

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbqk.2022.0084

杨亚锋, 高媛媛, 许新宜, 等. 水资源生态安全的时空分异特征: 以南水北调东线山东段为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 833-841. YANG Y F, GAO Y Y, XU X Y, et al. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources ecological security: Case study in Shandong section of the east route of South-to-North Water Transfer Project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 833-841. (in Chinese)

水资源生态安全的时空分异特征

——以南水北调东线山东段为例

杨亚锋^{1,2}, 高媛媛³, 许新宜¹, 袁浩瀚³, 王红瑞¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210;
3. 水利部南水北调规划设计管理局, 北京 100038)

摘要: 为厘清南水北调东线一期工程受水区的水资源生态安全状况, 为后续工程相关政策的制定和实施提供参考, 基于压力-状态-响应模型探讨水资源生态安全的评价指标体系, 进而耦合带模相似度的投影决策法和基尼系数法, 研究南水北调东线山东段水资源生态安全的时空分异特征。结果表明: 2011—2019 年该区域水资源生态安全整体上呈现良性发展态势, 综合评价函数值由 0.463 1 增至 0.623 4。除东营外, 各地市在不同程度上表现为: 压力子系统指数较高, 但由于积极的响应系统, 水资源生态安全状况有一定改善。从空间维度来看, 研究期内 14 个地市的水资源生态安全状态总体上保持均衡, 基尼系数稳定在 0.2 左右, 但万元 GDP 用水量等指标的空间差异较为突出。人类活动, 尤其用水效率对水资源生态安全的影响日益凸显, 南水北调东线工程对山东段受水区的水资源生态安全起到了重要的促进作用。

关键词: 水资源生态安全; 空间均衡; 带模相似度投影决策法; 基尼系数; 南水北调东线山东段

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



水是重要的基础和战略资源, 水资源供需不匹配、空间失衡等安全风险严重影响着人类的生存和发展已成为全球共识^[1-4]。水资源生态安全指的是在保持生态环境良性循环的前提下, 水资源对经济发展和人民生活的保障程度^[5-7], 而空间均衡则是区域协调和可持续发展的必要前提和基本要求之一^[8-9]。因此, 做好水资源生态安全的时空分异特征研究, 进而挖掘其主要扰动因子, 具有重要的现实意义。目前水资源生态安全研究主要集中在评价指标体系的构建和研究方法的选取上。刘丽颖等^[5]运用人工神经网络的方法, 构建了喀斯特地区水资源安全的评价模型; 张凤太等^[7]运用灰色关联方法和均方

差法测度了贵州省地下水资源生态安全; 代稳等^[10]运用生态足迹定量评价了六盘水市水资源生态安全; 何刚等^[11]构建了水资源生态安全评价的 TQR (威胁-质量-调控) 概念模型; 刘芳等^[12]运用压力-状态-响应(PSR)模型和熵值法, 对新疆生产建设兵团水资源安全状况进行评估及其制约因素分析; 徐玉霞^[13]应用洛伦兹曲线及基尼系数方法研究了宝鸡市水土资源匹配程度, 进而分析水资源生态安全状况。以上成果为水资源生态安全研究提供了行之有效的途径, 然而仍需要针对水资源生态安全的时空演变特征和区域协调均衡展开深入研究。

南水北调东线工程是缓解北京市、天津市、河

收稿日期: 2021-12-29 修回日期: 2022-06-22 网络出版时间: 2022-07-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220713.1002.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879010); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408902)

作者简介: 杨亚锋(1985—), 男, 河南宝丰人, 副教授, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hblgyyf@ncst.edu.cn

通信作者: 王红瑞(1963—), 男, 河南新乡人, 教授, 主要从事水资源分析与规划研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

北省、山东省和淮河流域水资源短缺与经济社会发展及生态环境保护之间矛盾的重要工程^[14]。作为其主要受水区,山东段水资源生态安全的时空分异特征对于南水北调东线后续工程的相关政策制定具有重要的参考价值。鉴于此,结合压力-状态-响应(PSR)模型探讨水资源生态安全评价指标体系,进而基于带模相似度的投影决策法,从时间和空间两个维度对 2011—2019 年山东段的水资源生态安全状态进行决策评价;借助基尼系数刻画区域之间的空间均衡特征,挖掘主要的扰动因子,进而提出相应的调控措施,可为南水北调东线后续工程相关政策的制定与实施提供支持。

1 研究方法

1.1 研究区与数据来源

山东省是我国北方地区资源性缺水的省份之一,水资源总量不足,人均占有量少,水资源地区分布不均衡,年际年内变化剧烈。南水北调东线工程是缓解山东省水资源供需矛盾的重大工程,在山东省境内分为两条输水干线,全长 1 191 km,南北干线

长 487 km,东西干线长 704 km,其中山东半岛东部利用引黄济青工程供水。工程在山东省内形成 T 形输水大动脉和现代水网大骨架,实现了长江水、黄河水和当地水的联合调度、优化配置,为保障全省经济社会可持续发展提供水资源支撑^[15]。本研究选取南水北调东线一期工程山东段为研究区,包括鲁南、鲁北和胶东半岛,涉及济南、青岛、烟台、威海、潍坊、淄博、东营、滨州、泰安、聊城、德州、枣庄、济宁和菏泽共 14 个地市。

