



环境工程技术学报

Journal of Environmental Engineering Technology

ISSN 1674-991X, CN 11-5972/X

《环境工程技术学报》网络首发论文

题目： 京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析
作者： 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 石云
收稿日期： 2021-06-28
网络首发日期： 2021-10-28
引用格式： 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 石云. 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/OL]. 环境工程技术学报.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20211027.2009.016.html>



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。

京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析

李魁明^{1,2}, 王晓燕², 姚罗兰³, 石云^{4**}

1.防灾科技学院应急管理学院

2.首都师范大学资源环境与旅游学院

3.北京农业职业学院国际教育学院

4.防灾科技学院生态环境学院

摘要 基于京津冀地区 2000 年、2010 年和 2018 年土地利用分类数据,通过分析土地利用结构及其动态变化、构建生态系统服务价值(ESV)模型,探究京津冀地区 13 个地市 ESV 的时空演变,运用地理探测器分析京津冀地区 ESV 驱动因子。结果表明:1)2000—2018 年,耕地是京津冀地区最主要的土地利用类型,建设用地是面积和幅度变化最剧烈的土地利用类型。2)2000—2018 年京津冀地区 ESV 呈先下降后上升趋势,调节服务与支持服务始终是京津冀地区生态系统服务的核心功能,其中水文调节的贡献率最大。3)从时间上看,京津冀地区地均生态系统服务价值变化不大。从空间上看,京津冀地区地均生态系统服务价值空间分布差异明显,高值区主要分布在冀北和京津地区,低值区主要分布在中南部的平原地区。京津冀各地市地均生态系统服务价值的变化较为明显,大多数地市呈减少趋势。4)各土地利用类型的敏感性指数均小于 1,其中林地的敏感性指数最高,对 ESV 影响最大。5)地理探测器分析表明,京津冀地区地均生态系统服务价值(AESV)在空间上的分布差异受到区域自然因子、经济因子和社会因子共同作用,其中高程、地均 GDP、人口密度等因子的贡献率较大,不同驱动力之间的交互作用对京津冀地区 AESV 的空间分异影响明显增强。

关键词 土地利用;生态系统服务价值(ESV);时空演变;地理探测器;京津冀地区

中图分类号: X171.1 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20210269

Spatio-temporal change and driving factor analysis of ecosystem service value in the Beijing-Tianjin-Hebei region

LI Kuiming^{1,2}, WANG Xiaoyan², YAO Luolan³, SHI Yun^{4*}

1.College of Emergency Management, Institute of Disaster Prevention

2.College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University Research

3.International Education College, Beijing Agricultural Vocational College

4.College of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention

Abstract In recent years, the LUCC in Beijing-Tianjin-Hebei region has change obviously, which has a great impact on the regional ecological environment. Strengthening the research on land use and ecosystem service

收稿日期: 2021-06-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(20160204); 河北省高等学校科学研究计划(SQ2021185); 北京农业职业学院人文社科项目(XY-SK-20-14)

作者简介: 李魁明(1989—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事生态安全与流域非点源污染研究, 809927535@qq.com

*责任作者: 石云(1981—), 女, 副教授, 博士, 主要从事动力学数值模拟等方面的研究, 444739691@qq.com

value (ESV) can effectively promote the protection of ecological environment, which is of great significance to the sustainable development of the whole Beijing-Tianjin-Hebei region. Based on land use classification data from 2000 to 2018 in Beijing-Tianjin-Hebei region, this paper explored spatial-temporal evolution of ecosystem service value in 13 cities by analyzing land use structure and dynamic changes, constructing ecosystem service value (ESV) model, and analyzing ecological sensitivity caused by land use. Finally, the driving factors of ESV in Beijing-Tianjin-Hebei region were analyzed by geodetector. The results show that: (1)From 2000 to 2018, cultivated land is the most important land use type in Beijing-Tianjin-Hebei region. Construction land have the largest changes in land use type area, and the range changed the most violently. (2)From 2000 to 2018, ESV in Beijing-Tianjin-Hebei region showed a downward trend and then an upward trend. Regulation services and support services are always the core functions of ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region, in which hydrological regulation contributes the most. (3)In terms of time, the AESV of Beijing-Tianjin-Hebei region has little change. However, from the perspective of space, the spatial distribution difference of AESV in Beijing-Tianjin-Hebei region is obvious. The high value areas are mainly distributed in the northern Beijing-Tianjin-Hebei region, and the low value areas are mainly distributed in the plain areas in the central and southern regions. The change of AESV in Beijing-Tianjin-Hebei region is obvious, and most cities show a decreasing trend.(4)The sensitivity index of each land use type is less than 1, and the sensitivity index of woodland is the highest, which has the greatest impact on ESV.(5)Geodetector analysis shows that the spatial distribution of AESV in Beijing-Tianjin-Hebei region was affected by regional natural factors, economic factors and social factors. The contribution rate of elevation, average GDP and population density was larger. The interaction between different driving forces has a significant effect on the spatial differentiation of AESV in Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words land use; ecosystem service value (ESV); spatial-temporal evolution; geodetector; Beijing-Tianjin-Hebei region

在社会经济发展加速转型时期,人类活动导致土地利用格局的改变,产生直接或间接的生态环境效应。1997年 Costanza 提出了生态系统服务价值(ESV)估算原理、方法后,生态系统服务概念和价值研究得到广泛重视^[1]。近年来,区域土地利用变化对ESV的影响研究,已成为生态学、地理学和环境科学等学科的研究热点:从研究空间尺度上看,有的以行政区^[2-4]、城市群^[5-6]、经济区^[7-8]等社会经济功能区为评价对象;有的以生态功能区^[9-10]为评价对象,有的以流域^[11]、高原^[12]、山地^[13]、盆地^[14]等自然地理单元为评价对象。从研究方法上看,ESV的评估一般将物质量评价法和价值量评价法结合进行研究^[15-16],其中以基于土地利用类型的生态系统服务价值系数法^[3-8]应用最广泛^[1]。关于ESV影响因素方面,或是基于土地利用方式的转换分析ESV的变化特征^[17],或是建立指标与ESV的回归结果解释影响因素^[18],2类研究方法均忽视了

