

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2023.05.005

郝帅,宋艳玲,孙爽,等.气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述[J].中国农业气象,2023,44(5):398-409

气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述*

郝 帅, 宋艳玲**, 孙 爽, 王春乙

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要: 青藏高原为全球气候变化敏感区, 生态系统非常脆弱。青稞是青藏高原主要作物, 对气候变化较为敏感。本文梳理了当前以及未来气候变化对青藏高原青稞生产影响的相关研究, 就青藏高原农业气候资源和农业气象灾害变化以及气候变化对青稞种植制度、生育期和产量的影响进行归纳总结。已有研究表明, 在气候变化背景下, 青藏高原地区较其他地区增温显著, 降水增加, 日照时数减少, 干旱和洪涝等农业气象灾害更加频繁; 气候变化使得青稞潜在种植界限向高纬度、高海拔地区移动, 可种植面积增加, 生育期缩短, 当前气候变化对青稞生长有利, 同时品种更替和技术进一步提高了青稞产量和适应气候变化的能力, 但在未来气候变化影响下, 青稞生育期将继续缩短, 青稞生产及藏区粮食安全面临严峻考验。现有研究存在青稞研究区域局限性, 气候变化对青稞复合影响和综合风险评估研究较少等问题。未来需深入认识气候变化对青稞生产影响的机制机理, 创建青稞气象灾害影响与综合风险动态评估技术体系, 制定有效措施促进高原青稞生产适应气候变化, 保障青藏高原青稞粮食安全。

关键词: 气候变化; 青藏高原; 青稞; 影响与适应对策

Review on the Impacts of Climate Change on Highland Barley Production in Tibet Plateau

HAO Shuai, SONG Yan-ling, SUN Shuang, WANG Chun-yi

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The Tibet plateau is strongly sensitive to global climate change and the ecosystem is very fragile. Highland barley is a major crop on Tibetan plateau and sensitive to climate change. Authors reviewed the studies on the impact of current and future climate change on barley production over the Tibetan plateau and summarized the changes of agro-meteorological resources and agro-meteorological disasters, as well as the impact of climate change on barley cropping systems, fertility and yield. The results of studies have shown that a significantly warmer trend was observed on the Tibet plateau compared to the trend in other regions, together with increasing precipitation, reduced sunshine hours, and more frequent agro-meteorological disasters such as drought and floods under climate change. The potential planting boundary of highland barely moved to higher latitudes and altitudes under climate change, which led to the potential cultivated region increasing. The climate change shortened the growth period and showed a potentially positive impact on highland barley growth. Cultivar renewal combined with technological advances boosted highland barley yields and the ability to climate change adaption. The future climate change would shorten the growth period of highland barley, which posed a big threat to highland barley production and food security on the Tibet plateau. Existing reports are limited in terms of the study area and there are few studies on

* 收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1002200); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0105)

** 通讯作者: 宋艳玲, 研究员, 研究方向为气候变化对作物的影响, E-mail: songyl@cma.gov.cn

第一作者联系方式: 郝帅, E-mail: haos_cams@163.com

climate compounding impacts and integrated risk assessment. Therefore, it is necessary to gain a deeper understanding of the mechanism of climate change impact on barley production, the technology of dynamic assessment of meteorological disaster impact and comprehensive risk, and to develop effective measures to promote the adaptation of highland barley to climate change, which can ensure food security for Tibetans over Tibet plateau.

Key words: Climate change; Tibet plateau; Highland barley; Impacts and adaptation measure

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出,全球地表平均温度在2011–2020年升高了约 1.09°C ,高于1850年以来的任一时期^[1–2]。以全球变暖为主要特征的气候变化带来的挑战是现实且严峻的,气候变化对中国的影响更加显著^[3],尤其是1900年以来中国气温增长速率为 $1.3\sim 1.7^{\circ}\text{C}\cdot 100\text{a}^{-1}$,高于全球同期升温幅度^[4]。青藏高原因其独特的地理位置和地势,对气候变化的响应更为敏感,是未来受气候变暖影响不确定性最大的地区^[5–8]。气候变暖引起的温度与降水的变化使得高原农业生产区内热量资源和水资源的时空分布格局发生改变,对农业生产不确定性提高^[9–11]。

作为青藏高原种植历史最久、分布范围最广的粮食作物^[12],青稞在高原极端环境中不断进化,具有生育期短、适应性强、耐寒耐旱以及抗逆性强等特点,是高原最主要的农作物^[13–14]。2017年青藏高原青稞种植面积为23万 hm^2 ,其中西藏自治区和青海省种植面积占青稞总种植面积76%^[12]。研究气候变化对青藏高原青稞生产的影响,对保障区域粮食安全、促进青藏高原农业可持续发展具有重要的科学意义和现实价值^[15]。

目前,国内外已开展了一系列关于气候变化对青藏高原青稞种植制度、生育期以及产量等影响的研究,研究方法主要包括统计方法^[16–18]、作物模型^[19]等。Yin等^[20]利用最大熵模型明确了气候变化背景下青藏高原青稞适生区域分布,并揭示了未来影响青稞种植分布的关键气候因子和栖息地退化(扩张)趋势。此外,有研究基于Thornthwaite Memorial模型、DSSAT-CERES-barley模型等明确了青稞产区气候生产潜力时空分布特征以及对气候变暖的响应^[19–22]。Ding等^[16]利用线性去趋势、固定效应以及差分模型等多种统计方法,揭示了气候变化对青稞单产的影响。学者们在气候变化对青稞生育期和产量影响^[16]、驱动的关键气候因子^[17–18]等方面开展了大量研究,但现有研究多仅聚焦于高原特定区域或个别站点,尚未发现系统性研究报道,此外,青稞物候、

产量等实测数据资料记录较少且不连续,使得气候因子与青稞生产之间的敏感性和相关性分析结果存在较大误差,气候变化复合影响和综合风险评估研究较少。本文通过总结评述现有研究成果,厘清气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究现状,以期制定有区域针对性的气候变化适应措施,青稞增产稳产以及青藏高原农牧业可持续发展提供科学参考。

1 有关青藏高原农业气候资源和农业气象灾害变化的研究

1.1 农业气候资源变化

青藏高原对气候变化的响应尤为敏感,其增温速率显著高于北半球同纬度其他地区^[23]。过去60a,高原年平均气温持续升高,1961–2021年增温速率达到 $0.36^{\circ}\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$,高于全国平均水平^[24–26]。青藏高原增温呈现出显著的空间差异,东部地区气温增暖较强烈^[27]。从各个季节来看,高原冬、春季增温幅度大于夏、秋季^[28–31]。青稞生长季气温呈升高趋势,自1998年以来平均气温距平为正; $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 有效积温的空间分布呈由高原四周向中部逐渐降低的趋势,高原北部地区增加明显^[22]。研究发现 0°C 、 10°C 、 15°C 界限温度的初日提前,终日推迟,青稞适宜生长期延长,随着气温的增加,青稞种植范围不断北移高抬^[32–34]。

