

DOI: 10.5846/stxb202003110482

张轶群, 吴迪, 付晓, 吴钢. 景感生态学在煤电基地生态建设与管理中的应用. 生态学报, 2020, 40(22): 8063-8074.

Zhang Y Q, Wu D, Fu X, Wu G. Study on the application of landsenses ecology in ecological construction and management of coal power base. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8063-8074.

## 景感生态学在煤电基地生态建设与管理中的应用

张轶群<sup>1,2</sup>, 吴迪<sup>3</sup>, 付晓<sup>1,\*</sup>, 吴钢<sup>1,2</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中科院建筑设计研究院有限公司, 北京 100086

**摘要:** 煤电基地的开发对中国能源利用格局具有深远的影响, 是煤炭行业发展的重要方向, 但也对生态环境提出了严峻的挑战。在我国煤电基地的生态建设中, 基于景观生态学的应用研究较多, 缺乏对居民感知、愿景和福祉等方面的联系和研究。以内蒙古锡林郭勒煤电基地为例, 在分析因煤电基地的开发建设而导致的生态环境问题基础上, 运用景感生态学的理论和方法, 从煤电基地的景感营造、景感修复、景感保护监测管理、生态文明建设共 4 个方面进行了分析, 为煤电基地的生态建设、保护与管理提出了具有建设性的措施和建议。结合生态环境物联网对所选景感指标的监测、谜码数据平台的评价分析及预警系统, 对实现煤电基地的生态健康保障、生态服务提升, 以及居民愿景和福祉的提高有着重要意义, 为实现区域可持续发展的目标提供了有效措施。本研究为煤电基地相关区域的生态建设、保护与管理提供科学依据和有效对策, 为后续相关研究打下基础。

**关键词:** 景感生态学; 生态修复; 生态管理; 煤电基地; 锡林郭勒盟

## Study on the application of landsenses ecology in ecological construction and management of coal power base

ZHANG Yiqun<sup>1,2</sup>, WU Di<sup>3</sup>, FU Xiao<sup>1,\*</sup>, WU Gang<sup>1,2</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Architecture Design and Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China

**Abstract:** The development of coal power base has a profoundly positive impact on China's energy utilization pattern, but also poses a severe challenge to the ecological environment. Many problems such as land collapse, groundwater level reduction, air pollution, soil erosion, serious desertification, ecosystem degradation, and biodiversity loss are caused by coal mining and power generation. The ecological construction of coal power bases in China was mainly in the fields of land restoration, landscape and vegetation restoration, water pollution control, soil and water conservation, and sustainable development of mining. A number of applied researches were based on landscape ecology, including landscape design, landscape reconstruction and restoration, landscape pattern evolution, and geological environment management. There was a lack of attention on local residents' perception, vision and well-being. Landsenses ecology is based on the research of landscape ecology, incorporated with the monitoring and data analysis tools of Internet of Things, and focuses on the research of residents' perception and well-being. On the basis of paying close attention to human physical perception and psychological cognition, the ecological construction and management based on landsenses ecology aims to safeguard the

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0501101); 国家重点研发计划课题(2016YFC0503603)

收稿日期: 2020-03-11; 修订日期: 2020-08-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaofu@cees.ac.cn

security, ensure the health, and improve the ecological service of the ecosystem, with the purpose to establish a sustainable environment and eventually enhance the residents' well-being. Taking Xilin Gol League coal power base in Inner Mongolia as a research object, this paper analyzed the ecological and environmental problems caused by mining and power generation, and then put forward some practical measures for the ecological construction and management of coal power base based on theories and methods of landscape ecology. With the target of regional sustainable development, the measures are proposed in four aspects of landscape creation, landscape restoration, landscape monitoring and protection, and development of ecological civilization. Based on the characteristics of coal mining and power generation industries and the local natural conditions of Xilin Gol League, a landscape monitoring index system was built. With long-term field monitoring, Internet of Things and mix-marching data platform are combined as the landscape monitoring and analyzing tool. Combined with the meliorization model, the analyzing platform would be adjusted and eventually evolved into an information management system for the sustainable development of Xilin Gol League coal power base, with the functions of description, evaluation, early warning, and decision support for the ecological construction and management of Xilin Gol League coal power base, in order to better protect the ecological health, enhance the ecological services, and improve the residents' well-being. This study provides a scientific basis and effective countermeasures for the ecological construction and management in areas associated with coal power bases.

**Key Words:** landscape ecology; ecological restoration; ecological management; coal power base; Xilin Gol League

煤炭资源是我国社会发展和经济增长的重要物质基础,一直在我国社会经济发展中占有非常重要的战略地位<sup>[1-2]</sup>。煤电基地是指在煤炭基地内,根据煤的储量和产量以及目前和未来电能的需求,有计划地建设与煤炭生产一体化的电厂群,以向外输电为主要目的产煤发电一体化基地<sup>[3]</sup>。大型煤电基地的建设为我国西电东输、全国供电联网战略的实施提供充裕的能源支持,对中国能源利用格局和区域生态环境的维持和改善具有深远的影响,是中国煤炭行业发展的重要方向<sup>[4]</sup>。2005年以来,国家在内蒙古、山西、陕西、宁夏、新疆等地开发建设了七个大型煤电基地(图1),为保证区域经济发展、社会稳定和生态环境改善起到了重要作用,煤电基地的开发建设虽然有力的保护和提升了受电区域的生态环境,大大地提高了能源的利用效率,但同时也对煤电基地建设区域带来了一系列严重的生态环境问题,如因矿山开采和燃煤发电而导致的土地塌陷、地下水位降低、大气污染、水土流失、荒漠化严重、生态系统退化和生物多样性丧失等<sup>[5-7]</sup>。我国的煤电基地多处于北方的生态脆弱型区域,生态环境质量的下降严重影响到了当地居民的生活质量<sup>[8]</sup>,致使人们的愿景难以得到满足、社会的需求不断降低,进而制约了区域居民的生活健康和社会经济的可持续发展<sup>[9-10]</sup>。

目前我国关于煤电基地生态建设的研究,多集中在矿区的土地修复<sup>[11]</sup>、景观及植被修复<sup>[12]</sup>、水污染治理<sup>[13]</sup>、水土保持<sup>[14]</sup>、矿山绿色发展<sup>[15]</sup>等领域,学者们都从某一专业角度对煤电基地的生态建设提出了研究方法及实施措施,但缺乏对当地居民物理感知、心理认知、居民愿景和福祉等方面的联系和研究。与此同时,也缺乏将当地的生态元素与互联网监测管理平台、数据分析系统的融合,运用生态环境物联网作为管理工具的研究。

