



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

## 《应用生态学报》网络首发论文

题目：山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力  
作者：潘换换, 吴树荣, 姬倩倩, 杜自强, 张红  
DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.004  
收稿日期: 2021-07-20  
网络首发日期: 2021-09-23  
引用格式: 潘换换, 吴树荣, 姬倩倩, 杜自强, 张红. 山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力[J/OL]. 应用生态学报. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.004>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 山西煤田生态系统服务时空格局及驱动力

潘换换<sup>1</sup> 吴树荣<sup>1</sup> 姬倩倩<sup>1</sup> 杜自强<sup>1</sup>✉ 张红<sup>2</sup>( <sup>1</sup>山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; <sup>2</sup>山西大学资源与环境学院, 太原 030006 )

\*通信作者 杜自强, E-mail: duzq@sxu.edu.cn

**摘要** 煤炭对人类经济社会的发展贡献巨大, 其经济效益备受关注, 然而煤田为人类提供的生态系统服务却往往易被忽视。本研究基于山西煤田 1986、2000、2015 年遥感数据、气象数据、土壤数据等, 采用 InVEST 模型估算土壤保持量和产水量, CASA 模型估算植被净初级生产力, RWEQ 模型估算防风固沙, 采用  $k$ -均值聚类分析和地理探测器模型模拟山西煤田生态系统服务的空间格局及影响机制。结果表明: 1986—2015 年, 研究区土壤保持服务、产水服务、植被生产服务和防风固沙服务呈持续增长态势。土壤保持服务高值区主要集中在河东煤田北部和沁水煤田东北部, 低值区分布在大同煤田西南部边缘; 产水服务高值区主要集中在沁水煤田东北部, 低值区分布在西山煤田和沁水煤田西北部; 植被生产服务高值区主要集中在沁水煤田东南部, 低值区分布在大同煤田、宁武煤田、西山煤田和河东煤田北部; 防风固沙服务低值区和高值区在研究区中的位置不固定。生态系统服务簇可分为 4 类, 第一类属于土壤保持服务簇, 主要分布在宁武煤田北部、河东煤田北部和沁水煤田北部; 第二类属于产水服务簇, 主要分布在霍西煤田和沁水煤田南部等地区; 第三类属于植被生产服务簇, 主要分布在沁水煤田局部; 第四类属于防风固沙服务簇, 主要分布在河东煤田南部和沁水煤田局部。土壤保持服务受气温、数字高程模型(DEM)、工业产值影响较大,  $q$  值分别为 0.5、0.3、0.2; 产水服务受降水、气温、DEM 影响较大,  $q$  值分别为 0.8、0.3、0.2; 植被生产服务的工业产值、降水、气温  $q$  值分别为 0.7、0.6、0.2; 防风固沙服务的主要影响因素有降水、气温和 DEM,  $q$  值分别为 0.7、0.3、0.3。煤田生态系统服务的空间分布及多种生态系统服务之间的关系与自然和人为因素紧密相关, 因此, 保持自然和人为因子与生态服务之间良好的协调关系, 有助于为煤田生态系统可持续发展、土地复垦与生态重建及管理政策的制定提供科学依据。

**关键词** 生态系统服务; 簇; 驱动力; 时空格局; 煤田

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.004

## Spatio-temporal pattern and driving forces of ecosystem services in coalfields of Shanxi Province, China

PAN Huan-huan<sup>1</sup>, WU Shu-rong<sup>1</sup>, JI Qian-qian<sup>1</sup>, DU Zi-qiang<sup>1</sup>✉, ZHANG Hong<sup>2</sup>(<sup>1</sup>Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; <sup>2</sup>College of Resource and Environment, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract** Although coal has made a huge contribution to the development of the economy and society and its economic benefits have often attracted much attention, little research has focused on the ecosystem services provided by coalfields for

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目(U1810101,41871193)、山西省研究生教育创新项目(2020SY035)和山西省高等学校“服务产业创新学科群建设计划”项目(20181401)资助

作者简介: 潘换换, 女, 1994 年生, 博士研究生。主要从事生态系统服务与人类福祉方面的研究。E-mail: phhsxdx@163.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation (U1810101, 41871193), the Shanxi Graduate Education Innovation Project (2020SY035), and the "Service Industry Innovation Discipline Group Construction Plan" of Colleges and Universities in Shanxi Province (20181401).

网络首发时间: 2021-09-23 14:51:38 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20210922.1616.001.html>

humans. Based on remote sensing data, meteorological data, and soil data in Shanxi coalfields during 1986, 2000, and 2015, this study estimated soil conservation and water yield using the InVEST model, assessed the net primary productivity of vegetation using the CASA model, and estimated sand fixation using the RWEQ model. Further, this study simulated the spatial patterns of ecosystem services (ESs) using the  $k$ -means cluster analysis method and analyzed the influence factors of ESs using the Geodetector model in Shanxi coalfield areas. The results showed that soil conservation service, water yield service, and sand fixation service increased continuously. The high-value area of soil conservation service was mainly concentrated in the north of Hedong coalfield and the northeast of Qinshui coalfield, and the low-value area was distributed in the southwestern edge of Datong coalfield; the high-value area of water yield service was mainly concentrated in the northeast of Qinshui coalfield, and the low-value area was distributed in the northeast of Qinshui coalfield, Xishan coalfield and northwestern Qinshui coalfield; the high-value area for vegetation production service was mainly concentrated in the southeast of Qinshui coalfield, and the low-value area was distributed in Datong coalfield, Ningwu coalfield, Xishan coalfield, and northern Hedong coalfield; the distribution of low- and high-value areas of sand fixation service were unfixed. Ecosystem service bundles were divided into four categories. The first category belonged to soil conservation service bundle, mainly distributed in the northern Ningwu coalfield, the northern Hedong coalfield, and the northern Qinshui coalfield. The second was the water yield service bundle, mainly distributed in Huoxi coalfield and southern Qinshui coalfield. The third category belonged to vegetation production service bundle, mainly distributed in parts of Qinshui coalfield. The fourth category belonged to sand fixation service bundle, mainly distributed in the southern part of Hedong coalfield and Qinshui coalfield. Soil conservation service was greatly affected by temperature, digital elevation model (DEM), and industrial output value, with  $q$  values of 0.5, 0.3, and 0.2, respectively. Water yield service was greatly affected by precipitation, temperature, and DEM, with  $q$  values of 0.8, 0.3, and 0.2, respectively. The industrial output value, precipitation, and temperature  $q$  values of vegetation production service were 0.7, 0.6, and 0.2, respectively. The main influencing factors of sand fixation service were precipitation, temperature, and DEM, and the  $q$  values were 0.7, 0.3, and 0.3, respectively. The spatial distribution of coalfields ESs and the relationship between multiple ESs were closely related to natural and human factors. Therefore, maintaining the coordination relationship between natural-human factors and ecological services would be helpful to the management of the land reclamation, ecological reconstruction, and the sustainable development of the coalfields ecosystem.

