

引用格式: 万世龙, 杨海楠, 马丽, 等. 黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 505–523. [Wan S L, Yang H N, Ma L, et al. Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization in the Yellow River Basin urban agglomeration[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 505–523.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.06

# 黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化 权衡协同关系

万世龙<sup>1,3</sup>, 杨海楠<sup>1,4</sup>, 马丽<sup>2</sup>, 叶露锋<sup>1,3</sup>, 张子龙<sup>1,3,4</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 兰州大学黄河流域绿色发展研究院, 兰州 730000; 4. 兰州大学碳达峰碳中和研究院, 兰州 730000)

**摘要:**【目的】水生态系统服务与城镇化的关系关乎区域可持续发展, 黄河流域水生态问题突出, 厘清水生态系统服务与城镇化权衡协同关系及其影响因素, 将有助于制定区域发展策略。【方法】本文运用InVEST模型在县域尺度分析了2000—2020年黄河流域城市群水生态系统服务的空间格局, 从人口、土地和经济3个维度分析了城镇化的时空变化, 使用双变量自相关、Spearman相关系数和差异划分法定量分析了水生态系统服务与城镇化的权衡协同关系, 最后利用GTWR模型揭示了生态和社会因子对权衡协同关系的影响。【结果】①黄河流域城市群水生态系统服务以粮食生产与水土保持服务为主, 且得到显著提升; 城镇化水平不断提高, 县(区)间的差异不断缩小。②水生态系统服务与城镇化之间的空间关系以“低-低”“高-低”类型为主, 两者在全局上呈现权衡关系; 在局部则以表现协同关系的县(区)为主, 但呈权衡关系的县(区)数量逐渐增多, 且主要分布在黄河几字弯都市圈西北部、关中原城市群中部和山东半岛城市群东部。③降水、以植被恢复为主的生态措施、土地利用强度和区位因子对两者权衡协同关系主要呈正影响, 而温度、海拔、地形和经济发展水平因子则相反。海拔和地形因子对二者权衡协同关系影响强度最强, 其次为降水因子, 其余因子影响强度较弱。【结论】因此, 需针对水生态系统服务功能与城镇化空间失调的问题, 根据两者之间的权衡协同关系及其驱动因子的时空分异, 分区分类制定生态保护和政策。

**关键词:** 水生态系统服务; 城镇化; 权衡协同; 影响因素; 黄河流域城市群

DOI: 10.18402/resci.2024.03.06

## 1 引言

作为生态系统服务的重要组成部分——水生态系统服务是指水生态系统形成的维持人类赖以生存的自然环境条件和效用<sup>[1,2]</sup>, 维系着人与自然的可持续发展<sup>[3]</sup>, 包括产水服务、水土保持服务、水质净化服务、粮食生产服务等关键生态系统服务<sup>[4,5]</sup>。但由于人类活动的影响, 特别是土地利用和覆被变化、环境污染、生态破坏等, 导致部分区域水生态系统服务功能持续退化。而城镇作为人类活动最为集中的地理单元<sup>[6]</sup>, 其空间扩张所引起的土地利用

变化从根本上改变了地表生态系统的结构、过程和功能<sup>[7]</sup>, 并引发水生态退化、水资源短缺、水环境破坏等问题<sup>[5,8,9]</sup>, 致使水生态系统服务能力下降。未来地球计划、联合国《2030年可持续发展议程》等都强调城镇化要与资源环境承载力相适应与生态环境相协调<sup>[10]</sup>。通过促进城镇化与水资源承载力相适应、与水生态相协调, 来保证水生态系统服务功能良性运转, 能够实现城镇化的可持续发展。因此, 如何促进城镇化与水生态系统服务的协同发展是当前面临的最严峻挑战之一。

收稿日期: 2023-12-13 修订日期: 2024-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(72050001)。

作者简介: 万世龙, 男, 四川达州人, 硕士研究生, 研究方向为生态经济与区域可持续发展。E-mail: 220220949101@lzu.edu.cn

通讯作者: 张子龙, 男, 新疆伊犁人, 教授, 研究方向为经济地理与产业生态。E-mail: zhangzl@lzu.edu.cn

当前学者主要应用人地耦合理论和方法,围绕城镇化对生态系统服务的影响<sup>[11-13]</sup>、城镇化与生态系统服务的空间交互作用<sup>[14-16]</sup>、城镇化与生态系统服务关系评价<sup>[17]</sup>及其驱动因素探究<sup>[15,18]</sup>等主题,就生态系统服务与城镇化的耦合过程和机理开展研究工作。水是人类生存的基础,水生态系统服务与人类福祉非常密切,因此越来越受到学者关注。其中,产水服务、水土保持服务与水质净化服务成为研究最多的水生态系统服务类型<sup>[19-21]</sup>。部分学者从土地利用角度研究城镇化对水生态系统服务的影响,发现土地利用和气候变化的相互作用对产水服务产生抑制作用,对土壤保持服务产生促进作用<sup>[4]</sup>,特别是建设用地的增加会造成节水服务量的损失<sup>[22]</sup>。同时,也有学者从水资源保护、农业扩张等情景模拟未来土地利用变化对水生态系统服务的影响<sup>[19]</sup>。现有的直接关于水生态系统服务与城镇化关系的研究表明,城市扩张对水生态系统服务具有显著的负向影响<sup>[21]</sup>,城市扩张所导致的不透水面面积增加使得地表水文形态和地下水补给发生变化,进而降低了水生态系统服务的供给能力。并且,水生态系统服务和城镇化的耦合协调关系随着自然环境和社会经济条件的不同而呈现明显的异质性。土地利用强度、植被覆盖变化、城市扩张等被认为是影响二者耦合协调关系的主要因素<sup>[5]</sup>。现有研究大多强调城镇化对水生态系统服务的影响,已有的有关耦合协调关系的研究也多以城市为基本尺度单元来进行分析,较少关注两者之间的权衡协同关系,也鲜有研究从县域尺度开展相关研究,同时对影响这种权衡协同关系的因素及其影响机制的研究也不足。与耦合协调关系不同,权衡协同关系主要是强调在长时间尺度上,水生态系统服务与城镇化是“此消彼长”还是“同增共长”的关系。对两者权衡协同关系的研究,能够识别城镇化与水生态系统服务矛盾冲突区域,有助于在县域尺度上找到两者之间的平衡点。对影响这种权衡协同关系演变的因素及其影响机制的探究,有利于找准缓解人-水矛盾的关键因素,构建可持续的人-水关系,促进城镇化与水生态系统服务相协调。

黄河流域是中国重要的生态屏障、粮食基地和经济地带,在生态保护和高质量发展方面具有极为重要的战略地位<sup>[23]</sup>。然而,受到快速城镇化的影响,

加剧了水、能、粮与脆弱生态间的冲突,使得人与水关系恶化,水成为黄河流域区域发展面临的重大难题<sup>[24]</sup>。鉴于此,本文以黄河流域城市群为案例区,以县(区)为研究单元,在分析2000—2020年水生态系统服务与城镇化水平时空格局及空间关系的基础上,探讨了二者之间的权衡协同关系以及生态和社会因子对这种关系的异质性影响,旨在为黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化协同发展提供决策依据。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

黄河流域城市群涉及9省(区)、78个地级市和657个县(区),包含兰西城市群、黄河几字弯都市圈、关中平原城市群、中原城市群、山东半岛城市群,其中黄河几字弯都市圈包括宁夏沿黄、呼包鄂榆、山西中部城市群。该区域农牧业基础良好,煤炭、石油等能源资源富集,是人口和经济发展的重点地区,2020年人口约为3.03亿人,GDP总量约为18.15万亿元,城镇建设用地面积约为3.24万km<sup>2</sup>。同时,该区域分布有众多河湖湿地,是中国重要的水资源分布区和水源补给地。但随着经济社会发展和城镇化进程不断推进,黄河流域城市群水资源利用开发率高达80%,远超40%的生态水位线,加之气候变化影响,出现水资源短缺、水源污染、水沙关系不协调等资源与环境问题。

### 2.2 数据来源

研究数据包括土壤数据(土壤质地、土壤有机碳含量、土壤深度等)、土地利用数据、DEM数据、气候数据(月降雨量、月均温、月最高温与月最低温等)、植被数据(月最大NDVI数据)、夜间灯光数据和社会经济统计数据,并参照已有研究<sup>[25-27]</sup>,提取/计算相似地区水生态系统服务的参数。其中,土壤数据来自世界土壤数据库(<https://www.isric.org/>)、时空三极环境大数据平台(<http://poles.tpdc.ac.cn/>);土地利用数据、DEM数据来自中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);气候、植被数据来自国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>);夜间灯光数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);社会经济统计数据来自《中国人口普查资料》《中国统计年鉴》《中国县域统计年鉴》及各县(区)



2024年3月

国民经济与发展统计公报。

2.3 研究方法

2.3.1 水生态系统服务评价

黄河流域城市群水资源时空分布不均,城镇发展水资源约束性强。水土保持与水质净化服务在黄河流域城市群脆弱的生态中显得尤为重要,过度的人类干扰极易造成不可逆的生态破坏。本文从水来源、水消耗、水治理角度选择与水直接相关的产水、水土保持、水质净化和粮食生产4种服务,对黄河流域城市群水生态系统服务进行评价,计算方法如表1所示。

采用极值法对水生态系统服务进行标准化,并计算水生态系统服务指数,计算公式如下(其中水质净化服务用流域氮输出量来衡量,需进行正向化处理):

$$\begin{cases} ES'_{uv} = \frac{ES_{uv} - ES_u^{\min}}{ES_u^{\max} - ES_u^{\min}}, ES'_{wv} = \frac{ES_w^{\max} - ES_{wv}}{ES_w^{\max} - ES_w^{\min}} \\ WESI_v = \sum_{b=1}^4 ES'_{bv} \times WE_b \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $ES_{uv}$  和  $ES'_{uv}$  分别表示标准化前后第  $u$  种正向水生态系统服务在  $v$  县(区)处的服务量;  $ES_{wv}$  和  $ES'_{wv}$  分别表示标准化前后第  $w$  种负向水生态系统服务在  $v$  县(区)处的输出量;  $ES_u^{\max}$  和  $ES_u^{\min}$  分别表示第  $u$  种正向水生态系统服务最大值与最小值;  $ES_w^{\max}$  和  $ES_w^{\min}$  分别表示第  $w$  种负向水生态系统服务

最大值与最小值;  $WESI_v$  表示  $v$  县(区)的水生态系统服务指数;  $ES'_{bv}$  表示第  $b$  种水生态系统服务量在  $v$  县(区)的标准化值;  $WE_b$  表示第  $b$  种水生态系统服务量的权重,根据标准间相关性赋权法(CRITIC)计算得到,最后  $WY$ 、 $SC$ 、 $ALV$  以及  $FP$  权重分别为 0.130、0.244、0.216 以及 0.410。

