doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.01.005
引用格式：闫瑞兵，苏佩东. 高海拔寒旱露天矿区生态恢复限制性因素分析[J]. 矿冶，2026，35(1)：35-41.
YAN Ruibing, SU Peidong. Analysis of limiting factors for ecological restoration in high-altitude arid open-pit mining areas[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(1): 35-41.

高海拔寒旱露天矿区生态恢复限制性因素分析

闫瑞兵[1,2] 苏佩东[3]
（1. 国家能源集团新疆能源化工有限公司，乌鲁木齐 830027；
2. 新疆大学化工学院，乌鲁木齐 830046；
3. 中国矿业大学（北京）化学与环境工程学院，北京 100083）

摘 要：露天煤矿开采常引发一系列的生态环境问题。本文以新疆典型高海拔寒旱矿区的黑山露天煤矿为例，详细分析了露天煤矿开采对植被生态的影响，并探讨了生态修复的限制性因子，以期为人工生态恢复提供前提和基础。通过综合运用数据收集、室内测试和遥感影像等多种手段，分析了矿区植被绿度的演变特征，并提出相应的生态恢复限制性因素。研究结果表明：黑山矿区植被覆盖度整体呈现显著增加趋势，但随着露天采坑和排土场面积的增加，裸地面积从开采前的9.6 km^2增加至目前的14.65 km^2，主要表现为低植被覆盖区向裸土区的转变，进一步增加了植被恢复的挑战。黑山露天矿具有高海拔、降水少、风速大、温度低的特点，其外界环境明显劣于东部草原露天矿区和晋陕蒙等地露天矿区。排土场表层覆土的碱解氮、全磷、有效磷、有机质等含量处于低至极低水平，pH值为8.77~8.8，呈碱性，不利于植被的生长和恢复。矿坑涌水总体呈现出夏季水量大、冬季水量小的特点，年平均涌水量为68万m^3，在年产量为1 000万t时，为了满足生产、生活和生态用水，仍缺少水源54.06万m^3。通过对高海拔寒旱地区露天煤矿生态环境现状的全面分析，揭示了影响植被恢复的关键因素，为黑山露天煤矿的生态恢复提供了科学依据，也为其他类似矿区的生态修复提供了参考。

关键词：寒旱区；露天煤矿；植被绿度；生态恢复；限制性因素
中图分类号：TD88 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-7854（2026）01-0035-07

Analysis of limiting factors for ecological restoration in high-altitude arid open-pit mining areas

YAN Ruibing[1,2] SU Peidong[3]
(1. CHN Energy Group Xinjiang Energy Chemical Co. Ltd., Urumqi 830027, China;
2. School of Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
3. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Open-pit coal mining often triggers a series of ecological and environmental issues. Taking the Heishan open-pit coal mine, a typical high-altitude cold-arid mining area in Xinjiang, as an example, this paper provides a detailed analysis of the impact of open-pit coal mining on vegetation ecology and explores the limiting factors for ecological restoration, aiming to provide a foundation and basis for artificial ecological recovery. By comprehensively utilizing methods such as data collection, laboratory testing, and remote sensing imagery, the evolution characteristics of vegetation greenness in the mining area were analyzed, and corresponding limiting factors for ecological restoration were proposed. The results show that the vegetation coverage in the Heishan mining area exhibited a significant overall increasing trend. However, with the expansion of the open-pit mining area and dump sites, the bare land area increased from 9.6 km^2 before mining to 14.65 km^2 at present, primarily due

收稿日期：2020-11-04
基金项目：煤矿开采水资源保护与利用全国重点实验室基金资助项目(NICE_RD_2023_139号)
第一作者：闫瑞兵，硕士研究生，高级工程师，研究方向为矿山生态修复。E-mail：20028672@ceic.com

