

## 霍东矿区生态服务价值时空特征与成因分析

张瑞<sup>1</sup>, 李晶<sup>1,2\*</sup>, 邵嘉豪<sup>1</sup>, 闫星光<sup>1</sup>, 李生财<sup>1</sup>, 马天跃<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;

2. 矿山生态安全教育部工程研究中心, 北京 100083)

**摘要:**霍东矿区属于国家规划矿区,面临着采矿等人类活动与生态保护的矛盾,研究矿区生态系统服务对其生态安全格局有重要作用。本文以霍东矿区为研究对象,分析其2000—2020年土地利用变化情况,采用当量因子法估算生态系统服务价值(ESV)并修正,应用地理探测器进一步探究ESV的空间驱动因素。结果表明:(1)霍东矿区主要土地利用类型为林地和草地,21年间霍东矿区土地利用活跃程度不高,草地面积减少;(2)21年间霍东矿区ESV呈上升趋势,共增长2900万元,空间格局变化不大,整体北高南低,高价值区及热点区域主要分布在矿区西北部及中部林地,中等价值区环绕较高价值区分布,低价值区呈“一面多带”分布格局,和冷点区域集中分布在矿区西南部与沁河及其支流两岸耕地和草地区域;(3)地理探测器结果表明自然因素主导影响霍东矿区ESV,土地利用程度解释力最大,因子贡献率达到0.5以上,高程、坡度、气温以及土壤侵蚀的因子贡献率均达到0.25以上,主要因子交互作用类型为双因子增强,人类活动增强了自然因素对生态系统服务的影响。研究结果可为霍东矿区生态保护与土地利用提供参考。

**关键词:**生态系统服务价值;时空特征;空间冷热点分析;地理探测器;霍东矿区

中图分类号:F205;X171.1 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2024)01-0214-13

## Spatiotemporal Characteristics of Ecosystem Service Value and Causes in Huodong Mining Area

ZHANG Rui<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1,2\*</sup>, SHAO Jiahao<sup>1</sup>, YAN Xingguang<sup>1</sup>, LI Shengcai<sup>1</sup>, MA Tianyue<sup>1</sup>

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Engineering Research Center of Mining Environment and Ecological Safety, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The Huodong mining area is a national planning mining area and faces the contradiction between human activities such as mining and ecological protection, so study on the ecosystem services of mining areas is important for protecting its eco-security pattern. Based on land use data from 2000 to 2020, we analyzed the land use changes in Huodong mining area, estimated the ecosystem service value (ESV) of the Huodong mining area using the equivalent factor method, and used geographic detectors to further explore the drivers of ecosystem service value. The results show that: (1) The main types land use in Huodong mining area are forest and grassland, the dynamic degree of land use in Huodong mining area is not high during the 21 years, the area of grassland has decreased. (2) The ecological service value of the Huodong mining area increased by 29 million yuan from 2000 to 2020, showing a relatively stable spatial pattern characterized by high in the north and low in the south. The high-value areas and hotspot areas are mainly distributed in the northwestern and central forests of mining area. The medium-value areas are distributed around the high-value areas. The low-value areas and cold spots are concentrated in the southwest of the mining area and on both sides of the Qinhe

收稿日期:2022-09-05;接受日期:2023-03-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0127700);中国工程院院地合作重大咨询研究项目(2020SX8)

作者简介:张瑞(1998-),男,湖北宜昌人,硕士研究生,研究方向为生态遥感。E-mail:zhangrui8991@163.com

\* 通信作者:李晶(LI Jing),E-mail:lijing@cumtb.edu.cn

引文格式:张瑞,李晶,邵嘉豪,等.霍东矿区生态服务价值时空特征与成因分析[J].山西大学学报(自然科学版),2024,47(1):214-226. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023054

River and its tributaries, mainly consisting of cultivated land and grassland, presenting a distribution pattern of "one cluster and multiple stripes"; (3) Geographic detectors shows that natural factors dominate the impact of ESV at the Hodong mining area, and the degree of land use has the most significant effect on the value of ecological services in the Huodong mining area, with factor contribution rates of more than 0.5. The contribution rates of elevation, slope, temperature and soil erosion all reach 0.25 or higher. Most of the factors enhanced each other, with human activities enhancing the influence of natural factors on ecosystem services. The results provide a reference for ecosystem conservation and land resource utilization in Huodong mining area.

**Key words:** ecosystem service value; spatiotemporal characteristics; spatial cold and hot spot analysis; geographical detector; Huodong mining area

## 0 引言

矿区作为资源与环境矛盾集中显现的区域,矿区可持续发展一直是学者关注的热点<sup>[1-2]</sup>。矿区资源开发和土地复垦会影响当地生态环境,导致土地利用变化和生态系统服务功能的变化:一方面煤炭开采造成土地退化、养分供应减少以及土壤恢复进程减慢等问题,导致区域生态系统受损;另一方面煤炭矿区的复垦对改善生态系统有重要作用<sup>[3]</sup>。黄河流域作为我国重要的生态屏障和能源区域,其中游地区亿吨级煤炭基地密集<sup>[4]</sup>。目前,黄河流域的生态保护和高质量发展已上升为国家战略。以黄河中游霍东矿区为例,研究其生态服务价值的变化,有助于提升黄河流域资源与环境协调开采和科学评价煤炭开发生态影响及制定生态保护修复政策提供案例和支撑。

生态服务价值(ESV)是衡量一个区域生态环境质量的重要指标<sup>[5]</sup>。生态系统服务对人类生存与自然环境改善起着重要作用,通过定量评估区域ESV进行生态环境监测,合理制定生态修复措施已成为当前生态学以及复垦学等研究的热点<sup>[6-7]</sup>。土地利用变化驱动着生态系统服务供给能力的变化<sup>[8-9]</sup>,大量学者通过分析土地利用变化规律来探讨ESV的变化规律,这对保护和优化生态系统空间分布具有重要意义。Costanza等<sup>[10]</sup>最先提出了ESV的量化评估方法,随后谢高地等<sup>[11]</sup>结合中国实际情况得出我国生态系统单位面积服务价值当量,且被大量学者广泛应用于全国<sup>[12-13]</sup>,流域<sup>[14-15]</sup>,省<sup>[16-17]</sup>,市<sup>[18-19]</sup>等不同区域尺度的ESV评估,为不同区域资源开发利用、生态补偿、土地管理等提供数据基础。

目前,针对ESV影响因素的分析往往多运

用相关性分析<sup>[20-21]</sup>和回归模型<sup>[22-23]</sup>等方法,但这些方法对影响因子之间的耦合关系缺乏解释力。地理探测器能够很好地结合地理空间异质性来揭示驱动因子与ESV的空间分布关系,既可以度量单因子对ESV的解释程度,也能够分析多因子交互作用对ESV的影响。当前应用地理探测器的研究范围涉及植被变化<sup>[24]</sup>、空气质量<sup>[25]</sup>、城乡发展分布格局<sup>[26-27]</sup>以及发病率空间分异<sup>[28]</sup>等多领域,较少针对大型国家规划矿区ESV进行研究。研究通过分析霍东矿区ESV时空变化,结合自然因素和社会经济因素两方面探究驱动力,能为黄河流域中游矿区生态保护和土地利用提供参考与数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

霍东矿区(图1)是煤炭国家规划矿区,位于黄河流域中游山西省中南部的沁水煤田西缘,地跨长治市沁源县与临汾市安泽县、古县、浮山县和洪洞县,在35°55'—36°55'N, 111°45'—112°30'E之间。霍东矿区地势北高南低,主要地形为山地和丘陵,东部流经沁河,沟谷纵横,年均气温为9.2℃,年均降水量为535.6mm,暴雨集中在七八月,气候四季分明,属于暖温带大陆季风性气候。矿区总体面积约为2800km<sup>2</sup>,煤炭资源储量366亿吨,2006年经过煤炭资源整合矿区范围内保留了107对矿井,以井工开采为主,主要赋存煤种为炼焦煤。