**Key words** ecosystem services; bundles; driving forces; spatio-temporal pattern; coalfields.

生态系统服务是生态系统满足人类生存与发展的各种条件, 1970 年左右首次作为一个独立的概念被提出。1997 年, Daily<sup>[1]</sup>和 Costanza 等<sup>[2]</sup>对其定义、分类、估算等进行深入研究, 从此生态系统服务的科学含义在学术方面相对明确, 迄今为止其在生态学和地理学方面也是颇具研究价值的重大成果。20 世纪 80 年代, 有关生态系统服务的概念、方法开始引入国内, 生态系统服务功能研究得到了国内学者的广泛关注。

生态系统服务的供需及空间格局等方面的研究一直以来备受国内外研究者关注。比如, Orsi 等<sup>[3]</sup>通过对整个欧盟主要森林生态系统服务的供水、栖息地保护、气候调节等生态系统服务的热点和其协同效应和权衡效应进行了空间格局研究并发现其分布规律。汪东川等<sup>[4]</sup>对京津冀都市圈 202 个县的食物、蔬菜、水果、碳储量、水、土、沙等生态系统的空间分布格局进行了研究并探索空间关系。王敏等<sup>[5]</sup>对宁德地区土壤保持的空间格局及导致其分布格局的原因进行分析。柳冬青等<sup>[6]</sup>在甘肃白龙江流域生态系统基于 InVEST 模型和地理探测器等方法对土壤保持功能时空变化及其原因进行分析, 结果表明流域生态系统土壤保持功能空间格局变化不大。生态系统服务簇的空间格局研究可以有效识别生态系统各功能区。比如, Zhao 等<sup>[7]</sup>对中国珠江三角洲地区的 8 个生态系统服务基于  $k$ -means 聚类识别生态系统服务簇, 明确了供应、文化、调节等服务区; 谢敏等<sup>[8]</sup>基于生态系统服务簇将陕西省划分为 5 个不同功能的生态系统区。

生态系统服务产生扰动的原因主要是气候、人为、社会经济等多种因素<sup>[9]</sup>。气候因素主要包括生态系统的地理分区差异、气候条件等; 人为因素包括人类对生态系统服务的干预和利用等, 如土地利用结构和土地利用强度等; 社会经济因素包括人口数量、工业发展等。吕乐婷等<sup>[10]</sup>基于 InVEST 模型定量研究 1980—2015 年大连市产水量的时空分布, 发现研究区产水量的变化是气候变化和土地利用共同作用的结果。吴瑞等<sup>[11]</sup>基于 InVEST 模型对官厅水库流域产水服务时空变化进行探究, 发现导致其发生改变的主要原因是气候变化和土地利用变化。

虽然目前对生态系统服务的研究已经较为全面, 涉及到的生态系统类型也较为丰富, 但是对于煤田这一特殊领域的研究尚相对匮乏, 而且对其变化的驱动力探讨还不够深入, 利用时期动态数据的研

究成果则更为鲜见。煤田生态系统由于采矿活动受到巨大的破坏,例如地表沉陷影响人类生产、生活,并且使得动植物也失去其赖以生存的环境;煤田开垦还会导致森林破坏、土壤流失、地下水污染、大气污染等,这些活动直接影响土壤保持、产水服务、碳固定以及防风固沙等诸多生态系统服务功能;此外,采矿等活动还可以通过森林碳储量的消耗和发电厂的燃煤,将原本是碳汇的地区转变为碳源,间接影响了煤田生态系统服务。由于煤炭开采造成严重破坏的煤田生态系统有着巨大的潜在价值,其涵养水源、保持水土、水体及土壤等生态功能尤为显著<sup>[12-13]</sup>,对其驱动因素的深入理解还需进行更深层次的研究,因此对煤田生态系统全面而深入的研究亟需开展。本研究通过收集山西省煤田区1986、2000和2015年的影像数据、气象数据和土壤数据,对山西煤田生态系统的土壤保持、产水、植被生产、防风固沙4种生态系统服务的时空分布及其影响因素进行定量分析和评价,以期对煤田经济与环境发展、土地利用复垦决策等提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省煤田区(34°34'—40°43' N, 110°14'—114°33' E)(图1)。属于典型的大陆性气候,年均气温4~13℃,年降水量400~600 mm,不同地理分布变化较大,年内分布不均匀,大部分地区年蒸发量为1500~2300 mm,日照比较充足。山西省煤炭资源丰富,成煤期前的构造格局对煤田的空间分布影响较大,但成煤期后的改造对其影响更大,各大煤田主要形成在地质构造凹陷或向斜盆地,而拗陷或向斜盆地边缘的隆起区和断裂又恰好形成了各煤田的天然分界。煤田总面积53800 km<sup>2</sup>。其中,位于最北部的大同煤田总面积1800 km<sup>2</sup>,是山西出口煤量最多的煤田;宁武煤田总面积约3500 km<sup>2</sup>,出口煤量排第二位;河东煤田紧挨黄河流域,总面积16900 km<sup>2</sup>,以产焦煤为主;西山煤田总面积1600 km<sup>2</sup>,在六大煤田中面积最小;霍西煤田位于山西省西南部,总面积3900 km<sup>2</sup>;沁水煤田以其近30000 km<sup>2</sup>的总面积位于六大煤田面积之首<sup>[12]</sup>。

