DOI: 10.20103/j.stxb.202401250238

刘海猛,卢佳祎,王成新,丁宇辰,杨志伟,李智勇,乔建民.基于栅格尺度的黄河流域人地关系时空耦合分析.生态学报,2024,44(15):6499-6512. Liu H M,Lu J Y,Wang C X,Ding Y C,Yang Z W,Li Z Y,Qiao J M.Spatio-temporal coupling of human-nature interactions in the Yellow River Basin at a grid scale.Acta Ecologica Sinica,2024,44(15):6499-6512.

基于栅格尺度的黄河流域人地关系时空耦合分析

刘海猛^{1,2},卢佳祎³,王成新^{3,4},丁宇辰³,杨志伟³,李智勇³,乔建民^{3,*}

1 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049

3山东师范大学地理与环境学院,济南 250358

4 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心, 开封 475001

摘要:黄河流域作为中国人口与产业集聚区,其水资源短缺、生态退化、环境污染等问题严重,研究该区域的人地关系对于推进 生态保护和高质量发展国家战略具有重要意义。然而面向国土空间规划、生态环境网格化治理等现实需求,目前黄河流域人地 关系还缺乏精细栅格尺度研究。使用人类足迹(HF)和生态系统质量指数(EQI)作为人地系统的代理变量,基于 Sen+MK 趋势 检验识别了 2000—2020 年 1km×1km 栅格尺度下黄河流域人类活动和生态系统质量时空演化特征,运用四象限图解法量化了 两者协调与冲突关系,基于多种回归模型解析了黄河流域人类活动对生态系统质量的影响程度和时空异质性。结果表明, 2000—2020 年黄河流域 EQI 和 HF 整体均呈上升趋势,其中显著上升区域前者占比 64.2%,后者占比 49.2%。黄河流域人地关 系整体呈现协调演化态势,人地协调演化区主要分布在黄土高原、太行山西麓和宁夏沿黄等地区;人地冲突区域仅占 7.7%,主 要分布在城镇化快速推进地区和上游生态脆弱区。在控制了气温、降水、日照、海拔等自然因子后,HF 对 EQI 仍有显著负向影 响,整体看 HF 每增加 1%,EQI 将下降 0.067%。但这种影响存在时空异质性,人类活动对黄河流域中下游 EQI 的负向影响更加 显著,20 年间整个流域的 HF 对 EQI 的负向影响呈现缓慢增加态势。为栅格尺度的人地关系研究提供了新的方法论,研究结果 为黄河流域人与自然和谐共生的政策制定提供决策支持。

关键词:黄河流域;人地关系;人与自然和谐共生;人类足迹;生态系统质量;冲突与协调

Spatio-temporal coupling of human-nature interactions in the Yellow River Basin at a grid scale

LIU Haimeng^{1,2}, LU Jiayi³, WANG Chengxin^{3,4}, DING Yuchen³, YANG Zhiwei³, LI Zhiyong³, QIAO Jianmin^{3,*}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 School of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China

4 Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development, Henan University, Kaifeng 475001, China

Abstract: The Yellow River Basin, a pivotal concentration area for China's population and industry, suffers from acute water shortages, ecological decline, and environmental pollution. Investigating the region's human-nature interaction is crucial for enhancing ecological conservation and sustainable development. However, research on this relationship at a grid scale, essential for national spatial planning and ecological management, remains insufficient. In this study, we utilized the Human Footprint (HF) and the Ecosystem Quality Index (EQI) as indicators to represent the human-nature interface. Employing the Sen+MK trend analysis, we delineated the spatio-temporal dynamics of human activities and ecosystem

基金项目:教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD790015);国家自然科学基金项目(42171210);山东省高等学校"青创团队计划"(2022KJ248)

收稿日期:2024-01-25; 采用日期:2024-04-29

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: qjmwilson@sdnu.edu.cn

http://www.ecologica.cn

quality across the basin at a $1 \text{km} \times 1 \text{km}$ grid scale from 2000 to 2020. The four-quadrant diagram was applied to quantify the synergies and conflicts between the two. Moreover, various regression models were used to evaluate the degree and spatio-temporal variability of human impacts on ecosystem quality within the basin. The study revealed that both the EQI and *HF* in the Yellow River Basin exhibited an overall upward trend from 2000 to 2020. Areas with significant increases in EQI accounted for 64.2% of the region, while those for *HF* comprised 49.2%. The basin exhibits a trend of coordinated human-nature evolution. Coordinated interactions predominantly occur on the Loess Plateau, the western Taihang foothills, and along Ningxia's Yellow River areas. Conflict zones, constituting only 8%, are mainly in rapidly urbanizing regions and upstream areas with delicate ecosystems. Controlling for natural variables like temperature, precipitation, sunlight, and elevation, *HF* significantly and negatively impacts the EQI, with each 1% increase in *HF* decreasing EQI by 0.067%. This effect exhibits spatio-temporal heterogeneity, being more pronounced in the middle and lower Yellow River Basin. The overall negative influence of *HF* on EQI is gradually intensifying. The study introduces a novel methodology for grid-scale human-nature interaction research and informs policy development for human-nature harmony in the Yellow River Basin.

Key Words: Yellow River Basin; human-nature relationship; harmonious coexistence of humans and nature; human footprint; ecosystem quality; conflict and coordination

人地关系是地球系统科学研究的前沿领域,是地理学和生态学的核心内容和重要议题^[1-3]。在人类世和 全球变化背景下,人与自然和谐共生既是整个人类社会可持续发展的核心,也是中国式现代化的本质要 求^[4]。2015年,联合国提出了17项可持续发展目标(SDGs),其中目标6、7、11、12、13、14和15,都旨在协调 社会经济发展与生态环境^[5-6]。近年来,未来地球计划、政府间气候变化专门委员会、生物多样性和生态系统 服务政府间科学政策平台等许多全球性研究机构或项目致力于探索人与自然的耦合机制和规律,寻求在行星 边界内的包容与可持续的发展空间,以实现人类福祉提升和永续发展^[7]。

