

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2021.0071

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(中英文),2021,19(4):680-688. WANG L C, HOU B D, ZHOU Y Y, 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)

基于水足迹理论的北京市水资源利用评价

王丽川^{1,2}, 侯保灯¹, 周毓彦¹, 陈晓清^{1,2}, 王欣^{1,3}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁 530004; 3. 华北水利水电大学水利学院, 郑州 450046)

摘要:为全面客观评价城市化进程中水资源利用状况,揭示水资源利用过程中的驱动因子,以北京市为例,基于水足迹理论与 LMDI 模型,分析计算 2003—2018 年水足迹变化以及经济、技术和人口对水足迹变化的驱动效应。结果显示:北京市总水足迹经历了 2 个阶段,第 1 阶段在 2003—2011 年为波动阶段,第 2 阶段在 2012—2018 年为下降阶段。水足迹变化总体呈良性发展,但输入依赖度均大于 25%,需要进一步优化内部水资源利用效率和产业结构,保障水资源生态安全;水资源可利用增长指数持续增加,可持续性增强,生态安全有所改善,但仍处于严重超载状态;对北京市水资源利用量变化起决定性的驱动因素是技术效应,其次是经济效应,人口效应占比最小。城市发展过程中应注意经济发展和人口增加带来的用水量的增加,重视发展节水科技,转变水资源的开发利用方式,从而实现水资源可持续发展。

关键词:水足迹;驱动因素;LMDI;北京市;水资源利用

中图分类号:TV213.9 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



水资源对于社会的深入发展具有积极作用,为人类的生活、生产提供保证^[1]。近年来由于国内城市化进程的快速发展^[2]、城市人口越来越多^[3],各行业用水量涨幅较大^[4-5]。实体水在水资源消费中占比较少,更多的是存在于产品和服务中的虚拟水^[6]。水足迹是以虚拟水理论为基础的,旨在探究公众消费及服务过程中的总水量,包括看不见的水^[7]。因此,为了定量评价城市化过程中实体水和虚拟水的消耗,明确在城市化过程中水资源的开发利用程度,提高水资源利用效率,引入水足迹理论及相关计算方法来研究水资源利用状况,在构建水资源利用体系方面有着积极的作用。

利用水足迹理论评价水资源利用状况不仅可以反映实体水状况,还可以反映虚拟水及其贸易状况,对水资源利用评价更为全面、客观^[8-9]。在 2002 年

水足迹概念由荷兰学者 Hoekstra^[10]提出,此后作为水资源利用评价的新理论被广泛应用。国外学者对此开展了大量的研究;Rui 等^[11]构建了水足迹结构、效益、生态安全及其稳定性的评价指标,验证了水足迹理论对水资源利用评价的可行性和合理性;Muratoglu^[12]计算了流域尺度农业、畜牧业、工业和生活的蓝色和绿色水足迹,研究成果预计将提高流域水资源利用效率和可持续性;Long 等^[13]测定了新疆作物水足迹变化,分析了农业增长与水资源利用之间的关系;Reza 等^[14]基于水足迹网格方法和生命周期评价框架,对钢铁生产水资源利用进行评价。国内学者应用水足迹理论对水资源利用评价也进行了一定的研究:操信春等^[15]基于水足迹理论对稻田水资源利用效率进行综合评价;高妍等^[16]对我国纺织工业水足迹强度和水生产率进行测算,对其水足

收稿日期:2020-08-16 修回日期:2021-02-06 网络出版时间:2021-03-03

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210303.0922.002.html

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0406506);国家自然科学基金(51625904)

作者简介:王丽川(1995—),男,北京人,主要从事水文水资源研究。E-mail:879348309@qq.com

通信作者:侯保灯(1988—),男,安徽蒙城人,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究,E-mail:houbadeng@163.com

迹强度和水资源利用效率进行评价; 雒新萍等^[17]基于 CROPWAT 模型分析了中国典型农作物的生产水足迹, 揭示了农作物生产过程中用水需求和区域分布特点; 乔扬源等^[18]基于水足迹理论分析了山西省及各行政区各行业用水需求, 并深入剖析了其用水情况与经济增长脱钩状况。可见, 在水资源利用评价中应用水足迹理论的研究成果较为丰富, 但研究尺度多集中于全国、省域范围^[19-22], 对城市尺度研究较少。北京市是典型的水资源消费城市, 尚未有从水足迹理论角度开展水资源利用评价的研究。

因此, 有必要基于水足迹理论, 评价城市实体水、虚拟水及贸易的水资源利用状况, 弥补单纯从常规尺度研究水资源利用的局限性。基于水足迹理论构建北京市水资源利用综合评价指标体系, 分析北京市 2003—2018 年水资源利用水足迹, 同时应用 LMDI 模型对结构效应、技术效应和人口效应等不同因素进行分解, 分析北京市水足迹变化的驱动力因素, 以期实现北京市可持续的水资源利用。

