

基于水足迹理论的水资源评价

——以河北省张家口市宣化区为例

王雅洁¹, 刘俊国^{1,2}, 赵丹丹¹

(1. 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083; 2. 南方科技大学 环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: [目的] 河北省张家口市是 2022 年北京冬季奥运会雪上项目的举办地, 其中宣化区是当地重要工业区, 对当地用水和水质有举足轻重的影响。对宣化区水资源情况进行分析, 旨在保障冬奥会顺利进行。[方法] 采用水足迹理论对张家口市宣化区 2007—2014 年的农业、工业和生活用水情况进行分析, 并结合水量、水质评价其水资源短缺状况。[结果] ①宣化区 2007—2014 年平均蓝水足迹 $5.77 \times 10^7 \text{ m}^3$, 且工业占比最大; 绿水足迹年平均值为 $9.90 \times 10^6 \text{ m}^3$, 全部来源于农业。②以 COD 为主要污染物排放指标核算该地区灰水足迹, 年平均灰水足迹为 $4.22 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。③根据年平均水量型缺水指标 (I_{blue} 为 3.55) 和年平均水质型缺水指标 (I_{grey} 为 0.51) 可知, 宣化区属于严重水量型缺水地区, 且水质型缺水情况日益明显。[结论] 从宣化区用水现状来看, 当地亟需优化产业结构, 提高非常规水源利用率, 改善区域水资源治理模式。
关键词: 水足迹理论; 水资源评价; 水量型缺水; 张家口市; 宣化区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)05-0213-07

中图分类号: TV213.4

文献参数: 王雅洁, 刘俊国, 赵丹丹. 基于水足迹理论的水资源评价[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 213-219. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.034. Wang Yajie, Liu Junguo, Zhao Dandan. Assessing water resources based on theory of water footprint [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 213-219.

Assessing Water Resources Based on Theory of Water Footprint

—A Case Study in Xuanhua District, Zhangjiakou City, Hebei Province

WANG Yajie¹, LIU Junguo^{1,2}, ZHAO Dandan¹

(1. School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

Abstract: [Objective] Zhangjiakou City of Hebei Province is the host city of snow events for the 2022 Beijing Winter Olympic Games. Xuanhua District in Zhangjiakou City is an important industrial area that has a decisive influence on local water use and water quality. The analysis of water resources in Xuanhua District, is crucial for the smooth progress of the Winter Olympic Games. [Methods] This study analyzed water use of agricultural, industrial and daily life in Xuanhua District from 2007 to 2014 by using water footprint theory. [Results] ① The average blue water footprint was 57.650 million m^3 , and industrial sector was the largest consumer. The average green water footprint was 9.900 million m^3 , and it all came from agricultural sector. ② The average grey water footprint was 42.235 million m^3 based on the COD indicator. ③ According to the average water quantity scarcity index (I_{blue} is 3.55) and the average water quality scarcity index (I_{grey} is 0.51), Xuanhua District was a serious water shortage area, and the water quality scarcity was getting worse. [Conclusion] According to the condition of water resources in Xuanhua District, it is urgent to optimize the industrial structure, improve the utilization rate of unconventional water resource and improve local water management strategies.

Keywords: water footprint theory; water resources assessment; water quantity scarcity; Zhangjiakou City; Xuanhua District

收稿日期: 2018-04-17

修回日期: 2018-05-23

资助项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项“海河北系永定河—洋河段水污染控制与水质改善技术集成与综合示范课题”(2015ZX07203-005); 国家自然科学基金项目(41571022); 北京市自然科学基金(8151002)

第一作者: 王雅洁(1991—), 女(汉族), 山西省阳泉市人, 硕士研究生, 研究方向为水足迹及水资源评价。E-mail: wangyajie@163.com。

通讯作者: 刘俊国(1977—), 男(汉族), 山东莱芜市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水足迹及水文水资源研究。E-mail: liu_junguo@163.com。

水资源作为一种具有特殊意义的资源,关乎到一切生物的生存以及社会的稳定和可持续发展^[1-2]。对于全球农业、工业、运输和能源生产来说,水资源的充足供应是保障其正常生产的必要条件^[3]。然而,随着人口增加、工业化程度加快、经济的高速发展使得全社会的用水需求呈现井喷式增长^[4]。水资源短缺的问题已威胁到全球约 1/3 的人口,合理利用、保护水资源已经成为各个国家的一项重要任务^[5-7]。

