

doi: 10.12097/gbc.2021.09.014

# 黄河流域生态系统服务价值时空变化特征

高萌萌, 杨楠\*, 王轶, 刘琼, 李小磊, 郅二铨

GAO Mengmeng, YANG Nan\*, WANG Yi, LIU Qiong, LI Xiaolei, ZHI Erquan

中国地质环境监测院, 北京 100081

China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China

**摘要:**【研究目的】黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带,开展生态系统服务价值时空变化特征分析,对黄河流域生态环境保护 and 高质量可持续发展具有十分重要的意义。【研究方法】本文计算了黄河流域2000年、2005年、2010年、2015年、2020年的生态系统服务价值,并运用热点分析法和生态经济协调模型,探究了生态系统服务价值变化率的高值和低值聚集分布特征及黄河流域各地市生态和经济协调程度,从国土空间规划的角度提出相关建议。【研究结果】①2000—2020年黄河流域生态系统服务价值(ESV)整体呈增加趋势,ESV由2000年的40217.33亿元增加到2020年的41135.10亿元,其中,草地的ESV值最大,未利用地的ESV最小。②黄河流域各地级市单位面积生态系统服务价值呈现“南高北低、中游高上下游低”的空间分布特征,2000—2020年各地级市单位面积生态系统服务价值较稳定,整体格局没有发生显著变化。各阶段ESV变化率的高值区与低值区空间集聚程度明显,聚集区主要集中在北部和东部。③2000—2020年黄河流域GDP的增加率远高于生态系统服务价值的增加率,生态和经济整体处于低度协调和低度冲突水平。【结论】2000—2020年间,黄河流域生态系统服务价值虽呈增长趋势,但增速低于GDP,生态与经济协调度较低,未来需要加强优化生态安全格局,确保生态系统服务功能的可持续发展。

**关键词:** 黄河流域;生态系统服务价值;土地利用;热点分析;生态经济协调模型;国土空间规划

**创新点:** (1)分析了黄河流域2000—2020年生态系统服务价值的时空变化特征;(2)不同于以往单一关注生态保护或经济发展研究,本研究在深入分析黄河流域生态系统服务价值与经济增长关系的基础上,从国土空间规划的角度出发提出相关建议。

中图分类号: X171.1; P5 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)02/03-0353-11

Gao M M, Yang N, Wang Y, Liu Q, Li X L, Zhi E Q. Temporal and spatial variation characteristics of ecosystem service value in the Yellow River Basin. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(2/3): 353-363

**Abstract:** 【Objective】 The Yellow River Basin is an important ecological barrier and important economic zone in China. The analysis of the temporal and spatial variation characteristics of ecosystem service value (ESV) is of great significance to the ecological environment protection and high-quality sustainable development of the Yellow River Basin. 【Methods】 The ESV in 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020 was calculated, and the hot spot analysis method and eco-economic harmony index model were used to explore the high and low value aggregation distribution characteristics of the change rate of ESV and the degree of eco-economic harmony of cities in the Yellow River Basin, and relevant suggestions were put forward from the perspective of national land spatial planning. 【Results】 ① The ESV of the Yellow River Basin will increase from 4021.733 billion yuan in 2000 to 4113.510 billion yuan in 2020. The ESV of grassland is the largest and that of unused land is the smallest. The service value of hydrological regulation, soil conservation and biodiversity maintenance is at a high level. ② The ESV of cities in the Yellow River Basin is characterized by the

收稿日期: 2023-09-07; 修订日期: 2024-04-08

资助项目: 中国地质调查局项目《全国空间规划试点区资源环境综合地质调查》(编号: DD20190506)、《国家重大区域发展战略区资源环境承载力监测评价》(编号: DD20230117)、《国家级地质环境监测与预报项目》(编号: 10220222018000009060)

作者简介: 高萌萌(1989-),女,高级工程师,从事国土空间规划研究。E-mail: gaomm\_321@163.com

\*通信作者: 杨楠(1982-),男,教授级高级工程师,从事生态环境地质、国土空间规划研究。E-mail: yangn@mail.cgs.gov.cn

spatial distribution of "high in the south and low in the north, high in the middle reaches and lower in the upstream and downstream". From 2000 to 2020, the AESV in each region is relatively stable, and the overall pattern has not changed significantly. The high value area and low value area of ESV change rate in each stage show obvious aggregation state, and the aggregation areas are mainly concentrated in the north and east. ③ The GDP growth rate of the Yellow River Basin from 2000 to 2020 is much higher than that of the ecosystem service value, and the ecology and economy are at a low level of coordination and conflict. [Conclusions] Although the ESV in the Yellow River Basin showed an increasing trend from 2000 to 2020, the growth rate was lower than GDP, and the coordination between ecology and economy was relatively low. In the future, it is necessary to strengthen and optimize the ecological security pattern to ensure the sustainable development of ecosystem service functions.

**Key words:** the Yellow River Basin; ecosystem service value(ESV); land use; hot spot analysis; eco-economic harmony index; spatial planning of national land

**Highlights:** (1) This study analyzed the spatiotemporal variation characteristics of ecosystem service value in the Yellow River Basin from 2000 to 2020; (2) Unlike previous studies that focused solely on ecological protection or economic development, this study proposes relevant suggestions from the perspective of national spatial planning based on a thorough analysis of the relationship between the ESV and economic growth in the Yellow River Basin.