to the transformation of low vegetation coverage areas into bare soil zones, which further intensified the challenges for vegetation restoration. The Heishan open-pit mine is characterized by high altitude, low precipitation, strong wind, and low temperature, with environmental conditions markedly inferior to those of open-pit mines in eastern grassland regions and areas such as Shanxi, Shaanxi, and Inner Mongolia. The surface soil of the dump sites exhibited low to extremely low levels of alkali-hydrolyzable nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, organic matter, and other nutrients, with a pH value ranging from 8.77 to 8.8, indicating alkalinity unfavorable for vegetation growth and restoration. Mine water inflow generally showed higher volumes in summer and lower volumes in winter, with an annual average inflow of 680 000 m³. At an annual production capacity of 10 million tons, there remains a water shortage of 540 600 m³ to meet production, domestic, and ecological water demands. Through a comprehensive analysis of the ecological and environmental conditions of open-pit coal mines in high-altitude cold-arid regions, this study reveals key factors affecting vegetation restoration, providing a scientific basis for the ecological restoration of the Heishan open-pit coal mine and offering references for ecological rehabilitation in other similar mining areas.

Key words: cold and arid area; open-pit coal mine; vegetation greenness; ecological restoration; limiting factors

我国20余座千万吨级大型露天煤矿已经建成，有效保障了我国的能源安全[1]。但是，由于我国大型露天煤矿主要分布在生态环境相对脆弱的内蒙古、山西、新疆等区域，相比井工煤矿开发，露天煤矿开发对煤层上覆地层的扰动更大，诱发的生态环境问题更为强烈[2-4]，其中以土地损伤[5]、植被退化[6]、自然景观[7]和地下水环境破坏[8]最为显著。露天煤矿的生态环境问题及其综合治理得到广大学者的关注[9-12]。

在东部草原露天矿区，范军富等[5]以白音华三号露天煤矿为例，提出通过合理规划采、排计划，达到露天绿色开采的原则；杨超元等[11]以宝日希勒一号露天矿为研究区分析了露天采场周边植被覆盖度空间变化，认为归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）平均值随着距采场距离总体呈现增大趋势，并逐渐达到稳定状态；宋子岭等[12]以胜利一号露天煤矿为例，提出了露天煤矿绿色度评价评价方法，认为该露天矿综合绿色度指标达到了“良”的标准，得分是相对较高；李全生[2]在大量研究的基础上，提出了东部草原露天矿区的生态修复技术，并取得了较好现场的治理效果。在晋陕蒙接壤露天矿区，刘鸿涛等[13]以永利露天矿为例探究了风化煤和砒砂岩添加对排土场土壤团聚体特征的影响，认为在排土场沙黄土中添加风化煤与砒砂岩可以改善土壤结构，提高土壤有机质含量；吴奇凡等[14]分析了排土场不同质地土壤水分运动规律，对指导露天矿区排土场新土体构筑提供了参考；王改玲等[15]以安太堡露天矿为例对排土场不同复垦年限的苜蓿地土壤养分进行分析，认为随着复垦年限的增加，土壤中碳、氮含量增加明显。总体来说，在露天煤矿生态修复领域的研究区域主要局限在我国的东部草原露天矿区和晋陕蒙接壤露天矿区，并形成了系统的生态修复技术体系。

新疆露天煤炭产量仅次于内蒙古，位居全国第二。以往针对新疆露天煤矿生态环境的研究主要集中在新疆的干旱荒漠区，在高海拔寒旱露天煤矿区基本没有开展相关研究，相关研究内容主要针对露天矿区的生态环境质量评价，在露天煤矿生态环境综合治理方面鲜有涉及[16-18]。本文以位于新疆高海拔寒旱矿区的黑山露天煤矿为例，采用数据收集与室内测试、野外调查和遥感解译相结合的方法，探讨黑山露天煤矿植被绿度演变特征，并确定该矿生态恢复的限制性因素，以期为我国高海拔寒旱露天煤矿区的生态精准预防与治理提供理论依据。

1 研究区概况

黑山露天煤矿位于新疆吐鲁番托克逊县西北约90 km，北距乌鲁木齐市约65 km，地处天山中段以北的山间谷地，地貌类型为天山高山盆地，地势北高南低、西高东低，区内海拔标高一般为2 400~2 900 m，最高海拔标高为3 023 m。受地形垂直分带的制约和影响，矿区气候条件与托克逊县有较大差异。矿区极端最高气温48 ℃，最低气温−37.5 ℃，年平均降水量为201.0 mm（托克逊县年平均降水量为16.4 mm），降水多集中于7~9月，主要生长有针茅、羊茅、披碱草、苔草等植被类型。矿区林草覆盖率为30%矿区含煤地层为侏罗系中统西山窑组，共含煤层14层，可

