

# 南京市水资源承载状态分析

杨 光<sup>1</sup>, 董增川<sup>1</sup>, 周 毅<sup>2</sup>, 纪晓敏<sup>2</sup>, 聂 青<sup>2</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;  
2. 江苏省水文水资源勘测局, 江苏 南京 210029)

**摘要:**在分析水资源承载状态内涵的基础上,提出基于协调发展度的区域水资源承载状态评价方法。以南京市为例,对市区、江宁、六合、浦口、溧水、高淳的水资源承载状态进行分析。结果表明:南京市各计算单元均处于中等的承载状态,为提升市区、江宁、浦口、溧水的水资源承载状态,应将重点放在改善区域水资源、水环境条件方面,为提升六合、高淳的承载状态,可以从产业结构调整、限制污染物入河等方面考虑。

**关键词:**水资源承载; 协调发展; 南京市

**中图分类号:**TV21

**文献标识码:**B

**文章编号:**1007-7839(2019)04-0005-04

## Analysis on the water resources carrying status in Nanjing City

YANG Guang<sup>1</sup>, DONG Zengchuan<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>2</sup>, JI Xiaomin<sup>2</sup>, NIE Qing<sup>2</sup>

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;  
2. Jiangsu Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210029, Jiangsu)

**Abstract:** Basing on the analysis of the connotation of water resources carrying status, a regional evaluation method based on coordinated development degree was proposed, and taking Nanjing as an example, the water resources carrying status of urban area, Jiangning, Luhe, Pukou, Lishui and Gaochun were analyzed. The results showed that all districts of Nanjing were in a medium carrying state. In order to improve the water resources carrying status of urban area, Jiangning, Pukou and Lishui, the focus should be on improving the conditions of water resources and water environment in each district. As for Luhe and Gaochun, it should be considered from the aspects of industrial structure adjustment, limiting pollutants entering the river and so on.

**Key words:** water resources carrying status; coordinated development; Nanjing City

## 0 引言

南京地处我国东部发达地区,位于长江下游,境内河流分属太湖、长江、水阳江、滁河四大水系,过境水量丰沛,但目前存在着水环境质量较差、水生态状况不容乐观等问题<sup>[1]</sup>。随着社会经济规模的快速扩张,区域水资源需求无限性与水资源承载力有限性的矛盾逐渐突显<sup>[2]</sup>。为了贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,协调社会经济发

展与水资源开发利用的关系,缓解水资源、水环境约束与社会经济发展的冲突,提供科学可行的水资源管理依据,需要明确水资源在承载社会经济发展、维持区域生态环境健康的过程中存在的问题与不足<sup>[3]</sup>。

本文以水资源承载主、客体协调发展为目标,提出基于协调发展度的水资源承载状态量化方法,并采用该方法对南京市水资源承载状态进行度量,提出提升、改善方向。

收稿日期:2018-10-14

基金项目:江苏省水利科技重点项目(2016003)

作者简介:杨光(1993—),男,博士研究生,研究方向为水资源可持续利用。

# 1 水资源承载状态量化方法

## 1.1 水资源承载状态与协调发展度

协调多用于描述系统状态,是指系统内部组成既各司其职又和谐统一;发展反映系统的运动性,描述了系统内部不断变化的过程。协调发展则是上述两个概念的集合,是指系统及其内部要素通过充分配合,呈现的高级、有序的演变状态。显而易见,协调发展度是一个可以同时描述系统要素协调水平与发展程度的综合性指标<sup>[4]</sup>。区域水资源承载状态是区域水资源承载主、客体在不断发展过程中呈现的一种状态,其中水资源承载主体是指区域水资源系统,承载客体则是由社会经济系统、生态环境系统共同构成<sup>[5]</sup>。在量化区域水资源承载状态时,需将重点放在各系统及其关联等方面,这与协调发展的内涵相契合,也就是分析水资源承载主、客体各自发展状况的基础上,探究两者的协调程度。故本文选用协调发展度量区域水资源承载状态。

## 1.2 协调发展度计算方法

### 1.2.1 指标体系构建

本文选用多指标法计算承载主、客体的协调发展度。在选取计算指标时,承载主体主要考虑区域水量、水质;承载客体主要考量生活水平、用水效率、治污水平、生态环境等,具体指标见表 1。

表 1 协调发展度计算指标表

目标层	准则层 A	指标层 X
协调发展度	承载主体	水量 产水模数 $x_1$
		水质 水功能区水质达标率 $x_2$
	承载客体	生活水平 人均 GDP $x_3$
		用水效率 万元 GDP 用水 $x_4$
		治污水平 综合排污系数 $x_5$
		生态环境 生态环境用水率 $x_6$

