

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0090

白鹏,刘昌明.北京市用水结构演变及归因分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):0106,34. BAI P, LIU C M. Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 0106, 34. (in Chinese)

# 北京市用水结构演变及归因分析

白鹏,刘昌明

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京市 100101)

**摘要:** 用水结构的分析和预测是水资源管理和规划的前提和基础。以北京市为例,分析了1988–2016年北京市用水结构的演变特征,揭示了导致用水结构变化的驱动因素,讨论了未来北京市用水结构可能出现的变化及其对水资源供给的影响。结果表明,近30年来北京市总用水量先升后降,而后缓慢增加,农业用水和工业用水持续减少,而生活用水和环境用水则持续增加。农作物播种面积的减少和工业节水分别是导致农业用水和工业用水减少的主要原因,生活用水的增加主要是由于人口的增长和人们用水方式的变化,而环境用水的增加和园林绿化面积的增长关系密切。预计未来北京的农业用水仍将持续减少,而工业用水的变化取决于产业结构调整的力度。生活用水仍将缓慢增长,这将是未来北京市水资源安全供给面临的巨大压力。

**关键词:** 北京市;水资源;供水;用水结构;归因分析

**中图分类号:** TV 213    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0001-06

## Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing

BAI Peng, LIU Changming

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Analyzing and forecasting the water utilization structure is essential to water resources planning and management. Taking Beijing as a case study, this study analyzed the change of water utilization structure in Beijing from 1988 to 2016, revealed the main driving factors that caused the change in water utilization structure, and discussed the possible changes in future water utilization structure in Beijing and their influence on water supply. Results showed that the total water use in Beijing first rose and then declined, then slowly rose again during 1988–2016. Agricultural and industrial water use continued to decrease, while domestic water use and environmental water use increased continuously. The reduction in agricultural and industrial water use was primarily attributed to the reduction in crop acreage and the practice of water conservation. The increase in domestic water use was mainly caused by the increase in population and the change of water related lifestyle. The increase in environmental water use can be explained by the increase of garden and green area in Beijing. It is expected that the agricultural water use in Beijing will continue to decrease in the near future, whereas the change in industrial water use will depend on the degree of industrial structure adjustment. In the near future, the biggest challenge to water resource security in Beijing comes from the increase in domestic water use.

**Key words:** Beijing; water resources; water supply; water utilization structure; attribution analysis

北京市地处水资源匮乏的海河流域,多年平均    降雨量 567 mm,年人均水资源量 161 m<sup>3</sup>,约为全国

收稿日期: 2018-04-18    修回日期: 2018-06-04    网络出版时间: 2018-06-07

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180607.1053.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401402); 国家自然科学基金(41601034; 41330529)

Funds: National key Research and Development Program of China(2016YFC0401402); National Natural Science Foundation of China(41601034; 41330529)

作者简介: 白鹏(1983-),男,河北石家庄人,助理研究员,博士,主要从事水文水资源方面研究。E-mail: baip@igs.nrr.ac.cn

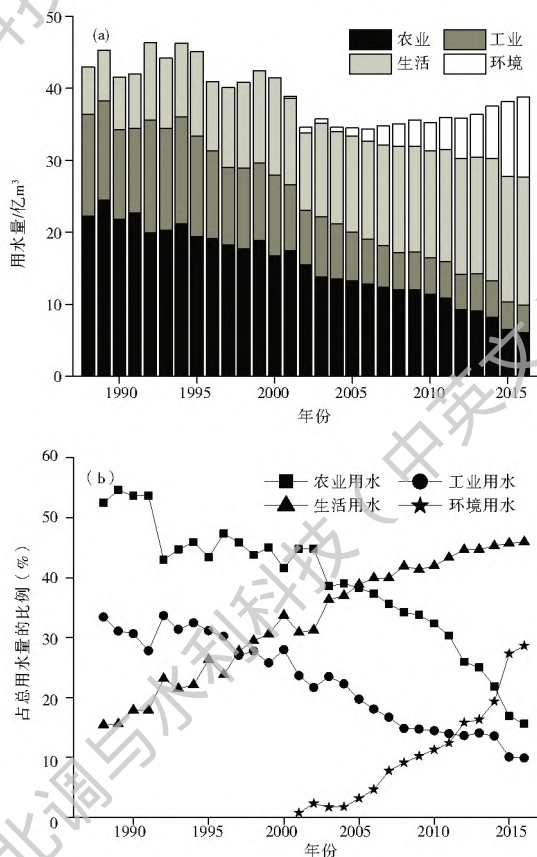
平均值的1/12。同时,北京也是我国的政治、文化、国际交往和科技创新中心,是我国经济发展水平最高、人口密度最大的地区之一。水资源短缺一直是制约北京市社会发展的重要因素<sup>[1]</sup>。解决北京市水资源供需矛盾的手段包括水资源的供给管理和需求管理。水资源供给管理是指通过各种工程措施扩大水资源的供给量,从而满足用户对水资源的需求。这是北京市一直以来偏重的水资源管理方式。水资源需求管理是指通过法律、行政、经济和科技等手段,控制用水总量,优化用水结构,提供水资源利用效率,抑制水资源需求,最终实现水资源供需平衡<sup>[2-5]</sup>。目前,北京的各种调水、供水工程已相对完善,水资源的开发利用已经超过了100%<sup>[6-7]</sup>,很难再通过供给管理来扩大供水量,必须转向水资源需求管理来减少水资源的需求。用水结构的准确分析和预测是制定水资源需求管理措施的基本前提和基础<sup>[9-10]</sup>。用水结构与产业结构的变化息息相关<sup>[11-13]</sup>。产业结构的变化势必会引起用水结构的改变,而用水结构的优化也会促进产业结构的调整<sup>[14-17]</sup>。自改革开放以来,北京市的产业结构经历了由第二产业主导向第三产业主导的过渡,同时,第一产业占GDP总量的比例持续降低。产业结构的改变对北京市的用水结构产生了深远的影响。本文将分析北京市1988-2016年用水结构的演变特征及其与产业结构变化的关系,试图揭示引起用水结构变化的驱动机理,并探讨未来用水结构的发展趋势及其对未来水资源供需形势的影响,旨在为协调水资源与社会经济发展的关系、制定合理的水资源需求管理措施提供依据。

