

山西平朔露天矿区复垦农用地 表层土壤质量差异对比

曹银贵^{1,2}, 白中科^{1,2*}, 张耿杰¹, 周伟^{1,2}, 王金满^{1,2}, 余勤飞¹, 杜振州¹

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

摘要:以复垦农用地为研究对象,以原地貌未受损农用地和排土场未复垦地作为对照,共选择18个样地,对比研究复垦农用地、未复垦地及原地貌未受损农用地的土壤容重、田间持水量、pH值、有机质、全氮、全钾、有效磷、速效钾的差异,揭示复垦农用地土壤重构的过程及变异的规律。结果表明:(1)复垦农用地土壤容重、田间持水量、pH值、全钾、有效磷、速效钾的均值都略高于未受损农用地;而复垦农用地有机质、全氮的均值都略低于未受损农用地。(2)复垦农用地和未受损农用地在0~10 cm的土壤容重及pH值均略低于10~20 cm土层;0~10 cm的土壤肥力指标均值略高于10~20 cm土层。(3)在0~10 cm土层,复垦耕地和复垦林地的相关土壤理化性质要优于未受损耕地;在10~20 cm,复垦林地土壤理化性质基本上优于未受损耕地。(4)复垦13年的耕地土壤容重、速效钾与未受损耕地差异不显著;复垦22年林地的单个土壤理化指标基本上优于复垦19年林地,复垦19年林地的单个土壤理化指标基本上优于未受损林地。

关键词:排土场复垦;农用地;土壤质量;露天矿

中图分类号:S158 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2013)12-2422-07 **doi:**10.11654/jaes.2013.12.015

Soil Quality of Surface Reclaimed Farmland in Large Open-cast Mining Area of Shanxi Province

CAO Yin-gui^{1,2}, BAI Zhong-ke^{1,2*}, ZHANG Geng-jie¹, ZHOU Wei^{1,2}, WANG Jin-man^{1,2}, YU Qin-fei¹, DU Zhen-zhou¹

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.Key Lab of Land Consolidation, LMR, Beijing 100035, China)

Abstract: To assess the impacts of land reclamation on soil quality in mining area, we compared the physicochemical properties of surface soils from reclaimed farmlands with those from the un-reclaimed lands and undamaged farmlands using a total of 18 plots with different land types and reclamation duration. All reclaimed farmlands had higher soil bulk density, field moisture capacity, pH, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium, but lower organic matter and total nitrogen than the undamaged farmlands did. For both reclaimed and undamaged agriculture lands, soils had lower density and pH, but better soil fertility at 0~10 cm than at 10~20 cm layers. Most of the physicochemical properties of soils at the depth of 0~10 cm were higher in the reclaimed cultivated lands and reclaimed woodlands than in the undamaged cultivated lands. Soil bulk density and available potassium of the cultivated lands with 13 year reclamation were not significantly different from those of the undamaged farmlands. Most of the physicochemical properties of the woodlands with 19 years reclamation were better than those of the undamaged woodlands. Taking together, reclaiming lands in mining areas would improve soil quality.

Keywords: reclamation of dump site; farmland; soil quality; open-cast mining

露天煤矿开采会导致剧烈的景观扰动和生态环境的破坏^[1-3]。露天矿开采过程,实质是表层土石剥离、植被消失、原有地貌景观改变、地表水及地下水改变的过程。露天开采的影响取决于开采技术条件、扰动的程度、矿物及其地表覆盖物的理化组成、地表和地

下水文状况和复垦的方式^[4-5]。具体表现为,开采的过程让肥沃的耕地变成了废弃地,并且对土地、空气和水造成了严重的污染^[6],最终导致生物多样性、宜居环境丧失^[7]。露天开采土地损毁以后,需要开展土地复垦工作,旨在通过削坡和覆盖表层土等方式使受损土地恢复到开采前的状态或新的可利用状态^[2]。而露天矿区生态系统的恢复非常复杂,受到矿区生命因素和非生命因素的综合作用。尽管有些矿区恢复工作开展了数十年,但露天开采活动严重摧毁了生态系统的生产力^[3]。在美国,露天开采受到法律的严格规范,但是开

收稿日期:2013-05-29

基金项目:2012年国土资源部公益行业项目(201211084)