黄河流域在中国经济社会发展和生态安全方面具有十分重要的战略地位。然而,一方面面临水资源短缺、生态脆弱、土地退化、环境污染严重等问题^[8—9],一方面流域内人口密集,城镇化快速发展,产业以能源化工、原材料、农牧业等主导^[10—11],导致黄河流域成为中国人地矛盾最为突出和复杂的区域之一。中国近些年不断推进美丽中国和生态文明建设,提出绿水青山就是金山银山的发展理念,将促进人与自然和谐共生作为全面实现现代化的重要方面。2019年中国政府将黄河流域生态保护和高质量发展确立为重大国家战略,探究黄河流域人地关系的时空演变具有重要的理论与现实意义。

学者们针对黄河流域人地关系进行了卓有成效的研究,近些年在人水关系^[12-13]、城镇化与生态环境^[14-15]、植被变化及人类影响^[16]、生态系统服务与人类福祉^[17]、生态保护与高质量发展关系^[18]等方面尤其关注。基于地市级尺度的人类活动施压和资源环境承压发现 21 世纪以来近 1/5 的地区人地关系趋于紧张^[19],新型城镇化与生态环境的协调度呈现先上升后下降的趋势,且呈现从上游到下游梯次增强的空间格局^[20-21]。从经济发展与生态环境脱钩视角,揭示了 1990—2018 年 68.34%的区县实现了两者有效脱钩^[22],其中水足迹与经济增长表现为弱脱钩^[23],水资源边际效益增长速度高于农业经济规模增长速度^[24]。从投入产出视角,发现黄河流域水资源利用与经济社会发展的协调性整体较差^[25],黄河水资源的可持续性在质量和数量上都面临风险^[26]。从生态系统服务视角,评估了人口密度、耕地等人为因素对黄河流域各个地市生态系统服务影响的空间异质性^[27],发现草地、耕地和林地之间的相互转换对生态系统服务价值影响最大^[28]。从功能耦合视角,揭示了黄河流域城市人居环境是经济水平、环境质量和社会资源综合作用的结果^[29],发现2013 年以来黄河流域生态保护水平进展速度快,但高质量发展成效不够显著^[30],可持续发展目标的达成度不均衡^[31]。

通过上述文献梳理发现:首先,当前大多人地关系研究以行政区为研究单元,缺乏栅格尺度的研究,无法 支撑当前国土空间规划精细化评估、生态环境网格化监管与治理等需求。基于行政单元的研究可以与政策的 制定、执行、评估等很好的匹配^[32],但基于公里网格或更高分辨率栅格尺度的研究能够与地块更好对应,有助 于国土空间的差异化开发、保护与治理。面向国土空间规划和全域治理现代化,人地关系研究的尺度下移显 得更加迫切。其次,目前人地关系研究的定量方法主要是耦合协调度、资源环境承载力、相关性分析、脱钩分 析、EKC 检验等^[33-34],这些方法主要关注两个系统之间的关联或时序关系,可以较好的判断人地系统整体的 演化趋势,但忽视了其他因素对"人"与"地"两者的影响,在栅格尺度的应用也受限。

鉴于此,本文使用人类足迹(HF)和生态系统质量指数(EQI)作为黄河流域人地系统的代理变量,首先剖 析了栅格尺度的 HF 和 EQI 时空演化特征,进而运用四象限图解法量化了两者的协调与冲突演化关系,最后 基于多种回归模型解析了黄河流域人类活动对生态系统的影响程度和时空异质性。本研究针对栅格尺度人 地关系识别的思路方法可供其他研究参考,研究结果可为黄河流域的生态保护和高质量发展提供科学支撑, 推动流域内人与自然和谐共生发展。

1 数据与方法

1.1 研究区

黄河从青藏高原的巴颜喀拉山发源,自西向东流经9个省(自治区)的448个区县,最终注入渤海,全长 5464km,流域面积79.5万km²。如图1所示,黄河流域地势西高东低,西部河源地平均海拔超4000m,包含高 山草甸、河流谷地、冰川等地貌类型,人口相对稀少;中部地区海拔在1000—2000m,主要为黄土地貌,是中国 重要能源富集区,长期以来的过度开发和农牧业活动导致水土流失严重;东部主要是黄河冲积平原,是中国重 要的粮食主产区和工业基地。流域内生态系统类型复杂多样,包涵了森林、草地、农田、湿地、荒漠等。黄河流 域的人均 GDP、人均财政收入、城镇化率等经济社会指标均滞后于全国平均水平^[21]。人口与产业主要集中在 兰西城市群、关中平原城市群、山东半岛城市群等7个城市群范围内^[35],中下游交通网密集,上游道路密度较 低。生态脆弱、发展质量不高不均衡是黄河流域面临的两大问题。



图 1 黄河流域研究区示意图 Fig.1 Yellow River Basin map

1.2 数据来源和指标计算

人类足迹(Human footprint, HF)是常用的综合反映人类活动强度的有效指标^[36]。本研究采用了一套 2000—2020年间1km分辨率的人类足迹数据产品^[37],以更全面地评估黄河流域的人类活动强度。该数据集 整合了八个关键的人类活动指标,包括人工建筑、人口密度、夜间灯光、耕地、牧场、公路、铁路以及通航水道 (表1),从不同维度反映人类对生态环境压力,通过将各个指标的得分进行加和得到人类足迹,对于任意栅格的人类足迹在[0,50]。HF提供了一个比传统土地覆被数据或单一的人口分布数据更全面的人类活动强度代理指数,且经过了详细的验证,已经在全球、国家、流域、城市等尺度得到广泛应用^[38-40],被国内外学者认可。

Table 1 Framework of mapping annual Human Footprint				
人类压力	得分	数据处理方法		
Pressure	Score	Data processing		
人工建筑 Built environment	0,4,10	对于建设用地占比超过20%的栅格,压力得分为10;否则,为4。		
人口密度 Population density	0—10	$ \begin{cases} 10, \ \ \square(P) \ge 1000 \\ 3.333 \times \log(P+1), 0 < P < 1000 \end{cases} $		
夜间灯光 Night-time lights	0—10	根据十等分的区间从 0 到 10 分配得分		
耕地 Croplands	0,4,7	对于作物占比超过20%的栅格,压力得分为7;否则,为4。		
牧场 Pasture	0—4	用每个栅格中的牧场比例乘以4		
公路 Roads	0—8	${8, 距离(D) ≤ 0.5 km}$ 3.75×exp(-1×(D-1))+0.25,0.5 km <d<15 km<="" td=""></d<15>		
铁路 Railways	0,8	$ \begin{cases} 0, 距离(D) > 0.5 km \\ 8, D \leq 0.5 km \end{cases} $		
通航水道 Navigable waterways	0—4	$ \begin{cases} 0, 距离(D) > 15 km \\ 4 \times \exp(-1 \times D), D < 15 km \end{cases} $		