## 1 北京市用水结构演变特征

根据用水特征分类,我国用水结构分为农业用水、工业用水、生活用水和生态用水。近30年以来,北京市用水结构的演变特征主要表现为以下几个方面。

(1) 总用水量先升后降,而后缓慢增加。总用水量在1988-1994年总体呈增加趋势,1994年达到最大,为45.9亿 $m^3$ ,随后波动下降,最低值出现在2006年,为35.3亿 $m^3$ ,而后开始缓慢增加,平均增加水量为0.35亿 $m^3/a$ (图1(a))。(2) 农业用水量持续减少,占总用水量的比重不断降低。1988-1994年间,农业用水量都在20亿 $m^3$ 以上,占总用水量的比重超过50%,且2005年之前一直是北京市最大用水部门。但农业用水量总体呈现持续减少的趋势,用水量由1988年的22.2亿 $m^3$ 减少到2016年的6.0亿 $m^3$ ,平均减少量为0.56亿 $m^3/a$ ,

且占总用水量的比重不断减少,2016年仅为15.6%(图1(b))。(3) 与农业用水相似,工业用水量也持续减少,比重不断降低。1996年之前,工业部门是北京市用水第二大部门,工业用水占总用水量的比重在30%左右。但工业用水量总体呈显著的下降趋势,平均减少量为0.36亿 $m^3/a$ ,所占比重亦不断减少,2016年仅为9.9%(图1(b))。(4) 生活用水增长迅速,比重不断增加。与农业和工业用水变化情况相反,1988-2016年间,北京市的生活用水持续增加,用水量由1988年的6.5亿 $m^3$ 增加到2016年的17.8亿 $m^3$ ,平均增长量为0.39亿 $m^3/a$ 。生活用水占总用水量的比重也持续增加,由1988年的15.4%增加到2016年的45.9%,并在2006年成为最大的用水项。(5) 环境用水在2000年之前未被纳入水资源统计中,但从现有的统计数据看,环境用水量呈快速增加的趋势,且变化幅度超过其他的用水项,成为不可忽视的用水项。环境用水量由2001年的0.3亿 $m^3$ 增加到2016年的11.1亿 $m^3$ ,平均增加量为0.68亿 $m^3/a$ ,所占比重在2001-2016年间增加了37倍(从0.77%到28.6%),成为第二大用水项。



注:本文所用数据主要来自北京市统计年鉴、北京市水资源公报;1988-2000年间无环境用水相关统计数据。

图1 1988-2016年北京市用水结构的变化  
 Fig. 1 The change of water utilization structure in Beijing during 1998-2016

