

# 气候变化对海河流域主要作物物候和产量影响

胡 实, 莫兴国, 林忠辉

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 基于海河流域30个气象站点1960-2009年的实测资料, 分析该流域1960年以来农业气象指标的变化趋势, 并利用VIP模型模拟分析大气CO<sub>2</sub>浓度增加、温度、降雨和日照时数变化对作物产量的影响。结果显示: 冬季温度的显著上升使冬小麦种植北界在50年间向北移动大约70 km; 在品种和灌溉条件不变的前提下, 小麦产量平均每10年上升0.2%~3.4%, 其中CO<sub>2</sub>浓度增加、温度、降雨及日照时数变化对其产量的影响分别为11.0%、0.7%、-0.2%和-6.5%; 大气CO<sub>2</sub>浓度增加的产量正效应大于日照时数减少的负效应。气候变化使夏玉米产量呈下降趋势(0.6%~3.8%/10年), 其中大气CO<sub>2</sub>浓度增加、温度、降雨及日照时数变化对其产量的影响分别为0.7%、-3.6%、-1.0%和-6.8%, 温度上升和辐射下降是玉米产量下降的主要原因。研究结果可为气候变化影响的评估和适应性对策制定提供科学依据。

**关键词:** 海河流域; 气候变化; 冬小麦; 夏玉米; VIP模型; 产量变化

DOI: 10.11821/dlyj201401001

## 1 引言

近50年间大气CO<sub>2</sub>浓度增加、温度和降雨格局变化对海河流域小麦-玉米轮作系统产生了显著影响。正确理解气候变化对小麦、玉米发育过程和产量形成的影响机理, 对海河流域作物品种规划布局、农业管理改善、作物产量提高具有重要意义。

气候变化背景下, 作物受到气象要素变化和大气CO<sub>2</sub>浓度增加的综合影响。近50年来海河流域日均温的显著上升<sup>[1]</sup>, 辐射总量的降低<sup>[2]</sup>和降雨的减少<sup>[3]</sup>使得作物需水量<sup>[4]</sup>、生育期的长度和产量<sup>[5]</sup>发生变化。温度上升缩短作物的生育期长度<sup>[6,7]</sup>, 加上降雨减少和辐射降低, 这些变化总体而言不利于作物产量的增长<sup>[8]</sup>。然而大气CO<sub>2</sub>浓度的增加使作物光合作用速率加快<sup>[9]</sup>, 叶片蒸腾降低<sup>[10]</sup>, 有利于作物产量增加和水分利用效益的提高<sup>[11]</sup>, 在一定程度上缓解了气象要素的不利影响。

气候变化对农业生产影响的早期研究多利用农业统计数据, 通过建立日均温、生育期降雨量等气象要素和统计产量之间的相关关系来分析气候变化对作物产量的影响<sup>[12,13]</sup>。近年来, 全球气候模式(GCM)、区域气候模式(RCM)与作物模型结合的评估方法已成为研究气候变化对农业生产影响的重要手段。例如: Chavas等<sup>[14]</sup>根据IPCC SRES A2情景, 利用区域气候模式RegCM3的输出数据, 采用EPIC模型模拟分析中国东部作物产量对气

收稿日期: 2012-07-25; 修订日期: 2013-05-26

基金项目: 国家重点基础研究973项目(2010CB428404); 国家自然科学基金项目(31171451, 41171448); 中国科学院地理与资源所重点项目(2012ZD003)

作者简介: 胡实(1982-), 女, 博士, 主要从事生态系统模拟及气候变化研究。E-mail: hus.08b@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 莫兴国(1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事气候变化和陆地生态系统生态水文的模拟研究。

E-mail: moxg@igsnrr.ac.cn

候变化的响应，结果表明 2071-2100 年中国东部水稻、小麦和玉米生产力将增长 6.5%~25%，扣除 CO<sub>2</sub> 肥效之后作物生产力将下降 2.5%~12%；Lin 等<sup>[15]</sup>利用区域气候模式 PRECIS 和 CERES 作物模型相结合分析气候变化和大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对中国小麦生产力的影响，结果表明排除大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加的影响，在 SRES A2 和 B2 情景下，2080 年小麦产量将在现有水平上分别降低 20% 和 10%；Guo 等<sup>[16]</sup>分析认为当大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加至 600 ppm 时，华北平原小麦和玉米的产量将分别提高 38% 和 12%，水分利用效率将提高 40% 和 25%。这些研究虽然将大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对作物产量的影响进行了单独分析<sup>[15,16]</sup>，但定量分析单个气象要素对作物产量影响的研究尚不多见。

本文首先分析海河流域 1960-2009 年农业气候指标的变化，然后采用 VIP 模型模拟冬小麦、夏玉米产量的变化趋势，定量分析温度、降雨和日照时数等气象要素变化及大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加对小麦、玉米产量的影响，研究结果将为华北平原农业生产应对气候变化提供科学依据。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

