



移动阅读

邵亚琴,汪云甲,李永峰,等. 草原区煤电基地开发生态环境时空响应及综合评价[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3874-3886. doi:10.13225/j.cnki.jccs.SH19.1033

SHAO Yaqin, WANG Yunjia, LI Yongfeng, et al. Spatial-temporal response and comprehensive evaluation of ecological environment of prairie coal-electricity base development [J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(12): 3874-3886. doi:10.13225/j.cnki.jccs.SH19.1033

草原区煤电基地开发生态环境时空响应及综合评价

邵亚琴^{1,2,3}, 汪云甲^{1,3}, 李永峰³, 张 华³, 吴志刚⁴, 刘竞龙³

(1. 中国矿业大学 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室, 江苏 徐州 221008; 2. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010; 3. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221008; 4. 神华北电胜利能源有限公司, 内蒙古 锡林浩特 026000)

摘 要:草原区煤电基地的大规模开发必然引发剧烈的生态环境问题。针对胜利煤电基地生态系统的特点,应用系统分析方法,以土地、水体和大气为空间载体,辨识生态扰动因子,构建生态环境综合评价指标体系,以多源动态监测技术为获取基础信息的主要手段,利用遥感反演、数据融合、空间插值、统计分析等数据处理方法,从煤电基地尺度、功能区单元和最适宜格网单元等多时空尺度,综合评价和分析研究区域2000年,2005年,2010年和2015年的生态环境状况,探寻区域生态的时空变化规律。研究表明,2000—2015年,研究区域生态环境整体处于良好状态;2005—2010年,煤电基地开发规模迅速扩大,恶化趋势明显,生态环境状况显著变差、明显变差和略微变差的区域面积分别达到512.76,664.52,284.26 km²,占研究区域的72.23%,主要集中在露天矿区及电厂区、锡林浩特市城区、城镇居民点和省道S307两侧区域,并以露天矿区及电厂区、市区和居民点为中心形成阶梯状缓冲区,印证了露天矿开采及电厂开发、城市建设对生态环境产生负面扰动的累积效应;2010—2015年,露天矿区排土场复垦、电厂控排、城市湿地公园建设及省道S307沿线绿化有效改善了局部生态环境状况,体现了生态修复与监管对生态环境恢复的重要性。根据生态环境评价结果及其时空发展规律,提出了搭建基于大数据的草原区煤电基地生态环境“监测-评价-管理”三位一体多源动态监测平台和建立生态环境修复“5W+2H+E”循环管理模式的管控对策,为煤电基地环境保护和生态修复监管提供了可靠依据。

关键词:草原区煤电基地;生态环境;系统分析;综合评价;多源动态监测;时空响应

中图分类号:X82;P237

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2019)12-3874-13

Spatial-temporal response and comprehensive evaluation of ecological environment of prairie coal-electricity base development

SHAO Yaqin^{1,2,3}, WANG Yunjia^{1,3}, LI Yongfeng³, ZHANG Hua³, WU Zhigang⁴, LIU Jinglong³

(1. Key Laboratory of Land Environment and Disaster Monitoring, MNR, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mines and Coals, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 3. School of Environment & Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. Shenhua Beidian Shengli Energy Company, Xilinhot 026015, China)

Abstract: The large-scale development of prairie coal-electricity base generates a host of severe eco-environmental problems. Taking into account the characteristics of the ecosystem around the Shengli coal-electricity base, this study applied a system analysis method. Land, water, and the atmosphere were used as spatial carriers to identify ecological

收稿日期:2019-07-26 修回日期:2019-09-11 责任编辑:陶 赛

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0501109);国家自然科学基金资助项目(51574221,41874044)

作者简介:邵亚琴(1982—),女,内蒙古赤峰人,讲师,博士。E-mail:shaoyaqin2@163.com

disturbance factors and to construct a comprehensive evaluation index system of the eco-environment. In addition, this study used multi-source dynamic monitoring technology as the main mean to obtain basic information. Remote sensing inversion, data fusion, spatial interpolation, and statistical analysis along with other data processing methods were used to comprehensively evaluate and analyze the eco-environment of the region in 2000, 2005, 2010 and 2015. This analysis was also used to explore the temporal and spatial change laws of the regional ecology, stemming from the multi-temporal and spatial scales such as the coal-electricity base, the functional area unit, and the most suitable grid unit. The results show that the overall eco-environment of the study area was in a good state from 2000 to 2015. From 2005 to 2010, the development scale of the coal-electricity base expanded rapidly, resulting in an obvious deterioration trend. The ecological areas that incurred significant deterioration, moderate deterioration and slight deterioration reached 512.76, 664.52 and 284.26 km², respectively, accounting for 72.23% of the study area. The deterioration was mainly concentrated in the open-pit mining area, power station area, urban area of Xilinhat City, urban settlements and the bilateral area of provincial highway S307. Moreover, a ladder buffer zone was formed within the areas around the open-pit mining and power station, and the urban and residential zones served as the center. This confirmed the cumulative effect of the negative disturbances to the eco-environment caused by open-pit mining, power station development and urban construction. From 2010 to 2015, the reclamation of the dump in the open-pit mining area, the controlled discharge of the power station, the construction of an urban wetland park and the greening along provincial highway S307 have effectively improved the local ecological environment. It reflected the importance of ecological restoration and regulation to eco-environment restoration. According to the results of eco-environment evaluation and its spatial-temporal development laws, the paper puts forward a multi-source dynamic monitoring platform with the trinity of “monitoring, evaluation and management” based on big data for the eco-environment of prairie coal-electricity base and the control countermeasures for the establishment of the circular management mode of “5W+2H+E” for the eco-environment restoration, providing a reliable basis for the environmental protection and ecological restoration supervision of the coal-electricity base.

Key words: prairie coal-electricity base; ecological environment; system analysis; comprehensive evaluation; multi-source dynamic monitoring; spatial-temporal response

草原区煤电基地开发在满足我国能源战略需求的同时,给区域生态环境系统带来了巨大冲击,引发众多生态问题,如土地损毁、地下水位下降、大气污染等^[1],生态扰动表现方式和演变机制各不相同,累积效应显著^[2],严重影响了区域能源保障和生态屏障作用的发挥,土地复垦与生态修复亟待加强^[3-4]。实现煤电基地生态环境实时监测和合理评价,为煤电基地生态环境监管和修复补偿提供依据,是促进煤电基地生态文明建设的重大课题。

生态环境评价多以其生态系统发展特点为依据,基于协同理论^[5]、系统动力学^[6]、生命周期^[7]、解释结构模型^[8]等理论分析方法,建立生态系统驱动机制,识别生态扰动因子,构建不同的生态环境评价体系和概念模型,通过多种途径和手段获取指标数据,针对煤电基地主要在生态效应评价^[9]、生态脆弱性评价^[10]、土地退化评价^[11]及修复对策^[12]、植被覆盖损害及变化评价^[13-15]、大气容量评价^[16]、电厂群空气质量监管^[17-18]和水资源评价^[19-20]等方面取得一定的研究成果。

其中针对生态效应、生态脆弱性等评价多从研究的角度出发构建理论模型,考虑资源开发、生态环境、经济社会等多方面因素,建立具有多层次多指标的评价体系,该类评价体系虽然较全面的反映了在资源开发驱动下生态环境的变化和经济社会的发展,但在评价过程中部分指标数据很难实时获取,不利于实现生态环境的实时动态监测及评价。由于该类评价没有统一的规范标准,主观性较强,与国家的政策法规衔接困难,适用范围受限。而针对土地、植被、大气、水体的独立评价,可作为综合评价分指标建立的参考,特别是通过遥感等多源动态监测技术获取指标数据,为本文建立综合评价指标体系提供了技术借鉴。

