

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20181128002

孙金玉, 卜庆伟, 吴东奎, 等. 煤矿区生态累积效应评价研究进展[J]. 生态毒理学报, 2019, 14(5): 74-82

Sun J Y, Bu Q W, Wu D K, et al. A review on evaluation of ecological cumulative effect in coal mining areas [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2019, 14(5): 74-84 (in Chinese)

煤矿区生态累积效应评价研究进展

孙金玉¹, 卜庆伟^{1,*}, 吴东奎¹, 刘云¹, 姜巍巍²

1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083

2. 上海城市水资源开发利用国家工程中心有限公司, 上海 200082

收稿日期: 2018-11-28 录用日期: 2019-03-18

摘要: 煤炭开采活动的特点决定了其对矿区生态环境的影响具有明显的累积效应。在梳理生态累积效应概念和特征的基础上, 结合煤矿区各类活动的特点综述了煤矿区生态累积效应的影响源、途径、效应及类型, 并评述了目前国内外有关煤矿区生态累积效应的相关研究。目前针对煤矿区生态累积效应的研究仍十分有限, 评价方法也尚不成熟。关于煤矿区的生态累积效应研究主要集中在效应评价方面, 有关生态累积效应的发生机理、指标体系构建、评价方法学、管理规划及应对机制, 是未来应加强的重点研究领域。

关键词: 煤炭开采; 煤矿区; 累积效应; 生态效应; 指标体系; 环境影响

文章编号: 1673-5897(2019)5-074-09 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

A Review on Evaluation of Ecological Cumulative Effect in Coal Mining Areas

Sun Jinyu¹, Bu Qingwei^{1,*}, Wu Dongkui¹, Liu Yun¹, Jiang Weiwei²

1. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China

2. Shanghai Municipal Water Resource Development and Utilization National Engineering Center Co., Ltd, Shanghai 200082, China

Received 28 November 2018 accepted 18 March 2019

Abstract: Coal mining activities usually make significantly cumulative effect on the ecosystem and local environment in mining area. In this study, the concept and characteristics of ecological cumulative effects (ECEs) of coal mining activities were summarized. Furthermore, the sources, pathways, effects, and types of ECEs of coal mining activities were reviewed and identified with considering the characteristics of various coal mining activities in coal mine areas, based on the studies focusing on ECEs of coal mining activities worldwide. This review found that most of the published literatures were focused on assessing the effects of coal mining activities in a specific area instead of ecological cumulative effects, and the methodology for the assessment of ECEs was not well established. Future studies are suggested to focus on the occurrence mechanisms of ECEs, selection of assessment indices, assessment methodology, and management strategies.

Keywords: coal mining areas; coal mining; cumulative effect; ecological effect; indicator system; environmental impact

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504401); 中国矿业大学(北京)“越崎青年学者”资助计划

作者简介: 孙金玉(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为煤矿区生态安全评价, E-mail: jinyu.sun@fateec.com

* 通讯作者 (Corresponding author), E-mail: qingwei.bu@cumt.edu.cn

累积效应的研究强调多项活动或多次重复活动在长时间和较大空间范围内对环境的叠加累积性影响^[1]。自从“生态累积效应”概念提出以来,在矿产资源开发影响区域^[1]、人工绿洲^[2]等相关领域的生态累积效应评估方面均有一定程度的应用,起到了协调经济发展与环境保护的重要作用。

煤炭在我国能源消费构成中占有重要比例。在社会经济发展对能源需求日益提高的背景下,煤炭资源的开采力度也日益加大。煤炭资源的大规模开采必然对煤矿区周边的土地资源和生态环境构成严重威胁。当前研究主要集中在煤炭开采对各生态要素的负面生态效应评估方面,为煤矿区的生态环境保护提供了一定的科学基础^[3-6]。但是,由于煤炭开采活动具有开发强度大、周期长和空间扩展性等特点^[7],已有的针对生态系统中各单一要素、固定时间点的评价研究难以准确地反映整个煤炭开采过程对生态环境的影响。因此,开展煤矿区生态累积效应评价显得尤为重要,这也是客观评价煤炭开采所导致的负面生态环境效应的重要手段。

本研究在梳理生态累积效应概念的基础上,重点剖析了煤矿区生态累积效应的影响源、途径、效应及表现形式等。结合目前国内外研究现状,综述了煤矿区生态累积效应评价的相关进展,并在此基础上对今后的研究方向进行了展望。

1 生态累积效应的概念与特征 (The concept and characteristics of ecological cumulative effect)

生态累积效应的概念是在20世纪70年代由美国科学家首次提出的^[8],是指当一项活动与过去、现在以及可合理预见的将来活动叠加在一起时,所产生的对生态环境的累积影响^[9]。生态累积效应是由人类活动对环境引起的具有附加性与交互性的影响,在时间尺度上重复推移并分散在空间上,是对生态环境在空间和时间尺度上通过叠加与交互作用而产生的长远的影响效应^[8]。

