

辽宁省不同水文年型玉米水足迹变化规律研究

张旭东¹, 郝迪¹, 吴迪², 付玉娟¹, 孙仕军¹, 陈志君¹

(1. 沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110161; 2. 中国灌溉排水发展中心, 北京 100054)

摘要:作物生产水足迹可反映农业生产过程中的水资源利用效率以及真实用水量, 为理清辽宁省玉米水足迹的动态变化规律, 实现农业水资源的高效利用, 运用水足迹理论和方法, 基于 CROPWAT 软件对辽宁省 14 个地级市 1992~2015 年的玉米水足迹进行计算, 分析了各地区玉米水足迹在丰水年、平水年、干旱年条件下的差异和年际变化规律, 对玉米主产区的生产水足迹进行了回归分析和 M-K 趋势检验。结果表明: 辽宁省多年平均玉米水足迹总量为 $1.109\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, 绿水、蓝水和灰水足迹比例分别为 47.4%、19.4% 和 33.2%; 丰水年营口最大 ($1.10\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、铁岭最小 ($0.68\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$), 平水年丹东最大 ($2.03\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、铁岭最小 ($0.69\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$), 干旱年型下大连最大 ($1.74\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、抚顺最小 ($0.75\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$); 辽宁省玉米主产区的绿水、蓝水(除锦州外)和灰水足迹大部分呈下降趋势, 其中, 沈阳、朝阳绿水足迹呈显著下降趋势, 分别为 $0.12\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.13\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。因此, 在各水文年型下, 辽宁省玉米生产水足迹均以绿水为主, 其在辽宁省粮食生产中具有重要地位; 灰水占第二, 对水资源的影响不容小觑, 在农业生产中需加强面源污染控制; 各地区玉米水足迹差异显著, 需针对不同地区制定不同的灌溉制度和灌溉策略, 以保证水资源的合理利用。本研究可为辽宁省的玉米生产空间布局和农业水资源科学管理提供参考。

关键词:玉米; 水足迹; 水文年型; 年际变化

中图分类号: S271; TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2018)05-0584-10

Changes of Maize Water Footprint under Different Hydrological Years in Liaoning Province

ZHANG Xu-dong¹, HAO Di¹, WU Di², FU Yu-juan¹, SUN Shi-jun¹, CHEN Zhi-jun¹

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. China Irrigation and Drainage Development Center, Beijing 100054, China)

Abstract: Crop production water footprint can reflect the water utilization efficiency in the process of agricultural production and the actual water consumption. In order to clarify corn dynamic change rule of water footprint in Liaoning Province and realize the efficient utilization of agricultural water resources, the water footprint of maize in 14 cities of Liaoning Province for 1992–2015 years was calculated based on CROPWAT, the maize water footprint of various regions in different hydrological years (wet year, normal year and dry year) was analyzed in this paper according to the theory and method of water footprint. Regression analysis and M–K trend test were carried out for water footprint of main maize production areas. The results showed that the annual average total water footprint of maize was $1.109\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$, the ratios of green water, blue water and grey water footprint ratio were 49.7%, 17.6%, 32.7%, respectively. There were significant difference of maize footprint in different areas based on hydrological years. Yingkou ($1.1\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the largest and Tieling ($0.68\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the smallest under the wet year. Dandong ($2.03\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the largest and Tieling ($0.69\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the smallest under normal year. Dalian ($1.74\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the largest and Fushun ($0.75\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$) was the smallest under drought year. Mostly, the green water, blue water (except Jinzhou) and grey water footprints in Liaoning's main maize production areas showed downward trends. The green water footprint of Shenyang and Chaoyang declined significantly, the rate of them were $0.12\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $0.13\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$, respectively. Therefore, under various hydrological years, the water footprint of corn production in Liaoning Province was mainly green water, which plays an important role in grain production in Liaoning. Grey water was the second most important whose influence on water resources should not be underestimated. There were significant differences in the water footprint of maize in different regions. Different irrigation systems and irrigation strategies should be adopted for different regions to ensure the rational utilization of water resources. This

收稿日期: 2018-04-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405805-03); 国家自然科学基金青年基金项目(51609137); 辽宁省教育厅项目(L20145475); 辽宁省自然科学基金项目(20180550617)

第一作者: 张旭东(1979-), 男, 博士, 讲师, 从事节水灌溉理论与技术和农业节水方面的研究, E-mail: zxxddd@126.com

通信作者: 付玉娟(1980-), 女, 博士, 讲师, 从事水资源高效利用方面的研究, E-mail: fuj0249@sina.com

results can provide references for corn production space layout and agricultural water resources scientific management in Liaoning Province.

Key words: corn; water footprint; hydrological year type; interannual change

传统农业用水管理常以灌溉用水为主要的表征指标,然而这并不能完全反映作物对天然降水的利用情况以及农药、肥料等对水资源污染的影响。2002年 HOEKSTRA 提出水足迹概念^[1],从生产和消费的角度来评价水资源利用情况^[2-3]。水足迹理论更能真实地反映出水资源的供需平衡状态,为水资源评价和管理提供了新的方向^[4-6]。作物的生产水足迹就是特定区域内某作物生产过程中所需消耗的水资源量,即绿水、蓝水、灰水总量^[7-8]。蓝水足迹指作物生长过程中所消耗的地下水和地表水,绿水足迹指作物生长过程中所消耗的储藏在土壤中的有效降水^[9-12],灰水足迹是稀释污染物需要的水量,量化为将污染物稀释到一定的程度使周围水体环境质量保持在约定标准之上需要的水的体积^[13]。

目前,国内外学者对作物水足迹进行了广泛研究。盖力强等^[14]分析了华北平原小麦、玉米绿水的重要性和灰水对环境的不利影响。于成等^[15]认为山东省冬小麦的生产水足迹以绿水为主,且数值高于夏玉米生产水足迹。秦丽杰等^[16]通过玉米大田试验,探究了在相同土壤及农田管理条件下不同试验年份玉米生产需水及水分来源的变化规律。徐鹏程等^[17]量化分析了 2000~2010 年间江苏省播种面积最大的 6 种农作物的生产水足迹。SUN 等^[18-19]分析了区域农作物生产水足迹的演变特征。史利洁等^[20]分析了陕西 2000~2012 年作物生产水足迹与水资源压力指数的时空分异特征。这些研究多从年际变化以及区域差异上对玉米水足迹进行了分析,较少考虑各区域不同水文年型对作物水足迹的影响。

