

京津冀地区城镇化与水资源可持续利用的演变及匹配特征

乔友凤¹, 李奕曼¹, 陈义忠^{1,2}, 王天漪¹, 郝灿¹

(1. 河北工业大学 经济管理学院, 天津 300401; 2. 河北工业大学京津冀发展研究中心, 天津 300401)

摘要: 提高水资源利用效率是实现京津冀地区城镇化高质量发展的关键环节。通过构建京津冀城市群新型城镇化水平评价指标体系, 评估其时空演变特征; 利用水资源生态足迹模型揭示城市群水资源利用格局。在此基础上, 结合耦合协调度模型及空间匹配模型探究两者的匹配特征。结果表明: 在新型城镇化水平方面, 北京市(0.82) > 天津市(0.47) > 河北省各市(0.1~0.4), 且障碍因子存在空间差异, 北京市表现为生态和城乡一体化, 而天津市和河北省的约束力主要来源于人口和社会城镇化。京津冀地区水资源可持续性有所增强, 具体表现为人均水资源生态足迹和足迹深度下降, 人均水资源生态承载力和足迹广度有所上升; 而与成渝城市群相比, 京津冀城市群水资源生态赤字形势严峻, 高强度农业用水是造成水资源生态足迹较高的主要原因。新型城镇化质量与水资源供需在时间尺度上处于勉强协调阶段, 其中北京市(良好协调)和天津市(中级协调)耦合协调度呈现上升趋势, 河北省各市耦合协调性较差; 水资源生态赤字与城镇化质量的空间匹配度有所下降, 河北省空间匹配性(匹配)高于北京市(不匹配)和天津市(较为匹配)。

关键词: 水资源可持续利用; 水资源生态足迹; 新型城镇化; 耦合协调度; 空间匹配度; 京津冀地区

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0064-10

Evolution and matching characteristics of urbanization and water resources sustainable utilization in Beijing – Tianjin – Hebei region

QIAO Youfeng¹, LI Yiman¹, CHEN Yizhong^{1,2}, WANG Tianyi¹, HAO Can¹

(1. School of Economics and Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Beijing – Tianjin – Hebei Development and Research Center, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: Improving water resources utilization efficiency is critical to the development of high-quality urbanization in Beijing – Tianjin – Hebei region (BTH). An evaluation index system of new urbanization level of BTH is established to evaluate its spatio-temporal evolution characteristics, and a water resources ecological footprint model is used to reveal its water resources utilization pattern. Based on this, the coupling coordination model and spatial matching model are combined to explore their matching characteristics. Results showed that the order of new urbanization level was as follows: Beijing (0.82) > Tianjin (0.47) > cities in Hebei Province (0.1 – 0.4). Spatial differences could be found in their obstruction factors, Beijing was mainly restricted by ecological and urban – rural integration factors, whereas that of Tianjin and Hebei mainly came from population concern. Water resources sustainability in BTH has been enhanced, because the per capita water resources ecological footprint and footprint depth decreased, and the per capita water resources ecological carrying capacity and footprint size increased. However, ecological deficit in BTH was still severe compared with Chengdu – Chongqing urban agglomeration, and high-intensity agricultural water use was the main reason for the high-level water resources ecological footprint. New urbanization quality and water resources supply – demand were at a quasi coordination stage. In the

收稿日期: 2022-08-27; 修回日期: 2022-12-25

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB22YJ070)

作者简介: 乔友凤(1998—), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为区域可持续发展。

通讯作者: 陈义忠(1989—), 男, 福建连江人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为区域可持续发展和资源与环境效应。

study area, the coupling coordination degree of Beijing (good coordination) and Tianjin (intermediate coordination) showed an upward trend, but that of cities in Hebei was rather poor. The spatial matching degree between water resources ecological deficit and urbanization quality has decreased, with Hebei (matching stage) higher than Beijing (mismatched stage) and Tianjin (relatively matched stage).

Key words: sustainable utilization of water resources; water resources ecological footprint; new urbanization level; coupling coordination degree; spatial matching degree; Beijing – Tianjin – Hebei region

1 研究背景

长期以来,京津冀地区以全国1%的水资源量支撑着全国11%的经济总量及8%的人口,其2021年的总用水量中约24.5%来自外引水(南水北调中线工程)。而2022年7月,长江流域遭受了自1961年全面气象观测以来最严重的干旱,且旱情仍有可能继续,工程沿线调蓄能力不足,难以支撑受水区新增的供水需求^[1]。有限的水资源与日益增长的城镇发展需求之间的矛盾严重阻碍了京津冀地区协同发展。如何正确处理水资源利用与城镇化进程间的关系,是京津冀地区实现高质量发展亟须解决的现实问题^[2]。

目前对于水资源系统与城镇化进程的相关研究多聚焦于两者的综合评价及交互关系。其中城镇化评价指标可分为单一和综合指标。传统的城镇化多指农村人口向城市人口过渡和集聚的过程^[3]。新型城镇化则强调从产业结构、生活环境、社会保障、生活方式等方面实现从“乡”向“城”的转变,进而实现城乡的统筹规划和可持续发展。综合指标兼顾城镇化发展的诸多方面(如人口、经济、环境和城乡一体化等),采用主成分分析法^[4]、层次分析法^[5]、熵值法^[6]以及优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)^[7]等方法来量化其水平,得到了广泛的应用。城镇化的快速推进加速了经济的发展及产业的调整,但也给水资源带来了巨大的压力。生态足迹作为定量测度特定人口资源消费需求的方法,由于其直观、实践方便和可操作性强等优点而得以广泛应用^[8]。黄林楠等^[9]向水资源帐户中引入生态足迹模型,建立了水资源生态足迹的模型,使生态足迹理论体系更加完善。在测算维度上,水资源生态足迹模型经历了由二维^[10]向三维^[11]的转变,三维模型通过引入足迹广度和足迹深度以区分人类对于水资源流量占用和存量消耗的情况。但目前三维水资源生态足迹侧重于省^[12]、市^[13]尺度。城市群作为城镇化发展的后期阶段,具有经济规模大、城镇化率高、人口密集等社会经济特征,环境特征

则表现为水资源需求大、水污染严重等^[14]。研究城市群尺度的水资源可持续利用更能够揭示社会经济发展对水资源的耗竭程度的区域空间差异。然而,目前对城市群尺度的研究较少。此外,已有的关于水资源与城镇化交互关系的研究多集中于城镇化对用水量与用水效率的影响、水资源对城镇化进程的约束以及二者之间的耦合性研究,常用的方法主要有复合系统协同度模型^[15]、耦合协调度模型^[16]、时空匹配模型^[17]、基尼系数^[18]等。正确地评估和掌握区域水资源与城镇化发展的时空匹配,是优化区域水资源配置的前提和依据。但目前较少有研究关注城镇化质量与水资源利用的时间和空间维度的匹配特征,如何刻画水资源系统与城市化系统之间的时空匹配性成为亟需解决的问题。

