

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024

# 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析

付强 刘焯 李天霄 崔嵩 刘东 成琨

(东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 运用水足迹理论, 计算黑龙江省各地区 2007—2012 年的粮食水足迹, 分析其粮食作物用水情况。结果表明: 黑龙江省粮食生产用水量巨大, 粮食作物灌溉用水量存在逐年增加的趋势, 用于粮食生产的灌溉用水量占黑龙江省水资源消耗量的绝大多数。黑龙江省各地区的粮食水足迹在空间分布上存在显著差异, 大体上呈东北部高, 西南部低的趋势; 粮食蓝水足迹明显低于绿水足迹, 粮食生产对绿水的依赖度较高。黑龙江省粮食水足迹整体上小于单产需水量, 部分地区粮食作物生产过程中缺水现象严重。空间自相关分析显示, 黑龙江省 2007—2012 年的粮食绿水足迹和蓝水足迹均存在相似值之间的空间聚集性。黑龙江省农垦总局的粮食产量较高, 但粮食蓝水足迹比例较高, 粮食生产比较依赖灌溉水资源, 水资源消耗量较大。由于 2009 年粮食作物单位面积产量显著降低, 使得 2007—2012 年被分成 2007—2008 年和 2009—2012 年 2 个不同的时期, 粮食水足迹在 2 个时期均存在逐年降低的趋势, 粮食生产的用水效率逐年升高。

**关键词:** 粮食; 水足迹; 水资源; 空间分布; 灌溉; 黑龙江省

**中图分类号:** S273; TV213.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0184-09

## Analysis of Water Utilization in Grain Production from Water Footprint Perspective in Heilongjiang Province

FU Qiang LIU Ye LI Tianxiao CUI Song LIU Dong CHENG Kun

(School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In order to provide decision-making references for the allocation of available water resources in Heilongjiang Province, water footprint theory was used to calculate the grain water footprint during 2007—2012 in different areas of Heilongjiang Province, and the water utilization of food crops was analyzed in Heilongjiang Province during 2007—2012. The results showed that water consumption of grain production was huge, which was increased instantly over the years in Heilongjiang Province. Grain water footprint was less than the water requirement for per unit yield in different areas of Heilongjiang Province, and water shortage was serious in the process of grain crop production in some areas. Through spatial autocorrelation analysis, it showed that the grain green water footprint and the grain blue water footprint of Heilongjiang Province in 2007—2012 both had spatial clustering between similar values. The grain yield of Heilongjiang Farms & Land Reclamation Administration was high, but the ratio of grain blue water footprint was also high, and the grain production was more dependent on irrigation water resources, the water consumption was great. There were significant differences in the spatial distribution of grain water footprint in different areas of Heilongjiang Province, which was generally high in the northeast and low in the southwest. In the six years, the average grain water footprints were 1.15 m<sup>3</sup>/kg, 1.01 m<sup>3</sup>/kg, 1.32 m<sup>3</sup>/kg, 1.04 m<sup>3</sup>/kg, 0.91 m<sup>3</sup>/kg and 0.83 m<sup>3</sup>/kg, respectively. The blue water footprint of grain was significantly lower than that of the green water footprint in Heilongjiang Province, and grain production was highly dependent on the green water resources. In the six years, the average grain blue water footprint ratios were 33.91%, 31.68%, 25.76%, 29.81%, 32.97% and 33.73%, respectively. Due to the significant reduction of grain yield per unit area in 2009, the years of 2007—2012 was divided into two distinct periods of 2007—2008 and 2009—2012. The grain water footprint had

收稿日期: 2016-10-18 修回日期: 2016-12-03

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51479032、51279031、51609039)、黑龙江省高校长江学者后备支持计划项目、黑龙江省水利科技项目(201318、201503)和中国博士后科学基金项目(2016M601410)

**作者简介:** 付强(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析等研究, E-mail: fuqiang0629@126.com

the trend of decreasing year by year during the two periods, and the water use efficiency of grain production in the two periods were increased year by year. From the perspective of grain water footprint, the situation of water use in grain production in different areas of Heilongjiang Province was discussed. It can effectively reflect the grain crop production and water resources utilization efficiency, and provide technical support for the water management in grain production in Heilongjiang Province.

**Key words:** grain; water footprint; water resources; spatial distribution; irrigation; Heilongjiang Province

## 引言

水足迹是一个国家、一个地区或一个人在一定时期内消费的产品和服务所需要的淡水资源的数量<sup>[1]</sup>。它也可以表示生产某一产品或提供某种服务所消耗的淡水资源量<sup>[2]</sup>,它是虚拟水理论的继承和发展<sup>[3]</sup>。粮食作为一种水资源密集型产品,其水足迹能够有效地反映某一区域内粮食生产过程中的水资源利用情况。对于粮食水足迹的研究既有灌区尺度研究<sup>[4]</sup>,也有以全国各省区为研究对象的全国尺度研究<sup>[5]</sup>,还有全球尺度研究<sup>[6]</sup>。

黑龙江省作为粮食大省,当前对其粮食生产的研究较多,主要是基于全省尺度的粮食产量研究<sup>[7-8]</sup>和全省尺度的粮食生产用水研究<sup>[9]</sup>。与以用水量为主导的水资源评价和水资源利用分析视角不同,王斌<sup>[10]</sup>利用产量和水分利用效率估算粮食总体耗水量的方法分析了黑龙江省2002—2011年的粮食耗水量,但同样只能从整体上分析黑龙江省粮食生产用水状况,并没有对其在黑龙江省各地区的空间分布进行分析。操信春等<sup>[5]</sup>采用水足迹对全国各省的粮食生产用水进行了分析和评价,分析了各省粮食生产用水的空间分布差异。而在黑龙江省省区尺度,利用水足迹理论分析粮食生产用水的研究并不多,尚不能满足黑龙江省粮食生产用水管理的需要。