2.3.2 城镇化水平评价

城镇化是一个集聚扩张的过程,人口集聚、城镇建设用地扩张和经济增长是城镇化的主要特征<sup>[31,32]</sup>。人口增长和经济发展为城镇化奠定了基础,城镇建设用地扩张则为城镇化提供了空间承载<sup>[33]</sup>。鉴于城镇化一般通过人口集聚、土地利用和经济生产对黄河流域城市群水生态环境产生影响,参考 Bi 等<sup>[5]</sup>、Liu 等<sup>[9]</sup>、Wang 等<sup>[13]</sup>、Ouyang 等<sup>[34]</sup> 的研究成果,从人口、土地和经济 3 个维度,构建指标体系来衡量城镇化水平(表 2)。采用极值法对指标体系的各项指标进行标准化,并利用加权平均法计算城镇化水平指数,计算公式如下:

$$\begin{cases} UR'_{cv} = \frac{UR_{cv} - UR_c^{\min}}{UR_c^{\max} - UR_c^{\min}} \\ URI_v = \sum_{c=1}^3 UR'_{cv} \times WU_c \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $UR_{cv}$  和  $UR'_{cv}$  分别表示第  $c$  种城镇化指标在  $v$  县(区)标准化前后的城镇化指标;  $UR_c^{\max}$  和  $UR_c^{\min}$  分别表示第  $c$  种城镇化指标的最大与最小值;  $URI_v$  表

表1 水生态系统服务评价方法

Table 1 Evaluation methods for water ecosystem services

类型	模型	计算方法	衡量指标	单位
产水服务	生态系统服务与权衡的综合评估(InVEST)模型 <sup>[28]</sup>	$WY = (1 - \frac{AET}{Pr}) \times Pr$ 式中: $WY$ 表示产水服务量,即降雨量减去实际蒸散量后的剩余量; $Pr$ 表示降雨量; $AET$ 表示实际蒸散量。	$WY$	$m^3$
水土保持服务	修正通用土壤流失(RUSLE)方程 <sup>[29]</sup>	$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ 式中: $SC$ 表示土壤保持服务量,即土壤潜在侵蚀量减去实际侵蚀量后的截留量; $R$ 表示降雨侵蚀力因子; $K$ 表示土壤可蚀性因子; $LS$ 表示坡度坡长因子; $C$ 表示植被覆盖因子; $P$ 表示水土保持措施因子。	$SC$	$t$
水质净化服务	InVEST 模型 <sup>[27]</sup>	$ALV_i = pol_i \times HSS_i$ 式中: $ALV_i$ 表示栅格单元 $i$ 的调节后的氮输出量; $pol_i$ 表示栅格单元 $i$ 的输出系数; $HSS_i$ 表示栅格单元 $i$ 的水文敏感得分值。该模型根据年平均径流分析养分的空间迁移,以评估生态系统的水净化能力,较低的氮输出量,意味着较好的水质净化服务。	$ALV$	$t$
粮食生产服务	经验模型 <sup>[30]</sup>	$FP_{nj} = a \times \frac{NDVI_{nj}}{NDVIS_{nj}} \times FP_{nj}$ , $a = \begin{cases} 0, & i \text{ 为非耕地栅格} \\ 1, & i \text{ 为耕地栅格} \end{cases}$ 式中: $FP_{nj}$ 表示第 $j$ 城市群的 $i$ 栅格的粮食产量; $NDVI_{nj}$ 表示第 $j$ 城市群的 $i$ 栅格的年最大 NDVI 值; $NDVIS_{nj}$ 表示第 $j$ 城市群内耕地年最大 NDVI 值总和; $FP_{nj}$ 表示第 $j$ 城市群的粮食产量; $n$ 表示年份; $a$ 表示耕地判定系数。	$FP$	$t$

表2 城镇化水平评价指标体系

Table 2 Evaluation indicator system of urbanization level

类别	指标	单位	描述	权重
人口城镇化(PUR)	城镇规模	人	城镇常住人口总数	0.080
	城镇化率	%	城镇常住人口数占常住人口总数的比例	0.235
土地城镇化(LUR)	城镇建设	%	建设用地面积占行政区总面积比例	0.184
	用地占比			
经济城镇化(EUR)	GDP密度	万元/km <sup>2</sup>	GDP除以行政区面积	0.343
	人均GDP	万元/人	GDP除以常住人口总数	0.158

示 $v$ 县(区)的城镇化水平指数; $WU_c$ 表示第 $c$ 种城镇化指标的权重。利用CRITIC方法确定权重。

### 2.3.3 CRITIC赋权法

CRITIC方法在考虑数据波动前提下结合指标间相关性进行指标权重计算,以减小极端值影响,并用标准差来反映对比强度,用相关系数来刻画冲突性<sup>[35]</sup>,本文用该方法来确定各水生态服务和城镇化指标的权重。计算公式如下:

$$W_d = \frac{S_d \sum_{k=1}^m (1 - R_{kd})}{\sum_{d=1}^m (1 - R_{kd})} \quad (3)$$

式中: $W_d$ 表示 $d$ 特征的权重; $R_{kd}$ 表示 $d$ 特征与 $k$ 特征的相关系数; $S_d$ 表示 $d$ 特征的类间标准差。

### 2.3.4 水生态系统服务与城镇化指数等级划分

自然断点法在等级划分方面具有显著优势,它能使等级内部相似性最大,而等级间相异性最大,同时兼顾各要素分布范围和数量。为进一步反映水生态系统服务、城镇化水平的时空差异,本文运用自然断点法对4类生态系统服务、3类城镇化指数和城镇化水平指数进行等级划分,在对比多个等级划分结果后,最终划分6个等级,即高、较高、中高、中低、较低、低等级。

### 2.3.5 水生态系统服务与城镇化空间关系

采用局部双变量 $I$ 来识别水生态系统服务与城镇化之间的空间分布关系<sup>[34]</sup>,计算公式如下:

$$I_v = Z_v \sum_{q=1}^t W_{vq} Z_q \quad (4)$$

式中: $I_v$ 表示第 $v$ 个县(区)双变量局部空间自相关系数; $t$ 为研究区的县(区)总数量; $Z_v$ 和 $Z_q$ 分别表示第 $v$ 个县(区)与第 $q$ 个县(区)的方差标准化值; $W_{vq}$ 表示空间权重矩阵。基于 $I_v$ 可形成LISA(Local Indications of Spatial Association)分布图,能够

呈现水生态系统服务与城镇化空间匹配模式。依据水生态系统服务与城镇化的空间关系将LISA分布图划分为4类,分别为“高-高”(水生态系统服务供给充足,城镇化水平较高)、“低-高”(水生态系统服务供给不足,但城镇化水平较高)、“低-低”(水生态系统服务供给不足,城镇化水平较低)、“高-低”(水生态系统服务供给充足,城镇化水平较低)。

### 2.3.6 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系

#### (1) 双变量全局自相关系数

采用全局双变量 $G-I$ 研究水生态系统服务与城镇化之间的空间相关性,计算公式如下:

$$G-I = \frac{\sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^l W_{pq} (WESI_p - \overline{WESI})(URI_q - \overline{URI})}{S^2 \sum_{p=1}^l \sum_{q=1}^l W_{pq}} \quad (5)$$

式中: $G-I$ 表示双变量全局空间自相关系数; $WESI_p$ 和 $URI_q$ 分别表示第 $p$ 个县(区)的水生态系统服务指数与第 $q$ 个县(区)的城镇化水平指数; $\overline{WESI}$ 和 $\overline{URI}$ 分别表示水生态系统服务指数与城镇化水平指数的平均值; $S^2$ 为所有样本的方差。

#### (2) Spearman相关系数

相关性分析在权衡协同研究中被广泛应用<sup>[36,37]</sup>,计算水生态系统服务指数与城镇化水平指数之间的Spearman相关系数,根据相关系数的正负以及大小关系衡量全局的权衡协同关系,计算公式如下:

$$RC = \frac{\sum_{v=1}^t (WESI_v - \overline{WESI})(URI_v - \overline{URI})}{\sqrt{\sum_{v=1}^t (WESI_v - \overline{WESI})^2 \sum_{v=1}^t (URI_v - \overline{URI})^2}} \quad (6)$$

式中: $RC$ 表示相关系数; $WESI_v$ 和 $URI_v$ 分别表示 $v$ 县(区)的水生态系统服务指数和城镇化水平指数; $\overline{WESI}$ 和 $\overline{URI}$ 分别表示水生态系统服务指数和城镇化水平指数的平均值。 $RC$ 为正表示水生态系统服务与城镇化之间为协同关系,反之则为权衡关系,为0则无相关关系, $RC$ 的绝对值越大则表示权衡或协同程度越大<sup>[38]</sup>。

#### (3) 权衡与协同指数(ST)

为了更好地探究水生态系统服务与城镇化之间权衡协同关系的空间异质性,参考Zhao等<sup>[39]</sup>、Shao等<sup>[40]</sup>、Xue等<sup>[41]</sup>的研究,采用差异划分来计算ST指数。该方法本质上是衡量水生态系统服务与城镇化之间“消长”关系是否在特定时期发生变化。

2024年3月

如果  $ST$  为正,表示二者沿着同一方向发生变化,表明二者处于协同关系,否则,处于权衡关系,而绝对值的大小直接表示协同或权衡的强度。

$$ST_v = \frac{WESI_{vt1} - WESI_{vt0}}{URI_{vt1} - URI_{vt0}} \quad (7)$$

式中:  $ST_v$  表示  $v$  县(区)的权衡协同指数;  $t_0$  表示起始年份;  $t_1$  表示终止年份。

### 2.3.7 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响因素

#### (1) 时空地理加权回归模型(GTWR)

GTWR 模型通过将时间效应纳入地理加权回归(GWR)模型,在加权矩阵中集成了时间和空间信息,可同时处理数据中的时间和空间非平稳性<sup>[42,43]</sup>,实现对地理现象时空分异的解释。GTWR 模型已经被广泛应用在聚落<sup>[44]</sup>、土地利用碳排放<sup>[45]</sup>、资源分布<sup>[46]</sup>、环境污染<sup>[47]</sup>等格局演变的驱动因素研究中。与 GWR 模型类似,GTWR 模型的局部回归系数( $STS$ )基于局部加权最小二乘法估计,计算式如下:

$$STS_v = \beta_0(x_v, y_v, t_{v,0 \rightarrow 1}) + \sum_s \beta_s(x_v, y_v, t_{v,0 \rightarrow 1}) l_{vs} + \varepsilon_v \quad (8)$$

式中:  $\beta_0(x_v, y_v, t_{v,0 \rightarrow 1})$  表示  $v$  县(区)处的回归系数常数;  $\beta_s(x_v, y_v, t_{v,0 \rightarrow 1})$  表示  $v$  县(区)的第  $s$  个回归系数;  $l_{vs}$  表示自变量  $l_s$  在  $v$  县(区)处的值;  $\varepsilon_v$  表示在  $v$  县(区)的残差。 $STS$  的正负代表影响方向,绝对值大小代表影响强度。

