西北大学学报(自然科学版)
2026 年 10 月,第 56 卷第 5 期,Oct. ,2026,Vol. 56,No. 5
Journal of Northwest University (Natural Science Edition)

·水资源·

# 黄河“几”字弯城市群水资源安全格局研究

李鸣骥,李晓娟,牛家禾

宁夏大学 地理科学与规划学院,银川 750021

**摘要** 黄河“几”字弯地区发展的关键在于水资源。本研究聚焦于人口产业高度集中的黄河“几”字弯城市群开展水资源安全格局研究。通过构建开发储备、发展利用、处理处置的三维评价体系,采用熵值法赋权与改进三角模型,揭示 2003—2022 年区域水资源安全时空演变特征。结果表明:① 空间格局呈现开发储备“东高西低”、发展利用“中心极化”、处理处置“全域趋优”的分异规律;② 时序变化呈现鲜明区域特征,宁夏开发储备持续薄弱但处理能力稳步提升,呼包鄂乌呈现波动性特征,晋中储备突出但波动剧烈;③ 安全状态的演变总体呈现“整体平稳、区域分异”特征。呼包鄂乌城市群因技术创新呈“核心稳定-边缘波动”趋势,宁夏沿黄城市群呈政策响应型特征,晋中城市群因资源开发呈缓速负向发展,陕北地区通过生态工程实现 T4-T2 级跃升。研究提出分区治理框架,为破解城市群体系资源型水危机、促进流域协同发展提供科学依据。

**关键词** 熵值法;空间格局;城市群体系;水资源安全;黄河“几”字弯地区

**中图分类号**:TV213.4;TV882.1 **DOI**:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2026-05-011

# The water resource security pattern of the Yellow River "Ji"-shaped bend urban agglomeration

Li Mingji, Li Xiaojuan, Niu Jiahe

School of Geographic Science and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

**Abstract** The key to the development of the Yellow River "Ji"-shaped bend region lies in water resources. This study focuses on the water resource security patterns within the highly concentrated urban agglomeration of the Yellow River "Ji"-shaped bend where population and industries are densely clustered. By constructing a three-dimensional evaluation system encompassing development reserves, utilization, and treatment/disposal, and employing the entropy weighting method with an improved triangular model, the study reveals the spatio-temporal evolution characteristics of regional water resource security from 2003 to 2022. Results indicate: ① Spatial patterns exhibit divergent trends: Development reserves show "higher in the east, lower in the west", development utilization displays "central polarization", and treatment/disposal demonstrates "overall improvement across the region". ② Temporal changes reveal distinct regional characteristics: Ningxia's development reserves remain persistently weak but treatment capacity steadily improves. The Hohhot-Baotou-Ordos-Wuhai

**收稿日期**:2026-06-08 修回日期:2026-07-11

**基金项目**:国家自然科学基金(41961028);宁夏自然科学基金(2026AAC030069)。

**第一作者**:李鸣骥,男,副教授,硕士生导师,从事城市地理学、中阿国别与区域地理研究,Li_mj@nxu.edu.cn。

**通信作者**:李晓娟,女,从事城市地理研究,18395089082@qq.com;牛家禾,男,从事人文地理研究,nxunjh@foxmail.com。

urban agglomeration exhibits fluctuating patterns; Jinzhong shows prominent reserves but experiences severe fluctuations. ③ The evolution of security generally presents "overall stability with regional divergence." The Hohhot-Baotou-Ordos-Wuhai urban agglomeration exhibits a "stable core-fluctuating periphery" trend driven by technological innovation. Ningxia's Yellow River cities demonstrate policy-responsive characteristics. Jinzhong's urban cluster shows slow negative development due to resource exploitation. Northern Shaanxi achieved a T4 to T2 tier upgrade through ecological engineering. This study proposes a zoned governance framework, providing scientific basis for resolving resource-based water crises in urban clusters and promoting coordinated basin development.

**Keywords**　entropy value method; spatial pattern; urban agglomeration system; water security; Yellow River "Ji"-shaped bend

我国中西部地区发展的关键在于水资源安全,这对于区域经济社会稳定和生态环境安全有着极其重要的意义[1]。黄河“几”字弯地区是以多个城市群和都市圈共同构成的都市圈体系[2],区域是我国中西部生态脆弱区和水资源匮乏区,也是我国能源富集区和高载能产业集聚区[3]。探究其水资源安全格局对于推进地区生态保护与高质量发展均具有重要的现实意义[4]。

国际研究将水资源安全定义为在气候变化与人类活动双重压力下,通过科学管理确保城市能够持续获得满足健康、生产、生态需求的水量、水质,并有效降低水灾害风险的综合状态[5],其核心要素包括水量安全[6]、水质安全、水害防治[7]和系统韧性[8]。城市水资源安全的评估通常基于压力 - 状态 - 影响 - 响应(PSIR)模型来理解城市系统的复杂性及其与全球环境的关系[9]。也有研究提出基于 DECS(饮用水和人类、生态系统、气候变化和水相关灾害、社会经济因素)四维度的评估框架,以实现城市水资源安全的目标[10]。部分研究认为城市水资源安全受到多种因素的制约[11],包括城市扩张、人口增长、经济发展水平和气候条件等因素均会对城市水资源安全产生影响[12]。水危机时期的地下水在城市供水中扮演着重要角色。在治理策略方面,需要进一步优化产业结构、提高水资源管理和利用效率,并重视地下水的保护,限制或减少城市扩张,以及采用绿色基础设施和社区保护措施[13]。还需要集成城市水管理措施,加强对城市水系统的风险评估和管理[14]。

国内的水安全研究正由定量评价向空间管控转型,但仍存在水环境安全格局构建滞后、缺乏耦合关联分析等问题[15]。国内水资源安全评价指标体系通常基于对水资源安全定义、内涵及评价维度的总结述评,包括数量充足性、水质符合性、可持续性、成本可承受性和防洪安全保证性等多维视角[16]。常用的评价模型构建方法包括层次分析法(AHP)、熵值法、模糊层次分析法、因子分析[17]、聚类分析等[18]。水资源安全的影响因素主要包括气候变化[17]、人口增长与城市化[19]、水资源短缺[20]和水污染[21]等方面。实证研究主要集中在测度水资源安全风险[22]、识别水资源安全状态[23]、提高水资源安全保障程度[24]等方面展开分析。针对水资源安全存在的问题,国内研究提出从建设海绵城市[25]、跨流域调水[26]、雨水收集[27]、污水资源化[28]等方面开展应对策略。

黄河流域长期面临“水少、沙多、水脏、水浑”的复合型水资源矛盾,其中“水少”问题在新时期尤为突出[29],已成为制约流域可持续发展的核心矛盾。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》指出,流域水资源开发利用率高达 80%,远超 40% 的生态警戒线,水资源短缺已成为威胁粮食安全、能源安全与生态安全的根本性瓶颈[30]。从资源禀赋来看,黄河流域水资源总量有限,降水补给不足,加之水土流失问题,导致水资源本底脆弱且呈持续减少趋势。流域内高耗水产业的快速发展进一步加剧了用水矛盾[31]。目前,已有学者对黄河流域部分区域的水资源安全开展评价,如张修宇等[32]对河南省引黄受水区及黄河下游灌区的研究,以及武兰珍等[33]对甘肃段的评估。然而,针对黄河“几”字弯城市群,谭君位等学者[34]探究了“几”字弯北部区域的水资源高效利用路径研究。而对于整个“几”字弯这一关键区域的系统性研究仍属空白。区域横跨宁蒙陕晋四省区,既是国家能源化工核心区,也是生态脆弱型流域典型区,其水资源安全状况直接关系到黄河流域整体可持续发展目标的实现。因此,开展该区

