

晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征

金 晓, 陈丽华

(北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 采用原状土冲刷水槽法, 以油松林、刺槐林、山杏林、荆条地及荒草地土壤为研究对象, 研究了晋西黄土残塬沟壑区蔡家川流域不同植被类型土壤抗冲性能及植物根系对土壤抗冲性的影响。结果表明: (1) 在原状土冲刷试验过程中, 各植被类型径流量随冲刷时间的变化趋势不明显, 含沙量随时间延长先减少后趋于平稳, 土壤抗冲指数呈逐渐增加的趋势。 (2) 各植被类型总根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度均表现为刺槐、油松林地较大, 山杏、荆条、荒草地较小且相差不大, 总根系参数之间均存在正相关关系。各植被类型不同根径范围 ($0\sim 0.5$, $0.5\sim 1.0$, $1.0\sim 2.0$, $2.0\sim 5.0$, >5.0 mm) 的根系指标中, $0\sim 0.5$ mm 径级的根长密度均最大, 根体积密度总体表现为细根比粗根小。 (3) 不同植被类型植物根系均能增强土壤的抗冲性, 增强效应表现为刺槐林地和油松林地较强, 山杏、荆条、荒草地较弱。植物根系指标中 <1 mm 径级的根长密度、根表面积密度、根体积密度与土壤抗冲性增强值呈显著或极显著正相关关系。其他径级根系参数与土壤抗冲性增强值相关性不显著。

关键词: 山西; 黄土区; 土壤抗冲性; 根系

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)06-0120-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.017

Soil Anti-scourability and Root Distribution Characteristics in Surface Soil Under Different Vegetation Types in the Loess Region of Western Shanxi Province

JIN Xiao, CHEN Lihua

(College of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water

Conservation and Desertification Combating, Beijing Forestry University, Ministry of Education, Beijing 100083)

Abstract: Soil anti-scourability of different vegetation types and the effects of plant roots on soil anti-scourability in Caijiachuan watershed of Loess Gully-Hilly Area in Western Shanxi Province were studied by using undisturbed soil scouring experiment, taking the soil of *Pinus tabulaeformis* forest, *Robinia pseudoacacia* forest, *Armeniaca sibirica* forest, *Vitex negundo* land and wasteland as research objects. The results showed that: (1) In the undisturbed soil scouring experiment, the trend of runoff of all vegetation types with the scouring time was not obvious, and the sediment concentration decreased at the beginning and then tended to be stable with time, while the index of soil anti-scourability showed a trend of increasing gradually. (2) The total root length density, root surface area density, root volume density and root biomass density of all vegetation types showed that *Robinia pseudoacacia* and *Armeniaca sibirica* forest land were larger, while *Prunus armeniaca*, *Vitex negundo* and wasteland were smaller and similar. There was a positive correlation between the total root parameters. Among the root indexes of different vegetation types with different root diameter ranges ($0\sim 0.5$, $0.5\sim 1.0$, $1.0\sim 2.0$, $2.0\sim 5.0$, >5.0 mm), the root length density of $0\sim 0.5$ mm diameter root was the largest, and the root volume density of the fine roots was generally smaller than that of coarse roots. (3) Plant roots of different vegetation types can enhance soil anti-scourability. The enhancement effect was stronger in *Robinia pseudoacacia* and *Armeniaca sibirica* forestland, weaker in *Armeniaca sibirica*, *Vitex negundo* and wasteland. There were significant or extremely significant positive correlations between the root length density, root surface area density and root volume density of <1 mm diameter root and soil

收稿日期: 2019-05-09

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501704)

第一作者: 金晓 (1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: 1747873318@qq.com

通信作者: 陈丽华 (1957—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程研究。E-mail: c_lihua@bjfu.edu.cn

anti-scourability enhancement value among all plant root system indexes. There was no significant correlation between other diameter root parameters and soil anti-scourability enhancement value.

Keywords: Shanxi; loess region; soil anti-scourability; root system

土壤抗冲性是指土壤抵抗径流冲刷对土壤的机械破坏和推动下移的能力,其大小主要取决于土粒和微结构间的胶结力,以及土壤结构体间抵抗离散的能力,是土壤自身的一种特性^[1]。关于土壤抗冲性的研究主要集中在抗冲性的机理、测试方法、评价指标、影响因素、强弱分级、时空变化及地域分异规律等方面^[2]。影响土壤抗冲性的因素主要包括海拔、坡度、植被覆盖度、生物多样性、土地利用方式、土壤理化性质及植物根系等^[3-4]。植物根系在改善土壤结构、提高土壤抗冲性、防治土壤侵蚀方面发挥着不可忽视的作用。国内外学者在植物根系对土壤抗冲性的影响等方面进行了大量的研究工作。Vannoppen 等^[5]研究认为,活根系能够改变土壤母质的机械和水文特征,增强土壤抗冲性。根系对抗冲性的作用主要体现在通过对土壤的穿插、缠绕、固结、错固等物理性作用,促进降水入渗,固持土体;以及通过分泌的化学物质来改善土壤的团粒结构,改变土壤的抗冲性^[6]。植物根系还能够增强土壤抗剪强度及土壤黏聚力,使得土壤不易被集中水流冲刷,提高土壤抗冲性^[7]。