根据上述概念不难看出,累积效应具有时间和空间累积特性等特征,据文献可以总结为以下3点^[1,10-11]。

(1)时间累积性。累积效应的时间累积性是指当扰动之间的时间间隔小于环境修复所需时间时,在时间尺度上产生的累积现象。生态累积效应的累积速率可以是连续的、周期性的或不规则的,并且在环境中发生的时间可长可短。时间累积性可以用累积频率表示,其概念为“某个区域在某段时间内出现累积效应或累积影响的时间比率”,可用公式表

示如下^[12]:

$$F = T_d/T_s$$

式中: F 为某个区域内累积效应或累积影响出现的频率; T_d 为累积效应或累积影响持续的时间; T_s 为选择的时间尺度。

(2)空间累积性。累积效应的空间累积性是指扰动因素之间的空间接近度小于去除或分散每个扰动所需的距离时,在空间尺度上产生的累积现象。空间累积可以通过空间尺度(局部、区域和全球)、密度(聚集、分散)和构型(点、线性和区域)来表征。空间累积性可以用累积度表示,体现累积影响在一定区域内的累积程度,其表达公式如下^[12]:

$$D = C/P$$

式中: D 为区域内某个累积影响区的累积度; C 为累积变化值; P 为环境阈值或临界值。

(3)人类活动干扰性。人类的活动或扰动也会影响环境变化的积累,环境变化的累积程度可能因人类活动的数量、类型和规模而异。

上述累积效应的特征并不是独立的,而是具有紧密的相互关联性。在对环境累积变化的研究过程中,对其特征的归纳分析有利于对环境累积效应变化的研究^[11]。

2 煤矿区生态累积效应的影响源、途径、效应及表现 (Sources, pathways, effects and manifestations of ecological cumulative effects in coal mining areas)

煤炭开采方式包括井工和露天2种,不同的开采方式均会对矿区内生态环境各要素产生累积影响,但2种开采方式对生态环境造成累积影响的途径略有差异。图1对煤矿区生态累积效应的影响源、途径、效应及表现形式等进行了汇总,下文将逐一阐述。

2.1 影响源

煤矿区生态累积效应的影响源涵盖矿区范围内的一切人类活动,包括生产与生活活动,可以是矿区单个项目或是多个项目^[7]。开采规模的扩大、开采速度变化以及矿区基础设施的建设,均是造成煤矿区生态累积效应的影响源。

2.2 影响途径

露天开采过程中,随着地上开采活动的进行,对地表的大规模挖掘造成大面积的矿坑,是破坏地形地貌以及地表植被的主要途径;井工开采过程中,随着煤矿开采活动的进行,矿井数量的增多,是造成开采区大面积的采空区域以及入地塌陷区的主要原因。露天开采方式中,矿坑废水的排放是污染煤矿

