

# 黄河流域城市群水资源可持续发展评价及其障碍因素研究

孙斌<sup>1,2</sup>, 姜慧敏<sup>1\*</sup>, 薛建春<sup>1</sup>, 孙涛<sup>1</sup>, 毕春宁<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学经济与管理学院, 内蒙古包头 014010; 2. 黄河“几字弯”发展研究基地, 内蒙古包头 014010)

**【摘要】**黄河流域城市群是我国生态安全的重要屏障和生产布局的战略核心区, 但自然地理条件和生态本底相对薄弱, 面临着严重的水资源短缺问题, 水土流失严重, 水资源开发利用率高, “人—水”矛盾凸显, 探究黄河流域城市群水资源可持续发展现状及其障碍因素具有重要的现实意义。基于2007—2022年黄河流域7个城市群58个地级市的面板数据, 本研究对黄河流域城市群水资源可持续发展水平进行测度, 并利用Dagum基尼系数与障碍度模型分析黄河流域城市群水资源可持续发展的区域差异和障碍因子。研究表明: ①2007—2022年, 黄河流域城市群水资源可持续发展指数整体呈波动上升趋势且增长速度缓慢, 呈现“东高西低”的空间分布格局。②黄河流域城市群水资源可持续发展水平总体差异呈“下降—上升”频繁交替的波动特征, 区域间差异是主要来源, 其贡献率波动上升, 区域内差异贡献率相对稳定, 超变密度贡献率呈波动下降趋势。③影响黄河流域城市群水资源可持续发展水平的主要障碍因子是产水系数、年降水量、农业用水量占比、地表水资源占比、人均日生活用水量、工业用水量占比。

**【关键词】**黄河流域; 城市群; 水资源可持续发展; 障碍因子

**【中图分类号】**X821; TV213.4

**【文章编号】**1674-6252(2025)01-0066-12

**【文献标识码】**A

**【DOI】**10.16868/j.cnki.1674-6252.2025.01.066

## 引言

2024年9月, 习近平总书记在甘肃省兰州市主持召开全面推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会时强调, 要严守水资源开发利用上限, 细化以水定城、以水定地、以水定人、以水定产举措, 健全覆盖全流域的取用水总量控制体系, 科学配置干支流水资源<sup>[1]</sup>。黄河流域仅占全国2%的水资源总量, 却承担着全国12%的人口、15%的耕地及50

多个大中城市的供水任务<sup>[2]</sup>。流域内的城市群是城镇化和工业化发展到一定程度的较高阶段空间形态<sup>[3]</sup>, 同时也是高耗水项目的集聚区, 人口集聚和空间扩张带来的水资源负面效应日益凸显, 黄河流域城市群正面临着提升高质量发展能力和水资源可持续发展水平的双重压力<sup>[3]</sup>。随着黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略, 破解流域水资源可持续发展问题愈发迫切。实现水资源可持续利用与保护是黄河流域水资源管理最根本的问题,

**资助项目:**国家自然科学基金项目“低碳约束下黄河流域城市土地利用效率研究: 测度、驱动机理与提升路径”(42061051); 内蒙古自治区哲学社会科学规划项目“黄河流域城市群‘以水定城’实施效能评估及路径优化研究”(2024NDA151); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目“黄河流域新型城镇化—生态安全—公共健康协调发展研究”(2024XKJX029)。

**作者简介:**孙斌(1974—), 男, 博士, 教授, 内蒙古科技大学经济与管理学院副院长, 研究方向为城市群城镇化与水资源保护, E-mail:sunbin\_bsu@hotmail.com。

**\* 责任作者:**姜慧敏(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市群城镇化与水资源保护, E-mail:jhm202303@163.com。

也是保障国家经济安全、生态安全和社会稳定的重要环节。在全球气候变化背景下,人类活动对水资源的影响已超出了流域尺度<sup>[4]</sup>,提升黄河流域城市群水资源可持续发展水平不仅为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学指引,而且有助于推动全球水资源管理向更加注重生态系统完整性与可持续性的方向转变。

水资源供需矛盾日益突出,水资源的相关研究成为当今学术界关注的焦点。从定性研究来看,相关研究主要集中在对水资源开发利用现状的解读<sup>[5]</sup>、水资源可持续利用路径的探究<sup>[6]</sup>、水资源与区域发展<sup>[7]</sup>、城市规划<sup>[8]</sup>、生态环境<sup>[9]</sup>等方面的逻辑关联分析。从定量研究来看,目前关于水资源方面的研究主要集中在水资源承载力<sup>[10,11]</sup>、水资源安全<sup>[12]</sup>、水资源节约集约<sup>[13]</sup>、水资源短缺<sup>[14]</sup>、水资源利用<sup>[15]</sup>、水—经济—生态<sup>[16]</sup>、水资源脆弱性<sup>[17]</sup>等领域。如部分学者指出,水资源承载力能够评估一个地区的水资源安全稳定程度、支持经济发展和社会进步及表征生态环境协调性<sup>[10]</sup>;水生态安全聚焦于水污染和水质,将众多影响因素与水质相结合对区域水环境开展评价研究,了解区域的水环境安全状态<sup>[12]</sup>。在研究尺度上,主要涉及区域<sup>[18]</sup>与流域<sup>[19]</sup>等宏观层面,也有部分学者对省域<sup>[14]</sup>、县域<sup>[20]</sup>及乡镇<sup>[21]</sup>的水资源进行测度分析;在指标体系构建上,早期学者侧重于探讨水资源与单一指标发展之间的关系<sup>[22,23]</sup>,如水资源与经济发展、水资源与人口等。随着研究的不断深入,对水资源的量化研究逐渐转向指标综合研究,指标体系包括水—经济—生态<sup>[16]</sup>或水—能源—粮食<sup>[24]</sup>这几个维度;在研究方法上,学者们多采用层次分析法、泰尔指数、熵权法及传统的基尼系数法进行水平测度和分析<sup>[25,26]</sup>,其中层次分析法由于定量与定性相结合而成为水资源评价最常用的方法<sup>[25]</sup>。还有部分学者采用耦合协调法<sup>[27]</sup>、脱钩分析<sup>[28,29]</sup>等,用于探究两个系统之间的关联,判断水资源的变化情况。

通过对目前水资源研究的相关文献提炼汇总可知,学者们对水资源评价的定量研究逐渐丰富,但仍存在一些问题有待进一步完善:第一,目前研究多集中在省级、流域及县域等层面,有关黄河流域城市群水资源可持续发展研究文献相对较少。研究黄河流域城市群水资源可持续发展水平所使用的地

级市数据比省份数据更细分,比县域数据更全面,将研究单元设置成地级市具有明显优势,有利于政策的制定和实施;第二,现有研究内容往往集中在水资源与多要素耦合的状态评价,其中关于水资源的指标不足,不能充分体现水资源可持续发展水平,水资源可持续发展的测度评价研究有待进一步深入;第三,现有研究在进行水平测度时多采用层次分析法和熵权法来确定权重,进而通过综合指数法来计算出系统指数,对指标的效用值和重要性考虑欠缺,在探究区域差异时主要通过泰尔指数和传统基尼系数进行测度分析,并未考虑到区域的交叉重叠部分。基于此,本文以黄河流域7个城市群58个地级市作为研究对象,结合理论分析和实际情况构建水资源可持续发展水平的指标体系,采用熵权TOPSIS模型,在熵权法赋权的基础上进一步通过TOPSIS法计算相对贴近度,从而更加精准地测度2007—2022年黄河流域城市群水资源可持续发展水平,进而利用Dagum基尼系数分析区域差异,探究交叉重叠部分的差异情况,最后通过障碍度模型诊断主要障碍因子及其障碍度,以期为推动黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