海河流域位于 35°~43°N，112°~120°E，包括北京、天津、河北省大部地区、山西省东部、山东、河南省北部及辽宁省、内蒙古自治区的一部分，总面积约 31.8×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>，其中 60% 为山区，40% 为平原（图 1）。流域地处温带东亚季风气候区，跨越半湿润半干旱地带，平均气温在 1.5~14℃ 之间，年均降雨量约 500~800 mm，以冬小麦-夏玉米两熟轮作制为主。夏玉米生育期（6-9 月）集中了全年降雨量的 75% 左右，冬小麦生育期（10 月-次年 5 月）只占年降雨量的 25%。由于小麦生育期降水资源的短缺，流域大部分麦田均需灌溉。

### 2.2 数据来源

本研究的数据主要包括：气象数据和数字高程数据。气象数据由中国气象局提供（<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>），包括研究区内 30 个国家基准气象站 1960-2009 年的均温、最高温、最低温、大气压、相对湿度、降雨量和日照时数的逐日观测数据。由于国家基准气象站四周环境均保持自然状态，周围的建筑物、树木及其它遮挡物与站址边缘的距离均为遮挡物高度的十倍以远，因此国家基准站的气象数据能很好的代表本气候区的农业气候特征，并能长期保持数据的准确性、代表性和比较性。数字高程数据采用美国地质测量局（USGS）的 GTOPO30。

### 2.3 研究方法

**2.3.1 VIP 模型简介及验证** VIP（Vegetation Interface Processes）模型是基于陆地生态系统能量收支、水文循环和碳氮循环的生态水文动力学模型。通过近 20 年的发展，VIP 模型已经从单点尺度扩展至流域及区域尺度。针对华北平原冬小麦—夏玉米轮作系统，模型应

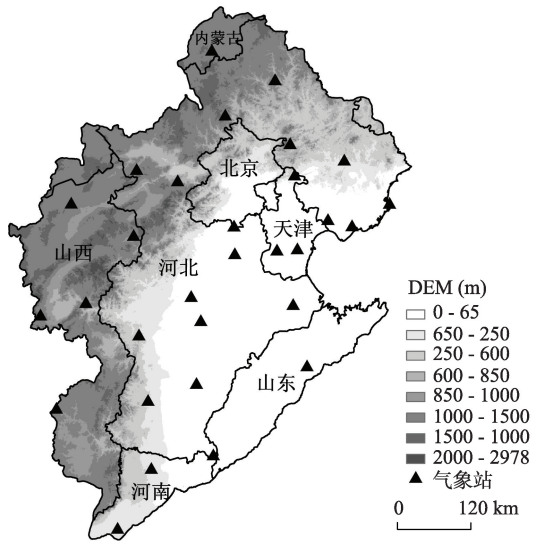


图1 海河流域数字高程及气象站分布图  
Fig. 1 Geographical and DEM map of Haihe River basin

用在作物产量、蒸散量及水分利用效率的模拟<sup>[18]</sup>、未来气候变化下作物产量、水分利用效率的预测<sup>[19]</sup>等方面都有系列成果，但在病虫害、极端气候条件对农作物生长影响等方面仍需进一步加强。

VIP模型采用双源能量平衡模型，对作物冠层光合作用进行模拟时区分受光叶与避阴叶，将冠层划分多个层次分别模拟其光合作用。对作物的干物质积累过程，生态系统的能量平衡过程、水量平衡过程均有很好的模拟效果<sup>[20,21]</sup>。利用中国科学院栾城农业生态试验站2007年冬小麦、夏玉米生育期的试验数据对作物生长过程的验证表明，2007年冬小麦和夏玉米生物量的观测值与模拟值的相关系数分别为0.97和0.99，均方根误差（RMSE）分别为956 kg/hm<sup>2</sup>和795 kg/hm<sup>2</sup>（图2）。采用该站长期观测样地2001-2008年冬小麦和夏玉米的产量数据对作物产量的验证表明，冬小麦和夏玉米产量观测值与模拟值的相关系数分别为0.79和0.87，RMSE分别为1054 kg/hm<sup>2</sup>和896 kg/hm<sup>2</sup>。这些结果说明模型对冬小麦和夏玉米的生长过程和产量有较好的模拟效果。

**2.3.2 农业气象指标** 温度、降雨、辐射是影响作物生长的主要气象要素，考虑到作物不同生长阶段对气象要素变化敏感程度的差异，除统计冬小麦和夏玉米全生育期积温、总降雨量和累积日照时数外，还分别针对冬小麦和夏玉米营养生长阶段和生殖生长阶段统计上述农业气象指标（表1）。

海河流域冬小麦以半冬性和冬性品种为主，其安全越冬的标准为12月中旬至次年1月底连续5天日最低温度不低于-24℃，且日均温不低于-15℃<sup>[22]</sup>。若十年之内80%的年份都满足此条件，则此地适合种植小麦，反之则不适合种植小麦。按此标准统计1960-2009年冬小麦种植北界。虽然冬小麦实际的种植北界与统计值可能存在一定的滞后性和年际波动，但是十年的统计值在一定程度上仍能反映小麦种植北界变化。例如：1971年承德地区宽城、兴隆、承德、滦平开始试种冬小麦，72年扩大到张家口地区的阳原、万全、怀来、宣化、蔚县；到1978年，除8个高寒县外，全省各县均有种植<sup>[23]</sup>。这与下文的统计结果十分吻合。

