

中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析

郭相平^{1,2} 高爽^{1,2} 吴梦洋^{1,2} 余涛^{1,2} 操信春^{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, 南京 210098;
2. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098)

摘要: 为全面评价中国农作物对水资源真实消耗,计算并分析了31个省区1996—2015年农作物水足迹,并借助通径分析方法分别对影响农作物生产水足迹(单位耕地面积水足迹)时间变化和空间分布的影响因素进行了揭示。结果显示:全国年均农作物水足迹为1 421.07 Gm³,蓝水、绿水和灰水足迹分别占10.05%、66.79%及23.16%;粮食和水果类作物水足迹占总量的85%以上,二者很大程度上决定着中国农作物水足迹的变化。中国农作物生产水足迹为1 156.90 mm,时间上呈先下降后缓慢上升态势,空间上为从东南向西北逐渐递减的格局。人口密度、人均纯收入和化肥施用量是农作物生产水足迹时间变化的主要驱动因子,而降雨量、人均GDP及人均纯收入对其空间分布有重要影响。经济发展是降低农作物水足迹的原动力,可以促进化肥施用量降低、灌溉用水效率提高以及增强绿水资源调控能力。

关键词: 水足迹; 农作物; 时空格局; 农业用水效率; 通径分析

中图分类号: TV213.9; S273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)05-0295-08

Analysis of Temporal-spatial Distribution and Influencing Factors of Water Footprint in Crop Production System of China

GUO Xiangping^{1,2} GAO Shuang^{1,2} WU Mengyang^{1,2} YU Tao^{1,2} CAO Xinchun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China
2. College of Agricultural Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to evaluate the actual water resources consumption in agricultural production industry comprehensively, the crop water footprint (total water footprint of all kinds of crops, CWP) in 31 provinces of China during 1996—2015 was calculated. The influencing factors for time-dependent and spatial distribution of crop production water footprint (CPWF, CWP per unit cultivated land) were revealed by using the path analysis method. The results showed that the national average annual CWP was estimated to be approximately 1 421.07 Gm³, and blue, green and gray water footprint accounted for 10.05%, 66.79% and 23.16%, respectively. The water footprint of grain and fruit crops accounted for more than 85% of the total, which decided the change trend of CWP in China. With a trend of decline after the slow rise, national CPWF in the studied period was 1 156.90 mm. The spatial difference of CPWF was large, and it was decreased from southeast to northwest of China. Population density, per capita net income and fertilizer application were the main driving factors of time variation of CPWF, and rainfall, per capita GDP and per capita net income had important influence on the spatial distribution of CPWF. Economic development was the driving force to reduce the crop water footprint, which can promote the reduction of fertilizer application, the efficiency of irrigation water use and the ability to control green water resources. The following specific measures, including reducing the use of chemical fertilizers and pesticides and water resource consumption caused by water environment pollution, improving irrigation water use efficiency to save agricultural water resources, controlling high consumption

收稿日期: 2017-11-12 修回日期: 2017-11-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51609065)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2015B11014)、中国博士后科学基金项目(2017M611681)、江苏省博士后科研资助计划项目(1701087B)和江苏高校优势学科建设工程项目
作者简介: 郭相平(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌排理论研究,E-mail: xpguo@hhu.edu.cn
通信作者: 操信春(1986—),男,副教授,主要从事农业高效用水研究,E-mail: caoxinchun@hhu.edu.cn

in areas with serious exploitation of groundwater, expounding the proportion of effective irrigation area and improving the mechanization of the productive forces can be adopted to reduce the CWF.

Key words: water footprint; crops; temporal and spatial pattern; agricultural water use efficiency; path analysis

0 引言

量化区域农作物对水资源的需求可为农业生产水资源高效利用提供基础^[1],而水足迹为此提供了有效的工具。作物水足迹为特定区域某种农作物生长过程对水资源的真实利用量,可分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹^[2]。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^[2]。基于对水量的核算,兼顾农业生产耗水与对水环境的影响,水足迹为不同种类作物与水资源关系提供了统一而全面的衡量指标。

