

黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变

张鹏岩^{1,2}, 耿文亮¹, 杨丹¹, 李颜颜¹, 张宇¹, 秦明周^{1,2*}

(1. 黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 河南大学区域规划与发展研究中心, 河南大学农业与农村可持续发展研究所, 沿黄生态建设与乡村振兴研究河南省学科创新引智平台, 开封 475004; 2. 黄河文明省部共建协同创新中心, 开封 475001)

摘要: 基于黄河下游地区 1990—2015 年土地利用分类数据, 运用土地利用变化动态度、土地利用转移矩阵, 探究不同土地利用类型的变化程度及转移情况, 运用当量因子法、热点分析、重心模型、**地理探测器探究黄河下游地区县域尺度生态系统服务价值的时空演变及其空间分异**。结果表明: 1) 耕地、草地、未利用地面积逐渐减少, 建设用地面积增加, 耕地是建设用地面积增加的主要贡献者, 建设用地扩张存在侵占耕地的现象。2) 从时间尺度看, 地区生态系统服务价值逐年减少; 从空间尺度看, 县域尺度的高值区逐渐减少, 低值区逐渐增加; 从地均生态系统服务价值的变化率来看, 大部分县区的地均生态系统服务价值呈现持续降低趋势。3) 地均生态系统服务价值的高值区与低值区空间集聚程度明显, 但有逐渐弱化的趋势; 生态系统服务价值的重心始终分布在山东省郓城县, 重心迁移与两地区之间生态系统服务价值变化差值有关。4) 黄河下游地区县域尺度地均生态系统服务价值空间分异受自然因素和社会经济因素共同作用的影响, 是不同驱动因子共同作用的结果, 其中人为综合影响指数对区域生态系统服务空间分异的影响最大。

关键词: 土地利用; 生态系统服务价值; 时空演变; 空间分异; 黄河下游

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.033

中图分类号: X171.1; F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-11-0277-12

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 http://www.tcsae.org

Zhang Pengyan, Geng Wenliang, Yang Dan, 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 (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 277-288. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.11.033 http://www.tcsae.org

0 引言

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是指直接或间接促进人类福祉的生态特征、功能或过程, 即人类从生态系统中获得的所有益处^[1-2], 而全球范围内土地利用的变化、人口的增加和经济的日益增长都会大大消耗生态系统服务功能^[3-4]。从时间尺度和空间尺度来看, 生态系统服务变化及其脆弱性与土地利用/土地覆被的变化密切相关^[5], 土地利用/土地覆被的变化通常直接或者间接对生态系统格局与过程产生影响, 改变着生态系统的服务功能, 从而对区域环境产生深刻的影响, 进一步对全球环境变化产生深远影响^[6]。20世纪90年代以来, 中国经济发展又迎来一波新的浪潮, 城乡空间结构的转

型导致了土地利用发生巨大的变化, 主要表现为人口的大量增加, 城市的盲目扩张和经济的快速增长, 迫使大量耕地、林地、草地、未利用地等转变为建设用地, 人类对土地的利用和改造越来越频繁, 引发了一系列的生态和环境问题^[7]。因此, 基于土地利用变化的生态系统服务价值研究成为国内外生态系统服务研究的热点问题。

生态系统服务价值的引入将对人类社会的整体发展具有积极意义^[8]。土地利用变化作为其中重要的驱动因素, 对区域生态系统服务功能及其服务价值产生重要影响^[9]。为了对生态系统服务功能进行更直观的表达, Costanza 等^[1]首先进行了全球生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)的评估工作, 推动相关研究进入一个新的阶段^[10]。进入21世纪后, 各国研究人员不断梳理生态系统服务与土地利用变化之间的关系, 将生态系统服务研究、全球变化研究、土地利用变化研究等有机地融合在一起^[11-12]。在世界各国学者的研究基础上, Costanza 等^[13]总结了多年来生态系统服务价值评估的研究经验, 对生态系统服务价值的评估工作进行了进一步的改进。目前, 生态系统服务价值评估可分为两类, 一是基于单位面积价值当量因子的评估方法^[14], 二是基于单位服务功能量价格的评估方法^[15], 相对而言,

收稿日期: 2020-03-29 修订日期: 2020-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601175); 2020年度河南省高校创新人才支持计划: 资源利用与环境保护(20HASTIT017); 2019年河南省重点研发与推广专项(科技攻关-农业及社发领域)(192102310002); 2018年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2018GGJS019); 河南省科技攻关项目(202102310339)

作者简介: 张鹏岩, 副教授, 博导, 主要研究方向: 土地利用与生态环境。

Email: pengyanzh@henu.edu.cn

*通信作者: 秦明周, 教授, 博导, 主要从事土地资源管理研究。

Email: mzqin@henu.edu.cn

当量因子法更适用于区域和全球尺度生态系统服务价值的评估^[16]。国内学者根据中国生态系统类型和生态服务价值特征,建立了符合中国实际的中国生态系统单位面积生态服务价值当量^[14,17],在国家^[18]、城市群^[19]、省市县^[20-21]、流域^[22]等空间尺度得到广泛应用。全面评估区域的生态系统服务价值,能够提高公众的生态环保意识,帮助政府为中国生态系统保育政策制定和决策过程提供理论依据^[23]。

黄河流域是中华民族的摇篮,长期作为中国的政治、经济、文化中心,其发展逐渐由农耕文明为主导的传统社会向大规模城市化的现代社会转型,成为全球动态变化的缩影^[24]。黄河流域与黄河所流经的地区在国家发展中具有极为重要的战略意义^[25]。黄河下游地区是中国最重要的粮食主产区和生产核心区之一,耕地是研究区内十分重要的土地利用类型,经济和城市化快速发展,城市土地扩张模式对生态系统构成严重威胁^[26]。加强对黄河下游地区生态系统服务价值的研究,对整个黄河流域内区域社会经济的可持续发展具有重要意义。目前,国内学者对于黄河下游的生态系统服务研究主要集中在黄河三角洲^[27-28],对于整个黄河下游地区的研究较少。本研究基于土地利用变化数据,通过对生态系统服务价值进行估算,分析其时空演变特征,运用热点分析探究生态系统服务价值的高、低值集聚,运用重心模型探究重心变化的轨迹,运用地理探测器对影响区域生态系统服务价值空间分异的驱动因子进行探测,有助于深入了解社会在满足发展需求的同时对生态系统服务功能的改变程度,对黄河下游生态环境保护和可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况

黄河下游以河南省荥阳市的桃花峪为起点,下游全长785.6 km。参照已有研究成果对黄河下游地区的划分^[29],结合引黄灌区覆盖的区域,同时考虑地区经济发展与黄河下游的密切关联性以及地市级行政区划的完整性,本项目将黄河下游地区界定为河南、山东两省的20个地级市133个县(含市辖区),总面积达14.81万km²。黄河下游地区地形以平原、山地和丘陵为主,海拔在-2~1 682 m,西部是以嵩山为主的豫西山地末段,西北部为太行山脉的豫北山地,东部为鲁中山地丘陵区,中部为豫东平原,北部为鲁西北平原区,中部和北部的平原区地势坦荡,土层深厚,是耕地最为集中的地区,构成华北平原的一部分。黄河下游因泥沙量大,长期淤积形成举世闻名的“地上悬河”。由于独特的地貌类型,使下游地区决溢频繁。多次决溢使其内部土壤存在着盐碱、沙化、干旱、渍涝、排水不良等多种障碍因素,加之人类对该地区的不合理开发利用,导致下游地区生态系统脆弱性升高、稳定性较差,在快速城镇化、工业化、农业现代化的背景下,建设用地扩张、水资源短缺以及城乡居民土地需求多样化等对区域生态安全提出了挑战。

