

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 06. 11

济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比

李如意¹, 束龙仓¹, 鲁程鹏¹, 司海洋², 胡笑燕²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 济宁市水资源办公室, 山东 济宁 272000)

摘要:针对目前水资源承载能力内涵界定尚不统一, 评价手段多样的现状, 采用投影寻踪法和行业技术大纲方法对济宁市 11 个县市区的水资源承载能力进行评价, 并与其他学者利用主成分分析法的评价结果进行对比。结果表明: 投影寻踪法评价结果为还有一定潜力, 行业技术大纲方法评价结果为超载, 主成分分析法评价结果为还有开发潜力。3 种方法评价结果存在差异的原因包括指标选取依据不同、指标权重确定方法不同以及数据年份不同。影响济宁市水资源承载能力强弱的主要因素是人均水资源占有量和地下水开发利用程度。

关键词:水资源承载能力; 投影寻踪法; 行业技术大纲方法; 主成分分析法; 济宁市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)06 - 0065 - 06

Application and comparison of water resources carrying capacity evaluation methods in Jining City

LI Ruyi¹, SHU Longcang¹, LU Chengpeng¹, SI Haiyang², HU Xiaoyan²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jining Water Resources Office, Jining 272000, China)

Abstract: Aiming at the present situation that the definition of water resources carrying capacity is not uniform and the evaluation methods are various, the projection pursuit method and the industry technical outline method are used to evaluate the water resources carrying capacity of 11 counties and cities in Jining City, and the results are compared with those of other scholars using the principal component analysis method. The results show that the evaluation result of the projection pursuit method is certain potential, the evaluation result of the industry technical outline method is overloaded, and the evaluation result of the principal component analysis method is certain development potential. The reasons for the differences among the three methods include the differences in the selection of indicators, the weight of indicators and the data year. The main factors affecting the water resources carrying capacity in Jining City are the per capita water resources occupancy and the degree of groundwater exploitation and utilization.

Key words: water resources carrying capacity; projection pursuit method; industry technical outline method; principal component analysis method; Jining City

水是地区社会经济发展、生态环境建设必不可少的资源条件,是城市化建设、可持续发展的战略资源^[1]。水资源在人类生产、生活、生态方面起着至关重要的作用,保持水资源、社会、经济、环境协调发展是可持续发展的前提条件^[2]。由于水问题日益突出,新疆水资源软科学课题研究组在 20 世纪 80 年代末期提出水资源承载能力的概念^[3]。随后我国不少学者对水资源承载能力进行深入探讨,1992

基金项目:国家自然科学基金(41572210)
作者简介:李如意(1993—),女,硕士研究生,研究方向为地下水数值模拟。E-mail:liruyi0117@126.com
通信作者:束龙仓,教授。E-mail:lcschu@hhu.edu.cn

年施雅风等^[4]对乌鲁木齐河流域、1993 年许有鹏^[5]对新疆和田河流域、2001 年惠泱河等^[6]对国家重点经济开发区关中平原等都展开了水资源承载能力的相关研究。目前水资源承载能力内涵界定尚不统一,本文对水资源承载能力的定义是指可预见的时期内在满足合理的河道内生态环境用水和保护生态环境的前提下,综合考虑来水情况、工况条件、用水需求等因素,水资源承载经济社会的最大负荷。目前水资源承载能力的评价方法很多,包括常规趋势法^[4]、多目标综合分析法^[7]、模糊综合评价法^[5]、主成分分析法^[8]、投影寻踪法^[9]、物元模型^[10]、系统动力学法^[11]、集对分析法^[12]、控制目标反推法^[13]等。其中,投影寻踪法由美国科学家 Kruskal^[14]在 20 世纪 60 年代最先提出,Friedman 等^[15]在 1974 年最早发现此方法在高维数据处理方面的优势,并正式提出投影寻踪法的概念。我国学者金菊良等^[16]把投影寻踪法应用于农业生产率评价,王顺久等^[9]用该方法评价了流域水资源承载能力并与其他评价方法进行了对比分析。另外,2016 年水利部提出建立全国水资源预警体制,发布了相关的技术大纲,指导各地区进行水资源承载状况评价,利用该技术大纲对水资源承载能力进行评价称作行业技术大纲法。

