

# 气候变化和物候变动对东北黑土区农业生产的 协同作用及未来粮食生产风险

高江波<sup>1</sup>, 刘路路<sup>1</sup>, 郭灵辉<sup>2</sup>, 孙东琪<sup>3</sup>, 刘婉露<sup>1,4</sup>, 侯文娟<sup>1</sup>, 吴绍洪<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;  
2. 河南理工大学测绘与国土信息学院, 焦作 454000; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院  
区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 4. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

**摘要:** 东北黑土区是中国重要的粮食生产基地, 也是中国气候变化最敏感的地区之一。然而, 气候变化背景下东北黑土区气候及物候变化对农业生产力的综合影响并不清晰, 未来农业生产风险评估的量化程度不够, 风险等级制定缺乏依据。本文借助遥感产品、气候资料和模拟数据等资料, 综合运用多元线性回归、相关分析及干旱危险性指数等方法, 探究东北黑土区作物物候动态及其气候响应特征, 辨识气候与物候变化对农业生产的复合效应及未来可能风险。结果表明: ① 2000—2017年东北黑土区29.76%的区域作物生长季开始期呈显著延后趋势, 16.71%的区域作物生长季结束期呈提前态势, 生长季开始期受气温的影响范围广, 且滞后时间长; 生长季结束期与前期气候变化关系更加密切, 且带状差异性响应格局尤其明显。② 气候变化和物候期改变对作物生产的解释能力较生长季同期气候变化的解释能力增加了70.23%, 解释面积扩大了85.04%。③ RCP8.5情景下东北黑土区粮食总产量呈现上升趋势, 粮食生产风险表现出“南增北减”的演变特征, 风险区面积不断扩大, 全球温升2.0℃时, 松嫩黑土亚区南部粮食减产可能达到10%。研究有助于深入认识气候—物候—作物生产的关联机理及未来粮食生产风险, 对制定气候变化应对策略, 保障国家粮食安全具有重要意义。

**关键词:** 东北黑土区; 植被物候; 植被生产力; 滞后效应; 未来风险

DOI: 10.11821/dlxb202207008

## 1 引言

气候变化是当今人类面临的巨大挑战之一, 已成为影响和制约经济社会可持续发展的重要因素<sup>[1-3]</sup>。气候变化极大地改变着农业生产要素时空格局及农业生产过程, 进而威胁全球粮食安全<sup>[4-6]</sup>。气候变化致使全球主要粮食作物水稻、小麦产量分别下降了约0.3%和0.9%<sup>[7]</sup>。未来情景下, 2050年全球大豆可能减产14%~43%, 春小麦减产约14%~52%<sup>[8]</sup>, 农业生产力总体下降2%~15%<sup>[9]</sup>。21世纪末, 全球水稻、小麦等四大作物平均减产可达5.6%~18.2%<sup>[10]</sup>。因此, 强化气候变化对农业生产的影响机制研究, 增强适应气候变化能力已成为全球及区域可持续发展的重要战略任务。部分学者发现作物产量波动主要受制于平均气温变化<sup>[11-12]</sup>, 平均气温每升高1℃, 玉米减产5.8%<sup>[12]</sup>, 小麦减产5.7%<sup>[13]</sup>, 水稻减

收稿日期: 2021-10-29; 修订日期: 2022-07-11

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28130104) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA28130104]

作者简介: 高江波(1984-), 男, 山东临沂人, 研究员, 博士生导师, 主要从事综合自然地理学、山地生态系统服务、气候变化影响与适应研究。E-mail: gaojiangbo@igsrr.ac.cn

通讯作者: 郭灵辉(1983-), 男, 河南洛阳人, 副教授, 主要从事气候变化与生态响应、生态系统服务核算与权衡研究。E-mail: guolinghui@hpu.edu.cn

产 3.2%<sup>[10]</sup>。然而,也有学者指出未来全球降水波动异质性强,作物产量对降水的敏感性高于气温<sup>[14-15]</sup>。农业生产是一个多因素综合作用的复杂过程,尽管大量研究通过联合多种作物模型模拟探究气候变化的可能影响,涵盖作物种类不断丰富、响应指标更加全面、机理探析日趋深入,但由于模型自身结构、前提假设以及输入参数等原因,结果仍具有一定不确定性<sup>[16-17]</sup>。另一方面,大多数作物模型虽然考虑了气候变化、作物水分供需及生长季缩短/延长等关联过程,但对其级联效应定量化尚需深入<sup>[10, 18]</sup>。

东北地区是北半球三大黑土区之一,也是中国最大的商品粮生产基地<sup>[19]</sup>,玉米、水稻和大豆等农作物产量约占全国总产量的 30%<sup>[20-21]</sup>。多年来,由于过度开垦利用、不合理的耕作活动以及长期的重用轻养观念等原因,东北黑土区水土流失严重、土层变薄肥力下降<sup>[22-23]</sup>,土壤养分效率低,环境风险增大<sup>[23-24]</sup>。同时,东北黑土区也是中国气候变化的敏感区和影响显著区之一。近 50 年来,区域平均气温上升速率为 0.38 °C/10a,高于全国平均水平<sup>[25]</sup>。未来情景下东北黑土区平均气温将进一步增加<sup>[26]</sup>,降水量总体上呈现波动增加态势,但异质性增强<sup>[27]</sup>。水热条件改变在一定程度上提高作物生产潜力,为农业生产带来了巨大机遇,但也可能导致农业气象灾害加剧。《中国水旱灾害公报 2019》指出,东北地区农作物旱涝受灾面积分别达  $3.29 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> 和  $4.60 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,未来农业生产脆弱性与风险可能加大<sup>[28]</sup>。黑土地保护与科学利用由此成为保障国家粮食安全战略的核心议题。习近平总书记也多次强调“把黑土地用好养好、把中国人的饭碗牢牢端在自己手中”。可见,明晰气候变化下东北黑土区作物生产的响应特征及定量辨识农业气象灾害风险程度不仅是解决国计民生的科技攻关,也是落实中央指示的重大政治任务。

多年来,国内外学者借助田间实验、遥感反演以及模型模拟等手段,围绕东北地区气候变化对农业生产的可能影响开展了深入研究,取得了丰硕成果<sup>[29-32]</sup>。例如,Chu 等探讨了农业热量资源和降水资源空间分布及其变化趋<sup>[31]</sup>,Zhang 等<sup>[26]</sup>和 Lv 等<sup>[33]</sup>分析了玉米、水稻等作物产量的波动特征及未来趋势。也有研究指出了作物开花期与成熟期等物候现象的响应规律<sup>[34-35]</sup>以及作物物候对作物生长的影响<sup>[32]</sup>。但鲜有研究以物候为链接,解析气候变化与物候响应对农业生产的综合效应。此外,农业气象灾害风险评估中定量辨识气候因子总体贡献与风险等级定量化程度不足<sup>[36]</sup>,难以为决策者提供更加精准的信息。鉴于此,本文基于气候变化—物候响应—生产力动态—风险评估的全链条工作思路,旨在开展 ① 明确东北黑土区气候变化特征与作物物候响应规律;② 阐明气候因子与作物物候变化对农业生产的综合影响;③ 定量预估不同温升目标下农业风险演变过程及空间格局特征,以期科学制定应对气候变化管理策略、保障国家粮食安全提供支撑。

## 2 数据来源与分析方法

### 2.1 研究区概况

东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市等地,总面积约 125 万 km<sup>2</sup><sup>[37]</sup>,本文将此范围界定为研究区域。该区属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨、冬季寒冷干燥,年平均气温为 -1~9 °C,年降水量约 500~800 mm,6—9 月降水量占全年的 60%~70%,无霜期约为 140~170 d<sup>[25]</sup>。东北地区黑土集中连片,黑土区涉及 146 个县级行政区,总面积约 55.6 万 km<sup>2</sup><sup>[38]</sup>,黑土土壤肥沃,大豆和玉米产量分别占全国总产量的 45.8% 和 32.8% (<http://data.stats.gov.cn/>)。

### 2.2 数据来源

数据包括:① 东北黑土区矢量边界。采用刘宝元等<sup>[38]</sup>界定的东北典型黑土区边界,

通过数字化获取,包括蒙东黑土亚区、松嫩黑土亚区 and 三江黑土亚区。② 土地利用数据。2000年和2015年1 km分辨率土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>)。③ EVI数据。该数据来源于美国俄克拉荷马大学空间分析中提供的2000—2017年8 d尺度的EVI反演产品,空间分辨率为500 m×500 m。该产品是基于MOD09A1 C6 500m 8 d地表反射率产品计算,并采用最佳坡度指数提取法进行降噪处理和SG滤波算法重构产生<sup>[39]</sup>。④ 气象数据。历史气象数据为中国气象科学数据共享服务网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的中国月尺度地面气象站点数据,时间为2000年1月—2017年12月,包括月平均气温 ( $T_m$ )、月平均最低气温 ( $T_{min}$ )、平均最高气温 ( $T_{max}$ )、月降水量 (TP) 等要素。剔除长期缺测的气象站点,并对极个别缺测值采用相邻年份同期均值进行插补,最终获得全国2031个站点数据,然后通过ANUSPLINE4.3软件插值生成1 km×1 km栅格数据集;未来气候情景数据来自多领域间影响模型比较计划 (ISI-MIP) 框架下5个全球气候模式 (GCMs) 降尺度输出的空间分辨率为0.5°×0.5°的日值数据集,本文选取代表最高水平温室气体排放的典型浓度路径情景RCP8.5数据,旨在揭示未来最恶劣气候变化状态下的黑土区粮食生产风险,为应对气候变化提供底线。⑤ 粮食产量数据。区县历史粮食总产量数据来自《中国县域统计年鉴》及各地区年鉴,主要用于模拟数据的校正。RCP8.5情景下粮食产量数据采用Xiong等基于CERES模型的模拟结果,该套数据以1981—2010年为历史时段,2011年至21世纪末为模拟时段。本文以水稻、小麦、玉米产量之和作为粮食总产量,同时考虑到模拟数据的时段和升温时段的交叉,选取1991—2010年为基准时段,未来粮食产量模拟不考虑未来种植面积的调整和农业技术的进步,反映气候变化影响的结果<sup>[40-41]</sup>。

