、IV、V 号的样地内,选取三个 1 m × 1 m 的样方,并按未分解、半分解层收集枯落物,现场记录厚度并称鲜重,取样后室内常规(105 ℃)烘干,称重后计算其干重和自然含水率,最后计算出单位面积枯落物量。

2.3 土壤理化性质的测定

在集水区 I、IV、V 号的样地内,选取 3 个 20 cm × 20 cm 样方,在 0—20 cm 均匀取样 1 kg 左右,装入密封袋中带回实验室,进行土壤理化性质分析。采用环刀法测定土壤容重和毛管孔隙度,而土壤总孔隙度和非毛管孔隙度采用如下公式估算^[11]:

$$P_t = 93.947 - 32.995m_1$$

$$P = P_t - P_e$$

式中, m_1 为土壤容重(g/cm³); P_t 为土壤总孔隙度(%); P 为土壤非毛管孔隙度(%); P_e 为土壤毛管孔隙度(%)。

水稳性团聚体用 ZZY-II 土壤团粒分析仪测定;有机质含量用重铬酸钾法测定;速效 N、P、K 含量分别用碱解扩散法、钼锑抗比色法、乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。

3 结果与讨论

3.1 不同间伐强度下降雨量等级对地表径流的影响及地表径流月变化

根据国家防办《防汛手册》,以 24 h 累积降水量,将会同生态站的 2006 年降雨分为六个等级:小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨。不同月份的降雨量特征如表 2 所示。2006 年的年均降水量为 1432.4 mm(表 2),其中小雨的降水次数达 87 次,主要分布在 1—3 月,11—12 月;中雨则分布较均匀,基本每个月份均有;而大雨以上的等级则基本分布在 5—8 月。

各降雨等级和间伐强度下的地表径流响应见表 3。由表 3 可知,降雨是影响地表径流的重要因素,地表径流量随着降雨等级增大而增大。在小雨情况下,3 种不同间伐强度集水区均没地表径流产生;中雨时,地表径流在对照集水区为 1.8 mm,间伐 15%集水区为 1.2 mm,间伐 30%集水区仅产生了 0.7 mm。在暴雨情况下,对照集水区产生地表径流高达 15.9 mm,间伐 15%的集水区为 10.5 mm,约为对照的 60%;间伐 30%的集水区

为 4.2 mm,仅为对照的 30%。由此推断,间伐利于减轻形成地表径流,且在目前研究的间伐强度范围内以 30%的效果更大。但随着降雨等级继续增大,特别是特大暴雨时,间伐和对照集水区均产生了较多地表径流。相似的结果也可从地表径流系数看出,随着降雨等级增大,对照集水区的径流系数逐渐增大;而间伐集水区的生长缓慢,只有大暴雨及特大暴雨情况下才会较高,且间伐 30%时增长最缓慢。

表 2 会同生态站 2006 年的降水强度分布特征

Table 2 The amount and time of rainfall distributed in various rainfall intensities in 2006

时间/月 Time	降雨次数 Time of Rainfall						总降雨量 Total amount of rainfall/mm
	小雨 (<10 mm) Light rain	中雨 (10—25 mm) Moderate rain	大雨 (25—50 mm) Heavy rain	暴雨 (50—100 mm) Rainstorm	大暴雨 (100—200 mm) Downpour	特大暴雨 (>200 mm) Super rainstorm	
1	17	2	0	0	0	0	54.5
2	8	3	0	0	0	0	62.7
3	13	1	0	0	0	0	55.7
4	9	3	5	0	0	0	101.7
5	1	2	3	3	1	0	291.3
6	1	4	2	2	0	0	194.9
7	0	1	2	0	0	1	256.2
8	3	2	3	2	0	0	172.6
9	4	5	3	0	0	0	103
10	7	3	2	0	0	0	94.4
11	15	1	0	0	0	0	19.3
12	9	4	0	0	0	0	26.1
总计 Total	87	31	20	7	1	1	1432.4

表 3 不同降雨等级和间伐强度下的地表径流响应

Table 3 Effect of thinning intensity on overland flow at different rainfall intensity

