

水文融合的草原露天矿内排土场地貌重塑优化

夏嘉南^{1,2}, 李根生¹, 李园园^{1,2}, 卞正富^{1,2}, 雷少刚²

(1. 中国矿业大学 公共管理学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿山生态修复教育部工程研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:草原露天煤矿内排土场地貌受采-排-复活动中塑形方式与土方量等因素影响, 面临景观破碎、水土流失等生态环境问题。在现有工艺与团队已有成果上, 为进一步实现矿区重塑地貌与周边水文相融, 构建基于水文保留曲面(HPCS)的采复子区划定优化模型, 以新疆黑山露天矿内排土场为例, 构建优化后的HPCS下近自然设计地貌(MNNDL_HPCS)为实验组, NNDL_HPCS、原始自然地貌(PNL)和传统设计地貌(TDL)3者为对照组, 结合空间叠加分析与地貌演化模拟技术, 评价MNNDL_HPCS在水文融合、土方调配与土壤抗水蚀3方面的优化效果。结果表明: ①采复子区划定上, MNNDL_HPCS内除开采子区位置划定调整外, 其余区域位置保持不变; ②水文融合上, 以PNL为基准, MNNDL_HPCS视觉效果最优, 并在水文沟道空间重叠率和水文融合率指标上, 分别较NNDL_HPCS与TDL高52.84%和7.04%, 与66.66%和18.11%; ③土方调配上, MNNDL_HPCS土方平均运距较NNDL_HPCS缩减约0.98 m/m³, 较TDL高约4.93%, 土方迁移成本较优化前略有降低; ④土壤抗水蚀能力上, MNNDL_HPCS较PNL、NNDL_HPCS和TDL的10年可分别减少约31.65%、56.86%和80.59%的土壤水蚀总量, 其中平均坡度缓和(0.28°)是MNNDL_HPCS土壤抗水蚀优于PNL的主因, 其通过HPCS模型内坡度缓和优化模块实现。研究成果可助于恢复研究矿区原径流通道和原地貌与景观, 提高矿区生态修复稳定性。

关键词:露天煤矿; 内排土场; 地貌重塑; 水文融合; 矿山生态修复

中图分类号: TD88 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2023)04-1673-14

Landform reshaping optimization of inner dump based on hydrological fusion in grassland open-pit coal mine

XIA Jianan^{1,2}, LI Gensheng¹, LI Yuanyuan^{1,2}, BIAN Zhengfu^{1,2}, LEI Shaogang²

(1. School of Public Policy & Manage, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Engineering Research Center of Ministry of Education for Mine Ecological Restoration, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The landform of the inner dump in the grassland open-pit coal mine is affected by factors such as the shaping method and the amount of earthwork in the mining-dumping-reclaiming activities, and it faces ecological and environmental problems such as landscape fragmentation and soil erosion. Based on the existing technologies and the team's achievements, in order to further realize the integration of the reshaped landform and the surrounding hydrology in the mining area, an optimization model for the delineation of the mining complex sub-area based on the hydrological preservation surface (HPCS) was constructed. Taking the inner dump site in the Heishan open-pit coal mine in Xinjiang as an ex-

收稿日期: 2022-04-26 修回日期: 2022-05-19 责任编辑: 韩晋平 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2022.0592

基金项目: 国家自然科学基金新疆联合基金资助项目(U1903209); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501107);
国家科技基础性工作专项资助项目(2014FY110800)

作者简介: 夏嘉南(1996—), 男, 浙江温州人, 博士研究生。E-mail: 07142987@cumt.edu.cn

通讯作者: 雷少刚(1981—), 男, 四川南部人, 教授, 博士生导师。E-mail: lsgang@126.com

引用格式: 夏嘉南, 李根生, 李园园, 等. 水文融合的草原露天矿内排土场地貌重塑优化[J]. 煤炭学报, 2023, 48(4): 1673-1686.

XIA Jianan, LI Gensheng, LI Yuanyuan, et al. Landform reshaping optimization of inner dump based on hydrological fusion in grassland open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1673-1686.



移动阅读

ample, the optimized near-natural design landform under HPCS (MNNDL_HPCS) was used as the experimental group, and the NNDL_HPCS, the original natural landform (PNL) and the traditional design landform (TDL) were used as the control group. Combined with spatial superposition analysis and geomorphological evolution simulation technology, the optimization effects of the MNNDL_HPCS in hydrological integration, earthwork allocation and soil water erosion resistance were evaluated. The result shows: ① in the delineation of the mining sub-area, except for the adjustment of the location of the mining sub-area in the MNNDL_HPCS, the positions of the rest of the areas remain unchanged. ② Compared with hydrological fusion, with the PNL as the benchmark, the MNNDL_HPCS has the best visual effect. Specifically, the spatial overlap rate of hydrological channels is 52.84% higher than that of the NNDL_HPCS and 66.66% higher than that of the TDL; the index of hydrological fusion rate is 7.04% higher than that of the NNDL_HPCS and 18.11% higher than that of the TDL. ③ Compared with earthwork deployment, the average earthwork distance of the MNNDL_HPCS is about 0.98 m/m³ shorter than that of the NNDL_HPCS, and about 4.93% higher than that of the TDL. Therefore, the earth moving cost is slightly lower than that before optimization. ④ Comparing soil water erosion resistance, the MNNDL_HPCS can reduce the total amount of soil water erosion by about 31.65%, 56.86% and 80.59% over 10 years compared with the PNL, NNDL_HPCS and TDL, respectively. In addition, the average slope mitigation (0.28°) is the main reason why the soil water erosion resistance of the MNNDL_HPCS is better than that of the PNL, which is realized by the slope mitigation optimization module in the HPCS model. The research results can restore the original runoff channels and original landforms and landscapes in the mining area to the maximum extent, improve the stability of ecological restoration in the mining area.

Key words: open-pit mine; inner dumping site; landform reshaping; hydrological fusion; mine ecological restoration

露天煤矿的采-排-复活动,彻底破坏了区域原有水文、植被和景观,尤其是在干旱半干旱的生态脆弱型草原区域^[1-3]。内排土场作为其重要组成部分,占地面积和影响范围随采复工作面的推进而不断增加^[4]。受系统性影响,内排土场地貌重塑对矿区整体土地复垦和生态重建意义重大^[5]。一方面,草原露天矿内排土场地貌塑形结果决定基底稳定性,从而影响修复区内部水土保持效果^[6-8];另一方面,其自身作为地表水资源为代表的物质流通道,维持相邻上下游区域间给排水等物质输送平衡^[6,9]。若未构建合理的内排土场重塑地貌,不仅会造成边坡表土失稳与严重侵蚀,还会造成进不来、留不住、出不去等诸多地表水资源输送问题,从而影响相邻上下游流域子区生态安全,提高维护成本^[6,9-13]。因此,有必要构建基于地表径流通道下的排土场地貌重塑模型,以提高水土保持效果。

在露天矿设计过程中,设计者基于经济、安全两大目标,制定采-排-复计划^[14-15],导致内排土场水平投影呈规则“台阶状”并横跨多个流域子区^[6,9],对周边水文单元影响范围较广。传统地貌重塑通过“台阶状”规则地貌替代原有自然复杂地貌,并辅以给排水设施以满足自身需求,然而因地貌融合性不佳,常导致自身地表水径流通道功能丧失,引发内部边坡侵蚀、积水、人工外源大量给排水等一系列问题^[9-10,16]。近自然地貌重塑作为露天矿土地复垦最具潜力的新方法,不仅能提高排土场自身稳定性,还可融合上下游

水资源通道^[6,9,17-18]。然而,受煤层走向、原始地貌起伏、煤层厚度、采-排-复等因素综合影响,复填可用土方或将无法满足近自然地貌重塑与周边水文相融,易造成外观相融,内部节点断流的土方供需矛盾^[17-18]。

前置研究中,笔者先后提出基于地表调整曲面(Surface Adjustment Curved-s, SAC)^[17]与基于 HPCS (Hydrological Preserved Curved Surface)^[18]的露天矿内排土场近自然地貌重塑模型,结合模拟对比发现,在地貌视觉融合的基础上,后者(HPCS)基于水文特征要素的近自然重塑地貌抗水蚀能力更优,其 10 a 土壤侵蚀总量较 SAC 与传统方式分别减少 55% 与 72.6%。受原采-排-复计划下复填子区土方量限制,上述近自然重塑地貌均存在局部坡度超标与水文节点断流等问题,在原始水文保留率取值上均小于 74%,水文未与周边地貌完全“相融”^[18]。因此,有必要尝试基于水文融合目标,优化原有采-排-复计划,获取新的开采与复填子区空间位置,从土方供需视角,切实保障区域径流通道再建。

因此,笔者在现有技术与前置研究的基础上,以新疆黑山露天矿为例,提出一种基于 HPCS 的内排土场采复子区划定优化模型,求解并以 MNNDL_HPCS(Modified Near-natural Design Landform with Hydrological Preserved Curved Surface)为实验组,NNDL_HPCS、TDL(Traditional Design Landform)和 PNL(Pristine Natural Landform)为对照组,结合 GIS

空间分析软件与 CLIDE 演化模型, 模拟并讨论 MNNDL_HPCS 在水文融合、土方调配和土壤抗水蚀 3 个方面的改良效果。从而为相同及相似地区矿山地貌近自然重塑提供方法支持。

1 研究方法

1.1 基于 HPCS 的采复子区划定优化模型

本研究基于 HPCS 的采复子区优化模型主要分 4 个模块, 包括: ① 采复子区原始空间位置识别; ② 基于灰色系统理论的最小及最大土方重塑地貌模型构建; ③ 复填可用及所需土方量计算; ④ 采复子区划定优化模型。其中, 模块 1 识别结果为模块 4 提供划定优化对象; 模块 2 地貌构建结果为模块 3 中复填所需土方量上下限取值提供地貌参照; 模块 3 土方供需计

