

2007–2020 年太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合关系及时空演化

王森^{1,2,3}, 吴加伟^{1**}, 孙伟^{1,3}, 刘崇刚¹, 郭辉^{1,3}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

(2: 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023)

(3: 中国科学院大学南京学院, 南京 211135)

摘要: 湖泊流域内水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调是实现流域可持续发展的重要途径。本研究构建了流域水敏性与工业水环境污染胁迫评价指标体系, 运用耦合协调度模型、空间马尔科夫链、灰色关联度模型分析 2007-2020 年太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的时空演化特征及驱动因素。结果显示: (1) 2007-2020 年太湖流域水敏性轻微下降, 整体呈现“西南高-东部低”的空间分布格局; 而工业水环境污染胁迫程度则显著提升, 东部形成 S 型高胁迫带, 西部保持低胁迫状态, 空间格局呈现明显分化。(2) 流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度整体下降, 空间上呈“西高东低”分布, 具有“俱乐部趋同”特征, 并且存在一定的空间溢出效应。(3) 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度受五大因素影响, 关联度从高到低依次为: 科技投入水平、产业结构、人口集聚程度、环境规制强度、社会经济发展水平, 且影响程度空间差异显著。因此, 本研究建议实施空间差异化水环境规制政策, 优化流域内生产力空间布局, 并健全流域水环境综合治理体系, 完善生态补偿与监测预警体系, 以促进湖泊流域实现可持续发展。

关键词: 太湖流域; 水敏性; 工业水环境污染胁迫; 耦合协调度; 马尔科夫链; 灰色关联度

Coupling relationship and spatiotemporal evolution of water sensitivity and industrial water environmental pollution stress in the Taihu Basin (2007-2020)

Wang Sen^{1,2,3}, Wu Jiawei^{1**}, Sun Wei^{1,3}, Liu Chonggang¹, Guo Hui^{1,3}

(1: State Key Laboratory of Lake and Watershed Science for Water Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

(2: School of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R.China)

Abstract: The coupling coordination between water sensitivity and industrial water environmental pollution stress in lake basins

* 2025-04-30 收稿; 2025-12-19 收修改稿。

中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署科研项目 (NIGLAS2022TJ09) 和中国科学院南京地理与湖泊研究所自主部署项目 (NIGLAS2022GS06) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: jwwu@niglas.ac.cn

represents an important pathway for achieving sustainable watershed development. This study established an evaluation index system for both water sensitivity and industrial water environmental pollution stress within the watershed. By applying the coupling coordination degree model, spatial Markov chain, and grey relational analysis, the spatiotemporal evolution characteristics and driving factors of their coupling coordination in the Taihu Basin from 2007 to 2020 were examined. The results revealed that: (1) From 2007 to 2020, water sensitivity in the Taihu Basin declined slightly, generally exhibiting a spatial pattern of “high in the southwest and low in the east”. In contrast, industrial water environmental pollution stress increased significantly, with an S-shaped high-stress belt forming in the east and low stress persisting in the west, indicating notable spatial differentiation. (2) The overall coupling coordination degree between water sensitivity and industrial water environmental pollution stress declined, displaying a “higher in the west and lower in the east” spatial distribution pattern, alongside characteristics of “club convergence” and a certain degree of spatial spillover effect. (3) The coupling coordination degree in the Taihu Basin was driven by five key factors, ranked in descending order of correlation as follows: technological investment level, industrial structure, population agglomeration degree, strength of environmental regulation, and socio-economic development level, with significant spatial variation in their effects. Thus, this study proposes optimizing the spatial layout of productivity within the basin, implementing differentiated water environmental regulation policies, and improving comprehensive watershed management, compensation, and monitoring and early warning systems to foster sustainable development of lake basins.

Keywords: Taihu Basin; water sensitivity; industrial water environmental pollution stress; coupling coordination degree; Markov chain; grey relational analysis

协调经济发展和生态环境保护之间的关系对推动区域可持续发展至关重要^[1]。改革开放以来,伴随着迅速的工业化与城镇化进程,我国工业经济发展水平显著提升,与此同时也面临着污染物排放强度高、生态环境退化等问题,经济发展与生态环境之间的矛盾日益突出^[2-4]。湖泊流域作为自然-经济-社会复合系统^[5,6],不仅是人类社会经济活动的重要载体,其内部的湖泊更是承担着关键的生态系统服务功能^[7-10],在社会经济发展高地与重要生态屏障的双重定位下,如何有效协调其经济发展目标与生态环境保护目标显得尤为艰难和迫切。

水是流域综合管理中最敏感的要素^[11],人类工业活动过程中各类水污染物输出对区域水环境系统造成的综合压力——即“工业水环境污染胁迫”——是湖泊流域需要重点关注的问题^[12-15]。工业水环境污染胁迫代表了人类工业活动对区域水环境系统的扰动^[16],当工业水环境污染胁迫超出水环境自净能力时,便会导致区域水环境发生结构失调,进而引发一系列水生态环境问题^[13, 17, 18]。而水敏性为我们衡量区域水环境本底条件提供一种新的视角,水敏性是指区域水文过程和水生态环境对人类活动影响的敏感程度,其状况基于“水资源、水生态、水环境、水安全”四个维度综合表征,能够全面客观地反映区域水系统的内在稳定性与脆弱性^[11, 19]。作为生态环境系统和社会经济系统的重要表征要素,流域水敏性与工业水环境污染胁迫之间存在着复杂的交互关系,一方面,工业水环境污染胁迫直接冲击并扰动流域水环境、水生态系统,进而改变流域水敏性状况;另一方面,流域水敏性也可通过反馈机制对区域工业活动形成反向约束,最终实现对工业水环境污染胁迫的调控。二者共同构成了“压力—状态—响应”闭环反馈系统,因此仅对单一系统进行研究难以揭示流域区域“人-水”系统互馈关系,需要从系统整体性和动态演化角度出发,定量揭示“人-水”系统间相互影响强度、方向与协调状态。同时,运用评价指标体系建构、耦合协调模型等技术方法,量化水敏性、工业水环境污染胁迫等“社会-生态”系统客观属性,有助于科学评估不同自然禀赋、社会经济发展阶段下区域工业发展与水环境保护间的协同程度,优化流域可持续发展管理机制,减缓工业活动对水环境系统负面影响。为此,探究典型湖泊流域内各小流域工业水环境污染胁迫

与水敏性之间的耦合协调状态及其影响因素，并据此提出科学调控政策建议，对促进湖泊流域可持续发展具有重要意义。

社会经济与生态环境系统之间的耦合关联研究是当前地理学、环境科学等学科研究的重点热点，国内外学者针对此展开了大量研究，其中国外研究起步较早，更侧重于理论构建与框架模型探索，研究内容主要从人地关系视角出发，探究社会经济系统与自然生态系统之间的相互反馈与协同演化机制，并提出了环境库兹涅茨曲线^[20]、“压力—状态—响应”框架^[21]、社会-生态系统等经典理论^[22]，而国内研究则更加侧重于开展特定区域的实证分析与政策应用研究，从发展视角探究区域社会经济与生态环境系统之间的匹配关系，研究内容主要集中在两个方面：一是分析系统耦合协调度的时空格局与演化特征，分析方法主要包括空间自相关分析^[23, 24]、标准差椭圆^[25, 26]以及空间马尔科夫分析^[27]等；二是探究系统耦合协调度的驱动因素，分析方法主要包括地理探测器^[23]、灰色关联度模型^[28, 29]以及地理加权回归模型^[30, 31]等。作为生态环境系统的核心子系统，水环境系统与社会经济系统的耦合关系尤其受到学界关注，然而既有研究在研究思路、研究尺度以及研究方法上仍存在拓展空间。研究思路上，现有研究主要集中于探究区域水生态环境与城镇化^[29, 32-34]、经济发展^[15, 35, 36]等宏观社会经济要素之间的耦合关联，这些研究虽揭示了区域社会经济发展与水环境保护间的普遍性矛盾，却对水环境系统内在脆弱性与特定污染压力源之间的互动机制探究不足，为此，本研究将“水敏性”与“工业水环境污染胁迫”引入此研究框架内，以推动研究从宏观现象关联分析转向对特定系统相互作用机理的微观剖析。研究尺度上，尽管现有的耦合关联研究区域已涵盖了国家^[37, 38]、省域^[27, 31]、城市群^[23, 24, 39]等多种行政尺度，但对湖泊流域这一关键且特殊的自然地理单元却鲜有涉及，基于行政单元的研究易破坏水环境系统的完整性，而以湖泊流域为研究对象更能系统地揭示社会经济活动对水环境影响的内在规律。研究方法上，当前针对流域尺度的工业水环境污染胁迫测度方法尚待完善，本研究在评价指标体系建构与空间分析技术方法应用基础上，纳入产污系数用于量化不同行业及规模企业进行工业活动时的污染物排放强度，为揭示工业水环境污染胁迫与水敏性耦合关系提供更精准的数据支撑。

太湖流域是我国经济活力最高的湖泊流域之一，同时是长三角地区重要的生态屏障^[40]。鉴于此，本文以太湖流域为案例区，以2007、2010、2013、2016、2020年为研究时间节点，构建水敏性与工业水环境污染胁迫评价指标体系，在对128个小流域单元水敏性与工业水环境污染胁迫程度评价的基础上，运用耦合协调度模型、空间马尔科夫链、灰色关联度模型等方法深入分析太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫之间耦合协调度的时空分异格局、动态演化特征及驱动因素，以期以太湖流域及类似湖泊流域的产业空间布局优化、水环境综合治理及区域可持续发展提供科学依据和政策建议。

