

# 吉林省玉米种植水足迹及其效率分析

崔红艳

(白城师范学院旅游与地理科学学院, 吉林 白城 137000)

**摘要:**玉米是吉林省重要的粮食作物,玉米水足迹及其效率分析可以有效指导区域水资源管理,促进绿色农业发展。本文根据CLIMWAT 2.0以及中国气象数据网提供的数据,运用CROPWAT 8.0软件,对2005~2016年吉林省玉米水足迹及其效率进行计算,得出以下结论:(1)吉林省玉米生长过程水足迹整体呈缓慢波动上升趋势,主要影响因素为玉米单产量;(2)玉米水足迹构成中绿水、蓝水和灰水足迹比例分别为55.10%、15.65%和29%;(3)玉米水足迹区域差异较为明显,西部蓝水和灰水足迹比例高达35%和31%左右;(4)玉米水足迹效率数值总体缓慢下降,水资源利用效率不断提高,但提升空间仍然较大。因此,吉林省玉米种植应因地制宜,高度重视水土资源合理开发利用;以科技为支撑,提高玉米单产量;适当降低氮肥用量,提高氮肥利用率;引导玉米种植结构调整,提升综合效益。

**关键词:**玉米水足迹;水足迹效率;绿色农业;吉林省

中图分类号:S513

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2022)01-0132-05

## The Analysis on Maize Water Footprint and Efficiency in Jilin Province

CUI Hongyan

(College of Tourism and Geographical Sciences, Baicheng Normal University, Baicheng 137000, China)

**Abstract:** Maize is an important food crops in Jilin Province. The analysis of maize water footprint and its efficiency can effectively guide regional water resources management and promote the development of green agriculture. Based on the data provided by CLIMWAT 2.0 and China Meteorological Data Network, CROPWAT 8.0 software is used to calculate the water footprint and efficiency of maize in Jilin Province from 2005 to 2016, and the following conclusions are drawn: (1) The water footprint of maize in Jilin Province fluctuated slowly, and the main influencing factor was maize yield per unit. (2) The percentages of green water footprint, blue water footprint and gray water footprint of maize were 55.10%, 15.65% and 29%, respectively. (3) The regional difference of maize water footprint was obvious, and the proportion of blue water footprint and gray water footprint was up to 35% and 31% respectively. (4) The water footprint efficiency of maize decreased slowly on the whole, and the water use efficiency increased continuously, but there was still a large room for improvement. Therefore, Jilin Province corn planting should adjust measures to local conditions, attach great importance to rational development and utilization of water and soil resources. Support by science and technology, increase maize yield per unit. Appropriately reduce nitrogen fertilizer dosage and improve nitrogen fertilizer utilization rate. And we should guide the maize planting structure adjustment, and promote comprehensive benefits in Jilin.

**Key words:** Maize water footprint; The efficiency of water footprint; Green agriculture; Jilin Province

保障我国粮食安全与生态安全仍然是当前最重要的工作。2019年中央一号文件指出:统筹推进山水林田湖草系统治理,推动农业农村绿色发展。

收稿日期:2019-09-20

基金项目:吉林省教育厅“十三五”社会科学研究项目(JJKH20170010SK);吉林省社会科学基金项目(2020B052)

作者简介:崔红艳(1975-),女,教授,硕士,研究方向为区域经济与可持续发展。

水足迹作为一种全面核算人类活动对水资源真实占用的综合指标,为提高区域水资源利用效率提供重要的科学依据,已成为当前国内外水资源管理的前沿研究领域。农业是用水大户,目前约70%的淡水用于农业生产。因此农作物生产水足迹,即农作物生长过程中所消耗的水资源数量,成为农业绿色发展的重要指标。

吉林省玉米单产水平和商品率稳居全国之首,在保障国家粮食安全方面具有举足轻重的地

位。2016年吉林省玉米总产量占全省粮食产量的76.21%,占全国玉米产量的12.9%。因此,准确估算吉林省玉米生产用水量,进行水资源科学管理,提高水土综合效益具有非常重要的意义。

### 1 研究区概况与研究方法

#### 1.1 研究区概况

吉林省地跨东经121°38'~131°19'、北纬40°50'~46°19',位于中国东北地区的中部,面积18.74万平方公里,属温带大陆性季风气候。中部松辽平原地势平坦,土质肥沃,素有“黄金玉米带”和“黑土地之乡”的美誉,是中国重要的商品粮生产基地,素有中国粮仓之称。根据自然条件和社会经济差异,吉林省可分为东部湿润区(通化、白山和延边)、中部半湿润区(长春、吉林、四平、辽源)和西部半干旱区(松原、白城)。