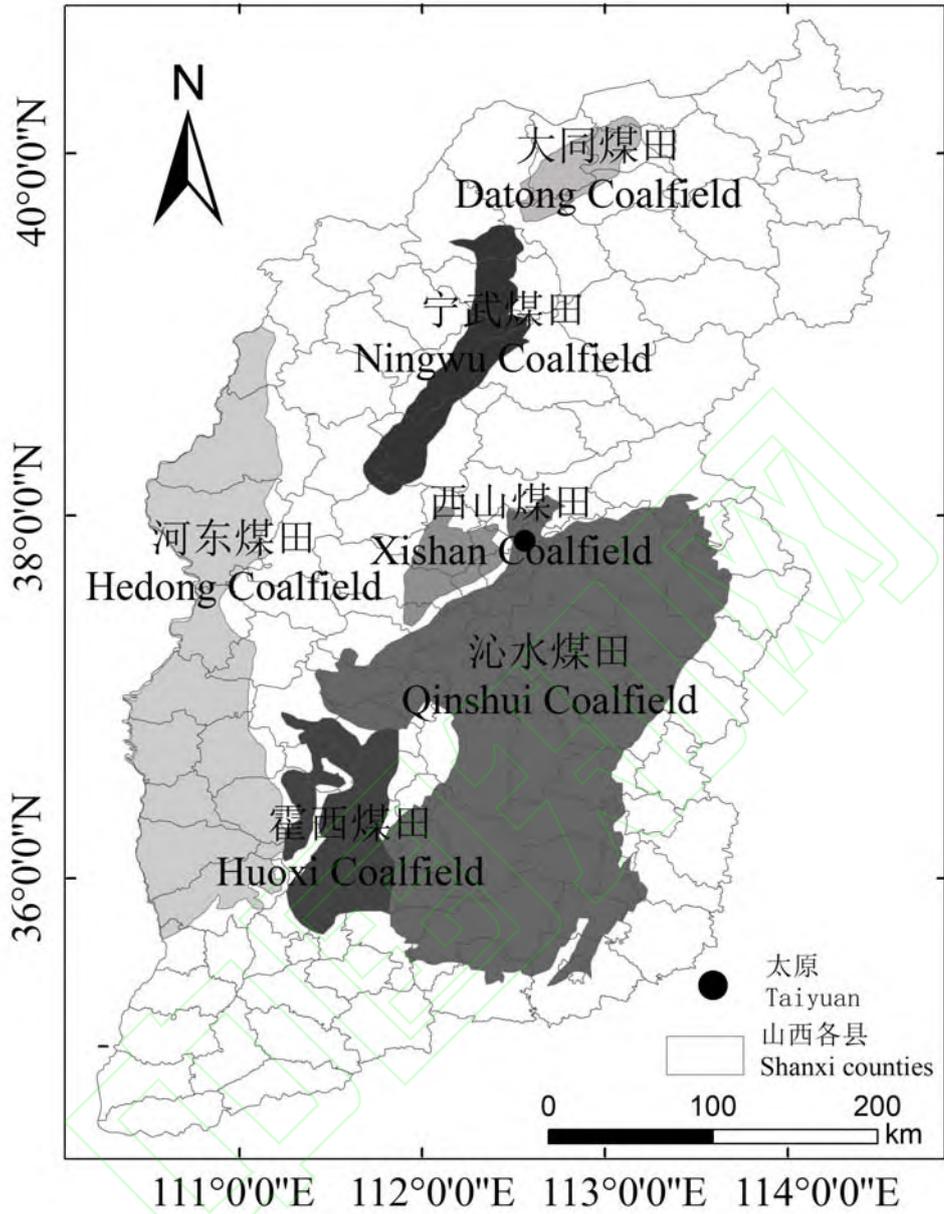


图1 研究区位置  
Fig.1 Location of the research area.

### 1.2 数据来源

本研究使用多源数据集估算矿区生态系统服务，数据来源及处理方法见表1。

表1 数据来源及处理方法<sup>[12]</sup>  
Table 1 Data sources and processing methods<sup>[12]</sup>

数据类型 Data type	数据来源 Data source	分辨率 Resolutio (m)	年份 Year	处理方法 Processing method
DEM 数据 DEM data	中国科学院资源环境科学与数据中心 Resource and environment science and data center	30	2000	ArcGIS 裁剪填洼流向分析与修正 Cutting, filling, flow direction analysis, and correction in ArcGIS
气象数据 Meteorological data	中国气象数据共享服务网 China Meteorological data sharing service network	30	1986、 2015	ArcGIS 反距离权重插值 Inverse distance weighted interpolation in ArcGIS
土壤数据 Soil data	寒区旱区科学数据中心 Cold and Arid Regions Science Data Center	1000	2009	ArcGIS 提取属性计算 Extract by attributes in ArcGIS
土地利用数据 Land use data	中国科学院资源环境科学与数据中心 Resource and environment science and data center	30	1986、 2000、 2015	ArcGIS 提取、裁剪 Extraction and clipping by ArcGIS
社会经济数据 Socio-economic data	山西统计年鉴 Shanxi statistical yearbook	/	1986、 2000、 2015	ArcGIS 空间化 Spatializing by ArcGIS

DEM: 数字高程模型 Digital elevation model.

### 1.3 生态系统服务评估

#### 1.3.1 土壤保持服务

土壤保持服务指地表植被对土壤侵蚀的减少功能。它基于 InVEST 模型进行估算。计算公式为<sup>[13]</sup>:

$$\Delta USLE = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$$

式中:  $\Delta USLE$  是年均土壤保持量 ( $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$ );  $R$  是降水侵蚀力因子 ( $MJ \cdot mm \cdot hm^{-2}$ );  $K$  为土壤可侵性因子 ( $t \cdot hm^{-2} \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$ );  $LS$  为坡长与坡度因子;  $C$  为植被与管理因子;  $P$  为土壤保持措施因子。

#### 1.3.2 产水服务

单位面积产水量指某一区域在单位时段内单位面积所产生的水量, 在气候调节和水资源供给等方面作用显著。InVEST 模型产水量以栅格为单元定量估算不同景观类型的水源供给能力。计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$Y_x = \left( 1 - \frac{AET_{xy}}{P_x} \right) \times P_x$$

式中:  $Y_x$  为单位栅格  $x$  的年产水量 ( $mm$ );  $P_x$  为单位栅格  $x$  的年降水量 ( $mm$ );  $AET_j$  为单位栅格  $j$  的年实际蒸散量 ( $mm$ )。

#### 1.3.3 植被生产服务

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是用来表示植被光合作用产生供自身生长发育的有机物净含量的多少。计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t)$$

式中:  $APAR(x, t)$  表示  $t$  月像元  $x$  处吸收的光合有效辐射 ( $MJ \cdot m^{-2}$ );  $\varepsilon(x, t)$  表示  $t$  月像元  $x$  处实际光能利用率 ( $g C \cdot MJ^{-1}$ )。

#### 1.3.4 防风固沙服务

防风固沙服务是生态系统中植被对风沙的阻挡作用。基于 RWEQ 模型进行估算, 通过潜在固沙量和实际固沙量之差估算固定沙粒的重量<sup>[16]</sup>, 计算公式如下:

$$SR = \frac{2z}{S_r^2} Q_{r\max} \cdot e^{-(z/S_r)^2} - \frac{2z}{S^2} Q_{\max} \cdot e^{-(z/S)^2}$$

[1] Wang JF, Li XH, Christakos G, Liao YL, Zhang T, Gu X & Zheng XY. 2010. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China.