水资源研究学者 Hoekstra^[8] 教授率先在荷兰代尔夫特举办的以虚拟水贸易为核心议题的国际专家会议上将水足迹概念明确提出,它是一种量化与水有关的潜在环境影响的指标,定义为维持人类日常消费的产品及服务而消耗的淡水资源总量。通过对水足迹的计算可以体现出人类在生产和消费活动中对淡水资源的影响,同时明确表征出水资源消耗和污染发生的时间和地点。按照不同的水资源类型,水足迹可以被分为 3 个部分,分别为:蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。绿水是一种不可见的水,通常指植物经蒸腾作用消耗的土壤中储存的那部分水;蓝水足迹包括江河湖海在内的地表水以及地下含水层中这些可见的水;灰水足迹是指在现有环境标准下,稀释同化一定的污染负荷需要的淡水体积^[9]。灰水足迹的提出,能将水环境污染对可用水资源量的影响更加直观反映出来。目前,从国内外研究来看,运用水足迹理论对不同尺度的区域进行水资源评价都取得了很大进展。Hoekstra 等^[10]以全球为基本单元,对全球水足迹进行核算。研究表明,1996—2005 年全球年均水足迹为 $9.10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。在中国,水足迹研究多针对国家、省、市或较大流域。Sun 等^[11]以国家为基本单元,核算了 1997—2007 年中国的水足迹,结果表明中国的水足迹总体呈下降趋势,水资源利用效率有所提高。有些学者以流域为基本单元,对其水足迹的动态特征时空分布作了评价^[12-13]。刘楚焯等^[14]以省级区域为基本单元,核算了江苏省 2005—2015 年的水足迹及其变化趋势,并分析了其水资源的可持续利用状况。对于疆域辽阔的中国,水资源状况在不同地区之间差异很大。对较大空间尺度的水足迹核算难以直接应用于其次级区域的水资源管理实践中,以县区等较小空间尺度为基本单元进行水足迹核算对当地水资源管理更具现实意义。

河北省张家口市是 2022 年北京冬季奥运会雪上项目的举办地,对其水资源情况进行分析,可以保障冬奥会顺利进行。其中张家口市宣化区作为海河北系永定河水源地上游的典型工业区,其生产、生活产生的污水经污水处理厂直接排入洋河,对洋河流域水

质的影响不容忽视。而位于永定河流域下游的官厅水库是冬奥会期间滑雪场馆的后备供水水源地之一,这就对宣化区水生态环境的治理和改善提出更高要求。本文拟通过核算 2007—2014 年宣化区农业部门、生活部门和工业部门的蓝、绿、灰水足迹,综合水量水质对区域水资源短缺状况作出评价,为解决宣化区水资源短缺危机提供更具参考价值的决策依据。

1 研究区概况

宣化区位于河北省张家口市东南 28 km 处,属于张家口市辖区,总面积为 275.8 km^2 ,2005 年人口 32 万,区域内规模以上工业总产值占地区生产总值的 67.6%,是张家口市重要工业密集区。洋河为该区内最大常年性河流,位于海河北系永定河上游,发源于内蒙古兴和县,自西向东横贯盆地中心,河道境内长度为 18.9 km,宽 200 m,洋河经宣化区最终注入官厅水库。季节性河流主要为小泡沙河、大泡沙河、柳川河 3 条较大支流。该区属东亚大陆性季风气候,年平均气温为 $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$;受地形和所处地理位置的影响,一年四季分明,春季干燥多风沙,降水较少;夏季炎热短促,降水集中,昼夜温差较大;秋季晴朗天气偏多,但气温下降快;冬季寒冷而漫长,大风天气较多。

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 区域蓝、绿水足迹核算 区域蓝水足迹由农业、工业、生活 3 个部门的蓝水足迹之和组成,绿水足迹仅由农业部门作物生长时消耗产生。工业部门和生活部门的耗水全部来源于蓝水,分别用各自的用水量乘以相应耗水率即为各部门的蓝水足迹。工业部门的蓝水足迹(WF_{i-blue})包括当地钢铁厂、水泥厂、热电厂及啤酒厂等主要工厂企业的用水大户。生活部门蓝水足迹(WF_{d-blue})包含当地服务业用水和居民生活用水。