域的水资源安全系统评价具有重要理论与现实意义。

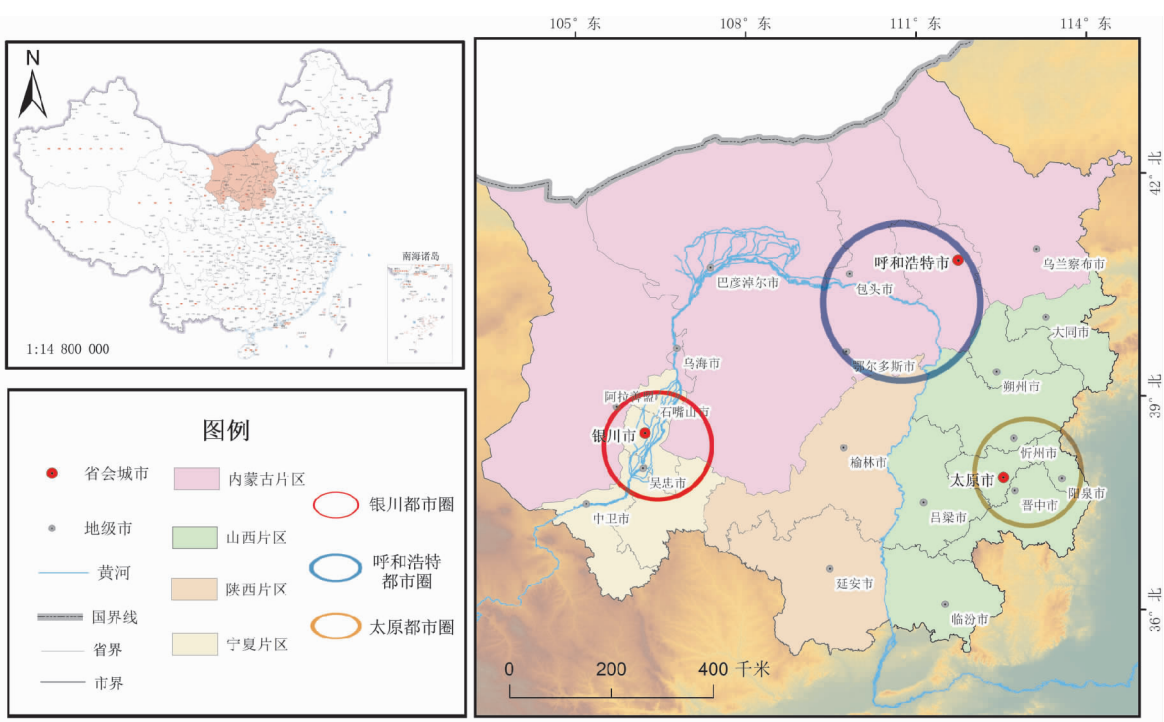
本文从水资源开发储备、水资源发展利用和水资源处理处置构建综合评价框架,引入三角模型,对黄河“几”字弯城市群 2003—2022 年水资源安全的时空格局、演变趋势进行量化解析。研究旨在揭示水资源安全与区域发展的互动机制,识别关键制约因子,为黄河流域差异化水资源管控策略的制定提供科学依据,推动实现以水定产、量水发展的流域治理新路径。

## 1 研究区域与数据来源

### 1.1 研究区概况

黄河“几”字弯地区地处黄河上中游交汇区,横跨甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西五省区,是黄河流域的重要经济腹地,也是我国西部大开发的重要引擎。研究选取银川、中卫、吴忠、石嘴山、呼和浩特、乌海、阿拉善、巴彦淖尔、包头、鄂尔多斯、乌兰察布、榆林、延安、大同、太原、朔州、忻州、吕梁、临汾、晋中、阳泉 21 盟市(见图 1)。水资源不仅是区域内经济社会发展的基础,也是维护生态平衡和保障民生需求的关键。研究区内地理条件复杂多样,水资源丰富但分布不均,存在资源型缺水和基础设施型缺水等问题,随着城市化进程加快,水资源供需矛盾日益突出。

在流域整体层面,依据水资源安全的空间异质性特征,将黄河“几”字弯地区划分为呼包鄂乌城市群、宁夏沿黄城市群、晋中城市群及陕北地区四大功能单元。研究单元划分依据省域行政协调优势,选择呼包鄂乌城市群(内蒙古片区)、宁夏沿黄城市群(宁夏片区)及晋中城市群(山西片区)为研究对象,共同构成黄河“几”字弯城市群体系。划界标准有别于传统城市群定义,晋中城市群涵盖太原、阳泉等 8 个城市,呼包鄂乌城市群则包含内蒙古沿黄沿线的 7 个城市(盟),以此确保研究单元在行政管辖权与流域功能上的双重统一性。陕北地区因仅含榆林、延安两市,未形成网络拓扑结构的最小节点规模,故仅纳入安全水平测度体系。通过以上划分方式,规避跨省行政壁垒对水资源协作网络的干扰,保持流域功能完整性与行政区划可操作性之间的平衡。




注:基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2023)2763 号的标准地图制作,底图无修改。

图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of the research area

### 1.2　数据来源

研究所用统计数据来源于流域各省区的统计年鉴(2004—2023)、水资源公报(2003—2022)、国民经济和社会发展统计公报(2003—2022)等。网站数据包括中经网统计数据库(https://ceidata.cei.cn/)以及 EPSDATA 数据统计网站(https://www.epsnet.com.cn/index.html)。其中统计年鉴相关数据通过各省统计局官网获取,统计公报通过相关信息网站获取。部分缺失数据采用线性插值法补齐。

## 2　研究方法

### 2.1　综合指数评价

遵循科学性、可比性、综合性、系统性等原则[35],重点考虑水资源的自然属性及社会属性之间的交互影响,尤其是水资源对人类生态、生产、生活需求的保障程度以及人类对水资源利用的积极能动作用和适应性,从水资源开发储备、水资源发展利用和水资源处理处置 3 个方面选取 12 个指标构成水资源安全的综合评价指标体系(见表 1)。其中,所有层级的指标都能体现水资源对人类活动的供需满足程度以及人水关系协调或矛盾状况。水资源开发储备条件越好、水资源发展利用效率越高、水资源处理处置水平越强,则水资源安全程度越高。考虑黄河流域的环境特点,研究以 0.2、0.4、0.6、0.8 为分割点将结果划分为极不安全、不安全、临界安全、较安全和非常安全 5 个阶段。本研究使用熵值法确定指标权重,以消除确定权重的主观因素[36]。为消除不同指标单位的影响,使用极差标准化方法对各区县的统计数据进行标准化处理,结合熵值法所得权重,计算水资源安全评价体系下水资源开发储备、发展利用、处置处理的水平,并得出城市水资源安全指数。

$$RFI = \sum_{i=1}^{z} w_i \times Z_{ij} \tag{1}$$

$$DFI = \sum_{i=1}^{z} w_i \times Z_{ij} \tag{2}$$

$$MFI = \sum_{i=1}^{z} w_i \times Z_{ij} \tag{3}$$

$$WSI = \sqrt[3]{RFI \times DFI \times MFI} \tag{4}$$

式中:$Z_{ij}$ 代表第 $i$ 指标在 $j$ 年的标准值,$w_i$ 代表第 $i$ 个指标的权重,RFI(Reserve)、DFI(Develop)、MFI(Manage)分别代表水资源开发储备、发展利用、处置处理水平的综合指数,WSI 为水资源基础安全指数(water resources security index)。

表 1　黄河“几”字弯城市群体系水资源安全评价指标

Tab. 1　Water resource security evaluation indicators for the Yellow River "Ji" Bend urban agglomeration

| 准则层 | 指标层 | 属性 | 权重 |
|---|---|---|---|
| A1 水资源开发储备安全 | 人均水资源量/$m^3$ | + | 0.251 |
| | 地表水资源量/$10^8$ $m^3$ | + | 0.338 |
| | 地下水资源量/$10^8$ $m^3$ | + | 0.171 |
| | 水资源总量折合水深/mm | + | 0.239 |
| A2 水资源发展利用安全 | 万元 GDP 用水量/($m^3$/万元) | | 0.304 |
| | 万元农业产值用水量/($m^3$/万元) | | 0.158 |
| | 万元工业产值用水量/($m^3$/万元) | | 0.159 |
| | 人均生活用水量/($m^3$/人) | + | 0.379 |
| A3 水资源处理处置安全 | 工业污水排放量/$10^8$ t | | 0.101 |
| | 城镇生活污水排放量/$10^8$ t | | 0.240 |
| | 城镇生活污水处理率/% | + | 0.386 |
| | 工业污水处理率/% | + | 0.273 |

