

## 基于模糊综合评价的水环境安全评价 —以南京市为例

赵 静<sup>1</sup>, 臧英平<sup>2</sup>, 张 丽<sup>3</sup>, 徐学东<sup>2</sup>, 王腊春<sup>1\*</sup>, 吴 昊<sup>1</sup>

(1. 南京大学地理科学与海洋学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京市水资源管理中心, 江苏 南京 210008;  
3. 西郊利物浦大学淮安新型城镇化发展研究院, 江苏 淮安 223005)

**摘要:** 水环境安全是区域社会经济健康发展的基础。针对南京市快速经济发展下的水环境安全问题, 基于压力-状态-响应(P-S-R)概念模型构建的水环境安全评价指标体系, 采用模糊综合评价模型对南京市 2005-2014 年水环境安全状况进行评价得出, 南京市水环境基本安全, 响应层安全性较好, 压力层次之, 状态层最弱。水环境安全状态平均安全度值高(3.16), 不安全年份比例大(40%), 且安全度值无明显下降趋势, 存在不安全转变的风险。可通过适度控制人口规模和经济增长, 从根本上降低城市用水压力和污染负荷。此外, 加强城市节水建设和水土保持相关工作, 如降低农田实灌亩均用水量、提高城市节约用水量、扩大建成区绿化覆盖率、森林覆盖率等, 对于促进和保障南京市水环境安全也具有重要意义。

**关键词:** P-S-R 模型; 水环境安全; 模糊综合评价; 南京

**中图分类号:**                      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-7839 (2016) 12-0004-08

### Water environment security assessment based on fuzzy comprehensive evaluation — A Case study of Nanjing City

ZHAO Jing<sup>1</sup>, ZANG Yingping<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup>, XU Xuedong<sup>2</sup>, WANG Lachun<sup>1\*</sup>, WU Hao<sup>1</sup>

( 1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu;  
2. Water Resources Management Center of Nanjing, Nanjing 210008, Jiangsu;  
3. XJTLU-Huaian Research Institute of New-Type Urbanization, Huaian 223005, Jiangsu )

**Abstract:** Water environment security is the foundation of regional social and economic development. Aiming at the problem of water security under the rapid economic development of Nanjing city, based on the water environment safety evaluation index system established by the concept model of pressure state response (P-S-R model), the fuzzy comprehensive evaluation model was used to evaluate the water environment security of Nanjing city from 2005 to 2014. Result showed that the water environment security of Nanjing city was at the basic safety level. Safety evaluation result in response layer was the best, then stress layer, and state layer was the weakest. There was an high average safety degree of water environmental safety state layer (3.16), and the proportion of unsafe years was relatively large (40%), considering no significant decrease trend in the value of safety degree, the risk of unsafe transition exists. Control of population and economic growth in a reasonable range, is the fundamental way to radically reduce urban water pressure and pollution load. In addition, strengthening water saving construction and water and soil conservation related work, such as decreasing

收稿日期: 2016-10-25

基金项目: 江苏省水利科技项目(2014007)

作者简介: 赵静(1988-), 女, 在读博士, 主要研究方向为水文水资源。

farmland irrigation water use, improving urban water saving and expanding the built-up area green coverage as well as the forest coverage rate and so on, also has important significance to promote and protect the water environment security of Nanjing city.

