

煤矿排土场复垦干扰指数构建及其时空分异

谢苗苗^{1,2}, 高姝婷¹, 李少玲¹, 周 岩¹, 白中科^{1,2}, 张 煜³

(1. 中国地质大学(北京)土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035;
3. 中化明达科技有限公司, 北京 100013)

摘 要: 排土场复垦后受干扰情况影响重建生态系统的稳定性, 直接关系煤矿区生态修复成败, 针对长期恢复过程的干扰状况评价尤其重要。该文在 MODIS 全球干扰指数的基础上, 将地表温度与增强型植被指数相结合, 构建基于 Landsat 影像的排土场复垦干扰指数 (dump reclamation disturbance index, DRDI), 并计算山西平朔安太堡露天矿排土场 28 年间的干扰指数及其时空分异特征。结果表明: 复垦初期干扰强烈区呈现较强空间聚集特性, 植被结构和功能恢复至自然水平的平均时长约为 10 a, 单个排土场受干扰面积可下降至 1.32%~17.76%之间。平朔安太堡露天煤矿 4 个排土场在稳定时限和干扰分布特征上呈现典型差异, 受排矸方式、复垦方向、年限及地形地貌等因素驱动。DRDI 可评估复垦排土场重建生态系统稳定时限, 有效识别重建生态系统因干扰造成植被退化的空间范围和严重程度, 应用于排土场复垦效果评价将为优化复垦模式、提高复垦效率提供参考。干扰指数对自然及人为因素响应的定量分析是未来研究重点。

关键词: 煤矿; 复垦; 排土场; 干扰指数; Landsat; 地表温度; 增强型植被指数

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.032

中图分类号: TD88; X87

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0258-08

谢苗苗, 高姝婷, 李少玲, 周 岩, 白中科, 张 煜. 煤矿排土场复垦干扰指数构建及其时空分异[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 258—265. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.032 http://www.tcsae.org

Xie Miaomiao, Gao Shuting, Li Shaoling, Zhou Yan, Bai Zhongke, Zhang Yu. Construction and spatiotemporal variation of dump reclamation disturbance index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 258 — 265. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.032 http://www.tcsae.org

0 引 言

作为露天煤矿的必然产物,排土场压占土地在中国矿产资源开采导致的土地损毁中占重要比例^[1],每开采万吨煤形成外排土场 0.10 hm²^[2],土地被压占造成土壤结构功能受损、植被丧失、生物多样性下降等问题,成为土地复垦与生态修复中的关键场所。受到复垦模式、复垦年限、排土工艺等影响^[3],排土场的复垦效果存在差异,如何评价排土场复垦效果是优化复垦模式、提高复垦效率的关键。对已复垦排土场进行综合评价多用于复垦项目验收,如采用《土地复垦质量控制标准》进行评价^[4]。侧重排土场复垦过程和复垦机理的评价研究,多以土壤质量或者复垦方式与植被恢复状况的关系研究为主^[5],植被作为重建生态系统的指示性因子成为复垦效果评价中的核心。植被通常采用遥感获取植被指数与群落调查的植被状态指标进行表征^[6-9],采用间隔数据进行对比或时空互代法进行比较分析,从而获得复垦模式、复垦年限及其他生态因子对复垦植被恢复效果的影响^[10-13]。

上述研究多采用间隔数据,即从研究时段中挑选几个时点开展研究,存在重状态轻过程的问题。由于重建

生态系统结构的不稳定性,造成了干扰抵御力较差,植被恢复易发生退化,间隔化分析难以评价高度不稳定的重建生态系统。植被恢复效果中多以植被覆盖度、健康程度度量^[14-16],难以比较不同复垦类型,且对重建生态系统所受干扰关注较少。监测长时间序列中复垦排土场重建生态系统所受干扰,识别干扰程度较强的区域,综合植被的生态功能、状态来表征复垦后的干扰状况成为亟需解决的问题^[17-19]。

MODIS 全球干扰指数 (MODIS global disturbance index, MGDI) 旨在评价植被在连续变化中的状态及所受干扰的影响,通过反映植被蒸发蒸腾作用的地表温度 (land surface temperature, LST) 与植被状态的增强型植被指数 (enhanced vegetation index, EVI) 计算,可有效识别和评估森林生态系统受到野火、台风等干扰的演变过程^[20-21]。在 MGDI 基础上衍生的植被干扰指数 (vegetation disturbances index, VDI) 更适合于识别大尺度区域内的露天矿分布范围及其对植被的干扰作用^[22]。本文拟在 MGDI 和 VDI 基础上,利用更适合排土场尺度的 Landsat 数据构建露天煤矿排土场复垦干扰指数 (dump reclamation disturbance index, DRDI), 为重建生态系统干扰事件进行空间定位,确定干扰程度与范围,以解决复垦排土场植被恢复评价研究中重状态轻过程、难以表征干扰程度等问题,为提高重建生态系统的稳定性与抗干扰能力提供依据。

收稿日期: 2019-09-03 修订日期: 2019-11-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504401)

作者简介: 谢苗苗, 博士, 副教授, 主要从事景观生态与土地利用研究。

Email: xiemiaomiao@cugb.edu.cn

1 排土场复垦干扰指数构建

1.1 排土场复垦主要干扰因素

排土场复垦后经历一定时间恢复至较稳定状态，受到自然因素和人为因素共同干扰之后其结构与功能再次发生改变，土壤、植被、地形等生态因子的组合差异造成重建生态系统面临同样干扰产生不同响应，由恢复最优状态产生不同程度退化（图 1）。干扰因素包含自然和人为影响，复垦方向、措施与年限决定了复垦状况的基础性条件，不恰当的复垦方向与措施成为恢复过程中的不稳定因素，在复垦之初即注定重建生态系统存在退化风险，称为预定型干扰因素；矿业开发过程中的采、剥、运、排、覆等环节对复垦效果产生交互作用，不同采矿工艺，以及矿种品味差异影响了矿业开发干扰的类型与强度，统称为演进型因素，是与重建生态系统恢复过程同时存在、发展的干扰因素；另外受到自然因素影响，如暴雨、干旱、滑坡、泥石流等自然灾害，会使得重建生态系统突发改变（图 1）。预定型和演进型干扰多为人为活动，突发型干扰多来源于极端气象事件、自然灾害等非人为因素。

