

成兰铁路受损边坡土壤抗冲性及其影响因素

韩美清^{1,2}, 吴维洲³, 万炳宏⁴, 闫晓俊⁵, 冯 潇⁶, 柯 尧⁷, 郑江坤⁶

(1.中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳卫研究所, 北京 100038;

2.中国国家铁路集团有限公司工程管理中心, 北京 100038; 3.成兰铁路有限责任公司, 成都 610036;

4.中铁二十五局集团第一工程有限公司, 广州 510405; 5.四川农业大学 风景园林学院,

成都 611130; 6.四川农业大学 林学院, 成都 611130; 7.中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:高陡边坡框格回填土抗冲性是边坡绿化研究的重点,为探究成兰铁路受损边坡不同恢复时期土壤抗冲性变化特征及其影响因素,以成兰铁路镇江关段(Z)和川主寺段(C)的受损边坡(Z_2, C_2)为研究对象,以原始植被区(Z_1, C_1)和自然恢复区(Z_3, C_3)为对照,采用原状土冲刷法和通径分析进行了研究。结果表明:土壤抗冲刷系数和径流含沙量随着冲刷时间的增加分别呈上升和下降趋势,均呈幂函数变化,亚高山区土壤的抗冲刷系数整体高于干旱河谷区,原始植被区土壤抗冲性最大,人工回填区最小;有机质含量、土壤密度、总孔隙度和土壤容重是成兰铁路松潘段受损边坡土壤抗冲性的主导因素,其中土壤密度对土壤抗冲性表现出最强烈的直接作用。提高人工回填土中有机质含量和土壤总孔隙度可提高土壤抗冲性,可为植被恢复提供重要土壤条件。

关键词:水土保持与荒漠化防治; 土壤抗冲性; 通径分析; 高陡边坡; 成兰铁路

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0400-07

Soil Anti-Scourability and Its Influence Factors of Damaged Steep Slope of Chenglan Railway

HAN Meiqing^{1,2}, WU Weizhou³, WAN Binghong⁴, YAN Xiaojun⁵,

FENG Xiao⁶, KE Yao⁷, ZHENG Jiangkun⁶

(1.Labor and Health Research Institute of Energy Conservation and Environmental

Protection, China Railway Research Institute Group Co., Ltd., Beijing 100038, China;

2.Engineering Management Center of China National Railway Group Co., Ltd., Beijing 100038,

China; 3.Chengdu-Lanzhou Railway Co., Ltd., Chengdu 610036, China; 4.First Engineering Co., Ltd. of

China Railway 25th Bureau Group, Guangzhou 510405, China; 5.College of Landscape Architecture,

Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 6.College of Forestry, Sichuan Agricultural

University, Chengdu 611130, China; 7.China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract:Northwestern Sichuan Province is an important ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River Basin. Anti-scourability of frame backfill soil was the focus in a large number of high and steep slopes of infrastructure projects, such as highways, railways and buildings. In order to explore the characteristics and influences of soil anti-scourability in different recovery periods of damaged slopes near Chenglan Railway, the zones of Zhenjiangguan and Chuanzhusi town were divided into original vegetation area (Z_1, C_1), artificial backfill area (Z_2, C_2), and natural restoration area (Z_3, C_3), which belong to dry valley area and subalpine area, respectively. Undisturbed soil scouring experiment and path analysis were applied to study soil anti-scourability and main factors. The results showed that sediment concentration and soil anti-scourability index decreased and increased with the increase of scouring time, respectively, and gradually became stable after 10 minute. The relationship between sediment concentration, scouring time and soil anti-scourability index can be expressed by power function. The anti-scourability of artificial backfill soil was the

收稿日期:2020-10-08

修回日期:2020-10-23

资助项目:成兰公司重大工程试验项目(CLSY-2018-001);四川省科技厅应用基础项目(2019YJ0422)

第一作者:韩美清(1971—),女,山西原平人,研究员,博士,主要从事铁路建设项目环水保管理和技术研究。E-mail:57153214@qq.com

通信作者:吴维洲(1966—),男,四川开江人,高级工程师,硕士,主要从事大型铁路建设工程技术管理工作。E-mail:2987894481@qq.com

郑江坤(1982—),男,河北邢台人,副教授,博士,主要从事生态水文与水土保持研究。E-mail:jiangkunzheng@126.com

worst, followed by that of natural restoration area and original vegetation area. On the whole, the soil anti-scourability of subalpine area was greater than that of dry valley area. Through correlation analysis and path analysis, organic matter content, soil density, total porosity and soil bulk density were the leading factors affecting the soil anti-scourability of high and steep slopes near Chenglan Railway, in which soil density showed the strongest direct effect on soil anti-scourability. Increasing the content of soil organic matter and soil total porosity in artificial backfill soil can improve soil anti-scourability, and then provide important basis for vegetation restoration.

