

基于突变级数法的徐州市近 10 年水环境承载力评价

吴颖超¹, 王震¹, 曹磊¹, 王新军^{1,2}, 赵言文¹

(1. 南京农业大学 资源与环境科学研究院, 江苏 南京 210095; 2. 常州工学院 艺术与设计学院, 江苏 常州 213002)

摘要: [目的] 研究徐州市近 10 a 水环境承载力状况, 为完善区域水环境承载力研究体系提供理论支撑。[方法] 从水资源承载力和水污染承载力两方面选取指标, 采用改进熵值法对指标进行重要性排序, 建立基于突变级数法的区域水环境承载力评价模型。[结果] (1) 研究区各目标年水资源承载力水平总体偏低, 年际波动较大, 其中 2002, 2006 和 2010 年处于等级 I 水平, 即弱承载状态; (2) 水污染承载力整体呈上升趋势, 从 2005 年开始达到并保持在等级 III 水平; (3) 徐州市水环境承载力仅 2005 和 2009 年达到等级 III 水平, 为中承载状态, 其余年份均在等级 III 水平以下。[结论] 徐州市近 10 a 水环境承载力状况从 2003 年开始有所改善, 但依然普遍较差。水资源承载力因其具有人为不可控的自然属性, 成为影响徐州市水环境承载力的限制因素。

关键词: 水环境承载力; 突变级数法; 徐州市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)02-0231-05

中图分类号: X143

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.044

Evaluation on Water Environment Carrying Capacity of Xuzhou City in Recent 10 Years Based on Catastrophe Progression Method

WU Yingchao¹, WANG Zhen¹, CAO Lei¹, WANG Xinjun^{1,2}, ZHAO Yanwen¹

(1. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China; 2. College of Art and Design, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China)

Abstract: [Objective] This paper aimed at studying the water environment carrying capacity of Xuzhou City in recent ten years, in order to provide theoretical supports for improving the research system of regional water environment carrying capacity. [Methods] The index system was established from two aspects: water resources carrying capacity and water pollution bearing capacity. And the improved entropy method was used to reorder the indices. Then, the model of regional water environment carrying capacity based on the catastrophe progression method was built and applied to the evaluation. [Results] (1) The water resource carrying capacity was overall low in each year, and had large inter-yearly variation. Especially in the years of 2002, 2006 and 2010, the water resource carrying capacity was at level I; (2) On the whole, the water pollution bearing capacity had climbed and had a sign of getting steady; (3) The water environment carrying capacity of Xuzhou City were at level III only in 2005 and 2009, while the other years were below level III. [Conclusion] Although the water environmental carrying capacity of Xuzhou City had shown some improvement since 2003, it was relatively poor. Due to the uncontrollable natural attributes, the water resources carrying capacity is the main factors that would limit the water environment carrying capacity of Xuzhou City.

Keywords: water environment carrying capacity; catastrophe progression method; Xuzhou City

水环境是社会经济发展至关重要的约束因子, 随着人口增长和社会经济的发展, 水资源短缺和水质量恶化已经成为全球性的严峻问题, 对水环境的研究已成为区域可持续发展的迫切需求。环境承载力是可持续发展的内涵之一, 也是考核可持续发展的重要指

标。水环境承载力(WECC)将承载力概念与水环境领域自然结合, 研究水环境承载力水平, 对保障区域水环境与人类社会经济的协调可持续发展具有重要的现实意义。目前应用于水环境承载力评价的方法主要有指标评价法^[1-3]、系统动力学方法^[4]、承载力分

收稿日期: 2014-03-20

修回日期: 2014-04-04

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“农村发展中生态环境管理研究”(70833001)

第一作者: 吴颖超(1987—), 女(汉族), 浙江省宁波市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持、环境规划与评价。E-mail: waiting_2022@163.com。

通信作者: 赵言文(1965—), 男(汉族), 江苏省徐州市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持、环境生态学、环境影响评价研究。E-mail: ywzhao@njau.edu.cn。