1 研究区概况及数据来源

北京市位于我国华北地区, 处于山脉与平原交接部位, 北京市降水多集中于 7、8 月, 是典型的大陆性季风气候。2018 年全市常住人口规模为

2 154.2 万人, 城镇化率达到 86.5%。北京市全年水资源总量为 35.5 亿 m^3 , 其中地表水和地下水资源量占比分别为 40.3% 和 59.7%。北京市水资源主要依靠外调水, 全市总用水量为 39.3 亿 m^3 , 其中生活、生态用水量占比分别为 46.8% 和 34.1%。全市万元工业增加值用水量不足全国的 1/20, 为 8.19 $\text{m}^3/\text{万元}$; 万元 GDP 用水量不足全国的 1/25, 为 14.1 $\text{m}^3/\text{万元}$ 。全市粮食总产量 34.14 万 t, 果类生产 49.89 万 t, 肉类生产 17.5 万 t。文中的数据大多出自年鉴以及水资源公报等。

2 研究方法

2.1 水足迹计算方法

水足迹可分为内部、外部水足迹。内部水足迹 (W_I) 分为四个部分: 生活用水量用 D 表示; 工业虚拟用水消费量用 I 表示; 农业虚拟水消费量用 A 表示; 生态用水量用 E 表示。外部水足迹 (W_E) 分为两个部分: 虚拟水输入量用 V_E 表示; 虚拟水输出量用 V_I 表示^[23-24]。水足迹计算公式为

$$W_T = W_I + W_E = D + I + A + E + V_E - V_I \quad (1)$$

在内部水足迹中, 农业虚拟水消费量根据农作物的用水量而定, 本研究采用单位产品虚拟含水量乘以农产品产量表示。根据北京市农作物种植结构, 挑选 15 种农-畜产业产品。根据已有的相关成果^[18,24], 单位产品虚拟含水量见表 1。

表 1 北京主要农-畜产业单位产品虚拟水含量

Tab. 1 Virtual water content per unit product of main agricultural and livestock industries in Beijing

产品	虚拟水含量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	产品	虚拟水含量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	产品	虚拟水含量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$
稻谷	1 321	中药药材	391	桃	910
冬小麦	690	蔬菜及食用菌	220	猪肉	5 455
玉米	801	瓜类及草莓	158	牛肉	13 290
薯类	276	苹果	803	羊肉	5 799
大豆	228	梨	920	牛奶	1 072
棉花	4 029	葡萄	608	禽类	3 094
油料	220	柿子	967	水产	5 000

引用《北京市水资源公报》数据确定以实体水为主的北京市生态环境、居民生活和工业用水量。对于虚拟水贸易量来说主要有 2 个方面: 一是进口水量; 二是出口水量。因为其虚拟水含量不能精确计算, 故采用单位 GDP 耗水量乘以进出口贸易量估算。

2.2 LMDI 模型的水足迹驱动力因素分析

在计算时, LMDI 模型不会出现无法分解的残差, 使 0 值的产生得以规避, 所以, 能够对因子影响研究对象的情况进行评估^[21,24]。本文分析北京市

水足迹变化的人口 (P_e)、经济 (A_e) 和技术效应 (T_e) 等 3 个方面, 探讨北京市水足迹变化的驱动因素。水足迹总量表达式为

$$W_T = \sum_t W_{T_t} = \sum_t P_t \times \frac{G_t}{P_t} \times \frac{W_{T_t}}{G_t} \quad (2)$$

式中: W_{T_t} 为第 t 年水足迹; P_t 为第 t 年人口数; G_t 为第 t 年 GDP。

$$\Delta W_T = W_T - W_{T_0} = P_e + A_e + T_e \quad (3)$$

$$P_e = \Delta W_T \sum_t (\ln P_t - \ln P_0) / \ln \frac{W_T}{W_{T_0}} \quad (4)$$

$$A_e = \Delta W_T \sum_t (\ln \frac{G_t}{P_t} - \ln \frac{G_0}{P_0}) / \ln \frac{W_{T_t}}{W_{T_0}} \quad (5)$$

$$T_e = \Delta W_T \sum_t (\ln \frac{W_{T_t}}{G_t} - \ln \frac{W_{T_0}}{G_0}) / \ln \frac{W_{T_t}}{W_{T_0}} \quad (6)$$

2.3 水足迹利用状况评价指标

根据相关研究成果^[25-26],基于水足迹理论对北京市水资源利用评价指标体系进行构建。指标体系主要分为水足迹的结构、可持续性、生态安全和效益等 4 个方面。结合北京市的具体情况,进