Keywords: soil and water conservation & desertification combating; soil anti-scourability; path analysis; high and steep slope; Chenglan Railway

土壤抗冲性指土壤抵抗径流冲刷对其机械破坏和推动下移的能力^[1]。目前学者从地形^[2]、土壤^[2]、气候^[3]、植被^[4]、人为因素^[6]等方面对土壤抗冲性做了大量研究,提出土壤抗冲性随着坡度的增加而减弱^[7];改善土壤的团粒结构和机械组成是提高土壤抗冲性的关键,随着黏粒含量和大粒径水稳性团聚体含量增加,土壤抗冲性呈增强趋势^[8];植被可明显降低降雨侵蚀,地表枯落物层可明显增加地面粗糙度,提高表层土壤的抗冲性,土壤抗冲性随着土层深度增加而减小,与 $d \leq 0.01$ mm 径级的须根密度关系最为密切^[9]。但学者们多探讨土壤抗冲的单一影响因素,综合评价少,且川西北地区的相关研究更少。

成兰铁路建设工程中形成大量的裸露边坡和弃渣场,其生态环境问题日益突出^[10]。边坡是铁路沿线生态系统最脆弱的区域之一,其安全防护和绿化美化是铁路生态建设的重点。本研究以成兰铁路松潘段为例,利用通径分析等方法研究受损边坡土壤抗冲性变化特征及其影响因素,以期为控制和治理成兰铁路受损边坡生态环境提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于成兰铁路松潘境内的镇江关和川主寺附近。镇江关地处四川省阿坝藏族羌族自治州松潘县南段,平均海拔 2 150 m,地貌以高山峡谷为主。该区属干旱河谷气候,干湿季分明,气候干燥。年均气温为 5.7℃,年均降水量为 720 mm,年日照时数 1 600 h 以上。土壤以山地褐土为主,土层浅薄,极度贫瘠。植物有刺柏(*Juniperus formosana*)、蔷薇(*Rosa*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、小檗(*Berberis amurensis*)、栒子(*Cotoneaster*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)等。

川主寺地处松潘县北段,平均海拔 2 980 m,地形以亚高山和中山为主,境内地貌复杂,地处岷山山脉中段,青藏高原东南缘,为四川盆地与青藏高原过渡地带。该区属寒温季风气候,冬长无夏、昼夜温差大,垂直差异明显,干湿季分明。年均气温 4.8℃,年

均降雨量 693.2 mm,年日照时数约 2 000 h。土壤主要为山地棕褐土和山地棕壤。植物有沙柳(*Salix cheilophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、云杉(*Picea asperata* Mast.)等。

2 材料与方法

2.1 样地设置

镇江关样地位于镇江关镇政府南 700 m 的 213 国道东侧,川主寺研究样地位于川主寺镇政府西北 2.2 km 的 213 国道东北侧。根据铁路修建受损边坡植被恢复情况分为镇江关原始植被区(Z_1)、人工回填区(Z_2)、自然恢复区(Z_3)和川主寺原始植被区(C_1)、人工回填区(C_2)和自然恢复区(C_3)。原始植被区指未受到人为扰动的区域,人工回填区指受损边坡经框格固坡后填土的区域,区域内无植被覆盖,自然恢复区指受损边坡后经框格护坡工程自然搁置 3~4 a 的区域,在各植被恢复区分别随机设置 6 个 5 m×5 m 的灌木样方和 12 个 1 m×1 m 草本样方,记录灌木和草本植物的种名、株数、高度及盖度等,样地基本情况见图 1 和表 1。

2.2 样品采集

植被调查和样品采集于 2018 年 8 月 20 日至 8 月 25 日,在各样地 6 个灌木样方内避开树根随机采集 0—20 cm 土层土样装入密封样品袋,并清理地表植被和凋落物,用环刀和自制取样器(长 10 cm×宽 10 cm×高 10 cm)采集表层原状土带回实验室备用。各样地土壤基本性质见表 2。

2.3 研究方法

2.3.1 土壤理化性质测定 土壤密度、毛管孔隙、非毛管孔隙、总孔隙度、土壤容重采用环刀法测定,土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热氧化法测定^[11]。

2.3.2 土壤抗冲性测定 土壤抗冲性测定采用原状土冲刷水槽法^[3],试验前,将特制取样器(规格 10 cm×10 cm×10 cm)采集的原状土带回实验室后,连同铝制底片放置装有 8 cm 深的水盆中,浸泡 12 h 后,

