

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.12.002

南水北调受水城市用水变化趋势分析

李化雨, 蒋艳灵

(中国城市规划设计研究院, 北京 100044)

摘要: 基于2006年—2020年的城市统计数据,采用信息熵与均衡度、Spearman秩相关系数等方法,分析了南水北调受水区范围内30座城市的用水变化趋势,以实现水资源均衡配置,指导南水北调后续工程实施。研究认为:15年间,受水城市的生产运营用水占比呈下降趋势,生活用水占比呈上升趋势,生活用水中,公共服务用水占比稳定在16%~18%,居民家庭用水占比从31%增至40%;受水城市用水均衡度呈先上升后回落态势,均衡度峰值出现年份较全国更晚;受水城市以较少的水量增长支撑了较多的人口增长,人均综合用水量逐年降低,且各城市人均综合用水量差异逐步缩小,节水水平良好;生活节水潜力较工业节水稍弱,但人均公共服务用水量与城市经济发展相关性增强。

关键词: 南水北调; 用水结构; 人均综合用水量; 年际变化; 水资源配置

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)12-0006-08

Analysis on the Trend of Water Consumption in Cities Receiving Water from South-to-North Water Diversion Project

LI Hua-yu, JIANG Yan-ling

(China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the urban statistical data from 2006 to 2020, this paper analyzed the trend of water consumption in 30 cities within the water-receiving area of South-to-North Water Diversion Project by means of information entropy and equilibrium degree and Spearman rank correlation coefficient, so as to realize the balanced allocation of water resources and guide the implementation of the follow-up projects. During the past 15 years, the proportion of industrial production water consumption in water-receiving cities showed a downward trend, and the proportion of domestic water consumption showed an upward trend. Among the domestic water, the proportion of public service water consumption remained stable at 16%–18%, while the proportion of household water consumption increased from 31% to 40%. The equilibrium degree of water consumption in water-receiving cities increased first and then decreased, and the peak of equilibrium degree appeared later than that of the whole country. The water-receiving cities supported more population growth with less water consumption growth, and the per-capita comprehensive water consumption decreased year by year, and the difference of per-capita comprehensive water consumption among water-receiving cities gradually decreased, indicating that the water-saving performance was good. Domestic water-saving potential was slightly weaker than industrial water-saving potential. However, the correlation between per-capita public service water consumption and

通信作者: 李化雨 E-mail: lihuayuconnie@126.com

urban economic development was stronger.

Key words: South-to-North Water Diversion; water consumption structure; per-capita comprehensive water consumption; interannual changes; allocation of water resources

南水北调工程是我国重大跨流域调水工程,从前期战略构想的提出至中线、东线一期工程的通水,历经半个多世纪。中线、东线一期工程的顺利通水和良好运行缓解了受水城市水资源短缺问题,改善了生活饮用水水质,获得了社会、经济的双重效益,验证了南水北调战略构想的正确性^[1]。而今,工作重点和国内形势都已发生深刻变化。2021年5月,习总书记在河南省南阳市召开推进南水北调后续工程高质量发展座谈会,强调要坚持节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力的治水思路,立足流域整体和水资源空间均衡配置,提高水资源集约节约利用水平;与此同时,社会经济发展态势由高速增长阶段转向高质量发展阶段,受水城市用水业态和用水水平也随之变化。为此,需对受水城市用水时空变化情况进行分析,摸清底数、研判趋势、优化对策,以便践行新时代治水思路,有效指导南水北调后续工程的实施。

鉴于此,本研究基于2006年—2020年的城市统计数据,以南水北调中线和东线工程受水区范围内的30座城市为研究对象,采用信息熵与均衡度、Spearman秩相关系数等量化方法,分析其在用水结构、用水总量、人均用水量以及人均用水量与城市经济发展相关性等方面的变化趋势,以揭示受水城市用水特征,为更好地实现水资源供需匹配和均衡配置提供支持。

1 研究范围与方法

1.1 研究范围

本研究涉及南水北调中线和东线工程受水区范围内的2个直辖市、3个省份,共计30座主要受水城市。其中,中线受水区包括北京、天津、河北省的7座城市以及河南省的10座城市;东线受水区包括山东省的11座城市。具体如表1所示。

研究采用2006年—2020年的相关数据,城市用水数据来源为《中国城市建设统计年鉴》,社会经济数据来源为《中国城市统计年鉴》。考虑到数据的连续性,对少量缺损数据进行了插值处理。

表1 南水北调中线、东线主要受水城市

Tab.1 Main water-receiving cities of the middle and east routes of South-to-North Water Diversion Project

