

排土场土体裂缝区植被根系及抗剪强度分布特征

李叶鑫^{1,2}, 吕刚², 宁宝宽¹, 陈四利¹, 王道涵², 魏忠平³

(1.沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2.辽宁工程技术大学
环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3.辽宁省林业科学研究所, 沈阳 110032)

摘 要:为揭示排土场土体裂缝区植物根系和抗剪强度分布特征,采用根钻法、WinRHIZO 根系分析系统和直剪仪研究了 0—60 cm 土层植物根系、黏聚力和内摩擦角随土层深度的变化规律。结果表明:3 个样地根系特征参数不同,随土层深度增加而减小,主要分布在 0—20 cm 土层,根密度和根重密度为 88.81~303.03 个/ 10^3 cm^3 , 0.15~2.69 mg/ cm^3 。根系以根径 $d\leq 0.1\text{ mm}$ 和 $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3\text{ mm}$ 为主,占总量的 34.79%, 40.99%;草本植物以须根为主,数量多且质量轻;各根系特征参数之间呈正相关关系,与土层深度呈显著负相关关系。3 个样地土壤黏聚力和内摩擦角为 5.56~45.51 kPa 和 $21.69^\circ\sim 31.67^\circ$;黏聚力随土层深度的增大表现为先增大后减小,最大值出现在 30—40 cm 土层,位于土体裂缝深度以下;黏聚力和内摩擦角均随土壤含水率的增大而衰减,黏聚力与土壤含水率之间具有极显著的指数函数关系,而内摩擦角与土壤含水率的关系未达到显著水平;土壤含水率对黏聚力的衰减作用显著大于内摩擦角。

关键词:排土场;根系;抗剪强度;土体裂缝;植被恢复

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0108-07

Distribution Characteristics of Vegetation Root System and Shear Strength with Ground Fissure in a Dump

LI Yexin^{1,2}, LÜ Gang², NING Baokuan¹, CHEN Sili¹, WANG Daohan², WEI Zhongping³

(1.School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China; 3.Liaoning Academy of Forestry Science, Shenyang 110032, China)

Abstract:In order to reveal the distribution characteristics of plant roots and shear strength with ground fissure in a dump, the variation of root system, cohesion and internal friction angle of 0—60 cm soil layer were studied by using root drill method, WinRHIZO root analysis system and direct shear apparatus. The results showed that the roots of the three plots mainly distributed in 0—20 cm soil layer, which decreased with the increase of soil depth, and the root density and root weight density of the three plots were 88.81~303.03 roots/ 10^3 cm^3 and 0.15~2.69 mg/ cm^3 , respectively; the diameters of plant roots of the three plots were mainly $d\leq 0.1\text{ mm}$ and $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3\text{ mm}$, accounting for 34.79% and 40.99% of the total, respectively; fibrous roots were the main root systems of herbaceous plants, which were abundant in quantity and light in quality; there was a positive correlation between root characteristic parameters and was a significant negative correlation between root characteristic parameters and soil depth; the soil cohesion and internal friction angle of the three plots were 5.56~45.51 kPa and $21.69^\circ\sim 31.67^\circ$; with the increase of soil depth, soil cohesion increased at first and then decreased, and the maximum appeared in the 30—40 cm soil layer, which was below the depth of the ground fissures in the soil; cohesion and internal friction angle attenuated with the increase of soil water content; there was a very significant exponential function relationship between cohesion and soil water content, while the relationship between internal friction angle and soil water content was not significant; the attenuation effect of soil water content on cohesion was significantly greater than the internal friction angle.

收稿日期:2021-06-17

修回日期:2021-06-30

资助项目:国家重点研发计划(2017YFC1503105);沈阳工业大学青年教师科研能力培育基金(200005781)

第一作者:李叶鑫(1989—),男,辽宁阜新人,博士,讲师,主要从事工矿区水土保持与生态修复研究。E-mail:liyexin2008@126.com

通信作者:吕刚(1979—),男,吉林九台人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀与土壤水文学的教学和科研工作。E-mail:lvgang2637@126.com

Keywords: dump; root; shear strength; ground fissure; vegetation restoration

我国大型煤矿多位于干旱半干旱地区的内蒙古高原、黄土高原及沙漠化地带^[1],生态环境极其脆弱,降雨量少且分布不均匀、蒸发量大,存在较为严重的土壤和植被水分亏缺问题。排土场是露天煤矿水土流失最为严重的区域,具有物质组成复杂、孔隙发达、边坡松散高陡、平台紧实、沉陷不均匀等特性^[2],不仅土壤水分和养分流失严重,还容易诱发滑坡、泥石流等水土流失灾害,不利于植被恢复。目前,人工植被构建是生态恢复的主要措施,也是最有效的恢复方法之一,它可通过整治改造使丧失的生产能力重新得到利用,有效地恢复受损的生态系统,提高植物多样性和植被覆盖度,其根系的分布、穿插和固结作用可以提高土壤抗剪强度和抗拉强度^[3],从而提高生态系统的稳定性、防治水土流失、增强土壤水源涵养功能,被广泛应用于矿区生态恢复^[4]。马红燕等^[5]指出柠条和沙棘是内蒙古准格尔露天矿排土场的先锋树种。高英旭^[6]研究了海州露天煤矿排土场不同植被措施的根系分布特征,认为根系主要分布在 0—40 cm 土层范围内。杨波等^[7]以内蒙古永利煤矿排土场为例,研究了不同植被配置对排土场土壤侵蚀的影响,结果表明,植被措施可以有效地抵御持续暴雨径流的冲刷袭击。周林虎等^[8]研究高寒矿区排土场边坡草本植物根-土复合体抗剪强度特征及其影响因素,指出抗剪强度与土体密度、含水率和根系含量关系密切。然而,对于土地复垦与植被恢复后排土场土体裂缝区植被根系分布特征的研究关注较少。排土场土体裂缝的出现会破坏土体连续性和完整性,改变土壤结构,严重影响植物正常生长发育,拉断植物根系,造成植物受损死亡^[9],导致植被退化^[10-12]。因此,研究排土场土体裂缝区植被根系和抗剪强度随土层深度的变化特征对排土场植被恢复与重建具有重要意义。基于此,本文以植被恢复 5 a 的排土场为研究对象,分析土体裂缝区植被根系分布特征,研究不同土体裂缝根系特征参数的差异,揭示抗剪强度随土层深度的变化规律,以期对排土场植被恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市大唐国际胜利东二号露天煤矿南排土场,地处东经 116°06′—116°14′,北纬 44°02′—44°07′,位于矿区的东南部,总面积 13.66 km²,属中温带干旱半干旱气候,年均气温 1.7℃,年均降水量 284.74 mm,主要集中在 6—8 月份,占全年降雨量的 71% 以上,暴雨多发生在此 3 个月内,7 月中旬—8 月中旬则更是暴雨集中频

