

中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性

苏聪文¹, 邓宗兵^{2,3}, 李莉萍², 文江雪², 曹宇芙²

(1. 复旦大学社会发展与公共政策学院, 上海 200433; 2. 西南大学经济管理学院, 重庆 400715; 3. 西南大学普惠金融与农业农村发展研究中心, 重庆 400715)

摘要: 分析水生态文明发展水平的空间关联及其收敛性有助于水生态文明协同建设。从水安全、水生态、水环境、水节约、水监管和水文化6个维度构建评价指标体系, 综合采用熵值法综合评价模型、探索性空间数据分析、时空跃迁测度方法和空间面板杜宾模型, 对2010—2018年中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性进行了实证研究。研究发现:(1)中国水生态文明发展水平逐年提升, 但水生态、水监管和水文化仍是主要短板; 地区发展差异显著, 从东往西呈“高一低一中”的分布特征。(2)中国水生态文明发展水平呈现显著的正向空间外溢效应和空间格局锁定特征, 高高集聚区集中在东部沿海, 低低集聚区集中在东北、西北、西南和长江中游地区, 后者难以实现向HH型省区的跃迁。(3)全国及东、中、西部地区水生态文明发展水平均存在 α 收敛、绝对 β 收敛和条件 β 收敛; 东部绝对 β 收敛最快, 中部条件 β 收敛最快, 西部绝对和条件 β 收敛均最慢。(4)经济发展水平、人口密度、人力资本和技术进步等对水生态文明发展水平的收敛有显著影响, 但存在明显的地区异质性。据此提出具体化的对策建议。

关键词: 水生态文明; 指数测度; 空间格局演变; 空间收敛性

中国是全球13个最贫水的国家之一, 面临人均水资源短缺、水资源时空分布失衡和水体污染等严峻问题^[1-3]。为推动水生态文明建设, 2011年中央1号文件明确要求实行最严格水资源管理制度, 并确立水资源开发利用控制、用水效率控制和水功能区限制纳污“三条红线”。2013年国务院2号文件和2013年水利部1号文件对最严格水资源管理制度做出了全面部署和具体安排。但中国的水资源和水生态问题尚未得到根本扭转, 如2020年发生1998年以来最严重汛情, 给人民生命财产安全带来极大威胁, 也暴露出我国水旱灾害防御能力亟待加强。本文拟解决的关键问题是: 自2011年最严格水资源管理制度实施以来, 中国水生态文明究竟处于怎样的水平? 地区间水生态文明发展存在怎样的空间关联? 地区间水生态文明发展水平的差异持续扩大抑或收敛? 影响因素是哪些? 回答以上问题可为水生态文明建设评价及协同推进水生态文明建设提供事实依据。

水是生命之源、生产之要和生态之基, 水生态文明是生态文明建设的基础和重要组成部分, 故对水生态文明建设探究已成为生态文明研究领域的热点。国内的学术贡献主要集中在内涵阐释、指标构建、水平测度和建设模式等方面^[4-9]。其中, 基于评价指标体系进

收稿日期: 2019-08-22; 修订日期: 2020-12-01

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目(19YJA790005); 西南大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWU2009221)

作者简介: 苏聪文(1994-), 男, 广东清远人, 博士研究生, 主要从事人口、资源与环境经济学研究。

E-mail: cwsu20@fudan.edu.cn

通讯作者: 邓宗兵(1969-), 男, 安徽长丰人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域经济技术经济研究。

E-mail: 1299858480@qq.com

行全面客观的综合测度，是水生态文明建设研究的基础工程，更是直接关系到对水生态文明水平能否进行准确的定量识别，从而避免可能出现的政策偏差。总体上看，学界多采用综合评价模型对水生态文明建设水平进行评价与分析。崔东文等^[6]构建了水资源、水环境和水利用等6个维度24个指标的评价指标体系，利用随机森林回归算法测度分析了2015年云南省文山州水生态文明水平。任俊霖等^[7]从水生态、水经济、水管理和水文化等方面筛选出18项指标构建了城市水生态文明评价指标体系，运用主成分分析法测算分析了2011—2013年长江经济带11个省会城市水生态文明建设水平。李千珣等^[8]从水安全、水生态、水环境、水节约、水监管和水文化6个维度，采用赋分法和层次分析法对2017年湖北省17个行政区水生态文明建设水平进行了评价与分析。张雯婕等^[9]则从水资源管理、水安全保障、水环境保护、水生态修复、水文化体系和水制度建设等层面，运用熵值法评价分析了2018年长江经济带城市群水生态文明建设水平。总之，随着对水生态文明建设内在规律认识的不断加深，对其评价指标体系构建越发成熟，但由于水生态文明建设是一个复杂的系统工程，涉及水安全、水环境、水生态、水管理、水制度和水文化等诸多方面，因此如何合理而全面地构建评价指标体系，进而准确而科学地测度其发展水平仍是亟待解决的重要理论与现实问题。

此外，地区间水生态文明发展水平存在怎样的空间关联、地区差异持续扩大抑或收敛以及何为其影响成因，是构成水生态文明研究的又一个重要课题，直接关系到水生态文明协同建设的成败。但这方面研究匮乏，仅部分学者研究了中国的生态文明发展水平收敛性及其影响因素。成金华等^[10]构建了未考虑空间因素的普通面板回归模型，对2003—2012年中国31个省（市、自治区）生态文明水平的收敛性进行了实证检验；研究结果显示，全国及三大地区的生态文明建设水平均存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛，其中中西部地区相对于东部地区的绝对 β 收敛速度更快，但东部的条件 β 收敛速度略快于西部。赵俊伟等^[11]同样构建了普通面板 β 收敛模型，对2007—2014年中国各省区农业生态文明发展水平的收敛性进行了实证研究；研究发现全国和东、西部地区农业生态文明发展存在绝对 β 收敛和条件 β 收敛，但中部地区仅存在条件 β 收敛。总之，国内学术界已关注到中国生态文明发展水平的地区差异及其收敛性问题，但多采用普通面板回归模型而对地区间客观存在的空间相关性缺乏必要探讨，且直接研究水生态文明水平收敛性的文献明显不足。

鉴于上述背景，本文在对水生态文明建设内涵进行讨论的基础上，以《水生态文明城市建设评价导则》（以下简称《导则》）为依据^[12]，构建了水安全、水生态、水环境、水节约、水监管和水文化6个维度的评价指标体系，对2010—2018年中国水生态文明发展水平的时空演变及其空间收敛性展开研究。本文边际贡献在于：（1）研究对象。以往研究多以城市或流域为对象，测度截面或较短时期的水生态文明水平，缺少对全国范围较长时期的测度与区域比较。（2）研究内容。本文不仅对中国、三大地区和31个省（市、自治区）水生态文明发展综合指数进行测度，而且对水生态文明发展水平空间分布及其动态演进予以定量刻画，再对水生态文明发展水平的收敛性进行实证检验。（3）研究方法。鉴于水生态文明建设内涵丰富的多维属性，以及由于水资源要素流动和区域间治理政策协同等客观形成的空间关联，本文利用经济学、统计学和地理学等跨学科的交叉方法和既定范式对以上内容进行研究。首先运用基于熵值法的评价模型测度分析中国及各地区水生态文明发展综合指数，然后利用ESDA分析和时空跃迁测度方法探究水生态文明发展水平的空间格局及其动态演变，最后利用空间计量模型对水生态文明发

展水平的收敛性进行实证检验。

1 研究方法数据来源

1.1 综合评价模型

1.1.1 指标体系构建

依据2013年的国务院2号文件^①和水利部1号文件^②等文件精神,结合左其亭^[4]、陈明忠^[5]、成金华等^[10]和黄茁^[13]等的研究成果,水生态文明建设可定义为:将生态文明的理念融入水资源开发、利用、治理、配置、节约和保护的各项和水利规划、建设和管理的各环节,坚持节约与保护优先和自然恢复为主的方针,以落实最严格水资源管理制度为核心,通过优化水资源配置、强化水资源节约、提升水环境质量、增强水生态服务功能、完善水管理制度等综合措施,实现水资源的高效持续利用,实现人、水、社会和谐发展和可持续发展。可见,水生态文明建设是系统性问题,建设内容涉及到多学科、多领域和多层次,如何构建合适的评价体系是用以衡量评价结果好坏的关键。本文遵照《导则》指标体系框架,结合相关文献^[8,9,13-16]和指标数据的科学性、综合性和可得性,构建了包含1个目标层、6个准则层、共计20项指标的评价指标体系(表1)。

