

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.002

区域用水结构演变及驱动力分析

吴昊¹, 华骅², 王腊春¹, 何菁³, 曾春芬¹

(1. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 南京市水资源管理中心, 江苏 南京 210008;
3. 南京市水利建筑工程检测中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 运用信息熵理论表征用水结构变化趋势, 采用主成分分析方法提取公共因子, 运用灰色关联理论分析公共因子与用水结构的关联程度。以南京市为例, 分析区域用水结构演变特征以及用水结构变化的驱动力因素。结果显示, 南京市用水系统的信息熵值从2000年的1.532 nat增长到2014年的1.791 nat, 均衡度由0.787提升至0.861, 表明城市用水结构随着时间的推移变得更加稳定; 经济结构调整、节水水平、人口演变、用水需求等因素是影响南京市用水结构变化的主要驱动力。提出区域用水总量控制对策, 以保障水资源合理利用。

关键词: 用水结构; 信息熵; 主成分分析; 灰色关联; 节水对策; 南京市

中图分类号: TV213.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2016)06-0477-08

Analysis of change and driving forces of regional water consumption structure

WU Hao¹, HUA Hua², WANG Lachun¹, HE Jing³, ZENG Chunfen¹

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;
2. Water Resources Management Center of Nanjing, Nanjing 210008, China;
3. Nanjing Water Conservancy Construction Engineering Testing Center, Nanjing 210036, China)

Abstract: Using the information entropy theory to characterize the change trend of water consumption structure, using the principal component analysis method to determine the principal components of each influencing factor, and using the grey incidence theory to analyze the correlation coefficient between the principal components and the water consumption structure, a study on the change and driving forces of the water consumption structure in Nanjing City was carried out. The results show that the information entropy increased from 1.532 nat to 1.791 nat and the balance degree increased from 0.787 to 0.861 from 2000 to 2014, indicating that the water consumption structure is becoming more stable. Factors such as economic structure, water-saving technology, population evolution, and water demand are main driving forces influencing the water consumption structure in Nanjing. Measures for total quantity control of water consumed are put forward to guarantee the reasonable utilization of water resources.

Key words: water consumption structure; information entropy; principal component analysis; grey incidence; water saving measure; Nanjing City

随着经济发展带来的城市化进程不断加剧以及全球人口的不断增长, 水资源短缺已成为许多国家经济社会发展的瓶颈^[1]。我国水资源公报显示, 2000年以来我国用水总量快速增长, 由5 497.6亿 m³增长到2014年的6 094.9亿 m³, 年均增幅达1.34%, 其中农业用水在一定范围波动, 但比例持续下降; 工业、生活用水增长较快, 比例均持续上升^[2]。研究用水结构的变化趋势, 分析用水结构变化的驱动力因素, 对区域水资源管理具有重要意义与参考价值^[3]。最严格水资源管理制度的逐步实施, 强化了区域用水总量控制、用水效率控制、水功能区限制纳污“三条红线”的刚性约束^[4]。在区域用水总量

收稿日期: 2015-10-30

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金(BK20130567); 江苏省水利科技项目(2014007)

作者简介: 吴昊(1988—), 男, 江苏南京人, 博士研究生, 主要从事水资源管理研究。E-mail: wuhao_cx@163.com

通信作者: 王腊春, 教授。E-mail: wang6312@263.net.cn

限制的条件下进行水资源配置,需要合理确定用水结构,为制定水资源发展利用规划提供前提和基础^[5]。

我国水资源时空分布不均,西部与北部地区水资源短缺问题尤为严重^[6]。目前对区域用水结构及其驱动力的研究主要集中在西北与华北等干旱缺水地区,而对南方丰水区的研究则相对较少^[4,7-11]。田贵良等^[6]对我国严重缺水的西北5省区(新疆、甘肃、山西、陕西、宁夏)与华北地区(河北、北京、天津)的用水结构研究结果显示,农业用水占据主导地位,用水总量控制对策主要是提高灌溉技术与调整种植结构等农业节水措施。而我国南方地区工业化与人口集聚程度相对较高,用水结构呈现不同的特征。施丽珊等^[10]运用生态位方法对福建省用水结构进行分析,发现1998—2011年福建省工业用水在系统中占据主导地位,而农业用水呈下降趋势。

