

# 气候变化下我国主要农作物需水变化

蔡超, 任华堂, 夏建新

(中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081)

**摘要:** 全球气候变化不可避免的会给农业用水带来影响。利用全国 93 个气象站 1960-2009 年的气候资料, 分析全国近 50 年 4 种主要粮食作物(玉米、小麦、大豆、水稻)的蓝水蒸散量及年蓝水需水量的分布和变化。结果表明: 1960-2009 年间全国平均温度上升 1.1 °C, 1980s 以后气候变暖加剧, 增幅北方大于南方。农作物蓝水蒸散量有不同程度下降; 1990s 前蓝水蒸散量主要影响因子为降雨量, 1990 s 后为温度。气候变化使得东北、内蒙古农作物种植面积增加, 农作物蓝水需水量上升。从蓝水蒸散量出发, 调整地区间农作物种植结构可以缓解因气候变化给北方地区带来的农业水资源压力。

**关键词:** 气候变化; 蓝水; 蓝水蒸散量; 农业需水

中图分类号: S162, S271

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)01-0071-05

## Variation of water requirement for main crops in China based on climate change

CAI Chao, REN Huatang, XIA Jianxin

(College of Life and Environment Science, Central University for Nationalities, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The globe climate change inevitably impacts the use of agricultural water. The distribution and change of blue water evapotranspiration and yearly irrigation water requirement of the four crops (maize, wheat, soybean and rice) in different regions were analyzed by using climate data of 93 meteorological stations in China from 1960 to 2009. The results show that annual average temperature increased by 1.1 °C from 1960 to 2009 in China. Northern China is warming faster than southern China, and climate warming has aggravated since 1980s. The blue water evapotranspiration of crop decreases at different extent; and the main influence factor of that was precipitation before 1990s, and that has been temperature since 1990s. The crop area of northeast China and Inner Mongolia increases significantly result from climate change, and the blue water requirement in these areas rises as well. The adjustment of crop planting structure between areas can relieve the pressure of agricultural water resources brought by the climate change in north China from the view of blue water evapotranspiration.

**Key words:** climate change; blue water; blue water evapotranspiration; agriculture water

全球气候变化的特征已经越来越明显, 其对于“靠天吃饭”的农业影响尤其显著。随着资源紧缺以及粮食安全问题日益突出, 气候变化对农业的影响已引起广泛关注<sup>[1-4]</sup>。而气候变化对于农业用水的影响尤其重要。吴普特等运用干旱指数等研究气候变化对农业用水的影响, 认为通过人为因素可以在一定程度上缓解气候变化对农业用水带来的负面影响<sup>[5]</sup>。黄晶等分析了北京近 20 年农业用水的变化, 指出气候对农业用水影响的贡献率为

17.1%<sup>[6]</sup>。王小军等讨论了气候变化背景下我国农业用水安全<sup>[7]</sup>。然而, 由于幅员辽阔, 气候变化对我国不同区域农作物用水的影响并不完全一致, 对农业用水的影响大都局限于定性分析, 缺乏相应的数据支持。

本文基于过去 50 年的气候变化数据, 利用 CROPWAT 模型计算分析了我国主要农作物的蓝水蒸散量以及相应地区蓝水需水量的变化, 探讨气候变化对不同区域农作物年均蓝水需水量的影响, 以期为

收稿日期: 2013-09-05; 修回日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(51179213); 中央高校基本科研业务费专项资金(1112KYZY53)

作者简介: 蔡超(1990-), 男, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 主要从事水资源与水环境研究。