采煤层6层，全矿平均剥采比为8.94 $m^3 \cdot t^{-1}$，现状开采工艺为单斗—卡车间断开采。

2 研究方法

由于Landsat系列卫星专题制图仪（Thematic Mapper，TM）与陆地成像仪（Operational Land Imager，OLI）遥感影像数据具有定位精度高、影响信息丰富的特点[19]。为了分析黑山露天煤矿植被绿度变化情况，选取了2000—2011年的TM数据和2013—2020年的OLI数据，合计18景。选择Landsat数据遵循以下2个原则：一是尽可能地减少气候及其它因素的影响，每年选取植被生长季7月25日至8月15日的数据；二是影像对应研究区域的位置应无云或者尽量少云。由于绿色植被在可见光红光（R）波段和近红外（NIR）波段上的光谱反射特性完全不同，因此经常采用红光波段的反射值与近红外波段的反射值计算植被指数（NDVI），并以此反映植被的绿度。为详细了解排土场表层覆土的养分特征及矿区周边水体的水质特征，分别对排土场表层覆土、矿坑水、处理后生活污水及水源地水进行取样，并在实验室内开展测试。其中土样的监测指标包括：总磷、有效磷、全氮、全钾、速效钾、有机质等指标，其中总磷和有效磷采用可见分光光度计测定[20]，全氮采用自动凯氏定氮仪测定[21]，全钾和速效钾采用原子吸收分光光度计测定[22]，有机质采用重铬酸钾容量法[23]测定；水样的检测指标包括：阳离子（K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}）、阴离子（OH^-、CO_3^{2-}、HCO_3^-、SO_4^{2-}、Cl^-、F^-），常规阴阳离子利用ICS1500高效型离子色谱仪[24]检测；土壤和水样pH值的检测采用离子电极法[25]。

3 矿区植被绿度演变特征

利用获取的矿区拐点数据，形成矿区的矢量边界，并利用矢量边界裁剪下载的植被数据，最终形成了矿区的年际NDVI时序数据，以此表征矿区尺度植被覆盖度年际变化趋势，结果见图1。从图1可以看出，黑山矿区植被覆盖度增加趋势，但增加趋势不显著。

利用像元二分模型采用NDVI数据计算植被覆盖度，典型年份矿区植被覆盖度如图2所示，将计算得到的植被覆盖度f_c分为5级，即裸地（f_c<10%）、低覆盖度区（10%≤f_c<30%）、中低覆盖度区（30%≤f_c<45%）、中覆盖度区（45%≤f_c<60%）、高覆盖度区（f_c≥60%），典型年份矿区植被覆盖度类型所占面积如表1所示。

