

doi: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20200912

· 技术方法 ·

我国主要粮食作物蓝水用水时序分布图制作^{*}

刘婷婷¹, 朱秀芳^{1,2*}, 刘莹¹, 徐昆¹

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 北京师范大学北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心, 北京 100875)

摘要 [目的] 明确实际蓝水用水的空间分布, 有利于用水供需矛盾和水资源短缺分析, 为进一步评价蓝绿水的投入量和利用效率, 以及合理和高效管理农业水资源提供参考信息。然而目前有关农业用水的数据只有行政单元的统计数据, 不利于进行空间分析。发展空间化模型, 将统计数据空间化是解决该问题的有效途径。[方法] 文章基于蓝水消耗量和蓝水需求量成正比的假设, 构建蓝水用水空间化模型, 利用气象数据、农业用水统计数据、灌溉农田分布图、主要粮食作物空间分布图、作物系数和生育期数据, 生成2003—2012年1km分辨率的我国主要粮食作物(小麦、玉米和水稻)的蓝水用水空间分布图, 分析蓝水用水的总体变化趋势以及影响各区域蓝水用水量的主导作物。[结果] (1) 华北地区平均蓝水用水量最高。(2) 大多数灌溉区蓝水用水量没有显著变化, 每年蓝水用水量的标准差低于0.004km³。蓝水用水量变化率的绝对值在夏季最大、冬季最小。(3) 就各地来说, 蓝水用水总量增加趋势最明显的是江苏省, 减少趋势最明显的是上海市。(4) 就不同作物来说, 小麦、玉米和水稻的蓝水用水量增加趋势最明显的分别是江苏、黑龙江、江西, 减少趋势最明显的分别是北京和上海。(5) 东南沿海地区主要影响蓝水用水量的作物为水稻, 在东北及华北地区主要影响蓝水用水量的作物为玉米, 其他部分地区主要影响蓝水用水量的作物为小麦。(6) 局部验证结果显示该文计算出的蓝水用水量与统计发布的数据存在很高的相关性($R^2 = 0.95$)。[结论] 该文发展的蓝水空间化模型可以用于时序蓝水用水分布图的制作, 具有一定的应用推广价值。

关键词 灌溉需水量 蓝水用水量 空间分配模型 空间化 粮食作物

中图分类号:S27 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9121[2020]09093-11

0 引言

为了缓解我国人口过多所产生的粮食问题, 自新中国成立以来, 国家大力发展灌溉农业, 截止2016年, 全国农田有效灌溉面积比重达到52%^[1]。我国每年种植生产用水约为3 900亿m³, 是整个国家总用水量的2/3, 水资源的消耗巨大^[2]。有限的水资源无法满足工业、农业、生活等多方面的用水需求。随着人口的增长、社会的发展, 不同部门间的用水矛盾越来越严重。再加上近年来, 由于温室气体的增加, 全球气候变暖, 作物的蒸腾加强, 需水量增加, 使得用水供水的供需矛盾以及水资源的短缺现象愈发严重。在农业生产中, 绿水是雨养农业的主要水源, 蓝水是指传统意义上的灌溉, 用以在作物需水关键期和干旱期补充绿水的不足^[3]。明确实际蓝水用水的空间分布, 有利于用水供需矛盾和水资源短缺分析, 为进一步评价蓝绿水的投入量和利用效率, 以及合理和高效管理农业水资源提供参考信息。

目前有关农业用水的数据只有行政单元的统计数据, 以行政区为单位的统计数据不能很好地与自然地理单元叠合, 不利于进行空间分析。发展空间化模型, 将统计数据空间化是解决该问题的有效途径。关于农业统计数据空间化方面的研究主要集中在农作物种植面积、粮食产量、农业生产投入和农业产值的空间

收稿日期: 2018-11-24

作者简介: 刘婷婷(1998—), 女, 辽宁大连人, 硕士在读。研究方向: 遥感应用

*通讯作者: 朱秀芳(1982—), 女, 浙江天台人, 副教授、博士生导师。研究方向: 农业遥感。Email: zhuxufang@bnu.edu.cn

*资助项目: 北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心资助项目; 国家“高分辨率对地观测系统”重大专项资助项目

化方面。例如在作物面积空间化方面, M. R. Khan 等^[4]以西班牙南部安达卢西亚自治社区为研究区, 基于 SPOT-VGT NDVI 影像进行了作物种植面积的空间化。唐鹏钦等^[5]利用作物分配模型 SPAM-China 得到了 30m × 30m 分辨率的东北地区水稻种植面积分布图。涂丽丽^[6]利用平均分配法、多元回归模型和灰色关联模型 3 种方法进行安徽省小麦面积空间化, 指出灰色关联模型方法精度最高。夏天等^[7]通过多元 Logistic 回归的方法对东北三省的水稻面积进行空间化。

在粮食产量的空间化方面, You 等^[8]设计了一种基于交叉熵方法的产量空间化分配模型, 制作了巴西 8 种作物(小麦、水稻、玉米、马铃薯、高粱、木薯、豆子、大豆)的产量分布图。刘忠和李保国^[9]以人口密度为因变量将全国的省级粮食产量数据空间化到 1km 分辨率的网格。谭杰扬等^[10]利用作物空间分配模型 SPAM-China 计算了像元尺度上春玉米分布概率, 模拟了过去 30 年东北三省的玉米种植面积与单产的时空分布。汤斌等^[11]基于 MOD09A1 EVI 数据进行了江苏省水稻产量的空间化。姬广兴等^[12]对比分析了 15 种粮食产量空间化模型的精度, 最终选择分区建模的方案制作了 2005 年我国粮食产量公里网格分布图。廖顺宝等^[13]利用多元线性回归分析建模生成了 2005 年我国粮食产量的空间化分布图。何鹏等^[14]以水田和旱地面积为自变量进行了四川省粮食产量的空间化。

在农业生产投入方面, Potter 等基于全球 161 个国家的化肥使用量和 175 种作物的全球产量图, 制作了全球 0.5°分辨率的氮肥和磷肥使用率空间分布图, 同时利用全球的家畜分布图及不同家畜的平均养分排泄率数据, 制作了全球 0.5°分辨率的氮肥和磷肥的生产率图^[15]。孙丹峰等基于 MODIS 8d 合成的 NDVI 数据进行了北京北部 6 个区县乡镇化肥量数据的空间分配^[16]。