首先借助ArcGIS 10.4将东北黑土区矢量边界及土地利用数据转为1 km栅格数据(投影与气候插值数据一致),并采用2000年和2015年土地利用中耕地分布区域进行黑土区掩膜提取,尽量减少研究时段内由土地利用类型变化所导致的不确定性,同时剔除4月初至生长旺季(EVI峰值)间平均EVI值小于0.05的植被稀疏区,最终生成东北黑土区农业种植范围(图1)。将EVI数据重采样为1 km分辨率,并且空间上配准使其与气候插值数据逐像素精确对应。

## 2.3 研究方法

### 2.3.1 作物物候提取

基于EVI累积曲线的四参数Logistic函数拟合曲线曲率求导法提取黑土区作物生长季开始期(SOS)和结束期(EOS),该方法能够有效克服环境干扰(如干旱、虫灾)引起的植被物候异常<sup>[42]</sup>。为了尽可能消除初春或秋冬季节降雪、降雨对EVI曲线的干扰,根据东北单季作物生长规律,确定4月初(第13期影像)至10月底(第38期

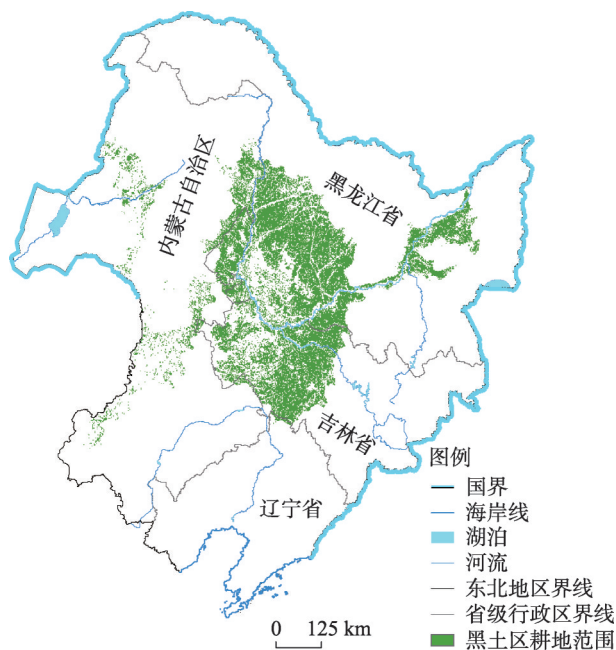


图1 东北黑土区耕地空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of crop planting area in the black soil region of Northeast China

影像)为作物生长时段,开展生长季开始期与结束期提取。为了进一步消除生长季初期环境因素的干扰,采用作物生长时段最大EVI值之前的最小EVI值代替该最小值之前的原始EVI值。具体计算如下:

$$CumEVI_t = \sum_{i=1}^t EVI_i \quad (1)$$

$$CumEVI_t = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d \quad (2)$$

$$RCC = b^3 cz \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z)^3 [2(1+z)^3 + b^2 c^2 z]}{[(1-z)^4 + bcz^2]^{2.5}} \right\} - \frac{(1+z)^2 (1+2z-5z^2)}{[(1+z)^4 + bcz^2]^{1.5}} \quad (3)$$

式中:  $t$  表示 8 d 间隔的日期;  $CumEVI_t$  是从第 13 期影像(即第 97 天)到时间  $t$  的累积 EVI;  $a$  和  $b$  为拟合参数,  $c$  和  $d$  之和为最大  $CumEVI$ ,  $d$  为最小  $CumEVI$ ;  $z=e^{(a+bt)}$ ,  $D$  是以日为单位的一年中的某天,  $RCC$  两个极大值即表示曲线在该点弯曲程度最大,定义该点为作物生长过程中的物候转换期。

**2.3.2 作物物候气候滞后效应** 农业作物生长活动不仅与气候因素有关,也受到诸如作物品种更新、施肥、灌溉等人类活动的强烈干扰。本文采用差分法来辨识作物生长季开始期、结束期与气候因子的关系,该方法能够尽可能消除长期人类活动的影响,为定量辨识气候变化的影响提供了一种可靠途径<sup>[43]</sup>。具体计算如下:

首先对作物物候指标与气候因素数据分别进行差分(即未来年与当年之差值),重新生成作物物候指标与气候因素数据时间序列,然后对新生成的数据序列进行相关分析。

$$r_{xyTj} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})(y_{iTj} - \bar{y}_{Tj})}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (y_{iTj} - \bar{y}_{Tj})^2}} \quad (4)$$

$$\text{滞后时间} = T, \text{当 } r_{xyT}^2 = \max(r_{xy0}^2, r_{xy1}^2, r_{xy2}^2, r_{xy3}^2) \quad (5)$$

式中:  $x_i$  为作物 SOS/EOS 差分数据;  $Tj$  为滞后月数;  $y$  为气候因素(平均气温、平均最高/最低气温、降水量)在滞后月数  $Tj$  内均值的差分数据;  $r_{xyTj}$  为作物 SOS/EOS 和不同气候因素之间在滞后月数  $Tj$  内相关系数;  $m$  为差分后数据序列长度;滞后月数以该象元作物物候 SOS/EOS 多年平均日期所在当月开始计算,当月计作  $T_0$  月;当月至前 1 个月计作  $T_1$ ,以此类推至  $T_3$ ;以  $r_{xyTj}$  大小来揭示作物物候与气候因素关系强度,以  $r_{xyTj}$  最大值对应的  $Tj$  来表征滞后时间。采用最小二乘法拟合线性斜率来表征作物物候或气候因素的变化趋势,显著水平为  $P < 0.10$ 。

**2.3.3 作物生产力气候影响** EVI 可以表征植被的光合能力,并与总初级生产力(GPP)等植被生产力具有较好的相关性。故本文将作物生产力定义为生长季内 EVI 的平均值,生长季长度由研究区平均生长季开始期和结束期所在月份确定。采用多元线性回归分析方法探讨气候因素及 SOS、EOS 对作物生产力的影响程度。具体如下:

$$\Delta EVI = A_{Tj} \times \Delta T_{\max(Tj)} + B_{Tj} \times \Delta T_{\min(Tj)} + C_{Tj} \times \Delta T_{m(Tj)} + D_{Tj} \times \Delta TP_{(Tj)} + E \times \Delta SOS + F \times \Delta EOS + \dots + \varepsilon \quad (6)$$

式中:  $\Delta EVI$  为研究时段内 EVI 差分值(即未来年与当年之差值),  $\Delta T_{\max(Tj)}$ 、 $\Delta T_{\min(Tj)}$ 、 $\Delta T_{m(Tj)}$  和  $\Delta TP_{(Tj)}$  分别表示滞后月数  $Tj$  内平均最高气温、平均最低气温、平均气温和降水



量的差分值;  $\Delta\text{SOS}$  和  $\Delta\text{EOS}$  分别表示 SOS 和 EOS 的差分值;  $A_{Tj}$ 、 $B_{Tj}$ 、 $C_{Tj}$ 、 $D_{Tj}$ 、 $E$  和  $F$  分别为相应的线性回归系数;  $\varepsilon$  为残差项, 表示其他因素对作物生长力的影响。采用多元线性回归决定系数  $R^2$  表示气候因素及 SOS、EOS 对作物生产力的解释程度, 显著水平为  $P < 0.10$ 。

**2.3.4 不同温升目标下粮食生产风险评估** 已有研究表明, 在 RCP8.5 情景下全球平均气温预计在 2029 年升高 1.5 °C, 预计在 2040 年升高 2.0 °C; 因此本文选取 2019—2038 年和 2030—2049 年作为全球温升 1.5 °C 和 2.0 °C 的时段开展粮食生产风险评估<sup>[44-45]</sup>。

基于历年统计年鉴获取县(区)粮食总产量, 通过黑土区农业种植范围将粮食产量进行空间化, 得到基准期实测粮食总产量空间数据<sup>[46]</sup>。采用  $\delta$  插值方法对粮食产量模拟结果进行校正, 以获取系统误差剔除后的模拟数据集<sup>[47]</sup>。具体为: 首先得到模拟的未来时段与基准期时段的粮食总产量差值序列, 然后将该序列叠加在基准期实测粮食总产量上得到新序列作为未来时段粮食总产量:

$$X_s = (\bar{X}_s - \bar{X}_o) + X_o \quad (7)$$

式中:  $X_s$  为校正后的未来时段粮食总产量;  $\bar{X}_s$  为原始模拟的未来时段粮食总产量;  $\bar{X}_o$  为原始模拟的基准期时段粮食总产量;  $X_o$  为基准期实测粮食总产量。

本文以校正后的未来时段粮食总产量相对于基准时段的变化程度作为粮食生产风险的评价指标。具体计算如下:

$$Q = Y_t / Y_0 \quad (8)$$

式中:  $Q$  表示未来粮食产量的变化程度;  $Y_t$  为未来  $t$  时段 (1.5 °C 和 2.0 °C) 的粮食产量;  $Y_0$  为基准期的粮食产量。

结合农业部门和应急部门减灾活动要求, 粮食产量减产 2% 的年份定义为歉年, 减产 5% 的年份定义为灾年, 本文以此作为未来粮食生产风险评价的临界值<sup>[48]</sup>, 具体表达为:

$$\begin{cases} Q \geq 1 & \text{无风险} \\ 0.98 \leq Q < 1 & \text{低风险} \\ 0.95 \leq Q < 0.98 & \text{中风险} \\ Q < 0.95 & \text{高风险} \end{cases} \quad (9)$$