本研究所用的各项水资源数据来源于 2011—2019 年的山东省水资源公报和各地市的水资源公报;经济社会方面的数据来源于 2012—2020 年的山东省统计年鉴和各地市的统计年鉴,部分评价指标数据根据年鉴和公报的数据计算得出。

1.2 指标体系

借鉴已有研究成果^[5-7, 10-13],结合指标的可获取性、代表性和可操作性等原则,从压力-状态-响应 3 个子系统出发,筛选出 9 个评价指标,并基于 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation)法确定各评价指标的权重,见表 1。

表 1 水资源生态安全评价指标体系

Tab. 1 Evaluation indicator system of water resources ecological security

子系统	指标	权重	规范化权重	属性
压力子系统	人口密度 C_1 /(人·km ⁻²)	0.137 4	0.397 9	-
	人均 GDP C_2 /元	0.098 0	0.283 8	+
	万元 GDP 用水量 C_3 /m ³	0.092 1	0.266 6	-
状态子系统	人均水资源量 C_4 /m ³	0.107 7	0.312 0	+
	化肥施用强度 C_5 /(kg·hm ⁻²)	0.122 6	0.355 0	-
	万元 GDP 工业污水排放量 C_6 /万 t	0.097 0	0.280 9	-
响应子系统	污水处理率 C_7 /%	0.180 8	0.523 7	+
	水利管理业投资比例 C_8 /%	0.085 2	0.246 9	+
	建成区绿化覆盖率 C_9 /%	0.079 2	0.229 5	+

指标选取依据及其含义解释如下:

压力子系统。水资源的消耗主要来自人类用水,因此水资源生态安全的压力与人口密度息息相关,人口密度越大,水资源系统压力越大。此外,经济发展速度和科技水平则会对用水量和用水效率产生重要的影响。万元 GDP 用水量越少,经济社会发展对水资源的需求就越小,因此使用同样的水资源,可以创造更多的财富。反过来,更高的人均 GDP 可以提供更好的财政保障,促进水资源利用效率的提高,减缓水资源系统的压力。本研究选取人口密度、人均 GDP 和万元 GDP 用水量作为压力子系统的相

关指标。

状态子系统。伴随着人类活动更多地参与水循环过程,水资源生态安全状态的表征也越来越复杂。除自然水资源因素之外,人口、经济、产业等逐渐占据重要的地位。本研究从水量和水质两个角度出发,综合考虑区域水资源禀赋、人口、农业和工业用水等因素,选取人均水资源量,农业化肥施用强度和万元 GDP 工业污水排放量作为状态子系统的相关指标。其中,人均水资源量是水量的主要刻画指标,其值越大,水资源系统状态越好。农业化肥施用强度和万元 GDP 工业污水排放量则从水质的

角度反映水资源生态安全的状态,二者越大,对水资源生态安全的负面影响越大。

响应子系统。绿水青山就是金山银山,二者既会产生矛盾,又可辩证统一^[16]。在追求经济社会发展的同时,着力改善水资源水环境是当前提高水资源生态安全的必要对策和关键途径之一。本研究选取污水处理率、水利管理业投资比例和建成区绿化覆盖率作为响应子系统的相关指标。其中:污水处理是改善水质,促进水资源安全利用,优化水生态环境的重要举措;水利管理旨在保护水源、水域和水利工程,合理使用,确保安全,因此水利管理业投资是确保水资源生态安全的基础保障;建成区绿化覆盖率则从一定程度上反映了管理机构促进水循环,改善水生态,保障水资源生态安全的响应力度。

1.3 带模相似度的投影决策法

投影决策法^[17]是多指标决策与评价的重要方法之一。自1998年由王应明提出以来,已衍生出多种改进或拓展算法,得到了广泛的应用^[18-20]。针对投影决策法中存在的仅利用决策向量在理想向量上的投影有时不能完全对决策向量进行排序的问题,邱根胜^[21]综合考虑投影和距离相似度的影响,构建了一种带距离相似度的投影决策法;江燕燕^[22]在综合评价函数中融入了模相似度,将决策向量在理想决策向量上的投影以及模相似度结合起来,给出一种多指标决策与评价的新方法——带模相似度的投影决策法。本文采用带模相似度的投影决策法对2011—2019年南水北调东线山东段14个地市的水资源生态安全水平进行综合排序与决策分析,其主要步骤如下:

设多指标决策的方案集为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, 指标集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, 决策矩阵为 $X = \{x_{ij}\}_{n \times m}$, 且设 $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2\}$, 其中 $\Omega_i (i=1,2)$ 分别表示越大越优型、越小越优型指标。

步骤1: 对决策矩阵进行规范化处理。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\}}{\max_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\} - \min_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\}}, \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, n, j \in \Omega_1$

$$y_{ij} = \frac{\max_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\} - x_{ij}}{\max_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\} - \min_{1 \leq k \leq n} \{x_{kj}\}}, \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, n, j \in \Omega_2$