历史观测及未来情景模拟显示,青藏高原降水量不断增加^[35–36],整体呈暖湿化趋势^[37]。受夏季风影响,高原降水雨带从东南部向西部推进^[38],青稞生长季内降水量呈由东南部的雅鲁藏布江谷地向西北地区逐步减少的空间分布特征^[19]。高原西部和柴达木地区降水稀少,不适宜青稞种植;高原东南部降水则可满足青稞生长发育的水分需求^[39]。

青藏高原处于中低纬度地区且海拔高,太阳直接辐射强度大,有利于青稞干物质积累^[40]。但在气候变化背景下,随着降水量增加,云层增厚,阻挡了部分太阳辐射,使得青稞生长季内日照时数呈下降趋势,除高原南部部分地区有所增加外其他地区

均呈减少趋势,特别是东北部地区日照时数减少尤为明显^[41-42]。

气候变化背景下青藏高原农业气候资源整体呈暖湿化趋势,即光照资源减少、热量资源增加、降水增多,但降水资源时空差异较大,冰川积雪融化加快,这一系列变化对优化青稞种植制度、提高青稞气候资源利用效率提出了新挑战。

1.2 农业气象灾害变化

气候变化使得青藏高原霜冻、冰雹、干旱、暴雨雪、大风等农业气象灾害重发频发,严重影响高原农业生产^[40],其中,青稞生产主要受霜冻、冰雹和干旱等灾害的影响^[12]。

青藏高原特殊的地形使得霜冻灾害发生范围广,重度和中度易损区域集中,农作物遭受霜冻后产量将受到严重影响^[43]。气候变暖背景下霜冻灾害的发生频率降低,青藏高原初霜日期推迟 $4\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,终霜日期提前 $5\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$,无霜期日数 $9\text{d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的速率增加^[44]。由于高原地区农业结构调整与无霜区北扩和延长变化不一致,同时气候变化导致作物生长发育节律发生改变,农作物出苗期提前,成熟期推迟,遭受霜冻灾害的风险增加^[45]。

青藏高原是中国冰雹灾害频发的地区之一,春夏季冰雹灾害频发。20 世纪 80 年代以来,青藏高原中东部冰雹发生频数降低^[46],冰雹高发区主要分布在青海南部牧区、环青海湖地区以及拉萨以北的藏东地区,海拔高度是影响冰雹形成发展和持续时间的重要因素,高原冰雹发生频数和持续时间随海拔升高而增加^[47]。近年来,冰雹灾害发生频数和持续时间的降低与气温升高、气温日较差减小以及 0°C 和 -20°C 温度层海拔升高有关,海拔较高的 0°C 和 -20°C 温度层不利于冰雹形成和持续,但有利于冰雹直径的增长^[48]。

研究表明青藏高原极端最低气温升幅大^[49],大部分地区极端高温和低温事件增加^[50],东北部极端降水事件频数增多^[51],降水量空间分布向不平衡和极端化趋势发展,旱涝灾害发生频次上升^[52]。青藏高原常发生季节性作物缺水,作物可利用水和灌溉率较低,1965–2015 年干旱灾害风险显著增加,高原农业区成为干旱灾害的高风险区^[53]。在青藏高原人口密集的河湟谷地,干旱致灾因子危险性增大,青藏高原农作物的暴露度和脆弱性加大,从而进一步增加了干旱灾害风险性^[54]。CMIP5 气候多模式集合

预估显示青藏高原是中国未来干旱灾害发生的高风险区之一^[55]。

气候变化背景下青藏高原霜冻和冰雹灾害发生频数减少,但旱涝灾害频发,造成青稞减产,高原农业气象灾害的变化对加强高原农业气象灾害风险监测预警、构建完善青稞生产气候保障方法体系提出了更高的要求。

2 有关气候变化对青稞生产影响的研究

2.1 对青稞种植制度的影响

青藏高原一半以上的县域均有青稞种植,适宜种植海拔范围为 $2400 \sim 4200\text{m}$ ^[56],种植区主要分布在西藏自治区日喀则市、拉萨市、昌都市和山南市,青海省海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州和海南藏族自治州,四川省阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州,甘肃省甘南藏族自治州以及云南省丽江市和迪庆藏族自治州等地区^[12]。

气候变化背景下青藏高原热量资源增加,有利于青稞潜在种植面积的扩大及作物生产力的提高,青稞种植界限和布局发生变化^[56-57]。研究表明,温度升高促进了青藏高原耕地面积的增加以及适宜作物生长海拔上限的升高^[58-61]。生长季有效积温的增加也提高了青稞地理适应性,青稞可种植区域不断向高纬度、高海拔地区扩展。例如 20 世纪中期西藏自治区浪卡子县、亚东县帕里镇等地为不适宜种植青稞区,但近 20a 已可以进行大面积青稞种植^[62-64]。1970–2010 年,雅鲁藏布江及其支流地区适宜青稞种植的海拔上限升高了 85m ^[20]。

2.2 对青稞播种期的影响

当日平均气温稳定通过 0°C 以上时,青稞种子可以萌发,日平均气温稳定通过 $3 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 时播种,千粒重最大。在水利灌溉条件较好的地区,日平均气温 $\geq 3^{\circ}\text{C}$ 时便可播种,海拔超过 3800m 可适当早播。在水利灌溉条件差的地区,为确保雨季降水能够满足作物关键生长期需水量,可适当晚播种。冬青稞早播易形成旺苗,有利于幼苗越冬^[65]。

高原春季干旱少雨,在全球变暖背景下气温明显升高,加速了土壤解冻,使得物候期提前。播期调整可满足青稞各个生育期的热量需求,有研究表明拉萨地区春青稞在常规播种(4 月 15–20 日)基础上提前播种 20d,青稞仍能良好生长发育,且可避开晚霜冻危害;研究建议提前播种 7–10d,顶凌播种,可使青稞提前形成旺苗,增强对抗病虫害能力,抑

制杂草生长^[65]。青稞灌浆期处在7月左右,此时降水日数较多,日照时数相对较少,早播时青藏高原环境温度相对较低,作物生长缓慢,延长了出苗-拔节历期,从而减轻因日照时数减少和光合时间缩短对青稞生长发育造成的不良影响^[66]。提前适时播种有利于促进青稞籽粒干物质累积,提高穗粒数和千粒重。

