

1993—2017年气候变化对西藏谷物单产的定量影响

丁 锐^{1,2}, 史文娇^{1,2}

(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院重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 气候变化对农业的影响是全球关注的热点问题之一, 青藏高原对气候变化尤其敏感, 但气候变化对青藏高原农业产量的定量影响缺乏系统研究。为定量评估气候变化对西藏谷物单产的影响, 本文使用气象数据与年鉴统计数据, 选取了固定效应模型、差分模型和线性去趋势模型3类统计模型, 分析了1993—2017年间气候变化(最低气温、降水量、生长度日和太阳辐射)对西藏县(区)级、市级和自治区3个尺度的谷物单产的影响。结果表明: 西藏整体对于温度(最低气温和生长度日)的敏感性大于降水量和太阳辐射。各项气候因子对西藏谷物单产的整体影响为正影响, 但不同区域对气候因子的敏感程度和显著性不同。除了生长度日对于拉萨为负影响以外, 最低气温、降水量和太阳辐射对于所有市均为正影响。气候趋势对于西藏整体谷物单产的影响为正影响, 不同模型计算结果集中在1.5%~4.8%区间内。3类模型中固定效应模型稳定性最好, 线性去趋势模型好于差分模型, 差分模型在引入气候因子间的交互项后模型稳定性降低。本文有助于西藏实施更加有空间针对性的农业适应气候变化措施, 以应对气候造成的青藏高原农业生态系统变化。

关键词: 青藏高原; 气候变化; 统计模型; 谷物; 单位产量

DOI: 10.11821/dlxb202109010

1 引言

随着自然条件的变化和人类社会生产活动强度的增加, 全球气候正发生着显著的变化。IPCC指出, 气候变化是人类在可持续发展议题上所面临的巨大挑战^[1]。气候变化已然对全球各国自然生态环境和社会生活的多个领域造成了较为严重的影响, 农业是对气候变化响应最为敏感和直接的领域之一^[2-3], 产量是农作物对于气候变化响应的最终表现^[4]。青藏高原粮食缺口量大, 是中国粮食短缺现象较为严重的地区^[5]。粮食一直是困扰西藏发展的主要因素^[6], 中国居民谷物消费所需耕地急剧增长^[7]。如何在全球气候变化的大背景下对农业资源进行科学的管理与调控、保障西藏粮食安全显得尤其重要。

目前关于气候变化对作物单产影响的主要研究方法可分为田间试验观测法、作物机理模型和统计模型3种。田间试验观测法通常情况下需要耗费大量人力物力和时间, 不

收稿日期: 2020-06-20; 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040301; XDA20010202; XDA23100202); 国家自然科学基金项目(41771111); 中国科学院青年创新促进会会员人才专项(2018071) [Foundation: Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences, No.XDA20040301; No.XDA20010202; No.XDA23100202; National Natural Science Foundation of China, No.41771111; Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences, No.2018071]

作者简介: 丁锐(1998-), 男, 四川德阳人, 硕士生, 研究方向为区域农业与地理信息分析。E-mail: dingrui_1998@163.com

通讯作者: 史文娇(1982-), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 研究员, 主要研究方向为全球变化与区域农业。

E-mail: shiwj@reis.ac.cn

适合作为长期研究作物产量变化的方法。作物机理模型和统计模型的应用分析更广。虽然二者原理并不相同,但均是观测历史产量与气候之间的关系,理解作物对管理因素和气候要素的响应规律,以此建立的模型^[8]。作物机理模型包含着某种程度的统计规律,统计模型同样也含有对作物过程和机理的假设^[9]。统计模型可操作性强、研究周期长,范围广,信息量大,适合在更广的时间和空间尺度上研究气候变化对产量的影响^[10],是了解区域和整体作物产量变化有效的研究方法。

国内外学者已利用统计模型进行了诸多研究,对全球不同地区多种作物进行了气候变化对作物单产影响识别,已在美国加州^[11]、墨西哥^[12]、印度^[13]、非洲^[14-15]以及全球尺度上^[16-17]开展了多项研究。Lobell等研究表明,全球玉米和小麦产量分别下降了3.8%和5.5%^[17]。Zaveri等最近的一项研究中^[13],利用固定效应模型探寻了灌溉因素和气候变化对印度小麦单产的影响,表明灌溉可以抵消一部分气候变化所带来的负面影响。Tao等调查了中国所有省级尺度上气候与作物的关系,研究结果表明气候变暖趋势虽然增加了东北的水稻和大豆的产量,但也有部分省的小麦单产出现了下降^[18-20]。Zhang等的研究中显示气候变化对于不同区域和不同作物影响不同,气候因子中太阳辐射与水稻单产呈正相关,温度的负面影响较弱^[21-22]。虽然国内外不同尺度的气候变化对作物产量影响的研究已开展较多,但仍缺乏针对青藏高原地区这一气候变化敏感区的谷物产量定量影响的系统研究。另外,不同统计模型之间的结果有差异,采用单个模型分析得出的结论具有一定随机性,但多类型多个统计模型的系统比较研究还鲜有报道。

基于此,本文采用3种不同类型,共7个统计模型,选取了最低气温、降水量、生长期日(Growing Degree Days, GDD)和太阳辐射(Solar Radiation, SRD)4个气候变量定量分析气候变化对西藏谷物单产所造成的影响。以此制定更加合理的农业政策与规划,对于应对青藏高原生态及农业系统的变化有着重要的作用。在全球气候变化的大背景下,西藏作为一个气候条件相对极端和生态较为脆弱的地区,发展优质、高效、安全的农业,降低气候变化对当地造成的影响,有助于实现青藏高原的可持续发展,确保当地的农业生态与粮食安全。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究区概况

西藏自治区全域土地面积约为120万 km²,下设6个地级行政单元,共有8个市辖区、66个县(区)。西藏气候总体上呈东南部湿润温暖,西北部干燥严寒的特点。地势总体由西北向东南倾斜,地貌区大致可分为藏北高原、藏东高山峡谷区、喜马拉雅山高山区和藏南谷地。藏南谷地是西藏主要的农业区。西藏的农业为“河谷农业”,主要种植青稞、小麦等谷类作物,其中青稞种植面积就约占西藏总粮食作物的60%^[23]。拉萨、山南、日喀则是自治区最重要的河谷农业区和商品粮基地。