算方法为模块 4 中原有问题区识别及是否完成优化提供判定手段; 模块 4 获取优化后的采复子区空间位置数据。最终通过 HPCS 下内排土场近自然地貌重塑模型, 求解并获取研究区 MNNDL_HPCS 数据。模型技术路线如图 1 所示。

1.1.1 采复子区原始空间位置识别

依据露天矿采复周期规划, 划分开采子区 a_{mn} 和复填子区 a_{fn} 的水平投影位置。依据露天矿实际采复周期及其时间先后顺序, 沿开采方向将露天矿内排土场划分为 N 个子区。其中, 开采子区和复填子区分别对应区域 $a_{ml} \sim a_{mn}$ 和区域 $a_{fl} \sim a_{fn}$ 。在露天矿内排构建的采复过程中, 采坑每前进一个开采子区 a_{mn} 对应修复一个复填子区 a_{fn} , 直至内排过程结束, 矿坑不断迭代前进至采矿终止边界^[18](图 2)。

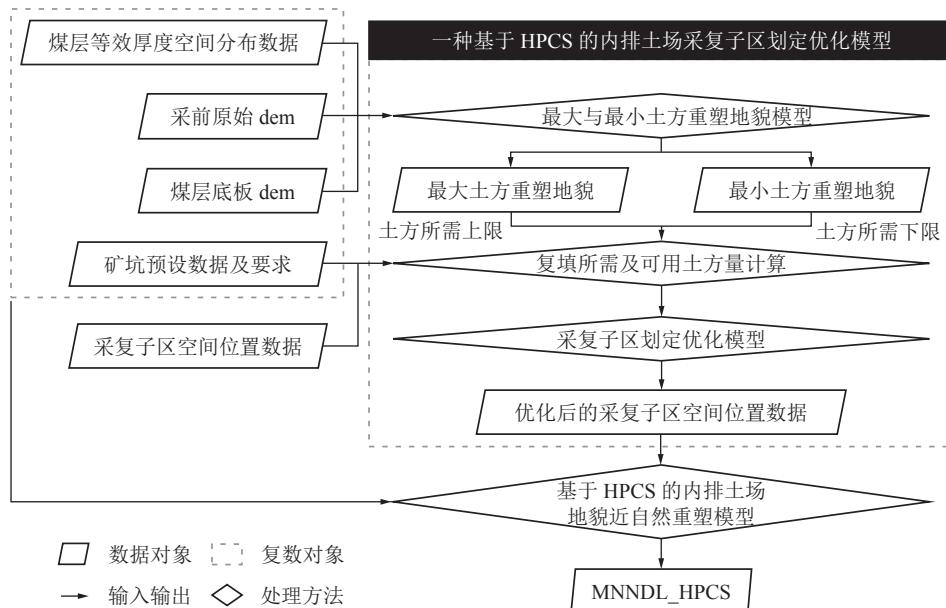


图 1 基于 HPCS 的采复子区划定优化模型技术路线示意

Fig.1 Schematic diagram of the technical route of the optimization model for the delineation of mining areas and refilling areas based on HPCS

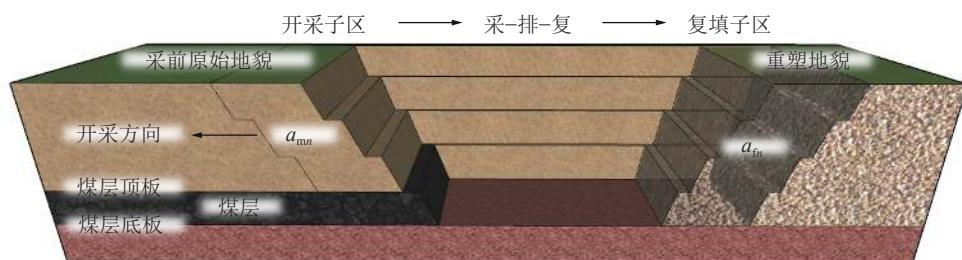


图 2 露天矿采复周期 n 中开采子区与复填子区三维示意

Fig.2 3D schematic diagram of mining sub-area and refilling sub-area in open-pit mining-refilling period n

1.1.2 最大及最小土方重塑地貌模型构建

采复子区空间位置直接影响复填区可用土方量

与复填所需土方量。为保证各复填子区均能实现重塑地貌与周边水文融合, 首先需优化原有采-排-复计

划,调整采复子区大小及其空间位置,以保证复填子区地貌重塑所需土方量与可用土方量相匹配,避免出现复填可用土方过多导致的二次外排,与可用土方不足所导致的水文节点断流两大问题。为计算水文融合及无二次外排情况下内排土场重塑地地貌土方量可行域,将内排土场整体视作一个灰色系统,通过重构其内部水文要素,以尽可能恢复系统内外水资源交换特征,构建最大土方重塑地地貌模型与最小土方重塑地地貌模型(图3)。

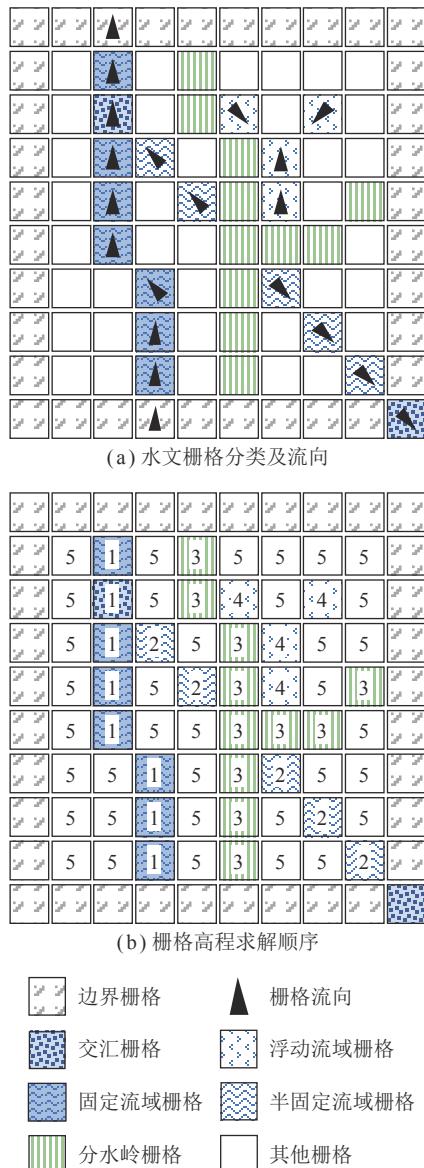


图3 最大与最小土方重塑地地貌模型构建示意

Fig.3 Schematic diagram of the construction of the maximum and minimum earthwork remodeling landform model

模型如图3所示,通过“由点至线至面”的模型设计思路构建模型。将研究区采前数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)及其高程倒置后的DEM

作为输入数据,通过ArcGIS软件内水文分析模块,分别获取研究区水文沟道栅格空间分布数据,与分水岭栅格空间分布数据。其中,河道提取所需的最小汇水栅格数通过OTSU法^[19],基于研究区水文沟道及分水岭密度与最小汇水栅格数间分形关系提取^[6,17-18]。按照水文沟道栅格(图3(a))空间相邻关系,将其细分为固定流域栅格、交汇栅格、半固定流域栅格、分水岭栅格和浮动流域栅格5类,并按照图3(b)所示序号,先后求解水文栅格高程值,然后基于模糊插值方法,获取周边其他栅格所在区域平均高程,构建最大与最小土方重塑地地貌模型。

其中,将水文沟道栅格中沿流向头尾与边界栅格相接的栅格组定义为固定流域栅格,并按流向将其中与半固定流域栅格相接的固定流域栅格定义为交汇栅格,重塑区外所有栅格定义为边界栅格,3者高程计算见式(1);若水文沟道栅格沿流向仅一端与交汇栅格相连,则定义为半固定流域栅格,其高度计算见式(2),如图4所示;分水岭栅格高度求解见式(3),如图5所示;若水文沟道栅格沿流向头尾未与上述栅格相连,则定义为浮动流域栅格,其高度求解见式(4),如图6所示。

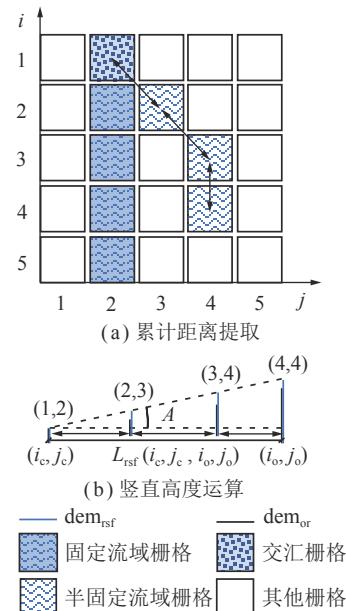


图4 半固定流域栅格高程求解模型示意

Fig.4 Schematic diagram of the semi-fixed watershed grid elevation solution model

$$dem_{rf}(i, j) = dem_{or}(i, j), c(i, j) \in \{1, 1.5, 5\} \quad (1)$$

其中, i, j 分别为数据栅格行与列序号,定义域分别为1~row与1~col的整数(row,col分别为内排土场边界内栅格数据总行列数); c 为栅格分类数据, $c(i, j)$ 为栅格 (i, j) 类型值,取值0、1、1.5、2、3、4、5,分别对应

