



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目： 黄河流域甘肃段水资源承载力-新型城镇化-生态环境耦合协调及影响因素
作者： 杜森，孙佛佑，胥德泽，周添红，张国珍
DOI： 10.13227/j.hjks.202506139
收稿日期： 2025-06-12
网络首发日期： 2025-09-15
引用格式： 杜森，孙佛佑，胥德泽，周添红，张国珍. 黄河流域甘肃段水资源承载力-新型城镇化-生态环境耦合协调及影响因素[J/OL]. 环境科学.
<https://doi.org/10.13227/j.hjks.202506139>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

黄河流域甘肃段水资源承载力-新型城镇化-生态环境耦合协调及影响因素

杜森^{1,2}, 孙佛佑², 胥德泽², 周添红^{1,3}, 张国珍^{1,3*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学建筑与城市规划学院, 兰州 730070; 3. 甘肃省黄河水环境重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 厘清水资源承载力-新型城镇化-生态环境之间的耦合关系及其影响因素, 对促进流域城市水资源利用、生态保护与新型城镇化协同发展至关重要。以黄河流域甘肃段 9 个市州为例, 建立水资源承载力-新型城镇化-生态环境整体发展为目标的评价体系, 运用耦合协调度、障碍度模型和时空地理加权回归模型来分析研究区三者的耦合协调关系的动态变化及影响因素时空异质性。结果表明: ①黄河流域甘肃段水资源承载力-新型城镇化-生态环境各系统发展指数呈稳定上升态势。②黄河流域甘肃段耦合协调度呈逐渐提高的趋势, 从 2012 年的 0.30 提高到 2023 年的 0.45, 耦合状态从轻度失调转变成濒临失调阶段。③从影响因素来看, 经济水平、人口规模、教育支出、政府能力、社会保障能力和对外开放程度的影响程度较大。研究为制定和实施流域城市水资源保护、生态修复及新型城镇化协调发展提供理论支撑和实践指导。

关键词: 水资源承载力; 新型城镇化; 生态环境; 耦合协调度; 时空地理加权回归模型; 黄河流域甘肃段

DOI:10.13227/j.hjkk.202506139

Coupling Coordination and Influencing Factors Analysis of Water Resources Carrying Capacity, New-Type Urbanization, and Ecological Environment in the Gansu Section of the Yellow River Basin

DU Sen^{1,2}, SUN Fo-you², XU De-ze², ZHOU Tian-hong^{1,3}, ZHANG Guo-zhen^{1,3*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Elucidating the coupling relationships and influencing factors between water resources carrying capacity, new-type urbanization, and the ecological environment is essential for improving urban water utilization, strengthening ecological protection, and promoting coordinated new-type urbanization development in river basins. Taking the 9 cities and prefectures in the Gansu section of the Yellow River Basin as an example, establish a comprehensive evaluation system targeting the overall development of water resources carrying capacity, new-type urbanization and ecological environment. By employing the coupling coordination degree obstacle degree model, and geographically and temporally weighted regression models, The study explores the dynamic variations and spatial-temporal differences of the coupled coordination degree across the three aspects in the study area. The key findings are: ①The development indices of water resources carrying capacity, new-type urbanization, and ecological environment in the Gansu section of the Yellow River Basin show a stable upward trend. ②The coupling coordination degree of the Yellow River Basin in Gansu province shows an increasing trend, rising from 0.30 in 2012 to 0.45 in 2023. The coupling state has shifted from a mild imbalance to a stage of near imbalance. ③In terms of influencing factors, economic level, population size, expenditure on science and education, government capacity, social security capacity, and degree of openness to the outside world are the main external factors influencing the coupled coordination degree. Providing theoretical underpinnings and practical guidance for the formulation and implementation of coordinated development strategies integrating water resource conservation, ecological restoration, and new-type urbanization in river basin cities.

Key words: water resource carrying capacity; new-type urbanization; ecological environment, coupled coordination degree; spatio-temporal geographic weighted regression model; Gansu section of the Yellow River Basin

随着我国城市建设从大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段, 新型城镇化已成为未来社会发展的必然趋势^[1]。近几十年来, 我国快速城镇化进程加剧了地区水资源和生态环境的压力, 影响社会经济正常发展^[2], 有研究表明, 我国人均水资源量仅占世界人均水资源量的 1/4, 且随着城市人口集聚和经济发展, 城市用水量增加速度远高于人口增加速度, 故我国存在严重的水资源供需矛盾^[3]。我国正处于快速城镇化阶段, 超过 8 亿人生活在城市地区^[4], 据住房和城乡建设部统计结果表明, 全国有 400 多个的城市是缺水城市, 其中 110 个城市属于严重缺水城市, 水资源是影响城市可持续发展的重要因素之一^[5], 同时随着城市人口高度集中引发建成区扩张, 加剧周边草地和林地等生态用地的侵占, 导致其生态环境破坏^[6]。因此, 有效统筹水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者协调发展是地区高质量发展亟待解决的现实需求。

水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者的交互耦合是一个涉及社会、经济和自然的开放巨系统,

收稿日期: 2025-06-12; 修订日期: 2025-08-30

基金项目: 中国工程院战略研究咨询项目 (GS2023ZDI02); 国家重点研发计划项目 (2019YFD1100103); 国家自然科学基金项目 (52060012); 甘肃省自然科学基金项目 (22JR5RA316); 甘肃省哲学社会科学规划项目 (2024YB060)

作者简介: 杜森 (1980~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为水资源环境与区域可持续发展, E-mail: dusen@mail.lzjtu.cn

*通信作者, E-mail: zhangguozhen@mail.lzjtu.cn

针对其关系研究,地理科学和环境科学等不同学科背景的学者提出了诸多研究理论和框架。代表性的理论主要有,以构建一个综合协同的生态网络系统,整合城市中的水域和绿地来实现生态、社会和环境的多重效益的城市蓝绿空间理论^[7]、把地理环境和人类活动两个子系统在特定地域中相互联系、相互作用形成的一种复杂开放的动态系统的人地关系地域系统^[8]、以资源环境约束上限或人口经济合理规模等关键阈值开展超载预警的人地耦合圈^[9]等理论。生态环境良好作为新型城镇化发展的内在需求,是区别传统城镇化和新型城镇化的关键特征之一^[10]。城市在近些年发展过程中,水资源过度开发^[11]、水环境污染严重^[12]和水生生态功能缺失^[13]等问题逐渐暴露,极大程度限制了城市新型城镇化水平的提高,同时,传统的城市发展模式导致城市出现经济增长动力不足和城乡二元结构明显等问题^[14],使新型城镇化难以稳定实施,破坏其生态环境承载能力^[15],反过来,受损的生态环境也限制了新型城镇化的发展,从而三者之间形成恶性循环,对城市和生态文明建设构成严峻挑战^[16]。

针对水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者关系的研究,学者们多聚焦于经济增长与生态环境、城镇化与生态环境等两两关系研究。如陈继红等^[17]以上海港为研究对象,探讨其经济增长与生态环境之间的关系、周荣兴等^[18]基于联系数的来构建实际与理想协调状态区域水资源、社会经济和生态环境之间协调发展、姜亚俊等^[19]基于不同区域研究城镇化与生态环境耦合关系、袁东海^[20]分析不同城市的水生态系统服务价值和城市水系统耦合协调关系及其相互作用、武照亮等^[21]以 96 个地级市为例,分析水环境质量对新型城镇化的影响及其驱动机制。综上所述,学者们对水资源承载力、新型城镇化和生态环境进行了探讨,但仍存在以下问题:第一,现有研究主要采用“三者取其二”进行两两关系分析,鲜有文献将三者纳入同一框架进行综合研究,且城市作为一个复杂交互系统,对其水资源承载能力、新型城镇化与生态环境三者之间整体关系的系统性研究仍较为欠缺,尤其在定量分析和机制探讨方面存在不足^[4,22]。第二,现有的研究大多数偏向于评估系统或者元素之间的测度评价和空间格局描述,对其影响因素的研究相对较少,且无法科学评价之间的关系及其影响程度^[23]。第三,研究方法主要利用均衡诊断法^[24]、达古姆基尼系数^[25]、综合发展指数^[26]和灰色关联分析^[27]等方法。上述方法主要侧重分析和评价指标体系中二级和三级关系,缺乏其内在影响机制讨论,难以全面揭示三者之间的复杂互动关系。且研究对象主要集中在城市群和东部地区,对西北城市研究关注度较少,导致缺乏对西北城市三者内在联系的研究。本文以黄河流域甘肃段为例,通过构建三者耦合协调度模型与影响因素识别,不仅可量化三者的演化强度与演进阶段,还能提出区域差异化的调控策略,为探索生态宜居、城乡统筹的新型城镇化提供方法依据。