通过联合国粮农组织(FAO)土地与水发展司在 1992 年开发设计的 CROPWAT 模型对农作物生长过程中每日蒸散发量进行模拟,该模型建立的基础是 Penman-Monteith 公式,主要用来计算作物灌溉需水量、蒸发蒸腾量、制定灌溉制度以及评价非充分灌溉或雨养对产量的影响。农业部门作物蓝绿水足迹如下所示:

$$WF_{a-green} = ER \times A_{rf} \quad (1)$$

$$WF_{a-blue} = IR \times A_{ir} \quad (2)$$

式中: $WF_{a-green}$ ——作物的绿水足迹 (m^3); WF_{a-blue} ——作物的蓝水足迹 (m^3); A_{rf} ——作物雨

养模式的种植面积(hm^2); A_{ir} ——作物灌溉模式的种植面积(hm^2); ER——作物生长过程所需的绿水蒸散发(mm); IR——作物生长过程所需的蓝水蒸散发(mm)。

2.1.2 区域灰水足迹核算 目前对灰水足迹的计算和评价主要以国际水足迹网络出版的《水足迹评价手册》^[15]为指导准则,计算公式如下所示:

$$\text{WF}_{\text{grey}} = \frac{L}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (3)$$

式中: WF_{grey} ——灰水足迹(m^3/a); L ——污染物排放负荷(kg/a); C_{max} ——环境水质标准情况下污染物的最高浓度(kg/m^3); C_{nat} ——自然条件下污染物在水体的初始浓度(kg/m^3)。

工业和生活部门在生产生活过程中对水环境的影响主要属于点源污染。点源污染指的是污染物经可确认的地点(例如工厂、污水处理厂及居民生活的排水管道等)进入水体中,并对接纳水体产生了富营养化或其他形式的污染^[16]。运用公式(3)核算工业和生活部门的灰水足迹($\text{WF}_{i-\text{grey}}$ 和 $\text{WF}_{d-\text{grey}}$)。包含在污水内的各种形式的污染物中,对灰水足迹起决定作用的通常指污水中最关键的污染物,即造成灰水足迹最大的污染物。通过对宣化区污水处理厂的污染物监测数据调研显示化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)是为含量最大的污染物,因此以 COD 作为该区域评价工业和生活部门灰水足迹的指标。

农业部门中作物种植生产对水环境的影响主要属于面源污染。面源污染主要发生在农业生产过程中,施用的化肥、农药等在灌溉或降水的冲刷作用下,大量的污染物汇入河流、湖泊等水体中而对水环境造成的污染^[17]。相比较点源污染,面源污染计算更为复杂。假定部分土壤表面或土壤中的污染物通过不断渗透最终会进入地下水或地表水,则这部分化学污染物即为面源污染物的污染负荷。根据宣化区农作物施用化肥情况的调研表明,该地区农作物种植生产

过程中最主要污染物为氮元素,农业部门的灰水足迹如下所示:

$$\text{WF}_{a-\text{grey}} = \frac{L}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} = \frac{\alpha \times A_{\text{ppl}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \quad (4)$$

式中: $\text{WF}_{a-\text{grey}}$ ——农业部门的灰水足迹(m^3); α ——氮肥的淋溶率; A_{ppl} ——氮肥施用的物质量(kg); C_{max} ——现有的环境水质标准下氮元素的最高排放浓度(kg/m^3); C_{nat} ——氮元素的自然本底浓度(kg/m^3)。

通过《全国污染源普查—农业污染源肥料流失系数手册》将氮元素淋溶率确定为 10%; C_{max} 根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中的Ⅲ类水标准定为 0.01 kg/m^3 ; C_{nat} 通常将其定为 0。

本研究对农业、工业和生活 3 个部门的灰水足迹分别进行核算。农业部门以氮元素为指标核算其灰水足迹。生活、工业部门均以 COD 为指标来核算其灰水足迹,所以可对这两个部门的灰水足迹进行加和。因为水体可以同时对各种类型的污染物进行稀释,所以选择由 COD 引发的灰水足迹和由氮元素引发的灰水足迹的较大值作为区域的灰水足迹。

$$\text{WF}_{\text{grey}} = \max\{\text{WF}_{a-\text{grey}}, \text{WF}_{i-\text{grey}} + \text{WF}_{d-\text{grey}}\} \quad (5)$$

