

新疆主要农作物生产水足迹计算分析

轩俊伟^{1,2}, 郑江华^{1,2}, 刘志辉^{1,2,3}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

3. 新疆大学干旱与半干旱生态研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 从农作物生产水足迹角度出发, 基于彭曼公式结合 CROPWAT 软件计算, 分析了 2011 年新疆 13 个地(州)主要农作物的生产水足迹情况。结果表明: 新疆地区棉花的单位面积及单位质量需水量分别为 $8\ 650\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $4.82\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 均大于小麦和玉米的需水量, 是三种农作物中最耗水的作物; 新疆主要农作物需水以蓝水为主, 其中棉花的蓝水比重最高达 93.31%, 南疆地区蓝水利用量最大; 2011 年新疆全区主要农作物生产水足迹为 $2\ 049.31 \times 10^7\ \text{m}^3$, 其中蓝水足迹为 $1\ 651.65 \times 10^7\ \text{m}^3$, 绿水足迹为 $186.88 \times 10^7\ \text{m}^3$, 灰水足迹为 $210.78 \times 10^7\ \text{m}^3$; 巴州、阿克苏、喀什地区的作物生产水足迹总量较大, 是水资源治理的主要地区。对于水资源缺乏的新疆地区, 合理调整农作物的种植结构及减少化肥施用量, 是落实最严格水资源管理制度的有效措施。

关键词: 生产水足迹; 农作物; 蓝水; 绿水; 灰水; 彭曼公式; 新疆

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)06-0195-06

Calculation and analysis on water footprint of main crops in Xinjiang

XUAN Jun-wei^{1,2}, ZHENG Jiang-hua^{1,2}, LIU Zhi-hui^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key Lab for Oasis Ecosystem of MOE, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

3. Institute of Arid and Semiarid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China)

Abstract: From the perspective of water footprint of crop production, based on Penman Equation and CROPWAT software, was analyzed the water footprint of major crops production in 13 regions of Xinjiang in 2011. The results showed that: The cotton water requirements per unit area and unit mass were $8\ 650\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and $4.82\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which is total large than the water requirements of wheat and corn, it is the maximal water consumption crop among the three crops. The water requirements of major crops in Xinjiang were mainly relied on blue water. Among them, the proportion of blue water for cotton was the highest, reached 93.31%, the maximal use of blue water was in the southern areas of Xinjiang. Meanwhile, the water footprint of major crops in whole Xinjiang was $2\ 049.31 \times 10^7\ \text{m}^3$ in 2011, among them, the blue water footprint was $1\ 651.65 \times 10^7\ \text{m}^3$, green water footprint was $186.88 \times 10^7\ \text{m}^3$, and grey water footprint was $210.78 \times 10^7\ \text{m}^3$. The total amount of water footprint of crop production in Bazhou, Aksu, Kashgar was bigger, which were the main regions for water resources control and government. So for the Xinjiang with water resources shortage, reasonably adjust the agricultural crop planting structure and reduce the application of chemical fertilizer, it is an effective measure to carry out the strictest water resources management institution.

Keywords: water footprint of production; crop; blue water; green water; grey water; Penman Equation; Xinjiang

水是地球上生物赖以生存的物质基础, 是维系地球生态环境可持续发展的首要条件。农业是世界上最大的水资源利用部门, 农业生产消耗了大部分的水资源, 还有一部分水资源用于工业生产和人类

生活^[1]。传统的农业用水评价关注于灌溉用水, 忽略了土壤水分及农业生产产生的污水。Hoekstra^[2]于 2002 年提出水足迹的概念, 作为水资源占用的综合评价指标, 涵盖了生产或消费过程中所消耗的蓝

收稿日期: 2014-05-11

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201301103)

作者简介: 轩俊伟(1988—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 研究方向为水资源管理及 GIS 应用。E-mail: sd1900@163.com。

通信作者: 郑江华(1973—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源调查监测和 3S 技术应用研究。E-mail: zheng_jianghua@126.com。