## 2 用水结构驱动因素分析

### 2.1 农业用水

灌溉用水是北京市农业用水的主要用途, 占到了农业用水量的 90% 以上, 而灌溉用水量主要取决于灌溉面积、农作物结构和灌溉方式<sup>[8, 10]</sup>。1988–2016 年, 北京市耕地及其灌溉面积显著减少, 主要原因是建设用地的增加。近 30 年来北京市建设用地面积增加了 2.2 倍<sup>[18]</sup>, 导致农作物播种面积由 59.5 万  $\text{hm}^2$  减少到 15.1 万  $\text{hm}^2$ , 所占城市总面积的比例也由 36.2% 下降到 9.2% (图 2(a))。农作物播种面积的减少是导致北京市农业用水减少的主要原因, 二者确定性系数  $R^2 = 0.93$  (图 2(b))。农作物种植结构变化和灌溉方式也会对农业用水造成一定的影响, 但不是主要原因。分析农作物结构变化发现, 蔬菜瓜果和其它作物(包括油料、饲料等)播种面积在近 30 年间呈先增加后减少的趋势, 但减少部分主要转为粮食作物, 而农作物总面积变化不大。农业灌溉方式的变化也会对农业用水的减少产生一定影响。近年来, 北京市大力发展与推广农业节水灌溉技术, 基本消除了大水漫灌的灌溉方式, 喷灌和

滴灌面积占有效灌溉面积的比重逐年攀升<sup>[8, 10]</sup>。

### 2.2 工业用水

工业用水量主要受工业规模、产业结构以及工业用水重复利用率几个方面的影响<sup>[19, 20]</sup>。1988–2016 年, 北京市工业产值一直呈增长趋势, 而工业用水却在持续减少, 单位产值 GDP 用水量逐年下降 (图 3(a)), 这主要得益于产业结构的调整和科技进步<sup>[21]</sup>。近 30 年来, 北京市的工业产业结构发生了较大的变化。20 世纪 90 年代初期, 北京市工业主导产业为化学工业、金属冶炼及压延加工业和机械工业, 这三个部门占工业总产值的 38.6%<sup>[22]</sup>。2016 年末, 北京市工业主导产业变为汽车制造业、电力、热力生产和供应业以及医药行业, 一些高耗水、低效益的行业(如造纸、纺织、印染等)退出了北京的主要工业领域。除产业结构调整外, 北京市还对一些单位高耗水行业进行技术改造, 提高工业用水重复利用率和生产废水再利用率。通过节水技术改造, 工业水利利用率已由 20 世纪 80 年代末的 80% 左右上升到 2004 年的 94%<sup>[22]</sup>。郭磊和张士峰<sup>[21]</sup>分析了北京 1990–2000 年间由产业结构调整 and 科技进步引起的工业用水节水量, 结果表明, 由科技进步引

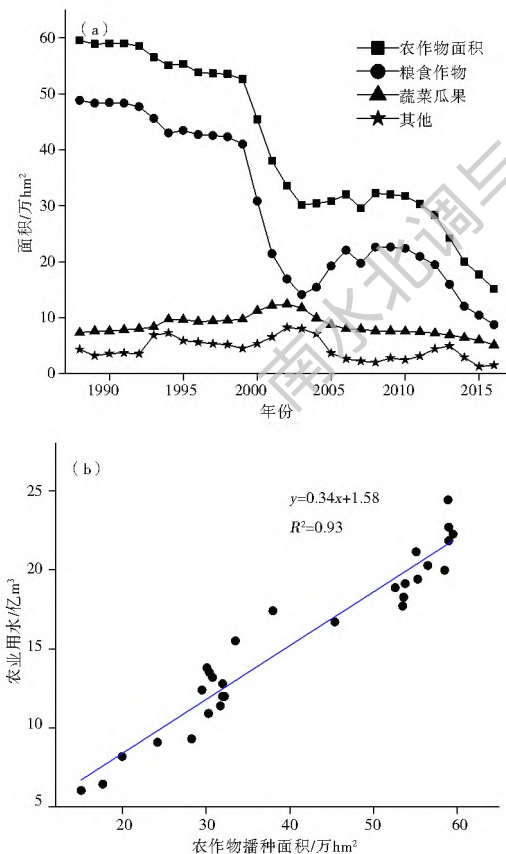


图 2 1988–2016 年北京市农作物播种面积及其与农业用水量的线性拟合

Fig. 2 The change of crop acreage in Beijing during 1988–2016 and the linear fitting between crop acreage and agricultural water use

