

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2018.0093

韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 26-34.
HAN Y P, LI X S, HUANG H P, et al. Spatial and temporal distribution of water footprint of main crops and its influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 26-34. (in Chinese)

京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析

韩宇平^{1,3}, 李新生¹, 黄会平^{1,2}, 贾冬冬¹

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450046;
3. 河南省水环境治理与模拟重点实验室, 郑州 450046)

摘要: 水资源短缺是制约京津冀协同、可持续发展的重要瓶颈之一, 为清晰地描述区域不同农作物生产过程中的需水特征, 为区域水资源的合理配置和高效利用提供指导意见。基于 2000–2015 年京津冀 24 个气象站日气象数据、全区作物种植面积及产量, 分析了区域作物蓝水、绿水、灰水足迹的时空分布、变化趋势及影响因子。结果表明: 2000–2015 年间, 小麦、玉米、大豆、油料、谷物、棉花、蔬菜年均单位质量总水足迹分别为 1 784.2 m³/t、1 564.2 m³/t、4 386.6 m³/t、3 427.5 m³/t、2 032 m³/t、9 574.1 m³/t 和 152 m³/t; 年均蓝水、绿水、灰水足迹分别为 211.6 亿 m³、164.8 亿 m³ 和 321.4 亿 m³; 总水足迹中蓝水、绿水、灰水所占比例分别呈现下降、上升及先上升后下降的趋势; 水足迹空间分布表现为西北部和北部较少、南部、东南部和中部较多; 影响水足迹总量的因子中, 第一、第五主成分为氮肥施用量和作物种植面积, 第二主成分为热力学和动力学因子, 第三、四主成分为水分因子。

关键词: 京津冀; 农作物; 水足迹; 时空分布; 主成分分析

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0026-09

Spatial and temporal distribution of water footprint of main crops and its influencing factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

HAN Yuping^{1,3}, LI Xinsheng¹, HUANG Huiping^{1,2}, JIA Dongdong¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Protection Engineering, Zhengzhou 450046, China;
3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Water shortage is one of the important bottlenecks restricting the coordination and sustainable development of the Beijing-Tianjin-Hebei region. In order to clearly describe the water demand characteristics of different crops in the region, this paper discussed the spatial-temporal characteristics and influencing factors of the blue, green, and grey water footprints (WF) of main crops based on crop acreage, yield data, and daily meteorological data of 24 meteorological stations during the period of 2000–2015. Results showed that the annual average total WF per unit mass of wheat, corn, soybean, oilseeds, grains, cotton and vegetables during 2000–2015 were 1 784.2 m³/t, 1 564.2 m³/t, 4 386.6 m³/t, 3 427.5 m³/t, 2 032 m³/t, 9 574.1 m³/t, and 152 m³/t respectively. The annual average blue, green and grey WF were 211.6 billion m³, 164.8 billion m³ and 321.4 billion m³ respectively. From 2000 to 2015, the proportions of blue, green and grey WF in total WF respectively showed a tendency of decreasing, increasing, and first increasing then decreasing. There was less distribution of WF in the northwest and north of the region and more distribution in the south, southeast and middle of the region. Among the factors influencing the total WF, the first

收稿日期: 2018-04-18 修回日期: 2018-06-01 网络出版时间: 2018-06-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180613.1409.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401402); 国家自然科学基金(51679089; 51709107)

Funds: The National Key Research and Development Program of China (2016YFC0401402); National Natural Science Foundation of China (51679089; 51709107)

作者简介: 韩宇平(1975-), 男, 宁夏彭阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: han0118@163.com

通讯作者: 黄会平(1979-), 女, 河南许昌人, 讲师, 博士, 主要从事水资源与地理信息系统研究。E-mail: 13526882916@163.com

and the fifth principal components were nitrogen application and crop acreage; the second principal component was the thermodynamic and kinetic factors; and the third and fourth principal components were both moisture factors.

Key words: Beijing Tianjin Hebei region; crops; WF; spatial-temporal distribution; principal component analysis

20世纪90年代, 英格兰伦敦大学非洲和东亚研究院Allan^[1]创造性地提出一种虚拟在商品中用于表示产品在生产过程中所消耗水资源量的指标, 并称之为“虚拟水”。荷兰学者Hoekstra^[2]在虚拟水研究的基础上进一步提出水足迹的概念, 指任何已知人口(如个人、企业、省、州、国家等)一定时期内消费的产品和服务所需要的淡水资源数量, 也可以表示生产某一产品或提供某种服务所消耗的淡水资源, 可以分为蓝水、绿水、灰水足迹。蓝水足迹指灌溉对地表水或地下水的消耗, 绿水足迹是降水的消耗, 灰水足迹指稀释作物生长阶段所产生污染物的理论消耗^[3]。此后, 国内外学者进行了诸多研究, 不断发展完善虚拟水和水足迹理论。柯兵等^[4]就虚拟水在解决我国农业用水和粮食安全问题上进行了探究; Chapagain等^[5]计算了全球水足迹和人均水足迹, 并对国家间水足迹和人均水足迹进行比较; 龙爱华等^[6]基于虚拟水理论, 核算了2000年西北四省的总水足迹和人均水足迹; Kampman^[7]基于水足迹分析了1997–2001年间印度的水资源利用状况; Ardaya等^[8]利用Cropwat软件对西班牙Mancha地区农产品蓝水和绿水含量进行核算, 同时探讨作物生长发育期的水文条件和农产品经济效应之间的关系; Chapagain等^[9]从生产者和消费者两个方面出发, 核算水稻中的蓝水、绿水、灰水含量; 钟一丹^[10]基于虚拟水理论对北京市水资源承载力进行了分析; 李红颖^[11]对吉林省水稻生产水足迹进行了时空分异研究; 孙世坤, 吴普特^[12]分析了中国小麦生产水足迹的区域差异并进行归因分析; 孙才志^[13]开展了中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析研究。不过, 目前从县域尺度对长时间序列的农业水足迹变化和分布研究还鲜见报道。