2.3 对青稞生育期的影响

青稞全生育期所需 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温要大于 $940^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,最好在 $1100^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 以上。青藏高原大部分地区均能满足青稞生育期各阶段的热量条件,在低海拔地区还可以种植冬青稞^[67]。青稞播种-出苗阶段日平均温度以大于 0°C 为宜,出苗-拔节阶段适宜温度为 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$,在此期间,青稞可抵挡 -10°C 左右的低温。分蘖期的低温和分蘖-拔节阶段的延长有利于青稞分蘖成穗,在较低温度条件下,青稞穗分化时间延长,同时光照和降水相配合,有利于青稞形成大穗。抽穗成熟期温度至关重要,当日平均气温 $< 12^{\circ}\text{C}$ 时,千粒重将显著减少。籽粒灌浆期间干物质迅速积累,若此期间遇到高温、干旱或霜冻等灾害的影响,千粒重也将有所降低^[65]。在海拔3800m以上地区若灌浆期间最低气温下降至 2°C 以下,青稞将会停止灌浆,从而造成严重减产^[68]。

春季气温对青稞生育期的影响强于降水,且影响随着海拔的升高而变大,对于海拔高、积温少的地区,随着气候变暖青稞适宜生长期延长^[69-70]。气候变化背景下,在播种期和品种不变的条件下,青稞生育期日数显著减少^[22]。基于田间控制试验的研究表明,气温升高青稞生育期长度缩短,增温使得青稞播种-出苗以及灌浆期两个阶段持续时间减少,主要由于春青稞播种后气温相对较低,而气温升高使青稞出苗期提前,在灌浆成熟阶段,气温升高提高了青稞灌浆速率^[71]。

2.4 对青稞产量的影响

气候变化对青藏高原粮食安全产生了显著影响^[22],气温和降水是影响青藏高原青稞产量及产量构成要素的主要气候因子^[72]。有研究发现,青稞主产区东部及沿雅鲁藏布江一带的气候生产潜力主要限制因子为降水,而北部地区产量的主要限制因子为气温和蒸散,高原气候暖湿化有利于提高当地青稞气候生产潜力^[21]。赵雪雁等^[19]基于青藏高原及周边气象站平均气温、降水量及日照时数等逐日气象

观测数据,分析了青藏高原青稞生长季内气象要素的变化,结果表明青稞生长季内气温显著升高,但不同生育阶段平均温度仍未达到其最适温度,因而当前青藏高原气候变暖有利于青稞产量的增加。Hou等^[73]基于不同青稞产区气象观测资料研究表明,青稞的生产情况与气候资源以及水资源的调配和利用相关,因气温升高使得青稞蒸发量加大,水分胁迫风险增大,而降水量增加会降低此风险,最终促进产量增加。高佳佳等^[17]利用经验正交函数方法研究发现青稞产量对气候变化存在显著响应,且对气温的敏感性要显著高于降水。1986-2015年西藏地区青稞产量的增加与最低气温的增加呈显著正相关关系,各气候因子中最低气温的变化是影响青稞产量的主要因子^[20]。青藏高原不同海拔高度地区光温生产潜力差异较大,高海拔地区青稞光温生产潜力显著高于低海拔,青藏高原大多数地区产量差较大,未来增产潜力较强^[22]。随着气候变化,林芝市青稞生长季增温明显,生长期显著延长,春青稞等喜凉作物产量降低^[74],但总体上气候变化对青稞产量的影响呈正效应,高海拔地区的影响要大于低海拔地区^[21]。

尽管青藏高原青稞生长季温度较低,但在夏季日最高气温仍可达到 25°C 以上^[75],而青稞光合作用的最适温度低于 25°C ^[76],超过了青稞发育的最适温度,对产量产生了不利影响^[77]。夏季是青稞主要的生长季,也是青稞对温度胁迫特别敏感的时期,气候变化致使高温天气强度和频率增加,青稞产量可能降低^[78]。有研究表明在1985-2015年青藏高原的作物产量对温度变化呈负响应,产量对温度的敏感性约增加一倍,降水和 CO_2 浓度的增加可能也不会削弱温度变化所带来的负面影响^[75]。

青稞抗旱能力较强,但在整个生育阶段仍需保证及时的水分供应^[65]。分蘖抽穗和灌浆成熟阶段是需水关键期^[79],特别是分蘖-抽穗阶段,青稞需水量较大,水分不足将影响茎秆高度和籽粒产量;在孕穗后期,水分供应不足会导致小穗退化,籽粒数减少,对产量造成严重影响^[80]。高原雨季降水强度较小,降水能够缓慢渗透土壤,有效提高土壤墒情,有利于青稞抽穗开花和灌浆。随着气候暖湿化,特别是青稞生长发育阶段,高原地区降水增多以及气温升高引起冰川、积雪的加快融化,有效补充了青稞的灌溉水源,有利于提高青稞产量^[72]。但若水分过

多,特别是连续降水、高温以及日照不足等天气条件叠加情况下,会使青稞易发生条锈病^[68],从而导致减产。未来仍需加强高原生态系统对气候变暖的适应机理的认知^[69],为提高青稞产量提供理论基础。

2.5 对青稞品质的影响

青稞具有高蛋白、高纤维、高维生素以及低脂、低糖的特点,富含 β -葡聚糖^[81-82],阿拉伯木聚糖^[83-84],比大多数谷类作物含有更多的蛋白质和不饱和脂肪酸^[85],是酿酒、饲料和食品加工生产的重要原料,近年受到广泛关注并成为具有发展前景的经济作物^[86]。青稞中 β -葡聚糖以及籽粒淀粉含量是其品质的重要衡量标准。

青藏高原海拔高,光照资源丰富,日照时数明显多于同纬度的其他区域,充足的光照有利于光合作用,有利于青稞品质提高和总糖、还原糖、淀粉含量的积累^[66]。气候因子对青稞籽粒淀粉含量有显著影响,随着气温升高,青稞中淀粉含量减少^[12];积温对青稞 β -葡聚糖含量的影响十分显著,青稞籽粒中 β -葡聚糖含量随着有效积温增加而增加^[87];灌浆期温度的变化对 β -葡聚糖的积累影响较大,籽粒灌浆末期温度的升高使得籽粒 β -葡聚糖含量一直增加,直至成熟期达到峰值;降水增多导致 β -葡聚糖含量显著减少,而开花后土壤水分会缺乏会导致 β -葡聚糖含量降低^[88-89]。青稞是喜光、长日照作物,日照时数和太阳辐射的增加会增强作物光合作用,提高青稞糖类物质转化量与积累量,增加青稞产量,改善品质^[90]。

