doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.024

黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析

刘　巍[1]　李雨晴[1]　付　强[1]　孟　军[2]　李天霄[1]　戴　爽[2]
(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学经济管理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为分析黑龙江省粮食水足迹的变化规律,根据水足迹理论,选取 2008—2018 年黑龙江省 11 个地区进行粮食水足迹评价,并对其时空分布规律及影响因素进行研究。结果表明:黑龙江省粮食蓝水足迹、绿水足迹的空间分布差异显著,呈现南北高、东西低的分布趋势。通过斯皮尔曼相关系数分析可知,东、西横向地区人口密度大,可用于粮食生产的灌溉水资源消耗少,粮食蓝水足迹较低;南、北部致力于农业生产,农业灌溉用水消耗较大,粮食蓝水足迹较高。南、北部降水储蓄率高,因而南、北部粮食绿水足迹较高;东、西部横向地区地势较为平坦,植被少,降水不易蓄积,所以东、西部绿水足迹相对较低。利用时间序列模型对黑龙江省粮食水足迹进行预测得出,2021—2025 年黑龙江省粮食总水足迹平均值为 2 050 m^3/t。本研究可为黑龙江省农业水资源的合理分配和利用提供参考。

关键词: 黑龙江省; 粮食水足迹; 时空分布; 影响因素
中图分类号: S273　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0214-09　　**OSID**:

Spatial and Temporal Distributions of Crop Water Footprint and Its Influence Factors Analysis in Heilongjiang Province

LIU Wei[1]　LI Yuqing[1]　FU Qiang[1]　MENG Jun[2]　LI Tianxiao[1]　DAI Shuang[2]
(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *School of Economics and Management*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: In order to evaluate the change of crop water footprint in Heilongjiang Province in recent years, the water footprint of 11 regions in Heilongjiang Province were calculated from 2008 to 2018 based on water footprint theory, meanwhile its spatial and temporal distributions and its influential factors were analyzed. The results showed that the blue and green crop water footprints varied geographically in an enormous way, the distribution trend was high in south and north regions and low in east and west regions. According to the Spelman's analysis of correlation coefficient, it could be acknowledged that the east-west horizontal regions had high population density, which caused small consumption of water resources used for crop irrigation and it rendered low trend in water footprint in the east-west horizontal regions. The north-south regions were devoted to agricultural production and it had high consumption of agricultural water and relatively high in blue water footprint. The north-south regions in Heilongjiang Province had good storage capacity of rainfall, so north-south regions presented high trend in green water footprint. In east-west regions, their terrains were flat with less coverage of vegetation, which made it low in green water footprint. According temporal series model to predict the regular pattern of crop water footprint in Heilongjiang Province, the total crop water footprint in Heilongjiang Province in 2021 to 2025 was forecasted as 2 050 m^3/t steadily. The research result would be important in arranging the use of agricultural water resources in recent years.

Key words: Heilongjiang Province; crop water footprint; spatial and temporal distribution; influence factors

收稿日期: 2020-05-06　修回日期: 2020-05-29
基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E009)和东农学者计划项目(18QC25)
作者简介: 刘巍(1988—),女,讲师,博士,主要从事农业灌溉水资源高效利用研究,E-mail: 546v@163.com
通信作者: 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和节水灌溉研究,E-mail: fuqiang0629@126.com

0　引言

水足迹概念最先于 2002 年由 HOEKSTRA 提出，将其定义为：在一定时期内（一般是 1 年）生产某一产品或提供某种服务所消耗的淡水资源量[1-2]。粮食作为一种耗水密集型产品，其水足迹能够反映某一区域粮食生产过程中水资源的利用情况[3-4]。黑龙江省是我国重要的商品粮基地[5]，自 2010 年起，全省粮食产量连续 9 年位列全国第一[6]，然而，黑龙江省单位面积灌溉水量比全国平均值高 5 ~ 6 倍[7-8]，且水资源时空分布不均，农业水资源利用效率低[9-10]。因此，有必要研究粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹的时空变化规律及影响因素，使黑龙江省在稳产的同时提高农业水资源利用率。

随着水足迹理论的发展，关于粮食水足迹的研究日渐增多。孙世坤等[11]利用水足迹理论分析了中国大陆小麦水足迹空间分布特征，并对造成水足迹区域差异的因素进行归因分析。CHAPAGAIN 等[12]对世界主要生产国的水稻蓝水足迹、绿水足迹、灰水足迹构成进行了量化和分析。徐猛等[13]利用 CROPWAT 模型评估了哈尔滨地区大豆的水足迹，为黑龙江省大豆主产区水肥统筹管理提供了依据。刘聪[14]计算了中国 31 个省的小麦、玉米和水稻 3 种主要粮食作物的水足迹，并对其空间分布特征进行评价。张凡凡等[15]对全国 31 个省粮食水足迹的影响因素进行了分析。通过对比可以发现，不同地区的粮食水足迹差异显著。

针对黑龙江省区域特点及存在的农业用水问题，根据水足迹理论，本文分别对 2008—2018 年黑龙江省 11 个市级地区的主要粮食作物（水稻、大豆、小麦）的平均蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹[16]进行评价，明晰粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹的时空分布规律，分析其影响因素，并对未来 5 年粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹进行预测，以期为黑龙江省农业水资源利用效率的提高及保障粮食安全提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黑龙江省位于中国东北部，全省年平均气温 -5 ~ 5℃，年降水量 400 ~ 650 mm[17-18]，多年灌溉水利用系数平均值为 0.53，低于全国平均水平[19]。粮食生产用水是黑龙江省主要的农业水资源消耗，占农业用水总量的 89.63%[20]。黑龙江省水资源总量并不丰富，且时空差异显著[21-22]。黑龙江省共 13 个下辖地区，包括 12 个地级市和 1 个地区[23-24]，本文选取 2008—2018 年黑龙江省 11 个市区（大兴安岭、黑河地区由于气候等因素不适合作物生长，暂不予以研究）的主要粮食作物（水稻、大豆和小麦）为研究对象。计算粮食水足迹所需的地区年降水量，作物播种面积以及产量数据来自《黑龙江省统计年鉴》、黑龙江省水资源公报，作物灌溉定额来自黑龙江省灌溉信息网（http://www.hljggxx.gov.cn）。研究区域概况见图 1。