辽宁省玉米的生产多以雨养为主,灌溉为辅。地域类型复杂、不同区域水文气候条件各异,各地区玉米产量以及水足迹差异明显,且作物水足迹中的主要因子天然降水呈现一定的水文频率变化。因此,本研究从水文频率的视角来分析水足迹的变化特征,以辽宁 14 个地市为计算单元,分析各地市的玉米水足迹在不同水文年型(丰水年、平水年、干旱年)的差异;并对辽宁省年均玉米水足迹以及 7 个玉米主产区的绿水、蓝水足迹年际变化特点进行研究,以期对辽宁省农业水资源利用管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽宁省地形大体为“六山一水三分田”,地势自北向南,自东西两侧向中部倾斜,属于温带大陆性季风气候区,为玉米种植气候最适宜区^[21],玉米在辽宁省 14 个地市均有分布。截止 2015 年,辽宁省玉米种植面积 $3.297 \times 10^6 \text{hm}^2$,产量 $2.2022 \times 10^7 \text{t}$,分别占全国的 8.6%和 9.0%^[22],玉米灌溉面积 $0.448 \times 10^6 \text{hm}^2$,沈阳、锦州、朝阳、阜新、铁岭、大连和鞍山 7 地市的玉米产量占到辽宁的 90%,为辽宁省的玉米主产区,位置分布见图 1。不同水文年下各地级市灌溉面积与种植面积之比和单产详见表 1。不同水文年下,主产区中偏东部的沈阳、铁岭、大连和鞍山的玉米单产在枯水年时最低,偏西部的锦州、朝阳和阜新的玉米单产在平水年时最低;玉米灌溉面积占播种面积的比例地区间差异比较明显,各水文年型下灌溉面积占播种面积 15%以上的地区为朝阳、锦州、阜新,低于 6%的为大连,但相同地市不同水文年间该比值变化不大。

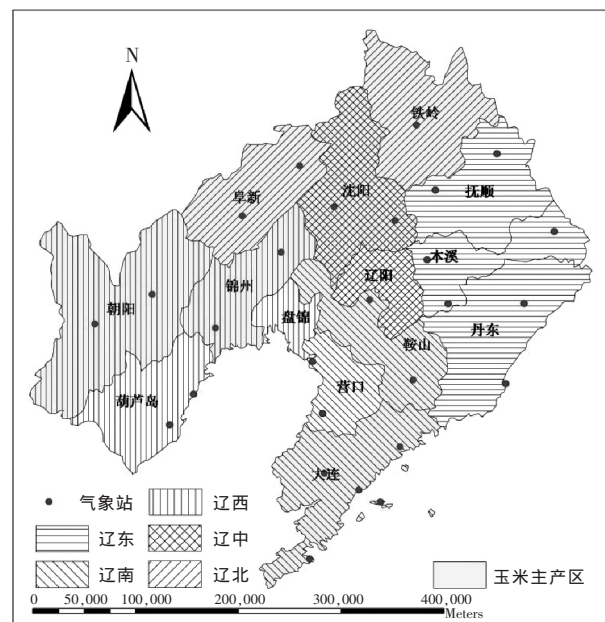


图 1 研究区域和气象站点分布
Figure 1 Research area and meteorological station distribution

1.2 数据来源

气象观测数据(平均温度、湿度、光照、风速、降水)来自 14 个地市的 25 个气象观测站(图 1);玉米单产、产量、种植面积和化肥施用量等数据来自《辽宁省统计年鉴》;生育阶段数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)的《中国农作物生长发育状况资料数据集》;玉米的灌溉面积数据来自松辽委的统计(2000~2015,缺 2004),研究时段为 1992~2015 年。

表 1 辽宁省各地市的单产和玉米灌溉面积与播种面积之比
Table 1 Unit output of local cities and the ratio of maize irrigated area to sown area in Liaoning

地区 Region	单产/kg·hm ⁻² Single production			灌溉面积与播种面积之比 The ratio of the area of irrigation area to the sown area		
	丰水年 Wet year	平水年 Normal year	枯水年 Dry year	丰水年 Wet year	平水年 Normal year	枯水年 Dry year
	铁岭 Tieling	8764	8767	4260	0.042	0.082
大连 Dalian	5671	5854	3975	0.054	0.057	0.020
本溪 Benxi	6525	6480	4995	0.300	0.219	0.112
盘锦 Panjin	6810	7035	4934	0.074	0.062	0.070
沈阳 Shenyang	6880	7575	6728	0.076	0.102	0.176
朝阳 Chaoyang	5865	5043	5520	0.607	0.260	0.286
阜新 Fuxin	6868	6255	7350	0.497	0.228	0.350
辽阳 Liaoyang	5943	6424	6555	0.047	0.047	0.068
锦州 Jinzhou	6555	3960	5102	0.168	0.607	0.319
葫芦岛 Huludao	5919	6518	5851	0.202	0.166	0.172
鞍山 Anshan	7165	6900	6367	0.018	0.018	0.069
抚顺 Fushun	7168	7018	8115	0.017	0.001	0.003
丹东 Dandong	5100	2820	4801	0	0	0.003
营口 Yingkou	5968	4875	5211	0.119	0.424	0.282

1.3 典型年的确定

本研究采用典型年法分别对辽宁省各地市 1992~2015 的年降水量进行频率分析。计算公式为:

$$P(\%) = \frac{m_{p_0}}{n+1} \times 100 \quad (1)$$

式中: n 为总年数; m_{p_0} 为年降水量 $P_0(\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$ 由大到小排序的序号; P 为水文频率。利用 P-型曲线进行配线,分别获得特定频率所对应的降雨量,查找与其相近的历史降水量,从而确定某一地市的水文年型及相应的水足迹值。参照文献[23],确定水文频率 P 为 75%、50%、25% 时对应的水文年型分别为干旱年、平水年、丰水年。