### 1.2 数据来源及处理

本研究使用的2000、2005、2010、2015和2020年霍东矿区土地利用数据来源于中国科学院空天信息创新研究院发布的GLC\_FCS30产品(<https://data.casearth.cn/>),空间分辨率为30m,经过重分类得到耕地、林地、草地、建设用

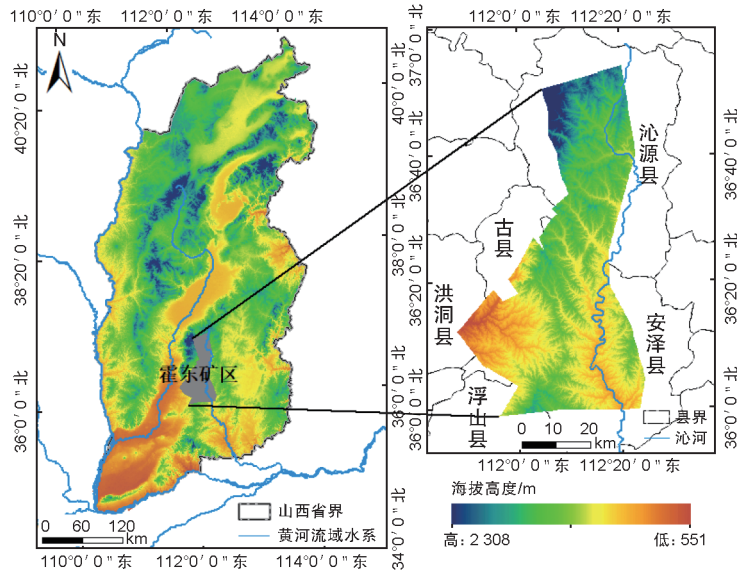


图1 霍东矿区地理位置以及范围

Fig. 1 Location and scope of the Huodong mining Area

地、湿地、水域和未利用地 7 种土地利用类型, 利用 ArcGIS 软件于研究区范围内随机选取 200 个样本点, 叠加谷歌地球高精度影像进行验证, 每期数据精度均达到 90% 以上, 符合本研究需要。粮食产量、播种面积和粮食价格数据分别来自于《山西省统计年鉴》和《中国农产品价格调查年鉴》; NDVI 数据基于 Google Earth Engine 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 上对 Landsat 地表反射率数据 (Surface Reflectance, SR) 进行去云, 裁剪等预处理, 利用年度最大值合成方法计算得到<sup>[4]</sup>, 分辨率为 30 m; 数字高程模型 (DEM) 来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m; 气温和降水数据来自国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/>), 由月度数据合成得到年均气温与年均降水, 分辨率为 1 km; 土壤侵蚀量基于土地利用数据通过 RUSLE (The Revised Universal Soil Loss Equation) 模型<sup>[29]</sup> 中土壤流失方程计算得到, 分辨率为 30 m; 人口密度数据来自 Worldpop (<https://www.worldpop.org/>), 分辨率为 100 m; 碳排放数据来自 ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO<sub>2</sub>)<sup>[30]</sup> 公布的全球碳排放栅格数据 (<https://www.cger.nies.go.jp/en/>), 由月度数据合成得到年度总碳排放, 分辨率为 1 km; 采矿点数据来自山西省能源局 (<http://nyj.shanxi.gov.cn/>), 利用 ArcGIS 10.2 近邻分析工具计算得到各像元距采矿点距离。

地、湿地、水域和未利用地 7 种土地利用类型, 利用 ArcGIS 软件于研究区范围内随机选取 200 个样本点, 叠加谷歌地球高精度影像进行验证, 每期数据精度均达到 90% 以上, 符合本研究需要。粮食产量、播种面积和粮食价格数据分别来自于《山西省统计年鉴》和《中国农产品价格调查年鉴》; NDVI 数据基于 Google Earth Engine 平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 上对 Landsat 地表反射率数据 (Surface Reflectance, SR) 进行去云, 裁剪等预处理, 利用年度最大值合成方法计算得到<sup>[4]</sup>, 分辨率为 30 m; 数字高程模型 (DEM) 来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 分辨率为 30 m; 气温和降水数据来自国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn/>), 由月度数据合成得到年均气温与年均降水, 分辨率为 1 km; 土壤侵蚀量基于土地利用数据通过 RUSLE (The Revised Universal Soil Loss Equation) 模型<sup>[29]</sup> 中土壤流失方程计算得到, 分辨率为 30 m; 人口密度数据来自 Worldpop (<https://www.worldpop.org/>), 分辨率为 100 m; 碳排放数据来自 ODIAC (Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO<sub>2</sub>)<sup>[30]</sup> 公布的全球碳排放栅格数据 (<https://www.cger.nies.go.jp/en/>), 由月度数据合成得到年度总碳排放, 分辨率为 1 km; 采矿点数据来自山西省能源局 (<http://nyj.shanxi.gov.cn/>), 利用 ArcGIS 10.2 近邻分析工具计算得到各像元距采矿点距离。

### 1.3 研究方法

本文采用当量因子法基于土地利用数据对霍东矿区 ESV 进行定量研究, 利用研究区粮食产量与价格计算研究区生态服务价值当量, 并通过 NDVI 数据进行植被长势空间差异的修正, 采用空间冷热点分析, 结合土地利用变化反映霍东矿区 ESV 的时空变化特征, 利用地理探测器的因子探测以及交互作用探测识别矿区 ESV 空间分异的主要驱动因子。

#### 1.3.1 土地利用变化分析

单一土地利用动态度用于表征霍东矿区某种土地利用类型研究期间变化情况<sup>[31]</sup>, 见式(1)。

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,  $K$  表示某种土地利用类型的动态度,  $K$  为正值表示转入面积大于转出面积,  $K$  为负值表示转出面积大于转入面积,  $K$  绝对值越大则表示变化情况越强烈,  $U_a$  和  $U_b$  分别表示开始研究时点下和结束研究时点下土地利用类型的面积;  $T$  表示研究持续时间, 单位为年。

综合利用动态度用于表示研究区整体的土地利用变化幅度<sup>[32]</sup>, 见式(2)。

$$L_c = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $L_c$  表示霍东矿区研究期间的综合土地利用动态度,  $LU_i$  为研究时段开始时第  $i$  类土地利用类型面积;  $\Delta LU_{i-j}$  表示研究时段内第  $i$  类土地利用类型变为其他土地利用类型的面积绝对值。

### 1.3.2 生态系统服务价值评估

霍东矿区地跨长治市与临汾市,为减少地区经济发展水平对数据的影响,分别获取研究时段下的长治市与临汾市粮食作物单产以及市场价格,均值计算后得到 2000—2020 年间长治市与临汾市平均粮食产量分别为 5 186.91 kg·hm<sup>-2</sup> 和 3 720.83 kg·hm<sup>-2</sup>, 同期国内主要粮食价格平均值为 2.56 元/kg。基于谢高地等<sup>[11,33]</sup> 制定的中国生态服务价值当量表,以单位面积当量服务价值为当地农田生态系统主要农作物单位经济价值的 1/7, 计算得到霍东矿区一个价值当量的经济价值为 1 627.25 元·hm<sup>-2</sup>, 得到霍东矿区不同土地利用类型单位面积的 ESV 见表 1。

同一土地利用类型受自然因素与人类活动影响,在不同的空间位置上其 ESV 存在差异,利用当量因子法进行估算,能够反映霍东矿区不同土地利用类型 ESV 的高低,但不能反映相同土地利用类型的空间异质性。在耕地、林地和草地等有植被覆盖的用地类型上,植被种类以及生长程度的差异,会使相同的土地利用类型在不同地理位置的 ESV 具有明显差异<sup>[34]</sup>。因此,本研究利用归一化植被指数(NDVI)对