作者简介:曹银贵(1982—),男,湖南常德人,讲师,博士生。主要从事土地利用与复垦的研究工作。E-mail:caoyingui1982@126.com

*通信作者:白中科 E-mail:baizk@cugb.edu.cn

采后恢复成原来的景观、土壤属性和生物多样性非常困难。因此,土地复垦工作要最大程度地坚持,并且长期可持续^[2]。

在土地复垦工作中,原地貌未受损地土壤质量成为了复垦土壤质量评价的重要参考标准。Lewis 等^[3]在露天矿复垦地土壤功能多样性的研究中,评价了未受损地与复垦地土壤功能多样性,证实了二者之间存在明显的差异性。Banning 等^[4]在复垦地与未损地红柳桉树地开展土壤理化性质对比分析,土壤理化性质指标在复垦地和未受损地红柳桉树地上存在显著差异。樊文华等^[5]在安太堡露天矿区的研究成果表明,未受损地土壤有机质质量分数为 $16.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于复垦地有机质质量分数。在露天矿土地复垦工作中,就局部排土场的土地复垦来看,排土场一般是非均匀的,这种非均匀源于排土不均匀和表土覆盖不规范^[2]。由于这种排土场的非均匀性,使得复垦土壤质量的空间差异性显著^[3,8,10]。复垦时间是土地复垦及生态系统恢复的重要保证。复垦时间越长,生态系统越成熟,成熟生态系统的多样性和复杂性要明显强于年轻的生态系统^[11-12]。复垦 8 年的土壤质量还远不能恢复到未扰动土壤质量水平,尤其是土壤物理质量水平还很差,且演变方向在演变初期很不稳定^[13]。Loit 等^[14]利用复垦近 30 年的土壤与新鲜复垦土壤相比,发现重构土壤中有有机质含量高达 $14.4 \sim 19.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可以满足作物的生长需要。张乃明等^[15]系统研究了孝义露天铝矿不同复垦年限的土壤养分变化,结果表明:随着复垦年限的增加,复垦土壤有机质、全氮、有效磷均呈逐年增加趋势,土壤容重逐年下降,土壤全磷、全钾、速效钾、土壤 pH 值变化不明显。

本次研究以复垦农用地为研究对象,旨在通过对复垦农用地、未复垦地及未受损农用地表层土壤理化性质的对比研究,探寻复垦农用地、未复垦地及未受损农用地不同地类、不同复垦时间土壤理化性质的差异,揭示土壤重构的过程及变异的规律。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

平朔矿区包含三个大型露天矿、三个井工矿,矿区面积近 160 km^2 。地处黄土高原晋陕蒙接壤的黑三角地带,位于山西省北部的朔州市境内(如图 1),属温带半干旱季风气候区,年平均气温 $4.8 \sim 7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年降雨量 $428.2 \sim 449.0 \text{ mm}$,属于草原植被类型。目前,平朔矿区地貌为黄土低山丘陵,海拔高度 $1300 \sim 1400 \text{ m}$ 。地带性土壤为栗钙土和栗褐土,土壤有机质含量低、结构差、抗蚀能力弱,土壤侵蚀严重,同时冬春季节风大风多,地表干燥。因此,本区生态系统抗逆能力差。平朔露天矿工程开发与设计采用单头挖掘机—卡车运输的采排工艺,生产过程主要由土岩剥离作业系统和毛煤作业系统构成,其中土岩剥离作业系统与土地复垦有着直接的关系^[9]。

1.2 样品采集

土壤样品采集,共设置 18 个采样地,其中包含 7 个未受损农用地样地、9 个复垦农用地样地和 2 个未复垦地样地(如表 1 所示)。采样时间 2012 年,每个样地的编号、名称、土地利用类型概况如表 1 所示。分别采集土壤剖面样和表层土壤混合样。在每个土壤剖面上,利用环刀($\Phi 100$)分层采集 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 和 $10 \sim 20 \text{ cm}$ 土壤样品,然后密封保存并编号。同时以土壤剖面为