为了满足居民对生态环境的需求愿景、维持和提升区域景观环境的生态服务,促使煤电基地的社会经济的可持续地发展,本研究以景观生态学的理论和方法为基础,选取锡林郭勒国家大型煤电基地为研究对象,在分析因煤电基地的开发建设而导致的生态环境问题基础上,将当地的社会经济、自然要素与居民的物理感知、心理认知、愿景和福祉等结合起来,从煤电基地的景观营造、景观修复、景观保护监测与管理、生态文明建设共四个方面进行系统分析,结合生态环境物联网对所选景观指标的监测、谜码数据平台的评价分析及预警系统,对实现煤电基地的生态健康保障、生态服务提升、以及居民愿景和福祉的提高有重要意义,为实现区域可持续发展的目标提供了有效措施和方法。

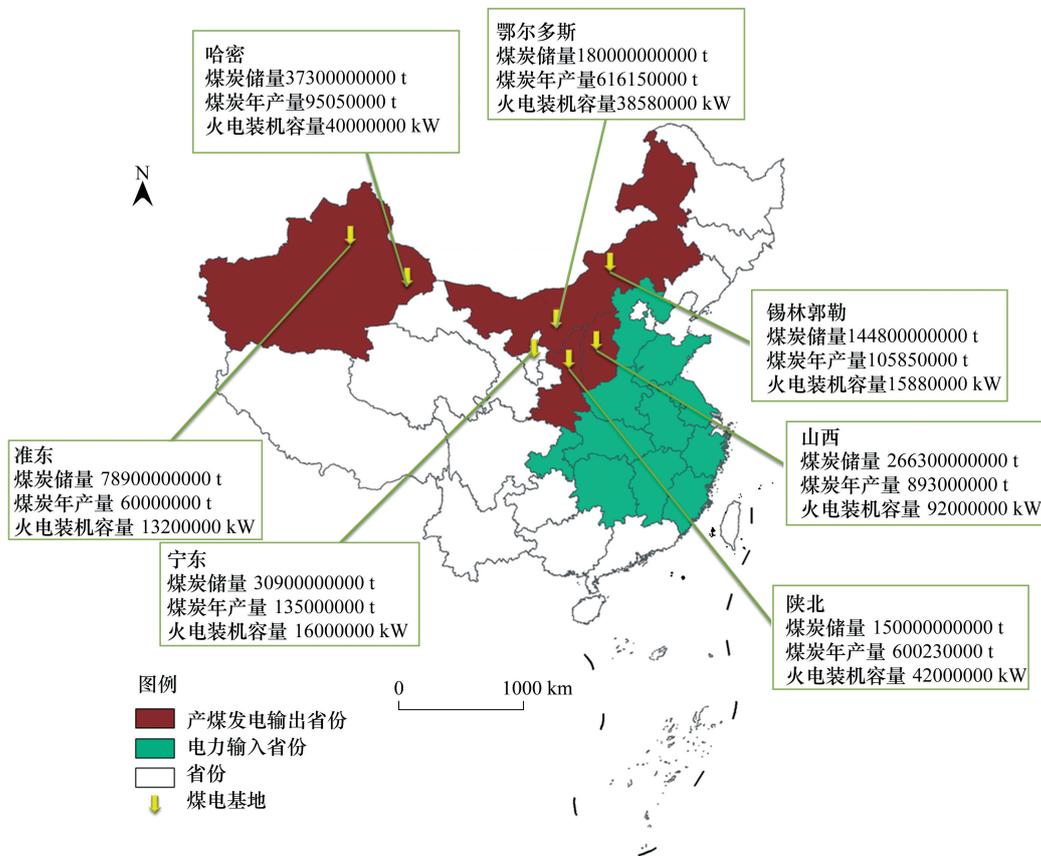


图 1 全国大型煤电基地的分布

Fig.1 Distribution of national large-scale coal power bases in China

## 2 研究理论与方法

### 2.1 景感生态学

景感生态学是指以可持续发展为目标,基于生态学的本原理,从自然要素、物理感知、心理感知、社会经济、过程与风险等相关方面,研究土地利用规划、建设与管理科学<sup>[16]</sup>。“景感”在中国古代的城市及乡镇规划和建筑中得以体现,古人在城市及乡镇规划或建筑设计中,会将当地的自然要素、传统文化、以及人们的希冀融合在一起,达到“人、自然、建筑”合一的效果<sup>[17]</sup>。我们在苏州园林、西湖十景、故宫、颐和园等著名建筑,乃至安徽宏村、江西婺源、贵州西江千户苗寨、云南元阳哈尼族村等古村落中都可以感受到独特的“景感”魅力,可以看出当时人们对居住和活动区域生态环境的愿景和需求,体现了区域可持续发展为目标的思想。

景感生态学的提出是为了解决传统生态学理论在生态规划、建设、保护及管理中对现代人的物理、心理需求变化考虑不足的问题,运用物联网等现代化技术手段,对生态数据进行智能收集、处理分析等,进而实施更科学、更有效的生态建设保护措施<sup>[16]</sup>。景感生态学目前在国内的生态规划、环境管理、环保建设等方面都有了一定的应用,如中国大运河香河段的生态规划<sup>[16,18-19]</sup>,河北香河区域的湿地修复<sup>[20]</sup>,北京市通州区城乡交错带的生态规划<sup>[21]</sup>等。景感生态学是研究生态系统服务和可持续发展的有效途径,也是联系生态系统服务、居民福祉和可持续发展的桥梁。

### 2.2 基于景感生态学的煤电基地生态建设管理理论框架

煤电基地生态系统是一个由人类社会经济系统和自然生态系统组成的复杂系统,其中包含了大量的物质、能量和信息的交换和流动<sup>[22]</sup>。人们在经济利益的驱动下,大规模的进行资源的开采和利用,对当地的生

态系统产生了巨大压力,居民的生活环境受到了严重影响,进而对人们的日常生活和健康构成了威胁<sup>[23]</sup>。

在我国煤电基地的生态建设及管理中,基于景观生态学的应用研究较多,如矿区的景观设计<sup>[24]</sup>、景观重塑及修复<sup>[25-26]</sup>、景观格局演变<sup>[27]</sup>、地质环境管理等<sup>[28]</sup>。景感生态学是在景观生态学的研究基础上,结合物联网监测及数据分析工具,更加注重对居民感知及福祉的研究。基于景感生态学的煤电基地生态建设要求以建立可持续发展为目标,在关注人类物理感知及心理认知的基础上,实现煤电基地生态系统健康的保障、生态系统服务的提升、以及居民愿景的满足与福祉的提高等多方面管理目标。为了使煤电基地的社会经济健康、可持续地发展,生态保护和修复工作需要从煤电基地的景感营造、景感修复、景感保护监测管理三个方面开展,建立煤电基地区域内自然资源、社会经济发展、生态环境一体化的管理模式,相关理论框架如图 2 所示。

