

## 露天矿排土场不同复垦模式下的土壤修复效果研究

刘宝勇<sup>1</sup>, 甄博琚<sup>1\*</sup>, 潘琪<sup>1</sup>, 何志勇<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 阜新市林业发展服务中心, 辽宁阜新 123000)

**摘要** 以阜新市海州露天矿排土场刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地、农田、草地、裸地 6 种复垦模式为研究对象, 其中以裸地为对照, 分析不同复垦模式土壤因子的显著性差异, 以揭示不同复垦模式对土壤的修复效果。结果表明, 白榆林地土壤温度显著低于裸地, 降低土壤温度效果明显; 刺槐白榆混交林地土壤含水量显著高于其余复垦模式, 保持土壤水分效果明显; 刺槐白榆混交林地提高土壤全氮、有机质、碱解氮含量效果最显著; 白榆林地提高土壤速效钾含量效果最显著; 农田提高土壤速效磷含量效果最显著; 各种复垦模式均有降低土壤 pH 效果。总的来说, 刺槐白榆混交林复垦模式对露天矿排土场的土壤修复效果最好。

**关键词** 露天矿排土场; 土壤因子; 复垦模式; 修复效果

中图分类号 X 171.4 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)06-0053-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.06.015



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on Soil Remediation Effect of Open-pit Mine Dump under Different Reclamation Modes

LIU Bao-yong, ZHEN Bo-jun, PAN Qi et al (School of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000)

**Abstract** Six reclamation modes of *Robinia pseudoacacia* forest land, *Ulmus pumila* forest land, *Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila* mixed forest land, farmland, grassland and bare land were studied in Haizhou open-pit mine of Fuxin City, and bare land was taken as control. The significant difference of soil factors in different reclamation modes was analyzed to reveal the effect of different reclamation modes on soil restoration. The results showed that the soil temperature of *Ulmus pumila* forest land was significantly lower than that of bare land, and the effect of reducing soil temperature was obvious. The soil water content of *Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila* mixed forest land was significantly higher than that in other reclamation models, and the effect of soil water conservation was obvious. The *Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila* mixed forest land had the most significant effect on increasing soil total nitrogen, organic matter and alkali-hydrolyzable nitrogen content. *Ulmus pumila* forest land had the most significant effect on increasing soil available potassium content; Farmland had the most significant effect on increasing soil available phosphorus content. All reclamation modes have the effect of reducing soil pH. In general, the reclamation model of the mixed forest reclamation model had the best effect on the soil remediation of the open-pit mine waste dump.

**Key words** Open-pit mine dump; Soil factors; Reclamation mode; Remediation effect

辽宁省阜新市海州露天矿在生产过程中, 形成了排土场, 周围环境被严重破坏。为改善这一情况, 排土场已经进行了土地复垦。但目前, 对于海州露天矿排土场复垦土壤的研究多停留在对土壤酶及生态化学计量的研究<sup>[1-3]</sup>, 缺少对不同复垦模式的土壤因子改良情况反映生态修复效果的研究。

土壤温度、含水量以及土壤 pH 直接影响土壤肥力, 土壤养分更与土壤的质量密切相关, 是植物生长过程中所需营养物质的主要来源<sup>[4]</sup>。因此笔者通过测定排土场不同复垦模式土壤温度、含水量以及土壤养分并进行显著性分析, 深入了解不同复垦模式对露天矿排土场土壤修复情况, 进一步了解排土场复垦的实施效果, 为排土场继续实施复垦提供理论方向与依据。

## 1 研究区概况与研究方法

**1.1 研究区概况** 海州露天矿排土场位于 121°26'E、42°02'N, 辽宁省阜新市太平区境内, 东西长 7 km, 南北宽 3 km, 占地 16 km<sup>2</sup>, 该地区年降水量 539 mm, 年蒸发量达 1 800 mm, 年平均气温 7.3 °C, 昼夜温差大, 属于半干旱大陆性季风气候区, 其土质是由露天矿排出的页岩、砂岩构成<sup>[5]</sup>, 覆土厚度约 30 cm。

**1.2 研究内容** 以海州露天矿排土场刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地、农田、草地为研究对象, 以裸地为对照。对海州露天矿排土场不同复垦模式下的土壤温度、含水量、pH 以及土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量进行测定, 并进行显著性分析。