发时段,多年平均 24 h 最大降水量为 46.8 mm。年平均蒸发量 1 794.6 mm,年均风速 3.4 m/s,冻结期为 10 月初—12 月上旬,解冻期为 3 月末—4 月中旬,最大冻土深度 2.89 m,土壤为典型栗钙土。排土场位于采区南侧,使用年限为 20 a,排土场总排弃高度、台阶高度、平台宽度依次为 100, 25, 20 m,排土场容量为 $5.92 \times 10^7 \text{ m}^3$,最终松散系数为 1.15。为尽快恢复排土场的植被,平台和边坡复垦采取覆土措施(土壤质地为砂质壤土),平台覆土厚度约为 1 m,边坡覆土厚度约为 0.5 m,复垦植被有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)等灌木或草本。

1.2 研究方法

本试验于 2017 年 8 月全面调查排土场 1 105 平盘土体裂缝分布特征,测定每条土体裂缝的长度、宽度和深度,根据数理统计原理和描述性统计结果(表 1)从中选取 3 条典型土体裂缝(GF_I, GF_{II}, GF_{III})作为研究对象,在土体裂缝区按照 0—10, 10—20, 20—30, 30—40, 40—50, 50—60 cm 土层深度处分别采集土壤样品,以测定土壤物理性质和力学性质。根据土壤砂粒、粉粒和黏粒含量(表 2),按照国际制划分标准将土壤质地定为砂质土壤。在采集土壤样品的同时,利用自制环刀(内径 10 cm 高 10 cm)采集植物根系,采样深度与土壤样品相同。将采集的植物根系放入布袋内并带回实验室,用清水将根系洗净,挑出并记录死亡腐烂根系的数量,将剩下的生长根按照 ≤ 0.1 , $0.1 \sim 0.3$, $0.3 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1$, $> 1 \text{ mm}$ 进行分类,记录各个径级植物根系的数量,采用沈阳农业大学农学院 WinRHIZO 根系分析系统(2016)对各个径级根系的长度、表面积、体积进行分析,最后测定根系生物量。根系通过调节其直径的粗细来适应环境,对于多年生草本而言,根系以径级 $\leq 1 \text{ mm}$ 为主,这部分根系可以有效地固结土壤、提高土壤抗侵蚀性能^[13]。参照国内外对草本根系径级划分的研究成果^[14-16],本研究将根系划分为 $d \leq 0.1 \text{ mm}$, $0.1 \text{ mm} < d \leq 0.3 \text{ mm}$, $0.3 \text{ mm} < d \leq 0.5 \text{ mm}$, $0.5 \text{ mm} < d \leq 1.0 \text{ mm}$ 和 $d > 1.0 \text{ mm}$,分析不同径级根系分布特征。采用 ZJ 型应变控制式直剪仪(便携式)测定黏聚力和内摩擦角,荷载条件为 100, 200, 300, 400 kPa,量力环率定系数为 1.623 kPa/0.01 mm。

2 结果与分析

2.1 根系垂直分布特征

植物根系可以有效地网络固持土壤,改善土壤结

构,增强土壤抗侵蚀能力,提高土体稳定性^[17]。与林木根系相比,草本植物根系一般没有强大的主根,通常以须根或细根为主,大部分根系直径 $\leq 1\text{ mm}$ ^[18]。由于草本植物的密度大、数量多且根系抗拉强度比粗根大等特点,须根对土壤剪切强度增加值是乔、灌木根系的 2~3 倍^[18-19]。由表 3 可知,3 个土体裂缝根密度表现为 $GF_{II} > GF_{III} > GF_I$,根重密度表现为

$GF_{III} > GF_I > GF_{II}$,根长密度和根表面积密度表现为 $GF_{II} > GF_I > GF_{III}$,根体积密度表现为 $GF_I > GF_{II} > GF_{III}$ 。 GF_I , GF_{II} , GF_{III} 的 0—60 cm 土层的根重密度依次为 4.04,3.51,4.11 mg/cm^3 ,明显小于林木根系的根重密度。这是由于草本根系以须根为主,数量多且质量轻,表现为根密度大、根重密度小的特征。

表 1 排土场土体裂缝统计特征

土体裂缝 形态参数	最大值/cm	最小值/cm	中位数/cm	平均值/cm	极差/cm	标准差	变异 系数/%	偏度	峰度	K-S 检验 p 值	样本数
地表长度	3998.5	11.3	290.4	412.9	3987.2	586.70	142.07	4.95	26.85	0.000	61
地表宽度	40.4	4.3	17.7	18.1	36.1	7.26	40.19	0.41	0.41	0.964	61
深度	55.3	5.7	25.5	25.7	49.6	15.13	58.97	0.58	-0.08	0.908	61