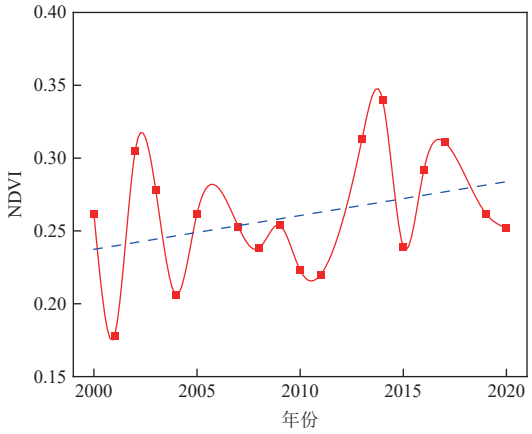


图1 黑山矿区植被NDVI整体变化趋势

Fig. 1 Overall trend of NDVI in the Heishan mining area

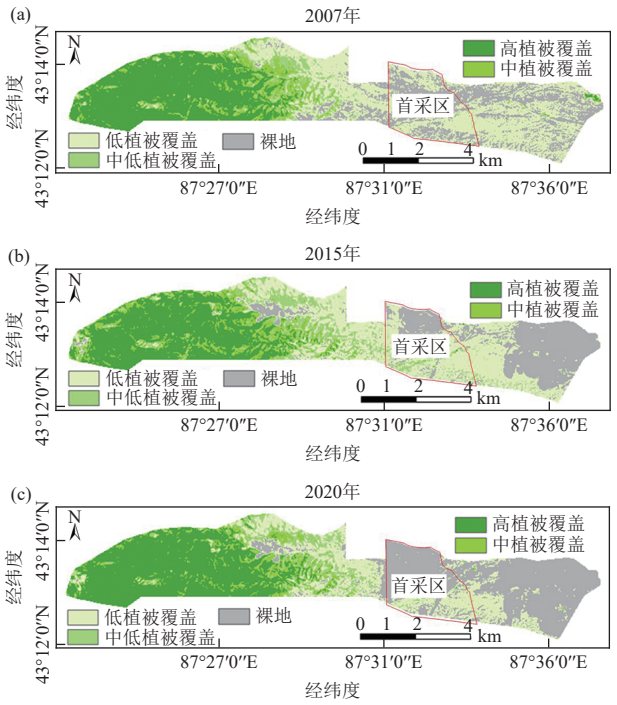


图2 典型年份矿区植被覆盖度特征

Fig. 2 Characteristics of vegetation coverage of different years in Heishan mining area

表1 典型年份矿区不同植被覆盖度类型所占面积

Table 1 Areas of different vegetation coverage types /km²

项目	2007年	2013年	2015年	2017年	2019年	2020年
裸地	9.60	3.92	9.92	9.55	12.81	14.65
低覆盖	14.30	12.47	13.35	10.80	9.98	8.48
中低覆盖	2.95	6.47	4.41	4.16	3.82	3.24
中覆盖	3.01	3.32	3.53	2.24	2.68	2.71
高覆盖	13.63	17.31	12.29	16.75	14.20	14.41

由图2和表1可以看出，黑山煤矿采前（2007年）裸地面积为9.6 km^2，随着露天采坑和排土场面积的增加，2020年裸地面积增加至14.65 km^2，表现为低植被覆

盖区向裸土区的转换，中低覆盖度区、中覆盖度区和高覆盖度区面积基本保持不变。

一元线性回归法常用于植被覆盖度变化特征分析，该方法可以在每个像元的基础上模拟变化趋势，即采用最小二乘法逐像元拟合得到植被覆盖度变化趋势，其计算公式见式(1)：

$$K=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times f_{ci}-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)\left(\sum_{i=1}^{n}f_{ci}\right)}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^{2}-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^{2}} \tag{1}$$

式中，K为植被覆盖度变化趋势线斜率；n为监测时间。K>0表明植被覆盖度呈增加趋势，反之植被覆盖度呈降低趋势。

一元线性回归法的趋势检验采用t检验法，显著性检验的结果仅代表趋势性变化可置信程度的高低，与变化快慢无关。统计量计算方法见式(2)和式(3)：

$$t=\frac{\hat{b}}{\hat{\sigma}}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2}\sim t_{1-\alpha}\left(n-2\right) \tag{2}$$

$$\hat{\sigma}=\sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(y_i-\hat{y}_i\right)^2} \tag{3}$$

式中，$\hat{b}$代表一元线性回归法得到的系数K的点估计，i=1，2，3，……，18为年序号，n为监测时长18年。y_i为第i年植被覆盖度的实际值，$\hat{y}_i$为第i年植被覆盖度的回归值，x_i为时间自变量，α表示显著性水平。

根据t检验结果将植被覆盖度变化趋势分成五个等级：极显著减少(K<0，α<0.001)、显著减少(K<0，0.001<α<0.05)、变化不显著(α>0.05)、显著增加(K>0，0.001<α<0.05)、极显著增加(K>0，α<0.001)，结果见如图3所示。从图3可以看出，变化不显著区域占比最大，达到25.2 km^2。其他变化类型按照面积从小到大排序为：显著增加(13.0 km^2)、显著减少(3.6 km^2)、极显著减少(1.2 km^2)、极显著增加(0.6 km^2)。

