

新疆主要农作物生产水足迹研究

金 谦^{1,2,3}, 桂东伟^{2,3}, 高霄鹏^{2,3}, 曾凡江^{2,3}, 薛 杰^{1,2,3}, 张齐飞^{1,2}

(1.中国科学院大学,北京 100049;2.中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011;
3.新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,新疆 策勒 848300)

摘 要:农业是新疆水资源消耗最大的产业。本研究应用水足迹理论对新疆 83 个县市主要农作物的生产水足迹进行研究分析,比较不同作物之间生产水足迹的差异,探讨新疆农业生产水足迹在空间上的变化规律。研究结果表明,全疆 2014 年主要农作物生产水足迹总量为 $355.47 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中主要为蓝水足迹,所占比例高达 91.31%;绿水足迹极低,所占比例仅为 8.69%。7 种主要作物生产水足迹由高到低分别是棉花,向日葵,小麦,水稻,玉米,苜蓿以及甜菜。水足迹空间分布在不同区域差异显著,南疆以及伊犁地区的生产水足迹总量相对较高,二者总量为 $243.46 \times 10^8 \text{ m}^3$,东疆和北疆地区水足迹总量相对较低,二者总量为 $112.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,总体呈现出西南高东北低的分布趋势。

关键词:农作物;水足迹;虚拟水;蓝水;绿水;新疆

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A

Water footprints of primary crop production in Xinjiang

JIN Qian^{1,2,3}, GUI Dong-wei^{2,3}, GAO Xiao-peng^{2,3}, ZENG Fan-jiang^{2,3}, XUE Jie^{1,2,3}, ZHANG Qi-fei^{1,2}

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;
3. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele, Xinjiang 848300, China)

Abstract: Agriculture production consumes the most water resources in Xinjiang. In this study, we estimated the water footprints (WF) of primary crops from 83 counties and cities in Xinjiang based on water footprint theory, compared the WF variation among different crops and investigated the spatial regularity of agriculture water footprints, the results indicated that the water footprints (WF) of primary crops in 2014 was $355.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ of that 91.31% was blue water footprints while the rest of 8.69% was green water footprints. The water footprints of the primary crops from high to low ranked as cotton, sunflower, wheat, paddy, maize, alfalfa, and beets. The water footprint varied significantly among regions. While WF is high in southern Xinjiang and Yili ($243.46 \times 10^8 \text{ m}^3$) it was relatively low in northern and eastern Xinjiang ($112.01 \times 10^8 \text{ m}^3$).

Keywords: crop production; water footprints; virtual water; blue water; green water; Xinjiang

水资源是人类赖以生存和发展的基础性资源^[1],同时也是农业可持续发展的重要限制因素。目前,全球约有 1/3 的人口面临着严重的水资源短缺压力。区域水资源的合理分配和科学管理是可持续发展的核心环节,随着世界范围内人口增长及工业化、城市化扩张,水资源短缺和水环境恶化这一问题将进一步加剧^[2]。农作物在生长时需要消耗大量的水资源,农业用水占全球人类活动用水的

70%左右^[3-4]。如何在保证农业健康可持续发展的同时,提高水资源使用效率,减小农业生产活动对水资源造成的压力,是目前面临的一项巨大挑战^[5-6]。

Hoekstra 于 2002 年提出了“水足迹”概念,用以表征任何已知人口(一个国家,一个地区或一个人)在一定时间内消耗的所有产品和服务所需要的水资源量^[7]。农业水足迹是指在农产品生产过程中,

从作物播种到收获整个时期内所消耗的水资源量^[8-9]。农业水足迹的概念包含 3 个方面:蓝水足迹(WF_{blue} ,生产过程中消耗的蓝水资源量,包括江河湖泊等地表水以及地下水);绿水足迹(WF_{green} ,降水中的能够被作物吸收利用的有效降水部分);灰水足迹(WF_{grey} ,稀释农药、化肥等污染物至正常浓度所需要的水量)。水足迹理论使传统的耗水评价体系得到了丰富和发展,为全面研究作物耗水特征提供了一种新的思路^[10]。水足迹理论在世界范围内得到广泛应用,众多学者利用水足迹方法对全球尺度或国家尺度的水资源利用现状进行研究分析。如 Arjen Y H 等^[10]利用水足迹理论从全球尺度上对人类生产生活水足迹进行分析;Hatem C 等^[11]从经济角度来研究分析突尼斯农业水足迹问题,并以此评估区域水资源现状;针对国内的水足迹研究,较小尺度如“省市区域”的研究主要集中在我国中东部平原农业以及经济发达地区,如黄晶等^[12-18]对“北京市水足迹及农业用水结构变化特征”的研究,利用水足迹的理论和计算方法计算评价北京市水足迹及水资源利用的可持续性,并进一步分析了北京市农业用水结构的变化特征;针对中东部等粮食主产区的农业水足迹研究,如苏明涛等^[13]对“吉林省主要农作物的生产水足迹研究”以及盖力强^[14]等对“华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究”。

