

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 02. 05

京津冀地区主要农作物生产水足迹研究

王勤勤¹, 刘俊国^{1,2}, 赵丹丹¹

(1. 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083;
2. 南方科技大学环境科学与工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要:利用京津冀地区(2 个直辖市、11 个地级市)气象及农业基础数据,采用彭曼公式与 CROPWAT 软件相结合的计算方法,分析了 2014 年京津冀地区主要农作物的生产水足迹。结果表明:小麦在整个生长期需水量主要以蓝水足迹为主,玉米在整个生长期主要以绿水足迹为主;2014 年京津冀地区主要农作物总的生产水足迹为 $437.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中绿水足迹为 $137.71 \times 10^8 \text{ m}^3$,蓝水足迹为 $176.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,灰水足迹为 $123.30 \times 10^8 \text{ m}^3$;从京津冀地区主要农作物总的生产水足迹空间格局上来看,沧州、保定、邯郸和石家庄地区的主要农作物生产水足迹较大,是水资源调控的主要地区。

关键词:水足迹;绿水;蓝水;灰水;农作物;京津冀地区

中图分类号:TV213.4,S271 **文献标识码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2018)02 - 0022 - 06

Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region

WANG Qinqin¹, LIU Junguo^{1,2}, ZHAO Dandan¹

(1. School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Based on the water footprint theory of crop production, we analyzed the water footprint of main crop production in 13 Jing-Jin-Ji regions (2 municipalities and 11 prefecture-level cities) in 2014. Meteorological and agricultural basic data was analyzed by combing the Penman equation with CROPWAT software. The results showed that: the water requirement of wheat in the whole growth period was mainly blue water footprint, but green water for maize in this area; The total water footprint for five crops production in the Jing-Jin-Ji Region in 2014 was $437.03 \text{ billion m}^3$, of which green water footprint was $137.71 \text{ billion m}^3$, blue water footprint was $176.03 \text{ billion m}^3$ and grey water footprint was $123.30 \text{ billion m}^3$; In terms of the spatial distribution of the total water footprint of these five crops in the Jing-Jin-Ji Region, we found that the main crop production of Cangzhou, Baoding, Handan, and Shijiazhuang major contribution to water footprint.

Key words: water footprint; green water; blue water; grey water; crop; Jing-Jin-Ji Region

农业部门是世界上最大的水资源利用部门,正确评价一个国家或地区的粮食生产用水状况对于提升农业用水效率、促进区域可持续发展具有十分重要的意义^[1-3]。然而,传统的研究往往只关注灌溉用

水,却忽略了作物生长过程中对土壤水即绿水的利用以及农药化肥等物质对环境的影响。

水足迹是由 Chapagain 等^[4-5]在 2002 年提出的一个关于水资源消耗指标的概念,可定义为人类生

基金项目:北京市自然科学基金(8151002);国家自然科学基金(41571022,41625001);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07203-005)

作者简介:王勤勤(1989—),女,硕士研究生,研究方向为水足迹及水资源评价。E-mail: wangqinqin1102@163.com

通信作者:刘俊国,教授。E-mail: junguo.liu@gmail.com

产和消费过程中消耗的淡水资源总量。按照用水类型,水足迹可划分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。蓝水指存在于江、河、湖泊及含水层中的地表水与地下水的总和,即是通常所说的水资源;绿水是指源于降水,未形成径流或未补充地下水,但存储于土壤或暂时储留在土壤或植物表面的水^[6-7];灰水是指人类生产过程中未被利用,用于吸纳污染物的水。据此,农作物生产水足迹中的蓝水足迹是作物生长过程中消耗使用的地表水和地下水的水资源量,即农田灌溉水量;绿水足迹是作物生长过程中蒸发所消耗的储存在非饱和土壤层中的水资源量;灰水足迹是以自然本底浓度和现有的水质环境标准为基准,将一定的污染负荷吸收同化所需的淡水量^[7-9]。灰水足迹实现了从水质的角度定量评价水污染程度的目的,能够更直观地反映水污染对可用水资源量的影响。

目前水足迹的研究主要集中在全球、国家、省级或流域等较大尺度^[10-13],同一水文单元内的不同区域的研究较少,尤其是水资源十分短缺的地区,如主要处于海河流域的京津冀地区。笔者基于水足迹理论及相关评定方法,以京津冀城市群内的 13 个地区为研究对象,评价该区域内主要农作物的生产水足迹及空间分布特征,以期科学管理水资源以及合理规划主要农作物的种植结构提供科学依据。