一步分为 14 个具体指标,形成北京市水资源利用状况评价指标体系,各指标、计算方法与含义见表 2。

3 结果分析

3.1 北京市水足迹量时序变化分析

根据北京市 2003—2018 年水资源状况,计算北京市水足迹量,结果见表 3、图 1。

表 2 北京市水足迹利用评价体系

Tab. 2 Evaluation system of water resources utilization in Beijing

评价指标		计算方法	含义	
水足迹结构指标	水资源进口依赖度 W_D	$E/W_T \times 100\%$	城市对外部水源的依赖度	
	水资源自给率 W_{SS}	$I/W_T \times 100\%$	城市本地水源使用程度	
	水足迹增长指数 W_{FPR}	$(W_{T_2} - W_{T_1})/W_{T_1}$	城市用水量变化程度	
	水足迹可持续性指标	可用水资源增长指数 W_{AR}	$(W_{A_2} - W_{A_1})/W_{A_1}$	城市可用水量变化程度
水足迹指标	水资源可持续利用指数 W_{SI}	$ W_{FPR} / -W_A $	城市水资源可持续利用性	
	水资源生态安全指标	水资源匮乏指数 W_S	$(W_T/W_A) \times 100\%$	城市水源紧缺状况
水足迹效益指标	水资源压力指数 W_P	$(I+V_E)/W_A$	城市需水量对可用水源作用强度	
	内部效益	人均水足迹	W_T/P_T	人均水足迹占有量
		水足迹经济效益	G/W_T	万元 GDP 水足迹用量
		水资源负载指数 C	$k \sqrt{P_T} \times G/W_T$	水资源开发利用水平与人口和经济的关系
	外部效益	水足迹净贸易量	$V_E - E$	在贸易中水资源的作用
		水资源贡献率	$(V_E - E)/W_A$	城市可利用水资源量贡献于其他区域的水平

注: W_A 为可用水资源量; G 为北京市国内生产总值; T_P 为区域人口总数; 其余符号同前。

表 3 北京市 2003—2018 年水足迹构成

Tab. 3 Composition of water footprint in Beijing from 2003 to 2018

年份	内部水足迹/亿 m^3				外部水足迹/亿 m^3		总水足迹/亿 m^3	人均水足迹/ m^3
	农业	工业	生活	生态	输出虚拟水	输入虚拟水		
2003	64.30	7.65	12.74	0.95	13.36	40.85	113.13	776.99
2004	64.63	7.66	12.38	1.00	13.73	49.38	121.33	812.67
2005	62.35	6.80	13.38	1.10	12.73	39.03	109.93	714.78
2006	54.39	6.20	13.70	1.62	13.25	41.97	104.63	661.78
2007	54.48	5.75	13.89	2.72	14.01	41.18	104.01	636.94
2008	54.75	5.20	14.70	3.20	13.53	50.40	114.73	676.84
2009	55.59	5.20	14.70	3.60	9.64	33.14	102.59	584.58
2010	53.88	5.06	14.71	3.97	9.39	41.68	109.90	560.15
2011	54.50	5.01	15.57	4.47	8.49	47.50	118.57	587.27
2012	53.33	4.89	16.01	5.67	7.56	44.15	116.49	563.01
2013	51.77	5.12	16.25	5.92	7.31	42.48	114.23	540.10
2014	48.21	5.09	16.98	7.25	6.73	38.12	108.91	506.10
2015	45.60	3.85	17.47	10.43	5.64	27.28	98.99	455.94
2016	41.07	3.84	17.82	11.10	5.19	23.01	91.65	421.75
2017	35.71	3.50	18.30	12.70	5.59	25.32	89.95	414.31
2018	26.61	3.30	18.40	13.40	6.32	28.91	84.29	391.33

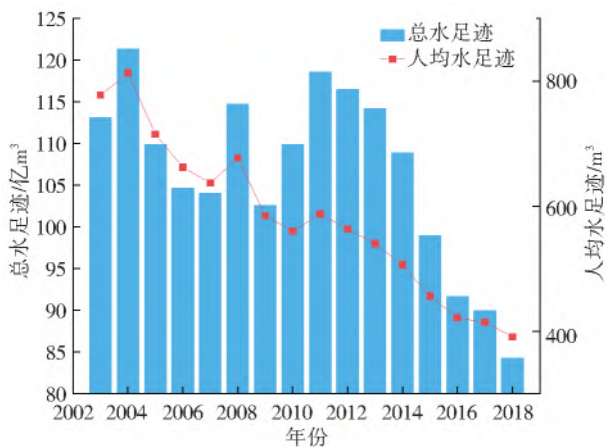


图1 北京市 2003—2018 年总水足迹与人均水足迹

Fig.1 Total water footprint and per capita water footprint of Beijing from 2003 to 2018

由图 1 和表 3 可以看出,北京市水足迹在 2003—2011 年总体呈降低趋势,最大值出现在 2004 年,为 121.33 亿 m^3 ,在 2018 年达到最小值,为 84.29 亿 m^3 。总水足迹在 2011 年之后下降幅度较大,多年平均下降率为 4.7%。人均水足迹总体呈降低趋势,最大值出现在 2004 年,为 812.67 m^3 ;最小值出现在 2018 年,为 391.33 m^3 。人均水足迹多年平均下降率为 5.8%。这说明近年来,水足迹结构改变、节水行动的实施提升了城市的水资源利用效率,同时外调水量增加显著抑制了本地水资源的消耗。