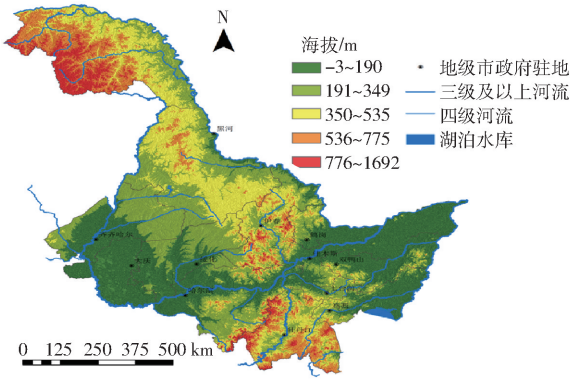

图 1　黑龙江省概况

Fig. 1　Location of Heilongjiang Province

1.2　研究方法

1.2.1　斯皮尔曼相关系数法

斯皮尔曼相关系数法是根据 2 个集合中的元素在各自集合的等级来计算二者之间的相关性[25-26]。斯皮尔曼相关系数法对数据的要求较低，只需 2 个变量的观测值是成对的等级，或是通过连续变量观测资料转换得到的等级数据，不论 2 个变量的总体分布形态、样本容量，都可以用斯皮尔曼相关系数法进行相关性研究。计算公式为

$$r_s = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2-1)} \tag{1}$$

式中　r_s——斯皮尔曼系数

d_i——不同集合对应变量之间的等级差

n——样本容量

1.2.2　时间序列模型

时间序列分析法[27-28]于 1927 年由英国统计学家 YULE 提出。时间序列分析法是通过曲线拟合和参数估计对观测得到的时间序列数据建立数学模型的理论和方法[29]。时间序列模型包含 Arima 模型、Simple 模型等 7 种模型。因本研究中不涉及趋势和季节成分，故采用时间序列 Simple 模型，具体公式为

$$\hat{x}_{t+1} = \alpha x_t + \alpha(1-\alpha)x_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 x_{t-2} + \cdots + \alpha(1-\alpha)^{t-1}x_1 + (1-\alpha)^t l_0 \tag{2}$$

式中 $\hat{x}_{t+1}$——$t+1$ 时刻的预测值

x_t——t 时刻的观测值

α——平滑参数 l_0——初始值

1.2.3 粮食水足迹

粮食水足迹在水足迹[30-31]概念上得来,其定义为某个区域生产粮食作物单位产量所消耗的水资源量。粮食水足迹主要包括粮食绿水足迹、粮食蓝水足迹和粮食总水足迹[32-35],为三者的统称。粮食蓝水足迹是指农田中可被作物利用的灌溉地表水和地下水的消耗量,反映了粮食生产过程中消耗的灌溉水资源;粮食绿水足迹是指雨水落入农田中可被作物利用的水资源量,反映了粮食生产过程中降水资源的利用情况。粮食总水足迹为粮食蓝水足迹和绿水足迹的总和。本文中涉及的粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹均为 3 种作物蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹平均值。粮食水足迹的具体公式为

$$w_f = w_{fb} + w_{fg} \tag{3}$$

其中

$$\begin{cases} w_{fb} = 10\dfrac{I_g}{y} \\ w_{fg} = 10\dfrac{P_e}{y} \end{cases} \tag{4}$$

式中 w_f——粮食总水足迹,m^3/t

w_{fb}——粮食蓝水足迹,m^3/t

w_{fg}——粮食绿水足迹,m^3/t

I_g——粮食作物生育期内的毛灌溉水量,mm

P_e——粮食作物生育期内的有效降水量,mm

y——单位面积粮食产量,t/hm^2

其中 10 是常量因子,是将水深转换为单位面积水量的转换系数。

2 结果与分析

2.1 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律

由图 2 可知,2008—2018 年间黑龙江省粮食总水足迹整体呈波动下降趋势:2008—2010 年间粮食总水足迹呈缓慢上升趋势,而 2011 年骤降至 1 750 m^3/t 后,一直处在 2 000 m^3/t 上下,比 2008—2010 年的粮食总水足迹平均值下降 20%,直至 2018 年恢复上升趋向。由趋势线可以看出,粮食总水足迹的趋势线斜率为 -27.487,其下降趋势最为显著。造成黑龙江省粮食总水足迹下降的原因包括两方面:①自然环境因素。由于全球气候变暖对粮食种植产生了较大影响,降水减少而蒸发加快,降低了可用于粮食生产的有效降水量,使得粮食总水足迹下降[36]。②社会发展因素。随着工业制造业用水增多,农业用水逐渐被挤占,促使农业现代化程度提高,水资源利用效率得到提升,使得粮食总水足迹呈下降趋势。

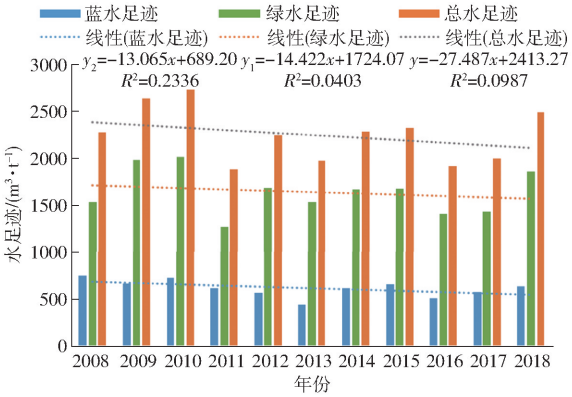

图 2 2008—2018 年黑龙江省粮食绿水足迹、蓝水足迹及总水足迹时间分布规律

Fig. 2 Temporal distribution of crop green, blue and total water footprints in Heilongjiang Province in 2008—2018

