

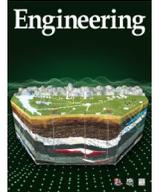


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Climate Change—Article

气候变暖加剧西藏自治区谷类作物单产的减产效应

斯确多吉^{a,b}, 朴世龙^{a,b,c,*}, 王旭辉^c, 赵闯^c, 刘保花^c, 陈安平^d, 汪诗平^{a,b}, 汪涛^{a,b}

^a Key Laboratory of Alpine Ecology and Biodiversity, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

^b Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

^c Sino French Institute for Earth System Science, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

^d Department of Biology, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 4 October 2020
Revised 15 November 2020
Accepted 19 January 2021
Available online 20 April 2021

关键词

西藏自治区
气候变暖
作物产量
青稞
减产

摘要

藏区农业是西藏自治区独特的历史和文化遗产的重要载体。与内地不同,作为唯一能在海拔4000 m以上生长的谷类作物,青稞是西藏自治区最主要的粮食作物。然而,气候变化对以青稞为主的西藏自治区谷类作物单产的影响仍不清楚。为此,本研究基于1985—2015年西藏自治区农业统计数据,解析了气候变暖对西藏自治区谷类作物单产的影响。研究发现,在20世纪80年代和90年代,气候变暖对西藏自治区谷类作物单产的影响并不显著($P > 0.10$);但21世纪以来,气候变暖显著降低了西藏自治区谷类作物单产($P < 0.05$)。同时,西藏自治区谷类作物单产变化对气候变暖的敏感度几乎加倍:从 $(-0.13 \pm 0.20) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 增至 $(-0.22 \pm 0.14) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$,表明气候变暖导致西藏自治区谷类作物生产更加脆弱。不仅如此,随着气温继续升高,当全球平均气温升幅比工业革命前高1.5 °C和2 °C时,西藏自治区谷类作物单产对气候变暖的敏感度将比当前再增强1~2倍,分别达到 $(-0.33 \pm 0.10) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 和 $(-0.51 \pm 0.18) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 。如何应对全球变化、实现农业可持续发展是当前西藏自治区社会发展面临的重大挑战。

© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

中国青藏高原作为地球的第三极,是世界上海拔最高、面积最大的高山地区[1],也是气候变化的热点区域之一。从该区域观测到的气候变暖速度[图1(c)]是全球气候变暖速度平均水平(每10年0.25~0.27 °C)的两倍[2]。由于青藏高原暴露在高强度太阳辐射下,使得该地区有别于其他气候类似寒冷的高纬度地区。西藏自治区(TAR)拥有300多万人口,其中一半人口以农业为生[3]。西藏自治区的种植体系也很独特。藏族人民的传统主食是

青稞,是唯一能生长在海拔4000 m以上的谷类作物,占中国西藏自治区农作物种植面积的60%左右、谷物产量的70%左右。青稞的种植和生产也孕育了独特的藏族文化。在过去30年中,西藏自治区谷类作物产量和人口数量同步增长(图1),使粮食供需水平急剧升高。近10年来,由于产量增长趋于平稳,导致供需平衡收紧(图1),同时,越来越多的证据表明全球变暖对农作物产量产生了广泛的不利影响[4-6]。这一切均在提醒人们关注气候变化对西藏自治区谷类农作物产量的影响。然而,由于缺乏气候快速变暖对西藏自治区谷类作物影响的相关证据,难以

* Corresponding author.

E-mail address: slpiao@pku.edu.cn (S. Piao).

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2022, 14(7): 163–168

引用本文: Tsechoe Dorji, Shilong Piao, Xuhui Wang, Chuang Zhao, Baohua Liu, Anping Chen, Shiping Wang, Tao Wang. Emerging Negative Warming Impacts on Tibetan Crop Yield. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.01.012>

认识西藏自治区谷类作物产量对变暖气候的响应特征。本研究利用谷类作物产量统计数据（1985—2015年）和历史气候数据集，初步探讨了西藏自治区谷类作物产量-气候关系及其在过去30年中的演变特征。

