

1996 ~ 2015 年江苏农作物播种水足迹变化 及其驱动因子分析

龚 严^{1,2}, 马彦彬¹, 赵梳垠¹, 秦 杰¹, 陈 丹^{1,2*}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 计算了 1996 ~ 2015 年江苏省农作物播种水足迹, 在分析水足迹及其组成变化趋势的基础上, 借助通径分析方法对其影响因素进行了研究。结果表明: 全省年均农作物播种水足迹为 702.7 亿 m^3 , 其中蓝水、绿水和灰水足迹分别为 83.5 亿 m^3 、477.5 亿 m^3 及 141.3 亿 m^3 ; 水足迹总量及其各组成成分均呈先减小后增大最终趋于平稳的变化趋势, 各组成占总水足迹的比例基本保持不变; 稻谷、小麦、水果、棉花等作物水足迹随时间呈现不同的变化趋势, 而豆类、花生等作物未出现明显的变化特征。区域经济发展程度和种植结构能直接影响区域作物播种水足迹, 其中控制高耗水作物比重和耕地灌溉率是对其进行调控的有效手段。

关键词: 作物水足迹; 农业生产; 种植结构; 通径分析; 江苏

中图分类号: [TV93] **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 05-0001-06

Analysis on change of crop water footprint and its driving factors in Jiangsu province in 1996–2015

GONG Yan^{1,2}, MA Yanbin¹, ZHAO Shutan¹, QIN Jie¹, CHEN Dan^{1,2*}

(1. *Key Laboratory of High-Effective Irrigation and Drainage and Agricultural Water and Soil Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu;*

2. *College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu*)

Abstract: The water footprint of crops in Jiangsu province from 1996 to 2015 was calculated. The influencing factors were studied by path analysis on the basis of analyzing the trend of water footprint and its composition change. The results showed that the average crop water footprint was 70270 million m^3 , among which the footprints of blue water, green water and grey water were respectively 8.35 billion m^3 , 477.5 billion m^3 and 14.13 billion m^3 . The total amount of water footprint and its constituent components both decreased and then increased to a stable trend. The proportion of the total water footprint was basically unchanged. The water footprint of rice, wheat, fruit and cotton showed different trends over time, while the crops such as beans and peanuts did not show obvious changes. The degree of regional economic development and planting structure could directly affect the regional crop sowing water footprint. Controlling the proportion of high water consumption crops and the irrigation rate of cultivated land was an effective way for its near regulation.

Key words: crop water footprint; agricultural production; planting structure; path analysis; Jiangsu

收稿日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金 (51609065); 江苏省水利科技项目 (2017057); 国家大学生创新创业训练项目 (201710294013)

作者简介: 龚严 (1998-), 女, 在读本科, 主要从事农业水利工程方面的研究。

通信作者: 陈丹 (1979-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水土资源高效利用。

0 引言

提高农业用水效率并控制农业生产对生态环境的影响对区域内的农业生产和生态平衡至关重要^[1]。水足迹是衡量一个地区水资源消耗的重要指标,农作物播种水足迹可以全面衡量作物播种及生长过程中水资源的需求量,分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹^[2-3]。蓝水和绿水足迹分别用于作物生长对灌溉水和有效降水的消耗,而灰水足迹为稀释农业生产过程产生的污染物使其达到环境水质标准所消耗掉的淡水量^[4]。农作物水足迹的计算与分析对水资源短缺的中国有重要意义,所以学者对不同区域农作物水足迹进行了研究。田园宏等^[5]与操信春等^[6]对全国尺度上粮食作物生产水足迹进行和核算;单纯宇和王素芬^[7]计算了流域尺度上作物生产水足迹;陈龙等^[8]对华北平原小麦和玉米作物的生产水足迹进行了研究。省区尺度作物生产水足迹研究较多,例如陕西、北京、山东以及黑龙江等^[9-12]。由于灌区是农业用水集中的区域,所以包括河套灌区与人民胜利渠灌区等在内典型灌区作物水足迹也受到关注^[13-14]。此外,也有学者在更小的尺度上作物生产水足迹计算方法进行探索:刘帝等^[15]基于田间耗水对深吸关中地区主要粮食作物水足迹进行了计算分析;Cao等^[16]对中国东部水稻水足迹进行了田间观测;吴楠等^[17]对农作物生产水足迹进行了试验观测。以上研究为水足迹理论尤其农业节水研究提供了重要的信息,然而当前的研究多停留在对单个作物或主要研究粮食作物上,也较少在农作物播种水足迹的驱动因子和调控机制上展开研究。本文以面临较严峻水资源压力的江苏省为研究对象^[18],计算1996~2015年不同种类作物水足迹,分析类农作物的水足迹构成及其随时间变化过程,并探寻影响农作物播种水足迹变化的驱动因素,为区域农业水资源管理提供参考。