3 有关未来气候变化对青稞生产可能影响的研究

3.1 有利影响

近年来随着青稞品种优化和田间管理水平的提高,青稞产量差逐渐减小,但大多数地区的产量差仍较大,未来仍有巨大的增产潜力^[22]。未来气候将持续呈现暖湿化趋势,有利于青藏高原青稞气候生产潜力的提高,青稞适宜种植范围向高纬度延伸,种植适宜区发生变化,一些以前不能种植青稞的区域随着未来青藏高原暖湿化也将适宜青稞种植^[21]。有人利用最大熵模型 MaxEnt 模拟了未来青稞潜在适生区空间分布,结果表明,未来气候变化有利于高原东北部青稞的生长。到 21 世纪末,适宜种植区域面积将扩张到 46 万 hm^2 ,气候变暖导致青稞种植区

向高海拔扩展,未来 2071-2100 年青稞适宜种植的上限海拔可能增加 215m^[20]。

3.2 不利影响

未来青藏高原仍将持续升温,随着气温升高,农作物更易受到病虫害、杂草的威胁,特别是冬季增暖后,有利于虫卵越冬,虫害风险加大。未来极端气候事件频发,对青稞的生长发育也容易造成严重影响^[63]。气候变暖正在显著影响着青藏高原脆弱的生态环境,有学者进行田间控制试验研究显示,气温和 CO_2 浓度的升高均不利于青稞的生产^[71]。有研究表明即使能够实现《巴黎协定》设定的气候目标(升温 1.5°C 的情景),青稞产量对温度升高的响应将增加到过去 30a 的近两倍,现有研究大大低估了未来变暖对作物产量的影响^[75]。随着气候持续变暖,预计未来极端高温事件将更加频繁,青稞产量的敏感性、脆弱性也将持续增加,青藏高原的粮食安全也将受到威胁。

4 问题与展望

本文通过总结气候变化对青藏高原青稞生产影响的相关文献,系统性总结梳理了在气候变化背景下,青藏高原农业气候资源变化对青稞种植区域、生育期以及产量等方面的影响。气候变化背景下,青藏高原农业气候资源的变化对青稞种植区域、生育期以及产量等产生显著影响。随着高原气候变暖,热量资源增加,青稞种植范围不断向高纬度、高海拔地区扩展,潜在适宜生长期延长,但实际生育期有所缩短,气候变化对青稞产量影响总体呈正效应,高海拔地区的积极影响大于低海拔地区,但是未来青稞产量的敏感性、脆弱性也将持续增加。尽管当前研究均取得一定成果,为青稞生产趋利避害和提质增效提供了一定理论依据,但也存在一些问题。

(1)青稞物候期资料匮乏,研究具有区域局限性。青藏高原气象和作物物候观测站点较为稀疏,数据资料的不足使得气候变化对青藏高原青稞影响研究存在很大的不确定性^[91],青稞物候、产量等实测数据资料记录较少且不连续,造成气候因子与青稞生产之间的敏感性和相关性分析存在较大误差^[22]。青稞生长受气候变化和作物管理的综合影响,由于数据资料的缺乏和研究方法的局限性很难剥离各因素对青稞的影响。未来需对地面观测、卫星雷达遥感探测以及多种高分辨率全球区域模式数据进行融合,充分利用多元数据资料和方法,建立大气圈、冰冻圈和

生物圈相结合的高原观测网络系统,提升气候变化对青稞生产影响机制的研究,为评估未来青稞生长发育状况提供理论依据。除了采取田间试验观测的方法以外,可通过作物生长模型来模拟评估青稞生产状况以及对气候变化的响应,其中需重点关注模型参数不稳定性、与区域气候模式的匹配度以及建模机理不完善等问题,可采用统计模型、作物生长模型与观测试验等多元方法结合来开展研究^[92]。除此之外作物生长模型还可与社会经济模型相互耦合,或将作物生长模型、卫星雷达遥感、无人机以及青稞表型观测等多种不同方式相结合^[93],提高研究的全面性、系统性,减少不确定性。

(2) 气候变化对青稞复合影响和综合风险评估研究报道较少。实际生产中青稞生长季易受多种气候因子和气象灾害的复合影响,当前研究多集中关注单气候因子的影响,对于多因子耦合影响的研究较少^[21],此外高原对气候变化较为敏感,特别是在极端天气气候事件影响下,高原冰冻圈和当地生态系统相互耦合,气候影响会被放大^[91]。除了极端气候事件的影响,未来病虫害等对青稞生产的影响也日益加重^[94],忽略了大气中 CO₂ 浓度增加带来的施肥效应^[95-97]。因此,青藏高原青稞复合气象灾害评估与气候保障技术研发是未来研究的方向。

(3) 高原气候变化具有显著区域性差异。由于青藏高原地形复杂,海拔跨度较大,各地区对不同气候因子的敏感性存在差异,特别是气候变化背景下高原出现了显著的海拔依赖型增暖现象,即气温变率随海拔升高而增加的现象^[98-99],基于该现象对生态环境的影响,尤其是对高原农业影响的研究也鲜有报道,也应作为未来研究中考虑的因素。

(4) 青稞生产适应气候变化的措施研究不足。气候变化对青稞生产影响显著,需要采取多方面多角度的措施有效应对气候变化带来的风险,稳定青稞生产。高原地区农业生产机械化程度还不够高,未来仍需大力发展设施农业,提高青藏高原土地利用率,加强机械化生产程度,增强智慧型农业科技发展^[64];合理调整种植结构,优化种植布局,加强品种选育,培育稳产、抗涝、抗高温等抗逆性品种,增强优质品种供应,确保青稞生产高产高效;提升高原地区防灾减灾能力,当前高原生态系统脆弱且气象灾害频发、强度增强,气象监测精细化现代化水平较低,仍有待提高;加强农田环境保护,形成

合理的轮作和恢复土壤肥力的耕作体系,提高土壤有机质含量和保墒能力;加大科学性生产和田间水肥管理,建设水利设施和节水设施,合理施用化肥,加强污染治理;强化储粮工作,因高原交通较为不便,一旦发生粮食减产情况,很难从外地及时调运,提高当地科学储粮技术,可以缓解粮食减产后所带来的风险。