**Key words:** P-S-R model; water environmental security; fuzzy comprehensive evaluation; Nanjing

## 1 概述

水作为重要的战略资源,与社会经济发展紧密相关,是维系人类可持续发展的重要命脉<sup>[1]</sup>。联合国于 1972 年首次提出全球性水危机,并在 5 年后再次发出警告,水问题未来可能会引发严重的社会危机<sup>[2]</sup>。目前来看,水安全问题已成为制约世界社会经济发展、生态环境建设、以及区域和平的主要因素<sup>[3]</sup>,是各国政府高度重视的问题<sup>[4]</sup>。水安全的概念相对广泛,涉及到供水安全、防洪安全、水质安全、水生态安全、跨境河流及国家安全等多个方面<sup>[5]</sup>。水环境安全则是水安全的重要内容,既包括水质、水量、水生态等自然属性,也与人类活动、社会进步等有着密切的联系。不同的是水环境安全更多地强调了环境的概念,主要针对可能影响水环境质量安全自然和社会经济因素进行分析评价。不同于水安全全局性和地域性的双重特征,水环境安全在区域尺度上更有实际研究意义,可通过分析水环境安全压力,评估当前现状,调控和治理影响水环境安全系统的各因素,实现区域水环境安全程度的优化。

快速经济发展背景下产生的水安全问题,以水环境安全问题最为普遍。近年来,国内外学者分别在流域及行政尺度上做了大量的水环境安全研究工作<sup>[6-11]</sup>,并针对水环境安全引起的粮食生产问题<sup>[12]</sup>、卫生健康问题、生态补偿问题<sup>[13]</sup>、经济损失<sup>[14]</sup>等问题展开了分析与评价。总体来看,水环境安全的合理评价是研究基础,而构建完善的评估指标以及选择合适的评估模型是保障评价结果客观可信的关键。南京市人口众多,且城市规模不断扩大,快速经济发展带来各种工业废水和生活污水的大量排放,水环境安全压力增大,针对以上问题,本文采用压力-状态-响应(P-S-R)概念模型构建水环境评价指标体系,利用模糊综合评价模型对南京市 2005 年以来水环境状况进行了安全等级评价,明确南京市水环境安全动态变化过程,重点识别影响水环境安全的主要因素,并提出针对性的水环境安全保障措施。

## 2 研究区域与方法

### 2.1 研究区概况

南京市位于 N 31° 14' ~ 32° 37'、E 118° 22' ~ 119° 14', 总面积 6587 Km<sup>2</sup>。地处长江中下游中部,气候温暖湿润,多年平均气温 15.4℃,平均降水量 1082 mm,但降水量时空分布不均匀。水资源总量充沛,2014 年水资源总量达到 30.76 m<sup>3</sup>。社会经济发展水平高,既是江苏省政治、经济、文化、交通的中心,也是长三角经济核心区的重要区域中心城市。2014 年人均生产总值达到 10.75 万元,社会经济发展迅速发展的同时,全市用水总量逐年加大,水环境质量也受到明显影响。2014 年南京市水资源公报显示,全市用水总量为 42.14 亿 m<sup>3</sup>,单位 GDP 用水量为 47.9 m<sup>3</sup>/万元,其中符合和优于Ⅲ类水的河流水质断面比例为 43.6%,水功能区水质达标率 68.1%(年均值法)。针对快速发展背景下南京水安全问题展开分析,并提出针对性的应对策略,对于实现南京市水环境与社会经济的协调可持续发展具有重要意义。