草原区煤电基地开发规模巨大且时序较长,为实现生态环境综合评价过程实时动态和综合评价结果有据可依,笔者参照国家生态环境状况评价技术规范,考虑实时动态评价的可行性,针对其生态环境的特点,建立草原区煤电基地综合评价体系,该评价体系包含1个综合指数和5个分指数。综合评价对于全面反映煤电基地生态环境状况及其时空发展趋势

具有重要意义。

笔者选择典型的草原区胜利煤电基地为研究区域,基于SA(System Analysis)模型构建合理的综合评价指标体系,借助多源动态监测技术获取指标数据,综合评价和分析研究区域2000年,2005年,2010年和2015年生态环境状况及其时空变化,并提出生态环境管控与修复对策,为草原区煤电基地实现可持续发展提供有效途径。

1 研究区域概况

内蒙古中东部草原区胜利煤电基地,2005年开始大规模开发,位于锡林浩特市西北郊,其中包含的胜利煤田延西南-东北走向,地理坐标为东经 $115.907^{\circ} \sim 116.442^{\circ}$,北纬 $43.904^{\circ} \sim 44.231^{\circ}$,划分为6个露天煤矿、1个露天锆矿、3个井工煤矿,目前有5个露天煤矿已投产,其中胜利一号露天煤矿的规模最大;同时胜利煤电基地规划建设坑口电厂群项目。考虑到煤田南部紧邻锡林浩特市市区及坑口电厂规划的空间位置,且煤田外有国家级自然保护区,故以胜利煤田边界向外扩展12 km作为研究区域^[21](图1)。

研究区域内以高地草原为主,海拔为939~

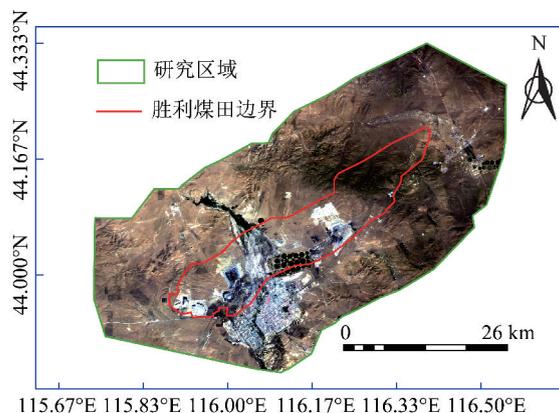


图1 研究区域区位

Fig. 1 Study area location

319 m,主要特点是风大、干旱、寒冷。植被类型以典型草原和草甸草原为主,伴有小面积的荒漠草原和沙地植被。土壤类型以栗钙土为主,锡林河两岸伴有少量石灰性草甸土、草甸沼泽土和潮土。

2 数据来源

本文以多源动态监测技术为手段,获取的数据类型主要包括监测数据,统计数据和调查数据,其数据类型、数据用途、数据来源和数据周期见表1。

表1 多源数据的类型、用途、来源和时间周期

Table 1 Types, uses, sources and time periods of multi-source data

多源数据	数据类型	数据用途	数据来源	时间周期
监测数据	Landsat TM/OLI	土地利用分类	地理空间数据云	2000年、2005年、2010年、2015年共4期
	OMI Level-2 SO ₂ 和 NO ₂ 数据产品	反演 SO ₂ 和 NO ₂ 柱状浓度		2005—2015年共11 a
	MOD13Q1 16 d、250 m 植被指数	提取植被指数	美国国家航空航天局	2000—2017年共18 a
	MOD/MYD04_3K	反演 AOD 厚度		2000年、2005年、2010年、2015年共4期
	SRTM/ASTERDEM	土壤侵蚀估算	地理空间数据云	2000年
	露天矿年际采掘工程平面图	地形地貌的更新	露天矿技术部	2005—2015年共11 a
统计数据	研究区域 AQI 数据	数据验证分析	资源环境数据云平台	2015年
	锡林浩特市原煤产量和火力发电量	辅助分析	锡林郭勒盟统计局	2000—2017年共18 a
	人口和 GDP 空间分布数据	辅助分析		2000年、2005年、2010年、2015年共4期
	土壤类型空间分布数据	土壤侵蚀估算	资源环境数据云平台	1995年
调查数据	植被类型空间分布数据	土地利用分类		2001年
	降雨逐日数据	土壤侵蚀估算	中国气象数据网	2000—2017年共18 a
	现场照片、视频	辅助分析	现场采集	2016—2019年每年的5—10月

3 研究方法

3.1 基于SA的煤电基地复合生态系统分析

复合生态系统最早由我国生态学家马世骏提出,

指以自然本底环境为载体,人类行为为主导、资源开发为命脉、经济社会管理体制为依托的人工生态系统^[22]。为了研究煤炭资源开发对生态系统的扰动规律,众多学者建立了煤矿区复合生态系统,将其划分

为煤矿区资源开发子系统、煤矿区环境子系统和煤矿区社会经济子系统,在煤矿区生态环境驱动机理、生态环境累积效应及生态风险防控等研究中广泛应用^[23-25]。

煤电基地生态系统是在煤矿区基础上发展起来的典型人工生态系统,为了突出生态环境监测、管理和评价的重要作用,本文将草原区煤电基地复合生态系统划分为煤电资源开发子系统、资源环境子系统、社会经济子系统和生态环境监管子系统,分析煤电基地开发驱动下生态系统的发展过程。其中,煤电资源开发子系统描述煤炭开采和电厂开发的不同组合模式及其对生态环境造成的影响,主要包括原煤产量和火力发电量;社会经济子系统描述的是煤电开发对社会经济带来的影响,包括煤电基地人口及 GDP 的变化;资源环境子系统以土地、水体和大气为空间载体,反映煤电开发和社会经济发展对生态环境的影响;生态环境监管子系统描述了不同的开发调控政策与管理决策对生态环境的影响。各子系统相互独立又互相影响(图 2)。

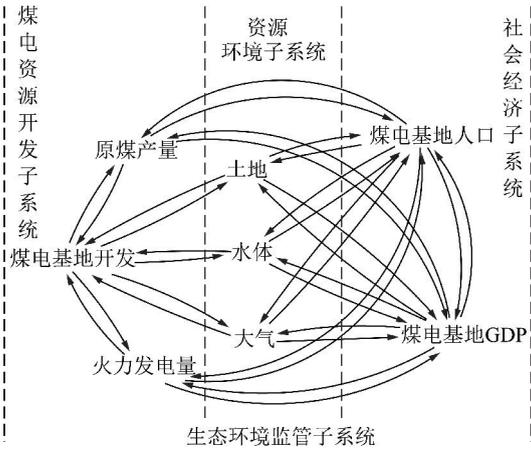


图 2 煤电基地各子系统相互影响关系

Fig. 2 Interaction among subsystem eco-environment system in Coal-Electricity Base

3.2 综合评价指标体系的构建

根据草原区煤电基地系统分析可知,在煤电基地不断开发的推动下,土地、植被、水体和大气等环境要素不断发生变化,相互耦合并逐渐累积,主要体现在土地利用与植被覆盖变化、土壤侵蚀程度、生物多样性变化及大气环境污染等方面。

目前生态环境状况多采用指标法进行评价,通过计算比较区域生态环境时间轴的指标值,评估生态环境的变化趋势和补偿修复的效果。原环境保护部在 2015 年颁布的新版《生态环境状况评价技术规范》^[26](HJ 192—2015)(以下简称《规范》),各项评价指标科学合理概括了区域生态环境的响应因子,本