南京市地处我国东部地区,属亚热带季风气候,雨量充沛,多年平均降水量1082.3 mm。长江穿城而过,沿江岸线总长近200 km,境内共有河道120条,水域面积达11%以上。但南京市本地区的水资源量并不丰富:2014年全市用水总量为45.69亿m³,而本地水资源总量仅为30.76亿m³(不包括过境水资源量),主要依靠长江等过境客水资源供水。本文以南京市为例,通过收集南京市2000—2014年各用水部门用水量,运用信息熵原理,计算不同年份用水结构熵值变化情况;结合主成分与灰色关联理论,分析用水结构变化的驱动因素;提出相应的用水总量控制对策。

1 研究方法 with 数据

1.1 信息熵

1948年,Shannon在信息论中把熵作为信息量的量度,引出信息熵的概念,用以描述系统的不确定性、稳定程度和信息量的定量表征^[12]。信息熵的概念在解决水资源系统分析、评价、决策等方面已经形成了较为成熟的研究方法^[7,13-14]。与发达国家水资源利用结构相比,我国用水结构经由以农业用水为主的初级阶段,发展到农业、工业、生活用水趋于合理的高级阶段,这一演变过程可以近似假设为系统的不可逆过程,故可纳入信息熵的数学模型^[14]。通过对逐年信息熵值的计算来反映农业、工业和生活用水比例的分配状态,从而直观地反映用水结构的演变过程,信息熵值越大,表明用水量在各个用水部门分配越平均。

设用水系统中用水总量为 W ,其中共有 n 种用水类型,每种类型的用水量为 $w_1, w_2, \dots, w_n$,则 $W = w_1 + w_2 + \dots + w_n$,各类用水比例为 $p_i = w_i / W$,满足 $\sum p_i = 1$,其中 $i = 1, 2, \dots, n$ 。用水系统的信息熵 H 为

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (1)$$

由于不同时间尺度内用水类型有多有少。如假设整个用水系统只有一个用水户,此时 $H_{\min} = 0$;相反,若 $w_1 + w_2 + \dots + w_n = W/n$,即用水系统内各部分用水最均衡时, $H_{\max} = \ln n$ 。在实际用水系统中,信息熵一般会介于以上两个极端情况之间。因此,考虑到不同时间尺度内,不同 n 计算的用水结构信息熵不具可比性,引入均衡度 J 进行比较:

$$J = \frac{H}{H_{\max}} \quad (2)$$

式中: J ——用水系统的均衡度,是实际信息熵 H 与最大信息熵 $H_{\max}$ 的比值,取值范围为 $J \in [0, 1]$, J 越大表示水资源开发利用过程中单一用水类型的优势性越弱,系统结构越复杂,用水系统结构的均衡性越强,系统越稳定^[4,14]。

1.2 主成分分析

主成分分析是利用降维的思想,将多个变量归纳为较少的几个综合变量(主成分),其中每个综合变量都是原始变量的线性组合,各综合变量之间互不相关,从而实现以少数几个综合变量反映原始变量的绝大部分信息,且所含的信息互不重叠的目的。其计算步骤主要有:对原始数据进行标准化处理;计算公共因子的特征值累计贡献率;计算主成分载荷;计算各主成分得分^[15]。

用水结构受到经济社会条件因素变化的影响,各驱动因子指标之间也存在一定的线性关系^[16],需要运用主成分分析法归纳主要驱动因子。马黎华等^[17]将石羊河流域用水结构变化的驱动力归纳为社会经济因子、农业面积因子以及自然环境因子3类。赵菲菲等^[18]运用主成分分析,将用水结构的影响因素归

纳成社会经济因子与自然环境因子2类,并得出影响建三江分局用水结构变化的主要因素是社会经济因子的结论。

1.3 灰色关联度

邓聚龙^[19]提出用灰色关联分析方法对系统动态发展过程进行量化分析,以考察系统诸因素之间的相关程度,其基本思想是通过确定参考数列和若干比较数列的集合几何形状相似程度来判断二者的联系是否紧密,反映了曲线间的关联程度^[20-21]。灰色关联分析主要用来分析用水结构与各影响因素的关联程度。商玲等^[11]和吕翠美等^[22]运用灰色关联度分析,分别计算了农业、工业、生活用水与各自影响因素的关联程度。设参考序列 $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(N)\}$ 和 M 个比较序列 $X_i = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(M)\} (i=1, 2, \dots, M)$, 无量纲化数据后,参考序列 $x_0(k)$ 与其对应比较序列 $x_i(k)$ 的点关联系数 $\gamma_0(x_0(k), x_i(k))$ 为