由图 3 可知,黑龙江省粮食总水足迹整体呈现南北高,东西低的变化趋势,其中,粮食绿水足迹及蓝水足迹的空间分布趋势具有一致性,粮食蓝水足迹、绿水足迹高值区在黑龙江省的牡丹江、伊春和齐齐哈尔,而哈尔滨、大庆等中东部地区属粮食蓝水足迹、绿水足迹低值区。粮食总水足迹空间分布规律与降水量有密切联系,黑龙江省南、北部和西部降水量较多,属于湿润地区,粮食总水足迹高;而中部和东部地区降水量偏少,属于半湿润半干旱地区,粮食

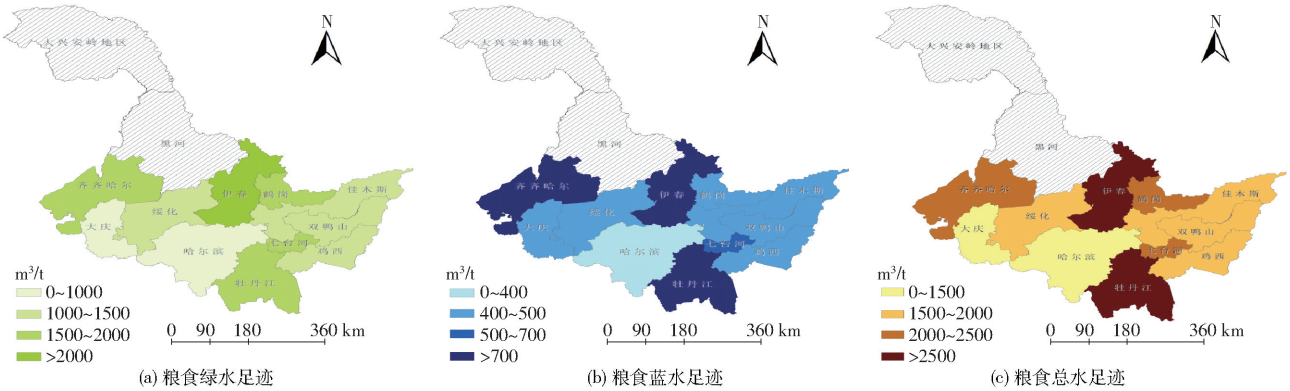

图 3 粮食绿水足迹、蓝水足迹及总水足迹空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution maps of crop green, blue and total water footprints

总水足迹较低[37]。

2.1.1 时间分布

由图 2 可知，黑龙江省粮食蓝水足迹、绿水足迹的变化趋势与粮食总水足迹一致：2008—2010 年粮食蓝水足迹、绿水足迹呈上升趋势，自 2011 年骤降后，期间虽有波动但未能恢复，直至 2018 年才有所上升。从粮食蓝水足迹、绿水足迹的对比情况来看，粮食绿水足迹趋势线斜率为 -14.422，粮食蓝水足迹趋势线斜率为 -13.065，粮食绿水足迹下降趋势比蓝水足迹显著；粮食蓝水足迹与绿水足迹比例始终趋于 1∶3，表明黑龙江省粮食用水结构 10 年间基本保持不变。

2008—2018 黑龙江省粮食绿水足迹波动在 1 750 m^3/t，整体有下降趋势。由于 2011 年黑龙江省粮食作物生产经历了春旱、伏旱等气象灾害，使得当年黑龙江省粮食绿水足迹呈现显著下降，之后的几年持续波动始终未超过 1 750 m^3/t，因此将 2008—2018 年黑龙江省粮食绿水足迹分成两个时期：2008—2010 年（粮食绿水足迹平均值 1 838 m^3/t）和 2011—2018 年（粮食绿水足迹平均值 1 562 m^3/t）。黑龙江省粮食蓝水足迹也有着类似的情况，自然灾害同样影响到 2011 年黑龙江省粮食蓝水足迹，由于旱灾使得降水量减少，导致可灌溉供水量的骤降，进而引起粮食蓝水足迹下降。

2.1.2 空间分布

利用 ArcGIS 软件绘制 2008—2018 年黑龙江省 11 个地区粮食绿水足迹、蓝水足迹及总水足迹的空间分布图，如图 4～6 所示。黑龙江省绿水足迹的低值区主要集中在黑龙江省的中部和东部地区，包括大庆、哈尔滨、鸡西、双鸭山、佳木斯、绥化，其中大庆最低，占总绿水足迹的 5.3%。绿水足迹的高值区主要分布在南部、北部和西部地区，包括伊春、牡丹江、七台河、鹤岗市、齐齐哈尔，其中伊春市最高，占粮食总绿水足迹比例为 15.2%。黑龙江省蓝水足迹的低值区主要集中在黑龙江省的中部和东部地区，特别是大庆、哈尔滨、绥化和佳木斯。而高值区则分布在南部、北部和西部地区，包括齐齐哈尔、伊春、牡丹江，北部地区齐齐哈尔的粮食蓝水足迹最高。黑龙江省粮食总水足迹整体呈现南北高、东西低的变化趋势。为了更清晰地表征黑龙江省各个地区的粮食总水足迹等级分布情况，将粮食总水足迹分为 4 个等级：伊春、牡丹江粮食总水足迹为Ⅰ级，粮食总水足迹过剩；齐齐哈尔、七台河和鹤岗为Ⅱ级，粮食总水足迹较为适宜；双鸭山、佳木斯、鸡西、绥化为Ⅲ级，粮食总水足迹相对正常；而大庆地区、哈尔滨地区为Ⅳ级，粮食总水足迹十分稀缺。由此可以看出，各个地区水足迹分布不均，差异较大，存在着粮食水足迹过剩与稀缺并存的情况。可采取工程措施实现省内的“南北水，东西调”，将粮食水足迹过剩地区如伊春、牡丹江的水资源，调入水足迹稀缺地区如哈尔滨、大庆，以改善粮食水足迹的空间分布结构。