不同水资源承载能力评价方法的结果具有差异性和可对比性,本文采用投影寻踪和行业技术大纲两种评价方法分别对济宁市 11 个县市区水资源承载能力进行评价,并与张光凤等^[17]利用主成分分析法对相同地区的研究结果进行对比,以期为该地区水资源合理利用与管控提供依据。

1 研究区概况

济宁市位于鲁西南腹地,地处黄淮海平原与鲁中南山地交接地带,坐标为北纬 34°26′~35°57′,东经 115°52′~117°36′,包括任城区、兖州区、曲阜市、邹城市、微山县、汶上县、泗水县、鱼台县、金乡县、嘉祥县、梁山县等 11 个县市区。总土地面积 11 285 km²,地形以低山丘陵和平原洼地为主,地势东高西低,地貌较为复杂。位于东亚季风气候区,属暖温带季风型大陆性气候区,四季分明,夏季高温多雨,冬季多晴寒天。多年平均气温 13.3~14.1℃,年平均降水量为 597~820 mm。全市多年平均水资源总量 46 亿 m³,其中,地表水资源量 28.3 亿 m³,地下水资源量 17.7 亿 m³,多年平均水资源可利用量 30.2 亿 m³。本文基础数据主要来源于济宁市 2015 年第二次全国土地调查成果、水资源公报、统计年鉴、水资源保护规划及水功能区水质监测报告等成果中的基础数据。

2 评价方法

2.1 投影寻踪法

投影寻踪的基本思路是通过计算机把高维数据线性投影到低维子空间上,然后通过优化投影指标函数求出能反映原高维数据结构或特征的投影向量,在低维空间上对数据结构进行分析以达到研究和分析高维数据的目的^[17]。投影寻踪法评价包含 5 个步骤^[18]。

步骤 1: 数据归一化处理。设第 i 个样本第 j 个指标值为 $x_{i,j}^*$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p$); n, p 分别为济宁市县级行政区的数量和各县包含的指标个数。归一化公式为

$$x_{i,j} = \begin{cases} \frac{x_{i,j}^* - x_{\min_j}}{x_{\max_j} - x_{\min_j}} & \text{越大越优指标} \\ \frac{x_{\max_j} - x_{i,j}^*}{x_{\max_j} - x_{\min_j}} & \text{越小越优指标} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{\max_j}$ 和 $x_{\min_j}$ 分别为第 j 个指标值的最大值和最小值; $x_{i,j}$ 为指标特征值归一化的序列。

步骤 2: 线性投影。将高维数据投影到一维子空间进行研究,设 $\mathbf{a}$ 为 p 维单位投影向量, $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_p)$, 定义 $z_{i,j} = a_j x_{i,j}$ 为样本指标的投影分量,则 $x_{i,j}$ 综合的一维投影特征值 z_i^* 可表示为

$$z_i^* = \sum_{j=1}^p a_j x_{i,j} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

步骤 3: 构造投影指标函数。为了反映多维指标数据的结构特征,投影时要求投影特征值 z_i 尽可能多地提取 $x_{i,j}$ 的变异信息,整体上投影点团尽可能散开,即 z_i 在一维空间散布的类间距 S_z 尽可能大。同时,投影特征值 z_i 的局部密度 D_z 达到最大,即局部投影点团尽量集中。因此,构建的投影目标函数可表示为

$$Q(\mathbf{a}) = S_z D_z \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z_i - E(z)]^2}{n-1}}$$

$$D_z = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r_{i,j}) \right] u(R - r_{i,j})$$

式中: $Q(\mathbf{a})$ 为投影目标函数; S_z 为投影特征值 z_i 的标准差; D_z 为投影特征值 z_i 的局部密度; $E(z)$ 为投影方向对应投影特征值 z_i 的平均值; R 为局部密度的窗口半径,根据数据特征确定,可取 $r_{\max} + \frac{p}{2} \leq R \leq 2p; r_{i,j}$ 为各个投影特征值间距, $r_{i,j} = |z_i - z_j|$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n; u(R - r_{i,j})$ 为单位阶跃函数,当 $R - r_{i,j} \geq 0$ 时, $u(R - r_{i,j}) = 1$, 反之, $u(R - r_{i,j}) = 0$ 。

