

部门水足迹及其经济效益的时空匹配特征研究

马维兢¹, 耿波², 杨德伟^{3,4}, 刘丹丹⁵, 徐凌星⁴,
Claudien Habimana Simbi^{4,6}, 于慧⁷, Christian Opp¹

(1. 马尔堡大学地理学院, 马尔堡 35037, 德国; 2. 泰安实验中学, 泰安 271000; 3. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 4. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 5. 华侨大学旅游学院, 泉州 362021; 6. 中国科学院大学, 北京 100049; 7. 中国科学院/水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 利用水足迹账户法, 核算了 2005—2015 年张家口市市辖区、坝上和坝下三个区域的农业、工业、建筑业、服务业和生活等部门的水足迹, 在此基础上分析不同产业部门水足迹经济效益的时空特征。研究结果表明: (1) 马铃薯种植成为张家口市农业水足迹快速上升的最主要驱动因子。马铃薯对农产品水足迹的贡献率由 10% 上升至 50%, 成为优势农作物, 但是主要集中在坝上地区。(2) 工业水足迹下降了 64%, 市辖区下降最快; 建筑业水足迹只有工业水足迹的 1%~4%; 服务业水足迹由 571 万 m³ 上升至 1436 万 m³, 市辖区上升最快。(3) 为实现节水目标, 张家口市应继续调整种植业结构、最大限度利用降水, 进一步减少灌溉用水; 工业领域建立与水有关的投入产出表, 并对工业内部产业结构和区域产业布局进行节水规划。

关键词: 水足迹; 产业部门; 匹配度; 经济效益; 张家口市

水资源危机已经成为制约社会—经济—生态系统健康发展的重要因素, 尤其是在水资源严重缺乏的国家和地区^[1,2]。为了反映凝结在产品或服务中的水资源真实消费量, 英国学者 Allan^[3]在 1993 年提出虚拟水的概念, 将水资源分为实体水和虚拟水。在此基础上, 荷兰学者 Hoekstra^[4]借鉴生态足迹的概念, 在 2003 年提出了水足迹。水足迹是指在一定时期内, 一个区域或个体消费的所有产品和服务中所蕴含的水资源总量, 主要有两种研究方法, 自下而上法和自上而下法。自下而上法借鉴了生命周期理论, 以建立水足迹账户为代表, 广泛应用于计算产业活动过程中的虚拟水含量^[5-16]; 自上而下法不仅计算各个产业部门的直接水消耗, 还计算由于原材料和服务的投入而间接消耗的水资源^[17-21], 需要借助于投入产出表。因此, 理论上后一个方法更适宜于计算不同产业部门的水足迹, 但是由于大部分市、县缺乏投入产出表, 该方法主要应用于国家、省级等大尺度研究。

张家口市人均水资源量不足 400 m³, 低于国际极度缺水标准。在生态格局上, 与首都北京“山同脉、水同源、气相通”, 是北京的重要生态屏障和水资源安全屏障。因此, 水资源安全问题不仅严重制约着当地社会经济的发展, 而且威胁着北京的可持续发展。

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-09-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07101001); 中央高校基本科研业务费专项资金 (SWU019047); 国家自然科学基金项目 (41690142); 国家公派留学基金项目 (201704910850)

作者简介: 马维兢 (1988-), 男, 宁夏中宁人, 博士研究生, 主要从事气候变化背景下水资源可持续性利用研究。

E-mail: adamwjma@163.com

通讯作者: 杨德伟 (1978-), 男, 山东泰安人, 教授, 博士生导师, 主要从事地理—社会—生态过程与可持续性科学研究。E-mail: younglansing@gmail.com

然而,目前关于张家口市水资源问题的研究较少,且多数只是作为京津冀和河北省研究的一部分^[22-25]。

综上所述,本文采用自下而上法,对张家口市2005—2015年农业、工业、建筑业、服务业和生活等部门水足迹进行详细核算,并利用数学模型进行多层面的综合评价。在此基础上,结合经济社会发展、地理区位、自然条件和生态环境等要素对水足迹消费格局进行深入讨论。最后,从水足迹角度为张家口市产业节水提出建议。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

张家口市地处高原与平原过渡地带,分为坝上和坝下两个地貌单元,属中温带大陆性季风气候,干旱少雨,蒸发量大。多年平均降水量409 mm,年均水面蒸发量1315 mm。2015年人均水资源量只有332 m³,不到全国平均水平的17%,已成为我国水资源供需矛盾最为尖锐的城市之一。另外,张家口市是2022年冬季奥林匹克运动会的举办地之一,且在2017年被确定为“首都水源涵养功能区及生态环境支撑区”,节水提效的任务重要而紧迫。