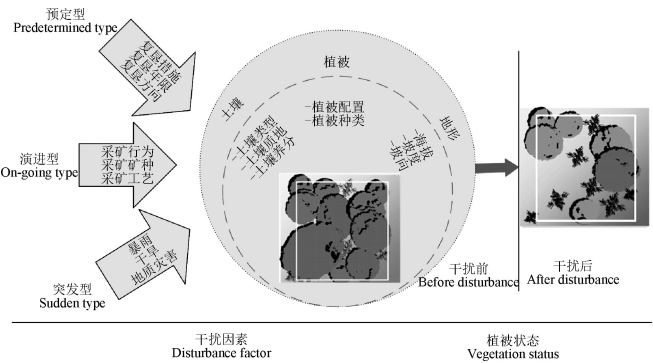


图 1 煤矿排土场干扰示意图（改自^[20]）

Fig.1 Schematic diagram of dump reclamation disturbance (Revised from^[20])

1.2 指数内涵

排土场复垦干扰指数表征在遭遇自然和人为活动等因素共同作用下，已经复垦后的排土场重建生态系统植被结构和功能变化的程度，包括恢复的程度与恢复后受到干扰退化的程度，通过植被某一时点状态与其恢复阶段内最优状态相比的差异状况进行表征。

MGDI 中应用 EVI 表征植被结构状态，地表温度 LST 表征植被的功能状态，通过两者的综合及其与过去一段时期最优值进行比较来表征植被受到干扰发生结构与功能退化的程度^[20]。由于植被和土壤水分等条件影响，地表温度和植被指数存在着明显的负相关性^[23-26]。植被通过蒸腾作用吸收潜热使地表温度降低，潜热的传递使得地表温度随植被密度的增加而降低^[27]。植被在重建生态系统中体现出较明显的降温效应，在长期复垦后，生态环境可以达到新的平衡，降温效应逐渐稳定。由于不同复垦区域配置乔灌木的复垦模式不同，导致植被覆盖对降温效果产生一定影响。为验证 MGDI 原理在矿区排土

场具备应用基础，本文开展了重建植被覆盖度与地表温度的相关分析，选择山西平朔南排土场已经复垦 30 年的植被样地进行实测，于夏季沿样地横截面每隔 10 m 测定地表温度与植被覆盖度。通过 5 个样地共 50 个采样点相关分析，得到乔木与灌木样地中地表温度与植被覆盖度在 0.01 水平上存在线性负相关（表 1）。相关前期研究也表明随着复垦年限的增长、复垦过程中土壤修复的进行及植被群落的演替和植被覆盖状况的改善，重建生态系统显示出明显的降温效应；长期复垦后生态环境达到新的平衡，降温效应逐渐稳定；不同复垦模式中，植被覆盖对降温效果的影响不同^[28-29]。

表 1 地表温度与植被覆盖度相关性分析

Table 1 Correlation analysis of land surface temperature and vegetation coverage

植被类型 Vegetation types	回归方程 Regression equation	决定系数 Coefficient of determination (R^2)
灌木 Shrubs	$Y = -0.074\ 4x + 2.393\ 6$	0.525\ 9
乔木 Woods	$Y = -0.051\ 6x + 1.840\ 2$	0.409\ 7
草本 Herbs	$Y = 0.058\ 7x - 1.306\ 1$	0.453\ 7

1.3 指数构建

基于非瞬时的 MGDI 构建表征小尺度重建生态系统的排土场复垦干扰指数^[20]，利用长时间序列数据确定植被生长最优状况，通过植被的结构和功能状态与最优状况的比值，表征重建生态系统所受的干扰程度。以地表温度表征植被降温功能，植被的降温效应越强，地表温度越低；以增强型植被指数表征植被结构状态，植被生长状况越好，增强型植被指数越高。地表温度越低同时增强型植被指数越高表明植被状态越好，与最优状况的比值越小表明干扰指数越小（式（1））。指数构建中包含两方面关键点，一是确定重建生态系统植被的现状，通过 LST 与 EVI 的比值获得，LST 反映植被的功能状态，EVI 代表植被的结构状况，植被恢复状态较差情况下，LST 越高，EVI 越低。二是确定每个像元研究时段某段时期内植被结构和功能配比最优状态，时段采用以复垦起始点到研究时点的标准确定，当植被处于最优状态时，LST 趋于最低值，EVI 趋于最高值，通过二者的比值，确定植被在此时间段内的最佳生长状态。

30 m 空间分辨率的 Landsat 遥感影像与 MODIS 数据相比，具有更高的空间分辨率，可快速准确监测排土场复垦状况。由于 Landsat 数据达不到 MODIS 的重访频率，无法利用多天合成数据进行计算，其数据集采用研究时段内所有可获取同季节并符合质量要求的影像（图 2）。DRDI_{ij} 为第 j 个像元目标监测年份 i 的干扰指数，公式如下

$$DRDI_{ij} = \frac{LST_{ij} / EVI_{ij}}{LST_{jmin} / EVI_{jmax}} \tag{1}$$

式中 LST_{ij} 为目标监测年份 i 年 j 像元的地表温度； EVI_{ij} 为目标监测年份 i 年 j 像元的增强型植被指数； LST_{jmin} 为自复垦措施开始至目标监测年份之间 j 像元地表温度的最小值； EVI_{jmax} 为自复垦措施开始至研究时点之间 j 像元 EVI 的最大值。