随着经济社会的发展和人类活动的影响,生态环境退化成为全球面临的主要问题之一,直接影响着社会经济的健康发展(石晓丽和王卫, 2008)。党的十八大以来,国家将生态文明建设提到了前所未有的高度。黄河流域是中国重要的生态屏障和经济地带,是打赢脱贫攻坚战的重要区域,在中国经济社会发展 and 生态安全方面具有十分重要的地位。推动黄河流域生态保护和高质量发展是践行生态文明思想的一项重大决策,是关系国家发展全局的重大战略(Liu et al., 2023)。

生态系统通过内部及与周围环境之间的物质和能量交换,发挥着多种多样的功能,为人类生存提供了必要的生态产品和服务,是人类赖以生存的自然载体,在维系生命系统和环境动态平衡方面发挥着不可替代的作用(欧阳志云等, 1998)。生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)评估是用货币的形式评估生态系统的功能,能直观地反映生态系统服务效益的变化(Xie et al., 2010)。目前,量化研究生态系统服务价值,已成为生态领域可持续发展的研究热点之一(Mamat et al., 2013)。Constanza et al.(1997)最早提出生态系统服务价值评估,创建了生态系统服务价值评价的理论方法体系。国内学者谢高地等(2015a)在Constanza研究的基础上,完善了生态系统服务相关理论,并结合中国实际情况对Constanza的评价方法进行了修正,制定了中国陆地生态系统服务价值当量表,并对中国生态系统价值进行评价,成为后续国内研究不同区域尺度(李冬玉等, 2013; 张艳军等, 2017; 李锋等,

2021)及不同生态系统类型(江波等, 2011; 杜婷婷等, 2012; 宋戈等, 2013; 穆松林等, 2016; 沈满洪等, 2019; 温璐等, 2020; 龙精华等, 2021)下生态系统服务价值的基础。该方法基于各类生态系统当量,结合各类生态系统面积实现对生态服务价值的定量评估,各类生态系统面积与土地利用类型有关,因此土地利用/覆盖变化(land use/cover changes, LUCC)影响着生态系统结构和功能的变化(丁梦婷等, 2020; 邵明等, 2021),是生态系统服务价值评价的基础。

目前,针对黄河流域的生态系统服务价值的研究较少,主要集中在黄河流域部分地区(丁辉和安全朝, 2015; 刘玉斌等, 2020; 肖建设等, 2020; 张鹏岩等, 2020),且以行政区为单元研究生态系统服务功能与经济发展协调程度方面较欠缺(王尧等, 2020),很难有针对性地直接服务于城市规划。本文参考国内外学者的研究方法,结合黄河流域特征,制定黄河流域生态系统服务价值系数表,并根据2000—2020年的土地利用变化数据,对黄河流域的生态系统服务价值进行估算。在此基础上,分析20年来黄河流域生态系统服务价值的时空变化特征,通过热点分析,探究流域生态系统服务价值变化率的高值和低值聚集分布特征,并引入生态经济协调度模型,分析黄河流域各地市生态和经济协调程度,从国土空间规划角度提出相关建议,对黄河流域生态环境保护和高质量可持续发展具有十分重要的意义。

## 1 研究区概况

黄河发源于青藏高原,全长约5464 km,流经青

海、四川、甘肃、宁夏、内蒙、陕西、山西、河南、山东等 9 个省(区), 涉及 70 个地级市(包括州、盟)。为保证行政边界的完整性, 本次工作在水利部黄河水利委员会划定的自然流域的基础上, 将黄河及其支流所流经的所有地市级范围作为研究区范围, 面积约  $215 \times 10^4 \text{ km}^2$  (图 1)。黄河流域地势西高东低, 平均海拔 2441 m, 多为干旱—半干旱区。黄河流域构成中国重要的生态屏障, 是连接青藏高原、黄土高原、华北平原的生态廊道, 拥有三江源、祁连山等多个国家公园和国家重点生态功能区。

## 2 研究数据及方法

### 2.1 数据来源

采用的土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 时间为 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年。该数据是基于 Landsat 8 遥感影像, 通过人工目视解译生成, 数据类型是  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  栅格, 包含耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种土地利用类型。粮食产量和种植面积数据来源于 2019 年国民经济和社会发展统计公报, 主要粮食价格来源于国家发展和改革委员会 2019 年粮食平均收购价格。GDP 数据来源于 2000 年和

2020 年各地市统计年鉴。

### 2.2 研究方法

#### (1) 土地利用动态度

采用土地利用动态度反映某一土地利用类型在某一时间段内的流转速度, 分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。

单一土地利用动态度的计算公式如下:

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

式中:  $K$  是土地利用动态度(%);  $U_a$  和  $U_b$  分别为某种土地利用类型在某一时间段期初和期末的面积( $\text{km}^2$ ),  $T$  为研究时长(无量纲)。

综合土地利用动态度的计算公式如下:

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

式中:  $R$  为综合土地利用动态度(%),  $U_i$  为研究时段内期初第  $i$  类土地利用类型的面积( $\text{km}^2$ ),  $\Delta U_{i-j}$  为研究时段内第  $i$  类土地利用类型转为非  $i$  类土地利用类型面积的绝对值( $\text{km}^2$ ),  $n$  为不同土地利用类型的数量(无量纲),  $T$  为研究时长(无量纲)。

#### (2) ESV 估算

ESV 的估算首先要确定单位面积的生态系统服

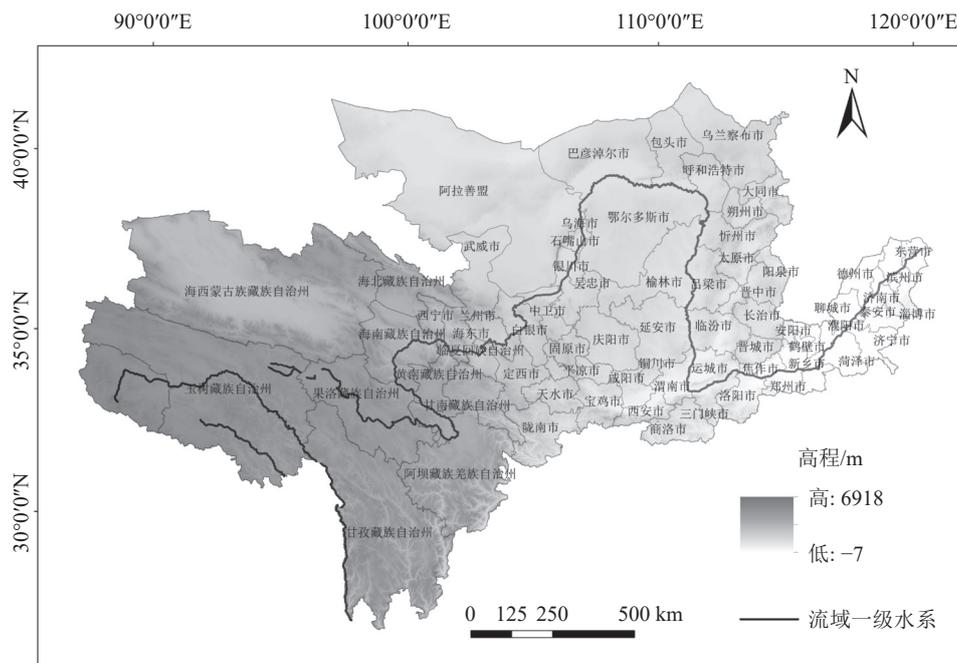


图 1 黄河流域地理位置和高程图

Fig. 1 Geographic location and elevation map of the Yellow River Basin

务价值系数,然后采用 Constanza et al.(1997)的方法计算生态系统服务价值(ESV)和单项生态服务价值(ESV<sub>f</sub>),计算公式如下:

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

$$ESV_f = \sum_{i=1}^n (S_i \times C_{fi}) \quad (4)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值总量(元/a), $S_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ ), $C_i$  为第  $i$  种土地利用类型生态服务价值系数(元· $\text{hm}^{-2}$ · $\text{a}^{-1}$ ), $ESV_f$  为第  $f$  项生态系统服务价值, $C_{fi}$  为第  $i$  种土地利用类型第  $f$  项单位面积的生态系统服务价值系数(元· $\text{hm}^{-2}$ · $\text{a}^{-1}$ )。

对于单位面积生态系统服务价值系数的估算,参考了谢高地(2015b)制定的“中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”,为了便于操作和可量化,用地类型分类采用中国 LUC 分类体系,分为耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地,其中,耕地当量对应农田当量,林地对应森林当量,未利用地对应荒漠当量,草地和水域分别取相对应的当量。另外,借鉴前人研究经验,本文设定建设用地价值系数为 0(姚小微等,2015),不予考虑建设用地所产生的消极影响对应的具体服务价值,其消极影响表现在挤占其他用地类型,导致其他生态用地面积减小,进而影响生态系统服务总价值上。

单位面积耕地生态系统服务价值取粮食单产市场价值的 1/7,以此作为耕地生态系统服务价值系

数。黄河流域主要农产品为小麦、玉米、大豆、稻谷等,黄河流域粮食作物单位面积产量为 5385.86  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,不考虑价格波动因素,2019 年粮食平均单价为 2.29 元/kg,由此确定黄河流域单位面积农田生态系统提供生产服务价值为 1761.95 元/ $\text{hm}^2$ 。结合各用地类型当量,确定了黄河流域单位面积生态系统服务价值系数表(表 1)。

### (3) 热点分析

采用热点分析法对研究区中各要素的 Getis-Ord  $G_i^*$  进行统计,反映黄河流域生态系统服务价值显著的高值和低值空间集聚区域,目前该方法被广泛应用于生态系统服务价值空间分析中(涂小松和龙花楼,2015)。热点分析可由 ArcGIS 的热点分析功能模块实现。

### (4) 生态经济协调度

采用生态经济协调度(Eco-economic harmony index, EEH)模型来衡量该地区的生态与经济发展是否协调,具体表达式如下:

$$EEH = \frac{(ESV_n - ESV_m)/ESV_m}{(GDP_n - GDP_m)/GDP_m} \quad (5)$$

式中: $ESV_m$ ,  $ESV_n$  分别为研究区某段时间期初和期末的单位面积生态系统服务价值,单位为万元/ $\text{km}^2$ ;  $GDP_m$ ,  $GDP_n$  为研究区某段时间期初和期末的单位面积 GDP,单位为万元/ $\text{km}^2$ 。将结果划分为 6 个等级(吴建寨等,2007):当  $EEH \geq 1$  时,生态经济高度协调;当  $0.5 \leq EEH < 1$  时,生态经济中度协调;当  $0 \leq EEH < 0.5$  时,生态经济低度协调;当  $-0.5 \leq EEH < 0$  时,生态经济低度冲突;当  $-1 \leq EEH < -0.5$  时,生态经

表 1 黄河流域单位面积生态系统服务价值系数

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

生态系统类型		生态系统服务价值/(元· $\text{hm}^{-2}$ · $\text{a}^{-1}$ )					
		耕地	林地	草地	建设用地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	1761.95	581.44	757.64	0.00	933.84	35.24
	原材料生产	687.16	5250.61	634.30	0.00	616.68	70.47
调节服务	气体调节	1268.61	7611.63	2642.92	0.00	898.60	105.71
	气候调节	1709.09	7171.13	2748.64	0.00	3629.61	229.06
	水文调节	1356.70	7206.37	2678.16	0.00	33071.79	123.34
	废物处理	2449.11	3030.56	2325.78	0.00	26164.94	458.11
支持服务	保持土壤	2590.06	7083.03	3946.77	0.00	722.40	299.53
	维持生物多样性	1797.19	7946.40	3294.84	0.00	6043.49	704.78
文化服务	美学景观	299.53	3664.86	1532.89	0.00	7823.06	422.87

济中度冲突;当 $EEH < -1$ 时,生态经济高度冲突。

### 3 结果与分析

#### 3.1 黄河流域土地利用变化特征

2000—2020年间,黄河流域主要的用地类型是草地和未利用地,两者面积之和占黄河流域总面积的69.03%左右,建设用地和水域面积最小,分别占总面积的1.98%和2.20%。建设用地、草地、水域和林地呈增加趋势,未利用地和耕地呈减少趋势。

根据单一动态度分析可知(表2),建设用地和水域土地流转较快,林地和草地流转较平稳,2000—2020年土地利用动态度由大到小分别是:建设用地、水域、耕地、未利用地、林地和草地,分别为2.79%、1.01%、-0.27%、-0.26%、0.11%和0.07%。其中,建设用地和水域的土地利用动态度在2015—2020年间达到最高,分别为4.37%和2.78%,说明二者在2015—2020年流转速率最快。根据综合动态度分析可知(表2),2000—2005和2005—2010年间,综合动态度值分别为0.09%和0.03%,说明整体土地流转较为平稳;2010—2015年综合动态度值略

