



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

晋北大型露天矿区生态系统弹性研究

杨庚, 曹银贵, 庄亦宁, 张振佳, 白中科

引用本文:

杨庚, 曹银贵, 庄亦宁, 等. 晋北大型露天矿区生态系统弹性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 562–573.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0408>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

京津冀潮白河区域土地利用变化对生态系统服务的影响

耿冰瑾, 曹银贵, 苏锐清, 刘施含, 冯喆

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 583–593 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0595>

西部绿洲城市土地利用转型的生态环境效应——以乌鲁木齐市为例

阿依吐尔逊·沙木西, 刘新平, 祖丽菲娅·买买提, 陈前利, 冯彤

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 149–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0113>

基于MCE-CA耦合模型的嘉兴市土地利用预测情景下生态敏感性评价

荣月静, 张慧, 赵显富

农业资源与环境学报. 2015(4): 343–353 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0359>

铁矿生态修复区生态系统服务价值增量评估

叶尔纳尔·胡马尔汗, 马伟波, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 方颖, 李海东

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 594–600 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0197>

新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 杨磊, 徐晓龙, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 17–23 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨庚, 曹银贵, 庄亦宁, 等. 晋北大型露天矿区生态系统弹性研究[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 562–573.

YANG Geng, CAO Yin-gui, ZHUANG Yi-ning, et al. Study on ecosystem resilience of large-scale open pit mining area in north Shanxi[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 562–573.



开放科学 OSID

晋北大型露天矿区生态系统弹性研究

杨庚¹, 曹银贵^{1,2*}, 庄亦宁¹, 张振佳¹, 白中科^{1,2}

(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)

摘要:为定量评估矿区生态系统弹性,从系统内在能力的角度揭示矿区在面临扰动时的状态保持与演变过程,本研究利用七期 Landsat TM 影像解译后的土地利用数据,结合遥感(RS)与地理信息系统(GIS)技术计算的植被覆盖度,运用生态弹性度计算模型,从土地利用显性形态变化的角度分析了1990—2018年整个平朔矿区以及三大矿山生态弹性度的动态变化。结果表明:1990—2018年整个平朔矿区的弹性值介于5~10之间,最大值为9.83,最小值为5.53;1996—2000年弹性值下降明显,2000—2014年弹性值不断上升但速度逐渐变缓,2014—2018年转为下降,但弹性值依然处于9~10之间,生态环境有所改善。矿山区域的生态弹性度差异明显,安太堡矿的弹性值一直处于较低水平,最大值仅为4.05;安家岭矿的弹性值呈现先上升后下降的趋势,弹性值峰值为5.26,最小值为3.57;东露天矿的弹性值呈下降趋势,但一直维持在5~6之间。矿山开采导致矿山区域的生态弹性度处于较低水平,2009年后矿山生态弹性度持续下降,平朔矿区的生态弹性度整体受到负向驱动,生态弹性动态度不断减小。研究表明,矿区生态弹性度的变化受土地利用类型与植被覆盖度影响较大,矿山生态弹性度的变化会通过尺度效应传递到整个矿区。

关键词:生态系统弹性;生态弹性度;土地利用;植被覆盖度;平朔矿区

中图分类号:F301.2;X171.1 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)04-0562-12 doi: 10.13254/j.jare.2019.0408

Study on ecosystem resilience of large-scale open pit mining area in north Shanxi

YANG Geng¹, CAO Yin-gui^{1,2*}, ZHUANG Yi-ning¹, ZHANG Zhen-jia¹, BAI Zhong-ke^{1,2}

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Lab of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources of the PRC, Beijing 100035, China)

Abstract: By quantitatively assessing the resilience of the mining ecosystem, the state of the system can be revealed from the perspective of the intrinsic carrying capacity of the mining area. In this study, we used land use data based on an interpretation of seven time periods Landsat TM images, combined with the vegetation coverage data calculated by remote sensing (RS) and geographical information system (GIS) technology. Using the ecological elasticity calculation model, from the perspective of dominant morphological changes in land use, the dynamic changes in the ecological elasticity of the entire Pingshuo mining area and the three mines were analyzed for the time period 1990—2018. The results showed that from 1990 to 2018 the elasticity value of the entire Pingshuo mining area was between 5 and 10. The maximum value was 9.83 and the minimum value was 5.53. The elasticity value decreased significantly from 1996 to 2000. From 2000 to 2014, the elasticity value rose but the rate of increase gradually slowed until the elasticity declined between 2014 and 2018. Nevertheless, the elasticity value was still between 9 and 10, indicating that the ecological environment had improved. The ecological elasticity of the mine areas themselves was markedly different. The elasticity value of the Antaibao mine had been at a low level, and the maximum value was only 4.05. The elasticity value of the Anjialing mine increased and then decreased; the peak value was 5.26 and the minimum was 3.57. The elasticity value of the East open-pit mine showed a downward trend but remained between 5 and 6. Mining has caused the ecological

收稿日期: 2019-08-09 录用日期: 2019-11-25

作者简介: 杨庚(1996—),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为土地复垦与生态恢复。E-mail: 1048514257@qq.com

*通信作者: 曹银贵 E-mail: caoyingui1982@126.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1810107, 41701607); 中央高校基本科研业务费项目(2-9-2018-025)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(U1810107, 41701607); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2-9-2018-025)

elasticity of the mine area to be at a low level. After 2009, the ecological elasticity of the mine continued to decline. The ecological elasticity of the Pingshuo mining area was driven negatively, and the ecological elasticity dynamics continued to decrease. Studies have shown that the change in ecological elasticity of mining areas is greatly affected by land use type and vegetation coverage, and that this change will be transmitted to the whole mining area through a scale effect.

Keywords: ecosystem resilience; ecological elasticity; land use; vegetation coverage; Pingshuo mining area

生态系统弹性是指生态系统在受到外界干扰,偏离平衡状态后所表现出的自我维持、自我调节及抵抗外界各种压力和扰动的能力,包括维持其重要特征,如生物组成、生态系统的结构与功能^[1-2]。矿区生态系统弹性是指矿区社会经济活动对生态环境造成的压力超过矿区资源环境承载力时,生态环境内部各组分之间的互补作用使得生态环境在一定的时间段内基本恢复到初始状态的能力^[3]。生态系统弹性包括弹性强度和弹性限度,弹性强度指的是系统弹性的高低,其大小由系统自身的状态决定^[1],弹性限度指的是弹性变化的范围,也是系统生态阈值可变化的区间,其大小不仅由地物的覆盖类型决定,还取决于地物类型的多样性^[4]。矿区生态系统弹性与其生态经济系统的可持续发展密切相关,本研究旨在为分析矿区的生态问题提供一个新的视角,通过研究生态系统弹性,可以从系统内在能力的角度解释矿区在面临扰动时的状态保持与演变过程。另外,现有的对矿区生态问题的思维方法是通过某种措施达到土地复垦的目标,缺乏对系统内在能力的考量,通过对矿区生态系统弹性进行定量研究,进一步完善矿区土地复垦与生态修复的思维体系,在一定程度上促进矿区生态可持续发展。

自20世纪末,国内外学者对矿区生态系统弹性开展了大量研究。目前,计算生态系统弹性大小的方法主要有以下三种:①通过各土地利用类型的面积以及各地类的弹性分值来计算^[1];②从景观角度利用景观多样性指数、植被指数以及区域年平均气温与降水的变化率计算^[5];③通过选择气候、植被等生态系统特征要素构建指标体系并通过其权重来计算^[6]。选取生态系统中的主要表现特征,确定生态系统弹性的主要影响因素来构建指标体系进行综合评价是当前实证研究中普遍应用的方法^[7-10]。土地利用类型与弹性分值方法目前已应用于城市生态弹性评价中^[11]。矿区生态适应性研究主要涉及污染胁迫下植物生长^[12]、复垦地的土壤理化性质^[13]、矿区生态系统健康状况与响应^[14],以及矿区可持续发展理论的概念与内涵、目标与要求、调控与模拟等^[15]。总体来看,直接研

