

河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析

韩宇平^{1,2,3}, 曲 唱¹, 贾冬冬^{1*}

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450046; 2. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心, 郑州 450046;
3. 河南省水环境治理与模拟重点实验室, 郑州 450046)

摘 要:【目的】调整区域农业种植结构, 合理利用区域农业水资源。【方法】基于水足迹理论框架分析了1957—2015年河北省14种农作物的水足迹及其历史变化趋势, 通过核算农作物耗水率和单位水价值2个指标, 划分了主要农作物的耗水结构。【结果】河北省主要农作物年均总水足迹为434.4亿m³, 其中蓝水、绿水和灰水分别占44%、42%和14%; 总水足迹、绿水足迹及灰水足迹均呈逐年增加趋势; 而蓝水足迹变化趋势不明显。冬小麦、夏玉米、水果与蔬菜为主要耗水作物。棉花和芝麻耗水率最高, 为典型的高耗水作物。甜菜、蔬菜和水果的单位水价值最高, 且耗水结构最优。【结论】河北省可进一步控制棉花和芝麻的种植规模, 在不造成水压力的前提下, 适度扩大蔬菜和水果的种植规模。

关 键 词:农作物; 水足迹; 耗水率; 单位水价值; 种植结构

中图分类号: TV213

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20190188

韩宇平, 曲唱, 贾冬冬. 河北省主要农作物水足迹与耗水结构分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(10): 121-128.

0 引 言

水资源短缺严重制约着京津冀一体化国家战略的实施。河北省作为农业大省, 承担着京津冀地区的农业保障任务^[1]。2017年, 河北省农作物种植面积838.2万hm², 占京津冀地区农作物种植面积的94%。深入分析河北省农业耗水结构及其历史变化趋势, 对于京津冀地区农业种植结构调整, 减轻该地区水资源压力具有一定的指导意义。Hoekstra^[2]于2002年提出了水足迹的概念, 水足迹包含了水量及用水来源, 可以作为农业占用水资源的一个综合指标^[3], 目前被广泛用于地区水资源管理。Liu等^[4]采用水足迹及相关指标作为综合指标, 从消费的角度对人类实际用水量进行评估, 分析了河北省2000—2013年11个行政区域水资源供需矛盾严重的情况。Zhao等^[5]通过将多区域投入产出模型(MRIO)与水足迹评估相结合, 量化了京津冀2010年的水足迹和虚拟水流, 结果表明河北省向北京、天津等省市出口了所有颜色的水足迹, 超过60%的水足迹以虚拟水的形式转移。李红颖等^[6]核算了2000—2013年吉林省水稻生产的总水足迹、蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹, 分析了吉林省水稻生长过程中水足迹及耗水结构随时间的变化规律。刘宁等^[7]对京津冀地区10种农产品虚拟水量(单位产品水足迹)进行计算, 提出可通过调整农业产业结构, 达到节约水资源的目的。程先等^[8]计算了京津冀地区区县尺度2000年水足迹与人均水足迹并分析了其时空变化特征。韩玉等^[9]计算了2010年河北省的虚拟水消费和水足迹。单纯宇等^[10]对海河流域主要作物的水足迹进行了研究, 指出河北省的作物总水足迹最大, 导致其用水压力最大。许多学者对河北地区的农业水足迹进行了核算, 指出可通过调整种植结构的方式节约农业水资源, 但大多时间系列较短, 且未综合考虑水足迹与农产品价格对农业种植结构的影响。

本研究利用河北省18个气象站点的气象数据及省农业基础数据, 基于水足迹理论对河北省1957—2015年的气象数据的14种农作物的蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹进行计算, 分析水足迹的历史变化趋势; 基于

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679089, 51609084, 51709017); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401402)

作者简介: 韩宇平(1975-), 男, 教授, 博士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: han0118@163.com

通信作者: 贾冬冬(1985-), 男, 博士, 主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail: dongdongjia06@163.com

耗水率和单位水价值对14种农作物耗水结构进行分类,以期为京津冀地区农业种植结构调整提供一定的思路和数据支撑。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河北省地跨海河、滦河两大水系,大部分属海河流域,气候为温带大陆性季风气候。河北省年均日照时间2 303 h;年均降水量484.5 mm,降水量东南多西北少。2017年河北省的水资源总量为138.34亿m³,人均水资源占有量183.97 m³,水资源人均占有量程度较低,约为全国平均水平值的1/10。河北省粮食作物主要包括冬小麦、夏玉米、稻谷、谷子、高粱、薯类和大豆;经济作物主要包括棉花、花生、芝麻、向日葵、甜菜、水果和蔬菜。

