

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.03.030

水生态文明建设质量的时空演化评估

宋晓娜^{1,2}, 经小川¹, 张峰²

(1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048; 2. 山东理工大学管理学院, 山东 淄博 255012)

摘要:基于习近平总书记提出的新时期治水思路设计水生态文明建设质量研究框架和评估指标体系,采用“纵横向”拉开档次法和探索性空间数据分析法评估了水生态文明建设质量的时序变迁规律和空间演化趋势。结果表明:2004—2020年水生态文明建设质量变迁先后经历了缓震荡期和快速增长期,总体上呈相对稳定的上升趋势,兼具“梯度演化”和“中游驱动”的变化特征;水生态文明建设质量具有空间正相关性,存在城市群极化现象,且以长三角地区最为显著;“十四五”期间是中、西部地区发挥后发优势的重要战略机遇期,发挥长三角、京津冀等领先优势城市群的辐射带动效应尤为重要。

关键词:水生态文明;质量评价;空间演化;趋势预测

中图分类号:TV213.4;X321 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)03-0246-07

Evaluation on spatiotemporal evolution of water ecological civilization construction quality// SONG Xiaona^{1,2}, JING Xiaochuan¹, ZHANG Feng² (1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China; 2. School of Management, Shandong University of Technology, Zibo 255012, China)

Abstract: Based on the idea of water control in the new era proposed by General Secretary Xi Jinping, a research framework and an evaluation index system of water ecological civilization construction quality were constructed, and the “vertical and horizontal” grading method and exploratory spatial data analysis method were used to evaluate the temporal change and spatial evolution trends of water ecological civilization construction quality. The results show that the evolution of water ecological civilization construction quality from 2004 to 2020 could be divided into a slow shock period and a fast growth period, demonstrating a relatively stable upward trend on the whole, with “gradient evolution” and “midstream driving” characteristics; the water ecological civilization construction quality has the characteristics of spatial positive correlation, along with a phenomenon of urban agglomeration polarization, especially in the Yangtze River Delta; the period of Fourteenth Five-Year Plan is an important strategic opportunity period for the central and western regions in China to give play to their late-developing advantages, and it is particularly important to give play to the radiative driving effect of leading urban agglomerations such as the Yangtze River Delta and Beijing-Tianjin-Hebei agglomerations.

Key words: water ecological civilization; quality evaluation; spatial evolution; trend prediction

生态文明建设是新时代中国特色社会主义的重要内容,“十四五”期间我国新时期生态文明建设面临着合理配置能源资源、大幅提高利用效率等多重目标挑战,而水生态文明建设是生态文明建设总体布局中最基础、最重要的组成部分之一,“十三五”期间,国家节水行动持续加强,水资源消耗总量和强度双控工作不断深化,但在2020年国家地表水考核断面中,水质优良(I~Ⅲ类)断面比例仍处于85%

以下,面对《“十四五”水安全保障规划》提出的“到2035年,美丽健康水生态系统基本形成”目标要求,未来较长时间内水生态文明建设任务依然繁重^[1]。

近年来,围绕水生态文明建设的理论研究成果主要聚焦在:①水生态文明建设意义及内涵变迁。建立在“人水和谐”理念基础之上的水生态文明建设重要意义已成为社会各界的共识^[2-4],认为开展水生态文明建设,必须要将生态文明的基本理念融

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(71904108);国家自然科学基金重点项目(U1501253)

作者简介:宋晓娜(1990—),女,讲师,博士研究生,主要从事系统工程研究。E-mail: aijia8190@163.com

通信作者:张峰(1989—),男,教授,博士,主要从事复杂系统与生态化研究。E-mail: glxyzf@163.com

入到水资源开发利用、集约配置和治理保护的每个环节^[5-7]。②水生态文明建设绩效评估体系及工具的转变。建立评估体系并引入定量模型进行指标测度是水生态文明建设水平量化的常用方式^[8-10]。常见指标准则包括水生态、水环境和水节约,相关研究中还引入了水安全、水监管和水文化等,以期构建更加完善的评估体系^[11-12]。在评估工具方面,主成分分析、模糊评价、熵值法等数理模型受到学者们的青睐^[13-14],尽管这类工具可以规避人为因素的干扰,但容易出现信息损失等问题。③水生态文明建设驱动机制的检验。主要思路是将水生态文明建设试点作为调控变量,检验其对水环境改善和水资源承载力提升的影响^[15-16]。总体来看,关于水生态文明建设评估指标体系尚未形成共识,对于空间格局演化特点也缺乏深入的量化分析。