受水区	城市名称
中线受水区	直辖市 北京、天津
	河北 石家庄、保定、邯郸、沧州、廊坊、邢台、衡水
	河南 郑州、平顶山、许昌、漯河、南阳、安阳、濮阳、鹤壁、新乡、焦作
东线受水区	山东 济南、济宁、烟台、青岛、威海、聊城、枣庄、泰安、淄博、东营、潍坊

1.2 研究方法

研究方法包括信息熵与均衡度、Spearman秩相关系数法。

① 信息熵与均衡度

在信息论中,信息熵是系统无序程度的量度,系统向无序方向发展需有正熵流的输入^[2-3]。信息熵值越大,则系统越紊乱。采用下式计算用水系统的信息熵 H ,以度量各城市不同用水类型的均衡性:

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

式中: H 为信息熵, nat; m 为该城市用水类型的数量; p_i 为每种用水类型占总用水量的比例, %。

p_i 应符合下式:

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1, p_i \neq 0 \quad (2)$$

由于不同城市可能存在用水类型数量不一的情况,为使不同城市的信息熵具有可比性,采用下式计算均衡度 J ,以实现信息熵的归一化处理:

$$J = H/H_{\max} = -\sum_{i=1}^m p_i \ln p_i / \ln m \quad (3)$$

式中: J 为均衡度; H_{\max} 为 H 的最大值, nat。

J 值取值在0~1之间, J 值越大,单一用水类型的优势性越弱,用水均衡性越强。

② Spearman秩相关系数

Spearman秩相关系数^[4-5]是反映等级相关程度的统计分析指标。采用下式分别分析各类人均用

水量与城市经济发展相关性 r_s :

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (R_i - Q_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (4)$$

式中: r_s 为 Spearman 秩相关系数; R_i 为各城市人均用水量从小到大排列的秩次; Q_i 为各城市地区生产总值从小到大排列的秩次; n 为城市数。

r_s^2 的取值在 0~1 之间, r_s^2 越接近 1, 则两者之间的相关性越强。若 r_s 为正, 则为正相关; 反之, 则为负相关。

2 用水结构分析

2.1 用水结构比例

按照《中国城市建设统计年鉴》, 可将用水类型分为生产运营用水、公共服务用水、居民家庭用水和其他用水。此四类用水同漏损与免费水量一起, 称为用水总量。公共服务用水与居民家庭用水之和, 称为生活用水。

统计分析了各城市生产运营用水量和生活用水量与用水总量之比的年际变化情况, 分别如图 1、2 所示。可见, 30 座南水北调受水城市的生产运营用水占比总体呈下降趋势, 生活用水占比总体呈上升趋势。30 座受水城市的生产运营用水占比从 2006 年的 37% 下降至 2020 年的 26%, 生活用水占比从 2006 年的 48% 上升至 57%, 与全国整体趋势基本相同、比例大致相似。但从各地区来看, 除北京因工业产业较少, 致使历年生产运营用水占比显著低于全国水平、生活用水占比显著高于全国水平外, 河北、河南以及山东省受水城市生产运营用水占比总体比全国水平更高, 生活用水占比总体比全国更低。

