

王舒菲, 曹银贵, 罗古拜, 等. 黄土露天矿区重构土壤典型物理性质差异及对植被生长状况的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 344-354.

WANG Shu-fei, CAO Yin-gui, LUO Gu-bai, et al. Effects of reconstructing soil in open cast mining areas of the Loess Plateau on soil physical properties and vegetative growth[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3): 344-354.

黄土露天矿区重构土壤典型物理性质差异 及对植被生长状况的影响

王舒菲¹, 曹银贵^{1,2*}, 罗古拜^{1,2}, 况欣宇¹, 宋 蕾¹, 白中科^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘 要:为研究重构土壤典型物理性质对植被生长状况的影响,以中煤平朔安太堡露天矿南排土场为研究对象,采用典型剖面采样法、室内测试法、方差分析法、拟合分析法等,分析土壤不同深度典型物理性质(土壤容重、土壤质量含水量)对植被生长指标的影响。结果表明,随着土层深度的增加,土壤容重均值呈现出先增加后减少的趋势,土壤质量含水量总体上随着土壤剖面深度的增加而降低。土壤容重介于 $0.87\sim 2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,土壤质量含水量的范围为 $1.19\%\sim 20.97\%$ 。各个土层之间土壤容重、土壤质量含水量均有较明显差异,且土壤容重在 $30\sim 60\text{ cm}$ 土层差异最明显,土壤质量含水量在 $0\sim 30\text{ cm}$ 土层差异最明显。研究区植被生长状况较好的样地土壤容重均值为 $1.47\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤质量含水量随深度增加趋于 10% 左右,并且 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层土壤容重与 $0\sim 30\text{ cm}$ 土层土壤质量含水量是影响植被生长的关键因素。研究区内重构土壤的容重、质量含水量在不同剖面以及不同土层之间存在较显著差异,表层土壤物理性质是影响植被生长的重要因素。

关键词:土地复垦;土壤重构;土壤容重;土壤质量含水量;植被生长状况

中图分类号:S152;S154.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)03-0344-11 doi: 10.13254/j.jare.2018.0223

Effects of reconstructing soil in open cast mining areas of the Loess Plateau on soil physical properties and vegetative growth

WANG Shu-fei¹, CAO Yin-gui^{1,2*}, LUO Gu-bai^{1,2}, KUANG Xin-yu¹, SONG Lei¹, BAI Zhong-ke^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Lab of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources of the PRC, Beijing 100035, China)

Abstract: We examined the southern dump of the Antaibao open-pit coal mine in Pingshuo, China to determine the effect of reconstructing typical physical properties of soil (soil bulk density, and soil mass water content) on vegetation growth status. Typical profile sampling, indoor testing, variance analysis, fitting analysis, and other methods were used in this study. Results showed that as soil depth increased, the average soil mass weight tended to first increase and then decrease, while the soil mass water content generally decreased with increasing soil section depth. Soil bulk density ranged from $0.87\sim 2.00\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and soil mass water content ranged from $1.19\%\sim 20.97\%$. There was a significant difference in soil bulk density and soil mass water content between each soil layer, with soil bulk density and soil mass water content being the most noticeably different between the layers $30\sim 60\text{ cm}$ and $0\sim 30\text{ cm}$. The mean soil bulk density values of the samples with higher vegetation growth in the study area was $1.47\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and soil mass water content tended to be about 10% with increased depth.

收稿日期:2018-09-05 录用日期:2018-11-16

作者简介:王舒菲(1995—),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为土地复垦与生态恢复。E-mail: wangshufei1995@126.com

*通信作者:曹银贵 E-mail: caoyingui1982@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41701607,41571508);中央高校基本科研业务费项目(2-9-2017-103)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41701607,41571508); Project for Basic Scientific Research of Central Universities (2-9-2017-103)

The soil mass water content of the 0~10 cm and 0~30 cm layers were key factors influencing vegetation growth. Soil mass and water content of the reconstructed soil in the study area were significantly different between different sections and different soil layers, and the physical properties of surface soil were important factors influencing vegetation growth. These results could improve the basic principle of land reclamation in mining areas in theory and provide the basis for further optimizing land reclamation processes in practice.

Keywords: land reclamation; soil reconstruction; soil bulk density; soil mass water content; vegetation growth

煤炭资源的开发利用在我国国民经济和社会发展中占有极其重要的位置,是过去与未来相当长一段时间内我国能源消费结构中的主要能源^[1]。我国煤炭产业经过“黄金十年”的发展,取得了辉煌的成就^[2],在满足我国经济建设需要的同时,也带来了一系列点多、量大、面广的生态环境问题和各种次生问题^[2-3]。我国露天矿区多数位于生态环境脆弱区,受到煤矿开采的影响,不可避免地存在土地损毁、土壤肥力下降等问题,并且会导致剧烈的景观扰动和生态环境的破坏,这些问题直接或间接地影响当地的植被生长^[4-6]。此外,露天煤矿开采过程中经过剥离、运输、排土形成的排土场采用堆山式排土,在原地貌或矿坑基础上堆起,稳定性差,易造成原有土体性质改变等问题,从而成为矿区土地损毁高生态风险区。早期排土场表层土壤重构通常采用厚层覆土方式并用重型机械碾压,这一方面造成平台表层土壤的严重压实,不利于植被恢复,另一方面,坚硬的平台表面不利于水分入渗,暴雨时极易形成地表集中的暴雨径流,严重威胁排土场稳定性^[7-8]。因此,矿山土地复垦与生态恢复已成为矿区可持续发展的重要环节^[3]。

煤矿开采造成的土地浪费、生态破坏已上升为全球性问题,由此衍生的土地复垦研究受到国内外学术界和政府的普遍关注^[9],国外许多发达国家特别是矿区较多的国家,如德国、美国等较早地开展了矿区土地复垦的相关研究^[9-10]。Hernando等^[11]指出土壤物理性质具有显著的区域变异性,其区域特性和后农业变化是决定主要植物功能群丰度的主要因素。Naeth等^[12]通过对土壤相关物理性质的测定,指出植被高低冠层对降水事件的响应不同,低植被覆盖区各深度的体积含水量波动较大。Mariusz等^[13]指出土壤容重是直接影响土壤质量的主要因素之一,其变化对苗木生长参数影响较大,特别是根系的长度和土壤容重之间存在很高的负相关性。Beata等^[14]强调了采矿后植被恢复的重要性,提出植被在总有机碳积累和确保土壤结构相对稳定方面起着重要作用。

