

江苏省主要农作物的生产水足迹研究

徐鹏程, 张兴奇

(南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023)

摘要: 运用水足迹的理论和方法对江苏省播种面积最大的6种农作物在2000-2010年间的水足迹进行计算,并分析各农作物生产水足迹的特点以及灰水足迹对水环境的不利影响。结果表明:6种农作物生产消耗的蓝水和绿水量总体上呈现下降趋势,江苏省农业生产的用水效率在逐年提高。6种农作物的绿水足迹占比为61.88%~88.17%,绿水在当地农作物生产中占有重要的地位;江苏省6种主要农作物中,水稻和小麦生产的水足迹之和占比为84.15%;单位质量棉花生产水足迹最大,其产生的灰水足迹也最大;单位质量小麦生产的水足迹是稻谷的近两倍,单位质量小麦生产产生的灰水足迹也明显大于水稻。

关键词: 水足迹; 农作物; 用水效率; 水环境; 江苏省

中图分类号: S51

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0232-06

Study on water footprint of main crops production in Jiangsu Province

XU Pengcheng, ZHANG Xingqi

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The paper calculated the water footprint of the six largest - sowing - area crops in Jiangsu province between 2000 to 2010 by using water footprint theory and method. It also analyzed the characteristics of each crop's water footprint as well as the adverse effects of the gray water footprint on the water environment. The results showed that blue water and green water volume consumed in the production process of six kinds of crop generally appeared a downward trend, and water using efficiency of agricultural production has increased every year in Jiangsu Province. The green water footprint of six kinds of crop accounted for 61.88% to 88.17% of total water consumption and green water played an important role in the local crop production; the water footprint of rice and wheat production accounted for 84.15% of the total water footprint of the six major crops in Jiangsu province; the water footprint per unit mass of cotton production is the highest, and it also produced the highest gray water footprint; the water footprint per unit mass of wheat production is almost twice as well as that of rice, its gray water footprint is also significant greater than that of rice.

Key words: water footprint; crop; water use efficiency; water environment; Jiangsu Province

随着人口的不断增长和经济社会的快速发展,水资源短缺问题日益突出。农业是人类食物的主要来源,是三大产业的基础,并且一直都是用水大户,因此,有效地评价一个国家或地区的农业水资源利用效率对于水资源的有效管理具有重要的意义。但是传统的农业用水管理主要关注灌溉用水,忽视了作物生产过程对土壤水的利用以及化肥和农药等的使用对水环境产生的不利影响。

水足迹是Hoekstra于2002年提出的,它是指在一

定的物质生产标准下,生产一定人群消费的产品和服务所需要的水资源的数量,它表征的是维持人类需要的产品和服务消费而使用的真实的水资源量^[1]。水足迹评价拓宽了传统水资源评价体系的外延和内涵,它涵盖了蓝水、绿水和灰水,能真实地反映实际用水状况和水资源的供需平衡状态。目前,国内外学者对区域农产品水足迹开展了广泛的研究:盖力强等^[2]对华北平原小麦和玉米的生产水足迹进行了研究,但由于该研究的时间尺度太短,结论缺乏说服力。何浩等^[3]对

收稿日期:2015-09-30; 修回日期:2015-11-12

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20141318)

作者简介:徐鹏程(1992-),男,安徽马鞍山人,在读硕士研究生,主要从事水文与水资源研究。

通讯作者:张兴奇(1964-),男,贵州仁怀人,博士,副教授,主要从事水资源与水土保持研究。

湖南水稻的生产水足迹进行了研究,发现该地区水稻生产的水足迹构成以绿水为主,但所占比例逐渐下降,而灰水足迹在不断增加。邓晓军等^[4]对南疆棉花的生产水足迹开展了实证研究,揭示了棉花生产过程中水资源的真实消费状况。周兴^[5]对江苏省主要农作物消耗的水资源量进行了计算分析,但是未涉及到灰水足迹,没有考虑到农业生产活动对水环境的负面影响。