究矿区生态系统弹性的文献和案例并不多,但类似观点已被提出,卞正富^[16]指出研究复垦区域的生态系统问题需要考虑生态系统弹性,弹性可用系统受扰动后恢复到平衡状态所需要的时间表示。Grant^[17]和Doley等^[18]认为弹性在矿区生态系统恢复和可持续生态系统创建中具有重要作用,Joseph等^[19]指出应从弹性视角管理采矿扰动带来的脆弱性,实现矿区社会-生态系统的可持续性。

矿区生态系统弹性是自然环境与人类活动对土地干扰结果的综合反映,土地利用类型的变化可以反映人类对环境的影响^[20]。露天煤矿开采会导致剧烈的景观扰动和生态环境的破坏,开采过程中大量肥沃的耕地变成废弃地^[21],平朔矿区属于典型的矿-农-城复合区,由于生态退耕、城乡一体化建设,露天采煤损毁的影响,土地利用类型转换比较频繁^[22]。农用地为主要土地类型,但建设用地与损毁土地面积呈线性增加,林地面积受采矿活动(地表挖损、地面压占、地表移动变形等)影响而减少,耕地面积受退耕、建筑占地、采矿破坏等影响也不断减少^[23],据统计,近30年平朔矿区有12 757 hm²的林地和耕地被直接移除^[24]。矿区植被作为矿区生态环境的重要组成部分,是整个生态系统的控制性组分,同时也是生态系统运动变化综合反映的结果,其覆盖状况直接影响整个矿区的生态环境质量,露天开采引发植被损伤并导致植被群落发生演替,导致系统状态发生变化^[25]。不同土地利用类型的植被覆盖度大小不同,其生态系统的类型、结构和功能决定了区域植被净初级生产力(NPP)的大小,NPP直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力,是表征陆地生态系统质量好坏的重要指标之一^[26]。因此,选择从土地利用类型显性形态变化的角度并结合植被覆盖度作为弹性分值来评估平朔矿区生态系统弹性的动态变化可以较为准确地反映实际情况。由于尺度效应的存在,在不同空间尺度上景观格局和生态过程的表征会发生变化,进而生态现象的规律性也会改变,不同尺度的研究是对研究对象充分理解和准确预测的关键^[27]。露天矿山生态扰动与恢复是必然过程,植被覆盖的面积和范围必然会发生变

化,矿山植被在采矿扰动后减小,在植被恢复后升高,在二次扰动(恢复后扰动)后再次减少,随着矿山损毁土地面积不断增加且所占比例增大,与矿区未扰动区植被覆盖度相比差异明显。如果矿山开采扰动的影响小于矿区生态系统稳定域边界阈值时,系统处于特定稳定域内,一旦影响超过生态系统稳定域边界阈值,则系统状态会发生演变,因此,从矿区和矿山两个尺度结合生态弹性度公式对平朔矿区的生态系统弹性进行定量评估,可以更好地认识矿区生态系统的内在状态,从而为区域的可持续发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处山西省朔州市平鲁区,位于山西省北部边陲,与内蒙古自治区清水河县、和林格尔县接壤,西南与忻州市偏关、神池两县毗连,南临朔城区,东靠山阴,东北连右玉。平鲁区为典型的黄土丘陵地貌,虽然地域辽阔,但山多沟深,平地很少,全区岩山区和黄土丘陵区占总面积的96%,土壤侵蚀、水土流失、地面割切严重,森林覆盖率较低,属于典型的生态脆弱区。选取中煤平朔矿区生产区及平鲁区的局部作为研究区。从行政区划来看,研究区包括井坪镇、向阳

堡乡、白堂乡、榆岭乡、陶村乡、下面高乡,整个研究区面积51 748 hm²,从采矿界来看,包括了中煤平朔公司的3个露天矿(安太堡露天矿、安家岭露天矿、东露天矿)及周边多个地方的井工矿(图1)。

1.2 数据来源与方法

本文数据包括利用1990、1996、2000、2004、2009、2014、2018年七期Landsat TM影像解译后得到的土地利用数据与利用ENVI 5.2得到的植被覆盖度(VFC)数据,遥感数据的解译基于ENVI与ArcGIS,采用监督分类的人机交互解译的方法,参考《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2017),考虑矿区实际情况,将研究区的土地利用类型分为耕地、林地、草地、城镇用地、农村居民点、交通用地、露天采场、排土场、剥离区、工业场地、水域11类。土地利用分类结果的总体精度高于80%,Kappa系数高于0.76。本文采用生态弹性度模型,在矿区尺度上分析整个平朔矿区、在矿山尺度上分析3个露天矿1990—2018年生态系统弹性的动态变化。

复合生态系统的生态弹性度比单一系统高,系统越复杂与多样化,各构成要素越健康,生态弹性度越大。利用ENVI 5.2所得出的植被覆盖度数据作为弹性分值来计算生态弹性度,计算前为提升模型的计算

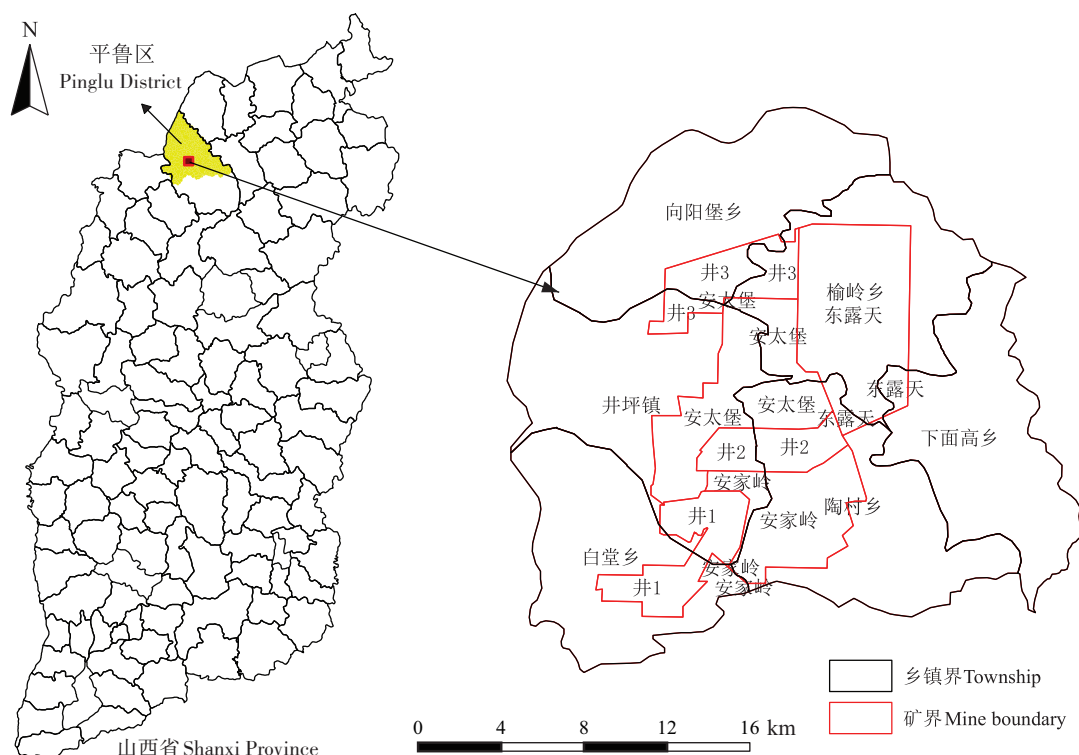


图1 研究区位置

Figure 1 Research area location

精度,采用对数函数对土地利用数据进行标准化处理,标准化计算方法如公式(1)所示,区域生态弹性度的计算方法如公式(2)所示^[1]。

$$f(x) = \frac{\lg x}{\lg x_{\max}} \quad (1)$$

$$E_{\text{CORES}} = D_i \sum_{i=1}^n S_i P_i = -(\sum_{i=1}^n S_i \log_2 S_i) \times \sum_{i=1}^n S_i P_i \quad (2)$$