#### 1.2 研究方法

##### 1.2.1 农作物蒸散量

首先,根据联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith模型,利用气象参数计算参考作物蒸散量 $ET_0$ 。然后,利用作物系数 $K_c$ 对 $ET_0$ 进行调整,获得具体农作物蒸散量 $ET_c$ (公式1)。

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \dots\dots\dots (1)$$

##### 1.2.2 农作物生产水足迹

农作物生产水足迹是指单位质量农作物生长过程中所消耗的水资源总量,包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹,也称为农作物总水足迹。

$$WF = WF_{green} + WF_{blue} + WF_{grey} \dots\dots\dots (2)$$

式中,WF为农作物生产水足迹( $m^3/t$ ); $WF_{green}$ 为绿水足迹( $m^3/t$ ); $WF_{blue}$ 为蓝水足迹( $m^3/t$ ); $WF_{grey}$ 为灰水足迹( $m^3/t$ )。

##### 1.2.3 绿水足迹

绿水是指源于降水,未形成径流或未补充地下水,但储存于土壤或暂时储留在土壤和植被表面的水,最终这部分水汽将通过蒸发或植被蒸腾的方式被消耗掉。绿水足迹是作物生长过程中消耗的雨水量,即降水通过下渗作用到达非饱和的土层以供作物生长所需的有效降水量<sup>[1]</sup>。

$$WF_{green} = 10ET_{green}/Y \dots\dots\dots (3)$$

$$ET_{green} \equiv \min(ET_c, P_{eff}) \dots\dots\dots (4)$$

式中, $ET_{green}$ 为绿水蒸散量(mm);Y为作物产量( $t/hm^2$ ); $P_{eff}$ 为作物生长期有效降水量(mm)。

##### 1.2.4 蓝水足迹

地下水与地表水的消耗指标被称为蓝水消耗

的指标,即蓝水足迹。蓝水足迹表征的是在一段特定时间内对可用蓝水量的消耗。在农作物生长过程中,对蓝水需求量的衡量一般采用灌溉用水指标进行分析,蓝水主要来源于河流、湖泊以及地下含水层中的水资源<sup>[1]</sup>。

$$WF_{blue} = 10ET_{blue}/Y \dots\dots\dots (5)$$

$$ET_{blue} \equiv \max(0, ET_c - P_{eff}) \dots\dots\dots (6)$$

式中, $ET_{blue}$ 为蓝水蒸散量(mm)。

##### 1.2.5 灰水足迹

灰水足迹是衡量水污染规模和程度的指标,主要通过将特定的污染物稀释达到安全水质标准所需的水量来体现。具体指在现有的环境水质标准和自然本底浓度基础上,把特定污染物负荷稀释所需要的淡水资源量。目前,在灰水足迹核算时,通常以稀释淋失氮的需水量为代表<sup>[2]</sup>。

$$WF_{grey} = \frac{(\alpha \cdot AR)/(C_{max} - C_{nat})}{Y} \dots\dots\dots (7)$$

式中,AR为化肥施用量( $kg/hm^2$ ); $\alpha$ 为淋溶率; $C_{max}$ 为污染物环境最大容许浓度( $kg/m^3$ ); $C_{nat}$ 为污染物的自然本底浓度( $kg/m^3$ )。

本文选择氮肥施用量的10%作为淋溶率;选取美国环境保护署推荐的10 mg/L氮元素质量浓度作为 $C_{max}$ 。根据相关研究结论,吉林省东部、东中部、中部和西部地区的施氮量分别为170、180、200、230  $kg/hm^2$ 。<sup>[2]</sup>

