

目次

基于时间序列分解的京津冀区域PM_{2.5}和O₃空间分布特征姚青,丁净,杨旭,蔡子颖,韩素芹 (2487)

基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析周红,王鸣,柴文轩,赵昕 (2497)

基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测杨晓彤,康平,王安怡,臧增亮,刘浪 (2507)

海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估符传博,林建兴,唐家翔,丹利 (2516)

京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估高冉,李琴,车飞,张艳平,祖永刚,刘芬 (2525)

2022年北京市城区PM_{2.5}水溶性离子含量及其变化特征陈圆圆,崔迪,赵泽熙,常森,景宽,沈秀娥,刘保献 (2537)

郑州市冬春季PM_{2.5}中金属元素污染特征、来源及健康风险评估陶杰,闫慧姣,徐艺斐,荆海涛 (2548)

淄博市供暖前后PM_{2.5}中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险孙港立,吴丽萍,徐勃,高玉宗,赵雪艳,姬亚芹,杨文 (2558)

西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析李萌津,张勇,张倩,田杰,李丽,刘卉昆,冉伟康,王启元 (2571)

天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析卢苗苗,韩素芹,刘可欣,唐晓,孔磊,丁净,樊文雁,王自发 (2581)

基于空间尺度效应的山东省PM_{2.5}浓度时空变化及空间分异地理探测徐勇,韦梦新,邹滨,郭振东,李沈鑫 (2596)

我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势武婷,崔焱文,肖成德,翟增秀,韩萌 (2613)

廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析张敬巧,刘铮,丁文文,朱瑶,曹婷,凌德印,王淑兰,王宏亮 (2622)

景观格局对河流水质影响的尺度效应Meta分析王玉仓,杜晶晶,张禹,吴昊,胡敏韵,陈丁江 (2631)

白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源孟佳靖,婁红,陈哲,周石磊,底怡玲,武辰彬,王晨光,张家丰,崔建升 (2640)

北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析胡昱欣,周瑞静,宋炜,杨全合,王鑫茹 (2651)

庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价刘海,魏伟,宋阳,徐洁,管政亭,黄健敏,赵国红 (2665)

农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价王蔚青,徐雄,刘权震,林利华,吕婧,王东红 (2678)

黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征韦程宸,魏枫沂,夏慧,黄魁 (2686)

基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析金晓龙,邓学良,戴睿,徐倩倩,吴月,范裕祥 (2694)

再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征贺赞,李雪梅,李宏权,魏琳琳,姜春晖,姜大伟,李魁晚 (2707)

水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响梅渝,黄平,王鹏,朱凯 (2715)

银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系蒙俊杰,刘双羽,邱小琼,周瑞娟 (2727)

热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析张含,张涵,王佳伟,高金华,文洋,李相昆,任征然 (2741)

市政污水中吗啡来源辨析耶雪婷,赵悦彤,蒋冰,裴伟,李彦莹,谭冬芹,王德高 (2748)

溱沔河流域生态环境动态遥感评价李艳翠,袁金国,刘博涵,郭豪 (2757)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素王奕洪,洪学莹 (2767)

基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例蔡进,危小建,江平,梁玉琦 (2780)

贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因李月,冯霞,吴路华,罗光杰,罗红芬 (2793)

2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子周怡婷,严俊霞,刘菊,王璞 (2806)

基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量崔霞,董燕,张露尹,王荣耀 (2817)

京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响武爱彬,陈辅国,赵艳霞,秦彦杰,刘欣,郭小平 (2828)

西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响江可,贾亚男,杨琰,陈坚淇,禹朴家 (2840)

不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析黄世威,赵一锴,朱馨雨,刘贺雷,刘姣姣,陈稍,陈佳永,张阿凤 (2848)

基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测胡志瑞,赵万伏,宋根先,王芳,林妍敏 (2859)

不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响孙凯,崔玉涛,李顺晋,魏冰丽,王媛,杨宏博,王孝忠,张伟 (2871)

集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性周连昊,曾全超,梅唐英泽,汪明霞,谭文峰 (2881)

控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响高玮,王学霞,谢建治,陈延华,倪小会,王甲辰,董艳芳,李子双,曹兵 (2891)

生物炭对黄绵土中NO₃-N运移过程影响及模拟白一茹,刘旭,张钰涵,张睿媛,马艳,王幼奇 (2905)

中国农田土壤重金属污染分析与评价杨雳,白宗旭,薄文浩,林静,杨佩佳,陈涛 (2913)

城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望王晓雨,刘恩峰,杨祥梦,王碧莲,林锦阔,颜梦霞,毕世杰 (2926)

场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展陈玥如,高文艳,陈虹任,薛生国,吴川 (2939)

黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析戴文婷,张晖,吴霞,钟鸣,段桂兰,董霖红,张培培,樊洪明 (2952)

拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价韩双宝,袁磊,张秋霞,郑焰,李甫成 (2962)

银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析于路加,马海军,王翠平 (2971)

基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估陈莲,邹子航,张培珍,王雨茜,王振江,林森,唐翠明,罗国庆,钟建武,李智毅,王圆 (2983)

西南典型碳酸盐岩高地地质背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型唐瑞玲,徐进力,刘彬,杜雪苗,顾雪,于林松,毕婧 (2995)

贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划韦美溜,周浪,黄燕玲,庞瑞,王佛鹏,宋波 (3005)

柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应刘梦宇,罗绪锋,辜娇峰,易轩韬,周航,曾鹏,廖柏寒 (3016)

改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响肖乃川,王子芳,杨文娜,谢永红,代文才,高明 (3027)

生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响郑晨格,裴欢欢,张亚珊,李嘉欣,刘奋武,乔星星,秦俊梅 (3037)

基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应姜继韶,侯睿,崔慧林,闫广轩,刘栋 (3047)

微塑料对土壤N₂O排放及氮素转化的影响研究进展刘一戈,杨安琪,陈舒欣,牛奕奕,卢瑛,李博 (3059)

土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响戴柳云,侯磊,王化,符立松,王艳霞,李晓琳,王万宾,梁启斌 (3069)

养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征宋可心,贺金成,李昌文,解思琦,刘宝莹,黄伟,冯志华 (3078)

聚乙烯微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响王志超,李哲,李嘉辰,屈忠义,胡文煊,李卫平 (3088)

鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测俞锦丽,赵俊凯,罗思琦,景文慧,杨启武,刘淑丽 (3098)

粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径徐艺诺,翁大维,王硕,胡喜生,王占永,张园园,张兰怡 (3107)

电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析徐圆圆,龚德鸿,黄正光,杨浪 (3119)

黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素

王奕淇, 孙学莹*

(长安大学经济与管理学院, 西安 710064)

摘要: 探析生态系统服务价值的外部时空演化及内在影响机制, 对理解区域生态系统问题和提升人类生态福祉具有重要意义. 基于格网数据, 利用当量因子法与归一化植被指数 (NDVI) 对黄河流域的生态系统服务价值进行测度, 分析流域沿线城市生态系统服务价值的时空格局演变, 并在利用地理探测器确定主要影响因素的基础上, 构建地理加权回归 (GWR) 模型, 探讨各影响因素的空间异质性. 结果表明: ① 2000~2020 年黄河流域生态系统服务价值先上升再下降最后上升, 呈现“南部高于北部”和“下游低、上中游高”的空间分布格局, 且调节服务对流域生态系统服务价值的贡献最大. ② 地理探测结果表明, 各因素的影响程度存在差异, 社会因素对黄河流域生态系统服务价值的解释作用最强, 经济因素次之, 自然因素的解释作用最弱, 且上游的高值区主要与河流湖泊有关, 中游的高值区主要与山地有关. ③ GWR 模型结果表明, 人口密度、土地垦殖率与生态系统服务价值呈负相关, 年均降水量呈正相关, 作用强度均由东向西递增; 单位面积 GDP 与整体生态系统服务价值呈负相关, 但在上游区域呈正相关.

关键词: 生态系统服务价值 (ESV); 时空演化; GWR 模型; 影响因素; 黄河流域

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2767-13 DOI: 10.13227/j.hjkk.202306163

Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin

WANG Yi-qi, SUN Xue-ying*

(School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The external spatiotemporal evolution and intrinsic impact mechanisms of ecosystem service value are of great significance for understanding regional ecosystem issues and enhancing human ecological well-being. Based on grid data, this study used the equivalent factor method and NDVI to measure the ecosystem service value of the Yellow River Basin, analyzed the spatial-temporal evolution of urban ecosystem service value along the basin, and established a GWR model to explore the spatial heterogeneity of each influencing factor on the basis of determining the main influencing factors via geographic detector. The results showed that: ① The ecosystem service value of the Yellow River Basin increased first, then decreased, and finally increased from 2000 to 2020, showing a spatial distribution pattern of “the south was higher than the north;” “the lower reaches were lower, and the upper and middle reaches were higher;” and the regulation service contributed the most to the ecosystem service value of the basin. ② The results of geographical exploration showed that the degree of influence of various factors was different. Social factors played the strongest role in explaining the ecosystem service value of the Yellow River Basin, followed by economic factors, and natural factors played the weakest role. The high value areas in the upper reaches were mainly related to rivers and lakes, and the high value areas in the middle reaches were mainly related to mountains. ③ The results of the GWR model showed that population density and land reclamation rate were negatively correlated with ecosystem service value, whereas average annual precipitation was positively correlated, and the effects increased from east to west. The GDP per unit area was negatively correlated with the overall ecosystem service value but positively correlated in the upstream region.