因子作用强度空间差异。地理探测器能够定量地探测单因子驱动力和多因子交互驱动力，定量识别因子强度空间差异。在城市群尺度上应用地理探测器方法开展生态服务价值的空间分异研究并不多见。

京津冀城市群是我国经济发展格局中最具活力和潜力的前沿阵地^[19]，但近年来快速城镇化和工业化进程导致土地利用结构的改变也给该区域带来了严重的生态环境问题。加强对京津冀地区土地利用变化、ESV 时空演变及驱动因子的研究，对于京津冀协同发展具有重要的意义。汪东川等^[20]利用县域尺度的粮食单产对单位面积农田食物生产服务价值进行修正，探讨了 ESV 的空间异质性，选取 3 km×3 km 尺度格网揭示京津冀地区 2005—2015 年 ESV 的空间动态演变特征。娄佩卿等^[21]基于谷歌地球引擎(GEE)云平台，利用当量估算方法定量估算京津冀地区的 ESV 并结合 15 km×15 km 网格尺度探明其时空动态变化。唐秀美等^[22]在分析生态系统服务供需逻辑关系的基础上选择指标，评估京津冀地区生态系统服务需求状况，从县域尺度分析 ESV 的时空变化。盛晓雯等^[23]采用土地利用动态度和 ESV 模型等方法，对京津冀地区土地利用变化影响下的 ESV 在时间和空间上的差异进行了分析。以上研究多从整体上评估京津冀地区 ESV，定量分析城市群内部地市的 ESV 时空演变的较少，并且鲜见 ESV 影响因子强度空间差异化的系统分析。

鉴于此，针对京津冀地区土地利用变化对生态系统造成的影响，根据谢高地等^[24]提出的 ESV 评估体系，分析 2000—2018 年京津冀地区土地利用变化引起的 ESV 时空规律，运用地理探测器分析京津冀地区影响因子强度空间差异，以期为研究区土地利用规划、环境修复与保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于华北平原北部，地势西北高东南低，地貌以平原为主，包括北京、天津两大直辖市以及河北省的 11 个地级市，共 13 个地级市以上行政单元，总面积为 21.72 万 km²，占全国总面积的 2.26%。在社会经济迅速发展的同时，太行山燕山土壤侵蚀和坝上高原荒漠化加剧，平原洼淀萎缩及消失等也对京津冀原本脆弱的生态环境造成了巨大压力。

1.2 数据来源与处理

使用的京津冀地区土地利用数据源自中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn>)的 2000 年、2010 年和 2018 年 3 期 Landsat TM 影像，根据中国科学院资源环境信息数据库分类法，对 3 期土地利用数据进行重分类得到耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地六大类土地利用类型。粮食单产数据来源于 3 省（市）相应年份统计年鉴，粮食价格根据《中国农产品价格调查年鉴-2019》得出，驱动因子指标中，数字高程模型（DEM）数据来源于美国对地观测全球高程数据；降水量、土壤侵蚀强度来源于中国科学院资源环境科学数据中心；GDP、农民人均纯收入、社会消费品零售额、人均耕地面积、人口密度等来源于相关省市统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态分析法

为定量分析京津冀地区土地利用变化，引入单一土地利用类型动态度和综合土地利用动态度。

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

$$LC = \left(\sum_{i=1}^n (\Delta U_{i-j} / 2 \sum_{i=1}^n U_i) \right) / T \times 100\% \quad (2)$$

式中： K 为某一土地类型动态度，%； U_a 、 U_b 分别为研究时段内起止年该土地利用类型的面积， hm^2 ； T 为研究年限； LC 为综合土地利用动态度，%； ΔU_{i-j} 为研究时段内第*i*种土地利用类型转换为其他利用类型的面积， hm^2 ； n 为土地利用类型数量。

1.3.2 生态服务价值测算

结合谢高地等^[24-25]的研究成果，同时借鉴已有研究^[26-28]，通过查阅统计年鉴，计算得出京津冀地区 2000 年、2010 年和 2018 年平均粮食单产（5 253 kg/hm^2 ），通过查阅《中国农产品价格调查年鉴-2019》计算出京津冀 2018 年粮食平均单价（2.65 元/kg），确定京津冀地区单位面积生态系统服务价值系数（表 1）。由此计算京津冀地区生态系统服务价值（ESV），其计算公式见式（3）。

表 1 京津冀地区单位面积生态系统服务价值系数表

Table 1 Table of ecosystem service value coefficient per unit area in Beijing-Tianjin-Hebei region 元/ hm^2

生态系统功能构成		土地利用类型				
一级	二级	耕地	林地	草地	水域	未利用
供给服务	粮食生产	2 187.50	492.68	453.27	788.29	19.71
	原料生产	492.68	1 143.02	670.04	236.49	39.41
	水资源供给	-2 581.64	591.22	374.44	10 306.87	19.71
调节服务	气体调节	1 753.94	3 764.08	2384.57	945.95	137.95
	气候调节	926.24	11 252.81	6286.60	2798.42	98.54
	净化环境	275.90	3 291.10	2069.26	5636.26	413.85
	水文调节	2 956.08	7 370.49	4611.48	107778.68	236.49
支持服务	土壤保持	1 024.77	4 572.07	2896.96	926.24	157.66
	维持养分循环	315.32	354.73	216.78	78.83	19.71
	生物多样性	335.02	4 177.93	2 640.76	2522.52	137.95
文化服务	美学景观	157.66	3015.20	1162.72	1951.01	59.12
	合计	7843.47	40025.33	23766.88	133969.56	1340.09