由于北京市近年来退耕还林政策的实施,区域内农田面积锐减,林业面积增加,农业水足迹呈连年下降趋势。2003 年农业水足迹为 64.30 亿 m^3 ,至 2018 年农业水足迹下降至 26.61 亿 m^3 ,下降了 58.6%;生态水足迹呈连年上升趋势,2003 年生态水足迹为 0.95 亿 m^3 ,2018 年生态水足迹上升至 13.40 亿 m^3 ,多年平均增长率为 20.5%。北京市人口在 2003—2011 年增长幅度较大,从 1 456 万增长至 2 019 万;受政策影响,2011—2018 年人口趋于平缓;但北京市生活水足迹量在 2003—2018 年总体上呈显著上升趋势,从 12.74 亿 m^3 增长至 18.40 亿 m^3 。由于北京市产业结构的优化,第一、二产业产值占比逐步减少,第三产业产值占比稳步增加,北京市工业水足迹呈下降趋势,从 2003 年 7.65 亿 m^3 降低至 3.30 亿 m^3 。北京市输入贸易额显著大于输出贸易额,因此输入虚拟水量大于输出虚拟水量;但在节水政策的促进下,在贸易额不断增加的情况下,单位用水量连续降低,节水效益明显。

3.2 北京市水足迹结构分析

采用水资源自给率和水资源输入依赖度指标对北京市水足迹结构进行分析,分析北京市对外部水

源与内部水源的依赖程度,结果见表 4。

表 4 北京市 2003—2018 年水足迹结构

Tab.4 Water footprint structure of Beijing from 2003 to 2018

年份	内部水足迹/亿 m^3	外部水足迹/亿 m^3	水资源自给率/%	水资源输入依赖度/%
2003	85.64	27.49	63.9	36.1
2004	85.67	35.65	59.3	40.7
2005	83.63	26.30	64.5	35.5
2006	75.91	28.72	59.9	40.1
2007	76.84	27.17	60.4	39.6
2008	77.85	36.87	56.1	43.9
2009	79.09	23.50	67.7	32.3
2010	77.62	32.29	62.1	37.9
2011	79.55	39.01	59.9	40.1
2012	79.90	36.59	62.1	37.9
2013	79.06	35.17	62.8	37.2
2014	77.58	31.39	65.0	35.0
2015	77.35	21.64	72.4	27.6
2016	73.83	17.82	74.9	25.1
2017	70.21	19.73	71.8	28.2
2018	61.71	22.59	65.7	34.3

由表 4 可以看出,2003—2018 年北京市内部水足迹总体呈下降趋势,最低值在 2018 年为 55.39 亿 m^3 ,最高值在 2012 年为 72.34 亿 m^3 。外部水足迹也呈波动下降趋势,最高值在 2008 年为 50.40 亿 m^3 ,最低值在 2016 年为 23.01 亿 m^3 ,相比于 2003 年 40.85 亿 m^3 降低了 25.32 亿 m^3 。水资源自给率总体呈上升趋势,至 2015 年自给率超过 70%,相应的水资源进口依赖程度呈下降趋势。这表明北京市水资源结构发展呈良性趋势,用水量显著减少,对进、出口产品结构进行了合理优化,但对进口需求依赖程度仍然相对较高,需要进一步优化本地水资源,使其发挥更大的经济效益。

3.3 北京市水足迹可持续性分析

采用 W_{FPR} 、 W_{AR} 和 W_{SI} 3 个指标对北京市水资源可持续状态和能力进行判定:当 $W_{FPR} < 0$, $W_{AR} > 0$ 时为可持续状态;当 $W_{FPR} < 0$, $W_{AR} < 0$ 时, $W_{SI} < 1$ 为不可持续状态, $W_{SI} > 1$ 为可持续状态;当 $W_{FPR} > 0$, $W_{AR} < 0$, 时为不可持续状态;当 $W_{FPR} > 0$, $W_{AR} > 0$ 时, $W_{SI} > 1$ 为不可持续状态, $W_{SI} < 1$ 为可持续状态。结果见表 5。

由表 5 可以看出:北京市水足迹增长指数负值居多,仅 2004、2008、2010 和 2011 年为正值,最小值在 2009 年为 -0.106;可利用水资源增长指数均为

正值,最大值为 0.121,最小值为 0.001;水资源可持续状态在 2003—2011 年不稳定,在 2012 年及之后年份均呈可持续状态。以上结果表明北京市可利用水资源趋势总体较好,2003—2011 年受经济发展、人口增加等影响,水资源利用状态较不稳定。在各项引调水工程的建设、水资源管理制度及节水行动的实施下,2011—2018 年水资源利用效率不断增加,加之人口增长趋于稳定,水资源均为可持续状态。结果表明在城市化过程中,北京市水资源可持续发展已经稳定,在各项与水有关的政策制度的推动下,大大提高了北京市水资源利用效率,促使北京市水资源可持续性逐步呈良性发展。

