

不同复垦方式对煤矿复垦区土壤养分状况的影响

李俊颖^{1,2},李新举^{1,2*},赵跃伦³,蔡德水⁴,吴争力³,高峰⁴

1. 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018
2. 山东农业大学 资环学院, 山东 泰安 271018
3. 济宁市国土资源局, 山东 济宁 272001
4. 济宁市采煤塌陷地治理中心, 山东 济宁 272001

摘要: 以济宁市采煤塌陷区粉煤灰充填、煤矸石充填、引湖充填、引黄充填、预复垦 5 种方式的复垦土壤为研究对象, 研究不同复垦方式对土壤养分及整体肥力恢复程度的影响。结果表明, 在 0~30 cm 耕作层, 煤矸石充填较其他方式对复垦土壤碱解氮、有效磷和有机质的含量提升效果更显著, 分别达 28.07 mg/kg、45.15 mg/kg、1.14%。速效钾含量以引黄充填最高, 粉煤灰充填对耕层土壤碱解氮含量影响最小, 预复垦对耕层土壤有效磷、速效钾、有机质含量的影响最小; 在 30~50 cm 土层, 对复垦土壤养分提升效果最显著的为粉煤灰充填, 土壤碱解氮、有效磷、速效钾及有机质分别高于对照地块 68.5%、89.0%、71.4%、177.3%。五种复垦方式对耕作层土壤整体肥力的影响由大到小依次为粉煤灰充填地块>煤矸石充填地块>引黄充填地块>引湖充填地块>预复垦地块, 在 30~50 cm 土层依次为引湖充填>粉煤灰充填>预复垦>引黄充填>煤矸石充填。综合考虑不同复垦方式对土壤养分及整体肥力恢复程度的影响, 粉煤灰充填、引湖充填方式对于济宁地区土壤肥力的恢复效果最为显著, 可在该地区进行进一步的推广。

关键词: 济宁市; 煤矿区; 复垦; 土壤养分

中图分类号: TD88;S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2017)02-0186-06

The Influence of Different Reclamation Modes on Soil Nutrient in Coal Mine Plots

LI Jun-ying^{1,2}, LI Xin-ju^{1,2*}, ZHAO Yue-lun³, CAI De-shui⁴, WU Zheng-li³, GAO Feng⁴

1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Tai'an 271018, China

2. College of Resources and Environment/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

3. Jining Municipal Bureau of Land and Resource, Jining 272001, China

4. Jining Coal Mine Subsidence Governance Center, Jining 272001, China

Abstract: This paper took the reclamation plots filled with fly ash, coal gangue, Yellow River sediment, lake sediments and the plots prepared for reclamation as the research object in Jining to explore the influences of different reclamation modes on soil nutrients and the total level of soil fertility. The results showed that the available nitrogen, available phosphorus and organic matter increased significantly 28.07 mg/kg, 45.15 mg/kg and 1.14% respectively at 0-30 cm depth of the plot filled with coal gangue. The content of available potassium for the plot filled with Yellow River sediment was highest. Fly ash filling had the worst effect on the content of the available nitrogen. Pre-reclamation had the least influence on the available phosphorus, available potassium and organic matter. At the 30-50 cm depth, fly ash filling had the biggest influence on the soil fertility. The available nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter were 68.5%、89.0%、71.4%、177.3% higher than the Control plot. The influence on the total level of soil fertility of five reclamation modes was in sequence of the plot filled with fly ash > the plot filled with coal gangue > the plot filled with Yellow River sediment > the plot filled with lake sediments > the plot prepared for reclamation, at the 30-50 cm depth, the sequence was the plot filled with lake sediments > the plot filled with fly ash > the plot prepared for reclamation > the plot filled with Yellow River sediment > the plot filled with coal gangue. Comprehensive consideration about soil nutrient and the total level of soil fertility, fly ash filling and lake sediments filling had the best effect on the recovery of soil fertility in Jining, and should get further popularization.