在农业产值的空间化方面, 邵霜霜等以耕地、草地、林地面积以及河流长度为自变量, 以农业产值为因变量, 建立多元回归模型进行农业产值的空间化, 生成新疆 1km 分辨率的农业产值分布图^[17]。张晶等^[18]综合考虑农业土地利用类型、高程和地表粗糙度建立模型对 2000 年西藏的农业产值进行了空间化。

虽然国内外学者已经在农作物种植面积、产量、生产投入和农业产值等方面进行了一些空间化研究, 但对灌溉用水数据空间化的研究甚少。Zhu 等建立了灌溉用水空间分配模型, 生成 1978—2008 年全国 1km 分辨率的灌溉用水分布图^[19], 但是该研究没有做到分品种。文章拟在其研究的基础上, 发展分作物的灌溉用水空间分配模型, 通过计算逐旬作物有效降雨量和作物需水量之差得到作物蓝水需水量, 假设蓝水需水量与实际灌溉量成正比, 据此建立蓝水用水空间分配模型, 将省级灌溉用水量分配到各农作物像元上, 制作 2003—2012 年我国 1km 分辨率的主要粮食作物灌溉蓝水用水分布图。

1 研究方法与过程

1.1 实验数据

该研究所用到的数据主要包括: (1) 来源于欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA Interim, daily 数据集 (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets>) 的 0.125°分辨率的最高气温、最低气温、平均气温、降水、平均风速等气象数据; (2) 来源于中国气象数据网中国农作物生长发育和农田土壤湿度旬值数据集的 2003—2012 年小麦、玉米、水稻 3 种作物全国农气站点生育期观测数据 (http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/AGME_AB2_CHN_TEN.html); (3) 来源于《中国主要作物需水量与灌溉》的各市各作物不同发育期中作物需水量与参考蒸散量之比的多年平均值^[20]。以上 3 个数据主要用于计算作物的参考蒸散和灌溉需水量, 以此作为蓝水用水分配的权重。(4) 来自于 Earthstat 全球 175 种作物的面积和产量数据集的 0.083°分辨率的我国小麦、玉米、水稻 3 种作物的空间分布图、zhu 等制作的 2000 年 1km 空间分辨率的我国灌溉农田分布图^[19], 这两个数据主要用于控制灌溉用水分配的空间位置; (5) 来源于 2004—2013 年中国统计年鉴的 2003—2012 年各地的农业用水量数据, 以及来源于 2011 年中国统计年鉴的 2010 年各省农田灌溉用水量, 这两个数据主要用来计算 2003—2012 年各地的农田灌溉用水量, 以此来控制待分配的蓝水总量。

1.2 技术路线

该研究技术路线如图 1 所示，主要包括数据预处理、作物需水量计算、蓝水需水量估算和作物灌溉用水量分配 4 个步骤。

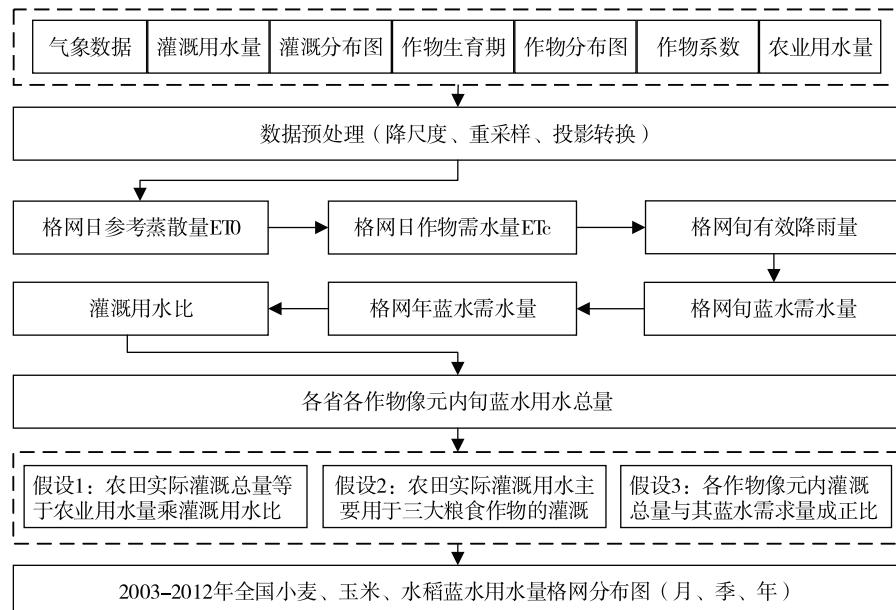


图 1 技术路线

1.2.1 数据预处理

该研究的数据预处理主要包括将不同空间分辨率的数据重采样到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 分辨率并与灌溉分布图的 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 格网匹配；整理作物生育期数据、作物系数数据，并借助 ArcGIS 将其并分配到 1 km 格网。

1.2.2 作物需水量的计算

FAO-56 彭曼—蒙蒂斯 (Penman-Monteith) 公式是联合国世界粮农组织推荐的一种计算需水量的方法。相较于其他计算作物需水量的方法，彭曼—蒙蒂斯简单方便，不需要专门的地区修正系数和风函数等参数，使用一般的气象资料即可计算。董仁等检验证明水稻、小麦、玉米需水量实测值与利用 FAO-56 彭曼—蒙蒂斯公式的计算值比较接近，误差在 $13.57\% \sim 9.26\%$ ^[21]。根据彭曼—蒙蒂斯公式，使用 MATLAB 编写程序计算格网尺度日值参考蒸散量 ET_0 ：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273}U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式 (1) 中， ET_0 为格网日蒸散量，mm； R_n 为冠层表面净辐射， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； G 为土壤热通量， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； T 为平均气温， $^\circ\text{C}$ ； e_s 为饱和水汽压，kPa； e_a 为实际水汽压，kPa； Δ 为饱和水汽压—气温关系曲线在 T 处的切线斜率，kPa/ $^\circ\text{C}$ ； γ 为湿度计常数，kPa/ $^\circ\text{C}$ ； U_2 为 2 m 高处的风速，m/s。

在此基础上，结合不同区域不同作物的作物系数，采用作物系数法计算作物分布范围内格网日值作物需水量，公式为：

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式 (2) 中， K_c 为作物系数； ET_0 为格网日蒸散量，mm； ET_c 为格网尺度日需水量，mm。