##### 1.2.6 玉米生长过程水足迹效率

玉米生长过程水足迹效率可选用水足迹与GDP的比值即万元GDP水足迹表示水资源利用效率。其值越大,表示水资源的利用效益越低。反之则表示水资源的利用效益越高<sup>[3-4]</sup>。

$$g = WF_{total}/A\_GDP \dots\dots\dots (8)$$

式中,g为玉米水足迹效率( $m^3/万元$ ); $WF_{total}$ 为玉米水足迹( $m^3$ );A\_GDP为吉林省农业总产值(万元)。

### 1.3 数据来源

计算玉米需水量所需的气象数据来源于CLIMWAT 2.0以及中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。吉林省玉米产量、播种面积和农业总产值等数据来源于《吉林省统计年鉴》(2006~2017)<sup>[5]</sup>。作物生长期有效降水量 $P_{eff}$ 、作物系数 $K_c$ 参考联合国粮农组织提供的CROPWAT 8.0软件中的数据,并结合吉林省各市区玉米生育期实际数据进行修正。吉林省各市区玉米种植集中在4月末、5月初,收获集中在9月下旬到

10月初,具体日期数据来源于中国气象数据网。

## 2 结果与分析

### 2.1 吉林省玉米生长过程水足迹

在对2005~2016年吉林省玉米生长过程水足迹进行核算的过程中,借助联合国粮农组织推荐的CROPWAT 8.0模型来计算玉米生长期蓝、绿水的蒸散发量、需水量、有效降水量,如表1所示<sup>[1]</sup>。

在此基础上,利用公式(1)~(7),分别计算2005~2016年吉林省玉米生长过程水足迹,包括绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹,如图1所示。

表1 基于CROPWAT 8.0作物需求量(CWR)法模拟的蓝绿水蒸散发量

	$ET_0$ (mm/day)	$ET_c$ (mm/dec)	$P_{eff}$ (mm/dec)	$I_{rr,reg}$ (mm/dec)	$ET_{green}$ (mm/dec)	$ET_{blue}$ (mm/dec)
白城	2.95	596.4	283.1	310.5	283.1	313.3
松原	2.64	528.3	305.0	226.4	226.4	223.3
长春	2.42	463.7	378.1	89.7	378.1	85.6
吉林	2.39	464.9	412.4	60.0	412.4	52.5
四平	2.52	454.8	389.0	74.7	389.0	74.7
辽源	2.41	479.4	411.4	76.7	411.4	68.0
白山	2.17	408.9	481.7	0.8	408.9	0
通化	2.21	409.1	434.9	11.2	409.1	0
延边	2.37	414.7	341.8	82.2	341.8	72.9

第一,吉林省玉米生长过程水足迹总体分析显示,绿水足迹最高,占比约为55.10%;其次为灰水足迹约为29%;蓝水足迹较低,约为15.65%。吉林省玉米生长需水中,蓝水消耗量约占20%,绿水消耗量约占80%,玉米生长需水主要来源于绿水。当有效降水不足时,玉米生长过程中还需消耗大量贮存在土壤中的水分以满足玉米生长需要<sup>[6]</sup>。因此,会很大程度上影响水土生态平衡。研究表明,1960~2015年吉林省玉米生长季平均有效降水量为242~374 mm,而平均需水量为452~637 mm。吉林省中西部是有效降水量的低值区,却是需水量的高值区,因而导致吉林省中西部水分亏缺严重,而东部是有效降水量的高值区,需水量的低值区,水分亏缺相对较轻<sup>[7]</sup>。吉林省玉米灰水足迹占比较高,而灰水足迹数值主要取决于氮肥施用量和玉米单产的多少。按照中国工程院东北地区农业发展战略研究项目的研究成果,吉林省农田土壤进入水体环境的氮磷负荷升高比例较大,对东北地区面源污染的影响不容忽视<sup>[8]</sup>。

第二,从变化趋势分析,2005~2016年吉林省玉米绿水足迹、灰水足迹和蓝水足迹均呈缓慢上升趋势。2009年水足迹总量最大,为1 120.28 m<sup>3</sup>/t;其中,绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹也为12年间