2.2 黑龙江省粮食水足迹影响因素分析

利用斯皮尔曼相关系数法对黑龙江省粮食水足迹的影响因素进行分析，得到各影响因素相关系数（表 1）。对于粮食蓝水足迹，人口密度对其影响最大，其次是 GDP、播种面积、降水量、粮食产量、单位面积产量，其中，GDP、单位面积产量、粮食产量、播种面积的相关系数为负值。GDP 的相关系数为 -0.573 2，负相关程度最显著。粮食蓝水足迹反映了粮食生产过程中消耗的灌溉水资源，在灌溉用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。GDP 是指一定时期内生产活动的最终成果，代表着经济发展水平，一个地区的经济发展水平越高，工业及第三产业越发达，相应的用水量越大，导致农业可供水被工业及第三产业用水挤占，因而 GDP 与粮食蓝水足迹呈现负相关；人口密度对粮食蓝水足迹影响最大，相关系数为 0.718 2，表明人口越多，粮食产品的需求量越高，生产过程中消耗的农业灌溉水资源总量就越多；此外，降水量可间接影响灌溉可供水量，降水量越大，灌溉可供水量越大，因而降水量与粮食蓝水足迹呈正相关。

对于粮食绿水足迹，降水量对其影响最大，其次是播种面积、GDP、粮食产量、单位面积产量、人口密度，其中，GDP、单位面积产量、粮食产量、播种面积与粮食绿水足迹呈负相关。粮食绿水足迹反映了粮食生产过程中降水资源的可利用情况，由于降水量直接影响作物生长蒸腾作用中可利用雨水资源量，其对粮食绿水足迹影响最大，相关系数为 0.672 7。播种面积与粮食绿水足迹的负相关性最显著，相关系数为 -0.263 6，在作物生育期有效降水量稳定的状态下，随着播种面积的增大，单位播种面积上的可利用降水量减少，进而导致粮食绿水足迹下降。

对于粮食总水足迹，GDP、播种面积、粮食产量、降水量与其呈负相关，单位面积产量、人口密度与粮食总水足迹呈正相关。根据粮食水足迹的计算公式可知，单位面积产量是计算粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹量的重要变量之一，因而单位面积产量的影响最大，相关系数为 0.663 6；而 GDP 越高，农业工业化程度越大，水资源利用效率越高，使得粮食总水足迹呈下降趋势。因而 GDP 与粮食总水足迹的负相关性显著。

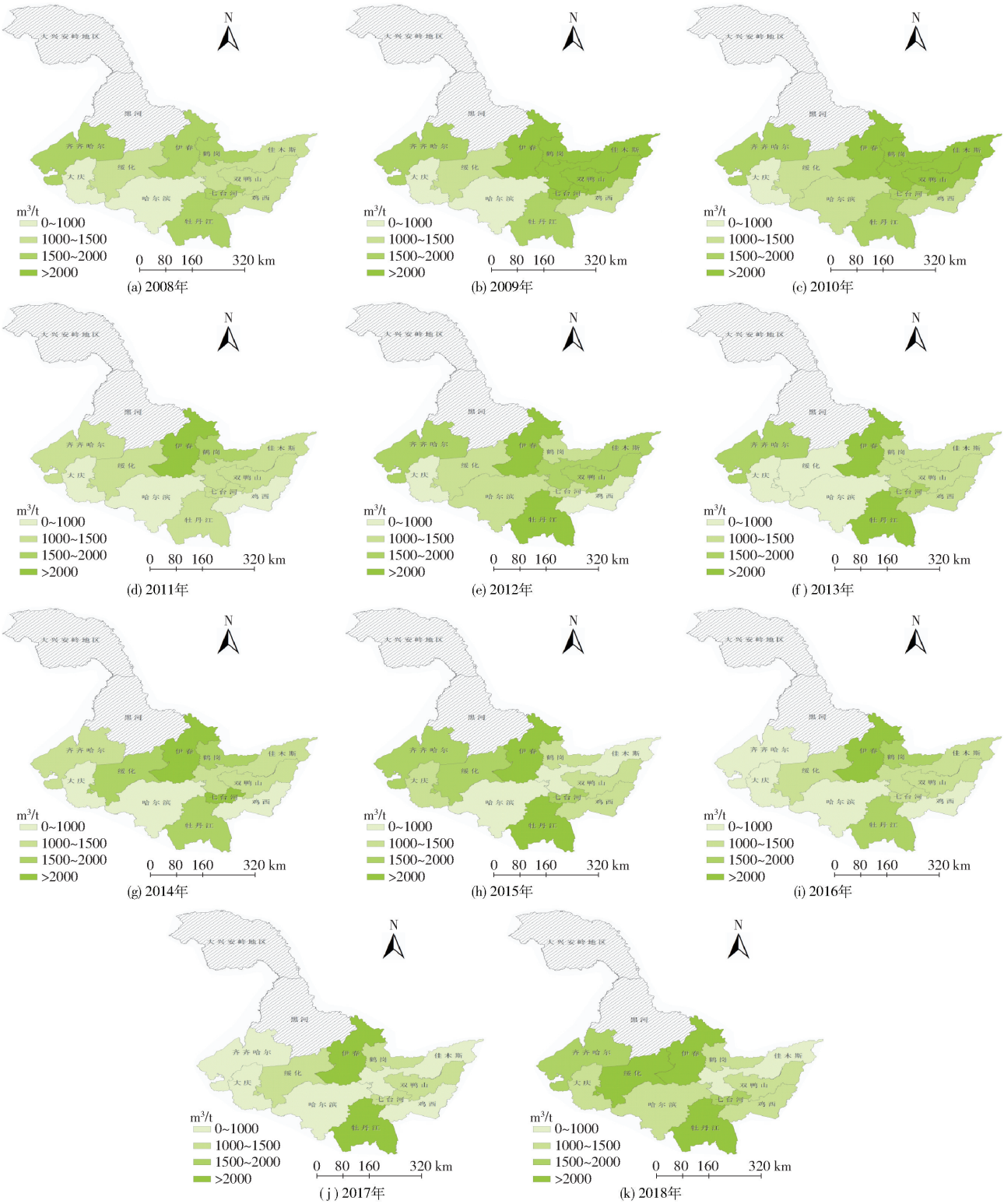

图 4 粮食绿水足迹逐年空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution maps of crop green water footprint