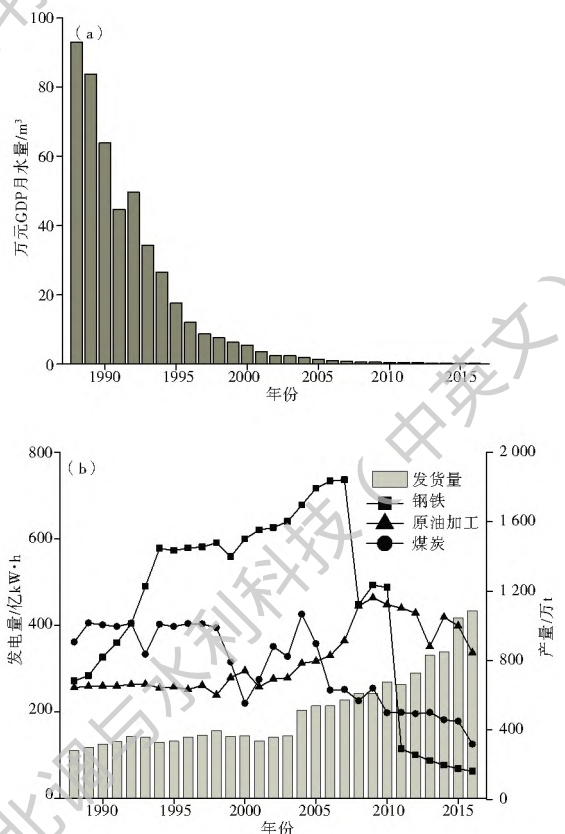


图 3 1988–2016 年北京市万元 GDP 用水量变化以及工业用水中四大用水行业产量变化

Fig. 3 Change of water use per ten thousand yuan GDP in Beijing from 1988 to 2016 and the change in production of the four major industrial water users



起的节水量占总节水量的比例较高, 而由产业结构调整引起的节水量占总节水量的比例却在逐年上升。图 3(b) 也印证了这一结论, 它展示了北京市工业用水中传统的四大用水行业( 热电、冶金、石化和煤炭开采) 产量的变化。这四大行业的用水量占工业用水量的比例在 2000 年之前都在 60% 以上。1988-2008 年, 除煤炭开采外, 其它产业产量均呈现增加的趋势, 而同期的工业用水量却在显著下降。这表明由科技进步引起的节水是这一时期工业用水量下降的主要原因。2009-2016 年间, 除热电行业外, 其它行业产量均显著减少, 工业产业结构调整引起的节水是这一时期工业用水量继续减少的主要原因。目前, 北京市工业用水重复利用率已经接近发达国家水平, 通过科技节水的潜力已十分有限, 未来工业节水的重心应放在产业结构的调整上。

### 2.3 生活用水

生活用水包括城镇生活用水和农村生活用水, 其中, 城镇生活用水中又包括居民家庭用水和公共用水; 农村生活用水包括农民家庭用水和家养牲畜用水<sup>[8,10]</sup>。北京市生活用水的增加与人口数量的快速增长以及人们用水方式的改变密切相关。1988-2016 年, 由于城市化水平的快速推进以及外来人口的增加, 北京市常住人口数量由 1 061 万人增加到 2 172.9 万人, 增加 1 111.9 万人。其中, 农村人口减少 117.7 万人, 城镇人口增加 1 229.6 万人, 城镇人口的增长是北京市总人口增加的主要原因( 图 4 (a))。人口的快速增长是导致北京市生活用水增加的主要原因。此外, 随着人们生活水平的提高、家用电器( 如洗衣机) 以及家庭洗浴设备的逐渐普及、住宿餐饮业的快速发展、水价调整以及节水设施安装等多种因素的影响, 人们的用水方式产生了根本性的变化。北京市年人均用水量呈现先增加后下降, 最低值出现在 1988 年, 为 61.6 m<sup>3</sup>, 最高值出现在 1999 年, 达到 101.9 m<sup>3</sup>, 2010 年以后呈缓慢增加的趋势。人均用水量的变化使得北京常住人口与生活用水量之间更符合双曲线函数关系而不是线性关系( 图 4(b))。

### 2.4 环境用水

北京市环境用水量近十年来呈快速增加的趋势, 目前是用水结构中的第二大项。北京市环境用水量的快速增长与园林绿化面积的增加有直接关系, 确定性系数  $R^2 = 0.93$  (图 5 (b))。1988-2016 年间, 北京市园林绿地面积由 4 074 hm<sup>2</sup> 增加到 30 069 hm<sup>2</sup>, 增加了 7.4 倍。人均绿地面积也由 1988 年的 3.84 m<sup>2</sup> 增加到 2016 年的 13.84 m<sup>2</sup> (图 5(b))。增加