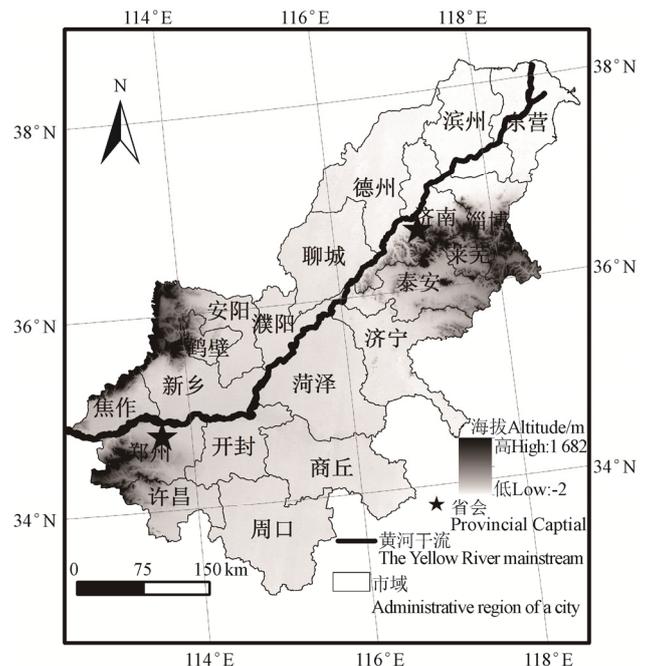


图1 研究区概况

Fig.1 Location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究采用的黄河下游地区土地覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn),为1990、2000、2010和2015年中国土地利用现状遥感监测解译数据,空间分辨率为1 000 m×1 000 m。根据研究区土地资源特征和研究目标,按照“中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统”对各年份的土地利用类型进行一级重分类,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。DEM是30 m的ASTER GDEM V2数据,来源于地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn)。粮食产量数据来自于1991、2001、2011、2016年的《河南统计年鉴》《山东统计年鉴》《中国统计年鉴》,粮食价格根据2016年《中国农产品价格调查年鉴》计算得出。

本研究的驱动因子指标选取主要考虑对生态系统服务价值产生影响的自然因素和人文经济因素。结合研究区实际情况,基于数据的可获取性,最终确定2类9项指标:①自然因子:高程、降水、气温、NDVI、土壤侵蚀强度;②社会经济因子:人为影响综合指数、地均GDP、人口空间分布数据、土地利用类型。高程数据基于DEM数据提取,人为影响综合指数参考前人研究计算得到^[30],降水、气温、NDVI、土壤侵蚀强度、地均GDP、人口空间分布数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)。降水、气温基于中国1980年以来逐年年降水量空间插值数据集提取,NDVI数据基于中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集提取,土壤侵蚀强度基于中国土壤侵蚀空间分布数据提取,地均GDP和人口空间分布数据分别基于中国GDP空间分布公里网

格数据集和中国人口空间分布公里网格数据集进行提取。若驱动因子为数值量，需要进行离散化处理得到需要的类型数据集。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度

土地利用动态度是定量评价土地利用变化速度的指标^[31]，表征研究区内某一时段不同土地类型的变化速度，包含单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。

利用单一土地利用动态度(K)来表达黄河下游地区一定时间内某一土地利用类型数量的速度变化。其模型表达式为

$$K = \frac{U_j - U_i}{U_i \cdot T} \times 100\% \quad (1)$$

式中 i 为第 i 类土地利用类型， U_j 、 U_i 分别为研究期末与研究期初某一土地利用类型的面积， T 为研究时长。

利用综合土地利用动态度(LC)来表示黄河下游地区一定时间内综合土地利用类型数量的速度变化。其模型表达式为

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

式中 U_i 为研究初期第 i 类土地利用类型面积； ΔU_{i-j} 为研究时段第 i 类土地利用类型转化为非 i 类土地利用类型面积的绝对值； n 为不同的土地利用类型数量。

2.2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述^[32]，可以全面、具体地刻画区域土地利用变化方向以及研究期末各土地利用类型的来源与构

成，反映出人类活动所引导的土地利用变化方向，更好地揭示土地利用格局的时空演化过程。其数学表达式为

$$U_{ij} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1n} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{m1} & U_{m2} & \dots & U_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中 U_{ij} 为 i 类用地转为 j 类用地的土地面积； n 为不同土地利用的类型数量； i, j 分别为转移前后的土地利用类型。运用 ArcGIS 10.3 软件对反映研究区内土地利用的栅格数据进行处理，计算得到研究期内的土地利用转移数据，构建土地利用转移矩阵。

2.2.3 生态系统服务价值测算

单位面积生态系统服务价值的等效系数是评估区域生态系统服务价值的基础。本研究以“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”^[17]为基础来测算黄河下游地区生态系统服务价值，按单位面积耕地生态系统服务价值等于平均粮食单产市场经济价值的 1/7 计算，通过查阅《河南统计年鉴》《山东统计年鉴》《中国统计年鉴》，“国家统计局关于 2015 年粮食产量的公告”等，计算得出黄河下游地区 1990—2015 年粮食单位面积产量为 5 162.88 kg/hm²，该地区主要农产品为小麦、玉米、水稻，同时为了使生态系统服务价值年份对比更直观，选取参照 2015 年小麦、玉米、水稻价格的平均值作为实际计算的粮食价格，经查阅《中国农产品价格调查年鉴》并进行计算，得到黄河下游地区粮食单价为 2.57 元/kg，确定黄河下游地区单位面积生态系统服务价值系数表(表 1)，并根据前人研究^[1,17,20,33]，假定建设用地的价值系数为 0。

表 1 黄河下游单位面积生态系统服务价值系数表

Table.1 Factor of ecosystem services value per unit area in the Lower Yellow River

生态系统类型 Ecosystem types		生态系统服务价值 Ecosystem services value/(Yuan·hm ⁻² ·a ⁻¹)					
		耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	建设用地 Built-up land	水域 Water	未利用地 Unused land
供给服务 Provisioning service	食物生产	1 895.37	625.47	815.01	0	1 004.55	37.91
	原材料生产	739.19	5 648.20	682.33	0	663.38	75.81
	小计	2 634.56	6 273.67	1 497.34	0	1 667.92	113.72
调节服务 Regulating service	气体调节	1 364.67	8 188.00	2 843.05	0	966.64	113.72
	气候调节	1 838.51	7 714.15	2 956.78	0	3 904.46	246.40
	水文调节	1 459.43	7 752.06	2 880.96	0	35 576.08	132.68
	废物处理	2 634.56	3 260.04	2 501.89	0	28 146.23	492.80
	小计	7 297.17	26 914.24	11 182.68	0	68 593.41	985.59
支持服务 Supporting service	保持土壤	2 786.19	7 619.38	4 245.63	0	777.10	322.21
	维持生物多样性	1 933.28	8 548.12	3 544.34	0	6 501.12	758.15
	小计	4 719.47	16 167.50	7 789.97	0	7 278.22	1 080.36
文化服务 Cultural service	美学景观	322.21	3 942.37	1 648.97	0	8 415.44	454.89
	小计	322.21	3 942.37	1 648.97	0	8 415.44	454.89
合计 Total		14 973.42	53 297.78	22 118.96	0	85 955.00	2 634.56

根据不同类型土地利用面积，结合公式(4)分别计算研究区内生态系统服务价值总量，由于研究区内各研究单元受面积大小的影响较大，使得县域间生态系统服务价值空间分异的结果并不合理，因此，结合公式(5)计算研究区内各研究单元的地均生态系统服务价值，基于此分析黄河下游地区生态系统服务价值的时空演变、空间集聚和驱动因子探测，并结合公式(6)计算研究区

内地均生态系统服务价值的变化率。

$$ESV = \sum_{i=1}^n (U_i \cdot VC_i) \quad (4)$$

$$AESV = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i \cdot VC_i)}{\sum_{i=1}^n U_i} \quad (5)$$

$$C = \frac{AESV_{t2} - AESV_{t1}}{AESV_{t1}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 ESV 为研究区内生态系统服务价值总量, 元; U_i 为土地利用类型 i 的面积, hm^2 ; VC_i 为黄河下游地区土地利用类型 i 单位面积内提供的生态系统服务价值系数, 元/ ($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$); $AESV$ 为地均生态系统服务价值, 元/ hm^2 , $AESV_{t1}$ 和 $AESV_{t2}$ 分别为 $t1$ 和 $t2$ 时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, %。

