

基于PSR—物元模型的水生态文明评价研究

——以南昌市为例

皮家骏, 欧阳澍, 张带琴, 刘成林

(南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 水生态文明评价指标体系是衡量水生态文明城市建设的技术手段, 为建设生态文明城市提供理论参考。在综述国内评价体系相关文献基础上, 本文采用PSR概念框架构建了评价指标体系, 运用层次分析法和熵权法来判断评价指标的权重, 引入物元分析法对城市水生态文明建设进行综合评价, 分别从水生态的水资源、水生态、水利用、水管理和水文化5个方面入手, 构建评价指标综合体系, 并以南昌市2006—2015年为实例进行评价, 结果表明: 2006—2008年的水生态文明级别为“一般”, 2008—2013年的水生态文明级别为“较好”, 2014—2015年的水生态文明级别为“好”。南昌水生态文明城市发展态势可观, 大部分指标和等级逐年提升, 水生态文明城市建设工作进展顺利。

关键词: 水生态文明; PSR—物元模型; 层次分析法; 评价指标体系; 南昌市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0055-07

Water ecological civilization evaluation based on PSR – matter element model: a case study of Nanchang City

PI Jiajun, OUYANG Shu, ZHANG Daiqin, LIU Chenglin

(School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The evaluation index system of water ecological civilization is the technical means to measure the construction of water ecological civilization city, and provide theoretical reference for the construction of ecological civilization city. On the basis of reviewing the relevant literature of the domestic evaluation system, this paper constructs the evaluation index system by using the PSR conceptual framework, uses the analytic hierarchy process and the entropy method to judge the weight of the evaluation index, and introduces the matter element analysis method to comprehensively evaluate the urban water ecological civilization construction. The water quality, water ecology, water use, water management and water culture of water ecological civilization were studied respectively. The comprehensive evaluation index system was constructed and Nanchang from 2006 to 2015 was evaluated as a case study. The results showed that: the water ecological civilization level in 2006 – 2008 assessed as "general", 2008 – 2013 as "good", and 2014 – 2015 as "excellent". Nanchang shows an optimistic developing trend as the water ecological civilization city, grade and most indicators are increasing year by year, and the water ecological civilization city construction work is progressing smoothly.

Key words: water ecological civilization; PSR – matter element model; analytic hierarchy process; Evaluation index system; Nanchang City

收稿日期: 2017-07-03; 修回日期: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41261053); 南昌大学研究生创新专项资金项目(CX2017070)

作者简介: 皮家骏(1995-), 男, 江西樟树人, 硕士研究生, 研究方向: 水文学及水资源管理。

通讯作者: 刘成林(1973-), 男, 江西玉山人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事3S技术在水利水电工程方面的应用研究。

1 研究背景

自古以来,善治国者必重水利,中华文明事实上是治水文明,恰是由于重视水利,中华文明得以延续千年,不断蓬勃发展^[1]。党的十八大报告首次将关系人民福祉,关乎民族未来的长远大计的生态文明建设,纳入中国特色社会主义的总体布局。水生态文明是生态文明的根基,也是生态文明建设的难点和重点^[2]。我国深入开展水生态文明建设,对遏制生态恶化和环境污染,提高水的生态环境,取得了良好的作用^[3]。刘海娇等^[4]、李坚等^[5]、王富强等^[6]对城市水生态文明建设现状进行了评价,发现些许不足之处,为加速水生态文明城市建设提供依据;王建华等^[7]、唐克旺等^[8]对水生态文明评价体系进行了探讨,建成了较完整的水生态文明评价体系;任俊霖等^[9]、刘海娇等^[10]对长江和黄河经济带周边典型城市水生态文明评价,提出量化城市水生态文明指标,能丰硕水生态文明城市建设的理论;汪伦焰等^[11]构建了水资源、水生态、水景观、水管理和水文化5个大类24个指标的水生态文明城市评价指标体系,并对许昌市进行了概括评价。舒持恺等^[12]建立湖泊健康物元分析模型,选取12个指标对5个湖泊进行了健康评价。通过对照国内水生态文明评价指标体系文献,可知当前水生态文明体系研究不完善,定量地概括性评价研究较少。本文选取南昌市2006-2015年的数据进行实证分析,定量地检验南昌市近10年间水生态文明建设状况。