Key words: ecosystem service value (ESV); spatial-temporal evolution; GWR model; influencing factor; Yellow River Basin

生态系统服务来源于自然生态系统及其组成物种维持和满足人类生命的环境条件和过程, 是人类从生态系统中获得的利益总称^[1,2]. 生态系统服务价值 (ecosystem service value, ESV) 作为衡量生态系统服务的关键指标, 逐步成为国际学术热点. 生态系统服务价值的时空格局及演化反映出生态系统的外部状况, 其影响因素及作用机制体现出生态系统问题的内在根源^[3]. 探析生态系统服务价值的外部时空演化及内在影响机制, 对理解区域生态系统问题、提升人类生态福祉和促进人与自然和谐共生具有重要意义.

生态系统服务价值是通过生态系统的功能直接或间接获得的产品与服务的价值^[4]. 随着 Costanza 等^[1]首次利用当量因子法对全球的 ESV 进行测度,

愈来愈多的学者关注 ESV 评估, 将 ESV 的研究推向了新高度^[5-7]. 当前对于生态服务价值的评估处于多角度与多方法的状态, 主要包括直接市场法^[8]、替代市场法^[9]、假想市场价值法^[10]、能值分析法^[11]和当量因子法^[12], 其中当量因子法由于具有使用简单、易于操作和评估范围全面等优势而被广泛应用^[13]. 然而 Costanza 等^[1]对 ESV 的研究不完全符合中国的实际生态系统情况, 因此谢高地等^[14]对当量因子法进行本土化修改, 建立了适用于中国的 ESV 评

收稿日期: 2023-06-20; 修订日期: 2023-08-03

基金项目: 国家社会科学基金项目 (18CGL028); 陕西省创新能力支撑计划软科学项目 (2023-CX-RKX-106); 中央高校基本科研业务费专项 (300102233604)

作者简介: 王奕淇 (1988-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为区域治理与生态环境价值, E-mail: wangyiqi17@126.com

* 通信作者, E-mail: s15034352049@163.com

估体系,此后当量因子法被大量应用于省域^[15]、城市群^[16]和流域^[17]等的ESV评估.随着ESV评估方法的逐渐成熟以及GIS和RS技术的快速发展,对ESV的评估由最初的各项生态系统服务功能的综合评估发展为研究ESV的时空演化特征^[18].然而,谢高地等^[14]的评估方法忽视了植被繁茂程度的潜在影响,而植被在生态系统中发挥维持生态平衡的重要作用,忽视植被的生长情况会导致ESV评估失准^[3].利用归一化植被指数(NDVI)对ESV进行修正,可得到更精准的评估结果^[19].

在ESV定量核算的基础上,部分学者开始关注其影响机制,探讨生态系统问题产生的根本.ESV的影响因素主要包括自然因素和社会经济因素,在自然因素方面,主要是由气候、高程、地形和降水等因素产生影响.气候通过调节水热条件和作用于生物行为影响生态系统服务^[20],高程的差异会影响人类活动与植被分布^[21],地形通过影响蓄水能力、光照强度等对生态系统的服务功能进行调节^[22],降水模式的变化会影响生态系统的土壤保持功能与水文循环^[23].在社会经济因素方面,主要是通过土地利用、人口和经济等因素产生影响.土地利用是人类直接影响生态系统服务的表现方式,可反映人类对资源的合理配置情况^[24];人口与经济等因素会通过开发、污染和治理等行为对生态系统服务产生影响^[25].现有研究大多利用相关性分析或回归分析考察ESV的主要影响因素^[26,27],然而相关性分析无法清晰指明变量间的因果方向,回归分析无法识别具体因素的重要程度,且均忽略了不同影响因素的空间异质性^[23].由于对ESV产生影响的各主导因素通常不是均质的,在空间的作用强度上具有显著区别,导致ESV的评估结果往往呈现较大差异^[28].因此,可通过引入GWR模型,从空间维度进行研究,探讨影响因素的空间分异情况^[29].

黄河流域作为我国重要的生态安全屏障,蕴藏着巨大的生态系统服务价值.习近平总书记强调黄河流域各省区都要坚持把保护黄河流域生态作为谋划发展、推动高质量发展的基准线.探讨黄河流域生态现状,分析黄河流域生态系统服务价值的时空演化特征及其影响因素,有利于推进黄河流域的生态保护和高质量发展.基于此,本文以黄河流域为研究对象,将当量因子法与NDVI相结合,对黄河流域生态系统服务价值进行测度,探讨沿线城市ESV的时空演化特征,并在识别ESV主要影响因素的基础上,构建GWR模型分析各影响因素的空间分异特征.可能的边际贡献在于:一方面,引入NDVI对黄河流域的生态系统服务价值进行修正,得

到更精确的测度结果,描绘出更精准的ESV时空演化过程;另一方面,引入地理探测器确定ESV的主要影响因素,构建GWR模型探讨影响因素的空间异质性,克服无法识别具体因素重要程度的缺陷,弥补ESV影响因素空间分析的不足.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河流域发源于青藏高原,流域面积达752 442 km².地势西高东低,区域地形变化多端.流域内气候类型复杂多样,自西北向东南分别属于干旱、半干旱和半湿润气候.黄河流域以内蒙古自治区托克托县河口镇、河南省荥阳市桃花峪为界,分为上游、中游和下游.上游为河源地区,平均海拔在4 000 m以上,由一系列高山组成,峡谷较多;中游海拔在1 000~2 000 m之间,为黄土地貌,水土流失严重;下游主要由黄河冲积平原组成,城市化水平较高.黄河流域上游、中游和下游各省的社会经济发展水平存在较大差异,其中,下游地区人口密集,交通便利,是流域中经济最发达的区域;而上游地区大多处于高寒生态脆弱区,开发程度受限,交通不便,经济发展较缓慢.本文参照水利部黄河水利委员会划定的自然流域范围,结合任保平等^[30]和杨永春等^[31]的研究,同时考虑到黄河流域仅流经四川省很短的区域,因此未把四川省地级以上城市纳入样本中,最终确定以黄河流域流经的70个地级市为研究对象.

1.2 数据来源

根据研究需求,将土地利用数据分为耕地、森林、草地、水域、湿地和未利用地这6类,结合粮食价格统计数据 and NDVI数据,并利用ArcGIS计算2000~2020年黄河流域沿线70个城市的生态系统服务价值.数据来源如表1所示.

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值的测算

谢高地等^[14,32]基于Costanza等^[1]提出的当量因子法,发展出适用于中国实际情况的生态系统服务价值当量因子体系.鉴于本文是对黄河流域的ESV进行测算,因此主要参考谢高地等^[32]的研究,并借鉴耿甜伟等^[28]和Xu等^[33]的方法,得到黄河流域单位面积生态系统服务价值当量(表2).

借鉴谢高地等^[32]的研究测算各个省份的生态系统服务价值当量系数,即单位面积生态系统服务价值当量因子的经济价值量,一般等于单位面积粮食产量经济价值的1/7.其测算方法为:

表 1 数据来源及精度¹⁾
Table 1 Data sources and accuracy table

数据名称	数据描述	数据格式/精度	数据来源
行政边界	正式政府规划边界	Shp	中国科学院资源环境科学与数据中心
土地利用	土地利用	Tif/30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心
植被覆盖指数	年均 NDVI	Tif/30 m	中国科学院资源环境科学与数据中心
农产经济数据	黄河流域各省粮食经济数据	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
高程	市级平均高程数据	Raster/30 m	地理空间数据云平台
地形起伏度	行政单元内最高海拔与最低海拔高度的差值	Raster/30 m	地理空间数据云平台
年均降雨量	年均降雨量	Raster/1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
年均气温	年均地表温度	Raster/1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
人均 GDP	每人平均 GDP	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
单位面积 GDP	每平方公里平均 GDP	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
城乡居民人均收入	城乡居民人均收入	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
社会消费品零售总额	社会消费品零售总额	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
人口总量	市级人数	—	《中国城市统计年鉴》(2001~2021年)
人口密度	每平方公里人口数量	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
土地垦殖率	耕地面积占行政单元总面积比例	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)
人均耕地面积	每人占耕地面积	—	黄河流域各省统计年鉴(2001~2021年)

1)“—”表示可以从统计年鉴等相关资料中直接获取的数据

表 2 黄河流域单位面积生态系统服务价值当量
Table 2 Equivalent value of ecosystem services per unit area in the Yellow River Basin

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	湿地	水域	未利用地
供给服务	食物生产	0.85	0.29	0.38	0.51	0.8	0.01
	原料生产	0.40	0.66	0.56	0.50	0.23	0.03
	水资源供给	0.02	0.34	0.31	2.59	8.29	0.03
调节服务	气体调节	0.67	2.17	1.97	1.90	0.77	0.11
	气候调节	0.36	6.50	5.21	3.60	2.29	0.10
	净化环境	0.10	1.93	1.72	3.60	5.55	0.31
	水文调节	0.27	4.74	3.82	24.23	102.24	0.21
支持服务	土壤保持	1.03	2.65	2.40	2.31	0.93	0.13
	维持养分循环	0.12	0.20	0.18	0.18	0.07	0.01
	生物多样性	0.13	2.41	2.18	7.87	2.55	0.12
文化服务	美学景观	0.06	1.06	0.96	4.73	1.89	0.05

$$E = \frac{1}{7} \sum_{f=1}^n \frac{d_f p_f q_f}{D} \quad (f = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, E 为各省耕地单位面积的粮食生产价格(元· hm^{-2}), p_f 为 f 型作物的平均价格(元· t^{-1}), q_f 为 f 型作物的单位面积产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), d_f 为 f 型作物的种植面积(hm^2), D 为所有作物的总种植面积(hm^2).