析法^[5]等,但这些研究基本都处于探索阶段,学术界尚未形成公认的水环境承载力量化方法。突变级数法已经被广泛应用到许多领域,而用于区域水环境承载力评价研究还很少见。基于此,本研究以突变理论为基础,通过多目标分解建立突变级数模型,对徐州市 2001—2011 年的水环境承载力进行评价分析,揭示区域水环境承载力的现状及变化趋势。并提供新的研究实例,完善区域水环境承载力研究体系。

1 研究区概况

徐州市属暖温带半湿润季风气候,具有长江流域与黄河流域过渡性气候特征,四季分明,光照充足,雨量适中,雨热同期。地表水多年平均可利用量为 $2.030 \times 10^9 \text{ m}^3$,地下水为 $2.025 \times 10^9 \text{ m}^3$,扣除重复量后,多年平均水资源总量约为 $3.563 \times 10^9 \text{ m}^3$ (不包括上游来水与抽引江水);而过境水资源量多年平均为 $7.300 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。徐州市多年平均人均拥有水资源量约 424 m^3 ,低于江苏省平均 $470 \text{ m}^3/\text{人}$ 的水平,仅为全国 $2190 \text{ m}^3/\text{人}$ 的 17.8% 。一般干旱年份全市缺水约 $5.700 \times 10^8 \text{ m}^3$,特殊干旱年份缺水近 $1.200 \times 10^9 \text{ m}^3$,为全国 40 个严重缺水地区之一^[6],水资源短缺已成为制约城市经济社会发展的重要因素。

由于地理位置及丰厚的自然资源禀赋,徐州市是全国重要的基础能源和原材料基地,自建国后国家就在该市布点建设煤炭、化工、建材、冶金、电力工业。

几十年来,徐州市为江苏省乃至全国的发展做出了历史性重大贡献,付出了生产高投入、资源高消耗、环境高污染的沉重代价,导致一个时期内煤区连片塌陷、城市灰黑脏乱、产业低端粗放、居住环境恶劣。而近期,徐州市工农业生产发展和城市化进程的加快,不仅导致了工农业废水和生活污水排放量逐年增加从而给水环境带来了更大的压力,同时也对水环境提出了更高的要求。正确评价水环境承载力是优化配置,合理开发,有效保护水资源的科学基础,是实现徐州市区域可持续发展的前提。

2 研究方法

2.1 突变级数法基本思想及优势

突变级数法是一种由突变理论(catastrophe theory)为基础,用突变数学模型进行多目标(准则或要求)评价决策的管理技术。它以势函数为研究对象,通过状态变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 和外部控制参量 $G = f(A, X)$ 来反映系统的动态变化情况。在各种可能变化的外部控制参量和内部行为变量的集合条件下,构造状态空间和控制空间。通过联立求解 $G'(x)$ 和 $G''(x)$,得到状态变量在控制空间的轨迹——分叉集。处于分叉集中的控制变量值会使势函数发生突变,即从一种质态跳跃到另一种质态^[7]。当状态变量为 1 时,多目标决策所涉及的初等突变模型主要有 4 种(表 1)。

表 1 几种主要的突变模型相关公式

突变模型	控制变量	势函数	分枝点集方程	归一化公式
折叠模型	1	$G(x) = x^3 + ax$	$a = -3x^2$	$X_a = a^{1/2}$
尖点模型	2	$G(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$a = -6x^2, b = 5x^3$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}$
燕尾模型	3	$G(x) = x^5 + ax^3 + bx^2 + cx$	$a = -6x^2, b = 8x^3, c = 3x^4$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}$
蝴蝶模型	4	$G(x) = x^6 + ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx$	$a = -10x^2, b = 20x^3, c = -15x^4, d = 4x^5$	$X_a = a^{1/2}, X_b = b^{1/3}, X_c = c^{1/4}, X_d = d^{1/5}$

注: a, b, c, d 为外部控制参量; X_a, X_b, X_c, X_d 为各控制参量相应的突变级数值。

突变级数法的比较优势主要体现在两个方面:
(1) 演变机理中突变特性的反映。区域水环境承载力状态演变过程具有突变特性,并不是连续、渐变、平滑的。因此,这就要求评价区域水环境承载力的数学模型能够体现这种非连续、阶跃式的数理特征^[8]。突变理论就是这样一门以突变为研究对象的数学理论,也是目前唯一的一门研究系统运动由渐变引起突变的系统理论。基于突变理论构造的突变级数法,反映了传统方法所忽略的水环境承载力演变过程的突变特性,更为客观、准确地揭示了水环境承载力的演变规律和变化驱动力机制。(2) 较高的客观性。突变级数法引用相对隶属度的概念,避免了主观判断承载力标准的不确定对评价结果客观性的影响。同时无需