1 研究区域、数据与方法

1.1 研究区域

太湖流域地处长江三角洲的南翼，行政区划上分属江苏省、浙江省、上海市和安徽省，流域面积37374.8 km²，水域面积约5644 km²，地形包含平原、山地，绝大部分属于平原地区，整体地势西高东低，其内部水系发达，河网密布，是我国典型的湖泊流域。并且太湖流域是我国经济最发达、工业企业最密集的地区之一，2023年太湖流域国内生产总值达123950亿元，以全国0.4%的国土面积承载了9.8%的GDP，从产业结构来看，流域所涉及的64个区县第一、二、三产业增加值分别为1095.51亿元、43742.57亿元和75986.79亿元，产业结构比例为0.9:36.2:62.9，呈现出典型的后工业化特征；2023年末流域内七大核心城市（包含上海、苏州、无锡、常州、湖州、嘉兴、杭州）工业企业法人单位数约为45.36万家，约占全国工业企业法人单位总数10.71%；在太湖流域经济高速发展的同时，其水资源环境

却面临着严峻挑战，太湖流域多年平均水资源总量为 176.0 亿立方米，但人均水资源量仅为全国平均水平之五分之一，水资源禀赋相对不足^[41]。2024 年太湖流域 206 个重点断面优Ⅲ比例为 97.6%，太湖水质总体达到Ⅲ类，但营养状态指数为 52.4，湖泊水体整体处于轻度富营养状态，流域水环境综合治理形势较为复杂。

本文以小流域作为太湖流域水敏性及工业水环境污染胁迫的评价单元，其中小流域基于数字高程模型（DEM）数据生成的集水区划分。具体操作如下，首先对 DEM 数据进行填洼、流向生成、流量分析等操作处理，初步划定太湖流域的集水区范围，随后结合太湖流域实际水系数据进行空间拓扑校正，优化集水区划分方案，最终将太湖流域划分为 128 个小流域单元。

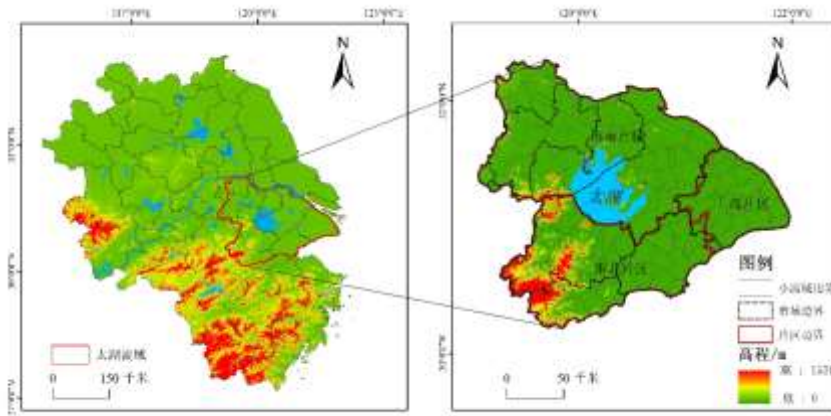


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic map of the study area

1.2 分析框架

本文基于社会-生态系统耦合视角，构建了流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调关系三步分析框架。第一步，构建水敏性与工业水环境污染胁迫评价指标体系。流域水敏性方面，本文从水资源、水环境、水生态、水安全四个维度选取评价指标，利用熵值法确定指标权重并加权评估；工业水环境污染胁迫方面，已有的研究证明工业企业的集聚程度与水环境污染之间存在空间正耦合效应^[42, 43]，因此本文基于区域工业企业密度数据表征工业水环境污染胁迫，同时构建行业排污强度系数、企业规模系数用于修正不同行业及规模企业的排污特征差异，最终通过行业排污强度系数、企业规模系数和工业企业密度数据加权计算工业水环境污染胁迫指数；第二步，耦合协调度时空分异格局及动态演化分析。基于流域水敏性与工业水环境污染胁迫评价结果运用耦合协调度模型计算各流域耦合协调状况，对 2007-2020 年太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度进行时空动态分析，同时应用空间马尔科夫链分析方法，构建耦合协调状况空间转移概率矩阵，深入挖掘耦合协调度的动态演化规律；第三步，耦合协调度驱动因素探究。基于行政边界将太湖流域分为三大片区，从社会经济、政策制度、科学技术等多个维度选取潜在驱动因素，通过灰色关联度模型量化各驱动因素与耦合协调度的关联程度。

本研究遵循“框架构建—动态评价—关联分析—驱动探究”的逻辑主线，旨在揭示太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的互动机制，为湖泊流域可持续发展提供科学依据。

1.3 数据来源与处理

文章使用的人口、经济、科技投入数据来源于上海、苏州、无锡、常州、镇江、杭州、嘉兴、湖州各省市统计局，环保词频数据基于各市政府工作报告处理获取，土地利用数据来自 CLCD 数据集

(<http://zenodo.org>), 空间分辨率为 30 m^[44], DEM 数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gs-cloud.cn>), 空间分辨率为 30 m, 水网和水面数据来源于 1:25 万全国基础地理数据库 (<https://www.webmap.cn>), 降雨量、潜在蒸散发数据和植被覆盖率数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 其中降雨量与潜在蒸散发数据空间分辨率为 1 km, 植被覆盖率数据空间分辨率为 250 m, 土壤数据集来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/>), 太湖流域企业属性信息数据来源于国家企业信用信息公示系统, 企业地理坐标通过对注册地址进行地理编码获取, 各工业行业化学需氧量 (COD) 和氨氮 (NH₃-N) 总排放量数据来自《中国环境统计年鉴》, 各工业行业法人单位数量来自《第四次经济普查公报》, 水质目标通过整理江苏、浙江、上海三地的水 (环境) 功能区划文件获得。



图 2 数据采集与处理流程

Fig. 2 Data Collection and Processing Procedure

由于各指标量纲有所不同, 且不同指标具有不同的指向性, 因此需要利用极差标准化法对各个指标数据进行无量纲处理, 正、逆向指标标准化的计算公式分别为:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{imin}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad X_{ij} = \frac{x_{imax} - x_{ij}}{x_{imax} - x_{imin}} \quad (1)$$

式中, X_{ij} 、 x_{ij} 分别是第 i 项指标第 j 个小流域标准化后的值和原始指标值; x_{imax} 是第 i 项指标中最大的值; x_{imin} 是第 i 项指标中最小的值。

1.4 研究方法

1.4.1 流域水敏性评价指标体系 研究基于“目标层—准则层—指标层”构建流域水敏性评价指标体系(表

1), 其中目标层为水敏性, 准则层包含水资源、水生态、水环境、水安全四个维度^[11, 45], 基于各准则层含义, 综合考虑评价指标的科学性以及可获取性, 最终选取了水网密度、产水量、生境质量、湿地占比、林地占比、养分输送比、水质目标、水体通达性、洪涝灾害危险性共 9 个评价指标^[11, 46-50]。指标权重确定方面, 为有效消除权重确定时人为主观因素的干扰, 选用熵权法这一客观性较强的赋权方法。

表 1 流域水敏性评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for watershed water sensitivity

目标层	准则层	指标层	计算方法	属性	权重
水敏性	水资源	水网密度	计算公式: $\frac{0.9 \times \text{水网面积} + 0.1 \times \text{河流长度}}{\text{流域面积}}$	-	0.13
		产水量	基于 InVEST 产水量模块模拟, 模拟单元为小流域, 输入数据包括降雨量、蒸散量、土壤类型等	-	0.06
		生境质量	基于 InVEST 生境质量模块模拟, 输入数据包括土地利用数据及威胁因子信息	+	0.15
	水生态	湿地占比	计算公式: $\frac{\text{湿地面积}}{\text{流域面积}}$	+	0.08
		林地占比	计算公式: $\frac{\text{林地面积}}{\text{流域面积}}$	+	0.06
	水环境	养分输送比	基于 InVEST 养分输送比模块模拟, 输入数据包括土地利用、土壤类型等	+	0.13
		水质目标	II 类赋值 7 分, III 类 5 分, IV 类 3 分, V 类及以下 1 分	+	0.09
		水体通达性	通长江或通海赋值 7 分, 大型湖泊或湖河通道赋值 5 分, 一般河道 3 分, 封闭或隔断区 1 分	-	0.20
		洪涝灾害危险性	从致灾因子和孕灾环境两个层面构建洪涝灾害危险性评价体系, 致灾因子包括平均降雨量、强降雨频次, 孕灾环境包括高程、坡度、植被覆盖度。	+	0.10

水资源层面, 水网密度与产水量均反映了流域水资源的相对丰沛程度, 数值越高代表流域水文调节能力越强, 水敏性越低; 水生态层面, 生境质量、湿地与林地占比越高, 则其水生态功能越重要, 水生态安全保障的约束更强, 水敏性相对更高; 水环境方面, 养分输送比高表明流域水质净化能力弱, 水质目标高表明流域污染容忍度低, 二者与水敏性均呈正相关关系, 而水体通达性强则有助于水流交换和污染物稀释, 从而降低水敏性; 水安全方面, 流域洪涝灾害危险性越高, 其对极端水文事件的承受度越小, 水敏性较高。

为确定 128 个小流域单元的各项指标值, 本研究以小流域边界为基本空间分析单元, 综合运用多种空间分析方法。具体而言, 针对水网密度、湿地占比与林地占比, 通过将水网水面矢量数据、土地利用栅格数据与 128 个小流域矢量边界进行空间叠加分析, 精确统计出各个小流域单元内相应地物的面积或长度数据, 再带入相应公式计算得到具体指标值; 针对产水量、生境质量、养分输送比等基于模型模拟的栅格数据指标, 可将数据直接导入模型计算得到整个流域的栅格结果, 再采用分区统计工具提取各小

流域内部栅格像元的平均值，并以此作为该小流域的最终指标值；而对于洪涝灾害危险性这一基于多因子综合评价生成的栅格数据指标，则先采用分区统计工具提取小流域各项基础指标数据平均值，再通过层次分析法计算各指标权重，加权各指标得到各小流域的洪涝灾害危险性评价价值；此外，水质目标与水体通达性采用赋值法，首先将各省市水功能区划图进行矢量化并判断不同河流与外部水体连通程度，通过空间连接以及面积最大原则，将预先划分好的水功能区划等级或连通性等级与小流域单元进行匹配，为每个小流域单元赋予相应的评价价值。通过上述方法，确保每个小流域单元均获得完整且精确的 9 项指标评估数据，为后续的综合评价奠定基础。