江苏省境内虽然湖泊、河流众多,可是多为过境水量,人均水资源量仅为 487.37 m^3 ^[6],水资源并不富足。近年来,人们开始意识到水资源供需矛盾对江苏省工业生产以及居民生活的影响,但是,农业生产中面临的水资源短缺问题却没有得到足够的重视。本文采用水足迹的理论和计算方法计算江苏省6种主要农作物(这6种主要农作物的种植面积占江苏省农地面积的70%)生产的水足迹,为合理规划和布局农作物生产、有效管理农用水资源以及减轻农业面源性水污染提供科学依据。

1 计算方法及数据来源

1.1 单位面积作物生长需水量

作物生长所需的水量通常采用联合国粮农组织FAO开发的基于Penman-Monteith模型的CropWat软件计算。该模型用于计算某一种粮食作物的单位质量需水量,在此基础上可以得到该种粮食作物单位质量的绿水和蓝水足迹值。

运用彭曼公式求解参考作物蒸散发量 ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: R_n 为作物表面的净辐射量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$; G 为土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$; T 为平均气温, $^{\circ}\text{C}$; U_2 为离地面2 m高处的风速, m/s ; e_s 为饱和水气压, kPa ; e_a 为实测水气压, kPa ; $e_s - e_a$ 为饱和水气压与实际水气压的差额, kPa ; Δ 为饱和水气压与温度相关曲线的斜率, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$; γ 为湿度计常数, $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ 。式(1)是由联合国粮农组织FAO推荐并修正,它忽略了作物类型、作物发育和管理措施等因素,仅考虑气象参数对农作物需水的影响。

然后,再利用作物系数 K_c 对 ET_0 进行修正,获得某种农作物蒸散发量 ET_c :

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

从CropWat软件中计算出作物生长期内的每天的蒸散发量 ET_c (mm/d)后,将作物生长期内的每天的蒸

散发量相加得到作物生长期内的总的蒸散发量 ET_c (mm)。在理想种植条件下,粮食作物蒸散发量 ET_c 等于单位面积作物需水量 CWR ,但由于CropWat软件中得到的作物生长期内的总的蒸散发量 ET_c 的单位为 mm ,为方便下文进行计算,利用公式(3)将 ET_c 的单位转换为 m^3/hm^2 :

$$CWR = \frac{ET_c \times 10000}{1000} \quad (3)$$

1.2 农作物生长的蓝水足迹与绿水足迹

蓝水指江河湖泊以及地表水和地下水的总和,即通常意义上的水资源。绿水概念由Falkenmark^[7]提出,指土壤非饱和含水层(包气带)中的土壤水,以蒸发形式被利用。农作物生长需水一般包括蓝水(灌溉用水)和绿水(土壤水)两部分。灌溉需水量等于农作物需水量减去有效降雨量。农作物生长所需的绿水量可通过有效降雨量和农作物产量的比值来计算,农作物生长所需的蓝水量也可通过灌溉用水量和作物产量的比值来估算,农作物生长所需的水资源量就是绿水水量与蓝水水量之和,也就是该种农作物的生产用水量。

$$IR = CWR - ER \quad (4)$$

当 $ER \geq CWR$ 时, $IR = 0$,农作物所需的蓝水量为0,单位质量农作物绿水量为:

$$VW_g = \frac{CWR}{Y} \quad (5)$$

当 $ER < CWR$ 时,单位质量农作物蓝水量为:

$$VW_b = \frac{IR}{Y} = \frac{CWR - ER}{Y} \quad (6)$$

单位质量农作物绿水量为:

$$VW_g = \frac{ER}{Y} \quad (7)$$

$$VW_{prod} = VW_g + VW_b \quad (8)$$

式中: IR 为单位面积灌溉用水量, m^3/hm^2 ; CWR 为单位面积农作物需水量, m^3/hm^2 ; ER 为有效降雨量, m^3/hm^2 ; VW_{prod} 为单位质量农作物的生产用水量, m^3/kg ; VW_g 为单位质量农作物绿水量, m^3/kg ; VW_b 为单位质量农作物蓝水量, m^3/kg ; Y 为农作物单位面积产量, kg/hm^2 。

