

DOI: 10.5846/stxb201801310271

程先, 孙然好, 陈利顶, 孔佩儒. 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. 生态学报, 2018, 38(12): - .
Cheng X, Sun R H, Chen L D, Kong P R. Spatial and temporal patterns of the water footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region with consideration of crop and animal products and domestic water. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

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

程 先^{1,2}, 孙然好^{1,*}, 陈利顶^{1,2}, 孔佩儒^{1,2}

1 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:水足迹将实体水消费和虚拟水消费联系起来,能真实地反映水资源利用的空间差异状况。运用自下而上的方法,分别计算了京津冀地区市级、区县尺度 2000—2014 年水足迹与人均水足迹,并分析其时空变化特征。结果表明:(1)市级尺度上,北京市水足迹、人均水足迹最高,天津市次之。石家庄市水足迹、人均水足迹相对较高,衡水市水足迹、人均水足迹均相对较低。京津冀市级平均水足迹由 2000 年的 35.88 亿 m³ 增长到 2014 年的 50.82 亿 m³,天津市、北京市增长幅度最大。(2)区县尺度上,北京市主城六区水足迹、人均水足迹最高,北京市其他市辖区和天津市主城六区、滨海新区水足迹、人均水足迹次之,石家庄市主城区水足迹、人均水足迹也相对较高。北部燕山山区、西部太行山区及衡水市所辖区县水足迹、人均水足迹最低。京津冀区县平均水足迹由 2000 年的 2.30 亿 m³ 增长为 2014 年的 3.16 亿 m³。北京市市辖区水足迹增长幅度最大,天津市市辖区次之。(3)水足迹的构成比例从大到小依次是消费虚拟水量、生活用水量 and 生态环境用水量,消费虚拟水量约占水足迹的 90%。京津冀生态环境用水所占水足迹比例总体呈现增加的趋势,北京市生态环境用水所占水足迹的比例高于天津市和河北省。本文对京津冀地区水足迹的计算与时空变化特征分析,以期研究京津冀地区城镇化对水资源量的胁迫效应提供参考与依据。

关键词:水足迹;时空特征;京津冀;区县

Spatial and temporal patterns of the water footprint in the Beijing-Tianjin-Hebei region with consideration of crop and animal products and domestic water

CHENG Xian^{1,2}, SUN Ranhao^{1,*}, CHEN Liding^{1,2}, KONG Peiru^{1,2}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The water footprint (WF) links the consumption of physical water with virtual water and can truly reflect the spatial differences of water use. In this paper, we used the bottom-up method to calculate the WF and the WF per capita at the city and district/county levels from 2000 to 2014 in the Beijing-Tianjin-Hebei region (BTHR). Besides, the temporal and spatial variation characteristics of the WF were analyzed. The results showed that: (1) at the city level, the WF and WF per capita in Beijing were the highest, followed by Tianjin. The WF and WF per capita in Shijiazhuang were relatively high, while they were relatively low in Hengshui. The average WF of the BTHR at the city level increased from 3.588 billion m³ in 2000 to 5.082 billion m³ in 2014, with the largest increase in Tianjin and Beijing. (2) At the district/county level, the WF and WF per capita of Beijing's six core districts were the highest, followed by Beijing's other districts, Tianjin's six

基金项目:国家自然科学基金项目(41590841)

收稿日期:2018-01-31; 修订日期:2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: rhsun@cees.ac.cn

core districts, and the Binhai New District. Besides, the WF and WF per capita of the core districts of Shijiazhuang were relatively high. The WF and WF per capita of the counties located in the Yanshan Mountains in the north and Taihang Mountains in the west, and Hengshui were the lowest. The average WF of the counties/districts in the BTHR increased from 230 million m^3 in 2000 to 316 million m^3 in 2014. The municipal districts of Beijing had the fastest growth in WF, followed by Tianjin. (3) The composition proportion of the WF in the BTHR from high to low was virtual water consumption, domestic water consumption, and ecological water consumption. The consumption of virtual water accounted for about 90% of the WF. The proportion of ecological water consumption and WF in the BTHR has generally increased, and its proportion in Beijing was higher than that of Tianjin or Hebei. The WF of the BTHR was calculated and the characteristics of its spatial and temporal variations were analyzed in this paper, which aimed to provide a reference and basis for studying the coercive effects of urbanization on water resources in the BTHR.

Key Words: water footprint; spatial and temporal characteristics; Beijing-Tianjin-Hebei; county

水资源是一切生物赖以生存和发展的物质基础,也是支撑一个国家和地区社会经济可持续发展的限制性因素和战略性资源^[1-2]。在对水资源及其提供产品和服务的消费过程中,人类活动对水资源的诸多问题产生了深刻影响^[3]。正确衡量人类对水资源的真实需求和消费,对水资源的合理利用发挥着关键作用。Hoekstra^[4]2002年提出了水足迹理论,将其定义为任何已知人口(一个国家、一个地区或者一个人)在一定时间内所消费的所有产品和服务所需要的水资源数量^[5-6]。这部分水资源量既包括日常生活实体用水,又包括工农业产品和服务中的虚拟水和为人类提供生态服务功能的用水^[7-8]。其中,以产品和服务形式的虚拟水消费是人类对水资源的主要消费形式^[9]。水足迹理论从水资源消费角度出发,将实体水消费和虚拟水消费联系起来,能较真实地反映水资源利用的分配状况,提供了水资源消费和居民消费之间定量关系研究的方法^[3, 10-11]。

京津冀地区属于严重资源型缺水区域。2014年,京津冀地区平均人均水资源量为124 m^3 /人,仅为全国平均水平的6%。其中,北京、天津、河北人均水资源量分别是94、74、143 m^3 /人^[12]。水足迹方法能够有效地刻画京津冀地区的水资源利用状况,例如Zhao等^[2]从蓝水、绿水、灰水三个方面计算了京津冀地区2010年水足迹,王艳阳等^[8]基于投入产出表计算了北京市2002年水足迹,韩玉等^[13]运用产品虚拟水研究方法计算了河北省2010年水足迹等。但上述研究中的水足迹计算多停留在省级尺度上,缺乏更小尺度(如市级、区县级)的研究。此外,前人的研究多关注于某一年份水足迹的计算,缺少长时间序列的水足迹的比较和变化趋势的分析。基于此,本研究尝试从市级、区县两个尺度定量研究京津冀地区水足迹与人均水足迹,并分析其在较长一段时间序列内的变化特征,以期为研究京津冀地区城镇化对水资源的胁迫效应提供数据参考与依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 水足迹计算方法