1.4 作物生产水足迹

作物生产水足迹是指生产单位作物产品所需要的水资源数量,即作物生产绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹之和。其中,绿水主要来自天然降水,蓝水主要来自灌溉水,灰水足迹核算时以稀释淋失氮所消耗的水资源量作为代表^[24]。

$$WF_{prod} = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \quad (2)$$

式中: WF_{prod} 为总生产水足迹($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$); WF_{green} 为绿水足迹($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$); WF_{blue} 为蓝水足迹($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$); WF_{grey} 为灰水足迹($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)。

绿水足迹计算公式为:

$$WF_{green} = \frac{\min(ER, CWR)}{Y} \quad (3)$$

式中: CWR 为单位面积作物需水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); ER 为有效降水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); Y 为作物单位面积产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

$$CWR = 10 \times ET_c = 10 \times K_c ET_0 \quad (4)$$

在理想种植条件下,粮食作物蒸发蒸腾量 ET_c 等于单位面积作物需水量 CWR , 10 为单位换算系数。 ET_c 和 ER 均采用联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization, FAO)基于 Penman-Monteith 模型开发的 Cropwat8.0 计算,其中 ER 采用美国农业部土壤保持局(USDA soil conservation service)推荐的方法。作物需水量 ET_c

由作物参考蒸发蒸腾量 ET_0 乘以作物系数 K_c 得到, K_c 根据参考文献^[25]拟合求得。

$$\text{蓝水足迹计算公式为: } WF_{blue} = \frac{IR}{Y} \quad (5)$$

式中: IR 为单位面积所需的灌溉用水量 ($m^3 \cdot hm^{-2}$), 其计算公式为:

$$IR = \begin{cases} CWR - ER & CWR > ER \\ 0 & CWR \leq ER \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{灰水足迹计算公式为: } WF_{grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (C_{max} - C_{nat})}{Y} \quad (7)$$

式中: AR 为化肥施用量 ($kg \cdot hm^{-2}$); α 为淋溶率, 考虑辽宁省情况, 根据已有研究结果^[14,26-27]比较分析取 10% 作为氮肥的淋溶率; C_{max} 为最大容许浓度 ($kg \cdot m^{-3}$), 取美国环境保护署 EPA (U.S. Environmental Protection Agency) 公布的标准, 即水环境质量标准中氮元素质量浓度不能超过 $10mg \cdot L^{-1}$ ^[28]; C_{nat} 为污染物的自然本底浓度 ($kg \cdot m^{-3}$), 本研究取 $0kg \cdot m^{-3}$ 。

2 结果与分析

2.1 不同水文年型下作物生产水足迹特征分析

由图 2 可知, 无论是丰水年、平水年还是枯水年, 玉米的绿水足迹均大于灰水和蓝水足迹, 表明辽宁省玉米生产主要依靠绿水, 形成了以绿水为主的格局。虽然本研究计算灰水足迹的结果偏保守, 采用建议施肥量^[29]中氮肥折纯量来计算, 但灰水消耗比例仍然较大, 占第二大份额。随着水文频率的减少 (水文年型由干旱年变为丰水年) 玉米的蓝水足迹逐渐降低, 辽阳、沈阳、本溪、丹东地区蓝水足迹的比例在丰水年非常小甚至趋向于零, 可见在丰水年这些地区的降水基本能够满足玉米的生长需求, 不需要灌溉。为了考察不同水文年水足迹的变化剧烈程度, 计算了丰水年和枯水年各水足迹的绝对差及其与多年均值相比的相对差, 结果详见表 2。铁岭、大连、本溪丰水年与干旱年绿水足迹绝对差和相对差均较大, 且干旱年的绿水足迹大于丰水年, 是因为这些地区虽然在干旱年型下降水量减少, 但玉米产量的减少幅度却大于降雨减少的幅度, 即这些地区玉米产量受水文年型变化的影响比较剧烈; 而丹东、营口则相反, 绿水足迹几乎不受水文年型的影响。蓝水足迹受水文年型影响较大的有铁岭、大连、本溪和丹东, 因丹东蓝水足迹年均较小, 因此丰枯年的相对差较大, 受水文年型影响较小的为阜新、抚顺。

由图 2a 可知, 丰水年辽宁省各地区的绿水、蓝水足迹有较大差异。绿水足迹丹东最高 $0.65m^3 \cdot kg^{-1}$, 铁岭最低 $0.37m^3 \cdot kg^{-1}$, 这种空间上的差异应归因于玉米单产的差异, 丹东、铁岭年平均玉米单产分别为 $4344kg \cdot hm^{-2}$ 和 $6718kg \cdot hm^{-2}$, 导致了两地绿水足迹的差异。辽阳、沈阳的绿水足迹偏高, 朝阳、葫芦岛等偏低, 然而辽阳 ($5943kg \cdot hm^{-2}$)、沈阳 ($6880kg \cdot hm^{-2}$) 两地年平均玉米的单产也高于朝阳 ($5865kg \cdot hm^{-2}$)、葫芦岛 ($5919kg \cdot hm^{-2}$), 这表明在丰水年条件下前者 and 后者相比绿水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。蓝水足迹营口最高 $0.25m^3 \cdot kg^{-1}$, 丹东最低为 0。葫芦岛、阜新、朝阳、锦州、抚顺的蓝水足迹也高于辽宁省其他地区, 说明丰水年这些地区对蓝水资源的依赖性偏高。且阜新、抚顺地区蓝水足迹和玉米单产都高于朝阳、锦州、盘锦、辽阳、本溪、丹东、大连地区, 这表明在丰水年条件下前者 and 后者相比, 蓝水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。玉米总生产水足迹营口最高 $1.10m^3 \cdot kg^{-1}$, 铁岭最低 $0.68m^3 \cdot kg^{-1}$, 说明铁岭地区玉米耗水量比较少, 产量高, 更适宜玉米的生长。灰水足迹丹东最高 $0.41m^3 \cdot kg^{-1}$, 铁岭最低 $0.24m^3 \cdot kg^{-1}$, 各地区的灰水足迹差异不大。