Keywords: Jining; coal mine plots; reclamation; soil nutrients

济宁市是我国重要的煤炭基地, 截至 2015 年底, 济宁市采矿塌陷地面积 27343.15 hm², 占济宁市土地总面积的 16.23%, 使得矿区土地资源破坏十分严重, 生态环境也遭到了严重地破坏。预计到 2050 年, 最终形成塌陷地面积达到 3333 km², 约占全市土地总面积的四分之一^[1]。为了恢复矿区生

收稿日期: 2016-08-07

修回日期: 2016-10-14

基金项目: 国家自然科学基金:煤矿区复垦土壤压实机理及其土壤环境效应研究(41171425)

作者简介: 李俊颖(1992-),女,硕士研究生.主要从事土地质量、土地复垦方面的研究. E-mail:ljj3069@163.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:lxj0911@126.com

态环境,遏制耕地锐减的局面,促进矿区经济与环境协调发展,开展土地复垦就成了一个现实而又迫切的问题^[2]。对于济宁市土地复垦模式的研究目前还处于空白当中,因此针对济宁煤矿区不同复垦方式开展研究,对比不同复垦方式对土壤质量的影响,建立济宁市土地复垦评价指标体系对于济宁市塌陷地治理具有一定的现实意义。

煤矿开采过程中直接挖掘表土、土石堆积而导致矿区植被损毁、地形和地质结构改变、地表和地下水文特征破坏^[3]。胡振琪首次提出了复垦土壤重构的原理与方法,为复垦优质土壤奠定了理论基础^[4]。目前济宁市采煤塌陷地治理主要采取引湖充填、引黄充填、预复垦、煤矸石充填、粉煤灰充填五种复垦方式。

土壤养分是植被生存与发展重要的物质基础^[5]。复垦土壤养分含量是耕地复垦效果评价的重要指标,也是指导土壤复垦工作的重要依据。矿区土壤养分变化研究及评价,对于指导矿区土地复垦工作具有重要的意义^[6]。前人已经对不同复垦方式的操作方法、复垦年限、效果等进行了部分研究。徐良骥等^[7]的研究表明,复垦地的速效氮含量低于对照地块、表层土壤有效磷远低于对照地块水平、各层位速效钾含量均高于正常地块。煤矸石充填复垦覆土 70~80 cm 既经济又能满足作物生长^[8]。焦晓燕等^[9]采用表土剥离复垦和混推复垦对煤矿塌陷区的研究表明,表土剥离复垦后土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量要稍高于混推复垦。采用排矸填充等方式复垦后地块表层速效钾含量、土壤 pH 值、EC 值都比未破坏地块高^[10]。胡振琪等^[11]采用粉煤灰充填复垦的土壤含有较低的有机质含量,复垦 12 a 的土壤与农业土壤的有机质含量相似,复垦土壤下层土的有机质含量并不比上层土低,有时还比上层土高。目前,煤矿塌陷区复垦研究主要集中在单一复垦方式不同年限对土壤理化性质的影响,对多种复垦方式进行效果对比的研究较少,尤其对引黄充填、引湖充填复垦方式的研究更少。因此,本文针对济宁市采煤塌陷地复垦实际,选择了 5 种复垦方式,开展复垦方式对土壤养分影响的研究^[12],将为煤矿塌陷区的土地复垦工作提供科学依据与理论支持。

1 研究区概括及研究技术与方法

1.1 研究区概括

济宁位于山东省南部,地处苏鲁豫皖四省结合部,最北端为北纬 35°57'的梁山县小路口镇邹桥村;最南端为北纬 34°26'的微山县高楼乡柳新养殖场;最东端为东经 117°36'的泗水县泉林乡历山火车站;最西端为东经 115°52'梁山县黑虎庙乡高堂村。

截至 2009 年底,济宁市境内现已有生产矿井 46 对,在建矿井 10 对,闭坑矿井 2 对,生产能力 8400 万吨,2009 年生产原煤 8200 万吨,累计生产原煤 10 亿余吨,累计动用储量 13.07 亿吨,其中累计采出量为 8.85 亿吨,累计损失量为 4.22 亿吨,另外还有 9 对境外矿井跨境开采,年产原煤量超过 1 亿吨^[13]。

1.2 土壤样品采集及分析方法

本研究的对象分别为邹城市平阳寺镇的粉煤灰充填地块、邹城市中心店的煤矸石充填地块、梁山县大路口乡彭那里村引黄充填地块、微山县赵庙乡的引湖充填地块和任城区南阳湖农场的预复垦地块及其各地具有相同耕作条件的对照地块。