1 方法与数据

1.1 农作物播种水足迹

农作物播种水足迹为所有农作物水足迹之和,能够衡量研究区域种植业对水资源的真实占用。每种作物的水足迹(CWF)可分为蓝水足迹(CWF_{blue})、绿水足迹(CWF_{green})和灰水足迹(CWF_{grey})^[17]:

$$CWF = CWF_{blue} + CWF_{green} + CWF_{grey} \quad (1)$$

其中 CWF_{blue} 与 CWF_{green} 之和等于作物蒸发蒸腾量,可利用联合国粮农组织推荐的彭曼公式计算得到^[8, 17]。灰水足迹、根据化肥中氮的流失造成水污染而需要的稀释水量来估算:

$$CWF_{grey} = (\alpha \times AR) / (c_{max} - c_{min}) \quad (2)$$

式中,AR为每公顷土地的化肥施用量,kg; α 为淋溶率(即进入水体的污染量占总化学物质施用量的比例); c_{max} 为最大容许浓度,kg/m³; c_{min} 为污染物的自然本底浓度,kg/m³。由于同一稀释水能同时稀释多种污染物,因此在计算稀释污染物的需水量时由所需稀释水量最大的污染物决定,前人考虑到数据的可获得性和代表性,以稀释淋失氮的需水量为代表,取氮肥施用量的10%作为淋失氮^[3],稀释标准浓度为10 mg/L,即 $\alpha=10\%$, $c_{max}=0.01$ kg/m³,受纳水体的自然本底浓度为0^[3]。

1.2 影响因素分析

本文利用通径分析方法来进行江苏省农作物水足迹变化的驱动因子分析。该方法通过对自变量与因变量之间表面直接相关性的分解,来研究自变量对因变量的直接重要性和间接重要性,即将相关系数分解为直接通径系数(某一自变量对因变量的直接作用)和间接通径系数(该自变量通过其他变量对因变量的间接作用)^[1]。本文所筛选的潜在影响因子包括降水量(X_1)、人口密度(X_2)、人均GDP(X_3)、人均纯收入(X_4)、化肥施用量(X_5)、粮食单产(X_6)、灌溉水利用系数(X_7)、高耗水作物比(X_8)、农业用水比重(X_9)及耕地灌溉率(X_{10})。其中,高耗水作物比为粮食作物播种面积与农作物总播种面积的比值;耕地灌溉率为有效灌溉面积与耕地面积的比值。

1.3 数据来源

本文研究时间段为1996~2015年,水足迹计算所包含的作物有小麦、玉米、稻谷、豆类、薯类、油料、花生、甜菜、麻类、烟叶以及水果等,与统计年鉴分类相对应。江苏省气象资料来自于位于13个地级市的70个气象站点(图1),由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)下载得到;历年各作物播种面积、产量,全省国土面积、耕地面积、有效灌溉面积、化肥施用量、人口、GDP、人均纯收入等数据来自1997~2016年中国统计年鉴和江苏省统计年鉴;此外,还参考了历年江苏省水资