1.3 农作物生长的灰水足迹

在农作物的生长过程中,地表水和地下水不可避免地受到化肥、农药的使用所带来的污染。土壤中的磷能和其他矿物质反应生成不容易溶解的化合物,所以磷不容易流动。钾在土壤中的流动性介于磷和氮之间,但是由于钾离子能被土壤胶体离子吸附,所以

钾也不容易流动^[2]。氮肥的施用很容易污染地下水和地表水,并且氮肥在化肥施用中比例最高,对水污染贡献也最大。因此,在灰水足迹的计算当中采用稀释淋失氮的需水量。参考已有相关研究^[8],以氮肥施用量的 10% 作为淋失氮量。稀释每吨氮所需要的水可通过过滤氮和自由排放的地表水中含氮的最高限度来计算,采用美国环境保护局(EPA)的标准,即每升饮用水中不能超过 10 mg 的氮(<10 mg/L)^[9]。

1.4 农作物生产水足迹

依据水足迹的概念,某种农作物的生产水足迹是其生长全过程中所消耗的水资源总量,即绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹的总和。

$$WF_{prod} = WF_{blue} + WF_{green} + WF_{gray} \tag{9}$$

式中: WF_{prod} 为农作物生产水足迹; WF_{blue} 为蓝水足迹; WF_{green} 为绿水足迹; WF_{gray} 为灰水足迹。

1.5 数据来源及计算软件

气象组织在江苏省境内分别设置了南京、东台和徐州 3 个气象观测站点;在地理位置上,南京、东台和徐州分别位于苏南、苏中和苏北,其气象条件和农作物种植条件具有相应地区的代表性。因此本文利用辅助软件 ClimWat 收集江苏省南京、东台、徐州 3 个气象观测站的长期月平均气象资料,然后结合软件的数据库分别计算各个气象站的参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 。

主要软件 CropWat 是根据标准彭曼公式设计

的。首先在 ClimWat 软件计算得出 ET_0 的基础上,利用 CROPWAT 软件及其数据库计算出江苏省 6 种主要农作物在各个气象站的蒸散发量 ET_c 、有效降雨量 ER 和灌溉需水量 IR , 然后对 3 个气象站的计算结果进行平均得到江苏省 6 种主要农作物蒸散发量 ET_c 、有效降雨量 ER 和灌溉需水量 IR 的平均值,最后利用公式(3)~(9)计算出各主要农作物的蓝、绿、灰水量。

土壤数据结合当地土壤类型从 FAO 全球数据库中 找到与此类型对应的土壤信息。2000 - 2010 年间江苏省主要农作物年产量、单位面积产量、种植面积、水资源使用量及化肥使用量等数据来自《江苏省统计年鉴》。

2 结果分析

2.1 不同站点的蒸散发量

如表 1 所示,由于分布于南京、东台、徐州的 3 个气象站之间经纬度、气候、土壤及光热条件的差异,导致了由 3 个地区数据计算出的主要农作物的蒸散发量差异明显。苏北地区农作物的蒸散发量明显高于苏中和苏南地区,由于苏北地区降水量较苏中苏南地区少、日照时间长,导致苏北地区农作物的灌溉用水量大。因此,在水资源赋存条件方面,与苏中和苏南地区相比,苏北地区处于劣势,水资源短缺形势更加严峻。

表 1 2000 - 2010 年江苏省 6 种主要农作物蒸散发量、有效降雨量和灌溉需水量 mm

作物 站点	南 京			东 台			徐 州			平均值		
	ET_c	ER	IR	ET_c	ER	IR	ET_c	ER	IR	ET_c	ER	IR
水稻	579	498	249	587	498	253	692	435	426	619	477	309
小麦	642	763	47	667	733	78	782	583	239	697	693	121
玉米	297	296	73	286	322	62	298	260	107	294	292	81
大豆	267	296	15	286	276	48	358	240	145	304	270	69
花生	412	447	22	419	445	33	490	401	104	441	431	53
棉花	606	599	94	600	616	37	671	531	161	625	582	97

