

模拟增温和 CO₂ 浓度升高对西藏‘冬青 18’生长发育及产量的影响

次仁央金^{1,2} 卓嘎² 刘国一³ 陈阜^{1*}

(1. 中国农业大学 农学院, 北京 100193;

2. 西藏农牧学院, 西藏 林芝 860000;

3. 西藏自治区农牧科学院 农业资源与环境研究所, 拉萨 850000)

摘要 为明确西藏冬青稞生长发育及产量对增温和 CO₂ 浓度升高的实际响应,以西藏冬青稞主栽品种‘冬青 18’为试验材料,设置开放式气室(OTC)内无增温且无增施 CO₂ 为对照(CK)、增温(T)和增温+增施 CO₂ (T+CO₂)3 个处理,经连续 2 个生长季全生育期增温控制试验,观察记录冬青稞生育时期、旗叶叶绿素含量和产量及其构成因素。结果表明:1)T 和 T+CO₂ 处理使‘冬青 18’全生育期显著缩短,缩短 12~20 d,主要集中于播种-出苗期和抽穗-成熟期。2)灌浆期旗叶叶绿素含量总体呈先增加后降低趋势,各处理之间无显著差异。3)T 处理降低‘冬青 18’产量,同时增加 CO₂ 有弥补产量的效果,主要是因为 T 处理的主穗粒数、穗粒重及千粒重均降低,增温同时增加 CO₂ 使千粒重和穗粒数有所增加。因此,全球气候变暖对于冬青稞生长整体表现为穗粒数、粒重和千粒重均降低等减产效应,而增加 CO₂ 可在一定程度上缓解减产趋势,未来该地区冬青稞生产栽培可通过调整播期及筛选耐高温品种来应对全球气候变暖。

关键词 增温; 青稞; 气候变化; 开顶式气室; 西藏

中图分类号 S162.5;F326.11

文章编号 1007-4333(2022)04-0053-08

文献标志码 A

Effects of simulated atmospheric warming and elevated CO₂ concentration on the growth and yield of barley variety ‘Dongqing 18’

TSERING Yangjin^{1,2}, ZHUO Ga², LIU Guoyi³, CHEN Fu^{1*}

(1. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Nyingchi 860000, China;

3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Academy of Sciences Agriculture and Animal Husbandry of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract In order to investigate the effects of elevated temperature and CO₂ concentration on Tibet highland barley growth and yield, this study took cultivation variety ‘Dongqing 18’ as test material. Three different treatments were set up as follows: Field environment (CK), elevated temperature (T) and elevated temperature and CO₂ (T+CO₂). This study recorded the growth period, chlorophyll content of flag leaf, yield and its components under two consecutive growing seasons in the Open-Top Chamber (OTC) control test. The results showed that: The whole growth period of ‘Dongqing 18’ was significantly shortened by 12–20 d compared with CK, mainly concentrated in seeding-seedling period and heading-maturity period. The total chlorophyll of flag leaves increased firstly and then decreased during the grain-filling stage, and there was no significant difference among different treatments. The yield of ‘Dongqing 18’ was significant decreased under the temperature increase condition due to the significant decreasing in spike kernel number,

收稿日期: 2021-04-06

基金项目: 西藏自治区科技厅重点科技计划(2015 ZD-15-36)

第一作者: 次仁央金,副教授,主要从事作物栽培、耕作制度及气候变化研究,E-mail:390065855@qq.com

通讯作者: 陈阜,教授,主要从事耕作制度与区域农业发展研究,E-mail:chenfu@cau.edu.cn

spike kernel weight and 1 000 kernel mass. Compared to the T treatment, the yield increased with the increase of CO₂ concentration. Therefore, the global warming has a negative effect on the highland barley. The increasing of CO₂ concentration can alleviate the trend of production reduction to a certain content. Adjustment of sowing data and selection of high temperature resistant variety could benefit the highland barley development in Tibet under global warming.

