

林型和微立地类型及其土壤性质对土壤抗侵蚀能力的影响

兰航宇, 段文标, 陈立新, 曲美学, 王亚飞, 赵戈榕

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 采用原状土冲刷水槽法和静水崩解法测定土壤抗冲性和抗蚀性, 以云冷杉红松林(PA)和椴树红松林(TP)的林隙和郁闭林分为对照, 分析了小兴安岭地区 2 种林型由掘根倒木形成的不同丘和坑微立地类型及其土壤性质对土壤抗冲性和抗蚀性的影响, 旨在揭示它们与土壤抗侵蚀能力的关系。结果表明: 在 2 种林型下由掘根倒木形成的丘和坑微立地上, 土壤砂粒含量均较高, 其抗侵蚀能力均较弱, 而对照却相反; 2 种林型下丘和坑微立地的土壤容重均与土壤抗冲性和抗蚀性呈无显著的负相关($P>0.05$), 而 PA 对照的土壤容重与它们均呈不显著正相关($P>0.05$), TP 林隙的土壤容重与它们却呈极显著正相关($P<0.01$), 其郁闭林分的土壤容重与它们呈极显著负相关; 2 种林型下丘和坑微立地的土壤有机质均与土壤抗冲性和抗蚀性呈不显著正相关, 而对照则呈极显著正相关; 土壤抗侵蚀能力随着林型和微立地类型而变化, TP 丘和坑微立地的土壤抗侵蚀能力不显著高于 PA, 而 PA 对照的土壤抗侵蚀能力却显著高于 TP 的对照。由此可知, 丘和坑微立地的形成会造成土壤抗侵蚀能力大幅下降, 导致土壤养分的流失, 土壤黏粒含量减少, 土壤恢复过程较为困难。

关键词: 土壤; 抗侵蚀能力; 丘坑微立地; 土壤性质

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0108-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.02.016

Effects of Forest Type, Microsite Type and Soil Properties on Soil Erosion Resistance

LAN Hangyu, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, QU Meixue, WANG Yafei, ZHAO Gerong

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040)

Abstract: Soil anti-scourability and anti-erodibility were measured by undisturbed soil washing flume method and static water disintegration method. The gap and canopy stand of *Picea koraiensis*-*Abies nephrolepis*-*Pinus koraiensis* forest (PA) and *Tilia amurensis*-*Pinus koraiensis* forest (TP) were taken as contrasts to analyze the effects of different pit and mound microsites formed by uprooted trees and soil properties on soil anti-scourability and anti-erodibility in Xiaoxingan Mountains, and reveal the relationship between them. The results showed that in the pit and mound microsites of the two forests, the soil sand content was higher and the soil erosion resistance was weaker, but the trends were opposite in the contrast. There was no significant negative correlation between soil bulk density and soil anti-scourability and anti-erodibility ($P>0.05$) in the two types of microsite of the two forests, while there was no significant positive correlation between soil bulk density and soil anti-scourability and anti-erodibility in the gap of the PA ($P>0.05$). In the TP, the soil bulk density was extremely significantly positively correlated with soil anti-scourability and anti-erodibility in the gap, while in the canopy stand, the soil bulk density was extremely significantly negatively correlated with them ($P<0.01$). There was no significant positive correlation between soil organic matter and soil erosion resistance in the two types of microsite, but there was an extremely significant positive correlation between them in the contrast stand. Soil erosion resistance varied with forest types and microsite types, the soil erosion resistance of TP pit and mound microsites was not significantly higher than that of PA. But the soil erosion resistance of PA contrast was significantly higher than that of TP contrast. It can be concluded that the formation of pit and mound microsites would lead a significant decline in soil erosion resistance, resulting in the

收稿日期: 2019-09-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(31670627, 31270666)

第一作者: 兰航宇(1995—), 女, 在校硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: lanhangyuchen@163.com

通信作者: 段文标(1964—), 男, 博士, 博士研究生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治和林隙微气候与树种更新研究。E-mail: dwbiao88@163.com

loss of soil nutrients, the reduction of soil clay content, and the process of soil restoration was difficult.