2.1.3 水资源短缺评价 本研究综合水量性缺水指标(I_{blue})与水质性缺水指标(I_{grey}),分别从水量和水质角度对宣化区水资源短缺程度进行评价^[18]。

$$I_{\text{blue}} = \frac{\text{WF}_{\text{blue}}}{\text{WA}_{\text{blue}}} \quad (6)$$

$$I_{\text{grey}} = \frac{\text{WF}_{\text{grey}}}{Q} \quad (7)$$

式中: I_{blue} ——水量性缺水指标; WF_{blue} ——区域特定时间段内的蓝水足迹(m^3); WA_{blue} ——区域特定时间段内可利用蓝水资源量(m^3); I_{grey} ——水质型缺水指标; WF_{grey} ——区域特定时间段内的灰水足迹(m^3); Q ——区域特定时间段内的淡水资源量(m^3)。根据 Hoekstra 等^[19]研究,可对水量型缺水等级和水质性缺水等级如表 1 设定。

表 1 张家口市宣化区水资源短缺评价指标

水资源短缺评价指标	阈值	等级
I_{blue}	$I_{\text{blue}} < 1$	不缺水
	$1 < I_{\text{blue}} < 1.5$	轻度缺水
	$1.5 < I_{\text{blue}} < 2$	中度缺水
	$I_{\text{blue}} > 2$	严重缺水
I_{grey}	$I_{\text{grey}} < 1$	当地污染物可以被境内淡水资源量稀释到一定的环境标准
	$I_{\text{grey}} > 1$	当地污染物无法完全被境内淡水资源量稀释达到一定的环境标准要求

2.2 数据来源

本研究数据来源主要包括:包括农业部门的统计

数据(2007—2014 年)来源于宣化区农牧局及田间调研;风速、降水量、温度、湿度、日照等气象资料来源于

中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 张家口市国家级气象站; 用水量、水资源总量、耗水率等水资源数据来源于宣化区水务局、张家口市水务局、工厂企业实地调研及《张家口市水资源公报》(2007—2014年)、《河北省水资源公报》(2007—2014年); 各行业污水排放量、主要污染物种类等来源于宣化区环保局、张家口市凯丹水务水业发展有限公司(生活部门2007年污染物统计数据缺失)及河北省国家重点监控企业自行监测信息公开平台 (<http://121.28.49.84:8003/#>)。

3 结果与分析

3.1 农业部门水足迹

2007—2014年宣化区农业部门蓝、绿、灰水足迹如图1所示,受当地气象条件、播种面积、施肥量、人口经济发展状况等因素影响,这10a期间区域农作物的蓝绿水足迹的变化处于波动状态。在2008、2013及2014年这些降水量大的年份,绿水足迹所占当年蓝绿水足迹之和的比例相对较大,表明在各种气象因素中,降水量是对区域农作物蓝绿水足迹产生较大影响的因子。其中2009年蓝水足迹最大,为 $2.07 \times 10^7 \text{ m}^3$,绿水足迹最小,为 $4.66 \times 10^6 \text{ m}^3$;2013年绿水足迹最大,为 $1.60 \times 10^7 \text{ m}^3$,蓝水足迹最小为 $8.28 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。农业部门灰水足迹呈先增加后下降的趋势,年平均值为 $7.29 \times 10^6 \text{ m}^3$,相比2008、2014年灰水足迹下降了36.4%,且从2009—2014年近5a处于一种相对平稳的趋势,可能与近些年宣化区不断调整产业结构、种植面积不断减小、着重发展第二产业经济等因素有关。

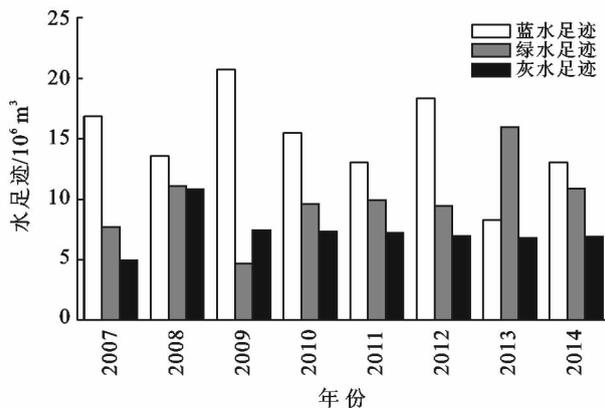


图1 2007—2014年宣化区农业部门水足迹

2007—2014年宣化区农作物蓝水足迹占年均蓝绿水足迹的60%,为 $1.49 \times 10^7 \text{ m}^3$,绿水足迹所占比例为40%,为 $9.90 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。其中蔬菜和玉米占蓝