本文以京津冀城市群为研究对象,通过构建多维度的新型城镇化综合评价指标体系,结合障碍度模型识别其关键影响因子;利用三维水资源生态足迹模型揭示水资源利用格局,并引入耦合协调度模型及空间匹配模型分别探究水资源供需状况与城镇化质量在时间和空间上的匹配性,以期京津冀城市群“人-水-城”协调发展提供一定的理论基础。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

京津冀城市群共包含北京市和天津市等13个城市(图1)。2000—2018年间,京津冀城市群人均GDP由16318.73元增长至102390.48元。随着京津冀协同发展战略的不断推进,城镇化进程日益加快,常住人口城镇化率由2000年的60.53%增长至2018年的75.87%。水资源既是城镇化发展的基础性资源,又是制约城镇化发展的重要因素。为支撑经济社会的快速发展,京津冀地区水资源开发利用率已达到106%,地下水累计超采超过 $1500 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中河北平原全域超采,出现了河道断流、湖泊湿地萎缩、地面沉降和海水入侵等一系列生态环境问题^[2]。因此,研究城市群城镇化和水资源可持续利用的演化规律及其匹配特征,是促进区域经济与自然资源协同发展的关键。

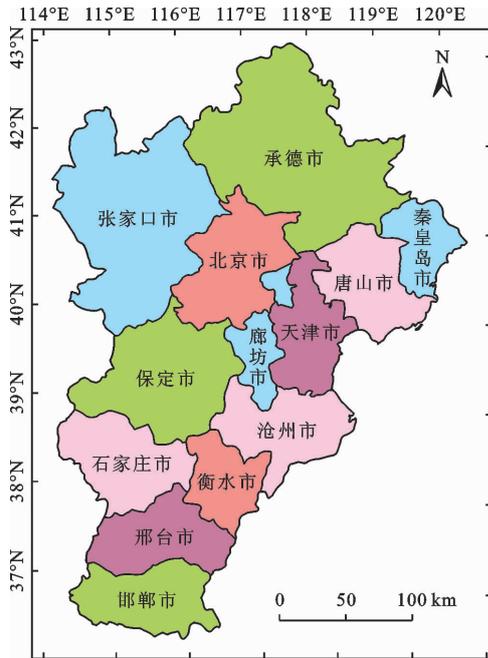


图1 京津冀城市群区域位置图

2.2 数据来源

本文中各城市人口、经济、社会等指标数据来源于《北京市统计年鉴》《天津市统计年鉴》《河北省统计年鉴》以及河北省各市的统计年鉴在2000—2018年间的相关资料；农业用水、生态用水等水资源数据来源于京津冀各城市的水资源公报。

2.3 研究方法

2.3.1 新型城镇化评价模型 新型城镇化更加强调居民享受城镇化的成果，其中经济发展是其发展的根本动力，城乡统筹协调发展是推动实现新型城镇化的重要环节。生态环境作为人类生存发展的基础，是城镇化健康可持续发展的重要保障。由此，本文从人口、经济、社会、空间、生态以及城乡一体化维度构建了新型城镇化评价指标体系，如表1所示。

由于各指标的量纲不同，采用极差法对所选的指标进行标准化。采用主客观相结合的方式（层次分析法和熵权法）确定指标综合权重，基于具有综合权重的评价指标体系，采用TOPSIS法核算京津冀城市群13个城市的新城镇化水平。综合权重计算公式如下：

$$r_{ij} = v_{ij} \cdot w_{ij} / \sum_{j=1}^n (v_{ij} \cdot w_{ij}) \quad (1)$$

式中： v_{ij} 、 w_{ij} 分别为熵权法、层次分析法得到的第*i*个准则层中第*j*个指标的权重； r_{ij} 为第*i*个准则层中第*j*个指标的综合权重；*n*为指标数量。

引入指标偏离度(G_{ij})、因素贡献度(F_{ij})与障碍度(P_{ij})等指标探求影响新型城镇化水平的障碍

因子^[19]。

$$G_{ij} = 1 - y_{ij} \quad (2)$$

$$F_{ij} = R_{ij} \cdot r_{ij} \quad (3)$$

$$P_{ij} = \frac{F_{ij} \cdot G_{ij}}{\sum_{i=1}^m (F_{ij} \cdot G_{ij})} \times 100\% \quad (4)$$

式中： y_{ij} 为各指标标准化后的值； R_{ij} 为第*j*个指标所在第*i*个准则层的权重；*m*为准则层数量。

表1 新型城镇化综合评价指标体系

| 准则层 | 指标层/单位 | 指标性质 |
|-------|-------------------------------|------|
| 人口城镇化 | 常住人口城镇化率/% | 正 |
| | 第三产业就业人员比例/% | 正 |
| | 科研综合技术服务业从业人员数占总人口比例/% | 正 |
| | 人均GDP/元 | 正 |
| 经济城镇化 | 城镇居民人均消费性支出/元 | 正 |
| | 城镇居民人均可支配收入/元 | 正 |
| | 第二产业占GDP比重/% | 正 |
| | 第三产业占GDP比重/% | 正 |
| 社会城镇化 | 每百人公共图书馆藏书册数 | 正 |
| | 医院、卫生院拥有床位数 | 正 |
| | 年末城镇失业(登记)人数/10 ⁴ | 正 |
| | 社会消费品零售总额/10 ⁸ 元 | 正 |
| 空间城镇化 | 人口密度/(人·km ⁻²) | 正 |
| | 公路路网密度/(km·km ⁻²) | 正 |
| | 人均道路面积/m ² | 正 |
| | 人均公园绿地面积/m ² | 正 |
| 生态城镇化 | 城市绿化覆盖率/% | 正 |
| | 城市生活垃圾无害化处理率/% | 正 |
| | 工业固体废物综合利用率/% | 正 |
| | 生活污水处理率/% | 正 |
| | 工业废水排放量/10 ⁴ t | 负 |
| | 一般工业固体废物综合利用率/% | 正 |
| 城乡一体化 | 建成区绿化覆盖率/% | 正 |
| | 污水处理厂集中处理率/% | 正 |
| | 城乡人均支配收入比 | 负 |
| | 城镇登记失业率/% | 负 |
| | 城乡人均消费性支出比 | 负 |

2.3.2 三维水资源生态足迹模型 水资源生态足迹是指人类生活、生产和自然环境所需的水资源面积，旨在揭示水资源消耗与水生态系统承载能力之间的关系^[20]；水资源生态承载力是指在一定区域中某一时间范围内的水资源最大供给能力^[21]。具体