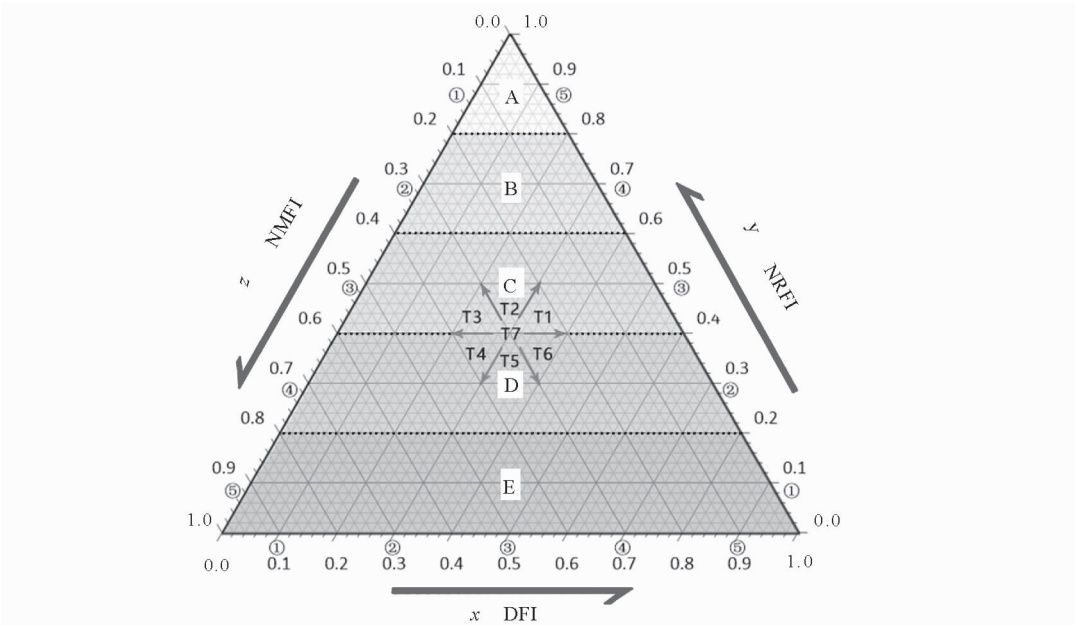
### 2.2　三角模型

三角模型(triangle model)是由美国农业部提出的根据土壤中沙土、壤土和黏土的含量和比例来确定土壤类型的分析方法[37]。本研究在城市群水资源安全格局研究中,引入和修正三角模型作为水资源安全格局水平阶段划分的测度模型[38]。水资源安全评价体系中开发储备、发展利用、处置处理 3 种安全体系之间相互依存。

三角模型中三系统合值为 1,但城市群内各城市的水资源安全系统内部不具备明确的线性关系。参考相关研究[39],为修正模型使其符合原模型的计算逻辑,采取非开发储备指数(NRFI = 1 − RFI)和非处置处理指数(NMFI = 1 − MFI)。NRFI 与 NMFI 表示对城市水资源的储备与处置发展具

有不利影响的抽象因素。使用 Grapher 软件绘制三角形模型,可使 DFI、NRFI、NMFI 的相对数值之和等于 1,符合三角模型要求。如图 2 所示,水资源安全格局复合功能三角形呈等边状,$x$、$y$、$z$ 轴分别代表 DFI、NRFI 和 NMFI,将三角形内划分为 5 个不同的安全阶段等级(见表 2)。同时根据 3 个指数的相对比例变化,在三角模型内部具有 7 个可能的发展稳定程度趋势,代表黄河“几”字弯城市群体系水资源安全在各年份发展中具有的稳定性(见表 3)。

具体而言,本研究分别测算 2003—2022 年各城市群的水资源安全三角模型坐标,并将 20 个年度测度点按照时间先后顺序依次连接,形成各城市群水资源安全的时序演变轨迹,据此结合相邻年份的指标变化特征及表 3 的判别标准,识别不同年份的水资源安全相对演变趋势。




注:①较低水平;②初级水平;③中等水平;④高等水平; ⑤极高水平

图 2 水资源安全三角模型

Fig. 2 Triangular model of water resource security

表 2 水资源安全阶段评价

Tab. 2 Stage evaluation of water resource security

| 区域 | 指标值范围 | | | 安全水平阶段 |
|---|---|---|---|---|
| | 非储备安全 | 非处置安全 | 发展安全 | |
| A | (0, 0.2] | (0, 0.2] | (0.8, 1.0] | 非常安全 |
| B | (0.2, 0.4] | (0.2, 0.4] | (0.6, 0.8] | 较安全 |
| C | (0.4, 0.6] | (0.4, 0.6] | (0.4, 0.6] | 基本安全 |
| D | (0.6, 0.8] | (0.6, 0.8] | (0.2, 0.4] | 不安全 |
| E | (0.8, 1.0] | (0.8, 1.0] | (0, 0.2] | 极不安全 |

表 3 水资源安全相对演变趋势评价

Tab. 3 Evaluation of relative evolution trend of water resource security

| 趋势 | 变化范围 | 指数变化相对方向 | | | 发展趋势 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 非储备安全 | 非处置安全 | 发展安全 | |
| T1 | (0°, 60°] | ↑ | ↑ | ↓ | 较平稳趋势 |
| T2 | (60°, 120°] | ↑ | ↓ | ↓ | 稳定趋势 |
| T3 | (120°, 180°] | ↑ | ↓ | ↑ | 较平稳趋势 |
| T4 | (180°, 240°] | ↓ | ↓ | ↑ | 较不平稳趋势 |
| T5 | (240°, 300°] | ↓ | ↑ | ↑ | 不稳定趋势 |
| T6 | (300°, 360°] | ↓ | ↑ | ↓ | 较不平稳趋势 |
| T7 | 无变化 | | | | 无变化 |

注:↑指上升状态,↓指下降状态。

## 3　研究结果

### 3.1　水资源安全空间格局特征

黄河“几”字弯城市群的 3 种水资源安全空间格局具有明显的分异性,本研究按照水资源开发储备安全(见图 3)、发展利用安全(见图 4)和处理处置安全(见图 5)3 种水资源安全体系对黄河“几”字弯城市群的水资源安全空间格局特征进行分析。

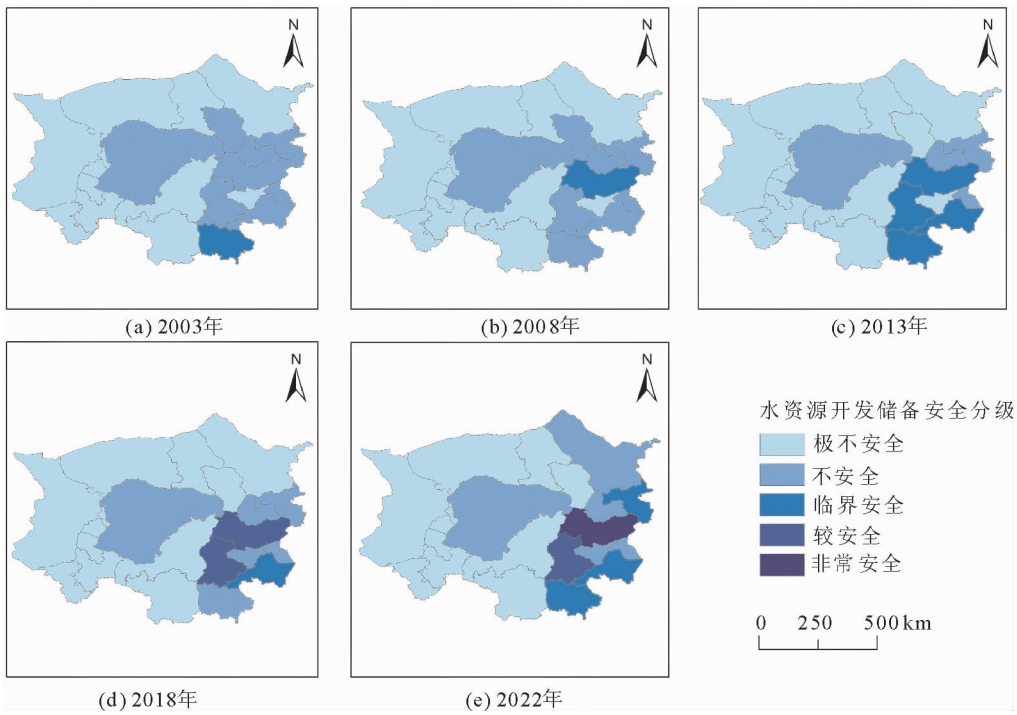



图 3　水资源开发储备安全空间格局

Fig. 3　Spatial pattern of water resource development and reserve security

黄河“几”字弯城市群体系内部水资源开发储备安全空间格局呈现出明显的“东高西低”特征,其差异本质是“先天资源优势”与“后天需求结构”的双重失衡。具体表现为晋中城市群的水资源开发储备安全等级显著高于宁夏沿黄城市群、呼包鄂乌城市群和陕北地区。一方面源于自然禀赋与制度约束所决定的供给差异,东部晋中城市群本地水资源丰富。另一方面西部城市群以高耗水产业为主导,与晋中城市群相对低耗水,多元的产业结构形成较大反差。这种供给与需求在空间上的错配,最终使得西部城市群安全等级持续低迷,而晋中城市群则保障水平较高。从安全分级水平来看,宁夏沿黄城市群和陕北地区始终处于极不安全状态,呼包鄂乌城市群仅有鄂尔多斯始终为不安全等级,乌兰察布于 2022 年也从极不安全提升至不安全等级。晋中城市群中南部安全等级较高,2022 年忻州市达到非常安全等级。

