

基于 DPSIR-TOPSIS 模型的长春市水资源脆弱性评价

朱逸凡^{1,2}, 何宏³, 张文静^{1,2}, 杜尚海^{1,2}

(1.吉林大学 地下水资源与环境教育部重点实验室, 吉林 长春 130021;

2.吉林大学 新能源与环境学院, 吉林 长春 130021; 3.长春市水务局, 吉林 长春 130021)

摘要: [目的] 分析吉林省长春市水资源脆弱性现状及影响因素, 为长春市水资源开发利用、保护及管理提供参考。[方法] 结合长春市水资源现状, 基于 DPSIR 模型选取 19 项指标构建了长春市水资源脆弱性评价体系, 采用熵权法计算各项指标权重, 采用 TOPSIS 法对长春市 2005—2019 年水资源脆弱性状况进行评价。[结果] 长春市水资源系统仅 2005 年处于轻度脆弱水平, 2006—2019 年在区间[0.3, 0.5]波动, 处于中等脆弱水平; 各子系统对综合评价结果的影响力为: 压力(P) > 影响(I) > 驱动力(D) > 状态(S) > 响应(R)。[结论] 长春市总用水量和水资源总量是影响其水资源脆弱性的重要因素, 地下水较地表水对水资源脆弱性影响更大。政府应持续加大在节能环保方面投入资金, 出台相关环境保护政策, 提高城市水污染治理力度。进一步优化水资源配置, 推广节水灌溉技术, 提高水资源利用率, 缓解枯水年供水压力。

关键词: 水资源; 脆弱性; DPSIR 模型; 熵权法; TOPSIS 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)05-0174-07

中图分类号: TV213.4

文献参数: 朱逸凡, 何宏, 张文静, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的长春市水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 174-180. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220922.001; Zhu Yifan, He Hong, Zhang Wenjing, et al. Water resource vulnerability assessment of Changchun City based on DPSIR-TOPSIS model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 174-180.

Water Resource Vulnerability Assessment of Changchun City Based on DPSIR-TOPSIS Model

Zhu Yifan^{1,2}, He Hong³, Zhang Wenjing^{1,2}, Du Shanghai^{1,2}

(1.Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education,

Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 2.College of New Energy and Environment,

Jilin University, Changchun, Jilin 130021, China; 3.Changchun Municipal Water Bureau, Changchun, Jilin 130021, China)

Abstract: [Objective] The current situation and influencing factors of water resource vulnerability in Changchun City, Jilin Province were analyzed in order to provide a reference for the development, utilization, protection, and management of water resources in Changchun City. [Methods] The DPSIR model was used to construct a water resource vulnerability evaluation system based on 19 indicators. The entropy weighting method was used to calculate the weights of each indicator. The TOPSIS method was used to evaluate the water resources vulnerability status of Changchun City from 2005 to 2019. [Results] The water resource system of Changchun City was at a mild vulnerability level in 2005, and fluctuated between 0.3 and 0.5 from 2006 to 2019 (a medium vulnerability level). The influence of each sub-system on the comprehensive evaluation results followed the order of pressure (P) > impact (I) > driving force (D) > state (S) > response (R). [Conclusion] Total water use and total water resources are important factors influencing water resource vulnerability in Changchun City, and groundwater has a greater impact on water resource vulnerability than surface water. The government should continue to increase investments in energy conservation and environmental protection, introduce relevant environmental protection policies, improve the treatment of urban water pollution, further

收稿日期: 2022-02-21

修回日期: 2022-03-21

资助项目: 国家重点研发计划项目“场地地下水污染快速识别与风险监测管控技术”(2019YFC1804804)

第一作者: 朱逸凡(1994—), 男(汉族), 河北省廊坊市人, 硕士研究生, 研究方向为地下水污染监测、预警。Email: 707362777@qq.com。

通信作者: 张文静(1980—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 教授, 博士, 主要从事污染水文地质、环境微生物以及水土污染控制与修复等研究。Email: zhangwenjing80@hotmail.com。

optimize the allocation of water resources, promote water-saving irrigation technology, improve the utilization rate of water resources, and alleviate the pressure on water supplies in dry years.