土壤抗冲性的研究是揭示黄土高原土壤侵蚀规律的关键,而植物根系提高土壤的抗冲性能是林地保持水土机理研究中的核心问题之一^[8]。已有研究^[9]讨论了植物根系与土壤抗冲性的关系,但其作用机理及对土壤抗冲性增强作用的有效性仍需进一步探索,需要加强不同植被类型根系对土壤抗冲性影响等方面的研究。本文通过对黄土残塬沟壑区山西吉县蔡家川流域不同植被类型土壤抗冲性及植物根系对土壤抗冲性影响的研究,分析典型乔木、灌木及草本植物土壤冲刷过程中径流量、含沙量及抗冲指数的变化情况;量化土壤表层(0—10 cm)不同植被类型的根

系分布特征;阐明不同植物根系对土壤抗冲性增强作用的有效性及根系参数指标与土壤抗冲性强化值之间的相关关系,为根系土壤层水土保持功能提升技术提供理论基础。

1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川流域,该流域属于黄河一级支流昕水河流域的一级支流义亭河。流域大体呈西东走向,地理坐标为 110°39′45″—110°47′45″E, 36°14′27″—36°18′23″ N。海拔 900~1 587 m,面积 38 km²。境内属暖温带半干旱大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季温度较高。年均气温 10.3 ℃,日均气温 ≥10 ℃积温为 3 357.9 ℃,极端最高温 38.1 ℃,极端最低温为-20.4 ℃。年降水量为 575 mm,7—9 月的降雨量占全年总降水量的 59.46%,多以暴雨形式出现。年水面蒸发量为 1 732 mm,4—7 月蒸发量最大,占全年蒸发量的 54%。土壤类型为褐土,黄土母质,呈微碱性。研究区人工林地主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.)Franco)等树种组成的纯林或混交林。林下林地主要为华北紫丁香(*Syringa oblata* Lindl.)、连翘(*Forsythia suspensa* (Thunb.) Vahl)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* L.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)等灌木。

2 研究方法

2.1 样地选择与调查

在野外调查的基础上,选择山西吉县蔡家川流域主要植被类型:油松林、刺槐林、山杏林、荆条地及荒草地为研究对象,采取对比分析方法研究不同植被类型的土壤抗冲性。所选样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

植被类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	林龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	郁闭度/ %	平均 冠幅/m	草本层 平均盖度/%
油松林	1115	15	阳坡	27	35.15	7.5	75	3.2	60
刺槐林	1180	20	阳坡	26	34.6	15.5	80	3.5	75
山杏林	1135	10	阳坡	20	52.8	3.5	65	4.56	50
荆条地	968	25	阳坡	16	23.5	1.5	60	2.75	25
荒草地	960	10	阳坡	—	—	0.5	—	—	80

2.2 土壤抗冲试验

土壤抗冲性测定采用原状土冲刷水槽法^[9]。在 5 种植被类型所选样地内去除地上部植物及枯枝落叶物,用 20 cm×10 cm×10 cm(长×宽×高)的特制取样器取表层(0—10 cm)原状土样,各取 3 个重复。

采样时间为 2018 年 7 月。将带回的取样器底部垫滤纸置于水盘中,水从滤纸自下而上浸润土壤 12 h 直至达到饱和。然后,将饱和的原状土静置 8 h 去除土壤重力水后进行抗冲试验,试验冲刷槽尺寸为 2 m×0.1 m(长×宽),根据所选 5 种植被类型样地调查基

本情况,研究在同一坡度条件下,不同植被类型土壤抗冲性差异,统一设置冲刷坡度为 10° ,对试验场内降雨观测资料进行统计分析,根据研究区暴雨雨强在当地标准径流小区($20\text{ m}\times5\text{ m}$)产生的最大径流量来计算单位流量为冲刷流量,计算得出冲刷流量为 4 L/min ,根据当地暴雨频率最大的降雨历时设定冲刷时间为 15 min 。自产流后的前 3 min 用水盆每 1 min 收集 1 次径流泥沙样,随后每 2 min 收集 1 次,共取 9 次样。冲刷结束后用铝盒从各个水盆中取样,然后静置澄清,泥沙沉淀完全后倒掉上层清液,剩余泥水样置于烘箱中 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘干并测定泥沙质量(g)。抗冲指数计算为每冲刷掉 1 g 的烘干土所需水量,用 AS 表示(L/g), AS 愈大,土壤的抗冲性愈强。

$$AS=f\times t/W$$

式中: f 为冲刷流量(L/min); t 为冲刷时间(min); W 为烘干泥沙质量(g)。

土壤抗冲性增强值,用 E_v 表示,计算公式为: $\Delta AS/AS_0=(AS_r-AS_0)/AS_0$ 。式中: AS_r 为含根土壤的抗冲指数; AS_0 为无根系空白对照土壤的抗冲指数; ΔAS 表示由于根系存在而使土壤抗冲指数增加的值; E_v 值则表示由于土壤中根系的存在而使土壤抗冲性增加的倍数,从而能很好地反映根系对土壤抗冲性的增强效应^[10]。