取出轻放在铁架台上 8 h, 除去重力水后待试验, 每个试验区做 3 次重复。冲刷水槽长 2.0 m, 宽 0.1 m, 高 0.1 m; 水槽的试验坡度均设定为 15°; 根据松潘县降雨数据和该区径流系数特征, 将流量设定为 2.8 L/min。把待试验的取样器放入冲刷槽中, 打开阀门, 当水流流过取样器中的土壤开始计时, 总共冲刷 34 min, 前五组每隔 2 min 记录一次, 中间四组每隔 3 min 记录一次, 最后三组每隔 4 min 记录一次, 总共记录 12 次。将水桶中泥水混合物过滤后小心倒入铝

盒内, 置于烘箱烘干后, 测量其泥沙含量(g)。抗冲指数为每冲刷掉 1 g 的烘干土所需水量, 用 AS(L/g) 表示, AS 越大, 表示土壤的抗冲性愈强。

$$AS=\frac{f\times t}{W}$$

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)。为便于比较, 采用 34 min 冲刷时间所流出水量和所冲刷的泥沙干重之比来表示土壤抗冲刷系数^[12]。



图 1 成兰铁路镇江关(A)和川主寺(B)受损边坡植被恢复分区

表 1 试验样地基本情况

编号	海拔/m	坡度/(°)	坡向	灌木				草本			
				密度/ (株/25 m ²)	盖度/%	Simpson 指数	Margalef 指数	密度/ (株·m ⁻²)	盖度/%	Simpson 指数	Margalef 指数
Z ₁	2646	15	东北	51	12.13	0.78	1.74	147	4.50	0.69	1.61
Z ₃	2650	35	东北	43	11.14	0.70	1.92	162	5.24	0.67	1.48
C ₁	2920	40	西南	11	9.40	0.46	1.44	20	0.33	0.48	0.62
C ₃	2880	20	西南	0	0	0	0	148	1.69	0.70	1.82

表 2 成兰铁路川主寺和不同植被恢复样地土壤基本性质

编号	土壤密度/ (g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	毛管 孔隙度/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	土壤 有机质/%	土壤抗冲刷系数/ (L·g ⁻¹)
Z ₁	1.02±0.10a	54.16±3.69a	40.22±4.43b	1.20±0.10b	28.55±3.68a	562.93±210.29abc
Z ₂	1.21±0.03a	38.78±4.20a	30.75±2.74a	1.37±0.03c	10.42±0.60b	278.95±285.00bc
Z ₃	1.19±0.16a	48.78±2.39a	40.84±2.49b	1.34±0.18b	27.03±2.83a	391.21±290.71bc
C ₁	1.06±0.14a	54.26±5.41a	46.32±2.80b	1.44±0.17a	26.65±3.15a	1710.04±556.15a
C ₂	1.51±0.13b	39.06±4.42b	34.50±2.83a	1.84±0.15bc	7.62±1.85b	34.71±22.81c
C ₃	1.08±0.21a	52.28±3.77a	38.42±5.75b	1.47±0.39b	8.58±0.50a	1430.71±1364.48ab

注:表中数据为平均值±标准差。同列不同字母代表不同样地之间存在显著性差异($p<0.05$)。

2.3.3 根系指标测定 将土样置于水中浸泡,用 0.5 mm 滤网筛反复冲洗,洗净土样中所有根系装入塑料盒中,观察记录根的完整形态,然后将洗净的根系小心平铺在透明的扫描皿中,摆放时各根系间不交叉重叠,且注意扫描皿边界根系能被扫描成像,盖上背景板后放入扫描仪中进行扫描,得到根系图像。利用 Photoshop 软件对图像进行裁剪、调色等处理,以便增强根系的清晰度,在根系图像订正完成后,用 WinRHIZO 根系系统分析软件来获得总根表面积、总根体积、根长等根系指标参数。根系扫描完成后,将根系晾干,装入铝盒,将铝盒置于烘箱中,烘干至恒重取出,用 1/10 000 电子

天平称重,得到根重(g)。

2.3.4 通径分析^[13] 通径分析可分解多个自变量与因变量之间的线性关系,将相关系数 r_{iy} 分为直接通径系数 p_{iy} (某一自变量对因变量的直接作用)和间接通径系数 $r_{ij} \cdot p_{jy}$ (该自变量通过其他自变量对因变量的间接作用),即自变量 x_i 与因变量 y 之间的相关系数 r_{iy} 是 x_i 对 y 的直接作用和其他所有 x_i 对 y 的间接作用之和。其中直接通径系数 p_{iy} 表示通过多元线性回归分析得到的自变量 x_i 的标准化系数,间接通径系数 $r_{ij} \cdot p_{jy}$ 表示 x_i 与 x_j 之间的相关系数 r_{ij} 和 x_j 对 y 的直接通径系数 p_{jy} 的乘积。通过软件进

