珊丹,崔崴,邢恩德,等.矿山废弃地植被恢复对土壤养分的影响与评价[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(1):101-110.
Shan D, Cui W, Xing E D,et al.Effects and evaluation of vegetation restoration on soil nutrients in abandoned coalmining area [J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(1):101-110.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202306032

矿山废弃地植被恢复对土壤养分的影响与评价

珊丹[1,2],崔崴[1,2],邢恩德[1,2],杨凌云[3]

(1.中国水利水电科学研究院 内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站,北京 100038;
2.水利部牧区水利科学研究所,内蒙古 呼和浩特 010020;3.鄂尔多斯市国土空间规划院 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘　要:[目的]探讨适合干旱半干旱矿山排土场特殊生境的人工植被类型,可为露天矿废弃地植被恢复模式的优化与植被建设工程的精准实施提供科学依据。[方法]以草原区大型露天煤矿排土场为研究对象,研究不同人工植被恢复类型土壤主要养分变化特征,并采用灰色关联度法分析评价不同人工植被类型的土壤肥力状况。[结果]干旱半干旱草原区矿山废弃地人工植被的土壤pH值均在8.5以上,属于碱性土壤,且与自然恢复的对照区(CK)之间变化差异不显著($P>0.05$)。人工植被土壤(0~40 cm)全氮、有机碳平均含量分别为486.66 mg•kg^{-1}、0.50%,与自然恢复植被相比(全氮305.95 mg•kg^{-1}、有机碳0.33%)有显著增加($P<0.05$),其中,草木樨(*Melilotus suaveolens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)群落的土壤全氮含量达到607.20、603.45 mg•kg^{-1},水解性氮含量为85.27、107.06 mg•kg^{-1},显著高于其它人工植被类型($P<0.05$),油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)群落的土壤有机碳含量显著高于其它植被类型($P<0.05$);人工植被对土壤中全磷含量、速效磷含量、全钾含量的影响不明显;基于灰色关联度法排土场平台的土壤肥力要明显优于边坡;土壤水解性氮、速效磷、速效钾含量与参考数列指标的关联度比较大。[结论]露天矿排土场植被恢复后土壤中钾元素充足,氮、磷等营养元素的不足会成为植被恢复的主要限制因子,速效养分含量对草原矿区排土场的土壤肥力影响更为重要;矿山废弃地11种植被恢复类型中,排土场平台榆树(*Ulmus pumila*)群落、草木樨群落、油松群落、紫花苜蓿群落的土壤肥力较高,边坡栽植柠条土壤肥力状况相对较好。

关键词:排土场; 土壤养分; 灰色关联度; 综合评价
中图分类号:S157.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)01-0101-10

矿产资源露天开采过程中大量弃土弃渣堆放形成的平台与边坡相间、阶梯宝塔状排土场是一种典型的人工再塑侵蚀地貌,具有质地松散、养分贫瘠、蓄水能力差、生物活性低等特点[1-3]。人工植被建设是矿山排土场生态恢复最常用、最有效的途径,人工植被能有效增加植物群落覆盖度和物种多样性,植物根系的增强能改善土壤环境,提高土壤肥力,使丧失的生产能力重新得到利用,从而提高生态系统的多样性与稳定性[4-9]。研究发现,露天开采废弃地植被自然恢复速度缓慢[10],人工复垦是尽快恢复矿区生态、保护矿区环境、进行现代化煤炭生产的重要一环。目前,矿山生态恢复已成为世界生态恢复的研究热点,资源开采强度大、破坏严重的露天矿成为研究重点,例如加拿大油砂开采矿区、中国干旱半干旱矿山等,从生态修复的对象来看植被一直受关注程度最高,其次是土壤,复垦土壤和建植植被之间的作用机理是全世界矿山生态修复的研究焦点[11],基于不同地区气候条件、土壤环境、植物物种的差异,土壤与植被之间的相互作用机理比较复杂,植被类型会明显影响土壤营养成分,碳、氮、磷的矿化速率以及硝化、反硝化速率,进而影响土壤碳氮循环[12-14]。另一方面,土壤是生态系统中诸多生态过程的载体,土壤决定了干旱半干旱生态系统植被群落物

收稿日期:2023-06-28　　**修回日期**:2023-12-11
基金项目:鄂尔多斯市科技合作重大专项(2021EEDSCXQDFZ2016);内蒙古自治区科技计划项目(2019GG023)
作者简介:珊丹(ORCID:0009-0007-0725-0204),正高级工程师,博士,研究方向:生态恢复与水土保持,E-mail:mksshd@126.com

种组成与初级生产力之间的关系,研究土壤特征与植被景观之间的关系,有助于认识生态系统过程和植被管理[15-17]。地处我国干旱半干旱地区的矿山排土场因其物质组成多样性、土壤特殊性以及降水量偏低、无霜期较短、生态环境相对脆弱等生境特征,其生态恢复难度一直较为艰巨,因此,基于自然条件、土壤特性、生态建设需求,通过灰色关联度法、层次分析等方法对人工植被的恢复效果进行科学评价对矿山废弃地的生态恢复至关重要。本文研究了干旱半干旱草原区露天煤矿排土场不同人工植被对土壤养分特征的影响,并采用灰色关联度法对不同植被恢复类型土壤肥力进行综合评价,以探讨适合干旱半干旱矿区排土场特殊生境的植物群落类型,旨在为干旱半干旱地区大型露天矿排土场的植被恢复和生态建设工程的科学实施提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区处于内蒙古高原中部(图1),属中温带干旱半干旱气候,多年平均降水量289 mm,多年平均蒸发量1831 mm,年平均气温1.7 ℃;所处草原区域土壤为典型栗钙土。研究区扰动前地表植被为典型草原植被,以克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Aneurotepidimu chinense*)为主要建群种,植被盖度35%~50%。本研究选择的露天煤矿排土场为平台、边坡相间分布的阶梯式地貌,台阶坡面为煤矸石与土混排后覆土,形成覆土坡,覆土深度50~80 cm,排土场原状土及周边草原0~20 cm土层原状土壤理化性质详见表1。自2012年起,排土场植被恢复工程陆续开展,人工栽植了榆树(*Ulmus pumila*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、草木樨(*Melilotus suaveolens*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)等。本研究选取排土场植被恢复区11种人工植被类型,包括乔木林(榆树、油松、小叶杨、侧柏)、灌木丛(柠条、沙蒿)、人工草地(草木樨、紫花苜蓿),以自然恢复植被为对照。各个植被类型群落的基本情况见表2。