**1.3 研究方法** 于 2021 年 5 月, 避开雨天等特殊天气, 选取晴朗微风典型天气, 选取周围地势相同、坡向相同、坡度相近的刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地、农田、草地、裸地进行土样采集, 在采集点选取 0~10、10~20、20~30 cm 土层深度, 共采集土样 18 个, 装入密封袋中, 编号并带回实验室进行检测。

土壤含水率的测定采用烘干法; 土壤温度的测定采用曲管地温计; 土壤全氮的测定采用半微量开氏法; 土壤全磷的测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法; 土壤全钾的测定采用 NaOH 熔融-火焰光度法; 土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法测定; 土壤碱解氮的测定采用碱解扩散法; 土壤速效磷的测定采用 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub> 法; 土壤速效钾的测定采用醋酸铵溶液浸提法; 土壤 pH 的测定使用土壤酸碱度计。

**1.4 数据统计分析** 采用 Excel 整理数据, SPSS 23 进行数据处理, 并进行差异显著性检验。采用 Origin 2021 画图。

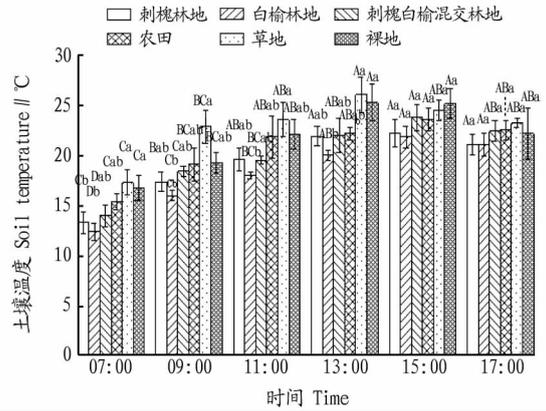
## 2 结果与分析

**2.1 不同复垦模式下土壤温度分析** 从图 1~3 可以看出, 不同复垦模式下土壤温度日变化表现为先上升后下降的变

**作者简介** 刘宝勇(1975—), 男, 辽宁葫芦岛人, 副教授, 博士, 从事工矿水土保持及矿山环境工程研究。\* 通信作者, 硕士研究生, 研究方向: 生态修复理论与技术。

**收稿日期** 2022-04-07

化趋势。对相同复垦模式不同时间土层温度进行分析,各土层相同复垦模式不同时间土壤温度存在差异。0~10 cm 土层,白榆林地 15:00 土壤温度显著高于 07:00—13:00,最高温度出现在 15:00;刺槐林地、刺槐白榆混交林地、农田、裸地、草地 11:00—17:00 土壤温度显著高于 07:00,最高温度出现在 13:00。10~20 cm 土层,各复垦模式 11:00—17:00 土壤温度均显著高于 07:00,刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地、农田土壤最高温度出现在 15:00,草地、裸地土壤最高温度出现在 13:00。20~30 cm 土层,各复垦模式 07:00 土壤温度均显著低于其余时段,刺槐林地、白榆林地、农田、裸地土壤最高温度出现在 15:00,刺槐白榆混交林地、草地土壤最高温度出现在 13:00。各土层不同复垦模式相同时间土壤温度存在差异,0~10 cm 土层 07:00—13:00 表现为农田、草地、裸地土壤温度显著高于白榆林地,15:00—17:00 各复垦模式土壤温度无显著差异;10~20 cm 土层 07:00—13:00 表现为草地土壤温度显著高于白榆林地,15:00—17:00 各复垦模式土壤温度无显著差异;20~30 cm 土层 07:00—11:00 草地、裸地土壤温度显著高于其余复垦模式,13:00—17:00 裸地土壤温度显著高于其余复垦模式。

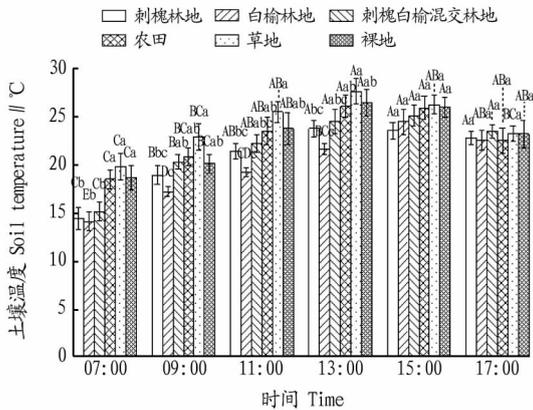


注:不同小写字母表示同一时间不同复垦模式间差异显著 ( $P < 0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同时间间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time ( $P < 0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times ( $P < 0.05$ ).