本文分析黑龙江省的粮食生产用水概况,并运用水足迹理论,分别对黑龙江省各地区2007—2012年的粮食蓝水足迹和绿水足迹进行计算,分析黑龙江省粮食水足迹的时间变化规律和空间分布特征,在水足迹的视角下分析粮食作物生产过程中的水资源利用情况,比较粮食水足迹与单产需水量的差异,为黑龙江省各地区粮食生产的用水管理提供理论依据,为黑龙江省可用水资源的分配提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

黑龙江省耕地面积占全国耕地面积的1/9,粮食产量排在全国第2位,粮食商品量占全国的1/6,是我国最大的商品粮生产基地<sup>[11-12]</sup>。粮食作物生

产用水作为黑龙江省主要的水资源消耗方式之一,严重制约着黑龙江省的可用水资源分配。黑龙江省粮食作物生产用水的高效利用,关系到国家的粮食安全、水资源安全以及生态安全<sup>[13]</sup>。因此,对于黑龙江省粮食生产中水资源利用情况的研究具有非常巨大的现实意义。黑龙江省除了下辖13个地级市外,还存在着农垦总局这一特殊的行政管理体制。黑龙江省农垦总局下辖9个管理局、113个农牧场,分布在全省12个市,遍布小兴安岭山麓、松嫩平原和三江平原地区。

### 1.2 数据来源

文中的粮食是谷物、豆类和薯类等的统称<sup>[14]</sup>。黑龙江省各地区降水量数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。农业用水数据来自《黑龙江省水利建设统计年鉴》<sup>[15]</sup>。粮食产量、播种面积等农业数据来自《黑龙江省统计年鉴》<sup>[16]</sup>。

### 1.3 计算方法

#### 1.3.1 粮食水足迹

研究区域为黑龙江省的13个地级市行政区,根据粮食生产过程中的实际用水量来计算粮食水足迹。为了避免不同年份间的差异对研究结果的影响,同时分析粮食水足迹的时间变化规律,分别计算2007—2012年黑龙江省各地区的粮食水足迹。粮食水足迹包括粮食蓝水足迹和粮食绿水足迹,其计算公式<sup>[5]</sup>分别为

$$w_f = w_{fb} + w_{fg} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} w_{fb} = 10 \frac{I_g}{y} \\ w_{fg} = 10 \frac{P_e}{y} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $w_f$ ——单位产量的粮食水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$   
 $w_{fb}$ ——单位产量的粮食蓝水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$   
 $w_{fg}$ ——单位产量的粮食绿水足迹,  $\text{m}^3/\text{kg}$   
 $I_g$ ——粮食作物生育期内单位面积的毛灌溉水量,  $\text{mm}$

$P_e$ ——粮食作物生育期内的有效降水量,  $\text{mm}$

$y$ ——单位面积的粮食作物产量,  $\text{kg}/\text{hm}^2$

粮食蓝水足迹比例计算式为

$$r_b = \frac{w_{jb}}{w_f} \times 100\% \quad (3)$$

粮食作物毛灌溉总水量计算式为

$$W_f = W_a \frac{\sum_{i=1}^n S_{fi} m_{fi}}{\sum_{j=1}^l S_{aj} m_{aj}} \quad (4)$$

式中  $W_f$ ——粮食作物总用水量,  $m^3$   
 $W_a$ ——农作物总用水量,  $m^3$   
 $S_{fi}$ ——第  $i$  种粮食作物种植面积,  $hm^2$   
 $S_{aj}$ ——第  $j$  种农作物种植面积,  $hm^2$   
 $m_{fi}$ ——第  $i$  种粮食作物灌溉定额,  $m^3/hm^2$   
 $m_{aj}$ ——第  $j$  种农作物灌溉定额,  $m^3/hm^2$   
 $n$ ——粮食作物种类数  
 $l$ ——农作物种类数

黑龙江省 2007—2012 年 6 年间, 粮食作物种植面积均占农作物种植面积的 90% 以上, 虽然各粮食作物和非粮食作物的灌溉定额差异较大, 但非粮食作物的种植面积远小于粮食作物种植面积, 因此将粮食作物和非粮食作物的灌溉定额假设相同, 其计算不会产生较大的误差<sup>[17]</sup>。

黑龙江省粮食作物的生育期主要分布在 5—9 月份<sup>[18]</sup>, 在计算粮食绿水足迹时, 生育期内有效降水量取 5—9 月份的有效降水量之和。

有效降水量的计算采用美国农业部土壤保持局推荐的方法<sup>[13,19]</sup>, 以旬为步长, 计算式为

$$P_e = \sum_{i=1}^k P_{ei} \quad (5)$$

$$\text{其中 } P_{ei} = \begin{cases} P_i(4.17 - 0.02P_i)/4.17 & (P_i < 83) \\ 41.7 + 0.1P_i & (P_i \geq 83) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $P_{ei}$ ——粮食作物生育期内第  $i$  旬的有效降水量,  $mm$

$P_i$ ——粮食作物生育期内第  $i$  旬降水量,  $mm$

$k$ ——粮食作物生育期内总旬数

### 1.3.2 空间自相关性分析的全局 Moran's $I$

全局自相关是反映全部研究对象间的相关性, Moran's  $I$  是一个常用的度量全局空间自相关的指标<sup>[20]</sup>。Moran's  $I$  反映空间邻接或空间邻近的区域单元属性值的相似程度, 范围在  $-1 \sim 1$  之间, 1 表示空间数据之间存在强烈的正自相关,  $-1$  表示空间数据之间存在强烈的负自相关, 0 则表示空间数据是随机模式, 独立分布, 不存在相关性<sup>[21]</sup>。Moran's  $I$  的计算公式<sup>[22]</sup>为

$$I = \frac{1}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t W_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x})^2 / t} \quad (7)$$