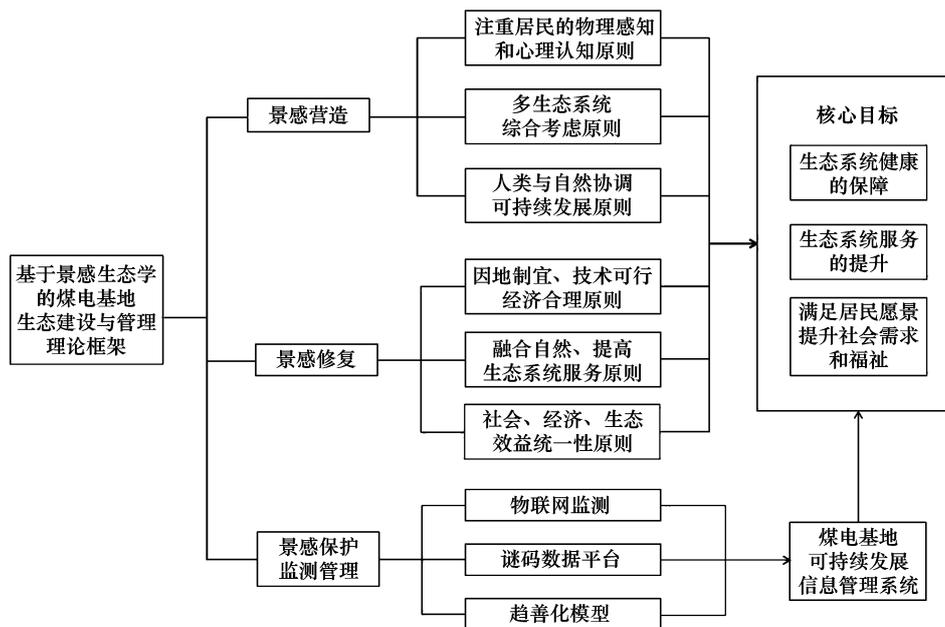


图 2 基于景感生态学的煤电基地生态建设与管理理论框架

Fig.2 Theoretical framework of ecological construction and management of coal power base based on Landsenses Ecology

### 2.2.1 景感营造

在景感生态学的应用中,人们通过适当的表现形式将某些愿景赋予或融入某种载体,使其他人能够从这一载体及其相关的表现形式中领悟到这些愿景,我们把具有这种属性的载体称为景感(landsense),把构思和构筑景感的整个过程称为景感营造(landsense creation)<sup>[29]</sup>。

在煤电基地中,根据功能不同分为采矿区、发电区、办公区和生活区,其景感营造各不相同。采矿区又分为露天矿和井工矿,随着生产活动的进行,露天矿产生的大型排土场、煤矸石堆等废弃物,井工矿导致的土地塌陷等都严重影响了区域的地貌<sup>[30]</sup>,导致水土流失、景观破碎化<sup>[31]</sup>,对环境也造成了污染,人们的物理及心理感知也受到了影响。此外,煤电基地因大多数是围绕着矿区建设而成,因此多位于距离城市较远的地区,周边无丰富的配套设施,人们的工作、生活都在基地内,通常连续工作停留的时间在 10 天以上,休闲娱乐生活较为单调,所以办公区和生活区的景感营造就显得尤为重要。将煤电基地内各个功能区的景感营造好,人们能够心情舒畅、精神丰富,也有利于工作效率和福祉的提高。煤电基地的景感营造应遵循以下原则:(1)注重居民的物理感知和心理认知原则;(2)多生态系统综合考虑原则(包括土壤、地表水、地下水、大气、植被等);(3)人类与自然协调可持续发展原则。

### 2.2.2 景感修复

煤电基地的景感修复,是指在现有景观修复的研究基础上,融入景感生态学的理论及方法,综合考虑煤电基地的自然条件,以及人们的生产、生活、文化、物理感知和心理认知、以及愿景和需求等内容,以生态修复措

施作为主要途径,促进和保障区域可持续发展的行为措施。

因持续采矿而引发的大面积土地塌陷、土地压占、森林和草原破损、水文污染、地下水水位下降、农田污染等,导致区域景观格局受损严重,矿区居民的生产、生活、居住以及愿景和需求也受到极大的影响<sup>[32]</sup>。煤电基地的景感修复则是在充分考虑人的物理感知、心理认知的基础上,通过修复、重建等手段调整景观组分与空间格局,遏制退化的生态过程,提升受损的生态系统服务,保持和提升区域生态系统的稳定性,满足居民愿景和提高生活福祉。景感修复是跨尺度、多系统的,涉及到受损生态系统与周围生态环境的关系、以及生态系统之间的结构、功能与过程的恢复、当地居民的物理感知、心理认知、文化及生活方式等。煤电基地的景感修复需遵循以下原则:(1)因地制宜、技术可行、经济合理原则;(2)融合自然、提高生态系统服务原则;(3)从区域生命共同体的角度满足社会、经济、生态效益统一性原则。

### 2.2.3 景感保护监测管理

景感生态学的实际应用需要对生态元素及相关动态过程进行长期的观测,包括客观的“感”和人们主观的“感”等,涉及到表征自然、经济、社会、心理、预期、过程、风险等多方面的数据<sup>[16]</sup>。物联网为景感保护监测管理提供了可行的途径,通过对“谜码”数据的收集分析及趋善化模型,为煤电基地的规划、建设、评价、管理与调控等提供了有效的保障<sup>[20]</sup>。

为了实现对煤电基地景感环境的有效保护,首先要构建具有可实施性的指标体系,通过物联网对水体、土壤、大气、风、噪声、辐射等环境要素开展长期的、实时的、实地的、原位的监测,与人们的物理感知和心理认知、需求变化等相结合,建立相应的景感监测网络,将收集到的静态数据和动态数据进行有效收集,进而形成煤电基地谜码数据平台。对数据进行综合分析处理,结合趋善化模型对分析评价工作不断改进完善,建立评估、预警、调控以及综合管理等多功能的煤电基地可持续发展信息管理系统,为煤电基地的景感保护管理工作提供有效数据支撑、管理及决策支持。

## 3 研究区域概况

锡林郭勒盟位于内蒙古自治区中部(以下简称“锡盟”),地处东经 115°13′—117°06′,北纬 43°02′—44°52′,该地区气候高寒干旱,无霜期短,降雨量少,具有寒冷、风大、雨少、日照长、温差大、蒸发力强的特点,冬季严寒漫长,夏季温凉短促,春秋风多而干燥。平均气温为 0—3℃,年平均风速为 4—5m/s,年均降水量为 295mm。