Keywords: soil; anti-erosion ability; pit and mound microsites; soil properties

树木是构建森林生态系统基本结构的一个组分^[1]。连根拔起的倒木及其形成的丘和坑微立地是森林生态系统中一个重要的干扰过程,它们影响着土壤的形成和森林生态环境的特征^[2]。丘和坑被定义为由单株树木连根拔起造成的微观地形形态,包括有或没有连根拔起的树干,同时在 100~101 m²的空间尺度上发展而成,并明显地导致显著的土壤变化^[3]。由于生物干扰和土壤运移,树木掘根可能会造成土壤侵蚀^[4],丘和坑微立地类型的这种微观地形形态可以持续数百年,具有持久性,因此这种微立地类型对土壤侵蚀的影响较大^[2]。虽然土壤侵蚀受到许多因素的控制,包括土壤质地、地形、水文和土地利用等因素,但是树木掘根是一种主要的和间歇性的扰动,对土壤侵蚀和未来森林演替产生潜在的重要影响^[5]。所以,研究不同微立地类型的土壤抗侵蚀能力对防止水土流失、加快植被恢复和提高森林生态系统的稳定性和生产力具有重要的意义。

土壤抗冲性是指土壤抵抗径流机械破坏作用的能力,它与土壤颗粒组成、团聚体间的结构稳定性及土壤结构体抵抗径流冲刷的能力相关,是土壤抗侵蚀性能的重要部分。土壤抗蚀性指土壤对抗侵蚀作用的分离和搬运的抵抗能力^[6]。土壤侵蚀是世界上最严重的生态环境问题之一,会造成水土流失,进而导致土壤养分缺失,破坏土壤养分结构并影响植被恢复^[7]。国内外学者^[1,8-9]对不同森林植被类型、黄土高原地区和土壤农田等土壤抗侵蚀能力的研究较多。在国内,如对黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性的研究^[10],不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响^[7],对以紫色土坡耕地为研究对象的玉米季各生育期土壤抗冲性的分析^[11],对土壤侵蚀的面积、状况和危害进行分析与预测;在国外,Zadrozng 等^[12]通过对挪威云杉连根拔起所产生的丘和坑的垂直分布特征的研究,分析了丘和坑微立地对土壤扰动的影响,证明挪威云杉林掘根后对土壤侵蚀的影响取决于倒木掘根过程中土壤所抬升的土量;Hancock 等^[5]分析了倒木掘根后对土壤侵蚀和景观生态变化的影响;Phillips 等^[4]对未经人为干扰的老龄山林坡地貌进行分析,由掘根倒木所形成的地貌会受到土壤物理性质的影响,特别是土壤质地和黏土含量,且会抑制植被生长造成坡面侵蚀;国外针对掘根倒木形成的微立地对抗侵蚀性影响的研究较多,但国内对丘和坑微立地类型对土壤抗冲性和抗蚀性影响的研究还没有报道。在土壤形成的长时间过程

中,虽然丘和坑微立地形成的时间较短,其重要性似乎是微不足道的,但是这种类型的微立地是森林生态系统发展过程中不可分割的一部分。而且在一个特定的时间内,甚至可以存在百年左右,森林生态系统的所有区域都会受到丘和坑微立地的影响^[8]。丘和坑微立地会影响土壤的形成,从而影响植被再生和幼苗的生长^[13]。

因此,为揭示小兴安岭地区 2 种林型不同微立地类型及其土壤性质对土壤抗侵蚀能力的影响,以云冷杉红松林和椴树红松林的林隙和郁闭林分为对照,分析了不同林型由掘根倒木形成的丘和坑微立地及其土壤性质与土壤抗冲性和抗蚀性的关系。本项研究将为提升本地区不同林型微立地土壤的抗侵蚀能力、提高土壤结构的稳定性和森林生态系统的生产力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地处于黑龙江省伊春市带岭区凉水国家级自然保护区(128°47′08″—128°57′19″E,47°06′49″—47°16′10″N)。该区属于温带大陆性季风气候,冬长夏短,日照时间较短,气温较低,年平均气温-0.3℃,年平均降水量 670 mm,年平均相对湿度 78%,无霜期 100~120 d。春夏季多为西南风,秋冬季多为西北风。地带性土壤为暗棕壤,土壤肥力较高。主要的森林类型为以红松为主的针阔混交林,所选样地主要树种为红松(*Pinus koraiensis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、臭冷杉(*Abies nephrolepis*)和紫椴(*Tilia amurensis*)。

1.2 样地选择

试验于 2018 年 5 月 8 日至 12 月 28 日进行,在研究区内,选择地形条件(坡向、坡度和海拔)相对一致的云冷杉红松林和椴树红松林 2 种林型作为研究对象。通过踏查,筛选出掘根倒木形成的典型丘和坑微立地的代表性林分(表 1),分别设置 1 个 170 m×170 m 的矩形固定样地,作为试验样地(以下简称为样地)。在每个样地内,分别选择 30 个典型的丘和坑微立地,每个丘和坑微立地面积大于 1 m²,并将其周围的林隙和郁闭林分设置为对照。在对照内,选择 6 个呈“S”形的取样点,每个取样点间相隔 3 m。在丘和坑微立地上,调查形成丘和坑微立地倒木的基径及其长度,并计算其均值。在丘和坑微立地及其对照,使用长度、宽度、高度分别为 20,10,5 cm 矩形环刀,采集 0—20 cm 的原状土,用于土壤抗冲性分析;同时采集 0—20 cm 土层的土样,每个土样重复 3 次,将其