表1 人类足迹的计算框架^[37]

人地系统中的"地"也是典型复杂系统,包含了水、土、气、生、能、矿等自然生态要素,本研究仅选择与人 类活动关系密切且栅格数据容易获取的陆地生态系统作为黄河流域"地"系统的代理变量。参考生态环境部 颁布的《全国生态状况调查评估技术规范——生态系统质量评估(HJ 1172—2021)》,通过植被覆盖度 (Fractional vegetation cover, FVC)、叶面积指数(Leaf area index, LAI)和总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)三个指标构建生态系统质量指数(Environmental quality index, EQI),该指数被认为是评估 和检测生态系统整体健康状况的综合指标。未选择湿度、热度、干度等其他生态遥感指数^[41-42],是考虑到本 文目的是探究年际尺度的人类活动与生态系统的演化关系,湿度、热度与年际人类活动变化的关系较小,受气 候气象要素影响波动很大,干度的计算方法主要是基于建筑指数计算而来,与人类足迹指数有重合。

FVC 是植被(包括叶、茎、枝)在地面的垂直投影面积占统计区总面积的百分比,代表该区的植被覆盖程度,本研究采用基于 NDVI 的像元二分模型将每个像元分成植被覆盖和非植被覆盖两类,进而在 Google Earth Engine 平台计算,公式如下:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$
(1)

式中,FVC为植被覆盖度,取值范围[0,1];NDVI为合成的年最大值,原始数据来自 MOD13Q1.061(https://code.earthengine.google.com/);NDVIveg为纯植被区域的 NDVI 值;NDVIsoil 为裸土或无植被区域的 NDVI 值。本研究选取累计概率分布为 95%和 5%的 NDVI 值代表 NDVIveg 和 NDVIsoil,以消除噪声误差。

LAI 为植物叶面积与地面单位面积的比值,是描述区域生态系统的重要指标,数据来自 MOD15A2H 数据 集(https://search.earthdata.nasa.gov/)。基于数据产品的质量信息,过滤了云、雪、气溶胶和卷云影响的像元, 保留高质量的 LAI 合成年均值。

GPP 为绿色植被在单位时间和单位面积上进行光合作用而固定的总有机碳量,是陆地生态系统的一个重要参数,数据来自 Science Data Bank(https://www.scidb.cn)。

将 FVC、LAI、GPP 数据集分别进行重采样,统一空间分辨率为 1km。由于研究目的是分析生态系统质量时空动态演化,关注变化量而不进行横向的状态评估,因此采用模糊隶属度函数的线性变换,对所有栅格数据进行归一化处理至[0,100],为了与人类足迹数据匹配裁剪掉研究区域的湖泊水域。最后,通过计算三个标

准化指数的平均值得到 EQI,公式为:

$$EQI = \frac{FVC + LAI + GPP}{3}$$
(2)

此外,在人类活动对生态系统质量影响分析中,选择了一些控制变量,包括年均降水量、年均气温、年日照时长、海拔等,数据来自国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/)。人类足迹数据集的分辨率为1km,其他数据的原始分辨率为250m到1km不等,为保证计算的准确性和结果的信度,所有指标数据均统一到1km分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen Median 趋势和 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen median 趋势分析是一种鲁棒性非参数统计方法,通过计算 n(n-1)/2 括号内为标准误个数据组合的斜率中位数判断时间序列的趋势,可以在减少噪声干扰的情况下确定趋势的显著性^[43]。本文利用其分析栅格尺度的 EQI 和 HF 的变化趋势,公式为:

$$\alpha = \operatorname{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \tag{3}$$

式中, Median 代表取中位数, α 为每个栅格的变化斜率; x 代表 EQI 或 HF; $i, j \in [2000, 2020]$ 。若 $\alpha > 0$, 表明对 应时间段内该指数有上升趋势; 若 $\alpha < 0$, 表明该指数有下降趋势。

Mann-Kendall(MK)检验是基于秩的一种非参数检验方法,可应用于任何时间分布模式,并且对异常值不 敏感^[44]。通过计算统计量 Z 值对 EQI 和 HF 变化趋势进行显著性检验,公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S>0) \\ 0 & (S=0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}} & (S<0) \end{cases}$$
(4)
$$\overrightarrow{\operatorname{Var}(S)} & (S<0) \\ 1 & x_j - x_i > 0 \\ 0 & x_j - x_i = 0 \text{ ; Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \text{ o} \end{cases}$$

式中,sgn 是符号函数,n 表示时间序列长度。在给定显著性水平 β 下,当 | Z |>Z_{1-^β/2}时,表示时间序列在 β 水平 上变化显著,当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96、2.58 时,表示分别通过了信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验。 1.3.2 新兴时空热点分析

新兴热点分析工具基于时空立方体(Space-time cube, STC)整合时间和空间两个维度来识别数据的冷热 点趋势^[45]。首先,将拥有时间序列的栅格图层创建时空立方体模型,生成特殊的 NetCDF 数据文件。然后,基 于 Getis-Ord *C**^[46],设置邻域距离和时间步长,识别具有统计显著性的高值(热点)和低值(冷点)空间聚类。 接着,使用 MK 趋势检验来评估热点和冷点的趋势,进而将每个位置划分为不同的时空模式。可以将这些模 式可视化为 2D 或 3D(图 2)。在 2D 地图上,每个位置可能是新增热点、加强热点、振荡冷点、分散冷点等 17 个类别中的一个(8 个热点,8 个冷点和 1 个未被识别模式),各模式的详细描述可参阅 ESRI 官方手册。分别 使用 1km、10km、20km、50km 等不同分辨率的栅格对黄河流域的 EQI 和 *HF* 进行时空热点分析,发现栅格太 小的话,识别出来的空间模式过于零碎,缺乏规律性;栅格过大结果又显粗糙,经过实验对比后,本研究选择 20km 分辨率的栅格进行时空热点分析和可视化效果最佳。