2.2 农作物的蓝水足迹与绿水足迹

2.2.1 农作物年均水足迹 在表 2 所示的 2000 - 2010 年江苏省 6 种主要农作物中,生产单位质量棉花的需水量最多,最少的是玉米。因为在生产单位面积农作物需水量保持不变的情况下,农作物单位面积产量越高,生产单位质量农作物的需水量就越低。因此,探究如何提高农作物的单位面积产量是提高农业用水效率的重要途径。

在表 2 所示的 6 种农作物生产需水量中,6 种

农作物均表现出绿水含量占总用水量比例大的现象,这得益于江苏地区丰沛的降水。绿水相对蓝水来说一般有相对较低的机会成本^[10-11],因此,进一步提高农作物生产过程中绿水的使用比例,既能减小蓝水使用对水环境的负面影响,又能节约灌溉用水,进而节约宝贵的水资源。

水稻和小麦是江苏省种植规模最大的两种作物,提高这两种作物的用水效率对于缓解整个江苏省水资源匮乏格局有着重要的意义。2000 - 2010

年间,江苏省生产单位质量水稻所需水量为 0.770 m³/kg,比全国平均水平(生产单位质量水稻所需水量为 1.255 m³/kg)及以色列(生产单位质量水稻所需水量为 2.350 m³/kg)低得多^[12]。但 2000 - 2010 年间江苏省生产单位质量小麦所需水量为 1.606 m³/kg,只比干旱缺水的以色列(生产单位质量小麦

所需水量为 1.731 m³/kg)低,而高于全国平均水平(生产单位质量小麦所需水量为 1.294 m³/kg)^[12]。这与作物生产的气候条件及用水效率、农业生产技术水平和 管理等因素有关。江苏省需要提高小麦生产用水效率,缓解水资源紧缺的压力。

表 2 2000 - 2010 年江苏省 6 种主要农作物年均生产消耗的蓝水、绿水量

农作物	年总耗水量/(亿 m ³ · a ⁻¹)			作物产量/ (万 t · a ⁻¹)	单位质量农作物耗水量/(m ³ · kg ⁻¹)		
	蓝水	绿水	总量		蓝水	绿水	总量
水稻	30.34	102.04	132.38	1720.49	0.177	0.594	0.770
小麦	0.72	128.20	128.92	815.64	0.009	1.597	1.606
玉米	0.05	11.89	11.94	216.27	0.002	0.555	0.557
大豆	0.77	6.24	7.01	59.80	0.130	1.050	1.179
花生	0.17	7.39	7.56	57.84	0.029	1.283	1.312
棉花	1.43	19.09	20.52	34.78	0.418	5.576	5.994

此外,江苏省生产单位质量棉花所需水量很高,生产棉花所消耗的蓝水、绿水量都远高于其它农作物。在江苏省水资源匮乏的局势下,今后需要合理规划棉花生产的规模与布局,同时应该逐步减少棉花的种植规模。相对于棉花生产的高耗水,2000 - 2010 年间江苏省生产单位质量玉米所需水量为 0.557 m³/kg,玉米生产过程所消耗的蓝水、绿水量在 6 种主要农作物中最少,并且生产单位质量玉米所需水量比全国平均水平(生产单位质量玉米所需水量为 0.865 m³/kg)低得多^[12],因此可以有计划地在江苏地区扩大玉米的播种面积。

2.2.2 农作物水足迹演变趋势 在图 1(a)和 1(b)中,6 种农作物生产消耗蓝水、绿水量总体上呈现微弱下降趋势,因此从本研究的时间尺度上来看,江苏省农业生产的用水效率在逐年提高。

如图 1(a)和 1(b)所示,棉花生产消耗蓝水、绿水量起伏大,并于 2003 年达到蓝水、绿水消耗量峰值,2005 年后下降趋势明显;小麦、玉米的蓝水消耗量未产生明显变化,几乎平行于横坐标轴;小麦的绿水消耗量下降趋势较为明显,而玉米的绿水消耗量下降趋势微弱;此外,水稻、大豆和花生的蓝水、绿水消耗量均呈现微弱下降的趋势。