黄河流域包括兰西、宁夏沿黄、呼包鄂榆、关中平原、晋中、中原及山东半岛7个城市群,根据国务院批复黄河流域城市群发展规划和现有相关研究<sup>[30]</sup>,选取58个地级市作为研究区域,如图1所示。本文选取2007—2022年为研究时段,相关数据均来源于《中国城市统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》、EPS数据库及各市水资源公报,部分缺失数据采用线性插值法补齐。

### 1.2 评价指标体系构建

水资源可持续发展不仅是经济社会发展的内生变量,也是保障人类福祉的关键因素。结合黄河流域城市群水资源的实际情况,充分考虑了各指标的科学性、合理性及可得性,并参考相关学者的研究成果,基于PSR(压力—状态—响应)模型<sup>[31-34]</sup>,构建由水资源本底条件、水资源利用程度、水资源

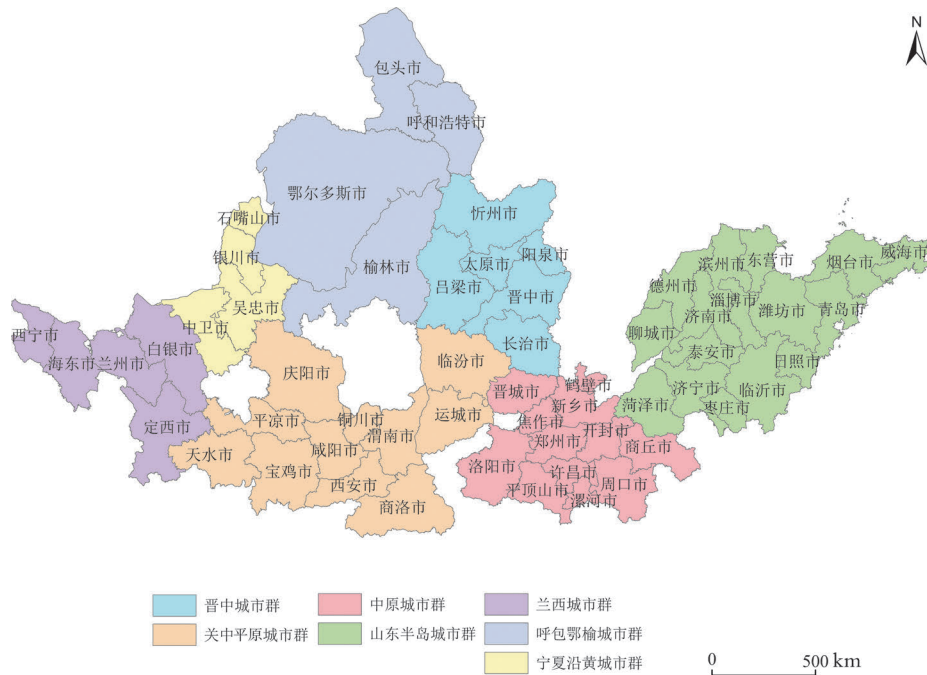


图 1 黄河流域城市群分布

管理能力及水资源压力指数 4 个一级指标综合而成的黄河流域城市群水资源可持续发展综合评价指标体系。水资源本底条件会受到水资源利用程度、水资源管理能力和水资源压力指数的影响。其中，水资源压力指数和水资源利用程度使得水资源本底条件恶化，水资源管理能力使得水资源本底条件回升，水资源本底条件的状态取决于水资源管理能力与水资源压力指数、水资源利用程度之间强度的对比。

水资源本底条件用于评价区域的自然资源禀赋状况。黄河流域城市群大部分位于我国北方干旱、半干旱地区，生态环境脆弱，区域内水资源短缺是城市群发展的主要限制因素，选取产水系数、年降雨量及地表水资源量来反映水资源的本底条件；水资源利用程度用来衡量区域水资源开发与使用效率。水资源开发利用状况涉及经济社会和自然环境两个系统，选取万元 GDP 用水量反映区域用水效率，人均日生活用水量反映流域人均用水效率，水资源开发利用程度反映区域水资源开发利用程度；水资源管理能力涉及对水资源有效规划、保护节约和修复等方面的水管理能力。参照《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》要求的加大工业污染治理力度，合理分配生活、生产用水及提高水资源节约集约利用水平，选取工业废水排放总量、生活污

水集中处理率、城市自来水普及率和人均污水排放量来表示水资源管理能力；水资源压力指数表征人类生产生活过程对水资源所产生的负荷，黄河流域城市群农业用水的高消耗及工业用水的低效率加剧了水资源可持续发展的压力，因此选取农业用水量占比和工业用水量占比表示水资源压力指数，如表 1 所示。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 熵权 TOPSIS 法

熵权法通过各项指标的实际数据确定权重，确保评价结果的准确性与客观性。TOPSIS 法作为多目标决策的一种综合评价方法，是基于评价指标与最优理想方案的接近程度，对所有评价指标整体进行排序从而确定方案的相对优劣。熵权 TOPSIS 法结合两者优点，广泛应用于水资源评价、干旱评价等方面<sup>[35,36]</sup>。计算公式如下。

表 1 水资源可持续发展综合评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标	属性	权重
水资源可持续发展	水资源本底条件	A <sub>1</sub> 年降水量	+	0.157 7
		A <sub>2</sub> 产水系数	+	0.269 4
		A <sub>3</sub> 地表水资源占比	+	0.125 5
	水资源利用程度	B <sub>1</sub> 万元 GDP 用水量	-	0.008 3
		B <sub>2</sub> 人均日生活用水量	-	0.056 7
		B <sub>3</sub> 水资源开发利用率	-	0.022 6
	水资源管理能力	C <sub>1</sub> 生活污水集中处理率	+	0.043 0
		C <sub>2</sub> 工业废水排放总量	-	0.039 6
		C <sub>3</sub> 城市自来水普及率	+	0.023 8
		C <sub>4</sub> 人均污水排放量	-	0.031 8
	水资源压力指数	D <sub>1</sub> 农业用水量占比	-	0.184 4
D <sub>2</sub> 工业用水量占比		-	0.037 2	

(1) 采用极值法对各项指标数据进行标准化：  
正向指标标准化：

$$Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.0001$$

负向指标标准化：

$$Y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + 0.0001 \quad (2)$$

(2) 计算指标比重  $P_{ij}$ 、信息熵  $e_{ij}$ 、冗余值  $f_j$  和熵权  $w_j$ ：

$$P_{ij} = d_{ij} / \sum_{i=1}^m d_{ij} \quad (3)$$

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (4)$$

$$f_j = 1 - e_j \quad (5)$$

$$w_j = f_j / \sum_{j=1}^n f_j \quad (6)$$

(3) 构建权重规范化矩阵  $S$ ：

$$S = (s_{ij})_{m \times n}, \quad s_{ij} = w_j d_{ij} \quad (7)$$

(4) 计算评价指标的正负理想解的距离  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ ：

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_j^+)^2} \quad (8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (s_{ij} - s_j^-)^2} \quad (9)$$