2 研究方法

2.1 物元可拓评价模型

物元分析方法是我国蔡文教授于20世纪80年代提出的,主要用于解决复杂的不相容问题,适合于多因子评价^[13]。水生态文明评价的概念具有模糊性,涉及较多的定量和定性指标,单项指标评价结果具有不相容性,因此按照物元分析法构建水生态文明评价模型,减少了在多成分辨别评价中的主观片面性^[14]。

2.1.1 建立物元矩阵 水生态文明程度物元可用 $R = (D, C, X)$ 来描述,其中 D 表示水生态文明程度,它关于特征 C 的量值为 X 。假设 D 有 n 个特征,以 C_1, C_2, \dots, C_n 及其对应的量值 X_1, X_2, \dots, X_n 来表示,则水生态文明程度的物元矩阵可表示为:

$$R = (D, C, X) = \begin{bmatrix} D & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R 为 n 维物元; R_i 为 R 的分物元; X_i 为关于 C_i 的量值,即水生态文明程度的各评价指标对应的原始数据。

2.1.2 经典域和节域 水生态文明程度的经典域物元矩阵 R_j 为:

$$R_j(D_j, C_n, X_j) = \begin{bmatrix} D_j & C_1 & X_{1j} \\ & C_2 & X_{2j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_j & C_1 & (a_{1j}, b_{1j}) \\ & C_2 & (a_{2j}, b_{2j}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{nj}, b_{nj}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $D_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为水生态文明程度所划分的评价标准的第 j 个等级; $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为影响水生态文明的第 i 个指标; 区间 X_{ij} 为 D_j 关于 C_i 所取得量值的范围。

所有等级的物元用 R_p 表示:

$$R_p(D_p, C_n, X_p) = \begin{bmatrix} D_p & C_1 & X_{1p} \\ & C_2 & X_{2p} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{np} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_p & C_1 & (a_{1p}, b_{1p}) \\ & C_2 & (a_{2p}, b_{2p}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{np}, b_{np}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 区间 $X_{ip} = (a_{ip}, b_{ip})$ 为 D_p 关于 C_i 所取的量值范围,且 $X_{np} = (a_{np}, b_{np})$, 为所有等级的 n 项指标的最大取值范围,则 (a_{np}, b_{np}) 称作节域。

2.1.3 关联函数

关联函数 $K_j(x_i)$ 为:

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, X_{ij})}{|X_{ij}|}, & x_i \in X_{ij} \\ \frac{\rho(x_i, X_{ij})}{\rho(x_i, X_{ip}) - \rho(x_i, X_{ij})}, & x_i \notin X_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $K_j(x_i)$ 为评级指标 i 第 j 级别的关联函数, $X_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

$$\rho(x_i, X_{ij}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{ij} + b_{ij}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ij} - a_{ij}) \quad (5)$$

$$\rho(x_i, X_{ip}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{ip} + b_{ip}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ip} - a_{ip}) \quad (6)$$

式中: $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为指标实测值; $X_{ij} = (a_{ij}, b_{ij})$ 、 $X_{ip} = (a_{ip}, b_{ip})$ 分别为已确定的经典域和节域。

2.1.4 计算关联度及确定评价等级

$$K_j(D) = \sum_{i=1}^n w_i K_j(x_i) \quad (7)$$

式中: $K_j(D)$ 为单元 D 的关于等级 j 的关联度; w_i 为评价指标的权重。若 $K_j(D) = \max K_j(D)$, 则判定 D 属于等级 j 。