我国在矿区土地复垦与土壤重构方面的研究起步相对较晚,从20世纪50年代末期开始,经过60年

的发展,在各方面也取得了较大进展^[15]。白中科等^[16]以安太堡露天矿为例,初步揭示了矿区土地复垦与生态重建过程中“三大效益”的有序配置和高度统一问题。胡振琪等^[17]对土地复垦、土壤重构方面的相关概念进行定义、分类,提出土壤重构与土地复垦的方法、程序与模型构建。王金满等^[18]研究了黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律,建立了黄土区露天煤矿排土场复垦土壤环境因子和乔木林地植被生物量 Logistic 演替模型,并构建了土壤-植被交互影响的偏微分方程组。Cao等^[19]对复垦农地的土壤理化性质进行相关性分析,表明再生农田土壤剖面性质随深度的不同而显著变化。Pan等^[20]指出土壤容重与植被指数(NDVI)呈负相关关系,土壤质量含水量与阴坡、半阴坡植被指数呈凹函数关系,与阳坡、半阳坡植被指数呈二次函数关系。Liu等^[21]对植被指数与土壤理化性质进行研究,指出植被覆盖率与土壤的理化性质间存在明显的正相关或负相关。

矿区重构土壤理化性质对植被生长状况的影响研究,多集中在重构土壤养分及环境因子对植被生长状况的影响,或表层重构土壤理化性质对植被生长状况的影响,而针对矿区重构土壤不同深度典型物理性质对植被生长状况的影响还需要深入研究。

本研究以中煤平朔安太堡露天煤矿南排土场为研究区,通过实地采样与分析,旨在揭示矿区重构土壤典型物理性质(土壤容重、土壤质量含水量)的深度差异、相互关系及对植被生长状况的影响,并且研究深度不只局限于表层土壤。一方面为矿区重构土壤质量对植被生长状况的影响机理及精准复垦研究提供参考,另一方面为本矿区及类似矿区土地复垦与生态重建实践提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省朔州市平鲁区内(图1),是中煤平朔安太堡露天矿早期的一个外排土场,排土时间是1985—1989年,海拔高度为1360~1465 m,边坡坡度为20°~40°。排土结束后其岩土容量达到 1.16×10^8



图1 研究区区位图

Figure 1 Location of the study area

m^3 ,属于土石混排类型,其中大于或等于50 mm的岩石占46.98%,50~5 mm砾石占15.48%,小于5 mm的砾石、土砂占37.54%^[22]。地表覆盖以黄土、红土、红黄土为主。1990年开始进行复垦,采用“草-灌-乔”的植被配置模式^[23]。该研究区地处黄土高原东部,所在的原地貌为黄土山地丘陵,属黄土丘陵强烈侵蚀生态脆弱系统,季节性河流较多,土壤侵蚀严重,同时冬春季节风大风多,地表干燥,是黄土高原典型的生态脆弱区,在此地区进行大规模的露天开采,更是加剧了水土流失与生态破坏^[24-26]。自1989年以来,中煤平朔露天矿采煤废弃地开展土地复垦与生态重建工作已有30年,现已形成3000 hm^2 以上不同复垦模式的复垦地^[26]。土地损毁和复垦过程中都对土壤造成了扰动^[25]。

研究区所采用的露天煤矿排土场堆状地面土壤重构方法是一项创新性的排土场侵蚀控制和土壤重构技术,它是针对矿区存在的问题,并基于对安太堡露天煤矿排土场土地复垦具体情况的科学分析和长期的研究与实践而提出的^[8]。研究区是安太堡露天矿复垦时间最长、复垦模式最多的排土场,相对高度为120 m,有4个台阶,平台与边坡相间分布,平台宽数十米至百余米,每层台阶高20~40 m,台阶坡面角为 $30^\circ\sim 42^\circ$ ^[27]。

1.2 样方与剖面建立

采样时间是在2018年5月中旬,是研究区干旱少雨的季节。综合考虑安太堡露天矿南排土场的海拔、地形、坡度和坡向条件,在该排土场范围内设置了具有代表性的5个样方,用于地表植被信息的收集,编号分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 。在排土场平台上,样方的大小设置为10 m×10 m,在排土场边坡上,样方的宽度设置为10 m,样方的长度根据边坡的坡度来确定。10 m×10 m的大样方内随机划定出具有代表性的1 m×1 m小样方,用于地表草本采集与土壤剖面的制作。在小样方内制作土壤剖面,剖面编号分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 。土壤剖面的平均深度为100 cm,个别剖面因障碍层太浅,开挖困难,最终开挖深度为60 cm。各样地编号、剖面编号、剖面深度、地形特征、海拔高度、平均坡度及主要植被情况如表1所示。

1.3 采样与测试

(1)草本样品采集:在各个样地建立的1 m×1 m小样方中,采集地表草本。草本样装入密封袋,保存并编号,避免遗漏,同时注意通风干燥,避免腐烂,后期在实验室用烘箱在65 $^\circ\text{C}$ 的温度下烘干至恒重,烘干时间为10 h左右。

(2)土壤样品采集:在各剖面内利用环刀($\phi 100$)每隔10 cm采集一次土壤样品,然后用保鲜袋或密封

表1 样方记录表

Table 1 Information of the plots

样方编号 Plots number	剖面编号 Profiles number	剖面深度 Depth of profile/cm	地形特征 Terrain features	海拔高度 Altitude/m	平均坡度 Average slope/(°)	主要植被 Main vegetation
S ₁	P ₁	100	顶部平台	1436	0	刺槐
S ₂	P ₂	60	边坡、阴坡	1421	22	刺槐
S ₃	P ₃	100	边坡、阳坡	1410	33	柠条
S ₄	P ₄	90	平台、半阳坡	1401	0	刺槐
S ₅	P ₅	80	平台、半阴坡	1361	0	刺槐

袋、布袋将样品封存并编号。在实验室对所采集的土壤样品进行称重(湿质量),称重后用烘箱在 105.50 °C 的温度下烘干至恒重(干质量),烘干时间为 8 h 左右。

土壤容重采用环刀法测定,土壤质量含水量采用烘干法测定^[28-29],计算公式^[30]如式(1)、式(2)所示:

土壤容重:

$$\rho=\frac{m_2-m_1}{V}$$
 (1)

式中:ρ 为土壤容重,g·cm³;V 为环刀容积,cm³;m₁ 为环刀的质量,g;m₂ 为环刀+烘干土质量,g。

土壤质量含水量:

$$\theta_m=\frac{w_1-w_2}{w_2}\times 100\%$$
 (2)