#### (2) 影响因子选取

水生态系统服务与城镇化的权衡协同关系主要受到自然环境变化与人类活动共同影响<sup>[48]</sup>,本文参考 Bi 等<sup>[5]</sup>、Tu 等<sup>[18]</sup>、Huang 等<sup>[36]</sup>、Zhao 等<sup>[39]</sup>、Shao 等<sup>[40]</sup>、Xue 等<sup>[41]</sup>的研究,结合黄河流域实际情况,将水生态系统服务与城镇化的权衡协同指数作为因变量,从生态和社会方面选择了8个影响因子作为自变量,构建水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响因子分析体系。生态因子是支持水生态系统服务与城镇化协同发展的基础,主要用来反映研究区自然本底状况。本文从气候角度选择了年均降雨量、年均温因子;从地形和地貌的角度选择了海拔、地形起伏度因子;从植被状况角度选择植被覆盖度因子。其中,气候因子表示气候变化对水生态系统服务与城镇化关系的影响。海拔和地形起伏影响水文循环,对水生态系统服务起着重要作用,

高海拔和较大的地形起伏往往成为城镇建设的约束条件。同时,长时间尺度植被覆盖变化能够反映以植被恢复为主的生态措施对水生态系统服务与城镇化关系的影响。社会因子方面,选择夜间灯光强度、土地利用强度、县(区)与省会城市的距离等3个因子。其中,夜间灯光强度与人口、经济分布密切相关,强度越高通常意味着经济发展水平越好<sup>[49]</sup>。土地利用强度反映了人类活动对土地利用格局的干扰程度<sup>[50]</sup>,通常会促进城镇化而对水生态系统服务起负作用。县(区)与省会城市距离表示区位条件,距离越近受到增长极带动可能性越大,通常城镇化水平越高<sup>[48]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 水生态系统服务时空格局

总体而言,2000—2020年间黄河流域城市群产水服务、水土保持服务、水质净化服务和粮食生产服务等4类水生态系统服务功能均得到了提升,其中前3类的空间异质性总体降低,而粮食生产服务的区域差异不断扩大(图1)。水生态系统服务时空变化情况如下:

(1) 产水服务。2000—2020年黄河流域城市群产水服务量总体呈增长趋势,产水服务量由2065.15亿  $m^3$  增加到2593.45亿  $m^3$ ,总体增幅为25.58%(图1a-1c),表明产水服务功能得到较大提升。其中,产水服务量增长最快的县(区)主要分布在鄂尔多斯台地和黄土高原西南部。就空间格局而言,研究期间产水服务量的变异系数从0.97缩小到0.90,虽然其区域差异呈现小幅缩小趋势,但南高北低的总体空间格局没有发生变化。其中,产水服务量处于中高、较高、高等级的县(区)数量有所增加,且主要分布在青藏高原东南缘、秦岭北部、华北平原南部以及山东半岛南部,这些区域主要为水源涵养区或降雨量较高的区域;产水服务量处于中低、较低、低等级的县(区)数量有所减少,且主要分布在鄂尔多斯高原以及晋中和晋南盆地,主要为植被相对稀疏、降雨量少或者人口密度大且耕地集中的区域。

(2) 水土保持服务。2000—2020年黄河流域城市群水土保持服务量总体呈增长趋势,水土保持服务量由1.74亿  $t$  增加到2.34亿  $t$ ,总体增幅34.93%(图1d-1f),表明水土保持服务功能得到较大提升。其中,水土保持服务量增长最快的县(区)主要



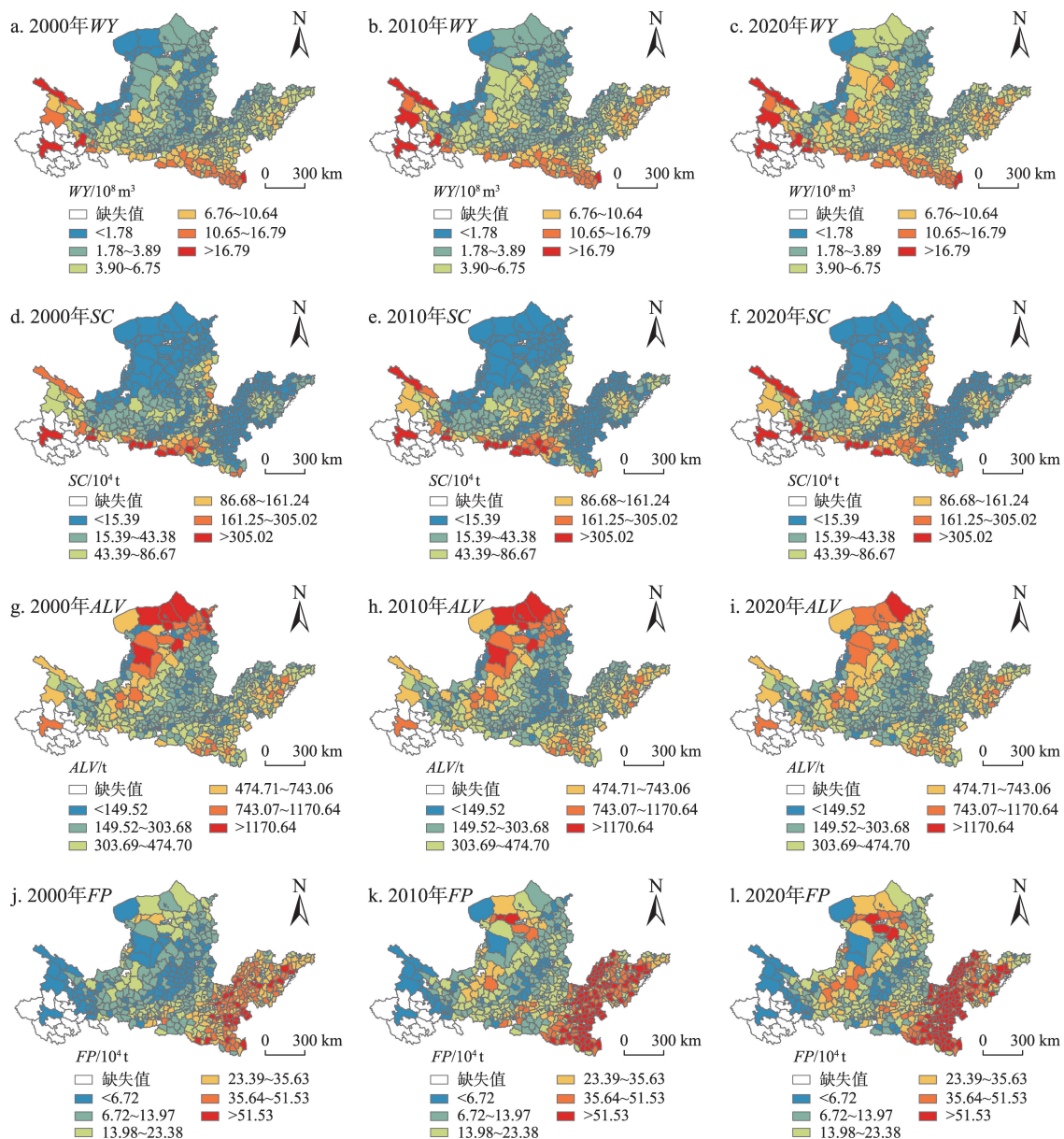


图1 2000、2010与2020年水生态系统服务时空分布格局

Figure 1 Spatial-temporal distribution patterns of water ecosystem services, 2000, 2010 and 2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作。底图边界无修改。

分布在黄土高原。就空间格局而言,研究期间水土保持服务量的变异系数从1.99先增加到2.01后缩小到1.68,区域差异先扩大后缩小,且始终呈现西南高西北、东南低的分布格局。其中,水土保持服务量处于高、较高等级的县(区)数量比较稳定,且主要分布在青藏高原东南缘、秦岭北部,这些区域具有较高的降雨量和较好的植被覆盖度;中高等级的县(区)数量明显增加,主要由较低和低等级的县(区)提升而来,且主要分布在黄土高原,该区

域实施了大范围的生态保护治理措施,水土保持服务功能显著增强;较低和低等级的县(区)数量减少,且主要分布在鄂尔多斯高原与华北平原,前者植被稀疏,水土保持能力较弱,后者地势平坦土壤潜在侵蚀量和实际侵蚀量较少。

(3)水质净化服务。2000—2020年黄河流域城市群氮输出量总体呈降低趋势,氮输出量由17.68万t下降到16.32万t,总体降幅7.67%(图1g—1i),说明黄河流域城市群水质净化服务功能得到提升。

2024年3月

就空间格局而言,研究期间氮输出量的变异系数从1.37缩小到1.26,虽然其区域差异小幅缩小,但西北高、东南次之、中间低的总体空间格局没有发生变化。高、较高等级的县(区)数量减少,且主要分布在鄂尔多斯高原;中高、中低等级的县(区)数量增加,主要由高、较高等级的县(区)降低而来,且主要分布在陕北高原、山东半岛;较低、低等级的县(区)数量较为稳定,主要分布在晋中、晋南盆地。

(4)粮食生产服务。2000—2020年黄河流域城市群粮食生产呈大幅增长趋势,粮食产量由1.10亿t增加到1.68亿t,总体增幅53.59%(图1j-1l),这说明粮食生产服务功能得到大幅提升。就空间格局而言,研究期间粮食产量的变异系数从0.87增加到0.95,区域差异呈现扩大趋势,但东南高西北低的总体空间格局没有发生变化。其中,粮食产量处于高、较高等级的县(区)数量有所增加,且主要分布在河套平原、华北平原、山东半岛,这些区域地势相对平坦且水资源较为丰富;中高和中低等级的县(区)数量增加,但分布较为离散;较低、低等级的县(区)主要分布在青藏高原东南部与黄土高原南部,这些区域海拔较高、积温不足或水土流失较为严重,土壤较为贫瘠。

### 3.2 城镇化水平时空格局

总体而言,2000—2020年黄河流域城市群人口城镇化、土地城镇化、经济城镇化以及总体城镇化水平均呈上升趋势,且区域差异均显著缩小(图2)。城镇化水平时空变化情况如下:

(1)人口城镇化。2000—2020年黄河流域城市群人口城镇化指数呈增长趋势,平均值由0.103增至0.204,增幅较大(图2a-2c)。就空间格局而言,研究期间人口城镇化指数的变异系数由0.838降低到0.340,区域差异显著缩小。人口城镇化指数处于高、较高和中高等级的县(区)数量大幅增多,且主要分布在山东半岛、中原城市群与黄河几字弯都市圈,这主要是由于这些区域的县(区)城镇基础设施和产业配套相对完善,吸引人口集聚的能力强;人口城镇化指数处于中低、较低和低等级的县(区)数量减少,且主要分布在兰西城市群和关中平原城市群西部,这主要是由于地形的限制,人口城镇化发展水平相对滞后。

(2)土地城镇化。2000—2020年黄河流域城市

群土地城镇化指数呈增长趋势,平均值由0.006增至0.012,增幅较大(图2d-2f)。就空间格局而言,研究期间土地城镇化指数的变异系数由3.042降低到2.011,区域差异显著缩小,但始终呈现东高西低的空间格局。其中,土地城镇化指数处于低等级的县(区)主要分布在兰西、关中城市群以及黄河几字弯都市圈西部,这主要是由于这些区域的县(区)产业结构层次偏低,一产占比较高,城镇规模较小;其余等级的县(区)主要分布在山东半岛、中原城市群以及黄河几字弯都市圈东部,这些区域的县(区)城镇规模较大,建设用地开发强度较高。