水(地表水和地下水)、绿水(不会成为径流的雨水)及灰水(污染的水)。从研究尺度来说,目前水足迹的研究主要是国家及省级尺度,省级区域内的研究较少^[3-9],并且大都集中于消费水足迹研究,农作物生产水足迹的研究偏少^[10-12]。新疆是我国西部地区最为干旱的内陆农业灌区,农业是水资源消耗大户,2010年第一次中央新疆工作座谈会明确要求,到2020年,在不增加全社会用水总量的前提下,农业用水比重从现在的95%下降到90%以下。本文基于水足迹视角,计算分析新疆各地(州)主要农作物的生产水足迹及其空间分布情况,以期新疆农业的可持续发展以及落实最严格水资源管理制度提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆幅员辽阔,地形非常有特色,横亘中部的天山将新疆分作天山北部、天山南部两块区域,再加上东部地区形成新疆三大区域,即:北疆、南疆和东疆。北疆包括:乌鲁木齐市、克拉玛依市、昌吉回族自治州、博尔塔拉蒙古自治州、伊犁州直属县(市)、阿勒泰地区、塔城地区、石河子市;南疆包括:巴音郭楞蒙古自治州、阿克苏地区、喀什地区、和田地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州;东疆包括吐鲁番地区、哈密地区。本文在研究农作物生产水足迹时,由于克拉玛依市、石河子市的数据缺失未包括在内,因此总计13个地(州)。

新疆是灌溉农业区,小麦、玉米、棉花是主要农作物,2011年小麦、玉米、棉花的播种面积分别占全区总播种面积的21.63%、14.61%、32.87%。小麦面积中冬小麦播种面积占60%左右,春小麦占40%左右。北疆以种植春小麦为主,南疆以种植冬小麦为主,其中天山南北两侧从丘陵到山前平原多为冬春麦混种区^[13]。玉米在新疆粮食作物中的地位仅次于小麦,根据播种时间的不同可分为夏玉米和春玉米。北疆和焉耆、拜城盆地主要为春播玉米区,南疆和东疆大部分地区,以夏播玉米为主。

1.2 研究方法

1.2.1 作物需水量 作物需水量是在理想的生长条件下作物从种植到收获所需的蒸散量,等于生长期蓝水和绿水蒸发量之和。作物的需水量一般采用联合国粮农组织(FAO)推荐的以Penman-Monteith公式为基础的作物系数法。

$$ET = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中, ET 、 K_c 、 ET_0 分别表示某一时期内,作物需水量、作物系数及参考作物腾发蒸腾量。其中,作物系数反映实际作物和参考作物之间需水量的差异。而参考作物腾发蒸腾量,是一种假想的参考作物冠层腾发速率,其大小只与气象因素有关,采用FAO推荐的最新修正Penman-Monteith公式进行计算^[14]。

作物理想生长条件下,绿水的蒸散发即降雨的蒸散发等于总作物蒸散发与有效降水的较小值。蓝水蒸散发即农田灌溉用水的蒸散发,等于总作物蒸散发减去有效降水。当有效降水超过作物蒸散发时,其值为0。绿水和蓝水的计算公式如下:

$$ET_{green} = \min(ET_c, P) \quad (2)$$

$$ET_{blue} = \max(0, ET_c - P) \quad (3)$$

式中, ET_{green} 为绿水蒸散发量; ET_{blue} 为蓝水蒸散发量; ET_c 为总作物蒸散发量; P 为有效降水,是总降水中能被作物利用的那一部分水分。本研究使用美国农业部土壤保护局(USDA SCS)的方法来计算有效降水量。

1.2.2 灰水 灰水足迹指以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准,将一定的污染负荷稀释至高于一定环境水质标准所需的淡水体积^[15]。这一部分水由于不能被人类利用,所以形象地称之为灰水。农业生产过程中,为了获得更高的产量,通常需要施用大量的化肥和农药。而化肥并不能被作物全部吸收利用,多余的肥料及农药会渗入地下或进入地表径流造成地下水和地表水的污染。由于氮肥是造成地下水及地表水污染的主要来源,一般以淋失氮的需水量作为灰水足迹。根据相关文献^[16],本研究选取氮肥施用量的10%作为淋失量。

由于研究区地处干旱区,农田以灌溉为主不易形成地表径流,氮肥主要造成地下水的污染,所以本文采用中国地下水质量标准(GB/T14848-93)中的Ⅲ类标准,氮的最大容许浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,氮的自然本底浓度一般取零。具体作物生产过程的灰水足迹计算公式如下:

$$WF_{grey} = (a \times AR) / (C_{max} - C_{nat}) \quad (4)$$

其中, WF_{grey} 为作物灰水足迹; AR 为氮肥施用量; a 为氮淋失量(即进入水体的污染量占总氮肥施用量的比例); C_{max} 为氮肥的最大容许浓度; C_{nat} 为污染物的自然本底浓度。