由图 2b 可知, 平水年辽宁省各地区玉米总水足迹差异大于丰水年, 水足迹最高丹东 ($2.03m^3 \cdot kg^{-1}$) 几乎是最底的铁岭 ($0.69m^3 \cdot kg^{-1}$) 的 3 倍, 这是由绿水足迹、灰水足迹差异所引起的, 平水年丹东地区绿水足迹 ($1.24m^3 \cdot kg^{-1}$)、灰水足迹 ($0.76m^3 \cdot kg^{-1}$) 远大于铁岭 (绿水足迹 $0.39m^3 \cdot kg^{-1}$ 、灰水足迹 $0.24m^3 \cdot kg^{-1}$) 地区。辽阳 ($0.59m^3 \cdot kg^{-1}$)、本溪 ($0.59m^3 \cdot kg^{-1}$)、鞍山 ($0.53m^3 \cdot kg^{-1}$)、抚顺 ($0.51m^3 \cdot kg^{-1}$) 地区绿水足迹大于阜新 ($0.44m^3 \cdot kg^{-1}$) 地区, 玉米单产前者也大于后者, 表明平水年前者 and 后者相比绿水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。葫芦岛、沈阳、阜新地区的蓝水足迹和玉米单产同时高于丹东、大连地区, 同样表明平水年前者 and 后者相比蓝水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。朝阳、锦州、营口地区的水足迹值偏高, 主要是由于这些地区的蓝水足迹较高所致, 因此这些地区需要提高绿水资源的使用效率, 减少蓝水资源的使用, 从而降低玉米的生产水足迹。

由图 2c 可知,干旱年玉米绿水足迹大连最高 $0.79\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,阜新最低 $0.34\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,其空间上的差异也是由玉米单产的差异引起,两市玉米的单产分别为 $3975\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $7350\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。辽阳($0.53\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、鞍山($0.49\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)地区绿水足迹大于朝阳($0.41\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、锦州($0.42\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)、葫芦岛($0.45\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)地区,玉米年单产也大于后者,说明前者和后者相比绿水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。朝阳、锦州、葫芦岛、阜新地区的蓝水足迹和玉米单产同时大于本溪、丹东地区,同样前者和后者相比蓝水消耗增多的速度大于玉米单产增加的速度。总水足迹大连最高 $1.74\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,抚顺最低 $0.75\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 。辽阳、沈阳地区的水足迹也相对小于其他地区,可见在干旱年型下辽宁中部地区对水资源的利用效率要高于其他地区。辽南、辽西、辽北大部分地区的蓝水足迹大于辽东、辽中地区。

就地区差异来说,无论何种年型,辽阳玉米单产较高主要是因为绿水消耗的增多;一些地区的蓝水消耗增多速度会大于玉米单产增加速度,特别是阜新。

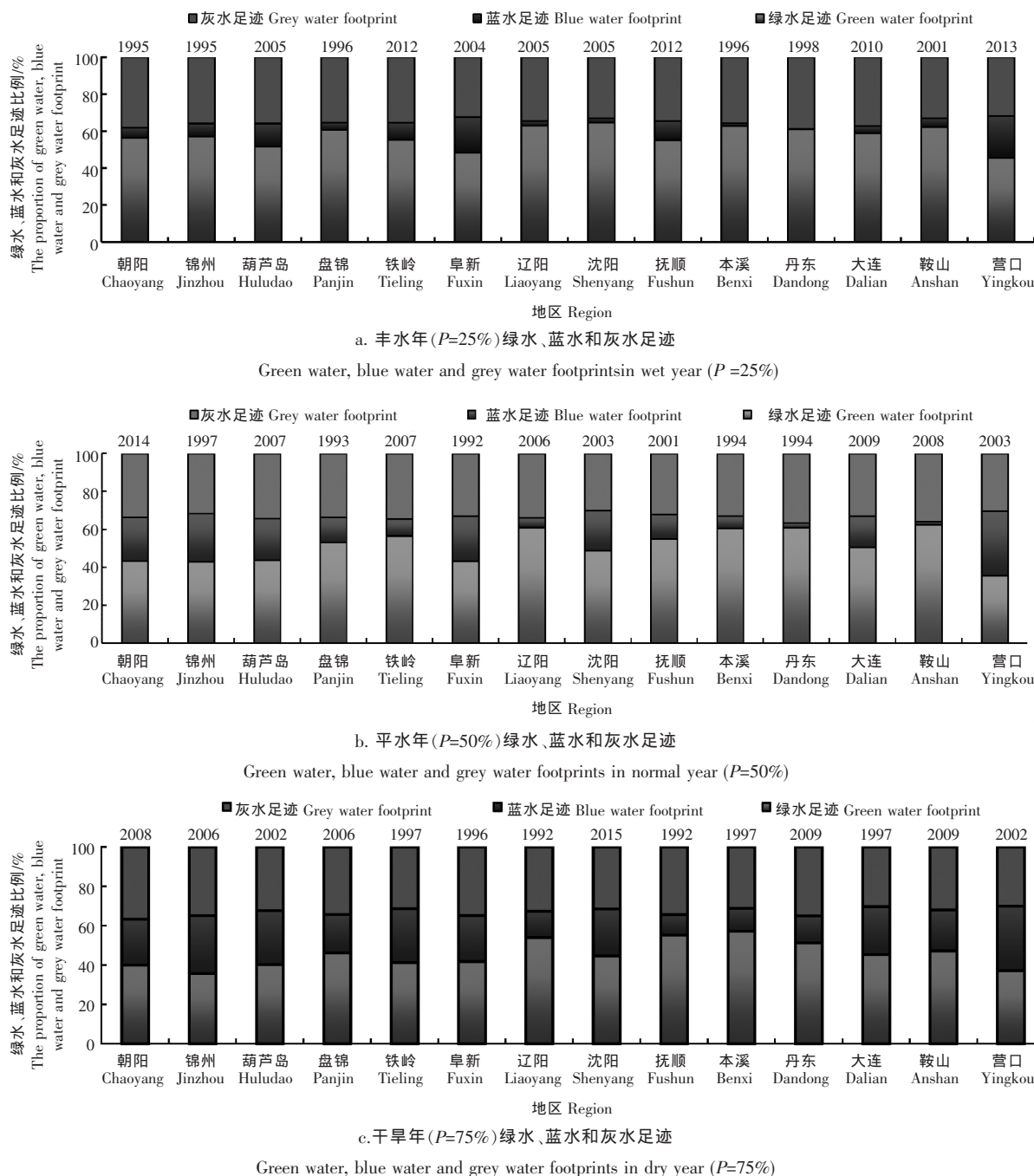


图 2 辽宁省各地区不同水文年下绿水、蓝水和灰水足迹相对比例

Figure 2 Ratios of green water, blue water and gray water footprints of different under hydrological years in various regions of Liaoning Province