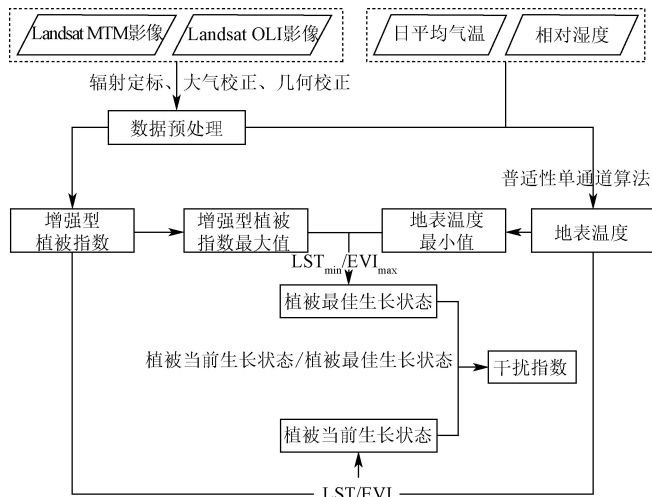


图2 排土场复垦干扰指数计算流程

Fig.2 Calculation procedure of dump reclamation disturbance index

2 数据与方法

2.1 研究区概况

研究区为平朔安太堡露天煤矿已复垦排土场,地处黄土高原东部,山西省朔州市平鲁区境内,是典型的生态脆弱区。气候干旱,年平均降水量在 430 mm 左右,主要集中于夏季,极端降水造成水土流失严重;年均气温为 3.6~7.3℃,昼夜温差大。地带性土壤为栗钙土与栗褐土的过渡带。该地区煤炭资源丰富,煤层厚度大,总厚度平均 26.08 m,煤层含煤系数 19.35%,煤层埋藏较浅,多为露天开采,安太堡露天煤矿 1987 年 9 月 10 日建成投产,剥离采用单一的单斗-卡车开采工艺,采煤为单斗铲-卡车-半固定破碎站-带式输送机工艺^[30-31]。

本文选择矿区内复垦时间较久,理化性质较为稳定的南排土场(南排)、内排土场(内排)、西排土场(西排)、西排扩大区(西扩)四个排土场为研究区,总面积 779.8hm²(图 3),采用的是自西向东“开采—运输—排土—复垦”的一体化工艺流程。不同排土场的复垦年限和复垦方式存在区别,南排形成于 1985—1989 年,1990 年开始复垦,植被以乔灌草多类型组合为主;西排形成于 1985—1993 年,1994 年开始复垦,以增加植被覆盖为目标;内排于 1989 年开始排弃,1998 年开始复垦,植被类型主要为草地或灌草组合;西扩形成于 2003—2005 年,2006 年开始复垦,地表覆盖以草地和农作物为主。研究区复垦时期覆盖多个阶段,适用于对重建生态系统的干扰监测研究。

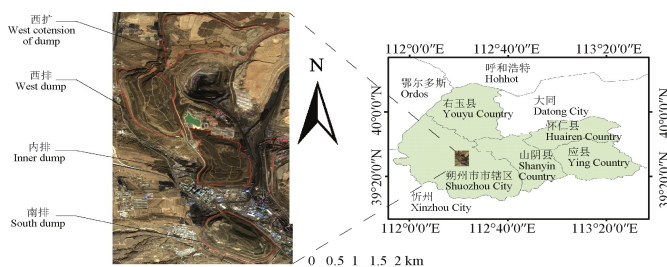


图3 研究区地理位置图

Fig.3 Schematic geographical location of study area

2.2 数据来源及预处理

本文采用 28 期 Landsat 遥感影像,以及安太堡露天煤矿的规划资料和实地调研资料为数据源。遥感影像包括 1987—2011 年 23 期 Landsat TM5 影像及 2013—2017 年 5 期的 Landsat8 影像,影像源于美国地质调查局(USGS, United States Geological Survey)资源探测卫星数据集(http://earthexplorer.usgs.gov/)。数据选取植被茂盛的 6 月至 10 月,天气晴朗无云,受干扰较小,影像质量理想,可真实反映反演状况。

对于原始的 Landsat 数据,本文采用 ArcGIS 10.2 及 ENVI 5.3 对其可见光和近红外波段进行预处理,包括几何校正、辐射定标以及 FLAASH 大气校正。

2.3 干扰指数计算

本文基于遥感影像将地表温度和 EVI 指数相结合构建排土场复垦干扰指数(式 1),计算 1987—2017 年安太堡露天煤矿排土场复垦干扰指数。采用均值-标准差分级法,根据干扰指数(DI)、均值(μ)及标准差(std),以 1std 和 2std 为间断点,将干扰划分为 4 级,一级为强烈干扰区,重建生态系统退化最为严重,二级为较强干扰区,三级为一般干扰,四级为未受干扰或经过复垦植被结构和功能恢复至或高于矿业开采前状态(图 3)。

2.3.1 增强型植被指数计算

应用 Landsat 遥感影像中的近红外、红光、蓝光波段,通过大气校正,辐射定标过程,进行增强型植被指数 EVI 的计算,公式如下^[32-34]

$$EVI = \frac{2.5(\rho_{NIR}^* - \rho_{RED}^*)}{(\rho_{NIR}^* + C_1\rho_{RED}^* - C_2\rho_{BLUE}^* + L)} \quad (2)$$