1.2.3 作物生产水足迹 水足迹是指一个国家或地区,生产一定人群(个体、城市或国家)消费的产

品和服务所需要的水资源数^[17]。而作物生产水足迹是指作物在整个生长过程中,所利用的淡水资源和引起的污染用水总量^[15]。其组成包括三个部分:来自地表或地下的灌溉用水(蓝水)、降雨(绿水)和氮肥所引起的污染水(灰水),其中,蓝水和绿水的总量即为作物整个生长期的需水量。作物生产水足迹计算公式如下:

$$WF_{proc} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (5)$$

1.3 数据来源

计算所需的气象数据来自联合国粮农组织(FAO)ClimWat 数据库中新疆地区的 12 个气象站点数据。作物参数包括作物系数和作物物候数据,参考 FAO 数据库及相关文献^[18-21]。新疆 2011 年各地(州)主要农作物总产量、单位面积产量、耕种面积及化肥施用量数据均源于《新疆统计年鉴 2012》。

2 结果与分析

2.1 主要农作物需水量

利用 CROPWAT 软件可计算得到新疆各地(州)小麦、玉米、棉花在整个生长期内的单位面积总需水量、单位面积绿水量及单位面积蓝水量。然后,乘以各地(州)主要农作物的播种面积,可得到各地(州)主要农作物总需水量、绿水量及蓝水量,再除以作物总产量,即可得到各地(州)小麦、玉米、棉花单位质量的需水量。

图 1 为 2011 年北疆、南疆、东疆以及全疆主要农作物单位面积需水量对比图。由图 1 可知,在新疆全区范围内,农作物单位面积需水量棉花最高为 $8\ 650\ \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、小麦为 $5\ 742\ \text{m}^3/\text{hm}^{-2}$ 、玉米为 $5\ 052\ \text{m}^3/\text{hm}^{-2}$ 。但玉米、小麦的单位面积需水量在不同区域互有高低,在北疆和东疆玉米大于小麦,而在南疆小麦却小于玉米。产生这种差异的原因主要是作物的种植模式及气候因素。北疆及东疆地区主要种植春小麦,而南疆主要种植冬小麦,春小麦的生长周期较短导致其整个生长期内的需水量相比冬小麦少,再加上南疆气温较北疆、东疆高,造成其在生长期内的作物蒸散量较大,需水量也较大。以上因素共同导致小麦、玉米在新疆不同区域的单位面积需水量呈现空间异质性。

为从不同角度对比新疆三种主要农作物的需水差异,本文计算了各农作物单位质量的需水量情况,结果见图 2。由图 2 可知,新疆各区域单位质量农作物需水量同样是棉花最大为 $4.82\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、小麦次之为 $0.99\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 、玉米最小为 $0.54\ \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。新疆地区棉花单位质量的需水量是小麦的 5 倍、玉

米的 9 倍,且三种农作物单位质量需水量在空间分布上具有一致性。小麦、玉米、棉花单位质量需水量均是东疆最大、南疆次之、北疆最小。分析导致这种现象的原因主要是与气候因素有关,如东疆地区特别是吐鲁番地区年降雨量稀少、气候干燥、日照时间长等导致农作物在生长期内的需水量偏大。

综合图 1、图 2 发现,无论从单位面积需水量还是单位质量需水量的角度来看,新疆地区棉花的需水量均大于小麦、玉米等粮食作物。从控制农业用水总量的角度,合理调整农作物的种植结构,特别是减少耗水作物棉花的种植面积,对于本地区水资源的合理利用及可持续发展具有重要意义。