文以此为基础,考虑指标数据通过多源动态监测技术的可获取性及草原区胜利煤电基地区域生态环境的特点,选取 5 个分指数和 1 个综合评价指数。根据选取的各分指数的内涵及研究区域土地利用与植被覆盖变化、土壤侵蚀程度、生物多样性变化及大气环境污染的特点,构建了层次结构模型(图 3),重新设置评价指标,构建了草原区煤电基地生态环境综合评价体系。

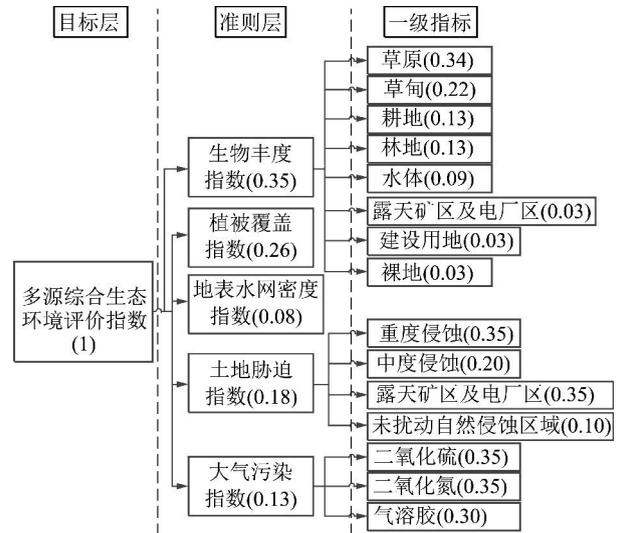


图 3 草原区煤电基地生态环境综合评价指标体系层次结构模型

Fig. 3 Hierarchical model of comprehensive evaluation index system for eco-environment in prairie coal-electricity base

(1) 生物丰度指数 EI_{bio}

$$EI_{bio} = A_{bio} (w_{g1}a_{g1} + w_{g2}a_{g2} + w_1a_1 + w_fa_f + w_wa_w + w_ma_m + w_ca_c + w_ba_b) / a \quad (1)$$

式中, EI_{bio} 值越高,生物多样性水平越高; A_{bio} 为生物丰度指数的归一化系数; $w_{g1}, w_{g2}, w_1, w_f, w_w, w_m, w_c, w_b$ 分别为草原、草甸、耕地、林地、水体、露天矿区及电厂区、建设用地和裸地的权重; a 为研究区域总面积; $a_{g1}, a_{g2}, a_1, a_f, a_w, a_m, a_c, a_b$ 分别为草原、草甸、耕地、林地、水体、露天矿区及电厂区、建设用地和裸地的面积。

(2) 植被覆盖指数 EI_{veg}

$$EI_{veg} = NDVI_{average} = A_{veg} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \right) \quad (2)$$

式中, EI_{veg} 值越高,植被覆盖度越高; A_{veg} 为植被覆盖指数的归一化指数; P_i 为 5—9 月像元 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 月最大值的均值。

(3) 地表水网密度指数 EI_{den}

$$EI_{den} = A_w a_w / a \quad (3)$$

式中, EI_{den} 值越高,地表水网越丰富; A_w 为地表水网

密度指数的归一化系数。

(4) 土地胁迫指数 EI_{ero}

$$EI_{ero} = A_{ero}(w_1 a_1 + w_2 a_2 + w_3 a_3 + w_4 a_4) \quad (4)$$

式中, EI_{ero} 值越高, 土地胁迫越严重; A_{ero} 为土地胁迫指数的归一化系数; w_1, w_2, w_3, w_4 为重度侵蚀、中度侵蚀、露天矿区及电厂区和未扰动自然侵蚀面积的权重; a_1, a_2, a_3, a_4 为重度侵蚀、中度侵蚀、露天矿区及电厂区和未扰动自然侵蚀的面积。

(5) 大气污染指数 EI_{pol}

$$EI_{pol} = A(NO_2)w(NO_2)D(NO_2) + A(SO_2)w(SO_2)D(SO_2) + A_{AOD}w_{AOD}D_{AOD} \quad (5)$$

式中, EI_{pol} 值越高, 大气污染越严重, $A(NO_2), A(SO_2), A_{AOD}$ 分别为 NO_2, SO_2 和 AOD 的归一化系数; $w(NO_2), w(SO_2), w_{AOD}$ 为 NO_2, SO_2 和 AOD 的权重; $D(NO_2), D(SO_2), D_{AOD}$ 为 NO_2, SO_2 和 AOD 的排放量。

(6) 综合评价指数 MEI_{CE}

基于上述 5 个分指数通过线性加权求和获得的草原区煤电基地综合生态评价指数 MEI_{CE} (Multi-source Ecological Index of Prairie Coal - Electricity Base, MEI_{CE}):

$$MEI_{CE} = w_{bio}EI_{bio} + w_{veg}EI_{veg} + w_{den}EI_{den} + w_{ero}(100 - EI_{ero}) + w_{pol}(100 - EI_{pol}) \quad (6)$$

其中, $w_{bio}, w_{veg}, w_{den}, w_{ero}, w_{pol}$ 分别为 5 个分指数的权重。从指数计算公式可以看出, 生境质量指数、植被覆盖指数和地表水网密度指数越高, 土地胁迫指数和大气污染指数越低时, MEI_{CE} 越高, 生态环境状况越好。

3.3 评价方法

3.3.1 基础数据处理

(1) 土地利用分类

利用 ENVI5.3 对 Landsat TM/OLI 影像进行预处理, 根据研究区域地物波谱特征选择最佳波段组合, 参照原国土资源部修订的最新分类标准^[27], 根据研究区域的特点, 采用支持向量机监督分类与目视解译相结合的方法^[28], 将研究区域土地利用类型分为草原、草甸、建设用地、露天矿区及电厂区、林地、耕地、水域及裸地等 8 种类型, 4 期影像分类结果总体精度均高于 90%, 同时 Kappa 系数均在 0.8 以上, 满足解译精度要求。

(2) 植被指数

研究区域于 5 月草场开始返青, 10 月基本枯黄, 故下载了研究区域每年 5—9 月的该研究区域 MOD13Q1 NDVI 产品, 采用最大值合成法计算了 5—9 月 NDVI 最大值的平均值, 能够代表研究区域全年

的植被覆盖情况。

(3) SO_2, NO_2 柱状浓度和气溶胶厚度

将 OMI 卫星 Level-2 SO_2 和 NO_2 数据产品的原始条带数据转换成点状数据并对点状数据进行空间插值, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ^[17]。

采用暗像元法和深蓝算法相结合^[29-30], 基于 MODIS L1B 数据产品反演研究区域的气溶胶厚度 (Aerosol Optical Depth, AOD)。

本文利用资源环境数据云平台下载的 2015 年的 SO_2, NO_2 数据及气溶胶主要成分 $PM_{2.5}, PM_{10}$ 的数据, 与遥感反演数据月均值进行归一化比较验证, 其 person 相关系数分别为 0.72, 0.94, 0.65 和 0.68, 相关性显著, 表明遥感反演数据能够较好的反映大气环境质量状况的变化。