源公报等资料。

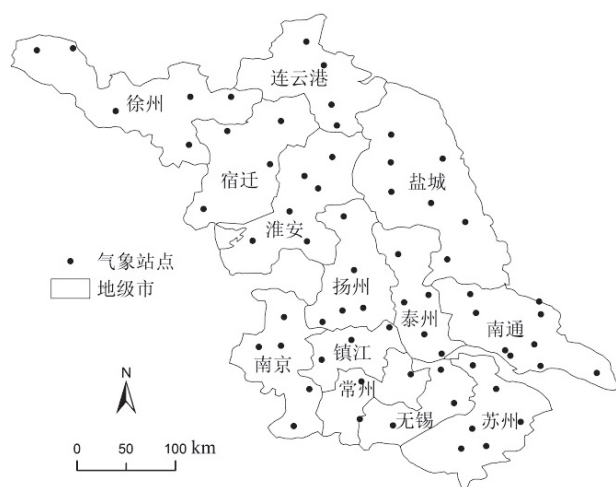


图1 气象数据收集站点分布图

2 结果与分析

2.1 江苏省农作物播种水足迹

1996 ~ 2015 年, 江苏省农作物播种水足迹的年均值为 702.3 亿 m^3 , 其中蓝水、绿水和灰水足迹分别为 83.5 亿 m^3 、 477.5 亿 m^3 及 141.3 亿 m^3 。计算出历年江苏省蓝水、绿水和灰水足迹值, 如图2所示。

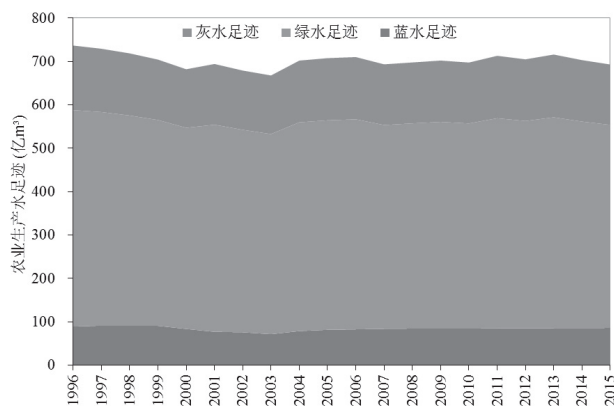


图2 江苏省历年农作物播种水足迹值

图2显示, 蓝水足迹基本保持平稳状态发展, 上下起伏波动不大; 绿、灰水足迹变化趋势基本相同, 都是先减小再增大最终趋于平稳。蓝水足迹最大年份出现在1997年, 为 91.1 亿 m^3 , 比最小年份大 19.7 亿 m^3 ; 绿水足迹在 $462.3 \text{ 亿} \sim 498.8 \text{ 亿 m}^3$ 之间变化; 灰水足迹最大值为 148.8 亿 m^3 , 出现在1997年, 最小值为 134.9 亿 m^3 , 出现在2000年。总体来看, 江苏省农作物播种水足迹呈现先下

降后上升再稳定的趋势, 最大值和最小值之间相差 69.0 亿 m^3 , 波动较小。

为更好的研究江苏省农作物播种水足迹的变化及构成, 计算出1996 ~ 2015年江苏省农业生产水足迹密度及蓝、绿、灰水足迹分别占总水足迹的比例, 由上述数据绘制出图3。