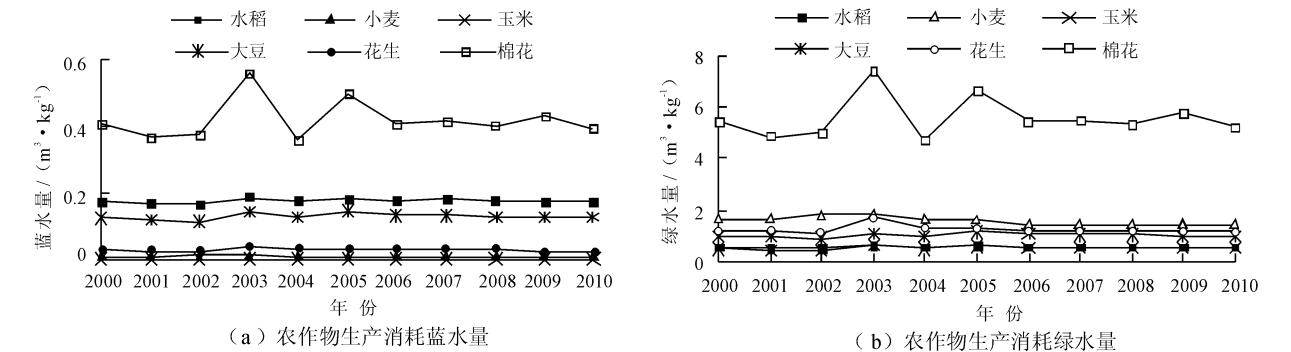


图 1 2000 - 2010 年江苏省 6 种主要农作物生产消耗蓝绿水量变化趋势

2.3 农作物的灰水足迹

表 3 所示的是江苏省 2000 - 2010 年间 6 种农作物年均灰水足迹:水稻和小麦的灰水足迹分别为 32.524 亿、22.707 亿 m³/a。尽管小麦生产产生的年灰水足迹小于水稻,但是单位质量小麦生产产生的灰水量为 0.278 m³/kg,明显大于水稻(单位质量水稻生产产生的灰水量为 0.189 m³/kg)的灰水足迹,小麦生

产给水环境带来的污染需要高度重视。棉花生产消耗高于其它农作物的蓝水、绿水量(如表 2 所示),同时,如表 3 所示,单位质量棉花的灰水量也远远高于其它农作物,说明棉花生产在消耗大量水资源的同时还会对周围水环境产生严重的污染。由于本文灰水量的估算仅考虑了化肥(以使用

比例最高的氮肥为准)对水环境造成的污染,没有考虑杀虫剂和除草剂等对水质的影响,因此,本文得到的灰水足迹只是一个保守的估算。尽管如此,灰水足迹在水足迹中的比例仍然不容忽视(表4)。灰水足迹是能够清晰反映农业生产造成水环境面源污染状况的重要指标,加之我国化肥滥用现象的普遍性,氮磷等肥料利用率低下、淋失率高的特点,因此,提高农作物的化肥利用率、降低其损失率是减少其灰水足迹的重要途径。

表3 2000-2010年江苏省6种主要农作物生产施用的化肥中氮素含量及其灰水量

农作物	平均施肥量/ (kg·hm ⁻²)		氮肥总 施用量		氮水体 污染量		灰水量/ (m ³ ·kg ⁻¹)
	尿素	磷酸二铵	(t·a ⁻¹)	(t·a ⁻¹)	(t·a ⁻¹)	(t·a ⁻¹)	
水稻	103.5	48.6	325235.3	32523.5	32.52	0.19	
小麦	69.0	54.0	227070.4	22707.0	22.71	0.28	
玉米	69.0	40.5	44524.2	4452.4	4.45	0.21	
大豆	41.4	13.5	12674.7	1267.5	1.27	0.21	
花生	34.5	13.5	8234.4	823.4	0.82	0.14	
棉花	124.2	59.4	60225.3	6022.5	6.02	1.73	

注:农作物平均施肥率依据参考文献[13],总施肥量依据种植面积来统计。

2.4 作物生产水足迹

如表4所示,计算得出2000-2010年间江苏省6种主要农作物生产水足迹年均值为376.12亿m³,其中蓝水、绿水和灰水足迹的年均值分别为33.49亿、274.84亿和67.80亿m³。而根据中国水资源公报,江苏省2014年水资源总量为399.30亿m³[14],文中计算的6种农作物总的生产水足迹已经逼近江

