

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.014

基于水足迹的北京市水资源开发利用演变特征分析

徐晋轩^{1,2,3}, 杨默远¹, 潘兴瑶¹, 朱永华^{2,3}, 欧阳友^{1,4}, 王 赫^{1,4}

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 4. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要:考虑用水效率提升对不同时期用水定额的影响,核算了1988—2019年北京市水足迹变化过程,利用信息熵方法对比分析了实体水和水足迹用水结构的演变特征。结果表明:北京市实体水开发利用情势不断优化,呈现农业和工业用水量快速下降、生活和生态用水量显著增加的变化规律,形成了以生活用水保障为主、生态用水需求提升为辅的用水格局;北京市水足迹不断上升,商品贸易带来的虚拟水净输入极大缓解了北京市用水压力,但提高了北京市对虚拟水净输入的依赖程度,2015—2019年农业和工业虚拟水净输入在其水足迹中的占比都超过60%,水资源系统常年处于严重超载状态;实体水系统信息熵呈先增后减的态势,生活与生态用水已逐渐成为占绝对优势的用水类型,水足迹系统前期为熵增过程,随后趋于稳定,用水结构较为均衡。

关键词:水足迹;水资源开发利用;虚拟水;信息熵;用水结构;北京市

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)05-0096-09

Analysis of evolution characteristics of water resources development and utilization in Beijing based on water footprint // XU Jinxuan^{1,2,3}, YANG Moyuan¹, PAN Xingyao¹, ZHU Yonghua^{2,3}, OUYANG You^{1,4}, WANG He^{1,4}
(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. College of Resources and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Considering the effect of water utilization efficiency improvement on water utilization quota in different periods, this study systematically analyzed the changing process of water footprint in Beijing from 1988 to 2019, and the information entropy was applied to quantitative assessment of water utilization structure of the real water and the water footprint. The results show that the development and utilization of real water in Beijing have been continuously optimized, with agricultural and industrial water consumptions decreasing rapidly and residential and ecological water consumption increasing significantly. A water consumption pattern has been formed, in which the guarantee of residential water consumption is placed in the first position, and the improvement of ecological water consumption is placed in the second position. The water footprint in Beijing is constantly increasing, and the virtual water net input induced by commodity trade greatly alleviates the pressure of water utilization in Beijing, but increases the dependence of Beijing on the virtual water net input, with the agricultural and industrial virtual water inputs accounting for more than 60% of their total water footprints from 2015 to 2019 and the water resources system being severely overloaded all year around. The information entropy of the real water system first increases and then decreases, residential and ecological water consumptions have become the dominant types of water utilization; the water footprint system experiences an entropy increase process in the earlier stage, then tends to be stable, with its water utilization structure reaching an equilibrium state.

Key words: water footprint; water resources development and utilization; virtual water; information entropy; water utilization structure; Beijing City

基金项目:国家自然科学基金(41830752,42071033);国家重点研发计划(2019YFC1510504,2019YFC0408703)

作者简介:徐晋轩(1998—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail: xjx1015987989@163.com

通信作者:杨默远(1989—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: ymoyuan@163.com

北京市是我国政治中心和京津冀“首都经济圈”的核心,与城市高标准发展需求相比,北京市水资源极度短缺、地下水超采、河道断流、水生态环境恶化等问题日益严重,成为制约社会经济发展的主要瓶颈^[14]。为了应对水资源严重短缺的局面,北京市不断优化供用水结构,供水端增加南水北调和再生水两大水源,本地地表水和地下水得到有效涵养,用水端农业和工业用水量减少超过 70%,生活和生态用水得到有效保障^[5]。在支撑城市高质量发展的基础上,水资源开发利用情势也在持续好转。

2000 年以来,北京市生产端农业和工业用水量减少近 20 亿 m³,同期商品消费总量由 1 213.2 亿元增加至 11 640.2 亿元,两者之间的差距主要通过商品贸易带来的虚拟水净输入来弥补。Allan^[6]定义虚拟水是隐含在产品中的水,2003 年荷兰学者 Hoekstra 将虚拟水理论拓展至生产某一产品所有环节所需水量的总和,认为水足迹是区域内消费的商品与服务耗用的所有水资源量^[7]。水足迹包括实体水和虚拟水净输入两部分,可以通过引入水足迹来反映真实、全面的用水情况。陈俊旭等^[8]基于 2006 年的水足迹核算结果对北京市进行了水资源保障研究;程先等^[9]研究了县域尺度下京津冀地区水足迹时空变化规律;王艳阳等^[10]基于投入产出表计算了北京市 2002 年水足迹情况;Zhao 等^[11]分别从蓝、绿、灰水 3 个方面计算了 2012 年京津冀地区水足迹;韩宇平等^[12]基于通径分析探究了 1958—2016 年影响海河流域冬小麦水足迹呈下降趋势的主要因素;魏怡然等^[13]使用投入产出模型对北京市 2012 年 42 个部门的虚拟水贸易与消费情况进行了分析。

此外,为了定量分析用水结构的系统演变特征,引入信息熵的概念来分析衡量用水系统的有序度。信息熵理论 1948 年由 Shannon^[14]提出,随后被广泛用于表征复杂系统结构的演变规律。信息熵理论在用水结构研究中应用较多,贾程程等^[15]利用信息熵与平衡度方法定量分析了山东省用水演变规律与均衡度值;甘丰余等^[16]利用信息熵原理定量分析了海南省生产用水结构的时空演变规律;易晶晶等^[17]基于信息熵研究了广东省 1980—2015 年的用水结构时空演变规律。水足迹同样具有复杂的演变规律,故可引入信息熵对其进行研究。