黄河发源于青海省,自西向东流经 9 个省份,跨越青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原这 4 大地理区域,总面积 79.5 万 km²,其人口和 GDP 分别占全国 29%和 25%^[28]。黄河流域甘肃段作为黄河流域重要的水源涵养区和生态补给区,是我国发展战略格局的重要支撑区、能源安全保障区和重要生态屏障,具有重要的战略意义^[29],故该区域是研究水资源承载能力、新型城镇化和生态环境三者耦合协调发展的理想研究区域。鉴于此,以黄河流域甘肃段为研究对象,深入其水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者之间的内在联系,解析三者的耦合协调的时空演变,并借助障碍度模型和时空地理加权回归模型分析其内外影响因素。本文通过揭示黄河流域甘肃段三者耦合发展研究提供辩证关系和一般规律,以期为制定和实施流域城市生态保护与社会经济可持续发展提供理论支撑和实践指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域甘肃段位于 32°11'N~42°57'N、92°13'E~108°46'E,地处乌鞘岭以东,西秦岭以北,横跨陇东黄土高原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区和甘南高原区三大地貌单元,属温带大陆性气候,是黄河上游重要的生态涵养区。区域年均降水量 400mm,总面积 14.59 万 km²,分别占甘肃省和黄河流域总面积的 34.26%和 17.65%^[30]。年均自产地表水资源量 125.2 亿 m³,超过黄河流域总水量的 1/5,其中甘南水源涵养区年均向黄河补水 64.4 亿 m³。黄河干流在甘肃省长度达到 913km,占黄河全长的 16.7%;且渭河、泾河、洮河、等重要支流流经定西、天水、平凉、庆阳和武威 5 市,其作为黄河重要的补给水源,有效保障了黄河在 upstream 地区径流稳定。行政区划上,黄河流域流经甘肃省中南部 9 个市州,分别为兰州市、天水市、白银市、定西市、庆阳市、平凉市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州和武威市,如图 1 所示。

近年来,黄河流域甘肃段在新型城镇化建设方面取得了一定进展。2021 年,黄河流域甘肃段常住人口为 1958.66 万人,地区生产总值为 7696.69 亿元。约占甘肃省 70%的人口和经济总量,是全省政治、经济和文化的核心区域,同时常住人口城镇化率达到 55.58%,低于全国平均水平,且区域内部发展不平衡。在生态环境方面,水土流失面积达 69097.54km²,生境质量均值为 0.90,在水资源承载力方面,废污水排放总量为 5.24 亿 t,水资源供需比为 0.90。黄河流域甘肃段作为黄河流域重要的水源涵养区和生态补给区,直接关系到黄河流域的生态安全。2021 年国务院发布的《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》中提

出加强上游水源涵养能力, 聚焦重点区域, 恢复地区生态系统, 同时地区横跨青藏高原、黄土高原、秦巴山脉及祁连山-西走廊四大国家重点生态治理区域^[31], 对保障西部生态安全和推动黄河流域高质量发展具有重要意义。然而因区域自然本底条件较差, 水功能减弱等生态环境问题突出^[32], 三系统之间发展两者冲突也愈演愈烈, 故探讨水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者的关系尤为重要。

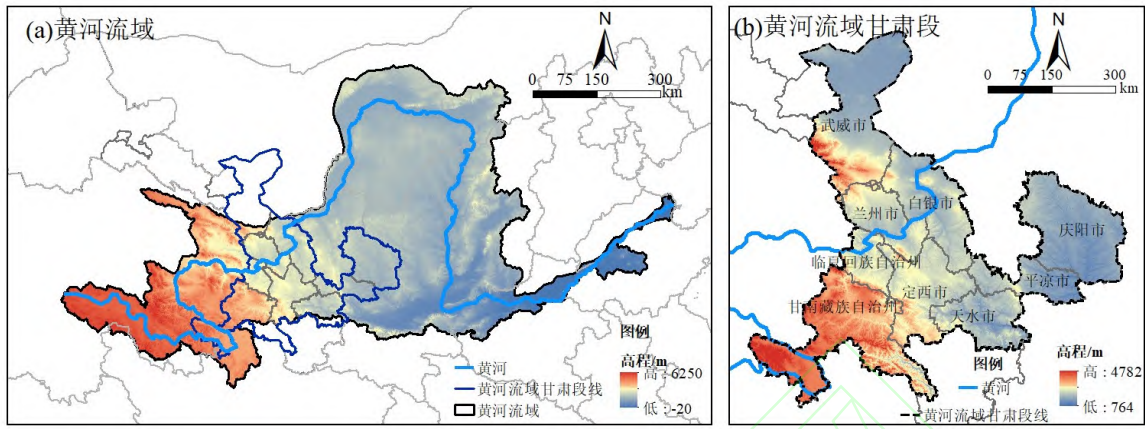


图 1 研究区概况

Fig.1 Location map of the study areas

1.2 构建指标评价体系

基于指标选取的典型性、实践性和客观性原则, 本文指标选取和构建充分考虑水资源承载力、新型城镇化和生态环境这三者的基本内涵和特征要求^[33], 能综合评价和反映其总体特征和发展水平。新型城镇化通过人口集聚、经济增长、空间变化和社会发展对水资源承载力和生态环境产生巨大压力和影响, 影响其健康可持续发展。水资源承载力通过以水定城、以水定地、以水定人、以水定产限制新型城镇化发展和生态环境保护、生态环境通过生态资源量、生态压力和生态弹性制约人口集聚、排斥资本, 严重限制新型城镇化的发展。因此, 指标选取从水资源承载力(以水定城、以水定地、以水定人和以水定产), 新型城镇化(人口城市化、经济城市化)和生态环境(生态资源)3个层面共选取 32 个指标^[34-36], 构建指标评价体系, 如表 1 所示。

表 1 水资源承载力、新型城镇化和生态环境系统耦合评价指标¹⁾
Table 1 Indicators for the coupled evaluation of water resources carrying capacity, new-type urbanization, and ecological environment system

目标层	准则层	指标层	单位	属性
水资源承载力	以水定城	生态环境用水量	亿 m ³	+
		建成区绿化覆盖率	%	+
		污水年排放总量	亿 t	-
	以水定地	水资源总量	亿 m ³	+
		产水模数	万 m ³ · km ⁻²	+
		地表水源供水量	亿 m ³	+
		降水量	亿 m ³	+
	以水定人	城市人口密度	km ² · 人 ⁻¹	-
		城镇居民生活人均日用水量	L · (人 · d) ⁻¹	-
		居民生活用水量	m ³	-
	以水定产	GDP 增长率	%	+
		工业用水量	亿 m ³	-
		单位工业增加值用水量	m ³ · 万元 ⁻¹	-
新型城镇化	人口城镇化	城镇人口比重	%	+
		户籍人口与常住人口之比	%	+
		城镇登记失业率	%	-
	经济城镇化	二三产业占 GDP 比例	%	+
		城镇居民人均可支配收入	万元	+
		社会消费品零售总额	亿元	+
	社会城镇化	普通高校在校生总数	万人	+
		城镇居民人均消费水平	万元	+
		卫生机构床位数	万张	+
	空间城镇化	建成区面积	km ²	+
		人均道路面积	km ² · 人 ⁻¹	+
		公园绿地面积	hm ²	+
生态环境	生态资源	粮食作物人均占有量	kg · 人 ⁻¹	+
		人均用水量	m ³	-
	生态压力	二氧化硫排放量	t	-
		工业固体废物产生量	万 t	-
		氨氮排放量	万 t	-
	生态弹性	污水回用率	万 m ³	+
		生活垃圾清运量	万 t	+
		人均绿化面积	m ²	+

1) “+”为正向指标，数值越高越好，“-”负向指标，数值越低越好

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究所用数据主要包括 2012—2023 年的水资源数据、社会经济统计数据 and 生态环境数据。水资源数据主要来自 2012—2023 年的《甘肃省水资源公报》《黄河水资源公报》；社会经济统计数据主要来自 2012—2023 年的《甘肃发展年鉴》、以及各州市的《统计年鉴》《国民经济和社会发展统计公报》等；生态环境数据来自 2012—2023 年的《甘肃发展年鉴》《中国环境统计年鉴》；行政区划数据来自国家基础地理信息中心。对于个别缺失数据采用线性插值法补齐。

2.2 熵权-TOPSIS 模型

熵值法由 Shannon 于 1948 年首次提出，根据熵值的特点，可以通过计算熵值的大小来判断指标的重要性。它能深刻反映出指标信息熵值的效用价值，从而确定权重，因此其得出的指标权重值比主观加权法

具有更高的可靠性和准确性^[37]。TOPSIS 是一种根据有限数量的评估对象与理想化对象之间的接近程度，然后评估当前评估对象的相对优势和劣势的方法，适用于小样本数据也适用于多评价对象、多指标的大样本数据。该模型将 TOPSIS 方法的优势与熵权重法相结合^[38]。

2.2.1 原始数据归一化

正向指标：

$$x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}) \quad (1)$$

负向指标：

$$x'_{ij} = (\max x_{ij} - x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij}) \quad (2)$$

式中， x'_{ij} 为第 j 个指标在第 i 年的标准化值、 $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为指标的最大值和最小值。

2.2.2 使用熵权法计算权重

$$y_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij} \quad (3)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \times \ln y_{ij} \quad (4)$$

$$w_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j) \quad (5)$$

式中， y_{ij} 为第 j 个指标在第 i 年的标准化值。同时也表示第 j 个指标的熵， w_j 表示该指标的权重。

2.2.3 确定正负理想解

$$a_{ij} = y_{ij} \times w_j \quad (6)$$

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - a_j^+)^2} \quad d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (a_{ij} - a_j^-)^2} \quad (7)$$