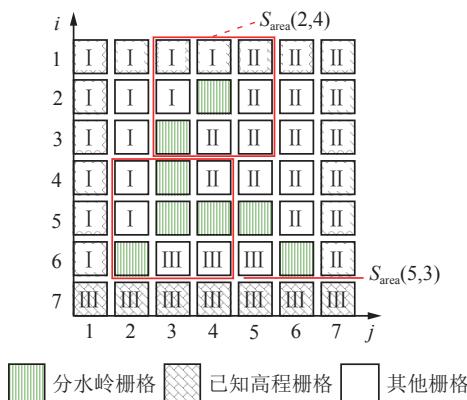


图5 分水岭栅格高程求解模型示意

Fig.5 Schematic diagram of the watershed grid elevation solution model

“其他栅格”、“固定流域栅格”、“交汇栅格”、“半固定流域栅格”、“分水岭栅格”、“浮动流域栅格”和“边界栅格”; $\text{dem}_{\text{rf}}(i, j)$ 为固定流域栅格 (i, j) 地表平均高程值; $\text{dem}_{\text{or}}(i, j)$ 为栅格 (i, j) 采前地貌平均高程。通

$$\text{dem}_{\text{rsf}}(i, j) = \frac{[\text{dem}_{\text{or}}(i, j) - \text{dem}_{\text{or}}(i_c(i, j), j_c(i, j))]L_{\text{rsf}}(i_o(i, j), j_o(i, j), i_c(i, j), j_c(i, j))\tan A}{\text{dem}_{\text{or}}(i_o(i, j), j_o(i, j)) - \text{dem}_{\text{or}}(i_c(i, j), j_c(i, j))} + \text{dem}_{\text{or}}(i_c(i, j), j_c(i, j)), c(i, j) = 2$$
 (2)

式中, $\text{dem}_{\text{rsf}}(i, j)$ 为半固定流域栅格 (i, j) 的平均高程值; L_{rsf} 为 dem_{rsf} 栅格中两栅格所沿半固定流域的最小累计距离函数, 如图4中 $L_{\text{rsf}}(1, 2, 4, 4)$ 为栅格(1,2)与栅格(4,4)沿半固定流域栅格的最小累计水平投影距离; i_c 、 j_c 为关于栅格 (i, j) 的交汇坐标函数, 取值分别对应半固定流域栅格 (i, j) 对应交汇栅格行列序号值(图4栅格(1,2)); i_o 、 j_o 为关于栅格 (i, j) 的发源坐标函数, 取值分别对应所在半固定流域栅格 (i, j) 对应发源栅格行列

$$\text{dem}_w(i, j) = \begin{cases} \min(L_w(i, j, n_{\text{ra}}(i, j))\tan A + h(n_{\text{ra}}(i, j))), & A = A_{\max} \cup c(i, j) = 3 \\ \max(L_w(i, j, n_{\text{ra}}(i, j))\tan A + h(n_{\text{ra}}(i, j))), & A = A_{\min} \cup c(i, j) = 3 \end{cases}$$
 (3)

其中, $\text{dem}_w(i, j)$ 为分水岭栅格 (i, j) 所在区域平均高程; L_w 为分水岭栅格单元距最近已知高程栅格间距离函数, 如 $L_w(i, j, n_{\text{ra}}(i, j))$ 为分水岭栅格 (i, j) 距各相邻汇水子区最近已知高程栅格(边界栅格、固定流域栅格、交汇栅格和半固定流域栅格)坐标 n_{ra} 间最小距离所组成的矩阵数据; $n_{\text{ra}}(i, j)$ 为分水岭栅格 (i, j) 相邻所有汇水子区(总数为 $n_c(i, j)$)内最相近已知高程栅格的行列坐标组成的 $n_c(i, j)$ 行2列矩阵数据; $h(n_{\text{ra}}(i, j))$ 为 $n_{\text{ra}}(i, j)$ 矩阵数据各行栅格坐标所在区域平均高程组成的 $n_c(i, j)$ 行1列矩阵数据; A_{\max} 为最大允许边坡角, 按标准取值 25° ; A_{\min} 为自然汇水子区最小边坡角, 是相

$$\text{dem}_{\text{rf}}(i, j) = \begin{cases} \min(h(n_{\text{ra}}(i, j)) - L_k(i, j, n_{\text{ra}}(i, j))\tan A), & A = A_{\min} \cup c(i, j) = 4 \\ \max(h(n_{\text{ra}}(i, j)) - L_k(i, j, n_{\text{ra}}(i, j))\tan A), & A = A_{\max} \cup c(i, j) = 4 \end{cases}$$
 (4)

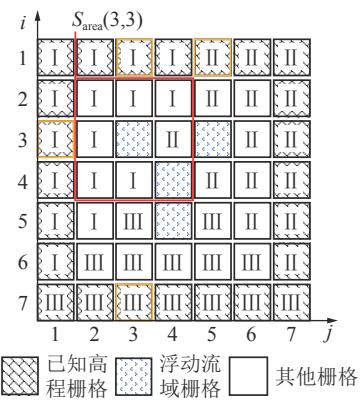


图6 浮动流域栅格高程求解模型示意

Fig.6 Schematic diagram of the floating watershed grid elevation solution model

过保留固定流域栅格、交汇栅格和边界栅格所在区域的采前地表平均高程, 保障重塑地貌与相邻上下游地貌间径流通道关系不变, 为后续半固定流域栅格高度求解提供交汇栅格高程数据。

序号值(如图4栅格(4,4)); A 为调整后需要达到的倾角, 定义域为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

通过控制半固定流域栅格起始与交汇栅格间夹角, 确保半固定流域栅格的斜率符合自然特征, 同时依据研究区及周边采前自然地貌半固定流域栅格源与交汇栅格间斜率, 获取最大倾角(A_{\max})与最小倾角(A_{\min}), 以分别用于研究区最大与最小土方地貌模型中半固定流域栅格所在区域平均高程求解, 为后续分水岭栅格高程求解提供数据支撑。

邻汇水子区栅格边坡角均值最小值, 其余参数解释同上。在求解过程中, 通过ArcGIS软件提取汇水子区的空间位置数据(如图5汇水子区I、II、III);然后以分水岭栅格 (i, j) 为中心, 构建 3×3 矩形搜索窗口(图5 S_{area}), 依据窗口内汇水子区序号值域(图5 $S_{\text{area}}(3,6)$ 内汇水子区值域为{I, II}, $S_{\text{area}}(6,6)$ 内汇水子区值域为{I, II, III}), 搜索获取各相邻汇水子区中最临近已知高程栅格坐标; 最后通过式3遍历求解最大(式3上)与最小(式3下)土方重塑地貌模型内分水岭栅格所在区域平均高程, 为后续浮动流域栅格高程求解提供依据。

式中, $\text{dem}_{\text{rf}}(i, j)$ 为浮动流域栅格 (i, j) 所在区域的平均高程值; $L_k(i, j, n_{\text{rfa}}(i, j))$ 为浮动流域栅格 (i, j) 与相邻各个汇水子区(例如图6汇水子区I、II、III)内最近已知高程栅格坐标 $n_{\text{rfa}}(i, j)$ 间水平直线间距所构成的矩阵数据; $n_{\text{rfa}}(i, j)$ 为浮动流域栅格 (i, j) 与所有相邻汇水子区(总数为 $n_{\text{cf}}(i, j)$, 如图6中 $n_{\text{cf}}(3, 3)=2$)中最相近已知高程栅格行列坐标组成的 $n_{\text{cf}}(i, j)$ 行2列矩阵数据; $h(n_{\text{rfa}}(i, j))$ 为 $n_{\text{rfa}}(i, j)$ 内坐标所对应的已知高程数列, 其结构为 $n_{\text{cf}}(i, j)$ 行1列矩阵数据, 其余参数解释同上。在求解过程中, 通过ArcGIS提取汇水子区空间分布栅格数据(如图6汇水子区I、II、III), 搜寻浮动流域栅格为中心栅格, 构建 3×3 矩形搜索窗口(图6 $S_{\text{area}}(3, 3)$), 依据窗口内汇水子区值域(例如图6 $S_{\text{area}}(3, 3)$ 汇水子区值域为{I, II}), 遍历获取对应汇水子区最近已知高程栅格坐标(如图6黄框标识栅格), 基于式(4)求解最大(式(4)上)与最小土方(式(4)下)重塑地貌所对应浮动流域栅格所在区域平均高程值, 为后续模糊插值构建表面提供数据支撑。

$$\text{dem}_f^n(i, j) = \begin{cases} \text{aerage}^n(S_{\text{area}}(i, j)), & c(i, j) = 0 \\ \text{dem}_{\text{rf}}(i, j), & c(i, j) \in \{1, 1.5, 5\} \\ \text{dem}_{\text{rsf}}(i, j), & c(i, j) = 2 \\ \text{dem}_{\text{w}}(i, j), & c(i, j) = 3 \\ \text{dem}_{\text{rf}}(i, j), & c(i, j) = 4 \end{cases} \quad (5)$$

式中, dem_f^n 为 n 次模糊插值^[18]后构建的最大(dem_{max})或最小(dem_{min})土方重塑地貌模型, $\text{dem}_f^n(i, j)$ 为栅格 (i, j) 插值后所在区域平均高程; n 为模糊次数, 定义域为 N^+ , 最小取值为内排土场固定流域栅格与最近分水岭栅格间栅格间距最大值的2倍; $S_{\text{arean}}(i, j)$ 为以 dem_f^{n-1} 栅格 (i, j) 为中心的 3×3 矩形搜索窗口。