ESV 进行空间修正,见式(3),对霍东矿区单元网格内的耕地、林地和草地 ESV 根据式(4)进行空间修正<sup>[35]</sup> 获得霍东矿区修正后的 ESV。

$$C_{ik} = \frac{NDVI_{ik}}{NDVI_i}, \quad (3)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o A_{ij} B_{ik} C_{ik}, \quad (4)$$

式中,  $ESV$  表示霍东矿区生态系统服务总价值,  $A_{ij}$  表示矿区内第  $i$  种土地利用类型第  $j$  种生态系统服务的  $ESV$  当量系数;  $B_{ik}$  表示第  $k$  个网格内第  $i$  种土地利用类型面积;  $C_{ik}$  表示第  $k$  个网格内第  $i$  种土地利用类型  $NDVI$  修订系数;  $NDVI_i$  为矿区内第  $i$  种土地利用类型的  $NDVI$  均值;  $NDVI_{ik}$  为第  $k$  个网格单元内第  $i$  种土地利用类型的  $NDVI$  均值;  $m$ 、 $n$ 、 $o$  分别表示土地利用类型数量,生态服务功能数量和单元网格数,  $m=3$ 、 $n=9$ 、 $o=3\ 141$ 。

### 1.3.3 敏感性分析

为证明  $ESV$  系数的科学性和可靠性,本研究利用敏感性指数(Coefficient of Sensitive,  $CS$ ) 表示  $ESV$  变化对其系数的依赖性,见式(5)。若  $CS < 1$ , 就说明  $ESV$  对系数缺乏弹性,结果可信。

$$CS = \frac{ESV_j - ESV_i}{ESV_i} \bigg/ \frac{VC_{jk} - VC_{ik}}{VC_{ik}}, \quad (5)$$

式中,  $ESV_i$  和  $ESV_j$  分别表示霍东矿区调整前后的  $ESV$ ;  $VC_{ik}$  和  $VC_{jk}$  分别表示第  $k$  种土地利用类型调整前后的  $ESV$  系数。

### 1.3.4 热点分析

空间冷热点分析用于表示霍东矿区内  $ESV$  的空间相关性,可进一步分析霍东矿区  $ESV$  的空间集聚特征。本研究应用 ArcGIS 10.2 的

表 1 霍东矿区单位面积生态系统服务价值系数表(元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

Table 1 Per unit ESV of different ecosystems in Huodong mining area (yuan·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)

一级类型	二级类型	林地	草地	耕地	湿地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	536.99	699.72	1 627.25	585.81	862.44	32.55
	原材料生产	4 849.21	585.81	634.63	390.54	569.54	65.09
调节服务	气体调节	7 029.73	2 440.88	1 171.62	3 921.68	829.90	97.64
	气候调节	6 622.92	2 538.51	1 578.43	22 049.26	3 352.14	211.54
	水文调节	6 655.46	2 473.42	1 252.98	21 870.27	30 543.52	113.91
	废物处理	2 798.87	2 147.97	2 261.88	23 432.43	24 164.69	423.09
支持服务	土壤保持	6 541.55	3 645.04	2 392.06	3 238.23	667.17	276.63
	维持生物多样性	7 338.91	3 042.96	1 659.80	6 004.56	5 581.47	650.90
文化服务	提供美学景观	3 384.68	1 415.71	276.63	7 631.81	7 225.00	390.54
	合计	45 758.32	18 990.02	12 855.28	89 124.59	73 795.87	2 261.89

Hot Spot Analysis (Getis-Ord  $G_i^*$ ) 工具, 如果分析结果中  $Z$  得分为正, 表明高值聚集, 为热点区, 反之, 如果  $Z$  得分为负, 表明低值聚集, 为冷点区, 经过 90%、95%、99% 的置信度检验, 将  $Z$  得分高低划分为  $\pm 1.65$ ,  $\pm 1.96$ ,  $\pm 2.58$  作为较热(冷)点、热(冷)点、极热(冷)点区域<sup>[36]</sup>。

### 1.3.5 地理探测器分析

地理探测器是由王劲峰等<sup>[37]</sup>提出的探测驱动因子空间异质的方法, 可研究各个驱动因子对其因变量空间分布差异的解释力, 其解释力用  $q$  值大小表示, 如式(6), 值域为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大表示该驱动因子与因变量空间分布相关性越大。当值为 1 时, 表示该驱动因子完全控制因变量的空间分布, 值为 0 时表示该驱动因子与因变量的空间分布不相关。该方法既可以探测单因子对因变量空间分异性的解释程度, 还可以判断多因子交互作用的强弱。本研究采用地理探测器模型对霍东矿区影响 ESV 空间分异的自然因素和社会经济因素进行探测。

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad (6)$$

式中  $q$  表示驱动因子对研究区 ESV 空间分布的解释力;  $N$  为整个研究区样本数量;  $\sigma_h^2$  表示各个网格单元 ESV 的方差,  $\sigma^2$  表示霍东矿区 ESV 的方差;  $N_h$  为次一级样本数量;  $L$  为次一级区域数量。

ESV 受到自然因素与社会经济因素双重影响, 参照前人研究成果<sup>[38-39]</sup>, 选择高程、坡度、气温、降水、土壤侵蚀程度、土地利用程度、人口密度、碳排放和距采矿点距离共 9 个因子对 2000—2020 年间隔 5 年的 ESV 进行地理探测研究。其中地形、气温和降水是影响 ESV 空间分异的基础因子; 土壤侵蚀强度探测丘陵河谷区水力侵蚀以及坡耕地水土流失造成的土壤退化

对地表植被长势与农业生产的影响; 土地利用程度量化土地利用类型变化对生态系统的影响; 碳排放数据是利用夜间灯光数据和全球发电站点位数据计算得到的化石燃料燃烧二氧化碳排放量<sup>[30]</sup>, 和人口密度共同表征人类经济活动强度分布, 反映城镇化以及工业发展水平对 ESV 的干扰; 距采矿点距离用于表征煤炭开采扰动对 ESV 的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 霍东矿区土地利用变化分析

2000—2020 年间霍东矿区的主要土地利用类型为林地和草地, 林地面积约占总面积的 50%, 草地约占总面积的 30%。由表 2 可知, 2000—2020 年间草地单一土地利用动态度呈负向变化, 其余土地利用类型都呈正向变化, 说明研究时段内只有草地面积减少, 其他用地类型面积都增加。由综合土地利用动态评估结果可知, 2000—2005、2015—2020 年间  $C \leq 0.10\%$ , 这两阶段土地利用不活跃; 2005—2010、2010—2015 年间  $C > 0.80\%$ , 这两阶段土地利用活跃, 主要原因是草地转耕地、草地转林地、草地转建设用地面积增加; 2000—2020 年间霍东矿区土地利用综合动态度为 0.08%, 土地利用活跃程度不高。

### 2.2 敏感性分析

如表 3 所示, 将各个土地利用类型的生态价值系数分别调整  $\pm 50\%$ , 计算得到霍东矿区各个研究时点下调整后的价值系数的敏感性指数绝对值均小于 1,  $CS$  值从高到低排列为: 林地  $>$  草地  $>$  耕地  $>$  水域  $>$  湿地  $>$  建设用地  $>$  未利用地。敏感性分析表明霍东矿区 ESV 对于其系数缺乏弹性, 证明计算得到的 ESV 系数合理可靠。

表 2 霍东矿区 2000—2020 年土地利用动态度(%)

Table 2 Dynamic degree of land use in Huodong mining area from 2000 to 2020 (%)

时期	单一土地利用动态度							综合土地利用动态度
	耕地	林地	草地	建设用地	湿地	水域	未利用地	
2000—2005	0.31	0.12	-0.44	13.74	0.64	0.81	0.38	0.09
2005—2010	0.28	0.10	-0.41	9.17	1.71	0.35	0.89	0.85
2010—2015	0.29	0.05	-0.35	5.73	4.46	1.78	3.11	0.81
2015—2020	0.48	0.06	-0.52	5.15	1.73	2.81	3.06	0.10
2000—2020	0.35	0.08	-0.42	14.91	2.44	1.57	2.09	0.08