1.4.2 工业水环境污染胁迫程度测算 由于不同行业及规模企业的排污特征存在差异，因此本文尝试构建企业规模系数和行业排污强度系数对此误差进行修正，最终通过行业排污强度系数、企业规模系数和工业企业密度三者加权计算工业水环境污染胁迫指数。

(1) 行业排污强度系数。化学需氧量 (COD) 和氨氮 (NH₃-N) 作为工业废水中最主要且受国家重点管控的两项水体污染物^[43, 51]，是衡量水环境污染状况的核心指标。基于此，本文以地区 COD 和 NH₃-N 的排放强度衡量区域工业水环境污染胁迫程度，并以各行业单位企业 COD 和 NH₃-N 排放量标准值的加权和代表其水污染物排放强度系数，具体计算公式如下：

$$ECOD_i = \frac{COD_i}{N_i} \quad ENH3-N_i = \frac{NH3-N_i}{N_i} \quad (2)$$

$$ECOD_{in} = \frac{ECOD_i - ECOD_{min}}{ECOD_{max} - ECOD_{min}} \quad (3)$$

$$ENH3-N_{in} = \frac{ENH3-N_i - ENH3-N_{min}}{ENH3-N_{max} - ENH3-N_{min}} \quad (4)$$

$$P_i = 0.5 * ECOD_{in} + 0.5 * ENH3-N_{in} \quad (5)$$

式中，COD_i 和 NH₃-N_i 分别为全国 2020 年行业 *i* 工业废水中 COD 和 NH₃-N 的排放量，N_i 为当年全国行业 *i* 的企业总数，ECOD_i 和 ENH3-N_i 分别为行业 *i* 每万家企业 COD 及 NH₃-N 排放量，ECOD_{in} 和 ENH3-N_{in} 为行业 *i* 每万家企业 COD 及 NH₃-N 排放量标准化值，P_i 为行业 *i* 的排污强度系数。

(2) 企业规模系数。企业注册资本在一定程度上可以反映该企业的规模大小^[52, 53]，本文依照企业注册资本将企业规模分为四类，并为其设定相应的企业规模系数，企业规模划分及系数设定详见表 2。

表 2 企业规模系数表

Tab.2 Table of enterprise scale coefficients

注册资本 (万元)	企业规模	规模系数
0-10	微型企业	0.01
10-500	小型企业	0.1
500-5000	中型企业	1
>5000	大型企业	10

(3) 工业水环境污染胁迫指数测算。编写 Python 代码对企业点位数据进行处理，获取不同年份流域单元内不同行业及规模的企业密度数据，将与其对应的行业排污强度系数和企业规模系数的加权乘积之和，即为工业水环境污染胁迫指数，具体计算公式如下：

$$E = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n N_{ij} * S_j * P_i \quad (6)$$

其中, E 为流域工业水环境污染胁迫指数, N_{ij} 为流域内第 i 种行业第 j 种规模等级的企业密度, P_i 为第 i 种行业的排污强度, S_j 为第 j 种规模等级的企业规模系数, n 为企业规模等级总数, m 为行业类型总数。

1.4.3 耦合协调度模型 耦合协调度模型可用于评价系统间相互作用程度以及协同发展水平, 借助该模型评估流域水敏性与工业水环境污染胁迫之间的耦合协调度^[54], 具体公式如下:

$$C = \frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \quad (7)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C * T} \quad (9)$$

式中, C 为耦合度; D 表示系统间的耦合协调度; T 为综合协调指数, 代表协调程度; U_1 、 U_2 分别代表流域水敏性与工业水环境污染胁迫的综合评价指数; 由于工业水环境污染胁迫是一个负面指标, 因此在进行耦合协调度计算前需对其进行正向化处理, 使其能够反映流域发展的积极状态; α 、 β 为贡献指数, 本文认为流域水敏性与流域工业水环境污染胁迫对流域的发展同等重要, 因此将贡献指数 α 和 β 均赋值为 0.5, 旨在反映两系统对流域发展的均衡贡献^[36]。虽然不同权重赋值会影响耦合协调度绝对值, 但本研究重点关注耦合协调度整体时空演化趋势, 等权重处理对研究结论有效性影响较小; 本文在参考太湖流域产业发展水平与水生态环境状况的基础上, 借鉴耦合协调领域的经典研究^[1, 54], 将耦合协调度划分为四个等级, 具体划分结果如下表所示。

表 3 耦合协调度等级划分表

Tab.3 Classification table of coupling coordination degree levels

耦合协调度值	协调等级
$0 < D \leq 0.4$	中度失调
$0.4 < D \leq 0.5$	轻度失调
$0.5 < D \leq 0.7$	初级协调
$0.7 < D \leq 1.0$	良好协调

1.4.4 空间马尔科夫链 马尔科夫链是一种研究时间和状态均为离散的随机转移问题的方法, 通过将不同时期的单元属性值进行离散化处理, 并划分为 k 种状态类型, 用一个 $k \times k$ 阶转移概率矩阵 M 来表示不同时期单元状态之间的相互转移过程。而空间马尔科夫链则是传统马尔科夫链与“空间滞后”相结合的方法, 可用于探究在不同邻域背景下某一单元状态向上或向下转移的概率, 进而更有效地分析单元状态在动态演进过程中与邻域状况的空间关联性^[55], 本文拟借助此方法尝试探究太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调度在不同邻域背景下的动态演变规律。具体而言, 将传统 $k \times k$ 阶马尔科夫矩阵分解为 k 个 $k \times k$ 阶转移概率矩阵形式, 从而清晰地表达出在不同的邻域背景下, 耦合协调度等级向上或者向下转移的可能性, 公式如下:

$$m_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (10)$$

$$Lag_a = \sum X_b W_{ab} \quad (11)$$

式中, n_{ij} 为在研究期间内从 t 时刻至 $t+1$ 时刻由状态 i 转移至状态 j 的单元总数; n_i 为整个研究期内于 t 时刻状态为 i 的单元总数; Lag_a 为单元 a 的空间滞后值; X_b 为单元 b 的属性值; W_{ab} 为空间权重矩阵, 本文采用邻接权重矩阵。

1.4.5 灰色关联度模型 灰色关联度模型是基于灰色系统理论的分析方法, 通过比较不同数据序列的几何形状相似性来量化因素间的关联程度, 其核心是通过计算参考序列与比较序列之间的关联系数, 评估两者在动态发展中的同步变化水平^[56], 在系统内, 若两个因素变化的趋势具有一致性, 则二者关联程度较高; 反之, 则较低。计算公式如下:

$$\Delta i(k) = |X_0(k) - X_i(k)| \quad (12)$$

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta i(k)}{\Delta i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta i(k)} \quad (13)$$

$$Ri = \frac{\sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)}{n} \quad (14)$$

式中, k 为时间; i 为比较变量序号; $X_0(k)$ 为 k 时期参考变量; $X_i(k)$ 为 k 时期第 i 个比较变量; $\Delta i(k)$ 为 k 时期参考变量与第 i 个比较变量的绝对差值; $\max_i \max_k \Delta i(k)$ 为参考变量与所有比较变量在所有时期的最大绝对差值; $\min_i \min_k \Delta i(k)$ 为参考变量与所有比较变量在所有时期的最小绝对差值; $\varepsilon_i(k)$ 代表 k 时期比较变量 i 的关联系数; ρ 为分辨系数, 本研究取 0.5; n 为时间跨度; Ri 代表灰色关联度, 其值越大说明两个序列的关联程度越高。

2 流域水敏性与工业水环境污染胁迫程度时空演变特征

2.1 流域水敏性时空演变特征

2007-2020 年太湖流域小流域水敏性的评价结果范围为 0.06-0.69, 利用自然断点法将其划分为三个等级, 由低到高依次为低水敏区 (0.06-0.26), 中水敏区 (0.26-0.44), 高水敏区 (0.44-0.69)。从流域水敏性时间演变趋势来看, 太湖流域水敏性变化幅度较小, 总体呈波动下降状态。2007-2010 年太湖流域水敏性均值由 0.333 下降至 0.324, 2013 年回升至 0.328, 之后再次进入下降状态, 最终于 2020 年下降至 0.311, 期间流域水敏性均值共下降 0.022, 降幅仅为 6.61%。空间演变特征方面, 太湖流域水敏性较为稳定地表现为“西南高-东部低”的梯度分布格局。具体来看, 高水敏区集中分布在太湖西南侧的丘陵地带, 该区域林地占比与生境质量较高, 流域水生态系统对人类活动较为敏感; 中水敏区主要集聚在以太湖为核心的流域中部地区, 该区域邻近太湖等大型水面, 水网密集且湿地占比与水质目标较高; 低水敏区则多分布于流域东部及北部的边缘地带, 此区域邻近海域, 水体通达性处于较高水平。研究期间共有 8 个小流域的水敏性状况发生变化, 且这些小流域大多分布在中水敏与低水敏区的交界处, 水敏性等级由中转为低。总体而言, 太湖流域呈现出高水敏区稳定、中水敏区轻微退化、低水敏性缓慢扩张的空间演变态势。

2.2 流域工业水环境污染胁迫指数时空演变特征

2007-2020 年太湖流域小流域工业水环境污染胁迫指数范围为 0.001-2.736, 利用自然断点法将其划分为低胁迫 (<0.42)、中胁迫 (0.42-0.88)、高胁迫 (>0.88) 三个等级。从时序变化来看, 2007-2020 年间