International Journal of Geographical Information Science 24(1): 107-127.

[2] Wang JF, Zhang TL, Fu BJ. 2016. A measure of spatial stratified heterogeneity. *Ecological Indicators* 67: 250-256. 应用生态学报

[3] 王劲峰, 徐成东. 2017. 地理探测器：原理与展望. *地理学报* 72(1): 116-134.

[Wang JF, Xu CD. 2017. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica* 72(1): 116-134.]  
式中： $SR$  为单位面积固沙量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )； $Q_{\max}$  表示潜在风力的最大输沙能力 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )； $S_r$  表示潜在关键地块长度 (m)； $Q_{\max}$  表示风力的最大输沙能力 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$ )； $S$  表示关键地块长度 (m)； $z$  表示下风向距离 (m)，本研究取 50 m。

### 1.3.5 生态系统服务簇

生态系统服务簇指多重生态系统服务在时间或者空间上的集聚，不仅可以系统了解生态系统服务的空间分布规律，还可以发现其主导服务。该方法的原理是将单位空间单元分配给距离最近均值的类中，直到所有的空间单元均分配到距离最小的类中为止<sup>[17]</sup>。

### 1.3.6 地理探测器模型

基于地理探测器分析生态系统服务空间分布的主要影响因素，选取 6 个密切相关的自然和社会因素，包括气温、降水、数字高程模型 (DEM)、人口数量、工业产值和煤炭产量，各因子决定力用  $q$  值 (0~1) 表示， $q$  值越大，表明自变量对因变量的影响力越大。计算公式如下<sup>[18-19]</sup>：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}$$

式中： $N_h$  和  $\sigma_h^2$  分别为类  $h$  和整体的单元数和方差； $N$  和  $\sigma^2$  分别为研究区整体的单元数和方差； $q$  值为因子 ( $X$ ) 对生态系统服务 ( $Y$ ) 的解释力。

## 2 结果与分析

### 2.1 山西煤田生态系统服务的时空变化

1986、2000、2015 年研究区年均土壤保持量有一定程度的波动 (图 2)，分别为 148.3、177.6、187.7  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，呈持续增大的态势。1986 年，土壤保持服务高值区在研究区中东部和西北部，包括沁水煤田东北部和河东煤田北部，低值区在研究区的河东煤田南部、霍西煤田、西山煤田和沁水煤田大部；2000 年，土壤保持服务高值区分布在研究区东部，主要位于沁水煤田，低值区主要分布在宁武煤田南部、河东煤田南部、霍西煤田、西山煤田和沁水煤田西部；2015 年，土壤保持服务高值区主要位于研究区中北部，包括大同煤田南部、宁武煤田北部、河东煤田北部和沁水煤田东北部；低值区主要集中于研究区西南部，包括河东煤田南部和沁水煤田西南部。

1986、2000、2015 年研究区年均产水量有一定波动，分别为 75.5、115.7、130.2  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，呈持续增大的态势。1986 年，产水服务高值区很少，主要分布在研究区东南部，包括沁水煤田东南部；低值区占到研究区面积的 93.4%。2000 年，产水服务高值区主要分布于研究区东部和西部，大同煤田和宁武煤田大部、西山煤田大部的服务水平较低。2015 年，产水服务高值区零星分布在河东煤田北部和沁水煤田东北部和东南部，河东煤田、霍西煤田、西山煤田等服务水平较低。

1986、2000、2015 年研究区植被生产服务年均值分别为 425.3、475.4、565.9  $\text{g}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$ ，整体呈持续增长态势。1986 年，植被生产服务在研究区东南部水平较高，在研究区北部的大同煤田、宁武煤田、中部的西山煤田等地较低。2000 年，在沁水煤田值较高，NPP 值较低的区域零星分布于研究区大同煤田和宁武煤田、河东煤田等区域。2015 年，NPP 高值区主要零星分布于沁水煤田中部和东北部，低值区很少，主要分布在研究区北部大同煤田的小部分区域。

1986、2000、2015 年研究区单位面积防风固沙量呈持续增长趋势，分别为 40.7、52.1、58.8  $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。1986 年，防风固沙服务在大同煤田、宁武煤田等区域较高，在研究区东南部的沁水煤田南部和东北部等地较低。2000 年，防风固沙服务高值区很少，低值区主要位于大同煤田、宁武煤田以及研究区西部的河东煤田中部和北部；2015 年，防风固沙服务在研究区北部的大同煤田大部、宁武煤田局部、西山煤田局部等水平较高，在河东煤田南部、霍西煤田、沁水煤田中部和南部局部区域固沙水平较低。整体来看，1986—2015 年来各服务平均有所提升。