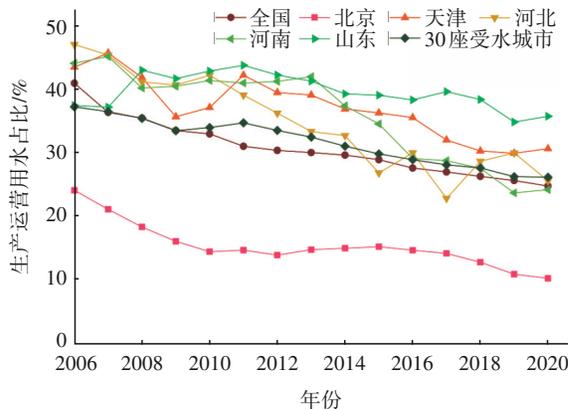


图 1 生产运营用水占比年际变化情况

Fig.1 Interannual changes of the proportion of industrial production water

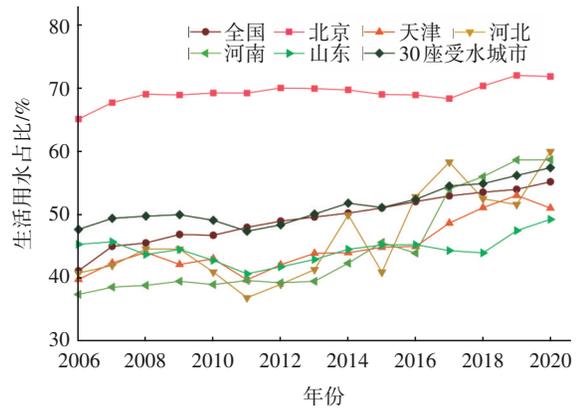


图 2 生活用水占比年际变化情况

Fig.2 Interannual changes of the proportion of domestic water

统计分析了各城市公共服务用水量和居民家庭用水量与用水总量之比的年际变化情况, 分别如图 3、4 所示。

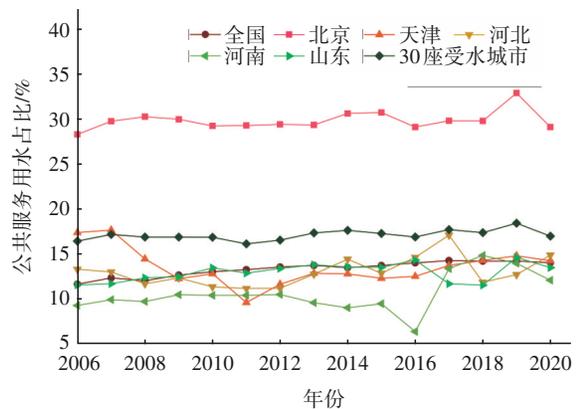


图 3 公共服务用水占比年际变化情况

Fig.3 Interannual changes of the proportion of public service water

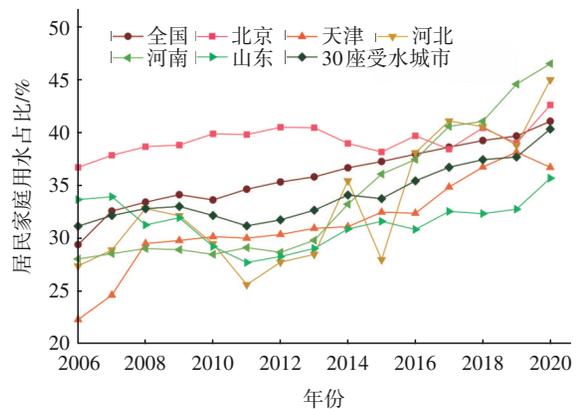


图 4 居民家庭用水占比年际变化情况

Fig.4 Interannual changes of the proportion of household water

由图 3、4 可见, 30 座受水城市公共服务用水

占比总体较为平稳;而居民家庭用水占比有所增长,是支撑生活用水占比增长的主要因素。

2006年—2020年,30座受水城市的公共服务用水占比维持在16%~18%,高于维持在12%~14%的全国水平。

从各地区来看,北京公共服务用水占比明显更高,多年来平均占比为30%;天津以及河北、山东受水城市多年来平均占比与全国水平接近,分别为14%、13%、13%;河南受水城市多年来平均占比较低,为11%。

15年间,30座受水城市的居民家庭用水占比从31%增长至40%,与从29%增长至41%的全国水平相比,趋势相同,但涨幅稍小,且自2007年以后逐年的居民家庭用水占比一直比全国更低。从各地区来看,北京居民家庭用水占比明显较高,多年来平均占比为39%;天津以及河北、河南、山东省受水城市多年来平均占比分别为31%、33%、34%、31%,略低于36%的全国水平。

2.2 用水结构均衡度

借助信息熵和均衡度分析自2006年—2020年的30座南水北调受水城市的用水均衡性变化。统计时,按照售水分类,将用水类型分为生产运营用水、公共服务用水、居民家庭用水和其他用水四类。由于《中国城市建设统计年鉴》在不同年份对漏损与免费水量的处理有所不同,且其相对售水量而言量值较小,故暂将其忽略。