式中， a^+ 和 a^- 分别为第 j 个指标的最大值和最小值。 i 为评价对象到正理想解的距离， a^+ 为评价对象到正理想解的距离， a^- 为评价对象到负理想解的距离。

2.2.4 计算相对贴近度

$$C_i = d_i^- / (d_i^+ + d_i^-) (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (8)$$

式中， C 为接近度。

2.3 耦合协调度模型

为了更好探究水资源承载力、新型城镇化和生态环境的相互关系，引入耦合协调度模型^[39]，耦合度反映三者系统间的影响程度，耦合度越高，系统间的发展越趋于有序和稳定（表 2）。耦合协调度反映两系统的动态关联程度，耦合协调度越高，发展越协调，促进作用越明显。其计算式如下：

$$C_j = \frac{(C_{1j} C_{2j} C_{3j})^{\frac{1}{3}}}{(C_{1j} + C_{2j} + C_{3j}) / 3} \quad (9)$$

$$T_j = \alpha C_{1j} + \beta C_{2j} + \gamma C_{3j} \quad (10)$$

$$D_j = \sqrt{C_j T_j} \quad (11)$$

式中， C_j 为各系统第 j 年的耦合度； T_j 为各系统第 j 年的发展指数； α 、 β 和 γ 为待定系数，且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ，由于水资源、城镇化和生态环境系统之间相互制约影响，因此三者同等重要，故取 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ ； D_j 为第 j 年的耦合协调度，既可以反映系统发展的综合水平，也可以体现系统发展的协调状况， $0 \leq D_j \leq 1$ ， D_j 越小，系统间协调状况越差， D_j 越大，协调状况则越好。参考已有研究成果^[17,26,40]，结合实际情况对耦合协调度等级进行划分。在 Y_{1j} 、 Y_{2j} 和 Y_{3j} 中， Y_{1j} 最小时为水资源滞后型， Y_{2j} 最小时为经济社会滞后型， Y_{3j} 最小时为生态环境滞后型，当某系统滞后时，说明该系统与该地区整体发展不协调。

表 2 耦合协调度划分标准及类型
Table 2 Criteria and types of coupling coordination

耦合度	耦合等级	耦合协调度	耦合协调等级
[0.0,0.3)	极低耦合	[0.0,0.1)	高度失调
		[0.1,0.2)	严重失调
		[0.2,0.3)	中度失调
[0.3,0.4)	低度耦合	[0.3,0.4)	轻度失调
[0.4,0.5)	初级耦合	[0.4,0.5)	濒临失调
[0.5,0.6)	中度耦合	[0.5,0.6)	勉强协调
[0.6,0.7)	高度耦合	[0.6,0.7)	初级协调
[0.7,1.0]	极高耦合	[0.7,0.8)	中度协调
		[0.8,0.9)	良好协调
		[0.9,1.0]	优质协调

2.4 障碍度模型

障碍度模型是一种用于识别和评估影响目标实现的关键因素的分析工具，可以用来发现阻碍某一过程或目标实现的主要障碍因素^[41]。利用障碍度模型对水资源承载力，新型城镇化和生态环境进行评估，可以识别威胁水资源承载力，新型城镇化和生态环境的主要内在障碍因子。

$$p_{ij} = \frac{(1 - x_{ij}) \times w_i \times 100\%}{\sum_{i=1}^n (1 - x_{ij}) \times w_i} \quad (12)$$

式中， w_j 表示第 j 个指标权重， x_j 表示标准化值。

2.5 时空地理加权回归模型

考虑随着时间和空间变化会造成外部影响因素对水资源承载力，新型城镇化和生态环境耦合度的影响存在时空异质性特征，文章为深入研究不同的时间和空间的水资源承载力，新型城镇化和生态环境耦合度影响因素是否存在差异，引入时空地理加权回归模型。时空地理加权回归模型（GTWR）在地理加权回归（GWR）的基础上考虑了时间变化的影响，可在研究对象在时间和空间的非平稳性特征的前提上进行局部线性回归^[42]。从时间维度和空间维度分析自变量和因变量之间的关系，减弱了参数估计偏差和模型误差的影响，有效的提高了回归结果的时效性和稳健性^[43]。因此，文章选择采用 GTWR 模型分析 2012-2023 年黄河流域甘肃段水资源承载力，新型城镇化和生态环境耦合度影响因素的时空变化，具体表达式为：

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i, t_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (13)$$

式中， Y_i 为耦合度； u_i 和 v_i 分别为第 i 个观测点的经度和纬度， t_i 为第 i 个观测点所处的时间， (u_i, v_i, t_i) 为第 i 个观测点的时空地理坐标； $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 为回归截距； $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为第 i 个观测点第 k 个自变量的回归参数，即第 k 个变量对其耦合度的影响程度； X_{ik} 为独立变量在第 i 个观测点的值，即在 GTWR 模型中的解释变量；当 $\beta > 0$ 时，表示自变量和因变量成正向关系，即 X 值变大， Y 值也会变大，反之亦然； ε 为残差。

GTWR 模型的本质是选择合适的时空权重矩阵和带宽。其中空间权重矩阵，指对于每个观测点 i 的时空位置以及自变量 k 提供一个 $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 合适估计值，即：

$$\hat{\beta} = (u_i, v_i, t_i) = [X^T W(u_i, v_i, t_i) X]^{-1} X^T W(u_i, v_i, t_i) Y \quad (14)$$

式中， $\hat{\beta} = (u_i, v_i, t_i)$ 为 $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 的估计值； $W(u_i, v_i, t_i)$ 为时空权重矩阵， X 为自变量矩阵； X^T 为矩阵的转置； Y 为因变量构成的矩阵。GTWR 常使用欧及里得距离、基于高斯距离的衰减函数来构建时空权重矩阵。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力-新型城镇化-生态环境的发展水平分析

黄河流域甘肃段因地理位置、生态环境和经济发展之间存在差异，其发展情况差异较大。通过熵权-TOPSIS 模型对黄河流域甘肃段的水资源承载力，新型城镇化和生态环境进行评价，利用接近度表示评价结果，值越高表示其发展能力越强，各市州水资源承载力，新型城镇化和生态环境的发展情况变化具体见如图 2。

从水资源承载力系统来看，黄河流域甘肃段 2012—2023 年各市州水资源承载能力处于波动上升发展，如图 2（a）所示。依据相关水资源承载力分级研究^[44]，在本研究期间，兰州市甘南藏族自治州水资源承载力处于 0.30~0.40 之间，处于中级范围内，其余的市州基本都处于 0.20~0.40，属于警戒范围内。其主要原因是研究地区位于干旱和半干旱地区，年降雨量有限，水资源利用效率低，公众节水意识较弱，水资源浪

费较为严重。

从新型城镇化系统来看，在 2012—2023 年，黄河流域甘肃段新型城镇化处于稳定上升发展阶段，如图 2（b）所示。兰州市作为甘肃省省会，其新型城镇化水平远高于其他城市，从 2012 年 0.48 发展到 2023 年的 0.83，相比兰州市，其他城市虽增速缓慢，但都处于增长状态。原因是随着我国城市建设政策的稳步推进，近年来研究地区不断提高科技，教育医疗和基础设施建设水平，从而使地区新型城镇化水平稳步提升。然而各地区新型城镇化水平也呈现出明显不均衡态势，定西市、陇南市和临夏回族自治州等市州属于脱贫攻坚成果巩固拓展区，且受到自然环境和交通设施的限制，新型城镇化发展水平相比其他地区发展较为缓慢。

从生态环境系统来看，黄河流域甘肃段 2012—2023 年生态环境以缓慢上升态势为主，如图 2（c）所示。其中，兰州市和白银市的生态环境变化程度较大，其中，兰州市的生态环境发展指数有 0.56 发展到 0.70，白银市有 0.13 发展到 0.22。原因是兰白地区经济发展以科技与创新为主，不断优化产业结构，生态环境质量不断提升，而其他市州经济发展则以工业和制造业为主，生态环境在经济发展中遭到一定程度的破坏，近年来随着各级政府加大生态环境保护和修复力度，各市州的生态环境质量逐渐缓慢上升。

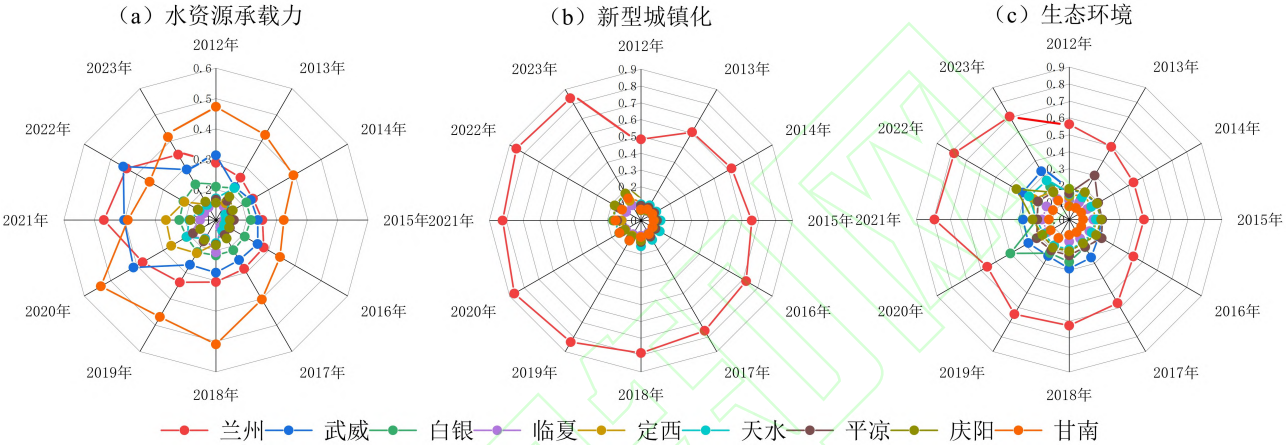


图 2 水资源承载力-新型城镇化-生态环境各子系统发展指数分析

Fig. 2 Analysis of development indices of water resources carrying capacity, new-type urbanization, and ecological environment subsystems