水足迹一般可以通过两种方法进行估算。一种是自上而下的方法,该方法将一个国家或地区的水足迹表示为生产当地居民所消费的所有产品和服务的水资源需求总量与该国家或地区净虚拟水的进口量的总和,公式如下^[5, 14]:

$$WF = PVW + RW + ENV + NVWI \quad (1)$$

式中,WF是一个国家或地区的水足迹;PVW是本地产品消费的虚拟水含量;ENV是生态环境用水;NVWI是净进口虚拟水消费量。该方法将水足迹分解成了内部水足迹和外部水足迹,并在此基础上,可以分析水资源自给率、水资源进口依赖度等^[1, 5, 15]。由于该方法需要有研究区较详细的汇入和流出产品的数据记录,适用于计算国家等大尺度单元的水足迹,而省市等小尺度区域因贸易数据不易获取,限制了该方法在省市尺度上的应用^[7, 16]。

水足迹另一种计算方法是采用自下而上的方法,公式表达式为^[7, 17]:

$$WF = DU + \sum_{i=1}^n P_i \times VWP_i + ENV \quad (2)$$

式中, WF 是一个国家或地区水资源的足迹; DU 为生活用水量; P_i 为第 i 种产品消费量; VWP_i 为第 i 种产品的单位产品的虚拟水量; ENV 是生态环境用水量。该方法相对简单,所需的消费资料可以从统计年鉴上获得,但存在数据不全的缺陷。本文考虑到京津冀的区域特点和统计数据的可获得性,采用第二种方法计算京津冀地区的水足迹。

1.2 主要产品虚拟水

农作物产品和动物产品的虚拟水是目前虚拟水计算中最主要的部分^[17]。单位农作物产品的虚拟水含量主要参考姜莉等人^[17]在本研究区的研究成果。农作物虚拟水含量为农作物单位面积虚拟水量与单位面积实际产量的比值。作物单位面积虚拟水量的获取主要参照《中国主要农作物需水量等值线图研究》中关于京津冀三省市的研究成果和研究区内已有的研究文献。同时根据《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北经济年鉴》等相关统计数据,计算京津冀单位产品虚拟水含量。本研究主要选取了京津冀主要的粮食作物类(小麦、水稻)和经济作物类(水果、蔬菜)共 4 种为研究对象,其单位质量的虚拟水含量如表 1 所示。

表 1 京津冀地区主要农作物单位质量的虚拟水含量^[17](m^3/kg)

Table 1 Virtual water content of the main crops in the Beijing-Tianjin-Hebei region

省市 Province/ municipality	小麦 Wheat	水稻 Rice	水果 Fruit	蔬菜 Vegetable
北京	1.23	1.4	0.58	0.38
天津	1.25	1.19	0.48	0.35
河北	1.38	1.56	0.68	0.56

由于计算动物产品虚拟水含量需要的数据很多,并且这些数据通常难以获得,因此,笔者参考 Chapagain 和 Hoekstra 根据 FAO 和 WTO 提供的数据库资料,按照贡献度大小对世界 100 多个国家单位质量动物产品的虚拟水估算中有关中国部分的估算结果^[5]。考虑到数据的可获得性和连续性,本文选取了京津冀地区 7 种主要动物产品,分别是猪肉、牛肉、羊肉、家禽肉、禽蛋、奶类、水产品,其单位质量虚拟水量如表 2 所示。

表 2 主要动物产品单位质量的虚拟水含量/ (m^3/kg)

Table 2 Virtual water content of the main animal products in the Beijing-Tianjin-Hebei region

动物产品 Animal product	猪肉 Pork	羊肉 Mutton	牛肉 Beef	家禽肉 Poultry meat	禽蛋 Egg	奶类 Milk	水产品 Aquatic product
单位虚拟水含量 Content of virtual water	3.6	19.98	18.1	3.5	9.65	2.2	5.1

1.3 数据来源

京津冀地区包括北京市、天津市和河北省的石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水共 13 个城市(图 1、表 3)。区域面积为 21.6 万 km^2 , 约占全面总面积的 2.3%, 2014 年区域内常住人口为 1.196 亿人。2012 年人均 GDP 为 45302.5 元, 城镇化率为 58.93%。其中, 北京、天津、河北城镇化率分别为 86.2%、81.55%、46.8%^[18]。京津冀地区共划分为 203 个县级(区、县级市、矿区)行政单元(截止 2014)。

本研究所需数据来源如表 4 所示。京津冀市级、区县城镇、乡村常住人口数据来自北京、天津统计年鉴、河北经济年鉴和河北农村统计年鉴。由于受可获得统计数据的限制, 城镇、乡村居民主要食品人均年消费量只能收集到省级尺度。其中, 对于北京、天津、河北统计年鉴中城乡居民主要食品人均年消费量统计缺失的年份, 参照中国统计年鉴中的全国城乡居民主要食物消费量, 按照北京、天津、河北城乡居民食品消费支出与全国城乡居民平均食品支出之比, 计算出京津冀城乡居民主要食物人均年消费量。京津冀地区生活用水量和生态环境用水量来自于北京、天津、河北省水资源公报, 数据收集到市级尺度, 并按照区县总人口数量, 分配至区县行政单元。

2 主要结果

2.1 市级尺度水足迹

根据公式(2),计算出京津冀13个城市2000—2014年水足迹(图2、表5)。结果表明,京、津两个直辖市由于人口总量大,且城镇化水平高,水足迹较高。北京市2000—2014年平均水足迹为138.99亿 m^3 ,在京津冀13个城市中位居第一。天津市次之,2000—2014年平均水足迹为77.94亿 m^3 。在河北省11个地级城市中,保定市和石家庄市是仅有的两个人口过千万的城市,2014年常住人口分别为1124.52万、1268.52万,因此水足迹最高,2000—2014年平均水足迹分别为51.96、49.60亿 m^3 。作为河北省常住人口数量最少的地级市(2014年常住人口306.45万),秦皇岛市2000—2014年水足迹最低,仅为14.99亿 m^3 。位于京津冀北部燕山山区的承德市、张家口市和中南部的衡水市,由于人口数量相对较少,且城镇化水平较低,水足迹相对较低。在时间上,京津冀市级尺度水足迹总体呈现增加的趋势,13个城市的平均水足迹由2000年的35.88亿 m^3 增长为2014年的50.82亿 m^3 。主要驱动因素是人口数量增加、城市发展及经济水平的提高^[3]。其中,天津市、北京市增长幅度最大,增长率分别为96.60%、62.32%。主要是因为京、津两直辖市城镇化水平最高,城市人口增加数量最多。石家庄、邯郸市水足迹增长幅度相对较大,增长率均超过了30%。