为分析生态系统服务价值随时间的变化对于生态系统价值系数的依赖程度, 本研究使用敏感性指数, 通过上下调整已确定的各类土地利用类型价值系数的 50% 大小, 计算 ESV 对 VC 变化的响应, 最终确定生态系统服务价值随着时间的变化情况和对价值系数的依赖程度^[34]。当 VC 变化 1% 时引起 ESV 的变化后, 若 $CS > 1$ 时, 说明 ESV 对 VC 富有弹性; 若 $CS < 1$ 时, 则缺乏弹性, CS 比值越大, 说明 VC 的准确性对 ESV 的计算越关键。计算公式如下

$$CS = \left| \frac{(ESV_{h2} - ESV_{h1}) / ESV_{h1}}{(VC_{ih2} - VC_{ih1}) / VC_{ih1}} \right| \quad (7)$$

式中 CS 为敏感性指数; VC 是价值系数、 $h1$ 、 $h2$ 分别为初始价值系数和调整后的值; i 为土地利用类型。

2.2.4 热点分析

热点分析已经被广泛应用于探索生态系统服务价值的空间异质性研究中^[35], 热点和冷点分别代表生态系统服务价值及其变化量在统计上显著的高值空间集聚和低值空间集聚, 并将其空间集聚的位置进行可视化表达。其公式为

$$Gi^* = \frac{\sum_b W_{ab}(d) S_a}{\sum_b S_b} \quad (8)$$

$$Z(Gi^*) = \frac{Gi^* - E(Gi^*)}{\sqrt{Var(Gi^*)}} \quad (9)$$

式中 $E(Gi^*)$ 为 Gi^* 值的数学期望, $Var(Gi^*)$ 为 Gi^* 值的方差; W_{ab} 为第 a 、 b 地理空间单元的空间权重系数。当 $Z(Gi^*) > 1.96$ 时, 表示为 ESV 变化的热点区, 当 $Z(Gi^*)$ 介于 $>1.65 \sim 1.96$ 时, 为 ESV 次热点区; 当 $Z(Gi^*)$ 介于 $>-1.65 \sim 1.65$ 时, 为 ESV 不显著变化区; 当 $Z(Gi^*)$ 介于 $-1.96 \sim -1.65$ 时, 为 ESV 次冷点区; 当 $Z(Gi^*) < -1.96$ 时, 为 ESV 冷点区。

2.2.5 重心分析

重心模型是研究区域发展过程中要素空间变动的重要分析工具。由于区域发展是要素集聚与扩散的过程, 各要素的重心位置处于不断变动之中, 要素重心的移动反映了区域发展的空间轨迹^[36]。本研究构建的区域生态系统服务价值重心模型公式如下

$$\bar{x} = \frac{\sum_{e=1}^n (m_{ef} \cdot x_e)}{\sum_{e=1}^n m_{ef}} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{e=1}^n (m_{ef} \cdot y_e)}{\sum_{e=1}^n m_{ef}} \quad (11)$$

式中 m_{ef} 为 f 年第 e 个评价单元的 ESV ; (x_e, y_e) 为第 e 个评价单元的地理中心坐标; (\bar{x}, \bar{y}) 为 ESV 第 f 年的重心坐标。重心移动的方向的计算公式如下

$$\theta = \left[\frac{k \cdot \pi}{2} + \arctan \left(\frac{\bar{y}_{t2} - \bar{y}_{t1}}{\bar{x}_{t2} - \bar{x}_{t1}} \right) \right] \times \frac{180^\circ}{\pi} \quad (12)$$

式中 θ 为研究期间重心偏移的角; $(\bar{x}_{t1}, \bar{y}_{t1})$ 和 $(\bar{x}_{t2}, \bar{y}_{t2})$ 分别为研究期初和研究期末的重心坐标; k 为调整系数, 确保 $\theta \in (-180^\circ, 180^\circ)$ 。本研究将逆时针方向定为正方向, 0° 为正东方向。

迁移距离的计算公式如下

$$D = \sqrt{(\bar{x}_{t2} - \bar{x}_{t1})^2 + (\bar{y}_{t2} - \bar{y}_{t1})^2} \quad (13)$$

式中 D 为指研究期间重心的移动距离, 其余指标含义与公式 (12) 一致。

2.2.6 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的统计学方法^[37]。因子探测可以探测各驱动因子多大程度上解释了分析变量的空间分异; 交互探测可以识别不同驱动因子之间共同作用是否增加或减弱对分析变量的解释力^[38]。本研究采用地理探测器模型对黄河下游地区影响 ESV 空间分异的自然因子、社会经济因子进行探测。公式如下

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (14)$$

式中 q 为某一影响因子对区域 ESV 空间分异的影响力; σ_h^2 和 σ^2 分别为次一级区域和全区 ESV 的方差; N 为整个研究区的样本数; N_h 为次一级样本数; L 为次一级区域个数。其中, q 取值范围为 $[0, 1]$, 若 q 值越大, 表明驱动因子对 ESV 空间分异的影响越大, 能更大程度解释对黄河下游地区 ESV 空间分异驱动机制。

3 结果与分析

3.1 黄河下游地区土地利用变化特征

基于遥感数据和统计数据, 得到黄河下游地区不同土地利用类型面积变化结构 (图 2)。1990—2015 年, 耕地始终是研究区内最主要的土地利用类型, 占全区总面积 70% 以上, 其次是建设用地。研究区内不同土地利用类型的变化趋势主要表现为: 耕地、草地和未利用地面积逐渐减少; 建设用地和水域面积也在逐渐增加, 水域面积增幅较小; 林地面积略有增加, 变化不大。

结合黄河下游地区土地利用数据, 根据公式 (1) 和公式 (2) 分别计算研究区单一土地利用动态度和综合土地利用动态度 (表 2)。从单一土地利用动态度来看, 1990—2000 年间, 研究区未利用地变化最剧烈, 其次是建设用地, 分别是 -31.60% 和 7.33%。2000—2010 年间, 未利用地变化幅度仍然最大, 但较上一阶段, 变化

幅度略有降低；水域和建设用地变化幅度较上一阶段有明显的提高；草地较上一阶段减少幅度最大，其次是耕地；2010—2015 年间，耕地、草地、未利用地较上一阶段都有轻微变化幅度，水域、建设用地面积增加幅度较为明显。总体来看，黄河下游地区近 25a 间，土地利用变化幅度较为剧烈的是未利用地、建设用地、水域和草地，分别是-48.57%，23.19%，13.24%和-11.62%，耕地变化幅度受制于基数大，变化幅度不明显，林地变化幅度较小。从综合土地利用动态度来看，1990—2015 年变化始终维持在 0.10%左右，2000—2010 年间最高，为 0.13%，2010—2015 年最低，仅 0.07%，主要由于此研究时段较短。土地利用动态度与人类对生态环境开发的强度密切相关，人口增加、建设用地面积扩张，未利用地逐渐被开发，耕地被侵占，出现草地退化等现象；水域面积受气候、径流影响较大；退耕还林还草工程的实施对于林地具有重要的保护措施。地类变化频繁，主要是自然因素和社会经济因素综合作用的影响，因此，各个时期土