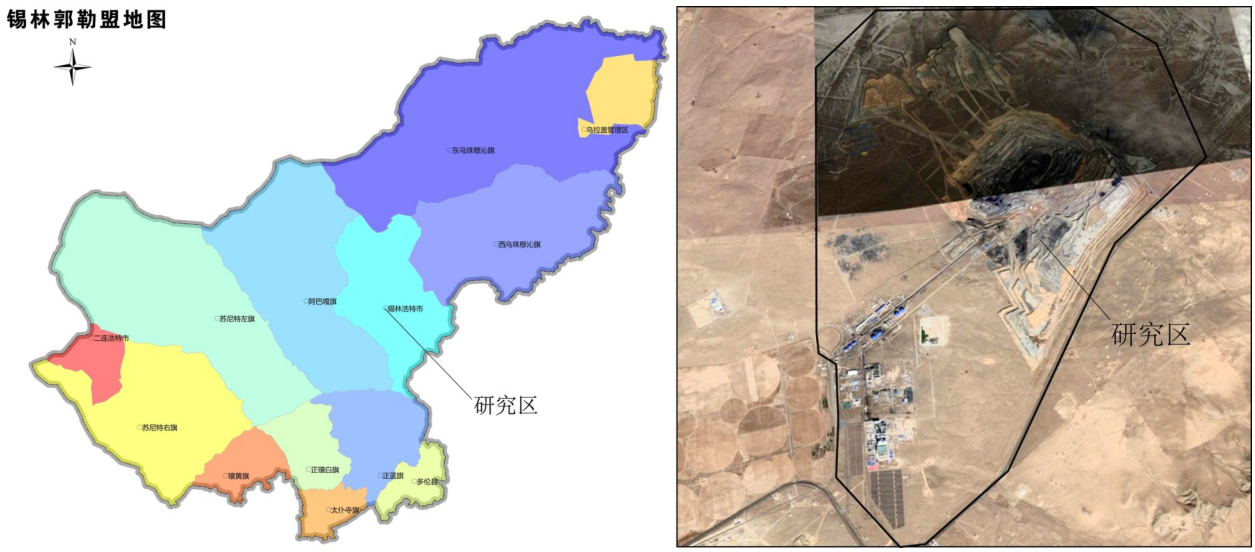

图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil profile

指标 Index	全氮/(mg·kg^{-1}) TN	水解性氮/(mg·kg^{-1}) AN	全磷/(mg·kg^{-1}) TP	速效磷/(mg·kg^{-1}) AP	全钾/(g·kg^{-1}) TK	速效钾/(mg·kg^{-1}) AK	有机碳/% OC	pH
排土场原状土	285.3±17.80	70.6±4.91	164.6±36.63	1.5±0.19	24.7±3.47	101.3±3.90	0.26±0.03	9.0±0.1
周边草原	578.4±28.65	105.8±7.53	246.5±17.06	2.4±0.63	38.4±5.31	133.8±11.51	0.69±0.09	8.3±0.1

表2　人工植被基本情况

Table 2　Selected plant community information

序号 NO.	植被类型 Vegetation patterns	恢复年限 Recovery period	分布地点 Location	建植方式 Planting method	植被高度/cm Vegetation height	植被盖度/% Vegetation coverage	郁闭度 Canopy density
Ⅰ	榆树1	8	排土场平台	人工造林	172	—	0.20
Ⅱ	榆树2	7	排土场边坡	人工造林	78	—	0.26
Ⅲ	油松	8	排土场平台	人工造林	211	—	0.14
Ⅳ	小叶杨	7	排土场平台	人工造林	194	—	0.17
Ⅴ	侧柏	9	排土场边坡	人工造林	65	54	—
Ⅵ	柠条1	7	排土场平台	穴状播种	71	48	—
Ⅶ	柠条2	7	排土场边坡	穴状播种	64	30	—
Ⅷ	沙蒿1	8	排土场平台	人工撒播	45	57	—
Ⅸ	沙蒿2	8	排土场边坡	人工撒播	42	36	—
Ⅹ	草木樨	7	排土场平台	人工撒播	47	43	—
Ⅺ	紫花苜蓿	7	排土场平台	人工撒播	34	45	—
CK	自然恢复	10	排土场平台		25	38	—

1.2　样品采集与测定

植物生长末期(2021年8月底)在每个植被类型样地内随机选取9个样点进行土壤样品采集,每个样点分2个土层采集0～20、20～40 cm土壤样品,装入铝盒,共采集样品180份,带回实验室。pH值采用电位法,通过酸度计直接测定。土壤的全氮、水解性氮含量测定采用半微量凯氏定氮法、碱解扩散法;全磷、速效磷含量测定采用H_2SO_4-$HClO_4$消解钼锑抗比色法、0.5 mol·$L^{-1}$$NaCO_3$浸提钼锑抗比色法,全钾、速效钾含量测定利用NaOH熔融火焰光度法和1 mol·$L^{-1}$$NH_4OAc$浸提火焰光度法,有机碳测定采用高锰酸钾氧化法[18]。