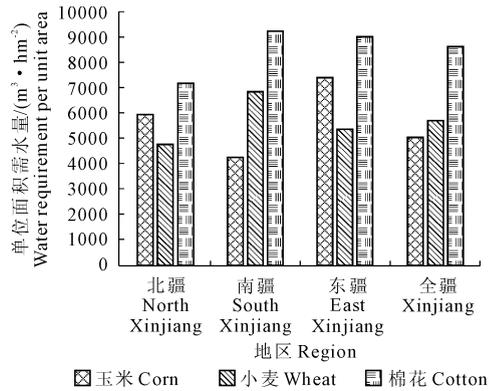


图 1 2011 年新疆主要农作物单位面积需水量

Fig.1 Water requirement of main crops in per unit aera of Xinjing in 2011

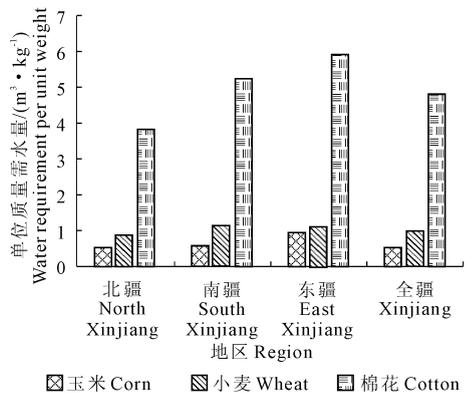


图 2 2011 年新疆主要农作物单位质量需水量

Fig.2 Water requirement of main crops in per unit weight of Xinjing in 2011

通过计算作物需水量发现,2011 年新疆各地(州)主要农作物需水以蓝水为主,为灌溉农业区,其中伊犁州直属地区的主要农作物蓝水需水量比重最小为 72.74%,吐鲁番地区蓝水比重最大为 98.89%。由表 1 可知,从更大的区域尺度上,主要农作物的蓝水比重大小排序为东疆最大、南疆次之、北疆

最小,蓝水比重大也意味着这些地区降雨稀少,农作物的生长主要依靠灌溉用水。

表 1 2011 年新疆地区主要农作物需水量

Table 1 Water requirements of main crops in Xinjiang in 2011

地区 Region	小麦 Wheat			玉米 Corn			棉花 Cotton			总需水量 Total water requirement		
	绿水 Green water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水 Blue water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水比重 Proportion of blue water /%	绿水 Green water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水 Blue water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水比重 Proportion of blue water /%	绿水 Green water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水 Blue water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水比重 Proportion of blue water /%	绿水 Green water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水 Blue water /(10 ⁷ m ³ · a ⁻¹)	蓝水比重 Proportion of blue water /%
北疆 North Xinjiang	74.43	178.37	70.56	26.66	153.30	85.18	31.19	190.47	85.93	132.29	522.14	79.79
南疆 South Xinjiang	15.75	302.33	95.05	7.45	137.12	94.84	30.43	643.79	95.49	53.63	1083.24	95.28
东疆 East Xinjiang	0.27	9.75	97.31	0.08	3.41	97.76	0.61	33.10	98.18	0.96	46.26	97.97
全疆 Xinjiang	180.63	490.45	84.43	34.20	293.84	89.58	62.23	867.36	93.31	186.88	1651.65	89.84

结合表 1 比较新疆全区各主要农作物(小麦、玉米、棉花)的蓝水比重,可知棉花的蓝水比重最高、玉米次之、小麦最小,但南疆地区的小麦蓝水比重大于玉米的蓝水比重。其原因可能是由于南疆地区主要种植冬小麦,生长周期较长,生长期内降雨量又较少,导致南疆地区的小麦蓝水比重较大。

从蓝水利用总量分析,2011 年新疆各地(州)主要农作物蓝水利用量最小的是乌鲁木齐市为 $6.15 \times 10^7 \text{ m}^3$ 、最大是喀什地区为 $375.64 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。根据表 1 从更大的区域尺度上分析,主要农作物的蓝水利用总量为南疆最大、北疆次之、东疆最小,分别考

察三种主要农作物的蓝水利用量,可知小麦、棉花符合以上空间分布规律。但对于玉米来说,北疆的玉米蓝水利用量却大于南疆,可能的原因是北疆的玉米种植面积较大,致使其总蓝水需水量较大。

2.2 灰水足迹

利用统计年鉴中各地(州)总氮肥施用量,结合主要农作物的面积权重可得到各地(州)主要农作物氮肥施肥总量,进而通过农作物灰水足迹公式计算得到各地(州)主要农作物灰水足迹及单位面积灰水足迹值,结果见表 2。