2.2 数据来源

土地利用数据和DEM数据来自资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)及国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)共享的青藏高原土地利用数据集,将多期耕地进行叠加确定青藏高原耕地区域范围。

气象数据来自于资源环境科学数据中心整理的国家气象台站观测数据,包括1993—2017年青藏高原地区318个站点(其中西藏自治区境内39个站点)的逐日气温(平均气温、最高气温、最低气温)、降水量、日照时数等资料。下文所涉及的气象指标均为西藏

谷物生长季期间的气候要素值。西藏谷物生长季的时间范围参考了中国气象局农业气象站点中拉萨站的记录和其他学者关于青藏高原作物物候的研究^[24-26]。青稞是西藏第一大作物,本文以青稞生长季为主,并结合与其他作物生长季时段的交集部分,最终将每年的4—8月确定为本文的谷物生长季。气象指标的有关计算,首先根据日值数据计算出月度气象指标,然后根据谷物生长季时段(4—8月)计算生长季内气象指标。随后基于站点尺度的气象指标结合高程数据,运用ANUSPLIN气象插值软件进行插值,得到年度青藏高原范围的气象指标栅格数据。最后根据土地利用数据提取研究区耕地范围,计算西藏每个县(区)级行政单位耕地范围内的谷物生长季气象指标。

年鉴数据来自于《西藏统计年鉴》,其中县(区)级谷物产量数据从1993年开始统计,所以对1993—2017年共25年的年鉴数据进行整理。根据县(区)级统计指标单元中的统计字段进行数据提取与整理,并在Python环境中进行异常值检验,剔除数据异常的数值。对于缺失的数据,使用相邻年份的均值进行替代处理。完成异常值处理和数据修复后,为了保证长时间序列的分析,剔除数据极少且不连续县(区)的数据,最终将西藏自治区数据稳定连续的63个县(区)纳入分析。利用县(区)级谷物产量和谷物播种面积二者的比值计算每个县(区)的谷物单产。

2.3 方法

2.3.1 生长度日和太阳辐射指标的计算 通过每日的气温数据,计算生长季期间的生长度日,即作物完成某一生育阶段所经历的累积有效积温,是代表植物生长积累的热量指标^[27]。虽然谷物包含多种作物,但西藏种植谷物主要为青稞和小麦,所以本文GDD主要参考青藏高原青稞和春小麦对生长发育温度的要求,计算的基点温度设置为0℃,温度上限确定为25℃^[28-29],具体计算公式如下:

$$GDD = \sum d_{gd} \quad (1)$$

$$d_{gd} = \begin{cases} 0, & T_{day} < T_{base} \\ T_{day} - T_{base}, & T_{base} \leq T_{day} < T_{up} \\ T_{up} - T_{base}, & T_{day} \geq T_{up} \end{cases} \quad (2)$$

式中:GDD表示谷物生长季期间的生长度日(℃); d_{gd} 表示生长季内每天的一般生长度日(℃); T_{day} 表示单日平均温度(℃); T_{base} 表示基点温度(0℃); T_{up} 表示最适温度范围的上限(25℃)。

太阳辐射根据逐日日照时数数据计算,最终获得生长季太阳辐射,计算方法采用Angstrom-Prescott(A-P)公式^[30]:

$$SRD = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (3)$$

式中:SRD表示单日太阳辐射值($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); a 和 b 表示A-P公式系数; n 表示实际日照时数(h); N 表示理论日照时数(h); R_a 表示大气外界辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)。

2.3.2 气候因子选取与模型构建 本文利用皮尔逊相关系数描述两个变量之间线性相关性,以此进行气候因子的选取。谷物单产与平均气温、最低气温、降水量、GDD与SRD均在0.01水平上呈显著相关关系。平均气温和最低气温相关性极强(相关系数为0.819),平均气温与GDD之间也呈正相关关系,为了避免温度变量过多,导致变量间的共线性问题与相互干扰,因此不将平均气温纳入模型参数。温度差与谷物单产并无显著相关关系,所以也不将其纳入模型参数。综上,将最低气温、降水量、GDD和SRD气候因子作为模型的自变量,谷物单产作为因变量,以此进行模型输入。其中最低气温反映温度趋势和低温对谷物单产造成的影响,GDD反映积温变化对谷物单产的影响,降水量反映降水的变化对谷物单产的影响,SRD反映光照引起的辐射量变化对谷物单产的影响。

本文采用多元线性回归模型定量分析气候变化对西藏谷物的影响。为避免单个模型的随机性, 本文采用了3类统计模型, 包括固定效应模型、差分模型和线性去趋势模型。

固定效应模型(Fixed Effect Model)是统计学中一种利用面板数据进行分析的统计模型^[31]。固定效应模型的固定效应用来反映不同县(区)级行政单位的差异, 将西藏所有县(区)按照所属市级行政单位进行分类, 以便更准确地反映气候因子对谷物单产的影响。固定效应模型(Fixed)表达式如公式(4):

$$\log Y_{it} = \alpha_i + \lambda_c t + \theta_1 T_{\min it} + \theta_2 P_{it} + \theta_3 GDD_{it} + \theta_4 SRD_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: Y_{it} 表示第*i*个县(区)第*t*年的谷物单产, 单产值取对数可以使气象因子成比例地影响单产, 并且样本能更好地满足正态分布^[32]。 $T_{\min it}$ 、 P_{it} 、 GDD_{it} 、 SRD_{it} 分别表示第*i*个县(区)第*t*年的生长季最低气温、降水量、生长度日和太阳辐射。 α_i 表示县(区)级固定影响, 用来区别气候因子之外的要素变化对谷物单产的影响^[12], 并且可以反映不同地区区间除气象要素外的差异性; λ_c 表示市级时间趋势效应, 主要用来反映科技进步因素带来的影响; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 和 θ_4 表示衡量谷物单产对气候变化影响的敏感性系数; ε_{it} 表示误差项。

差分模型和线性去趋势模型均去除了长时间变化对气候因子的影响, 避免了非气候要素因为长期变化带来的混合影响, 例如作物品种、管理措施提升等技术进步因素导致的变化^[16, 20, 33-34]。除气候因子(X)对单产的线性影响外, 往往还存在一部分非线性影响因素, 因此本文在基础差分模型和线性去趋势回归模型的基础上又引入了气候因素的平方项(X^2)。气候因子之间还会存在一定相关性(例如温度与降水、温度与生长度日之间存在的相关关系等), 为了反映这部分影响因素, 本文又在上述基础上加入了气候因素之间的相互影响, 即交互项(Z)。综上, 差分模型系列和线性去趋势模型系列各构造了3个模型, 包括原始模型(df-I和dt-I, 公式(5)和公式(8))、加入平方项后的模型(df-II和dt-II, 公式(6)和公式(9))和加入平方项及交互项后的模型(df-III和dt-III, 公式(7)和公式(10))。

