

2000—2020年黄河下游河岸带生态系统 服务价值与碳储分析

刘畅, 谭梓柔, 张晓彤, 孙小雅, 郅雨欣, 陈硕, 刘琳

(山东师范大学地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要: 为了促进黄河下游生态脆弱河岸带土地资源的合理配置, 助力河岸带生态可持续发展, 采用野外调查、ArcGIS、InVEST模型、当量因子法等方法, 通过分析2000—2020年黄河下游河岸带土地利用动态变化, 揭示其生态系统服务总价值(ESV)和碳储量(C_t)的变化。结果表明:2000—2020年黄河下游河岸带湿地和建设用地面积持续增加, 湿地主要来源于耕地和水域, 建设用地主要来源于耕地;耕地和建设用地面积占比随着距河道距离的增大而增大, 而草地面积占比随着距河道距离的增大而减小, 林地面积占比随河道距离变化不明显, 2000—2010年湿地面积占比随河道距离减少, 而2010—2020年远岸湿地增加, 且主要位于距河道200~500 m区间。2000—2020年, 黄河下游河岸带ESV呈先增加后减少的变化趋势。其中, 水域对ESV的贡献率最大, 湿地次之, 耕地、林地和草地的贡献率低, 且不稳定。2000—2020年, 黄河下游河岸带碳储量逐渐提高, 湿地碳储量逐渐上升, 然而林地、草地和水域碳汇能力则先增加后降低。水沙状况、人类活动以及国家政策是影响黄河下游河岸带生态系统服务价值与碳储量的重要因素。为减缓黄河下游人为调水调沙引发的河岸带生态功能减退, 亟待提升湿地质量, 适当退耕还林、还草和还水, 以提高河岸带生态系统的服务价值和碳储量。

关键词: 生态系统服务价值; 碳储量; 河岸带; 生态功能; 黄河下游

中图分类号: TV213.4; X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)01-0090-11

Ecosystem service value and carbon storage of the riparian zone in the lower Yellow River from 2000 to 2020

LIU Chang, TAN Zirou, ZHANG Xiaotong, SUN Xiaoya, QIE Yuxin, CHEN Shuo, LIU Lin

(College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: Rational allocation of land resources can facilitate ecological sustainable development of the ecologically vulnerable riparian zone in the lower Yellow River. Here, we investigated the dynamic changes of land use, ecosystem service value (ESV) and carbon storage (C_t) of the riparian zone in the lower Yellow River from 2000 to 2020 by means of field investigation, ArcGIS, InVEST model and equivalent factor method. The results show that the area of wetland and construction land in the riparian zone of the lower Yellow River continued to increase from 2000 to 2020, of which the additional wetland mainly came from cultivated land and water area, and the additional construction land mainly came from cultivated land. The proportion of cultivated land and construction land increased with the increase of the distance from the river, whereas the proportion of grassland was on the contrary, which decreased with the increase of the distance from the river and the proportion of woodland didn't change significantly with the distance from the river. From 2000 to 2010, the proportion of wetland decreased with the distance from the river, while the far shore wetland increased from 2010 to 2020, mainly located in the range from 200 to 500 m away from the river. The ESV of the riparian zone in the lower Yellow River first increased and then decreased from 2000 to 2020. Among the land use types, water area had the most significant impact on the ESV, followed by wet-

收稿日期: 2023-06-16; 修回日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41907055)

作者简介: 刘畅(2003—), 女, 山东临沂人, 本科生, 研究方向为水土保持与碳循环。

通讯作者: 刘琳(1990—), 女, 山东烟台人, 博士, 副教授, 研究方向为水土保持与碳循环。

land, and the contribution rate of cultivated land, woodland and grassland was lower and unstable. As for the carbon storage, it increased gradually as a whole during the study period, among which the carbon storage of wetland increased gradually, whereas the carbon sequestration capacity of woodland, grassland and water area increased first and then decreased. Water and sediment conditions, human activities and national policies are all influencing factors of ecosystem service value and carbon storage of the riparian zone in the lower Yellow River. To address the weakening of ecological function of the riparian zone caused by human activities of water and sediment transport in the lower Yellow River, it is of great significance to improve the quality of wetland and encourage the conversion from cultivated land to woodland, grassland and water area, so as to enhance the ecosystem service value and carbon storage of the riparian zone.

Key words: ecosystem service value (ESV); carbon storage; riparian zone; ecological function; lower Yellow River

1 研究背景

河岸带是河流-陆地边界形成的交互作用带^[1],是水陆物质、能量和信息交换的重要生态过渡区^[2]。河岸带生态系统与远离河道的陆地区域有较大差异,是地球上最复杂易变的生态系统之一^[2],且河岸带生态脆弱性显著,存在明显的边缘效应,生态过程独特^[3-4],同时,河岸带在流域生态系统中发挥着保持水土等重要的生态价值和碳汇功能。然而,随着人类活动强度的增大,河岸带的土地利用方式不断被改变,农业开垦、工程修建等造成河岸带退化,影响了河岸带景观的连续性,严重威胁了河岸带生态系统的稳定性^[5-7],生境破碎化已成为全球河岸带普遍存在的问题。因此,探究河岸带生态系统服务价值与碳储变化对于维护河岸带生态功能和增强社会经济价值有重要意义。黄河流域是我国人类活动与自然环境相互作用最为强烈的区域之一,在国家发展中占有极为重要的战略地位^[8],其河岸带面临生物多样性降低、人类活动频繁等多种问题。尤其是在黄河下游调水调沙条件下,河道的形态变化不仅影响了河岸带湿地等地类面积,也改变了其生态系统服务价值与碳汇能力。因而,探究黄河下游河岸带生态价值与碳储变化对于保障其生态功能具有重要意义^[9]。

基于 Costanza 的生态系统服务价值测算方法^[10-12],谢高地等^[13]编制了中国生态系统服务价值当量表。目前,国内外学者也针对不同类型区域开展了广泛的生态系统服务价值研究,如探索城镇化与生态系统服务价值的时空耦合关系^[14-16],探究高原山区、流域、河岸带、林地和喀斯特地貌等区域的生态系统服务价值风险^[17-22]等。目前全球气候变化被广泛关注,生态系统碳储变化也成为研究热