考虑到京津冀地区 13 个地级以上城市大小不一，引入地均生态系统服务价值（式（4））和地均生态系统服务价值变化率（式（5）），来分析京津冀地区生态系统服务价值的时空演变。

使用敏感性指数^[27]分析生态系统服务价值对于生态系统价值系数的依赖程度（式（6））。

$$ESV = \sum_{i=1}^n (U_i \times VC_i) \quad (3)$$

$$AESV = \sum_{i=1}^n (U_i \times VC_i) / \sum_{i=1}^n U_i \quad (4)$$

$$C = \frac{(AESV_{t_2} - AESV_{t_1})}{AESV_{t_1}} \times 100\% \quad (5)$$

$$CS = \left| \frac{(ESV_{h_2} - ESV_{h_1}) / ESV_{h_1}}{VC_{ih_2} - VC_{ih_1} / VC_{ih_1}} \right| \quad (6)$$

式中： ESV 为生态系统服务价值，元； U_i 为第 i 种生态系统面积， hm^2 ； VC_i 为第 i 种生态系统服务价值，元/ hm^2 ； $AESV$ 表示地均生态系统服务价值，元/ hm^2 ； C 为地均生态系统服务价值变化率，%； $AESV_{t_1}$ 、 $AESV_{t_2}$ 分别为不同时段的地均生态系统服务价值，元/ hm^2 ； CS 为敏感性指数； h_1 、 h_2 分别为初始价值系数和调整后的值，元/ hm^2 ， i 为土地利用类型。

1.3.3 地理探测器模型

地理探测器是用来探测地理要素空间分异性，揭示地理要素背后驱动因子的一种新方法^[29-30]。采用地理探测器模型对京津冀地区影响 ESV 空间分异的自然因子、社会因子和经济因子进行探测，公式如下：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (7)$$

式中： q 为某因子对 ESV 空间分异的影响力，取值为 $[0, 1]$ ， q 越大，该因子对 ESV 空间分异的影响越大； σ_h^2 和 σ^2 分别为评价单元和全区域 ESV 的方差； N 为研究区的评价单元样本数。

3 结果与分析

3.1 土地利用动态变化

从土地利用结构上看（图 1），2000—2018 年，京津冀地区土地利用结构以耕地、林地、草地为主，2000 年，这 3 种土地类型的占比分别为 50.81%、20.72%和 16.32%，合计占比为 87.84%；2018 年的占比分别为 46.14%、21.13%和 15.75%，合计占比为 83.02%。2000—2018 年，各类型土地面积变化最大的为建设用地，其次是耕地，建设用地面积增加了 9 992 km^2 ，耕地面积减少了 9 742 km^2 。而林地、草地、水域、未利用土地 4 种土地利用类型面积变化幅度不大。

地理探测器正确引用：

- [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.
 - [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.]

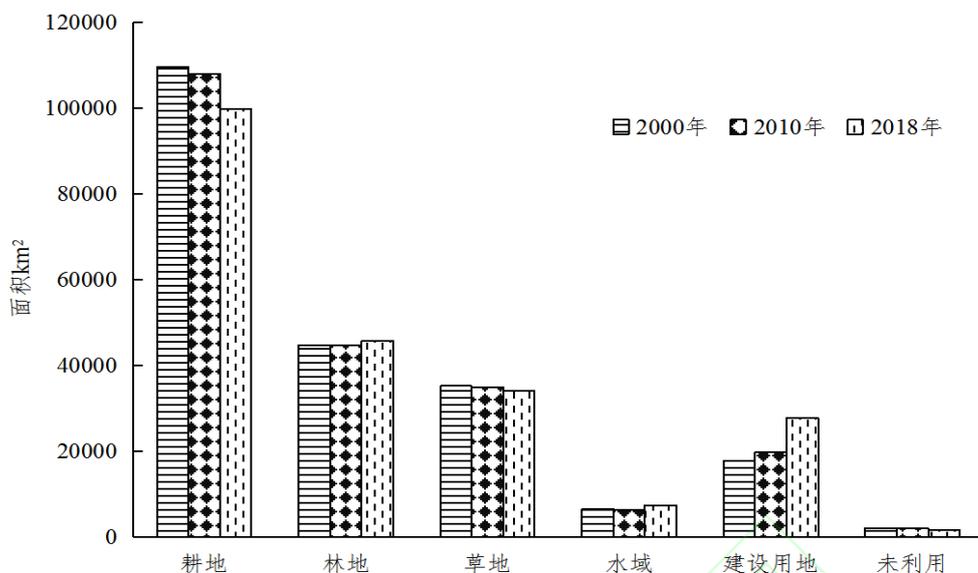


图 1 2000—2018 年京津冀地区不同土地利用类型面积变化

Fig.1 Area change of different land use types in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018

2000—2018 年京津冀地区土地利用变化动态如表 2 所示。从单一土地利用动态来看，2000—2010 年，京津冀地区建设用地变化最剧烈，其次是水域和未利用土地，其动态分别为 1.19%、-0.38%和-0.37%；2010—2018 年，建设用地变化幅度依然最大，其次是水域和未利用土地，其中建设用地变化幅度明显上升，水域呈增长趋势，耕地较上一阶段减少幅度提升。总的来看，京津冀地区近 18 年来，土地利用幅度变化剧烈的是建设用地、未利用土地，变化幅度大于 1%，耕地因面积占比最大，变化不明显，草地和林地变化较小。水域面积波动大，不稳定。

2000—2018 年，综合土地利用动态为 0.30%，其中 2000—2010 年仅为 0.10%，但 2000—2018 年为 0.57%，这表明京津冀地区在 2010 年后土地利用变化速率加快，也表明区域社会经济活动对土地影响更加剧烈。土地利用动态与人类活动强度密切相关，例如耕地被侵占，建设用地面积扩张，未利用地逐渐被开发、实施退耕还林还草等生态修复工程，导致京津冀各地市各个时期地利用动态出现不同幅度的变化。