1.3.3 人地关系识别的四象限图解法

如图 3 所示,将 HF 的变化作为横轴, EQI 变化为纵轴, 绘制四象限图, 将二者的演化关系细分为冲突、协调、自然优先和双向退化四种类型^[39]。进一步, 参考前人的做法^[47-49], 根据 MK 检验的 Z 值和 Theil-Sen 斜率



图 2 新兴时空热点分析示意图 Fig.2 Illustration of emerging hot spot analysis

值,本研究将人地关系演化的每种类型进一步分为极显 著、较显著、不显著:检验信度超过 99%为极显著, 90%—99%为较显著,低于 90%或 Theil-Sen 斜率值的绝 对值小于 0.0005 为不显著,其中所有不显著的类型在 图中用灰色进行表示,本文重点分析极显著和较显著变 化的栅格。图 3 中的第一象限为人地系统协调演化, *HF*和 EQI 都显著提升,是人类社会发展与自然生态共 同繁荣、充满希望的状态;第二象限代表人类活动减弱 (可能由政策干预、低碳生态技术升级等因素导致),生 态系统质量趋向显著改善。在第三象限,*HF*和 EQI 均 呈显著下降趋势,这可能由特定的气候变化、政策干预 等导致。第四象限是人与自然的冲突状态,人类活动持 续增强,而生态系统却趋向恶化,这类区域尤其需要关 注。其中,象限—和二被认为是人地系统可持续发展状 态,象限三和四是不可持续状态。



coordination between human and nature

1.3.4 回归模型

本文使用固定效应面板回归和时空地理加权回归两种模型,探究不同区域的人类活动在多大程度上对生态系统造成影响。为更好地服务政府部门决策,支撑地方高质量发展与生态治理决策,使用了黄河流域 448 个区县为样本单元进行建模。研究表明生态系统质量的年际变化除了人类活动影响外,还受到区域自然地理 本底条件和气候变化的影响^[50]。因此,本文参考前人研究^[51-52],选择了年降水量、年均气温、年日照时长和 海拔作为回归模型的控制变量。

(1)固定效应面板回归

固定效应面板回归可以通过充分利用时间维度和个体维度的信息,提供对变量之间关系的更准确估计, 以更好地理解变量之间的因果关系,适用于无法观测到的遗漏变量的控制与处理,包括个体固定和时间固定 两种类型。本研究中的海拔属于非时变变量,因此选择时间固定效应模型,以排除其他影响 EQI 时序变化的 不可观测的遗漏变量,例如环保政策变动、技术进步等。基于黄河流域 2000—2020 年 448 个区县的面板数据 构建回归方程:

$$EQI_{t} = c + \gamma_{1}HF_{t} + \gamma_{2}P_{t} + \gamma_{3}S_{t} + \gamma_{4}T_{t} + \gamma_{5}E_{t} + \mu_{t} + \varepsilon_{t}$$

$$\tag{5}$$

式中, EQI 为被解释变量, HF 为人类足迹, γ 是模型带估系数, 反映相关变量与 EQI 之间的关系, t 为年份, c 为 常数; P、S、T、E 为控制变量, 分别代表年降水量、年日照时长、年均气温和海拔; μ_t 为时间固定效应, ε_t 为随机

扰动项。所有变量原始数据的描述性统计见	表:	2。
---------------------	----	----

Table 2 Descriptive statistics of the original data for panel regression							
变量类型 Variable	名称 Abbreviation	单位 Unit	样本量 Observations	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最大值 Max	最小值 Min
被解释变量 Dependent variable	EQI	_	9408	47.88	8.05	62.78	12.34
解释变量 Independent variables	HF		9408	19.59	9.18	45.53	2.06
控制变量 Control variables	P(年降水量)	mm	9408	535.09	165.70	1091.83	82.03
	S(年日照时长)	h	9408	2347.71	348.37	3498.25	1410.68
	T(年均气温)	°C	9408	17.12	4.62	23.92	0.09
	E(海拔)	m	9408	1258.46	998.96	4580.41	1.49

ahla 1	Decemintive	statistics of the original data for nanal	nonnocci
	表 2	面板回归原始数据的描述性统计	

(2)时空地理加权回归

传统的回归模型通常假设变量间的关系在整个研究区域范围内是恒定不变的,没有考虑空间差异和时间 演化。时空地理加权回归(GTWR)通过将空间权重和时间权重引入回归模型,解决空间和时间非平稳性问 题,使得估计更加有效。在 GTWR 中,每个观测点均有一个自适应的局部回归模型,模型的权重值基于该观 测点与其余观测点间的空间距离和时间相似度^[53]。计算公式如下:

$$Y_{k} = \varphi_{0}(u_{k}, v_{k}, t_{k}) + \sum_{m} \varphi_{m}(u_{k}, v_{k}, t_{k}) X_{km} + \lambda_{k}$$
(6)

式中, Y_k 为观测值, u_k 和 v_k 分别是第k个样本点的纬度和经度, t_k 为第k个样本点的时序, (u_k, v_k, t_k) 即为第k个样本点的时空坐标; $\varphi_0(u_k, v_k, t_k)$ 为回归常数; $\varphi_m(u_k, v_k, t_k)$ 为第k个样本点第m个解释变量的回归系数; X_{km} 为第m个解释变量在第k点的值; λ_k 为残差。

GTWR 模型的核心要素是时空权重矩阵与带宽的选择,所谓时空权重矩阵,是指对每个时空位置的观测 点 k 提供一个 $\varphi_m(u_k, v_k, t_k)$ 的估计值,即:

$$\boldsymbol{\phi}(\boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{v}_k, \boldsymbol{t}_k) = \left[\boldsymbol{X}^T \boldsymbol{W}(\boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{v}_k, \boldsymbol{t}_k) \boldsymbol{X}\right]^{-1} \boldsymbol{X}^T \boldsymbol{W}(\boldsymbol{u}_k, \boldsymbol{v}_k, \boldsymbol{t}_k) \boldsymbol{Y}$$
(7)

式中, $\phi(u_k, v_k, t_k)$ 为 $\varphi_m(u_k, v_k, t_k)$ 的估计值; $W(u_k, v_k, t_k)$ 为时空权重矩阵,X为自变量构成的矩阵; X^T 是转置 矩阵;Y为观测值构成的矩阵。本文在确定权重时采用有限高斯函数,即 bi-square 空间权函数:

$$W_{kl}^{ST} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{d_{kl}^{ST}}{b_k} \right)^2 \right]^2, & d_{kl}^{ST} \le b_k \\ 0, & d_{kl}^{ST} > b_k \end{cases}$$
(8)