学者在不同区域尺度对作物水足迹进行了量化与分析,包括农田^[3]、灌区^[4]、行政区^[5]、流域^[6]、国家^[7]及全球^[8]等。由于人口、农业生产和水资源等条件的典型性,中国范围内的农作物(特别是粮食作物)水足迹被广泛报道。吴普特等^[9-10]对中国粮食生产水足迹进行了全面的计算与分析,并以此为评价了区域间虚拟水流动及其对农业生产和水资源利用的影响;CAO等^[11-13]利用水足迹工具、从蓝绿水资源利用角度对中国灌区的粮食生产用水进行了分析和评价,阐明了省区灌溉农田粮食生产用水效率的空间分布格局;孙世坤等^[14]、CAO等^[15]分别对全国尺度单一粮食作物蓝绿水足迹空间分布格局及其影响因素进行了研究。盖力强等^[16]对华北平原小麦和玉米作物生产蓝、绿、灰水足迹进行分析,提出减少小麦、玉米生产水足迹对华北平原具有重要的意义。流域尺度上,黄河、黑河等北方水资源-农业生产关系矛盾突出的流域是农作物水足迹评价与分析的重点^[17-18]。省区农作物水足迹分析上,付强等^[19]计算了黑龙江省各地区粮食水足迹,并比较了粮食水足迹与单产需水量的差异;文献[20-21]分别在计算陕西和江苏作物水足迹的基础上,对区域蓝水和广义水资源压力进行了评价。此外,典型灌区农业生产水足迹也受到关注,文献[22-23]研究了河套灌区小麦等作物水足迹,而 CAO等^[3]对江苏省涟西灌区的水稻水足迹进行了观测。

当前研究在量化不同区域尺度下作物生长与水资源利用之间关系上取得了重要进展。然而,由于研究对象单一,能评判所观察作物的水资源利用效

率及其组成,而不能全面识别区域农作物播种对水资源的真实需求。本文基于水足迹理论与方法,核算中国 31 个省区农作物水足迹,分析农作物水足迹及作物生产水足迹的时空变化并探索其影响因素。以期在提供中国农作物-水资源之间关系全局信息的基础上,为农业水资源高效利用相关策略的制定提供参考。

1 方法与数据

1.1 区域农作物水足迹

区域农作物水足迹(AWF)即为该区域所播种的所有作物水足迹之和,为

$$A_{WF} = \sum C_{WFi} \tag{1}$$

其中 $C_{WF} = C_{WFblue} + C_{WFgreen} + C_{WFgrey} \tag{2}$

$C_{WFblue} = ET_{blue}A \tag{3}$

$C_{WFgreen} = ET_{green}A \tag{4}$

式中 C_{WF} ——作物水足迹, Gm^3
 C_{WFblue} ——作物蓝水足迹, Gm^3
 $C_{WFgreen}$ ——作物绿水足迹, Gm^3
 C_{WFgrey} ——作物灰水足迹, Gm^3
 ET_{blue} 、 ET_{green} ——作物生育期灌溉水消耗量
和有效降水消耗量, mm
 A ——作物播种面积, khm^2

ET_{blue} 与 ET_{green} 可基于气象数据、利用彭曼公式计算得到^[14,24]。其中,有效降水消耗量以旬为步长,计算公式为^[25]

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P)/4.17 & (P < 83) \\ 41.7 + 0.1P & (P \geq 83) \end{cases} \tag{5}$$

式中 P 、 P_e ——旬降水量和旬有效降水量, mm
作物灰水足迹的计算公式为^[24]

$$C_{WFgrey} = \alpha R / (c_{max} - c_{nat}) \tag{6}$$

式中 R ——每公顷土地的化肥施用量, kg
 α ——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} ——最大容许浓度, kg/m^3
 c_{nat} ——污染物的自然本底浓度, kg/m^3

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 5%~15%作为淋失氮^[26],本文选取氮肥施用量的

10% 作为淋失氮, 稀释标准为每升饮用水中不能超过 10 mg 的氮, 即 $\alpha = 10\%$, $c_{\max} = 0.01 \text{ kg/m}^3$, 受纳水体的自然本底浓度在无人工影响的自然条件下设为零。

农作物生产水足迹, 即单位耕地面积水足迹的计算公式为

$$M_{WF} = A_{WF} / S \tag{7}$$

式中 S ——区域耕地面积, m^2

1.2 通径分析

通径分析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)^[27-28]。本文从时间和空间角度分别进行通径分析, 探究影响中国农作物生产水足迹时间变化与空间分布的主控因素。从气候条件、社会经济、生产要素 3 个方面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)、高耗水作物面积比(X_8)、农业用水比重(X_9)及灌溉面积比重(X_{10})。其中, 高耗水作物面积比为粮食作物播种面积与农作物总播种面积的比值; 灌溉面积比重为有效灌溉面积与耕地面积的比值。

1.3 数据收集与处理

本文的研究时段为 1996—2015 年。根据《中国统计年鉴》分类, 农作物包括粮食(稻谷、小麦、玉米、其他谷物、豆类和薯类)、棉麻(棉花、麻类)、油料(花生、油菜籽和其他油料)、糖料(甘蔗、甜菜)、水果(苹果、柑桔、梨、葡萄、香蕉和其他水果)和其他(桑蚕、烟叶和茶叶)六大类。用于作物水足迹计算的气象数据来自位于 31 个省区内的 835 个气象站^[29], 参数包括降水量、月平均气温、风速、相对湿度以及日照时数等, 下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>); 各省区总用水量、农业用水量和灌溉水利用系数来自 1997—2015 年中国水资源公报及各省区水资源公报及大型灌区测算数据; 各省区历年作物播种面积、耕地面积、有效灌溉面积、作物产量、化肥施用量、农村人均纯收入、年末人口数以及人均 GDP 来自《中国统计年鉴》(1997—2016)。