地利用动态度出现不同幅度的变化。

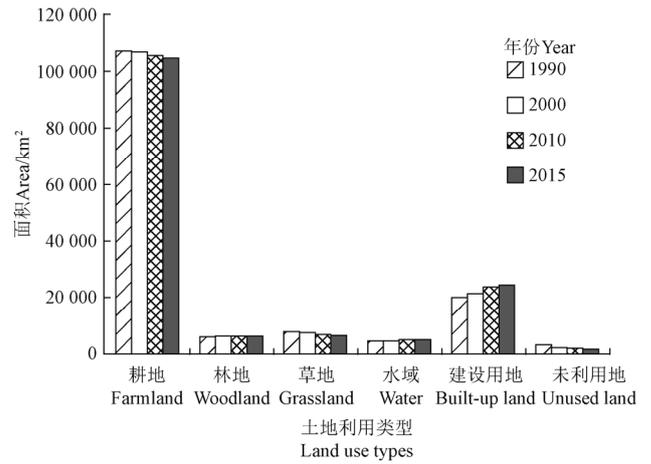


图 2 1990—2015 年黄河下游地区不同土地利用类型面积变化
Fig.2 Area change of different land use types in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

表 2 1990—2015 年黄河下游地区土地利用变化动态度
Table 2 Dynamic changes of land use in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

时期 Time	单一土地利用动态度 Single land use change/%						综合土地利用动态度 Comprehensive land use change/%
	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land	
1990—2000	-0.45	0.25	-2.07	2.96	7.33	-31.60	0.11
2000—2010	-1.43	0.25	-9.63	8.87	10.64	-24.42	0.13
2010—2015	-0.87	0.00	-0.14	1.02	3.74	-0.51	0.07
1990—2015	-2.73	0.50	-11.62	13.24	23.19	-48.57	0.10

根据 1990—2015 年黄河下游地区土地利用转移矩阵(表 3)，近 25 年间，研究区内土地利用类型发生转变的面积为 7 764 km²，占总面积的 5.24%，耕地、草地和未利用地面积呈现减少态势，分别减少了 2 894、1 476、856 km²。水域和建设用地扩张明显，面积分别增加了 595、4 598 km²，林地面积变化微小。其中耕地的转出面积(4 433 km²)占

总转出面积(7 764 km²)的 57.10%，是其他土地利用类型转入的主要贡献者。建设用地则表现出大幅扩张的态势，转入面积高达 4 650 km²，且有 82.19%来源耕地。水域的转入面积为 1 300 km²明显大于转出面积 705 km²，有 38.69%来自耕地，46.54%来自未利用地。草地大量转出，净转出面积为 856 km²，草地转出量的 63.80%转入耕地。

表 3 1990—2015 年黄河下游地区土地利用转移矩阵
Table3 Land use transition in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

	2015							总计 Total	转出总计 Exported area
	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land			
1990 年	耕地 Farmland	102 855	85	13	503	3 822	10	107 288	4 433
	林地 Woodland	60	5 890	2	9	58	0	6 019	129
	草地 Grassland	578	52	6 550	157	82	37	7 456	906
	水域 Water	526	16	25	3 729	123	15	4 434	705
	建设用地 Built-up land	25	0	0	26	19 821	1	19 873	52
	未利用地 Unused land	350	9	10	605	565	1 502	3 041	1 539
	总计 Total	104 394	6 052	6 600	5 029	24 471	1 565	148 111	-
转入总计 Imported area	1 539	162	50	1 300	4 650	63	-	7 764	

3.2 黄河下游地区地均生态系统服务价值的时空演变

3.2.1 地均生态系统服务价值的时间变化

根据公式(4)计算得出 1990、2000、2010、2015 年黄河下游地区 ESV 分别为：2 480.24、2 478.13、2 477.95、2 461.38 亿元，近 25a 间 ESV 降低了 18.86 亿元根据公式(5)计算得出 AESV 分别为：167.36、167.22、167.21、166.09

万元/km²。1990—2000 年间年均降低 0.09%，2000—2010 年间年均降低 0.01%，2010—2015 年间年均降低 1.34%，表明了黄河下游地区生态系统总体趋于恶化。

3.2.2 地均生态系统服务价值的空间变化

根据公式(5)计算得到黄河下游地区县域尺度 AESV 的空间分布(图 3)。为了更加清晰地表达县域尺度 AESV

的空间演变趋势,将 AESV >210 万元/ km^2 划分为高值区、 $190\sim 210$ 万元/ km^2 为较高值区、 $170\sim 190$ 万元/ km^2 为中高值区、 $150\sim 170$ 万元/ km^2 为中低值区、 $130\sim 150$ 万元/ km^2 为较低值区、 <130 万元/ km^2 为低值区。整体来看,黄河下游地区 AESV 空间分布差异明显, AESV 的高值区主要分布于主要分布在豫北、豫西和鲁中地区,这些地区海拔较高,多山地丘陵,不适宜进行耕作,因此林地和草地分布范围较广,生态环境相对较好;低值区主要分布在中部和北部的平原地区,这些地区除了耕地外多分布建设用地,生态环境相对较差。具体来看,1990 年的高值区主要集中在 4 个区域:豫北和豫西 13 个县区(焦作市、郑州市以及新乡市、鹤壁市、安阳市的少部分县区)、鲁中 7 个县区(淄博市、莱芜市、济南市

及泰安市的部分县区)、以及垦利县和微山县;有 17 个县区属于低值区,主要在周口市和商丘市。2000 年相对于 1990 年比,高值区明显较少,减少的区域主要集中在豫西地区,主要表现在郑州市辖区、中牟县、孟州市、武陟县,这一阶段该区域城市化发展水平较快,出现建设用地侵占耕地、草地等现象;低值区较前一阶段的变化主要表现在河南省新增加了长葛市、鄢陵县,山东省新增了定陶县和莘县。2010 年较 2000 年相比,高值区和低值区没有明显变化,主要归功于全面推行退耕还林还草政策的实施。2015 年与前一阶段相比,高值区较前一阶段数量有所增加,河南省新增了南乐县,山东省新增了菏泽市辖区以及茌平县,而黄河下游中部平原地区有形成低值区连接的趋势。

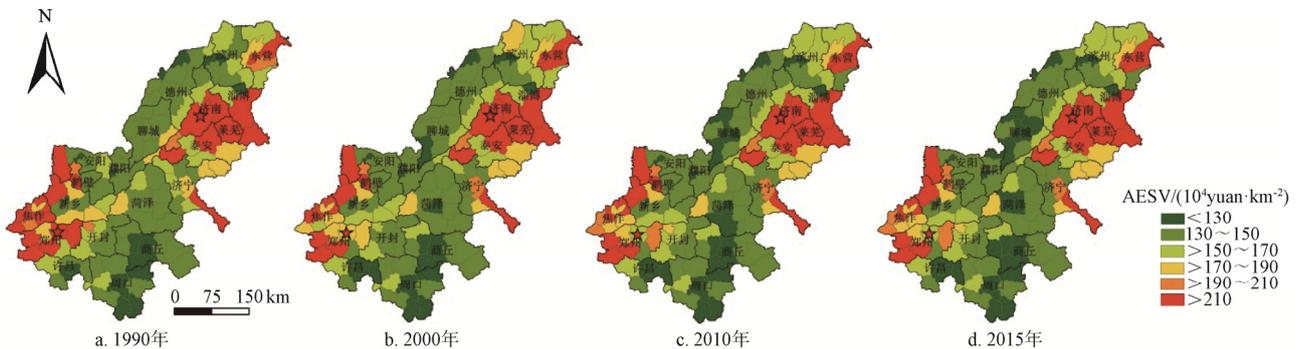


图 3 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of Average Ecosystem Services Value (AESV) in the lower Yellow River from 1990 to 2015

根据公式(6)计算得出黄河下游县域尺度 AESV 的变化率,得到 AESV 变化率的空间分布(图 4)。具体来看,1990—2000 年间,81.2% 的县区 AESV 处于减少趋势,17.29% 的县区处于增加趋势,增加幅度较大的县区主要分布在山东省,其中微山县增幅高达 83.22%,减少幅度较大的县区主要分布在河南省,其中郑州市辖区、开封市辖区、周口市辖区、濮阳市辖区、新郑市、中牟县、