锡盟煤炭资源丰富,已探明储量 1448 亿 t,褐煤总储量在全国居第一位。锡林郭勒煤电基地(以下简称“锡盟煤电基地”)是国家“十二五”规划中大力发展的 7 个以电力外送为主的千万千瓦级清洁高效大型煤电基地之一,包括胜利矿区、白音华矿区、五间房矿区等为主的多个电源基地,具体位置及分布如图 3 所示,其中大部分煤电基地于 2005 年前后开始建设投产。2018 年,锡盟煤电基地的原煤产量达到 10585 万 t,火电发电量为 316.7 亿 kW·h,是国家重要的能源接续地和电源供应基地<sup>[33]</sup>。此外,锡林郭勒典型草原是国家重要的畜产品基地,也是我国北方重要的生态屏障。

锡盟煤电基地大部分处于锡盟典型草原地区,区域生态本底脆弱,煤电基地集群式、大规模、高强度、持续性的开发对草原生态系统产生了跨尺度、多等级、累积性的严重影响<sup>[30]</sup>,产生很多生态环境及居民愿景和福祉方面的问题,主要包括:

- (1)土地资源:土地挖损,土地塌陷,排土场、煤矸石堆的土地占压等;
- (2)水资源:地下水水位下降,矿区的疏干水、矿井水,电厂的冲灰水、除尘水等工业废水对地表水和地下水的污染;
- (3)大气环境:矿井排风、瓦斯抽放等产生的大量有害气体和粉尘,发电后排放的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等工业废气的污染;
- (4)植被:草场破坏,植被生物量减少、生长量下降等;

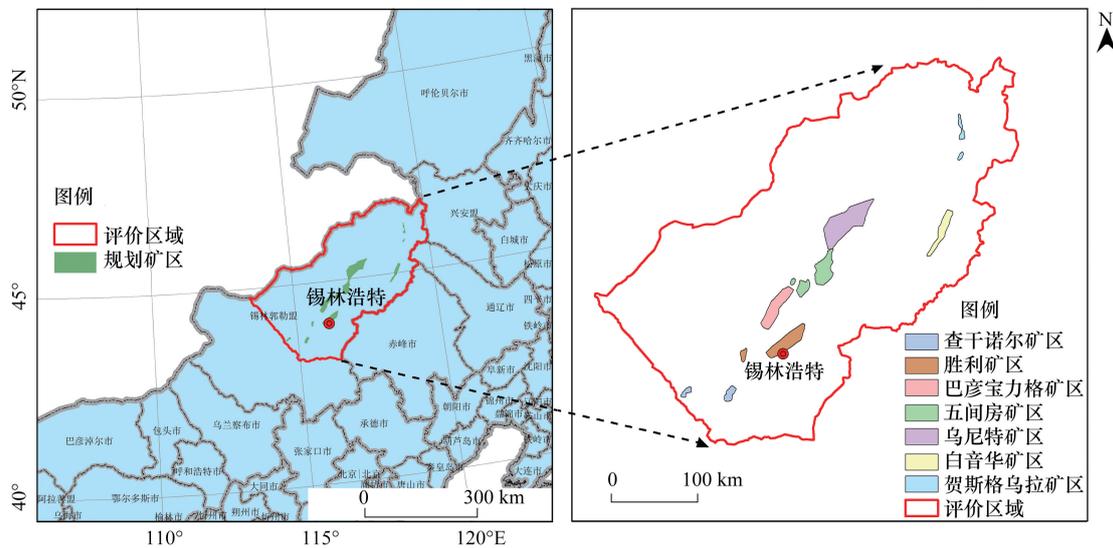


图3 锡林郭勒煤电基地示意图

Fig.3 Location and distribution of Xilin Gol coal power base

(5) 土壤:土壤养分差,水土流失,草原和土地荒漠化等;

(6) 居民愿景和福祉:草原破坏、环境污染对当地居民物理感知和心理认知的影响,导致的生活质量下降、健康威胁等。

#### 4 景感生态学在锡盟煤电基地生态建设管理中的应用

基于景感生态学的思想,充分考虑锡盟煤电基地的当地自然条件、社会经济状况、人文因素等,充分利用生态环境物联网、人工智能等智慧化的现代技术,从景感营造、景感修复、景感保护监测与管理、生态文明的建设4个方面探讨锡盟煤电基地的生态建设与管理。其目标是逐步保障区域复合生态系统健康、提升生态系统服务、实现区域可持续发展、以及满足居民愿景和提高生活福祉(图4)。

##### 4.1 锡盟煤电基地的景感营造

本文以赵景柱等提出的景感营造的8种原则为基础<sup>[29]</sup>,结合锡盟煤电基地的生态建设与管理,提出以下关于煤电基地景感营造的建议:

##### 4.1.1 以符合民众需求及愿景为目的

目前锡盟煤电基地的规划建设中,多数都只考虑了基础的生活配套,对人们的愿景需求和感知层面缺乏关注。在未来的煤电基地生态建设中,应注重人们物理感知和心理上的愿景诉求,在景感营造的过程中,可借助“时空组合的多尺度性”和“物理感知与心理认知的交互性”原则,将跨尺度的时空组合融入同一景感中,以满足人们的物理和心理需求。

锡盟煤电基地的生态建设,采矿区应注重绿色矿山的建设,提高水土保持功能,发电区应提倡智能清洁的生产工艺,提高资源回收利用率。锡盟地区冬季时间长、极其寒冷、风沙较大,人们在冬季的大部分时间为室内活动,基地内的办公区及生活区等应注重室内环境的景感营造,满足人们的愿景,例如建筑物之间生态廊道的建设,室内矿山公园、绿植、花卉、假山、凉亭、水系等景观的搭建,休闲、娱乐、文化生活的配套布局等。四季常青,让人们在严寒冬季仍能感受到温暖春意,心情愉悦舒畅,精神饱满,也就是我们景感营造的目的,福祉提高了,也有利于产业和经济的可持续发展。

煤电基地的景感营造,在关注基地内工作人员需求及愿景的同时,也应加强对煤电基地开发区域当地居民的关注。锡盟的矿区多位于典型草原区域,当地居民以畜牧业为主要生计。矿山开采导致的土地挖损、土