1.1.3 复填可用及所需土方量计算

基于1.1.2节最大与最小土方重塑地貌模型以及采复子区空间位置, 求解水文融合保障下采-排-复周期中复填子区 a_{mn} 可用与所需土方量, 计算式分别为

$$V_g(a_{\text{mn}}) = k \sum_{i=1}^{\text{row}_{\text{mn}}} \sum_{j=1}^{\text{col}_{\text{mn}}} \{[\text{dem}_{\text{ormn}}(i, j) - h_{\text{ln}}(i, j) - H_{\text{mdn}}(i, j)] L_t^2\} \quad (6)$$

$$V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}}) = k \sum_{i=1}^{\text{row}_{\text{fn}}} \sum_{j=1}^{\text{col}_{\text{fn}}} \{[\text{dem}_{\text{maxn}}(i, j) - H_{\text{fdn}}(i, j)] L_t^2\} \quad (7)$$

$$V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}}) = k \sum_{i=1}^{\text{row}_{\text{fn}}} \sum_{j=1}^{\text{col}_{\text{fn}}} \{[\text{dem}_{\text{minn}}(i, j) - H_{\text{fdn}}(i, j)] L_t^2\} \quad (8)$$

式中, $V_g(a_{\text{mn}})$ 为开采子区 a_{mn} 可用于复填子区 a_{fn} 的土方量, 取值为开采子区 a_{mn} 总岩土体积(最底层煤层底板以上所有物质)与可采煤层体积之差; k 为可用土体

修正系数, 是煤层受剥离损失、夹矸、岩土膨胀等多因素综合影响下实际土方量与剥离量之比; i, j 分别为对应开采及复填子区的栅格行列序号; $\text{row}_{\text{mn}}, \text{col}_{\text{mn}}$ 分别为开采子区 a_{mn} 的栅格行列序号最大值; $\text{dem}_{\text{ormn}}(i, j)$ 为开采子区 a_{mn} 内栅格 (i, j) 的采前原始地貌高程值; h_{ln} 为开采子区 a_{mn} 栅格 (i, j) 所在区域可采煤层的平均厚度; $H_{\text{mdn}}(i, j)$ 为开采子区 a_{mn} 栅格 (i, j) 所在区域可露采煤层最底层底板的平均高程值; L_t 为开采子区栅格数据的空间分辨率(本研究 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$); $V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}})$ 为复填子区 a_{fn} 复填所需最大土方量, 其值是复填子区 a_{fn} 所对应最大土方重塑地貌模型与其可露采煤层底层底板间的总岩土体积; $\text{row}_{\text{fn}}, \text{col}_{\text{fn}}$ 分别为开采子区 a_{mn} 栅格行列序号的最大值; $\text{dem}_{\text{maxn}}(i, j)$ 为复填子区 a_{fn} 栅格 (i, j) 所在区域最大土方重塑地貌模型平均高程; $H_{\text{fdn}}(i, j)$ 为复填子区 a_{fn} 栅格 (i, j) 所在区域可露采煤层最底层底板平均高程值; $V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}})$ 为复填子区 a_{fn} 的复填所需最小土方量, 其值是复填子区所对应最小土方重塑地貌模型与其可露采煤层最底层底板间的总岩土体积; $\text{dem}_{\text{minn}}(i, j)$ 为复填子区 a_{fn} 栅格 (i, j) 所在区域最小土方重塑地貌模型平均高程。

1.1.4 采复子区划定优化模型

通过1.1.3节模型, 求解复填可用土方总量 $\sum V_g(a_{\text{mn}})$ 、复填最大所需土方总量 $\sum V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}})$ 和最小所需土方总量 $\sum V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}})$, 确保 $\sum V_g(a_{\text{mn}}) \in [\sum V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}}), \sum V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}})]$, 进行采复子区划定优化模型求解。

如图7所示, 在矿坑跟踪距离 $\geq 50\text{ m}$ 的标准下, 构建采复子区划定优化模型。其中, 若原始采复子区中 $V_g(a_{\text{mn}}) < V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}})$, 且开采与复填子区间距 \geq 矿坑安全跟踪距离 L_{fn} 时, 固定其开采子区靠近内排土场侧边界, 将另一侧边界沿开采方向适度前移(图7(a)); 若开采与复填子区间距 $< L_{\text{fn}}$, 固定其复填子区远离矿坑侧边界, 将相邻矿坑侧边界沿开采方向适度后移(图7(b)); 若原始采复子区中 $V_g(a_{\text{mn}}) > V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}})$, 且开采与复填子区间距 $\geq L_{\text{fn}}$, 固定开采子区靠近内排土场侧边界, 将另一侧边界沿开采方向适度后移(图7(c)); 若开采与复填子区间距 $< L_{\text{fn}}$, 则固定其复填子区远离矿坑侧边界与开采子区靠近矿坑侧边界, 将复填子区相邻矿坑侧边界和开采子区远离矿坑侧边界沿开采方向适度后移(图7(d))。直至调整后子区内 $V_g(a_{\text{mn}}) \in [V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}}), V_{\text{fmax}}(a_{\text{fn}})]$ 且 $V_g(a_{\text{mn}})/V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}}) \approx \sum V_g(a_{\text{mn}})/\sum V_{\text{fmin}}(a_{\text{fn}})$, 按周期顺序完成优化迭代。其中, 矿坑安全跟踪距离下开采与复填子区间距求解模型如图8与式(9)所示。

$$L_{\text{fn}} = \max(L_{\text{fni}}) \quad (9)$$

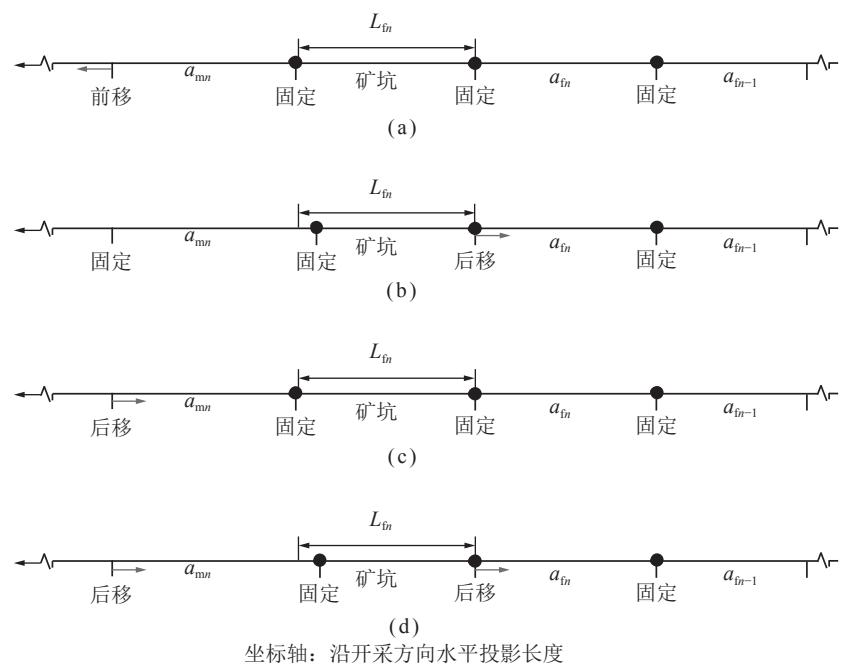


图 7 采复子区划定优化示意
Fig.7 Schematic diagram of optimization of mining-refill sub-area delineation

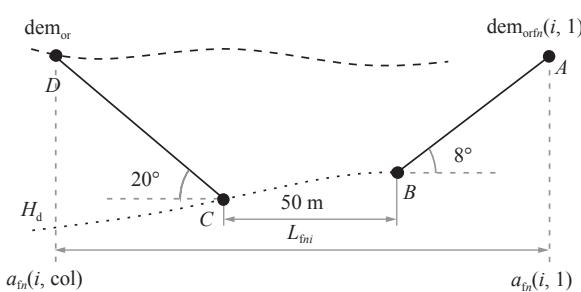


图 8 采复子区安全间距求解示意
Fig.8 Safety distance calculation of mining sub-zone and filling subsite

如图 8 所示,依据复填子区 a_{fn} 靠近矿坑侧各行高程 $dem_{orfn}(i, 1)$ 、采前原始地表高程 dem_{or} 、煤层底板高程 H_d 、矿坑安全跟踪距离 (50 m)^[20]、矿坑内排侧帮坡角 (8°) 和矿坑开采侧帮坡角 (20°),计算开采子区 a_{fn} 与其对应复填子区 a_{mn} 间最小安全距离 L_{fn} ,选取其中最大值 L_{fn} 作为采复周期 n 内开采子区与复填子区间最小安全距离(式(9)),为上述采复子区优化提供矿坑长度依据,求解获取采复子区划分优化结果。

1.2 水文融合率

基于灰色系统理论,若重塑地貌与周边自然地貌水文融合度越高,边界处潜在径流交换量应与采前原始地貌差异越小^[21-22]。通过 ArcGIS 提取 MNNDL_HPCS 与 NNDL_HPCS 所在流域地貌,采用水文分析工具,获取各自流向及累计栅格流量空间分布栅格数据,构建式(10)~(12)所示模型,求解重塑地貌水文融

合率。

$$r_{hr} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{row_{fn}} \sum_{j=1}^{col_{fn}} \frac{p_v(i, j)p_d(i, j)}{\text{size}(S_b)}, (i, j) \in S_b \quad (10)$$

$$p_v(i, j) = \begin{cases} 1, & v_{dem}(i, j) = v_{or}(i, j) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

$$p_d(i, j) = 1 - \frac{|Q_{dem}(i, j) - Q_{or}(i, j)|}{row_{fn}col_{fn}} \quad (12)$$