表 2 2011 年新疆地区主要农作物灰水足迹

Table 2 Grey water footprint of main crops in Xinjiang in 2011

地区 Region	氮肥量 Consumption of nitrogenous fertilizer /t	面积 Area /10 ³ hm ²	总灰水足迹 Total grey water footprint /10 ⁶ m ³	单位面积灰水足迹 Grey water footprint per unit area /(m ³ ·hm ⁻²)
乌鲁木齐 Urumqi	1674.32	15.79	8.37	530.18
昌吉 Changji	45973.61	357.53	229.87	642.93
伊犁 Ili	19722.40	288.99	98.61	341.23
塔城 Tacheng	44297.62	321.27	224.49	689.41
阿勒泰 Altay	3737.37	45.90	18.69	407.12
博州 Bortala	17651.26	108.22	88.26	815.53
巴州 Bayangol	51821.42	225.52	259.11	1148.93
阿克苏 Aksu	95774.57	497.76	478.87	962.06
克州 Kizilsu	7698.40	48.59	38.49	792.18
喀什 Kashgar	96875.06	591.36	484.38	819.09
和田 Hotan	26989.84	173.90	134.38	776.02
吐鲁番 Turpan	4056.57	23.39	20.28	867.16
哈密 Hami	5290.57	37.30	26.45	709.19
总计 Total	421563.01	2735.52	2107.82	770.53

由表2可知,2011年新疆地区主要农作物生产灰水足迹为 $2\,107.82 \times 10^6 \text{ m}^3$,其中乌鲁木齐灰水足迹最小为 $8.37 \times 10^6 \text{ m}^3$,喀什地区灰水足迹最大为 $484.38 \times 10^6 \text{ m}^3$,一个地区的氮肥施用总量越大,其灰水足迹也越大。

为便于比较新疆各地(州)的灰水足迹强度,计算单位面积灰水足迹值作为评价指标,结果见表2。从表2可以看出,伊犁州直属县(市)主要农作物的单位面积灰水足迹最小为 $341.23 \times \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,巴音郭楞蒙古自治州的单位面积灰水足迹最大为 $1\,148.93 \times \text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。说明巴州单位播种面积的氮肥施用量较多,可能存在过度施肥的问题,可以利用减少氮肥施用量、提高氮肥利用率等方式来减少化肥对地下水的污染,从而减少灰水足迹。

2.3 农作物生产水足迹

在计算新疆各地(州)主要农作物需水量及灰水足迹的基础上,根据公式5可计算得到各地(州)主要农作物总的生产水足迹。结果显示:2011年新疆全区主要农作物生产水足迹为 $2\,049.31 \times 10^7 \text{ m}^3$,其中蓝水足迹为 $1\,651.65 \times 10^7 \text{ m}^3$,绿水足迹为 $186.88 \times 10^7 \text{ m}^3$,灰水足迹为 $210.78 \times 10^7 \text{ m}^3$;新疆各地(州)农作物生产水足迹总量差异明显,乌鲁木齐的主要农作物生产水足迹最小为 $9.26 \times 10^7 \text{ m}^3$,而喀什地区的主要农作物生产水足迹最大为 $445.86 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

为表征新疆地区主要农作物生产水足迹的空间分布差异,将各地(州)主要农作物总的生产水足迹除以本地区主要农作物的播种面积得到单位播种面积的生产水足迹,然后利用 ArcMap 制作得到新疆各地(州)主要农作物单位播种面积生产水足迹图(图3)。

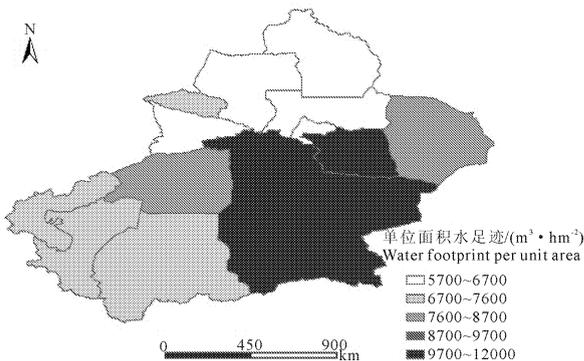


图3 各地(州)农作物单位面积水足迹

Fig.3 Spatial distribution of production water footprints in per unit area of main crops

由图3可知:乌鲁木齐、昌吉回族自治州、伊犁州直属县(市)、塔城及阿勒泰地区,主要农作物单位播种面积生产水足迹较小,值范围为 $5\,700 \sim 6\,700$