太湖流域工业水环境污染胁迫指数呈现显著的上升趋势。2007、2010、2013、2016 和 2020 年流域工业水环境污染胁迫指数均值分别为 0.353、0.396、0.434、0.473 和 0.533，平均每年上升 0.014，年均增长率达 3.22%。太湖流域的空间演化格局具有显著的空间异质性，流域东部工业水环境污染胁迫程度较高且高污染胁迫区迅速扩张，西部工业水环境污染胁迫程度较低且空间格局较为稳定。具体而言，流域东部高污染胁迫区呈现“集核分布—双轴格局—带状整合”的空间演变特征，2007 年高污染胁迫区集中分布于上海、苏州、无锡三市，并在太湖东北侧和上海市核心城区分别构成两个高污染胁迫核心区，高污染胁迫核心区向外逐渐扩散，并于 2013 年在无锡、苏州太湖沿岸地带与上海市内分别形成两条独立高污染胁迫轴，2020 年两条高污染胁迫轴在空间上实现了连通与整合，并最终构成了以张家港市为起点，途经常州、无锡、苏州、上海市中心城区并延伸至平湖市的 S 型高污染胁迫带。流域西部总体保持低污染胁迫状态，研究期间仅太湖西岸局部区域和杭州市区工业水环境污染胁迫等级出现上升。

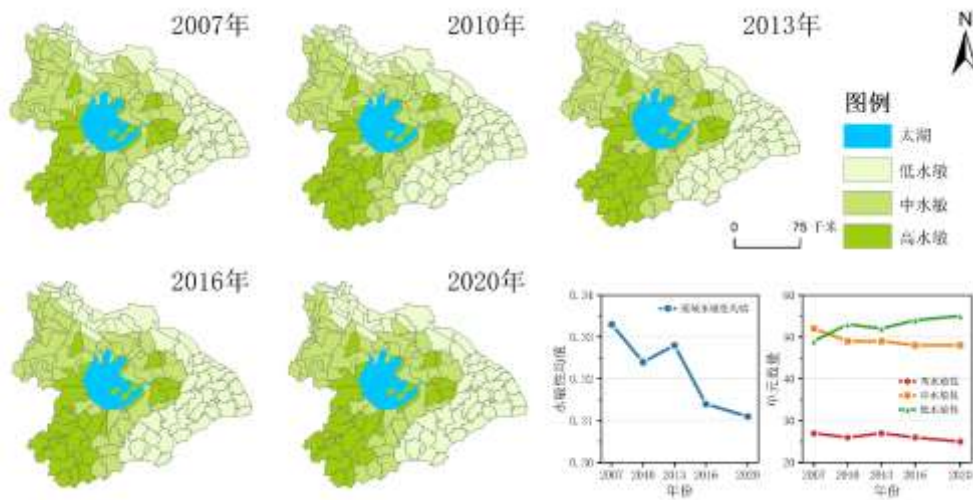


图 3 2007-2020 年太湖流域水敏性时空演变特征

Fig.3 Spatiotemporal evolution characteristics of water sensitivity in the Taihu Basin,2007-2020

东西部胁迫分化格局与区域产业结构差异密切相关，流域东部的上海、苏州等城市承载着长三角地区最密集的制造业集群，局部地区纺织、装备制造、化工等高耗水、高污染行业聚集程度较高，且以中大型企业为主，单位面积工业产值与污染物排放强度均显著高于西部。相比之下，流域西部的湖州、杭州西部等地区则以农业、旅游业和新兴服务业为主，传统制造业占比相对较低，且多为轻工业。此外，东部地区较早进入快速工业化阶段，历史遗留的污染存量问题与当前高强度的产业经济活动叠加，进一步加剧了区域工业水环境污染胁迫程度。

3 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调分析

3.1 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的时空分异特征

时间演变特征方面，研究期间太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调度呈现稳步下降态势。2007-2020 年流域耦合协调度平均值由 0.592 逐渐下降至 0.539，整体耦合协调等级由“初级协调”向“轻度失调”方向发展，这主要是由于研究期间太湖流域水敏性缓慢下降，而流域工业水环境污染胁迫则保持快速上升，两系统之间的协同变化程度不断减弱，最终导致流域整体耦合协调度持续降低。空间分布格局上，太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度呈现出显著的梯度特征，自西向东依

次为良好协调区、初级协调区和失调区。研究期间流域始终存在两大核心区域，分别是位于流域西南侧的良好协调核心区和位于上海市区的中度失调核心区，其中流域西南侧水敏性较高且流域工业水环境污染胁迫程度较低，流域水生态环境优越的同时受人类活动扰动较少，因此耦合协调度始终处于较高水平；上海市区则与之相反，社会经济与生态环境系统之间的耦合协调状况相对较差。

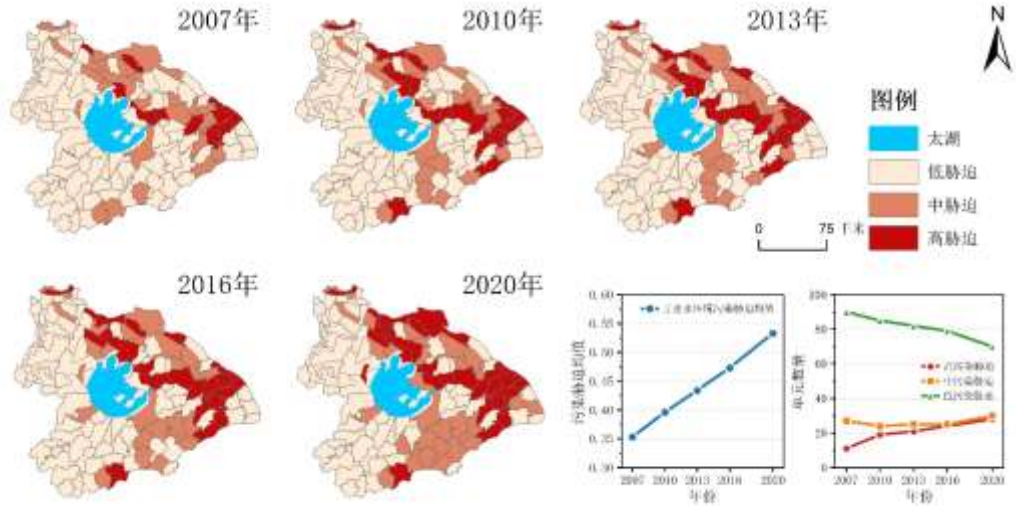


图 4 2007-2020 年太湖流域工业水环境污染胁迫指数时空演变特征

Fig.4 Spatiotemporal evolution characteristics of industrial water environmental pollution stress index in the Taihu Basin,2007-2020

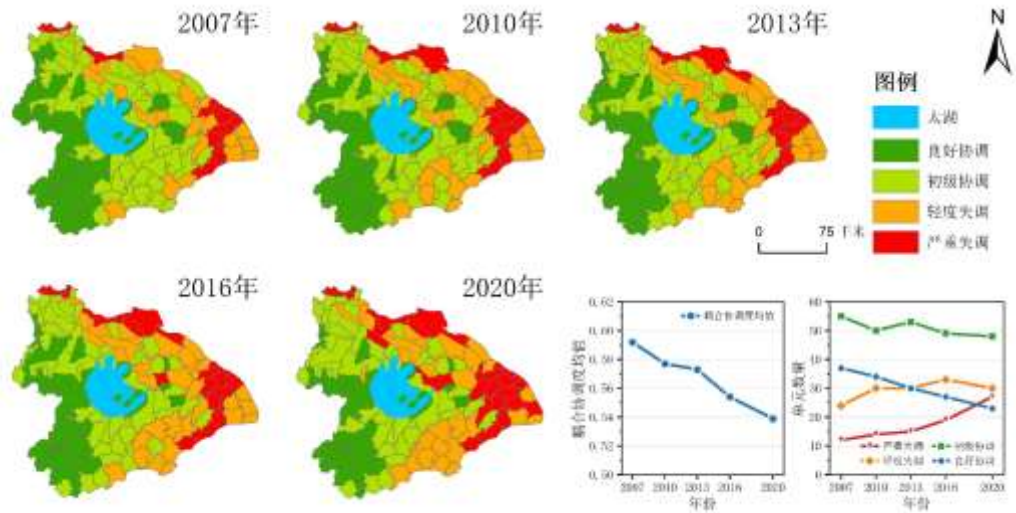


图 5 2007-2020 年太湖流域耦合协调度时空演变特征

Fig.5 Spatiotemporal differentiation characteristics of coupling coordination degree in the Taihu Basin,2007-2020

3.2 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的动态演化特征

本文利用马尔科夫链方法探究太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的动态演化特征。基于前文对耦合协调度的等级划分，共存在 4 种耦合协调类型：分别是良好协调、初级协调、轻度失调

和中度失调（在表格中简称 GC、PC、LD、MD），与以往的逐年马尔科夫链分析不同，考虑到研究区数据的可获取性与变化特征，本文选取 2007 年、2010 年、2013 年、2016 年和 2020 年作为关键时间节点，将非相邻年份的时段视为整体跃迁过程，假设状态转移的齐次性，构建 2007-2020 年马尔科夫转移概率矩阵（表 4），并得出以下结论：

表 4 2007-2020 年太湖流域耦合协调度马尔科夫转移概率矩阵

Tab.4 Markov transition probability matrix of the coupling coordination degree in the Taihu Basin,2007-2020

等级	n	GC	PC	LD	MD
GC	127	0.890	0.110	0	0
PC	208	0	0.899	0.101	0
LD	115	0	0	0.870	0.130
MD	62	0	0	0	1

（1）对角线上的概率值显著大于非对角线的概率值，其中对角线上的最低值为 0.870，表明在整个研究期内耦合协调度等级保持原有状态的最小概率为 87.0%，太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调状态具有较强的稳定性，呈现出明显的“俱乐部趋同”特征。

（2）非对角线区域仅有位于对角线上侧的概率值大于 0，表明研究期间太湖流域耦合协调等级的变化均为向下转移，且这种转移仅发生在相邻等级之间。这一方面印证了前文有关流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度稳步下降的结论，又说明了耦合协调等级的转变是一个长期、渐进的过程，在短时间内难以实现“跨越式”发展。