3. 2 水资源承载力-城镇化-生态环境耦合协调分析

3. 2. 1 时序发展变化

基于耦合协调度模型，对黄河流域甘肃段的水资源承载力、新型城镇化和生态环境这 3 个系统进行了耦合协调度的计算，并按照市州进行划分，展示了各市州耦合协调度的时间变化趋势，如图 3。

由图 3 所知，2012—2023 年黄河流域甘肃段各市州水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合协调度整体上呈逐年上升趋势，除 2020 年外，研究区内各市州总体上水资源承载力、新型城镇化和生态环境一直处于缓慢平稳上升态势。分市州来看，兰州市耦合协调程度最大，本研究期内均值为 0.72，从最初的初级协调转变为中级协调状态。兰州市作为甘肃省省会城市，新型城镇化发展迅速，且黄河穿城而过，水资源丰富，因此三者的耦合协调程度相对较好，耦合协调水平处于较高的水平。其次是武威市，耦合协调程度变化平缓，均值为 0.45，发展较为稳定，耦合协调程度仅次于兰州市。直到 2023 年，耦合协调程度从濒临失调转变成勉强协调，武威市处于河西走廊地区，城镇化发展缓慢，水资源利用效率不高，导致其耦合协调程度一般。定西市和庆阳市的耦合协调程度变化趋势基本相同，2012—2023 年，耦合协调程度由 0.34 增长至 0.42，耦合协调水平较低，耦合协调程度有待提高，原因是该地区资源环境紧张，城镇化发展较缓慢。天水市、平凉市、白银市和甘南藏族自治州这 4 个市州的耦合协调程度较低，2012 年耦合协调度为轻度失调状态，到 2018 年转变成濒临失调状态，且耦合协调增长缓慢，原因是以上地区为工贸性城市，水资源消耗大且利用方式不合理，严重降低了以上城市的生态环境质量，导致三者的矛盾突出，未来发展应该转变产业结构，注重生态环境。临夏回族自治州耦合协调度最低，到 2023 年仍是轻度失调状态。原因是该州处于黄河上游，水资源丰富，但其州内建有刘家峡水电站，又因地理位置导致其城镇化发展缓慢，水平低，加上自然灾害对经济产生了不小的影响，导致耦合协调度处于较低水平。

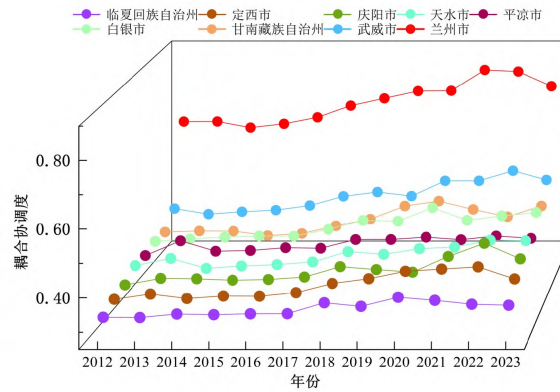


图3 黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合协调度的时序发展变化

Fig. 3 Temporal changes in the coupling coordination among water resources carrying capacity, new-type urbanization, and ecological environment in the Gansu section of the Yellow River Basin

3. 2. 2 空间格局演变

为进一步分析黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合协调的空间分布和演化特征。根据计算结果和耦合协调度等级（表2）绘制了黄河流域甘肃段的耦合协调度空间分布，如图4所示。

由图4可知，2012—2023年黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合协调度演变呈现出平稳上升的发展态势，大部分地区耦合协调演变趋势逐渐由轻度失调向濒临失调的转变。从空间上看，空间格局呈现出“北高南低”的空间分布特征，且城市之间的空间差异明显。原因是黄河横跨北部地区，因此该地区具有较丰富的水资源和良好的生态环境，同时该区域作为兰西城市群组成部分，拥有较高的经济发展水平，导致其耦合协调度高于南部地区。2012—2018期间，除兰州市以外，其余地区耦合协调度基本处于轻度失调状态，原因是以上地区经济发展以工业为主，导致三者发展并不协调。2018—2023年，基本呈现出勉强协调的发展状态，原因是随着新型城镇化和黄河流域高质量发展战略的实施初见成效。至2023年，研究区域内兰州市以高质量的新型城镇化发展水平、高稳定的水资源承载力和高品质的生态环境共同造就了兰州市良好的耦合协调发展状态。武威市得益于其在快速城镇化进程中，以产业转型升级和节能减排为抓手，强化了生态环境治理，同时依托水资源等自然禀赋，推动三者协同共进。使其处于初级协调状态。濒临失调区占据了黄河流域甘肃段大部分区域，主要有天水市、庆阳市、白银市、平凉市、临夏回族自治州和甘南藏族自治州。随着新型城镇化和黄河流域高质量发展战略的提出，城市未来发展过程中要更加注重自然资源的本地条件和生态环境的改善，这对于提升耦合协调度具有积极作用。

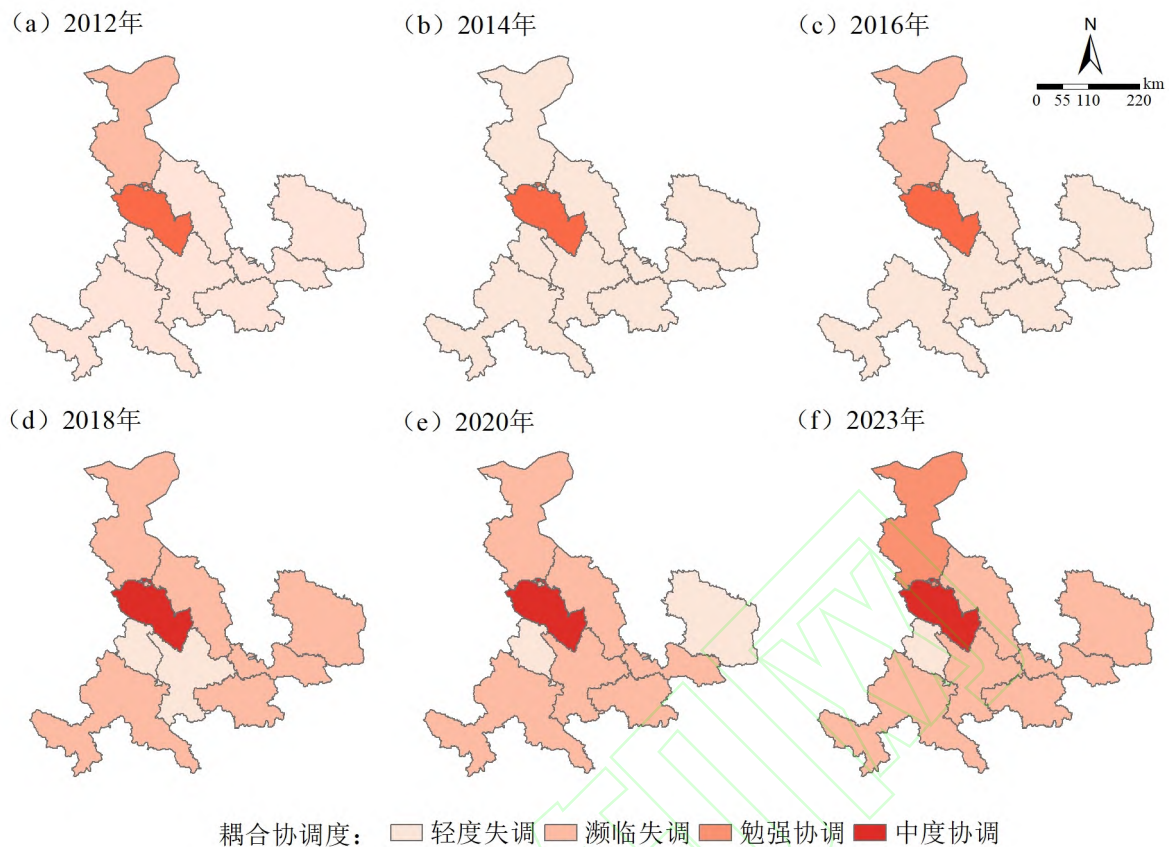


图4 黄河流域甘肃段耦合协调度的时空演变

Fig. 4 Spatiotemporal evolution of the coupling coordination degree in the Yellow River Basin of Gansu