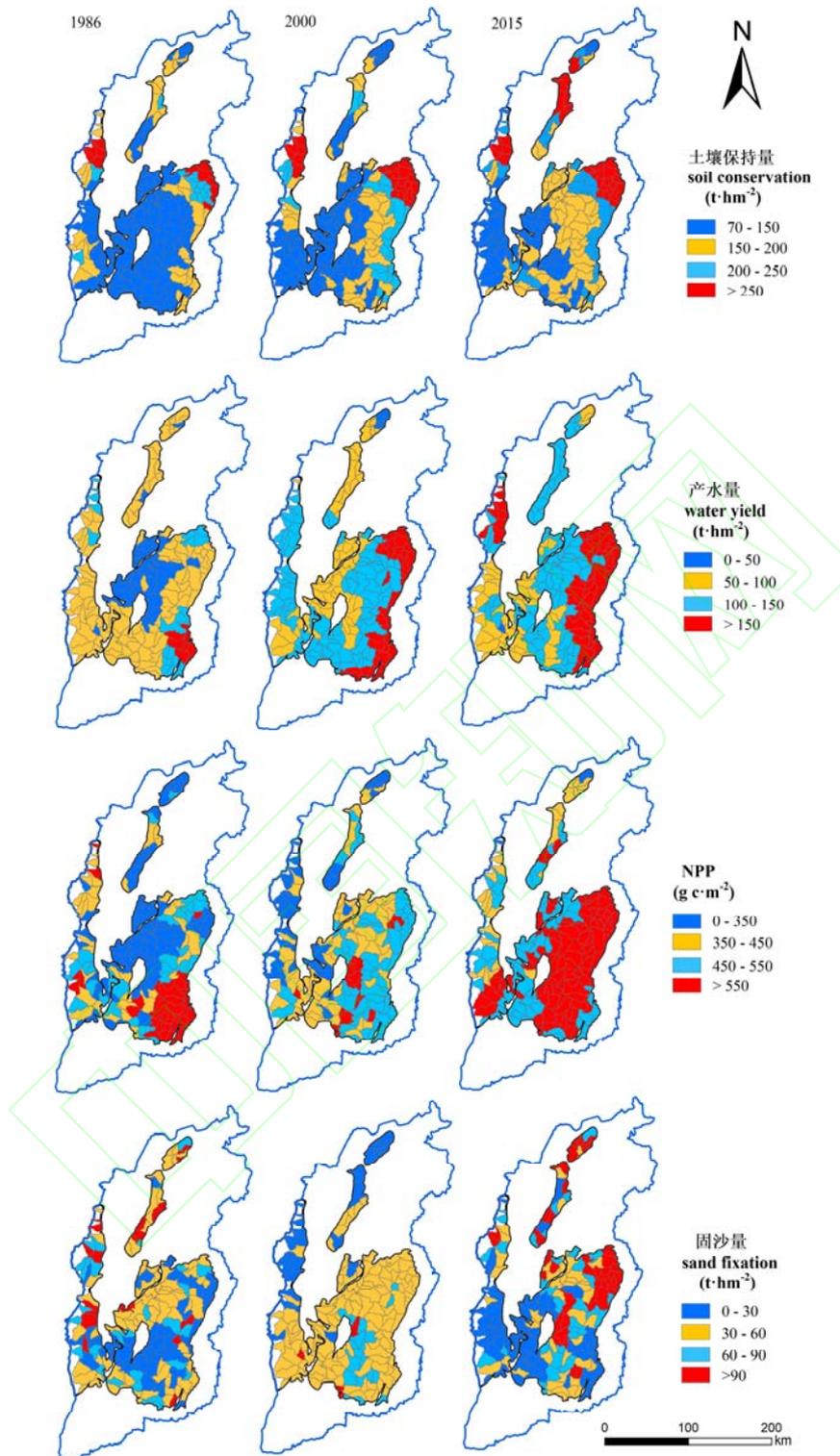


图2 1986、2000、2015年山西煤田生态系统服务的空间分布  
Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services in 1986, 2000 and 2015.

NPP: 植被净初级生产力 Net primary productivity.

## 2.2 山西煤田生态系统服务簇及其空间分布

本研究经  $k$ -均值聚类方法运算最终得到 4 种生态系统服务簇。由图 3 可以看出, 1986 年, 第一

类生态系统服务簇占研究区面积的 17.2%，该服务簇主要分布在研究区的中北部，包括宁武煤田中北部、河东煤田北部和沁水煤田东北部，其中，土壤保持服务较为突出。2000 年，第一类服务簇占研究区面积的 33.8%，在 4 类服务簇中面积占比最大，主要位于研究区北部、中部和西南部的宁武煤田、西山煤田、霍西煤田南部等，该服务簇各服务均低于研究区平均水平。2015 年，第一类服务簇占研究区总面积的 40.4%，比 1986 年面积大大增加，集中分布于研究区北部的大同煤田、宁武煤田等，虽然相较于 1986 年土壤保持服务水平有所下降，但整体土壤保持服务功能在第一类服务簇中较优。

1986 年，第二类服务簇占研究区面积的 4.6%，在 4 类服务簇中面积占比最小，位于研究区东南部。2000 年，第二类服务簇占研究区面积的 26.5%，主要位于研究区东部和西北部，包括河东煤田北部和沁水煤田东部，其中，产水量和土壤保持最高，远超出研究区平均水平。2015 年，第二类服务簇占研究区总面积的 29.1%，相比 1986 年面积有所增加，主要集中分布于河东煤田中南部局部、霍西煤田大部等，该服务簇中产水量在 4 类服务簇中最高，属于产水服务簇。

1986 年，第三类服务簇占研究区面积的 25.8%，主要位于研究区西部和东南部，包括河东煤田南部、沁水煤田东南部，NPP 服务较高。2000 年，第三类服务簇占研究区面积的 28.5%，主要位于研究区北部、西南部的大同煤田、宁武煤田、河东煤田等，该服务簇在 4 类服务簇中整体水平最低，各服务均远低于研究区平均水平。2015 年，第三类服务簇占研究区总面积的 21.2%，相比 1986 年面积小幅下降，零散分布于研究区中南部，包括河东煤田中部、西山煤田西南部、沁水煤田北部和南部局部。该服务簇中 NPP 在 4 类服务簇中最高，属于植被生产服务簇。

1986 年，第四类服务簇占研究区面积的 52.3%，在 4 类服务簇中面积占比最大，主要位于研究区中南部和北部局部地区，包括大同煤田、宁武煤田中南部、河东煤田中部和南部、西山煤田、霍西煤田和沁水煤田大部，该服务簇的各服务水平均较低。2000 年，第四类服务簇占研究区面积的 11.3%，主要位于沁水煤田南部，该服务簇中防风固沙远高于研究区平均水平。2015 年，第四类服务簇占研究区面积的 9.3%，相比 1986 年面积占比大幅下降，零星分布于河东煤田、霍西煤田等，相较于 1986 年，该服务簇中防风固沙功能大为提升，属于防风固沙服务簇。