1 研究区概况

京津冀地区包括北京、天津 2 个直辖市以及河北省的保定、廊坊、唐山、张家口、承德、秦皇岛、沧州、衡水、邢台市、邯郸市、石家庄 11 个地级市。位于东经 113°27′~119°50′,北纬 36°05′~42°40′,总面积约为 22 万 km²,占国土区域面积的 2.3%。京津冀大部分地区处于海河流域,部分位于滦河流域。其中,北京位于海河流域中下游,天津位于海河流域下游至入海口,河北大部分位于海河流域的上游^[14]。同时京津冀地区地处华北平原,属暖温带大陆性季风气候,四季变化明显,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。华北平原土层深厚,土壤肥沃,是中国重要的粮棉油生产基地。《中国环境统计年鉴(2015 年)》显示 2014 年京津冀地区的水资源总量为 137.9×10⁸ m³,北京、天津、河北年人均水资源量分别为 95.1 m³、76.1 m³、144.3 m³,都远低于国际公认的 1700 m³ 的水资源短缺阈值^[15-16]。地处水资源极为短缺的海河流域,多年平均水资源量仅占全国的 1%,却承载着全国 8% 的人口、6% 的粮食生产和 10% 的 GDP^[17-18]。该地区属于资源型严重缺水地

区,是全国农业水资源最紧缺的地区之一,京津冀城市群内的 13 个区域位置见图 1。

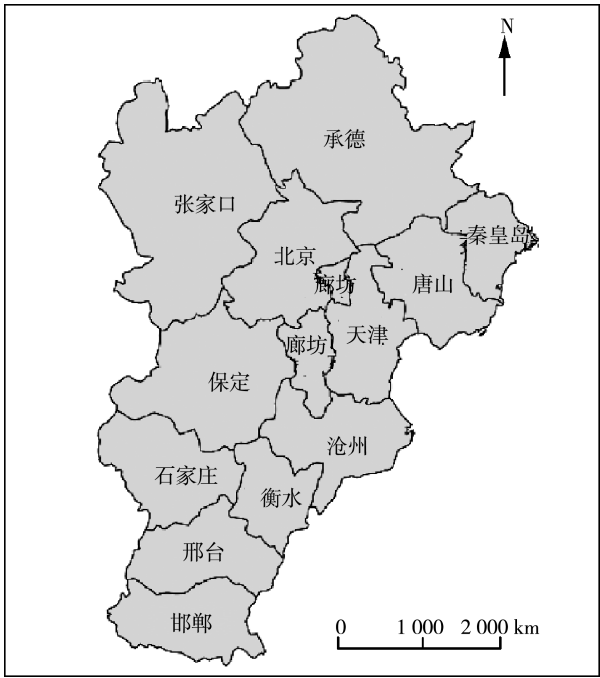


图 1 京津冀区域位置

2 研究方法和数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 作物需水量

作物需水量定义为作物系数与参考作物蒸散发的乘积。该方法是假定在理想的生长条件下模拟种植作物的蒸散发。理想条件是指在给定的气象条件下作物无病虫害,肥力条件好,大面积种植,土壤水分最优并获得最高产量。模拟作物需水量仅需要气象数据和作物数据。一般采用联合国粮农组织 (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 推荐的 Penman-Monteith 计算和 CROPWAT 模型^[19-20]模拟,计算公式为

$$E_{tc} = K_c E_{to} \quad (1)$$

其中:

$$E_{to} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} V_2 (P_a - P_d)}{\Delta + r(1 + 0.34V_2)} \quad (2)$$

$$C_{WR} = 10E_{tc}$$

式中: E_{tc} 为作物蒸散发总量,mm; K_c 为作物系数; E_{to} 为参考作物蒸散发,mm; C_{WR} 为作物单位面积需水量,m³/hm²; Δ 为饱和水汽压与温度相关曲线的斜率,kPa/℃; R_n 为作物表面的净辐射量,MJ/(m²·d); G 为土壤热通量,MJ/(m²·d); r 为湿度计常数,kPa/℃; T 为平均气温,℃; V_2 为 2 m 高处的风速,m/s; P_a 为饱和水汽压,kPa; P_d 为实测水汽压,kPa。