点,为减缓气候变化和促进区域可持续发展提供理论支撑。以往关于黄河下游的相关研究多集中于对湿地、草地、森林等生态系统的服务价值评估,这些研究虽然探讨了不同生态系统碳储变化,但多集中于非河岸带区域,河岸带受其独特水文特征与河流冲淤变化的影响,其生态系统服务价值和碳库变化与其他区域存在较大差异,因而,需要对河岸带生态系统服务和碳储进行分析。

鉴于此,本文以黄河下游河岸带为研究对象,通过遥感解译 2000—2020 年其河岸带土地利用空间转化特征,借助 InVEST 模型探究其碳储量和生态系统服务价值贡献率变化,旨在为黄河下游水沙治理和土地资源合理配置提供理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

从桃花峪至入海口的黄河河段为黄河下游(地理坐标:34°37'~37°27'N,111°02'~120°38'E),下游河段流经河南省和山东省^[23],为著名的“地上悬河”。研究区属于温带季风气候,年降雨量为 500~600 mm,降水集中于夏季^[24-25],主要土壤类型为潮土、褐土^[26],受黄河冲淤的影响,土壤质地变异性强。黄河下游地形以平原、丘陵为主。河道的纵横断面为纵向上陡下缓、横向上宽下窄,河道冲淤演变具有上段大、下段小的特点。基于河道演变的特点,下游河道常被分为 3 个河段,包括花园口至高村的游荡型河段、高村至艾山的过渡型河段以及艾山至利津的弯曲型河段。黄河流域及其下游河岸带研究区如图 1 所示。

2.2 数据来源

本研究所采用的 2000、2010 和 2020 年 Landsat 卫星遥感影像数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为 30 m × 30 m,为保证

数据精度,本文选取影像数据云量均小于 2%,所选取的数据信息见表 1。

2.3 遥感解译

运用监督分类中的最大似然法对遥感影像进行分类,采用小斑块去除,通过目视解译对监督分类做进一步优化,结合野外考察校准地类,形成 2000、2010 和 2020 年土地利用类型图,地类划分见表 2。

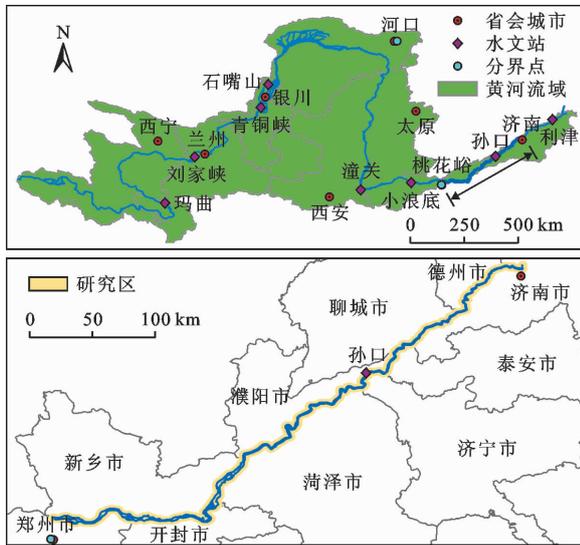


图 1 黄河流域及其下游河岸带研究区示意图

表 1 研究选取的 Landsat 卫星遥感影像数据

年份	遥感数据类型	轨道号	成像时间
2000 年	Landsat 5 TM	122-34	2000-05-17
		122-35	2000-06-18
		123-34	2000-06-09
		123-35	2000-06-09
		123-36	2000-05-24
		124-36	2000-05-31
2010 年	Landsat 5 TM	122-34	2010-03-26
		122-35	2010-03-10
		123-34	2010-06-21
		123-35	2010-06-21
		123-36	2010-06-21
		124-36	2010-11-19
2020 年	Landsat 8 OLI_TIRS	122-34	2020-04-22
		122-35	2020-03-05
		123-34	2020-04-29
		123-35	2020-04-29
		124-36	2020-03-19

建立解译标志时,首先利用 ENVI5.3 对 2000、2010 和 2020 年遥感影像进行正射校正、辐射定标、大气校正、图像镶嵌等数据预处理^[27],以消除大气、光照等因素对遥感影像的干扰。本次采用系统纠正^[28]、图像镶嵌、影像增强^[29-30]等方法优化解译效果,又进行彩色合成以达到最佳效果。以全国第三次土地调查形成的土地利用现状图作为底图,利用 ArcGIS 的属性选择功能提取河流图斑,通过空间分析功能在河流两侧生成 500 m 缓冲区,进而通过图像裁剪形成河岸带遥感影像图。

表 2 黄河下游河岸带土地利用类型

一级类型	二级类型
耕地	旱地
林地	林地、灌木林、疏林地、其他林地
草地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地
水域	河渠、湖泊、水库塘坑
湿地	沼泽地、湿原、滩涂、滩地
未利用地	裸土地、裸岩石质地
建设用地	城镇用地、农村居民点、其他建设用地

2.4 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵不仅可以揭示各土地利用类型转化方向,还能反映其来源构成,其表达式如下:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: i 为研究初期的土地利用类型; j 为研究末期的土地利用类型; n 为土地利用类型数量; S_{ij} 为土地利用类型 i 转变为 j 的面积, hm^2 。

2.5 InVEST 模型

本研究借助 InVEST 模型的 Carbon 模块测算 2000、2010 和 2020 年黄河下游河岸带碳储量时空分布状况。结合土地利用数据与碳密度数据,将陆地生态系统碳储量划分为 4 个基础碳库,分别为地上植被碳库、地下植被碳库、土壤有机碳库和死亡有机碳库。碳储量计算公式如下:

$$C_i = C_{iabove} + C_{ibelow} + C_{isoil} + C_{idead} \quad (2)$$

$$C_t = \sum_{i=1}^n (C_i \cdot A_i) \quad (3)$$

式中: i 为某种土地利用类型; C_i 为地类总碳密度, t/hm^2 ; C_{iabove} 为地类 i 地上生物碳密度, t/hm^2 ; C_{ibelow} 为地类 i 地下生物碳密度, t/hm^2 ; C_{isoil} 为地类 i 土壤

碳密度, t/hm^2 ; C_{idead} 为地类 i 死亡有机质碳密度, t/hm^2 ; A_i 为地类 i 的面积, hm^2 ; C_i 为生态系统碳储量, t ; n 为地类数量。