(3)经济城镇化。2000—2020年黄河流域城市群经济城镇化指数大幅增长,平均值由0.004增至0.047(图2g-2i)。就空间格局而言,研究期间经济城镇化指数变异系数由1.031降低到0.686,区域差异显著缩小,且全部县(区)经济城镇化水平显著提高,主要处于高和较高等级。而处于陕甘宁交界的县(区)因远离主要经济中心,受辐射带动作用较弱,经济城镇化水平始终相对滞后。

(4)城镇化水平。2000—2020年黄河流域城市群城镇化水平指数呈增长趋势,平均值由0.114增至0.264(图2j-2l)。就空间格局而言,研究期间城镇化水平指数变异系数由0.889降低到0.410,区域差异显著缩小。城镇化水平指数处于中高、较高与高等级的县(区)在研究区广泛分布,中低、较低与低等级的县(区)主要分布在兰西城市群东部与关中平原城市群西部,这主要是由于经济基础差,同时受自然条件和资源禀赋的制约明显。

### 3.3 水生态系统服务与城镇化空间关系

利用局部双变量自相关来探索水生态系统服务与城镇化之间的空间关系(图3),结果表明,2000—2020年黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化的空间分布关系在县域尺度上总体较为稳定,以“低-低”“高-低”类型为主,即“水生态系统服务供给不足,城镇化水平低”“水生态系统服务供给充足,城镇化水平低”两种类型的空间分布关系。相较于2000年,2020年呈现“低-低”“高-低”类型的县(区)数量小幅减少,“低-高”类型的县(区)数量小幅增加。“低-低”“低-高”类型县(区)主要分布在兰西城市群、黄河几字弯都市圈与关中平原城市群,“高-高”“高-低”类型县(区)主要分布在山东半



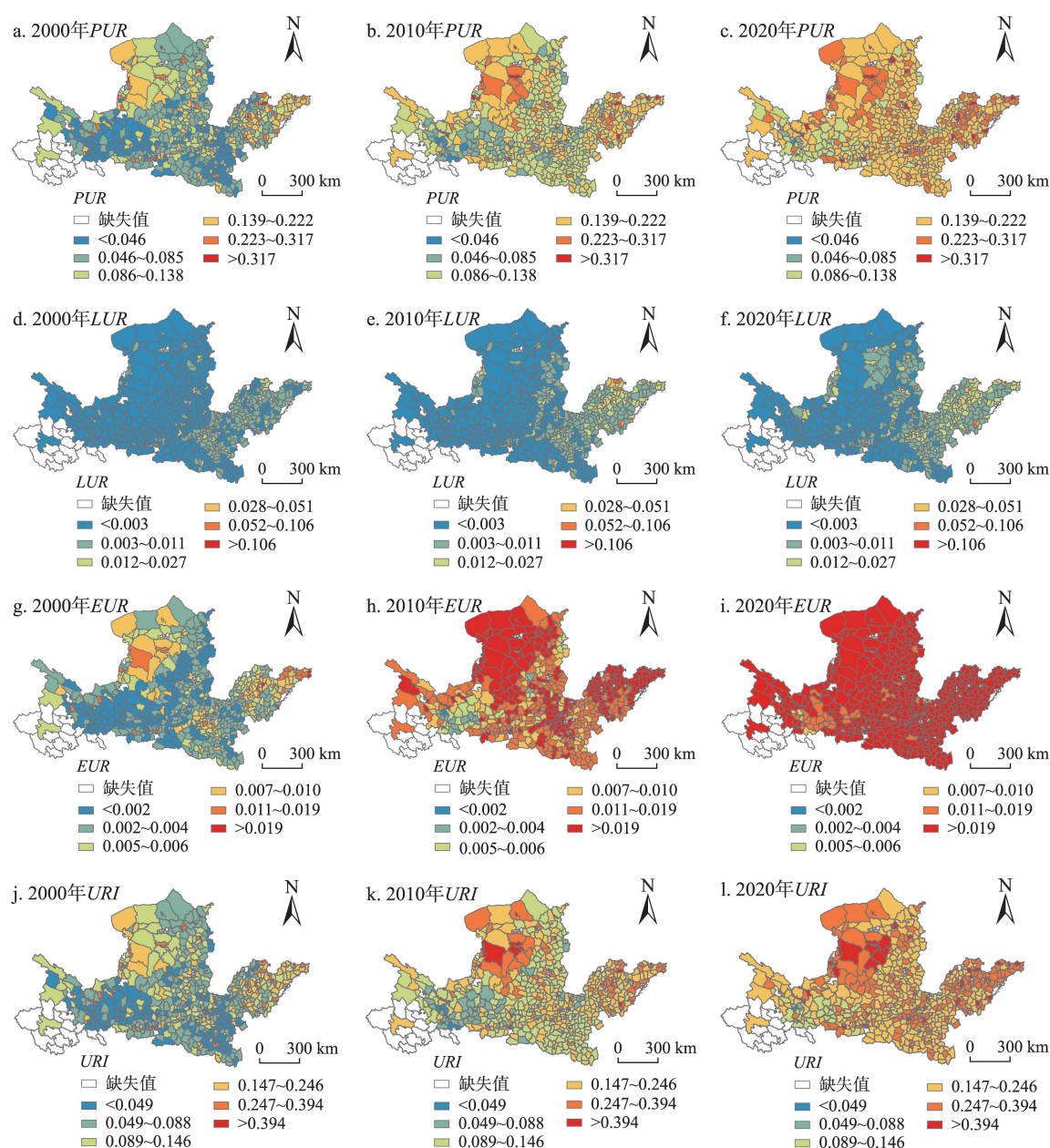


图2 2000、2010与2020年城镇化指数时空分布格局

Figure 2 Spatial-temporal distribution patterns of urbanization indicators, 2000, 2010 and 2020

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作,底图边界无修改。

岛、中原城市群。水资源量、水生态承载力以及城镇化发展水平在黄河流域城市群东南、西北方向上的空间差异造成了这种分布格局。

### 3.4 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系

从全局双变量自相关结果来看(表3),2000与2010年水生态系统服务与城镇化均呈现正的空间自相关性,二者在相邻区域之间具有一定的相似性,但2020年的空间自相关没有通过显著性检验。从Spearman相关系数来看,2000年、2010年与2020

年均呈现较弱的负相关,且两者的负相关性先缩小后扩大,表明从全局角度来看,黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化水平间表现出较弱的权衡关系,权衡关系先减弱后增强。从权衡协同指数来看(图4),2000—2010年,黄河流域城市群中表现出弱协同的县(区)数量最多,占比87.95%,在研究区广泛分布。弱权衡的县(区)数量次之,占比10.84%,主要分布在兰西城市群东南部与黄河几字弯都市圈东北、东南部。2010—2020年,表现为权



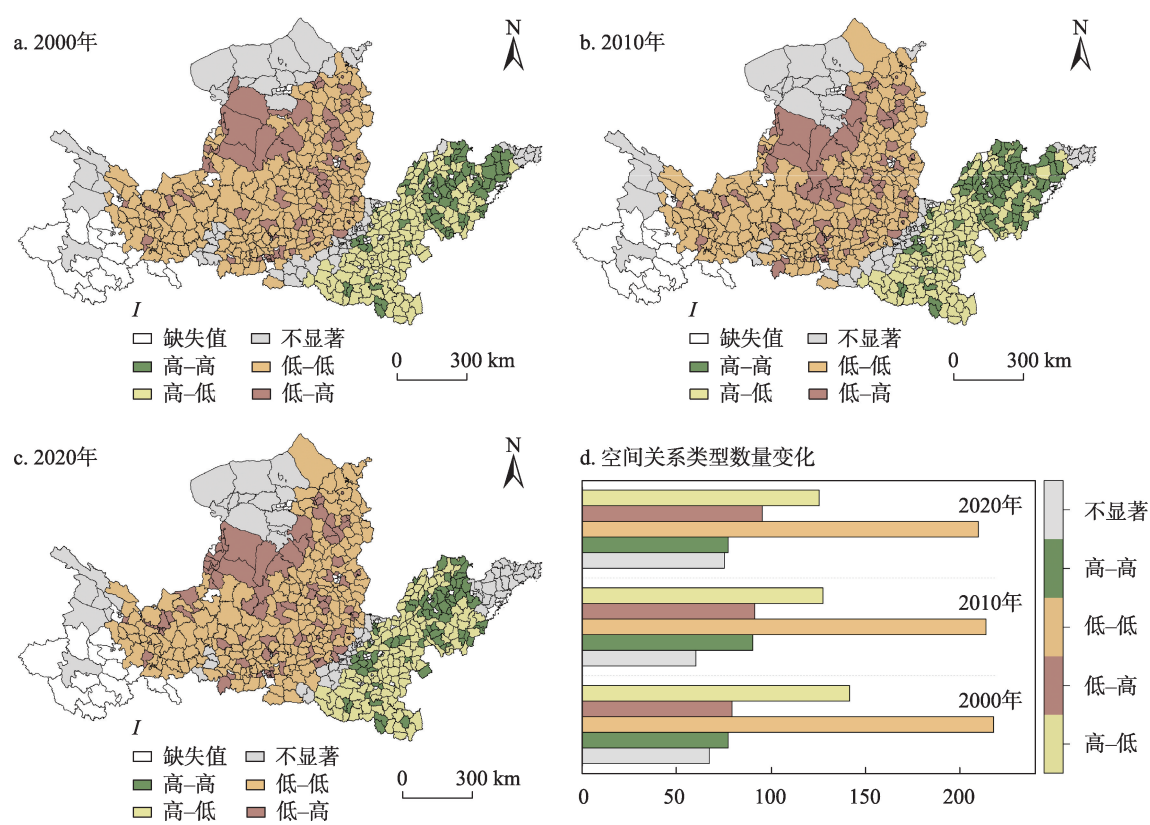


图3 2000、2010与2020年水生态系统服务与城镇化局部双变量自相关

Figure 3 Localized bivariate autocorrelation between water ecosystem services and urbanization, 2000, 2010 and 2020  
注:基于自然资源部标准地图服务网站GS (2019) 1822号 标准地图制作,底图边界无修改。

表3 2000、2010与2020年水生态系统服务与城镇化全局双变量自相关与Spearman相关系数

Table 3 Water ecosystem services and urbanization global bivariate autocorrelation and spearman correlation coefficients, 2000, 2010 and 2020					
年份	全局双变量自相关			spearman	
	G-I	Z	P	相关系数	P
2000	0.019	3.093	0.002	-0.377	0.000
2010	0.036	6.174	0.001	-0.330	0.000
2020	0.003	0.423	0.341	-0.362	0.000

衡关系的县(区)数量明显增加,从上一个阶段的68个增加到187个,主要分布在山东半岛城市群东南部、黄河几字弯都市群西北部以及关中平原城市群中部。从上、中、下游来看,在两个阶段中,上游地区数量稳定,但表现为权衡关系的县(区)分布位置从甘肃东南部变化到宁夏北部,主要原因是甘肃经济发展缓慢,而宁夏北部的银川、石嘴山等城市承接煤化工产业转移,水生态受到较大影响;中、下游表现为弱协同关系的县(区)数量明显减少,弱权衡与强权衡关系的县(区)数量增多。中、下游的中心