2.3 根系参数测定

将做完抗冲性试验后的土块在细筛网中反复冲洗,获取干净的植株根系,在根系扫描仪中进行扫描后,用根系分析系统(WinRHIZO-EC),按照根径 $<0.5,0.5\sim1.0,1.0\sim2.0,2.0\sim5.0,>5.0\text{ mm}$ 的级别进行分析,得到植物根系根径、根长、根表面积、根体积等根系参数^[11]。根生物量指标是将植物根系置入 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干至恒定质量后称量所得。根系扫描分析时间为 2018 年 9 月。根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度计算为相应的根系指标与原状土取土器体积的比值^[12]。

2.4 数据统计与分析

采用 Excel 软件进行数据整理与初步分析,SPSS 20.0 软件进行数据相关性分析及回归模型构建。

3 结果与分析

3.1 土壤冲刷过程中径流量变化特征分析

原状土冲刷试验过程中,各植被类型径流量随冲刷时间的动态变化过程见图 1。由图 1 可知,不同植被类型径流量随冲刷时间的变化趋势不同。在相同冲刷坡度、相同冲刷流量的条件下,各植被类型径流量总体随时间的变化趋势不明显。这与杨玉梅等^[13]得出的不同土地利用方式土壤径流量随冲刷时间的变化趋势处于一个相对稳定的水平的结论相同。在

$1\sim3\text{ min}$ 内,不同植被类型径流量随冲刷时间均呈先增加后减少的变化趋势,且均在第 2 min 达到最大值。在 $5\sim15\text{ min}$ 内,各植被类型径流量大致在 $2.5\sim4.5\text{ L}$ 范围内变化。油松、刺槐林地径流量随时间延长大致呈逐渐降低的趋势,即油松、刺槐林地径流量逐渐减少。经样地调查情况可知,油松、刺槐林地林下草本植物及凋落的枯枝落叶层共同覆盖地表,在一定程度上能够起到阻延地表径流的作用,同时改善林地土壤理化性质,从而提高林地土壤的抗冲刷能力,减少径流的形成。山杏、荒草地径流量随时间延长呈先减少后增加的变化趋势。山杏林地第 9 min 时达到径流量的最低值,后又逐渐增加。荒草地在 $5\sim13\text{ min}$ 内,径流量逐渐降低,后略有增加。荆条地径流量随时间的变化趋势较平缓,在 13 min 径流量达到最大值。 15 min 冲刷结束时,刺槐、油松林地径流量较小且相差不大,荆条、荒草地、山杏林地径流量相对较大。油松、刺槐、山杏林地、荆条地、荒草地在 $5\sim15\text{ min}$ 土壤冲刷过程中产生的径流量最大值分别为最小值的 $1.53,1.51,1.27,1.12,1.34$ 倍。

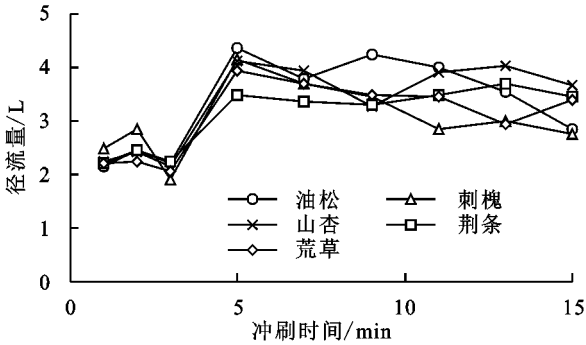


图 1 不同植被类型土壤冲刷过程径流量变化特征

3.2 土壤冲刷过程中含沙量变化特征分析

在原状土冲刷试验过程中,各植被类型含沙量随冲刷时间的变化趋势见图 2。由图 2 可知,随着冲刷时间的延长,不同植被类型含沙量总体呈先减少后趋于平稳的变化规律。这与何淑勤等^[14]的研究结论相一致。魏阜森等^[15]的研究同样表明,土壤冲刷初始阶段,径流含沙量最大,随着时间的推移,产生的地表径流泥沙流失量总体呈递减趋势,最后基本趋于一个水平值。在产流初期,表层土壤颗粒较为松散,在水流冲刷作用下,容易被推动下移,因此土壤冲刷初期径流含沙量较大。随着冲刷时间的延长,含沙量逐渐降低。从图 2 可以看出,各植被类型含沙量在前 5 min 内大体呈下降趋势, $5\sim15\text{ min}$ 径流含沙量较小且趋于平缓,彼此之间相差不大。其中荒草地径流含沙量初始值最高,达到 16.00 g/L ,后在 1 min 内急速下降,在 $2\sim15\text{ min}$ 冲刷过程中,含沙量缓慢降低。其次,荆条地初始径流含沙量也较大,为 9.80 g/L ,在 $1\sim2\text{ min}$ 内,含沙量急剧下降,在 $2\sim3\text{ min}$,含沙量