1.3　统计分析

采用灰色关联度法对不同植被配置类型的土壤养分情况进行分析评价[19-20]。灰色关联度分析包括设置参考指标数列、关联系数计算及灰色关联度计算。

不同植被类型各指标的差异性采用SPSS 17.0单因素方差分析,指标之间的关联系数、综合评价值等采用Microsoft Excel 2016统计。

2　结果与分析

2.1　不同植被类型土壤养分变化

干旱半干旱草原区露天采煤形成的大型排土场改变了土壤原有机械组成和结构,土壤贫瘠、水分条件差、微生物活性低[21]。测定各个试验样地的土壤酸碱度,pH值均在8.5以上,属于碱性土壤,碱性土壤不利于植物生长发育,这也是矿区废弃地植被恢复比较困难的原因之一。不同人工植被类型土壤pH值与自然恢复的对照区(CK)相比,变化差异不显著($P>0.05$)。对比分析不同人工植被类型0～20、20～40 cm土层土壤主要养分变化(表3～表4),除20～40 cm土层的平均土壤全磷含量高于0～20 cm土壤全磷含量外,各人工植被类型土壤中,全氮、水解性氮、速效磷、全钾、速效钾、有机碳的平均值均是0～20 cm土层大于20～40 cm。从表3～表4可见,露天矿排土场采取植被恢复措施后,土壤主要营养元素都发生了变化,其中,土壤全氮和水解性氮含量变化较为明显,说明人工植被对土壤氮元素积累影响较大。

结果可见,11种人工植被类型0～20 cm土层土壤全氮含量平均值比对照增加了83.42%,11种人工植被类型0～20 cm土层土壤全氮含量均显著高于对照区($P<0.05$),各个人工植被类型之间0～20 cm土层土壤全氮含量变化差异也达到显著水平($P<0.05$),其中,油松群落(Ⅲ)的土壤全氮含量最高(786.9 mg·kg^{-1}),并且显著高于其它植被类型,其次为紫花苜蓿群落(Ⅺ)、草木樨群落(Ⅹ);20～40 cm土层土壤全氮含量也有明显差异,土壤全氮含量最高的依次为草木樨群落(Ⅹ)、紫花苜蓿群落(Ⅺ),显著高于其它人工植被类型($P<0.05$);排土场边坡沙蒿群落(Ⅸ)20～40 cm土层土壤全氮含量最低,且显著低于自然恢复群落(CK)。土壤中水解性氮含量与土壤全氮含量

表3 不同人工植被类型0～20 cm土层土壤养分变化

Table 3 Variation of soil nutrients in the 0～20 cm soil layer in different vegetated areas

编号 NO.	全氮/(mg·kg^{-1}) TN	水解性氮/(mg·kg^{-1}) AN	全磷/(mg·kg^{-1}) TP	速效磷/(mg·kg^{-1}) AP	全钾/(g·kg^{-1}) TK	速效钾/(mg·kg^{-1}) AK	有机碳/% OC	pH
Ⅰ	480.4±14.1e	69.09±4.2ab	147.1±11.6ab	0.9±0.43a	31.9±2.3a	144.8±5.7c	0.72±0.04d	8.8a
Ⅱ	404.5±13.3b	86.14±10.4bc	150.5±8.4ab	1.6±0.36a	29.8±5.7a	103.4±8.6a	0.58±0.05c	8.8a
Ⅲ	786.9±7.9i	110.61±7.7d	232.2±13.4e	2.0±0.35ab	26.3±3.0a	135.6±8.0bc	0.71±0.09d	8.9a
Ⅳ	508.1±5.6f	68.91±5.6ab	238.2±7.3e	1.1±0.41a	29.8±5.3a	112.6±6.7ab	0.46±0.09b	8.8a
Ⅴ	478.3±9.6e	61.31±12.7a	155.6±7.6ab	1.3±0.66a	27.6±6.0a	93.2±7.3a	0.34±0.04a	8.7a
Ⅵ	420.6±6.1c	111.83±8.6d	163.9±14.0bc	1.4±0.56a	32.0±4.0a	105.7±4.1a	0.45±0.07b	8.8a
Ⅶ	412.6±7.9bc	85.30±4.3bc	135.4±9.1a	1.3±0.17a	31.1±6.1a	113.5±3.6ab	0.35±0.03a	8.6a
Ⅷ	458.5±6.0d	98.17±8.7d	144.3±13.7ab	1.8±0.26ab	30.8±4.3a	136.1±7.0bc	0.54±0.11bc	8.6a
Ⅸ	398.0±9.4b	98.56±5.6c	157.4±8.6ab	1.6±0.36ab	28.4±4.9a	126.8±6.1b	0.52±0.03bc	8.5a
Ⅹ	598.3±12.7g	67.60±9.6ab	209.3±11.7d	2.8±0.30b	28.1±2.1a	126.0±3.8b	0.70±0.06d	8.8a
Ⅺ	606.4±19.8g	127.17±6.7e	183.1±16.4c	2.9±0.36b	30.4±5.6a	110.9±6.8ab	0.58±0.07c	8.7a
CK	275.2±7.6a	82.34±10.8b	168.4±8.6bc	1.7±0.20ab	25.9±3.3a	99.2±8.4a	0.34±0.05a	9.0a
平均值	485.65	88.92	173.78	1.7	29.34	117.32	0.52	8.8

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column showed significant difference at $P<0.05$ level