城市附近县(区)形成权衡集中区,这是由于这些县(区)开发强度相对较大,破坏了水生态环境。

3.5 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响因素

3.5.1 数据检验与模型比较

首先,对变量进行标准化处理,其次,进行空间自相关检验和多重共线性检验,确保所有变量具有显著的空间相关性且 $VIF$ 值小于5。再者,运行GWR、时间加权回归(TWR)、GTWR模型并对结果进行比较(表4),结果表明,GTWR模型相较GWR、TWR模型赤池信息量准则( $AICc$ )的值最小, $R^2$ 最大,说明GTWR模型更适合进行影响因素分析。

对GTWR模型计算结果进行检验,2000—2010年与2010—2020年残差的空间自相关不显著,且大部分分布在-2.50~2.50之间(图5),说明权衡协同指数与各影响因子之间的关系稳健,模型结果可靠。

3.5.2 影响因素的时空分异

整体而言,降水、植被等因子对黄河流域城市

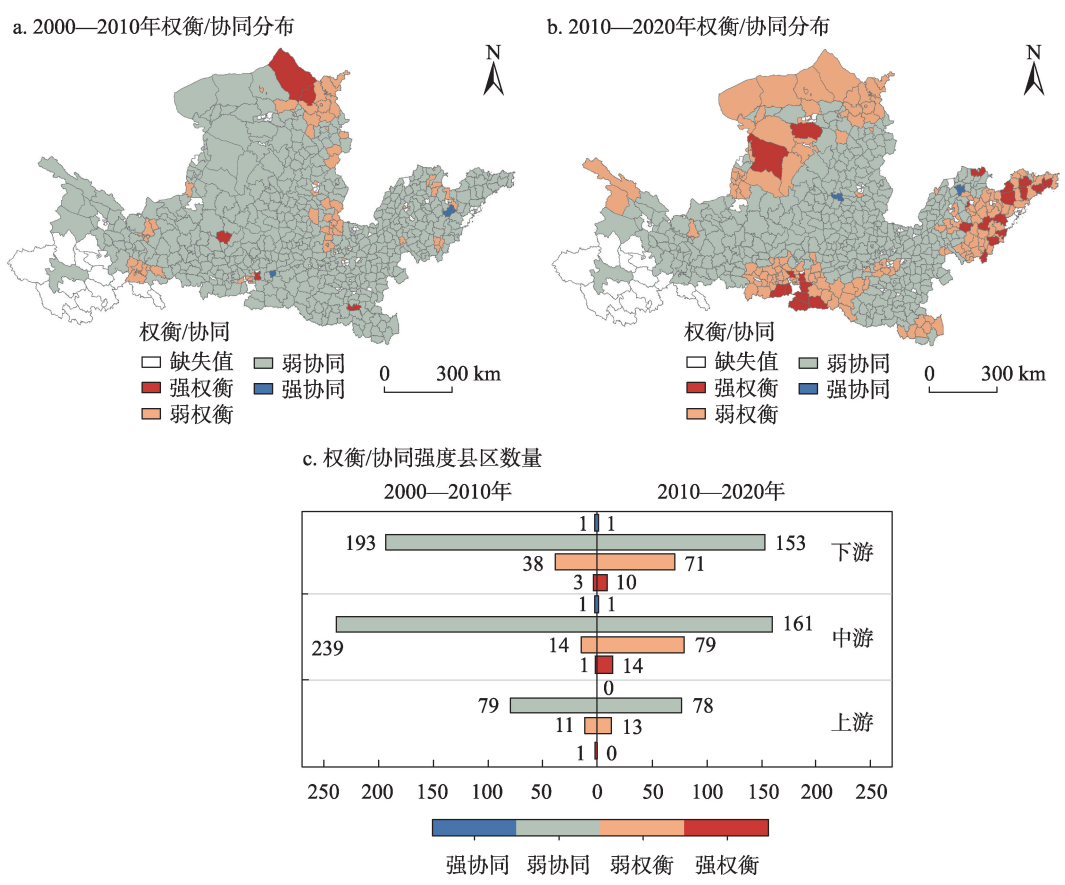


图4 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系

Figure 4 Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization  
注:基于自然资源部标准地图服务网站GS (2019) 1822 号标准地图制作,底图边界无修改。

表4 影响因素模型参数对比

Table 4 Comparison of impact factor model parameters

模型	$AIC_c$	$R^2$	调整后 $R^2$	$RSS$
GWR	3158.330	0.220	0.215	906.360
TWR	3214.980	0.098	0.092	1048.310
GTWR	3139.830	0.269	0.264	849.614

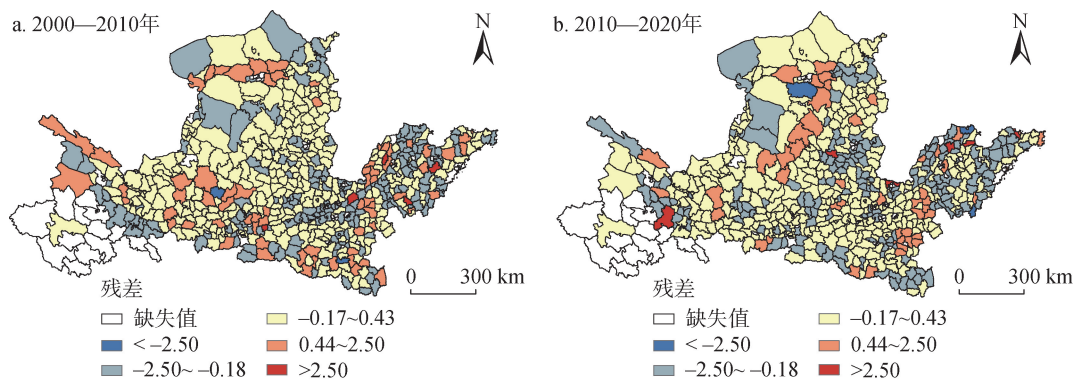


图5 GTWR模型残差分布图

Figure 5 Distribution of residual remains of geographical and temporal weighted regression (GTWR) model  
注:基于自然资源部标准地图服务网站GS (2019) 1822 号标准地图制作,底图边界无修改。

2024年3月

群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系主要产生正向促进作用;而温度、海拔等因子主要产生负向抑制作用。与此同时,各影响因子对二者的权衡协同关系在影响方向和影响强度上存在时空异质性。

### 3.5.2.1 生态因子影响分析

(1)降水因子。结果表明年降雨量对权衡协同关系的影响在大多数县(区)表现为正向促进作用,即:随着年降雨量的增加,权衡关系减弱,而协同关系增强(图6a、6b)。具体而言,在第一阶段(2000—2010年),年降雨量表现为正向促进作用的县(区)数量为558个,占比96.71%,其广泛分布在除黄河几字弯都市圈西部的其他地区;到第二阶段(2010—2020年),此类县(区)数量减少到525个,占比92.76%,分布在除黄河几字弯都市圈西部和中原城市群南部的其他地区。年降雨量在少数县(区)则表现出负向抑制作用,即:随着降雨量的增加,权衡关系增强,而协同关系减弱。具体而言,在第一阶段,年降雨量表现为负向抑制作用的县(区)数量为19个,仅占比3.29%,主要分布在黄河几字弯都市圈西部;到第二阶段,此类县(区)数量扩大到41个,仅占比7.24%,主要分布在除黄河几字弯都市圈西部和中原城市群南部。同时,年降雨量对权衡协同关系的影响强度逐渐增强,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.16增至第二阶段的0.23。并且正向作用在水资源相对充沛的山东半岛城市群以及兰西城市群西部的作用强度更强,原因在于山东半岛城市群城镇和产业用水需求大,降雨增加能够补充供水,缓解对水生态造成的压力。同时,兰西城市群西部分布大量河湖湿地,是重要水源涵养区,降雨量增加能更大程度提升水生态系统服务能力。

(2)温度因子。结果表明年均温对权衡协同关系的影响在大多数县(区)表现为负向抑制作用,即:随着年均温的升高,权衡关系增强,而协同关系减弱(图6c、6d)。具体而言,在第一阶段,年均温表现为负向抑制作用的县(区)数量为326个,占比57.60%,主要分布在山东半岛城市群与中原城市群;到第二阶段,此类县(区)数量扩大到454个,占比80.93%,广泛分布在除黄河几字弯都市圈中部和北部以及山东半岛城市群东部的其他地区。年均

温在少数县(区)表现为正向促进作用,即:随着年均温的增加,权衡关系减弱,而协同关系增强。具体而言,在第一阶段,年均温表现为正向促进作用的县(区)数量为240个,占比42.40%,主要分布在关中平原城市群、黄河几字弯都市圈和兰西城市群东部。第二阶段,此类县(区)数量减少到107个,占19.07%,其主要分布在黄河几字弯都市圈中部和北部以及山东半岛城市群东部。同时,年均温对权衡协同关系的影响强度略有减弱,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.12降低至第二阶段的0.11。负向作用在山东半岛城市群东部地区的作用更强,原因在于该地区粮食生产服务功能突出,随着温度升高,蒸发量上升,种植用水需求量增大,导致产水服务和粮食生产服务受到影响。

(3)海拔因子。结果表明海拔对权衡协同关系的影响在大多数县(区)表现负向抑制作用,即:随着海拔的升高,权衡关系增强,而协同关系减弱(图6e、6f)。具体而言,在第一阶段,海拔表现为负向抑制作用的县(区)数量为452个,占比78.61%,主要分布在山东半岛、中原城市群以及黄河几字弯都市群;到第二阶段,此类县(区)数量减少到327个,占比57.07%,主要分布在山东半岛城市群东部、中原城市群与黄河几字弯都市圈。这些区域海拔相对较低,相对比较适宜城镇发展,随着海拔升高,会抑制城镇化发展。海拔在少数县(区)表现正向促进作用,即:随着海拔的增加,权衡关系减弱,而协同关系增强。其中,在第一阶段,海拔表现为正向促进作用的县(区)数量为123个,占比31.39%,主要分布在关中平原城市群西部、黄河几字弯都市圈西南部以及兰西城市群。第二阶段,此类县(区)数量增加到246个,占42.93%,主要分布范围和第一阶段基本一致,但在山东半岛城市群形成新的分布区。这些区域海拔相对较高,城镇化水平相对较低,具有较大的上升潜力,同时海拔越高人类活动相对越少,水生态系统服务能力较强,更易促进二者的协同发展。同时,海拔对权衡协同关系的影响强度略有增强,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.51增至第二阶段的0.59。