表 2 排土场土体裂缝区与非裂缝区土壤物理性质

样地	裂缝 宽度/cm	裂缝 深度/cm	0—60cm 土层土壤物理性质变化范围				
			砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤 含水率/%	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
GF_I	9.85±3.48a	29.00	70.24~76.58	10.25~16.54	8.78~14.63	4.14~6.36	1.30~1.41
GF_{II}	2.86±0.84c	30.67	70.39~78.62	12.05~17.64	6.72~13.53	4.29~7.16	1.22~1.45
GF_{III}	5.77±2.76b	28.67	69.58~74.35	13.58~16.13	10.31~14.85	4.89~7.42	1.26~1.43
非裂缝区	—	—	70.23~75.35	12.35~17.14	9.25~13.24	7.59~9.68	1.32~1.48

注:表中裂缝宽度为多个测量点位的结果,为平均值±标准差,“—”表示无数据。不同小写字母表示不同土体裂缝之间差异显著($p<0.05$)。

表 3 排土场 0—60 cm 土层根系特征参数

样地	根密度/ ($\text{个} \cdot 10^{-3} \text{cm}^{-3}$)	根重密度/ ($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	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/ ($\text{cm}^3 \cdot 10^{-3} \text{cm}^{-3}$)
GF_I	892.22	4.04	29.23	12.53	448.90
GF_{II}	1173.93	3.51	31.07	12.87	443.06
GF_{III}	999.49	4.11	28.67	12.14	438.62

不同裂缝根系特征参数呈现不同的变化特征,但总体上呈现随土层深度增加而减小的变化规律,根系主要分布在 0—20 cm 土层(图 1)。对于 0—60 cm 土层, GF_I , GF_{II} , GF_{III} 根密度依次为 88.81~208.81,120.96~303.03,99.31~266.11 个/ 10^3cm^3 ;随着土层深度的增大,3 个样地根密度的变化规律不同,0—10 cm 土层根密度依次为 143.88,160.43,266.11 个/ 10^3cm^3 ,分别占 0—60 cm 土层的 16.13%,13.67%,26.62%。 GF_I , GF_{II} , GF_{III} 根重密度依次为 0.45~0.94,0.33~0.91,0.15~2.69 mg/cm^3 ,且随着土层深度的增大表现为减小的变化趋势,根重密度与土层深度具有较好的幂函数关系(表 4);3 个样地 0—10 cm 土层根重密度依次为 0.45,0.86,2.69 mg/cm^3 ,分别占 0—60 cm 土层的 11.22%,24.52%,65.44%, GF_{III} 显著大于 GF_I 和 GF_{II} ($p<0.05$),这不仅与根系数量有关,而且还与 3 个样地根系生长状态关系密切。 GF_I , GF_{II} , GF_{III} 根长密度依次为 3.24~6.24,3.81~7.74,3.91~6.35 cm/cm^3 ,随着土层深度的增大而减小,且根长密度与土层深度具有较好的指数关系(表 4);3 个样地 0—20 cm 土层根长密度可达

10.92~13.03 cm/cm^3 ,分别占总根长密度的 37.35%,41.93%,40.79%。 GF_I , GF_{II} , GF_{III} 根表面积密度依次为 1.50~2.53,1.91~2.65,1.84~2.60 cm^2/cm^3 ,随着土层深度的增加, GF_I 和 GF_{II} 表现为先增大后减小,且在 10—20 cm 土层达到最大,其数值分别为 2.53,2.65 cm^2/cm^3 ; GF_{III} 表现为减小的变化趋势,最大值为 2.60 cm^2/cm^3 ,出现为 0—10 cm 土层。

3 个样地根表面积密度平均值依次为 2.09,2.15,2.02 cm^2/cm^3 ,其数值范围与已有研究结果相一致^[20-22],草本植物根表面积密度为 0.36~3.33 cm^2/cm^3 。 GF_I , GF_{II} , GF_{III} 根体积密度依次为 56.34~97.61,61.45~92.30,62.79~86.53 $\text{cm}^3/10^3 \text{cm}^3$,随着土层深度的增加, GF_I 根体积密度呈现先增大后减小的变化趋势,在 20—30 cm 土层达到最大值; GF_{II} 和 GF_{III} 根体积密度表现为逐渐减小的变化趋势,最大值出现在 0—10 cm 土层;3 个样地 0—10 cm 土层根体积密度大小为 $GF_{II} > GF_{III} > GF_I$,其变化规律与根密度、根重密度、根长密度和根表面积密度均不同,这是根密度、根系长度和根系直径共同作用的结果。