Keywords: water resources; vulnerability; DPSIR model; entropy weight method; TOPSIS model

水资源脆弱性是评价水资源系统变化的主要指标^[1]。对水资源脆弱性进行科学有效的评价有利于提高水资源利用效率、保护水资源、促进经济与水系统协调发展。随着经济的发展和城市化水平的不断提高,生产生活用水量迅速增加,导致水资源问题日益严重^[2]。特别是水资源短缺问题已经成为制约社会经济发展的关键因素。为解决水资源系统存在的问题,从研究方法和水资源系统构成的角度进行研究已成为国内外专家的主要方向。

已有研究通过一种基于连接熵的水资源脆弱性分析方法,提出了提高安徽省水资源脆弱性水平的建议^[3];通过改进的盲删除粗糙集(IBDRS)方法建立评价指标体系,使用随机森林模型(RF)评价和预测黄淮海流域水资源脆弱性^[4];使用层次分析法和集对分析理论对气候变化背景下北京市水资源脆弱性进行评价^[5];将系统动态模型(SD)与最优配置模型相结合,建立了研究黑河中游地区水资源脆弱性和最优用水结构的模型框架,制定适应性的水资源管理方案^[6];运用改进的径流—覆盖层—降雨(COP)模型,利用 RS 及 GIS 技术对水城盆地的岩溶地下水脆弱性进行评价^[7]。然而,以往研究所建立的指标评价体系未能详细描述各评价因素之间的连续反馈机制,且多针对地表水或地下水单独进行评价,未能将地表水与地下水相结合对水资源系统整体进行脆弱性评价。

吉林省长春市水资源相对紧缺,水资源供需矛盾突出,存在局部地下水超采,地表水污染较为严重等问题^[8]。目前,对于长春市水资源脆弱性尚未进行过相关研究。本研究针对长春市水资源现状,结合长春市多年的统计资料,基于 DPSIR 模型选取与长春市水资源脆弱性密切相关的 19 项指标,采用熵权计算权重,使用 TOPSIS 法对长春市包含地表水、地下水在内的水资源系统进行脆弱性评价,从而分析长春市水资源脆弱性现状及影响因素,以期对长春市水资源开发利用、保护及管理提供参考。

1 研究区概况

长春市地处吉林省中部,地理坐标北纬 $43^{\circ}05'$ — $45^{\circ}15'$,东经 $124^{\circ}18'$ — $127^{\circ}05'$,全市下辖 7 个区,1 个县,代管 3 个县级市,总面积 $24\,662\text{ km}^2$,是中国重要的工业基地。全国第二次土地调查成果显示,全市总面积 $24\,744\text{ km}^2$ 。截至 2020 年 11 月 11 日,长春市常

住人口为 9.06×10^6 人,地区生产总值 5.90×10^{11} 元。

研究区气候为温带大陆性半湿润季风气候,年平均气温 $4.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水多集中在 6—9 月,且分布不均,呈现自西向东递增趋势,其多年平均降水量在 $600\sim 700\text{ mm}$ 之间。研究区内水系包括拉临河和松花江两大水系,主要河流有伊通河、雾开河、新凯河等^[9]。长春市下部基岩为中生代白垩纪红色岩系,岩层致密,为一不透水层或含水水性极微,因而无深层地下水,地下水贫乏。根据 2019 年《长春市水资源公报》显示,长春市地表水资源总量为 $2.12 \times 10^9\text{ m}^3$,地下水资源总量为 $1.60 \times 10^9\text{ m}^3$ 。长春市供水量为 $2.45 \times 10^9\text{ m}^3$,其中地表水供水量为 $1.55 \times 10^9\text{ m}^3$,地下水供水量为 $8.50 \times 10^8\text{ m}^3$,中水回用量为 $4.40 \times 10^7\text{ m}^3$,综合耗水率 56.2% 。

2 研究方法

2.1 DPSIR 模型

1993 年,联合国为综合分析和描述环境问题及其和社会发展之间的关系,提出了压力(pressure)—状态(state)—响应(response)(PSR)模型,1997 年欧洲环境署(EEA)在 PSR 模型上提出了驱动力(driving)—压力(pressure)—状态(state)—影响(impact)—响应(response)(DPSIR)模型,为生态安全评价提供更加灵活系统的评价体系^[10]。