放入编号的密封袋后,及时带回实验室风干,用于土壤抗蚀性指标的测定及土壤理化性质的分析。

表 1 2 种林型下不同微立地基本信息

林型	微立地类型	海拔/ m	坡向	坡度/ (°)	倒木数量	倒木平均 基径/cm	倒木平均 长度/m
云冷杉红松林(PA)	郁闭林分(PAS)	359	北	3	—	—	—
	林隙(PAG)	359	北	3	—	—	—
	坑底(PAP)	359	北	3	15	40.66±0.94a	21.64±0.96a
	丘顶(PAM)	359	北	3	16	41.14±0.41a	21.64±0.45a
椴树红松林(TP)	郁闭林分(TPS)	366	东北	5	—	—	—
	林隙(TPG)	366	东北	5	—	—	—
	坑底(TPP)	366	东北	5	15	65.16±1.21b	29.16±0.79a
	丘顶(TPM)	366	东北	5	15	64.06±0.84b	28.05±1.03a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

1.3 测定方法

土壤容重采用环刀法进行测定;土壤全磷含量采用浓硫酸、高氯酸消煮,钼锑抗比色法进行测定;土壤全氮含量采用浓硫酸、高氯酸消煮,凯式定氮法测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化—外加热法测定;土壤机械组成采用吸管法测定,采用美国制土壤分类标准进行分级,砂粒为 0.05~2 mm 粒级,粉粒为 0.002~0.05 mm 粒级,黏粒为<0.002 mm 粒级^[7-14]。

土壤抗冲性采用原状土冲刷水槽法测定^[15]。土壤样品浸水 24 h,设置冲刷坡度 15°,采用年平均降水量换算的冲刷流量为 2 L/min,冲刷时间为 9 min,每隔 1 min 用取样桶取浑浊水样 1 次,试验结束后将桶内上清液倒掉,剩余溶液移至铝盒中,置于烘箱中烘干称重。土壤的抗冲性采用抗冲系数 ANS 表示,即冲刷掉每克的土需要的水量和时间((L·min)/g),采用公式(1)计算^[16]。

$$ANS=\frac{q\times t}{M_s}$$

(1)

式中: q 为各次冲刷所需水量(L); t 为冲刷时间(min); M_s 为每次冲刷产生的泥土干质量(g)。

土壤抗蚀性采用静水崩解法进行测定,并计算土壤抗蚀指数。取 30 粒试验土粒放置在孔径为 5 mm 的筛网上,每 1 min 记录 1 次崩解粒数,时间设置为 10 min,试验置于静水中进行。用每分钟未崩解土粒数量与总土粒的比值来表示抗蚀性指数,采用公式(2)计算。

$$k=\frac{m-n}{m}\times 100\%$$

(2)

式中: k 为土壤的抗蚀性指数(%); m 为总土粒; n 为崩解总土粒。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20 软件进行数据的基本统计,2 种林型不同微立地类型的土壤机械组成、土壤抗冲性和土壤理化性质与土壤抗冲性和土壤抗蚀性的差异性检

验采用 LSD 法和多因素方差分析法确定($P<0.05$),使用 Origin Pro 9.0 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 2 种林型不同微立地类型土壤机械组成变化特征

由表 2 可以看出,2 种林型不同微立地类型的土壤机械组成均以<0.02 mm 的粒径为主,0.02~0.002 mm 和<0.002 mm 粒级含量较高,分别为 33.39%~48.14%和 26.38%~38.51%,平均值分别为 37.68%和 31.99%;0.05~0.02 mm 粒级含量居中,为 13.33%~17.86%,平均值为 15.98%;0.25~2,0.05~0.25 mm 粒级含量的较低,分别为 3.59%~12.27%和 2.90%~11.55%,平均值分别为 8.34%和 6.59%。

由表 2 可知,在 2 种林型不同微立地类型下,0.02~2 mm 粒级的土壤颗粒含量均无显著差异,而在 0.02~0.002 mm 的粒径下,TPS 的土壤颗粒含量最高,且与其他微立地类型存在显著差异性。在 0.25~2 mm 的粒径下,2 种林型不同微立地类型的土壤颗粒含量均为坑>丘>林隙>郁闭林分。在<0.002 mm 的粒径下,PAS 的颗粒含量高于其他微立地,且与其具有显著差异性,其黏粒含量的大小为 PAS>TPS>TPG>PAG>TPM>PAM>TPP>PAP。