为了比较分析,在2015年行政区划的基础上,本文将张家口市分为三大经济地理区,分别是市辖区(含桥东区、桥西区、原宣化区、下花园区和经济开发区)、坝上地区(含张北县、康保县、沽源县、尚义县、察北管理区和塞北管理区)和坝下地区(含原宣化县、蔚县、阳原县、怀安县、万全县、怀来县、涿鹿县、赤城县和崇礼县)。从表1可以看出,这三个地区经济社会发展差异很大,凸显出分地区识别部门水足迹时空差异及变化规律的必要性。

表1 张家口市2015年经济社会发展指标

Table 1 Economic and social development indicators of Zhangjiakou city in 2015

指标	市辖区	坝上地区	坝下地区	张家口市
人口/10 ⁴ 人	91	108	269	469
城市化率/%	85	18	27	36
面积/km ²	873	13858	22054	36786
用水量/10 ⁴ m ³	15545	16142	62161	93848
农业用水百分比/%	37	81	83	75
生产总值/10 ⁸ 元	450	212	701	1363
三次产业结构/%	3 : 46 : 51	34 : 39 : 27	23 : 36 : 41	18 : 40 : 42

1.2 水足迹

1.2.1 生产水足迹

生产水足迹账户分为五个部门,即农产品水足迹(WF_{agr})、畜产品水足迹(WF_{ani})、工业水足迹(WF_{ind})、建筑业水足迹(WF_{con})以及服务业水足迹(WF_{ser}),计算公式如下:

$$WF_{pro} = WF_{agr} + WF_{ani} + WF_{ind} + WF_{con} + WF_{ser} \quad (1)$$

(1) 农产品水足迹

农作物需水量一般采用联合国粮农组织推荐的标准彭曼公式计算,其影响因素包括气象、作物类型、土壤条件及收获时间等^[5]。参考已有文献中河北省和张家口市的单位农

产品虚拟水含量^[5,6]，乘以农产品产量，可得到农产品水足迹，计算公式如下：

$$WF_{agr} = \sum_{i=1}^m UWF_{agr(i)} \times Y_{agr(i)} \quad (2)$$

式中： m 为农产品种类； $UWF_{agr(i)}$ 为第 i 类农产品单位产量虚拟水含量（ m^3/kg ）； $Y_{agr(i)}$ 为第 i 类农产品产量（ kg ）。

(2) 畜产品水足迹

畜产品虚拟水含量包括两部分：动物生长阶段需水量和动物产品后期加工处理需水量。畜产品虚拟水含量与动物类型、饲养方式及饲养地区等诸多因素有关，计算复杂。目前，荷兰水文和环境工程研究所计算了各国动物产品的虚拟水含量，本文引用该研究成果^[26]，计算公式如下：

$$WF_{ani} = \sum_{j=1}^n UWF_{ani(j)} \times Y_{ani(j)} \quad (3)$$

式中： n 为畜产品种类； $UWF_{ani(j)}$ 为第 j 类畜产品单位产品虚拟水含量（ m^3/kg ）； $Y_{ani(j)}$ 为第 j 类畜产品产量（ kg ）。

(3) 工业、建筑业、服务业水足迹

由于张家口市投入产出表无法获得，导致工业、建筑业和服务业的子部门之间因生产原料的消耗而间接消耗的水资源无法估算，即无法计算子部门虚拟水需求量及子部门间虚拟水的转移量。因此，本文只分析这三个部门的直接水足迹。

1.2.2 生活水足迹

生活水足迹分为城镇居民生活水足迹和农村居民生活水足迹。由于居民生活水足迹主要是实体水的消耗，因此同工业、建筑业和服务业一样，只分析直接水足迹。

1.3 综合评价指数

1.3.1 水足迹与GDP匹配度

水足迹与地区生产总值（GDP）匹配度，用该地区该产业水足迹占全市该产业水足迹百分比和该地区该产业GDP占全市该产业GDP百分比的比值来反映，计算公式如下：

$$\alpha = \frac{WF_{lk}}{WF_k} \bigg/ \frac{GDP_{lk}}{GDP_k} \quad (4)$$

式中： α 表示匹配度； WF_{lk} 表示第 l 区第 k 产业水足迹（ m^3 ）； WF_k 表示张家口市第 k 产业水足迹（ m^3 ）； GDP_{lk} 表示第 l 区第 k 产业GDP（万元）； GDP_k 表示张家口市第 k 产业GDP（万元）。当 $\alpha > 1$ 时，表示该地区该产业水足迹比例大于该产业GDP比例，即该地区该产业水资源效益低于全市平均值， α 越大，效益越低；同理，当 $\alpha < 1$ 时，意味着该地区该产业水资源利用效益高于平均值， α 越小，效益越高。