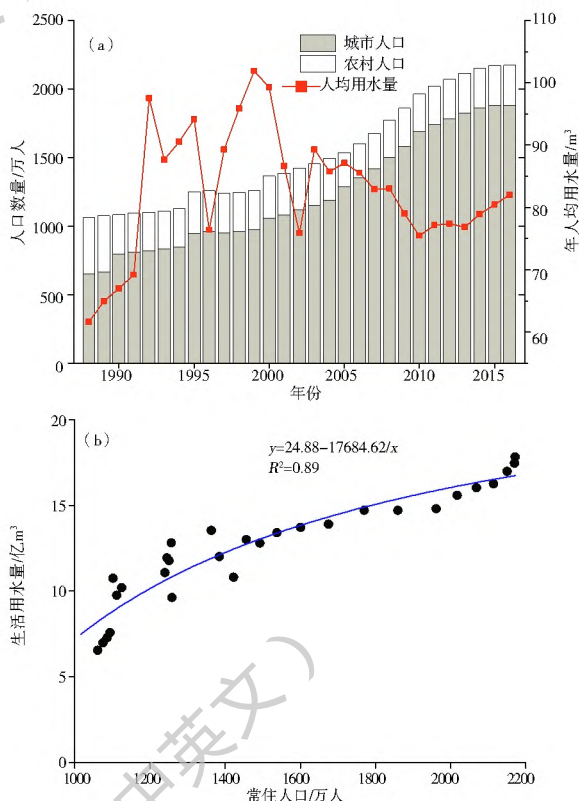


图 4 1988-2016 年北京市常住人口、年人均用水量的变化以及常住人口和生活用水量的非线性拟合  
Fig. 4 The changes in permanent population and annual water use per capita in Beijing from 1988 to 2016 and the non-linear fitting between permanent population and domestic water use

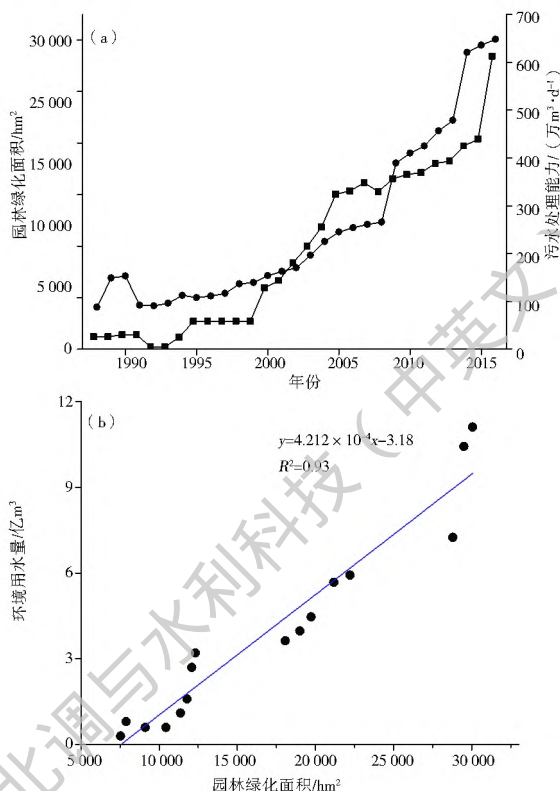


图 5 1988-2016 年北京园林绿化面积和污水处理能力的变化以及园林绿化面积和环境用水量的线性拟合  
Fig. 5 The changes in garden and green area and sewage treatment capacity in Beijing from 1988 to 2016 and the linear fitting between garden and green area and environmental water use

的园林绿地面积需要消耗大量的水资源,但对水质的要求相比饮用水要低。目前,北京市的环境用水主要由再生水(中水)提供。中水具有来源稳定、保证率高、不受气候条件影响的特点。2016年,北京市中水利用量达到了10亿 $\text{m}^3$ ,约占全市总用水量的26%,是不可或缺的水资源。北京市中水利用量的增加得益于北京市污水处理能力的增长。1988–2016年间,北京市污水处理能力由26.4万 $\text{m}^3/\text{d}$ 增加到612万 $\text{m}^3/\text{d}$ (图5(a)),污水处理率也由7.4%上升到90%。

### 3 未来用水结构趋势及影响

#### 3.1 未来的用水结构变化分析

北京市未来用水结构主要取决于各用水部门驱动力的变化。根据《北京市土地利用总体规划(2006–2020)》,2020年北京市耕地保有量保持在21.5万 $\text{hm}^2$ (2015年为21.9万 $\text{hm}^2$ )。因此,未来几年内北京市耕地面积不会出现大幅度的减少。但目前北京市的农业产业结构与北京市建设国际一流和谐宜居之都的战略目标不相适应,从发达国家农业发展的经验来看,未来北京市农业产业结构将会进一步的调整,农作物播种面积仍将会继续下降,因此,未来几年北京市农业用水仍将保持下降的趋势。按照目前北京市的经济运行状况,未来第二产业规模仍将继续扩大。此外,北京市工业用水重复利用率已经接近发达国家水平,要进一步提高非常困难。如果不实施产业结构的调整,未来工业用水减少的趋势将会放缓甚至出现增长。因此,实施工业产业结构的调整是继续保持工业用水负增长的唯一出路。根据《北京城市总体规划(2016–2035年)》,确定北京市常住人口规模到2020年控制在2300万人以内(2016年2172.9万人),2020年以后长期稳定在这一水平,因此,北京未来的常住人口还会继续增长。此外,发达国家的经验表明,人均用水量通常随经济发展水平的提高而增加<sup>[23]</sup>。因此,未来北京市生活用水量势必进一步增加,成为水资源安全供给面临的巨大压力。人口的增长以及北京建设的战略目标决定了北京市环境用水量仍将会进一步增加。但是,北京市环境用水主要来源于中水回用,中水资源也会随城市人口和经济的发展相应增加。因此,增加的环境用水对水资源安全供给产生的压力较小。