2.1.2 农作物蓝水足迹和绿水足迹

农作物生长需水量一般包括绿水(土壤水)和蓝水(灌溉用水)两部分。采用目前应用较为广泛的由美国农业部土壤保护局(the United States Department of Agriculture Soil Conservation Service)提出的方法计算有效降雨量,可通过 CROPWAT 模型模拟获得,灌溉需水量、绿水足迹和蓝水足迹的计算公式为

$$I_R = C_{WR} - E_R \tag{3}$$

$$W_{F-green} = AE_R \tag{4}$$

$$W_{F-blue} = AI_R \tag{5}$$

式中: I_R 为单位面积有效灌溉量, m^3/hm^2 ; E_R 为单位面积有效降雨量, m^3/hm^2 ,当 $E_R \geq C_{WR}$ 时, $I_R = 0$; $W_{F-green}$ 为农作物绿水足迹, m^3 ; W_{F-blue} 为农作物蓝水足迹, m^3 ; A 为区域某种农作物的种植面积, hm^2 。

2.1.3 灰水足迹

作物生长过程中,化肥和农药的使用都会对水质产生污染。土壤中的磷能与其他矿物质结合生成不容易溶解的化合物,钾离子能被土壤胶体离子吸附,所以磷和钾离子不容易产生流动,对土壤及地下水的污染有限^[1-2]。氮肥的施用很容易引起地表水和地下水的污染,因此采用氮元素作为灰水足迹的衡量指标^[21],最简单的计算是假定一部分污染物最终会到达地表水或地下水,进入水体的污染物与总施肥量中该物质的比例为一个固定值^[8],即淋失率。因此可用稀释土壤淋失氮肥以达到现有水环境水质标准所需要消耗的淡水量计算农业部门的灰水足迹,根据已有文献的研究,选取华北地区 2003—2006 年均氮肥的施用量的 7.4%^[22]作为淋失率。灰水足迹的计算公式为

$$W_{F-grey} = \frac{\alpha A_{ppl}}{C_{max} - C_{nat}} \tag{6}$$

式中: W_{F-grey} 为灰水足迹, m^3 ; A_{ppl} 为施用的化学物质量,kg; α 为氮的淋失率,取 7.4%; C_{max} 为环境可以稀释的氮元素的最大浓度,采用《地表水环境质量标准基本项目标准限值》(GB3838—2002)中Ⅲ类水质标准阈值,取 10 mg/L; C_{nat} 为氮元素的自然本地浓度,一般假设为 0。

2.1.4 农作物的生产水足迹

根据水足迹的概念,某种农作物的生产水足迹 W_{F-prod} 是其生长期所消耗的水资源总量,计算公式为

$$W_{F-prod} = W_{F-blue} + W_{F-green} + W_{F-grey} \tag{7}$$

2.2 数据来源

为研究京津冀地区农作物水足迹,选取小麦、玉米、大豆、花生和棉花 5 种主要农作物。2014 年,小

麦、玉米和大豆的种植面积和种植产量分别占京津冀地区粮食作物的 89% 和 92%,花生的种植面积和种植产量分别占京津冀地区油料作物的 76% 和 86%,棉花是主要的经济作物,故选取这 5 种极具代表性的农作物来核算该地区农作物的水足迹。作物生长参数数据来源于联合国粮农组织 CROP 数据库中有中国部分数据;京津冀各地区降雨量、温度、湿度、风速等气象数据来源于中国气象数据网公布的中国地面气候资料月值数据集(<http://data.cma.cn>);不同作物类型的种植面积、产量及化肥折纯量数据来自于 2015 年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北农村统计年鉴》《中国农村统计年鉴》等。

3 结果与分析

3.1 京津冀地区主要农作物需水量

京津冀地区主要农作物需水量结果见表 1。由表 1 可知,2014 年京津冀地区单位面积作物需水量最大的是棉花为 670.0 mm;最小的是大豆为 322.4 mm;小麦、玉米和花生的单位面积需水量分别为 516.4 mm、367.8 mm 和 501.5 mm。其中小麦在沧州地区的单位面积作物需水量最大为 629.0 mm;玉米、大豆、花生和棉花在张家口的单位面积需水量最大分别为 450.1 mm、394.2 mm、594.8 mm 和 805.6 mm;小麦、大豆、花生和棉花在秦皇岛地区的单位面积作物需水量最小分别为 405.6 mm、284.8 mm、420.2 mm 和 576.9 mm;玉米在石家庄的单位面积需水量最小为 316.5 mm。不同地区相同农作物的需水量存在一定的差异,这与当地的地理环境条件有关,而不同农作物之间的差异则与农作物的生物学特性有关。