式中: E_{CORES} 为区域生态弹性度,值越大说明弹性限度越高; i 为土地利用类型;由于在生态系统中,地面覆盖不一定是植被,因此模型中的 S_i 表示地类 i 的覆盖面积,而非植被面积,单位为 hm^2 ; P_i 为地类 i 的弹性分值,地物的弹性分值可以由植被覆盖度、专家打分、生产力的方法确定,本文为植被覆盖度,单位为%。生态系统的弹性限度大小除取决于地物的覆盖类型与等级状况外,还取决于地类的多样性,为此,公式中引入了Shannon-Wiener多样性指数(D)。

为分析区域生态系统弹性的动态变化,采用生态弹性动态度,即某段时间内弹性变化的速度来描述生态系统弹性的动态变化。生态弹性动态度的计算方法如公式(3)所示。

$$K = (U_b - U_a) / U_a \times T^{-1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: K 为区域生态弹性动态度,%; U_a 、 U_b 分别为研究初期和末期区域的生态弹性度; T 表示研究时段长度, a 。

2 结果与分析

2.1 矿区尺度

2.1.1 平朔矿区土地利用变化分析

1990—2018年平朔矿区的土地利用类型以耕地、林地、草地为主,随着对露天矿区的开采,出现了排土场、露采场、剥离区三种土地类型,三者与工业场地均主要分布在安太堡、安家岭、东露天三个矿山区域(图2)。耕地主要集中于研究区的西北部与西南部;林地由研究区的东北与西南片区逐渐扩散至整个研究区,人工林生产在西南部平原;草地主要分布于丘陵沟壑区;城镇主要分布在井坪镇;农村居民点分布较分散,连片程度较高的区域分布在向阳堡乡、白堂乡和下面高乡。

1990—2018年平朔矿区土地利用格局变化如图3所示,其中,耕地面积所占比例均在40%以上,但总体来看呈现下降趋势,2018年与1990年相比已减少1 614.28 hm^2 ,1990—2000年变化较大,1996年比1990年增加4 943.39 hm^2 ,耕地面积达到峰值,而

2000年比1996年减少4 002.83 hm^2 。林地与草地呈现对称式变化趋势,林地呈现出先减少后增加的趋势,1990—1996年间林地减少4 934.12 hm^2 ,到达最小值,后续呈增加趋势,2018年比1996年增加4 485.94 hm^2 ;草地呈现出先增加后减少的趋势,1990—2004年草地增加1 804.3 hm^2 ,到达峰值,而2004—2018年草地减少7 149.69 hm^2 ,林地与草地总面积基本保持在2万 hm^2 左右(图3a)。城镇用地增长趋势明显,1990—2018年增加903.33 hm^2 。农村居民点与交通用地变化相对较为稳定,1990—2018年间分别增加102.86 hm^2 与359.7 hm^2 ,变化幅度较小(图3b)。由于露天开采,损毁土地面积不断增加,1990—2018年露采场、排土场、剥离区、工业场地分别增加727.5、2 187.61、936.63、1 992.91 hm^2 (图3c)。

2.1.2 植被覆盖度(VFC)分析

运用ArcGIS 10.2的空间分析工具,将各研究期的土地利用数据与植被覆盖度数据进行分区统计,得到不同时期各类用地的VFC均值(表1),植被覆盖度数据利用ENVI 5.2,采用像元二分模型得到(图4)。从表1中可以看出,平朔矿区耕地的VFC均值除1990年与2000年外,基本维持在45%~75%之间,林地的VFC均值在1996年后都超过80%,草地基本处于40%~60%之间,城镇用地与农村居民点的VFC均值在2014年之前低于40%,2014年超过50%,露采场、排土场、剥离区三类用地的植被覆盖较少,其VFC均值均低于10%,工业场地的VFC均值在2014年以前均低于20%,2014年超过40%。交通用地的VFC均值整体呈现先减小后增大的趋势,2009年以后约50%。水域的VFC均值为0。

2.1.3 平朔矿区生态弹性度分析

利用土地利用数据与植被覆盖度数据,结合公式(2)和公式(3),计算出整个平朔矿区1990—2018年的生态弹性度(图5)及其动态度(表2)。生态弹性度总体分布在5~10之间,最大值与最小值分别为9.83、5.53,研究期间区域生态弹性度总体呈上升趋势,1990—1996年增长最快,动态度为5.22%,这主要得益于耕地、林地、草地VFC均值的增加。由于1996—2000年各地类VFC均值大幅减少,生态弹性度下降明显,动态度为-8.52%。2000—2014年虽然耕地、林地、草地面积均存在小幅减少,损毁土地面积明显增多,但整个矿区各地类VFC均值都有明显的提升,生态弹性度呈现上升趋势,并在2014年到达峰值,为9.83,2014—2018年小幅下降,动态度为-1.04%,但依