通讯作者: 夏建新(1969-), 男, 教授, 主要研究方向为环境科学与资源利用等。

区域间水资源调配和农业产业结构调整提供依据。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究方法

农作物需水量指作物生长过程中蒸发蒸腾所消耗的水资源量,主要分为两类:蓝水和绿水。蓝水、绿水概念最早由瑞典水文学家 Falkenmark 于 1993 年提出<sup>[8]</sup>。其中蓝水指地表水和地下水;绿水指来源于降水、储存于非饱和土壤层中以蒸散形式供植物利用的水。绿水直接由作物从土壤中汲取,蓝水则需人工从地表或地下提取供给作物,即人工灌溉。绿水所占比例越高,反映自然雨养条件越好;反之,则反映农作物对人工灌溉用水的需求量越大。绿水和蓝水的计算参考 NOVO P.<sup>[9]</sup>:

$$ET_g[c, q, m] = \min[CWR(c, q, m), P_{eff}(q, m)] \quad (1)$$

$$ET_b[c, q, m] = \max[0, CWR(c, q, m) - ET_g(c, q, m)] \quad (2)$$

$$CWU_b[c, q, t] = \sum_{m=1}^t ET_b[c, q, m] \quad (3)$$

式中:  $ET_g[c, q, m]$  和  $ET_b[c, q, m]$  分别表示  $q$  地区作物  $c$  在第  $m$  月的绿水和蓝水的蒸散总量;  $CWR$  为作物需水量,其值大小等于  $ET_c$ ;  $P_{eff}$  为有效降雨量;  $CWU_b[c, q, t]$  表示在  $q$  地区作物  $c$  生长时间共  $t$  月的蓝水的需水量。式中作物逐月的  $CWR[c, q, m]$  和  $P_{eff}[q, m]$  均由联合国粮农组织推荐的 CROPWAT 模型计算得出。

按区域自然地理和气候变化的特点,参考行政区划,将全国分成 9 个区域(不包括港澳台)<sup>[4]</sup>: 东北(黑、吉、辽)、华北(陕、晋、豫、京、津、冀、鲁)、华东(闽、浙、苏、赣、皖、沪)、华南(桂、粤、琼)、华中(鄂、湘)、西南(川、滇、渝、贵)、青藏高原(藏、青)、内蒙古和西北(新、甘、宁)。利用上述计算结果,将作物蓝水蒸散量乘以相应农作物地种植面积,得出各区域主要农作物总蓝水需水量。蓝水需水量并不代表实际灌溉用水量,它只反映在当前生长环境下作物正常生长所需的地表或地下水水量。该指标排除了灌溉效率、田间蒸发等因素,可以更直接地反映气候变化对农作物需水的影响。

### 1.2 数据来源

主要气候数据,如最高气温、最低气温、日照时数、平均风速、平均相对湿度以及降雨量等,来自中国气象局国家气候信息中心,其中包括全国 93 个测站 1960-2009 年逐日的数据集(缺失数据采用相邻

日期插值得到);历年农作物种植面积来自《新中国农业 60 年统计资料》<sup>[10]</sup>;土壤和作物相关参数来自国际粮农组织(FAO)的 CROP 数据库。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同区域主要气候因子变化

近 50 年来,各地区平均温度呈不同程度的上升(图 1)。全国平均温度上升  $1.1^{\circ}\text{C}$ ,以 1980s 为分界点,其变化过程可分为两个阶段。1980s 前全国平均温度增幅仅为每 10 年  $0.1^{\circ}\text{C}$ ,1980s 后气候变暖加剧,平均温度增幅达到每 10 年  $0.4^{\circ}\text{C}$ 。空间上,上升幅度从南向北逐渐增加。其中,青藏高原上升幅度最大为  $1.9^{\circ}\text{C}$ ;西南地区上升幅度最小为  $0.6^{\circ}\text{C}$ 。

图 2 为近 50 年来中国不同区域年降雨距平变化。其中,西北区、青藏高原区降雨量呈现上升趋势,1970-1989 年的上升幅度尤为明显;内蒙古、华中、华东等区域在 2000s 前降雨量逐渐上升,2000s 后有所下降;东北、华北、西南、华南等地区降雨量年际波动较大。