步骤 4:优化投影方向。投影寻踪方法成功应用的关键在于投影目标函数的优化^[19]。不同的投影方向反映不同的数据结构特征,最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向,因此投影指标函数值最大时对应的投影方向为最佳投影方向,即:

$$\begin{cases} \max[Q(\boldsymbol{a})] = S_z D_z \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^p a_j^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

步骤 5:综合评价。得到最佳投影方向 $\boldsymbol{a}^*$, 计算一维投影特征值 z_i^* 与投影分量 $z_{i,j}$, 并以 z_i^* 与 $z_{i,j}$ 差异水平对样本数据进行综合评价, z_i^* 值越大, 样本越优。

2.2 行业技术大纲方法

行业技术大纲法按照可操作、可度量、可监测的原则,根据水利部办公厅印发的《全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)》,以 2015 年为现状年,主要考虑水量、水质两个方面,采用用水总量指标、地下水开采量指标、水功能区水质达标率指标和污染物限排量指标进行单因素评价。评价方法为对照各评价指标度量标准直接判断其水资源承载状况,划定为严重超载、超载、临界状态、不超载 4 个等级。①严重超载:水量、水质要素任一要素为严重超载;②超载:水量、水质要素任一要素为超载;③临界状态:水量、水质要素任一要素为临界状态;④不超载:水量、水质要素均不超载。判别标准见表 1。

3 评价结果对比与分析

3.1 基于投影寻踪法的评价结果

参考夏军等^[20]研究的水资源评价标准,结合研究区实际情况与现有的数据资料,选取社会经济指

标:人口密度、城镇化率、人均 GDP、万元 GDP 用水量;水资源指标:人均水资源占有量、单位面积水资源量、有效灌溉率、地表水开发利用程度、地下水开发利用程度;生态环境指标:水体 COD 浓度、植被覆盖率共 11 项作为水资源承载能力评价指标,根据类似地区研究成果^[21-22],各评价等级指标取值范围见表 2。

根据前文介绍的方法计算投影特征值,投影值越大对应的水资源承载能力的潜力越大,从而得到 11 个县级行政区的水资源承载能力的潜力从大到小依次为:兖州区、任城区、微山县、梁山县、金乡县、鱼台县、曲阜市、汶上县、邹城市、嘉祥县、泗水县。根据计算出的权重进行排序,可知城镇化率、人均 GDP、有效灌溉率、人均水资源占有量、地下水开发利用程度 5 个指标是影响评价结果的主要因素。进而计算各个县域的指标贡献率,具体结果见表 3。由表 3 可见,任城区、曲阜市的城镇化率贡献率分别达到了 38.0%、28.1%;兖州区、邹城市的主要特点是受人均 GDP 影响较大;微山县、汶上县、金乡县及嘉祥县的有效灌溉率贡献率最大;泗水县植被覆盖率贡献率所占比重最大,占 22.4%;鱼台县和梁山县的人均水资源占有量分别是 36.1%、24.2% 的贡献率。最后得到任城区、兖州区、曲阜市、邹城市、微山县、汶上县、泗水县、鱼台县、金乡县、嘉祥县、梁山县的水资源承载力等级分别为Ⅲ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅲ级、Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅲ级。

3.2 基于行业技术大纲法的评价结果

基于行业技术大纲法对济宁市各县市区的水资源承载能力评价结果见表 4。由表 4 可见,水量、水质综合评价结果中兖州区、邹城市、汶上县、嘉祥县超载,其他地区严重超载。