**2.3.3 大气CO<sub>2</sub>浓度升高和气候变化对作物产量影响的模拟** 基于作物品种，施肥量，耕作方式，灌溉量，土壤数据在1960-2009年间保持不变的假设，利用VIP模型对海河流域30个气象站冬小麦和夏玉米1960-2009年的生长过程进行模拟。对农业气象要素，小麦和玉米产量50年的变化趋势进行线性回归分析，并用F检验对回归系数进行99%的显著性检验。由于相对变化率比绝对变化率更能体现变化幅度，且适合于不同要素之间的比较，因

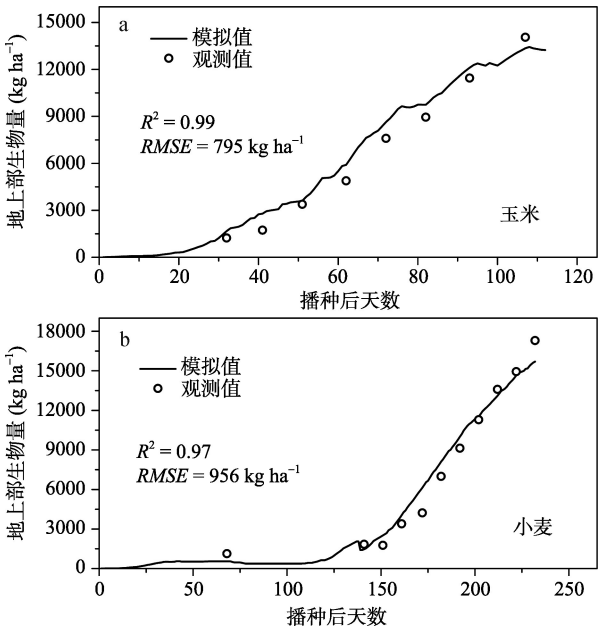


图2 2007年夏玉米和冬小麦地上部生物量模拟值和观测值的对比

Fig. 2 Simulated and observed aboveground biomass for summer maize and winter wheat over their respective growing seasons with Pearson correlation coefficient ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) in 2007

表 1 农业气象指标  
Tab. 1 Agrometeorological indice

项目	定义
小麦生育期积温/降雨量/日照时数	每年 10 月下旬至次年 6 月中旬的累积温度(日均温 >0℃时)/累积降雨量/累积日照时数
小麦营养生长期积温/降雨量/日照时数	每年 10 月下旬至次年 5 月上旬的累积温度(日均温 >0℃时)/累积降雨量/累积日照时数
小麦生殖生长期积温/降雨量/日照时数	每年 5 月中旬至 6 月中旬的累积温度(日均温 >0℃时)/累积降雨量/累积日照时数
玉米生育期积温/降雨量/日照时数	每年 6 月下旬至 10 月中旬的累积温度(日均温 >10℃时)/累积降雨量/累积日照时数
玉米营养生长期积温/降雨量/日照时数	每年 6 月下旬至 8 月中旬的累积温度(日均温 >10℃时)/累积降雨量/累积日照时数
玉米生殖生长期积温/降雨量/日照时数	每年 8 月下旬至 10 月中旬的累积温度(日均温 >10℃时)/累积降雨量/累积日照时数

此本文对变化趋势采用相对变化率表示。

设定大气 CO<sub>2</sub> 浓度保持 1960-2009 年的变化趋势为 C1 情景，维持 1960 年的水平为 C2 情景，分别利用 VIP 模型模拟 C1 情景和 C2 情景下的作物产量。利用 C1 情景下的产量减去 C2 情景下的产量，即认为是大气 CO<sub>2</sub> 浓度增加导致的作物产量变化。

为研究气象要素对作物产量的单独作用，分别对 1960-2009 年温度（均温，最高温，最低温），降雨量和日照时数进行线性去趋势化。以温度对作物产量的影响分析为例，首先假定农业管理措施和大气 CO<sub>2</sub> 浓度在 1960-2009 年间保持不变，其中温度按照历史过程变化为 S1 情景，去除温度年际变化趋势为 S2 情景；利用 S1 情景下的产量减去 S2 情景下的产量，即认为是只受温度变化影响的作物产量。

3 结果分析

3.1 农业气象指标的变化趋势

海河流域冬小麦、夏玉米生育期的总积温呈显著上升趋势（其中小麦生育期内 90% 的站点，玉米生育期内 70% 的站点均通过了 99% 的显著性检验），北部山区温度上升幅度高于南部平原地区（图 3）。由于海河流域温度变化呈现显著的季节差异，冬、春两季气温上升幅度显著高于夏、秋两季<sup>[1]</sup>，使得冬小麦（3.3%/10 年）生育期积温的上升幅度高于夏玉米（1.0%/10 年），缩短了冬小麦和夏玉米的生育期长度。其中玉米营养生长期积温的上升幅度（0.7%/10 年）低于其生殖生长期（1.2%/10 年）（图 3b），导致玉米生殖生长期缩短的时间（6.5 天/50 年）大于营养生长期（2 天/50 年），不利于玉米的灌浆和产量增长。