#### 3.2 用水结构变化对未来水资源供需形势的影响

当前,北京市的供水按来源可分为地表水、地下水、再生水、外调水(南水北调)和应急供水五部分构

成。2016年,上述五种水源占总供水的比例分别为5.4%、42.5%,21.7%,25.8%和4.6%。其中,地表水和地下水资源量主要取决于降水量的及其时空分布格局(图6),二者之和与降水量的线性相关系数为0.89。近年来,在气候变化和人类活动的影响下,北京市地表水资源量持续减少<sup>[24–25]</sup>,且考虑到水质的影响,目前地表水开发利用已经非常高,而地下水又常年处于“入不敷出”的超采状态。农业用水量和工业用水量的减少大大缓解了北京市水资源的供需矛盾,而环境用水量与中水之间基本保持“供需平衡”。因此,目前北京市供水安全面临的巨大压力主要来自于持续增长的生活用水量。尽管近年来南水北调工程调水能力不断提升,但当降水量出现严重亏缺的年份(如1999年和2000年),北京市供水安全仍面临巨大压力。以2016年为例,如果当年的降水量为1999年的266.9mm,保持其他供水结构不变且不超采地下水的情景下,水资源供给面临21.2亿 $\text{m}^3$ 的缺口。因此,北京市相关部门有必要做好降水极端亏缺年份水资源供给预案,同时继续加强水资源需求管理,调整农业和工业产业结构,加大节水设施的安装,从而抑制水资源需求的增长。

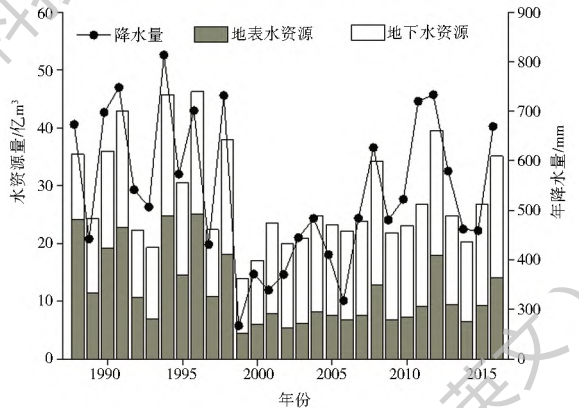


图6 1988–2016年北京市降水量和水资源量的变化  
Fig. 6 The changes in annual precipitation and available water resources in Beijing from 1988 to 2016

### 4 结论

本文分析了北京市近30年来用水结构的变化,揭示了影响用水结构变化的驱动因素,讨论了未来北京市用水结构可能出现的变化及其影响,主要研究结论如下。

(1) 近30年来,北京市的用水结构发生了深刻的变化:总用水量先升后降,而后缓慢增加。农业用水和工业用水持续减少,生活用水稳步增加,环境用水量增长最快,目前是北京市用水结构中第二大项。

(2) 农作物(特别是粮食作物)播种面积的减少

是导致农业用水量的减少的主要原因;工业用水量的减少得益于科技进步和产业结构调整引起的工业节水;生活用水的增加主要是由于人口的持续增长以及人们用水方式的变化;园林绿化面积的增加和中水生产规模的扩大是引起环境用水量增加的主要原因。

(3) 未来几年北京市的农业用水量仍将继续减少,而工业用水量的变化取决于产业结构调整的力度。未来的生活用水量很可能随着人口增长和经济水平的提高缓慢增加,这将是北京市水资源安全供给面临的巨大压力。环境用水量将继续保持增加态势,但由于中水生产规模的扩大,对水资源安全供给产生的压力很小。