2.2 2 种林型下不同微立地类型土壤抗冲性变化特征

由表 3 可知,在 2 种林型不同微立地类型内,土壤抗冲性的变化均为郁闭林分>林隙>丘>坑。在林隙和郁闭林分内,云冷杉红松林的土壤抗冲性大于椴树红松林,而在丘和坑微立地内,椴树红松林的土壤抗冲性大于云冷杉红松林。云冷杉红松林的土壤抗冲性系数为 23.38~90.09 (L·min)/g,椴树红松林的土壤抗冲性系数为 30.78~50.07 (L·min)/g。整体来看,PAS 的抗冲性系数最高,且与其他微立地存在显著性差异。PAP 的抗冲性系数最小,为 23.38 (L·min)/g。2 种林型不同微立地类型土壤冲刷泥沙总重的变化均为郁闭林

分<林隙<丘<坑,其中 PAP 的土壤冲刷泥沙总重最高,为 26.00 g,与其他微立地存在显著性差异。土壤冲刷泥沙总重大小为 PAP>PAM>TPP>TPM>TPG>TPS>PAG>PAS。

表 2 2 种林型下不同微立地类型土壤机械组成变化特征 单位: %

微立地类型	0.25~2 mm	0.05~0.25 mm	0.05~0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
PAS	5.62±0.07a	4.89±0.12a	17.03±0.37a	34.06±0.18a	38.51±0.12b
PAG	8.67±0.28a	5.30±0.03a	17.86±0.13a	36.05±0.05ab	33.25±0.04ab
PAP	12.81±0.01a	3.57±0.28a	15.82±0.30a	34.24±0.04a	26.06±0.01ab
PAM	11.88±0.19a	9.97±0.15a	13.93±0.18a	37.42±0.17ab	27.63±0.11ab
TPS	3.17±0.24a	2.90±0.26a	17.78±0.22a	41.14±0.18b	37.11±0.32a
TPG	4.59±0.06a	6.81±0.05a	13.33±0.13a	39.47±0.07ab	34.80±0.18ab
TPP	12.27±0.01a	7.72±0.07a	17.54±0.24a	36.65±0.13ab	26.38±0.14a
TPM	10.74±0.04a	11.55±0.37a	14.58±0.16a	33.39±0.38a	32.23±0.08ab

表 3 2 种林型下不同微立地土壤抗冲性系数和冲刷泥沙总重

指标	PAS	PAG	PAM	PAP	TPS	TPG	TPM	TPP
抗冲性系数/ (L·min·g ⁻¹)	90.09±0.59b	77.04±0.98b	36.36±1.25ab	23.38±0.81a	50.07±0.29ab	49.01±1.11ab	41.40±0.80ab	30.78±0.67a
冲刷泥沙总重/g	3.86±0.87a	3.98±0.39a	10.01±1.29ab	26.00±0.73b	4.08±0.26a	4.09±0.19a	4.12±1.02a	9.09±0.69ab

从图 1 可以看出,2 种林型不同微立地类型的原状土在开始冲刷时泥沙量均较大,其中 PAM 最大,PAG 最小。2 种林型的林隙和郁闭林分在 10 min 内的含沙量变化都接近平稳,丘和坑微立地的变化则不同,其中 PAP、PAM 和 TPM 土壤冲刷泥沙重量一直在减少,且变化幅度较大,但 TPP 的含沙量变化幅度较小。由图 2 可知,2 种林型的林隙和郁闭林分在 10 min 内的土壤抗冲系数较大,增长趋势明显,而 PAP、PAM 和 TPM 的土壤抗冲系数及其变化幅度均较小,TPP 的土壤抗冲系数增长趋势明显且变化幅度相对较大。