1.2 研究方法

河北省主要作物水足迹分为绿水、蓝水和灰水足迹。水足迹按照Hoekstra等^[11]建立的水足迹框架计算。对于雨养农业,作物的水足迹等于其生育期内的有效降雨量,其蓝水足迹等于0;对于灌溉农业,作物绿水足迹与雨养作物绿水足迹相同,其蓝水足迹等于作物需水量与有效降水量之差,绿水足迹计算式为:

$$W_{\text{green}} = \frac{10 \times \min \{P_e, E_c\}}{Y_a}, \quad (1)$$

式中: W_{green} 为单位农产品的绿水足迹; P_e 为作物生育期有效降水量(mm);按照美国农业部土壤保持局(US-DA SCS)^[11]提出的方法逐旬计算。 E_c 为作物蒸散发量(mm), Y_a 为作物单位面积产量,蓝水足迹计算式为:

$$W_{\text{blue}} = \frac{10 \times (1 - \beta) \times \max \{E_c - P_e, 0\}}{Y_a}, \quad (2)$$

式中: W_{blue} 为单位农产品的蓝水足迹; β 为区域灌溉面积所占比例,通过作物的灌溉面积与作物的总种植面积之比获得,各作物不同。其中 E_c 计算式为:

$$E_c = K_c \times E_0, \quad (3)$$

式中: K_c 为作物系数, E_0 为作物潜在蒸散发量(mm)。各作物生育期划分为生育初期、快速生长期、生育中期和生育末期,其中作物生育中期和末期的作物系数根据相对湿度和风速的变化,按照FAO推荐的方法进行了修正^[12]。作物潜在蒸散量(E_0)采用FAO推荐的Penman-Monteith公式计算^[12]。

灰水足迹按照稀释一定量的氮肥所需的水量计算^[13]。氮肥的淋溶率取值7.4%^[14]。受纳水体中氮的最大允许质量浓度参考GB 3838—2002《地表水环境质量标准》,取值0.01 mg/L,自然水体中氮的本底质量浓度取值为0。

单位水价值 UWV : 单位水价值是指作物产品的单位虚拟水含量值所体现的价格^[15],计算式为:

$$UWV[n, c] = \frac{P[n, c]}{SWD[n, c]}, \quad (4)$$

式中: $UWV[n, c]$ 为区域 n 作物 c 的单位水价值(元/m³); $P[n, c]$ 为区域 n 作物 c 的价格(元/t); $SWD[n, c]$ 为区域 n 作物 c 单位质量的虚拟水量(m³/t)。

1.3 数据来源

本研究用到的气象数据均来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),时间跨度为1957—2015年,数据包括日均最高气温、日均最低气温、相对湿度、风速、日照时间和降水量。作物生育期参数和作物系数的初始值来自联合国粮农组织(FAO)。各作物灌溉面积数据来源于Portmann等^[16]整理的MIRCA2000数据库,数据于2016年更新。农业统计数据来源于中国农业种植网(<http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>),主要包括作物的播种面积及产量。作物产量指标中:冬小麦、夏玉米产量为籽粒产量,是风干质量;花生产量为带壳的花生果的风干质量;甜菜、蔬菜和水果的质量为鲜质量^[17]。作物的价格数据来源于惠农网的实时信息(<http://www.cnhnb.com/hangqing/sczw/>)。

2 结果与分析

2.1 主要农作物灌溉面积占比

参考MIRCA2000数据库河北地区各作物的灌溉面积与雨养面积,统计了河北省主要农作物灌溉面积

占比数据,见表1。其中,薯类用马铃薯的灌溉面积,芝麻的灌溉面积占比参考了花生,蔬菜的灌溉面积占比为1。

由表1可知,河北省冬小麦、水稻2种作物的灌溉面积占比为1,均为灌溉作物;而甜菜、葡萄与果树3种作物的灌溉面积占比为0,均为雨养作物。夏玉米、棉花的灌溉面积占比皆超过50%,大部分依赖于灌溉,其灌溉面积占比分别为75%和61%。大豆的灌溉面积占比为47%,高粱的灌溉面积占比为39%,花生的灌溉面积占比为31%,向日葵的灌溉面积占比为24%,薯类的灌溉面积占比为22%。另外,谷子和其他多年生作物主要为雨养作物,二者灌溉面积分别占其播种面积的10%和12%。