表 1 行业技术大纲法评价标准

等级	用水总量 W	平原区地下水开采量 G	水功能区水质达标率 Q	污染物入河量 P
严重超载	$W \geq 1.2W_0$	$G \geq 1.2G_0$ 或超采区浅层地下水超采系数不小于 0.3 或存在深层承压水开采量或存在山丘区地下水过量开采	$Q \leq 0.4Q_0$	$P \geq 3P_0$
超载	$W_0 \leq W < 1.2W_0$	$G_0 \leq G < 1.2G_0$ 或超采区浅层地下水超采系数介于 (0, 0.3] 或存在山丘区地下水过量开采	$0.4Q_0 < Q \leq 0.6Q_0$	$1.2P_0 \leq P < 3P_0$
临界状态	$0.9W_0 \leq W < W_0$	$0.9G_0 \leq G < G_0$	$0.6Q_0 < Q \leq 0.8Q_0$	$1.1P_0 \leq P < 1.2P_0$
不超载	$W < 0.9W_0$	$G < 0.9G_0$	$Q > 0.8Q_0$	$P < 1.1P_0$

注: W_0 、 G_0 、 Q_0 、 P_0 分别为用水总量指标、平原区地下水开采量指标、水功能区水质达标率要求和污染物限排量。

表 2 各评价等级的指标取值范围

等级	人口密度/(人·km ⁻²)	城镇化率/%	人均 GDP/元	万元 GDP 用水量/m ³	人均水资源占有量/m ³	单位面积水资源量/(万 m ³ ·km ⁻²)	有效灌溉率/%	地表水开发利用程度/%	地下水开发利用程度/%	水体 COD 质 量浓度/ (mg·L ⁻¹)	植被覆盖率/%
I 级	100	80	35 000	80	2 200	50	65	20	15	10	40
Ⅱ级	200	55	21 000	110	1 700	35	45	40	40	20	30
Ⅲ级	400	45	7 000	250	1 000	25	35	50	60	40	20
Ⅳ级	600	30	4 000	600	500	10	20	60	80	60	10

表 3 济宁市各县市区指标贡献率

%

行政区	人口密度	城镇化率	人均GDP	万元 GDP用水量	人均水资源占有量	单位面积水资源量	有效灌溉率	地表水开发利用程度	地下水开发利用程度	水体 COD 质量浓度	植被覆盖率
任城区	0	38.0	10.9	3.2	2.5	4.8	22.5	2.3	10.9	3.0	2.0
兖州区	3.4	17.5	24.3	2.8	10.9	3.9	19.5	2.9	9.9	2.6	2.3
曲阜市	7.2	28.1	21.4	5.8	0	0.9	25.3	3.8	0	0	7.5
邹城市	8.5	26.8	32.6	6.0	5.0	1.8	2.8	2.9	0.3	4.9	8.4
微山县	7.8	11.9	15.3	3.7	14.1	1.0	27.4	5.8	8.5	3.7	0.9
汶上县	7.4	9.5	4.5	4.2	10.3	3.8	39.1	5.8	4.1	5.2	6.0
泗水县	15.7	13.7	0	7.2	5.4	0	0	9.7	20.1	5.9	22.4
鱼台县	7.8	2.2	4.0	0	36.1	9.3	28.5	4.1	3.4	4.7	0
金乡县	7.1	11.0	0.3	2.6	15.5	4.5	27.4	5.7	17.0	5.1	3.8
嘉祥县	10.4	0	1.4	6.1	1.0	2.2	57.2	0	4.3	8.5	9.0
梁山县	5.2	4.5	2.1	1.9	24.2	7.4	22.2	6.1	19.0	3.9	3.5

注：“0”不代表没有贡献,表示该地区此项指标在所有样本中贡献率是最小的。

表 4 行业技术大纲法的评价结果

行政区	用水总量	平原区地下水开采量	水量评价	水功能区水质达标率	污染物入河量	水质评价	综合评价结果
任城区	不超载	超载	超载	不超载	严重超载	严重超载	严重超载
兖州区	不超载	超载	超载	不超载	超载	超载	超载
曲阜市	不超载	临界状态	临界状态	不超载	严重超载	严重超载	严重超载
邹城市	不超载	临界状态	临界状态	临界状态	超载	超载	超载
微山县	不超载	临界状态	临界状态	不超载	严重超载	严重超载	严重超载
汶上县	不超载	超载	超载	不超载	不超载	不超载	超载
泗水县	临界状态	不超载	临界状态	不超载	严重超载	严重超载	严重超载
鱼台县	不超载	临界状态	临界状态	严重超载	不超载	严重超载	严重超载
金乡县	不超载	临界状态	临界状态	严重超载	严重超载	严重超载	严重超载
嘉祥县	临界状态	临界状态	临界状态	临界状态	超载	超载	超载
梁山县	不超载	临界状态	临界状态	不超载	严重超载	严重超载	严重超载