式中 ρ_{NIR}^* 、 ρ_{RED}^* 、 ρ_{BLUE}^* 为大气校正及辐射定标后近红外、红光、蓝光波段的反射值;参数 C_1 、 C_2 分别为 6.0 和 7.5,通过蓝光波段对红光波段的影响进行校正。 L 为土壤调节参数,其值为 1。

2.3.2 地表温度反演

本文采用单波段算法中的普适性单通道算法,采用 1987—2017 年 28 期 Landsat 遥感影像的红外波段反演安太堡露天煤矿四个排土场的地表温度。该方法主要包括地表辐射温度计算、参数计算和地表真实温度反演 3 个步骤^[35-36]。该方法经过数据预处理并结合气温、湿度数据具有较高的精度,误差一般在 0.6℃ 左右^[37]。

2.3.3 干扰指数验证

利用高空间分辨率的 WorldView 2 遥感影像表征地表植被的真实状况,使用像元二分法获得研究区植被覆盖度^[7],选择 64 个随机样点的植被覆盖度与干扰指数进行相关分析,如干扰指数较高区域对应植被覆盖较差地区,可验证干扰指数与地表植被真实状况较为符合。

2.4 干扰指数空间分布

2.4.1 时间动态分析

为排除气候状况对干扰指数整体波动的影响,选取

西扩排土场北部的井坪梁林场有林地作为对照区, 井坪梁林场抚育林木 333 hm², 被称为“平鲁第一天然氧吧”。将排土场干扰指数时间动态与较为稳定的林地生态系统干扰指数时间动态进行对比, 分析排土场作为重建生态系统的恢复效果。

2.4.2 空间自相关性分析

空间自相关反映的是某一属性在空间上的聚集程度和分布规律, 通过空间关联性进行分析, 常用 Moran's I 指数衡量相关程度^[38,39]。采用 Moran's I 指数对每年的排土场复垦干扰指数进行全局空间自相关分析, 判断其在空间上的是否具有聚集特性, 分析干扰程度空间聚集性的时间动态。

2.4.3 叠加分析

参考已有规划资料, 通过询问专家的方式, 结合实地调研, 得到了安太堡露天煤矿南排、内排、西排、西扩四个排土场的开始复垦时间与复垦模式, 参考复垦开始当年遥感影像获得不同复垦年限的边界。通过复垦年限空间分布与干扰指数之间的叠加分析获得不同复垦年限的干扰状况。

利用时相最为相近的高分辨率数据提取植被配置模式与排土场复垦干扰指数进行比较, 获得植被复垦模式与干扰状况之间的关系。本研究基于 2012 年 Wordview-2 遥感数据, 通过最大似然监督分类法将植被配置类型分为乔灌木、灌木、乔木、草地与耕地 5 类^[7], 将其与 2011 年干扰指数 (2012 年干扰指数由于数据限制暂缺) 进行叠加分析。

3 结果分析

计算研究区排土场复垦干扰指数, 得到 28 期排土场复垦干扰情况分布图, 通过高分辨率数据验证, 干扰指数与植被覆盖度在 0.01 水平上存在线性负相关 ($R^2=0.934$), 其空间分布与更高分辨率数据结果相符, 干扰指数可用于表征排土场重建生态系统植被复垦效果的时空动态。

3.1 不同时期排土场复垦干扰情况

3.1.1 干扰指数时间动态

对照区干扰指数在研究时段内围绕 3 上下波动, 波动范围较小, 而排土场的干扰指数呈现较大波动, 初期干扰程度较为强烈, 尤其在 1990 年呈现峰值, 之后逐渐下降, 趋近于对照区干扰指数。研究区四级干扰区面积相对增加, 一般干扰和强烈干扰面积有所减少, 强烈干扰面积轻微减少 (图 4)。纵观安太堡露天排土场干扰指数的变化情况, 根据所受干扰程度的波谷可以分为两个阶段, 第一个阶段是 1987 年至 2003 年, 所受干扰最低值在 7.3 左右; 第二个阶段为 2004 年至 2017 年, 所受干扰的谷值在 3.5~4.5 之间, 越来越接近未受干扰对照区的干扰指数。

3.1.2 干扰指数空间差异

从 28 期干扰指数中选取各排土场刚开始复垦、复垦 5、10、15 年的干扰指数空间分布进行对比, 不

同区域干扰指数变化存在差异, 不同复垦模式导致排土场恢复效果不同。南排、西排、内排及西扩四个排土场干扰指数平均值的总体变化趋势大致相同, 复垦前干扰较大, 恢复一定时间后, 生态系统得到一定程度的恢复, 干扰范围明显减小。南排、内排和西排同在 1990 年出现最大干扰, 后期呈现波动下降逐渐趋于稳定。干扰指数高值聚集区域主要处于排弃阶段、刚开始复垦未稳定阶段以及由于复垦不佳造成的煤矸石自燃等区域, 其植被也主要以草地、耕地或裸地为主。

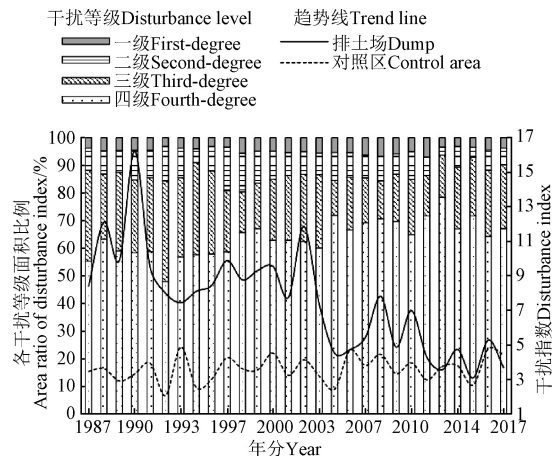


图 4 干扰等级面积变化与干扰指数变化趋势
Fig.4 Area ratio and variation trends of dump reclamation disturbance index