本文碳密度数据见表 3。据估算我国单位碳减排经济成本约为 649.6 元 / t , 结合公式(1) 和(2) 可得出生态系统碳储价值, 计算公式如下:

$$L_{cst} = C_i \cdot L_{rec} \quad (4)$$

式中: L_{cst} 为生态系统碳储价值, 元; C_i 为生态系统碳储量, t ; L_{rec} 为单位碳减排经济成本, 元 / t 。

表 3 黄河下游河岸带各地类碳密度数据 t/hm^2

序号	土地利用类型	地上生物碳密度	地下生物碳密度	土壤碳密度	死亡有机质碳密度
1	耕地	4.75	0	33.51	0
2	林地	49.60	24.97	128.67	1.99
3	草地	24.38	19.59	52.29	22.74
4	水域	2.45	0.62	80.11	0.10
5	湿地	28.73	14.39	317.82	2.40
6	建设用地	4.33	2.17	6.37	0.58
7	未利用地	0	0	0	0

2.6 生态系统服务价值

本研究参考谢高地等^[13] 的处理方法, 计算河岸

带单位面积粮食产量创造的经济价值为 1 550.75 元 / hm^2 。将此值与黄河下游各地类生态系统当量因子相乘(表 4), 得到对应单项生态服务功能价值系数(E_d) 和总价值系数(E_t), 从而计算单个地类生态系统服务价值和生态系统服务总价值, 公式如下:

$$ESV_d = \sum_1^m (K_z \cdot E_d) \quad (5)$$

$$ESV = \sum_1^n (K_z \cdot E_t) \quad (6)$$

式中: ESV 和 ESV_d 分别为生态系统服务总价值和单个地类生态系统服务价值, 元; E_t 为生态服务功能总价值系数, 元 / hm^2 ; m 为生态服务功能数量; K_z 为第 Z 种土地类型面积, hm^2 ; E_d 为单项生态服务功能价值系数, 元 / hm^2 。

生态系统服务贡献率反映区域在一定时间段内各类用地对 ESV 变化的贡献率, 公式如下:

$$C_a = \frac{ESV_{iu} - ESV_{is}}{ESV_u - ESV_s} \times 100\% \quad (7)$$

式中: C_a 为各类用地生态系统服务贡献率, %; ESV_{is} 和 ESV_{iu} 分别为第 i 类土地利用类型研究初期和末期的生态系统服务总价值, 元。当 $C_a > 0$ 时, 表示某种地类变化产生的 ESV 变化与 ESV 总变化为同向性变动; 当 $C_a < 0$ 时, 则为反向性变动。

表 4 黄河下游河岸带各地类生态系统当量因子表

10^8 元

生态系统分类		耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	0.85	0.26	0.23	0.80	0.51	0	0.01
	原料生产	0.40	0.60	0.34	0.23	0.50	0	0.03
	水资源供给	0.02	0.31	0.19	8.29	2.59	0	0.02
调节服务	气体调节	0.67	1.98	1.21	0.77	1.90	0	0.11
	气候调节	0.36	5.92	3.19	2.29	3.60	0	0.10
	净化环境	0.10	1.73	1.05	5.55	3.60	0	0.31
	水文调节	0.27	3.87	2.34	102.24	24.23	0	0.21
支持服务	土壤保持	1.03	2.41	1.47	0.93	2.31	0	0.13
	维持养分循环	0.12	0.18	0.11	0.07	0.18	0	0.01
	生物多样性	0.13	2.19	1.34	2.55	7.87	0	0.12
文化服务	美学景观	0.06	0.96	0.59	1.89	4.73	0	0.05

3 结果与分析

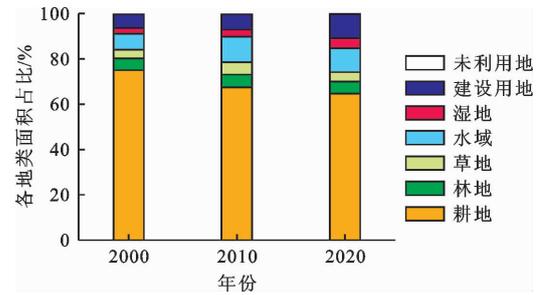
3.1 土地利用类型时空变化分析

基于 ArcGIS 分析遥感影像提取的土地利用图, 对比 2000、2010 和 2020 年黄河下游河岸带各土地利用类型面积及其占比, 结果见图 2 和表 5。由图 2

和表 5 可知, 耕地是黄河下游河岸带主要土地利用类型, 多年平均面积为 2 448.16 km^2 , 平均占比为 69.08%, 2000—2020 年耕地面积呈减少趋势; 其次是水域, 多年平均面积和平均占比分别为 342.12 km^2 和 9.65%, 面积呈先增后减趋势; 建设用地多年平均面积为 280.09 km^2 , 平均占比为 7.90%, 面

积呈明显增加趋势;林地与草地多年平均面积分别为 190.12 和 159.28 km²,平均占比分别为 5.37% 和 4.50%,两者面积呈先增加后减少的趋势;湿地多年平均面积为 117.33 km²,平均占比为 3.31%,面积呈不断增大趋势,尤其是 2010—2020 年增加趋势更加明显;未利用地占地面积最小,平均占比为 0.19%,面积整体呈减少趋势。2000—2020 年,黄河下游河岸带土地利用类型变化大,耕地面积持续减少;湿地、建设用地面积呈不断增加态势,且相较于 2000—2010 年,2010—2020 年的增加态势更加明显;林地、草地和水域面积均在 2000—2010 年有所增大,且水域面积增长最显著,2010—2020 年,3 种土地类型面积转而减少。总体而言,耕地是黄河下游河岸带最主要的土地利用类型,其次为水域和

建设用地,而林地、草地、湿地等地类面积占比较小。近 20 年黄河下游耕地面积减少幅度最大,湿地和建设用地面积增加,其他地类均呈先增大后减小趋势。



注:由于未利用地占比仅为 0.19%,未显示。

图2 2000—2020年黄河下游河岸带各土地利用类型面积占比

表5 2000—2020年黄河下游河岸带各土地利用类型面积

年份	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地	总面积
2000年	2 658.30	184.66	139.07	246.77	92.13	219.69	6.13	3 546.76
2010年	2 393.82	199.14	193.01	403.04	106.53	241.75	9.49	3 546.77
2020年	2 292.36	186.57	145.75	376.56	153.34	378.84	4.65	3 538.07
多年平均	2 448.16	190.12	159.28	342.12	117.33	280.09	6.76	3 543.87
占比/%	69.08	5.37	4.50	9.65	3.31	7.90	0.19	100.00