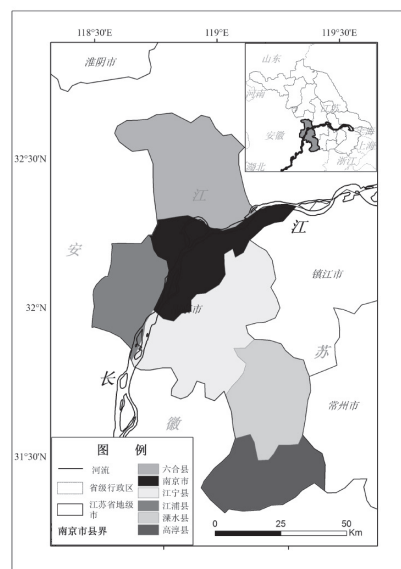


图 1 研究区地理位置图

### 2.2 数据与方法

以 2005-2014 年《南京市统计年鉴》、《南京

市水资源公报》等为数据资料来源,在P-S-R框架模型下,利用模糊综合评价法对南京市2005年以来的水环境安全进行综合评价。

### 2.2.1 “压力-状态-响应”(P-S-R)框架模型

P-S-R模型将指标体系划分为“压力”、“状态”、“响应”3个层次系统,其中,“压力”反映人类活动对城市水环境造成的负荷,包括通过水资源的不合理利用、水体污染物的过度排放等对水环境造成影响和破坏的人类活动;“状态”表征水环境质量状况,主要包括水环境质量现状、水生态系统、供水能力等;“响应”指标表征人类面临水环境问题所采取的对策与措施,用来恢复、阻止、预防人类对自然环境造成不好的影响。模型逻辑关系明确,具有可操作性强、灵活性、系统性等特点,应用十分广泛。

### 2.2.2 模糊综合评价模型

模糊综合评价法主要利用模糊数学的隶属度理论将定性评价转化为定量评价,具有系统性强,评价结果清晰等优点。鉴于数学模型简单,且对非确定问题具有很好的评价效果等优点,在环境影响评价、安全、土木等领域得到广泛应用<sup>[15-17]</sup>。

主要步骤如下:

#### (1) 指标标准化

对指标原始数据矩阵  $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$  进行标准化处理,正负项指标标准化公式不同,如下:

正向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ijmin}}{x_{ijmax} - x_{ijmin}} \quad (1)$$

负向指标:

$$y_{ij} = \frac{x_{ijmax} - x_{ij}}{x_{ijmax} - x_{ijmin}} \quad (2)$$

式中,  $x_{ijmax}$  和  $x_{ijmin}$  分别为2005-2014年某一评价指标的最大值和最小值;为对应该指标的标准化值。

#### (2) 指标权重确立

不同指标在评价过程中的重要性不同,常见的权重确定方法包括主观赋权及客观赋权两种方法。层次分析法(AHP)建立的判断矩阵能很好的反映对象两两比较的重要程度,是目前研究与应用较为广泛的一种主观赋权方法,而熵权法能够客观反映指标间的相互影响与作用,且近年来得到广泛的应用。本文采用基于层次分析法和熵权法的组合赋权方法,且无偏好性( $\varepsilon$ 取0.5),如

下式:

$$A = 0.5(A_1 + A_2) \quad (3)$$

式中,  $A_1$  指的是用层次分析法求得的权重,  $A_2$  指的是用熵权法求得的权重。鉴于层次分析法和熵权法进行权重分析的案例十分普遍,具体公式不再赘述,详见参考文献<sup>[18-19]</sup>。

#### (3) 隶属度矩阵的计算

依据各指标的评价标准,采用三角形隶属函数建立指标隶属度函数,并最终确定隶属度矩阵  $R$ 。其中,隶属函数的计算方法如下,  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $a_5$  分别各评价指标安全等级划分阈值。

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a_1 \\ \frac{a_2 - x}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ 0 & x > a_2 \end{cases} \quad (4)$$

$$f_2(x) = \begin{cases} \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 < x \leq a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 < x \leq a_3 \\ 0 & x \leq a_1, x > a_3 \end{cases} \quad (5)$$

$$f_3(x) = \begin{cases} \frac{x - a_2}{a_3 - a_2} & a_2 < x \leq a_3 \\ \frac{a_4 - x}{a_4 - a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ 0 & x \leq a_2, x > a_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$f_4(x) = \begin{cases} \frac{x - a_3}{a_4 - a_3} & a_3 < x \leq a_4 \\ \frac{a_5 - x}{a_5 - a_4} & a_4 < x \leq a_5 \\ 0 & x \leq a_3, x > a_5 \end{cases} \quad (7)$$

$$f_5(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_4 \\ \frac{x - a_4}{a_5 - a_4} & a_4 < x \leq a_5 \\ 1 & x > a_5 \end{cases} \quad (8)$$