(5) 计算贴近度  $C_i$ ：

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (10)$$

式(1)和式(2)中,  $Y_{ij}$ 表示第*i*年第*j*项评价指标标准化处理后的值;  $x_{ij}$ 表示第*i*年第*j*项评价指标的当年实际值;式(10)中,  $C_i \in [0,1]$ ,  $C_i$ 值越大,表明水资源可持续发展水平越高。

### 1.3.2 Dagum 基尼系数分解法

对黄河流域城市群水资源可持续发展水平的

Dagum 基尼系数进行差异分解,能更好体现样本数据的空间差异及差异来源<sup>[37]</sup>。计算公式如下:

$$G = \sum_{j=1}^k \sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}| 2n^2 \bar{y} = G_w + G_{nb} + G_t \quad (11)$$

$$G_w = \sum_{j=1}^k G_{jj} P_j S_j \quad (12)$$

$$G_{jj} = \frac{1}{2Y_j} \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_j} |y_{ji} - y_{jr}| / n_j^2 \quad (13)$$

$$G_{nb} = \sum_{j=2}^k \sum_{r=1}^{j-1} G_{jh} (p_j S_h + p_h S_j) D_{jh} \quad (14)$$

$$G_t = \sum_{i=2}^k \sum_{r=1}^{i-1} G_{jh} (p_j S_h + p_h S_s) (1 - D_{jh}) \quad (15)$$

$$G_{jh} = \sum_{i=1}^{n_j} \sum_{r=1}^{n_h} |y_{ji} - y_{hr}| / n_j n_h (\bar{Y}_j + \bar{Y}_h) \quad (16)$$

式(11)~式(16)中,  $G$ 为总体基尼系数,  $G_w$ 为区域内差距贡献,  $G_{nb}$ 为区域间差距贡献,  $G_t$ 为超变密度贡献;  $j$ 和 $h$ 分别为7个城市群,  $j=1, 2, \dots, 7$ ;  $h=1, 2, \dots, 7$ 且 $j \neq h$ ;  $n_j$  ( $n_h$ )为*j* (*h*)城市群中地级市个数,  $y_{ji}$  ( $y_{jh}$ )为水资源可持续发展水平,  $\bar{y}$ 为水资源可持续发展水平的平均值。

### 1.3.3 障碍度模型

通过识别黄河流域城市群水资源可持续发展水平的障碍因素,以寻求提升黄河流域城市群水资源可持续发展水平的有效途径,引入3个指标:因素贡献程度  $F_j$ 、指标偏差程度  $I_j$ 和障碍程度  $P_j$ ,利用这3个指标对阻碍水资源可持续发展的障碍因子进行诊断<sup>[38,39]</sup>。计算公式如下:

$$F_j = w_j \quad (17)$$

$$I_j = 1 - Y_{ij} \quad (18)$$

$$P_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^n F_j I_j} \times 100\% \quad (19)$$

式(17)~式(19)中,  $F_j$ 是指单个因子对整体目标的重要程度,采用各因子的权重  $w_j$ 表示;  $Y_{ij}$ 为第*i*年第*j*项评价指标标准化处理后的值;  $n$

为指标个数。

## 2 结果与分析

### 2.1 黄河流域城市群水资源可持续发展水平的时空演变特征

由熵权 Topsis 法计算出黄河流域城市群 58 个地级市的水资源可持续发展指数，再分别对各城市群所包含城市的水资源可持续发展指数值取均值，以表示各城市群总体的水资源可持续发展指数，指数越大表明水资源可持续发展水平越高，反之越低，具体如图 2 所示。

由图 2 可知，从整体变化趋势来看，2007—2022 年黄河流域城市群的水资源可持续发展指数呈波动上升趋势但增长速度缓慢。具体来看，2007—2022 年黄河流域各城市群的水资源可持续发展指数相对稳定，位于黄河中上游地区的宁夏沿黄、兰西和呼包鄂榆城市群水资源可持续发展指数排名靠后，尤其是宁夏沿黄城市群，水资源可持续发展指数最低，2007 年仅为 0.21，到 2022 年增长到 0.22，年均增长率仅有 0.31%，兰西和呼包鄂榆城市群的水资源可持续发展指数也仅在 0.31 到 0.35 之间，可能是特殊的地理位置和气候特征使得兰西、呼包鄂榆及宁夏沿黄城市群干旱少雨，生态本底条件脆弱，水资源时空分布不均，水资源可持续发展指数低下。另外，呼包鄂榆城市群的重工业化加速了水资源的消耗，过高的水资源开发利用压追了水资源生态承载力，而兰西、宁夏沿黄城市群经济发展方式较为粗放，科技创新水平低下，水资

源管理运行机制不健全等制约着水资源的可持续发展；其余四个城市群中，中原和晋中城市群在研究期内的水资源可持续发展指数相对较高，位于 0.33 到 0.49 之间，这是因为中原城市群新建大型水资源开发利用工程，尤其自 2014 年 12 月南水北调中线工程正式通水后，水资源短缺的问题有所缓解，而晋中城市群严格执行水污染防治工作，工业污染综合减排效果明显，水资源可持续发展水平不断提升；山东半岛和关中平原城市群的水资源可持续发展指数波动较大，这是由于山东半岛城市群人口众多，人均水资源量少，灌溉面积较大且降水时空分布不均等因素的共同作用，而关中平原城市群东西向跨度较大，经济发展水平、产业结构及水资源利用效率存在明显差异，供水与用水矛盾严重。总的来说，黄河流域城市群以生态保护为着重点，但各城市群间水资源可持续发展水平仍不均衡，在未来发展中要针对不同城市群特点，制定更具有针对性的水资源管理政策，注重集约节约用水。

为了更加直观地展示黄河流域城市群水资源可持续发展水平的变化情况，运用 ArcGIS 软件，选取 2007 年、2012 年、2017 年、2022 年作为研究时间节点分析其空间分异特征，具体如图 3 所示。

由图 3 可知，研究期内黄河流域水资源可持续发展水平逐渐提高，不同城市群水资源可持续发展水平具有明显的区域差异，大致呈现东高西低的空间分异格局，其中高值区集中分布在晋中、中原和山东半岛城市群，低值区主要集中在呼包鄂榆

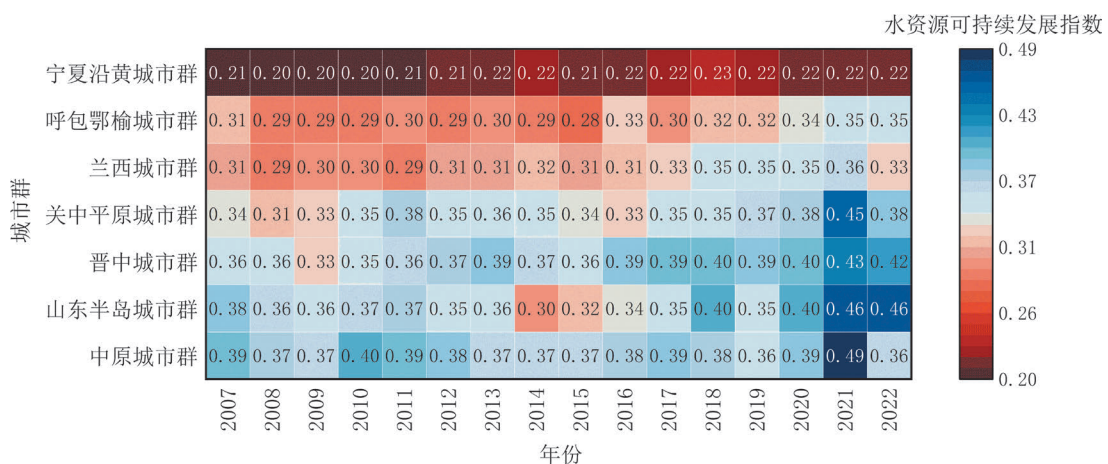


图 2 黄河流域城市群水资源可持续发展水平变化趋势

城市群和宁夏沿黄城市群。具体来看,2007年除了宁夏沿黄城市群的水资源可持续发展水平处于0.20~0.30,其余城市群均在0.31~0.40,到2022年宁夏沿黄城市群仍处于较低水平,停留在0.20~0.30未发生变化,其余各城市群的水资源可持续发展水平均有所提升,其中山东半岛和晋中城市群提升较快,达到0.41~0.50,兰西、呼包鄂榆、关中平原和中原城市群达到0.31~0.40。