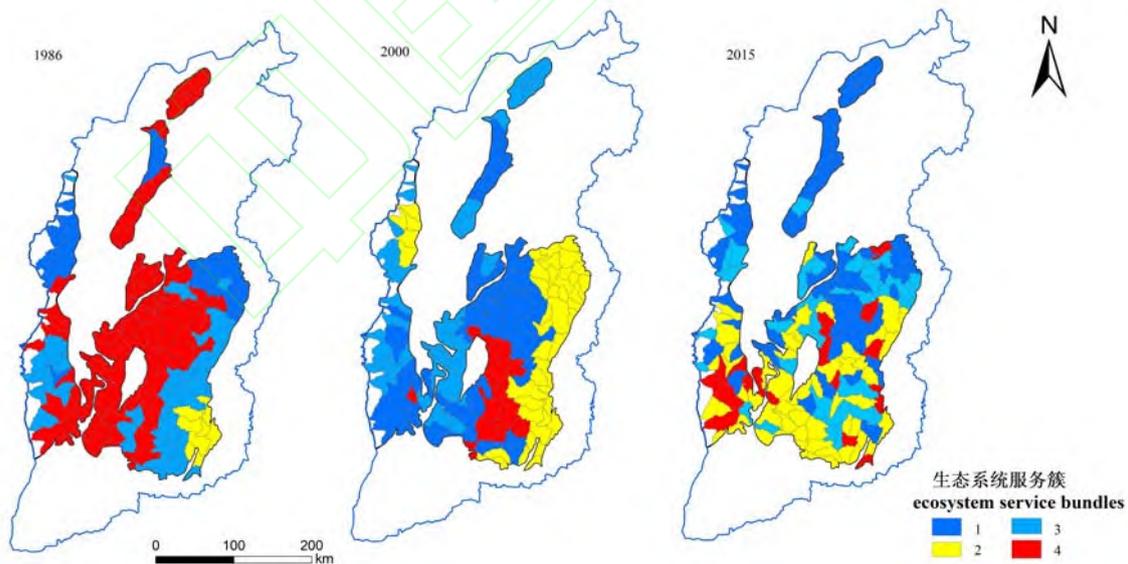


图3 1986、2000、2015年山西煤田生态系统服务簇的空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service bundles in 1986, 2000 and 2015.

- 1) 土壤保持服务簇 Soil conservation service bundle; 2) 产水服务簇 Water yield service bundle; 3) 植被生产服务簇 Vegetation production service bundle; 4) 防风固沙服务簇 Sand fixation service bundle.

### 2.3 山西煤田生态系统服务的影响因素

由图 4 可以看出, 1986 年, 研究区土壤保持服务中, 煤炭产量的  $q$  值最大, 为 0.3, 其次是降水 (0.2), 这 6 种影响因子的  $q$  值均未通过显著性检验; 产水服务的显著影响因子为气温和 DEM,  $q$  值分别为 0.8、0.2; 植被生产服务的显著影响因子为气温、降水和 DEM,  $q$  值分别为 0.6、0.2、0.2; 防风固沙服务的显著影响因子为气温、降水、DEM 和煤炭产量,  $q$  值分别为 0.7、0.3、0.2、0.15。2000 年, 降水对土壤保持服务的影响最大, 其  $q$  值为 0.5, 这 6 种影响因子的  $q$  值均未通过显著性检验; 产水服务的显著影响因子为降水、煤炭产量和气温,  $q$  值分别为 0.7、0.3、0.2; 植被生产服务的主要影响因子为气温、降水, 这 6 种影响因子的  $q$  值均未通过显著性检验; 防风固沙服务的显著影响因子为气温、降水,  $q$  值分别为 0.3、0.2。2015 年, 土壤保持服务的显著影响因子为降水、工业产值,  $q$  值分别为 0.5、0.2; 产水服务的显著影响因子为降水,  $q$  值为 0.3; 植被生产服务的显著影响因子为工业产值、降水、气温,  $q$  值分别为 0.7、0.2、0.2; 防风固沙服务的显著影响因子为 DEM、气温和工业产值,  $q$  值分别为 0.3、0.2、0.1。

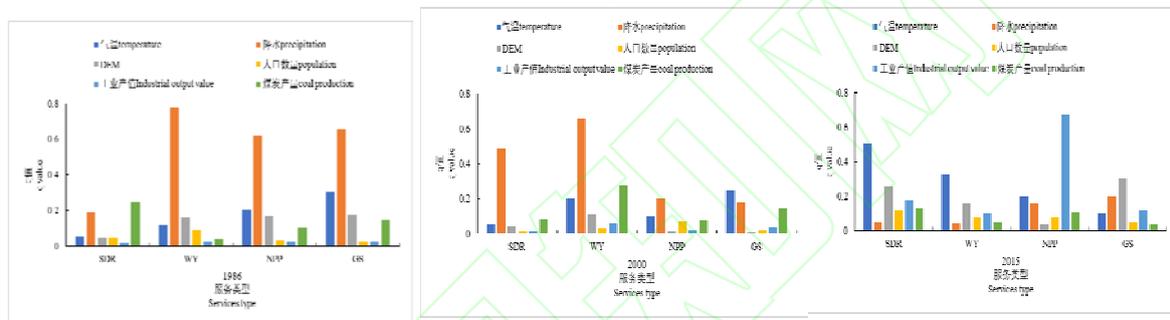


图 4 1986、2000 和 2015 年山西煤田生态系统服务  $q$  值  
Fig. 4  $q$  value of ecosystem services in 1986, 2000 and 2015.

SDR: 土壤保持服务 Soil conservation service; WY: 产水服务 Water yield service; NPP: 植被生产服务 Vegetation production service; GS: 防风固沙服务 Sand fixation service; DEM: 数字高程模型 Digital elevation model.

## 3 讨 论

在大尺度上, 自然因素和人为因素是影响生态系统服务时空变化的主要原因。自然因素主要是气候条件的改变对生物的生长环境和内部发育产生影响, 从而对生态系统功能产生影响<sup>[20-22]</sup>。人为因素主要通过人为干扰影响土地利用结构和土地利用强度, 从根本上改变生态系统的组成和结构, 从而引起物质循环和其他生物物理过程的改变, 最终对生态系统服务的供应水平产生影响。