有升高,达到0.24%,土地流转速率呈增加趋势;2015—2020年综合动态度达到3.40%,说明这一阶段土地流转速率最快。

根据2000—2020年黄河流域土地利用转移矩阵可知(表3),近20年来,研究区发生转变的土地利用类型面积为731519 km<sup>2</sup>,草地、耕地和未利用地转出面积最大,分别占发生转变的土地利用类型总面积的38.45%、20.08%和19.36%;草地、耕地和林地转入面积最大,分别占发生转变的土地利用类型总面积的40.19%、17.57%和15.80%。

耕地和未利用地呈减少趋势,分别减少了18480 km<sup>2</sup>和29356 km<sup>2</sup>,建设用地和草地呈显著扩张趋势,分别增加了19645 km<sup>2</sup>和12807 km<sup>2</sup>,新增建设用地主要来源于耕地,耕地对建设用地增加的占比为68.97%,新增草地主要来源于未利用地,未利用地对草地增加的占比为40.06%。

#### 3.2 黄河流域生态系统服务价值时空变化

##### 3.2.1 各土地利用类型生态系统服务价值变化特征

黄河流域不同土地利用类型单位面积的生态系统服务价值由高到低分别为:水域>林地>草地>

表2 2000—2020年黄河流域土地利用变化度

Table 2 Dynamic changes of land use in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

时期	单一土地利用动态度/%						综合土地利用动态度/%
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2000—2005	-0.28	0.19	-0.04	0.43	1.58	0.02	0.09
2005—2010	-0.09	0.04	0.01	0.19	0.83	-0.05	0.03
2010—2015	-0.15	0.00	-0.03	0.47	2.78	-0.10	0.24
2015—2020	-0.58	0.21	0.34	2.78	4.37	-0.91	3.40
2000—2020	-0.27	0.11	0.07	1.01	2.79	-0.26	0.85

表3 2000—2020年黄河流域土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transition in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

km<sup>2</sup>

时间	土地利用类型	2020年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出合计
2000年	耕地	194843	23835	81002	5999	31991	4047	146874
	林地	22343	125681	79318	1329	2418	4658	110066
	草地	76214	83869	632172	14382	8848	97948	281261
	水域	5153	941	11638	19282	1164	6114	25010
	建设用地	19441	1025	4256	1489	8375	498	26709
	未利用地	5397	5888	117776	10577	1961	425220	141599
	转入总计	128548	115558	293990	33776	46382	113265	731519

耕地>未利用地>建设用地,基于各土地利用类型的生态系统服务价值,得到黄河流域2000年和2020年单位面积生态系统服务价值分布图(图2)。

2000—2020年黄河流域生态系统服务价值整体呈增加趋势,ESV由2000年的40217.33亿元增加到2020年的41135.10亿元(表4)。其中,草地的ESV值最大,占比可达46%~47%,未利用地的ESV最小,占比为3%~4%(不考虑建设用地)。各年度不同土地类ESV由大到小依次为:草地、林地、耕地、水域和未利用地。从变化趋势上来看,耕地、草地、未利用地ESV的占比在各阶段表现出减小的趋势,水域呈增加的趋势,林地先增加后减小,最后期末(2020年)与期初(2000年)达到持平的状态。

### 3.2.2 生态系统单项服务价值变化特征

从各单项生态系统服务价值统计结果看(表5),黄河流域水文调节、土壤保持和维持生物多样性服务价值一直处于较高水平,占比均达15%以上。食物

生产、原材料生产和美学景观服务价值处于较低水平,分别为3%、5%和7%以上。从变化趋势看,食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、土壤保持和维持生物多样性服务价值呈减小趋势,水文调节、废物处理和美学景观服务价值呈增加趋势。

### 3.2.3 地级市单位面积生态系统服务价值空间分布特征

将2000年、2005年、2010年、2015年和2020年黄河流域各地市生态系统服务价值除以各地市的面积,得到地级市单位面积生态系统服务价值(Average of Ecosystem Services Value, AESV),按其生态服务价值的大小分为低(<150万元/km<sup>2</sup>)、较低(150~190万元/km<sup>2</sup>)、中等(190~230万元/km<sup>2</sup>)、较高(230~270万元/km<sup>2</sup>)和高(>270万元/km<sup>2</sup>)5个等级(图3)。黄河流域地级市单位面积生态系统服务价值呈现“南高北低、中游高上下游低”的空间分布特征,其生态系统服务价值高的地区主要集中在中

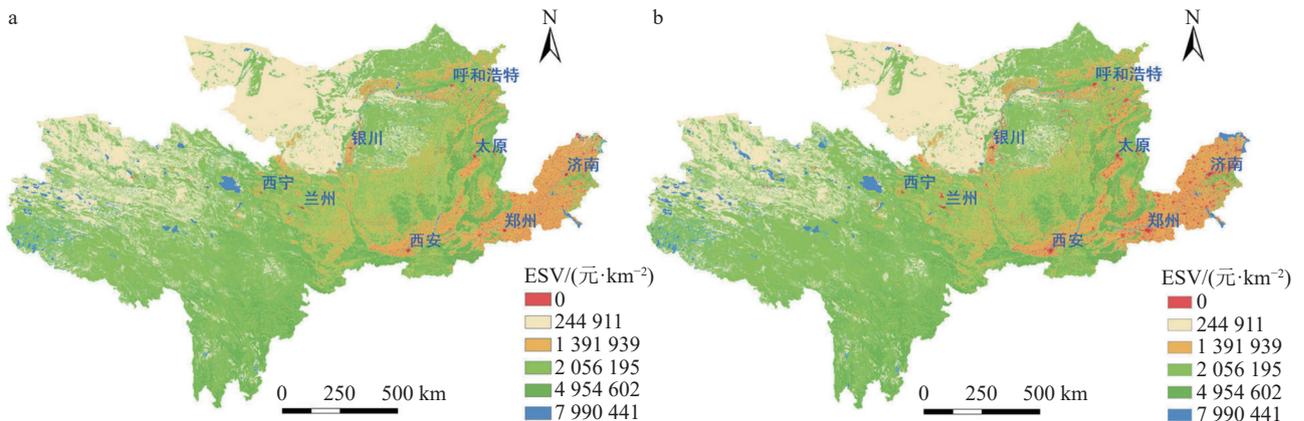


图2 黄河流域2000年(a)和2020年(b)生态系统服务价值分布图

Fig. 2 Distribution map of ESV in the Yellow River Basin in 2000(a) and 2020(b)