2.2 农业水足迹总量及其变化趋势分析

河北省1957—2015年14种作物的总水足迹及蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹的年际变化趋势如图1所示。由图1可知,河北省在1957—2015年农业水足迹的平均值约为434.36亿m³,其中蓝水、绿水和灰水足迹分别为193.62亿、181.4亿及59.34亿m³,分别占总量的45.2%、42.3%及12.5%。总水足迹整体呈上升趋势,1957—2015年,总水足迹由389.29亿m³上升为539.19亿m³,上升幅度为38.5%,说明河北省作物农产品生产对水资源的需求一直在增加。1962年河北省作物的总水足迹最低,为322.78亿m³;2009年河北省作物的总水足迹最高,为541.41亿m³。河北省蓝水足迹的总量最大,河北省的蓝水足迹上下波动起伏,在121.58亿m³与243.96亿m³之间变化,变化趋势不太明显。河北省绿水足迹呈上升趋势,由178.03亿m³上升为208.6亿m³,上升幅度17.2%,变化显著。总灰水足迹呈显著上升趋势($P<0.001$),灰水足迹由1.76亿m³上升为108亿m³,上升幅度60.4%。大部分年份蓝水足迹稍多于绿水足迹。灰水足迹的占比逐年增大,农业生产对水环境的影响逐年提高。河北省总水足迹的变化与作物总播种面积有关。1957—1962年的作物播种面积呈下降趋势,到1962年,河北省作物总播种面积达到最小值732.8万hm²;之后,作物的总播种面积趋于平稳,并且自20世纪90年代开始增长。

作物种类	灌溉面积占比/%	作物种类	灌溉面积占比/%
小麦	100	薯类	22
玉米	75	甜菜	0
水稻	100	花生	31
谷子	10	葡萄	0
高粱	39	棉花	61
大豆	47	果树	0
向日葵	24	其他多年生作物	12

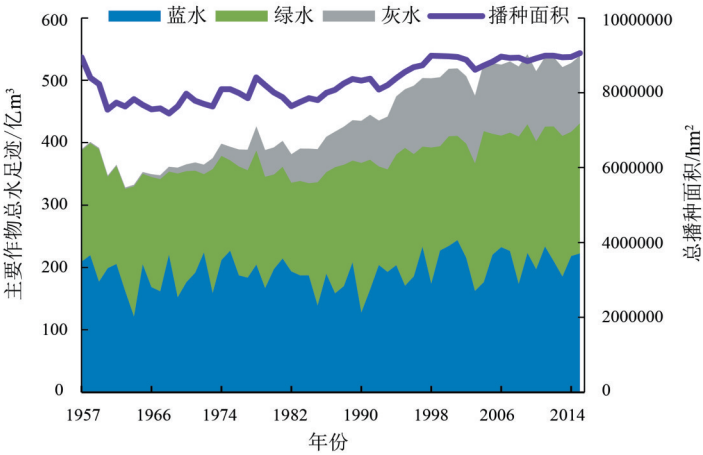


图1 1957—2015年河北省主要农作物总水足迹

各作物的总水足迹历史变化如图2所示。由于花生、向日葵、甜菜和芝麻4种作物的平均水足迹均不足10亿m³,本研究将其归入其他作物。由图2可知,不同作物的历年总水足迹变化趋势不尽相同。14种作物中,冬小麦总水足迹占比最大,其变化趋势为先上升后下降,1978年达到最大值(181.04亿m³)。夏玉米总水足迹持续增长,2015年达到最大值(108.36亿m³)。冬小麦和夏玉米的水足迹占比最大,占据主导地位。蔬菜与水果的总水足迹均呈上升趋势;而薯类、谷子、水稻和大豆总水足迹先下降后趋于平稳。高粱的总水足迹呈先上升后下降趋势,1974年达到最大值39.47亿m³。这与河北省农作物种植结构变化有关。