Keywords warming; highland barley; climate change; OTC; Tibet

目前,全球气候变暖,CO₂ 浓度呈现明显增加趋势,且在不同大气空间分布特征差异较大^[1-2]。大量的研究表明,气候变暖直接或间接影响作物生长发育、产量形成以及作物品质形成。增温加速了作物生长发育,缩短了生长周期,对作物生产力造成了负面影响,导致作物减产^[3-6],并且作物不同生育阶段遭遇增温对作物生长发育和产量影响不同,不同生育阶段夜间增温对小麦旗叶生育特性和产量均有显著影响^[7],冬前增温对冬小麦单产提高有积极作用^[8],花后不同增温处理均使小麦产量、穗粒数和千粒重呈下降趋势^[9-10]。同时也有研究结果显示一定程度的增温有利于作物生产,夜间温度升高对东北寒地水稻的直接效应以增产为主^[11],在高寒区域,增温降低冻害风险,有利于提升籽粒产量^[12]。二氧化碳是作物光合作用的底物^[13],浓度升高显著影响着全球气候变暖以及极端气候的形成^[14]。在增温的同时增加 CO₂ 浓度,可以增加马铃薯叶片净光合速率,增大水分利用率,有机物积累增多,经济产量提高^[15],且可以改善植物的养分状况。青藏高原地区是受气候变化影响最为明显的区域之一^[16-17],青稞是西藏区域特色作物和主粮,生态适应性强,分布广泛,同时也是高原家畜的主要饲料来源^[18-19]。

已有从不同作物种类、生育进程、产量和品质,以及作物生理生化和生长环境等方面着手,就增温、

增加 CO₂ 浓度对作物生产的影响进行了大量且深入的研究^[7-12],但关于增温和增加 CO₂ 浓度对作物生产的影响认识尚存争议,尤其对青藏高原作物响应气候变暖的机制,尚缺乏田间实证研究。本研究以西藏自治区林芝地区传统农作物冬青稞为材料,利用开顶式气室(OTC)模拟增温环境,分析冬青稞生育阶段、产量及其构成因素的变化特征,旨在明确西藏林芝地区青稞生长发育及产量对增温和 CO₂ 浓度升高的实际响应,以期为林芝地区青稞栽培和优化作物布局提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以西藏主栽冬青稞品种‘冬青 18’为材料(西藏自治区农牧科学院农业研究所提供),2017—2019 年,在西藏农牧学院实习农场(29. 67° N,94. 34° E,海拔 2 998 m)进行。试验地年平均气温为 8. 7 °C,最热月(7 月)平均气温为 18 °C,年平均降雨量 650~700 mm(图 1),年日照时数 834~2 256 h,平均为 1 651 h,年总辐射量为 3 896. 60~5 786. 60 MJ/m²,土壤为沙壤土。试验采用可控开顶式气室(Open-Top Chamber,OTC(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业部农业环境重点实验室改良)模拟增温设备^[20](图 2),用来模拟大田增温和 CO₂ 浓度升高的生长环境。

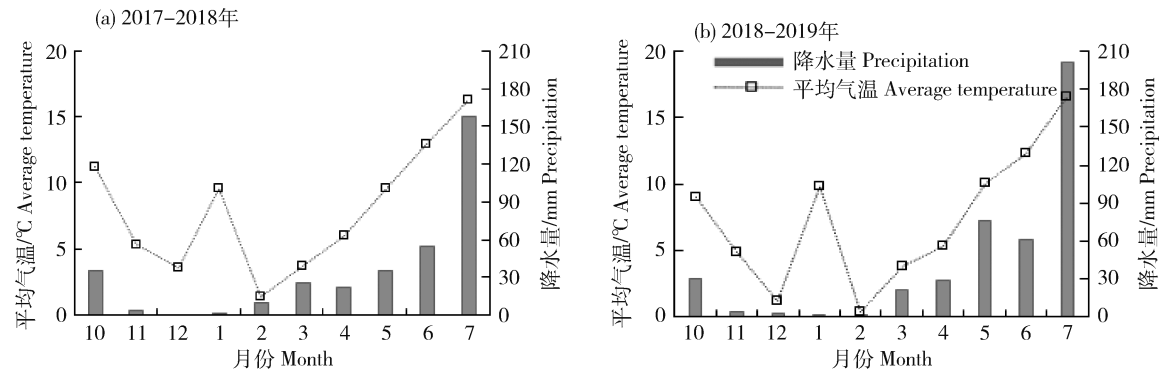
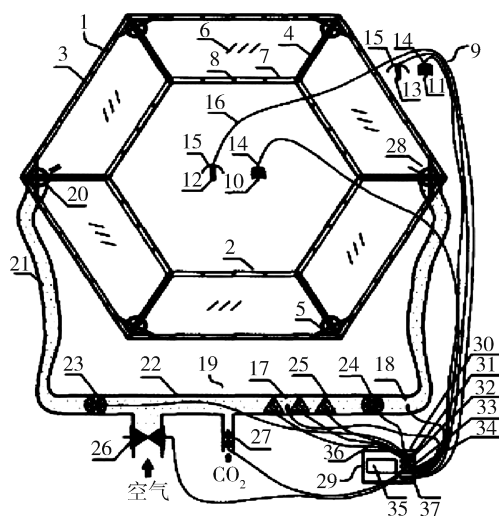