式中:θ_m 为质量含水量(自然含水率或绝对含水量),%;w₁ 为湿土质量,g;w₂ 为烘干土质量,g。

1.4 研究方法

利用野外实地收集样方内植被生长参数与室内测定土样、草本样相关数据,采用上述计算方式,得到每个样方各个土层(以 10 cm 为间隔)的土壤容重、土壤质量含水量数据,制作相关图表以分析数据分布和变化规律。利用 SPSS 22 软件对土壤容重、土壤质量含水量进行差异性分析,研究不同样地相应土层之间土壤容重和质量含水量的差异性;利用 Excel 2010 对土壤容重和质量含水量进行拟合分析,探索二者之间是否存在一般规律性,并进一步分析土壤容重、土壤质量含水量对植被生长状况的影响。

2 结果与分析

2.1 重构土壤典型物理性质特征

2.1.1 土壤容重的特征

各剖面不同深度内土壤样品容重如表 2 所示。从表 2 可以看出,各个剖面土壤容重的均值相差较大,土壤容重均值最高的是 P₅ 剖面,达到 1.74 g·cm⁻³。土壤容重均值最低的是 P₃ 剖面,为 1.27 g·cm⁻³。另

表2 各剖面不同深度土壤容重及总体特征(g·cm⁻³)

Table 2 Soil bulk density and general characteristics at different depth of each profile(g·cm⁻³)

项目 Items	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
0~10 cm	0.99	0.87	1.34	1.22	1.21
10~20 cm	1.50	1.32	1.23	1.50	1.29
20~30 cm	1.71	1.25	1.13	1.54	1.57
30~40 cm	1.59	1.52	1.15	1.60	1.95
40~50 cm	1.71	1.41	1.22	1.56	1.97
50~60 cm	1.54	1.66	1.29	1.57	2.00
60~70 cm	1.49		1.32	1.66	1.95
70~80 cm	1.49		1.30	1.61	1.99
80~90 cm	1.51		1.33	1.52	
90~100 cm	1.48		1.35		
均值	1.50	1.34	1.27	1.53	1.74
标准偏差	0.20	0.27	0.08	0.13	0.34
变异系数/%	13.33	20.37	6.34	8.32	19.29

外,平台 P₁、P₄、P₅ 剖面土壤容重的均值较高,都在 1.50 g·cm⁻³ 以上,而边坡 P₂、P₃ 剖面的土壤容重均值相对较低,在 1.34 g·cm⁻³ 以下。P₃、P₄ 剖面属于弱变异程度,其余属于中等变异程度。

通过对比各层土壤容重的均值和中值发现,土层土壤容重均值和中值的最大值出现在 40~70 cm 之间,其均值和中值分别为 1.47、1.51 g·cm⁻³。从各层土壤容重均值随深度变化的规律来看(图 2),随着土层深度的增加,土壤容重均值呈现出先增加后减少的趋势。

为了分析各个剖面土壤容重垂向上的变化规律,分别以 P₁、P₂、P₃、P₄、P₅ 剖面 0~60、0~30 cm 及 30~60 cm 土层为研究对象,从同一深度进行差异性分析,差异性分析结果如图 3 所示。

从 5 个剖面不同深度土壤容重差异来看(图 3),在 0~60 cm 整体深度内:P₁ 剖面与其他剖面差异均不显著;P₂ 剖面与 P₅ 剖面差异显著,而与其他剖面差异

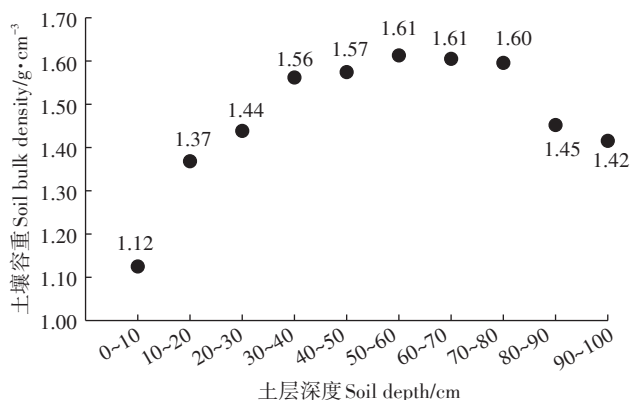
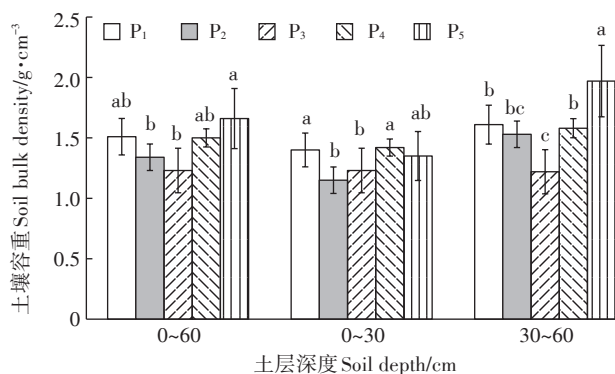


图2 分层土壤容重均值变化趋势

Figure 2 Trend of soil bulk density average value with depths



相同土层不同字母表示不同剖面间差异显著($P<0.05$)。下同
Different letters in the same soil layer indicate significant differences between different sections ($P<0.05$). The same below

图3 各剖面不同深度土壤容重

Figure 3 Soil bulk density at different depth in each profile

不显著;P₃剖面与P₅剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₄剖面与其他剖面差异均不显著;P₅剖面与P₂、P₃剖面差异显著,而与P₁、P₄剖面差异不显著。在0~30 cm深度内:P₁剖面与P₂、P₃剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₂剖面与P₁、P₄剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₃剖面与P₁、P₄剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₄剖面与P₂、P₃剖面差异显著,而与其他剖面差异性不显著;P₅剖面与其他剖面差异均不显著。在30~60 cm深度内:P₁剖面与P₃、P₅剖面差异显著,而与P₂、P₄剖面差异不显著;P₂剖面与P₃剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₃剖面与P₂剖面差异不显著,而与其他剖面差异显著;P₄剖面与P₃、P₅剖面差异显著,而与其他剖面差异不显著;P₅剖面与其他剖面差异均显著。

2.1.2 土壤质量含水量的特征

各剖面深度内土壤样品土壤质量含水量如表3所示。从表3可以看出,各个剖面土壤质量含水量的

均值相差较大,土壤质量含水量均值最高的是P₅剖面,达到8.88%。土壤质量含水量均值最低的是P₃剖面,为4.00%。另外,P₁、P₂、P₅剖面土壤质量含水量的均值较高,在8.04%以上。而P₄剖面的土壤质量含水量均值相对较低,P₃剖面的土壤质量含水量均值最低。各个剖面均属于中等变异程度。