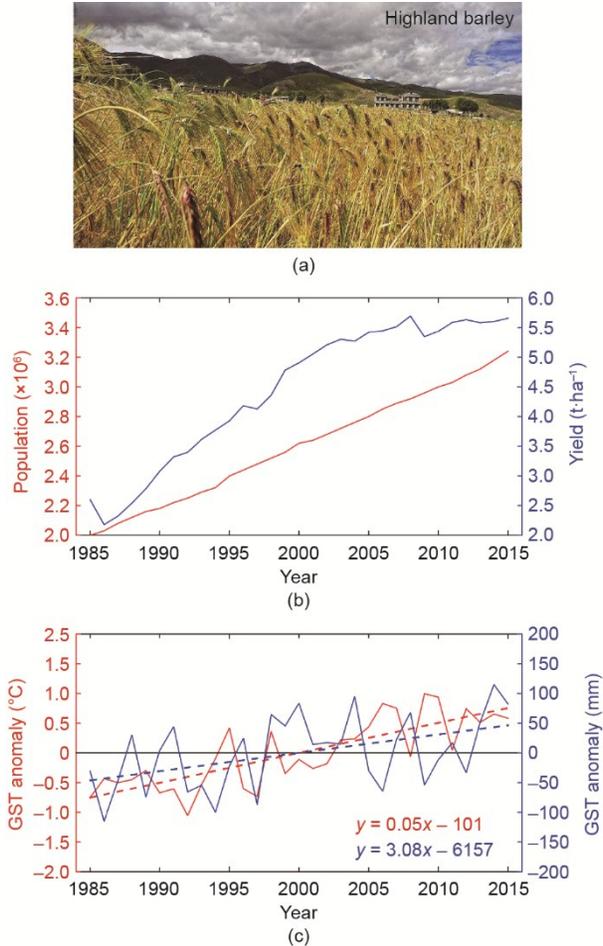


图1. (a) 中国西藏自治区的青稞；(b) 西藏自治区人口数量和谷类作物产量的时间序列；(c) 西藏自治区青稞种植区生长季气温和降水异常的时间序列。GST：生长季气温；GSP：生长季降水

2. 方法

2.1. 数据集

1985—2015年西藏自治区谷物种植面积和产量的时间序列数据源自《西藏统计年鉴》。西藏自治区种植的主要谷类作物是青稞，占作物种植面积的60%左右、谷物产量的70%左右。尽管只有1985—1994年的青稞数据，但整个西藏自治区谷物产量的变化普遍反映了青稞产量的变化特征 ($R^2 = 0.91, P < 0.01$; 见附录A中的图S1)。因此，对谷物产量变化的分析主要反映了青稞产量的分析。青稞种植面积数据取自MIRCA2000数据集[7] (见附录A中的图S2)。每月气候数据 (包括平均/最高/最低气温、

降水和太阳辐射) 源于中国科学院《中国区域地面气象要素驱动数据集》(CMFD)的0.1°网格气候数据[8]。生长季定义为5~8月。青稞种植区各网格的生长季气温 (GST)、生长季降水 (GSP) 和生长季辐射 (GSR) 通过相应的面积加权月平均数据计算获得。通过谷物种植面积对每个网格单元 (0.5° × 0.5°网格) 进行加权，获得整个西藏自治区的年平均GST、GSP和GSR [9]。较工业革命前气温升高1.5 °C和2.0 °C情景下的气温数据源自巴黎拉普拉斯学院 (Institut Pierre-Simon Laplace) 的气候模拟研究所耦合模型第5版，结合NEMO的低分辨率 (IPSL-CM5A-LR) [10] 的偏差校正气候变化预测，其中模拟范围从工业化前延伸至21世纪末。此外，还利用IPSL-CM5A-LR获得了不同变暖情景下西藏自治区的气温变化数据。