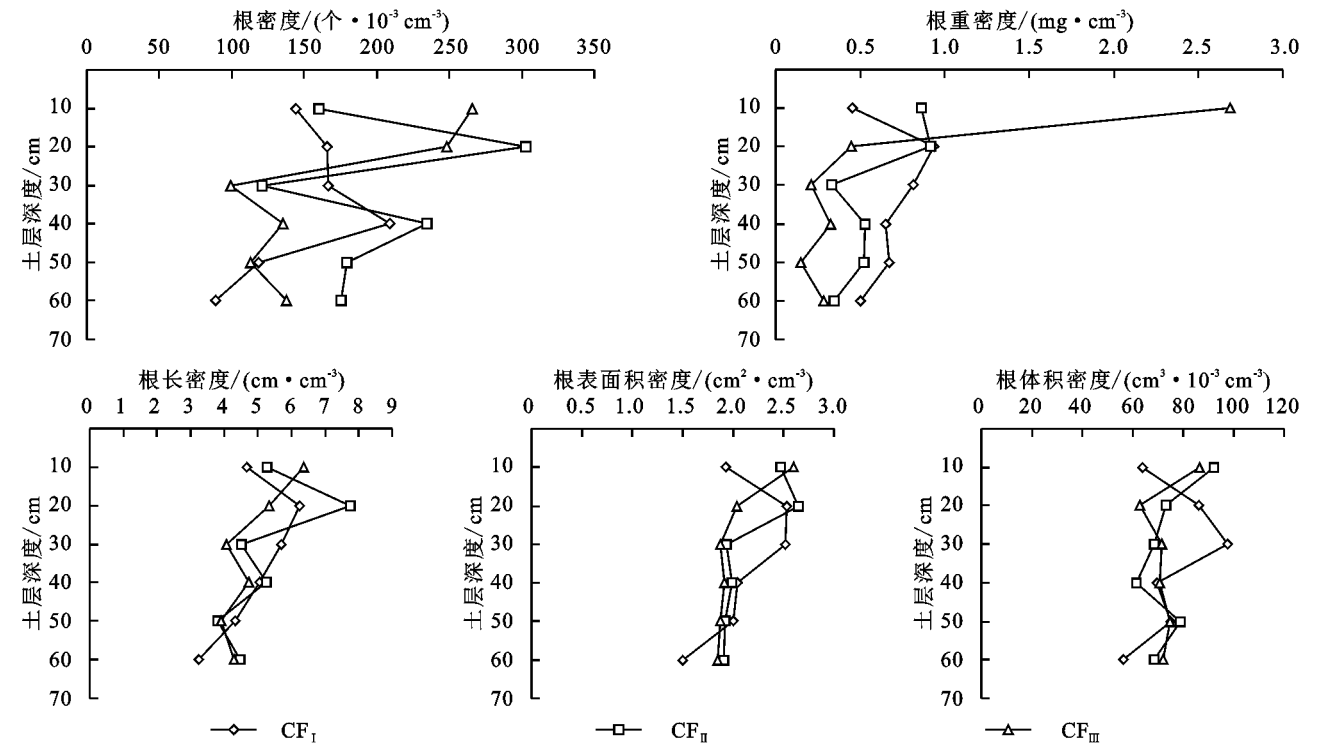


图1 排土场土体裂缝区根系垂直分布特征

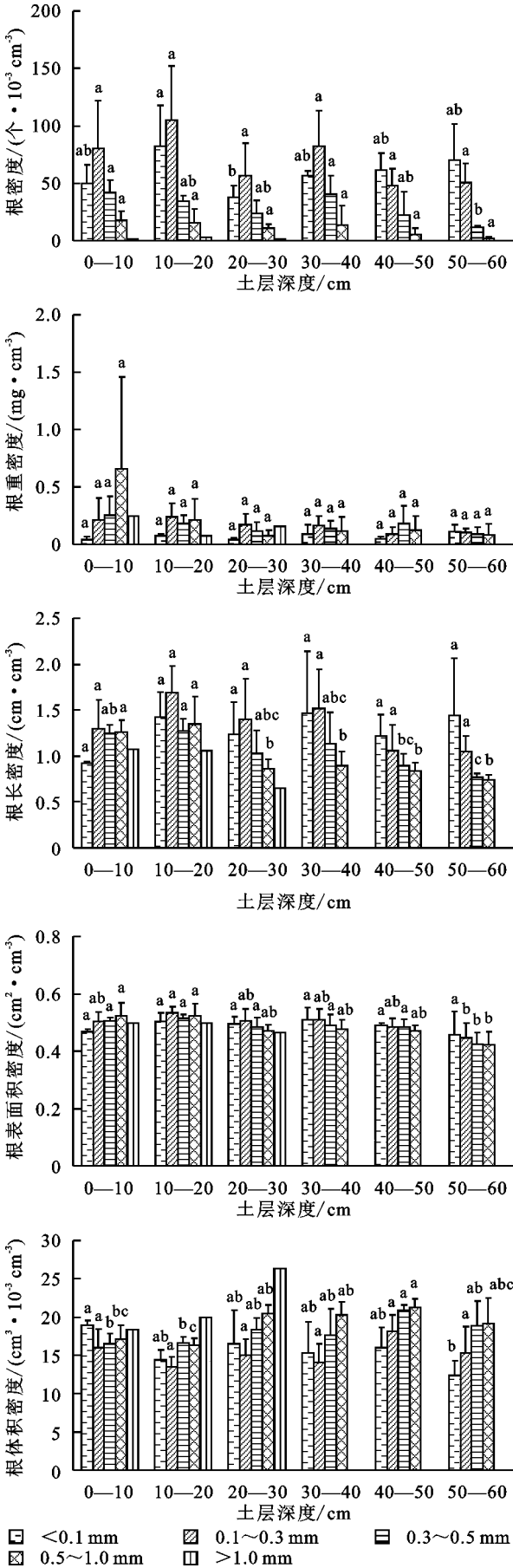
表4 根系特征参数(y)与土层深度(x)的关系

根系特征	GF _I				GF _{II}				GF _{III}			
参数	拟合方程	R ²	p		拟合方程	R ²	p		拟合方程	R ²	p	
根密度	$y=121.172e^{-0.009x}$	0.173	0.021		$y=42.722e^{-0.001x}$	0.227	0.017		$y=82.198e^{-0.005x}$	0.367	0.013	
根重密度	$y=32.180x^{-0.195}$	0.233	0.043		$y=21.142x^{-0.762}$	0.286	0.016		$y=20.866x^{-0.472}$	0.416	0.011	
根长密度	$y=187.154e^{-0.357x}$	0.388	0.012		$y=187.493e^{-0.340x}$	0.259	0.017		$y=347.508e^{-0.495x}$	0.499	0.008	
根表面积密度	$y=111.323x^{-1.673}$	0.231	0.018		$y=846.031x^{-4.428}$	0.662	0.004		$y=20140.461x^{-9.702}$	0.742	0.002	
根体积密度	$y=99.265e^{-0.014x}$	0.518	0.034		$y=0.001e^{1.422x}$	0.182	0.889		$y=82.267e^{-0.012x}$	0.485	0.041	