表 5 北京市 2003—2018 年水资源可持续状态

Tab. 5 Sustainable state of water resources of Beijing from 2003 to 2018

年份	水足迹增长指数	可利用水资源增长指数	水源可持续利用指数	状态
2004	0.073	0.001	158.139	不可持续
2005	-0.094	0.024		可持续
2006	-0.048	0.092		可持续
2007	-0.006	0.012		可持续
2008	0.103	0.013	7.865	不可持续
2009	-0.106	0.016		可持续
2010	0.071	0.019	3.805	不可持续
2011	0.079	0.025	3.159	不可持续
2012	-0.018	0.004		可持续
2013	-0.019	0.010		可持续
2014	-0.047	0.019		可持续
2015	-0.091	0.002		可持续
2016	-0.074	0.045		可持续
2017	-0.019	0.049		可持续
2018	-0.063	0.121		可持续

3.4 北京市水资源生态安全分析

水资源生态安全采用水资源匮乏指数和水资源压力指数进行评价,主要反映城市水源紧缺状况和城市需水量对可用水源作用强度,计算结果见图 2。

由图 2 可以看出:水资源匮乏指数与压力指数均大于 1,水资源匮乏指数在 2003—2011 年较不稳定;在 2011—2016 年呈下降趋势,最大值在 2011 年为 1.49,最小值在 2016 年为 1.24;在 2017—2018 年呈增加趋势。水资源压力指数总体呈下降趋势,指数为 1.0~1.2,最大值在 2007 年为 1.18,最小值在 2016 年为 1.07。北京市水资源生态安全状况不容乐观,均超出 0.40 的水资源开发利用阈值^[17],处于严重超载状况。北京市在绿色发展理念的引导下,城市对生态建设日益重视,生态需水量逐年升

高,对生态安全保障用水量也越来越高。虽然近几年北京市生态安全状况有所改善,但匮乏指数与压力指数均有增加趋势,还要进一步提升水资源利用率。城市化发展的同时,也要保障水资源生态安全。

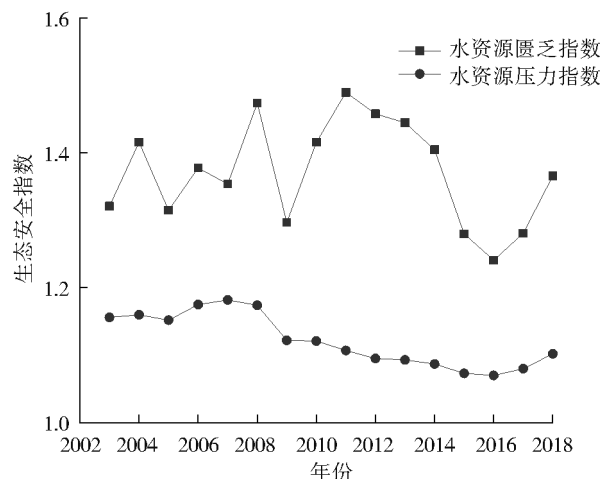


图 2 北京市 2003—2018 年水资源生态安全指数

Fig. 2 Ecological security index of water resources of Beijing from 2003 to 2018

3.5 北京市水足迹效益分析

北京市水资源效益分为内部效益与外部效益。内部效益采用人均水足迹、水足迹经济效益与水资源负载指数进行分析,探究内部水源的经济效益;外部效益采用水足迹净贸易值与水资源贡献率进行评价。计算结果见表 6。

由表 6 可以看出,北京市人均水足迹在 2003—2018 年呈下降趋势,其中:最大值出现在 2004 年,为 0.081 万 $\text{m}^3/\text{人}$;最小值出现在 2018 年,为 0.039 万 $\text{m}^3/\text{人}$;多年平均下降率为 4.3%。水足迹经济效益呈升高趋势:最小值在 2003 年为 32.38 元/ m^3 ;最大值在 2018 年为 359.696 元/ m^3 ;多年平均增长率为 18.4%。水资源负载指数呈上升趋势:最小值在 2004 年为 15.804;最大值在 2018 年为 69.675;平均增长率为 11.7%。本地水资源利用潜力不大,仍需外流域补水。水足迹净贸易值与水资源贡献率在 2003—2011 年处于波动阶段,2011—2018 年处于逐渐下降阶段。因此,北京市内部效益处于良性发展阶段,对外部效益依赖性越来越低且节水效果显著,水足迹经济效益增长较快,但开发难度逐步增加。