1.3.2 农产品水足迹与灌溉用水量比值

在水足迹研究中，农作物生长水足迹主要包括两部分：蓝水和绿水。蓝水指人工灌溉的地表水或地下水，绿水指降雨后储存在土壤中的水分^[27]。由于灌溉过程中水资源的流失，蓝水足迹要小于灌溉用水量，但在县域尺度计算蓝水和绿水所需要的数据难以获得。因此，本文将通过计算农产品水足迹与灌溉用水量（蓝水足迹最大值）的比值，粗略地对一个地区蓝水和绿水的消耗进行窥探，大致掌握该地区农业生产中灌溉用水和降雨量之间的相互关系及变化趋势。计算公式如下：

$$\beta = \frac{WF_{agr}}{W_{irr}} \quad (5)$$

式中： β 为农产品水足迹与灌溉用水量比值； WF_{agr} 为农产品水足迹（ m^3 ）； W_{irr} 为灌溉用水量（ m^3 ）。

1.3.3 人均生活水足迹

在城镇化过程中，随着农村居民转变为城镇居民，居民饮食结构和生活习惯也发生变化，往往导致水资源需求升高^[26]。因此，计算并识别人均生活水足迹在时空的变化趋势，有助于完善居民用水政策。计算公式如下：

$$wf_{dom} = \frac{WF_{dom}}{P} \quad (6)$$

式中： wf_{dom} 为人均生活水足迹（ m^3 /人）； WF_{dom} 为该地区所有居民生活水足迹（ m^3 ）； P 为该地区人口数量（人）。

1.4 数据来源

农产品和畜产品产量以及人口数量、地区生产总值等社会经济数据来自张家口市经济年鉴^[28]。工业、建筑业、服务业及家庭生活部门用水数据来自张家口市水资源公报。单位农产品及畜产品虚拟水含量，参考他人研究结果（表2）^[5,6]。

表2 张家口市农、畜产品水足迹核算系数

Table 2 Calculation coefficient of agricultural water footprint in Zhangjiakou city

农产品种类	虚拟水含量/(m^3 /kg)	畜产品种类	虚拟水含量/(m^3 /kg)
玉米	0.93	牛肉	12.56
谷子	1.38	马(驴、骡)肉	5.67
筱麦	1.38	猪肉	2.21
豆类	2.59	羊肉	5.20
薯类	1.20	禽肉	3.65
油料	1.61	禽蛋	3.55
蔬菜	0.10	奶类	1.00
水果	0.68	水产品	3.11

2 结果分析

2.1 农业水足迹

2005—2015年，张家口市农业水足迹增加了1.2倍，由393854万 m^3 增加到870655万 m^3 （图1），其中农产品水足迹增加了1.8倍，畜产品水足迹增加了0.7倍。市辖区由35976万 m^3 下降至28449万 m^3 ，主要由于畜产品水足迹减少；坝上地区增加了1.8倍，其中农产品水足迹增加了3.7倍；坝下地区农业水足迹一直最大，且由236460万 m^3 增加至466935万 m^3 。

农产品水足迹如图2所示，薯类水足迹增速最快，贡献率由10%上升至50%，成为张家口市水足迹最大的农产品，这是张家口市大力推广马铃薯种

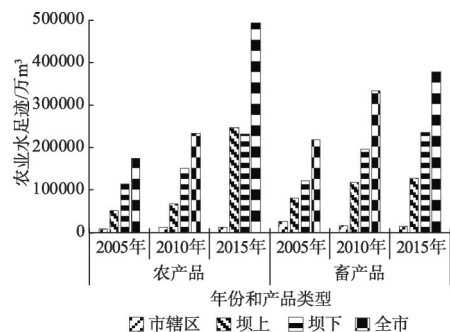


图1 2005—2015年张家口市农业水足迹
Fig. 1 Agricultural water footprint in 2005-2015

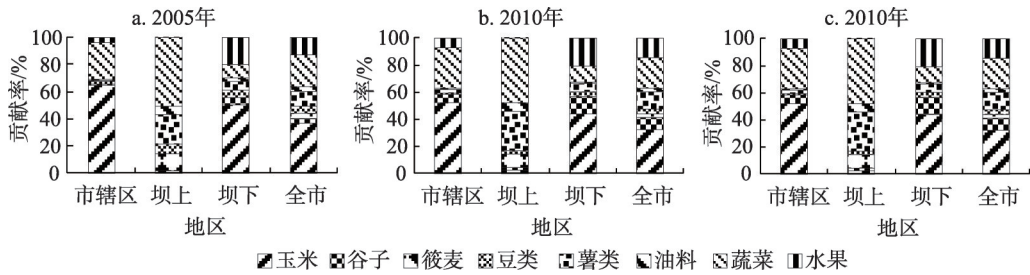


图2 2005—2015年张家口市主要农产品水足迹贡献率

Fig. 2 Contribution rate of water footprint of major agricultural products in Zhangjiakou city in 2005-2015