此外, 针对未来粮食总产量增加部分 (即  $Q \geq 1$ ), 应用标准差法进一步划分等级, 以便精准地揭示未来粮食生产的区域分异特征。具体划分标准如下:

$$\begin{cases} Q \geq \bar{Q}_1 + \frac{1}{2}\sigma_1 & \text{微弱增加} \\ \bar{Q}_1 - \frac{1}{2}\sigma_1 \leq Q < \bar{Q}_1 + \frac{1}{2}\sigma_1 & \text{明显增加} \\ Q < \bar{Q}_1 - \frac{1}{2}\sigma_1 & \text{显著增加} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\bar{Q}_1$  表示在  $Q \geq 1$  时未来粮食总产量的平均产量;  $\sigma_1$  表示在  $Q \geq 1$  时未来粮食总产量的标准差。

**2.3.5 不同温升目标下干旱危险性评估** 采用吴绍洪等<sup>[49]</sup>提出的干旱事件危险性评估方法, 基于综合气象干旱指数计算全球温升 1.5 °C 和 2.0 °C 时段东北黑土区干旱危险性指数, 预估未来干旱事件对东北黑土区粮食生产的潜在影响。具体计算如下:

首先, 根据综合气象干旱指数值的大小将其划分为 3 个等级, 轻度干旱、中度干旱和重度干旱。再以综合气象干旱指数连续 10 d 达到轻度干旱 (中度干旱或重度干旱) 以上等级记为一次轻度干旱 (中度干旱或重度干旱) 过程, 计算不同等级干旱发生的频率:

$$H_{C,i} = \begin{cases} 1 & f_{C,i} \geq T \\ \frac{f_{C,i}}{T} & f_{C,i} < T \end{cases} \quad (11)$$

式中： $H_{C,i}$  为干旱发生频率； $f_{C,i}$  为干旱发生频次； $i$  为干旱等级； $T$  为研究时段的年数。最后，基于从重原则使用叠置分析法得到干旱危险性指数。

### 3 结果分析

#### 3.1 气候变化特征与物候动态

2000—2017年东北黑土区年平均气温波动起伏明显，其中2000—2007年平均气温逐渐上升，2008—2011年波动下降，而2012之后又再次上升，速率约为0.24 °C/a ( $P = 0.11$ )。相比而言，2000—2017年该区降水量呈现显著增加态势，增加速率为8.28 mm/a ( $P = 0.02$ )，但在2012年后明显减少（图2a）。2000—2017年东北黑土区各季节气候变化与年均变化规律整体较为一致，但也存在阶段性差异，主要表现为2012—2017年春季最高气温、最低气温和年均气温上升较快，秋季最高气温、最低气温和年均气温下降明显（图2b~2d）。从空间格局上，2000—2017年东北黑土区约59.57%的面积年降水量呈显著增加趋势，其中，年降水量增加较快（ $\geq 9$  mm/a）的区域约占总面积的30.23%，主要分布于松嫩黑土亚区的齐齐哈尔、绥化、白城、长春等地以及三江黑土亚区的北部。全区近52.07%的面积年均气温呈波动下降态势，主要集中在松嫩黑土亚区的北部、中部和东部地区（图3）。

由图4可知，东北黑土区作物生长季开始期平均在第147天（5月27日），生长季结束期为第265天（9月25日）。东北3省79个农业气象观测资料显示，东北农业区主要种植作物出苗期和成熟期分别在5月12日、在9月19日左右，这与本文吻合<sup>[50]</sup>。东北松嫩黑土亚区北部、东部和三江黑土亚区作物生长季开始期主要集中在第150—160天，结束期一般早于第270天，而松嫩黑土亚区西南部和蒙东黑土亚区等地作物生长季开始期较早，结束期稍晚（图4a、4b）。近年来东北黑土区作物生长季开始期与结束期变化空间异质性明显，约68.25%的面积生长季开始期呈现延后态势，其中43.60%的区域生长季开始期延后趋势显著（ $P < 0.10$ ），集中分布在齐齐哈尔、绥化、哈尔滨中北部地区及白城西部和松原东北部地区，而8.01%的黑土区作物生长季开始期呈显著的提前趋势，零星分布在东南、西北地区（图4c、4d）。相比而言，全区约58.36%（显著区约占全区总面积的16.71%）的面积作物生长季结束期呈提前态势，尤其在松嫩黑土亚区的白城、松原、四平和长春等地，提前速率可达0.4 d/a。相反黑土区东北部作物生长季结束期延后现象十分明显，约占总面积的8.95%（图4e、4f）。

#### 3.2 物候滞后效应及两者对生产力的综合影响

东北黑土区作物生长季开始期对气候变化的滞后效应明显，且空间异质性较强（图5）。总体上，松嫩黑土亚区北部边缘以及中南部地区作物生长季开始期与T2、T3时段降水量呈显著的正相关关系，齐齐哈尔、绥化中部黑土区和三江黑土亚区作物生长季开始期与T1时段降水量呈显著正相关关系，但蒙东黑土区作物生长季开始期与T2、T3时段降水量大体呈负相关关系（图5a、5b）。平均气温与三江黑土亚区和松嫩黑土亚区的北部、南部作物生长季开始期呈显著负相关关系，但三江黑土亚区滞后时间集中在T0和T1时段，而松嫩黑土亚区多集中在T2、T3时段。蒙东黑土亚区和松嫩黑土亚区中部作物生长季开始期与平均气温呈正相关关系，部分地区相关关系显著（图5c、5d）。作物生长季

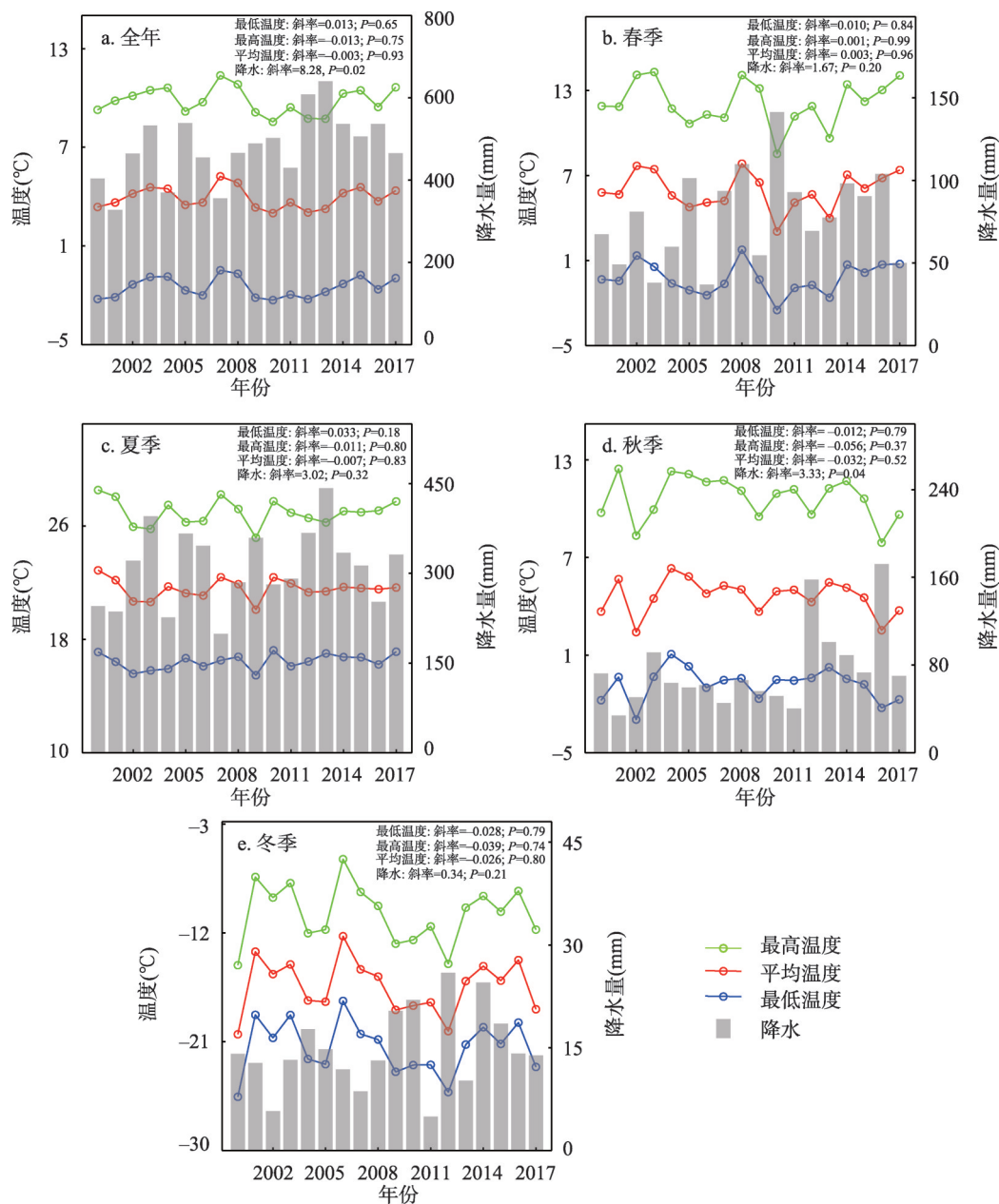


图2 2000—2017年东北黑土区全年与季节气候变化特征

Fig. 2 Trend of annual and seasonal average temperature and precipitation in the black soil region of Northeast China during 2000-2017

