

增温对不同土壤上冬小麦保护酶活性的影响

金丽惠, 冯茜, 潘仕球, 苗淑杰, 乔云发

引用本文:

金丽惠, 冯茜, 潘仕球, 苗淑杰, 乔云发. 增温对不同土壤上冬小麦保护酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1228-1237.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1178>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施氮水平对冬小麦冠层氨挥发的影响

景建元, 孙晓, 杨阳, 李娜, 田肖肖, 吕慎强, 王林权

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 401-408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1233>

农田管理对夜间增温稻-麦农田CH₄和N₂O排放强度的影响

陈佳义, 李君, 姜运生, 张震, 马莉, 李睿

农业环境科学学报. 2023, 42(5): 1166-1180 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0922>

开顶式气室的内外环境差异及其对小麦生长的影响

童思思, 孙旭, 郑飞翔, 王效科

农业环境科学学报. 2023, 42(1): 17-26 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0332>

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650-1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

黄土高原潜在缺锌区施用纳米氧化锌(ZnO NPs)对冬小麦生长及籽粒品质的影响

孙宏达, 钟民正, 张腾, 翟丙年, 王朝辉, 毛晖

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2041-2048 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1499>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

金丽惠, 冯茜, 潘仕球, 等. 增温对不同土壤上冬小麦保护酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1228–1237.

JIN L H, FENG Q, PAN S Q, et al. Effects of warming on protective enzyme activities of winter wheat in different soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1228–1237.

增温对不同土壤上冬小麦保护酶活性的影响

金丽惠¹, 冯茜¹, 潘仕球², 苗淑杰¹, 乔云发^{1*}

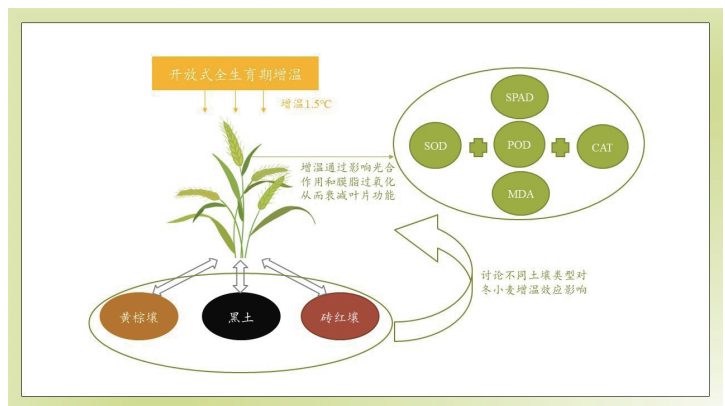
(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 桂林市气象局, 广西 桂林 541001)

摘要:为探究全球气候变暖背景下冬小麦生长发育情况,通过全生育期增温,研究温度升高对冬小麦叶片保护酶活性和产量的影响。2021年11月,在南京信息工程大学农业气象试验站进行框栽试验,以常温为对照(CK),以开放式增温装置模拟大气增温1.5℃(eT)条件,以在南移的黑龙江黑土、北移的海南砖红壤和江苏南京黄棕壤上生长的冬小麦为研究材料,以成熟期小麦株高、单穗粒数、千粒质量等指标体现生长量的变化,以拔节期和开花期冬小麦叶片的叶绿素(SPAD)和丙二醛(MDA)含量,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性等指标表征保护酶系统的变化。结果表明:全生育期增温使生长在黄棕壤、黑土和砖红壤上的小麦叶

绿素含量分别显著减少了9.51%、19.03%和4.60%,使开花期MDA含量分别显著增加了10.59%、14.83%和13.72%,说明增温通过影响光合作用和膜脂过氧化衰减了叶片功能使开花期叶片SOD、POD和CAT活性显著升高,这表明冬小麦叶片在增温条件下仍保持了较高的抗氧化能力。相关性分析表明,开花期MDA含量、POD活性与产量指标呈显著负相关($P<0.05$)。此外,全生育期增温显著降低了生长在黄棕壤和黑土上冬小麦的株高、单穗粒数和千粒质量,最终导致产量分别减少33.86%和16.53%,然而黑土上生长的冬小麦各参数对增温的响应程度低于黄棕壤。增温导致砖红壤上生长的冬小麦千粒质量有所降低,但是最终产量未达到5%的显著差异。综合而言,增温能通过降低光合作用、提升膜脂过氧化水平导致冬小麦生长减缓,且这种减缓作用在黑龙江黑土冬小麦上的效应较弱,但对黄棕壤上的冬小麦影响较大。

关键词:冬小麦;全生育期增温;土壤类型;保护酶系统;产量

中图分类号:S154.2;S512.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2023)06-1228-10 **doi:**10.11654/jaes.2022-1178



Effects of warming on protective enzyme activities of winter wheat in different soils

JIN Lihui¹, FENG Qian¹, PAN Shiqiu², MIAO Shujie¹, QIAO Yunfa^{1*}

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Guilin Meteorological Bureau, Guilin 541001, China)