综上,目前气候变化对青藏高原青稞生产影响的相关成果不能满足青稞生产服务的需求,急需加强气候变化对青稞生产影响机理机制研究、气象灾害影响与综合风险动态评估技术研发和青稞生产适应气候变化措施体系构建,以提升青藏高原青稞生产气候保障能力,促进青稞深层次的开发和利用,增加经济附加值,为青稞生产趋利避害和提质增效,促进高原经济发展提供科技支撑。

参考文献 References

- [1] IPCC.Climate change 2021:the physical science basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press,2021:4- 41.
- [2] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等.气候变化科学方面的几个最新认知[J].气候变化研究进展,2021,17(6):629-635.
Zhai P M,Zhou B Q,Chen Y,et al.Several new understandings in the climate change science[J].Climate Change Research, 2021,17(6):629-635.(in Chinese)
- [3] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势[J].气候变化研究进展, 2006(1):3-8.
Ding Y H,Ren G Y,Shi G Y,et al.National(I):climate change in China and its future trend[J].Climate Change Research, 2006(1): 3-8.(in Chinese)
- [4] 严中伟,丁一汇,翟盘茂,等.近百年中国气候变暖趋势之再评估[J].气象学报,2020,78(3):370-378.
Yan Z W,Ding Y H,Zhai P M,et al.Re-assessing climatic warming in China since the last century[J].Acta Meteorologica Sinica,2020,78(3):370-378.(in Chinese)
- [5] 陈德亮,徐柏青,姚檀栋,等.青藏高原环境变化科学评估:过去、现在与未来[J].科学通报,2015,60:3025-3035.
Chen D L,Xu B Q,Yao T D,et al.Assessment of past,present and future environmental changes on the Tibetan plateau[J]. Chinese Science Bulletin,2015,60:3025-3035.(in Chinese)
- [6] 姚檀栋,朱立平.青藏高原环境变化对全球变化的响应及

- 其适应对策[J].地球科学进展,2006(5):459-464.
- Yao T D,Zhu L P.The response of environmental changes on Tibetan plateau to global changes and adaptation strategy[J]. *Advances in Earth Science*,2006(5):459-464.(in Chinese)
- [7] Chen S,Liu W H,Ye T.Dataset of trend-preserving bias-corrected daily temperature,precipitation and wind from NEX-GDDP and CMIP5 over the Qinghai-Tibet plateau[J].*Data in Brief*,2020,31:105733.
- [8] Immerzeel W W,Bierkens M F P.Asia's water balance[J]. *Nature Geoscience*,2012,5(12):841-842.
- [9] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等.气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适应[J].*气候变化研究进展*,2006(2):51-56.
- Lin E D,Xu Y L,Jiang J H,et al.National assessment report of climate change(II):climate change impacts and adaptation [J].*Climate Change Research*,2006(2):51-56.(in Chinese)
- [10] Piao S L,Ciais P,Huang Y,et al.The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*,2010,467(7311):43-51.
- [11] Lobell D B,Bänziger M,Magorokosho C,et al.Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials[J].*Nature Climate Change*,2011,1(1):42-45.
- [12] 杜军,刘依兰,建军,等.气候变化对西藏青稞种植的影响研究[M].北京:气象出版社,2017:22-42.
- Du J,Liu Y L,Jian J,et al.A study of the impact of climate change on barley crops in Tibet[M].Beijing:China Meteorological Press,2017:22-42.(in Chinese)
- [13] Wang J,Li H R,Yang L S,et al.Distribution and translocation of selenium from soil to highland barley in the Tibetan plateau Kashin-Beck disease area[J]. *Environmental Geochemistry and Health*,2017,39(1):221-229.
- [14] 戚伟,刘盛和,周亮.青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用[J].*地理学报*,2020,75(2):255-267.
- Qi W,Liu S H,Zhou L.Regional differentiation of population in Tibetan plateau:insight from the "Hu Line"[J]. *Acta Geographica Sinica*,2020,75(2):255-267.(in Chinese)
- [15] Zhang J J,Jiang F,Li G Y,et al.Maxent modeling for predicting the spatial distribution of three raptors in the Sanjiangyuan National Park,China[J].*Ecology and Evolution*,2019,9(11):6643-6654.
- [16] Ding R,Shi W J.Contributions of climate change to cereal yields in Tibet,1993-2017[J].*Journal of Geographical Sciences*,2022,32(1):101-116.
- [17] 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[J].*生态与农村环境学报*,2019,35(11):1484-1489.
- Gao J J,Du J,Liu C Y,et al.Study on response of sensitive area of main crops to climate change in Tibet area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*,2019,35(11):1484-1489. (in Chinese)
- [18] 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[J].*农业资源与环境学报*,2018,35(4):374-380.
- Wan Y F,Li Y E,Gao Q Z,et al.Climate change trend and its impact on yield of highland barley in Tibet,China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*,2018,35(4):374-380.(in Chinese)
- [19] 赵雪雁,王伟军,万文玉,等.近 50 年气候变化对青藏高原青稞气候生产潜力的影响[J].*中国生态农业学报*,2015,23(10):1329-1338.
- Zhao X Y,Wang W J,Wan W Y,et al.Impact of climate change on potential productivity and phenological phase of forage in the Qinghai-Tibet plateau in the past 50 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2015,23(10):1329-1338.(in Chinese)
- [20] Yin Y Y,Leng G Y,Zhao J A,et al.Future potential distribution and expansion trends of highland barley under climate change in the Qinghai-Tibet plateau (QTP)[J]. *Ecological Indicators*,2022,136:108702.
- [21] 周刊社,邓伟,崔元良,等.1961-2018 年青藏高原青稞产区气候生产潜力时空变化特征[J].*中国农学通报*,2020,36(23):88-98.
- Zhou K S,Deng W,Cui Y L,et al.Highland barley production area of Tibetan plateau from 1961 to 2018: spatio-temporal variation characteristics of climatic potential productivity [J].*Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020,36(23):88-98.(in Chinese)
- [22] 弓开元,何亮,邬定荣,等.青藏高原高寒区青稞光温生产潜力和产量差时空分布特征及其对气候变化的响应[J].*中国农业科学*,2020,53(4):720-733.
- Gong K Y,He L,Wu D R,et al.Spatial-temporal variations of photo-temperature potential productivity and yield gap of highland barley and its response to climate change in the