植的结果。在市辖区和坝下地区，玉米水足迹贡献率分别由64%和51%下降至41%和31%，但仍然处于主导地位；而坝上地区，水足迹贡献率最大的农产品则由蔬菜转变为薯类，2015年薯类贡献率达到75%。

畜产品水足迹如图3所示，牛肉、猪肉和羊肉水足迹贡献率由47%下降至38%，禽

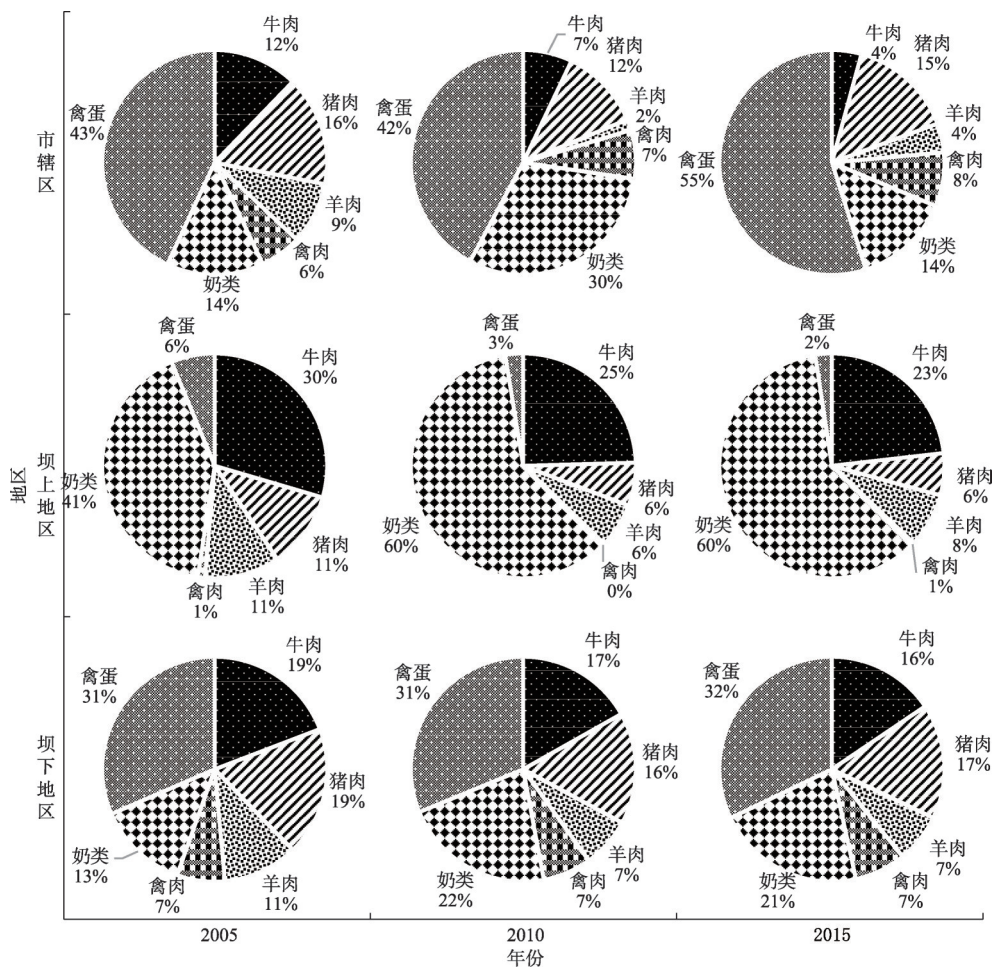


图3 2005—2015年张家口市主要畜产品水足迹贡献率

Fig. 3 Contribution rate of water footprint of major livestock products in Zhangjiakou city in 2005-2015

肉和禽蛋水足迹贡献率基本保持不变,只有奶类水足迹贡献率由25%上升至34%,反映了食品消费结构的转变^[29]。市辖区水足迹份额最大的畜产品依次为禽蛋、奶类和猪肉,贡献率合计由73%上升至84%;坝上地区水足迹份额最大的畜产品依次为奶类、牛肉和猪肉,贡献率合计由82%上升至89%;坝下地区各类畜产品水足迹相对均衡,且处于较稳定状态。

2.2 工业、建筑业和服务业水足迹

2005—2015年,张家口市工业水足迹下降了64%(图4a)。市辖区下降了73%,下降速度最快,因为在产业结构调整中,市辖区服务业发展迅速,且在多次“节能减排”行动中,对高耗水行业调整和关停的力度最大;坝上地区工业水足迹一直很小,且基本保持不变;坝下地区工业水足迹下降了55%,2010年后成为张家口市工业水足迹最大的地区。建筑业水足迹“先升后降、总体下降”(图4b),总共减少了26万 m^3 ,其中坝下地区贡献率为53%~58%。另外,随着产业结构的调整,服务业的发展速度越来越快,导致张家口市服务业水足迹增加了1.5倍(图4c)。其中,市辖区增加了3.5倍,坝上和坝下地区分别只增加了0.2和0.3倍。