记规范化后的矩阵为 $Y = \{y_{ij}\}_{n \times m}$ 。

步骤2: 确定理想决策向量。定义各评价指标的理想指标值为: $y_j^* = \max\{y_{ij} | i = 1, 2, \dots, n\}$, 则理想

决策向量为

$$y^* = \{y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*\} \quad (3)$$

步骤3: 确定加权规范化矩阵及加权理想决策向量。假设指标集的权重向量为 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$, 且满足 $w^T w = 1$, 则加权规范化矩阵设为 $z = \{z_{ij}\}_{n \times m} = \{w_j y_{ij}\}_{n \times m}$, 加权理想决策向量为

$$A^* = (w_1 y_1^*, w_2 y_2^*, \dots, w_m y_m^*) \quad (4)$$

步骤4: 计算决策向量 A_i 在理想决策向量 A^* 上的投影 D_i 及两向量的模相似度 α_i 。第 i 个加权决策向量 $A_i = (w_1 y_{i1}, w_2 y_{i2}, \dots, w_m y_{im})^T$ 在加权理想决策向量 A^* 上的投影和到 A^* 的模相似度分别为

$$D_i = \frac{A_i A^*}{|A^*|} = \sum_{j=1}^m w_j^2 y_{ij}, \alpha_i = \left[\sum_{j=1}^m (w_j y_{ij})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

步骤5: 评价与决策。先确定偏好系数 λ , 一般取 $\lambda = \left[\sum_{i=1}^n (\ln \alpha_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, n 为待评估和决策向量的个数^[22]。计算决策方案 A_i 的综合评价函数 $T_i = D_i / (1 - \lambda \ln \alpha_i)$ 的值, 然后按照 T_i 的值进行评价与决策。 T_i 在 $[0, 1]$ 上取值, 其值越大, 表明越接近正理想解, 方案越优。

1.4 基尼系数

基尼系数是一个常用的经济指标,用以衡量收入不平等或财富分配不均的程度^[23-24]。该系数在0到1之间取值,其值越大表明不平等性越大。在水资源相关领域,许多学者^[8-9, 25]使用基尼系数来描述均衡程度。水资源生态安全的区域均衡性也在一定程度上反映了各评价指标在区域间的平等程度,与居民收入分配均等问题基本一致。因此,本研究考虑采用基尼系数法来描述水资源生态安全状态的区域平衡特征,并使用张建华^[26]推导的一个简单的基尼系数公式来计算各指标的基尼系数。公式为

$$G = 1 - \frac{1}{n} \left(2 \sum_{i=1}^{n-1} y_i + 1 \right) \quad (6)$$

式中: G 为基尼系数; y_i 为各指标从第1个到第 i 个评价对象的累计和占全部总量和的百分比; n 是评价对象个数。

根据国际通行标准和水资源生态安全空间均衡评价的实际情况,基尼系数的等级划分及相应的内涵描述如下:当 $0 \leq G < 0.2$ 时,表示非常均衡;当 $0.2 \leq G < 0.3$ 时,表示一般均衡;当 $0.3 \leq G < 0.4$ 时,表示临界均衡;当 $0.4 \leq G < 0.5$ 时,表示一般失衡;当 $0.5 \leq G < 1.0$ 时,表示严重失衡。

2 结果与讨论

2.1 时序变化特征分析

以南水北调东线山东段的 14 个地市为研究区,以南水北调东线一期工程通水前后的 9 年(2011—

2019 年)为研究期,构建评价样本集;采用带模相似度的投影决策法计算 126 个样本的水资源生态安全综合评价函数值,其值越大,表明水资源生态安全水平越高,结果见表 2。

表 2 水资源生态安全综合评价函数值

Tab. 2 Comprehensive evaluation function value of water resources ecological security

城市	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
济南	0.578 3	0.515 1	0.516 6	0.513 5	0.546 5	0.577 7	0.588 7	0.584 0	0.613 3
青岛	0.539 3	0.485 0	0.547 4	0.507 0	0.504 0	0.527 0	0.574 8	0.603 6	0.615 2
烟台	0.516 8	0.595 8	0.611 8	0.575 3	0.607 1	0.576 9	0.675 8	0.635 0	0.678 9
威海	0.541 0	0.661 5	0.616 8	0.629 6	0.615 5	0.623 2	0.658 5	0.702 5	0.726 9
潍坊	0.398 7	0.482 0	0.448 8	0.520 0	0.468 6	0.524 3	0.568 9	0.640 1	0.561 6
淄博	0.526 6	0.561 6	0.563 6	0.545 7	0.561 1	0.594 4	0.596 9	0.613 1	0.598 7
东营	0.593 1	0.607 7	0.660 5	0.706 8	0.728 7	0.741 7	0.761 0	0.786 7	0.839 1
滨州	0.481 9	0.529 0	0.557 8	0.519 1	0.533 9	0.557 1	0.542 7	0.636 2	0.624 5
泰安	0.488 4	0.510 5	0.535 6	0.555 7	0.542 7	0.587 9	0.597 0	0.626 5	0.604 9
聊城	0.335 7	0.385 9	0.463 0	0.449 8	0.458 8	0.512 9	0.562 4	0.569 6	0.538 5
德州	0.440 2	0.528 8	0.548 8	0.527 5	0.456 6	0.460 5	0.487 9	0.537 3	0.612 9
枣庄	0.410 7	0.466 2	0.438 8	0.458 0	0.464 5	0.500 0	0.541 3	0.524 5	0.498 1
济宁	0.437 9	0.367 1	0.400 4	0.406 2	0.500 8	0.528 2	0.554 9	0.581 2	0.629 5
菏泽	0.194 2	0.218 5	0.373 6	0.457 2	0.473 3	0.486 1	0.504 1	0.565 8	0.586 1
均值	0.463 1	0.493 9	0.520 2	0.526 5	0.533 0	0.557 0	0.586 8	0.614 7	0.623 4