新疆地处亚欧大陆腹地,气候极端干旱,降水稀少且在时空上分布不均,资源性缺水问题十分突出^[15]。过去 30 年,随着人口数量的不断增加和社会经济的快速发展,水资源开发利用程度不断增强,水资源的供给也越发紧张^[16-17]。2014 年新疆农

业生产总值占全疆经济总量的 18.12%,农业用水却占全部水资源消耗量的 75%以上,而目前却未见有对新疆农业生产水足迹进行详细定量的核算。随着“一带一路”战略的实施,新疆作为其中的重要节点之一,其人口增长、经济发展速度加快和生态环境建设规模的扩大,必然水资源需求量持续增加。因此本研究利用水足迹理论分析方法,对新疆主要种植的 7 种农作物的生产水足迹现状进行研究分析,以阐明粮食生产与水资源消耗之间的强度关系,实现农业生产与水资源分配管理最优化设计,也为提高用水效率、解决当地农业经济发展问题以及实现新疆商品粮基地可持续发展目标提供新的思路。

1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北部,其下辖 14 个地(州),105 个县级行政区划单位。新疆远离海洋,降雨稀少,年平均降雨量约为 176 mm,年平均蒸发量却高达 2 000 mm 以上,属于典型的干旱半干旱大陆性气候,冬季严寒,夏季高温酷热。独特的气候条件与地理条件,使新疆成为农业大省,是我国重要的粮食生产基地,也是最重要的商品棉种植基地。本研究根据各区域不同的地理位置、气候条件,将新疆划分为南疆、北疆、东疆以及伊犁河谷四个区域。各地区基本情况见表 1。

2 数据资料来源及研究方法

2.1 数据资料来源

本研究所需的 2014 年全疆县级区域的温度、降水、风速、日照时长等气象数据来源于新疆气象局;

表 1 各地区基本情况

Table 1 General characteristics of regions in Xinjiang

地区 Region	所含地(州) Districts of each region	主要种植作物 Primary crops	年均降雨量/mm Average annual precipitation	年均气温/℃ Average annual temperature
北疆地区 Northern Xinjiang	乌鲁木齐市,昌吉回族自治州,塔城地区,克拉玛依市,阿勒泰地区 Urumqi City, Changji Hui Autonomous Prefecture, Taheng District, Karamay City, Altay District	小麦,玉米,甜菜,向日葵 Wheat, Maize, Beets, Sunflower	215	7.4
东疆地区 Eastern Xinjiang	吐鲁番地区,哈密地区 Turpan District, Hami District	小麦,棉花 Wheat, Cotton	21.7	12.4
伊犁地区 Yili region	博尔塔拉蒙古自治州,伊犁直属县(市) Bortala Mongol Autonomous Prefecture, County(city) directly under Yili	玉米,小麦,甜菜 Maize, Wheat, Beets	363.5	9.2
南疆地区 Southern Xinjiang	巴音郭楞蒙古自治州,阿克苏地区,和田地区,喀什地区,克孜勒苏柯尔克孜自治州 Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, Akesu District, Hotan Prefecture, Kashi Prefecture, Kzil sukotz Autonomous Prefecture	棉花,小麦,玉米,苜蓿 Cotton, Wheat, Maize, Alfalfa	70.7	12.6

主要农作物的种植面积、产量以及灌溉量等相关数据来源于2014年新疆统计年鉴;作物生长相关数据以及土壤信息数据均来源于世界粮农组织(FAO56);全疆县级行政区划单位的电子矢量地图来源于国家科技基础条件平台,由于近年来新疆县级行政区划单位并未进行重大调整,因此沿用2008年的电子矢量地图进行分析。