#### (4) 模糊综合评价

通过对权重系数矩阵  $W$  与隶属度评价矩阵  $R$  进行模糊变换得到模糊评判集  $S$ , 设  $W = (y_j)_{1 \times m}$ ,  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ , 那么

$$S = W \circ R = (y_1, y_2, \dots, y_m) \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m1} & r_{m1} & \dots & r_{m5} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, 运算符号  $\circ$  为模糊合成算子,  $y_j$  为标准化后的指标值,  $S_i$  ( $i=1, 2, \dots, 5$ ) 指的是水环境安全对第  $i$  等级的隶属程度。若  $S_j = \max_{1 \leq j \leq 5} \{S_j\}$ , 则被评事物总体上隶属于第  $r$  等级, 由于该评价方法对模糊运算结果数值进行了取舍, 在某些情



况下会造成信息损失, 本文采用加权平均原则, 对评价模型进行改进。

加权平均原则的原理是将评价等级视为一种连续的相对位置, 即去定量化处理。采用数值  $\{1, 2, \dots, m\}$  表示各评价等级, 称为各等级的秩。通过对评价对象各等级的秩进行加权运算, 得到各评价对象的相对位置, 计算公式如下:

$$S_r = \sum_{j=1}^m S_j^k * j / \sum_{j=1}^m S_j^k \quad (10)$$

式中,  $k=2$ 。  $S_r$  为加权平均原则改进后的模糊综合评价结果, 结合水环境状态分级标准 (表 1), 既可以得到评价对象的等级, 还能对多个评价对象进行比较。由表 1 可知, 水环境安全综合评价价值越高, 表示越不安全。

表 1 水环境安全状态分级标准

安全状态	极安全 I	安全 II	基本安全 III	不安全 IV	极不安全 V
安全度值	1-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	3.5-4.5	4.5-5

3 评价指标体系的构建

本文根据 P-S-R 概念模型框架, 参考国内学者已有水环境安全评价指标体系, 结合南京市水环境现状, 建立了图 1 所示的水环境安全评价指标体系。并根据各评价指标与水环境安全之间的关系, 将指标分正向指标和负向两类指标, 其中, 正向指标代表向上或向前发展、增长的指标, 其值越大, 评价就越好, 反之为负向指标。

作为水环境安全评价指标体系的重要组成部分, 指标体系评价标准关系到最终评价结果是否

客观准确。借鉴相关的研究成果<sup>[20-21]</sup>、地表水环境标准、生活饮用水卫生标准、农田灌溉水质标准、国家环保模范城市考核标准、“十二五”环保规划、发达国家水平、全国、江苏省及南京市平均水平等, 将评价指标进行分级, 并制定划分标准 (表 2)。该划分阈值是隶属度计算的基础。

4 水环境安全综合评价

4.1 指标权重分析

利用层次分析法和熵权法进行 1:1 组合赋权的方法, 对南京市水环境安全指标进行权重分析, 结果见表 3。压力、状态、响应的权重之比为 0.412:0.203:0.385, 表明 P-S-R 模型中, 压力准则层对南京市水环境安全影响较大, 其次是响应层, 最后为状态层。各指数权重值由大小顺序如下: 排污控制指数 ( $C_8$ ) > 污染物负荷指数 ( $C_4$ ) > 经济压力指数 ( $C_2$ ) > 水资源条件指数 ( $C_5$ ) > 水环境质量指数 ( $C_6$ ) > 水土保持指数 ( $C_9$ ) > 政府管理指数 ( $C_{10}$ ) = 用水压力指数 ( $C_3$ ) > 节水指数 ( $C_7$ ) > 人口压力指数 ( $C_1$ ), 即压力层中污染物负荷指数 ( $C_4$ )、状态层中水资源条件指数 ( $C_5$ )、水环境质量指数 ( $C_6$ ) 以及响应层中的排污控制指数 ( $C_8$ ) 权重系数大。具体来看, 农用化肥使用负荷 ( $D_{43}$ )、城市生活污水集中处理率 ( $D_{83}$ )、污水年处理量 ( $D_{81}$ )、建成区绿化覆盖率 ( $D_{91}$ )、常住人口 ( $D_{11}$ )、人均水资源量 ( $D_{51}$ )、污水日处理能力 ( $D_{82}$ ) 等指标是影响南京市水环境安全的重要因素, 需重点关注。