图 1 试验期间气象数据
Fig. 1 Meteorological data during the test



1. 主框架; 2. 顶框架; 3. 底框架; 4. 斜棱; 5. 固定脚; 6. 碳酸酯板; 7. 压条; 8. 固定螺钉; 9. 探头感应系统; 10. 气室内温湿度探头; 11. 气室外温湿度探头; 12. 气室内 CO₂ 探头; 13. 气室外 CO₂ 探头; 14. 防辐射罩; 15. 防水罩; 16. 探头线; 17. 加热温控; 18. 出口温控; 19. 换气加热系统; 20. 左气体释放管; 21. 空压软管; 22. 罩管; 23. 左风扇; 24. 右风扇; 25. 加热组件; 26. 空气阀; 27. CO₂ 释放阀; 28. 右气体释放管; 29. 自动控制系统; 30. 风扇控制模块; 31. 加热控制模块; 32. 阀控制模块; 33. 湿度感应模块; 34. CO₂ 感应模块; 35. 显示屏; 36. 主控板; 37. 控制箱。

1. Main frame; 2. Top frame; 3. Bottom frame; 4. Tilted aris; 5. Fix feet; 6. Polycarbonate sheet; 7. Patand; 8. Fix screw; 9. Sensor detecting system; 10. Temperature and humidity sensor inside chamber; 11. Temperature and humidity sensor outside chamber; 12. CO₂ sensor inside chamber; 13. CO₂ sensor outside chamber; 14. Radiation protection cover; 15. Water proof cover; 16. Sensor cable; 17. Temperature controller for heating; 18. Temperature controller for exit; 19. Air exchange system with heating; 20. Left gas release pipe; 21. Soft pipe for pressed air; 22. Covered pipe; 23. Left fan; 24. Right fan; 25. Heating module; 26. Solenoid valve for air; 27. Solenoid valve for CO₂; 28. Right gas release pipe; 29. Automated control system; 30. Fan control module; 31. Heating control module; 32. Solenoid valve control module; 33. Temperature and humidity detecting module; 34. CO₂ detecting module; 35. Display screen; 36. Main control board; 37. Control box.

图2 可控开顶式气室(OTC)结构俯视图^[20]

Fig. 2 Top view of improved open-top chamber (OTC) structure^[20]

1.2 试验设计

试验共设3个处理: 1) 对照(CK), OTC气室内无增温和无增施 CO₂; 2) OTC气室增温处理(T), 气室内温度相较于对照动态增加(2.0±0.2)℃, CO₂浓度与CK一致; 3) OTC增温+CO₂浓度处理(T+CO₂), 气室内温度相较于对照动态增加(2.0±0.2)℃, 且 CO₂浓度较对照动态增加(60±20) μL/L。

每个处理设3次重复, 随机区组排列, 共设9个小区。

试验地面积 26 m×24 m, 每个气室面积为 3.75 m²。于 2017 年 10 月 25 日和 2018 年 10 月 19 日播种供试材料‘冬青 18’, 播种量按 420 kg/hm², 人工开沟播种, 行距 25 cm。用磷酸二铵 225 kg/hm²重施基肥, 于翻耕前撒施在地里, 随后深翻。分别于冬青裸越冬前和返青拔节前追施尿素 54 kg/hm²作为追肥。2 年试验均于 12 月 10 日灌溉越冬水, 并进行松土除草, 其他田间管理同当地正常的栽培方式。

1.3 青稞生长发育及生理指标测定

从播种到成熟期观察记录冬青裸各生育时期, 每个处理于冬青裸灌浆期用日本 Konica Minolta SPAD-502 plus 测定旗叶叶绿素含量, 成熟期每个处理取样 20 株进行产量及构成因素测定。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 整理试验数据, 用 Origin 9.0 软件绘图, 并基于 SPSS 19.0 利用 LSD 法进行显著性检验($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 冬青裸生育期对增温及 CO₂ 浓度升高的响应特征

由图 3 可知, T 和 T+CO₂ 处理使‘冬青 18’生育期较对照显著缩短, 生育期为 204~221 d, 2017—2018 年 T 和 T+CO₂ 处理使‘冬青 18’生育期分别缩短了 12 和 17 d, 2018—2019 年分别缩短 13 和 10 d, 但 T 和 T+CO₂ 处理之间差异不显著。不同年份‘冬青 18’在播种—出苗期 T 和 T+CO₂ 处理的生育期较 CK 均显著缩短, 分别缩短 3~5 和 3~4 d; 2017—2018 年, 出苗期—孕穗期 T 和 T+CO₂ 处理的生育期差异不显著, 但 2018—2019 年 T 和 T+CO₂ 处理生育阶段呈显著缩短趋势, 缩短约 9~11 d; 抽穗—收获期 T 和 T+CO₂ 处理较 CK 生育期显著缩短, 分别缩短了约 11 和 12 d。由此可见, 温度条件是影响‘冬青 18’生育期的主要因素, 温度升高会显著缩短‘冬青 18’生育期, 且营养生长、营养和生殖并进生长和生殖生长均有缩短趋势, 而 CO₂ 浓度升高, 对于‘冬青 18’生育进程影响不显著。