（3）处于中度失调等级的流域保持原有状态的概率为 100%，“俱乐部趋同”特征最为显著，耦合协调等级完全被锁定在当前状态；处于良好协调、初级协调和轻度失调等级的流域则展现出相似的稳定性，保持原有状态的概率分别为 89.0%、89.9%和 87.0%，三者均存在向下转移的风险，其中轻度失调区向下转移概率最高（13.0%）、良好协调区次之（11.0%）、初级协调区最低（10.1%），各等级均未存在向上转移可能性，即使是处于良好协调状态的流域也面临退化的风险。

传统马尔科夫概率转移矩阵并未考虑到流域耦合协调度等级转移会受其邻域流域耦合协调度等级类型的影响，因此本文在传统马尔科夫转移概率矩阵中引入“空间滞后”因素，并构建出太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调空间马尔科夫转移概率矩阵（表 5），对比表 4 和表 5 可得出以下结论：

（1）空间马尔科夫概率转移矩阵中，位于不同空间滞后类型的概率转移矩阵与传统马尔科夫概率转移矩阵存在差异，说明太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调等级变化受空间因素的影响。例如，当流域的空间滞后类型为初级协调时，处于良好协调、初级协调、轻度失调、中度失调状态的流域保持原有状态的概率分别为 85.7%、91.1%、89.6%和 100%，分别较传统马尔科夫矩阵中的概率值变化 -3.3%、1.2%、2.6%和 0%。

（2）太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调度演变具有空间溢出效应。区域耦合协调度转移概率受其邻域状态影响，相邻流域耦合协调度越低，其向下转移的概率越高。例如，处于初级协调状态的流域与良好协调、初级协调、轻度失调、中度失调流域相邻时，其耦合协调度等级下降的概率分别为 3.4%、8.9%、24.1%和 25%；处于轻度失调状态的流域与初级协调、轻度失调、中度失调流域相邻，其耦合协调度等级下降的概率分别为 10.4%、13.7%和 18.6%。

本文进一步通过 ArcGIS 绘制耦合关系空间演变分布图，结果显示：2007-2020 年太湖流域共有 50 个小流域耦合协调度等级下降，78 个小流域耦合协调度等级保持平稳，二者分别占总流域数的 39.06%和 60.94%，其中下降区域主要集中在流域东部，而平稳区域则主要分布在流域中部与流域西南侧。

表 5 2007-2020 年太湖流域耦合协调度空间马尔科夫转移概率矩阵

Tab.5 Spatial markov transition probability matrix of coupling coordination degree in the Taihu Basin,2007-2020

空间滞后	等级	n	GC	PC	LD	MD
GC	GC	78	0.910	0.090	0	0
	PC	29	0	0.966	0.034	0
	LD	0	0	0	0	0
	MD	0	0	0	0	0
PC	GC	49	0.857	0.143	0	0
	PC	146	0	0.911	0.089	0
	LD	48	0	0	0.896	0.104
	MD	5	0	0	0	1
LD	GC	0	0	0	0	0
	PC	29	0	0.759	0.241	0
	LD	51	0	0	0.863	0.137
	MD	22	0	0	0	1
MD	GC	0	0	0	0	0
	PC	4	0	0.750	0.250	0
	LD	16	0	0	0.813	0.188
	MD	35	0	0	0	1

进一步考虑邻域状态的影响，在区域耦合协调度等级下降的小流域中，有 39 个小流域和邻域耦合协调度等级均下降，占比高达 78.00%，这些流域主要分布在太湖东北侧的苏州、无锡市以及太湖东南侧的嘉兴市；而区域下降、邻域不变的小流域有 11 个，占比 22.00%，多集中于流域西北部的常州和镇江市。在区域耦合协调度等级不变的小流域中，有 52 个小流域的区域和邻域耦合协调度等级均保持不变，占比 66.67%，且空间分布范围较广；区域不变、邻域下降的小流域有 15 个，占比 19.23%，多位于太湖流域边缘地区；区域不变、邻域上升的小流域有 11 个，主要分布在大型湖泊所在区域。由此可知太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调演变呈现出显著的空间异质性与邻域协同效应，需针对不同区域特性制定差异化的调控策略，加强跨区域合作与协同治理。

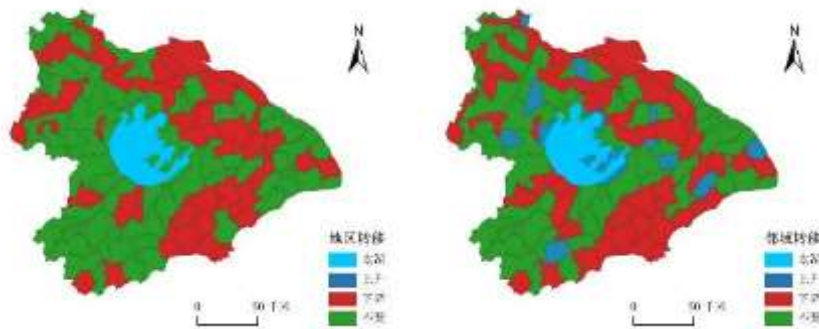


图 6 2007-2020 年太湖流域耦合协调度地区转移与邻域转移时空分异格局

Fig.6 Spatiotemporal differentiation patterns of coupling coordination degree and neighborhood transitions in the Taihu Basin,2007-2020

4 流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的影响因素分析

4.1 驱动因素选择

太湖流域的水敏性与工业水环境污染胁迫的耦合协调是一个复杂的系统过程，多种因素在其中发挥着不同程度的作用。本文借助灰色关联度模型，对水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调的驱动因素进行研究，同时考虑到太湖流域的实际情况，初步选定了人口集聚程度、经济社会发展水平、产业结构、环境规制强度、科技投入水平五大影响因素，其中人口集聚程度通过人口密度表征，高密度人口区域往往人类活动强度较高，污水排放量、水资源短缺等问题较为严重，并直接影响水环境与水资源系统状况；经济社会发展水平采用人均 GDP 表征，经济规模扩张既为水环境治理提供资金保障，也可能因过度开发导致水生态环境系统受损；产业结构以第二产业 GDP 占比为衡量指标，与第一、三产业相比，第二产业尤其是制造业与采矿业具有更高的能源依赖性与污染物排放强度，其在经济总量中的比重体现了区域经济对工业的依赖程度，更从宏观上反映着地区工业污染的潜在规模与强度，第二产业 GDP 占比高，往往意味着高耗能、污染排放强度高的工业占据主导地位，易导致工业废水排放超标；环境规制强度基于政府工作报告中环保词频占比量化，该指标能有效捕捉政策导向对污染治理的刚性约束，体现行政力量在水环境管理中的管控作用；科技投入水平以科学技术支出占财政支出比重表征，更高的科技投入有助于研发更高效的治污技术和清洁生产工艺。

在理想情况下，驱动因素的分析单元应与耦合协调度的评价单元保持一致，然而社会经济指标多以行政区划为单元进行统计与发布，但县级行政区划与小流域自然边界交错复杂，“社会经济统计单元”与“自然地理评价单元”之间的空间尺度严重不匹配，以往研究通常采用参数空间化方法解决这一问题，例如以夜间灯光数据为基础，将政区统计数据分配到网格单元，再按小流域边界进行汇总^[57, 58]。然而该方法存在较大局限性，对于产业结构、环境规制强度、科技投入水平等非空间化的宏观指标缺乏有效的空间代理变量，强行进行空间分配可能会引入较大误差，而简单的面积加权法假设指标在行政区内均匀分布，与现实情况（如工业区高度集中）严重不符，且流域耦合协调度的演变差异性主要体现在宏观省域尺度上。受相关数据获取限制，并兼顾研究的精细度与数据的准确性，本文以小流域单元为基底并叠加省域行政边界共将太湖流域划分为三大片区——苏南片区、上海片区和浙北片区，由于三大片区在空间上均涵盖多个完整的小流域单元，宏观尺度上的数据整合能有效规避边界错位误差，确保片区社会经济数据对内部流域整体状况的代表性，该方法在确保小流域单元完整性与数据权威性基础上，体现了江浙沪三大行政单元在社会经济发展、产业布局与环境管理政策上的现实差异，能够较好兼顾流域自然边界与行政管理单元。因此，本文分别将太湖流域整体及苏南、上海、浙北三大片区作为研究对象，通过整合各片区内相关城市的社会经济数据来代表其变量指标，并对比分析流域整体与各片区的灰色关联度计算结果，旨在揭示在不同行政管理与发展状况下各影响因素的空间异质性。

同时为避免多重共线性问题对模型结果造成干扰，保证驱动因素分析的科学与准确性，本文对上述五个指标进行了共线性诊断，采用方差膨胀因子（VIF）法进行检验，结果表明，所有指标的方差膨胀因子值均远小于 10，表明所选指标间不存在严重的多重共线性问题，可将其纳入后续的灰色关联度分析模型中。

4.2 结果分析

通过灰色关联度模型测试各影响因素对太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度的影响程度。由表 6 所示，各驱动因素的关联度都在 0.5 以上，影响程度显著且存在地区间的差异：

（1）太湖流域科技投入水平与耦合协调度关联度为 0.808，是对整体流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度影响程度最大的驱动因素。分片区来看，上海片区关联度最高为 0.811，其次是浙北片区