对指标赋值权重值,只需要按照指标内在逻辑关系对其重要性进行排序,很大程度上减少了人为赋权的主观性。

2.2 评价步骤

利用突变级数法进行水环境承载力评价时,主要操作步骤为^[9-11]:

(1) 构建评价指标体系,即按系统的内在作用机理,将系统分解为由若干评价指标组成的多层子系统,并将每一层次中的各个指标按相对重要性进行排序,即重要指标排在前、次要指标排在后,建立递级突变模型。

(2) 根据已有研究基础及研究区域特点,制定合适的等级标准。对指标层原始数据进行规格化处理,

即采用隶属度法将各指标原始数值转换为 $[0, 1]$ 之间的无量纲数值。

(3) 利用突变系统的归一化公式和突变级数值取均值的“互补”、“大中取小”的“非互补”、“过阈互补”准则进行综合量化递归运算,求取目标层的综合评价价值,即相对隶属度。

(4) 将各评价对象的综合评价价值与等级标准综合评价价值进行比较,判定评价对象隶属的评价等级。

3 徐州市突变级数法水环境承载力分析

3.1 指标选取及递级突变模型建立

至今,学术界尚未形成统一的水环境承载力评价指标体系,以下 2 个方面可以作为选择指标的参考依据:(1) 相关研究文献中的指标体系。相关文献中的

指标体系是学者们经过大量研究提出来的。通过文献统计,可以得到目前相关研究关注的主要指标。借鉴这些指标可提高指标体系的科学性。(2) 国家颁布的指标体系。国家颁布相关指标体系包括生态县、生态市、生态省建设指标,节水型城市考核标准等,主要应用于城市和区域考核评比,在实践中被大量使用并检验。参考这些指标有助于提高指标体系的政策相关性。

水环境作为生态环境的组成部分,具有环境属性;同时,其水体属于资源范畴,具有资源属性,因此,根据水环境承载力的概念^[12]及以上两点指标选取依据,结合资料数据的连续性和可获取性,从水资源承载力和水污染承载能力两方面选取指标,构建徐州市水环境承载力评价指标体系。具体指标详见表 2。

表 2 水环境承载力评价指标体系

目标层	要素(排序)	类别(排序)	指标层	指标说明	排序
A 水 环 境 承 载 力	A ₁ 水资源承载力 (1)	B ₁ 水质	C ₁ 用水总量/水资源总量	反映供水能力(-);	3
		源禀赋(2)	C ₂ 人均水资源量	反映水资源丰、缺情况(+)(m ³ /人)	1
		B ₂ 水资源再生与利用水平(1)	C ₃ 万元工业增加值用水量	反映同等工业生产条件下用水水平(-)(10 ⁴ m ³ /万元)	2
			C ₄ 工业用水重复利用率	反映工业废水重复利用水平(+)%;	8
			C ₅ 农田实灌亩均用水量	反映农业灌溉节水发展水平(-)(m ³ /667 m ²)	6
			C ₆ 人均日生活用水量	反映居民生活用水情况、节水观念(-)[L/(人·d)]	7
	A ₂ 水污染承载力 (2)	B ₃ 水污染压力(1)	C ₇ 工业万元产值排污水量	反映工业废水排放情况(-)(t/万元)	4
		B ₄ 水环境治理水平(2)	C ₈ 化肥施用强度	反映农业面源污染负荷情况(-)/(kg·hm ⁻²)	9
			C ₉ 工业废水排放达标率	反映工业废水处理程度(+)%	5
		C ₁₀ 污水处理率	反映地区的污水处理程度(+)%	10	

注: +, - 分别表示越大越优, 越小越优。

为克服各指标排序的主观性,使评价结果更符合实际,采用改进熵值法^[13]确定各层次指标重要性排序(表 2)。据此,提出的徐州市水环境承载力评价指标逐级集成的突变模型如图 1 所示。