京津冀不仅是我国政治、经济、文化中心, 而且在我国的粮食生产中也占有重要地位, 2016年该地区农业用水量达146亿 m^3 , 占区域水资源总量的55.7%, 占区域用水总量的58.7%^[14]。随着京津冀协同发展战略和雄安新区的规划建设等项目的实施, 人们生活、生产和生态用水的增加将会对区域未来水资源可持续利用产生重大影响。为此, 本文从水足迹视角, 基于2000–2015年气象数据、作物种植面积及产量数据, 核算主要作物蓝水、绿水和灰水

足迹, 分析其时空分布特征及发展趋势, 揭示水足迹影响因子。研究结果可以为京津冀地区水资源管理、农业种植结构调整、适水发展模式等一系列问题提供有益的参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

京津冀地区位于华北平原北部, 处于 $113^{\circ}04' - 119^{\circ}53' E$ 和 $36^{\circ}01' - 42^{\circ}37' N$ 之间, 包括北京市、天津市和河北省。受地形和降水影响水资源时空分布不均, 多年平均降水量约500 mm, 由东南向西北方向递减, 降水多集中于夏季; 西北部地区地势较高, 蒸发大降水少; 燕山以南靠近海岸线, 受海上东南季风影响, 降水丰富。同时京津冀又是我国重要的粮食主产区, 粮食作物种植面积700多万 hm^2 , 作物种类丰富, 以小麦和玉米为主要粮食作物, 为保障我国的粮食安全做出突出贡献。

1.2 数据来源

本文气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台, 包括日最高气温($^{\circ}C$)、日最低气温、日平均气温、平均风速(m/s)、日照时数(h)、相对湿度($\%$)、平均水汽压、逐日降水量以及各气象站点的经纬度、海拔高程等。2000–2015年间全区作物面积、产量数据来自《河北农村统计年鉴》以及《中国统计年鉴》中北京、天津的相关数据^[15-16]。作物系数参照《北方地区主要农作物灌溉用水定额》^[17]以及FAO推荐的84种作物的标准系数相关数据。

1.3 研究方法

1.3.1 基于全生命周期法田间尺度作物水足迹的量化方法

作物水足迹(water footprint of crop production, WF_{crop})指单位质量的作物生产过程中消耗的水资源量, 包括绿水足迹(WF_{green})、蓝水足迹(WF_{blue})和灰水足迹(WF_{grey}), 按照《水足迹评价手册》^[18]中推荐的方法计算如下:

$$WF_{crop} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (1)$$

式中: WF_{crop} 为作物生产水足迹($m^3/t, m^3/Kg$), 作物绿水和蓝水足迹计算公式如下:

$$WF_{green} = CWU_{green}/Y = 10ET_{green}/Y \quad (2)$$

$$WF_{blue} = CWU_{blue}/Y = 10ET_{blue}/Y \quad (3)$$

式中: CWU_{green} 、 WF_{blue} 表示作物生长过程中对绿水和蓝水的消耗量(m^3/hm^2), Y 表示某作物的单位面积产量(t/hm^2), 10 为转化系数, 其中绿水蒸散发(ET_{green} , mm/d)与蓝水蒸散发(ET_{blue} , mm/d)计算公式如下:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \quad (4)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \quad (5)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (6)$$

式中: K_c 为作物系数, 采用 CROPWAT 数据库中的数据; P_{eff} 为有效降水量, 采用美国农业部土壤保持局(USDA-SCS)的方法进行计算^[19], ET_0 采用 Penmar Monteith 公式计算。

作物生长过程中氮肥在化肥施用中比例最高, 对农业面源污染贡献最大, 因此在农业灰水足迹计算中引入稀释淋失氮的需水量^[20]。本文农业灰水足迹主要指稀释作物生长阶段所产生的淋失氮, 使其达到标准规范所需要的淡水体积。《水足迹评价手册》中计算公式为:

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR)/(c_{max} - c_{nat})}{Y} \quad (7)$$

式中: α 为氮肥淋失率; AR 为折纯后每公顷氮肥施用量(kg/hm^2); c_{max} 为污染物的水质标准质量浓度(kg/m^3); c_{nat} 为受纳水体的自然本底质量浓度(kg/m^3)。相关参数参照文献[21-22]中数据, α 取

25%, c_{max} 取 $0.01 kg/m^3$, c_{nat} 取 $0 kg/m^3$ 。

1.3.2 主成分分析法

主成分分析是通过对原始变量相关矩阵或者协方差矩阵内部关系的研究, 利用原始变量的线性组合形成几个综合指标(主成分)的多元统计方法^[23], 可以在保留原始变量信息的前提下达到降维与简化问题的作用。