表 2 2000—2018 年京津冀地区土地利用变化动态度

Table 2 Land use change dynamics in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018 %

年份区间	单一土地利用动态度						综合土地利用动态度
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地	
2000—2010 年	-0.13	-0.01	-0.07	-0.38	1.19	-0.37	0.10
2010—2018 年	-0.96	0.30	-0.31	2.42	4.98	-2.30	0.57
2000—2018 年	-0.49	0.13	-0.18	0.83	3.14	-1.19	0.30

3.2 生态系统服务价值变化

3.2.1 京津冀地区生态系统服务价值时间序列分析

根据式(3)得到京津冀地区 2000 年、2010 年、2018 年的 ESV 分别为 4 346.78 亿、4 295.36 亿、4 413.11 亿元,ESV 呈先下降后上升趋势,总共增加了 66.33 亿元,其中 2000—2010 年减少了 51.42 亿元,2010—2018

年增加了 117.75 亿元（表 3）。

从生态系统功能构成一级内容来看，调节服务与支持服务始终是京津冀地区生态系统服务的核心功能；从占比分析，各类服务占比变化幅度较小，说明 2000—2018 年京津冀地区各类生态系统服务较为稳定，且其中调节服务占比一直保持在 71%左右，其次为支持服务，占比一直保持在 18%左右，文化服务与供给服务占比都较小。从生态系统功能构成二级内容来看，水文调节的贡献率最大，2000—2018 年均在 35%左右，其次是气候调节、气体调节、土壤保持，贡献率都在 10%左右。

表 3 京津冀地区 2000—2018 年生态系统功能单项服务价值

Table 3 Ecosystem individual service value table of Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018

生态系统功能构成		2000 年		2010 年		2018 年	
一级	二级	价值/亿元	占比/%	价值/亿元	占比/%	价值/亿元	占比/%
供给服务	粮食生产	282.60	6.50	279.04	6.50	262.04	5.94
	原料生产	130.16	2.99	129.17	3.01	126.00	2.86
	水资源供给	-176.77	-4.07	-175.58	-4.09	-141.56	-3.21
	小计	235.98	5.43	232.63	5.42	246.48	5.59
调节服务	气体调节	450.37	10.36	446.83	10.40	435.37	9.87
	气候调节	843.18	19.40	839.21	19.54	841.45	19.07
	净化环境	287.06	6.60	284.63	6.63	290.69	6.59
	水文调节	1 509.03	34.72	1 477.07	34.39	1 585.88	35.94
	小计	3 089.64	71.08	3 047.74	70.95	3 153.39	71.46
支持服务	土壤保持	424.53	9.77	421.91	9.82	416.88	9.45
	养分循环	58.54	1.35	57.99	1.35	55.66	1.26
	生物多样性	332.62	7.65	330.71	7.70	333.10	7.55
	小计	815.70	18.77	810.62	18.87	805.64	18.26
文化服务	美学景观	205.46	4.73	204.38	4.76	207.60	4.70
合计		4 346.78	100	4 295.36	100	4 413.11	100

3.2.2 地均生态系统服务价值的时空变化

根据式（4）得到京津冀地区 2000 年、2010 年、2018 年的 AESV 分别为 201.67 万、199.27、204.10 万元/km²。2000 年相较 2010 年降低了 1.19%，2010 相较 2018 年增加了 2.42%，呈现先下降后上升的趋势，上升幅度大于下降幅度，说明京津冀地区生态系统服务趋于好转。

将 AESV 大于 200 万元/hm² 的城市划分为高值区，100 万~200 万元/hm² 为中值区，小于 100 万元/hm² 为低值区，作出京津冀地区 13 个地级以上城市的 AESV 空间演变趋势，结果如图 2 所示。由图 2 可知，京津冀地区 AESV 空间分布差异明显，高值区主要分布在冀北和京津地区，具体来看，2000 年和 2010 的高值区主要集中在北京市、天津市、承德市和秦皇岛市；低值区主要分布在中南部的平原地区，包括衡水市、沧州市、廊坊市。2018 年相对于 2000 年和 2010 年，高值区增加了唐山市，开始连片分布，低值区少

了沧州市。承德市和北京市土地利用类型以林地为主，近年来造林工程的实施和山区草地转换为林地，对 ESV 贡献较大；天津市东邻渤海地区，地势较低，水域面积广大，在土地利用类型中，水域生态系统服务价值系数最大；秦皇岛市地处燕山山脉东段丘陵地区与山前平原地带，林地草地占比较大。衡水市、沧州市、廊坊市地处华北平原腹地，耕地面积占比特别大，故 AESV 较低；唐山市和沧州市 AESV 的提升得益于 2 市沿海滩涂滩地面积的扩大。

根据式 (5) 得出京津冀地区各地级以上城市 AESV 变化率的空间分布，结果如图 3 所示。由图 3 可知，近 18 年京津冀地区大部分地市 AESV 呈减少趋势，表明生态系统仍然面临较大压力。具体来看，2000—2010 年，84.62% 的地市 AESV 呈减少趋势，但减幅不大，仅天津市减幅超过 5%，15.38% 的地市呈增加趋势，但是增幅不大，均小于 5%。2010—2018 年间，38.46% 的地市 AESV 呈增加趋势，61.54% 的地市趋于减少，其中天津市、廊坊市和衡水市减幅超过 5%，该阶段呈增加趋势的地市较上一阶段增加 3 个，分别是张家口市、沧州市和唐山市。天津市近 18 年水域面积大幅转换为建设用地，而水域的生态系统服务价值系数最高，因此 AESV 减幅较大；2010 年以来张家口市的“三北防护林”“退耕还林还草”以及“京津风沙源治理工程”等工程建设成效显著，AESV 开始呈现增长趋势；廊坊市紧邻京津地区，受地理位置和环京楼市影响，2010 年以后大量耕地转换为建设用地，AESV 减幅较大。衡水市土地利用类型单一，耕地面积占比特别大，2010 年后大量耕地转换为建设用地，AESV 减幅较大。