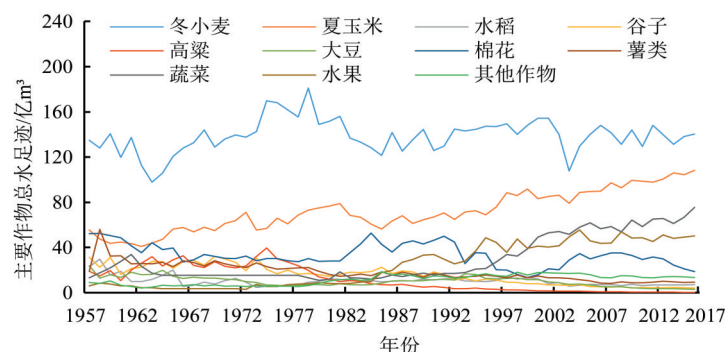


图2 1957—2015年河北省各作物总水足迹历史变化

为进一步分析河北省主要农作物的水足迹结构,将14种主要农作物划分为粮食作物和经济作物。粮食作物包括:冬小麦、夏玉米、水稻、谷子、高粱、薯类和大豆。其余7种作物为经济作物。1957—2015年河北省粮食作物水足迹总体呈下降趋势,其占比从1957年的80%下降到2015年的63%。1957—1966年,经济作物的水足迹呈下降的趋势,1966年最低(52.6亿 m^3),占农业水足迹总量的15%。1967年后经济作物水足迹呈上升趋势,尤其是1979—2002年其上升趋势最为明显,到2002年,达最大值(165.4亿 m^3),占比接近40%,之后趋于稳定。主要农作物水足迹的变化反映了河北地区农业种植结构的变化。1979年以前河北省农业种植结构以粮食作物为主,追求粮食安全。1980年后,农作物种植结构中经济作物占比逐渐扩大,说明农业生产者在满足粮食自给的前提下逐渐追求高收益的经济作物。

2.3 农业水足迹构成

研究以2011—2015年为例分析了河北省主要农作物蓝水、绿水及灰水足迹占农作物水足迹的比例,见图3(a)。由图3(a)可知,河北省农作物水足迹中,蓝水占比最大,为40.2%,说明灌溉水为河北省农业耗水的主要来源;其次是绿水,为39.1%,说明降水及土壤水占据较大的比例,尤其对于雨养作物,其作用不可忽视;而灰水占比最小,为20.7%。

2011—2015年河北省各作物水足迹占总水足迹的比例如图3(b)所示。由图3(b)可知,水足迹占比从大到小依次为冬小麦33.1%、夏玉米24.5%、蔬菜15.8%、水果11.6%、棉花6.0%、花生2.8%、薯类2.2%、水稻1.7%、谷子1%和大豆0.8%。高粱、向日葵、芝麻、甜菜4种作物因水足迹占比较小统称为其他类作物,其占比为0.5%。冬小麦与夏玉米占比之和超过50%,说明河北地区的冬小麦和夏玉米耗水占有主导地位;而在经济作物中,蔬菜、水果和棉花的水足迹占有量较大。

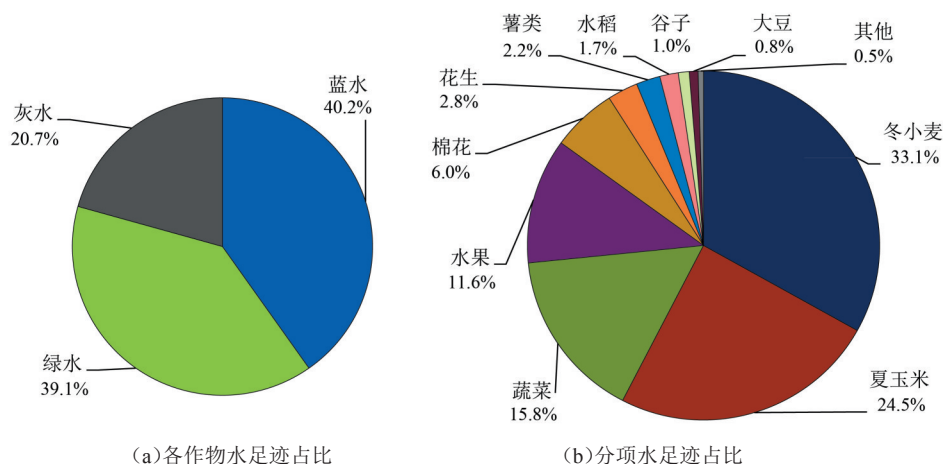


图3 河北省总水足迹构成分析

2011—2015年河北省作物蓝水足迹和绿水足迹占比情况如图4(a)和图4(b)所示。由图4(a)可知,作物的绿水足迹占比中,夏玉米所占比例最大,为34.0%;水果其次,占比为22.0%。尽管夏玉米与水果的总水足迹占比不及冬小麦,其绿水足迹占比高于冬小麦,主要因为河北省冬小麦生长季降水较小,冬小麦生长所消耗的水量大部分来源于灌溉。而夏玉米生长在雨季,降水基本能够满足作物生长需水要求。果树的生长同样主要依赖于天然降水。蔬菜的绿水足迹占比9.4%,小于水果。芝麻、甜菜和高粱3种作物的绿水足迹最