2 结果分析

2.1 京津冀地区主要作物单位质量水足迹时空分布

2.1.1 主要作物单位质量水足迹构成及时间变化

2000-2015 年间各作物年均单位质量水足迹见表 1。棉花单位质量水足迹为 $9574.1 m^3/t$, 远高于其他作物。大豆和油料作物单位质量水足迹为 $4386.6 m^3/t$ 、 $3427.5 m^3/t$ 。小麦、玉米和稻谷为当地主要粮食作物, 单位质量水足迹为 $1784.2 m^3/t$ 、 $1564.2 m^3/t$ 、 $2032 m^3/t$ 。蔬菜单位质量水足迹最低为 $152 m^3/t$ 。棉花单位质量水足迹为小麦的 5.4 倍, 为玉米的 6.1 倍。大豆和油料作物单位质量水足迹分别为小麦的 2.5 倍和 1.9 倍, 为玉米的 2.8 倍和 2.2 倍。小麦和玉米单位质量水足迹相近, 从构成来看小麦单位质量蓝水足迹高于玉米, 为玉米的 2.5 倍。

表 1 京津冀 2000-2015 年主要作物单位质量水足迹

Tab. 1 Water footprint per unit mass of main crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000-2015 m^3/t

作物	小麦	玉米	蔬菜	棉花	油料作物	稻谷	大豆
单位质量蓝水足迹	712.7	282.5	33.3	2836.7	771	622.4	861.4
单位质量绿水足迹	196	420.4	29.3	2703.2	909.5	426.1	1168.4
单位质量灰水足迹	875.5	861.3	89.4	4034.2	1747	983.5	2356.8
单位质量总水足迹	1784.2	1564.2	152	9574.1	3427.5	2032	4386.6

图 1 反映了各作物单位质量水足迹在 2000-2015 年间变化情况。各作物单位质量水足迹虽有波动但整体均呈现出下降趋势, 反映了京津冀农业用水效率在逐年提高。2000-2015 年间, 棉花、油料、稻谷、大豆、玉米、小麦和蔬菜单位质量水足迹最高年份和最低年份差值为 $2067.9 m^3/t$ 、 $1590.1 m^3/t$ 、 $1002.3 m^3/t$ 、 $930.1 m^3/t$ 、 $674.8 m^3/t$ 、 $485.6 m^3/t$ 、 $49.2 m^3/t$ 。在作物用水量保持不变的前提下, 作物单位面积产量越高, 其单位质量水足迹就越低, 因此提高作物单位面积产量是提高农业用水效率的重要途径。

2.1.2 京津冀地区主要作物单位质量水足迹空间分布

图 2 表明京津冀地区各作物单位质量水足迹空

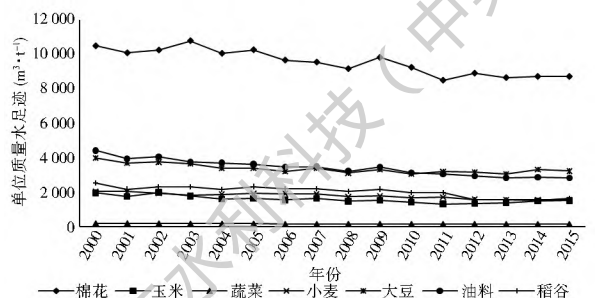


图 1 2000-2015 年京津冀各作物单位质量水足迹年际变化
Fig. 1 Interannual variation of water footprint per unit mass of crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000-2015

间分布存在较大的差异性。小麦是区域主要的农业耗水作物, 单位质量水足迹 80% 的区域集中分布在 $1143.4 \sim 2120.6 m^3/t$ 之间, 中部和南部偏低, 东部和北部较高, 较大值出现在迁西县和黄骅市。玉

米是区域主要的秋收作物,单位质量水足迹 80% 的区域集中分布在 950.6~2014.2 m³/t 间,承德市与张家口市较高,一方面是由于当地玉米类型为春玉米,另一方面与当地气象和地理因素造成的灾害性减产有关。油料作物单位质量水足迹 80% 的区域集中在 2046.8~6501.8 m³/t,西北部较高,东北部次之,中部和南部区域较低。棉花单位质量水足迹 80% 的区域集中在 6665.6~14070.3 m³/t,

空间分布较为散乱,较大值出现在石家庄市和邢台市等,如栾城县、海兴县和沙河市等地,较小值出现在唐山和邯郸的部分区域。蔬菜水足迹 80% 的区域分布在 78.3~210.5 m³/t,承德大部分区域和西部地区则较高,较小值出现在石家庄、唐山和秦皇岛地区。各作物县域尺度水足迹空间分布表明,区域农业水资源管理水平、农业水资源利用效率有很大的提升空间。