以 100 m 为间距,建立宽度为 500 m 的河岸缓冲带,分别从整体和局部两个尺度分析 2000—2020 年黄河下游河岸带不同缓冲带各土地利用类型的占比与空间结构变化,结果见图 3 和 4。由图 3 可以看出,河岸带各土地利用类型面积占比在空间分布上发生着变化,其中耕地、湿地、水域和建设用地变化较大。河岸带耕地占比随距河道距离的增加呈增大趋势,但 2020 年该趋势变缓;2000—2010 年各缓冲带湿地占比随距河道距离的增加而减少,2010—2020 年湿地占比随距河道距离的增加先增大后减少,且主要分布在 200 ~ 500 m 缓冲带范围内,远岸湿地占比明显升高;建设用地占比随距河道距离的增加而增大,主要分布在距河道 200 ~ 500 m 区间内,且 2010—2020 年该区间建设用地占比明显升高;草地面积占比随距河道距离的增加而减少,但该趋势在 2000—2020 年期间逐渐减弱;各缓冲带水域面积占比在 2000—2020 年期间变化逐渐加剧,空间变幅增大;各缓冲带林地面积随河道距离变化不明显,而未利用地面积占比基数小,小面积零星分布于 100 m 缓冲区内。图 4 显示了局部河段各地类分布特征,虽然各缓冲带地类分布存在较大异变性,但基

本符合以上统计规律。此外,黄河下游河岸带耕地呈连续分布状态;草地和林地面积小,分布零散,两者分布规律相似;建设用地与湿地集呈集聚分布。

根据遥感解译提取 2000—2010 年地类面积的转移数据,代入公式(1)得出黄河下游河岸带地类转移矩阵及转入和转出率,结果见表 6 和 7。由表 6 和 7 中计算结果可知,2000—2010 年黄河下游河岸带土地利用类型发生净转移的面积约为 443.76 km²,占河岸带总面积的 14.71%。土地利用类型的转移主要表现为耕地的减少,以及水域、草地、建设用地、林地、湿地和未利用地的增加。其中,耕地面积净减少 221.88 km²,主要转出至水域、建设用地和湿地,转出面积占比分别为 49.31%、17.67% 和 16.60%。水域增加了 132.10 km²,主要由耕地转入(占比 82.83%),其次为湿地、林地和草地转入。草地增加了 44.74 km²,主要由耕地转入,转入占比为 68.94%,其次为林地、建设用地和水域转入。建设用地增加面积为 18.72 km²,主要由耕地转入(占比 92.82%),其次为草地转入,其他地类几乎无转移。林地面积净增加 12.52 km²,草地转入占比最大,达到 42.81%,其次为耕地、水域和建设用地转入。湿地面积净增长 11.01 km²,主要