绿水足迹的比例均较大,蔬菜所占农作物蓝水足迹的比例为45%,玉米为43%;蔬菜占绿水足迹的比例分别为32%,玉米为48%。主要因为玉米是当地主要粮食作物,且蔬菜和玉米的播种面积非常大,占该区域种植总面积的59.2%。仅次于二者的葡萄消耗了11%的蓝水足迹和6%的绿水足迹。主要因为葡萄种植业在宣化已有近千年的历史,产于当地的白牛奶葡萄是中国北方最好的鲜食葡萄品种之一,种植面积占总耕地面积的10.3%。谷子、胡麻等多为雨养作物,无需灌溉,只消耗绿水资源。

3.2 工业部门水足迹

2007—2014年宣化区工业部门年均蓝水足迹为 $3.08 \times 10^7 \text{ m}^3$,最大蓝水足迹发生在2011年为 $3.30 \times 10^7 \text{ m}^3$,2012年最小为 $2.92 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。由图2可知,工业部门对蓝水资源的消耗在2007—2014年期间均维持在较高水平,2011—2014年明显下降后又趋于平稳趋势,主要原因是2010年后,宣化区通过采取污染减排、政策引导和财政支持等有效措施,相继建成并投运了宣化钢铁厂和张家口市发电厂废水深度处理回用工程,对于占整个工业部门蓝水足迹达83%的当地支柱产业宣化钢铁厂而言,加强企业内部的中水回用,提高了水资源的利用率,对降低工业部门的蓝水足迹起显著作用。

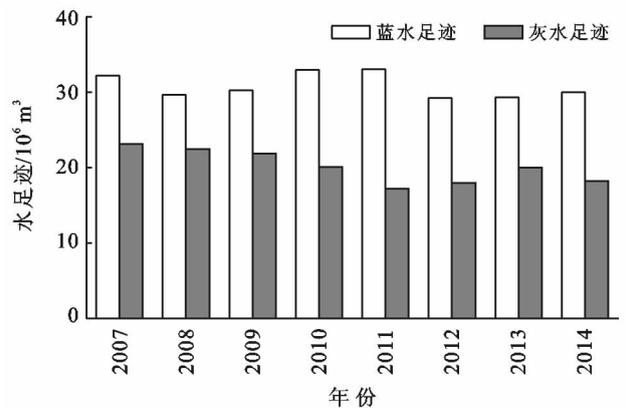


图2 2007—2014年宣化区工业部门水足迹

3.3 生活部门水足迹

宣化区生活部门蓝水足迹(图3)包括居民生活和服务业用水,2007—2014年整体呈现增加趋势,年均蓝水足迹为 $1.19 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。蓝水足迹最小值发生在2007年,为 $9.80 \times 10^6 \text{ m}^3$;最大值发生在2014年,为 $1.70 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。相比较2007,2014年蓝水足迹增长了73.5%。这与近年来随着宣化区工业建设的高速发展,城市基础设施建设的逐步完善,当地城市化率明显提升,已由2007年的70.2%上升到2014年的

92%,城市人口的不断增加对已是重化工产业密集的宣传区的水环境承载能力提出考验。

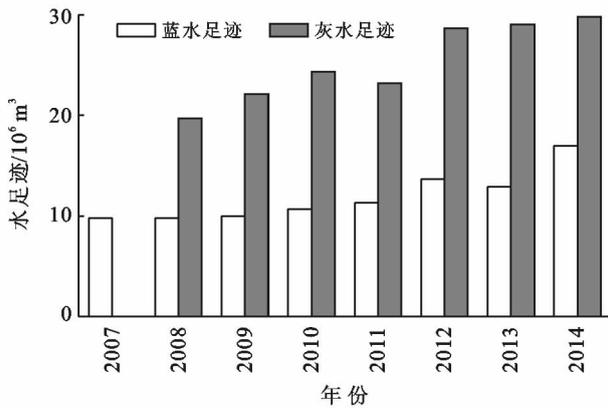


图 3 2007—2014 年宣化区生活部门水足迹

3.4 宣化区整体水足迹分析

2007—2014 年宣化区蓝绿水足迹如图 4 所示,平均蓝水足迹为 $5.77 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中农业部门蓝水足迹占 25.86%,工业部门占 53.50%,生活部门占 20.64%;平均绿水足迹为 $9.90 \times 10^6 \text{ m}^3$,且绿水足迹全部由农作物种植产生。由于灰水足迹是根据包含于污水内的各种污染物中造成灰水足迹最大的污染物来决定,由图 5 可知,源于工业部门和生活部门的 COD 点源污染产生的灰水足迹远大于因农业部门氮元素面源污染产生的灰水足迹,因此宣化区的灰水足迹即当地工业和生活部门产生的灰水足迹之和。2007—2014 年平均灰水足迹为 $4.22 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中工业部门的灰水足迹占 47.6%,而生活部门的灰水足迹占比较大为 52.4%。