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \min_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

式中: ρ ——分辨系数,取值范围为 $\rho \in (0, 1)$,按最少信息原理一般取 $\rho = 0.5$; $k=1, 2, \dots, N$; $i=1, 2, \dots, M$ 。则比较序列 X_i 与参考序列 X_0 的灰色关联度 $\gamma(X_0, X_i)$ 为

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (4)$$

按灰色关联度分析原则,关联度大,影响因子对用水结构的影响大;反之,影响因子对用水结构的影响小。

主成分分析是多因素综合归纳的有效降维方法,但主成分划分依据的方差累积值大小只表明原始数据群相对于主轴面的变异程度,不直接反映主成分与分析目标的相关性^[23]。因此引入灰色关联理论,分析降维得到的各综合变量,与用水结构均衡度的关联程度,确定用水结构演变的主要因素。

1.4 数据来源

本文所采用的经济社会发展数据指标来源于2000—2014年《南京市统计年鉴》,各用水部门水资源利用状况来源于历年《南京市水资源公报》。

2 南京市用水结构演变分析

2.1 用水量变化趋势

南京是我国东部地区重要的中心城市,依托丰富的长江过境水量,南京市用水总量维持在较高水平,2005—2014年用水总量基本保持在45亿 m^3 以上,其中农业与工业用水占据较大比例,随着沿江开发战略的逐步实施,自2001年工业用水量已超过农业灌溉用水量。2000—2014年南京市用水总量,以及农业、工业、生活与生态4个类型用水量变化的主要趋势为:用水总量,农业、工业用水在2005年前均呈增长趋势。2005年后用水总量在约46亿 m^3 上下波动,用水最高峰出现在2011年,用水量为48.64亿 m^3 ,最小值出现在2009年,用水量为45.05亿 m^3 ;农业、工业用水呈下降趋势,2005—2014年分别减少3.42亿 m^3 与1.12亿 m^3 。生活用水量保持增长,由2000年的7.12亿 m^3 增长到2014年的10.45亿 m^3 。生态用水量自2005年开始统计,2005—2014年共增长2.12亿 m^3 ,增幅达75%。

2.2 用水结构的熵值变化分析

按用水类型不同可分为农业、工业、生活及生态用水。其中,农业用水包括农田灌溉与林牧渔业用水,工业用水包括一般工业与火力发电用水(火力发电机组直流冷却水),生活用水包括城镇生活、农村生活以及城镇公共用水,再加上生态用水共8个用水部门。表1反映南京市8个用水部门15a的用水结构变化:农田灌溉用水在用水结构中占主导地位,但比例不断下降;一般工业、火力发电、城镇生活用水占据较大比例,其中一般工业用水比重不断减小,火力发电与城镇生活用水比重持续上升;林牧渔业、农村生活、城镇公共3个部门用水比例较小,林牧渔业与城镇公共用水比重呈增长趋势,而农村生活用水比例持续下降;生态用水自2005年开始比重不断增加,至2014年在用水结构中所占比例已达到10.84%。表1中城镇生活用水主要包括城镇居民日常生活用水,以及餐饮、服务等第三产业用水;生态用水主要包括城市内部景观河湖水体更新所引水量,以及河道外城镇绿地灌溉用水。

表 1 2000—2014 年南京市 8 个用水部门用水结构变化

Table 1 Changing proportions of eight water use sectors in Nanjing City from 2000 to 2014 %

年份	农业用水		工业用水		生活用水			生态用水
	农田灌溉	林牧渔业	一般工业	火力发电	城镇生活	农村生活	城镇公共	
2000	40.64	3.33	17.14	20.94	13.95	3.21	0.78	
2005	36.71	4.46	15.34	20.69	13.47	2.20	0.84	6.29
2010	31.46	5.06	11.25	21.81	18.23	1.48	0.90	9.81
2011	34.14	4.52	9.45	20.46	19.49	1.47	0.87	9.61
2012	33.91	5.73	8.11	22.16	18.73	1.51	1.24	8.62
2013	31.40	5.92	9.01	22.14	17.21	1.67	1.37	11.28
2014	27.84	5.33	9.08	24.05	18.51	1.62	2.73	10.84