收稿日期:2022-11-17 录用日期:2023-02-12

作者简介:金丽惠(1999—),女,湖南怀化人,硕士研究生,从事农业气象与全球变化研究。E-mail:jinlihui554@163.com

*通信作者:乔云发 E-mail:qiaoyunfa@nuist.edu.cn

基金项目:江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金项目(BE2022312);江苏省农业自主创新项目[CX(21)3170]

Project supported: The R&D Foundation of Jiangsu Province, China(BE2022312); Jiangsu Agriculture Science and Technology Innovation Fund [CX(21)3170]

Abstract: To explore the development of winter wheat production under global warming, the effects of elevated temperature on leaf protective enzyme activity and winter wheat yield during the vegetative and reproductive growth periods were studied by experimental warming during the whole growth period. In November 2021, a frame-planting experiment was conducted at the Agricultural Meteorological Experimental Station of Nanjing University of Information Science and Technology. Ambient air temperature was designed as control (CK), and an open warming device was used to simulate an atmospheric temperature increase of 1.5 °C (eT). Winter wheat grown on black soil (from Heilongjiang), brick red soil (from Hainan), and yellow-brown soil (from Nanjing) was the focus of this research. The changes in growth amount at the maturity stage were reflected by indicators such as plant height, kernel number per panicle, and 1 000-grain weight. The contents of chlorophyll (SPAD) and malondialdehyde (MDA), and the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in wheat leaves of jointing and flowering stages were used to characterize the protective enzyme system. The results showed that elevated temperature significantly reduced the chlorophyll content of wheat grown on yellow-brown soil, black soil, and brick red soil by 9.51%, 19.03% and 4.60%, respectively, and increased the MDA content at the flowering stage by 10.59%, 14.83% and 13.72%. This indicates that warming attenuated leaf function by affecting photosynthesis and membrane lipid peroxidation. Significantly increased SOD, POD, and CAT activities in wheat leaves during the flowering stages indicates that winter wheat leaves maintain a high protective capacity under warming conditions. MDA content and POD activity showed significant negative correlation with yield during the reproductive growth period. In addition, elevated temperature significantly decreased plant height, kernel number per panicle and 1 000-grain weight of wheat grown on yellow-brown and black soils, leading to a 33.86% and 16.53% yield reduction, respectively. The degree of response of wheat grown in black soil to elevated temperature is weaker than that of wheat grown in yellow-brown soil. The 1 000-grain weight of wheat grown in brick red soil was decreased by elevated temperature, but the yield did not decrease significantly. In general, warming slows the growth of winter wheat by reducing photosynthesis and increasing the level of membrane lipid peroxidation. This mitigation effect is weaker on winter wheat in black soil, but stronger on that in yellow-brown soil.

Keywords: winter wheat; warming throughout the growth period; soil type; protective enzyme activity; yield

全球变暖背景下,温度升高已成为作物生长过程中的重要非生物胁迫因子之一^[1],将对全球范围内的农作物生长发育、产量形成和粮食安全产生直接影响^[2-3]。研究表明,全球变暖减少了我国东北区作物高产稳产面积^[4],削弱了作物抗寒和抗病能力^[5]。Juroszek等^[6]对气候变化驱动下的作物病害风险模拟发现,温度升高使得小麦患叶锈病的风险大幅提高。冬小麦作为我国的三大粮食作物之一,具有重要地位。因此,研究冬小麦生长发育对温度升高的适应性响应,对在全球变暖背景下指导冬小麦生产具有重要意义。

我国冬小麦种植面积大、范围广,从寒温带逐步过渡到温带、亚热带和热带地区^[7]。我国北部冬麦区、长江中下游冬麦区、西南冬麦区和华南冬麦区的冬小麦生长、物候、产量对气候变暖均有不同响应^[8-11]。例如,增温既有提高华北平原壤质潮土和长江中下游地区棕壤上小麦生理活性、延缓衰老并增加产量的正效应^[12-13],也有加速上述两地区褐土和黄棕壤上生长的小麦功能叶片衰老、影响干物质分配、造成减产的负效应^[14-16]。由此可见,增温对冬小麦叶片生理活性及产量的影响存有争议,这种不确定性是不同麦区的农业气候资源和土壤类型的差异所致^[17-18]。当前气候变暖情境下,冬春季的增温幅度较夏秋季高^[19]。冬小麦属于喜凉作物,全生育期历经冬春两

季,常在秋末冬初播种,春季正是营养生长关键期,小麦叶片生理特性对增温的响应会影响其发育和衰老进程,进而影响产量。研究发现:花后8~10 d增温导致小麦旗叶超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)活性明显上升^[20];灌浆期小麦叶片SOD、超氧化物酶(POD)和CAT活性在高温处理下很快被诱导增强,以清除体内活性氧^[21];早春时期增温提高了SOD和POD活性,降低了旗叶丙二醛(MDA)含量^[22];小麦扬花后期高温处理降低了叶片SOD和POD活性,生理功能明显衰退^[23]。不同地区冬小麦生长对温度升高的响应差异,可能还受光照、降水等其他气象因子的调控,因此有必要在相同气候条件下,进行不同类型土壤上生长的小麦适应增温的生理效应研究。