2 结果与分析

2.1 中国农作物水足迹

中国农作物水足迹在 1996—2015 年间的平均值为 $1\,421.07 \text{ Gm}^3$, 其中蓝水、绿水和灰水足迹分别为 142.80 、 949.18 、 329.19 Gm^3 , 分别占总量的

10.05%、66.79% 及 23.16%, 绿水在中国农作物水资源需求中占主导地位。历年农作物蓝水、绿水及灰水足迹如图 1 所示。

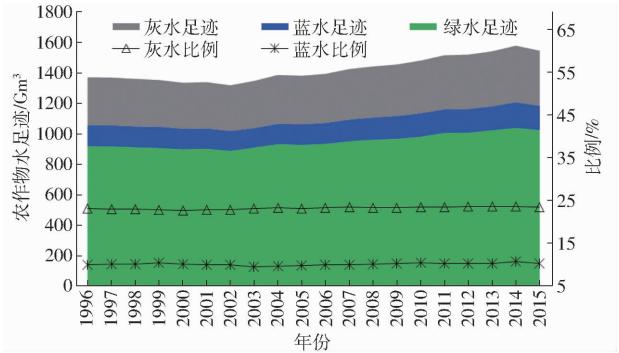


图 1 1996—2015 年中国农作物水足迹及其组成的变化趋势

Fig. 1 Changing trend of crop water footprint and its composition in China in 1996—2015

由图 1 可知, 中国农作物水足迹的年际变化趋势大致分为 2 个阶段。第 1 阶段从 1996—2002 年呈现递减态势, 由 $1\,368.88 \text{ Gm}^3$ 减少到 $1\,316.36 \text{ Gm}^3$, 年均减少 0.65% ; 第 2 阶段从 2002—2014 年呈现递增态势, 由 $1\,316.36 \text{ Gm}^3$ 增加到 $1\,576.79 \text{ Gm}^3$, 年均增加 1.52% 。绿水足迹比例基本维持在 $65\% \sim 68\%$ 之间, 近 10 a 呈微弱下降趋势。绿水足迹年际变化情况与水足迹基本一致, 第 1 阶段由 917.12 Gm^3 减少到 886.70 Gm^3 , 第 2 阶段由 886.70 Gm^3 增加到 $1\,037.41 \text{ Gm}^3$; 灰水和蓝水占比小, 分别在 $22.62\% \sim 23.54\%$ 和 $9.45\% \sim 10.67\%$ 之间, 两阶段年均变化率分别为 0.75% 和 2.18% 。第 1 阶段绿水足迹比例呈上升趋势, 蓝水和灰水足迹比例下降; 在第 2 阶段则相反。作物耗水类型以绿水资源为主, 随着农作物需水量的不断增加, 蓝水和灰水资源的需求量不断增长。为观察不同种类水足迹在中国农业生产耗水中的作用, 给出各类作物水足迹占总量比例的年均值, 如图 2 所示。粮食和水果水足迹均值分别为 $5\,907.80 \text{ Gm}^3$ 和 $6\,178.16 \text{ Gm}^3$, 分别占总量的 41.57% 与 43.48% , 粮食作物中稻谷、玉米和小麦分别占总量的 12.75% 、 11.66% 和 11.30% 。水果和粮食作物水足迹之和占水足迹总量的 85.05% , 二者主导着中国农作物水足迹的走向。

结合图 1 和图 2 可知, 中国农作物水足迹的变化趋势主要受水果和粮食类作物的影响。1996—2002 年稻谷、小麦和玉米的产量呈现递减趋势, 分别由 $19\,510.4$ 、 $11\,057.1$ 、 $12\,747.0$ 万 t 减少到 $17\,454.0$ 、 $9\,029.0$ 、 $12\,131.0$ 万 t, 这导致水资源消耗比例较大的绿水资源量减少; 2002—2014 年农作物水足迹呈现年际递增态势, 这是因为该时段水果类