2.2 研究方法

Chapagain 和 Hoekstra 于2011年提出水足迹计算的基本理论框架。基于该理论我们利用新疆各个县市的气象数据,结合CROPWAT8.0模型可以计算得到新疆各地区的作物在整个生长期内的单位面积需水量(mm),单位面积绿水蒸散发量(ET_{green} , mm),单位面积蓝水蒸散发量(ET_{blue} , mm);进而乘以作物的种植面积,即可得到作物总需水量(m^3),总绿水消耗量(m^3)以及总蓝水消耗量(m^3);最后除以该种作物的产量,即可得到作物的单位质量生产水足迹^[18]。因计算灰色水足迹的相关资料难以获取,所以本研究主要关注于蓝水足迹与绿水足迹,对灰水足迹则未讨论。本研究计算的基本技术框架如图1。

2.2.1 区域作物需水量 作物需水量(Crop Water Requirement, CWR, $m^3 \cdot hm^{-2}$)是指在一定的生长条件下,作物在生长期正常生长的作物蒸腾量与土壤蒸发量之和,即是将生长期内的日蒸散发量($ET_c, m \cdot d^{-1}$)逐日累加而得到^[19-20]。区域内主要作物需水量计算公式如下。系数10是为把 ET_c 的单位 $mm \cdot d^{-1}$ 转换为 $m^3 \cdot hm^{-2}$:

$$CWR = 10 \times \sum_{d=1}^{lgr} ET_c \tag{1}$$

具体作物的日蒸散发量(ET_c)计算如下:

$$ET_c = K \times ET_0 \tag{2}$$

其中, K_c 是作物系数, ET_0 是参考作物蒸散发量。

绿水(ET_{green} , mm)和蓝水(ET_{blue} , mm)的蒸散发量计算如下:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P_{eff}) \tag{3}$$

绿水蒸散发量取的是有效降水与总蒸散发量之间的最小值;

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P_{eff}) \tag{4}$$

蓝水蒸散发量取的是总蒸散发量与有效降水的差值和0之间的最大值;

则单位质量农作物的蓝水足迹计算公式为:

$$BWF = ET_{blue} \times S_c / Y_c \tag{5}$$

其中, BWF 为单位质量农作物的蓝水足迹($m^3 \cdot kg^{-1}$); S_c 为该种作物的种植面积(hm^2); Y_c 为该作物的产量(kg)。

则单位质量作物的绿水足迹计算公式为:

$$GWF = ET_{green} \times S_c / Y_c \tag{6}$$

其中, GWF 为单位质量农作物的绿水足迹($m^3 \cdot kg^{-1}$); S_c 为该种作物的种植面积(hm^2); Y_c 为该作物的产量(kg)。

2.2.2 有效降水 有效降水通常指可以满足作物蒸散发需要的那部分降水量,不包括降雨形成的地表径流以及深层渗透量。本文选用计算有效降水的经验公式SCS法,在农业水资源管理上应用最多,并经过简化用于作物的有效降水计算,公式如下:

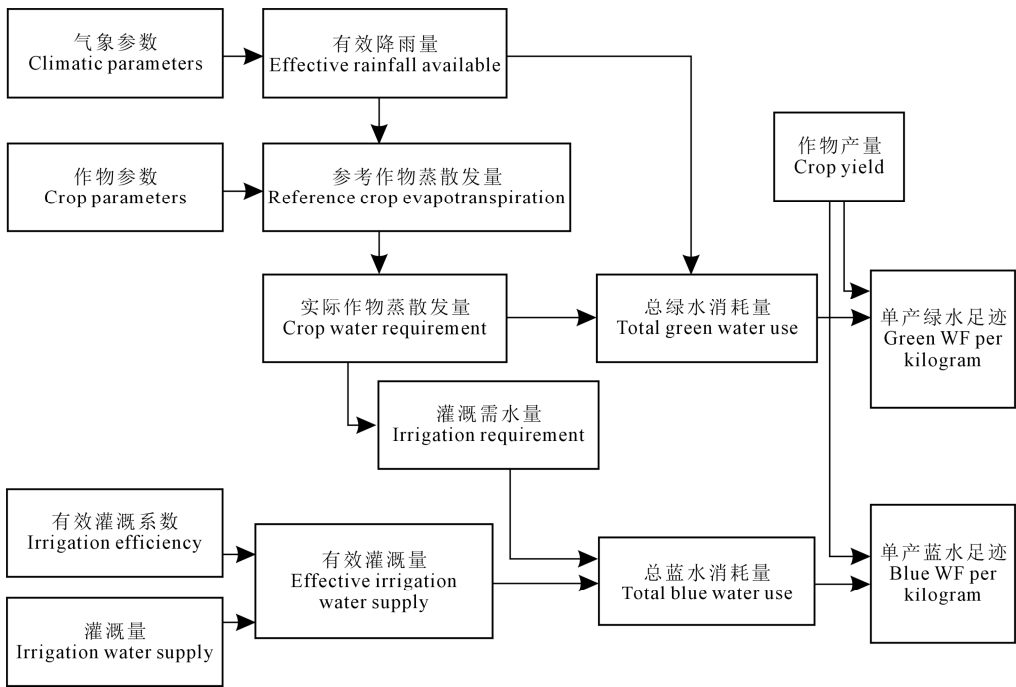


图1 农业水足迹计算基本框架

Fig.1 The basic framework of water footprint calculation

$$P_{\text{eff}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{month}} \times (125 - 0.2 \times P_{\text{month}})}{125}, & P_{\text{month}} \leq 250 \\ P_{\text{eff}} = 125 + 0. \times P_{\text{month}}, & P_{\text{month}} > 250 \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_{month} 是每月降雨量 (mm); P_{eff} 是有效降水量 (mm)。

2.2.3 作物选取标准 依据主要农作物的选取标准:(1)单种作物的耗水量超过了全部农业用水量的 1%;(2)单种作物的经济产值在全部农业产值的比重大于 5%;(3)单种作物的种植面积占全部作物种植面积的 2%以上。只要满足其中一个条件即可将其选取为主要作物^[21]。根据 2014 年农业统计数据,全疆农业总种植面积为 5 212.26 hm²,小麦、玉米、棉花、苜蓿以及向日葵的种植面积分别为 1 120.98 hm²、920.80 hm²、1 718.26 hm²、184.70 hm²、145.77 hm²,分别占到总种植面积的 21.51%、17.67%、32.97%、3.54%和 2.80%,而水稻以及甜菜的耗水总量则分别占农业总用水量的 1.54%和 1.01%。根据这个标准,本文选取了水稻、小麦、玉米、棉花、苜蓿、向日葵以及甜菜这 7 种作物为主要作物进行研究分析,具有代表性。

2.2.4 制图分析 为显示全疆各地区的农业生产水足迹的分布在空间上的差异性,在计算得到每个县(市)的农业生产水足迹总量数据之后,利用 Arcgis 10.1 制作得到新疆 83 个县(市)农业生产水足迹图。

3 结果与分析

3.1 主要作物水足迹分析

在计算得到 7 种作物水足迹结果后,分别从作物需水总量、作物生产水足迹以及水足迹构成比例三个方面进行分析。

3.1.1 主要作物的水足迹总量 在计算得到 7 种作物在不同地区的生产水足迹之后,再将每个地区该种作物的生产水足迹相加,即可得到全疆范围内该作物的生产水足迹。得到结果如下表 2。

表 2 各作物的蓝水足迹量、绿水足迹量以及总水足迹量/×10⁸ m³

类型 Type	水稻 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Maize	棉花 Cotton	向日葵 Sunflower	甜菜 Beet	苜蓿 Alfalfa
总绿水足迹 TGWF	0.37	11.55	5.82	11.50	0.82	0.36	1.28
总蓝水足迹 TBWF	4.98	68.99	60.96	173.02	7.63	3.14	5.36
总水足迹 TCWR	5.35	80.54	66.78	184.52	8.45	3.50	6.64

结果表明,2014 年全疆农业需水总量为 355.47 ×10⁸ m³,在所有作物中棉花的需水总量最高,达到了 184.52×10⁸ m³,所占比例为 51.9%。这是因为新疆是全国最为重要的商品棉基地,棉花的种植范围遍布全疆,且棉花的生长季处于一年中温度最高的时候,蒸散发量最大,所以棉花的需水总量最大;小麦和玉米的总需水量基本处于同一水平,分别为 80.54×10⁸ m³ 和 66.78×10⁸ m³。玉米的生长期处于夏季,蒸散发量比生长在冬天和春天的小麦高很多,但小麦的种植面积远大于玉米的种植面积,因而小麦的需水总量比玉米需水总量还要多 13.76×10⁸ m³。棉花、小麦以及玉米这三种作物的需水总量达到了 331.84×10⁸ m³,占总需水量的 93.42%。水稻、向日葵、甜菜以及苜蓿因种植面积相对较小,总需水量均处于相对较低水平,四种作物的需水总量仅为 23.94×10⁸ m³,占总需水量的 6.73%。因种植范围较小且生长期温度较低,甜菜的需水总量仅为 3.51×10⁸ m³,在所有作物中处于最低水平。