目前,关于增温对冬小麦叶片保护酶及产量的影响研究多集中于原位气候区,但这些研究无法排除其他气候因子差异的影响。前人在水热条件和土壤性质对农田土壤硝化作用的影响研究^[24]以及不同气候和土壤条件下玉米产量的预测研究中^[25],将不同类型土壤移位至同一地区进行试验,排除了除温度以外的其他气候因子。因此本研究也采用空间移位法^[26],将东北地区的黑龙江黑土与华南地区的海南砖红壤移至江苏南京,同时与江苏南京黄棕壤进行对比试验,利用开放式增温装置模拟大气增温1.5 °C,分析小麦

叶片在营养和生殖阶段的叶绿素含量、保护酶系统的变化以及产量及其构成因子的差异,以期在当前气候变暖背景下的小麦生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于2021年11月至2022年5月在南京信息工程大学农业气象试验站(32.16° N, 118.86° E)进行,该区域地处北亚热带季风气候区,四季分明,雨水充沛,年均气温为15.5℃,多年平均降水量为1 019.5 mm。

1.2 植物材料及处理

供试冬小麦品种为“镇麦168”,于2021年11月11日播种,播种密度为每框5穴,每穴3粒。肥料施用按照当地常规施肥量,包括尿素0.35 g·pot⁻¹,磷酸氢二铵3.5 g·pot⁻¹,硫酸钾1 g·pot⁻¹,在苗期每框选定长势一致的5株保留,田间杂草用手拔出,正常田间管理。2022年5月14日成熟收获,分析产量及其构成参数。

1.3 试验设计

试验采用裂区框栽试验设计,主区为对照(常温,CK)和增温(1.5℃,eT)两个处理,处理间设置5 m保护行。其中,增温处理小区采用开放式增温系统(Free Air Temperature Increase, FATI)对冬小麦进行全生育期增温,红外辐射加热器(165 cm×15 cm, MR-2420, 美国)高度保持在小麦冠层上方50 cm处,并随小麦生长调整装置高度。同时用温湿度记录仪(L92-1*型)监测两种处理小麦冠层的每小时温度,生育期内冠层日均气温变化如图1所示。

副区为3种典型农田土壤,分别为华东地区江苏黄棕壤(Ybs, 32°13' N, 118°43' E)、东北地区黑龙江黑土(Bls, 47°26' N, 126°38' E)和华南地区海南砖红壤(Las, 19°10' N, 108°57' E),其中黑龙江黑土和海

南砖红壤于2017年6月从各原位区域取原状土,取土深度为50 cm,供试土壤基础参数如表1所示。框栽采用PVC材质无底圆柱(直径33 cm, 深度50 cm)。每个处理3次重复,随机排列。

表1 供试土壤理化性质

Table 1 The physical and chemical properties of soil in different areas

土壤类型 Soil type	pH	碱解氮 Avail. N/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Avail. P/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Avail. K/ (mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter/ (g·kg ⁻¹)
黄棕壤 Ybs	5.85	63.02	16.30	88.50	15.42
黑土 Bls	6.22	204.84	45.62	211.28	55.21
砖红壤 Las	4.60	107.21	23.74	92.10	33.36

1.4 测定项目与方法

小麦于成熟后收获,带回室内测定株高,调查单穗粒数、有效穗数、千粒质量以及每盆产量^[27]。

在冬小麦拔节期和开花期分别选取小麦旗叶样品,利用SPAD-502型叶绿素测定仪测定叶绿素含量(SPAD),参考孔祥生等^[28]的方法测定丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性,参考李合生^[29]的方法测定过氧化物酶(POD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性。

1.5 数据分析与处理

采用Excel 2019进行数据处理,JMP 10.0进行双因素方差分析(Two-way ANOVA),比较在0.05水平上不同处理间的显著性差异。对各生理指标和产量之间进行Pearson相关性分析。利用Origin 2018绘图。

2 结果与分析

2.1 增温对不同类型土壤中生长的冬小麦产量的影响

增温对不同类型土壤中生长的冬小麦产量及其构成因素均产生了影响(表2)。在常温条件下,生长

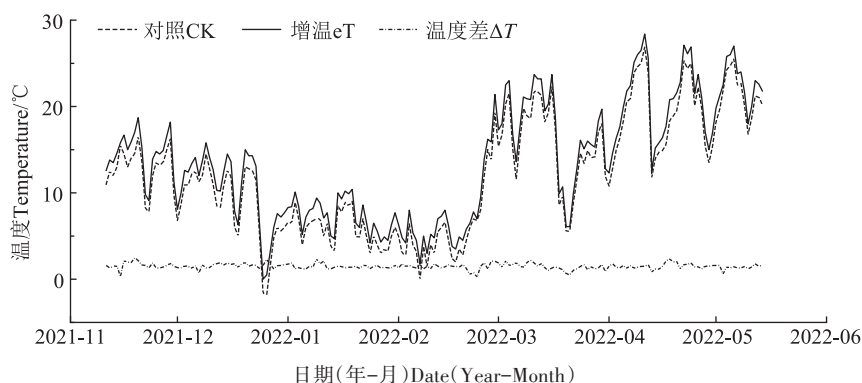


图1 全生育期冬小麦冠层日均气温变化

Figure 1 Variation of daily average temperature of winter wheat canopy during whole growth period