对30座受水城市整体用水均衡度进行分析,结果如图5所示。

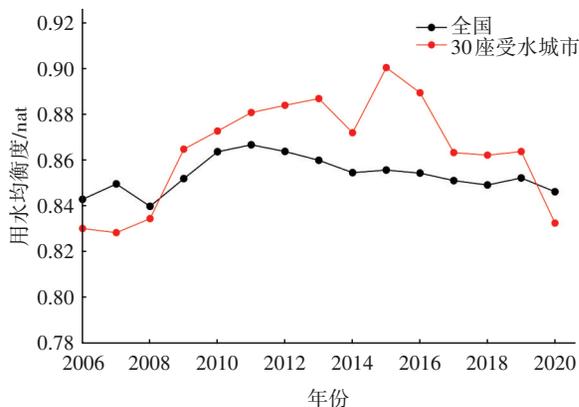


图5 用水均衡度年际变化

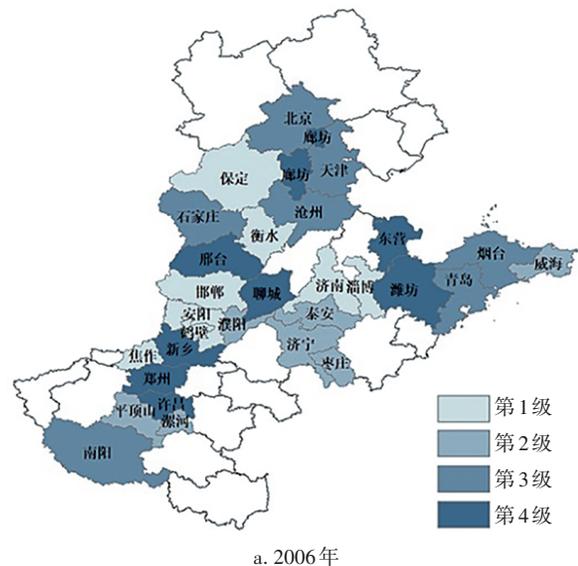
Fig.5 Interannual changes of equilibrium degree

由图5中的数据可以看出,30座受水城市用水均衡度从2006年的0.83 nat逐渐上升至2013年的

0.89 nat,经过波动震荡后于2015年达到峰值0.90 nat,此后逐渐回落,至2020年降至0.83 nat;而全国用水均衡度也呈先上升后回落的趋势,但整体变化较平稳,峰值出现在2011年,为0.87 nat。结合各用水类型占比分析,此现象说明早期30座受水城市用水有序度较高,以生产运营用水占据主导;此后随着生产运营用水占比下降,居民家庭用水、其他用水占比上升,各类用水日趋均衡,用水有序性逐渐降低;而近年来,在政策、社会、经济等外部因素的影响下,受水城市用水结构向着更加有序的方向发展。

同时,对各个受水城市的用水均衡度进行地理分布分析,逐年绘制受水城市用水均衡度的四分位分布图,2006年、2015年、2020年的四分位分布见图6。30座城市的用水均衡度从小到大排列,将用水均衡度为前25%、25%~50%、50%~75%、75%~100%的城市分别标示为第1、2、3、4级。

如图6所示,2006年各受水城市用水均衡度分布规律不明显,京津冀、河南和山东地区均存在用水均衡度排名较前或较后的受水城市。2006年以后,京津冀地区受水城市用水均衡度增长趋势相对明显,山东地区基本保持原有水平,而河南地区有所下降;至2015年,用水均衡度在第4级的受水城市均转移至京津冀和山东地区。2015年以后,河北、河南地区受水城市用水均衡度均有所下降;至2020年,除天津外,用水均衡度在第4级的受水城市均转移至山东。