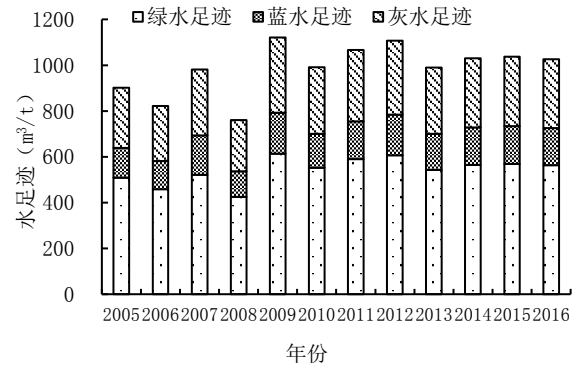


图1 吉林省2005~2016年玉米生长过程水足迹

最大数值,分别为613.19 m<sup>3</sup>/t、179.05 m<sup>3</sup>/t、328.05 m<sup>3</sup>/t。主要原因是2009年玉米单产仅为6.10 t/hm<sup>2</sup>,为15年来最低值;当年降水量较少,仅为530.3 mm。2008年玉米水足迹总量最小,为759.80 m<sup>3</sup>/t;其中,绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹也为12年间最小数值,分别为424.90 m<sup>3</sup>/t、112.47 m<sup>3</sup>/t、222.43 m<sup>3</sup>/t。主要原因是2008年玉米产量丰收,单产较高,为8.83 t/hm<sup>2</sup>;当年降水量较少,为590.1 mm。可以看出,玉米单产是吉林省玉米水足迹的主要影响因素。因此,提高单产是减少吉林省玉米水足迹的重要途径<sup>[9-11]</sup>。

### 2.2 吉林省玉米水足迹区域差异

综合分析不同年份区域差异的基础上,选取吉林省玉米水足迹数值最小年份2008年以及最大年份2009年,做出吉林省玉米水足迹的区域对比图,可以看出区域差异明显(图2)。

(1)玉米绿水足迹的区域差异。吉林东部延边、通化、白山玉米绿水足迹最高,2008年和2009年延边玉米绿水足迹值最高,分别为524.07 m<sup>3</sup>/t和874.75 m<sup>3</sup>/t,主要原因是降水丰富、玉米单产较低;吉林西部的松原玉米绿水足迹最低,2008年和2009年分别为202.74 m<sup>3</sup>/t和329.94 m<sup>3</sup>/t,主要原因是降水有限,同时玉米单产较高。

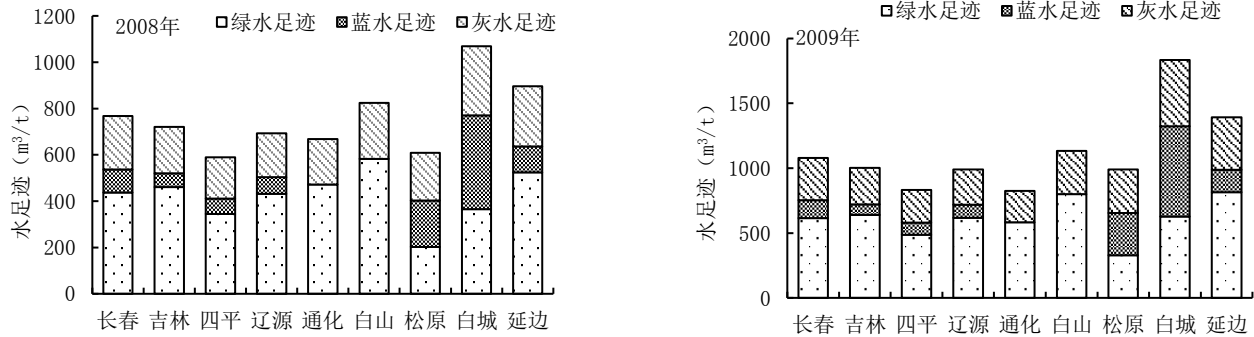


图2 2008、2009年吉林省玉米水足迹区域差异

(2)玉米蓝水足迹的区域差异。吉林东部的通化、白山玉米蓝水足迹为0,说明降水充足;吉林西部的松原和白城玉米蓝水足迹最高,尤其白城是全省最高,且较为突出,2008年和2009年分别为 $405.01\text{ m}^3/\text{t}$ 和 $695.66\text{ m}^3/\text{t}$ ,主要原因是降水量最少、玉米单产较低。

(3)玉米灰水足迹的区域差异。吉林中部的四平玉米灰水足迹最,2008年和2009年分别为 $177.59\text{ m}^3/\text{t}$ 和 $250.82\text{ m}^3/\text{t}$ ,主要原因是化肥施用率较低,且单产较高。吉林西部的松原、白城玉米灰水足迹最高,尤其是白城全省最高,2008年和2009年分别为 $297.32\text{ m}^3/\text{t}$ 和 $510.70\text{ m}^3/\text{t}$ ,主要原因是化肥施用率最高,且单产较低。