2.2 不同径级根系分布特征

由图2可知,不同土层各个径级根系特征参数存在差异。对于根密度,3个样地0—60 cm土层以径级 $d\leq 0.1$ mm和 $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3$ mm为主,占总根密度34.79%,40.99%, $d\leq 1.0$ mm根密度为169.82个/ 10^3 cm^3 ,占总根密度的98.96%,说明3个样地根系以 $d\leq 1.0$ mm为主。对于径级 $d\leq 0.1$ mm根系,随着土层深度的增加,根密度表现为先增大再减小后增大的变化规律,在10—20 cm土层根密度达到最大值,为82.34个/ 10^3 cm^3 ,而在20—30 cm土层达到最小,仅为37.77个/ 10^3 cm^3 ,两者之间差异显著($p<0.05$); $d\leq 0.1$ mm, $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3$ mm和 $d>1.0$ mm根系的根密度最大值出现在10—20 cm土层, $0.3\text{ mm}<d\leq 0.5$ mm和 $0.5\text{ mm}<d\leq 1.0$ mm根系最大值出现在0—10 cm土层,说明根系主要集中在0—20 cm土层范围内。对于根重密度,径级 $d\leq 0.1$ mm, $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3$ mm, $0.3\text{ mm}<d\leq 0.5$ mm, $0.5\text{ mm}<d\leq 1.0$ mm和 $d>1.0$ mm依次为0.07,0.16,0.16,0.21,0.16 mg/ cm^3 , $d\leq 0.1$ mm根重密度最小,这主要是由于该径级根系直径小、质量轻; $d>$

1 mm根系仅出现0—30 cm土层范围内,其中GF_{III}根系直径均小于1 mm,GF_I和GF_{II}的0—30 cm土层根重密度为0.17,0.15 mg/ cm^3 ,由于 $d>1$ mm根系数量少且仅出现在部分土层,进而导致该径级根重密度偏小。不同径级根长密度依次为1.28,1.34,1.06,0.99,0.98 cm/ cm^3 ,随着根系径级的增大,根长密度呈减小的变化规律。 $d\leq 0.1$ mm和 $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3$ mm根系根长密度随土层深度的增大而增大, $0.3\text{ mm}<d\leq 0.5$ mm和 $0.5\text{ mm}<d\leq 1.0$ mm根系则相反,且0—10 cm和10—20 cm土层根长密度显著大于其他土层($p<0.05$)。不同径级根表面积密度依次为0.49,0.50,0.48,0.48,0.49 cm^2/cm^3 ,各径级之间无显著差异($p>0.05$),不同径级根系随着土层深度的增大而减小。不同径级根体积密度依次为15.59,15.35,18.12,19.12,20.58 $\text{cm}^3/10^3\text{ cm}^3$,根体积密度随根系径级的增大而减小;对于 $d\leq 0.1$ mm根系,随着土层深度的增加,根体积密度呈现减小的变化规律;对于 $0.1\text{ mm}<d\leq 0.3$ mm, $0.3\text{ mm}<d\leq 0.5$ mm, $0.5\text{ mm}<d\leq 1.0$ mm根系,根体积密度则为增大。



注:不同小写字母表示不同土层之间差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同径级根系分布特征

2.3 不同根系参数的相关性

表 5 为排土场土体裂缝区根系特征参数与土层深度之间的 Spearman 相关分析。由表 5 可知,根密度、根重密度、根长密度、根表面积密度、根体积密度之间相互呈正相关,根长密度与根表面积密度之间为极显著正相关关系,相关系数为 0.903。根重密度、根长密度、根表面积密度与土层深度之间呈显著或极显著负相关关系($p<0.05$),根长密度与土层深度的相关性最高,为 0.737;根密度和根体积密度与土层深度呈负相关关系,但未达到显著水平($p>0.05$)。

2.4 土壤抗剪强度特征

土壤抗剪强度直接反映土体在外力作用下发生剪切变形破坏的难易程度^[23-24]。由图 3 可知,3 个样地均有相似的变化规律。GF_I 0—10 cm 土层在 100, 200, 300, 400 kPa 的剪应力依次为 52.88, 95.25, 124.69, 175.65 kPa; 10—20 cm 土层依次为 53.38, 109.85, 136.57, 186.53 kPa; 20—30 cm 土层依次为 86.13, 134.29, 198.57, 268.57 kPa; 30—40 cm 土层依次为 81.54, 154.80, 216.66, 226.87 kPa; 40—50 cm 土层依次为 79.58, 124.58, 198.67, 236.86 kPa; 50—60 cm 土层依次为 82.54, 118.54, 190.60, 240.21 kPa。GF_I, GF_{II}, GF_{III} 3 个样地不同土层的剪应力均随着法向应力的增大而呈线性增大。当法向应力由 100 kPa 增加到 400 kPa 时, 0—10 cm 土层 3 个裂缝土壤剪应力的增加量为 122.77~175.38 kPa, 增加幅度为 228.96%~234.87%, 20—30 cm 土层 3 个裂缝的增加量为 173.89~182.45 kPa, 增加幅度为 211.84%~272.62%。

图 4 为各样地不同土层深度下土壤黏聚力和内摩擦角的分布特征。由图 4 可知, GF_I 不同土层土壤黏聚力和内摩擦角为 12.68~45.51 kPa 和 21.69°~31.45°, GF_{II} 为 5.56~22.72 kPa 和 25.69°~29.75°, GF_{III} 为 12.37~41.40 kPa 和 25.92°~31.67°。随着土层深度的增加, 土壤黏聚力呈现先增大后减小的变化趋势, 最大值出现在 30—40 cm 土层, 位于土体裂缝深度以下, 随后土壤黏聚力减小; 与 30 cm 土层以下的土壤相比, 土体裂缝深度范围内(0—30 cm)的土壤黏聚力均偏小, 这可能由于土体裂缝的出现打断土体连续性, 增加土壤结构的松散程度, 极大程度上地降低土壤黏聚力。内摩擦角随土层深度没有明显的变化规律。