以对照区每年干扰指数的平均值加标准差作为阈值, 判断各排土场受干扰面积。南排是最早形成和开展复垦的排土场, 1990 年排弃结束后进行复垦, 0 年干扰面积占 98.66%, 复垦 5 年后干扰面积仍高达 51.90%, 复垦 10 年后降为 17.76%, 恢复速度较慢的原因是不当排矸方式造成的煤矸石自燃, 导致植被丧失, 加之地表温度过高影响周边植物根系, 影响恢复效果, 至复垦 15 年后基本不受干扰 (图 5)。

西排早期处于排弃阶段, 分别于 1994 年和 1996 年进行复垦, 恢复速度较慢, 于 2005 年复垦 10 年后基本达到稳定状态。在复垦 15 年后由于产业调整出现了一定程度的干扰加剧, 干扰所占面积比例为 7.12% (图 5)。

内排早期为露天矿坑, 闭坑后进行排弃, 于 1998 年和 2001 年复垦, 内排复垦 0 年干扰面积占比为 91.14%, 复垦 5 年后基本稳定, 复垦 10 年后受干扰面积下降至 1.32%, 恢复速度与复垦后的稳定性均要优于其他排土场 (图 5)。

西扩早期为自然林地, 未被开发利用, 复垦 0 年干扰面积占比 52.41%, 后部分开发为露天矿排土场, 2003 年开始排弃, 2005 年排弃结束, 分别在 2006 年和 2008 年开始复垦, 5 年后降至 13.73%。由于复垦年限较短, 虽然得到了一定程度的恢复, 但至今仍存在较大干扰, 尚未达到稳定状态 (图 5)。

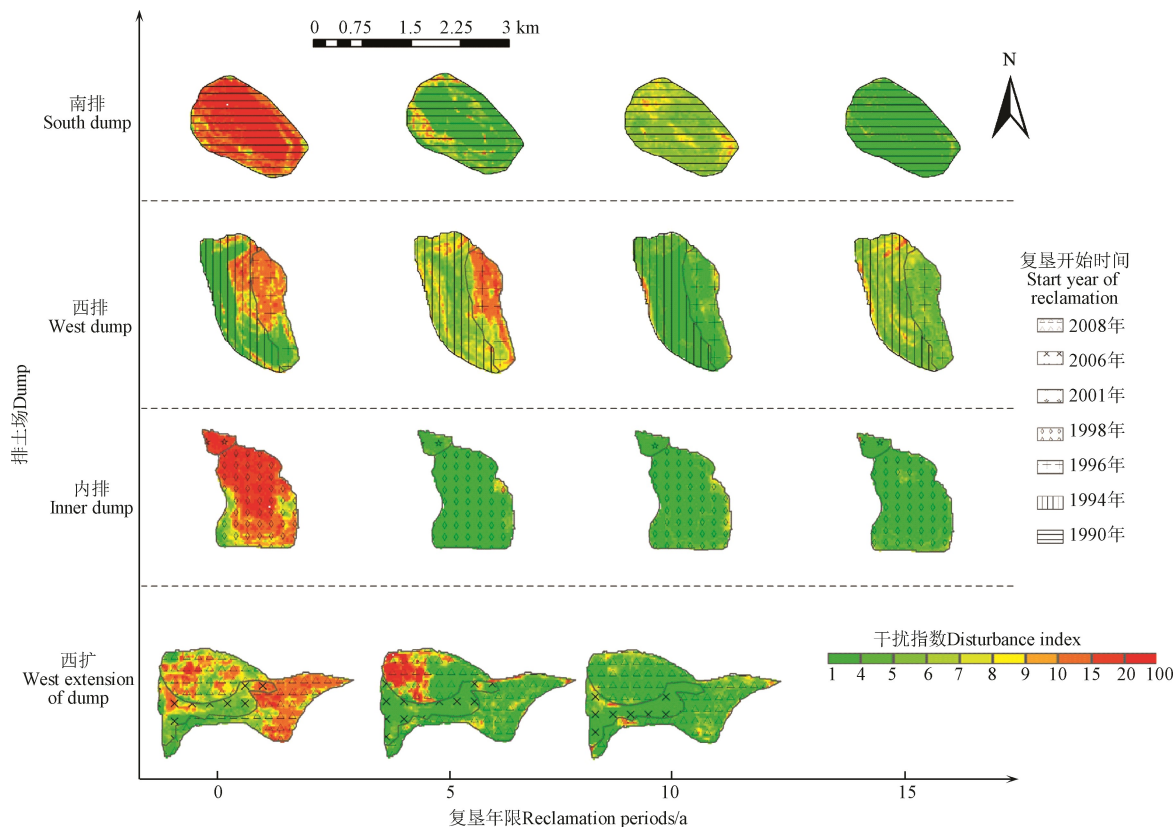


图 5 各排土场复垦干扰指数分布状况
Fig.5 Distribution of dump reclamation disturbance index of four dumps

3.2 干扰指数空间自相关性

排土场复垦干扰指数的空间自相关 Moran's I 指数在 0.75 上下波动,表明排土场复垦干扰指数具备显著的空间正相关。复垦初期干扰强度大时, Moran's I 指数呈明显上升趋势,表现出较强的空间聚集特征,局部的干扰会影响到周边地区。随着复垦年限增长,其空间自相关性有所下降(图 6)。四个排土场中,整体来看西扩的空间自相关性最强,显示出干扰现象较强的空间聚集效应。时间上波动较大的为西排和内排,与其发展历程及种植产业调整有较大关联。