表3 霍东矿区生态服务价值敏感性指数

Table 3 Sensitivity index of ESV in Huodong mining area

土地类型	2000	2005	2010	2015	2020
耕地 VC±50%	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09
林地 VC±50%	0.73	0.74	0.74	0.74	0.74
草地 VC±50%	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17
建设用地 VC±50%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
湿地 VC±50%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水域 VC±50%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
未利用地 VC±50%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 2.3 霍东矿区生态服务价值时空变化特征

#### 2.3.1 霍东矿区生态服务价值时间变化特征

霍东矿区 2000—2020 年 ESV 总体呈上升趋势见表 4, 由 91.63 亿元上升到 91.92 亿元, 总体增长 0.29 亿元, 增长率为 0.33%, 2000—2005 年增长量最大, 其次是 2005—2010 年, ESV 增长超过 1 000 万元。20 年间霍东矿区 ESV 变化的土地利用驱动力在于草地转林地和草地转耕地, 林地的供给、调节、支持和文化服务价值均优于草地, 耕地的供给服务价值优于草地。从不同土地用地类型的 ESV 来看, 林地的 ESV 最高, 占比超过霍东矿区总 ESV 的 70%, 其次是草地和耕地, 占比分别超过霍东矿区总 ESV 的 16% 和 8%, 这与当地土地利用类型面积分布具有显著的相关性。2000—2020 年间林地、耕地的 ESV 持续增长, 增长量分别为 1.09 亿元和 0.52 亿元, 增长率达到 1.62% 和 6.89%, 草地 ESV 持续减少, 减少量为 1.29 亿元, 减少幅度达到 8.35%, 此外, 湿地、水域和未利用地的 ESV 都持续增长, 由于其面积基数较小, 增长幅度都十分显著, 分别达到 57.14%、36.36% 和 41.88%。随着植树造林、封山育林等生态治理举措的实施, 林地面积增长, 使得 ESV 总体处

于上升趋势, 但另一方面, 霍东矿区草原生态系统比较脆弱, 研究时段内草原面积一直处于退化状态。

霍东矿区单项 ESV 及其变化如表 5 所示, 2000—2010 年间霍东矿区各单项生态服务功能价值整体呈现上升趋势, 这是由于草地转化为林地和耕地, 林地作为霍东矿区的主要土地利用类型, 除食物生产功能的单位面积价值低于草地, 其他生态服务功能价值均高于草地, 同时, 由于耕地的食物生产功能单位面积价值显著高于草地, 草地转耕地使得霍东矿区食物生产功能价值不断增长。2010—2020 年间土壤保持和提供美学景观功能价值呈现下降趋势, 分别降低了 100 万元和 200 万元, 其他生态功能的价值均呈现上升趋势, 这是由于草地的土壤保持功能和提供美学景观的价值较高, 林地的土壤保持与提供美学景观功能价值虽然也较高, 由表 2 可看出 2010—2020 年间林地的土地利用动态明显低于 2000—2010 年, 而耕地的土地利用动态明显上升, 说明期间草地转耕地的程度较大, 由于耕地的土壤保持与提供美学景观功能价值较低, 造成这两种生态服务功能价值降低。食物生产功能与原材料生产功能价值的增长率最高, 增长率分别为 1.27% 和 1.25%, 这与耕地和林地面积显著增加具有较强的相关性。

#### 2.3.2 霍东矿区生态服务价值空间变化特征

按照网格单元总 ESV 分成低价值区 ( $0 \leq \text{ESV} < 200$  万元)、较低价值区 ( $200 \text{ 万元} \leq \text{ESV} < 300$  万元)、中价值区 ( $300 \text{ 万元} \leq \text{ESV} < 400$  万元)、较高价值区 ( $400 \text{ 万元} \leq \text{ESV} < 500$  万元)、高价值区 ( $\text{ESV} \geq 500$  万元) 如图 2。从空间分

表4 霍东矿区不同土地利用类型 2000—2020 年生态服务价值

Table 4 ESV of different land use types in Huodong mining area from 2000 to 2020

土地利用类型	ESV/×10 <sup>8</sup> 元					2000—2020年ESV 变化量/×10 <sup>8</sup> 元	增长率/%
	2000	2005	2010	2015	2020		
耕地	7.55	7.66	7.77	7.88	8.07	0.52	6.89
林地	67.24	67.64	67.97	68.13	68.33	1.09	1.62
草地	16.65	16.28	15.94	15.67	15.26	-1.39	-8.35
湿地	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.04	57.14
水域	0.11	0.12	0.12	0.13	0.15	0.04	36.36
未利用地	0.002 3	0.002 4	0.002 5	0.002 9	0.003 3	0.001 0	41.88
合计	91.63	91.78	91.89	91.91	91.92	0.29	0.32

表5 霍东矿区不同生态服务功能2000—2020年生态服务价值

Table 5 ESV of different ecological service functions in Huodong mining area from 2000 to 2020

生态系统服务功能		ESV/ $\times 10^8$ 元					2000—2020年ESV 变化量/ $\times 10^8$ 元	增长率/%
一级类型	二级类型	2000	2005	2010	2015	2020		
供给服务	食物生产	2.36	2.37	2.37	2.38	2.39	0.03	1.27
	原材料生产	8.01	8.05	8.08	8.09	8.11	0.10	1.25
调节服务	气体调节	13.16	13.19	13.20	13.20	13.20	0.04	0.30
	气候调节	12.91	12.93	12.95	12.95	12.95	0.04	0.31
	水文调节	12.75	12.77	12.79	12.80	12.80	0.05	0.39
	废物处理	7.38	7.39	7.39	7.40	7.40	0.02	0.27
支持服务	土壤保持	14.22	14.22	14.23	14.22	14.20	-0.02	-0.14
	维持生物多样性	14.44	14.46	14.47	14.47	14.46	0.02	0.14
文化服务	提供美学景观	6.40	6.40	6.40	6.40	6.39	-0.01	-0.16
合计		91.63	91.78	91.89	91.91	91.92	0.29	0.32

布上看,霍东矿区ESV整体北高南低,中间高,两边低。高价值区域离散分布于矿区西北部和中部,与西北部太岳山国家级森林公园、灵空山国家级自然保护区以及霍山省级自然保护区等,中部安泽县红叶岭风景区和安泽省级森林公园分布一致;较高价值区域呈块状由北向南纵向分布,这些区域海拔较高,森林覆盖率高;中等价值区环绕较高价值区分布,具有明显的过渡特征,这与霍东矿区植被沿地形垂直分布的特点具有明显的相关性;低价值区域呈现“一面多带”的分布格局,在矿区西南部耕地面积分布,沿沁河及其支流两岸带状分布,这些区域地势较低,主要土地利用类型为耕地、草地和建设用。土地利用类型分布与生态系统服务功能及ESV呈现出明显的耦合关联特征,2000—2020年霍东矿区西北部和中部区域林地

为主,该区域ESV较高,且林地对霍东矿区整体ESV的贡献率相对高,西南部以耕地和草地为主,沁河流域两岸多为耕地和零碎的建设用地,相应的ESV整体表现为低值区域。

2000—2020年霍东矿区ESV冷热点分布格局相似,但冷热点区面积有所差异如图3。ESV不显著区域面积占比最大,约占霍东矿区总面积的50%。热点区分布较为零散,在霍东矿区由北向南纵向分布,在西北部和中部地势高的山地和丘陵区域比较集中,主要用地类型为林地,ESV的冷点区则集中分布在西南部耕地地区域与东南部沁河两岸。21年间极冷点区域面积出现了明显的缩减,极热点区域出现了扩张,霍东矿区ESV呈现出明显的冷热分区差异。