土壤含水率是影响土壤黏聚力和内摩擦角的关键因素。相关研究表明, 随着土壤含水率的增大, 土壤抗剪强度降低, 土壤黏聚力和内摩擦角均有所减小^[25-26]。图 5 为土壤黏聚力和内摩擦角与土壤含水率的关系。由图 5 可知, 黏聚力和内摩擦角均随土壤含水率的增大而衰减, 黏聚力与土壤含水率之间具有较好的指数函数关系, 其回归方程的决定系数 $R^2 = 0.107$, $F = 29.175$,

$p < 0.01$, 拟合结果达到极显著水平, 具有统计学意义, 说明土壤含水率的变化会显著影响土壤黏聚力; 而内摩擦角随土壤含水率无明显变化, 其拟合结果较差, 未

达到显著水平 ($p > 0.05$)。黏聚力的衰减程度显著大于内摩擦角, 说明含水率对黏聚力的影响显著大于内摩擦角, 这与黄琨等^[27]研究结果相一致。

表 5 根系特征参数与土层深度相关分析

根系特征参数	根重密度	根长密度	根表面积密度	根体积密度	土层深度
根密度	0.573 *	0.717 **	0.692 **	0.121	-0.392
根重密度		0.692 **	0.853 **	0.478 *	-0.492 *
根长密度			0.903 **	0.302	-0.737 **
根表面积密度				0.474 *	-0.718 **
根体积密度					-0.266