3.3 3 种评价方法结果对比分析

投影寻踪法、行业技术大纲法以及主成分分析法分别对济宁市各县市区水资源承载能力进行评价的结果对比见表 5。

表 5 3 种评价方法的评价结果对比

行政区	投影寻踪法	行业技术大纲法	主成分分析法
任城区	Ⅲ级	严重超载	I 级
兖州区	Ⅱ级	超载	I 级
曲阜市	Ⅲ级	严重超载	I 级
邹城市	Ⅲ级	超载	I 级
微山县	Ⅲ级	严重超载	I 级
汶上县	Ⅲ级	超载	Ⅱ级
泗水县	Ⅳ级	严重超载	Ⅱ级
鱼台县	Ⅲ级	严重超载	Ⅱ级
金乡县	Ⅲ级	严重超载	Ⅱ级
嘉祥县	Ⅳ级	超载	Ⅱ级
梁山县	Ⅲ级	严重超载	Ⅱ级

由表 5 可见,投影寻踪法评价结果整体承载能力等级为Ⅲ级,比行业技术大纲法整体承载状况严重超载的状态强;主成分分析方法只存在 I 级、Ⅱ级两种承载能力,各县市区承载能力均强于另外两种方法的评价。投影寻踪法和行业技术大纲法对水资源承载能力评价结果相似的是邹城市、汶上县和泗水县;利用投影寻踪法评价时,任城区、兖州区、曲阜市、微山县、鱼台县、金乡县和梁山县承载状况更强,而利用行业技术大纲法时,嘉祥县承载状况更强。

投影寻踪法是通过优化投影指标函数,求出能

反映原高维数据结构或特征的投影向量,在低维空间上对数据结构进行分析,以达到研究和分析高维数据的目的。行业技术大纲法是对各评价单元的绝对状态进行评价,给定了相应的等级界限。主成分分析法是对高维数据进行降维处理,以少数综合指标代替原始高维变量,尽可能保存数据信息不流失,比较客观地确定指标权重。

投影寻踪法评价指标权重较大的几项是城镇化率、人均 GDP、有效灌溉率、人均水资源占有量以及地下水开发利用程度;行业技术大纲法的评价结果主要受主要污染物入河量和平原区地下水开采量影响;主成分分析法的主要贡献指标是人均水资源占有量、单位面积水资源量、水资源开发利用率以及人均供水量。

投影寻踪法和行业技术大纲法所得出的水资源承载能力评价结果存在差异,主要是由于评价指标的选取原则不同。投影寻踪法根据样本数据自身越大越优或越小越优的特性进行计算,得出指标权重,得到各评价单元的相对大小,避免主观因素带来的误差,绝对状态需要根据数据特性划出相应的等级临界值;行业技术大纲法则根据相应的等级界限确定各评价单元的绝对状态。主成分分析法与其他两种方法评价结果存在差异主要是因为:①指标选取依据侧重点不同;②指标权重的确定方法不同;③数

据年份不同。随着济宁市经济社会发展和水资源的持续利用,水资源承载能力也发生了一定程度的变化。从评价结果来看,投影寻踪法和主成分分析法是从区域水资源承载能力的潜力角度出发的;而行业技术大纲法关注的是区域水资源承载状况,适用于考核评价和管理。