计算公式如下:

$$WF = \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}{P_w} \quad (5)$$

$$WC = N \cdot ec = (1 - \alpha) \cdot \psi \cdot \gamma_w \cdot \frac{Q}{P_w} \quad (6)$$

$$WS = WC - WF \quad (7)$$

式中:WF 为水资源生态足迹, hm^2 ; W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 分别为农业用水量、工业用水量、生活用水量、生态环境补水量, m^3 ; P_w 为水资源全球平均生产能力, m^3/hm^2 ; WC 为水资源生态承载力, hm^2 ; ec 为人均水资源生态承载力, hm^2 ; N 为人口数; α 为维持生态环境的水资源量占比, 取 $\alpha = 60\%$; ψ 为水资源产量因子; γ_w 为水资源全球均衡因子; Q 为区域水资源总量, m^3 ; WS 为水资源生态盈亏指数, hm^2 , 用来表示区域水资源供需平衡状况, 其值为正时, 为生态盈余, 反之, 为生态赤字。

三维水资源生态足迹利用水资源足迹广度 (WF_{size}) 和足迹深度 (WF_{depth}) 两项指标区分水资源流量资本占用和存量消耗水平。足迹广度表征人类对水资源相应的生物生产土地的年际需求, 具有空间属性; 足迹深度表征人类对超出水资源承载力部分的水资源累积需求, 具有时间属性^[22]。当 $WF < WC$ 时, $WF_{depth} = 1$, 表明流量刚好满足人类对水资源的需求; 当 $WF_{depth} > 1$ 时, 表明流量无法满足人类对水资源消费的需求, 必须消耗存量资本。 WF_{size} 、 WF_{depth} 的计算公式如下:

$$WF_{size} = \min\{WC, WF\} \quad (8)$$

$$WF_{depth} = 1 + \frac{WS}{WC} \quad (9)$$

2.3.3 匹配性模型 在时间尺度上, 采用耦合协调度模型分析区域城镇化质量与水资源供需情况之间的协调程度:

$$C = \sqrt{\frac{U_1 \cdot U_2}{[(U_1 + U_2)/2]^2}} \quad (10)$$

$$T = aU_1 + bU_2 \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (12)$$

式中: C 为耦合度, 其值范围为 $0 \leq C \leq 1$, 当 $C = 1$ 时, 说明系统间达到良性共振耦合, 当 $C = 0$ 时, 说明系统间为无关状态; D 为耦合协调度; T 为描述耦合与协调发展水平的指标; U_1 和 U_2 分别为水资源生态盈亏指数和新型城镇化综合指数按照正向指标采用极差法进行标准化后的值, 这里认为两者同等重要, 因此取其系数 $a = b = 0.5$ 。耦合协调度类别及等级划分见表 2。

表 2 耦合协调度类别及等级

| 类别 | 区间 | 耦合度 | 耦合协调度 |
|-------|-----------|------|-------|
| 失调衰退类 | [0,0.1) | 极度失调 | 极度失调 |
| | [0.1,0.2) | 严重失调 | 严重失调 |
| | [0.2,0.3) | 中度失调 | 中度失调 |
| | [0.3,0.4) | 轻度失调 | 轻度失调 |
| 过渡类 | [0.4,0.5) | 濒临失调 | 濒临失调 |
| | [0.5,0.6) | 勉强协调 | 勉强协调 |
| 协调发展类 | [0.6,0.7) | 初级协调 | 初级协调 |
| | [0.7,0.8) | 中级协调 | 中级协调 |
| | [0.8,0.9) | 良好协调 | 良好协调 |
| | [0.9,1.0) | 优质协调 | 优质协调 |

在空间尺度上, 采用空间匹配模型测算京津冀城市群 13 个城市水资源供需情况和新型城镇化质量间的空间匹配度 (当匹配度 ≥ 0.8 , 表明两者匹配; $0.6 < \text{匹配度} < 0.8$, 表明两者较为匹配; 匹配度 ≤ 0.6 , 表明两者不匹配), 以度量区域不同阶段水资源供需状况与城镇化发展速度的匹配状况及其成因, 从而为水资源的合理调配及推进城镇化高质量发展提供支撑。其具体步骤如下:

将研究时段划分为 h 个单元, 各个单元的变量 X (水资源生态盈亏指数) 和 Y (新型城镇化综合评价指数) 分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_h, y_h)$ ^[17]:

(1) 将 h 个单元的 x 值和 y 值从小到大排序, 则匹配度计算公式为:

$$a_i = 1 - \frac{|x_i - y_i|}{h - 1} \quad (i = 1, 2, \dots, h) \quad (13)$$

(2) 按照各个单元上变量的具体数值占研究区该变量总值的比例进行匹配度的计算, 则匹配度计算公式为:

$$a_i = 1 - \frac{|r_i - s_i|}{\max(r_h, s_h) - \min(r_h, s_h)} \quad (14)$$

$$r_h = \frac{x_h}{\sum_{i=1}^h x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, h) \quad (15)$$

$$s_h = \frac{y_h}{\sum_{i=1}^h y_i} \quad (i = 1, 2, \dots, h) \quad (16)$$

3 结果与分析

3.1 城镇化与水资源持续利用时空演变

3.1.1 城镇化时空演变特征 2000—2018 年京津冀城市群各城市新型城镇化综合指数变化趋势如图 2 所示。

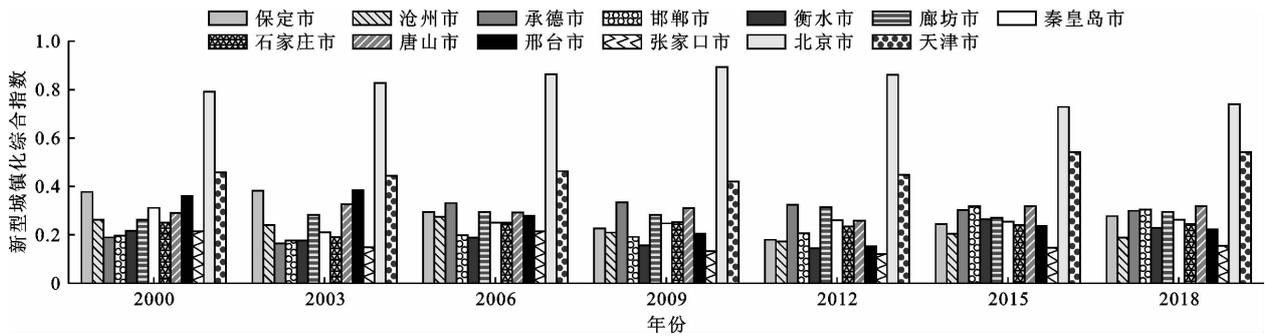


图2 2000—2018年京津冀城市群各城市新型城镇化综合指数变化趋势

对图2中的结果分析如下:

(1)在时间上,2000—2018年京津冀地区新型城镇化综合指数呈现轻微下降趋势,年均下降率为0.13%。就各城市而言,北京市由2000年的0.791下降至0.739,年均下降率为0.34%;而天津市则由0.443增加至0.542,年均增长率为0.95%;邯郸市和承德市年均增长率较高,分别为2.91%和3.04%;而邢台市和张家口市年降幅较大,分别为2.01%和1.46%。北京市和天津市作为京津冀城市群的两大核心城市,其经济发展、教育资源均要优于其他城市,同时吸引了周边城市的投资、资源等,导致该两城市城镇化发展水平显著高于其他城市。具体分析京津冀地区城镇化发展状况:①2000—2005年京津冀地区经济快速发展,区域人口、经济、生态、空间城镇化水平逐渐上升,但城市基础设施建设相对滞后,导致社会城镇化水平增长缓慢;②2006—2015年《京津冀协同区域发展规划纲要》初步编制完成并得以加速落实,但不同城市落实措施的差异性,导致城市群城镇化水平呈现不同的波动趋势,对于新型城镇化综合指数下降的城市而言(如保定市、邢台市和张家口市),主要原因为产业升级发展造成了生态城镇化水平出现波动,以及打工潮带来的人口流动引起的人口城镇化波动;③2016—2018年随着“京津冀一体化”概念的提出及“新型城镇化”试点的实施,京津冀整体对经济、生态、人口等协同发展更加重视,使得区域城镇化发展水平逐渐平稳。

(2)在空间上,京津冀城市群形成了北京市和天津市新型城镇化水平较高、周边地区较低的分布格局。北京市的新型城镇化综合指数最高(年均值为0.82),其次是天津市(年均值为0.47),该两市新型城镇化综合指数分别在0.75~0.90和0.45~0.55的范围内波动。而河北省各城市新型城镇化水平在0.1~0.4的范围内波动,远低于北京市,且城市间城镇化水平相差较大。究其原因,主要是城

市群内部城市结构规模不合理,主要资源聚集于北京市和天津市,其他城市吸纳力不足,城市间联动性不强,且河北省内各城市分属于不同功能区域,其发展重点及进展各不相同。从不同功能区域角度分析:①中部核心功能区:北京市和天津市依靠各自的政治中心独特优势及港口区位优势能够获得更多的资源,使得其新型城镇化综合指数整体高于河北省各城市。保定市和廊坊市同样属于京津冀中部核心功能区,由于在一定程度上能够受到京津的辐射作用,使得其新型城镇化综合指数高于河北省内其他城市;②东部滨海发展区:唐山市、秦皇岛市、沧州市濒临渤海,唐山市重工业发达,是河北省第一大经济体;秦皇岛市的旅游业及交通优势显著;沧州市北部与天津市接壤,在位置优势上突出。该3市在环渤海经济带范围内发展机遇高于其他城市,使得其新型城镇化综合指数在河北省内仅低于保定市和廊坊市;③生态区:由石家庄市、邢台市、衡水市、邯郸市构成的南部生态拓展区,以及由张家口市、承德市构成的西北部生态涵养区在京津冀城市群发展中承担了生态空间保障的作用,其生态城镇化水平时空演变趋势基本一致,且2014年以后持续上升。

3.1.2 城镇化障碍因子 各地区新型城镇化综合指数的障碍因子存在显著差异。北京市城镇化主要障碍因子为生态城镇化和城乡一体化因素,而天津市和河北省整体的障碍因子表现为人口>社会>空间>城乡一体化>经济>生态。具体就北京市来看,人口方面的障碍度在研究期内持续降低;经济方面的障碍度在2000—2015年持续降低,2018年略有回升,总体制约作用较小;2000—2006年社会方面的障碍度持续降低,2009年回升达到峰值后又呈现持续降低趋势;空间城镇化的障碍度呈现波动变化趋势,2012年达到峰值24.88%;2000—2018年生态维度的障碍度在较高水平内上下波动;2009年城乡一体化的障碍度制约作用较小,其他年份在较

高水平内上下波动。对于天津市而言,人口城镇化障碍度相较于其他因素保持在较高水平的上下波动(27.48%);经济城镇化障碍度在 9.80%~11.58% 范围内波动;2000—2009 年社会城镇化障碍度呈现下降趋势(年均下降率为 3.21%),之后略有回升,整体在 14.16%~20.86% 范围内波动;空间城镇化障碍度整体在 10.21%~16.15% 的范围内波动;2000—2006 年生态城镇化障碍度呈下降趋势(年均下降率为 2.93%),2009—2018 年缓慢上升(年均增长率为 2.50%);城乡一体化障碍度在 9.45%~16.59% 范围内波动。从河北省整体来看,人口城镇化障碍度相较于其他因素在较高水平内波动;经济城镇化障碍度在 12.49%~14.31% 范围内波动;社会、空间和城乡一体化障碍度变化幅度不大,其均值分别为 19.14%、14.88% 和 14.74%;生态城镇化障碍度在 7.03%~10.98% 的较低水平内变化。

3.2 水资源可持续利用格局

2000—2018 年京津冀城市群水资源利用状况时空变化如图 3 所示。由图 3 可知,京津冀地区的人均水资源生态足迹由 2000 年的 0.506 hm^2 下降至 2018 年的 0.387 hm^2 ,年均降幅为 1.23%。就各城市而言,沧州市和邯郸市的年均降幅较高,分别为 1.33% 和 1.38%。人均水资源生态足迹高值主要分布在唐山市(0.597 hm^2)和衡水市(0.594 hm^2);北京市、天津市、沧州市和邯郸市人均水资源生态足迹分别为 0.344、0.299、0.324 和 0.346 hm^2 ;其余城市介于 0.392~0.493 hm^2 之间。从用水结构来看,农业用水生态足迹占比最高(69.1%),其次是生活用水(15.1%)和工业用水(13.2%),虽然生态用水占比最低(2.6%),但其在研究时段占比显著增大,由 2004 年的 0.46% 上升至 2018 年的 10.09%,年

均增长率为 139.56%。从人均水资源承载力来看,2000—2018 年京津冀各城市年际波动较大,整体呈现上升趋势,从 0.040 hm^2 增长至 0.058 hm^2 ,年均增长率为 2.38%。其中,秦皇岛市人均水资源承载力变化范围最大,2002 年为最低值(0.029 hm^2),2012 和 2016 年出现两次峰值,分别为 1.342 和 0.404 hm^2 。由于降水量的影响,京津冀各城市人均水资源生态承载力均在 2012 和 2016 年出现峰值,均值分别为 0.189 和 0.094 hm^2 。

虽然京津冀城市群人均水资源承载力呈现波动上升趋势,且水资源生态足迹呈现下降趋势,但各城市仍均处于生态赤字状态。从时间变化来看,京津冀城市群人均水资源生态赤字呈现下降趋势,由 2000 年的 0.466 hm^2 下降至 2018 年的 0.329 hm^2 ,年均下降率为 1.63%。其中北京市年均下降率最高(2.68%),其次为承德市(2.58%)、秦皇岛市(2.41%)、唐山市(2.15%)、保定市(1.55%)、沧州市(1.47%),其余城市年均下降率均处于 0.64% (邯郸市)至 1.01% (石家庄市)之间;从空间分布来看,人均生态赤字高值区主要有衡水市(0.576 hm^2)、唐山市(0.525 hm^2)、石家庄市(0.475 hm^2)和保定市(0.433 hm^2);人均生态赤字低值地区主要有天津市(0.271 hm^2)、北京市(0.297 hm^2)和沧州市(0.304 hm^2)。目前,人们逐渐意识到了水资源的重要性,政府部门也推出了“增供南水北调东线水”等多项综合治理措施,京津冀地区水资源短缺、水环境污染等问题逐步得以改善,京津冀城市群水资源生态赤字逐渐减小。