图 2 南京市水环境安全评价指标体系

表 2 南京市水环境安全评价指标分级标准

安全等级	极安全 I	安全 II	基本安全 III	不安全 IV	极不安全 V
常住人口 (万人)	[0,500)	(500,650)	[650,800)	[800,950)	[950, ∞)
人口密度 (人/km <sup>2</sup> )	[0,300)	[300,500)	[500,1000)	[1000,2500)	[2500, ∞)
人口自然增长率 (‰)	[0,0.5)	[0.5,2)	[2,3.5)	[3.5,5)	[5, ∞)
人均 GDP (万元/人)	[0,1.5)	[1.5,3.5)	[3.5,5.5)	[5.5,7.5)	[7.5, ∞)
第三产业比重 (%)	[80, ∞)	[60,80)	[40,60)	[20,40)	[0,20)
城镇恩格尔系数 (%)	[0,30)	[30,40)	[40,50)	[50,60)	[60, ∞)
经济增长率 (%)	[0,8)	[8,10)	[10,12)	[12,14)	[14, ∞)
人均日生活用水量 (L)	[0,220)	[220,250)	[250,280)	[280,310)	[310, ∞)
用水人口 (万人)	[0,350)	[350,455)	[455,560)	[560,665)	[665, ∞)
单位 GDP 用水量 (m <sup>3</sup> /万元)	[0,100)	[100,150)	[150,200)	[200,300)	[300, ∞)
工业 COD 排放负荷 (mg/L)	[0,6)	[6,12)	[12,18)	[18,24)	[24, ∞)
工业氨氮排放负荷 (mg/L)	[0,0.15)	[0.15,0.5)	[0.5,1.0)	[1.0,1.5)	[1.5, ∞)
农用化肥使用量 (kg/亩)	[0,15)	[15,21.2)	[21.2,27.4)	[27.4,33.6)	[33.6, ∞)
农用农药使用量 (kg/亩)	[0,0.4)	[0.4,0.6)	[0.6,0.8)	[0.8,1.0)	[1.0, ∞)
人均水资源量 (m <sup>3</sup> )	[2300, ∞)	[1700,2300)	[1100,1700)	[500,1100)	[0,500)
过境水资源量 (亿 m <sup>3</sup> )	[10000, ∞)	[9000,10000)	[8000,9000)	[7000,8000)	[0,7000)
年降水量 (mm)	[2000, ∞)	[1500,2000)	[1000,1500)	[500,1000)	[0,500)
城市用水普及率 (%)	[95,100)	[85,95)	[75,85)	[65,75)	[0,65)
III 类水以上河湖断面比例 (%)	[70,100)	[50,70)	[40,50)	[30,40)	[0,30)
水功能区水质达标率 (%)	[80,100)	[70,80)	[60,70)	[50,60)	[0,50)
地下水水质达标率 (%)	[95,100)	[90,95)	[85,90)	[80,85)	[0,80)
集中式饮用水水源地水质达标率 (%)	[95,100)	[90,95)	[85,90)	[80,85)	[0,80)
农田实灌亩均用水量 (m <sup>3</sup> /亩)	[0,300)	[300,420)	[420,500)	[500,600)	[600, ∞)
工业用水重复利用率 (%)	[90, ∞)	[80,90)	[70,80)	[60,70)	[0,60)
节约用水量 (万 m <sup>3</sup> )	[4500, ∞)	[4000,4500)	[3500,4000)	[3000,3500)	[0,3000)
污水年处理量 (亿 t)	[9.6, ∞)	[8.6,9.6)	[7.6,8.6)	[6.6,7.6)	[0,6.6)
污水日处理能力 (万吨)	[468, ∞)	[448,468)	[428,448)	[408,428)	[0,408)
城市污水处理率 (%)	[90,100)	[85,90)	[80,85)	[75,80)	[0,75)
生活垃圾粪便无害处理率 (%)	[95,100)	[90,95)	[85,90)	[80,85)	[0,80)
建成区绿化覆盖率 (%)	[46,100)	[45,46)	[44,45)	[43,44)	[0,43)
人均公园绿地面积 (m <sup>2</sup> )	[15, ∞)	[13,15)	[11,13)	[9,11)	[0,9)
森林覆盖率 (%)	[65,100)	[50,65)	[35,50)	[20,35)	[0,20)
工业污染治理项目完成投资额 (万元)	[24, ∞)	[18,24)	[12,18)	[6,12)	[0,6)
建成区排水管道密度 (km/km <sup>2</sup> )	[16, ∞)	[12,16)	[8,12)	[4,8)	[0,4)
污水处理厂 (座)	[25, ∞)	[20,25)	[15,20)	[10,15)	[0,10)