从表3可以看出,土壤质量含水量总体上随着土壤剖面深度的增加而降低,最大值出现在0~20 cm(阴坡、半阴坡、半阳坡)和80~100 cm(阳坡),最小值规律不明显。此外,从土壤质量含水量的均值来看,P₅剖面土壤质量含水量最高,P₃剖面土壤质量含水量最低。

为了分析各个剖面土壤质量含水量在垂向上的变化规律,分别以P₁、P₂、P₃、P₄、P₅剖面0~60、0~30 cm及30~60 cm土层为研究对象,从同一深度进行差异性分析,分析结果如图4所示。

由图4可知,5个样方在不同土层深度中的土壤质量含水量呈现出的差异性较为显著。在0~60 cm的整体土层中,P₁剖面中的土壤质量含水量与P₂、P₃剖面差异显著,而与P₄、P₅剖面差异不显著。P₂、P₃、P₄三剖面的土壤质量含水量的差异两两之间皆不显著。对于P₅剖面而言,其与P₁、P₂、P₄剖面土壤质量含水量差异均不显著。在0~30 cm土层中,P₅剖面与P₁、P₃、P₄剖面土壤质量含水量差异均较为显著。P₁剖面与P₄剖面、P₁剖面与P₃剖面以及P₂剖面与P₅剖面的土壤质量含水量差异均不显著。在30~60 cm土层中,P₃剖面与其他各个剖面中的土壤质量含水量比较,均具

表3 各剖面不同深度土壤质量含水量及总体特征(%)

Table 3 Soil mass water content and general characteristics at different depth of each profile(%)

项目 Items	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
0~10 cm	8.80	19.71	1.47	10.43	16.28
10~20 cm	2.26	16.78	4.17	6.15	20.97
20~30 cm	5.41	11.11	5.94	6.63	7.87
30~40 cm	9.55	10.08	3.76	5.82	8.98
40~50 cm	6.53	9.52	5.40	6.47	8.43
50~60 cm	8.81	13.17	1.19	5.62	9.09
60~70 cm	10.07		1.91	5.21	8.32
70~80 cm	8.82		4.86	8.12	8.87
80~90 cm	11.99		4.41	8.05	
90~100 cm	11.02		6.90		
均值	8.33	8.04	4.00	6.25	8.88
标准偏差	2.88	4.07	1.94	1.65	4.82
变异系数	34.55	30.36	48.44	23.73	43.45

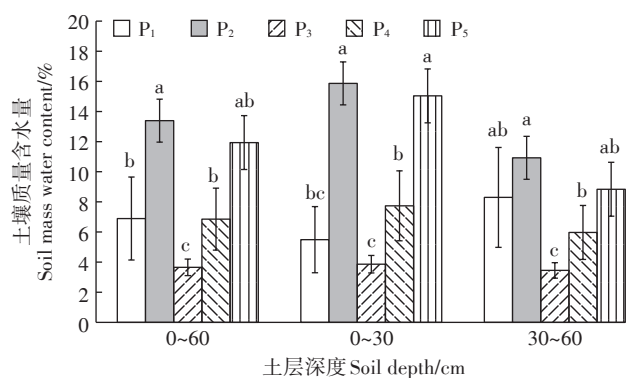


图4 各剖面不同深度土壤质量含水量

Figure 4 Soil mass water content at different depths in each profile

有较为显著的差异。而 P_1 、 P_2 、 P_5 三剖面 and P_1 、 P_4 、 P_5 三剖面的土壤质量含水量差异均不显著。

2.2 土壤容重与土壤质量含水量关系分析

利用 Excel 2010 分别进行各个剖面土壤容重与土壤质量含水量拟合分析,如图 5 所示。可以发现土壤容重和土壤质量含水量之间存在显著负相关关系,并且 5 个剖面作比较,土壤容重与土壤质量含水量相关性大小为 $P_5 > P_4 > P_2 > P_3 > P_1$ 。