由于该研究中探讨的有效降水是针对作物而言的，如果考虑蓄水等复杂情况，计算会较为复杂且缺少数据。若实际降水量大于格网尺度的日需水量，则有效降水量等于格网尺度的日需水量。故可以根据下面的公式计算农作物格网上逐旬有效降水量为：

$$P_c = \begin{cases} P & P \leq ET_c \text{ 时} \\ ET_c & P > ET_c \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, P_c 为有效降水量, mm; P 为实际降水量, mm; ET_c 为格网尺度日需水量, mm。

由旬值作物需水量与旬值有效降雨量之差计算旬值作物蓝水需水量, 在全年内各自求和得到 3 种作物的格网旬蓝水需水量为:

$$IR_i = ET_{c,i} - P_{c,i} \quad (4)$$

$$IR = \sum_i^n IR_i \quad (5)$$

式(5)(6)中: IR_i 、 $P_{c,i}$ 和 $ET_{c,i}$ 分别为格网第 i 旬蓝水需水量, 有效降水量和需水量, 单位均为 mm。 IR 为所有作物格网全年蓝水需水量, mm。

1.2.3 灌溉用水比的计算

农业用水不仅用于作物灌溉, 还用于其他农业部门, 如牧草、果园和林地等。灌溉用水比是指农田灌溉用水占农业用水量的比例, 由于缺乏相应数据, 该研究中利用 2010 年各地农田灌溉用水总量与 2010 年各地农业用水量计算出各省灌溉用水比, 并假设在研究时段内灌溉用水比不变。

$$f = \frac{IW_{2010}}{AW_{2010}} \quad (6)$$

式(6)中, IW_{2010} 为 2010 年各地农田灌溉总量, mm^3 ; AW_{2010} 为 2010 年各地农业用水量, mm^3 ; f 为灌溉用水比。

1.2.4 各地各作物格网内旬蓝水用水量的计算

假设农田实际灌溉总量等于农业用水量乘以灌溉用水比, 农田实际灌溉用水主要用于三大粮食作物的灌溉, 且各作物格网内灌溉总量与其蓝水需求量成正比, 则对于某地, 其第 j 个作物格网在给定年份中第 i 旬的蓝水用水量 ($IW_{i,j}$, mm^3) 为:

$$IW_{i,j} = \frac{IW}{\sum_{j=1}^n IR_{i,j}} \times IR_{i,j} = \frac{AW \times f}{\sum_{j=1}^n IR_{i,j}} \times IR_{i,j} \quad (6)$$

式(6)中, AW 为农业用水量, mm^3 ; f 为灌溉用水比; $IR_{i,j}$ 为第 j 个作物格网在给定年份中第 i 旬的蓝水需水量, mm; $\sum_{j=1}^n IR_{i,j}$ 为所有作物格网全年蓝水需水量, mm。

1.2.5 小麦、玉米、水稻蓝水用水量格网分布图制作

基于上一步制作的 2003—2012 年的分旬的作物蓝水用水量空间分布图, 结合小麦、玉米和水稻空间分布图和作物物候历, 得到 2003—2012 年全国小麦、玉米、水稻的月、季和年尺度的蓝水用水量分布图。

2 研究结果与分析

2.1 蓝水用水总量时空特征分析

图 2 显示了 1km 格网尺度 2003—2012 年的蓝水用水量的平均值和标准差。总体来说, 华北地区平均蓝水用水量最高, 这是由于华北平原粮食种植密度高, 而降水相比东南地区少。从标准差来看, 大多数灌溉区蓝水用水量没有显著变化, 每年蓝水用水量的标准差低于 $0.004km^3$ 。

图 3 显示 2003—2012 年蓝水用水量的四季变化率, 大部分地区蓝水用水量的变化趋势是相似的, 夏天蓝水用水量的变化率的绝对值最大, 冬季蓝水用水量的变化率的绝对值最小, 因为夏季是作物生长的旺盛时期, 灌溉需求大, 受气候等外界影响大。整体看来(图 4)江西、重庆、湖北、四川、安徽、江苏、河南、陕西、山西、辽宁、吉林、新疆、黑龙江共 13 个省(市、区)蓝水用水量呈现增加的趋势; 广东、海南、广西、福建、贵州、云南、湖南、浙江、上海、山东、宁夏、天津、北京、河北、内蒙古共 15 个省(市、区)蓝水用水量呈现减少的趋势; 而西藏、青海、甘肃 3 个地区的蓝水用水量基本保持不变。其

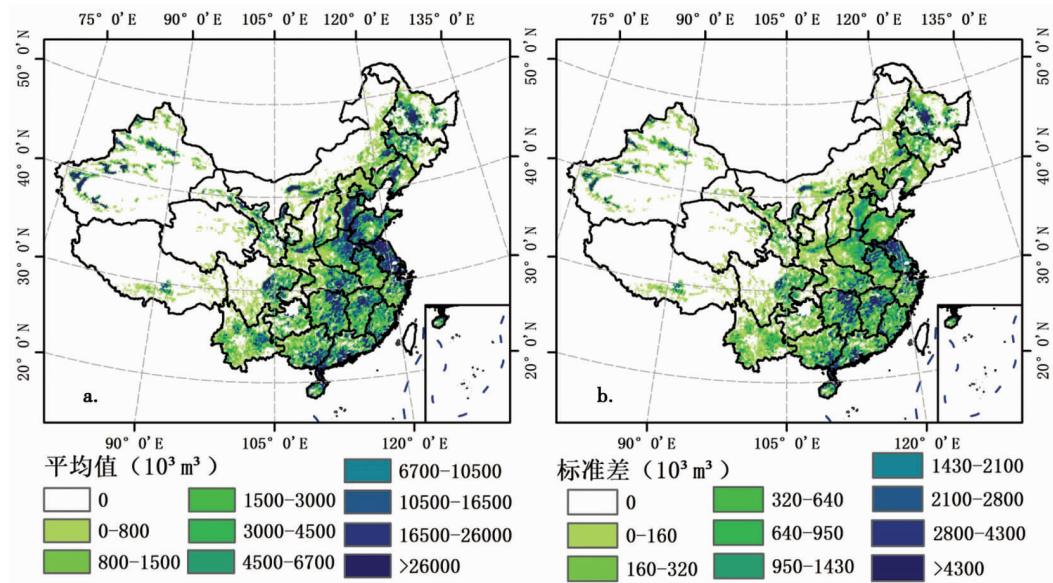


图2 2003—2012年蓝水总量的平均值(a)和标准差(b)