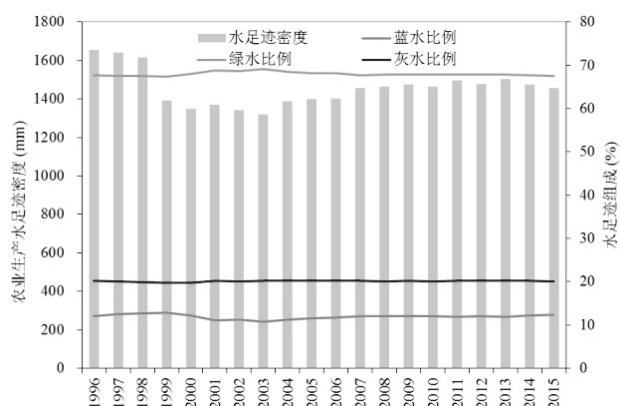


图3 江苏省1996 ~ 2015年单位耕地农作物水足迹及其构成

由图3可知, 农业生产水足迹密度的年均值为 1456.93 mm , 蓝、绿、灰水足迹占总水足迹的比例的年均值分别为 11.9% 、 68% 和 20.11% 。1996年到2003年, 农作物水足迹密度呈下降趋势, 蓝、绿、灰水比例基本保持不变; 在2000年由于江苏省耕地面积的增加以及农作物水足迹总值的下降, 农作物水足迹密度出现了突然下降的情况, 蓝水比例下降; 绿水比例上升; 灰水比例保持不变。2001 ~ 2008年, 农作物水足迹密度缓慢上升, 蓝水比例小幅度上升; 绿水比例有较小的下降; 灰水比例继续保持不变。2008 ~ 2015年, 农作物水足迹密度趋于平稳, 蓝、绿、灰水比例保持稳定。

2.2 农作物播种水足迹构成

江苏省播种的农作物包括稻谷、水果、小麦、棉花、豆类、玉米、花生、油料、薯类、茶叶、甘蔗、麻类、烟叶及糖料等类别。计算出1996 ~ 2015年各类作物水足迹值年均值, 以该省作物水足迹的来源, 结果列于表1。因薯类、茶叶、甘蔗、麻类、烟叶与糖料的水足迹值较小, 为便于分析, 将此6类作物统一归为“其他”类。

表1显示, 全省各个作物的绿水足迹占自身总水足迹的比例最大, 平均可达到 74% , 说明绿水是江苏省农作物生长发育所需水资源的最重要来源, 是维持该地区农产品正常生产的重要水资源

表 1 1996–2015 年各个作物水足迹及其组成年均值

作物种类	水足迹 (亿 m ³)			水足迹组成 (%)			
	蓝水	绿水	灰水	水足迹	蓝水	绿水	灰水
稻谷	61.0	120.7	38.9	220.6	27.66	54.72	17.62
水果	1.7	143.7	46.1	191.5	0.89	75.04	24.07
小麦	16.2	92.8	26.5	135.5	11.92	68.50	19.58
棉花	1.3	51.3	16.9	69.5	1.91	73.79	24.30
豆类	2.1	26.6	1.8	30.5	6.97	87.16	5.88
玉米	0.3	21.1	6.6	27.9	0.94	75.44	23.62
花生	0.9	11.9	2.0	14.8	5.97	80.46	13.57
油料	0.0	5.9	1.9	7.7	0.00	75.76	24.24
其他	0.3	3.5	0.7	4.5	7.00	78.24	14.75

注：“其他”包括：薯类、茶叶、甘蔗、麻类、烟叶及糖料。

基础。其中，豆类、花生的绿水足迹占自身总水足迹的比例最大，均超过 80%；水果、稻谷、小麦的绿水足迹最多，占总绿水足迹的 74.5%。除稻谷、小麦之外，其他农作物的蓝水足迹均小于 2 亿 m³ 或在 2 亿 m³ 左右，蓝水足迹占自身总水足迹的比例也基本在 10% 以下，说明蓝水在这些作物生长发育阶段所使用的比例不大，这跟作物的生长习性以及江苏省沿江沿海降水充沛有关。灰水足迹中，除豆类作物外，其他作物的灰水足迹占自身总水足迹的比例均在 10% 以上，这一方面是由于作物自身生长特性导致，另一方面也说明在种植过程中环境污染问题较为严重。其中，玉米、油料和水果作物的绿水足迹占自身总水足迹的比例超过 80%，生长发育主要来源于绿水，蓝水用量很少，可在降水丰沛的地区推广种植；但由于这几种作物灰水足迹占自身总水足迹的比例过大，对环境污染较大，在今后的种植过程中需要考虑对环境的影响。