黄河“几”字弯城市群体系内部的水资源发展利用安全空间格局具有明显的阶段性过渡特点,呈现出“中心突出性”的空间特征,且随着时间变化,安全等级产生整体性的提升。具体表现为 2003 年鄂尔多斯、石嘴山、银川、延安和榆林市等居于中心地区的城市安全水平达到较安全等级及以上。2022 年,节水技术的跨区域扩散,推动全域用水效率提升。同时,最严格水资源管理制度(三条红线)通过用水总量控制与效率红线倒逼。政策与技术的双轮驱动,促使安全格局从“局部非常安全”向“全域非常安全”跃迁。从而形成了各城市的水资源利用安全水平均达到较安全及以上,中心地区达到非常安全等级的空间格局。

黄河“几”字弯城市群水资源处理处置安全空间格局呈现显著的动态演化特征。研究期内(2003—2022 年),空间格局经历了从 2003 年“中心突出”到 2013 年“东西高、中间低”,最终发展为全域高安全水平的演变过程。环境基础设施建设的区域不均衡性使早期重点投资区域获得先发优势,这使得空间格局的高水平地区重心早期位于中部及西北部;2013 年产业转型进程的差异导致西部能源城市与东部城市通过循环经济项目实

现处理水平的快速提升,高水平地区迁移至西部;而重点生态功能区更严格的排放标准则在一定程度上延缓了太原、呼和浩特等核心城市的达标进程,因此 2022 年除包头、呼和浩特和太原市外,均达到非常安全等级。研究表明,基础设施建设、产业转型与政策调控的三重驱动机制共同塑造了区域水资源处理处置安全格局的时空分异特征。

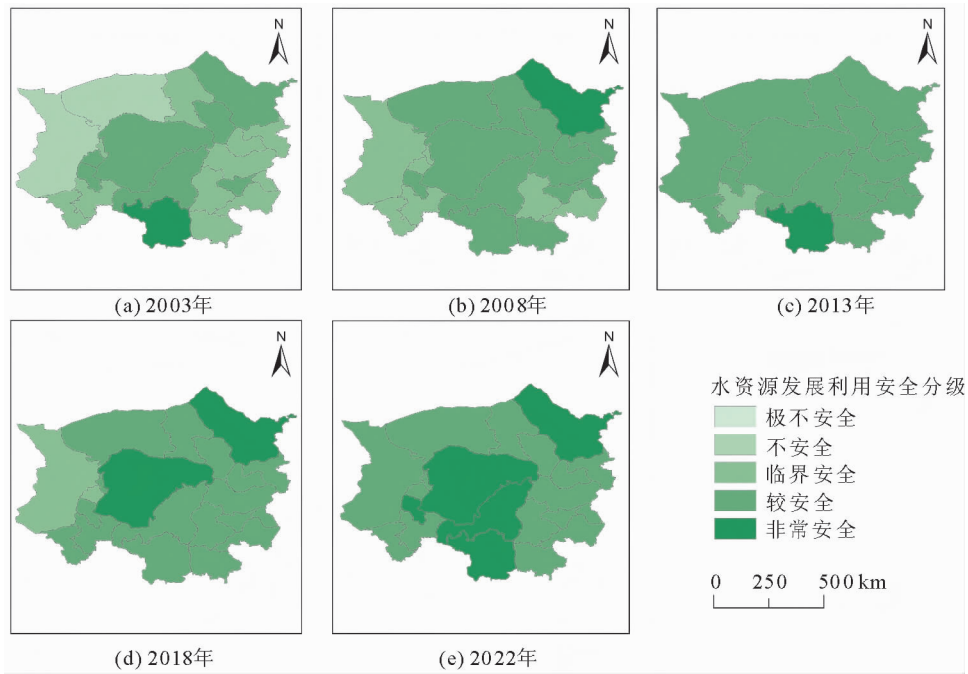



图 4 水资源发展利用安全空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of water resource development and utilization security

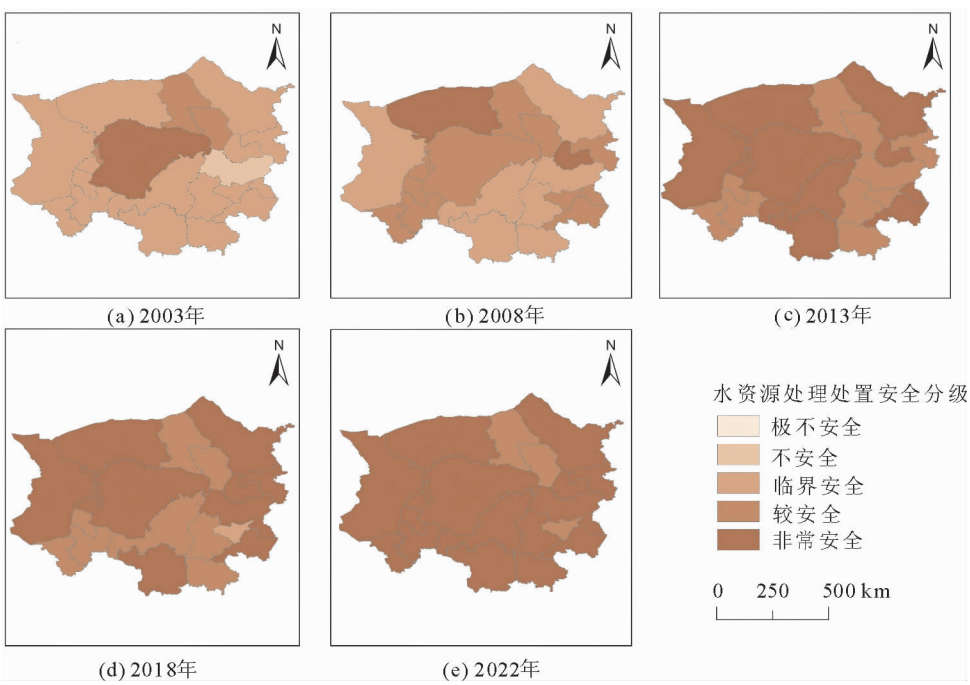



图 5 水资源处理处置安全空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of water resource treatment and disposal

### 3.2 水资源安全时序变化特征

黄河“几”字弯城市群体系的水资源安全时序变化特征呈现出明显的地域差异。

宁夏沿黄城市群以银川都市圈为核心,共包含 4 个城市(见图 6),水资源基础安全变化的整体趋势为发展利用和处理处置安全远高于开发储

备安全。宁夏四地市的开发储备安全基本处于动态平衡的状态,但均值不超过 0.2,安全水平从高到低排序为银川 > 石嘴山 > 中卫 > 吴忠。水资源处理处置安全基本均高于开发利用安全水平,处理处置安全最高为石嘴山(0.813)。此外,处理处置安全与开发利用安全呈现出近似趋同的发展趋势,均表现为逐渐提升的态势。

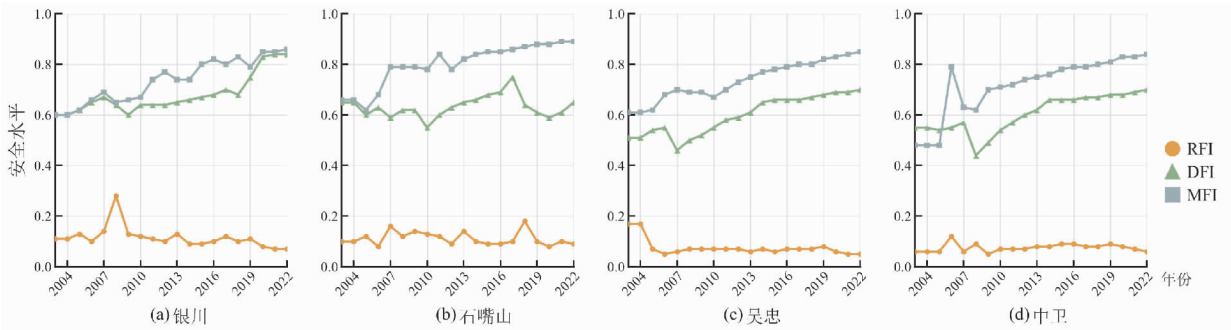



图 6　水资源基础安全时序特征(宁夏沿黄城市群)

Fig. 6　Temporal characteristics of basic safety of water resources (Ningxia urban agglomeration along the Yellow River)