3.6 基于 LMDI 模型的北京市水足迹变化驱动因素分析

对北京市水足迹驱动因素进一步探讨,选定 2003 年为基准年,进行 2004—2018 年水足迹分解效应计算。计算结果见表 7。

表6 北京市2003—2018年水足迹效益

Tab.6 Water resources benefits of Beijing from 2003 to 2018

年份	内部效益			外部效益	
	人均水足迹/亿 m ³	水足迹经济效益/(元·m ³)	水资源负载指数	水足迹净贸易值/亿 m ³	水资源贡献率/%
2003	0.078	32.380	15.873	27.492	0.321
2004	0.081	35.302	15.804	35.655	0.416
2005	0.071	62.641	23.524	26.307	0.315
2006	0.066	75.222	31.725	28.722	0.378
2007	0.064	89.925	28.483	27.170	0.354
2008	0.068	91.419	25.243	36.877	0.474
2009	0.058	118.458	34.198	23.497	0.297
2010	0.056	128.421	35.372	32.285	0.416
2011	0.059	137.066	30.904	39.016	0.490
2012	0.056	153.490	33.072	36.587	0.458
2013	0.054	170.713	39.948	35.168	0.445
2014	0.051	195.853	47.854	31.389	0.405
2015	0.046	232.505	55.036	21.640	0.280
2016	0.042	280.091	54.230	17.817	0.241
2017	0.041	311.462	61.725	19.738	0.281
2018	0.039	359.696	69.675	22.583	0.366

表7 北京市2004—2018年水足迹分解效应

Tab.7 Decomposition effect of water footprint of Beijing from 2004 to 2018

年份	人口效应	经济效应	技术效应	合计
2004	2.94	15.39	-10.13	8.20
2005	6.11	64.29	-73.59	-3.20
2006	8.96	74.26	-91.73	-8.50
2007	12.45	89.27	-110.83	-9.12
2008	17.32	102.53	-118.25	1.60
2009	20.13	109.12	-139.79	-10.54
2010	33.26	117.15	-153.63	-3.23
2011	37.87	134.71	-167.13	5.44
2012	40.34	141.66	-178.64	3.36
2013	42.44	147.64	-188.99	1.10
2014	43.37	152.21	-199.80	-4.22
2015	42.31	152.32	-208.77	-14.14
2016	40.85	157.77	-220.10	-21.48
2017	40.39	165.28	-228.85	-23.18
2018	38.38	168.75	-235.97	-28.84
均值	28.47	119.49	-155.08	-7.12
比例/%	9.39	39.43	51.17	100.00

由表7分析可知:人口效应总体占比较小,贡献不大;经济效应和技术效应占比较大,贡献较大。从人口效应来看:北京市人口一直呈增长趋势,人口效应在2004—2012年增长较快,从2004年的2.94增长至2012年的40.34,多年平均增长率为23.6%;

2012—2018年因人口增长逐渐平稳,人口效应呈下降趋势;各年平均人口效应值均大于0,说明促进了水足迹增长,即正向驱动作用。各年经济效应值均为正值,且呈增长趋势,2003—2011年增长迅速,2011—2018年增速放缓,多年平均增长率为30%左右;经济快速发展使用水量不断增加,对水足迹贡献率较大,起到正向驱动作用。技术效应对于水足迹变化贡献率最大,占50%以上。技术效应值在2004—2018年呈降低趋势,从-10.13下降至-155.08,多年平均减少率为53.7%。由于节水技术不断提高,各种节水设备不断发展,各行业单位用水效率大幅度提高,用水量不断减少,技术效应抑制了水足迹增长。技术效应严重影响水足迹变化,其次是经济以及人口效应。对于北京市来说,技术效应的影响是最显著的。

4 结论

(1) 北京市内部水足迹占70%左右,外部水足迹占30%左右且主要以农业为主。但随着城市化进程加快,人口不断增长,产业结构发生改变,农业水足迹越来越低,生态水足迹与生活水足迹不断增加。总水足迹呈不断下降趋势,其进口依赖度不断降低。结果表明,北京市水资源呈良性发展,但进口依赖度较高。

(2) 从水足迹发展趋势来看,北京市总体发展

呈2个阶段:第1阶段在2003—2011年处于波动阶段;第2阶段在2012—2018年处于下降阶段。自2012年以来,北京市水资源呈可持续发展且呈良性态势。北京市水资源严重短缺,水资源匮乏指数与压力指数均偏高,水资源生态安全状况处于严重超载状况。虽然水资源内部经济效益不断升高,但负载较严重,仍需增加外调水量。