本文基于习近平总书记提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”新时期治水思路(以下简称“十六字”治水思路),设计水生态文明建设质量研究框架和评估指标体系,并综合“纵横向”拉开档次法和探索性空间数据分析法评估水生态文明建设质量的时序变迁规律和空间演化趋势。

1 研究方法

1.1 研究框架设计

基于习近平总书记提出的“十六字”治水思路,综合设计水生态文明建设质量研究框架,见图1。其中,“节水优先”和“系统治理”反映了水生态文明建设的目标导向和实践路径,是构建其质量评估指标体系的重要参考依据;在空间尺度下,检验水生态文明建设质量的关联特性及其类型是探究促进“空间均衡”问题的关键内容;而要精准提升“两手发力”的着力点,则需要科学预判水生态文明建设质量的未来变化趋势,为正确设计“十四五”期间生态文明建设政策提供决策依据。

1.2 指标体系构建

本文结合《关于印发实行最严格水资源管理制度考核办法的通知》(国办发〔2013〕2号)和《关于加快推进水生态文明建设的意见》(水资源〔2013〕1号),将水生态文明建设质量定义为:以“人水和谐”为导向,遵循生态文明理念,聚焦水资源开发、利用、治理、配置、节约、保护整体流程和水利规划、建设和管理状态的系统评估,以落实最严格水资源管理制度为核心,推动水资源优化配置、水资源节约保护、水生态容量提升、水环境质量提高和水安全平稳保障等维度的综合建设水平。本文依据水生态文明建设质量内涵和图1所示的水生态文明建设质量研究框架,结合SL/Z 738—2016《水生态文明城市建设评价导则》中评价体系框架,构建了水生态文明建设质量评估指标体系如图2所示(括号中为指标权重,*表示负向指标,其他为正向指标)。

1.3 评估方法

水生态文明建设质量属于多因素综合评价问题,目前相关研究中的测算主要是针对选定区域,利用截面数据进行静态评价,包括主观评估和客观赋权两类。考虑到常用的主观评估法存在赋权争议的弊端,而客观赋权法又难以解决评价指标在不同时期由于变化程度非均衡引发的跨期比较问题,本文采用“纵横向”拉开档次法对水生态文明建设质量进行测算,该方法在处理截面数据时具有强化对比结果、克服主观因素影响的优点,具体计算过程见文献[17]。

在测算水生态文明建设质量的基础上,利用探索性空间数据分析法分析空间集聚变化特征。首先从全局空间自相关的角度,采用莫兰指数(Moran's I)解析水生态文明建设质量地理空间尺度下的关联度,进而从局域空间自相关的角度,利用Getis-OrdG_i^{*}分析水生态文明建设质量的局域单元*i*及其邻近空间单元的冷热点分布状况,详细计算过程见文献[18]。