行线性回归计算,计算结果中的标准化系数也就是我们需要的直接通径系数,再乘以两自变量之间的相关系数就可以获得间接通径系数。

首先对土壤抗冲性数据进行正态转换并检验, $n=18$ 属于小样本,因此对因变量 y 进行 Shapiro-Wilk 正态性检验,结果显示近似服从正态分布,可进行相关性分析,把土壤抗冲刷系数作为因变量 y ,把土壤有机质含量 x_1 ,土壤密度 x_2 ,最大持水量 x_3 ,田间持水量 x_4 ,毛管孔隙 x_5 ,非毛管孔隙 x_6 ,总孔隙度 x_7 ,土壤容重 x_8 ,总根表面积 x_9 ,平均根系直径 x_{10} ,总根体积 x_{11} , <0.5 mm 须根根长 x_{12} ,根表面积 x_{13} ,根体积 x_{14} ,根系密度 x_{15} ,总根质量 x_{16} ,总根长 x_{17} ,根尖数 x_{18} ,分枝数 x_{19} 和交叉数 x_{20} 作为自变量。采用 SPSS 23.0 软件对数据进行相关分析。

3 结果与分析

3.1 土壤冲刷过程中径流含沙量的变化

在原状土冲刷试验过程中,各受损边坡含沙量随冲刷时间的变化趋势见图 2。在产流初期,含沙量均较大,随产流时间的增加含沙量呈规律性递减,整体趋势为先减少后趋于平稳,这与金晓等^[14]的研究结论一致。除 C_3 外,变化趋势可以由幂函数很好的拟合,相关指数介于 0.910 5~0.994 7。产流初期,由于表层土壤比较疏松,在冲刷过程中土壤颗粒易被搬离,所以初始径流含沙量较大。在 0~2 min 阶段, Z_1 , Z_3 和 C_1 的初始径流含沙量约是末期径流含沙量的 8 倍, Z_2 , C_2 的初始径流含沙量约是末期径流含沙量的 4 倍, C_3 的初始径流含沙量约是末期径流含沙量的 2 倍。表层土壤更易被冲刷,由于植被根系的固土作用,深层土壤不易被冲刷。随着冲刷时间的延长,含沙量逐渐降低。各受损边坡土壤产流后前 6 min 阶段含沙量急剧减小,6~10 min 阶段下降缓慢,随后在一个较低水平趋于稳定。在干旱河谷区,土壤冲刷结束后径流含沙量表现为 Z_2 (0.287 g/L) $>$ Z_3 (0.203 g/L) $>$ Z_1 (0.156 g/L)。在亚高山地区,土壤冲刷结束后径流含沙量表现为 C_2 (0.168 g/L) $>$ C_3 (0.081 g/L) $>$ C_1 (0.018 g/L)。人工回填区没有植被覆盖,更易被冲刷;植被生长稀疏的自然恢复区植物根系在一定程度上固土作用;植被丰富的原始植被区土壤径流量显著减少,丰富的植被增强了土壤抗冲性。其中 C_2 径流含沙量初始值最高,达到 7.12 g/L, C_1 , C_3 初始径流含沙量最小,分别为 0.15 g/L, 0.16 g/L。由此可知, C_2 相比于 Z_2 土壤受损程度最大,土壤更松散,更易被冲刷。 C_1 植被茂盛,根系发达,相比于 Z_1 土壤抗冲性强; C_3 相比于 Z_3 土壤抗冲性也较强,说明干

旱河谷区交亚高山同类型土壤更容易发生侵蚀。

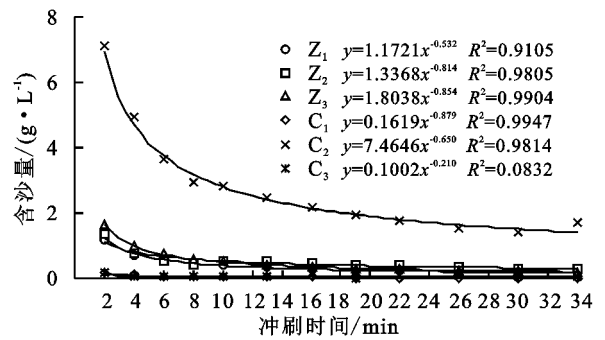


图2 干旱河谷和亚高山受损边坡不同恢复时期含沙量动态变化特征

3.2 土壤冲刷过程中抗冲指数的变化

由图 3 看出,土壤抗冲指数随冲刷时间延长总体呈上升趋势,且这种关系不受边坡恢复程度变化而改变,这与伏耀龙等^[15]研究结果一致。土壤抗冲指数与时间的拟合曲线呈幂函数,相关系数范围为 0.752 9~0.979 4。由于边坡土壤表层较为疏松,容易被冲刷,深层土壤较紧实,且有须根加固,颗粒之间摩擦力增大,不易被冲刷,表现较强的抗冲性,所以在不同恢复程度下的土壤抗冲性随冲刷时间的延长而增强。