为避免由于不同年份粮食售价的不同造成黄河流域单位面积 ESV 当量的波动, 参考娄佩卿等^[34]和周素等^[35]的研究, 计算出各省 2000~2020 年每种作物的平均价格和平均产量, 然后进一步根据式(1), 可测得黄河流域各省的生态系统服务价值当量系数(表 3).

由于在有植被覆盖的土地利用类型上, 同一用地类型的生态服务价值水平会随着植被繁茂程度的

表 3 黄河流域各省单位面积 ESV 当量系数
Table 3 ESV equivalent coefficients per unit area of provinces in the Yellow River Basin

省份	生态服务价值当量系数/元· hm^{-2}	省份	生态服务价值当量系数/元· hm^{-2}
宁夏	2 312.59	山西	1 714.26
山东	2 186.26	甘肃	1 659.32
河南	2 159.96	陕西	1 615.05
内蒙古	2 032.22	青海	1 597.01

不同而变化^[36], 而 NDVI 不受地形和群落结构的干扰, 能够准确反映植被的生长状态和覆盖度^[37], 因此借鉴刘志涛等^[3]利用 NDVI 对 ESV 进行修正的方法, 采用 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 分辨率的土地利用数据及植被覆盖指数数据, 具体计算方法如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^o E e_{ij} B_{ik} C_{ik} \quad (2)$$

$$C_{ik} = \frac{NDVI_{ik}}{NDVI_i} \quad (3)$$

式中, e_{ij} 为第*i*种用地类型第*j*种生态服务的当量因子, B_{ik} 和 C_{ik} 分别为在第*k*个研究单元格中第*i*种用地类型的面积和NDVI修正系数, $\overline{NDVI_i}$ 为第*i*种利用类型的均值, $NDVI_{ik}$ 为在第*k*个研究单元格中第*i*种利用类型的NDVI值, m 为用地类型的数量, n 为生态服务类型的种类, o 为研究单元格编号, $m=6, n=4, o=2112$.

1.3.2 地理探测器

地理探测器是用来识别地理现象的空间分异情况及其与潜在影响因素间关系的模型^[38], 在探测因变量 y_i 空间分异性的同时, 在一定程度上反映自变量 x_i 对 y_i 的解释程度^[39]. 利用该模型考察ESV与潜在影响因素之间的关系, 可识别出主导因子与无效因子, 计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (4)$$

式中, n 为样本数量, σ^2 为变量 y_i 的离散方差, h 为因变量 y_i 或自变量 x_i 的分区, L 表示分区数目, q 表示指标的空间异质性, $q \in [0, 1]$, 若 h 是由自变量 x_i 生成的, 则 q 越大, x_i 对 y_i 的解释力越强, 反之越弱.

1.3.3 普通最小二乘法

普通最小二乘法(OLS)模型作为统计学中一种常用的方法来解释因变量(y_i)与自变量(x_i)之间的驱动关联, 可利用其计算各研究单元的ESV与各项影响因子的基础回归关系^[40]. 计算公式如下:

$$y_i = \beta + \sum_{z=1}^n \beta_z x_{iz} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中, y_i 为因变量, β 为空间截距项, β_z 为第 z 项自变量的回归系数, x_{iz} 为第 z 项自变量(主导因子)在空间*i*位置的数值, ε_i 表示残差项.

由于OLS模型为线性非空间的回归模型, 其结论探索的是自变量对因变量在整个研究区内的回归情况, 无法有效反映主导因子在不同区域对该城市的ESV的影响程度. 因此研究结合GWR模型分析主导因子在空间上对ESV的影响.

1.3.4 地理加权回归

地理加权回归(GWR)模型通过将空间数据引入回归参数中, 探索影响因素在空间层面的作用机制^[41], 相较于OLS的线性回归模型, GWR模型引入空间距离权重, 考虑了空间对象的局部效应, 评价结果具有空间尺度的可靠性^[42], 具体公式为:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_z \beta_z(u_i, v_i) x_{iz} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, 研究区域*i*的坐标为 (u_i, v_i) , $\beta_0(u_i, v_i)$ 为空间截距项, x_{iz} 为目标区域*i*中解释变量 x_z 的数值, $\beta_z(u_i, v_i)$ 为空间地理位置函数 $\beta_z(u_i, v_i)$ 在位置*i*的数值, z 为解释变量个数, ε_i 为随机扰动项.

依据地理学第一定律, 将观测数值进行加权, 当地理位置*i*发生变化时, 观测点的赋值也会随之改变, 公式如下:

$$\beta(u_i, v_i) = [X^T W(u_i, v_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i) Y \quad (7)$$

其中:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1z} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2z} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nz} \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix},$$

$$W(u_i, v_i) = W(i) = \begin{bmatrix} w_{i1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_{i2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_{in} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0(u_1, v_1) & \beta_1(u_1, v_1) & \cdots & \beta_z(u_1, v_1) \\ \beta_0(u_2, v_2) & \beta_1(u_2, v_2) & \cdots & \beta_z(u_2, v_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_0(u_n, v_n) & \beta_1(u_n, v_n) & \cdots & \beta_z(u_n, v_n) \end{bmatrix}$$

式中, β 为估计量; n 表示空间地域的个数; W_{in} 为地理位置*i*中第*n*个区域的权重.

空间权重函数的确定直接影响GWR模型参数估计的精准度, 考虑到流域沿线城市空间的交互性, 选择Gauss函数进行测算, 其思想是利用一个连续单调递减函数刻画距离与权重间的关系, 其函数形式为:

$$W_{ij} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{ij}}{b} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中, d_{ij} 为区域*i*和*j*的距离(km); b 为带宽, 表示距离与权重间关系的非负衰减参数. 采用Cleveland^[43]的交叉确认法(CV)选取最优带宽, 公式如下:

$$CV = \sum_{i=1}^n [y_i - \tilde{y}_{*i}(b)]^2 \quad (10)$$

式中, $\tilde{y}_{*i}(b)$ 为除去本身的拟合值, 当CV值为最小值时, 带宽*b*为最优带宽.

2 结果与分析

2.1 黄河流域生态系统服务价值的时空特征

2.1.1 时间特征

选取黄河流域2000、2005、2010、2015和2020年等5个特征年份的数据, 对ESV进行测度, 结果如表4所示. 黄河流域ESV从2000年的34 264.58亿

元增至2020年的35 045.53亿元,增幅为2.28%,总体上呈现先上升后下降再上升的波动变化特征.具体而言,2000~2005年,黄河流域ESV增加了103.66亿元,其中水域和林地的ESV分别增加117.74亿元和79.63亿元,这与我国在1999年开始进行的“退耕还林”政策密切相关.该项政策加快了国土绿化进程,增加了林草植被,使黄河流域水土流失和风沙危害强度减弱,故该阶段的ESV上升.2005~2015年,ESV下降了106.55亿元,其中草地和耕地的

ESV大量减少,缘于2008年全球暴发金融危机,黄河流域各地方政府为刺激经济,加大基础设施投入,导致城市土地的过度开发利用,建设用地挤占草地与耕地,环境污染问题愈发严重,故该阶段各城市的ESV呈现下降趋势.2015~2020年,ESV呈显著上升态势,增加了783.84亿元,这主要是因为党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视生态文明建设,国家经济发展的重点由速度转为质量,逐步侧重于环境和民生方面的考核.

表4 2000~2020年黄河流域各类土地生态系统服务价值及变化

Table 4 Variation in land ESV in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

土地利用类型	ESV/亿元					变化幅度/%
	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	
耕地	2 019.47	1 983.72	1 951.87	1 933.57	1 900.09	-5.91
林地	5 145.54	5 225.17	5 192.07	5 175.26	5 206.28	1.18
草地	18 808.27	18 739.98	18 680.64	18 620.11	18 983.76	0.93
水域	6 759.23	6 876.97	6 995.37	7 057.82	7 478.13	10.64
湿地	958.96	968.25	9 363.88	918.95	942.08	-1.76
未利用地	573.11	574.15	556.95	555.39	535.19	-6.62
合计	34 264.58	34 368.24	34 313.78	34 261.69	35 045.53	2.28

由表5可知,调节服务与支持服务一直是黄河流域生态系统服务的核心功能,各类服务占比变化较小,说明各类生态系统服务较稳定,其中调节服务占比均高于67%,其次为支持服务,供给服务与文化服务占比均在10%以下.2000~2005年,黄河流域生态系统服务价值总值上升,但食物生产和土壤保持的服务价值下降,主要是由于该时期耕地面积减少.2005~

2015年,流域生态系统服务价值总值下降,但水资源供给与水文调节的服务价值上升,主要是因为该时期林地与草地面积增加.2015~2020年,流域生态系统服务价值总值上升,各项生态服务价值因未利用地面积的减少及林地草地水域面积的增加均在上升.