具体说明如下:(1)水安全。水安全是水生态文明建设的关键,是实现人水和谐的基础。水安全评价主要评估区域防洪除涝与饮水安全程度,选择了堤防达标率、旱涝受灾面积占比、农村无害化卫生厕所普及率和农村供水普及率四项指标。(2)水生态。水生态是水生态文明建设的前提。没有安全的生态系统,水生态文明就会失去载体。40多年的经济快速发展给诸多水域造成了严重污染,水生态系统退化趋势尚未得到根本扭转。水生态评价主要评估区域水生态系统健康程度,选取了生态用水量占比、用水超载率、堤防保护耕地面积率和水土流失治理率四项指标。(3)水环境。良好的水环境是人类社会经济可持续发展的条件。建设水生态文明的直接目标是保护好人类赖以生存的生态环境。水环境评价主要评估区域水环境质量和水污染防治水平,选取了水质优良度、城市污水处理率、万元GDP化学需氧量排放量和万元GDP氨氮排放量四项指标。(4)水节约。我国水资源短缺问题日益突出,水资源面临的形势非常严峻。厉行水资源节约,构建节水型社会是水生态文明建设的重要目标,是构建人水和谐的重要内容。水节约评价主要评估区域工业用水、农业用水、生活用水和公共用水的水资源节约程度及效率水平,选取了万元工业增加值用水量、节水灌溉面积占比、人均生活用水量和公共供水管网漏损率四项指标。(5)水监管。水监管是水生态文明建设的保障。保护水生态环境须依靠制度,而制度文明是制度建设的结果。水监管评价主要评估区域水资源监控管理能力及重要管理制度的落实情况,选取了用水总量控制达标情况和水生态文明建设重视度两项指标。(6)水文化。水文化是水生态文明建设的灵魂。水生态文明建设需要社会各界和民众广泛参与,需要借助特定载体,开展全民水生态环境宣传、教育和培训,促使民众将节水、爱水、护水的水生态文明理念“内化于心”,进而“外化于行”,形成全社会爱护、保护水生态环境的良好风气。水文化评价主要评估区域水文化传承及水生态文明普及情况,选取了水文化传承载体数量和建成区绿化覆盖率两项指标。

① 国务院办公厅关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知(2013-01-02)。

② 水利部关于加快推进水生态文明建设的意见(2013-01-05)。

表1 水生态文明发展指数评价指标体系

Table 1 Development index system of water eco-civilization

目标层	准则层	指标层	指标释义	单位	指标属性
水生态 文明建 设水平	水安全	堤防达标率	累计达标堤防长度/堤防长度	%	正向
		旱涝受灾面积占比	旱涝受灾面积/辖区面积	%	负向
	水生态	农村无害化卫生厕所普及率	农村无害化卫生厕所普及率	%	正向
		农村供水普及率	使用自来水户数/农村总户数	%	正向
		生态用水量占比	生态用水量/用水总量	%	正向
	水环境	用水超载率	用水总量/水资源总量	%	负向
		堤防保护耕地面积率	堤防保护范围内的耕地面积/耕地面积	%	正向
		水土流失治理率	新增水土流失治理面积/水土流失面积	%	正向
		水质优良率	达到或优于III类水质标准的河流长度/河流总长度	%	正向
		城市污水处理率	城市污水处理率	%	正向
万元GDP化学需氧量排放量		化学需氧量排放量/地区生产总值	kg/万元	负向	
万元GDP氨氮排放量		氨氮排放量/地区生产总值	kg/万元	负向	
水节约	万元工业增加值用水量	工业用水量/工业增加值	t/万元	负向	
	节水灌溉面积占比	节水灌溉面积/灌溉面积	%	正向	
	人均生活用水量	生活用水量/年末人口数	m ³ /人	负向	
	公共供水管网漏损率	漏损水量/公共供水总量	%	负向	
水监管	用水总量控制达标情况	用水控制目标/用水总量	%	正向	
	水生态文明建设重视度	水利建设地方投资完成额/财政支出	%	正向	
水文化	水文化传承载体数量	国家级水利风景区个数	个	正向	
	建成区绿化覆盖率	建成区绿化覆盖率	%	正向	

1.1.2 综合评价模型

客观赋权法（熵值法、主成分分析法等）基于数据本身的变异度（区分度）确定权重，可有效排除人为因素干扰，因而具备更强的客观性和可靠性。本文采用熵值法的综合评价模型测度了2010—2018年中国及不同区域的水生态文明发展综合指数，计算公式如下：

$$Y_i = \sum_{j=1}^{m_i} W_j P_{ij} \quad (1)$$

式中： Y_i 表示水生态文明发展综合指数； W_j 表示具体指标的权重； P_{ij} 表示具体指标的标准化评价值。具体步骤是：首先采用极差法对各指标评价值进行无量纲化和同向化处理，然后采用熵值法确定指标权重，最后依据式（1）计算出发展指数，详见文献[17]。

1.2 探索性空间数据分析

探索性空间数据分析（ESDA）是一系列空间数据分析方法和技术的集合，其以空间关联测度为核心，通过对事物或现象空间分布格局的描述与可视化，判别空间集聚和空间分异，以揭示对象间空间依赖关系。ESDA包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析。全局Moran's I 指数揭示水生态文明发展水平在整体上的空间关联程度，计算公式如下：

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (2)$$

式中： I 为全局Moran's I 指数，取值范围为 $[-1, 1]$ ，当 $I > 0$ 时，表示水生态文明发展水平在空间上趋于集聚； n 表示研究区域个数（个）； Y_i 和 Y_j 分别表示区域 i 和 j 的水生态文明发展指数； \bar{Y} 为 Y 的均值； S^2 为 Y 的方差； W_{ij} 是空间权重矩阵，鉴于 K 最近点距离矩阵所得结果更为稳健^[18]，本文将省际地理距离平方的倒数作为空间权重矩阵 W_{ij} 的元素，地理距离采用省会间的球面距离，省会经纬度数据来自于Google Earth。

局部Moran's I 指数既能够反映局部区域水生态文明发展水平的关联情况，还可以结合Moran散点图等形象地揭示空间异质性及其变化趋势^[11]，计算公式如下：

$$I_i = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} (Y_j - \bar{Y}) \quad (3)$$

式中： I_i 是区域 i 的局部Moran's I 指数。

1.3 时空跃迁测度方法

鉴于Moran散点图无法精确量化空间关联的凝聚度和跃迁性，采用Rey等^[19]提出的时空跃迁（Space-time Transition）测度方法，进一步探究中国水生态文明发展水平局部空间关联类型的时空转移特征。时空跃迁包括四种类型：类型I：本地区发生跃迁而相邻地区未发生跃迁，包括LL（第三象限）→HL（第四象限）、HL→LL、HH（第一象限）→LH（第二象限）、LH→HH等；类型II：本地区在相邻地区发生跃迁的情况下仍保持原有状态，包括LL→LH、LH→LL、HH→HL、HL→HH等；类型III：本地区与相邻地区均发生跃迁，包括LL→HH、HH→LL、LH→HL、HL→LH；类型IV：本地区与相邻地区均未发生跃迁。各省水生态文明发展水平的空间凝聚度计算方法为：

$$S_t = \frac{F_{0,t}}{n} \quad (4)$$

式中： S_t 为空间凝聚度； $F_{0,t}$ 表示在 t 研究期间内跃迁类型IV的省区数量（个）。 S_t 取值范围为 $[0, 1]$ ， S_t 值越大，表明中国水生态文明发展水平的空间格局锁定或路径依赖性特征越显著，跃迁阻力越大。

1.4 收敛模型

借助上述方法虽然能够反映中国各省区水生态文明发展水平的空间关联程度及其动态演进，但不能揭示各省区水生态文明发展水平的空间异质性发展趋势，因此引入收敛模型作进一步分析。水生态文明发展水平的收敛性是指随着时间推移，水生态文明发展水平的区域差距呈现逐渐缩小的态势。常用的收敛方法包括 α 收敛和 β 收敛。

1.4.1 α 收敛

α 收敛是存量概念，指区域间水生态文明发展水平的离散程度随时间推移而降低，常用分析方法有标准差、变异系数和Theil指数等，本文采用变异系数衡量 α 收敛，计算公式如下：

$$CV = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n}}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i} \quad (5)$$

式中： CV 为变异系数。

1.4.2 β 收敛

β 收敛是增量概念，指初始水生态文明发展水平低值地区相比高值地区具有更快的增

长速度，最终趋于稳态。 β 收敛分为绝对 β 收敛和条件 β 收敛，前者假设不同地区水生态文明发展条件完全相同，且收敛于相同的稳态水平；后者则承认各省区之间经济基础、人口密度和工业化水平等存在差异，不同地区会向各自的稳态水平收敛。考虑到空间因素对水生态文明发展的潜在影响，本文在借鉴Elhorst^[20]和Yu等^[21]模型的基础上，构建空间面板计量模型来检验中国水生态文明发展水平的 β 收敛：

$$\ln y_{it} - \ln y_{i,t-1} = \alpha I + \beta \ln y_{i,t-1} + \lambda \sum_{j=1}^n W_{ij} (\ln y_{jt} - \ln y_{j,t-1}) + \delta \sum_{j=1}^n W_{ij} (\ln y_{j,t-1} + \zeta u_{jt}) + \zeta u_{it} + \varepsilon \quad (6)$$

式中： i 、 j 表示不同省区； y_{it} 表示 i 省区第 t 年水生态文明发展指数； $\ln y_{it} - \ln y_{i,t-1}$ 表示 i 省区水生态文明发展指数第 t 年增长率； I 是空间单位向量； u_{it} 是控制变量； ε 为随机扰动项； α 为常数项； β 为收敛系数； λ 、 δ 为空间效应系数； ζ 表示控制变量的影响系数。若 $\beta < 0$ 且在统计上显著，表明存在 β 收敛，反之则不收敛。当 $\zeta = 0$ 时，上述方程是绝对 β 收敛模型；当 $\zeta \neq 0$ 时，上述方程是条件 β 收敛模型。式（6）是空间计量模型的一般形式，要判断SDM模型、SLM模型还是SEM模型更为适用，还需进行相应的模型检验。

1.5 数据来源

鉴于数据的可得性，本文将研究对象确定为31个省（市、自治区，港、澳、台除外），样本期为2010—2018年。所有指标的原始数据均源自于相应年份的《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》和《中国水土保持公报》及各省市区的水资源公报。缺失数据采用线性处理进行补充。