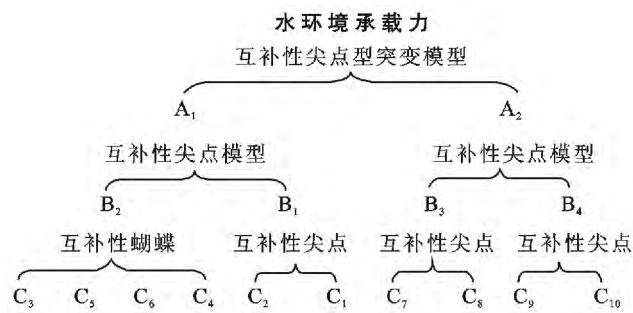


图 1 水环境承载力评价的递级突变模型

3.2 数据来源及预处理

数据主要来源于 2001—2011 年的《徐州统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《江苏省水资源公报》《江苏统计年鉴》等,部分数据来源于相关部门年报。

各目标年指标原始值详见表 3。

原始数据预处理时采用隶属度的概念进行标准化处理,使其转化为 $[0, 1]$,计算公式为:

越大越优型指标:

$$(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (x_{\min} < x < x_{\max})$$

越小越优型指标:

$$(x_{\max} - x) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (x_{\min} < x < x_{\max})$$

3.3 评价标准的制定

由于突变级数法归一化公式的特点,计算得到的评价价值一般均偏高,且指数间差距很小,从而无法按照常规根据评价价值对评价对象“优”、“劣”情况进行直观判定。因此制定出合适的突变级数法的等级标准,是使突变级数法更具实用价值的关键,也是目前使用突变级数的难点^[14]。为解决该问题,参考已有研究成果、考核标准并结合徐州市实际,制定出徐州市水环境承载力评价指标分级标准(表 4)。通过各突变系统的归一公式逐级向上计算,得到突变级数法在绝对意义下的等级标准值(表 5)。

表 3 徐州市水环境承载力评价指标 2001—2011 年原始数据

年份	C ₃	C ₅	C ₆	C ₄	C ₂	C ₁	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀
2001	56.84	472.00	105.75	71.36	314.57	0.06	32.48	945.0	91.87	42.94
2002	51.22	447.00	163.27	71.77	192.38	0.11	32.40	977.5	99.49	44.04
2003	31.52	465.00	108.18	77.42	840.14	0.02	22.37	1 064.9	99.81	54.95
2004	20.24	440.00	111.10	75.30	361.89	0.05	23.22	1 074.6	99.83	82.62
2005	16.46	425.00	122.82	70.01	728.30	0.02	20.10	1 120.0	99.18	84.87
2006	32.88	448.00	148.95	78.57	361.17	0.14	14.80	1 142.0	98.57	84.04
2007	26.78	362.00	163.53	79.01	671.13	0.06	11.83	1 172.0	97.99	86.62
2008	35.35	348.00	159.68	91.31	508.95	0.09	10.01	1 164.0	98.85	80.75
2009	2.02	380.00	178.82	92.71	366.85	0.05	6.77	1 182.0	98.60	81.46
2010	27.54	379.00	163.89	90.95	326.76	0.14	7.61	1 201.0	99.00	81.66
2011	5.45	372.00	150.24	87.30	330.00	0.07	7.77	1 206.0	99.18	86.55

表 4 水环境承载力评价指标分级标准

指标	I 级	II 级	III 级	IV 级
C ₃	≥40	30~40	20~30	<20
C ₅	≥500	400~500	300~400	<300
C ₆	≥240	180~240	120~180	<120
C ₄	≤60	60~75	75~90	>90
C ₂	≤500	500~1 700	1 700~2 000	>2 000
C ₁	≥0.10	0.08~0.10	0.06~0.08	<0.06
C ₇	≥20	15~20	10~15	<10
C ₈	≥2000	1 500~2 000	1 000~1 500	<1 000
C ₉	≤96	96~98	98~100	100
C ₁₀	≤50	50~70	70~90	>90