有所增加,后逐渐减少。山杏、油松、刺槐林地径流含沙量变化趋势大致表现为在前 3 min 逐渐降低,后趋于平缓。刺槐林地初始含沙量最小,在整个冲刷过程中随时间的变化也较为缓和。在 15 min 冲刷结束后,各植被类型含沙量很接近。刺槐林地含沙量最小,为 0.07 g/L。山杏林地径流含沙量与其他植被类型相比较较大,因山杏林地土壤受外界人为活动影响较大,且地表植被覆盖度较低,导致径流含沙量较高。

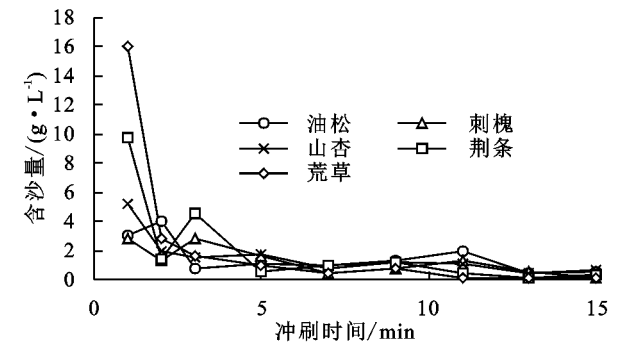


图 2 不同植被类型土壤冲刷过程含沙量变化特征

3.3 土壤冲刷过程中抗冲指数变化特征分析

不同植被类型土壤抗冲指数随冲刷时间的变化趋势见图 3。由图 3 可知,不同植被类型土壤抗冲指数随冲刷时间的变化总体呈上升趋势,说明随冲刷时间的延长,各植被类型土壤抗冲性逐渐增强。这与伏耀龙等^[16]土壤抗冲性随冲刷时间延长而增强,且这种关系不受土地利用方式的变化而改变的研究结论一致。由于各植被类型单位土体中表层土较为疏松,较容易被冲刷,在表层土几乎全部被冲刷掉之后,土壤较紧实,颗粒之间摩擦力增大,不易被冲刷,表现出的抗冲性较强^[17]。由图 3 还可看出,土壤抗冲指数上升最快和最高的是刺槐林地,其次是油松林地,最低的是荒草地;荆条和山杏林地土壤抗冲指数相差不大,变化趋势也较为一致。Burylo 等^[18]对刺槐、黑松及草地进行的水槽冲刷试验也得出相似的结论,即在集中水流冲刷试验中,刺槐样品的侵蚀率最低。可能是因为 0—10 cm 表层土壤中,刺槐、油松林根系分布密集,固结缠绕土体,改善土壤理化性质,使土壤结构更加合理,从而增强了表层土壤的抗冲性能。荆条地植物根系对土壤结构性质具有一定的改善作用。山杏林地及荒草地受外界人为活动的干扰较多,使得土壤抗冲性相对较低。

利用统计分析软件 SPSS 20.0 的曲线估计功能对抗冲指数(AS)与冲刷时间(*t*)做回归分析得出,在 15 min 原状土冲刷过程中,各植被类型土壤抗冲指数与冲刷时间均呈线性函数关系,其关系式见表 2。杨玉梅等^[13]研究表明,不同土地利用方式下土壤抗冲性随着冲刷时间的延长而增强,且二者之间的关系可用幂函数较好地拟合;储小院等^[19]同样研究得出,

典型林地土壤抗冲指数随时间变化特征为幂函数关系;任改等^[17]研究表明,土壤抗冲指数与时间的关系用指数函数拟合效果较好,与本研究所得的线性函数关系不同。

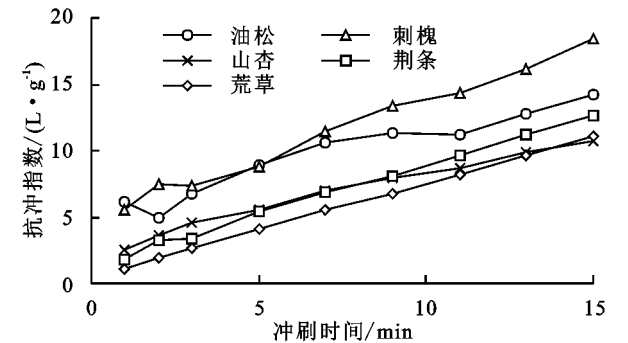


图 3 不同植被类型土壤冲刷过程抗冲指数变化特征

表 2 不同植被类型土壤抗冲指数与冲刷时间的关系式

植被类型	关系式	<i>R</i> ²
油松	$AS=0.061t+0.517$	0.932
刺槐	$AS=0.088t+0.495$	0.989
山杏	$AS=0.056t+0.263$	0.985
荆条	$AS=0.076t+0.139$	0.997
荒草	$AS=0.070t+0.051$	0.999

