

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.01.016

南京市水资源可持续利用评价

季 妤¹, 陆宝宏^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源学院 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:以南京市所辖区域作为研究区,根据2003—2010年水资源利用的有关资料,采用主成分分析法和熵权法对该研究区水资源可持续利用程度进行综合评价,并运用聚类分析法对评价结果进行对比分析。结果表明:研究区2003—2010年期间水资源可持续利用水平总体呈上升趋势,但从聚类分析结果看,水资源可持续利用程度的改善幅度并不大,说明目前南京市水资源可持续利用问题依然严峻。

关键词:主成分分析法;熵权法;聚类分析;水资源;可持续利用;南京市

中图分类号:TV213.4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2014)01-0079-05

Assessment of sustainable utilization of urban water resources in Nanjing City

JI Yu¹, LU Baohong^{1,2}

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The principal component analysis method and the entropy weight method were used to evaluate the sustainable utilization of the water resources in Nanjing City, based on water resources utilization data from 2003 to 2010. The clustering analysis method was used to compare and analyze the evaluation results. The results show that, during the period from 2003 to 2010, the sustainable utilization level of water resources showed an increasing trend in general. Clustering analysis shows that the increase is not significant, indicating that there are still serious obstacles to sustainable utilization of the water resources in Nanjing City.

Key words: principal component analysis method; entropy weight method; clustering analysis, water resources; sustainable utilization; Nanjing City

水资源是人类赖以生存和发展的最基本物质条件,是生态系统中最活跃和影响最广泛的因素,水资源的可持续利用是人类社会可持续发展的基础和保障。水资源可持续利用评价是水资源可持续利用研究的核心问题之一。区域自然环境、经济社会发展相互作用,水资源可持续利用评价是对不同阶段水资源开发利用所导致的生态过程、经济结构、社会组

成的动态变化进行评价,以了解区域水资源可持续利用的程度,提出水资源开发利用的方向。传统的评价方法有层次分析法、模糊综合评价法、指标综合评价法等^[1-2]。

笔者以南京市所辖区域为研究区,根据2003—2010年水资源利用的有关资料,构建水资源可持续利用评价指标体系,采用主成分分析法和熵权法建

基金项目:国家自然科学基金(NSFC-50979023);水利部公益性行业科研专项(201201026)
作者简介:季妤(1990—),女,硕士研究生,研究方向为水资源规划与管理。E-mail:jy798@163.com
通信作者:陆宝宏,副教授。E-mail:lubaohong@126.com

立综合评价模型,对南京市的水资源可持续利用能力进行综合评价,并运用系统聚类法对评价结果进行对比分析。

1 研究背景

南京市位于江苏省西南部,东与扬州、镇江、常州市接壤,南、西、北3面与安徽毗邻,是江苏省政治、经济、文化和交通中心。境内共有大小河道116条,分属两江(长江、青弋江—水阳江)、两湖(固城湖、石臼湖)、两河(滁河、秦淮河),按照跨省、市的流域划分水系,可将之划分为长江南京段、滁河水系、秦淮河水系、青弋江—水阳江水系、淮河流域高宝湖水系、太湖流域湖西水系。

南京市地处北亚热带季风气候区,气候温暖湿润,多年平均气温15.4℃,降水量较为丰沛,多年平均降水量为1081.9 mm,但降水量时空分布不均;全市多年平均水资源总量为30.47亿 m³ [3]。近年来,随着社会经济的快速发展,南京市各类用水量逐年递增,水资源供需矛盾日益突出,水资源短缺已经成为制约南京市社会经济发展的因素,进行南京市水资源可持续利用综合评价,对促进南京地区的可持续发展具有重要意义。

2 评价方法的选择

2.1 主成分分析法

主成分分析法的特点是,利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标。在实际应用中,为了全面、系统地分析问题,指标通常较多。每个变量都在不同程度上反映了所研究问题的某些信息,并且指标之间有一定的相关性,因而所得的统计数据所反映的信息在一定程度上有重叠。变量太多会增加计算量和分析问题的复杂性,而主成分分析法可以较好地解决这一问题。利用主成分分析法进行定量分析,涉及的变量较少,得到的信息量较多。笔者使用主成分分析法计算南京市水资源可持续利用水平综合指数,能够避免计算过程中由于因子众多、数据复杂而造成的人工计算误差,使结果更加可靠。