2.1.2 空间特征

为提高空间描绘精度,本文结合黄河流域面积

表5 黄河流域土地生态系统服务价值时间演变特征¹⁾

Table 5 Characteristics of temporal evolution of land ESV in the Yellow River Basin

一级服务	二级服务	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
供给服务	食物生产	913.68	906.64	898.62	893.57	896.60
	原料生产	921.43	921.54	912.17	908.06	916.38
	水资源供给	891.75	896.94	904.14	906.05	940.40
	供给服务总值	2 726.86	2 725.12	2 714.94	2 707.69	2 753.39
	供给服务占比	7.96	7.93	7.91	7.90	7.86
调节服务	气体调节	2 838.98	2 839.87	2 818.36	2 807.29	2 842.37
	气候调节	6 856.56	6 857.71	6 831.22	6 808.61	6 918.00
	净化环境	2 651.13	2 655.11	2 646.60	2 640.69	2 688.60
	水文调节	10 904.41	11 005.56	11 063.57	11 089.41	11 513.07
	调节服务总值	23 251.08	23 358.25	23 359.74	23 346.00	23 962.04
	调节服务占比	67.86	67.96	68.08	68.14	68.37
支持服务	土壤保持	3 565.14	3 558.23	3 536.47	3 522.00	3 563.01
	维持养分循环	289.46	289.57	286.59	285.30	288.02
	生物多样性	3 032.44	3 034.99	3 020.71	3 010.10	3 062.32
	支持服务总值	6 887.04	6 882.79	6 843.77	6 817.41	6 913.36
	支持服务占比	20.10	20.03	19.94	19.90	19.73
文化服务	美学景观	1 399.60	1 402.08	1 395.33	1 390.60	1 416.75
	文化服务占比	4.08	4.08	4.07	4.06	4.04
生态系统服务价值总值		34 264.58	34 368.24	34 313.78	34 261.69	35 045.53

1)除占比单位为%外,其余参数单位均为亿元

及地形地势特征等因素,参考娄佩卿等^[34]和李桂娥等^[44]的研究,将黄河流域划分为 $30\text{ km}\times 30\text{ km}$ 的格网(共2112个),计算黄河流域生态系统服务价值,并将每个城市包含的若干格网的ESV相加可得到城市的ESV.同时,借鉴杨光宗等^[45]的研究,利用自然断点法将ESV划分为4个区间,分别为低值区、次低值区、次高值区和高值区.采用GIS可视化描绘了2000、2010和2020年3个特征年份的ESV,结果如图1所示.2000~2020年黄河流域ESV在空间上总体呈现“南部高于北部”整体相对稳定的状态.ESV高值区聚集在上游的青海湖及中游的吕梁山、秦岭地区,次高值区除上游的青海河源区外,其他区域基本是以高值区为中心向外扩散,次低值区聚集于上游的宁夏平原及下游的山东半岛城市群,低值区主要在内蒙古的阿拉善盟.

黄河流域上游的ESV在不同地区差异较大,这与黄河上游河流分布众多、气候条件多样且区域内土壤类型差异显著有关.黄河流域上游的高值区及次高值区主要位于三江源草原草甸湿地生态功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区以及阴山北麓草原生态功能区.三江源草原草甸湿地生态功能区和甘南黄河重要水源补给生态功能区是上游水域较为丰富的区域,丰富的水域为植被的生长提供有利条件;阴山北麓草原生态功能区为加强防风固沙服务,不断提高区域内植被覆盖率,因此这3个区域的ESV较高.上游其余地区的ESV较低,主要是因为海拔高、降雨少等自然本底特征导致草地覆盖度低,且随着区域不断扩大经济活动规模,生态环境遭受的冲击也愈发强烈.而处于次低值区的宁夏平原因气候干旱,草

地覆盖度较低,致使土壤侵蚀量较高;处于低值区的阿拉善盟是内蒙古自治区沙漠最集中的地区,生态环境本底脆弱,敏感度极高,2000~2020年未利用土地均在87%以上.

黄河流域中游的ESV整体相对较高,且大部分区域处于高值区与次高值区.中游的高值区与区域内的山地有关,这是因为吕梁山以及秦岭山脉的单位面积林草价值量较高.中游的高值区及次高值区主要位于黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区的吕梁山及秦巴生物多样性生态功能区.吕梁山地处半湿润气候区,林地分布广泛且以天然林和人工林为主,且吕梁山的林草单位面积价值量较高,故黄土高原吕梁山地区的ESV处于较高的状态.秦巴生物多样性生态功能区地处关中平原的南部,在山地水热条件的作用下,山地的林草植被成片存在,而秦岭山脉天然形成的地形雨带来充沛的降水使关中盆地丰沃,使关中平原南部的生态服务价值稳定在高值.

黄河流域下游的ESV较低,大部分区域处于次低值区.其中山东半岛城市群的ESV一直处于次低值区,这是由于下游的山东半岛城市群的经济发展水平较高,土地利用强度大,在城市发展过程中不断增加建设用地的面积,而区域内林草植被较少,后备资源较匮乏.2000~2020年,下游处于次低值区域的ESV没有发生显著变化.政府对于黄河下游生态环境的治理效果并不理想,这主要是由于黄土高原的水土流失造成下游的泥沙堆积,黄河在经过黄土高原时携带大量泥沙,形成下游的地上“悬河”.而水土流失治理的成本极高且技术难度大,在短期内难以完成.

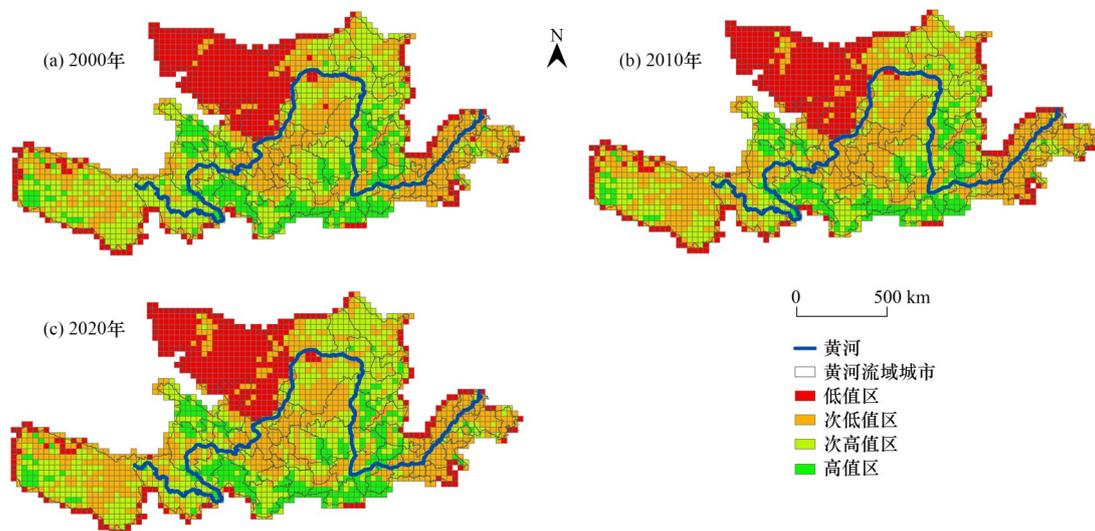


图1 黄河流域生态系统服务价值的空间特征

Fig. 1 Spatial characteristics of ESV in the Yellow River Basin

对黄河流域4类功能服务价值的空间特征进行探讨, 鉴于篇幅有限, 以2020年为例刻画其空间特征. 由图2(a)可知, 黄河流域供给服务价值的高值区主要集中于甘南藏族自治州、关中平原城市群和吕梁山地区, 缘于甘南黄河重要水源补给生态功能区位于甘南藏族自治州, 关中平原城市群和吕梁山自然条件优越, 土壤肥沃, 植被覆盖度很高, 可以提供较高的供给服务. 次高值区集中于兰西城市群和山东半岛城市群, 主要是由于这些地区虽然林地分布较少, 但属于温带季风气候, 适合耕种, 而农作物也能提供较多的供给服务价值. 次低值区集中于青海河源区和呼包鄂城市群, 青海河源区地处上游的高寒生态脆弱区, 其生态本底特征差, 植被覆盖度较低, 提供的供给服务价值较低; 呼包鄂城市群建设能源化工基地, 资源开发强度大, 导致植被不断退化, 提供的供给服务价值也较低. 低值区主要在阿拉善盟, 缘于阿拉善盟的未利用土地为87%以上, 生态环境本底脆弱, 敏感度极高, 因此其供给服务价值最低.