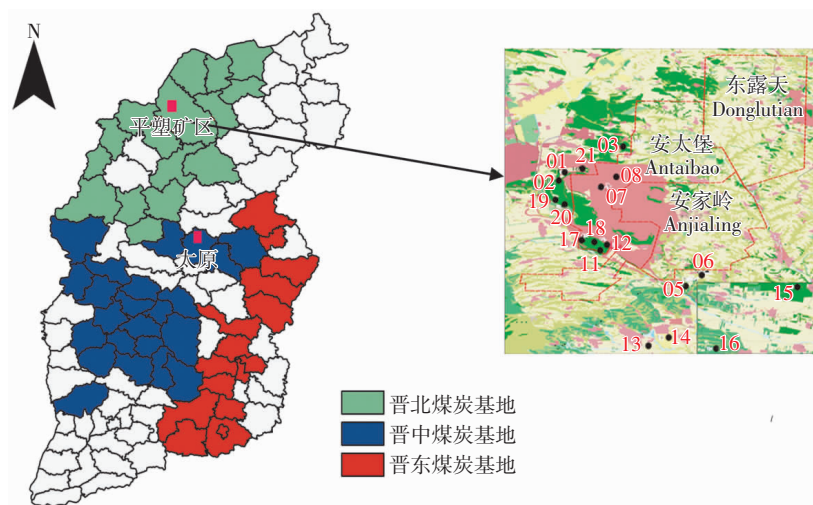


图 1 平朔露天矿位置及样区分布

Figure 1 Location of Pingshuo open-cast mining area and sampling plots

表 1 采样点情况一览表
Table 1 General description of sampling plots

样地 编号	样地名称	复垦 年限	复垦利用 类型
1	安太堡西扩排土场 1430 平台—1	13 年	耕地
2	安太堡西扩排土场 1430 平台—2	13 年	耕地
3	安太堡西扩排土场以北原地貌荞麦地	—	耕地
5	石东村荞麦地	—	耕地
6	大尹庄村玉米地	—	耕地
7	安太堡内排 1480 平台—1	0 年	裸地
8	安太堡内排 1480 平台—2	0 年	裸地
11	安太堡南排土场 1360 平台	22 年	林地
12	安太堡南排土场 1330—1360 平台间边坡	22 年	草地
13	全武营村玉米地	—	耕地
14	峙峪村玉米地	—	耕地
15	四圣店村小叶杨林地	—	林地
16	峙庄村草地	—	草地
17	安太堡南排林地 1420 平台	19 年	林地
18	安太堡南排林地 1380 平台	19 年	林地
19	安太堡西扩排土场	2 年	耕地
20	安太堡西排土场 1460 平台	19 年	林地
21	安太堡西排土场	18 年	耕地

注:缺少 4、9、10 三个样地的原因是采样不成功,在附近进行了重采样。

中心,采用对角线法,利用土钻分层采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤样品,并将同层土壤样品多点混合均匀放入布袋中,保存并编号。

1.3 试验方法

土壤容重采用环刀法;田间持水量采用威尔科克斯法(环刀法);pH 值采用电位法;有机质采用油浴加热 $K_2Cr_2O_7$ 容量法;全氮采用半微量凯氏定氮法;全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;全钾采用 NaOH 熔

融,火焰光度法;有效磷采用 Olsen 法;速效钾采用 $1.0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提—火焰光度法。

2 结果与分析

2.1 复垦农用地与未受损农用地土壤理化性质的差异

2.1.1 复垦农用地与未受损农用地土壤理化性质的总体差异

以复垦农用地为重点研究对象,与未复垦地、未受损农用地进行对比,并对各指标进行差异性检验。从表 2 看出,通过 T 检验复垦农用地和未受损农用地,各指标差异明显($P<0.05$),但复垦农用地的土壤容重、田间持水量、pH 值、全磷、全钾、有效磷、速效钾的均值略高于未受损农用地相应指标的均值,其标准偏差值则反之(除了速效钾),而复垦农用地有机质、全氮的均值都略低于未受损农用地相应指标的均值,其标准偏差值则反之。

2.1.2 复垦农用地与未受损农用地土壤理化性质的垂向差异

复垦农用地与未受损农用地土壤理化性质在垂向上也存在明显差异。经过 T 检验发现,所有指标在样本类型上均存在明显差异($P<0.05$),如表 3 所示。无论是复垦农用地还是未受损农用地,0~10 cm 土层土壤容重及 pH 值的均值略低于 10~20 cm 土层各对应指标的均值。0~10 cm 的其他指标均值略高于 10~20 cm 的各对应指标的均值。对比复垦农用地与未受损农用地 0~10 cm 的土壤理化性质,发现复垦农用地的土壤容重、田间持水量、pH 值、有机质、全磷、全钾、有效磷、速效钾的均值要略高于未受损农用地对应各指标的均值,其比例分别是 0.78%、1.93%、1.49%、

表 2 土壤理化性质的总体差异
Table 2 Soil physicochemical properties of reclaimed and undamaged farmlands

样本	容重 */ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间 持水量 */%	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦农用地	1.34±0.17	17.43±2.68	8.23±0.17	9.13±8.31	0.35±0.16	0.52±0.05	18.04±1.35	7.36±2.54	119.33±42.25
未受损农用地	1.30±0.35	17.21±2.70	8.11±0.17	9.68±3.25	0.50±0.10	0.43±0.12	17.05±3.15	6.32±4.61	90.60±29.11

注:* 表示指标均达到 T 检验要求, $P<0.05$ 。

表 3 土壤理化性质的垂向差异
Table 3 Vertical differences of the physicochemical properties in soil profile