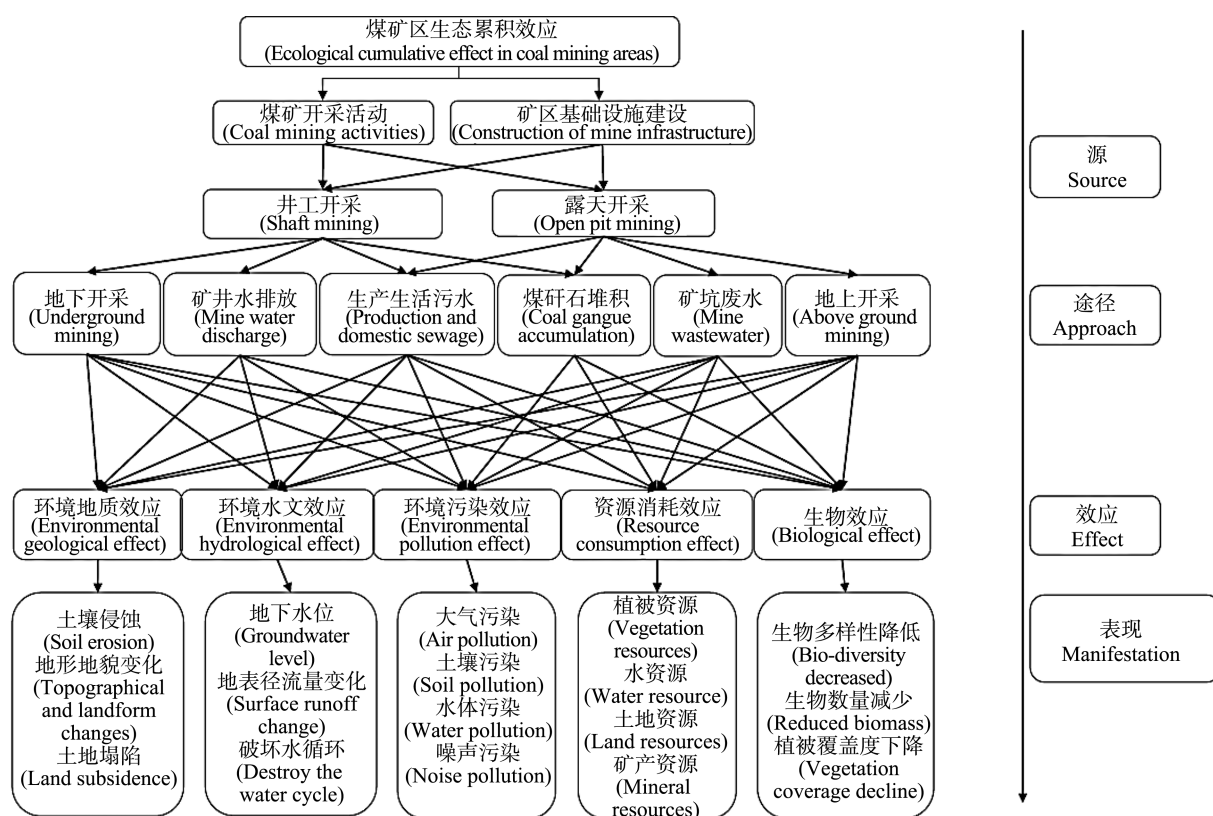


图1 煤矿区生态累积效应的源、途径、效应及表现形式

Fig. 1 Sources, pathways, effects and manifestation of ecological cumulative effects in coal mining areas

开采区水环境的重要途径,同时开采过程对岩层以及含水层的破坏,会影响地下径流以及地表径流;井工开采过程的矿井废水的排放,可能会导致更大范围内的地下及地表水环境受到污染破坏。在煤矿开采区域内的生产、生活过程中排放的污水均可能对地下及地表水环境造成污染,同时还可对土壤环境造成潜在的影响。此外,气态或颗粒态污染物(如粉尘、甲烷等)则主要通过矿区煤矸石的堆放、自燃等途径进入大气。

2.3 效应及表现

在煤炭开采过程中,通过上述影响源及途径对矿区造成的累积影响可简要概括如下^[7,13-14]。

2.3.1 环境地质效应

在煤炭资源的开采过程中,地下开采、地上开采活动均可带来一定的环境地质效应。其中,在井工开采过程中,随着开采规模的不断扩大,采空区的大量形成,可表现为形成大面积的地面塌陷区;无论井工或者露天开采,由于土地挖掘等活动破坏土地原有的结构,形成大面积的塌陷区以及矿坑,表现为煤矿区地形地貌的改变,矿井水、矿坑废水等的排放还会加剧土壤侵蚀。

2.3.2 环境水文效应

地下开采活动、地上开采活动均可导致一定程度的环境水文效应。比如,地上或地下开采均会破坏地下含水层和地表径流,打破原有的水动力学平衡,破坏地表水与地下水之间的水循环过程;地下开采、地上开采等活动可能会导致地下水位下降;在上述途径的共同作用下,原有的地表水水系可能会遭受破坏,导致水流方向、流量等的改变,甚至还会导致水系退化。

2.3.3 环境污染效应

地下开采、矿井水排放、生产生活污水排放、煤矸石堆积、矿坑废水排放和地上开采等活动都将伴随着环境污染效应的产生。例如,矿井水以及矿坑废水的排放可能会污染地下水;生产生活污水的排放、煤矸石的淋滤可能会对地下水及地表水造成污染;采矿废水的排放及煤矸石的堆积还会造成土壤环境污染,进一步使土壤生产力降低;矿井废气及煤矸石自燃等过程会产生大量的硫化物、甲烷等污染性气体,开采过程中产生的粉尘等将会污染大气环境,加剧酸雨、温室效应等环境问题;基础设备的运行还会产生巨大的噪声污染等。

2.3.4 资源消耗效应

煤炭开采过程中会对矿产资源产生巨大的消耗;开采过程还会破坏大量的土地,消耗大量的土地资源及地表植被资源;煤矸石的堆积也会占据大量的土地资源;此外,地下开采、生产生活用水、矿坑废水的产生和地上开采等活动都伴随着大量的水资源消耗。

2.3.5 生物效应

煤炭开采过程中的地下开采、矿井水排放、生产生活污水排放、煤矸石堆积、矿坑废水排放和地上开采等活动均会产生一定的生物效应。随着煤炭资源开采规模的扩大,矿区水文(地表水、地下水)环境、土壤结构与地表生长环境、地表植被等矿区环境的破坏也随之加剧,引起矿区原有生境的破坏,致使区域生物多样性及生物量发生改变,可能会进一步导致矿区区域生态系统功能减弱及结构的改变。

