



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： 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应——以陕甘宁地区为例

作者： 孙梦华，牛文浩，张蚌蚌，耿庆玲，于强

DOI： 10.13287/j.1001-9332.202111.016

收稿日期： 2021-06-29

网络首发日期： 2021-08-03

引用格式： 孙梦华，牛文浩，张蚌蚌，耿庆玲，于强. 黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应——以陕甘宁地区为例. 应用生态学报. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.016>



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。

黄河流域土地利用变化下生态系统服务价值时空演变及其响应——以陕甘宁地区为例

孙梦华¹ 牛文浩² 张蚌蚌² 耿庆玲³ 于强^{1,4}✉

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²西北农林科技大学经济管理学院, 陕西杨凌 712100; ³郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001; ⁴西北农林科技大学水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

*通信作者 于强, E-mail: yuq@nwfufu.edu.cn

摘要 黄河流域中上游的陕甘宁地区是西北生态脆弱区, 在区域生态安全格局上具有重要作用, 其生态经济问题值得重点关注。本研究基于陕甘宁地区 1995—2020 年土地利用和自然社会经济数据, 利用空间分析和地理探测器等方法, 研究陕甘宁地区土地利用及生态系统服务价值的时空变化特征以及生态系统服务价值空间分异的驱动机制。结果表明: 1995—2020 年, 陕甘宁地区耕地、未利用地呈减少趋势, 建设用地、林地呈增长趋势。1995—2020 年陕甘宁地区生态系统服务价值总量呈下降-上升的变化, 1995—2000 年减幅约 1.2%, 2000—2020 年增幅约 1.0%。草地提供的生态系统服务价值最大, 调节功能价值贡献突出。地理探测器结果表明, 归一化植被指数 (NDVI) 是生态系统服务价值空间分异的主导因子, 气温和农民人均纯收入是次要影响因子; 生态系统服务价值空间分异影响因素探测力 (q 值) 达 30% 以上的交互组合有 32 种, 其中, NDVI 与土壤类型的 q 值近 46%, 自然、社会经济、政策因子的交互协同增强效应共同影响了陕甘宁地区生态系统服务价值在空间上的分异效果。

关键词 土地利用; 生态系统服务价值; 时空演变; 地理探测器

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.016

Spatial-temporal evolution pattern and response of ecosystem service value under land use change in the Yellow River Basin: A case study of Shaanxi-Gansu-Ningxia region, Northwest China

SUN Meng-hua¹, NIU Wen-hao², ZHANG Bang-bang², GENG Qing-ling³, YU Qiang^{1,4}✉

(¹College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ³School of Geo-Science & Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; ⁴State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract The Shaanxi-Gansu-Ningxia region is located in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin in the Northwestern China, which is vulnerable ecosystem. It plays an important role to define the regional pattern of ecological security. The ecological and economic issues in this region deserve attention and investigation. This study integrated land use data and the socio-economic data from 1995 to 2020, and used spatial analysis and geodetector to investigate the spatial-temporal variation of land use and ecosystem service value (ESV) and the driving forces of spatial difference of ESV in the region. The results showed that the cultivated land and unused land in the study area had been decreasing, whereas the construction land and forest land increased from 1995 to 2020. The overall ESV in the region showed a “decrease-increase” trend, which decreased by 1.2% from 1995 to 2000, and increased by 1.0% from 2000 to 2020. Grassland provided the largest ESV, contributing a prominent regulation function and service. The results of geodetector indicated that NDVI was the dominant factor for the spatial difference, while temperature and farmers' per capita net income were the important

收稿日期: 2021-06-29

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目 (41961124006, 41801210) 和 2020 年陕西生态空间治理重点研究项目 (20ST-169) 资助

作者简介: 孙梦华, 女, 1997 年生, 硕士研究生。主要从事土地利用与粮食安全研究。E-mail: menghua_sun@163.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41961124006, 41801210) and the Key Research Project of Shaanxi Eco-Space Management in 2020 (20ST-169).

网络首发时间: 2021-08-03 11:20:45 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20210802.1517.002.html>

influencing factors. There were mainly 32 types of the index of driving forces with the spatial difference of ESV (q value) being more than 30%. The q value of NDVI and soil type factor was nearly 46%. The ESV spatial difference in Shaanxi-Gansu-Ningxia region was affected by the interactive enhancement among natural, socio-economic and policy factors.

Key words land use; ecosystem service value; spatial-temporal evolution; geodetector.

生态系统服务是生态系统为人类提供的物质基础和环境条件^[1], 其可持续供给是社会可持续发展的基础^[2]。在经济高速发展和工业化、城市化水平不断提高的背景下^[3], 生态系统不断受到干扰甚至遭到破坏^[4], 如何保护生态系统, 提高生态系统服务的供给, 已经成为全球面临的一个共同挑战^[5]。生态服务价值作为衡量生态安全的核心指标, 对科学管理生态系统及实现可持续发展具有重要意义^[6]。