- cold regions of the Tibetan plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(4): 720-733. (in Chinese)
- [23] Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 20(14): 1729-1742.
- [24] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 11-37.
- Climate Change Centre, China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China(2021)[M]. Beijing: Science Press, 2021: 11-37. (in Chinese)
- [25] Duan A M, Xiao Z X. Does the climate warming hiatus exist over the Tibetan plateau[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 1-9.
- [26] 徐丽娇, 胡泽勇, 赵亚楠, 等. 1961-2010 年青藏高原气候变化特征分析[J]. *高原气象*, 2019, 38(5): 911-919.
- Xu L J, Hu Z Y, Zhao Y N, et al. Climate change characteristics in Qinghai-Tibetan plateau during 1961-2010[J]. *Plateau Meteorology*, 2019, 38(5): 911-919. (in Chinese)
- [27] 杨耀先, 胡泽勇, 路富全, 等. 青藏高原近 60 年来气候变化及其环境影响研究进展[J]. *高原气象*, 2022, 41(1): 1-10.
- Yang Y X, Hu Z Y, Lu F Q, et al. Progress of recent 60 years climate change and its environmental impacts on the Qinghai-Xizang plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2022, 41(1): 1-10. (in Chinese)
- [28] 马晓波, 李栋梁. 青藏高原近代气温变化趋势及突变分析[J]. *高原气象*, 2003(5): 507-512.
- Ma X B, Li D L. Analyses on air temperature and its abrupt change over Qinghai-Xizang plateau in modern age[J]. *Plateau Meteorology*, 2003(5): 507-512. (in Chinese)
- [29] 李栋梁, 钟海玲, 吴青柏, 等. 青藏高原地表温度的变化分析[J]. *高原气象*, 2005(3): 291-298.
- Li D L, Zhong H L, Wu Q B, et al. Analyses on changes of surface temperature over Qinghai-Xizang plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2005(3): 291-298. (in Chinese)
- [30] Su J Y, Duan A M, Xu H M. Quantitative analysis of surface warming amplification over the Tibetan plateau after the late 1990s using surface energy balance equation[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2017, 18(3): 112-117.
- [31] Gao K L, Duan A M, Chen D L, et al. Surface energy budget diagnosis reveals possible mechanism for the different warming rate among Earth's three poles in recent decades[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(16): 1140-1143.
- [32] 杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 西藏高原气候变化及其差异性[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(2): 290-298.
- Yang C Y, Shen W S, Lin N F. Climate change and its regional differences over the Tibet plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2014, 37(2): 290-298. (in Chinese)
- [33] 杨春艳, 沈渭寿, 王涛. 近 30 年西藏耕地面积时空变化特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 264-271.
- Yang C Y, Shen W S, Wang T. Spatial-temporal characteristics of cultivated land in Tibet in recent 30 years[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(1): 264-271. (in Chinese)
- [34] 杜军, 刘英, 韩晶, 等. 气候变化对陇东塬区界限温度和作物种植结构的影响分析[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(27): 253-257.
- Du J, Liu Y, Han J, et al. Impact analysis of climate change on the boundary temperature and crop planting structure in eastern Gansu Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(27): 253-257. (in Chinese)
- [35] 李晓英, 姚正毅, 肖建华, 等. 1961-2010 年青藏高原降水时空变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1233-1240.
- Li X Y, Yao Z Y, Xiao J H, et al. Analysis of the spatial-temporal variation characteristics of precipitation over the Tibetan plateau from 1961 through 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1233-1240. (in Chinese)
- [36] Ji Z M, Kang S C. Double-nested dynamical downscaling experiments over the Tibetan plateau and their projection of climate change under two RCP scenarios[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70(4): 1278-1290.
- [37] Lu H L, Liu G F. Trends in temperature and precipitation on the Tibetan plateau, 1961-2005[J]. *Climate Research*, 2010, 43(3): 179-190.
- [38] 汤懋苍, 沈志宝, 陈有虞. 高原季风的平均气候特征[J]. *地理学报*, 1979(1): 33-42.
- Tang M C, Shen Z B, Chen Y Y. On climatic characteristics of the Xizang plateau monsoon[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1979 (1): 33-42. (in Chinese)
- [39] 汪青春, 秦宁生, 张占峰, 等. 青海高原近 40a 降水变化特征及其对生态环境的影响[J]. *中国沙漠*, 2007(1): 153-158.
- Wang Q C, Qin N S, Zhang Z F, et al. Precipitation change and its impact on eco-environment of Qinghai plateau for the last 40 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2007(1):