3 评价指标体系

3.1 构建 PSR 评价指标体系

目前国内外广泛采用 PSR 模式构建指标体系, 压力(P) - 状态(S) - 响应(R) 模式主要是回答 3 个问题: “发生什么、为什么发生、我们怎么做”。压力(P) 是影响水生态文明建设的因素; 状态(S) 是指水生态文明现有的状况; 响应(R) 是水生态文明建设采用的策略和意见。通过参考相关文献, 确定评价指标的选择遵照以下原则: (1) 科学性。所选指标物理意义要明确、统计方法要规范、测量方法要标准^[18]。(2) 目的性。所选指标体系能反映出水生态文明真实情况, 诊断出水生态文明的破坏程度, 为决策者提供对策建议^[19]。(3) 整体性。指标体系需全面地反映水生态的综合特性, 将所选目标和评价目标有机联合, 构成条理分明的整体^[20]。(4) 可操作性。指标数据的获取可通过实际调查和统计等途径, 且便于统计和定义明确, 有足够的数量^[21]。(5) 可比性。水生态文明评价是长期的工作, 所选指标的含义和计算方法需统一规范^[22]。

按照现有水生态文明评价文献^[23] 和结合南昌市建设规划特点, 从水资源、水生态、水景观、水管理、水文化 5 方面选取 23 项定量和 4 项定性评价指标。同时, 按照所取资料采用专家打分法确定定性指标的量值。针对区域各指标的量值, 采用层次分析法和熵权法计算, 得到各指标的权重, 结果见表 1。

3.2 确定评价标准

本文根据国内现有的标准和国家城市发展指导性政策, 将其划分为 5 个不同等级, 即好、较好、一般、较差和差, 分别用 I 级、II 级、III 级、IV 级、V 级表

示。评价经典域的确定主要参考全国平均水平、《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》标准值、国际相关标准及江西省平均水平, 构建水生态文明评价的经典域综合物元和节域如下。

表 1 评价指标体系

目标系统	指标层	权重
水资源	人均水资源量 $C_1(P)/m^3$	0.0605
	地下水开采系数 $C_2(S)$	0.0364
	水资源开发利用效率 $C_3(S)/\%$	0.0404
	集中式饮用水水源地水质达标率 $C_4(R)/\%$	0.0125
	防洪标准 $C_5(R)$	0.0127
水生态	水功能区水质达标率 $C_6(S)/\%$	0.0286
	水面面积率 $C_7(P)/\%$	0.0124
	单位耕地面积化肥使用量 $C_8(P)/(kg \cdot m^{-2})$	0.0627
	水土流失治理率 $C_9(P)/\%$	0.0296
	城市污水处理率 $C_{10}(R)/\%$	0.0587
水生态文明	栖息地状况 $C_{11}(S)$	0.0125
	珍惜水生动植物状况 $C_{12}(S)$	0.0127
	万元 GDP 取水量 $C_{13}(P)/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	0.0485
	有效灌溉面积占常用耕地面积的比例 $C_{14}(P)/\%$	0.0422
	农田灌溉亩均取水量 $C_{15}(P)/(m^3 \cdot 亩^{-1})$	0.0722
	工业用水循环利用率 $C_{16}(R)/\%$	0.0705
	万元工业增加值取水量 $C_{17}(P)/(m^3 \cdot 万元^{-1})$	0.0308
	居民满意度 $C_{18}(S)/\%$	0.0415
	规划编制完善情况 $C_{19}(R)$	0.0334
	水利制度建设情况 $C_{20}(R)$	0.0338
水管理	水利管理占 GDP 比重 $C_{21}(R)/\%$	0.0347
	水环境满意度 $C_{22}(S)/\%$	0.0321
	人均绿地面积 $C_{23}(S)/m^2$	0.0375
水文化	森林覆盖比例 $C_{24}(S)/\%$	0.0482
	自然保护区的比例 $C_{25}(S)/\%$	0.0282
	建成区绿化覆盖率 $C_{26}(S)/\%$	0.0293
	水文化普及率 $C_{27}(R)/\%$	0.0374

3.3 子系统

3.3.1 压力系统(P) 人均水资源量、工业取水量、农业用水量等决定了水生态文明建设的压力系统构成。南昌市正处于经济发展的上升期, 万元 GDP 取水量和万元工业增加值用水量等指标过大, 则表明该地区需进一步加强环境管理和资源节约建设工作。水土流失治理情况可反映土地承载压力, 通过控制人均耕地面积, 减轻土地承载压力。