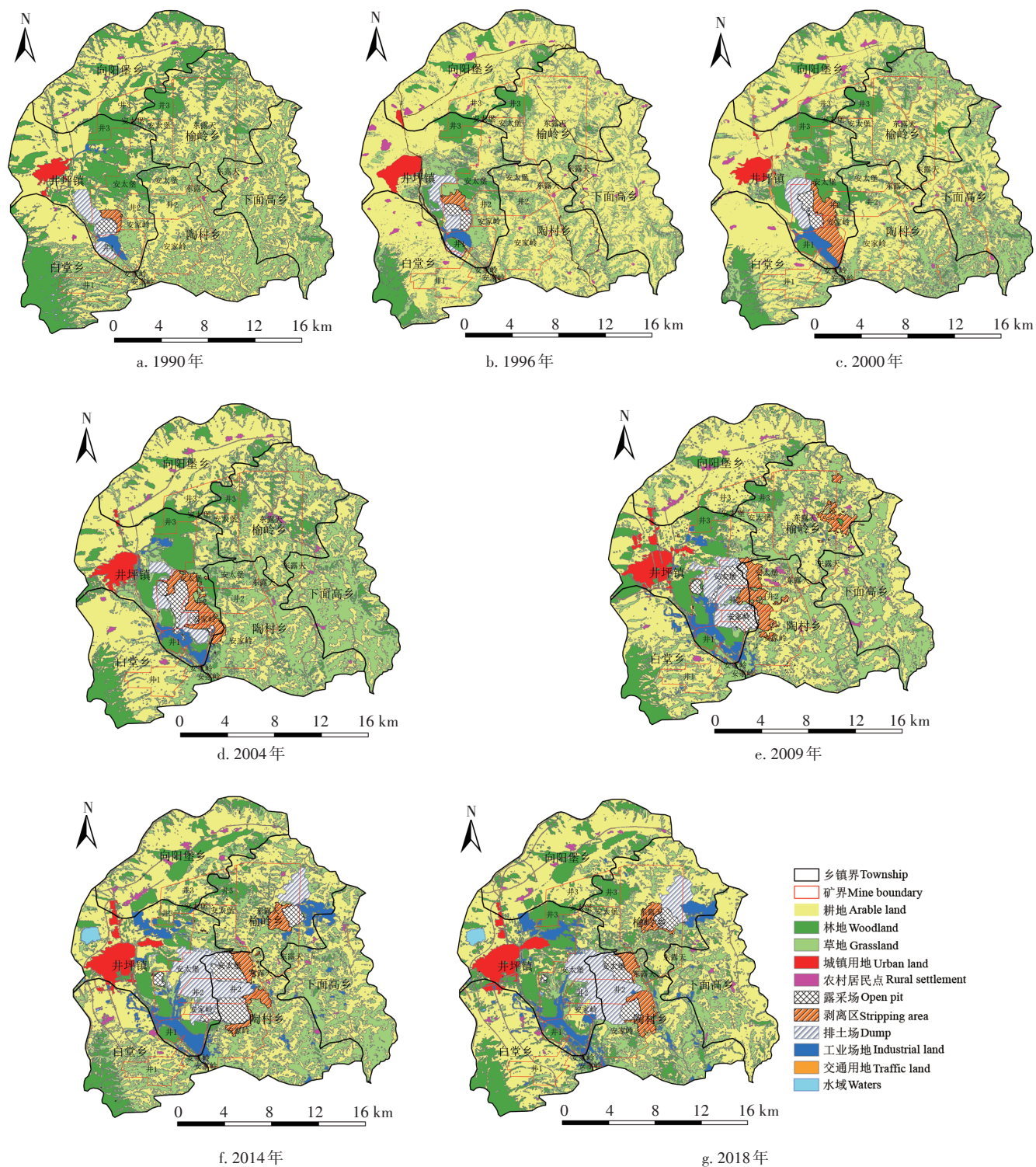


图2 1990—2018年矿区土地利用类型分布

Figure 2 Land use distribution from 1990 to 2018 in the Pingshuo mining area

然处于较高水平。

2.2 矿山尺度

2.2.1 矿山土地利用变化分析

在矿山区域,由于采煤过程采取“剥-采-排-复”

的一体化采煤工艺,损毁土地(露天采场、剥离区、排土场)的面积逐渐扩大,所占比例不断增加(图6~图8)。在安太堡矿,2009年后损毁土地面积比例已达30%,2014年超过40%,排土场面积在2018年为843.83

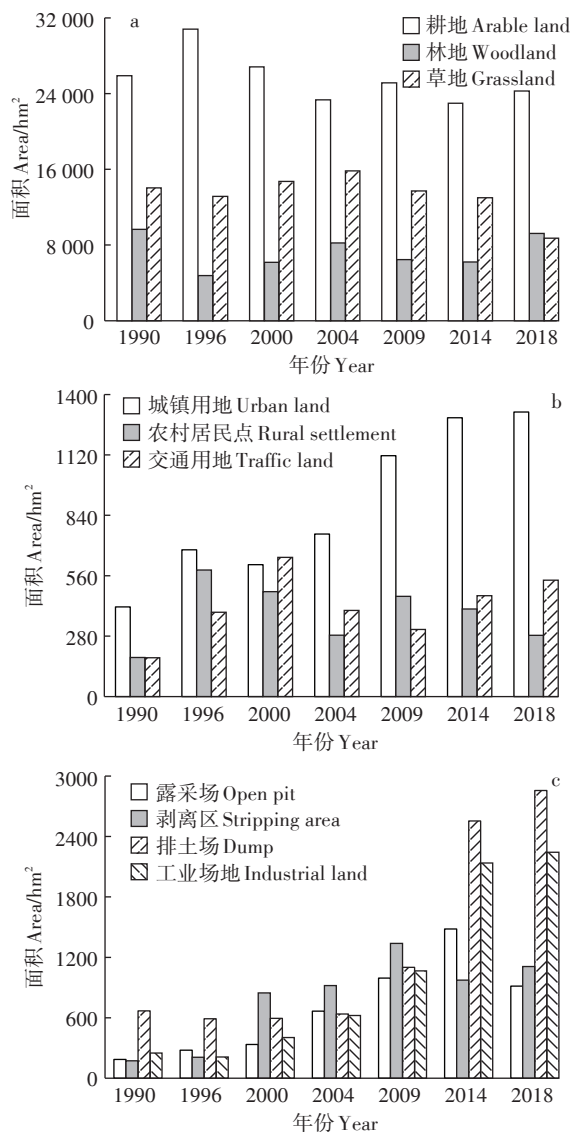


图3 1990—2018年平朔矿区各土地利用类型面积变化
Figure 3 Land use type area change in Pingshuo mining area from 1990 to 2018

hm²,比1990年增加了705.16 hm²。耕地仍然是所占比例最高的地类,占整个安太堡矿的30%左右,但一直呈下降趋势,2018年仅有886.29 hm²,相比1990年已减少了694.31 hm²;林地面积2018年稍有增加,但总体呈下降趋势,所占比例已不足15%;草地面积呈现出先增加后减少的趋势,总体变化较为稳定,约占25%。安家岭与东露天矿自开采以来,损毁土地面积总体不断增加,约占35%,排土场面积增加最为明显,2018年与研究初期相比两矿分别增加了434.26、468.13 hm²;耕地与草地仍然占较大比重,但2018年与研究初期相比耕地分别减少了307.43、460.74 hm²,草地分别减少了673.03、565.01 hm²,减少趋势明显;林地面积呈不断增加的趋势,但所占比例均不足10%。伴随着3个露天矿山的开采,工业场地的面积不断增加,特别在安太堡矿,2018年比1990年增加了247.03 hm²。交通用地在3个露天矿所占比例较小。

2.2.2 矿山植被覆盖度(VFC)分析

运用 ArcGIS 10.2 的空间分析功能,分别将安太堡、安家岭、东露天三个露天矿的土地利用数据与植被覆盖度数据进行分区统计,得到不同阶段各个露天矿各地类的VFC均值(表3和表4)。总体来说,有大量植被覆盖的耕地、林地、草地的VFC均值较高,林地的VFC均值高于其他地类,耕地、草地的VFC均值均在40%~70%左右;损毁土地的VFC均值总体变化不大,且均在10%以下;安太堡与安家岭矿交通用地和工业用地的VFC均值都呈上升趋势。

2.2.3 矿山生态弹性度分析

根据土地利用数据与VFC数据,结合公式(2)和公式(3),计算出1990—2018年三个露天矿开采过程中的生态弹性度(图9)以及生态弹性动态度(表5)。安太堡矿1990—1996年耕地、林地、草地的VFC均值

表1 1990—2018年平朔矿区各地类植被覆盖度(VFC)均值(%)
Table 1 Mean values of VFC of Pingshuo mining area from 1990 to 2018(%)

地类 Land use type	1990	1996	2000	2004	2009	2014	2018
耕地 Arable land	17.14	55.79	27.95	48.19	68.01	73.41	62.15
林地 Woodland	68.04	88.00	80.25	80.34	87.32	84.10	89.93
草地 Grassland	42.31	59.18	48.27	45.85	64.95	60.00	60.46
城镇用地 Urban land	19.84	12.86	3.54	13.66	16.59	50.34	48.51
农村居民点 Rural settlement	37.33	21.29	13.30	33.17	37.27	65.69	55.03
露采场 Open pit	0.18	0.84	0.02	0.62	3.78	3.05	3.61
剥离区 Stripping area	2.61	3.29	0.87	2.22	6.33	9.56	5.60
排土场 Dump	5.42	7.36	0.53	3.45	8.59	3.83	3.62
工业场地 Industrial land	13.48	14.61	15.14	16.51	19.03	42.19	39.38
交通用地 Traffic land	38.20	32.54	10.25	34.91	48.98	55.35	49.86