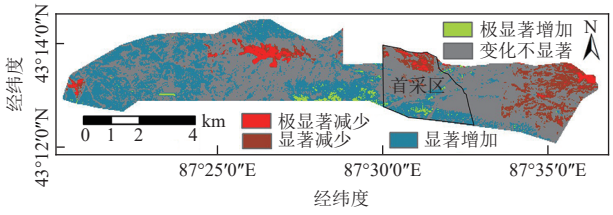


图3 矿区植被覆盖度变化趋势

Fig. 3 Variation trend of vegetation coverage in the mining area

4 矿区植被恢复限制性因素分析

4.1 环境因素

为分析外界环境要素对黑山露天煤矿植被恢复的限制作用，选择目前生态修复研究较多的宝日希勒矿和安太堡矿作为对比对象，分别代表东部草原露天矿区和晋陕蒙接壤露天矿区，对比分析其降水量、最低温度、海拔和最大风速的不同特点，结果如图4所示。从图4可以看出，黑山煤矿降水量为200 mm左右，明显小于宝日希勒矿和安太堡矿；同时其平均海拔为2 650 m，最大风速高大40 m·s^{-1}，该两项指标明显大于宝日希勒矿和安太堡矿；最低温度−37.5 ℃，介于宝日希勒矿和安太堡矿之间。从以上分析可以判断，黑山露天矿海拔高、降水少、风速大、且温度低的特点，具有典型的高海拔、寒、旱等特点，其外界因素明显差于东部草原露天矿区和晋陕蒙接壤露天矿区，在该类区域开展生态修复选择植被类型时需要重点关注外界环境因素的限制作用。

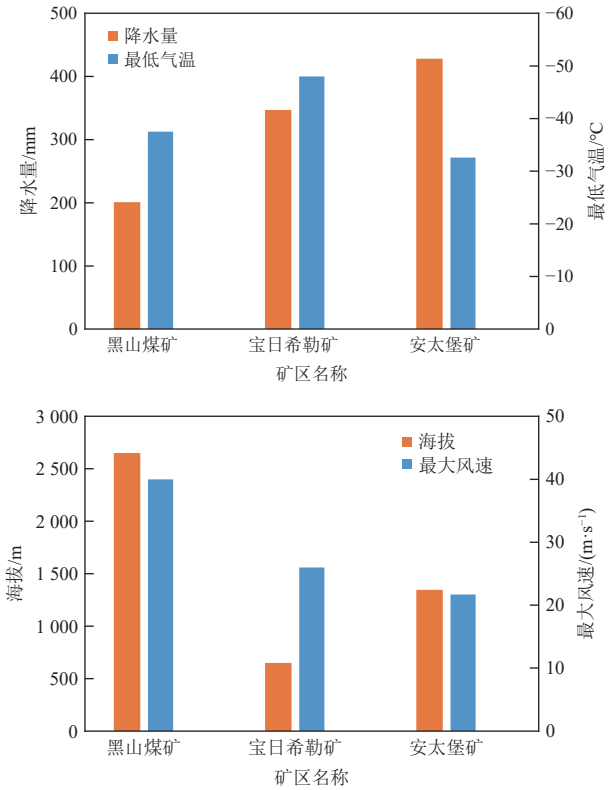


图4 矿区环境要素对比图

Fig. 4 Comparison of environmental factors in the mining area

4.2 土壤因素

如表2所示，本研究对所在样地进行了基本养分含量的调查，经过取样分析，不同地点所取样品各养

表2 矿区排土场表层覆土主要养分含量

Table 2 Main nutrient contents of the topsoil cover at the dump site in the mining area

主要养分	取样点					
	1	2	3	4	5	标准差
全氮/(g·kg^{-1})	2.62	2.4	2.53	2.48	2.52	0.08
碱解氮/(mg·kg^{-1})	5.15	5.475	5.09	4.76	5.03	0.26
全磷/(g·kg^{-1})	0.348	0.345	0.35	0.33	0.341	0.01
速效磷/(mg·kg^{-1})	3.28	3.04	2.89	3.01	3.09	0.14
全钾/(g·kg^{-1})	19.2	19.47	19.3	18.9	19.1	0.21
速效钾/(mg·kg^{-1})	168.25	170	176	171	173	2.98
有机质/(g·kg^{-1})	6.51	6.52	6.31	6.68	6.17	0.20
pH值	8.8	8.8	8.77	8.79	8.8	0.01