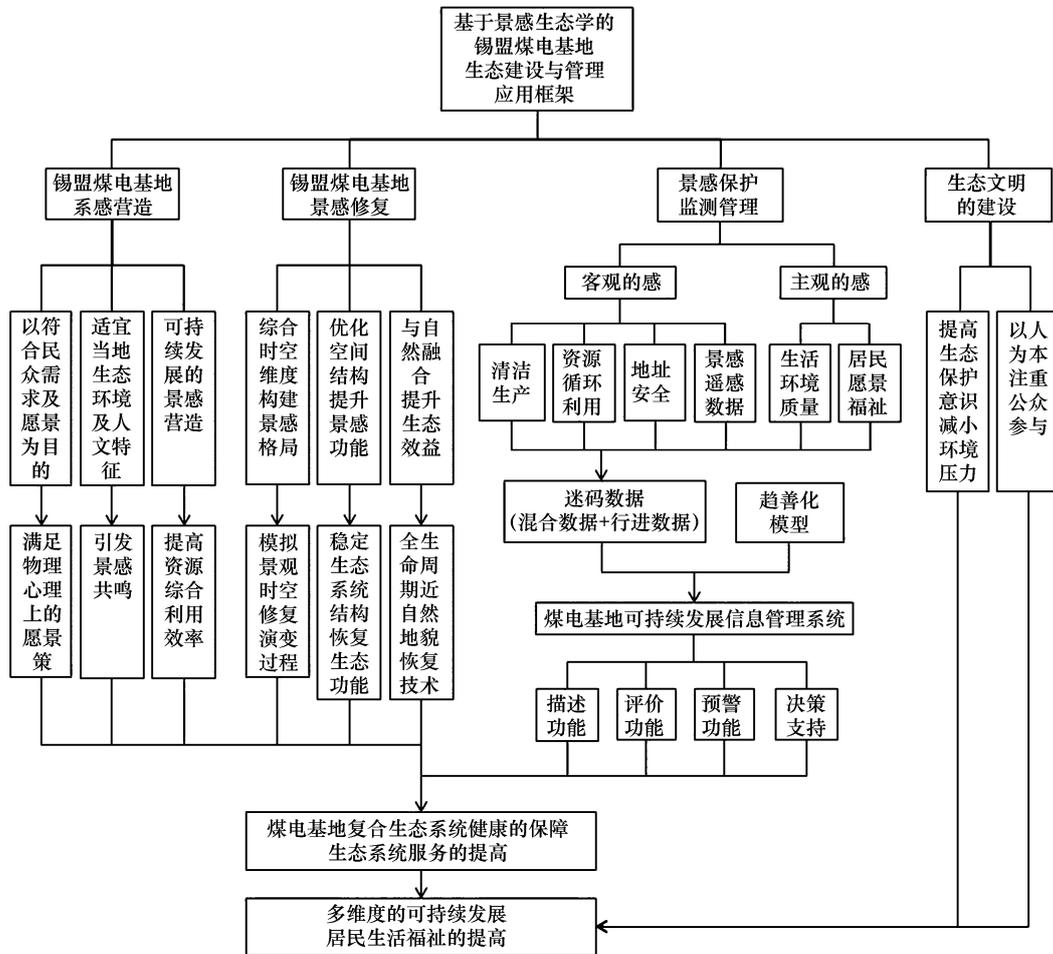


图 4 基于景感生态学的锡盟煤电基地生态建设与管理应用框架

Fig. 4 Application framework of ecological construction and management of Xilin Gol League coal power base based on Landsenses Ecology

地占用等会直接影响草场环境<sup>[34]</sup>, 所以应与当地政府及居民代表进行充分沟通, 了解当地居民的诉求, 合理规划煤电基地的空间布局, 最大程度减小对草原的损害。锡盟草原地区的水果蔬菜较少, 可在煤电基地内开展温室大棚等农业项目, 满足基地内及当地居民的需求。

煤电基地的景感营造是一个长时间持续不断的过程, 很难一步到位, 随着社会的发展, 人们的物理及心理需求在变化, 科学技术和社会经济的进步也会引发新事物、新思想和新追求。所以, 煤电基地的景感营造需要在后续过程中持续关注人们的物理及心理感知变化, 进行调整、改进和完善。

#### 4.1.2 最大程度适宜当地生态环境及人文特征

锡盟煤电基地的景感营造, 须结合“社会-经济-自然”复合生态系统理论<sup>[35]</sup>, 最大程度适宜当地生态环境, 并与人们的愿景、地域文化、社会经济、知识教育等要素紧密联系, 符合“不同文化的差异性”和“心理认知的整体性”原则。如此一来, 通过煤电基地的景感营造所表达出的愿景, 才能成为人们的共同愿景, 引起人们的共鸣, 达成“景感共鸣”<sup>[29]</sup>。

矿山生态建设涉及生态系统各个要素的建设和利用, 包括土地利用、地表水、地下水、植被、土壤、大气环境等。根据锡盟煤电基地区域的具体情况, 因地制宜充分利用已有自然条件, 对现有草原、植被、水源等进行保护, 采用满足人们的愿景和社会的需求、符合地域自然演变规律的最适宜、综合效益最高、经济可行、可持续的技术方法进行生态建设。同时, 煤电基地的景感营造应结合当地蒙古族文化、信仰、生活习性等特征, 让人们从物理感知、心理认知两个层面共同引发景感共鸣。

锡盟煤电基地的开发建设应充分结合草原区的风光特点,开展文化旅游项目,使基地具备“工业、文化、旅游”多种功能,成为兼具“草原特色风情”的大型煤电开发、环境治理与观光旅游一体化的“生态、环保、绿色”示范区,充分带动区域的社会经济发展。

#### 4.1.3 可持续发展的景感营造

在锡盟煤电基地的景感营造及生态建设过程中,应注重可持续发展理念。矿产资源是不可再生资源,物质、能量循环利用与守恒是煤电基地景感营造和生态建设的重要原则。在景感营造过程中,一方面要考虑到当地的自然资源的回收利用,如太阳能、风能、雨雪水等,提高环境资源的利用效率,使每个置身于煤电基地内的人都能感受到绿色环保可持续的“景感”。另一方面也要考虑到生产运营中,对矿产资源的综合利用,既可以提高矿产资源的使用价值,又可以减少采矿过程废弃物的产生,减少对区域生态环境的压力。保障锡盟煤电基地生态系统物质和能量循环利用,其主要措施是结合不同生产阶段资源和环境条件的变化,调节产业结构,延长产业链,加强资源(如水资源、矿产资源、土地资源等)与生产废弃物(如煤矸石、矿山废水、工业废料等)的循环利用度,如发展“煤-电-气-化-建材”一体化的复合工业基地等<sup>[36]</sup>。此外,应注重与锡盟地区其他产业的共同发展,如地产开发、草原旅游、康养、新能源、林草等,创新多种开发式、可持续的生态建设及景感营造模式。不断提高煤电基地的景感水平及资源、经济、生态等综合效益,促进区域“社会-经济-自然”复合系统的健康协调发展。