2.2 冬青裸旗叶 SPAD 对增温及 CO₂ 浓度升高的响应特征

由图 4 可知, ‘冬青 18’灌浆期旗叶 SPAD 动态

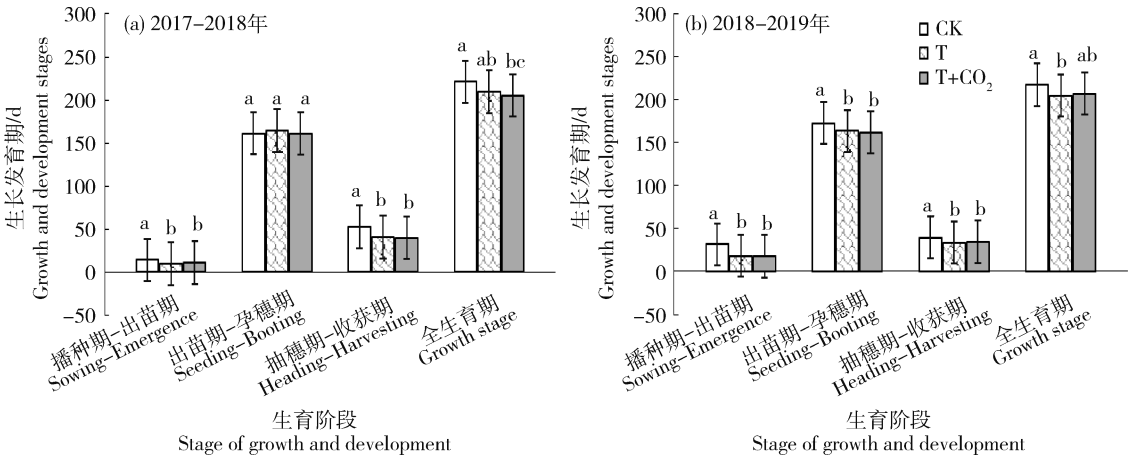


图3 2017—2018年(a)和2018—2019年(b)不同处理对‘冬青18’生育期的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on stage of growth and development of ‘Dongqing 18’ in 2017—2018 (a) and 2018—2019 (b)

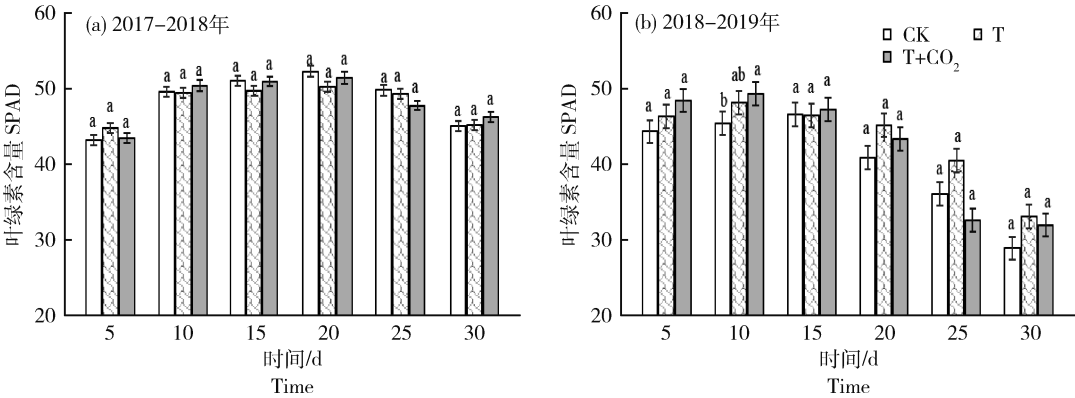


图4 2017—2018年(a)和2018—2019年(b)不同处理对‘冬青18’旗叶绿素动态变化影响

Fig. 4 Effects of different treatments on dynamic changes of SPAD in flag leaves of ‘Dongqing 18’ in 2017—2018 (a) and 2018—2019 (b)