2 结果分析

2.1 水生态文明发展水平的空间格局演变

2.1.1 描述性统计分析

表2报告了2010—2018年全国、三大地区和31个省（市、自治区）水生态文明发展指数及其变化。（1）在全国层面，水生态文明发展指数由2010年的0.303增至2018年的0.412，累计增长35.74%，表明考察期内中国水生态文明水平呈明显上升趋势，但仍有巨大提升空间。各维度得分从高至低依次为：水环境（0.683）、水安全（0.590）、水节约（0.539）、水监管（0.299）、水文化（0.227）和水生态（0.179），可见，强化水资源监督管理，向公众大力弘扬水文化，同时加强水生态保护及修复，是当前推进水生态文明发展的重中之重。（2）在地区层面，从发展水平看，样本期间水生态文明发展指数从东往西呈“高一低一中”分布特征，东部平均水平（0.420）远高于西部（0.322）和中部（0.309），均值排名前十位的省（市、自治区）中有八个位于东部，后十位的省（市、自治区）超过半数位于中部；从变化趋势看，水平越高（低）的地区增长幅度越小（大），表明存在水生态文明落后地区对先进地区的追赶趋势。（3）在省域层面，样本期间31个省（市、自治区）水生态文明发展指数均有不同程度提升，但省际差异显著，指数增幅介于9.93%~75.94%之间，指数均值从0.250到0.590不等。

地区和省际间水生态文明发展水平的显著差异，究竟是由先天的水资源禀赋所致，还是主要取决于后天的水资源开发、利用、治理和保护？图1报告了水生态文明发展水

表2 中国各省(市、自治区)水生态文明发展指数与综合排名

Table 2 Development index and ranking of water eco-civilization in China's provincial-level regions

省(市、自治区)	年份									均值	均值排名	增幅/%	增幅排名
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018				
北京	0.491	0.502	0.542	0.544	0.569	0.617	0.658	0.685	0.699	0.590	1	42.22	15
天津	0.442	0.438	0.450	0.425	0.463	0.482	0.529	0.564	0.564	0.484	4	27.59	22
河北	0.303	0.314	0.335	0.385	0.410	0.398	0.414	0.425	0.439	0.380	9	44.93	13
辽宁	0.243	0.264	0.301	0.283	0.283	0.309	0.324	0.338	0.337	0.298	24	39.06	17
上海	0.423	0.399	0.409	0.396	0.430	0.429	0.444	0.483	0.465	0.431	6	9.93	31
江苏	0.420	0.436	0.413	0.399	0.425	0.436	0.473	0.492	0.480	0.442	5	14.12	29
浙江	0.470	0.466	0.499	0.462	0.515	0.510	0.528	0.539	0.533	0.502	2	13.58	30
福建	0.330	0.329	0.339	0.352	0.381	0.433	0.447	0.467	0.471	0.394	8	42.71	14
山东	0.423	0.436	0.459	0.487	0.485	0.519	0.532	0.557	0.546	0.494	3	28.84	21
广东	0.307	0.296	0.305	0.295	0.308	0.329	0.346	0.358	0.361	0.323	16	17.87	27
海南	0.255	0.246	0.274	0.253	0.262	0.294	0.287	0.331	0.335	0.282	27	31.46	20
东部平均	0.373	0.375	0.393	0.389	0.412	0.432	0.453	0.476	0.475	0.420	(1)	27.35	(3)
山西	0.316	0.327	0.325	0.321	0.351	0.343	0.376	0.371	0.387	0.346	13	22.52	23
吉林	0.213	0.250	0.262	0.261	0.287	0.282	0.310	0.324	0.325	0.279	28	52.16	9
黑龙江	0.252	0.285	0.260	0.225	0.241	0.278	0.267	0.290	0.288	0.265	30	14.29	28
安徽	0.241	0.248	0.267	0.278	0.314	0.318	0.338	0.399	0.394	0.311	22	63.53	2
江西	0.252	0.255	0.271	0.264	0.302	0.321	0.337	0.367	0.372	0.305	23	47.52	11
河南	0.384	0.348	0.392	0.386	0.358	0.386	0.425	0.448	0.468	0.399	7	22.10	24
湖北	0.241	0.244	0.260	0.244	0.286	0.285	0.319	0.343	0.362	0.287	25	50.14	10
湖南	0.214	0.237	0.245	0.251	0.278	0.288	0.312	0.337	0.344	0.278	29	60.42	3
中部平均	0.264	0.274	0.285	0.279	0.302	0.313	0.336	0.360	0.368	0.309	(3)	39.11	(2)
内蒙古	0.290	0.299	0.348	0.344	0.350	0.372	0.418	0.444	0.449	0.368	10	54.60	6
广西	0.216	0.231	0.265	0.266	0.271	0.301	0.320	0.338	0.338	0.283	26	56.34	4
重庆	0.266	0.274	0.302	0.305	0.319	0.328	0.342	0.356	0.353	0.316	18	33.01	19
四川	0.254	0.266	0.278	0.308	0.332	0.324	0.366	0.387	0.393	0.323	15	54.60	7
贵州	0.219	0.223	0.280	0.288	0.300	0.315	0.366	0.423	0.384	0.311	21	75.94	1
云南	0.278	0.269	0.318	0.314	0.327	0.356	0.369	0.384	0.392	0.334	14	40.66	16
西藏	0.229	0.225	0.254	0.246	0.256	0.250	0.259	0.259	0.270	0.250	31	17.94	26
陕西	0.292	0.320	0.346	0.349	0.367	0.369	0.403	0.408	0.426	0.364	11	45.88	12
甘肃	0.253	0.262	0.296	0.290	0.302	0.327	0.349	0.372	0.388	0.315	19	53.29	8
青海	0.247	0.261	0.305	0.292	0.307	0.317	0.353	0.371	0.384	0.315	20	55.49	5
宁夏	0.287	0.271	0.304	0.274	0.307	0.322	0.343	0.387	0.396	0.321	17	37.95	18
新疆	0.353	0.322	0.331	0.334	0.333	0.364	0.377	0.400	0.423	0.360	12	19.77	25
西部平均	0.265	0.269	0.302	0.301	0.314	0.329	0.355	0.377	0.383	0.322	(2)	44.33	(1)
全国平均	0.303	0.308	0.330	0.327	0.346	0.361	0.385	0.408	0.412	0.353	—	35.74	—

注:受篇幅所限,未报告全国及各地区水生态文明发展各维度指数及排名。如需要,可向作者索取。

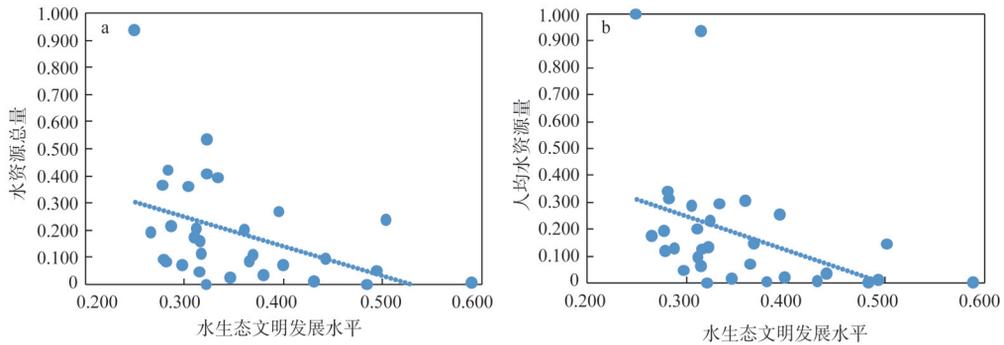


图1 水生态文明发展水平与水资源总量、人均水资源量散点图

Fig. 1 Scatter plot of water eco-civilization development level and total or per capita water resources

平与标准化后的水资源总量、人均水资源量^③的散点图。由图1可知，水生态文明发展水平与水资源总量、人均水资源量均为负相关。表3报告了采用均值—标准差法计算并汇总得出的31个省（市、自治区）水生态文明发展短板类型^④。由表3可知，仅江苏、浙江、福建、山东、陕西5省份短板数为0个，其余26个省（市、自治区）存在1~4个不等的短板，其中河北、内蒙古、辽宁等10省（市、自治区）为水安全短板型，黑龙江、广西、海南等11省（市、自治区）为水生态短板型，天津、河北、山西等7省（市、自治区）为水环境短板型，吉林、上海、安徽等10省（市、自治区）为水节约短板型，北京、辽宁、黑龙江等13省（市、自治区）为水监管短板型，北京、天津、辽宁等11省（市、自治区）为水文化短板型；内蒙古、云南等6省（市、自治区）有1个短板，北京、天津等8省（市、自治区）有2个短板，广东、重庆等8省（市、自治区）有3个短板，海南、西藏等4省（市、自治区）有4个短板。总体而言，短板数量的多少与发展水平的高低存在正相关性。上述结果综合表明，水资源开发、利用、治理、配置、节约和保护等对水生态文明发展水平地区差异的影响远远大于先天的水资源禀赋差异。为了佐

表3 2010—2018年中国各省（市、自治区）水生态文明发展的短板类型

Table 3 Weakness types of water eco-civilization development in China's provincial-level regions from 2010 to 2018