3.1.2 不同作物生产水足迹 将作物的需水总量除以其各自产量,可以得到单位作物的生产水足迹。7 种作物的平均生产水足迹如下图 2。结果表明,棉花是生产水足迹最高的作物,生产水足迹为 4.80 m³ · kg⁻¹;其次是向日葵(1.69 m³ · kg⁻¹),小麦(1.15 m³ · kg⁻¹),水稻(1.05 m³ · kg⁻¹),玉米(0.65 m³ · kg⁻¹),苜蓿(0.23 m³ · kg⁻¹),生产水足迹最低的是甜菜,为 0.12 m³ · kg⁻¹。棉花的生产水足迹是向日葵的 2.8 倍,是甜菜的 41 倍。造成作物之间的生产水足迹差异性的主要原因是作物本身需水特性,以及作物种植面积和产量等。因为棉花的生长季处于一年中蒸散发量最大的时候,需水量最大,且产量相对于小麦、玉米较低,因此生产水足迹最高。

3.1.3 作物水足迹比例构成 由于新疆极端干旱、降雨稀少的气候条件,新疆农业生产活动主要以地下水与高山融冰、融雪径流为主,使得蓝水在农业用

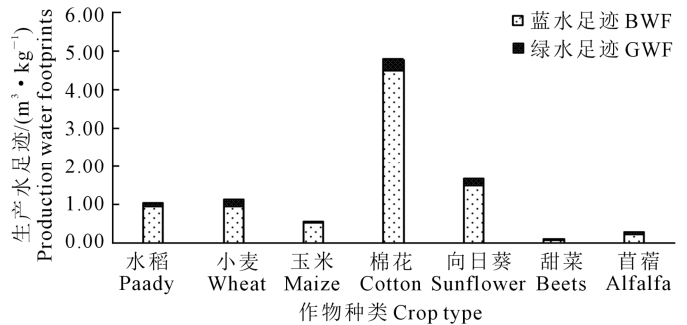


图 2 不同作物的生产水足迹

Fig.2 Water footprints of primary crops in Xinjiang

水中所占的比例普遍处于较高水平。结果显示,新疆农业用水中蓝水所占比例为 91.17%。由于作物之间以及区域气候条件之间存在的差异,不同作物之间以及不同地区之间的蓝水与绿水比例相差巨大。如表 3 所示,在 7 种作物中,棉花的蓝水比例最高为 93.77%;其次是水稻,蓝水比例为 93.04%,而苜蓿的蓝水比例最低,为 80.71%。从不同地区之间来看,南疆的平均蓝水比例最高,为 94.83%,而伊犁地区的平均蓝水比例只有 84.21%,在全疆范围内处于最低水平。由于南疆大部分地区位于塔克拉玛干沙漠,降雨量极低而年蒸发潜力却高达 3 000 mm 以上,农业用水几乎全部来源于河水及地下水灌溉,蓝水比例处于极高的水平;相反伊犁地区独特的气候条件,相对湿润的环境,丰富的降雨资源降低了农业用水对地下水的依赖程度,降低了蓝水所占比例。

3.2 水足迹区域分布

为比较水足迹在全疆空间分布上的差异性,根据研究结果我们利用 Arcgis10.1 制作得到了农业生产水足迹在全疆的空间分布图(图 3),依次分别为全疆范围内的蓝水足迹空间分布图(图 3a)、绿水足迹空间分布图(图 3b)以及总水足迹空间分布图(图 3c)。

从图 3a 来看,全疆蓝水足迹总量最高的是南疆地区,达到了 $189.73 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次是北疆地区($105.11 \times 10^8 \text{ m}^3$),伊犁地区($36.43 \times 10^8 \text{ m}^3$),最低的是东疆地区,为 $7.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于近年来新疆的农业发展实施的是“南棉北粮”的策略,即南疆地区大力发展棉花种植产业而北疆主要以粮食生产为主。而棉花作为生产水足迹最高的作物,也是蓝水足迹比例最高的作物,因此全疆的蓝水足迹总体上与全疆棉