表4 2000—2020年黄河流域不同用地类型生态系统服务价值

Table 4 ESV of different types of land use in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

用地类型	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年	
	ESV/亿元	占比								
耕地	4763.55	11.84%	4697.59	11.66%	4676.40	11.59%	4640.75	11.50%	4506.32	10.95%
林地	11704.16	29.10%	11816.68	29.32%	11843.23	29.35%	11844.47	29.34%	11971.46	29.10%
草地	18808.69	46.77%	18770.37	46.57%	18778.67	46.54%	18753.83	46.46%	19072.03	46.36%
水域	3548.87	8.82%	3625.18	8.99%	3658.82	9.07%	3744.48	9.28%	4265.14	10.37%
建设用地	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%
未利用地	1392.05	3.46%	1393.39	3.46%	1390.03	3.45%	1383.16	3.43%	1320.15	3.21%
合计	40217.33	100.00%	40303.20	100.00%	40347.16	100.00%	40366.69	100.00%	41135.10	100.00%

表 5 2000—2020 年黄河流域各单项生态系统服务价值  
Table 5 ESV<sub>r</sub> in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

生态功能	2000年		2005年		2010年		2015年		2020年	
	ESV/亿元	占比								
食物生产	1494.88	3.72%	1487.35	3.69%	1485.63	3.68%	1481.12	3.67%	1482.49	3.60%
原材料生产	2123.16	5.28%	2131.27	5.29%	2133.46	5.29%	2131.53	5.28%	2150.37	5.23%
气体调节	4749.79	11.81%	4757.05	11.80%	4760.50	11.80%	4754.92	11.78%	4806.21	11.68%
气候调节	5084.59	12.64%	5091.24	12.63%	5094.81	12.63%	5090.54	12.61%	5152.71	12.53%
水文调节	6155.40	15.31%	6191.99	15.36%	6208.63	15.39%	6237.21	15.45%	6496.34	15.79%
废物处理	5103.98	12.69%	5120.16	12.70%	5129.39	12.71%	5147.14	12.75%	5325.95	12.95%
土壤保持	6372.17	15.84%	6369.47	15.80%	6370.82	15.79%	6359.53	15.75%	6410.74	15.58%
维持生物多样性	6175.11	15.35%	6184.66	15.35%	6189.09	15.34%	6185.21	15.32%	6260.45	15.22%
美学景观	2958.24	7.36%	2969.99	7.37%	2974.83	7.37%	2979.51	7.38%	3049.82	7.41%
合计	40217.33	100.00%	40303.20	100.00%	40347.16	100.00%	40366.69	100.00%	41135.10	100.00%

部和南部,生态系统服务价值低的地区主要集中在东部和西北部。从变化趋势来看,各地级市单位面积生态系统服务价值较为稳定,整体格局没有发生显著变化。

### 3.3 冷热点格局时空变化特征/冷热点分布与演化

为了更好地反映黄河流域 ESV 变化的分布特征,对各地市 ESV 变化率进行冷热点分析,得到 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年 4 个阶段的冷热点分布图(图 4),冷热点区主要反映黄河流域生态系统服务价值变化率的显著低值空间和高值空间集聚区。由图 4 可知,2000—2005 年热点区主要分布在开封、临汾、运城等地,主要原因是草地和水域面积的增加,但是增加幅度不大;冷点区主要分布在山东省中部,包括东营、滨州、淄博、泰安和德州,主要原因是建设用地扩张,挤占了草地和耕地。2005—2010 年没有显著冷热点区。2010—2015 年冷热点区发生了较大变化,热点区主要分布在内蒙的乌海、巴彦淖尔、鄂尔多斯及宁夏的石嘴山、银川,这些地区主要集中在鄂尔多斯高原,分布有库布其沙漠和毛乌素沙地,党的十八大提出加强生态文明建设以来,沙地治理力度加大,效果显著,沙地面积显著减小;冷点区主要在濮阳和菏泽,主要原因是建设用地扩张侵占了耕地。2015—2020 年热点区在山东,主要有东营、滨州,原因是东营、滨州沿海地区海水入侵导致水域面积增大;主要冷点区有安阳、濮阳和菏泽,主要原因是建设用地扩张导致耕地面积减小。

### 3.4 生态经济协调度分析

2000—2020 年黄河流域 GDP 从 12213.06 亿元增长到 131683.69 亿元,增加了 978.21%;ESV 从 40171.98 亿元增长到 41081.10 亿元,增加了 2.26%,GDP 的增加率远高于生态系统服务价值的增加率。黄河流域各地市生态经济协调指数在-0.017~0.104 之间,生态和经济整体处于低度协调和低度冲突水平(图 5)。黄河流域范围内 70 个地市中,35 个地市处于低度协调状态,主要分布在黄河流域中西部地区,这些地区生态系统服务价值虽然低于 GDP 的增长率,但是也是处于微弱增长的态势,没有造成生态环境的恶化。另外 35 个地市处于低度冲突状态,主要分布在黄河流域中东部地区,这部分地区经济增长速度过快,而生态系统服务价值却处于减小的趋势,说明经济的发展对生态环境造成负面压力,存在生态环境问题的潜在危害,因此在今后城市发展中,这些地区应该尤其重视生态环境的保护。生态经济协调指数最大的 5 个地市分别为山东东营市、滨州市,青海玉树藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州和河南济源市,生态经济协调指数最小的 5 个地市分别为山东淄博市、聊城市、济南市,河南郑州市和濮阳市。

## 4 结 论

(1)黄河流域主要的用地类型是草地和未利用地。2000—2020 年间,耕地和未利用地呈减少趋势,分别减少了 18480 km<sup>2</sup> 和 29356 km<sup>2</sup>,建设用地和草