短板类型	均值	标准差	界线	省(市、自治区)
水安全短板型(10)	0.590	0.167	0.507	冀、蒙、辽、吉、黑、皖、赣、鄂、湘、贵
水生态短板型(11)	0.179	0.127	0.116	黑、桂、琼、渝、川、贵、云、藏、甘、青、宁
水环境短板型(7)	0.683	0.066	0.650	津、冀、晋、黑、豫、甘、宁
水节约短板型(10)	0.539	0.145	0.467	吉、沪、皖、赣、鄂、湘、粤、琼、渝、藏
水监管短板型(13)	0.299	0.105	0.247	京、辽、黑、皖、赣、湘、粤、桂、琼、藏、甘、宁、新
水文化短板型(11)	0.227	0.147	0.153	京、津、辽、沪、粤、桂、琼、渝、藏、青、宁
无(5)	—	—	—	苏、浙、闽、鲁、陕

注：括号内数字表示该短板类型包含的省（市、自治区）数，各省（市、自治区）以简称表示，下同。

③ 由于西藏、青海等省（市、自治区）人均水资源量远超出其他省（市、自治区），故采用5%和95%分位数进行去极值处理后，再进行标准化。

④ 参照魏敏等^[22]、秦晓楠等^[23]的做法，将水生态文明发展各个维度指数均值减去0.5个标准差的差值作为短板界线，由此确定31个省（市、自治区）区存在的短板。

证上述初步判断,下面选取均值排名第1的北京、第16的广东、第27的海南分别作为高、中、低水平的代表省市,做进一步讨论。

北京作为缺水严重的城市,在水生态文明发展中并不占据先机。比如,受限于较低的水环境承载力,同等程度的污染物单产排放水平,会给北京的水体污染带来相对更大的压力,因而要求的治水投入就更高;受限于水资源禀赋,北京难以像江苏、山东那样提供足够多的水文化载体,来对公众进行便利且充分的水生态文明宣传与教育。但早在2009年,北京就率先启动了水生态监测及健康评价研究工作,对涵盖山区河流、平原河流、水库和湖泊等四类共30个水体的生境、理化和生物三类指标进行定期评估;面对缺水困局,北京通过地表水、地下水、外调水、雨洪水和再生水五水联合调度,逐步实现水资源的合理统筹配置;2017年,北京全面建立河(湖)长制,每10 km河段平均护河人数达到11人。结果是,北京水生态维度和水环境维度在31个省(市、自治区)中排名第1、水安全维度排名第2,帮助北京在全国水生态文明发展中取得领先地位。相对于北京而言,广东水资源禀赋更好、供需矛盾更小,但阻碍广东水生态文明高水平发展的主要原因在于,相对于经济体量(及其带来的用水强度和排污强度)而言,广东治水投入仍显不足;加上丘陵多而成规模的平整耕地少、公众节水意识尚未形成,其农业节水和生活节水力度实际上均远远落后于全国平均水平。与广东类似,海南同样有着较高的水资源环境承载力,但农业用水和生活用水浪费现象较为普遍,且过高的工业废水排放强度、农药化肥施用强度和生活COD及氨氮排放强度也使得水生态系统过度承压;此外,受热带季风气候影响,海南水资源时空分布不均的问题突出,因而春季多发干旱,夏季多发洪水,如2010年、2011年、2014年和2016年,海南均发生严重洪涝灾害,造成不同程度的人员伤亡和经济损失。加强用水节约、降污减排和水利基础设施建设成为海南推进水生态文明发展的重要内容。总而言之,尽管水资源禀赋为水生态文明发展提供自然本底,但能否补短板为长板,化长板为实际成效,则更倚赖于各地足够重视,在制度、资金、技术和人员投入上有所作为。

2.1.2 探索性空间分析

(1) 全局空间自相关分析。为了量化中国水生态文明发展水平的整体空间集聚状况,计算出全局Moran's I 指数(表4)。表4的结果表明,2010—2018年间的全局Moran's I 指数始终稳定在0.400以上,且始终在1%的水平上显著;从变化趋势看,全局Moran's I 指数波动上升,综合表明中国省域水生态文明水平存在显著且稳定的空间正相关,高值(低值)省(市、自治区)在空间上存在集聚效应。

表4 中国水生态文明发展指数全局Moran's I 指数

Table 4 Global Moran's I index of China's water eco-civilization development index

项目/年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	均值
Moran's I	0.420	0.420	0.407	0.402	0.443	0.404	0.417	0.429	0.440	0.440
Z Statistic	5.060	5.114	5.017	4.949	5.431	5.053	5.206	5.348	5.540	5.413
P值	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

(2) 局部空间自相关分析。为了探测局部地区水生态文明发展水平的空间集聚和分异特征,运用Stata 14.0绘制出2010年、2014年和2018年省域水生态文明发展指数的局部Moran散点图(图2),并据此整理出空间聚类表(表5)。

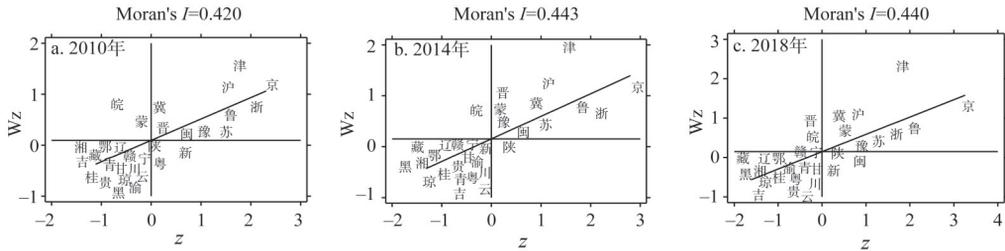
图2 2010年、2014年和2018年中国水生态文明发展指数局部Moran's I 散点图Fig. 2 Local Moran's I scatter plot of China's water eco-civilization development index in 2010, 2014 and 2018

表5 中国水生态文明发展指数局部空间聚类表

Table 5 Local spatial clustering table of China's water eco-civilization development index

年份	HH型	LH型	LL型	HL型
2010	京、津、沪、苏、浙、闽、鲁、晋、豫(9)	冀、皖、蒙、陕(4)	辽、琼、吉、黑、赣、鄂、湘、桂、渝、川、贵、云、藏、甘、青、宁(16)	粤、新(2)
2014	京、津、冀、沪、苏、浙、闽、鲁、晋、豫、蒙(11)	皖(1)	辽、粤、琼、吉、黑、赣、鄂、湘、桂、渝、川、贵、云、藏、甘、青、宁、新(18)	陕(1)
2018	京、津、冀、沪、苏、浙、闽、鲁、豫、蒙、陕(11)	晋、皖、宁(3)	辽、粤、琼、吉、黑、赣、鄂、湘、桂、渝、川、贵、云、藏、甘、青(16)	新(1)

从图2可以发现，2010—2018年，位于第一象限和第三象限的省（市、自治区）始终占据绝大多数，再度表明中国省（市、自治区）水生态文明发展指数具有正的空间相关性和较稳定的空间集聚性。从表5可以发现，2010—2018年，高高集聚区主要分布在东部沿海地区，低低集聚区主要分布在东北地区、西北地区、西南地区和长江中游地区。其中，高高集聚区表现出两个重要特征：（1）具有较高的稳定性。北京、天津、上海、江苏、浙江、福建、山东和河南始终在列。这些省（市、自治区）位于京津冀和长三角两大城市群内部及周边，经济发展水平较高，节水清洁生产技术较先进，且已建立起较好的区域协调联动机制，通过“强强联合”，水生态文明发展成果得以巩固。（2）近年来，高高集聚区有向黄河中游（陕西、内蒙古）延伸的趋势。一方面，陕西正加快开展黄土高原区塬面保护、河源区生态修复，以及逐步完善水土保持重点治理区和水土流失敏感区的动态监测；内蒙古也大力推进河湖湿地生态治理、生态脆弱区移民搬迁与地下水超采区生态补水，并通过盟市间水权交易来盘活存量水资源，破解水资源瓶颈，且陕、蒙在跨省补水来共同维护红碱淖湿地生态平衡中已经做出有益尝试，这些举措均有力地促进了当地水生态文明的发展。另一方面，这些省（市、自治区）受到东部水生态文明高水平地区的辐射带动，有助于发挥后发优势，通过引进东部较先进的经验技术来实现水资源的高效利用。低低集聚区也呈现两大特征：（1）具有很高的稳定性。辽宁、海南、吉林、黑龙江、江西、湖北、湖南、广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏、甘肃、青海共15个省（市、自治区）始终在列。这些省（市、自治区）或重化工业大量分布，或水利基础设施建设落后，或地处内陆干旱区、水生态文明发展基础较为薄弱，容易陷入“低水平均衡陷阱”。（2）对邻近省（市、自治区）具有明显的同化作用。突出表现为高低集聚型的省（市、自治区），因缺乏与周边低水平省（市、自治区）的协同治理，最终也容易落入低水平省（市、自治区）。如广东、新疆2010年均属于高低集聚

区, 由于缺乏协同, 2014年均落入低低集聚型省(市、自治区), 直至2018年广东仍为低低集聚型省区。上述特征突出表明, “以面带点”更易, “以点带面”更难, 中国水生态文明持续发展不能依靠“单打独斗”, 而需区域联动、协同推进。