小,这里统称为其他作物,其绿水足迹占所有作物的比例仅为0.4%。

由图4(b)可知,冬小麦的蓝水足迹是各个作物中最大的,占比为51.3%,为所有作物中消耗蓝水最多的作物。其次是蔬菜,占比为22.1%,是经济作物中最耗水的作物。夏玉米的蓝水足迹为15.3%,小于蔬菜。高粱、谷子、芝麻、甜菜和向日葵,5种作物的蓝水足迹最小,统称为其他作物,其蓝水足迹占所有作物的比例仅为0.2%。

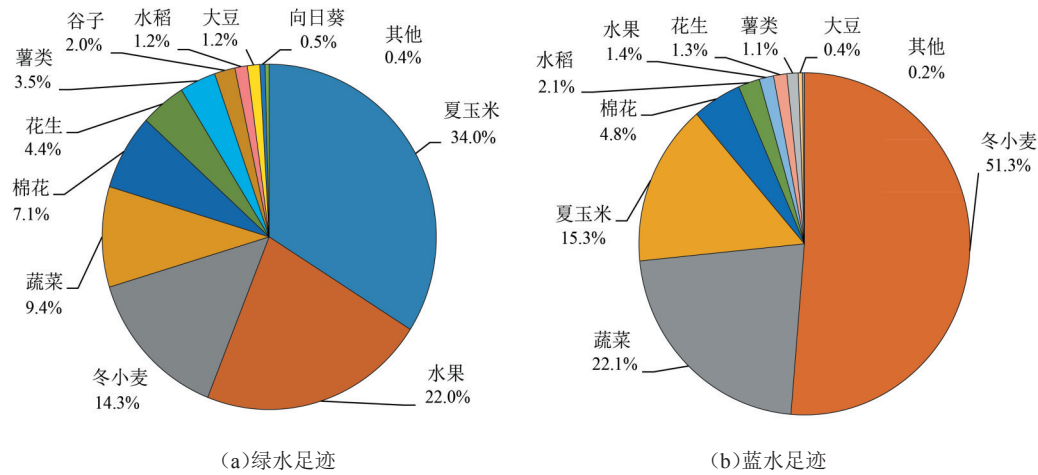


图4 河北省各作物所占蓝水绿水的比例

2.4 作物蓝水、绿水和灰水足迹

把握各种作物的耗水程度,能够更好地掌握作物间的耗水差异。适当减少高耗水作物的生产,增加低耗水作物的种植有助于农业水资源的合理分配和利用^[18-19]。汇总2011—2015年河北省主要农作物水足迹数据,计算得出各主要农作物的平均单位产品的水足迹,见表2。

表2 河北省2011—2015年农作物水足迹

作物种类	水足迹/(m ³ ·t ⁻¹)	绿水足迹/(m ³ ·t ⁻¹)	蓝水足迹/(m ³ ·t ⁻¹)	灰水足迹/(m ³ ·t ⁻¹)
冬小麦	1 232	217	804	211
夏玉米	849	423	197	229
水稻	1 453	469	795	189
谷子	1 393	919	61	413
高粱	1 367	746	236	385
大豆	1 943	1 035	306	602
棉花	6 283	2 989	2 079	1 215
薯类	1 197	671	219	307
向日葵	1 705	923	283	499
甜菜	90	63	0	27
花生	1 263	716	211	336
芝麻	2 888	1 695	310	883
蔬菜	104	25	60	19
水果	431	342	23	66

在河北省主要农作物水足迹计算结果的基础上,将河北省主要作物划分为高耗水、中耗水及低耗水作物,划分依据^[18-19]及划分结果见表3。由表3可知,经济作物大都被划分到了高、中度耗水的一类中,其中棉花和芝麻属于高度耗水,花生和向日葵属于中度耗水。在粮食作物中,大多数被划分到了中度耗水的类别中:冬小麦、水稻、高粱、谷子、大豆和薯类;耗水低的是夏玉米,属于低度耗水。蔬菜、水果,还有甜菜都属于低度耗水。综上,在河北省的主要农作物中,不同作物的虚拟水量是存在相当大的差异,耗水程度也存在一定的差距。

表3 河北省主要农作物耗水类型划分

分类	划分依据	作物名称	m ³ /t
高耗水	SWD≥2 000	棉花和芝麻	
中耗水	1 000<SWD≤2 000	冬小麦、水稻、高粱、谷子、大豆、薯类、花生和向日葵	
低耗水	SWD≤1 000	夏玉米、甜菜、蔬菜和水果	

农作物的单位水价值指作物消耗单位质量的水所产生的经济效益。各作物的价格及单位水价值见表4。表4单位作物耗水量(或水足迹)包括了作物实际消耗的蓝水和绿水以及消除农业水污染所需的灰水^[18-19]。