煤炭开采过程的特点决定了上述效应并不会以单一形式存在,不同的活动、效应可以在时空尺度上通过加和、协同等交互共同作用对生态系统各要素产生累积影响。例如,煤炭开采造成的地表塌陷及生产生活污水的排放,两者可协同导致土壤质量进一步下降;煤炭开采活动所导致的地形地貌的改变与采矿废水的排放造成的土壤污染,两者协同作用导致土壤结构和性质发生改变,导致土壤质量和功能的进一步衰退。

2.4 累积效应的类型

生态累积效应的类型多样,并没有形成一个统一的分类标准。如时间拥挤、空间拥挤和协同效应,是依据累积的过程而划分;蚕食效应则依据累积效应的形式和结果划分;然而,阈值的划分依据为指标。尽管划分依据不同,却均是在时间与空间特征的基础上进行区分的,各类型之间紧密相连,共同服务于对累积效应的研究与分析。通过文献分析,对不同累积效应类型总结如下^[7,10,12]。

(1)时间拥挤。其产生原因是由于频繁且重复的人类活动导致的环境变化超过环境介质吸收或恢复该变化的时间容量。比如煤矿区高频率的重复采动。

(2)空间拥挤。指的是密集的人类活动发生在有限的空间内,可以改变一个地区的空间格局或其空间过程。比如在煤矿区有限的单元空间内进行大规模、高强度的开采。

(3)协同效应。当2个或多个环境变化通过物理、化学等过程耦合促进另一个环境变化产生时,其

表现为复合或协同作用。比如,煤炭开采过程产生的甲烷与氮氧化物可产生光化学烟雾。

(4)时间滞后。扰动产生一段时间后,系统才做出相应的响应,具有一定程度的时间延迟。比如井工开采引起的地表沉陷与裂缝发育。

(5)空间滞后。指的是导致的环境变化与影响源之间存在一定距离。典型的案例包括由煤炭开采造成的大气污染现象以及酸雨等。

(6)触发点和阈值。指在破坏环境过程中,超过某个极限将从根本上改变系统。比如矿区土地利用类型的改变。

(7)间接效应。指的是因主要活动发展所带来的次生影响或者主要活动通过复杂路径产生更高阶环境变化。例如,开采活动导致矿区的人口增长,进一步导致配套设施的发展而带来的环境污染和生态破坏等现象。

(8)蚕食效应。指多个分散的重复干扰行为对某一区域或空间内的生态系统产生的累积影响,导致生态系统的割裂和破碎化。例如,多个分散开采点导致的植被的破碎化和土地沉陷成片状分布。

3 研究案例分析 (Review of case study)

如前文所述,生态累积效应的概念由来已久,在不同的领域也得到了较为广泛的应用,如水电开发^[15-20]、铁路及公路建设^[21-25]、绿洲开发^[26]、湿地开发^[27-29]和流域管理^[30]等,但有关煤矿区生态累积效应评价的研究仍十分有限,国外仅有零星研究^[31-32]。如 Merriam 等^[31]通过构建累积效应线性评价模型评价了采煤活动对美国西弗吉尼亚阿巴拉契亚流域生态环境的累积影响。研究表明,区域的河流退化是地表开采、地下开采和住宅开发等复杂问题相互叠加、相互作用的结果。

在我国,由于煤炭资源在能源消耗构成中的巨大占比,相关研究较国际上略多。如中国科学院、中国矿业大学、国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室等单位均开展了相关案例研究^[14,33-38]。例如韩林桅等^[14]针对煤电一体化开发建设活动,从建设活动、土壤环境、水资源、大气环境、生物、景观和生态7个方面筛选出29个生态环境因子,运用解释结构模型(interpretation structure modeling, ISM)对煤电一体化开发的生态累积效应因子之间进行关联与层次分析,揭示了煤电一体化开发产生生态累积效应的方式和途径,并分析煤电开发过程中不同开发建设活动产生的累积效应。结果表明,煤电建设活动

会造成多种生态环境影响,并且所引发的环境效应可以相互叠加、传递和累积。王行风等^[35]以地理信息系统(GIS)为基础平台,结合系统动力学(SD)及元胞自动机(CA),建立 SD-CA-GIS 模型,对山西潞安矿区的社会、经济与环境因素进行时间及空间累积效应分析,对矿区在一定时间范围内土地利用变化的累积状况进行了评估。结果表明,随煤炭开采活动的进行,矿区内工矿用地等呈现累积性增加,其他土地类型呈累积性减少。该研究团队^[38]通过构建基于景观演变的生态累积效应表征模型,利用遥感技术对矿区景观变化进行分析,探讨矿区煤炭开采活动对土地利用变化类型以及矿区景观生态的累积影响。结果表明,矿区景观空间累积负荷显著增强,同时还具有向外扩张趋势。此外,由于不同分区的人类活动的干扰强度具有差异,矿区的不同分区内也会表现出不同累积程度。连达军和汪云甲^[36]基于场论与 GIS 技术,结合生态场理论构建了生态位元素体系,描述了采动生态势的确定方法以及生态环境采动累积效应的分析方法,并针对山西潞安矿区某开采沉陷区进行分析,得到该矿区主要生态位元素的采动累积效应规律,探究了矿区土壤覆盖、土壤侵蚀以及植被覆盖的煤炭采动累积效应变化,得出开采沉陷是造成矿区环境灾害的直接根源。