降水等级 Rainfall intensity	降水量均值 Average rainfall/mm	降雨次数 Rainfall frequency	径流量 Overland flow/mm			径流系数 Overland flow/%		
			对照 Control	15%间伐 15% thinning	30%间伐 30% thinning	对照 Control	15%间伐 15% thinning	30%间伐 30% thinning
小雨(<10) Light rain	8.4±2.37	87	0	0	0	0.00	0.00	0.00
中雨(10—25) Moderate rain	19.1±4.60	31	1.8±0.4	1.2±0.4	0.7±0.3	9.42±1.5	6.28±2.3	3.66±2.07
大雨(25—50) Heavy rain	23.8±6.57	20	4.6±1.4	3.3±1.2	1.1±0.8	19.33±2.0	13.87±2.2	4.62±2.0
暴雨(50—100) Rainstorm	67.6±13.29	7	15.9±10.2	10.5±4.5	4.2±2.6	23.52±3.9	15.53±3.1	6.21±2.1
大暴雨(100—200) Downpour	158.3±15.41	1	48.5	33.7	27.3	30.64	21.29	17.25
特大暴雨(>200) Super rainstorm	232.7±19.16	1	75.3	69.1	62.1	32.36	29.69	26.69

进一步拟合了次降雨量(X ,mm)和杉木林地表径流量(Y ,mm)的关系,相关较好,关系式分别为:

对照 $Y=0.0005X^2+ 0.2018X -1.19163 \quad R^2=0.9828$ (1)

15%间伐 $Y=0.0009X^2+ 0.1017X -1.1393 \quad R^2=0.9867$ (2)

30%间伐 $Y=0.0014X^2-0.0435X + 0.4817 \quad R^2=0.9917$ (3)

从次降雨量和地表径流的拟合曲线(图 1)可清楚看到,地表径流随降雨量增大而增大。只要不出现大暴雨及特大暴雨,间伐处理的地表径流比对照就明显小很多。因此认为,间伐可在一定程度上削弱地表径流形成,利于水土保持。李素艳等^[12]在江西大岗山人工杉木林得出了同样结论。

为进一步研究间伐强度的影响,分析了地表径流的月动态变化。在旱季(1—3 月、11—12 月),主要以小强度降水(小雨,中雨)为主(表 2),相应的几乎没有地表径流产生(图 2)。小雨有利于水分下渗,加上林地凋落物阻截,因此不易形成地表径流^[13]。在雨季(4—10 月),降雨以大雨为主,产生的地表径流量也较大(图 2)。随着间伐强度的增大,地表径流量减小。特别需注意的是,五月份降雨总量(291.3 mm)大于七月份(256.2 mm),但五月份地表径流却小于七月份(图 2),这可能是降雨等级不同导致的。五月份虽然降雨次数和降雨量都高于七月份,但七月份发生了一次特大暴雨,直接导致了较大地表径流的形成。

由此进一步证明,间伐可减小地表径流量,利于水土保持,且间伐强度 30%的效果更大。此外,引起地表径流变化的关键是单次降雨量,即降雨等级,而不是月降雨总量。

3.2 不同间伐强度下的林下植被及土壤特性变化

不同间伐强度下的林下植被生长状况见表 4。由表 4 可知,间伐处理的林下植被覆盖率和生物量明显增大,物种多样性有所提高,枯落物量也明显增多。

在比较间伐和对照处理的数据后可发现,15%间伐强度下,林下植被生物量增加了 786.2 kg/hm²,枯落物量增加了 786.2 kg/hm²,盖度增加了 7.7%,物种多样性增加了 0.56;而 30%的间伐强度下,林下植被生物量增加了 1658.9 kg/hm²,枯落物量增加了 1796.4 kg/hm²,盖度增加了 14.9%,物种多样性增加了 0.94。随着间伐强度提升,增长幅度增大。这是由于间伐降低了林分郁闭度,使得林内光照得到改善,促进了林下植被生长,丰富了林植物多样性^[14]。

不同间伐强度下的土壤理化特性见表 5。可以看出,间伐后土壤物理性质改善和元素含量显著增加。在 15%间伐强度下,土壤容重是不间伐的 0.87 倍,非毛管孔隙度、毛管孔隙度、水稳性团聚体平均粒径、有机碳含量、速效钾含量、速效磷含量、速效氮含量分别是不间伐的 1.22、1.04、1.28、1.33、1.10、1.46、1.35 倍;在 30%的间伐强度下,土壤容重是不间伐的 0.80 倍,其他特性依次是不间伐的 1.33、1.10、1.81、1.90、1.24、1.92、2.24 倍。