20 世纪 90 年代, Costanza 等^[7]最先明确了全球生态服务价值测算并进行论述后, 国内外学者以此为基础, 从生态服务基础概念^[8]出发, 基于不同空间尺度^[9]、不同生态系统^[10]等多个角度对生态系统服务进行量化评估^[11-12]。国内研究主要围绕生态服务价值的估算与实际应用展开^[13-14], 对生态服务价值的估算采用基于能值的生态学参数模型^[15-16]或基于单位面积价值的当量法^[17-19]。谢高地等^[20-22]基于 Costanza 模型建立了中国不同陆地生态系统的生态服务价值评估体系, 由于其操作简单, 结果易于比较, 在中国得到广泛应用。诸多学者在此基础上根据实际研究地域的生态系统和社会经济发展状况进行修正和改良^[23-25], 能相对准确地评估区域生态系统状况。随着生态服务价值评估方法的完善, 学者围绕生态服务价值的时空演变规律及其驱动机制开展研究, 研究主要集中在土地利用变化等直接驱动力^[26-27]和社会经济因素^[28-29]等间接驱动力对生态服务价值的影响。大多研究基于土地利用变化探究区域生态服务价值的响应^[30-31], 或者利用相关分析、多元回归分析等讨论生态服务价值的驱动机制^[32-33]。目前, 生态服务价值的估算、时空分布的研究比较常见, 但对生态服务价值影响机制的综合研究并不多, 也很少考虑影响因子的空间局部差异以及多因子交互影响作用。

陕甘宁地区位于黄河流域中上游, 地处黄土高原地形区。由于其水土流失严重, 生态环境脆弱, 是退耕还林等生态工程实施的重点监测省份。本研究基于陕甘宁地区的土地利用结构变化, 以谢高地等^[21]制定的当量因子表为基础, 对粮食产量、社会发展系数、空间异质性进行修正, 建立生态服务价值评估模型, 分析 1995—2020 年生态服务价值时空演变, 使用地理探测器^[34]来识别生态服务价值空间分异的驱动机制, 以期为区域生态文明建设及经济调控、生态补偿等相关政策提供理论帮助。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

陕甘宁地区 (31°42'—42°57' N, 92°12'—111°15' E) 位于黄河中上游, 西北内陆腹地, 跨越陕西、甘肃、宁夏 3 省 (区), 总面积约 69.78 万 km²。全境地势多变, 包括高原、山地、盆地、平原、沙漠和戈壁等复杂的地貌类型, 海拔在 460~3600 m。研究区横跨 4 个气候带, 从南到北包括亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性气候和高原高寒气候, 全区各地年降水量在 36.6~1240 mm, 降水量从东南向西北递减, 年均气温 -9~16 °C。陕甘宁地区地跨黄河、长江、内陆河 3 个流域, 水能资源丰富, 且日照充足、太阳能资源丰富, 适宜农林牧业生产。

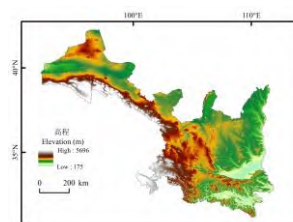


图 1 陕甘宁地区地理位置

Fig.1 Geographic location of the Shaanxi-Gansu-Ningxia region.

1.2 数据来源及处理

本研究数据主要包括土地利用数据和驱动因子指标数据。其中，土地利用数据为 1995、2000、2010 和 2020 年的土地利用分类图，数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。对各年份的土地利用类型进行重分类，得到耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型。

考虑到可能影响生态系统服务功能的自然、社会经济、政策等因素，结合研究区实际和数据的可获得性，最终选择 14 个驱动因子：1) 自然因子，包括温度、降水、高程、坡度、归一化植被指数 (NDVI) 和土壤类型；2) 社会经济因子，包括地区生产总值、人口数量、粮食产量、农业机械总动力、农民人均纯收入及农业化肥施用量；3) 政策因素，包括财政收入和财政支出。自然因子的数据源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。社会经济及政策数据来源于陕西、甘肃、宁夏的统计年鉴。各因子最终形成栅格数据并进行空间离散化形成数据集。

1.3 土地利用变化特征分析

单一土地利用动态是定量描述研究时段中特定土地利用类型的变化幅度，可以表征研究区某种土地利用类型在一段时间内的数量动态变化，比较不同时期的土地转变差异及未来的发展趋势。其计算公式为：

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

式中： K 为研究时段内某一土地利用类型动态度； U_a 和 U_b 分别表示研究期初和研究期末某土地利用类型的面积 (km^2)； T 为研究时段长 (年)。

利用 ArcGIS 空间分析工具中的地图代数对不同年份的土地利用数据叠加运算，获取土地利用转移图谱，反映研究期内各土地利用类型之间的转入和转出。

1.4 生态系统服务价值计算

以谢高地等^[21]对中国生态系统服务价值评估的当量因子法为基础，依据各类生态系统的价值比例，修正其各地类各功能的生态服务价值当量，获得陕甘宁地区的当量因子系数。结合研究区自然社会经济等多方面影响因素，通过统计年鉴以及《中国农产品价格调查年鉴》^[35]等资料，以陕甘宁地区恩格尔系数、城镇化率和 GDP 进行社会发展系数修订，以粮食产量为基准进行农田生态服务价值当量的修订，计算陕甘宁地区 1995—2020 年耕地平均粮食单产 ($4106.74 \text{ kg hm}^{-2}$) 及粮食市场价格 ($2.2414 \text{ yuan kg}^{-1}$)，按单位面积农田生态服务价值等于平均粮食单产市场经济价值的 1/7 计算^[20]，获得陕甘宁地区生态服务价值当量系数。其计算公式为：

$$ESV = \sum_{k=1}^n A_k \times VC_k$$

式中：ESV 为生态系统服务价值 (元)； A_k 为研究区第 k 种土地利用类型面积 (hm^2)； VC_k 为生态系统服务价值当量系数 (yuan hm^{-2})。