主成分分析法原理:设原始变量为 $x_1, x_2, \cdots, x_n$, 则

$$\begin{cases} z_1 = l_{11}x_1 + l_{12}x_2 + \cdots + l_{1n}x_n \\ z_2 = l_{21}x_1 + l_{22}x_2 + \cdots + l_{2n}x_n \\ \vdots \\ z_m = l_{m1}x_1 + l_{m2}x_2 + \cdots + l_{mn}x_n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $z_1, z_2, \cdots, z_m (m < n)$ 分别为原始变量指标 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 的第1,第2, ..., 第 m 个主成分; $L_{11}, L_{12},$

$\cdots, L_{mn}$ 为主成分系数。在操作中常挑选几个最大的主成分,且两个主成分之间相互无关 [4-5]。

2.2 熵权法

熵,原本是一个热力学概念,最先由 Shannon 引入信息论,现已在各个领域得到广泛的应用。熵权法在综合考虑各因素所提供信息量的基础上计算综合指标。作为一种客观综合评价方法,熵权法主要是根据各指标的信息量大小来确定其权数。如果指标的信息熵越小,该指标提供的信息量则越大,在综合评价中所起作用也就越大,权重就越高 [6]。笔者使用熵权法确定南京市水资源可持续利用评价体系各子系统的权重。

熵权法原理:当系统处于 n 种不同的状态,状态概率为 $p_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 时,则系统熵的表达式为

$$E(p_1, p_2, \cdots, p_n) = -k \sum p(x_i) \ln p(x_i) \quad (2)$$

式中: E 为熵; k 为玻尔兹曼常量; x_i 为第 i 个状态值; $p(x_i)$ 为出现第 i 个状态值时的概率。

熵权定义为

$$w_E^i = \frac{1 - E_i}{\sum (1 - E_i)} \quad (3)$$

式中: w_E^i 为 i 状态的熵权。

3 研究区水资源利用综合评价

3.1 指标体系的构建

水资源可持续利用评价指标的选取,应根据区域特点,考虑区域社会经济发展的不平衡、水资源开发利用程度及当地科技文化的差异等,具体考虑以下几个方面原则:科学性,整体性,动态性,定性与定量相结合,简明、实用、可行性 [7]。

根据2003—2010年《南京市统计年鉴》《南京市水资源公报》中的相关数据和各项相关指标与可持续发展的关系,构建出可持续发展发展水平指标评价体系及指标性质,见表1 [8-9]。

3.2 主成分分析

本文运用 SPSS20.0 统计分析软件对水资源子系统的指标进行标准化处理,计算出水资源子系统主成分的特征值与贡献率 [10],见表2。

由表2可见,前3个主成分的累计贡献率已经达到90.17%,而第1个主成分的贡献率更是达到44.38%。根据主成分累计贡献率大于85%的原则,这3个主成分能反映全部指标中的大部分信息,因此选取前3个主成分 F_1, F_2, F_3 进行分析。

主成分载荷矩阵是主成分与变量间的相关系数,根据确定的3个主成分,利用 SPSS20.0 进一步计算3个主成分的载荷,计算结果见表3。表3中,

表 1 评价指标体系及指标性质

子系统	评价指标名称	计算方法	指标性质
水资源	水资源总量(亿 m ³)		正指标
	过境水资源量(亿 m ³)		正指标
	生产用水量(亿 m ³)		逆指标
	生活用水量(亿 m ³)		逆指标
	生态用水量(亿 m ³)		逆指标
	供水总量(亿 m ³)		正指标
社会经济	人均生产总值(万元)	城市国内生产总值(GDP)除以城市总人口	正指标
	人均工业产值(万元)	城市工业产值除以城市总人口	正指标
	人口自然增长率(%)	人口出生率减去人口死亡率	逆指标
	城市居民人均可支配收入(元)	城市家庭总收入减去交纳个人所得税,再减去个人交纳社会保障支出,减去记账补贴	正指标
	粮食产量(万 t)		正指标
	耕地有效灌溉面积(hm ²)		逆指标
生态环境	工业废水达标率(%)	工业废水达标排放量除以工业废水排放总量×100%	正指标
	工业重复用水率(%)	工业重复用水量除以(生产中取用的新水量加上重复用水量)×100%	正指标
	工业固体废物综合利用率(%)	工业固体废物综合利用量除以(工业固体废物产生量加上综合利用往年贮存量)×100%	正指标
	地表水功能区水质达标率(%)	地表水认证水体达标频次之和除以认证监测总频次×100%	正指标
	建成区绿化覆盖率(%)	城市建成区绿化覆盖面积除以建成区面积×100%	正指标
	城市污水处理率(%)	城市污水处理量除以城市污水排放总量×100%	正指标
	河流水质劣于Ⅲ类断面比例(%)	河流水质劣于Ⅲ类断面数量除以监测断面总数×100%	逆指标