开封县、封丘县、长垣县、武陟县、温县、孟州市 AESV 减少幅度超过 10%。2000—2010 年间,36.84% 的县区 AESV 处于增加趋势,60.9% 的县区趋于减少,这一阶段,呈增加趋势的县区数量较 1990—2000 年这一阶段增加 26 个。2010—2015 年间,86.47% 的县区 AESV 趋于较低幅度的降低,增长的地区主要为山东省 12 个县区以及河南省 3 个县区。

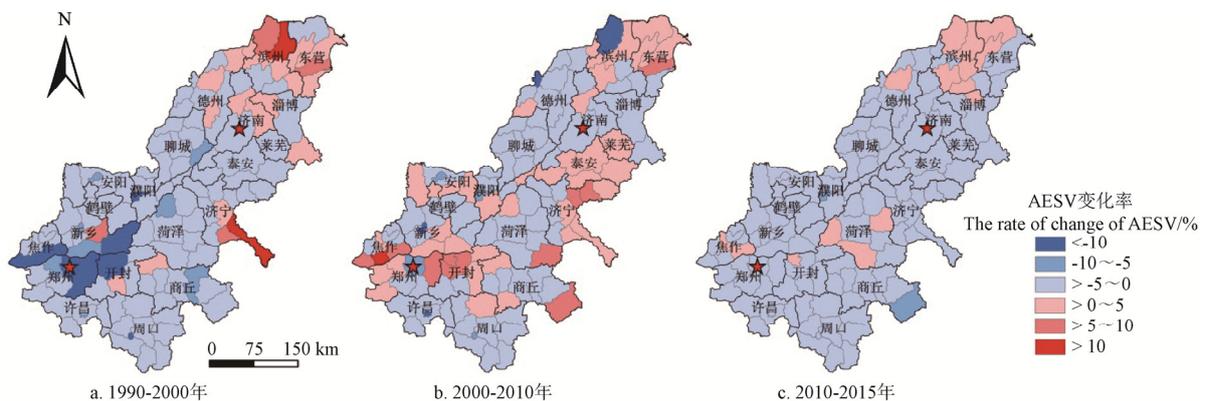


图 4 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 变化率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the change rate of AESV in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

3.2.3 生态系统服务价值对价值系数的敏感性分析

根据公式(7),通过上下调整 50% 的生态系统服务价值系数来计算敏感性指数(表 4),结果表明,黄河下游地区所有土地利用类型的生态系统服务价值系数的敏感性指数均小于 1,由高到低依次为耕地、水域、林地、

草地、未利用地。其中,耕地的敏感性指数为 $0.63\sim 0.65$,说明当耕地的价值系数增加 1% 时,生态系统服务价值将增加 $0.63\%\sim 0.65\%$ 。敏感性分析表明,黄河下游地区的生态系统服务价值是缺乏弹性的,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。

表 4 生态系统服务价值敏感性指数变化表

Table4 Changes of sensitivity index of ecosystem service value

年份 Year	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	未利用地 Unused land
1990	0.65	0.13	0.07	0.15	0.003
2000	0.64	0.13	0.07	0.16	0.002
2010	0.64	0.13	0.06	0.17	0.002
2015	0.63	0.13	0.06	0.18	0.002

3.3 黄河下游地区地均生态系统服务价值冷热点格局及演变特征

为探究 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 空间集聚特征，根据公式 (8) 和公式 (9)，采用 ArcGIS 10.3 软件中的热点分析工具，对 1990、2000、2010、2015 四个年份 AESV 进行冷热点探测，得到黄河下游地区 AESV 的冷热点分布 (图 5)。整体来看，黄河下游地区 AESV 的空间格局保持相对稳定，热点区仍然主要分布在豫西

和鲁中的山地地区；冷点区主要分布在豫东平原地区。具体来看，1990 年 AESV 的空间集聚最为明显，热点区主要分布在豫西地区郑州市、焦作市下辖的 12 个县区和鲁中地区泰安市、莱芜市下辖的 5 个县区，除此之外，水域面积分布较广的山东省微山县和鱼台县也成为高值集聚的区域；冷点区主要集中在周口市辖区、商水县、项城市、淮阳县、西华县、鹿邑县、柘城县、太康县、睢县、宁陵县等耕地分布较广的平原地区。2000 年热点区和冷点区较前一阶段出现萎缩趋势，鲁中地区的济南市辖区、泰安市辖区和新泰县由热点区变为了次热点区，豫西地区的热点区有一半变成了不显著区，豫东地区的次冷点区逐渐消失，变为不显著区，冷点区大量消减。2010 年较 2000 年冷点区和热点区变化并不明显，只有河南省许昌市辖区、许昌县、襄城县与鄢陵县新增成为次冷点区。2015 年冷点区已经消失，冷热点和热点区变化极其微小，只有周口市次冷点区减少。

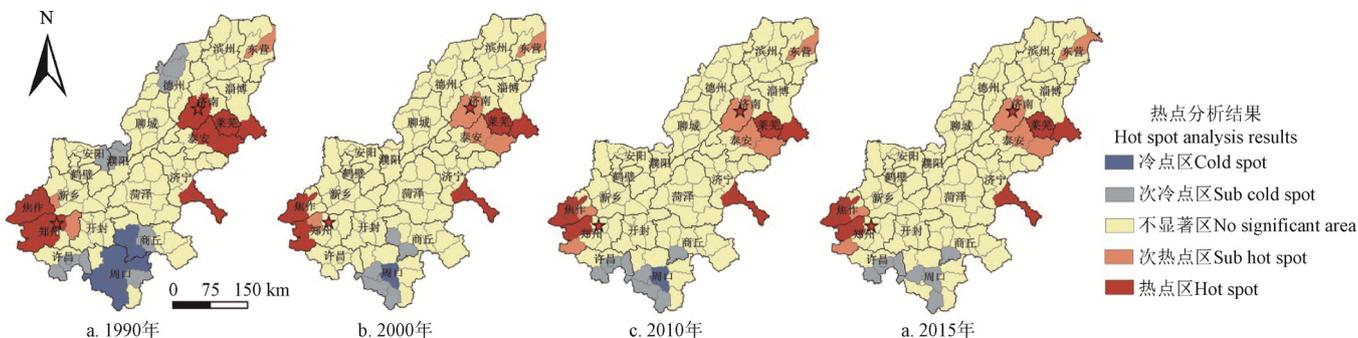


图 5 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 的空间集聚图
Fig.5 Spatial clustering of AESV in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

为深入探究 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 变化的空间分布特征，仍然采用 ArcGIS 10.3 中热点分析工具，对 1990—2000 年、2000—2010 年、2010—2015 年 3 个时段 AESV 的变化量进行冷/热点探测，得到黄河下游地区 AESV 增减变化的冷热点分布 (图 6)。

具体来看，1990—2000 年，AESV 变化的热点区分布在济宁市的微山县和鱼台县。冷点区和次冷点区集中分布在河南省焦作、郑州、新乡、开封四市相邻的县区。2000—2010 年，价值量变化较前一阶段出现了明显的高值集聚，热点区主要分布在焦作市下辖孟州市、

温县、沁阳市、博爱县和紧邻的巩义市，开封市辖区、开封县及北部相邻的封丘县，以及山东的曲阜市。次热点区有 5 个县区，其中 3 个分布在热点区周围，2 个分布在东营市的利津县和垦利县。冷点区转移至许昌下辖 6 个县区以及北边的新郑市。2010—2015 年，与前一阶段相比，冷热点迁移明显，热点区分布在沾化县和滨州市辖区，次热点区数量衰減至 2 个，冷点区分布在郑州市下辖的新密市、新郑市、中牟县，以及永城市、曲阜市和宁阳县，次热点区分布在郑州市辖区、夏邑县和汶上县。