(4) 土壤侵蚀估算

草原区胜利煤电基地位于典型的土壤风水复合侵蚀区域, 本文建立了研究区域土壤侵蚀风水复合模型。根据前学者^[31]的研究成果, 利用《土壤侵蚀分类分级标准》中植被覆盖度与侵蚀模数之间的关系, 基于最小二乘原理, 建立土壤风蚀方程:

$$A_v = -47.07 \ln v + 217.25 \quad (7)$$

其中, A_v 为该区域土壤风力侵蚀模数; v 为植被覆盖度, 当 $P < 0.01$ 时, $R^2 = 0.9481$, 二者的相关性十分显著。

基于修正通用土壤流失方程 RUSLE 估算研究区域水蚀模数^[32]。其计算公式为

$$A = RKLSCP \quad (8)$$

式中, A 为土壤水力侵蚀模数; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持措施因子。

研究区域风蚀和水蚀在空间上叠加, 时间上交错, 研究区域的土壤侵蚀总模数可以利用水力侵蚀模数和风力侵蚀模数的空间叠加运算:

$$A_s = A + A_v \quad (9)$$

式中, A_s 为研究区域的土壤侵蚀总模数。

根据本文提出的土壤侵蚀复合模型, 定量估算的 2000 年和 2005 年末受煤电基地开发影响和影响较小时的土壤侵蚀模数结果, 对照《内蒙古土壤侵蚀图》^[33], 与其侵蚀等级基本一致, 说明该方法具有一定的适用性。

3.3.2 权重的确定

本文采用层次分析法确定了不同层次各指标的权重 (图 3)。

层次分析法^[34] 首先构建层级结构模型, 并对各层次因子按照两两比较法建立相对重要性判断矩阵,

计算判断矩阵的特征根、特征向量,找出最大特征根 λ_{\max} 及相应的特征向量 w ,计算一致性指标CI(Consistency Index, CI),查表找到相应阶段 n 的平均随机一致性指标RI(Random Index, RI),按照下式计算一致性比例CR,当 $CR \leq 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性在接受范围,特征向量 w 可作为权重向量,否则需要重新计算。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

$$CR = CI/RI \quad (11)$$

3.3.3 数据标准化

在计算 MEI_{CE} 之前,各分指数需要进行标准化处理,归一化指数 A_i 的作用就是使各系数的计算结果落入指定取值区间,此次评价选取的区间是 $[0, 100]$, MEI_{CE} 的计算值也在该区间内,归一化系数的计算方法为

$$A_i = \frac{100}{I_{\max}} \quad (12)$$

式中, I_{\max} 为各分指数标准化前的最大值。

3.3.4 生态环境状况分级与变化分析标准

参照《规范》标准,按生态环境综合评价指数将生态环境状况分为5个等级(表2);同时,为了分析

生态环境状况的指数与基准值的变化情况,按表3划分其生态环境质量变化幅度和波动变化幅度。

表2 生态环境状况分级

级别	优	良	一般	较差	差
指数	$EI \geq 75$	$55 \leq EI \leq 75$	$35 \leq EI \leq 55$	$20 \leq EI \leq 35$	$EI < 20$

表3 生态环境状况变化度及波动分级

Table 3 Classification grades of eco-environment changes and gradation

变化值	$ \Delta EI < 1$	$1 \leq \Delta EI < 3$	$3 \leq \Delta EI < 8$	$ \Delta EI \geq 8$
变化级别	无明显变化	略微变化	明显变化	显著变化
波动分级	稳定	波动	较大波动	剧烈波动

4 生态环境多时空尺度综合评价

4.1 煤电基地宏观尺度评价

以煤电基地宏观尺度评价生态环境状况能够有效的反映生态环境的全局状况。首先基于基础数据处理结果完成各分指数的计算并进行归一化,得到研究区域全局评价指数(表4)。

表4 胜利煤电基地综合生态评价指数计算结果

Table 4 Calculation results of comprehensive ecological evaluation index in Shengli Coal-Electricity Base

年份	生物丰度指数	植被覆盖指数	地表水网密度指数	土地胁迫指数	大气污染指数				综合指数
					SO ₂	NO ₂	AOD	大气污染综合指数	
2000年	100	67.25	31.5	88.21	6.46	18.42	91.26	36.09	65.44
2005年	97.96	83.42	100	59.48	40.0	60.05	87.56	61.31	76.30
2010年	89.91	80.53	19.66	84.58	100	95.11	100	98.29	61.50
2015年	93.31	100	60.44	100	68.83	100	94.03	87.30	60.80

(1)研究区域15年4期的整体生态环境状况均达到了良好及以上水平。

(2)2000—2005年煤电基地开发规模较小,对生态环境影响较小。据调查,2000年以前我国对草地资源、矿产资源等自然资源的开发属于粗放掠夺式,致使生态环境破坏严重,随着国家对生态环境的重视和群众环保意识的增强,2000年以后全国开始大规模开展生态环境保护与修复,2000—2005年 $\Delta EI = 10.86$,生态环境整体状况显著变好。

(3)2005—2015年研究区域内煤电基地大规模开发,同时伴随城市不断发展和扩张,人类活动对生态环境的影响类型和程度不断增加,造成生态环境状况显著恶化;特别是2005—2010年间,煤电基地开发处于快速发展期,生态环境恶化程度显著。2010—

2015年,受煤电基地土地复垦和环境修复等因素的影响,生态环境全局状况无明显变化。

4.2 基于功能区评价

为了突出煤电基地开发对研究区域生态环境的影响,按我国生态功能单元的定义,本文将其划分为露天矿区及电厂区、城乡建设区、农牧林区,根据多源生态环境评价指标体系得到各功能单元生态环境的评价结果,见表5。

(1)露天矿区和电厂区的生态环境状况在2000—2010年处于恶化趋势,2010—2015年有所好转,与排土场复垦关系密切。

(2)城乡建设区的生态环境状况则处于一般偏上和良好状态,较适合人类居住。

(3)农牧林区的生态环境则一直处于良好以上

的状态,植被覆盖度较高,生物多样性较丰富。

表5 各功能单元综合生态评价指数计算结果

Table 5 Calculation results of comprehensive ecological evaluation index of each functional unit

年份	露天矿区及电厂区	城乡建设区	农牧林区
2000年	32.95	56.96	73.19
2005年	28.21	60.50	74.58
2010年	23.76	51.15	72.13
2015年	23.66	50.82	70.43

4.3 基于最适宜格网单元的评价

4.3.1 最适宜格网的选择

本文通过变异系数的计算确定最适宜评价价格网评价单元,变异系数越大,说明该尺度的格网单元是研究区域生态环境状况指数空间分异的最佳格网单元^[35],用以探测研究区域生态环境的时空变化规律。变异系数为

$$CV = \frac{\sigma_{EI}}{EI} \quad (13)$$

式中, σ_{EI} 为各尺度格网单元内生态环境状况指数的标准差; \overline{EI} 为各尺度格网单元内生态环境状况指数

的平均值。

图4为研究区域4年不同格网尺寸的变异系数变化曲线,其发展趋势基本一致,变异系数在格网单元900 m×900 m时达到最大,故以此格网单元为最适宜评价单元。

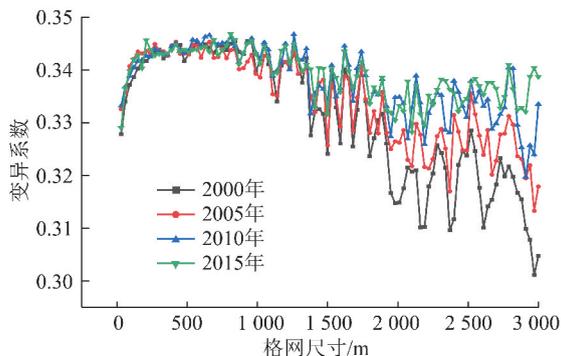


图4 不同格网尺寸下生态环境状况综合指数变异系数
Fig. 4 Coefficient of variation of ecological index under different grid sizes