图2 不同复垦模式 10~20 cm 土层土壤温度

Fig.2 10~20 cm soil temperature in different reclamation modes



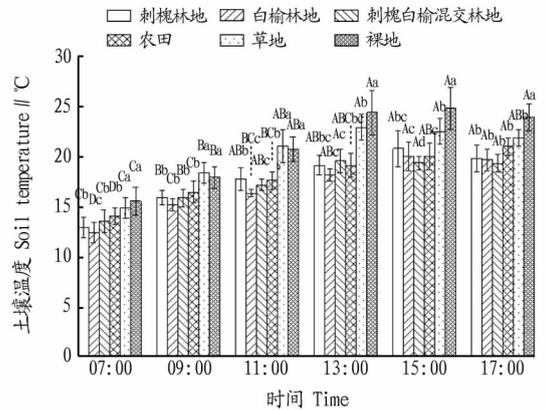
注:不同小写字母表示同一时间不同复垦模式间差异显著 ( $P < 0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同时间间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time ( $P < 0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times ( $P < 0.05$ ).

图1 不同复垦模式 0~10 cm 土层土壤温度

Fig.1 0~10 cm soil temperature in different reclamation modes

2.2 不同复垦模式下土壤含水量分析 从表1可以看出,同一复垦模式不同土层间土壤含水量有一定的差异,白榆林地、草地、农田与裸地 0~10 cm 土层土壤含水量略低于 10~20、20~30 cm 土层,刺槐林地 20~30 cm 土层含水量低于 0~10、10~20 cm 土层。同一土层不同复垦模式土壤含水量有一定的差异,0~10 cm 土层土壤含水量,刺槐白榆混交林地、刺槐林地显著高于白榆林地、草地、裸地、农田;10~20 cm 土层土壤含水量,刺槐白榆混交林地、刺槐林地、农田显著高于白榆林地、草地、裸地;20~30 cm 土层土壤含水量,刺槐白榆混交林地显著高于其余复垦模式。



注:不同小写字母表示同一时间不同复垦模式间差异显著 ( $P < 0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同时间间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time ( $P < 0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times ( $P < 0.05$ ).

图3 不同复垦模式 20~30 cm 土层土壤温度

Fig.3 20~30 cm soil temperature in different reclamation modes

2.3 不同复垦模式下土壤全氮、全磷、全钾、有机质含量分析 从表2可以看出,刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地不同土层间土壤全氮含量均存在差异,农田、草地、裸地不同土层间土壤全氮含量差异不显著 ( $P > 0.05$ ),刺槐林地、刺槐白榆混交林地 0~10 cm 土层土壤全氮含量显著高于 10~20、20~30 cm,白榆林地 20~30 cm 土层土壤全氮含量显著低于 0~10、10~20 cm。对相同土层不同复垦模式分析,各土层不同复垦模式土壤全氮含量均存在差异;同一土层刺槐白榆混交林地、刺槐林地土壤全氮含量显著高于其余复垦模式。

表 1 不同复垦模式下土壤含水量比较

Table 1 Comparison of soil water content in different reclamation modes

复垦模式 Reclamation mode	土层深度 Soil depth//cm		
	0~10	10~20	20~30
刺槐林地 <i>Robinia pseudoacacia</i> forest	0.20±0.02 Aa	0.19±0.00 ABa	0.17±0.01 Bc
白榆林地 <i>Ulmus pumila</i> forest	0.13±0.01 Bb	0.15±0.01 Ab	0.15±0.00 Ad
刺槐白榆混交林地 <i>Robinia pseudoacacia-Ulmus pumila</i> mixed forest	0.20±0.02 Aa	0.19±0.00 Aa	0.19±0.01 Aa
农田 Farmland	0.07±0.00 Cc	0.19±0.01 Aa	0.17±0.00 Bc
草地 Grassland	0.13±0.00 Bb	0.15±0.00 Ab	0.15±0.01 Ad
裸地 Bare land	0.08±0.01 Cc	0.14±0.02 Bb	0.18±0.00 Ab

注:不同小写字母表示同一土层不同复垦模式间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time( $P<0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times( $P<0.05$ ).