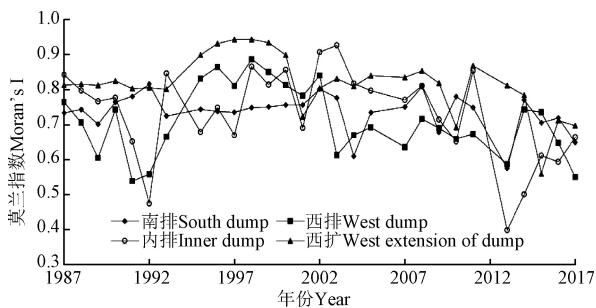


图 6 Moran's I 指数变化趋势
Fig.6 Variation trends of Moran's I

3.3 不同植被配置的干扰程度分析

研究区南排、内排和西排大部分由乔草覆盖,西扩多复垦为耕地和草地。通过 4 个排土场的植被配置方式与干扰指数叠加分析,结果表明不同植被类型的抗干扰

效应有显著差异,排土场不同复垦模式的干扰指数排序为:草地>耕地>乔草>灌草>乔灌草(表 2),草地受干扰程度最严重,乔灌草抗干扰能力最强。

表 2 复垦排土场不同植被类型及其干扰程度分析
Table 2 Disturbance degrees of different vegetation types in reclaimed dump

植被复垦模式 Vegetation reclamation patterns	面积比例 Area ratio/%	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean
草地 Grassland	22.59	16.74	2.40	6.33
耕地 Cultivated land	11.64	15.49	2.36	4.41
乔草 Woods and grassland	30.45	17.49	2.27	3.68
灌草 Shrubs and grassland	24.92	18.00	2.29	3.64
乔灌草 Woods, shrubs and grassland	10.39	11.79	2.31	3.29

4 讨论

由于 1994 年和 2012 年 Landsat 影像无符合质量要求的数据,两年数据暂缺,对动态分析和结果验证有一定影响,但研究结果符合其他研究中重建生态系统的恢复规律^[6,40]。通过本文构建的排土场复垦干扰指数动态表明一般 10 年后重建生态系统才能达到稳定,建议加强复垦排土场恢复效果的跟踪监测,跟踪监测年限应在复垦后 10 年以上。随着复垦时间增长,重建生态系统最优状态的判断更为准确,干扰指数对长时间复垦状况的反映将更为精准。

本研究在构建排土场复垦干扰指数的基础上,结合实地对照和土地覆被分析,初步分析了干扰指数变动的

原因, 下一步研究将针对不同干扰因素对重建生态系统的作用程度展开定量分析。结合基于 Landsat 影像的 DRDI 与基于 MODIS 的 MGDI 或 VDI, 更好地反映气候变化与人类活动共同影响下重建生态系统的扰动特征, 进一步明确人为干扰(预定型与演进型)和自然干扰(突发型)等不同因素的作用规律, 以期为建立更为稳定的重建生态系统提供参考。

5 结 论

在 MGDI 基础上构建的排土场复垦干扰指数直观有效且易于实施, 通过植被的结构和功能来反映复垦排土场所受到的自然和人为干扰动态, 其数据方便获取, 计算方法简单易懂, 可以有效、快速识别复垦排土场的干扰位置、空间范围和严重程度, 为土地复垦的后跟踪评价提供了有效方法。以山西省平朔安太堡露天矿区为案例区, 研究结果表明:

1) 排土场复垦干扰指数随着复垦年限的增长逐渐下降, 并趋近于对照区, 所受强烈干扰、较强干扰的面积呈逐渐减少趋势, 复垦地植被结构和功能恢复至自然水平的时长约为 10~15 年, 受干扰面积可下降至 1.32% 到 17.76% 之间。复垦初期, 受干扰区域呈现空间聚集状态, 局部干扰强烈区域对周边影响强烈。

2) 排土场干扰存在较强的时空分异, 对比分析研究区 4 个排土场的复垦恢复效果, 内排发展方向为生态、高效农业, 5 年内基本恢复, 并且复垦后未出现较大程度干扰, 得益于地形较平坦且人为管护下生态恢复速度较快。西扩复垦效果较差, 至今未完全稳定。南排于 1990 年开始复垦, 复垦时间最长, 但由于存在煤矸石自燃现象, 造成重建生态系统受损。西排复垦方式以增加植被覆盖为主, 乔木较多, 由于乔木生长速度较慢, 导致其生态恢复速度较慢。比较 4 个排土场干扰指数演变差异表明驱动排土场复垦干扰时空变化的因素主要包括排矸方式、复垦方向、年限及地形地貌等。