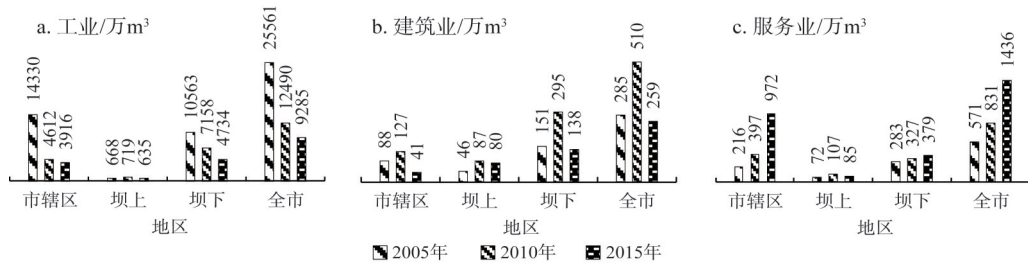


图4 2005—2015年张家口市工业、建筑业和服务业水足迹

Fig. 4 Water footprint of industries, construction and service industry in Zhangjiakou city in 2005-2015

2.3 家庭生活水足迹

2005—2015年,张家口市居民生活用水足迹只增加了89万 m^3 (图5)。其中,市辖区减少了1011万 m^3 ,坝上和坝下地区分别增加了574万 m^3 和527万 m^3 。城镇居民生活水足迹“先减后增、总体上升”,农村居民生活水足迹一直缓慢下降。其中,市辖区城镇居民生活水足迹减少了1074万 m^3 ,坝上和坝下地区分别增加了510万 m^3 和890万 m^3 ;坝下地区农村居民生活水足迹减少了363万 m^3 ,市辖区和坝上地区分别增加了62万 m^3 和64万 m^3 。

2.4 水足迹与经济社会指标综合分析

2.4.1 水足迹与GDP匹配度

如图6所示,农业方面,市辖区和坝下地区匹配度分别由1.6和1.1下降至0.5和0.9,说明这两个地区单位农业GDP水足迹消耗量由高于全市平均值转变为低于全市平均值,坝上地区反之。第二产业方面,市辖区和坝上地区匹配度一直维持在1以下,坝下地区一直高于1,说明市辖区和坝上地区单位第二产业GDP水足迹消耗量始终低于全市平均水平,坝下地区则一直高于全市平均

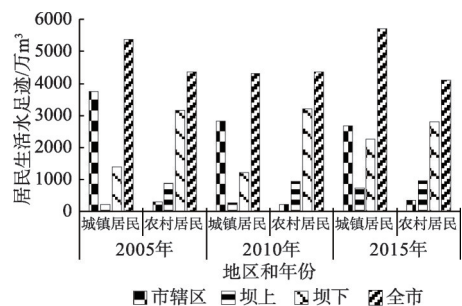


图5 2005—2015年张家口市居民生活水足迹

Fig. 5 Domestic water footprint in 2005-2015

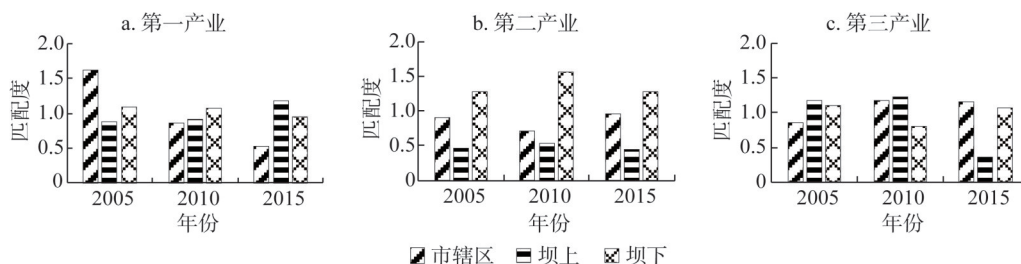


图6 2005—2015年张家口市三次产业水足迹与GDP匹配度

Fig. 6 Matching degree of industrial water footprint and GDP in Zhangjiakou city in 2005-2015