式中, r_{hr} 为重塑地貌结果相较于 PNL 的水文融合率,取值 $0 \sim 1$, 值越大则水文融合效果越好; $p_v(i, j)$ 为栅格 (i, j) 所在区域重塑地貌与 PNL 流向间的一致率,相同时值为 1, 反之为 0; $p_d(i, j)$ 为重塑地貌相较于 PNL 在栅格 (i, j) 处累计栅格流量一致率,取值 $0 \sim 1$,一致性越高值越大; S_b 为复填子区所有相邻边界栅格坐标组成的数组; $v_{dem}(i, j)$ 、 $v_{or}(i, j)$ 分别为重塑地貌与 PNL 在栅格 (i, j) 处的流向取值,其通过 ArcGIS 流向模块计算获取; $Q_{dem}(i, j)$ 、 $Q_{or}(i, j)$ 分别为重塑地貌与 PNL 在栅格 (i, j) 处的累计栅格流量取值,其通过 ArcGIS 流量模块计算获取。

1.3 土方直线运距

受露天矿采-排-复一体化的运输通道等诸因素影响,基于直线运距简化评价方案土方运距差异。令开采工作面土方由上层台阶逐级向下剥离,后侧复填工程由可露采煤层底板逐层向上。其中,复填区当相邻低处台阶可用土方量完全满足复填需要时,进行相邻高处台阶的复填工作。台阶以 10 m 为竖直分段间隔,通过 MATLAB 建立采复前后土方空间索引,并依

据采前各立方米(采前)土体中心点的位移,统计其土方平均运距^[17]:

$$L = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{V_0=1}^{V_u(a_{mn})} |c(a_{mn}, V_0) - c'(a_{mn}, V_0)|}{\sum_{n=1}^N V_u(a_{mn})} \quad (13)$$

其中, L 为土方平均运距; V_0 为运移土方按时间的排序, 取值为以 1 为步长从 0 至 $V_u(a_{mn})$ 的递进值; $c(a_{mn}, V_0)$ 、 $c'(a_{mn}, V_0)$ 分别为开采子区 a_{mn} 中第 V_0 运移的立方土体运移前后中心点所对应的三维坐标。通过统计各采复周期中各立方土体运移前后位移对应的模长均值, 简要评价重塑地貌土方运移特征。

1.4 抗水蚀能力评价

将研究区 MNNDL_HPCS 作为实验组, NNDL_HPCS、TDL 和 PNL 三者作为对照组, 套用前置研究参数^[18], 运用 CLiDE 景观演化模型^[23-24], 模拟 3 者 10 a

的土壤侵蚀演化过程。其中, 依据研究区典型草原植被类型, 将土地利用类型统一设置为模型自带地类 5 (适用于半野生草地、粗糙的草地、中性草地等)。通过空间叠加分析方法与 MATLAB 软件统计各地貌演变前后土方变化量, 评估地貌抗水蚀效果。其中, 为排除矿坑最终位置对土壤水蚀模型结果的干扰, 在 PNL 相同位置设置相同大小的最终矿坑。

2 案例与分析

2.1 研究区概况

研究区位于新疆黑山露天矿矿权范围内, 地理坐标: 87.43°E~87.49°E, 43.23°N~43.23°N, 周边地形以山间谷地为主, 属大陆半干旱及高寒气候; 区内表土以第四系为主, 野生植被类型为典型草原植被。采区东西长约 4 874 m、南北长约 1 000 m; 采坑预设 812 m×1 000 m, 作业方向为正西方(图 9)。

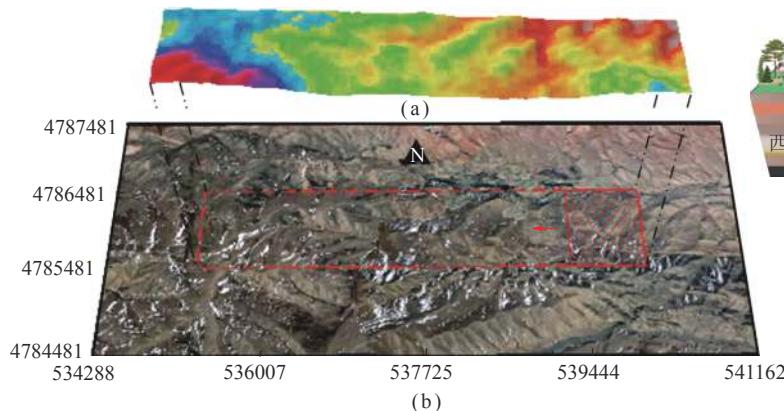


图 9 研究区概况

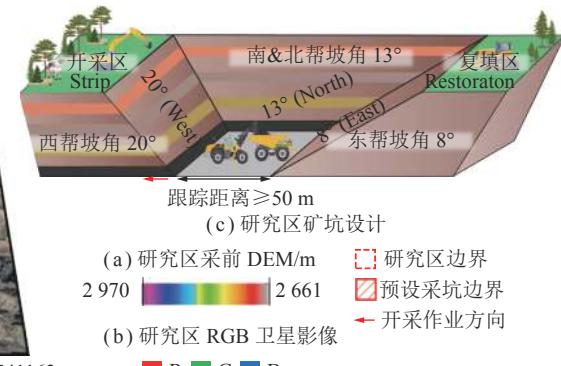
Fig.9 Overview of the study area

依据研究区内排土场采-排-复计划, 各周期内开采与复填子区东西条带宽度均约 90 m。区域内可采煤层为 6、7、8、9、11、12-1、12-2、13-1 和 13-2 号。其中, 13-2 号煤层为全区可采, 其余为局部可采。内排土台阶高度预设为 10 m, 采坑跟踪距离 ≥ 50 m。其中, 西帮为开采帮, 帮坡角为 20°; 南北两侧边帮帮坡角均为 13°; 东帮为内排帮, 帮坡角为 8°(图 9(c))^[18]。

2.2 数据结果及分析

通过 ArcGIS 克里金插值模块, 由研究区最下层煤层底板等高线数据获取煤层底板 DEM 数据, 叠加各煤层厚度空间分布数据, 获取区域煤层顶板等效 DEM 数据, 实现多矿层复杂情景下基于 HPCS 的内排土场近自然地貌重塑模型构建。

依据 1.1 节采复子区原始空间位置识别方法与划



定优化模型, 解得复填可用土方总量约 2.28 km³, 最大与最小所需土方总量分别约为 2.31、2.24 km³, 符合模型应用条件。其中, 为避免采复周期总数差异对后续模型效果对比造成干扰, 套用前置研究参数^[18], 将研究区划分为 45 对采复子区, 划分结果如图 10 所示。

由图 10 可知, 复填子区位置优化结果与优化前一致(90 m), 开采子区位置及长度发生不同程度的变化。即研究区各采-排-复周期内矿坑沿开采方向水平投影距离均 $\geq L_{fn}$, 研究区划定优化按照图 7(a)、(c) 所示情景进行。

2.3 NNDL_HPCS 优化结果及分析

通过基于 HPCS 的内排土场地貌近自然重塑模型, 获取研究区 MNNDL_HPCS(图 11(b))。其中, 除采复子区空间位置划分差异外, MNNDL_HPCS 模型