分含量间均无显著差异(P<0.05)，结合全国第二次土壤普查养分分级标准(表3)，可知排土场表层覆土氮含量为2.4~2.62 g·kg^{-1}，均大于2 g·kg^{-1}，在土壤全氮含量中属于一级；碱解氮含量为4.76~5.475 mg·kg^{-1}，均小于30 mg·kg^{-1}，在土壤碱解氮含量中属于六级；全磷含量为0.33~0.35 g·kg^{-1}，在0.2~0.4 g·kg^{-1}，属于五级；有效磷含量为2.89~3.28 mg·kg^{-1}，均小于5 m·kg^{-1}，属于五级；全钾含量为18.9~19.47 g·kg^{-1}，在15~20 g·kg^{-1}，属于三级；速效钾含量为168.25~176 mg·kg^{-1}，均在150~200 mg·kg^{-1}，属于三级；有机质含量为6.17~6.68 g·kg^{-1}，在6~10 g·kg^{-1}，属于五级；pH值范围为8.77~8.8，属于碱性土质。综上所述，本研究认为土壤中有机质含量低，土质为碱性土，土质中有效磷含量低等因素共同导致排土场土壤的贫瘠，一定程度上限制了植物的生长，在土壤重构中需要改善土壤有机质，同时外施磷肥等措施来促矿区生态修复。

表3 全国第二次土壤普查养分分级标准

Table 3 Standard of nutrient classification for the second national soil survey

级别	全氮/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})
一级(很高)	>2.0	>150	>1.0	>40	>25	>200	>40
二级(高)	1.5~2.0	120~150	0.8~1.0	20~40	20~25	150~200	30~40
三级(中上)	1.0~1.5	90~120	0.6~0.8	10~20	15~20	100~150	20~30
四级(中下)	0.75~1.0	60~90	0.4~0.6	5~10	10~15	50~100	10~20
五级(低)	0.50~0.75	30~60	0.2~0.4	3~5	5~10	30~50	6~10
六级(很低)	<0.5	<30	<0.2	<3	<5	<30	<6

4.3 水资源因素

如按照规划煤炭产能1 000万t·a^{-1}计算，研究区年用量和取水量的水量均衡分析如表4所示。由表4可知，研究区总用量为161.47万m^3，其中生产用水占比达67.8%，其次为用于1 200亩排土场植被修复的生态用水，占比为20%。图5为该矿2014—2019年不同月份矿坑排水量，整体呈现出夏季水量大、冬季水量小的特点，在年产量为500万t时，年平均涌水量为68万m^3；在此基础上，采用比拟法估算年产量为1 000万t时，该矿年涌水量为91.3万m^3，但为了满足生产、生活和生态用水，该矿仍缺少54.06万m^3，需要从外部水源地外调水源，从以上分析可以看出，水资源量匮乏也是限制该矿生态修复关键因素。

表4 黑山露天煤矿水均衡分析

Table 4 Water balance analysis in Heishan mining area /10^4 m^3

年用水量				年取水量			
生产用水	生活用水	生态用水	合计	矿坑涌水	外部调水	复用水	合计
109.53	19.43	32.50	161.47	91.3	54.06	16.11	161.47

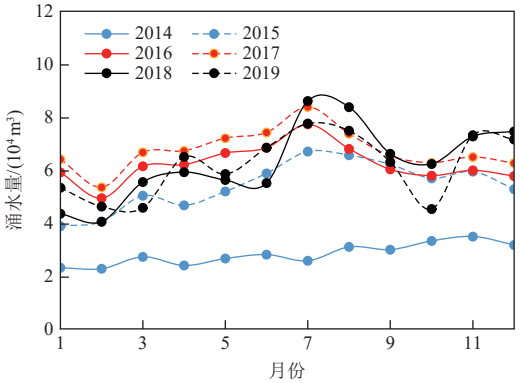


图5 矿井涌水量动态变化特征

Fig. 5 Dynamic variation characteristics of mine water inflow

5 结论

1）黑山矿区植被覆盖度整体呈著出增加趋势，其中变化不显著区域25.2 km^2，显著增加13.0 km^2、显著减少3.6 km^2、极显著减少1.2 km^2、极显著增加0.6 km^2，开采前（2007年）裸地面积为9.6 km^2，随着露天采坑和排土场面积的增加，2020年裸地面积增加至14.65 km^2，主要表现为低植被覆盖区向裸土区的转换，中低覆盖度区、中覆盖度区和高覆盖度区面积基本保持不变。