呼包鄂乌城市群以呼和浩特都市圈为核心,共包含 7 个城市(见图 7),水资源安全变化的整体趋势同样为发展利用和处理处置安全远高于开发储备安全。呼和浩特与包头市变化趋势类似,发展利用安全和处理处置安全较高且稳定,但安全水平最高值均不超过 0.8,储备安全呈现逐渐降低的变化趋势。乌兰察布与阿拉善左旗的处理处置安全变化相同,呈现出增 - 减 - 增的趋势。鄂尔多斯和巴彦淖尔变化波动较大,乌海的发展和储备安全水平相对较低,但处理处置安全水平较高。开发储备安全水平最高为鄂尔多斯(0.298),发展利用安全水平最高为乌兰察布(0.859),处理处置安全最高为乌海(0.849)。

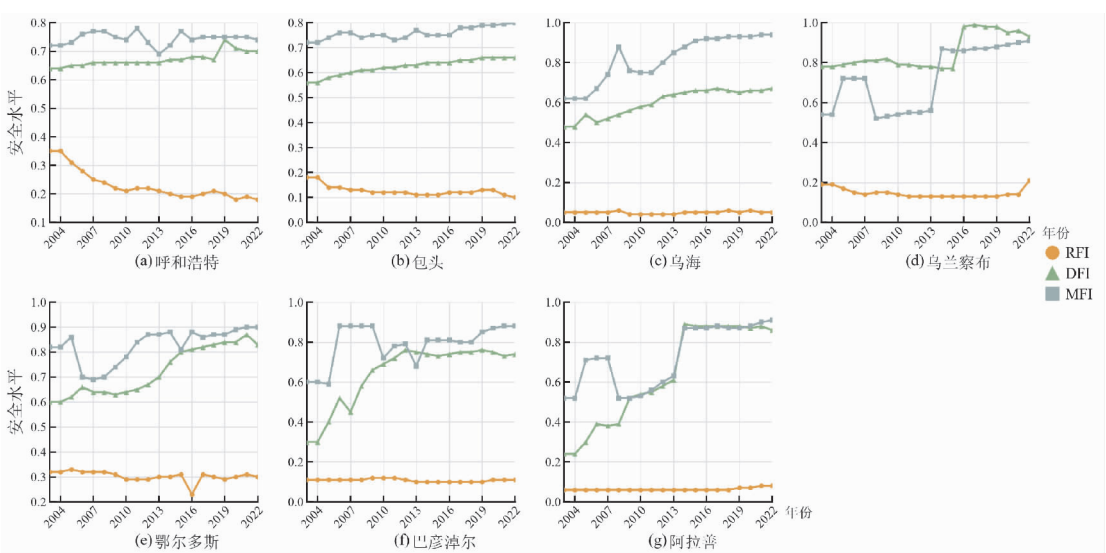



图 7　水资源基础安全时序特征(呼包鄂乌城市群)

Fig. 7　Time sequence characteristics of basic security of water resources (Hohhot-Baotou-Ordos-Wuhai urban agglomeration)

晋中城市群以太原都市圈为核心,共包含 8 个城市(见图 8),水资源安全变化的整体趋势与前两个城市群有较大区别,水资源的开发储备安全等级相对较高且波动较大。太原市的发展利用安全和处理处置安全水平较为拟合,但最高不超过 0.7,开发储备安全水平波动上升。大同、阳泉和朔州的开发储备安全变化程度相似,且发展利用安全水平均在 0.610 左右,处理处置安全提升较大,由 2003 年的 0.5 提升至 2022 年 0.88 左右。忻州、吕梁、晋中和临汾的开发储备安全水平均相对较高,平均值分别为 0.504、0.399、0.401 和 0.357,但变化波动非常大。忻州的处理处置

安全水平提升幅度最大,由 2003 年的 0.337 提升至 2022 年的 0.872。晋中城市群 8 个城市的发展利用安全水平较为均衡,基本维持在 0.6 左右,储备安全是黄河“几”字弯地区水平最高,均值达到 0.323,远高于其他城市群,表明山西省水资源的开发储备安全水平相对较好。此外,发展利用和处理处置安全的平均水平低于其他城市群。

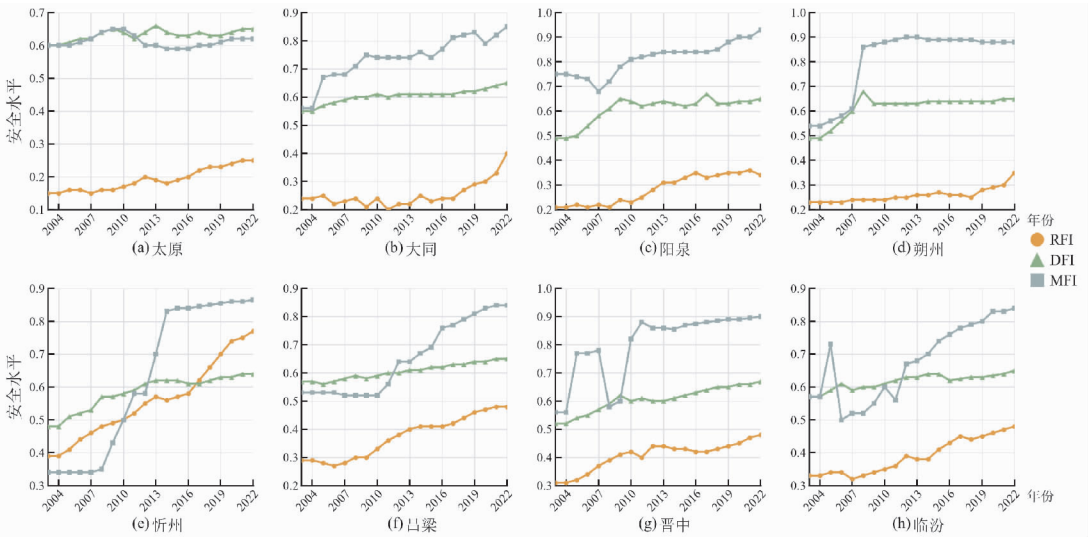



图 8 水资源基础安全时序特征(晋中城市群)

Fig. 8 Time sequence characteristics of basic safety of water resources (Jinzhong urban agglomeration)

黄河“几”字弯城市群体系的陕北地区包括延安和榆林两个城市(见图 9)。水资源基础安全变化的整体趋势为发展利用和处理处置安全远高于开发储备安全;此外均呈现出处理处置安全首先低于开发利用安全水平,在 2012 年后陆续超过开发利用安全的反超趋势;开发储备安全逐年上升但均未能超过 0.2 的阈值。陕北地区的水资源利用安全水平相对较高,但处理处置安全水平变化较大,呈现出近似指数型的变化趋势。而储备安全有待进一步提升。

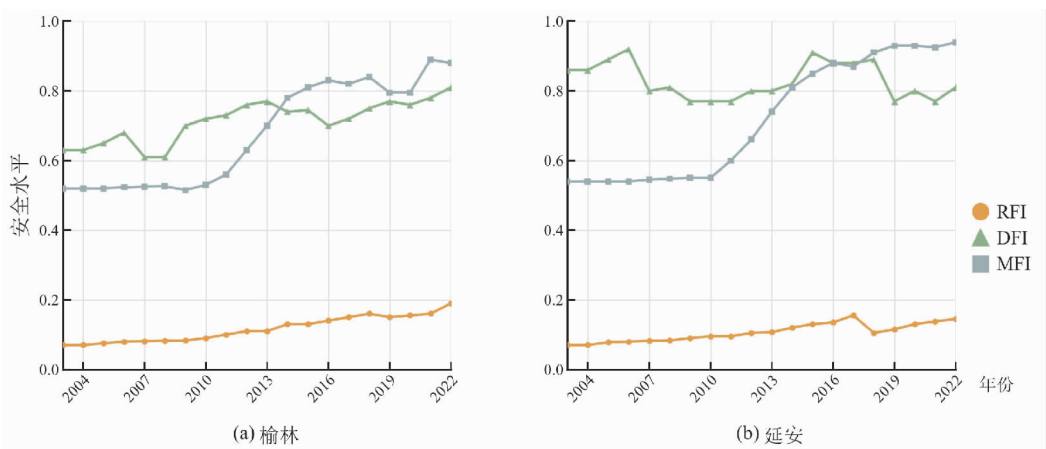



图 9 水资源基础安全时序特征(陕北地区)

Fig. 9 Time sequence characteristics of basic security of water resources (Northern Shaanxi region)

### 3.3 水资源安全状态及演变趋势分析

本文研究时段为 2003—2022 年,共 20 年。在三角模型测度过程中,分别计算各城市群 20 个年度的水资源安全评价结果,并将各年度测度结果依照时间先后顺序连接,形成相应城市群的水资源安全演变轨迹。因此,图 10 ~ 13 中的各数据点分别对应 2003—2022 年的年度测度结果,轨迹则反映了水资源安全三维指标相对结构随时间变化的特征。