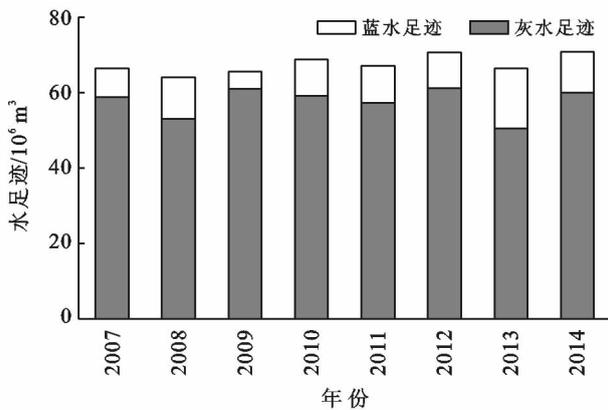


图 4 2007—2014 年宣化区蓝、绿水足迹

蓝水足迹中,工业部门消耗的地下水资源最多,为蓝水足迹的主要贡献者。本研究中生活部门的灰水足迹最大,大于工业部门,这与生活部门的污水排

放量远大于工业部门有关,2015 年生活部门的废水排放量 $2.63 \times 10^7 \text{ m}^3$,是工业 $5.33 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的 4.9 倍,因此,当地灰水足迹的主要贡献者为生活部门。

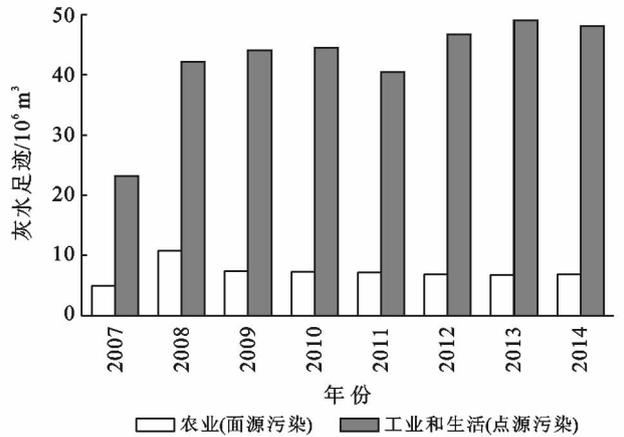


图 5 2007—2014 年宣化区灰水足迹

3.5 宣化区水资源短缺评价

根据图 6 宣化区水量、水质缺水状况可以看出,2007—2014 年宣化区存在明显的水量性缺水问题,且均属于重度缺水;水量性缺水指标 I_{blue} 平均值为 3.55,2007 年最大,为 3.69,2013 年最小,为 2.21。宣化区政府近年来加大对各工厂企业及污水处理厂污水处理技术的投资力度,鼓励工厂对处理达标的污水进行回用,以减少地下水的开采力度,但是由于宣化区作为张家口市的重工业区,工厂基数大,中水回用设备及管网等设施仍有待完善,其水量性缺水问题依旧严重。

水质性缺水指标 I_{grey} 均比阈值 1 小,年平均值为 0.51,虽然宣化区暂不存在水质性缺水问题,但 2007—2014 年期间灰水足迹整体呈现增长趋势,对下游官厅水库的水质影响存在潜在威胁。