样本	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持 水量 */%	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦农用地(0~10 cm)	1.29±0.13	18.50±2.54	8.19±0.19	12.28±10.86	0.37±0.22	0.53±0.05	18.20±0.97	8.34±2.84	146.02±47.21
未受损农用地(0~10 cm)	1.28±0.07	18.15±3.33	8.07±0.19	11.26±2.19	0.52±0.09	0.44±0.14	17.17±1.78	6.49±3.82	112.07±21.46
复垦农用地(10~20 cm)	1.40±0.19	16.37±2.51	8.27±0.14	5.97±2.58	0.33±0.09	0.51±0.04	17.89±1.67	6.49±2.01	95.60±16.54
未受损农用地(10~20 cm)	1.41±0.07	16.40±1.93	8.16±0.16	8.10±3.50	0.48±0.11	0.42±0.11	16.93±4.27	6.15±2.12	69.12±17.31

注:* 表示指标均达到 T 检验要求, $P<0.05$ 。

9.06%、20.45%、6.00%、28.51%、30.29%，并且相差最明显的是速效钾。复垦农用地全氮均值要略低于未受损农用地对应各指标的均值，其比例是 40.54%。对比复垦农用地与未受损农用地 10~20 cm 的土壤理化性质，发现 pH 值、全磷、全钾、有效磷、速效磷的均值要略高于未受损农用地对应各指标的均值，其比例分别是 1.35%、21.43%、5.67%、5.52%、38.31%，并且相差最明显的是速效钾。土壤容重、田间持水量、有机质、全氮的均值要略低于未受损农用地对应各指标的均值，其比例分别是 0.71%、0.18%、35.68%、45.45%，并且全氮的差异最明显。总的来看，在垂向层面，复垦农用地 pH 值、全磷、全钾、有效磷、速效钾的均值要略高于未受损农用地对应各指标的均值，复垦地全氮的均值要略低于未受损地对应各指标的均值。

2.2 复垦农用地不同地类土壤理化性质的垂向差异

在平朔露天矿开采过程中，矿区大量的耕地被排土场占用，排土场的复垦方式一般是耕地和林地。为了分析复垦耕地、复垦林地、未受损耕地土壤理化性质的差异，从同一深度进行方差分析，方差分析结果如表 4 所示。在各样本 0~10 cm 土壤层，pH 值、有机质、速效钾表现出明显的差异性 ($P<0.05$)，均能通过 F 检验的要求。针对 pH 值，复垦耕地与未受损耕地差异明显，而复垦林地与复垦耕地、未受损耕地差异不明显，并且复垦耕地>复垦林地>未受损耕地。针对有机质，复垦林地与复垦耕地差异明显，而未受损耕地与复垦耕地、复垦林地差异不明显，并且复垦林地>未受损耕地>复垦耕地。针对速效钾，复垦林地与复垦耕地、未受损耕地差异明显，而复垦耕地与未受损耕地

差异不明显，并且复垦林地>未受损耕地>复垦耕地。其他指标均未能通过 F 检验的要求，表明在 0~10 cm 深度情况下，样本土壤在此类指标上差异不显著。

各样本 10~20 cm 土壤层各指标的差异如表 5 所示。全氮和有效磷表现出明显的差异 ($P<0.05$)，均能通过 F 检验的要求。针对全氮，未受损耕地与复垦耕地差异明显，而复垦林地与复垦耕地和未受损耕地差异不明显，并且未受损耕地>复垦林地>复垦耕地。针对有效磷，复垦耕地与复垦林地、未受损耕地差异明显，而复垦林地与未受损耕地差异不明显，并且复垦耕地>复垦林地>未受损耕地。其他指标均未能通过 F 检验的要求，表明在 10~20 cm 深度情况下，样本土壤在此类指标上差异不显著。

2.3 复垦农用地不同地类土壤理化性质的时间差异

以未复垦地和未受损农用地作为对照，主要分析复垦耕地和复垦林地土壤理化性质的时间差异。在复垦耕地土壤理化性质的时间差异分析中，对复垦 13 年的耕地、未复垦地、未受损耕地进行方差分析。结果表明 (表 6)，各样本在容重、pH 值、有机质、全氮、速效钾指标上表现出明显的差异 ($P<0.05$)，均能通过 F 检验的要求。针对容重，未复垦地与复垦 13 年的耕地、未受损耕地差异显著，而复垦 13 年的耕地与未受损耕地差异不显著，并且未复垦地>未受损耕地>复垦 13 年的耕地。针对 pH 值，未受损耕地与复垦 13 年的耕地、未复垦地差异显著，而复垦 13 年的耕地与未复垦地差异不显著，并且复垦 13 年的耕地>未复垦地>未受损耕地。针对有机质，未受损耕地与复垦 13 年的耕地、未复垦地差异显著，而复垦 13 年的耕地与未复

表 4 不同地类土壤理化性质的垂向差异 (0~10 cm)

Table 4 Differences of the physicochemical properties of soils in different land use types (0~10 cm)