## 2.2 黄河流域城市群水资源可持续发展水平的区域差异分解

### 2.2.1 总体及区域内差异分析

为进一步分析黄河流域城市群内的水资源发展差距情况,运用Dagum基尼系数分解法,对各个城市群内水资源发展水平的基尼系数进行测算,结果如表2所示。

由表2可知,总体基尼系数在研究期内呈现出“下降—上升”频繁交替的波动特征,在2021年和2016年分别达到顶峰(0.1431)和低谷(0.1028),说明黄河流域城市群水资源可持续发展水平没有表现出严格的递减趋势,仍存在水资源发展不平衡的问题。从区域内基尼

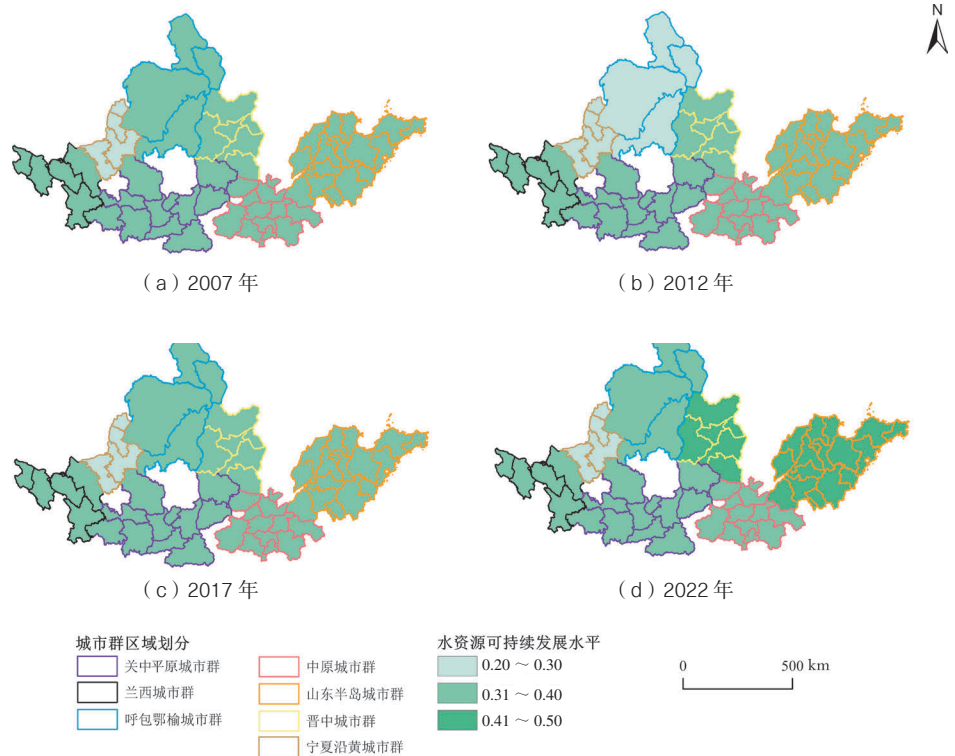


图3 黄河流域城市群水资源可持续发展水平空间分异特征

表2 总体及区域内基尼系数

年份	总体基尼系数	区域内基尼系数						
		兰西	宁夏沿黄	呼包鄂榆	关中平原	晋中	中原	山东半岛
2007	0.135 0	0.127 0	0.051 9	0.076 7	0.085 9	0.079 3	0.079 0	0.149 1
2008	0.132 1	0.105 0	0.033 1	0.088 3	0.085 5	0.066 7	0.062 2	0.151 0
2009	0.120 1	0.113 3	0.040 1	0.114 5	0.109 1	0.065 3	0.073 2	0.094 8
2010	0.129 7	0.112 7	0.037 1	0.112 7	0.114 7	0.060 3	0.101 5	0.081 1
2011	0.132 1	0.109 3	0.047 9	0.108 5	0.097 4	0.045 9	0.092 1	0.120 6
2012	0.115 8	0.107 2	0.032 3	0.120 8	0.092 1	0.032 5	0.083 9	0.094 4
2013	0.110 8	0.100 2	0.037 5	0.139 0	0.081 0	0.032 9	0.076 5	0.083 8
2014	0.115 4	0.122 8	0.046 5	0.146 9	0.089 1	0.038 3	0.065 0	0.094 6
2015	0.108 0	0.106 7	0.049 7	0.164 2	0.089 9	0.054 0	0.065 6	0.065 5
2016	0.102 8	0.103 5	0.036 5	0.116 6	0.085 4	0.032 0	0.054 8	0.080 4
2017	0.118 1	0.098 9	0.026 8	0.132 4	0.100 6	0.032 1	0.074 1	0.106 9
2018	0.110 7	0.117 6	0.010 7	0.108 9	0.092 8	0.038 1	0.058 2	0.103 4
2019	0.124 0	0.136 6	0.020 1	0.107 2	0.127 4	0.058 2	0.069 5	0.111 2
2020	0.128 0	0.115 1	0.026 8	0.139 9	0.124 1	0.048 3	0.060 7	0.117 8
2021	0.143 1	0.141 2	0.033 2	0.164 4	0.157 1	0.029 5	0.081 8	0.062 5
2022	0.141 4	0.104 2	0.028 0	0.150 7	0.131 7	0.036 1	0.062 1	0.114 5
均值	0.123 0	0.113 8	0.034 9	0.124 5	0.104 0	0.046 8	0.072 5	0.102 0

系数年均值来看,呼包鄂榆城市群和兰西城市群较高,分别为0.1245和0.1138,反映出这两个城市群的水资源可持续发展水平的空间非均衡性较为突出,城市群内部分地区水资源丰富,而另一些地区则面临水资源短缺,例如呼包鄂榆城市群中的呼和浩特市拥有较为丰富的地表水资源量,年降雨量远远高于包头市,而包头市地表水供给不足,地下水过度开采,因此水资源的利用存在显著差异;宁夏沿黄城市群的基尼系数最小(0.0349),说明其内部城市的水资源可持续发展水平大致相当,结合前文分析可以发现,宁夏沿黄城市群虽然水资源可持续发展水平较低,但是内部差异较小,仍存在提升空间,应当合理进行水资源的开发利用,调整产业结构,促进高耗水产业的转型升级,进一步提升水资源的管理能力。从变化趋势来看,除了宁夏沿黄城市群和晋中城市群的区域内基尼系数有所下降,其余城市群均呈现“下降—上升”的波动趋势。