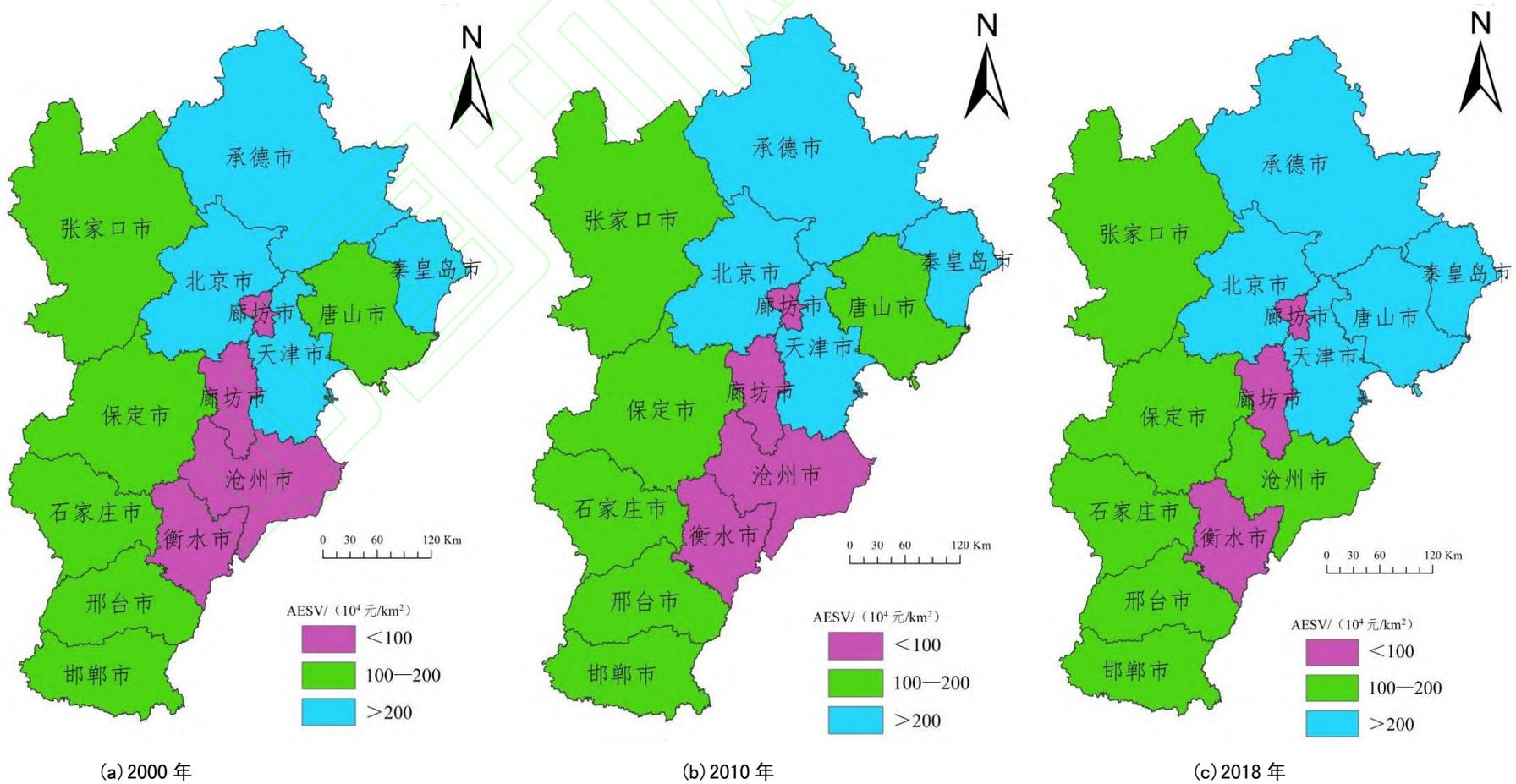


图2 2000—2018年京津冀地区 AESV 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of AESV in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018