3.3 水资源承载力—城镇化—生态环境耦合协调影响因素分析

3.3.1 障碍度分析

鉴于评价指标体系中指标层因素众多，本研究旨在找出制约各市州耦合协调度进一步提高的关键内在因素。通过障碍度模型，可以评估与每个指标相关的障碍程度，从而进一步确定影响耦合协调度的主要内在因素。加强对以上关键因子的合理利用，有利于提高水资源承载力、新型城镇化和生态环境三者发展。本文将前5位指标确定为影响耦合协调度的主要障碍因素。具体见表3。

表3 2012—2023年各市州前5位障碍因素及障碍度大小¹⁾

Table 3 Top five barriers and size of barriers by city and state from 2012 to 2023

主要障碍因素	兰州	武威	白银	临夏	定西	天水	平凉	庆阳	甘南
普通高校在校生总数	24.03	—	—	—	—	10.87	—	7.67	3.25
生活垃圾清运量	22.20	11.13	12.65	18.90	—	18.59	10.85	14.18	—
社会消费品零售总额	13.05	—	—	—	—	7.74	—	—	—
建成区面积	7.99	—	7.41	—	—	—	—	—	—
污水回用率	7.80	15.84	15.82	—	11.50	7.40	22.27	10.66	—
生态环境用水量	—	16.37	6.77	—	9.43	—	—	—	—
地表水源供水量	—	13.72	14.75	8.86	—	—	—	—	—
粮食作物人均占有量	—	5.99	—	6.21	8.67	—	7.06	10.38	—
产水模数	—	—	—	12.55	6.11	—	5.23	—	15.77
水资源总量	—	—	—	8.14	9.62	7.37	4.70	—	45.54
降水量	—	—	—	—	—	—	—	9.27	10.25
人均道路面积	—	—	—	—	—	—	—	—	3.13
各市州5大障碍因素障碍度总计	75.08	63.05	57.40	54.66	45.34	51.97	50.11	52.17	77.93

1) “—”表示障碍因素的障碍度排名未进入前5位

各市州障碍因子排名反映了水资源承载力、新型城镇化和生态环境等三方面耦合协调发展主要挑战。由表 3 可以看出，污水回用率、生活垃圾清运量、粮食作物人均占有量、水资源总量和产水模数是影响其的重要因素。本研究期间，各市州排名在前 5 位的障碍因素的障碍度之和基本都超过 50%，其中兰州市最大，定西市最小，障碍度分别为 75.08%和 45.34%，其中除兰州市以外，生活垃圾清运量在多个地区排名第一，这与当地的生态环境政策的实施密切相关。对于兰州市，普通高校在校生成数影响其耦合协调发展最重要的因素，并且除兰州以外，其他各市州排在前 2 位的障碍因素始终是生态环境系统的生活垃圾清运量和水资源承载力系统的污水回用率。各市州在研究期内新型城镇化水平普遍较低，受限于经济水平低，难以支撑水资源、新型城镇化与生态环境的协同发展需求，当区域经济发展到一定水平后，可以通过以富补源、以产养绿的方式来维系三者的协调发展。

3.3.2 时空地理加权回归模型分析

耦合协调发展受多种因素影响，参考赵建吉等^[45]、张胜武等^[46]和任保平等^[47]的研究，并考虑黄河流域甘肃段实际发展情况及特色，最终选取经济水平、工业化水平、科教支出、人口规模、政府能力、社会保障能力、对外开放程度和用水效率，总共 8 项指标作为影响因素，进一步分析影响耦合协调度的外部因素及其作用程度。借助 SPSS 软件对所选取的 8 个影响因素进行相关性检验和多重共线性检验，结果如表 4 所示。除工业化水平和用水效率在 10%显著水平下显著外，其余 6 个变量均通过 1%显著水平检验。通过使用方差膨胀系数（VIF）用于衡量回归模型中多重共线性程度，剔除冗余变量，一般认为， $VIF \geq 10$ ，存在强共线性； $5 \leq VIF < 10$ ，存在中度共线性； $2 \leq PVIF < 5$ ，存在轻度共线性，因此，变量 VIF 值超过 10 应该剔除^[48]，结果显示，VIF 均小于 7.5，表明各影响因素之间不存在严重的多重共线性问题。

表 4 影响因素相关性检验结果¹⁾

Table 4 Correlation test results of influencing factors

项目	经济水平	工业化水平	科教支出	人口规模	政府能力	社会保障能力	对外开放程度	用水效率
q 值	0.575**	0.087**	0.572**	0.613**	0.785**	0.456**	0.702**	0.154**
P 值	0.001	0.395	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.130
VIF	4.191	2.418	4.450	5.165	6.749	5.601	2.464	1.309

1)**为 $P < 0.01$

（1）各影响因素时间演化分析 基于 GTWR 模型对不同时间内中黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合度影响因素进行回归分析，以耦合协调程度为因变量，6 个影响因素为自变量进行回归分析。结果显示，模型拟合优度达 0.969，AICc 值为-71.802。结果表明 GTWR 模型能够有效解释各影响因素对黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合度的影响在不同时期呈现的空间异质性和波动性特征。根据各影响因素在不同时空位置上对耦合度的拟合系数，进而绘制各系数随时间变化的箱线图，以探讨各个影响因素在时间上的演变特征，结果见图 5。

经济发展水平对耦合系统的影响系数在研究期内的离散程度相对较大，呈波动上升变化态势，拟合系数多介于-0.1~0.50 之间，说明该影响因素在研究期内对耦合系统的影影响程度相对较小，表明研究期间经济发展水平的提升对耦合系统起到抑制作用的地区数量和抑制作用都较少。

科教支出的拟合系数随时间呈现先下降后平稳发展的态势。整体而言，科教支出的拟合系数多为负值，说明教育支出的提升对耦合系统提升具有一定的抑制作用。在研究期间，其变化幅度相对较小，拟合系数多介于-0.10~0.20 之间，说明教育支出降低对耦合系统提升的抑制作用有限。

人口规模的拟合系数随时间呈现先平稳后下降的变化趋势，对耦合系统影响呈正向，2012—2014 年人口规模拟合系数的平均值基本成平稳状态，表明该阶段人口规模的提升对耦合系统促进作用基本一致，但从 2015 年开始，该影响因素的拟合系数逐年降低，且整体呈下降的趋势，说明该阶段人口规模的降低对耦合系统的提升具有一定的提升作用。原因是人口规模越大，对水资源承载力和生态环境的要求越高。

政府能力拟合系数平均值整体呈平稳上升趋势，2012—2017 年政府能力拟合系数为正值，且较为平稳，说明该阶段政府能力对耦合系统影响程度较小，对耦合系统的促进作用相对较小，2018—2023 年政府能力的拟合系数平均值逐渐变大，原因是政府加大了生态环境的保护及可持续发展。

社会保障能力的拟合系数在研究时期内变化趋势逐年增加，但拟合系数平均值均为负，且离散程度逐渐扩大，表明研究时期内社会保障能力的升高有助于提升耦合系统的整体效率水平，但该研究时期内，其变化幅度相对较小，拟合系数多介于-0.40~-0.10 之间，说明社会保障能力对耦合系统的提升的促进作用有限。

对外开发程度的拟合系数随时间呈现波动式上升的态势，整体而言，对外开发程度的拟合系数均为负值，且离散化程度较低。说明对外开发程度的提升对耦合系统的提升具有一定的促进作用。