3.2 京津冀地区主要农作物的生产水足迹

京津冀各地区主要农作物的生产水足迹见表 2,从表 2 可以看出小麦在整个生长期需水量主要以蓝水足迹为主。沧州的小麦绿水足迹和蓝水足迹最高分别为 $3.96 \times 10^8 m^3$ 和 $20.16 \times 10^8 m^3$;除张家口、承德没有小麦种植外,秦皇岛的小麦绿水足迹和蓝水足迹最小分别为 $0.04 \times 10^8 m^3$ 和 $0.09 \times 10^8 m^3$ 。玉米在整个生长期主要以绿水足迹为主。保定的玉米绿水足迹最大为 $12.88 \times 10^8 m^3$;秦皇岛的玉米绿水足迹最小为 $1.80 \times 10^8 m^3$;沧州的玉米蓝水足迹最大为 $10.07 \times 10^8 m^3$;唐山的玉米蓝水足迹最小为 $1.01 \times 10^8 m^3$ 。大豆在石家庄、秦皇岛、张家口和沧州地区生长期主要以蓝水足迹为主,其他地区主要以绿水足迹为主。沧州的大豆绿水足迹和蓝水足迹最大分别为 $0.42 \times 10^8 m^3$ 和 $0.43 \times 10^8 m^3$;唐山

表 1 2014 年京津冀地区主要农作物蒸散发量、有效降雨量和灌溉量															mm
地区	小麦			玉米			大豆			花生			棉花		
	E_{tc}	E_R	I_R	E_{tc}	E_R	I_R	E_{tc}	E_R	I_R	E_{tc}	E_R	I_R	E_{tc}	E_R	I_R
北京	570.2	65.1	505.1	408.3	293.7	114.6	358.3	287.0	71.3	551.7	361.8	189.9	734.8	384.5	350.3
天津	602.0	83.9	518.1	409.7	264.3	145.4	357.4	231.4	126.0	561.7	315.6	246.1	755.0	366.3	388.7
石家庄	431.1	71.3	359.8	316.5	186.3	130.2	285.7	126.6	159.1	443.9	167.8	276.1	580.7	245.3	335.4
唐山	499.6	93.6	406.0	347.4	312.1	35.3	303.7	243.2	60.5	482.6	325.6	157.0	640.9	412.2	228.7
秦皇岛	405.6	120.8	284.8	342.2	188.1	154.1	284.8	135.2	149.6	420.2	228.2	192.0	576.9	297.9	279.0
邯郸	545.9	106.7	439.2	348.6	274.7	73.9	310.3	205.5	104.8	499.2	277.1	222.1	661.3	373.4	288.0
邢台	474.8	78.9	395.9	326.7	211.1	115.6	291.7	157.4	134.3	458.8	221.5	237.3	605.0	294.0	311.0
保定	496.0	88.2	407.8	353.7	278.1	75.6	316.5	195.3	121.2	498.5	242.6	255.9	655.6	347.0	308.6
张家口	612.6	79.1	533.5	450.1	228.0	222.1	394.2	170.5	223.7	594.8	255.2	339.6	805.6	330.1	475.5
承德	484.4	108.8	375.6	357.2	290.1	67.1	309.3	233.3	76.0	464.4	352.9	111.5	628.0	434.1	193.9
沧州	629.9	103.5	526.4	431.5	215.9	215.6	370.8	183.4	187.4	585.9	266.6	319.3	795.3	315.8	479.5
廊坊	485.4	87.1	398.3	354.1	237.8	116.3	312.4	199.0	113.4	486.0	274.6	211.4	644.1	333.3	310.8
衡水	475.2	108.5	366.7	335.8	206.9	128.9	295.9	186.1	109.8	471.2	237.1	234.1	626.3	284.1	342.2
总计	516.4	92.0	424.4	367.8	245.2	122.7	322.4	196.5	125.9	501.5	271.3	230.2	670.0	339.8	330.1

表 2 2014 年京津冀各地区主要农作物的生产水足迹											$10^8 m^3$
地区	小麦		玉米		大豆		花生		棉花		
	绿水	蓝水	绿水	蓝水	绿水	蓝水	绿水	蓝水	绿水	蓝水	
北京	0.15	1.19	2.60	1.02	0.12	0.03	0.08	0.04	0	0	
天津	0.83	5.13	5.36	2.95	0.18	0.10	0.04	0.03	1.11	1.17	
石家庄	2.67	13.46	6.28	4.39	0.19	0.24	0.90	1.48	0.26	0.35	
唐山	0.99	4.31	8.93	1.01	0.28	0.07	2.53	1.22	0.97	0.54	
秦皇岛	0.04	0.09	1.80	1.48	0.08	0.09	0.43	0.36	0.05	0.05	
邯郸	4.01	16.52	9.33	2.51	0.19	0.10	0.93	0.75	3.65	2.81	
邢台	2.68	13.46	6.91	3.78	0.15	0.13	0.78	0.84	4.72	5.00	
保定	3.47	16.02	12.88	3.50	0.20	0.12	1.64	1.73	0.70	0.62	
张家口	—	—	4.03	3.93	0.21	0.27	0.02	0.02	—	—	
承德	—	—	5.54	1.28	0.18	0.06	0.01	0.00	—	—	
沧州	3.96	20.16	10.08	10.07	0.42	0.43	0.72	0.86	3.12	4.73	
廊坊	0.65	2.96	5.05	2.47	0.21	0.12	0.36	0.28	0.92	0.86	
衡水	3.09	10.44	6.00	3.74	0.11	0.07	0.59	0.58	3.34	4.02	
合计	22.55	103.75	84.79	42.12	2.52	1.82	9.02	8.19	18.82	20.15	