2.3 重构土壤典型物理性质对植被生长状况的影响

整理野外实地调查采集得到的数据,各样方植被生长指标如表 4 所示。从表 4 可看出,在乔木样方

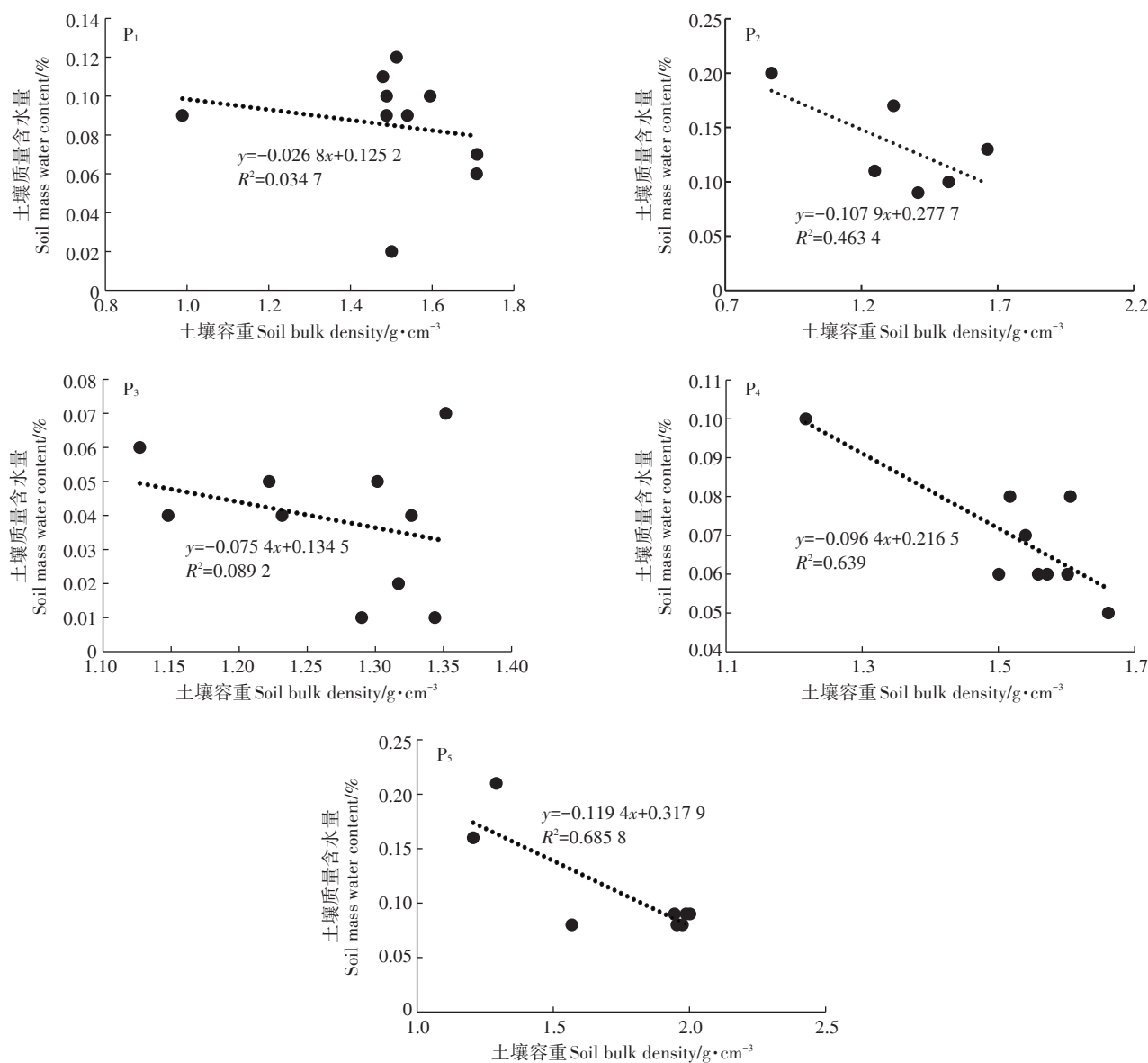


图5 各剖面土壤容重与土壤质量含水量关系

Figure 5 Relationship between soil bulk density and soil mass water content in each profile

内, S₂样方(边坡、阴坡)内的植被生长状况好于其他样方, 而 S₄样方(平台、半阳坡)内的植被生长状况比其他样方差。乔木样方内植被生长状况总体上来看: S₂>S₁>S₅>S₄。S₃样方属于灌木样方, 没有参与乔木样方的对比。

利用Excel 2010制作各剖面土壤容重、土壤质量含水量随深度的变化趋势图(图6、图7)。通过对比各个剖面土壤容重变化趋势(图6)发现, 土壤容重介于0.87~2.00 g·cm⁻³之间, 除 P₃剖面以外的剖面土壤容重随着土层深度的增加有明显的增加, 呈先增大后减小、然后趋于平稳的趋势, 而 P₃剖面呈现的是先减小后缓慢增大的趋势。从30~40 cm 土层开始 P₅剖面容重值明显大于其余剖面, 0~10 cm 土层中, 土壤容重大小比较大致为 P₂<P₁<P₅<P₄<P₃。通过对比各个剖面土壤质量含水量变化趋势(图7)发现, 土壤质量含水量的范围为1.19%~20.97%, 整体上 P₁剖面质量含水量随土层深度的增加有上升趋势, P₃剖面质量含水量较其余剖面小, P₂剖面与 P₅剖面在20~30 cm 土层有明显下降趋势, 并且 P₅剖面下降更为明显, P₄剖面随土层加深变动程度较小。

3 讨论

3.1 重构土壤容重差异

基本统计结果表明, 土壤容重最大值出现在40~70 cm 土层之间, 最小值出现在0~30 cm 土层之间。土壤容重平均值和中值为1.47、1.51 g·cm⁻³, 较全国土壤容重平均值和中值(1.32、1.35 g·cm⁻³)大^[31], 含矿物质较多的土壤的容重值为1.40~1.70 g·cm⁻³^[31], 表明该区域排土场土地复垦重构土壤质量较接近标准水平。土壤容重变幅为0.49 g·cm⁻³, 变化幅度大, P₃、P₄剖面属于弱变异程度, 其余属于中等变异程度。

各个土层之间土壤容重存在较显著差异, 且土壤容重在30~60 cm 土层差异性最大。在30~60 cm 土层中 P₃剖面与 P₅剖面的土壤容重与其他剖面土壤容重差异最明显。这是由于 P₃剖面是边坡, 是在排土造地过程中自然形成, 且没有受到机械碾压^[32], 坡度大、草本稀少, 土壤容重总体偏小。植被根系作用对土壤容重会产生很大影响^[33]。该样地种植植被为柠条, 比其他样地的刺槐扎根要深^[34], 使得 P₃剖面在较深土层中土壤疏松、容重小。P₅剖面是典型的土石混排剖面,

表4 样方植被生长状况
Table 4 Vegetation growth in each plot

样方编号 Plots number	乔灌木数量/株 Quantity/plant	高度 Height/m	乔木胸径(冠径) Tree diameter (Crown diameter)/cm	乔灌木盖度 Coverage/%	草本生物量 Herbaceous biomass/g
S ₁	23	7.26	10.50	56.10	272.67
S ₂	41	10.35	12.45	58.62	157.99
S ₃	90	0.77	73.50	60.00	35.31
S ₄	23	4.50	10.18	42.31	273.44
S ₅	25	6.41	10.62	41.70	182.33

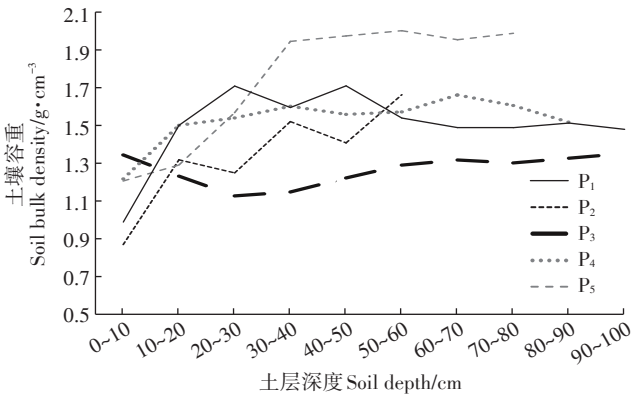


图6 土壤容重随土层深度变化趋势
Figure 6 Trend of soil bulk density with depths

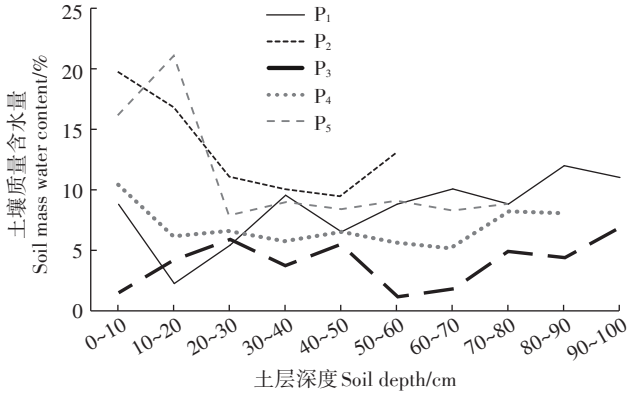


图7 土壤质量含水量随土层深度变化趋势图
Figure 7 Trend of soil mass water content with depths

砾石含量高,并且受大型机械压实严重,在30~60 cm土层中土壤紧实度急剧升高,造成P₅剖面与其他剖面产生较显著差异。

通过比较发现,平台土壤容重大于边坡。边坡处的土壤容重较低,这是因为边坡是在排土过程中自然形成的,没有经过重型机械的碾压^[35]。P₂剖面与P₃剖面均为边坡,土壤容重却存在较大差异。这是因为土壤容重与坡度呈负相关关系^[36-37],P₃剖面所在边坡坡度为33°,P₂剖面所在边坡坡度为22°,所以P₃剖面的土壤容重小于P₂剖面。