为 0.792，最后是苏南片区为 0.591，其中仅有上海片区的关联度高于太湖流域整体水平，原因在于上海片区整体技术创新投入相对更大，有较高的驱动力来提升区域绿色技术水平，易于影响区域工业水环境污染胁迫程度及其与水敏性的耦合协调度，以苏州工业园区为例，2015-2020 年园区 R&D 经费投入强度由 3.35% 提升至 4.77%，科技投入通过支持清洁生产技术研发推动传统企业设备更新改造，并加速淘汰高耗能、高污染的落后产能，引导主导产业向电子信息、生物医药等高附加值低排放的高新技术产业转型，2015-2020 年高新技术产业产值占工业总产值比重已由 67.4% 增至 70.2%，这一系列技术创新与产业升级有助于单位产值的污染物排放强度降低，从而有效缓解了区域工业水环境污染胁迫程度，尽管科技投入不直接影响区域水环境的自然本底，但通过降低水环境污染胁迫，有效改善了区域水环境质量，并间接作用于水敏性评价中的水环境和水生态维度，进而提升了区域“人-水”系统的耦合协调水平。

(2) 太湖流域产业结构与耦合协调度关联度为 0.777，是影响程度第二的驱动因素。三大片区关联度从高到低依次为苏南片区 (0.846)、上海片区 (0.732) 和浙北片区 (0.683)，其中苏南片区关联度略高于太湖流域整体水平，这是由于该片区第二产业占比较高，产业结构的优化调整对流域工业水环境污染胁迫的消减效果更为显著和直接，进而显著影响流域耦合协调度。

(3) 太湖流域人口集聚与耦合协调度关联度为 0.776，影响程度位居第三。其中苏南片区与浙北片区关联度分别为 0.755 与 0.793，二者与流域整体水平相近，而上海片区关联度最高为 0.827，这与上海片区人口密度最高有关，其人口规模早已达到区域水资源环境承载力上限，流域水敏性状态受人口密度变化影响较大。

(4) 太湖流域环境规制强度与耦合协调度关联度为 0.738，影响程度居第四位。其中苏南片区关联度 (0.755) 显著高于上海片区 (0.594)、浙北片区 (0.612)，且略高于流域整体水平，这是由于自 2007 年太湖水危机事件爆发后，苏南片区各市的环境规制强度显著提升，并通过倒逼传统工业企业清洁化改造或退出，有效影响了流域工业水环境污染胁迫的变化。

(5) 太湖流域社会经济发展水平与耦合协调度关联度为 0.547，在五大影响因素中影响程度最低。上海、苏南、浙北片区关联度依次为 0.544、0.570 和 0.549，三大片区及流域整体之间的关联度差异较小，原因在于三大片区均属于我国经济社会发展水平较高的地区，经济社会发展的边际生态效益显著降低。

表 6 太湖流域及各片区影响因素灰色关联度

Tab.6 Grey relational analysis of influencing factors in different subregions

地区	人口集聚	经济社会发 展水平	产业结构	环境规制强 度	科技投入水 平
苏南片区	0.755	0.570	0.846	0.755	0.591
上海片区	0.827	0.544	0.732	0.594	0.811
浙北片区	0.793	0.549	0.683	0.612	0.792
太湖流域	0.776	0.547	0.777	0.738	0.808

5 结论与建议

5.1 研究结论

(1) 2007-2020 年太湖流域水敏性轻微下降，而工业水环境污染胁迫指数则显著提升。研究期间流域水敏性均值由 0.333 下降至 0.311，降幅仅为 6.61%，整体呈现“西南高-东部低”的空间分布格局，高水敏区集中在西南丘陵，中水敏区聚集在太湖周边，低水敏区分布于东部及北部边缘；工业水环境污染

胁迫指数均值则由 0.353 上升至 0.533，年均增长率达 3.22%，东部高胁迫区经历了“集核分布—双轴格局—一带整合”的演化过程，最终形成 S 型的高污染胁迫带，而流域西侧基本保持低胁迫状态。

(2) 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度总体呈现下降趋势且呈现时空分异与动态演化双重特征。研究期间流域耦合协调度均值由 0.592 降至 0.539，整体从“初级协调”转向“轻度失调”，空间上呈现“西高东低”的梯度分布，西南侧为良好协调核心区，上海市为中度失调核心区。马尔科夫分析表明，流域耦合协调度具有显著的稳定性和“俱乐部趋同”特征，等级变化均为向下转移且仅发生在相邻等级间，并且耦合协调度演变存在空间溢出效应，相邻流域耦合协调度越低，其向下转移概率越高。

(3) 太湖流域水敏性与工业水环境污染胁迫耦合协调度受多种驱动因素影响，且呈现明显的空间差异性。基于灰色关联度模型分析，五大驱动因素按影响程度依次为：科技投入水平、产业结构、人口集聚程度、环境规制强度和经济社会发展水平。其中科技投入水平和人口集聚程度在上海片区影响最显著；产业结构和环境规制强度在苏南片区关联度最高；而经济发展水平在三大片区关联度差异较小。

5.2 建议

基于以上研究结论，本文提出以下建议，供决策者参考：

(1) 针对不同区域实施差异化水环境规制政策，优化流域内部生产力的空间布局。对于流域西南侧的“良好协调区”，应制定严格的环境保护政策，针对水敏性大于 0.44 的高水敏性小流域，突出以“保护优先”为原则减少人类活动对区域水生态环境系统的干扰，建立基于行业排污强度系数的产业准入负面清单，严控新增工业项目，同时充分利用其生态资源优势，探索发展碳汇林业、生态旅游等环境友好型产业，将生态优势转化为经济优势。对于太湖周边的“初级协调区”，鉴于产业结构与环境规制强度是其耦合协调度的关键驱动因素，应采取“污染总量控制”与“产业结构优化”兼顾的优化策略，针对工业水环境污染胁迫大于 0.88 的高污染胁迫小流域设定胁迫指数年度削减目标，并以削减目标完成率作为区域新增工业项目环评审批的前置条件，倒逼高污染工业企业绿色转型，同时积极承接低水敏区外溢的环保产业和高技术产业，实现生态保护与产业经济的协调发展。对于以上海为核心的“失调核心区”，科技投入水平的核心驱动地位决定了其治理路径必须聚焦于科技创新和效率提升，针对 S 型高污染胁迫带上的小流域，应进一步推动其内部传统产业进行绿色化、智能化改造，并设立专项财政补贴与绿色信贷支持，激励企业技术升级，同时积极培育新能源、节能环保等新型绿色产业，形成“传统产业绿色化与新兴产业高端化”双轮驱动产业转型路径，在维持经济活力的同时，尽快迎来污染胁迫指数的拐点。

(2) 构建太湖流域跨区域水环境综合治理体系，完善生态补偿与监测预警体系，建立多元共治评估机制。为应对马尔科夫分析所揭示的耦合协调度空间溢出效应，应建立全流域综合治理平台，打破行政区划壁垒，由太湖流域管理局牵头建立“流域-片区-小流域”三级联动治理体系，构建统一的流域水环境大数据平台，建议将水敏性指数、工业水环境污染胁迫指数作为核心监测预警指标，一旦监测到某流域单元耦合协调度向低等级转移，便对邻近流域发出预警，防止失调状态扩散。与此同时完善流域生态补偿机制，明确上下游地区的生态权责，引导资金、技术等要素向生态保护成效显著但发展受限的西南高水敏区域倾斜，可探索建立与本研究指标体系相关的动态补偿模型，并基于以下框架进行补偿额度核算：
$$\text{年度补偿额度} = [(\text{保护区水敏性指数} \times \text{保护机会成本系数}) + (\text{受益区工业胁迫指数} \times \text{污染责任系数})] \times \text{补偿基准}$$
，其中“保护机会成本系数”基于保护区因执行严格环境标准而受限的产业发展潜力核算，“污染责任系数”与受益区高胁迫产业的经济产值挂钩，确保补偿标准的科学性与动态性。最后，在此基础上加强公众参与，构建政府、企业、公众多元共治格局，提高社会共识，建立流域治理效果评估体系，定期评估流域工业水环境污染胁迫变化，及时调整策略，形成“现状评估—政策施策—成效检

验—策略优化”闭环管理。

本文以太湖流域为案例区,构建了水敏性与工业水环境污染胁迫评价体系,揭示了二者耦合协调关系的时空演变、动态特征及驱动因素,为流域可持续发展提供了科学参考,但仍存在一定不足,未来可在以下方面进行深化研究:一是在水环境污染胁迫测算上,本研究基于企业密度、行业排污强度和规模系数进行简单估算,且仅聚焦于工业污染,然而农业面源污染、第三产业污水排放以及微塑料、抗生素等新兴污染物同样是流域的重要水环境污染源,但由于其缺乏官方统计数据,难以在本研究尺度下展开量化测算,未来可整合企业环评报告、在线监测及污染源普查数据,综合考虑企业生产工艺和治理能力,并将农业、第三产业及新兴污染物纳入评估体系,以构建更全面精细的流域产业水环境污染胁迫测算模型。二是受限于行政与流域尺度数据匹配困难,本文采用分片区整合数据的方式进行驱动因素分析,未来研究应探索更有效的空间降尺度方法,将社会经济数据精确配置到小流域单元,实现精细化的驱动机制分析。三是本文中耦合协调度模型的权重设置是基于两系统同等重要的普遍性假设,未来可引入多权重情景进行敏感性分析,并尝试运用随机森林、神经网络等机器学习方法验证非线性关系,以提升检验结果的稳健性,为流域可持续发展提供更精准的科学支持。