4 结 论

- a. 采用投影寻踪法对济宁市各县市区的水资源承载力评价结果表明,城镇化率、人均 GDP、有效灌溉率、人均水资源占有量、地下水开发利用程度 5 个指标是影响济宁市水资源承载能力的主要因素。兖州区承载能力较强,泗水县、嘉祥县承载能力弱,其他各县承载能力处于两者之间,还有一定的潜力。
- b. 行业技术大纲法对济宁市各县市区的水资源承载力评价结果表明,影响水质超载的原因是主要污染物入河量,影响水量超载的原因是平原区地下水开采量。兖州区、邹城市、汶上县、嘉祥县超载,其他地区严重超载,承载能力差。
- c. 投影寻踪法、行业技术大纲法以及主成分分析法的评价结果对比表明,投影寻踪法评价结果整体承载能力等级为Ⅲ级,比行业技术大纲法整体承载状况严重超载的状态强;主成分分析方法只存在 I 级、Ⅱ级两种承载能力,各县市区承载能力均强于另外两种方法的评价。水资源承载能力评价结果存在差异性主要是因为指标选取和权重确定不同产生的;投影寻踪法和主成分分析法侧重区域水资源承载能力的潜力;行业技术大纲法更关注区域水资源承载状况,适用于考核评价和管理,也存在年份不同产生的数据差异。

参考文献:

[1] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3): 14-16. (MIN Qingwen, YU Weidong, ZHANG Jianxin. Fuzzy-based evaluation of water resources carrying capacity and its application [J]. Research of Soil and Water Conservation,2004,11(3):14-16. (in Chinese))

[2] 何希吾,陆亚洲. 区域社会经济发展与水资源[J]. 科学对社会的影响,1996(2):12-16. (HE Xiwu, LU Yazhou. Social and economic development in regional and water resources[J]. Impact of Science on Society,1996(2):12-16. (in Chinese))

[3] 新疆水资源软科学课题组. 新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J]. 水利水电技术,1989(6):2-9. (The Research Group of Water Resources Soft Science in Xinjiang. Water resources carrying capacity and its

development strategy in Xinjiang[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,1989(6):2-9. (in Chinese))

[4] 施雅风,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京:科学出版社,1992.

[5] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报,1993,8(3):229-237. (XU Youpeng. A study of comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in the arid area;a case study in the Hetian River Basin of Xinjiang[J]. Journal of Natural Resources,1993,8(3):229-237. (in Chinese))

[6] 惠决河,蒋晓辉,黄强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,21(1):30-34. (HUI Yanghe,JIANG Xiaohui,HUANG Qiang,et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2001,21(1):30-34. (in Chinese))

[7] 徐中民,程国栋. 运用多目标决策分析技术研究黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2000,36(2):122-132. (XU Zhongmin, CHENG Guodong. A study on the water resources carrying capacity by using the method of multi-objective optimization model:taking the Heihe River as an example[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences),2000,36(2):122-132. (in Chinese))

[8] 傅潮,纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价:主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境,1999,8(2):168-173. (FU Xiang, JI Changming. A comprehensive evaluation of the regional water resources carrying capacity:application of main component analysis method[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,1999,8(2):168-173. (in Chinese))

[9] 王顺久,侯玉,张欣莉,等. 流域水资源承载能力的综合评价方法[J]. 水利学报,2003,34(1):88-92. (WANG Shunjiu, HOU Yu, ZHANG Xinli, et al. Comprehensive evaluation method for water resources carrying capacity in river basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2003,34(1):88-92. (in Chinese))

[10] 门宝辉,王志良,梁川,等. 物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版),2003,35(1):34-37. (MEN Baohui, WANG Zhiliang, LIANG Chuan, et al. Application of matter element model to evaluating on of resources carrying capacity of regional groundwater[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition),2003,35(1):34-37. (in Chinese))

[11] 李丽娟,郭怀成,陈冰,等. 柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学,2000,21(2):20-23. (LI Lijuan, GUO Huaicheng, CHEN Bing, et al. Water resource supporting capacity of Chaidamu Basin[J]. Environmental Science,2000,21(2):20-23. (in Chinese))