式中, W_{kl}^{sT} 为利用 bi-square 空间权函数得到的时空权重矩阵, d_{kl}^{sT} 为观测点 k 与观测点 l 之间的时空距离, 即 $\sqrt{\delta [u_k - u_l]^2 + (v_k - v_l)^2 + \tau (t_k - t_l)^2}$,其中 δ 和 τ 是空间和时间的比例因子, 用于平衡各自度量系统中空间和时间距离的不同影响。b 为带宽, 其选则很大程度上影响时空权重矩阵的确立。考虑样本点分布不均, 带宽确立使用自适应带宽法(Adaptive bandwidth)^[53], 该方法的确立准则为 AICc 法。

2 结果分析

2.1 2000—2020 年 EQI 和 HF 的时空演化

图 4 展示了黄河流域 2000—2020 年生态系统质量的空间格局与变化趋势。整体上黄河流域上游和下游 的 EQI 指数要高于中游黄土高原地区,2020 年的值也普遍高于 2000 年。根据 Sen+MK 趋势检验,黄河流域 EQI 显著上升的区域占比为 64.2%(其中极显著上升占比 49.6%),显著下降的区域占比为 6.3%(其中极显著 下降占比 2.5%),30.5%区域变化不显著。具体来说,黄土高原、渭河、泾河和洛河流域地区的 EQI 呈现显著 上升趋势,这与 21 世纪以来黄土高原生态治理工程密不可分。而关中城市群、郑州都市圈以及青甘川三省交 界地区的 EQI 则表现出下降的趋势,城市群、都市圈的 EQI 下降主要由于城市化带来的人口集聚和建设用地

44 卷



扩张所致,青甘川交界处以草原为主,EQI下降除了由于近20年城镇化加速外,也和放牧强度的变化有关。

图 4 黄河流域 2000—2020 年生态系统质量的时空变化趋势 Fig.4 Spatiotemporal trend of the EQI in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 EQI:生态系统质量指数 Ecosystem quality index

如图 5 所示,黄河流域人类足迹高值区主要集中在传统的城镇地区、产业集聚区和农耕区。2000—2020 年大部分地区的 HF 在增长,49.2%的地区 HF 显著上升(其中极显著上升占比 37.2%),而 15.4%的地区 HF



图 5 黄河流域 2000—2020 年人类足迹的时空变化趋势

Fig.5 Spatiotemporal trend of the HF in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

HF:人类足迹 Human footprint

显著下降(其中极显著下降占比 8.8%),35.2%地区 HF 变化不显著。具体来说,关中城市群、宁夏沿黄城市 群、呼包鄂榆城市群、郑州都市圈和黄河青海段的 HF 呈现显著上升的趋势,这与 2000 年以来中国人口、经济 和城市化发展趋势相一致。而秦岭和黄土高原南部等地区的 HF 则呈现显著下降的趋势,这与实施的一系列 生态保护和修复措施密切相关,如 2008 年颁布《陕西省秦岭生态环境保护条例》,2010 年颁布《黄土高原地区 综合治理规划大纲(2010—2030 年)》,通过退耕还林还草、生态移民等措施减少了人类活动的干扰。

为更加细致的探究黄河流域 EQI 和 HF 的时空演化热点,基于 20km 分辨率的栅格使用新兴时空热点工 具进行分析。如图 6 所示,黄河流域 EQI 时空冷热点表现出明显的集聚性。时空热点包括 8 个类别,其中加 强的热点和持续的热点数量较多,分别占比 19.1%、16.7%,前者主要分布在黄土高原南部,后者主要集中在兰 西城市群和甘南地区。时空冷点分为 6 个类别,其中逐渐减少的冷点和持续的冷点数量较多,分别占比 24.4%、9.2%。逐渐减少的冷点主要分布在黄土高原地区,也印证了黄土高原生态的逐渐趋好;而持续的冷点 主要分布在鄂尔多斯市和吴忠市,说明这些地区生态系统质量本底较差且没有改观。如图 6 所示,黄河流域 HF 的时空热点包含 5 个类别,其中加强热点占比最多(33.21%)。主要分布在陇海兰新线两侧以及流域山东 段。时空冷点包含 7 个类别,其中加强热点占比最多(33.21%)。主要分布在陇海兰新线两侧以及流域山东 资点包含 7 个类别,其中逐渐减少的冷点和持续的冷点最多,分别占比 19.9%、13.5%。逐渐减少的 冷点主要分布在黄河流域的鄂尔多斯市中部、玉树藏族自治州和甘孜藏族自治州等地。持续冷点主要位于若 尔盖自然保护区,说明该地区近 20 年的人类活动强度变化不大。

整体来看,黄河流域生态系统质量和人类活动强度在 2000—2020 年均呈上升趋势,其中 EQI 的显著改善 区域占黄河流域总面积的 64.2%, HF 的显著上升区域占 49.2%。生态系统质量显著下降区域和人类活动显 著上升区域都主要集中在城市群和都市圈。生态系统质量的加强热点主要分布在黄土高原南部,人类足迹的 加强热点主要分布在陇海兰新线两侧以及黄河山东段。





2.2 2000—2020 年 EQI 和 HF 的动态演化关系

根据上文的 Sen+MK 趋势检验结果,本节重点分析在 2000—2020 年 EQI 和 HF 都有显著变化的区域,面积占总流域的 44.8%。根据人地关系识别的四象限图解法将这些区域划分为 9 种类型,显著变化类型的各自占比为:人地协调类型占 65.7%,自然优先类型占 25.7%,冲突类型占 7.7%,双向退化类型占 0.9%(图 7)。可见在显著变化区域中超过一半的面积属于人地协调发展状态,表明这些区域人类活动虽然在增强,但生态系统质量也在提升,这也在图 7 中 EQI 和 HF 年平均值散点图中得到印证。

如图 7 所示,人地协调发展区域主要分布在黄土高原、太行山西麓和宁夏沿黄等地区。自然优先发展区域在黄土高原南部广泛分布,也出现在河套平原、兰西城市群外围等区域,这些地区的人类活动强度趋于降低,生态系统质量得到显著改善。人地冲突类型主要分布在城镇化快速推进地区和生态脆弱地区,包括关中城市群、郑州都市圈和果洛藏族自治州部分地区,以及银川、太原等城市附近。这些地区人类活动增强的同时 生态系统退化显著。人地双向退化类型占比 0.9%,主要在黄河上游零星分布。