3.3.2 状态系统(S) 状态系统主要指生态资源丰富和水环境安全的良好状态, 其中栖息地状况、水生动植物状况、森林覆盖率和建成区绿化覆盖率可以较好地

反映该区域生态资源丰富情况。地下水开采率、水资源开发利用率和水质达标率可反映水环境安全状态。

3.3.3 响应系统(R) 响应系统主要指水环境治理和生态修复等方面,其中水利制度建设情况和水

利管理占 GDP 比重等反映水环境治理的力度,另外需要提高城市污水处理率和工业用水循环利用。居民满意度和水文化普及率等这些指标能间接反映水生态环境治理效果。

		好	较好	一般	较差	差			
$R_o =$	C_1	(3000,8000)	(1700,3000)	(1000,1700)	(500,1000)	(100,500)	$R_p =$	C_1	(100,8000)
	C_2	(0,0.5)	(0.5,1.2)	(1.2,1.9)	(1.9,2.5)	(2.5,3.5)		C_2	(0,3.5)
	C_3	(0,20)	(20,30)	(30,40)	(40,50)	(50,100)		C_3	(0,100)
	C_4	(95,100)	(90,95)	(85,90)	(80,85)	(40,80)		C_4	(40,100)
	C_5	(300,500)	(100,300)	(50,100)	(20,50)	(10,20)		C_5	(10,500)
	C_6	(95,100)	(80,95)	(60,80)	(50,60)	(0,50)		C_6	(0,100)
	C_7	(20,50)	(10,20)	(5,10)	(3,5)	(0,3)		C_7	(0,50)
	C_8	(5,15)	(15,21.2)	(21.2,27.4)	(27.4,33.6)	(33.6,50)		C_8	(5,50)
	C_9	(80,95)	(65,80)	(50,65)	(35,50)	(20,35)		C_9	(20,95)
	C_{10}	(90,100)	(80,90)	(70,80)	(60,70)	(20,60)		C_{10}	(20,100)
	C_{11}	(8,10)	(6,8)	(4,6)	(2,4)	(0,2)		C_{11}	(0,10)
	C_{12}	(8,10)	(6,8)	(4,6)	(2,4)	(0,2)		C_{12}	(0,10)
	C_{13}	(10,100)	(100,200)	(200,300)	(300,400)	(400,1000)		C_{13}	(10,1000)
	C_{14}	(90,100)	(75,90)	(60,75)	(45,60)	(5,45)		C_{14}	(5,100)
	C_{15}	(10,300)	(300,420)	(420,500)	(500,600)	(600,1000)		C_{15}	(10,1000)
	C_{16}	(90,100)	(80,90)	(70,80)	(60,70)	(10,60)		C_{16}	(10,100)
	C_{17}	(5,20)	(20,40)	(40,60)	(60,100)	(100,500)		C_{17}	(5,500)
	C_{18}	(90,100)	(80,90)	(70,80)	(40,70)	(0,40)		C_{18}	(0,100)
	C_{19}	(8,10)	(6,8)	(4,6)	(2,4)	(0,2)		C_{19}	(0,10)
	C_{20}	(8,10)	(6,8)	(4,6)	(2,4)	(0,2)		C_{20}	(0,10)
	C_{21}	(0.25,0.30)	(0.20,0.25)	(0.15,0.20)	(0.05,0.10)	(0.01,0.05)		C_{21}	(0.01,0.30)
	C_{22}	(90,100)	(80,90)	(60,80)	(50,60)	(0,50)		C_{22}	(0,100)
	C_{23}	(16,20)	(12,16)	(8,12)	(4,8)	(0,4)		C_{23}	(0,20)
	C_{24}	(65,80)	(50,65)	(35,50)	(20,35)	(0,20)		C_{24}	(0,80)
	C_{25}	(25,35)	(15,25)	(10,15)	(5,10)	(0,5)		C_{25}	(0,35)
	C_{26}	(40,50)	(30,40)	(20,30)	(10,20)	(0,10)		C_{26}	(0,50)
	C_{27}	(80,100)	(60,80)	(40,60)	(20,40)	(0,20)		C_{27}	(0,100)