2.2. 数据分析

为了分析产量和气候之间的关系，首先基于通用的一阶差分 (即年际间的变化) 方法对所有时间序列进行去趋势化[11–12]。通过一阶差分方法可弱化，诸如作物管理、技术进步和大气二氧化碳 (CO₂) 浓度增加等缓慢变化因素的影响。利用去趋势化时间序列之间的相关性来分析1985—2015年间的产量和气候之间的关系。为最大程度降低共变变量的混淆影响，还在产量和一个气候变量之间进行了偏相关处理，同时对其他两个变量进行统计控制。使用15年 (1985—2015年) 的移动时间窗口，通过重复普通相关性和偏相关来检验气温-产量关系的逐时变化特征。利用10~17年的不同时间窗口长度，对其重复进行相同的分析并进行测试，确保时间窗口长度选择的稳健性 (robustness) (见附录A中的图S3)。时间序列越长，相关性分析通常越可靠。本文提供了15年时间窗口的结果，因为这是最长的时间窗口，可确保第一个和最后一个时间窗口中的数据点完全独立。通过产量与GST、GSP和GSR之间的多元回归获得产量对气温的敏感性 (S_T)。在 S_T 和GST、GSP以及GSR之间进行回归处理，以探讨 S_T 随时间变化的可能原因。利用回归模型推断了 S_T 在不同的气候变化情景 (1.5 °C和2.0 °C) 下95%置信区间内的变化特征。

3. 结果

3.1. 产量的变化主要由气温异常引起

首先，利用一阶差分法 (见第2节) 进行去趋势化获得的数据，分析了过去30年年产量 (ΔY)、生长季气温 (ΔGST)、降水量 (ΔGSP) 和入射太阳辐射 (ΔGSR) 的

年际变化特征(图2)[11–12]。1985—2015年期间,产量的重大变化与气温之间呈强反相关系[图2(a)]。相关分析表明,当控制 ΔGSP 和 ΔGSR 时, ΔY 与 ΔGST ($R_{Y-\text{GST}}$)呈显著负相关 [$R_{Y-\text{GST}} = -0.37, P = 0.05$; 图2(b)]。平均而言,气温异常升高 1°C 会导致 $0.11 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ 的产量损失。另一方面, ΔY 似乎也与 ΔGSP 和 ΔGSR 相关[图2(e)、(f)],不过在偏相关分析中,当控制其他气候因素后这些相关性消失了 [$P > 0.05$; 图2(e)、(f)]。总之,研究结果表明,在西藏自治区谷类作物产量变化的驱动因素方面, ΔGST 比 ΔGSP 和 ΔGSR 更重要。这是合理的,因为西藏自治区的农田暴露在充足的太阳辐射(年平均太阳辐射约为 $7.2 \times 10^9 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)下,并且灌溉管理已普及[13]。

3.2. 产量似乎对气温升高更敏感

由于产量变化主要由气温异常驱动(图2),而气温异常在过去30年中迅速加剧(图1),下一个问题是:在同一时期,产量对气温升高的反应是否发生了变化。为回答这个问题,本文分析了15年移动时间窗口内 ΔY 和 ΔGST

之间的关系[图3(a)]。如图3所示,在20世纪80年代末和90年代期间, ΔY 和 ΔGST 之间的偏相关无统计学显著性,但在21世纪初转变为显著负相关 ($R_{Y-\text{GST}} < -0.60, P < 0.05$)。这个 ΔY 和 ΔGST 之间的相关系数变化特征在控制 ΔGSP 和 ΔGSR 条件下也很明确。由于 ΔY 和 ΔGST 的标准偏差在时间窗口内无显著变化(见附录A中的图S4), ΔY 和 ΔGST 之间的负相关性增加应该是由产量对更高温度的负反应增强产生的。事实上, ΔY 对 ΔGST 、 ΔGSP 和 ΔGSR 的多元回归表明,在第一个15年时间窗口内, GST 每增加 1°C ,产量就会减少 $(0.13 \pm 0.20) \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$;但是,在2001—2015年,与相同 GST 增加量对应的产量损失几乎翻倍 [$(-0.22 \pm 0.14) \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$]。

进一步进行两项额外的分析,以评估 ΔY 和 ΔGST 之间的偏相关系数变化的稳健性,以及在过去30年中 S_T 的明显翻倍情况。首先,检查了几个极端年份的数据是否可能导致所观察到的 $R_{Y-\text{GST}}$ 和 S_T 变化。通过进行500次自举分析(bootstrapping analyses),发现 $R_{Y-\text{GST}}$ 从第一个15年期间的 (-0.42 ± 0.21) 稳健地变化为最后15年期间的 $(-0.70 \pm$