现有北京市的水足迹研究大多针对某一特定时期,缺乏对水足迹长序列演变过程的系统分析,同时在水足迹核算中未考虑用水效率提升对不同时期用水定额的影响,一定程度上可能高估了水足迹的增长幅度。基于以上问题,本文利用长序列统计年鉴

数据,以本地农业和工业用水效率作为修正系数,核算得到了北京市 1988—2019 年农业、工业、生活和生态 4 类水足迹的年际变化过程,并利用信息熵方法对比分析了实体水和水足迹用水结构的演变特征,为全面掌握北京市水资源开发利用演变的内在和外在驱动过程,进行实体水与水足迹的水资源协同优化配置提供依据。

1 研究方法数据来源

1.1 水足迹计算方法

计算区域水足迹时常采用自下而上与自上而下两种方法,前者主要用于计算特定生产部门的产品水足迹,后者主要用于开展生产过程中相关产业部门间的虚拟水关联分析^[18-21]。本文利用自下而上的方式,综合计算农业、工业、生活、生态用水 4 类水足迹。区域总水足迹计算公式为

$$W = W_l + W_e + W_a + W_i \quad (1)$$

式中: W 为总水足迹,亿 m³; W_l 、 W_e 、 W_a 、 W_i 分别为生活水足迹、生态水足迹、农业水足迹、工业水足迹,亿 m³。其中,生活与生态水足迹主要包括供给公共事业、居民生活用水以及维持生态环境系统正常运作所必需的水资源,二者均为实体水^[22];农业和工业水足迹分别指农业和工业消费品生产加工全过程中所消耗的水资源总量,均由虚拟水净输入量与本地实体水量两部分组成。

1.1.1 农业水足迹核算

参考孙才志等^[23-24]的研究成果,农业水足迹核算时考虑粮食、蔬菜、油料、猪肉、牛肉、羊肉、蛋类、奶类、干果、鲜果共 10 类代表性农畜产品种类。利用 Penman 公式与联合国粮食及农业组织 Cropwat 8.0 模型计算各类农作物产品虚拟水定额,计算公式为

$$M_p = V_{as} S_c / Y_{cs} \quad (2)$$

其中

$$V_{as} = ET_c \cdot \Delta t K_c$$

式中: M_p 为单位农产品虚拟水定额, m³/t; V_{as} 为作物生长期所需水量, mm; S_c 为作物种植面积, m²; Y_{cs} 为作物总产量, t; ET_c 为可能蒸发量, mm/d; K_c 为调节系数; Δt 为作物生长周期, d。畜产品水足迹主要包括饲料用水、清洁用水、宰杀加工耗水等,单位产品的虚拟水定额计算十分复杂,所需数据量大且质量不高^[25]。参考以往研究,引用 Hoekstra 等^[26-29]研究中有关中国地区的数据和方法得到各类畜产品的虚拟水定额。

现有研究在核算农业水足迹时,通常仅考虑单位农畜产品的虚拟水定额,而未考虑农畜业节水技术逐年推广应用对农业用水效率提升的影响,在一

定程度上高估了近年来的农业水足迹^[30-32]。因此,本文考虑到农业用水效率(即本地农业实际用水量 V_{ar} 与生产所需虚拟水 V_{av} 的比值)对农业水足迹的修正,得到以下公式:

$$W'_a = (V_{ar}/V_{av})W_a \quad (3)$$

式中 W'_a 为修正后的农业水足迹,亿 m^3 。

1.1.2 工业水足迹核算

工业产品种类繁多、生产原料用水统计困难、生产工艺差异较大,导致难以准确核算工业产品的水足迹。因此,现有研究在核算工业水足迹时大多仅考虑本地工业实体水部分,未考虑工业产品贸易带来的工业虚拟水净输入^[33]。本文尝试从工业产品消费额入手,结合年度万元工业增加值水耗核算消费端全口径的工业水足迹^[34-35]。

1.2 基于信息熵的系统结构分析方法

参考相关研究^[36-38],本文引入信息熵定量分析实体水和水足迹用水结构的演变规律。计算公式为

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i (\ln p_i) \quad (4)$$

式中: H 为信息熵; n 为用水类型总数; p_i 为第 i 种用水类型的用水量占用水总量的比例。信息熵越大,表明单一用水类型的优势性越弱,用水结构越均衡。以相邻阶段的熵增量 ΔH 来判断系统的演变趋势与均衡程度,当 $\Delta H > 0$ 时,系统演化为熵增过程,系统结构的复杂性增强,由非平衡态向平衡态发展,反之为熵减过程。

1.3 数据来源

本文收集整理1988—2019年的水资源开发利用和社会经济发展相关数据资料,主要包括4类:①北京市年度水资源可利用量与农业、工业、生活、生态用水量,来源于《北京市水资源公报》;②农业虚拟水计算中本地农畜产品消费量、生产量,来源于《北京统计年鉴》《北京区域统计年鉴》以及北京市宏观经济与社会发展基础数据库;③Penman公式与Cropwat 8.0模型计算所需参数根据联合国粮食与农业组织推荐的北京地区参数计算,并与现有相关成果进行对比修订;④工业虚拟水计算中社会消费额以及万元工业增加值水耗,来源于《北京统计年鉴》《北京市水务统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 实体水开发利用演变特征

2.1.1 总体演变规律

1988年以来,北京市水资源可利用量在20亿~60亿 m^3 范围内周期波动,1990年左右达到最高值59.34亿 m^3 ,2002年减少至历史最低值16.42亿 m^3 。

