

陕西省水资源空间均衡量化评估分析

路婷婷¹, 王 广²

(1. 陕西省水利发展调查与引汉济渭工程协调中心, 陕西 西安 710004; 2. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250013)

【摘要】本研究基于生产、生活和生态三个维度, 结合干旱影响, 建立了全面的水资源空间均衡评价指标体系, 并采用一般剥夺性指数 (GDI) 对陕西省的水资源空间均衡 (WRSE) 进行评估。研究结果显示: 2012—2022 年陕西省 WRSE 均值整体呈现空间不均衡、分布呈南高北低格局; 水网建设可使 2035 年陕西省 WRSE 同比增长 8.95%, 空间均衡显著改善。通过评估, 可确定各地级市水资源的不平衡和矛盾, 为水网建设规划的顺利实施提供科学依据, 对提升陕西省水资源空间均衡具有重要指导意义。

【关键词】 陕西省; 水资源; 水网建设; 一般剥夺性指数

【中图分类号】 TV213.4

【文献标志码】 A

【文章编号】 1009-6159(2025)-10-0067-04

Quantitative Evaluation and Analysis of the Spatial Equilibrium of Water Resources in Shaanxi Province

LU Tingting¹, WANG Guang²

(1. Water Resources Development Survey and the Coordination, and Water Diversion from Han River to Wei River Project Center of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710004, China; 2. Planning and Design Co., LTD., Water Resources Development Group, Jinan, Shandong 250013, China)

Abstract: Based on three dimensions of production, living, and ecology, and combined with the impact of drought, this study established a comprehensive evaluation index system for the spatial equilibrium of water resources. The General Deprivation Index (GDI) was adopted to evaluate the Water Resources Spatial Equilibrium (WRSE) in Shaanxi Province. The research results show that from 2012 to 2022, the average value of WRSE in Shaanxi as a whole presents a pattern of spatial imbalance, with a higher value in the south and a lower in the north. The construction of the water grid can make the WRSE increase by 8.95% year-on-year in 2035, and the spatial equilibrium is significantly improved. Through the evaluation, the imbalance and contradictions of water resources in each municipality-level city can be determined, providing a scientific basis for the smooth implementation of the water grid construction plan, which has important guiding significance for improving the spatial equilibrium of water resources in Shaanxi Province.

Key words: Shaanxi Province; Water resources; Water grid construction; General Deprivation Index

水资源具有有限性和不可替代性, 与区域经济社会发展和生态环境保护紧密相关, 其均衡协调至关重要^[1-2]。随着社会经济快速发展, 水资源对区域发展的制约日益凸显, 有效调水、配水成为关键。然而, 全球范围内水资源分配不均、气候变化加剧水旱灾害等挑战依然严峻。

水资源空间均衡 (WRSE) 是反映“水资源-社会-经济-自然”复合系统可持续发展属性的测度, 受到国内外学者广泛关注, 在理论方法、应用

框架及对策措施等方面取得了一定成果, 但仍存在不足。一方面, 指标体系往往忽略极端天气 (干旱、洪水等) 对 WRSE 的影响; 另一方面, 现有 WRSE 评估方法在应对高质量发展多目标协同、气候韧性量化及空间剥夺效应识别等方面存在局限。因此, 本文采用一般剥夺性指数 (GDI) 开展陕西省水资源空间均衡的研究, 旨在更全面地评

收稿日期: 2025-01-18

作者简介: 路婷婷 (1993—), 女, 助理工程师

估水资源空间均衡状况,为水资源开发利用过程中的资源平等配置提供科学依据。

1 研究区概况和资料

1.1 研究区概况

本研究区涉及陕西省全省 10 个地市,横跨东经 105°29'~111°15',北纬 31°42'~39°35',总面积 20.56 万 km²。陕西省地势南北高、中间低,以“北山”和秦岭为界,分为陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山地三大区域。省内河流分属黄河、长江两大流域,多年平均水资源总量为 419.7 亿 m³,其中长江流域占比 72%,黄河流域占比 28%,水资源南多北少,分配极不均衡。