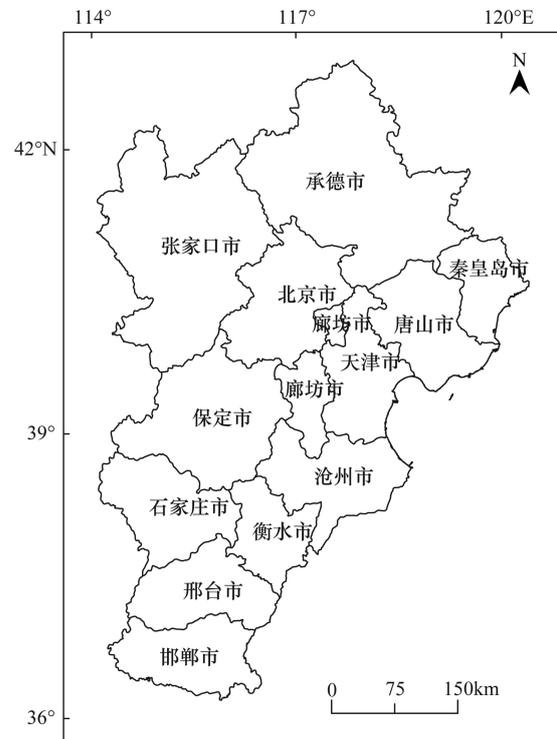


图1 京津冀地区

Fig.1 The Beijing-Tianjin-Hebei region

表3 京津冀地区2014年常住人口与县级行政单元数量

Table 3 Number of permanent population and county administrative units of the Beijing-Tianjin-Hebei region in 2014

城市 City	常住人口/万人 Number of permanent population ($\times 10^4$ people)	所辖县级单元数量/个 Number of county administrative units	城市 City	常住人口/万人 Number of permanent population ($\times 10^4$ people)	所辖县级单元数量/个 Number of county administrative units
北京市	2152	16	保定市	1185	24
天津市	1517	16	张家口市	469	17
石家庄市	1060	23	承德市	381	11
唐山市	736	14	沧州市	757	16
秦皇岛市	289	7	廊坊市	444	10
邯郸市	1015	19	衡水市	438	11
邢台市	753	19	总和	11196	203

表4 主要数据来源

Table 4 Data sources

数据类型 Data type	数据来源 Data source	数据尺度 Data scale
城镇、乡村常住人口数据 Population of permanent residents of urban and rural areas	北京统计年鉴、天津统计年鉴、河北经济年鉴、河北农村统计年鉴、中国统计年鉴	市级、区县级
城镇、乡村居民主要食品人均年消费量 Per capita annual consumption of main food of urban and rural residents		省级
生活用水量 Domestic water consumption	水资源公报	市级
生态环境用水量 Ecological and environmental water consumption		

表 5 京津冀市级 2000—2014 年水足迹/(亿 m³)
Table 5 Water footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei cities from 2000 to 2014

城市 City	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2000—2014 年平均 Average of water footprint from 2000 to 2014
北京市	109.87	112.25	119.22	123.94	121.22	127.91	134.29	133.49	128.49	145.12	158.87	157.76	163.00	171.03	178.35	138.99
天津市	57.58	57.80	59.40	64.11	64.32	65.42	65.06	75.55	76.94	88.41	94.65	90.38	96.35	99.91	113.21	77.94
石家庄市	41.92	43.08	45.23	48.00	45.88	49.20	50.70	46.53	48.34	50.02	50.69	54.85	55.67	57.91	55.96	49.60
唐山市	33.08	32.53	33.95	34.91	34.50	35.15	36.88	33.38	33.87	34.63	34.00	37.01	37.85	38.87	37.68	35.22
秦皇岛市	13.77	13.40	13.49	14.10	13.99	14.03	14.77	13.85	13.84	14.39	14.12	15.06	15.38	15.61	14.99	14.32
邯郸市	37.48	37.49	38.48	39.42	39.41	40.05	43.05	39.47	41.56	41.81	42.43	46.94	47.99	50.18	48.97	42.32
邢台市	28.88	28.72	29.59	30.33	29.55	29.86	31.88	28.95	29.96	30.70	30.75	33.23	34.86	37.28	36.04	31.37
保定市	45.69	46.09	47.63	50.04	49.96	50.51	54.37	50.00	52.68	52.72	52.10	55.72	56.64	58.74	56.47	51.96
张家口市	19.88	20.78	21.43	21.76	21.73	21.78	23.15	20.87	20.97	21.52	20.94	22.54	22.92	23.67	22.72	21.78
承德市	14.59	15.96	16.49	16.83	16.53	16.57	17.72	16.22	16.63	16.90	16.84	18.13	18.68	19.02	18.30	17.03
沧州市	28.14	28.46	29.33	30.26	29.77	31.13	32.96	30.12	31.19	31.36	31.69	34.56	35.48	36.86	35.68	31.80
廊坊市	17.63	17.23	17.52	18.45	18.30	18.66	19.99	18.37	18.81	19.18	19.35	20.94	21.76	22.61	22.13	19.40
衡水市	17.90	17.69	17.89	18.21	18.14	18.39	19.89	18.18	18.71	18.89	18.88	20.24	20.38	21.01	20.19	18.97
平均 Average	35.88	36.27	37.67	39.26	38.71	39.90	41.90	40.38	40.92	43.51	45.02	46.72	48.23	50.21	50.82	

京津冀地区 13 个城市 2000—2014 年人均水足迹如图 3 所示。北京市人均水足迹最高,2000—2014 年平均人均水足迹为 814.92 m³/人。天津市次之,平均人均水足迹为 683.90 m³/人。石家庄市、秦皇岛市平均人均水足迹相对较高,均超过了 500 m³/人。衡水市、邢台市人均水足迹相对较低,其中衡水市人均水足迹低于 450 m³/人。