开始期对最低气温和最高气温的响应规律与其对平均气温的响应特征基本一致,但松嫩黑土亚区西北部、蒙东黑土区T0时段最低气温与作物生长季开始期多呈负相关关系(图5e~5h)。

由图6可知,三江黑土亚区西部、松嫩黑土亚区北部以及中部和蒙东黑土亚区作物生长季结束期与降水量呈正相关关系,但滞后时间由T3时段提前至T0和T1时段,而松嫩黑土亚区南部作物生长季结束期与T3时段降水量呈负相关关系(图6a、6b)。就气温

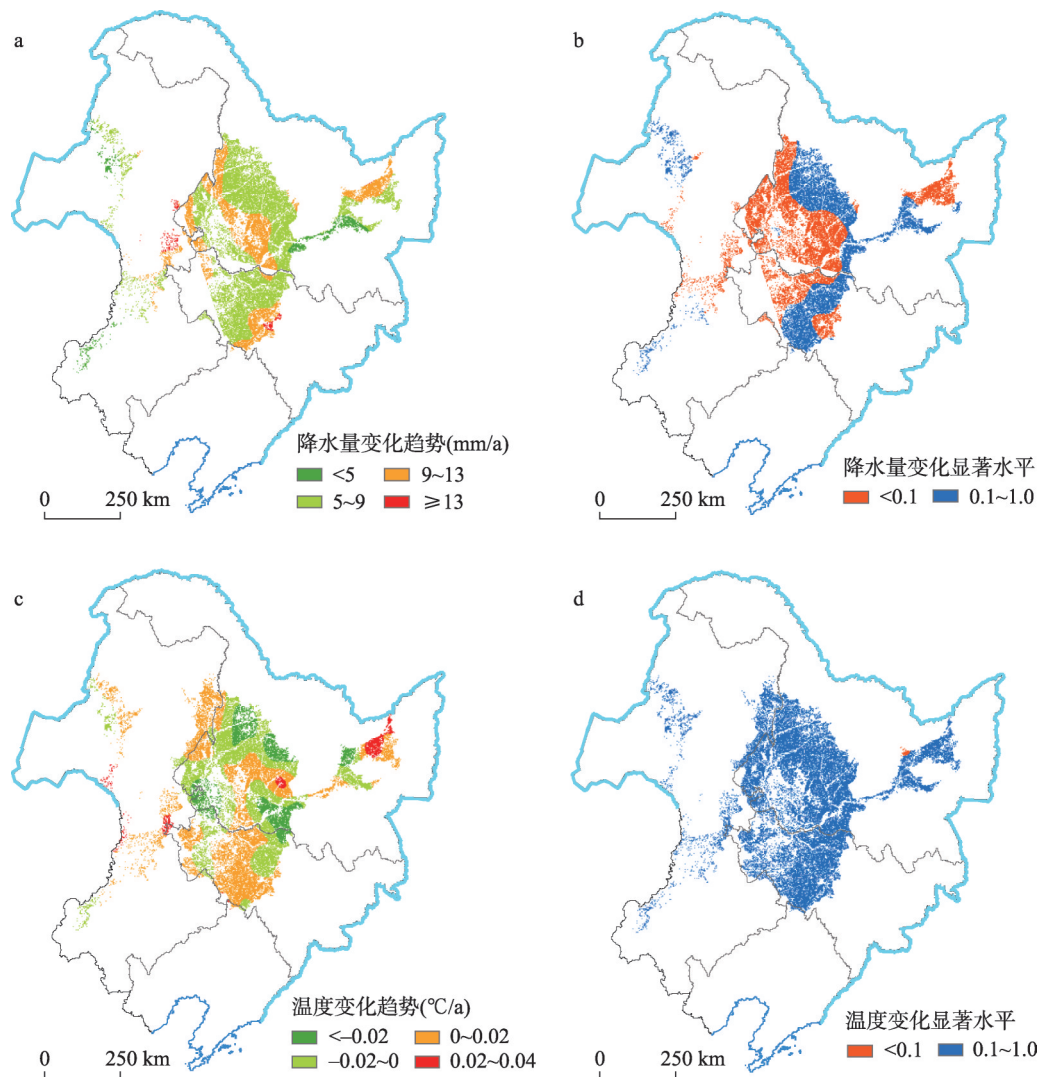


图3 2000—2017年东北黑土区全年气候变化空间格局  
Fig. 3 Spatial variation trend of annual average temperature and precipitation  
in the black soil region of Northeast China during 2000-2017

而言，从东北向西南，东北黑土区平均气温、最高气温与作物生长季结束期之间关系逐渐由负相关转变为正相关，滞后时间由T3时段转变为T2时段，而最低气温变化与作物生长季结束期的相关关系空间差异性更加明显，主要表现为松嫩黑土亚区中部及三江黑土亚区作物生长季结束期与T3时段最低气温负相关，而松嫩黑土亚区北部、南部以及蒙东黑土亚区作物生长季结束期与最低气温正相关，滞后时间主要集中在T0和T1时段(图6c~6h)。

如图7所示，气候变化与作物物候期对东北黑土区作物生产力的解释能力空间异质性较强。总体上，约57.69%的区域生长期气候变化与作物物候变动能够显著解释作物生产力变化，解释能力在50%~80%、80%以上的面积分别占总面积的39.77%和17.92%，主要分布在松原—绥化线以西的松嫩黑土亚区以及三江黑土亚区等地(图7a、7b)。单一生



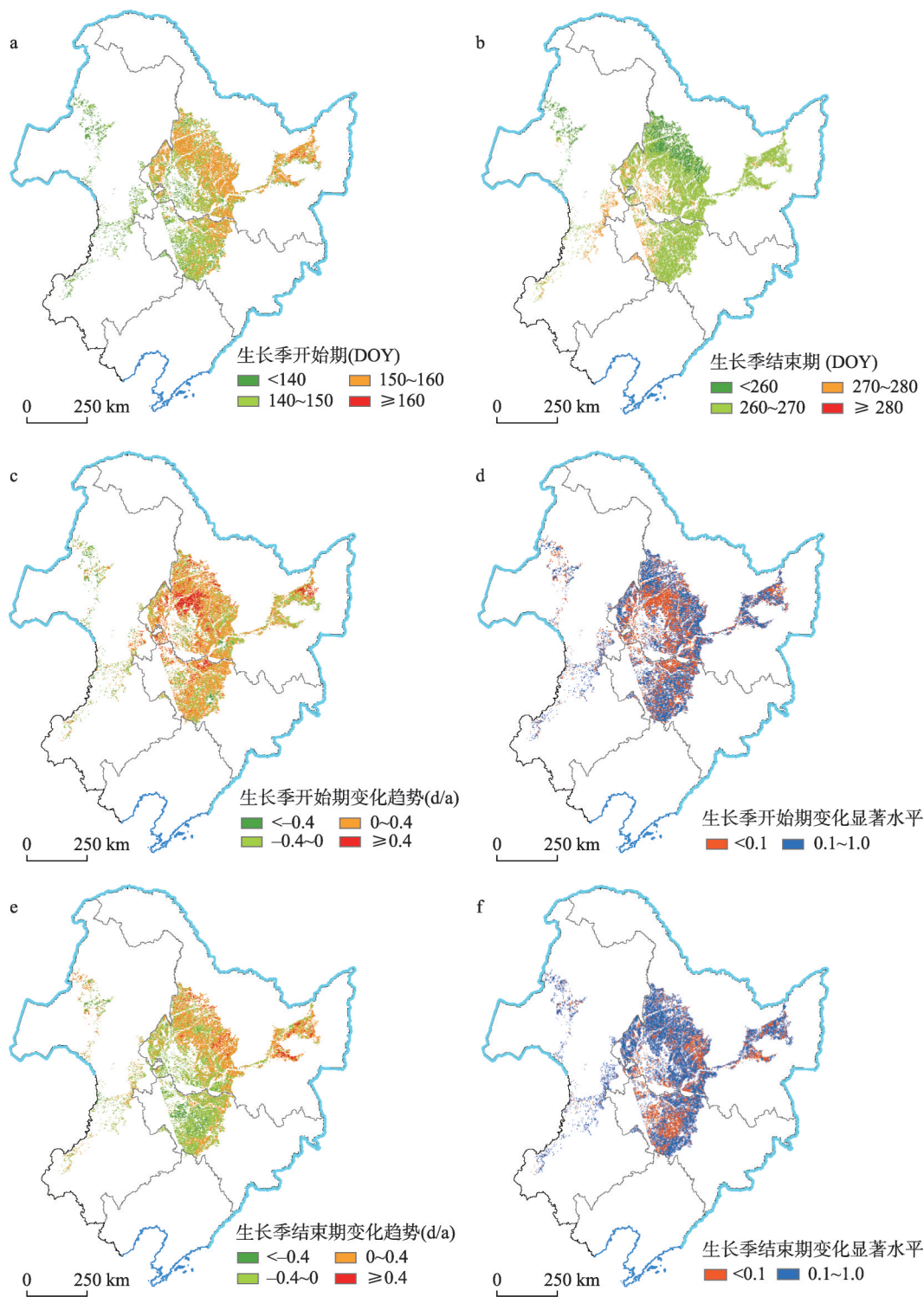


图4 2000—2017年东北黑土区作物生长季开始与结束期趋势空间特征

Fig. 4 Spatial variation of mean annual SOS and EOS, and their stability and trend in the black soil region of Northeast China during 2000-2017