### 1.2.2 指标解释及指标值获取

(1)  $X_1$ —产水模数,该指标是指单位面积水量。

$$M_{sw} = W_a / S \quad (1)$$

式中,  $M_{sw}$  为产水模数,  $W_a$  为区域水量,  $S$  表示区域国土面积。

(2)  $X_2$ —水功能区水质达标率,该指标是区域

内达标水功能区数量的比例。

$$R_1 = Z_a / Z \quad (2)$$

式中,  $R_1$  为水功能区水质达标率,  $Z$  为水功能区数量,  $Z_a$  表示达标水功能区数量。

(3)  $X_3$ —人均 GDP,该指标用于反映居民生活水平。

$$GDP_a = GDP / P \quad (3)$$

式中,  $GDP_a$  为人均 GDP,  $GDP$  为国内生产总值,  $P$  指人口数量。

(4)  $X_4$ —万元 GDP 用水量,该指标是反映区域用水效率的综合性指标。

$$W_{UA} = W_U / GDP \quad (4)$$

式中,  $W_{UA}$  为万元 GDP 用水量,  $W_U$  为区域用水量。

(5)  $X_5$ —综合排污系数,该指标能够反映区域内治污水平。

$$PO_a = PO / GDP \quad (5)$$

式中,  $PO_a$  为综合排污系数,  $PO$  为区域排污总量。

(6)  $X_6$ —生态环境用水率,该指标为区域生态环境用水占总用水比例。

$$R_2 = W_e / W_U \quad (6)$$

式中,  $R_2$  为生态环境用水率,  $W_e$  为生态环境用水量。

### 1.2.3 归一化处理

按照计算指标内涵,将指标划分为正项指标与逆向指标,并分别按照下式归一化<sup>[6]</sup>。

(1) 正向指标

$$x_i = \begin{cases} 0 & x_i^* \geq S_{it} \\ \frac{x_i^* - S_{i(k-1)}}{S_{ik} - S_{i(k-1)}} & S_{i(k-1)} < x_i^* < S_{ik} \\ 1 & x_i^* \leq S_{il} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 逆向指标

$$x_i = \begin{cases} 0 & x_i^* \leq S_{il} \\ \frac{S_{ik} - x_i^*}{S_{ik} - S_{i(k-1)}} & S_{i(k-1)} < x_i^* < S_{ik} \\ 1 & x_i^* \geq S_{it} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $x_i$  是指标归一化结果,  $x_i^*$  是实际指标值,  $S_{ik}$  是指标第  $k$  级的分级标准。

(3) 归一化标准

为保证归一化结果的合理性与科学性,参照南京市相关规划与研究成果划分计算指标的归一化

标准,见表2。

表2 协调发展度计算指标归一化标准表

计算指标	I	II	III
产水模数	>65	45~65	<45
水功能区水质达标率	>0.85	0.70~0.85	<0.70
人均GDP	>12	8~12	<8
万元GDP用水	<50	50~150	>150
综合排污系数	<300	300~400	>400
生态环境用水率	>0.08	0.03~0.08	<0.03

#### 1.2.4 权重确定

为尽量避免人为主观因素影响,保证结果的客观性,选用熵权法分别计算反映承载主体、承载客体的指标相对于各自准则层的权重<sup>[7]</sup>。计算主要分为以下三步:

##### (1) 比重计算

$$P_{ii} = x_{ii}^* / \sum_{i=1}^n x_{ii}^* \quad (9)$$

$$P_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{i=1}^n x_{ij}^* \quad (10)$$

式中,  $P_{ii}$ 、 $P_{ij}$  为  $x_{ii}^*$ 、 $x_{ij}^*$  所占比重,其中  $x_{ii}^*$  为表征承载主体指标,  $x_{ij}^*$  为表征承载客体指标,  $n$  表示所需计算单元的个数。

##### (2) 熵值计算

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n P_{ii} \ln P_{ii} \quad (11)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad (12)$$

式中,  $e_i$ 、 $e_j$  为承载主、客体各项指标的熵值。

##### (3) 熵权计算

$$w_i = (1 - e_i) / (m - \sum_{i=1}^m e_i) \quad (13)$$

$$w_j = (1 - e_j) / (m - \sum_{j=1}^m e_j) \quad (14)$$

式中,  $w_i$ 、 $w_j$  分别是指第  $i$ 、 $j$  项指标相对于承载主、客体的权重,  $m$  为指标个数。

##### (4) 发展指数计算

发展指数用于反映承载主、客体各自发展情况,计算方法如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^p w_i x_i \quad (15)$$

$$g(y) = \sum_{j=1}^p w_j x_j \quad (16)$$

式中,  $f(x)$ 、 $g(y)$  分别指承载主、客体的发展指数,  $x_i$ 、 $x_j$  分别指经过归一化后承载主、客体的指标值。

##### (5) 协调度计算

$$C = (1 - C_{fg}^2)^K \quad (17)$$

$$C_{fg} = \sqrt{1 - \frac{f(x)g(y)}{\left(\frac{f(x) + g(y)}{2}\right)^2}} \quad (18)$$