### 2.2.2 群间差异分析

表3为黄河流域城市群水资源可持续发展水平2007年、2012年、2017年和2022年的群间差异结果。

如表3所示,从年均值来看,中原—宁夏沿黄水资源可持续发展水平的差异最为明显,群间基尼系数为0.2851,在研究期内始终高于其他地区的群间基尼系数,其原因可能是中原城市群经济结构相对多元,相对湿润的气候条件与有效的水资源管理趋向有助于保持生态平衡,而宁夏沿黄城市群经济以对水资源依赖程度较高的农业为导向,缺乏多样化的发展模式,农业用水量大,使得两者差异较大;其次为晋中—宁夏沿黄、山东半岛—宁夏沿黄,群间基尼系数分别为0.2776、0.2667;水资源可持续发展水平差异最小的是中原—晋中,原因在于中原、晋中城市群改变了以往粗放的用水模式,开展节水技术改造,推进水资源调配工程建设,促进了水资源的合理利用。从变化趋势来看,在21个城市群配对组中,有16个城市群配对组的群间差异较研究初期有所上升。具体来看,关中—呼包鄂榆的基尼系数增幅最大;山东半

表3 区域间基尼系数

区域	均值	2007年	2012年	2017年	2022年
中原—山东半岛	0.101 0	0.122 8	0.099 1	0.100 1	0.132 8
中原—晋中	0.072 3	0.089 7	0.074 2	0.059 4	0.084 0
中原—关中平原	0.102 6	0.105 0	0.097 5	0.104 7	0.109 5
中原—呼包鄂榆	0.148 6	0.125 6	0.158 6	0.161 8	0.129 5
中原—兰西	0.122 7	0.141 9	0.127 1	0.109 2	0.091 6
中原—宁夏沿黄	0.285 1	0.313 0	0.283 2	0.266 9	0.253 1
山东半岛—晋中	0.089 5	0.123 4	0.077 5	0.090 7	0.092 5
山东半岛—关中平原	0.113 7	0.131 3	0.095 7	0.108 6	0.148 3
山东半岛—包鄂榆	0.149 4	0.141 7	0.140 1	0.150 1	0.181 9
山东半岛—兰西	0.128 7	0.162 2	0.110 9	0.110 5	0.173 5
山东半岛—宁夏沿黄	0.266 7	0.301 8	0.244 6	0.224 5	0.359 3
晋中—关中平原	0.093 0	0.087 8	0.075 1	0.098 1	0.117 0
晋中—包鄂榆	0.139 9	0.098 7	0.147 6	0.159 9	0.149 8
晋中—兰西	0.107 2	0.118 5	0.098 8	0.095 1	0.124 1
晋中—宁夏沿黄	0.277 6	0.270 6	0.273 8	0.270 9	0.319 4
关中平原—包鄂榆	0.139 7	0.089 3	0.136 8	0.145 4	0.150 8
关中平原—兰西	0.123 2	0.113 9	0.113 3	0.108 2	0.138 0
关中平原—宁夏沿黄	0.251 3	0.242 9	0.241 9	0.220 6	0.277 8
呼包鄂榆—兰西	0.139 8	0.109 4	0.141 6	0.142 2	0.148 4
呼包鄂榆—宁夏沿黄	0.186 4	0.211 1	0.160 7	0.151 1	0.233 9
兰西—宁夏沿黄	0.210 6	0.215 7	0.204 0	0.1939	0.215 2

岛—宁夏沿黄的增幅次之;中原—呼包鄂榆增幅最小。其余城市群之间的群间差异总体表现为波动缩小的趋势,其中中原—宁夏沿黄间的基尼系数下降幅度最大。出现这种变化的原因在于宁夏沿黄城市群积极开展“四水四定”试点,跨省(区、市)区域水权交易,扭转区域间差异过大的局面。因此要发挥上游地区用水调配功能,进一步完善水权交易机制,加快流域内水资源要素流动,同时积极推动资金技术的流动,增强集聚效应,实现融合发展。

### 2.2.3 差异来源及贡献率

图4为黄河流域城市群水资源可持续发展的差异来源及其贡献率的变化情况。

由图 4 可知, 2007—2022 年, 黄河流域城市群水资源可持续发展水平区域间差异贡献率均值最大, 均值为 52.18%, 在 39%~62% 范围内浮动, 说明目前黄河流域各城市群在水资源利用和协调方面仍差异较大, 未来要结合实际情况, 探索实现水资源可持续发展的最优路径, 对于水资源可持续发展水平低值区的城市群, 合理分配规划人口、城市和产业布局, 在农业和工业方面需严格控制用水量, 尤其是宁夏沿黄城市群和兰西城市群, 要改进农业用水技术, 将农业用水和工业用水压缩以便腾出更多水资源用于生态保护; 对于水资源可持续发展水平高值区的城市群要继续加强水资源保护, 综合运用政策、技术和管理手段, 全面提高水资源的综合利用水平; 其次为超变密度贡献率, 均值为 33.75%, 变动区间为 24.32%~45.47%, 说明黄河流域水资源发展水平较高的城市群内并不是每个城市的水资源可持续发展水平都要高于水资源可持续发展低水平城市群内的城市, 所以要重点关注城市群内水资源可持续发展水平较低的城市, 推动水资源管理体制变革, 应用先进的节水技术才能实现经济与环境的共赢; 区域内差异贡献率最低, 均值仅为 14.07% 且在 11.8%~15.81% 区间内波动, 则表明黄河流域各城市群内的水资源可持续发展水平的差异相对较小。

### 2.3 黄河流域城市群水资源可持续发展水平障碍因子诊断

利用障碍度模型, 计算黄河流域城市群水资源可持续发展综合评价指标的障碍度, 并选取各个城市群障碍度排名前 8 的指标

开展分析, 具体如图 5 所示。箭头的宽度表示障碍度的大小, 宽度越大表示相应的障碍因子的障碍度越大(从上到下的排序为软件默认)。

由图 5 可知, 各个城市群障碍度排名前 8 的障碍因子涉及 11 个二级指标, 其中 36% 集中在水资源管理能力, 27% 集中在水资源本底条件, 18% 集