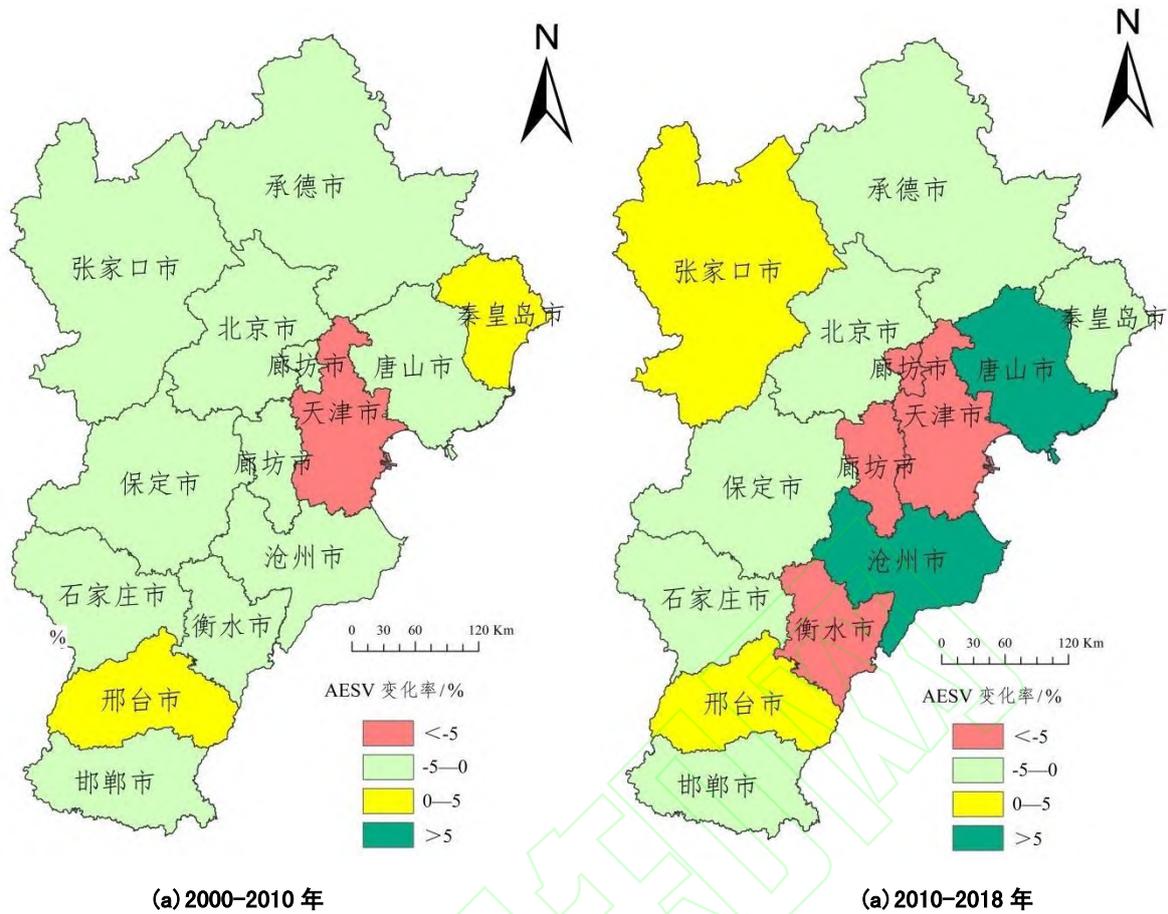


图3 2000—2018年京津冀地区 AESV 变化率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of AESV change rate in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2018

3.3 生态系统服务价值对价值系数的敏感性分析

根据式(6)，通过上下调整 50%的生态系统服务价值系数来计算京津冀地区敏感性指数，结果如表 4 所示。

表 4 京津冀地区生态系统服务价值敏感性指数

Table 4 Sensitivity index of ecosystem services value in Beijing-Tianjin-Hebei Region

年份	耕地	林地	草地	水域	未利用
2000	0.197 6	0.411 2	0.192 3	0.198 3	0.000 6
2010	0.197 3	0.415 8	0.193 2	0.193 1	0.000 6
2018	0.177 3	0.414 4	0.183 4	0.224 4	0.000 5

由表 4 可见，不同土地利用类型的敏感性指数差别较大，但不同年份之间差别较小。2000 年各土地利用类型的敏感性指数高到低依次是林地、水域、耕地、草地、未利用土地；2010 年依次为林地、耕地、草地、水域、未利用土地；2018 年依次为林地、水域、草地、耕地、未利用土地。各土地利用类型的敏感性指数均小于 1，表明京津冀的 ESV 是缺乏弹性的，相对于价值系数来说是相对稳定的，因此本研究所选取的价值系数适用于该研究区。其中林地的敏感性指数最高，说明林地对 ESV 影响最大，这是由于京津冀地区林地面积占比大，且林地生态系统服务价值系数也大。林地的敏感性指数为 0.411 2~0.415 8，表明当林地的价值系数增加 1%时，ESV 将增加 0.411 2%~0.415 8%。水域虽然面积占比不大，但其当量因子最大，故而敏感性指数较高。耕地的敏感性指数从 0.197 6 减小到 0.177 3，这是因为耕地面积在逐年减少。

3.4 生态系统服务价值驱动因子分析

为了探测京津冀地区 ESV 的驱动因子，参照前人成果^[2,11,28]，基于数据可获取性，选用了年降水量 (X_1)、DEM (X_2)、土壤侵蚀强度 (X_3) 3 个自然因子，GDP 总量 (X_4)、地均 GDP (X_5)、农民人均纯收入 (X_6)、社会消费品零售额 (X_7) 4 个经济因子，人均耕地面积 (X_8)、人口密度 (X_9) 2 个社会因子对京津冀地区的 ESV 进行探测。

基于京津冀地区 13 市研究尺度，以 AESV 作为变量，以上述影响因子为因变量，基于地理探测器 (GeoDetector) 工具的“因子探测”和“交互作用探测”功能进行驱动因子及驱动因子之间交互作用的定量分析，探讨京津冀地区 ESV 空间分异的主导因子，以及各驱动因子间交互作用的特征，最终得到地理探测器对京津冀地区 AESV 空间分异的因子探测结果 (表 5) 和交互探测结果 (表 6)。

表 5 京津冀地区生态系统服务价值驱动因子

Table 5 Impact factors of ecosystem services value in Beijing-Tianjin-Hebei region

驱动因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
统计量(q)	0.141	0.272	0.073	0.176	0.212	0.171	0.063	0.032	0.204
P	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

分析显示，京津冀地区 AESV 在空间上的分布差异受到区域自然因子、经济因子和社会因子共同作用，其中高程、地均 GDP、人口密度等因子的贡献率较大，而土壤侵蚀力、社会消费品零售额、人均耕地面积等对 AESV 空间分异影响的贡献率相对较小。从驱动因子对 AESV 的影响来看，DEM 的解释力最为显著，为 27%；其次是地均 GDP 和人口密度，其影响力都在 20% 左右，是影响区域 AESV 空间分异的重要因素；另外，年降水量、GDP 总量和农民人均纯收入等因子影响力都在 15% 以上，是影响区域 AESV 空间分异较为重要的因素；土壤侵蚀力、社会消费品零售额、人均耕地面积的解释在 10% 以下，对 ESV 的空间分异影响较小。