式中  $W_{ij}$ ——空间权重矩阵元素, 通过空间邻接方式和空间距离来确定

$x_i$ ——区域单元  $i$  的属性值

$\bar{x}$ ——各区域单元属性值的平均数

$t$ ——区域单元数

常用标准化统计量  $Z$  来检验区域是否存在空间自相关关系,  $Z$  的计算公式为

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (8)$$

式中  $E(I)$ ——Moran's  $I$  的期望值

$\text{Var}(I)$ ——Moran's  $I$  的方差

当  $Z$  值为正时, 表明存在正的空间自相关, 也就是说相似的观测值趋于空间集聚; 当  $Z$  值为负时, 表明存在负的空间自相关, 相似的观测值趋于分散分布; 当  $Z$  值为 0 时, 观测值呈现独立随机分布。

### 1.3.3 粮食作物单产需水量

各地区的粮食作物单产需水量计算式<sup>[23]</sup>为

$$w_r = \frac{\sum_{i=1}^n w_{ri} S_{fi}}{\sum_{i=1}^n S_{fi}} \quad (9)$$

其中

$$w_{ri} = \frac{W_{ri}}{y_i} \quad (10)$$

式中  $w_r$ ——主要粮食作物加权平均得到的单产需水量,  $m^3/kg$

$w_{ri}$ ——第  $i$  种粮食作物单产需水量,  $m^3/kg$

$W_{ri}$ ——第  $i$  种粮食作物单位面积需水量, 可看作是粮食作物生育期的累积蒸发蒸腾总量, 可由彭曼公式计算得到<sup>[24]</sup>,  $m^3/hm^2$

$y_i$ ——第  $i$  种粮食作物单位面积产量,  $kg/hm^2$

## 2 结果与分析

### 2.1 黑龙江省粮食生产及用水分析

2007—2012 年黑龙江省各地区粮食生产及用水指标分布情况如图 1 所示。空间上, 黑龙江省各地区粮食作物种植面积分布差异较大(图 1a), 农垦总局、齐齐哈尔市、哈尔滨市、绥化市和佳木斯市等地区的粮食作物种植面积较大; 而大兴安岭地区、七台河市、鹤岗市和伊春市等地区的粮食作物种植面积较小。黑龙江省各地区粮食作物总产量的分布规律(图 1b)和粮食作物种植面积分布规律基本一致。