由图2(b)可知, 黄河流域调节服务价值的高值区及次高值区主要集中于青海河源区、甘南藏族自治州、关中平原城市群和吕梁山地区, 缘于青海河源区内有三江源草原草甸湿地生态功能区, 甘南藏族自治州内有甘南黄河重要水源补给生态功能区, 水域及湿地的单位面积调节服务价值当量较高; 关中平原城市群和吕梁山有茂盛的森林, 且这些地区的植被覆盖度很高, 也可以提供较高的调节服务. 次低值区集中于兰西城市群、宁夏沿黄城市群和山东半岛城市群, 由于这些区域适合耕种, 而在调节服务中耕地所提供的单位面积调节服务价值当量较

低, 因此处于次低值区. 低值区主要在阿拉善盟.

由图2(c)可知, 黄河流域支持服务价值的高值区主要集中于甘南藏族自治州、关中平原城市群和吕梁山地区, 缘于甘南黄河重要水源补给生态功能区位于甘南藏族自治州, 对该区域的植物生长具有重要作用, 且关中平原城市群及吕梁山区域的植被覆盖度较高, 可以提供较高的支持服务. 次高值区集中于青海河源区、兰西城市群、宁夏沿黄城市群和内蒙古呼包地区, 缘于青海河源区内有三江源草原草甸湿地生态功能区, 而草地和湿地对支持服务具有重要作用; 兰西城市群及宁夏沿黄城市群地处黄土高原, 黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区也可有效提高其支持服务, 因此这些区域处于次高值. 次低值区集中于山东半岛城市群, 是因为该区域内大部分是耕地及建设用地, 耕地及建设用地的单位面积支持服务价值当量较低, 所提供的支持服务价值较低. 低值区同样也是位于阿拉善盟.

由图2(d)可知, 黄河流域文化服务价值的高值区及次高值区集中于青海河源区、甘南藏族自治州和关中平原城市群, 由于三江源草原草甸湿地生态功能区位于青海河源区, 甘南黄河重要水源补给生态功能区位于甘南藏族自治州, 而水域及湿地的单位面积文化服务价值当量较高; 关中平原城市群有茂盛的森林, 且植被覆盖度很高, 因此这些区域可提供较高的文化服务价值. 次低值区集中于黄土高原, 而黄土高原整体环境较单一, 提供的文化服务价值较低. 低值区主要在阿拉善盟及山东半岛城市群, 其中山东半岛城市群内大多是耕地及建设用地, 所提供的美学景观较低, 因此这些地区处于低值区.

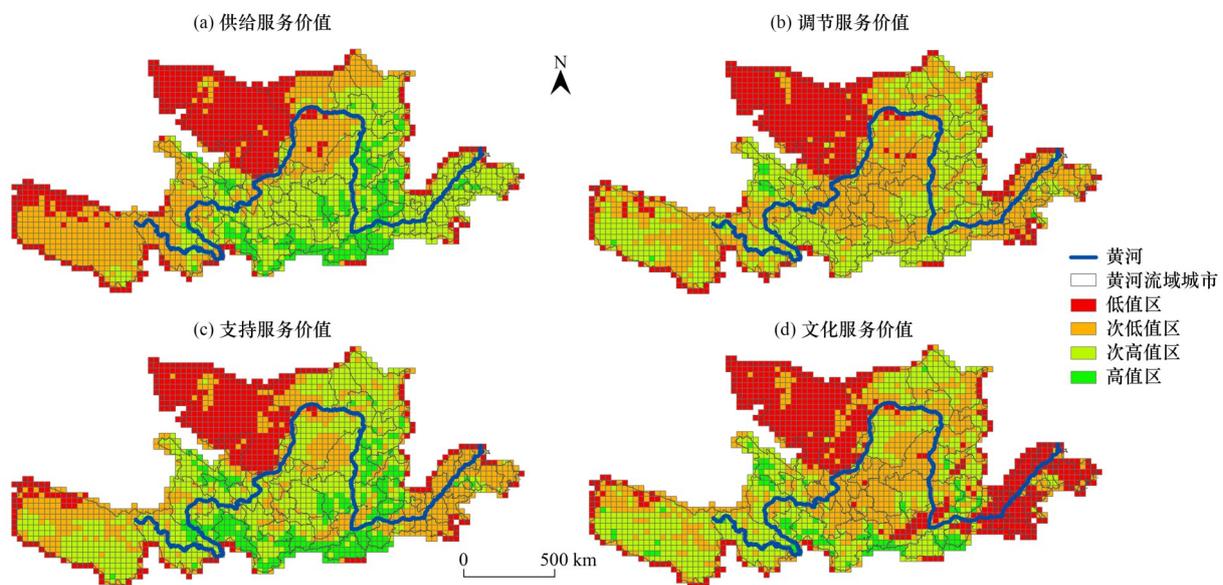


图2 黄河流域四类功能服务价值的空间特征

Fig. 2 Spatial characteristics of four types of functional service value in the Yellow River Basin

进一步探析黄河流域各城市生态系统价值当量的变化,图3分别表示2000~2005、2005~2010、2010~2015和2015~2020年的演变情况.其中,由于每个时期经济发展模式的不同,对环境造成的影响程度大小不一,因此利用自然断点法的划分特点将ESV变化划分为4个区间.由图3(a)可知,2000~2005年,黄河流域内ESV变化值为正的城市较多,而变化值为负的城市主要分布在黄河流域“几字湾”区域.这一时期城市的ESV上升多与“退耕还林”政策有关,黄河“几字湾”是我国的重要能源支撑区,能矿资源的粗放型开采会改变破坏地表植被,从而影响地区生态环境.

由图3(b)可知,2005~2010年,部分城市的ESV变化值由正转负,主要集中于内蒙古、山西和山东半岛城市群.2005年后,中游地区的产业发展方向以煤化工产业为主,点多面广的煤矿开采导致的地面沉陷使地表侵蚀加剧,如鄂尔多斯及巴彦淖尔西北部沙漠化加剧,山西地区尤其是运城、吕梁、忻州和临汾等城市土壤侵蚀加剧.此外,煤化工产业的发展需要大量水资源,进而传统的煤化工行业会挤占生态用水,同时,大规模的能源重化工业发展造成黄河及其支流承受的污染物超过自身的水环境承载能力,引发次生态问题.该阶段山东半岛城市群的城市化发展水平较快,建设用地侵占耕地与草地等现象频繁出现,工业化和城镇化发展挤占生态空间.

由图3(c)可知,2010~2015年,黄河流域ESV变化值为负的城市进一步增加,主要集中于上游的兰西城市群及中游的黄土高原地区,上中游在这一阶段经济发展加快,经济活动规模扩大,导致植被覆盖度下降,对生态环境造成的冲击也愈发强烈,

因此上游生态环境的变化开始降低.同时,下游大部分城市的ESV持续下降,但下降幅度变缓,这与这一阶段国家逐渐加强对黄河流域生态环境的治理并开始培育新兴生态产业有关.这一阶段下游区域的经济趋于成熟,开始注重生态产业的发展,新型生态产业的培育使下游在工业化与城镇化发展的同时,生态环境并未持续恶化.

由图3(d)可知,2015~2020年,黄河流域ESV变化值为正的城市增加,主要集中在内蒙古呼包鄂地区及兰西城市群,晋中城市群的局部地区ESV也有提高,但在中游黄土高原及下游滩区的ESV却有所下降.这是由于在十三五期间我国提出工业绿色转型,推行节能减排、清洁能源和低碳经济等绿色发展政策并持续加速新兴生态产业链培育,且各地方政府进一步加强对生态环境的治理,黄河流域整体的ESV呈上升趋势.

2.2 黄河流域生态系统服务价值的影响因素

2.2.1 影响因子选择

生态系统服务价值的变化主要受到自然因素与社会经济因素的影响.参考赵志刚等^[26]和徐媛银等^[46]的研究,进一步将经济因素与社会因素分开,选择黄河流域ESV的初选影响因子,如表6所示.

2.2.2 影响因子识别

考虑到选取的初选因子数量较多,可能会出现多重共线性的问题,因此,利用地理探测器对初选因子进行探测,筛选出无效因子与主导因子,将解释程度较高的因子引入模型中,可以规避可能出现的多重共线性问题^[13].