2.3 人类活动对生态系统质量影响分析

人类活动究竟是降低还是改善了生态系统质量? 我们通过全局的面板回归和可以将时空拆解的 GTWR 来探索该问题。首先,运用面板固定效应模型,基于黄河流域 2000—2020 年 448 个县区的数据,模型两边同 时取对数后进行回归分析(表 3)。谨慎起见,按照逐步回归的思路,选择了不同控制变量构造了 5 个模型进 行比较。根据模型的调整 R²值,显然模型 5 的结果是最可靠的,HF 系数在 0.01 显著水平下为-0.067,这表明 在控制住相关自然气象因素的前提下,人类足迹对生态系统质量产生了显著负向影响,且人类足迹每增加 1%,生态系统质量指数将下降 0.067%。此外,模型 5 的结果也显示日照时长和海拔对 EQI 具有显著负向影 响,而降水量对 EQI 具有显著正向影响,温度对 EQI 影响不显著。

由于黄河流域存在巨大的区域异质性,进一步运用 GTWR 分析这种影响的时空异质性。结果表明不同 影响因子之间存在显著的空间差异,模型的调整 R²值为 0.728,远高于面板回归模型。图 8 中的箱线图展示 了各因子回归系数分布情况,整体看,人类足迹和日照时长对生态系统质量的影响负向为主,降水、气温和海 拔的影响以正向为主。日照时长和气温的异质性显著高于其他因素。从影响因子回归系数的空间格局看 (图 8),HF 对 EQI 的影响表现出明显的空间异质性。在下游地区 HF 对 EQI 呈现显著负向影响,上游地区的 HF 对 EQI 的影响显著为正但数值较小,可见上游的人类活动不仅未给生态系统带来压力,还一定程度上有 助于生态系统质量的提升。日照时长对 EQI 的影响在大部分地区都是负向的,但在黄河源地区和西安片区 表现出正向影响。年均降水量对 EQI 的影响在大部分地区都是正向的,只有在泰安片区呈现负向影响。年

表 3 面板固定效应模型结果							
Table 3 Results of the panel fixed effects model							
变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5		
Variable	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4	Model 5		
ln <i>HF</i>	0.042 ***	-0.023 ***	-0.041 ***	-0.052 ***	-0.067 ***		
	(7.42)	(-5.47)	(-9.98)	(-10.02)	(-11.00)		
lnP		0.358 ***	0.384 ***	0.290 ***	0.280 ***		
		(69.96)	(41.66)	(41.34)	(38.61)		
lnS			-0.275 ***	-0.248 ***	-0.261 ***		
			(-19.68)	(-15.91)	(-16.70)		
lnT				0.026 ***	0.007		
				(6.23)	(1.49)		
lnE					-0.016 ***		
					(-10.99)		
Constant	3.675	0.859	3.674	3.306	3.742 ***		
	(195.99)	(19.52)	(23.81)	(19.06)	(20.88)		
Cluster-robust standard errors	YES	YES	YES	YES	YES		
Observations	9408	9408	9408	9408	9408		
F-statistics	14.82	240.24	281.11	285.46	341.57		
R^2	0.032	0.452	0.469	0.470	0.477		
Adjusted R^2	0.030	0.450	0.467	0.469	0.475		

均气温对 EQI 的影响在大部分地区都是正向,但在黄河流域的甘肃-内蒙段以及西安片区表现出负向影响。 海拔对 EQI 的正向影响范围要多于负向影响范围,异质性较大。

括号中为 t 统计量, * * * 代表 P<0.01, * * 代表 P<0.05, * 代表 P<0.1



图 8 2000—2020 年生态系统质量影响因子系数的空间分布 Fig.8 Spatial distribution of EQI impact factor coefficients from 2000 to 2020

图 9 展示了各影响因子回归系数的时间变化趋势。 2000—2020 年,黄河流域的 HF 对 EQI 的负向影响呈现 缓慢增加态势。降水量对 EQI 的正向影响在逐步加 强,近些年成为最重要的影响因素。气温对 EQI 的影 响整体是正向,但 2010 年之前的影响强度呈下降趋势, 2010 年之后又开始上升。此外,日照时长的负向影响 在逐步减小,海拔对 EQI 的影响较弱,回归系数一直在 0.04 附近,没有太明显的时间变化。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文的创新点和贡献包括:发展了栅格尺度下人地 系统演化关系的识别方法;从栅格尺度剖析了黄河流域 人与自然的协调与冲突关系;揭示了黄河流域不同自然 和人文因子对生态系统质量影响的时空异质性。主要 结论如下:

(1)黄河流域生态系统质量和人类足迹在 2000—



Fig.9 Temporal trend of EQI impact factor coefficients from 2000 to 2020

2020年整体均呈上升趋势。生态系统质量显著上升的区域占比为 64.2%,显著下降的区域占比为 5.3%,黄土高原大部分区域的生态系统质量显著上升。人类足迹显著上升区域占比 49.2%,显著下降占比 15.6%,显著上升地区主要分布在城市群、都市圈以及黄河山东段,显著下降区域分布在秦岭和黄土高原南部。

(2)2000—2020年黄河流域人地关系整体呈现协调演化态势。人地协调类型占总显著变化区域的 65.7%,自然优先类型占25.7%,冲突类型占7.7%,双向退化类型占0.9%。人地协调区域主要分布在黄土高 原、太行山西麓和宁夏沿黄等地区,人地冲突区域主要分布在城镇化快速推进地区和上游生态脆弱地区。

(3)在控制了气温、降水、日照、海拔等自然因子后,从整个流域看人类足迹对生态系统质量有显著负向 影响,HF每增加1%,EQI指数将下降0.067%。但这种影响存在明显的时空异质性,人类活动对黄河流域中 下游的生态系统负向影响更加显著、强度更大,对上游的影响并不显著;从时间序列上看,人类活动的负向影 响有缓慢加强趋势。