表 2 辽宁省各地区不同水文年的水足迹及其特征差值
 Table 2 Difference and characteristics of water footprints under different hydrological years in each region of Liaoning Province

地区 Region	绿水足迹/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ Green water footprint				蓝水足迹/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ Blue water footprint				灰水足迹/ $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ Grey water footprint			
	丰水年	枯水年	绝对差	相对差	丰水年	枯水年	绝对差	相对差	丰水年	枯水年	绝对差	相对差
	Wet year	Dry year	Absolute difference	Relative difference	Wet year	Dry year	Absolute difference	Relative difference	Wet year	Dry year	Absolute difference	Relative difference
铁岭 Tieling	0.373	0.650	-0.28	-0.667	0.062	0.431	-0.37	-3.236	0.240	0.493	-0.253	-0.904
大连 Dalian	0.584	0.790	-0.21	-0.328	0.039	0.428	-0.39	-1.812	0.370	0.528	-0.157	-0.361
本溪 Benxi	0.569	0.772	-0.20	-0.315	0.014	0.158	-0.17	-1.484	0.323	0.420	-0.097	-0.256
盘锦 Panjin	0.527	0.577	-0.05	-0.088	0.034	0.244	-0.21	-1.112	0.307	0.426	-0.120	-0.320
沈阳 Shenyang	0.598	0.443	0.15	0.294	0.020	0.236	-0.22	-1.181	0.305	0.312	-0.007	-0.022
朝阳 Chaoyang	0.528	0.415	0.11	0.193	0.052	0.241	-0.19	-0.547	0.358	0.380	-0.022	-0.046
阜新 Fuxin	0.458	0.344	0.11	0.226	0.184	0.192	-0.01	-0.032	0.306	0.286	0.020	0.053
辽阳 Liaoyang	0.643	0.531	0.11	0.167	0.030	0.131	-0.14	-0.987	0.353	0.320	0.033	0.085
锦州 Jinzhou	0.508	0.060	0.09	0.168	0.422	0.347	-0.28	-1.143	0.320	0.412	-0.091	-0.235
葫芦岛 Huludao	0.512	0.448	0.06	0.097	0.123	0.303	-0.18	-0.743	0.355	0.359	-0.004	-0.009
鞍山 Anshan	0.552	0.488	0.06	0.102	0.042	0.214	-0.17	-1.217	0.293	0.330	-0.037	-0.101
抚顺 Fushun	0.467	0.415	0.05	0.096	0.088	0.078	0.01	0.088	0.293	0.258	0.035	0.107
丹东 Dandong	0.647	0.641	0.01	0.015	0.002	0.172	-0.17	-2.234	0.411	0.437	-0.026	-0.059
营口 Yingkou	0.502	0.500	0	0	0.249	0.440	-0.19	-0.635	0.352	0.402	-0.050	-0.128

注:绝对差:丰水年与枯水年水足迹之差;相对差: $\frac{\text{丰水年水足迹}-\text{枯水年水足迹}}{\text{水足迹多年平均值}}$ 。

Note: Absolute difference: The water footprint value difference between the year of rich water and the year of dry water; Relative difference: Water footprint value in wet year - Water footprint value in dry year / mean water footprint value of multi-year.

2.2 辽宁省玉米主产区水足迹年际变化特征

2.2.1 辽宁省玉米主产区 1992~2015 年水足迹年际变化 由图 3 可知,辽宁省主产区玉米蓝水、绿水足迹之间大体上呈现此消彼长的变化趋势,这反映出雨养作物消耗水资源的一般规律。1992~2015 年绿水足迹平均值为 $0.526\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,最高 $1.051\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (1994 年),最低 $0.404\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (2011 年)。绿水足迹整体呈下降趋势,说明辽宁省农业管理精细化程度逐步提高,降水的利用效率越来越高。蓝水足迹平均值为 $0.215\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,最高 $0.868\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (2000 年),最低 $0.036\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (1998 年)。蓝水足迹整体呈下降趋势,但下降趋势小于绿水足迹。灰水足迹平均值为 $0.368\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,最高 $0.787\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (2000 年),最低 $0.267\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (2012 年)。一般情况下随着农业的发展,对肥料的需求越来越大,图 3 显示灰水足迹整体呈现微弱下降趋势,可知辽宁省玉米单产的增加速率大于化肥的施用量的增加速率。根据绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹的变化趋势,将其分为两个阶段,1992~2001 年玉米绿水、蓝水、灰水足迹呈现波动式下降趋势。该阶段绿水足迹 ($0.622\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、蓝水足迹 ($0.262\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、灰水足迹 ($0.429\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) 平均值分别高于研究期的绿水足迹 ($0.526\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、蓝水足迹 ($0.215\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)、灰水足迹 ($0.368\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) 平均值,主要原因为该阶段农业生产条件差、干旱频发等导致个别年份的粮食产量极低(1994,1997 和 2000 年)。2002~2015 年绿水、蓝水、灰水足迹平稳缓慢下降,主要是由于大力推广玉米节水抗旱新品种以及扩大种植面积,农业管理水平逐步提高,从而使玉米产量不断上升且水足迹平稳下降。