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

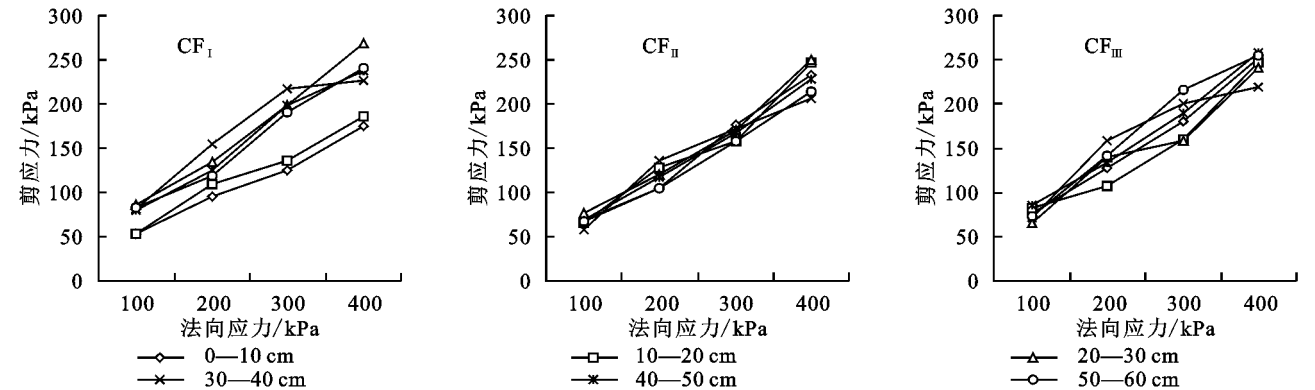


图 3 土壤剪应力与法向应力的关系

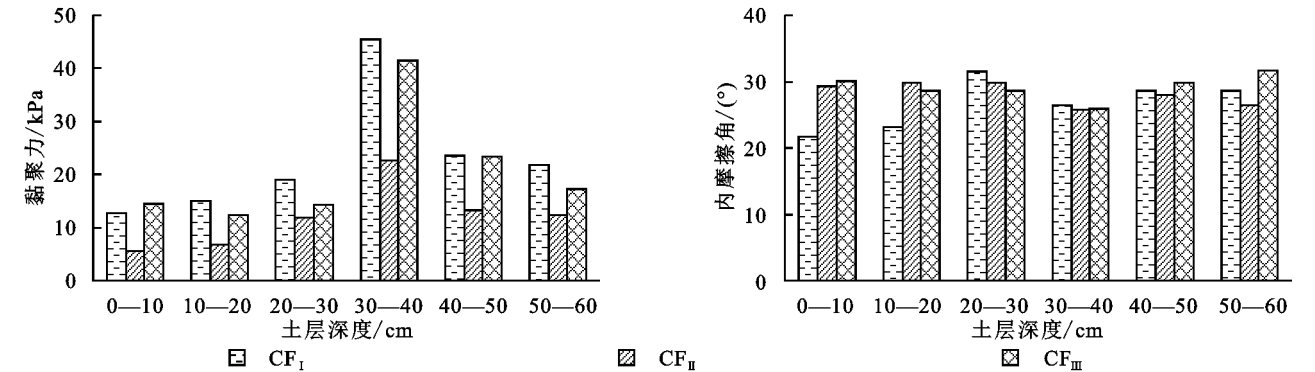


图 4 不同土层深度土壤黏聚力和内摩擦角分布

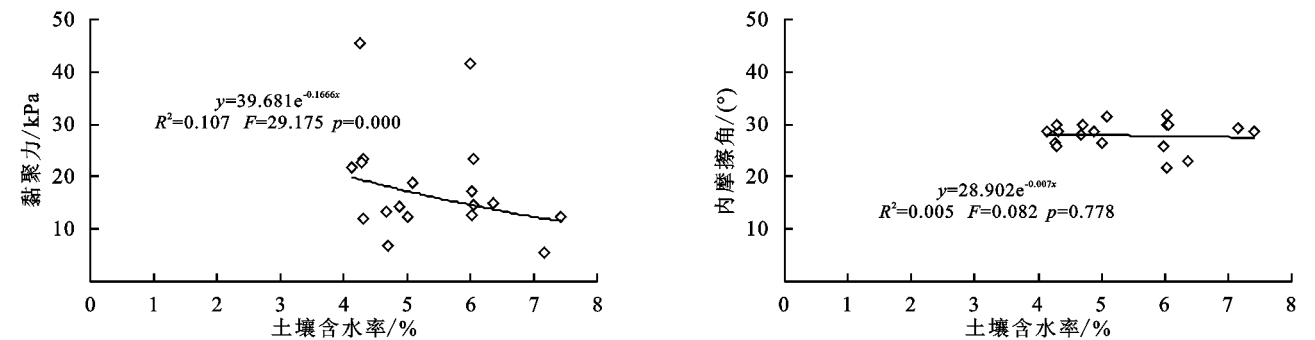


图 5 土壤黏聚力和内摩擦角与土壤含水率的关系

3 讨论

排土场在不均匀沉降作用下形成土体裂缝和土层错位, 进而导致排土场植物根系损伤和死亡。相关研究表明, 从形态上可以将根系损伤分为扯断、劈裂、

扭曲、拉出 4 类^[28]。从排土场现场调查和根系样品采集可知, 排土场土体裂缝区植被根系的损伤形式多为扯断, 且裂缝区域出现数量不等的死根系, 这是由于土体裂缝导致土层发生错位或拉张, 使得一定范围内的根系暴露在外; 蒙仲举等^[29]也认为扯断是根系

损伤的主要类型,其比例高达75%,且根系损伤率随着距土体裂缝距离的增大而减小。在本研究中,3个样地根重密度依次为4.04,3.51,4.11 mg/cm³,其数值低于已有研究成果,周林虎等^[8]研究结果表明排土场0—10 cm土层含根量为9.1~13.1 mg/cm³,10—20 cm土层为6.5~11.7 mg/cm³。相关研究表明,土体塌陷、错位会拉裂根系,是造成根系损伤的主要原因^[29],其土体裂缝附近的植物枯萎、死亡或盖度明显降低^[30-34]。土体裂缝不仅造成根系损伤,降低根系抗拉强度,还会加快土壤水分蒸发,导致根系由于缺水而死亡。由本研究可知,3个样地土体裂缝区土壤含水率依次为4.14%~6.36%,4.29%~7.16%,4.89%~7.42%,低于排土场非裂缝区,说明土体裂缝的出现会加快土壤水分流失,阻碍植物生长、发育以及自修复;张延旭^[32]、杜国强^[33]、台晓丽^[34]等研究结果也表明土体裂缝会降低土壤含水率。本文初步研究了排土场土体裂缝区植被根系和抗剪强度分布特征,但并未涉及到整株植物和单根根系的抗拉强度以及根系损伤机理等,今后应加强这方面的研究。

4 结论

(1) 土体裂缝区根系主要集中在0—20 cm土层,且随着土层深度的增大,根密度、根重密度、根长密度、根表面积密度、根体积密度均呈现减小的变化趋势;根重密度和根长密度与土层深度之间具有幂函数或指数关系。

(2) 3个样地各个径级根系的差异性不同。土体裂缝区根系以径级 $d \leq 1.0$ mm为主,其根密度占98.96%,径级 $d \leq 0.1$ mm和 $0.1 \text{ mm} < d \leq 0.3$ mm根密度占34.79%和40.99%;径级 $d > 1$ mm根系数量少且分布在部分土层。不同根系参数之间具有正相关关系。

(3) 3个样地土壤黏聚力和内摩擦角为5.56~45.51 kPa和21.69°~31.67°,土壤黏聚力最大值出现在30—40 cm土层,位于土体裂缝深度以下。内摩擦角随土层深度没有明显的变化规律。土壤含水率显著影响黏聚力,且黏聚力的衰减程度显著大于内摩擦角。

参考文献:

- [1] 谷裕,王金满,刘慧娟,等.干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J].灌溉排水学报,2016,35(4):81-86.
- [2] 魏忠义,白中科.露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J].煤炭学报,2003,28(5):486-490.
- [3] 张超波,蒋静,陈丽华.植物根系固土力学机制模型[J].中国农学通报,2012,28(31):1-6.
- [4] Houerou H L. Restoration and rehabilitation of arid and

semiarid mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000,14(1):3-14.

- [5] 马红燕,格日乐,赵杏花,等.2种水土保持灌木的根系数量特征研究[J].水土保持通报,2013,33(2):165-168.
- [6] 高英旭.海州露天煤矿排土场复垦区植物根系分布特征研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(4):124-128.
- [7] 杨波,王文龙,郭明明,等.矿区排土场边坡不同植被配置模式的控蚀效益研究[J].土壤学报,2019,56(6):1347-1358.
- [8] 周林虎,杨幼清,胡夏嵩,等.高寒矿区排土场边坡土体抗剪强度特征[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):144-152.
- [9] 赵国平,封斌,徐连秀,等.半干旱风沙区采煤塌陷对植被群落变化影响研究[J].西北林学院学报,2010,25(1):52-56.
- [10] Lei S, Bian Z, Ddaniels J L, et al. Spatio-temporal variation of vegetation in an arid and vulnerable coal mining region [J]. mining Science and Technology, 2010,20(3):485-490.
- [11] 马超,张晓克,郭增长,等.半干旱山区采矿扰动植被指数时空变化规律[J].环境科学研究,2013,26(7):750-758.
- [12] 王力,卫三平,王全九.榆神府煤田开采对地下水和植被的影响[J].煤炭学报,2008,33(12):1408-1414.
- [13] 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.
- [14] 叶超,郭忠录,蔡崇法,等.5种草本植物根系理化特性及其相关性[J].草业科学,2017,34(3):598-606.
- [15] 钟荣华,鲍玉海,贺秀斌,等.三峡水库消落带4种草本根系抗拉特性及根系黏聚力[J].水土保持学报,2015,29(4):188-194.
- [16] 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, 2007,32(9):1323-1345.
- [17] 杨幼清,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区草本植物根系增强排土场边坡土体抗剪强度试验研究[J].水文地质工程地质,2018,45(6):111-119.
- [18] 程洪,颜传盛,李建庆,等.草本植物根系网的固土机制模式与力学试验研究[J].水土保持研究,2006,13(1):62-65.
- [19] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3):276-284.
- [20] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.