样本	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持水量/%	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦耕地	1.33±0.12	19.02±2.28	8.33±0.04 a	3.93±0.57b	0.30±0.10	0.53±0.02	17.64±0.80	10.11±2.60	102.92±16.69b
复垦林地	1.31±0.10	17.82±3.30	8.07±0.22 ab	18.28±11.98 a	0.42±0.31	0.51±0.05	18.30±1.46	6.23±1.79	172.90±35.14a
未受损耕地	1.25±0.02	19.76±1.99	8.14±0.20 b	12.19±1.65 ab	0.42±0.19	0.49±0.10	17.55±1.58	8.20±2.99	112.38±26.26b

注: * 表示指标达到 F 检验要求, $P<0.05$ 。a、b 表示二者差异显著的状态, ab 表示差异不显著的状态。

表 5 不同地类土壤理化性质的垂向差异 (10~20 cm)

Table 5 Differences of the physicochemical properties of soils in different land use types (10~20 cm)

样本	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持水量/%	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦耕地	1.46±0.21	16.37±1.95	8.33±0.10	3.80±2.06	0.31±0.09b	0.52±0.02	17.10±1.15	7.85±2.20a	93.40±17.47
复垦林地	1.41±0.15	16.47±3.60	8.22±0.09	7.50±1.35	0.35±0.11ab	0.52±0.04	17.72±0.47	5.21±1.11b	96.29±20.12
未受损耕地	1.43±0.14	16.38±2.37	8.16±0.17	8.40±4.21	0.49±0.13a	0.48±0.10	15.54±2.05	4.68±1.41b	86.30±20.43

注: * 表示指标达到 F 检验要求, $P<0.05$ 。a、b 表示二者差异显著的状态, ab 表示差异不显著的状态。

表 6 复垦耕地土壤理化性质的时间差异(0~20 cm)

Table 6 Temporal differences of the physicochemical properties of reclaimed cultivated soils(0~20 cm)

样本	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持水量/ %	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦耕地 13 年	1.28±0.08b	18.72±1.41	8.27±0.06a	4.13±0.63b	0.33±0.09b	0.51±0.01	17.42±1.30	8.26±2.99	112.67±6.46b
未复垦地	1.74±0.04a	18.47±5.19	8.26±0.26a	3.07±1.10b	0.19±0.09c	0.48±0.03	20.60±9.51	12.19±2.55	171.81±22.36a
未受损耕地	1.32±0.08b	19.15±2.28	7.97±0.15b	10.43±3.01a	0.59±0.03a	0.50±0.06	14.20±0.87	7.63±3.72	91.48±19.00b

注:* 表示指标达到 F 检验要求, $P<0.05$ 。a、b、c 表示差异显著的状态, ab 表示差异不显著的状态。

垦地差异不显著; 并且未受损耕地>复垦 13 年的耕地>未复垦地。针对全氮, 未受损耕地、复垦 13 年的耕地及未复垦地三者差异显著, 并且未受损耕地>复垦 13 年的耕地>未复垦地。针对速效钾, 未复垦地与复垦 13 年的耕地、未受损耕地差异显著, 而复垦 13 年的耕地与未受损耕地差异不显著, 并且未复垦地>复垦 13 年的耕地>未受损耕地。

在复垦林地土壤理化性质的时间差异分析中, 对复垦 19 年的林地、复垦 22 年的林地、未复垦地、未受损林地进行方差分析, 结果如表 7 所示。结果表明, 各样本在容重、有机质、全氮、全磷、有效磷、速效钾指标上表现出明显的差异($P<0.05$), 均能通过 F 检验的要求。针对容重, 未复垦地与复垦 19 年的林地、复垦 22 年的林地、未受损林地差异显著, 而复垦林地与未受损林地差异不显著, 并且未复垦地>未受损林地>复垦 19 年的林地>复垦 22 年的林地。针对有机质, 复垦 22 年的林地与其他三个样本值差异显著, 而其他三个样本间差异不显著, 并且复垦 22 年的林地>未受损林地>复垦 19 年的林地>未复垦地。针对全氮, 复垦 19 年的林地、未受损林地与其他样本差异显著, 而复垦 19 年的林地、未受损林地差异不显著, 复垦 22 年的林地、未复垦地差异不显著, 并且未受损林地>复垦 19 年的林地>复垦 22 年的林地>未复垦地。针对全磷, 未受损地与复垦 19 年的林地、复垦 22 年的林地差异显著, 而未复垦地与其他三个样本差异不显著, 并且复垦 22 年的林地>复垦 19 年的林地>未复垦地>未受损林地。针对有效磷, 复垦 19 年的林地与复

垦 22 年的林地差异不显著外, 样本之间均差异显著, 并且未复垦地>复垦 22 年的林地>复垦 19 年的林地>未受损林地。针对速效钾, 未复垦地与未受损地差异显著外, 样本之间均差异不显著, 并且未复垦地>复垦 22 年的林地>复垦 19 年的林地>未受损地。