变化总体均呈先增加后减少趋势,旗叶 SPAD 为 28.00~52.24,且 T 和 T+CO₂ 处理旗叶 SPAD 较 CK 高,最多高出 4.42,2018—2019 年 T 和 T+CO₂ 处理旗叶 SPAD 增加表现更明显,但 2017—2018 年旗叶灌浆 15、20 和 25 d 时 CK 的 SPAD 略高于 T 和 T+CO₂ 处理,2018—2019 年旗叶灌浆 25 d 时 CK 的 SPAD 高于 T+CO₂,差异不显著,这可能与 2019 年‘冬青 18’灌浆期降水量相对增加有关。由此可知,T 和 T+CO₂ 处理对‘冬青 18’灌浆期旗叶 SPAD 均无显著影响。

2.3 冬青稈产量及构成因素对增温及 CO₂ 浓度升高的响应特征

由表 1 可知,增温使‘冬青 18’产量显著降低,但增温同时增加 CO₂ 浓度(T+CO₂)对‘冬青 18’产量有弥补作用,各处理的‘冬青 18’单产从高到

低表现为 CK>(T+CO₂)>T。产量构成因素分析发现,与 CK 相比,T 和 T+CO₂ 处理的主穗粒数、主穗粒重及千粒重均显著降低;穗部农艺性状表现 T 和 T+CO₂ 处理主穗长度较 CK 显著增加,但收获指数显著降低。与 T 处理相比,T+CO₂ 促进穗长生长,千粒重显著增加,主穗粒数增加,这可能是 T+CO₂ 处理的产量显著高于 T 处理的主要原因。‘冬青 18’产量年际间差异较大,2018 年‘冬青 18’产量普遍高于 2019 年,这可能与 2019 年林芝地区初春干旱且倒春寒有一定的关系。2019 年各处理冬青稈株高较 2018 年普遍偏矮,苗期生长缓慢,后期表现早衰。说明,林芝地区在增温和 CO₂ 浓度升高背景下冬青稈有减产现象,但如果返青拔节期能确保灌溉,则有利于缓解减产趋势。

表 1 不同处理‘冬青 18’产量及其构成因素
Table 1 Effects of different treatments on yield and components of ‘Dongqing 18’

年份 Year	处理 Treatment	主穗粒数 Main spike kernel number	主穗粒重/g Main spike kernel weight	千粒重/g 1 000-kernel mass	主穗长/cm Main Spike length	收获指数 Harvest index	产量/(kg/667 m ²) Yield
2017—2018	CK	46.39±3.98 aA	2.55±0.07 aA	36.10±1.65 aA	4.41±0.75 aA	0.27±0.02 aA	300.59±26.99 aA
	T	33.64±2.73 cC	2.47±0.65 bB	31.77±5.85 cC	4.95±0.32 bB	0.23±0.03 bB	241.90±36.42 cC
	T+CO ₂	37.95±4.88 bB	2.31±0.20 bB	34.65±3.32 bB	6.39±0.45 cC	0.22±0.01 bB	280.82±29.72 bA
2018—2019	CK	44.00±5.20 aA	1.66±0.44 aA	37.30±6.15 aA	5.18±0.48 aA	0.28±0.02 bB	259.55±41.71 aA
	T	36.84±7.13 bB	1.16±0.11 bB	27.35±1.08 cC	5.54±0.49 bB	0.25±0.02 bcBC	180.35±42.66 cC
	T+CO ₂	37.78±5.99 bB	1.05±0.15 bB	31.84±3.09 bB	5.95±0.80 bB	0.21±0.03 cC	212.54±27.35 bB

注：不同的大小写字母分别表示在 0.01 和 0.05 水平上的差异显著。
Note: Different upper and lower case letters represent significant differences at the levels of 0.01 and 0.05, respectively.

3 讨论

全球气候变化对农业生产影响显著,尤其对青稞和小麦等冷凉作物的生育进程及产量影响更为明显^[21-22],C3比C4作物对CO₂浓度增加更为敏感^[23]。温度升高往往会导致作物生长发育速度增加,从而缩短作物的生育期,导致农作物减产^[24-25]。研究表明,青藏高原地区是增温敏感区域,气候变化导致青稞营养生长和生殖生长期均缩短,其中生殖生长期缩短更明显,不利于青稞灌浆,从而对产量造成不利影响^[21,26]。

气候变暖影响植物的光合作用,从而对作物生长发育和产量造成影响^[27-28]。在晚冬—早春阶段增温处理可以维持小麦旗叶较高的光合速率,其中灌浆期旗叶的SPAD提高了17.3%^[29]。此外,气候变暖会导致青稞的叶片成熟速度加快,导致光合作用持续时间变短,从而影响光合速率。也有研究表明抽穗前增温对叶绿素含量影响不大,抽穗后增温对叶绿素含量影响不断增加^[30-31]。本研究主要分析青稞灌浆期叶绿素含量的变化,发现灌浆期旗叶叶绿素含量在不同处理之间没有显著差异,但增温和增加CO₂浓度(T+CO₂)处理旗叶叶绿素含量显著高于CK。