进一步从水资源流量和存量分析,得到 2000 和 2018 年京津冀城市群人均水资源生态足迹广度和生态足迹深度及其年均变化率,如表 3 所示。

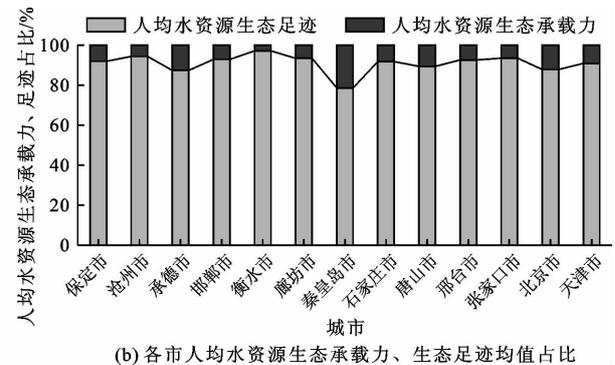
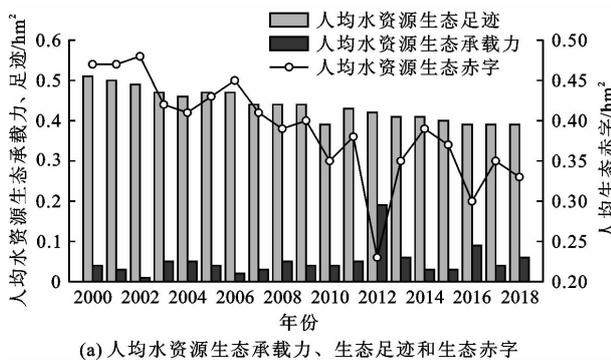


图 3 2000—2018 年京津冀城市群水资源利用状况时空变化

由表 3 可知,2000—2018 年京津冀各城市的水资源生态足迹深度均大于 1,表明各城市的快速发展是建

立在透支自然资源资本存量的基础上的。从变化趋势来看,除石家庄市、邢台市和邯郸市外,其余城市水资

源生态足迹深度均呈现下降趋势。水资源生态足迹深度高值区主要有沧州市(均值45.39)和衡水市(均值78.43);低值区主要有承德市(均值9.84)、秦皇岛市(均值5.98)和北京市(均值8.91),其余地区水资源生态足迹深度均值均处于14.74~31.96之间。2000—2018年京津冀各城市的人均水资源生态足迹广度有一定的上升趋势,其中天津市和承德市年均增长率较高,分别为100.28%和23.04%。人均水资源生态足迹广度高值区主要有保定市(年均值0.041 hm²)、承德市(年均值0.064 hm²)、石家庄市(年均值0.047 hm²)、北京市(年均值0.046 hm²)和唐山市(年均值0.072 hm²),低值区主要出现在沧州市(年均值0.019 hm²)、

衡水市(年均值0.017 hm²)和秦皇岛市(年均值0.013 hm²)。值得注意的是,由于南水北调中线工程的运行,天津市的水资源利用情况得到了明显的改善,其人均水资源生态足迹广度由2000年的0.002 hm²上升至2018年的0.035 hm²,水资源禀赋明显增强。而石家庄市、邢台市和邯郸市的水资源生态足迹深度呈上升趋势,同时人均水资源生态足迹广度呈现下降趋势,该3个城市的水资源利用形势较为严峻。

3.3 城镇化与水资源利用匹配特征

3.3.1 耦合协调度 2000—2018年京津冀地区各城市新型城镇化质量、水资源供需情况及两者耦合度的年均值和年均变化率见表4。

表3 2000和2018年京津冀城市群人均水资源生态足迹广度和深度及其变化率

| 区域划分 | 城市 | 人均水资源生态足迹广度 | | | 水资源生态足迹深度 | | |
|--------------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------|-------|---------|
| | | 2000年/hm ² | 2018年/hm ² | 年均增长率/% | 2000年 | 2018年 | 年均增长率/% |
| 中部核心 功能区 | 北京市 | 0.027 | 0.075 | 9.48 | 18.31 | 4.03 | -4.11 |
| | 天津市 | 0.002 | 0.035 | 100.28 | 56.12 | 8.64 | -5.05 |
| | 保定市 | 0.030 | 0.052 | 3.92 | 17.98 | 7.85 | -2.97 |
| | 廊坊市 | 0.007 | 0.027 | 15.60 | 64.27 | 14.04 | -4.11 |
| 东部滨海 发展区 | 唐山市 | 0.054 | 0.091 | 3.58 | 13.66 | 5.45 | -3.16 |
| | 秦皇岛市 | 0.068 | 0.183 | 8.94 | 8.15 | 2.44 | -3.69 |
| | 沧州市 | 0.007 | 0.015 | 5.43 | 50.95 | 18.70 | -3.33 |
| 南部生态 拓展区 | 石家庄市 | 0.074 | 0.032 | -2.95 | 8.10 | 14.06 | 3.87 |
| | 邢台市 | 0.095 | 0.036 | -3.28 | 5.02 | 10.57 | 5.82 |
| | 衡水市 | 0.013 | 0.013 | -0.14 | 49.23 | 41.60 | -0.82 |
| | 邯郸市 | 0.079 | 0.011 | -4.51 | 5.25 | 27.15 | 21.94 |
| 西北部生态 涵养区 | 承德市 | 0.028 | 0.150 | 23.04 | 18.41 | 2.64 | -4.51 |
| | 张家口市 | 0.032 | 0.029 | -0.52 | 13.26 | 12.07 | -0.47 |