由表 2 可知,2011—2019 年南水北调东线山东段的水资源生态安全水平呈现逐年提升的基本态势,其综合评价函数值由 0.463 1 增至 0.623 4,增幅为 34.6%,但情况并不乐观。在 14 个地市 126 个样本中,综合评价函数值超过 0.6 的仅有 25.4%,超过 0.7 的占比 6.3%,只有 2019 年的东营市达到了 0.8 以上。具体来看:东营市一直处在领先水平,主要归因于东营市的低人口密度,仅为济南市的 1/3 左右(2019 年),这间接导致了较高的人均 GDP 和人均水资源量。其次是威海、烟台、济宁和青岛。除济宁外,其余 3 市作为沿海发达城市,用水效率较高,万元 GDP 用水量均在 15 m³ 以下。济宁市排在第 5 名的主要影响指标是人均水资源量,仅次于东营市。菏泽水资源生态安全水平提升幅度最大,综合评价函数值增幅高达 202%,除人口密度持续增长外,其余指标均呈现逐年向好发展的基本态势,与 2011 年相比,2019 年的万元 GDP 用水量降低了 60.17%,化肥施用强度降低了 75.46% 等。济南市

的水资源生态安全状态在 9 年间变化不大,始终处在相对稳定的临界水平。从以上城市的情况来看,人口和经济发展是影响水资源生态安全的重要因素,这也表明人类在追求经济社会高速发展的同时,对水资源系统的影响越来越多。

自然本底,尤其是区域水资源量是保障水资源生态安全的基础因素。南水北调东线山东段区域水资源条件较差,资源性缺水严重制约着水资源系统的可持续发展。自 2014 年 12 月 12 日南水北调东线一期工程全线通水以来,顺利完成了 7 个年度的省界调水任务,累计调入山东省长江水 46.2 亿 m³,为山东省保障城市供水、抗旱补源、防洪除涝、河湖生态保护等方面发挥了重要作用,经济效益、社会效益、生态效益显著。2019 年山东全省总供水量为 225 亿 m³,其中跨流域调水量(引黄、引江)占 38.66%。以济南市为例,2019 年平均降水量为 581.8 mm,较多年平均偏少了 12.8%,水资源总量为 15.8 亿 m³,较多年平均偏少了 28.79%,然而 2019 年全市总供水量为 19.6 亿 m³,其中引黄引江调水

8.41 亿 m³, 调水量占总供水量的 42.9%, 可见, 南水北调东线工程为山东段的水资源生态安全起到了重要的促进作用。由表 2 可知, 2014 年以后红橙色区域消除, 水资源生态安全进入了稳步提升阶段(2014—2017 年)。2018 和 2019 年出现了显著变化, 绿色区域覆盖了山东段大部分区域。

为挖掘水资源生态安全的现状水平及存在的问题, 选取最近的 2019 年分析南水北调东线山东段区域 14 个地市的压力-状态-响应 3 个子系统与水资源生态安全的作用关系, 见图 1。除东营外, 14 个地

市的响应子系统情况相对较好, 而状态子系统和压力子系统则存在不同程度的滞后现象, 其中压力子系统更为显著。其中: 济宁市的状态子系统和响应子系统均处于较高的水平, 但压力子系统却异常落后; 压力子系统最差的是菏泽和枣庄; 潍坊市主要由于超高的万元 GDP 工业污水排放量(9.85 万 t, 是 14 个地市平均水平的 4.09 倍, 处在第二位的滨州仅为 4.97 万 t)和较高的化肥施用强度(764.24 kg/hm², 是 14 个地市平均水平的 1.89 倍), 致使状态子系统在 2019 年急剧下滑。