2.1.3 时空跃迁分析

表6报告了2010—2018年中国水生态文明发展指数的时空跃迁类型。由表6可知, 跃迁类型IV的省(市、自治区)最多, 其次为跃迁类型I、类型II, 跃迁类型III的省(市、自治区)最少。从总体上看, 在2010—2014年和2014—2018年两个研究期间内, 属于类型IV的省(市、自治区)数量分别为26个、27个, 空间凝聚度高达0.839、0.871, 表明中国水生态文明发展水平的空间格局具有明显的空间锁定或路径依赖性。具体而言: (1) 在跃迁类型I中, 2010—2014年间, 广东和新疆由于缺乏与邻近省域的协同治理, 水生态文明发展受阻, 从HL型跃迁至LL型; 河北和内蒙古则受到邻近高水平省(市、自治区)的带动, 成功从LH型跃迁至HH型。2014—2018年间, 新疆加大水生态文明建设力度, 如严控社会用水总量, 连续多年通过生态补水培育塔里木河流域1500亩胡杨林, 构建起塔克拉玛干沙漠边缘沙洲最重要的生态屏障, 新疆得以由LL型重新跃迁至HL型; 山西则受制于自身资源型、粗放型的产业结构, 未能保持与邻接省(市、自治区)的水生态文明协同建设, 从HH型跃迁至LH型。(2) 在跃迁类型II中, 2010—2014年间, 没有省(市、自治区)发生该类型的跃迁; 2014—2018年间, 陕西、宁夏由于邻近省(市、自治区)水生态文明发展水平的显著提升, 因而分别从HL型、LL型跃迁至HH型、LH型。(3) 样本期间, 仅陕西一省在2010—2014年间发生类型III的跃迁, 从LH型跃迁至HL型, 表明陕西水生态文明发展水平在此期间实现了对邻省的超越。(4) 在跃迁类型IV中, LL型省区个数在2010—2014年和2014—2018年间分别占比61.54%和59.26%, 东北地区(辽宁、吉林、黑龙江)、西北地区(西藏、甘肃、青海)、西南地区(广西、重庆、四川、贵州、云南)、长江中游(江西、湖北、湖南)及海南共15个LL型省(市、自治区)始终未发生跃迁, 成为制约当前中国水生态文明发展指数整体向高水平跃迁的重点省(市、自治区)。

表6 2010—2018年中国水生态文明发展指数的时空跃迁类型

Table 6 Space-time transition types of China's water eco-civilization development index from 2010 to 2018

跃迁类型	时间划分	
	2010—2014年	2014—2018年
类型I	HL→LL: 粤、新 LH→HH: 冀、蒙	LL→HL: 新 HH→LH: 晋
类型II	—	HL→HH: 陕 LL→LH: 宁
类型III	LH→HL: 陕	—
类型IV	京、津、辽、沪、苏、浙、闽、鲁、琼、晋、吉、黑、皖、赣、豫、鄂、湘、桂、渝、川、贵、云、藏、甘、青、宁	京、津、冀、辽、沪、苏、浙、闽、鲁、粤、琼、吉、黑、皖、赣、豫、鄂、湘、蒙、桂、渝、川、贵、云、藏、甘、青

2.2 水生态文明发展水平的收敛性分析

上文分析表明, 中国水生态文明发展水平具有显著的空间相关性, 如忽略空间因素的潜在影响, 会造成收敛模型的估计结果与实际情况存在较大偏差^[24]。因此下文将在 α 收敛分析的同时, 构建空间计量模型进行 β 收敛分析。

2.2.1 α 收敛

利用式(5)计算出中国水生态文明发展指数的变异系数, 结果如图3所示。由图3

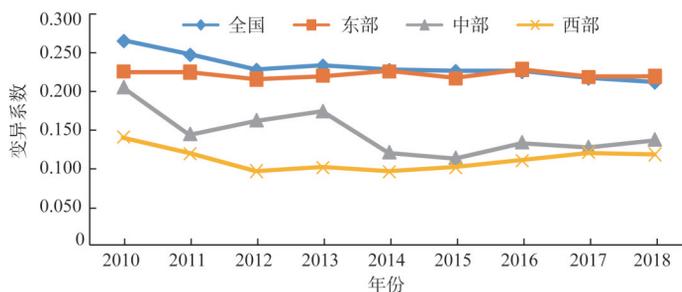


图3 中国水生态文明发展指数的变异系数

Fig. 3 Coefficient of variation of China's water eco-civilization development index

可知，全国和东、中、西部地区的变异系数分别从2010年的0.265、0.225、0.204、0.139下降为2018年的0.211、0.219、0.136、0.117，可见全国和东、中、西部水生态文明发展指数的差距均有所缩窄，存在 α 收敛。

2.2.2 绝对 β 收敛

考虑到本文基于省域面板数据展开，故 β 收敛模型选取固定效应模型。在空间固定效应模型的基础上，为了观察SDM模型、SLM模型和SEM模型的适用性，需要进行相关检验。LR检验和Wald检验可以判断SDM模型能否简化为SLM模型或SEM模型，如能简化，LM检验还能进一步为SLM模型或SEM模型的选择提供参考。检验结果表明（表7），LR检验中，除东部的LR（SLM）外，全国和东、中、西部地区的LR统计量均在10%的水平下拒绝原假设；Wald检验中，除东部地区Wald（SLM）在5%的水平下拒绝原假设，全国和东、中、西部地区的Wald统计量均在1%的水平下拒绝原假设。综上所述，在进行全国和三大地区水生态文明发展 β 收敛分析时，SDM模型最为适用。

表7 空间计量模型检验结果

Table 7 Model test results for China and its three regions

检验方法	全国		东部		中部		西部	
	统计量	P值	统计量	P值	统计量	P值	统计量	P值
LR Test (SEM)	31.750	0.000	13.740	0.089	17.650	0.024	15.840	0.045
Wald Test (SEM)	39.560	0.000	20.670	0.004	2324.280	0.000	38.900	0.000
LR Test (SLM)	23.810	0.003	11.340	0.183	20.690	0.008	14.140	0.078
Wald (SLM)	19.590	0.007	14.870	0.038	13545.430	0.000	32.480	0.000

为凸显SDM模型的优势，本文同时运用OLS和SDM模型进行回归，全国及三大地区水生态文明发展指数的绝对 β 收敛结果如表8所示。由SDM模型计量结果可知，全国及东部、中部和西部地区的 β 系数均在1%的水平下显著为负，说明全国及三大地区水生态文明发展指数均存在绝对 β 收敛，即在假定经济基础、人口密度、工业化水平等外部条件完全相同的情况下，随着时间推移，全国及三大地区的水生态文明发展指数将收敛于同一水平。结合 β 系数绝对值可知，东部收敛速度最快，中部次之，西部最慢。此外，全国及东部、中部和西部的 λ 系数均显著为正，表明全国及三大地区的水生态文明发展均存在正向空间溢出效应。而在OLS计量结果中，东部和中部地区绝对 β 收敛系数的显著性均不如SDM模型，通过对比LogL和 R^2 值可知，SDM模型比OLS模型明显更优，再次表

表8 全国及三大地区水生态文明发展指数的绝对 β 收敛结果Table 8 Absolute β convergence results of water eco-civilization development index in China and its three regions

变量	全国		东部		中部		西部	
	OLS	SDM	OLS	SDM	OLS	SDM	OLS	SDM
$\ln y_{i,t-1}$	-0.123***	-0.478***	-0.119**	-0.508***	-0.119*	-0.484***	-0.128***	-0.462***
λ		0.458***		0.499***		0.454***		0.417***
LogL	378.679	441.995	145.729	163.680	89.176	101.203	146.385	175.484
R^2	0.066	0.230	0.056	0.194	0.051	0.220	0.086	0.205

注：*、**、***分别表示在10%、5%和1%的水平下显著，下同。

明考虑空间因素对中国水生态文明发展收敛性的影响是必要的。

2.2.3 条件 β 收敛

(1) 控制变量选取。在分析水生态文明发展的条件 β 收敛时，需要设置若干控制变量(表9)。借鉴相关文献，本文选择的控制变量包括：① 经济发展水平(*eco*)。用人均GDP表示。相关研究表明，经济发展水平与环境污染存在EKC曲线，曲线形状和转折点位置因污染物不同而不同，且存在显著的地区差异^[25-27]。此外，吴丹^[28]、孙才志等^[29]实证发现，经济发展水平对用水总量增加、用水效率提升存在显著正向影响。② 工业化水平(*indu*)。用第二产业增加值占GDP比例表示。中国长期以来的粗放型工业增长模式导致了大量的资源消耗和严重的环境污染^[30]，但也有学者指出，近年来增速最快的工业部门多集中于技术密集型产业和战略性新兴产业等节能环保产业，高耗能产业和资源型产业增速已十分缓慢^[31]，鲍超等^[32]就实证发现，河南工业产值比例增加显著提升了用水效率。③ 市场化程度(*mark*)。用王小鲁等^[33]测算的市场化指数表示，以反映生产要素、产品、经济政策等市场化进程。陈燕等^[34]、杨文进等^[35]发现，市场化程度的提高对于控制工业污染、农业面源污染以及促进生态文明建设等发挥积极作用。④ 技术进步(*tech*)。用规模以上工业企业的劳动生产率表示。技术进步对生态环境保护的重要作用已被广泛证实^[36,37]。此外，马海良等^[38]研究发现，技术进步对用水效率的提升具有直接作用。⑤ 人力资本存量(*edu*)。用大学本科及以上学历就业人员占总就业人员比例表示，以衡量地区人力资本水平。人才是提升国家或地区综合实力和核心竞争力的战略性资源，然而，目前中国水生态文明建设面临着人才总量不足和人才结构性错位等突出问题^[39]。⑥ 人口密度(*popu*)。学界普遍认为人口规模扩大会导致污染物排放增加^[40,41]，周侃等^[42]指出人口规模对污染物排放的正向影响程度甚至在城镇化水平和经济增长速度之上，但陆铭等^[43]认为人口集聚有利于降低单位工业增加值的排污强度。⑦ 城镇化水平(*urban*)。周侃等^[40]研究发现，城镇化水平和人口规模会显著驱动氨氮排放，但对大城市及特大城市的化学需氧量排放有较强抑制作用，焦若静^[44]实证发现中国等人口大国的城镇化率与环境污染呈倒“U”型关系；近年来对城镇化与生态文明建设的耦合协调发展研究逐渐展开^[45,46]，指出二者耦合协调度逐年上升且存在显著的地区差异，因此对水生态文明建设的相关研究也离不开对城镇化水平的适当考量。