#### 4.2 锡盟煤电基地的景感修复

锡盟煤电基地的景感修复,需要在景观生态修复的基础上,以稳定生态系统结构、恢复和提升生态系统功能为核心,是煤电基地生态安全格局构建和生态系统健康保障的关键途径,相关措施需从以下 3 个方面开展:

##### 4.2.1 综合时空维度、构建景感格局

锡盟煤电基地的景感修复首先需认识矿群开发对草原煤电基地景感生态的综合影响,包括时间、空间两个维度,并进行综合修复:

(1)在空间维度上,整体考虑锡盟煤电基地内各景观单元的空间格局与地貌形态特点的关系,进行修复及优化。露天矿产生的大型排土场等容易发生水土流失,应实施有针对性的绿化护坡工程,如种植乔木、灌木等适宜当地气候的植物,打造绿色示范排土场。井工矿需要对输煤传送系统周边进行保护,如布设沙障等。同时,在煤电基地内的煤炭加工区、发电区等铺设绿化带及输水管道。改善控制煤电基地的水土流失、地表水文过程、物质与能量循环等<sup>[29]</sup>,稳定各项生态系统结构。

(2)在时间维度上,综合考虑矿山开采的生命周期性,利用现代的人工智能模拟技术,结合煤电基地发展规划,创建全生命周期的景感生态恢复模型,模拟煤电基地的景感生态恢复,结合公众对恢复过程的感知变化和满意度,做出相应的分析和评价,为后续的修复工作提供决策支持。

##### 4.2.2 优化空间结构、提升景感功能

在景感生态学理论指导下优化锡盟煤电基地的空间结构是非常必要的,整体上统筹煤电基地的水、土、地形地貌等生态要素,调控水土物质流过程,从生态系统结构及其生态功能恢复方向拓展,更有利于实现区域可持续发展。包括对区域内地表径流及潜在汇水区进行分析,优化水流路径和植物配置,构建水土物质流控制系统,达到控水蓄水、增加生态用水,矿山复绿、减轻水土流失的效果<sup>[37]</sup>。

充分考虑人们的物理及心理感知,通过引入新的景感组分、空间格局的优化、廊道的建设等,稳定生态系统结构,提升锡盟煤电基地整体的景感。根据基地内物质及能源流动的特点,在目前产业分布及景观格局的基础上,构建景感生态廊道,如物质流廊道、防粉尘廊道、生态廊道、文化廊道等<sup>[38]</sup>,将绿色清洁的采矿区、加工区,智能环保的发电区、储运系统,人工湖、矿山公园等景观区,与休闲娱乐的生活区等各系统进行有效的链接,以人在其中的整体感知为核心,在进一步稳定各生态系统结构的同时,提升能源基地的景感功能,满足基地工作人员及当地居民的需求和愿景。

##### 4.2.3 与自然融合、提升生态效益

锡盟煤电基地景感修复的理想状态是能够与周边草原地形地貌融合,让人们感觉不到明显的破坏痕迹,

形成一个有机的整体。景感修复应根据开采计划,在煤电基地建设初期,就开始规划全生命周期近自然地貌恢复技术策略,以保证重塑地貌的整体效果。具体需要通过一系列仿自然地形特征提取与关键技术应用,包括对草原地形、气候条件、水文和植被等参数提取分析,研究各参数之间关系,以实现修复后的斑块与周边自然景观有机融合,促进生态系统的健康稳定<sup>[39]</sup>。如美国西弗吉尼亚布法罗煤炭公司就将长壁采煤产生的地表沉陷积水区改造成为湿地和野生动物栖息地<sup>[40]</sup>,增加了区域的生物多样性,满足了人们的审美感知,有利于生态修复的可持续性。

#### 4.3 锡盟煤电基地景感保护监测与管理

煤电基地生态系统是由自然资源、生态环境和社会经济耦合成的复杂系统,因此在开展景感保护和营造工作时,需根据煤电产业特点及锡盟当地的自然条件,构建景感监测指标体系,以物联网监测手段为工具,结合谜码数据平台,搭建煤电基地可持续发展信息管理系统,为区域的景感保护及管理提供描述、评价、预警、决策支持等功能。

##### 4.3.1 景感监测指标体系

构建景感监测指标体系时,需综合考虑煤电基地的资源节约利用、生产排放、环境保护等“硬”指标,以及居民感知认知、生活环境质量、健康可持续度等“软”指标。指标的选择应具有描述、监测、预警复合生态系统的功能,以实现煤电基地景感的调控、保护和管理,促进煤电基地复合生态系统的健康和协调发展。锡盟煤电基地的景感保护监测指标体系由对生态环境保护(客观的“感”)和对居民感知及福祉的保护(主观的“感”)两部分组成,具体如表 1 所示。

表 1 锡盟煤电基地的景感保护监测指标体系

Table 1 Indicators system of landsenses protection and monitoring in Xilin Gol League coal power base

景感类型 Landsenses type	指标类别 Indicator classification	监测指标 Monitoring indicator	景感类型 Landsenses type	指标类别 Indicator classification	监测指标 Monitoring indicator
客观的“感” Objective landsenses	清洁生产	工业 SO <sub>2</sub> 排放达标量	主观的“感” Subjective landsenses	生活环境质量	噪声环境质量
		工业 NO <sub>x</sub> 排放达标量			地表水环境质量
		重金属元素排放达标量			地下水环境质量
		工业废水排放达标量			土壤环境质量
		工业烟尘排放达标量			大气环境质量
	资源循环利用	可再生能源资源利用率		植被覆盖率	
		矿产资源综合利用率		物种多样性	
		工业固体废弃物综合利用率		生活垃圾无害化处理率	
		单位 GDP 能耗		居民愿景 及福祉	人均公共绿地面积
		工业用水循环利用率			人均水资源占有量
	地质安全	废弃土地复垦率		环境保护满意度	
		水土流失治理率		景观绿化满意度	
		矿山恢复面积		人均可支配收入	
		地质灾害发生率		人均居住面积	
		景观遥感数据		景观斑块数量	职工健康危害指数
景观斑块密度					
平均景观斑块面积					
最大景观斑块指数					
景观形状指数					
		景观分离度			
		景观破碎度			

##### 4.3.2 煤电基地可持续发展信息管理系统

通过在煤电基地内安装多个物联网监测装置,定期对基地内工作人员及区域内居民进行访谈调查,对上

述景感指标进行长期的、实时的、实地的、原位的监测,将采集的混合数据和行进数据组成谜码数据,并进行智能分析,形成景感保护的监测管理平台,进而搭建煤电基地可持续发展信息管理系统,其主要功能如下:

- (1)描述功能:描述煤电基地生态环境状况与居民福祉的变化;
- (2)评价功能:评价煤电基地复合生态系统安全状况;
- (3)预警功能:对煤电基地潜在的生态环境问题提供预警;
- (4)决策支持功能:为管理者提供智能化管理支持,进而制定保障煤电基地生态系统健康和居民福祉的政策。

煤电基地的景感营造,因涉及复合生态系统,同时受时间、投入和人们认知水平、需求变化等因素限制,景感营造工作很难一步到位,需要逐步改进完善。所以煤电基地可持续发展信息管理系统需结合趋善化模型<sup>[16]</sup>,在生产运营过程中根据系统提供的环境变化的分析评价,对实施的管理工作加以不断的调整、改进和完善。

#### 4.4 煤电基地生态文明的建设

生态文明是指具有保持和改善生态系统服务能力,并能够为其民众提供可持续福利的文明形态<sup>[41]</sup>。锡盟煤电基地的生态文明建设是实现区域生态稳定与可持续发展的重要基础,可持续发展的实现不仅需要科学技术的“硬”支撑,更需要与之相应的文化和伦理道德方面的“软”支撑。

##### 4.4.1 提高生态保护意识,减小环境压力

锡盟草原不仅是当地牧民赖以生存的家园、保护动物的栖息地,更是中国北方的重要生态屏障。锡盟煤电基地的生态文明建设需要社会各界的共同关注和努力,包括政府、企业、个人,政府的责任是制定相应的生态文明保护政策,企业的责任是将生态保护纳入企业文化和生产经营中,个人则在工作和生活中都要具有生态环保意识。

煤电基地生产导致的生态破坏和污染排放是影响居民生活愿景和区域生态健康的主要原因<sup>[22,30]</sup>,要充分把握矿业生产和居民生活所排放的废水、废气和固体废弃物的数量、分布、强度等,提高企业和个人的生态保护意识,逐步减小污染排放对环境保护和生态健康的压力。同时,调整实施有利于资源节约的生产开发方式,激励煤电企业加强资源循环利用的科技创新,提高资源的综合利用效率。加强生态文明的建设,保护锡盟草原,是所有人共同的责任。

##### 4.4.2 以人为本,注重公众参与,提高居民福祉

锡盟煤电基地的生态建设应以人为本,生态文明可以促进煤电基地内人们可持续发展的行为规范,进而使得人们在享用生态系统服务的同时,自觉地共同行动去保持和提升生态系统服务,以保障可持续发展目标的实现<sup>[29]</sup>。同时,生态建设应加强公众的参与度,包括煤电基地的工作人员以及锡盟当地的居民,只有充分了解公众物理认知、心理感知层面的需求变化,才能更好地规划建设煤电基地的景感。在考虑资源环境承载力的基础上制定远期与近期规划,加强矿区文化教育、商业服务、休闲娱乐、医疗卫生等基础设施的建设,不断提高当地居民的福祉,促使煤电基地建设与“创新、协调、绿色、开放、共享”景感营造理念的系统化融合发展。

## 5 讨论与结论

煤电基地生态建设及修复主要包括废弃地土壤复垦和改良、排土场边坡修复、景观修复和植被恢复、环保电厂的建设、区域生态环境管理等<sup>[11,32]</sup>。依据景感生态学理论做指导,进行煤电基地的景感营造工作,才能真正的逐步达到构建和谐社会、建立可持续发展的煤电基地的目的。这就要求必须改变以往的生态建设与恢复技术模式单一<sup>[42]</sup>、矿区景观与自然景观融合度低<sup>[38]</sup>的生态整治模式,引入景感生态学理念及方法,从提升生态系统服务和居民愿景及福祉的角度,来开展煤电基地的生态建设与管理。

### 5.1 生态系统服务提升

借助景感生态学的理论和方法,研究煤电基地产业布局、景观格局的变化所产生的物质流、能量流等过程

的机理,结合自然生态系统的要素及变化特征,可以更科学地认识自然生态系统与外界环境胁迫之间的作用机理,以及煤电基地生态系统的承载力、恢复力等,进而为区域生态系统的正向演变、生态服务的正常供给提供支持<sup>[43-44]</sup>。结合生态环境物联网的监测、分析与评价,可以更系统地了解生态系统服务的变化,统筹水、土、气等生态要素和声、光、感等感知要素<sup>[45]</sup>,并结合人们的愿景和社会需求从景感营造的角度共同开展生态建设工作,有助于煤电基地复合生态系统结构的稳定、生态系统服务的提高。

## 5.2 居民愿景和福祉的提高

景感生态学在传统生态学的基础上,更加关注居民的物理感知、心理认知,结合互联网技术及信息化平台,可以提高公众的参与度,将居民对生态环境和社会发展的愿景融入煤电基地可持续发展信息管理系统中,进而更好地了解公众的需求,提高居民生活福祉。

煤电基地的景感营造,不仅仅是人们在生产经营活动中对生态环境的感知、赏悦,更是享受其生态服务、维持其生命支撑、营造其生命共同体的生态环境系统。更为值得重视的是,景感营造把人类的智慧和对自然生态环境系统的需求理念、需求程度充分结合,体现在景感设计、生态环境建设和保护管理之中,从根本上满足了人们的愿景,提高了居民福祉。

## 5.3 结论

本文以景感生态学为理论基础,在分析锡林郭勒煤电基地因开发建设而导致的生态环境问题基础上,关注当地居民的物理感知和心理认知,结合社会经济、自然条件等要素,提出了煤电基地的景感生态建设应用策略。从煤电基地的景感营造、景感修复、景感生态保护监测与管理、生态文明的建设 4 个方面进行了分析,结合生态环境物联网等现代化智能技术,建立煤电基地可持续发展信息管理系统,为区域生态系统的保护管理提供了描述、评价、预警、决策支持等支持功能。对煤电基地生态系统健康的保障、生态系统服务的提升、以及居民福祉的提高有着重要意义,为实现区域可持续发展的目标提供了有效措施。