#### 参考文献(References):

- [1] 左建兵,刘昌明,郑红星,等.北京市城区雨水利用及对策[J].资源科学,2008(7):990-998.(ZUO J B,LIU C M,ZHENG H X,et al. Countermeasures and characteristics of Beijing [J]. Urban Rainwater Utilization Resources Science, 2008(7): 990-998 (in Chinese))
- [2] 黄永基,陈晓军.我国水资源需求管理现状及发展趋势分析[J].水科学进展,2000(2):215-220.(HUANG Y J,CHEN X J. Water Demand management present and development trend of China[J]. Advances in Water Science, 2000(2): 215-220. (in Chinese))
- [3] 甘泓,王浩,罗尧增,等.水资源需求管理——水利现代化的重要内容[J].中国水利,2002(10):66-68.(GAN H,WANG H,LUO Y Z,et al. Water demand management——Important content of water modernization[J]. China Water Resources, 2002(10): 66-68. (in Chinese))
- [4] 王晓君,石敏俊,王磊.干旱缺水地区缓解水危机的途径:水资源需求管理的政策效应[J].自然资源学报,2013,28(7):1117-1129.(WANG X J,SHI M J,WANG L. Solutions to water scarcity in arid regions: Effectiveness of water demand management policy[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1117-1129. (in Chinese))
- [5] 曹惠提,郭艳,张会敏.黄河流域水资源需求管理初探[J].南水北调与水利科技,2007(2):81-83.(CAO H T,GUO Y,ZHANG H M. Discussion on Water Resource Demand Side Management in the Yellow River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007(2): 81-83. (in Chinese))
- [6] 张传霞,白颖,高媛媛,等.北京市水资源可持续利用对策研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(4):83-86,110.(ZHANG C X,BAI Y,GAO Y Y,et al. Studies on countermeasures for sustainable utilization of water resources of Beijing [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 83-86, 110. (in Chinese))
- [7] 魏保义,王军.北京市水资源供需分析[J].南水北调与水利科技,2009,7(2):40-41,54.(WEI B Y,WANG J. Supply and demand analysis of water resources in Beijing[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(2): 40-41, 54. (in Chinese))
- [8] 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 J,SONG Z W,CHEN F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6546-6554. (in Chinese))
- [9] 翟远征,王金生,郑洁琼,等.北京市近30年用水结构演变及驱动力[J].自然资源学报,2011,26(4):635-643.(ZHAI Y Z,WANG J S,ZHENG J Q,et al. Evolution and driving forces of water consumed structure in Beijing during the past 30 years [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(4): 635-643. (in Chinese))
- [10] 刘宝勤,姚治君,高迎春.北京市用水结构变化趋势及驱动力分析[J].资源科学,2003(2):38-43.(LIU B Q,YAO Z J,GAO Y C. Trend and driving forces of water consumed structure changes in Beijing [J]. Resources Science, 2003(2): 38-43. (in Chinese))
- [11] 蒋桂芹,赵勇,于福亮.水资源与产业结构演进互动关系[J].水电能源科学,2013,31(4):139-142,182.(JIANG G Q,ZHAO Y,YU F L. Interaction between water resources and industrial structure evolution [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 139-142, 182. (in Chinese))
- [12] 张文国,杨志峰,伊锋,等.基于水资源可持续利用的流域产业结构分析[J].山地学报,2003(2):187-194.(ZHANG W G,YANG Z F,YI F,et al. Industrial structure and sustainable use of water resources in reservoir basin [J]. Journal of Mountain Science, 2003(2): 187-194. (in Chinese))
- [13] 陈妍彦,张玲玲.水资源约束下的区域产业结构优化研究[J].水资源与水工程学报,2014,25(6):50-55,60.(CHEN Y Y,ZHANG L L. Research on optimization of regional industrial structure under restriction of water resources [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(6): 50-55, 60. (in Chinese))
- [14] 孙振宇,李华友.北京市工业用水影响机制研究[J].环境科学动态,2005(4):63-64.(SUN Z Y,LI Y H. Research on the influence mechanism of industrial water use in Beijing [J]. Environmental Science Trends, 2005(4): 63-64. (in Chinese))
- [15] 崔志清,董增川.基于水资源约束的产业结构调整模型研究[J].南水北调与水利科技,2008(2):60-63.(CUI Z Q,DONG Z C. Research on industrial structure adjustment model based on water resource [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(2): 60-63. (in Chinese))
- [16] 吴丽,田俊峰.区域产业结构与用水协调的优化模型及评价[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):51-54,72.(WU L,TIAN J F. Optimal model of coordination between industrial structure and water resources utilization as well as its evaluation [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(4): 51-54, 72. (in Chinese))
- [17] 钟科元,陈莹,陈兴伟,等.福建省用水结构与产业结构相关性的区域变化[J].南水北调与水利科技,2015,13(3):593-596,605.(ZHONG K Y,CHEN Y,CHEN X W,et al. Analysis of the correlation between water consumed structure and industrial structure in different regions of Fujian Province [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(3): 593-596, 605. (in Chinese))