图 4 所示的是 1996 ~ 2015 年间，各类作物水足迹随年份变化折线图。在 1996 ~ 2015 年间，豆类、玉米、花生还有其他类作物水足迹随年份变化幅度均较小，基本保持不变。稻谷、水果、小麦、棉花这 4 类作物水足迹随年份的变化幅度大。其中，稻谷呈先下降后上升再稳定的状态，并在 2004 年达到最小值，2007 年以后水足迹基本稳定。小麦的变化趋势和稻谷大致相同，小麦水足迹在 1996 ~ 2005 年间呈下降趋势，2006 ~ 2008 年有小幅度的上升，2008 年以后基本平稳。水果水足迹基本呈上升的趋势发展，只在 2007 ~ 2008 年有小幅度的下降。棉花水足迹除在 1999 ~ 2001

和 2002 ~ 2005 年有上升过，其余年份基本以下降的趋势发展。不同的作物的水足迹随年份变化的趋势多有不同，除跟作物本身的生长特性有关以外，与作物的种植面积、气候条件等都有很大的关系。

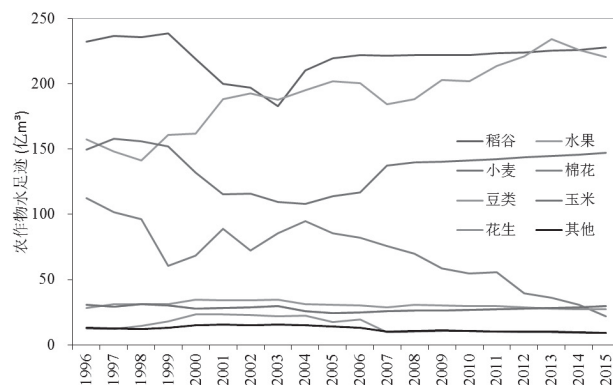


图 4 各类作物水足迹随时间变化

选取 1996 年、1999 年、2003 年、2008 年和 2015 年为特征年份计算各个作物蓝、绿、灰水足迹和总水足迹，并计算各个作物 1996 ~ 2015 年的蓝、绿、灰水足迹和总水足迹的平均值，绘制出图 5。稻谷、玉米、花生和其他类作物的蓝、绿、灰水足迹各占的比例随年份的变化基本保持不变；水果的绿水足迹和灰水足迹所占比例呈上升趋势，并在 2015 年的时候达到最大；小麦在 2003 年时总水足迹达到最低值，蓝、绿、灰水足迹占总水足迹比例也达到最低；棉花水足迹一直呈下降趋势，在 2015 年达到最低值，蓝、绿、灰水足迹占总水足迹比例也达到最小。