表 3 权重计算结果

准则层 (B)	权重值			指数层 (C)	权重值			指标层 (D)	权重值		
	AHP	熵权	组合		AHP	熵权	组合		AHP	熵权	组合
B <sub>1</sub>	0.400	0.425	0.412	C <sub>1</sub>	0.067	0.080	0.074	D <sub>11</sub>	0.033	0.039	0.036
								D <sub>12</sub>	0.017	0.021	0.019
								D <sub>13</sub>	0.017	0.021	0.019
								D <sub>21</sub>	0.033	0.031	0.032
				C <sub>2</sub>	0.133	0.119	0.126	D <sub>22</sub>	0.033	0.028	0.031
								D <sub>23</sub>	0.033	0.029	0.031
								D <sub>24</sub>	0.033	0.031	0.032
								D <sub>31</sub>	0.022	0.036	0.029
				C <sub>3</sub>	0.067	0.098	0.082	D <sub>32</sub>	0.022	0.030	0.026
								D <sub>33</sub>	0.022	0.032	0.027
								D <sub>41</sub>	0.033	0.033	0.033
								D <sub>42</sub>	0.033	0.026	0.030
				C <sub>4</sub>	0.133	0.128	0.130	D <sub>43</sub>	0.033	0.050	0.042
								D <sub>44</sub>	0.033	0.019	0.026
B <sub>2</sub>	0.200	0.207	0.203	C <sub>5</sub>	0.100	0.116	0.108	D <sub>51</sub>	0.035	0.035	0.035
								D <sub>52</sub>	0.019	0.031	0.025
								D <sub>53</sub>	0.035	0.032	0.033
								D <sub>54</sub>	0.011	0.019	0.015
				C <sub>6</sub>	0.100	0.090	0.095	D <sub>61</sub>	0.025	0.022	0.024
								D <sub>62</sub>	0.025	0.022	0.024
								D <sub>63</sub>	0.025	0.027	0.026
								D <sub>64</sub>	0.025	0.019	0.022
B <sub>3</sub>	0.400	0.369	0.385	C <sub>7</sub>	0.080	0.073	0.077	D <sub>71</sub>	0.027	0.019	0.023
								D <sub>72</sub>	0.027	0.029	0.028
								D <sub>73</sub>	0.027	0.025	0.026
				C <sub>8</sub>	0.160	0.117	0.139	D <sub>81</sub>	0.046	0.029	0.037
								D <sub>82</sub>	0.046	0.025	0.035
								D <sub>83</sub>	0.046	0.038	0.042
								D <sub>84</sub>	0.023	0.026	0.024
				C <sub>9</sub>	0.080	0.094	0.087	D <sub>91</sub>	0.027	0.045	0.036
								D <sub>92</sub>	0.027	0.020	0.023
								D <sub>93</sub>	0.027	0.029	0.028
				C <sub>10</sub>	0.080	0.084	0.082	D <sub>101</sub>	0.027	0.026	0.026
								D <sub>102</sub>	0.027	0.025	0.026
								D <sub>103</sub>	0.027	0.033	0.030