2.2.2 辽宁省玉米主产区绿水、蓝水足迹趋势分析 由图 4a 可知,玉米主产区的绿水足迹在 1994 年(大连、鞍山)、2000 年(朝阳、阜新、锦州)突然增大,是因为 1994 年大连、鞍山地区玉米单产低于其他地区,2000 年辽西大旱,玉米产量锐减。而其他地区年际变化不大。M-K 趋势检验和回归分析均表明,主产区玉米绿水足迹值均呈下降趋势($K < 0$),其中沈阳、朝阳为极显著下降趋势($p < 0.05$),下降速度为 $0.12\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.13\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。由图 4b 可知主产区的蓝水足迹除在 2000 年(朝阳、阜新、锦州)、2009 年(朝阳)突然增大外,其他地区年际变化不大,这主要是因为 2000 年朝阳、锦州、阜新地区大旱,玉米严重减产。

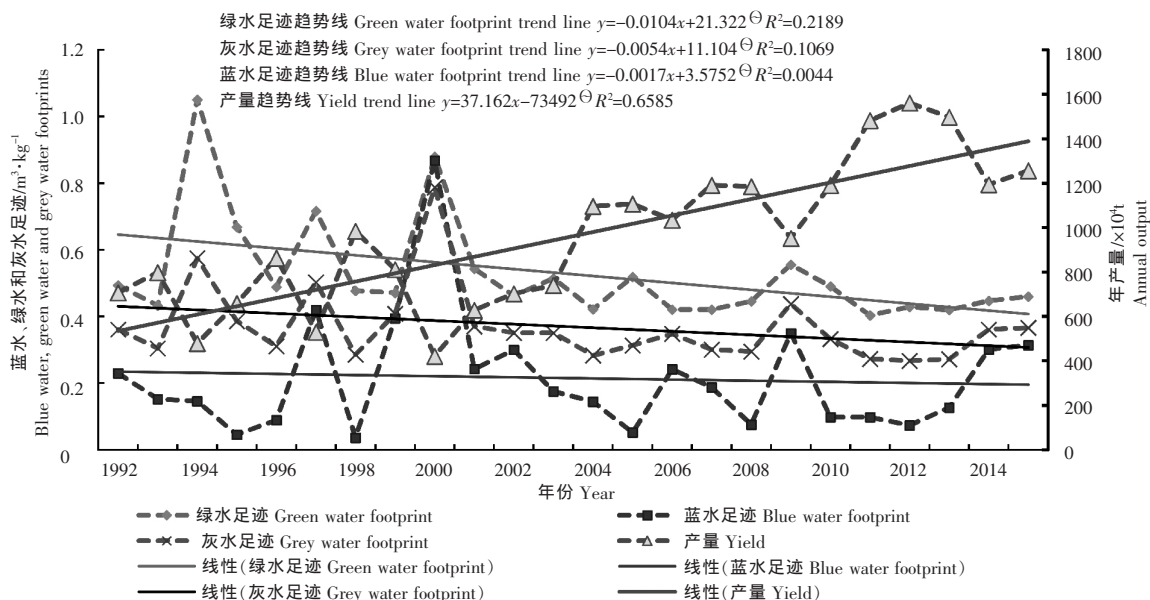
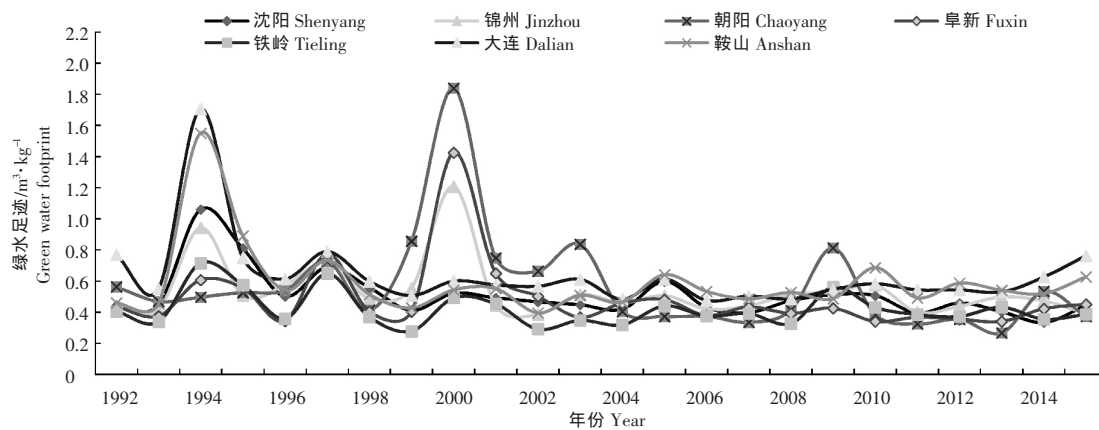
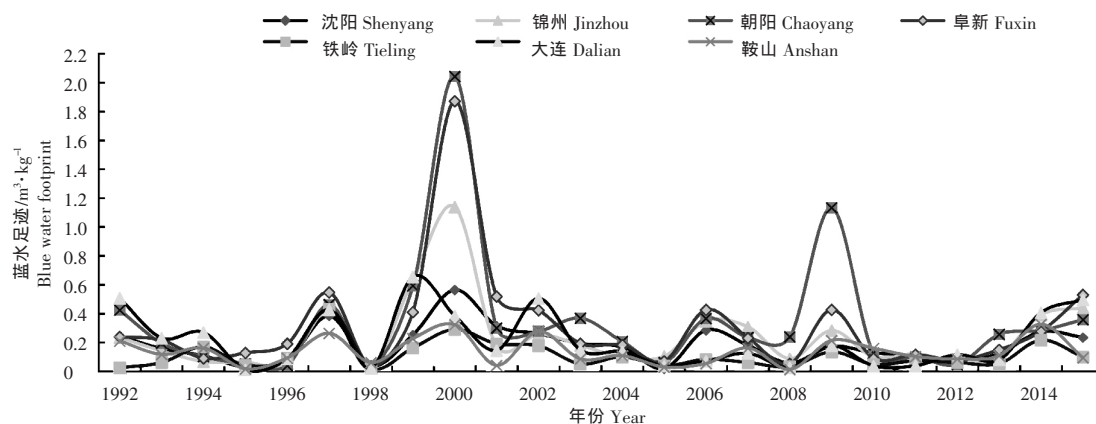