1.5 生态系统服务价值空间分异的地理探测

地理探测器模型是由王劲峰等^[34]提出的运用于空间数据探索的方法之一，其原理在于检验空间异质性，利用因子在空间分布上的一致性表明统计相关性。地理探测器包括 4 个探测器：分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测。本研究采用因子探测器及交互探测器对陕甘宁地区县域及不同地区影响生态服务价值的自然因子、社会经济因子以及政策因子的影响力进行探测。公式为^[34]：

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

式中： q 为生态系统服务价值空间分异影响因素探测力； L 为变量 Y 或因子 X 的分层 (分类或分区)； N 和 σ^2 分别为研究区内所有样本总数和整个区域的离散方差； N_h 和 σ_h^2 分别为 h 区域的样本数目和离散方差。

空间分异因子探测器中利用 q 统计量值来衡量自变量对因变量空间分异的解释力, 当 q 为 0 时表示自变量与因变量无关; q 为 1 时表示自变量完全控制了因变量的空间分布^[34]。 q 值越大, 表明影响因素对产生生态系统服务价值空间分异的影响越大。通过比较 q 值的大小, 探测出陕甘宁地区生态系统服务价值空间分异的主导因素。交互作用探测器主要用于识别不同因素之间的交互作用, 即评估驱动因子共同作用时是否会增强或减弱对因变量的生态系统服务价值空间分异的解释力, 或者这些因子对生态系统服务价值是否独立产生影响。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化及空间特征

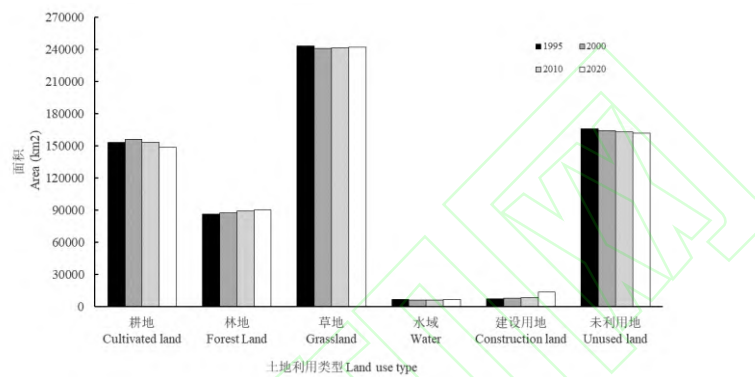


图 2 1995—2020 年陕甘宁地区土地利用变化
Fig.2 Land use change in Shaanxi-Gansu-Ningxia region during 1995-2020.

1995—2020 年, 陕甘宁地区土地利用类型以草地为主, 约占整个研究区面积的 35%, 未利用地和耕地次之, 水域面积最小 (图 2)。由表 1 可以看出, 研究期间, 陕甘宁地区土地利用变化的总体趋势表现为建设用地、林地面积增加, 水域面积维持相对稳定, 耕地、草地、未利用地面积减少。其中, 建设用地面积增加最多, 变幅最大, 耕地次之; 未利用地和耕地面积减少最快。1995—2000 年, 耕地面积增加, 草地面积减少, 2000—2020 年, 耕地面积明显减少, 林地面积显著增加, 草地面积小幅增加, 这与 1999 年退耕还林、天然林保护等生态保护工程的实施相关, 其在一定程度上调整了土地利用结构, 改善了生态条件。随着社会经济的快速发展和城市化进程的加快, 人口数量激增, 导致研究期内建设用地面积持续增长。

表 1 1995—2020 年陕甘宁地区土地利用变化
Table 1 Land use change in Shaanxi-Gansu-Ningxia region during 1995-2020

土地利用类型 Land use type	1995—2000		2000—2010		2010—2020		1995—2020	
	变化比例 Change proportion (%)	动态度 Dynamic degree (%)	变化比例 Change proportion (%)	动态度 Dynamic degree (%)	变化比例 Change proportion (%)	动态度 Dynamic degree (%)	变化比例 Change proportion (%)	动态度 Dynamic degree (%)
耕地 Cultivated land	0.5	0.4	-0.4	-0.2	-0.8	-0.3	-0.7	-0.1
林地 Forest land	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2
草地 Grassland	-0.4	-0.2	0.1	0.0	0.1	0.0	-0.1	-0.0
水域 Water	-0.1	-1.8	0.0	0.1	0.1	0.9	0.0	0.0
建设用地 Construction land	0.1	2.1	0.1	1.2	0.7	5.6	1.0	3.7
未利用地 Unused land	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-0.8	-0.1