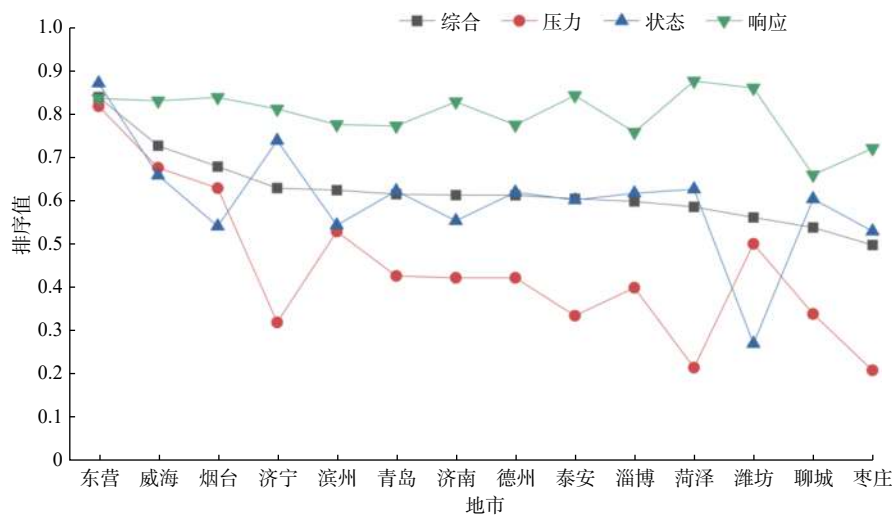


图 1 压力-状态-响应子系统排序(2019 年)

Fig. 1 Pressure, state and response subsystems ranking in 2019

需要指出的是, 各地市水资源生态安全的响应子系统均呈现良性发展态势, 保持着较高的水平, 见图 2。山东段的平均污水处理率逐年提升, 2019 年高达 97.26%, 较 2011 年增长了 9%, 较 2018 年增长 1.67%。除青岛和聊城略低, 污水处理率分别为 94.52% 和 94.86% 之外, 其余地市的污水处理率均在 96% 以上。研究期内山东段的建成区绿化覆盖率始终保持在 40% 以上, 处在全国前列。2019 年该区域建成区绿化覆盖率为 42.10%, 高于中国城市建成区绿化覆盖率(41.51%), 这与山东省城市公园建设成效是密不可分的。2019 年山东省城市公园绿地面积为 67 884 hm², 居全国省级行政区第二位, 仅次于广东省。此外, 水利管理业投资比例在 2014 年跌至最低, 从 2015 年开始逐年提升, 且增幅越来越大, 这在一定程度上反映了 2014 年底南水北调东线一期工程全线通水以后, 沿线地区在水利设施管理、水体污染治理和水环境保护等方面加大了力度, 有力促进了水资源生态安全。

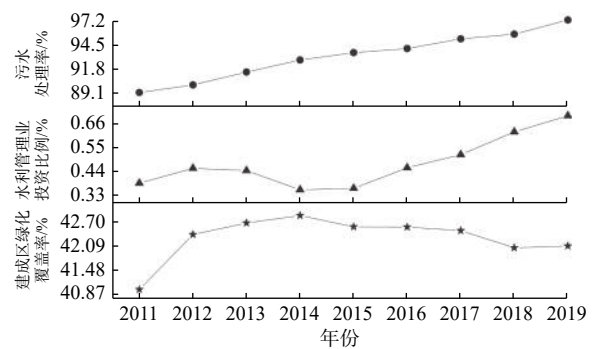


图 2 南水北调东线山东段响应子系统指标的演化态势

Fig. 2 Evolution trend of response subsystem indicators in Shandong section

综上, 南水北调东线山东段的水资源生态安全状况总体上呈现逐年变优的态势, 然而仍存在较大的提升空间。人类活动, 尤其是用水效率对水资源生态安全的影响日益凸显, 其中东部沿海地区更为明显。南水北调东线一期工程对山东段区域的水资源生态安全起到了重要的促进作用。山东段区域均面临着不同程度的水资源生态安全压力, 相对来讲, 压力指数明显高于状态指数和响应指数, 但

得益于积极的人为调控措施,弥补了压力子系统带来的风险,使得水资源生态安全水平出现了逐年提升的态势。

2.2 空间均衡及其扰动因子分析

图 3 利用基尼系数描述了 2011—2019 年南水

北调东线山东段区域水资源生态安全及各项指标的空间均衡状况。容易发现,综合考虑 9 项指标的空间均衡水平较高,其基尼系数稳定在 0.2 左右,在非常均衡和一般均衡的临界点处略有上下波动,但从单项指标来看存在显著的差异。

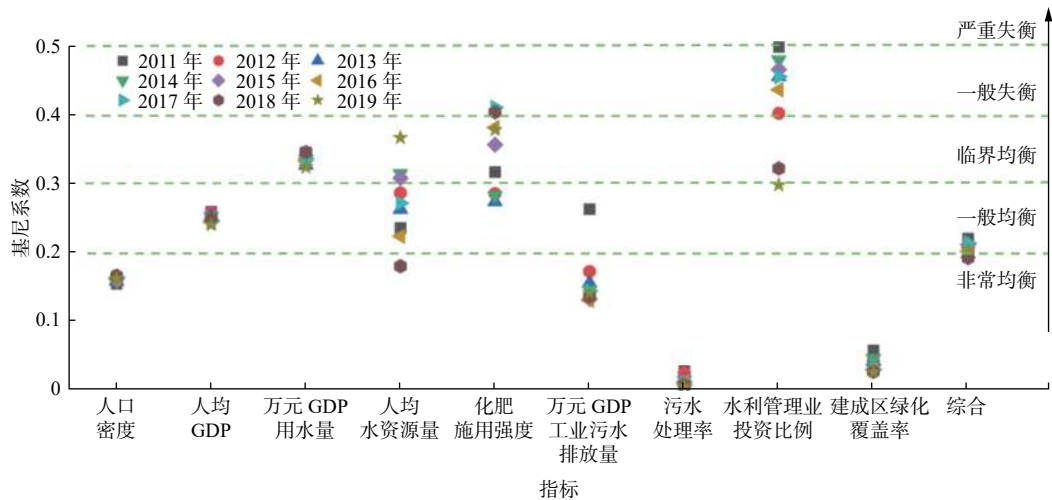


图 3 水资源生态安全空间均衡与各指标基尼系数

Fig. 3 Spatial equilibrium of water resources ecological security and indicators' Gini coefficient