2.3 黑龙江省粮食水足迹预测结果分析

结合当地规划目标,根据式(3)、(4)及 2.2 节的结果选取对粮食水足迹影响较大的 3 个因素进行预测,即播种面积、降水量、粮食产量(1998—2018 年),得出 2021—2025 年粮食水足迹 3 个因素的预测趋势图(图 7)。由图可以看出,粮食产量和播种面积在未来 5 年整体都有上升趋势,而降水量波动幅度较大。根据以上预测结果对粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹进行计算,由表 2 可知,2021—2025 年黑龙江省粮食绿水足迹远大于粮食蓝水足迹,粮食蓝水足迹平均值为 563 m^3/t,粮食绿水足迹平均值为 1 487 m^3/t,粮食总水足迹平均值为 2 050 m^3/t,粮食蓝水足迹、绿水足迹、总水足迹均有下降趋势。

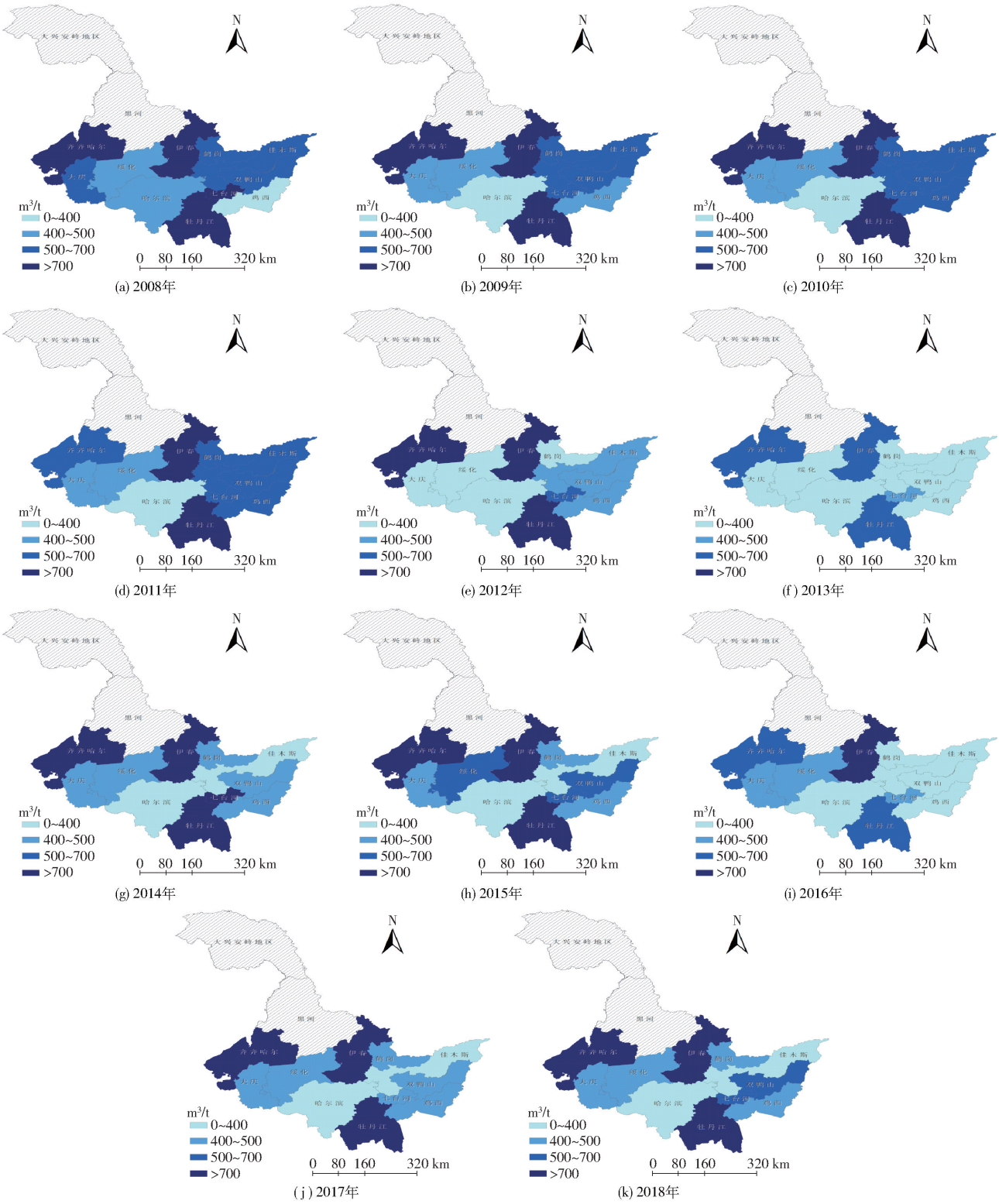

图 5　粮食蓝水足迹逐年空间分布图

Fig. 5　Spatial distribution maps of crop blue water footprint

结合上述结果分析造成粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹下降趋势的原因：①气候环境的变化使降水量减少，同时气候变暖使蒸发加快，因而粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹下降。②根据当前的政策形势来看，农业逐渐工业化，形成规模效应。虽然播种面积和产量在未来几年略有上升，预计2021—2025 年播种面积从 8.15×10^6 hm^2 增长到 8.74×10^6 hm^2，涨幅为 7.24%；产量由 3.319×10^7 t 增长到 3.474×10^7 t，涨幅为 4.67%，然而工业等其他行业用水挤占农业用水的现象凸显[38]，农业工业化程度越大，水资源利用效率越高，进而粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹呈现降低趋势。可采取科学方