$\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$;巴音郭楞蒙古自治州及吐鲁番地区,主要农作物单位播种面积生产水足迹较大,值范围为 $9\,700 \sim 12\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从空间分布来看,新疆北部地区单位播种面积生产水足迹偏小、新疆西南部及东部地区单位播种面积生产水足迹为中间水平、而新疆中南部地区单位播种面积生产水足迹最大。

3 讨论

通过计算新疆地区主要农作物的需水量发现,棉花的单位面积需水量、单位质量需水量及其蓝水比重均大于玉米和棉花,为最耗水的农作物。但棉花作为一种经济作物,其单位面积经济效益分别是玉米的2.5倍、小麦的3倍。另外,通过计算农作物的单位水产值(即用于作物生长的单位水量所获得的经济收益)可知,棉花为 $3.8 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 、玉米为 $3.0 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 、小麦为 $2.1 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$,棉花也稍高于玉米和小麦。因此,从经济效益角度出发,棉花种植有其独特优势,这也是自治区政府将棉花作为重点优势资源的原因。但是快速增长的棉花种植面积也导致了新疆地区农业用水量的增加,加剧了本地区的水资源压力。因此,要从可持续发展的角度出发,在保持棉花种植的经济效益基础上,还要适宜地控制棉花的种植面积,特别是控制单位面积需水量较大的南疆地区的种植规模,以减少本地区农业用水总量。

农作物蓝水利用计算结果表明:南疆地区蓝水利用总量最大、北疆次之、东疆最小;蓝水比重东疆最大、南疆次之、北疆最小;主要农作物中棉花的蓝水比重最高、玉米及小麦次之,南疆地区小麦的蓝水比重大于玉米。由于东疆地区作物种植面积较少,虽然其蓝水比重较大,但总的蓝水利用量较小,南疆地区农作物的蓝水比重较大且其作物种植面积也较大,特别是种植蓝水比重高的棉花的面积较大,因此导致其蓝水利用量最大。蓝水利用量大也就是意味着农业生产所需的灌溉用水较多,可以通过调整种植结构,如在南疆地区可以适宜增加蓝水比重和单位面积需水量均较小的玉米种植面积,减少棉花、小麦的种植面积,来减少本地区农业灌溉用水量。

灰水足迹表征的是农业生产过程中所引起的污染用水总量,对新疆各地(州)的灰水足迹计算表明,一个地区的氮肥施用总量越大,其灰水足迹也越大。但一个地区氮肥施用量是与农作物的播种面积呈正比关系的,所以一个地区总的灰水足迹大并不表示其化肥污染最严重。为此需要考察研究区内主要农作物的单位面积灰水足迹,结果表明,巴州、阿克苏及吐鲁番地区的单位面积灰水足迹最大,说明这些

地区单位播种面积的氮肥施用量较多,可能存在过度施肥的问题。可以通过减少氮肥施用量、提高氮肥利用率等方式减少化肥对地下水的污染,进而减少灰水足迹。另外,本研究在计算灰水足迹时,借鉴国外的灰水研究,只考虑了化肥产生的污染,并未包含农药引起的水体污染,因此,灰水足迹的研究还需进一步的深入完善。

农作物生产水足迹综合反映了农作物生产过程中所消耗的水资源总量。2013 年 1 月国务院颁布了《实行最严格水资源管理制度考核办法》,其中规定新疆 2015、2020、2030 年的用水总量控制目标分别为 $515.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $515.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $526.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。计算结果表明,2011 年新疆全区仅三种主要农作物的生产水足迹就高达 $204.93 \times 10^8 \text{ m}^3$,而新疆地区目前的灌溉渠系水利用系数仅为 0.468,意味着用水总量中有一半以上损失在灌溉渠系上,两者相加就已经接近新疆用水总量的控制目标,因此能否有效地控制农业用水量是新疆落实最严格水资源管理制度的关键。另外,从新疆各地(州)农作物单位面积生产水足迹空间分布来看,南疆及东疆地区特别是巴州、吐鲁番、阿克苏及喀什地区的水足迹值较大,并且除吐鲁番地区外,其它三个地区的农作物生产水足迹总量也较大,是水资源治理的主要地区。总之,通过因地制宜地调整农作物种植类型,控制高耗水作物种植面积,减少氮肥施用量及提高氮肥利用率等措施,可以有效地减少研究区农业用水量,为尽快实现国务院规定的最严格水资源管理制度指标奠定良好的基础。