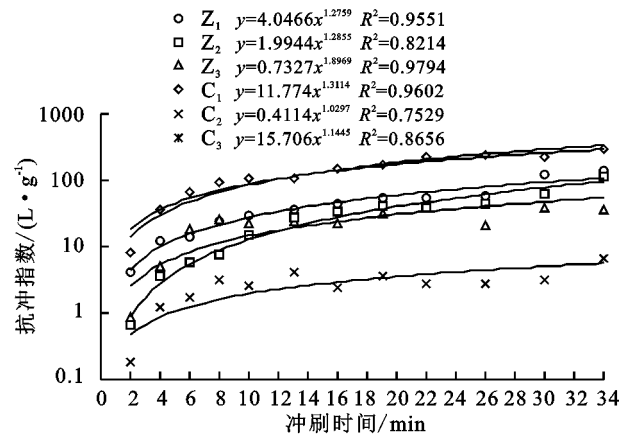


图3 干旱河谷和亚高山受损边坡不同恢复时期土壤抗冲指数动态变化特征

由图 3 可知, C_1 和 C_3 的土壤抗冲指数增速较大, C_2 的土壤抗冲指数增速较小。干旱河谷 3 种不同受损边坡的抗冲性指数表现为 Z_1 (589.70 L/g) $>$ Z_3 (391.21 L/g) $>$ Z_2 (285.00 L/g);亚高山地区 3 种不同受损边坡的抗冲性指数为表现为 C_1 (1 710.04 L/g) $>$ C_3 (1 622.65 L/g) $>$ C_2 (34.71 L/g)。在原始植被土壤中,根系分布密集,固结缠绕土体能力强,土壤理化性质得到改善,从而增强了土壤的抗冲性能。自然恢复区植被恢复了 3~4 a,植物根系对土壤结构性质具有一定的改善作用,但远不如原始植被区。人工回填区无植被覆盖,且土壤孔隙度低,有机质含量少,土壤容重高,土体紧实,结构性和通透性较差,所以土壤抗冲性较小。

3.3 土壤抗冲性的相关性分析

由表 3 可知,土壤抗冲性与土壤有机质含量 x_1 , 土壤密度 x_2 ,最大持水量 x_3 ,田间持水量 x_4 ,毛管孔隙度 x_5 和总孔隙度 x_7 间存在极显著相关关系($p<0.01$),其中与 x_1, x_3, x_4, x_5 和 x_7 呈正相关;而与土壤密度 x_2 呈负相关,即随土壤密度的增加,土壤抗冲性减弱。因为影响因素间存在多重共线性,对土壤抗冲性的影响效果重叠,为了消除多重共线性,采用通径分析法进一步研究。

表 3 土壤抗冲刷系数相关性显著的因子间相关系数

相关因子	土壤抗冲刷系数 y	有机质含量 x_1	土壤密度 x_2	最大持水量 x_3	田间持水量 x_4	毛管孔隙 x_5
有机质含量 x_1	0.600**					
土壤密度 x_2	-0.702**	-0.514*				
最大持水量 x_3	0.756**	0.531*	-0.943**			
田间持水量 x_4	0.711**	0.660**	-0.826**	0.799**		
毛管孔隙 x_5	0.760**	0.557*	-0.456	0.594**	0.739**	
总孔隙度 x_7	0.753**	0.574*	-0.875**	0.971**	0.780**	0.682**

注: ** 表示相关性在 0.01 水平上显著; * 表示相关性在 0.05 水平上显著。下表同。

3.4 土壤抗冲性的通径分析

通径分析过程中剔除了影响不显著或存在多重共线性的变量,变量 x_1, x_2, x_7, x_8 被选入最优模型。由此可见,在 20 项影响因素中, x_1, x_2, x_7 和 x_8 对土壤抗冲刷系数有较为直接且显著的作用,是影响土壤抗冲性的主导因素。表 4 为主导因素对土壤抗冲刷系数的通径系数,其中 x_1 和 x_7 与土壤抗冲刷系数呈正相关, x_2 和 x_8 与土壤抗冲刷系数呈负相关。主导因素直接通径系数的绝对值大小依次为: x_2 (-2.665), x_8 (1.877), x_7 (-0.590), x_1 (0.523)。可见,土壤密度 x_2 对土壤抗冲性表现为强烈的直接作用,其次是土壤容重 x_8 ,而土壤有机质含量 x_1 和总孔隙度 x_7 的直接作用较小。主导因素间接通径系数合计后的绝对值大小依次为: x_8 (-2.295), x_2 (1.963), x_7 (1.343), x_1 (0.077)。说明 x_8 对土壤抗冲性间接作用最强烈,其次是 x_2, x_1, x_7 。 x_1, x_7 和 x_8 通过 x_2 的间接通径系数最大,说明自变量 x_1, x_7 和