水利管理业投资比例和人均水资源量的基尼系数较高,2011—2019 年的平均值分别为 0.42 和 0.27,且年际变化明显。水利管理业投资比例在 2018 年以前一直处于失衡状态。2018 年以后,菏泽、滨州、威海和东营等地市的水利管理业投资比例大幅提升,其中菏泽市提升了 12.25 倍,促使基尼系数在 2019 年达到了 0.30,接近一般均衡水平。需要指出的是,2019 年水利管理业投资比例各地市之间的悬殊依然较大,青岛市为 1.31%,是 14 市平均水平的近 2 倍,淄博等 7 个地市在平均水平以下。人均水资源量基尼系数的多年平均值为 0.27,基本上处在一般均衡水平,但 2019 年出现异常点,高达 0.37,趋向失衡,这主要归因于青岛等 11 个地市的水资源总量大幅降低,其中青岛、威海和烟台 3 个地市较多年平均值分别偏少了 74.6%,73.8% 和 73.1%,而东营、淄博和滨州 3 市则均有不同程度增加。

部分指标存在显著差异,且没有明显的改善迹象,如:万元 GDP 用水量(平均 0.34,2019 年为 0.32)和化肥施用强度(平均 0.34,2019 年为 0.38)。万元 GDP 用水量平均值为 41.74 m^3 ,而最低值为 7.82 m^3 (青岛),最高值则为 81.72 m^3 (滨州),表明各地市的用水效率存在着显著的差异;烟台市的化肥施用强度较高,为 14 个地市平均水平的 1.89 倍。青岛市用水效率高,且水利管理和环境保护财政投入较

多,但人均水资源量极少,限制了水资源生态安全水平的进一步提升。

人均 GDP、人口密度、万元 GDP 工业污水排放量、污水处理率和建成区绿化覆盖率 5 项指标的空间均衡水平相对较高,且比较稳定。人均 GDP 的基尼系数稳定在 0.25 附近,处于一般失衡,其余 4 项指标一直处在非常均衡的状态,尤其是污水处理率和建成区绿化覆盖率,几乎是绝对均衡的。

综上所述,2011—2019 年南水北调东线山东段区域水资源生态安全的空间均衡水平较高,但人均水资源量、水利管理业投资比例、万元 GDP 用水量和化肥施用强度的地域差异较大,是该区域水资源生态安全空间均衡水平提升的主要扰动因子。南水北调东线山东段区域的协调发展需要进一步做好顶层设计,统筹规划,充分发挥东线调水效益,在建设良好的水资源生态环境的同时,优化配置水利管理业投资比例,推进资源与技术共享,共同提高用水效率,减少农业面源污染。

3 结论

本研究探索了一个耦合带模相似度的投影决策方法和基尼系数法的综合分析框架,可以确定区域水资源生态安全的时空演变与空间均衡特征,挖掘主要扰动因子,并在南水北调东线山东段展示案例

应用。主要结论有:南水北调东线山东段 14 个地市的水资源生态安全状态呈现逐年提升的基本态势,但情况并不乐观,压力子系统滞后现象较为严重;人类活动尤其是用水效率对水资源生态安全的影响越来越大;2011—2019 年,南水北调东线山东段的水资源生态安全状态基本处于均衡状态,但水利管理业投资比例、万元 GDP 用水量和化肥施用强度等部分指标存在较大的差异;人均水资源量的均衡状况受降水量等自然因素影响显著。总体来看,本文模型用于时序演化排序和空间均衡分析是实用的和有效的。

参考文献(References):