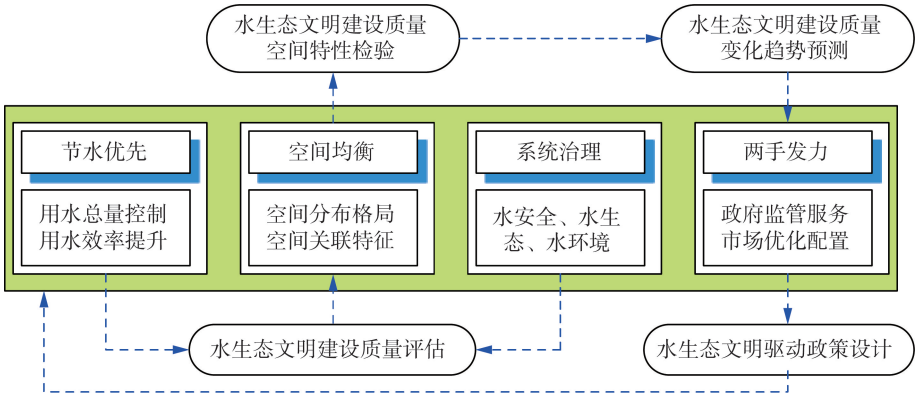


图1 水生态文明建设质量研究框架

Fig.1 Research framework on water ecological civilization construction quality

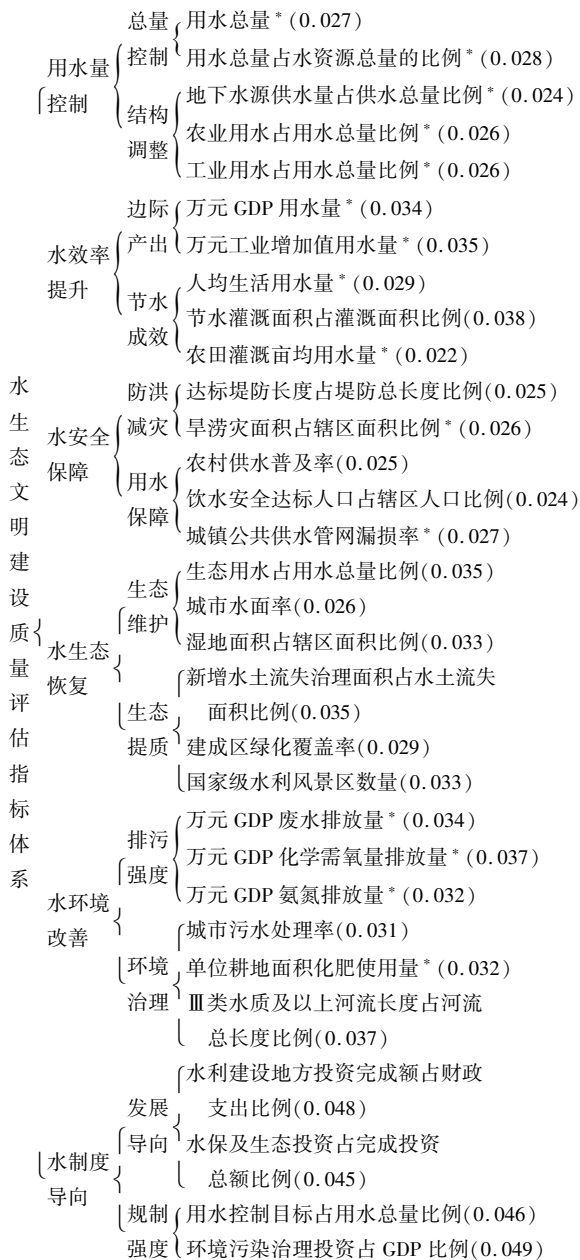


图2 水生态文明建设质量评估指标体系

Fig. 2 Water ecological civilization construction quality evaluation index system

1.4 数据来源

本文研究区域为中国除港、澳、台和西藏以外的30个省(直辖市、自治区)(以下简称“省”)。数据主要源于2004—2020年的《中国统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国水土保持公报》《中国环境统计年鉴》《中国农业年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》以及各地区统计年鉴、水资源公报和环境统计公报等,少数缺失数据采用插值法补充。

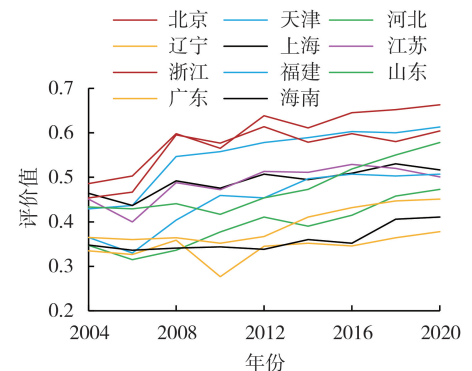
2 水生态文明建设质量评估

2.1 水生态文明建设质量时序变化比较分析

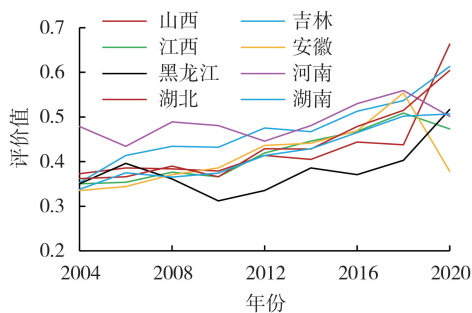
利用“纵横向”拉开档次法评估30个省2004—2020年水生态文明建设质量,并采用云模型和聚类

函数刻画2020年水生态文明建设质量的正态分布和最优类别划分。

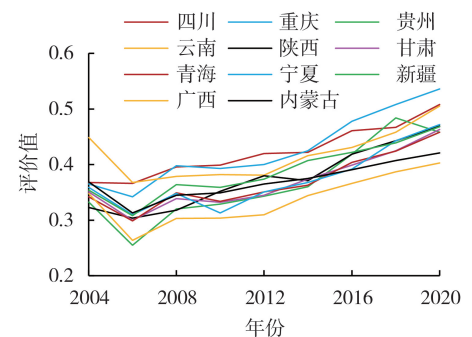
a. 考察期内水生态文明建设质量在经历缓震荡期后,步入快增长阶段,总体上呈相对稳定的攀升态势。图3为各区域水生态文明建设质量评价结果。从图3可见,全国总体水生态文明建设质量评价价值从2004年的0.378增长至2020年的0.495,增