3.4 不同植被类型土壤表层植物根系特征

3.4.1 不同植被类型土壤表层总根系特征及根系参数相关性分析 不同植被类型土壤表层(0—10 cm)根系参数存在差异。由表 3 可知,5 种植被类型根长密度大小范围为 0.61~1.53 cm/cm³,根表面积密度范围为 0.09~0.34 cm²/cm³,根体积密度介于 0.001 2~0.006 3 cm³/cm³,根生物量密度介于 0.63~2.94 mg/cm³。不同植被类型土壤表层总根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度均表现为刺槐、油松林地较大,山杏、荆条、荒草地较小且相差不大。

表 3 不同植被类型土壤表层根系参数

植被类型	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根体积密度/ (cm ³ ·cm ⁻³)	根生物量密度/ (mg·cm ⁻³)
油松	1.09	0.25	0.0051	2.94
刺槐	1.53	0.34	0.0063	1.66
山杏	0.65	0.09	0.0012	1.19
荆条	0.61	0.10	0.0014	0.63
荒草	0.79	0.17	0.0035	1.33

各植被类型根系参数之间也具有一定的相关性。将 5 种植被类型根系扫描后所得各根系参数进行相关性分析(样本量 *N* = 15),得表 4 结果。由表 4 可知,各根系参数之间均存在正相关关系。其中植物根系的根长密度与其根表面积密度、根体积密度,根表面积密度与根体积密度,根体积密度与根生物量密度之间的相关性均达到极显著水平(*P* < 0.01)。根表面积密度与根生物量密度之间呈显著正相关关系(*P* < 0.05)。根表面积密度与根体积密度之间的相

关系数最大,达到 0.955;根长密度与根生物量密度之间的相关系数最小,为 0.630。与覃森^[12]的研究结论,黑麦草、紫花苜蓿各根系参数之间均呈显著或极显著正相关相似。

表 4 各植被类型根系参数之间的相关性分析

根系指标	根表面积密度	根体积密度	根生物量密度
根长密度	0.907 **	0.757 **	0.630
根表面积密度		0.955 **	0.737 *
根体积密度			0.825 **

注: * 表示各植被类型根系参数之间的相关性达到显著水平($P<0.05$); ** 表示各植被类型根系参数之间的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。

3.4.2 不同植被类型土壤表层各径级根系特征 由图 4 可知,不同植被类型土壤表层根系各根径级的根长密度存在差异。各植被土壤表层不同根径级的根长密度大小均表现为 0~0.5 mm>0.5~1.0 mm>1.0~2.0 mm>2.0~5.0 mm,各植被根径>5.0 mm 的根长密度均最小。这与吕刚等^[20]随着根系径级的不断增大,根系长度不断减小的研究结论相符。陈晏^[21]研究结果也表明,不同土地利用类型植物根系各根径级的根长指标中<0.5 mm 根系最长,其次为 0.5~1 mm 根系,1~3 mm 根系,最小的是>3 mm 的根系。植物根长密度指标能很好地表明根系在土壤中所占据的空间以及根系与土壤接触面积的大小情况^[22]。通过计算得出,各植被类型不同根径级的根系长度比(0~0.5 mm:0.5~1.0 mm:1.0~2.0 mm:2.0~5.0 mm)油松林为 1:0.42:0.26:0.09,刺槐林为 1:0.49:0.32:0.07,山杏林为 1:0.21:0.08:0.03,荆条地为 1:0.25:0.14:0.03,荒草地为 1:0.37:0.12:0.07。各植被类型根径范围为 0~0.5 mm 的根长密度均最大。说明细根根系长度大,可以延伸的范围较广,在土壤中穿插、缠绕、固结土壤,增加土壤的机械抗冲作用,同时细根能够通过分泌的化学物质,对于土壤结构及理化性质的改善起到非常大的作用,从而有效提高土壤抗冲性能。同一根径级,不同植被根长密度也不同,表现为刺槐、油松较大,山杏、荆条、荒草相对较小。