在 5 个试验区选择典型地块挖掘 1 m×1 m×0.5 m 土壤剖面,分成 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm 和 30~50 cm 四个层次采集土样;样品采回后,自然风干、磨细,过 2 mm 筛和 0.25 mm 筛,备用。

土壤样品测定:土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法;土壤有效磷采用 Oslen 法测定;土壤速效钾采用 pH7.0 醋酸铵浸提—火焰光度计法测定^[14]。

2 结果分析

2.1 不同复垦方式对复垦土壤碱解氮含量的影响

济宁地区采用的五种复垦方式对土壤碱解氮含量的影响见图 2。在 0~50 cm 深度范围内,粉煤

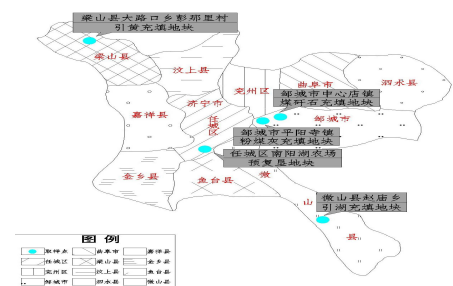


图 1 采样点分布图

Fig.1 The distribution of sampling points

灰复垦地块碱解氮含量均明显低于对照地块。在 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 深度范围内碱解氮含量分别为 18.90 mg/kg、4.20 mg/kg、4.97 mg/kg、4.10 mg/kg，高于对照地块 42.8%、74.7%、61.8%、68.5%；煤矸石复垦地块碱解氮含量在 0~50 cm 深度范围内均明显高于对照地块，各土层土壤碱解氮含量分别为 82.40 mg/kg、71.40 mg/kg、79.10 mg/kg、27.30 mg/kg，高于对照地块 805.5%、168.4%、303.6%、49.6%。

引湖充填复垦地块在 0~5 cm 深度范围内碱解氮含量高于对照地块，5~50 cm 深度范围内碱解氮含量均低于对照地块。在 0~5 cm 范围内的碱解氮含量达到 59.50 mg/kg，高于对照耕地 32.2%，5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 的深度范围内碱解氮含量为 15.40 mg/kg、10.50 mg/kg、10.20 mg/kg，低于对照耕地 66.9%、68.4%、64.0%。

在 0~30 cm 深度范围内，引黄充填复垦地块碱解氮含量均高于对照地块。碱解氮含量在 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm 深度范围内分别为 16.10 mg/kg、44.80 mg/kg、76.30 mg/kg，高于对照地块 9.5%、106.5%、505.6%。在 30~50 cm 的碱解氮含量比对照地块低，为 4.20 mg/kg，低于对照地块碱解氮含量 46.2%。

预复垦地块在 0~30 cm 深度范围内，碱解氮含量均低于对照地块，而在 30~50 cm 深度范围内含量明显要高于对照地块。0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm 深度范围内碱解氮含量分别为 58.10 mg/kg、21.70 mg/kg、38.50 mg/kg，低于对照地块 39.0%、83.1%、34.5%。30~50 cm 深度范围内碱解氮含量为 30.10 mg/kg，高于对照地块 437.5%。

在 0~30 cm 耕作层范围内，煤矸石充填复垦土壤碱解氮的含量明显增加，其次为引黄充填复垦地块。30~50 cm 土层范围内，预复垦地块土壤碱解氮含量增加幅度最大，其次为煤矸石充填复垦地块。因此，从对土壤碱解氮含量的影响方面可以得出，在 0~50 cm 范围内，五种复垦方式对土壤碱解氮的影响程度由大到小依次为：煤矸石充填 > 引黄充填 > 预复垦 > 引湖充填 > 粉煤灰充填。

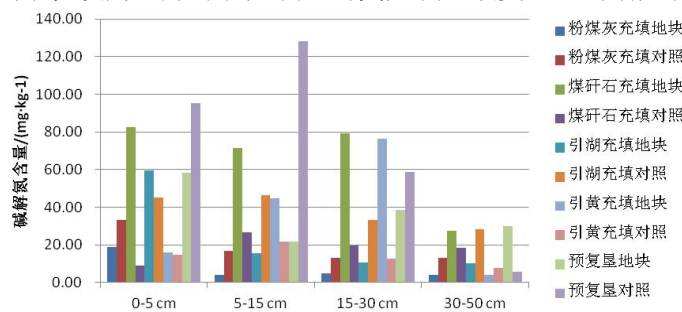


图 2 不同复垦区各土层土壤碱解氮含量

Fig.2 The contents of soil alkali hydrolyzable nitrogen on soil layers of different reclamation plots