4.3.2 基于最适宜格网单元的时空评价

在最适宜格网900 m×900 m单元下进行生态环境状况评价,按表2对生态环境状况进行分级(图5)并进行面积统计(表6)。

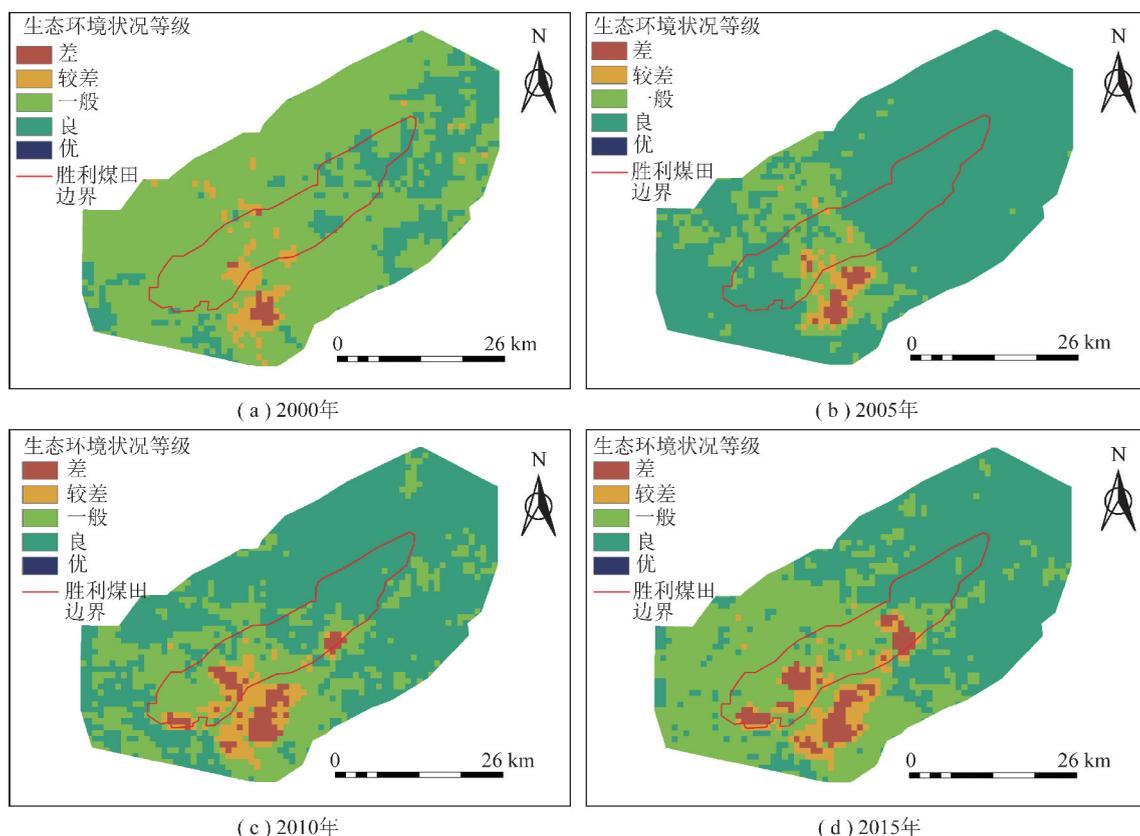


图5 研究区域900 m×900 m格网单元生态环境状况评价结果空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of eco-environment assessment results under 900 m×900 m grid in study area

表 6 900 m×900 m 格网单元下生态环境状况分级面积统计
Table 6 Statistics of eco-environment grading area under 900 m×900 m grid

生态环境 状况等级	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km ²	面积百分比/%						
差	16.20	0.80	26.74	1.34	64.80	3.20	87.48	4.32
较差	86.27	4.26	48.60	2.40	106.96	5.29	106.15	5.25
一般	1 533.53	75.79	345.89	17.09	601.67	29.73	878.73	43.43
良	387.25	19.14	1 602.01	79.16	1 249.78	61.77	950.89	46.99
优	0.12	0.01	0.13	0.01	0.16	0.01	0.12	0.01

(1)2000 年,研究区域生态环境状况为一般等级的所占比例最大,为 75.79%,其次是良好区域为 19.14%,生态环境状况为优的所占比例最小,为 0.01%。

(2)2005 年,研究区域生态环境状况明显好转,良好区域所占比例上升为 79.16%;2010 年研究区域 61.77% 为生态环境良好区域,29.73% 为一般区域,差和较差区域占 8.49%,较 2000 年和 2005 年明显增加;2015 年,生态环境良好区域和一般区域分别为 47% 和 43.43%,差和较差区域为 9.57%,为研究期间比例最高。

(3)从 2000 年,2005 年,2010 年和 2015 年研究

区域生态环境状况等级的空间分布可知,形成以市区、居民点和露天矿区及电厂区为中心的阶梯状缓冲区,印证了城市建设、露天矿开采及电厂开发对生态环境产生的负面扰动。

4.3.3 生态环境时空变化分析

为了在最适宜格网单元下分析研究区域生态环境的时空变化,将研究时段 2000—2005 年,2005—2010 年,2010—2015 年以及 2000—2015 年 4 个阶段分别进行生态环境状况栅格差值运算,参照表 3 进行生态环境状况变化度分级(图 6),并进行了各变化度等级的面积统计(表 7)。