由耕地和水域转入(占比分别为 83.07% 和 15.39%)。原部分水域底部因为沉积而增高或黄河流量变化而出露,形成新的湿地。未利用地面积净增加 2.79

km²,主要由耕地转入(占比 62.34%),受到河道变化以及河流含沙量和径流量的影响,河流两侧滩涂面积增大。

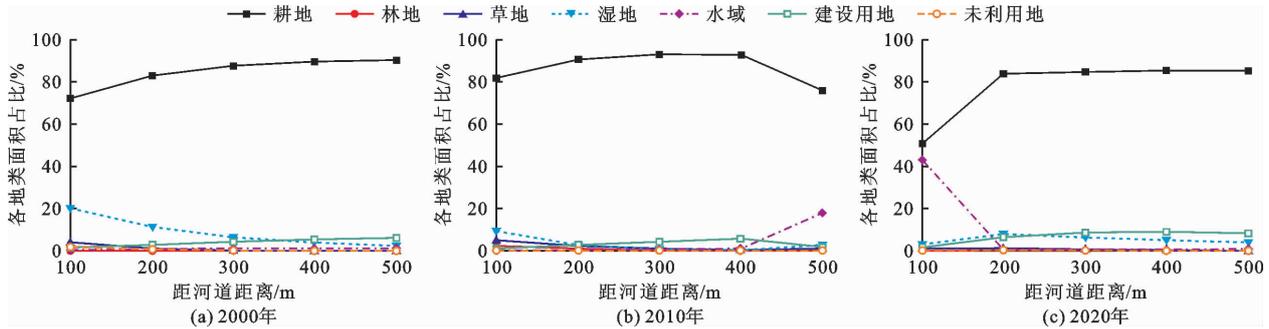


图 3 2000—2020 年黄河下游河岸带各土地利用类型空间占比

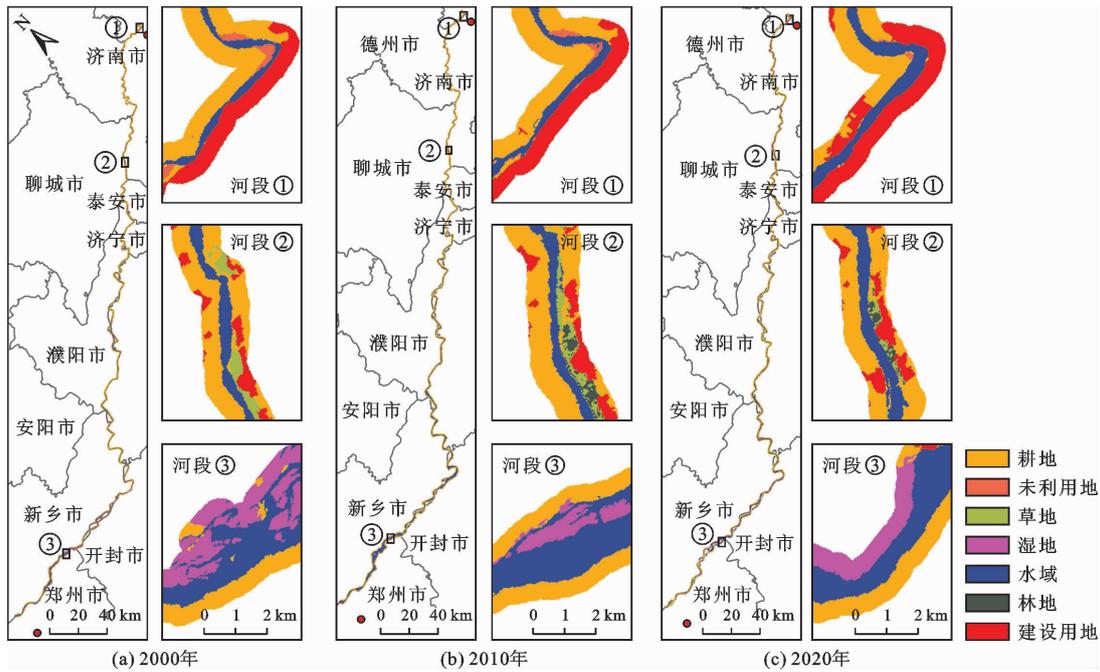


图 4 2000—2020 年黄河下游局部河段河岸带土地利用状况

表 6 2000—2010 年黄河下游河岸带土地利用类型的转移矩阵

km²

年份	土地利用类型	2000 年							总计	增加量
		耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地		
2010 年	耕地	1 887.52	9.40	3.96	31.05	64.75	39.86	0.15	2 036.69	149.17
	林地	9.77	137.55	14.50	1.71	5.00	2.16	0.73	171.42	33.87
	草地	48.18	7.31	94.37	1.21	6.13	6.67	0.39	164.26	69.89
	湿地	61.58	0.20	0.14	16.05	11.41	0.79	0.01	90.18	74.13
	水域	182.98	3.21	2.78	29.02	120.33	2.25	0.67	341.24	220.91
	建设用地	65.56	0.54	3.41	0.12	0.96	134.93	0.04	205.56	70.63
	未利用地	2.98	0.69	0.36	0.01	0.56	0.18	3.20	7.98	4.78
	总计	2 258.57	158.90	119.52	79.17	209.14	186.84	5.19	3 017.33	623.38
	减少量	371.05	21.35	25.15	63.12	88.81	51.91	1.99	623.38	
净转移	221.88	12.52	44.74	11.01	132.10	18.72	2.79	443.76		

基于2010—2020年地类面积转移数据,代入公式(1)得出黄河下游河岸带地类转移矩阵及转入和转出率,结果见表8和9。经计算可得,2010—2020年,黄河下游河岸带土地利用类型的转移强度较前10年减小,发生变化的面积约为314.68 km²,占河岸带总面积的10.41%。土地利用类型转移主要表现为湿地和建设用地的净增加,以及耕地、草地、水域、林地和未利用地面积的净减少。其中,湿地面积增加40.07 km²,水域转入面积占44.25%,主要由河道径流呈增加态势以及郑州等地极端暴雨天气影响下地类自然过渡造成,其次为草地、耕地转入。建设用地面积净增加117.27 km²,主要由耕地转入,转入占比为91.33%,这与耕地本身地势平坦、交通条件优越的地理区位有关。黄河下游河岸带大部分区域自然条件优越,农民主要在灌溉方便的沿岸地区种植小麦、玉米等粮食作物,其居民点也呈现沿岸、沿耕地分布的特征。当地居民多选择在村庄周

围直接占用耕地建造房屋或农田设施,再加上经济的不断发展,大面积耕地转化为建设用地,建设用地侵占耕地现象严重,2010—2020年耕地面积净转出78.96 km²,其中建设用地占比为48.37%,其次为水域,占比为34.45%,这与退耕还湿等国家湿地保护政策相关。

草地面积净减少39.39 km²,主要转出至湿地、耕地和林地,占比分别为30.49%、24.02%和22.63%。水域面积减少了23.98 km²,主要转出至耕地,转出占比为70.65%,其次转出为湿地、草地。林地面积减少了10.95 km²,主要转出至草地,转出占比为47.84%,其次转出为耕地、水域,转出占比分别为27.07%和10.19%。未利用地面积净减少了4.06 km²,主要转出至湿地、林地和水域,三者占比接近,分别为29.14%、24.28%和22.31%,主要由气候引起的自然环境变化所致,人为植树造林等林地保护措施也发挥了一定作用。

表7 2000—2010年黄河下游河岸带各土地利用类型转入与转出率

%

土地利用类型	耕地		林地		草地		湿地		水域		建设用地		未利用地	
	转入	转出												
耕地			28.85	44.03	68.94	15.75	83.07	49.19	82.83	72.91	92.82	76.79	62.34	7.54
林地	6.30	2.63			10.46	57.65	0.27	2.71	1.45	5.63	0.76	4.16	14.44	36.68
草地	2.65	12.98	42.81	34.24			0.19	1.92	1.26	6.90	4.83	12.85	7.53	19.60
湿地	20.82	16.60	5.05	0.94	1.73	0.56			13.14	12.85	0.17	1.52	0.21	0.50
水域	43.41	49.31	14.76	15.04	8.77	11.05	15.39	45.98			1.36	4.33	11.72	33.67
建设用地	26.72	17.67	6.38	2.53	9.54	13.56	1.07	0.19	1.02	1.08			3.77	2.01
未利用地	0.10	0.80	2.16	3.23	0.56	1.43	0.01	0.02	0.30	0.63	0.06	0.35		

表8 2010—2020年黄河下游河岸带土地利用类型的转移矩阵

km²

年份	土地利用类型	2010年								总计	增加量
		耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地			
2020年	耕地	1 746.40	12.17	21.80	26.12	121.17	30.58	0.74	1 958.98	212.58	
	林地	10.26	127.32	20.54	0.07	1.02	0.52	1.60	161.33	34.01	
	草地	21.14	21.51	74.23	0.71	6.49	0.80	0.71	125.59	51.36	
	湿地	18.35	1.91	27.67	39.82	40.12	0.69	1.92	130.48	90.66	
	水域	100.44	4.58	13.02	23.52	171.42	4.50	1.47	318.95	147.53	
	建设用地	141.01	3.30	7.16	0.17	2.60	169.24	0.15	323.63	154.39	
	未利用地	0.34	1.49	0.56	0	0.11	0.03	1.44	3.97	2.53	
	总计	2 037.94	172.28	164.98	90.41	342.93	206.36	8.03	3 022.93	693.06	
	减少量	291.54	44.96	90.75	50.59	171.51	37.12	6.59	693.06		
	净转移	78.96	10.95	39.39	40.07	23.98	117.27	4.06	314.68		