2010年左右,水资源可利用量逐步恢复至35亿 m^3 ,2015年南水北调工程调水进京后,年均水资源可利用量增加约10亿 m^3 ,接近历史最高水平。同水资源可利用量的波动变化相比,用水总量的年际变化不显著,维持在40亿 m^3 左右。

总体而言,北京市水资源开发利用情势得到不断优化,大致可以分为1988—2002年、2003—2014年和2015—2019年3个阶段,水资源可利用量与实际开发量逐步趋于平衡(图1)。第一阶段年均水资源过度开发量达9.55亿 m^3 ,地表水资源过度开发累计65.13亿 m^3 ,北京市重要地表水源地密云水库的蓄水量由32.59亿 m^3 减少到9.72亿 m^3 ,地下水资源过度开发累计76.34亿 m^3 ,地下水埋深由11.39 m下降至17.32 m。第二阶段年均水资源过度开发量减少至6.15亿 m^3 ,地表水资源基本收支平衡,地下水资源仍持续过度开发,地下水埋深进一步下降至25.66 m。第三阶段南水北调工程调水进京后,北京市水资源开发利用情势极大好转,年均水资源结余7.94亿 m^3 ,密云水库蓄水量和地下水埋深分别恢复至25.72亿 m^3 和22.71 m,地表水、地下水资源得到有效涵养。

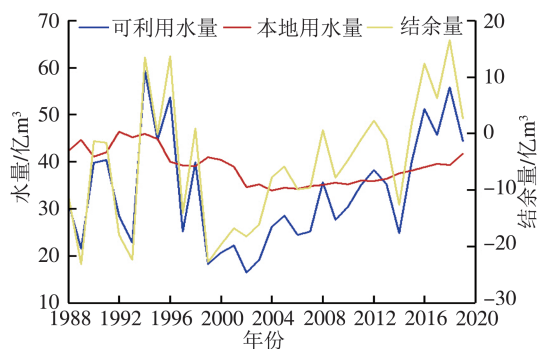


图1 1988—2019年北京市本地实体水资源开发利用情势
Fig.1 Development and utilization situation of local real water resources in Beijing from 1988 to 2019

2.1.2 用水结构演变规律

1988年以来北京市实体水的用水结构变化如图2所示,总体呈“两减两增”的变化规律。农业和工业用水量快速下降,分别由21.99亿 m^3 和14.04亿 m^3 减少至3.70亿 m^3 和3.30亿 m^3 ,在实体水中的占比分别由51.83%和33.09%降低至8.87%和7.91%;生活和生态用水量增加显著,分别上升至18.70亿 m^3 和16.00亿 m^3 。

“两减”充分说明了北京市产业不断向低耗水、高产值的方向发展。近年来北京逐步优化产业结构,疏解高耗水、低附加值产业,第一和第二产业占GDP的比例分别由1988年的9.04%和53.95%降低至2019年的0.32%和16.16%,农业和工业用水量分

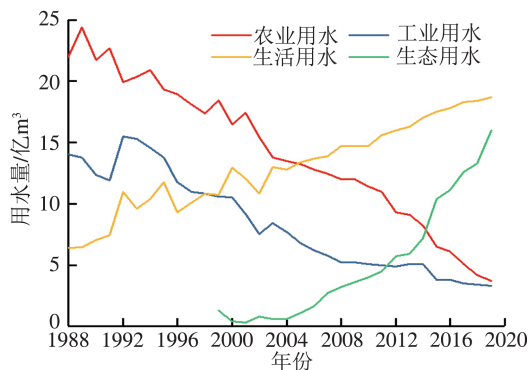


图2 北京市用水结构年际变化

Fig.2 Interannual variation of water utilization structure in Beijing

别以 0.57 亿 m^3/a 和 0.34 亿 m^3/a 的速度逐年递减。生活用水量的增加一方面由于常住人口的增加(由 1988 年 1 061 万人增加到 2019 年 2 153.6 万人),另一方面由于第三产业规模的快速增长(占 GDP 比例由 1988 年的 37.01% 增加到 2019 年的 83.52%)。与此同时,人均生活用水量得到有效控制,与 1988 年相比较仅增加 26.51 m^3 。在用水总量基本稳定的前提下,农业和工业压减的水量一方面支撑生活用水的适度增长,另一方面被用于补充生态环境用水。得益于再生水规模的逐年增长以及南水北调工程调水进京对供水水源的扩充,生态环境用水量由 1999 年的 1.29 亿 m^3 快速增加至 2019 年的 16.00 亿 m^3 ,远超过农业和工业用水量之和,成为北京第二大用水类型。

3 个阶段的用水结构统计结果如表 1 所示。第一阶段用水结构以农业用水为主(占比 46.37%);第二阶段突出对生活用水的保障(占比由第一阶段的 24.46% 提升至 41.24%);第三阶段则加强对生态环境用水的投入(占比由第二阶段的 10.17% 提升至 31.99%)。总体而言,1988 年以来北京市用水结构基本完成了从初级阶段向高级阶段的发展,即从农业用水占比高向各环节趋于合理的发展方向^[39],同时不同用水类型的变化趋势逐步稳定。

表1 北京市用水结构统计结果

Table 1 Statistical results of water utilization structure in Beijing

阶段	用水类型占比/%				信息熵/nat
	农业用水	工业用水	生活用水	生态用水	
第一阶段	46.37	28.61	24.46	1.79	1.06
第二阶段	32.18	15.96	41.24	10.17	1.22
第三阶段	13.04	9.03	45.94	31.99	1.17