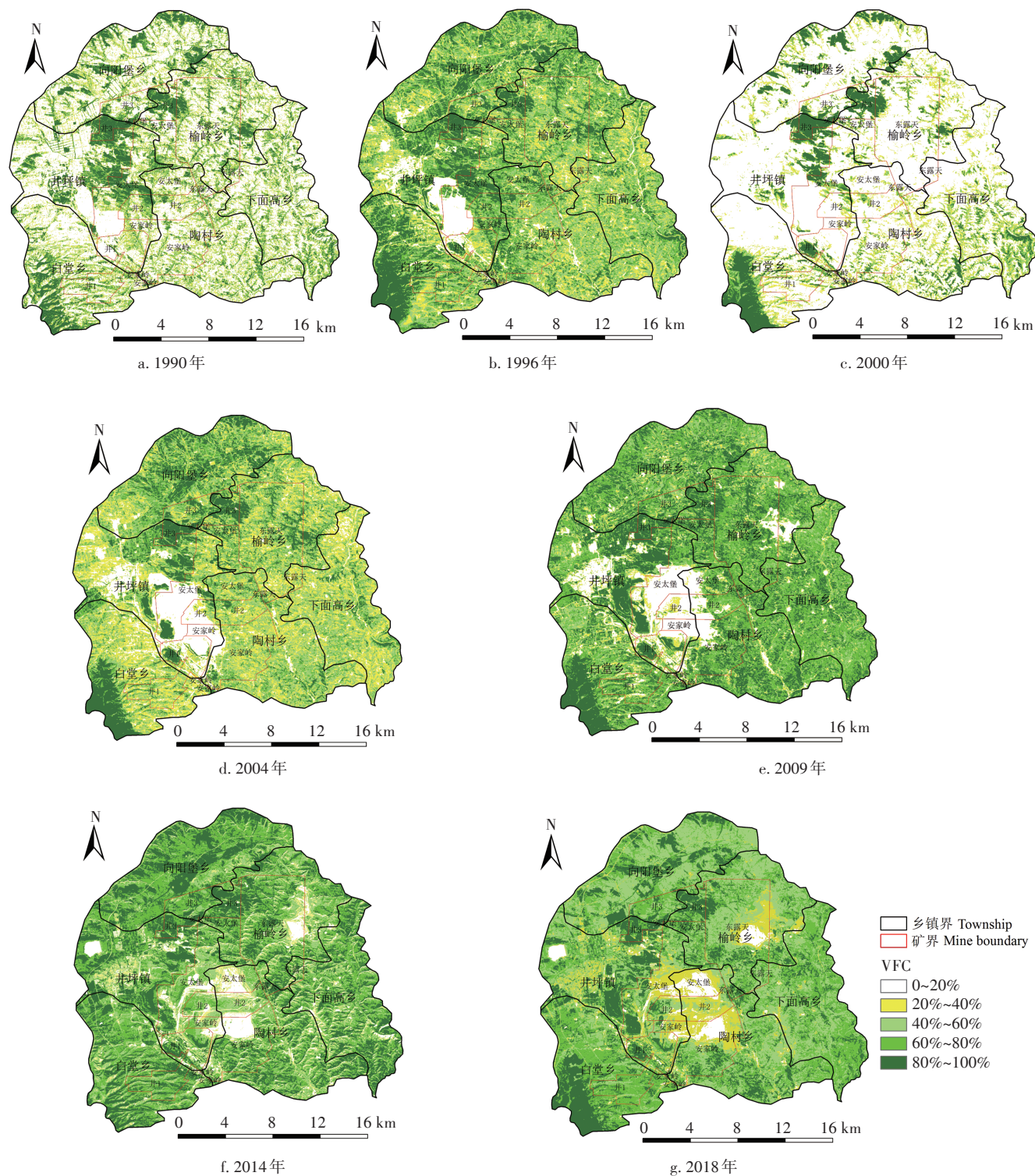


图4 1990—2018年平朔矿区植被覆盖度(VFC)

Figure 4 VFC map of Pingshuo mining area from 1990 to 2018

表2 1990—2018年平朔矿区生态弹性动态度(%)

Table 2 Ecological elasticity dynamic degree of Pingshuo mining area from 1990 to 2018(%)

1990—1996	1996—2000	2000—2004	2004—2009	2009—2014	2014—2018
5.22	-8.52	6.78	4.77	2.42	-1.04

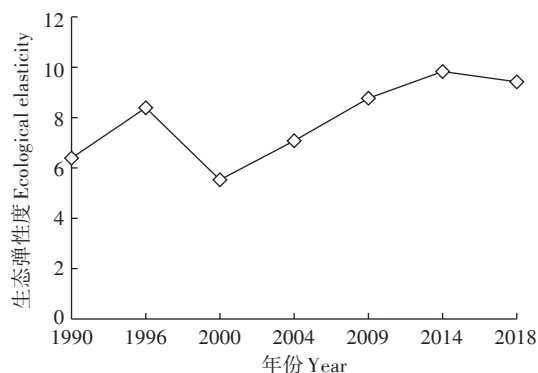


图5 1990—2018年平朔矿区生态弹性度变化趋势

Figure 5 Trend of ecological elasticity of Pingshuo mining area from 1990 to 2018

均得到了明显提升,生态弹性值由2.64增长至4.05,动态度为8.90%,这也是生态弹性度唯一的峰值。之后1996—2000年耕地、林地、草地的VFC均值均出现下降,耕地与草地面积分别减少了94.13、296.27 hm^2 ,导致2000年生态弹性度降至最低点,动态度为-9.20%。2000年后生态弹性度处于稳定状态,这主要得益于矿区土地复垦率的提高以及矿区退耕还林还草政策

的实施,生态系统处于较为稳定的状态。安家岭矿2004—2009年各类用地VFC均值均有明显提升,耕地面积增加了359.31 hm^2 ,这弥补了林地、草地面积减少以及损毁土地增加带来的负面影响,2009年生态弹性度达到峰值5.26,动态度为9.45%。之后各类用地的VFC均值虽较为稳定,但2009—2018年耕地面积大幅减少,减少量为666.74 hm^2 ,另外,损毁土地面积大幅增加,增长量为497.57 hm^2 ,导致生态弹性度呈现下降趋势,2018年弹性值降至3.69。东露天矿由于开采时间较晚,开采初期耕地、林地、草地、交通用地的VFC均值已处于较高水平且较为稳定,但2009—2018年,耕地与草地面积分别减少460.74、565.01 hm^2 ,损毁土地面积增加826.30 hm^2 ,林地面积的小幅增加不足以弥补耕地、草地面积减少以及损毁土地面积增加带来的负面影响,生态弹性度呈下降趋势。总体来看,生态弹性度依次为东露天矿区>安家岭露天矿区>安太堡露天矿区。