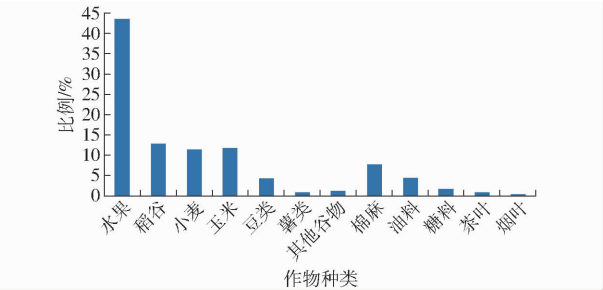


图 2 中国农作物水足迹的作物种类结构

Fig.2 Crop species structure of crop water footprint in China

作物产量和粮食作物产量逐年增长,其中稻谷、小麦和玉米产量分别由 17 454.0、9 029.0、12 131.0 万 t 增加到 20 650.7、12 620.8、21 564.6 万 t,水果类作物产量由 6 951.8 万 t 增加到 26 142.2 万 t。虽然水果和粮食作物单位产量水足迹逐年减少,但是单位产量水足迹的减少幅度远不如作物产量增加的幅度,使得该阶段的作物水足迹逐年增加。

2.2 农作物生产水足迹的时空格局

1996—2015 年中国年均耕地面积 1.24 亿 hm^2 ,农作物生产水足迹均值为 1 156.90 mm,其中蓝水、绿水和灰水足迹分别为 116.3、772.6、268.0 mm,历年农作物生产水足迹如图 3 所示。

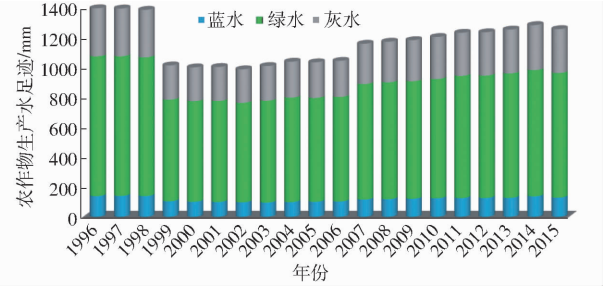


图 3 1996—2015 年中国农作物生产水足迹

Fig.3 Water footprint of crop production in China in 1996—2015

由图 3 可知,除 1998—1999 年间出现较大跌落外,其余年份均呈现平稳增加态势。作物生产水足迹的变化现象主要与中国耕地面积的变化密切相关,1999 年全国耕地面积从 0.99 亿 hm^2 增加到 1.34 亿 hm^2 ,农作物生产水足迹从 1 376.8 mm 下降到 1 007.4 mm;2007 年全国耕地面积从 1.34 亿 hm^2 减少到 1.24 亿 hm^2 ,作物生产水足迹由 1 037.57 mm 增加到 1 151.12 mm。当耕地面积变化不大时,作物生产水足迹变化趋势主要受水足迹的影响,2007—2014 年我国耕地面积保持在 1.24 亿 hm^2 左右,农作物生产水足迹由 1 151.2 mm 增加到 1 275.3 mm。图 4 给出了各省区作物生产水足迹及其组成的年均值,同时计算出各省区作物生产水足迹在 20 年间的变异系数和年均变化率,以观察不同地区农作物水足迹变化情况,如表 1 所示。

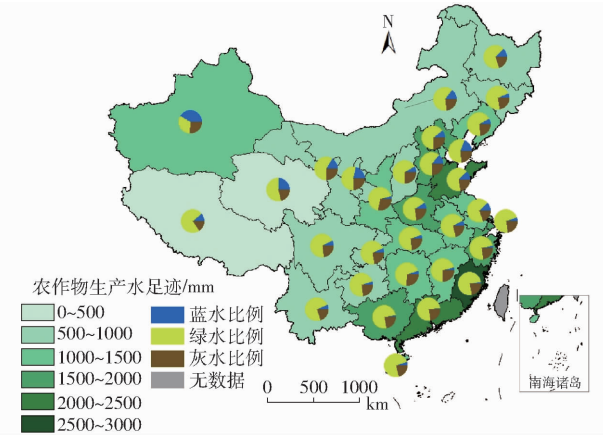


图 4 1996—2015 年中国农作物生产水足迹及其组成空间分布图

Fig.4 Water footprint and its spatial distribution of crop production in China in 1996—2015

表 1 1996—2015 年间各省区农作物生产水足迹的主要统计参数

Tab.1 Main statistical parameters of water footprint of crop production in various provinces during 1996—2015

区域	变异系数	年均变化率/%	区域	变异系数	年均变化率/%
北京	0.143	1.2	湖北	0.174	-0.4
天津	0.043	-0.7	湖南	0.098	0.3
河北	0.039	0.1	广东	0.124	0.3
山西	0.126	0.3	广西	0.151	0.5
内蒙古	0.204	3.3	海南	0.138	-0.1
辽宁	0.144	-1.2	重庆	0.099	1.6
吉林	0.132	0	四川	0.248	0.5
黑龙江	0.127	0.5	贵州	0.389	-0.5
上海	0.161	0.1	云南	0.299	-0.7
江苏	0.066	-0.7	西藏	0.254	-2.3
浙江	0.134	-0.9	陕西	0.236	1.6
安徽	0.118	-0.7	甘肃	0.134	-0.3
福建	0.098	-0.5	青海	0.212	0.3
江西	0.150	-0.4	宁夏	0.200	1.0
山东	0.126	-1.4	新疆	0.390	5.0
河南	0.071	-0.8	中国	0.118	-0.3