3 讨论

(1) 通过对复垦农用地与未受损农用地的对比, 在土壤物理指标层面, 复垦农用地的容重均值偏高, 较接近未受损农用地容重的均值, 其容重均值比未受损农用地高 3.08%。复垦农用地容重增加一方面是由于排土过程中对土壤的碾压, 使土壤压实, 大孔隙减少, 容重增加^[16]; 另一方面随着复垦时间增加表层土壤紧实度不断增加, 主要是由于在利用过程中浇水、耕作等农业措施使土壤紧实度增加^[17]。多数研究成果表明原地貌土壤的容重一般在 $1.35\sim 1.53\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 而重构土壤大多在 $1.50\sim 1.80\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ^[18-20], 研究区未受损地土壤容重与复垦农用地土壤容重的均值分别为 $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 表明复垦农用地土壤容重接近未受损地土壤容重。复垦农用地田间持水量的均值比未受损地田间持水量高, 表明矿区复垦农用地土壤所能稳定保持的最高土壤含水量得到一定的提升, 有利于促进作物对土壤水的吸收, 分析其原因主要是由于机械的碾压, 使重构土壤变得紧实, 土壤孔隙度较小, 入渗率小于农业土壤, 土壤含水率大于农业土壤^[21-23]。在土壤化学指标层面, 对比未受损农用地, 复垦农用地的 pH 值增加了 1.48%, 并且未受损地和

表 7 复垦林地土壤理化性质的时间差异(0~20 cm)

Table 7 Temporal differences of the physicochemical properties in reclaimed forestry soils(0~20 cm)

样本	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	田间持水量/ %	pH 值 *	有机质 */ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 */ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
复垦林地 19 年	1.34±0.15b	16.85±3.80	8.12±0.10	7.37±1.95b	0.48±0.15a	0.51±0.05a	17.98±1.24	5.69±1.31 b	130.97±35.48ab
复垦林地 22 年	1.23±0.17b	17.80±1.39	8.06±0.19	17.28±10.49a	0.25±0.18b	0.52±0.08a	19.07±1.81	6.36±1.73 b	144.18±66.98ab
未复垦地	1.74±0.08a	18.47±5.19	8.26±0.03	3.07±1.10b	0.19±0.09b	0.48±0.03ab	20.60±9.51	12.19±2.55a	171.81±22.36a
未受损林地	1.37±0.05b	15.69±2.23	8.15±0.19	8.14±1.47b	0.52±0.08 a	0.44±0.05b	19.16±4.68	1.78±0.76c	85.85±30.77 b

注:* 表示指标达到 F 检验要求, $P<0.05$ 。a、b、c 表示差异显著的状态, ab 表示差异不显著的状态。

复垦农用地总体上属于碱性土壤,进一步表明复垦农用地土壤碱性增加。王金满等^[24]和 Yang 等^[25]通过对复垦农用地与未受损农用地 pH 值的对比发现,复垦农用地土壤 pH 值始终比未受损农用地的 pH 值偏高。在土壤肥力指标层面,复垦农用地的有机质、全氮含量都略低于未受损农用地对应指标值,相关研究成果^[26-27]也进一步证实未受损农用地土壤肥力的聚集力要明显高于复垦农用地的土壤肥力的聚集力。而复垦农用地的全磷、全钾、有效磷、速效钾含量都略高于未受损农用地对应指标值,可见在复垦农用地,可供植物直接利用的磷元素、钾元素在提升。Banning 等^[8]和倪含斌等^[28]也认为复垦农用地由于土壤改良条件好,相比生态环境脆弱区,其营养元素都有所提升。

(2)无论是复垦农用地还是未受损农用地,0~10 cm 土壤容重及 pH 值的均值略低于 10~20 cm 的各对应指标的均值。土壤肥力指标 0~10 cm 的均值略高于 10~20 cm 各对应指标的均值,这与孙海运等^[17]的研究成果相吻合,即 0~10 cm 的土壤质量要高于 10~20 cm 土壤的质量。在复垦农用地与未受损农用地垂向差异层面,复垦农用地 pH 值、全磷、全钾、有效磷、速效钾的均值要略高于未受损农用地对应各指标的均值,复垦农用地全氮的均值要略低于未受损农用地对应各指标的均值。

(3)在 0~10 cm 土壤深度处,复垦耕地和复垦林地土壤都属于碱性土壤,复垦耕地土壤的碱性更强。复垦林地土壤有机质的含量最高,通过一定时间的林地复垦,其有机质含量远超过未复垦耕地。速效钾也表现出与土壤有机质一样的趋势。在 10~20 cm 深度处,复垦林地土壤理化性质基本上优于未受损耕地。可见,在 10~20 cm 处,复垦林地土壤理化性质相关指标处于优势地位。主要因为树是生物量的产生工具,能够给土壤带来更多的有机质^[29]。另外在 10~20 cm 处,复垦耕地土壤理化性质相关指标处于劣势地位,主要是在此深度处,土壤障碍因子(土壤容重、土壤质地)的影响要大于未受损耕地土壤障碍因子的影响^[30]。