根据表 1 统计的用水结构数据,依据式(1)、式(2)计算南京市用水结构信息熵与均衡度,结果如图 1 所示。从图 1 可知,南京市 2000—2014 年用水结构信息熵由 2000 年的 1.532 nat 增长到 2014 年的 1.791 nat,均衡度由 0.787 提升至 0.861,整体均呈上升趋势,说明用水系统中单一用水结构类型所占比例逐步减小,用水系统的均衡性有所提高,表明南京市水资源利用趋向多元化与合理化发展。根据图 1 反映的信息熵与均衡度变化趋势,2000—2014 年用水结构演变可划分为 3 个阶段:

a. 2000—2004 年,占据主导的农田灌溉用水呈现先下降后上升的趋势,所占比重由 2000 年 16.14%降低到 2002 年 14.98%,随后下降至 2004 年 15.14%;一般工业、火力发电与城镇生活用水则出现相反趋势,呈倒 U 形变化。这些变化使得用水结构的信息熵与均衡度 2000—2002 年不断上升,2002 年达到最大值分别为 1.571 nat 与 0.807,随后下降,整体呈现倒 U 形变化趋势。

b. 2005—2010 年,农田灌溉与一般工业用水逐渐下降,其中农田灌溉用水量由 2005 年 16.56 亿 m³ 下降至 2010 年 14.48 亿 m³,用水比例由 36.71%下降至 31.46%;一般工业用水的用水比例由 15.34%减少至 11.25%。火力发电与城镇生活用水比例不断增加,分别由 20.69%与 13.47%,增长至 21.81%与 18.23%。生态用水自 2005 年开始统计,2005—2010 年保持增长。这一阶段用水结构信息熵与均衡度呈波动上升趋势,由 1.688 nat 与 0.812 增长至 1.736 nat 与 0.835。

c. 2011—2014 年,用水结构信息熵与均衡度呈快速增加趋势,由 1.702 nat 与 0.818 上升至 1.791 nat 与 0.861。2011 年农田灌溉用水较上年增加 2.13 亿 m³,增幅达 14.67%;而除城镇生活用水外的其他 6 项用水所占比重,较上年均有不同程度减少,导致用水结构中单一用水的主导地位加强,2011 年用水结构信息熵与均衡度较上年有所下降。2011—2014 年,用水总量大幅下降 2.95 亿 m³。同时,农田灌溉用水量减少 3.89 亿 m³,所占比重由 34.14%锐减至 27.84%。这导致信息熵与均衡度大幅上升,用水结构系统的均衡性有所提高。

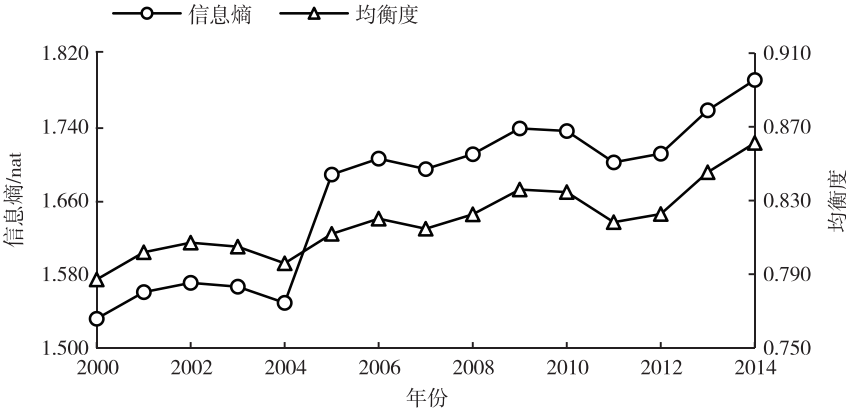


图 1 2000—2014 年南京市用水结构的信息熵与均衡度变化趋势

Fig. 1 Changes of information entropy and balance degree of water consumption structure in Nanjing City from 2000 to 2014

3 南京市用水结构演变的驱动力分析

3.1 影响因子选取

区域用水结构受社会经济条件的影响,直接取决于经济水平与结构、人口总量与构成,以及各行业节水水平,驱动因素包括产业结构的调整、长期人口演变规律、技术进步趋势等。通过比较筛选与用水结构相关的社会经济统计数据(表2),选取实际灌溉面积、节水灌溉面积率、气温、工业比重、工业重复用水率、第三产业比重、人口自然增长率、城镇化率8个指标作为分析用水结构变化的因素,基本覆盖了经济产业结构、节水水平、城市人口与自然条件等方面,具有较强的代表性。