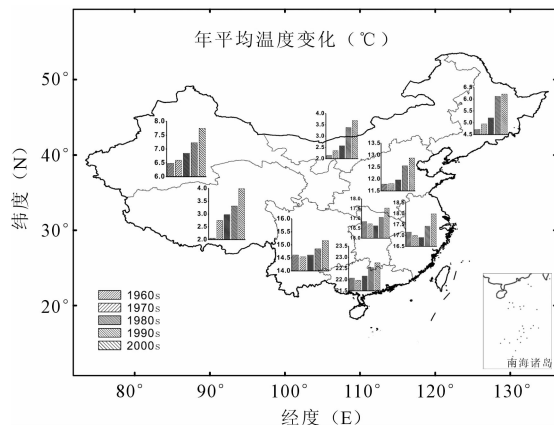


图 1 近 50 年来中国不同区域年平均温度变化

### 2.2 气候变化对主要农作物蓝水蒸散量的影响

不同农作物的蓝水蒸散量具有较大的差别(图 3)。以 2000s 为例,玉米和大豆全国平均蓝水蒸散量分别为 350 和 277 mm,而小麦和水稻全国平均蓝水蒸散量分别为 598 和 827 mm。全国范围内,新疆农作物蓝水蒸散量最大,华南农作物蓝水蒸散量最小。农作物蓝水蒸散量由西北至东南呈减小趋势。由于气候变化,各农作物的蓝水蒸散量有不同程度的下降。玉米、大豆降幅较小,分别为每 10 年下降 14 mm 和 10 mm;小麦、水稻降幅较大,分别为每 10 年下降 25 mm 和 26 mm,下降主要集中于 1970s-1990s。

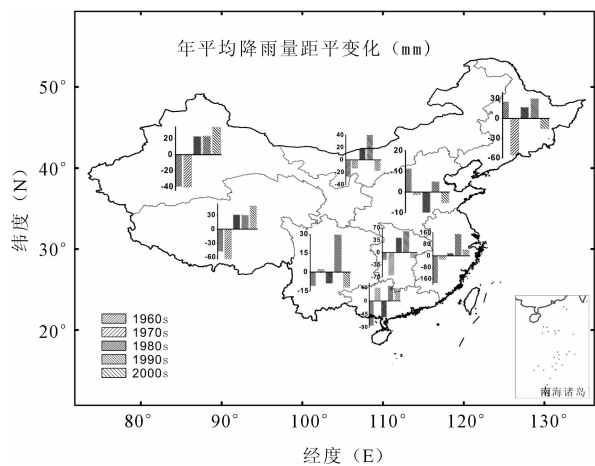


图 2 近 50 年来中国不同区域年降雨距平变化

### 2.3 不同区域主要农作物蓝水需水量变化

图 4 为不同区域主要农作物蓝水需水量变化。可以看出,各地区主要耗水作物有所区别。其中,华南、华东、华中、西南主要耗水作物为水稻;青藏高

原、西北、内蒙古、华北主要耗水作物为小麦;东北主要耗水作物为玉米。

近 50 年来,东北、内蒙古地区农作物蓝水需水量出现显著上升,且上升主要集中于近 20 年(图 4)。1980s 以前,东北、内蒙古农作物蓝水需水量基本不变;而 1980s 以后,其增幅分别为每 10 年增加 130 亿、51 亿  $m^3$ ;且蓝水需水量的增加分别主要用于玉米和水稻。华中、华南、华东地区的农作物蓝水需水量有较程度的下降,降幅分别为每 10 年下降 39 亿、53 亿、127 亿  $m^3$ ,且主要源于水稻蓝水需水量下降。