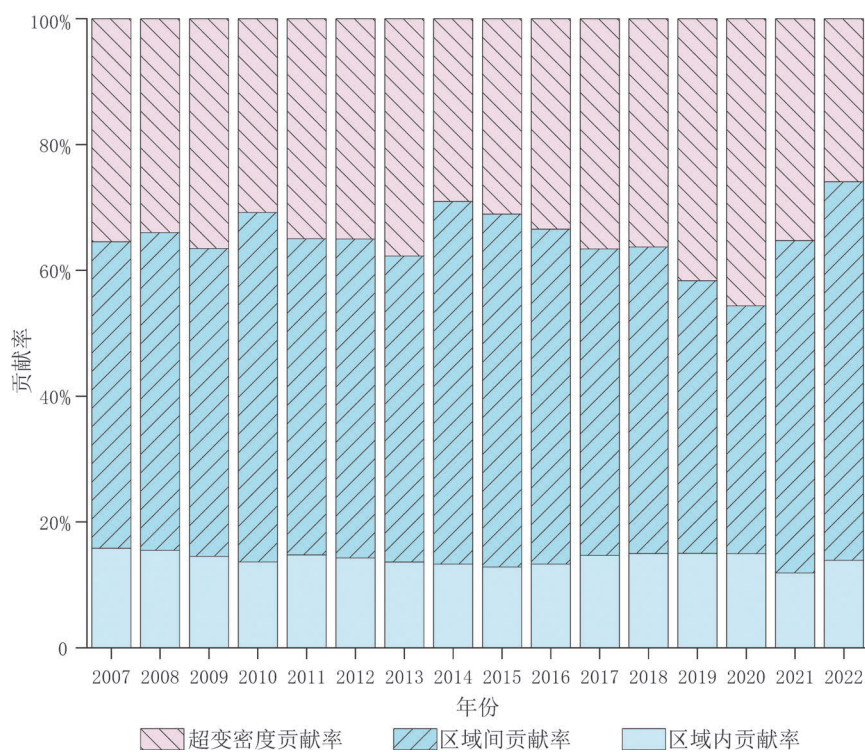


图 4 差异来源及其贡献率

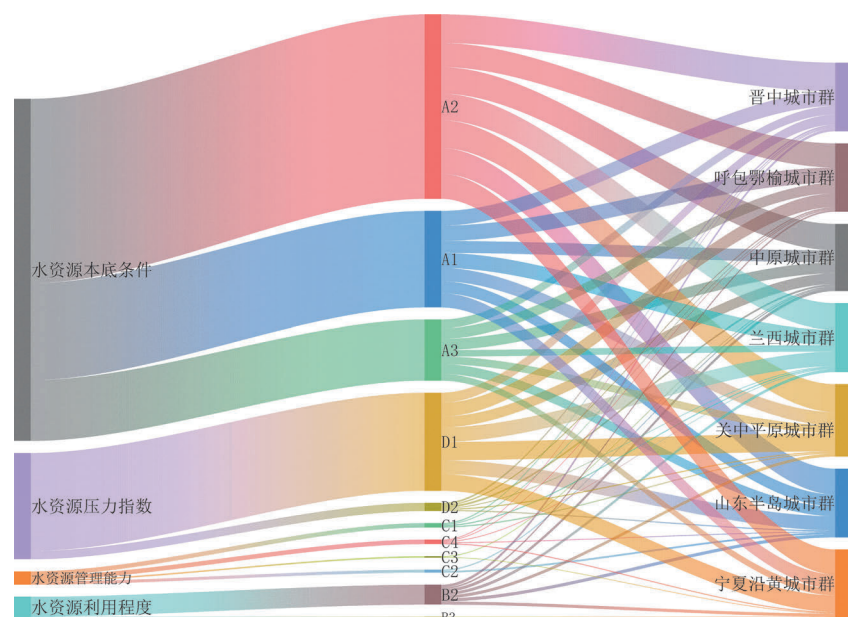


图 5 障碍因子来源



中在水资源压力指数，18% 在水资源利用程度，这表明水资源压力指数和水资源利用程度的指标对水资源可持续发展的阻碍最小，其他一级指标对水资源可持续发展的阻碍相对较大。选择出现频次6次及以上的二级指标为黄河流域城市群主要障碍因子，其障碍度从大到小的排序依次为：产水系数、年降水量、农业用水量占比、地表水资源占比、人均日生活用水量、工业用水量占比。

进一步分析黄河流域各城市群的主要障碍因子，具体如图6所示。

由图6可知，黄河流域各城市群的障碍因子各不相同，且同一障碍因子在不同城市群的障碍度也不相同，侧面印证了各城市群水资源发展水平不协调；从时间来看，2007—2022年单个指标颜色变动较少，说明影响水资源可持续发展的障碍因子受空间影响往往大于时间。在产水系数方面，障碍度最

高和最低分别是晋中城市群和呼包鄂榆城市群，主要是因为晋中城市群受地形和气候的影响，地表水不易集流，导致地表水资源相对匮乏且降水时空分布不均，面临更大的水资源开发利用压力；而呼包鄂榆城市群拥有相对丰富的水资源储备，周围水域众多，且降水量相对较少，因此障碍度低。年降水量方面，呼包鄂榆城市群由于深居内陆的地理位置及所属气候类型，降水量少，障碍度最高；而山东半岛城市群的障碍度最低，仅为17.13%。在农业用水量占比方面，宁夏沿黄城市群的障碍度最高，其原因是该地区干旱的气候条件决定了农业对水资源的高度依赖，且农业生产模式相对传统，效率较低，致使水资源的过度开采和环境压力增大；而晋中城市群的障碍度最低，是因为晋中城市群其工业和服务业相对发达，注重工业和城市用水的均衡配置，且应用现代农业技术，提高了水资源的利用效