的变化规律较相似,0～20 cm土层土壤水解性氮含量相对较高的分别为紫花苜蓿群落(Ⅺ)、平台的柠条群落(Ⅵ)、油松群落(Ⅲ),显著高于其他植被类型;20～40 cm土层土壤水解性氮含量最高的为平台的榆树群落(Ⅰ)、草木樨群落(Ⅹ),显著高于其它植被类型,对照样地水解性氮含量最低(50.14 mg·kg^{-1})。与自然恢复植被相比,人工植被土壤全磷含量未表现出明显增加,沙蒿、柠条群落土壤全磷含量均相对较低,各人工植被土壤速效磷含量变化差异也不明显,说明不同植被恢复类型对土壤磷元素影响较小。各试验样地土壤全钾含量在25.6～31.9 g·kg^{-1},自然恢复的对照样地与人工植被之间的变化差异不明显,各个植被类型之间土壤全钾含量变化也不显著;速效钾含量变化在73.1～144.8 mg·kg^{-1},对照样地20～40 cm土层土壤速效钾含量最低(73.1 mg·kg^{-1}),不同植被类型之间土壤速效钾含量变化差异大于土壤中全钾含量的变化,平台榆树群落(Ⅰ)0～20 cm土层土壤速效钾含量、平台柠条群落(Ⅵ)20～40 cm土层土壤速效钾含量均显著高于其它植被类型,排土场土壤钾元素含量较高,速效钾含量水平中等,植物可吸收利用的土壤速效态钾充足。对比分析不同植被类型土壤有机碳变化,自然恢复群落(CK)、边坡的侧柏群落(Ⅴ)、边坡柠条群落(Ⅶ)0～20 cm土层的土壤有机碳含量显著低于其它植被类型($P<0.05$),平台榆树群落(Ⅰ)、油松群落(Ⅲ)、草木樨群落(Ⅹ)的土壤有机碳含量明显高于其他植被类型($P<0.05$);20～40 cm土层的土壤有机碳含量较低的是自然恢复群落(CK)和沙蒿群落(Ⅷ、Ⅸ),油松群落(Ⅲ)、小叶杨群落(Ⅳ)、平台的柠条群落(Ⅵ)20～40 cm土层的土壤有机碳含量显著高于其它植被类型,11种人工植被类型0～20 cm土层土壤有机碳含量平均值比对照增加了59.09%。

2.2 土壤肥力评价

本研究选取土壤全氮(C1)、水解性氮(C2)、全磷(C3)、速效磷(C4)、全钾(C5)、速效钾(C6)、土壤有机碳(C7)、PH值(C8)作为矿区排土场土壤肥力水平的评价指标。按照灰色理论把本研究所涉及11种植被配置类型作为一个灰色系统,每个植被配置类型即为该系统中的一个因素。根据土壤肥力目标,构造一个理想的植被配置类型,其各项土壤主要肥力指标所构成的数列为参考数列,本研究中选择各项土壤肥力指标中的最优指标作为参考数列,分析所有参与植被配置类型的各项土壤肥力指标构成比较数列。由于各土壤肥力指标的量纲不同,首先对其进行归一化处理,初值化处理值见表5。

表4　不同人工植被类型20～40 cm土层土壤养分变化

Table 4　Variation of soil nutrients in the 20～40 cm soil layer in different vegetated areas

编号 NO.	全氮/(mg•kg^{-1}) TN	水解性氮/(mg•kg^{-1}) AN	全磷/(mg•kg^{-1}) TP	速效磷/(mg•kg^{-1}) AP	全钾/(g•kg^{-1}) TK	速效钾/(mg•kg^{-1}) AK	有机碳/% OC	pH
Ⅰ	576.8±13.7g	104.62±11.2d	263.8±15.6f	1.9±0.30a	29.4±3.0a	94.3±3.6bc	0.49±0.06bc	9.0a
Ⅱ	450.2±12.7de	50.52±8.0a	173.1±10.7d	0.8±0.23a	28.3±2.6a	81.0±6.1ab	0.48±0.03bc	8.8a
Ⅲ	542.0±14.5f	78.20±13.4bc	213.7±7.2e	1.2±0.34a	27.1±3.8a	116.1±4.2cd	0.63±0.11c	9.0a
Ⅳ	420.7±49.1c	85.66±8.3cd	267.4±11.3f	1.7±0.62a	28.4±5.9a	135.6±10.9d	0.52±0.04c	8.9a
Ⅴ	444.1±11.4d	87.57±9.8cd	132.6±10.4bc	1.3±0.38a	29.9±2.1a	92.9±8.8bc	0.49±0.06bc	8.7a
Ⅵ	467.7±10.4e	77.84±9.6bc	176.7±8.7d	1.0±0.28a	29.5±4.4a	98.6±3.3c	0.57±0.07c	8.8a
Ⅶ	406.8±9.1c	56.71±10.3a	143.0±11.4c	0.8±0.35a	27.7±6.3a	79.5±4.2ab	0.40±0.05ab	8.8a
Ⅷ	324.7±7.4b	54.82±10.6a	116.0±9.5b	1.6±0.46a	31.6±4.6a	87.4±6.0b	0.35±0.09a	8.9a
Ⅸ	304.4±11.3a	64.53±7.5ab	98.3±7.7a	1.5±0.53a	26.2±6.4a	76.1±5.6a	0.33±0.07a	8.7a
Ⅹ	616.1±10.3h	102.94±14.0d	253.8±12.5f	2.2±0.69a	27.8±2.5a	138.2±3.2d	0.47±0.10bc	8.8a
Ⅺ	600.5±8.5h	86.94±12.8cd	170.7±9.6d	2.0±0.61a	28.6±2.8a	86.4±3.0b	0.39±0.06ab	8.9a
CK	336.7±9.2b	50.14±8.5a	123.5±6.2bc	1.4±0.40a	25.6±4.9a	73.1±5.6a	0.32±0.05a	9.0a
平均值	457.56	75.04	177.72	1.5	28.34	96.60	0.45	8.9

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column showed significant difference at $P<0.05$ level

表5　各评价指标归一化处理结果

Table 5　Normalized results of each evaluation index

编号 NO.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Ⅰ	0.761	0.575	0.737	0.381	0.172	0.736	0.875	0.750
Ⅱ	0.297	0.236	0.376	0.190	0.539	0.266	0.525	0.500
Ⅲ	0.495	0.477	0.634	0.286	0.789	0.648	0.713	0.667
Ⅳ	0.370	0.352	0.914	0.286	0.547	0.711	0.425	0.583
Ⅴ	0.363	0.315	0.271	0.238	0.492	0.278	0.238	0.333
Ⅵ	0.330	0.580	0.426	0.190	0.805	0.327	0.475	0.500
Ⅶ	0.263	0.271	0.242	0.119	0.594	0.326	0.138	0.333
Ⅷ	0.227	0.342	0.188	0.429	0.875	0.617	0.313	0.417
Ⅸ	0.149	0.408	0.175	0.357	0.266	0.395	0.263	0.167
Ⅹ	0.649	0.456	0.788	0.810	0.367	0.823	0.663	0.500
Ⅺ	0.641	0.739	0.465	0.786	0.609	0.356	0.413	0.500