x_8 通过 x_2 间接影响土壤抗冲性系数 y 的程度最大。而 x_2 通过 x_8 间接影响土壤抗冲性最大。

由相关性分析可知, x_3 ($r=0.668^{**}$), x_4 ($r=0.725^{**}$), x_5 ($r=0.668^{**}$)与土壤抗冲性具有极显著的相关性(表 3),而通径分析显示以上因子不是影响土壤抗冲性的关键因子,可能是由于以上因子与其他因子间存在多重共线性,以上因子通过影响土壤有机质含量 x_1 ,土壤密度 x_2 ,总孔隙度 x_7 和土壤容重 x_8 间接影响土壤抗冲性,所以不作为影响土壤抗冲性的主导因素。

决定系数结果见表 4, x_2 对土壤抗冲性的决定系数 d_{y,x_2} (7.102)最大,其次是 x_8 (3.523); x_2 对 R^2 的总贡献($R^2=1.871$)最大,其次是 x_8 ($R^2=-0.785$),其他关键因子的决定因素和总贡献 R^2 相对较小。由此可见, x_2 是影响成兰铁路受损边坡土壤抗冲性的最重要指标,且与土壤抗冲刷系数呈显著负相关。

表 4 主导因素对土壤抗冲刷系数的通径系数、决定系数和对 R^2 的总贡献

自变量	直接通径系数	间接通径系数					决定系数	对 R^2 总贡献
		x_1	x_2	x_7	x_8	合计		
x_1	0.523		1.37	-0.339	-0.954	0.077	0.274	0.314
x_2	-2.665	-0.269		0.516	1.716	1.963	7.102	1.871
x_7	-0.590	0.301	2.333		-1.291	1.343	0.348	-0.444
x_8	1.877	-0.266	-2.435	0.406		-2.295	3.523	-0.785

3.5 主导因子对土壤抗冲性的影响

利用采样点的土壤有机质含量 x_1 ,总孔隙度 x_7 和土壤容重 x_8 与进行回归分析可得, x_1, x_7 和 x_8 与土壤抗冲刷系数的相关关系可以用幂函数较好的拟合。

由图 4 可知, x_1 与土壤抗冲刷系数呈极显著正相关($r=0.600, p<0.01$), x_7 与土壤抗冲刷系数呈极显著正相关($r=0.670, p<0.01$)。随着土壤有机质

含量和总孔隙度的增加,土壤抗冲性能也增加,反之亦然。土壤容重与土壤抗冲刷系数呈负相关($r=-0.418$),土壤抗冲刷系数随土壤容重增加而减弱。通过分析, x_2 是影响成兰铁路受损边坡土壤抗冲性的最重要指标,利用土壤密度和土壤抗冲性进行回归分析,土壤密度 x_2 与土壤抗冲刷系数呈极显著正相关($r=0.702, p<0.01$)。土壤抗冲刷系数随着土壤密度的增加明显减少,二者的关系可用幂函数 $y =$

$3704.5x^{-6.451}$ 来表达。式中: y 为土壤抗冲刷系数 (L/g); x 为土壤密度 (g/cm^3)。当土壤密度小于 $1.3 g/cm^3$ 时,土壤抗冲刷系数随着土壤密度的增加迅速