(3)在北京市水资源利用量变化中,技术效应是决定性驱动因素,贡献较大,其次是经济效应,人口效应占比最小。经济效应与人口效应均呈正向驱动,仅有技术效应呈反向驱动,表明在城市化过程中应高度重视经济发展和人口增长带来的水资源消耗的增加,持续对产业结构进行优化和升级,关注节水技术创新,不断提升水资源利用率,深入推进水资源可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 韩雁,贾绍凤,鲁春霞,等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征:以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1392-1401. (HAN Y, JIA S F, LU C X, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: A case study in Zhangjiakou[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1392-1401. (in Chinese)) DOI:10.31497/zrzyxb.20200612.
- [2] 苗治平,张峰. 新型工业化背景下的工业水资源利用效率指数测量及其影响因素分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(6): 761-768. (MIAO Z P, ZHANG F. Industrial water use efficiency index and its influencing factors under the background of new industrialization [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(6): 761-768. (in Chinese))
- [3] 胡光伟,许滢,张明,等. 基于SPA的湖南省水资源与社会经济发展协同度评价[J]. 水利水电技术, 2019, 50(1): 65-72. (HU G W, XU Y, ZHANG M, et al. Evaluation on synergy degree of water resources system and social economical system in Hunan Province based on SPA[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(1): 65-72. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2019.01.009.
- [4] 尚毅梓,赵勇,石红旺,等. 天津市行业用水变化与归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 153-157, 192. (SHANG Y Z, ZHAO Y, SHI H W, et al. Analysis of water use trend and its impact factors in tianjin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 153-157, 192. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.01.035.
- [5] 曹士圯,胡庆芳,蒋思佳,等. 1995—2016年深圳市用水量变化与节水潜力分析[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 76-81. (CAO S Y, HU Q F, JIANG S J, et al. Analysis of water consumption change from 1995 to 2016 and water saving potential in Shenzhen City[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 76-81. (in Chinese)) DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.011.
- [6] 安婷莉,韩昕雪琦,高学睿,等. 虚拟水理论发展及应用前景综述[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 44-61. (AN T L, HAN X X Q, GAO X R, et al. A review of the development and application prospect of virtual water theory[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 44-61. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0026.
- [7] 孙艳芝. 基于水足迹理论的北京水资源利用研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2015. (SUN Y Z. Water resources utilization in Beijing based on water footprint theory[D]. Beijing. University of Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese))
- [8] 侯林秀,温璐,赵吉,等. 基于水足迹法的阿拉善地区水资源利用评价与分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(12): 35-41. (HOU L X, WEN L, ZHAO J, et al. Evaluation of water resource utilization in Alxa League based on water footprint method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(12): 35-41. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2020.325.
- [9] 余灏哲,韩美. 基于水足迹的山东省水资源可持续利用时空分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(3): 474-483. (YU H Z, HAN M. Spatial-temporal analysis of sustainable water resources utilization in Shandong Province based on water footprint[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(3): 474-483. (in Chinese))
- [10] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1963-1974. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.06.021.
- [11] RUI Q, YONG G, QIING H Z. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 486-495. DOI:10.11849/zrzyxb.2011.03.015.
- [12] MURATOGLU A. Water footprint assessment within a catchment: A case study for Upper Tigris River basin[J]. Ecological indicators, 2019, 106(11): 1-13. DOI:10.1016/j.ecolind.2019.105467.
- [13] LONG A, ZHANG P, HAI Y, et al. Spatio-temporal

- variations of crop water footprint and its influencing factors in Xinjiang, China during 1988-2017[J]. Sustainability, 2020, 12 (22): 1-15. DOI: 10.3390/su12229678.
- [14] REZA N, HOSSEINIAN S. An improved water footprint model of steel production concerning virtual water of personnel; The case of Iran. [J]. Journal of environmental management, 2020, 260: 110065. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110065.
- [15] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1189-1198. (CAO X C, CUI S M, WU M Y, et al. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10): 1189-1198. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20200260.
- [16] 高妍, 马广奇, 李宗省. 基于水足迹理论的水资源利用评价: 以我国纺织工业为例[J]. 资源开发与市场, 2020, 36(3): 241-245. (GAO Y, MA G Q, LI Z S. Evaluation of water resources utilization based on water footprint theory: Taking textile industry in China for example [J]. Resource Development & Market, 2020, 36(3): 241-245. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2020.128.
- [17] 雒新萍, 刘晓洁. 中国典型农作物需水量及生产水足迹区域差异[J]. 节水灌溉. 2020(1): 88-93. (LUO X P, LIU X J. Regional differences on typical crop water requirement and water footprint in China from production perspective[J]. Water Saving Irrigation, 2020(1): 88-93. (in Chinese))
- [18] 乔扬源, 贾陈忠. 基于水足迹理论的山西省水资源利用与经济发展脱钩状况分析[J]. 节水灌溉, 2019(12): 58-64, 71. (QIAO Y Y, JIA C Z. Analysis of water resources utilization and economic development in Shanxi Province based on water footprint theory [J]. Water Saving Irrigation, 2019 (12): 58-64, 71. (in Chinese))
- [19] 杨文娟, 赵荣钦, 张战平, 等. 河南省不同产业碳水足迹效率研究[J]. 自然资源学报, 2019, 34(1): 92-103. (YANG W J, ZHAO R Q, ZHANG Z P, et al. Carbon and water footprint efficiency of different industries in Henan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 92-103. (in Chinese)) DOI:10.31497/zrzyxb.20190108.
- [20] 商庆凯, 阴柯欣, 米文宝. 基于水足迹理论的青海省水资源利用评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(5): 70-77. (SHANG Q K, YIN K X, MI W B. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(5): 70-77. (in Chinese)) DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2020.128.
- [21] 熊鸿斌, 周银双. 基于三维水足迹-LMDI的安徽省水资源压力及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 194-203. (XIONG H B, ZHOU Y S. An analysis of water resources pressure and driving forces in Anhui Province based on LMDI-three-dimensional water footprint model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 194-203. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.027.
- [22] 常玉婷, 尤斌. 基于水足迹理论的干旱区水资源可持续利用评价[J]. 干旱环境监测, 2019, 33(4): 150-154. (CHANG Y T, YOU B. Evaluation of water resources carrying capacity of Xinjiang based on water footprint method. [J]. Arid Environmental Monitoring, 2019, 33(4): 150-154. (in Chinese))
- [23] 郑亭, 杜海龙, 黄靖. 杭州市 2010—2016 年水足迹分析研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(5): 69-75. (ZHENG H, DU H L, HUANG J. Analysis of water footprint in Hangzhou in 2010-2016 [J]. Pearl River, 2019, 40(5): 69-75. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.2019.05.012.
- [24] 吴昊, 张兴奇, 都金康. 基于水足迹理论与 LMDI 模型的贵州省水资源利用评价[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 696-703. (WU H, ZHANG X Q, DUO J K. Evaluation of water resources utilization in Guizhou Province based on water footprint theory and LMDI model [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(5): 696-703. (in Chinese)) DOI:10.11932/karst20190505.
- [25] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495. (QI R, GENG Y, ZHU Q H. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3): 486-495. (in Chinese))
- [26] 刘楚焯, 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 C Y, ZHAO Y W, MA Q Y, 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)) DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.051.