3.2 主成分分析

主成分分析是从多个原始变量中构造出少数具有代表意义的因子,如果原有变量之间相关关系较弱,就无法提取具有共同特性的公共因子。KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验统计量是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标,其取值在0~1之间。当所有变量间的简单相关系数平方和远远大于偏相关系数平方和时,KMO值接近1,表示变量间的相关性越强,原始变量越适合做主成分分析。原始变量通过标准化方法进行无量纲化处理,经过KMO检验的结果为0.602,一般KMO值在0.6以上可以进行主成分分析。

特征值与因子贡献率是提取公共因子的主要指标。特征值是指每个变量在某一个公共因子权重的平方总和,公共因子的提取依据其特征值大小依次提取;因子贡献率是指该公共因子所解释的方差占有所有变量总方差的比例,反映公共因子对原始数据的解释能力。为保证以最少的公共因子对变量做出最大解释,提取的因子应越少越好,提取因子累计解释的变异量越大越好。一般以特征值大于1提取公共因子。

表2反映提取出的公共因子的特征值、贡献率,以及每个公共因子在选取的8个指标上的载荷(权重),共得到3个公共因子,累计贡献率达到93.04%,基本涵盖8个指标的大部分信息。其中第一个公共因子的贡献率为59.01%,节水灌溉率、工业重复用水率、第三产业比重、人口自然增长率、城镇化率5个指标在第一个公共因子中的权重较高,该因子是代表经济结构、节水水平与人口演变三类影响因素的综合因子;第二个公共因子的贡献率为20.03%,实际灌溉面积、工业比重在该因子所占的权重较高,其中,实际灌溉面积体现农田灌溉用水的规模,工业比重也能反映工业需水的规模,因此第二个公共因子可以归纳为需水因子;第三个公共因子的贡献率为14.00%,气温占据较大权重,定义为自然因子。值得注意的是,工业比重在综合因子与需水因子中的权重分别为-0.689与-0.702,这反映出工业比重不仅表征区域工业需水规模,还体现经济结构的调整,而产业需水与经济结构均会对用水结构产生影响,因此工业比重在两个公共因子中都有较高的权重。

表2 用水结构影响因子及公共因子的特征值、贡献率与载荷矩阵

Table 2 Influencing factors of water consumption structure and eigenvalue, contribution rate, and loading matrix of principal component

指标变量	公式及含义	综合因子	需水因子	自然因子
实际灌溉面积	表征区域农田灌溉需水规模	-0.510	0.830	0.028
节水灌溉率	节水灌溉面积/有效灌溉面积,表征农业节水水平	0.972	-0.158	0.058
气温	表征区域气候条件	-0.352	-0.008	0.905
工业比重	工业增加值/GDP,表征经济结构与工业需水规模	-0.689	-0.702	0.111
工业重复用水率	表征区域工业节水水平	0.884	-0.282	0.158
第三产业比重	第三产业增加值/GDP,表征第三产业经济规模	0.881	0.448	-0.057
人口自然增长率	出生率-死亡率,表征区域人口变化	0.722	0.234	0.496
城镇化率	城镇人口/常住人口,表征城市人口集聚程度	0.916	-0.246	-0.103
特征值		4.721	1.603	1.120
贡献率		0.590	0.200	0.140
累计贡献率		0.590	0.790	0.930

注:常住人口自2005年开始统计,2005年前采用非农人口/户籍人口计算城镇化率。

3.3 灰色关联分析

根据各指标在公共因子的权重计算各公共因子得分,依据式(3)、式(4),结合南京市2000—2014年用水结构均衡度数据,计算用水结构均衡度与3个公共因子的灰色关联度。如表3所示,3个公共因子与用水

结构均衡度的灰色关联系数分别为 0.914, 0.908 与 0.679, 表明用水结构均衡度的变化与节水灌溉率、工业重复用水率、第三产业比重、人口自然增长率、城镇化率 5 个指标构成的综合因子, 实际灌溉面积与工业比重构成的需水因子两者的关联程度较高。说明经济结构调整、节水水平提高、人口演变规律以及产业需水形势是南京市用水结构演变的主要驱动力。