相关研究表明,DPSIR 指标框架方法可以详细描述因素之间的连续反馈机制,可以用来表征和反映具有融合和冲突特征的影响因素^[11],也可以与其他研究框架进行较好的耦合应用^[12]。基于 DPSIR 概念的水资源脆弱性评价指标体系描述了一条引发环境问题的起源和结果之间的因果链^[13],这条因果链表明:气候、人口、经济作为长期驱动力(D)促进当地水资源的开发利用,而人类社会对水资源的开发利用对水环境产生的副作用形成压力(P),造成水环境状态(S)的变化。在各种因素的作用下,水环境的变化对人类社会产生的影响(I),这些影响(I)促使人类对生态环境状态(S)发生的变化做出响应(R),响应(R)所采取的措施反作用于驱动力(D)、环境压力(P)以及状态(S)。

模型中,驱动力(D)包括经济、气候和人类活动等方面;压力(P)包括直接或间接污染物排放等;状态(S)包括生物群和环境的物理、化学和生物状况等方面;影响(I)包括由环境理化生状态变化决定的生

态系统质量和人类健康方面等;响应(R)决策者对非期望的影响做出的政策或技术上的反应。

2.2 DPSIR 评价指标选取与体系构建

为了对长春市水资源进行客观、科学的评价,本文从水资源脆弱性的概念出发,根据科学性、客观性、数据可得性和可操作性等原则,结合长春市水资源现状和特点以及资料获取程度,基于 DPSIR 模型选取 19

项指标建立研究区水资源脆弱性评价指标体系(表 1)。

为研究地表水与地下水分别在水资源脆弱性评价中发挥的作用,在建立 DPSIR 指标体系时,将长春市总用水量以地表水供水量和地下水开采量两项指标表示,纳入压力(P)中;同时将长春市水资源总量以地表水资源量和地下水资源量表示,纳入状态(S)中。

表 1 长春市水资源脆弱性评价指标

目标层	准则层	指标层	单位	指标性质	权重
长春市水资源脆弱性评价	驱动力(D)	人均 GDP(X_1)	元	—	0.055 0
		人口密度(X_2)	人/km ²	—	0.031 9
		城镇化率(X_3)	%	—	0.061 3
		人口增长率(X_4)	%	—	0.055 2
	压力(P)	地表水供水量(X_5)	10 ⁸ m ³	—	0.054 8
		地下水开采量(X_6)	10 ⁸ m ³	—	0.060 4
		污水排放量(X_7)	10 ⁴ m ³	—	0.022 7
		工业总产值增长速度(X_8)	%	—	0.040 0
		农业灌溉面积(X_9)	km ²	—	0.072 0
	状态(S)	年降水量(X_{10})	mm	+	0.046 1
		地表水资源量(X_{11})	10 ⁸ m ³	+	0.047 5
		地下水资源量(X_{12})	10 ⁸ m ³	+	0.061 0
	影响(I)	水资源利用率(X_{13})	%	—	0.041 9
		浅层地下水污染比例(X_{14})	%	—	0.065 0
		劣五类河长占比(X_{15})	%	—	0.080 0
		水功能区达标率(X_{16})	%	+	0.058 7
	响应(R)	全市蓄水总量(X_{17})	10 ⁸ m ³	+	0.032 4
		污水处理率(X_{18})	%	+	0.029 9
		节能环保支出占公共预算支出比重(X_{19})	%	+	0.084 2

2.3 DPSIR 权重确定方法

在建立长春市水资源脆弱性评价的 DISIR 评价体系后,需要对模型中各项评价指标的权重进行计算。目前,国内外广泛采用的方法有变异系数法^[14]、专家打分法^[15]、AHP 法^[16]以及熵权法等^[17]。其中熵权法属于客观赋权法,可以客观地体现数据的原始信息,避免因评价者的主观意愿对评价结果产生较大影响^[18]。本文采用熵权法对模型中所构建的指标体系进行赋权。

熵权法是信息论中一种确定权重的常用方法,其基本思路是根据指标变异性的确定来客观权重^[19],其赋权步骤如下:

(1) 数据标准化。使用熵权法计算指标权重时,首先要对数据进行标准化处理。将表 1 中评价指标根据其在水资源脆弱性的影响分为正向指标(+)和负向指标(-)。

正向指标即对水资源脆弱性起促进作用的指标,数值越大,水资源脆弱性评分越高,水资源系统越不脆弱。对于正向指标,采用公式(1)对其进行标准化:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