气候变化可以通过影响作物的产量构成因素而对产量造成影响。高美玲等^[32]研究表明,全球不同气候区小麦生殖期增温造成小麦减产主要是由于千粒重和穗粒数的显著减少,生殖期增温0~5℃对小麦产量及其构成要素均呈显著负效应。气候变暖主要通过降低结实率,并最终减少穗粒数和千粒重,从而降低作物产量,还可以通过缩短灌浆进程使得籽粒质量降低从而影响产量^[32],与本研究增温处理(T)使‘冬青18’主穗粒数、主穗粒重、千粒重及收获指数呈下降趋势,造成显著减产的结果一致。杨连新等^[33]研究认为,CO₂浓度升高有利于小麦增产,且产量随CO₂浓度升高而增加,小麦产量增加17.2%~36.1%,本研究结果表明,适当升高CO₂浓度,有利于减缓增温导致的减产效应,可能是因为CO₂浓度升高使冬青稞旗叶叶绿素含量增加,促进光合作用,从而使冬青稞主穗粒数及千粒重有所增加,与张秀云等^[15]和闫鹏等^[29]研究结果基本一致。

4 结论

1)T和T+CO₂处理使‘冬青18’生育期显著

缩短,平均缩短12~20 d,主要是播种—出苗期和抽穗—成熟期缩短。

2)‘冬青18’灌浆期旗叶叶绿素总体呈先增加后降低趋势,各处理间差异不显著。

3)T处理显著降低‘冬青18’产量,较CK平均降低68.84 kg/667 m²,而T+CO₂处理使‘冬青18’产量较T处理平均增加35.55 kg/667 m²,但‘冬青18’产量年际间有差异,分析认为与生育期内的天气有关,2019年初春干旱、灌浆期雨水较2018年多,导致2019年青稞株高较矮,后期早衰,且灌浆期雨水较多,不利于籽粒灌浆,产量较2018年低。

参考文献 References

- [1] 何江浩,蔡玉林,秦鹏. 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析[J]. 科学通报, 2020, 65(S1): 194-202
He J H, Cai Y L, Qin P. Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(S1): 194-202 (in Chinese)
- [2] 李伏生,康绍忠,张富仓. 大气CO₂浓度和温度升高对作物生理生态的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1169-1173
Li F S, Kang S Z, Zhang F C. Effect of atmospheric CO₂ and temperature increment on crop physiology and ecology[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1169-1173 (in Chinese)
- [3] 张吉旺,董树亭,王空军,胡昌浩,刘鹏. 大田增温对夏玉米产量和品质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 52-56
Zhang J W, Dong S T, Wang K J, Hu C H, Liu P. Effects of high field temperature on summer maize grain yield and quality[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 52-56 (in Chinese)
- [4] 付刚,孙维,李少伟,何永涛,沈振西. 藏北高原不同海拔高寒草甸群落地上部分碳氮含量对模拟增温的响应[J]. 生态环境学报, 2015, 24(7): 1093-1097
Fu G, Sun W, Li S W, He Y T, Shen Z X. Response of community aboveground parts carbon and nitrogen content to experimental warming in an alpine meadow at three elevations in the northern Tibet[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(7): 1093-1097 (in Chinese)
- [5] 李向东,张德奇,王汉芳,邵运辉,方保停,吕凤荣,岳俊芹,马富举. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 839-846
Li X D, Zhang D Q, Wang H F, Shao Y H, Fang B T, Lv F R, Yue J Q, Ma F J. Effects of temperature increase on growth and yield of wheat before overwintering[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 839-846 (in Chinese)
- [6] 胡阳阳,卢红芳,刘卫星,康娟,马耕,李莎莎,褚莹莹,王晨