2）黑山露天矿海拔高、降水少、风速大、温度低的特点，具有典型的高海拔、寒、旱等特征，其外界环境因素明显差于东部草原露天矿区和晋陕蒙接壤露天矿区；排土场表层覆土碱解氮含量为4.760~5.475 $mg\cdot kg^{-1}$、全磷含量为0.33~0.35 $g\cdot kg^{-1}$、有效磷含量为2.89~3.28 $mg\cdot kg^{-1}$、有机质含量为6.17~6.68$g\cdot kg^{-1}$，属于低-很低级别，pH值为8.77~8.8，属于碱性土。

3）矿坑涌水整体呈现出夏季水量大、冬季水量小的特点，年平均涌水量为68万m^3，在规划年产量为1 000万t时，为了满足生产、生活和生态用水，该矿需要每年从外部水源地外调水源54.06万m^3。

参考文献

[1] 李浩荡，佘长超，周永利，等. 我国露天煤矿开采技术综述及展望[J]. 煤炭科学技术，2019, 47(10): 24-35.
LI H D, SHE C C, ZHOU Y L, et al. Framework and structure design of system construction for intelligent open-pit mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 24-35.

[2] 李全生. 东部草原区大型煤电基地开发的生态影响与修复技术[J]. 煤炭学报，2019, 44(12): 3625-3635.
LI Q S. Progress of ecological restoration and comprehensive remediation technology in large-scale coal-fired power base in the eastern grassland area of China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3625-3635.

[3] 孟梦. 矿山环境中的复杂地质生态修复效果数值模拟[J]. 矿冶，2022, 31(6): 1-8.
MENG M. Numerical simulation of complex geological ecological restoration effect in mine environment[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(6): 1-8.

[4] 吕岑，郑志乐，李梦茹，等. 鄂尔多斯盆地某矿区储层特征及潜在损害因素评价[J]. 矿冶，2019, 28(3): 22-26.
LYU C, ZHENG Z L, LI M R, et al. Evaluation of reservoir characteristics and potential damage factors in a mining area of Ordos Basin[J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(3): 22-26.

[5] 范军富，胡铁男. 绿色开采条件下露天煤矿土地动态演化规律研究[J]. 安全与环境学报，2018, 18(2): 814-819.
FAN J F, HU T N. On the land dynamic evolution tendency of the open-pit coal mine based on the green mining condition[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(2): 814-819.

[6] 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.

[7] 雷少刚，张周爱，陈航，等. 草原煤电基地景观生态恢复技术策略[J]. 煤炭学报，2019, 44(12): 3662-3669.
LEI S G, ZHANG Z A, CHEN H, et al. Landscape ecology restoration strategies for the coal-electricity base in steppe of China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3662-3669.

[8] 赵春虎，王强民，王皓，等. 东部草原区露天煤矿开采对地下水系统影响与帷幕保护分析[J]. 煤炭学报，2019, 44(12): 3685-3692.
ZHAO C H, WANG Q M, WANG H, et al. Analysis of influence of open-pit coal mining on groundwater system and curtain wall protection in grassland area of northeastern China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3685-3692.

[9] 张明天，侯克鹏，王亚，等. 晋宁磷矿排土场生态修复与景观再造研究[J]. 矿冶，2021, 30(5): 11-17.
ZHANG M T, HOU K P, WANG Y, et al. Study on ecological restoration and landscape reconstruction of Jinning phosphate mine dump[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(5): 11-17.

[10] 王瑀辉，吴萌，陈雁南，等. 矿用复合型生态友好抑尘剂的研发及应用[J]. 矿冶，2020, 29(4): 123-127.
WANG Y H, WU M, CHEN Y N, et al. Research and application of mine eco friendly composite dust suppressant[J]. Mining and Metallurgy, 2020, 29(4): 123-127.

[11] 杨超元，杨震，李晶. 露天采场周边植被覆盖度空间变化特征[J]. 矿山测量，2019, 47(5): 27-30.
YANG C Y, YANG Z, LI J. Spatial variation characteristics of vegetation coverage around open-pit stope[J]. Mine Surveying, 2019, 47(5): 27-30.

[12] 宋子岭，赵东洋，张宇航，等. 露天煤矿绿色开采生态环境评价体系模糊评判研究[J]. 煤炭科学技术，2019, 47(10): 58-66.
SONG Z L, ZHAO D Y, ZHANG Y H, et al. Study on evaluation model and application of green mining ecological environment evaluation system in open-pit coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 58-66.