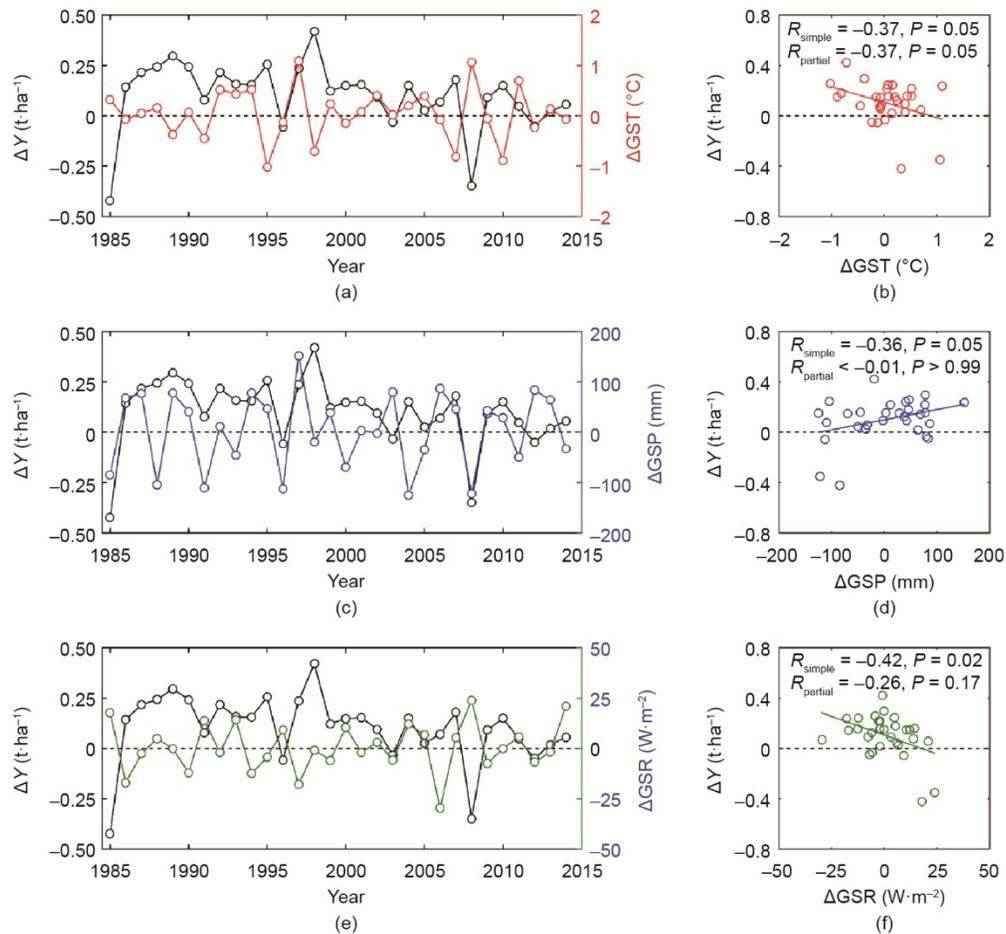


图2. 时间序列和产量一阶差分与西藏自治区内 GST [(a)、(b)]、 GSP [(c)、(d)]以及 GSR [(e)、(f)]之间的关系。 R_{simple} 和 R_{partial} 分别表示普通和偏相关系数。