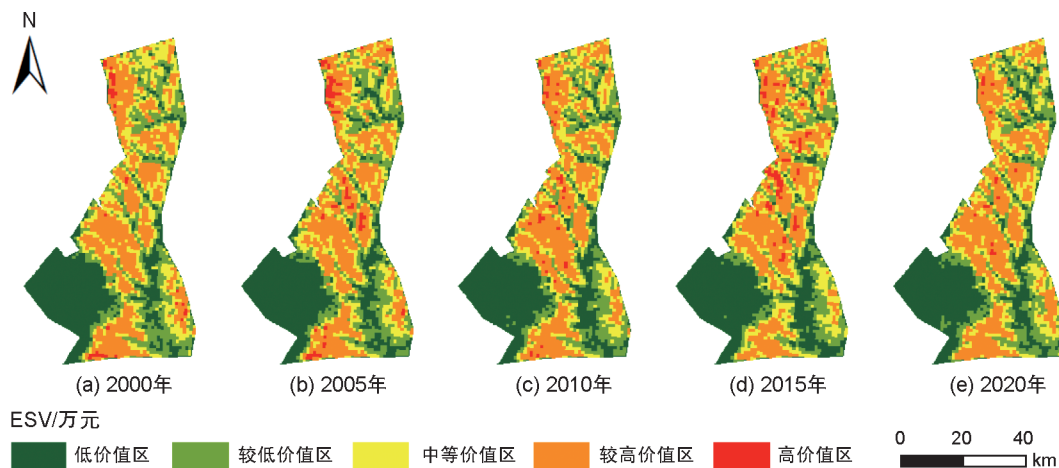


图2 2000—2020霍东矿区生态服务价值空间分布

Fig. 2 Distribution of ESV in Huodong mining area from 2000 to 2020

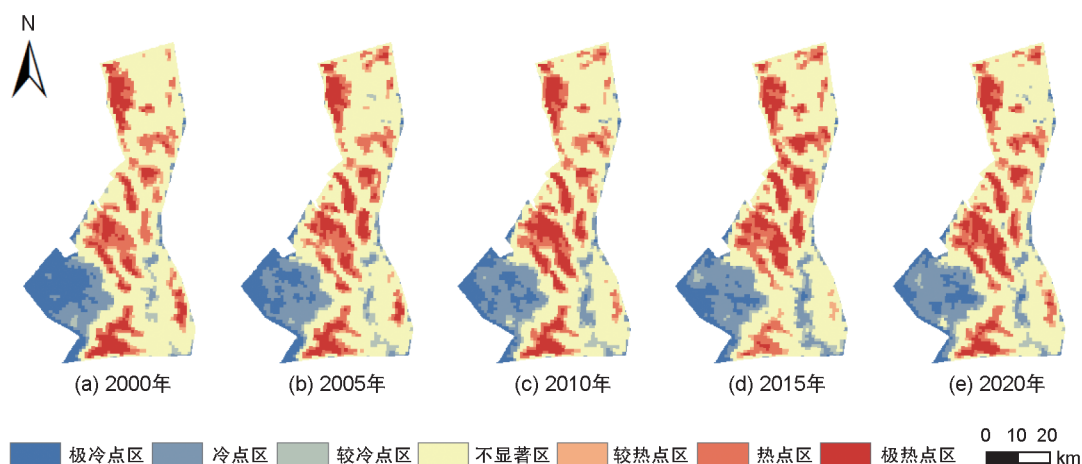


图3 2000—2020霍东矿区生态服务价值冷热点分布

Fig. 3 Spatial agglomeration characteristics of ESV in Huodong mining area from 2000 to 2020

#### 2.4 霍东矿区生态服务价值变化成因探测

通过地理探测器计算高程( $X_1$ )、坡度( $X_2$ )、气温( $X_3$ )、降水( $X_4$ )、土壤侵蚀程度( $X_5$ )、土地利用程度( $X_6$ )、人口密度( $X_7$ )、碳排放( $X_8$ )、距采矿点距离( $X_9$ )共9个驱动因子对ESV的影响程度,对霍东矿区ESV进行单因子探测和交互探测。

单因子探测结果如图4所示,霍东矿区ESV受到自然、社会等多重因素影响,驱动因子均通过显著性检验( $P < 0.05$ )。20年间霍东矿区平均ESV空间分布的主要驱动因素按 $q$ 因子统计量大小依次排序为土地利用程度(0.576 7) > 土壤侵蚀强度(0.550 8) > 气温(0.520 8) > 高程(0.498 0) > 坡度(0.357 7) > 降水(0.296 3) > 人口密度(0.136 6) > 距采矿点距离(0.086 7) > 碳排放(0.041 5),根据 $q$ 值大小,发现不同驱动因素对ESV影响程度差异明显,自然因素的影响力总体高于社会经济因素。不同年份的主导因素略有差别,霍东矿区2000年的主要驱动因素依次为土地利用程度、高程、气温和土壤侵蚀,2005年的主要驱动因素依次为土地利用程度、土壤侵蚀、气温和高程,2010年的主要驱动因素依次为土地利用程度、土壤侵蚀、高程和气温, $q$ 因子均超过0.4,2015年以及2020年的主要驱动因素为土地利用程度、高程和气温, $q$ 因子均超过0.3。土壤侵蚀在2000—2005年间对霍东矿区ESV的影响程度逐渐加深,2005—2020年间逐渐减弱。20年间人口密度,碳排放以及距采矿点距离 $q$ 因子均小于0.15,说明人

类活动对当地ESV影响较小。霍东矿区目前煤炭资源开发程度较小,矿区范围内不包含大型城市,人口较少,地形较为复杂,以山地和丘陵为主,林地是主要土地利用类型,矿区内的森林分布与地形显著相关,高程,坡度对植被长势有重要作用,气温对植被生长也具有显著影响,与此同时,丘陵河谷区与坡耕地易发生土壤侵蚀,破坏地貌和地表植被,造成土壤退化,影响当地的植物生长和农业生产。

通过交互探测可识别各个驱动因子两两之间的协同作用对因变量的解释程度。根据交互探测结果如表6,霍东矿区ESV主要的驱动因子交互作用类型为双因子交互增强,2000—2020年间各驱动因子之间相互关联,而不是相互独立,交互因子对霍东矿区ESV分布的解释力比单因子更强。2000—2020年间平均土壤侵蚀强度与平均坡度和平均气温的交互强度能够达到0.7以上,说明自然因素主导了矿区ESV分布格局。各时期土地利用程度、高程、坡度、降水、气温以及土壤侵蚀等主要单因子间的交互强度均达到0.55以上,有些年份的交互强度能够达到0.6以上,说明土地利用程度、高程、坡度、降水、气温和土壤侵蚀是影响霍东矿区ESV的重要因素。霍东矿区社会经济因素单因子影响力较小,但与自然因素交互后,影响程度明显增强,土地利用程度与人口密度、碳排放、距采矿点距离的交互作用影响力达到0.55以上,说明人类活动增强了自然因素对生态系统服务的影响。

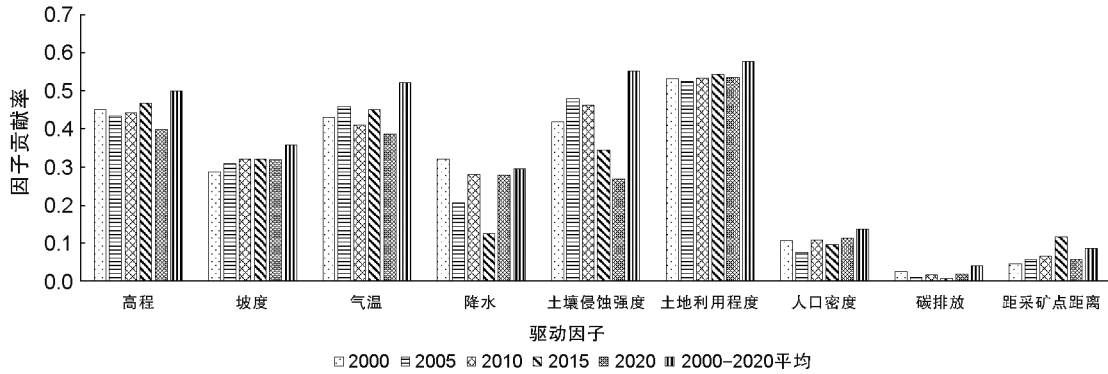


图4 2000—2020霍东矿区生态服务价值驱动因子贡献率

Fig. 4 Contribution of ESV drivers in Huodong mining area from 2000 to 2020

表6 2000—2020霍东矿区生态服务价值主要交互因子

Table 6 The main interaction factors of ESV in Huodong mining area from 2000 to 2020