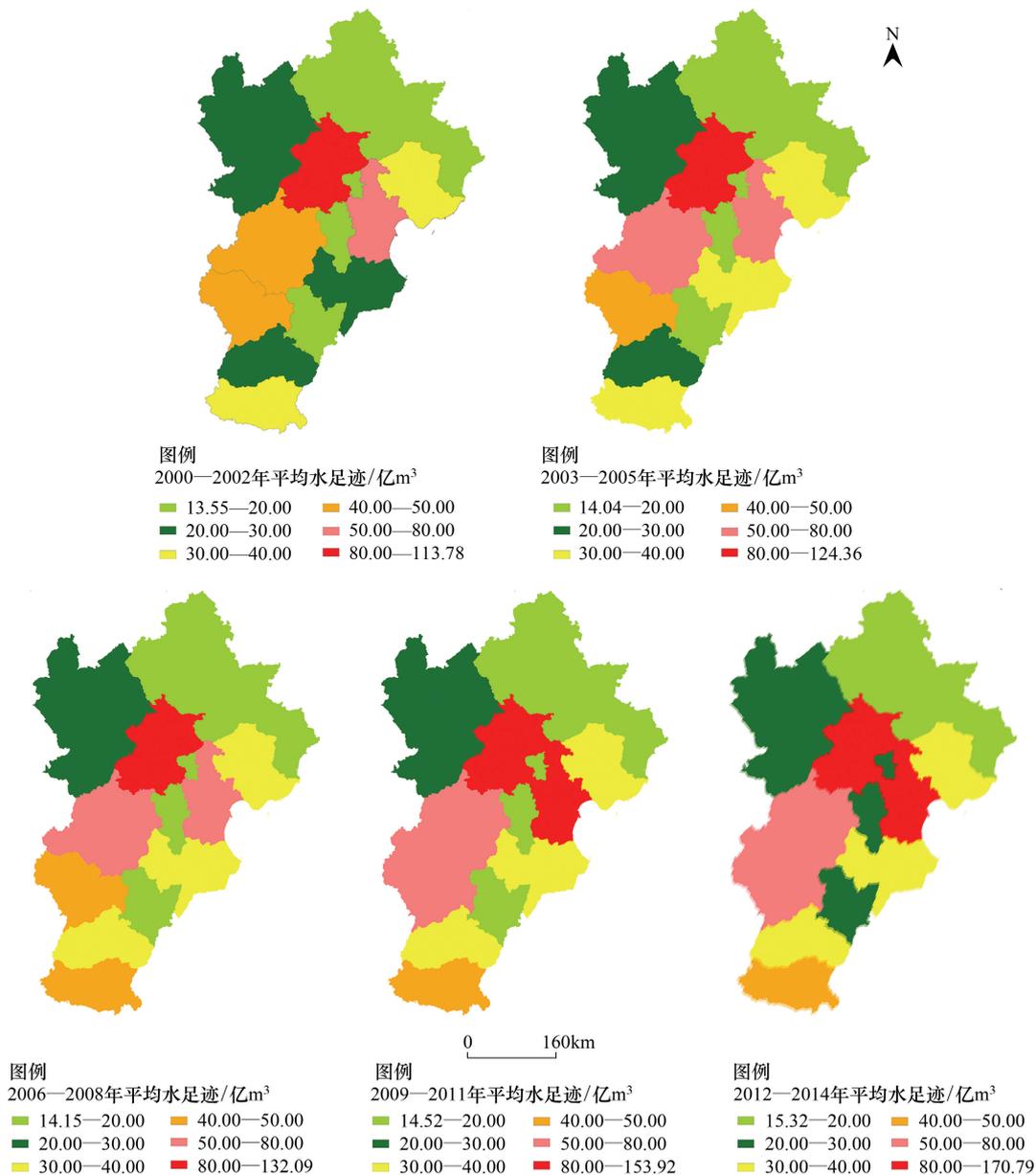


图 2 京津冀市级 2000-2014 年水足迹

Fig.2 Water footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei cities from 2000 to 2014

2.2 区县尺度水足迹

京津冀区县 2000—2014 年水足迹结果表明(图 4),北京市市辖区水足迹总体最高,朝阳区年均水足迹达 26.38 亿 m³,位居京津冀区县第一,其次是海淀区,年均水足迹为 24.87 亿 m³。天津市市辖区水足迹低于北京市市辖区,滨海新区年均水足迹达 12.05 亿 m³,位居天津市市辖区第一。在河北省所辖区县中,定州市年均水足迹最高,为 5.43 亿 m³。北部燕山山区与西部太行山区区县由于人口总量相对较少,且城镇化水平较低,因此,水足迹相对较低。如张家口、承德、邢台等市所辖区县。其中张家口市下花园区水足迹最低,年均水足迹