在黄棕壤中的小麦株高、有效穗数和千粒质量在3种土壤中最髙,其中,株高和有效穗数均与砖红壤中的小麦存在显著差异($P<0.05$),千粒质量与黑土上的小麦差异显著。砖红壤上生长的小麦产量分别较黄棕壤和黑土低31.96%和34.45%($P<0.05$)。与常温条件相比,增温处理下黄棕壤、黑土和砖红壤上的小麦株高分别降低了10.8%、5.84%和12.55%($P<0.05$),黄棕壤和黑土上小麦单穗粒数分别降低10.22%和4.43%($P<0.05$),3种土壤上小麦的有效穗数均未见显著差异,千粒质量在黄棕壤和砖红壤上表现为显著降低。最终,黄棕壤和黑土上生长的小麦对增温表现出显著减产,砖红壤无显著响应,其中黄棕壤减产幅度最大。综上所述,不同土壤类型上的小麦产量构成均对增温产生了响应,且响应程度有所不同。

2.2 增温对不同类型土壤中生长的小麦叶片叶绿素含量(SPAD)的影响

从图2可以看出,与常温处理相比,增温显著降

低了小麦叶片叶绿素含量,且不同土壤类型间存在差异($P<0.05$)。拔节期,在黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦的SPAD值表现为增温处理较对照分别下降12.74%、18.33%和14.42%。对3种类型土壤上小麦的SPAD值进行比较可知,常温条件下,黑土显著高于黄棕壤($P<0.05$),砖红壤与另外两种土壤均未达到显著差异;增温条件下,3种土壤上小麦叶片SPAD值之间均无显著差异。开花期,黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片的SPAD值表现为增温处理较对照分别下降了9.51%、19.03%和4.60%。3种土壤类型进行对比可知,常温条件下表现为砖红壤>黑土>黄棕壤($P<0.05$),增温条件下黄棕壤和黑土上生长的小麦叶片SPAD值无显著差异,但较砖红壤分别降低了19.24%和21.25%。

2.3 增温对不同类型土壤中生长的小麦叶片保护酶活性的影响

2.3.1 丙二醛(MDA)含量

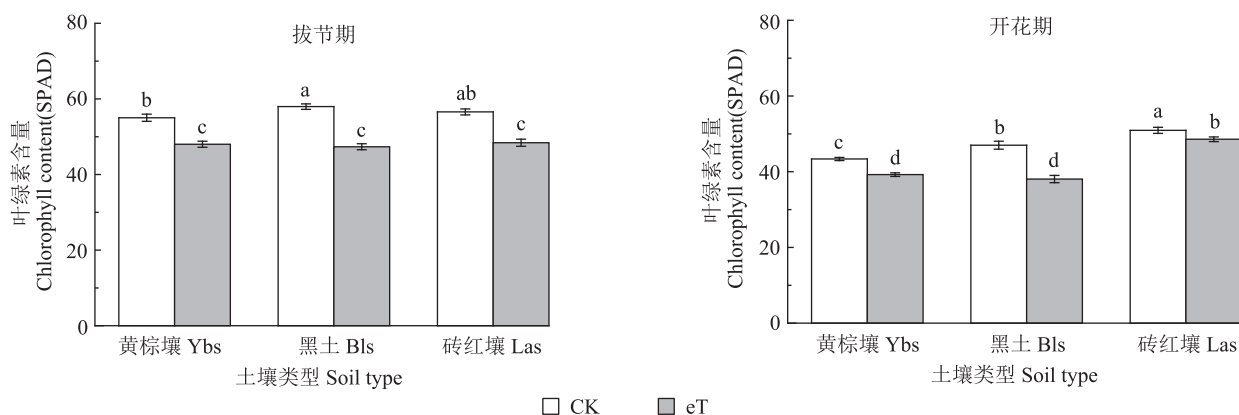
表2 增温对不同类型土壤中小麦产量构成的影响

Table 2 Effects of warming on yield composition of wheat in different soil types

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	单穗粒数 Grain number per spike	有效穗数 Ear number per pot	千粒质量 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(g·pot ⁻¹)
黄棕壤 Ybs	CK	73.90±0.44a	30.22±0.63b	19.33±1.15a	48.00±0.62a	27.97±0.45a
	eT	65.92±1.25d	25.09±0.73c	18.67±0.58a	39.63±0.55c	18.50±0.72c
黑土 Bls	CK	73.66±1.47ab	33.66±0.11a	19.00±1.00a	45.43±0.58b	29.03±1.14a
	eT	69.36±1.37c	30.51±0.31b	18.00±1.00a	44.10±0.96b	24.23±0.72b
砖红壤 Las	CK	70.29±1.11bc	31.75±1.28b	12.67±0.58b	47.27±0.47a	19.03±0.61c
	eT	61.47±1.49e	31.70±0.45b	13.33±1.53b	45.52±0.28b	19.27±0.67c

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).