冬季温度的显著上升使小麦营养生长期的积温上升幅度（7.2%/10 年）显著高于其生殖生长期（0.8%/10a）（图 3a），缩短了小麦越冬期长度，使其返青期和抽穗期提前，从而延长了抽穗-灌浆-成熟时间（生殖生长期）。因此升温虽然导致过去 50 年间冬小麦生育期缩短 1.9%，但其生殖生长期却延长 3.1%（图 4），有利于冬小麦灌浆和产量增长。

冬季温度的上升使小麦遭受冻害的风险降低，冬小麦适宜种植区域的面积也在逐年扩大，其种植北界变化如图 3a 所示。60 年代至 80 年代冬小麦种植北界缓慢北移，平均每 10



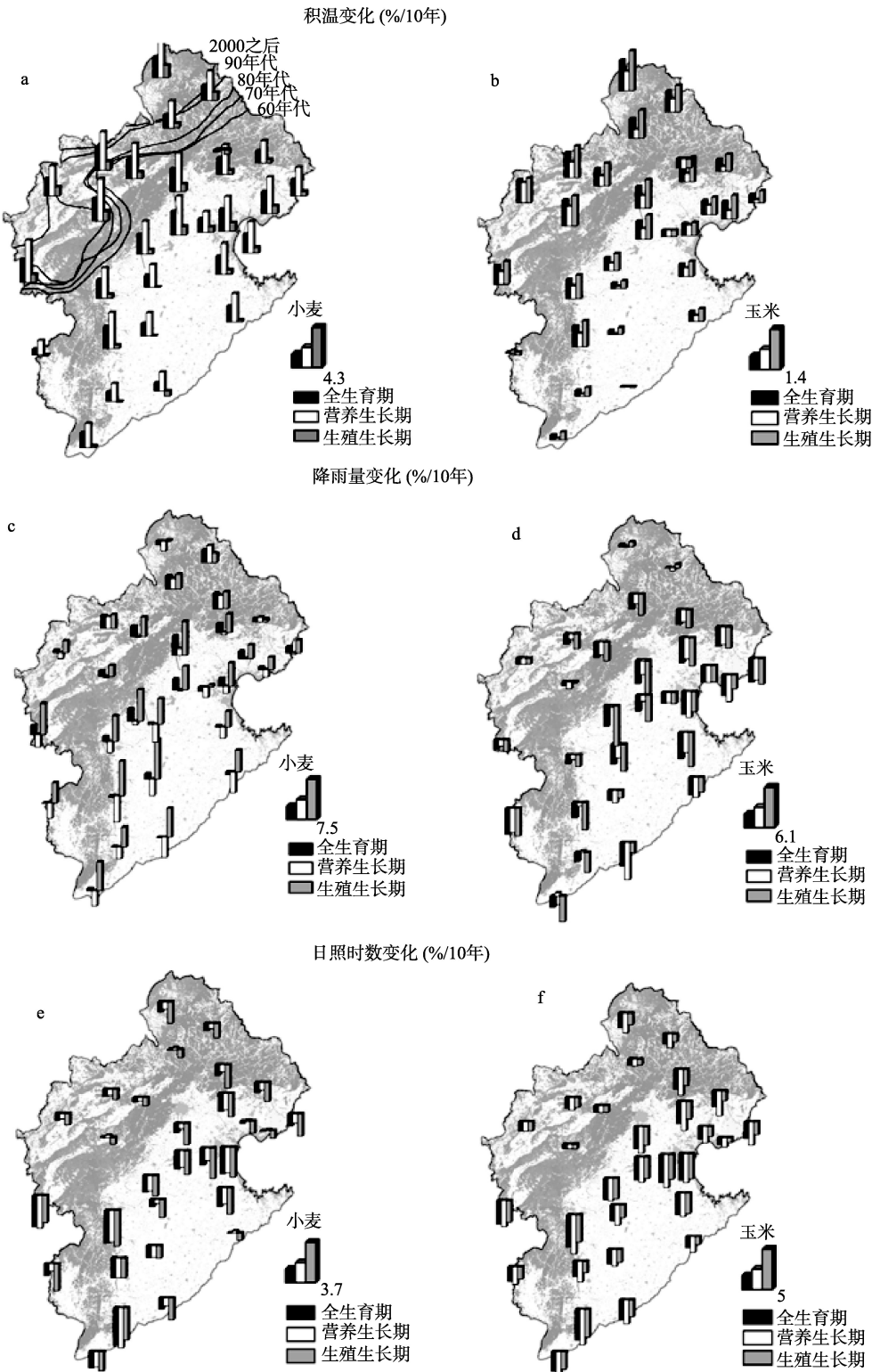


图3 海河流域农业气象指标变化趋势 (图例中的数字表示该图中最大值的一半)

Fig. 3 The variations of agrometeorological indice in Haihe River Basin (The chart symbol is scaled to equal half the size of the largest value for the attribute that relates to the longest bar)

年向北移动 10 km；80年代之后，种植北界向北移动的速度加快，其中80年代至90年代平均向北移动 20 km，90年代至2000年之后平均移动 30 km，即50年间小麦种植北界大约北移 70 kkm。杨晓光等<sup>[24]</sup>的研究结果显示，与11951-1980年相比，1980-2007年河北省冬小麦的种植北界平均向北移动 50 km，与本文的研究结果基本吻合。