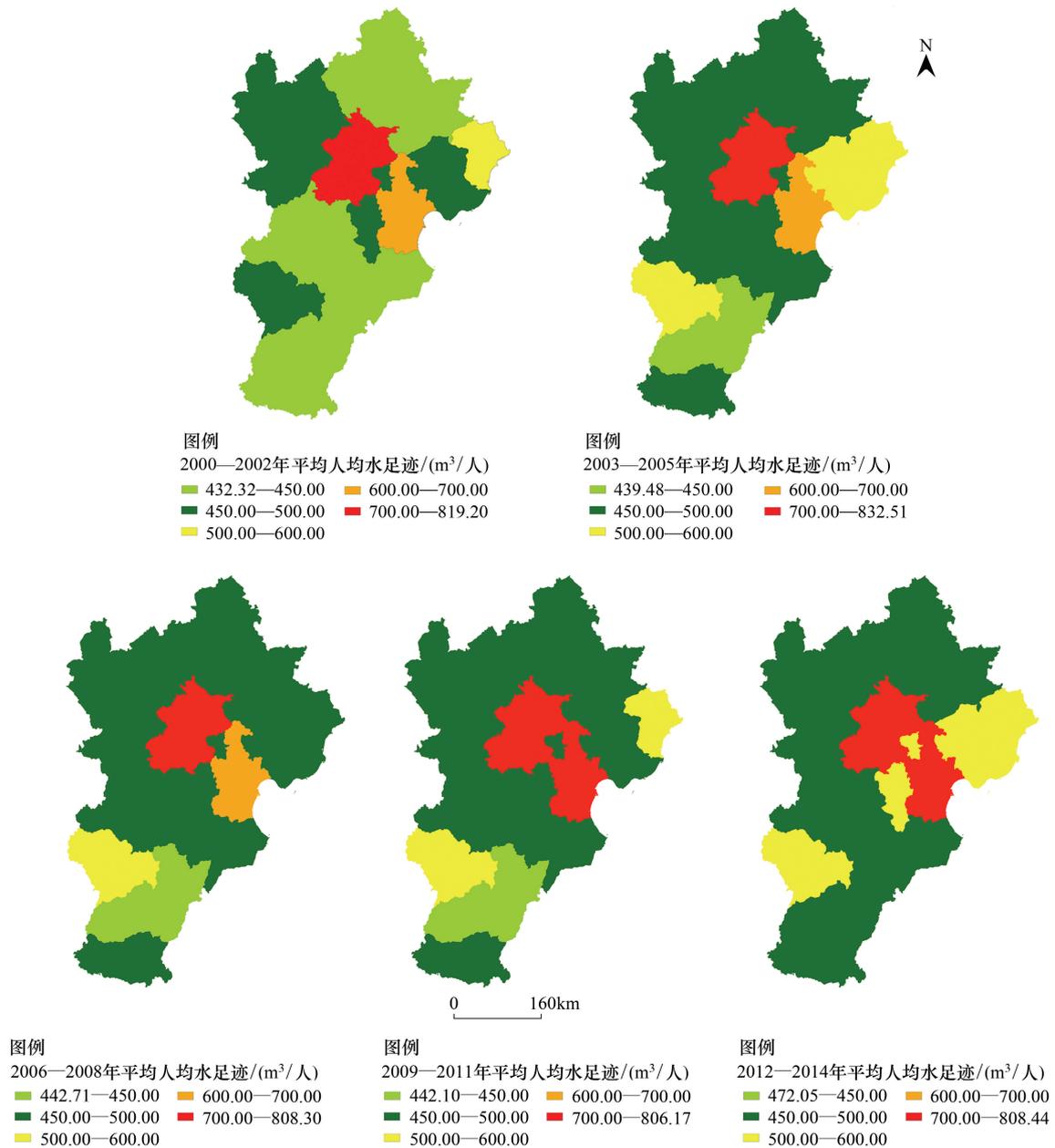


图3 京津冀市级 2000—2014 年人均水足迹
 Fig.3 Water footprint per capita of the Beijing-Tianjin-Hebei cities from 2000 to 2014

仅为 0.36 亿 m³。衡水市所辖区县水足迹也较低。在时间上,2000—2014 年,由于人口总量,特别是城镇人口的增加,京津冀区县水足迹总体呈现增长趋势,203 个区县平均水足迹由 2000 年的 2.30 亿 m³ 增长为 2014 年的 3.16 亿 m³。其中北京市市辖区水足迹增长幅度最大,天津市次之(图 5)。

京津冀区县 2000—2014 年人均水足迹结果表明(图 6),北京市主城六区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山区)人均水足迹在京津冀区县中最高,年平均人均水足迹超过 860 m³/人。北京市其他市辖区和天津市主城六区(和平、南开、河北、河东、河西、红桥区)、滨海新区人均水足迹次之,均高于 700 m³/人。石家庄主城区人均水足迹也相对较高,均高于 600 m³/人。邯郸、邢台、保定所辖山区区县人均水足迹相对较低。衡水市所辖区县人均水足迹也较低,均低于 450 m³/人。