相同土层不同复垦模式之间土壤全磷含量均存在差异。0~10 cm 土层草地土壤全磷含量显著低于除农田外其余复垦模式;10~20 cm 土层白榆林地、刺槐白榆混交林地、裸地土壤全磷含量显著高于农田、草地;20~30 cm 土层白榆林地、刺槐白榆混交林地土壤全磷含量显著高于刺槐林地、农田、

裸地、草地。对相同复垦模式不同土层分析发现,农田不同土层土壤全磷含量存在显著差异。农田 0~10 cm 土层土壤全磷含量显著高于 20~30 和 10~20 cm 土层;裸地 10~20 cm 土层土壤全磷含量显著高于 0~10 和 20~30 cm 土层。

相同土层不同复垦模式之间土壤全钾含量均存在差异。0~10、10~20 cm 土层刺槐白榆混交林地土壤全钾含量显著低于其余复垦模式;20~30 cm 土层裸地、刺槐白榆混交林地土壤全钾含量显著低于其余复垦模式。对相同复垦模式不同土层分析发现,刺槐林地 10~20 cm 土层土壤全钾含量显著高于 20~30 cm 土层;白榆林地 0~10 cm 土层土壤全钾含量显著低于 10~20、20~30 cm 土层;草地 20~30 cm 土层土壤全钾含量显著高于 0~10、10~20 cm 土层。

相同土层不同复垦模式之间土壤有机质含量存在差异,各土层均表现为刺槐白榆混交林地土壤有机质含量显著高于其余复垦模式。对相同复垦模式不同土层分析发现,白榆林地、草地 0~10 cm 土层土壤有机质含量显著高于 10~20、20~30 cm 土层;刺槐林地 10~20 cm 土层土壤有机质含量显著高于 0~10、20~30 cm 土层;裸地 10~20、20~30 cm 土层土壤有机质含量显著高于 0~10 cm 土层;农田 20~30 cm 土层土壤有机质含量显著高于 0~10、10~20 cm 土层;刺槐白榆混交林地各土层间无显著差异。

表 2 不同复垦模式全氮含量、全磷含量、全钾含量、有机质含量比较

Table 2 Comparison of total nitrogen content, total phosphorus content, total potassium content and organic matter content in different reclamation modes

土层深度 Soil depth cm	复垦模式 Reclamation mode	全氮含量 Total nitrogen content	全磷含量 Total phosphorus content	全钾含量 Total potassium content	有机质含量 Organic content
0~10	刺槐林地	1.85±0.71 Aa	0.54±0.05 Aa	20.72±0.64 ABa	69.23±0.42 Bc
	白榆林地	0.08±0.01 Ab	0.54±0.19 Aa	19.62±0.24 Ba	78.75±1.23 Ab
	刺槐白榆混交林地	2.05±1.47 Aa	0.62±0.01 Aa	17.87±0.93 Ab	145.51±4.37 Aa
	农田	0.11±0.07 Ab	0.48±0.00 Aab	20.12±0.69 Aa	21.65±6.13 Be
	草地	0.31±0.32 Ab	0.30±0.02 Ab	21.09±0.37 Ba	7.12±0.18 Af
	裸地	0.05±0.02 Ab	0.55±0.01 Ba	19.12±1.35 Aa	53.98±0.17 Bd
10~20	刺槐林地	0.22±0.06 Ba	0.55±0.01 Ab	21.85±0.22 Aa	80.94±2.00 Ac
	白榆林地	0.08±0.01 Ab	0.67±0.05 Aa	22.62±0.92 Aa	44.16±2.77 Bd
	刺槐白榆混交林地	0.17±0.05 Ba	0.65±0.09 Aab	14.05±3.25 Ab	154.34±4.73 Aa
	农田	0.04±0.01 Ab	0.38±0.01 Cc	20.63±1.32 Aa	13.74±8.56 Be
	草地	0.03±0.01 Ab	0.21±0.00 Ad	20.78±0.03 Ba	5.75±0.09 Be
	裸地	0.06±0.00 Ab	0.65±0.02 Aab	18.82±1.11 Aa	109.78±6.08 Ab
20~30	刺槐林地	0.12±0.02 Ba	0.54±0.01 Ab	20.39±0.39 Ba	44.45±1.87 Ccd
	白榆林地	0.05±0.01 Bb	0.65±0.02 Aa	21.55±0.39 Aa	37.27±0.94 Cd
	刺槐白榆混交林地	0.13±0.05 Ba	0.66±0.04 Aa	16.01±0.69 Ac	143.11±8.45 Aa
	农田	0.07±0.03 Ab	0.45±0.01 Bc	21.44±0.57 Aa	51.50±4.60 Ac
	草地	0.03±0.01 Ab	0.22±0.05 Ad	21.88±0.17 Aa	4.07±0.41 Ce
	裸地	0.06±0.01 Ab	0.51±0.02 Bbc	17.46±0.97 Ab	98.47±1.12 Ab