2.2 不同复垦方式对复垦土壤有效磷含量的影响

如图 3 显示，粉煤灰充填复垦对土壤有效磷的含量影响较大，在 0~50 cm 深度范围内，粉煤灰复垦地块有效磷含量均明显高于对照地块。在 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 深度范围内各土层土壤有效磷的含量分别为 36.32 mg/kg、3.80 mg/kg、5.03 mg/kg、4.95 mg/kg，高于对照地块 194.8%、92.9%、341.1%、89.0%；煤矸石复垦地块有效磷含量在 0~50 cm 深度范围内均明显低于对照地块，各土层土壤有效磷含量分别为 14.86 mg/kg、18.33 mg/kg、23.92 mg/kg、2.35 mg/kg，低于对照地块 60.7%、53.9%、19.9%、91.6%。

引湖充填复垦地块在 0~5 cm 深度范围内有效磷含量低于对照地块，5~50 cm 深度范围内有效磷含量均高于对照地块，5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 的深度范围内有效磷含量分别为 5.70 mg/kg、7.15 mg/kg、6.95 mg/kg，高于对照 42.5%、1330.5%、6852.2%。

在 0~30 cm 深度范围内，引黄充填复垦地块有效磷含量均低于对照地块。有效磷含量在 0~5 cm、5~15 cm、15~30 cm 深度范围内分别为 8.05 mg/kg、4.14 mg/kg、4.92 mg/kg，低于对照地块 88.3%、89.3%、42.9%。在 30~50 cm 的有效磷含量为 3.61 mg/kg，高于对照地块 24.4%。

预复垦地块在 0~5 cm、5~15 cm、30~50 cm 深度范围内，有效磷含量均分别为 7.82 mg/kg、2.01

mg/kg、1.12 mg/kg, 低于对照地块 89.9%、95.2%、92.5%。15~30 cm 深度范围内有效磷含量为 5.59 mg/kg, 高于对照地块 138.1%。

在 0~30 cm (耕作层) 土层范围内, 粉煤灰充填地块土壤有效磷含量明显增加, 其次为引湖充填复垦地块。30~50 cm 土层范围内, 引湖充填地块土壤有效磷含量增加幅度最大, 其次为引黄充填复垦地块。因此, 从对土壤有效磷含量的影响方面可以得出, 在 0~50 cm 范围内, 五种复垦方式对土壤有效磷的影响程度由大到小依次为: 粉煤灰充填 > 引湖充填 > 预复垦 > 引黄充填 > 煤矸石充填。

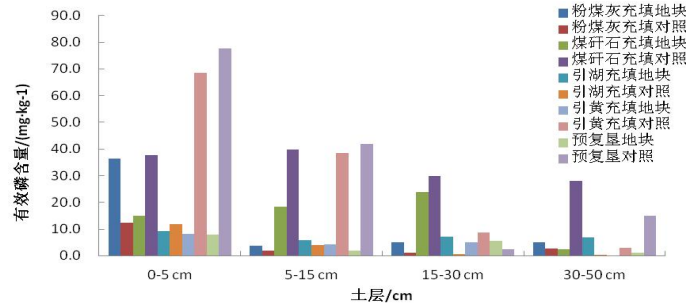


图 3 不同复垦区各土层土壤有效磷含量

Fig.3 The content of available phosphorus on soil layers of different reclamation plots