式中,  $C$  表示承载主体、客体之间协调度,  $C_{fg}$  表示离差系数,  $K$  为调节系数(一般取 2~5)<sup>[8]</sup>。

##### (6) 协调发展度计算

$$D = \sqrt{CT} \quad (19)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (20)$$

式中,  $D$  表示协调发展度,  $T$  表示系统综合指数<sup>[9]</sup>,  $\alpha$ 、 $\beta$  为权重系数,一般  $\alpha$  取 0.7,  $\beta$  取 0.3<sup>[10]</sup>。

#### 1.3 水资源承载状态的判别标准

参照“全国水资源承载能力监测预警机制工作大纲”分级标准,划分水资源承载状态判别等级,并根据计算所得协调发展度评价区域水资源承载状态,具体标准见表3<sup>[11]</sup>。

表3 区域水资源承载状态划分标准表

承载状态	好	中	差
协调发展度 $D$	0.8~1	0.4~0.8	0~0.4

## 2 研究区概况及基础数据来源

南京位于我国东部发达地区,年均降雨量 1059.8 mm,雨期集中在 5~9 月,年均径流深为 334.1 mm,年均蒸发量为 884.3 mm。2015 年南京常住人口 823.59 万人, GDP 9720.77 亿元。

研究数据及来源分别为:南京市水资源公报、南京统计年鉴、南京市国民经济发展统计公报。

## 3 南京市各评价单元水资源承载状态分析

### 3.1 计算指标值获取

通过查阅相关报告获取区域水资源量、GDP 规模、人口数量、用水量等相关基础数据,按照式(1)至式(6)分别计算各指标值,结果见表4。

表4 协调发展度计算指标值

指标	市区	江宁	六合	浦口	溧水	高淳
$x_1$ (万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	79.39	80.35	67.16	65.41	69.67	51.70
$x_2$ (%)	48.00	30.00	73.00	56.00	73.00	81.00
$x_3$ (万元/人)	11.07	13.87	10.18	10.97	14.23	13.29
$x_4$ (m <sup>3</sup> /万元)	24.48	38.4	119.09	37.68	64.6	59.28
$x_5$ (g/万元)	105.54	91.92	406.40	369.33	139.92	100.10
$x_6$ (%)	4.41	3.30	2.00	4.05	4.60	2.70

### 3.2 计算相关中间结果

#### (1) 归一化

参照式(7)、式(8)对各指标归一化,具体结果见表5。

表5 协调发展度计算指标归一化结果表

指标	市区	江宁	六合	浦口	溧水	高淳
$x_1$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.33
$x_2$	0.00	0.00	0.20	0.00	0.20	0.73
$x_3$	0.77	1.00	0.55	0.74	1.00	1.00
$x_4$	1.00	1.00	0.31	1.00	0.85	0.91
$x_5$	1.00	0.90	0.50	1.00	0.40	0.20
$x_6$	0.28	0.06	0.00	0.30	0.32	0.00

#### (2) 指标权重

按照上文提及熵权法分别计算承载主体、承载客体各计算指标的权重,结果见表6。其中,承载主体方面,水功能区水质达标率权重稍大;承载客体方面,反映生活水平的人均GDP与河道外生态环境状况的生态环境用水率所占权重略大于其它指标。

表6 协调发展度计算指标权重表

	指标	权重
承载主体	供水模数	0.45
	水功能区水质达标率	0.55
	人均GDP	0.33
承载客体	万元GDP用水	0.21
	综合排污系数	0.14
	生态环境用水率	0.32

### 3.3 南京市水资源承载状态评价结果与分析

按照式(15)至式(20)在分别计算承载主、客体发展指数的 $f(x)$ 、 $g(x)$ 基础上,确定南京市各单元协调发展度 $D$ ,结果见表7。可以看出:(1)南京市社会经济规模相对较大、城镇化率较高的市区、江宁、浦口承载主体发展指数较低,这是由于这些区域社会经济发展污染物排放量大,水功能区水质状况不容乐观造成的;(2)高淳、六合的承载客体发展指数较低,这是由于其农业占比较大,用水效率、治污水平相对较差导致;(3)溧水的协调发展度最大,其次是高淳,六合的协调发展度最小,说明目前在各单元中溧水、高淳的水资源承载状态较好,六合的承载状态则相对较差;(4)尽管各单元计算的协调发展度存在差异,但根据表3的评价标准,南京