陕甘宁地区草地分布范围最广, 未利用地集中于甘肃西北部, 耕地主要分布在陕西中部、宁夏北

部及甘肃省部分地区,林地主要分布在甘肃南部、陕西南部及秦岭地区,建设用地较多分布在沿黄河流域地区。由图 3 可以看出,草地和林地在与其它土地类型转换中较为剧烈。1995—2010 年,草地面积有所减少,主要转出为耕地、林地;由于部分耕地和草地转化为建设用地,建设用地面积有所增长;林地的增加主要依靠耕地和草地的供给,说明研究区退耕还林工程的实施具有一定效果,但存在一定复耕现象。2010—2020 年,耕地主要转为林地、草地,草地的增加主要源于耕地、林地和未利用地的转入,说明存在一定的耕地撂荒现象。从空间上看,林地、草地增长分布范围广,其中,秦岭地区林地增长较明显,甘肃南部林地分布更集中,而陕南、宁夏北部、甘肃东部地区的草地增长分布较为集中;建设用地增长地区相对集中,主要表现为以西安、银川、兰州 3 个省会城市为中心向四周辐射性分布,这是由于西部大开发战略的实施,促进陕甘宁地区的改革开放,促进关中-天水经济区、银川都市区等经济区的发展,导致研究区城市化进程加快。在城市化进程加快的同时,建设生态城市,尤其是提升都市区森林生态系统服务功能,包括都市区绿地、湿地、湖泊水域的保护,也是提升陕甘宁地区生态系统服务价值的一个路径。

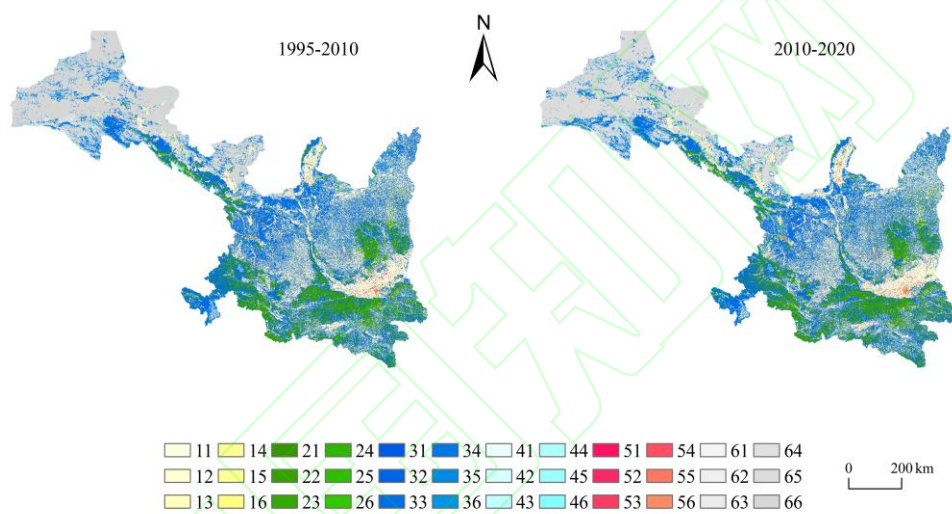


图 3 1995—2020 年陕甘宁地区土地利用转移
Fig.3 Land use transfer in Shaanxi-Gansu-Ningxia region during 1995-2020.

- 1) 耕地 Cultivated land; 2) 林地 Forest land; 3) 草地 Grassland; 4) 水域 Water; 5) 建设用地 Construction land; 6) 未利用地 Unused land.

2.2 生态系统服务价值演变趋势

研究期间,陕甘宁地区生态系统服务总价值呈先下降后上升的变化趋势(表 2),总价值从 1995 年的 28581.93 亿元下降到 2000 年的 28250.44 亿元,2010 年上升至 28426.04 亿元,2020 年上升至 28532.53 亿元。1995—2020 年,陕甘宁地区生态系统服务价值总体下降 49.39 亿元,减幅约 0.2%,主要是建设用地所提供的生态系统服务价值为负。1995—2000 年,对生态系统服务价值有负面影响的建设用地面积增加,同时未利用地减少,而草原大量放牧等造成的草原荒漠化,使草地面积减少,致使草地所贡献的生态系统服务价值持续减小,同时贡献较高的水域面积减少,导致研究区生态系统服务总价值量下降。2000—2020 年,生态系统服务总价值增加 282.10 亿元,呈上升趋势,这是由于城镇化的发展使大量未利用地转为建设用地,导致生态系统服务价值减少量逐年增加,然而一系列生态退耕工程的实施使得林地、水域面积有一定程度的增加,其生态系统服务价值的增加量超过了其他地类所带来的生态系统服务价值的萎缩。

表 2 陕甘宁地区 1995—2020 年各地类生态服务价值变化
Table 2 Changes of ecosystem service value (ESV) of different land use types in Shaanxi-Gansu-Ningxia region

土地利用类型 Land use type	生态服务价值 ESV ($\times 10^{11}$ yuan)				变化率 Change rate (%)			
	1995	2000	2010	2020	1995—2000	2000—2010	2010—2020	1995—2020
耕地 Cultivated land	29.24	29.85	29.34	28.38	2.1	-1.7	-3.2	-2.9
林地 Forest land	81.36	82.01	83.93	85.26	0.8	2.3	1.6	4.8
草地 Grassland	140.26	138.9	139.45	139.76	-1.0	0.4	0.2	-0.4
水域 Water	31.78	28.97	29.24	31.92	-8.8	0.9	9.2	0.5
建设用地 Construction land	-3.27	-3.61	-4.04	-6.3	10.5	11.7	56.1	92.6
未利用地 Unused land	6.45	6.38	6.33	6.29	-1.0	-0.8	-0.6	-2.4
总计 Total	285.82	282.50	284.26	285.33	-1.2	0.6	0.4	-0.2