为更加深入分析与对比当前已有研究案例,以便为今后的研究提供参考,我们将不同案例研究的评价指标、评价方法等进行了梳理(表1),总结了相关研究的异同并简要分析如下。首先,当前研究局限于少数的矿区,对于不同区域、不同开采规模和不同开采方式下的研究相对较少。如针对国内矿区的研究仅集中在山西潞安煤矿^[35-38]、淮南煤矿^[33]、内蒙古锡林郭勒盟煤电基地^[34],而国外相关研究则更少,仅美国^[31]、印度^[32]有少量相关报道。其次,目前在生态累积效应评价的指标选择上缺乏共识。现有研究多数基于专家判断来确定相应的指标,具有一定的主观性。此外,不同研究之间所选取指标代表的生态要素层次不同,如部分研究选取景观水平的指标(如景观类型结构偏离累积度^[38]、景观格局干扰累积度^[38]、覆被态指数^[36]等),而部分研究则选取环境质量水平的指标(如大气污染、水污染等^[31-32]以及土地破坏^[36-37])。此外,目前在煤矿区生态累积效应评价的方法学方面仍处于探索阶段,缺乏统一的评价方法体系。多数方法学研究仍然停留在概念解释或者原则性指导框架研究层面^[10,39]。定性的方法(如解释

结构模型^[14]、DPSIR 模型^[34]、源-路径-效应分析^[40]等)可以较好地描述煤矿区系统内部各活动和影响的作用机理及因果关系,有助于梳理复杂系统中各活动的相互关联和层次关系,帮助研究者理清效应产生的原因,并提出相应的解决思路。然而,其弊端在于无法衡量累积效应的强度或大小。定量方法(如广义线性累积效应评价模型^[31]、层次分析^[32]、模糊多层次综合评价^[33]、SD-CA-GIS 模型^[35]、场论和 GIS 技术^[36]、概率积分、胡克定律和莫尔-库伦破坏准则方法^[37]、景观分析^[38])可以克服上述弊端,也是目前研究者更加青睐的手段,但其往往选取代表某一特定生态要素层次的指标进行评价,在因果关系探讨方面仍面临巨大挑战。

4 结论与展望 (Conclusions and perspectives)

煤矿区煤炭开采活动对生态系统的影响具有范围广、程度深和周期长等特点,评价其生态累积效应具有必要性及紧迫性。因此,加强煤矿区煤炭开采活动生态累积效应评价的相关研究具有重要科学和现实意义。近些年来,有关煤矿区生态累积效应评价的研究逐渐增多,取得了一些进展。但是,有关煤矿区生态累积效应评价的指标体系构建、评价方法学以及生态累积效应“源-效应”之间的内在关联及机理等方面仍需进一步深入研究。第一,亟需加强生态系统不同层次指标间的因果关系研究,以便于建立更加全面客观的生态累积效应评价指标体系。针对不同环境要素选择相应的指标便于监测和管理,但是其与生态系统功能和结构改变之间的因果关系尚不明晰,需要进一步加强研究;景观或者高层次的指标更贴近生态系统的真实状况,但其与某项具体的人为扰动或活动的关联较为模糊。开展评价指标之间因果关系或关联度研究,是解决上述问题的重要基础问题。第二,如前文所述,目前关于煤矿区生态累积效应评价的方法学研究仍存在较大争议。如何加强定性方法与定量方法的结合,特别是与遥感、地理信息系统等定量工具的结合^[7,41-42],应该是未来进一步研究的方向。第三,煤炭开采活动对生态系统产生影响的路径复杂,加之生态累积效应的非线性特征显著,机制极其复杂,阐明影响源与效应(表现)之间的关系及内在机理,是近期内应加强的重要研究方向之一,这也依赖于生态、环境等相关学科同步发展。最后,加强管理规划和应对机制也是有待开展的研究方向之一^[39,43],可为科学的管理和减缓煤炭开采活动所致的生态累积效应提供有力的手段。

表 1 煤矿区生态累积效应评价研究汇总
Table 1 Summary of ecological cumulative effects in coal mining areas