随着土层深度的增加,土壤容重值先增加后减少,依次交替并趋于稳定。这与柴华等^[31]提出的土壤容重随土层深度增加而增加,两者间表现为显著的幂函数关系的结论存在不一致之处。这是因为本研究区为露天煤矿排土场,在一定厚度的覆土下多分布着煤矸石与砾石,煤矸石与砾石在土体中形成障碍层,影响土壤的物理性质。此外,在研究区内多有煤矸石自燃现象,放出的热量以及气体会影响到覆土的性质,对土壤物理性质产生很大的影响^[27]。这导致了露天煤矿排土场土壤容重在不同土层上的分布规律与一般规律存在差别。

3.2 重构土壤质量含水量差异

P₁剖面随着土层深度的增加,土壤质量含水量总体上逐渐增大,与王尚义等^[38]提出的土壤含水量与土壤深度呈极显著正相关结论一致。并且该样地整体含水量较大,从造地工艺与植被恢复效果来看,该样地是平台且植被恢复效果比较好,土壤质量含水量有明显的提高^[39]。在20~30 cm土层间,P₂剖面与P₅剖面土壤质量含水量有明显下降趋势。这是因为P₂剖面与P₅剖面障碍层浅,0~20 cm以表土为主,以下为土石混排,孔隙度大,砾石含量高,含水量低。

各个土层之间土壤质量含水量之间均存在显著差异,且土壤质量含水量在0~30 cm土层差异性最大。表层土壤处于大气圈、土壤圈和生物圈的交界面上,在各种影响下具有高度的空间变异性^[40]。P₁、P₃剖面与P₄剖面为纯土壤剖面,P₂剖面与P₅剖面为土石混排剖面,不同土体构型有不同的透水保水性能^[41],这就造成了土壤质量含水量差异性的存在。在0~30 cm土层,P₃剖面土质疏松,保水性能差,土壤质量含水量显著低于其他剖面;P₁、P₂剖面与P₄剖面草本较多,草根多分布于0~30 cm土层,消耗了土体表层的水分^[33];P₅剖面草本密集,对水分的消耗更大。

研究区内土壤质量含水量大小基本表现为平台

大于边坡,阴坡大于阳坡,半阳坡和半阴坡介于阴坡、阳坡两者之间,与孟秦倩等^[42]的研究结果一致。这是因为地形和光照是影响土壤含水量的重要因素^[42],边坡较平台水分流失严重,而光照充足的阳坡水分蒸发量更大。

3.3 重构土壤典型物理性质与植被生长状况的关系

从图6和图7可以看出重构土壤容重与土壤质量含水量的变化大体呈S型变化,这一现象比较符合王金满等^[18]提出的Logistic生长模型。土壤容重与土壤质量含水量之间存在明显的负相关关系,这与甘森等^[43]的研究结果一致,并且相关性较小的样地植被生长状况较好。矿区的建设和生产损毁了土地的原始条件,对植被生长造成严重影响,也加大了矿区植被的恢复难度^[44]。植被恢复的早期阶段,很大程度上受到土壤质量的约束^[45],这就对早期造地工艺提出要求,在重构土壤的物理性质方面要注意加强单个物理因子以及各个因子之间相关性的研究,优化土壤质量。本研究表明研究区植被生长状况较好的样地土壤容重均值为1.47 g·cm⁻³,土壤质量含水量随深度增加趋于10%左右。

表层土壤容重和质量含水量是影响植被生长的重要因素。本研究中,表层0~10 cm土壤容重较小的样方,植被生长状况较好,并且土壤质量含水量在0~30 cm之间存在较大差别,在30 cm以下基本趋于10%左右,结合植被生长状况,说明表层土壤物理性质的不同是植被生长状况存在差异的主要原因。浅层土壤更容易受到环境因素的影响^[46],土壤含水量受植被根系的影响,但随着深度的增加,根系对土壤含水量的影响逐渐减弱^[47]。实地调研与分析表明,S₂样方中植被生长状况最好,S₃样方最差。二者土壤容重均比其余样地小,但是植被状况差异却很大,这可能是因为S₂样方土壤质量含水量较S₃样方大,并且在0~20 cm表层土中S₂样方土壤质量含水量约为S₃样方的4倍。S₃样方土质疏松,水分含量少,只适合生长柠条这类根系发达、耐旱、耐高温的树种。本研究着重强调土壤物理性质对植被的影响,关于植被对土壤影响的研究缺乏,今后有待进一步研究。同时,缺乏一个综合指标来反映植被生长状况,而且采样地数量有限,可能会影响所得结论的严谨性。

4 结论

(1)基本统计学分析表明,研究区土壤容重随土层深度增加先增加后减少,均值为1.47 g·cm⁻³,变幅

为 $0.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 变化幅度大; 平台容重大于边坡。土壤质量含水量总体上随土层深度增加而减小, 平台大于边坡, 阴坡大于阳坡, 半阳坡和半阴坡介于阴坡、阳坡两者之间。

(2) 差异性分析表明, 在不同土层各个剖面土壤容重和土壤质量含水量之间均存在较明显差异, 且土壤容重在 30~60 cm 土层差异最明显, 土壤质量含水量在 0~30 cm 土层差异最明显。相关性分析表明土壤容重与土壤质量含水量之间存在明显的负相关关系, 相关性大小为 $P_5 > P_4 > P_2 > P_3 > P_1$ 。

(3) 表层 0~10 cm 土壤容重较小的样方, 植被生长状况较好, 并且土壤质量含水量在 0~30 cm 之间存在较大差别, 说明表层土壤容重和质量含水量是影响植被生长的重要因素; 植被生长状况良好的样地土壤容重呈上升趋势并最终浮动于 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右, 且土壤质量含水量随深度增加趋于 10% 左右。

参考文献:

- [1] 赵开功, 李彦平. 我国煤炭资源安全现状分析及发展研究[J]. 煤炭工程, 2018(10): 185-189.
ZHAO Kai-gong, LI Yan-ping. Analysis and development research of coal resource safety in China[J]. *Coal Engineering*, 2018(10): 185-189.
- [2] 徐东岳, 刘涛. 我国煤炭工业发展十年回顾及趋势展望[J]. 中国煤炭, 2014, 40(1): 29-32, 45.
XU Dong-yue, LIU Tao. Review of development of China's coal industry in past 10 years and its trend prospect[J]. *China Coal*, 2014, 40(1): 29-32, 45.
- [3] 黄丹勇. 矿区土地复垦与生态环境恢复综述[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(6): 45-48.
HUANG Dan-yong. Review of land reclamation and ecological environment restoration in mining areas[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2011, 27(6): 45-48.
- [4] 曹银贵, 白中科, 张耿杰, 等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2422-2428.
CAO Yin-gui, BAI Zhong-ke, ZHANG Geng-jie, et al. Comparison of surface soil quality of reclaimed agricultural land in Pingshuo open mining area, Shanxi[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2422-2428.
- [5] 赵利权, 林清松, 路永胜, 等. 浅谈露天煤矿开采环境问题及防治对策[J]. 科技风, 2018, 30(8): 58-59.
ZHAO Li-quan, LIN Qing-song, LU Yong-sheng, et al. Discussion on environmental problems and prevention and control strategies of open-cast coal mining[J]. *Technology Wind*, 2018, 30(8): 58-59.
- [6] Lewis D E, White J R, Wafula D, et al. Soil functional diversity analysis of a bauxite-mined restoration chronosequence[J]. *Microbial Ecology*, 2010, 59(4): 710-723.
- [7] 孙琦, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿土地损毁生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 278-288.
SUN Qi, BAI Zhong-ke, CAO Yin-gui, et al. Ecological risk assessment of land damage in extra-large open coal mines[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(17): 278-288.
- [8] 吕春娟, 白中科. 露天排土场的岩土侵蚀特征及水保效应分析[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 14-19.
LÜ Chun-juan, BAI Zhong-ke. Analysis of the characteristics of rock and soil erosion and water conservation effect of open pit dump[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 14-19.
- [9] 杜建平, 邵景安, 谭少军, 等. 煤矿区土地复垦研究: 前景与进展[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(1): 131-140.
DU Jian-ping, SHAO Jing-an, TAN Shao-jun, et al. Land reclamation research in coal mine areas: Prospects and progress[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science)*, 2018, 35(1): 131-140.
- [10] 王莉, 张和生. 国内外矿区土地复垦研究进展[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 294-300.
WANG Li, ZHANG He-sheng. Research progress of mine land reclamation at home and abroad[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(1): 294-300.
- [11] Hernando G, David T, Maria M, et al. Patterns of variability in soil properties and vegetation cover following abandonment of olive groves in Catalonia (NE Spain)[J]. *Acta Oecologica*, 2007, 31(3): 316-324.
- [12] Naeth M A, Chanasyk D S, Burgers T D. Vegetation and soil water interactions on a tailings sand storage facility in the Athabasca oil sands region of Alberta Canada[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36(1/2/3/4): 19-30.
- [13] Mariusz K, Jacek B, Paweł S. Effect of soil bulk density on forest tree seedlings[J]. *International Agrophysics*, 2015, 29(1): 67-74.
- [14] Beata K, Maja B, Anna S J, et al. Soil physical properties of agriculturally reclaimed area after lignite mine: A case study from central Poland[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 163(5): 54-63.
- [15] 王海荣. 矿区土地修复和生态恢复现状及趋势[J]. 绿色科技, 2016, 55(6): 66-67, 69.
WANG Hai-rong. Status and trends of mine land restoration and ecological restoration[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2016, 55(6): 66-67, 69.
- [16] 白中科, 郭青霞, 王改玲, 等. 矿区土地复垦与生态重建效益演变与配置研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(6): 525-530.
BAI Zhong-ke, GUO Qing-xia, WANG Gai-ling, et al. Study on the evolution and allocation of benefits of mine land reclamation and ecological reconstruction[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(6): 525-530.
- [17] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 矿山复垦土壤重构的概念与方法[J]. 土壤, 2005, 48(1): 8-12.
HU Zhen-qi, WEI Zhong-yi, QIN Ping. Concepts and methods of soil reconstruction for mine reclamation[J]. *Soil*, 2005, 48(1): 8-12.
- [18] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223-232.
WANG Jin-man, GUO Ling-li, BAI Zhong-ke, et al. Evolution law of