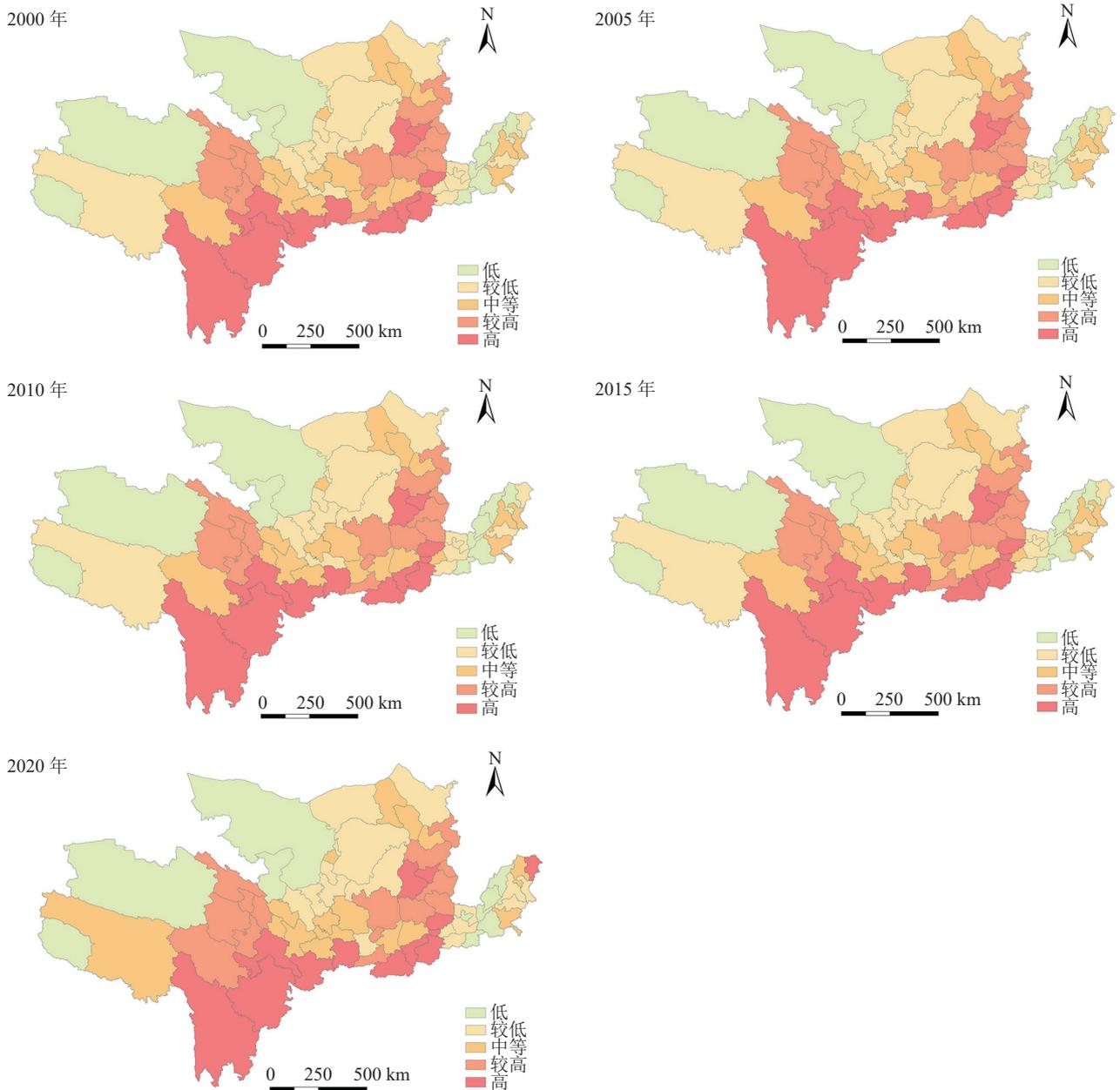


图3 2000—2020年黄河流域各地级市单位面积生态系统服务价值分布图

Fig. 3 Distribution map of A ESV in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

地呈显著扩张趋势,分别增加了 19645 km<sup>2</sup> 和 12807 km<sup>2</sup>,新增建设用地主要来源于耕地,新增草地主要来源于未利用地。

(2)2000—2020年黄河流域生态系统服务价值整体呈增加趋势,ESV由2000年的40217.33亿元增加到2020年的41135.10亿元,其中,草地的ESV值最大,占比可达46%~47%,未利用地的ESV最小,占比为3%~4%。黄河流域水文调节、土壤保持和维持生物多样性服务价值一直处于较高水平,食物生产、原

材料生产和美学景观服务价值处于较低水平。

(3)黄河流域各地级市单位面积生态系统服务价值呈现“南高北低、中游高上下游低”的空间分布特征,2000—2020年各地级市单位面积生态系统服务价值较为稳定,整体格局没有发生显著变化。

(4)各阶段ESV变化率的高值区与低值区空间集聚程度明显。出现极显著热点区的是2010—2015年鄂尔多斯高原及2015—2020年的东部沿海地区,主要原因分别是沙地治理成效显著及海水入