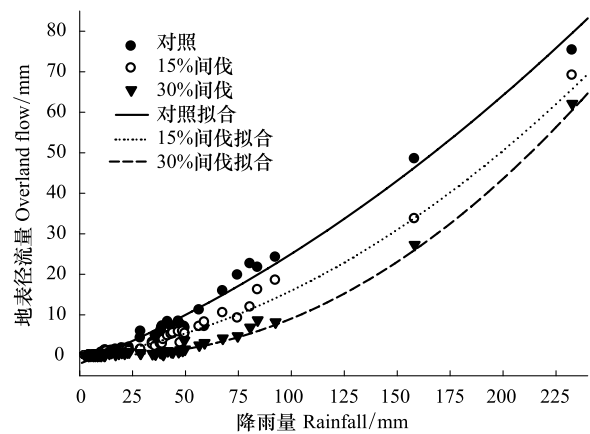


图 1 次降雨量与地表径流的相关关系

Fig.1 Relation of rainfall and overland flow in rainfall event scale

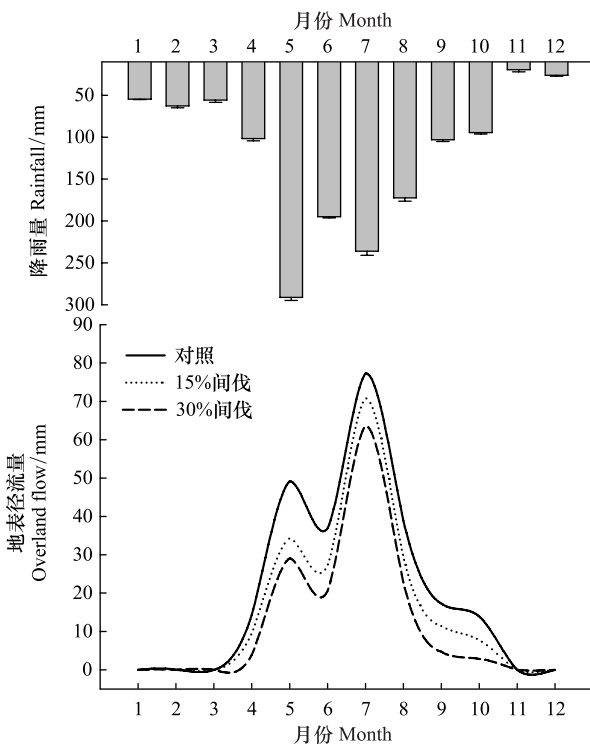


图 2 降雨量与地表径流量月变化曲线

Fig.2 Monthly changes of rainfall and overland flow

表 4 杉木林不同间伐强度下的林下植被和枯落物状况

Table 4 Effect of thinning intensity on vegetation properties

参数 Parameters	对照 Control	15%间伐 15% thinning	30%间伐 30% thinning
林下植被生物量 Undergrowth biomass/(kg/hm ²)	892.5	1478.7	2551.4
枯落物量 Litter biomass/(kg/hm ²)	589.7	1343.2	2386.1
灌木草本层盖度 Cover degree/%	29.7	37.4	44.6
草本植物物种多样性 Diversity of species	2.21	2.77	3.15

表 5 杉木林不同间伐强度下土壤理化特性(0—20 cm)

Table 5 Effect of thinning intensity on soil properties (0—20 cm)

参数 Parameters	对照 Control	15%间伐 15% thinning	30%间伐 30% thinning
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	1.27	1.11	1.02
非毛管孔隙度 Noncapillary porosity/%	10.32	12.67	13.74
毛管孔隙度 Capillary porosity/%	44.32	46.21	48.79
水稳性土壤团聚体平均粒径 APSWSSA/mm	2.1	2.7	3.8
有机碳含量 Organic carbon/(mg/kg)	8.6	11.5	16.3
速效钾含量 Rapid available potassium/(mg/kg)	62.3	68.9	77.5
速效磷含量 Rapid available phosphorus/(mg/kg)	1.3	1.9	2.5
速效氮含量 Rapid available nitrogen/(mg/kg)	1.7	2.3	3.8