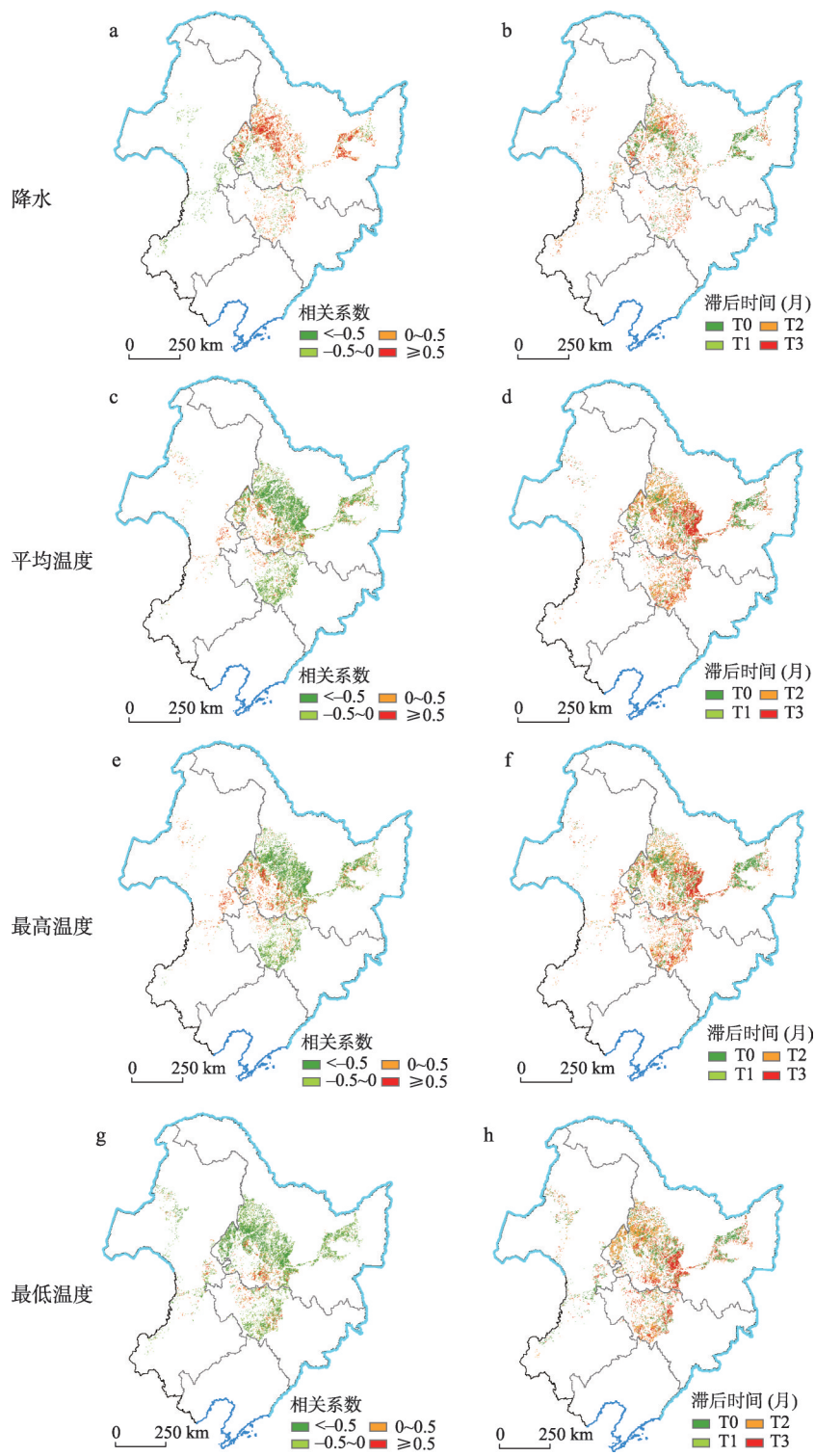


图5 2000—2017年东北黑土区作物生长季开始期气候滞后效应空间格局  
Fig. 5 Spatial distribution of significant lag responses of SOS to climate variables  
in the black soil region of Northeast China during 2000-2017



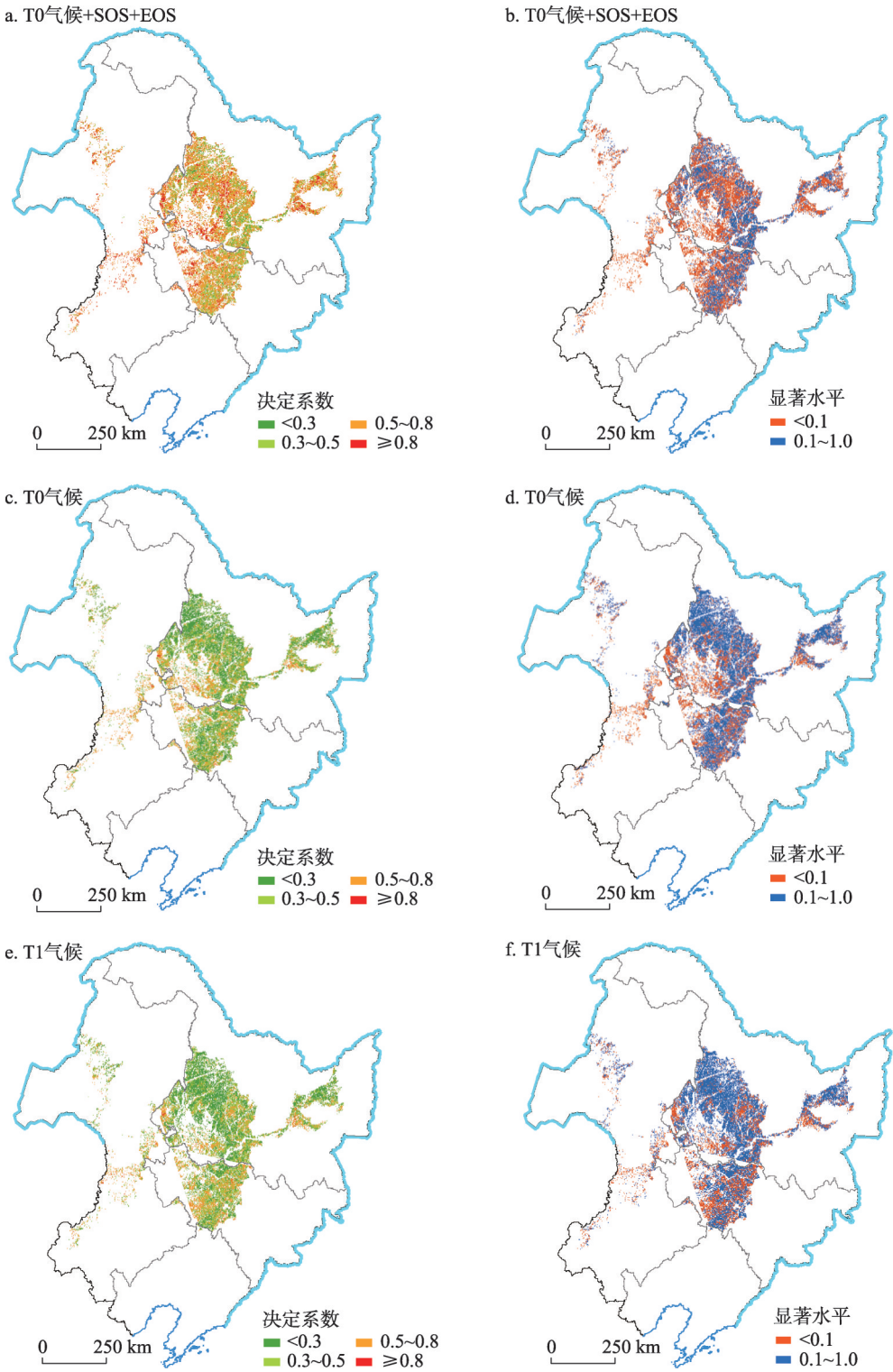


图7 2000—2017年东北黑土区作物生产力气候与物候解释能力空间格局特征  
Fig. 7 Spatial distribution of determination coefficient of vegetation productivity, and climatic variables, SOS, EOS in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2017



长季同期气候变化对作物生产力的解释面积仅为总面积的31.18%,集中分布在白城、松原、大庆、齐齐哈尔南部等松嫩黑土亚区以及蒙东黑土亚区东南部,且解释能力在50%~80%、80%以上的面积分别减少了41.90%和95.20%(图7c、7d)。相比于同期气候变化的影响,T1时段的气候变化对黑土区作物生产力的解释能力无明显改变,解释面积减少了约0.52%(图7e、7f)。

### 3.3 不同温升目标下未来气候变化风险评估

基于县区历史粮食总产量和土地利用数据校正的东北黑土区粮食生产模拟结果显示,1991—2010年东北黑土区年平均粮食总产量约为5400万t,高产区主要集中在三江黑土亚区中部、松嫩黑土亚区东部和西部(图8a)。

RCP8.5情景下,全球温升1.5℃时,东北黑土区年平均粮食总产量将超过6000万t,粮食产量空间分布与当前时段基本相同(图8b)。与当前时段相比,全球温升1.5℃时东北黑土区粮食产量变化呈现“南减北增”变化特征,其中蒙东黑土亚区、松嫩黑土亚区北部和三江黑土亚区西部粮食产量增加明显,粮食生产风险区主要分布在松嫩黑土亚区的南部边缘,粮食减产量最高接近5%(图8d)。全球温升2.0℃时,东北黑土区年平均粮食总产量将超过6700万t,相较于温升1.5℃和当前时段分别增加约7%和24%,粮食产量空间分布与当前时段基本一致(图8c)。与当前时段相比,全球温升2.0℃时东北黑土区粮食产量变化的“南减北增”分布格局更加明显,蒙东黑土亚区、松嫩黑土亚区北部和三江黑土亚区西部增产面积明显扩大,松嫩黑土亚区的南部边缘粮食生产呈高风险,粮食减产量最高接近10%,中风险区扩大到松花江以南的大部分地区(图8e)。