2.3 水足迹结构组成分析

如前文所述,水足迹主要由生活用水、虚拟水消费和生态环境用水组成。其中虚拟水消费包括农产品和

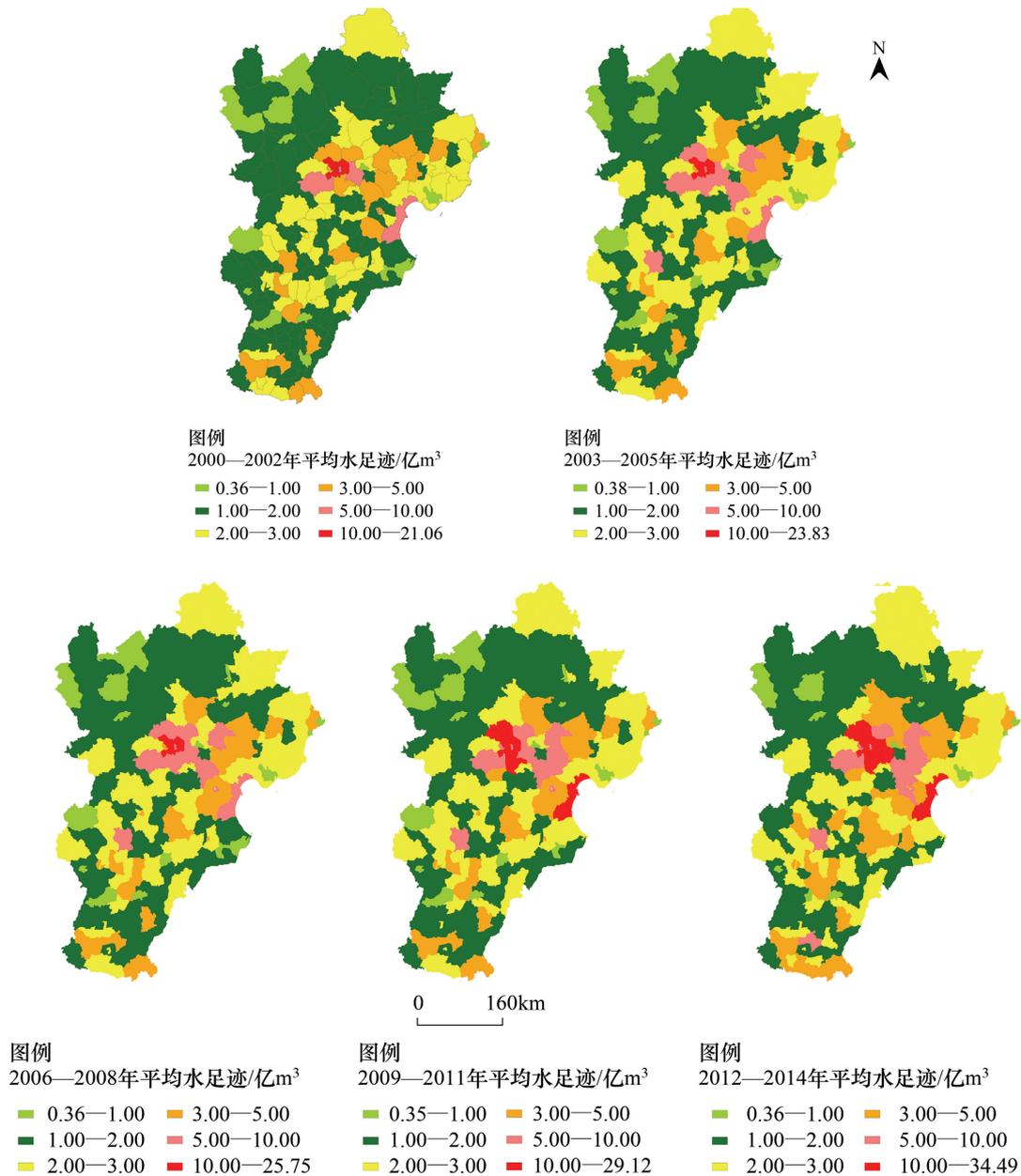


图4 京津冀区县2000—2014年水足迹

Fig.4 Water footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei counties from 2000 to 2014

动物产品的虚拟水消费。本文以2014年为例,分析京津冀13个城市水足迹的结构组成(图7)。结果表明,京津冀地区水足迹的组成比例从大到小依次是消费虚拟水量、生活用水量和生态环境用水量。消费虚拟水量约占水足迹的90%,这与王艳阳、曹永强等^[7-8]计算出的虚拟水消费所占水足迹的比例一致。在虚拟水消费中,除北京、天津、石家庄、秦皇岛消费的动物产品虚拟水所占比例高于该市消费的农产品虚拟水外,其余城市消费的动物产品虚拟水比例略低于农产品虚拟水或与之持平。

生态环境用水量能反映一个城市或地区对生态环境建设与修复的投入程度。本文计算了2000—2014年京津冀三省市生态环境用水所占各自省市水足迹比例(图8)。结果表明,北京市生态环境用水所占水足迹的比例高于天津市和河北省。同时,京津冀生态环境用水所占水足迹比例总体呈现增加的趋势,表明京津冀地区对生态环境保护的重视和投入有所加大。北京市增加幅度最大,天津市次之。其中,北京市生态环境用水所占水足迹比例在2004年到2008年期间增长幅度高于其他年份,原因是北京市为了筹备2008年奥运会,进

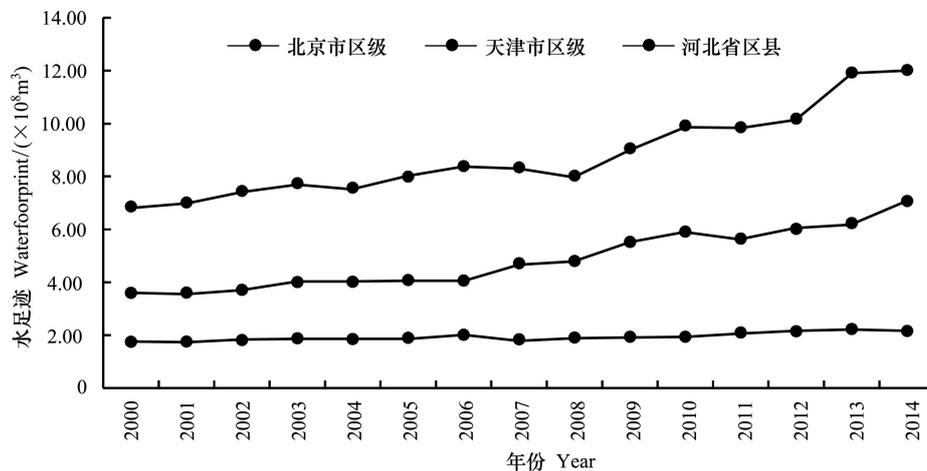


图 5 京津冀三省市 2000—2014 年平均区县水足迹

Fig.5 Average water footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei counties from 2000 to 2014

一步加大了对生态环境的保护力度。

3 讨论

(1) 京津冀地区需要提高水资源利用和分配效率。京津冀市级、区县水足迹、人均水足迹均呈现出增加的趋势,表明随着城镇化水平的提高,城镇化对水资源的胁迫和压力越来越大。京津冀地区是我国水资源最为短缺的地区之一,城市的扩张和城镇人口的增长必须考虑水资源这一重要的限制性因素,必须考虑到水资源的承载能力。虽然自 2014 年底南水北调工程正式通水运行以来,京津冀地区水资源压力得到了一定程度的缓解。但是,如何更为高效地分配南水北调水资源也是一个重要的课题。本文水足迹的研究成果,可为南水北调水资源在京津冀地区的合理分配提供参考。对于水足迹较大且本地水源供应不足的市和区县,在使用南水北调水资源时,应该予以优先保障。

(2) 京津冀地区需要提高生态环境用水所占比例,进一步加大生态环境投入力度。本地区生态环境用水所占水足迹的比例虽然在不断上升,但总体仍然偏低。以 2014 年为例,京津冀生态环境用水所占水足迹的平均比例仅为 2.06%,除北京、石家庄生态环境用水所占比例略高(超过 3%)外,其余城市均较低(图 7)。京津冀地区是我国水污染最为严重的地区之一,前人研究表明,京津冀地区水体总体呈现富营养化,其中 44% 的主要河流处于极度富营养化水平^[19]。环保部发布的 2014 年中国空气质量最差的 10 位城市中,河北省占据 7 席。因此,京津冀地区需要进一步提高生态环境用水量,通过城镇绿地灌溉、环境卫生清洁和河湖、湿地补水等措施,可以在一定程度上减轻本区域水体和大气污染。京津冀生活用水所占水足迹比例为 6.96%。其中,唐山、北京、秦皇岛、廊坊、石家庄、承德等城市生活用水所占比例均超过了平均值。上述城市除石家庄外,均位于京津冀北部。因此,北部城市需要进一步增强节水意识,降低生活用水所占比例。