2.3 矿区与矿山尺度效应分析

由于矿山开采的扰动,矿区生态系统弹性受到矿山开采的正向驱动或者负向驱动,矿山生态系统弹性

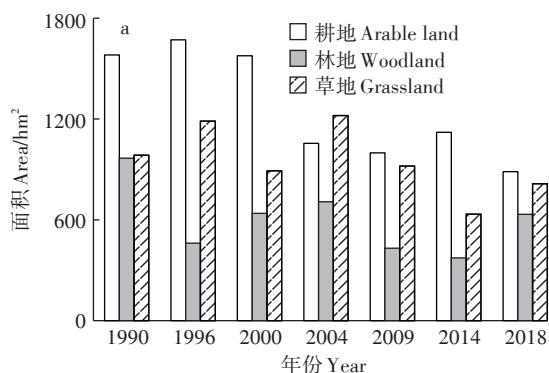


图6 安太堡矿各土地利用类型面积变化

Figure 6 Land use type area change in Antaibao mine

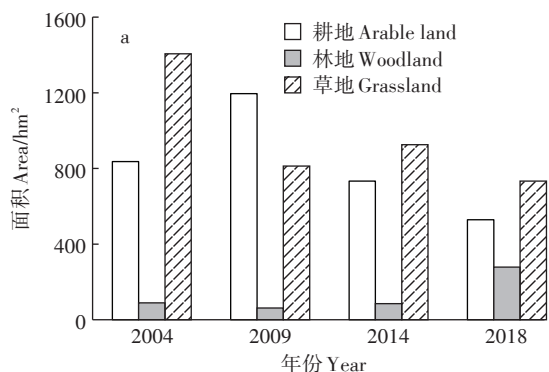
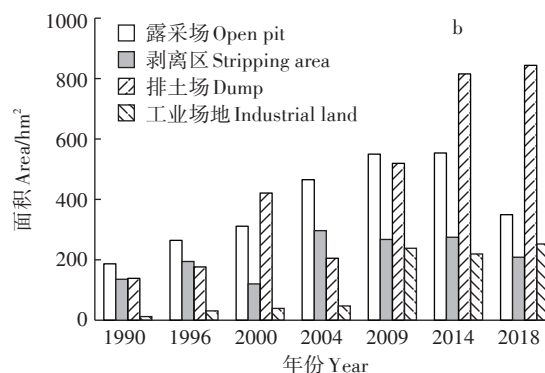
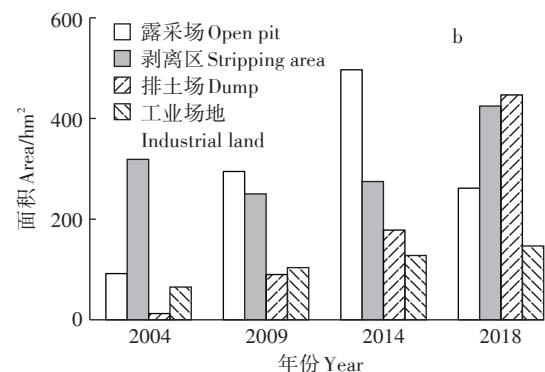


图7 安家岭矿各土地利用类型面积变化

Figure 7 Land use type area change in Anjialing mine



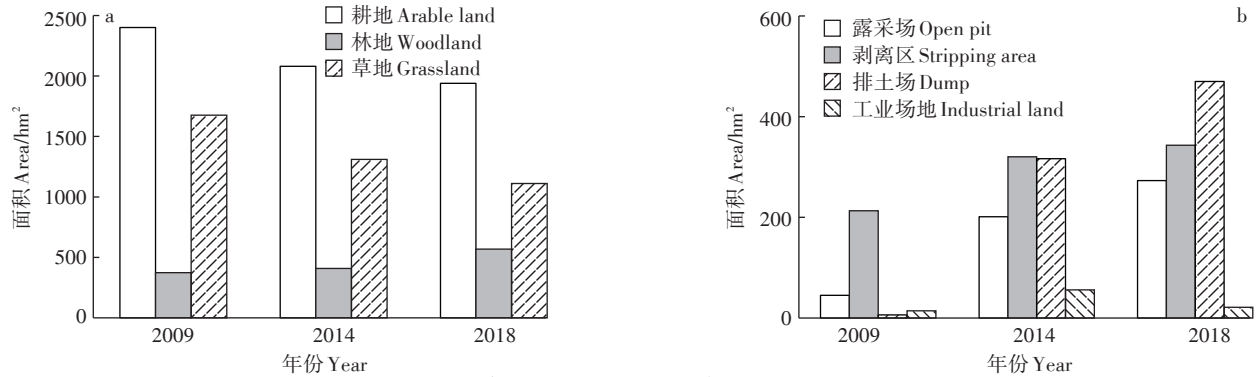


图8 东露天矿各土地利用类型面积变化

Figure 8 Land use type area change in the East open pit mine

表3 1990—2018年安太堡矿各地类植被覆盖度(VFC)均值(%)

Table 3 Mean values of VFC of the Antaibao mine from 1990 to 2018(%)

地类 Land use type	1990	1996	2000	2004	2009	2014	2018
耕地 Arable land	20.86	55.74	33.43	46.33	67.75	69.66	60.12
林地 Woodland	69.73	91.34	56.28	78.14	92.03	82.64	88.76
草地 Grassland	48.71	64.77	45.71	48.55	70.02	52.70	59.34
露天采场 Open pit	0.18	0.69	0.57	0.46	4.85	2.11	6.24
剥离区 Stripping area	1.16	3.77	0.42	1.95	5.18	5.33	5.51
排土场 Dump	2.69	0.53	0.67	5.07	7.26	4.10	6.89
工业场地 Industrial land	0.44	6.61	3.91	11.10	21.96	33.95	35.68
交通用地 Traffic land	6.97	5.57	5.65	5.72	29.33	52.94	21.42

表4 2004—2018年安家岭矿与东露天矿各地类植被覆盖度(VFC)均值(%)

Table 4 Mean values of VFC of the Anjialing mine and East open pit mine from 2004 to 2018(%)

地类 Land use type	安家岭矿 Anjialing mine				东露天矿 East open pit mine		
	2004	2009	2014	2018	2009	2014	2018
耕地 Arable land	41.20	71.76	71.29	59.53	69.03	74.32	60.65
林地 Woodland	62.18	89.32	66.73	83.53	91.13	84.20	90.14
草地 Grassland	43.40	65.09	57.43	59.46	69.60	56.38	60.43
露天采场 Open pit	0.08	1.93	4.19	4.05	6.84	8.88	6.83
剥离区 Stripping area	1.86	7.06	4.70	3.37	9.76	7.67	8.76
排土场 Dump	0.27	3.34	4.28	5.64	8.18	11.02	7.24
工业场地 Industrial land	12.00	23.96	37.83	37.58	11.39	43.85	32.81
交通用地 Traffic land	11.24	32.32	41.58	58.93	54.43	38.50	43.93

的变化会通过尺度效应传递到整个矿区。1990—1996年,安太堡矿耕地、林地、草地的VFC均值明显提高,生态弹性度达到峰值,矿区生态系统受到正向驱动以及各地类VFC均值提升的影响,弹性值在1996年也达到了第一个峰值;相反,1996—2000年安太堡矿由于损毁土地面积增加,各地类VFC均值减少,生态弹性度大幅下降,矿区生态系统受到负向驱动以及整体VFC均值减小的影响,2000年生态弹性度达到最小值。2000年后,安太堡矿由于损毁土地面积所占比例较大,生态弹性度一直维持在较低水

平。2004—2009年,随着安家岭矿的开采,损毁土地面积明显增加,矿山的扰动增大,由于各类用地VFC均值的明显提升,安家岭矿的生态弹性度达到峰值,对矿区起到一定的正向驱动作用,2009年后,由于耕地、林地、草地所占比例较小,损毁土地面积不断增加,VFC均值也相对稳定,生态弹性度不断下降。2009年后,东露天矿的开采导致损毁土地面积所占比例不断增大,矿山的扰动进一步增强,由于开采初期各地类的VFC均值已处于较高水平,东露天矿的生态弹性度相比其他矿山高,但总体呈下降趋势。