根据关联系数、灰色关联度计算公式计算出经过初值化处理的各项土壤肥力指标的关联系数、关联度及综合评价值,见表6。各指标性状灰色关联度值大小顺序为:土壤水解性氮含量(0.768)＞速效磷含量(0.743)＞速效钾含量(0.740)＞全氮含量(0.708)＞全磷含量(0.702)＞全钾含量(0.677)＞有机碳含量(0.638)＞土壤pH值(0.618),土壤水解性氮含量、速效磷含量、速效钾含量与参考数列指标的关联度比较大,说明土壤中速效养分的含量对干旱半干旱矿区排土场的土壤肥力影响更为重要。根据灰色关联度与灰色综合评价值结果,排土场不同植被类型土壤肥力的综合指数表现为:平台榆树群落(Ⅰ)＞平台草木樨群落(Ⅹ)＞平台油松群落(Ⅲ)＞平台紫花苜蓿群落(Ⅺ)＞平台小叶杨群落(Ⅳ)＞平台柠条群落(Ⅵ)＞平台沙蒿群落(Ⅷ)＞边坡柠条群落(Ⅶ)＞边坡侧柏群落(Ⅴ)＞边坡榆树群落(Ⅱ)＞边坡沙蒿群落(Ⅸ)。灰色关联度与综合评价值可反映干旱半干旱矿区排土场平台和边坡不同植被类型的土壤肥力状况,灰色关联度与综合评价值越大,反

表6 各植被类型土壤肥力指标关联系数、关联度及综合平均值

Table 6 Correlation coefficient, correlation degree, and comprehensive average value of soil fertility index of various vegetation types

编号 NO.	关联系数 Correlation coefficient	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	ri	G(k)	排序 Sort
Ⅰ	L_1(k)	1.000	0.853	0.839	0.731	0.450	0.904	1.000	1.000	0.847	0.845	1
Ⅱ	L_2(k)	0.603	0.671	0.578	0.628	0.671	0.622	0.500	0.446	0.590	0.594	10
Ⅲ	L_3(k)	0.740	0.785	0.767	0.690	0.870	0.824	0.833	0.785	0.787	0.785	3
Ⅳ	L_4(k)	0.659	0.712	1.000	0.690	0.636	0.880	0.714	0.569	0.733	0.736	5
Ⅴ	L_5(k)	0.655	0.693	0.589	0.671	0.600	0.600	0.500	0.482	0.599	0.603	9
Ⅵ	L_6(k)	0.637	0.858	0.654	0.653	0.891	0.622	0.625	0.597	0.692	0.695	6
Ⅶ	L_7(k)	0.620	0.656	0.631	0.653	0.631	0.595	0.625	0.629	0.630	0.630	8
Ⅷ	L_8(k)	0.586	0.707	0.560	0.754	1.000	0.799	0.556	0.514	0.684	0.688	7
Ⅸ	L_9(k)	0.552	0.743	0.555	0.721	0.485	0.656	0.417	0.492	0.578	0.585	11
Ⅹ	L_{10}(k)	0.871	0.772	0.880	1.000	0.531	1.000	0.625	0.736	0.802	0.809	2
Ⅺ	L_{11}(k)	0.864	1.000	0.672	0.980	0.684	0.637	0.625	0.562	0.753	0.761	4
	r_i	0.708	0.768	0.702	0.743	0.677	0.740	0.638	0.619			
	W_i	0.126	0.137	0.126	0.133	0.121	0.132	0.114	0.111			

映了这种植被类型的土壤肥力越高,从灰色关联度与灰色综合评价值结果可见,排土场平台的土壤肥力明显优于边坡,在11种植被配置类型中,平台榆树群落(Ⅰ)、平台草木樨群落(Ⅹ)、平台油松群落(Ⅲ)、平台紫花苜蓿群落(Ⅺ)对排土场平台土壤肥力的改善效果较明显,排土场边坡栽植柠条(Ⅶ)的土壤肥力状况相对较好。

3 讨论

露天煤矿排土场基质主要为采矿剥离物、采矿废弃物、灰渣等,岩土混排后覆土形成覆土坡,处于自然气候条件相对恶劣区域的矿区排土场,生态恢复如果依靠自然演替需要50～100年的时间[22]。对于这种极度退化的生态系统,需要在遵循自然规律的基础上,通过人类的作用,根据技术上适当、经济上可行、社会可接受的原则,使其恢复重建到结构合理、功能高效的状态[23]。植被重建是矿区废弃地生态恢复的关键,根据地域性、演替规律及生态位原理,筛选适宜植物和植被配置方式,以缩短植被演替周期,提高演替速率,使修复后的景观与周边相协调,最大限度保蓄水土,修复后的生态系统能够自我维护、自我维持、功能逐渐增强[24-25]。试验区选择的草原露天矿从2012年开始陆续进行排土场植被恢复建设,人工栽植了乔木、灌木、撒播种草,7～9年的恢复期内,人工植物群落结构和功能发生了相应的变化,矿区废弃地植被恢复过程中,植物群落朝着顶级群落演替,物种丰富度增加,多样性指数上升[26-28],同时,植被枯枝落叶和根系固氮作用使土壤有机质和N含量增加,土壤质量提高[29],植物根系的穿插作用有助于改善土壤质地,增加土壤孔隙度[30],植物群落的演替可以影响土壤,而土壤状况的变化也可导致植被类型改变。干旱半干旱草原矿区排土场采取人工栽植措施后,土壤中全氮、水解性氮含量均明显增加,其中,紫花苜蓿群落、草木樨群落的土壤中氮元素含量均处于较高的水平,研究结果也印证了在缺水和贫瘠的废弃地上,豆科植物是植被恢复的优良植物种类,适合作为复垦的先锋物种[31-32]。有研究表明,不同植被类型对土壤有机碳的积累贡献存在较大差异,一般是乔木比灌木和草地能产生更多的枯落物归还量,能将更多光合产物固定到根部,草本植物由于根系较浅,其生物量和枯落物归还量也相对较低[33-34]。本研究的11种人工植被类型中,油松、小叶杨、柠条群落土壤有机碳含量显著高于其他植被类型,乔灌木的土壤固碳能力更强,赵姣等[35]在黄土高原黑岱沟露天矿排土场复垦区检测不同植被类型碳循环相关功能基因丰度的结果表明,阔叶林土壤碳循环功能基因丰度最高,在干旱半干旱草原矿区排土场植被恢复中,如何在环境承载力范围内,选择适宜