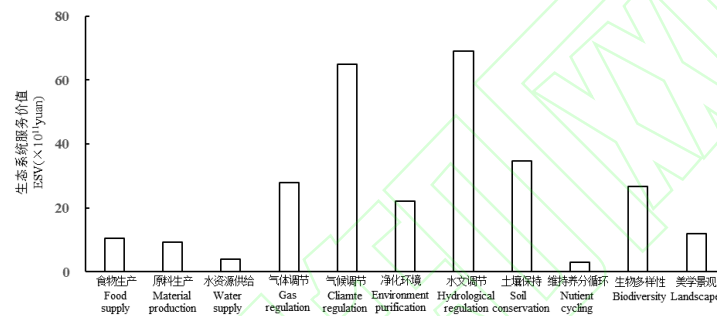


图 4 陕甘宁地区单项生态系统服务价值(ESV)
Fig. 4 Individual ecosystem service value (ESV) in Shaanxi-Gansu-Ningxia region.

各单项生态系统服务功能所占比例较为稳定：维持养分循环<水资源供给<原料生产<食物生产<美学景观<净化环境<生物多样性<气体调节<土壤保持<气候调节<水文调节（图 4）。陕甘宁地区水文调节功能价值最突出，占总服务价值的 24% 左右；气候调节的价值贡献次之，占总服务价值的 23% 左右；维持养分循环和水资源供给的生态服务贡献居于末位，二者之和不足 3%。陕甘宁地区生态系统提供的服务主要是水文和气候的调节服务，故调节性功能占主导地位。从其变化看，研究期内水文调节功能、净化环境功能，食物生产功能提供的生态系统服务价值减少，其他生态系统服务价值均有所增加。其中，水资源供给服务呈现先减少后增加的趋势，研究期内变幅最大，增加了 2.6%；而贡献居于首位的水文调节变化幅度次之，减少了 2.3%（表 3）。

表 3 陕甘宁地区 1995—2020 年各类型生态系统服务价值的变化
Table 3 Changes of different ecosystem service values (ESV) in Shaanxi-Gansu-Ningxia region in 1995-2020

生态系统服务 Ecosystem service	生态服务价值 ESV ($\times 10^{11}$ yuan)				变化率 Change rate (%)			
	1995	2000	2010	2020	1995—2000	2000—2010	2010—2020	1995—2020
食物生产 Food supply	10.56	10.66	10.58	10.41	0.9	-0.7	-1.6	-1.4
原料生产 Material production	9.33	9.36	9.38	9.34	0.3	0.3	-0.4	0.2
水资源供给 Water supply	4.13	3.89	3.97	4.23	-5.7	2.1	6.5	2.6

气体调节 Gas regulation	27.94	27.95	28.1	28.1	0.0	0.5	0.0	0.6
气候调节 Climate regulation	64.57	64.4	65.06	65.48	-0.3	1.0	0.7	1.4
净化环境 Environment purification	22.45	22.17	22.26	21.93	-1.2	0.4	-1.5	-2.3
水文调节 Hydrological regulation	70.74	68.11	68.42	69.08	-3.7	0.4	1.0	-2.3
土壤保持 Soil conservation	34.53	34.55	34.72	34.71	0.1	0.5	-0.0	0.5
维持养分循环 Nutrient cycling	3.05	3.06	3.06	3.05	0.3	0.2	-0.5	0.1
生物多样性 Biodiversity	26.61	26.49	26.74	26.94	-0.5	0.9	0.7	1.2
美学景观 Landscape	11.92	11.85	11.96	12.06	-0.6	0.9	0.8	1.2

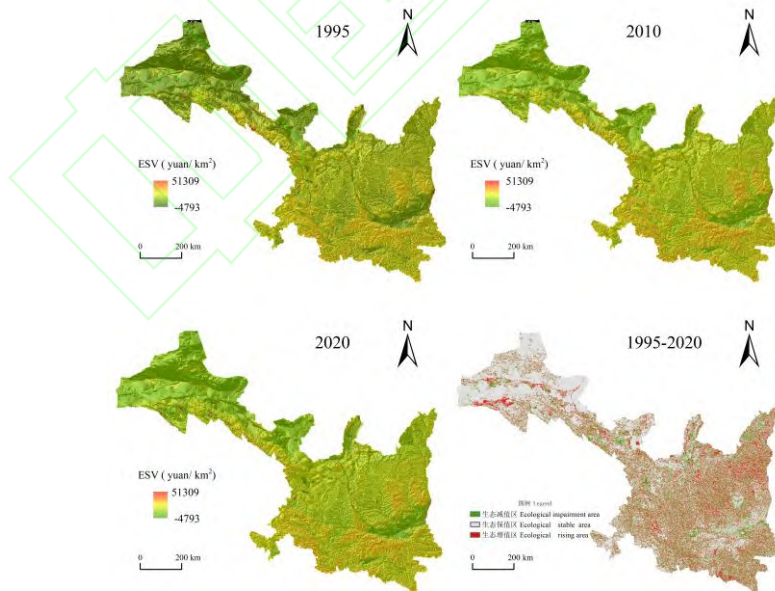


图 5 陕甘宁地区生态系统服务价值的空间分布及变化
Fig.5 Spatial distribution and change of ecosystem service value (ESV) in Shaanxi-Gansu-Ningxia region.