- [1] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. *水利学报*, 2019, 50(8): 980-989. (WANG H R, QIAN L X, ZHAO Z Y, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190177.
- [2] 韩宇平,阮本清,汪党献. 区域水资源短缺的多目标风险决策模型研究[J]. *水利学报*, 2008(6): 667-673. (HAN Y P, RUAN B Q, WANG D X. Multi-objective risk decision-making model for regional water resources shortage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008(6): 667-673. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.06.006.
- [3] AHMED S S, BALI R, KHAN H, et al. Improved water resource management framework for water sustainability and security[J]. *Environmental Research*, 2021 (8): 111527.
- [4] 胡惠兰,周亮广. 淮河流域水资源短缺风险评估与时空分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(6): 59-65. (HU H L, ZHOU L G. The risk assessment and space-time analysis of water resources shortage in Huaihe River basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(6): 59-65. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2017.06.009.
- [5] 刘丽颖,官冬杰,杨清伟,等. 基于人工神经网络的喀斯特地区水资源安全评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 207-214. (LIU L Y, GUAN D J, YANG Q W, et al. Assessment of water resources security in Karst area based on artificial neural network[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 207-214. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.032.
- [6] 刘渝,张俊飏. 中国水资源生态安全与粮食安全状态评价[J]. *资源科学*, 2010, 32(12): 2292-2297. (LIU Y, ZHANG J B. Analysis on temporal differences in water resources security and grain security in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(12): 2292-2297. (in Chinese))
- [7] 张凤太,苏维词. 基于组合权重法的岩溶地区地下水资源生态安全动态演化研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(12): 53-58. (ZHANG F T, SU W C. A study of the dynamic evolution of the ecological security of groundwater resources in Karst region based on combination weighting method[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(12): 53-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2016.12.012.
- [8] 杨亚锋,巩书鑫,王红瑞,等. 水资源空间均衡评估模型构建及应用[J]. *水科学进展*, 2021, 32(1): 33-44. (YANG Y F, GONG S X, WANG H R, et al. New model for water resources spatial equilibrium evaluation and its application[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 33-44. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.004.
- [9] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 1-6. (JIN J L, XU X G, ZHOU R X, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.001.
- [10] 代稳,张美竹,秦趣,等. 基于生态足迹模型的水资源生态安全评价研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(12): 228-233. (DAI W, ZHANG M Z, QIN Q, et al. Ecological security evaluation of water resource based on ecological footprint model[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(12): 228-233. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.12.044.
- [11] 何刚,赵疏航,杜宇. 基于TQR-EGM模型的水资源生态安全评价及动态预警[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(1): 36-42. (HE G, ZHAO S H, DU Y. Evaluation and dynamic warning of ecological security of water resources based on TQR-EGM model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(1): 36-42. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2021.01.06.
- [12] 刘芳,梁红军. 基于PSR模型的新疆兵团水资源生态安全评估及制约因素分析[J]. *新疆大学学报(哲学·人文社会科学版)*, 2019, 47(1): 26-33. (LIU F, LIANG H J. Water resources ecological security assessment of Xinjiang production and construction corporation based on PSR model[J]. *Journal of Xin-*

- jiang University(Philosophy, Humanities & Social Sciences), 2019, 47(1): 26-33. (in Chinese)) DOI: 10.13568/j.cnki.issn1000-2820.2019.01.003.
- [13] 徐玉霞. 宝鸡市12区县水资源生态安全基尼系数分析[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(5): 175-179. (XU Y X. Gini coefficient of ecological security of water resources in 12 districts of Baoji[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(5): 175-179. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7601.2012.05.033.
- [14] 王复生, 李传奇, 张焱炜, 等. 基于GIS的南水北调东线山东段区域洪灾风险区划[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(6): 45-53. (WANG F S, LI C Q, ZHANG Y W, et al. Regional flood disaster risk zoning in Shandong reach of eastern route of South-to-North Water Transfer Project based on GIS[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(6): 45-53. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2019.0134.
- [15] 张婷婷, 杨刚, 张建国, 等. 南水北调东线一期工程输水干线水质变化趋势分析[J]. 水生态学杂志, 2022, 43(1): 8-15. (ZHANG T T, YANG G, ZHANG J G, et al. Trend analysis of water quality change in main water delivery line of the first phase of the east route of South-to-North Water Transfer Project[J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(1): 8-15. (in Chinese)) DOI: 10.15928/j.1674-3075.202106290208.
- [16] 沈满洪. 习近平生态文明思想研究: 从“两山”重要思想到生态文明思想体系[J]. 治理研究, 2018, 34(2): 5-13. (SHEN M H. Research on Xi Jinping's thought on ecological civilization: from the important thought of "Two mountains" to the ideological system of ecological civilization[J]. *Governance Studies*, 2018, 34(2): 5-13. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-9092.2018.02.001.
- [17] 王应明. 一种多指标决策与评价的方法: 投影法[J]. 统计研究, 1998(4): 66-69. (WANG Y M. A new method for multiindices decisions and evaluations: A projection method[J]. *Statistical Research*, 1998(4): 66-69. (in Chinese)) DOI: 10.19343/j.cnki.11-1302/c.1998.04.024.
- [18] 唐耀平, 周立平. 基于投影的联系数多属性决策方法[J]. 数学的实践与认识, 2013, 43(13): 168-173. (TANG Y P, ZHOU L P. Decision-making based on projection for connection number multiple attributes[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2013, 43(13): 168-173. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2013.13.024.
- [19] 孟俊娜, 于利爽, 刘炳胜. 基于投影的直觉模糊群决策专家权重确定方法[J]. 统计与决策, 2016(20): 43-46. (MENG J N, YU L S, LIU B S. Weight determination method of intuitionistic fuzzy group decision expert based on projection[J]. *Statistics & Decision*, 2016(20): 43-46. (in Chinese)) DOI: 10.13546/j.cnki.tjyj.2016.20.012.
- [20] 王铁旦, 汤森, 彭定洪, 等. 基于投影的单值中智集M AGDM一致性合成方法[J]. 模糊系统与数学, 2019, 33(2): 84-94. (WANG T D, TANG M, PENG D H, et al. A projection method for single valued neutrosophic group decision making based on consistency degree[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2019, 33(2): 84-94. (in Chinese))
- [21] 邱根胜. 一种多指标决策与评价的新方法[J]. 数学的实践与认识, 2004(11): 47-50. (QIU G S. A new method of multi-criteria decision making and evaluation[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2004(11): 47-50. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0984.2004.11.009.
- [22] 江燕燕. 多指标决策与评价新方法: 带模相似度投影决策法[J]. 统计与决策, 2020(23): 33-36. (JIANG Y Y. A new method for multi-index decision-making and evaluation: Projection decision method with norm similarity[J]. *Statistics & Decision*, 2020(23): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10.13546/j.cnki.tjyj.2020.23.007.
- [23] ATKINSON A B. On the measurement of inequality[J]. *Journal of Economic Theory*, 1970, 2(3): 244-263. DOI: 10.1016/0022-0531(70)90039-6.
- [24] BOSI S, SEEGMULLER T. Optimal cycles and social inequality: What do we learn from the Gini index?[J]. *Research in Economics*, 2006, 60(1): 35-46. DOI: 10.1016/j.rie.2005.12.003.
- [25] 夏帆, 陈莹, 窦明, 等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA F, CHEN Y, DOU M, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.01.008.
- [26] 张建华. 一种简便易用的基尼系数计算方法[J]. 山西农业大学学报(社会科学版), 2007, 6(3): 275-278. (ZHANG J H. A convenient method to calculate Gini coefficient[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Social Science Edition)*, 2007, 6(3): 275-278. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-816X.2007.03.015.

Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources ecological security: Case study in Shandong section of the east route of South-to-North Water Transfer Project

YANG Yafeng^{1,2}, GAO Yuanyuan³, XU Xinyi¹, YUAN Haohan³, WANG Hongrui¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 3. Bureau of South to North Water Transfer Planning, Designing and Management, Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Shandong of the east route of South-to-North Water Transfer Project (Hereinafter referred to as Shandong section) is the main water receiving area of the first phase of the east route of the South-to-North Water Transfer Project, and its water resources ecological security (WRES) research can provide reference for the implementation of subsequent projects. Based on the pressure-state-response (P-S-R) model, an evaluation indicators system of WRES was discussed, and then the spatial-temporal differentiation characteristics of WRES were studied by coupling the projection decision method with modulus similarity and Gini coefficient method.

From the perspective of time series, WRES in 14 cities of Shandong section has generally become better year by year, and the comprehensive ranking value has increased from 0.463 1 in 2011 to 0.623 4 in 2019. However, the situation is not optimistic, and there is still a large gap from the ideal state. Among the 126 samples, only 25. 4% had a ranking value of more than 0.6, 6. 3% more than 0.7, and only Dongying reached 0.8 in 2019. Population and economic development are important factors affecting WRES, which also shows that human beings have more and more influence on the water resources system while pursuing the rapid development of economy and society. In 2019, with the exception of Dongying, the response subsystem is better than the pressure subsystem and the state subsystem to varying degrees, especially the lag of the pressure subsystem. The Shandong section is generally facing great pressure on WRES, and it has not been effectively alleviated during the study period. Especially Heze and Zaozhuang, the pressure subsystem of the two cities is in a relatively backward position all the year round. The strong man-made control measures in various cities have alleviated the risks brought by the pressure subsystem to a certain extent, making the level of WRES improve year by year.

From the perspective of space, the spatial equilibrium state of Shandong section of east route of South-to-North Water Transfer Project has great differences in 9 indicators, but the interannual variation range is small, which indicates that there are differences among various systems in the Shandong section, but it has maintained a good coordinated development trend as a whole. Comprehensively considering the nine indicators, WRES spatial equilibrium index of Shandong section from 2011 to 2019 is stable at about 0.2, and fluctuates slightly up and down at the critical point of very equilibrium and general equilibrium. However, from the perspective of single indicators, there are significant differences in the investment proportion of water management industry, water consumption per 10000 -yuan GDP, per capita water resources and fertilizer application intensity, and there is no obvious sign of improvement. The multi-year average Gini coefficient of per capita GDP is 0.25, slightly biased towards imbalance, but relatively stable. Population density, 10 000-yuan GDP, industrial sewage discharge, sewage treatment rate and green coverage rate of built-up areas have always been in a very balanced state, especially the sewage treatment rate and green coverage rate of built-up areas are almost absolutely balanced. The impact of human activities, especially water use efficiency, on WRES is becoming more and more prominent. The east route of South-to-North Water Transfer Project has played an important role in promoting the WRES in Shandong.

In general, the comprehensive model constructed is practical and effective for temporal evolution and spatial equilibrium analysis. The temporal and spatial differentiation characteristics of WRES in Shandong section can provide some guidance for the formulation and implementation of relevant policies for the follow-up of the east route of South-to-North Water Transfer Project. Besides, the results can also provide reference for other relevant studies and support regional coordinated development and environmental protection.

Key words: water resources ecological security; spatial equilibrium; projection decision method with norm similarity; Gini coefficient; Shandong section of the east route of South-to-North Water Transfer Project