1988 年以来实体水系统信息熵如图 3 和表 1 所示,第一和第二阶段信息熵由 1988 年的 0.99 nat 快速增加至 2013 年的 1.28 nat,增加速率为

0.01 nat/a,直观反映了由于生活用水和生态用水占比增加引起的用水结构向平衡态的发展。第三阶段信息熵快速减少至 2019 年的 1.14 nat,下降速率为 0.27 nat/a,反映了农业和工业所削减的水资源被进一步用于补充生态环境用水的过程,生活和生态用水已成为占有绝对优势的用水类型(两者占比之和超过 75%)。总体而言,第一阶段的用水结构中农业用水占比较大,生态用水占比极小,不同用水类型间差异较大;随着用水结构“两增两减”的逐步发展,不同用水类型差异逐渐降低;第三阶段北京市生活与生态用水总量不断上升,农业、工业用水占比被进一步压缩,用水结构的发展逐渐两极分化。目前以生活和生态用水为主导的用水格局是对北京市以第三产业发展为主导、水生态环境提升需求日益突出的响应。

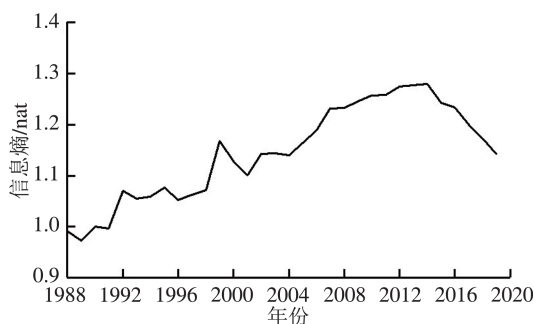


图3 北京市实体水系统信息熵年际变化

Fig.3 Interannual variation of information entropy of real water system in Beijing

2.2 水足迹演变特征

2.2.1 整体演变规律

在系统分析北京市本地实体水开发利用演变特征的基础上,核算农业、工业、生活和生态水足迹,从消费端出发,全面掌握水足迹系统结构演变过程。1988 年以来,北京市实体水利用量稳定在 40 亿 m^3 左右,而水足迹整体变化较为明显(图 4);第一阶段在 30 亿 ~ 40 亿 m^3 的范围内波动变化;第二、三阶

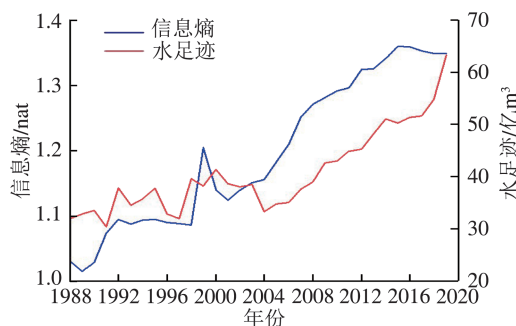


图4 北京市水足迹与信息熵年际变化

Fig.4 Interannual variations of water footprint and information entropy in Beijing

段由 38.43 亿 m^3 快速增加至 63.30 亿 m^3 , 增幅高达 1.46 亿 m^3/a 。

水足迹系统信息熵整体呈现快速上升后趋于稳定的变化趋势(图 4), 由 1988 年的 1.03 nat 增加至 2015 年的 1.36 nat, 增加速率为 0.01 nat/a (与实体水系统信息熵增加速率基本一致), 随后信息熵趋于稳定, 说明水足迹系统用水结构逐渐趋于均衡, 且目前已基本稳定。水足迹系统在考虑实体水的基础上将虚拟水引入其演变过程, 信息熵值整体高于实体水系统, 且在第三阶段表现出与实体水系统信息熵(图 3)相反的演变趋势, 说明采用水足迹的方法能够全面反映消费端的用水结构变化规律。

2.2.2 用水结构演变规律

从消费端核算的水足迹用水结构变化过程如图 5 所示, 较实体水而言, 水足迹用水结构变化整体更加平稳, 农业和工业水足迹分别在 11 亿 ~ 17 亿 m^3 和 9 亿 ~ 14 亿 m^3 的范围内波动, 农业和工业虚拟水净输入的增加填补了本地实体水快速减少产生的水资源缺口。生活和生态水足迹持续增长, 占比分别由第一阶段的 27.21% 和 1.82% 提升至第三阶段的 33.62% 和 23.26% (表 2)。

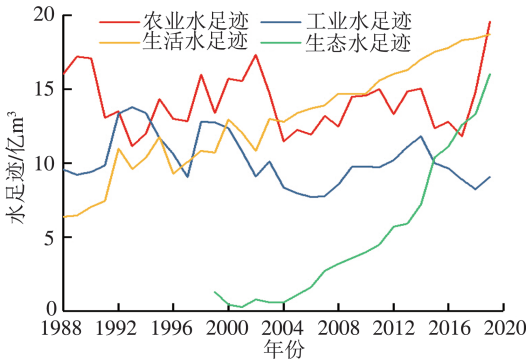


图 5 北京市各用水类型水足迹年际变化
Fig. 5 Interannual variations of water footprints of different types of water utilization in Beijing

表 2 北京市各用水类型水足迹平均占比
Table 2 Average proportions of water footprints of different types of water utilization in Beijing

阶段	用水类型占比/%			
	农业水足迹	工业水足迹	生活水足迹	生态水足迹
第一阶段	40.97	31.33	27.21	1.82
第二阶段	33.37	22.93	35.91	7.79
第三阶段	26.07	17.05	33.62	23.26