3.2 讨论

从研究结果看,上游青海果洛、四川阿坝、甘肃甘南等黄河水源主要补给地的人地冲突比例仍然较高,未 来应因地制宜的推动退耕还林还草、退牧还草,加大甘南、若尔盖等主要湿地治理和修复力度,基于草原的资 源环境承载能力严格控制放牧规模,通过发展生态农牧业、生态旅游,完善生态补偿政策,引导当地居民逐步 调整生产生活方式。中下游人地冲突的地区主要分布在城市群、都市圈,这与20年间城市快速扩张挤占生态 用地、城市郊区景观破碎化密切相关。随着中国城市化进入后半程,逐渐由增量建设转向存量提质,未来应进 一步统筹城乡发展,将山水林田湖草作为一个完整系统,强化生态保护红线、高标准基本农田和城镇开发边界 管控,加强黄河流域城市群内部蓝绿空间的治理与修复,推动沿黄特大城市减量增效绿色高质量发展。

本文提出的方法论可以为其他尺度和其他地域的人地协调评估提供参考,支撑国土空间保护利用的动态 监管和生态环境网格化治理。平衡空间开发与保护实现人地和谐是国土空间规划和用途管制的重要目标,然 而当前的规划实施评估缺乏栅格尺度的方法指引,本研究的思路方法对于国土空间规划实施评估和城市体检 评估具有参考价值。生态环境的网格化治理是我国现代化治理在空间维度的具体体现,本研究从栅格尺度对 黄河流域人地关系类型的识别与显著性分级可以为地方政府的生态环境网格化保护与治理提供科学参考。

人与自然均是复杂的巨系统,本研究选择人类足迹和生态系统质量指数作为两个复杂系统的代理变量,

计算之结果仅能管中窥豹,期望未来能找到更具代表性和综合性的指标进行拓展研究。本文仅基于各类遥感 和统计数据对黄河流域人地关系进行了状态描述,人地协调或冲突的背后机制有待今后结合调研展开深入分 析。生态系统质量的变化除了受到人类活动和自然因素的影响,一些政策性生态工程也是重要影响因素,本 文受数据所限未将其专门纳入模型。未来考虑将地理过程模拟和机器学习结合、行政区尺度与栅格尺度结 合^[54]、大数据和统计数据结合^[55],将黄河流域作为自然与人文环境相互影响与依存的"生命共同体"^[56],借 助复杂系统科学、近远程耦合框架^[57]等更加深入的探讨流域多尺度人地关系,支撑区域可持续高质量发展。

参考文献(References):

- [1] 傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务. 科技导报, 2020, 38(13): 19-24.
- [2] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234.
- [3] 方精云. 生态学学科体系的再构建. 大学与学科, 2021, 2(4): 61-73.
- [4] Giddings B, Hopwood B, O'Brien G. Environment, economy and society: fitting them together into sustainable development. Sustainable Development, 2002, 10(4): 187-196.
- [5] Cheng Y, Liu H M, Wang S B, Cui X G, Li Q R. Global action on SDGs: policy review and outlook in a post-pandemic era. Sustainability, 2021, 13(11): 6461.
- [6] Liu J G, Hull V, Godfray H C J, Tilman D, Gleick P, Hoff H, Pahl-Wostl C, Xu Z C, Chung M G, Sun J, Li S X. Nexus approaches to global sustainable development. Nature Sustainability, 2018, 1: 466-476.
- [7] 邵庆龙,李默,康鹏,郭海男.可持续发展评估的新方法:"甜甜圈"理论的中国案例分析.自然资源学报,2022,37(2):334-347.
- [8] 傅伯杰, 王帅, 沈彦俊, 程昌秀, 李琰, 冯晓明, 刘焱序. 黄河流域人地系统耦合机理与优化调控. 中国科学基金, 2021, 35(4): 504-509.
- [9] Li T T, Zhang Q, Singh V P, Zhao J Q, Song J B, Sun S, Wang G, Shen Z X, Wu W H. Identification of degradation areas of ecological environment and degradation intensity assessment in the Yellow River Basin. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 922013.
- [10] 张鹏岩,李颜颜,康国华,孙东琪,卢谦成,周志民.黄河流域县域经济密度测算及空间分异研究.中国人口·资源与环境,2017,27 (8):128-135.
- [11] 李梦程, 王成新, 刘海猛, 王瑞莉, 于尚坤. 黄河流域城市发展质量评价与空间联系网络特征. 经济地理, 2021, 41(12): 84-93.
- [12] Zhao Q Y, Tian G L, Jing X D, Hu H. Impact of economic development and environmental regulations on greywater footprint loads in the Yellow River Basin in China. Ecological Indicators, 2023, 154: 110586.
- [13] 王浩, 贾仰文, 王建华, 秦大庸, 周祖昊, 仇亚琴, 严登华. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探. 自然资源学报, 2005, 20 (2): 157-162.
- [14] Yang M H, Gao X D, Siddique K H M, Wu P T, Zhao X N. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive coercing relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years. The Science of the Total Environment, 2023, 858(Pt 1): 159757.
- [15] 何慧娟,王钊,董金芳,王娟,邹继业.陕西黄河流域植被变化与城镇化协同权衡关系研究——基于卫星遥感数据.生态学报,2022,42
 (9):3536-3545.
- [16] 王紫荆,徐梦珍,胡宏昌,张向萍. 1982—2020 年黄河流域植被变化特征及驱动因素.水科学进展, 2023, 34(4): 499-509.
- [17] Zhang P P, Li X, Yu Y. Relationship between ecosystem services and farmers' well-being in the Yellow River Wetland Nature Reserve of China. Ecological Indicators, 2023, 146: 109810.
- [18] 李达,林龙圳,林震,张绍文,安黎哲.黄河流域生态保护和高质量发展的 EKC 检验. 生态学报, 2021, 41(10): 3965-3974.
- [19] 李小建, 文玉钊, 李元征, 杨慧敏. 黄河流域高质量发展:人地协调与空间协调. 经济地理, 2020, 40(4): 1-10.
- [20] 张卓群,王菡,单菁菁.黄河流域城市人与自然耦合协调状况及影响因素.城市问题,2022(12):19-29.
- [21] 赵建吉,刘岩,朱亚坤,秦胜利,王艳华,苗长虹.黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素.资源科学,2020,42 (1):159-171.
- [22] 李思雅,梁伟,吕一河,纪秋磊,严建武,兰志洋.黄河流域经济发展与生态环境压力的脱钩关系及其驱动效应分析.生态学报,2023, 43(13):5417-5431.
- [23] 李汝资,白昳,周云南,黄淑琪,晏振宁,李英姿,赵宏波.黄河流域水资源利用与经济增长脱钩及影响因素分解.地理科学,2023,43 (1):110-118.
- [24] 马维兢,张闻顺,李程祎,寇敬雯,王梅梅,薛冰.黄河流域经济规模与水资源边际效益异速增长时空特征及驱动因素.自然资源学报, 2023,38(12):3116-3134.
- [25] 左其亭, 张志卓, 马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(10): 29-38.
- [26] Chen Y P, Fu B J, Zhao Y, Wang K B, Zhao M M, Ma J F, Wu J H, Xu C, Liu W G, Wang H. Sustainable development in the Yellow River Basin: issues and strategies. Journal of Cleaner Production, 2020, 263: 121223.
- [27] Zhang Y S, Lu X, Liu B Y, Wu D T, Fu G, Zhao Y T, Sun P L. Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: a case study in the Yellow River Basin. The Science of the Total Environment, 2021, 766: 142480.