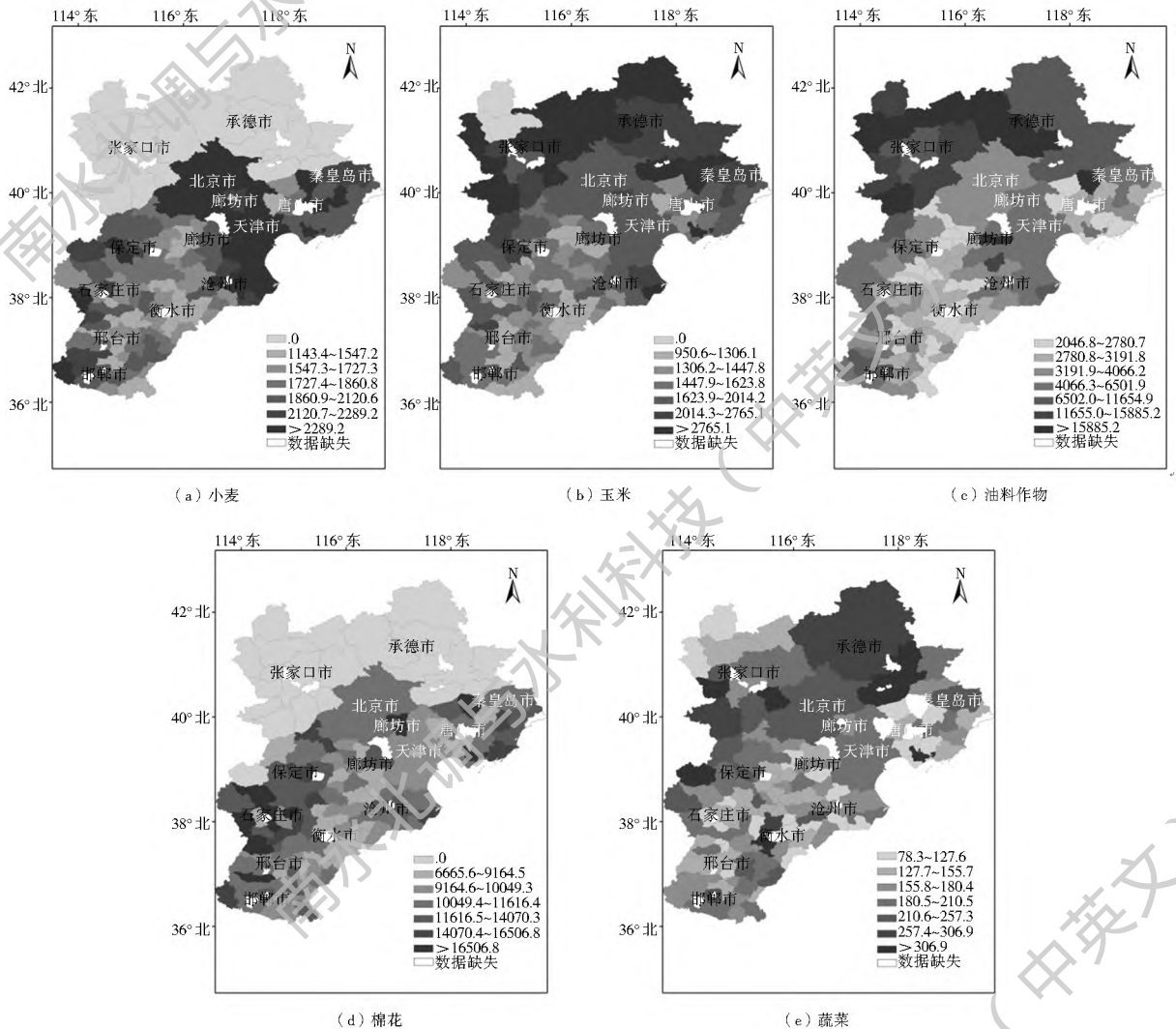


图 2 2000-2015 年间京津冀主要作物单位质量水足迹空间分布 (单位: m³/t)

Fig. 2 Spatial distribution of water footprint per unit mass of main crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000-2015

2.2 京津冀主要作物总水足迹时空变化

2.2.1 作物总水足迹构成及时间变化

2000-2015 年间各作物水足迹和构成见表 2,小麦和玉米是该地区主要耕种作物和耗水作物,两种作物水足迹和占总作物水足迹的 66.3%。从蓝水足迹可以看出,小麦蓝水足迹占作物总蓝水足迹的 46.9%,为该地区主要灌溉需水作物,蓝水足迹和绿水足迹比值接近 4:1,表明小麦生产在该地区对灌溉的依重程度高。玉米蓝水足迹占总蓝水足迹的 22.8%,玉米年均蓝水足迹和绿水足迹比值接近

2:3,是对灌溉倚重程度最低的作物。蔬菜为低耗水作物,单位质量水足迹最低,但由于种植面积较大,水足迹达 113.7 亿 m³。棉花为高耗水作物。油料,稻谷,大豆在作物生长期蓝、绿水足迹所占比值相近,水足迹消耗较少,共占总水足迹的 11.2%。除棉花外,所有作物灰水足迹占总水足迹的比例均高于 50%,年均水足迹为 442.2 亿 m³,为京津冀多年平均水资源量的 1.71 倍,表明在农作物生产过程中给水环境带来的污染是非常严重的,需引起足够重视。

表 2 京津冀 2000-2015 年主要作物水足迹

Tab. 2 Water footprint of main crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000-2015

作物	小麦	玉米	蔬菜	棉花	油料	稻谷	大豆
蓝水足迹/亿 m ³	99.3	48.2	23.4	20	11.4	4.8	4.6
绿水足迹/亿 m ³	27	74.9	20.8	19.6	13.4	3.3	5.8
灰水足迹/亿 m ³	128.8	164.6	69.5	30.9	27.7	8.1	12.6
蓝水所占比(%)	38.9	16.8	20.6	28.4	21.7	29.6	20.0
绿水所占比(%)	10.6	26.0	18.3	27.8	25.5	20.4	25.2
灰水所占比(%)	50.5	57.2	61.1	43.8	52.8	50.0	54.8