[12] 张欣,陈华伟,仕玉治,等. 基于集对分析的黄河三角洲

- 东营市水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 17-21. (ZHANG Xin, CHEN Huawei, SHI Yuzhi, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Dongying City in Yellow River Delta based on set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 17-21. (in Chinese))
- [13] 左其亭. 城市水资源承载力: 理论·方法·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [14] KRUSKAL J B. Toward a practical method which helps uncover the structure of a set of multivariate observations by finding the linear transformation which optimizes a new index of condensation, in statistical computation[M]. New York: Academic Press, 1969.
- [15] FRIEDMAN J H, TUKEY J W. A projection pursuit algorithm for exploratory data analysis [J]. IEEE Transactions on Computers, 1974, 23(9): 881-890.
- [16] 金菊良, 魏一鸣, 付强, 等. 农业生产综合力评价的投影寻踪模型[J]. 农业系统科学与综合研究, 2001, 17(4): 241-243. (JIN Juliang, WEI Yiming, FU Qiang, et al. Projection pursuit model for comprehensive evaluation of agricultural productive capacity [J]. System Sciences and Comprehensive Studies, 2001, 17(4): 241-243. (in Chinese))
- [17] 张光风, 张祖陆. 基于 GIS 的济宁市水资源承载力的主成份分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 21-24. (ZHANG Guangfeng, ZHANG Zhulu. Principal component analysis of water resources carrying capacity in Jinning based on GIS techniques [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12): 21-24. (in Chinese))
- [18] 薛联青, 朱祎真, 王思琪, 等. 基于投影寻踪的湖泊生态健康评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 67-72. (XUE Lianqing, ZHU Yizhen, WANG Siqi, et al. Lake ecosystem health assessment based on projection pursuit [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 67-72. (in Chinese))
- [19] 黄显峰, 贾永乐, 方国华. 基于投影寻踪法的城市水生态文明建设评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 117-122. (in Chinese))
- [20] 夏军, 张永勇, 王中根, 等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1482-1488. (XIA Jun, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. Water carrying capacity of urbanized area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1482-1488. (in Chinese))
- [21] 潘兴瑶, 夏军, 李法虎, 等. 基于 GIS 的北方典型区水资源承载力研究: 以北京市通州区为例[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 664-671. (PAN Xingyao, XIA Jun, LI Fahu, et al. Applied study on evaluation method for water resources carrying capacity based on GIS techniques in typical north district [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 664-671. (in Chinese))
- [22] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价: 以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA Feng, WANG Qian, LIN Wenjing, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model: a case study in Shijiazhuang [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese))
- (收稿日期: 2017-12-28 编辑: 王芳)

(上接第 48 页)

- [5] 尚钊仪,张亚洲,戴晶晶,等.昆山主城及周边区域活水畅流改善水环境方案研究[J].水资源保护,2017,33(6):125-132. (SHANG Zhaoyi, ZHANG Yazhou, DAI Jingjing, et al. Study on water environment improvement scheme by living water flow in Kunshan main city and its surrounding areas[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(6):125-132. (in Chinese))
 - [6] 费国松,胡尊乐.太湖流域湖西区水量调度与水环境改善试验研究[J].江苏水利,2015(7):40-44. (FEI Guosong, HU Zunle. Study on experiment of water dispatch and water environment improvement in west district of Taihu Basin [J]. Jiangsu Water Conservancy, 2015(7): 40-44. (in Chinese)).
 - [7] 刘春生,吴浩云.引江济太调水试验的理论和实践探索[J].水利水电技术,2003,34(1):4-8. (LIU Chunsheng, WU Haoyun. The theory and practice of water diversion from the Yangtze River to Taihu Lake [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(1):4-8. (in Chinese)).
 - [8] 程文辉,王船海,朱琰.太湖流域模型[M].南京:河海大学出版社,2006.
 - [9] 赵林林,朱广伟,顾钊,等.太湖水体氮、磷赋存量的逐月变化规律研究[J].水文,2013(5):28-33. (ZHAO Linlin, ZHU Guangwei, GU Zhao, et al. Monthly variation of nitrogen and phosphorus volume in Taihu Lake, China [J]. Journal of China Hydrology, 2013(5):28-33. (in Chinese))
 - [10] 戴秀丽,钱佩琪,叶凉,等.太湖水体氮、磷浓度演变趋势(1985—2015年)[J].湖泊科学,2016,28(5):935-943. (DAI Xiuli, QIAN Peiqi, YE Liang, et al. Changes in nitrogen and phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985-2015 [J]. Lake of Science, 2016, 28(5):935-943. (in Chinese))
- (收稿日期:2017-12-17 编辑:王 芳)