市各单元的水资源承载状态均为“中”。

造成各单元协调发展度存在差异,且承载状态均为“中”的原因主要包括:(1)承载主体与承载客体发展不均衡,市区、江宁、浦口承载客体的发展指数远大于承载主体,承载主体的发展程度远不及承载客体,而六合与之相反,承载主体的发展程度远优于承载客体;(2)承载主、客体发展指数较为接近的溧水与高淳,由于其指数的绝对数值较小,故协调发展度的计算结果同样不甚理想。

表7 南京市水资源承载状态评价结果表

评价单元	市区	江宁	六合	浦口	溧水	高淳
$f(x)$	0.450	0.450	0.560	0.450	0.560	0.554
$g(x)$	0.693	0.685	0.315	0.691	0.668	0.549
$D$	0.690	0.691	0.643	0.690	0.764	0.743
评价结果	中	中	中	中	中	中

为改善水资源在承载社会经济过程中的不足,本文以承载主、客体的发展指数为依据,制定水资源承载状态提升方向判别表<sup>[12]</sup>,见表8。

表8 区域水资源承载状态提升方向判别表

指数	状 态
$f(x) > g(x)$	承载主体的发展超前于承载客体,应加快区域社会经济发展速度、改善居民居住环境
$f(x) = g(x)$	承载主体与承载客体同步发展,现状区域水资源开发利用与社会经济发展、生态环境保护的协调性较好,今后目标实现更高水平的协调
$f(x) < g(x)$	承载客体的发展超前于承载主体,应着力于提升区域水资源供给、改善河道内水环境质量

参照表8,市区、江宁、浦口、溧水的提升方向应着重于承载主体,包括改善区域水环境质量,提升区域水功能区水质达标率等;六合的提升方向应着重于承载客体,包括调整区域产业布局、加强面源污染控制、加快节水型社会建设等;高淳承载主、客体发展指数较为接近,在此基础上,应追求更高层次的协调,以达到提升水资源承载状态的目标。

## 4 结论

(1)在分析水资源承载状态内涵的基础上,提出了基于协调发展度的水资源承载状态量化方法,为水资源承载力的研究拓宽思路。

(下转第12页)

(上接第8页)

(2)南京市各单元现状的水资源承载状态均处于中等的状态,但协调发展度存在一定的差异。其中,溧水的协调发展度最大,其次是高淳,而六合的协调发展度最小。

(3)通过对比分析承载主、客体的发展指数,确定各单元水资源承载状态提升方向,其中市区、江宁、浦口、溧水应着重于承载主体,六合则应着重于承载客体。

### 参考文献:

- [1] 童纪新,顾希.基于主成分分析的南京市水资源承载力研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(01):122-125.
- [2] 孙雅茹,董增川,周毅,等.基于结构熵权法的长江下游水资源承载力评价——以南京市为例[J].人民长江,2018(7).
- [3] 党丽娟,徐勇.水资源承载力研究进展及启示[J].水土保持研究,2015,22(3):341-348.
- [4] 何兵,高凡,唐小雨,覃姗.基于协调发展度模型的叶尔羌河健康评价[J].干旱区研究,1(11).
- [5] 俞祎波,董增川,刘森,等.水资源配置对水资源承载力影响研究[J].人民黄河,2018(7).
- [6] 冯胜男,董增川,杨光.基于分形理论的滦河流域生态系统健康评价[J].人民黄河,2017,39(6):72-76.
- [7] 侍孝瑞,王远坤,卞锦宇,等.水资源承载力关键驱动因素识别研究[J].南京大学学报:自然科学,2018(3).
- [8] 刘杨,戚国强,卢静.基于水资源的复合系统协调度研究[J/OL].人民黄河:1-7[2018-10-12].  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1128.TV.20180628.0919.008.html>.
- [9] 樊贤璐,徐国宾.基于生态—社会服务功能协调发展度的湖泊健康评价方法[J].湖泊科学,2018,30(05):1225-1234.
- [10] 王雪薇.考虑负荷均衡的流域水资源承载力研究[D].南京:河海大学,2018,23-24.
- [11] 郭德泉.区域经济社会发展协调度分析[J].温州大学学报:社会科学版,2007,20(2):73-78.
- [12] 翟晶,徐国宾,郭书英,等.基于协调发展度的河流健康评价方法研究[J].水利学报,2016,47(11):1465-1471.