水平。服务业方面，市辖区由0.9上升至1.2，坝上地区由1.2下降0.4，坝下地区先由1.1下降至0.8，又上升至1.1。

2.4.2 农产品水足迹与灌溉用水量

如表3所示，由于灌溉用水量不断下降、农产品水足迹不断上升，导致张家口市农产品水足迹和灌溉用水量的比值由2.2上升至7.4，说明绿水足迹贡献率越来越大。从不同地区来看，市辖区农产品水足迹与灌溉用水之比一直最低，2005年灌溉用水量甚至超过了农产品水足迹，这可能是由于市辖区耕地有效灌溉率高达72%，消耗了更多蓝水。坝上地区农产品水足迹与灌溉用水之比由3.2快速上升至21.1，增速最快，这是因为马铃薯推广主要集中于坝上高原地区，要么是在旱地，完全依赖于降水，要么是实施了膜下滴管技术，灌溉用水相对较少。坝下地区农产品水足迹与灌溉用水量之比由2.1上升至4.7，同样反映了绿水足迹的比例越来越大。

表3 2005—2015年张家口市农产品水足迹与灌溉用水量

Table 3 Water footprint of agricultural products and irrigation water consumption in Zhangjiakou city in 2005-2015

年份	变量	市辖区	坝上	坝下	全市
2005年	农产品水足迹/ 10^4 m^3	8951	52210	113821	174982
	灌溉用水量/ 10^4 m^3	9323	16202	55446	80971
	农产品水足迹与灌溉用水量之比	1.0	3.2	2.1	2.2
2010年	农产品水足迹/ 10^4 m^3	13046	68491	151968	233505
	灌溉用水量/ 10^4 m^3	7185	18529	53096	78810
	农产品水足迹与灌溉用水量之比	1.8	3.7	2.9	3.0
2015年	农产品水足迹/ 10^4 m^3	12606	247936	232207	492749
	灌溉用水量/ 10^4 m^3	5687	11744	49449	66880
	农产品水足迹与灌溉用水量之比	2.2	21.1	4.7	7.4

2.4.3 人均生活水足迹

如表4所示，2005—2015年，城镇居民人均生活水足迹由113 L/d大幅度下降至91 L/d，农村居民人均生活水足迹维持在38 L/d左右，但所有居民人均生活水足迹只从59 L/d下降至57 L/d，反映了城镇居民比例不断扩大的现象。总体上，市辖区居民人均生活水足迹一直最高，坝上地区一直最低。

3 讨论

2015年张家口市农业实体水消耗量为64185万 m^3 ，农田灌溉与林牧渔畜之比为91:9，

表4 2005—2015年张家口市人均生活水足迹

Table 4 Per capita domestic water footprint in Zhangjiakou city in 2005-2015

(L/d)

年份	居民	市辖区	坝上	坝下	全市
2005	城镇居民	145	44	84	113
	农村居民	52	27	41	37
	所有居民	128	29	49	59
2010	城镇居民	103	36	58	77
	农村居民	42	29	42	38
	所有居民	93	30	45	51
2015	城镇居民	94	103	85	91
	农村居民	71	30	39	38
	所有居民	91	43	52	57

即只考虑实体水时,牲畜用水比例很小。然而本文考虑虚拟水后发现,2005—2015年,畜产品水足迹占农业水足迹的比例始终在40%以上,且经济越发达的区域,畜产品水足迹比例越高。因此,畜牧业节水有必要引起更多的重视,可以通过改善饲料成分、改变畜牧业结构及加工模式等,降低畜产品水足迹^[30]。另外,由于马铃薯在旱田大规模推广、或采用膜下滴灌技术等,绿水足迹不断上升,即对降水的利用率提高,但目前73%的马铃薯种植在坝上地区,市辖区仅占1%。接下来可以通过将水浇地、菜田改为旱田的方式,减少灌溉用水,提升绿水足迹,尤其是在市辖区和坝下地区。

建筑业和服务业由于水足迹较小,节水空间有限。工业方面,通过产业转型以及关停高耗水行业等措施,水足迹快速下降至2005年的36%,节水效果显著。但前五年下降了13071万m³,后五年只下降了3205万m³,说明通过技术手段减少实体水消耗的空间越来越小^[31]。因此,接下来需要编制与水资源关联的投入产出表,识别不同部门间由于原材料的投入、产品运输等环节间接消耗的水资源,在此基础上,以节水为导向,实施产业布局调整。

张家口市在2015年时实施了针对主城区的《张家口市主城区居民用水实行阶梯水价制度方案》。但是根据表4,2015年时张家口市坝上和坝下地区城镇居民人均水足迹分别为103 L/d和85 L/d,甚至高于市辖区的94 L/d。因此,需要在全市制定与主城区类似的政策,全面营造浓厚的节水氛围。

4 结论

基于水足迹理论,本文对2005—2015年张家口市农业、工业等部门水足迹进行了详细核算,综合评价了三次产业GDP与水资源匹配水平及灌溉用水与农业水足迹的关系等,并分部门讨论了水资源节约利用的空间和对策。主要结果如下:

(1) 农业水足迹由393854万m³增加至870655万m³。其中,农产品增速快于畜产品,二者之比由44:56转变为57:43。马铃薯种植是农产品水足迹增长的主要驱动力,但主要集中在坝上地区。