表4 河北省农作物单位水价值测度表

作物	价格/(元·t ⁻¹)	单位作物耗水量/(m ³ ·t ⁻¹)	单位水价值/(元·m ³)
冬小麦	2 400	1 232	1.95
夏玉米	2 280	849	2.69
水稻	3 000	1 453	2.06
谷子	5 000	1 393	3.59
高粱	2 400	1 367	1.76
大豆	4 300	1 943	2.21
薯类	1 960	1 197	1.64
棉花	15 500	6 283	2.47
花生	7 600	1 263	6.02
芝麻	27 340	2 888	9.47
向日葵	4 600	1 705	2.70
甜菜	8 000	90	88.89
水果	5 000	431	11.60
蔬菜	3 900	104	37.5

河北省主要农作物的单位水价值指标划分,见表5。由表5可知,粮食作物大多数都属于中度单位水价值指标:冬小麦、夏玉米、水稻、高粱、大豆和薯类,只有谷子属于高度单位水价值指标。经济作物中,花生、芝麻与甜菜属于高度单位水价值指标,棉花和向日葵属于中度单位水价值指标。水果和蔬菜都属于高度单位水价值指标。

表5 河北省农作物单位水价值划分

分类	指标	作物名称
高度单位水价值	$UWV \geq 3 \text{ 元/m}^3$	谷子、花生、芝麻、甜菜、水果和蔬菜
中度单位水价值	$1 \text{ 元/m}^3 \leq UWV < 3 \text{ 元/m}^3$	冬小麦、夏玉米、水稻、高粱、大豆、薯类、棉花和向日葵
低度单位水价值	$UWV \leq 1 \text{ 元/m}^3$	

以横轴表示农作物的单位水价值高低,纵轴表示农作物耗水程度的高低,绘制河北省农业耗水结构图,如图5所示。为表示农作物的综合指数高低,将河北省主要农作物按照耗水结构的优劣划分为9种情况,编制代码为A、B、C、D、E、F、G、H和I(在权衡耗水量和单位水分价值时,优先考虑耗水量的多少)。A代表耗水结构最优,最适宜河北省大力发展的农作物,而I则是耗水结构最不利的农作物,河北省应不鼓励甚至限制发展。从图5可以看出,蔬菜、水果和甜菜的耗水结构最优。夏玉米是粮食作物中耗水程度最低的作物,棉花与芝麻耗水程度最高,皆属于经济作物。粮食作物的耗水结构要优于经济作物,属于中、高水平,经济作物多属于耗水程度和单位水分价值都较高,耗水结构属于中、低水平。

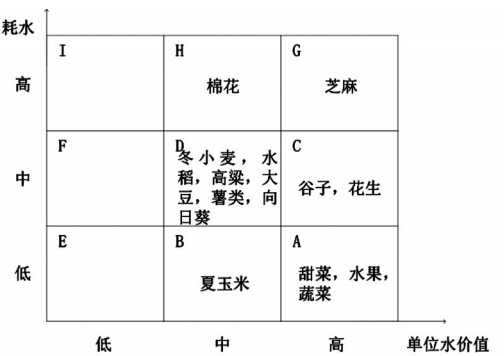


图5 河北省农业耗水结构图

3 讨论

刘梅等^[20]指出河北省1995年以河北省年总水足迹呈增长趋势,与本研究一致。王勤勤等^[21]指出河北省绿水足迹中夏玉米占比最大,蓝水足迹中冬小麦占比最大,与本研究的结论一致。曹永强等^[22]得出河北省粮食作物的总水足迹大于经济作物的总水足迹,是农业用水的大户,农作物分项水足迹占比最大的为冬小麦、夏玉米、蔬菜和水果,与本研究结论一致。在王勤勤等^[21]的研究中,河北省小麦、玉米、大豆、花生和棉花5种主要作物在2014年的总水足迹为402.95亿m³,其蓝水、绿水和灰水足迹值分别为:162.3亿、126.97亿和113.68亿m³;本研究蓝水与绿水足迹与之接近,二者分别为160.9亿m³和117.73亿m³;本研究灰水足迹为78.55亿m³,低于其研究。主要因为王勤勤等^[21]的研究中,5种作物的施肥量按照河北省总施肥量进行估算。程先等^[8]对河北省2000—2014年的主要作物水足迹进行计算,小麦和水稻的单位水足迹值与本研究的数据相差不到2%;而水果的单位水足迹值比本研究大21.5%,蔬菜的单位水足迹值大约为本研究的5倍。曹永强等^[22]计算了河北省主要农产品水足迹,小麦、玉米、水稻和棉麻4种作物的总水足迹值与本研究相差不大;薯类、油料及豆类的水足迹高于本研究,主要因为选取的研究对象不同,本研究计算的是其中的分项,例如本研究选取的大豆仅为豆类的一部分。其计算的水果水足迹值约为本研究的1.7倍,蔬菜的水足迹值