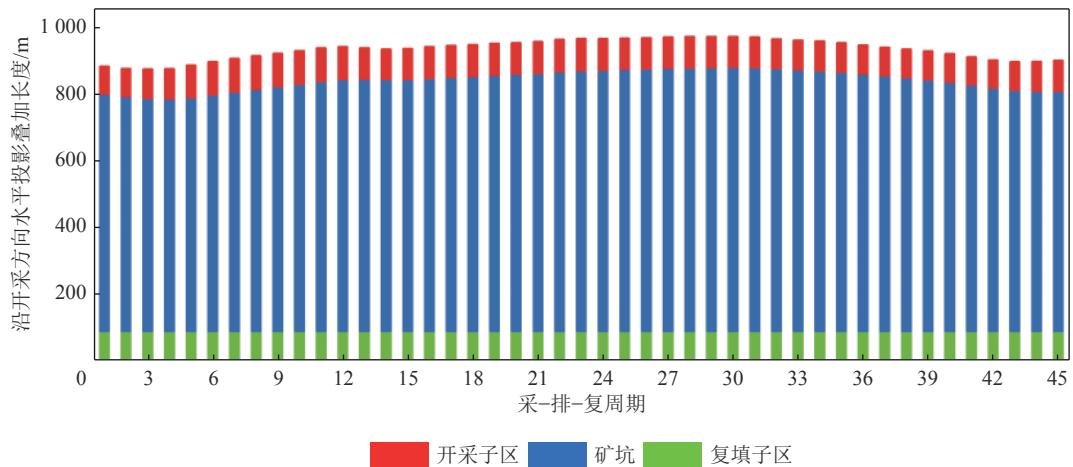


图 10 采复子区划定优化结果

Fig.10 Result of optimization of mining-refill sub-area delineation

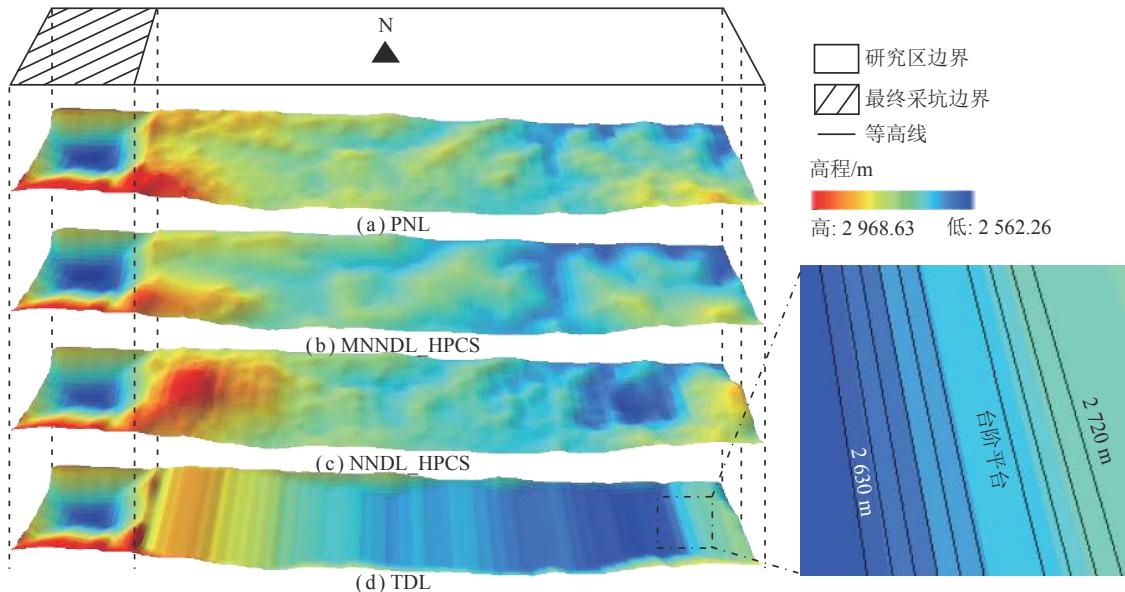


图 11 研究区内排土场 DEM

Fig.11 Research area inner refilling area DEM

内其余参数均与优化前^[18]一致。

2.3.1 水文融合结果与分析

在视觉融合效果上,相较于 TDL “阶梯状”三维地貌(图 12(d)),MNNDL_HPCS、NNDL_HPCS 与 PNL 地貌形态更为复杂(图 12(a)~(c))。其中,MNNDL_HPCS 三维地貌纹理效果与 PNL 最为相近,且重塑区平均坡度(14.02°)小于其他样本(TDL: 14.45° ; PNL: 14.73° ; NNDL_HPCS: 16.73°)。结合土方供需曲线(图 12(e))可知,在采-排-复周期 1~4、4~13 和 32~45 中 NNDL_HPCS 和 TDL “土方供需失衡”是导致 2 者视觉融合效果不佳的重要原因。其中,在周期 1~4 和 32~45 内,研究区复填可用土方量均大于水文融合下土方需求上限,使区域较 PNL 地貌发生明

显“抬升”;而在周期 4~13 中复填可用土方量均低于水文融合下土方需求下限,使区域较 PNL 地貌发生明显“下沉”。

在水文沟道空间分布上,MNNDL_HPCS(图 13(b))与 PNL 间水文沟道空间重叠率最高(90.24%),远优于 NNDL_HPCS 与 TDL 与 PNL 间水文沟道空间重叠率(分别为 37.40% 与 23.58%)。同时在内排土场空间范围内,MNNDL_HPCS 具有与 PNL 更为接近的汇水子区数与沟道长度,且汇水子区空间分布上与 PNL 高度重叠,不存在 NNDL_HPCS 所示汇水子区部分形变(图 13(c)),以及 TDL 中汇水子区大范围形变及数量缩减等问题(图 13(d))。

水文融合率求解结果表明,MNNDL_HPCS 水文

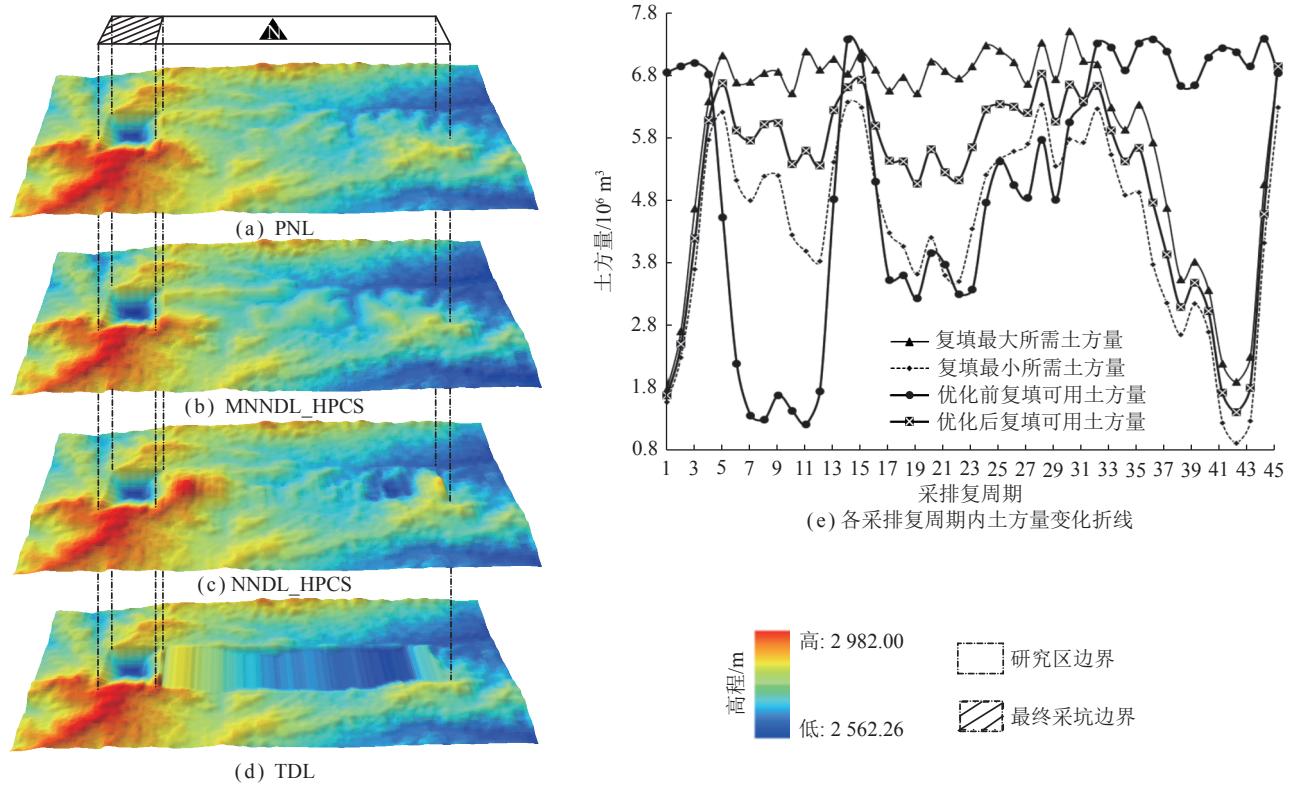


图 12 研究区及周边地貌三维透视图和各采-排-复周期内土方量变化折线

Fig.12 Research area and surrounding landform 3D map and Line chart of earthwork quantity change in the cycle of each mining-refilling sub-area in the study area

融合率最高(91.90%),分别较NNDL_HPCS(84.86%)和TDL(73.79%)高出7.04%与18.11%。受矿坑最终位置及其高程特征影响,重塑地貌水文融合率在矿坑交界处较低,潜在径流迁移方向仅表现为由内向外输出,矿坑处原有输入路径完全丧失。若无矿坑地貌影响(将矿坑处地貌替换为采前DEM),重塑地貌结果中MNNDL_HPCS的水文融合率(98.73%)较NNDL_HPCS(89.92%)与TDL(72.45%)将得到进一步地提升。

2.3.2 土方调配结果与分析

土方运移上,依据采复子区土方空间对应关系,运用MATLAB计算获取MNNDL_HPCS、NNDL_HPCS以及TDL三者的土方平均运距值(PNL未发生采-排-复,故不计算)。计算结果表明(表1),3者土方运距中NNDL_HPCS(863.23 m/m^3)>MNNDL_HPCS(862.25 m/m^3)>TDL(821.71 m/m^3)。其中,MNNDL_HPCS土方平均运距较TDL增加约4.93%(40.54 m/m^3),较NNDL_HPCS减少约0.11%(0.98 m/m^3)。

2.3.3 土壤抗水蚀能力结果与分析

通过CLIDE演化模型,获取研究区MNNDL_HPCS、NNDL_HPCS、PNL和TDL四者10 a演化地貌结果。其中,为避免边缘影响,将研究区周边1 000 m范围共同纳入运算(图12(a)~(d))。并基于空间叠加

分析技术,通过MATLAB软件对比演化前后地貌模型,统计研究区排土场MNNDL_HPCS、NNDL_HPCS、TDL和PNL四者土壤10 a水蚀总量(表2)。

由表2可知,研究区内排土场不同设计地貌下10年土壤水蚀总量在 $2.8013 \times 10^5 \sim 14.4287 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。其中,MNNDL_HPCS土壤抗水蚀能力最强,演化模拟情景下土壤10 a水蚀总量约为4者平均水平($6.9556 \times 10^5 \text{ m}^3$)的 $2/5(40.27\%)$ 。TDL土壤抗水侵蚀能力最弱,在研究区演化模拟情景下,MNNDL_HPCS、PNL与NNDL_HPCS相较其可分别减少约80.59%、71.60%和54.99%的土壤水蚀体积。相较于NNDL_HPCS,本研究基于HPCS的采复子区划分优化模型可提升研究区HPCS下内排土场近自然地貌重塑模型求解结果的抗水蚀效果,整体提升约56.86%。