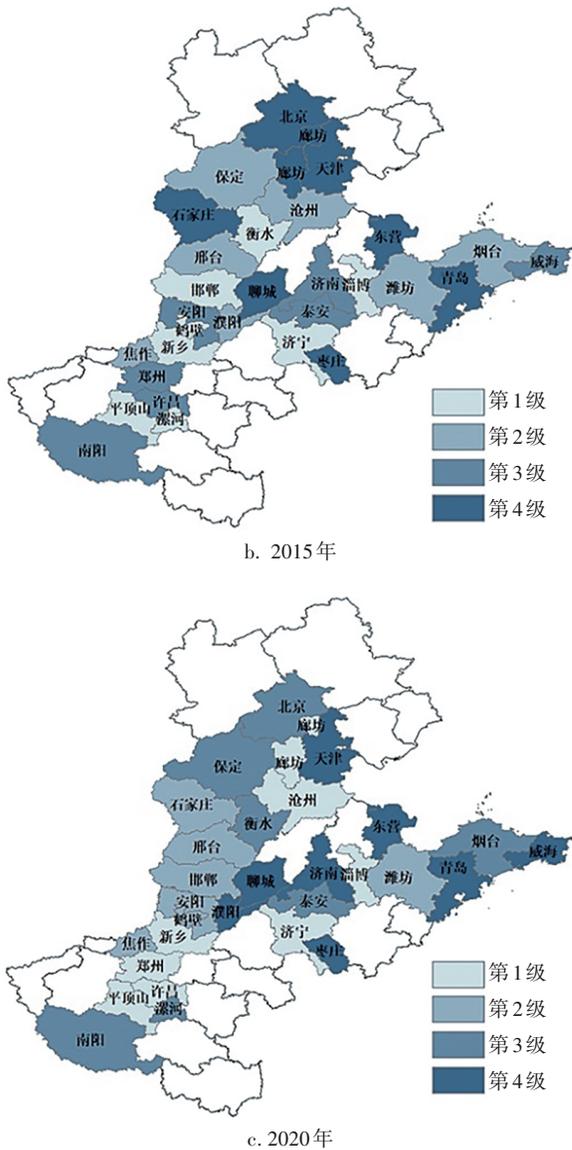


图 6 用水均衡度变化四分位分布

Fig.6 Quartile map of water equilibrium degree

3 用水量分析

3.1 用水总量

2006年—2020年,30座南水北调受水城市的用水总量由 $546\ 581.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 增长至 $664\ 985.7 \times 10^4 \text{ m}^3$,增长了 21.7%;用水人口由 4 998.5 万人增长至 8 005.8 万人,增长了 60.2%。可见,南水北调受水城市以较少的水量增长支撑了较多的人口增长。

通过进一步分析用水总量和用水人口的变化趋势可知,2006年—2013年间用水总量年均增长率为 2.58%,用水人口年均增长率为 2.81%;2013年—2020年间用水总量年均增长率仅为 0.44%,而用水人口年均增长率为 4.84%。在用水总量增速

明显放缓的前提下,用水人口增长依然可观。

15年间,30座城市的用水总量与全国之比先增后减,用水人口与全国之比先减后增,转折点出现在 2013年,总体符合由粗放式发展到高质量发展的用水规律,具体如图 7 所示。

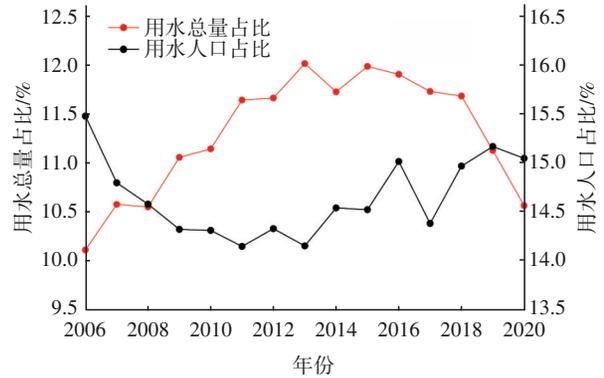


图 7 用水总量和用水人口占比的年际变化情况

Fig.7 Interannual changes of the proportion of total water consumption and water consuming population

3.2 人均用水量

2006年—2020年,30座受水城市的人均综合用水量从 $299.59 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 降至 $227.57 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,全国的人均综合用水量从 $458.42 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 降至 $324.10 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。30座受水城市的人均综合用水量变化趋势同全国一样,呈逐年降低趋势,且历年间始终低于全国水平。截至 2020年,受水城市人均综合用水量比全国水平低 30% 左右。分析发现,30座受水城市中已有 23 座城市成功申报国家级节水型城市,占城市数量的 77%。其余 7 座城市也多为省级节水型城市,并正在积极创建国家级节水型城市。可见,受水城市节水水平良好,节水积极性较高。

为展示各受水城市的人均综合用水量分布情况,绘制受水城市历年的频数分布直方图,并对频数分布进行高斯曲线拟合,2006年、2013年和 2020 年的情况见图 8。可见,2006年—2020年,位于较小人均综合用水量数值位置的频数逐渐增加,且频数分布由分散变得集中;相应地,拟合曲线波峰左移,波形变窄。2006年、2013年和 2020年 30 座城市的人均综合用水量平均值分别为 338.33 、 309.76 、 $250.52 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,标准差分别为 109.57 、 85.10 、 $64.96 \text{ L}/(\text{人} \cdot \text{d})$ 。结合图 8 以及人均综合用水量平均值、标准差可知,30 座城市的人均综合用水量逐渐减小,且各城市人均综合用水量差异逐步减小。