不同小写字母表示在同一时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

The different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same period ($P<0.05$). The same below.

图2 增温对不同类型土壤中小麦拔节期和开花期SPAD值的影响

Figure 2 Effects of warming on SPAD values of wheat at jointing and flowering stages in different soil types

与常温对照相比,增温显著降低了拔节期小麦叶片MDA含量,而显著增加了开花期小麦叶片MDA含量($P<0.05$,图3)。在拔节期,黄棕壤和砖红壤上生长的小麦MDA含量表现为增温处理较对照分别下降了11.40%和28.76%,而黑土对增温响应不显著。3种类型土壤上的小麦叶片MDA含量进行比较可知:在常温条件下,MDA含量表现为砖红壤>黄棕壤>黑土($P<0.05$);增温条件下,黄棕壤和黑土上生长的小麦叶片MDA含量无显著差异,但分别较砖红壤增加了12.82%和12.45%($P<0.05$)。在开花期,增温处理下黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片MDA含量较对照分别升高了10.59%、14.83%和13.72%。3种土壤类型进行对比可知:常温条件下,MDA含量表现为砖红壤>黄棕壤>黑土($P<0.05$);增温处理下,砖红壤上生长的小麦叶片MDA分别显著高于黄棕壤和黑土12.13%和13.53%($P<0.05$)。

2.3.2 超氧化物歧化酶(SOD)活性

由图4可见,与常温对照相比,增温对拔节期和开花期小麦叶片SOD活性的影响不同($P<0.05$)。拔节期增温处理使黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片SOD活性分别下降了29.63%、36.04%和5.37%。3种类型土壤上的小麦叶片SOD活性间进行比较可知:在常温条件下,黄棕壤和黑土之间无显著差异,而两者分别较砖红壤高32.37%和21.18%($P<0.05$);在增温处理下,黄棕壤上小麦叶片SOD活性显著高于黑土和砖红壤,黑土和砖红壤之间无显著差异。开花期黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片SOD活性表现为增温处理较对照分别升高了8.84%、45.20%和71.89%。3种类型土壤间进行比较可知:在常温条件下,黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦SOD活性逐渐降低,且差异显著($P<0.05$);在增温条件下,黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦SOD活性逐渐增加,

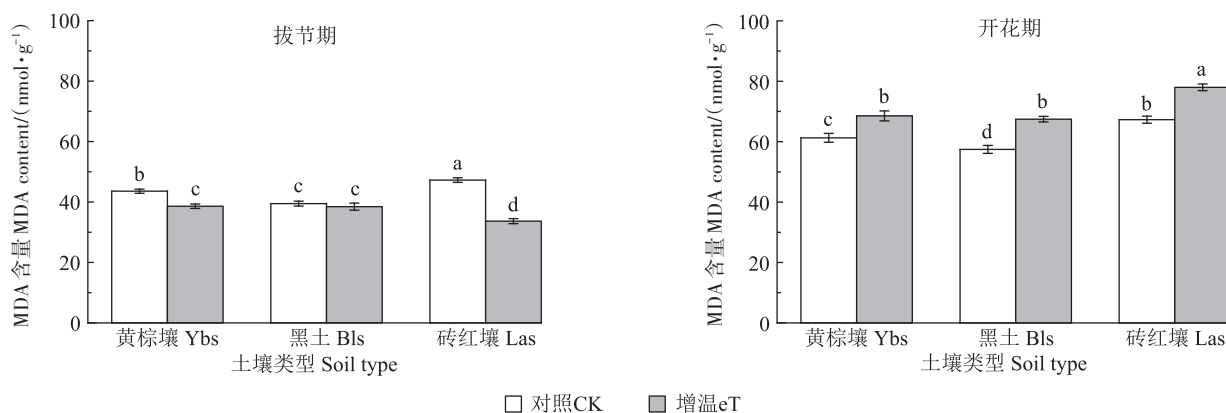


图3 增温对不同类型土壤中小麦拔节期和开花期MDA含量的影响

Figure 3 Effects of warming on MDA content of wheat at jointing and flowering stages in different soil types