- 阳. 灌浆期高温与干旱胁迫对小麦籽粒淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J]. 作物学报, 2018, 44(4): 591-600
- Hu Y Y, Lu H F, Liu W X, Kang J, Ma G, Li S S, Chu Y Y, Wang C Y. Effects of high temperature and drought stress on activities of key enzymes in starch synthesis and starch accumulation in wheat grains during grain filling stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2018, 44(4): 591-600 (in Chinese)
- [7] 刘秋霞, 樊惠惠, 罗音, 王华斌, 武倩倩, 张文静, 马尚宇, 黄正来. 不同阶段夜间增温对小麦生长特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(5): 642-631
- Liu Q X, Fan Y H, Luo Y, Wang H B, Wu Q Q, Zhang W J, Ma S Y, Huang Z L. Effects of night warming at different stages on growth characteristics and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(5): 624-631 (in Chinese)
- [8] 孟自力, 闫向泉, 朱倩, 倪雪峰, 朱伟. 越冬前增温对商麦156生长发育的影响[J]. 山西农业科学, 2018, 46(6): 923-925
- Meng Z L, Yan X Q, Zhu Q, Ni X F, Zhu W. Effect of temperature increased before over-wintering period on the growth of Shangmai 156[J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(6): 923-925 (in Chinese)
- [9] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 王绍华. 花后开放式增温对小麦产量及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1489-1498
- Bian X B, Chen D D, Wang Q S, Wang S H. Effects of different day and night temperature enhancements on wheat grain yield and quality after anthesis under free air controlled condition[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(8): 1489-1498 (in Chinese)
- [10] 费立伟, 代兴龙, 张秀, 初金鹏, 李梅, 郑飞娜, 贺明荣. 花后高温胁迫下晚播对冬小麦灌浆特性和粒重的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(3): 479-488
- Fei L W, Dai X L, Zhang X, Chu J P, Li M, Zheng F N, He M R. Effect of late sowing on grain filling characteristics and grain weight in winter wheat under heat stress after flowering[J]. *Plant Physiology Journal*, 2020, 56(3): 479-488 (in Chinese)
- [11] 陈金, 田云录, 董文军, 侯立刚, 马巍, 徐志宇, 张卫建. 东北水稻生长发育和产量对夜间升温的响应[J]. 中国水稻科学, 2013, 27(1): 84-90
- Chen J, Tian Y L, Dong W J, Hou L G, Ma W, Xu Z Y, Zhang W J. Response of rice growth, development and yield to nocturnal warming in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2013, 27(1): 84-90 (in Chinese)
- [12] Choi B, Jang Y, Khulan S, Cho J W. Effect of warming treatment on the cold resistance and yield characteristics of Barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties during winter season[J]. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 2020, 23: 427-432
- [13] 李彦生, 金剑, 刘晓冰. 作物对大气CO₂浓度升高生理响应研究进展[J]. 作物学报, 2020, 46(12): 1819-1830
- Li Y S, Jin J, Liu X B. Physiological response of crop to elevated atmospheric carbon dioxide concentration: A review[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1819-1830 (in Chinese)
- [14] 吕政翰. 中国大气二氧化碳浓度时空变化特征及其影响因素分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2019
- Lv Z H. Spatial and temporal variation characteristics of atmospheric carbon dioxide concentration and its influencing factors in China [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2019 (in Chinese)
- [15] 张秀云, 姚玉璧, 雷俊, 牛海洋, 赵鸿. CO₂浓度升高与增温对马铃薯产量及品质的复合影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 240-246
- Zhang X Y, Yao Y B, Lei J, Niu H Y, Zhao H. Collaborative impact of elevated CO₂ concentration and temperature on potato yield and quality[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(4): 240-246 (in Chinese)
- [16] 李东昇, 张仁勇, 崔步礼, 赵云朵, 王莹, 姜宝福. 1986—2015年青藏高原哈拉湖湖泊动态对气候变化的响应[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 501-512
- Li D S, Zhang R Y, Cui B L, Zhao Y D, Wang Y, Jiang B F. Response of lake dynamics to climate change in the Hala Lake Basin of Tibetan Plateau from 1986 to 2015[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 501-512 (in Chinese)
- [17] 李菲, 郇永祺, 万欣, 李倩, 郭东林, 王朋岭, 李惠心. 全球变暖与地球“三极”气候变化[J]. 大气科学学报, 2021, 44(1): 1-11
- Li F, Gao Y Q, Wan X, Li Q, Guo D L, Wang P L, Li H X. Earth's "three-poles" climate change under global warming[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(1): 1-11 (in Chinese)
- [18] 郭本兆, 王世金, 李健华. 大麦属的属间亲缘和属下分类的研究[J]. 西北植物学报, 1986, 6(1): 23-31
- Guo B Z, Wang S J, Li J H. A study on the relationships among the genera and the classification under the genus of *Hordeum* L [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 1986, 6(1): 23-31 (in Chinese)
- [19] 臧靖巍, 阚建全, 陈宗道, 赵国华. 青稞的成分研究及其应用现状[J]. 中国食品添加剂, 2004, 4(6): 43-46
- Zang J W, Kan J Q, Chen Z D, Zhao G H. Applications of barley and study on its components[J]. *China Food Additives*, 2004, 4(6): 43-46 (in Chinese)
- [20] 万运帆, 游松财, 李玉娥, 王斌, 高清竹, 秦晓波, 刘硕. 开顶式气室原位模拟温度和CO₂浓度升高在早稻上的应用效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 123-130
- Wan Y F, You S C, Li Y E, Wang B, Gao Q Z, Qin X B, Liu S. Applied effect of improved open-top chamber on simulation in situ of elevating air temperature and CO₂ concentration in early rice field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 123-130 (in Chinese)
- [21] 弓开元. 青藏高原青稞产量和光温生产潜力对气候变化的响