的大豆绿水足迹最小为 $0.08 \times 10^8 m^3$ ；北京的大豆蓝水足迹最小为 $0.03 \times 10^8 m^3$ 。花生在石家庄、邢台、保定、张家口和沧州地区种植期主要以蓝水足迹为主,其他地区以绿水足迹为主。石家庄的花生绿水足迹最大为 $2.53 \times 10^8 m^3$ ；保定的花生蓝水足迹最大为 $1.73 \times 10^8 m^3$ ；承德的花生绿水足迹和蓝水足迹最小分别为 $30 \times 10^4 m^3$ 和 $96 \times 10^4 m^3$ 。棉花在张家口、承德没有种植,而在北京种植面积很小,可忽略不计。邢台的棉花绿水足迹和蓝水足迹最大分别为 $4.72 \times 10^8 m^3$ 和 $5.00 \times 10^8 m^3$ 。由于不同地区气候和作物的生物学特性等因素不同导致作物生长期的需水量不同,不同农作物的种植面积也直接影响蓝绿水足迹的大小。

3.3 京津冀地区主要农作物灰水足迹

京津冀地区主要农作物灰水足迹结果见表 3。从表 3 可知,2014 年京津冀地区农作物生产灰水足迹为 $123.30 \times 10^8 m^3$,其中石家庄灰水足迹最大为

$19.53 \times 10^8 m^3$,张家口灰水足迹最小为 $3.59 \times 10^8 m^3$ 。灰水足迹与氮肥的施用量存在直接关系,即一个地区的氮肥施用总量越大,其灰水足迹也越大。

表 3 2014 年京津冀各地区氮肥施肥情况和灰水足迹				
地区	氮肥施用量/t	氮肥淋失量/t	灰水足迹/ $10^8 m^3$	单位面积灰水足迹/($m^3 \cdot hm^{-2}$)
北京	53 678	3 972.2	3.97	2 025.6
天津	106 000	7 844.0	7.84	1 637.6
石家庄	263 900	19 528.6	19.53	1 942.9
唐山	167 155	12 369.5	12.37	1 537.8
秦皇岛	50 622	3 746.0	3.75	1 701.6
邯郸	193 487	14 318.0	14.32	1 351.8
邢台	140 235	10 377.4	10.38	1 018.4
保定	222 653	1 6476.3	16.48	1 354.6
张家口	48 536	3 591.7	3.59	509.2
承德	54 876	4 060.8	4.06	1 045.2
沧州	158 667	11 741.4	11.74	1 037.8
廊坊	94 238	6 973.6	6.97	1 459.4
衡水	112 213	8 303.8	8.30	983.5
总计	1 666 260	123 303.2	123.30	1 291.6

为了更加直观地比较京津冀各地区的灰水足迹,计算了单位面积灰水足迹(灰水足迹与农作物的播种面积比值),用来分析各地区灰水足迹的强度,结果见表3。单位面积灰水足迹最大的地区是北京,为 $2025.6\text{ m}^3/\text{hm}^2$,其次是石家庄,为 $1942.9\text{ m}^3/\text{hm}^2$,单位面积灰水足迹最小的地区是张家口,为 $509.2\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。单位面积播种的氮肥施肥量越多,说明可能存在过度施肥的现象,提高农作物的化肥利用率降低损失率是减少其灰水足迹的主要途径。

3.4 京津冀地区主要农作物总生产水足迹

2014 年京津冀各地区主要农作物总生产水足迹见图2。由图2可知,2014 年京津冀地区主要农作物总生产水足迹为 $437.04 \times 10^8\text{ m}^3$,其中绿水足迹为 $137.71 \times 10^8\text{ m}^3$,占生产水足迹的31.5%;蓝水足迹为 $176.03 \times 10^8\text{ m}^3$,占生产水足迹的40.3%;灰水足迹为 $123.30 \times 10^8\text{ m}^3$,占生产水足迹的28.2%。