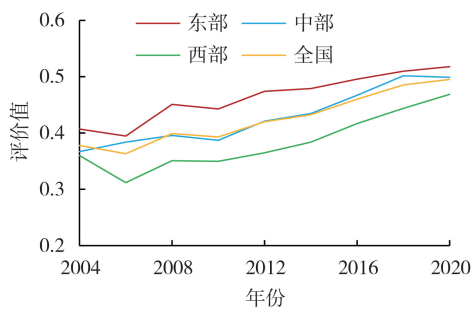
(a) 东部各省



(b) 中部各省



(c) 西部各省



(d) 全国与东、中、西部地区

图3 水生态文明建设质量评价结果

Fig. 3 Water ecological civilization construction quality evaluation results

幅为 31.02%,印证了近年来水生态文明建设成效持续走高的发展趋势,也反映出现阶段水生态文明建设质量整体水平仍有较大提升空间。从时序变化状态来看,拐点发生在 2010 年(评价值为0.393),拐点前期表现为阶段性的震荡波动,但总体变化趋势较为平缓,而拐点后期存在局部小幅度波动,增幅跨度明显。

b. 水生态文明建设质量具有“梯度演化”特征。由图 3 和表 1 可知,水生态文明建设质量从东至西呈高一中一低分布,水生态文明建设质量评价均值排名前 10 的省中 7 个在东部,均值排名后 10 的省中 8 个在西部。中、西部地区水生态文明建设质量平均增幅超过 30%,说明这些地区已形成了对东部地区的追赶之势。水生态文明建设质量正态云隶属度分布(图 4)显示,北京、浙江和天津等省领先优势不突出,而其他省水生态文明建设质量正态云隶属度分布呈现出重叠状态。

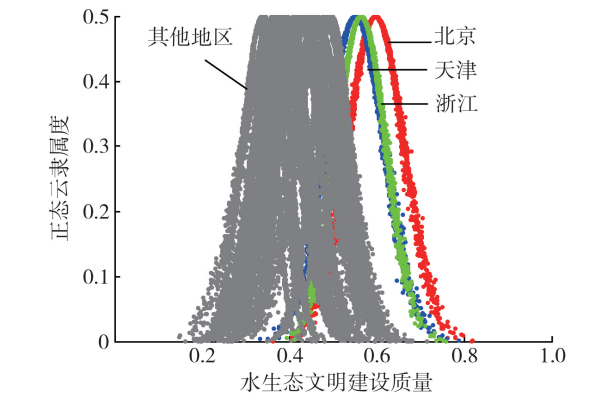


图 4 水生态文明建设质量正态云隶属度分布

Fig.4 Distribution of normal cloud membership of water ecological civilization construction quality

c. 水生态文明建设质量“中游驱动”特征显著。图 5 给出了 2020 年水生态文明建设质量的聚类结果

果。可以发现,山东与北京、天津和浙江聚为一类;湖北、重庆、江西等 11 个省被划分为第二类,评价价值位于 0.500 ~ 0.560 之间,属于中游梯队;贵州、青海、山西等 10 个省被划分为第三类,评价价值位于 0.450 ~ 0.480 之间,略低于全国平均水平。第二、三类地区省的数量达到样本总量的 70%,进一步印证了现阶段全国水生态文明建设总体形势依旧不容乐观。剩余 5 个省的水生态文明建设质量评价价值均小于 0.430,为第四类地区,是应当给予重点关注和扶持发展的地区。

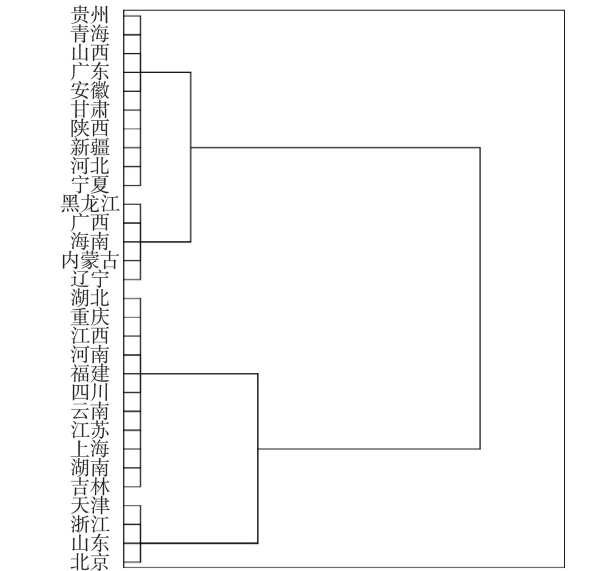


图 5 水生态文明建设质量聚类结果

Fig.5 Clustering results of water ecological civilization construction quality

2.2 水生态文明建设质量空间格局特征分析

图 6 为 2004 年、2012 年和 2020 年水生态文明建设质量评价价值的莫兰指数散点分布,莫兰指数的 P 统计值为 0.015,表明水生态文明建设质量呈显