研究区 Research area	评价方法 Methodology	评价方式 Evaluation mode	评价指标 Criteria	参考文献 References
美国西弗吉尼亚 West Virginia, USA	广义线性累积效应评价模型 Generalized linear cumulative effect evaluation model	定量 Quantitative	1)水质(电导率、硒) Water quality (conductivity, selenium) 2)生物(底栖大型无脊椎动物群落组成) Biology (benthic macroinvertebrates)	[31]
印度贾里亚煤矿 Jharia Mining area, India	层次分析 Analytical hierarchy process	定量 Quantitative	1)大气 Atmospheric pollution 2)水/污水 Water/sewage 3)土壤 Soil quality 4)植被 Vegetation	[32]
-	源-路径-效应分析 Source-pathway-effect analysis	定性 Qualitative	-	[40]
-	解释结构(ISM)模型 Interpretive structure (ISM) model	定性 Qualitative	-	[14]
内蒙古锡林 郭勒盟煤电基地 Coal-electricity Base in Xilingol League, Inner Mongolia	驱动力-压力-状态-影响-相应 (DPSIR)模型 Driving-pressure-state-impact- responding (DPSIR) model	定性 Qualitative	-	[34]
山西潞安煤矿 Shanxi Lu'an mining area	景观分析 Landscape analysis	定量 Quantitative	1)景观类型结构偏离累积度 Deviation accumulation of landscape type 2)景观格局干扰累积度 Disturbance accumulation of landscape pattern 3)生态敏感性退化累积度 Degradation accumulation of ecological sensitivity	[38]
山西潞安煤矿 Shanxi Lu'an mining area	概率积分、胡克定律和 莫尔-库伦破坏准则方法 Probabilistic integral, Hook's Law and Mohr-Coulomb's failure criterion method	定量 Quantitative	地表裂缝 Fissures	[37]
山西潞安煤矿 Shanxi Lu'an mining area	场论和 GIS 技术 Ecological field theory and GIS	定量 Quantitative	1)土地利用变化/覆被态指数 Land use/cover index 2)土壤侵蚀强度 Soil erosion intensity	[36]
山西潞安煤矿 Shanxi Lu'an mining area	系统动力学-元胞自动机-地理信息 系统(SD-CA-GIS)模型 System dynamics-Cellular automata-Geographic information system (SD-CA-GIS) model	定量 Quantitative	土地利用变化(工矿、居民、交通用地) Land use change (industrial, mining, residential, transportation land)	[35]
淮南矿区 Huainan mining area	模糊多层次综合评价 Fuzzy multi-level comprehensive evaluation	定量 Quantitative	1)矿山地质背景(地形地貌、植被覆盖率、降雨量) Geological background of mining area (topography, vegetation coverage, rainfall) 2)矿山开采强度(煤层采深采厚比、矿井分布密度、开采状况、 累积效应、累积比率、累积频率) Mining intensity (ratio of mining depth to thickness, distribution density of mine, mining status, cumulative effect, cumulative ratio, cumulative frequency) 3)矿山环境问题(矿山塌陷强度、水资源影响度、社会影响程度) Mine environmental problems (collapse intensity, water resource impact, social impact)	[33]

通讯作者简介:卜庆伟(1983—),男,环境科学博士,副教授,主要研究方向为新兴污染物环境归趋及生态风险评价。

参考文献(References):