- [28] 陈美景,王庆日,白中科,谢立军,张冰松,郝森.黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响.生态学报, 2023,43(22):9459-9470.
- [29] 赵宏波,谷天顺,孙东琪,苗长虹."三生"功能视角下黄河流域城市人居环境动态演变与机制.地理学报,2023,78(12):2973-2999.
- [30] 高国力, 贾若祥, 王继源, 窦红涛. 黄河流域生态保护和高质量发展的重要进展、综合评价及主要导向. 兰州大学学报: 社会科学版, 2022, 50(2): 35-46.
- [31] 宁瑶,刘雅莉,杜剑卿,杨雅茜,王艳芬.黄河流域可持续发展评估及协同发展策略.生态学报,2022,42(3):990-1001.
- [32] Liu H M, Xing L, Wang C X, Zhang H Y. Sustainability assessment of coupled human and natural systems from the perspective of the supply and demand of ecosystem services. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 1025787.
- [33] 杨宇,李小云,董雯,洪辉,何则,金凤君,刘毅.中国人地关系综合评价的理论模型与实证.地理学报,2019,74(6):1063-1078.
- [34] 刘海猛,石培基,杨雪梅,张胜武,韩梅芳,陈莉.人水系统的自组织演化模拟与实证.自然资源学报,2014,29(4):709-718.
- [35] 方创琳. 黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展. 经济地理, 2020, 40(6): 1-8.
- [36] Venter O, Sanderson E W, Magrach A, Allan J R, Beher J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Sixteen years of change in the global terrestrial human footprint and implications for biodiversity conservation. Nature Communications, 2016, 7: 12558.
- [37] Mu H W, Li X C, Wen Y N, Huang J X, Du P J, Su W, Miao S X, Geng M Q. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. Scientific Data, 2022, 9: 176.
- [38] Meng Z Q, Dong J W, Ellis E C, Metternicht G, Qin Y W, Song X P, Löfqvist S, Garrett R D, Jia X P, Xiao X M. Post—2020 biodiversity framework challenged by cropland expansion in protected areas. Nature Sustainability, 2023, 6: 758-768.
- [39] Liu H M, Cheng Y, Liu Z F, Li Q R, Zhang H Y, Wei W. Conflict or coordination? the spatiotemporal relationship between humans and nature on the Qinghai-Tibet Plateau. Earth's Future, 2023, 11(9): e2022EF003452.
- [40] Tang J, Zhou L, Dang X, Hu F, Yuan B, Yuan Z, Wei L. Impacts and predictions of urban expansion on habitat quality in the densely populated areas: A case study of the Yellow River Basin, China. Ecological Indicators, 2023, 151: 110320.
- [41] Xu D, Yang F, Yu L, Zhou Y Y, Li H X, Ma J J, Huang J C, Wei J, Xu Y, Zhang C, Cheng J. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128948.
- [42] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [43] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.
- [44] Kendall M. Rank Correlation Methods, Charles Griffin, London M. London: Charless Griffin, 1975.
- [45] Liu H M, Liu J, Li M C, Gou P, Cheng Y. Assessing the evolution of PM_{2.5} and related health impacts resulting from air quality policies in China. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 93: 106727.
- [46] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis, 1992, 24(3): 189-206.
- [47] 林子琦,温仲明,刘洋洋,姚宏斌,周荣磊,任涵玉,袁浏欢.基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因分析.生态学报,2024, 44(1):377-391.
- [48] Panwar M, Agarwal A, Devadas V. Analyzing land surface temperature trends using non-parametric approach: a case of Delhi, India. Urban Climate, 2018, 24: 19-25.
- [49] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. 生态学报, 2013, 33 (24):7798-7806.
- [50] Grimm N B, Chapin F S III, Bierwagen B, Gonzalez P, Groffman P M, Luo Y Q, Melton F, Nadelhoffer K, Pairis A, Raymond P A, Schimel J, Williamson C E. The impacts of climate change on ecosystem structure and function. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(9): 474-482.
- [51] Zuo Y F, Li Y H, He K N, Wen Y S. Temporal and spatial variation characteristics of vegetation coverage and quantitative analysis of its potential driving forces in the Qilian Mountains, China, 2000-2020. Ecological Indicators, 2022, 143: 109429.
- [52] Zheng Z T, Zhu W Q, Zhang Y J. Seasonally and spatially varied controls of climatic factors on net primary productivity in alpine grasslands on the Tibetan Plateau. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00814.
- [53] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(3): 383-401.
- [54] Zhou T Y, Liu H M, Gou P, Xu, N. Conflict or Coordination? measuring the relationships between urbanization and vegetation cover in China. Ecological Indicators, 2023, 147: 109993.
- [55] 程昌秀, 沈石, 李强坤. 黄河流域人地系统研究的大数据支撑与方法探索. 中国科学基金, 2021, 35(4): 529-536.
- [56] 汪芳, 安黎哲, 党安荣, 韩建业, 苗长虹, 王静, 张广汉, 赵勇. 黄河流域人地耦合与可持续人居环境. 地理研究, 2020, 39(8): 1707-1724.
- [57] 刘海猛,方创琳,李咏红.城镇化与生态环境"耦合魔方"的基本概念及框架.地理学报,2019,74(8):1489-1507.