从自然因素来看, 土壤保持服务受气温影响较大, 这与 Xiao 等<sup>[23]</sup>的研究结果一致, 气温主要通过蒸散发改变土壤含水量来对生态系统中植被生长的开始和持续时间产生影响, 植被生长良好的地区通常具有较强的生产力, 可以有效地减少水土流失, 但是, 植被覆盖度的提高会引起降雨的增多, 一旦降雨量超过阈值, 土壤保持功能就会下降<sup>[24]</sup>。产水服务由主要受气温、DEM 影响转为主要受降水影响, 这与孙小银等<sup>[25]</sup>的研究结果相似, 降水可以通过直接供给水分决定产水量的高低, 而且研究区降水量逐年提高, 水热条件逐年向好, 降水贡献日益凸显。植被生产服务由气温、降水和 DEM 为主要影响因素转为气温和降水为主要影响因素, 这与 Wang 等<sup>[26]</sup>的研究结果一致, 这是由于水热条件直接影响植被生长, DEM 通过间接影响植被生长环境条件包括植被生长的土壤条件、气候条件等影响 NPP, 但随着气温和降水条件的改善, DEM 的影响相对减弱。防风固沙服务由主要受气温和降水影响转变为气温和 DEM, 气温通过影响地表覆被以及地表湿度改变沙形成条件以及固沙条件来影响固沙量, 而 DEM 可以通过地形高度影响风速从而间接控制固沙量<sup>[27]</sup>, 因此也是影响固沙量的主要原

因。

从人为因素来看, 土壤保持服务由受煤炭产量影响较大转为受工业产值影响为主, 1986 年煤炭开采处于初步阶段, 其他工业产业发展相对较弱, 2015 年国家重视可持续发展, 煤炭开采受到一定控制, 工业产业蓬勃发展, 因此工业产值为主要影响因素。产水量受煤炭产量影响较大, 由于煤炭开采破坏地表土层和植被, 而且煤炭加工产生有毒气体排放到大气中影响降水条件, 直接影响产水量。植被生产服务受工业产值影响较大, 其主要通过人为工业活动包括各种资源开采、制造业等直接影响土地利用方式, 破坏土层结构, 影响地下水的分布与质量, 对植被生长负面作用较大, 随着工业水平的发展, 工业产值逐年提高, 工业产值影响越来越突出。防风固沙服务由煤炭产量为主要影响因素转为工业产值, 这也与 2015 年国家对煤炭资源的合理开发有关, 而工业发展却在逐年提升, 因此到 2015 年工业产值为主要影响因素。

关于生态系统服务簇, 它的空间表现对应于生态系统服务在不同经度、纬度、气候或社会经济条件下的相互作用, 在这种相互关系中, 服务簇与特定的景观格局有一定关联性<sup>[28]</sup>。本研究土壤保持服务簇在研究区面积逐年增加且向东北部转移, 这是由于西南部处于黄河流域, 土壤侵蚀较为严重, 而且东北部工业活动相对较少; 产水量服务簇主要向研究区南部逐年转移并且扩大, 研究区南部降水充沛, 降水量逐年提高, 人为干扰相对较小, 因此产水量较高; 植被生产服务簇主要聚集在研究区中南部, 这与其良好的水热条件密不可分, 由于水热条件适宜, 植被生长茂盛, 植被覆盖度较高, 人为工业活动对植被破坏也相对较小, 因此 NPP 较高; 防风固沙服务簇面积逐年减少且向中南部分散, 这主要由于该区域工业活动对土地破坏较小, 特别是退耕还林工程实施以来, 人类的生态建设活动使得其防风固沙能力提高。

总之, 有效的生态系统服务管理需要深入理解生态系统服务权衡和协同作用的机制, 聚类方法可以快速识别由相似的社会生态因素决定的具有相似生态系统服务聚集的区域, 从而能够更好地针对不同区域制定特定的可持续性政策, 然而在对土地利用管理做出任何最终决定之前, 还需要考虑到不同生态系统服务簇内部的差异以及社会生态条件<sup>[29]</sup>。而且, 自然条件和社会条件与生态系统服务功能之间存在着相互影响和制约的关系, 它们通过影响自然环境条件和改变土地利用方式等间接干扰生态系统服务功能, 因此要保持良好的人地耦合状态。

## 4 结 论

本研究系统分析了山西煤田 1986、2000、2015 年 4 种生态系统服务的空间格局, 运用  $k$ -均值聚类分析和地理探测器等方法了解了生态系统服务的空间分布规律、明确了生态系统服务各功能区, 以及自然和社会因素对煤田生态系统服务的影响。受自然和人为因素交互影响, 各服务的空间分布存在异质性; 在生态系统服务功能簇方面, 第一类服务簇属于土壤保持服务簇, 第二类服务簇属于产水服务簇, 第三类服务簇属于植被生产服务簇, 第四类生态系统服务簇属于防风固沙服务簇。面向煤田生态系统管理应结合自然和社会因素合理开发利用土地资源, 使人类发展与土地资源保持良好的耦合状态, 这样才有助于煤田的可持续发展。此外, 本研究只分析了煤田有限数量的生态系统服务, 在大尺度上基于模型评估结果也可能存在一定误差, 影响因子的选取还不够全面, 特别是采矿等人为活动因子还不够全面, 尤其需要进一步厘清矿业活动等人为因素对煤田生态系统的相对作用, 强化研究结果对煤炭矿区生态系统维持与可持续发展的指导意义。

责任编辑 杨 弘

## 参考文献

- [1] Daily GC. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997
- [2] Costanza R, de Groot R, Sutton P, *et al.* Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158
- [3] Orsi F, Ciolli M, Primmer E, *et al.* Mapping hotspots and bundles of forest ecosystem services across the European Union. *Land Use Policy*, 2020, 99, doi: 10.1016/j.landusepol.2020.104840
- [4] 汪东川, 孙志超, 孙然好, 等. 京津冀城市群生态系统服务价值的时空动态演变. *生态环境学报*, 2019, 28(7): 1285-1296 [Wang D-C, Sun Z-C, Sun R-H, *et al.* Spatial-temporal dynamic evolution of ecosystem service value in beijing-tianjin-hebei