黑龙江省各地区粮食作物灌溉用水量分布差异也较大(图 1c), 农垦总局最大, 占全省粮食作物灌溉用水量的 30.53%, 哈尔滨市、佳木斯市、绥化市

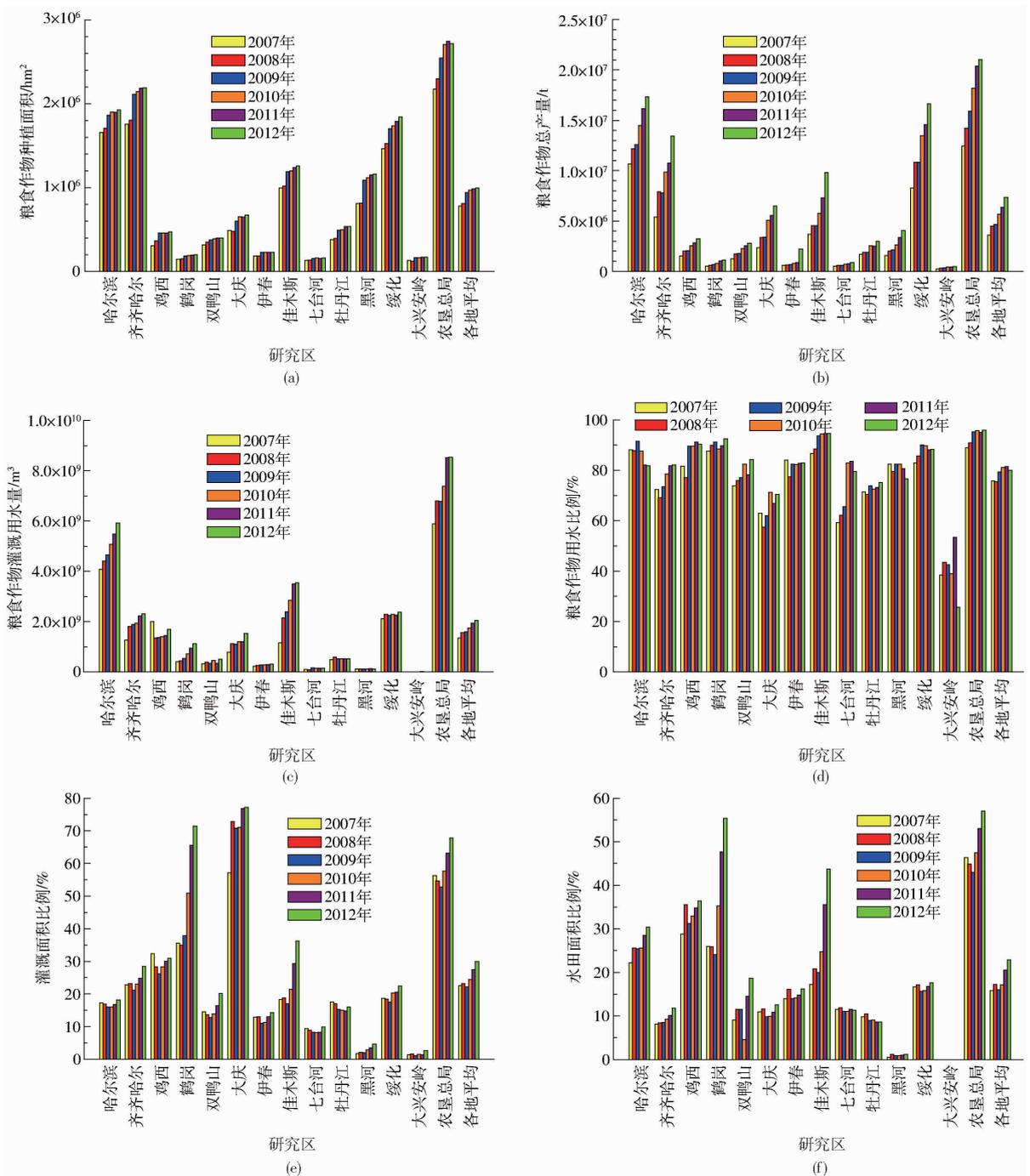


图1 黑龙江省各地区粮食生产及用水指标分布

Fig. 1 Distributions of grain production and water utilization in different areas of Heilongjiang Province

和齐齐哈尔市等地区也均较大;而大兴安岭地区、黑河市和七台河市等地区均较小。黑龙江省各地区粮食作物用水比例分布差异不明显(图1d),黑龙江省农垦总局粮食作物用水比例最高;大兴安岭地区最低;由于石油工业存在着较大的耗水量,大庆市也明显低于全省平均值。

黑龙江省各地区的灌溉面积比例的分布差异显著(图1e),其中,大庆市最高,农垦总局也较高;大兴安岭地区、黑河市最低;而鹤岗市、佳木斯市6年间存在明显的增加趋势。黑龙江省各地区的水田面积比例的分布差异也较为显著(图1f),其中,农垦

总局最高,鹤岗市、鸡西市、佳木斯市、哈尔滨市均较高;大兴安岭地区没有水田种植,黑河市的水田种植面积极低。

黑龙江省2007—2012年粮食作物生产及用水总体概况如表1所示。时间上,2009年相比2008年粮食播种面积呈现显著增加的趋势,而其他年份则呈平稳增加的趋势。黑龙江省灌溉面积比例6年间呈上升趋势,仅2009年呈下降趋势,这主要是由于2009年粮食播种面积显著增加,而灌溉面积没有明显增加,导致灌溉面积比例在2009年呈现一个较大的下降趋势;同时2009年也是丰水年,降水量较

大,对灌溉的需求量较小。黑龙江省水田面积比例6年间同样呈现平稳增加趋势。黑龙江省粮食作物用水比例6年间变化幅度很小,6年平均值为86.27%。通过粮食作物用水比例可以看出,黑龙江省作为一个农业大省,粮食作物消耗的灌溉水资源量占黑龙江省水资源消耗的绝大多数,较高的粮食作物用水比例严重制约着黑龙江省除了农业以外其他产业的发展,阻碍了黑龙江省经济的良性发展。在2007—2012年的6年间,黑龙江省

粮食作物的播种面积逐年增长,粮食作物总产量也稳步上升,同时灌溉面积比例大体上也呈逐年增加的趋势,粮食生产消耗的灌溉水量也随之逐年增加,导致黑龙江省的水资源压力逐年增加。而粮食作物灌溉水资源投入的增加对于粮食作物生产过程中灌溉水资源的利用效率具有一定的影响,这种影响关系到黑龙江省可用水资源分配的决策,这就需要从粮食水足迹的角度来分析水资源的利用效率。

表1 黑龙江省粮食作物生产及用水总体概况

Tab.1 General situation of grain crop production and water utilization in Heilongjiang Province

年份	水文年	粮食作物播种面积/hm <sup>2</sup>	粮食作物总产量/t	灌溉用水量/m <sup>3</sup>	粮食作物用水比例/%	灌溉面积比例/%	水田面积比例/%
2007	枯水年	1.082 × 10 <sup>7</sup>	3.966 × 10 <sup>7</sup>	1.949 × 10 <sup>10</sup>	85.04	27.11	22.20
2008	偏枯水年	1.099 × 10 <sup>7</sup>	4.225 × 10 <sup>7</sup>	2.191 × 10 <sup>10</sup>	83.74	28.27	25.58
2009	丰水年	1.313 × 10 <sup>7</sup>	4.353 × 10 <sup>7</sup>	2.239 × 10 <sup>10</sup>	87.03	25.81	25.44
2010	偏丰水年	1.355 × 10 <sup>7</sup>	5.012 × 10 <sup>7</sup>	2.441 × 10 <sup>10</sup>	87.93	28.48	25.60
2011	偏枯水年	1.376 × 10 <sup>7</sup>	5.571 × 10 <sup>7</sup>	2.699 × 10 <sup>10</sup>	86.79	31.37	28.50
2012	偏丰水年	1.394 × 10 <sup>7</sup>	5.761 × 10 <sup>7</sup>	2.862 × 10 <sup>10</sup>	87.09	34.14	30.41

## 2.2 粮食水足迹分析

### 2.2.1 空间分析

运用水足迹理论,分别计算黑龙江省各地区的粮食蓝水足迹和绿水足迹,并计算黑龙江省各地区

的粮食水足迹和蓝水比例,分析黑龙江省粮食作物灌溉过程中灌溉水资源和降水资源的利用情况。计算得到黑龙江省13个地区2007—2012年的粮食水足迹空间分布状况如图2所示。