表 2 主成分特征值、贡献率计算结果

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
F_1	2.66	44.38	44.38
F_2	2.10	35.04	79.42
F_3	0.65	10.75	90.17
F_4	0.29	4.86	95.03
F_5	0.21	3.44	98.46
F_6	0.09	1.54	100

表 3 主成分载荷矩阵

变量	主成分载荷		
	F_1	F_2	F_3
X_1	0.80	-0.40	-0.19
X_2	0.60	-0.51	0.60
X_3	0.26	0.91	-0.11
X_4	-0.84	-0.40	-0.13
X_5	-0.50	0.67	0.47
X_6	0.79	0.48	-0.07

$X_1, X_2, \dots, X_6$ 分别代表水资源总量、过境水资源量、生产用水量、生活用水量、生态用水量、供水总量。

从表 3 中可以看出,第 1 主成分 F_1 在水资源总量 X_1 、过境水资源量 X_2 、供水总量 X_6 具有较大的载荷,第 2 主成分 F_2 在生产用水量 X_3 、生态用水量 X_5 具有较大的载荷,而第三主成分 F_3 在过境水资源量 X_2 具有较大的载荷。第 1~3 主成分可以充分反映子系统的综合水平,可以利用这 3 个主成分的变化来反映水资源子系统的变化情况。

根据表 3 的主成分载荷,计算研究区水资源子系统在第 1、第 2、第 3 主成分上的综合得分。如果某年份在某一主成分上的得分为正,则意味着该年份的这一主成分在平均发展水平之上;得分为负则在平均水平以下。综合得分 Z_1 为各主成分得分乘以相应的贡献率之后的和,即 $Z_1 = 0.4438F_1 + 0.3504F_2 + 0.1075F_3$ 。综合得分值越高,表示水资源子系统的发展水平越高,即水资源可持续利用水平越高。计算结果见表 4。

表 4 水资源子系统主成分因子得分

年份	主成分得分			水资源子系统综合得分
	F_1	F_2	F_3	
2003	2.61	0.30	0.05	1.27
2004	0.33	1.57	-0.03	0.69
2005	1.21	1.03	0.62	0.96
2006	-0.80	1.37	-0.86	0.03
2007	-1.77	0.40	-0.09	-0.66
2008	-2.36	-0.50	1.07	-1.11
2009	-0.16	-1.87	-1.37	-0.87
2010	0.95	-2.31	0.61	-0.32

采用相同的方法与步骤对研究区社会经济子系统、生态环境子系统分别进行评价计算,得到社会经济子系统主成分为 2 个,生态环境子系统主成分为 3 个。各子系统综合得分的计算结果见表 5。

表 5 各子系统综合得分

年份	综合得分		
	水资源子系统	社会经济子系统	生态环境子系统
2003	1.27	-2.41	-1.61
2004	0.69	-0.89	-1.86
2005	0.96	-0.66	-0.94
2006	0.03	-0.28	-0.32
2007	-0.66	0.44	0.88
2008	-1.11	1.16	1.52
2009	-0.87	1.13	1.30
2010	-0.32	1.50	1.04

3.3 利用熵权法计算子系统权重

利用熵权法对影响水资源可持续利用的指标赋予权重,能够最大限度地消除水资源可持续利用评价中的不确定性。具体的计算步骤为

a. 构建 8 年 19 个评价指标的判断矩阵 $R = (x_{ij})_{8 \times 19} (i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, 19)$ 。

b. 将矩阵进行归一化处理。

正指标计算公式为
$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}} \quad (4)$$

逆指标计算公式为
$$x_{ij}^* = \frac{x_{jmax} - x_{ij}}{x_{jmax} - x_{jmin}} \quad (5)$$

c. 计算第 i 年第 j 项因子占该年所有因子的比例。计算公式为

$$y_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{i=1}^8 x_{ij}^* \quad (6)$$

d. 计算各指标的权重。

$$w_j = \frac{1 - e_j}{19 - \sum_{j=1}^{19} e_j} \quad (0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^{19} w_j = 1) \quad (7)$$

其中
$$e_j = \frac{-1}{\ln 8 \sum_{i=1}^8 y_{ij} \ln y_{ij}} \quad (e_j > 0)$$

式中: e_j 为第 j 项评价指标的熵值。

为使 $\ln y_{ij}$ 有意义, 假定当 $y_{ij} = 0$ 时, $y_{ij} \ln y_{ij} = 0$ 。

e. 计算子系统权重。

$$S_{ia} = \sum_{j=1}^m x_{ij}^* w_j \quad (8)$$

式中: S_{ia} 为第 A 个子系统权重, $A = 1, 2, 3$; m 为第 A 个子系统中的指标个数。

对 S_{ia} 也进行归一化处理, 按照上述公式进行计算, 即可得到 8 年中 3 个子系统在研究区水资源可持续利用系统中的权重值 W_A : 水资源子系统权重为 0.242, 社会经济子系统权重为 0.508, 生态环境子系统权重为 0.250。