各作物 2000-2015 年间水足迹变化见图 3。小麦水足迹 2000-2003 年间呈现连续下降趋势,而后处于高位的波动状态且变幅较小。玉米和蔬菜水足迹呈上升趋势,棉花水足迹表现出先增长后持续下降的变化趋势。大豆、油料作物和稻谷水足迹则表现出持续的下降趋势。这种变化与区域作物种植结构的调整和减少高耗水作物种植面积从而降低灌溉用水需求密切相关,说明通过农业种植结构调整在一定程度上可以缓解区域农业用水压力。

2.2.2 作物总水足迹时间变化

表 3 表明 2000-2015 年间京津冀地区农业水足迹整体处于高位波动状态,因为京津冀作为我国粮食主产区,虽种植结构略有变化,但作物耕种面积

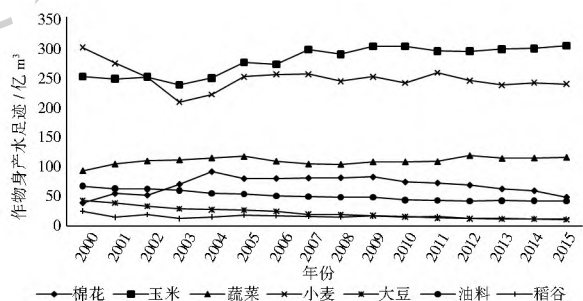


图 3 京津冀地区各作物水足迹 2000-2015 年年际变化

Fig. 3 Interannual variation of water footprint of crops in Beijing-Tianjin-Hebei during 2000-2015

并没有较大变动,作物生长需水量旺盛,化肥的大量使用使区域灰水足迹大幅上升。从作物总水足迹构成来看,蓝水足迹呈下降趋势,绿水足迹呈上升趋势,这与棉花、稻谷、大豆和油料等高耗水作物种植面积减少、灌溉需求较低的玉米种植面积增加有关。绿水足迹所占比例跟降雨状况密切相关。2000-2002 年连续三年干旱,该时段内绿水足迹所占比例较低,其中 2002 年绿水足迹所占比例仅为 19.1%,蓝水足迹所占比例为 36.7%,而在其雨水较为丰沛的 2008 年,绿水足迹所占比例最高达到 28.9%,蓝水足迹为 25.9%,因此绿水足迹在区域粮食生产中具有重要的作用。灰水足迹表现出先上升后下降的趋势,与区域氮肥施用量的变化关系密切。

表 3 京津冀 2000-2015 年农业水足迹

Tab. 3 Water footprint of agriculture in Beijing-Tianjin-Hebei region during 2000-2015

年份	水足迹/亿 m ³			水足迹构成(%)			
	绿水足迹	蓝水足迹	灰水足迹	总水足迹	绿水百分比	蓝水百分比	灰水百分比
2000	142.9	259.4	321.7	724.0	19.7	35.8	44.4
2001	134.1	254.8	294.5	683.4	19.6	37.3	43.1
2002	126.8	243.7	293.4	663.9	19.1	36.7	44.2
2003	158.5	163.1	292.8	614.5	25.8	26.5	47.7
2004	195.9	162.3	297.6	655.9	29.9	24.7	45.4
2005	164.9	226.7	313.5	705.0	23.4	32.1	44.5
2006	141.3	234.7	314.6	690.5	20.5	34.0	45.6
2007	167.0	221.2	325.1	713.3	23.4	31.0	45.6
2008	197.2	176.4	308.6	682.2	28.9	25.9	45.2
2009	180.4	219.0	322.2	721.6	25.0	30.4	44.7
2010	176.3	200.4	362.7	739.5	23.8	27.1	49.0
2011	169.4	216.3	342.9	728.7	23.2	29.7	47.1
2012	189.8	186.8	342.7	719.3	26.4	26.0	47.6
2013	191.8	173.8	341.7	707.3	27.1	24.6	48.3
2014	147.2	225.7	339.4	712.3	20.7	31.7	47.7
2015	153.4	221.8	329.6	704.9	21.8	31.5	46.8
多年平均	164.8	211.6	321.4	697.9	23.6	30.3	46.0

2.2.3 作物总水足迹空间分布

图4为2000-2015各县市年均水足迹空间分布,蓝水足迹与绿水足迹分布较为一致,河北省东部和南部较大,西部和北部区域较小。2000-2015年北京年均蓝水足迹为6.3亿m³,天津为12.7亿m³,河北省蓝水足迹较高的地区集中分布在邯郸、邢台、衡水等南部区域,其中宁晋、大名、定州、河间、沧县、景县和深州蓝水足迹均大于3亿m³。蓝水足迹分布较小的区域为承德、唐山、秦皇岛和张家口等西北部、北部和东北部区域,其中兴隆、宽城满族自治县、阜平、乐亭、崇礼和青龙满族自治县蓝水足迹均未超过0.3亿m³;2000-2015年北京年均绿水足迹为5.3亿m³,天津为9.5亿m³,河北省绿水足

迹较高的地区为沧州、唐山、邢台和石家庄等中部、南部和东北部区域,其中河间、定州、玉田、沧县和滦县绿水足迹均大于了2亿m³,河北省绿水足迹分布较小的区域在承德、张家口和保定等北部、西北部和西部区域,其中崇礼、阜平、宽城满族自治县、大厂回族自治县、尚义和涞源等绿水足迹均小于0.4亿m³。2000-2015年北京年均灰水足迹为18.2亿m³,天津为27.4亿m³,河北省灰水足迹较高的地区分布在石家庄、沧州、唐山和邯郸等东北部,中部和南部地区,其中辛集、赵县、沧县、藁城和定州灰水足迹均大于6亿m³,灰水足迹较少的区域分布在张家口、保定和承德等北部,西北部和西部地区,其中康保、沽源和张北灰水足迹小于0.3亿m³。