表 1 各省水生态文明建设质量评价均值及增幅排名

Table 1 Ranking of mean value and increase of water ecological civilization construction quality in different provinces

省	均值	均值排名	增幅/%	增幅排名	省	均值	均值排名	增幅/%	增幅排名
北 京	0.596	1	36.42	12	江 西	0.426	12	56.00	1
天 津	0.550	3	42.89	7	河 南	0.495	4	15.45	24
河 北	0.391	19	36.31	13	湖 北	0.430	10	48.62	3
辽 宁	0.343	29	12.84	27	湖 南	0.419	15	51.78	2
上 海	0.492	5	11.42	29	四 川	0.423	13	38.04	10
江 苏	0.487	6	11.09	30	重 庆	0.427	11	46.85	5
浙 江	0.563	2	33.04	16	贵 州	0.367	27	37.54	11
福 建	0.447	9	38.90	8	云 南	0.419	16	12.47	28
山 东	0.477	7	33.49	15	陕 西	0.375	21	45.20	6
广 东	0.394	18	23.56	20	甘 肃	0.370	24	31.91	18
海 南	0.360	28	18.10	22	青 海	0.369	25	33.92	14
山 西	0.409	17	22.52	21	宁 夏	0.373	22	31.48	19
吉 林	0.461	8	48.16	4	新 疆	0.388	20	32.20	17
黑 龙 江	0.368	26	14.29	25	广 西	0.337	30	15.80	23
安 徽	0.422	14	38.81	9	内 蒙 古	0.371	23	14.09	26

著空间自相关;2004 年、2012 年和 2020 年水生态文明建设质量莫兰指数值分别为 0.238、0.480 和 0.270,均大于 0,表明空间正相关性显著。观测散点分布可发现,第一象限(高-高集聚)、第三象限(低-低集聚)为主要集中区域。在时序维度下,莫兰指数呈现倒“U”形变化,反映了水生态文明建设质量地区差异具有“扩大→缩小”的特点。

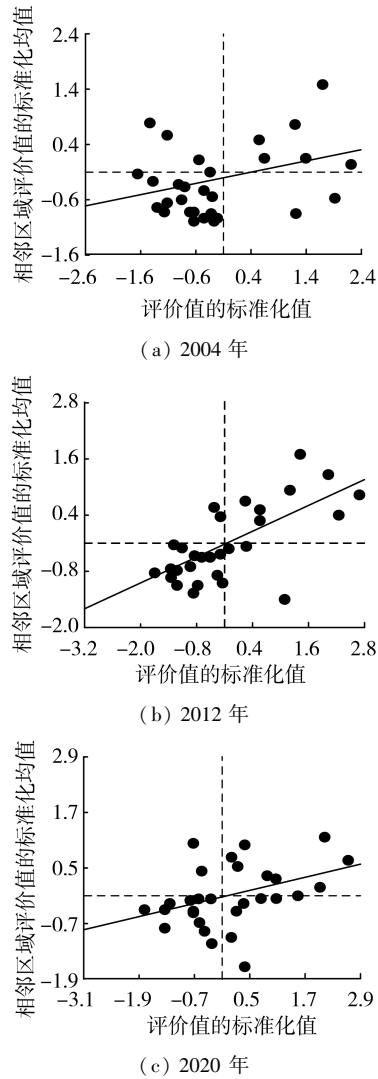


图 6 水生态文明建设质量莫兰指数散点分布
Fig.6 Moran's I scatter distribution of water ecological civilization construction quality

为进一步明确水生态文明建设质量的空间集聚点,选用 $Getis-OrdG_i^*$ 揭示水生态文明建设质量冷热点,结果见图 7。

a. 水生态文明建设质量具有较为显著的城市群极化现象,即长三角城市群所在地区具有较强且相对稳定的水生态文明建设质量领先优势,而周边的长江中游城市群和环渤海城市群所在地区也呈现出了较好的发展趋势,说明“十一五”以来城市群作为城镇化主体的战略地位不断推进,水生态文明建设随之步入提质增速阶段^[19]。同时,随着长三角城市群对