4 结 论

本文通过计算、分析 2011 年新疆地区 13 个地(州)主要农作物(小麦、玉米及棉花)的生产水足迹得到以下结论:

- (1) 新疆地区棉花的需水量及蓝水比重均大于小麦、玉米等粮食作物,为最耗水的农作物,限制棉花种植面积可以有效控制本地区的农业用水总量。
- (2) 新疆各地(州)主要农作物生产水足迹组成以蓝水为主,南疆地区蓝水利用量最大,棉花的蓝水比重最高,玉米及小麦次之,南疆地区小麦的蓝水比重大于玉米。通过调整种植结构,如在南疆地区增加蓝水比重较小的玉米种植面积,减少棉花、小麦的种植面积,可以有效地减少本地区农业灌溉用水量。
- (3) 灰水足迹表征的是农业生产过程中所引起的污染用水总量,一个地区的氮肥施用总量越大,其灰水足迹也越大,巴州、阿克苏及吐鲁番地区的单位

面积灰水足迹最大,表明这些地区单位播种面积的氮肥施用量较多,存在过度施肥及化肥利用率较低的问题。

(4) 2011 年新疆全区仅三种主要农作物的生产水足迹加上灌溉渠系所损失的水量,就已经接近国务院颁布的《实行最严格水资源管理制度考核办法》所规定的用水总量指标,因此有效地控制农业用水量对新疆落实最严格水资源管理制度有着重要的意义。其中,南疆及东疆地区特别是巴州、阿克苏、喀什地区农作物的单位面积水足迹值和总生产水足迹均较大,是落实最严格水资源管理制度的关键地区。

总之,对于地处干旱区、水资源缺乏的新疆地区来说,通过因地制宜地调整农作物种植类型、控制高耗水作物种植面积、减少氮肥施用量及提高氮肥利用率等措施,可以有效地减少研究区农业用水量,为完成最严格水资源管理制度考核指标奠定良好基础。

参 考 文 献:

- [1] Shiklomanov I A, Rodda J C. World water resources at the beginning of the twenty-first century [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [2] Hoekstra A Y. Virtual water trade: Proceedings of the international expert meeting on virtual water trade, Delft [C]//The Netherlands, Value of Water Research Reports Series No. 12, UNESCO - IHE, Delft, 2002.
- [3] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern [J]. Water Resources Management, 2007, 21(1):35-48.
- [4] 徐中民,龙爱华,张志强.虚拟水的理论方法及在甘肃省的应用 [J].地理学报,2003,58(6):861-869.
- [5] 龙爱华,徐中民,张志强.西北四省(区)2000 年的水资源足迹 [J].冰川冻土,2003,25(6):692-700.
- [6] 龙爱华,徐中民,王新华,等.人口、富裕及技术对 2000 年中国水足迹的影响 [J].生态学报,2006,26(10):3358-3364.
- [7] 马 静,汪党献,来海亮,等.中国区域水足迹的估算 [J].资源科学,2005,27(5):96-100.
- [8] 陈 颢,任志远,郭 斌.陕西省近 10 年来水资源足迹动态变化研究 [J].干旱区资源与环境,2011,25(3):43-48.
- [9] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局 [J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.
- [10] 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.
- [11] 苏明涛,张郁新,英 华.吉林省主要农作物的生产水足迹研究 [J].干旱区资源与环境,2012,26(7):26-30.
- [12] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究 [J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.
- [13] 王荣栋,孔 军,陈荣毅,等.新疆小麦品质生态区划 [J].新疆农业科学,2005,42(5):309-314.

$$(F = 26.88 > F_{0.01} = 3.39)$$

$$Y_{\text{衣分率}} = 0.046D_{\text{吐絮期}} + 0.002R_{\text{吐絮期}} + 1.096T_{\text{苗期}} + 12.648$$

$$(F = 7.76 > F_{0.01} = 3.39)$$

建立的回归模型均通过了0.01的 F 显著性检验,在棉花生产中对产量的预报有一定应用价值。

5 结论与讨论

本文通过对敦煌(地区)的棉花农业气象资料进行分析,得到以下结论:

(1) 棉花的全生育期天数呈现增加趋势,气候倾向率为 $0.72 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,但各个阶段的天数变化有一定差异。其中播种出苗期、苗期和吐絮期的天数均有所增加,以吐絮期增幅最为明显;其它两个阶段生育天数缩短。棉花播种出苗期和苗期的生育天数变化与播种日期关系密切。