(4)随着复垦时间的增加表层土壤质量不断提升^[11-12,17]。在复垦耕地层面,复垦 13 年的耕地土壤容重、速效钾与未受损耕地差异不显著,并且其土壤容重略低于未受损耕地。复垦 13 年耕地的土壤有机质、全氮、速效钾均超过未复垦地,但其值略低于未受损耕地土壤对应指标值,陕永杰等^[13]也认为土壤质量在复垦 10 多年后还远不能恢复到未扰动土壤质量水平。在复垦林地土壤理化性质层面,复垦 22 年林地的

单个土壤理化指标基本上优于复垦 19 年林地的对应指标,并且复垦 19 年林地的单个土壤理化指标基本上优于未受损林地的对应指标。具体来看,复垦时间越长,土壤的容重越低,张乃明等^[15]的研究成果也证实了这一结论。复垦 22 年林地的土壤有机质、全磷最高,这与 Graham 和 Haynes^[27]的研究成果基本一致。

4 结论

(1)复垦农用地土壤容重、田间持水量、pH 值、全钾、有效磷、速效钾的均值都略高于未受损农用地,而复垦农用地有机质、全氮的均值都略低于未受损农用地。复垦农用地和未受损农用地,0~10 cm 土壤容重及 pH 值的均值略低于 10~20 cm 土层。土壤肥力指标 0~10 cm 土层的均值略高于 10~20 cm 土层。在 0~10 cm 土层,复垦耕地和复垦林地相关土壤理化性质要优于未受损耕地。在 10~20 cm 深度处,复垦林地土壤理化性质基本上优于未受损耕地。

(2)在复垦耕地层面,复垦 13 年的耕地土壤容重、速效钾与未受损耕地差异不显著,并且其土壤容重略低于未受损耕地。复垦 22 年林地的单个土壤理化指标基本上优于复垦 19 年林地的对应指标,并且复垦 19 年林地的单个土壤理化指标基本上优于未受损林地。

致谢:感谢博士生景明、硕士生张召、潘健、陈思、孙琦、樊翔、丁翔等在土壤采样过程中的辛勤付出。

参考文献:

- [1] 白中科,李晋川,王文英,等.中国山西平朔安太堡露天煤矿退化土地生态重建研究[J].中国土地科学,2000,14(4),1-4.
BAI Zhong-ke, LI Jin-chuan, WANG Wen-ying, et al. Research on the ecological reconstruction of degraded land in Pingsuo ATB open-cast coal mine, Shanxi, China[J]. *China Land Science*, 2000, 14(4), 1-4.
- [2] Jacinthe P A, Lal R. Spatial variability of soil properties and trace gas fluxes in reclaimed mine land of southeastern Ohio[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3):598-608.
- [3] 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.
- [4] Shrestha R K, Lal R. Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil[J]. *Environment International*, 2006, 32(6):781-796.
- [5] Tahir K, Ender M. Some soil properties on coal mine spoils reclaimed with black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) and umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in Agacli-Istanbul[J]. *Environment Monitor Assessment*, 2009, 159(1-4):407-414.
- [6] Miao Z, Mars R. Ecological restoration and land reclamation in open-