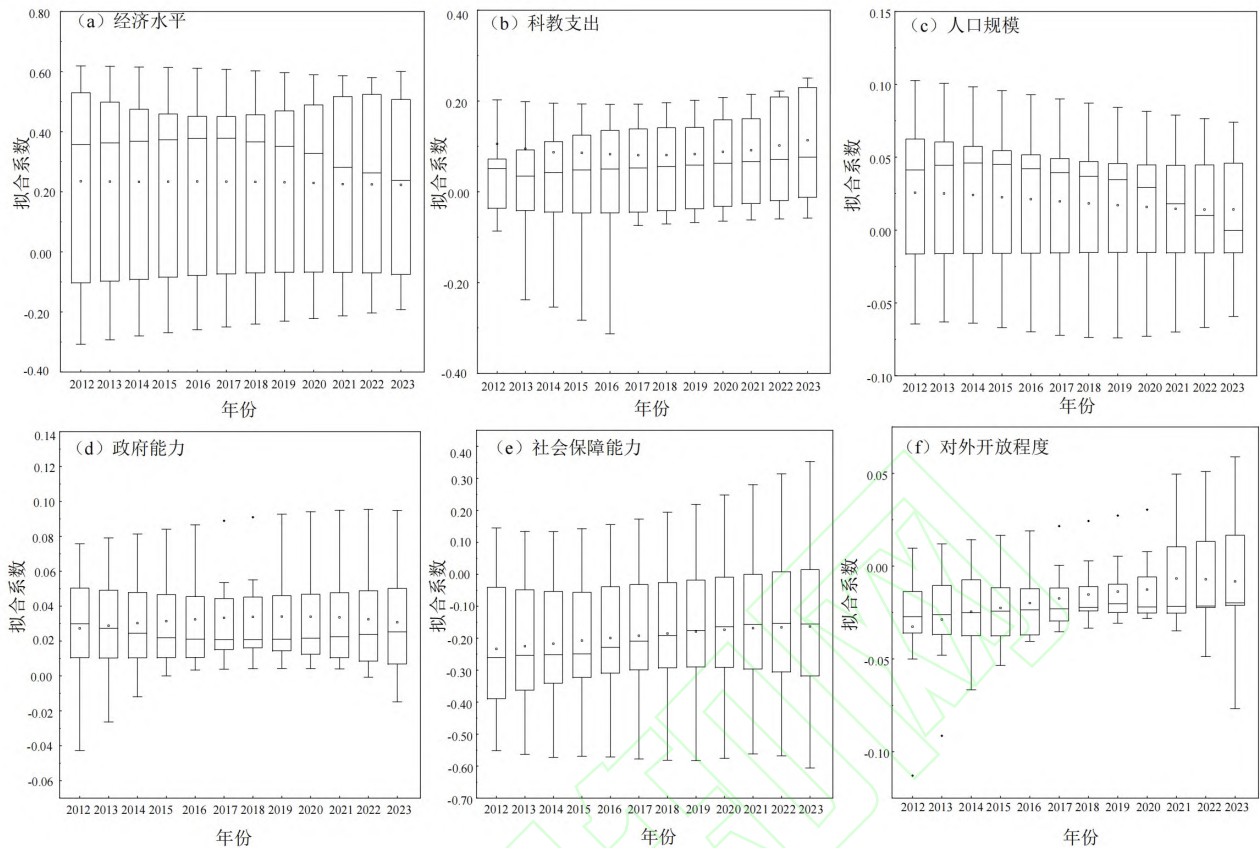


图 5 GTWR 模型拟合系数的时间演化趋势

Fig. 5 Time evolution trend of regression coefficient of GTWR model

(2) 各影响因素空间差异性分析 为能清晰地反应黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合度各影响因素的作用强度，本文选取研究期间内各影响因素拟合系数的平均值进而探讨其在空间上的差异性，结果见图 6。

经济水平在研究期内对各区域耦合度的影响具有正负双向性。本研究表明，白银市、兰州市、临夏回族自治州、甘南藏族自治州和定西市等 6 个州市，经济水平对耦合度的影响成正向关系，随着经济水平的提高对耦合水平提升有促进作用，原因是以上地区能够提供自然资源，导致其经济发展情况较好，然后反作用来保护水资源和生态环境，以此来保证水资源承载力、新型城镇化和生态环境的协同发展。而天水市、平凉市和庆阳市的拟合系数为负，说明以上地区在维系三者的耦合协调发展中，经济水平投入较低。

科教支出在研究期内对各区域耦合度的影响也具有正负双向性。本研究表明，科教支出三者耦合协调发展的抑制作用主要集中于临夏回族自治州、庆阳市和定西市。说明地区文化软实力的提升，可能在研究期间对其影响不太显著。在兰州市和武威市等其余 6 市中，科教占比的影响为正，说明在该区域加大科教占比投入，可提高其耦合协调度，以此来支撑三者的协调发展。

人口规模在研究期内对各区域耦合度的影响也具有正负双向性。本研究表明，在陇东地区和武威市呈负向关系，表明该市人口规模集聚过快与其本底脆弱的水资源承载力和生态环境不相匹配，从而不利于整体系统的耦合协调发展。其他地区成正向关系，表明人口规模的集聚可促使经济发展的同时，其资源环境能够支撑起整个地区的发展。

政府能力在研究期内拟合系数为正向关系。本研究表明，当前黄河流域甘肃段各地政府对水生态文明建设注意较多，在新型城镇化进程中不能仅依靠市场在资源配置中的决定性作用，还要有效发挥政府的宏观调控作用，缩小发展差距，避免因盲目竞争而带来的资源浪费，从而促进三者的协调发展。

社会保障能力在研究期内对各区域耦合度的影响负向关系较多。本研究表明，除庆阳市之外，其他的地区为负向关系。原因是以上地区居民失业率偏低和就业岗位较多，导致人口吸引力较大，从而导致资源环境承载力变大，影响三者的耦合协调水平。

对外开放程度在研究期内拟合系数为负向关系较多。本研究表明，除甘南和定西为正向关系，其他的地区为负向关系。说明以上地区扩大对外开放及引进外资，并不会提高三者的耦合协调发展。原因是以上

城市大部分为主要以工业为主，导致对外开放及引资较低，而甘南和定西主要以旅游为主导，外资对其经济发展影响较大，从而影响三者的耦合协调发展。

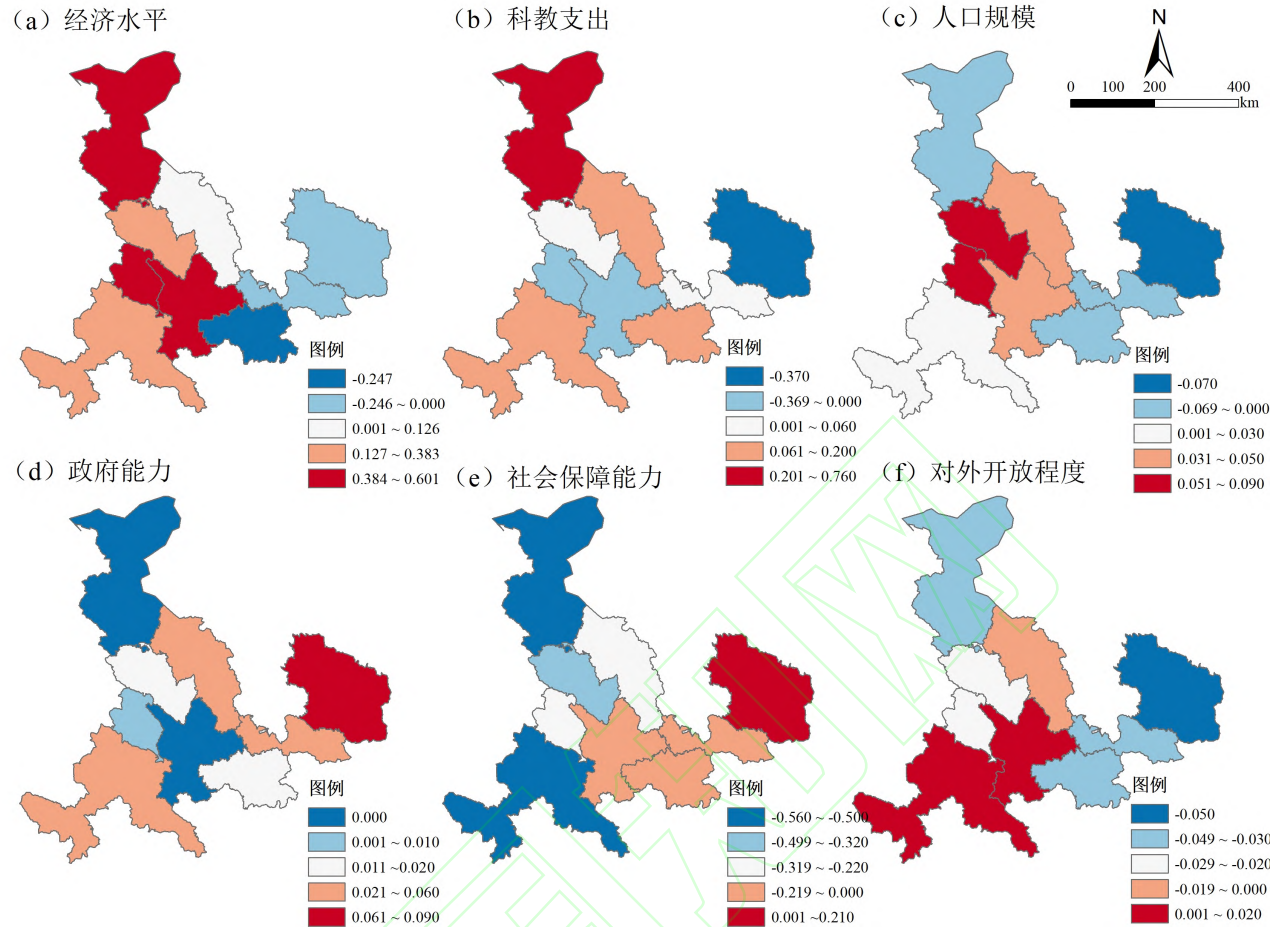


图 6 GTWR 模型拟合系数的时空变化趋势
Fig. 6 Spatial and temporal trends of the fitted coefficients of the GTWR model

4 讨论

通过分析黄河流域甘肃段的耦合协调关系的时空变化，本研究发现黄河流域甘肃段各市州耦合协调度存在明显的空间差异，经济社会发展水平较好的市州耦合水平远高于欠发达地区。这与 Li 等^[49]的研究结论保持一致。兰州市和天水市作为甘肃省的区域中心，经济发展效率、社会发展水平和经济实力较高，其城市建设投资、财政资金充裕，原因是中心城市周边城市的具有较高的虹吸效应^[50]。城市人口增长同时也为城市发展积累了足够的劳动力资源，进而推动了城市的快速发展。三者的耦合协调度随着时间的推移而增长，耦合状态从起初的轻度失调到后面的濒临失调。黄河流域甘肃段是甘肃省新型城镇化建设的重要区域，也是黄河流域重要的水源涵养和补给区，各级政府应大力推进河湖生态系统治理和保护，致力于探索绿色发展道路和建立生态保护市际协调机制，促进城市的可持续发展。