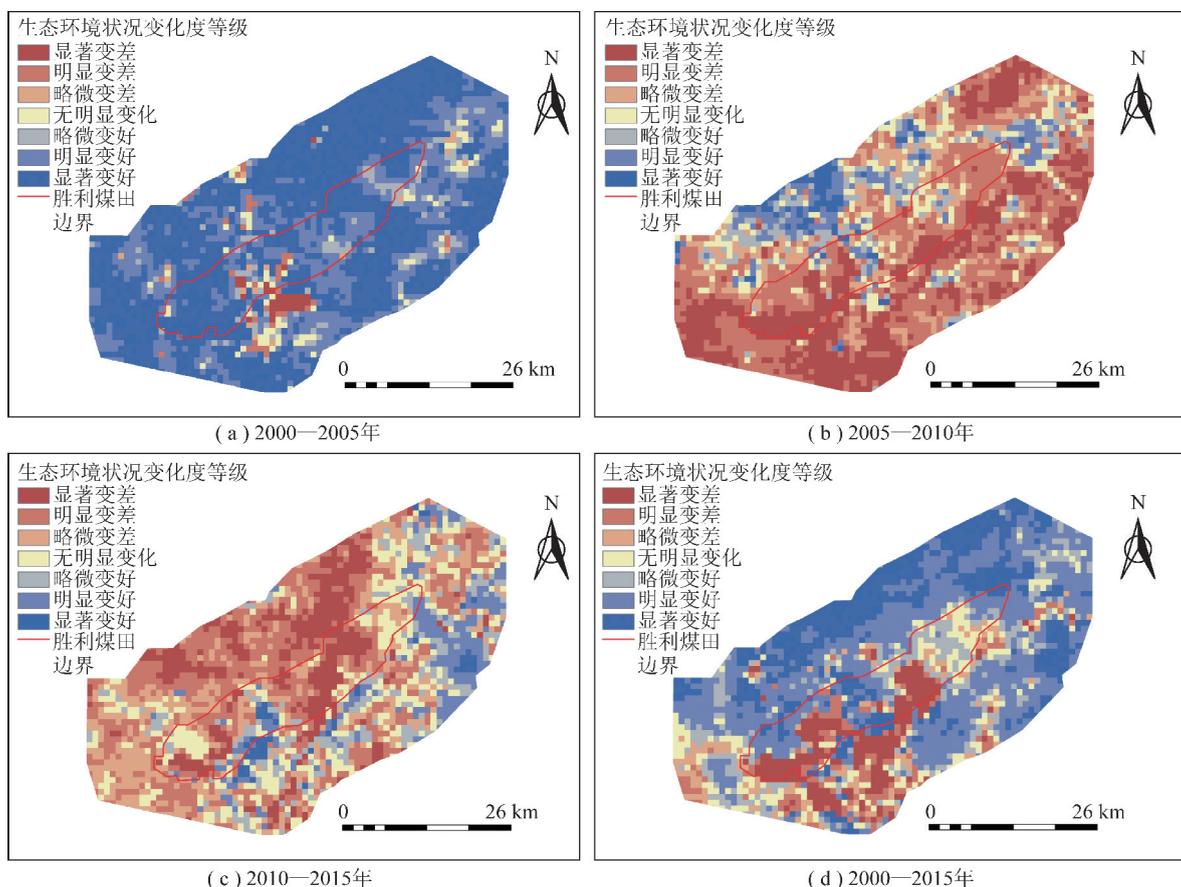


图 6 研究区域分阶段生态环境变化度等级空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of hierarchical eco-environment change degree in study area

表7 研究区域分阶段生态环境变化度等级面积统计

Table 7 Statistics of hierarchical eco-environment change degree area in study area

生态环境状况 变化度等级	2000—2005年		2005—2010年		2010—2015年		2000—2015年	
	面积/km ²	面积百分比/%						
显著变差	26.06	1.29	512.76	25.34	298.58	14.75	186.47	9.22
明显变差	29.09	1.44	664.52	32.84	552.38	27.30	118.10	5.83
略微变差	15.61	0.76	284.26	14.05	420.54	20.78	113.67	5.62
无明显变化	61.89	3.05	205.43	10.15	327.78	16.20	194.85	9.63
略微变好	109.59	5.42	151.16	7.47	205.11	10.14	253.75	12.54
明显变好	549.24	27.15	144.02	7.12	177.56	8.78	716.64	35.42
显著变好	1 231.89	60.89	61.22	3.03	41.42	2.05	439.89	21.74

(1)由图6和表7可知,2000—2005年,生态环境状况显著变好、明显变好和略微变好的面积分别达到1 231.89,549.24和109.59 km²,分别占研究区域的60.89%,27.15%和5.42%,总计93.46%,变好为此期间生态环境状况变化的主要趋势;显著变差、明显变差和略微变差的区域较小,主要集中在锡林浩特市城区、乡镇居民点及露天矿区。

(2)2005—2010年,生态环境状况显著变差、明显变差和略微变差的面积分别达到512.76,664.52和284.26 km²,分别占研究区域的25.34%,32.84%和14.05%,总计72.23%,变差是此期间生态环境状况变化的主要趋势,从其空间分布来看,露天矿区及电厂区包含在显著变差的范围内,且沿省道S307出现一条明显的显著变差条带状区域,说明人类改造自然建设用地面积的不断扩大,对生态环境状况影响非常明显。

(3)2010—2015年,生态环境状况显著变差、明显变差和略微变差的面积分别达到298.58,552.38和420.54 km²,分别占研究区域的14.75%,27.30%和20.78%,总计62.83%,较2005—2010年,变差的比例降低了近10%,但仍为研究区域主要的变化趋势;生态环境状况无明显变化的区域有327.78 km²,占研究区域的16.2%,呈分散分布;显著变好区域面积为41.42 km²主要分布分区域为露天矿区已复垦排土场、城市湿地公园、耕地及省道S307沿线。

(4)2000—2015年,时间跨度涵盖前3个时段,生态环境状况显著变好、明显变好和略微变好的面积分别达到439.89,716.64和253.75 km²,分别占研究区域的21.74%,35.72%和12.54%,总计69.7%,变好为长时间跨度生态环境状况变化的主要趋势。生态环境状况显著变差、明显变差和略微变差的区域在

空间分布上则显得尤为突出,露天矿区、电厂区、锡林浩特市城区及城镇居民点沿省道S307两侧分布,尤其是露天矿开采区及电厂区以显著变差为主,突出了煤电基地开发对生态环境影响的主体趋势。

5 结果讨论与生态环境管控对策

胜利煤电基地生态环境综合评价和分析结果显示,2005年以来,随着煤电开发的规模不断扩大,生态环境显著恶化的区域主要集中在露天开采区、电厂开发区和锡林浩特市城区。根据研究区域历年来的原煤产量和火力发电量及研究区域生态环境分级状况,统计了2005年,2010年和2015年研究区域累积原煤产量和火力发电量及各年生态环境状况等级为差和较差的总面积,并进行了Person相关性分析,累积原煤产量和火力发电量与研究区域生态环境累积恶化总面积的相关系数均为0.855,表明煤电开发是研究区域生态环境恶化的主要驱动力。

按当前趋势发展,煤电基地开发规模不断扩大,如果生态环境修复不及时治理不到位,生态环境损毁势必会逐渐加剧,影响国家能源计划的执行。这就需要在国家的宏观调控政策下,依据生态环境评价标准,基于多源动态数据监测平台,对开发过程生态环境的变化进行实时监测、评价、监督和管理。

5.1 “监测—评价—管理”三位一体的多源动态监测平台的搭建

以大数据为基础搭建草原区煤电基地“监测—评价—管理”三位一体的多源动态监测平台(图7),为草原区煤电基地生态环境动态监测提供技术支撑,为评价提供基础数据,并将监测评价结果公开发布,实现管理公开化,以达到社会监督管理的目的。

该平台自下而上以“管理—评价—监测”顺序构建,能够灵活处理新情况,如管理目标的变更、评价体

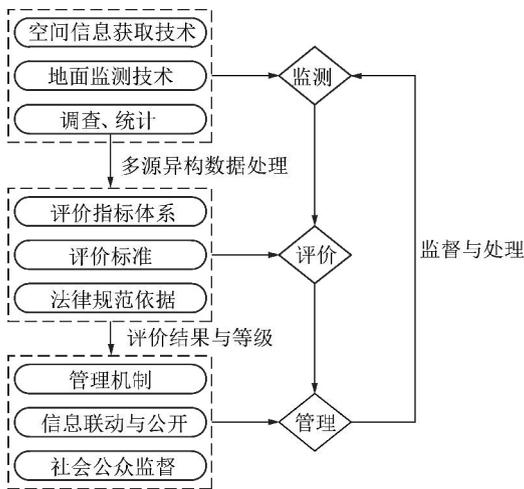


图 7 “监测—评价—管理”三位一体监测平台的基本架构

Fig. 7 Basic framework of “monitoring-evaluation-management” trinity monitoring platform

系和评价标准的更新、国家新政策的实施以及多源监测新技术的进场。该平台的工作流程如下:

(1)明确管理目标。针对研究区域的开发计划确定阶段性管理目标,管理目标不同,评价标准不同,监测重点不同。可按空间区域确定管理目标,如可将整个研究区域作为一个整体管理目标,可以以扰动源为管理目标,如煤矿、火电厂或城区,也可以以扰动源功能区为管理目标,如露天矿排土场、井工矿塌陷区等;可按环境单元划分管理区,如土地环境、水环境和大气环境。

(2)选择(制定)评价体系。根据管理目标,确定评价体系,可以制定综合指标体系,也可以是单指标体系,如研究区域生态环境综合评价指标体系、排土场复垦率、大气质量综合指数等。