负向指标即对水资源脆弱性起抑制作用的指标,数值越大,水资源脆弱性评分越低,水资源系统越脆弱。对于负向指标,采用公式(2)对其进行标准化:

式中: r_{ij} 为标准化后的值; x_{ij} 为原始数据中评价对象的值; x_{\max} 和 x_{\min} 分别最大值和最小值; i 为评价指标的数目; j 为评价数据的年份。

$$r_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

(2) 构造原始数据矩阵。

$$R = (r_{ij})_{n \times m} \quad (3)$$

式中: n, m 分别为评价对象数量、评价指标数量。

(3) 计算指标熵值。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (4)$$

其中, $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, n)$

(4) 计算指标权重。

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{m - \sum_{j=1}^m e_j} \quad (5)$$

2.4 TOPSIS 模型评价方法

采用 TOPSIS 法对长春市水资源脆弱性状况进行评价,该模型旨在对多维度、多项指标进行比较^[20]。其计算步骤如下:

(1) 基于熵权的评价矩阵构建。

使用熵权 ω_j 构建加权评价矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{m1} & y_{m2} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $y_{mn} = r_{mn} \times \omega_m$ 。

(2) 正负理想解确定。

① 正理想解:

$$Y^+ = \{ \max(1 \leq j \leq n) y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, n \} \\ = \{ y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+ \} \quad (7)$$

② 负理想解:

$$Y^- = \{ \min(1 \leq j \leq n) y_{ij} \mid i = 1, 2, \dots, n \} \\ = \{ y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^- \} \quad (8)$$

(3) 距离计算。

计算评价对象各指标值与最优及最劣方案的距

离 D_j^+ 和 D_j^- , 计算公式如下:

$$D_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i (y_i^+ - y_{ij})^2} \quad (9)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i (y_i^- - y_{ij})^2} \quad (10)$$

(4) 贴近度计算。

贴近度取值范围为 $[0, 1]$, 用于表征评价对象与最优方案的接近程度。当计算结果趋近于 1 时表示评价对象越接近最优水平, 越趋近于 0 表示评价对象越接近最劣水平^[21]。贴近度计算公式如下:

$$T_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (11)$$

2.5 研究区水资源脆弱性评价阈值划分

水资源脆弱性是水资源系统受到气候变化、极端事件和人类活动等因素等不利影响过程中所表现出来的适应性。本研究认为, 水资源脆弱性高, 水资源系统所表现出的适应性强, 水资源脆弱性低, 水资源系统所表现出的适应性弱。

在进行阈值划分时, 由于不同研究者在研究水资源脆弱性时采用方法不同, 地域不同, 导致很难对水资源系统的脆弱程度进行界定。本文根据研究区自然、社会、经济和环境特性, 并结合相关研究^[22-23], 将贴近度划分为 4 个等级以评价水资源脆弱性(表 2)。

表 2 长春市水资源脆弱性评价标准

贴近度	脆弱性等级	特征描述
≤ 0.2	重度脆弱	水资源系统结构崩溃, 功能严重缺失, 即将崩溃
$0.2 \sim 0.5$	中度脆弱	水资源系统受损程度大, 结构、功能退化, 稳定性降低
$0.5 \sim 0.8$	轻度脆弱	水资源系统结构、功能轻微受损, 整体仍处于稳定状态
≥ 0.8	不脆弱	水资源系统供需平衡、结构健康、功能稳定

3 长春市水资源脆弱性评价

利用收集到的长春市 2005—2019 年相关经济效益与水资源动态数据, 对其进行水资源脆弱性评价, 通过建立 DPSIR-TOPSIS 模型计算得到长春市在 2005—2019 年的水资源脆弱性评价结果。长春市各年度社会效益来自于历年《长春市统计年鉴》, 水资源量及各项水文数据来自于吉林省水利厅以及历年《长春市水资源公报》。

3.1 长春市水资源脆弱性评价结果与分析

根据公式(1)—(5), 利用熵权法计算得到各项指标权重值(表 1), 由表 1 计算各准则层、指标层权重结果(图 1, 图 2)。

图 1 显示, 在 DPSIR 模型 410 准则层中, 压力(P)所占比例最高, 为 0.249 9; 其次是影响(I), 所占

比例为 0.245 6; 驱动力(D)、状态(S)及响应(R)的比例分别为 0.203 4, 0.154 6, 0.146 5。说明长春市目前水资源系统现状较差, 压力(P)和影响(I)因素对长春市水资源脆弱性的变化起主导作用。