(下转第34页)

- 2001-2016. (in Chinese)
- [17] 段爱旺. 北方地区主要农作物灌溉用水定额[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004. (DUAN A W. Irrigation water quota of main crops in northern China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [18] MATTHEW EGAN. The water footprint assessment manual. setting the global standard[J]. *Social & Environmental Accountability Journal*, 2011, 31(2): 181-182. DOI: 10.1080/0969160X.2011.593864.
- [19] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(4): 81-810. DOI: 10.1029/2001WR000355.
- [20] 徐鹏程, 张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 232-237. (XU P C, ZHANG X Q. Study on water footprint of main crops in Jiangsu province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(1): 232-237. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.43.
- [21] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁, 等. 华北地区冬小麦夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-697. (ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S, et al. Circulation and balance of nitrogen in winter wheat summer maize rotation system in north China[J]. *Acta Soil Science Sinica*, 2009, 46(4): 684-697. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0564-3929.2009.04.017.
- [22] 张宇, 李云开, 欧阳志云. 华北平原冬小麦夏玉米生产水足迹及其县域尺度变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6647-6654. (ZHANG Y, LI Y K, OU YANG Z Y. Characteristics of gray water footprint of winter wheat-summer maize production and its scattering in county scale in North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6647-6654. (in Chinese)) DOI: 10.5846/stxb201405211051.
- [23] 徐秋艳, 毛军, 朱辉. SPSS 统计分析方法及应用实验教程[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011. (X Q Y, MAO J, ZHU H. SPSS statistical analysis methods and application of experimental tutorial[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2011. (in Chinese))
- [24] 黄会平, 曹明明, 宋进喜, 等. 1957-2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 315-326. (HUANG H P, CAO M M, SONG J X, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of reference evapotranspiration in China from 1957 to 2012[J]. *Chinese Journal of Natural Resources*, 2015, 30(2): 315-326. (in Chinese))
- [25] 王景雷, 孙景生, 宋妮, 等. 基于 GIS 和 PCA 的冬小麦需水量影响因子分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(5): 640-643. (WANG J L, SUN J S, SONG N, et al. Analysis of influence factors of winter wheat water demand based on GIS and PCA[J]. *Journal of Wuhan University (Engineering Science)*, 2009, 42(5): 640-643. (in Chinese))

(上接第 6 页)

- [18] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. (LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 69(1): 3-14. (in Chinese))
- [19] 左建兵, 陈远生. 北京市工业用水分析与对策[J]. 地理与地理信息科学, 2005(2): 86-90. (ZUO J B, CHEN Y S. Analysis and Countermeasures on Industrial Water Use in Beijing[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005(2): 86-90. (in Chinese))
- [20] 车建明, 张春玲, 付意成, 等. 北京市工业用水特征与行业发展趋势分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13(2): 111-116. (CHE J M, ZHANG C L, FU X Y, et al. Analysis of industry development's trend and its water use characteristics in Beijing[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(2): 111-116. (in Chinese))
- [21] 郭磊, 张士峰. 北京市工业用水节水分析及工业产业结构调整对节水的贡献[J]. 海河水利, 2004(3): 55-58. (GUO L, ZHANG S F. Analysis of industrial water saving and contribution of industrial structure adjustment to water saving in Beijing City[J]. *Haihe Conservancy*, 2004(3): 55-58. (in Chinese))
- [22] 张彪, 汪慧贞, 何建平, 等. 北京市工业用水发展趋势[J]. 给排水, 2006(S1): 153-156. (ZHANG B, WANG H Z, HE J P, et al. Trend of industrial water consumption in Beijing[J]. *Journal of Water Supply and Drainage*, 2006(S1): 153-156. (in Chinese))
- [23] 赵卫华. 居民家庭用水量影响因素的实证分析——基于北京市居民用水行为的调查数据考察[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(4): 137-142. (ZHAO W H. Empirical study on the water consumption behavior and its influences on the domestic water use: based on the data collected in Beijing[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(4): 137-142. (in Chinese))
- [24] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 等. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260. (ZHAO Y, YU X X, ZHENG J K, et al. Quantitative effects of climate variations and land-use changes on annual streamflow in Chaobai river basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(22): 252-260. (in Chinese))
- [25] 姚治君, 管彦平, 高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展, 2003(6): 599-606. (YAO Z J, GUAN Y P, GAO Y C. Analysis of distribution regularity of annual runoff and affection to annual runoff by human activity in the Chaobaihe River[J]. *Progress in Geography*, 2003(6): 599-606. (in Chinese))