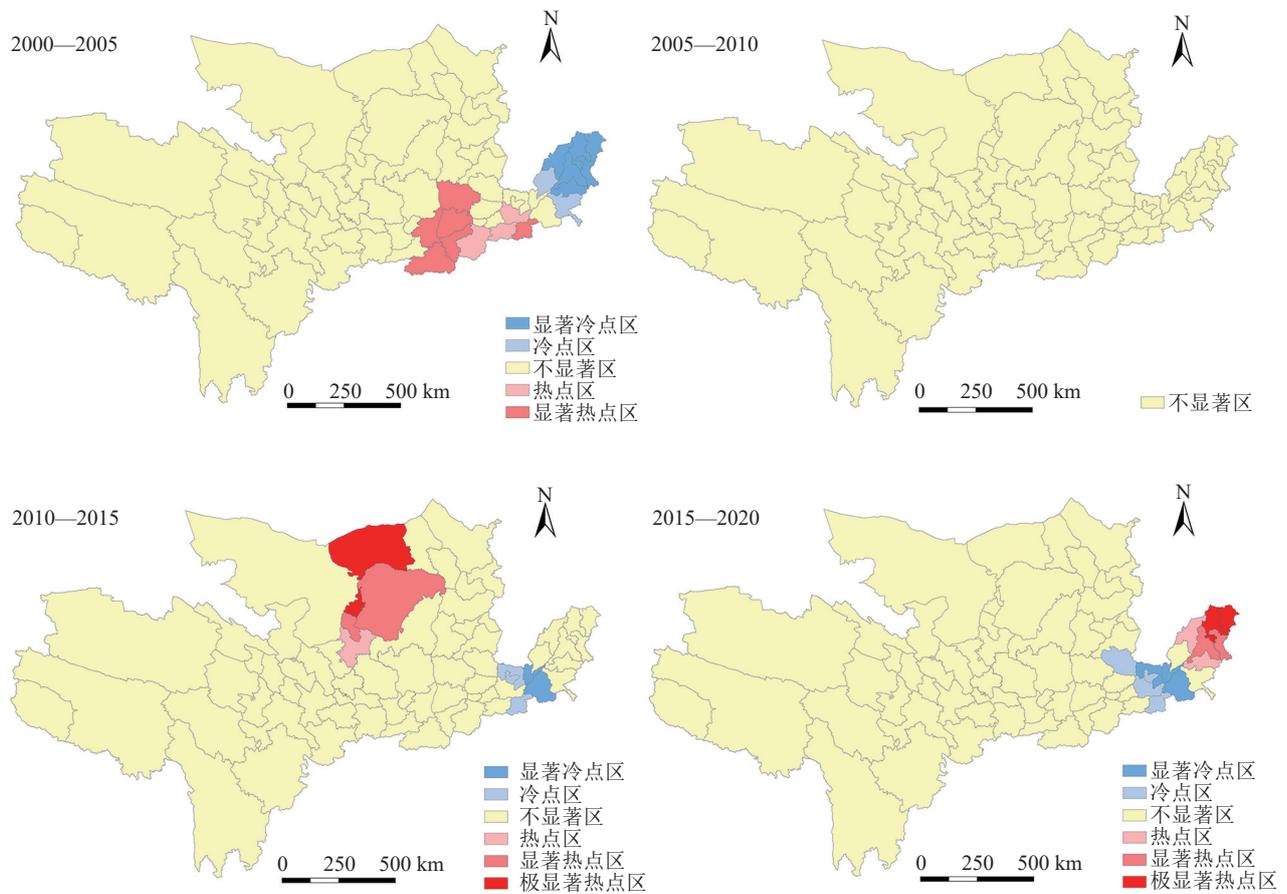


图 4 2000—2020 年黄河流域热点变化空间分布图(极显著热点代表 99% 的置信水平, 显著热点代表 95% 的置信水平, 热点代表 90% 的置信水平; 冷点亦如此)

Fig. 4 Spatial distribution of hot spots in changes of ESV in the Yellow River Basin from 2000 to 2000

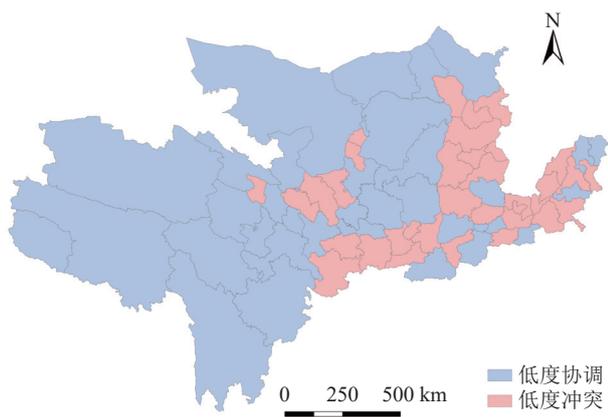


图 5 黄河流域生态经济协调度空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of Eco-economic harmony index in the Yellow River Basin

侵导致水域面积扩张所致。

(5)2000—2020 年黄河流域 GDP 的增长率远高于生态系统服务价值的增加率。生态和经济整体处

于低度协调和低度冲突水平。35 个地市处于低度协调状态, 主要分布在黄河流域中西部地区, 另外 35 个地市处于低度冲突状态, 主要分布在黄河流域中东部地区。

(6)从空间规划的角度, 建议重点针对处于低度冲突的 35 个地市, 优化生态安全格局, 识别生态环境问题风险, 主动采取自然恢复和人为修复相结合的方式实施生态修复; 注重科学谋划国土空间开发保护格局, 有序统筹生态、农业、城镇等功能空间, 加强底线约束, 严控建设用地占用生态红线和永久基本农田, 确保生态系统服务功能的可持续发展。

References

Constanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. World Environment, 387(6630): 253-260.  
Ding H, An J C. 2015. Study on the ecosystem service value of the Upper