图3 辽宁省主产区1992-2015年绿水、蓝水和灰水足迹与产量年际变化图
 Figure 3 Interannual changes of green water, blue water, grey water footprint and production in Liaoning Province in 1992-2015 years



a. 各地市绿水足迹变化图
 Annual changes of green footprint in different areas



b. 各地市蓝水足迹变化图
 Interannual changes of blue water footprint in different areas

图4 辽宁省玉米主产区绿水、蓝水足迹年际变化
 Figure 4 Interannual variation of green water and blue water footprint in main maize producing areas of Liaoning Province

回归趋势分析中(表 3),主产区玉米蓝水足迹和绿水足迹均呈下降趋势,但均不显著($p>0.05$)。M-K 趋势检验显示(表 4)蓝水足迹锦州上升,朝阳不变($K=0$),其他地区下降。这可能是朝阳蓝水足迹在 2000 年、2009 年均有较大波动,标准差较大($0.43\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)所致。另据松辽委统计数据,2001~2015 年锦州玉米的实际灌溉用水量呈上升趋势,这与表 3 中锦州的蓝水变化趋势基本一致。

总之,在玉米主产区绿水足迹逐年减小,其中沈阳、朝阳最为显著,且绿水足迹的下降趋势明显大于蓝水足迹。除锦州和朝阳外,主产区蓝水足迹呈现微弱的下降趋势。

表 3 辽宁省玉米主产区绿水、蓝水足迹年际回归方程
Table 3 Regression equation of annual green water and blue water footprint in main maize producing areas of Liaoning Province

水足迹种类	区域	回归方程	相关系数 r	平均值/ $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数
Type of water footprint	Region	Regression equation	Correlation coefficient r	Average value	Standard deviation	Coefficient of variation
绿水足迹 Green water footprint	沈阳 Shenyang	$y=-0.0111x+0.6486$	0.511	0.509	0.155	0.305
	锦州 Jinzhou	$y=-0.0083x+0.6395$	0.321	0.536	0.186	0.347
	朝阳 Chaoyang	$y=-0.0136x+0.7387$	0.299	0.569	0.322	0.566
	阜新 Fuxin	$y=-0.0089x+0.5992$	0.028	0.487	0.227	0.466
	铁岭 Tieling	$y=-0.0041x+0.4714$	0.270	0.420	0.110	0.261
	大连 Dalian	$y=-0.013x+0.8028$	0.260	0.639	0.246	0.384
	鞍山 Anshan	$y=-0.0086x+0.6977$	0.260	0.591	0.230	0.390
蓝水足迹 Blue water footprint	沈阳 Shenyang	$y=-0.0015x+0.2045$	0.078	0.187	0.128	0.683
	锦州 Jinzhou	$y=-7\text{E}-05x+0.2459$	0.004	0.245	0.244	0.995
	朝阳 Chaoyang	$y=-0.002x+0.3722$	0.032	0.347	0.430	1.240
	阜新 Fuxin	$y=-0.0047x+0.3716$	0.089	0.313	0.370	1.181
	铁岭 Tieling	$y=-0.002x+0.1393$	0.144	0.114	0.097	0.848
	大连 Dalian	$y=-0.0051x+0.2789$	0.183	0.217	0.194	0.894
鞍山 Anshan	$y=-0.0006x+0.147$	0.037	0.140	0.093	0.669	

表 4 辽宁省玉米主产区绿水、蓝水足迹年际变化 M-K 趋势检验
Table 4 M-K trend test of annual variation of green water and blue water footprint in main maize producing areas of Liaoning Province

水足迹种类	M-K 检验	沈阳	锦州	朝阳	阜新	铁岭	大连	鞍山
Type of water footprint	M-K test	Shenyang	Jinzhou	Chaoyang	Fuxin	Tieling	Dalian	Anshan
绿水足迹 Green water footprint	p	0.0106	0.1951	0.0170	0.0561	0.6024	0.0702	0.8233
	K	-0.0070	-0.0040	-0.0097	-0.0049	-0.0015	-0.0047	0.0010
	趋势性 Trend	显著减小 Significantly reduce	减小 Reduce	显著减小 Significantly reduce	减小 Reduce	减小 Reduce	减小 Reduce	减小 Reduce
蓝水足迹 Blue water footprint	p	0.7471	0.5343	0.9802	0.0561	0.6024	0.4130	0.8622
	K	-0.0015	0.0022	0.0000	-0.0010	-0.0001	-0.0041	-0.0006
	趋势性 Trend	减小 Reduce	增加 Increase	不变 Unchanged	减小 Reduce	减小 Reduce	减小 Reduce	减小 Reduce

注: $K<0$ 为下降趋势, $K=0$ 为不变, $K>0$ 为上升趋势。 $p<0.05$ 为趋势显著, $p>0.05$ 为趋势不显著。

Notes: $K<0$ is decreasing trend, $K=0$ is unchanged, $K>0$ is rising trend. The trend of $p<0.05$ is significant, and the trend of $p>0.05$ is not significant.

3 讨论与结论

辽宁省玉米主产区水足迹在年际间呈下降趋势,这主要归因于年际间玉米年产量的升高。在空间分布上辽西地区(朝阳,阜新,锦州)年际水足迹波动也大于其他主产区,辽西地区坡耕地多,旱灾频发,粮食生产水平较低,农作物受极端天气影响较为明显,玉米的生长对水分条件的依赖性更强。不同水文年型下各地区水足迹构成也存在较大差异,但绿水足迹均占 45% 以上,可见绿水在玉米生长过程中占有重要地位,但不同水文条件对