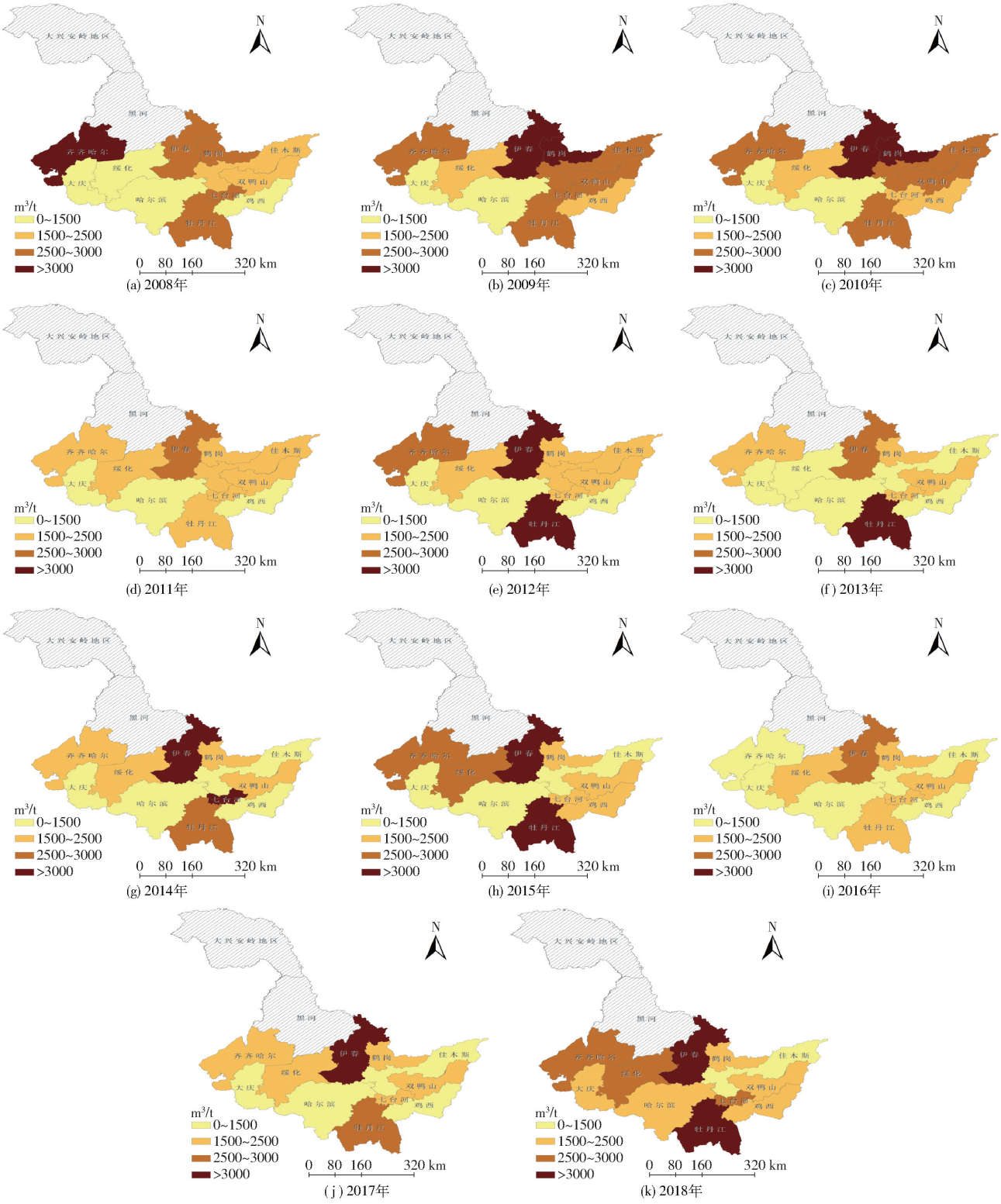

图 6 粮食总水足迹逐年空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution maps of crop total water footprint

表 1 黑龙江省蓝水足迹、绿水足迹、总水足迹各影响因素相关系数

Tab. 1 Correlation coefficient of crop blue, green and total water footprints in Heilongjiang Province

	GDP	播种面积	粮食产量	单位面积产量	降水量	人口密度
蓝水足迹	-0.573 2	-0.572 7	-0.472 7	-0.418 2	0.481 8	0.718 2
绿水足迹	-0.190 9	-0.263 6	-0.163 6	-0.145 5	0.672 7	0.109 1
总水足迹	-0.236 4	-0.118 2	-0.081 8	0.663 6	-0.181 8	0.272 7

法合理制定农业发展规划，持续提高农业水资源利用率，合理促进农业发展。

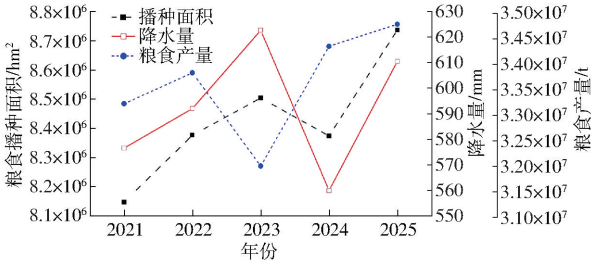

图 7　播种面积、产量、降水量预测结果

Fig. 7　Prediction of seeding area, yield and precipitation

表 2　粮食蓝水足迹、绿水足迹、总水足迹预测结果

Tab. 2　Prediction of blue water footprint, green water footprint and total water footprint　　m^3/t

指标	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
蓝水足迹	551	556	597	548	564
绿水足迹	1 415	1 466	1 655	1 366	1 534
总水足迹	1 966	2 022	2 252	1 914	2 098

3　结论

(1)黑龙江省不同地区粮食水足迹差异显著，存在粮食水足迹过剩与稀缺并存的现象。粮食水足迹在空间上呈现南北高、东西低的趋势，伊春、牡丹江地区的粮食水足迹较丰富，而哈尔滨、大庆地区的粮食水足迹相对匮乏；在时间分布上，2011、2016 年粮食总水足迹最低。

(2)人口密度对粮食蓝水足迹影响最大，降水量对粮食绿水足迹影响最大，GDP、播种面积、粮食产量、降水量与粮食总水足迹呈负相关，单位面积产量、人口密度与粮食总水足迹呈正相关。