(4)地形因子。结果表明地形起伏度对权衡协同关系的影响表现为负向抑制作用的县(区)数量不断增加(图6g、6h),从第一阶段的269个增加到第



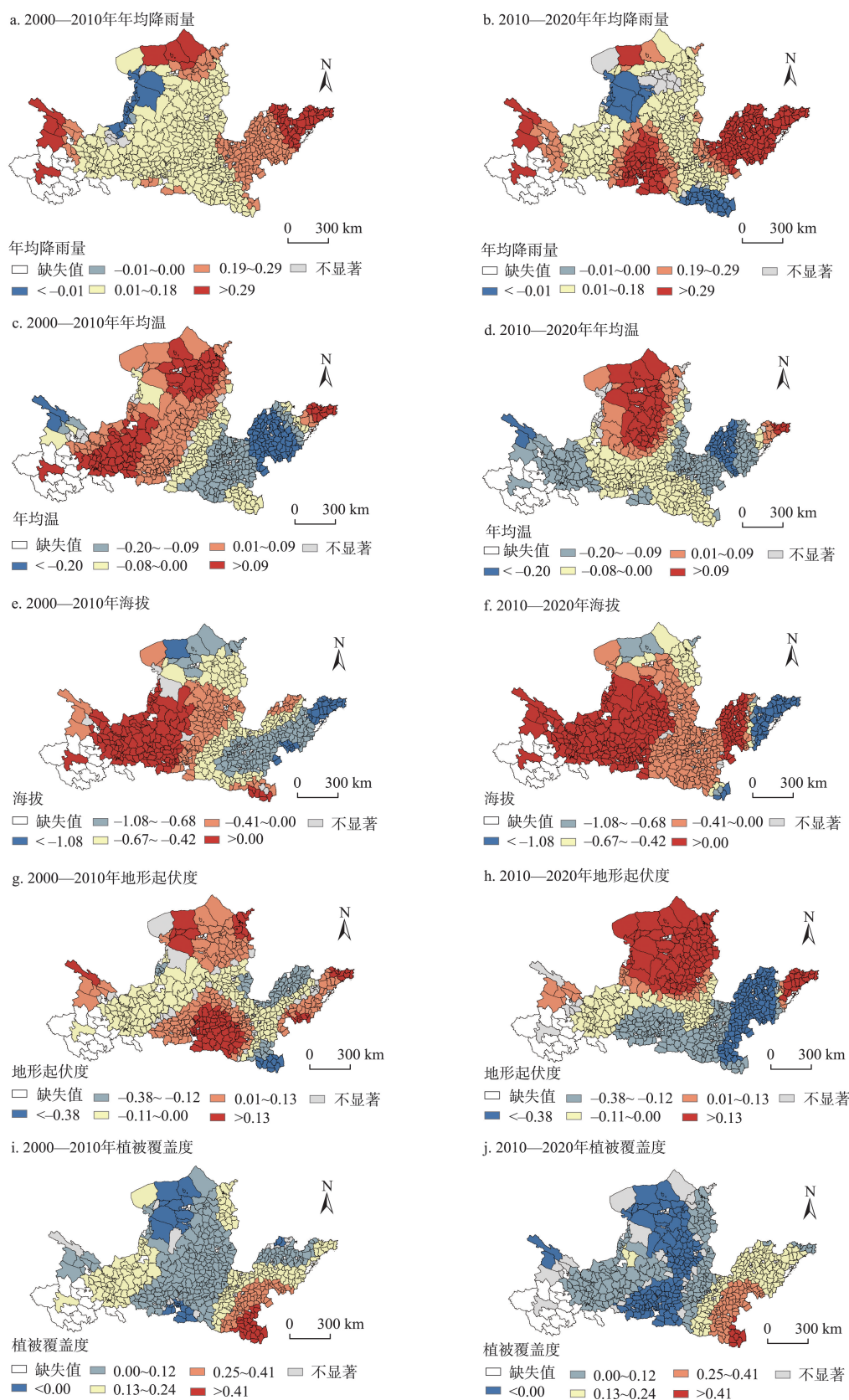


图6 水生态系统服务与城镇化权衡协同关系生态影响因素的时空分异

Figure 6 Spatiotemporal variability of ecological factors influencing the trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作。底图边界无修改。

2024年3月

二阶段的405个,主要分布在山东半岛城市群西部、中原城市群、关中平原城市群以及兰西城市群。这些区域人口分布和城镇建设相对密集,地形起伏度越大,权衡关系越强,而协同关系越弱。而表现为正向促进作用的县(区)数量从第一阶段282个减少到第二阶段的168个,主要分布在山东半岛城市群东部和黄河几字弯都市圈。在这些区域,地形起伏度越大,权衡关系越弱,而协同关系越强。同时,地形起伏度对权衡协同关系的影响强度大幅增强,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.11增加至第二阶段的0.35。

(5)植被因子。本文用植被覆盖度反映以植被恢复为主的生态措施对权衡协同关系的影响。结果表明这种影响在大多数县(区)表现正向促进作用,即:随着以植被恢复为主的生态措施的增加,权衡关系减弱,而协同关系增强(图6i、6j)。具体而言,在第一阶段,植被覆盖度表现为正向促进作用的县(区)数量为534个,占比94.01%,广泛分布在除关中平原城市群中部、黄河几字弯都市圈西北部以外的其他地区;到第二阶段(2010—2020年),县区数量减少到397个,占比71.92%,广泛分布在除关中平原城市群中部、黄河几字弯都市圈西北部和中部的其他地区。以植被恢复为主的生态措施的增加在少数县(区)表现出负向抑制作用,即:随着以植被恢复为主的生态措施的增加,权衡关系增加而协同关系减弱。具体而言,在第一阶段,表现为负向抑制作用的县(区)数量为34个,仅占比5.99%,主要分布在关中平原城市群中部、黄河几字弯都市圈西北部;到第二阶段,此类县(区)数量增加到155个,占比28.08%,主要分布在关中平原城市群中部、黄河几字弯都市圈西北部和中部。同时,以植被恢复为主的生态措施的影响强度逐渐减弱,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.15降低至第二阶段的0.13。

### 3.5.2.2 社会因子影响分析

(1)经济发展水平。本文利用夜间灯光强度来表征经济发展水平。结果表明夜间灯光强度对权衡协同关系表现为正向促进作用的县(区)数量不断增加,从第一阶段的25个增加到第二阶段的187个,主要分布在黄河几字弯都市圈西部和北部、兰西城市群、中原城市群西南部(图7a、7b)。在这些

区域,随着夜间灯光强度增强,经济发展水平不断提升,权衡关系减弱而协同关系增强。而表现为负向抑制作用的县(区)数量在不断减少,从第一阶段的513个减少到第二阶段的351个,集中分布在山东半岛城市群、黄河几字弯都市圈东南部、关中平原城市群。在这些区域,经济发展水平的提升,会强化权衡关系,弱化协同关系。同时,夜间灯光强度对权衡协同关系的影响强度略有降低,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.13降低至第二阶段的0.10。以上结果主要原因是随着经济水平提高,城镇化率快速增加,经济反哺生态力度不断加大,因此水生态系统服务与城镇化不断协同发展,尤其在低城镇化地区,经济与生态协同促进作用更显著。

(2)土地利用强度。结果显示土地利用强度对权衡协同关系主要表现为正向促进作用,即土地利用强度的增大会强化协同关系,弱化权衡关系(图7c、7d)。具体而言,在第一阶段,土地利用强度表现为正向促进作用的县(区)数量为389个,占比69.22%,主要分布在除山东半岛城市群东部、中原城市群南部以及黄河几字弯都市圈西南部、中东部以外的其他地区;到第二阶段,表现为正向促进作用的县(区)数量增加到399个,占比71.12%,主要分布在除山东半岛城市群东部、中原城市群南部以及黄河几字弯都市圈东北部以外的其他地区。同时,土地利用强度对权衡协同关系的影响强度有所降低,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.11降低至第二阶段的0.06。主要原因在于土地利用强度在城镇发展较早或资源开发型城市的负向抑制作用显著,而研究区大部分县(区)城镇化水平低,表现出较高的潜力,适当增强土地利用强度能促进城镇化发展。

(3)区位因子。本文用县(区)与省会城市距离表征区位优势。结果显示县(区)与省会城市距离对权衡协同关系主要表现为正向促进作用的县(区)数量从第一阶段的243个增加到第二阶段的392个,主要分布在除山东半岛东部、黄河几字弯都市圈中部和东北部以外的其他地区(图7e、7f)。而表现为负向抑制作用的县(区)从第一阶段的333个减少到第二阶段的181个,主要分布在山东半岛东部、黄河几字弯都市圈中部和东北部。这主要是因

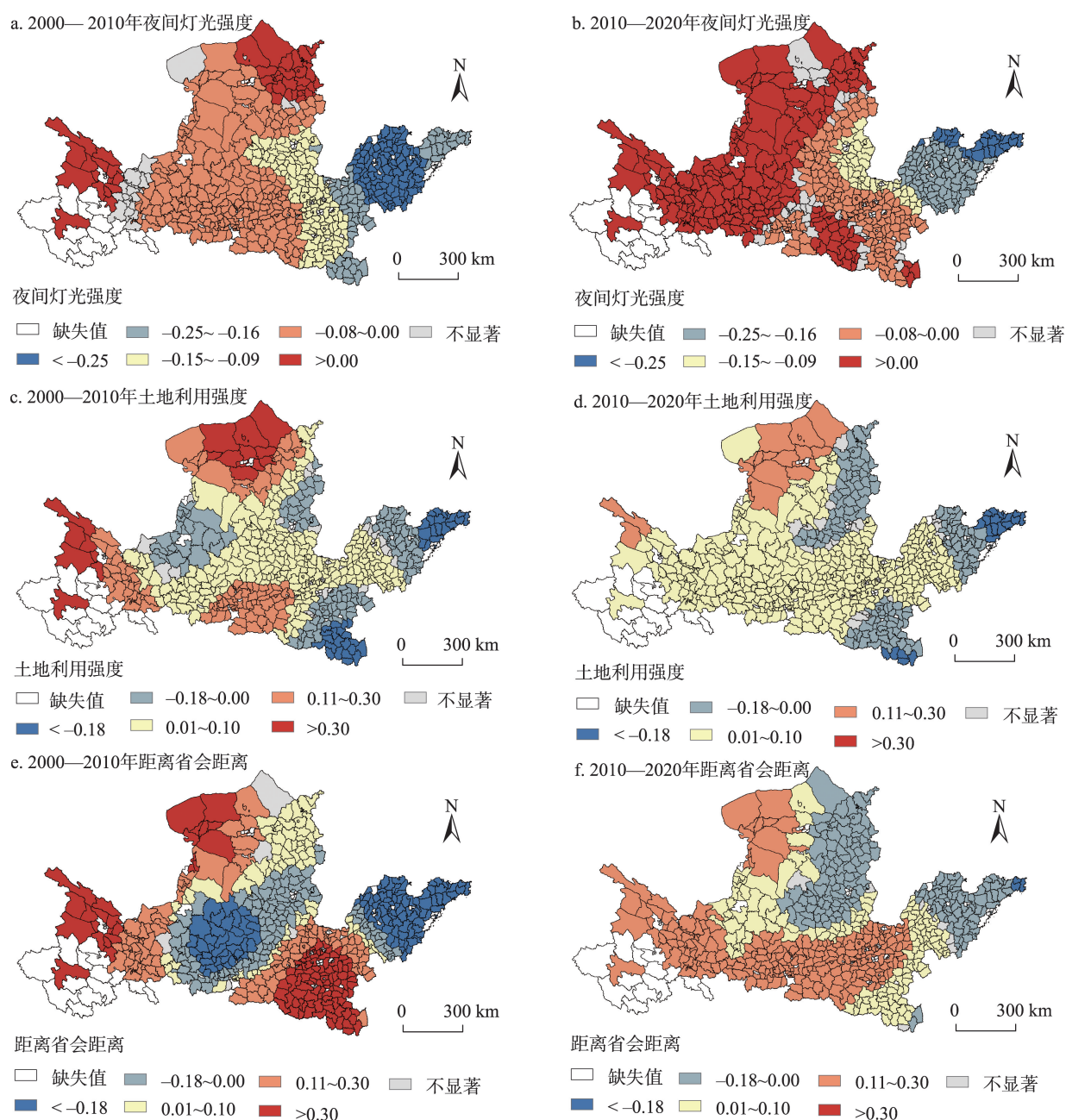


Figure 7 Spatiotemporal variability of social factors influencing the trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization

注:基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图制作。底图边界无修改。

为山东半岛东部城市群经济重心在东部沿海口岸,而济南偏向内陆,经济辐射带动作用相对较小。而且呼和浩特与太原市是典型的资源型城市,所带来的辐射带动作用通常是以破坏水生态为代价的。同时,县(区)距省会城市距离对权衡协同关系的影响强度略有降低,回归系数绝对值的平均值由第一阶段的0.12降低至第二阶段的0.11。

## 4 讨论

### 4.1 权衡协同关系及其影响因素

改善水生态系统服务与城镇化的关系,有利于促进社会经济与水生态环境的可持续发展<sup>[5]</sup>,本文研究发现黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化在全局上处于权衡关系,这和Yang等<sup>[51]</sup>的研究结果一致,在局部上主要以表现为协同关系的县(区)



2024年3月

为主,这些县(区)主要分布在黄河流域上、中游地区,且具有“低-低”即水生态系统服务供给不足、城镇化水平较低的空间关系。这主要是由于黄河流域生态脆弱,开发历史悠久,经济发展不平衡,上中游大部分县(区)经济发展水平较低,发展速度较慢<sup>[49]</sup>,加之近20年,退耕还林、黄土高原综合治理等生态恢复措施的施行,使得脆弱的水生态一定程度上得到恢复<sup>[52]</sup>。同时研究发现,表现为权衡关系的县(区)数量增多且分布范围随时间发生变化。黄河几字弯都市圈西北部是重要“能”“粮”基地、关中平原城市群中部和山东半岛城市群东部城市密集且规模较大,近10年开发强度和城镇化发展迅速<sup>[53-55]</sup>,对水生态和水环境产生较大的负向影响,形成新的权衡关系区。

生态和社会因子对水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响存在显著时空异质性,这和Bi等<sup>[5]</sup>的研究结果一致。同时,降雨量与植被覆盖度在黄河几字弯都市圈部分县(区)产生负影响,这和Wang等<sup>[56]</sup>、燕丹妮等<sup>[57]</sup>的研究结果一致,这些县(区)地表生态脆弱,雨季降水量增加,加大降水对地表的侵蚀,并且不适宜的植被恢复会增加蒸腾,改变区域水分平衡,造成整体水生态系统服务供给降低<sup>[58]</sup>。黄河流域城市群县(区)整体城镇化水平偏低,适度且可持续地开发,有助于水生态系统服务与城镇化的协同发展,Zhang等<sup>[59]</sup>的研究也证实了这一点,所以经济发展水平、土地利用强度等社会因子对水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响在部分县(区)呈正向促进作用。

#### 4.2 研究不足与展望

本文针对水生态系统服务与城镇化权衡协同关系及其影响因子开展研究,补充和丰富了相关研究,但尚存在一些不足。首先,水生态系统服务模型参数来自前人研究的经验参数,虽在反映区域生态系统服务相对量上具有可行性,但在刻画绝对量仍需结合实验数据进行模型矫正,这需要加强野外调查和实验数据积累。其次,由于县(区)统计数据存在缺失,未对社会城镇化方面进行反映。再者,目前衡量局部权衡协同关系及其强度的方法尚未形成统一认识,不同强度量化方法造成生态和社会因子的影响方向和强度存在差异,这增加了结果的

不确定性风险,根据黄河流域城市群自然和社会经济特征构建一个具有普适性的权衡协同衡量模型是未来工作重点。

## 5 结论与政策建议

### 5.1 结论

本文以黄河流域城市群为案例区,在分析2000—2020年水生态系统服务与城镇化水平时空格局及空间关系的基础上,探讨了二者之间的权衡协同关系及其影响因素,在此基础上提出了针对黄河流域城市群县域生态管理与城镇化发展策略。主要结论如下:

(1)近20年,黄河流域城市群水生态系统服务以粮食生产与水土保持服务为主。产水服务、水土保持服务、水质净化服务与粮食生产服务均呈现上升趋势,水生态系统服务显著提高。城市群城镇化水平不断提高,经济城镇化增速最快,其次为土地城镇化、人口城镇化,县(区)间人口、土地和经济城镇化差异缩小。

(2)黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化的空间关系以“低-低”“高-低”为主,东南部和西北部县(区)间差异显著,“高-高”“高-低”主要分布在东南部,“低-低”“低-高”主要分布在西北部。水生态系统服务与城镇化之间在全局上呈现权衡关系;在局部上则以表现为协同关系的县(区)为主,但表现为权衡关系的县(区)数量增多主要分布在黄河几字弯都市圈西北部、关中平原城市群中部、山东半岛城市群东部。

(3)从影响方向来看,降水、以植被恢复为主的生态措施、土地利用强度和区位因子对黄河流域城市群水生态系统服务与城镇化权衡协同关系主要产生正向促进作用;而温度、海拔、地形以及经济发展水平因子主要产生负向抑制作用。从影响强度来看,海拔和地形因子对二者权衡协同关系影响强度最强;其次为降水因子;温度、以植被恢复为主的生态措施、经济发展水平、土地利用强度与区位因子影响强度较弱。同时,不同时期各影响因子对水生态系统服务与城镇化权衡协同关系的影响存在空间分异,总体上分布在下游城市群的县(区)各影响因子的影响方向和影响强度较分布在上游和中游的城市群的县(区)更稳定。

## 5.2 政策建议

黄河流域城市群县(区)间自然和社会经济发展条件存在较大差异,水生态系统服务与城镇化关系复杂,整体表现出水生态系统服务供给不足、城镇化水平较低的弱协同关系,所以制定区域发展策略和措施,需因地制宜,分类分区进行。

(1)“高-高”类型的县(区),自然条件、经济基础较好,但权衡与协同关系受地形约束明显,发展过程中需规划城市内部系统自身生态绿地,适当增加水域面积和植被面积,调节小区域气候。

(2)“低-低”类型的县(区),经济基础较差、生态脆弱且存在退化风险,应严守生态保护红线,有效利用生态转移资金进行生态保护,同时充分挖掘本地化特色产业和文化资源结合产业生态化调整发展模式。

(3)“高-低”组合的县(区),生态系统服务能力强,但城镇化进程乏力,资源环境优势未得到有效利用,表现为权衡的县(区)的现有发展模式通常对生态系统产生胁迫,需引入投资结合地区优势促进产业高级化,表现为协同的县(区)需结合资源优势,将生态产业化,以此推进城镇化进程。

(4)“低-高”类型的县(区),生态相对脆弱,城镇化水平高,表现为权衡与协同的县(区)均需进一步加强人口和经济的集聚,提高土地利用效率,并加强生态保护和治理投入。同时在植被覆盖度产生负影响的县(区)需谨慎采取以恢复植被为主的生态措施。

## 参考文献(References):

- [1] 梁鸿,潘晓峰,余欣繁,等.深圳市水生态系统服务功能价值评估[J].自然资源学报,2016,31(9):1474-1487. [Liang H, Pan X F, Yu X F, et al. Valuation of water ecosystem service functions in Shenzhen[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(9): 1474-1487.]
- [2] 咎欣,张玉玲,贾晓宇,等.永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J].自然资源学报,2020,35(6):1326-1337. [Zan X, Zhang Y L, Jia X Y, et al. Evaluation on the ecosystem services value of the upper reaches of Yongding River[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1326-1337.]
- [3] Wang Y X, Wang H M, Zhang J X, et al. Exploring interactions in water-related ecosystem services nexus in Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2023, DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117550.
- [4] Wang H B, Wang W J, Liu Z H, et al. Combined effects of multi-land use decisions and climate change on water-related ecosystem services in Northeast China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115131.
- [5] Bi Y Z, Zheng L, Wang Y, et al. Coupling relationship between urbanization and water-related ecosystem services in China's Yangtze River Economic Belt and its socio-ecological driving forces: A county-level perspective[J]. Ecological Indicators, 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109871.
- [6] UN-Habitat. World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities[R]. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme, 2022.
- [7] Liang J, Li S, Li X D, et al. Trade-off analyses and optimization of water-related ecosystem services (WRESs) based on land use change in a typical agricultural watershed, southern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123851.
- [8] Deng C X, Liu J Y, Nie X D, et al. How trade-offs between ecological construction and urbanization expansion affect ecosystem services? [J]. Ecological Indicators, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107253.
- [9] 于冰,徐琳瑜.城市水生态系统可持续发展评价:以大连市为例[J].资源科学,2014,36(12):2578-2583. [Yu B, Xu L Y. Evaluation of sustainable development of urban water ecosystems: Taking Dalian City as an example[J]. Resource Science, 2014, 36(12): 2578-2583.]
- [10] 崔学刚,方创琳,刘海猛,等.城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展[J].地理学报,2019,74(6):1079-1096. [Cui X G, Fang C L, Liu H M, et al. Dynamic simulation of urbanization and eco-environment coupling: A review on theory, methods and applications[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6): 1079-1096.]
- [11] Liu Z H, Liu Z Y, Zhou Y, et al. Distinguishing the impacts of rapid urbanization on ecosystem service trade-offs and synergies: A case study of Shenzhen, China[J]. Remote Sensing, 2022, DOI: 10.3390/rs14184604.
- [12] Wan L L, Ye X Y, Lee J, et al. Effects of urbanization on ecosystem service values in a mineral resource-based city[J]. Habitat International, 2015, 46: 54-63.
- [13] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, et al. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion[J]. Science of the Total Environment, 2019, 662: 824-833.
- [14] Yuan Y J, Wu S H, Yu Y N, et al. Spatiotemporal interaction between ecosystem services and urbanization: Case study of Nanjing City, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 917-929.
- [15] Yang M H, Gao X D, Siddique K H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive co-erding relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years[J]. Science of the Total Environment, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159757.