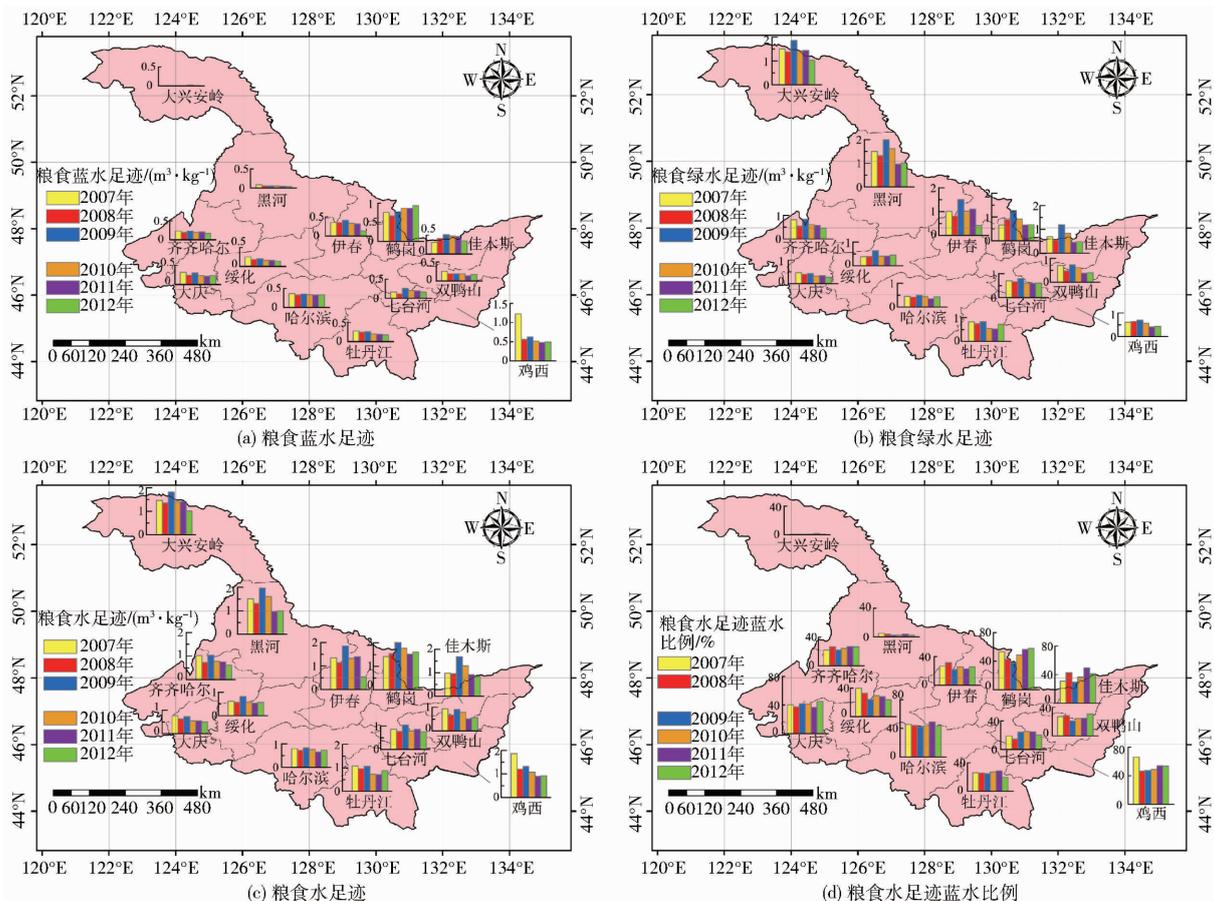


图2 黑龙江省各地区粮食水足迹分布

Fig.2 Distributions of grain water footprint in different areas of Heilongjiang Province

粮食蓝水足迹反映了粮食生产过程中消耗的灌溉水资源,在灌溉水比例一定的情况下,粮食蓝水足迹越低,灌溉水资源的利用效率越高。空间上,黑龙江省各地区粮食蓝水足迹的分布差异显著(图2a),大体上呈北部低、南部高、东部高、西部低的趋势。其中,鹤岗市最高,最高值为全省平均值的3.57倍,鸡西市、佳木斯市、哈尔滨市均较高;大兴安岭地区最低,最低值仅为全省平均值的2%,其次为黑河市;黑龙江省农垦总局6年的粮食蓝水足迹均高于全省平均水平。

粮食绿水足迹反映了粮食生产过程中降水资源的利用情况,黑龙江省各地区粮食绿水足迹的分布具有一定的差异性(图2b),大体上呈北部高、南部低、东部高、西部低的趋势。其中,大兴安岭地区最高,最高值为全省平均值的2.33倍,其次为黑河市;大庆市最低,最低值仅为全省平均值的44%,哈尔滨市、绥化市、鸡西市、双鸭山市均较低;黑龙江省农垦总局6年的粮食绿水足迹含量均低于全省平均水平。

空间上,黑龙江省各地区的粮食水足迹的分布差异显著(图2c),全省大体上呈北部高、南部低、东部高、西部低的趋势。其中,鹤岗市的粮食水足迹最高,最高值为全省平均值的1.99倍,大兴安岭地区、黑河市均较高;绥化市最低,最低值仅为全省平均值的54%,大庆市也较低;黑龙江省农垦总局6年的粮食水足迹接近全省平均水平。

蓝、绿水足迹不足以表示粮食生产用水的组成状况,而蓝水比例可以反映不同区域水足迹的构成存在差异。黑龙江省各地区的粮食水足迹蓝水比例的分布差异显著(图2d),大体上呈北部低、南部高、东部高、西部低的趋势。绝大多数地区6年平均蓝水比例均在50%以下,黑龙江省的灌溉系统与中国南方省区相比较为不发达,粮食生产比较依赖降水资源。蓝水比例略高于50%的地区仅有三江平原的鸡西市和鹤岗市,这主要是由于水田面积比例较高,而水稻生产的耗水量明显大于其他粮食作物<sup>[25]</sup>,因此应适当减少水田面积或采用先进的节水灌溉技术,降低粮食灌溉水引用量,缓解该地区的水资源压力。而同处于三江平原的佳木斯市、七台河市、双鸭山市等地区的蓝水比例相对较低。主要处于松嫩平原的哈尔滨市、大庆市、齐齐哈尔市、绥化市等地区的粮食水足迹均较低,蓝水比例处于全省中等水平,灌溉水和降水的利用效率均较高,结合这些地区较高的粮食作物单产水平,较为适合进行粮食生产。蓝水比例最低的大兴安岭地区和黑河市均不足5%,粮食生产用水几乎完全依赖于降水资源。