0.17)。两个时期的 R_{Y-GST} 差异显著 ($P < 0.01$)。同样, S_T 显著 ($P < 0.01$)增加, 从最初15年期间的 $(-0.13 \pm 0.07) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ 增加到最后15年期间的 $(-0.22 \pm 0.06) \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ (见附录A中的图S5)。因此, 不断增加的 R_{Y-GST} 和 S_T 反相关关系并非由几个极端年份的数据所引起。其次, 测试了观察到的 R_{Y-GST} 和 S_T 的变化是否由选定时间窗口长度所造成的假象。进行了相同的移动窗口分析, 时间窗口长度从10年到17年不等。结果显示, 无论时间窗长度如何, R_{Y-GST} 从第一个时间窗口的无统计学显著性 ($P > 0.10$)变为最后一个时间窗口的显著负相关 ($R_{Y-GST} < -0.68, P < 0.05$), 但10年时间窗口除外, 其中 R_{Y-GST} 在最后一个时间窗口的显著性不大 ($R_{Y-GST} = -0.62, P < 0.10$)。不同时间窗口长度的第一个和最后一个时间窗口之间的 S_T 增量范围为55% (17年时间窗口)至177% (12年时间窗口), 平均增量为 $100\% \pm 49\%$ (见附录A中的图S3)。因此, 在过去的30年里, 基于选定的时间窗口长度, 不断升高的 R_{Y-GST} 负相关关系以及几乎翻倍的 S_T 都是可信、稳健的。

3.3. 气候变暖对西藏自治区产生不利影响的预警

在过去30年中, 西藏自治区谷类作物产量对生长季气温的敏感性幅度 ($-2\% \cdot \text{°C}^{-1}$ 至 $-4\% \cdot \text{°C}^{-1}$) 小于全球大

麦因气温升高而造成的产量损失 ($-9\% \cdot \text{°C}^{-1}$) [12]。然而, 气温上升对西藏自治区作物产量的不利影响尤其令人担忧, 因为之前的假设是高纬度和高海拔地区的作物产量可能或多或少受益于气温上升[14]。这些结果还可能意味着, 在一些潮湿寒冷的地区, 当前气候变暖对农作物产量产生的有益效应 [15]可能会在不久的将来消失。此外, S_T 从20世纪80年代和90年代的不显著转变为21世纪的显著负值, 可能与GST的快速上升有关[图1 (c)]。图3 (c)、(d)表明 R_{Y-GST} 与GST高度相关 ($R = -0.78, P < 0.001$)。当控制GSP和GSR时, 这种关系变化不大 ($R = -0.58, P = 0.03$)。虽然GSP也显示出较大的上升趋势 [$3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}; P < 0.05$; 图1 (c); 见附录A中的图S6], 但在偏相关分析中, GSP和GSR的变化与 R_{Y-GST} 的变化未呈现显著相关 (见附录A中的图S7)。