- 153-158.(in Chinese)
- [40] 刘国一.气候变化对西藏农业生产的影响[J].西藏农业科技,2019,41(1):49-54.
- Liu G Y.Effect of climate change on Tibetan agricultural production[J].Tibet Journal of Agricultural Sciences,2019,41(1):49-54.(in Chinese)
- [41] 杜军,边多,胡军,等.西藏近 35 年日照时数的变化特征及其影响因素[J].地理学报,2007(5):492-500.
- Du J,Bian D,Hu J,et al.Climatic change of sunshine duration and its influencing factors over Tibet during the last 35 years[J].Acta Geographica Sinica,2007(5):492-500.(in Chinese)
- [42] 华维,董一平,范广洲.青藏高原年日照时数变化的时空特征[J].山地学报,2010,28(1):21-30.
- Hua W,Dong Y P,Fan G Z.The analysis of spatial and temporal characteristics of annual sunshine duration over Qinghai-Tibet plateau[J].Journal of Mountain Science,2010,28(1):21-30.(in Chinese)
- [43] 次仁曲珍.西藏主要气象灾害特征及防御措施[J].农业灾害研究,2019,9(6):99-100.
- Cirenquzhen.Characteristics and prevention measures of main meteorological disasters in Tibet[J].Journal of Agricultural Catastrophology,2019,9(6):99-100.(in Chinese)
- [44] 白磊,张帆,文元桥,等.基于格点资料的 1961-2018 年中国霜冻灾害时空变化规律[J].中国农业气象,2021,42(9):761-774.
- Bai L,Zhang F,Wen Y Q,et al.Evolution of the frost hazards based on gridded meteorological data across China in 1961-2018[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2021,42(9):761-774.(in Chinese)
- [45] 马树庆,杨菲芸.我国霜期、霜冻时空特征及其对气候变暖的响应[J].气象灾害防御,2015,22(2):1-4.
- Ma S Q,Yang F Y.Spatial and temporal characteristics of frost periods and frosts in China and its response to climate warming[J].Meteorological Disaster Prevention,2015,22(2):1-4.(in Chinese)
- [46] 符琳,李维京,张培群,等.近 50 年我国冰雹年代际变化及北方冰雹趋势的成因分析[J].气象,2011,37(6):669-676.
- Fu L,Li W J,Zhang P Q,et al.Inter-decadal change of hail events over China and causation analysis in northern China in recent 50 years[J].Meteorological Monthly,2011,37(6):669-676.(in Chinese)
- [47] 马晓玲,李德帅,胡淑娟.青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J].气象,2020,46(3):301-312.
- Ma X L,Li D S,Hu S J.Refined analysis of spatio-temporal characteristics of thunderstorm and hail over Qinghai province[J].Meteorological Monthly,2020,46(3):301-312.(in Chinese)
- [48] 冯晓莉,马占良,管琴,等.1980-2018 年青海高原冰雹分布特征及其关键影响因素分析[J].气象,2021,47(6):717-726.
- Feng X L,Ma Z L,Guan Q,et al.Spatio-temporal characteristics of hail and its influence factors in Qinghai plateau during 1980-2018[J].Meteorological Monthly,2021,47(6):717-726.(in Chinese)
- [49] 杜军,路红亚,建军.1961-2010 年西藏极端气温事件的时空变化[J].地理学报,2013,68(9):1269-1280.
- Du J,Lu H Y,Jian J.Variations of extreme air temperature events over Tibet from 1961 to 2010[J].Acta Geographica Sinica,2013,68(9):1269-1280.(in Chinese)
- [50] 韩国军,王玉兰,房世波.近 50 年青藏高原气候变化及其对农牧业的影响[J].资源科学,2011,33(10):1969-1975.
- Han G J,Wang Y L,Fang S B.Climate change over the Qinghai-Tibet plateau and its impacts on local agriculture and animal husbandry in the last 50 years[J].Resources Science,2011,33(10):1969-1975.(in Chinese)
- [51] 杨志刚,建军,洪建昌.1961-2010 年西藏极端降水事件时空分布特征[J].高原气象,2014,33(1):37-42.
- Yang Z G,Jian J,Hong J C.Temporal and spatial distribution of extreme precipitation events in Tibet during 1961-2010[J].Plateau Meteorology,2014,33(1):37-42.(in Chinese)
- [52] 黄晓清,罗布次仁,杨勇,等.西藏高原汛期降水日数和强度的时空演变特征[J].中国沙漠,2013,33(3):902-910.
- Huang X Q,Luobuciren,Yang Y,et al.Temporal and spatial variation of precipitation events frequency and intensity in rainy season during 1961-2007 in Tibet,China[J].Journal of Desert Research,2013,33(3):902-910.(in Chinese)
- [53] Chen Q,Liu F G,Chen R J,et al.Trends and risk evolution of drought disasters in Tibet region,China[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(11):1859-1875.
- [54] 王劲松,姚玉璧,王莺,等.青藏高原地区气象干旱研究进展与展望[J].地球科学进展,2022,37(5):441-461.
- Wang J S,Yao Y B,Wang Y,et al.Research progress and prospects of meteorological drought over the Qinghai-Tibet plateau[J].Advances in Earth Science,2022,37(5):441-461.

- (in Chinese)
- [55] Wang L, Chen W. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(6): 2059-2078.
- [56] 谭大明, 季永月, 谭海运, 等. 西藏 60 多年来青稞生长季日照时长变化趋势[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(12): 48-57.
- Tan D M, Ji Y Y, Tan H Y, et al. On variation profile of sunshine duration in growing season of Tibetan barley in recent 60 years[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2020, 45(12): 48-57. (in Chinese)
- [57] 李祎君, 王春乙. 气候变化对我国农作物种植结构的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2010, 6(2): 123-129.
- Li Y J, Wang C Y. Impacts of climate change on crop planting structure in China[J]. *Climate Change Research*, 2010, 6(2): 123-129. (in Chinese)
- [58] 马伟东, 苏鹏, 贾伟, 等. 气候变化背景下青藏高原青稞自然灾害暴露研究进展[J]. *灾害学*, 2020, 35(4): 215-221.
- Ma W D, Su P, Jia W, et al. Advances in the research on the exposure of highland barley natural disasters on the background of climate change[J]. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(4): 215-221. (in Chinese)
- [59] Peng J, Liu Z H, Liu Y H, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet plateau using Hurst exponent[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 14(1): 28-39.
- [60] 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 VI: 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1562-1570.
- Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China VI: possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1562-1570. (in Chinese)
- [61] Zhang G L, Dong J W, Zhou C P, et al. Increasing cropping intensity in response to climate warming in Tibetan plateau, China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142: 36-46.
- [62] 徐华军, 杨晓光, 王文峰, 等. 气候变化背景下中国农业气候资源变化 VII: 青藏高原干旱半干旱区农业气候资源变化特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1817-1824.
- Xu H J, Yang X G, Wang W F, et al. Changes of China agricultural climate resources under the background of climate change VII: change characteristics of agricultural climate resources in arid and semi-arid region of Tibet plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1817-1824. (in Chinese)
- [63] 张戈丽, 欧阳华, 周才平, 等. 近 50 年来气候变化对西藏“一江两河”地区农业气候热量资源的影响[J]. *资源科学*, 2010, 32(10): 1943-1954.
- Zhang G L, Ouyang H, Zhou C P, et al. Response of agricultural thermal resources to climate change in the region of the Brahmaputra River and its two tributaries in Tibet during past 50 years[J]. *Resources Science*, 2010, 32(10): 1943-1954. (in Chinese)
- [64] 尼玛扎西, 杨勇, 禹代林, 等. 全球气候变化与西藏农牧业发展[J]. *西藏科技*, 2010(3): 22-27.
- Nimazhaxi, Yang Y, Yu D L, et al. Global climate change and the development of agriculture and livestock in Tibet[J]. *Tibet Science and Technology*, 2010(3): 22-27. (in Chinese)
- [65] 胡颂杰. 西藏农业概论[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1995: 144-147.
- Hu S J. Introduction to Tibetan agriculture[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1995: 144-147. (in Chinese)
- [66] 刘国一, 唐亚伟, 孙全平, 等. 提早播种对高原青稞增产的成因研究[J]. *西藏科技*, 2015(8): 9-13.
- Liu G Y, Tang Y W, Sun Q P, et al. Study of the causes of early sowing on the yield increase of highland barley[J]. *Tibet Science and Technology*, 2015(8): 9-13. (in Chinese)
- [67] 王先明, 扎桑. 西藏高原温度条件对大麦生长发育的生态作用[J]. *中国农业气象*, 1990(1): 26-28.
- Wang X M, Zasang. Ecological effects of temperature conditions on barley growth and development on the Tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 1990(1): 26-28. (in Chinese)
- [68] 袁雷, 刘依兰. 基于 GIS 和气候-土地利用信息的西藏青稞种植适宜性区划[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(17): 92-97.
- Yuan L, Liu Y L. Suitability regionalization for highland barley in Tibet based on climate, land use information and GIS[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(17): 92-97. (in Chinese)
- [69] 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[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.