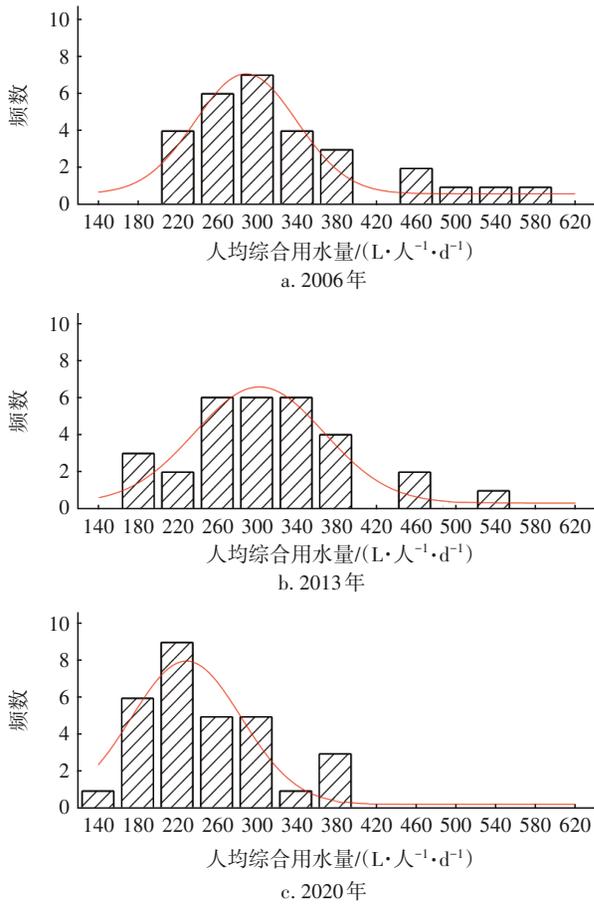


图8 人均综合用水量频数分布直方图

Fig.8 Frequency distribution histogram of per-capita comprehensive water consumption

对各受水城市的人均综合用水量进行地理分布分析,绘制逐年四分位分布图,2006年、2013年、2020年的四分位分布见图9。

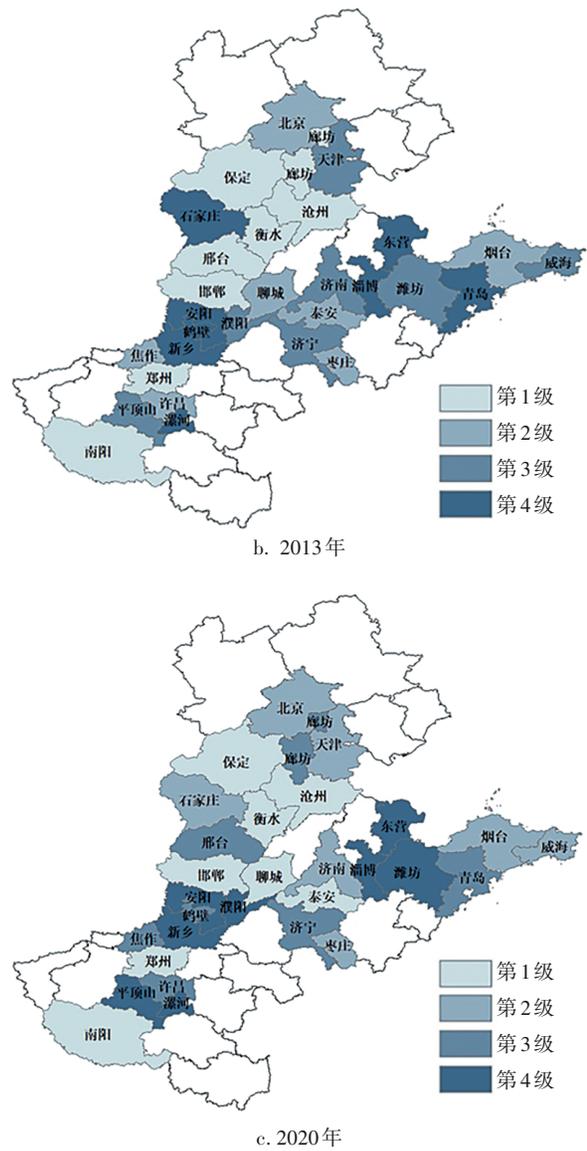
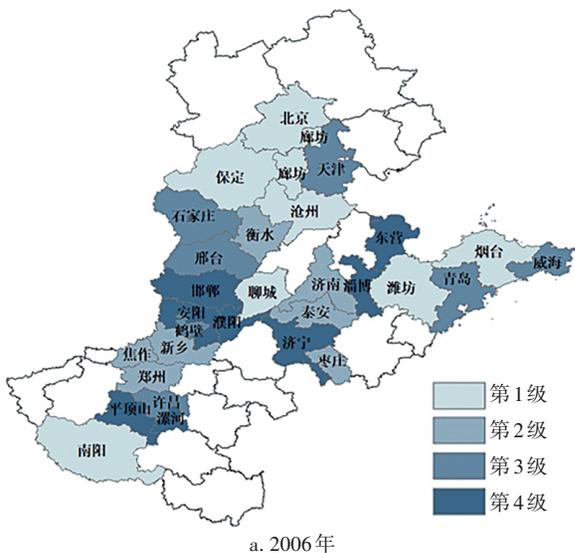