表4 2000—2018年京津冀地区各城市新型城镇化质量、水资源供需情况及其耦合协调度

| 类型 | 城市 | 新型城镇化综合指数 | | 水资源生态盈亏指数 | | 耦合协调度 | |
|-----|------|-----------|---------|-----------|---------|-------|---------|
| | | 年均值 | 年均变化率/% | 年均值 | 年均变化率/% | 年均值 | 年均变化率/% |
| I | 北京市 | 0.827 | -0.34 | -0.298 | -2.69 | 0.898 | 0.52 |
| II | 天津市 | 0.473 | 0.96 | -0.271 | -1.47 | 0.795 | 0.16 |
| | 沧州市 | 0.228 | -1.46 | -0.304 | -1.47 | 0.648 | -0.47 |
| | 邯郸市 | 0.236 | 2.91 | -0.318 | -0.65 | 0.643 | 0.23 |
| | 石家庄市 | 0.247 | -0.09 | -0.475 | -1.02 | 0.494 | -0.48 |
| | 邢台市 | 0.256 | -2.00 | -0.406 | -0.54 | 0.592 | -1.01 |
| III | 秦皇岛市 | 0.265 | -0.84 | -0.310 | -2.41 | 0.635 | 0.32 |
| | 承德市 | 0.281 | 3.04 | -0.366 | -2.59 | 0.629 | 1.39 |
| | 保定市 | 0.283 | -1.40 | -0.433 | -1.56 | 0.582 | -0.30 |
| | 廊坊市 | 0.290 | 0.67 | -0.386 | -0.96 | 0.628 | -0.17 |
| | 唐山市 | 0.313 | 0.51 | -0.525 | -2.15 | 0.412 | 18.49 |
| IV | 张家口市 | 0.155 | -1.46 | -0.365 | -0.98 | 0.550 | -0.66 |
| | 衡水市 | 0.197 | 0.27 | -0.577 | -0.95 | 0.067 | -5.11 |

由表4可知,2000—2018年京津冀地区整体新型城镇化综合指数与水资源盈亏指数耦合协调度变化幅度较小(年均增长率为0.054%),处于勉强协调阶段。就各城市而言,衡水市为河北省乃至全国严重缺水的地区之一,其水资源供需矛盾突出,导致两系统的耦合协调度降幅明显,由轻度失调转为极度失调阶段。北京市和天津市耦合协调度呈现上升趋势,耦合协调度年均增长率分别为0.52%和0.16%,分别处于良好协调和中级协调阶段。

以耦合协调度为基础,结合城镇化质量与水资源供需情况,将京津冀地区13个城市划分为4种类型(表4)。

高耦合-高城镇化质量型(类型I):北京市。北京市经济处于高度发展阶段,人口城镇化处于后期发展阶段,生态环境保护逐步受到重视,因而地区的城镇化与水资源利用协调性较好。

高耦合-中高城镇化质量型(类型II):天津市。天津市城镇化率高于国家平均水平,但存在水资源短缺、水源单一等问题;同时,天津市承接了大量的高耗能、高耗水产业,加剧了水资源的消耗。水资源问题对天津市未来城镇化发展过程的制约程度将会愈加凸显。

中等耦合-低城镇化质量型(类型III):沧州市、邯郸市、石家庄市、邢台市、秦皇岛市、承德市、保定市、廊坊市和唐山市。此类城市属于中低速发展区域,新型城镇化综合指数处于0.22~0.32之间,耦合协调度位于0.41~0.65之间。这些城市随着城市建设力度的加大,水资源与城镇化耦合关系处于拮抗阶段,水资源对于城镇化发展的制约作用还较小。但也应加强对水资源的保护,避免制约这些城市未来城镇化的整体发展。

低耦合-低城镇化质量型(类型IV):张家口市和衡水市。该两市城镇化和经济发展水平均较低,城镇化进程尚未对水资源系统形成显著影响。在未来的城镇化进程中,张家口市和衡水市一方面要通过加大区级统筹能力,有针对性地开展城区扩容和城市品质优化工程,以提高人口集聚度,提高城镇的核心竞争力;另一方面,要加强对水资源的合理利用,落实最严格的水资源管理制度,控制水资源消耗与用水过程,加强水资源保护,降低水资源对城镇化发展的阻碍。

3.3.2 空间匹配特征 2000—2018年京津冀地区各城市人均水资源盈亏指数与城镇化综合指数空间匹配度见表5。

表5 2000—2018年京津冀地区各城市人均水资源盈亏指数与城镇化综合指数空间匹配度

| 区域划分 | 城市 | 2000年 | 2006年 | 2012年 | 2018年 | 年均值 | 年均变化率/% |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| 中部核心功能区 | 北京市 | 0.413 | 0.062 | 0.672 | 0.105 | 0.194 | -3.93 |
| | 天津市 | 0.996 | 0.673 | 0.853 | 0.507 | 0.662 | -2.59 |
| | 保定市 | 0.849 | 0.925 | 0.869 | 0.889 | 0.895 | 0.25 |
| | 廊坊市 | 0.864 | 0.984 | 0.996 | 0.929 | 0.958 | 0.40 |
| 东部滨海发展区 | 唐山市 | 0.633 | 0.773 | 0.942 | 0.881 | 0.845 | 2.07 |
| | 秦皇岛市 | 0.981 | 0.873 | 0.313 | 0.980 | 0.878 | -0.01 |
| | 沧州市 | 0.732 | 0.929 | 0.925 | 0.900 | 0.943 | 1.21 |
| 南部生态拓展区 | 石家庄市 | 0.984 | 0.797 | 0.846 | 0.730 | 0.822 | -1.36 |
| | 邢台市 | 0.893 | 0.946 | 0.831 | 0.824 | 0.881 | -0.41 |
| | 衡水市 | 0.830 | 0.554 | 0.728 | 0.547 | 0.643 | -1.79 |
| | 邯郸市 | 0.603 | 0.936 | 0.910 | 0.960 | 0.920 | 3.11 |
| 西北部生态涵养区 | 承德市 | 0.868 | 0.984 | 0.959 | 0.890 | 0.907 | 0.14 |
| | 张家口市 | 0.734 | 0.86 | 0.826 | 0.741 | 0.799 | 0.05 |

由表5可知,京津冀地区水资源供需水平与城镇化质量空间匹配度整体呈现下降趋势(年均下降率为0.25%),特别是北京市、天津市、石家庄市和衡水市,年均下降率分别为3.93%、2.59%、1.36%和1.79%。而唐山市和邯郸市空间匹配度增幅较大,年均增长率分别为2.07%和3.11%。北京市城

镇化发展进程与水资源供需水平在空间上处于不匹配状态,这主要是由于近年来南水北调对于北京市的水资源生态赤字有着一定程度的缓解,在南水北调工程调水量得到保障的前提下,北京市未来城镇化发展仍有较大空间。天津市空间匹配度年均值为0.662,整体处于较为匹配状态。河北省除衡水市

外,其他城市空间匹配度均处于匹配状态。衡水市新型城镇化综合指数较低而水资源生态赤字较高,主要是由于该地区地表水与客水资源不足(人均水资源量不足河北省的40%),城镇化的发展长期依赖于地下水的开发。

4 讨论

4.1 对比分析

从新型城镇化的核算结果来看,北京市和天津市新型城镇化水平明显高于其他城市,且各市间差距逐渐扩大,城乡一体化因素是制约北京新型城镇化发展的因素,这与曾建丽等^[23]和韩冬^[24]对京津冀城镇化水平相关的研究成果基本一致。在评价体系构建中,指标的选取应在考虑经济、人口和社会维度的基础上,兼顾生态环境、空间以及城乡差异,以符合新型城镇化内涵。翁钢民等^[25]对京津冀城市群旅游-生态-城镇化耦合机理进行了研究,将城镇化系统细分为经济、人口和社会三大子系统,得出城镇化综合发展水平较高,发展势头强劲,给生态环境造成了巨大压力的结论。本文构建了涵盖人口、经济、社会、空间、生态和城乡一体化的新型城镇化评估指标体系,由于数据的限制,评估指标选取范围有限,在今后可以考虑将科技创新能力等相关指标纳入其中。