差分模型系列中采用一阶差分序列(First-difference Time Series)的产量(ΔY)和气候因子(ΔT_{\min} 、 ΔPRE 、 ΔGDD 和 ΔSRD , 公式中采用向量 ΔX 表示4个气候因子)。差分模型系列形式如下:

$$\Delta Y_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j \Delta X_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (5)$$

$$\Delta Y_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j \Delta X_{i,t} + \sum \beta_k \Delta X_{i,t}^2 + \varepsilon_{i,t} \quad (6)$$

$$\Delta Y_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j \Delta X_{i,t} + \sum \beta_k \Delta X_{i,t}^2 + \sum \beta_m \Delta Z_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

式中: $\Delta Y_{i,t}$ 表示第*i*个县(区)第*t*年谷物单产的一阶差分值; $\Delta X_{i,t}$ 表示第*i*个县(区)第*t*年气候因子的一阶差分值构成的向量; $\Delta X_{i,t}^2$ 表示第*i*个县(区)第*t*年的差分气象因子的平方项, 反映气候因素超过一定阈值后(如过量降雨)造成的非线性影响; $\Delta Z_{i,t}$ 表示第*i*个县(区)第*t*年差分气候因子之间的交互作用, 用来消除气候因素之间的影响。 $\beta_{0i,t}$ 模型中的截距项, 表示各县(区)除气候要素外的其他因素引起的变化; β_j 是气候因子的系数, 表示气候因子对谷物单产的影响程度; β_k 和 β_m 分别为气候因子平方项和交互项的系数; $\varepsilon_{i,t}$ 是误差项。

与差分模型系列相似, 线性去趋势模型采用了去时间趋势序列(De-trend Time Series)的产量(dtY)和气候因子(dt T_{\min} 、dtPRE、dtGDD和dtSRD, 公式中采用向量dtX表示4个气候因子)。线性去趋势模型系列形式如下:

$$dtY_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j dtX_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (8)$$

$$dtY_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j dtX_{i,t} + \sum \beta_k dtX_{i,t}^2 + \varepsilon_{i,t} \quad (9)$$

$$dtY_{i,t} = \beta_{0i,t} + \sum \beta_j dtX_{i,t} + \sum \beta_k dtX_{i,t}^2 + \sum \beta_m dtZ_{i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (10)$$

式中： $dtY_{i,t}$ 表示第*i*个县（区）第*t*年谷物单产的线性去趋势值； $dtX_{i,t}$ 表示第*i*个县（区）第*t*年气候因子的线性去趋势值构成的向量； $dtX_{i,t}^2$ 表示第*i*个县（区）第*t*年的线性去趋势气候因子的平方项； $dtZ_{i,t}$ 表示第*i*个县（区）第*t*年线性去趋势气候因子之间的交互作用； $\beta_{0i,t}$ 是模型中的截距项； β_j 是气候因子的系数； β_k 和 β_m 分别是气候因子平方项和交互项的系数； $\varepsilon_{i,t}$ 是误差项。

2.3.3 气候变化对谷物产量的定量影响分离 为了保证统计学意义，本文仅将模型中通过显著性检验（ $P \leq 0.1$ ）的气候因子纳入对谷物单产影响的计算，最终得出不同模型所计算的各气候因子对谷物单产的影响百分比。4个气候变量对作物产量的影响总和，即为气候变化对谷物单产的联合影响。按各县（区）的谷物面积进行加权，得到气候变化对西藏市级和自治区级谷物单产的影响值。

在固定效应模型中，为了衡量气候对谷物单产的贡献程度，本文构造了反事实与事实2个情景。反事实情景为：将显著的气候因子分别保持在研究时段的初始水平（1993—1994年的平均值），其他气候因子为每年观测真实值。事实情景为：所有气候因子均保持为每年的现实观测值水平。2种情景的模型预测产量比值即为对应气候因子每年对谷物单产的影响值。为了评估样本在研究期末的变化，我们对研究时段的后5 a（2013—2017年）的谷物产量变化进行了平均，以消除某些年份波动的干扰^[13]，并将此作为气候变化对谷物单产的影响百分比。

在差分和线性去趋势系列模型中，首先对数据进行一阶差分或线性去趋势处理，目的是为了消除长时间中年与年之间的波动，增强数据平稳性。采用一元线性回归方程计算气候因子的10 a气候倾向率，公式如下：

$$y = ax + b \quad (11)$$

式中： y 为各气候因子； x 为年份； b 为截距项。

气候因子的系数（ β_j ）为敏感性，利用敏感性除以研究时段的谷物平均单产计算每个气候因子的单位敏感性。以每个县（区）的气候倾向率与单位敏感性的乘积，估算出1993—2017年期间不同气候变量对谷物单产的影响（以实际平均产量的百分比表示）。

3 结果分析

3.1 谷物产量和气候因子描述性分析

在各市的单产对比中（图1a），拉萨和山南谷物单产最高。其次是日喀则、林芝和昌都，那曲和阿里最低。西藏各县（区）每年的单产中位数和单产均值均呈上升趋势，所有县（区）的单产中位数和均值保持在3~4 t hm⁻²（图1b）。西藏自治区各县（区）谷物单产差距明显，其中最低的县（区）单产不足1 t hm⁻²，最高的县（区）在部分年份超过了10 t hm⁻²。

西藏各市的平均气温由高到低排序为：林芝>阿里>拉萨>昌都>山南>日喀则>那曲（图2）。最低气温呈波动上升趋势（图2a），林芝最高，那曲最低，其他市波动范围较为接近，主要集中在5~6℃范围内。降水量年与年之间波动较大（图2b），林芝的降水量最多，阿里的降水量最少，其他市主要集中在250~500 mm范围波动。GDD也为波动上升趋势，但上升幅度不明显（图2c）。各市的生长期日差异也较为明显，拉萨和林芝的GDD最大。各市之间的太阳辐射均呈波动减少趋势（图2d），阿里最高，林芝最小。