2.3 不同复垦方式对复垦土壤速效钾含量的影响

由图 4 可知, 五种复垦方式各地块土壤在 0~5 cm 深度范围内土壤速效钾含量以粉煤灰充填方式最高, 为 220 mg/kg, 高于对照地块 175.0%。煤矸石充填地块、引湖充填地块、引黄充填地块、预复垦地块 0~5 cm 土层土壤速效钾的含量分别为 90 mg/kg、180 mg/kg、145 mg/kg、110 mg/kg, 低于对照地块 10.0%、28.0%、21.6%、54.2%。5~15 cm 深度范围内粉煤灰充填地块、煤矸石充填地块与引黄充填地块的速效钾含量分别为 60 mg/kg、105 mg/kg、140 mg/kg, 高于对照地块 33.3%、50.0%、180.0%; 煤矸石充填复垦地块与预复垦地块速效钾含量为 120 mg/kg、40 mg/kg, 低于对照地块 41.5%、81.8%。15~30 cm 深度范围内, 粉煤灰充填地块、煤矸石充填地块与引黄充填地块的速效钾含量为 60 mg/kg、90 mg/kg、155 mg/kg, 高于对照地块 20.0%、12.5%、181.8%。煤矸石充填复垦地块与预复垦地块速效钾含量为 120 mg/kg、50 mg/kg, 低于对照地块 14.3%、60.0%。30~50 cm 深度范围内粉煤灰充填复垦地块与引湖充填复垦地块的速效钾含量为 60 mg/kg、119 mg/kg, 高于对照地块 71.4%、8.2%。煤矸石充填复垦地块、引黄充填复垦地块与预复垦地块速效钾含量为 70 mg/kg、20 mg/kg、300 mg/kg, 低于对照地块 7.9%、75.0%、76.0%。

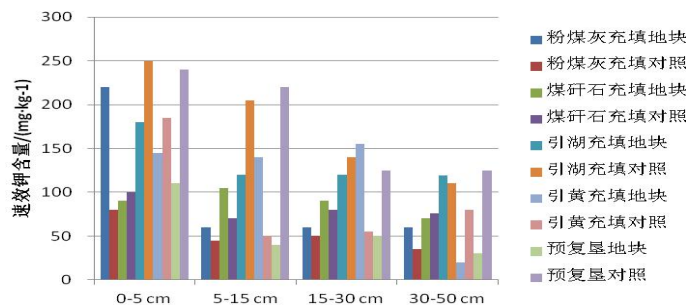


图 4 不同复垦区各土层土壤速效钾含量

Fig.4 The contents of available potassium on soil layers of different reclamation plots

2.4 不同复垦方式对复垦土壤有机质含量的影响

由图 5 可见, 不同复垦方式对复垦地块土壤有机质含量的影响不同, 粉煤灰充填地块与引湖充填地块在 0~5 cm 土层内土壤有机质含量高于对照地块, 分别为 1.63%、1.26%, 高于对照地块 570.6%、9.0%; 粉煤灰充填复垦地块在 5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 深度范围内土壤有机质含量为 0.88%、0.66%、0.58%, 高于对照地块 165.4%、88.2%、177.3%。煤矸石充填地块在 5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 土层内土壤有机质含量分别为 1.26%、0.86%、0.27%, 低于对照地块 51.3.9%、64.0%、88.1%; 引湖充填复垦地块在 5~15 cm、15~30 cm、30~50 cm 土层内土壤有机质含量为 0.71%、0.73%、0.64%,

低于对照地块 12.5%、10.0%、3.7%；引黄充填复垦地块在 5~30 cm 深度范围内各土层有机质含量分别为 0.62%、0.96%、0.75%，低于对照地块 41.7%、12.6%、14.2%；预复垦地块在 5~30 cm 深度范围内各土层有机质含量分别为 0.22%、0.45%、0.31%，低于对照地块 89.7%、62.5%、80.5%。

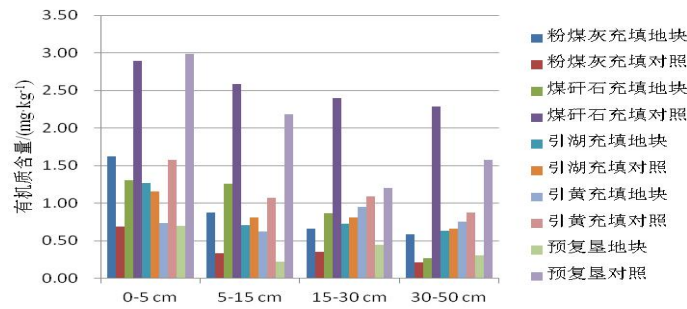


图 5 不同复垦区各土层土壤有机质含量

Fig.5 The contents of organic matter on soil layers of different reclamation plots

2.5 不同复垦方式对复垦土壤整体肥力恢复程度的影响

2.5.1 指标权重的确定 在土壤质量评价中，各项指标对土壤质量的贡献各不相同，因此各项指标的权重需要确定。在权重的确定中，本研究中采用各指标的相关系数来确定权重。