基于黄河“几”字弯城市群体系内部各城市的水资源基础安全指数水平,可以进一步得出水资源安全阶段的三角模型测度结果。水资源安全的演变阶段方面,黄河“几”字弯城市群所有城市在 2003—2022 年间均处于基本安全阶段。呼包

鄂乌城市群和宁夏沿黄城市群的安全阶段演变较为集中;晋中城市群的安全阶段演变最为平滑,但呈现下降趋势;陕北地区安全阶段演变跨度较大,提升较为明显。综合来看,研究区域内整体水资源安全阶段分布状况较为良好。

对水资源安全水平阶段的演变分析中划分状态:T2 的稳定趋势表示演变态势良好,有着较快的发展速率;T1 和 T3 为较平稳趋势,表示有向好发展的趋势,但速率相比 T2 较慢;T4 和 T6 为较不平稳趋势,表示发展态势呈现向负面发展的趋势,但速率较慢;T5 不稳定趋势表示发展方向为完全负向,发展态势不容乐观。T7 无变化状态出现概率较低,在本研究中未出现。

从呼包鄂乌城市群的安全水平演变趋势来看(见图 10),其水资源安全阶段在 2005 和 2008 年均无明显变化,2022 年为稳定发展趋势,2004 年、2009—2013 年、2015—2020 年为较平稳发展趋势,2013—2015 年和 2021 为较不平稳趋势,2007 年为不稳定趋势。呼包鄂乌城市群安全阶段演变呈现核心稳定、边缘波动的特征,2005 年与 2008 年因鄂尔多斯煤化工循环水系统投运及包头稀土产业升级,推动 T2 级稳定趋势形成;2013—2015 年受乌兰察布风电基地建设挤占生态用水影响,安全指数波动进入 T4 级较不平稳阶段。

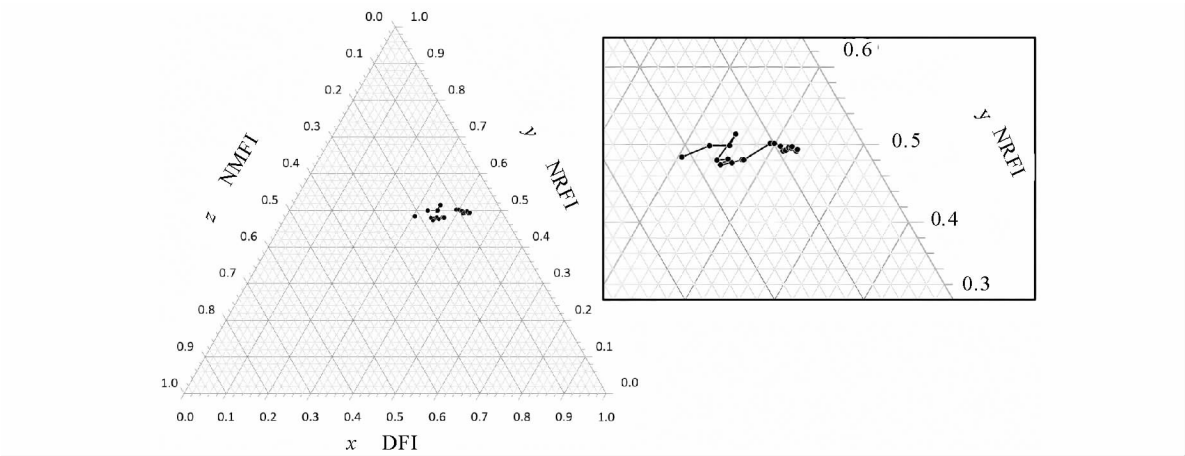



图 10　水资源安全三角模型测度结果(呼包鄂乌城市群)

Fig. 10　Measurement results of triangular model of water resource security (Hohhot-Baotou-Ordos-Wuhai urban agglomeration)

宁夏沿黄城市群的安全水平演变趋势(见图 11),水资源安全阶段在 2013 年和 2015—2016 年为稳定发展趋势,2003—2006 年、2008 年、2012 年、2018—2022 年为较平稳趋势,2008—2011 年、2014 年为不稳定发展趋势,2007 年和 2017 年为不稳定趋势。宁夏沿黄城市群表现出政策响应型的演进特征,2013 年《宁夏节水型社会建设规划》实施推动进入 T2 稳定趋势,2017 年石嘴山火电行业用水强度反弹导致安全指数回落至 T5 不稳定区间。

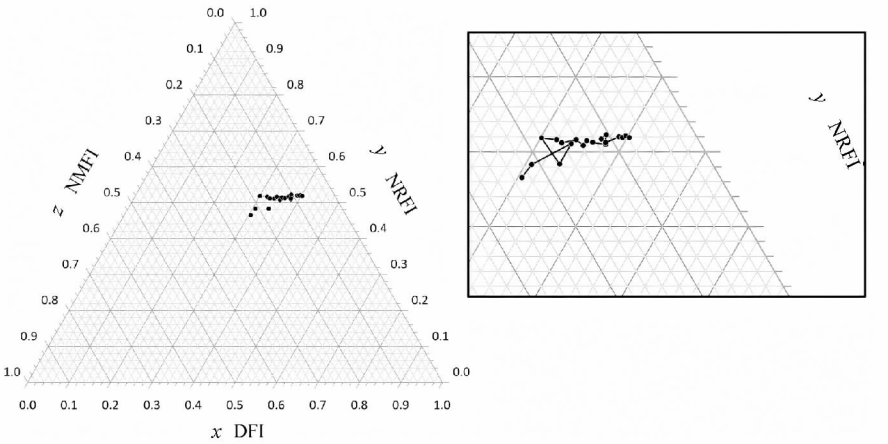



图 11　水资源安全三角模型测度结果(宁夏沿黄城市群)

Fig. 11　Measurement results of triangular model of water resource security (Ningxia urban agglomeration along the Yellow River)

晋中城市群的安全水平演变趋势(见图 12),水资源安全阶段演变程度较为平稳,波动幅度较小,但整体呈现出负向的发展趋势。具有较平稳发展趋势的年份为 2004 年、2008—2010 年、2012—2015 年以及 2018 年。其余年份除 2005 年和 2011 年外,均为较不平稳的发展趋势,发展呈现缓速负向,而 2005 和 2011 年表现为不稳定趋势,表明其发展态势呈现出完全负向的状态。晋中城市群安全阶段演变呈现状态集中、全域缓降的特殊趋势,2004—2015 年间虽维持 T1/T3 级较平稳趋势,但非储备安全指数年均递减 0.9%,反映煤炭资源高强度开发对地下水储量的持续性损耗。2017 年阳泉矿井水回用工程投运短暂拉升处置安全指数至 T2 级,但因忻州农业面源污染加剧,整体仍呈现全域失衡的负向演进。

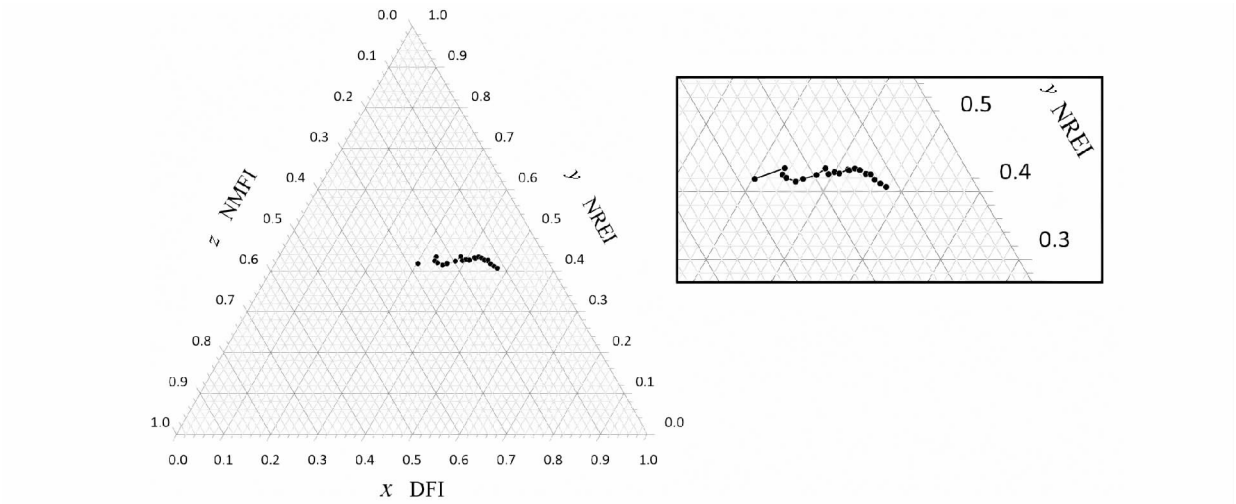



图 12 水资源安全三角模型测度结果(晋中城市群)