4 结论

本文运用自下而上的方法,基于消费虚拟水量、生活用水量和生态环境用水量等指标,计算并分析了京津冀地区 2000—2014 年市级、区县水足迹、人均水足迹的时空变化特征,可为研究该区域城镇化对水资源量的胁迫效应提供参考与依据。结果表明,(1) 市级尺度上,北京市水足迹、人均水足迹最高,天津市次之。石家庄市水足迹、人均水足迹相对较高,衡水市水足迹、人均水足迹均相对较低。京津冀市级平均水足迹由 2000 年的 35.88 亿 m^3 增长到 2014 年的 50.82 亿 m^3 ,天津市、北京市增长幅度最大。(2) 区县尺度上,北京市主城六区水足迹、人均水足迹最高,北京市其他市辖区和天津市主城六区、滨海新区水足迹、人均水足迹次之,石家庄市主城区水足迹、人均水足迹也相对较高。北部燕山山区、西部太行山区及衡水市所辖区县水足迹、人均水

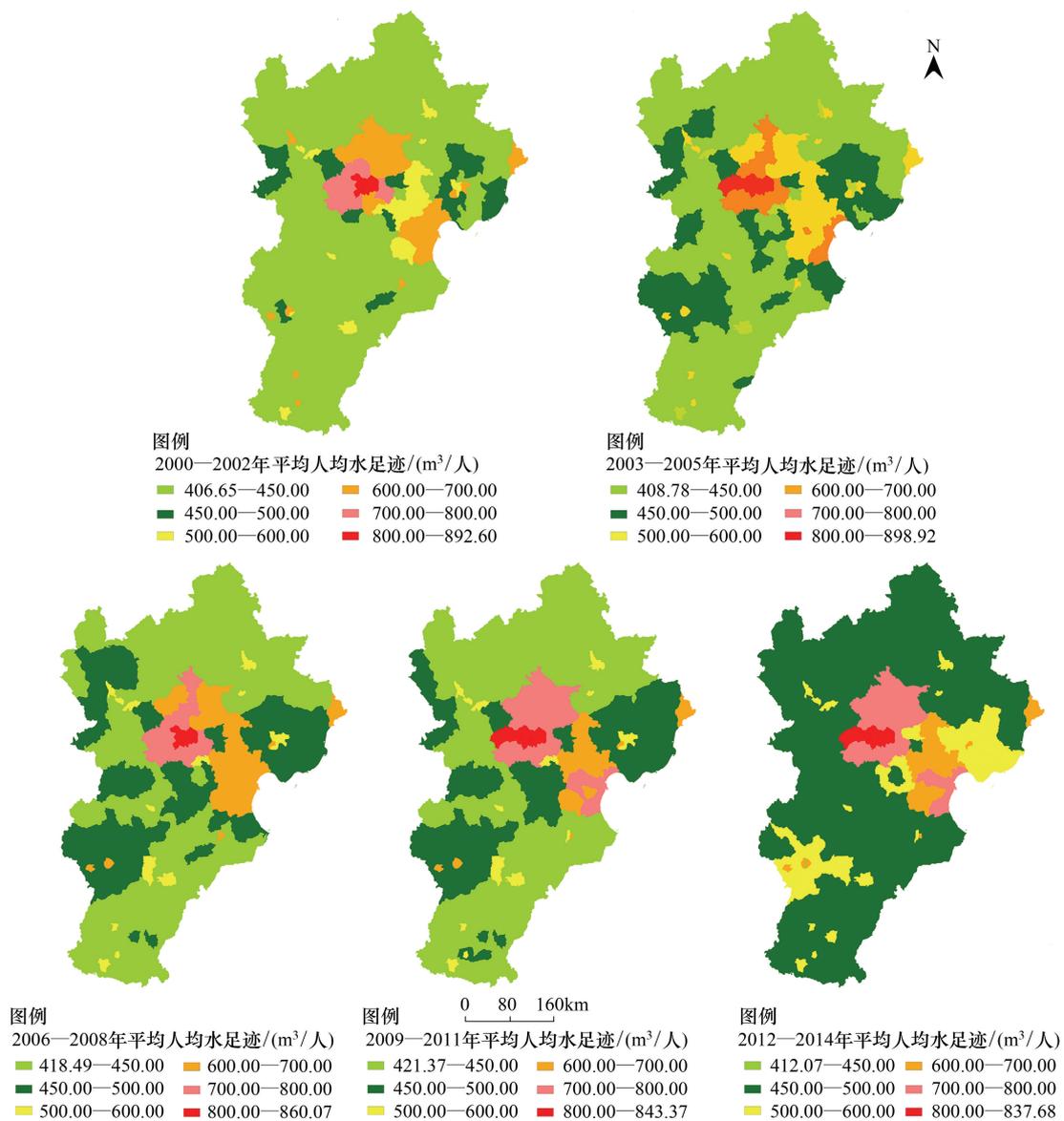


图 6 京津冀区县 2000—2014 年人均水足迹

Fig.6 Water footprint per capita of the Beijing-Tianjin-Hebei counties from 2000 to 2014

足迹最低。京津冀区县平均水足迹由 2000 年的 2.30 亿 m^3 增长为 2014 年的 3.16 亿 m^3 。北京市市辖区水足迹增长幅度最大,天津市市辖区次之。(3) 水足迹的构成比例从大到小依次是消费虚拟水量、生活用水量和生态环境用水量,消费虚拟水量约占水足迹的 90%。京津冀生态环境用水所占水足迹比例总体呈现增加的趋势,北京市生态环境用水所占水足迹的比例高于天津市和河北省。

由于工业产品种类繁多且生产工艺过程复杂多样,工业产品虚拟水核算框架很难构建,且缺乏相关的数据支持^[20-21],本文计算的虚拟水消费量不包括工业产品。然而,大规模的工业生产过程不仅需要消耗大量的水资源,还排放大量的生产废水。因此,在未来的研究中,可以选取少数代表性的工业产品,估算京津冀地区工业产品的虚拟水量。同时,受制于数据的局限,本文没有考虑京津冀地区虚拟水的进口与出口情况。然而,京津冀地区消费的农作物产品和动物产品除了来自本区域外,还来自于全国或全球其他区域。因此,在下一步的研究中,虚拟水的贸易情况需要关注。