年份	霍东矿区ESV交互因子
2000	$X_6 \cap X_1(0.610\ 1)$ $X_6 \cap X_3(0.602\ 0)$ $X_6 \cap X_4(0.597\ 8)$ $X_6 \cap X_5(0.578\ 1)$ $X_2 \cap X_1(0.570\ 7)$ $X_6 \cap X_2(0.568\ 4)$ $X_6 \cap X_7(0.562\ 3)$ $X_2 \cap X_3(0.557\ 5)$ $X_4 \cap X_5(0.557\ 4)$ $X_6 \cap X_8(0.554\ 4)$ $X_6 \cap X_9(0.550\ 1)$
2005	$X_6 \cap X_2(0.569\ 6)$ $X_2 \cap X_5(0.606\ 7)$ $X_6 \cap X_4(0.603\ 8)$ $X_6 \cap X_5(0.601\ 2)$ $X_6 \cap X_3(0.601\ 2)$ $X_6 \cap X_1(0.598\ 9)$ $X_2 \cap X_3(0.580\ 6)$ $X_2 \cap X_1(0.569\ 7)$ $X_4 \cap X_5(0.569\ 6)$ $X_3 \cap X_5(0.562\ 3)$ $X_1 \cap X_5(0.555\ 0)$
2010	$X_2 \cap X_5(0.619\ 9)$ $X_6 \cap X_5(0.609\ 8)$ $X_6 \cap X_1(0.607\ 4)$ $X_6 \cap X_3(0.597\ 1)$ $X_1 \cap X_5(0.582\ 5)$ $X_2 \cap X_1(0.579\ 6)$ $X_6 \cap X_2(0.576\ 6)$ $X_6 \cap X_4(0.576\ 2)$ $X_3 \cap X_5(0.572\ 6)$ $X_2 \cap X_3(0.561\ 3)$ $X_6 \cap X_7(0.556\ 7)$ $X_6 \cap X_8(0.551\ 4)$
2015	$X_6 \cap X_1(0.623\ 1)$ $X_6 \cap X_3(0.615\ 5)$ $X_6 \cap X_4(0.601\ 9)$ $X_2 \cap X_1(0.594\ 0)$ $X_1 \cap X_5(0.590\ 8)$ $X_6 \cap X_5(0.589\ 8)$ $X_3 \cap X_5(0.588\ 7)$ $X_2 \cap X_3(0.583\ 9)$ $X_6 \cap X_2(0.582\ 9)$ $X_6 \cap X_9(0.559\ 4)$ $X_6 \cap X_7(0.556\ 7)$ $X_6 \cap X_8(0.550\ 7)$
2020	$X_6 \cap X_1(0.587\ 9)$ $X_6 \cap X_3(0.584\ 4)$ $X_6 \cap X_5(0.582\ 8)$ $X_6 \cap X_2(0.572\ 9)$ $X_6 \cap X_4(0.569\ 4)$ $X_1 \cap X_5(0.562\ 0)$ $X_6 \cap X_7(0.558\ 7)$ $X_3 \cap X_5(0.558\ 1)$ $X_6 \cap X_8(0.553\ 8)$ $X_6 \cap X_9(0.550\ 3)$
2000— 2020年 平均	$X_5 \cap X_2(0.726\ 3)$ $X_5 \cap X_3(0.700\ 1)$ $X_5 \cap X_1(0.695\ 7)$ $X_6 \cap X_1(0.688\ 7)$ $X_6 \cap X_3(0.679\ 6)$ $X_6 \cap X_5(0.672\ 7)$ $X_2 \cap X_3(0.672\ 2)$ $X_2 \cap X_1(0.650\ 1)$ $X_6 \cap X_4(0.647\ 3)$ $X_6 \cap X_2(0.627\ 3)$ $X_5 \cap X_9(0.619\ 6)$ $X_4 \cap X_8(0.614\ 8)$ $X_4 \cap X_5(0.613\ 9)$ $X_6 \cap X_8(0.608\ 6)$ $X_6 \cap X_7(0.608\ 0)$ $X_7 \cap X_3(0.601\ 8)$ $X_3 \cap X_8(0.600\ 0)$ $X_6 \cap X_9(0.599\ 8)$ $X_5 \cap X_8(0.591\ 9)$ $X_4 \cap X_1(0.588\ 5)$ $X_5 \cap X_7(0.588\ 3)$ $X_3 \cap X_1(0.584\ 2)$ $X_4 \cap X_2(0.574\ 5)$ $X_3 \cap X_9(0.572\ 9)$ $X_1 \cap X_7(0.554\ 2)$

### 3 讨论

本研究使用当量因子法估算霍东矿区2000—2020年的生态服务价值,通过霍东矿区所在行政区域粮食价格计算其生态服务价值,同时针对同一土地利用类型植被类型以及长势会有差异这一问题,利用NDVI数据进一步进行了修正,对区域生态服务价值评估具有更高的精确性。研究表明20年间霍东矿区ESV整体较为稳定,一方面该区自然生态本底情况良好,森林覆盖率相对高,且重视太岳山生态防护林和沁河水源涵养林建设,霍东矿区内各采矿点以井工开采为主,对地上植被等的影响较露天矿开采而言相对较小,且霍东矿区目前整体资源开发力度不大。但与此同时,霍东矿区草地退化较为明显,草地具有土壤保持、水源

涵养、防风固沙等多种重要的生态服务功能,草地退化会造成土壤性质恶化,需要因地制宜制定政策,结合自然恢复与人工修复,利用科学的治理手段保护草原生态系统。

此外,霍东矿区ESV的空间分异性较为明显,北高南低,这是由于霍东矿区以山地为主,土地利用垂直分布的特点较为明显,使其ESV变化呈现明显的地形梯度特点。矿区西南部以及南部沁河两岸主要是耕地,ESV较低,在保护耕地红线的前提下,尽可能将坡度较大区域的耕地转化为林地和草地,避免水土流失。

受到生态系统功能结构复杂性、数据可获取性,市场价格系数不稳定性等多因素影响,本文仅根据土地利用一级类型使用当量因子法评估了霍东矿区ESV,缺乏土地类型的细化,并未能结合当地生态系统短板进行综合考

考虑。研究结果表明,林地是研究区主要用地类型,地形、气候和土壤侵蚀对霍东矿区ESV具有显著的驱动作用,在后续研究中,可以进一步细化土地利用类型,并结合生产力、生物量等数据进行更加精细的测算研究,同时挑选固碳、气候调节以及土壤保持等典型生态服务功能,更有针对性地评估霍东矿区生态服务价值。

#### 4 结论

(1)2000—2020年间霍东矿区主要土地类型为林地和草地,土地利用活跃程度不高,林地、耕地、建设用地、湿地和水域面积增加,草地面积减少。

(2)从时间尺度看,霍东矿区ESV在2000—2020年间一直呈现稳定上升的趋势,共增加2900万元。草地生态系统ESV持续下降,其他生态系统ESV持续上升;土壤保持和提供美学景观服务功能价值下降,其他服务功能价值持续上升。从空间尺度看,霍东矿区ESV整体北高南低,较高价值区以及热点区域主要分布在矿区西北部山地及中部丘陵的高海拔森林;中等价值区环绕较高价值区分布,呈现过渡特征;低价值区呈“一面多带”空间格局,同时冷点区分布于西南部耕地与沁河及其支流两岸。21年间霍东矿区ESV空间格局没有大的变化,冷热分区差异明显。