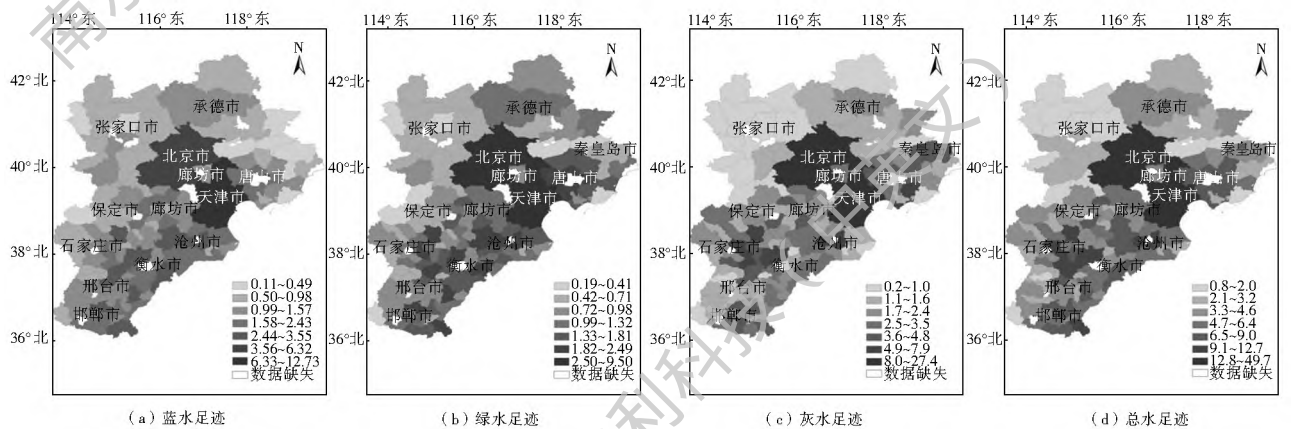


图4 京津冀地区水足迹空间分布(单位:亿m³)
Fig. 4 Spatial distribution of water footprint in Beijing Tianjin Hebei region

2.3 主要作物总水足迹影响因子

2.3.1 影响因子主成分分析

作物水足迹影响因素众多,且不同因素之间还会相互影响,同时一个区域内不同地区的作物水足迹主要影响因素也不尽相同。根据影响总水足迹的相关因素,本文选取了14个因子(包括氮肥施用量;稻谷、小麦、玉米、大豆、油料、棉花和蔬菜七种作物的种植面积;日照时数、平均气温、平均风速、平均水汽压、平均相对湿度;降水量),利用SPSS软件做主成分分析,具体步骤参照文献[24]。各个影响因子的度量单位和不同县市数据取值范围有较大差异,由此采用相关矩阵求解主成分。表4为总方差表,可以看出提取前5个成分累计贡献率达到82.6%,

即选取5个主成分已经能够对14个影响因子82.6%的信息进行概括,前两个主成分携带的信息量累积达57.4%。

每个因子中各原始变量系数差别不明显,文中采用方差最大正交旋转法(Varimax)进行因子旋转^[25],使每个因子具有最高荷载变量数目最小,更好地简化对因子的解释。表5为旋转成分矩阵。

表5表明第一主成分在X4、X1、X8、X5、X3等因子上有较大荷载,荷载值依次降低,第一主成分中有较大荷载的因素分别为氮肥施用量与玉米、蔬菜、大豆和小麦的种植面积,为影响区域农业水足迹总量的主要因素,且均为正相关;X9、X10、X11、X12等因子在第二主成分中有较大荷载,荷载值依次降

表4 主成分的特征值和贡献率

Tab.4 Eigenvalues and squared loadings of the principal components

成分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
合计	4.71	3.32	1.41	1.11	1.02	0.71	0.51	0.37	0.30	0.21	0.17	0.10	0.07	0.00
初始特征值	33.6	23.7	10.1	7.9	7.3	5.0	3.6	2.6	2.1	1.5	1.2	0.7	0.5	0.0
方差贡献率(%)	33.6	23.7	10.1	7.9	7.3	5.0	3.6	2.6	2.1	1.5	1.2	0.7	0.5	0.0
累积贡献率(%)	33.6	57.4	67.5	75.4	82.6	87.7	91.3	94.0	96.1	97.5	98.8	99.5	100	100

表 5 旋转成份矩阵

Tab.5 Rotated component matrix

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14
1	0.93	0.41	0.76	0.94	0.84	0.21	0.47	0.86	-0.05	0.1	0.12	0.08	-0.03	0.06
2	0.12	-0.33	0.38	0.04	-0.13	-0.08	-0.02	-0.06	-0.88	0.86	-0.8	0.72	0.07	0.41
3	0.05	0.06	0.32	0.05	-0.08	0.05	0.57	-0.08	-0.04	0.4	0.32	0.65	0.88	0.2
4	0.13	0.59	-0.18	0.06	0.07	-0.04	-0.24	0.15	0.08	0	-0.26	0.13	0.27	0.74
5	0.11	-0.02	0.18	0.08	-0.09	0.93	-0.31	0.15	-0.01	-0.1	0.03	-0.03	0.15	-0.03