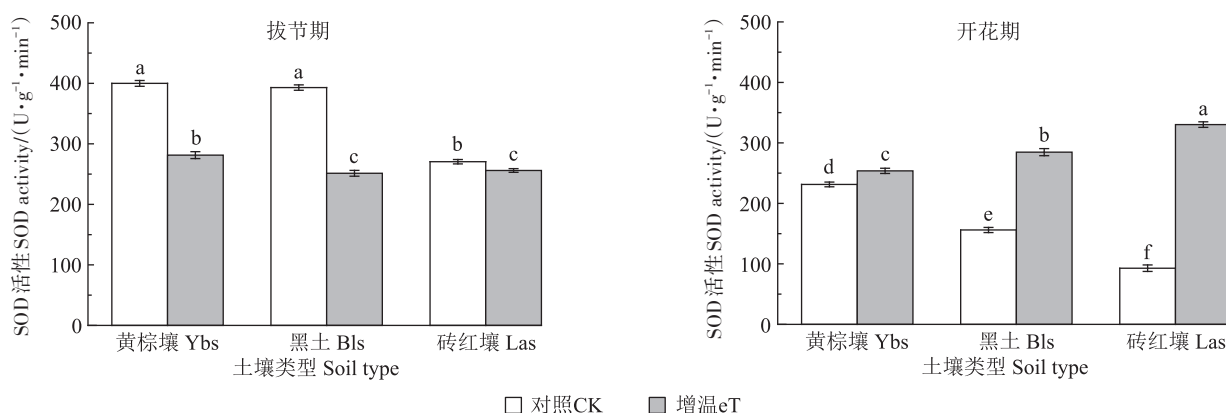


图4 增温对不同类型土壤中小麦拔节期和开花期SOD活性的影响

Figure 4 Effects of warming on SOD activity of wheat at jointing and flowering stages in different soil types

且同样差异显著($P<0.05$)。

2.3.3 过氧化物酶(POD)活性

与常温处理相比,增温仅显著增加了黑土上生长的小麦拔节期叶片POD活性;而开花期,增温处理下3种土壤上小麦叶片POD活性均显著增加($P<0.05$,图5)。在拔节期,常温处理下,3种类型土壤上小麦POD活性均无显著差异;而增温条件下,砖红壤分别显著低于黄棕壤和黑土17.34%和21.07%($P<0.05$)。在开花期,黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片POD活性表现为增温较对照分别升高53.20%、36.90%和37.81%。3种类型土壤间相比:常温处理下,黄棕壤、黑土和砖红壤上的小麦叶片POD活性逐渐升高,且差异显著($P<0.05$);增温处理下,黄棕壤和黑土上生长的小麦叶片POD活性之间差异不显著,但分别较砖红壤处理降低了46.61%和45.50%。

2.3.4 过氧化氢酶(CAT)活性

从图6可以看出,增温对小麦叶片CAT活性的影响在拔节期和开花期正好相反($P<0.05$)。在拔节期,

黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片CAT活性表现为增温处理较对照分别下降了36.81%、46.07%和57.39%。3种类型土壤上的小麦叶片CAT活性进行比较可知:常温条件下,黄棕壤和砖红壤之间未达到显著差异,但均显著高于黑土($P<0.05$);增温条件下,黑土和砖红壤之间未达到显著差异,但分别显著低于黄棕壤29.87%和36.98%。在开花期,黄棕壤、黑土和砖红壤上生长的小麦叶片CAT活性表现为增温处理较对照分别升高了46.24%、35.1%和13.19%($P<0.05$)。3种类型土壤上的小麦叶片CAT活性进行比较可知:常温条件下,黑土和砖红壤之间未表现出显著差异,但较黄棕壤均增加了20.40%;增温条件下,黄棕壤和黑土之间未达到显著差异,但分别显著高于砖红壤22.20%和25.93%。

2.4 相关性分析

2.4.1 产量构成要素与产量的相关分析

影响产量的主要构成要素是株高和有效穗数,相关分析结果见表3。结合表2可知,增温显著降低了

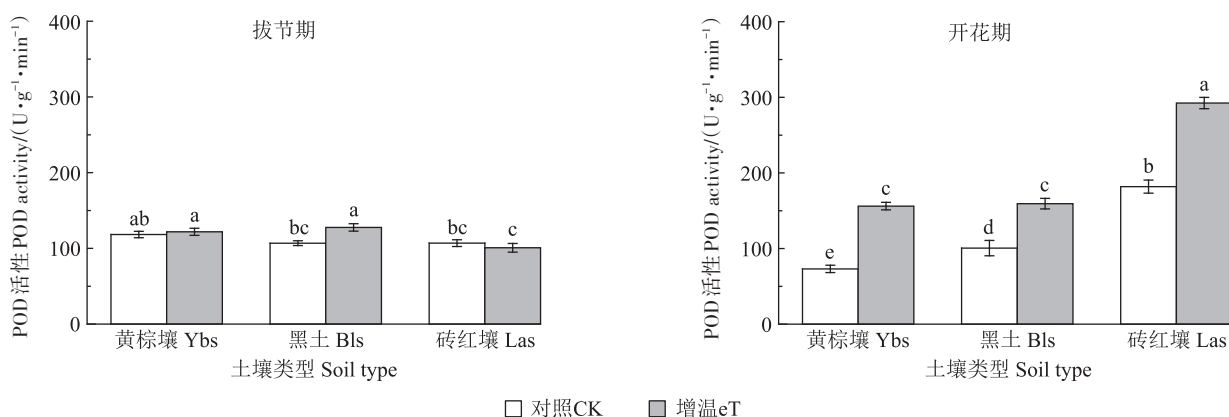


图5 增温对不同类型土壤中小麦拔节期和开花期POD活性的影响

Figure 5 Effects of warming on POD activity of wheat at jointing and flowering stages in different soil types