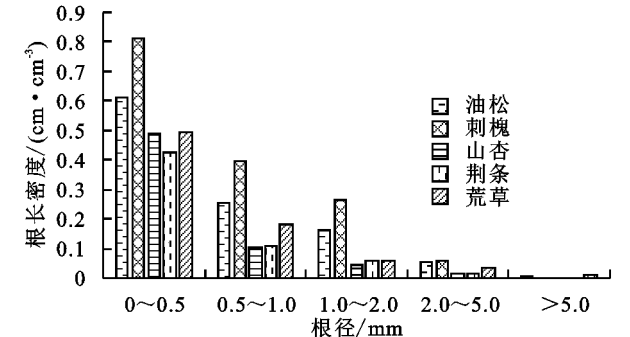


图 4 不同植被类型土壤表层各径级的根长密度

由图 5 可知,不同植被类型土壤表层根系各根径级的根表面积密度表现出不同的分布趋势。其中,

油松、刺槐表现为相似的规律,即由 0~0.5 mm 到 1.0~2.0 mm 根表面积密度递增,至 1.0~2.0 mm 根表面积密度达到最大值,随根径的继续增大,根表面积密度逐渐减小,而且各根径根表面积密度均表现为刺槐>油松。山杏根表面积密度随着根径的增大呈逐渐减小的趋势。0~0.5,0.5~1.0,1.0~2.0 mm 的根表面积密度相差不大,2.0~5.0 mm 及>5.0 mm 根表面积密度明显下降。荆条地则表现为由 0~0.5 mm 到 0.5~1.0 mm 逐渐降低,1.0~2.0 mm 略有增加,后逐渐降低,>5.0 mm 根表面积密度最小。荒草各根径级根表面积密度表现为 0~0.5,0.5~1.0,2.0~5.0 mm 较大,1.0~2.0 mm 径级的根表面积密度较小,>5.0 mm 根表面积密度最小。根系表面积的大小反映了植物根系与土壤接触面积的大小,这一指标综合了根径与根长 2 个因子,单位体积根系表面积与土壤抗冲性之间往往具有相关性,有学者^[23]研究根系与土壤抗冲性关系时,将根系表面积密度作为影响土壤抗冲性的一个重要根系指标。

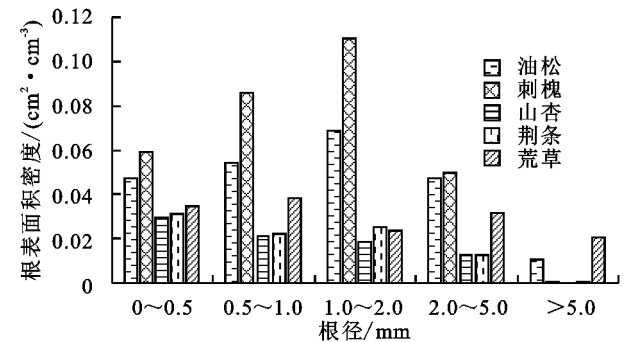


图 5 不同植被类型土壤表层各径级的根表面积密度

由图 6 可知,不同植被类型各根径级的根体积密度总体表现为细根比粗根小。各植被类型 0~0.5 mm 径级的根体积密度均较小。刺槐、油松、山杏、荆条根系随根径级的增加,根体积密度呈先增加后减少的变化趋势,刺槐 1.0~2.0 mm 径级的根体积密度最大,油松、山杏、荆条 2.0~5.0 mm 径级的根体积密度最大。荒草根系随径级增大,根体积密度逐渐增加,>5.0 mm 根体积密度最大。除>5.0 mm 根径外,其余根径范围的根体积密度大致表现为刺槐>油松>荒草>荆条>山杏,且刺槐、油松的根体积密度远大于其余 3 种植被类型。

3.5 植物根系对土壤抗冲性的影响

植物根系一方面通过在土壤中的穿插,形成根系网,起到网络固结土体的作用,这种机械网络作用使得土壤不容易被水流冲刷搬运;另一方面,植物根系的存在能够改善土壤的物理化学性质,使土壤结构更加合理,从而提高土壤的抗冲性。根系密度是影响土壤抗冲性的关键指标之一^[24]。De Baets 等^[25]通过测定 26 种典型植被类型根密度、根长密度等根系指

标,用经验模型预测植物根系的减蚀作用,得出表层土壤中根系密度高的某些植物种,能够有效减轻土壤侵蚀速率;Vannoppen 等^[26]研究表明,与无根裸土相比,植物根系能够有效降低土壤水蚀速率,其中细根的作用更加明显。谢欣利等^[27]研究得出,根径<0.5 mm 的根长与土壤抗冲性的相关性最强,呈极显著的线性关系。土壤抗冲性增强值,用 E_v 表示,计算公式为: $\Delta AS/AS_0=(AS_r-AS_0)/AS_0$ 。式中: AS_r 为冲刷试验结束后所计算的含根土壤的抗冲指数; AS_0 为无根系空白对照土壤的抗冲指数,则 ΔAS 表示由于根系存在而使土壤抗冲指数增加的值,那么 E_v 值就是由于土壤中根系的存在而使土壤抗冲性增加的倍数,从而能很好地反映根系对土壤的抗冲性增强效应^[10]。由表 5 可知,不同植被类型植物根系均能增强土壤的抗冲性,刺槐和油松对土壤抗冲性的增强效应较强,土壤抗冲性增强值分别为 4.16,3.44。荆条、山杏的增强效应次之且彼此之间相差不大,分别为 2.25,2.18,荒草根系对土壤抗冲性的增强效应最弱,土壤抗冲性增强值为 0.59。