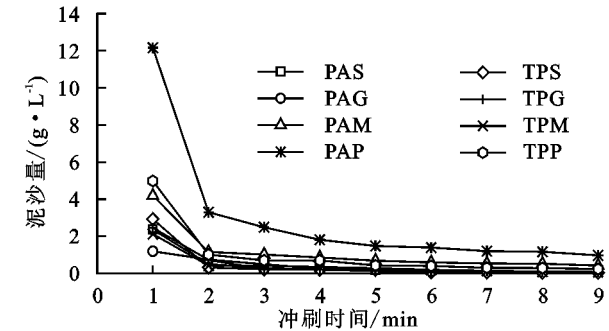


图 1 2 种林型不同微立地土壤冲刷泥沙量随冲刷时间的变化

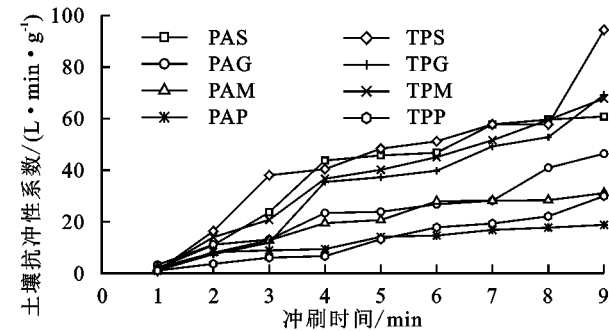


图 2 2 种林型不同微立地土壤抗冲性系数随冲刷时间的变化过程

2.3 2 种林型不同微立地类型土壤抗蚀性变化特征

由图 3 可知,在 10 min 内,TPS 的崩解比例最高,在 90% 以上,每分钟崩解量最小且最稳定;PAS 的崩解比例在 85%,仅随其次;2 种林型郁闭林分的崩解比例较高,为 62%~85%,每分钟崩解量较小且较稳定;PAM 和 PAP 的崩解比例为 40%~68%;TPM 和 TPP 的崩解比例较低,为 12%~40%,每分钟崩解量较大。

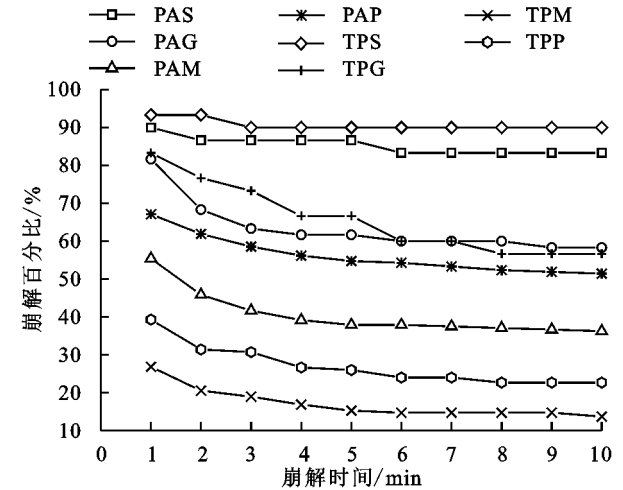


图 3 2 种林型不同微立地土壤的崩解过程

2.4 土壤抗冲性与土壤性质的相关关系

从表 4 可以看出,PAS、PAG、TPS 和 TPG 的土壤有机质与土壤抗冲性均呈极显著正相关,其中 PAG 的土壤抗冲性与其他土壤理化性质均无显著相关性。PAP 和 PAM 的土壤抗冲性与土壤理化性质不存在显著相关性。PAS 的土壤抗冲性与土壤全磷呈极显著正相关关系,仅与土壤碳氮比呈极显著负相关,与土壤总有机碳和氮磷比存在显著负相关。TPS

的土壤抗冲性与土壤容重、全磷和总有机碳呈极显著负相关。TPG 的土壤抗冲性与土壤容重和全氮存在极显著正相关性,而与土壤总有机碳和碳氮比呈极显著负相关。TPP 的土壤抗冲性与土壤全氮、总有机

碳和氮磷比呈极显著负相关,而与土壤容重、全磷和碳氮比均无显著相关性。TPM 的土壤抗冲性与土壤容重存在显著负相关,与土壤有机质和碳氮比呈显著正相关,与其他土壤理化性质均无显著相关性。

表 4 土壤抗冲性与土壤性质的相关系数

微立地 类型	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	C/N	N/P
PAS	0.005	0.892**	0.597**	0.025	-0.488*	-0.582**	-0.518*
PAG	0.298	0.701**	-0.446	-0.211	-0.198	-0.006	-0.050
PAP	-0.180	0.111	-0.002	-0.154	-0.059	0.162	0.150
PAM	-0.176	0.164	0.233	0.077	0.174	0.050	0.022
TPS	-0.998**	0.875**	-0.858**	-0.030	-0.988**	-0.041	0.310
TPG	0.994**	0.967**	0.640	0.880**	-0.991**	-0.963**	0.170
TPP	-0.161	0.382	0.194	-0.623**	-0.403**	0.208	-0.590**
TPM	-0.320*	0.478	0.212	0.007	0.197	0.326*	0.019