注:不同小写字母表示同一土层不同复垦模式间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time( $P<0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times( $P<0.05$ ).

## 2.4 不同复垦模式下土壤碱解氮、速效磷、速效钾、pH 分析

对相同复垦模式不同土层土壤碱解氮含量分析(表 3)发现,白榆林地表现为 0~10 cm 土层土壤碱解氮含量显著高于 10~20、20~30 cm 土层,刺槐白榆混交林地表现为 10~20 cm 土层土壤碱解氮含量显著低于 0~10、20~30 cm 土层。

对同一土层不同复垦模式分析发现,0~10 cm 土层土壤碱解氮含量,刺槐白榆混交林地、白榆林地、刺槐林地显著高于农田、裸地、草地;10~20 cm 土层土壤碱解氮含量,草地显著低于其余复垦模式;20~30 cm 土层土壤碱解氮含量,刺槐白榆混交林地显著高于白榆林地、裸地、农田、刺槐林地、草地。

对相同土层不同复垦模式土壤速效磷含量分析(表3)发现,0~10 cm土层土壤速效磷含量,农田显著高于其余复垦模式;10~20 cm土层土壤速效磷含量,农田、草地显著高于其余复垦模式;20~30 cm土层土壤速效磷含量,农田显著高于其余复垦模式。对相同复垦模式不同土层分析发现,农田各土层间速效磷含量差异显著,表现为0~10 cm土层含量显著高于10~20、20~30 cm土层。

对相同复垦模式不同土层土壤速效钾分析(表3)发现,刺槐林地、刺槐白榆混交林地、农田、草地、裸地0~10 cm土层土壤速效钾含量显著高于10~20、20~30 cm土层;白榆林

地20~30 cm土层土壤速效钾含量显著高于0~10、10~20 cm土层。对同一土层不同复垦模式分析发现,各土层白榆林地土壤速效钾含量均显著高于其余复垦模式。

对相同复垦模式不同土层土壤pH分析(表3)发现,农田不同土层土壤pH无显著差异;刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地、裸地20~30 cm土层土壤pH显著高于0~10、10~20 cm土层;草地10~20、20~30 cm土层土壤pH显著高于0~10 cm土层。对同一土层不同复垦模式分析发现,各土层均表现为裸地土壤pH显著高于其余复垦模式,5种复垦模式土壤pH低于裸地且深层土壤pH高于表层土壤。

表3 不同复垦模式碱解氮含量、速效磷含量、速效钾含量、pH比较

Table 3 Comparison of alkali-hydrolyzable nitrogen content, available phosphorus content, available potassium content and pH value in different reclamation modes