表中 APSWSSA: average particle size of the water stability soil aggregate

由于各集水区的地质地形条件相似,因此土壤和林下植被生长情况成为影响地表径流的关键。为进一步了解这些因子与地表径流的关系,进行了多元相关性分析,结果如表 6 所示。

多元分析表明,地表径流与枯落物量,灌木草本植物盖度,土壤非毛管孔隙度,水稳性土壤团聚体粒径呈显著负相关,与土壤容重呈显著正相关。其中,枯落物量与林下植被生物量,灌木草本植物盖度、草本植物物种多样性呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关。灌木草本植物盖度则与枯落物量,土壤非毛管孔隙度呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关。土壤非毛管孔隙度与枯落物生物量、水稳性土壤团聚体粒径呈显著正相关,与土壤容重呈显著负相关。水稳性土壤团聚体粒径与枯落物量、灌木草本植物盖度、土壤非毛管孔隙度呈显著正相关。

表 6 地表径流与林下植被和土壤特性的多元相关性分析

Table 6 The multivariate correlation analysis of overland flow, vegetation, and soil factors

相关系数 Correlation coefficient	地表径流 Surface overland flow	林下植被 生物量 Undergrowth biomass	枯落物量 Litter biomass	灌木草本 植物盖度 Cover degree	草本植物 物种多样性 Diversity of species	土壤容重 Soil bulk density	非毛管 孔隙度 Non-capillary porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	水稳性土 壤团聚体 平均粒径 APSWSSA
地表径流 Surface overland flow	1.000 **	-6.783	-0.994 **	-0.998 **	-0.642	0.893 *	-0.902 **	-0.672	-0.999 **
林下植被生物量 Undergrowth biomass		1.000 **	0.897 *	0.765	0.806 *	-0.943 **	0.573	0.632	0.541
枯落物量 Litter biomass			1.000 **	0.995 **	0.583	-0.958 **	0.903 **	0.542	0.993 **
灌木草本层盖度 Cover degree				1.000 **	0.782	-0.653	0.904 **	0.567	0.868 *
草本植物物种多样性 Diversity of species					1.000 **	-0.571	0.541	0.662	0.751
土壤容重 Soil bulk density						1.000 **	-0.904 **	-0.741	-0.674
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity							1.000 **	0.674	0.999 **
毛管孔隙度 Capillary porosity								1.000 **	0.631
水稳性土壤团聚体 平均粒径 APSWSSA									1.000 **

表中 ** 表示在 0.01 显著性水平下的相关性, * 表示在 0.05 显著性水平下的相关性;APSWSSA: average particle size of the water stability soil aggregate

枯落物层对土壤蓄水量有显著影响。在降雨过程中,枯落物能有效地使土壤免受雨水直接冲击,同时还能过滤出土壤颗粒,防止土壤大孔隙堵塞而减弱水分渗透性能^[15],因此能有效减缓地表径流、保持水土。大量研究表明,随着植被覆盖度增加,土壤侵蚀量减少,地表径流也随之减小^[16]。土壤非毛管孔隙度增加能减

少地表径流量^[17]。团聚体稳定性在很大程度上影响降雨剥离土壤颗粒的能力,它还影响到土壤结皮形成,而土壤结皮能增大径流^[18]。随着团聚体的形成和增大,地表径流减小。土壤最大持水率与土壤容重呈负相关^[19],本研究也发现,土壤容重越大,孔隙度越小,透水透气性越差,入渗率越低。

由此可知,正是因为不同间伐强度导致了枯落物量、灌木草本植物盖度、土壤非毛管孔隙度、水稳性土壤团聚体粒径和土壤容重的不同,才形成了不同的径流特性。由于 30% 的间伐比 15% 的间伐对枯落物量、灌木草本植物盖度、土壤非毛管孔隙度、水稳性土壤团聚体粒径有更大促进作用,因此形成地表径流更少。

4 结论

(1) 单次降雨量大小,即降雨量等级,是控制形成地表径流数量的主要原因。随着降雨量等级增加,地表径流增大。

(2) 间伐过密的杉木人工林,可增加林下植被生物量、枯落物量、灌木草本植物盖度、土壤非毛管孔隙度、水稳性土壤团聚体粒径,并减小土壤容重,从而利于减小地表径流形成,发挥保持水土、涵养水源的效益。