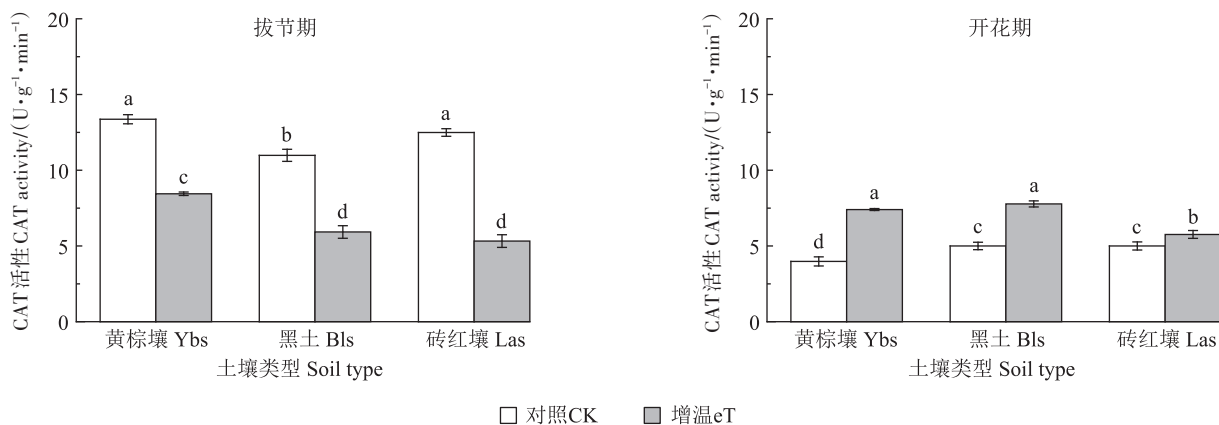


图6 增温对不同类型土壤中小麦拔节期和开花期CAT活性的影响

Figure 6 Effects of warming on CAT activity of wheat at jointing and flowering stages in different soil types

表 3 小麦产量及其构成因素的相关分析
Table 3 Correlation analysis of wheat yield and its components

产量构成指标 Production composition	相关系数 Correlation coefficient				
	株高 Plant height	单穗粒数 Grain number per spike	有效穗数 Ear number per pot	千粒质量 1 000-grain weight	产量 Yield
株高 Plant height	1				
单穗粒数 Grain number per spike	0.303	1			
有效穗数 Ear number per pot	0.487*	-0.292	1		
千粒质量 1 000-grain weight	0.456	0.739**	-0.317	1	
产量 Yield	0.757**	0.467	0.661**	0.406	1
P 值 P-Values					
土壤类型 Soil type	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
温度 Temperature	<0.001	<0.001	0.504	<0.001	<0.001
交互 Soil type×Temperature	0.019	<0.001	0.363	<0.001	<0.001

注:*,**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。下同。
Note:*,** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$. The same below.

小麦株高,而株高与产量呈正相关,因此增温对产量的形成可能是负效应;有效穗数也与产量呈正相关,通过双因素方差分析得知,虽然增温没有显著影响有效穗数,但在土壤类型间表现出了差异。同时,有效穗数与株高呈正相关。

2.4.2 小麦叶片生理特征与产量的相关分析

从两个时期小麦生理指标与产量的相关分析可知(表 4),拔节期决定小麦产量的因素主要是 SPAD 值和 SOD 活性,两者都与产量呈显著正相关,开花期 MDA 含量和 POD 活性与产量呈极显著负相关。

表 4 不同时期小麦生理指标与产量的相关分析
Table 4 Correlation analysis of wheat physiological index and yield in different periods

生育时期 Growth stage	相关系数 Correlation coefficient				
	SPAD	MDA	SOD	POD	CAT
拔节期 Jointing stage	0.501*	0.113	0.820**	0.141	0.398
开花期 Flowering stage	-0.129	-0.797**	-0.144	-0.741**	-0.435

3 讨论

3.1 增温影响冬小麦生长的可能机制

植物体内存在的活性氧(ROS)调控系统,使植物在生长发育期间产生的活性氧处于动态平衡状态^[30]。增温胁迫会打破这种平衡,使大量活性氧积累在植物体内,导致细胞膜脂过氧化程度加剧,诱发其自身保护酶系统活性提高,从而减轻增温带来的伤害^[20]。旗叶 SPAD 值可以反映叶片中叶绿素相对含量,较高的叶绿素含量有利于提高光合作用^[31],进而提高光能利