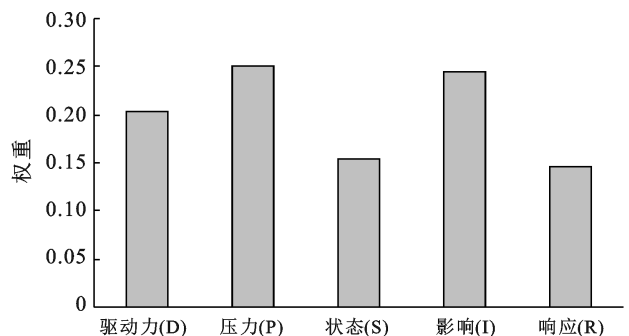


图 1 长春市水资源脆弱性评价模型各子系统所占权重

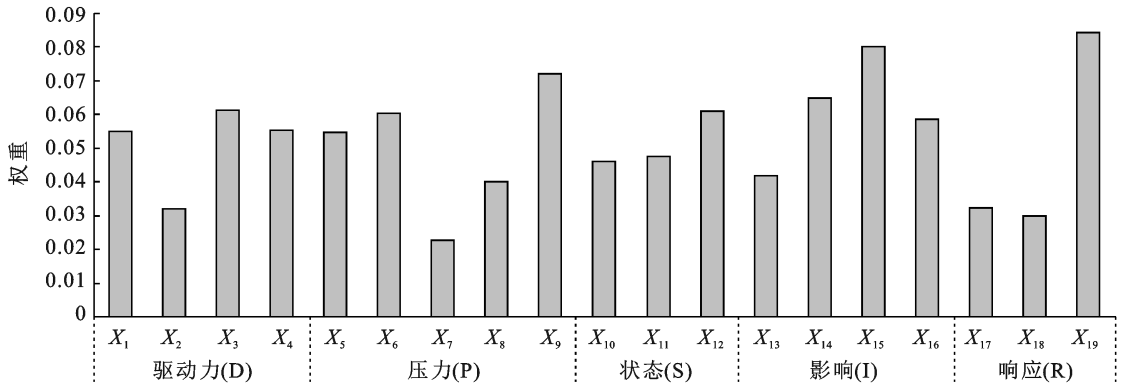


图 2 长春市水资源脆弱性评价指标权重

整体看来(图 2),节能环保支出占公共预算支出比例、劣 V 类河长比例所占权重最高,分别为 0.084 2, 0.080 0。在压力(P)中,地表水供水量、地下水开采量权重分别为 0.054 8, 0.060 4, 两项指标权重之和为 0.115 2;在状态(S)中,地表水资源量、地下水资源量权重分别为 0.047 5, 0.061 0, 权重之和为 0.108 5。由此可以说明,长春市总用水量和水资源总量是影响长春市水资源脆弱性的重要因素,其中地下水较地表水对水资源脆弱性影响更大;日益增加的总用水量导致长春市水生态环境严重污染,长春市劣 V 类河长占比较常年处于较高比例;持续在节能环保方面投入资金,对提高长春市水资源脆弱性有积极作用。

利用公式(6)~(11),计算最优及最劣方案的距离 D_j^+ , D_j^- 及贴近度 T_j 。

结果显示(图 3~5), 2005—2019 年长春市水资源脆弱性呈先下降再上升的趋势, D_j^+ 由 2005 年的 0.20 增加至 2019 年的 0.34, 呈先递增再缓慢递减趋势; D_j^- 由 2005 年的 0.44 减少至 2019 年的 0.29, 呈递减再缓慢递增趋势;贴近度 T_j 由 2005 年的 0.69 减少至 2019 年的 0.46, 呈先快速降低随后缓慢升高的趋势。具体来看, 2005—2007 年长春市水资源脆弱性呈逐渐严重的趋势, 脆弱性等级由轻度脆弱迅速变化至中度脆弱, 其原因是长春市 2005—2007 年经历经济快速发展, 人口较快增长, 工业发展增速快导致水资源的消耗量急剧增加, 且 2005—2007 年长春市水资源总量呈下降趋势。人均 GDP 由 2005 年的 16 897 元增加至 2007 年的 24 672 元, 地表水供水量由 2005 年 $9.94 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加至 2007 年 $1.41 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2007 年地表水、地下水资源量为所统计 15 a 来最低。2008—2019 年, 长春市水资源脆弱性贴近度在区间 $[0.3, 0.5]$ 之间波动, 总体仍处于中度脆弱水平。