(2) 生育天数对产量有一定影响,综合考虑各阶段生育期与棉花产量的关系,为了使棉花产量高、品质好,应适当减少播种日期至吐絮日期之间的生育天数,适当增长吐絮期的天数。

(3) 光热因子对棉花产量的影响显著,且在各个生育阶段并不相同。在技术手段的支持下,我们应该适当增长苗期与吐絮期的日照时数,减少蕾期和花铃期的日照时数;也可以在适当范围内提高气温,促进植物的光合作用,以满足棉花在各阶段生长发育的需要,同时提高棉花的产量与质量。

(4) 构建了棉花产量与生育天数、日照时数和平均气温的回归方程,经检验都通过了0.01的 F 显著性检验,对棉花产量预测有一定的实际应用价值。

河西走廊地区应根据早熟及抗病为主的棉花品种对发育天数和光热条件的需求,科学调控播种期,

适应气候变暖给棉花播种带来的影响;尽可能选育抗逆的优良品种,采用稳产增产技术,不断提高棉花生产过程中对气候变化的应变能力和抗减灾水平;同时,更应建立健全气象灾害预警系统,为棉花的高质高产提供科学的气象信息服务和保障。

参考文献:

- [1] 贾恒昌. 临清县气候条件对棉花产量影响的统计分析[J]. 中国农业气象, 1982, (3): 12-15.
- [2] 千怀遂, 石艳蕊, 魏东岚. 气候对河南省棉花产量的影响及其变化研究[J]. 生态学报, 2000, 20(6): 1061-1068.
- [3] 张永红, 李湘阁, 葛徽衍, 等. 气候变化对山西棉花产量影响的情景分析[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 111-113.
- [4] 王润元, 张强, 刘宏谊, 等. 气候变暖对河西走廊棉花生长的影响[J]. 气候变化研究进展, 2006, 1(1): 41-42.
- [5] 邓振镛, 王鹤龄, 李国昌, 等. 气候变暖对河西走廊棉花生产影响的成因与对策研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 161-166.
- [6] 刘德祥, 董安祥, 陆登荣. 中国西北地区近43 a气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 195-201.
- [7] 瞿汶, 刘德祥, 赵红岩, 等. 甘肃省近43年降水资源变化对农业的影响[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1): 56-60.
- [8] 王建勋, 朱晓玲, 庞新安, 等. 塔里木灌区棉花生长发育光热条件的分析[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 30-33.
- [9] 周震, 王鹤龄, 李耀辉. 甘肃河西地区棉花生长对气候变暖的响应及对策研究[J]. 中国棉花, 2006, (11): 18.
- [10] 阿不力米提·帕提古力. 试谈棉花的早熟性及影响的因素[J]. 农业科技, 1996, (3): 3-4.
- [11] 中国农业科学院棉花研究所. 中国棉花栽培学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 33-67.
- [12] 郑维, 林秀碧. 新疆棉花生产与气象[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1993: 13-67.
- [13] 王鹤龄, 王润元, 赵鸿雁, 等. 中国西北冬小麦和棉花生长对气候变暖的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 258-264.
- [14] 刘德祥, 董安祥, 邓振镛. 中国西北地区气候变暖对农业的影响[J]. 自然资源学报, 2005, 20(1): 119-125.

(上接第200页)

- [14] Smith M, Allen R, Pereira L. Revised FAO methodology for crop water requirements[M]. Rome: Land and Water Development Division, 1997.
- [15] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aladaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual-Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [16] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. Ecological Economics, 2006, 60(1): 186-203.
- [17] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [18] 黄敬峰, 王秀珍, 蔡承侠, 等. 新疆冬小麦物候与气候条件研究[J]. 中国农业气象, 2000, 21(1): 14-19.
- [19] 王秀珍, 黄敬峰. 新疆大田玉米物候与气候研究[J]. 玉米科学, 1994, 2(2): 20-26.
- [20] 黄敬峰, 王秀珍. 新疆棉花物候与气候条件研究[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(2): 90-95.
- [21] Allen R G, Smith M, Pette A. An update for the calculation of reference evapotranspiration[J]. ICID Bulletin, 1994, 43(2): 35-92.