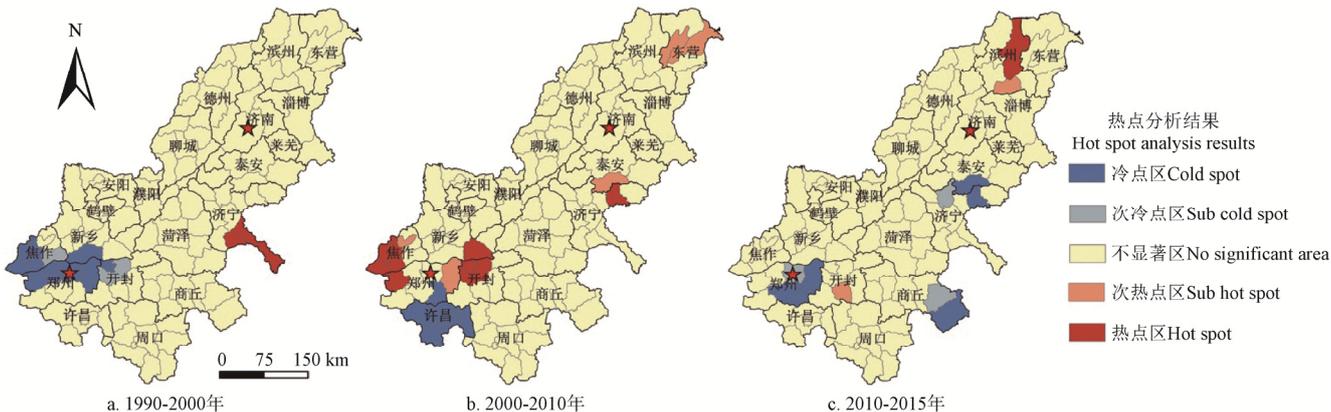


图 6 1990—2015 年黄河下游地区 AESV 变化的空间集聚图
Fig.6 Spatial clustering of AESV changes in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

3.4 黄河下游地区生态系统服务价值重心变化轨迹

根据区域 ESV 重心模型公式 (10) 和公式 (11) 计算得出 1990—2015 年间黄河下游地区 ESV 的重心变化趋势 (图 7)。由图 7 可知, 1990 年的重心是 (115°51'25.2"E, 35°42'39.6"N), 2000 年的重心是 (115°55'8.4"E, 35°43'15.6"N), 2010 年的重心是 (115°54'50.4"E, 35°42'46.8"N), 2015 年的重心是 (115°54'50.4"E, 35°42'54"N)。根据重心分布的位置来看, 1990—2015 年间 ESV 的重心始终分布在山东省郓城县, 说明山东地区的 ESV 始终高于河南地区。根据公式 (12) 计算黄河下游地区 ESV 重心的移动方向, 根据公式 (13) 计算重心的移动距离, 得到 1990—2000 年间 ESV 重心向北偏东 78° 方向迁移了 7.57km, 结合 1990—2000 年间的 ESV 来看, 整个黄河下游地区减少了 2.11 亿元, 河南地区减少了 44.46 亿元, 山东地区增加了 42.35 亿元, 两地区 ESV 差值出现较大幅度的增加, 表现为 ESV 的重心向 ESV 增加的地区 (山东地区) 明显迁移趋势。2000—2010 年间, ESV 重心向南偏东 24.5° 方向迁移了 0.71km, 这一阶段整个地区的 ESV 减少了 0.18 亿元, 河南地区增加 5.69 亿元, 山东地区减少了 5.87 亿元, 因此这一阶段重心出现向河南地区迁移的趋势。2010—2015 年间, 重心迁移较前一阶段几乎没有变化, 在这 5a 间, 整个黄河下游地区减少了 16.56 亿元, 这一阶段与前两个阶段相比出现了较大幅度的减少, 但是由于河南地区和山东地区生态系统服务价值减少数值十分相近, 且相对均衡, 河南地区减少了 8.51 亿元, 山东地区减少了 8.05 亿元, 因此这一阶段黄河下游地区 ESV 的重心变化非常微小。

3.5 黄河下游地区生态系统服务价值空间分异的驱动分析

基于黄河下游地区县域研究尺度, 以 AESV 作为因变量, 以气温 (X1)、降水 (X2)、高程 (X3)、土壤侵蚀强度 (X4)、NDVI (X5)、人为影响综合指数 (X6)、地均 GDP (X7)、人口空间分布数据 (X8)、土地利用类型 (X9) 为因变量, 基于 GeoDetector 工具的“因子探测”和“交互作用探测”功能, 输入地理探测器进行驱

动因子及驱动因子之间交互作用的定量分析, 探讨黄河下游地区 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黄河下游 AESV 空间分异的因子探测结果 (表 5) 和交互探测结果 (表 6)。

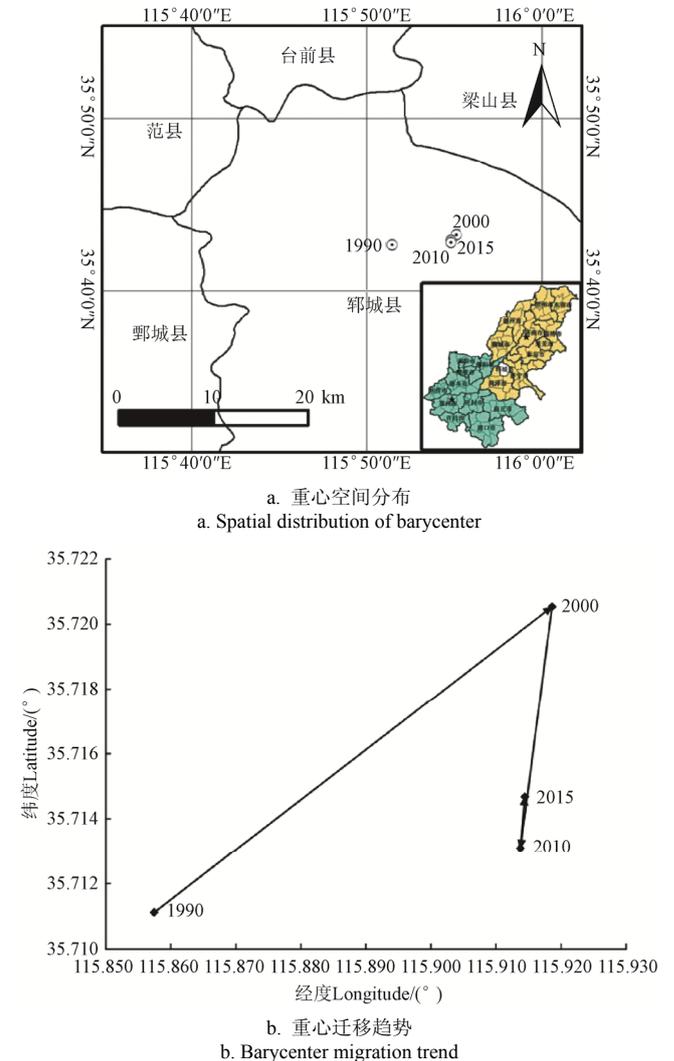


图 7 1990—2015 年黄河下游地区 ESV 重心变化轨迹
Fig.7 Change of barycenter of average ESV in the Lower Yellow River from 1990 to 2015

表 5 地理探测器的因子探测

Table 5 Factor detector of the GeoDetector

驱动因子 Driving factor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
q 统计量 q statistic	0.14	0.12	0.23	0.05	0.12	0.75	0.10	0.05	0.02
P 值 P value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注: X1、X2、X3、X4、X5、X6、X7、X8、X9 分别指气温、降水、高程、土壤侵蚀强度、NDVI、人为影响综合指数、地均 GDP、人口空间分布数据和土地利用类型。下同。

Note: X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8 and X9 indicate temperature, precipitation, altitude, soil erosion intensity, NDVI, human comprehensive impact index, per capital GDP, population spatial distribution data, land use type, respectively. The same as below.