1) 相关系数的计算：把选取的 4 项指标数据在 SPSS 中运行，计算出各指标相关系数矩阵。

2) 指标的权重计算：

$$\text{计算各指标与其他指标相关系数的平均值 } r_i: \bar{r}_i = (\sum_{i=1}^4 r_i) / 4$$

式中， \bar{r}_i 为各指标相关系数平均值； r_i 为第 i 指标与其他 4 个指标的相关系数。

$$\text{则各指标权重为: } W_i = \bar{r}_i / \sum_{i=1}^4 \bar{r}_i$$

根据上述公式对各指标权重进行计算^[15]，结果见表 1：

表 1 不同土壤特性的相关系数及权重

Table 1 Correlation coefficients and weights of different soil characteristics

项目 Items	有机质/% Organic matter	碱解氮/mg/kg Alkali-hydrolyzale nitrogen	有效磷/mg/kg Available phosphorus	速效钾/mg/kg Available potassium
平均相关系数	0.4741	0.3089	0.4755	0.4741
权重	0.2736	0.1783	0.2744	0.2736

2.5.2 复垦土壤肥力整体恢复程度的计算 以土壤中各养分的恢复程度以及权重大小来求算复垦土壤肥力整体恢复程度。计算式为： $I = \sum F_i W_i 100\%$ ， $F_i = C_i / S_i$ ， $(i=1-4)$ ，

式中， I 代表复垦土壤养分恢复综合指数； F_i 为第 i 个指标评分值； W_i 为第 i 个指标的权重； C_i 为复垦土壤评价养分的实测值； S_i 为评价因子标准，即为各复垦方式对照地块的农田养分值^[6]。

2.5.3 对复垦土壤整体肥力恢复程度的影响 不同复垦方式对复垦土壤整体肥力恢复程度的影响不同。如表 2 所示，粉煤灰充填和煤矸石充填对复垦地块 0~15 cm 土层整体肥力恢复程度已达到甚至超过对照地块肥力水平；引湖充填地块 0~5 cm 和 5~15 cm 土壤整体恢复程度分别达到对照地块的 94.5%、85.0%，复垦程度基本达到正常农田水平；引黄充填地块在 0~5 cm 土层土壤整体肥力恢复程度达到正常农田的 57.1%，存在较大恢复潜力，5~15 cm 土层土壤整体肥力恢复程度达到周围正常农田相同土层的 132.3%，恢复程度较好。预复垦地块 0~5 cm、5~15 cm 土层土壤整体肥力恢复程度分别达到正常农田相同土层的 32.6%、12.1%，复垦效果较差，有较大提升潜力，此种方式可能不适用于南阳湖煤矿塌陷区地块土壤整体肥力恢复，多年连续采用预复垦方式对耕层土壤肥力的恢复有待进一步研究。

15~50 cm 土层土壤肥力恢复程度以引湖充填复垦地块最高，15~30 cm、30~50 cm 两土层恢复程度分别是正常农田的 446.2%、1970.1%，明显高于正常农田地块，引湖充填对微山县赵庙乡煤矿塌陷区 30~50 cm 土层土壤肥力提升明显。其余四种复垦方式地块 15~50 cm 土层土壤整体肥力恢复程度基本达到其所对应基本农田肥力水平，57.4%~224.7% 范围内变化。

表2 不同复垦方式各土层整体肥力恢复程度

复垦方式 Reclamation ways	整体肥力恢复程度/% Total recovery levels of fertility			
	0~5 cm	5~15 cm	15~30 cm	30~50 cm
粉煤灰充填	349.8066	166.544	212.1776	180.2609
煤矸石充填	209.2075	114.8694	134.5889	57.44754
引湖充填	94.49018	84.96168	446.2426	1970.065
引黄充填	57.06119	132.304	224.6708	74.02569
预复垦	32.56508	12.12535	98.21827	109.7903