(3)霍东矿区ESV变化受到自然因素和社会经济因素共同作用,自然因素为主导,其中土地利用程度对霍东矿区ESV影响最显著,因子贡献率达到0.5以上。高程、坡度、气温以及土壤侵蚀是影响霍东矿区ESV的重要因子,因子贡献率均达到0.25以上,相对而言,目前采矿活动并未对霍东矿区ESV产生较大影响。霍东矿区ESV主要的驱动因子交互作用类型为双因子增强,人类活动增强了自然因素对生态系统服务的影响。

#### 参考文献:

- [1] 彭苏萍,毕银丽. 黄河流域煤矿区生态环境修复关键技术  
与战略思考[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1211-1221. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0444.  
PENG S P, BI Y L. Strategic Consideration and Core  
Technology about Environmental Ecological Restoration in  
Coal Mine Areas in the Yellow River Basin of China[J]. *J  
China Coal Soc*, 2020, 45(4): 1211-1221. DOI: 10.13225/  
j.cnki.jccs.2020.0444.
- [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. DOI: 10.11947/j.  
AGCS.2017.20170358.  
WANG Y J. Research Progress and Prospect on Ecological  
Disturbance Monitoring in Mining Area[J]. *Acta Geod  
Cartogr Sin*, 2017, 46(10): 1705-1716. DOI: 10.11947/j.  
AGCS.2017.20170358.
- [3] 魏远,顾红波,薛亮,等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复  
研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(2): 107-114.  
DOI: 10.16843/j.sswc.2012.02.019.  
WEI Y, GU H B, XUE L, et al. Review of Studies on  
Reclamation and Ecological Restoration of Abandoned  
Land of Mine[J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2012, 10(2): 107-  
114. DOI: 10.16843/j.sswc.2012.02.019.
- [4] 李晶,闫星光,闫萧萧,等. 基于GEE云平台的黄河流域  
植被覆盖度时空变化特征[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1439-  
1450. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.st21.0331.  
LI J, YAN X G, YAN X X, et al. Temporal and Spatial  
Variation Characteristic of Vegetation Coverage in the  
Yellow River Basin Based on GEE Cloud Platform[J]. *J  
China Coal Soc*, 2021, 46(5): 1439-1450. DOI: 10.13225/  
j.cnki.jccs.st21.0331.
- [5] DAILY G C, POLASKY S, GOLDSTEIN J, et al. Eco-  
system Services in Decision Making: Time to Deliver[J].  
*Front Ecol Environ*, 2009, 7(1): 21-28. DOI: 10.1890/  
080025.
- [6] 白中科,周伟,王金满,等. 再论矿区生态系统恢复重建[J].  
中国土地科学, 2018, 32(11): 1-9. DOI: 10.11994/zgtd-  
kx.20181107.162318.  
BAI Z K, ZHOU W, WANG J M, et al. Rethink on Eco-  
system Restoration and Rehabilitation of Mining Areas[J].  
*China Land Sci*, 2018, 32(11): 1-9. DOI: 10.11994/zgtd-  
kx.20181107.162318.
- [7] 肖武,张文凯,吕雪娇,等. 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[J].  
自然资源学报, 2020, 35(1): 68-81. DOI: 10.31497/  
zrzyxb.20200107.  
XIAO W, ZHANG W K, LYU X J, et al. Spatio-temporal  
Patterns of Ecological Capital under Different Mining In-  
tensities in an Ecologically Fragile Mining Area in Western  
China: A Case Study of Shenfu Mining Area[J]. *J Nat Re-  
sour*, 2020, 35(1): 68-81. DOI: 10.31497/zrzyxb.20200107.
- [8] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、  
方法与进展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446. DOI:

- 10.11820/dlkxjz.2014.04.001.  
FU B J, ZHANG L W. Land-use Change and Ecosystem Services: Concepts, Methods and Progress[J]. *Prog Geogr*, 2014, **33**(4): 441-446. DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.04.001.
- [9] 陈万旭, 李江风, 姜卫, 等. 豫西山区土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(1): 376-381. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.056.  
CHEN W X, LI J F, JIANG W, *et al.* Impacts of Land Use Change on Ecosystem Service Values Based on RS and GIS in Western Mountainous Area of He'nan Province[J]. *Res Soil Water Conserv*, 2018, **25**(1): 376-381. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2018.01.056.
- [10] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, *et al.* The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260. DOI: 10.1038/387253a0.
- [11] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, **23**(5): 911-919. DOI: 10.11849/zrzyxb.2008.05.019.  
XIE G D, ZHEN L, LU C X, *et al.* Expert Knowledge Based Valuation Method of Ecosystem Services in China [J]. *J Nat Resour*, 2008, **23**(5): 911-919. DOI: 10.11849/zrzyxb.2008.05.019.
- [12] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015, **37**(9): 1740-1746.  
XIE G D, ZHANG C X, ZHANG C S, *et al.* The Value of Ecosystem Services in China[J]. *Resour Sci*, 2015, **37**(9): 1740-1746.
- [13] SONG W, DENG X Z. Land-use/Land-cover Change and Ecosystem Service Provision in China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, **576**: 705-719. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.078.
- [14] 韩梦涛, 涂建军, 徐桂萍, 等. 黄河流域水域生态系统服务与经济发展时空协调性[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(4): 167-176. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00064.  
HAN M T, TU J J, XU G P, *et al.* Spatio-temporal Coordination between Aquatic Ecosystem Services and Economic Development in the Yellow River Basin[J]. *J Desert Res*, 2021, **41**(4): 167-176. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00064.
- [15] 蒋斋, 孙小银, 刘飞, 等. 1975—2015年南四湖自然保护区生态系统服务价值时空变化分析[J]. 生态科学, 2019, **38**(3): 201-210. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.03.025.  
JIANG Z, SUN X Y, LIU F, *et al.* Spatio-temporal Variation of Ecosystem Service Values in Nansihu Lake Reserve During 1975-2015[J]. *Ecol Sci*, 2019, **38**(3): 201-210. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.03.025.
- [16] 郝娜, 王晓晴, 王耀, 等. 河北省耕地图谱特征及其生态服务价值变化[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 277-283. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20180705.001.  
HAO N, WANG X Q, WANG Y, *et al.* Characteristics of Cultivated Land Map and the Change of Its Ecological Service Value in Hebei Province[J]. *Res Soil Water Conserv*, 2018, **25**(6): 277-283. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.20180705.001.
- [17] ZHANG X M, XIE H L, SHI J Y, *et al.* Assessing Changes in Ecosystem Service Values in Response to Land Cover Dynamics in Jiangxi Province, China[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2020, **17**(9): 3018. DOI: 10.3390/ijerph17093018.
- [18] 谢启姣, 刘进华. 1987—2016年武汉市湖泊时空演变及其生态服务价值响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(21): 7840-7850. DOI: 10.5846/stxb201806281432.  
XIE Q J, LIU J H. Spatio-temporal Dynamics of Lake Distribution and Their Impact on Ecosystem Service Values in Wuhan Urbanized Area During 1987-2016[J]. *Acta Ecol Sin*, 2020, **40**(21): 7840-7850. DOI: 10.5846/stxb201806281432.
- [19] 何军, 马娅, 张昌顺, 等. 基于生态服务价值的广州市生态补偿研究[J]. 生态经济, 2017, **33**(12): 184-188.  
HE J, MA Y, ZHANG C S, *et al.* Study on Ecological Compensation of Guangzhou Based on Ecological Service Value[J]. *Ecol Econ*, 2017, **33**(12): 184-188.
- [20] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J]. 自然资源学报, 2020, **35**(2): 371-386. DOI: 10.31497/zrzyxb.20200210.  
WANG Y H, DAI E F, MA L, *et al.* Spatiotemporal and Influencing Factors Analysis of Water Yield in the Hengduan Mountain Region[J]. *J Nat Resour*, 2020, **35**(2): 371-386. DOI: 10.31497/zrzyxb.20200210.
- [21] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力[J]. 生态学报, 2018, **38**(9): 3248-3259. DOI: 10.5846/stxb201704050578.  
LUO S F, YAN W D. Evolution and Driving Force Analysis of Ecosystem Service Values in Guangxi Beibu Gulf Coastal Areas, China[J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(9): 3248-3259. DOI: 10.5846/stxb201704050578.
- [22] 璩路路, 刘彦随, 周扬, 等. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应: 以井冈山为例[J]. 生态学报, 2019, **39**(10): 3468-3481.  
QU L L, LIU Y S, ZHOU Y, *et al.* Spatio-temporal Evolution of Ecologically-sustainable Land Use in the Luoxiao Mountains and Responses of Its Ecosystem Services: a Case Study of Jinggangshan City in Jiangxi Province[J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(10): 3468-3481.