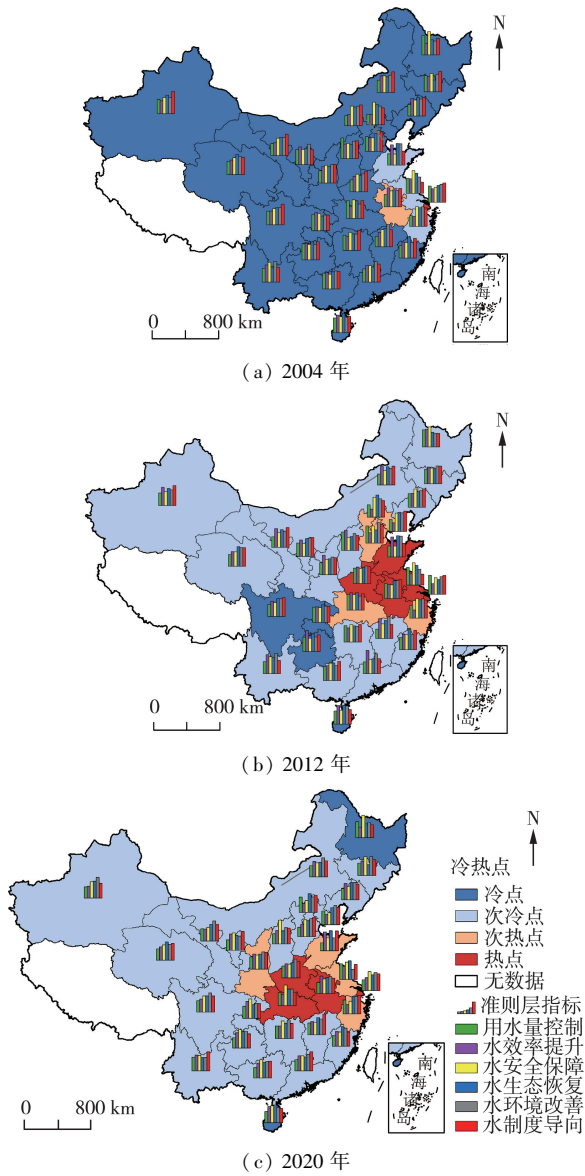


图 7 水生态文明建设质量冷热点空间分布演化趋势和准则层指标值的时序变化

Fig.7 Evolution of spatial distributions of hot and cold spots of water ecological civilization construction quality and temporal changes of indexes in each criterion layer

周边地带网络辐射效应的提升,“多中心、组团式、网络化、集约型”水生态文明建设空间格局已见成效。

b. 水生态文明建设质量热点和次热点变化呈先增后稳的特点,而冷点和次冷点表现出较好的改观趋势。从 2012 年到 2020 年,虽然热点和次热点地区数量由 10 个下降至 8 个,但变动幅度较小,热点地区主要集中在河南、湖北、安徽和上海,说明水生态文明建设质量重心正由东部沿海向内陆地区转移。冷点和次冷点地区占据大部分面积,且东北部区域新增冷点地区,说明东北部地区水生态文明建设需引起重视。

c. 多数地区水生态文明建设质量存在长期性的共性短板。图 7 给出了各准则层指标赋值的时序

变化,可发现不同省水生态文明建设质量的短板呈现较高的异质性,对于多数地区而言,用水量控制是亟待改善的短板。此外,东北部地区的水安全保障能力需要进一步提升,西北都地区社会经济发展水平相对落后,沿袭传统粗放式的用水模式会进一步加剧该区域的供需水矛盾。

2.3 水生态文明建设质量趋势预测

基于多项式拟合模型对“十四五”末(2025 年)水生态文明建设质量进行预测。为保障预测精度,本文对比分析了多项式拟合模型、GM(1,1)模型、DGM(1,1)模型和 Verhulst 模型的预测效果,发现多项式拟合模型阶数取值为 5 时,平均相对误差均低于 5%,比其他模型误差小。利用自然间断点分级法得到 2025 年水生态文明建设质量空间分布的预测结果(图 8)。2025 年全国总体水生态文明建设质量评价价值达到 0.585,与 2020 年相比增幅为 37.63%,说明“十四五”期间,水生态文明建设能够保持良好的发展趋势。东、中、西部地区水生态文明建设质量评价价值分别为 0.611、0.584、0.560,东部地区继续保持领先优势;中部地区与全国平均水平基本持平,增幅为 36.17%,略低于全国平均水平;西部地区总体水平依然偏低,但与东、中部地区之间的差距进一步缩小,且增幅达到 45.71%。上述结果表明,“十四五”时期将是中、西部地区发挥后发优势的重要战略机遇期。