(3)未来 5 年(2021—2025 年)，黑龙江省粮食蓝水足迹平均值为 563 m^3/t，粮食绿水足迹平均值为 1 487 m^3/t，粮食总水足迹平均值为 2 050 m^3/t，粮食蓝水足迹、绿水足迹及总水足迹呈下降趋势。

(4)黑龙江省粮食生产供水量不足的问题不容乐观，一方面应科学制定农业发展规划，提高农业水资源利用率，合理促进农业发展；另一方面应采取工程措施，实现省内的“南北水，东西调”，将粮食水足迹过剩地区的水资源调入水足迹稀缺地区，以改善粮食水足迹的空间分布结构。

参　考　文　献

[1] 黄凯，王梓元，杨顺顺，等. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展[J]. 水利水电科技进展，2013，33(4)：78－83.
HUANG Kai，WANG Ziyuan，YANG Shunshun，et al. Theory，calculation method and application progress of water footprint [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources，2013，33(4)：78－83.（in Chinese）

[2] 戚瑞，耿涌，朱庆华. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报，2011，26(3)：486－495.
QI Rui，GENG Yong，ZHU Qinghua. Evaluation of regional water resources utilization based on water footprint method[J]. Journal of Natural Resources，2011，26(3)：486－495.（in Chinese）

[3] 付强，刘烨，李天霄，等. 水足迹视角下黑龙江省粮食生产用水分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(6)：184－192.
FU Qiang，LIU Ye，LI Tianxiao，et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(6)：184－192. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170624&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024.（in Chinese）

[4] XU Qiang，HU Kelin，LIANG Hao，et al. Incorporating the WHCNS model to assess water and nitrogen footprint of alternative cropping systems for grain production in the North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production，2020，263(1)：121548.

[5] 刘巍. 黑龙江省灌溉水利用效率时空分异规律及节水潜力研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2017.
LIU Wei. Spatial and temporal variation of irrigation water use efficiency and water saving potential analysis in Heilongjiang Province[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2017.（in Chinese）

[6] 黑龙江省统计局. 2019 年黑龙江省国民经济和社会发展统计公报[M]. 北京：中国统计出版社，2020.

[7] SYMEONIDOU S，VAGIONA D. The role of the water footprint in the context of green marketing[J]. Environmental Science and Pollution Research International，2018，25(27)：26837－26849.

[8] LIU Gang，HU Fan，WANG Yixin，et al. Assessment of lexicographic minimax allocations of blue and green water footprints in the Yangtze River economic belt based on land，population，and economy[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2019，16(4)：643.

[9] 刘烨. 黑龙江省粮食作物水分生产率时空分布规律及影响因素分析[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2017.
LIU Ye. Analysis of temporal and spatial distribution and influencing factors of water productivity of grain crops in Heilongjiang Province[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2017.（in Chinese）

[10] 高子清，朱玉芬. 黑龙江省农业水资源利用研究[J]. 经济研究导刊，2012(24)：131－132.
GAO Ziqing，ZHU Yufen. The research of the agricultural water use of the Heilongjiang Province[J]. Economic Research Guide，2012(24)：131－132.（in Chinese）

[11] 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）

[12] CHAPAGAIN A K，HOEKSTRA A Y. The blue，green and grey water footprint of rice from production and consumption

perspectives[J]. Ecological Economics,2010,70(4): 749 - 758.
[13] 徐猛, 金梁, 魏丹, 等. 基于 CROPWAT 模型的哈尔滨地区 26 年大豆生产水足迹变化研究[J]. 大豆科学, 2019, 38(2):251 - 257.
XU Meng, JIN Liang, WEI Dan, et al. Research on soybean production water footprint based on CROPWAT model during past 26 years in Harbin[J]. Soybean Science, 2019, 38(2): 251 - 257. (in Chinese)
[14] 刘聪. 中国粮食生产的水资源利用特征评价[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2017(4): 22 - 29, 146.
LIU Cong. Evaluation on utilization of water resources of food production in China[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2017(4): 22 - 29, 146. (in Chinese)
[15] 张凡凡,张启楠,李福夺,等.中国水足迹强度空间关联格局及影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 934 - 944.
ZHANG Fanfan, ZHANG Qi'nan, LI Fuduo, et al. The spatial correlation pattern of water footprint intensity and its driving factors in China[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 934 - 944. (in Chinese)
[16] HAMIDEH N, SATTER C, ARJEN Y H. The blue water footprint of urban green spaces: an example for Adelaide, Australia [J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 190:103613.
[17] 靳春香, 王秀茹, 王希, 等. 黑龙江省近 50 年降水变化趋势及空间分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 76 - 83.
JIN Chunxiang, WANG Xiuru, WANG Xi, et al. Variation trend and spatial distribution characteristics of precipitation inrecent 50 years in Heilongjiang Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1):76 - 83. (in Chinese)
[18] 孟凯, 李勇. 黑龙江省农业生态环境态势与对策[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(2): 213 - 216.
MENG Kai, LI Yong. The agricultural ecological environment situation in Heilongjiang Province and puts forward some countermeasures[J]. Agricultural System Science and Integrated Research, 2011, 27(2): 213 - 216. (in Chinese)
[19] 王小军, 张强. 广东省灌溉水有效利用系数影响因素的动静态分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 6 - 11.
WANG Xiaojun, ZHANG Qiang. Static and dynamic analysis of factors affecting the efficient utilization coefficient of irrigation water in Guangdong Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 6 - 11. (in Chinese)
[20] 丁红, 李铁男, 张守杰, 等. 黑龙江省实行最严格水资源管理制度建设与成效[J]. 水利科学与寒区工程, 2018, 1(12): 98 - 101.
DING Hong, LI Tienan, ZHANG Shoujie, et al. The system construction and effectiveness of the most stringent water resources management in Heilongjiang Province[J]. Water Conservancy Science and Cold Region Engineering, 2008,1(12): 98 - 101. (in Chinese)
[21] 付强, 戴春胜. 黑龙江省地下水资源承载力时空差异[J]. 黑龙江水利科技, 2016, 44(4): 8 - 13.
FU Qiang, DAI Chunsheng. Time-space differences on groundwater bearing capacity in Heilongjiang Province [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2016, 44(4): 8 - 13. (in Chinese)
[22] 张燕. 黑龙江省耕地开垦费标准测算研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
ZHANG Yan. Study on calculation standard of cultivated land reclamation fees in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[23] 李佳鸿. 黑龙江省水资源承载力评价及水资源优化配置研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
LI Jiahong. Analysis of the water resources carrying capacity and joint optimization allocation of water resources in Heilongjiang Province [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016. (in Chinese)
[24] 王禹. 黑龙江省地下水资源保护法律问题研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
WANG Yu. The study on the legislation problem of the groundwater of Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013. (in Chinese)
[25] 周科. 斯皮尔曼简捷相关系数的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2017.
ZHOU Ke. The study of the Spearman's footrule[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2017. (in Chinese)
[26] BICE C. Functional relations and Spearman correlation between consistency indices[J]. Journal of the Operational Research Society, 2020, 71(2): 301 - 311.
[27] 王松伟. 时间序列的多尺度分析方法研究[D]. 开封: 河南大学, 2006.
WANG Songwei. Research on multi-scale time series analysis[D]. Kaifeng: Henan University, 2006. (in Chinese)
[28] MENDONCA F, MOSTAFA S S, MORGADO D F, et al. Matrix of lags: a tool for analysis of multiple dependent time series applied for CAP scoring[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2020, 189: 105314.
[29] 卢理. 时间序列加法模型的分解预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
LU Li. Research of time series addition model decomposition forcasting[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
[30] 郑翔益. 中国城乡居民农产品消费水足迹的时空演变及驱动因素分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
ZHENG Xiangyi. Spatial temporal evolution and driving factors of water footprint of agricultural products consumption of urban and rural residents in China[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese)
[31] HOEKSTR A Y, HUNG P Q. Globalisation of water resources: international virtual water flows in relation to crop trade[J]. Global Environmental Change, 2005, 15(1): 45 - 56.
[32] 孙世坤. 近 50 年来河套灌区作物生产水足迹时空演变过程研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2013.
SUN Shikun. Research on the spatial - temporal variation of water footprint of crop production in nearly 50 years in Hetao Irrigation District[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