由图 4 可知,中国农作物水足迹呈现由东南向西北递减的空间格局。除新疆外,绿水均为水足迹的最主要部分;蓝水足迹比例由东南向西北递增;各省区灰水足迹比例均保持在 20% 上下浮动,区域差异小于蓝水和绿水比例。年降水量大于 1 100 mm 的广东、海南、江西、福建、浙江、湖南、广西、湖北、上海、重庆 10 个省区,除福建和广东大于 2 000 mm 外,作物生产水足迹均在 1 000 ~ 2 000 mm 之间,绿水足迹比例均在 68% ~ 76% 之间;年降水量介于 550 ~ 1 100 mm 的江苏、贵州、安徽、云南、四川、山东、辽宁、河南、吉林、陕西 10 个省区中,云南、贵州、吉林作物生产水足迹均小于 1 000 mm,山东作物生

产水足迹在 2 000 mm 以上,其余省份作物生产水足迹则在 1 000 ~ 2 000 mm 之间,绿水足迹比例均在 65% ~ 75% 之间,比年降水量大于 1 100 mm 的省区整体下浮了 3%;年降水量小于 550 mm 的河北、黑龙江、天津、西藏、北京、青海、山西、内蒙古、甘肃、新疆及宁夏 11 个省区,除了北京、新疆、天津和河北外,作物生产水足迹均小于 1 000 mm,绿水足迹比例在 30% ~ 75% 之间,变化较大。东南地区降水充足,作物生产水足迹和绿水资源可利用量均较大,这直接导致灌溉需水和蓝水比例较小;华北地区降水资源短缺,多年平均降水量不足 500 mm,却是中国农业生产水平和粮食产出较高的地区之一,虽然能极大程度地利用降水资源,但仍需补充大量灌溉用水,因此作物生产水足迹较高而绿水足迹比例明显低于南方湿润地区;西部大部分省区农业产出规模较小是作物生产水足迹较低的直接原因,新疆在降水资源缺乏的条件下成为中国的农业生产大区,和灌溉水的利用密不可分,从而使得蓝水足迹比例全国最大。东北地区耕地资源丰富,但较低的复种指数导致了农作物生产水足迹明显低于华北平原和东南地区。

由表 1 可知,西北和西南省区变异系数较大,大部分在 0.200 以上,其中新疆 0.390 为全国最大;华北、华东和华中地区的变异系数均较小,大多数省份低于 0.100,其中最小值的河北为 0.039。变异系数与作物生产水足迹空间分布格局基本相反,即作物生产水足迹较大的省区变异系数较小,年际离散程度小。新疆、内蒙古、西藏、陕西、宁夏、山东、北京、辽宁和重庆的作物生产水足迹年均变化率不小于 1.0%,其中新疆年均变化率最大为 5.0%;而青海、甘肃、山西、湖南、广东、河北、海南、上海和吉林的年均变化率均不大于 0.3%。

结合表 1 和图 4 可知,作物生产水足迹空间格

局由东南沿海向西北内陆逐渐递减。东南地区多年平均降水量充足,作物生产水足迹较大且年均变化不大,年际间分散性小,绿水资源可满足作物 70% 左右的需水。由于山东、江苏是农业大省,作物种植面积和产量大,农业用水量和蓝水比例较大;西北地区降水资源稀少且时空分布不均,农作物生产水足迹较小且年际变化大,蓝水比例明显高于东部;西南地区降水高于全国平均水平,大部分省区农业生产条件不足,使得农作物生产水足迹较小,绿水是区域农业耗水的主要来源;华北地区降水不足且年际变化较大,北京、天津、河北的作物生产水足迹较大,山西和内蒙古作物生产水足迹较小,且北京和内蒙古作物生产水足迹年均变化和蓝水比例较大;东北地区耕地面积大,农作物生产水足迹小且稳定,蓝水比例比西北和华北地区小,但高于西南、东南地区,降水量不足给作物生产带来了很大压力,直接或间接增加了农业用水和作物产量的不确定性,导致作物生产水足迹时空差异较大。

2.3 影响因素分析

20 年间全国农作物生产水足迹时间变化影响因素分析结果如表 2 所示。由于农作物生产水足迹的空间分布格局在不同年份总体上稳定,故计算出 1996—2015 年作物生产水足迹及自变量均值进行水足迹空间分布的影响因素分析,结果如表 3 所示。