花产业的空间分布一致,呈现出西南高、东北低的趋势。高山雪水作为新疆农业灌溉水的主要来源之一,在昆仑山南缘以及天山南坡附近的传统棉花种植区域蓝水足迹分布较高,南疆地区蓝水足迹最高的区域是塔里木河沿岸流域。绿水足迹较高的区域主要在新疆的西北部,其中北疆地区最高,达到了 $14.58 \times 10^8 \text{ m}^3$,其次是南疆地区($10.33 \times 10^8 \text{ m}^3$),位于西北部的伊犁地区为 $6.83 \times 10^8 \text{ m}^3$,东疆地区绿水足迹最低,为 $0.46 \times 10^8 \text{ m}^3$;总体呈现出西高东低的分布趋势,基本与新疆的降水资源在空间上的分布一致。将蓝水足迹量与绿水足迹量相加之后可得到总水足迹量,由于新疆地区农业用水中绿水的比例很小,因此总水足迹的分布仍然是和蓝色水足迹的分布一样,呈现出西南高东北低的态势。

3.3 区域用水分析

计算得到每个县(市)的农业生产水足迹后,即可得到全疆 14 个地(州)的农业生产水足迹总量。结合 2014 年新疆统计年鉴中的各地(州)农业用水的统计数据,得到表 4。2014 年全疆实际农业总用水量为 $549.18 \times 10^8 \text{ m}^3$,与本研究计算得到的生产水足迹之间的差距高达 $193.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。实际用水量与理论水足迹(即本文计算的农作物生产水足迹)之间的

表 3 各作物蓝水足迹、绿水足迹的比例
Table 3 The ratio of blue and green water footprints of main crop

作物种类 Crop type	水稻 Paddy	小麦 Wheat	玉米 Maize	棉花 Cotton	向日葵 Sunflower	甜菜 Beet	苜蓿 Alfalfa
绿水比例/% The ratio of BWF	6.96	14.34	8.72	6.23	9.74	10.18	19.29
蓝水比例/% The ratio of BWF	93.04	85.66	91.28	93.77	90.26	89.82	80.71

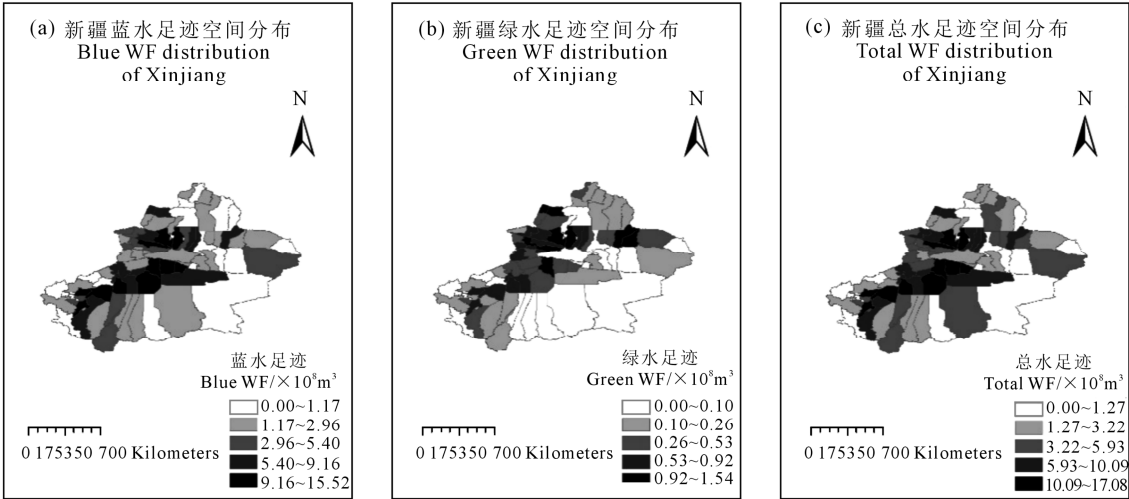


图 3 全疆水足迹分布示意图

Fig.3 Water footprint distribution of Xinjiang

表 4 新疆各地区农业用水统计/ $\times 10^8\text{ m}^3$
Table 4 Agriculture water usage of each region in Xinjiang