## 3 研究结果讨论

### 3.1 农作物蓝水蒸散量与气候变化响应关系

作物蓝水蒸散量受气温、降雨量、日照、风速等多种因素影响,其中气温和降雨量的影响尤为显著。气温越高,作物蓝水绿水总蒸散量最大。降雨量越

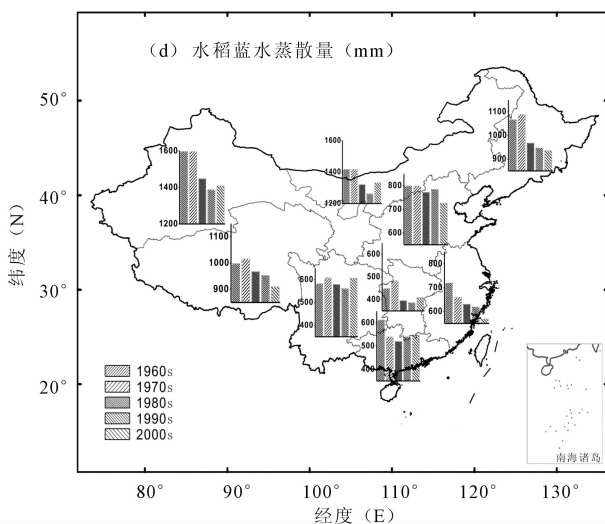
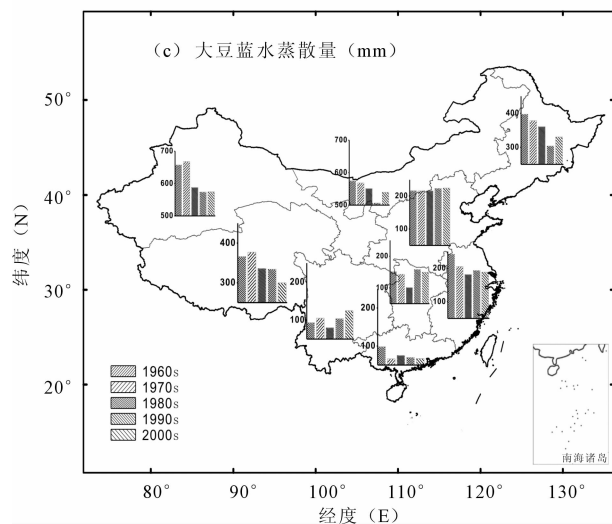
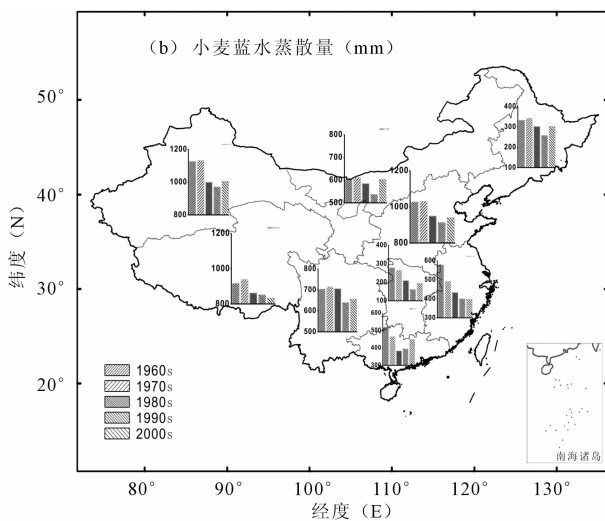
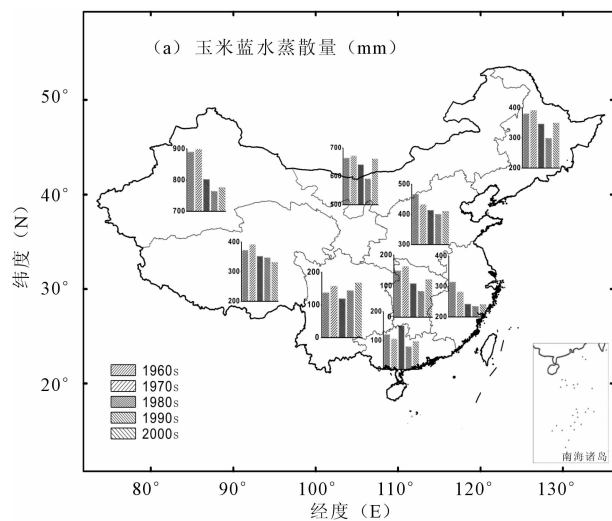