Fig. 12 Measurement results of triangular model of water resource security (Jinzhong urban agglomeration)

陕北地区的安全水平演变趋势(见图 13),水资源安全阶段在 2009 年之前波动较大,在平稳与不平稳的状态间反复波动,2009—2013 年、2015—2016 年、2019 年和 2022 年为较平稳趋势,2014 年、2017 年和 2020—2021 年为较不平稳趋势。陕北地区安全阶段实现跨越式提升,榆林通过煤油气共生资源协同开发技术,使利用安全指数 2012—2022 年增长 214%,驱动区域从 T4 级跃升至 T2 级稳定趋势;延安退耕还林工程则通过提升生态储水能力,2019 年后处置安全指数稳定在 0.85 阈值以上,形成开发与保护协同的演进范式。

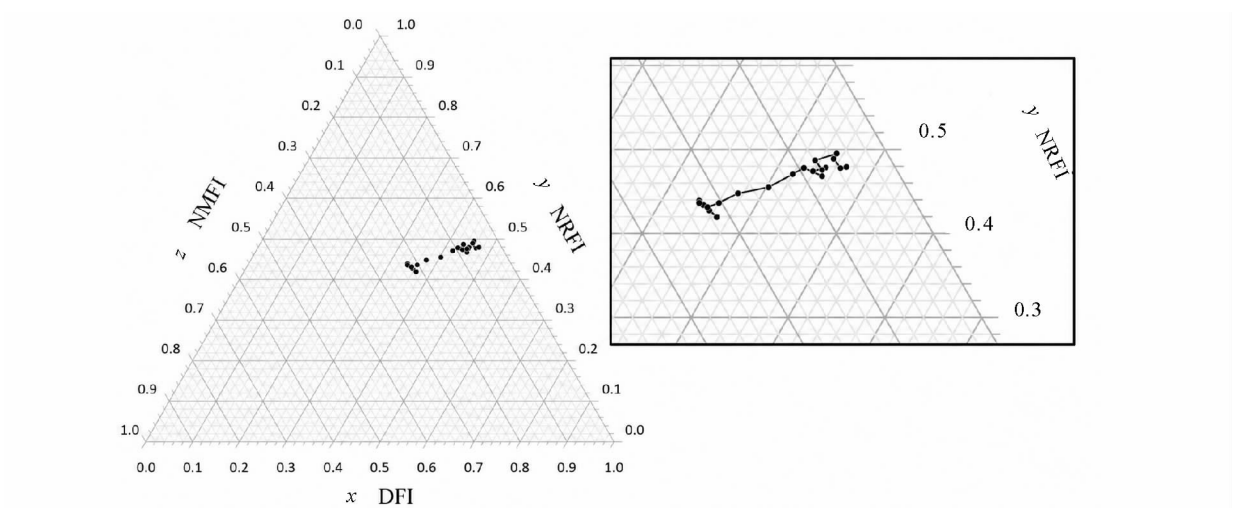



图 13 水资源安全三角模型测度结果(陕北地区)

Fig. 13 Measurement results of triangular model of water resource security (Northern Shaanxi Region)

黄河“几”字弯城市群体系内部的水资源基础安全水平虽整体处于相对安全的状态,但区域内部差异明显,且部分区域存在显著的不稳定趋势,需针对不同省份的具体情况制定差异化的水资源管理和保护策略,以确保区域水资源的可持续利用和生态安全。同时,加强对水资源安全的长期监测和预警机制建设,对于提前识别风险、及时采取措施也具有重要意义。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

1)晋中城市群开发储备安全综合水平较高,均值达 0.323,显著高于其他区域,但其发展利用安全水平因重工业占比偏高而受限,2022 年太原发展利用安全指数仅 0.68。宁夏沿黄城市群通过制度创新推动处理处置安全提升,石嘴山处置安全指数达 0.813,但开发储备安全均值不足 0.2,暴露地表水依赖风险。呼包鄂乌城市群受煤化工产业扩张影响,鄂尔多斯开发储备安全指数达 0.298,但乌兰察布因生态补水不足,2015 年处置安全指数下降 12.7%。陕北地区安全指数跃升,榆林发展利用安全指数 2012—2022 年增长 214%,但开发储备安全仍低于 0.2 阈值。

2)空间格局上各城市群开发储备安全呈现“东高西低”特征,晋中城市群中南部安全等级显著优于其他区域;发展利用安全形成“中心突出”格局,鄂尔多斯、银川等核心城市长期维持较安全等级;处理处置安全则从“中心突出”演变为全域覆盖,2022 年除包头、呼和浩特和太原外均达非常安全等级。

3)黄河“几”字弯城市群整体处于水资源基本安全阶段,但区域差异显著。呼包鄂乌城市群呈现“核心稳定 - 边缘波动”特征,工业技术升级推动 T2 级稳定趋势,而风电建设引发的生态用水挤占导致阶段性 T4 级波动;宁夏沿黄城市群呈现政策响应型演变,节水政策实施后形成稳定趋势,但火电用水反弹引发 T5 级倒退;晋中城市群因煤炭开发导致非储备安全指数年均下降 0.9%,呈现全域缓降态势;陕北地区通过资源协同开发与生态修复实现从 T4 到 T2 级的跃升。研究表明,水资源安全演变具有空间异质性与多因素驱动耦合特征,建议建立分区治理体系,重点防控资源型城市的结构性水危机与工程性生态胁迫,强化技术干预与动态监测机制,以保障区域水安全可持续发展。

### 4.2 建议

1)省际差异与区域强化。研究揭示黄河“几”字弯城市群水资源安全存在显著的省际差异,这种分异根植于区域资源禀赋与产业结构的深层耦合关系。晋中城市群得益于山西盆地地下水富集优势,开发储备安全均值显著高于其他区域,但其发展利用安全受制于重工业占比过高,揭示“资源诅咒”效应下的结构性矛盾。宁夏沿黄城市群通过节水政策创新实现处理处置安全提升,但开发储备安全均值不足 0.2,暴露过度依赖地表水的脆弱性,印证了干旱区水资源安全对制度设计的强依赖性。建议晋中城市群通过产业绿色转型降低用水强度,宁夏地区需加快地下水战略储备工程建设,以强化区域水资源安全韧性。

2)空间格局分异与区域协同发展。水资源安全空间分异呈现“开发储备东高西低、发展利用中心极化、处理处置全域趋优”的三维特征。晋中城市群中南部的高开发储备等级与山西煤炭采空区地下水富集密切相关,而鄂尔多斯、银川等中心城市的持续高利用安全等级则映射出经济集聚效应下的技术溢出优势。值得注意的是,处理处置安全的全域提升表明污水处理技术进步具有强扩散性,但包头、呼和浩特等核心城市的滞后反映基础设施更新与人口增长间的动态失衡。建议构建跨区域水权交易机制,推动晋中地下水储备向宁夏、陕北地区进行战略补给,同时建立核心城市水处理技术转移平台,促进空间协同。

3)水资源安全稳定性与区域差异应对。不同城市群稳定性机制存在本质差异:呼包鄂乌城市群的“核心稳定 - 边缘波动”特征源于煤化工技术升级的正向驱动与生态用水挤占的负向胁迫;晋中城市群的全域缓降趋势则揭示了资源型城市“开发 - 损耗”路径依赖的锁定效应。相较之下,陕北地区通过榆林资源协同开发与延安生态修复形成的“开发 - 保护”双驱模式,为脆弱生态区提供了可推广的范式。建议建立三阶差异化应对策略,对波动型区域实施生态用水红线动态管控,对衰退型区域设定煤炭开发地下水损耗阈值,对跃升型区域完善生态补偿制度,最终通过多尺度调控实现全域稳定。

## 参考文献


[1] Bao C, Fang C L. Water resources flows related to urbanization in China: Challenges and perspectives for water management and urban development[J]. Water Resources Management, 2012, 26(2): 531-552.

[2] 张伟. 都市圈的概念、特征及其规划探讨[J]. 城市规划,2003(6):47-50.
Zhang W. The Basic Concept, characteristics and planning of metropolitan [J]. Urban Planning, 2003 (6): 47-50.

[3] 巩雪娇. 碳排放约束、产业集聚与经济高质量发展研究: 基于黄河"几"弯都市圈实证研究[D]. 兰州:兰州大学,2022.