且两地的粮食单产不高,不适合发展灌溉农业生产,两地应控制本地区水田的面积,以达到水资源可持续发展的需要;同时通过适当的用水策略,缓解可用水资源短缺的情况,促进区域经济发展。牡丹江市和伊春市的粮食绿水足迹均处于中等水平,而粮食蓝水足迹较低,蓝水比例较低。农垦总局的蓝水比例高于全省平均水平,在全省属于较高的水平。由于耕地规模大、现代化程度高、综合生产能力强,黑龙江省农垦总局仅用全省19.94%的粮食作物种植面积生产出全省35.40%的粮食作物产量,粮食作物生产能力较强。但农垦总局的粮食作物生产比较依赖灌溉水资源,灌溉水资源的消耗量较大,占全省粮食灌溉用水量的30.53%。这势必会增加周边地区的水资源压力,不利于周边地区的发展。

### 2.2.2 空间自相关性分析

对2007—2012年黑龙江省各地区的粮食蓝水足迹和绿水足迹进行空间自相关分析,得到各年粮食水足迹的Moran's  $I$ 值如表2所示。黑龙江省2007—2012年6年间的绿水足迹空间分布存在着显著的正的空间自相关性,即黑龙江省各地区粮食绿水足迹空间分布并非表现出完全的随机性,而是表现出相似值之间的空间集聚,粮食绿水足迹高的地区相对地趋于和粮食绿水足迹高的地区相邻,粮食绿水足迹低的地区相对地趋于和粮食绿水足迹低的地区相邻。这主要是由于粮食绿水足迹主要受降水量的影响,而降水量在地理位置相邻的地区空间上呈相似集聚<sup>[26]</sup>。2009—2011年黑龙江省的蓝水足迹空间分布呈现为显著的、正的空间自相关;而2008年和2012年的蓝水足迹空间分布呈现为不显著的、正的空间自相关性,只有2007年的蓝水足迹空间分布表现为不显著的负的空间自相关性,且Moran's  $I$ 值只有-0.020。6年间蓝水足迹的空间分布整体上也呈现为正的空间自相关性,表现为相似值之间的空间集聚,粮食蓝水足迹高的地区相对地趋于和粮食蓝水足迹高的地区相邻,粮食蓝水足迹低的地区相对地趋于和粮食蓝水足迹低的地区相邻。这主要是由于黑龙江省各相邻地区的区域灌溉特征、粮食作物生产管理方式和粮食生产投入状况等社会经济条件在地理空间上呈现出一定的相似性<sup>[5]</sup>。黑龙江省各地区的蓝水足迹虽然差异明显,但在相邻区域具有一定的相似性,黑龙江省各地区应根据自身实际情况,借鉴其相邻地区的粮食作物种植策略和灌溉管理方式经验,因地制宜地发展符合地区特点的粮食生产方式。

### 2.2.3 时间分析

黑龙江省各地区2007—2012年粮食水足迹的

表2 黑龙江省粮食水足迹 Moran's I 及其统计参数值

Tab. 2 Values of Moran's I and its statistical parameters of grain water footprint of Heilongjiang Province

参数	粮食蓝水足迹						粮食绿水足迹					
	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
<i>I</i>	-0.020	0.234	0.285	0.267	0.238	0.073	0.462	0.480	0.526	0.525	0.358	0.369
<i>Z</i>	0.439	1.771	2.062	2.155	2.029	1.096	3.124	3.215	3.333	3.465	2.952	2.541
<i>p</i>	0.660	0.766	0.039	0.031	0.042	0.273	0.002	0.001	0.001	0.001	0.010	0.011

注:*p*为假设概率。

全省平均值如表3所示。2007—2012年黑龙江省粮食蓝水足迹整体上呈现逐年下降的趋势。粮食蓝水足迹在2009年呈现出异常的上升趋势,这主要是由于虽然2009年相比2008年粮食播种面积激增,但是2009年黑龙江省农业作物生产经历了春旱、夏涝、伏旱、寡照和低温等多重自然灾害<sup>[27]</sup>,使得粮食作物的单位面积产量显著降低,最终导致2009年的粮食蓝水足迹异常增多,同时也使得2007—2012年被分成2007—2008年和2009—2012年2个不同的时期。

表3 黑龙江省各地区粮食水足迹平均值

Tab. 3 Average grain water footprint in different areas of Heilongjiang Province

年份	粮食蓝水 足迹/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	粮食绿水 足迹/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	粮食水 足迹/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	粮食蓝水 足迹 比例/%
2007	0.39	0.76	1.15	33.91
2008	0.32	0.69	1.01	31.68
2009	0.34	0.98	1.32	25.76
2010	0.31	0.73	1.04	29.81
2011	0.30	0.61	0.91	32.97
2012	0.28	0.55	0.83	33.73