3.4 综合评价结果

设水资源、社会经济和生态环境子系统的综合得分分别为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 , 再根据上小节熵权法得到的水资源、社会经济和生态环境 3 个子系统权重系数, 得到水资源可持续利用状况综合评价指数计算公式为

$$I_{su} = 0.242Z_1 + 0.508Z_2 + 0.250Z_3 \quad (9)$$

式中, 水资源可持续利用综合指数 I_{su} 与水资源子系统评价指数 Z_1 、社会经济子系统评价指数 Z_2 以及生态环境子系统评价指数 Z_3 相关。依据公式(9), 可计算出南京市 2003—2010 年的水资源可持续利用综合评价指数, 见表 6 和图 1。

表 6 南京市水资源可持续利用综合评价结果

年份	评价指数			I_{su}
	Z_1	Z_2	Z_3	
2003	1.27	-2.41	-1.61	-1.32
2004	0.69	-0.89	-1.86	-0.75
2005	0.96	-0.66	-0.94	-0.34
2006	0.03	-0.28	-0.32	-0.21
2007	-0.66	0.44	0.88	0.28
2008	-1.11	1.16	1.52	0.70
2009	-0.87	1.13	1.30	0.69
2010	-0.32	1.50	1.04	0.95

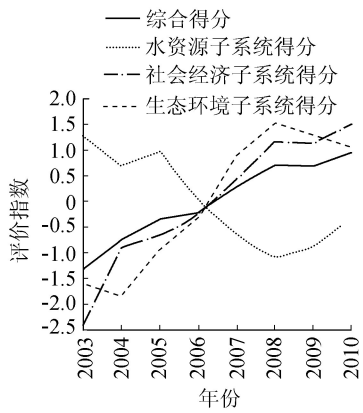


图 1 南京市水资源可持续利用评价指数变化曲线

对上述计算结果进行分析, 可以得到以下结论:

a. 2003—2010 年, 研究区水资源可持续利用水平随时间变化总体呈上升趋势, 虽然在 2005 年综合得分值有小幅的下降, 但 2009 年后开始回升。

b. 从子系统来看, 社会经济子系统和生态环境子系统得分的变化趋势与综合得分的趋势基本一致, 总体呈上升趋势, 而水资源子系统得分呈下降趋势。说明虽然水资源开发利用程度的变化对水资源可持续利用水平产生了较大影响, 但是随着社会经济的发展, 环保意识和节约用水的理念深入人心, 以及一些节水硬性措施的出台, 促使了水资源可持续利用水平持续向好的方向发展。

c 从单个因子来看, 水资源总量、生产用水量、供水总量、人口自然增长率和河流水质劣于Ⅲ类断面比例等指标占有较大的权重。除水资源量、用水效率、水环境质量等因素会影响南京市水资源可持续利用水平外, 公众的节水意识也是主要的影响因素。

3.5 评价结果聚类分析

由于以上的评价方法并不能准确地界定出各个年份水资源可持续利用状况的相似程度, 也就无法进一步分析各年份水资源可持续利用程度的差异。为使结果进一步明晰, 以各年份的综合得分值为指标, 应用聚类分析法划分出不同的发展类型对南京市 2003—2010 年的水资源可持续利用程度进行对比分析。运用 SPSS20.0 软件, 得到聚类树状图, 见图 2。

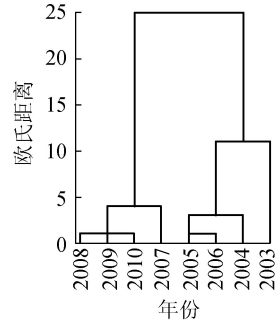


图 2 南京市水资源可持续利用程度聚类树状图

根据各年的综合评价指数,设计水资源可持续利用能力的度量标准为: $I_{su} \geq 0.4$ 为可持续发展模式、 $-0.2 \leq I_{su} < 0.4$ 为中层发展模式、 $I_{su} < -0.2$ 为低层次发展模式。当欧氏距离取值为 10 时,基于欧式距离相近度,将南京市水资源可持续利用程度划分为 3 种类型:第 1 类:2003—2004 年,水资源可持续利用程度相对较低,综合得分为-0.31,属于低层次发展模式;第 2 类:2005—2009 年,在 8 年间的对比中,其水资源可持续利用程度属中等,综合得分均值为 0.03,属于中层发展模式,与 2003 年相比,水资源可持续利用状况有所改善;第 3 类:与前 8 年间相比,2010 年水资源可持续利用程度相对较高,综合得分值为 0.45,有较大的改善,属于可持续发展模式。但对比 3 种类型的平均综合得分值,其改善幅度并不大,这说明南京市水资源可持续利用问题依然严峻。