4.2 水环境安全综合评价

利用构建的水环境安全综合评价模型, 计算 2005–2014 年南京市水环境的各类指标的安全度, 并结合表 1 安全状态分级标准, 评价并分析近 10

年来南京市水环境安全状况(见图 3 和表 4)。结果显示南京市水环境总体处于基本安全水平(平均安全度值为 2.9), 安全度值呈缓慢下降趋势, 且 2012 年以来安全度值下降明显, 2014 年已降

至 2.2 ( $< 2.5$ , 处于安全范围内)。此外, 压力、响应层安全度值下降趋势也十分明显, 并已控制在安全范围内, 表明水环境压力得到了有效缓解, 相关水环境治理及保护措施取得了良好的成效。状态层安全度值相对较高, 平均安全度值为 3.16, 不安全年份比例大 (40%), 且无明显下降趋势, 表明水环境安全现状存在较大问题, 相关工作尚待提升与完善。综上可知, 南京市水环境虽总体安全, 但状态层安全性欠佳, 针对当前水环境现状展开深度治理和保护是未来一段时间南京市水环境安全保护工作的主要内容。



图3 水环境安全综合评价指数的安全度值变化趋势

表4 水环境安全度均值及不安全年份比例

评价对象	平均值	不安全年份比例 (%)
综合	2.906	0
压力	2.956	0
状态	3.161	40
响应	2.719	0

根据综合评价结果, 对压力、状态及响应层各指数及对应指标展开溯源分析。压力源中, 人口压力、用水压力平均安全度值高 (分别为 3.9 和 3.5), 不安全年份比例均高于 50%, 是水环境安全的重要压力来源。此外, 经济压力也不容忽视, 平均安全度值为 3.2, 接近不安全警戒阈值。水环境安全最根本的压力来源是人口与经济增长, 人口规模扩大和经济快速发展直接导致用水量和污染负荷增多, 高用水需求和污染负荷给水环境安全带来了直接威胁。

状态源中, 水资源条件指数和水环境质量指数平均安全度值分别为 3 和 3.3, 不安全年份比例为 20% 和 40%。其中, 人均水资源量安全度值常年高于 4, 表明南京市人均水资源量较国际平均水平低。环境质量指标中, III 类水以上河湖断面比例、水功能区水质达标率和地下水水质达标率评价结果均不理想, 平均安全度值依次为 3.5、3.6 和 4,

2012 年以来虽有所缓解, 但尚未稳定, 地表和地下水环境安全保障工作仍是未来区域工作的重点内容。

相对于压力和状态, 响应源安全性较好, 节水、排污控制、水土保持和政府管理指数平均安全值依次为: 3、2.5、2.5、3, 为基本安全状态。其中, 排污控制指数、政府管理安全度值呈缓慢下降趋势, 且排污控制指数已降至十分安全的等级, 而政府管理指数降至基本安全等级。需要指出的是节水指数、水土保持指数安全度下降趋势不明显, 长期处于基本安全状态。具体来看, 节水指数中, 农田实灌亩均用水量、节约用水量安全等级不高, 农业节水灌溉与城市节水建设均有待提高。水土保持指数中森林覆盖率安全度值普遍偏高, 建成区绿化覆盖率安全度值呈上升趋势, 尽管政府加大了市政工程投入, 但城市扩张速度快, 水土保持水平距离发达国家水平还有差距, 相关工作仍然有提升的空间。