由表 2 可知,各影响因素的直接通径系数绝对值由大到小依次为 X_5 、 X_2 、 X_4 、 X_7 、 X_3 、 X_9 、 X_8 、 X_1 、 X_6 、 X_{10} ,表明化肥施用量、人口密度、人均纯收入对农作物生产水足迹的直接影响较大,直接通径系数分别为 1.409、-1.173、0.566;而有效灌溉面积比重、粮食单产、平均降水量的直接影响较小,直接通径系数分别为 -0.013、0.022、-0.026。通过对各因子之间的间接通径系数分析可知:就社会经济因素组内而言,各变量通过人口密度和人均纯收入对作物生

表 2 中国农作物生产水足迹时间变化影响因素分析结果

Tab. 2 Analysis results of influence factors on water footprint of crop production in China with time change												
影响 因素	直接通 径系数	间接通径系数										总影响 系数
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
X_1	-0.026		-0.099	-0.025	0.089	0.276	0.003	-0.033	-0.007	-0.003	-0.003	0.172
X_2	-1.173	-0.002		-0.174	0.505	0.991	0.019	-0.334	0.067	0.128	-0.004	0.022
X_3	-0.188	-0.004	-1.087		0.560	1.216	0.021	-0.326	0.037	0.102	-0.008	0.324
X_4	0.566	-0.004	-1.046	-0.186		1.181	0.021	-0.316	0.034	0.091	-0.008	0.333
X_5	1.409	-0.005	-0.826	-0.162	0.475		0.019	-0.257	-0.001	0.081	-0.011	0.722
X_6	0.022	-0.004	-1.041	-0.183	0.542	1.260		-0.313	0.027	0.101	-0.008	0.403
X_7	-0.338	-0.003	-1.162	-0.181	0.530	1.072	0.020		0.057	0.121	-0.005	0.111
X_8	-0.106	-0.002	0.741	0.066	-0.180	0.016	-0.006	0.182		-0.097	-0.005	0.609
X_9	-0.144	-0.001	1.042	0.134	-0.357	-0.798	-0.015	0.283	-0.071		0.002	0.074
X_{10}	-0.013	-0.007	-0.358	-0.110	0.335	1.244	0.014	-0.133	-0.043	0.020		0.949

表 3 中国农作物生产水足迹空间分布影响因素分析结果

Tab. 3 Analysis results of influence factors on water footprint of crop production in China with spatial change												
影响 因素	直接通 径系数	间接通径系数										总影响 系数
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	
X_1	-0.250		-0.046	-0.013	0.134	0.545	0.025	-0.010	0.056	0.042	-0.013	0.469
X_2	-0.241	-0.048		-0.181	0.440	0.357	0.032	0.014	0.039	0.080	-0.031	0.461
X_3	-0.234	-0.014	-0.187		0.521	0.348	0.031	0.019	0.025	0.064	-0.035	0.539
X_4	0.552	-0.061	-0.192	-0.221		0.437	0.039	0.018	0.032	0.072	-0.039	0.637
X_5	0.863	-0.158	-0.100	-0.094	0.280		0.036	0.001	0.049	0.045	-0.035	0.887
X_6	0.069	-0.091	-0.112	-0.106	0.310	0.448		0.006	0.045	0.031	-0.035	0.564
X_7	0.041	0.063	-0.084	-0.110	0.237	0.012	0.009		-0.015	0.033	-0.007	0.180
X_8	-0.117	0.120	0.081	0.049	-0.151	-0.364	-0.026	0.005		-0.021	0.024	-0.400
X_9	-0.114	0.093	0.168	0.131	-0.347	-0.342	-0.018	-0.012	-0.022		0.015	-0.449
X_{10}	-0.055	-0.061	-0.139	-0.148	0.394	0.555	0.044	0.005	0.051	0.031		0.677

产水足迹的影响较大,其中人均 GDP、人均纯收入通过人口密度对因变量的间接通径系数分别为 -1.087、-1.046;各因素主要通过化肥施用量与灌溉水利用系数对作物生产水足迹产生影响,其中粮食单产、灌溉水利用系数、农业用水比重、有效灌溉面积比重通过化肥施用量对因变量的间接通径系数分别为 1.260、1.072、-0.798、1.244;社会经济因素主要通过化肥施用量对作物生产水足迹产生较大正影响,并通过灌溉水利用系数对作物生产水足迹产生较小负影响;而生产要素主要通过人口密度和人均纯收入对作物生产水足迹产生影响,化肥施用量、粮食单产、灌溉水利用系数和有效灌溉面积比重主要通过人口密度对作物生产水足迹产生负影响,通过人均纯收入对作物生产水足迹产生较小正影响;高耗水作物面积比和农业用水比重则主要通过人口密度对作物生产水足迹产生较大正相关影响,并通过人均纯收入对作物生产水足迹产生较小负相关影响,对作物生产水足迹的总影响系数主要取决于各变量通过人口密度对因变量产生的影响;此外,降水量主要通过化肥施用量对作物生产水足迹产生影响。有效灌溉面积比重、化肥施用量、高耗水作物面积比、粮食单产的总影响系数分别为 0.949、0.722、0.609、0.403,对作物生产水足迹时间变化影响最大的变量为化肥施用量、人口密度和人均纯收入。