参 考 文 献

- [1] 卫博, 付梅臣, 白中科, 等. 基于节地的露天矿排土场设计[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 230—232.
Wei Bo, Fu Meichen, Bai Zhongke, et al. Dump design for opencast mine based on land-conserving[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 230—232. (in Chinese with English abstract)
- [2] 罗明. 土地复垦潜力调查评价研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [3] 曹梦, 张兰兰, 李贞, 等. 复垦年限及植被模式对煤矿复垦土壤微生物多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 278—285.
Cao Meng, Zhang Lanlan, Li Zhen, et al. Effects of regenerated periods and vegetation modes on soil microbial functional diversity in regenerated land of opencast coal mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(5): 278—285. (in English with Chinese abstract)
- [4] 寇晓蓉, 白中科, 杜振州, 等. 黄土区大型露天煤矿企业土地复垦质量控制研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 957—965.
Kou Xiaorong, Bai Zhongke, Du Zhenzhou, et al. Land reclamation quality completion standards for large opencast coalmine enterprises in Loess areas[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(5): 957—965. (in English with Chinese abstract)
- [5] Feng Yu, Wang Jinman, Bai Zhongke, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 191: 12—25.
- [6] 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 Jinman, Guo Lingli, Bai Zhongke, 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 (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 223—232. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张泽民, 吕昌河, 谢苗苗, 等. 基于 WorldView 2 影像的矿区植被重建效果评估[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1301—1310.
Zhang Zemin, Lü Changhe, Xie Miaomiao, et al. Evaluation of vegetation restoration effects in mining areas based on WorldView 2 images[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1301—1310. (in Chinese with English abstract)
- [8] Yang Zhen, Li Jing, Zippe Carl E., et al. Identification of the disturbance and trajectory types in mining areas using multitemporal remote sensing images[J]. Science of The Total Environment, 2018, 644: 916—927.
- [9] 李晶, Zipper Carl E., 李松, 等. 基于时序 NDVI 的露天煤矿区土地损毁与复垦过程特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 251—257.
Li Jing, Zipper Carl E., Li Song, et al. Character analysis of mining disturbance and reclamation trajectory in surface coal-mine area by time-series NDVI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 251—257. (in Chinese with English abstract)
- [10] 贾铎, 王藏姣, 牟守国, 等. 基于 NDVI 时间序列轨迹的草原露天矿区植被时空动态特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1808—1816.
Jia Duo, Wang Cangjiao, Mu Shouguo, et al. Vegetation spatial and temporal dynamic characteristics based on NDVI time series trajectories in grassland opencast coal mining[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1808—1816. (in Chinese with English abstract)
- [11] Liu Xiaoyang, Zhou Wei, Bai Zhongke. Vegetation coverage change and stability in large open-pit coal mine dumps in China during 1990—2015[J]. Ecological Engineering, 2016, 95: 447—451.
- [12] Yuan Ye, Zhao Zhongqiu, Niu Shuye, et al. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: A case study from Robinia pseudoacacia reclaimed forests, Pingshuo mine, China[J]. Catena, 2018, 165: 72—79.
- [13] Huang Lei, Zhang Peng, Hu Yigang, et al. Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines[J]. Ecological Engineering, 2016, 94: 638—646.
- [14] 张寅玲, 白中科, 陈晓辉, 等. 基于遥感技术的露天矿区土地复垦效益评价[J]. 中国矿业, 2014, 23(6): 71—75, 82.

- Zhang Yinling, Bai Zhongke, Chen Xiaohui, et al. Remote sensing-based assessment of land reclamation effect in open-cast mine[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(6): 71—75, 82. (in Chinese with English abstract)
- [15] 丁美青, 郭云开, 陈松岭, 等. 土地复垦整理植被覆盖度的遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 102—106. Ding Meiqing, Guo Yunkai, Chen Songling, et al. Evaluation of vegetation coverage land reclamation based on RS[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2010, 25(1): 102—106. (in Chinese with English abstract)
- [16] 丁美青, 陈松岭, 郭云开. 基于遥感的土地复垦植被覆盖度评价[J]. 中国土地科学, 2009, 23(11): 72—75. Ding Meiqing, Chen Songling, Guo Yunkai. Assessment on the vegetation coverage after land reclamation based on RS[J]. China Land Science, 2009, 23(11): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [17] 白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建[J]. 中国土地科学, 2018, 32(11): 1—9. Bai Zhongke, Zhou Wei, Wang Jinman, et al. Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas[J]. China Land Science, 2018, 32(11): 1—9. (in Chinese with English abstract)
- [18] Kennedy Robert E, Yang Zhiqiang, Braaten Justin, et al. Attribution of disturbance change agent from Landsat time-series in support of habitat monitoring in the Puget Sound region, USA[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 166: 271—285.
- [19] Grogan Kenneth, Pflugmacher Dirk, Hostert Patrick, et al. Cross-border forest disturbance and the role of natural rubber in mainland Southeast Asia using annual Landsat time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 169: 438—453.
- [20] Mildrexler David J, Zhao Maosheng, Running Steven W. Testing a MODIS global disturbance index across North America[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2103—2117.
- [21] Coops Nicholas C, Wulder Michael A, Iwanicka Donald. Large area monitoring with a MODIS-based Disturbance Index (DI) sensitive to annual and seasonal variations[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(6): 1250—1261.
- [22] Ma Qun, He Chunyang, Fang Xuening. A rapid method for quantifying landscape-scale vegetation disturbances by surface coal mining in arid and semiarid regions[J]. Landscape Ecology, 2018, 33(12): 2061—2070.
- [23] 李娅丽, 汪小钦, 陈芸芝, 等. 福建省地表温度与植被覆盖度的相关性分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(3): 445—454. Li Yali, Wang Xiaoqin, Chen Yunzhi, et al. The correlation analysis of land surface temperature and fractional vegetation coverage in Fujian province[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(3): 445—454. (in Chinese with English abstract)
- [24] 庞光辉, 蒋明卓, 洪再生. 沈阳市植被覆盖变化及其降温效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(1): 191—196. Pang Guangjie, Jiang Mingzhuo, Hong Zaisheng. Vegetation cover change and its cooling effects in Shenyang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 191—196. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王美莲, 戴晓爱. 植被覆盖度与温度关系的 MODIS 高光谱研究[J]. 测绘科学, 2018, 43(4): 138—143. Wang Meilian, Dai Xiaoi. Study of relation between vegetation coverage degree and temperature based on MODIS hyperspectral data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(4): 138—143. (in Chinese with English abstract)
- [26] 池腾龙, 曾坚, 王思彤. 基于 RS 和 GIS 的郑州市植被覆盖度与地表温度演化研究[J]. 中国园林, 2016, 32(10): 78—83. Chi Tenglong, Zeng Jian, Wang Sitong. Research of the relationship between vegetation fraction and evolution of thermal environment in Zhengzhou based on RS and GIS technology[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016, 32(10): 78—83. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王晓娟, 孔繁花, 尹海伟, 等. 高温天气植被蒸腾与遮荫降温效应的变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4234—4244. Wang Xiaojuan, Kong Fanhua, Yin Haiwei, et al. Characteristics of vegetation shading and transpiration cooling effects during hot summer[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4234—4244. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘静. 安太堡露天煤矿排土场地表温度影响因素研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. Liu Jing. The Research to the Influential Factors of the Surface Temperature in Antaibao Opencast Coal Mine[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张寅玲. 露天矿区遥感监测及复垦区生态效应评价: 以平朔露天矿区为例[D]. 北京: 中国地质大学, 2014. Zhang Yinling. Open Cast Mine Monitoring and Ecological Effect Assessment through Remote Sensing: A Case Study from Pingshuo[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [30] 何仕. 山西宁武煤田平朔矿区煤层赋存规律[J]. 山西煤炭管理干部学院学报, 2006, 19(3): 123—124.
- [31] 刘光, 段起超, 刘宪权, 等. 安太堡露天煤矿原煤开采工艺探讨[J]. 露天采矿技术, 2005(6): 10—11. Liu Guang, Duan Qichao, Liu Xianquan, et al. Discussion on raw coal mining technology in antaibao opencast coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2005(6): 10—11. (in Chinese with English abstract)
- [32] Liu Huiqing, Alfredo Huete. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 457—465.
- [33] Huete Alfredo, Didan Kamel, Miura Tomoaki, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1/2): 195—213.
- [34] 郭妮. 植被指数及其研究进展[J]. 干旱气象, 2003(4): 71—75. Guo Ni. Vegetation index and its advances[J]. Arid Meteorology, 2003(4): 71—75. (in Chinese with English abstract)
- [35] Jiménez-Munoz Juan C, Sobrino José A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D22): 4688.
- [36] Jiménez-Munoz Juan C, Sobrino José A, Skokovics Drazen, et al. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data[J]. IEEE Geoscience