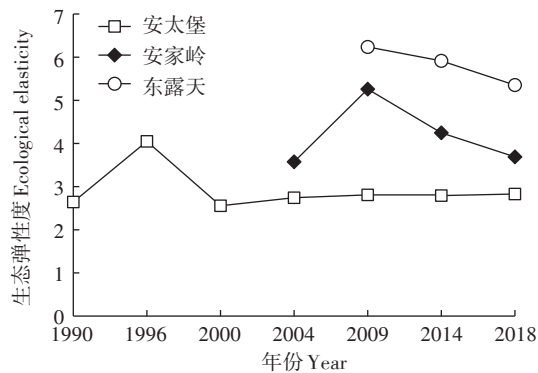


图9 1990—2018年矿山生态弹性度变化趋势

Figure 9 Trend of ecological elasticity of mine from 1990 to 2018

2000年后,虽然矿区生态系统一直受到负向驱动,但矿区未扰动区土地利用类型以耕地、林地、草地为主,对矿区生态系统弹性的提升作用最大,VFC均值不断增加,而矿山面积只占整个平朔矿区的20%,矿区虽一直受矿山开采的扰动,但其扰动的影响小于矿区生态系统稳定域边界阈值时,矿区的生态弹性度不断增加,但受矿山开采负向驱动的影响,增长速度不断减慢,2004—2009年,整个矿区生态弹性动态度降至4.77%,较2000—2004年下降2.01个百分点,2009—2014年间,整个矿区的动态度降至2.42%,较2000—2004年下降4.36个百分点。2014—2018年,当矿山负向驱动的影响大于矿区生态系统稳定域边界阈值时,整个矿区生态弹性度由上升转变为下降。

3 讨论

结合弹性“杯球模型”^[28-29],当矿山扰动的影响小于矿区生态系统的稳定域边界阈值(系统弹性)时,系

统总是保持相对稳定的状态,一旦影响超过稳定域边界阈值,则系统在不同状态间移动。外部驱动因素(矿山开采、挖损、塌陷、压占、植被修复、土地复垦,矿山规划和管理)都可导致矿区生态系统稳定性景观的改变(图10),其中稳态1为系统当前状态,稳态2为较高水平状态,稳态3为退化状态^[25]。通过生态弹性度以及生态弹性动态度公式,在时间序列上从矿区尺度和矿山尺度上对平朔矿区的生态系统弹性进行定量评估,可对系统所处的内在状态有更全面的认识。矿山尺度上生态弹性度的动态变化,反映了矿山开采扰动能力的大小,安太堡矿弹性值一直处于较低水平,安家岭与东露天矿的弹性值2009年后均呈下降趋势,说明采矿扰动影响较大,矿区生态系统受到负向驱动(过度开采、损毁土地大幅增加等)。矿区尺度上,由于耕地、林地、草地所占比例较大以及VFC均值的提升,对生态弹性的促进作用最大,矿区弹性值较高,生态系统一直向更高级别状态演替。

由于矿区生态系统状态演替的可逆性,其生态系统弹性具有多稳态机制,矿区生态系统会在多个稳态间循环演替,即处于稳态2的系统如果受到的负向驱动影响过大,可能再倒退回到稳态1(2014年后矿区生态弹性由上升转为下降),而处于稳态3的系统通过适当的修复措施也会重新回到稳态1(2000年后矿区生态弹性由下降转为上升)。为引导矿区向较高水平状态移动,需考虑矿山存在的负向驱动因素。在矿山开采过程中,应加强生态环境保护的政策引导,对经济行为进行宏观调控,重点解决好矿山占地造成的生态环境和耕地破坏的问题^[30]。加强矿山区域的土地利用规划和土地整治,同时注重土地利用规

表5 1990—2018年矿山生态弹性动态度(%)

Table 5 Ecological elasticity dynamic degree of mine from 1990 to 2018(%)

矿山 Mine	1990—1996	1996—2000	2000—2004	2004—2009	2009—2014	2014—2018
安太堡 Antaibao	8.90	-9.20	1.76	0.51	-0.14	0.36
安家岭 Anjialing				9.45	-3.84	-3.29
东露天 East open pit					-1.06	-2.37

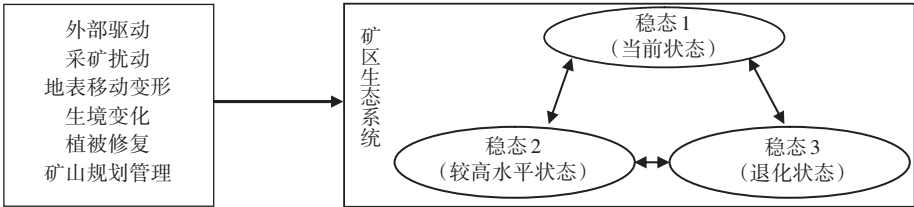


图10 矿区生态系统弹性模型

Figure 10 Resilience model of mining area ecosystem

划与环境保护规划等相关规划在空间上的衔接^[31]。伴随着矿山开采,农民为获得补偿大量建设简易房屋^[32],为避免采矿所带来的影响,农民搬迁、新村建设等过程中废弃的农村居民点占用了大量土地资源^[33]。另外,耕地撂荒等土地粗放利用现象严重,形成了一大批闲置土地,一方面造成土地资源的严重浪费,同时也给生态环境造成不利影响。因此必须集中、高效利用有限的土地资源,对排土场、露采场等损毁土地以及“简易房”等低效利用、不合理利用的土地进行整治,提高土地复垦率与植被覆盖,开展土地复垦向耕地、林地、草地并重的格局发展,继续加强“退耕还林”工程、生态移民工程、矿山地质保护工程建设,使矿区生态系统受到正向驱动,从而通过进展演替向更高级别状态转化。

本研究所采用的生态弹性度公式采用VFC均值作为弹性分值,并结合土地利用数据对矿区生态系统弹性进行评估,但缺少对气候、土壤、地形地貌等因素的考量,针对矿区土地利用类型特点及植被覆盖对矿区生态系统质量的重要性来考虑,生态弹性度公式可以较准确地反映矿区实际情况,通过采用不同的赋值方法(生产力、专家评分)、不同的弹性计算方法进行比较研究,可验证得出结果的准确性。

4 结论

(1)1990—2018年,由于耕地、林地、草地等土地利用类型植被覆盖度的上升,平朔矿区的生态弹性度总体呈上升趋势,整个生态系统抵抗外界干扰的能力增强,生态环境得到了改善。

(2)由于矿山开采导致露采场、剥离区、排土场等损毁土地面积不断增加,且在矿山区域所占比例较大,安太堡矿的生态弹性度一直处于较低水平,近年来,安家岭与东露天矿的生态弹性度不断下降,2018年均处于较低水平。总体来看,生态弹性度依次为东露天矿>安家岭矿>安太堡矿。

(3)随着采矿活动的进行,矿山的生态环境质量下降,生态弹性度不断减小,平朔矿区的生态弹性度整体受到矿山开采的负向驱动,近年来矿区生态弹性动态不断下降。亟待通过合理的矿山开采与建设、植被修复等方式,使矿区生态系统受到正向驱动,从而使矿区生态系统弹性向更高级别状态演替。

参考文献:

[1] 高吉喜. 可持续发展理论探索[M]. 北京: 中国环境科学出版社,

- 2001.
- GAO Ji-xi. Exploration of the theory of sustainable development[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [2] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4: 1-23.
- [3] 孙顺利, 周科平. 基于承载力的矿区生态经济系统演化分析[J]. 系统工程, 2007, 25(8): 119-123.
- SUN Shun-li, ZHOU Ke-ping. Evolution analysis of mine ecological economy based on ecological carrying capability[J]. *Systems Engineering*, 2007, 25(8): 119-123.
- [4] 张宝秀, 熊黑钢, 徐长春. 新疆于田绿洲生态弹性度与景观环境分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 112-114.
- ZHANG Bao-xiu, XIONG Hei-gang, XU Chang-chun. Study on ecological resilience and environment in Yutian oasis, Xinjiang[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(6): 112-114.
- [5] 类淑霞, 郝晋珉, 杨立, 等. 煤炭型城市土地生态环境及资源承载力定量研究——基于土地利用总体规划视角[J]. 国土资源情报, 2010(11): 49-53.
- LEI Shu-xia, HAO Jin-min, YANG Li, et al. Quantitative study on land ecological environment and resource carrying capacity of coal-based cities: Based on the perspective of integrated land use planning[J]. *Land and Resources Information*, 2010(11): 49-53.
- [6] 王文婕, 葛大兵, 周双, 等. 平江县生态弹性度定量分析评价研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(3): 130-134.
- WANG Wen-jie, GE Da-bing, ZHOU Shuang, et al. Quantitative analysis on ecological resilience of Pingjiang County[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(3): 130-134.
- [7] Li Y F, Shi Y L, Qureshi S, et al. Applying the concept of spatial resilience to socio-ecological systems in the urban wetland interface[J]. *Ecologic Indicators*, 2014, 42(7): 135-146.
- [8] Drever C R, Peterson G, Messier C, et al. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36(9): 2285-2299.
- [9] Zurlini G, Amadio V, Rossi O. A landscape approach to biodiversity and biological health planning: The map of Italian nature[J]. *Ecosystem Health*, 1999, 5(4): 294-311.
- [10] 王云霞, 陆兆华. 北京市生态弹性力的评价[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(2): 97-100.
- WANG Yun-xia, LU Zhao-hua. Evaluation on ecosystem resilience in Beijing City[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(2): 97-100.
- [11] 廖柳文, 秦建新, 刘永强, 等. 基于土地利用转型的湖南省生态弹性研究[J]. 经济地理, 2015, 5(9): 16-23.
- LIAO Liu-wen, QIN Jian-xin, LIU Yong-qiang, et al. Study on ecological elasticity of Hunan Province based on land use transition[J]. *Economic Geography*, 2015, 5(9): 16-23.
- [12] Erenre A. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitömer open cast coal mine[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 86(1): 20-26.
- [13] Cao Y G, Bai Z K, Zhao Z Q, et al. Development of soil physicochemical properties of reclaimed croplands in a large opencast mining area on the Loess Plateau[J]. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 2014, 12(2): 1045-1053.

- [14] 闫旭嵩,王广成. 矿区生态系统健康理论相关问题的探讨[J]. 中国矿业, 2005, 14(4):32-35.
YAN Xu-qian, WANG Guang-cheng. Discussion on mining area ecosystem health theory[J]. *China Mining Magazine*, 2005, 14(4):32-35.
- [15] Laurence D. Establishing a sustainable mining operation: An overview [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(2):278-284.
- [16] 卞正富. 矿区土地复垦界面要素的演替规律及其调控研究[J]. 中国土地科学, 1999, 13(2):6-11.
BIAN Zheng-fu. Succession law and regulation of land reclamation interface elements in mining area[J]. *China Land Science*, 1999, 13(2):6-11.
- [17] Grant C D. State-and-transition successional model for bauxite mining rehabilitation in the Jarrah forest of western Australia[J]. *Restoration Ecology*, 2006, 14(1):28-37.
- [18] Doley D, Audet P, Mulligan D R. Examining the Australian context for post-mined land rehabilitation: Reconciling a paradigm for the development of natural and novel ecosystems among post-disturbance landscapes[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 163(12):85-93.
- [19] Joseph W L, Fitzpatrick P, Fonseca A. Mining communities from a resilience perspective: Managing disturbance and vulnerability in Itabira, Brazil[J]. *Environmental Management*, 2014, 53(3):481-495.
- [20] 任建军, 阳国梁. 中国区域经济发展差异及其成因分析[J]. 经济地理, 2010, 30(5):784-789.
REN Jian-jun, YANG Guo-liang. Analysis of China's regional economic development of the differences and their cause[J]. *Economic Geography*, 2010, 30(5):784-789.
- [21] 曹银贵, 白中科, 张耿杰, 等. 山西平朔露天矿区复垦农用地表层土壤质量差异对比[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12):2422-2428.
CAO Yin-gui, BAI Zhong-ke, ZHANG Geng-jie, et al. Soil quality of surface reclaimed farmland in large open-cast mining area of Shanxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12):2422-2428.
- [22] 曹银贵, 张笑然, 白中科, 等. 黄土区矿-农-城复合区土地利用时空转换特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7):238-246.
CAO Yin-gui, ZHANG Xiao-ran, BAI Zhong-ke, et al. Temporal-spatial transformation characteristics of land use types in composite area of ore-agriculture-urban in loess area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7):238-246.
- [23] Cao Y G, Bai Z K, Zhou W, et al. Characteristic analysis and pattern evolution on landscape types in typical compound area of mine rural urban in Shanxi Province, China[J]. *Environmental Earth Science*, 2016, 75(7):585-599.
- [24] 张笑然, 白中科, 曹银贵, 等. 特大型露天煤矿区生态系统演变及其生态储存估算[J]. 生态学报, 2016, 36(16):5038-5048.
ZHANG Xiao-ran, BAI Zhong-ke, CAO Yin-gui, et al. Ecosystem evolution and ecological storage in outsize open-pit mining area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16):5038-5048.
- [25] 王 丽, 雷少刚, 卞正富. 多尺度矿区植被生态系统弹性定量测度研究框架[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(5):76-79.
WANG Li, LEI Shao-gang, BIAN Zheng-fu. Research framework for quantitative measurement of mine vegetation ecosystem resilience in multi scale[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(5):76-79.
- [26] Behrenfeld M J, Field C B. Primary production of the bio-sphere: Integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281(5374):237-240.
- [27] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7):673-681.
FU Bo-jie, XU Yan-da, LÜ Yi-he. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(7):673-681.
- [28] Gunderson L H. Ecological resilience in theory and application[J]. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 2003, 31(1):425-439.
- [29] 闫海明, 战金艳, 张 韬. 生态系统恢复力研究进展综述[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3):303-314.
YAN Hai-ming, ZHAN Jin-yan, ZHANG Tao. Review of ecosystem resilience research progress[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(3):303-314.
- [30] 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构[J]. 地理学报, 2013, 68(8):1019-1028.
LONG Hua-lou. Land consolidation and rural spatial restructuring[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(8):1019-1028.
- [31] 龙花楼, 刘永强, 李婷婷, 等. 生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究[J]. 经济地理, 2014, 34(5):1-8.
LONG Hua-lou, LIU Yong-qiang, LI Ting-ting, et al. Spatial inter-linking of land use planning and environmental protection planning from the perspective of ecological civilization construction[J]. *Economic Geography*, 2014, 34(5):1-8.
- [32] Cao Y G, Martin D, Lindsay C, et al. Land expropriation compensation among multiple stakeholders in a mining area: Explaining "skeleton house" compensation[J]. *Land Use Policy*, 2018, 74(74):97-110.
- [33] Cao Y G, Bai Z K, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 61(61):9-21.