(3)获取基础数据。通过多源动态监测技术,获取评价基础数据,并进行标准化、归一化处理。

(4)计算评价指数。根据基础数据计算评价指数,并按相关标准进行评价结果的分级和判定。

(5)依据评价结果进行监督管理。针对管理目标评价结果低于规定标准的,依据相关法律法规进行相关的处罚,并责令整改修复、严重时需要调整开发规模和生产计划,其生态环境进入新一轮周期“监测—评价—管理”;管理目标评价结果符合标准的,可根据规定调整其“监测—评价—管理”周期。在“监测—评价—管理”不断循环中,不断更新评价标准,以最新政策进行监督管理。

5.2 草原区煤电基地生态环境修复“5W+2H+E”循环管理模式的建立

5.2.1 循环管理模式的建立

草原区煤电基地“监测—评价—管理”多源动态

监测平台搭建完成后,建立科学的管理模式能够促进该平台监测管理功能的发挥。“5W+2H+E”源于管理学,将“5W+2H+E”应用草原区煤电基地生态环境的循环管理,主要目的是利用该方法的周密性,在生态环境监测过程中,对于遭到严重破坏区域生态环境的修复进行管理和监督,由于煤电基地潜在扰动源较多,生态环境影响因素复杂,可防止管理疏漏造成生态环境再度恶化,“5W+2H+E”的含义见表 8。

表 8 草原区煤电基地生态环境“5W+2H+E”循环管理模式

Table 8 “5W+2H+E” cycle management model of eco-environment in prairie coal-electricity base

表达方式	管理学含义	草原区煤电基地循环管理模式含义
W(What)	目的、内容	生态环境恶化区域修复的监督管理
W(Who)	相关人员	责任负责人
W(Where)	地点或区域	修复区域
W(When)	时间或周期	修复起始时间及修复周期
W(Why)	缘由或起因	生态环境不达标
H(How)	解决办法	修复方案
H(How much)	预算	修复成本及投入
E(Effect)	结果、效果	修复效果评价

5.2.2 应用分析

本文对研究区域进行生态环境评价的结果显示,2000—2015 年间生态环境明显变差的区域主要集中在露天矿区、电厂区和城区,尤其是露天矿的剥离区、采坑和排土场,这些区域植被覆盖度低,土壤侵蚀严重,扬尘肆虐,生态环境修复治理需要及时加强。针对研究区域内胜利一号露天矿已到界的外排土场进行监测,主要通过其植被覆盖度(可通过遥感反演获得)判断其复垦情况,按“5W+2H+E”模式进行管理,见表 9。

据排土场复垦经验,排土场复垦达到预期效果周期一般为 3~5 a,北排土场、南排土场和沿帮排土场的复垦周期均达到了 3 a 以上,根据 2017 年的监测结果,北排土场和沿帮排土场的植被覆盖度均值都未达到 50%,不符合《胜利一号露天矿土地复垦与生态恢复实时方案》的要求,需要及时修复,南排土场虽然植被覆盖度平均值达到复垦要求,但是部分空间区域植被覆盖度较低,也需要重点修复。各排土场需要修复的空间区域可根据图 8 结合现场调查结果获得,并通过责任人制定修复方案和修复计划并执行,待 2020 年监测其植被覆盖变化情况判断其修复效果,期间也可定期监测其植被覆盖情况是否有所好转,督促其责任人对修复计划和修复方案的实施。

表 9 胜利一号露天矿排土场“5W+2H+E”循环管理模式分析

Table 9 Analysis of “5W+2H+E” cycle management model of No. 1 open-pit dump, Shengli

排土场名称	北排土场	南排土场	沿帮排土场
到界时间	2005 年	2008 年	2011 年
复垦情况(2017 年植被覆盖度)/%	46.62	65.95	45.59
复垦责任人	胜利一号露天矿	胜利一号露天矿	胜利一号露天矿
空间区域/万 m ²	134	253	610
复垦时间(周期)	2006—2009 年	2007—2013 年	2011—2013 年
是否达标	否	是	否
修复方案	责任人制定	责任人制定	责任人制定
修复投入	按规范标准计算	按规范标准计算	按规范标准计算
修复效果(2020 年植被覆盖度)	待监测	待监测	待监测

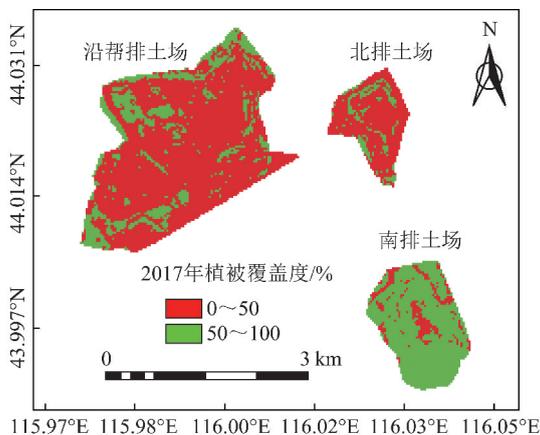


图 8 胜利一号露天矿排土场 2017 年植被覆盖度空间分布

Fig. 8 Spatial vegetation coverage distribution of No. 1 open-pit dump, Shengli in 2017

6 结 论

(1)2000—2015 年,草原区胜利煤电基地生态环境整体状况均为良好,且呈现先变好后变差的发展趋势;经统计,生态环境状况显著变差、明显变差和略微变差的区域占 20.68%,主要分布在露天矿区及电厂区、锡林浩特市城区、城镇居民点和省道 S307 两侧区域。

(2)2010—2015 年,露天采区及电厂区、锡林浩特市城区及 S307 两侧出现明显的变好区域,表明露天矿区排土场复垦、电厂控排、城市湿地公园建设及省道 S307 沿线绿化有效改善了生态环境状况。

对比现场调查情况,评价结果与研究区域生态环境实际状况相符,说明本文针对草原区煤电基地建立的综合评价指标体系具有一定的科学可靠性,评价结果揭示了煤电基地开发及其生态修复措施对生态环境的影响规律。后续可依据该评价指标体系,基于“监测—评价—管理”三位一体的多源动态监测平台和“5W+2H+E”循环管理模式,对煤电基地生态环境

状况及修复工程进行监测评价和监督管理,实现“监测—评价—管理—修复”有效循环是进一步研究的内容。

参考文献 (References):

- [1] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究[J]. 生态学杂志, 2016, 36(22): 7049-7053.
LI Quansheng. Research on ecological restoration technology of coal-power base in eastern steppe of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): 7049-7053.
- [2] 汪云甲. 矿区生态扰动监测研究进展与展望[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1705-1716.
WANG Yunjia. Research progress and prospect on ecological disturbance monitoring in mining area[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1705-1716.
- [3] 武强, 刘宏磊, 陈奇, 等. 矿山环境修复治理模式理论与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1085-1092.
WU Qiang, LIU Honglei, CHEN Qi, et al. Theoretical study of mine geo-environmental restoration model and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1085-1092.
- [4] WAITKUS Anna Krzyszowska. Surface coal mine permit application for successful reclamation, semi-arid shortgrass prairie (Wyoming, USA)[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2018, 5(1): 8-17.
- [5] HUANG Chengyi, DENG Langji, FANG Conggang, et al. Synergetic analysis and assessment study on vital area of chengdu plain farmland resource system[A]. International Conference on Geo-Informatics in Resource Management and Sustainable Ecosystem 2015, Wuhan, China[C]. 2015.
- [6] XIE Mingxia, WANG Jiayao, CHEN Ke. Coordinated development analysis of the “Resources-Environment-Ecology-Economy-Society” complex system in China[J]. Sustainability, 2016, 8(6): 582.
- [7] 安英莉, 戴文婷, 卞正富, 等. 煤炭全生命周期阶段划分及其环境行为评价——以徐州地区为例[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 293-300.
AN Yingli, DAI Wenting, BIAN Zhengfu, et al. Phase division of whole life cycle of coal and their environment behavior assessment