在土壤10 a水蚀总量随采-排-复周期变化上,研究区样本值域MNNDL_HPCS($-1.54 \times 10^5 \sim 1.93 \times 10^5 \text{ m}^3$)<PNL($-2.81 \times 10^5 \sim 1.58 \times 10^5 \text{ m}^3$)<NNDL_HPCS($-2.17 \times 10^5 \sim 2.28 \times 10^5 \text{ m}^3$)<TDL($-3.29 \times 10^5 \sim 3.97 \times 10^5 \text{ m}^3$)。其中,样本土壤水蚀量随周期变化幅度与侵蚀总量排序呈正相关关系。以PNL土壤10 a水蚀量随采-排-复周期取值为基准,进一步构建图14所示的MNNDL_HPCS与NNDL_HPCS较PNL间土壤水蚀

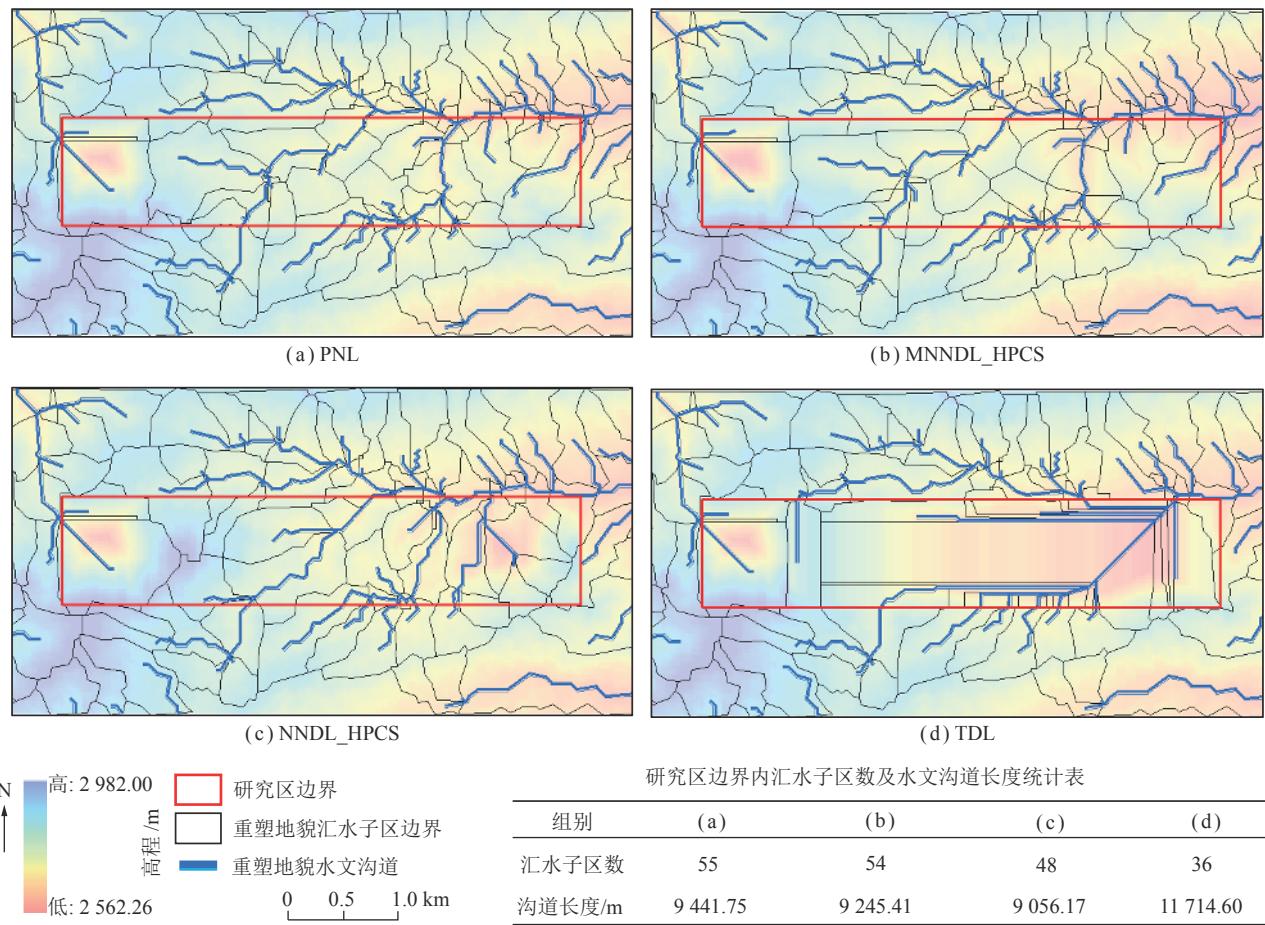


图 13 研究区内排土场地貌汇水子区及水文沟道空间分布

Fig.13 Spatial distribution of river basins and channels in the study area

表 1 研究区 PNL、优化后 NNDL_HPCS、优化前 NNDL_HPCS、TDL 土方平均运距

Table 1 Average earth hauling distance for PNL, optimized NNDL_HPCS, pre-optimized NNDL_HPCS, and TDL in the study area

内排土场设计模型	土方平均运距/(m · m ⁻³)
PNL	—
MNNDL_HPCS	862.25
NNDL_HPCS	863.23
TDL	821.71

差异曲线。对比可知,在研究区各采-排-复周期中,MNNDL_HPCS 土壤水蚀量与 PNL 更为相近,2 者间差值范围上下限差值(图 14 灰色实线: $-1.54 \times 10^5 \sim 2.33 \times 10^5 \text{ m}^3$)较 NNDL_HPCS 与 PNL(图 14 灰色虚线: $-4.56 \times 10^5 \sim 3.36 \times 10^5 \text{ m}^3$)更小,范围仅为后者的 48.79%。

3 讨 论

20 世纪 70 年代,露天矿“采矿与修复同步进行”

表 2 研究区 PNL、优化后 NNDL_HPCS、优化前 NNDL_HPCS、TDL 10 a 土壤水蚀总量

Table 2 Soil erosion total amount in the study area over 10 years for PNL, optimized NNDL_HPCS, pre-optimized NNDL_HPCS, and TDL

内排土场设计模型	10 a 土壤侵蚀总量/ 10^5 m^3
MNNDL_HPCS	2.801 3
PNL	4.098 3
NNDL_HPCS	6.493 7
TDL	14.428 7

的生产理念由美国提出^[25],其中美国内务部编写的《露天矿采复一体化技术手册》《Integrated surface mining and reclamation techniques》系统性地对露天矿开采过程中表土剥离-采矿-回填-复垦一体化技术进行总结,并就露天矿开采设计、表土剥离尺寸、表土剥离工艺、表土剥离与回填时间及选用设备等进行了详细的介绍和规范^[26]。现今,采-排-复一体化技术已广泛应用于美国、澳大利亚、中国、加拿大等露天

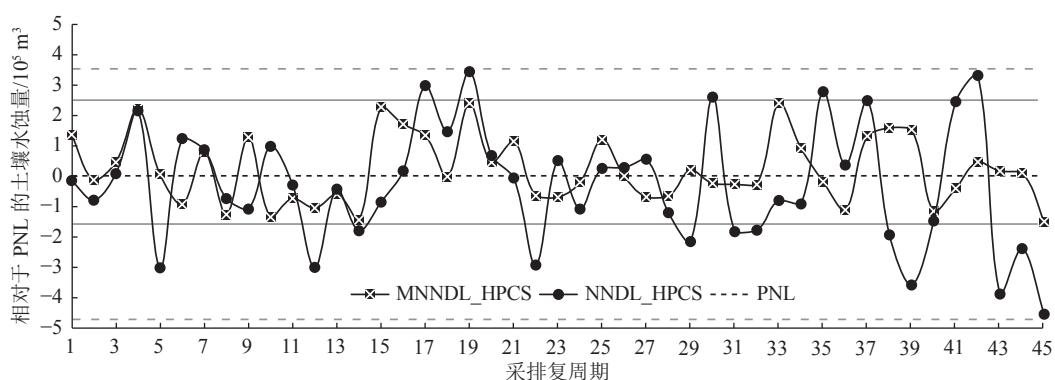


图 14 优化前后 NNDL_HPCS 相对于 PNL 的土壤水蚀量随采排复周期变化

Fig.14 Periodic variation chart of soil erosion in MNNDL_HPCS and NNDL_HPCS based on PNL

矿^[13,27-29],且形成了一批以空间利用、边坡安全、土方运距为优化导向的实践与理论成果^[14-15,30]。其中,已有成果鲜有涉及近自然恢复导向的采-排-复一体化下地貌重塑研究。地貌作为区域物质流活动的重要载体,不仅影响自身稳定性,也会通过物质流影响相邻子区。若未划分合理的采复子区,或将造成空间利用低下、二次外排、土方运距增加等前期工程问题;同样若未构建合理形态,也将大幅削弱自身表土抗水侵蚀能力^[13]。

与上述结论相似,本研究地貌演化模拟结果表明,传统采-排-复一体化采复子区划分下,TDL较其他方案土方平均运距最小(821.71 m/m^3),然而10 a 土壤水蚀总量最大(约为样本平均水平的2倍),且重塑地貌水文融合率值最低(较近自然地貌重塑样本平均水平少40.24%);在相同采-复子区划分设计下,近自然重塑地貌(NNDL_HPCS)虽较前者在土方平均运距与水文融合率上少量增高(高5.00%、7.04%),土壤水蚀总量却较前者显著减少(减少约54.99%);同样在HPCS地貌近自然重塑模型下,基于水文融合的采复子区优化后地貌重塑模型(MNNDL_HPCS)不仅拥有最高的水文融合率(91.90%)与最小的土壤水蚀总量(较NNDL_HPCS低56.86%),且在土方平均运距上也得到略微缩小(较NNDL_HPCS低0.98 m/m³)。在灰色系统理论指导下,研究区基于水文融合的采-排-复子区划分优化模型可进一步提升原有近自然地貌重塑模型效果。