[13] 刘鸿涛，郑纪勇，李高亮，等. 晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J]. 农业环境科学学报，2021, 40(1): 137-143.
LIU H T, ZHENG J Y, LI G L, et al. Characteristics of soil

aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2021, 40(1): 137-143.

[14] 吴奇凡, 樊军, 王继军. 晋陕蒙接壤区露天矿不同质地土壤水分运动特征与模拟[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1134-1142.
WU Q F, FAN J, WANG J J. Water movement and simulation of different soil textures at open pit mine in Jin-Shan-Meng adjacent region[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5): 1134-1142.

[15] 王改玲, 江山, 张菁, 等. 安太堡露天矿不同复垦年限苜蓿地土壤养分化学计量特征[J]. 草地学报, 2018, 26(5): 1118-1123.
WANG G L, JIANG S, ZHANG J, et al. Soil stoichiometry characteristics of Alfalfa pasture of different restoration years in Antaibao open-cast coal mine[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1118-1123.

[16] 姚峰, 古丽·加帕尔, 包安明, 等. 基于遥感技术的干旱荒漠区露天煤矿植被群落受损评估[J]. 中国环境科学, 2013, 33(4): 707-713.
YAO F, GULI J P R, BAO A M, et al. Damage assessment of the vegetable types based on remote sensing in the open coalmine of arid desert area[J]. China Environmental Science, 2013, 33(4): 707-713.

[17] 杨建军, 张园园, 周耀治, 等. 新疆准东露天煤矿生态安全评价研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(10): 76-82.
YANG J J, ZHANG Y Y, ZHOU Y Z, et al. Ecological security assessment of opencast in Zhundong coalfield[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(10): 76-82.

[18] 张俊杰, 白中科, 杨博宇. 新疆荒漠露天矿区生态受损及砾幕层重构方法研究[J]. 地学前缘, 2021, 28(3): 401-412.
ZHANG J J, BAI Z K, YANG B Y. Ecological damage and gravel layer reconstruction in northwest desert open-pit mining area[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(3): 401-412.

[19] 王党朝, 申莹莹, 杨震. 胜利一号露天煤矿开发建设对生态环境的影响评价[J]. 中国煤炭, 2020, 46(1): 58-66.
WANG D C, SHEN Y Y, YANG Z. Evaluation of the impact of development and construction of Shengli No.1 open-pit coal mine[J]. China Coal, 2020, 46(1): 58-66.

[20] 水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法: GB/T 11893—1989[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.
Water quality—determination of total phosphorus—ammonium molybdate spectrophotometric method: GB/T 11893—1989[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.

[21] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会(SAC/TC 124). 全(半)自动凯氏定氮仪: GB/T 33862—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Technical Committee 124 on Industrial Process Measurement and Control and Automation of Standardization Administration of China (SAC/TC 124). Automatic (semi) Kjeldahl analyzer: GB/T 33862—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[22] 中国环境监测总站. 大气降水中钠、钾的测定 原子吸收分光光度法: GB/T 13580.12—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
China National Environmental Monitoring Centre. Determination of sodium and potassium in the wet precipitation—atomic absorption spectrophotometry: GB/T 13580.12—1992, [S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.

[23] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法 第27部分: 有机碳量测定 重铬酸钾容量法: DZ/T 0279.27—2016[S]. 北京: 地质出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Analysis methods for regional geochemical sample—part 27: determination of organic carbon contents by potassium dichromate volumetric method: DZ/T 0279.27—2016[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.

[24] 全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会(SAC/TC 124). 离子色谱仪: GB/T 36240—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
National Technical Committee 124 on Industrial Process Measurement and Control and Automation of Standardization Administration of China (SAC/TC 124). Ion chromatographs: GB/T 36240—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

[25] 中华人民共和国国土资源部. 区域地球化学样品分析方法 第34部分: pH值测定 离子选择电极法: DZ/T 0279.34—2016[S]. 北京: 地质出版社, 2016.
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Analysis methods for regional geochemical sample—part 34: determination of pH by ion selective electrode method: DZ/T 0279.34—2016[S]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.