- Yellow River in Gannan Area[J]. *Yellow River*, 37(5): 74–76 (in Chinese with English abstract).
- Ding M T, Peng F S, Hu Y C, et al. 2020. Spatial and temporal changes of ecosystem service value in Jiangsu Province based on LUCC[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 37(5): 74–76 (in Chinese with English abstract).
- Du T T, Luo W, Li Z. H, et al. 2012. Evaluation of lake ecosystem services: A case study of Taihu Lake[J]. *China Population, Resources and Environment*, 22(S2): 208–211 (in Chinese with English abstract).
- Jiang B, Ouyang Z Y, Miao H, et al. 2011. Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(8): 2236–2244 (in Chinese with English abstract).
- Li D Y, Ren Z Y, Liu X F, et al. 2013. Dynamic change of ecological service value of cultivated land in Shaanxi Province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 27(7): 40–45 (in Chinese with English abstract).
- Li F, Chen C. 2021. Dynamic change of ecological–living–industrial land and the response to ecosystem service value—— a case study of Shunde[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 28(1): 250–257 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Cheng Y P, Zhang F E, et al. 2023. Research hotspots and trends of groundwater and ecology studies: Based on a bibliometric approach[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 11(1): 20–36.
- Liu Y B, Wang X L, Hou X Y, et al. 2020. Land use pattern and ecosystem service value assessment of the Yellow River Delta in 2025 under four periods and simulated scenarios[J]. *Wetland Science*, 18(4): 424–436 (in Chinese with English abstract).
- Long J H, Zhang W, Fu Y H, et al. 2021. The value of ecosystem services in Hegang coal mining area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 41(5): 1728–1737 (in Chinese with English abstract).
- Mamat S, Mamattursun E, Taxpolat T. 2013. The effects of land–use change on ecosystem service value of desert oasis: A case study in Ugan–Kuqa River Delta Oasis, China[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(1): 99–108.
- Mu S L. 2016. Spatial patterns of value of ecosystem service in temperate grassland in Inner Mongolia during 1982–2014[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 30(10): 76–81 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. 1998. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological–economic values[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 19(5): 607–613 (in Chinese with English abstract).
- Shao M, Li X, Liu Z C, et al. 2021. Evolution analysis and optimization research of ecosystem service value in Chengde City, Hebei Province of northern China based on land use/land cover change (LUCC)[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(3): 106–116 (in Chinese with English abstract).
- Shen M H, Mao D. 2019. Review of the evaluation of marine ecosystem services value[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(6): 2255–2265 (in Chinese with English abstract).
- Shi X L, Wang W. 2008. Evaluation method of integrated valuation of ecosystem functions and its application: A case study of Kangbao County, Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 28(8): 3998–4006 (in Chinese with English abstract).
- Song G, E S X, Xu S, et al. 2013. Study on measurement of cultivated land ecosystem services evaluation in Bayan County[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 44(5): 126–131 (in Chinese with English abstract).
- Tu X S, Long H L. 2015. Spatial patterns and dynamic evolution of ecosystem service values in Poyang Lake Region from 2000 to 2010[J]. *Resources Science*, 37(12): 2451–2460 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Chen R S, Xia Z L, et al. 2020. The evaluation of ecosystem service value and its spatial change in the Yellow River Basin and suggestions from the ecological geology perspectives[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(10): 1650–1662 (in Chinese with English abstract).
- Wen L, Song J, Zhang H C, et al. 2020. Dynamics of ecosystem service value in Ulan Buh Desert from 1990 to 2018[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 34(12): 57–64 (in Chinese with English abstract).
- Wu J Z, Li B, Zhang X S. 2007. Ecosystem service value and its application in evaluation of eco–economic harmonious development[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 18(11): 2554–2558 (in Chinese with English abstract).
- Xiao J S, Qiao B, Chen G Q, et al. 2020. Land use change and evolution of ecosystem service value in Maduo County of source region of the Yellow River[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 40(2): 510–521 (in Chinese with English abstract).
- Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. 2015a. The value of ecosystem services in China[J]. *Resources Science*, 37(9): 1740–1746 (in Chinese with English abstract).
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. 2015b. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 30(8): 1243–1254 (in Chinese with English abstract).
- Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. 2010. Applying value transfer method for eco–service valuation in China[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2010,1(1): 51–59.
- Yao X W, Zeng J, Li W J. 2015. Spatial correlation characteristics of urbanization and land ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(9): 249–256 (in Chinese with English abstract).
- Zhang P Y, Geng W L, Yang D, et al. 2020. 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*, 36(11): 277–288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y J, Guan D J, Zhai J, et al. 2017. Spatial and temporal variations of ecosystem services value in Chongqing City[J]. *Acta Scientiae*

Circumstantiae, 37(3): 1169–1177 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 丁辉, 安金朝. 2015. 黄河上游甘南段生态系统服务价值估算[J]. *人民黄河*, 37(5): 74–76.
- 丁梦婷, 裴凤松, 胡引翠, 等. 2020. 基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究[J]. *生态学报*, 40(19): 6801–6811.
- 杜婷婷, 罗维, 李中和, 等. 2012. 湖泊生态系统服务功能价值评估: 以太湖为例[J]. *中国人口(资源与环境)*, 22(S2): 208–211.
- 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 2011. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. *生态学报*, 31(8): 2236–2244.
- 李冬玉, 任志远, 刘宪锋, 等. 2013. 陕西省耕地生态系统服务价值动态测评[J]. *干旱区资源与环境*, 27(7): 40–45.
- 李锋, 陈春. 2021. “三生”用地功能动态变化及其生态系统服务价值响应——以顺德区为例[J]. *水土保持研究*, 28(1): 250–257.
- 刘玉斌, 王晓利, 侯西勇, 等. 2020. 四个时期和模拟情景下 2025 年黄河三角洲的土地利用格局和生态系统服务价值评估[J]. *湿地科学*, 18(4): 424–436.
- 龙精华, 张卫, 付艳华, 等. 2021. 鹤岗矿区生态系统服务价值[J]. *生态学报*, 41(5): 1728–1737.
- 穆松林. 2016. 1982—2014 年内蒙古自治区温带草原生态系统服务价值及其空间分布[J]. *干旱区资源与环境*, 30(10): 76–81.
- 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 1998. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. *生态学报*, 19(5): 607–613.
- 邵明, 李雄, 刘志成, 等. 2021. 基于 LUCC 的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究[J]. *北京林业大学学报*, 43(3): 106–116.
- 沈满洪, 毛狄. 2019. 海洋生态系统服务价值评估研究综述[J]. *生态学报*, 39(6): 2255–2265.
- 石晓丽, 王卫. 2008. 生态系统功能价值综合评估方法与应用——以河北省康保县为例[J]. *生态学报*, 28(8): 3998–4006.
- 宋戈, 鄂施璇, 徐珊, 等. 2013. 巴彦县耕地生态系统服务功能价值测算研究[J]. *东北农业大学学报*, 44(5): 126–131.
- 涂小松, 龙花楼. 2015. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. *资源科学*, 37(12): 2451–2460.
- 王尧, 陈睿山, 夏子龙, 等. 2020. 黄河流域生态系统服务价值变化评估及生态地质调查建议[J]. *地质通报*, 39(10): 1650–1662.
- 温璐, 宋洁, 张慧超, 等. 2020. 近 30 年乌兰布和沙漠生态系统服务价值评估[J]. *干旱区资源与环境*, 34(12): 57–64.
- 吴建寨, 李波, 张新时. 2007. 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[J]. *应用生态学报*, 18(11): 2554–2558.
- 肖建设, 乔斌, 陈国茜, 等. 2020. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J]. *生态学报*, 40(2): 510–521.
- 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 2015a. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*, 37(9): 1740–1746.
- 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 2015b. 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*, 30(8): 1243–1254.
- 姚小微, 曾杰, 李旺君. 2015. 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*, 31(9): 249–256.
- 张鹏岩, 耿文亮, 杨丹, 等. 2020. 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*, 36(11): 277–288.
- 张艳军, 官冬杰, 翟俊, 等. 2017. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 37(3): 1169–1177.