值得注意的是,相较于PNL,MNNDL_HPCS土壤10 a 水蚀总量更小(减少约31.64%),且在相同采复子区空间位置下土方量较前者略高(多0.33%)。由于2者间汇水子区空间位置重合,同时结合坡度越低地貌稳定性约高的地貌重塑经验^[6,9,31]可知,坡度削减(减少约0.28°)是本研究MNNDL_HPCS土壤水蚀总量低于PNL的主要原因。结合原有HPCS下内排

土场地貌近自然地貌重塑模型^[18]分析可得,虽然在相同采复子区空间位置下,MNNDL_HPCS土方量略高于PNL,但是受模型坡度优化模块的直接影响,土方于复填子区内汇水单元间遵照坡度最小的原则实现再分配,故其坡度较低。尚无证据表明,本研究区基于HPCS的采复子区划定优化模型只适用于采前地貌稳定区域,因此在后续研究中应进一步增加样本量,结合施工精度需求、自然沉降扰动及工程应用3方面,进一步回答模型鲁棒性、适用性及其施工可行性。并在前提假设上,进一步突破本研究采复前后地层结构一致,地表水流不考虑矿区污染迁移等条件限制,拓展露天矿内排土场地貌近自然重塑模型于非自然地层结构及污染迁移影响等复杂情景下的构建与应用。

4 结 论

(1) 采复子区划定上,除各开采子区位置重置外,MNNDL_HPCS 内复填子区空间位置及最终采坑形态与NNDL_HPCS一致。

(2) 水文融合效果上,MNNDL_HPCS 较 NNDL_HPCS 和 TDL 视觉上更接近于 PNL,且与 PNL 间水文沟道空间重叠率分别较后 2 者提高 52.84% 与 66.66%,其内部汇水子区数及水文沟道长度与 PNL 基本一致,且在水文融合率上较后两者分别提升约 7.04% 和 18.11%。

(3) 土方调配上,MNNDL_HPCS 土方运移成本小幅降低,其土方平均运距较 NNDL_HPCS 减少约 0.98 m/m³,与 TDL 间差异略有缩减(0.11%)。

(4) 土壤抗水蚀上,MNNDL_HPCS 较 NNDL_HPCS 和 TDL 10 a 可分别减少约 56.86% 和 80.59% 的表土水蚀总量,可显著提升研究区内排土场表土抗水蚀能力。且 MNNDL_HPCS 在复填子区土方量大于 PNL 的情况下(多 0.33%),结合已有基于 HPCS 下

内排土场近自然地貌重塑模型, 实现土方于复填区汇水单元间再调配, 构建较 PNL 坡度更为缓和(平均坡度减少 0.28°)的重塑地貌, 优化研究区 PNL 约 31.65% 的土壤 10 a 水蚀总量。

参考文献(References):

- [1] 王韶辉, 才庆祥, 刘福明. 中国露天采煤发展现状与建议[J]. *中国矿业*, 2014, 23(7): 83–87.
WANG Shaohui, CAI Qingxiang, LIU Fuming. Development status and suggestions of open-cut mining technology in China[J]. *China Mining Magazine*, 2014, 23(7): 83–87.
- [2] 荣颖, 胡振琪, 付艳华, 等. 中美草原区露天煤矿土地复垦技术对比案例研究[J]. *中国矿业*, 2017, 26(1): 55–59.
RONG Ying, HU Zhenqi, FU Yanhua, et al. Comparative study on land reclamation technology in typical surface coal mine in steppe region between China and USA[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(1): 55–59.
- [3] 张莉, 王金满, 刘涛. 露天煤矿区受损土地景观重塑与再造的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1235–1246.
ZHANG Li, WANG Jinman, LIU Tao. Landscape reconstruction and recreation of damaged Land in opencast coal mine: A review[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(12): 1235–1246.
- [4] HANCOCK G R, MARTIN DUQUE J F, WILLGOOSE G R. Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation - The Drayton mine example (New South Wales, Australia)[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019(114): 140–151.
- [5] 胡振琪, 肖武, 赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 351–359.
HU Zhenqi, XIAO Wu, ZHAO Yanling. Re-discussion on coal mine eco-environment concurrent mining and reclamation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 351–359.
- [6] 陈航. 草原露天煤矿内排土场近自然地貌重塑模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
CHEN Hang. Research on near-natural landform reshaping simulation of inner dump of the open-pit coal mine in grassland areas: A case of Shengli No.1 Open-pit Coal Mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [7] 白中科. 工矿区土地复垦与生态重建[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [8] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复30年: 回顾、反思与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 25–35.
HU Zhenqi. The 30 years' land reclamation and ecological restoration in China: Review, rethinking and prospect[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 25–35.
- [9] 杨翠霞. 露天开采矿区废弃地近自然地形重塑研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
YANG Cuixia. Study on near-natural topographic reconstruction of abandoned land in the open mined area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014: 10–20.
- [10] 卞正富, 雷少刚, 金丹, 等. 矿区土地修复的几个基本问题[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 190–197.
- [11] BIAN Zhengfu, LEI Shaogang, JIN Dan, et al. Several basic scientific issues related to mined land remediation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 190–197.
- [12] KOPONEN P, NYGREN P, SABATIER D, et al. Tree species diversity and forest structure in relation to microtopography in a tropical freshwater swamp forest in french guiana[J]. *Plant Ecology*, 2004, 173(1): 17–32.
- [13] THOMPSON S, KATUL G, PORPORATO A. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): W07520.1–7520.11.
- [14] NICOLAU J M. Trends in relief design and construction in open-cast mining reclamation[J]. *Land Degradation & Development*, 2003, 14(2): 215–226.
- [15] OGGIERI C, FENOGLIO T M, GODIO A, et al. Overburden management in open pits: Options and limits in large limestone quarries[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 29(2): 217–228.
- [16] 栗嘉彬. 露天矿采—排—复一体化应用技术及效果评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017: 30–45.
LI Jiabin. Study on the application technology and effect evaluation of mining-dumping-reclaiming of open-pit mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017: 30–45.
- [17] 白中科, 赵景逵, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例[J]. *生态学报*, 1999, 19(6): 870–875.
BAI Zhongke, ZHAO Jingkui, LI Jinchuan, et al. Ecosystem damage in a large opencast coal mine: A case study on Pingshuo Surface Coal Mine, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(6): 870–875.
- [18] 夏嘉南, 李根生, 卞正富, 等. 露天矿内排土场近自然地貌重塑研究——以新疆黑山露天矿为例[J/OL]. 煤炭科学技术: 1–9[2021–11–17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210804.1022.002.html>.
XIA Jianan, LI Gensheng, BIAN Zhengfu, et al. Research on the reshaping of the near-natural landform of the internal dump for open-pit mine: A case study of Heishan open-pit mine, Xinjiang, China [J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1–9[2021–11–12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20210804.1022.002.html>.
- [19] 夏嘉南, 李根生, 卞正富, 等. 水文保留曲面下草原露天矿内排土场地貌近自然重塑[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2756–2767.
XIA Jianan, LI Gensheng, BIAN Zhengfu, et al. Reshaping of near-natural landform of the internal dump in the grassland open-pit mine based on HPCS[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2756–2767.
- [20] DEPRIEST N C, HOPKINSON L C, QUARANTA J D, et al. Geomorphic landform design alternatives for an existing valley fill in central Appalachia, USA: Quantifying the key issues[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81(8): 19–29.
- [21] GB50197—2015, 煤炭工业露天矿设计规范[S].
- [22] LIU S F, FORREST J, YANG Y. A brief introduction to grey systems theory[C]/IEEE international Conference on Grey Systems and Intelligent Services. 2011: 1–9.
- [23] ZAPICO I, LARONNE J B, CASTILLO L, et al. Drainage network

- evolution and reconstruction in an open pit kaolin mine at the edge of the Alto Tajo natural Park[J]. *Catena*, 2021, 204: 1–12.
- [23] BARKWITH A, HURST M D, JACKSON C R, et al. Simulating the influences of groundwater on regional geomorphology using a distributed, dynamic, landscape evolution modelling platform[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 74: 1–20.
- [24] VELDKAMP A, BAARTMAN J E M, COULTHARD T J, et al. Two decades of numerical modelling to understand long term fluvial archives: Advances and future perspectives[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 166(S1): 177–187.
- [25] DAVID S H. Surface mining[M]. Baltimore, Maryland: Port City Press, 1990.
- [26] Pennsylvania State University, University Park. Integrated surface mining and reclamation techniques: A curriculum for training surface mining personnel[M]. Washington: Bureau of Mines, 1973.
- [27] BONTA J V, WARREN A. Impact of coal surface mining and reclamation on surface water chemical concentrations and load rates in three Ohio Watersheds[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2003, 39(4): 793–815.
- [28] MARTÍN M C, MARTÍN D J F, NICOLAU I J M, et al. Effects of topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro Mine (Central Spain)[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(2): 145–159.
- [29] 胡振琪, 肖武. 矿山土地复垦的新理念与新技术——边采边复[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(9): 178–181.
HU Zhenqi, XIAO Wu. New idea and new technology of mine land reclamation: Concurrent mining and reclamation[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 178–181.
- [30] 王东, 李广贺, 曹兰柱, 等. 基于内排空间利用最大化的露天煤矿排土线布置方法[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(9): 3150–3156.
WANG Dong, LI Guanghe, CAO Lanzhu, et al. method for arranging the working line of internal waste dump in surface coal mining based on maximizing utilization[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3150–3156.
- [31] QIN J, DU S, YE J, et al. SVNN-ANFIS approach for stability evaluation of open-pit mine slopes[J]. *Expert Systems With Applications*, 2022, 198: 1–13.