各控制变量数据来源于《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》(2011—2019年)及《中国分省份市场化指数报告》(2018年)，缺失数据采用线性处理补充。

(2) 结果分析。由表9可知，在引入相关控制变量后，无论是OLS还是SDM模型，

表9 全国及三大地区水生态文明发展指数的条件 β 收敛结果Table 9 Conditional β convergence results of water eco-civilization development index in China and its three regions

变量	全国		东部		中部		西部	
	OLS	SDM	OLS	SDM	OLS	SDM	OLS	SDM
$\ln y_{i,t-1}$	-0.558***	-0.576***	-0.534***	-0.597***	-848***	-0.980***	-0.687***	-0.567***
λ		0.447***		0.308***		0.151**		0.392***
<i>eco</i>	0.078	-0.141	0.235**	-0.174	-0.024	-0.858*	-0.267	-0.419*
<i>indu</i>	-0.071	0.048	-0.294**	0.209	0.323	0.509**	-0.124	-0.038
<i>mark</i>	0.011	-0.018	0.073	-0.015	0.387***	0.358**	-0.049	0.011
<i>tech</i>	0.006	-0.011	0.004	0.016	0.161	0.354*	-0.056	-0.018
<i>edu</i>	0.114	-0.068	-0.165	-0.187	0.836	0.553	0.123	0.228***
<i>popu</i>	1.999**	1.807*	1.222**	1.606*	7.456	10.696	-5.164	-5.749
<i>urban</i>	0.964***	0.127	0.261	-0.243	1.232**	1.061	1.784***	0.343
$W \times eco$		0.452		0.398		-2.411		0.387
$W \times indu$		-0.257**		-0.633**		-0.064		-0.299*
$W \times mark$		-0.007		0.087		0.798*		-0.249
$W \times tech$		-0.154*		0.052		0.464**		-0.241
$W \times edu$		0.012		-0.043		-0.489		-1.014
$W \times popu$		-0.763		-1.480		-59.495**		33.961***
$W \times urban$		0.919***		0.420		3.431***		1.311**
$\log L$	424.034	458.616	162.404	172.613	110.549	120.820	169.669	188.746
R^2	0.352	0.478	0.354	0.449	0.513	0.624	0.437	0.603

全国及三大地区的 β 收敛系数均在1%的水平下显著为负，表明全国及三大地区水生态文明发展指数存在显著的条件 β 收敛，即随着时间的推移各地区水生态文明发展会趋向于各自的稳态水平。通过对比表7和表8的 $\log L$ 和 R^2 值，发现SDM的条件 β 收敛模型比绝对 β 收敛模型明显更优。相比于绝对 β 收敛系数，三大地区条件 β 收敛系数的绝对值更大，表明在考虑经济发展水平等控制变量的影响后，三大地区水生态文明发展指数收敛速度更快，其中，中部收敛速度最快，东部次之，西部最慢。此外，全国及三大地区的空间效应系数 λ 均显著为正，表明全国层面及三大地区的水生态文明发展均受到邻近省区的显著正向影响。

由表9中的SDM模型回归结果还可以发现，不同控制变量的影响效应存在显著的地区异质性。在全国层面，7个控制变量中人口密度(*popu*)通过10%的显著性检验，影响系数为1.807。这可能是因为，正如陆铭等^[43]所指出的，人口高度集聚可以促进水资源的集约节约高效利用，同时降低水体污染物的单位排放强度，从而加速了水生态文明的发展。经济发展水平(*eco*)对全国水生态文明发展的影响系数为负，但未通过显著性检验，表明在EKC曲线拐点出现以前，经济的发展可能对中国水生态文明发展存在潜在的负向影响。在区域层面，东部地区的人口密度(*popu*)也通过了10%的显著性检验，系数为1.606。结合其与中部、西部地区人口密度的影响系数差异(中部不显著为正，西部不显著为负)可以推断，人口密度与水生态文明发展速度可能存在“U”型的非线性关系，当人口密度较低时，随着人口逐步集聚，用水强度将急剧上升、水体污染会逐步加剧，一旦配套设施未能及时完善，会给水生态文明发展带来明显压力；而当人口密度处

于高水平时,人口继续集聚可能带来业已配置的资源、设施的高效利用,水生态相关产业有利可图、良性发展,从而加快水生态文明的健康、长效发展。这也是中央财经委员会第五次会议强调仍要继续“增强中心城市和城市群等经济发展优势区域的经济和人口承载能力”的重要原因。中部地区的经济发展水平(*eco*)、工业化水平(*indu*)、市场化程度(*mark*)和技术进步(*tech*)均通过了显著性检验,系数分别为 -0.858 ($P<0.1$)、 0.509 ($P<0.05$)、 0.358 ($P<0.05$)和 0.354 ($P<0.1$),表明中部地区仍处在EKC曲线拐点之前,经济体量的增大会带来难以避免的水生态压力,而技术密集型、节能环保型工业企业的发展、市场化程度的提高以及节水清洁生产技术的推广应用将有助于提升用水效率、促进控污减排,为水生态文明发展扫除障碍。西部地区的经济发展水平(*eco*)和人力资本存量(*edu*)通过了显著性检验,系数分别为 -0.419 ($P<0.1$)、 0.228 ($P<0.01$),表明西部地区面临与中部地区类似的难题,传统经济增长模式将意味着水资源消耗总量的持续增加和水污染排放强度的持续加大;而在西部开发战略的机会窗口下,大量高素质水利人才的培养和引进可能是破解西部地区水生态文明发展难题的关键。上述结果表明,各地区因经济社会发展的异质性,水生态文明发展的驱动因素和收敛情况有所不同,在制定经济发展政策和规划时应区别对待。

2.2.4 稳健性检验

考虑到不同的空间权重矩阵对 β 收敛结果存在显著影响,为进一步检验研究结果的稳健性,下文使用空间邻接权重矩阵(0~1矩阵)对上文的 β 收敛结果进行稳健性检验。结果表明,全国及三大地区水生态文明发展的绝对 β 收敛和条件 β 收敛系数均显著为负,空间效应系数 λ 除东部地区条件收敛的显著性略大于10%外,其余均显著为正;且控制变量的影响系数与前文回归结果相比,方向基本保持不变,显著性也无明显变化,综合表明考虑空间效应的中国水生态文明发展存在稳健的绝对 β 收敛和条件 β 收敛(表10)。

3 结论与讨论

本文在测度2010—2018年中国水生态文明发展综合指数的基础上,运用ESDA分析和时空跃迁测度方法考察其空间格局及动态演进,构建空间面板杜宾模型剖析其空间收敛性。研究发现:

第一,从发展水平变化趋势看,考察期内中国水生态文明建设成效显著,但仍有巨大的提升空间,其中水生态、水监管、水文化是目前水生态文明发展水平提升的主要短板;地区发展差异明显,从东往西呈“高一低一中”分布特征;高达26个省(市、自治区)水生态文明发展存在突出的短板,但各省(市、自治区)的短板类型差异显著。因此,全国在继续保障用水安全、厉行节约用水和改善水体环境之外,应当着重保护和修复水生态系统,以实现其良性循环和健康存续,也要进一步完善水管理制度、强化水监管力度,同时大力弘扬水文化,发动群众自发地投入到水生态文明发展事业中,而不仅仅依赖政府力量来推动。此外,各省(市、自治区)由于水资源禀赋和经济社会发展水平的不同,面临的水生态文明发展短板也不尽相同,因此一方面应该避免由于短板的牵制而陷入“低水平均衡陷阱”,另一方面还应避免由于水资源丰富而陷入用水粗放、排污粗放的“资源陷阱”。

第二,从发展水平空间相关性和跃迁趋势看,中国水生态文明发展水平呈现显著的正向空间外溢效应和空间格局锁定特征,高高集聚区集中在东部沿海,低低集聚区集中在东

表10 0~1矩阵下的 β 收敛回归结果Table 10 Regression result of conditional β convergence with 0-1 matrix

变量	全国 (SDM)		东部 (SDM)		中部 (SDM)		西部 (SDM)	
	绝对收敛	条件收敛	绝对收敛	条件收敛	绝对收敛	条件收敛	绝对收敛	条件收敛
$\ln y_{i,t-1}$	-0.470***	-0.592***	-0.419***	-0.662***	-0.452***	-1.024***	-0.495***	-0.647***
λ	0.437***	0.342***	0.287**	0.144	0.332***	0.111**	0.603***	0.353***
<i>eco</i>		-0.182		-0.116		-0.319		-0.268
<i>indu</i>		0.062		0.029		0.404**		-0.078
<i>mark</i>		-0.075		-0.014		0.296*		-0.063
<i>tech</i>		0.007		0.017		0.364**		0.010
<i>edu</i>		0.033		-0.258		0.489		0.153
<i>popu</i>		1.128		1.130		12.049		-8.343
<i>urban</i>		0.147		-0.396**		1.449		1.056*
$W \times eco$		0.151		0.289		-2.743		-0.721
$W \times indu$		-0.178*		-0.669**		-0.053		0.019
$W \times mark$		0.196		0.277**		0.826*		0.126
$W \times tech$		-0.068		0.053		0.406***		-0.160
$W \times edu$		-0.044		-0.070		-0.472		-0.623*
$W \times popu$		1.866		-0.275		-43.492**		29.912
$W \times urban$		1.004***		0.064		2.607**		1.519***
$\log L$	425.516	446.979	154.921	169.782	99.472	120.592	171.398	184.231
R^2	0.218	0.440	0.182	0.447	0.193	0.624	0.206	0.560