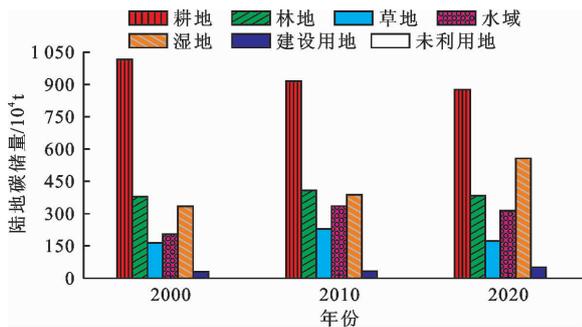
表 9 2010—2020 年黄河下游河岸带各土地利用类型转入与转出率 %

土地利用类型	耕地		林地		草地		湿地		水域		建设用地		未利用地	
	转入	转出												
耕地			30.17	27.07	41.16	24.02	20.24	51.63	68.08	70.65	91.33	82.38	13.44	11.23
林地	5.72	3.52			41.88	22.63	2.11	0.14	3.10	0.59	2.14	1.40	58.89	24.28
草地	10.25	7.25	60.39	47.84			30.52	1.40	8.83	3.78	4.64	2.16	22.13	10.77
湿地	12.29	6.29	0.21	4.25	1.38	30.49			15.94	23.39	0.11	1.86	0	29.14
水域	57.00	34.45	3.00	10.19	12.64	14.35	44.25	46.49			1.68	12.12	4.35	22.31
建设用地	14.39	48.37	1.53	7.34	1.56	7.89	0.76	0.34	3.05	1.52			1.19	2.28
未利用地	0.35	0.12	4.70	3.31	1.38	0.62	2.12	0	1.00	0.06	0.10	0.08		

综上所述,2010—2020 年黄河下游河岸带各土地利用类型转移强度较 2000—2010 年有所减小。2000—2020 年耕地和建设用地存在相互转化的现象,耕地面积虽呈递减态势,但黄河下游河岸带始终以耕地为主要土地利用类型。此外,人类活动对土地利用方式的影响改变着河岸带的土地利用结构及其相互转化。

3.2 碳储分析

在黄河下游河岸带地类面积数据的基础上,利用公式(2)和(3)计算 2000—2020 年河岸带内不同地类碳储量及其变化趋势,结果见图 5。



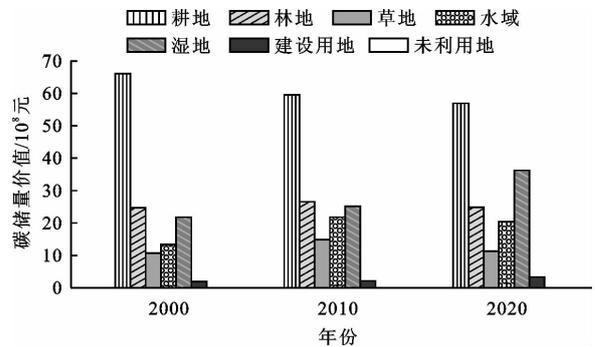
注:由于未利用地碳储量为 0,不显示。

图 5 2000—2020 年黄河下游各类用地碳储量变化

由图 5 可以得出 2000、2010 和 2020 年河岸带碳储量分别为 $2\ 131.33 \times 10^4$ 、 $2\ 309.46 \times 10^4$ 和 $2\ 355.10 \times 10^4$ t,整体呈上升趋势。不同地类碳储量差异明显,耕地、湿地和林地占比较大,其中,耕地平均碳储量为 936.67×10^4 t,占比 41.35%;湿地平均碳储量为 426.31×10^4 t,占比 18.82%;林地平均碳储量为 390.19×10^4 t,占比 17.22%;水域平均碳储量为 284.92×10^4 t,占比 12.58%;草地平均碳储量为 189.53×10^4 t,占比 8.37%;建设用地和未利用地碳储量占比 1.66%。2000—2020 年河岸带耕地碳储量逐渐减少,湿地碳储量逐渐上升,水域、林

地和草地则先增加后降低。整体而言,河岸带碳储量变化较小,虽然耕地对保持河岸带碳库有重要贡献,湿地碳储量逐渐上升,但耕地、水域、湿地等地类碳汇能力还有待提升。

基于不同土地利用类型的生态系统碳储量数据,利用公式(4)计算出各地类的碳储价值,并分析时间变化趋势,结果见图 6。由图 6 可知,耕地在各地类中碳储价值最大,但 2000—2020 年呈持续降低态势,其余各类地受面积制约碳储价值均较小,2000—2020 年林地、草地、水域的碳储价值均呈先增加后减少趋势;湿地碳储价值逐渐上升,且 2010—2020 年增长明显,碳汇功能显著。因此,河岸带耕地、林地、草地和水域的碳汇能力有待加强,应适当退耕还林或还水。此外,湿地数量与质量均为影响地类碳储价值的重要因素。



注:由于未利用地碳储量为 0,不显示。

图 6 2000—2020 年黄河下游河岸带各类用地碳储价值量

3.3 生态系统服务价值 (ESV) 分析

结合河岸带单位面积粮食产量创造的经济价值与表 4 中所列当量因子,可得到单项生态服务功能价值系数和生态服务功能总价值系数,进而利用公式(5)和(6)分别计算单个地类 ESV_i 与河岸带总 ESV ,结果见图 7。由图 7 可以看出,2000—2020 年黄

河下游河岸带 *ESV* 先上升后下降。2000、2010 和 2020 年河岸带 *ESV* 分别为 80.49×10^8 、 111.92×10^8 和 108.62×10^8 元。其中,耕地平均 *ESV* 为 15.22×10^8 元,占比 15.17%;林地平均 *ESV* 为 6.02×10^8 元,占比 6%;草地平均 *ESV* 为 2.98×10^8 元,占比 2.97%;水域平均 *ESV* 为 66.64×10^8 元,占比 66.42%;湿地平均 *ESV* 为 9.47×10^8 元,占比 9.43%;而未利用地平均 *ESV* 仅为 0.01×10^8 元,占比 0.01%。2000—2020 年黄河下游 *ESV* 总量增加 28.13×10^8 元,*ESV* 总量主要来源于水域、耕地和湿地,其中,水域增加 25.28×10^8 元,湿地增加 4.94×10^8 元,而耕地随面积减少 *ESV* 总量逐年下降,共减少 2.28×10^8 元。总之,水域 *ESV* 显著高于其他地类,林地、草地和湿地 *ESV* 虽整体呈增加趋势,但占比较低,因此林地、草地和湿地 *ESV* 尚有提升潜力。