苏全省的年水资源总量,加上全省剩余30%农地面积上种植农作物产生的水足迹和本文未进行计算的工业及生活用水量,江苏省水资源已经到了严重匮乏的地步。

表4 2000-2010年江苏省主要农作物生产水足迹 亿m³/a

农作物	蓝水足迹	绿水足迹	灰水足迹	作物生产水足迹
水稻	30.34	102.04	32.52	164.90
小麦	0.72	128.20	22.71	151.63
玉米	0.05	11.89	4.45	16.39
大豆	0.77	6.24	1.27	8.28
花生	0.17	7.39	0.82	8.38
棉花	1.43	19.09	6.02	26.54
总计	33.49	274.84	67.80	376.12

如图2显示,6种农作物的绿水足迹占作物生产水足迹的比例为61.9%~88.2%,蓝水足迹占作物生产水足迹的比例为0.3%~18.4%,灰水足迹占作物生产水足迹的比例为9.8%~27.2%。因此绿水足迹在作物生产水足迹中占绝对优势,所占比例远远高于蓝水和灰水,这表明江苏省农作物的种植得益于丰沛的降水,形成了绿水在江苏省农作物生产中发挥重要作用的格局。灰水足迹占各作物生产水足迹的比例均偏高,如何减少农作物生产过程中化肥农药的使用,是缓解其对水环境产生不利影响的关键所在。从图2中可以看出蓝水在玉米和小麦生产足迹中所占比例极低,这是小麦、玉米的需水特性决定的,此外,水稻的蓝水足迹占生产足迹的比例明显高于其它5种农作物,应该加紧对水稻蓝水灌溉系统的改进。