降低,当土壤密度大于 $1.3 g/cm^3$ 时,土壤抗冲刷系数的降低速率减缓并趋于平稳,即土壤抗冲性达到相对稳定的状况(图 4)。

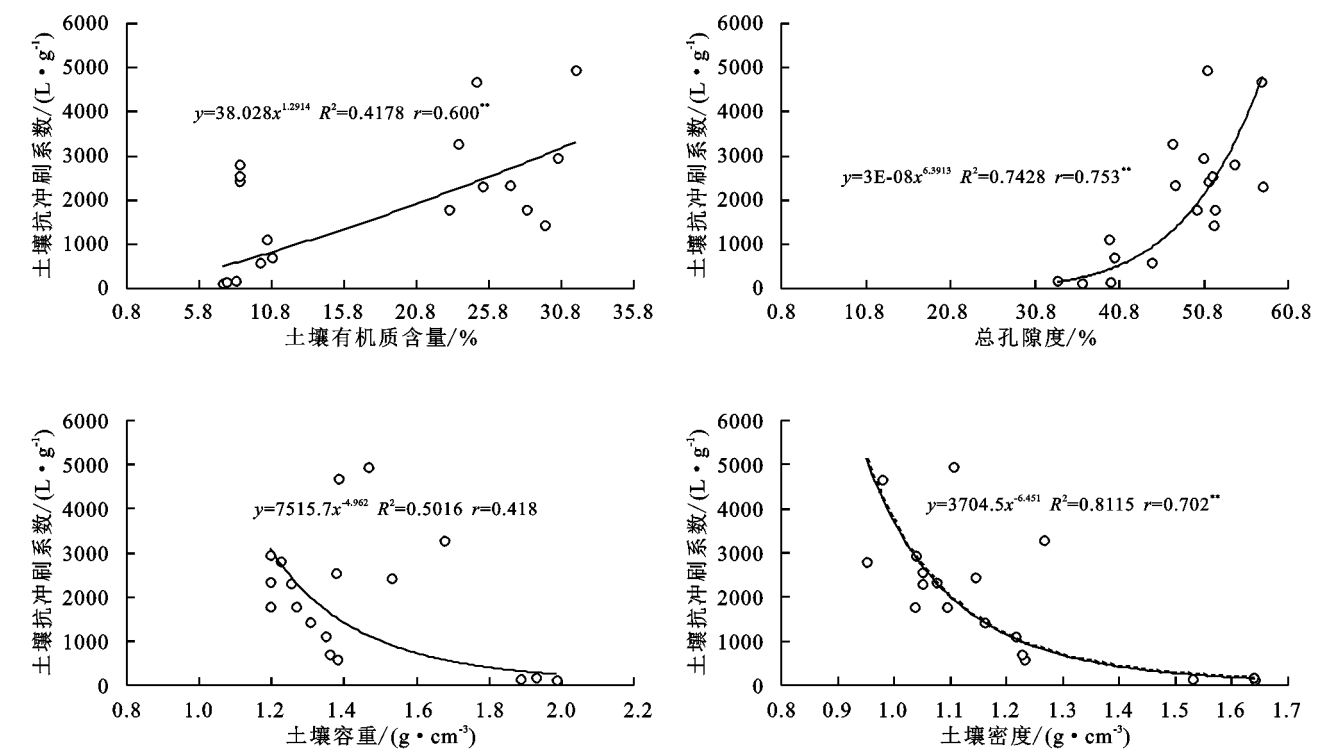


图 4 受损边坡土壤抗冲刷系数与主导因子的关系

4 讨论

4.1 受损边坡不同恢复时期对土壤理化性质和根系的影响

成兰铁路不同受损边坡对土壤理化性质和根系的影响有所差异。原始植被区未受铁路工程干扰,土壤密度小,表明土壤较疏松,通透性好,肥力较高,根系分布广,故土壤抗冲性强。人工回填区为土体紧实,结构性和通透性较差,生长植物稀疏,根系联结作用弱,其土壤抗冲性弱。自然恢复区的土壤回填后自然恢复了 3~4 a,其土壤容重、孔隙度、植物生长情况等有一定的改善,其下渗能力较强,土壤抗冲性也较强。植物的生长发育增加了根系的生长,根系具有根土黏结和生物化学作用^[16],因此能疏松土壤,降低土壤容重,增加土壤孔隙度,还能促进土壤有机质的形成^[9]。

4.2 土壤抗冲刷系数及主要影响因素分析

本文通过通径分析得出土壤有机质含量、总孔隙度、土壤容重和土壤密度是影响土壤抗冲性的主要影响因子。土壤抗冲性与土壤容重和土壤密度呈极显著的负相关关系,与有机质含量和总孔隙度呈极显著正相关关系,这与郭明明等^[17]研究结果一致。这是由于容重的减小和土壤总孔隙度的增加能提高土壤的蓄水能力,缓解径流对土壤的分离作用,进而使土

壤抗冲性能增强;同时,有机质以胶膜的形式包被土壤颗粒,增加了土壤的黏结性,促进了土壤团粒结构的形成,因此增加了土壤颗粒抵抗径流冲刷的能力^[8]。王健等^[18]研究结果表明土壤容重和土壤密度与土壤抗冲指数呈正相关,土壤孔隙度与土壤抗冲指数呈负相关,土壤容重越大,孔隙度越小,土壤越紧实,其抗冲性能越强,这与本试验结果相反,可能因为研究区土壤类型差异所致,说明土壤容重和土壤总孔隙度不是影响土壤抗冲性的唯一因素,有机质含量以及水稳性团聚体含量也会影响土壤抗冲性的大小。根据通径分析得出,剩余项的通径系数 e 约为 0.290,说明对土壤抗冲性有影响的自变量不止以上 20 个因素,还有因素没有考虑到,对土壤抗冲性影响因素的分析有待于进一步研究。