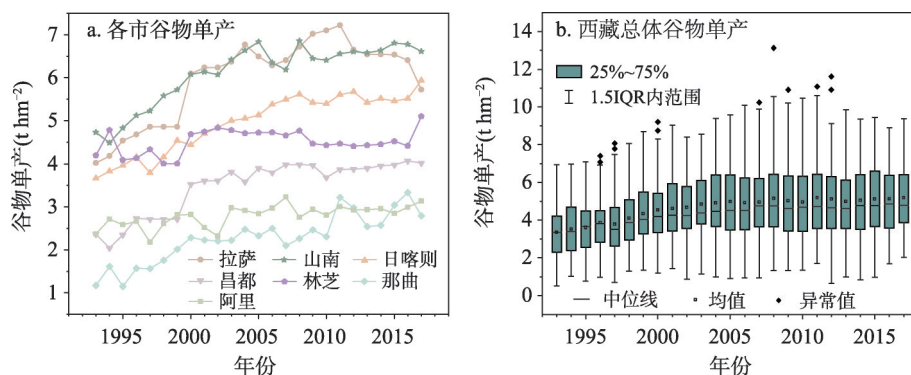


图1 1993—2017年西藏各市总体谷物单产逐年变化

Fig. 1 Cereal yields in different cities and whole area of Tibet from 1993 to 2017

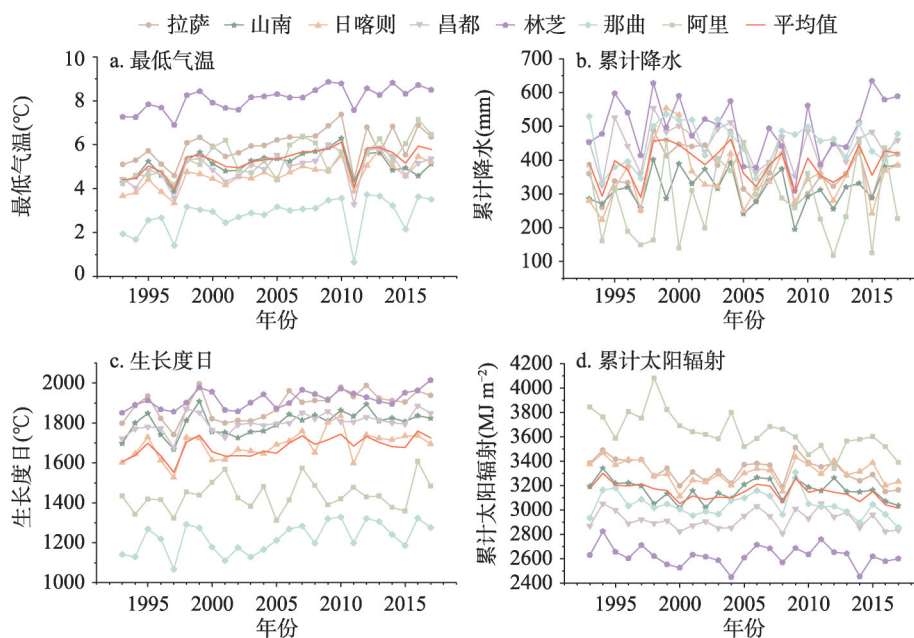


图2 1993—2017年西藏各市耕地区域气象因子逐年变化

Fig. 2 The annual changes of each variable factor in cropland area in different cities of Tibet from 1993 to 2017

1993—2017年的气候倾向率空间分布格局表明,在谷物生长季期间,最低气温除山南市琼结县呈 $-0.03\text{ }^{\circ}\text{C }10\text{a}^{-1}$ 小幅度下降以外,其余62个县(区)均呈升温趋势,升温趋势集中在 $0.35\sim 0.65\text{ }^{\circ}\text{C }10\text{a}^{-1}$ (图3)。位于“一江两河”区域的日喀则市升温最为明显。不同县市降水量差异较大,有接近一半的县(区)有减少趋势,另一半的县(区)为增加趋势。降水量减幅较大的地区主要集中在日喀则市和昌都市。高原边界的县降水量增幅较为明显,其中康马县、浪卡子县、察隅县和洛扎县上升幅度最大,超过 $20\text{ mm }10\text{a}^{-1}$ 。92%的县(区)GDD均呈增长趋势,50%的县(区)集中在 $28.16\sim 60.00\text{ }^{\circ}\text{C }10\text{a}^{-1}$ 。GDD增长趋势较为明显的县(区)中大多属于日喀则市。在太阳辐射的变化趋势中,89%的县(区)级行政单位为下降趋势,仅有7个县(区)为增长趋势。下降幅度最大的3个县均位于阿里地区,其中普兰县下降幅度最大,为 $-228.18\text{ MJ m}^{-2}10\text{a}^{-1}$ 。西部太阳辐射下降趋势明显高于东部,所有县(区)太阳辐射变化的平均值为 $-33.69\text{ MJ m}^{-2}10\text{a}^{-1}$ 。