4 实证研究

4.1 研究区域概况

南昌市位于江西省中北部,东经 115°27' 至 116°35'、北纬 28°10' 至 29°11' 之间,土地总面积 7 402.36 km²,其中陆地面积 5 197.99 km²,占总面积的 70.22%;水域面积 2 204.37 km²,占总面积的 29.78%。全市年平均气温 17℃~18℃,多年平均降雨量 1 589 mm。水资源丰富,多年平均径流量 61.53 × 10⁸ m³,多年平均地表水水资源量约为 63.31 × 10⁸ m³,平均水资源总量为 65.96 × 10⁸ m³,

人均水资源量用水量高于全国平均水平。伴随南昌市水生态文明城市建设,城镇化率达 72.29%,水资源环境将面临的主要问题是水环境安全及水质恶化现象。

4.2 数据来源与处理

文中研究的数据主要来源于江西统计年鉴(2006-2015年)、江西水资源公报(2006-2015年)、南昌统计年鉴(2006-2015年)及相关的文献[24-26],借助遥感空间分析技术、MATLAB、EXCEL等,对南昌市 2006-2015 年的数据进行综合处理,如表 2 所示。

表 2 各年份各项评价指标的实际值

评价指标	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
C_1	1344	915	1064	980	2067	952	1768	1250	1381	1740
C_2	0.106	0.136	0.104	0.091	0.064	0.086	0.059	0.077	0.070	0.099
C_3	72.38	57.79	68.55	29.73	29.73	47.36	31.77	49.42	47.62	46.45
C_4	99.8	99.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
C_5	100	100	100	100	100	100	100	200	200	200
C_6	74.9	80.1	88.0	88.9	88.5	63.6	88.9	94.4	91.3	100.0
C_7	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78	29.78
C_8	44.83	44.52	44.74	44.75	45.24	35.54	35.64	36.80	40.42	41.21
C_9	68.1	67.2	68.3	68.9	69.8	69.2	71.5	72.1	73.5	73.9
C_{10}	61.97	83.03	86.76	86.07	87.30	88.30	94.60	93.50	91.80	92.00
C_{11}	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
C_{12}	3.0	3.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C_{13}	234.06	234.19	183.18	181.88	139.87	119.00	96.05	98.00	86.00	77.00
C_{14}	89.50	89.50	88.20	87.90	87.70	66.90	68.41	98.52	96.59	96.59
C_{15}	560.00	715.00	666.00	679.00	577.00	606.00	488.00	638.00	610.00	573.00
C_{16}	59.14	64.76	67.43	75.49	75.51	75.24	76.25	78.00	78.56	78.92
C_{17}	180.97	140.97	101.98	87.23	78.82	73.30	68.26	67.00	59.00	56.00
C_{18}	70.00	71.00	71.00	72.00	73.00	71.00	75.00	77.00	98.00	98.00
C_{19}	5.0	5.0	5.0	7.0	7.0	7.0	7.0	9.0	9.0	9.0
C_{20}	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	7.0	7.0	7.0
C_{21}	0.0175	0.1074	0.0139	0.1163	0.0407	0.0740	0.0951	0.0736	0.1033	0.0976
C_{22}	78	78	78	80	80	82	82	82	82	83
C_{23}	7.84	8.08	8.36	8.49	9.01	9.18	9.01	12.04	12.04	11.8
C_{24}	17.10	16.10	16.05	16.05	21.96	21.96	21.96	21.96	21.96	21.96
C_{25}	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43	17.43
C_{26}	39.20	40.40	41.42	42.66	43.76	42.96	43.00	43.05	42.08	41.10
C_{27}	61	62	62	65	72	70	75	75	77	78