4. 讨论

本文提出了两种可能的机制来解释研究结果。首先, 考虑到饱和水压和气温之间的指数关系[16], 在气候变暖的情况下, 相同幅度的气温上升可能会导致更大的大气水

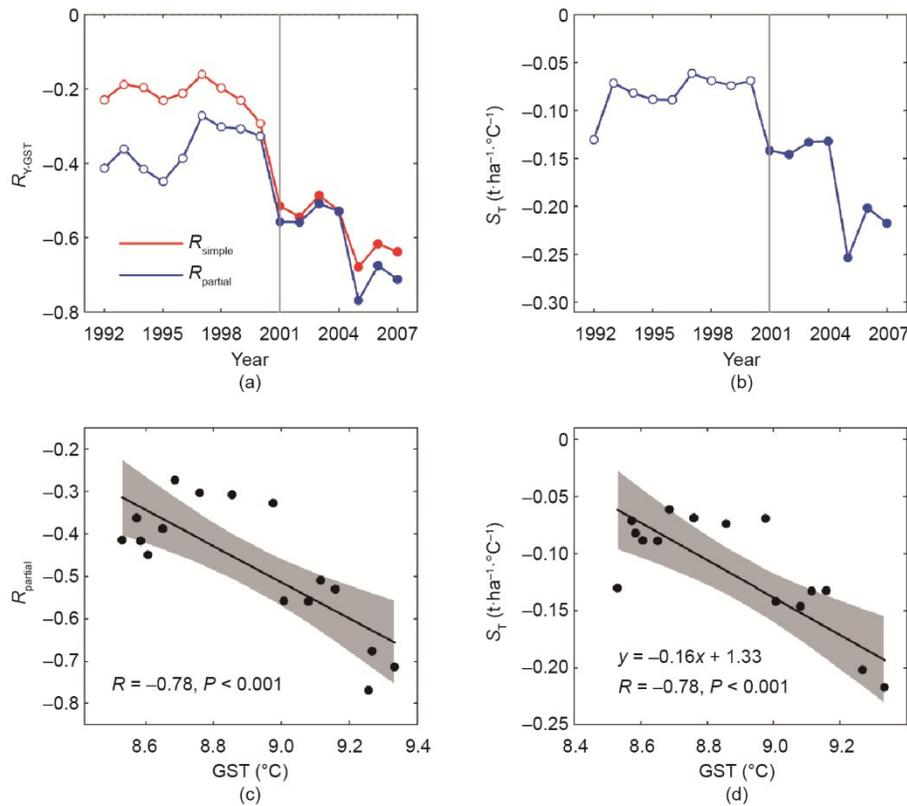


图3. 西藏自治区谷类作物一阶差分产量和GST之间相关系数以及产量对GST的敏感性的逐时变化特征。(a) 相关系数的逐时变化特征 (R_{simple} 和 $R_{partial}$ 分别代表普通和偏相关系数; 虚线代表10%的显著性水平); (b) 谷类作物产量对GST敏感性的逐时变化特征 (S_T 表示通过多重线性回归得出的敏感性); (c) $R_{partial}$ 与GST之间的关系; (d) S_T 和GST之间的关系。

分亏缺。这种更大的水汽压亏缺 (VPD) 会降低气孔导度, 从而降低光合作用[17], 导致作物产率下降。通过改变大气需水量来区分变暖的直接和间接影响并不容易。然而, ΔY 与生长季节平均最高日气温 (ΔT_{\max}) 和最低日气温 (ΔT_{\min}) 间的偏相关分析表明, ΔY 与 ΔT_{\min} 之间的偏相关在最近几十年并不显著, 偏相关系数在整个研究期间保持相对稳定 (见附录 A 中的图 S8)。相反, 近几十年来, ΔY 和 ΔT_{\max} 之间的偏相关显著 ($P < 0.05$), ΔY 和 ΔT_{\max} 之间的反偏相关随着时间的推移而增强 (见附录 A 中的图 S8), 这解释了 R_{Y-GST} 随时间的变化机制。与夜间气温 (T_{\min}) 相比, 日间气温 (T_{\max}) 在产量-气温关系中的主导作用表明, 气温对光合作用过程的影响 (而不是对呼吸过程的影响) 是驱动 R_{Y-GST} 变化的原因, 这与第一个假设相一致, 即变暖引起的较高 VPD 对西藏自治区的作物生产力造成胁迫。

其次, 尽管西藏自治区的平均 GST 相当低, 但夏季 (7 月和 8 月) 日间的气温仍然较高 ($> 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) (见附录 A 中的图 S9)。最近对基本温度阈值的研究表明, 即使对于海拔相对较低的西藏自治区的农田, 光合作用的最佳气温仍然低于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]。此调查结果表明, 对青稞发育的温度胁迫超越了其最适气温阈值 [19], 这可能对产量产生不利影响[20]。事实上, 西藏自治区的夏季正好是青稞的生殖生长期, 这是一个对高温胁迫特别敏感的时期[21–23]。气温上升导致高温天气的强度和频率增加, 这可能加剧了产量下降[24–26]。然而, 关于西藏自治区青稞生殖生长相关信息仍然十分有限, 阻碍确定了主导变暖造成不利影响的确切胁迫点位。未来的研究应加强对西藏自治区青稞物候和生长指标的监测, 并鼓励在不同生长期进行人工增温试验, 以进一步了解驱动产量对气温产生不断攀升的消极响应机制。

从过去 30 年气候变暖情景下产量对 GST 的敏感性增加这一结果来推断, 预计在气候更暖的未来, 作物产量变化对气温变化呈现的负相关响应会更强。通过将 GST 和 S_T 之间的历史关系外推至预测的气候变化发现, S_T 可能会从 $(-0.19 \pm 0.04)\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ [即从当代气候下的 $(4.3\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1} \pm 0.9\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$ 变化至高于工业化前水平 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 $(-0.33 \pm 0.10)\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($-7.5\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1} \pm 2.3\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), 以及 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变暖情景下的 $(-0.51 \pm 0.18)\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ ($-11.6\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1} \pm 4.1\%\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) (图 4)。这意味着, 即使《巴黎协定》设定的气候目标 ($1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变暖情景) [27] 能够实现, 西藏自治区各类作物产量对气温的敏感性仍将升至过去 30 年的近两倍。先前 S_T 不随时间改变的研究假设[4,28] 可能大幅低估了未来气候变暖对谷类作物产量的影响。随着气温持续变暖, 西