表 6 地理探测器的交叉探测结果

Table 6 Cross detection of Geodetectors

驱动因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
X_1	0.141								
X_2	0.407	0.272							
X_3	0.185	0.253	0.073						
X_4	0.291	0.352	0.179	0.176					
X_5	0.325	0.412	0.193	0.234	0.212				
X_6	0.251	0.385	0.182	0.188	0.332	0.171			
X_7	0.162	0.291	0.079	0.178	0.253	0.184	0.063		
X_8	0.155	0.283	0.074	0.177	0.225	0.183	0.074	0.032	
X_9	0.215	0.289	0.206	0.208	0.298	0.225	0.213	0.203	0.204

交互作用探测器用来检验 2 种影响因子是自身独立起作用还是相互作用^[30]。从表 6 可以看出，任意 2 个因子的交互作用均大于单个因子的影响，因此京津冀地区 AESV 空间分异是由不同驱动因子共同作用的结果。从交互探测的结果来看，DEM (X_2) 与地均 GDP (X_5)、DEM (X_2) 与年降水量 (X_1) 的交互作用程度达到 0.40 左右，不同

驱动力之间的交互作用对京津冀地区 AESV 的空间分异影响明显增强,不同因子之间的复杂耦合作用所形成的协同增强效应共同影响了京津冀地区 AESV 在空间上分异效果。

因此京津冀地区在生态系统优化与生态风险管控实践中,应考虑不同驱动因子的作用特点和各驱动因子交互协同增强的效果,采取差异化多元调控策略,选择与区域自然条件、社会经济发展水平相适应的土地利用开发模式,避免不合理或强烈人为土地利用干扰与自然、社会经济因子协同作用增强对区域生态系统的压力。

4 结论

(1) 2000—2018 年,耕地是京津冀地区最主要的土地利用类型,土地利用类型面积变化最大的为耕地和建设用地。耕地减少了 9 742 km²,建设用地增加了 9 992 km²。从单一土地利用动态来看,土地利用幅度变化剧烈的是建设用地,变化幅度高达 3.14%,变化幅度最小的是林地。综合土地利用变化度呈增长趋势。

(2) 从数值分析,2000—2018 年 ESV 呈先下降后上升趋势,18 年间增加了 66.33 亿元。从生态功能构成来看,调节服务与支持服务始终是京津冀地区生态系统服务的核心功能,其中水文调节的贡献率最大。从时间上看,京津冀地区 2000 年、2010 年、2018 年的 AESV 分别为 201.67 万、199.27 万、204.10 万元/km²,京津冀地区生态系统服务趋于好转。从空间上看,京津冀地区 AESV 空间分布差异明显,高值区主要分布在冀北和京津地区,低值区主要分布在中南部的平原地区。京津冀各地市 AESV 的变化较为明显,大多数地市呈减少趋势,2010—2018 年较前一阶段情况稍有好转。敏感性结果表明京津冀的 ESV 是缺乏弹性的。其中林地的敏感指数最高,对 ESV 影响最大。

(3) 生态系统本身具有多样性与复杂性,加上 ESV 计算模型和方法多样,其价值评估结果存在较大差异,因此其计算方法及参考指标数据仍有完善的空间。对比京津冀地区已有的相关研究,本文所采用的当量因子测算的 ESV 与已有研究结果大致相同,研究结论合理。

(4) 地理探测器分析表明,京津冀地区 AESV 在空间上的分布差异受到区域自然因素、经济因素和社会因素共同作用,其中高程、地均 GDP、人口密度等因子的贡献率较大,不同驱动力之间的交互作用对京津冀地区 AESV 的空间分异影响明显增强。

参考文献

- [1] 王军,顿耀龙.土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J].长江流域资源与环境,2015,24(5):798-808.
WANG J,DUN Y L.A review on the effects of land use change on ecosystem services[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(5):798-808.
- [2] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].自然资源学报,2020,35(7):1714-1727.
GENG T W,CHEN H,ZHANG H,et al.Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR[J].Journal of Natural Resources,2020,35(7):1714-1727.
- [3] 石龙宇,崔胜辉,尹锴,等.厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响[J].地理学报,2010,65(6):708-714.
SHI L Y,CUI S H,YIN K,et al.The impact of land use/cover change on ecosystem service in Xiamen[J].Acta Geographica Sinica,2010,65(6):708-714.
- [4] 侯春飞,韩永伟,孟晓杰,等.雄安新区 1995—2019 年土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].环境工程技术学报,2021,11(1): 65-73.
HOU C F,HAN Y W,MENG X J,et al.Effects of land-use change on ecosystem service values in Xiong'an New Area from 1995 to 2019[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2021,11(1):65-73.