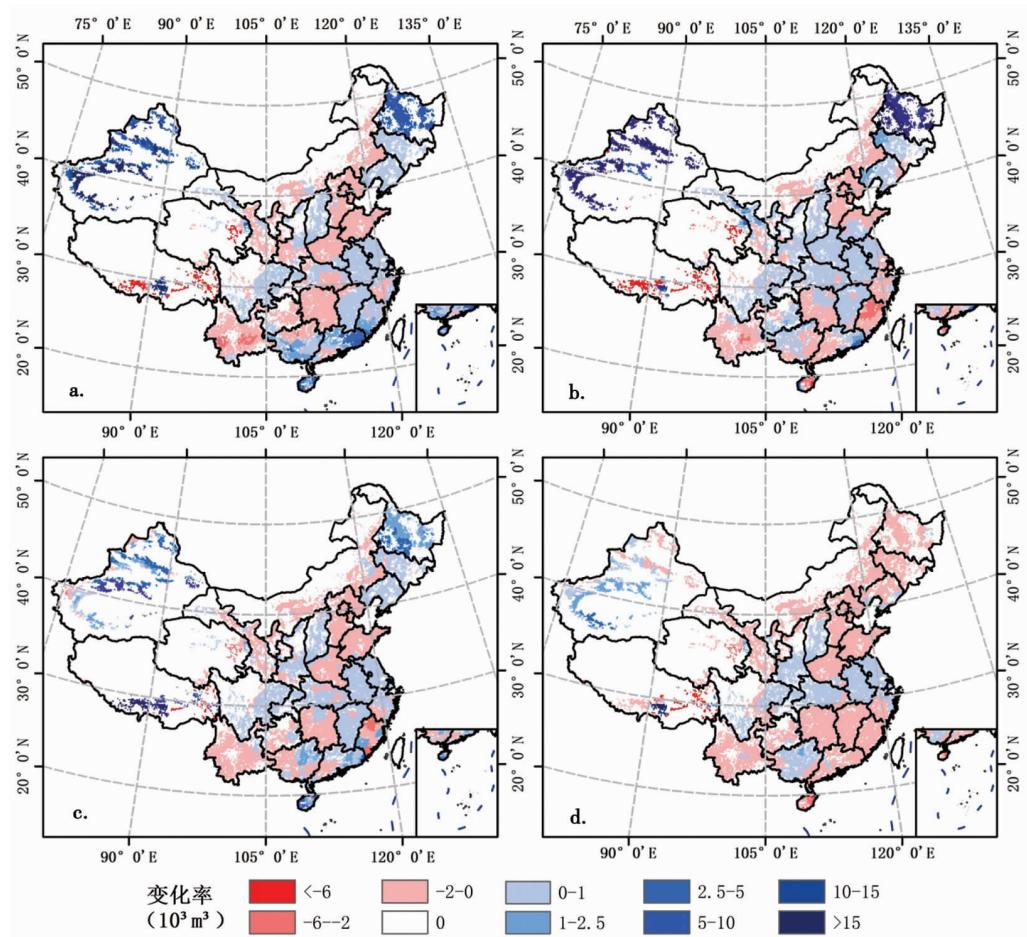


图3 2003—2012年蓝水用水量四季变化率

(a. 春季(3—5月), b. 夏季(6—8月), c. 秋季(9—11月), d. 冬季(12—2月))

中，江苏蓝水用水总量增加趋势最明显（ $56.17 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ），上海蓝水用水总量减少趋势最明显（ $25.72 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ）。

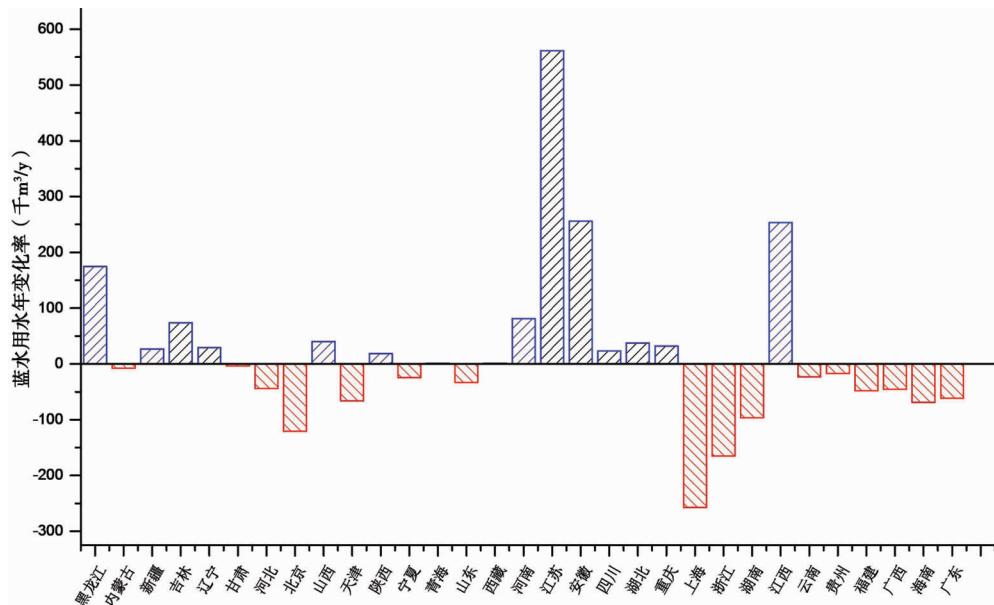


图 4 2003—2012 年各省蓝水用水量变化率

2.2 2003—2012 年三大粮食作物蓝水用水时空分布特征分析

通过该文提出的灌溉用水空间化模型，空间化得到 2003—2012 年 1km 分辨率的我国小麦、玉米和水稻蓝水用水分布图。2003—2012 年小麦、玉米和水稻灌溉量的平均值、标准差和变化率空间分布如图 5 所示。总体来说小麦的蓝水用水总量与玉米的相近，水稻的蓝水用水总量较其他两者更大。

小麦蓝水用水总量的分布规律为：华北平原和新疆部分地区蓝水用水总量最高，东北三省和东南沿海蓝水用水总量较低。在大多数灌溉区，小麦的蓝水用水总量没有显著变化，每年蓝水用水总量的标准差低于 0.002km^3 。综合图 5 和图 6 可看出，2003—2012 年上海、重庆、湖北、四川、安徽、江苏、河南、陕西、山西、辽宁、新疆、黑龙江共 12 个省（市、区）小麦的蓝水用水总量增加，而贵州、云南、湖南、山东、宁夏、天津、北京、河北 8 个省份小麦的蓝水用水总量呈现减少趋势，剩下的 11 个省（市、区）小麦的蓝水用水量基本保持不变。其中，江苏小麦蓝水用水量的增加趋势最明显（ $30.45 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ），北京的小麦蓝水用水量的减少趋势最明显（ $6.02 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ）。