3.4 区域用水结构调控对策分析

3.4.1 农业用水

农业用水占据南京市用水结构的主导地位, 其中 85% 以上是农田灌溉用水。1997 年农业灌溉用水达到峰值 19.31 亿 m^3 , 2000—2014 年农业用水减少 2.30 亿 m^3 , 主要得益于灌溉需水的减少与节水灌溉技术的提高, 这 15 年, 耕地面积减少 0.58 万 hm^2 , 实灌面积减少 1.48 万 m^2 , 再加上农作物种植结构的调整, 水稻种植面积由 13.26 万 hm^2 减至 9.35 万 hm^2 , 农田灌溉需水量逐渐下降; 另一方面, 节水灌溉面积增加 9.27 万 hm^2 , 占有有效灌溉面积的 57.68%, 灌溉水有效利用系数达到 0.654, 灌溉用水效率不断提高, 有效控制了农业用水量的增长。

3.4.2 工业用水

南京是国家重要的综合性工业生产基地, 工业用水占据较大比重, 2001 年已经超过农田灌溉用水量, 2014 年已基本与农业用水总量持平。2000—2005 年城市工业化发展对水资源需求不断增加, 工业比重由 45.82% 增长到 48.92%, 工业用水量也由 15.12 亿 m^3 增加到 16.26 亿 m^3 。2005 年后, 工业比重不断下降, 2014 年减至 41.08%, 其中南京市 4 大耗水行业产值(石油加工、炼焦和核燃料加工业, 化学原料和化学制品制造业, 黑色金属冶炼和压延加工业, 电力、热力生产和供应业) 占工业总产值的比重由 40.16% 降低至 28.55%。经济结构与产业结构的调整约束了工业需水的增长, 再加上工业重复用水率不断提高, 用水量持续减少, 工业用水得到控制。

3.4.3 生活用水

南京市农业、工业用水随着用水效率与节水水平的提高, 近年来呈现均呈现负增长趋势。而生活用水则随着城市化发展与人口增长持续增加, 城市生活节水成为城市节水的重点^[24]。生活用水主要包括居民生活用水、第三产业用水以及城镇公共用水。随着南京市节水型社会建设的推进, 居民生活用水增量不大: 2005—2014 年综合生活用水指标由 318 $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 增长到 296 $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$, 而其中的居民生活用水指标却由 158 $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 下降到 130 $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。因此, 生活用水节水重点应控制第三产业与城镇公共用水。

产业规模的快速增长是第三产业用水需求增长的重要因素^[25]。2000—2014 年南京第三产业 GDP 年均增长率达到 16.20%, 成为拉动城市经济增长的主要产业, 用水需求也不断提高。因此, 节水措施应主要集中在用水效率的提高, 尤其是第三产业中洗车、餐饮等高用水行业, 需要提高节水意识与发展节水技术。

学校、卫生、消防等公共用水远高于居民家庭用水量, 且浪费现象比较普遍, 节水潜力较大^[24, 26]。这类公共用水主要用于绿化灌溉、池塘景观补水、冲洗卫生间等, 本身对水质要求不高, 可以利用再生水与雨水等作为补充, 减缓公共用水的增长, 避免水资源浪费。

4 结 论

a. 采用信息熵的方法分析南京市用水结构演变趋势。分析结果表明, 南京市 2000—2014 年用水结构信息熵由 2000 年的 1.532 nat 增长到 2014 年的 1.791 nat, 均衡度由 0.787 提升至 0.861, 整体均呈上升趋势, 表明南京市水资源利用趋向多元化与合理化发展。

b. 运用主成分分析归纳用水结构演变的驱动因子。选取社会经济发展、产业结构、节水水平等指标, 运用主成分分析方法, 归纳成综合因子、需水因子、自然因子 3 个驱动因子。综合因子包括节水灌溉率、工业重复用水率、第三产业比重、人口自然增长率以及城镇化率, 需水因子包括实际灌溉面积与工业比重, 自然因子主要为气温。

表 3 用水结构驱动力因子得分与灰色关联度

Table 3 Scores of driving forces and grey incidence degree of water consumption structure