藏自治区谷类作物产量对预计更频繁的极端高温事件的脆弱性也将增加, 从而对粮食安全和西藏自治区人民的独特文化构成威胁。

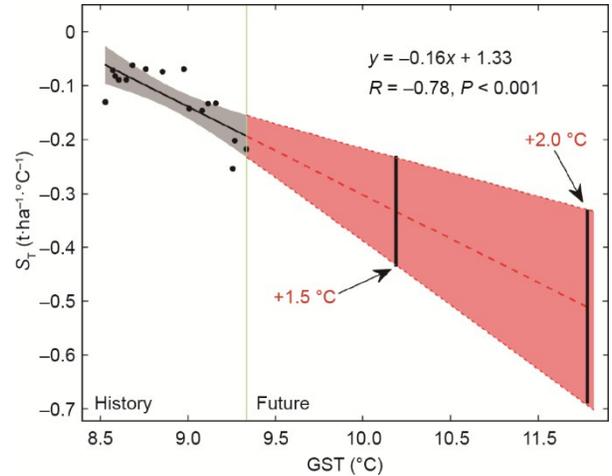


图 4. 不同变暖情景下预测的西藏自治区 S_T 。左边和右边部分代表过去和未来预测的 S_T 和 GST 之间的关系。灰色和红色区域分别代表 S_T 的过去和未来预估值的 95% 置信区间。两条黑色垂直线分别代表较工业化前水平上升 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情景。

5. 结论和未来展望

总之, 本研究发现在过去的 30 年中, 西藏自治区气温变化对作物产量具有不利影响。产量对 GST 的表观敏感度大约增加了一倍。这一结果与之前关于气温变化对美国玉米产量的影响减弱的研究结论相反[29], 并暗示, 至少在西藏自治区, 降水量或大气 CO_2 浓度增加可能不会减缓变暖的不利影响。本研究还质疑了在预测气温变化对未来作物产量的影响时经常做出的关于作物产量对温度的敏感性恒定的假设。当前文献主要关注“四大”作物, 而本文的结果则针对对生物学和文化层面均具有独特性的一种作物体系提供了新见解。尽管理解西藏自治区这一独特作物体系对气候变化的响应特征仍然存在很大的不确定性——特别是与过程建模和其他方法相比——但其为作物模型预测提供了额外的证据链条[30]。本文的结果强调了进行进一步实验和建模工作的紧迫性, 以保障区域/全球粮食安全和世界第三极区域人民生活方式的延续。

致谢

本研究由青藏高原第二次科学考察项目 (2019QZ-KK0608、2019QZKK0405) 和国家自然科学基金青藏高原地球系统基础科学中心项目 (41988101) 资助。

Authors' contribution

Shilong Piao and Xuhui Wang designed the research. Chuang Zhao performed the statistical analyses. Tsechoe Dorji, Chuang Zhao, Shilong Piao, Xuhui Wang, and Baohua Liu drafted the manuscript. All authors contributed to interpretations of the results and discussions of the contents.

Compliance with ethics guidelines

Tsechoe Dorji, Shilong Piao, Xuhui Wang, Chuang Zhao, Baohua Liu, Anping Chen, Shiping Wang, and Tao Wang declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.01.012>.