未来气候变化情景下中国北方地区呈暖湿化趋势,南方地区呈暖干化趋势<sup>[51]</sup>,而东北地区总体向暖湿化发展,水热资源不匹配可能会对农业生产造成不利的影响<sup>[31]</sup>。本文

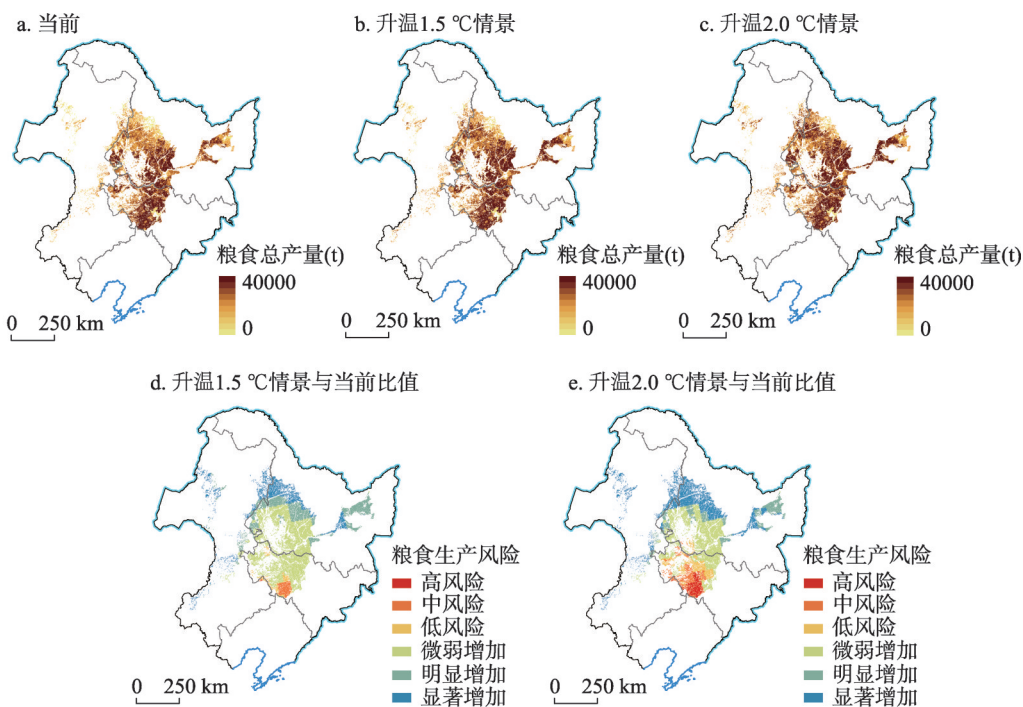


图8 东北黑土区不同温升时段粮食总产量和粮食生产风险空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of total grain yield and grain production risk in the black soil region of Northeast China

基于综合气象干旱指数评估不同温升时段东北黑土区干旱危险性的时空变化规律。当前时段，东北黑土区干旱危险性呈现中部高东西低的分布格局，危险性指数较高的地区主要分布在松嫩黑土亚区西部、蒙东黑土亚区东南部，松嫩黑土亚区东部干旱危险性次之，三江黑土亚区、蒙东黑土亚区北部干旱危险性指数最低（图9a）。

RCP8.5情景下，全球温升1.5℃时，东北黑土区干旱危险性指数分布与当前时段基本一致（图9b）。与当前时段相比，全球温升1.5℃时，松嫩黑土亚区中西部地区的危险性指数明显增大，松嫩黑土亚区西南部和西北部、蒙东黑土亚区东南部的危险指数明显减小；三江黑土亚区中西部、松嫩黑土亚区东北部的危险性指数增大，蒙东黑土亚区北部的危险性指数减小（图9d）。全球温升2.0℃时，东北黑土区干旱危险性指数总体分布格局与之前两个时段基本相同（图9c）。相对于温升1.5℃时段，全球温升2.0℃时，松嫩黑土亚区中部地区的危险性指数明显增大，松嫩黑土亚区中西部的危险指数减小；蒙东黑土亚区北部的危险性指数增大，三江黑土亚区、松嫩黑土亚区东北部的危险性指数明显减小（图9e）。

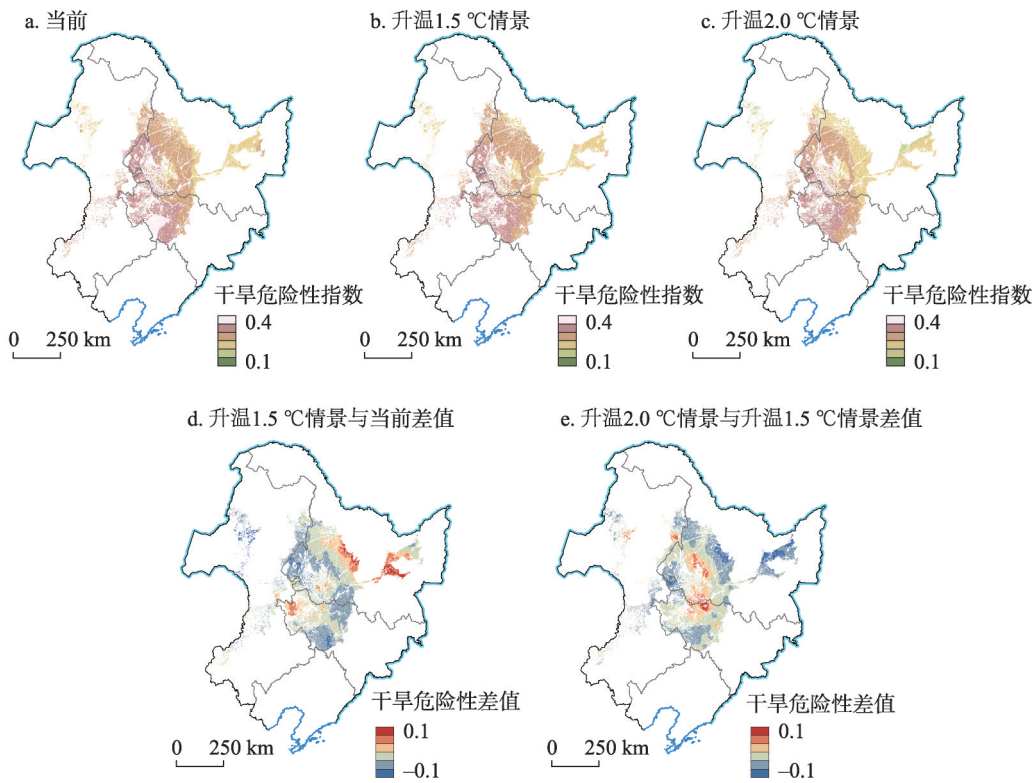


图9 东北黑土区不同温升时段干旱危险性及其变化差值空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of drought hazard and variation in the black soil region of Northeast China

## 4 讨论

### 4.1 气候变化背景下作物生长的气候响应特征

2000—2011年东北黑土区平均气温波动起伏剧烈，表现出全球陆地较为一致的变暖停滞现象，之后再次快速升温，气温变化率超过了西北地区2012—2019年的平均水平（0.10℃/a）<sup>[52]</sup>，该区2012年后年降水量出现显著减少现象，暖干化态势值得高度关注。

随着气候暖干化,全区约三成的面积作物生长季开始期延后趋势显著( $P < 0.10$ ),仅8.01%的区域作物生长季开始期呈显著的提前趋势。研究表明北半球植被生长季开始期由2000—2008年仅提前了0.2 d,较1982—1999年减少了约92.31%<sup>[53]</sup>,华北冬小麦生长季开始期在1999—2013年表现出明显的延迟现象,延迟幅度约4.3 d/10a<sup>[54]</sup>,这与本文结果较为一致。东北黑土区北部和南部大部分地区作物生长季开始期与前期降水量呈正相关关系,与前期平均气温、最高气温、最低气温呈负相关关系,这与该区水热资源状况及变化态势有关。东北地区平均气温较低,降水量自西北向东南呈弧形条带状递减,蒙东、吉林西部和黑龙江西南部地区降水量较少<sup>[55]</sup>,在寒冷但降水量相对丰富的北部和南部黑土区,前期气温上升促进生长季提前,而前期降水量增多将在一定程度上导致日照强度减小、气温下降,进而引起生长季延迟<sup>[56]</sup>。相反,在降水量相对较小的蒙东、吉林西部和黑龙江西南部地区,前期升温可能引发干旱,抑制作物生长<sup>[57]</sup>。2000—2017年东北黑土区约58.36%的面积作物生长季结束期呈提前态势,这与前人研究有别,可能与研究时段有关<sup>[58]</sup>。Yang等指出与20世纪80年代相比,21世纪初中国北方植物生长结束期延迟趋势减弱,部分地区呈现结束期提前趋势<sup>[59]</sup>。作物生长季结束期与前期降水量和气温呈现出相负相关特征,体现出气候变化敏感区水分有效性与气温对作物生长的交互影响,而黑土区北部作物生长季结束期与最低气温的正相关关系可能与低温胁迫有关<sup>[60]</sup>。

气候资源条件的变化对农作物生产具有重要的影响。研究显示与20世纪80年代相比,20世纪90年代气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献率为23.2%~28.8%<sup>[61]</sup>,气候变暖对松嫩平原玉米增产的贡献率为26.78%<sup>[62]</sup>。在华北平原,近30年来气候变量对玉米产量的总体贡献率约为15%~30%<sup>[63]</sup>。本文发现生长季气候变化对东北黑土区农业生产的平均解释能力约为36.31%,与上述研究基本一致,两者间差异可能与研究时段及区域范围有关。植被生长季开始期及结束期作为植被生长发育的重要节点,既受气候变化的影响,又对植被生理过程与光合生产能力产生重要作用<sup>[32]</sup>。气候变化和关键物候期协同考虑能够有效提高东北黑土区作物生产力的解释能力,两者解释能力较单一考虑生长季气候变化的解释能力增加了70.23%,解释面积扩大了85.04%,可为建立大尺度作物产量估算模型提供一种有效途径。