## 参考文献(References):

- [1] 薛黎明,王豪杰,朱兵兵,沈文龙,郑志学,葛英辉,徐翠云. 煤炭资源可持续力评价与系统协调发展分析. 经济地理, 2020, 40(1): 114-124.
- [2] 滕吉文,乔勇虎,宋鹏汉. 我国煤炭需求、探查潜力与高效利用分析. 地球物理学报, 2016, 59(12): 4633-4653.
- [3] 黄志军. 跨区域输电背景下煤电基地建设对当地经济和环境的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [4] 周政达,王辰星,付晓,全元,魏东,王毅,高雅,李思远,吴钢. 基于 DPSIR 模型的国家大型煤电基地生态效应评估指标体系. 生态学报, 2014, 34(11): 2830-2836.
- [5] 武强,涂坤,曾一凡,刘守强. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625-1636.
- [6] 肖新建. 改革开放 40 年煤炭支撑我国经济社会高速发展. 中国能源, 2018, 40(11): 10-16.
- [7] 高春雨. 煤炭生产开发布局西移对环境的影响及建议. 能源环境保护, 2018, 32(5): 7-11.
- [8] 肖武,张文凯,吕雪娇,王新静. 西部生态脆弱区矿山不同开采强度下生态系统服务时空变化——以神府矿区为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 68-81.
- [9] 韩林桅,付晓,严岩,王辰星,吴钢. 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. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1653-1660.
- [10] 国合会"中国环境保护与社会发展"课题组. 中国环境保护与社会发展. 环境与可持续发展, 2014, 39(4): 27-45.
- [11] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 25-35.
- [12] 李成,刘美博,吴佳怿,孔德义. 采煤塌陷区园林生态景观修复研究进展. 安徽农业科学, 2020, 48(7): 35-37, 73-73.
- [13] 杨勤学,赵冰清,郭东罡. 中国北方露天煤矿区植被恢复研究进展. 生态学杂志, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [14] 王慧,吕英英. 煤矿开采导致水污染的污染特征与控制措施研究. 环境科学与管理, 2019, 44(7): 68-73.
- [15] 鞠建华,强海洋. 中国矿业绿色发展的趋势和方向. 中国矿业, 2017, 26(2): 7-12.
- [16] Zhao J Z, Liu X, Dong R C, Shao G F. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016, 23(4): 293-297, doi: 10.1080/13504509.2015.1119215.
- [17] 张学玲,闫荣,赵鸣. 中国古典园林中的景感生态学思想刍议. 生态学报, 2017, 37(06): 2140-2146.
- [18] Dong R C, Liu X, Liu M L, Feng Q Y, Su X D, Wu G. Landsenses ecological planning for the Xianghe Segment of China's Grand Canal.

- International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016, 23(4): 298-304, doi: 10.1080/13504509.2015.1125397.
- [19] Dong R C, Yu T S, Ma H, Ren Y. Soundscape planning for the Xianghe Segment of China's Grand Canal based on landsenses ecology. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016, 23(4): 343-350, doi: 10.1080/13504509.2015.1125964.
- [20] Wu G, Tan L B, Yan Y, Tian Y, Shen Y, Cao H M, Dong M T. Measures and planning for wetland restoration of Xianghe Segment of China's Grand Canal. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016, 23(4): 326-332, doi: 10.1080/13504509.2015.1136856.
- [21] 石龙宇, 赵会兵, 郑拴宁, 于天舒, 董仁才. 城乡交错带景感生态规划的基本思路与实现. 生态学报, 2017, 37(6): 2126-2133.
- [22] 马一丁, 付晓, 田野, 王辰星, 吴钢. 锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价. 生态学报, 2017, 37(13): 4505-4510.
- [23] 魏东, 全元, 王辰星, 付晓, 周政达, 王毅, 高雅, 吴钢. 国家大型煤电基地生态环境监测技术体系研究——以内蒙古锡林郭勒盟煤电基地为例. 生态学报, 2014, 34(11): 2821-2829.
- [24] 陈娇. 煤矿废弃地景观设计策略. 能源与节能, 2017, (2): 90-91.
- [25] 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. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1235-1246.
- [26] 洪长兴, 邱小平, 魏钰倩, 杨利田, 林皎皎. 废弃矿山景观生态修复研究——以福州市连江县丹阳镇废弃花岗岩矿区为例. 西部资源, 2020, (1): 174-176.
- [27] 索新文, 陈果, 卜璞. 基于3S的矿区景观格局演变研究: 以冷水江市闪星锡矿山为例. 中国矿业, 2018, 27(1): 95-99.
- [28] 吴瑶. 景观生态学在矿山地质环境治理中的有效运用. 中国金属通报, 2018, (12): 186-187.
- [29] Zhao J Z, Yan Y, Deng H B, Liu G H, Dai L M, Tang L N, Shi L Y, Shao G F. Remarks about landsenses ecology and ecosystem services. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2020, 27(3): 196-201, doi: 10.1080/13504509.2020.1718795.
- [30] 王鹏. 煤矿开采引发的地质环境问题及其对策研究. 科技创新与应用, 2019, (28): 118-120.
- [31] 康萨如拉, 牛建明, 张庆, 韩砚君, 董建军, 张靖. 草原区矿产开发对景观格局和初级生产力的影响——以黑岱沟露天煤矿为例. 生态学报, 2014, 34(11): 2855-2867.
- [32] 李全生. 东部草原区煤电基地开发生态修复技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7049-7053.
- [33] 吴迪, 代方舟, 严岩, 刘昕, 付晓. 煤电一体化开发对锡林郭勒盟环境经济的影响. 生态学报, 2011, 31(17): 5055-5060.
- [34] 范小杉, 高吉喜, 田美荣, 张玮. 内蒙古自治区煤炭开采资源损耗及生态破坏成本核算与分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(9): 39-44.
- [35] 赵景柱. 社会-经济-自然复合生态系统持续发展评价指标的理论研究. 生态学报, 1995, 15(3): 327-330.
- [36] 吴玉萍, 刘娅楠, 吕小师. 煤炭产业链低碳经济发展模式研究——以煤-焦-电-建材产业链为例. 内蒙古煤炭经济, 2013, (7): 17-18, 27-27.
- [37] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [38] 雷少刚, 张周爰, 陈航, 吴振华, 宫传刚, 卞正富. 草原煤电基地景观生态恢复技术策略. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3662-3669.
- [39] 韩林桅, 张森, 石龙宇. 生态基础设施的定义、内涵及其服务能力研究进展. 生态学报, 2019, 39(19): 7311-7321.
- [40] 卞正富, 许家林, 雷少刚. 论矿山生态建设. 煤炭学报, 2007, 32(1): 13-19.
- [41] 赵景柱. 关于生态文明建设与评价的理论思考. 生态学报, 2013, 33(15): 4552-4555.
- [42] 杨金燕, 杨锴, 田丽燕, 黄仁豪. 我国矿山生态环境现状及治理措施. 环境科学与技术, 2012, 35(S2): 182-188.
- [43] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001, 21(11): 1885-1892.
- [44] 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. 生态学报, 2017, 37(15): 5221-5227.
- [45] 李欢欢, 张雪琦, 张永霖, 董仁才. 城市生态环境损害鉴定评估监测体系研究. 生态学报, 2019, 39(17): 6469-6476.