- cast mines in Shanxi Province, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2000, 59(3):205-215.
- [7] Wong M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6):775-780.
- [8] Banning N C, Lalor B M, Cookson W R, et al. Analysis of soil microbial community level physiological profiles in native and post-mining rehabilitation forest: Which substrates discriminate[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 56:27-34.
- [9] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):330-336.
- FAN Wen-hua, BAI Zhong-ke, LI Hui-feng, et al. Effects of different vegetation restoration patterns and reclamation years on microbes in reclaimed soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):330-336.
- [10] Renetzeder C, Schindler S, Peterseil J, et al. Can we measure ecological sustainability? Landscape pattern as an indicator for naturalness and land intensity at regional and European level[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1):38-49.
- [11] Rumpel C, Koegel-Knabner I, Huettl R F. Organic matter composition and degree of humification in lignite-rich mine soils under a chronosequence of pine[J]. *Plant Soil*, 1999, 213(1-2):161-168.
- [12] Nierop K, Lagen B, Buurman P. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession[J]. *Geoderma*, 2001, 100(1-2):1-24.
- [13] 陕永杰, 张美萍, 白中科, 等. 平朔安太堡大型露天矿区土壤质量演变过程分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(4):565-568.
- SHAN Yong-jie, ZHANG Mei-ping, BAI Zhong-ke, et al. Investigation on the evolution of soil quality in the Antaibao large-scaled open-cast area[J]. *Arid Zone Research*, 2005, 22(4):565-568.
- [14] Loit R, Elmar K, Igna R. Development of soil organic matter under pine on quarry detritus of open-cast oil-shale mining[J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 71(1-2):191-198.
- [15] 张乃明, 武雪萍, 谷晓滨, 等. 矿区复垦土壤养分变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2003, 34(1):58-60.
- ZHANG Nai-ming, WU Xue-ping, GU Xiao-bin, et al. Variability in fertility of reclaimed soil in colliery regions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1):58-60.
- [16] 李新举, 胡振琪, 李晶, 等. 采煤塌陷地复垦土壤质量研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):276-280.
- LI Xin-ju, HU Zhen-qi, LI Jing, et al. Research progress of reclaimed soil quality in mining subsidence area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(6):276-280.
- [17] 孙海运, 李新举, 胡振琪, 等. 马家塔露天矿区复垦土壤质量变化[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12):205-208.
- SUN Hai-yun, LI Xin-ju, HU Zhen-qi, et al. Variance of reclamation soil quality in Majiata opencast mine region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12):205-208.
- [18] 卞正富. 矿区土地复垦界面要素的演替规律及其调控研究[J]. 中国土地科学, 1999, 13(2):6-11.
- BIAN Zheng-fu. Research on succession and adjustment of land reclamation interface[J]. *China Land Science*, 1999, 13(2):6-11.
- [19] 陈龙乾, 邓喀中, 徐黎华, 等. 矿区复垦土壤质量评价方法[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(5):449-452.
- CHEN Long-qian, DENG Ka-zhong, XU Li-hua, et al. Method of quantitative evaluation of quality of reclaimed soil[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1999, 28(5):449-452.
- [20] 张学礼, 胡振琪, 初士力. 矿山复垦土壤压实问题分析[J]. 能源环境保护, 2004, 18(3):1-4.
- ZHANG Xue-li, HU Zhen-qi, CHU Shi-li. Analysis of soil compaction in reclaimed land[J]. *Energy Environmental Protection*, 2004, 18(3):1-4.
- [21] 于君宝, 王金达, 刘景双, 等. 矿山复垦土壤营养元素时空变化研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(5):750-753.
- YU Jun-bao, WANG Jin-da, LIU Jing-shuang, et al. Temporal-spatial variation in nutrient element content in overlaying soil of reclaimed coal mine area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5):750-753.
- [22] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛, 等. 采煤塌陷堆土质量的影响效应及保护技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3):67-70.
- ZHANG Fa-wang, HOU Xin-wei, HAN Zhan-tao, et al. Impact of coal mining subsidence on soil quality and some protecting technique for the soil quality[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, 19(3):67-70.
- [23] 孙泰森, 师学义, 杨玉敏, 等. 五阳矿区采煤塌陷地复垦土壤质量变化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4):35-37.
- SUN Tai-sen, SHI Xue-yi, YANG Yu-min, et al. Changes of reclaimed soil quality on subsided land resulting from coal-mine at Wuyang Area[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(4):35-37.
- [24] 王金满, 杨睿璇, 白中科. 草原区露天煤矿排土场复垦土壤质量演替规律与模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14):229-235.
- WANG Jin-man, YANG Rui-xuan, BAI Zhong-ke. Succession law and model of reclaimed soil quality of opencast coal mine dump in grass-land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14):229-235.
- [25] Yang D, Zeng D H, Zhang J, et al. Chemical and microbial properties in contaminated soils around a magnesite mine in North China[J]. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(3):256-262.
- [26] Anderson J D, Ingram L J, Stahl P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 40(2):387-397.
- [27] Graham M H, Haynes R J. Organic matter status and the size, activity and metabolic diversity of the soil microflora as indicators of the success of rehabilitation of mined sand dunes[J]. *Biology Fertile Soils*, 2004, (39):429-437.
- [28] 倪含斌, 张丽萍, 吴希媛, 等. 矿区废弃地土壤重构与性能恢复研究进展[J]. 土壤通报, 2007, 38(2):399-403.
- NI Han-bin, ZHANG Li-ping, WU Xi-yuan, et al. A research progress on soil reconstruction and property restoration in mine regions[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2):399-403.
- [29] Filcheva E, Noustorova M, Gentcheva-Kostadinova S, et al. Organic accumulation and microbial action in surface coal-mine spoils, Pernik, Bulgaria[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(1-2):1-15.
- [30] Fettweis U, Bens O, Huettl R F. Accumulation and properties of soil organic carbon at reclaimed sites in the Lusatian lignite mining district afforested with *Pinus sp.*[J]. *Geoderma*, 2005, 129(1-2):81-91.