References

- [1] Zhang YL, Li BY, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geogr Res* 2002;21(1):1–8.
- [2] Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung, et al., editors. *Climate change 2013: the physical science basis (working group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge: Cambridge University Press; 2013.
- [3] Guedes JDA, Lv H, Li Y, Spengler R, Wu X, Aldenderfer M, et al. Early agriculture on the Tibetan Plateau: the palaeobotanical evidence. *South Ethnol Archaeol* 2015;11:91–114. Chinese.
- [4] Lobell DB, Burke MB, Tebaldi C, Mastrandrea MD, Falcon WP, Naylor RL. Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030. *Science* 2008;319(5863):607–10.
- [5] Asseng S, Ewert F, Martre P, Rötter RP, Lobell DB, Cammarano D, et al. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nat Clim Chang* 2015; 5(2):143–7.
- [6] Zhao C, Piao S, Wang X, Huang Y, Ciais P, Elliott J, et al. Plausible rice yield losses under future climate warming. *Nat Plants* 2016;3:16202.
- [7] Portmann FT, Siebert S, Döll P. MIRCA2000—global monthly irrigated and rainfed crop areas around the year 2000: a new high-resolution data set for agricultural and hydrological modeling. *Global Biogeochem Cycles* 2010;24(1): GB1011.
- [8] Chen Y, Yang K, He J, Qin J, Shi J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *J Geophys Res* 2011;116:D20104.
- [9] Monfreda C, Ramankutty N, Foley JA. Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. *Global Biogeochem Cycles* 2008;22:89–102.
- [10] Hempel S, Frieler K, Warszawski L, Schewe J, Piontek F. A trend-preserving bias correction—the ISI-MIP approach. *Earth Syst Dynam Discuss* 2013;4(2): 219–36.
- [11] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature* 1997;387:484–5.
- [12] Lobell DB, Field CB. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environ Res Lett* 2007;2(1):014002.
- [13] Luo H, Cui Y, Zhao S. Spatial distribution of irrigation water quota of highland barley in Tibet region. *Trans Chin Soc Agric Eng* 2013;29(10):116–22. Chinese.
- [14] Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, editors. *Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects (contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014.
- [15] Zhao C, Piao S, Huang Y, Wang X, Ciais P, Huang M, et al. Field warming experiments shed light on the wheat yield response to temperature in China. *Nat Commun* 2016;7(1):13530.
- [16] Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, editors. *FAO Irrigation and drainage paper No. 56-crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1998.
- [17] Novick KA, Ficklin DL, Stoy PC, Williams CA, Bohrer G, Oishi AC, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nat Clim Chang* 2016;6(11):1023–7.
- [18] Huang M, Piao S, Ciais P, Peñuelas J, Wang X, Keenan TF, et al. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. *Nat Ecol Evol* 2019;3(5):772–9.
- [19] Porter JR, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *Eur J Agron* 1999;10(1):23–36.
- [20] Lobell DB, Bänziger M, Magorokosho C, Vivek B. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nat Clim Chang* 2011; 1(1):42–5.
- [21] Challinor AJ, Wheeler TR, Craufurd PQ, Slingo JM. Simulation of the impact of high temperature stress on annual crop yields. *Agric Meteorol* 2005;135(1–4):180–9.
- [22] Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, et al. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agron J* 2011; 103(2):351–70.
- [23] Sánchez B, Rasmussen A, Porter JR. Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Glob Change Biol* 2014;20(2):408–17.
- [24] Schlenker W, Roberts MJ. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *Proc Natl Acad Sci USA* 2009;106(37):15594–8.
- [25] Ottman MJ, Kimball BA, White JW, Wall GW. Wheat growth response to increased temperature from varied planting dates and supplemental infrared heating. *Agron J* 2012;104(1):7–16.
- [26] Schauburger B, Archontoulis S, Arneith A, Balkovic J, Ciais P, Deryng D, et al. Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models. *Nat Commun* 2017;8(1):13931.
- [27] Paris Agreement [Internet]. Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change; 2015 Dec 12 [cited 2020 Oct 1]. Available from: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- [28] Rowhani P, Lobell DB, Linderman M, Ramankutty N. Climate variability and crop production in Tanzania. *Agric Meteorol* 2011;151(4):449–60.
- [29] Leng G. Evidence for a weakening strength of temperature–corn yield relation in the United States during 1980–2010. *Sci Total Environ* 2017;605–606:551–8.
- [30] Wang X, Zhao C, Müller C, Wang C, Ciais P, Janssens I, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. *Nat Sustainability* 2020;3:908–16.