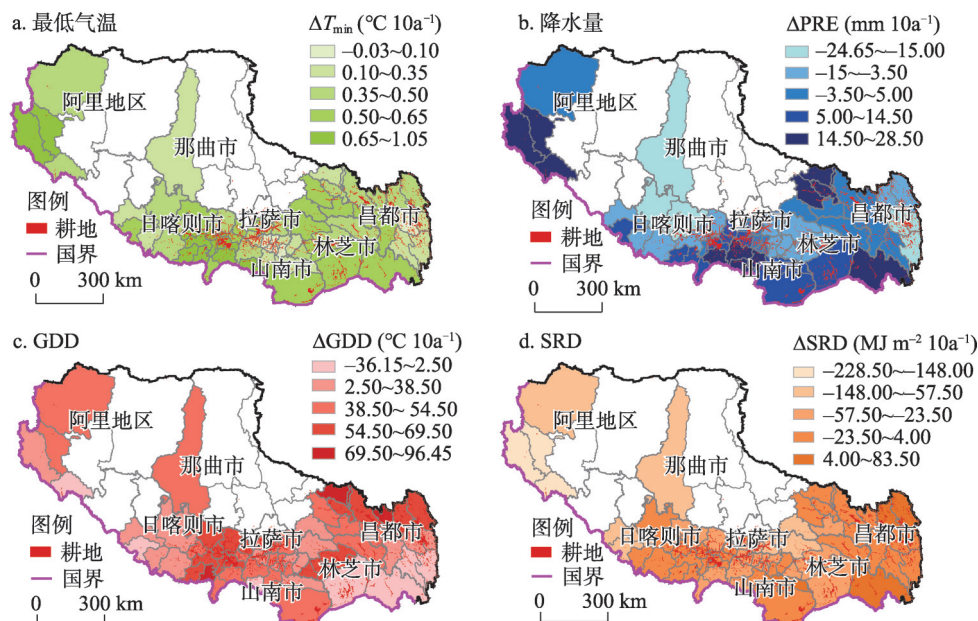


图3 1993—2017年气候倾向率空间分布

Fig. 3 Distribution of climate trends from 1993 to 2017

3.2 不同气候因子对西藏谷物单产的影响

气候变化对于西藏谷物影响以正面影响为主,不同气候因子对于不同区域的显著性不尽相同(图4)。西藏总体对与温度有关的气候变量比较敏感,有3个市(山南、拉萨和阿里)最低气温敏感性显著,4个市(拉萨、日喀则、昌都和林芝)对GDD敏感性显著,但过高的积温已经开始在拉萨产生负面影响(-8.3%)。目前降水量和SRD的变化对西藏各市谷物单产呈积极影响,其中降水量对于拉萨和那曲影响显著,影响分别为2.9%和1.5%。SRD对于山南和日喀则影响显著,影响分别为4.3%和2.5%。不同变量的对比中,最低气温、降水量和GDD均对拉萨影响最大,SRD对于山南影响最大。总体而言,不同的气候因子影响大小因地域不同而存在差异。西藏地区海拔高,太阳辐射较强,相比温度变量而言,对SRD影响响应显著的地区较少。造成此现象的原因一定程度上与西藏自身光照条件丰富有关,辐射不是影响产量的主要限制性因子。

3.3 气候变化对西藏谷物单产的影响

3.3.1 自治区尺度 在自治区尺度上,除模型df-III计算结果为-0.5%外,其他所有模型均表明研究时段气候变化对谷物单产为正面影响(图5)。模

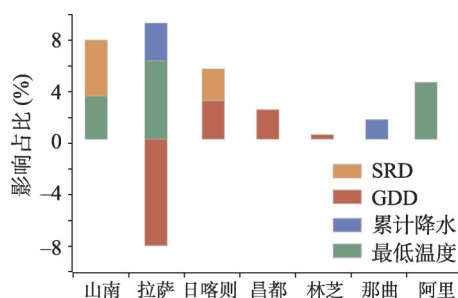


图4 1993—2017年期间不同气候因素对西藏单位谷物单产的影响占比

Fig. 4 Contributions of climate variable to cereal yields in different cities of Tibet from 1993 to 2017

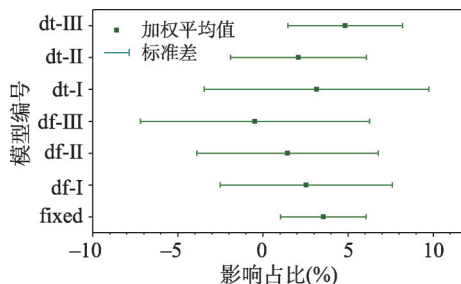


图5 气候变化对西藏谷物单产影响结果对比

Fig. 5 Contributions of climate change to cereal yield in Tibet from different models

型 fixed、df- I 、df- II 、dt- I 、dt- II 、dt- III 所计算的影响百分比分别为 3.5%、2.1%、1.5%、3.2%、2.1%和 4.8%。7 个模型的计算结果平均值为 2.39%，因此气候变化对西藏谷物单产的影响总体为正面影响。

3.3.2 市级尺度 大部分模型在市级尺度计算的结果也均为正面影响。对于林芝、那曲和阿里的正面影响较大（图 6），其中林芝在所有 7 个模型的计算结果均为正面影响。但林芝、那曲和阿里恰好是谷物播种面积和谷物产量最少的 3 个市，所以对西藏整体谷物产量贡献有限。其他几个市的结果主要以正面影响为主，而拉萨、日喀则和昌都在部分模型中表现出负面影响。

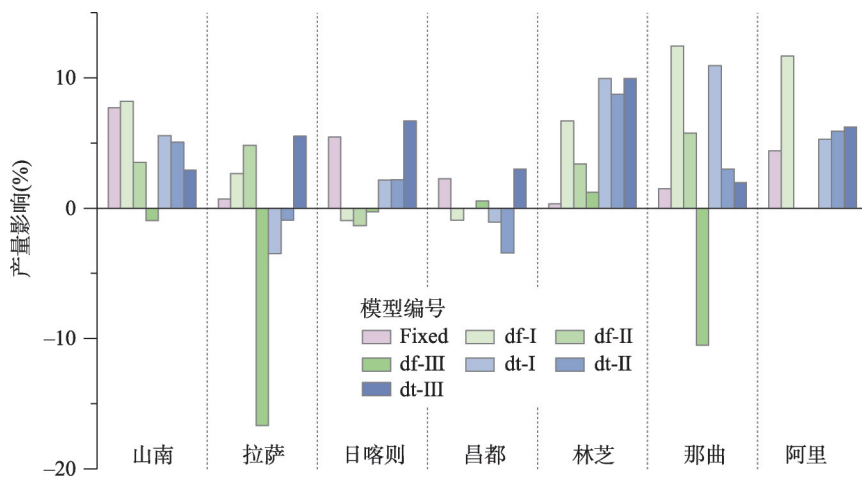


图6 气候变化对西藏市级单位谷物单产影响不同模型结果对比

Fig. 6 Contributions of all climate variables to cereal yields in different cities of Tibet based on different models