区域玉米水足迹各分项的比例有一定的影响。与其他学者关于作物生产水足迹的研究结果比较发现,辽宁省玉米绿水和蓝水生产水足迹总和($0.741\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)低于吉林长春($1.26\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)^[30]、陕西地区($0.827\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)^[20]水足迹;与华北平原(河北 $0.813\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、北京 $0.734\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、天津 $0.788\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)^[14]比较相近,其中与北京最为接近;高于山东(济南 $0.59\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、东营 $0.70\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、临沂 $0.63\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 、青岛 $0.50\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)^[15]、江苏($0.557\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17]地区。虽辽宁省玉米生产水足迹($0.741\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)低于全国平均水平^[31]($0.87\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$),但仍有许多地区玉米水足迹较高,如朝阳($0.92\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)本溪($0.91\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)葫芦岛($0.86\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$)大连($0.85\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$),应该在这些地区采用综合措施提高农业生产水平,提高作物单产,以降低玉米水足迹。辽西地区应该更注重发展多种水源和推广节水措施,通过集雨补灌、滴灌、地膜覆盖等土壤蓄水保墒技术提高雨水利用率,减少水分对农业生产的制约。此外,玉米生产水足迹的时空差异分析对于辽宁省各地区调整农业布局具有启示作用:扩大生产水足迹比较优势区玉米的播种面积,如铁岭、抚顺地区,缩小缺乏生产水足迹优势区玉米的播种面积,如朝阳、本溪地区,优化玉米种植结构,缓解全省的水资源压力。

本研究需要进一步改善的地方为:需采用多源数据相互校验并进行误差分析,进一步考虑一些不能得到充分灌溉的干旱地区对本文算法的结果影响该如何评估;此外,人口、生产规模、农业技术和经济发展等因素也会对玉米水足迹产生影响,探明其影响大小及其作用机制可为降低玉米水足迹提供思路。

本研究结果表明,玉米年均水足迹总量为 $1.109\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,绿水、蓝水和灰水足迹年平均值分别为 $0.526, 0.215, 0.368\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,分别占总量的 47.4%、19.4%、33.2%。无论在丰水年、平水年还是干旱年,玉米绿水足迹占主体,灰水次之,蓝水最少;不同年型下绿水所占比例均在 45%以上,各地区水足迹空间差异明显。研究时段内全省 7 个玉米主产区绿水、蓝水、灰水足迹整体呈下降趋势。1992~2001 年玉米绿水、蓝水、灰水足迹波动剧烈,2002~2015 年水足迹波动较小。各地区玉米水足迹的突然增大主要是因干旱导致的玉米单产严重减少所致。因此,在玉米生产中,提高农田系统的抗旱防灾能力,玉米稳产是保证水足迹相对稳定的首要问题。辽宁省玉米主产区的绿水足迹均呈一定的下降趋势,且沈阳($0.12\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$)、朝阳($0.13\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$)地区呈显著下降趋势。除锦州外,其他地区蓝水足迹整体呈微弱下降趋势。而且,阜新地区的蓝水消耗增多速度大于玉米单产增加速度。因此,需要通过调整种植结构或增强工程、管理等节水措施效果来控制这些地区蓝水的消耗量并提高蓝水利用效率。

参考文献:

- [1] HOEKSTRA A Y. Virtual water: an introduction[C]//Virtual Water Trade:Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade-Value of Water Research Report Series No.12.Delft,Netherlands:IHE,2003.
- [2] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K. Water footprints of nations:Water use by people as a function of their consumption pattern[J]. Water Resource Management,2007,21:35-48.
- [3] LIU J, HHG S. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China [J]. Hydrology & Earth System Sciences,2008,5(1):27-50.
- [4] HOEKSTRA A Y. Virtual Water Trade:Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade[EB/OL]//Value of Water Research Report Series No.12.UNESCO-IHE,Delft,The Netherlands:(2013-03-01).(last access:1 March 2012),2003.
- [5] 徐长春,黄晶,RIDOUTT B G,等.基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J].自然资源学报,2013,28(5):873-880.
- [6] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012,109:3232-3237
- [7] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual:Setting the Global Standard[M]. London:Earthscan,2011:27-35
- [8] SUN S K, WU P T, WANG Y B, et al. The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture,2013,93(6):1427.
- [9] FALKENMARK M. Land-water Linkages:A Synopsis.In:Land and Water Integration and River Basin Management [R]. Rome:FAO,1995.
- [10] 孙世坤,王玉宝,刘静,等.中国主要粮食作物的生产水足迹量化及评价[J].水利学报,2016,47(9):1115-1124.

- [11] 马育军,李小雁,徐霖,等.虚拟水战略中的蓝水和绿水细分研究[J].科技导报,2010,28(4):47-54.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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(12):202-204.
- [16] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.
- [17] 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.
- [18] SUN S,WU P,WANG Y,et al.The temporal and spatial variability of water footprint of grain:A case study of an irrigation district in China from 1960 to 2008[J].Journal of Food Agriculture & Environment,2012,10(3):1246-1251.
- [19] SUN S K,WU P T,WANG Y B,et al.Temporal variability of water footprint for maize production:The case of Beijing from 1978 to 2008[J].Water Resources Management,2013,27(7):2447-2463.
- [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.
- [21] 何奇瑾,周广胜.我国玉米种植区分布的气候适宜性[J].科学通报,2012,57(4):267-275.
- [22] 国家统计局.国家统计局关于2015年粮食产量的公告[R].2015.
- [23] 魏新光,王铁良,刘春成,等.基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J].农业机械学报,2017,48(6):193-202.
- [24] CHAPAGAIN A K,HOESTRA 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.
- [25] 李晶,张运福,班显秀.辽宁玉米作物系数研究[J].辽宁气象,2000(1):18-20.
- [26] 张郁,张峥,苏明涛.基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(7):28-32.
- [27] 李红颖,秦丽杰,王晔旻.长春市玉米生产水足迹时序变化及影响因素研究[J].东北师大学报(自然科学版),2017,49(2):120-126.
- [28] EPA.List of drinking water contaminants:Ground water and drinking water [S].Washington,DC:US Environmental Protection Agency,2005.
- [29] 王兴仁,张福锁,张卫峰.中国农化服务:肥料与施肥手册[M].北京:中国农业出版社,2013.
- [30] 王晔旻.长春市近53年玉米生产水足迹的时空演变[D].长春:东北师范大学,2015.
- [31] MEKONNEN M M,HOEKSTRA A Y.National Water Footprint Accounts:The Green,Blue and Grey Water Footprint of Production and Consumption[M].Netherlands:UNESCO-IHE Institute for Water Education,2011.

[责任编辑 亓国]