(3) 在不发生大暴雨和特大暴雨的情形下,间伐能有效减小地表径流。在本研究范围内,间伐强度 30% 时的减少地表径流的效果最大。

参考文献 (References):

- [1] 康文星, 田大伦. 杉木人工林采伐后水源涵养和固土保肥效益损失的评价. 林业科学, 2002, 38(1): 111-115.
- [2] 闫文德, 田大伦. 会同第二代杉木林集水区水质生态效应. 中南林学院学报, 2003, 23(2): 6-10, 32-32.
- [3] 郑郁善, 陈卓梅, 邱尔发, 尤志达, 洪有为, 陈礼光. 不同经营措施笋用麻竹人工林的地表径流研究. 生态学报, 2003, 23(11): 2387-2395.
- [4] 张胜利. 秦岭南坡中山地带森林生态系统对径流和水质的影响研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005: 6-7.
- [5] Gundale M J, DeLuca T H, Fiedler C E, Ramsey P W, Harrington M G, Gannon J E. Restoration treatments in a Montana ponderosa pine forest: Effects on soil physical, chemical and biological properties. Forest Ecology and Management, 2005, 213(1/3): 25-38.
- [6] 冉然, 张文辉, 周建云, 何景峰. 间伐强度对秦岭南坡栓皮栎种子库及实生苗生长的影响. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1494-1500.
- [7] 成向荣, 冯利, 虞木奎, 吴统贵, 孙海菁, 王宗星, 张翠. 间伐对生态公益林冠层结构及土壤养分的影响. 生态环境学报, 2010, 19(2): 355-359.
- [8] 石丽丽, 徐成立, 王雄宾, 谷建才, 赵廷宁. 抚育间伐对华北落叶松人工林涵养水源功能影响. 南水北调与水利科技, 2013, 19(2): 108-111, 124-124.
- [9] Cram D S, Baker T T, Fernald A G, Madrid A, Rummer B. Mechanical thinning impacts on runoff, infiltration, and sediment yield following fuel reduction treatments in a southwestern dry mixed conifer forest. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 62(5): 359-366.
- [10] Dung B X, Gomi T, Miyata S, Sidle R C, Kosugi K, Onda Y. Runoff responses to forest thinning at plot and catchment scales in a headwater catchment draining Japanese cypress forest. Journal of Hydrology, 2012, 444-445(11): 51-62.
- [11] 曹鹤, 薛立, 谢腾芳, 王相娥, 傅静丹, 郑卫国. 华南地区八种人工林的土壤物理性质. 生态学杂志, 2009, 28(4): 620-625.
- [12] 李素艳, 黄瑜, 张建国. 人工杉木林间伐对水土流失影响的研究. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 120-123.
- [13] 邓湘雯, 康文星, 田大伦, 项文化, 闫文德. 不同年龄阶段杉木人工林生态系统的径流规律. 林业科学, 2007, 43(6): 1-6.
- [14] Horner G J, Baker P J, Nally R M, Cunningham S C, Thomson J R., Hamilton F. Forest structure, habitat and carbon benefits from thinning floodplain forests: Managing early stand density makes a difference. Forest Ecology and Management, 2010, 259(3): 286-293.
- [15] 莫江明, 彭少麟, Brown S, 孔国辉, 方运霆. 鼎湖山马尾松林群落生物量生产对人为干扰的响应. 生态学报, 2004, 24(2): 193-200.
- [16] 甄宝艳, 张卫平, 邓春芳, 刘征, 贾志军. 桃林口水库不同径流小区水土流失规律研究. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 57-60, 65-65.
- [17] 张保华, 刘子亭, 周长辉. 川中紫色丘陵区人工林表层土壤侵蚀率与土壤结构性关系. 林业资源管理, 2005, 10(5): 51-54, 65-65.
- [18] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 李朝霞, 闫峰陵, 蔡崇法. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响. 生态学报, 2007, 27(6): 2516-2522.
- [19] 彭舜磊, 梁亚红, 陈昌东, 刘沛松, 文祯中. 伏牛山东麓不同植被恢复类型土壤入渗性能及产流预测. 水土保持研究, 2013, 20(4): 29-33.