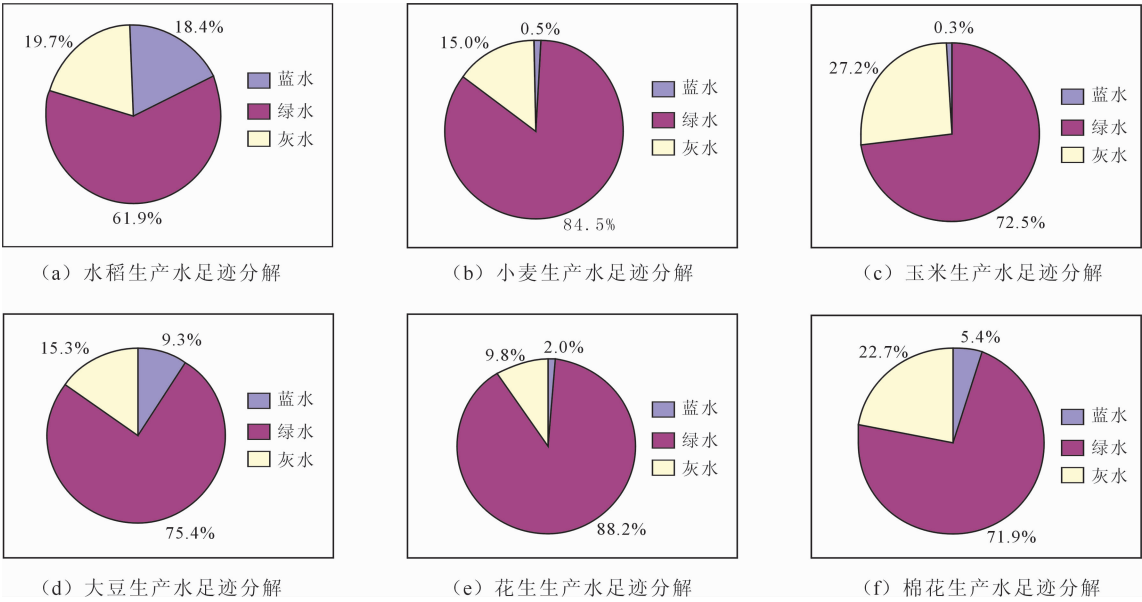


图2 2000-2010年间6种农作物年均生产水足迹分解

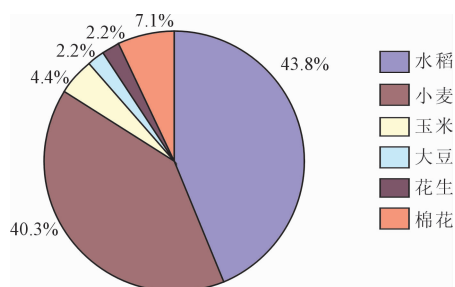


图3 2000-2010年间农作物年均生产水足迹占比

如图3所示,在2000-2010年间江苏省6种农作物年均生产水足迹中,水稻生产水足迹占比最高,为43.8%;小麦占比次之,为40.3%;棉花、玉米、花生和大豆的占比依次为7.1%,4.4%,2.2%和2.2%。水稻和小麦生产水足迹所占比例高与它们的种植规模大密不可分,因此提高这两种农作物的用水效率对于缓解江苏省水资源匮乏状况意义重大。

3 结论

利用水足迹计算模型 CropWat 对2000-2010年间江苏省6种主要农作物生产水足迹的计算分析,揭示了这些农作物在生产过程中对水资源的实际消耗量,并且从灰水足迹的角度评价了农作物生产所引起的水环境污染问题。

(1)江苏省境内6种主要农作物的绿水足迹在其农业生产过程中占据了主导地位。绿水相对蓝水来说一般有相对较低的机会成本,并且其对环境的负面影响很小,因此,进一步增加绿水使用的比例、努力提高绿水利用率有利于缓解水资源匮乏的局面。

(2)通过对江苏省6种主要农作物的蓝水足迹和绿水足迹的计算,小麦的单位质量生产需水量是单位质量稻谷生产需水量的两倍多。从水资源有效利用的角度看,建议控制或减小高耗水的小麦的种植规模。单位质量的棉花生产不仅消耗的水资源量较其它农作物大,其灰水足迹也远高于其它农作物,对水环境产生了极大的压力,因此需要从节约水资源与保护水环境的角度逐步降低棉花的种植规模。

(3)本文通过粗略的估算得出2000-2010年间江苏省年均灰水足迹量占年均生产水足迹的18.0%,农业生产对水环境的压力不容忽视。但是用传统方法评价农业对水资源使用状况时,通常只以农业灌溉用水作为主要的表征指标,忽视了农业生产中肥料和农药等的使用对水环境的污染,这是

需要引起重视的问题。

参考文献:

- [1] Hoekstra A Y. The concept of virtual water and its applicability in Lebanon[C] // Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, The Netherlands: IHE DELFT, 2003: 171-182.
- [2] 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.
- [3] 何浩,黄晶,淮贺举,等. 湖南省水稻水足迹计算及其变化特征分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(14): 294-298.
- [4] 邓晓军,谢世友,崔天顺,等. 新疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 176-180+185.
- [5] 周兴. 基于虚拟水理论的江苏省农业产业结构研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
- [6] 中国统计局编. 江苏统计年鉴2010[M]. 北京:中国统计出版社, 2011.
- [7] Falken M, Rockstrom J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning, and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2006, 132(3): 129-132.
- [8] Chapagain A K, Hoekstra A Y. The green, blue and grey water footprint of rice from both a production and consumption perspective[J]. Value of Water Research Series, 2010, 70: 749-758.
- [9] EPA. List of drinking water contaminants: Ground water and drinking water[S]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2005.
- [10] Hoekstra A Y, Savenije H H G, Chapagain A K. An integrated approach towards assessing the value of water: a case study on the Zambezi basin[J]. Integrated Assessment, 2001, 2(4): 199-208.
- [11] Albersen P J, Houba H E D, Keyzer M A. Pricing a rain-drop in a process-based model: general methodology and a case study of the Upper-Zambezi[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(4-5): 183-192.
- [12] Mekonnen M M, Hoekstra A Y. National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption[M]. The Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2011.
- [13] 佚名. 主要农作物每亩推荐施肥量和施肥时期参考表[K]. 农技服务, 2005(7): 70-70.
- [14] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报2014[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2014.