现有农业水足迹核算研究表明^[40-42], 北京市农业水足迹高达百亿 m^3 量级, 近年来仍居高不下。由于上述研究采用的单位农产品虚拟水定额为固定值, 未考虑农业节水技术的发展和推广应用对单位产品虚拟水定额的影响。通过年鉴数据统计分析可

得, 北京市农产品产量由 1988 年的 586.96 万 t 减少到 2019 年的 228.60 万 t, 同期农业用水量由 19.46 亿 m^3 减少至 3.69 亿 m^3 , 单位产量农产品的综合用水量降低了 51.4%, 农业节水效果显著(图 6), 2019 年北京农田灌溉水有效利用系数为 0.747, 处于全国前列。故在计算农产品虚拟水时, 需要引入式(3)中的修正系数以得到更加合理的农业水足迹核算成果。

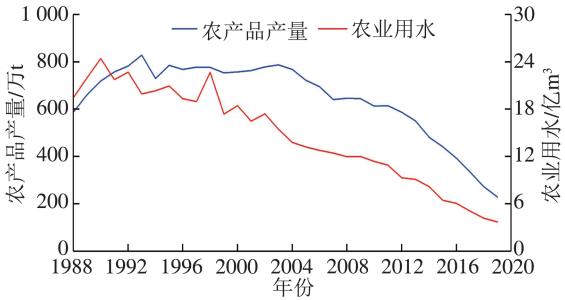


图 6 北京市农产品产量与农业用水量年际变化
Fig. 6 Interannual variations of agricultural production and agricultural water consumption in Beijing

与农业水足迹的变化规律类似, 1998 年以来, 北京市不断进行产业结构调整, 高耗水产业逐步向高产低耗的工业转型。万元工业增加值水耗由 1988 年的 634.33 m^3 减少至 2019 年的 7.78 m^3 , 总体降低 98.8%, 同期工业消费额由 150.9 亿元上升至 11640.2 亿元。故在满足工业消费需求快速增加的同时, 北京市工业水足迹基本稳定(图 7)。

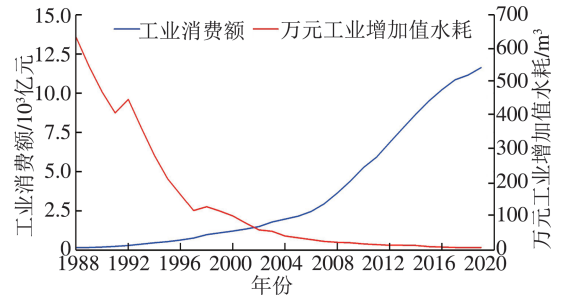


图 7 北京市工业消费额与万元工业增加值水耗年际变化
Fig. 7 Interannual variations of industrial consumption and water consumption per 10000 yuan industrial added value

农业和工业水足迹可以进一步分为实体水供给和虚拟水净输入两部分, 由图 8 可以看出, 北京市农业和工业实体水使用量不断下降, 虚拟水由净输出转变为净输入状态。随着北京市产业结构逐渐由第一、第二产业向第三产业转移, 农业和工业贸易由生产型向消费型转变, 第一阶段虚拟水年均净输出 6.60 亿 m^3 , 第二阶段年均净输入 5.33 亿 m^3 , 而第三阶段虚拟水年均净输入进一步增加至 14.79 亿 m^3 (表 3)。虚拟水的净输入拓展了北京市消费端的水

资源供给,极大缓解了城市用水紧张局面,但北京市对虚拟水净输入的依赖程度在逐年增加,农业、工业虚拟水使用量在农业和工业水足迹中的占比分别增至 64.3% 和 61.2%。

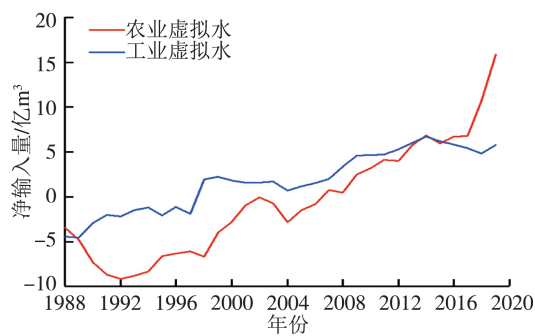


图 8 北京市农业、工业虚拟水净输入量

Fig. 8 Virtual water net inputs of agriculture and industry in Beijing

表 3 北京市农业、工业虚拟水与实体水的使用量

Table 3 Virtual water and real water consumptions in agriculture and industry in Beijing

阶段	实体水/亿 m ³		虚拟水净输入/亿 m ³	
	农业	工业	农业	工业
第一阶段	20.15	12.17	-5.61	-0.99
第二阶段	11.71	5.87	1.80	3.53
第三阶段	5.09	3.56	9.18	5.61

2.3 水资源环境效应评价

为了定量评估虚拟水不断增长的水资源环境效应,参考水资源系统评价研究的相关方法^[43-45],引入水资源压力指数(水足迹与水资源可利用量的比值),对北京市水资源环境效应进行评价,水资源压力指数大于 1.0 时,水资源系统处于超载状态(图 9)。