- [1] 王行风,汪云甲.煤炭资源开发的生态环境累积效应[J].中国矿业,2010,19(11):70-72,88
Wang X F, Wang Y J. Ecological environment cumulative effects of coal exploitation in coal mining area [J]. Chinese Mining Magazine, 2010, 19(11): 70-72, 88 (in Chinese)
- [2] 杜明远,真木太一.沙漠绿洲的开发与环境变化的相互影响[J].自然资源学报,1999,14(4):368-371
Du M Y, Maki T. Mutual influence between the exploitation of desert oases and the environmental change [J]. Journal of Natural Resources, 1999, 14(4): 368-371 (in Chinese)
- [3] 张建成.大同地区煤炭开采对水环境的影响分析和对策研究[J].山西水利科技,2005(2):34-36
Zhang J C. Analysis of effect of mining coal on water environment in Datong Area and countermeasure study [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2005(2): 34-36 (in Chinese)
- [4] 周莹,贺晓,徐军,等.半干旱区采煤沉陷对地表植被组成及多样性的影响[J].生态学报,2009,29(8):4517-4525
Zhou Y, He X, Xu J, et al. Effects of coal mining subsidence on vegetation composition and plant diversity in Semi-Arid Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4517-4525 (in Chinese)
- [5] 郭友红,李树志,高均海.采煤塌陷区景观演变特征研究[J].矿山测量,2009(2):72-75
- [6] 刘环玉,甘晓成,宋岭.新疆煤炭产业发展对大气环境的影响分析[J].生态经济,2009(10):95-97
Liu H Y, Gan X C, Song L. An analysis of the influence of Xinjiang coal industry's development on the atmospheric environment [J]. Ecological Economy, 2009(10): 95-97 (in Chinese)
- [7] 汪云甲,张大超,连达军,等.煤炭开发的资源环境累积效应[J].科技导报,2010,28(10):61-67
Wang Y J, Zhang D C, Lian D J, et al. Cumulative effects of coal mine development on resources and environment [J]. Science and Technology Review, 2010, 28(10): 61-67 (in Chinese)
- [8] Tollefson C, Wipond K. Cumulative environmental impacts and aboriginal rights [J]. Environmental Impact Assessment Review, 1998, 18(4): 371-390
- [9] Cocklin C, Creasey R, Dupuis S, et al. Cumulative effects assessment practitioners guide [J]. Impact Assessment & Project Appraisal, 1999, 16(4): 267-276
- [10] Spaling H, Smit B. Cumulative environmental change: Conceptual frameworks, evaluation approaches, and institutional perspectives [J]. Environmental Management, 1993, 17(5): 587-600
- [11] 彭应登,王华东.累积影响研究及其意义[J].环境科学,1997,18(1):86-88
Peng Y D, Wang H D. Cumulative impacts research and its significance [J]. Environmental Science, 1997, 18(1): 86-88 (in Chinese)
- [12] 彭应登,杨明珍.区域开发环境影响累积的特征与过程浅析[J].环境保护,2001(3):22-23,32
Peng Y D, Yang M Z. Study on the feature and process of impact accumulation of regional development [J]. Environmental Protection, 2001(3): 22-23, 32 (in Chinese)
- [13] 王行风.煤矿区生态环境累积效应研究——以潞安矿区为例[D].徐州:中国矿业大学,2010:48-58
Wang X F. Study on eco-environmental cumulative effects in coal mine area—Case studies in Lu'an mining area [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010: 48-58 (in Chinese)
- [14] 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 L W, Fu X, Yan Y, 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 (in Chinese)
- [15] 史婉丽,杨帆,王尚玉,等.梯级水电开发累积环境影响评价理论框架[J].南水北调与水利科技,2015,13(5):871-876
Shi W L, Yang F, Wang S Y, et al. Preliminary theoretical frame of cumulatively environmental assessment of cascade hydropower development [J]. South-to-North Water Transfer and Water Conservancy and Technology, 2015, 13(5): 871-876 (in Chinese)
- [16] 裴厦,刘春兰,陈龙.梯级水电站开发的生态环境累积影响[C].成都:中国环境科学学会学术年会,2014
- [17] 寇晓梅,牛天祥,黄玉胜,等.黄河上游已建梯级电站的水环境累积效应[J].西北水电,2009(6):11-14
Kou X M, Niu T X, Huang Y S, et al. Cumulative effect of water environment of existing cascade stations on the upper Yellow River [J]. Northwest Water Power, 2009(6): 11-14 (in Chinese)
- [18] 杨宏.流域水电梯级开发累积环境影响评价研究[D].兰州:兰州大学,2007:26-32
Yang H. Study on cumulative effects assessment of cascade hydropower development in drainage area [D].