(4)玉米水足迹构成的区域差异。吉林东部地区玉米绿水足迹比例最大,蓝水足迹比例最小,2009年玉米绿水、蓝水和灰水足迹比例平均为66.6%、4.2%、29.2%。吉林中部地区2009年玉米绿水、蓝水和灰水足迹比例平均为60.5%、10.6%、28.9%。吉林西部地区玉米绿水足迹最小,蓝水足迹最大,2009年玉米绿水、蓝水和灰水足迹比例平均为33.8%、35.4%和30.8%<sup>[12-13]</sup>。

总体来说,吉林中部地区玉米水足迹最低,吉林西部地区玉米水足迹最高,尤其是蓝水足迹占比较高。吉林西部白城气候干旱,降水量较少,水资源短缺较为严重;农业水资源消耗量很大程度上决定了区域水资源科学合理利用程度。因此,白城必须采取相应措施,提升农业生产水平,降低水资源消耗,减轻农业对有限水资源的压力,实现良性水生态循环,促进区域农业绿色发展。

### 2.3 吉林省玉米水足迹效率

水足迹效率指标可以更好地分析吉林省农业总产值与玉米生长过程水足迹的关系,运用公式(8)计算得出2005~2016年吉林省玉米水足迹效率,如图3所示。

在这12年间,吉林省玉米水足迹效率总体上

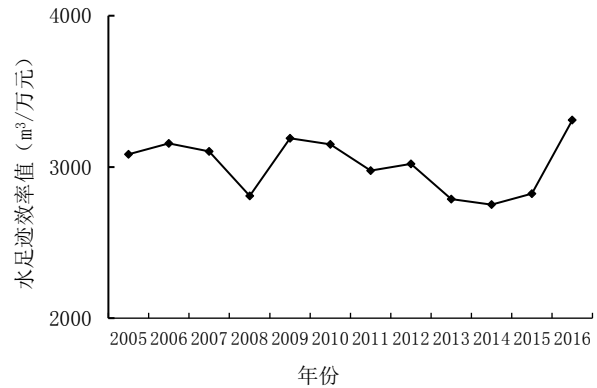


图3 吉林省2005~2016年玉米水足迹效率

为平缓波动状况,呈下降趋势年份较多,仅有2009年和2016年明显上升,说明吉林省水资源利用效率在相对提高。但玉米水足迹效率数值总体偏大,水资源利用效率较低,仍有较大的提升空间。吉林省玉米水足迹效率最小值为2014年的 $2\ 751\text{ m}^3/\text{万元}$ ,该年玉米水足迹值较大,农业总产值最大,玉米水足迹效率最高,说明水资源利用效率最高;最大值为2016年的 $3\ 309\text{ m}^3/\text{万元}$ ,该年农业总产值较低,玉米水足迹效率最低,水资源利用效率较低;12年间平均值为 $3\ 013\text{ m}^3/\text{万元}$ 。其中,2008年玉米水足迹最小年,显示水足迹效率相对较低,仅次于2014年,为 $2\ 809\text{ m}^3/\text{万元}$ 。

## 3 结论和建议

### 3.1 结论

(1)吉林省玉米生长过程水足迹整体呈缓慢波动上升趋势,2009年水足迹最大,为 $1\ 120.28\text{ m}^3/\text{t}$ ;2008年玉米水足迹最小,为 $759.80\text{ m}^3/\text{t}$ 。影响吉林省玉米水足迹的主要因素为玉米单产量。(2)吉林省玉米水足迹构成中以绿水足迹为主,绿水足迹最高,占比约为55.10%,其次为灰水足迹约29%,蓝水足迹较低,约为15.65%。三者皆呈缓慢波动上升趋势。(3)吉林省玉米水足迹区域差异较为明显。东部地区降水量丰富,玉米绿

水足迹最高,蓝水足迹最低,其中通化、白山玉米蓝水足迹为0;而西部地区降水量明显不足,玉米绿水足迹最低,蓝水足迹最高,蓝水足迹占比高达35%左右。另外,西部地区化肥施用量高,玉米灰水足迹占比最高,高达31%左右。(4)吉林省玉米水足迹效率数值总体呈缓慢下降趋势,最小值为2014年的2 751 m<sup>3</sup>/万元,最大值为2016年的3 309 m<sup>3</sup>/万元。表明吉林省水资源利用效率不断提高,但数值相对偏大,仍然有较大提升空间。