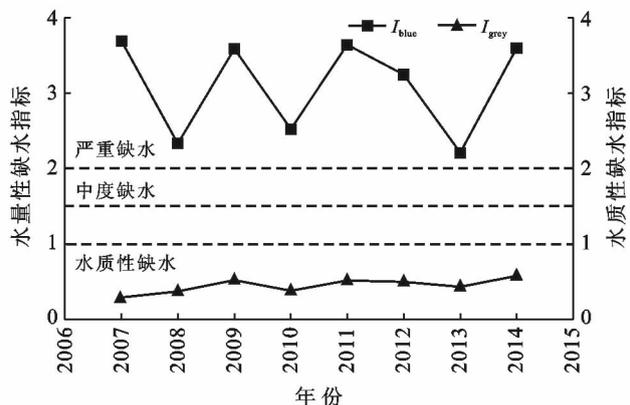


图 6 2007—2014 年宣化区水量性和水质型缺水状况

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 2007—2014 年宣化区主要农作物中,玉米和蔬菜的蓝绿水比例均较高,这与胡彬等^[20]对海河流域上游清水河支流农作物的蓝绿水足迹核算的研究结论类似。其中蔬菜所占农作物蓝水足迹的比例最大,为 45%,其次是玉米,为 43%,二者对灌溉的依赖性都很大。对比已有的研究看出,这主要取决于区域所在地的气象、地理条件以及农作物本身的生物学特性等因素。

(2) 工业部门和生活部门的蓝、绿、灰水足迹核算模拟,分析了不同部门对区域水资源的消耗状况。宣化区工业部门消耗了区域最多的蓝水足迹。由工业和生活部门产生的灰水足迹大于农业部门,这与张楠等^[21]对河北省灰水足迹的研究结果相似。

(3) 通过对 2007—2014 宣化区农业部门、工业部门和生活部门的蓝水、绿水、灰水足迹核算模拟,运用水足迹评价方法对宣化区不同部门对区域水资源的消耗状况及整个区域的水资源现状进行了评价,并综合水质和水量的水资源短缺评价法,分析了宣化区 2007—2014 年的水短缺状况,为当地合理发展工农业生产、调整农作物结构提供了数据支撑。但是本研究中生活部门部分年份污染物统计数据缺失,可能会使当地灰水足迹的均值偏小,在一定程度上会影响研究结果。未来运用水足迹理论对较小空间尺度进行分析时,在调研当地统计数据的基础上,可增加野外试验,提高研究结果的准确性。

4.2 建议

(1) 调整农业种植结构,发展节水农业。根据当地农业水资源消耗现状,对种植产业结构进行调整,探索新型农业发展模式是未来宣化区实现产业结构调整的必要之路。一方面发挥当地的葡萄特色种植业的优势,形成对优势农业的产业化发展模式,从而带动农业经济发展以及农民收入的增加;另一方面减少蔬菜等高耗水作物的种植规模的同时,加大对农业节水灌溉设施的改建和推广,结合不同作物的特性选用喷灌、滴灌、膜上灌等节水灌溉方式,提高水资源的利用效率。

(2) 优化产业结构,提高非常规水源利用率。作为重工业产业密集区和下游官厅水库的水源地,未来宣化区应积极优化产业结构,提高非常规水源的利用效率,例如将污水处理厂处理达标的一级 A 出水根据不同部门水质要求作为水源再生利用,可用于市政园林绿化、景观用水、工业冷却水、城市杂用等,一方

面缓解了对地下水的开采压力,增加了可利用水资源总量,另一方面大量减少废水排放量,能够减轻城市污水对地表水环境的污染。此外,宣化区是一座拥有着悠久历史的文化名城,古香古色的钟楼等各种古迹文物和革命遗址为旅游文化方面提供了丰富的资源,因此可以加快发展现代化的绿色服务业,摆脱“三高”问题(高污染、高能耗、高排放)的困境的同时,缓解了当前资源紧缺的压力,以旅游产业为核心带动区域经济发展。

(3) 建立水足迹管理制度。政府根据当地实际情况制定区域水足迹减量目标,并将该目标转化为农业、工业等各部门的减量目标,通过制定相关法律或经济政策的激励机制,如水足迹税、特定水足迹减量措施的补贴,从而引导各企业实现绿色转型。在企业的业绩考核中,将水足迹减量业绩纳入考核体系中,为资源保护提供政策支持。

[参 考 文 献]

- [1] Padowski J C, Lorenzo C, Jawitz J W. Overcoming urban water insecurity with infrastructure and institutions [J]. *Water Resources Management*, 2016, 30 (13):4913-4926.
- [2] Jenerette G D, Larsen L. A global perspective on changing sustainable urban water supplies [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3/4):202-211.
- [3] Biewald A, Rolinski S, Lotze-campen H, et al. Valuing the impact of trade on local blue water [J]. *Ecological Economics*, 2014, 101:43-53.
- [4] Berrittella M, Hoekstra A Y, Rehdanz K, et al. The economic impact of restricted water supply: A computable general equilibrium analysis [J]. *Water Research*, 2007, 41(8):1799-1813.
- [5] Vörösmarty C J, Green P, Salisbury J, et al. Global water resources: vulnerability from climate change and population growth [J]. *Science*, 2000, 289(5477):284-288.
- [6] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources [J]. *Science*, 2006, 313(5790):1068-1072.
- [7] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity [J]. *Nature*, 2010, 467:555-561.
- [8] Hoekstra A. Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade [C] // Value of Water Research Report Series No. 12. The United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization-International Institute for Hydraulic and