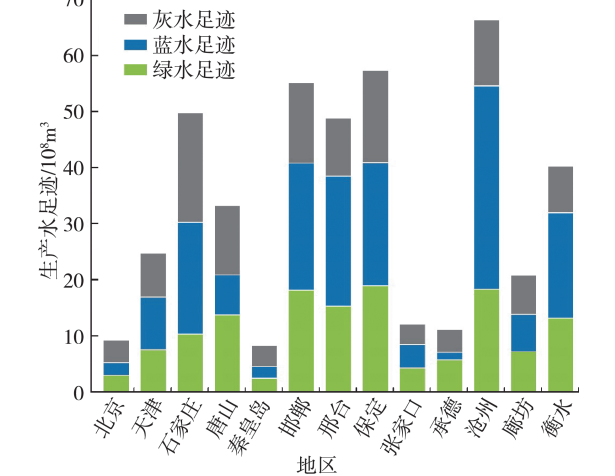


图2 2014 年京津冀各地区主要农作物总生产水足迹

北京、天津和河北省分别占整个京津冀地区总生产水足迹的2.1%、5.7%和92.2%。

京津冀各地区主要农作物生产水足迹总量差异明显,沧州地区主要农作物总生产水足迹最大为 $66.29 \times 10^8\text{ m}^3$,秦皇岛地区主要农作物总生产水足迹最小为 $8.23 \times 10^8\text{ m}^3$ 。沧州地区蓝水足迹最大为 $36.25 \times 10^8\text{ m}^3$;承德是蓝水足迹最小的地区为 $1.34 \times 10^8\text{ m}^3$ 。保定地区的绿水足迹最大为 $18.88 \times 10^8\text{ m}^3$,占其总生产水足迹的32.9%;秦皇岛地区绿水足迹最小为 $2.41 \times 10^8\text{ m}^3$ 。石家庄灰水足迹最大为 $19.53 \times 10^8\text{ m}^3$,占其总生产水足迹的39.3%;张家口灰水足迹最小为 $3.59 \times 10^8\text{ m}^3$,占其生产水足迹的29.8%。

沧州地区蓝水足迹占其总生产水足迹比重最大为54.7%,承德地区蓝水足迹占其总生产水足迹比重最小为12.1%。承德地区绿水足迹占其总生产水足迹的比重最大为51.5%,秦皇岛地区绿水足迹占其总生产水足迹的比重最小为29.3%。秦皇岛地区灰水足迹占其总生产水足迹的比重最大为45.5%,承德地区灰水足迹占其总生产水足迹的比重最小为17.7%。

3.5 京津冀各地区主要农作物生产水足迹空间格局

京津冀各地区主要农作物生产水足迹空间格局分布见图3。由图3可知,京津冀地区农作物蓝绿水足迹由南向北呈逐渐减少的趋势,灰水足迹呈现先减少后增加再减少的趋势。大部分地区的农作物蓝水足迹要高于绿水足迹和灰水足迹,北京、张家口、承德、秦皇岛的农作物绿水足迹大于蓝水足迹。邯郸、保定、沧州的绿水足迹最大,均在 $18 \times 10^8\text{ m}^3$ 以上,张家口、北京、秦皇岛的绿水足迹最小,均在5