玉米蓝水用水总量的分布规律为：华北平原和新疆部分地区灌溉量最高，东北三省蓝水用水量较高，东南沿海蓝水用水量较低。在大多数灌溉区，玉米的蓝水用水量没有显著变化，每年蓝水用水量的标准差低于 0.002km^3 。综合图 5 和图 6 可看出，2003—2012 年湖北、四川、安徽、青海、陕西、河北、甘肃、辽宁、新疆、黑龙江共 10 个省（市、区）玉米的蓝水用水量增加，而湖南、河南、山东、宁夏、天津、山西 6 个省（市、区）玉米的蓝水用水量呈现减少的趋势，剩下的 15 个省（市、区）玉米的蓝水用水量基本保持不变。其中，黑龙江玉米蓝水用水量的增加趋势最明显（ $8.83 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ），北京的玉米蓝水用水量的减少趋势最明显（ $5.19 \text{ 万 m}^3/\text{年}$ ）。

水稻蓝水用水总量的分布规律为：东南沿海和东北部分地区较多，中部地区较少。在大多数灌溉区，水稻的蓝水用水量没有显著变化，每年蓝水用水量的标准差低于 0.002km^3 。综合图 5 和图 6 可看出，2003—2012 年江西、重庆、湖北、四川、安徽、江苏、河南、山东、辽宁、吉林、黑龙江共 11 个省（市、区）水稻的蓝水用水量增加，而广东、海南、广西、福建、贵州、云南、湖南、浙江、上海、宁夏、天津、北京、河北 13 个省（市、区）水稻的蓝水用水量呈现减少的趋势，剩下的 7 个省（市、区）

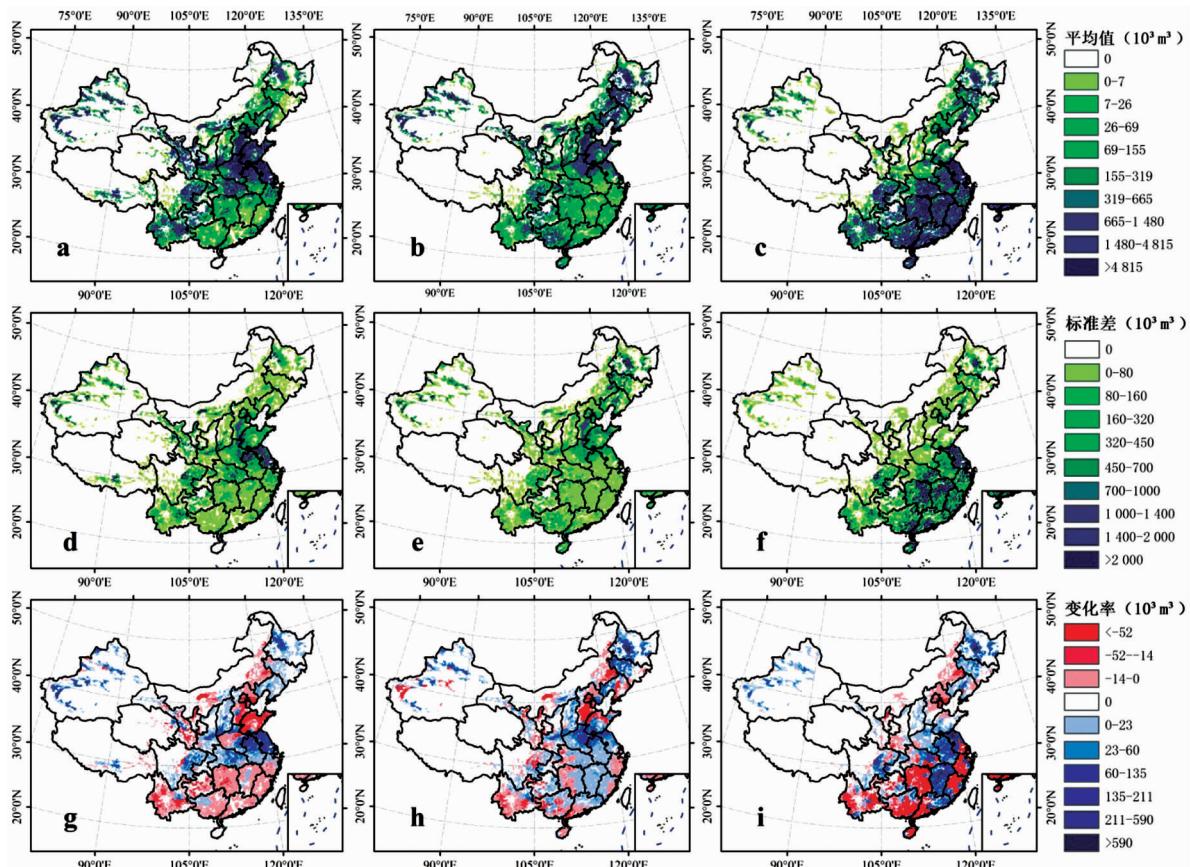


图5 2003—2012年三大粮食作物蓝水用水量的平均值、标准差和变化率
(a. d. g. 对应小麦, b. e. h. 对应玉米, c. f. i. 对应水稻)