植物种或植被配置类型,在植物群落的正向演替的同时,尽可能增加土壤固碳潜力,还需进一步研究探讨。矿区排土场人工植被建植对土壤氮元素的积累和固碳能力的增强都有积极的作用,但是与矿区所在锡林浩特市周边的天然草原相比[36],土壤中全氮、水解性氮和有机碳的含量仍处于较低的水平,土壤磷元素的含量也偏低,但土壤钾元素充足,自然恢复与人工植被之间钾元素变化差异不明显,土壤氮、磷等营养元素的不足会成为植被恢复的限制因子,对土壤碳氮的交互作用产生影响,植物群落演替减缓,甚至出现逆向演替,干旱半干旱草原矿区排土场等废弃地的生态恢复过程中,根据土壤养分的变化、植被与土壤的响应关系是否需要适时、适量的采取施肥等人工干预措施还需进一步加强研究。

采用数学方法对土壤质量、土壤肥力等进行综合评价可以更加直观的表现出土壤的总体情况[37],而依据评价的目的性和针对性,选用的评价方法和评价指标皆有不同[38]。李晋川等[39]通过主成分分析对平朔安太堡露天矿各植被恢复模式的土壤肥力进行综合评价,结果表明油松与刺槐混交林土壤肥力最高,人工植被恢复显著地改善了土壤生态环境;李叶鑫等[40]采用层次分析法评价了海州露天煤矿排土场不同植被类型的土壤质量,发现刺槐能够显著提高排土场复垦区土壤质量。本研究采用灰色关联度法以土壤全氮、水解性氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、土壤有机碳、pH值作为干旱半干旱草原矿区排土场土壤肥力水平的评价指标。从评价结果来看,排土场平台土壤肥力状况要明显优于排土场边坡,排土场平台栽植榆树、油松等抗逆性强的乔木以及豆科的草木樨、紫花苜蓿等植物对土壤肥力的改善效果较明显,排土场边坡栽植柠条土壤肥力状况相对较好。张泽宇等[41]研究了内蒙古乌拉山废弃矿山不同立地类型下植物群落特征,建议生境较差的立地类型如缓坡坡下软质土立地类型配置草本模式,其它立地条件较好区域配置灌草模式,针对不同立地类型水养条件可适当进行施肥灌溉,补充氮磷钾等生物复合肥可促进植被均匀分布快速建植。

4　结论

干旱半干旱区露天煤矿排土场11种人工植被类型的土壤中氮元素、有机碳均有明显增加,紫花苜蓿、草木樨群落的土壤全氮、水解性氮含量显著高于其它人工植被类型;油松、小叶杨、柠条群落的土壤有机碳含量显著高于其它植被类型;与自然恢复植被相比,人工植被土壤全磷、速效磷、全钾含量变化均不明显;人工植被建设对土壤速效钾含量的影响明显大于土壤全钾含量,平台榆树群落、柠条群落土壤速效钾含量显著高于其它植被类型。露天矿排土场采取植被恢复后,土壤中全氮、水解性氮、有机碳含量以及土壤中磷元素虽有增加,但仍处于较低的水平,土壤中钾元素充足,自然恢复与人工植被之间钾元素变化差异不明显,土壤氮、磷等营养元素的不足会成为植被恢复的主要限制因子。基于灰色关联度法的人工植被类型土壤养分评价结果表明,土壤中速效养分含量对干旱半干旱矿区排土场的土壤肥力影响更为重要;排土场平台的土壤肥力要明显优于边坡,11种植被配置类型中,排土场平台榆树群落、草木樨群落、油松群落、紫花苜蓿群落的土壤肥力较高,边坡栽植柠条土壤肥力状况相对较好。

参　考　文　献

[1]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.
Wei Z Y, Bai Z K. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5):486-490.

[2]吕刚,刘雅卓,李叶鑫,等.海州露天煤矿排土场植被恢复的土壤水文效应评价[J].生态环境学报,2017,26(1):67-72.
Lü G, Liu Y Z, Li Y X, et al. Evaluation of soil hydrology effects of the vegetation restortion in Haizhou open-pit coal mine dump[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(1): 67-72.

[3]马从安,才庆祥,王启瑞,等.露天煤矿排土场土壤质地和肥力的分析与评价[J].煤炭工程,2008,40(5):77-79.
Ma C A, Cai Q X, Wang Q R, et al. Analysis and assessment on quality and fertility of soil at surface mine dumping site[J]. Coal Engineering, 2008, 40(5):77-79.

[4]杨漫,朱月,徐长友,等.通辽露天煤矿排土场恢复初期土壤碳组分变化及影响因素[J].环境工程学报,2023,17(10):3400-3407.
Yang M, Zhu Y, Xu C Y, et al. Variation of soil carbon and its effect factors in Tongliao opencut coal mine dump during early restoration stages [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3400-3407.