年份与 灰色关联度	综合因子	需水因子	自然因子
2000	-1.195	1.317	-0.109
2005	-0.929	-0.713	-0.140
2010	0.480	-0.420	-1.051
2011	1.144	-0.610	-0.229
2012	1.242	-0.318	-0.807
2013	1.307	0.794	1.118
2014	1.684	1.337	0.472
灰色关联度	0.914	0.908	0.679

c. 采用灰色关联方法分析用水结构均衡度与驱动因子的关联程度。结果显示,综合因子和需水因子对用水结构均衡度的影响较为显著,灰色关联度分别为 0.914 和 0.908,表明经济结构调整、节水水平、人口演变、用水需求等是影响南京市用水结构变化的主要驱动力。

d. 根据用水结构的驱动力研究结果提出相应的用水总量控制对策。调整农作物种植结构、增加节水灌溉面积,以减少灌溉用水需求,提高农业用水效率;提高工业节水水平,同时优化产业结构,发展生态型低耗水产业,促进工业用水量进一步降低;提高第三产业重复用水率,采用再生水、雨水等补充城镇公共用水,可以有效控制生活用水增长,缓解城市经济发展与人口增长带来的供水压力。

参考文献:

- [1] WANG X J, ZHANG J Y, SHAHID S, et al. Water resources managements strategy for adaptation to droughts in China[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2012, 17(8): 923-937.
- [2] 潘雄锋,刘凤朝,郭蓉蓉.我国用水结构的分析与预测[J].干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 11-14. (PAN Xiongfeng, LIU Fengchao, GUO Rongrong. Analysis and forecast of water utilization structure in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 11-14. (in Chinese))
- [3] 焦士兴,王腊春,李静,等.基于生态位及其熵值模型的用水结构研究:以河南省安阳市为例[J].资源科学, 2011, 33(12): 2248-2254. (JIAO Shixing, WANG Lachun, LI Jing, et al. Water consumption structure based on the niche and its entropy model: A Case Study of Anyang City, Henan Province[J]. Resources Science, 2011, 33(12): 2248-2254. (in Chinese))
- [4] 郑爱勤,王文科,段磊.关中盆地用水结构变化及其驱动因子分析[J].干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 75-79. (ZHENG Aiqin, WANG Wenke, DUAN Lei. Water consumption structure evolvement and Its driving forces for Guanzhong Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(9): 75-79. (in Chinese))
- [5] 张静,秦公伟.西安市用水结构变化及驱动力分析[J].水资源保护, 2012, 28(4): 87-90. (ZHANG Jing, QIN Gongwei. Driving forces of change of water consumption structure in Xi'an City[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 87-90. (in Chinese))
- [6] 田贵良,顾巍,谢文轩.基于虚拟水贸易战略的缺水地区用水结构优化研究[J].水利经济, 2013, 31(1): 1-6. (TIAN Guiliang, GU Wei, XIE Wenxuan. Optimization of water use structure in water shortage region based on virtual water trade strategy[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013, 31(1): 1-6. (in Chinese))
- [7] 刘燕,胡安焱,邓亚芝.基于信息熵的用水系统结构演化研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 141-144. (LIU Yan, HU Anyan, DENG Yazhi. Study on the evolution of water resource structure based on information entropy[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University(natural Science), 2006, 34(6): 141-144. (in Chinese))
- [8] 孙凯艳,张浩,缪萍萍,等.近 10 年海河流域用水结构特征及演变趋势研究[J].水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 102-104. (SUN Kaiyan, ZHANG Hao, LIAO Pinpin, et al. Study on characteristics of water utilization structure and evolution tendency in Haihe River Basin in recent 10 years[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 102-104. (in Chinese))
- [9] 黄晶,宋振伟,陈阜.北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J].生态学报, 2010, 30(23): 6546-6554. (HUANG Jing, SONG Zhenwei, CHEN Fu. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6546-6554. (in Chinese))
- [10] 施丽珊,张曼.基于生态位理论的福建省用水结构研究[J].水资源与水工程学报, 2014, 25(6): 109-112. (SHI Lishan, ZHANG Man. Study on water consuming structure based on ecology niche theory in Fujian Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014, 25(6): 109-112. (in Chinese))
- [11] 商玲,李宗礼,于静洁.宁波市用水结构分析[J].水利水电技术, 2013, 44(9): 12-16. (SHANG Ling, LI Zhongli, YU Jingjie. Analysis on water consumption structure in Ningbo[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(9): 12-16. (in Chinese))
- [12] 王栋.信息熵在水系统中的应用研究综述[J].水文, 2001, 21(2): 9-14. (WANG Dong. Information entropy and the state-of-the-art of its application in hydrology, water resources and water environment[J]. Journal of China Hydrology, 2001, 21(2): 9-14. (in Chinese))
- [13] 郑志宏,魏明华.基于熵值法的改进集对分析水质模糊评价[J].河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 136-139. (ZHENG Zhihong, WEI Minghua. Water quality fuzzy evaluation based on entropy method-improved set pair analysis[J]. Journal