## 5 结论

综合分析可知, 近年来南京市的水环境治理及保护措施取得了良好的成效, 水环境安全度值呈缓慢下降趋势, 2014 年水环境安全度值已降至 2.2, 处于安全范围。由于状态源安全度值相对较高, 平均安全度值为 3.16, 不安全年份比例相对较高 (30%), 且无明显下降趋势, 水资源条件和水环境质量均存在较大问题, 加强城市水环境治理和水资源保护工作, 仍是南京市水环境安全保障的首要工作。人口和经济增长是造成南京市水环境安全压力的根本来源, 未来控制人口规模 and 经济增长在适度范围内, 可以有效降低城市用水和污染负荷。未来继续推进污染减排工作, 重点加强城市节水和水土保持相关工作。以南京市节水建设和市政工程建设为重点, 降低农田实灌亩均用水量、提高城市节约用水量、扩大建成区绿化覆盖率、森林覆盖率、增加建成区排水管道密度及污水处理厂数, 对于提高南京市水环境安全水平具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 彭建, 赵会娟, 刘焱序等. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架 [J]. 生态学报, 2016, 36(11):3137-3145.

- [2] 陈绍金. 2005. 水安全系统评价、预警与调控研究 [D]. 南京: 河海大学.
- [3] 史正涛, 刘新有. 城市水安全研究进展与发展趋势 [J]. 城市规划, 2008, 32 (7): 82–86.
- [4] Anderson E W. 1992. The political and strategic significance of water [J]. Outlook on Agriculture, 21 (4): 247–253.
- [5] 夏军, 石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望 [J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 292–301.
- [6] 崔海波. 流域水环境安全防控评价指标体系 [D]. 山东大学, 2015.
- [7] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣等. 基于联系数的流域水安全评价模型 [J]. 水利学报, 2008, 39 (4): 401–409.
- [8] 张颖, 刘凌, 燕文明. 区域水环境安全评价指标体系与评价方法 [J]. 水电能源科学, 2013, 27 (1): 54–57.
- [9] 任丽军, 安强, 韩美. 山东省水环境安全问题及对策研究 [J]. 水资源保护, 2005, 21 (3): 39–41.
- [10] 何贝贝, 李绍飞, 朱习爱. 天津市水环境安全评价及其指标体系研究 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 125–129.
- [11] 史正涛, 刘新有, 黄英, 方绍东. 基于边际效益递减原理的城市水安全评价方法 [J]. 水利学报, 2010, 41 (5): 545–552.
- [12] Y Lu, S Song, R Wang, et al. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China. Environment International, 2015, 77: 5–15.
- [13] Xinjian Guan, Wenkang Liu, Moyu Chen. Study on the ecological compensation standard for river basin water environment based on total pollutants control [J]. Ecological Indicators, 2016, 69: 446–452.
- [14] 梁威. 区域水环境安水环境破坏经济损失研究 [D]. 河海大学, 2007.
- [15] 张青, 路金喜, 刘智奇. 基于 ANP2FCE 模型的水电工程环境影响评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13 (3): 28–31.
- [16] 张立业. 基于随机过程的桥梁系统可靠性及其模糊综合评价研究 [D]. 吉林大学, 2013.
- [17] 吕妍, 魏文普, 王佳, 安伟. FPSO 原油外输溢油风险分析及风险评价 [J]. 中国海上油气, 2013, 25 (5): 89–92.
- [18] 张蕾, 韩雪冰, 范兴华. 基于层次分析法的南京市水安全评价 [J]. 水电能源科学, 2012, 30 (12): 30–33.
- [19] 张丽, 王腊春. 南京市水环境生态安全评价 [J]. 中国农村水利水电, 2014 (10): 1–4.
- [20] 刘宏. 镇江市水环境安全评价及风险控制研究 [D]. 江苏大学, 2010.
- [21] 刘永叶. 长江流域水环境安全及其评价指标体系初探 [D]. 华中科技大学, 2007.

(责任编辑: 华智睿)