6参考文献

- [1] Wang SJ, Fang CL, Wang Y. Quantitative investigation of the interactive coupling relationship between urbanization and eco-environment. *Acta Ecologica Sinica*. 2015, 35(7): 2244-2254. DOI: 10.5846/stxb201306021271. [王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. *生态学报*. 2015, 35(7): 2244-2254.]
- [2] Zhang XP. Industrial development and geographical change in China during the past 30 years of reform and opening up. *Economic Geography*. 2008, 28(6): 897-903. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2008.06.027. [张晓平. 改革开放 30 年中国工业发展与空间布局变化. *经济地理*. 2008, 28(6): 897-903.]
- [3] He CF, Hu XQ. Evolution of Chinese industrial geography since reform and opening-up. *Acta Geographica Sinica*. 2019, 74(10): 1962-1979. DOI: 10.11821/dlxb201910002. [贺灿飞, 胡绪千. 1978 年改革开放以来中国工业地理格局演变. *地理学报*. 2019, 74(10): 1962-1979.]
- [4] Fan J. Territorial spatial governance and regional economic layout for high-quality development in China during the 14th Five-Year Plan period. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. 2020, 35(07): 796-805. DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.20200509003. [樊杰. 我国“十四五”时期高质量发展的国土空间治理与区域经济布局. *中国科学院院刊*. 2020, 35(07): 796-805.]
- [5] Jin S, Sheng ZH, Liu XF. Complexity Analysis on Watershed System and Adaptive Management. *CHINA POPULATION RESOURCES AND ENVIRONMENT*. 2010, 20(7): 60-67. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2104.2010.07.010. [金帅, 盛昭瀚, 刘小峰. 流域系统复杂性与适应性管理. *中国人口·资源与环境*. 2010, 20(7): 60-67.]
- [6] Zhang BC, Zhang Y, Li Z, *et al.* Simulation methods for coupling lake basin water environment and economic system. *Journal of Peking University (Natural Science Edition)*. 2022, 58(05): 937-948. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2022.076. [张百川, 张扬, 李政等. 湖泊流域水环境-经济系统耦合模拟方法研究. *北京大学学报(自然科学版)*. 2022, 58(05): 937-948.]
- [7] Liu Y, Guo HC, Huang K, *et al.* Contents and methods of lake-watershed ecosystem management. *Acta Ecologica Sinica*. 2007(12): 5352-5360. [刘永, 郭怀成, 黄凯等. 湖泊-流域生态系统管理的内容与方法. *生态学报*. 2007(12): 5352-5360.]
- [8] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW, *et al.* Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China. *Chinese Science Bulletin*. 2022, 67(30): 3503-3519. DOI: 10.1360/TB-2022-0178. [张运林, 秦伯强, 朱广伟等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题. *科学通报*. 2022, 67(30): 3503-3519.]
- [9] Wu Y, Wu YM, Chen YJ, *et al.* Ecological environmental effects and influencing factors of plateau lake basin based on “production-living-ecological” space evolution: A case study of Dianchi Basin. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*. 2022, 35(10):

- 2265-2275. DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2022.10.005. [武燕, 吴映梅, 陈云娟等. 基于“三生”空间演变的高原湖泊流域生态环境效应及影响因素——以滇池流域为例. 西南农业学报. 2022, 35(10): 2265-2275.]
- [10] Xu L, Chen SS. Coupling coordination degree between social-economic development and water environment: A case study of Taihu lake basin, China. *Ecological Indicators*. 2023, **148**: 110118. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110118.
- [11] Sun W, Chen W, Liu CG. Correlation Evaluation of Water Sensitivity and Construction Land Expansion in Taihu Lake Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 2019, **28**(7): 1575-1582. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201907007. [孙伟, 陈雯, 刘崇刚. 太湖流域水敏感性与建设用地扩张的关联评价. 长江流域资源与环境. 2019, **28**(7): 1575-1582.]
- [12] Lazarus RS, Cohen JB. 1977. *Environmental Stress//Human Behavior and Environment*[M]. New York: Springer. 89-127.
- [13] Zhou K, Li H, Shen YM. Spatiotemporal patterns and driving factors of environmental stress in Beijing-Tianjin-Hebei region: A county-level analysis. *Acta Geographica Sinica*. 2020, **75**(9): 1934-1947. DOI: 10.11821/dlxb202009009. [周侃, 李会, 申玉铭. 京津冀地区县域环境胁迫时空格局及驱动因素. 地理学报. 2020, **75**(9): 1934-1947.]
- [14] Sun JH, Cao XF, Huang Y. Relationships between spatial-temporal trends of water quality and the human activities in Lake Dianchi. *Journal of Lake Sciences*. 2012, **24**(3): 347-354. DOI: 10.18307/2012.0304. [孙金华, 曹晓峰, 黄艺. 滇池水质时空特征及与流域人类活动的关系. 湖泊科学. 2012, **24**(3): 347-354.]
- [15] Rao QH, Lin XZ, Li JB, *et al.* Analysis of coupling coordination between social economy and water environment quality in river basin. *China Environmental Science*. 2019, **39**(4): 1784-1792. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2019.04.052. [饶清华, 林秀珠, 李家兵等. 流域社会经济与水环境质量耦合协调度分析. 中国环境科学. 2019, **39**(4): 1784-1792.]
- [16] Zhang P, Tian FJ. Regional zonation research on water environment pressure based on GIS. *Research of Soil and Water Conservation*. 2011, 18(05): 14-18. DOI: 10.7666/d.y1931444. [张培, 田富姣. 基于 GIS 的区域水环境压力分区研究. 水土保持研究. 2011, 18(05): 14-18.]
- [17] Chen W, Zhuo ZK, Zhao HX, *et al.* Regionalization of water environmental risk and spatial development guidance: a case study of Wuxi City. *JOURNAL OF LAKE SCIENCES*. 2008, 20(1): 129-134. DOI: 10.3321/j.issn:1003-5427.2008.01.020. [陈雯, 褚振坤, 赵海霞等. 水环境约束分区与空间开发引导研究——以无锡市为例. 湖泊科学. 2008, 20(1): 129-134.]
- [18] Yang QK, Duan XJ, Wang L. Industrial structure adjustment based on water environment-constrained zoning: A case study of Taihu Basin in Jiangsu Province. *Scientia Geographica Sinica*. 2016, 36(10): 1539-1545. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.10.011. [杨清可, 段学军, 王磊. 基于水环境约束分区的产业优化调整——以江苏省太湖流域为例. 地理科学. 2016, 36(10): 1539-1545.]
- [19] Peng J, Zhao HJ, Liu YX, *et al.* Construction of regional water security pattern: Research progress and conceptual framework. *Acta Ecologica Sinica*. 2016, 36(11): 3137-3145. DOI: 10.5846/stxb201503260580. [彭建, 赵会娟, 刘焱序等. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架. 生态学报. 2016, 36(11): 3137-3145.]
- [20] Grossman GM, Krueger AB. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement. *CEPR Discussion Papers*, 1991, 8(2):223-250.
- [21] Berger AR, Hodge RA. Natural Change in the Environment: A Challenge to the Pressure-State-Response Concept. *Social Indicators Research*, 1998, 44:255- 265.
- [22] Ostrom E. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science*. 2009, 325(5939): 419-422. DOI: 10.1126/science.1172133.
- [23] Sun HP, Huang ZF, Xu DD, *et al.* The Spatial Characteristics and Drive Mechanism of Coupling Relationship between Urbanization and Eco-Environment in the Pan Yangtze River Delta. *Economic Geography*. 2017, **37**(2): 163-170, 186. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2017.02.022. [孙黄平, 黄震方, 徐冬冬等. 泛长三角城市群城镇化与生态环境耦合的空间特征与驱动机制. 经济地理. 2017, **37**(2): 163-170, 186.]

- [24] Ren YW, Cao WD, Zhang Y, *et al.* Temporal and Spatial Coupling Characteristics of Urbanization and Ecological Environment of Three Major Urban Agglomerations in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 2019, **28**(11): 2586-2600. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201911005. [任亚文, 曹卫东, 张宇等. 长江经济带三大城市群城镇化与生态环境时空耦合特征. *长江流域资源与环境*. 2019, **28**(11): 2586-2600.]
- [25] Xing LP, Fang B. Spatial-Temporal Pattern and Coordinated Development of Urbanization and Ecological Environment in Jiangsu Province. *Journal of Nanjing Normal University(Natural Science Edition)*. 2018, **41**(3): 131-137. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4616.2018.03.020. [邢璐平, 方斌. 江苏省城镇化和生态环境的时空格局与协调发展研究. *南京师大学报(自然科学版)*. 2018, **41**(3): 131-137.]
- [26] Zhang ZH, Nie TT, Gao Y, *et al.* Study on Temporal and Spatial Characteristics of Coupling Coordination Correlation Between Ecosystem Services and Economic-Social Development in the Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 2022, **31**(5): 1086-1100. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202205013. [张中浩, 聂甜甜, 高阳等. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究. *长江流域资源与环境*. 2022, **31**(5): 1086-1100.]
- [27] Wu BW, Wang Y, Wang Q, *et al.* Coupling relationship and driving mechanism between ecological environment and high-quality development in Fujian Province. *Acta Ecologica Sinica*. 2022, **42**(20): 8238-8253. DOI: 10.5846/stxb202110092793. [伍博炜, 王远, 王强等. 福建省生态环境与高质量发展耦合关系及驱动机制. *生态学报*. 2022, **42**(20): 8238-8253.]
- [28] Liu CG, Sun W, Zhang LC. Spatio-temporal pattern of coupling coordination degree between carbon emissions and vegetation cover and its influencing factors of the Yangtze River Delta. *Scientia Geographica Sinica*. 2023, **43**(1): 142-151. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.01.015. [刘崇刚, 孙伟, 张落成. 长江三角洲碳排放与植被覆盖耦合协调时空格局及影响因素分析. *地理科学*. 2023, **43**(1): 142-151.]
- [29] Zhang N, Wang YQ. Coupling Coordination and Driving Factors of New Urbanization and Water Environment in Yangtze River Economic Belt. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*. 2024, **33**(3): 572-583. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202403010. [张宁, 王昱倩. 长江经济带新型城镇化与水环境耦合协调及其驱动因素研究. *长江流域资源与环境*. 2024, **33**(3): 572-583.]
- [30] Duan PL, Liu SG, Yin P, *et al.* Spatial-Temporal Coupling Coordination Relationship Between Development Strength and Resource Environmental Bearing Capacity of Coastal Cities in China. *Economic Geography*. 2018, **38**(5): 60-67. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2018.05.008. [段佩利, 刘曙光, 尹鹏等. 中国沿海城市开发强度与资源环境承载力时空耦合协调关系. *经济地理*. 2018, **38**(5): 60-67.]
- [31] Tang L, Hu XJ, Luo ZW, *et al.* Temporal and spatial coupling of ecological vulnerability and urbanization level and its interactive influencing factors: A case study of Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*. 2024, **44**(11): 4662-4677. DOI: 10.20103/j.stxb.202307181532. [汤良, 胡希军, 罗紫薇等. 生态脆弱性与城镇化水平时空耦合及其交互影响因素——以湖南省为例. *生态学报*. 2024, **44**(11): 4662-4677.]
- [32] Zhang SW, Ge YM, Li XS, *et al.* Spatio-temporal pattern and influencing factors of the coupling coordination of new urbanization and water ecological environment in the Yellow River Basin. *Journal of Desert Research*. 2024, **44**(3): 172-181. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00024. [张胜武, 葛宇梦, 李小胜等. 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. *中国沙漠*. 2024, **44**(3): 172-181.]
- [33] Ariken M, Zhang F, Liu K, *et al.* Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data. *Ecological Indicators*. 2020, **114**: 106331. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106331.
- [34] Bi Y, 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. *Ecological Indicators*. 2023, **146**: 109871. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.109871.