(2) 工业水足迹由25561万m³下降至9285万m³,市辖区下降速度最快;建筑业水足迹只有工业水足迹的1%~4%;服务业水足迹由571万m³上升至1436万m³,主要是市辖

区上升导致。

(3) 居民生活用水足迹略微增加, 由9727万 m^3 增加至9816万 m^3 。其中, 市辖区减少了1011万 m^3 , 坝上和坝下地区分别增加了574万 m^3 和527万 m^3 。

(4) 2015年时, 市辖区农业水足迹效益远高于全市平均水平, 第二产业与全市平均水平持平, 第三产业高于全市平均水平; 坝上地区农业水足迹效益低于全市平均水平, 第二产业和第三产业相反; 坝下地区农业水足迹效益略高于全市平均水平, 第二产业和第三产业相反。

参考文献(References):

- [1] ZHUO L, MEKONNEN M, HOEKSTRA A Y, et al. Inter- and intra-annual variation of water footprint of crops and blue water scarcity in the Yellow River Basin (1961-2009). *Advances in Water Resources*, 2016, 87: 29-41.
- [2] YANG Z W, LIU H L, XU X Y, et al. Applying the water footprint and dynamic structural decomposition analysis on the growing water use in China during 1997-2007. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 634-643.
- [3] ALLAN J A. Fortunately there are substitutes for water: Otherwise our hydro-political futures would be impossible//Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: ODA, 1993: 13-26.
- [4] HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual trade. Value of Water Research Report Series No.12. IHE Delft, 2003: 1-23.
- [5] 孙才志, 张蕾. 中国农产品虚拟水—耕地资源区域时空差异演变. *资源科学*, 2009, 31(1): 84-93. [SUN C Z, ZHANG L. Changes in spatial and temporal differences of agricultural product virtual water versus cultivated land in China. *Resources Science*, 2009, 31(1): 84-93.]
- [6] 刘梅, 许新宜, 王红瑞, 等. 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. [LIU M, XU X Y, WANG H R, et al. Water footprint and spatial-temporal analysis of Hebei province based on virtual water theory. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 1022-1034.]
- [7] 吴兆丹, 赵敏, 田泽, 等. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较: 基于“总量—相关指标—结构”分析框架. *自然资源学报*, 2017, 32(1): 78-89. [WU Z D, ZHAO M, TIAN Z, et al. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical framework of "amount-relative index-structure". *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(1): 78-89.]
- [8] SEMMENS J, BRAS B, GULDBERG T. Vehicle manufacturing water use and consumption: An analysis based on data in automotive manufacturers' sustainability reports. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(1): 246-256.
- [9] CHAO Z, ANADON L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. *Ecological Economics*, 2014, 100(2): 159-172.
- [10] 成润禾, 潘丽君, 朱洪利. 西部大开发10年云南省水足迹账户核算与动态评估. *环境科学与技术*, 2015, 38(3): 195-199. [CHENG R H, PAN L J, ZHU H L. Accounting and dynamics of water footprints within the first ten years for the great western development strategy in Yunnan province. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(3): 195-199.]
- [11] MANZARDO A, MAZZI A, LOSS A, et al. Lessons learned from the application of different water footprint approaches to compare different food packaging alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4657-4666.
- [12] HAN M Y, CHEN G Q, MENG J, et al. Virtual water accounting for a building construction engineering project with nine sub-projects: A case in E-town, Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4691-4700.
- [13] BAKKEN T H, MODAHL I S, ENGELAND K, et al. The life-cycle water footprint of two hydropower projects in Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 241-250.
- [14] CHANG Y, HUANG Z Y, RIES R J, et al. The embodied air pollutant emissions and water footprints of buildings in China: A quantification using disaggregated input-output life cycle inventory model. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 113: 274-284.
- [15] SHAO L, CHEN G Q. Embodied water accounting and renewability assessment for ecological wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 4628-4635.