区域 Region	地(州) Districts	实际用水量 Actual water use	理论水足迹 Water use in theory	节水空间 Potentialwater-saving	合计 Total
东疆 Eastern Xinjiang	吐鲁番地区 Turpan District	12.20	3.28	8.92	14.26
	哈密地区 Hami District	10.25	4.91	5.34	
	乌鲁木齐市 Urumqi City	6.51	1.94	4.57	
	克拉玛依市 Karamay City	4.33	1.38	2.95	
北疆 Northern Xinjiang	昌吉回族自治州 Changji Hui Autonomous Prefecture	44.27	35.22	9.05	41.09
	塔城地区 Tacheng District	41.54	37.33	4.21	
	阿勒泰地区 Altay District	32.45	15.42	17.03	
	博尔塔拉蒙古自治州 Bortala Mongol Autonomous Prefecture	15.81	12.53	3.28	
南疆 Southern Xinjiang	巴音郭楞蒙古自治州 Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture	52.75	40.12	12.63	132.9
	阿克苏地区 Akesu District	109.11	66.14	42.97	
	克孜勒苏柯尔克孜自治州 Kzil sukotz Autonomous Prefecture	12.35	4.88	7.47	
	喀什地区 Kashi Prefecture	114.50	70.95	43.55	
	和田地区 Hotan Prefecture	44.45	18.11	26.34	
伊犁 Yili region	伊犁州直属县(市) County(city) directly under Yili	48.66	43.26	5.40	5.40
合计 Total	全疆 Tatol Xinjiang	549.18	355.47	193.71	-

差值越小则说明农业水资源的利用效率越高,节水空间就越小。反之差值越大,说明水资源利用效率越低,节水空间越大^[22-23]。

从结果来看,新疆在农业生产用水方面仍然有 $193.71\times 10^8\text{ m}^3$ 的节水空间。从各地区来看,喀什地区、阿克苏地区以及和田地区的实际用水量与理论水足迹之间的差值最大,分别为 $43.55\times 10^8\text{ m}^3$ 、 $42.97\times 10^8\text{ m}^3$ 和 $26.34\times 10^8\text{ m}^3$ 。三个地区均属于南疆,都是以传统农业种植方式为主的地区,无论是当地农民的综合素质还是农业种植技术与管理水平相对其它地区都比较落后,对于水资源的管理利用相对粗放。如果政府可以以政策为导向,持续投入资金技术支持南疆地区改善农业种植方式,并加强对当地农民的教育以此提高农业水资源利用效率,可以大幅降低全疆水资源消耗水平,极大地缓解干旱区水资源短缺带来的压力。

4 结论与讨论

2014 年新疆农业生产水足迹为 $335.47\times 10^8\text{ m}^3$,其中蓝水足迹为 $324.10\times 10^8\text{ m}^3$,所占比例为95.6%,绿水足迹为 $14.37\times 10^8\text{ m}^3$,所占比例为4.4%。本研究表明,在新疆蓝水是农作物生长的最主要的水源,确立了蓝水足迹在新疆农业生产过程中的重要

地位;绿色水足迹所占比例较低,主要分布在新疆西北部地区,虽然绿水量很少,但其作用不应该被忽视。在 7 种主要作物中,棉花无论是总水足迹、单位作物生产水足迹,还是蓝水比例都显著高于其它作物,是最耗水的作物,因此棉花大面积种植对全疆农业生产水足迹以及全疆水资源分配都有重要影响。从生态角度看,大面积进行棉花种植会直接增加水资源的消耗,加剧区域水资源短缺压力。政府应该制定相应的政策,适当调整作物种植结构,充分考虑不同地区的气候条件,在生态环境脆弱的地区减少高耗水作物的种植,因此尤其应该调整“南棉北粮”的农业发展策略,在南疆大力发展低耗水作物,减少南疆地区对水资源的持续利用压力。

农产品作为人类生存的必需品,各种农产品中实际蕴涵、“寄存”了大量的水资源,是人类消费水足迹的主体部分^[24-25]。在总水资源量有限的干旱缺水地区,用于农业生产的水资源量越多,则生态用水就越少^[26],因此降低粮食生产水足迹不仅对于减缓水资源压力有重要作用,也可以缓解生态用水紧张局面,改善新疆整体生态环境脆弱的现状^[27-28]。而基于目前种植格局,计算结果表明当前灌溉量比作物理论水足迹高 $193.71\times 10^8\text{ m}^3$,表明作物用水效率仍然需要进一步提高,这可对未来节水

灌溉方案的进一步实施及具体管理提供决策支持^[29]。由于受数据获取性的影响,本研究只对2014年的农业生产水足迹进行研究,并忽略了灰色水足迹的计算;而某些县(市)气象数据缺失也会在水足迹计算结果的准确性造成影响,这些都是需要改进之处^[30]。进一步量化计算土地、资源以及人口等因素对水足迹的影响大小以及作用机制,是寻求降低新疆农业生产水足迹的研究思路。