- Piao S L, Zhang X Z, Wang T, et al. Responses and feedback of the Tibetan plateau's alpine ecosystem to climate change[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(27): 2842-2855. (in Chinese)
- [70] Piao S L, Cui M D, Chen A P, et al. Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1599-1608.
- [71] 刘国一, 谢永春, 侯亚红, 等. 温度和二氧化碳浓度升高对青稞生长的影响[J]. 中国农业气象, 2018, 39(9): 567-574.
- Liu G Y, Xie Y C, Hou Y H, et al. Effects of elevated temperature and carbon dioxide concentration on the growth of highland barley[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(9): 567-574. (in Chinese)
- [72] 石磊, 杜军, 刘依兰. 气候变化对日喀则保灌地青稞生育期的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(33): 182-186.
- Shi L, Du J, Liu Y L. Impact of climate change on growth period of hullless barley in Shigatse's protect irrigation field[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(33): 182-186. (in Chinese)
- [73] Hou Y H. Effect of irrigation and rainfall on water consumption characteristics and yield of high yield highland barley in Tibet River Valley[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(3): 530-534.
- [74] 次仁央金, 吴尧, 陈阜, 等. 气候变暖对西藏林芝地区作物生产的影响[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(8): 33-42.
- Cirenyangjin, Wu Y, Chen F, et al. Impacts of climate warming on crop production in Nyingchi, Tibet[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(8): 33-42. (in Chinese)
- [75] Tsechoe D, Piao S L, Wang X H, et al. Emerging negative warming impacts on Tibetan crop yield[J]. Engineering, 2022(7): 163-168.
- [76] Huang M T, Piao S L, Ciais P, et al. Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes[J]. Nature Ecology & Evolution, 2019, 3(5): 772-779.
- [77] Porter J R, Gawith M. Temperatures and the growth and development of wheat: a review[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 10(1): 23-36.
- [78] Schauburger B, Archontoulis S, Arneth A, et al. Consistent negative response of US crops to high temperatures in observations and crop models[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1-9.
- [79] 杜军, 胡军, 张勇. 西藏农业气候资源区划[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 175-176.
- Du J, Hu J, Zhang Y. Agricultural climate resource zoning in Tibet[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 175-176. (in Chinese)
- [80] 拉巴, 潘多, 次仁多吉. 近 30 年西藏中部拉萨以东农业气候资源分析: 以墨竹工卡县为例[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(36): 292-294.
- La B, Pan D, Cirenduoji. Analysis of agriculture climate resources in the east of Lhasa in central Tibet in recent 30 years: a case study of Mozhugogka county[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(36): 292-294. (in Chinese)
- [81] Chen H H, Nie Q X, Xie M, et al. Protective effects of β -glucan isolated from highland barley on ethanol-induced gastric damage in rats and its benefits to mice gut conditions[J]. Food Research International, 2019, 122: 157-166.
- [82] Zhang K Z, Yang J G, Qiao Z W, et al. Assessment of β -glucans, phenols, flavor and volatile profiles of hullless barley wine originating from highland areas of China[J]. Food Chemistry, 2019, 293: 32-40.
- [83] Xia X J, Li G N, Song J X, et al. Hypocholesterolaemic effect of whole-grain highland hull-less barley in rats fed a high-fat diet[J]. British Journal of Nutrition, 2018, 119(10): 1102-1110.
- [84] Obadi M, Sun J, Xu B. Highland barley: chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications[J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.
- [85] Wang C P, Pan Z F, Nima Z X, et al. Starch granule-associated proteins of hull-less barley (*Hordeum vulgare* L.) from the Qinghai-Tibet plateau in China[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2011, 91(4): 616-624.
- [86] Guo T L, Horvath C, Chen L, et al. Understanding the nutrient composition and nutritional functions of highland barley (Qingke): a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 103: 109-117.
- [87] Swanston J S, Ellis R P, Perez-Vendrell A, et al. Patterns of barley grain development in Spain and Scotland and their implications for malting quality[J]. Cereal Chemistry, 1997,

- 74(4):456-461.
- [88] Fastnaught C E, Berglund P T, Holm E T, et al. Genetic and environmental variation in β -glucan content and quality parameters of barley for food[J]. *Crop Science*, 1996, 36(4):941-946.
- [89] 王改花, 王建林. 生态因子对青稞农艺性状及光合特性的影响研究[J]. *中国农业信息*, 2017(7):68-72.
- Wang G H, Wang J L. Study on the influence of ecological factors on agronomic traits and photosynthetic characteristics of barley[J]. *China Agricultural Informatics*, 2017(7):68-72. (in Chinese)
- [90] 石晓旭, 韩笑, 刘海翠, 等. 元麦 β -葡聚糖含量的差异性及影响因素的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(2): 12-18.
- Shi X X, Han X, Liu H C, et al. β -glucan content in naked barley: research progress of the difference and influencing factor[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(2): 12-18. (in Chinese)
- [91] 游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3):885-901.
- You Q L, Kang S C, Li J D, et al. Several research frontiers of climate change over the Tibetan plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3):885-901. (in Chinese)
- [92] Zhao C, Liu B, Piao S L, et al. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(35):9326-9331.
- [93] Puroila T, Lehtonen H, Liu X, et al. Production of cereals in northern marginal areas: an integrated assessment of climate change impacts at the farm level[J]. *Agricultural Systems*, 2018, 162:191-204.
- [94] 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[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S1):263-271.
- Li Y J, Wang C Y, Zhao B, et al. Effects of climate change on agricultural meteorological disaster and crop insects diseases[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(S1):263-271. (in Chinese)
- [95] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO_2 浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究[J]. *气象学报*, 1997(1):87-95.
- Wang C Y, Pan Y R, Bai Y M, et al. The experiment study of effects doubled CO_2 concentration on several main crops in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997(1):87-95. (in Chinese)
- [96] Vanuytrecht E, Thorburn P J. Responses to atmospheric CO_2 concentrations in crop simulation models: a review of current simple and semi-complex representations and options for model development[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(5):1806-1820.
- [97] Cai C, Li G, Yang H L, et al. Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated CO_2 , elevated temperature, and their combination, in FACE environments[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4):1685-1707.
- [98] Rangwala I, Miller J R. Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes[J]. *Climatic Change*, 2012, 114(3):527-547.
- [99] You Q L, Chen D L, Wu F Y, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan plateau: patterns, mechanisms and perspectives[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103349.