- and Remote Sensing Letters, 2014, 11(10): 1840—1843.
- [37] Jiménez-Munoz Juan C, Sobrino José A. Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(5): 999—1014.
- [38] 秦昆. GIS 空间分析理论与方法[M]. 第二版. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [39] 杨永均, 张绍良, 卞正富, 等. 中国土地复垦省际格局分异及影响机制[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 206—214.
- Yang Yongjun, Zhang Shaoliang, Bian Zhengfu, et al. Spatial-temporal pattern differentiation and influencing mechanism of land reclamation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 206—214. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王晓琳, 王丽梅, 张晓媛, 等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分 16a 恢复程度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 198—203.
- Wang Xiaolin, Wang Limei, Zhang Xiaoyuan, et al. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 198—203. (in Chinese with English abstract)

Construction and spatiotemporal variation of dump reclamation disturbance index

Xie Miaomiao^{1,2}, Gao Shuting¹, Li Shaoling¹, Zhou Yan¹, Bai Zhongke^{1,2}, Zhang Yu³

(1. College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China;

3. Geoshare Information Technology Co, Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: Dumps in coal mine occupy huge areas of land and cause many problems, therefore, dumps reclamation become an important issue in ecological restoration. The reconstructed ecosystem of the reclamation dump is affected by various disturbance factors, which causes it to be unstable and prone to degradation. The disturbance influences the stability of reconstructed ecosystem and decides the success or failure of the ecological restoration in coal mine. Therefore, it is important to evaluate the recovery process of the reconstructed ecosystem. Based on the MODIS global disturbance index (MGDI) and vegetation disturbance index, which are based on MODIS data, we constructed the dump reclamation disturbance index (DRDI) by combing land surface temperature (LST) and enhanced vegetation index (EVI) using Landsat data. DRDI can provide higher spatial resolution than MGDI and VDI. EVI indicates the vegetation structure, and LST indicates the function of vegetation. The best status of reconstructed ecosystem is estimated by the maximum EVI and minimum LST, which is compared with the status of every year. DRDI is used to measure the vegetation recovery process and the degree of disturbance of vegetation in dumps. This study calculated the disturbance index of Antaibao opencast coal mine dump in Shanxi province, China for 28 years. This study combined remote sensing analysis with field validation data to analyze the spatial and temporal dynamics of characteristics for reconstructed vegetation restoration and interference. The results indicated that: in the early stage of reclamation, the areas with great disturbance showed highly spatial aggregated. The areas with disturbances had been gradually decreasing and took about 10 years for the vegetation structure and function to recover to the natural state in the reclamation dump, when the disturbed area could be reduced to the degree between 1.32% and 17.76%. DRDI could reflect the reclamation process and reveal spatial heterogeneity. The four dumps in Antaibao coal mine showed different stability periods and distribution characters of disturbance, which were influenced by dumping (coal gangue), reclamation strategy and vegetation reconstruction mode, as well as topography. Due to the spontaneous combustion of coal gangue, South Dump was more unstable than other dumps. Inner Dump began to reclaim later than other dumps but has entered a stable state relatively quickly, which was because of fine topography condition. The Western dump and its expansion area showed a degradation and great disturbance, where the surface vegetation covers mostly wasteland, grassland and cultivated land. DRDI can effectively identify the spatial extent and severity of disturbances for vegetation in reclamation dumps. DRDI is intuitive, effective and easy to implement. Its data can be easily obtained, and the calculation method is simple. It can effectively monitor the restoration properties of the reconstructed ecosystem for post-review evaluation of land reclamation. The quantitative analysis between influencing factors and disturbance index will be a key point in future research. Applying DRDI in evaluating the effect of reclamation in dumps will provide references to optimizing reclamation strategy and improving the efficiency of reclamation. For future research, DRDI can be combined with VDI to distinguish the causative factors of restoration character.

Keywords: coal mines; reclamation; dump; disturbance index; Landsat; land surface temperature; enhanced vegetation index