4 结 语

笔者以南京市为研究区域,采用熵权法确定各子系统的权重,结合主成分分析法对水资源可持续利用进行了综合评价。评价结果表明:2003—2010 年,南京市水资源可持续利用水平呈总体上升趋势,虽然在 2005 年综合得分值有小幅的下降,但 2009 年后开始回升;社会经济子系统和生态环境子系统得分的变化趋势与综合得分的趋势基本一致,总体呈上升趋势,而水资源子系统得分呈下降趋势。对评价结果进行聚类分析可以看到,8 年间的改善幅度并不大,说明目前南京市水资源可持续利用问题依然严峻。

参考文献:

[1] 程乖梅,何士华. 水资源可持续利用评价方法研究进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17 (1) : 52-56. (CHENG Guaimei, HE Shihua. Progress on evaluating methods for sustainable utilization of water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2006, 17 (1) : 52-56. (in Chinese))

[2] 姚章民,张建云. 水资源评价研究进展 [J]. 水文, 2009, 30 (增刊 1) : 16-18. (YAO Zhangmin, ZHANG Jianyun. Advance in research on water resources assessment [J]. Journal of China Hydrology, 2009, 30 (S1) : 16-18. (in Chinese))

[3] 南京市水利局. 2003-2010 年水资源公报 [EB/OL]. [2012-12-10]. <http://www.njsl.gov.cn/www/njsl/szygb.html>.

[4] 徐建华. 现代地理学中的数学方法 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002 : 31-36.

[5] 任玉忠,叶芳,高树东,等. 基于主成分分析的潍坊市水

资源承载力评价研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28 (5) : 312-316. (REN Yuzhong, YE Fang, GAO Shudong, et al. Study on water resources carrying capacity in weifang city based on principal component analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28 (5) : 312-316. (in Chinese))

[6] 罗刚军,解建仓,阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用 [J]. 水利学报, 2008, 39 (9) : 1092-1097. (LUO Gangjun, XIE Jiancang, RUAN Benqing. Fuzzy comprehensive assessment model for water shortage risk based on entropy weight [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (9) : 1092-1097. (in Chinese))

[7] 来海亮,汪党献,吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系 [J]. 水科学进展, 2006, 17 (1) : 95-101. (LAI Hailiang, WANG Dangxian, WU Difei. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use [J]. Advances in Water Science, 2006, 17 (1) : 95-101. (in Chinese))

[8] 姜登岭. 区域水资源可持续利用的评价指标体系研究 [J]. 水科学与工程学报, 2006 (2) : 14-16. (JIANG Dengling. Assessment index system of regional water resources sustainable utilization [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2006 (2) : 14-16. (in Chinese))

[9] HELLSTROM D, JEPSSON U, RRMAN E. A framework for systems analysis of sustainable urban water management [J]. Environment Impact Assessment Review, 2000, 20 : 311-321.

[10] 王伏虎. SPSS 在社会经济分析中的应用 [M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2009 : 231-238.

(收稿日期: 2013 - 03 - 12 编辑: 彭桃英)

(上接第 78 页)

[6] 张军,耿雅妮. 宝鸡市主要河流水质现状综合评价 [J]. 科学技术与工程, 2010, 10 (27) : 6825-6827. (ZHANG Jun, GENG Yani. Assessment on water quality of the main rivers in Baoji City [J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10 (27) : 6825-6827. (in Chinese))

[7] 刘月丽,赵振华,夏丽玲,等. 秦淮河沉积物中重金属赋存特征及风险分析 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38 (25) : 13910-13912. (LIU Yueli, ZHAO Zhenhua, XIA Liling, et al. Occurrence characters of heavy metals in sediment in Qinhuai River and its risk analysis [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38 (25) : 13910-13912. (in Chinese))

[8] 陈建平. 南京市主要水系表层沉积物重金属污染潜在的生态风险评价 [J]. 污染防治技术, 2008, 4 (21) : 33-35. (CHEN Jianping. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the water systems in Nanjing [J]. Pollution Control Technology, 2008, 4 (21) : 33-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2013 - 07 - 25 编辑: 徐 娟)