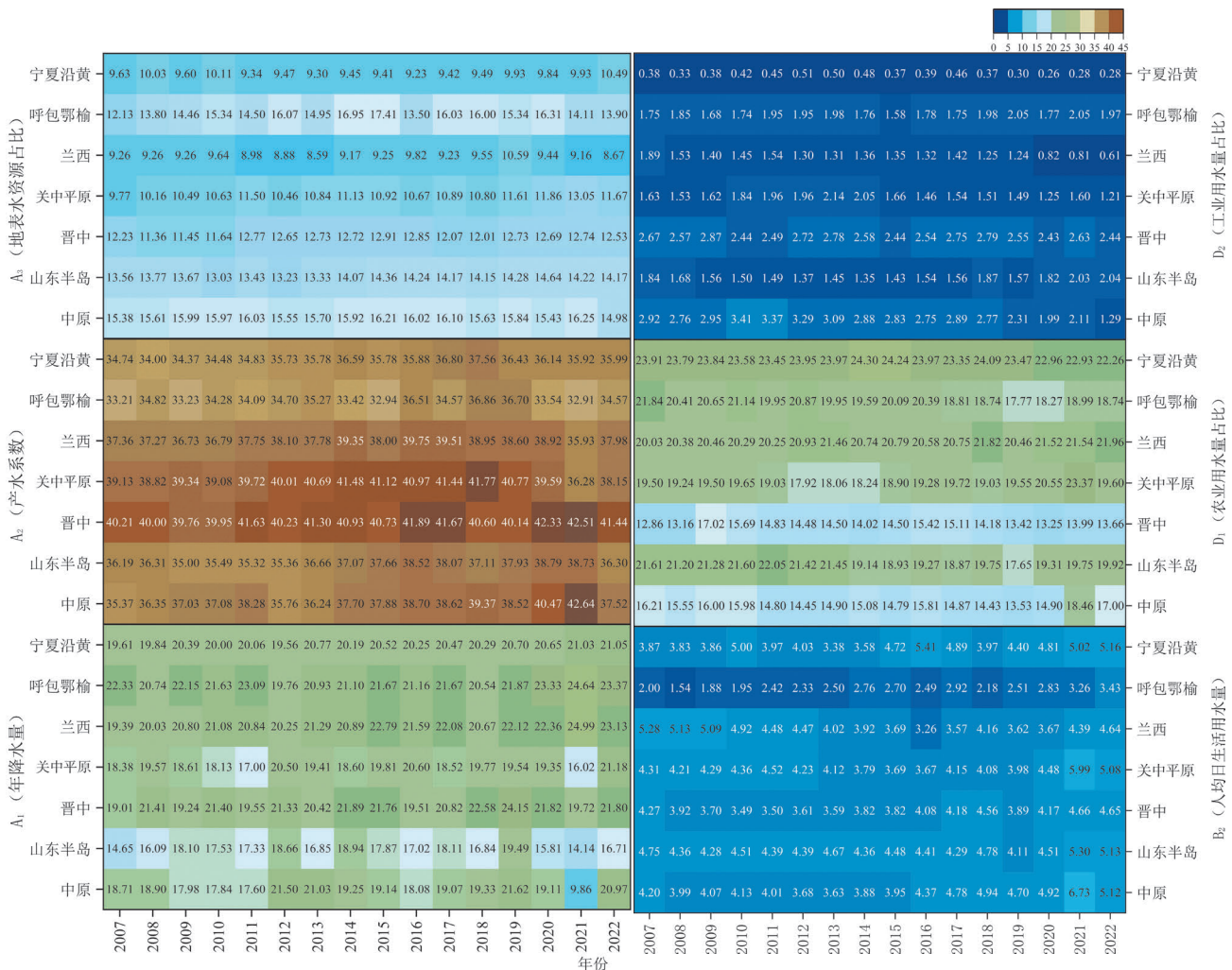


图6 黄河流域城市群水资源可持续发展水平障碍度分布

率。在地表水资源占比方面,中原城市群的障碍度最高,兰西城市群的障碍度最低。在人均日生活用水量方面,障碍度最高和最低的城市群分别是山东半岛城市群和兰西城市群,山东半岛城市群由于人口密集和经济活动频繁,人均日生活用水量较高,因此障碍度较高。在工业用水量占比方面,中原城市群的障碍度最高,晋中城市群次之,而宁夏沿黄城市群的障碍度最低,这与城市群产业结构密切相关。总体而言,黄河流域各城市群水资源可持续发展水平展示出向好的趋势,但产水系数、年降水量、农业用水量占比、地表水资源占比、人均日生活用水量、工业用水量占比等对水资源可持续发展的阻碍依旧存在。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 研究期内,黄河流域城市群水资源可持续发展指数整体呈波动上升趋势且增长速度缓慢,不同城市群水资源可持续发展水平具有明显的区域差异,呈现东高西低的空间分布格局。

(2) 研究期内,黄河流域城市群水资源可持续发展水平总体差异呈“下降—上升”频繁交替的波动特征,区域间差异是主要来源,其贡献率呈波动上升趋势,中原城市群和宁夏沿黄城市群水资源可持续发展水平的区域间差异最大,区域间差异最小的是中原城市群和晋中城市群;区域内差异贡献率相对稳定,除宁夏沿黄城市群和中原城市群区域内基尼系数呈下降趋势,其余城市群均呈现出“下降—上升”的波动变化特征;超变密度贡献率呈波动下降趋势。

(3) 产水系数、年降水量、农业用水量占比、地表水资源占比、人均日生活用水量、工业用水量占比是黄河流域城市群水资源可持续发展的主要障碍来源,其中产水系数是第一障碍因子,因此水资源短缺是黄河流域城市群水资源可持续发展水平提升的最大阻碍。

#### 3.2 讨论

黄河流域城市群水资源状况关系着国家生态安全,对于我国经济社会发展也有着重要影响<sup>[6]</sup>。本

研究基于城市群尺度,围绕黄河流域城市群水资源可持续发展水平及影响因素展开探讨,这是对黄河流域城市群水资源现有研究体系的补充,一定程度上弥补了现有研究内容及尺度的不足。与现有研究成果相比,研究结论与其相互验证。研究发现,黄河流域城市群水资源可持续发展水平波动上升,可能得益于积极的水资源管理<sup>[40]</sup>。黄河流域城市群整体水资源用水效率水平不高、用水效率差异较大<sup>[41]</sup>,改进用水方式、提升用水效率有利于提升水资源可持续发展水平。产水系数是影响水资源可持续发展的首要障碍因子,工业、农业用水量大、效率低导致黄河流域用水紧张,尤其是宁夏沿黄城市群、呼包鄂榆城市群及兰西城市群,存在巨大的节水潜力<sup>[6,42]</sup>。本研究不同之处在于进一步探究了黄河流域城市群内的水资源可持续发展差距情况,发现黄河流域城市群水资源可持续发展水平总体差异呈“下降—上升”频繁交替的波动特征,城市群间的差异是主要来源。因此,黄河流域城市群要统筹水资源分配利用与产业布局、城市建设,建立跨区域合作机制,促进流域内不同城市群及城市信息共享,以实现流域内水资源的合理配置;政府需从针对性、有效性等方面采取不同策略,分区域推进水资源保护和治理,确保水资源管理与当地经济、社会和生态环境相适应。同时,要加强公众教育,增强居民的环保意识,鼓励家庭选择节水与减少污染的生活方式,减少生活污水的排放,正确处理生活和生态之间的关系,着力减少过度放牧、过度开发水资源等人为活动对水资源可持续发展的影响。

本研究存在的不足之处有待进一步完善。受限于数据的来源,未能全面覆盖关于水资源可持续发展的相关指标,若借助夜间灯光数据、遥感技术等,可突破数据的限制,使结果更加具体、合理。此外,鉴于篇幅有限,本研究未对水资源未来可持续发展趋势进行预测,在今后的研究中可利用气候变化模型、系统动力学模型等对水资源可持续发展趋势加以探讨,为黄河流域生态保护和高质量发展提供更多的政策启示。