- [35] Yang LH, Tong LJ. Dynamic coupling and spatial pattern of economic development and water environment quality in Songhua River Basin of Jilin Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2013, 24(02): 503-510. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2013.0186. [杨丽花, 佟连军. 吉林省松花江流域经济发展与水环境质量的动态耦合及空间格局. *应用生态学报*. 2013, 24(02): 503-510.]
- [36] Liu Y, Yang L, Jiang W. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality – A case study from Nansi Lake catchment, China. *Ecological Indicators*. 2020, 119: 106870. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106870.
- [37] Zhao TX, Zhu LQ, Wang LY, *et al.* Coupling Mechanisms of Eco-environmental Quality and Human Activities in China and Their Influencing Factors. *Environmental Science*. 2024, 45(6): 3341-3351. DOI: 10.13227/j.hjcx.202307046. [赵体侠, 朱连奇, 王丽园等. 中国生态环境质量与人类活动耦合机制及其影响因子. *环境科学*. 2024, 45(6): 3341-3351.]
- [38] Liu N, Liu C, Xia Y, *et al.* Examining the coordination between urbanization and eco-environment using coupling and spatial analyses: A case study in China. *Ecological Indicators*. 2018, 93: 1163-1175. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.06.013.
- [39] Cui MH. Coupling coordination relationship between urbanization and ecological environment in 9 cities of Central Plains Urban Agglomeration. *Economic Geography*. 2015, 35(7): 72-78. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2015.07.011. [崔木花. 中原城市群9市城镇化与生态环境耦合协调关系. *经济地理*. 2015, 35(7): 72-78.]
- [40] Chen W, Liu W, Sun W. Taihu Lake and integrated development of Yangtze River Delta region: Status, challenges and countermeasures. *Journal of Lake Sciences*. 2021, 33(02): 327-335. DOI: 10.18307/2021.0201. [陈雯, 刘伟, 孙伟. 太湖与长三角区域一体化发展: 地位、挑战与对策. *湖泊科学*. 2021, 33(02): 327-335.]
- [41] Bian JY, Xia YL, Mao XQ, *et al.* Adaptability evaluation of water resources carrying capacity and economic and social development in Taihu Lake Basin. *Express Water Resources & Hydropower Information*. 2022, 43(4): 31-37. DOI: 10.15974/j.cnki.slsdkb.2022.04.005. [卞锦宇, 夏玉林, 毛学谦等. 太湖流域水资源承载力与经济社会发展适应性评价. *水利水电快报*. 2022, 43(4): 31-37.]
- [42] Gao S, Wei YH, Chen W, *et al.* Spatial correlation between manufacturing agglomeration and water pollution in developed regions: A case study of Wuxi urban area. *Geographical Research*. 2011, 30(05): 902-912. DOI: 10.11821/yj2011050014. [高爽, 魏也华, 陈雯等. 发达地区制造业集聚和水污染的空间关联——以无锡市区为例. *地理研究*. 2011, 30(05): 902-912.]
- [43] Zhang SS, Zhang L, Zhang LC, *et al.* Coupling Relationship Between Polluting Industrial Agglomeration and Water Environment Pollution in Southern Jiangsu of Taihu Lake Basin. *Scientia Geographica Sinica*. 2018, 38(6): 954-962. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.06.015. [张姗姗, 张磊, 张落成等. 苏南太湖流域污染企业集聚与水环境污染空间耦合关系. *地理科学*. 2018, 38(6): 954-962.]
- [44] Zhang X, Zhao T, Xu H, *et al.* GLC_FCS30D : the first global 30 m land-cover dynamics monitoring product with a fine classification system for the period from 1985 to 2022 generated using dense-time-series Landsat imagery and the continuous change-detection method. *Earth System Science Data*. 2024, 16(3): 1353-1381. DOI: 10.5194/essd-16-1353-2024.
- [45] Ren XQ, Yang ZW, Zhang Y, *et al.* Evaluation of hydro-ecological carrying capacity(HECC)in Luanhe River Basin. 2019, 30(05): 72-79. DOI:10.11705/i.issn.1672-643X.2019.05.12. [任晓庆, 杨中文, 张远等. 滦河流域水生态承载力评估研究. *水资源与水工程学报*. 2019, 30(05): 72-79.]
- [46] Zhang Y, Gao X, Lin JN, *et al.* Research on Evaluation Methods for Riverine Aquatic Ecological Security. 2016, 29(10): 1393-1399. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.10.01. [张远, 高欣, 林佳宁等. 流域水生态安全评估方法. *环境科学研究*. 2016, 29(10): 1393-1399.]
- [47] Liu L, Zhao HX, Ma SL, *et al.* Cooperative Governance of Industry and Space of Lake Basins under the Concept of Water Environment Restriction Zoning, Wuhan. *Planners*. 2021, 37(14): 5-12. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0022.2021.14.001. [刘璐, 赵寒

- 雪, 马斯璐等. 水环境约束分区下的武汉市湖泊流域产业、空间协同治理模式研究. 规划师. 2021, 37(14): 5-12.]
- [48] Huang GR, Li BQ. Risk assessment of storm water flooding in Shenzhen City based on fuzzy comprehensive evaluation method. *Journal of Water Resources and Water Engineering*. 2021, 32(01): 1-6. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.01. [黄国如, 李碧琦. 基于模糊综合评价的深圳市暴雨洪涝风险评估. 水资源与水工程学报. 2021, 32(01): 1-6.]
- [49] Zheng DF, Gao M, Li Y, et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*. 2022, 50(03): 1-8. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2022.03.001. [郑德凤, 高敏, 李钰等. 基于 GIS 的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估. 河海大学学报(自然科学版). 2022, 50(03): 1-8.]
- [50] Sun CZ, An ZY. Water security pattern in Northeast China based on ecosystem service flow. 2024, 40(03): 11-19. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2024.03.002. [孙才志, 安志英. 基于生态系统服务流的东北地区水安全格局. 水资源保护. 2024, 40(03): 11-19.]
- [51] Zhang SS, Zhu XD, Zhang L, et al. Comprehensive Evaluation of Pollution Reduction of Manufacturing Industry in Suzhou, Wuxi and Changzhou District. *Scientia Geographica Sinica*. 2020, 40(2): 238-247. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.02.009. [张姗姗, 朱晓东, 张磊等. 苏锡常地区制造业污染减排综合分析评价. 地理科学. 2020, 40(2): 238-247.]
- [52] Li JM, Zhang WZ, Li YJ, et al. Analysis of industrial spatial agglomeration characteristics based on micro-enterprise data: A case study of Hangzhou urban area. *Geographical Research*. 2016, 35(01): 95-107. DOI: 10.11821/dlyj201601009. [李佳滔, 张文忠, 李业锦等. 基于微观企业数据的产业空间集聚特征分析——以杭州市区为例. 地理研究. 2016, 35(01): 95-107.]
- [53] Niu Q, Zhang H, Wu L, et al. Urban - suburban heterogeneity of mobile office development in recent years: Based on China Unicom App big data in Wuhan City in 2019 and 2021. *Progress in Geography*. 2022, 41(08): 1428-1439. DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.08.007. [牛强, 张浩, 伍磊等. 近年来移动办公发展的城——郊异质性特征研究——基于 2019 年与 2021 年武汉市联通用户手机 App 使用大数据. 地理科学进展. 2022, 41(08): 1428-1439.]
- [54] Wang SJ, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China. *Journal of Natural Resources*. 2021, 36(3): 793-810. DOI: 10.31497/zrzyxb.20210319. [王淑佳, 孔伟, 任亮等. 国内耦合协调度模型的误区及修正. 自然资源学报. 2021, 36(3): 793-810.]
- [55] Alyousifi Y, Ibrahim K, Kang W, et al. Correction to: Modeling the spatio-temporal dynamics of air pollution index based on spatial Markov chain model. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020, 192(12). DOI: 10.1007/s10661-020-08720-5.
- [56] Qin S, Liu F, Wang J, et al. Analysis and forecasting of the particulate matter (PM) concentration levels over four major cities of China using hybrid models. *Atmospheric Environment*. 2014, 98: 665-675. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.09.046.
- [57] Han XD, Zhou Y, Wang SX, et al. GDP spatialization in China based on nighttime imagery. *Journal of Geo-information Science*. 2012, 14(01): 128-136. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00128. [韩向娣, 周艺, 王世新等. 夜间灯光遥感数据的 GDP 空间化处理方法. 地球信息科学学报. 2012, 14(01): 128-136.]
- [58] Liang H, Guo Z, Wu J, et al. GDP spatialization in Ningbo City based on NPP/VIIRS night-time light and auxiliary data using random forest regression. *Advances in Space Research*. 2020, 65(1): 481-493. DOI: 10.1016/j.asr.2019.09.035.