5 结论

亚高山区的土壤抗冲性整体高于干旱河谷区,其中两地原始植被区的高陡边坡土壤抗冲性最大,其次是自然恢复区和人工回填区。径流含沙量和土壤抗冲刷系数随冲刷时间的增长总体分别呈幂函数式的下降和上升变化,在冲刷 10 min 后逐渐趋于稳定。土壤密度和土壤有机质是影响成兰铁路边坡土壤抗冲性关键因子,土壤密度越大,土壤抗冲性越小,而土

壤有机质越大,土壤抗冲性也越大。因此,对成兰铁路高陡边坡人工填土区土壤应适当添加有机质,改善土壤团聚体结构,有效提高土壤孔隙度。

参考文献:

- [1] 刘红岩,周正朝,王宁,等.黄土区草被生长初期土壤抗冲性及其影响因素[J].中国水土保持科学,2018,16(2):55-61.
- [2] 田秀民,马春霞,鲁旭东,等.微地形重塑对大型排土场平台水沙及植被的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):74-82.
- [3] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.花岗岩红壤区不同治理模式土壤抗冲性因素试验[J].水土保持学报,2019,33(5):34-40,49.
- [4] 肖俊波,孙宝洋,李占斌,等.冻融循环对风沙土物理性质及抗冲性的影响试验[J].水土保持学报,2017,31(2):67-71.
- [5] 吕刚,马君蕙,王磊,等.辽西低山丘陵区不同密度荆条实地放水冲刷试验研究[J].灌溉排水学报,2019,38(S1):94-97.
- [6] 晏伟明,谢颂华,刘苑秋,等.生产建设项目边坡及弃土侵蚀影响机制研究进展[J].中国水土保持科学,2016,14(4):142-152.
- [7] 王丹丹,张建军,茹豪,等.晋西黄土高原不同地类土壤抗冲性研究[J].水土保持学报,2013,27(3):28-32,38.
- [8] 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.
- [9] 徐文秀,鲍玉海,韦杰,等.水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):65-71,109.
- [10] 石杨子.成兰铁路弃渣场生态修复技术方案初步研究[D].重庆:西南交通大学,2014.
- [11] 国家林业局.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,2000.
- [12] 蒋定生,范兴科,李新华,等.黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J].水土保持学报,1995,9(2):1-8.
- [12] 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.
- [13] 宋小园,朱仲元,刘艳伟,等.通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现[J].干旱区研究,2016,33(1):108-113.
- [14] 金晓,陈丽华.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[J].水土保持学报,2019,33(6):120-126.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 王健,刘旦旦,张鹏辉.土壤密度对土壤抗侵蚀性的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(1):65-68.
- [12] 魏江波,赵洲.基于加权确定性系数法的地质灾害易发性分析[J].煤田地质与勘探,2018,46(6):108-114.
- [13] 赵银兵,陈利顶,孙然好,等.地质灾害易发性评价方法对比研究:以京津冀地区为例[J].环境生态学,2020,2(4):27-38,50.
- [14] 欧戮,张述清,甘淑,等.基于 GIS 与均方差决策法的山区县域资源环境承载力评价[J].湖北农业科学,2017,56(3):454-458.
- [15] 张晓东,刘湘南,赵志鹏,等.基于层次分析法的盐池县地质灾害危险性评价[J].国土资源遥感,2019,031(3):183-192.
- [16] Hasekiogullari G D, Ercanoglu M. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey) [J]. Natural Hazards, 2012, 63(2):1157-1179.
- [17] 郭谦.层次分析法在生态环境综合评价应用中的优化[J].国土资源遥感,2008,20(3):104-107.
- [18] Saaty, Thomas L. Erratum: A scaling method for priorities in hierarchical structures. [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3):234-281.
- [19] 金菊良,魏一鸣,潘金锋.修正 AHP 中判断矩阵一致性的加速遗传算法[J].系统工程理论与实践,2004,24(1):63-69.
- [20] Lee S, Pradhan B. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models[J]. Landslides, 2007, 4(1):33-41.
- [21] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 85(1/3):239-248.
- [22] 饶品增,曹冉,蒋卫国.基于地理加权回归模型的云南省地质灾害易发性评价[J].自然灾害学报,2017,26(2):134-143.

(上接第 399 页)