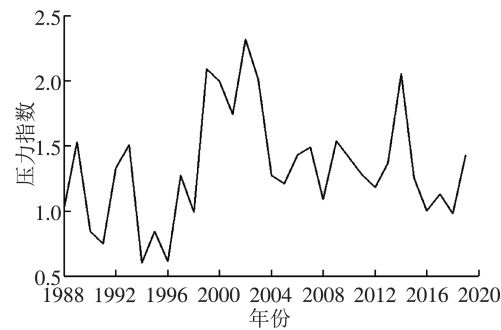


图 9 水资源压力指数变化情况

Fig. 9 Variation of water resources stress index

由图 9 可见,北京市水资源系统常年处于超载状态。1988—1998 年水资源压力指数在 1.0 附近波动,水资源系统处于超载的临界状态;1999—2003 年水资源压力指数均值为 2.0,处于严重超载状态;2004—2019 年水资源压力指数在 1.2 附近波动,水资源系统的超载程度得到一定缓解。虽然 2004—

2019 年北京市通过南水北调、再生水大规模利用等举措显著拓展了水资源可利用量,有效缓解了水资源系统严重超载的态势,但由于水足迹的逐年增长(图 4),水资源压力指数仍将处于波动上升趋势。故北京市在引入虚拟水缓解本地用水压力的同时,需考虑水资源系统的生态安全与发展的可持续性,推动水资源系统与经济社会相匹配,得到良性发展。另一方面,北京市通过不断引入虚拟水以满足本地生产、消费各环节的水资源消耗,从而置换出部分本地实体水资源,并用于河湖补水、水生态恢复、地下水回补等,促进了城市生态环境可持续发展,获得了显著的资源生态环境效益。

2.4 讨论

与其他城市不同,北京市面临的水资源压力尤为明显,随着水足迹逐年上升,如今“紧平衡”的水资源情势即将被打破。随着产业结构升级和节水技术水平的提升,2000 年以来北京市的用水总量得到有效控制,用水结构持续优化,水资源开发利用状况持续好转。但由于北京市的第一、第二产业持续向第三产业转移,导致本地农业、工业产品生产量锐减与消费端需求量持续增长的矛盾加剧,北京市对虚拟水输入的依赖程度显著增加^[46]。在本地实体水开发利用总量得到有效控制的基础上,水足迹的持续增长支撑了北京市的产业结构升级与社会经济的快速发展,但需重视水资源系统压力超载问题。因此,在北京市水资源相关研究中,不仅应考虑实体水的开发利用与优化配置,还需重点关注虚拟水输入对本地水置换、用水结构优化和社会经济发展支撑的作用以及过度依赖虚拟水可能引起的风险,以水足迹为对象开展全口径系统化研究。

另外,在虚拟水核算中,产品种类选择、虚拟水定额核定以及生产量、消费量与贸易量确定等环节都涉及较为复杂的数据资料收集与计算方法选取等问题,主观判断对虚拟水核算结果影响较大。以孙艳芝等^[41]和王丽川等^[42]的计算结果为例,2012 年水足迹核算结果分别为 352.6 亿 m³ 和 116.49 亿 m³,计算结果差异比较明显。此外,现有基于固定用水定额的虚拟水核算方法不能反映用水效率提升的影响,可能导致对虚拟水的高估。因此,有必要基于各行业统计年鉴及投入产出表等权威数据,综合国内外虚拟水定额确定方法,考虑各类产品生产中的用水效率变化情况,探索出一套标准化的虚拟水核算方法,为北京市水足迹研究提供更准确的基础数据支撑。

3 结论

a. 北京市实体水开发利用情势不断优化,大致

可划分为 1988—2002 年、2003—2014 年和 2015—2019 年 3 个阶段,由水资源年均过度开发 9.55 亿 m^3 演变至年均结余 7.94 亿 m^3 。用水总量稳定在 40 亿 m^3 左右,用水结构总体呈“两减两增”的变化规律,形成了生活用水保障为主、生态用水需求提升为辅的用水格局,第三阶段生活和生态用水占比达到 77.93%。

b. 北京市水足迹第一阶段稳定在 35 亿 m^3 左右,第二、第三阶段分别快速增加至 51.04 亿 m^3 、63.30 亿 m^3 。在农业和工业实体水快速减少的背景下,虚拟水净输入的增加拓展了北京市消费端的水资源供给,极大缓解了用水紧张局面,但北京市对虚拟水净输入的依赖程度逐年增加。第三阶段的农业、工业虚拟水在农业、工业水足迹中的占比分别增至 64.3% 与 61.2%,特别是 2019 年农业虚拟水占比高达 81.1%,农产品消费严重依赖外部输入。水资源压力指数高且仍有上升趋势,水资源系统常年处于严重超载状态。

c. 实体水和水足迹系统信息熵在第一和第二阶段同步增加,分别从 0.99 nat 和 1.03 nat 增至 1.28 nat 和 1.34 nat,说明用水结构逐渐趋于均衡,随后实体水系统信息熵在第三阶段快速下降至 1.14 nat,生活和生态用水成为占绝对优势的用水类型,而水足迹系统信息熵在第三阶段保持稳定,水足迹的用水结构较为均衡。

参考文献:

[1] 童玉芬. 北京市水资源人口承载力的动态模拟与分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 42-47. (TONG Yufeng. Dynamic simulation and analysis of water resources population carrying capacity in Beijing[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(9): 42-47. (in Chinese))

[2] 杨静, 荆平, 高蝶, 等. 京津冀城市群水资源循环经济发展的障碍因子分析[J]. 中国农村水利水电, 2020(10): 131-136. (YANG Jing, JING Ping, GAO Die, et al. An analysis of the development obstacle factors of water resource recycling economy in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10): 131-136. (in Chinese))

[3] 韩雁, 张士锋, 吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2236-2246. (HAN Yan, ZHANG Shifeng, LYU Aifeng. Research on effect on water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region by water transfer[J]. Resources Science, 2018, 40(11): 2236-2246. (in Chinese))

[4] 郭旭宁, 郦建强, 李云玲, 等. 京津冀地区水资源空间均衡评价及调控措施[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 62-

66. (GUO Xuning, LI Jianqiang, LI Yunling, et al. Water resources spatial equilibrium evaluation and regulation measures in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 62-66. (in Chinese))

[5] 洪思扬, 王红瑞, 梁俊芬, 等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 102-111. (in Chinese))

[6] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water; otherwise our hydro-political futures would be impossible [C]//Priorities for water resources allocation and management. London: Overseas Development Administration, 1993: 13-26.