## 4.2 未来粮食生产风险预估与应对策略

过去几十年间,随着区域气候资源条件改变,东北黑土区水稻、小麦、玉米等主要粮食作物的种植面积和产量均呈现增加趋势<sup>[29, 64]</sup>。本文基于“气候变化—粮食生产—未来风险”的视角,采用渐变事件气候变化风险评估方法<sup>[45]</sup>,同时引入 $\delta$ 插值方法校正粮食产量模拟结果,建立高精度粮食生产风险评估模型,综合揭示东北黑土区不同温升情景下粮食生产的演变特征。该方法相比过去研究采用的趋势分析和相关分析方法具有含义明确、可信度高、可操作性强的特点,且综合考虑1.5℃和2.0℃的全球升温情景,对辨识未来东北黑土区粮食产量面临的可能风险更具指导价值<sup>[65-66]</sup>。东北黑土区水稻、小麦、玉米等主要粮食作物种植范围分布不均衡,水稻种植主要集中在松嫩黑土亚区中东部和三江黑土亚区,小麦主要散布在松嫩黑土亚区北部和蒙东黑土亚区北部,玉米种植范围基本覆盖东北黑土区。在暖湿化趋势的影响下,水稻和小麦产量呈现平稳或小幅增加的可能性较大,玉米减产量和减产范围随温升不断扩大,尤其在种植密集的松嫩黑土亚区,该区域干旱危险性指数大,且未来部分地区危险性指数持续增加,气候变化趋势性和极端事件突发性可能会对玉米生产造成更为不利的影响。未来应进一步加强农业气候资源监测,明确区域气候变化及其相关极端天气气候事件的变化特征,加强农业基础设施建设,大力发展韧性农业,全面提升未来气候变化应对能力。



综上,本文基于气候资料、遥感产品和产量预估数据,较为全面地阐述了气候变化下东北黑土区作物生产的响应特征及未来潜在风险,但结果仍然存在一定的不确定性。首先,尽管利用两期土地利用数据掩膜去消除土地利用变化的干扰,但土地利用类型年际间变化及混合像元的可能影响无法避免。其次,采用基于MODIS反射率产品计算并验证的EVI反演产品,该数据时空分辨率尤其是时间分辨率较高,在精准刻画东北黑土区作物物候特征方面具有一定优势,但数据时间序列长度有限。此外,由于全球气候模式及作物模型本身会导致未来粮食预估结果的不确定性,多模式集合研究有待加强,且应充分考虑作物品种、种植模式以及灌溉施肥等农业管理对未来粮食生产的影响,建立应对气候变化的适应技术体系,确保粮食供给。

## 5 结论

本文基于气候变化—物候响应—生产力动态—风险评估的全链条工作思路,探究了东北黑土区气候变化对农业生产的级联效应以及未来粮食生产风险的演变特征,得到以下结论:① 2000—2017年东北黑土区降水量呈现显著增加态势,但年均气温在2000—2011年表现出与全球陆地一致的变暖停滞现象。黑土区作物生长季开始期延后、结束期提前趋势明显,生长季开始期多与前期降水量呈正相关关系,与前期平均气温呈负相关关系,且生长季开始期对气温的滞后时间更长;生长季结束期与前期气候变化关系更加密切,且从南向北分异明显。② 生长季同期气候变化对东北黑土区作物生产力的解释能力有限,而气候变化和关键物候期协同考虑能够有效提高作物生产力的解释程度,可作为作物产量预测的重要依据。③ 未来RCP8.5情景下东北黑土区粮食总产量呈现上升趋势,粮食生产风险呈“南增北减”的演变特征,风险区面积不断扩大,全球升温2.0℃时,松嫩黑土亚区南部粮食减产量最高接近10%。为此,亟需研发区域性气候变化适应技术,保障粮食生产安全。

## 参考文献(References)

- [1] Su Y, Gabrielle B, Makowski D. The impact of climate change on the productivity of conservation agriculture. *Nature Climate Change*, 2021, 11(7): 628-633.
- [2] Chen J, Liu Y J, Pan T, et al. Global socioeconomic exposure of heat extremes under climate change. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123275. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123275.
- [3] Byers E, Gidden M, Leclère D, et al. Global exposure and vulnerability to multi-sector development and climate change hotspots. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(5): 055012. DOI: 10.1088/1748-9326/aabf45.
- [4] Liu M H, Xu X, Jiang Y, et al. Responses of crop growth and water productivity to climate change and agricultural water-saving in arid region. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134621. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134621.
- [5] Fujimori S, Hasegawa T, Krey V, et al. A multi-model assessment of food security implications of climate change mitigation. *Nature Sustainability*, 2019, 2(5): 386-396.
- [6] Liu B, Martre P, Ewert F, et al. Global wheat production with 1.5 and 2.0 °C above pre-industrial warming. *Global Change Biology*, 2018, 25(4): 1428-1444.
- [7] Ray D K, West P C, Clark M, et al. Climate change has likely already affected global food production. *PLOS ONE*, 2019, 14(5): e0217148. DOI: 10.1371/journal.pone.0217148.
- [8] Osborne T, Rose G, Wheeler T. Variation in the global-scale impacts of climate change on crop productivity due to climate model uncertainty and adaptation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 183-194.
- [9] Delincé J, Ciaian P, Witzke H P. Economic impacts of climate change on agriculture: The AgMIP approach. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 097099. DOI: 10.1117/1.JRS.9.097099.



- [10] Zhao C, Liu B, Piao S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(35): 9326-9331.
- [11] Arnell N W, Lowe J A, Challinor A J, et al. Global and regional impacts of climate change at different levels of global temperature increase. *Climatic Change*, 2019, 155(3): 377-391.
- [12] Hou P, Liu Y E, Liu W M, et al. Quantifying maize grain yield losses caused by climate change based on extensive field data across China. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 174: 105811. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105811.
- [13] Liu B, Asseng S, Muller C, et al. Similar estimates of temperature impacts on global wheat yield by three independent methods. *Nature Climate Change*, 2016, 6(12): 1130. DOI: 10.1038/NCLIMATE3115.
- [14] Leng G Y, Hall J. Crop yield sensitivity of global major agricultural countries to droughts and the projected changes in the future. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 811-821.
- [15] Liu J, Wang B, Cane M A, et al. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing. *Nature*, 2013, 493(7434): 656-659.
- [16] Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, et al. Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 111(9): 3268-3273.
- [17] Kukal M S, Irmak S. Climate-driven crop yield and yield variability and climate change impacts on the U.S. Great Plains agricultural production. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3450. DOI: 10.1038/s41598-018-21848-2.
- [18] Lin Y M, Wu W X, Ge Q S. CERES-Maize model-based simulation of climate change impacts on maize yields and potential adaptive measures in Heilongjiang Province, China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 95(14): 2838-2849.
- [19] Lam H M, Remais J, Fung M C, et al. Food supply and food safety issues in China. *The Lancet*, 2013, 381(9882): 2044-2053.
- [20] Sun T, Li Z Z. Alfalfa-corn rotation and row placement affects yield, water use, and economic returns in Northeast China. *Field Crops Research*, 2019, 241: 107558. DOI: 10.1016/j.fcr.2019.107558.
- [21] Lv Y J, Wang Y J, Wang L C, et al. Straw return with reduced nitrogen fertilizer maintained maize high yield in northeast China. *Agronomy*, 2019, 9(5): 229. DOI: 10.3390/agronomy9050229.
- [22] Li H, Feng W T, He X H, et al. Chemical fertilizers could be completely replaced by manure to maintain high maize yield and soil organic carbon (SOC) when SOC reaches a threshold in the Northeast China Plain. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(4): 937-946.
- [23] Xu X Z, Xu Y, Chen S C, et al. Soil loss and conservation in the black soil region of Northeast China: A retrospective study. *Environmental Science & Policy*, 2010, 13(8): 793-800.
- [24] Jiang R, He W T, Zhou W, et al. Exploring management strategies to improve maize yield and nitrogen use efficiency in northeast China using the DNDC and DSSAT models. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 166: 104988. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104988.
- [25] Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Wang Wenfeng, et al. Characteristics of agricultural climate resources in three provinces of Northeast China under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(9): 2199-2206. [刘志娟, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下我国东北三省农业气候资源变化特征, *应用生态学报*, 2009, 20(9): 2199-2206.]
- [26] Zhang H, Zhou G S, Liu D L, et al. Climate-associated rice yield change in the Northeast China Plain: A simulation analysis based on CMIP, multi-model ensemble projection. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 126-138.
- [27] Piao J L, Chen W, Chen S F, et al. Mean states and future projections of precipitation over the monsoon transitional zone in China in CMIP<sub>3</sub> and CMIP<sub>5</sub> models. *Climatic Change*, 2021, 169(3/4): 35. DOI: 10.1007/s10584-021-03286-8.
- [28] Ari G N, Bao Y B, Asi H F, et al. Impact of global warming on meteorological drought: A case study of the Songliao Plain, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 146(3/4): 1315-1334.
- [29] Li Z G, Tan J Y, Tang P Q, et al. Spatial distribution of maize in response to climate change in Northeast China during 1980-2010. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(1): 3-14.
- [30] Zhang Y, Zhao Y X, Sun Q. Increasing maize yields in Northeast China are more closely associated with changes in crop timing than with climate warming. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(5): 054052. DOI: 10.1088/1748-9326/abe490.
- [31] Chu Z, Guo J P, Zhao J F. Impacts of future climate change on agroclimatic resources in Northeast China. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(9): 1044-1058.