1.2 研究资料

本研究收集采用了与生产、生活和生态三生空间相关的水资源指标,并将其分成水资源禀赋和水资源匹配两大类指标和 18 个子指标,见表 1。其中,数据系列为 2012—2022 年,均来源于《陕西省水资源公报》和《陕西省统计年鉴》。

2 一般剥夺性指数(GDI)

一般剥夺性指数(GDI)常与主成分分析(PCA)结合使用,PCA 确定的成分能揭示剥夺的主要维度,且第一个分量因对方差贡献最大,常作为计算 GDI 的基础。

假定存在 m 个元素(水资源空间均衡相关指标),每个元素都有 n 个地市的样本数据,则数据矩阵可以表示为:

$$X_{n \times m} = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

利用 PCA 对 GDI 进行计算,对选定的指标进行正交转换,得到式(2)中的新向量 Z_{n×p}:

$$Z_{n \times p} = X_{n \times m} \cdot W_{m \times p} \quad (2)$$

式中:W_{m×p}为第 m 个最大特征值对应的单位特征向量。特征值 λ_j (j=1,2, …, m) 通过 |λE-C|=0 来计算,其中 λ₁≥λ₂≥…≥λ_m(C 为相关系数矩阵);相应的单位特征向量可以表示为 w_j=(w_{1j}, w_{2j}, …, w_{mj})。

通过因子得分系数计算因子得分向量,如式(3)和式(4)所示:

表 1 水资源空间均衡指标体系

目标层	元素层	指标层	编码
水资源禀赋	水资源源量	年降水量/mm	W1
		水资源总量/亿 m ³	W2
		地表水资源量/亿 m ³	W3
		地下水资源量/亿 m ³	W4
		水资源开发利用率/%	W5
		产水系数	W6
		综合生产能力/(万 m ³ ·d ⁻¹)	W7
水资源空间均衡	供水	供水管网长度/m	W8
		供水覆盖率/%	W9
		万元 GDP 用水量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	W10
水资源匹配	生产空间水资源匹配	工业用水量/亿 m ³	W11
		农业用水量/亿 m ³	W12
		农田灌溉亩均用水量/(m ³ ·hm ⁻²)	W13
		农作物受灾面积/×10 ³ hm ²	W14
	生态空间水资源匹配	生活用水量/亿 m ³	W15
		人均用水量/(m ³ ·人 ⁻¹)	W16
		废水处理能力/(t·d ⁻¹)	W17
		生态用水量/亿 m ³	W18

$$S_{ij} = W_{ij} / \lambda_j (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$$R'_{n \times p} = X_{n \times m} \cdot S_{m \times p} \quad (4)$$

式中:S_{ij}为因子得分系数;W_{ij}为主成分载荷;λ_j为各主成分的特征值;p为成分总数。

在源自 PCA 的因子得分的基础上,GDI 可以通过式(5)~式(7)计算。其中,GDI 值越高,剥夺程度越高,表明越不平衡。为了能够直观表征 WRSE 的状态并快速识别紧急区域以改善水资源的空间均衡,基于式(7)进一步计算得到 WRSEI:

$$R_{ij} = \frac{R'_{ij} - \min(R'_{ij})}{\max(R'_{ij}) - \min(R'_{ij})} \quad (5)$$

$$GDI_i = \frac{R_{ik} (1 + \sum_{j \neq k}^p R_{ij})}{P} \quad (6)$$

$$WRSEI_i = 1 - GDI_i \quad (7)$$

式中:R_{ik}为区域 i 的第一个主成分 k 的重新调整因子得分(λ_j=λ₁);R_{ij}为区域 i 上次要成分 j 的重新缩放因子得分。WRSEI_i为区域 i 上水资源空间均衡指数。GDI_i和 WRSEI_i均位于 [0, 1] 之间。WRSEI 值越高,说明区域水资源空间越均衡。

3 结果分析

3.1 陕西省 WRSE 时空格局分析

为全面反映原 18 个指标的特征,根据累计

贡献率(>85%)的原则,选取了前6个主成分。由于篇幅限制,这里仅展示西安市指标的主成分分析结果,包括主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率,见表2。