3 结论

(1) 五种复垦方式对复垦土壤碱解氮含量的影响由大到小为煤矸石充填>引黄充填>预复垦>引湖充填>粉煤灰充填;在30~50 cm土层,由大到小为预复垦>煤矸石充填>引湖充填>引黄充填>粉煤灰充填。对耕层土壤有效磷含量的影响由大到小为煤矸石充填>粉煤灰充填>引黄充填>引湖充填>预复垦;在30~50 cm土层,由大到小依次为引湖充填>粉煤灰充填>引黄充填>煤矸石充填>预复垦。对耕层土壤速效钾的影响由大到小为引黄充填>引湖充填>煤矸石充填>粉煤灰充填>预复垦;在30~50 cm土层,由大到小为引湖充填地块>煤矸石充填地块>粉煤灰充填地块>预复垦地块>引黄充填地块。

(2) 五种复垦方式对耕层土壤有机质的影响由大到小为煤矸石充填地块>粉煤灰填>引湖充填>引黄充填>预复垦。在30~50 cm土层,五种复垦方式对土壤有机质的影响由大到小为引黄充填>引湖充填>粉煤灰充填>预复垦>煤矸石充填。

(3) 从复垦地块整体肥力的恢复程度来看,0~30 cm耕作层,土壤整体肥力恢复程度由大到小为粉煤灰充填地块>煤矸石充填地块>引黄充填地块>引湖充填地块>预复垦地块,分别达到周围基本农田的264.7%、132.8%、112.5%、95.1%、26.2%;在30~50 cm土层,土壤整体肥力恢复程度由大到小为引湖充填>粉煤灰充填>预复垦>引黄充填>煤矸石充填,分别达到周围基本农田的1969.6%、179.9%、109.8%、74.1%、57.4%。

(4) 粉煤灰充填、引湖充填复垦方式对土壤肥力的恢复效果明显,可在该地区进一步推广。

煤矿塌陷区进行土地复垦后,土壤养分逐渐恢复,已接近当地耕地养分水平,说明土地复垦对土壤修复有重要意义。济宁塌陷区进行的土地复垦方法是切实有效的,适宜在各煤炭塌陷区进行推广。粉煤灰充填、引湖充填复垦方式的方法对土壤养分恢复影响很大,其余三种复垦方式恢复程度稍加欠缺,还需采取一定的措施,应进一步改良复垦土壤的养分水平,以期提高土壤的生产力。

参考文献

- [1] 宁尚知,石勇,赵振峰.山东省采煤塌陷地治理技术方法研究[J].山东煤炭科技,2016,1(5):200-202
- [2] 王培俊,牟守国,丁忠义等.东部平原矿区三种复垦方式复田土壤理化性状对比分析[J].能源环境保护,2008(3):13-19,24
- [3] Keskin T, Makineci E. Some soil properties on coal mine spoils reclaimed with black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) and umbrella pine (*Pinus pinea* L.) in Agacli-Istanbul[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2009,159(1-4):407-414
- [4] 胡振琪.煤矿山复垦土壤剖面重构的基本原理与方法[J].煤炭学报,1997,22(6):617-622
- [5] 温仲明,焦峰,赫晓慧等.黄土高原森林边缘区退耕地植被自然恢复及其对土壤养分变化的影响[J].草业学报,2007,16(1):16-23
- [6] 黎炜,陈龙乾,周天建.张集矿区复垦土壤养分变化研究及评价[J].现代矿业,2011(2):41-43
- [7] 徐良骥,许善文,杨秀芳等.粉煤灰充填复垦地理化特性与重金属分布特征研究——以淮南洛河电厂粉煤灰复垦地为例[J].农业环境科学学报,2012(12):2352-2360
- [8] 徐良骥,黄璨,章如芹等.煤矸石充填复垦地理化特性与重金属分布特征[J].农业工程学报,2014,30(5):211-219
- [9] 焦晓燕,王立革,卢朝东等.采煤塌陷地复垦方式对土壤理化特性影响研究[J].水土保持学报,2009,23(4):123-125,145
- [10] 孙海运.山东济宁矿区复垦土壤理化特征及修复技术研究[D].北京:中国矿业大学,2010
- [11] 胡振琪,戚家忠,司继涛.粉煤灰充填复垦土壤理化性状研究[J].煤炭学报,2002,27(6):639-643
- [12] 孙纪杰,李新举.不同复垦方式对煤矿复垦区土壤物理性状的影响[J].土壤通报,2014,45(3):608-612
- [13] 杨光华,胡振琪,杨耀淇.采煤塌陷积水耕地信息提取方法研究——以山东省济宁市为例[J].金属矿山,2013(9):152-157
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000
- [15] 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):205-209