注: X1 氮肥用量, X2 稻谷种植面积, X3 小麦种植面积, X4 玉米种植面积, X5 大豆种植面积, X6 油料种植面积, X7 棉花种植面积, X8 蔬菜种植面积, X9 日照时数, X10 平均气温, X11 平均风速, X12 平均水汽压, X13 平均相对湿度, X14 降水量。

低,其中 X9、X11 与第二主成分呈负相关, X10、X12 与第二主成分呈正相关; X12、X13 等因子在第三主成分中有较大荷载均呈正相关; X14 等因子在第四主成分中有较大荷载且均呈正相关, 第五主成分 X6 有较大的荷载且呈正相关。

2.3.2 主要影响因子空间分布

利用 SPSS 软件将初始数据标准化, 计算各区域主成分得分, 结合 ArcGIS 软件转化为栅格数据, 得到各县市 2000–2015 年平均农业水足迹各主成分因子得分的空间分布图(图 5), 据此分析影响因子的空间差异性。第 1 主成分主要表现为氮肥施用量与玉米、蔬菜、大豆和小麦的种植面积, 影响较大

的区域主要集中于京津冀平原粮食主产区, 对张家口, 承德等北部和西北部山区和坝上非作物主产区影响较小。第 2 主成分主要为日照时数、平均气温和平均风速, 影响较大的区域主要集中京津冀北部和西北部多山区的地域。第 3 主成分主要为平均相对湿度和平均气压, 影响较大的区域集中于东南部沿线和西北部坝上地区与相对湿度的空间分布较为一致。第 4 主成分主要为年降水量, 影响较大的区域集中于燕山以南, 这是由于该区域靠近海岸线, 受海上东南季风影响, 降水丰富。第 5 主成分主要为油料作物面积, 影响区域呈散状分布, 主要和油料种植集中种植区域相吻合。

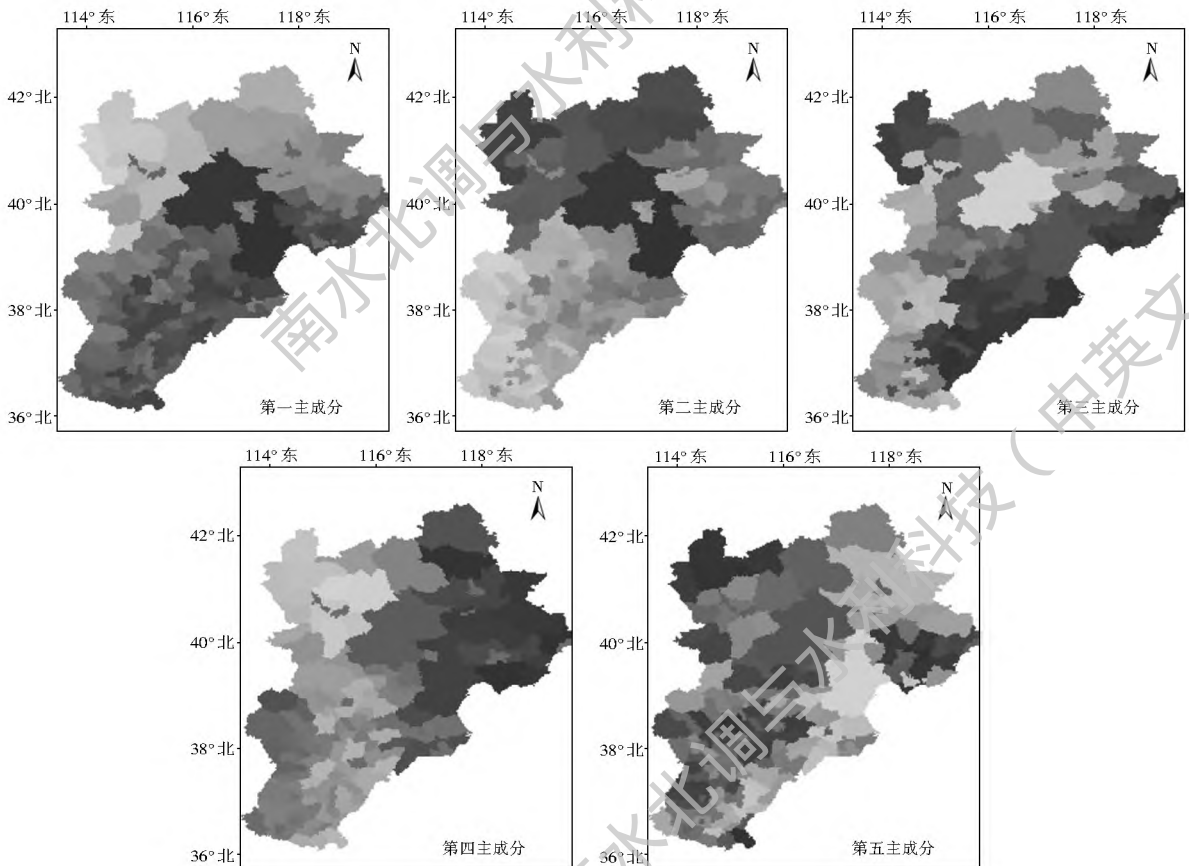


图 5 水足迹影响主要因子的空间分布

Fig. 5 Distribution of the leading factors influencing water footprint of main crops