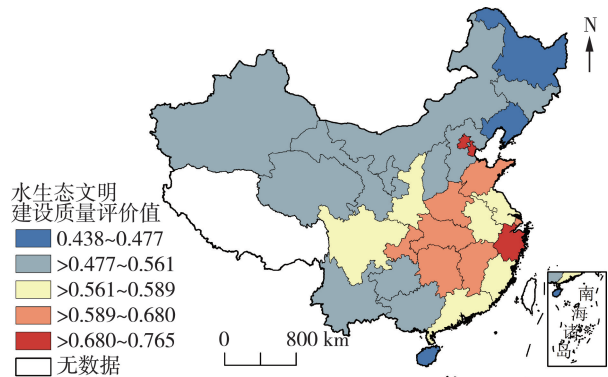


图 8 2025 年水生态文明建设质量空间分布预测结果
Fig.8 Prediction results of spatial distribution of water ecological civilization construction quality in 2025

图 9 为水生态文明建设质量的核密度估计结果,即采用估计连续随机变量的概率密度函数,检验水生态文明建设质量的动态分布规律。可以看出,2025 年分布曲线中心和变化区间发生了明显右移,体现出水生态文明建设质量持续提升。从曲线的分布形态来看,2025 年保持了单峰分布状态,说明随着时间的推移,水生态文明建设质量不会出现多级分化的趋势。2025 年水生态文明建设质量核密度

峰值与 2012 年基本持平,比 2020 年略低,而波峰宽度呈微弱扩大的态势,说明“十四五”期间水生态文明建设质量的绝对差异总体上可能呈现微弱扩大的变化趋势。基于以上问题,综合水生态文明建设质量演化存在的城市群极化现象,“十四五”期间应根据“以点带面、以面带全”的水生态文明建设全局空间网络建设思路,发挥长三角和京津冀地区水生态文明建设的领先引导优势,北向环渤海城市群、南向珠三角城市群、西向成渝城市群进行逐点辐射扩散。

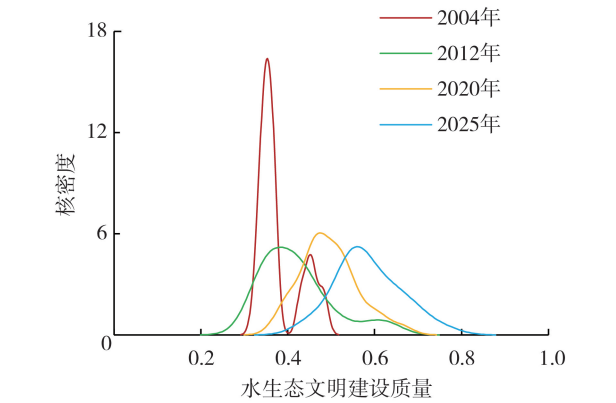


图 9 水生态文明建设质量核密度估计结果
Fig.9 Kernel density estimation of water ecological civilization construction quality

3 结 论

a. 2004—2020 年水生态文明建设质量先后经历缓震荡期和快速增长期,总体上呈相对稳定的上升趋势,拐点发生在 2010 年;水生态文明建设质量兼具“梯度演化”和“中游驱动”的变化特征,其中,“梯度演化”印证了水生态文明建设质量形成东部领先,中、西部追赶的发展态势,而“中游驱动”则揭示了水生态文明建设质量在总体趋势稳增的背景下,仍有较大的提升空间。

b. 水生态文明建设质量具有空间正相关性,地区差异存在“扩大→缩小”特点。空间冷热点变化中,水生态文明建设质量存在城市群极化现象,以长三角一带最为显著;水生态文明建设质量热点和次热点变化呈先增后稳的特点,而冷点和次冷点表现出较好的改观趋势;提升水生态文明建设整体质量,不仅要克服用水量控制不足等共性短板,而且要聚焦不同地区的实际弱项。

c. “十四五”时期水生态文明建设总体上能够保持良好的发展趋势,是中、西部地区发挥后发优势的重要战略机遇期,特别是西部地区将进一步缩小与东、中部地区的差异,而东北部地区和西南部地区应着力加快提升水生态文明建设速度;发挥长三角和京津冀地区水生态文明建设的领先辐射效应尤为

重要,路径上可北向环渤海城市群、南向珠三角城市群、西向成渝城市群进行逐点辐射扩散。

参考文献:

- [1] 刘波,汪紫薇,王文鹏,等.我国城市用水效率关键指标时空格局分析[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):534-541.(LIU Bo, WANG Ziwei, WANG Wenpeng, et al. Spatiotemporal characteristics analysis of major indicators of urban water use efficiencies over mainland China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 534-541. (in Chinese))
- [2] 季晓翠,王建群,傅杰民.基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J].水资源保护,2019,35(2):74-79.(JI Xiaocui, WANG Jianqun, FU Jiemin. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 74-79. (in Chinese))
- [3] 金菊良,汤睿,周戎星,等.基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J].水资源保护,2021,37(4):1-6.(JIN Juliang, TANG Rui, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 1-6. (in Chinese))
- [4] 赵钟楠,张越,黄火键,等.基于问题导向的水生态文明概念与内涵[J].水资源保护,2019,35(3):84-88.(ZHAO Zhongnan, ZHANG Yue, HUANG Huojian, et al. Concept and connotation of aquatic ecological civilization based on problem orientation[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 84-88. (in Chinese))
- [5] 左其享.人水关系学的基本原理及理论体系架构[J].水资源保护,2022,38(1):1-6.(ZUO Qiting. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 1-6. (in Chinese))
- [6] FANG Hongyuan, GAN Shengwei, XUE Chenying. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on binary index method and reduction index method[J]. Water Science and Engineering, 2019, 12(4): 263-273.
- [7] HANSEN M H, LI Hongtao, SVARVERUD R. Ecological civilization: interpreting the Chinese past, projecting the global future[J]. Global Environmental Change, 2018, 53: 195-203.
- [8] GEALL S, ELYA. Narratives and pathways towards an ecological civilization in contemporary China[J]. The China Quarterly, 2018, 236: 1175-1196.
- [9] 姜明栋,杨晓卉.农村水生态文明建设研究进展[J].环境污染与防治,2019,41(10):1239-1244.(JIANG Mingdong, YANG Xiaohui. Advances on rural water ecological civilization construction[J]. Environmental Pollution and Control, 2019, 41(10): 1239-1244. (in Chinese))
- [10] 许晶荣,黄德春,方隽敏.中国区域全要素水资源利用效率及其影响[J].河海大学学报(哲学社会科学版),2021,23(6):77-84.(XU Jingrong, HUANG Dechun, FANG Junmin. Regional total factor water resources utilization efficiency and its influencing factors in China[J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2021, 23(6): 77-84. (in Chinese))
- [11] HAN Ying, TANG Chengcai, ZENG Rui. Review of tourism ecological security from the perspective of ecological civilization construction[J]. Journal of Resources and Ecology, 2022, 13(4): 734-745.
- [12] YAO Xilong, FENG Wei, ZHANG Xiaoling, et al. Measurement and decomposition of industrial green total factor water efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 198: 1144-1156.
- [13] TARDIEU F. Different avenues for progress apply to drought tolerance, water use efficiency and yield in dry areas[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2022, 73: 128-134.
- [14] TARROJA B, CHIANG F, AGHAKOUCHAK A, et al. Assessing future water resource constraints on thermally based renewable energy resources in California[J]. Applied Energy, 2018, 226: 49-60.
- [15] 唐克旺.水生态文明的内涵及评价体系探讨[J].水资源保护,2013,29(4):1-4.(TANG Kewang. Discussion on concept and assessment system of aquatic ecological civilization[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(4): 1-4. (in Chinese))
- [16] ZHANG Jinliang, SHANG Yizi, LIU Jixiang, et al. Improved ecological development model for lower Yellow River floodplain, China[J]. Water Science and Engineering, 2020, 13(4): 275-285.
- [17] 郭亚军.一种新的动态综合评价方法[J].管理科学学报,2002,5(2):49-54.(GUO Yajun. New theory and method of dynamic comprehensive evaluation[J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(2): 49-54. (in Chinese))
- [18] 焦士兴,王安周,张崇崇,等.河南省水资源效率综合测度及时空分异[J].水资源保护,2022,38(2):48-55.(JIAO Shixing, WANG Anzhou, ZHANG Chongchong, et al. Comprehensive measurement and temporal-spatial differentiation of water resources efficiency in Henan Province[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 48-55. (in Chinese))
- [19] 李晓英,江崇秀,张琛.基于云模型的城市资源水价研究[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):215-221.(LI Xiaoying, JIANG Chongxiu, ZHANG Chen. Study on city resource water price based on cloud model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(3): 215-221. (in Chinese))

(收稿日期:2022-08-21 编辑:施业)