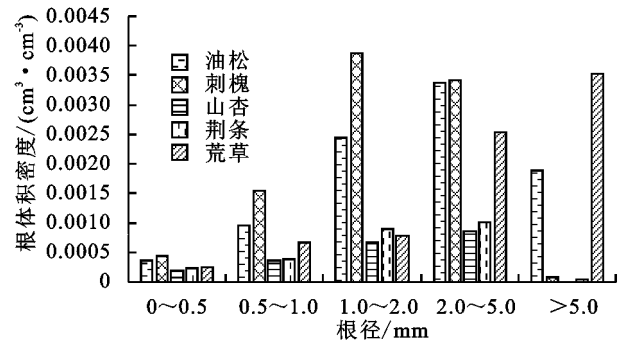


图 6 不同植被类型土壤表层各径级的根体积密度

表 5 植物根系对土壤抗冲性的增强值

参数	油松	刺槐	山杏	荆条	荒草
$\Delta AS/(L \cdot g^{-1})$	1.23	1.49	0.78	0.80	0.33
E_v	3.44	4.16	2.18	2.25	0.59

表 6 土壤抗冲性强化倍数 E_v 与植物根系参数之间的相关性												
参 数	根长密度/($\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$)				根表面积密度/($\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$)				根体积密度/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)			
根系径级/mm	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0	0~0.5	0.5~1.0	1.0~2.0	2.0~5.0
E_v	0.966 **	0.817 **	0.691	0.516	0.970 **	0.805 **	0.684	0.505	0.934 **	0.793 *	0.677	0.491

注: * 表示相关性达到显著水平($P<0.05$); ** 表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)。

4 结论

- (1)在原状土冲刷试验过程中,各植被类型径流量相差不大,且随时间的变化趋势相对稳定,含沙量随时间延长呈先降低后趋于平缓的变化规律,抗冲指数总体呈上升趋势,即随冲刷时间的延长,各植被类型土壤抗冲性逐渐增强,且土壤抗冲指数与冲刷时间均呈线性函数关系。
- (2)不同植被类型土壤表层(0—10 cm)根系参数之间存在差异。5 种植被类型总根长密度大小范

围为 0.61~1.53 cm/cm^3 ,根表面积密度范围为 0.09~0.34 cm^2/cm^3 ,根体积密度介于 0.001 2~0.006 3 cm^3/cm^3 ,根生物量密度介于 0.63~2.94 mg/cm^3 。总根长密度、根表面积密度、根体积密度及根生物量密度均表现为刺槐、油松林地较大,山杏、荆条、荒草地较小且相差不大。总根系参数之间均存在正相关关系。各植被类型 0~0.5 mm 径级的根长密度均最大,根表面积密度随根径级的变化表现为不同的特征,根体积密度总体表现为细根根体积密度比粗根小。

植物根系对土壤抗冲性的增强效应与各根系参数之间存在一定的相关关系。尤其是根径<1 mm 的细根对土壤有网结、固持作用,增大了水流运动的阻力,提高径流入渗率,增强土壤抵抗径流冲刷的能力^[28]。杨玉梅^[29]研究得出,各根系参数中<1 mm 须根根系的根长、根表面积、根体积与土壤抗冲性强化值均呈显著或极显著正相关,而与>1 mm 根系参数无相关性,即植物根系中<1 mm 径级的根系在增强土壤抗冲性方面起到主要作用。舒乔生等^[30]对土壤抗冲性与根密度之间的关系进行曲线拟合,得出抗冲性与根径<1 mm 根密度之间可用幂函数表示。湛芸等^[31]研究得出,根系径级为 0.5~1.5 mm 的根系有利于土壤抗冲性的增强。对 5 种植被类型土壤抗冲性增强值与所对应的主要根系参数指标数据整理后进行相关性分析(样本量 $N=9$),所得相关系数结果见表 6。由表 6 可知,土壤抗冲性增强值与根系参数之间存在正相关关系。<1 mm 径级根系的根长密度、根表面积密度、根体积密度与土壤抗冲性增强值呈显著或极显著正相关,其他径级根系参数与土壤抗冲性增强值相关性不显著。这与张金池等^[32]土壤抗冲性强化值主要与根径 ≤ 0.5 mm 和 0.5~1 mm 2 种径级的根密度与根量之间呈极显著相关关系的研究结论相似。卢立霞等^[33]的研究同样表明,土壤抗冲性的增强效应与根径<1 mm 的根系长度、表面积、体积之间呈极显著或显著相关,而与径级>1 mm 的根系指标的相关系数较小。植物根系中<1 mm 径级的细根对土壤抗冲性的增强起到主导作用,细根通过机械网络缠绕土体,增强土壤抗剪强度,还具有一定的抗拉能力,能够抵抗径流的冲刷力。细根与土壤的接触面积较大且代谢旺盛,能够增加土壤有机质与水稳性团聚体含量,改善土壤结构,在增强土壤抗冲性方面发挥着积极作用^[34]。