4.3 综合评价结果和分析

根据已得评价指标量值,将得到的实际值 C_i ($i = 1, 2, \dots, 27$) 代入式(4)、(7)中,得到南昌市水生态文明评价指标关联度。以 2012 年 C_1 指标(人均水资源量)的计算为例解释其他参数的意义。将 $x_1 = 1768$ 输入相应的公式后,获得对应的指标等级的关联度分别为: $k_{(C_1)I} = -0.424$ 、 $k_{(C_1)II} = 0.019$ 、 $k_{(C_1)III} = -0.369$ 、 $k_{(C_1)IV} = -0.236$ 、 $k_{(C_1)V} = -0.431$, 可知 2012 年该指标级别为 II 级,属于“较好”水平。同时可获得其他年份评价指标的相关结果(见表 3)。将(表 3)中的各项指标的关联度与其相应的权重(表 1)代入公式(7)计算出各年份水生态文明综合关联度,并判定其水生态文明等级。以 2012 年为例,其 $K_1 = -0.284$ 、 $K_2 = -0.228$ 、 $K_3 = -0.275$ 、 $K_4 = -0.316$ 、 $K_5 = -0.424$, 可以判定 2012 年水生态文明级别为 II 级,即“较好”级别。同时可

判别其他年份的水生态文明等级(见表 4)。

从表 4 可以发现,2006 - 2008 年的水生态文明级别为“一般”,2008 - 2013 年的水生态文明级别为“较好”,2014 - 2015 年的水生态文明级别为“好”,整体上呈现由“一般”向“好”跃升的趋势。从 2006 - 2015 年的水生态文明等级可以看出, $K_I(2006) \leq K_I(2015)$,表明等级无限逼近且达到 I 级; $K_{II}(2006 - 2011)$ 呈增大趋势,表明等级向 II 靠拢,然而 $K_{II}(2011 - 2015)$ 呈下降趋势,表明等级向 I 级靠拢; $K_{III-V}(2006 - 2015)$ 较稳定地减少,表明等级逼近 I 级和 II 级。

综上所述,2011 年的对应的综合关联度反常,和其他年份存在较大的反差,这主要由于当年人均水资源量,年降雨量较低有关,表明水资源总量是水生态文明的关键所在,其他年份的综合关联度随单项指标的变化同步稳定变化。