3.4 综合目标评价

同样按突变理论多准则评价方法,采用各突变系统的归一公式逐步向上综合计算,得到徐州市 2001—2011 年水环境承载力综合目标评价价值(表 6)。

表 5 水环境承载力评价等级标准

等级	水资源禀赋 B ₁	水资源再生与利用水平 B ₂	水资源承载力(WECC)	承载状况
I	≤0.833 6	≤0.882 2	≤0.936 0	弱承载
II	0.833 6~0.918 1	0.882 2~0.926 6	0.936 0~0.966 5	低承载
III	0.918 1~0.954 0	0.926 6~0.959 4	0.966 5~0.981 5	中承载
IV	>0.954 0	>0.959 4	>0.981 5	高承载

表 6 徐州市 2001—2011 年水环境承载力综合目标评价价值

目标年	水资源承载力	水污染承载力	水环境承载力
2001	0.834 7	0.875 9	0.935 2
2002	0.805 8	0.879 5	0.927 9
2003	0.909 4	0.916 7	0.962 5
2004	0.888 5	0.924 4	0.958 4
2005	0.916 7	0.931 9	0.967 1
2006	0.821 4	0.943 2	0.943 5
2007	0.898 7	0.949 2	0.965 4
2008	0.875 1	0.951 6	0.959 5
2009	0.900 6	0.957 4	0.967 3
2010	0.813 0	0.955 6	0.943 3
2011	0.894 3	0.956 8	0.965 5

3.5 结果分析

比较各目标年的综合目标评价价值与等级标准值,可以得到各目标年的水环境承载力等级(图 2)。由图 2 可以看出,水资源承载力方面,各目标年承载力水平总体偏低,年际波动较大,其中 2002,2006 和 2010 年处于等级 I 水平,即弱承载状态。一方面虽然生产节水、废水重复再生利用等环节的技术水平、实施力度逐年有所提高,但尚不足,依然需要突破更多的技术革新,提高水资源利用率。另一方面丰水年和枯水年地表水资源量差距悬殊,2003 年最高为 $7.634 \times 10^9 \text{ m}^3$,2002 年最低为 $1.74 \times 10^9 \text{ m}^3$;人均水资源量严重偏低,根据“国际人口行动”人口和环境计划中规定,人均水资源量少于 $1 700 \text{ m}^3$ 将发生用水紧张,少于 $1 000 \text{ m}^3$ 将发生严重缺水,少于 500 m^3 将发生极度缺水,即使是最高年份 2003 年的 $840 \text{ m}^3/\text{人}$ 也处于严重缺水状态。徐州市水资源自然禀赋的不可调控性更加要求从节流方面加强管理力度。

水污染承载力方面,10 a 来整体状态呈上升趋势,并从 2005 年开始达到并保持等级 III 水平。徐州市从 1999 年开始创建国家环境保护模范城市,2006 年全面通过国家考核验收。走过了五年打基础、三年攻坚战、两年大提升的奋斗历程,徐州市水污染治理、水环境整治工作也取得了一定成效。另外,2009 年以后水污染承载力开始趋于稳定状态,徐州市在后续的工作中需要在减排治污的力度增加一个量级,增加资金支持、完善基础设施、提高技术水平,争取在水污染承载力水平上有所突破。

2001—2011年期间,徐州市水环境承载力仅2005和2009年达到等级Ⅲ水平,为中承载状态,其余几年均在等级Ⅲ水平以下。总体来看,徐州市近10a水环境承载力状况从2003年开始有所改善,但依然普遍较差。在今后的城市化进程中要更加注重和加强水环境的保护。水环境承载力偏低主要受水

资源和水污染两方面制约,但就徐州市而言,在水污染治理得到社会和政府部门的充分关注的情况下,水资源“量”的问题已经成了影响水环境承载力主要突出因素,也必将影响到今后的发展。从图2中反映的水环境承载力的年际变化趋势与水资源承载力的具有很高同步性正说明了这一问题。