固定效应模型（fixed）计算结果中，气候变化对西藏自治区 7 个市级单位的影响均为正值，从高到底依次为山南 7.7%、日喀则 5.4%、阿里 4.4%、昌都 2.2%、那曲 1.5%、拉萨 0.7%和林芝 0.3%。在模型 df- I 和 df- II 中，计算结果表明对于那曲和阿里影响值较高，日喀则和昌都则为微弱的负面影响（不足 -1%）。在加入了气象因子交互项的模型 df- III 中，结果中有 4 个市的影响值为负值，对比其他模型结果，发现该模型的负面影响值普遍偏大。模型 df- III 与同为差分模型的 df- I 和 df- II 结果在部分市同样存在差距。从 df- III 的计算结果中，发现其在一些县（区）中回归异常，最终汇总结果也受到影响。究其原因，推测是模型 df- III 引入气候因子的交互项后，使回归项过多，导致差分模型不稳定。df- III 模型在小尺度结果稳定性较差，但汇总至自治区级尺度后，其模型不稳定性有所改善。线性去趋势模型 dt- I 、dt- II 和 dt- III 结果表明气候变化对于林芝和阿里的正面影响较大，3 个模型的结果较为一致。虽然线性去趋势系列的 3 个模型在部分市的结果也出现了负面影响，但数值范围均在 5% 以内。

因此，气候变化整体对于西藏市级尺度影响总体为正面影响，其中林芝、那曲和阿里收益较其他市更大。在模型稳定性方面，整体固定效应模型效果最好，线性去趋势模型好于差分模型，尤其差分模型引入气候因子间的交互项后（模型 df- III）模型稳定性降低。

3.3.3 县(区)级尺度 通过对于自治区尺度和市级尺度的分析结果发现，固定效应模型表现最为稳定，因此选择固定效应模型进行县（区）级尺度空间分布的分析（图 7）。县（区）级尺度上气候变化对西藏谷物单产影响依然多数为正面影响，对洛扎县、亚东县的

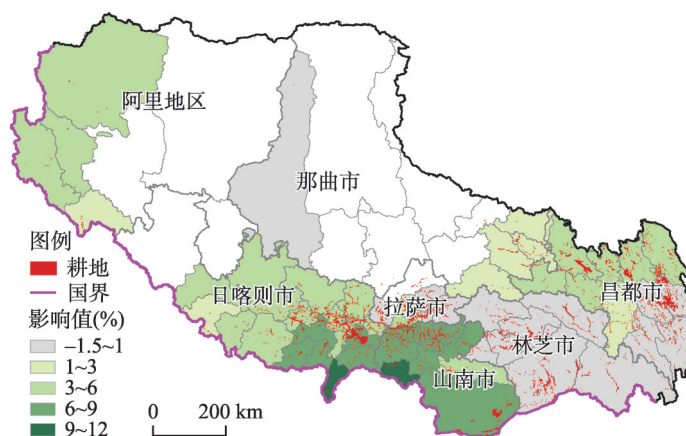


图7 基于固定效应模型的1993—2017年间气候变化对西藏谷物单产的影响

Fig. 7 Distribution of the percentage impacts of all climate variables change on cereal yields in Tibet from 1993 to 2017

影响最大,分别为11.3%和9.4%。整体空间上对“一江两河”区域藏南谷地(图中山南市和日喀则市部分)的乃东区、扎囊县、贡嘎县、桑日县、琼结县、江孜县影响较大。气候变化对于阿里地区各县均为正面影响,但该区域耕地较少,也不太适合发展农业。而相比于同为重要商品粮基地的山南和日喀则,气候变化对拉萨区域的影响则较小。从地形角度分析,对于海拔相对较低的林芝和昌都的县(区)影响偏小,影响范围在-1.5%~1%。虽然从总体来看,气候变化趋势对西藏大部分县(区)都为正面影响,但对于拉萨市的墨竹工卡县、尼木县、昌都市的芒康县和林芝市的察隅县、墨脱县这5个县产生了负面影响,其中察隅县、墨脱县和尼木县的负面影响均小于0.2%,可以忽略不计;对墨竹工卡县、芒康县的影响分别为-1.5%和-1.2%。由此可见,并不是所有西藏县(区)级单位谷物单产都从气候变化中受益,所以要因地制宜地制定农业政策,以适应气候变化带来的影响。

4 讨论

本文结果表明1993—2017年气候变化对西藏谷物单产整体为正面影响,与青藏高原农作物生产潜力提高的结果一致^[35-36]。加入气候因子平方项和交互项的差分模型稳定性较差,但汇总至更大尺度后,其模型不稳定性有所改善,这点与Lobell等关于验证统计模型准确性的研究观点一致^[15]。不同气候因子中谷物单产对于温度相关的指标比降水量和太阳辐射更显著,与此前学者研究西藏主要农作物敏感区对气候变化的响应的结果一致^[37]。虽然整体上气候变化对西藏谷物单产为正影响,但值得注意的是GDD在拉萨产生了负面的影响,可能是拉萨积温过高导致产生了一些其他负面影响,如蒸散增加、病虫害增加、土壤理化性质改变等^[38-39],而拉萨的温度在西藏自治区中相对较高,这部分负面影响超过了温度升高本身对作物的正面影响,导致了GDD在拉萨影响为负面影响。同为GDD较高的林芝市,积温升高带来的收益仅为0.3%,小于积温更低的日喀则(3.0%)和昌都(2.3%)。

西藏地区海拔高、气温低、辐射强,与其他粮食种植区自然条件存在差异。由于西藏粮食产量占全国总体的比例较小,前人研究大多未考虑青藏高原地区的情况。气候变化在中国不同地区所造成的影响并不相同。其他地区有关研究表明,1981—2009年温

度, 降水量和太阳辐射的变化共同使中国北方的小麦单产提高了0.9%~12.9%, 而中国南方的小麦单产降低了1.2%~10.2%, 空间差异很大^[19]。气候变暖趋势增加了东北的水稻、大豆产量, 但降低了中国7个省(自治区或直辖市)的玉米单产和3个省的小麦单产^[20]。目前普遍认为中高纬度地区的农作物产量可以从气候变暖中受益^[40]。气候变暖使各地区本身适宜种植的农作物种类以及主要作物品种的布局发生变化。例如中国东北地区气温明显增加, 使得东北地区水稻种植区域北扩^[41]。本文研究结果表明当前气候变化整体对西藏谷物生产有利。与中国东北地区等高纬度地区类似, 青藏高原常年温度较低, 随着气温的升高正朝着有利于农作物生长的条件发展, 之前一些不适合农作物生长的地区条件逐渐得到改善。但值得注意的是, 青藏高原地区本身生态条件较为脆弱, 生态承载力有限, 一定要考虑对生态环境的影响, 不可盲目扩大种植面积。