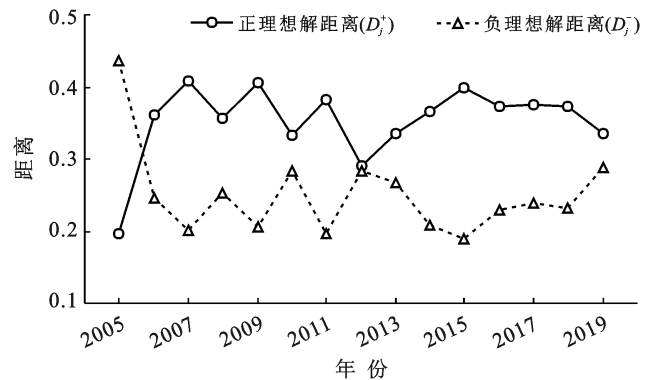
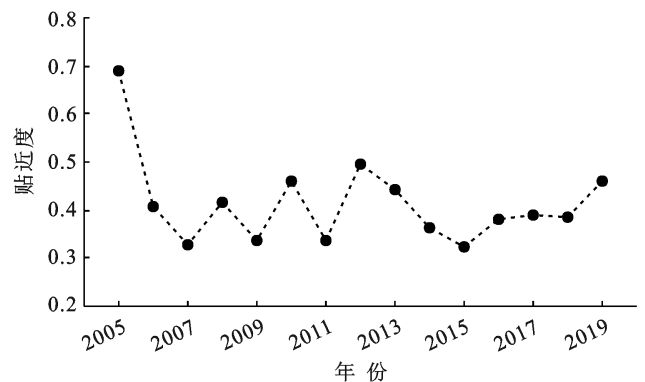
图 3 2005—2019 年长春市水资源脆弱性 D_j^+ , D_j^- 变化趋势

图 4 2005—2019 年长春市水资源脆弱性综合贴近度变化趋势

3.2 子系统水资源脆弱性分析

(1) 驱动力子系统。驱动力子系统在水资源评价体系中的比重占 20.34%, 属于第三重要影响因素, 其贴近度呈下降趋势, 贴近度从 2005 年的 0.643 下降至 2019 年的 0.261。这表明自 2005 年以来, 长春市经济发展处于快速增长阶段, 而水资源系统显然无法适应过快的经济增长产生的负载, 从而对长春市水资源脆弱性产生负面影响。

(2) 压力子系统。压力子系统所占比重为 24.99%, 属于第一重要影响因素, 其贴近度 2005—2011 年期

间显著下降,2012—2018年稳定在区间 $[0.2, 0.4]$,2019年上升至0.454,总体仍处于较低水平。长春市在经济快速发展的同时,不可避免地对环境产生不良影响,其地表水供水量与工业总产值增长速度在2005—2010年快速增加,污水排放量呈逐年递增趋势,这些都对长春市水资源脆弱性带来了巨大压力。

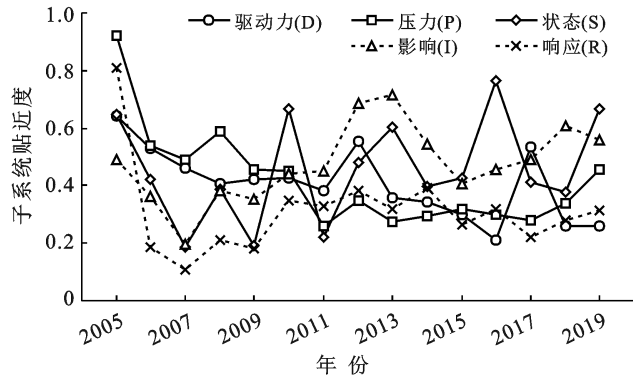


图5 2005—2019年长春市水资源脆弱性各子系统的贴近期变化趋势分析

(3) 状态子系统。状态子系统所占比重为15.46%,其贴近期在区间 $[0.2, 0.8]$ 之间呈现剧烈波动,贴近期大部分时间仍处于低水平区间,产生这种情况的原因主要是状态子系统中年降水量、地表水资源量和地下水资源量等指标主要受气候变化影响。由于状态子系统中3项指标与自然气候等不可控的因素有关,因此需要在其他方面,如兴建水利工程等来增加地表水及地下水资源量,从而提高长春市水资源脆弱性评价等级。