基于 1 km×1 km 网格单元统计的 1995、2010、2020 年陕甘宁地区生态系统服务价值显示，陕甘宁地区生态系统服务价值总体呈东南高、西北低，源于区域内海拔差异，导致东南部区域拥有更适合

植被生长的外部环境（图 5）。东南部区域大都为草地和森林，其贡献的生态系统服务价值较高。生态系统服务价值较低的区域主要集中在甘肃西北部，这是由于该区域土地覆盖类型以高寒草地、荒漠为主，其生态系统服务价值低。部分生态系统服务价值低的区域与城市发展方向类同，由于建设用地的生态系统服务价值为负，而城市内的绿地、湿地、湖泊水域分布松散且面积占比较小，故而对对应范围内的生态系统服务价值低。1995—2020 年，陕甘宁地区生态系统服务价值变化区域与土地利用变化区域基本一致。生态工程的实施改善了陕甘宁地区生态环境质量，陕北、甘肃东北部、宁夏南部地区林地、草地、水域均有所增加，是研究区生态系统服务价值增长较明显的区域。运用价值图谱分析方法^[36]将陕甘宁地区生态系统服务价值变化分为生态减值区、生态保值区和生态增值区，1995—2020 年间，生态增值区的生态系统服务价值逐渐增加，导致整个研究区表现出增长趋势。

2.3 生态系统服务价值空间分异的驱动力地理探测

通过地理探测器“因子探测”，获得陕甘宁地区生态系统服务价值空间分异的单因子影响程度并对比 14 个要素对研究区影响的重要性差异。2020 年地理探测结果显示，陕甘宁地区生态系统服务价值的空间分布差异受到自然要素和社会经济要素共同作用，各指标对生态系统服务价值空间分异影响的解释能力由高到低依次为 NDVI>农民人均纯收入>坡度>降水>财政收入>农业机械总动力>土壤类型>地区生产总值>农业化肥施用量>温度>人口数量>高程>财政支出>粮食产量。其中，NDVI 对生态系统服务价值的空间分异贡献率最大，其 q 值为 0.16；农民人均纯收入因子的 q 值为 0.15；坡度、降水因子的 q 值约 11%。自然因素和社会经济因素对生态系统服务价值空间分异均起到了较为重要的作用。粮食产量、财政支出等经济因素和政策因素的驱动因子 q 值在 5% 以下，但对生态系统服务价值的空间分异也起到了一定作用。

由表 4 可以看出，研究期间，自然、经济、政策因素在不同程度上解释了陕甘宁地区生态系统服务价值空间分异的驱动机制。自然因素（NDVI、坡度、降水、土壤）贡献占比较高，其中，NDVI 对生态系统服务价值空间分异的贡献最大，处于主导优势地位，说明土地覆被对研究区生态系统的影响程度较大，是陕甘宁地区空间分异的主导要素。在处于黄土高原区的陕甘宁地区，草地面积占比最大，应继续加强退耕还林、三北防护林等生态保护工程建设，扩大草地、林地面积，促进生态系统功能优化。

表 4 陕甘宁生态系统服务价值空间分异驱动因子探测结果

Table 4 Detection results of driving factors for spatial differentiation of ecosystem service value (ESV) in Shaanxi-Gansu-Ningxia region

探测因子 Detection factor	1995		2000		2010		2020	
	q 统计量 statistic	P	q 统计量 statistic	P	q 统计量 statistic	P	q 统计量 statistic	P
温度 Temperature	0.10	0.13	0.11	0.01	0.12	0.01	0.07	0.16
降水 Precipitation	0.11	0.08	0.18	0.00	0.11	0.01	0.11	0.01
高程 Elevation	0.07	0.05	0.11	0.00	0.09	0.01	0.07	0.04
坡度 Slope	0.11	0.03	0.14	0.00	0.14	0.00	0.12	0.02
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index (NDVI)	0.13	0.00	0.12	0.00	0.14	0.00	0.16	0.00
土壤类型 Soil type	0.09	0.07	0.12	0.00	0.12	0.00	0.09	0.15
地区生产总值 Regional gross product	0.03	0.51	0.04	0.30	0.05	0.21	0.08	0.02
人口数量 Population	0.04	0.36	0.03	0.59	0.06	0.14	0.07	0.09
粮食产量 Grain yield	0.04	0.24	0.04	0.40	0.03	0.44	0.01	0.96

农业机械总动力 Total powers of agriculture machine	0.06	0.13	0.14	0.0	0.09	0.01	0.10	0.01
农民人均纯收入 Farmers' per capita net income	0.18	0.00	0.14	0.0	0.10	0.00	0.15	0.00
农业化肥施用量 Agriculture fertilizer consumption	0.08	0.04	0.05	0.14	0.05	0.13	0.08	0.03
财政收入 Financial revenue	0.06	0.08	0.05	0.19	0.04	0.35	0.10	0.04
财政支出 Financial expenditure	0.03	0.66	0.03	0.66	0.07	0.36	0.05	0.63