本文使用了多种统计模型评估气候变化趋势对西藏谷物单产的影响, 避免了单个模型分析的随机性。然而, 由于数据可得性的原因, 无法详细区分具体的谷物种类, 在选取生长季时主要参考了种植面积占比较高的青稞的生长季。未来的研究中, 可以进一步细分不同种类的作物以及作物不同的生长阶段, 还可针对不同地区的差异, 更详细研究气候变化对不同地区不同作物的各生长阶段带来的影响。在使用统计模型时, 由于不同地区作物品种存在差异^[13], 而不同品种对气候适应性具有差异, 今后研究可将作物品种变化纳入分析, 使结果的信息量更丰富。当前研究中还有一些未解决的因素, 例如更高的大气CO₂浓度会改变施肥效应, 以及没有充分考虑可能存在的具体自然灾害的影响等。另外, 受统计年鉴数据的限制, 本文仅对1993—2017年的数据进行分析, 后续研究可随着未来年份统计数据的扩充或者有可靠手段反演出更早年份的县(区)级谷物产量数据, 增加样本的年份数量, 进一步提高结果精度。

5 结论

为避免单个模型的随机性, 本文基于固定效应模型、差分模型、线性去趋势模型3类统计模型, 系统分析了1993—2017年最低气温、降水量、GDD、SRD对西藏谷物单产的影响, 主要结论如下:

(1) 西藏对于温度(最低气温和GDD)的敏感显著性大于降水量和SRD。不同市对不同气候因子的敏感显著性不同, 最低气温、降水量和GDD均对拉萨影响最大, SRD对于山南影响最大。所有市都从气候变化中受益, 但GDD对拉萨已产生一定负面影响。不同气候因子中, 最低气温升高对谷物单产的贡献较为明显。

(2) 气候变化对西藏谷物单产的影响总体上是正面的。其中对一江两河流域的山南和日喀则影响较大, 影响范围在6%~12%之间。对拉萨、林芝和昌都影响偏小, 影响范围在-1.5%~1%。总体来看, 低海拔地区比高海拔地区的收益更小。

(3) 7个模型的计算结果平均值为2.39%, 不同模型计算结果集中在1.5%~4.8%之间。在模型稳定性方面, 固定效应模型效果最好, 线性去趋势模型好于差分模型, 尤其差分模型引入气候因子间的交互项后模型稳定性降低。虽然加入交互项的差分模型在县(区)级和市级结果稳定性较差, 但汇总至更大尺度后, 其模型不稳定性有所改善。

参考文献(References)

- [1] Matthes F C. Climate change 2007. The physical science basis, impacts, adaptation and vulnerability mitigation of climate change. Internationale Politik, 2008, 63(4): 130-132.
- [2] Motha R P, Baier W. Impacts of present and future climate change and climate variability on agriculture in the temperate

- regions: North America. *Climatic Change*, 2005, 70(1/2): 137-164.
- [3] Salinger M J. Climate variability and change: Past, present and future: An overview. *Climatic Change*, 2005, 70(1/2): 9-29.
- [4] Guo Jianping. Advances in impacts of climate change on agricultural production in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2015, 26(1): 1-11. [郭建平. 气候变化对中国农业生产的影响研究进展. *应用气象学报*, 2015, 26(1): 1-11.]
- [5] Duan Jian, Xu Yong, Sun Xiaoyi. Spatial patterns and their changes of grain production, grain consumption and grain security in the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(4): 673-688. [段健, 徐勇, 孙晓一. 青藏高原粮食生产、消费及安全风险格局变化. *自然资源学报*, 2019, 34(4): 673-688.]
- [6] Liu Jian, Li Xiangmei, Zhong Xianghao. Consumption structure of food and the countermeasure of grain in Tibet. *Journal of Mountain Research*, 2004, 22(3): 286-291. [刘健, 李祥妹, 钟祥浩. 西藏自治区居民食品消费结构与粮食对策. *山地学报*, 2004, 22(3): 286-291.]
- [7] Zhao Yaoyang, Wang Jie, Zhang Li, et al. Analysis of arable land requirement for protecting the self-supply of grains under new food security policy. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(8): 1-6. [赵姚阳, 王洁, 张莉, 等. 粮食安全新政背景下保障我国谷物基本自给的耕地需求研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 1-6.]
- [8] Shi Wenjiao, Tao Fulu, Zhang Zhao. Identifying contributions of climate change to crop yields based on statistical models: A review. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1213-1222. [史文娇, 陶福禄, 张朝. 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展. *地理学报*, 2012, 67(9): 1213-1222.]
- [9] Lobell D B, Burke M. *Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World*. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2009.
- [10] Zhao Yanxi, Xiao Dengpan, Tang Jianzhao, et al. Effects of climate change on the yield of major grain crops and its adaptation measures in China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26(6): 317-326. [赵彦茜, 肖登攀, 唐建昭, 等. 气候变化对我国主要粮食作物产量的影响及适应措施. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 317-326.]
- [11] Lobell D B, Cahill K N, Field C B. Historical effects of temperature and precipitation on California crop yields. *Climatic Change*, 2007, 81(2): 187-203.
- [12] Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Asner G P, et al. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3): 250-256.
- [13] Zaveri E, Lobell D B. The role of irrigation in changing wheat yields and heat sensitivity in India. *Nature Communications*, 2019, 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-12183-9.
- [14] Schlenker W, Lobell D B. Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 014010. DOI: 10.1088/1748-9326/5/1/014010.
- [15] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443-1452.
- [16] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1): 014002. DOI: 10.1088/1748-9326/2/1/014002.
- [17] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333(6042): 616-620.
- [18] Tao F L, Zhang Z, Zhang S, et al. Response of crop yields to climate trends since 1980 in China. *Climate Research*, 2012, 54(3): 233-247.
- [19] Tao F L, Zhang Z, Xiao D P, et al. Responses of wheat growth and yield to climate change in different climate zones of China, 1981-2009. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189: 91-104.
- [20] Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends. *Climate Research*, 2008, 38(1): 83-94.
- [21] 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(3): 699-708.
- [22] Zhang T Y, Zhu J A, Wassmann R. Responses of rice yields to recent climate change in China: An empirical assessment based on long-term observations at different spatial scales (1981-2005). *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(7-8): 1128-1137.
- [23] Wan Yunfan, Li Yu'e, Gao Qingzhu, et al. Climate change trend and its impact on yield of highland barley in Tibet, China. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 374-380. [万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 西藏气候变化趋势及其对青稞产量的影响. *农业资源与环境学报*, 2018, 35(4): 374-380.]
- [24] Yan Yingcun, Zhao Quanning, Wang Zhe, et al. Analysis of highland barley phenophase change trend and the driving factors in Menyuan County, Qinghai Province during 1980-2015. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4): 1264-1271. [严应