2.3 作物播种水足迹的驱动因素分析

所选因子对单农作物播种水足迹影响程度用通径分析，结果列于表 2。

各因素对农作物播种水足迹变化直接影响因

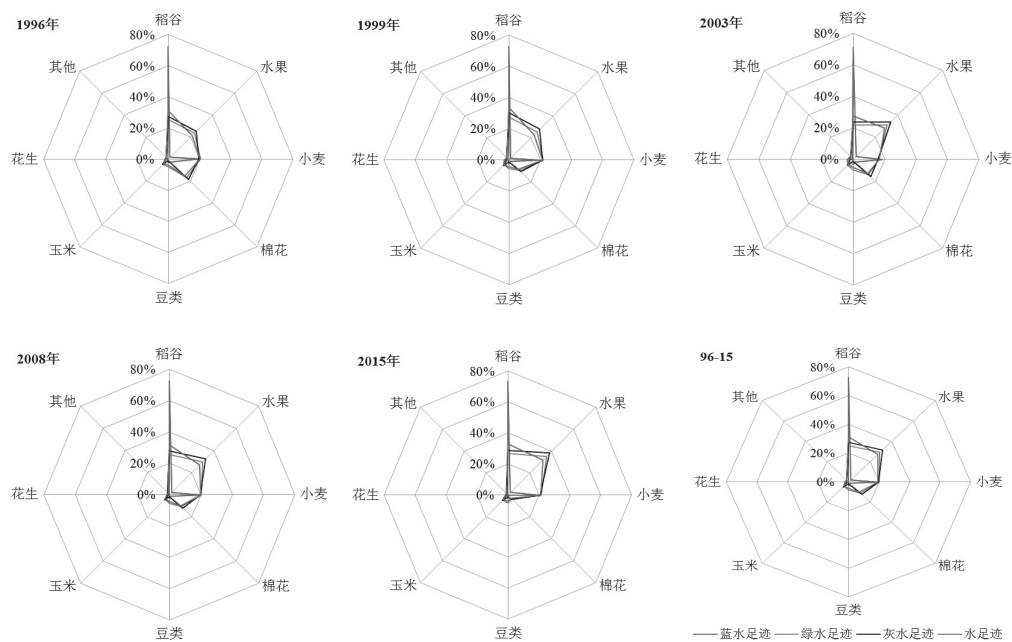


图 5 典型年份蓝、绿及灰水足迹的来源构成

素由大到小依次为：正相关为人均 GDP (X_3)、有效灌溉面积比重 (X_{10})、单位耕地面积化肥施用量 (X_5)、高耗水作物面积比 (X_8)、粮食单产 (X_6)；负相关为人均纯收入 (X_4)、灌溉水利用系数 (X_7)、人口密度 (X_2)、降水量 (X_1)、农业用水比重 (X_9)。人均 GDP (X_3) 较大则农作物播种水足迹变化较大，而人均纯收入 (X_4) 和灌溉水利用效率 (X_7) 较大则相反。总影响系数与直接通径系数的一致性不强，说明因素与因素之间存在不可忽视的间接影响。降水量 (X_1)、单位耕地面积化肥施用量 (X_5)、粮食单产 (X_6)、高耗水作物面积比 (X_8)、有效灌溉面积比重 (X_{10}) 的直接通径系数和总影

响系数相差不大，这几个因子主要直接影响农作物播种水足迹的变化；人均 GDP (X_3) 直接通径系数较大的同时，也对人均纯收入 (X_4)、灌溉水利用系数 (X_7)、农业用水比重 (X_9) 产生较大的影响，使得这 3 个因子对农作物播种水足迹的负相关影响变成正相关。而人均 GDP (X_3) 直接通径系数较大，但总影响系数却较小，主要是受到人均纯收入 (X_4) 及灌溉水利用系数 (X_7) 的间接影响。

总体来看，除降水量 (X_1) 和灌溉水利用效率 (X_7) 对农作物播种水足迹起负相关作用外，其他

表 2 农作物播种水足迹变化的影响因素的通径分析结果

因子	直接通径系数	间接通径系数										总影响
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
X1	-0.052		0.027	0.808	-0.505	0.004	-0.005	-0.368	0.010	0.000	0.029	-0.051
X2	-0.188	0.007		0.389	-0.060	0.027	0.000	-0.196	0.019	0.000	0.004	0.002
X3	4.275	-0.010	-0.017		-2.416	0.091	0.057	-2.033	0.032	0.000	0.042	0.019
X4	-2.431	-0.011	-0.005	4.248		0.083	0.057	-2.006	0.030	0.000	0.043	0.008
X5	0.203	-0.001	-0.025	1.922	-0.992		0.025	-0.782	0.131	-0.001	0.173	0.653
X6	0.071	0.003	0.001	3.412	-1.964	0.073		-1.584	0.074	0.000	0.060	0.145
X7	-2.096	-0.009	-0.018	4.146	-2.327	0.076	0.054		0.002	0.000	-0.007	-0.179
X8	0.203	-0.003	-0.017	0.666	-0.360	0.131	0.026	-0.024		0.000	0.211	0.832
X9	-0.002	0.003	0.010	0.902	-0.445	0.056	0.010	-0.467	0.011		0.006	0.085
X10	0.255	-0.006	-0.003	0.697	-0.408	0.138	0.017	0.056	0.168	0.000		0.913