应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020

Gong K Y. Responses of yield and photo-temperature potential productivity of highland barley to climate change in the Tibetan Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020 (in Chinese)

[22] 邓振镛, 王强, 张强, 倾继祖, 杨启国, 袁志鹏, 刘文婧, 徐金芳. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278-6288

Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, Qing J Z, Yang Q G, Yuan Z P, Liu W J, Xu J F. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6278-6288 (in Chinese)

[23] 王建林, 温学发, 赵风华, 房全孝, 杨新民. CO₂ 浓度倍增对 8 种作物叶片光合作用、蒸腾作用和水分利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 438-446

Wang J L, Wen X F, Zhao F H, Fang Q X, Yang X M. Effects of doubled CO₂ concentration on leaf photosynthesis, transpiration and water use efficiency of eight crop species[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(5): 438-446 (in Chinese)

[24] 杨敏慎, 刘晓雨, 郭辉. 气候变暖和 CO₂ 浓度升高对农作物的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(1): 246-258

Yang M S, Liu X Y, Guo H. Effects of climate warming and elevated CO₂ concentration on crops[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(1): 246-258 (in Chinese)

[25] 郭建平, 高素华. 高温、高 CO₂ 对农作物影响的试验研究[J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 17-20

Guo J P, Gao S H. The experimental study on impacts of high temperature and high CO₂ concentration on crop[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2002, 10(1): 17-20 (in Chinese)

[26] 徐华军, 杨晓光, 王文峰, 徐超. 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, Xu C. 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)

[27] 张丽霞, 尹季显. 气候变暖对农作物物候、光合生理特性和产量影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 201-218

Zhang L X, Yin J X. Research progress about the effects of climate warming on crop phenology, photosynthetic physiological characteristics and yield[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, 43(29): 201-218 (in Chinese)

[28] 袁漫漫, 朱建国, 刘钢, 王伟露. 不同天气水稻光合日变化对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应—FACE 研究[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1897-1907

Yuan M M, Zhu J G, Liu G, Wang W L. Response of diurnal variation in photosynthesis to elevated atmospheric CO₂ concentration and temperature of rice between cloudy and sunny days: A free air CO₂ enrichment study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1897-1907 (in Chinese)

[29] 闫鹏, 孙小诺, 杜雄, 高震, 边大红. 晚冬早春阶段增温对冬小麦光合性能及旗叶衰老的调控作用[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2581-2592

Yan P, Sun X N, Du X, Gao Z, Bian D H. Effects of temperature on photosynthetic performance and flag leaf senescence of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2581-2592 (in Chinese)

[30] 张玮玮, 姜运生, 朱怀卫, 肇思迪, 石一凡. 夜间增温对水稻生长、生理特性及产量构成的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(2): 88-95

Zhang Y W, Lou Y S, Zhu H W, Zhao S D, Shi Y F. Impacts of Night Warming on Rice Growth, Physiological Properties and Yield Components[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(2): 88-95 (in Chinese)

[31] 杨卫君, 吴高明, 高文翠, 张金汕, 石书兵, 贾永红. 增温对北疆灌区冬小麦生长光合和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(12): 1512-1518

Yang W J, Wu G M, Gao W C, Zhang J S, Shi S B, Jia Y H. Warming effects on winter wheat in irrigation region of northern Xinjiang[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(12): 1512-1518 (in Chinese)

[32] 高美玲, 唐灵云, 吴正肖, 张旭博, 孙志刚, 孙楠, 高永华, 张崇玉. 全球不同气候区小麦产量构成要素对生殖期增温的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1247-1256

Gao M L, Tang L Y, Wu Z X, Zhang X B, Sun Z G, Sun N, Gao Y H, Zhang C Y. Response of wheat yield components in global climatic zones to the warming during reproductive period[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(7): 1247-1256 (in Chinese)

[33] 杨连新, 李世峰, 王余龙, 黄建晔, 杨洪建, 董桂春, 朱建国, 刘钢. 开放式空气二氧化碳浓度增高对小麦产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(1): 75-80

Yang L X, Li S F, Wang Y L, Huang J Y, Yang H J, Dong G C, Zhu J G, Liu G. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on yield formation of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 75-80 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