- 存, 赵全宁, 王喆, 等. 青海省门源县 1980—2015 年青稞物候期变化趋势及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(4): 1264-1271.]
- [25] Zhao Yanxi, Xiao Dengpan, Bai Huizi, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China. *Progress in Geography*, 2019, 38(2): 224-235. [赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(2): 224-235.]
- [26] Wang Li, Li Fengxia, Xu Weixin, et al. Impact of climate change on growth of wheat in the irrigation district of Qaidam Oasis. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2010, 31(Suppl.1): 81-83, 89. [王力, 李凤霞, 徐维新, 等. 气候变化对柴达木灌区小麦生育期的影响. 中国农业气象, 2010, 31(Suppl.1): 81-83, 89.]
- [27] Shi Xiaoli, Shi Wenjiao. Impacts of extreme high temperature on winter wheat yield in the Huang-Huai-Hai Plain. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(2): 259-269. [石晓丽, 史文娇. 极端高温对黄淮海平原冬小麦产量的影响. 生态与农村环境学报, 2016, 32(2): 259-269.]
- [28] Zhao Yan, Wang Lianfen, Yang Qingsong. Effects of temperature and variety on germination and seedling growth of naked barley. *Seed*, 2013, 32(11): 34-37, 41. [赵艳, 王连芬, 杨青松. 萌发温度及品种对青稞种子萌发和幼苗生长的影响. 种子, 2013, 32(11): 34-37, 41.]
- [29] Du Jun, Hu Jun, Sonam Ngotrur. Climate change on agriculture critical temperature over Tibetan Plateau from 1971 to 2000. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 289-298. [杜军, 胡军, 索朗欧珠. 青藏高原农业界限温度的变化特征. 地理学报, 2005, 60(2): 289-298.]
- [30] Hu Qingfang, Yang Dawen, Wang Yintang, et al. Effects of Angstrom coefficients on ET_0 estimation and the applicability of FAO recommended coefficient values in China. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 644-652. [胡庆芳, 杨大文, 王银堂, 等. Angstrom 公式参数对 ET_0 的影响及 FAO 建议值适用性评价. 水科学进展, 2010, 21(5): 644-652.]
- [31] Lee L F, Yu J H. Estimation of spatial autoregressive panel data models with fixed effects. *Journal of Econometrics*, 2010, 154(2): 165-185.
- [32] Gourdjji S, Läderach P, Valle A M, et al. Historical climate trends, deforestation, and maize and bean yields in Nicaragua. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 200: 270-281.
- [33] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends. *Nature*, 1997, 387(6632): 484-485.
- [34] Verón S R, de Aballeyra D, Lobell D B. Impacts of precipitation and temperature on crop yields in the Pampas. *Climatic change*, 2015, 130(2): 235-245.
- [35] Zhao Xueyan, Wang Weijun, Wan Wenyu, et al. Influence of climate change on potential productivity of naked barley in the Tibetan Plateau in the past 50 years. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1329-1338. [赵雪雁, 王伟军, 王文玉, 等. 近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1329-1338.]
- [36] Gesangquzhen, Pubuciren, Hu Xiyuan. Effect of climate change on yield potential of crops in Tibet. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(2): 266-271. [格桑曲珍, 普布次仁, 胡希远. 西藏气候变化及其对作物产量潜力的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 266-271.]
- [37] Gao Jiajia, Du Jun, Liu Zhaoyang, et al. Study on response of sensitive area of main crops to climate change in Tibet Area. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(11): 1484-1489. [高佳佳, 杜军, 刘朝阳, 等. 西藏地区主要农作物敏感区对气候变化的响应. 生态与农村环境学报, 2019, 35(11): 1484-1489.]
- [38] Piao Shilong, Zhang Xianzhou, Wang Tao, et al. Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2842-2855. [朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 等. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. 科学通报, 2019, 64(27): 2842-2855.]
- [39] Li Yijun, Wang Chunyi, Zhao Bei, et al. Effects of climate change on agricultural meteorological disaster and crop insects diseases. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S1): 263-271. [李祎君, 王春乙, 赵蓓, 等. 气候变化对中国农业气象灾害与病虫害的影响. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 263-271.]
- [40] IPCC. Climate change 2007. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [41] Wang Yuan, Fang Xiuyi, Xu Tan, et al. Impact of climate warming and adaptation activities of rice plantation in Northeast China. *Resources Science*, 2005, 27(1): 121-127. [王媛, 方修琦, 徐钹, 等. 气候变暖与东北地区水稻种植的适应行为. 资源科学, 2005, 27(1): 121-127.]

Quantitative evaluation of the effects of climate change on cereal yields of Tibet during 1993-2017

DING Rui^{1,2}, SHI Wenjiao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Climate change, which can lead to environmental problems, has become a global concern, especially in the Tibetan Plateau. However, there are few studies on quantitative assessment of climate change on agricultural crops in the Tibetan Plateau. We used meteorological data and yearbook statistical data to assess the impact of climate change on cereal yields of Tibet. Three types of statistical models were selected, including fixed effect model, first-difference model and linear de-trend model. We analyzed the impacts of climate change (minimum temperature, precipitation, growing degree days, and solar radiation) on cereal yields at the county, city, and autonomous region scales in Tibet from 1993 to 2017. The results showed that the sensitivity of cereal production to temperature (minimum temperature and growing degree days) was greater than that to precipitation and solar radiation. The joint impacts of climate variables were positive, but the sensitivity and significance of different regions were different. Except for the negative impact of growing degree days on Lhasa, the impacts of minimum temperature, precipitation and solar radiation were positive on all cities. The impacts of climate trends on the cereal yields in Tibet Autonomous Region were positive and the results of different models were concentrated in the range of 1.5% to 4.8%. Among the three types of models, the fixed effect model performed best in robustness, and the linear de-trend model was better than the first-difference model. After we add the interaction between different climate variables, the robustness of the first-difference model decreased. Our study could help implement more spatially targeted agricultural adaptation measures to cope with the impact of climate change on the agricultural ecosystem of the Tibetan Plateau.

Keywords: Tibetan Plateau; climate change; statistical model; cereal; yields