[7] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA Y Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products; value of water research report series No. 13 [R]. Delft: UNESCO-IHE, 2003.

[8] 陈俊旭, 张士锋, 华东, 等. 基于水足迹核算的北京市水资源保障研究[J]. 资源科学, 2010, 32(3): 528-534. (CHEN Junxu, ZHANG Shifeng, HUA Dong, et al. A study on water resources guarantee in Beijing City based on water footprint evaluation[J]. Resources Science, 2010, 32(3): 528-534. (in Chinese))

[9] 程先, 孙然好, 陈利顶, 等. 基于农牧业产品和生活用水的京津冀地区水足迹时空特征研究[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4461-4472. (CHENG Xian, SUN Ranhao, CHEN Liding, et al. Spatial and temporal patterns of the water footprint in Beijing-Tianjin-Hebei region with consideration of crop and animal products and domestic water[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4461-4472. (in Chinese))

[10] 王艳阳, 王会肖, 蔡燕. 北京市水足迹计算与分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 954-960. (WANG Yanyang, WANG Huixiao, CAI Yan. Calculation and analysis of water footprint in Beijing City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 954-960. (in Chinese))

[11] ZHAO D D, TANG Y, LIU J G. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 919-928.

[12] 韩宇平, 贾冬冬, 黄会平, 等. 基于通径分析的海河流域冬小麦水足迹及影响因素[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 6-13. (HAN Yuping, JIA Dongdong, HUANG Huiping, et al. Water footprint of winter wheat and its influencing factors in Haihe River Basin based on path analysis[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 6-13. (in Chinese))

[13] 魏怡然, 邵玲, 张宝刚, 等. 北京市虚拟水消费与贸易

- [J]. 自然资源学报, 2019, 34 (9): 1962-1973. (WEI Yiran, SHAO Ling, ZHANG Baogang, et al. Virtual water consumption and trade of Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (9): 1962-1973. (in Chinese))
- [14] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. The Bell System Technical Journal, 1948, 27 (3): 379-423.
- [15] 贾程程, 张礼兵, 徐勇俊, 等. 基于信息熵的山东省用水结构与产业结构协调性分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34 (5): 17-19. (JIA Chengcheng, ZHANG Libing, XU Yongjun, et al. Study on water consumption structure and industrial structure harmony of Shandong Province based on information entropy [J]. Water Resources and Power, 2016, 34 (5): 17-19. (in Chinese))
- [16] 甘丰余, 邢侨芬, 林振豪, 等. 海南近期用水结构变化规律分析[J]. 中国农村水利水电, 2021 (3): 153-157. (GAN Fengyu, XING Qiaofen, LIN Zhenhao, et al. An analysis of the change law of water utilization structure in Hainan [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021 (3): 153-157. (in Chinese))
- [17] 易晶晶, 陈志和, 杨创鹏, 等. 基于信息熵原理的区域用水结构时空演变特征研究[J]. 水文, 2019, 39 (4): 12-17. (YI Jingjing, CHEN Zhihe, YANG Chuangpeng, et al. Analysis of spatiotemporal characteristics of regional water utilization structure based on the information entropy [J]. Journal of China Hydrology, 2019, 39 (4): 12-17. (in Chinese))
- [18] OEL P, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The external water footprint of the netherlands: geographically-explicit quantification and impact assessment [J]. Ecological Economics, 2009, 69 (1): 82-92.
- [19] 张凡凡, 张启楠, 李福夺, 等. 中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34 (5): 934-944. (ZHANG Fanfan, ZHANG Qinan, LI Fuduo, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34 (5): 934-944. (in Chinese))
- [20] 杨志峰, 支援, 尹心安. 虚拟水研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35 (5): 181-190. (YANG Zhifeng, ZHI Yuan, YIN Xinan. Research advances in virtual water [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5): 181-190. (in Chinese))
- [21] 吴普特, 高学睿, 卓拉, 等. 过程水文学的方法框架与学科体系探讨[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (1): 1-7. (WU Pute, GAO Xuerui, ZHUO La, et al. Methodological framework and discipline system for process hydrology [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (1): 1-7. (in Chinese))
- [22] 陈莎, 吕鹤, 李素梅, 等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37 (4): 22-28. (CHEN Sha, LYU He, LI Sumei, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (4): 22-28. (in Chinese))
- [23] 孙才志, 刘王玉, 陈丽新, 等. 基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J]. 生态学报, 2010, 30 (5): 1312-1321. (SUN Caizhi, LIU Yuyu, CHEN Lixin, et al. The spatial-temporal disparities of water footprints intensity based on Gini coefficient and Theil index in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30 (5): 1312-1321. (in Chinese))
- [24] 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))
- [25] 刘静, 余钟波. 江苏省农产品水足迹与虚拟水流动及其环境影响[J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (4): 320-326. (LIU Jing, YU Zhongbo. Water footprint and virtual water flow of agricultural products in Jiangsu and their environmental impacts [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (4): 320-326. (in Chinese))
- [26] HOEKSTRA M A Y. A global assessment of the water footprint of farm animal products [J]. Ecosystems, 2012, 15 (3): 401-415.
- [27] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAINA A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [J]. Social and Environmental Accountability Journal, 2011, 31 (2): 181-182.
- [28] 邢浩翰, 李保明, 郑炜超, 等. 畜禽产品水足迹研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26 (6): 196-205. (XING Haohan, LI Baoming, ZHENG Weichao, et al. Research progress on water footprint of livestock and poultry products [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26 (6): 196-205. (in Chinese))
- [29] 吴芳, 王浩, 杨陈, 等. 中国农业水足迹时空差异和流动格局研究[J]. 人民长江, 2019, 50 (6): 104-110. (WU Fang, WANG Hao, YANG Chen, et al. Study on spatial-temporal change and flow pattern of agricultural water footprint in China [J]. Yangtze River, 2019, 50 (6): 104-110. (in Chinese))
- [30] 陈岩, 童国平, 王蕾. 淮河流域农业灰水足迹效率的时空分布与驱动模式[J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 60-66. (CHEN Yan, TONG Guoping, WANG Lei. Spatial-temporal distribution and driving models of agricultural grey water footprint efficiency in the Huai River Basin [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 60-66. (in Chinese))
- [31] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及