图 3 4 种主要农作物蓝水蒸散量变化

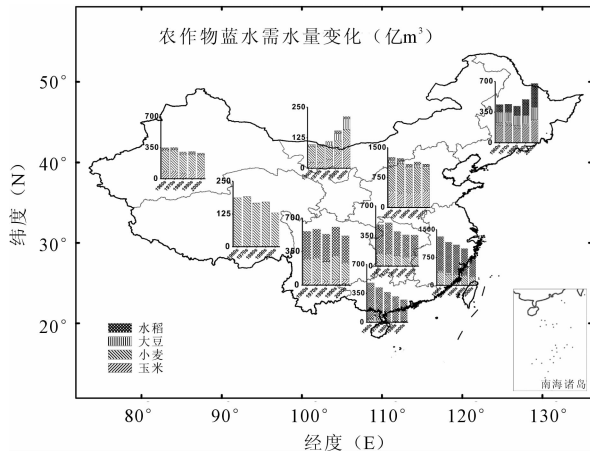


图4 不同区域主要农作物蓝水需水量变化

大,绿水蒸散量越大,相应蓝水蒸散量越小<sup>[11]</sup>。总体来看,气候变化对农作物蓝水蒸散量的影响大致可分为两个阶段:1960s-1990s和1990s-2000s。第一阶段,气温呈现上升趋势,但气温数值较小,农作物蓝水绿水总蒸散量不大,降雨量的起伏使得作物绿水蒸散量有较大变化,从而间接影响了作物蓝水蒸散量;第二阶段,气候变暖趋势有所缓解,但气温数值较大,此时作物蓝水绿水总蒸散量较大,作物蓝水蒸散量随总蒸散量普遍增加。部分地区如新疆降雨量虽然有所增加,但农作物蓝水蒸散量依然增大,可见此时温度成为作物蓝水蒸散量的主要影响因子,降雨量为次要影响因子。但是也有例外,如2000s东北的水稻,相比1990s,东北年平均温度上升,年均降雨量减小,水稻的蓝水蒸散量却有所下降。这主要是由于年降雨量仅反映该地区年平均大小,未考虑到年内降雨量分布不均。由于年内分布不均,降雨量集中于水稻生长期,导致其蓝水蒸散量有所减小。

不同农作物对气候变化的响应也不同。以1960s为参照,1970s华中地区年平均温度和降雨量均有所下降,其水稻和玉米的蓝水蒸散量上升,而小麦和大豆的蓝水蒸散量下降。一方面由于降雨量年内分布不均,导致对农作物的影响不同;另一方面由于不同农作物对不同气候因子变化的敏感性不同。水稻和玉米更易受降雨量影响。虽然温度下降使得蓝水绿水总蒸散量减小,但幅度不大;而降雨量的减小使得蓝水蒸散量占总蒸散量比例有较大幅度地增加,综合影响导致蓝水蒸散量上升。相对来说小麦和大豆对温度敏感性更高。

总体来说,由于气候变化,新疆、青藏高原、华中、华南、华东、东北地区农作物蓝水蒸散量成下降

趋势,这些地区农作物雨养条件在得到改善;而华北的大豆,西南、内蒙古等地区农作物蓝水蒸散量有所增加。

### 3.2 农作物蓝水需水量变化对区域水资源利用的影响

由于气候变暖,喜温作物玉米、大豆、水稻种植区北界向北扩展<sup>[12-13]</sup>,东北、内蒙古成为未来农业潜在增长区。虽然这些地区农作物蓝水蒸散量有所下降,但其农作物年均蓝水需水量呈现上升趋势。以1990s为参照,2000s内蒙古和东北地区农作物年均蓝水需水量分别增加58亿 $m^3$ 和162亿 $m^3$ 。大量的农业用水将挤占工业和生态用水,给本来水资源紧缺的北方地区带来巨大压力,严重破坏水资源的可持续利用。一旦这些地区出现水资源危机,粮食安全也将受到威胁。华北地区农作物年均蓝水需水量虽然呈现下降趋势,但其总量为各地区最大,2000s达到1087亿 $m^3$ 。且华北地区如河北省,农业发展严重依赖地下水,这些地区已经形成大面积的漏斗区,农业水资源形势依然严峻。