Evaluation of water resources utilization based on water footprint theory in BeijingWANG Lichuan^{1,2}, HOU Baodeng¹, ZHOU Yuyan¹, CHEN Xiaoqing^{1,2}, WANG Xin^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, School of Water Conservancy, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: In recent years, with the continuous acceleration of industrialization, rapid social and economic development and continuous population growth, water consumption in various industries is increasing, and the contradiction between supply and demand is aggravating. Water consumption includes not only physical water but also virtual water in products and services. The purpose of water footprint theory is to study invisible water in the public consumption and service process. Beijing is a typical water consumption city, but there is no research on water resources utilization from the perspective of water footprint theory. Therefore, based on water footprint theory, it is necessary to evaluate the utilization of water resources in urban physical water, virtual water, and trade.

The internal water footprint and external water footprint are calculated based on water footprint theory, including agricultural virtual water consumption, industrial virtual water consumption, domestic water consumption, ecological environment water consumption, virtual water outlet, and external water footprint is virtual water inlet. At the same time, the LMDI model is applied to decompose different factors such as structure effect, technology effect, and population effect of water footprint change.

The total water footprint of Beijing showed a fluctuating downward trend from 2003 to 2011 and from 2011 to 2018, respectively. Among them, agricultural and industrial water footprint has a downward trend year after year, living and ecological water footprint has an upward trend; virtual water quantity of import is greater than virtual water quantity of export. In terms of water footprint structure, the self-sufficiency rate of water resources is generally on the rise, exceeding 70% by 2015, and the dependence on water resources imports is on the decline side. In case of water footprint sustainability, the water footprint growth index is mostly negative and the available water resources growth index is positive. In terms of ecological safety of water resources, both the water shortage index and pressure index are greater than 1, and the water resource pressure index is on the decline as a whole. Likewise, in terms of water footprint benefits, the economic benefits of water footprint are on the rise, the water load index is on the rise, the net trade value of water footprint and the contribution rate of water resources are on the fluctuating stage from 2003 to 2011, and from 2011 to 2018. Among the drivers of water footprint, the proportion of population effect is less than 10%, the economic effect is less than 40%, and the technical effect is more than 50%, respectively.

Water footprint accounts for about 70% in Beijing, mainly in agriculture. However, with the acceleration of urbanization, population growth, industrial structure changes, agricultural water footprint is getting lower and lower, and ecological water footprint and living water footprint are increasing. The total water footprint is on a downward trend and its dependence on imports is decreasing. Water resources are developing in Beijing, and the import dependence is high. From the perspective of the water footprint development trend, the overall development of Beijing is in two stages, fluctuating from 2003 to 2011 and declining from 2012 to 2018. Since 2012, the sustainable development of water resources in Beijing has been benign and in a sustainable state. Due to the shortage of local water resources in Beijing, both the water shortage index and pressure index are relatively high, and the ecological safety of water resources is in a serious overload situation. Although the internal economic benefit of water resources is increasing continuously, the external water diversion still needs to be increased due to heavy load. Based on the LMDI model analysis, it can be seen that the driving factors of water resources change in the process of urbanization are technology effect > economy effect > population effect. Only technical effect is driven in the opposite direction, while economic effect and population effect are both driven in the positive direction. It indicates that great attention should be paid to the increase of water consumption brought by economic development and population growth in the process of urbanization and that sustainable attention should be paid to the development of water-saving technology, the optimization and adjustment of industrial structure, and the improvement of water resource utilization efficiency to realize the sustainable development of water resources.

Key words: water footprint; driving factor; LMDI; Beijing; water resources utilization