本文从三维水资源生态足迹角度对京津冀地区

的水资源利用状况进行了评估,结合笔者对成渝城市群水资源生态足迹的核算情况,对2000—2018年两个城市群水资源利用情况和结构构成进行了对比分析,结果如图4所示。

从水资源利用情况(图4(a))来看,2000—2018年,两个城市群人均水资源生态足迹表现为:成渝城市群(0.487 hm^2) > 京津冀城市群(0.437 hm^2);人均水资源生态承载力表现为:成渝城市群(2.054 hm^2) > 京津冀城市群(0.049 hm^2);水资源生态足迹深度表现为:京津冀城市群(10.92) > 成渝城市群(0.24)。相比较而言,成渝城市群的水资源利用情况较好,但其人均水资源生态足迹和水资源生态足迹深度均呈现上升趋势(年均增长率分别为1.64%和2.44%),人均水资源生态承载力呈现下降趋势(年均下降率为0.55%),可持续发展情况堪忧。从水资源利用结构来(图4(b))看,两个城市群农业和工业用水生态足迹占比均较高,成渝城市群占比分别为58.81%和26.11%;京津冀城市群占比分别为70.32%和12.97%。两个城市群的农业和工业用水生态足迹均呈现下降趋势,特别是京津冀城市群,其农业和工业用水生态足迹比重大年下降率分别为0.86%和1.06%。而两个城市群的生活用水和生态用水生态足迹均呈现上升趋势,其中生态用水变化趋势最为明显。

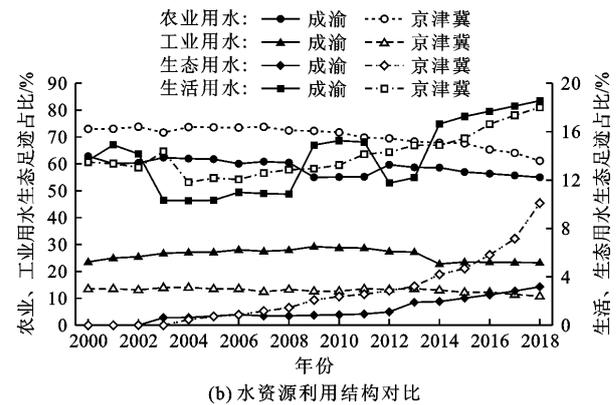
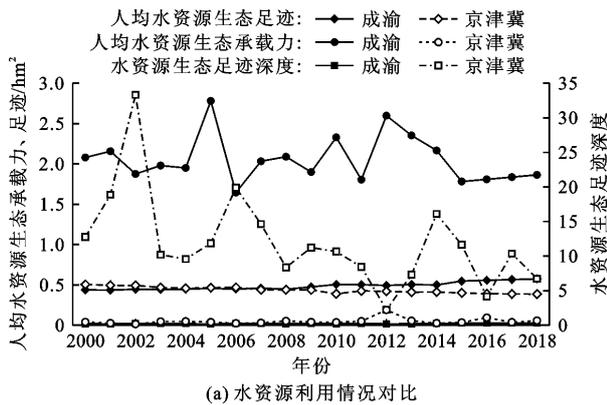


图4 2000—2018年京津冀城市群与成渝城市群水资源利用状况和结构构成对比

4.2 政策建议

(1) 优化用水结构,提高用水效率。加强推进农业节水,通过滴灌和喷灌建设和更新改造水利工程建设,节约农业用水量、提高农业用水效率。此外,京津冀地区作为南水北调中线的主要受水区,其水资源使用量远超出规划分配的水量,且生态用水呈现显著增长的趋势。在水量分配中,生态用水量过高会挤占其余用水,应进一步调整水资源利用结

构,提升水资源优化配置效率。

(2) 建立跨区域水资源协同管理体系,实现水资源可持续利用。在城镇化发展阶段,城市间水资源利用状况存在较大差异,可能导致各市所追求的利益相反。可以通过建立跨区域协同管理体系,将生态补偿机制纳入其中,通过制定合理的补偿政策,调动各市对水资源保护的积极性,实现水资源可持续利用。

(3)注重城镇化建设质量,提高核心城市辐射能力。对于人口城镇化水平较低的城市(如衡水市、承德市和邢台市),应当在推进人口城镇化建设的同时考虑其质量,比如加速推进现代农业发展以降低农业从业人口数量,加快产业结构升级为城镇化发展提供更多的工作岗位,提高第三产业从业人口比重。

5 结 论

本文基于水资源生态足迹量化了京津冀城市群水资源可持续利用情况,多维度评估其新型城镇化水平,并探求了双方的演变特征及其匹配关系,主要结论如下:

(1)京津冀地区城市间城镇化水平存在显著差异。其中北京市和天津市的新型城镇化综合指数最高,其余城市较低且相差不大。生态和城乡一体化是影响北京市城镇化高质量发展的主要障碍因子,天津市及河北省表现为人口和社会城镇化。

(2)京津冀地区水资源可持续性有所增强,水资源禀赋有所提升(尤其是天津市),区域人均水资源生态足迹和足迹深度下降、人均水资源生态承载力和足迹广度上升。从用水结构来看,农业用水生态足迹占比最高,生态用水生态足迹占比上升趋势明显。水资源生态足迹深度高值区主要有沧州市和衡水市,低值区主要有承德市、秦皇岛市和北京市。

(3)京津冀地区城镇化发展与水资源可持续利用匹配性有所上升。时间上,北京市和天津市耦合协调度呈现上升趋势,衡水市耦合协调度下降趋势最明显。京津冀地区新型城镇化质量与水资源供需情况整体处于勉强协调阶段。京津冀地区13个城市可被划分为4类,其中北京市属于高耦合-高城镇化质量型,而张家口市和衡水市属于低耦合-低城镇化质量型。空间上,水资源供需情况与新型城镇化质量空间匹配度呈下降趋势,主要原因为区域水资源赤字情况有所缓解。河北省除衡水市外,其余地区空间匹配度均高于北京市和天津市。

参考文献:

[1] 夏军,陈进,余敦先. 2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报,2022,53(10):1143-1153.

[2] 赵勇,王庆明,王浩,等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学,2022,24(5):8-18.

[3] LIU Yixuan, KE Xinxin, WU Weicheng, et al. Geospatial characterization of rural settlements and potential targets for revitalization by geoinformation technology [J]. Scientific

Reports, 2022, 12: 8399.

[4] 陈涛,杨佳怡,陈池波. 新型城镇化与农业现代化耦合协调度评价[J]. 统计与决策,2022,38(12):70-74.