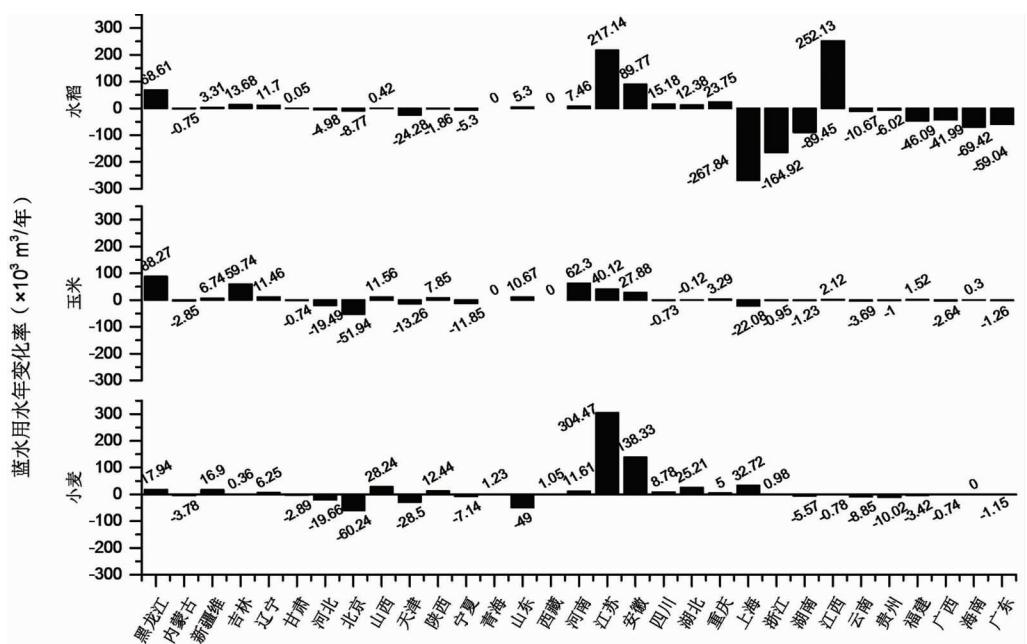


图6 2003—2012年三大粮食作物蓝水用水量年变化率

水稻的蓝水用水量基本保持不变。其中，江西水稻蓝水用水量的增加趋势最明显（25.21 万 m^3 /年），上海的水稻蓝水用水量的减少趋势最明显（26.78 万 m^3 /年）。

2.3 蓝水用水总量与三大粮食作物蓝水用水量的相关性分析

对蓝水总用水量与三大粮食作物的蓝水用水量进行相关性计算，分别得到三大粮食作物蓝水用水量与蓝水总用水量的相关系数图（图 7）。从图 7 可以看出总灌溉量与 3 种作物的灌溉量在大体上均呈现较好的正相关关系，其中水稻的灌溉量与总灌溉量的相关性最好；在东南沿海地区，小麦和玉米的灌溉量与总灌溉量的正相关关系不明显，个别地区甚至呈现负相关。由计算出的相关系数进一步得到各地区影响总蓝水总用水量的主要作物的分布图（图 8）。由图 8 可以看出在东南沿海地区主要影响灌溉量的作物为水稻，在东北及华北部分地区主要影响灌溉量的作物为玉米，其他部分地区主要影响灌溉量的作物为小麦。在刘钰等人的研究中指出，我国东北地区玉米的净灌溉需水量高于小麦和水稻的净灌溉需水量，而在华南地区则是水稻的净灌溉需水量最多^[22]，这与该研究所得出的主要影响区域相符。

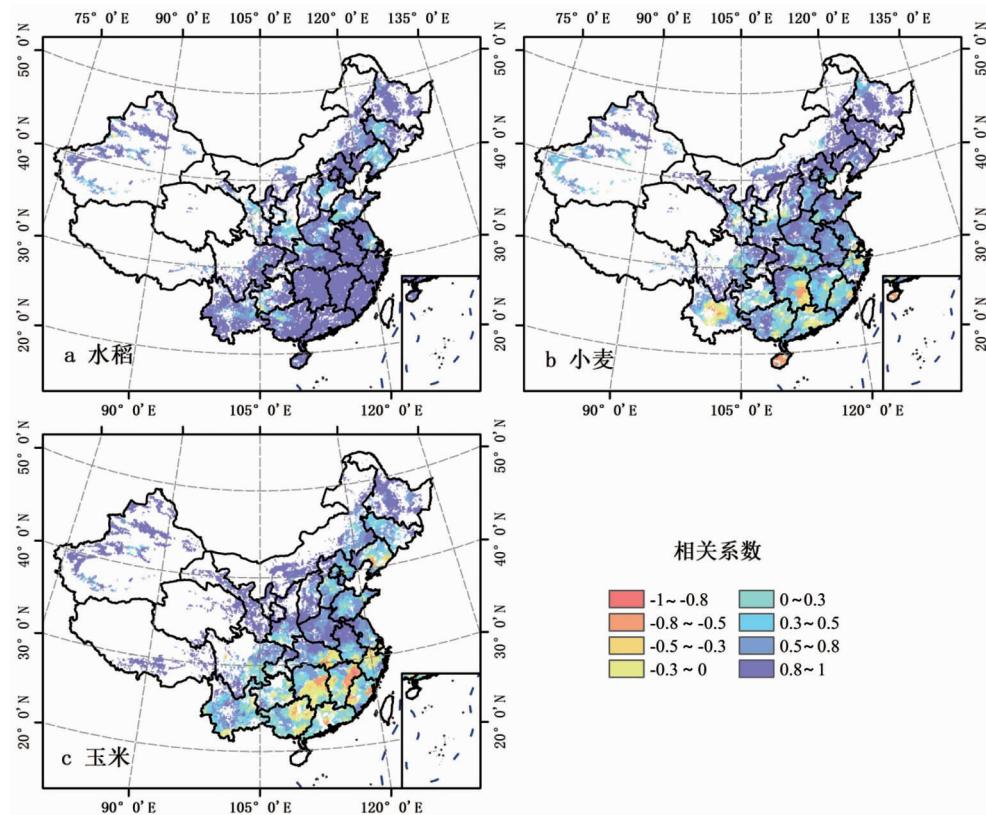


图 7 2003—2012 年三大粮食作物灌溉量与总灌溉量相关性

2.4 空间化误差分析

对于统计数据空间化结果的评价，通常需要借助更加精细尺度的数据，例如对市级粮食产量进行空间化得到格网尺度的产量分布图进行评价时通常会收集该市的各县的粮食产量统计数据，以此为参考，对比分析由格网统计出的县级粮食的产量和官方发布的产量数据之间的差异。该研究空间化的目标对象是省级农业灌溉用水数据，目前有关灌溉用水的市县级数据少有报道。通过查阅大量年鉴，收集到了宁夏水利年鉴 2010—2012 年各县的灌溉用水量^[23]，将其与用模型计算出的蓝水用水量进行拟合，结果如图 9 所示。整体上来看，该文计算出的蓝水用水量与统计发布的数据存在很高的相关性 ($R^2 = 0.95$)，平均相对误差为 -23.516%。具体原因可能如下：首先，农业用水不仅用于作物灌溉，还用于其他农业部门，如牧草、果园和林地等。在实验中，利用 2010 年各省的灌溉用水量与农业用水量计算出了灌溉用水比，并将这个