表3 2006-2015年评价指标关联度

关联度	2012年					等级	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013	2014	2015
	I级	II级	III级	IV级	V级										
$k_{(C_1)j}$	-0.424	0.019	-0.369	-0.236	-0.431	II	III	IV	III	IV	II	IV	III	III	II
$k_{(C_2)j}$	0.119	-0.881	-0.894	-0.969	-0.989	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_3)j}$	-0.148	-0.026	0.036	-0.107	-0.211	III	V	V	V	II	II	IV	IV	IV	IV
$k_{(C_4)j}$	0.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_5)j}$	-0.345	0.000	-0.345	-0.441	-0.441	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_6)j}$	-0.355	0.049	-0.445	-0.723	-0.778	II	III	II	II	II	II	III	I	I	I
$k_{(C_7)j}$	0.1820	-0.423	-0.495	-0.551	-0.559	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_8)j}$	-0.590	-0.502	-0.365	-0.065	0.325	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
$k_{(C_9)j}$	-0.265	0.060	-0.207	-0.461	-0.592	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_{10})j}$	0.034	-0.460	-0.730	-0.820	-0.865	I	IV	II	II	II	II	II	I	I	I
$k_{(C_{11})j}$	-0.250	0.000	-0.250	-0.546	-0.667	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_{12})j}$	-0.857	-0.833	-0.750	-0.500	0.000	V	IV	IV	V	V	V	V	V	V	V
$k_{(C_{13})j}$	0.398	-0.044	-0.547	-0.703	-0.779	I	III	III	II	II	II	II	I	I	I
$k_{(C_{14})j}$	-0.406	-0.173	0.072	-0.171	-0.427	III	II	II	II	II	II	III	I	I	I
$k_{(C_{15})j}$	-0.282	-0.194	0.018	-0.041	-0.284	III	IV	V	V	V	IV	V	V	V	IV
$k_{(C_{16})j}$	-0.366	-0.135	0.035	-0.147	-0.308	III	V	IV	IV	III	III	III	III	III	III
$k_{(C_{17})j}$	-0.433	-0.116	-0.038	0.073	-0.127	IV	V	V	V	IV	IV	IV	IV	III	III
$k_{(C_{18})j}$	-0.375	-0.167	0.047	-0.057	-0.048	III	III	III	III	III	III	III	III	I	I
$k_{(C_{19})j}$	-0.250	0.100	-0.250	-0.500	-0.667	II	III	III	III	II	II	II	I	I	I
$k_{(C_{20})j}$	-0.375	-0.167	0.139	-0.167	-0.375	III	III	III	III	III	III	III	II	II	II
$k_{(C_{21})j}$	-0.641	-0.552	-0.392	0.283	-0.104	IV	V	IV	V	IV	V	V	V	IV	V
$k_{(C_{22})j}$	-0.308	0.017	-0.100	-0.550	-0.640	II	III	III	III	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_{23})j}$	-0.388	-0.213	0.071	-0.085	-0.314	III	IV	III	III	III	III	III	II	II	III
$k_{(C_{24})j}$	-0.662	-0.560	-0.372	0.050	-0.083	IV	V	V	V	V	IV	IV	IV	IV	IV
$k_{(C_{25})j}$	-0.053	0.020	-0.469	-0.320	-0.646	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II
$k_{(C_{26})j}$	0.0470	-0.300	-0.650	-0.767	-0.825	I	II	I	I	I	I	I	I	I	I
$k_{(C_{27})j}$	-0.167	0.050	-0.375	-0.583	-0.688	II	II	II	II	II	II	II	II	II	II

表4 各年份水生态文明等级

年份	I级	II级	III级	IV级	V级	等级
2006	-0.398	-0.276	-0.220	-0.280	-0.266	III级
2007	-0.368	-0.249	-0.223	-0.246	-0.318	III级
2008	-0.355	-0.244	-0.237	-0.349	-0.322	III级
2009	-0.325	-0.228	-0.241	-0.325	-0.335	II级
2010	-0.332	-0.214	-0.252	-0.312	-0.394	II级
2011	-0.361	-0.187	-0.249	-0.259	-0.348	II级
2012	-0.275	-0.221	-0.275	-0.318	-0.421	II级
2013	-0.258	-0.235	-0.307	-0.358	-0.452	II级
2014	-0.241	-0.246	-0.349	-0.418	-0.479	I级
2015	-0.227	-0.288	-0.377	-0.447	-0.498	I级

从指标因子的权重来看,人均水资源量(C_1)、单位面积化肥施用量(C_8)、城市污水处理率(C_{10})、

农田灌溉亩均用水量(C_{15})、工业用水重复利用率(C_{16})是南昌水生态文明程度差异的主要影响因

子。水资源开发率(C_3)、水功能区水质达标率(C_6)、城市污水处理率(C_{10})、万元 GDP 取水量(C_{13})、工业用水重复利用率(C_{16})、万元工业增加值用水量(C_{17})等指标逐年提升,说明南昌水生态文明建设工作进展顺利。公众满意度(C_{18})在 2006—2013 年均 III 级,2014 年迅速达到 I 级,证实政府对水生态文明城市建设加大资金投入,效果明显,成绩显著。政府可用财力中水利管理投入比例(C_{21})等级较低,说明政府对生态水利工程的投入少,且管道建设滞后。政府重视水生态文明可以有效地提升水生态文明建设工作,具有较大的提升潜力。

5 结论与讨论

(1) 本文选取南昌市水资源、水生态、水景观、水管理、水文化 5 个方面 27 项评价指标,运用 PSR—物元分析模型对南昌市 2006—2015 年的水生态文明建设进行评价,结果表明:2006—2008 年的水生态文明级别为“一般”,2009—2013 年的水生态文明级别为“较好”,2014—2015 年的水生态文明级别为“好”。