- of Hohai University(natural Sciences), 2013, 41(2): 136-139.(in Chinese))
- [14] 王小军,张建云,贺瑞敏,等.区域用水结构演变规律与调控对策研究[J].中国人口·资源与环境, 2011, 21(2): 61-65. (WANG Xiaojun, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Study on the evolution law of water utilization structure and regulating approach inYulin City[J]. China Population, Resources and Environment, 2011, 21(2): 61-65.(in Chinese))
- [15] 马小雪,王腊春,廖玲玲.温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别[J].环境科学, 2015(1): 64-71. (MA Xiaoxue, WANG Lachun, LIAO Lingling. Spatio-temporal characteristics and source identification of water pollutants in wenruitang river watershed[J]. Environment Science, 2015(1): 64-71.(in Chinese))
- [16] 栗晓玲,赵晨,马黎华.关中地区近20年用水结构演变及其驱动力研究[J].灌溉排水学报, 2008(5): 71-73. (SU Xiaoling, ZHAO Chen, MA Lihua. Water consumed structure evolvement and its driving forces for guanzhong regioninthe past 20 years[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008(5): 71-73.(in Chinese))
- [17] 马黎华,康绍忠,栗晓玲.西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J].干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 125-130. (MA Lihua, KANG Shaozhong, SU Xiaoling. Study on evolution and its driving forces of water utilization structure of shiyang river basin in northwest arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Area, 2008, 26(1): 125-130.(in Chinese))
- [18] 赵菲菲,刘东,于苗,等.建三江分局用水结构演变及其驱动机制研究[J].水土保持研究, 2012, 19(2): 244-247. (ZHAO Feifei, LIU Dong, YU Miao, et al. Study on the water structure evolution and its driving mechanism of Sanjiang Branch Bureau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(2).244-247.(in Chinese))
- [19] 邓聚龙.灰色系统综述[J].世界科学, 1983(7): 1-5. (DENG Julong. Summary of grey system[J]. World Science, 1983(7): 1-5.(in Chinese))
- [20] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J].系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2041-2046. (LIU Sifeng, CAI Hua, YANG Yingjie, et al. Advance in grey incidence analysis modeling[J]. system engineering-theory and practice, 2013, 33(8): 2041-2046.(in Chinese))
- [21] 王平,王云峰.综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J].水资源保护, 2013, 29(5): 52-54. (WANG Ping, WANG Yunfeng. River water quality evaluation based on grey incidence analysis of comprehensive weight [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(5): 52-54.(in Chinese))
- [22] 吕翠美,吴泽宁,胡彩虹.用水结构变化主要驱动力因子灰色关联度分析[J].节水灌溉, 2008(2): 39-41. (LUY Cuimei, WU Zening, HU Caihong. Grey relational degree analysis on the major driving forces of water use structure[J]. Water Saving Irrigation, 2008(2): 39-41.(in Chinese))
- [23] 于世军,刘英舜,梁先登.区域交通运输结构信息熵演变及动力分析[J].交通运输系统工程与信息, 2011, 11(4): 91-96. (YU Shijun, LIU Yingshun, LIANG Xiandeng. Evolution of regional transport structure information entropy and its dynamic analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(4): 91-96.(in Chinese))
- [24] 赵金辉,蒋宏.城市公共市政用水节水潜力及措施分析:以南京市为例[J].水资源与水工程学报, 2008, 19(3): 58-61. (ZHAOJinhui, JIANG Hong. Analysis of water saving potential and measures for the public municipal water uses:taking Nanjing as case study[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(3): 58-61.(in Chinese))
- [25] 洪思扬,王红瑞,程涛,等.北京市第三产业用水特征及其发展策略[J].中国人口·资源与环境, 2016, 26(5): 108-116. (HONG Siyang, WANG Hongrui, CHENG Tao, et al. Water features and development strategy of tertiary industry in Beijing [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 108-116. (in Chinese))
- [26] 褚俊英,陈吉宁,王灿,等.城市公共用水的节水和污水再生利用潜力分析[J].给水排水, 2007, 33(3): 49-55. (CHU Junying, CHEN Jining, WANG Can, et al. Potential analysis on public water conservation and wastewater reclamation[J]. Water and Wastewater Engineering, 2007, 33(3): 49-55.(in Chinese))