- [16] 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. 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. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 474-483.]
- [17] WANG Z, HUANG K, YANG S, et al. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 172-179.
- [18] 谭圣林, 邱国玉, 熊育久. 投入产出法在虚拟水消费与贸易研究中的新应用. 自然资源学报, 2014, 29(2): 355-364. [TAN S L, QIU G Y, XIONG Y J. New application of the input-output framework in the study of virtual water consumption and trade. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(2): 355-364.]
- [19] 吴兆丹, 吴兆磊, 张长征. 多区域投入产出分析下中国水足迹地区间比较: 基于经济区域分析层次. 冰川冻土, 2017, 39(1): 207-219. [WU Z D, WU Z L, ZHANG C Z. Regional comparison of water footprint in China based on the multi-regional input-output analysis: In the analytical level of economic regions. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(1): 207-219.]
- [20] BOGRA S, BAKSHI B R, MATHUR R. A water-withdrawal input-output model of the Indian economy. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(3): 1313-1321.
- [21] 曹涛, 王赛鸽, 陈彬. 基于多区域投入产出分析的京津冀地区虚拟水核算. 生态学报, 2018, 38(3): 788-799. [CAO T, WANG S G, CHEN B. Virtual water analysis for the Jing-Jin-Ji region based on multiregional input-output model. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 788-799.]
- [22] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58-67. [BAO C, HE D M. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Progress in Geography*, 2017, 36(1): 58-67.]
- [23] 何伟, 宋国君. 河北省城市水资源利用绩效评估与需水量估算研究. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2909-2918. [HE W, SONG G J. Evaluation of urban water resources utilization efficiency and water demand estimation in Hebei province. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2909-2918.]
- [24] 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. 生态学报, 2018, 38(12): 4461-4472. [CHENG X, SUN R H, CHEN L D, et al. 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): 4461-4472.]
- [25] SONG C, YAN J J, SHA J H, et al. Dynamic modeling application for simulating optimal policies on water conservation in Zhangjiakou city, China. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 201: 111-122.
- [26] CHAPAGAIN A K, HOEKSTRA A Y. Virtual water flows between nations in relation to trade in livestock and livestock products. Value of Water Research Report Series No. 13. The Netherlands IHE, Delft, 2003.
- [27] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3493-3503. [LI B G, HUANG F. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3493-3503.]
- [28] 张家口市统计局. 张家口经济年鉴(2006, 2011, 2016). 北京: 中国统计出版社, 2006, 2011, 2016. [Zhangjiakou City Bureau of Statistics. *Zhangjiakou Economy Yearbook* (2006, 2011, 2016). Beijing: China Statistics Press, 2006, 2011, 2016.]
- [29] 许菲, 张彩萍, 白军飞. 收入增长与老龄化对城镇居民食物消费水足迹的影响. 资源科学, 2018, 40(1): 104-116. [XU F, ZHANG C P, BAI J F. Impact of income growth and aging on the water footprint of food consumption in urban China. *Resources Science*, 2018, 40(1): 104-116.]
- [30] 赵锐, 李红, 贺华玲, 等. 乐山市动物类产品水足迹测算分析. 生态科学, 2017, 36(2): 93-99. [ZHAO R, LI H, HE H L, et al. Assessment of water footprint of animal products in Leshan city. *Ecological Science*, 2017, 36(2): 93-99.]
- [31] 王晓萌, 黄凯, 杨顺顺, 等. 中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2114-2126. [WANG X M, HUANG K, YANG S S, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(12): 2114-2126.]

Spatiotemporal matching characteristics and economic benefits of sectoral water footprint

MA Wei-jing¹, GENG Bo², YANG De-wei^{3,4}, LIU Dan-dan⁵, XU Ling-xing⁴,
CLAUDIEN Habimana Simbi^{4,6}, YU Hui⁷, CHRISTIAN Opp¹

(1. Faculty of Geography, University of Marburg, Marburg 35037, Germany; 2. Tai'an Experimental Middle School, Tai'an 271000, Shandong, China; 3. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 4. Institute of Urban Environment, CAS, Xiamen 361021, Fujian, China; 5. College of Tourism, Huaqiao University, Quanzhou 362021, Fujian, China; 6. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 7. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: The per capita water resources of Zhangjiakou city in 2015 was only 332 m³, or less than 17% of the national level, even below the internationally recognized extreme water shortage standard of 500 m³ per capita. Therefore, water shortage has become one of the major factors restricting the sustainable development of the city. In this paper, we divide Zhangjiakou into three geographical regions: the municipal district, the Bashang area and the Baxia area. On this basis, the water footprint account method is used to calculate the water footprint of the agricultural, industrial, construction, service and domestic sectors of the study city and its three subregions in 2005-2015. Then, the matching levels between water footprint and economic benefits in different regions and sectors are analyzed, and its spatial and temporal differences are discussed in detail. The results show that: (1) Potato cultivation became the main driving factor for the rapid increase of agricultural water footprint in Zhangjiakou city. The contribution rate of potato to agricultural water footprint increased from 10% to 50%, thus potato became the dominant crop, which was mainly planted in the Bashang area. (2) The industrial water footprint decreased by 64%, and the municipal district experienced the fastest decline; the water footprint of construction industry accounted for only 1%-4% of the industrial water footprint; the water footprint of service industry increased from 5.71 million m³ to 14.36 million m³. The municipal district witnessed the largest rise. (3) It is recommended that Zhangjiakou should continue to adjust the planting structure, maximize the use of precipitation, and reduce irrigation water; establish a water-related input-output table in the industrial sector, and plan the industrial structure and layout of the industry within the goal of saving water.

Keywords: water footprint; industrial sector; matching degree; economic benefits; Zhangjiakou