灌溉用水比使用在整个实验过程中。同样的，用2000年的我国灌溉地图来表示2003—2012年的灌溉农田分布。所用的灌溉用水比和灌溉农田分布体现不出年际和省内各县市的差异和变化。此外，所用的灌溉图中的灌溉面积表示的是有效灌溉面积，而非实际灌溉面积，由于环境的影响，实际灌溉面积可能大于或小于有效灌溉面积，导致计算的单位面积蓝水用水量和实际值产生偏差。

3 结论与讨论

3.1 结论

空间分配模型建立的关键在于因变量和辅助因子的选取，以及这些因素与目标变量的关系分析。相关研究表明，由于现实生产中，人们大多按照农作物的需求进行相应的灌溉，理论需水量与实际用水量之间的比值，即折算系数与净灌溉需水量之间存在较好的正相关关系^[24]。基于此，该研究生成了全国主要农作物（小麦、玉米和水稻）时间序列（2003—2012年）高分辨率（1km×1km）蓝水用水分布图，明确了实际蓝水用水的空间分布，有利于用水供需矛盾和水资源短缺分析，为进一步评价蓝绿水的投入量和利用效率，以及合理和高效管理农业水资源提供参考信息。

尽管该研究对灌溉用水空间化进行了有意义的探索，但仍然存在很多的不确定性因素。

3.2 结论

（1）农业用水不仅用于灌溉，还用于其他

农业部门，如畜牧业和林业等。实验中，利用2010年各省的灌溉用水量与农业用水量计算出了灌溉用水比，并将这个灌溉用水比使用在整个实验过程中。然而，由于不同地区农业结构的不断变化，部分地区在调整农业结构后林业和畜牧业用水增多，对于这些地区来说，计算出的2010年前的灌溉用水量可能较实际值偏大；而对于另一些种植业灌溉用水增多的省份来说，计算出的2010年前的灌溉用水量可能较实际值偏小。

（2）灌溉用水不仅用于三大粮食作物的灌溉，同时用于其他粮食作物和经济作物的灌溉。而在实验中，由于缺乏其他作物的相关数据，假设灌溉用水仅用于三大粮食作物的灌溉。对于绝大多数以这三大作物为主的省份来说，误差较小，而对于一些其他作物种植广泛的地区，这种计算方式会使得计算出的3种作物的灌溉用水偏高。

（3）该实验中，利用2000年的我国灌溉地图来表示2003—2012年的灌溉面积。由于缺乏其他可用的灌溉数据，只能忽略2000—2012年的灌溉面积的变化。实际上，由于退耕还林、退耕还草等政策的实施，2000年以来全国大部分地区灌溉面积在不断减少^[25]，因此计算出的2003—2012年的灌溉用水量可能会比实际值偏大。此外，灌溉图中的灌溉面积表示灌溉区域（也称有效灌溉面积，而非实际灌溉面积），由于

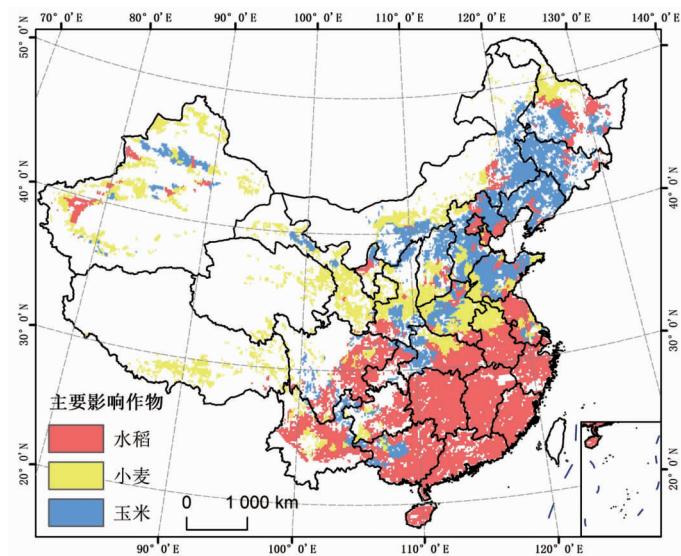


图8 2003—2012年总灌溉量的主要影响作物

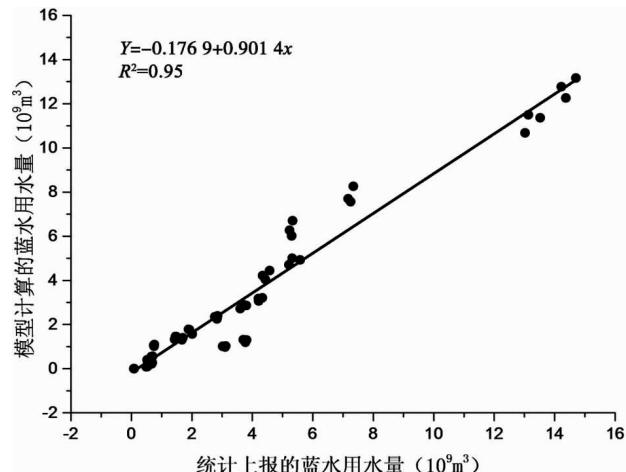


图9 计算蓝水用水量与统计蓝水用水量的拟合

环境的影响，实际灌溉面积可能大于或小于有效灌溉面积。因此，计算的单位面积蓝水用水量和实际值可能产生偏差。

(4) 实验中由于缺少具体的作物分布数据，采用 2014 年的作物分布图来表示 2003—2012 年的作物分布，忽略了作物种植面积的变化。此外该数据本身也存在一定误差，且分辨率比较粗为 0.083° 。我国南方地区种植结构复杂、地块破碎、混合像元问题严重，通过低分辨率的影像很难得到高精度的作物空间分布图。而作物空间分布图是该研究的基础，决定了被分配的格网的数量和位置。

(5) 使用《中国主要作物需水量与灌溉》^[20]一书的作物系数来计算不同作物的需水量，但由于气候、土壤、作物品种等客观差异的存在，局部地区作物系数也可能存在差异，导致真实的作物系数和所用的作物系数存在偏差。此外，对于作物来说有效水为土壤水，实验中只考虑了降水，未考虑降水到土壤水的延迟，使得有效降水的计算存在误差。以上两点都会影响蓝水需求量的计算，进而导致蓝水分配量的误差。