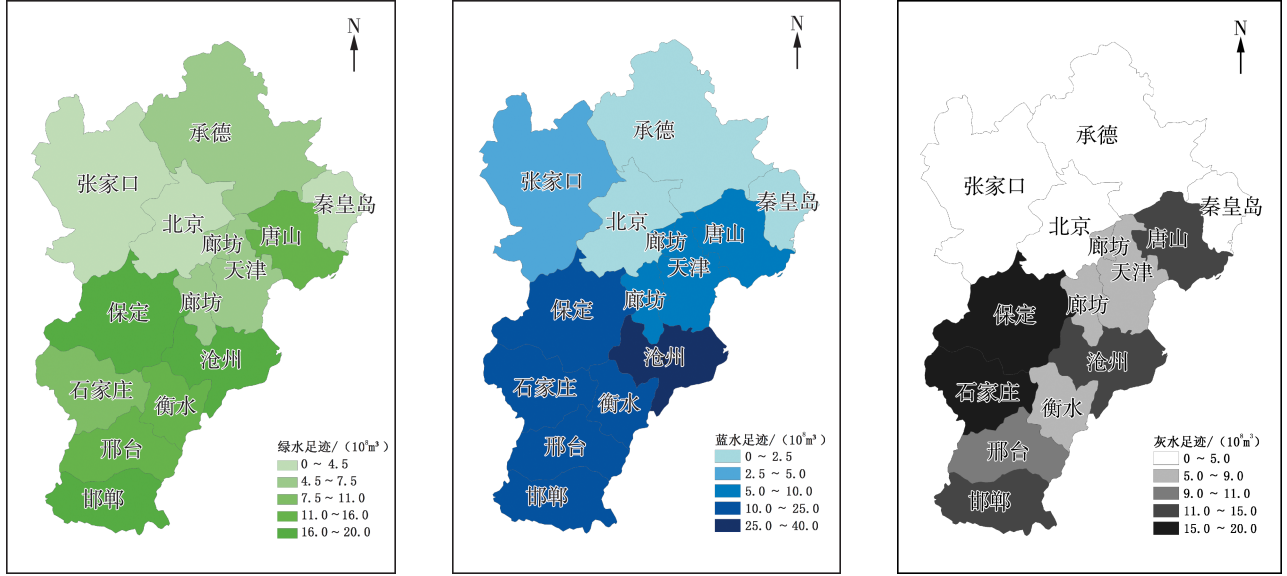


图3 京津冀各地区主要农作物生产水足迹空间格局分布

$\times 10^8 \text{ m}^3$ 以下。沧州地区的蓝水足迹最大,邯郸、邢台、衡水、石家庄和保定蓝水足迹相差较小,均在 $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右,京津冀东北部地区的北京、承德、秦皇岛蓝水足迹最小,均在 $2.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下。石家庄、保定的灰水足迹最大,均在 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上,北京、张家口、承德、秦皇岛的灰水足迹较小,均在 $5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以下。由于不同地区气候、地形条件、种植结构等因素不同导致农作物的生产水足迹之间存在明显差异。

4 结 论

通过对 2014 年京津冀地区主要农作物绿水足迹、蓝水足迹以及灰水足迹的计算,揭示了不同农作物在生产过程中对水资源的实际消耗情况,并从灰水足迹的角度分析了农作物生产所引起的水质污染问题。

a. 棉花是京津冀各地区农作物需水量最大的农作物,但由于种植面积较少,并未在农业生产过程中占主导地位。小麦和玉米是京津冀地区农作物总耗水量最大的作物,小麦的蓝水足迹占其总生产水足迹的比例最大,玉米的绿水足迹占其总生产水足迹的比例最大。绿水相对于蓝水来说具有较低的成本,从水资源高效利用和经济学的角度看,建议减少或控制高耗水小麦的种植规模,适当的增加雨养农业如玉米的种植,进一步优化种植结构。

b. 北京、天津、石家庄、唐山、秦皇岛单位面积的灰水足迹最大,说明这些地区单位播种面积的氮肥使用量过多,存在过度施肥的问题。可以通过减少氮肥使用量、提高氮肥使用效率等途径减少化肥对水资源的污染。

c. 京津冀地区农作物蓝、绿水足迹由南向北呈逐渐减少的趋势,灰水足迹呈现先减少后增加再减少的趋势。大部分地区的农作物蓝水足迹要高于绿水足迹和灰水足迹,北京、张家口、承德、秦皇岛的农作物绿水足迹大于蓝水足迹。

参考文献:

[1] 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):2066-2070. (in Chinese))

[2] 徐鹏程,张兴奇. 江苏省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(1):232-237. (XU Pengcheng, ZHANG Xingqi. Study on water footprint of

main crops production in Jiangsu Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27 (1) : 232-237. (in Chinese))

[3] 史利洁. 西北旱区粮食作物生产水足迹空间差异分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.

[4] CHAPAGAIN A, HOEKSTRA A Y. Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[M]. Delft: VNESCO-IHE, 2003.

[5] 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.

[6] FALKENMARK M. Land and water integration and river basin management[J]. FAO Land and Water Bulletin, 1995, 1:15-16.

[7] 刘俊国,曾昭,马坤,等. 水足迹评价手册[M]. 北京:科学出版社,2012:1-147.