由于不同地区水资源承载力存在差异，显著影响各区域的新型城镇化和生态环境发展水平，导致三者耦合协调度差异显著。首先，从内部影响因素来看，如韩丽红等^[51]通过研究云南省城镇化与水资源协调发展，发现水资源开发利用率、城镇就业人口占比和人均公园绿地面积等为主要影响因素。杨建平^[52]以关中平原城市群为例，发现人口和经济水平影响其新型城镇化与水资源耦合协调的主要影响因素。其次，从外部影响因素来看，由王星星等^[53]采用灰色关联度模型对黄河流域上游生态环境、经济发展和城镇化进行耦合评价，确定影响其关键因素是经济发展水平和水资源等，王佳韡等^[40]利用 GWR 模型对长江经济带旅游经济、城镇化和生态环境耦合协调发展进行评估，确定主要影响因素为入境游客人数。本研究发现，影响黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境耦合协调发展的外部影响因素是经济水平、社会保障能力和政府能力，其中经济水平是影响其耦合水平的关键因素，这与刘冉然等^[54]研究保持一致。

本文通过耦合协调度模型，分析黄河流域甘肃段水资源承载力、新型城镇化和生态环境之间的耦合关系，为研究区不同要素之间的协调配置及区域可持续发展提供新的视角，然而，研究同时也有一些局限性。在影响因素选择方面，由于地区政策和管理能力尚未量化，因此将政策执行及管理能力主要以社会经济和生态环境情况来体现，未来可基于地区管理方式的差异化，探讨政策对地区耦合协调水平的影响。同时，

今后也可以通过人口和经济发展趋势进行场景模拟,结合各系统的临界值,为地区可持续发展提供参数阈值。

5 结论

(1) 2012—2023 年期间,黄河流域甘肃段各市州的水资源承载力、新型城镇化和生态环境发展水平持续变好,并呈稳步上升趋势,但各市州存在明显空间差异。其中,水资源承载力发展指数在甘南藏族自治州最高,临夏回族自治州最低。新型城镇化和生态环境发展指数均在兰州市最高,甘南藏族自治州最低。到 2023 年,兰州市和天水市的作为甘肃省的中心城市,新型城镇化水平高于其他市州,属于水资源承载力滞后型城市,其他市州属于新型城镇化滞后型城市。

(2) 2012—2023 年期间,水资源承载力、新型城镇化和生态环境在黄河流域甘肃段的耦合协调度呈现增长趋势,地区耦合协调水平从轻度失调上升到濒临失调等级,且各市州仍存在差异,在空间上呈现出“南低北高”的空间特征,大部分地区耦合协调度集中在 0.40~0.50 之间,属濒临失调等级。到 2023 年,兰州市耦合协调度最高,处于良好协调等级,武威市次之,基本处于勉强协调等级,其余地区处于濒临失调等级,并且各市州的耦合协调度逐年变好。

(3) 从内部影响因素来看,2012—2023 年期间,各市州的影响因素存在差异,但污水回用率、生活垃圾清运量、粮食作物人均占有量、水资源总量、产水模数是影响耦合协调度的主要影响因素。且各市州排名在前 5 位的影响因素的影响程度总和全部超过 50%,其中兰州市最大,定西市最小,障碍度分别为 75.08% 和 45.34%。从外部影响因素来看,经济水平、人口规模、教育支出、政府能力、社会保障能力和对外开放程度对黄河流域甘肃段耦合协调度存在驱动作用,从影响程度从强到弱来看,依次为经济水平、社会保障能力、政府能力、教育支出、人口规模和对外开放程度,且各市州的主导因素存在差异。来发展应促使各市州重视其影响因素,使其耦合协调发展。

参考文献:

- [1] 姚士谋,张平宇,余成,等.中国新型城镇化理论与实践问题[J].地理科学,2014,34(6):641-647.
Yao S M, Zhang P Y, Yu C, *et al.* The theory and practice of new urbanization in China[J]. *Geographical Science*, 2014, 34(6): 641-647.
- [2] 王平顺,臧旭超,厚富来,等.基于 SD 模型的巴彦淖尔市水资源供需平衡方案研究[J].干旱区地理,2025,48(2):202-211.
Wang, P S, Zang, X C, Hou, F L, *et al.* Study on water resources supply and demand balance scheme of Bayannur city based on SD model[J]. *Arid Land Geography*, 2025, 48(2): 202-211.
- [3] Song M L, Tao W L, Shang Y P, *et al.* Spatiotemporal characteristics and influencing factors of China's urban water resource utilization efficiency from the perspective of sustainable development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 338, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.130649.
- [4] Li D L, Zuo Q T, Zhang Z Z. A new assessment method of sustainable water resources utilization considering fairness-efficiency-security: a case study of 31 provinces and cities in China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 81, doi: 10.1016/j.scs.2022.103839.
- [5] Huang Y Y, Lin T, Zhang G Q, *et al.* Spatiotemporal patterns and inequity of urban green space accessibility and its relationship with urban spatial expansion in China during rapid urbanization period[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 809, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151123.
- [6] 杨朝斌,张亭,胡长涛,等.蓝绿空间冷岛效应时空变化及其影响因素——以苏州市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):677-688.
Yang C B, Zhang T, Hu C T, *et al.* Spatial-temporal characteristics of the cooling island for blue-greenSpace and its driving factors in Suzhou, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(3): 677-688.
- [7] 樊杰.“人地关系地域系统”是综合研究地理格局形成与演变规律的理论基石[J].地理学报,2018,73(4):597-607.
Fan J. "Territorial System of Human-environment Interaction": a theoretical cornerstone for comprehensive research on formation and evolution of the geographical pattern[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607.
- [8] 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[J].地理学报,2019,74(8):1489-1507.
Liu H M, Fang C L, Li Y H. The Coupled Human and Natural Cube: a conceptual framework for analyzing urbanization and eco-environment interactions[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 597-607.
- [9] 黄金川,方创琳.城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J].地理研究,2003,(2):211-220.
Huang J C, Fang C L. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment[J]. *Geographica research*, 2003(2): 211-220.
- [10] Yu Q W, Sun Z H, Shen J Y, *et al.* The nonlinear effect of new urbanization on water pollutant emissions: empirical analysis based on the panel threshold model[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118564.
- [11] 杜森,张大勇,王冠南,等.基于水资源保护的长江流域产业发展研究——以宜宾市为例[J/OL].灌溉排水学报,doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2025040.
Du S, Zhang D Y, Wang G N, *et al.* Research on industrial development of Yangtze River basin based on water resource protection: taking Yibin city as an example[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*. doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2025040.
- [12] Xu R, Hu S R, Wan H, *et al.* A unified deep learning framework for water quality prediction based on time-frequency feature extraction and data feature enhancement[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 351, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119894.
- [13] Liang S Z, Zhang F B, Li R, *et al.* Field investigation on the change process of microbial community structure in large-deep reservoir during the initial impoundment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117827.
- [14] Ma Q Q, Yang R X, Lin Y. Dynamic role of clean energy and sustainable economic growth in coastal region: novel observations from China[J]. *Environmental Research*, 2024, 251, doi: 10.1016/j.envres.2024.118659.
- [15] Fu H, Gaizère P, García Molinos J, *et al.* Mitigation of urbanization effects on aquatic ecosystems by synchronous ecological restoration[J]. *Water Research*, 2021, 204, doi: 10.1016/j.watres.2021.117587.
- [16] Liu G Y, Du S P, Gao Y, *et al.* A study on energy-water-food-carbon nexus in typical chinese northern rural households[J]. *Energy Policy*, 2024, 188, doi: 10.1016/j.enpol.2024.114100.