由表 3 可知,各影响因素直接通径系数绝对值由大到小依次为 X_5 、 X_4 、 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_8 、 X_9 、 X_6 、 X_{10} 、 X_7 。与时间变化不同的是,除了化肥施用量、人均纯收入和人口密度之外,平均降水量对农作物生产水足迹的直接影响也较为明显, X_5 、 X_4 、 X_1 、 X_2 的直接通径系数分别为 0.863、0.552、-0.250、-0.241;而灌溉水利用系数、有效灌溉面积比重、粮食单产对作物生产水足迹空间分布的直接影响较小,直接通径系数分别为 0.041、-0.055、0.069。对间接通径

系数分析可得:各个自变量对因变量的间接作用均主要通过人均纯收入和化肥施用量对作物生产水足迹产生影响,其中气候条件、社会经济因素以及生产要素中的 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_{10} 对作物生产水足迹产生正相关间接作用,而生产要素的 X_8 、 X_9 对作物生产水足迹产生负相关的间接作用。数据显示,化肥施用量、有效灌溉面积比重、人均纯收入、粮食单产对作物生产水足迹空间变化的总影响居于前 4 位,总影响系数分别为 0.887、0.677、0.637、0.564,化肥施用量和人均纯收入对作物生产水足迹空间分布影响较大。

3 讨论

本文从农业生产对水资源需求出发,分析了中国农作物水足迹及作物生产水足迹时空差异的影响因素。发现,农作物水足迹中,绿水占据绝对的主导部分,来自灌溉的蓝水足迹仅为水足迹总量 1/10。当前以粮食为主的作物水足迹组成状况核算,蓝水足迹约占 1/3^[9-12],明显高于本文的计算结果。这是因为粮食作物需水量大且生育期长、为灌溉水消耗的重要主体,其他作物以绿水资源作为耗水的主要来源。不同种类农作物均为社会提供功能不可替代的初级农产品,此外,随着经济社会发展、居民生活水平提高和消费模式的转变,经济作物种植将越来越受到重视。所以仅以粮食为对象进行水足迹评估能够揭示灌溉在农业生产中的重要性,但不能全面衡量农业生产活动对水源的真实占用,也有可能低估绿水资源在保障人类农产品供应中的重要作用。需要指出的是,作物灰水足迹在不同区域均占有较大比例,大部分区域内大于蓝水足迹。降低农作物灰水足迹应该成为区域农业生产-水资源之间关系调控的重要内容。同时,本文以单位面积农作物水足迹来衡量区域的作物生产水足迹,不仅使不

同农业生产类型地区作物生产水足迹具有可比较性,也是进行作物生产水足迹影响因素识别的重要基础。人口密度、人均纯收入和化肥施用量是农作物生产水足迹随时间变化的主要驱动因子,而降水量、人均 GDP 和人均纯收入是其空间分布格局的主要关联要素。除降水量外,人口、收入、GDP 等社会经济条件是影响中国农作物生产水足迹时空分布格局的主要因子,而耕地灌溉率、灌溉效率等与蓝水资源利用息息相关的灌溉管理要素,直接影响非作物生产水足迹条件。这同时也间接印证了绿水资源在农业生产中的主导地位。考虑不同作物种类、不同需水类型是对区域农业水足迹进行调控从而保障农产品可靠供应和水资源持续利用的重要前提。通过本文分析可知,发展经济是进行农作物生产水足迹调控的原动力,可以促进化肥施用量降低、灌溉用水效率提高从而降低农作物生产水足迹。同时均衡区域经济发展也能促进不同区域间农业水资源利用效率的全面提升。

4 结束语

中国农作物生产需要占用超过 1 400 Gm³的水资源,其中绿水占 2/3,是农产品供应的主要支撑;粮食和水果水足迹占总量的 85% 以上,主导着农作物水足迹的走向。作物生产水足迹 20 a 的变化趋势呈先下降后上升态势。中国农作物生产水足迹整体呈现从东南向西北逐渐递减的趋势,降水量大省区,作物生产水足迹也较大,绿水足迹比例较大,蓝水足迹比例较小,作物生产水足迹年际间稳定。作物生产水足迹时空差异归因分析表明,发展社会经济是实现农作物水足迹调控的重要前提,在此基础上可以通过以下措施对农作物水足迹进行调控:减少化肥农药的使用,改善土壤理化性状和质地,降低由水环境污染引起的水资源消耗;提高灌溉水利用效率以节约农业水资源;在地下水严重开采的地区减少高耗水作物的种植面积,保护地下水资源;提高有效灌溉面积比重,实现水资源利用的最佳状态。