[5]Le Houérou H N. 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.

[6]董倩, 李素清. 安太堡露天煤矿区复垦地不同植被下草本植物群落生态关系研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(4):95-100.
Dong Q, Li S Q. The ecological relationships of herbaceous plant communities under different plantations on the reclaimed dumps in Antaibao opencast coal mining area [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(4):95-100.

[7]珊丹, 邢恩德, 荣浩,等. 草原矿区排土场不同植被配置类型生态恢复[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2):336-342.
Shan D, Xing E D, Rong H, et al. Ecological restoration of different vegetation collocations of coal mine dump in typical steppe [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(2):336-342.

[8]周国驰,杨卓,辛建宝,等.排土场复垦初期种群生态位与多样性动态分析[J].矿业安全与环保, 2023,50(4):149-154.
Zhou G C, Yang Z, Xin J B, et al. Dynamic analysis of niche and diversity of populations in the early stage of dump reclamation [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023,50(4):149-154.

[9]Huang L, Zhang P, Hu Y G, et al. Vegetation succession soil infiltration characteristics under different aged refuse dumps at the Heidaigou opencast coal mine [J]. Global Ecology and Conservation, 2015, 4:255-263.

[10]李青丰, 曹江营, 张树礼, 等.准格尔煤田露天矿植被恢复的研究——排土场植被自然恢复的观察研究[J]. 中国草地, 1997(2):23-25,66.
Li Q F, Cao J Y, Zhang S L, et al. Vegetation restoration in Zungeer open-cut coal mine——natural recovery in soil refusal site[J]. Chinese Journal of Grassland, 1997(2):23-25,66.

[11]张绍良, 米家鑫, 侯湖平, 等. 矿山生态恢复研究进展——基于连续三届的世界生态恢复大会报告[J]. 生态学报, 2018, 38(15):5611-5619.
Zhang S L, Mi J X, Hou H P, et al. Research progress on mining ecological restoration: based on the report of three consecutive world ecological restoration conferences [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15):5611-5619.

[12]Carter C T, Ungar I A. Aboveground vegetation, seed bank and soil analysis of a 31-year-old forest restoration on coal mine spoil in southeastern Ohio [J]. The American Midland Naturalist, 2002, 147(1):44-59.

[13]Li J J, Zhou X M, Yan J X, et al. Effects of regenerating vegetation on soil enzyme activity and microbial structure in reclaimed soils on a surface coal mine site [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 87:56-62.

[14]翁伯琦, 郑祥洲, 丁洪,等. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3610-3616.
Weng B Q, Zheng X Z, Ding H, et al. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3610-3616.

[15]Asensio V, Covelo E F, Kandeler E. Soil management of copper mine tailing soils—Sludge amendment and tree vegetation could improve biological soil quality[J]. Science of the Total Environment, 2013, 456-457:82-90.

[16]Zhao Y, Zhang P, Hu Y G, et al. Effects of re-vegetation on herbaceous species composition and biological soil crusts development in a coal mine dumping site [J]. Environmental Management, 2016, 57(2):298-307.

[17]张兆彤, 王金满, 张佳瑞. 矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J]. 土壤, 2018, 50(2):239-247.
Zhang Z T, Wang J M, Zhang J R. Interaction between reclaimed soil and vegetation in mining area: a review [J]. Soils, 2018, 50(2):239-247.

[18]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:42-109.
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:42-109.

[19]于昊辰, 牟守国, 卞正富, 等. 北方草原露天煤矿区植被退化因素分析[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1):1-8.
Yu H C, Mu S G, Bian Z F, et al. Analysis for vegetation degradation factors in opencast coal mines in northern grassland area, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(1):1-8.

[20]王安宁, 刘歌畅, 徐学华, 等. 铁尾矿废弃地不同复垦年限土壤质量评价[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(1):104-113.
Wang A N, Liu G C, Xu X H, et al. Evaluation of soil quality in iron tailing ore wastelands of various reclamation periods[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(1):104-113.

[21]珊丹, 何京丽, 邢恩德,等. 微生物菌肥对草原矿区排土场土壤微生物与土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):81-85.
Shan D, He J L, Xing E D, et al. Effects of microbial fertilizer on microorganism and soil enzyme activity in coal mine dump of typical steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):81-85.

[22]王军, 李红涛, 郭义强,等. 煤矿复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(2):126-136.
Wang J, Li H T, Guo Y Q, et al. Research progress and perspectives on biodiversity conservation and restoration of coal mine reclamation area[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(2):126-136.

[23]郝蓉, 白中科, 赵景逵,等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003(8):1470-1476.
Hao R, Bai Z K, Zhao J K, et al. Vegetation dynamics during plant rehabilition in degraded mined land of large opencast coal mine within loess area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003(8): 1470-1476.

[24]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 Q X, Zhao B Q, Guo D G. A review on vegetation restoration of opencast coal mine areas in Northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(4):1152-1157.

[25]Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Spatial heterogeneity of soil properties and vegetation-soil relationships following vegetation restoration of mobile dunes in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. Plant and Soil, 2009, 318:153-167.

[26]韩煜, 赵伟, 张淇翔, 等.不同植被恢复模式下矿山废弃地的恢复效果研究[J].水土保持研究, 2018, 25(1):120-125.
Han Y, Zhao W, Zhang Q X, et al. Effects of different vegetation patterns on ecological restoration in mining wasteland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(1):120-125.

[27]Bauman J M, Cochran C, Chapman J, et al. Plant community development following restoration treatments on a legacy reclaimed mine site [J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 521-528.

[28]Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. CATENA, 2015, 128: 44-53.

[29]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 J M, Guo L L, Bai Z K, et al. Succession law of reclaimed soil and vegetation on opencast coal mine dump of loess area [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21):223-232.

[30]Chen Y L, Zhang Z S, Huang L, et al. Co-variation of fine-root distribution with vegetation and soil properties along a revegetation chronosequence in a desert area in northwestern China[J]. CATENA, 2017, 151:16-25.