北、西北、西南和长江中游地区，后者成为制约中国水生态文明发展指数整体向高水平跃迁的重点地区。高高集聚区和低低集聚区都在自我强化，这表明一方面应积极引导人口和要素向水利基础设施更完备、城市治理能力更先进和治水管水体系更科学的中心城市和城市群流动，加强高高集聚区对周边省区的辐射带动；另一方面还需转变非经济发展优势区盲目扩张的粗放型城镇化模式，通过适当收缩城市规模，明确城市发展定位，有效利用当地独特的生态资源，走“小而美”“精而特”的可持续发展路径^[47]，来消减低低集聚区对周边省区的同化。总之，各地区水生态文明发展不能依靠单打独斗，而应加强区域内大中小城市和流域内上中下游间的统筹治理和协同分工，鼓励人才和资本、资源、能源等生产要素向优势区域自由流动，从而实现人、水和社会的高效配置。

第三，从发展水平收敛趋势及其影响因素看，全国及东、中、西部地区水生态文明发展均存在 α 收敛、绝对 β 收敛和条件 β 收敛，东部绝对 β 收敛最快，中部条件 β 收敛最快，西部绝对和条件 β 收敛均最慢。在全国和东部地区，水生态文明发展收敛均受到人口密度的显著正向影响，其对中部地区的正向影响和西部地区的负向影响均不显著。综合表明，应该基于比较优势适度引导人口集聚，“在集聚中走向平衡”^[48]，这将大大促进水资源与水利基础设施的优化配置，也符合中央财经委员会第五次会议关于“增强中心城市和城市群等经济发展优势区域的经济和人口承载能力”的战略布局。具体而言，东部地区应逐步放宽落户政策，努力实现公共服务均等化，促进流动人口市民化。中部地区，关键是要推动工业企业向技术密集型、节能环保型企业转型升级，加强节水清洁生产技术的推广应用和水资源要素的市场化配置，通过绿色发展方式来尽量消减经济增长带来

的用水缺口和水生态压力。西部地区,在克服经济规模扩张带来的水生态压力的同时,更需要立足水生态功能区定位,积极发展生态旅游等绿色产业,尤其注重生态脆弱区、江河源头区水生态的持续修复和保护,后者既有赖于跨区域的转移支付,也需要当地大力培养和引进水利人才来提供智力支持。

最后应当指出,可靠的数据是水生态文明建设评价、规划与管理的基础。然而目前各类统计资料(年鉴)公布的统计条目缺乏连续性、可比性与统一性,不仅难以满足水生态文明建设评价的研究需要,更难以作为后续水生态文明建设的统筹规划和科学决策提供真实可靠的事实依据,因此水资源、水生态和水环境等监测体系建设和数据采集工作亟待加速推进。此外,正是受限于数据可得性,本文的研究基于省级层面展开,不可避免地抹去了省区下辖各市县水生态文明发展的异质性,尤其对于内蒙古等东西跨度长、地理分异大的省区而言,评价结果的科学性、准确性将有所削弱。未来如有条件,采用市级或县级数据进行测度,无疑将更加有助于全面、科学把握我国各地区水生态文明发展的空间格局与动态演进。

参考文献(References):

- [1] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究.中国软科学,2016,(1):79-97. [WU D J, ZHAN S Z, LI Y H, et al. New trends and practical research on the sponge cities with Chinese characteristics. China Soft Science, 2016, (1): 79-97.]
- [2] 孙才志,白天骄,吴永杰,等.要素与效率耦合视角下中国人均灰水足迹驱动效应研究.自然资源学报,2018,33(9):1490-1502. [SUN C Z, BAI T J, WU Y J, et al. Driving effect of per capita grey water footprint in China from the perspective of factor and efficiency coupling. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1490-1502.]
- [3] 张凡凡,张启楠,李福寿,等.中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析.自然资源学报,2019,34(5):934-944. [ZHANG F F, ZHANG Q N, LI F D, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 934-944.]
- [4] 左其亭.水生态文明建设几个关键问题探讨.中国水利,2013,(4):1-3,6. [ZUO Q T. Discussions on key issues of water ecological civilization construction. China Water Resources, 2013, (4): 1-3, 6.]
- [5] 陈明忠.关于水生态文明建设的若干思考.中国水利,2013,(15):1-5. [CHEN M Z. Reflection related to water ecological civilization construction. China Water Resources, 2013, (15): 1-5.]
- [6] 崔东文,金波.基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价.水利水电科技进展,2014,34(5):56-60,79. [CUI D W, JIN B. Comprehensive evaluation of water ecological civilization based on random forests regression algorithm. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(5): 56-60, 79.]
- [7] 任俊霖,李浩,伍新木,等.基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价.长江流域资源与环境,2016,25(10):1537-1544. [REN J L, LI H, WU X M, et al. Assessment of 11 provincial capitals' water ecological civilization of the Yangtze River Economic Belt on the principal component. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(10): 1537-1544.]
- [8] 李千珣,郭生练,邓乐乐,等.湖北省行政区水生态文明建设评价.水资源研究,2020,9(2):121-130. [LI Q X, GUO S L, DENG L L, et al. Evaluation on water ecological civilization construction in Hubei provincial administrative regions. Journal of Water Resources Research, 2020, 9(2): 121-130.]
- [9] 张雯婕,岳启蒙,温河青,等.水生态文明城市建设评价方法及其应用研究.北京师范大学学报:自然科学版,2020,56(2):315-323. [ZHANG W J, YUE Q M, WEN H Q, et al. Evaluation of water ecologically civilized city construction. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2020, 56(2): 315-323.]
- [10] 成金华,李悦,陈军.中国生态文明发展水平的空间差异与趋同性.中国人口·资源与环境,2015,25(5):1-9. [CHENG J H, LI Y, CHEN J. Regional difference and convergence of ecological civilization level in China. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 1-9.]
- [11] 赵俊伟,尹昌斌,牛敏杰.中国农业生态文明发展水平的时空差异与变动趋势.财贸研究,2017,28(6):47-57. [ZHAO J W, YIN C B, NIU M J. Spatial-temporal difference and trends of agricultural eco-civilization level in China.

- Finance and Trade Research, 2017, 28(6): 47-57.]
- [12] SL/Z 738-2016. 水生态文明城市建设评价导则. 北京: 中华人民共和国水利部, 2016. [SL/Z 738-2016. Guidelines for Evaluation of Water Ecological Civilization City Construction. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2016.]
- [13] 黄苗. 水生态文明建设的指标体系探讨. 中国水利, 2013, (6): 17-19, 9. [HUANG Z. Discussions on index system of water ecological civilization. China Water Resources, 2013, (6): 17-19, 9.]
- [14] 刘芳, 苗旺. 水生态文明建设系统要素的体系模型构建研究. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 117-122. [LIU F, MIAO W. System model construction of system elements in water ecological civilization construction. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 117-122.]
- [15] 王建华, 胡鹏. 水生态文明评价体系研究. 中国水利, 2013, (15): 39-42. [WANG J H, HU P. Studies on evaluation system of water ecological civilization. China Water Resources, 2013, (15): 39-42.]
- [16] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨. 水资源保护, 2013, 29(4): 1-4. [TANG K W. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4.]
- [17] 邓宗兵, 苏聪文, 宗树伟, 等. 中国水生态文明建设水平测度与分析. 中国软科学, 2019, (9): 82-92. [DENG Z B, SU C W, ZONG S W, et al. Measurement and analysis of China's water ecological civilization construction index. China Soft Science, 2019, (9): 82-92.]
- [18] 高鸣, 宋洪远. 粮食生产技术效率的空间收敛及功能区差异: 兼论技术扩散的空间涟漪效应. 管理世界, 2014, (7): 83-92. [GAO M, SONG H Y. Spatial convergence of technological efficiency in grain production and differences in functional areas: Also on the spatial ripple effect of technological diffusion. Management World, 2014, (7): 83-92.]
- [19] REY S J, JANIKAS M V. STARS: Space-time analysis of regional systems. Geographical Analysis, 2006, 38(1): 67-86.
- [20] ELHORST J P. Dynamic panels with endogenous interaction effects when T is small. Regional Science and Urban Economics, 2010, 40(5): 272-282.
- [21] YU J, LEE L F. Estimation of spatial autoregressive panel data models with fixed effects. Journal of Econometrics, 2010, 154(2): 165-185.
- [22] 魏敏, 李书昊. 新时代中国经济高质量发展水平的测度研究. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(11): 3-20. [WEI M, LI S H. Study on the measurement of economic high-quality development level in China in the New Era. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(11): 3-20.]
- [23] 秦晓楠, 卢小丽. 基于BP-DEMATEL模型的沿海城市生态安全系统影响因素研究. 管理评论, 2015, 27(5): 48-58. [QIN X N, LU X L. A BP-DEMATEL-model-based research of the factors that affect coastal urban ecological security system. Management Review, 2015, 27(5): 48-58.]
- [24] 肖磊, 鲍张蓬, 田毕飞. 我国服务业发展指数测度与空间收敛性分析. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(11): 111-127. [XIAO L, BAO Z P, TIAN B F. Study on the development index and spatial convergence of service industry in China. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(11): 111-127.]
- [25] GROSSMAN G M, KRUEGER A B. Environmental impacts of a North American free trade agreement. Social Science Electronic Publishing, 1991, 8(2): 223-250.
- [26] 包群, 彭水军. 经济增长与环境污染: 基于面板数据的联立方程估计. 世界经济, 2006, (11): 48-58. [BAO Q, PENG S J. Economic growth and environmental pollution: Simultaneous equation estimation based on panel data. The Journal of World Economy, 2006, (11): 48-58.]
- [27] DASGUPTA S, HETTIGE H, WHEELER D. What improves environmental compliance? Evidence from Mexican industry. Journal of Environmental Economics and Management, 2000, 39(1): 39-66.
- [28] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用脱钩态势评价与展望. 自然资源学报, 2014, 29(1): 46-54. [WU D. Evaluation and prospect on the decoupling trend of economic development and water resource utilization in China. Journal of Natural Resources, 2014, 29(1): 46-54.]
- [29] 孙才志, 刘玉玉. 基于DEA-ESDA的中国水资源利用相对效率的时空格局分析. 资源科学, 2009, 31(10): 1696-1703. [SUN C Z, LIU Y Y. Analysis of the spatial-temporal pattern of water resources utilization relative efficiency based on DEA-ESDA in China. Resources Science, 2009, 31(10): 1696-1703.]
- [30] 李斌, 彭星, 欧阳铭珂. 环境规制、绿色全要素生产率与中国工业发展方式转变: 基于36个工业行业数据的实证研究. 中国工业经济, 2013, (4): 56-68. [LI B, PENG X, OUYANG M K. Environmental regulation, green total factor productivity and the transformation of China's industrial development mode-Analysis based on data of China's 36 industries. China Industrial Economics, 2013, (4): 56-68.]