图9 人均综合用水量变化四分位分布图

Fig.9 Quartile map of per-capita comprehensive water consumption

由图9可见,京津冀地区第1、2级城市较多,即将人均综合用水量按从小到大排序后京津冀地区位于前25%和25%~50%的城市数量较多,说明京津冀地区人均用水量普遍控制在更低水平。

与人均综合用水量不同,15年间30座受水城市的人均生活用水量基本趋于稳定。30座受水城市的人均生活用水量从2006年的123.73 L/(人·d)变为2020年的129.36 L/(人·d),全国的人均生活用水量从2006年的188.32 L/(人·d)变为2020年的178.77 L/(人·d),变化幅度均较小,历年间30座受水城市的人均生活用水量始终低于全国水平。



2006年、2013年和2020年的人均生活用水量频数分布直方图见图10。可见,2006年以来,频数拟合曲线的波峰位置变化不大,但频数分布由分散逐渐集中,波形由宽而平变得窄而尖。2006年、2013年和2020年30座城市的人均生活用水量平均值分别为133.31、124.82、125.68 L/(人·d),标准差分别为31.92、23.06、26.03 L/(人·d)。可见,受水城市人均生活用水量总体变化不大,且已达相对稳定状态,继续下降的空间较小,但受水城市之间人均生活用水量的差异仍在逐步缩小。相对而言,生活节水对降低人均综合用水量的贡献不大,节水主要依靠工业节水。

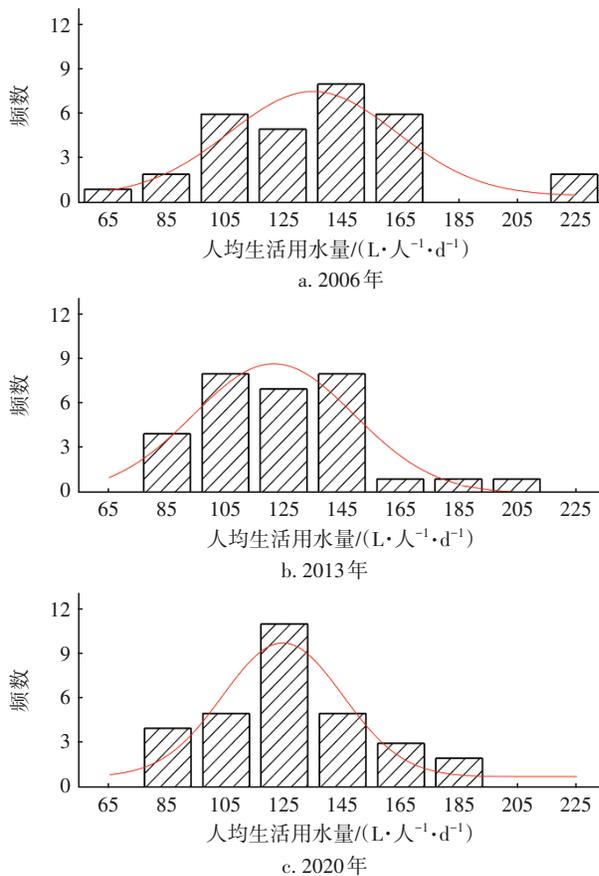


图10 人均生活用水量频数分布直方图

Fig.10 Frequency distribution histogram of per-capita domestic water consumption

3.3 人均用水量与城市经济发展相关性

分别计算2006年—2020年30座南水北调受水城市人均综合用水量、人均生活用水量、生产运营用水量与其市辖区人均GDP的Spearman秩相关系数,发现人均生活用水量与市辖区人均GDP的相关性逐渐增强,其中2006年、2013年、2019年的Spearman

秩相关系数分别为0.23、0.38、0.63;而人均综合用水量、生产运营用水量与市辖区人均GDP均无明显相关性规律。

为进一步分析支撑人均生活用水量与市辖区人均GDP相关性的用水类型,分别计算2006年—2020年30座受水城市人均公共服务用水量、人均居民家庭用水量与其市辖区人均GDP的Spearman秩相关系数,发现人均公共服务用水量与市辖区人均GDP的相关性逐渐增强,其中2006年、2013年、2019年的Spearman秩相关系数分别为0.19、0.40、0.57;而人均居民家庭用水量与市辖区人均GDP无明显相关性规律。这说明城市经济发展状况对人均公共服务用水的影响更为显著。