(4) 影响子系统。影响子系统所占比重为24.56%,为第二重要影响因素,其贴近期呈先下降后上升的趋势。2005—2007年下降的原因是经济快速发展。粗放型经济是中国大部分城市的主要发展模式,多年以来“先污染后治理”的方式对长春市水资源系统产生了极大的负面影响。随着国家逐渐重视生态环境治理,2006年,《浙江日报》发表文章提出“两山”理论,2012年党的十八大将生态文明建设写入党章,2013年党的十八届三中全会明确了生态文明体制改革的主要任务,长春市加大环境治理,影响子系统贴近期逐渐提高,长春市水资源状况有所改善,但总体仍处于中等偏下水平。

(5) 响应子系统。响应子系统在5个子系统中所占比重最低,为10.91%,其贴近期呈先下降后上升的趋势,处于低水平区间。从该子系统内部来看,产生上升趋势的原因包括污水处理率由2005年的44.1%增长至2019年的94.4%,政府在节能环保支

出方面也有显著提高,全市蓄水总量多年来较为稳定。持续在节能环保方面投入、合理使用水利设施、提高污水处理能力等,对提高长春市水资源脆弱性有积极作用,然而目前的措施显然无法适应经济社会发展对水资源系统的负面影响,政府部门仍需完善水资源管理政策。

4 结论

(1) 从水资源脆弱性总体评价结果来看,长春市仅2005年处于轻度脆弱水平,2006—2019年在区间 $[0.3, 0.5]$ 之间波动,水资源脆弱性处于中等脆弱水平。近年来长春市经济快速发展,导致水资源需求量快速增加,是长春市水资源脆弱性的最主要原因,如何协调经济社会快速发展过程中对水资源系统的过度开发,仍是未来长春市需要探索、解决的问题。

(2) 综合2005—2019年长春市水资源评价结果,长春市总用水量和水资源总量是影响长春市水资源脆弱性的重要因素,地下水较地表水对水资源脆弱性影响更大。

(3) 从DPSIR各子系统来看,除状态子系统贴近期波动较大,无明显趋势,其余子系统与长春市水资源脆弱性总体评价结果变化趋势基本一致,各子系统对综合评价结果的影响力为:压力(P) > 影响(I) > 驱动力(D) > 状态(S) > 响应(R)。

(4) 对策建议。①持续加大在节能环保方面投入资金。②出台相关环境保护政策,提高城市水污染治理力度。③进一步优化水资源配置,推广节水灌溉技术,提高水资源利用率,缓解枯水年供水压力。

[参 考 文 献]

- [1] Śliwiński P. The influence of water and mineral oil on volumetric losses in a hydraulic motor [J]. Polish Maritime Research, 2017, 24(s1): 213-223.
- [2] Wang Hao, An Xiaoqing, Zhang Zhenying. Effect of advanced treatment on ammonia nitrogen contained in secondary effluent from wastewater treatment plant [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2018, 27(4): 2043-2050.
- [3] Pan Zhengwei, Jin Juliang, Li Chunhui, et al. A connection entropy approach to water resources vulnerability analysis in a changing environment [J]. Entropy, 2017, 19(11): 591.
- [4] Chen Yan, Feng Yazhong, Zhang Fan, et al. Assessing and predicting the water resources vulnerability under various climate-change scenarios: A case study of Huang-Huai-Hai River Basin, China [J]. Entropy (Basel, Switzerland), 2020, 22(3): 333.