- [19] 桑广书,袁扬,黄秋亚.浙江省兰溪市地下长河河水泥沙来源与治理对策[J].浙江水利科技,2016(2):58-61.
- [20] Minella J P G, Walling D E, Merten G H. Combining sediment source tracing techniques with traditional monitoring to assess the impact of improved land management on catchment sediment yields [J]. Journal of Hydrology, 2008,348(3/4):546-563.
- [21] Collins A L, Walling D E, Leeks G J L. Source type ascription for fluvial suspended sediment based on a quantitative composite fingerprinting technique [J]. Catena, 1997,29(1):1-27.
- [22] Motha J A, Wallbrink P J, Hairsine P B, et al. Determining the sources of suspended sediment in a rested catchment in southeastern Australia [J]. Water Resources Research, 2003, 39 (3). DOI: 10.1029/2001WR000794, 2003.
- [23] Sherriff S C, Rowan J S, Melland A R, et al. Investigating suspended sediment dynamics in contrasting agricultural catchments using ex situturbidity: Based suspended sediment monitoring [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2015,19(8):3349-3363.
- [24] Nosrati K, Collins A L, Madankan M. Fingerprinting sub-basin spatial sediment sources using different multivariate statistical techniques and the Modified MixSIR model [J]. Catena, 2018,164:32-43.
- [25] Franz C, Makeschin F, Weib H, et al. Sediments in urban river basins: Identification of sediment sources within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF, Brazil-using the fingerprint approach [J]. Science of the Total Environment, 2014,466/467:513-523.
- [26] 方海燕,孙莉英,聂斌斌,等.基于 WaTEM/SEDEM 模型的双枫潭流域侵蚀产沙模拟[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(1):92-97.
- [27] 孙莉英,郑明国,蔡强国,等.张家界地区溇水流域洪水特征分析[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(2):95-102.
- [28] Gruszowski K E, Foster I D L, Lees J A, et al. Sediment sources and transport pathways in a rural catchment, Herefordshire, UK [J]. Hydrological Processes, 2003,17(13):2665-2681.
- [29] Florsheim J L, Pellerin B A, Oh N H, et al. From deposition to erosion: Spatial and temporal variability of sediment sources, storage, and transport in a small agricultural watershed [J]. Geomorphology, 2011,132(3):272-286.
- [30] 郭进,文安邦,严冬春,等.复合指纹识别技术定量追踪流域泥沙来源[J].农业工程学报,2014,30(2):94-104.
- [31] 李国强,方海燕.基于¹³⁷Cs 示踪和 WaTEM/SEDEM 模型的黑土区小流域侵蚀产沙模拟[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2015,43(3):86-92.

(上接第 114 页)

- [21] 蒋平海,周正朝,李静,等.黄土区不同植被类型条件下土壤分离速率变化特征及其影响因素[J].水土保持研究,2018,25(2):105-111.
- [22] 湛芸,何丙辉,练彩霞,等.紫色土区 3 种草本植物根系特征及改土培肥效应[J].草业学报,2015,24(10):99-107.
- [23] 王云琦,王玉杰,张洪江,等.重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J].农业工程学报,2006,22(3):40-45.
- [24] 张晓明,王玉杰,夏一平,等.重庆缙云山典型植被原状土与重塑土抗剪强度研究[J].农业工程学报,2006,22(11):6-9.
- [25] 邢鲜丽,李同录,李萍,等.黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J].水文地质工程地质,2014,41(3):53-59,97.
- [26] 李晓丽,于际伟,刘李杰,等.鄂尔多斯坳砂岩力学特性的试验研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):118-123.
- [27] 黄琨,万军伟,陈刚,等.非饱和土的抗剪强度与含水率关系的试验研究[J].岩土力学,2012,33(9):2600-2604.
- [28] 高岩,党晓宏,蒙仲举,等.采煤沉陷区植物根系损伤及修复研究进展[J].内蒙古林业科技,2020,46(4):50-55.
- [29] 蒙仲举,任晓萌,陈晓燕,等.采煤塌陷对沙柳根系损伤机理研究[J].北方园艺,2014,38(1):66-68.
- [30] 王文龙,李占斌,张平仓.神府东胜煤田开发中诱发的环境灾害问题研究[J].生态学杂志,2004,23(1):34-38.
- [31] 范立民.榆神府区煤炭开采强度与地质灾害研究[J].中国煤炭,2014,40(5):52-55.
- [32] 张延旭,毕银丽,陈书琳,等.半干旱风沙区采煤后裂缝发育对土壤水分的影响[J].环境科学与技术,2015,38(3):11-14.
- [33] 杜国强,陈秀琴,郅晨龙,等.半干旱矿区地裂缝对土壤水分和地表剪切强度的影响[J].生态与农村环境学报,2016,32(2):224-228.
- [34] 台晓丽,胡振琪,陈超.风沙区采煤沉陷裂缝对表层土壤含水量的影响[J].中国煤炭,2016,42(8):113-117.