参 考 文 献:

- [1] 路杨,刘秀位,张喜英,等.农产品水足迹研究进展[J].应用生态学报,2015,26(10):3207-3214.
- [2] 马静,王党献,来海亮,等.中国区域水足迹的估算[J].资源科学,2005,27(5):96-100.
- [3] 陈俊旭,张士锋,华东,等.基于水足迹核算的北京市水资源保障研究[J].资源科学,2010,32(3):528-534.
- [4] 田园宏,诸大建,王欢明,等.中国主要粮食作物的水足迹值[J].中国人口·资源与环境,2013,23(6):122-128.
- [5] Hoekstra A Y, Huang P Q. Globalization of water resources: International virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environment Change, 2003,15(1):45-56.
- [6] 马晶,彭建.水足迹研究进展[J].生态学报,2013,33(18):5458-5466.
- [7] 吴兆丹,赵敏,田泽,等.关于中国水足迹研究综述[J].中国人口·资源与环境,2013,23(11):73-80.
- [8] 潘文俊,曹文志,王飞飞,等.基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价[J].资源科学,2012,34(10):1905-1912.
- [9] 蔡振华,沈来新,刘俊国,等.基于投入产出方法的甘肃省水足迹及虚拟水贸易研究[J].生态学报,2012,32(20):6481-6488.
- [10] Arjen Y H, Mesfin 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] Hatem C, Arjen Y H, et al. The water footprint of Tunisia from an economic perspective[J]. Ecological Indicators, 2015, 52(1):311-319.
- [12] 黄晶,宋振伟,陈阜,等.北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J].生态学报,2010,30(23):6546-6554.
- [13] 苏明涛,张郁,靳英华,等.吉林省主要粮食作物的生产水足迹研究[J].干旱区资源与环境,2017,26(7):26-30.
- [14] 盖力强,谢高地,李士美,等.华北平原小麦—玉米作物生产水足迹的研究[J].资源科学,2010,32(11):2066-2071.
- [15] 李啸虎,杨德刚,夏富强,等.干旱区城郊种植业水足迹分析与适宜耕地规模测算—以乌鲁木齐市为例[J].2015,5(9):2860-2869.
- [16] 陶国通,王景雷,南纪琴,等.基于温度的作物需水量估算方法[J].应用生态学报,2015,25(7):2019-2025.
- [17] 戚瑞,耿涌,朱庆华,等.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.
- [18] 孙艳芝,鲁春霞,谢高地,等.北京市水足迹[J].生态学杂志,2015,34(2):524-531.
- [19] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The global component of freshwater demand and supply: an assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products[J]. Water International, 2008,33(1):19-32.
- [20] Pandey V P, Babel M S, Shrestha S, et al. Vulnerability of freshwater resources in large and medium Nepalese river basins to environmental change[J]. Water Science Technology, 2008,61(6):1525-1534.
- [21] 史利洁,吴普特,王玉宝,等.基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J].中国农业生态学报,2015,23(5):650-658.
- [22] 赵慧,潘志华,韩国琳,等.气候变化背景下武川主要作物生产水足迹变化分析[J].中国农业气象,2015,36(4):406-416.
- [23] 虞伟,张晖,胡浩,等.农业生产与水资源承载力评价[J].中国生态农业学报,2016,24(7):978-986.
- [24] Van Oel P R, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The external water footprint of the Netherlands: geographically-explicit quantification and impact assessment[J]. Ecological Economics, 2009,69(1):82 - 92.
- [25] Mesfin M M, Arjen Y H. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(15):1577-1600.
- [26] Rockstrom, J, Barron J. Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs[J]. Irrigation Science, 25(3), 299 - 311, 2007.
- [27] Lopez L, Bautista C C. Green and blue water footprint accounting for dry beans (*Phaseolus vulgaris*) in primary region of Mexico[J]. Sustainability, 2015,3(1):3001-3016.
- [28] Yu Y, Hubacek K, Feng K S, et al. Assessing regional and global water footprints for the UK[J]. Ecological Economics, 2010, 5(2):1140-1147.
- [29] Yoo S H, Choi J Y, Lee S-H. Estimating water footprint of paddy rice in Korea[J]. Paddy and Water Environment, 2014, 1(5):43-54.
- [30] 赵忠瑞,解传奇,吴彤,等.西藏农牧民生态足迹[J].应用生态学报,2015,26(24):1049-1054.