表2 西安市主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率表

成分	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	11.73	61.74	61.74
2	2.87	15.12	76.87
3	1.71	9.00	85.87
4	0.91	4.80	90.68
5	0.80	4.21	94.89
6	0.57	3.00	97.89

从表2中可以看出,前6个主成分的方差贡献率累计达到了97.89%,远超过85%的标准,这表明所选择的主成分是合理的(其他地级市的分析结果与此类似,故不再一一赘述)。其中,第一主成分的方差贡献率为61.74%,因此将其作为计算一般剥夺性指数(*GDI*)的基础。

本研究按照公式(1)~(7)计算了陕西省各地级市的水资源空间均衡指数 *WRSEI* 及其均值,计算结果如图1所示。

由图1可知,陕西省2012—2022年的 *WRSEI* 均值在[0.64, 0.81]之间,整体呈下降趋势,说明水资源未来空间分布趋向于不均衡发展。对于地市而言,咸阳市、渭南市 *WRSEI* 呈现上升趋势,其他地市 *WRSEI* 均呈下降趋势,这说明陕西省水资源空间配置不均匀,亟需开展水网建设。



图1 陕西省水资源空间均衡指数时间变化特征

本研究选取2012年、2016年、2018年和2022年4个时间点,对陕西省水资源均衡的空间变化特征进行分析。基于自然断点法(运用R语言实现)将陕西省10个地级市过去11年

(2012—2022年)的水资源空间均衡指数(*WRSEI*)划分为5个等级:0.288~0.447(极不均衡)、0.447~0.610(不均衡)、0.610~0.766(中等均衡)、0.766~0.896(良好均衡)以及0.896~1.000(非常均衡)。

图2展示了这4个年份陕西省各地市的 *WRSEI* 空间分布格局。在过去11年间,陕西省2012年、2016年、2018年和2022年 *WRSEI* 均值分别为0.837、0.889、0.786和0.747,整体呈水资源空间分布趋向于不均衡的趋势。各地市的 *WRSEI* 值介于0.288~1.000之间, *WRSEI* 值越高,表明该地级市的水资源分布越均衡。

研究表明:2012年榆林市、铜川市、西安市、渭南市和汉中市的水资源分布处于非常均衡状态,而不均衡的城市主要集中在中部的延安市和咸阳市,其他城市则处于中等均衡和良好均衡之间。随着时间的推移,2016年陕西省南部和中部咸阳市的水资源空间均衡情况进一步改善,达到非常均衡状态,这主要得益于这些地区降水量大、分布均匀且供水量充足;然而,北部榆林市的水资源均衡状况却转向不均衡。到了2018年,中部延安市、铜川市和咸阳市的水资源空间分布趋向中等均衡,表现出向好的发展态势;同时,中部宝鸡市、渭南市以及南部汉中市的水资源空间分布转向良好均衡。2022年,安康市、西安市、商洛市和铜川市的水资源分布达到非常均衡状态,而榆林市则转向极不均衡,渭南市也转向不均衡;其他城市的水资源均衡状况变化不明显。

综上所述,陕西省水资源空间均衡情况主要表现为南部均衡、中北部不均衡。这一差异主要归因于南部水资源丰富、北部少雨缺水且干旱严重,以及水资源开发利用程度的不同。此外,城市的发展水平也对水资源空间均衡产生显著影响,如西安市经济发展迅速、人口密度大、人均水资源量少,导致其水资源空间不均衡发展;而安康市经济发展水平较低、人口密度小、水资源需求小,因此水资源空间均衡状况相对较好。

3.2 水网建设对陕西省 *WRSEI* 影响分析

通过对比水网建成前后陕西省水资源空间均衡指数(*WRSEI*)的变化,定量分析水网建设对 *WRSEI* 的影响。选取2022年作为基准年,其 *WRSEI* 值作为水资源空间均衡的评价值,并与水