黑龙江省的粮食绿水足迹在2007—2008年和2009—2012年2个不同的时期分别呈逐年下降趋势,而在2009年有显著的增加。2009年粮食作物单位面积产量的显著降低同样也影响到了2009年的粮食绿水足迹,导致2009年粮食绿水足迹增多;另一方面,粮食绿水足迹主要来源于作物生育期的有效降水量,由于2009年是一个典型的丰水年,降水量异常丰富也是导致2009年粮食绿水足迹较2008年增多较多的一个主要原因。2007—2012年黑龙江省各地区粮食作物生育期(5—9月份)平均降水量分别为271.66、296.16、355.74、324.62、300.33、338.50 mm。2008年的生育期平均降水量高于2007年,2008年的粮食绿水足迹却较2007年低;同样2012年的降水量高于2010年和2011年,粮食绿水足迹在2009—2012年却呈逐年下降的趋势。

黑龙江省粮食水足迹在2007—2008年呈现减

小的趋势,2009—2012年的粮食水足迹同样呈现逐年减小的趋势,而2009年的粮食水足迹由于蓝水足迹和绿水足迹均异常增多而较2008年呈增加趋势。在2007—2008年和2009—2012年2个时期内,粮食作物灌溉用水量的逐年增加虽然消耗了更多的水资源,但同时也生产了更多的粮食,且生产单位质量的粮食消耗的水资源量减少,获得的粮食作物增产的增益高于水资源消耗的增加。节约水资源并不仅是要节约水资源的用量,更要提高水资源的利用效率,而粮食水足迹能够有效地反映水资源的利用效率。

黑龙江省2007—2012年粮食蓝水足迹比例变化呈平稳趋势,6年的均值为31.31%,说明黑龙江省粮食生产用水结构6年间基本保持不变。灌溉水量虽然逐年增加,并没有明显地影响到粮食作物的生产用水结构。仅2009年由于生育期降水量充沛,粮食蓝水足迹比例相比其他年份较低。

#### 2.2.4 粮食作物水足迹与单产需水量比较

2012年黑龙江省各地区粮食作物的单产需水量见图3。2012年黑龙江省粮食作物水足迹整体上小于单产需水量,粮食作物生产过程中实际投入的水资源量不足,存在着一定的缺水现象<sup>[28]</sup>。其中,鹤岗市的粮食水足迹大于单产需水量较多,哈尔滨市、鸡西市、绥化市、农垦总局粮食水足迹略大于单产需水量;其他9个地区粮食水足迹均不同程度地小于单产需水量,其中伊春市缺水程度最大,粮食水

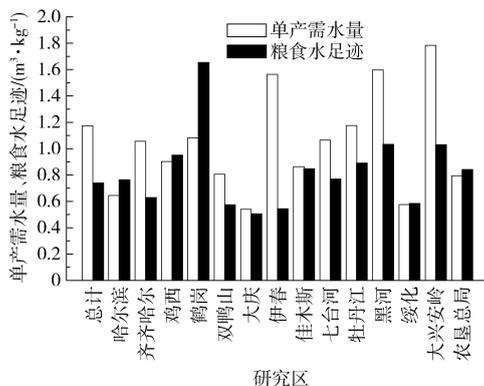


图3 黑龙江省各地区的单产需水量与粮食水足迹  
Fig. 3 Water requirement per unit yield and grain water footprint in different areas of Heilongjiang Province

足迹不到单产需水量的 1/2。这一结果显示,虽然黑龙江省水资源量相对比较充沛,但是在部分地区的粮食作物生产过程中仍存在较为严重的缺水现象,水资源的高效利用应该被充分重视。水资源短缺严重的地区可采取以下措施降低粮食作物生产中水资源的消耗量,提高水资源的利用效率:改善粮食作物种植结构减少作物需水量;提高渠道衬砌率减少灌溉水资源的渗漏损失;修建蓄水建筑物存蓄未被作物直接利用的降水资源。

### 3 结论

(1)黑龙江省粮食作物的播种面积逐年增长,粮食生产消耗的灌溉水量也逐年增加,粮食作物用水比例巨大,严重制约着黑龙江省除农业以外其他产业的发展。

(2)黑龙江省各地区的粮食水足迹在空间分布上存在显著差异,大体上呈东北部高,西南部低的趋势。黑龙江省的粮食蓝水足迹明显低于绿水足迹,绿水资源是粮食作物生产过程中消耗的最主要的水

资源类型。2007—2012年黑龙江省各地区绿水足迹和蓝水足迹的空间分布整体上都呈现为相似值之间的空间集聚,说明相邻地区间粮食作物生产的社会经济条件具有一定的相似性,值得互相交流借鉴粮食作物种植和节水经验。

(3)由于2009年黑龙江省粮食作物单位面积产量的显著降低,使得2007—2012年被分成2007—2008年和2009—2012年2个不同的时期。粮食水足迹在2个时期均存在逐年降低的趋势,虽然黑龙江省粮食作物的灌溉用水量逐年增加,粮食生产的用水效率却得到了提升。