土层深度 Soil depth cm	复垦模式 Reclamation mode	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzed nitrogen content//mg/kg	速效磷含量 Available phosphorus content//mg/kg	速效钾含量 Available potassium content//mg/kg	pH
0~10	刺槐林地	164.23±17.53 Aa	7.45±1.70 Ac	5.79±0.51 Ab	7.96±0.02 Cb
	白榆林地	188.64±12.84 Aa	4.24±0.57 Ad	7.41±0.08 Ba	7.24±0.03 Ce
	刺槐白榆混交林地	200.74±0.24 Aa	7.05±0.57 Ac	5.00±0.04 Ac	7.62±0.01 Cd
	农田	116.99±15.02 Ab	34.18±0.00 Aa	3.92±0.38 Ad	7.04±0.01 Af
	草地	76.87±27.37 Ac	14.29±1.42 Ab	2.66±0.04 Ae	7.73±0.03 Be
	裸地	115.46±2.51 Ab	4.04±0.28 Ad	4.71±0.11 Ac	8.19±0.04 Ca
10~20	刺槐林地	165.44±49.27 Aa	7.25±1.42 Ab	3.99±0.46 Bb	8.15±0.05 Bb
	白榆林地	125.83±2.59 Bab	4.34±1.85 Ab	7.10±0.19 Ca	7.49±0.04 Be
	刺槐白榆混交林地	127.45±4.78 Cab	6.75±0.99 Ab	4.20±0.07 Cb	7.70±0.05 Bd
	农田	92.60±5.15 Ab	18.10±0.00 Ca	1.88±0.14 Bc	7.08±0.07 Af
	草地	54.21±0.01 Ac	15.29±5.68 Aa	2.00±0.10 Bc	7.79±0.02 Ac
	裸地	122.36±2.29 Aab	3.94±0.43 Ab	4.01±0.13 Bb	8.35±0.04 Ba
20~30	刺槐林地	80.24±12.16 Ac	6.25±0.57 Abc	3.72±0.05 Bc	8.37±0.06 Ab
	白榆林地	115.22±17.37 Bb	5.24±0.85 Ac	7.71±0.14 Aa	7.70±0.09 Ad
	刺槐白榆混交林地	144.81±5.27 Ba	5.85±0.57 Abc	4.49±0.07 Bb	7.77±0.02 Ad
	农田	101.20±2.18 Abc	26.44±0.71 Ba	2.35±0.10 Bd	7.12±0.01 Ae
	草地	36.67±0.05 Ad	9.06±3.13 Ab	1.63±0.04 Ce	7.84±0.03 Ac
	裸地	109.91±9.90 Ab	3.84±0.00 Ac	3.62±0.14 Bc	8.53±0.02 Aa

注:不同小写字母表示同一土层不同复垦模式间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示同一复垦模式不同土层间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between different reclamation modes at the same time ( $P<0.05$ ); different capital letters indicate significant differences in the same mode at different times ( $P<0.05$ ).

### 3 讨论

研究区土壤含大量煤矸石,大孔隙多,结构较差,使土壤导热率增加。土壤被太阳直接照射时吸热快,温度高;太阳照射不强时散热快,一天之内温度变化大。所以没有植物遮蔽的农田、草地、裸地的表层土壤温度日变化较大,林地有林冠以及枯枝落叶遮挡,林地土壤温度日变化不大,地表温度较低<sup>[6]</sup>,有助于生态环境恢复。

林地枯枝落叶吸收水分,缓解了土壤水分流失和蒸发,提高土壤表层水分含量<sup>[7-8]</sup>,而农田、裸地、草地0~10 cm土层的含水量显著低于深层土壤。刺槐林地0~20 cm土层土壤含水量高于白榆林地、裸地、草地。刺槐白榆混交林地各土层土壤含水量均最高,这是由于刺槐属于水平根系植物<sup>[9-10]</sup>,根系主要分布于接近地表的浅层土壤中<sup>[11-12]</sup>,白榆属深根性树种,根系深度远大于刺槐<sup>[13]</sup>。在所测土层较浅的情况下,刺槐林地0~30 cm土壤含水量显著高于白榆林地。而深层土壤含水量刺槐白榆混交林地最高,证明了水平