由图 6 可以看出，自然、社会经济、政策指标两两交互后对生态系统服务价值的空间分异的解释程度表现为双因子增强型和非线性增强，故造成研究区域生态系统服务价值空间分异是受到不同驱动因子产生交互作用的效果，而非单一因子决定。其中，NDVI 与土壤类型的交互作用影响程度最大， q 值为 0.46，解释程度为 46%；交互程度对生态系统服务价值空间分异的影响程度达到 40% 以上的还有 NDVI 与气温（ q 值为 0.43）、NDVI 与农民人均纯收入（ q 值为 0.40）、NDVI 与降水量（ q 值为 0.40）。其余因子交互类型的 q 值虽然均在 40% 以下，但也说明多因子对生态系统服务价值空间分异有更高的影响。



图 6 陕甘宁地区生态系统服务价值空间分异驱动因子的交互作用探测

Fig.6 Interactive detection results of driving factors of spatial differentiation of ecosystem service value (ESV) in Shaanxi-Gansu-Ningxia region.

TEM: 气温 Temperature; PRE: 降水量 Precipitation DEM: 高程 Elevation; SLOPE: 坡度 Slope; NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; SOIL: 土壤类型 Soil type; GDP: 地区生产总值 Regional gross product; POP: 人口数量 Population; YIELD: 粮食产量 Grain yield; MACHINE: 农业机械总动力 Total powers of agriculture machine; FARMER: 农民人均纯收入 Farmers' per capita net income; FARM: 农业化肥施用量 Agriculture fertilizer consumption; INCOME: 财政收入 Financial revenue; OUTPUT: 财政支出 Financial expenditure. * 双因子增强型 Double factor enhancement; ** 非线性增强 Non-linear enhancement.

从交互探测的结果来看，自然要素内部交互作用大于自然要素与经济政策要素之间交互及社会经济要素内部交互作用。研究区域受到自身地理、气象条件的极大约束，各项生态工程的实施，有利于实现生态恢复。同时，生态系统服务价值的空间分布差异会因为受到外部要素驱动进一步加强或减弱。各自然因子与经济因子中的农业机械总动力及农民人均纯收入交互作用显著。人类通过灌溉、施肥等机械技术手段对农田生态系统进行调控，提高农机效率，优化农田生态结构，有助于改善研究区生态环境。

3 结 论

在生态安全保护的背景下，以陕甘宁地区为研究对象，基于 1995、2000、2010、2020 年的土地利用结构变化，建立生态系统服务价值评估模型，分析 1995—2020 年生态系统服务价值时空分异及其影响因素。主要结论如下：1) 1995—2020 年，研究区耕地、未利用地呈减少趋势，建设用地、林

地、水域呈增长趋势, 草地比较稳定。在各类土地利用类型中, 草地占地面积最大, 建设用地变化速度最快。2) 草地生态系统服务价值贡献最高, 是陕甘宁地区生态系统的重要组成部分, 而建设用地贡献的生态系统服务价值为负。研究期内, 草地面积大幅减少, 致使生态系统服务价值减少, 随着经济发展和城市化进程的加快, 未利用地转化为建设用地, 这也是研究区生态系统服务价值减少的重要原因。陕甘宁地区生态系统服务功能中, 调节服务和支持服务的贡献大于供给服务和文化服务。研究期内, 调节服务功能占主导地位。3) 陕甘宁地区生态系统服务价值的空间分布差异受到自然因子和社会经济因子共同作用, 其中, NDVI 对生态系统服务价值的空间分异贡献率最大, 其次为气温和农民人均纯收入因子。自然、社会经济、政策指标两两交互后对生态系统服务价值的空间分异的解释程度均表现为双因子增强型, 区域生态系统服务价值空间分异的结果由不同因素共同影响。

生态系统服务价值是衡量区域可持续发展的重要指标, 其驱动机制的认识是科学管理生态系统功能调节及优化正确决策的前提^[6]。国内外学者围绕生态系统服务对土地利用及社会经济要素的响应做了大量研究^[26-29], 但不能科学地表征各土地利用类型变化的影响。大部分研究忽略了建设用地的转入转出所带来的生态系统服务价值的增益和损失。本研究将建设用地的生态系统服务价值包含在内, 考虑其对气候调节、净化环境等生态系统服务的负面效应。

当量因子法适用于区域及全球尺度生态系统服务价值评估, 可以直观展示陕甘宁地区生态系统服务价值时空演变特征, 然而由于人地关系的复杂性和区域的异质性, 导致基于经验关系的生态系统服务价值货币化测算具有一定的不确定性。为了减弱这种不确定性, 同时体现区域差异性, 本研究采用 ESV 的区域修正系数制定陕甘宁地区生态系统服务价值评估当量系数。

地理探测器用于生态系统服务价值空间分异探测的结果显示出陕甘宁地区在研究期内产生空间分异的主导因子, 同时反映出各影响因素交互作用的特征, 明晰了生态系统服务价值产生空间分异的驱动机制。但不同自变量数据的离散化对因子探测的结果造成一定程度的影响, 未来将进一步确定其数据离散化的标准。