从表 5 中可以看出, 黄河下游地区 AESV 空间上的差异受自然因素和社会经济因素共同作用的影响, 根据各驱动因子的 q 统计量从大到小排序为: 人为影响综合指数、高程、气温、降水、NDVI、地均 GDP、人口空间分布数据、土壤侵蚀强度、土地利用类型, 可以看出, 人类综合影响指数 (X6) 的 q 统计量为 0.75, 对区域生态系统服务的影响最大, 是黄河下游地区县域尺度 AESV

空间分异最主要的原因, 也反映了黄河下游地区是人类活动的热点区域, 人类活动频繁, 社会经济发展迅速。高程 (X3) 的 q 统计量也达到 0.23, 是影响其空间分异的重要因素; 气温 (X1)、降水 (X2)、NDVI (X5) 在 0.10~0.15 之间, 也是影响其空间分异较为重要的因素。而地均 GDP (X7)、人口空间分布 (X8)、土壤侵蚀强度 (X4)、土地利用类型 (X9) q 值小于 0.1, 说明这些

驱动因子一定程度上影响着 AESV 的空间分异，但是影响程度较小。

表 6 地理探测器的交叉探测

Table 6 Interaction detector of the GeoDetector

驱动因子 Driving factor	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1	0.14								
X2	0.31	0.12							
X3	0.28	0.31	0.23						
X4	0.17	0.17	0.23	0.05					
X5	0.31	0.12	0.31	0.17	0.12				
X6	0.85	0.87	0.78	0.75	0.87	0.75			
X7	0.25	0.23	0.29	0.14	0.23	0.80	0.10		
X8	0.24	0.21	0.29	0.11	0.21	0.78	0.16	0.05	
X9	0.16	0.16	0.24	0.07	0.16	0.79	0.13	0.09	0.02

从表 6 中可以看出，任何两种驱动因子对黄河下游地区县域尺度 AESV 空间分异的交互作用均大于一个驱动因子的单独作用，也证实了黄河下游地区县域尺度 AESV 空间分异结果的不是由单一驱动因子造成的，而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，人为影响综合指数 (X6) 与气温 (X1)、降水 (X2)、NDVI (X5) 之间的交互作用程度达到 0.85 左右，不同驱动力之间的交互作用对区域 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区域 AESV 在空间上分异效果。黄河下游地区生态环境较为脆弱，受制于自然因素的约束，加之人类活动较为频繁，因此要采取与自然环境、社会发展水平相适应的发展模型，加强生态保护治理，促进生态文明建设。

4 结论与讨论

1) 耕地是黄河下游地区最主要的土地利用类型，1990—2015 年间，全区耕地、未利用地、草地面积逐渐减少，分别减少了 2 894、1 476、856 km²，而建设用地和水域面积逐渐增加，分别增加了 4 598、595 km²。从不同土地利用类型的动态变化度来看，变化最剧烈的未利用地，幅度最小的是林地；综合土地利用变化度基本上稳定在 0.1% 左右。从土地利用类型的转移情况来看，耕地是其他土地利用类型转入的主要贡献者，建设用地表现出大幅扩张的态势，且有 82.19% 来源耕地。

2) 从时间尺度看，黄河下游地区近 25 年间生态系统服务价值 ESV 降低了 18.86 亿元，生态系统需要进行保护和改善。从空间尺度来看，县域尺度的地均生态系统服务价值 AESV 空间分布差异明显，高值区主要分布于主要分布在豫西、豫北的山地地区和鲁中山地丘陵区，低值区主要分布在建设用地较多的平原地区。高值区逐渐减少，低值区逐渐增加，且低值区有形成沿着平原地区南北贯通的趋势。黄河下游地区各县区 AESV 的变化较为明显，大多数县区处于减少趋势，2000—2010 年较前一阶段情况稍有好转。本研究通过敏感性指数来反映 ESV 对生态价值系数的依赖程度，表明所选用的生态价值系数比较合理。

3) 黄河下游地区 AESV 的热点区主要分布在海拔较高、植被覆盖较广的豫西和鲁中地区，冷点区分布在豫东平原地区。整体来看，热点区和冷点区都有逐渐减少的趋势，空间集聚趋于弱化。微山县和鱼台县受广阔水域面积的影响始终是热点区。重心模型研究表明，山东地区 ESV 始终高于河南地区，重心前移距离与两地区之间生态系统服务价值变化差值有关。

4) 黄河下游地区 AESV 空间上的差异受自然因素和社会经济因素共同作用的影响，人为综合影响指数对区域生态系统服务的影响最大，是黄河下游地区县域尺度 AESV 空间分异最主要的原因，其次是高程，地均 GDP、人口空间分布、土壤侵蚀强度、土地利用类型等对于 AESV 空间分异的影响较小。黄河下游地区县域尺度 AESV 空间分异结果的不是由单一驱动因子造成的，而是由不同驱动因子共同作用的结果，不同驱动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区域 AESV 在空间上分异效果。

黄河下游地区未来的发展需完善生态保护的法律法规、强化监管责任，严格控制城市建设用地的盲目扩张，划定区域生态保护红线，加大生态用地保护力度，同时还需做好区域范围内的生态补偿，从而促进黄河下游地区生态经济系统协调高质量发展。在建设用地的 ESV 评估方面，由于其自然的复杂性对区域 ESV 总量的结果影响较大，在今后的研究中将从不同城乡等级、多种建设用地生态功能角度探究建设用地 ESV 的评估。在 ESV 空间分异的驱动力探测方面，本研究仅以 2015 年为例探测了黄河下游地区县域尺度 AESV 空间分异的驱动因子，驱动因子探测还可以从多个年份、不同空间尺度开展研究，揭示不同驱动因子对于 ESV 在时序和多层次空间上的变化规律。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
 - [2] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
 - [3] Obeng E A, Aguilar F X. Value orientation and payment for ecosystem services: Perceived detrimental consequences lead to willingness-to-pay for ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 458-471.
 - [4] Ridging L E, Redhead J W, Oliver T H, et al. The importance of landscape characteristics for the delivery of cultural ecosystem services[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1145-1154.
 - [5] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom[J]. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
 - [6] 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.
- Fu Bojie, Zhang Liwei. Land-use change and ecosystem services: Concepts, methods and progress[J]. *Progress in*

- Geography, 2014, 33(4): 441-446. (in Chinese with English abstract)
- [7] Chen W X, Ye X Y, Li J F, et al. Analyzing requisition-compensation balance of farmland policy in China through telecoupling: A case study in the middle reaches of Yangtze River Urban Agglomerations[J]. Land Use Policy, 2019, 83: 134-146.
- [8] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 705-719.
- [9] 约日古丽卡斯木, 杨胜天, 孜比布拉·司马义. 新疆艾比湖流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 260-269.
- Yueriguli Kasimu, Yang Shengtian, Zibibula Simayi. Impact of land use change on ecosystem service value in Ebinur Lake Basin, Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 260-269. (in Chinese with English abstract)
- [10] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, et al. The value of nature and the nature of value[J]. Science, 2000, 289(5478): 395-396.
- [11] Carpenter S R, Mooney H A, Agard J, et al. Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment[J]. PNAS, 2009, 106(5): 1305-1312.
- [12] Simonit S, Perrings C. Bundling ecosystem services in the Panama Canal watershed[J]. PNAS, 2013, 110(23): 9326-9331.
- [13] Costanza R, Groot R D, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014, 26(1): 152-158.
- [14] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibeta Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196. (in Chinese with English abstract)
- [15] 赵同谦, 欧阳志云, 王效科, 等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 443-452.
- Zhao Tongqian, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke, et al. Ecosystem services and their valuation of terrestrial surface water system in China[J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(4): 443-452. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, 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. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
- Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 Huiming, Gao Jixi, Liu Xiao, 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. (in Chinese with English abstract)
- [19] 刘金雅, 汪东川, 张利辉, 等. 基于多边界改进的京津冀城市群生态系统服务价值估算[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4192-4204.
- Liu Jinya, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Estimation of the ecosystem service value of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-boundary improvement[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4192-4204. (in Chinese with English abstract)
- [20] 姚小薇, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 249-256.
- Yao Xiaowei, Zeng Jie, Li Wangjun. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 249-256. (in Chinese with English abstract)
- [21] 侯孟阳, 姚顺波, 邓元杰, 等. 格网尺度下延安市生态服务价值时空演变格局与分异特征: 基于退耕还林工程的实施背景[J]. 自然资源学报, 2019, 34(3): 539-552.
- Hou Mengyang, Yao Shunbo, Deng Yuanjie, et al. Spatial-temporal evolution pattern and differentiation of ecological service value in Yan'an city at the grid scale based on Sloping Land Conversion Program[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 539-552. (in Chinese with English abstract)
- [22] 陈明叶, 刘素红, 于连海, 等. 大清河阜平流域生态系统结构变化的服务价值响应研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1376-1389.
- Chen Mingye, Liu Suhong, Yu Lianhai, et al. Response of ecosystem service value to ecosystem structure change in Fuping Basin of the Daqinghe River[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(8): 1376-1389. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望[J]. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
- Li Wenhua, Zhang Biao, Xie Gaodi. Research on ecosystem services in China: Progress and perspectives[J]. Journal of