- 虚拟水流动影响评价[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))
- [32] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消耗生态足迹和水足迹[J]. 资源科学, 2011, 33(6): 1145-1152. (WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei. Ecological footprint and water footprint of food consumption in Beijing [J]. Resources Science, 2011, 33(6): 1145-1152. (in Chinese))
- [33] 李新生, 黄会平, 韩宇平, 等. 京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2): 40-48. (LI Xinsheng, HUANG Huiping, HAN Yuping, et al. Agricultural virtual water flow and its impacts on regional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. South-to-North Water Diversion and Water Science and Technology, 2019, 17(2): 40-48. (in Chinese))
- [34] 侯小洁. 基于水足迹理论的水资源承载力研究: 以武汉市为例[D]. 武汉: 华中师范大学, 2015.
- [35] 谭晖川. 重庆市工业水足迹变化特征分析与预测[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [36] 崔婧, 赵鹏宇, 步秀芹, 等. 基于信息熵的忻州市用水结构演变及其驱动力的因子分析[J]. 节水灌溉, 2015(6): 58-61. (CUI Qiang, ZHAO Pengyu, BU Xiuqin, et al. Analysis of water utilization structure evolution and its driving forces based on information entropy in Xinzhou [J]. Water Saving Irrigation, 2015(6): 58-61. (in Chinese))
- [37] 陈美琳, 陈磊, 夏琳琳, 等. 广东省生产用水结构时空变化及影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(1): 92-102. (CHEN Meilin, CHEN Lei, XIA Linlin, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of productive water structure in Guangdong Province [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2021, 19(1): 92-102. (in Chinese))
- [38] 张黎鸣, 赵岩, 王红瑞, 等. 基于信息熵与灰关联的西安市城市经济与用水结构的耦合度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 187-192. (ZHANG Liming, ZHAO Yan, WANG Hongrui, et al. Study of the relationship between urban economic development and the utilization of water resources in Xi'an City based on information entropy and grey correlation [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 187-192. (in Chinese))
- [39] 吴丹. 中国经济发展与水资源利用的演变态势、“脱钩”评价与机理分析: 以中美对比分析为例[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2016, 18(1): 47-53. (WU Dan. An analysis of evolution trend and decoupling evaluation mechanism of economic development and water resource utilization in China based on comparative analysis of China and America [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2016, 18(1): 47-53. (in Chinese))
- [40] 李新生. 京津冀农业水足迹协调度与调控研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- [41] 孙艳芝, 鲁春霞, 谢高地, 等. 北京市水足迹[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 524-531. (SUN Yanzhi, LU Chunxia, XIE Gaodi, et al. Water footprint in Beijing[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 524-531. (in Chinese))
- [42] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价[J]. 南水北调与水利科技, 2021, 19(4): 680-688. (WANG Lichun, HOU Baodeng, ZHOU Yuyan, et al. Evaluation of water resources utilization based on water footprint theory in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(4): 680-688. (in Chinese))
- [43] 刘楚烨, 赵言文, 马群宇, 等. 基于水足迹理论的江苏省水资源可持续利用评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 313-320. (LIU Chuye, ZHAO Yanwen, MA Qunyu, et al. Evaluation of sustainable utilization of water resources in Jiangsu Province based on water footprint theory[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 313-320. (in Chinese))
- [44] 高玉琴, 吴迪, 刘海瑞, 等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 1-8. (GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 1-8. (in Chinese))
- [45] 王保乾, 严蕾. 长江经济带水足迹与经济高质量发展的脱钩效应[J]. 水利经济, 2022, 40(1): 6-12. (WANG Baoqian, YAN Lei. Decoupling effects of water footprint and high-quality economic development in Yangtze River Economic Belt [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2022, 40(1): 6-12. (in Chinese))
- [46] 曹永强, 李玲慧. 基于水资源综合模拟与调配一体化模型的北京市水资源模拟分析[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 25-31. (CAO Yongqiang, LI Linghui. Simulation analysis of water resources in Beijing based on integrated comprehensive water simulation and allocation model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(6): 25-31. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-07-07 编辑: 施业)