责任编辑 郗凤明
责任编辑 杨弘

参考文献

- [1] Song W, Deng XZ. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719
- [2] Groot RD, Brander L, Ploeg SVD, *et al.* Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 2012, 1: 50-61
- [3] Gómez-Baggethun E, Barton DN. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 2013, 86: 235-245
- [4] Arowolo AO, Deng XZ, Olatunji OA, *et al.* Assessing changes in the value of ecosystem services in response to land-use/land-cover dynamics in Nigeria. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 597-609
- [5] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值. 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. *Resources Science*, 2015, 37(9): 1740-1746]
- [6] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 等. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920 [Huang M-Y, Yue W-Z, Fang B, *et al.* Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, central China from 1970 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9): 1904-1920]
- [7] Costanza R, Arge RD, Groot RD, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1997, 25: 3-15
- [8] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640 [Ouyang Z-Y, Wang R-S, Zhao J-Z. Ecosystem services and their economic valuation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640]
- [9] Jia XQ, Fu BJ, Feng XM, *et al.* The tradeoff and synergy between ecosystem services in the Grain-for-Green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113
- [10] Jiang C, Wang F, Zhang HY, *et al.* Quantifying changes in multiple ecosystem services during 2000-2012 on the Loess Plateau, China, as a result of climate variability and ecological restoration. *Ecological Engineering*, 2016, 97: 258-271
- [11] 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念、核算方法与案例研究. 生态学报, 2013, 33(21): 6747-6761 [Ouyang Z-Y, Zhu C-Q, Yang G-B, *et al.* Gross ecosystem product: Concept, accounting framework and case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6747-6761]
- [12] Song W, Deng XZ, Yuan YW, *et al.* Impacts of land-use change on valued ecosystem service in rapidly urbanized North China Plain. *Ecological Modelling*, 2015, 318: 245-253

- [13] 吴建赛, 李波, 张新时. 生态系统服务价值变化在生态经济协调发展评价中的应用. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2554-2558 [Wu J-Z, Li B, Zhang X-S. Ecosystem service value and its application evaluation of eco-economic harmonious development. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2554-2558]
- [14] 李梦桃, 周忠学. 西安市城市景观的正负生态系统服务测算及空间格局. 地理学报, 2016, 71(7): 1215-1230 [Li M-T, Zhou Z-X. Positive and negative ecosystem services evaluation and its spatial pattern analysis on urban landscape: A case study of Xi'an City. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(7): 1215-1230]
- [15] Fu BJ, Liu Y, Lü YH, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8: 284-293
- [16] Geng QL, Ren QF, Yan HM, et al. Target areas for harmonizing the Grain for Green Program in China's Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2019, 31: 325-333
- [17] Constanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158
- [18] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 等. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. 地理研究, 2015, 34(4): 691-700 [Liu Y-Q, Liao L-W, Long H-L, et al. Effects of land use transitions on ecosystem services value: A case study of Hunan Province. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 691-700]
- [19] Ye YQ, Zhang JE, Wang T, et al. Changes in land-use and ecosystem service value in Guangdong Province, Southern China, from 1990 to 2018. *Land*, 2021, 10: 426
- [20] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196 [Xie G-D, Lu C-X, Leng Y-F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196]
- [21] 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. 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. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254]
- [22] 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. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919 [Xie G-D, Zhen L, Lu C-X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919]
- [23] Zhang J, Qu M, Wang C, et al. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: A case study at the county level in the Chinese Loess Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01110
- [24] Zhou DY, Tian YY, Jiang GH. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: Case study of the Jingjinji urban agglomeration, China. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 152-164
- [25] Liu YQ, Song W, Mu FY. Changes in ecosystem services associated with planting structures of cropland: A case study in Minle County in China. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 102: 10-20
- [26] Constanza R, Groot RD, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158
- [27] 陈春阳, 戴军虎, 王焕炯, 等. 基于土地利用数据集的三江源地区生态系统服务价值变化. 地理科学进展, 2012, 31(7): 970-977 [Chen CY, Dai JH, Wang HJ, et al. Changes of the value of ecosystem services in the Sanjiangyuan Region based on land use data. *Progress in Geography*, 2012, 31(7): 970-977]
- [28] He Y, Wang W, Chen YD, et al. Assessing spatio-temporal patterns and driving force of ecosystem service value in the main urban area of Guangzhou. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 3027
- [29] Song F, Su FL, Mi CX, et al. Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 141778
- [30] 张舟, 吴次芳, 谭荣. 生态系统服务价值在土地利用变化研究中的应用: 瓶颈和展望. 应用生态学报, 2013, 24(2): 556-562 [Zhang Z, Wu C-F, Tan R. Application of ecosystem service value in land use change research: Bottlenecks and prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(2): 556-562]
- [31] Liu JY. Impacts of LUCC processes on potential land productivity in China in the 1990s. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2005, 48: 1259-1269
- [32] 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. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1426-1440]
- [33] Peng J, Zhao MY, Guo XN, et al. Spatial-temporal dynamics and associated driving forces of urban ecological land: A case study in Shenzhen City, China. *Habitat International*, 2017, 60: 81-90
- [34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134]
- [35] 国家统计局. 中国农产品价格调查年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020 [National Bureau of Statistics. China Yearbook of Agricultural Price Survey. Beijing: China Statistics Press, 2020]
- [36] 史洋洋, 吕晓, 黄贤金, 等. 江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应. 自然资源学报, 2017, 32(6): 961-976 [Shi Y-Y, Lyu X, Huang X-J, et al. Arable land use transitions and its response of ecosystem services values change in Jiangsu coastal areas. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(6): 961-976]