- urban agglomeration. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28 (7): 1285-1296]
- [5] 王敏, 阮俊杰, 姚佳. 基于 InVEST 模型的生态系统土壤保持功能研究——以福建宁德为例. *水土保持研究*, 2014, 21 (4): 184-189 [Wang M, Ruan J-J, Yao J. Study on soil conservation service of ecosystem based on InVEST model: A case study of Ningde City, Fujian Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21 (4): 184-189]
- [6] 柳冬青, 巩杰, 张金茜. 甘肃白龙江流域生态系统土壤保持功能时空变异及其影响因子. *水土保持研究*. 2018, 25 (4): 98-103 [Liu D-Q, Gong J, Zhang J-Q. Spatiotemporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Balongjiang watershed in Gansu Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (4): 98-103]
- [7] Zhao MY, Peng J, Liu YX, et al. Mapping Watershed-Level ecosystem service bundles in the Pearl River Delta, China. *Ecological Economics*, 2018, 152: 106-117
- [8] 谢敏, 熊向阳. 基于生态系统服务簇的陕西省生态功能区划分. *北方园艺*, 2019 (20): 92-98 [Xie M, Xiong X-Y. Divisions of ecological region based on ecosystem bundles in Shaanxi Province. *Northern Horticulture*, 2019 (20): 92-98]
- [9] Zhang HY, Fan JW, Cao W, et al. Changes in multiple ecosystem services between 2000 and 2013 and their driving factors in the Grazing Withdrawal Program, China. *Ecological Engineering*, 2018, 116: 67-79
- [10] 吕乐婷, 任甜甜, 李赛赛, 等. 基于 InVEST 模型的大连市产水量时空变化分析. *水土保持通报*, 2019, 39 (4): 144-150 [Lyu L-T, Ren T-T, Li S-S, et al. Analysis on spatio-temporal variation of water supply in Dalian City based on InVEST model. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (4): 144-150]
- [11] 吴瑞, 刘桂环, 文一惠. 基于 InVEST 模型的官厅水库流域产水和水质净化服务时空变化. *环境科学研究*. 2017, 30 (3): 406-414 [Wu R, Liu G-H, Wen Y-H. Spatiotemporal variations of water yield and water quality purification service functions in guanting reservoir basin based on InVEST model. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30 (3): 406-414]
- [12] 潘换换, 吴树荣, 杨琪雪, 等. 山西煤田生态系统服务热(冷)点时空格局 [EB/OL]. (2021-06-04) [2021-06-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210604.0840.002.htm> [Pan H-H, Wu S-R, Yang Q-X, et al. Spatiotemporal Pattern of Hotspots (coldspots) of Ecosystem Services in Coalfields of Shanxi Province [EB/OL]. (2021-06-04) [2021-06-04]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20210604.0840.002.htm>]
- [13] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例. *应用生态学报*, 2020, 31 (4): 1278-1288 [Gong J, Liu D-Q, Gao B-L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (4): 1278-1288]
- [14] 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. *自然资源学报*, 2020, 35 (2): 371-386 [Wang Y-H, Dai E-F, Ma L, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain region. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35 (2): 371-386]
- [15] 潘换换, 刘雪佳, 杜自强, 等. 中国干旱区自然植被降水利用效率的时空格局. *山西大学学报: 自然科学版*, 2021, 44 (1): 184-193 [Pan H-H, Liu X-J, Du Z-Q, et al. Spatio-temporal patterns of precipitation utilization efficiency of natural vegetation in the arid areas of China. *Journal of Shanxi University: Natural Sciences*, 2021, 44 (1): 184-193]
- [16] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 等. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. *生态学报*, 2019, 39 (16): 5857-5873 [Xu J, Xiao Y, Xie G-D, et al. Assessment of wind erosion prevention service and its beneficiary areas identification of national key ecological function zone of windbreak and sand fixation type in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (16): 5857-5873]
- [17] 董敏. 汾河上游流域生态系统服务时空变化及影响因素研究. 硕士论文. 太原: 山西大学, 2020 [Dong M. Evolution of Ecosystem Services and its Influencing Factors in the Upper Reach of the Fenhe River watershed. Master Thesis. Taiyuan: Shanxi University, 2020]
- [18] 林子雁, 肖焱, 饶恩明, 等. 中国西南地区不同类型生态系统服务的关系. *应用生态学报*, 2020, 31 (3): 978-986 [Lin Z-Y, Xiao Y, Rao E-M, et al. Relationships among different types of ecosystem service in Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31 (3): 978-986]
- [19] Wang H, Liu LB, Yin L, et al. Exploring the complex relationships and drivers of ecosystem services across different geomorphological types in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China (2000–2018). *Ecological Indicators*, 2021, 121, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2020.107116
- [20] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. *地理学报*, 2020, 75 (3): 607-619 [Dai E-F, Wang Y-H. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain region. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (3): 607-619]
- [21] 许丁雪, 吴芳, 何立环, 等. 土地利用变化对生态系统服务的影响——以张家口-承德地区为例. *生态学报*, 2019, 39 (20): 7493-7501 [Xu D-X, Wu F, He L-H, et al. Impact of land use change on ecosystem services: Case study of the Zhangjiakou-Chengde area. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (20): 7493-7501]
- [22] 张金茜, 李红璘, 曹二佳, 等. 多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性——以甘肃白龙江流域为例. *应用生态学报*, 2018, 29 (9): 2897-2906 [Zhang J-Q, Li H-Y, Cao E-J, et al. Assessment of ecological vulnerability in multi-scale and its spatial correlation: A case study of Bailongjiang watershed in Gansu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29 (9): 2897-2906]
- [23] Xiao Q, Hu D, Xiao Y. Assessing changes in soil conservation ecosystem services and causal factors in the Three Gorges Reservoir region of China. *Journal of Cleaner Production*. 2017, 163: S172-S180
- [24] Jiang C, Zhang HY, Zhang ZD. Spatially explicit assessment of ecosystem services in China's Loess Plateau: Patterns, interactions, drivers, and implications. *Global and Planetary Change*. 2018, 161: 41-52
- [25] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽姝, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析. *自然资源学报*. 2017, 32 (4): 669-679 [Sun X-Y, Guo H-W, Lian L-S, et al. The spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (4): 669-679]
- [26] Wang ZY, Zhong JL, Lan H, et al. Association analysis between spatiotemporal variation of net primary productivity and its driving factors in inner mongolia, china during 1994–2013. *Ecological Indicators*, 2019, 105: 355-364

- [27] Lyu RF, Zhang JM, Xu MQ, *et al.* Impacts of urbanization on ecosystem services and their temporal relations: A case study in Northern Ningxia, China. *Land Use Policy*, 2018, 77: 163–173
- [28] Chen TQ, Feng Z, Zhao HF, *et al.* Identification of ecosystem service bundles and driving factors in Beijing and its surrounding areas. *Science of the Total Environment*. 2020, 711, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134687
- [29] Yang YY, Zheng H, Kong LQ, *et al.* Mapping ecosystem services bundles to detect high- and low-value ecosystem services areas for land use management. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 11-17