[5] ZHOU Dingyang, TIAN Yingying, JIANG Guanghui. Spatio-temporal investigation of the interactive relationship between urbanization and ecosystem services: case study of the Jingjinji urban agglomeration, China [J]. Ecological Indicators, 2018, 95(Part 1): 152-164.

[6] 唐丽娜,万诗雨. 新型城镇化水平与社会保障水平关系的实证检验[J]. 统计与决策,2022,38(16):62-65.

[7] 王新越,伍焯轩. 中国东部地区国内旅游消费与城镇化协调关系研究[J]. 地理科学,2018,38(7):1139-1147.

[8] LIU Ye, ZHOU Xi, ZHANG Qiuyun, et al. Study on sustainable developments in Guangdong Province from 2013 to 2018 based on an improved ecological footprint model [J]. Scientific Reports, 2022, 12: 2310.

[9] 黄林楠,张伟新,姜翠玲,等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报,2008,28(3):1279-1286.

[10] 张羽,左其亭,曹宏斌,等. 沁河流域水资源生态足迹时空变化特征及均衡性分析[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(3):50-57.

[11] 焦士兴,王安周,陈林芳,等. 中国省域三维水生态足迹及其驱动研究[J]. 世界地理研究,2022,31(5):988-997.

[12] 岳晨,钱永,崔向向,等. 福建省2010—2019年水资源生态足迹与生态承载力[J]. 水土保持通报,2021,41(6):282-287.

[13] 门宝辉,蒋美彤. 基于生态足迹法的水资源承载力研究——以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):29-36.

[14] LYU Yanming, JIANG Fangye. Spatial and temporal distribution of population in urban agglomerations changes in China [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8315.

[15] 支彦玲,王慧敏,张帆,等. 西北地区水资源、能源和粮食系统协同关系评估——基于复杂系统协同进化视角[J]. 干旱区资源与环境,2022,36(10):76-85.

[16] 郑德凤,徐文瑾,姜俊超,等. 中国水资源承载力与城镇化质量演化趋势及协调发展分析[J]. 经济地理,2021,41(2):72-81.

[17] 左其亭,赵衡,马军霞,等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用[J]. 水利水电科技进展,2014,34(6):1-6.

[18] 陈义忠,乔友凤,卢宏伟,等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报,2022,42(4):1368-1380.

[19] 马继敏,脱云飞,王倩,等. 基于GRA-TOPSIS法云南省水资源承载力评价及障碍因子诊断[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(2):11-17+26.

(下转第82页)

- tem in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Science in China; Series D: Earth Sciences*, 2006, 49: 1-13.
- [15] 郑丙辉,曹晶,王坤,等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践[J]. *湖泊科学*,2022,34(3):699-710.
- [16] 祝云龙,姜加虎,孙占东,等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. *湖泊科学*,2008,20(4):477-485.
- [17] 张志川. 三峡工程对洞庭湖水量的影响及应对措施[J]. *科技视界*,2012(21):55+65.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 河流流量测验规范:GB 50179—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [20] 刘发根,王仕刚,郭玉银,等. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008—2012年)[J]. *湖泊科学*,2014,26(5):641-650.
- [21] 余君妍,马骏,杨正健,等. 基于水体溯源的澜沧江梯级水库水体总磷来源及滞留效应分析[J]. *中国农村水利水电*,2023(3):94-101+119.
- [22] 朱坚,邵颖,彭华,等. 湖南省农业面源污染形势与综合管理对策[J]. *湖南农业科学*,2022(10):49-53.
- [23] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014-2018.
- [24] 张萍. 洞庭湖氮磷污染特征及防控技术体系研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [25] 卢少勇,张萍,潘成荣,等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. *中国环境科学*,2017,37(6):2278-2286.
- [26] 付湘,赵秋湘,孙昭华. 三峡水库175 m 试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响[J]. *湖泊科学*,2019,31(6):1713-1725.
- [27] MA Xiao, LI Ye, ZHANG Meng, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 412-413: 154-161.
- [28] 续衍雪,吴熙,路瑞,等. 长江经济带总磷污染状况与对策建议[J]. *中国环境管理*,2018,10(1):70-74.
- [29] 蔡佳,王丽婧,陈建湘,等. 西洞庭湖入湖河流磷的污染特征[J]. *环境科学研究*,2018,31(1):70-78.
- [30] 谢康,张晓菁,卫晓婧,等. 洞庭湖流域未控区间水量平衡分析[J]. *水资源研究*,2019,8(1):44-55.
- [31] 何介南,康文星,袁正科. 洞庭湖湿地污染物的来源分析[J]. *中国农学通报*,2009,25(17):239-244.
- [32] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年)[J]. *湖泊科学*,2006,18(3):225-230.
- [33] 陈奇,霍守亮,席北斗,等. 云贵高原湖区湖库总磷和叶绿素a浓度参照状态研究[J]. *环境工程技术学报*,2012,2(3):184-192.
- [34] 王洗民,翟淑华,张红举,等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析[J]. *湖泊科学*,2017,29(1):9-21.
- [35] 马会娟,李茹梦,唐晟凯,等. 高邮湖轮虫群落结构分析及水质生态学评价[J]. *江苏农业科学*,2021,49(1):192-197.
- [36] 朱昕阳,蒋彩萍,马晓雁. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量[J]. *湖泊科学*,2020,32(3):629-640.
- [37] 郑丙辉,王丽婧,张鸿,等. 洞庭湖江湖生态监测重点站技术报告[R]. 江湖生态监测重点站(洞庭湖),2016-2017.
- [38] HUISMAN J, CODD G A, PAERL H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(8): 471-483.
- [39] 王婷,王坤,王丽婧,等. 三峡工程运行对洞庭湖水环境及富营养化风险影响评述[J]. *环境科学研究*,2018,31(1):15-24.
- [40] 谢平. 三峡工程对长江中下游湿地生态系统的影响评估[M]. 武汉:长江出版社,2018.

(上接第73页)

- [20] WANG Huan, HUANG Jiejun, ZHOU Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: a case study of Hubei Province, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110331.
- [21] JING Peiran, SHENG Jinbao, HU Tiesong, et al. Spatio-temporal evolution of sustainable utilization of water resources in the Yangtze River Economic Belt based on an integrated water ecological footprint model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358: 132035.
- [22] 董建红,张志斌,张怀林,等. 生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制——以宁夏为例[J]. *中国人口·资源与环境*,2021,31(2):162-173.
- [23] 曾建丽,赵玉帛,李淑琪. 京津冀城市群新型城镇化水平时空格局演变及驱动因素研究[J]. *生态经济*,2021,37(10):100-107.
- [24] 韩冬. 城镇化高质量发展水平测度——基于京津冀城市群的实证[J]. *统计与决策*,2022,38(4):93-97.
- [25] 翁钢民,唐亦博,潘越,等. 京津冀旅游-生态-城镇化耦合协调的时空演进与空间差异[J]. *经济地理*,2021,41(12):196-204.