- Natural Resources, 2009, 24(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [24] Wohlfart C, Mack B, Liu G H, et al. Multi-faceted land cover and land use change analyses in the Yellow River Basin based on dense Landsat time series: Exemplary analysis in mining, agriculture, forest, and urban areas[J]. Applied Geography, 2017, 85: 73-88.
- [25] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. 地理学报, 2019, 74(12): 2431-2436.
Lu Dadao, Sun Dongqi. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2431-2436. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘永强, 龙花楼. 黄淮海平原农区土地利用转型及其动力机制[J]. 地理学报, 2016, 71(4): 666-679.
Liu Yongqiang, Long Hualou. Land use transitions and their dynamic mechanism in the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(4): 666-679. (in Chinese with English abstract)
- [27] Wang C D, Li X, Yu H J, et al. Tracing the spatial variation and value change of ecosystem services in Yellow River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 270-277.
- [28] 吴大千, 刘建, 贺同利, 等. 基于土地利用变化的黄河三角洲生态服务价值损益分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 256-261.
Wu Daqian, Liu Jian, He Tongli, et al. Profit and loss analysis on ecosystem services value based on land use change in Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 256-261. (in Chinese with English abstract)
- [29] Cen Y F, Zhang P Y, Yan Y H, et al. Spatial and temporal agglomeration characteristics and coupling relationship of urban built-up land and economic hinterland: A case study of the Lower Yellow River, China[J]. Sustainability, 2019, 11(19): 5218.
- [30] 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.
Huang Muyi, Fang Bin, Yue Wenzhe, et al. Spatial differentiation of ecosystem service values and its geographical detection in Chaohu Basin during 1995-2017[J]. Geographical Research, 2019, 38(11): 2790-2803. (in Chinese with English abstract)
- [31] 宋戈, 王越. 松嫩高平原土地利用格局变化时空分异[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 225-233.
Song Ge, Wang Yue. Spatial and temporal distribution of land use pattern change in Songnen high plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(18): 225-233. (in Chinese with English abstract)
- [32] 徐岚, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272-277.
Xu Lan, Zhao Yi. Forecast of land use pattern change in DongLing District of Shenyang: an application of Markov process[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1993, 4(3): 272-277. (in Chinese with English abstract)
- [33] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
Liu Guilin, Zhang Luocheng, Zhang Qian. Spatial and temporal dynamics of land use and its influence on ecosystem service value in Yangtze River Delta[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 3311-3319. (in Chinese with English abstract)
- [34] 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 Shuping, Zhang Shuwen, Yan Yechao. Impacts of land use change on ecosystem services value in the Northeast China Transect (NECT)[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(8): 879-886. (in Chinese with English abstract)
- [35] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173-2187.
Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of ecoenvironmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173-2187. (in Chinese with English abstract)
- [36] 吴凯, 顾晋怡, 何宏谋, 等. 基于重心模型的丘陵山地区耕地利用转换时空特征研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 247-254.
Wu Kai, Gu Jinyi, He Hongmou, et al. Spatiotemporal characteristics of cultivated land use transition in hilly and mountainous regions based on barycenter model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(7): 247-254. (in Chinese with English abstract)
- [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.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese with English abstract)
- [38] 张荣天, 陆建飞. 长江经济带耕地集约利用多尺度时空特征与影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(24): 271-278.
Zhang Rongtian, Lu Jianfei. Multiscale spatiotemporal characteristics and influencing factors of intensive cultivated land use in Yangtze River Economic Belt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(24): 271-278. (in Chinese with English abstract)

Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the Lower Reaches of the Yellow River Region

Zhang Pengyan^{1,2}, Geng Wenliang¹, Yang Dan¹, Li Yanyan¹, Zhang Yu¹, Qin Mingzhou^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Region, Research Center of Regional Development and Planning, Institute of Agriculture and Rural Sustainable Development, Henan Overseas Expertise Introduction Center for Discipline Innovation (Ecological Protection and Rural Revitalization along the Yellow River), Henan University, Kaifeng 475004, China; 2. Collaborative Innovation Center of Yellow River Civilization Provincial Co-construction, Kaifeng 475001, China)

Abstract: Land use/land cover change (LUCC) is one of the important driving forces of ecosystem services change. Because ecosystem services depend on different ecological and geographical processes on different spatial and temporal scales, it is of great significance to study ecosystem services based on LUCC. In recent years, the LUCC in the Lower Yellow River has changed obviously, which has a huge impact on the regional ecological environment. Strengthening the research on the land use and Ecosystem Services Value (ESV) can effectively promote the protection of the ecological environment in the Lower Yellow River, which is of great significance for the sustainable development of the whole Yellow River basin ecosystem. Based on the land use classification data of the Lower Yellow River from 1990 to 2015, using the land use change degree and land use transfer matrix, this paper explored the spatiotemporal distribution of land transfer change, and used the equivalent factor method, hot spot analysis and focus model to explore the spatiotemporal evolution and spatial heterogeneity of the county ecosystem service value in the Lower Yellow River. The results showed that: 1) During 1990-2015, the area of farmland, grassland and unused land decreased by 2 894, 1 476 and 856 km² respectively, and the area of built-up land increased by 4598 km². Farmland was the main contributor of the increase of built-up land. 2) From the perspective of spatiotemporal scale, the ESV of the Lower Yellow River decreased by 1.885 billion yuan in 25 years, and the areas with higher average ESV decreased gradually, while the areas with lower average ESV increased gradually. The ESV at the county level changed obviously, and most of the regions showed a downward trend. Sensitivity analysis showed that the ESV of the Lower Yellow River was inelastic to the value coefficient. Even though the value coefficient was uncertain, the calculation of ecosystem services in the whole study area was still stable, which could prove that the research results were credible. 3) From 1990 to 2015, the spatial concentration degree of the high value and low value areas of average ESV in the Lower Yellow River was obvious, but there was a trend of gradual weakening. The barycenter of ESV was located in Yuncheng County, Shandong Province. The ecosystem service value of Shandong Province was always higher than Henan Province. 4) The spatial differentiation of ecosystem service value in the lower reaches of the Yellow River was influenced by the interaction of natural factors, social factors and economic factors, and was the result of the interaction of different driving factors, among which the human comprehensive impact index has the greatest impact on the spatial differentiation of ecosystem service. Therefore, the ecological protection of the Yellow River should strengthen the protection of the vulnerable areas of the ecosystem, strengthen the construction of regional ecological barriers, build the evaluation system of the coordinated development of the ecological economy, and realize the high-quality development of the ecological economy in the Lower Yellow River.

KeyWords: land use; ecosystem service value; spatial-temporal evolution; spatial differentiation; the Lower Yellow River