- [5] Yang Xiaohua, Sun Boyang, Zhang Jian, et al. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China [J]. *Natural Hazards*, 2016, 84(1): 63-76.
- [6] Li Ruihuan, Guo Ping, Li Jianbing. Regional water use structure optimization under multiple uncertainties based on water resources vulnerability analysis [J]. *Water Resources Management*, 2018, 32(5): 1827-1847.
- [7] 汪莹, 罗朝晖, 吴亚, 等. 岩溶地下水脆弱性评价的城镇化因子: 以水城盆地为例[J]. *地球科学*, 2019, 44(9): 2909-2919.
- [8] 周彦红, 尹华, 刘玉申, 等. 长春市水资源开发利用存在的问题及其节水潜力分析[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2015, 47(2): 153-157.
- [9] 杨天通. 长春市水资源可持续利用及其与经济脱钩分析[D]. 吉林 长春: 吉林大学, 2019.
- [10] 崔馨月, 方雷, 王祥荣, 等. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 302-319.
- [11] Xiang Xiaojun, Li Qiong. Water resources vulnerability assessment and adaptive management based on projection pursuit model [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 103(S1): 431.
- [12] 赵翔, 贺桂珍. 基于 CiteSpace 的驱动力—压力—状态—影响—响应分析框架研究进展[J]. *生态学报*, 2021, 41(16): 6692-6705.
- [13] Labianca C, de Gisi S, Todaro F, et al. DPSIR model applied to the remediation of contaminated sites. A case study: Mar piccolo of Taranto [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(15): 5080.
- [14] 王方方, 王延华, 蔡祖聪, 等. 基于 DPSIR 模型的曲周县氮素资源可持续利用评价与预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9): 1133-1140.
- [15] 王文莹, 李明孝. 基于 DPSIR 的湖南省土地生态安全时空变化[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(8): 2724-2736.
- [16] 黄垒, 张礼中, 朱吉祥, 等. 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 68-73.
- [17] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(2): 11-16.
- [18] 杨法暄, 郑乐, 钱会, 等. 基于 DPSIR 模型的城市水资源脆弱性评价: 以西安市为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 77-84.
- [19] 郝洋, 梁秀娟, 孟凡傲, 等. 基于 AHP-熵权法的地下水水质模糊综合评价: 以白城市为例[J]. *节水灌溉*, 2016(6): 51-54.
- [20] 顾家明, 胡卫卫, 田素妍. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的江苏省生态承载力评价及障碍因素诊断[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 246-252.
- [21] 何刚, 夏业领, 朱艳娜, 等. 基于 DPSIR-TOPSIS 模型的安徽省土地承载力评价及预测[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 127-134.
- [22] 刘宝涛, 王冬艳, 刘惠清. 基于 DPSIR 模型与 TOPSIS 算法的吉林省土地利用系统健康诊断[J]. *吉林农业大学学报*, 2017, 39(1): 74-81.
- [23] 周奉, 苏维词, 郑群威. 基于 DPSIR 模型的黔中地区水资源脆弱性评价研究[J]. *节水灌溉*, 2018(8): 59-65.

(上接第 157 页)

- [17] 方纲, 阮伏水, 吴雄海, 等. 福建省主要土壤可蚀性特征初探[J]. *福建水土保持*, 1997, 9(2): 19-23.
- [18] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007 [S]. 北京: 2008.
- [19] 高华端. 贵州岩溶地区地质条件对水土流失的影响[J]. *山地农业生物学报*, 2003, 22(1): 20-22.
- [20] 徐加盼. 颗粒组成对花岗岩风化岩体抗剪强度的影响研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2020: 24-26.
- [21] 李黎, 颜琳, 黄晶. 砾石量对砾质黏土抗剪强度参数影响规律的试验研究[J]. *四川建筑*, 2013, 33(2): 74-75.
- [22] 刘洋, 李春阳. 植被因子对水土流失的影响[J]. *世界科技研究与发展*, 2005, 27(5): 95-99.
- [23] 刘悦, 刚成诚, 温仲明, 等. 降雨和植被因子对延河流域土壤侵蚀影响的定量评估[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(2): 35-42.
- [24] 潘成忠, 上官周平. 降雨和坡度对坡面流体力学参数的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2009, 17(6): 843-851.
- [25] 邓辉, 何政伟, 陈晔, 等. 基于 GIS 和 RUSLE 模型的山地环境水土流失空间特征定量分析: 以四川泸定县为例[J]. *地球与环境*, 2013, 41(6): 669-679.
- [26] 陈法扬. 不同坡度对土壤冲刷量影响试验[J]. *中国水土保持*, 1985(2): 20-21.