注: * 表示相关性达显著水平($P<0.05$); ** 表示相关性极显著水平($P<0.01$)。下同。

2.5 土壤抗蚀性与土壤性质的相关关系

由表 5 可知,土壤碳氮比仅与 TPG 的土壤抗蚀性存在极显著负相关,土壤的氮磷比与 PAP、PAM 和 TPP 的土壤抗蚀性均呈极显著正相关。PAP、PAM 和 TPS 的土壤抗蚀性与土壤容重呈极显著负相关,TPG 则呈极显著正相关。土壤全磷与 PAS、PAP 和 TPG 的土壤抗

蚀性均无显著相关性,而 PAP 和 TPG 的土壤抗蚀性则与土壤全氮存在极显著正相关。PAP、PAM、TPP 和 TPM 的土壤抗蚀性与土壤总有机碳呈极显著正相关,TPS 和 TPG 则存在极显著负相关,PAS 和 PAG 则无显著相关性。PAS、PAG、TPS 和 TPG 的土壤有机质与土壤抗蚀性呈极显著正相关。

表 5 土壤抗蚀性与土壤性质的相关性

微立地 类型	容重/ (g·cm ⁻³)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	C/N	N/P
PAS	0.262	0.779**	-0.304	-0.569*	-0.389	0.462	-0.108
PAG	0.073	0.863**	-0.585*	-0.454	-0.361	0.319	-0.102
PAP	-0.659**	0.192	0.072	0.746**	0.670**	0.015	0.631**
PAM	-0.502**	0.228	0.460**	0.437**	0.591**	0.012	0.352**
TPS	-0.998**	0.952**	-0.858**	-0.030	-0.988**	-0.041	0.310
TPG	9.786**	0.914**	0.640	0.880**	-0.991**	-0.963**	0.170
TPP	-0.346*	0.245	-0.375**	0.255	0.781**	0.091	0.496**
TPM	-0.242	0.169	0.320*	0.158	0.466**	0.234	0.102

3 讨论

3.1 土壤性质对土壤抗侵蚀能力的影响

影响林地土壤抗冲性的主要影响因素有 2 个方面:一是外营力,雨滴对地表的击溅和地表径流对地面的冲刷;二是土壤本身即抵抗径流对地表的机械破坏和推移的能力^[17]。土壤抗蚀性为土壤抵抗水的分散和悬浮的能力,受土壤理化性质和植被覆盖度等外在因素的影响^[18]。土壤机械组成是土壤结构的基础,反映土壤颗粒组成、土壤质地和土壤颗粒大小的不同,对土壤抗冲能力和土壤抗蚀能力的影响也不同^[19-20]。本文选择 2 种林型云冷杉红松林和椴树红松林作为对比结果表明,从整体来看,2 种林型均是郁闭林分内的黏粒含量最高,其土壤结构稳定性增

强,吸附水能力也增强,因此土壤抵抗冲刷能力增强,且土壤崩解性降低^[20];林隙的土壤黏粒含量较高,黏粒含量最低为丘和坑微立地。2 种林型下丘和坑微立地的砂粒含量较高,土壤透水性能增强,结构较松散,土壤抵抗冲刷能力降低,土壤崩解速率加快^[21];在丘和坑微立地下,椴树红松林的黏粒含量高于云冷杉红松林,椴树红松林的土壤抗侵蚀能力较强;在郁闭林分下,云冷杉红松林的黏粒含量比椴树红松林高,云冷杉红松林的土壤抗侵蚀能力较强。

土壤抗冲性和土壤抗蚀性与土壤理化性质的关系密切^[22]。本研究中,椴树红松林中郁闭林分的土壤容重与土壤抗冲性和抗蚀性呈极显著负相关,因为林分中植被较多,从而使土壤容重减小,增大土壤保水能力,因此土壤不易被分散破坏,进而使土壤抗冲