参考文献

- [1] 新华社. 我国农田有效灌溉面积比重达到 52%. 四川农业科技, 2016 (6): 23–23.
- [2] 中华人民共和国水利部. 2012 年中国水资源公报. 北京: 中华人民共和国水利部, 2014.
- [3] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索. 中国农业科学, 2015, 48 (17): 3493–3503.
- [4] Khan M R, Bie C A J M D, Keulen H V, et al. Disaggregating and mapping crop statistics using hyper temporal remote sensing. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2010, 12 (1): 36–46.
- [5] 唐鹏钦, 陈仲新, 杨鹏, 等. 利用作物空间分配模型模拟近 30 年东北地区水稻分布变化. 中国农业资源与区划学会学术年会, 2012.
- [6] 涂丽丽. GIS 支持下的安徽省小麦面积历史统计数据空间栅格化研究 [硕士论文]. 南京: 南京大学, 2012.
- [7] 夏天, 吴文斌, 周清波, 等. 基于地理回归的农作物播种面积统计数据空间化方法. 自然资源学报, 2016, 31 (10): 1773–1782.
- [8] You L, Wood S. An entropy approach to spatial disaggregation of agricultural production. Agricultural Systems, 2006, 90 (1): 329–347.
- [9] 刘忠, 李保国. 基于土地利用和人口密度的中国粮食产量空间化. 农业工程学报, 2012, 28 (9): 1–8.
- [10] 谭杰扬, 李正国, 杨鹏, 等. 基于作物空间分配模型的东北三省春玉米时空分布特征. 地理学报, 2014, 69 (3): 353–364.
- [11] 汤斌, 王福民, 周柳萍, 等. 基于地级市的区域水稻遥感估产与空间化研究. 江苏农业科学, 2015, 43 (11): 525–528.
- [12] 姬广兴, 廖顺宝, 岳艳琳, 等. 不同样本尺度和分区方案的粮食产量空间化及误差修正. 农业工程学报, 2015, 31 (15): 272–278.
- [13] 廖顺宝, 姬广兴, 王晖, 等. 粮食产量空间化中 4 种误差修正方法的对比与分析. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (8): 128–136.
- [14] 何鹏, 林正雨, 景晓卫, 等. 基于不同样本分区和模型参数的四川省粮食产量空间化研究. 中国农业资源与区划, 2017, 38 (9): 23–31.
- [15] Potter, Philip, Ramankutty, Navin, Bennett, Elena M, et al. Characterizing the spatial patterns of global fertilizer application and manure production. Earth Interactions, 2010, 14 (1): 1–22.
- [16] 孙丹峰, 王雅, 李红, 等. 基于 MODIS NDVI 年序列的区域化肥投入空间化方法. 农业工程学报, 2010, 26 (6): 175–180.
- [17] 邵霜霜, 师庆东, 刘曼, 等. 新疆农业产值的空间化表达与分析. 中国生态农业学报, 2014, 22 (11): 1379–1384.
- [18] 张晶, 吴绍洪, 刘燕华, 等. 土地利用和地形因子影响下的西藏农业产值空间化模拟. 农业工程学报, 2007, 23 (4): 59–65.
- [19] Zhu X, Shi P, Pan Y. Development of a gridded dataset of annual irrigation water withdrawal in China. International Conference on Agro-Geoinformatics. IEEE, 2012: 1–6.
- [20] 陈玉民, 郭国双. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [21] 董仁, 隋福祥, 张树辉. 应用彭曼公式计算作物需水量. 黑龙江大学工程学报, 2006, 33 (2): 100–101.
- [22] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征. 农业工程学报, 2009, 25 (12): 6–12.
- [23] 《宁夏水利年鉴》编委会. 宁夏水利年鉴 2013. 银川: 宁夏人民出版社, 2014.
- [24] 温忠辉, 张刚, 鲁程鹏, 等. 基于作物需水的灌溉用水量核算方法及应用. 南水北调与水利科技, 2015 (2): 370–373.
- [25] 柳长顺, 杜丽娟, 陈献, 等. 近 20 年我国有效灌溉面积动态分析. 资源科学, 2006, 28 (2): 8–12.

DEVELOPMENT OF TIME SERIES GRIDDED MAPS OF MAJOR FOOD CROPS BLUE WATER CONSUMPTION IN CHINA *

Liu Tingting¹, Zhu Xiufang^{1,2*}, Liu Ying¹, Xu Kun¹

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Defining the spatial distribution of actual blue water consume is beneficial to the analysis of water supply and demand contradiction and water shortage, and provides reference information for further evaluating the input and utilization efficiency of blue and green water, as well as rational and efficient management of agricultural water resources. However, the current data on agricultural water use are only the statistics of administrative units, which is not conducive to spatial analysis. The development of spatialization model to spatialize statistical data is effective way to solve this problem. Based on the hypothesis that the consumption of blue water was directly proportional to the demand of blue water, a spatial model of blue water was constructed in this paper. Using climatic data, agricultural water statistics, irrigation farmland distribution map, spatial distribution map of main grain crops, crop coefficient and growth period data, the gridded maps of major food crops blue water consumption in China with a resolution of 1 km from 2003 to 2012 were generated. The overall trend of blue water consumption and the dominant crops affecting the blue water consumption in different regions were analyzed. The results showed that the average blue water consumption in North China was highest. There was no significant change in blue water consumption in most irrigation districts. The standard deviation of blue water consumption per year was less than 0.004 cubic kilometers. The absolute change rate of water consumption of blue water was the largest in summer and the smallest in winter. As far as the provinces were concerned, the most obvious increasing trend of total blue water consumption was in Jiangsu province, and the most obvious decreasing trend was in Shanghai. For different crops, the most obvious increasing trend of blue water consumption of wheat, maize and rice occurred in Jiangsu, Heilongjiang and Jiangxi, and the most obvious decreasing trend occurred in Beijing and Shanghai. Rice was the main crop affecting blue water consumption in the southeast coastal area of China, maize was the main crop affecting blue water consumption in the northeast and North China, and wheat was the main crop affecting blue water consumption in other parts of China. Local validation results showed that the blue water consumption calculated in this paper was highly correlated with the statistical data ($R^2 = 0.95$). The spatialization model of blue water developed in this paper can be used to make time series blue water distribution map, and has certain application value.

Keywords irrigation water demand; blue water consumption; spatial distribution model; spatialization; grain crops