是本研究的4倍多。本研究估算的水果和蔬菜的水足迹低于其研究,原因主要有:①本研究灌溉面积数据来源于MIRCA2000的数据库,其认为河北地区葡萄和果树主要为雨养作物,因此计算过程中葡萄和果树的灌溉面积全部按0考虑。②对于蔬菜,本研究为了计算方便采用统一的平均生育期,且按照1年1季考虑,未考虑年内2季和3季的情况,因此蔬菜的水足迹存在低估,同时蔬菜的施肥量采用所有作物的平均值,可能进一步低估了蔬菜的灰水足迹。

对于灌溉面积与雨养面积的区分,由于未找到河北省地区雨养面积和灌溉面积的调查资料,本研究采用了Portmann等^[16]整理的数据库,该数据库收集于2000年。近年来随着我国河北省地区灌溉面积的扩大,实际的灌溉面积占比会大于该调查值,进而引起估算的作物水足迹偏低。

本研究对主要作物的耗水程度进行了划分,研究结果与刘梅等^[20]的研究一致,与曹永强等^[22]的研究略有不同,差异在于其认为豆类属于高耗水作物,而本研究认为豆类属于中耗水作物。本研究与韩宇平等^[15]对唐山地区的研究相比也略有不同,差异在于其认为水稻和薯类属于低耗水作物,而本研究认为其为中度耗水作物。韩宇平等^[15]将河北省唐山市的主要农作物单位水价值划分为:花生、蔬菜和瓜类属于高度单位水价值作物,而其他作物皆属于中度单位水价值作物,而本研究不同在:除了花生、水果和蔬菜,谷子、芝麻和甜菜也属于高度单位水价值作物。芝麻的市场价格较高,而甜菜的单位作物耗水量极少,导致其单位水价值较高。

对比作物总水足迹量和单位农作物水足迹值可以发现:总水足迹量较大的冬小麦、夏玉米、蔬菜和水果4种作物,单位作物水足迹值较低。并且夏玉米、蔬菜和水果还被划分为低耗水作物的行列中,这是由于产量较高。而总水足迹量过小的向日葵和芝麻2种作物,它们的单位作物水足迹值反而很大。芝麻被划分为高耗水作物,这是由于种植面积与产量相对于其他作物都较少;同样种植面积较少的还有棉花,也被划分为高耗水作物。在评价作物耗水程度时不应只单单关注于作物的总水足迹量与蓝水足迹量,作物的产量是生产用水量的主要影响因素^[20],作物的单位水足迹值是重要的衡量作物耗水程度的指标。

研究建议优化河北省主要农作物种植结构,对于高耗水、中度水价值农作物棉花来说,应该控制其种植规模。对于低耗水、中度水价值的夏玉米,其绿水足迹占比最大,可保留或适度增加其种植规模,这对降低河北省种植业蓝水消耗具有重要意义。

4 结 论

1)1957—2015年河北省作物年均总水足迹为434.36亿 m^3 ,其中蓝水、绿水和灰水足迹分别占44%、42%和14%。在水足迹变化趋势中,总水足迹总量、总绿水足迹及总灰水足迹均呈随时间增加趋势,而蓝水足迹变化不明显。在水足迹结构中,粮食作物(63.3%)大于经济作物(36.7%)。冬小麦和夏玉米的水足迹占比最大,分别为33.1%和24.5%。

2)分作物统计,冬小麦、夏玉米占比最大,其次是蔬菜和水果。夏玉米消耗的绿水足迹最多,其次是水果、冬小麦和蔬菜;冬小麦消耗的蓝水足迹最多,其次是蔬菜和夏玉米,水果的蓝水足迹占比很小。

3)夏玉米是粮食作物中耗水程度最低的作物;棉花与芝麻耗水程度最高,二者皆属于经济作物。综合考虑耗水量和单位水价值,蔬菜、水果和甜菜的综合指数最高,是河北省最适合大力发展的农作物。粮食作物的综合指数要高于经济作物,属于中、高水平,经济作物多属于耗水程度和单位水分价值都较高,综合指数属于中、低水平。