(3)不同植被类型植物根系均能增强土壤的抗冲性,增强效应表现为刺槐和油松较强,土壤抗冲性增强值分别为 4.16,3.44。荆条、山杏的增强效应次之且彼此之间相差不大,分别为 2.25,2.18,荒草根系对土壤抗冲性的增强效应最弱,土壤抗冲性增强值为 0.59。植物根系指标中 $<1\text{ mm}$ 径级根系的根长密度、根表面积密度、根体积密度与土壤抗冲性增强值呈显著或极显著正相关关系。其他径级根系参数与土壤抗冲性增强值相关性不显著。

参考文献:

- [1] 朱显谟.黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J].水土保持通报,1982,2(1):25-30.
- [2] 郭明明,王文龙,史倩华,等.黄土高原沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].农业工程学报,2016,32(10):129-136.
- [3] 侯春镁,李玲,温昌焘.土壤抗冲性研究方法及其影响因素综述[J].现代农业科技,2017(2):230-232.
- [4] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- [5] Vannoppen W, Vanmaercke M, De Baets S, et al. A review of the mechanical effects of plant roots on concentrated flow erosion rates [J]. Earth-Science Reviews, 2015,150:666-678.
- [6] 王俭成.北川地区典型林分土壤抗蚀性与抗冲性研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [7] Baets S D, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM[J]. Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2008, 33(13):1948-1963.
- [8] 李强.黄土丘陵区植物根系强化土壤抗冲性机理及固土效应[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2014.
- [9] 张素,熊东红,苏正安,等.土壤抗冲性及其影响因素研究进展[J].世界科技研究与发展,2014,36(6):721-725.
- [10] 徐少君,曾波.三峡库区 5 种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J].水土保持学报,2008,22(6):13-18.
- [11] 刘红岩,周正朝,刘俊娥,等.黄土区草被生长过程中土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].水土保持学报,2017,31(2):72-78.
- [12] 覃森.黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的实验研究[D].西安:陕西师范大学,2016.
- [13] 杨玉梅,郑子成,李廷轩.不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(4):64-68.
- [14] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被条件下土壤抗冲性及其影响因素[J].水土保持通报,2013,33(6):75-79.
- [15] 魏阜森,刘益军,代数,等.紫色土丘陵区不同耕作模式土壤抗冲性对比分析[J].防护林科技,2012(3):1-5.
- [16] 伏耀龙,张兴昌.岷江干旱河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.
- [17] 任改,张洪江,白芝兵.重庆四面山水源涵养林土壤抗冲性及影响因素[J].中国水土保持科学,2013,11(1):1-7.
- [18] Burylo M, Rey F, Mathys N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012,37(14):1463-1470.
- [19] 储小院,王云琦.长江三峡重庆库区不同植被条件下土壤抗冲性研究[J].林业建设,2012(5):42-46.
- [20] 吕刚,刘红民,高英旭,等.排土场边坡根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J].土壤通报,2014,45(3):711-715.
- [21] 陈晏.紫色土丘陵区土壤抗冲性及影响因素研究[D].重庆:西南大学,2007.
- [22] Baets S D, 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: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 2007,32(9):1323-1345.
- [23] 郭汉清,张勇.沙沟小流域不同土地利用方式土壤抗冲性研究[J].山西农业科学,2014,42(5):470-472.
- [24] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013,29(10):153-159.
- [25] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant and Soil, 2007,294(1/2):169-183.
- [26] Vannoppen W, De Baets S, Keeble J, et al. How do root and soil characteristics affect the erosion-reducing potential of plant species? [J]. Ecological Engineering, 2017,109:186-195.
- [27] 谢欣利,王计磊,路培,等.黄土缓坡耕地粟株不同生育期土壤的抗冲性特征[J].泥沙研究,2018,43(5):52-57.
- [28] 李玉婷,张建军,茹豪,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤抗冲性及糙率的影响[J].水土保持学报,2013,27(4):1-6.
- [29] 杨玉梅.不同土地利用方式下土壤抗蚀与抗冲性研究[D].四川 雅安:四川农业大学,2010.
- [30] 舒乔生,谢立亚.沙棘林退化对林木根系和土壤抗冲性的影响[J].浙江农林大学学报,2014,31(3):380-385.
- [31] 湛芸,何丙辉,练彩霞,等.三峡库区陡坡根-土复合体抗冲性能[J].生态学报,2016,36(16):5173-5181.
- [32] 张金池,臧廷亮,曾锋.岩质海岸防护林树木根系对土壤抗冲性的强化效应[J].南京林业大学学报(自然科学版),2001,25(1):9-12.
- [33] 卢立霞,曾波.三峡库区嘉陵江岸生优势须根系植物根系对土壤抗冲性的增强效应研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2006,31(3):157-161.
- [34] 占海歌.3 种草本植物根系特征对土壤抗侵蚀性能影响[D].武汉:华中农业大学,2017.