- [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2):293-300.
- [8] 韩林桅,付晓,严岩,等.基于解释结构模型的煤电一体化开发生态环境累积效应识别[J].*应用生态学报*,2017,28(5):1653-1660.
HAN Linzhi, FU Xiao, YAN Yan, et al. Identification of the cumulative eco-environment effect of coal-electricity integration based on interpretative structural model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(5):1653-1660.
- [9] 周政达,王辰星,付晓,等.基于DPSIR模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系[J].*生态学报*,2014,34(11):2830-2836.
ZHOU Zhengda, WANG Chenxing, FU Xiao, et al. Evaluation index system on ecological effect of national large-scale coal-fired power base based on the DPSIR conceptual model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(11):2830-2836.
- [10] 马一丁,付晓,田野,等.锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价[J].*生态学报*,2017,37(13):4505-4510.
MA Yiding, FU Xiao, TIAN Ye, et al. Analysis of the ecological vulnerability of the coal-electricity base area in Xilinguole League[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13):4505-4510.
- [11] 杨峻,白中科.基于GIS和RS的矿区土壤侵蚀分级及其适用性研究[J].*土壤通报*,2018,49(5):1206-1213.
YANG Jun, BAI Zhongke. Soil erosion classification and its applicability in mining area based on GIS and RS[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5):1206-1213.
- [12] 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.
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.
- [13] 巴岩,田野,柳彩霞,等.中国东部草原植被绿度时空变化分析及其对煤电基地建设的响应[J].*生态学报*,2018,38(15):5423-5433.
BAO Yan, TIAN Ye, LIU Caixia, et al. Spatial and temporal variation analysis of vegetation greenness in grassland of eastern China and its response on the construction of coal and electricity base[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15):5423-5433.
- [14] 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 Haochen, MU Shouguo, BIAN Zhengfu, 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.
- [15] 王双明,杜华栋,王生全.神木北部采煤塌陷区土壤与植被损害过程及机理分析[J].*煤炭学报*,2017,42(1):17-26.
WANG Shuangming, DU Huadong, WANG Shengquan. Analysis of damage process and mechanism for plant community and soil properties at northern Shenmu subsidence mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1):17-26.
- [16] 马一丁,付晓,吴钢.锡林郭勒盟煤电基地大气环境容量分析及预测[J].*生态学报*,2017,37(15):5221-5227.
MA Yiding, FU Xiao, WU Gang. Analysis and prediction of the atmospheric environmental capacity of the Xilinguole League's coal-based electricity region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15):5221-5227.
- [17] 武卫玲,陈良富,陶金花,等.利用遥感数据评价燃煤电厂空气质量[J].*遥感学报*,2013,17(5):1240-1245.
WU Weiling, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, et al. Assessment of air quality in coal-fired power plants using satellite observations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(5):1240-1245.
- [18] 王斯文.卫星遥感定量分析燃煤电厂二氧化硫和氮氧化物排放[D].北京:清华大学,2014.
WANG Siwen. Satellite remote sensing of the sulfur dioxide and nitrogen dioxide emissions from coal-fired power plants[D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [19] 刘慧芳,毕如田,文博.流域“地-矿”土地水资源利用冲突测度确定及土地整治策略[J].*农业工程学报*,2017,33(14):238-249.
LIU Huifang, BI Rutian, WEN Bo. Determination of conflict between coal mining and water and soil resources utilization and land consolidation strategy of resource destruction in river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(14):238-249.
- [20] 张锐.锡林郭勒盟煤电基地水资源保障问题研究[D].天津:天津大学,2016.
ZHANG Rui. Research on water resources insurance problem of the coal-power base in XilinGol League[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [21] 北京华宇有限责任公司.内蒙古锡林郭勒盟胜利矿区总体规划(修改版)环境影响报告书[R].2015.
Beijing Huayu Co. Ltd. Environmental impact report of the overall plan of shengli mining area in Xilingol league, Inner Mongolia (revised version)[R]. 2015.
- [22] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].*生态学报*,1984,4(1):1-9.
MA Shijun, WANG Rusong. Social-economic-natural complex ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, 4(1):1-9.
- [23] 王广成,李宁,崔新新.煤炭矿区复合生态系统协同演化序参量的选择与协同度评价[J].*中国矿业*,2017,(2):99-105.
WANG Gangcheng, Li Ning, CUI Xinxin. The determination of order parameter and the assessment of the synergy degree for the co-evolution of integrated ecosystem in coal mining area[J]. *China Mining Magazine*, 2017, (2):99-105.
- [24] 王行风,汪云甲,李永峰.基于SD-CA-GIS的环境累积效应时空分析模型及应用[J].*环境科学学报*,2013,33(7):2078-2086.
WANG Xingfeng, WANG Yunjia, LI Yongfeng. Analysis and assessment model of environmental cumulative effects based on the integration of SD, CA and GIS methods and its application[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(7):2078-2086.
- [25] 孙琦.煤矿区生态风险演化过程及防控机制研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2017.
SUN Qi. The evolution process of ecological risk and prevention mechanism in coal mining area[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017.

- [26] 环境保护部. HJ 192—2015 生态环境状况评价技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社,2015-03-13.
Ministry of Environmental Protection. HJ 192 - 2015 Technical specification for ecological environment evaluation [S]. Beijing: China Environmental Science Press,2015-03-13.
- [27] 国土资源部. GB/T 21010—2017 土地利用现状分类[S]. 北京:中国标准出版社,2017-11-01.
Ministry of Land and Resources. GB/T 21010-2017 land-use status classification [S]. Beijing: China Standards Press,2017-11-01.
- [28] 成淑艳,曹生奎,曹广超,等. 基于高分辨率遥感影像的青海湖沙柳河流域土地覆盖监督分类方法对比[J]. 水土保持通报,2018,38(5):261-268.
CHENG Shuyan, CAO Shengkui, CAO Guangchao, et al. Comparisons of supervised classification methods for land cover based on high spatial resolution remote sensing images in Shaliu river basin of Qinghai lake[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):261-268.
- [29] MA Z, HU X, SAYER A M, et al. Satellite-based spatiotemporal trends in PM2.5 concentrations; China, 2004—2013[J]. Environmental Health Perspective, 2016, 124(2):184-192.
- [30] 同丽嘎. 城市居民 PM2.5 暴露风险格局、过程及机制研究[D]. 沈阳:辽宁师范大学,2018.
TONG Lige. Pattern, process and mechanism of PM2.5 exposure risk of urban residents [D]. Shenyang: Liaoning Normal University, 2018.
- [31] 巩国丽,刘纪远,邵全琴. 基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展,2014,33(6):466-472.
GONG Guoli, LIU Jiyuan, SHAO Quanqin. Research on soil wind erosion in Xilingol league, Inner Mongolia since 1990s based on RWEQ[J]. Progress in geographical science, 2014, 33(6):466-472.
- [32] 周佳宁. 内蒙古多伦县土壤侵蚀与 LUCC 的时空耦合关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
ZHOU Jianing. Spatio-temporal coupling between soil erosion and LUCC in Duolun county, Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [33] 金争平. 内蒙古土壤侵蚀图[M]. 北京:科学出版社,1989.
- [34] HOU Kang, LI Xuxiang, WANG Jingjing, et al. Evaluating ecological vulnerability using the gis and analytic hierarchy process (AHP) Method in Yan'an, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2016, 25(2):599-605.
- [35] 王劲峰. 空间数据分析教程[M]. 北京:科学出版社,2010.