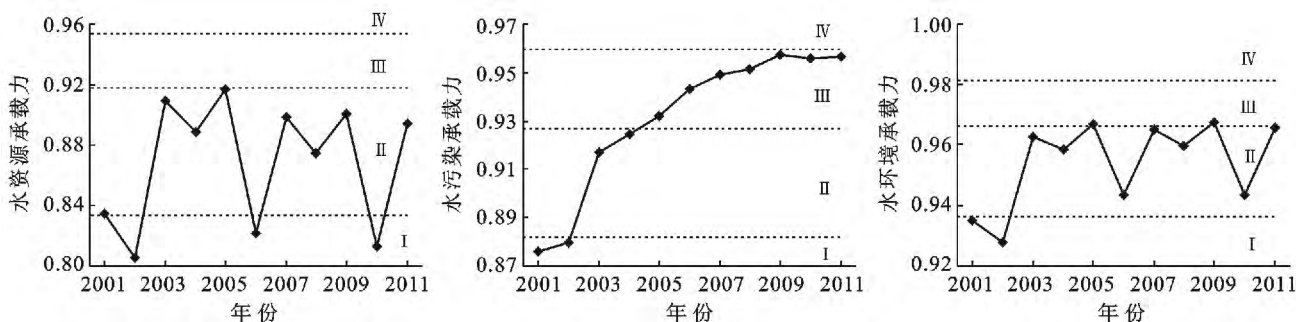


图2 徐州市近10a水环境承载力评价结果

4 结论

(1) 近10a徐州市水环境承载力除2005和2009年达到等级Ⅲ水平外,其余几年均在等级Ⅲ水平以下,从2003年开始水环境承载力有所改善,但依然普遍较差。

(2) 徐州市水污染承载力整体上呈上升趋势并逐渐趋于稳定状态,在后续工作中相关职能部门仍需加大减排治污力度,争取在水污染承载力水平上有所突破。

(3) 徐州市水资源承载力的年际变化趋势与水环境承载力的具有很高的同步性,水资源问题因其具有人为不可控的自然属性,在今后的发展中必然成为影响徐州市水环境承载力的主要突出因素。应进一步强化水资源合理利用,如提高再生水利用水平、倡导节水技术和产品的应用等,同时提高对过境水资源的深入开发利用,合理开发利用并保护地下水资源。

[参考文献]

[1] 王俭,孙铁珩,李培军,等.基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J].生态学报,2007,26(1):139-144.
 [2] 张会涓,陈然,赵言文.基于模糊物元模型的区域水环境承载力研究[J].水土保持通报,2012,32(2):186-189.
 [3] 来雪慧,王小文,徐杰峰,等.基于向量模法的陕南地区水环境承载力评价[J].水土保持通报,2010,30(2):56-59.

[4] 王俭,李雪亮,李法云,等.基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J].应用生态学报,2009,20(9):2233-2240.
 [5] 王金南,于雷,万军,等.长江三角洲地区城市水环境承载力评估[J].中国环境科学,2013,33(6):1147-1151.
 [6] 李明武,陈玲.徐州市区水环境问题及对策[J].能源技术与管理,2006(3):51-53.
 [7] 凌复华.突变理论的原理和应用[M].上海:上海交通大学出版社,1997.
 [8] Collie J S, Richardson K, Steele J H. Regime shifts: can ecological theory illuminate the mechanisms? [J]. Progress in Oceanography, 2004, 60(2): 281-302.
 [9] 陈云峰,孙殿义,陆根法.突变级数法在生态适宜度评价中的应用[J].生态学报,2006,26(8):2587-2593.
 [10] 张端梅,梁秀娟,李钦伟,等.基于突变理论的吉林西部灌区地下水环境风险评价[J].农业机械学报,2013,44(1):95-100.
 [11] 魏婷,朱晓东,李杨帆,等.突变级数法在厦门城市生态安全评价中的应用[J].应用生态学报,2008,19(7):1522-1528.
 [12] 赵卫,刘景双,孔凡娥.水环境承载力研究述评[J].水土保持研究,2007,14(1):47-50.
 [13] 孟凡生,李美莹.我国能源消费影响因素评价研究:基于突变级数法和改进熵值法的分析[J].系统工程,2012,30(8):10-15.
 [14] 徐琳瑜,康鹏,刘仁志.基于突变理论的工业园区环境承载力动态评价方法[J].中国环境科学,2013,33(6):1127-1136.