3 结论

本文参照水足迹评价手册的相关计算方法,核算了京津冀主要作物的水足迹,结合 ArcGIS 和 SPSS 软件探讨该区域各作物水足迹空间分布及其影响因子,得出如下结论。

(1) 2000—2015 年间京津冀地区小麦、玉米、大豆、油料、谷物、棉花和蔬菜年均单位质量水足迹分别为 $1\ 784\ 2\ \text{m}^3/\text{t}$ 、 $1\ 564\ 2\ \text{m}^3/\text{t}$ 、 $4\ 386\ 6\ \text{m}^3/\text{t}$ 、 $3\ 427\ 5\ \text{m}^3/\text{t}$ 、 $2\ 032\ \text{m}^3/\text{t}$ 、 $9\ 574\ 1\ \text{m}^3/\text{t}$ 和 $152\ \text{m}^3/\text{t}$ 。

(2) 2000—2015 年均总水足迹为 $6\ 97.9$ 亿 m^3 , 蓝水、绿水、灰水足迹分别为 211.6 亿 m^3 、 164.8 亿 m^3 和 321.4 亿 m^3 , 占总水足迹的比例分别为 30.3% 、 23.6% 和 46% 。2000—2015 年间,绿水足迹所占比例呈上升趋势,蓝水足迹所占比例呈下降趋势,灰水足迹呈现先上升后下降的趋势。

(3) 影响水足迹总量的因子中,第一主成分主要因子为氮肥施用量、玉米、小麦和大豆种植面积,第二主成分主要因子为日照时数、平均气温、平均风速,第三主成分主要因子为平均相对湿度和平均水汽压,第四主成分主要因子为降水量,第五主成分主要因子为油料种植面积。

参考文献(References):

- [1] ALLAN J A. Overall perspectives on countries and regions. In Rogers, P. and Lydon, P. edits. *Water in the arab world: perspectives and prognoses*. Massachusetts: Harvard University Press, 1994: 65-100.
- [2] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction[A]. *Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade* Value of Water Research Report Series No. 12[C]. Delft, The Netherlands, IHE, 2003: 12-13.
- [3] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption. *Value of water research report series No. 50*[R]. Delft: UNESCO-IHE, 2011.
- [4] 柯兵,柳文华,段光明,等.虚拟水在解决农业生产和粮食安全问题中的作用研究[J]. *环境科学*, 2004(2): 32-36. (KE B, LIU W H, DUAN G M, et al. A virtual water analysis for agricultural production and food security[J]. *Environmental Science*, 2004(2): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn: 0250-3301.2004.02.007.
- [5] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Water footprints of nations[R]. *Value of Water Research Report Series No. 16*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2004.
- [6] 龙爱华,徐中民,张志强.虚拟水理论方法与西北4省(区)虚拟水实证研究[J]. *地球科学进展*, 2004(4): 577-584. (LONG A H, XU Z M, ZHANG Z Q. Theory and method of virtual water: a case study of northwest China[J]. *Advances in Earth Science*, 2004(4): 577-584. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn: 1001-8166.2004.04.014.
- [7] KAMPMAN D, HOEKSTRA A Y, KROL M. The water footprint of India[R]. *Value of Water Research Report Series No. 32*, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2008.
- [8] ALDAYA M M, ALLAN J A, HOEKSTRA A Y. Strategic importance of green water international trade[J]. *Ecological Economics*, 2010(69): 887-894. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2009.11.001.
- [9] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives[J]. *Ecological Economics*, 2011, 70: 749-758. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.11.012.
- [10] 钟一丹.基于虚拟水理论的北京市水资源承载力分析[D].北京:中国水利水电科学研究院,2012. (ZHONG Y D. Analyzing the carrying capacity of water resources in Beijing based on virtual water theory[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012. (in Chinese))
- [11] 李红颖,秦丽杰,杨婷.吉林省水稻生产水足迹时空分异研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 32-39. (LI H Y, QIN L, YANG T. Spatio-temporal differentiation of water footprint of rice production in Jilin province[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science edition)*, 2018, 39(2): 32-39. (in Chinese))
- [12] 孙世坤,王玉宝,吴普特,等.小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 142-148. (SUN S K, WANG Y B, WU P T, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(13): 142-148. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.13.020.
- [13] 孙才志,张灿灿.中国人均水足迹驱动效应分解与空间聚类分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(2): 1-11. (SU N C Z, ZHANG C C. Study on drive effect decomposition and spatial clustering analysis of China's per capita water footprint. [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(natural science edition)*, 2018, 39(2): 1-11. (in Chinese))
- [14] 赵勇,翟家齐.京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用[J]. *中国环境管理*, 2017, 9(4): 113-114. (ZHAO Y, ZHAI J Q. Research and development integration and demonstration application of Beijing Tianjin-Hebei water resources security assurance technology[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2017, 9(4): 113-114. (in Chinese)) DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2017.04.113.
- [15] 河北省人民政府办公厅;河北省统计局.河北农村统计年鉴 2006-2015[M].北京:中国统计出版社,2006-2016. (General office of Hebei Provincial People's Government; Statistical Bureau of Hebei Province. *Hebei Rural Statistical Yearbook 2006-2015* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2006-2016. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴 2006-2015[M].北京:中国统计出版社,2006-2016. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2006-2015* [M]. Beijing: China Statistics Press,

- 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))