南水北调的中线、东线规划总调水量为278亿 $m^3$ ,主要将华中、华东地区的水资源调往华北地区。以1990s为基准,2000s华中、华东地区因气候变化,农作物蓝水需水量共减小228亿 $m^3$ 。可见,气候变化可以很大程度上抵消南水北调工程对华中、华东地区带来的负面效应,而相应华北地区的水资源危机又可以得到缓解。由于地理位置的特殊性,对内蒙古、东北地区实施调水工程尚有困难。除改善水资源管理、提高水资源利用率外,蓝水蒸散量为缓解水资源危机提供一种新思路。如2000s,东北、华北地区大豆蓝水蒸散量分别为330mm和223mm;玉米蓝水蒸散量分别为350mm和410mm。通过改善种植结构,如将东北一定面积大豆移植到华北,而将华北相等面积玉米移植到东北,则可以充分利用当地气候、土壤等自然条件,减小农作物对蓝水的需求,从侧面减小了对农业灌溉用水的依赖。

## 4 结 语

(1)1969-2009年,全国平均温度上升 $1.1^{\circ}C$ ,1980s后,气候变暖加剧。空间上,温度增幅由南至北呈增加趋势。东北、华北、西南、华南等地区降雨量年际波动较大,其余地区年降雨量有不同程度的增加。

(2)农作物蓝水蒸散量在空间上由西北至东南呈减小趋势。近50年来,气候变化使得农作物的蓝

水蒸散量均有不同程度的下降。玉米、大豆降幅较小,分别为每 10 年下降 14 和 10 mm;小麦、水稻降幅较大,分别为每 10 年下降 25 和 26 mm。气候变化对农作物蓝水蒸散量的影响可分两个阶段:1990s 前,降雨量为主要影响因子;1990s 后温度为主要影响因子。不同农作物对温度和降雨量变化的敏感性不同。

(3)气候变暖导致喜温作物种植区北界向北扩展,东北、内蒙古农作物种植面积上升。1980s 后,东北、内蒙古地区农作物年蓝水需水量出现显著增加,增幅分别为每 10 年增加 130 亿、51 亿  $m^3$ ,增加的蓝水需水量分别源于玉米和水稻。从农作物蓝水蒸散量出发,结合不同农作物在不同地区的需水特性,调整地区间尤其是北方地区的种植结构,可以一定程度上减小农作物对人工灌溉的需求,缓解因气候变化对北方地区农业水资源带来的压力。

本文对于农作物蓝水蒸散量、蓝水需水量的计算主要考虑气候因素对其的影响,尚属理论计算,有待实际观测数据的进一步验证。同时由于肥料和农药的使用造成的面源污染,农作物灰水足迹的考虑也是十分必要的。

#### 参考文献:

[1] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China [J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43 - 51.

- [2] 李保国,黄峰. 1998 - 2007 年中国农业用水分析[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 575 - 583.
- [3] 孙才志,陈丽新,刘王玉. 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.
- [4] 肖国举,张强,王静. 全球气候变化对农业生态系统的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(8): 1877 - 1885.
- [5] 吴普特,赵西宁. 气候变化对中国农业用水和粮食生产的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 1 - 6.
- [6] 黄晶,宋振伟,陈阜,等. 北京市近 20 年农业用水变化趋势及其影响因素[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(5): 103 - 108.
- [7] 王小军,张建云,王国庆,等. 气候变化与农业用水安全[J]. *中国农村水利水电*, 2012, 2: 23 - 29.
- [8] Falkenmark M. Land - water linkages: a synopsis [J]. *Land and Water integration and river basin management. FAO Land and Water Bulletin*, 1995, 1: 15 - 16.
- [9] Novo P, Garrido A, Varela - Ortega C. Are virtual water "flows" in Spanish grain trade consistent with relative water scarcity? [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(5): 1454 - 1464.
- [10] 新中国农业 60 年统计资料[M]. 北京:中国农业出版社, 2009.
- [11] 张强,邓振镛,赵映东,等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(3): 1210 - 1218.
- [12] 刘彦随,刘玉,郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905 - 910.
- [13] 潘根兴,高民,胡国华,等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(9): 1698 - 1706.