基于探测得到的结果,结合 q 值与显著性检验识别无效因子和主导因子,结果如表7所示. x_2 、 x_7 和 x_8 这3个因子的 q 值均小于0.1,说明其无法较好

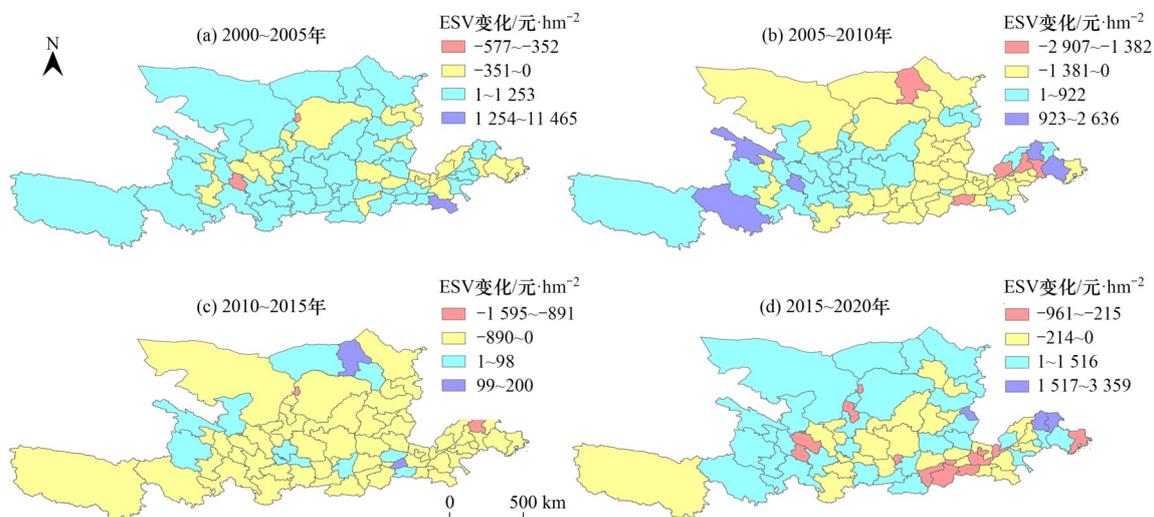


图3 黄河流域生态系统服务价值的变化特征

Fig. 3 Changing characteristics of ESV in the Yellow River Basin

表 6 黄河流域生态系统服务价值初选影响因素

Table 6 Influencing factors of ESV in the Yellow River Basin

影响因素	初选因子	单位	变量编号
自然因素	高程	m	x_1
	地形起伏度	m	x_2
	年均降水量	mm	x_3
	年均气温	°C	x_4
经济因素	人均 GDP	元·人 ⁻¹	x_5
	单位面积 GDP	元·km ⁻²	x_6
	城乡居民人均收入	元	x_7
	社会消费品零售总额	元	x_8
社会因素	人口总量	人	x_9
	人口密度	人·km ⁻²	x_{10}
	土地垦殖率	%	x_{11}
	人均耕地面积	km ²	x_{12}

地解释因变量, 故剔除这 3 个因子。 x_1 、 x_4 、 x_9 和 x_{12} 的 q 值均大于 0.1, 但没有通过 0.05 的显著性检验;

表 7 地理探测器的探测结果

Table 7 Geodetector results

探测因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
q 值	0.294 7	0.042 0	0.363 1	0.109 7	0.159 1	0.397 3
P 值	0.085 0	0.629 0	0.000	0.063 0	0.000	0.000
探测因子	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}
q 值	0.022 6	0.047 7	0.139 8	0.435 4	0.276 3	0.042 4
P 值	0.797 1	0.654 5	0.013 9	0.000	0.000	0.472 4

2.2.3 OLS 线性回归结果

在识别出主导因子后, 进行 OLS 经典线性回归, 结果见表 8. 结果表明主导因子均具有较强的显著性, 且联合 F 值均通过 0.001 的显著性检验, 检验结果良好, 说明主导因子对 ESV 没有影响的概率为 0, 因此该模型具有统计学意义. 同时, 方差膨胀因子检验显示 VIF 值均小于 7.5, 表明主导因子之间不存在多重线性关系; Jarque-Bera 结果反映出残差不服从正态分布, 模型拟合效果较差. 因此, 应引入 GWR 模型进一步提升模型拟合效果.

2.2.4 影响因子的空间异质性分析

由于 GWR 模型探讨的是影响因素的空间异质性, 因此在使用 GWR 模型前, 需考察 ESV 的空间

x_3 、 x_5 、 x_6 、 x_{10} 和 x_{11} 的 q 值均大于 0.1, 且均通过 0.05 的显著性检验, 说明具有较强的解释作用.

根据 q 值将各因素的影响大小排序, 依次为 x_{10} 、 x_6 、 x_3 、 x_{11} 和 x_5 , 其中 x_{10} 、 x_6 、 x_3 和 x_{11} 的 q 值明显高于 x_5 , 解释力均在 0.25 以上, 且均通过了 0.01 的显著性检验, 说明这 4 个因子的解释贡献度较高. 依据探测结果, 发现社会因素对黄河流域 ESV 产生的影响最大, 反映出人类活动对生态环境存在较大干扰, 因此在土地开发利用过程中, 要加强人类活动对生态干扰的风险管控, 严格遵守土地利用规划原则.

在选取的影响因子中, x_5 与 x_6 均表示 GDP 因素, 为保证得到更精确的研究结论, 将 x_5 与 x_6 合并为一个影响因子. 结合各因素的影响大小, 最终选定 4 个主导因子, 分别为年均降雨量(x_3)、单位面积 GDP (x_6)、土地垦殖率(x_{10})和人口密度(x_{11}).

关系^[47]. 利用 GeoDA 软件进行检验, 发现黄河流域 ESV 存在明显的空间集聚性. 考虑到 OLS 拟合结果存在不足, 且黄河流域 ESV 存在空间自相关关系, 因此运用 GWR 模型考察影响因子的空间异质性.

由表 9 可知, GWR 模型的 AICc 数值大于 OLS 的数值, 且差值为 12.592 9, 当二者差值大于 3 时, 则认为 GWR 的拟合结果更好. 同时, 对比 R^2 和调整后的 R^2 , 发现 GWR 模型的结果更优, 再次验证应选择 GWR 模型分析黄河流域 ESV 的影响因素.

利用式(9)和式(10)确定 GWR 模型中的参数, 并将影响因子的空间异质性进行可视化, 结果如图 4 所示, 其分别表示人口密度、单位面积 GDP、年均降水量和土地垦殖率对 ESV 的空间异质性作用.

由图 4(a)可知, 人口密度与 ESV 全局呈负相关

表 8 OLS 模型测算结果¹⁾

Table 8 OLS model calculation results

变量	系数	标准差	t 值	P 值	VIF
截距	17.593 7	0.069 7	6.433 5	0.000 0***	
x_3	0.363 1	0.040 9	2.288 1	0.002 1***	6.508 9
x_6	-0.390 7	0.007 8	-3.151 9	0.000 0***	2.993 8
x_{10}	-0.435 4	0.003 3	-2.181 8	0.003 6***	3.705 6
x_{11}	-0.276 3	0.031 6	-4.902 2	0.000 0***	2.512 3
OLS 诊断	联合 F 值	Jarque-Bera 检验	$K(BP)$ 检验	联合卡方	
	0.000 0***	8.419 4	5.534 3	0.000 0***	

1)***表示在 1% 的水平上通过显著性检验.

表9 模型结果对比
Table 9 Comparison of model results

模型	AICc	R ²	调整后R ²
OLS	1 152.125 4	0.576 0	0.602 5
GWR	1 164.718 3	0.718 3	0.693 3

关系,空间上表现出东高西低的特征.其中黄河流域上游区域的绝对值较高,说明上游人口密度对ESV的影响作用更强,即上游每增加一单位人口密度导致的ESV下降程度高于中下游区域.这是因为人口密度越高则该区域的人类活动强度越大,而黄河流域上游生态本底较差,人口密度的增加会消耗更多的生态系统服务,造成的生态环境破坏程度也愈发严重,故而呈现出人口密度对上游ESV作用强度更大的特征.

由图4(b)可知,整体上单位面积GDP与ESV呈负相关,但在黄河流域上游区域呈现正相关,这是因为上游除少部分城市单位面积GDP较高外,大部分城市经济发展水平较低,且ESV也较低.黄河流域下游的绝对值较高,说明在下游大部分城市,单位面积GDP的变动会引起ESV更大幅度的下降,这是由于下游是黄河流域成熟的产业聚集中心,土地

开发强度大,此时每提高一单位面积GDP对ESV的影响就越大.

由图4(c)可知,年均降水量与ESV呈全局正相关关系,空间上表现出南低北高的特征.在黄河流域的上中游地区,影响因子系数均高于0.3,年均降水量对ESV的影响作用在区域内相对较大.上中游是黄河流域相对干燥的地区,但林草植被覆盖面积较大,适量的降雨可提供植物生长所需的水分,促进植被生长,因此降水量对ESV的影响更为显著.而下游主要为耕地,合适的降水量有助于维持农业生产.但由于林草植被的ESV高于农作物,因此上中游的降雨量变化对ESV的影响更大.

由图4(d)可知,土地垦殖率与ESV全局均呈负相关关系,空间上表现出东高西低的特征.其中上游ESV受土地垦殖率的影响远高于中下游,意味着上游每单位土地垦殖率的上升引起的ESV下降幅度均高于中下游.这是由于上游区域处于高寒脆弱地区,地形险峻,可开发利用的土地相对较少,且土地荒漠化问题严重,提高土地垦殖率可能会侵占提供较高生态系统服务的林草地,因此上游的土地垦殖率变化对ESV的影响更强.