### 3.2 建议

(1)吉林省玉米种植应充分考虑不同地区的水土资源条件,合理利用水资源,减轻水土生态压力。吉林西部地区降水较少,属于较干旱地区,水资源短缺严重,玉米生长在有效降水不足时会大量消耗贮存在土壤中的水分。另外,玉米生长需要的蓝水足迹最高,因此需要大力发展节水农业,提升灌溉效率。(2)以科技为支撑,提高玉米单产量。这是减少玉米水足迹、提高水资源利用效率的最主要途径。吉林省黑土区农田长期以来“重用轻养”,水土失衡严重,因此,要注重科学技术支撑,实现玉米生产绿色高效发展,包括改良新品种、发明新技术、增加农业现代化等各种措施<sup>[14]</sup>。相关研究表明,吉林西部通过构建“密植增产-秸秆深还-滴灌施肥”为核心的半干旱区玉米丰产增效绿色技术模式,与常规生产相比可节肥19.1%,节水35.7%~41.7%,增产18.3%<sup>[15]</sup>。(3)适当降低氮肥用量,提高氮肥利用率。吉林省玉米灰水足迹占比较高,化肥施用量较大。相关实验研究表明,在吉林黑土区适当降低氮肥用量,可以有效提高氮肥利用效率,显著减少土层中无机氮的积累<sup>[16]</sup>。也可以通过增施有机肥,改良土壤,提高土壤肥力等措施,实现吉林省乃至东北地区的粮食安全和生态安全。(4)引导玉米种植结构调整,提升综合效益。吉林省的玉米优势主要体现在中部核心产区,西部和东部优势相对不足<sup>[17-18]</sup>。今后应进一步充分发挥市场机制的决定作用与政府政策的宏观调控作用,引导玉米种植结构调整,促进玉米综合效益提升。

### 参考文献:

- [1] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, 等. 水足迹评价手册[M]. 刘俊国, 曾昭, 赵乾斌, 等译. 北京: 科学出版社, 2012: 101-106.
- [2] 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): 32-38.
- [3] 蔡建辉, 颜七笙, 王彦芳. 甘肃省马铃薯种植水足迹及效率评价—基于GM(1,1)模型的实证预测研究[J]. 农机化研究, 2018(3): 1-7.
- [4] 邓晓军, 韩龙飞, 杨明楠, 等. 城市水足迹对比分析—以上海和重庆为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014(2): 189-196.
- [5] 吉林省统计局. 吉林统计年鉴(2006-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社.
- [6] 秦丽杰, 靳英华, 段佩利. 吉林省西部玉米生产水足迹研究[J]. 地理研究, 2012(8): 1021-1025.
- [7] 邱美娟, 郭春明, 王冬妮, 等. 1960~2015年吉林省玉米生长季有效降水和水分亏缺指数的变化特征[J]. 干旱区农业研究, 2018, 36(1): 238-243.
- [8] 曹宁, 曲东, 陈新平, 等. 东北地区农田土壤氮、磷平衡及其对面源污染的贡献分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(7): 127-133.
- [9] 苏明涛, 张郁, 靳英. 吉林省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 26-30.
- [10] 段佩利, 秦丽杰. 吉林省玉米生长过程水足迹研究[J]. 资源开发与市场, 2014, 30(7): 810-820.
- [11] 沈淑平. 吉林省农作物虚拟水地域分异研究[D]. 长春: 东北师范大学.
- [12] 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]. 东北师范大学学报(自然科学版) 2017, 49(2): 120-126.
- [13] 段佩利, 秦丽杰. 基于ESDA的吉林省玉米生产水足迹空间分异[J]. 东北师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(2): 120-126.
- [14] 闫伟平, 边少锋, 张丽华, 等. 半干旱区抗旱丰产玉米品种的评价及筛选[J]. 东北农业科学, 2017, 42(3): 1-5.
- [15] 王立春, 王永军, 边少锋, 等. 吉林省玉米高产高效绿色发展的理论与实践[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 383-392.
- [16] 陈治嘉, 隋标, 赵兴敏, 等. 吉林省黑土区玉米氮肥减施效果研究[J]. 玉米科学, 2018, 26(6): 139-145.
- [17] 邱美娟, 王冬妮, 王美玉, 等. 近35年吉林省玉米气候适宜度及其变化[J]. 东北农业科学, 2019, 44(1): 70-78.
- [18] 王冬妮, 曲思邈, 姚渝丽, 等. 吉林省主要农区气候变化特征及其对玉米农田土壤湿度的影响[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(6): 42-46.

(责任编辑:王丝语)