[31]张志权, 束文圣, 廖文波, 等.豆科植物与矿业废弃地植被恢复[J].生态学杂志, 2002, 21(2):47-52.
Zhang Z Q, Shu W S, Liao W B,et al. Role of legume species in revegetation of mined wastelands [J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(2):47-52.

[32]李晋川, 白中科, 柴书杰, 等.平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J].科技导报, 2009,27(17):30-34.
Li J C, Bai Z K, Chai S J,et al. Study on technology of land reclamation and ecological rehabilitation of waste land in pingshuo surface mine [J]. Science & Technology Review, 2009,27(17):30-34.

[33]Chen L D, Gong J, Fu B J, et al. Effect of land use conversion on soil organic carbon sequestration in the loess hilly area, Loess Plateau of China[J]. Ecological Research, 2007, 22(4): 641-648.

[34]李裕元, 邵明安, 郑纪勇,等.黄土高原北部草地的恢复与重建对土壤有机碳的影响[J].生态学报, 2007, 27(6):2279-2287.
Li Y Y, Shao M A, Zheng J Y, et al. Impact of grassland recovery and reconstruction on soil organic carbon in the northern Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(6):2279-2287.

[35]赵姣, 马静, 朱燕峰,等.植被类型对黄土高原露采矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响[J].环境科学, 2023, 44(6): 3386-3395.
Zhao J, Ma J, Zhu Y F, et al. Effects of vegetation types on carbon cycle functional genes in reclaimed soil from open pit mines in the loess plateau[J]. Environmental Science, 2023, 44(6):3386-3395..

[36]贺俊杰.锡林郭勒草原土壤主要营养成分的空间分布[J].草业科学, 2013, 30(11):1710-1717.
He J J. Spatial distribution of major nutrients in Xilin Gol Grassland [J]. Pratacultural Science, 2013, 30(11): 1710-1717.

[37]刘世梁, 傅伯杰, 刘国华,等.我国土壤质量及其评价研究的进展[J].土壤通报, 2006, 37(1):137-143.
Liu S L, Fu B J, Liu G H, et al. Research review of quantitative evaluation of soil quality in China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1):137-143.

[38]李颖慧, 姜小三, 王振华, 等.基于土壤肥力和重金属污染风险的农用地土壤质量综合评价研究—以山东省博兴县为例[J].土壤通报, 2021, 52(5):1052-1062.
Li Y H, Jiang X S, Wang Z H, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of agricultural land based on soil fertility and heavy metal pollution risk: a case study of Boxing County, Shandong Province [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(5):1052-1062.

[39]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 J C, Wang X, Yue J Y, et al. Evaluation on soil ecologic fertility during vegetation succession in antaibao open pit [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(1): 66-71,79.

[40]李叶鑫, 吕刚, 王道涵, 等.露天煤矿排土场复垦区不同植被类型土壤质量评价[J].生态环境学报, 2019, 28(4):850-856.
Li Y X, Lv G, Wang D H, et al. Soil quality evaluation with different vegetation types of reclamation area in A surface coal mine dump[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(4):850-856.

[41]张泽宇, 吴晓静, 梁一鹏, 等.乌拉山废弃矿山生态恢复的近自然植被空间配置模式[J].干旱区研究, 2023, 40(7):1164-1171.
Zhang Z Y, Wu X J, Liang Y P, et al. Spatial allocation pattern of near-natural vegetation for ecological restoration of abandoned mines in the Wula Mountains [J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7):1164-1171.

Effects and evaluation of vegetation restoration on soil nutrients in abandoned coalmining area

Shan Dan[1,2], Cui Wei[1,2], Xing Ende[1,2], Yang Lingyu[3]

(*1.Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2.Institute of Water Resources for Pastoral Area Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China; 3.Ordos National Space Planning Institute, Ordos 017010, China*)

Abstract: [Objective] The analysis targeted plant community types suitable for the unique habitat of arid and semi-arid mining area dumps. The study aimed to provide scientific basis for optimizing vegetation restoration models and implementing vegetation construction within open-pit coal mines. [Methods] The research focused on a dump within a large-scale prairie open-pit coal mine, investigating changes in main soil nutrients. Soil fertility of artificial vegetation types was analyzed and evaluated using grey relational degree method. [Results] The soil pH value of each test plot was >8.5, suggesting an alkaline nature. No significant difference was observed between CK and artificial vegetation ($P>0.05$). Artificial vegetation significantly increased soil nitrogen (N) and organic carbon (OC) content. Specifically, areas with *Medicago sativa* and *Melilotus suaveolens* showed significantly higher total nitrogen (TN) and available nitrogen (AN) content compared to other vegetated areas. Moreover, soil organic carbon (OC) content under *Pinus tabulaeformis*, *Populus simonii*, and *Caragana Korshinskii* communities was significantly higher than other vegetation types. Compared to natural restoration vegetation, artificial vegetation exhibited insignificant impact on soil total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) content, and total potassium (TK) content. Using grey correlation method, soil fertility status under varying artificial vegetation types were analyzed. The results indicated significantly higher soil fertility on the dump platform than the slope, with stronger correlation between soil available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), and reference values. [Conclusion] Post-vegetation restoration in open-pit dumps revealed sufficient soil potassium; however, nitrogen, phosphorus, and other nutrients deficiencies emerged as primary limiting factor for restoration. Available nutrient content emerged as a better indicator for soil fertility in prairie mining area dumps. Among the 11 vegetation configurations, soil fertility was relatively higher on platform areas hosting *Ulmus pumila*, *Melilotus suaveolens*, *Pinus tabulaeformis* and *Medicago sativa* communities, while the slope exhibited higher fertility under the *Caragana Korshinskii* community.

Keywords: Open-pit dump, Soil nutrient, Grey correlation degree, Comprehensive evaluation

(编辑:韩志强)