(4)黑龙江省农垦总局由于粮食生产技术先进,仅用较少的种植面积生产出较多的粮食作物,但其粮食蓝水足迹比例较高,粮食生产比较依赖灌溉水资源,水资源消耗量较大。

(5)黑龙江省粮食作物水足迹整体上小于单产需水量,部分地区粮食作物生产过程中存在较为严重的缺水现象。黑龙江省水资源空间分布不均,各地区水资源情况差异较大。

### 参 考 文 献

- 1 HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan, 2011.
- 2 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)
- 3 诸大建, 田园宏. 虚拟水与水足迹对比研究[J]. 同济大学学报: 社会科学版, 2012, 23(4): 43 - 49.  
ZHU Dajian, TIAN Yuanhong. Comparative research of virtual water and water footprint[J]. Journal of Tongji University: Social Science Section, 2012, 23(4): 43 - 49. (in Chinese)
- 4 刘静, 吴普特, 王玉宝, 等. 河套灌区粮食水足迹与虚拟水净输出时空演变[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 435 - 440.  
LIU Jing, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation of grain production water footprint and net virtual water export in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 435 - 440. (in Chinese)
- 5 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 中国灌区粮食生产水足迹及用水评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1826 - 1835.  
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Agriculture water utilization assessment based on water footprint of grain production evaluation in irrigated farmland of China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(11): 1826 - 1835. (in Chinese)
- 6 MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. A global and high-resolution assessment of the green, blue and grey water footprint of wheat [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(7): 1259 - 1276.
- 7 杜国明, 刘彦随, 刘阁. 黑龙江省近 30 年来粮食生产变化及增产因素分析[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 519 - 524.  
DU Guoming, LIU Yansui, LIU Ge. The analysis of changes in grain production and driving factors in Heilongjiang Province recent 30 years[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5): 519 - 524. (in Chinese)
- 8 张德华, 娄厦, 刘慧萍. 黑龙江省粮食生产地位及潜在问题研究[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(5): 525 - 530.  
ZHANG Dehua, LOU Sha, LIU Huiping. Analysis on the status and potential problems of grain production in Heilongjiang Province [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5): 525 - 530. (in Chinese)
- 9 卢铁光, 付强. 黑龙江省水资源态势与粮食生产研究[C]//中国水利学会 2002 年年会论文集, 2002: 202 - 205.
- 10 王斌. 黑龙江省粮食生产与耗水问题探讨[J]. 节水灌溉, 2015(12): 77 - 80.  
WANG Bin. A study on grain production and its water consumption in Heilongjiang Province[J]. Water Saving Irrigation, 2015(12): 77 - 80. (in Chinese)
- 11 付强, 刘巍, 刘东, 等. 黑龙江省灌溉水利用率分形特征与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 147 - 153.  
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx? flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.022.  
FU Qiang, LIU Wei, LIU Dong, et al. Fractal characteristics and influence factors analysis of irrigation water use efficiency in

- Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(9):147-153. (in Chinese)
- 12 CHENG K, FU Q, LI T X, et al. Regional food security risk assessment under the coordinated development of water resources [J]. Natural Hazards, 2015,78(1):603-619.
- 13 操信春,吴普特,王玉宝,等.水分生产率指标的时空差异及相关关系[J].水科学进展,2014,25(2):268-274.  
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation and correlativity of water productivity indexes in irrigated land of China[J]. Advances in Water Science, 2014,25(2):268-274. (in Chinese)
- 14 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?flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?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)
- 15 黑龙江省水利厅.黑龙江省水利建设统计年鉴[M].
- 16 黑龙江省统计局.国家统计局黑龙江调查总队.黑龙江统计年鉴2015[M].北京:中国统计出版社,2015.
- 17 刘宝勤.我国粮食虚拟水流动空间格局及其调控政策[J].水利发展研究,2010,10(2):16-20.
- 18 杨飞,姚作芳,宋佳,等.松嫩平原作物生长季气候和作物生育期的时空变化特征[J].中国农业气象,2012,33(1):18-26.  
YANG Fei, YAO Zuofang, SONG Jia, et al. Temporal and spatial changes characteristics of the agricultural meteorological factors and crops growth stages in Songnen Plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012,33(1):18-26. (in Chinese)
- 19 SUN S, WU P, WANG Y, et al. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444:498-507.
- 20 王雪青,陈媛,刘炳胜.中国区域房地产经济发展水平空间统计分析——全局 Moran's  $I$ 、Moran 散点图与 LISA 集聚图的综合研究[J].数理统计与管理,2014,33(1):59-71.  
WANG Xueqing, CHEN Yuan, LIU Bingsheng. Exploratory spatial data analysis about the development level of the regional real estate economy in China—the research based on global Moran's  $I$ , Moran scatter plots and LISA cluster map[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2014,33(1):59-71. (in Chinese)
- 21 付强,刘巍,刘东,等.黑龙江省灌溉用水效率指标体系空间格局研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):127-132. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.018.  
FU Qiang, LIU Wei, LIU Dong, et al. Spatial distribution of irrigation water use efficiency index system in Heilongjiang Province [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):127-132. (in Chinese)
- 22 冒小栋,刘琼芳.江西省人口分布空间自相关分析[J].华东交通大学学报,2014,31(2):131-138.  
MAO Xiaodong, LIU Qiongfang. Spatial autocorrelation analysis of population distribution in Jiangxi Province[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014,31(2):131-138. (in Chinese)
- 23 关博,付强,李婷.基于虚拟水理论的三江平原农畜产品需水研究[J].农业现代化研究,2008,29(4):457-459.  
GUAN Bo, FU Qiang, LI Ting. Research on water requirement of agricultural and livestock products in Sanjiang Plain based on virtual water[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008,29(4):457-459. (in Chinese)
- 24 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/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1). 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)
- 25 曹连海,吴普特,赵西宁,等.近50年河套灌区种植系统演化分析[J/OL].农业机械学报,2014,45(7):144-150. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.023.  
CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Plantation system evolution analysis of Hetao Irrigation District in recent 50 years [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(7):144-150. (in Chinese)
- 26 孙才志,陈丽新,刘玉玉.中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J].水科学进展,2010,21(5):637-643.  
SUN Caizhi, CHEN Lixin, LIU Yuyu. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China[J]. Advances in Water Science, 2010,21(5):637-643. (in Chinese)
- 27 马德全.强基础 调结构 上科技 提标准 实现垦区农业连续大丰收[J].农场经济管理,2009(8):13-14.
- 28 殷志强,秦小光,李长生.东北三省主要农作物耗水量与缺水研究[J].科技导报,2009,27(13):42-49.  
YIN Zhiqiang, QIN Xiaoguang, LI Changsheng. Study on water consumption and deficiency of main crops in northeastern China [J]. Science & Technology Review, 2009,27(13):42-49. (in Chinese)