- Lanzhou: Lanzhou University, 2007: 26-32 (in Chinese)
- [19] 何鹏, 肖伟华, 李彦军, 等. 南水北调东线工程生态环境累积效应机理分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 44-46
- He P, Xiao W H, Li Y J, et al. Mechanism analysis of ecological environment cumulative effect on eastern route of South-to-North water transfer project [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 44-46 (in Chinese)
- [20] 纪道斌, 龙良红, 徐慧, 等. 梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(3): 7-14
- Ji D B, Long L H, Xu H, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(3): 7-14 (in Chinese)
- [21] 段晓晨, 孙敬. 高速铁路区域环境累积效应评价方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2014, 36(11): 65-71
- Duan X C, Sun J. Study on evaluation method of environment cumulative effect in high-speed railway area [J]. Railway Transport and Economy, 2014, 36(11): 65-71 (in Chinese)
- [22] 张小平, 王兆雨, 赵飞, 等. 高铁区域生态环境累积影响评价方法研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 社会科学版, 2014, 8(4): 23-27
- Zhang X P, Wang Z Y, Zhao F, et al. Research on the cumulative impact assessment method of the regional ecology environment of high-speed railway [J]. Journal of Shijiazhuang Railway University: Social Sciences, 2014, 8(4): 23-27 (in Chinese)
- [23] 孙敬. 高铁区域环境累积拉动效应评价方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014: 4-10
- Sun J. Research on the methods of cumulative and pulling environment impact assessment in the high-speed railway region [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2014: 4-10 (in Chinese)
- [24] 李佳承. 基于遥感和GIS的青藏铁路生态累积效应研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013: 44-54
- Li J C. The ecological cumulative effects of Qinghai-Tibet Railway based on remote sensing and geographic information system [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2013: 44-54 (in Chinese)
- [25] 徐丽丽. 盐城市道路网络对景观格局的影响和累积效应分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2015: 35-45
- Xu L L. The influence analysis of road network on landscape pattern and cumulative effect of Yancheng City [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Technology, 2015: 35-45 (in Chinese)
- [26] Qi S Z, Li X Y, Duan H P. Oasis land-use change and its environmental impact in Jinta Oasis, arid northwestern China [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2007, 134(1-3): 313-320
- [27] 沈汇超, 张益民, 崔云霞, 等. 盐城湿地建设项目对越冬水鸟生境的累积生态影响评价研究[J]. 环境科学与管理, 2016, 41(11): 182-186
- Shen H C, Zhang Y M, Cui Y X, et al. Cumulative ecological impact of construction projects on wintering waterfowl habitat in Yancheng wetland [J]. Environmental Science and Management, 2016, 41(11): 182-186 (in Chinese)
- [28] 夏贵菊, 何彤慧, 赵永全, 等. 湿地环境累积效应研究进展[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(9): 79-84
- Xia G J, He T H, Zhao Y Q, et al. Research progress of wetland environmental cumulative effect [J]. Environmental Pollution and Control, 2014, 36(9): 79-84 (in Chinese)
- [29] 刘红玉, 李兆富. 挠力河流域湿地景观演变的累积效应[J]. 地理研究, 2006, 25(4): 606-616
- Liu H Y, Li Z F. Analysis on cumulative effects of wetland landscape changes in Naoli River Watershed [J]. Geographical Research, 2006, 25(4): 606-616 (in Chinese)
- [30] 李哲, 张飞, 张海威, 等. 艾比湖典型区域景观格局及累积环境效应研究[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(4): 172-181
- Li Z, Zhang F, Zhang H W, et al. Analysis of the environmental cumulative effects and landscape pattern in the typical region of Ebinur Lake [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 41(4): 172-181 (in Chinese)
- [31] Merriam E R, Petty J T, Strager M P, et al. Landscape-based cumulative effects models for predicting stream response to mountain top mining in multistressor Appalachian watersheds [J]. Freshwater Science, 2015, 34(3): 1006-1019
- [32] Saini V, Gupta R P, Arora M K. Assessing the environmental impacts of coal mining using analytical hierarchy process: A case study of Jharia coal-field, India [M]// Bulucea A. Advances in Environmental and Geological Science and Engineering [M]. WSEAS Press, 2015: 281-289
- [33] 赵一清, 汪云甲, 汪炜. 淮南矿区地质环境累积效应综合评价[J]. 煤炭工程, 2011(2): 104-106
- Zhao Y Q, Wang Y J, Wang W. Comprehensive evaluation on geological environment accumulated effect of Huainan Mining Area [J]. Coal Engineering, 2011(2): 104-106 (in Chinese)
- [34] 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 Z D, Wang C X, Fu X, et al. Evaluation index sys-

- tem 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 (in Chinese)
- [35] 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 X F, Wang Y J, Li Y F. 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 (in Chinese)
- [36] 连达军, 汪云甲. 基于场论的矿区生态环境采动累积效应研究[J]. *中国矿业*, 2011, 20(5): 49-53
- Lian D J, Wang Y J. Study on cumulative effective of mining-induced eco-environment with ecological field theory [J]. *Chinese Mining Magazine*, 2011, 20(5): 49-53 (in Chinese)
- [37] 朱国宏, 连达军. 开采沉陷对矿区地表裂缝的采动累积效应分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2012, 8(5): 47-51
- Zhu G H, Lian D J. Analysis on mining-induced cumulative effective of surface cracks in mining areas [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2012, 8(5): 47-51 (in Chinese)
- [38] 王行风, 汪云甲, 马晓黎, 等. 煤矿区景观演变的生态累积效应——以山西省潞安矿区为例[J]. *地理研究*, 2011, 30(5): 879-892
- Wang X F, Wang Y J, Ma X L, et al. Ecological accumulation effect of landscape evolution in coal mines: A case study of Lu'an mining area, Shanxi Province [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 879-892 (in Chinese)
- [39] Franks D M, Brereton D, Moran C J. Managing the cumulative impacts of coal mining on regional communities and environments in Australia [J]. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2010, 28(4): 299-312
- [40] Meng L, Feng Q Y, Zhou L, et al. Environmental cumulative effects of coal underground mining [J]. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2009, 1(1): 1280-1284
- [41] Wang Y J, Zhang D C, Lian D J, et al. Environment cumulative effects of coal exploitation and its assessment [J]. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2009, 1(1): 1072-1080
- [42] Wang X F, Wang Y J, Huang T. Extracting mining subsidence land from remote sensing images based on domain knowledge [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2008, 18(2): 168-171, 181
- [43] Eberhard R, Johnston N, Everingham J A. A collaborative approach to address the cumulative impacts of mine-water discharge: Negotiating a cross-sectoral waterway partnership in the Bowen Basin, Australia [J]. *Resources Policy*, 2013, 38(4): 678-687 ◆