近50年来，海河流域大部分站点小麦生育期的降雨总量呈上升趋势（2.1%/10年），其中营养生长期呈下降趋势（2.5%/10年），生殖生长期呈上升趋势（9.1%/10年）（图3c）。玉米生育期的降雨总量呈下降趋势（4.2%/10年），营养生长期和生殖生长期每10年平均下降 3.2% 和 6.2%（图3d）。区域内所有站点的降雨变化趋势均未通过99%的显著性检验。

海河流域的日照时数呈显著下降趋势（图3e，图3f），北部山区日照时数的下降幅度要低于南部平原地区。在小麦营养和生殖生长期，日照时数每10年平均下降 2.9%和 3.4%；对玉米而言，日照时数在这两个生长期每10年平均下降 4.7%和 3.6%（图3f）。

3.2 作物产量变化趋势

根据VIP模型预测，当作物产量只受气象要素和大气CO<sub>2</sub>浓度增加的影响时，1960-2009年海河流域小麦产量呈现上升趋势（除北京、廊坊和塘沽站外），玉米产量呈现下降趋势（除乐亭和怀来站外）（图5），但作物产量变化趋势并不显著（区域上所有站点均未通过99%的显著性检验）。流域内各站点小麦产量平均每10年增加 0.2~3.8%，其流域平均值为 1.4%/10年，其中河南省和山东省的增长速度大于河北省。Zhang等<sup>[25]</sup>对全国2339个县小麦产量数据的研究结果显示，1980-2008年，温度上升使得小麦产量提高了 3.7%（1.3%/10年）；而Li<sup>[26]</sup>等认为日均温每升高1℃，冬小麦

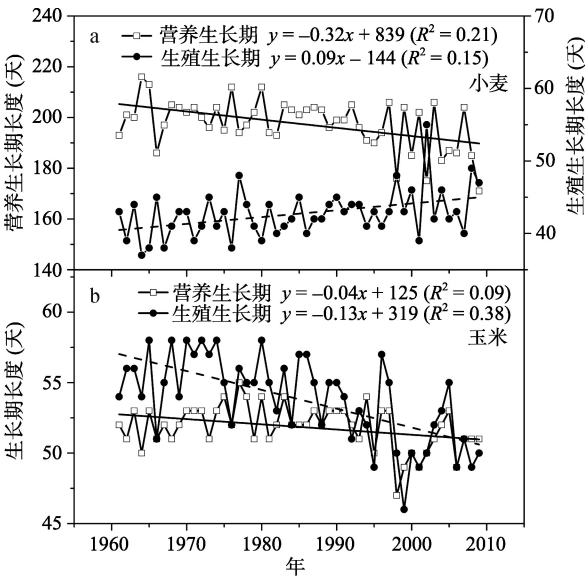


图4 1960-2009年石家庄地区冬小麦和夏玉米生育期长度的变化

Fig. 4 The variation of growth period length of winter wheat and summer maize in Shijiazhuang from 1960 to 2009

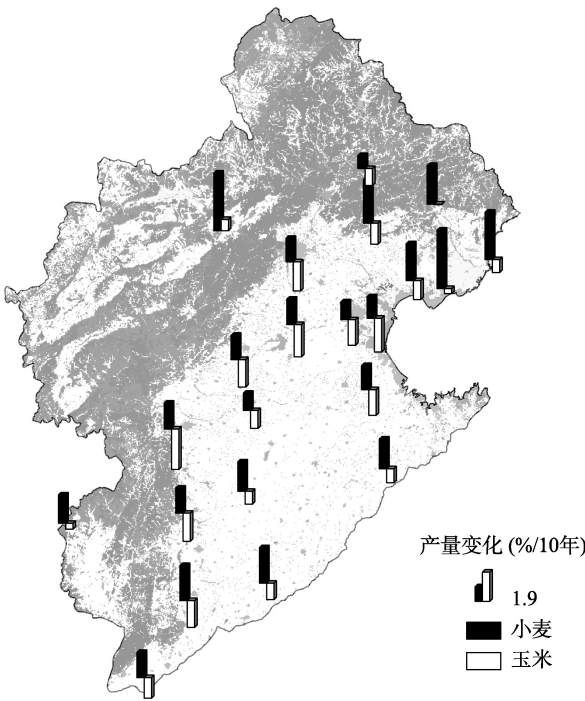


图5 海河流域作物产量变化

Fig. 5 The variation of crop yield in Haihe River Basin

而Li<sup>[26]</sup>等认为日均温每升高1℃，冬小麦

产量将会增加7.8%，即过去50年中冬小麦产量的增加幅度为1.5%/10年，与本文的模拟结果基本吻合。

各气象站玉米产量平均每10年下降0.6~3.2%，其流域平均值为1.6%/10年，无显著的空间差异。Zhang等<sup>[25]</sup>通过对全国2339个县玉米产量数据的分析认为，1980-2008年玉米产量降低了4.4%（1.5%/10年），与本文研究结果一致。

3.3 大气CO<sub>2</sub>浓度升高及气候要素变化对作物产量的影响

根据VIP模型预测，当排除耕作方式差异、灌溉措施改进，作物品种更新等技术进步因素，作物只受气象要素和大气CO<sub>2</sub>浓度增加的影响时，海河流域小麦产量呈上升趋势；玉米产量呈下降趋势。以石家庄地区为例，50年间小麦产量上升了5%，玉米产量下降了10%。不同气象要素及CO<sub>2</sub>浓度升高对作物产量的影响如图6所示。