注： $X_1 \sim X_{10}$ 分别为：降水量、人口密度、人均 GDP、人均纯收入、化肥施用量、粮食单产、灌溉水利用系数、高耗水作物面积比重、农业用水比重、耕地灌溉率。

因子都起正相关作用,其中,有效灌溉面积比重(X_{10})、高耗水作物面积比(X_8)、单位耕地面积化肥施用量(X_5)对农作物播种水足迹变化的影响最大,特别是有效灌溉面积,这说明在合理利用水资源,提高有效灌溉面积的比重,减少不必要的农作物播种水足迹,对减缓农业用水压力有重要影响;同时,单位耕地面积化肥施用量直接影响农作物播种水足迹中的灰水足迹,故合理使用化肥,减少污染对缓解农业用水紧张也很重要。

3 总结

农作物播种水足迹可以通过蓝、绿水足迹从水量消耗角度分析,也可以通过灰水足迹从污染角度分析,从而能更好地衡量区域农业生产过程对水足迹的真实需求。此外,核算和研究区域农作物播种水足迹能够全面评价农业生产过程对水资源系统的真实影响。江苏省农作物播种水足迹虽然保持稳定不变,但其平均值仍然超过 700 亿 m^3 ,其中大部分水由稻谷、水果和小麦消耗,对作物用水量的合理分配和管理、提高有效灌溉面积、减少高耗水作物的种植将是接下来农业发展的重点领域。同时,灰水足迹占总水足迹的比例高达 20%,优化种植结构,提高生产技术减少化肥使用,减少灰水足迹较高作物的种植比例也是减少作物灰水足迹从而保持农业生产环境平衡的重要措施。

参考文献:

- [1] 操信春,邵光成,王小军,等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 14-21.
- [2] Hoekstra A, Chapagain A, Aldaya M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- [3] Cao X, Wu P, Wang Y, et al. Assessing blue and green water utilisation in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. Hydrology and Earth System Sciences. 2014, 18(8): 3165-3178.
- [4] 翁清,马骏,袁军. 基于水足迹理论的苏北地区水资源评价[J]. 中国农村水利水电, 2016(4): 33-37.
- [5] 田园宏,诸大建,王欢明,等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978-2010[J]. 中国人口资源与环境, 2013, 23(6): 122-128.
- [6] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826-1835.
- [7] 单纯宇,王素芬. 海河流域作物水足迹研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 50-55.
- [8] 陈龙,盖力强,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, 32(11): 2066-2071.
- [9] 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]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650-658.
- [10] 黄晶,宋振伟,陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 2010(23): 6546-6554.
- [11] 于成,张祖陆. 山东省冬小麦夏玉米作物生产水足迹研究[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12): 202-204.
- [12] 付强,刘烨,李天霄,等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 184-192.
- [13] 刘静,吴普特,王玉宝,等. 河套灌区粮食水足迹与虚拟水净输出时空演变[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 435-440.
- [14] 韩宇平,张嘉彧,代小平,等. 灌区粮食生产水足迹的影响因素研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(2): 42-46.
- [15] 刘帝,操信春,王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 719-724.
- [16] Cao X, Wu M, Shu R et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610-611: 84-93.
- [17] 吴楠,郑雅莲,栾雅璐,等. 基于试验的稻田作物生产水足迹计算方法研究[J/OL]. 灌溉排水学报 2017 (2017-08-23). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1337.s.20170823.1522.015.html>.
- [18] 操信春,束锐,郭相平,等. 基于 BWSI 与 GWSI 的江苏省农业生产水资源压力评价[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 856-864.