(2) 实证结果表明:人均水资源量、单位面积化肥施用量、城市污水处理率、农田灌溉亩均用水量、工业用水重复利用率是影响水生态文明发展的关键要素。南昌市水生态文明发展态势可观,大部分指标逐年提升,促进了水生态文明城市建设。政府高度重视水生态文明建设工作,对发展生态文明城市至关重要。

(3) 采取物元分析法对南昌市水生态文明建设进行评价,评价结果科学可靠,能真实地反应实际情况,但水生态文明综合评价的指标较多,无法将所有评价指标都纳入体系,还需学者们今后进一步去更新和完善。

参考文献:

[1] 陈明忠. 关于水生态文明建设的若干思考[J]. 中国水利,2013(15):1-5.

[2] 陈雷. 加强水生态文明建设 大力节约保护水资源[N]. 中国水利报,2013-03-22(001).

[3] 王浩. 水生态文明建设的理论基础及若干关键问题[J]. 中国水利,2016(19):5-7.

[4] 刘海娇,黄继文,仕玉治. 滨州水生态文明城市建设现状评价[J]. 山东水利,2013(6):23-24+38.

[5] 李坚,崔海洋,尚光旭,等. 北京水生态文明建设评估与预测[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(3):23-26+31.

[6] 王富强,王雷,魏怀斌,等. 郑州市水生态文明城市建设现

状评价[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(4):639-642.

[7] 王建华,胡鹏. 水生态文明评价体系研究[J]. 中国水利,2013(15):39-42.

[8] 唐克旺. 水生态文明的内涵及评价体系探讨[J]. 水资源保护,2013,29(4):1-4.

[9] 任俊霖,李浩,伍新木,等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J]. 长江流域资源与环境,2016,25(10):1537-1544.

[10] 刘海娇,黄继文,仕玉治,等. 黄河下游典型城市水生态文明评价[J]. 人民黄河,2013,35(12):64-67.

[11] 汪伦焰,袁杰,李娜,等. 基于物元可拓模型的水生态文明城市建设评价——以许昌市为例[J]. 人民长江,2016,47(18):18-21.

[12] 舒持恺,杨侃. 基于组合赋权的湖泊健康评价物元分析模型[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):40-46.

[13] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1994.

[14] 涂小松,濮励杰,朱明. 基于可拓学和协调性分析的区域土地综合质量评价[J]. 农业工程学报,2008,24(11):57-62.

[15] 刘东,孙楠,于苗,等. 三江平原井灌区地下水资源承载力物元评价模型[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):1-4.

[16] 黄辉玲,罗文斌,吴次芳,等. 基于物元分析的土地生态安全评价[J]. 农业工程学报,2010,26(3):316-322.

[17] 李朦,解建仓,杨柳,等. 基于模糊物元模型的渭北工业区地下水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(4):169-174.

[18] 陈正华. 基于遥感资料的浙江省海岸带生态系统健康研究[D]. 杭州:浙江大学,2009.

[19] 史飞,严力蛟. 未确知测度模型在城市生态系统健康评价中的应用研究[J]. 科技通报,2007,23(4):603-608.

[20] 宫少军,叶思源,詹华明,等. 天津市滨海湿地生态系统健康研究进展[J]. 海洋地质前沿,2012,28(7):52-58.

[21] 赵帅,柴立和,李鹏飞,等. 城市生态系统健康评价新模型及应用——以天津市为例[J]. 环境科学学报,2013,33(4):1173-1179.

[22] 许力飞. 我国城市生态文明建设评价指标体系研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.

[23] 傅春,占少贵,章无根. 南昌市水环境安全评价[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(3):434-438.

[24] 占少贵,傅春,陈建军. 城市生态文明建设综合评价——以江西 11 个地级市为例[J]. 企业经济,2014,33(12):123-126.

[25] 戴文渊,张芮,成自勇,等. 白银市水生态安全评价研究[J]. 水利水运工程学报,2015(4):92-97.

[26] 宋梦林. 城市水生态系统健康评价及水生态文明建设应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.