大气CO<sub>2</sub>浓度升高使得大气中的CO<sub>2</sub>更容易进入叶片以增加细胞间CO<sub>2</sub>浓度，加快作物的光合作用速率，有利于作物产量的形成<sup>[11]</sup>。50年间大气CO<sub>2</sub>浓度增加使得海河流域小麦产量增加了11%~15%，缓和了玉米0.1%~0.6%的产量下降趋势（图7），说明随着CO<sub>2</sub>浓度的增加，C3植物光合作用速率增加的幅度更大，使C3植物比C4植物受益更多<sup>[10]</sup>。这主要是由于在碳同化过程中，C4作物生成的是具有4个碳原子的草酰乙酸（OAA），而C3作物生成的是具有3个碳原子的磷酸甘油酸（PGA），因此C4作物对CO<sub>2</sub>亲和力较高，并具有浓缩CO<sub>2</sub>的机制，对CO<sub>2</sub>浓度的变化没有C3作物敏感。

温度对作物产量的影响较为复杂。作物各种生理活动（例如光合、呼吸、蒸腾作用等）均受温度条件的制约。一方面增温可以促进植物的呼吸作用，加快光合产物的分解转化，使净光合速率增加，有利于干物质的累积<sup>[6]</sup>。另一方面，升温加快作物发育速度、改变各发育阶段出现的时间及生育期的长度，其对作物产量的影响因作物类型和品种而异<sup>[7,27]</sup>。以石家庄为例，50年间温度上升使得冬小麦产量增加0.7%，其主要原因为温度上升使小麦返青期（例如：石家庄地区冬小麦1998-2003年返青期比1991-1997年平均提早3天<sup>[29]</sup>）、开花期提前，增加碳水化合物的累积及其向籽粒转化的时间，对作物产量增加具有正效应<sup>[28]</sup>。对夏玉米而言，温度的升高使作物生长期，尤其是生殖生长期的长度

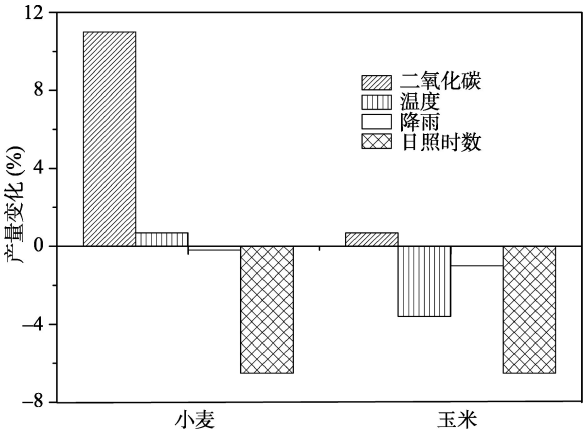


图6 石家庄地区二氧化碳、温度、降雨、日照时数变化对作物产量的影响

Fig. 6 The impacts of changes of carbon dioxide, temperature, precipitation and sunshine duration on the crop yield in Shijiazhuang

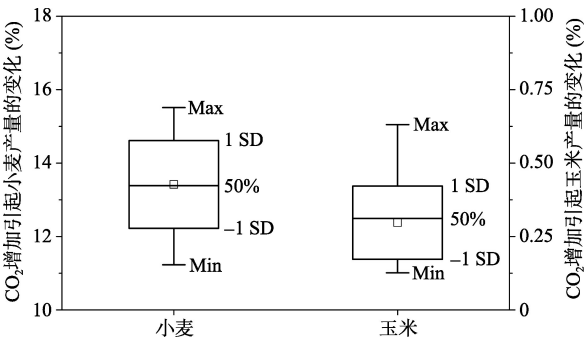


图7 海河流域近50年大气CO<sub>2</sub>浓度增加引起的作物产量变化

Fig. 7 The variation of crop yields in Haihe River Basin caused by CO<sub>2</sub> enrichment in recent 50 years

缩短,减少碳水化合物累积及其向籽粒转化的时间,对玉米生长具有负效应<sup>[6]</sup>,因此50年间石家庄地区玉米产量减少3.6%(图6)。

虽然降雨的季节变化和年际变化通常被认为是导致粮食减产的主要原因<sup>[30]</sup>,但由于海河流域大部分农田均为灌溉地,灌溉缓解了降雨的季节变化和年际变化对作物产量的影响,因此降雨对灌溉条件下小麦和玉米产量的影响并不显著。以石家庄地区为例,降雨变化使得冬小麦产量降低了0.2%,夏玉米产量下降1%(图6)。

辐射降低对冬小麦和夏玉米的生长均产生不利影响。过去50年间海河流域小麦生殖生长期的日照时数降低17%,导致小麦产量下降6.5%。这主要是由于辐射降低使得光合作用能量来源减少,引起净光合速率下降,显著降低小麦干物质累积量<sup>[31]</sup>,尤其是在拔节期至成熟期,弱光显著降低小麦籽粒重量<sup>[32]</sup>。对于玉米等喜光作物,生殖生长阶段辐射量的减少,使其穗粒数和产量显著降低<sup>[33,34]</sup>。海河流域夏玉米生殖生长期日照时数减少20%,使得其产量降低6.8%(图6)。