(下转第 335 页)

Agricultural Sciences,2015,43(1):267 - 269. (in Chinese)
[19] 杨信廷,钱建平,孙传恒,等. 农产品及食品质量安全追溯系统关键技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):212 - 222.
YANG Xinting,QIAN Jianping,SUN Chuanheng,et al. Key technologies for establishment agricultural products and food quality safety traceability systems[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(11):212 - 222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20141133&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.033. (in Chinese)
[20] 郑立华,冀荣华,王敏娟,等. 农产品追溯统一编码方案设计与应用[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(增刊):385 - 392.
ZHENG Lihua,JI Ronghua,WANG Minjuan,et al. Design and application of traceable unified coding scheme for agricultural products[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(Supp.):385 - 392. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2019s059&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.059. (in Chinese)
[21] 于丽娜,张国锋,贾敬敦,等. 基于区块链技术的现代农产品供应链[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(增刊):387 - 393.
YU Li'na,ZHANG Guofeng,JIA Jingdun,et al. Modern agricultural product supply chain based on block chain technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(Supp.):387 - 393. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2017s059&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.059. (in Chinese)
[22] 鲍海燕. 基于改进 AES 算法的网络数据安全加密方法研究[J]. 信息技术与信息化,2019(9):79 - 82.
BAO Haiyan. Research on network data security encryption based on improved AES algorithm[J]. Information Technology and Informatization, 2019(9):79 - 82. (in Chinese)
[23] 李莉,史国振,杨凤. SM4 算法 CBC 模式的并行化研究与实现[J]. 网络安全技术与应用,2016(7):60 - 62.
LI Li,SHI Guozhen,YANG Feng. SM4 algorithm CBC pattern parallelization study and implementation[J]. Network Security Technology & Application,2016(7):60 - 62. (in Chinese)
[24] 陈黎震. AES 密码算法的性能研究与实现[J]. 现代计算机(专业版),2012(25):15 - 20.
CHEN Lizhen. Research and implementation of performance of AES algorithm[J]. Modern Computer, 2012(25):15 - 20. (in Chinese)
[25] WANG C, FENG C. The application of dynamic password technology based on ECC algorithm in mobile payment[J]. International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, 2014, 13(3 - 4): 268 - 276.
[26] 赵梦婷,李斌勇,李文皓,等. ECC 加密算法分析及应用研究[J]. 网络安全技术与应用,2018(12):35 - 36.
ZHAO Mengting, LI Binyong, LI Wenhao, et al. ECC cryptographic algorithm analysis and applied research[J]. Network Security Technology & Application, 2018(12):35 - 36. (in Chinese)

(上接第 222 页)

[33] HOEKSTRA A Y, MEKONNEN M M. The water footprint of humanity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(9): 3232 - 3237.
[34] 卓拉,王伟,冯变变,等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):264 - 271.
ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 264 - 271. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190931&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.031. (in Chinese)
[35] 郭相平,高爽,吴梦洋,等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):295 - 302.
GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5):295 - 302. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180535&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.035. (in Chinese)
[36] 任静. 我国碳市场中碳配额交易价格影响因素分析[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2019.
REN Jing. An analysis of factors affecting the trading price of carbon quota in China's carbon market[D]. Chongqing: Chonqing Techology and Business University, 2019. (in Chinese)
[37] 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.
LI Hongying, QIN Lijie, YANG Ting. Temporal variability and spatial distribution of water footprint for rice production in Jilin Province[J]. Journal of North China University of Water Conservancy and Hydropower (Natural Science Edition), 2018, 39(2):32 - 39. (in Chinese)
[38] 张学礼. 滹沱河流域水环境变迁与区域社会发展研究(1949—2009)[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2018.
ZHANG Xueli. Research on water environmental transition and regional social development in Hutuo River Basin (1949—2009)[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2018. (in Chinese)