4 结论与讨论

基于2006年—2020年的城市统计数据,分析了南水北调中线和东线工程受水区范围内的30座城市在用水结构、用水总量、人均用水量以及人均用水量与城市经济发展相关性等方面的变化趋势,以期深入理解受水城市用水情况,为实现水资源均衡配置、指导南水北调后续工程实施提供依据。主要研究结论如下:

① 2006年—2020年,30座受水城市的生产运营用水占比呈下降趋势,生活用水占比总体呈上升趋势,与全国情况相似。生活用水中,公共服务用水占比多年来较为稳定,且略高于全国水平;居民家庭用水占比有所增长,但涨幅小于全国水平。

② 30座受水城市用水均衡度在时间上呈先上升后回落态势,趋势与全国相同,但峰值出现年份较全国更晚。受水城市早期生产运营用水占比较高,用水有序性较高;此后随着生产运营用水占比下降,生活用水占比上升,各类用水日趋均衡,用水有序性逐渐降低;而今,在外部因素的调控下,受水城市用水结构向着更加有序的方向发展。

③ 受水城市以较少的水量增长支撑了较多的人口增长。15年间受水城市用水总量与全国之比先增后减,用水人口与全国之比先减后增,符合由粗放式发展到高质量发展的用水规律。受水城市人均综合用水量呈逐年降低趋势,且始终低于全国水平,各城市人均综合用水量差异逐步缩小,节水水平良好。

④ 目前人均生活用水量基本趋于稳定,继续

下降的空间较小。相对而言,生活节水对降低人均综合用水量的贡献程度不大,工业节水效果较生活节水更显著,人均公共服务用水量与城市经济发展相关性逐渐增强。

通过对南水北调受水城市用水情况分析可知,受水城市用水量增速明显放缓,用水效益显著提升,用水结构有所调整。在调水方面,应注重城市用水量的科学计量,结合城市用水现状,精确预测未来用水需求,合理制定水量调度和分配方案,避免盲目扩大调水规模、水资源配置不均等问题。在节水方面,应持续贯彻“节水优先”战略,推动用水方式的节约集约。在人均生活用水量已达相对稳定的情况下,可进一步挖潜公共服务节水空间,并强化工业节水增效。实施节水工程建设的同时,依托节水“三同时”、水效领跑者、水价动态调整等制度驱动节水工作的长久深入。在用水方面,应根据水资源承载能力优化产业布局,制定与城市水资源条件和城市发展定位相适应的产业规划,实现从“被动要水”到“量水而行”的转变,以水资源刚性约束促进用水效率提升。

参考文献:

- [1] 许继军. 新时期南水北调工程战略功能定位与发展思路研究[J]. 中国水利, 2021(11): 12-14.
XU Jijun. Research on strategic function orientation and development ideas of South-to-North Water Transfer Project in the new era [J]. China Water Resources, 2021(11): 12-14(in Chinese).
- [2] 许土国, 吕素冰, 刘建卫, 等. 白城地区用水结构演

变与用水效益分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(4): 106-108, 214.

XU Shiguo, LÜ Subing, LIU Jianwei, *et al.* Analysis of water consumed structure evolution and benefit in Baicheng region [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(4): 106-108, 214(in Chinese).

- [3] 陈晓清, 侯保灯, 周毓彦, 等. 中国地理分区用水结构时空演变对比分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 78-85, 90.

CHEN Xiaoqing, HOU Baodeng, ZHOU Yuyan, *et al.* A comparative analysis of the spatial and temporal evolution of water use structure in geographical regions of China [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(6): 78-85, 90 (in Chinese).

- [4] 张良均, 杨坦, 肖刚, 等. MATLAB数据分析与挖掘实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 35-38.

ZHANG Liangjun, YANG Tan, XIAO Gang, *et al.* MATLAB Data Analysis and Data Mining [M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 35-38 (in Chinese).

- [5] 张富刚, 郝晋珉, 姜广辉, 等. 中国城市土地利用集约度时空变异分析[J]. 中国土地科学, 2005, 19(1): 23-29.

ZHANG Fugang, HAO Jinmin, JIANG Guanghui, *et al.* Spatial-temporal variance of urban land use intensity [J]. China Land Science, 2005, 19(1): 23-29 (in Chinese).

作者简介:李化雨(1994-),女,北京人,硕士,助理工程师,主要研究方向为城镇水务规划设计。

E-mail: lihuayuconnie@126.com

收稿日期:2022-04-29

修回日期:2022-05-07

(编辑:孔红春)

做好水文监测分析预报,保障国家水安全