性和抗蚀性增强,土壤抵抗径流冲刷的能力得到显著提高^[16]。椴树红松林中林隙的土壤容重与土壤抗冲性和抗蚀性呈极显著正相关,这是由于随着土壤容重的增加,被冲刷掉的泥沙含量显著减少,土壤抗侵蚀能力也随之增强^[11-23]。2 种林型下丘和坑微立地的土壤容重与土壤抗冲性和抗蚀性呈负相关。可能由于丘和坑微立地内植被存在极少,使土壤容重增大,土壤结构稳定性被破坏,从而使土壤抗侵蚀能力有降低的趋势。椴树红松林中丘和坑微立地的土壤有机质与土壤抗冲性呈显著正相关,随着有机质的增加,其土壤抗冲性逐渐增强。2 种林型下林隙和郁闭林分的土壤有机质均与土壤抗冲性和抗蚀性呈极显著正相关,这是由于土壤有机质会以一种胶膜的形式包裹土壤颗粒,增加土壤黏结性,从而增加土壤抗侵蚀的能力,土壤有机质随着时间的增加,不断积累,土壤稳定性也不断增强^[16-24]。2 种林型下丘和坑微立地的土壤总有机碳与土壤抗蚀性均呈极显著正相关,因为土壤总有机碳有助于改善土壤结构,提高土壤稳定性,随着土壤有机碳的增加,土壤抗蚀性也随之增加^[7-22]。土壤 C:N 是影响土壤质地和分解速率的指标之一^[25]。2 种林型下林隙和郁闭林分的土壤 C:N 与土壤抗冲性均呈负相关,土壤 C:N 比值越低,枯枝落叶的分解速率越高,其土壤抗冲性越强,与张杰等^[7]对林地的土壤理化性质研究结果相符合。2 种林型下丘和坑微立地的土壤 C:N 与土壤抗冲性呈正相关,C:N 比值越低,有机物质的分解速率越低,其土壤抗侵蚀能力越低,与段文标等^[26]对丘和坑微立地的土壤理化性质研究结果一致。

3.2 微立地类型对土壤抗侵蚀能力的影响

2 种林型下林隙和郁闭林分中存在许多乔木灌木树种,而丘和坑微立地则是由树木连根拔起产生的独特微立地地貌^[4],其微立地内存在植被较少,使土壤受到侵蚀和破坏,导致丘和坑微立地土壤结构形成与其他非干扰的土壤不同^[3]。整体看来,2 种林型下林隙和郁闭林分土壤的抗侵蚀能力大于丘和坑微立地,这是由于郁闭林分和林隙内的植被较多,其植被根系具有稳定和固结土壤的能力,有效提高土壤的抗径流能力,减缓径流对土壤颗粒的分散作用^[27-28],有利于枯落物分解,增加土壤养分元素和土壤的保水持水能力^[29]。在丘和坑微立地内,椴树红松林比云冷杉红松林的抗侵蚀能力强,可能由于阔叶树种椴树较针叶树种云杉和冷杉更易风干,质量较小,叶体表面积较大,较容易受到风力和水力等作用聚集在坑内^[26],而针叶树种残体的凋落物质量较低,微生物分解只能将少量的成分转化为土壤有机物质,所以落入坑内的有机物质有限,不利于土壤的有机碳和有机氮

等物质的积累^[30-31]。阔叶树种的枯落物经过长时间分解从而改善土壤质地,存在较多的植物残体,利于植被再生,使再生植被产生较多细根的分布,提高了土壤抗侵蚀能力^[32]。在 2 种林型下,均为丘顶的土壤抗侵蚀能力大于坑微立地,这是由于丘顶可以更好的为树种早期和中期的更新和演替提供有利的微生物,而坑底为树木再生的不利位置^[33],其他的调查中也发现,丘顶的植被覆盖度远高于坑底,且丘顶的腐殖质含量和温度高于坑底^[34-35]。

4 结论

(1)在 2 种林型不同微立地下,土壤机械组成均影响土壤的抗侵蚀能力,椴树红松林丘和坑微立地的土壤抗侵蚀能力较强,而云冷杉红松林对照的土壤抗侵蚀能力较强。随着土壤黏粒含量的增高,土壤抗冲性系数越高,土壤崩解比例越高。

(2)在 2 种林型不同微立地下,土壤性质影响土壤的抗侵蚀能力。丘和坑微立地的土壤容重与土壤抗冲性和抗蚀性均呈负相关,即随着土壤容重的增大,其抗侵蚀能力降低;椴树红松林丘和坑微立地的土壤有机质与土壤抗冲性呈显著正相关,即土壤有机质越多,土壤抗侵蚀的能力越强;丘和坑微立地的土壤总有机碳与土壤抗蚀性均呈极显著正相关,即土壤总有机碳越高,土壤抗蚀性越强。

(3)在 2 种林型下,丘顶的土壤抗冲系数和土壤崩解比例大于坑微立地,坑底的土壤抗侵蚀能力最弱;椴树红松林丘顶的土壤抗侵蚀能力比云冷杉红松林更有利于土壤有机物质的积累,土壤抗侵蚀能力较强。

参考文献:

- [1] Plotkin A B, Schoonmaker P, Leon B, et al. Microtopography and ecology of pit-mound structures in second-growth versus old-growth forests[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 404: 14-23.
- [2] Šamonil P, Valtera M, Schaetzel R J, et al. Impacts of old, comparatively stable, tree-throw microtopography on soils and forest dynamics in the northern hardwoods of Michigan, USA[J]. Catena, 2016, 140: 55-65.
- [3] Šamonil P, Král K, Hort L. The role of tree uprooting in soil formation: A critical literature review[J]. Geoderma, 2010, 157(3/4): 65-79.
- [4] Phillips J D, Šamonil P, Pawlik L, et al. Domination of hillslope denudation by tree uprooting in an old-growth forest[J]. Geomorphology, 2017, 276: 27-36.
- [5] Hancock G R, Evans K G, McDonnell J, et al. Ecohydrological controls on soil erosion and landscape evolution[J]. Ecohydrology, 2012, 5(4): 478-490.
- [6] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots

- during concentrated flow[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32(9): 1323-1345.
- [7] 张杰, 郑太辉, 肖胜生, 等. 不同植被恢复模式对红砂岩土壤化学性质及抗蚀特征的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 115-122.
- [8] 寇萌, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区抵抗土壤侵蚀的植物群落结构特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 7-14.
- [9] 王润泽, 湛芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响[J]. *草业学报*, 2017, 26(7): 45-54.
- [10] 李超, 周正朝, 朱冰冰, 等. 黄土丘陵区不同撂荒年限土壤入渗及抗冲性研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 61-66.
- [11] 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米季土壤抗冲性变化特征及其影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 180-186.
- [12] Zadrozny P, Halecki W, Gasiorek M, et al. Vertical pit-mounds distribution of uprooted Norway spruce (*Picea abies* L.): Field evidence in the upper mountain belt[J]. *Forest-Biogeoosciences and Forestry*, 2017, 10: 783-787.
- [13] Plotkin A B, Foster D, Carlson J, et al. Survivors, not invaders, control forest development following simulated hurricane[J]. *Ecology*, 2013, 94(2): 414-423.
- [14] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 227-241.
- [15] 刘志, 杨瑞, 裴仪岱. 喀斯特高原峡谷区顶坛花椒与金银花林地土壤抗侵蚀特征[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 466-474.
- [16] 郭明明, 王文龙, 康宏亮, 等. 黄土高原沟壑区植被自然恢复年限对坡面土壤抗冲性的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 138-146.
- [17] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 233-238.
- [18] 徐文远, 刘玉花, 王晓春, 等. G111 公路讷嫩段 9 种护坡灌木根系增强土壤抗蚀性比较[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 72-77.
- [19] 史东梅, 陈晏. 紫色丘陵区农林混作模式的土壤抗冲性影响因素[J]. *中国农业科学*, 2008(5): 1400-1409.
- [20] 张素, 熊东红, 校亮, 等. 冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J]. *土壤*, 2016, 48(6): 1270-1276.
- [21] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱—农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 125-135.
- [22] 康玲玲, 王云璋, 刘雪, 等. 水土保持措施对土壤化学特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1): 46-48.
- [23] 王一峰, 张平仓, 朱兵兵, 等. 长江中上游地区土壤抗冲性特征研究[J]. *长江科学院院报*, 2007, 24(1): 12-15.
- [24] 周维, 张建辉, 李勇, 等. 金沙江干暖河谷不同土地利用条件下土壤抗冲性研究[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(5): 26-30.
- [25] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 58-67.
- [26] 段文标, 曲美学, 陈立新, 等. 云冷杉林林隙内倒木腐烂等级及其形成的微立地类型对土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 3977-3985.
- [27] 李佳, 黄梦静, 任艳, 等. 水分胁迫对向水性突变体 *rhe2* 根生长与响应的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(5): 858-862.
- [28] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤—根系—微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 210-219.
- [29] Boivin P, Schäffer B, Sturny W. Quantifying the relationship between soil organic carbon and soil physical properties using shrinkage modelling [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(2): 265-275.
- [30] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 988-995.
- [31] Castellano M J, Mueller K E, Olk D C, et al. Integrating plant litter quality, soil organic matter stabilization, and the carbon saturation concept [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3200-3209.
- [32] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 等. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2387-2396.
- [33] Vodde F, Jogiste K, Engelhart J, et al. Impact of wind-induced microsites and disturbance severity on tree regeneration patterns: Results from the first post-storm decade [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, 348: 174-185.
- [34] Thomas W S, Schaetzl R J, Brixie J M. Redistribution and mixing of soil gravels by tree uprooting [J]. *The Professional Geographer*, 2005, 42(4): 445-457.
- [35] Zhang H D, Zhang R H, Qi F, et al. The CSLE model based soil erosion prediction: Comparisons of sampling density and extrapolation method at the county level [J]. *Catena*, 2018, 165: 465-472.