- [17] Chen J H, Zhang W P, Song L, *et al.* The coupling effect between economic development and the urban ecological environment in shanghai port[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **841**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156734.
- [18] Zhou R X, Jin J L, Wu C G, *et al.* Connection number based model for coordination development evaluation of regional water resources, social economy and ecological environment complex system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **339**, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117913.
- [19] 姜亚俊, 慈福义, 史佳璐, 等. 山东省新型城镇化与生态环境耦合协调发展研究[J]. *生态经济*, 2021, **37**(5): 106-112.
Jiang Y J, Ci F Y, Shi J L, *et al.* Study on the coupling development of new urbanization and ecological environment in Shandong province[J]. *Ecological Economy*, 2021, **37**(5): 106-112.
- [20] Yuan D, Du M, Yan C, *et al.* Coupling coordination degree analysis and spatiotemporal heterogeneity between water ecosystem service value and water system in Yellow River basin cities[J]. *Ecological Informatics*, 2024, **79**, doi: 10.1016/j.ecoinf.2023.102440.
- [21] 武照亮, 仝自强. 水环境质量对新型城镇化的影响机制研究[J/OL]. *西安理工大学学报*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20241108.1454.006.html>.
Wu Z L, Tong Z Q, Research on the influence and mechanism of water environment quality on new urbanization[J/OL]. *Journal of Xi'an University of Technology*, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20241108.1454.006.html>.
- [22] Zhang Y, Khan S U, Swallow B, *et al.* Coupling coordination analysis of China's water resources utilization efficiency and economic development level[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, **373**, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133874.
- [23] Zhao G L, Liang R, Li K F, *et al.* Study on the coupling model of urbanization and water environment with basin as a unit: a study on the hanjiang basin in China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **131**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108130.
- [24] 陈艳萍, 蒋倩倩, 刘晶婕. 黄河流域“水资源-生态保护-高质量发展”空间均衡性诊断[J]. *水利经济*, 2024, **42**(1): 14-20.
Chen Y P, Jiang Q Q, Liu J J. Spatial equilibrium diagnosis of “water resources-ecological protection-high-quality development” in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, **42**(1): 14-20.
- [25] 宁朝山, 李可馨. 黄河流域水资源-生态-城市-产业协同演进研究[J]. *人民黄河*, 2024, **46**(2): 21-28.
Ning C S, Li K X. Study on the Evolution of quaternary cooperation of water resources-ecology-city-Industry in the Yellow River Basin[J]. *Yellow River*, **46**(2): 21-28.
- [26] Li C, Wei Y, Zhang X B. Spatio-temporal patterns of high-quality urbanization development under water resource constraints and their key drivers: a case study in the Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, **166**, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112441.
- [27] 王锐, 祝笑笑, 彭艳艳, 等. 2000-2020 年黄河流域水-能源-粮食系统耦合协调时空演变特征[J]. *水土保持研究*, 2024, **31**(1): 354-362.
Wang R, Zhu X X, Peng Y Y, *et al.* Spatio temporal characteristics of water-energy-food coupling coordination in the Yellow River Basin in the period from 2000 to 2020[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, **31**(1): 354-362.
- [28] 杨学文, 刘小慧, 叶萍萍, 等. 熵权法和 TOPSIS 模型协同下的黄河流域(甘肃段)水资源承载力时空变化分析[J]. *测绘通报*, 2024, (10): 18-24.
Yang X W, Liu X H, Ye P P, *et al.* Spatio-temporal variation analysis of water resources carrying capacity in the Yellow River basin (Gansu section) in collaboration with entropy weight method and TOPSIS model[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2024, (10): 18-24.
- [29] Pang B, Li X X, Yao F. Coupling coordination analysis and obstacle factors of water-energy-environment-economy in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, **468**, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143108.
- [30] Jin C L, Guan Q Y, Li G, *et al.* Evaluation of regional water environmental carrying capacity and diagnosis of obstacle factors based on UMT model[J]. *Water*, 2023, **14**, doi: 10.3389/fenvs.2022.1015158.
- [31] 武旭, 王勃砚, 任伟, 等. 2000—2023 年黄河流域甘肃段生态环境质量与影响因素[J]. *应用生态学报*, 2025, **36**(2): 353-364.
WU X, Wang B Y, Ren W, *et al.* Ecological environment quality and the influencing factors in Gansu section of Yellow River Basin during 2000-2022[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2025, **36**(2): 353-364.
- [32] 俞金凤, 杜怀玉, 王家亮, 等. 基于 Zonation-MSPA 耦合模型的甘肃沿黄地区生态安全格局构建与评估[J]. *环境科学*, 2025, **46**(5): 3085-3097.
Yu J F, Du H Y, Wang J L, *et al.* Construction and assessment of ecological security pattern in Gansu along the Yellow River Based on Zonation-MSPA coupling model[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(5): 3085-3097.
- [33] Bahtebay J, Zhang F, Ariken M, *et al.* Evaluation of the coordinated development of urbanization-resources-environment from the incremental perspective of Xinjiang, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **325**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129309.
- [34] Han H, Li G, Zhang J Q, *et al.* Spatiotemporal analysis of the coordination of economic development, resource utilization, and environmental quality in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **127**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107724.
- [35] Luo D, Liang L W, Wang Z B, *et al.* Exploration of coupling effects in the economy-society-environment system in urban areas: case study of the Yangtze River delta urban agglomeration[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **128**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107858.
- [36] Cai J, Li X P, Liu L J, *et al.* Coupling and coordinated development of new urbanization and agro-ecological environment in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145837.
- [37] Zhang Y, Zhang Y J, Zhang H, *et al.* Evaluation on new first-tier smart cities in China based on entropy method and TOPSIS[J]. *Ecological Indicators*, 2023, **145**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109616.
- [38] Jing X D, Tao S T, Hu H, *et al.* Spatio-temporal evaluation of ecological security of cultivated land in China based on DPSIR-entropy weight TOPSIS model and analysis of obstacle factors[J]. *Ecological Indicators*, 2024, **166**, doi: 10.1016/j.ecolind.2024.112579.
- [39] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. *水资源保护*, 2022, **38**(5): 80-86.
Wang F Q, Ying Z H, Lv S B, *et al.* Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Water Resources Protection*, 2022, **38**(5): 80-86.
- [40] 王佳轶, 冉光泰, 肖世平, 等. 长江经济带旅游经济-城镇化-生态环境耦合研究[J]. *人民长江*, 2024, **55**(10): 38-47.
Wang J S, Ran G T, Xiao S P, *et al.* Study on coupling of tourism economy - urbanization - ecological environment of Yangtze River Economic Belt[J]. *Yangtze River*, 2024, **55**(10): 38-47.
- [41] Zhang Y S, Xiao L, Liu B Y, *et al.* Spatial relationships between ecosystem services and socioecological drivers across a large-scale region: a case study in the Yellow River basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **766**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142480.
- [42] Zhang J T, Dong Z C. Assessment of coupling coordination degree and water resources carrying capacity of hebei province (china) based on WRESP2D2P framework and GTWR approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, **82**, doi: 10.1016/j.scs.2022.103862.
- [43] 周镨基, 刘璇, 皮修平. 外部性视阈下湖南省水稻生产净碳汇时空演绎及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2025, **46**(8): 4876-4887.
Zhou R J, Liu X, Pi X P. Spatiotemporal evolution and driving factors of net carbon sink in rice production in punan province: an externality perspective[J]. *Environmental Science*, 2025, **46**(8): 4876-4887.
- [44] 邓乐乐, 郭生练, 王俊, 等. 基于博弈论云模型的汉江中下游湖北片区水资源承载力评价[J]. *水资源保护*: 1-15.
Deng L L, Guo S L, Wang J, *et al.* Assessment of water resources carrying capacity in the middle-lower reaches of Han River (Hubei Province) based on game theory-cloud model[J]. *Water Resources Protection*: 1-15.
- [45] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 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[J]. *资源科学*, 2020, **42**(1): 159-171.
Zhao J J, Liu Y, Zhu Y K, *et al.* Spatiotemporal differentiation and influencing factors of the coupling and coordinated development of new urbanization and ecological environment in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2020, **42**(1): 159-171.
- [46] 张胜武, 葛宇梦, 李小红, 等. 黄河流域新型城镇化与水生态环境耦合协调的时空格局及影响因素[J]. *中国沙漠*, 2024, **44**(3): 172-181.
Zhang S W, Ge Y M, Li X S, *et al.* Spatio-temporal pattern and influencing factors of the coupling coordination of new urbanization and

- water ecological environment in the Yellow River Basin[J]. *Journal of desert research*, 2024, **44**(3): 172-181.
- [47] 任保平, 巩羽浩. 黄河流域城镇化与高质量发展的耦合研究[J]. *经济问题*, 2023, (3): 1-12.
Ren B P, Gong Y H. Study on the coupling of urbanization and high-quality development in the Yellow River Basin[J]. *On Economic Problems*, 2022, (3): 1-12.
- [48] 王江波, 王晗, 苟爱萍. 粤港澳大湾区城市生态韧性的时空演变特征与影响因素[J]. *生态经济*, 2024, **40**(12): 98-107.
Wang J B, Wang H, Gou A P. Spatio-temporal evolution characteristics and influencing factors of urban ecological resilience in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Ecological Economy*, 2024, **40**(12): 98-107.
- [49] Li W J, Min A, Wu H L, *et al.* The local coupling and telecoupling of urbanization and ecological environment quality based on multisource remote sensing data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, **327**, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116921.
- [50] Li W J, Wang Y, Xie S Y, *et al.* Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between urbanization and ecosystem health in chongqing municipality, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **791**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148311.
- [51] 韩丽红, 潘玉君, 高庆彦, 等. 云南省城镇化与水资源协调发展时空演化及影响因素分析[J]. *人民珠江*, 2024, **45**(7): 119-27.
Han L H, Pan Y J, Gao Q Y, *et al.* Spatio-temporal evolution and influencing factors analysis of coordinated development between urbanization and water resources in Yunnan province[J]. *Pearl River*, 2024, **45**(7): 19-27.
- [52] 杨建平, 王萌. 缺水型地区新型城市化与水资源耦合协调及障碍分析——基于关中平原城市群的分析[J]. *经营与管理*, 2022, (10): 159-166.
- [53] 王星星, 周文霞, 任董莉. 黄河流域上游生态环境-经济发展-城镇化耦合协调发展——以甘肃段为例[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2024, **60**(3): 64-73.
Wang X X, Zhou W X, Ren D L. Coupling and coordinated development of eco-environment, economic growth, and urbanization in the upper Yellow River Basin: a case study of the Gansu section[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science Edition)*, 2024, **60**(3): 64-73.
- [54] Liu R R, Dong X B, Wang X C, *et al.* Relationship and driving factors between urbanization and natural ecosystem health in China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, **147**, doi: 10.1016/j.ecolind.2023.109972.