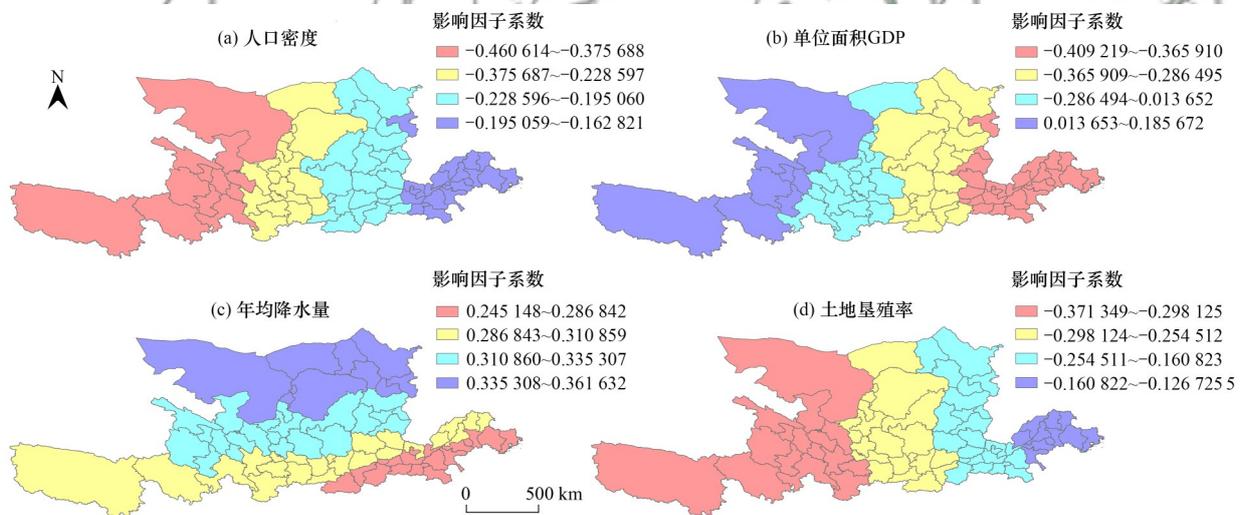


图4 影响因子的空间异质性

Fig. 4 Spatial heterogeneity of influencing factors

3 讨论

黄河流域ESV在2000~2020年总体上呈现先上升后下降再上升的波动变化特征,尤其在2015~2020年,ESV呈显著上升态势,这与党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央高度重视生态文明建设密切相关.黄河流域上游的ESV在不同地区差异较大,高值区及次高值区主要位于三江源草原草甸湿地生态功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区以及阴山北麓草原生态功能区,主要是缘于

这些区域是上游水域较为丰富的区域,而丰富的水域为植被的生长提供有利条件.流域中游的ESV整体相对较高,其高值区及次高值区主要位于黄土高原丘陵沟壑水土保持生态功能区的吕梁山及秦巴生物多样性生态功能区,是因为这些区域的单位面积林草价值量较高.流域下游的ESV较低,可以反映出政府对于黄河下游生态环境的治理效果并不理想.

2000~2005年,黄河流域内ESV变化值为正的城市较多,主要与“退耕还林”政策相关.2005~2010年,部分城市的ESV变化值由正转负,主要是

因为该时期的中游地区的产业发展方向以煤化工产业为主, 点多面广的煤矿开采导致的地面沉降使地表侵蚀加剧. 2010~2015年, 黄河流域ESV变化值为负的城市进一步增加, 上中游地区的经济活动规模扩大, 对生态环境造成的冲击也愈发强烈, 导致上中游生态环境的变化开始降低. 2015~2020年, 黄河流域ESV变化值为正的城市增加, 主要是由于“十三五”期间我国提出工业绿色转型, 推行节能减排等绿色发展政策, 且各地方政府加强对生态环境的治理, 使ESV上升.

黄河流域生态系统服务价值主要受到人口密度、单位面积GDP、年均降水量和土地垦殖率的影响. 人口密度和土地垦殖率与ESV全局呈负相关关系, 这是因为人口密度的增加会消耗更多的生态系统服务, 土地垦殖率的提高可能会侵占提供较高生态系统服务的林草地; 整体上单位面积GDP与ESV呈负相关, 这是因为土地开发强度越大, 每提高一单位面积GDP对ESV的影响就越大; 年均降水量与ESV呈全局正相关关系, 主要缘于适量的降雨可提供植物生长所需的水分, 促进植被生长.

4 结论

(1) 从时序变化来看, 2000~2020年黄河流域ESV呈现出先上升再下降最后上升、研究期末的ESV高于期初的总体特征; 在研究期内调节服务与支持服务对黄河流域ESV的贡献较大, 且各类生态系统服务占比稳定.

(2) 从空间变化来看, 黄河流域的ESV在空间上总体相对稳定, 且呈现“南部高于北部”和“下游低、上中游高”的分布格局, 且上游的高值区及次高值区主要与河流湖泊有关, 中游的高值区与区域内的山地有关.

(3) 地理探测结果表明, 各影响因素对黄河流域不同地区生态系统服务的影响程度存在差异. 社会因素对黄河流域ESV的解释作用最强, 经济因素次之, 自然因素的作用最弱.

(4) GWR模型结果表明, 人口密度、土地垦殖率与ESV呈负相关, 作用强度由东向西递增; 年均降水量与ESV呈正相关, 作用强度从东到西逐渐增强; 单位面积GDP整体上与ESV呈负相关, 但在黄河流域上游区域呈现正相关.

参考文献:

[1] Costanza R, d'Arge R, de Groot P, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387** (6630): 253-260.

[2] Daily G C. Introduction: what are ecosystem services? [A]. In: Daily G C (Ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on*

Natural Ecosystems [M]. Washington: Island Press, 1997.

[3] 刘志涛, 王少剑, 方创琳. 粤港澳大湾区生态系统服务价值的时空演化及其影响机制[J]. *地理学报*, 2021, **76**(11): 2797-2813.

Liu Z T, Wang S J, Fang C L. Spatiotemporal evolution and influencing mechanism of ecosystem service value in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(11): 2797-2813.

[4] 朱相君, 薛亮. 陕甘宁革命老区生态系统服务价值时空分异及影响因素研究[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2022, **49**(4): 498-507.

Zhu X J, Xue L. Research on the spatial and temporal variations and influencing factors of ecosystem service value in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Revolutionary Region [J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2022, **49**(4): 498-507.

[5] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being* [M]. Washington: Island Press, 2005.

[6] Bateman I J, Mace G M, Fezzi C, *et al.* Economic analysis for ecosystem service assessments [J]. *Environmental and Resource Economics*, 2011, **48**(2): 177-218.

[7] Sannigrahi S, Chakraborti S, Joshi P K, *et al.* Ecosystem service value assessment of a natural reserve region for strengthening protection and conservation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **244**: 208-227.

[8] 江波, 陈媛媛, 肖洋, 等. 白洋淀湿地生态系统最终服务价值评估[J]. *生态学报*, 2017, **37**(8): 2497-2505.

Jiang B, Chen Y Y, Xiao Y, *et al.* Evaluation of the economic value of final ecosystem services from the Baiyangdian wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(8): 2497-2505.

[9] Garrick D, Siebenritt M A, Aylward B, *et al.* Water markets and freshwater ecosystem services: policy reform and implementation in the Columbia and Murray-Darling Basins [J]. *Ecological Economics*, 2009, **69**(2): 366-379.

[10] 苗赫萌, 元媛, 李天奇, 等. 开封城市水域生态系统服务价值评估及影响因素分析[J]. *生态学报*, 2021, **41**(22): 9084-9094.

Miao H M, Yuan Y, Li T Q, *et al.* Assessment of urban waters ecosystem service value and analysis of its influencing factors in Kaifeng City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(22): 9084-9094.

[11] Zadehdabagh N, Monavari S M, Kargari N, *et al.* Sustainability of agroecosystems by indices: a comparative study between indicators of ecological footprint sustainability and emergy analysis; a case study in Dez catchment, Iran [J]. *Ecological Modelling*, 2022, **474**, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110165.

[12] 李聪慧, 马彩虹, 滑雨琪, 等. 黄河上游荒漠绿洲生态系统服务对三生用地变化的响应——以银川市为例[J]. *资源科学*, 2023, **45**(1): 190-203.

Li C H, Ma C H, Hua Y Q, *et al.* Response of desert oasis ecosystem services to the production-living-ecological land change in the upper reaches of the Yellow River: a case study in Yinchuan City [J]. *Resources Science*, 2023, **45**(1): 190-203.

[13] 赵泳春, 苏方林. 经济差异化增长下生态系统服务价值的时空演变特征——以珠江—西江经济带为例[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(7): 1782-1798.

Zhao Y C, Su F L. Spatio-temporal dynamic characteristics of the ecosystem service values under differential economic growth: a case study of the Pearl River-West River Economic Belt [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(7): 1782-1798.