表 10 为 2000—2020 年不同时段各地类生态系统服务贡献率。分析表 10 中数据的变化特征发现,

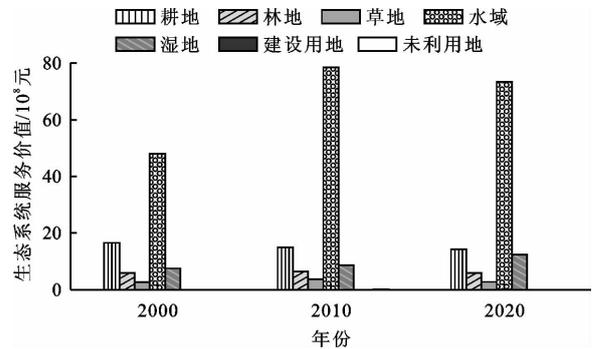
表 10 2000—2020 年不同时段黄河下游河岸带各地类生态系统服务贡献率

时段	耕地	林地	草地	水域	湿地	建设用地	未利用地
2000—2010 年	-0.052	0.015	0.032	0.968	0.037	0.000	0.000
2010—2020 年	0.191	0.120	0.267	1.562	-1.143	0.000	0.003
2000—2020 年	-0.081	0.002	0.004	0.899	0.176	0.000	0.000

4 讨论

2000—2020 年黄河下游河岸带地类的时空变化较大。由于人类活动对河岸带的影响不断增强,2000—2020 年耕地面积不断减少,主要转换为水域、建设用地、湿地和草地。因此,2000—2020 年建设用地面积持续增加,在生态保护政策驱动下 2000—2020 年湿地面积也呈持续增加趋势,而林地、草地和水域和未利用地面积则先增加后减少,变化不稳定,其中,增加的林地主要来源于草地,林地与草地存在相互转化,而草地的来源则较为多样,部分耕地也转化为林地与草地,而水域面积则主要受黄河下游水沙调节的影响,水域部分来源于湿地,水域与湿地存在相互转化。张鹏岩等^[31]的研究发现,1990—2015 年黄河下游耕地是其他地类转入的主要贡献者,耕地和未利用地面积逐渐减少,而建设用地和水域面积增加,未利用地土地利用动态最高,这与本文的结论一致。研究还发现,调水调沙造成 2000—2010 年水域面积增大,而 2010—2020 年水域面积减少。调水调沙在改善泥沙淤积状况的同

虽然水域对生态系统服务价值增长的贡献率较其他地类最大,但 2020 年水域贡献率有下降趋势,其次为湿地,耕地、林地和草地的贡献率低。因此,为进一步增加黄河下游河岸带各地类 *ESV*,未来应增大湿地、水域、林地和草地的生态系统服务贡献率。



注:由于建设用地生态系统服务价值为 0,未利用地生态系统服务价值趋于 0,均未显示。

图 7 2000—2020 年黄河下游河岸带各地类生态系统服务价值变化

时^[32],对河岸带地类结构也产生了重要影响,使得河滩草地被泥沙覆盖,湿地面积增大,但湿地质量降低。同时,更多的湿地来源于耕地转化,且位置远离河岸带,因此湿地质量也存在上升空间。在空间上,水文环境条件的变化也是引起耕地和建设用地随距河道距离的增加而增加以及林地、湿地和草地随距河岸距离的增加而减少的主要原因^[33],这与前人的研究结果一致。整体而言,2010—2020 年黄河下游河岸带土地利用变化强度较 2000—2010 年小,耕地面积是主要转出地类,与大部分地类存在相互转化的现象,湿地面积增加,水域与湿地、耕地存在相互转换,且湿地更倾向于向河岸带外围扩展,而未利用地和草地面积减少,与水域、林地、草地和湿地存在转换。总而言之,河岸带地类的时空变化与水文环境、人类活动和国家政策等因素密切相关,而调水调沙背景下黄河下游河岸带各地类组成与空间布局是未来优化河岸带生态功能应重点考虑的问题。

2000—2020 年黄河下游生态系统服务价值先上升后下降,这与刘莹等^[34]的研究结论一致。其中黄河下游河岸带耕地碳汇能力和生态系统服务价值

持续降低,但由于耕地基数大,依然是河岸带碳储量的主要贡献地类。虽然2000—2010年林地、草地和水域的碳储量和生态系统服务价值增加,但2010—2020年这些地类碳储量与生态系统服务价值降低,而湿地碳汇与生态系统服务价值持续增大。因此,黄河下游河岸带林地、草地和水域的碳汇能力和生态系统服务价值有较大的提升空间,建议未来可以适当退耕,扩大林地、湿地和草地,改善水域环境,从而提升黄河下游河岸带碳汇能力与生态系统服务价值。总而言之,人为控制输水输沙和高强度人类活动使河岸带土地利用格局对河岸带的生态系统服务价值与碳汇能力产生了重要影响,合理规划河岸带土地资源利用方式与格局,如采用植物嵌套配置、生态岛屿等方法,同时,针对河岸带耕地,适当退耕还林、还草或还水,结合微生物碳泵等技术原理,充分发挥耕地的生态功能,积极平衡各地类的生态与社会效益,将会显著提升河岸带生态系统服务价值与碳汇能力。

5 结论与建议

5.1 结论

(1)2000—2020年黄河下游河岸带耕地是主要的地类,且其面积持续缩减;湿地和建设用地面积持续增加;林地、草地和水域和未利用地面积先增加后减少,且这些地类面积小,波动大。耕地是主要转出地类,主要转出至建设用地和水域;水域与湿地也存在相互转换;其中,湿地向河岸带外围扩展,林地、草地、耕地三种地类转换密切。

(2)黄河下游河岸带耕地呈连续分布状态;草地和林地分布规律相似,即面积小且分布零散;建设用地与湿地呈集聚分布。耕地和建设用地面积占比随距河道距离的增加而增大,草地面积占比随距河道距离的增加而减少,2000—2010年湿地面积占比的变化规律与草地一致,而2010—2020年湿地占比随距河道距离先增大后减少,林地随河道距离变化不明显。