- soil and vegetation after reclamation of open coal mine drainage field in loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21):223-232.
- [19] Cao Y G, Bai Z K, Zhao Z Q, et al. Development of soil physicochemical properties of reclaimed croplands in a large opencast mining area on the Loess Plateau[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2014, 12(2):1045-1053.
- [20] Pan J, Bai Z K, Cao Y G, et al. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(30):23953-23965.
- [21] Liu X Y, Cao Y G, Bai Z K, et al. Evaluating relationships between soil chemical properties and vegetation cover at different slope aspects in a reclaimed dump[J]. *Environmental Earth Science*, 2017, 76(23):805.
- [22] 马 锐, 韩武波, 白中科. 黄土区大型露天矿排土场水土流失致灾因子的确定——以安太堡露天煤矿南排土场为例[J]. *能源环境保护*, 2006, 20(2):50-53.
- MA Rui, HAN Wu-bo, BAI Zhong-ke. Determination of the disaster-causing factors of soil erosion in the large open pit dump in loess area: Taking the southern dump of Antaibao open pit coal mine as an example[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(2):50-53.
- [23] 李思扬. 安太堡露天矿土地利用变化和土地复垦技术分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- LI Si-yang. Analysis of land use change and land reclamation techniques in Antaibao open pit mine[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [24] 白中科, 赵景速, 李晋川, 等. 黄土区大型露天矿复垦土地的土壤重构与土壤环境质量[C]. 第七次土壤与环境学术研讨会, 2001.
- BAI Zhong-ke, ZHAO Jing-su, LI Jin-chuan, et al. Soil rearrangement and soil environmental quality of reclaimed land of large open pit mine in loess area[C]. 7th Soil and Environment Academic Seminar, 2001.
- [25] 王 军, 张亚男, 郭义强. 矿区土地复垦与生态重建[J]. *地域研究与开发*, 2014, 33(6):113-116.
- WANG Jun, ZHANG Ya-nan, GUO Yi-qiang. Land reclamation and ecological reconstruction in mining area[J]. *Areal Research and Development*, 2014, 33(6):113-116.
- [26] 李晋川, 王 翔, 岳建英, 等. 安太堡露天矿植被恢复过程中土壤生态肥力评价[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1):66-71, 79.
- LI Jin-chuan, WANG Xiang, YUE Jian-ying, et al. Evaluation of soil ecological fertility during vegetation restoration in Antaibao open pit mine[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1):66-71, 79.
- [27] 樊文华, 李慧峰, 白中科, 等. 黄土区大型露天煤矿煤矸石自燃对复垦土壤质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2):319-324.
- FAN Wen-hua, LI Hui-feng, BAI Zhong-ke, et al. Effect of spontaneous combustion of coal gangue in large open coal mines in loess area on soil quality for reclamation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2):319-324.
- [28] 陈 琦. 锡林郭勒草原原煤排土场植被恢复措施应用效果初步评价[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- CHEN Qi. Preliminary evaluation of the application effect of vegetation restoration measures in Xilingol grassland coal mine dump[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [29] 邵新庆, 石永红, 韩建国, 等. 典型草原自然演替过程中土壤理化性质动态变化[J]. *草地学报*, 2008, 18(6):566-571.
- SHAO Xin-qing, SHI Yong-hong, HAN Jian-guo, et al. Dynamic changes of soil physical and chemical properties during natural succession of typical grassland[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2008, 18(6):566-571.
- [30] 杨晓刚, 黄振艳, 李 杰, 等. 不同退化程度草甸草原土壤理化性质与地上生物量的关系[J]. *现代农业科技*, 2013, 42(17):234-235.
- YANG Xiao-gang, HUANG Zhen-yan, LI Jie, et al. Relationship between physicochemical properties of meadow steppe soil and above-ground biomass with different degradation degrees[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2013, 42(17):234-235.
- [31] 柴 华, 何念鹏. 中国土壤容重特征及其对区域碳储量估算的意义[J]. *生态学报*, 2016, 36(13):3903-3910.
- CHAI Hua, HE Nian-peng. Soil bulk density characteristics in China and its significance in estimating regional carbon storage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13):3903-3910.
- [32] 魏忠义, 胡振琪, 白中科. 露天煤矿排土场平台“堆状地面”土壤重构方法[J]. *煤炭学报*, 2001, 38(1):18-21.
- WEI Zhong-yi, HU Zhen-qi, BAI Zhong-ke. Soil reconstruction method of "pile ground" platform of opencast coal mine drainage field[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 38(1):18-21.
- [33] 单梦颖, 杨永刚, 吴兆录. 云南省中部3种森林土壤含水率、容重和细根重及其垂直分布[J]. *云南地理环境研究*, 2013, 25(4):38-44.
- SHAN Meng-ying, YANG Yong-gang, WU Zhao-lu. Moisture content, bulk density and fine root weight of three forest soils in central Yunnan Province and their vertical distribution[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2013, 25(4):38-44.
- [34] 吕海波, 梁宗锁. 刺槐林和柠条林土壤剖面理化性质对比及相关性分析[J]. *中国水土保持*, 2012, 38(4):28-31, 68.
- LÜ Hai-bo, LIANG Zong-suo. Comparison and correlation analysis of physical and chemical properties of soil profiles of acacia forests and caragana forests[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012, 38(4):28-31, 68.
- [35] 张耿杰. 矿区复垦土地质量监测与评价研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- ZHANG Geng-jie. Study on monitoring and evaluation of reclamation land quality[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- [36] 冯 强, 段宝玲, 姜 硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(1):39-45.
- FENG Qiang, DUAN Bao-ling, JIANG Shuo. Spatial variation of soil bulk density at small watershed scale and its influencing factors[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, 36(1):39-45.
- [37] 周凤艳, 郝春英, 张柏习, 等. 不同植被类型对沙地土壤理化性质

- 的影响[J]. 辽宁林业科技, 2011, 44(3):12-14.
- ZHOU Feng-yan, HAO Chun-ying, ZHANG Bai-xi, et al. Effects of different vegetation types on the physical and chemical properties of sandy soil[J]. *Liaoning Forestry Science and Technology*, 2011, 44(3):12-14.
- [38] 王尚义, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 晋西北矿区、非矿区不同植被下土壤水分特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6):986-991.
- WANG Shang-yi, NIU Jun-jie, ZHU Wei-xin, et al. Soil moisture characteristics under different vegetation in the mining and non-mining areas in northwest Shanxi Province[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(6):986-991.
- [39] Cao Y G, Wang J M, Bai Z K, et al. Differentiation and mechanisms on physical properties of reconstructed soils on open-cast mine dump of loess area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(8):6367-6380.
- [40] 郭德亮, 樊 军, 米美霞. 黑河中游绿洲区不同土地利用类型表层土壤水分空间变异的尺度效应[J]. 应用生态学报, 2013, 24(5):1199-1208.
- GUO De-liang, FAN Jun, MI Mei-xia. Scale effect of spatial variation of surface soil moisture in different land use types in the oasis area of middle reaches of Heihe River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5):1199-1208.
- [41] 崔浩浩, 张 冰, 冯 欣, 等. 不同土体构型土壤的持水性能[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):1-5.
- CUI Hao-hao, ZHANG Bing, FENG Xin, et al. Water holding performance of soil with different soil types[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(4):1-5.
- [42] 孟秦倩, 王 健, 吴发启, 等. 黄土山地苹果园土壤水分最大利用深度分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):65-71.
- MENG Qin-qian, WANG Jian, WU Fa-qi, et al. In-depth analysis of maximum use of soil moisture in apple orchard in loess mountain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(15):65-71.
- [43] 甘 森, 贾玉华, 李同川, 等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2):315-324.
- GAN Miao, JIA Yu-hua, LI Tong-chuan, et al. Analysis of the changes in the density, saturated conductivity and soil moisture content of the slope groove system in loess area[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2):315-324.
- [44] 王树凯, 冯永建. 矿区森林植被恢复调查研究[J]. 河北林业科技, 2011, 45(4):16-19.
- WANG Shu-kai, FENG Yong-jian. Investigation and study on forest vegetation restoration in mining area[J]. *The Journal of Hebei Forestry Science and Technology*, 2011, 45(4):16-19.
- [45] 杨勤学, 赵冰清, 郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展[J]. 生态学杂志, 2015, 34(4):1152-1157.
- YANG Qin-xue, ZHAO Bing-qing, GUO Dong-gang. Research progress of vegetation restoration in opencast coal mining areas in north China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(4):1152-1157.
- [46] 赵亚丽. 黄土区不同尺度深层土壤水分研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- ZHAO Ya-li. Study on deep soil moisture at different scales in loess region[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [47] 焦 瑞, 赵 英, 司炳成, 等. 黄土高原退耕还林措施对深层土壤含水率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5):129-135.
- JIAO Rui, ZHAO Ying, SI Bing-cheng, et al. Effects of returning farmland to forest measures on soil moisture content in deep soil on Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5):129-135.