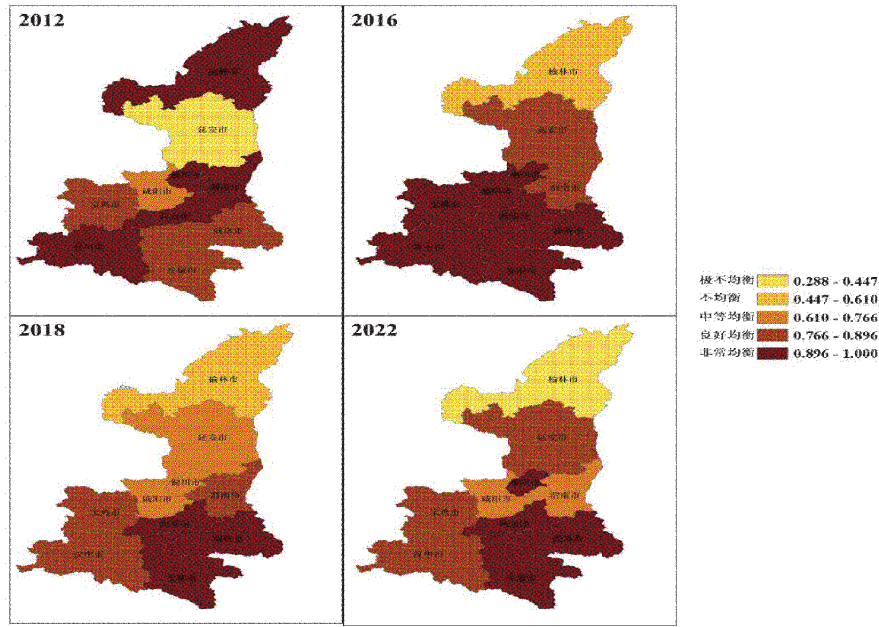


图2 陕西省各地级市 2012 年、2016 年、2018 年和 2022 年 WRSEI 空间分布特征

网规划年 2035 年的预测值进行对比分析。规划数据来源于《陕西省水网建设规划》，其中部分基础数据(如降水量、水资源总量、地表水资源量、地下水资源量、产水模数等)与 2022 年保持一致。计算过程依旧采用前文所述的公式(1)~(7)。

鉴于规划数据未细化至地级市层面,现仅对陕西省整体的 WRSE 均值在基准年 2022 年、规划年 2035 年以及 2012—2022 年均值上的变化情况进行对比分析,结果见表 3。

表 3 水网建成后陕西省 WRSE 对比分析结果

年份	WRSE	评价等级
2012—2022 年均值	0.797	良好均衡
2022 年基准值	0.793	良好均衡
2035 年预测值	0.864	良好均衡

从表 3 中的统计数据可以看出,基准年 2022 年陕西省的水资源空间均衡指数 (WRSE) 为 0.793,而规划水平年 2035 年的 WRSE 预计将达到 0.864。通过对比分析,水网建设将使得 2035 年陕西省整体的 WRSE 呈现显著上升趋势,同比增长 8.95%,相较于多年平均 WRSE 的增长率也达到了 8.41%。这一结果表明,水网建设对水资源在空间上的均衡分布起到了积极的促进作用。根据《陕西省水网建设规划》,到 2035 年,陕西省的水网将基本建成,覆盖范围将达到 88%。在水

资源空间均衡评价指标体系中,综合生产能力、供水管长度、用水普及率、废水处理能力等正向指标均预计有不同程度的增加;同时,万元 GDP 用水量、农田灌溉亩均用水量等逆向指标也预计有所下降。由此可见,水网建设对于提升陕西省水资源空间均衡具有重大意义。

4 结论

1)2012—2022 年间,陕西省水资源空间均衡指数总体呈下降趋势,均值在 0.64~0.81 之间波动。

2) 水资源空间均衡指数较高地区集中在南部,这些地区水资源丰富且发展水平中等;而中北部地区,特别是榆林市和西安市,因水资源短缺或城市发展水平高,指数较低。

3)通过水网建设,能有效改善水资源空间分布不均衡状况,预计到 2035 年陕西省水资源空间均衡指数提升到 0.864。

参考文献

[1] Vairavamorthy, K., Gorantiwar, S.D., Pathirana, A. Managing urban water supplies in developing countries -Climate change and water scarcity scenarios [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33, 330-339.

[2] 韩春辉.水资源空间均衡理论方法及应用研究[D].郑州大学,2021.

(责任编辑 崔春梅)