4)减少或控制高耗水作物的种植规模,增加和鼓励低耗水作物的种植;适当发展经济效益较大的作物。

参考文献:

- [1] 王盼盼. 京津冀一体化背景下河北省发展战略分析[J]. 经济论坛, 2010(8): 92-94.
- [2] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction[A]. Virtual Water Trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade-Value of Water Research Report Series No.12[C]// Delft, The Netherlands, IHE, 2003: 12-13.
- [3] 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.
- [4] LIU Mei, WEI Jiahua, WANG Guangqian, et al. Water resources stress assessment and risk early warning-a case of Hebei Province China[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 358-368.
- [5] ZHAO Dandan, TANG Yu, LIU Junguo, et al. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 167: 919-928.
- [6] 李红颖, 秦丽杰, 杨婷. 吉林省水稻生产水足迹时空分异研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 32-39.
- [7] 刘宁, 沙景华, 张宏亮, 等. 京津冀地区农产品虚拟水与区域可持续发展关系研究[J]. 资源与产业, 2016, 18(3): 80-85.

- [8] 程先,孙然好,陈利顶,等.基于农牧业产品和生活用水的京津冀地区水足迹时空特征研究[J].生态学报,2018,38(12): 4 461-4 472.
- [9] 韩玉,杨晓琳,陈源泉,等.基于水足迹的河北省水资源安全评价[J].中国生态农业学报,2013,21(8): 1 031-1 038.
- [10] 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.
- [11] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYAM M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M].London and Washington,DC:Earthscan,2011.
- [12] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [13] 何立新,练继建,王书吉.河北省主要农作物2005—2014年灰水足迹变化[J].水利水电技术,2016,47(12): 143-148.
- [14] JU Xiaotang, XING Guangxi, CHEN Xinping, et al. Reducing environmental risk by improving n management in intensive chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(9): 3 041-3 046.
- [15] 韩宇平,雷宏军,潘红卫.基于虚拟水的区域发展研究[M].北京:中国水利水电出版社,2011: 106-108.
- [16] PORTMANN F T, SIEBERT S, DÖLL P. MIRCA2000-Global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: A new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24, GB1011.
- [17] 谢光辉,王晓玉,任兰天.中国作物秸秆资源评估研究现状[J].生物工程学报,2010,26(7):855-863.
- [18] 陈鹏.基于水足迹的天津市农业产业分析[D].天津:天津理工大学,2011.
- [19] 李素娟.虚拟水与山东省农业产业结构优化[D].泰安:山东农业大学,2007.
- [20] 刘梅,许新宜,王红瑞,等.基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J].自然资源学报,2012,27(6): 1 022-1 034.
- [21] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹.京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J].水资源保护,2018,34(2): 22-27, 33.
- [22] 曹永强,姜莉,张伟娜,等.海河流域京津冀地区农产品虚拟水实证研究[J].水利经济,2010,28(5): 11-14, 77.

Analysis of Water Footprint and Water Consumption Structure of Major Crops in Hebei Province

HAN Yuping^{1,2,3}, QU Chang¹, JIA Dongdong^{1*}

- (1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;
2. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Support Engineering, Zhengzhou 450046, China;
3. Henan Key Laboratory of Water Environment Simulation and Treatment, Zhengzhou 450046, China)

Abstract:【Objective】This paper aims to adjust the regional agricultural planting structure, make rational use of regional agricultural water resources.【Method】The total water footprint and its historical trends of 14 main crops from 1957 to 2015 in Hebei province of northern China were analyzed based on the traditional water footprint calculation framework. All of the 14 crops were classified based on the unit water footprint and price index per unit of water.【Result】The average annual total water footprint of major crops in Hebei province was 43.44 billion m³. The blue water, green water and grey water accounted for 44%, 42%, and 14%, respectively. The total water footprint, green water footprint, and grey water footprint all had increasing trends, however the total blue water footprint had not significant trend. Winter wheat, summer maize, fruits and vegetables accounted for a larger proportion of the total water footprint. For individual crops, cotton and sesame had the highest water consumption rate, which were typical high water-consuming crops. The unit water value of beet, vegetable and fruit is the highest, and the water consumption structure was best.【Conclusion】It was pointed out that the sown area of cotton and sesame can be further controled, and the scale of fruits and vegetables which under the premise of not causing water pressure should be expanded, so as to meet the agricultural water-saving and water-adaptive development in Hebei and promote the implementation of the national strategy of integration of Beijing, Tianjin and Hebei.

Key words: crop water; footprint; water consumption rate; unit water value; planting structure adjustment

责任编辑:白芳芳