根系树种与深根性树种混交可以相较于纯林显著提高深层土壤含水量<sup>[14-15]</sup>。

土壤养分是植物生长过程中所需营养物质的主要来源<sup>[4]</sup>,其中氮素更是土壤中的三大营养元素之一,研究区土壤全氮、碱解氮含量均表现为表层土壤高于深层土壤,这是由于采集土壤时期正值5月份植物在生长发育阶段,植物会吸收深层土壤养分供本身使用。各复垦模式提高土壤全氮含量都比较明显,尤其是刺槐白榆混交林地,其次为刺槐林地。枯枝落叶分解为土壤提供有机质、氮、磷、钾等营养物质,并逐年积累,向下沉淀,所以林地土壤全氮含量高于结构简单且凋落物量更少的复垦模式,其中混交林地结构最复杂,所以其土壤全氮含量也最高。土壤碱解氮含量相较于裸地,除农田与草地外不同复垦模式均有提高土壤碱解氮含量的能力。根据全国土壤养分评级<sup>[16]</sup>,海州露天矿排土场0~20 cm土层土壤碱解氮含量大多处于高和极高范围,说明土地复垦对露天矿排土场土壤修复效果明显。

磷是构成植物生命不可或缺的重要元素<sup>[17]</sup>。0~10 cm 土层土壤全磷含量刺槐白榆混交林地最高。与裸地相比,白榆林地、刺槐白榆混交林地提高 20~30 cm 土层土壤全磷效果显著,其余复垦模式土壤全磷含量没有表现出明显提高。各复垦模式速效磷含量均有提高。但根据土壤速效磷含量分级<sup>[16]</sup>,所测土壤速效磷含量均处在中等及以下水平,大多数处在极低和较低等级,但是各复垦模式含量相较裸地均有提高。说明海州露天矿排土场整体速效磷含量不高,但是实施复垦对排土场土壤速效磷含量有提高效果。

各复垦模式土壤全钾含量差别较小,刺槐白榆混交林地土壤全钾含量最低。与裸地相比,白榆林地、刺槐林地、农田、草地提高 20~30 cm 土层土壤全钾效果显著,各复垦模式 0~20 cm 土层土壤全钾含量没有明显提高。刺槐林地、白榆林地、刺槐白榆混交林地有提高土壤速效钾含量的能力。而土壤速效钾含量整体处于极低水平,说明海州露天矿排土场整体缺钾,需要施用其他措施处理。

刺槐白榆混交林地土壤有机质含量显著高于其余复垦模式,且处于极高水平<sup>[16]</sup>,说明刺槐白榆混交林地对土壤的修复效果明显。各复垦模式对土壤 pH 均有降低作用,且林地降低 pH 较小,但总体来说,进行土壤复垦的土地对土壤酸性都有改良作用。

#### 4 结论

不同复垦模式与裸地相比,均有修复土壤的效果。表层土壤质量提高明显,土壤磷含量变化不明显。刺槐白榆混交林地提高土壤全氮、全磷、碱解氮、有机质含量能力明显。各复垦模式对土壤修复效果由强到弱依次为刺槐白榆混交林地、刺槐林地、白榆林地、农田、草地、裸地。综上所述,排土