[14] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价

- 值[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(1): 47-53.
- Xie G D, Zhang Y L, Lu C X, *et al.* Study on valuation of rangeland ecosystem services of China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(1): 47-53.
- [15] 刘利花, 杨彬如. 中国省域耕地生态补偿研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(2): 52-62.
- Liu L H, Yang B R. Research on ecological compensation of provincial cultivated land in China [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(2): 52-62.
- [16] 赵海溶, 莫宏伟. 长株潭城市群生态系统服务价值时空变化分析[J]. *测绘科学*, 2022, **47**(12): 206-215.
- Zhao H R, Mo H W. Spatial-temporal change of ecosystem service value in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, **47**(12): 206-215.
- [17] 赵晶晶, 葛颜祥, 李颖, 等. 基于生态系统服务价值的大汶河流域生态补偿适度标准研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, **37**(4): 1-8.
- Zhao J J, Ge Y X, Li Y, *et al.* Study on the appropriate standard of eco-compensation based on ecosystem service value in Dawen River basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, **37**(4): 1-8.
- [18] 姜晗, 吴群. 基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评估及时空演变特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(11): 2712-2725.
- Jiang H, Wu Q. Ecological service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(11): 2712-2725.
- [19] Zelený J, Mercado-Bettín D, Müller F. Towards the evaluation of regional ecosystem integrity using NDVI, brightness temperature and surface heterogeneity [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148994.
- [20] Braun D, de Jong R, Schaepman M E, *et al.* Ecosystem service change caused by climatological and non-climatological drivers: a Swiss case study [J]. *Ecological Applications*, 2019, **29**(4), doi: 10.1002/eap.1901.
- [21] 刘梁美子, 占车生, 胡实, 等. 黔桂喀斯特山区年NDVI变化的影响因素研究[J]. *地理科学进展*, 2019, **38**(11): 1783-1792.
- Liu L M Z, Zhan C S, Hu S, *et al.* Impact factors of annual NDVI change in Karst mountain areas of Guizhou and Guangxi Provinces [J]. *Progress in Geography*, 2019, **38**(11): 1783-1792.
- [22] Wang S J, Liu Z T, Chen Y X, *et al.* Factors influencing ecosystem services in the Pearl River Delta, China: spatiotemporal differentiation and varying importance [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, **168**, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105477.
- [23] 郑晓豪, 陈颖彪, 郑子豪, 等. 湖北省生态系统服务价值动态变化及其影响因素演变[J]. *生态环境学报*, 2023, **32**(1): 195-206.
- Zheng X H, Chen Y B, Zheng Z H, *et al.* Dynamic changes of ecosystem service value and evolution of its influencing factors in Hubei Province [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, **32**(1): 195-206.
- [24] 魏佳豪, 温玉玲, 龚志军, 等. 近30年鄱阳湖滨岸缓冲带土地利用变化及生态系统服务价值[J]. *生态学报*, 2022, **42**(22): 9261-9273.
- Wei J H, Wen Y L, Gong Z J, *et al.* Land use changes and ecosystem service value in the buffer zone of Poyang Lake in recent 30 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(22): 9261-9273.
- [25] 马伟波, 杨帆, 王楠, 等. 长三角城市群地区生态系统服务价值时空演变及驱动因素研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, **38**(11): 1365-1376.
- Ma W B, Yang F, Wang N, *et al.* Study on spatial-temporal evolution and driving factors of ecosystem service value in the Yangtze River Delta urban agglomerations [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, **38**(11): 1365-1376.
- [26] 赵志刚, 余德, 韩成云, 等. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力[J]. *生态学报*, 2017, **37**(24): 8411-8421.
- Zhao Z G, Yu D, Han C Y, *et al.* Ecosystem services value prediction and driving forces in the Poyang Lake Ecoeconomic Zone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24): 8411-8421.
- [27] Aziz T. Terrestrial protected areas: understanding the spatial variation of potential and realized ecosystem services [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **326**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116803.
- [28] 耿甜伟, 陈海, 张行, 等. 基于GWR的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(7): 1714-1727.
- Geng T W, Chen H, Zhang H, *et al.* Spatiotemporal evolution of land ecosystem service value and its influencing factors in Shaanxi Province based on GWR [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(7): 1714-1727.
- [29] Loc H H, Park E, Thu T N, *et al.* An enhanced analytical framework of participatory GIS for ecosystem services assessment applied to a Ramsar wetland site in the Vietnam Mekong Delta [J]. *Ecosystem Services*, 2021, **48**, doi: 10.1016/j.ecoser.2021.101245.
- [30] 任保平, 杜宇翔. 黄河流域经济增长—产业发展—生态环境的耦合协同关系[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, **31**(2): 119-129.
- Ren B P, Du Y X. Coupling coordination of economic growth, industrial development and ecology in the Yellow River Basin [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, **31**(2): 119-129.
- [31] 杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. *资源科学*, 2020, **42**(3): 409-423.
- Yang Y C, Mu Y J, Zhang W. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin [J]. *Resources Science*, 2020, **42**(3): 409-423.
- [32] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(8): 1243-1254.
- [33] Xu Z H, Wei H J, Fan W G, *et al.* Energy modeling simulation of changes in ecosystem services before and after the implementation of a Grain-for-Green Program on the Loess Plateau—A case study of the Zhifanggou valley in Ansai county, Shaanxi Province, China [J]. *Ecosystem Services*, 2018, **31**: 32-43.
- [34] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 等. 基于GEE的1998~2018年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5473-5483.
- Lou P Q, Fu B L, Lin X C, *et al.* Influence of land use change on ecosystem service value based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5473-5483.
- [35] 周素, 刘国华, 周维, 等. 红河哈尼梯田遗产区生态系统服务价值外溢研究[J]. *生态学报*, 2023, **43**(7): 2734-2744.

- Zhou S, Liu G H, Zhou W, *et al.* Spillover of ecosystem service value in Honghe Hani Terrace Heritage Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(7): 2734-2744.
- [36] 田智慧, 任祖光, 魏海涛. 2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制[J]. *环境科学*, 2022, **43**(2): 743-751.
- Tian Z H, Ren Z G, Wei H T. Driving mechanism of the spatiotemporal evolution of vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(2): 743-751.
- [37] 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 等. 2000~2020年西南地区植被NDVI时空变化及驱动机制探究[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 323-335.
- Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, *et al.* Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in southwest China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 323-335.
- [38] 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 等. 基于地理探测器的山西省2000~2020年NPP时空变化特征及驱动力分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(1): 312-322.
- Shao J H, Li J, Yan X G, *et al.* Analysis of spatiotemporal variation characteristics and driving forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 based on geodetector [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 312-322.
- [39] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000~2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J]. *环境科学*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, *et al.* Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- [40] Zhong Y, Lin A W, He L J, *et al.* Spatiotemporal dynamics and driving forces of urban land-use expansion: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(2), doi: 10.3390/rs12020287.
- [41] 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 等. 兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1620-1635.
- Kang L, Peng X B, Ma Y L, *et al.* Accumulation characteristics and influencing factors of heavy metals in cultivated land surface soil in Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1620-1635.
- [42] 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 等. 长株潭城市群PM_{2.5}和O₃浓度时空分布特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5354-5366.
- Liu X Z, Zhang G Q, Yang W T, *et al.* Analysis of spatiotemporal distribution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} and O₃ in Changsha—Zhuzhou—Xiangtan urban agglomeration, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5354-5366.
- [43] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1979, **74**(368): 829-836.
- [44] 李桂娥, 李杰, 赵冲, 等. 生态系统服务时空演化的非线性影响因子——以钱塘江流域为例[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(12): 5941-5952.
- Li G E, Li J, Zhao C, *et al.* Spatiotemporal dynamics of ecosystem services and their nonlinear influencing factors—A case study in the Qiantang River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(12): 5941-5952.
- [45] 杨光宗, 吕凯, 李峰. 基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J]. *中国土地科学*, 2022, **36**(8): 121-130.
- Yang G Z, Lyu K, Li F. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale [J]. *China Land Science*, 2022, **36**(8): 121-130.
- [46] 徐媛银, 郭砾, 薛达元, 等. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学报*, 2019, **39**(6): 1969-1978.
- Xu N Y, Guo L, Xue D Y, *et al.* Land use structure and the dynamic evolution of ecosystem service value in Gannan region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(6): 1969-1978.
- [47] 杨雪婷, 邱孝梓, 徐云, 等. 典型山区生态系统服务对居民福祉影响的空间差异及动态特征——以川西山区为例[J]. *生态学报*, 2021, **41**(19): 7555-7567.
- Yang X T, Qiu X P, Xu Y, *et al.* Spatial heterogeneity and dynamic features of the ecosystem services influence on human wellbeing in the West Sichuan Mountain Areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(19): 7555-7567.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i> (2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i> (2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i> (2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i> (2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i> (2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> (2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i> (2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i> (2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i> (2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i> (2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i> (2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i> (2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i> (2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i> (2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i> (2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i> (2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i> (2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i> (2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i> (2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying (2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i> (2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i> (2793)
Spatial-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i> (2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i> (2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i> (2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i> (2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i> (2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i> (2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i> (2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i> (2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i> (2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i> (2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i> (2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i> (2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i> (2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i> (2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i> (2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping (2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i> (2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i> (2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i> (3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i> (3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i> (3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i> (3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i> (3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-hua, <i>et al.</i> (3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i> (3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i> (3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i> (3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i> (3119)