## 4 结论

尽管农业技术在粮食增产中起着重要的作用,但随着全球气候变暖及极端气候事件的增多,气候变化对作物生长和产量将产生较大的影响。本文基于VIP模型,模拟1960-2009年海河流域冬小麦和夏玉米的产量,并定量分析气候变化对作物产量的影响。结果表明:大气CO<sub>2</sub>浓度增加是冬小麦产量增长的主要原因,但对夏玉米产量的影响并不显著。日照时数的减少是冬小麦和夏玉米生长的主要不利因素。冬季温度的显著上升使得冬小麦花期提前,生殖生长期延长并且使其种植北界在50年间向北移动了大约70 km,有利于小麦产量提高。对夏玉米而言,温度升高导致其生育期缩短、产量减少。因此科学地调整作物种植结构,改进作物品种,使作物在气候变化背景下能有效获取更多的光温资源,是应对气候变化不利影响的有效措施,也是当前乃至今后亟待研究的重要科学问题。

## 参考文献(References)

- [1] 郝春沣, 贾仰文, 龚家国, 等. 海河流域近50年气候变化特征及规律分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 39-51. [Hao Chunfeng, Jia Yangwen, Gong Jianguo et al. Analysis on characteristics and rules of climate change of Haihe River Basin in recent 50 years. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2010, 8(1): 39-51.]
- [2] 刘昌明, 刘小莽, 郑红星, 等. 海河流域太阳辐射变化及其原因分析. 地理学报, 2009, 64(11): 1283-1291. [Liu Changming, Liu Xiaomang, Zheng Hongxing et al. The change of solar radiation and its cause in Haihe River Basin and surrounding areas. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(11): 1283-1291.]
- [3] 褚建婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异. 地理学报, 2009, 64(9): 1083-1092. [Chu Jianting, Xia Jun, Xu Chongyu et al. Comparison and spatial-temporal variability of daily precipitation data of weather stations and rain gauges in Haihe River Basin. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(9): 1083-1092.]
- [4] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响. 水利学报, 2004(2): 77-87. [Liu Xiaoying, Lin Erda. Impact of climate change on water requirement of main crop in North China. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 2: 77-87.]
- [5] 张建平, 赵艳霞, 王春乙, 等. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1179-1184. [Zhang Jianping, Zhao Yanxia, Wang Chunyi et al. Effects of climate change on winter wheat growth and yield in North China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(7): 1179-1184.]
- [6] Wheeler T R, Craufurd P Q, Ellis R H et al. Temperature variability and the annual yield of crops. Agriculture, Ecosystem and Environment, 2000, 82: 159-167.
- [7] Estrella N, Sparks T H, Menzel A. Trends and temperature response in the phenology of crops in Germany. Global



- Change Biology, 2007, 13: 1737-1747.
- [8] Lobble D B, Asner G P. Climate and management contributions to recent trends in U.S. agricultural yields. *Science*, 2003, 299: 1032.
- [9] Oliver R J, Finch J W, Taylor G. Second generation bioenergy crops and climate change: a review of the effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and drought on water use and the implications for yield. *Global Change Biology Bioenergy*, 2009, 1(2): 97-114.
- [10] Vanuytrecht E, Rase D, Willems P et al. Quantifying field-scale effects of elevated carbon dioxide concentration on crops. *Climate Research*, 2012, 54(1): 35-47.
- [11] Pinter P L, Kimball B A, Wall G W. Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE): Blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(4): 319-333.
- [12] 史本林, 朱新玉, 李红忠, 等. 中原腹地气候变化对冬小麦产量的影响: 以商丘地区为例. *地理研究*, 2012, 31(1): 14-22. [Shi Ben-in, Zhu Xinyu, Li Hongzhong et al. Impacts of climate change on winter wheat yield in Central Plains of China: Case study of Shangqiu. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 14-22.]
- [13] 蒲金涌, 姚小英, 王位泰. 气候变化对甘肃省冬小麦气候适宜性的影响. *地理研究*, 2011, 30(1): 153-160. [Pu Jinyong, Yao Xiaoying, Wang Weitai. Influence of climate change on climate suitability of wheat in Gansu. *Geographical Research*, 2011, 30(1): 153-160.]
- [14] Chavas D R, Cesa Izaurrealde R, Thomson A M et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 1118-1128
- [15] Lin E D, Xiong W, Ju H et al. Climate change impacts on crop yield and quality with CO<sub>2</sub> fertilization in China. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2005, 360(1463): 2149-2154.
- [16] Guo R P, Lin Z H, Mo X G. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1185-1194.
- [17] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤图集. 北京: 中国地图出版社. 1989. [Institute of Soil Science, Academia Sinica. The Soil Atlas of China. Cartographic Publishing House, Beijing, China. 1989.]
- [18] Mo X G, Liu S X, Lin Z H et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling*, 2005, 183: 301-322.
- [19] Mo X G, Liu S X, Lin Z H et al. Regional crop productivity and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2009, 134(1-2): 67-78.
- [20] Mo X, Liu S, Lin Z. Evaluation of an ecosystem model for a wheat-maize double cropping system over the North China Plain. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 32: 61-73.
- [21] Mo X, Liu S. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109: 203-222.
- [22] 崔读昌, 曹广才, 张文, 等. 中国小麦气候生态区划. 贵州: 贵州科技出版社, 1991. 15. [Cui Duchang, Cao Guangcai, Zhang Wen et al. Climat-ecological regionalization of wheat in China. Guizhou Science and Technology Press, Guizhou. 1991. 15]
- [23] 河北省地方志编纂委员会. 河北省志. 北京: 中国农业出版社, 1995, 16: 127 [The compilers of the local chronicles in Hebei province. Hebei local chronicles. China Agriculture Press, Beijing, China. 1995, 16: 127.]
- [24] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响. I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 329-336. [Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, Chen Fu. The possible effects of climate warming on Northern Limits of cropping systems and crop yields in China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 329-336.]
- [25] Zhang T Y, Huang Y. Estimating the impacts of warming trends on wheat and maize in China from 1980 to 2008 based on county level data. *International Journal of Climatology*, 2013, 33: 699-708.
- [26] Li S, Wheeler T, Challinor A et al. The observed relationships between wheat and climate in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150: 1412-1419.
- [27] Stockle C O, Nelson R L, Higgins S et al. Assessment of climate change impact on Eastern Washington agriculture. *Climate Research*, 2010, 102(1-2): 77-102.
- [28] Tao F, Zhang Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 146-165.
- [29] 李元华, 车少静. 河北省温度和降水变化对农业的影响. *中国农业气象*, 2005, 26(4): 224-228. [Li Yuanhua, Che Shaojing. Impacts of changes of temperature and precipitation on agriculture in Hebei regions. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(4): 224-228.]
- [30] Mishra A, Hansen J W, Dingkuhn M et al. Sorghum yield prediction from seasonal rainfall forecasts in Burkina Faso.

- Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148 (11): 1798-1814.
- [31] 贺明荣, 王振林, 高淑萍. 不同小麦品种千粒重对灌浆期弱光的适应性分析. 作物学报, 2001, 27(5): 640-644. [He Mingrong, Wang Zhenlin, Gao Shuping. Analysis on adaptability of wheat cultivars to low light intensity during grain filling. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(5): 640-644.]
- [32] 李永庚, 于震文, 梁晓芳, 等. 小麦产量和品质对灌浆期不同阶段低光照强度的响应. 植物生态学报, 2005, 29(5): 807-813. [Li Yonggeng, Yu Zhenwen, Liang Xiaofang et al. Response of wheat yields and quality to low light intensity at different grain filling stages. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(5): 807-813.]
- [33] 侯玉虹, 陈传志, 郭志强. 春玉米不同产量群体叶面积指数动态特征与生态因子资源量的分配特点. 应用生态学报, 2009, 20(1): 135-142. [Hou Yuhong, Chen Chuanzhi, Guo Zhiqiang. Dynamic characteristics of leaf area index and allocation characters of ecological resources for different yielding spring maize populations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1): 135-142.]
- [34] 李言照, 东先旺, 刘光亮, 等. 光温因子对玉米产量及产量构成因素值的影响. 中国生态农业学报, 2002, 10(2): 86-89. [Li Yanzhao, Dong Xianwang, Liu Guangliang et al. Effects of light and temperature factors on yield and its components in maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(2): 86-89.]

## The contribution of climate change to the crop phenology and yield in Haihe River Basin

HU Shi<sup>1</sup>, MO Xingguo<sup>1</sup>, LIN Zhonghui<sup>1</sup>

(Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** According to the 30 climatic stations with climatic records from 1960 to 2009 in Haihe River Basin, the classical calculation methods of agro-meteorological indicators was adopted to analyze the changes of temperature, precipitation and sunshine duration in the past 50 years. With the aid of VIP crop model, the effect of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, temperature, precipitation and sunshine duration variations on crop yield was study separately. The results show that the north limit of winter wheat moved northward by approximately 70 km in recent 50 years due to the significant temperature rising in winter. Based on the assumption that the irrigation amount and the crop varieties remained same in recent 50years, the wheat yield shows an upward trend (0.2%-3.4%/10 years). Roughly 11%, 0.7%, -0.2% and -6.5% variability of wheat yield can be explained by atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, temperature rise, precipitation decline and sunshine duration decrease, respectively. The positive effect introduced by atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment offsets most negative effect introduced by sunshine duration declining, indicating that atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment is the main causes of the wheat yield rising. The maize yield shows a downward trend (0.6%~3.8%/10 years) in the recent 50 years when the irrigation amount and the maize varieties remained same. Roughly 0.7%, -3.6%, -1.0% and -6.8% variability of maize yield can be explained by atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, temperature rise, precipitation decline and sunshine duration decrease, respectively, indicating that the sunshine duration decrease and the temperature rise are the main causes of the maize yield declining. These results can provide scientific supports for the assessment of the impact of climate change on agriculture and its adaptation countermeasures formulation.

**Key words:** Haihe River Basin; climate change; winter wheat; summer maize; VIP model; yield variation