[8] 王丹阳,李景保,叶亚亚,等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析[J]. 水资源保护,2016,32(4):49-54. (WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies[J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (4) : 49-54. (in Chinese))

[9] 黄晶,王学春,陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示[J]. 水资源保护,2016,32(1):135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(1):135-141. (in Chinese))

[10] 王新华,徐中民,龙爱华. 中国 2000 年水足迹的初步计算分析[J]. 冰川冻土,2005,27(5):774-780. (WANG Xinhua, XU Zhongmin, LONG Aihua. Estimation of water footprint of China in 2000[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5):774-780. (in Chinese))

[11] 王新华,徐中民,李应海. 甘肃省 2003 年的水足迹评价[J]. 自然资源学报,2005,20(6):909-915. (WANG Xinhua, XU Zhongmin, LI Yinghai. A rough estimate of water footprint of Gansu Province in 2003[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(6):909-915. (in Chinese))

[12] 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. (MA Jing, WANG Dangxian, LAI Hailiang, et al. Water footprint: an application in water resources research [J]. Resources Science, 2005, 27(5):96-100. (in Chinese))

[13] LIU J G, WILLIAMS J R, ZEHNDER A J B, et al. GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale [J]. Agricultural Systems, 2007, 94(2):478-493.

(下转第 33 页)

东莞、佛山、广州、深圳、中山、汕头、珠海 7 市多年出现水资源生态赤字,水资源利用呈现可持续发展状态。

c. 在结构上,水污染足迹占水资源生态足迹的比例最大,且增长速度最快。同时,相关性分析结果也显示,城镇生活污水、人均 GDP、工业废水是影响广东省水资源生态足迹的最主要因素。

参考文献:

[1] WACKERNAGEL M, REES W E, TESTEMALE P. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth [M]. Gabriola Island: New Society Publisher, 1996.

[2] HOEKSTRA A Y, HUNG P Q. Globalization of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade [J]. Global Environmental Change, 2005, 15 (1): 45-56.

[3] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法 [J]. 生态学报, 2008, 28 (3): 1279-1286. (HUANG Linnan, ZHANG Weixin, JIANG Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (3): 1279-1286. (in Chinese))

[4] 谭秀娟, 郑钦玉. 我国水资源生态足迹分析与预测 [J]. 生态学报, 2009, 29 (7): 3559-3568 (TAN Xiujuan, ZHENG Qinyu. Dynamic analysis and forecast of water resources ecological footprint in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (7): 3559-3568. (in Chinese))

[5] 张义, 张合平. 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析 [J]. 生态学报, 2013, 33 (13): 4111-4124. (ZHANG Yi, ZHANG Heping. Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (13): 4111-4124. (in Chinese))

[6] 王丹阳, 李景保, 叶亚亚, 等. 基于不同受纳水体的湖南省农业灰水足迹分析 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (4): 49-54. (WANG Danyang, LI Jingbao, YE Yaya, et al. Analysis of agricultural grey water footprint in Hunan Province based on different receiving water bodies [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (4): 49-54. (in Chinese))

[7] 黄晶, 王学春, 陈阜. 水足迹研究进展及其对农业水资源利用的启示 [J]. 水资源保护, 2016, 32 (1): 135-141. (HUANG Jing, WANG Xuechun, CHEN Fu. Research progress of water footprint and its implication for utilization of agricultural water [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (1): 135-141. (in Chinese))

[8] 何开为, 张代青, 侯璠, 等. 云南省城乡居民膳食消费的水足迹计算及评价 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (5): 114-118. (HE Kaiwei, ZHANG Daiqing, HOU Jin, et al. Calculation and evaluation of water footprint about dietary consumption of urban and rural residents in Yunnan Province [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (5): 114-118. (in Chinese))

(收稿日期: 2017-05-21 编辑: 王 芳)

(上接第 27 页)

[14] 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. (SHAN Chunyu, WANG Sufen. Study on the crop water footprint in the Haihe River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35 (5): 50-55. (in Chinese))

[15] 国家统计局, 环境保护部. 中国环境统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

[16] FALKENMARK M, WIDSTRAND C. Population and water resources: a delicate balance [J]. Population Bulletin, 1992, 47 (3): 1-36.

[17] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价 [J]. 水土保持通报, 2016, 36 (3): 211-218. (LIU Yujie, LIU Junguo, ZHAO Xu, et al. Assessment of vulnerability of water resource in Beijing-Tianjing-Hebei Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36 (3): 211-218. (in Chinese))

[18] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2016.

[19] Food and Agriculture Organization of the United Nations

(FAO). CROPWAT 8.0 model [EB/OL]. [2017-02-11] http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html, 2010a. last access date: 1/3/2012.

[20] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.

[21] 程存旺, 石嫣, 温铁军. 氮肥的真实成本 [J]. 绿叶, 2013 (4): 77-88. (CHENG Cunwang, SHI Yan, WEN Tiejun. True cost of nitrogen fertilizer [J]. Green Leaf, 2013 (4): 77-88. (in Chinese))

[22] JU X T, XING G X, CHEN X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106 (9): 3041-3046.

(收稿日期: 2017-05-21 编辑: 王 芳)