- [5] 欧阳晓,贺清云,朱翔.多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响:以长株潭城市群为例[J].经济地理,2020,40(1):93-102.
- OUYANG X,HE Q Y,ZHU X.Simulation of impacts of urban agglomeration land use change on ecosystem services value under multi-scenarios:case study in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J].Economic Geography,2020,40(1):93-102.
- [6] 朱治州,钟业喜.长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(7):1520-1530.
- ZHU Z Z,ZHONG Y X.Spatio-temporal evolution of land use and ecosystem service value in Yangtze River Delta urban agglomeration[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2019,28(7):1520-1530.
- [7] 董会忠,姚孟超.成渝经济区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].水土保持通报,2020,40(1):213-220.
- DONG H Z,YAO M C.Impacts of land use change on value of ecosystem services in Chengdu-Chongqing economic zone[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2020,40(1):213-220.
- [8] 肖红克,李洪忠,王莉,等.粤港澳大湾区土地利用及生态系统服务价值的变化:以广佛肇为例[J].水土保持研究,2020,27(1):290-297.
- XIAO H K,LI H Z,WANG L,et al.Changes of land use and ecosystem service value in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area:a case study of Guangzhou-Foshan-Zhaoqing[J].Research of Soil and Water Conservation,2020,27(1):290-297.
- [9] 刘慧明,高吉喜,刘晓,等.国家重点生态功能区 2010—2015 年生态系统服务价值变化评估[J].生态学报,2020,40(6):1865-1876.
- LIU H M,GAO J X,LIU X,et al.Monitoring and assessment of the ecosystem services value in the national key ecological function zones[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(6):1865-1876.
- [10] 李付杰,孙倩莹,王世曦,等.2000—2015 年三江源区生态系统服务评估[J].环境工程技术学报,2020,10(5):786-797.
- LI F J,SUN Q Y,WANG S X,et al.Valuation of ecosystem services in Three-River Headwaters Region from 2000 to 2015[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2020,10(5):786-797.
- [11] 陈万旭,李江风,朱丽君.长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J].自然资源学报,2019,34(2):325-337.
- CHEN W X,LI J F,ZHU L J.Spatial heterogeneity and sensitivity analysis of ecosystem services value in the Middle Yangtze River region[J].Journal of Natural Resources,2019,34(2):325-337.
- [12] 张瑜,赵晓丽,左丽君,等.黄土高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].国土资源遥感,2019,31(3):132-139.
- ZHANG Y,ZHAO X L,ZUO L J,et al.The impact of land use change on ecosystem services value in Loess Plateau[J].Remote Sensing for Land & Resources,2019,31(3):132-139.
- [13] 钱大文,曹广民,杜岩功,等.2000—2015 年祁连山南坡生态系统服务价值时空变化[J].生态学报,2020,40(4):1392-1404.
- QIAN D W,CAO G M,DU Y G,et al.Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in the southern slope of Qilian Mountain from 2000 to 2015[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(4):1392-1404.
- [14] 麦麦提吐尔逊·艾则孜,海米提·依米提,祖皮艳木·买买提,等.焉耆盆地土地利用变化对生态服务价值的影响[J].水土保持研究,2012,19(6):137-141.
- MAMATTURSUN E,HAMID Y,ZULPIYA M,et al.Effects of land use change on ecosystem service value in Yanqi Basin[J].Research of Soil and Water Conservation,2012,19(6) 137-141.
- [15] 赵景柱,肖寒,吴刚.生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析[J].应用生态学报,2000,11(2):290-292.
- ZHAO J Z,XIAO H,WU G.Comparison analysis on physical and value assessment methods for ecosystems services[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(2):290-292.
- [16] 杨光梅,李文华,闵庆文.生态系统服务价值评估研究进展:国外学者观点[J].生态学报,2006,26(1):205-212.
- YANG G M,LI W H,MIN Q W.Review of foreign opinions on evaluation of ecosystem services[J].Acta Ecologica Sinica,2006,26(1):205-212.
- [17] 熊鹰,张方明,龚长安,等.LUCC 影响下湖南省生态系统服务价值时空演变[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1397-1408.
- XIONG Y,ZHANG F M,GONG C A,et al.Spatio-temporal evolvement of ecosystem service value in Hunan Province based on LUCC[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(6):1397-1408.
- [18] 赵育恒,曾晨.武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J].生态学报,2019,39(4):1426-1440.
- ZHAO Y H,ZENG C.Analysis of spatial-temporal evolution and factors that influences ecological service values in Wuhan Urban Agglomeration,China[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(4):1426-1440.
- [19] 陆大道.京津冀城市群功能定位及协同发展[J].地理科学进展,2015,34(3):265-270.
- LU D D.Function orientation and coordinating development of subregions within the Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration[J].Progress in Geography,2015,34(3):265-270.

- [20] 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[J].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[J].Ecology and Environmental Sciences,2019,28(7):1285-1296.
- [21] 娄佩卿,付波霖,林星辰,等.基于 GEE 的 1998—2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].环境科学,2019,40(12):5473-5483.
- [22] 唐秀美,刘玉,任艳敏,等.基于需求的京津冀地区生态系统服务价值时空变化研究[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(1):173-180.
TANG X M,LIU Y,REN Y M,et al.Evaluation and analysis of ecosystem services value in Beijing-Tianjin-Hebei region based on demand zoning[J].Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,2021,57(1):173-180.
- [23] 盛晓雯,曹银贵,周伟,等.京津冀地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].中国农业资源与区划,2018,39(6):79-86.
SHENG X W,CAO Y G,ZHOU W,et al.Impact of land use change on ecosystem service value in Beijing-Tianjin-Hebei region[J].Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2018,39(6):79-86.
- [24] 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.
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].Journal of Natural Resources,2015,30(8):1243-1254.
- [25] COSTANZA R,D'ARGE R,de GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Ecological Economics,1998,25(1):3-15.
- [26] 秦张瑶.京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[D].北京:首都经济贸易大学,2019.
- [27] 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.
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].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(11):277-288.
- [28] 岳书平,张树文,闫业超.东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J].地理学报,2007,62(8):879-886.
YUE S P,ZHANG S W,YAN Y C.Impacts of land use change on ecosystem services value in the northeast China transect (NECT)[J].Acta Geographica Sinica,2007,62(8):879-886.
- [29] 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.
WANG J F,XU C D.Geodetector:Principle and prospective[J].Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134.
- [30] 胡凯衡,魏丽,刘双,等.横断山区泥石流空间格局和激发雨量分异性研究[J].地理学报,2019,74(11):2303-2313.
HU K H,WEI L,LIU S,et al.Spatial pattern of debris-flow catchments and the rainfall amount of triggering debris flows in the Hengduan Mountains region[J].Acta Geographica Sinica,2019,74(11):2303-2313.