- [31] 黄群慧. “新常态”、工业化后期与工业增长新动力. 中国工业经济, 2014, (10): 5-19. [HUANG Q H. "The new normal", the late stage of industrialization and the new power of industrial growth. *China Industrial Economics*, 2014, (10): 5-19.]
- [32] 鲍超, 陈小杰, 梁广林. 基于空间计量模型的河南省用水效率影响因素分析. 自然资源学报, 2016, 31(7): 1138-1148. [BAO C, CHEN X J, LIANG G L. Analysis on the influencing factors of water use efficiency in Henan province based on spatial econometric models. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(7): 1138-1148.]
- [33] 王小鲁, 樊纲, 李胡鹏. 中国分省份市场化指数报告(2018). 北京: 社会科学文献出版社, 2019. [WANG X L, FAN G, HU L P. *Marketization Index of China's Provinces: NERI report 2018*. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2019.]
- [34] 陈燕, 蓝楠. 美国环境经济政策对我国的启示. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2010, 10(2): 38-42. [CHEN Y, LAN N. Inspiration for our country from American environmental economic policy. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2010, 10(2): 38-42.]
- [35] 杨文进, 柳杨青. 论市场经济向生态市场经济的蜕变. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2013, 13(3): 20-25. [YANG W J, LIU Y Q. Discussion on the transformation from market economy to eco-market economy. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2013, 13(3): 20-25.]
- [36] 成艾华. 技术进步、结构调整与中国工业减排: 基于环境效应分解模型的分析. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 41-47. [CHENG A H. Technological progress, structural readjustment and pollution reduction for the industry in China. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(3): 41-47.]
- [37] 董直庆, 蔡啸, 王林辉. 技术进步方向、城市用地规模和环境质量. 经济研究, 2014, 49(10): 111-124. [DONG Z Q, CAI X, WANG L H. The direction of technical change, urban land size and environment quality. *Economic Research Journal*, 2014, 49(10): 111-124.]
- [38] 马海良, 丁元卿, 王蕾. 绿色水资源利用效率的测度和收敛性分析. 自然资源学报, 2017, 32(3): 406-417. [MA H L, DING Y Q, WANG L. Measurement and convergence analysis of green water utilization efficiency. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 406-417.]
- [39] 于法稳, 张海鹏, 于贤储. 粮食安全背景下基层水利人才队伍建设对策研究. 中国软科学, 2014, (6): 17-24. [YU F W, ZHANG H P, YU X C. Countermeasures for building primary water conservancy talent team under the context of grain security. *China Soft Science*, 2014, (6): 17-24.]
- [40] 周侃, 王强, 樊杰. 经济集聚对区域水污染物排放的影响及溢出效应. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1483-1495. [ZHOU K, WANG Q, FAN J. Impact of economic agglomeration on regional water pollutant emissions and its spillover effects. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1483-1495.]
- [41] 胡宗义, 李毅. 金融发展对环境污染的双重效应与门槛特征. 中国软科学, 2019, (7): 68-80. [HU Z Y, LI Y. Dual effects and threshold characteristics of financial development on environmental pollution. *China Soft Science*, 2019, (7): 68-80.]
- [42] 周侃, 樊杰. 中国环境污染源的区域差异及其社会经济影响因素: 基于339个地级行政单元截面数据的实证分析. 地理学报, 2016, 71(11): 1911-1925. [ZHOU K, FAN J. Regional disparity of environmental pollution source and its socio-economic influencing factors: Based on the cross-section data of 339 cities at prefecture level or above in China. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(11): 1911-1925.]
- [43] 陆铭, 冯皓. 集聚与减排: 城市规模差距影响工业污染强度的经验研究. 世界经济, 2014, 37(7): 86-114. [LU M, FENG H. Agglomeration and emission reduction: Empirical study on the impact of urban scale disparity on industrial pollution intensity. *The Journal of World Economy*, 2014, 37(7): 86-114.]
- [44] 焦若静. 人口规模、城市化与环境污染的关系: 基于新兴经济体国家面板数据的分析. 城市问题, 2015, (5): 8-14. [JIAO R J. Study on the relationship among population size, urbanization and environmental pollution: Based on the panel data of emerging economies. *Urban Problems*, 2015, (5): 8-14.]
- [45] 毕国华, 杨庆媛, 刘苏. 中国省域生态文明建设与城市化的耦合协调发展. 经济地理, 2017, 37(1): 50-58. [BI G H, YANG Q Y, LIU S. Coupling coordination development between ecological civilization construction and urbanization in China. *Economic Geography*, 2017, 37(1): 50-58.]
- [46] 邓宗兵, 宗树伟, 苏聪文, 等. 长江经济带生态文明建设与新型城镇化耦合协调发展及动力因素研究. 经济地理, 2019, 39(10): 78-86. [DENG Z B, ZONG S W, SU C W, et al. Research on coupling coordination development between ecological civilization construction and new urbanization and its driving forces in the Yangtze River Economic Zone. *Economic Geography*, 2019, 39(10): 78-86.]
- [47] 张耀军, 王小玺. 城市群视角下中国人口空间分布研究. 人口与经济, 2020, (3): 1-13. [ZHANG Y J, WANG X X. A study on population spatial distribution in China from the perspective of urban agglomeration. *Population & Economics*, 2020, (3): 1-13.]

- [48] 陆铭, 李鹏飞, 钟辉勇. 发展与平衡的新时代: 新中国 70 年的空间政治经济学. 管理世界, 2019, 35(10): 11-23, 63, 219. [LU M, LI P F, ZHONG H Y. The New Era of development and balance: Spatial political economics of New China's regional economy for 70 years. Management World, 2019, 35(10): 11-23, 63, 219.]

Spatial pattern evolution and convergence of water eco-civilization development index in China

SU Cong-wen¹, DENG Zong-bing^{2,3}, LI Li-ping², WEN Jiang-xue², CAO Yu-fu²

(1. School of Social Development and Public Policy, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. College of Economics and Management, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. Research Center for Inclusive Finance and Agricultural and Rural Development, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Spatial correlation and convergence of the development level of China's water eco-civilization is vital to its coordinated construction. Constructing an evaluation system of water eco-civilization construction, whose dimensions contain water security, water ecology, water environment, water conservation, water supervision and water culture, this paper adopts entropy methods to measure water eco-civilization development index of China and its 31 provincial-level regions from 2010 to 2018, uses exploratory spatial data analysis (ESDA) and space-time transition method to examine the spatio-temporal evolution patterns, and builds spatial panel Durbin model to reveal the spatial convergence. The results are obtained as follows. (1) The development index of China's water eco-civilization is increasing year by year, but water ecology, water supervision and water culture are still the main short boards. There are significant regional differences, showing a pattern of "high-low-medium" from east to west. (2) The development index of China's provincial water eco-civilization shows significant positive spatial spillover effect and spatial pattern locking characteristics. The high-high aggregation areas mainly include eastern coastal regions while the low-low ones mainly include northeast, northwest and southwest of China, and middle reaches of the Yangtze River, and the latter is difficult to realize the transition to HH-type provinces. (3) There exists significant α convergence, absolute β and conditional β convergence in China as well as in its eastern, central and western regions from 2010 to 2018, with the fastest in the eastern region referring to absolute β convergence and the fastest in the central region referring to conditional β convergence, while the western region is the slowest in both types of β convergences. (4) Economic development, population density, human capital and technological progress have significant effects on the convergence of China's water eco-civilization development, but there are obvious regional variations. Specific countermeasures and suggestions are put forward accordingly.

Keywords: water eco-civilization; index measure; spatial pattern evolution; spatial convergence