- Environmental Engineering(UNESCO-IHE): Delft, the Netherlands, 2003.
- [9] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planets' Freshwater Resources [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2008.
- [10] Hoekstra A Y, Mekonnen M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(9):3232-3237.
- [11] 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.
- [12] 钟文婷, 张军, 蔡立群, 等. 疏勒河流域 2001—2010 年水足迹动态特征及评价[J]. 草原与草坪, 2015, 35(6): 27-34.
- [13] 王博. 基于水足迹理论的吉林省辽河流域城市化进程中水资源可持续利用评价与优化配置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [14] 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.
- [15] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London, U K: Earthscan, 2011.
- [16] Hill M S. Understanding Environmental Pollution[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [17] 杨淑静, 张爱平, 杨世绮, 等. 农业非点源污染现状分析及国内外研究进展[J]. 中国农业气象, 2009, 30(S1): 82-85.
- [18] 曾昭. 基于水足迹的水资源短缺评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [19] Hoekstra A Y, Mekonnen M M, Chapagain A K, et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability[J]. Plos One, 2012, 7(2):1-9.
- [20] 胡彬, 刘俊国, 赵丹丹, 等. 基于水足迹理念的水资源短缺评价: 以 2022 年冬奥会雪上项目举办地为例[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7):108-116.
- [21] 张楠, 李春晖, 杨志峰, 等. 基于灰水足迹理论的河北省水资源评价[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2017, 53(1):75-79.

(上接第 212 页)

- [5] 杨广, 何新林, 付杨, 等. 玛纳斯河流域水资源承载力综合评价研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(1):55-56.
- [6] 董雯, 刘志辉. 艾比湖流域水资源承载力综合评价[J]. 干旱区地理, 2010, 33(2):217-223.
- [7] 王暄. 基于模糊综合评判法的塔里木河流域水资源承载力评价[J]. 广东水利水电, 2010(8):46-48.
- [8] 段新光, 栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24,(S1):119-122.
- [9] 向秀容. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测[J]. 地理研究, 2016, 35(5):875-884.
- [10] 新疆统计局. 新疆统计年鉴[M]. 乌鲁木齐: 新疆统计出版社, 2012.
- [11] 张新时. 天山北部山地—绿洲—过渡带—荒漠系统的生态建设与可持续农业范式[J]. 植物学报: 英文版, 2001, 43(12):1294-1299.
- [12] 雷艳娇, 葛强. 云南省地市(州)水资源承载力模糊综合评判[J]. 人民珠江, 2016, 37(4):21-24.
- [13] 乔长录, 刘昭. 干旱区流域水文生态系统质量综合评价研究: 以新疆自治区玛纳斯河流域为例[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2):215-221.
- [14] 王根绪, 程国栋, 徐中民. 中国西北干旱区水资源利用及其生态环境问题[J]. 自然资源学报, 1999, 14(2): 109-116.
- [15] 冯兰刚, 焦彦臣, 都沁军. 基于 AHP 的河北省水资源承载能力分析[J]. 工业技术经济, 2009, 28(7):90-93.
- [16] 蒋春林. 基于模糊综合评判模型的区域水资源承载力评价[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(12):1-3.
- [17] 张占江, 李吉玫, 石书兵. 阿克苏河流域水资源承载力模糊综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 138-143.
- [18] 卜楠楠, 唐德善, 尹算. 基于 AHP 法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J]. 水电能源科学, 2012(3):42-44.
- [19] 荣跃, 刘志斌, 冯吉燕. 基于模糊聚类分析的地下水环境质量评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006(S2): 309-311.
- [20] 韩小孩, 张耀辉, 孙福军, 等. 基于主成分分析的指标权重确定方法[J]. 兵器装备工程学报, 2012, 33(10):124-126.
- [21] 宋丹丹, 郭辉. 新疆水资源承载力综合评价研究[J]. 新疆师范大学学报: 自然科学版, 2014(4):1-8.