- [32] Wang X Y, Zhou Y K, Wen R H, et al. Mapping spatiotemporal changes in vegetation growth peak and the response to climate and spring phenology over northeast China. *Remote Sensing*, 2020, 12(23): 3977. DOI: 10.3390/rs12233977.
- [33] Lv S, Yang X G, Lin X M, et al. Yield gap simulations using ten maize cultivars commonly planted in Northeast China during the past five decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 205. DOI: 10.1016/j.agrformet.2015.02.008.
- [34] Lin Y M, Feng Z M, Wu W X, et al. Potential impacts of climate change and adaptation on maize in northeast China. *Agronomy Journal*, 2017, 109(4): 1476-1490.
- [35] Xiao D P, Zhang Y, Bai H Z, et al. Trends and climate response in the phenology of crops in northeast China. *Frontiers in Earth Science*, 2021(9): 811621. DOI: 10.3389/feart.2021.811621.
- [36] He B, Wu J J, Lyu A F, et al. Quantitative assessment and spatial characteristic analysis of agricultural drought risk in China. *Natural Hazards*, 2013, 66(2): 155-166.
- [37] You N S, Dong J W, Huang J X, et al. The 10 m crop type maps in Northeast China during 2017-2019. *Scientific Data*, 2021, 8: 41. DOI: 10.1038/s41597-021-00827-9.
- [38] Liu Baoyuan, Zhang Ganlin, Xie Yun, et al. Delineating the black soil region and typical black soil region of northeastern China. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(1): 96-106. [刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界. *科学通报*, 2021, 66(1): 96-106.]
- [39] Zhang Y, Xiao X M, Wu X C, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016. *Scientific Data*, 2017, 4: 170165. DOI: 10.1038/sdata.2017.165.
- [40] Xiong W, Holman I, Lin E D, et al. Untangling relative contributions of recent climate and CO<sub>2</sub> trends to national cereal production in China. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044014. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044014.
- [41] Xiong W, Asseng S, Hoogenboom G, et al. Different uncertainty distribution between high and low latitudes in modelling warming impacts on wheat. *Nature Food*, 2020, 1(1): 63-69.
- [42] Wu C Y, Hou X H, Peng D L, et al. Land surface phenology of China's temperate ecosystems over 1999-2013: Spatial-temporal patterns, interaction effects, covariation with climate and implications for productivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216: 177-187.
- [43] Guo L H, Gao J B, Hao C Y, et al. Winter wheat green-up date variation and its diverse response on the hydrothermal conditions over the North China Plain, using MODIS time-series data. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1593. DOI: 10.3390/rs11131593.
- [44] Schleussner C F, Lissner T K, Fischer E M, et al. Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: The case of 1.5 °C and 2 °C. *Earth System Dynamics*, 2016, 7(2): 327-351.
- [45] Wu S H, Liu L L, Gao J B, et al. Integrate risk from climate change in China under global warming of 1.5 and 2.0 °C. *Earth's Future*, 2019, 7(12): 1307-1322.
- [46] Luo Y C, Zhang Z, Li Z Y, et al. Identifying the spatiotemporal changes of annual harvesting areas for three staple crops in China by integrating multi-data sources. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(7): 074003. DOI: 10.1088/1748-9326/ab80f0.
- [47] Hay L E, Wilby R L, Leavesley G H. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 2000, 36(2): 387-397.
- [48] Deng Guo, Wang Angsheng, Zhou Yushu, et al. Geographical distribution of China's grain yield risk area. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(2): 210-215. [邓国, 王昂生, 周玉淑, 等. 中国粮食产量不同风险类型的地理分布. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 210-215.]
- [49] Wu Shaohong, Liu Lulu, Liu Yanhua, et al. Geographical patterns and environmental change risks in terrestrial areas of the Belt and Road. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7): 1214-1225. [吴绍洪, 刘路路, 刘燕华, 等. “一带一路”陆域地理格局与环境变化风险. *地理学报*, 2018, 73(7): 1214-1225.]
- [50] Li Zhengguo, Tang Huajun, Yang Peng, et al. Identification and application of seasonality parameters of crop growing season in northeast China based on NDVI time series data. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(5): 882-892. [李正国, 唐华俊, 杨鹏, 等. 基于时序植被指数的东北地区耕地生长季特征识别与应用研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(5): 882-892.]
- [51] Gao J B, Liu L L, Wu S H. Hazards of extreme events in China under different global warming targets. *Big Earth Data*, 2020, 4(2): 153-174.
- [52] Li Zhe, Ding Yongjian, Chen Aijiao, et al. Characteristics of warming hiatus of the climate change in Northwest China from 1960 to 2019. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(9): 1845-1859. [李哲, 丁永建, 陈艾姣, 等. 1960—2019年西北地区气候变化中的Hiatus现象及特征. *地理学报*, 2020, 75(9): 1845-1859.]

- [53] Jeong S J, Ho C H, Gim H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982-2008. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399.
- [54] Liu Z J, Wu C Y, Liu Y S, et al. Spring green-up date derived from GIMMS3g and SPOT-VGT NDVI of winter wheat cropland in the North China Plain. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 130: 81-91.
- [55] Wu Jinhua, Sheng Zhilu, Du Jiaqiang, et al. Spatiotemporal change patterns of temperature and precipitation in Northeast China from 1956 to 2017. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(3): 340-347, 415. [吴金华, 盛芝露, 杜加强, 等. 1956—2017年东北地区气温和降水的时空变化特征. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 340-347, 415.]
- [56] Shen M G, Piao S L, Cong N, et al. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2015, 21(10): 3647-3656.
- [57] Piao S L, Tan J G, Chen A P, et al. Leaf onset in the northern hemisphere triggered by daytime temperature. *Nature Communications*, 2015(6): 6911. DOI: 10.1038/ncomms7911(2015).
- [58] Yang B, He M H, Shishov V, et al. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(27): 6966-6971.
- [59] Yang Y T, Guan H D, Shen M G, et al. Changes in autumn vegetation dormancy onset date and the climate controls across temperate ecosystems in China from 1982 to 2010. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 652-665.
- [60] Yang Z Y, Shen M G, Jia S G, et al. Asymmetric responses of the end of growing season to daily maximum and minimum temperatures on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(24): 13278-13287.
- [61] Fang Xiuqi, Wang Yuan, Xu Tan, et al. Contribution of climate warming to rice yield in Heilongjiang Province. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 820-828. [方修琦, 王媛, 徐钺, 等. 近20年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献. *地理学报*, 2004, 59(6): 820-828.]
- [62] Wang Zongming, Song Kaishan, Li Xiaoyan, et al. Effects of climate change on yield of maize in maize zone of Songnen Plain in the past 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21(9): 112-117. [王宗明, 宋开山, 李晓燕, 等. 近40年气候变化对松嫩平原玉米带单产的影响. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(9): 112-117.]
- [63] Xiao D P, Tao F L. Contributions of cultivar shift, management practice and climate change to maize yield in North China Plain in 1981-2009. *International Journal of Biometeorology*, 2016, 60(7): 1111-1122.
- [64] Hu Y N, Fan L L, Liu Z H, et al. Rice production and climate change in Northeast China: Evidence of adaptation through land use shifts. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(2): 024014. DOI: 10.1088/1748-9326/aafa55.
- [65] Guo E L, Liu X P, Zhang J Q, et al. Assessing spatiotemporal variation of drought and its impact on maize yield in Northeast China. *Journal of Hydrology*, 2017, 553: 231-247.
- [66] Pu L M, Zhang S W, Yang J C, et al. Assessing the impact of climate changes on the potential yields of maize and paddy rice in Northeast China by 2050. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 140(1/2): 167-182.

## Synergic effects of climate change and phenological variation on agricultural production and its risk pattern in black soil region of Northeast China

GAO Jiangbo<sup>1</sup>, LIU Lulu<sup>1</sup>, GUO Linghui<sup>2</sup>, SUN Dongqi<sup>3</sup>, LIU Wanlu<sup>1,4</sup>,  
HOU Wenjuan<sup>1</sup>, WU Shaohong<sup>1,4</sup>

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 3. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The black soil region of Northeast China is the major food base and one of the most sensitive regions to climate change in China. However, the characteristics of crop phenological response, the integrated impact of climatic and phenological changes on agricultural productivity in the black soil region of Northeast China under the background of climate change are not clear, the quantitative degree of future agricultural risk assessment is insufficient, and the risk level formulation lacks a basis. Therefore, based on remote sensing products, climate data and model simulations, this study integrated the logistic function fitting curvature derivation, multiple linear regression and scenario simulation to investigate the crop phenology dynamics and its climate response characteristics in this black soil region, and to identify the compound effects of climate and phenology changes on agricultural production and possible future risks. Results show that: (1) From 2000 to 2017, about 29.76% of the black soil region of Northeast China showed a significant delay in the onset of the growing season and 16.71% of the total area showed an advancing trend in the end of the growing season. The time lag effects of the onset of the growing season for crop response to climatic factors depended on site and climatic parameters, with the widespread influence of temperature and its lag time longer in general. (2) Both climatic and phenological changes have a significant effect on the interannual variability of crop production, and the explanatory capacity of both increased by 70.23% and the explanatory area expanded by 85.04% compared to that of climate change in the same period of the growing season. (3) Under RCP8.5 scenario, the future crop yield would show a decrease in the north and increase in the south, and when the global temperature rises by 2.0 °C, the crop yield of southern Songnen black soil subregion would reduce by nearly 10%. Spatial and temporal variation of drought would adversely affect crop production. The study will help to understand the mechanisms underlying climate change, phenological response and productivity dynamics, and also help to strengthen the risk management of agrometeorological disasters, which is important to ensure national food security and regional climate change response.

**Keywords:** black soil region of Northeast China; vegetation phenology; vegetation productivity; lag effect; future risk