- [23] YAN X X, LI J, SHAO Y, *et al.* Driving Forces of Grassland Vegetation Changes in Chen Barag Banner, Inner Mongolia[J]. *Giscience Remote Sens*, 2020, **57**(6): 1548–1603. DOI: 10.1080/15481603.2020.1794395.
- [24] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. *地理学报*, 2019, **74**(9): 1758–1776. DOI: 10.11821/dlxb201909005.
- PENG W F, ZHANG D M, LUO Y M, *et al.* Influence of Natural Factors on Vegetation NDVI Using Geographical Detection in Sichuan Province[J]. *Acta Geogr Sin*, 2019, **74**(9): 1758–1776. DOI: 10.11821/dlxb201909005.
- [25] 赵锐, 詹梨苹, 周亮, 等. 地理探测联合地理加权岭回归的PM<sub>2.5</sub>驱动因素分析[J]. *生态环境学报*, 2022, **31**(2): 307–317. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.02.011.
- ZHAO R, ZHAN L P, ZHOU L, *et al.* Identification of Driving Factors of PM<sub>2.5</sub> Based on Geographic Detector Combined with Geographically Weighted Ridge Regression [J]. *Ecol Environ Sci*, 2022, **31**(2): 307–317. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2022.02.011.
- [26] 赵永玉, 阿里木江·卡斯木, 高鹏文, 等. 基于地理探测器的乌鲁木齐市城区扩展及影响因素分析[J]. *干旱区地理*, 2021, **44**(6): 1729–1739. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.06.21.
- ZHAO Y Y, A KASIM, GAO P W, *et al.* Quantitative Analysis of Urban Expansion and Response Factors in Urumqi City Based on Random Forest Algorithm and Geographical Detector[J]. *Arid Land Geogr*, 2021, **44**(6): 1729–1739. DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2021.06.21.
- [27] 谭雪兰, 蒋凌霄, 安悦, 等. 湖南省传统农区乡村功能时空演变及影响因素研究[J]. *地理科学*, 2021, **41**(12): 2168–2178. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.12.010.
- TAN X L, JIANG L X, AN Y, *et al.* The Spatial-temporal Evolution and Influencing Factors of Rural Functions in Traditional Agricultural Areas in Hunan Province[J]. *Sci Geogr Sin*, 2021, **41**(12): 2168–2178. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2021.12.010.
- [28] 潘梦华, 黄斌, 黎燕宁. 基于核密度和地理探测器的南宁市手足口病空间聚集及影响因素[J]. *中华疾病控制杂志*, 2020, **24**(11): 1269–1274. DOI: 10.16462/j.cnki.zhjbkz.2020.11.006.
- PAN M H, HUANG B, LI Y N. Analysis of Spatial Clustering and Influencing Factors of Hand, Foot, and Mouth Disease in Nanning Based on Nuclear Density and Geodetector[J]. *Chin J Dis Control & Prev*, 2020, **24**(11): 1269–1274. DOI: 10.16462/j.cnki.zhjbkz.2020.11.006.
- [29] 刘欢欢, 刚成诚, 温仲明, 等. 基于结构化植被指数的延河流域土壤侵蚀时空动态分析[J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(5): 1–7. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.05.026.
- LIU H H, GANG C C, WEN Z M, *et al.* Soil Erosion Dynamics Analysis in the Yanhe Basin during 2000–2018 Based on the Structural Vegetation Index[J]. *Res Soil Water Conserv*, 2022, **29**(5): 1–7. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.05.026.
- [30] ODA T, MAKSYUTOV S, ANDRES R J. The Open-source Data Inventory for Anthropogenic Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), Version 2016 (ODIAC2016): A Global, Monthly Fossil-fuel CO<sub>2</sub> Gridded Emission Data Product for Tracer Transport Simulations and Surface Flux Inversions[J]. *Earth Syst Sci Data*, 2018, **10**(1): 87–107. DOI: 10.5194/essd-10-87-2018.
- [31] 郭彦君, 郭文炯. 晋西黄土丘陵区土地利用变化及生态效应分析[J]. *人民黄河*, 2021, **43**(2): 106–111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.02.022.
- GUO Y J, GUO W J. Analysis of Land Use Change and Ecological Effects in the Loess Hilly Region of Western Shanxi Province[J]. *Yellow River*, 2021, **43**(2): 106–111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2021.02.022.
- [32] 段宝玲, 卜玉山. 山西省土地利用动态特征及驱动因素分析[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2018, **38**(3): 43–51. DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.201801004.
- DUAN B L, BU Y S. Analysis of Dynamic Variation and Driving Forces of Land Use in Shanxi Province[J]. *J Shanxi Agric Univ Nat Sci Ed*, 2018, **38**(3): 43–51. DOI: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.201801004.
- [33] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(8): 1243–1254. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, *et al.* Improvement of the Evaluation Method for Ecosystem Service Value Based on Per Unit Area[J]. *J Nat Resour*, 2015, **30**(8): 1243–1254. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001.
- [34] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法: 以渤海湾沿岸为例[J]. *地理研究*, 2012, **31**(10): 1775–1784. DOI: 10.11821/yj2012100004.
- XU L F, XU X G, LUO T, *et al.* Services Based on Land Use: a Case Study of Bohai Rim[J]. *Geogr Res*, 2012, **31**(10): 1775–1784. DOI: 10.11821/yj2012100004.
- [35] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. *地理学报*, 2021, **76**(11): 2797–2813. DOI: 10.11821/dlxb202111014.
- LIU Z T, WANG S J, FANG C L. Spatiotemporal Evolution and Influencing Mechanism of Ecosystem Service Value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Acta Geogr Sin*, 2021, **76**(11): 2797–2813. DOI: 10.11821/dlxb202111014.
- [36] 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 黄河下游地区土地利用和

- 生态系统服务价值的时空演变[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(11): 277-288. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.033.
- ZHANG P Y, GENG W L, YANG D, *et al.* Spatial-temporal Evolution of Land Use and Ecosystem Service Value in the Lower Reaches of the Yellow River Region[J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2020, **36**(11): 277-288. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.033.
- [37] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and Prospective[J]. *Acta Geogr Sin*, 2017, **72**(1): 116-134. DOI: 10.11821/dlxb201701010.
- [38] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 等. 京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(4): 1114-1122. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210269.
- LI K M, WANG X Y, YAO L L, *et al.* Spatio-temporal Change and Driving Factor Analysis of Ecosystem Service Value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *J Environ Eng Technol*, 2022, **12**(4): 1114-1122. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210269.
- [39] 黄木易, 方斌, 岳文泽, 等. 近20a来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J]. 地理研究, 2019, **38**(11): 2790-2803. DOI: 10.11821/dlyj020181075.
- HUANG M Y, FANG B, YUE W Z, *et al.* Spatial Differentiation of Ecosystem Service Values and Its Geographical Detection in Chaohu Basin During 1995-2017[J]. *Geogr Res*, 2019, **38**(11): 2790-2803. DOI: 10.11821/dlyj020181075.