(3)2000—2020年黄河下游河岸带碳储量逐渐增加。耕地和湿地对河岸带碳储量有重要贡献,其中,湿地基于面积增长,其碳汇能力逐年上升,而林地、草地和水域碳汇能力在2010—2020年随时间下降,因此,未来进一步提升各地类碳汇能力是未来提升黄河下游河岸带碳储量的重要途径。

(4)水域对生态系统服务价值的贡献率最大,湿地次之,耕地、林地和草地的贡献率小,且不稳定。提

升湿地质量、增大林地和草地面积,缩减建设用地面积是提高河岸带生态系统服务价值的重要途径。

5.2 建议

在人为控制黄河下游输水输沙条件下,河道形态变化不仅减少了河岸带湿地和草地面积,也降低了它们的生态系统服务价值与碳汇能力。针对黄河下游河岸带生态系统与碳储特点,未来应在保证林地、湿地和草地面积的前提下,通过植物嵌套配置、生态岛屿等方法,进一步提高生态系统服务价值与碳汇能力。针对河岸带耕地,应适当退耕还林、还草或还水,通过发挥微生物碳泵及其生态功能,进一步提高耕地土壤健康及其生态系统服务价值。

参考文献:

- [1] 孙玉婷,闫淑君,凌玲,等. 河岸带植物生态适应策略研究进展[J/OL]. 世界林业研究: 1-7[2023-09-20]. <https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2023.0072.y>.
- [2] 王静,王冬梅,任远,等. 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系[J]. 生态学报,2019,39(8):2687-2695.
- [3] BUSATO L, BOAGA J, PERRI T M, et al. Hydrogeophysical characterization and monitoring of the hyporheic and riparian zones: the Vermigliana Creek case study[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648(1): 1105-1120.
- [4] GU Sen, GRUAU G, DUPAS R, et al. Release of dissolved phosphorus from riparian wetlands: evidence for complex interactions among hydroclimate variability, topography and soil properties[J]. Science of the Total Environment, 2017, 598(1): 421-431.
- [5] CHEN Fangxin, LU Shaoyong, HU Xiaozhen, et al. Multi-dimensional habitat vegetation restoration mode for lake riparian zone, Taihu, China[J]. Ecological Engineering, 2019, 134: 56-64.
- [6] CHI Yuan, SHI Honghua, ZHENG Wei, et al. Spatiotemporal characteristics and ecological effects of the human interference index of the Yellow River Delta in the last 30 years[J]. Ecological Indicators, 2018, 89: 880-892.
- [7] MEITZEN M K, PHILLIPS N J, PERKINS T, et al. Catastrophic flood disturbance and a community's response to plant resilience in the heart of the Texas Hill Country[J]. Geomorphology, 2018, 305: 20-32.
- [8] 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.
- [9] 张灿灿,胡艳芳,雷雅凯,等. 基于人类需求的河岸带生态系统服务功能评价:以郑州市花园口黄河为例[J]. 河南科学,2014,32(12):2574-2578.
- [10] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The

- value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [11] COSTAMZA R, GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [12] 段维利,余新晓,陈丽华,等. 京津冀城市群城镇化与生态建设对生态系统服务价值的影响 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 404-411.
- [13] 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.
- [14] 黄日鹏,李加林,段义斌,等. 快速城镇化对杭州湾南岸慈溪市土地利用及生态系统服务价值的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2018, 16(5): 105-113.
- [15] 陈宏伟,许晶,刘娜,等. 沈阳市城区绿地生态系统服务价值的时空变化 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3391-3397.
- [16] 赖勇,林少涛,黄光庆,等. 快速城镇化背景下生态系统服务价值时空变化及空间特征研究: 以潮州市潮安区为例 [J]. *生态科学*, 2023, 42(4): 18-28.
- [17] 张杨,马泽忠,陈丹. 基于生态格局视角的三峡库区土地生态系统服务价值 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 321-327.
- [18] 马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,等. 基于遥感与GIS的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究 [J]. *生态学报*, 2018, 38(16): 5938-5951.
- [19] 南笛,杨子寒,毕旭,等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析: 以长江中游华阳河湖群地区为例 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [20] 史莎娜,李晓青,谢炳庚,等. 喀斯特和非喀斯特区农业景观格局变化及生态系统服务价值变化对比: 以广西全州县为例 [J]. *热带地理*, 2018, 38(4): 487-497.
- [21] 刘凤莲,杨磊,王舒. 金沙江流域景观生态风险与生态系统服务价值时空演变及关联分析 [J]. *资源与生态学报*, 2023, 14(5): 914-927.
- [22] 张亦清,赵翔,潘雨飘,等. 湖北省 2009—2019 年主要生态用地的时空演变特征及驱动因素 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 417-426.
- [23] 黄嘉瑜,焦露. “双碳”约束下黄河下游生态效率测度与时空演变分析 [J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 41(2): 24-32.
- [24] 郭燕,杨秀忠,王来刚,等. 黄河下游滩区河南段土地利用类型的时空变化特征 [J]. *河南科学*, 2023, 41(1): 47-54.
- [25] 王广州,窦身堂,凡姚申,等. 黄河下游地区水资源生态足迹时空分析与预测 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(01): 117-123 + 132.
- [26] 湛江,李志萍,于小朋. 黄河下游冲积平原典型区包气带土壤水分特征曲线的模型优选 [J]. *人民黄河*, 2022, 44(12): 147-153.
- [27] 闫驰. 基于 WorldView-2 数据岩浆岩解译方法研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [28] 刘清,吴文魁,张斌才. 遥感影像自动解译与变化检测方法研究与应用 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(12): 122-125 + 129.
- [29] 汤国安,张友顺,刘咏梅,等. 遥感数字图像处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 徐涵秋,邓文慧. *MRSEI* 指数的合理性分析及其与 *RSEI* 指数的区别 [J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(1): 1-7.
- [31] 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.
- [32] 陈琳. 小浪底水库运用后黄河下游水沙变化及河道冲淤演变 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2017.
- [33] 常玉旸,张凤荣,张天柱,等. 典型江南山地丘陵区河岸带土地利用时空变化特征及其政策响应 [J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(8): 76-87.
- [34] 刘莹,耿文亮,邵静文,等. “三生空间”视角下土地利用变化与生态系统服务价值响应: 以黄河下游地区为例 [J]. *地域研究与开发*, 2021, 40(4): 129-135.