#### 参考文献

[1] 牛犛,岳弘彬.以进一步全面深化改革为动力 开创黄河流域

- 生态保护和高质量发展新局面 [EB/OL]. (2024-09-13)[2024-09-13]. <http://politics.people.com.cn/n1/2024/0913/c1024-40319188.html>.
- [2] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委有关负责同志就《黄河流域水资源节约集约利用实施方案》答记者问 [EB/OL]. (2021-12-17)[2023-09-30]. [https://www.gov.cn/zhengce/2021-12/17/content\\_5661518.htm](https://www.gov.cn/zhengce/2021-12/17/content_5661518.htm).
- [3] 刘海猛, 卢佳祎, 王成新, 等. 基于栅格尺度的黄河流域人地关系时空耦合分析 [J]. 生态学报, 2024, 44(15): 6499-6512.
- [4] 杨建锋, 左力艳, 姚晓峰, 等. 人类活动对全球淡水循环影响与行星边界评估研究进展 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 1-9.
- [5] 申豪勇, 李佳, 王志恒, 等. 黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题 [J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1127-1138.
- [6] 赵莺燕, 于法稳. 黄河流域水资源可持续利用: 核心、路径及对策 [J]. 中国特色社会主义研究, 2020(1): 52-62.
- [7] 王格芳, 李梦程. 黄河流域水资源与区域发展时空耦合研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(2): 8-15.
- [8] 王连接, 王开春, 吴连丰, 等. 基于海绵城市理念的城市水系规划方法及实践 [J]. 中国给水排水, 2024, 40(4): 32-36.
- [9] 成玉宁, 王雪原. 城市蓝绿空间融合规划的生态逻辑 [J]. 中国园林, 2023, 39(10): 39-43.
- [10] 周亮广, 梁虹, 焦树林. 喀斯特地区的枯水承载力研究 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2005, 23(4): 23-27.
- [11] CHEN Q Y, ZHU M T, ZHANG C J, et al. The driving effect of spatial-temporal difference of water resources carrying capacity in the Yellow River Basin [J]. Journal of cleaner production, 2023, 388: 135709.
- [12] 杨振华, 苏维词, 李威. 基于 PESBR 模型的岩溶地区城市水资源安全评价——以贵阳市为例 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2016, 34(5): 1-9.
- [13] 刘佳, 付鹏举, 林春艳, 等. 黄河流域水资源节约集约水平的测度、时空差异及收敛性分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(9): 20-30.
- [14] 赵孝威, 张洪波, 李同方, 等. 中国城市水资源短缺类型与发展轨迹识别——以 32 个主要城市为例 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(10): 2619-2636.
- [15] 杨庚霞. 黄河流域生态脆弱区水资源利用评价 [J]. 人民黄河, 2024, 46(S1): 33-34, 36-36.
- [16] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价 [J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 80-86.
- [17] 刘海娇, 仕玉治, 范明元, 等. 基于 GIS 的黄河三角洲水资源脆弱性评价 [J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 34-37.
- [18] 张文阁, 雍会. 西北干旱区城市水资源绿色效率及节水减排研究 [J]. 人民黄河, 2024, 46(6): 68-73.
- [19] 杨学文, 刘小慧, 叶萍萍, 等. 熵权法和 TOPSIS 模型协同下的黄河流域 (甘肃段) 水资源承载力时空变化分析 [J]. 测绘通报, 2024(10): 18-24.
- [20] 刘海娇, 范明元, 管清花, 等. 县域“四水四定”协调性评价及应用 [J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(4): 194-200.
- [21] 高雅玉, 宋玉, 田晋华, 等. 西北干旱区乡镇水资源承载力评价体系构建 [J]. 人民长江, 2023, 54(8): 139-145, 159-159.
- [22] 张粉霞, 于国荣, 张代青. 区域水资源复合系统均衡评价及障碍因子分析 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2024, 55(S2): 260-267.
- [23] 赖辛, 曹国华. 基于直觉模糊联盟合作博弈的我国主要流域水资源优化配置研究 [J]. 中国环境管理, 2024, 16(4): 71-79, 90-90.
- [24] 王恒, 方兰. 黄土高原能源富集区水-能源-粮食纽带系统安全时空耦合协调关系分析——以榆阳区为例 [J]. 中国环境管理, 2023, 15(3): 43-50.
- [25] 姜锋, 张百祖. 基于层次分析法和变异系数法的酒泉市水资源承载能力分析评价研究 [J]. 节水灌溉, 2023(9): 94-99.
- [26] 陶洁, 张李婷, 左其亭, 等. 基于泰尔指数的水资源配置公平性研究——以引江济淮工程河南段为例 [J]. 人民长江, 2023, 54(12): 113-119.
- [27] 何刚, 何训喜. 淮河流域水资源-经济-社会-环境耦合协调研究 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(11): 4484-4493.
- [28] 钟妮栖, 夏瑞, 张慧, 等. 黄河流域城市群水资源利用与经济发展脱钩关系研究 [J]. 环境科学研究, 2024, 37(1): 102-113.
- [29] LAI Z C, LI L, HUANG M, et al. Spatiotemporal evolution and decoupling effects of sustainable water resources utilization in the Yellow River Basin: based on three-dimensional water ecological footprint [J]. Journal of environmental management, 2024, 366: 121846.
- [30] 孙涛, 孙斌, 薛建春. 黄河流域城市群城乡融合与生态环境交互胁迫及耦合协调研究 [J/OL]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 1-12(2024-08-28)[2024-08-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.tv.20240827.1403.002.html>.
- [31] 王松茂, 牛金兰. 黄河流域城市生态韧性时空演变及其影响因素 [J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8309-8320.
- [32] 谢群, 卢泽花, 负晓哲. 黄河流域水资源承载力与高质量发展的耦合协调及其驱动机制研究 [J/OL]. 中国农业资源与区划, 1-14(2024-05-17)[2024-05-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20240516.1435.013.html>.
- [33] 陈立, 于伟, 张学波, 等. 黄河流域城镇化高质量发展的水资源约束效应及其空间关联网 [J/OL]. 世界地理研究, 1-15(2024-02-27)[2024-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20240226.1506.002.html>.
- [34] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析 [J]. 地理学报, 2008, 63(11): 1140-1150.
- [35] 侯雷. 武汉市水资源脆弱性评价及障碍因子分析 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 214-222.
- [36] 李占玲, 王佳雯, 叶瀛韬, 等. 权重和数据影响下水资源承

- 载力评价不确定性研究 [J]. 人民长江, 2023, 54(5): 53-60.
- [37] 田宇. 中国水资源综合利用水平的地区差异与动态演进 [J]. 经济问题, 2024(1): 105-112.
- [38] 孙茜, 张捍卫, 张小虎. 河南省资源环境承载力测度及障碍因素诊断 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 33-38.
- [39] 张乐勤. 经济社会与资源环境系统协调视角下的安徽省高质量发展判别及障碍诊断 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2019, 37(3): 35-42.
- [40] 张瑞中, 徐福祥. 黄河流域水资源管理绩效水平测度及时空分异 [J]. 河南工程学院学报 (社会科学版), 2024, 39(4): 15-24.
- [41] 高建刚, 何丽娜, 王云鹏. 黄河流域山东—河南段水资源利用效率研究 [J]. 山东工商学院学报, 2024, 38(5): 115-128.

## Evaluation and Obstacle Factors of Sustainable Development Level of Water Resources in Urban Agglomerations of the Yellow River Basin

SUN Bin<sup>1,2</sup>, JIANG Huimin<sup>1,\*</sup>, XUE Jianchun<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, BI Chunming<sup>1</sup>

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. Yellow River Jiziwan Development Research Institute, Baotou 014010, China)

**Abstract:** While the Yellow River Basin urban agglomeration is a strategic core area of productivity layout in China and a significant barrier to ecological security, its natural geographic conditions and ecological background are relatively weak, and it encounters significant challenges such as a shortage of water resources, significant soil erosion, a high rate of water resource development and utilization, and the growing conflict between human needs and water availability. Examining the current state of sustainable water resource development and its obstacle factors in urban agglomerations of the Yellow River Basin is extremely important from a practical standpoint. Based on the panel data of 58 prefectural-level cities in 7 urban agglomerations of the Yellow River Basin from 2007 to 2022, the level of sustainable development of water resources in urban agglomerations of the Yellow River Basin is measured, and the regional discrepancies and obstacle factors of sustainable implementation of water resources in urban agglomerations of the Yellow River Basin are modelled using the Dagum's Gini coefficient and barrier magnitude module. According to the study's findings, ① the sustainable index of water resources in urban agglomerations of the Yellow River Basin indicates a slow growth rate overall and a fluctuating upward trend from 2007 to 2022, with a low growth rate in the west and a high index in the east. ② The overall disparity in the degree of sustainable water resource development in the Yellow River Basin urban agglomeration is marked by a "falling-rising" fluctuation, with the interregional difference assisting as the main source of energy and its fluctuating contribution rate is increasing. In contrast, the intraregional difference's contribution rate is fairly constant, and the hypervariable density contribution rate is fluctuating downward. ③ The number of water-producing systems, the amount of precipitation yearly, the quantity of surface water resources, the proportions of agricultural water consumption, the daily per capita domestic water consumption, and the percentages of industrial water consumption are the key variables determining the sustainable development level of water resources in the Yellow River Basin urban agglomeration.

**Keywords:** the Yellow River Basin; urban agglomeration; water resources sustainable development; obstacle factors