[4] 胡正塬, 张振中, 阿思根, 等. 加快"黄河'几'字弯"都市圈协同发展打造生态保护与高质量发展先行区——我社新发展研究院主持召开"黄河'几'字弯"先行发展座谈会[J]. 中国经贸导刊, 2020 (5): 1-3.

[5] Aboelnga H T, Ribbe L, Frechen F B, et al. Urban water security: Definition and assessment framework [J]. Resources, 2019, 8(4): 178.

[6] Vörösmarty C J, Mcintyre P, Gessner M, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. Nature, 2010, 467(7315): 555.

[7] Andimuthu R, Kandasamy P, Mudgal B V, et al. Performance of urban storm drainage network under changing climate scenarios: Flood mitigation in Indian Coastal City [J]. Scientific Reports, 2019, 9(1):2045-2322.

[8] He C Y, Liu Z F, Wu J G, et al. Future global urban water scarcity and potential solutions[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 4667-4667.

[9] Hoekstra a Y, Buurman J, Ginkel K C H V. Urban water security: A review[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(5): 053002.

[10] Alwathaf Y, Abdel Kawy W A, Al-Areeq N, et al. Urban water security index assessment for Ibb city, Yemen: Comprehensive vision[J]. Water Conservation & Management, 2023, 7(1): 28-35.

[11] Shi C H, Hu B. Synthetically evaluating the security of urban water supply[J]. Resources Science, 2007, 29 (3): 80-85.

[12] Dãaz-caravantes E R, Zuniga-teran A, Martãn F, et al. Urban water security: A comparative study of cities in the arid Americas:[J]. Environment and Urbanization, 2020, 32(1) :275-294.

[13] Jiao Y, Chen S, Yuan J C. Practical research on protection and utilization of urban spatial water elements from the perspective of healthy cities[C]//E3S Web of Conferences, 2021:DOI:10.1051/e3sconf/202126-103036.

[14] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域水安全格局构建:研究进展及概念框架[J]. 生态学报,2016,36(11): 3137-3145.
Peng J, Zhao H J, Liu Y X, et al. Progress and conceptual framework of regional water security pattern construction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (11): 3137-3145.

[15] 邓捷铭,贾绍凤. 区域水安全评价指标体系构建与应用[J]. 水科学进展,2022,33(1):48-56.
Deng J M, Jia S F. Indicators system construction and application of regional water security[J]. Advances in Water Science, 2022,33(1): 48-56.

[16] 张玉泽,王爽. 黄河流域水资源安全评价及时空格局[J]. 人民黄河,2023,45(1):25-29.
Zhang Y Z, Wang S. Evaluation of water resources security and spatial-temporal pattern of Yellow River basin[J]. Yellow River, 2023, 45(1): 25-29.

[17] 孙才志, 迟克续. 大连市水资源安全评价模型的构建及其应用[J]. 安全与环境学报, 2008(1): 115-118.
Sun C Z, Chi K X. Establishment and application of the assessment model for water resources safety in Dalian[J]. Journal of Safety and Environment, 2008 (1): 115-118.

[18] 陆咏晴, 严岩, 丁丁, 等. 我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响[J]. 生态学报, 2018(4): 1470-1477.
Lu Y Q, Yan Y, Ding D, et al. The variation trend of extreme drought weather in China and its impact on urban water resources pressure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018(4): 1470-1477.

[19] 刘华. 上海市水资源安全利用理论及应用研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.

[20] 谢振华, 张兆吉, 邢国章, 等. 华北平原典型城市地下水供水安全保障分析[J]. 资源科学, 2009 (3): 400-405.
Xie Z H, Zhang Z J,Xing G Z, et al. Analysis of the ground water-supply security about the representative cities in North China Plain [J]. Resources Science, 2009(3): 400-405.

[21] 游文荪, 丁惠君, 许新发. 鄱阳湖水生态安全现状评价与趋势研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009 (12): 1173-1180.
You W S, Ding H J, Xu X F. Study on the status evaluation and trend of water ecosystem security in Poy-

ang Lake [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009(12): 1173-1180.

[22] 梁缘毅, 吕爱锋. 中国水资源安全风险评价[J]. 资源科学, 2019(4): 775-789.
Liang Y Y, Lyu A F. Risk assessment of water resources security in China [J]. Resources Science, 2019(4): 775-789.

[23] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008(4): 401-409.
Jin J L, Wu K Y, Wei Y M. River basin water security assessment model based on connection number[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008 (4): 401-409.

[24] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. 自然资源学报, 2012(2): 204-214.
Gao Y Y, Wang H R, Xu X Y, et al. Construction and application of water resources security evaluation model: Taking Quanzhou City, Fujian Province as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2012(2): 204-214.

[25] 王文瀚. 融入海绵城市理念的城市水系统规划[J]. 水资源开发与管理, 2021(6): 38-44,72.
Wang W H. Urban water system planning integrated with sponge city concept[J]. Water Resources Development and Management, 2021(6): 38-44,72.

[26] 陈志. 国外城市水务管理经验分析及环境保护[J]. 中国建设信息(水工业市场), 2009(7): 39-42.

[27] 刘新有, 黄英, 史正涛. 城市雨水资源利用对水安全的作用及其利用途径[J]. 中国水土保持, 2009(7): 39-41.

[28] 李玉鲲, 李玉鹏, 李明涛. 浅谈我国污水处理及污水资源化[J]. 水资源保护, 2004(1): 3-5.

[29] 王浩,赵勇. 新时期治黄方略初探[J]. 水利学报, 2019,50(11):1291-1298.
Wang H, Zhao Y. Preliminary study on harnessing strategies for Yellow River in the new period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1291-1298.

[30] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.
Xia J, Zhu Y Z. The Measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 262-269.

[31] 杨盼,梁伟,严建武,等. 黄河流域多尺度水系统结构变化特征[J]. 中国沙漠, 2021,41(6):223-234.
Yang P, Liang W, Yan J W, et al. Multi-scale analysis of water system structure changes in the Yellow River Basin[J]. Journal of Desert Research, 2021,41(6): 223-234.

[32] 张修宇,王李良,杨淇翔. 河南省引黄受水区水资源安全综合评价[J]. 人民黄河,2021,43(9):90-93.
Zhang X Y, Wang L L, Yang Q X. Comprehensive evaluation of water resources security in the Yellow River water receiving area of Henan Province[J]. Yellow River, 2021, 43(9): 90-93.

[33] 武兰珍,赵霞,成艺,等. 黄河流域甘肃段水资源承载力与水资源安全评价[J]. 排灌机械工程学报, 2021,39(9):897-903.
Wu L Z, Zhao X, Cheng Y, et al. Water resources carrying capacity and water resources security assessment in Gansu section of Yellow River Basin [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(9): 897-903.

[34] 谭君位,霍再林,任东阳,等. 黄河流域几字弯北部水资源高效利用路径研究 [J]. 中国工程科学, 2025, 27 (4): 152-161.
Tan J W, Huo Z L, Ren D Y, et al. Pathways for efficient utilization of water resources in the Northern Jiziwan Region of the Yellow River Basin[J]. Strategic Study of CAE, 2025, 27 (4): 152-161.

[35] 鲍超, 邹建军. 基于人水关系的京津冀城市群水资源安全格局评价[J]. 生态学报, 2018(12): 4180-4191.
Bao C, Zou J J. Evaluation of water resource security patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on human-water relationships [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018(12): 4180-4191.

[36] 刘金凤, 吴文恒, 万赟, 等. 近 20 年黄河流域城乡耦合协调的演化特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2023(3): 413-422,429.
Liu J F, Wu W H, Wan Y, et al. Evolutionary characteristics and influencing factors of urban-rural coupling coordination in Yellow River Basin in recent 20 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023(3): 413-422,429.

[37] Xu F L, Zhao S S, Dawson R W, et al. A triangle model for evaluating the sustainability status and trends of economic development [J]. Ecological Modelling, 2006, 195(3/4): 327-337.

[38] 郑炜. 基于三角模型的城市水资源安全动态评价——以广州市为例 [J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(5): 68-73,80.

Zheng W. Dynamic evaluation on regional water resource security based on trigonometric model: Taking Guangzhou as an example [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(5): 68-73, 80.

[39] 姚岚, 吴次芳, 吕添贵, 等. 基于三角模型的喀斯特地区土地利用系统健康评价[J]. 农业工程学报, 2015(14): 246-254.

Yao L, Wu C F, Lv T G, et al. Health assessment of land use system on Karst region based on triangle model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015(14): 246-254.

(编 辑 亢小玉)