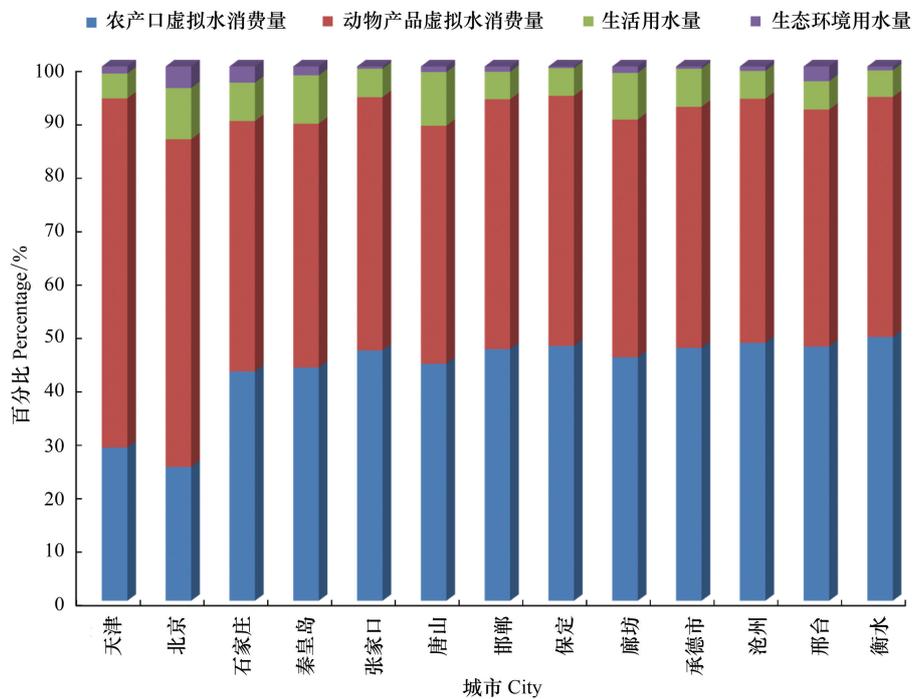


图 7 京津冀市级 2014 年水足迹结构组

Fig.7 Structural components of the water footprint of the Beijing-Tianjin-Hebei cities in 2014

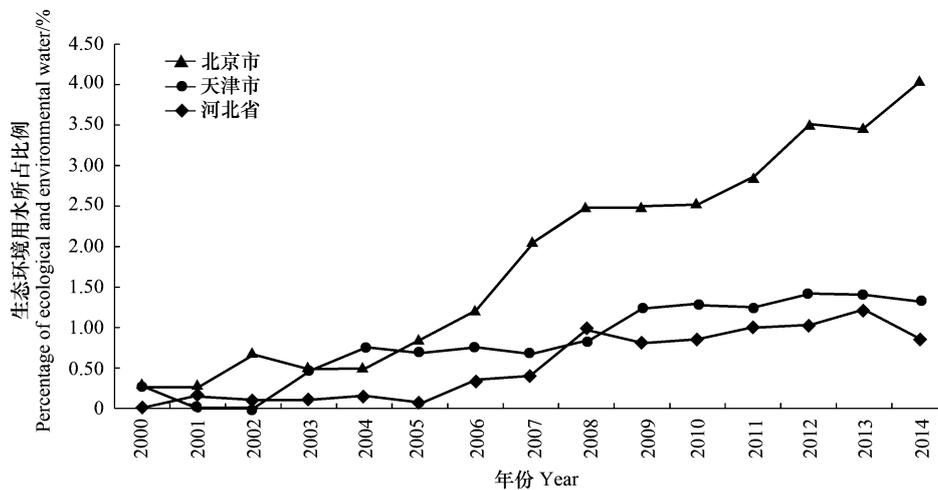


图 8 京津冀三省市生态环境用水所占水足迹比例

Fig.8 Percentage of ecological and environmental water and the Beijing-Tianjin-Hebei water footprint from 2000 to 2014

参考文献 (References):

[1] 戚瑞, 耿涌, 朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价. 自然资源学报, 2011, 26(3): 486-495.

[2] Zhao D D, Tang Y, Liu J G, Tillotson M R. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 919-928.

[3] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 王峰. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析. 自然资源学报, 2012, 27(6): 1022-1034.

[4] Hoekstra A Y, Hung P Q. Globalisation of water resources; international virtual water flows in relation to crop trade. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45-56.

[5] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water Footprints of Nations Volume 1: Main Report. Virtual Water Trade: Value of Water Research Report Series

No. 16. Delft: UNESCO-IHE, 2004.

- [6] Ridoutt B G, Eady S J, Sellahewa J, Simons L, Bektash R. Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(13): 1228-1235.
- [7] 曹永强, 马静. 水足迹在河北省水资源管理中的实证研究. *长江科学院院报*, 2011, 28(8): 18-21, 26-26.
- [8] 王艳阳, 王会肖, 蔡燕. 北京市水足迹计算与分析. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 954-960.
- [9] Gleick P H. *The World'S Water 2000-2001: the Biennial Report on Freshwater Resources*. Washington: Island Press, 2000.
- [10] 董蒙, 张军民. 新疆 2012 年水足迹计算与分析. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 1162-1170.
- [11] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5458-5466.
- [12] 张钧茹. 基于系统动力学的京津冀地区水资源承载力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [13] 韩玉, 杨晓琳, 陈源泉, 隋鹏, 顾时贵. 基于水足迹的河北省水资源安全评价. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 1031-1038.
- [14] 王书华. 流域水资源约束下的产业结构选择和虚拟水战略研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [15] 王新华, 徐中民, 李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价. *自然资源学报*, 2005, 20(6): 909-915.
- [16] 黄少良, 杜冲, 李伟群, 王丽华. 工业水足迹理论与方法浅析. *生态经济*, 2013, (1): 28-31.
- [17] 姜莉. 海河流域京津冀地区虚拟水实证研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2011.
- [18] 李磊, 张贵祥. 京津冀城市群内城市发展质量. *经济地理*, 2015, 35(5): 61-64, 8-8.
- [19] 张洪, 林超, 雷沛, 单保庆, 赵钰. 海河流域河流富营养化程度总体评估. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2336-2344.
- [20] 贾佳, 严岩, 王辰星, 梁玉静, 张亚君, 吴钢, 刘馨磊, 王丽华, 杜冲. 工业水足迹评价与应用. *生态学报*, 2012, 32(20): 6558-6565.
- [21] 严岩, 贾佳, 王丽华, 杜冲, 刘馨磊, 付晓, 刘昕, 吴钢. 我国几种典型棉纺织产品的工业水足迹评价. *生态学报*, 2014, 34(23): 7119-7126.