2024年3月

- [16] Chen W X, Chi G Q. Urbanization and ecosystem services: The multi-scale spatial spillover effects and spatial variations[J]. *Land Use Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105964.
- [17] 赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 131–147. [Zhao X Y, Du Y X, Li H, et al. Spatial-temporal changes in the coupled relationship between urbanization and ecosystem services in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 131–147.]
- [18] Tu D, Cai Y, Liu M. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between ecosystem services and new-type urbanization: A case study of the Yangtze River Economic Belt in China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110535.
- [19] Gao J, Li F, Gao H, et al. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: A study of the Guishui River Basin, Beijing, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.049.
- [20] Li J H, Zhou K C, Xie B G, et al. Impact of landscape pattern change on water-related ecosystem services: Comprehensive analysis based on heterogeneity perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108372.
- [21] Wu D, Zheng L, Wang Y, et al. Characteristics of urban expansion in megacities and its impact on water-related ecosystem services: A comparative study of Chengdu and Wuhan, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.111322.
- [22] Qin J B, Ye H, Lin K, et al. Assessment of water-related ecosystem services based on multi-scenario land use changes: Focusing on the Poyang Lake Basin of southern China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.111549.
- [23] 陆大道, 孙东琪. 黄河流域的综合治理与可持续发展[J]. *地理学报*, 2019, 74(12): 2431–2436. [Lu D D, Sun D Q. Development and management tasks of the Yellow River Basin: A preliminary understanding and suggestion[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(12): 2431–2436.]
- [24] 金凤君. 黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J]. *改革*, 2019, (11): 33–39. [Jin F J. Coordinated promotion strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *Reform*, 2019, (11): 33–39.]
- [25] 顾晋怡, 李一平, 杜薇. 基于InVEST模型的太湖流域水源涵养能力评价及其变化特征分析[J]. *水资源保护*, 2018, 34(3): 62–67. [Gu J Y, Li Y P, Du W. Evaluation on water source conservation capacity and analysis of its variation characteristics of Taihu Lake Basin based on InVEST model[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(3): 62–67.]
- [26] Yang J, Xie B P, Zhang D G, et al. Climate and land use change impacts on water yield ecosystem service in the Yellow River Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, DOI: 10.1007/s12665-020-09277-9.
- [27] Luo Y, Lu Y H, Fu B J, et al. Half century change of interactions among ecosystem services driven by ecological restoration: Quantification and policy implications at a watershed scale in the Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2546–2557.
- [28] Yang D, Liu W, Tang L Y, et al. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133–143.
- [29] Zhang H, Wei J, Yang Q, et al. An improved method for calculating slope length ( $\lambda$ ) and the LS parameters of the Revised Universal Soil Loss Equation for large watersheds[J]. *Geoderma*, 2017, 308: 36–45.
- [30] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780–2796. [Zhao X Y, Ma P Y, Li W Q, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780–2796.]
- [31] Chen J. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security[J]. *CATENA*, 2007, 69(1): 1–15.
- [32] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, et al. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: A case study in Wuhan, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.396.
- [33] Peng J, Tian L, Liu Y X, et al. Ecosystem services response to urbanization in metropolitan areas: Thresholds identification[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.218.
- [34] Ouyang X, Tang L S, Wei X, et al. Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations[J]. *Land Use Policy*, 2021, DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105587.
- [35] Yin Q Y, Niu K, Li N. Using CV-CRITIC to Determine Weights for Smart City Evaluation[C]. *Macao: IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, 2017.
- [36] Huang F X, Zuo L Y, Gao J B, et al. Exploring the driving factors of trade-offs and synergies among ecological functional zones based on ecosystem service bundles[J]. *Ecological Indicators*, 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109827.
- [37] 郭伟, 张鹏飞, 赵丽茹, 等. 京津冀区域乡村旅游发展环境差异及权衡协同关系[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1): 184–197. [Guo W, Zhang P F, Zhao L R, et al. Environmental differences and tradeoff synergistic relationship of rural tourism development in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(1): 184–197.]
- [38] 牛丽楠, 邵全琴, 宁佳, 等. 西部地区生态状况变化及生态系统服务权衡与协同[J]. *地理学报*, 2022, 77(1): 182–195. [Niu L N, Shao Q Q, Ning J, et al. Ecological changes and the tradeoff and synergy of ecosystem services in western China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(1): 182–195.]
- [39] Zhao T, Pan J H. Ecosystem service trade-offs and spatial non-sta-



- tionary responses to influencing factors in the Loess hilly-gully region: Lanzhou City, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157422.
- [40] Shao Y J, Liu Y S, Li Y H, et al. Regional ecosystem services relationships and their potential driving factors in the Yellow River Basin, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(4): 863–884.
- [41] Xue C L, Chen X H, Xue L R, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158834.
- [42] Chu H J, Huang B, Lin C Y. Modeling the spatio-temporal heterogeneity in the PM10–PM2.5 relationship[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 176–182.
- [43] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatio-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383–401.
- [44] 孙裔煜, 高静, 全德, 等. 基于GTWR的广东省乡村聚落规模时空演变研究[J]. *地理科学*, 2023, 43(7): 1249–1258. [Sun Y Y, Gao J, Tong D, et al. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of rural settlements in Guangdong Province based on GTWR model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(7): 1249–1258.]
- [45] 任世鑫, 李二玲, 赵金彩, 等. 黄河流域耕地利用碳排放时空特征及影响因素研究[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(10): 102–113. [Ren S X, Li E L, Zhao J C, et al. Spatial-temporal characteristics of carbon emissions from cultivated land use in the Yellow River Basin and the influencing factors[J]. *China Land Science*, 2023, 37(10): 102–113.]
- [46] 郑靖伟, 孙才志. 基于MRIO与GTWR的中国水资源流动格局驱动因素分析[J]. *地理科学*, 2023, 43(10): 1837–1850. [Zheng J W, Sun C Z. Driving factors of China's water resources flow pattern based on MRIO and GTWR[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(10): 1837–1850.]
- [47] 刘佳明, 王洁. GTWR模型联合地理探测的长三角地区PM2.5驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(1): 139–149. [Liu J M, Wang J. Research on the driving factors of PM2.5 in Yangtze River Delta based on GTWR model combined with geographical detector[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(1): 139–149.]
- [48] Bi Y Z, Zheng L, Wang Y, et al. Coupling relationship between urbanization and water-related ecosystem services in China's Yangtze River economic Belt and its socio-ecological driving forces: A county-level perspective[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 146.
- [49] 陈洪章, 曾冰, 郭虹. 黄河流域县域经济时空分异及影响因素: 来自夜间灯光数据的检验[J]. *经济地理*, 2022, 42(11): 37–44. [Chen H Z, Zeng B, Guo H. Spatial-temporal pattern evolution and driving factors of county economy in the Yellow River Basin: Based on the analysis of night light data[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(11): 37–44.]
- [50] 曾志伟, 杨华, 宁启蒙, 等. 洞庭湖区土地利用强度演变及其对生态系统服务的影响[J]. *经济地理*, 2022, 42(9): 176–185. [Zeng Z W, Yang H, Ning Q M, et al. Temporal and spatial evolution of land use intensity and its impact on ecosystem services in Dongting Lake Zone[J]. *Economic Geography*, 2022, 42(9): 176–185.]
- [51] Yang M H, Gao X D, Siddique K H M, et al. Spatiotemporal exploration of ecosystem service, urbanization, and their interactive co-erding relationship in the Yellow River Basin over the past 40 years[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159757.
- [52] Geng W L, Li Y Y, Zhang P Y, et al. Analyzing spatio-temporal changes and trade-offs/synergies among ecosystem services in the Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108825.
- [53] 沈丽娜, 刘傲然, 赵新正. 城市化进程中城市空间响应模式与发展策略: 以关中平原城市群为例[J]. *同济大学学报(社会科学版)*, 2021, 32(3): 101–108. [Shen L N, Liu A R, Zhao X Z. The urban spatial response modes and development strategies in the process of urbanization: Based on a case of Guanzhong plain urban agglomeration[J]. *Journal of Tongji University (Social Science Edition)*, 2021, 32(3): 101–108.]
- [54] 王富喜. 山东半岛城市群人口-土地城镇化质量测度与协调发展研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(8): 1345–1354. [Wang F X. Study on the quality measurement and coordinated development of population-land urbanization in Shandong Peninsula urban agglomeration[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1345–1354.]
- [55] 魏乐, 周亮, 孙东琪, 等. 黄河流域城市群扩张的时空格局演化及情景模拟: 以呼包鄂榆城市群为例[J]. *地理研究*, 2022, 41(6): 1610–1622. [Wei L, Zhou L, Sun D Q, et al. The evolution of spatio-temporal pattern and scenario simulation of urban agglomeration expansion in the Yellow River Basin: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin urban agglomeration[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(6): 1610–1622.]
- [56] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, et al. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China's Loess Plateau[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4(1): 336–336.
- [57] 燕丹妮, 武心悦, 王博恒, 等. 1982–2015年黄土高原植被变化特征及归因[J]. *生态学报*, 2023, 43(23): 9794–9804. [Yan D N, Wu X Y, Wang B H, et al. Characteristics and driving forces of changes in vegetation coverage on the Loess Plateau, 1982–2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(23): 9794–9804.]
- [58] Qiu H H, Zhang J Y, Han H R, et al. Study on the impact of vegetation change on ecosystem services in the Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110812.
- [59] Zhang J Y, Zhang Z W, Liu L P, et al. The coupling relationship and driving mechanism between urbanization and ecosystem services in the Yellow River Basin from a multi-spatial scale perspective[J]. *PLOS ONE*, 2023, DOI: 10.1371/journal.pone.0293319.

# Trade-offs/synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization in the Yellow River Basin urban agglomeration

WAN Shilong<sup>1,3</sup>, YANG Hainan<sup>1,4</sup>, MA Li<sup>2</sup>, YE Lufeng<sup>1,3</sup>, ZHANG Zilong<sup>1,3,4</sup>

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling of the Chinese Academy of Sciences, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. Institute of Green Development for the Yellow River Drainage Basin, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. Institute of Carbon Peak & Carbon Neutrality, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** [Objective] The relationship between water ecosystem services and urbanization is related to regional sustainable development. The Yellow River Basin has pronounced water ecological problems, and clarifying the synergistic relationship between water ecosystem services and urbanization and their influencing factors will contribute to formulating development strategies. [Methods] This study evaluated the distribution pattern of water ecosystem services and urbanization from 2000 to 2020 by using the InVEST model and a comprehensive evaluation model, explored the trade-offs/synergistic relationship between the two using bivariate autocorrelation, correlation coefficients, and the division of variance method, and analyzed the ecological and social influencing factors on the Trade-offs/synergistic relationship based on the geographical and temporal weighted regression (GTWR) model. [Results] (1) The water ecosystem services of the Yellow River Basin urban agglomeration are dominated by food production and soil and water conservation services, and have been significantly enhanced; the level of urbanization has been increasing, and the differences between counties (districts) have been narrowing. (2) The spatial relationship between water ecosystem services and urbanization is dominated by the types of “low-low” and “high-low”, which show a trade-off relationship globally and a synergistic relationship locally in counties and districts, but the number of counties and districts with the trade-off relationship has gradually increased and is the main distribution of the northwestern part of the Yellow River Bend Metropolitan Area, the central part of the Guanzhong Plain urban agglomeration, and the eastern part of the Shandong Peninsula urban agglomeration. (3) Precipitation, ecological measures based on vegetation restoration, land-use intensity and location factors have mainly positive effects on the trade-offs/synergistic relationship, while the opposite is true for temperature, altitude, topography and level of economic development. Elevation and topography factors have the strongest influence on the trade-offs/synergistic relationship, followed by precipitation, and the rest of the factors have a weaker influence. [Conclusion] Therefore, to address the spatial mismatch between water ecosystem services and urbanization, ecological protection and development policies need to be formulated in zones and classified according to the synergistic relationship between the trade-offs between the two and the temporal differentiation of their driving factors.

**Key words:** water ecosystem service; urbanization; trade-offs/synergistic relationship; influencing factors; Yellow River Basin urban agglomeration