场在改善土壤质量方面应采用刺槐白榆混交林地为主,白榆和刺槐林地为辅,还需要施用其余复垦措施来提高土壤速效磷、速效钾含量。

#### 参考文献

- [1] 高英旭,刘红民,刘阳,等.海州露天矿排土场不同林分土壤理化性质对植被生物量的影响[J].中南林业科技大学学报,2014,34(1):78-83.
- [2] 许丽,樊金栓,周心澄,等.阜新市海州露天煤矿排土场植被自然恢复过程中物种多样性研究[J].干旱区资源与环境,2005,19(6):152-157.
- [3] 刘宝勇,赵凯,宋子岭,等.海州露天矿排土场不同复垦模式下土壤酶与土壤肥力典型相关分析[J].中国水土保持科学,2018,16(4):97-105.
- [4] 黄思远.广西都安县核桃林土壤养分状况及其评价[D].南宁:广西大学,2019:3-5.
- [5] 闫晗.露天煤矿排土场土壤微生物生态特征及土壤质量评价[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011:20.
- [6] 梁冰,白国良.阜新市新邱露天矿东排土场土地复垦模式研究[J].露天采矿技术,2005,21(1):29-31.
- [7] 刘宝勇,李岩岩,刘欣玲,等.基于海州露天矿排土场不同复垦模式下小气候效应研究[J].工程技术研究,2019,47(1):88-96.
- [8] 王珍,冯浩.秸秆不同还田方式对土壤入渗特性及持水能力的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):75-80.
- [9] 张帅,孔德刚,常晓慧,等.秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(6):127-129.
- [10] 何新原,吴胜坤,罗东志,等.宿迁市道路边坡主要乔木刺槐根系固土力学特性研究[J].工程技术研究,2020,5(22):250-251.
- [11] 尚武.防护林体系树种选择[J].农村科技,2014(9):61-62.
- [12] 刘杰.柳杉根系加固边坡土壤的试验研究[J].路基工程,2017(3):103-106.
- [13] 李晓凤,陈丽华,宋恒川,等.柳杉不同树龄根系加筋作用对边坡稳定性的影响[J].四川农业大学学报,2013,31(3):258-263.
- [14] 席本野,邱楠,曹治国,等.树木吸收利用深层土壤水的特征与机制:对人工林培育的启示[J].植物生态学报,2018,42(9):885-905.
- [15] 许平华.柳杉与阔叶树混交涵养水源功能变化的研究[J].安徽农学通报,2012,18(1):124-125,130.
- [16] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查技术[M].北京:农业出版社,1992.
- [17] 李岩岩.排土场不同复垦模式实施效果研究:以小气候、土壤养分及酶活性为例[D].阜新:辽宁工程技术大学,2019:25-26.
- [18] 国家海洋局.海水总碱度的测定 敞口式电位滴定法.HY/T 197-2015[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [19] 谭丽菊.化学海洋学实验[M].青岛:中国海洋大学出版社,2018:54-63.
- [20] BATES R G.Determination of pH:Theory and practice[M].New York:John Wiley and Sons,1973.
- [21] DICKSON A G.Thermodynamics of the dissociation of boric acid in synthetic seawater from 273.15 to 318.15K[J].Deep sea research part A,1990,37(5):755-766.
- [22] WEISS R F.Carbon dioxide in water and seawater:The solubility of a non-ideal gas[J].Marine chemistry,1974,2(3):203-215.
- [23] 陈敏.化学海洋学[M].北京:海洋出版社,2009:60-113.
- [24] 郝珍珍.黄渤海海水碳酸盐体系的特征与影响因素研究[D].青岛:中国海洋大学,2015.
- [25] Global Monitoring Laboratory.Trends in CO<sub>2</sub> [R/OL].(2021-02-10)[2022-05-09].<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends.html>.
- [26] 陆音.得到课程《碳中和产业报告》第二讲[R/OL].[2022-05-09].<https://www.dedao.cn/course/article?id=e1k8gp2WGMzqj3m2mKq5YmP6D0jxAL>.
- [27] 梅德文.得到课程《前言课·碳中和10讲》第一讲.第二讲[R/OL].[2022-05-09].<https://www.dedao.cn/course/detail?id=zdev25Ro61ZXRQksDeJNq4C809xMAw>.
- [28] 习近平.习近平谈治国理政:第三卷[M].北京:外文出版社,2020:244.

(上接第 52 页)

物等方面的综合人才,在国家2030“碳达峰”及2060“碳中和”的宏观战略方针里,以知识为节点,数据为链接,用经济学思维,推动“蓝碳”在“碳交易”市场化中的进一步发展。③进一步加强海洋环境的综合治理状况。牢记习近平总书记“谈海洋生态,为子孙后来留下一片碧海蓝天”的指示精神,高度重视海洋生态文明建设,加强海洋环境污染防治,保护海洋生物多样性,实现海洋资源有序开发利用<sup>[15]</sup>。恢复海洋碳循环体系的平衡,增强地球的“新陈代谢”。

#### 参考文献

- [1] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C M, 等.蓝碳:健康海洋对碳的固定作用——快速反应评估[R].联合国环境规划署,全球资源信息数据库挪威阿伦达尔中心,2009.
- [2] 张正斌.海洋化学[M].青岛:中国海洋大学出版社,2018:71-117.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海洋监测规范 第4部分 海水分析:GB 17378.4—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.海洋调查规范 第4部分 海水化学要素调查:GB/T 12763.4—2007