参 考 文 献

- 1 刘小刚,符娜,李闯,等. 河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 188 - 197. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150927&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 027.
- LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Trends and causes analysis of water requirement for main grain crops in Henan Province [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188 - 197. (in Chinese)
- 2 HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012, 109(9): 3232 - 3237.
- 3 CAO Xinchun, WU Mengyang, SHU Rui, 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.
- 4 MORILLO J G, DÍAZ J A R, CAMACHO E, et al. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 594 - 602.
- 5 BOCCHIOLA D, NANA E, SONCINI A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116: 50 - 61.
- 6 DUMONT A, SALMORAL G, LLAMAS M R. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: the case of Guadalquivir basin (Spain)[J]. Water Resources and Industry, 2013, 1 - 2: 60 - 76.
- 7 操信春,任杰,吴梦洋,等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1 - 8.
- CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 1 - 8. (in Chinese)
- 8 MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(5): 1577 - 1600.
- 9 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2014 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国农业出版社, 2016.
- 10 王玉宝,吴普特,孙世坤,等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 208 - 215. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151027&flag=1. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 10. 027.
- WANG Yubao, WU Pute, SUN Shikun, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208 - 215. (in Chinese)
- 11 CAO X, WANG Y, WU P, et al. An evaluation of the water utilization and grain production of irrigated and rain-fed croplands in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 529: 10 - 20.
- 12 CAO X, WU M, ZHENG Y, et al. Can China achieve food security through the development of irrigation? [J]. Regional Environmental Change, 2018, 18(2): 465 - 475.
- 13 CAO X, WANG Y, WU P, et al. Water productivity evaluation for grain crops in irrigated regions of China[J]. Ecological Indicators, 2015, 55: 107 - 117.

- 14 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 142–148.
SUN Shikun, WANG Yubao, WU Pute, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 142–148. (in Chinese)
- 15 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.
- 16 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.
GAI Liqiang, XIE Gaodi, LI Shimei, et al. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the north China plain[J]. Resources Science, 2010, 32(11): 2066–2071. (in Chinese)
- 17 ZHENG Z, LIU J, KOENEMAN P H, et al. Assessing water footprint at river basin level: a case study for the Heihe River basin in northwest China[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2771–2781.
- 18 ZHUO L, MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sensitivity and uncertainty in crop water footprint accounting: a case study for the Yellow River basin[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(6): 2219–2234.
- 19 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 184–192.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170624&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024.
FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184–192. (in Chinese)
- 20 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.
SHI Lijie, WU Pute, WANG Yubao, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 650–658. (in Chinese)
- 21 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.
CAO Xinchun, SHU Rui, GUO Xiangping, et al. Water stresses evaluation of agricultural production in Jiangsu Province using BWSI and GWSI[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6): 856–864. (in Chinese)
- 22 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 63–72.
CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 63–72. (in Chinese)
- 23 孙世坤, 刘文艳, 刘静, 等. 河套灌区春小麦生产水足迹影响因子敏感性及其贡献率分析[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2751–2762.
SUN Shikun, LIU Wenyan, LIU Jing, et al. Sensitivity and contribution rate analysis of the influencing factors of spring wheat water footprint in Hetao irrigation district[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(14): 2751–2762. (in Chinese)
- 24 HOEKSTRA A, CHAPAGAIN A, ALDAYA M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. London: Earthscan, 2011.
- 25 PETRA D, STEFAN S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Research, 2002, 38(4): 1037–1048.
- 26 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.
HE Hao, HUANG Jing, HUAI Heju, et al. The water footprint and its temporal change characteristics of rice in Hunan[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(14): 294–298. (in Chinese)
- 27 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.
CAO Xinchun, SHAO Guangcheng, WANG Xiaojun, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: a case study of grain production in China[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 14–21. (in Chinese)
- 28 陶瑞, 张前前, 李锐, 等. 旱区覆膜滴灌棉田 N_2O 排放对化肥减量有机替代的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 204–211. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151227&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.027.
TAO Rui, ZHANG Qianqian, LI Rui, et al. Response of soil N_2O emission to partial chemical fertilizer substituted by organic fertilizer in mulch-drip irrigated cotton field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 204–211. (in Chinese)
- 29 CAO X, WU M, GUO X, et al. Assessing water scarcity in agricultural production system based on the generalized water resources and water footprint framework[J]. Science of the Total Environment, 2017, 609: 587–597.