用率以增加产量^[32]。本研究中增温显著提高了开花期冬小麦叶片的 SOD、POD、CAT 活性和 MDA 含量;显著降低了拔节期的 MDA 含量以及两个时期的叶片 SPAD 值。从生理特征与产量的相关性分析可知,冬小麦生育前期的 SPAD 值越高,对于后期生长发育和产量形成越有利,开花期 MDA 含量和 POD 活性越高,越不利于产量形成。这说明增温通过影响叶片光合作用以及细胞膜脂过氧化程度从而影响冬小麦生长发育。有研究表明,小麦在 25~30 ℃短暂热胁迫时具有一定的适应性^[33]。本研究中全生育期平均增温 1.5 ℃,生育期内有 11 d 温度在 25~28.4 ℃范围内,增温处理下的保护酶系统仍处在较高活性水平,还能保持合适的氧化还原条件,减缓细胞膜脂过氧化程度。这意味着增温对冬小麦的影响在一定温度范围内是可以被保护酶系统所克服的。本研究中增温引起 3 种酶活性增加的结果与闫鹏等^[13]和刘秋霞等^[34]在晚冬早春阶段增温和不同阶段夜间增温下小麦花后 SOD、POD 和 CAT 活性的变化一致。这可能是因为增温处理提前了小麦生长发育进程,为了延缓小麦衰老,保护酶活性会显著提高。然而,这两个研究中增温降低了 MDA 含量,与本研究拔节期的结果相同、与开花期的结果相反,可能是因为他们的研究是采用阶段性增温,移除增温装置后早发小麦花后的环境温度相对降低,小麦旗叶中保护酶活性较高,仍能够保持较强的活性氧清除能力。本研究进行全生育期增温与上述研究的增温方式和时长都不同,本研究小麦从苗期开始就处在增温条件下,体内保护酶系统被激活的时间可能较早,但苗期到拔节期仍处于全生育期温

度相对较低的阶段,因此在冷刺激下对照组小麦叶片酶活性和MDA含量相对增温组较高;随着物候的推进和环境温度升高,小麦生长进入对温度最敏感的生殖生长期^[35],加上在经历冷刺激后产生的应激记忆可能具有增强生殖期耐热性、增加酶活性的作用^[22],因此,为缓解ROS对小麦细胞膜系统带来的伤害,SOD、POD和CAT协同作用,但该作用无法完全消除生育期内积累的活性氧和自由基的氧化作用^[34],最终导致MDA含量与酶活性协同上升,叶片生理性能降低。

3.2 土壤类型对冬小麦增温效应的影响

到目前为止,作物产量对增温的响应研究结论尚未统一,既存在正效应,也存在负效应。本研究中,全生育期增温显著降低了黄棕壤和黑土上的小麦株高、单穗粒数、千粒质量,最终导致减产,这与张凯等^[36]、傅晓艺等^[37]和卞晓波等^[38]在华北地区和江淮地区的全天增温研究结果一致;也有研究认为非对称性增温和夜间增温处理提高了棕壤土和黄褐土上的小麦株高、千粒质量,最终增产^[14,39],这与我们的结果相反,可能是由于增温方式不同所导致的差异。本研究中,增温降低了黑土上的小麦产量,但与黄棕壤相比,减产幅度仅为黄棕壤的一半。此外,砖红壤上小麦产量未对增温产生显著响应,但却显著低于黄棕壤和黑土。这些结果表明,冬小麦产量对增温的响应因土壤类型不同而存在差异。由于本研究是在同一气候条件下进行,南移的黑土原位于我国东北地区黑龙江省,土壤养分较高,从年均气温3~4℃的寒温带地区移至年均气温15.5℃的亚热带地区,尽管有机碳矿化温度敏感性与气候变量无关^[40],但负责养分循环和供应的土壤微生物活性随升温而增强,其数量很可能在受到环境气温升高的压力下而减少^[41]。研究表明土壤速效养分含量与作物产量呈显著正相关^[42],氮、磷、钾养分能有效避免膜脂过氧化对植物细胞造成的伤害,尤其是氮含量,其是限制植物酶活性的关键因子^[43]。本研究使用的黄棕壤中的有机质含量仅为黑土的27.93%,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为黑土的30.77%、35.73%和41.89%,因此,黑土上冬小麦产量显著高于黄棕壤,并且对增温的响应程度也弱于黄棕壤。砖红壤原位于华南地区的海南省,该地属于热带地区,光热充足,年均气温在25℃左右,北移使环境气温降低了10℃左右,而土壤中的多种功能酶和微生物都在25℃时活性最高^[44],且有研究表明砖红壤的土壤细菌丰富度与温度呈正相关关系^[45],可见,虽然在试验区设置了1.5℃增温,但是该温度条件下,砖红壤内微

生物主导的养分释放未能满足作物需求。同时,本研究中砖红壤为酸性土壤,较黄棕壤和黑土而言土壤结构差,作物生长发育受到影响^[46]。因此砖红壤上生长的冬小麦的产量低于黄棕壤和黑土,其对于增温也未产生明显响应。

4 结论

全生育期增温减少了拔节期和开花期小麦叶片叶绿素含量,提高了开花期叶片保护酶活性。在保护酶系统的作用下诱导丙二醛积累,因此叶内丙二醛含量也协同增加。这些结果表明,增温通过影响叶片光合作用以及细胞膜脂过氧化程度从而影响冬小麦生长发育。增温显著降低了生长在黄棕壤和黑土上冬小麦的株高、单穗粒数和千粒质量,导致减产;对砖红壤中的小麦产量未产生显著影响,但其产量显著低于黄棕壤和黑土。因为本试验在同一区域进行,摒弃了除温度外的其他环境因子的差异,因此可以推测不同类型土壤上小麦产量的差异,一方面受增温的直接影响,另一方面受土壤性状及土壤微生物适应增温的影响。

参考文献:

- [1] 王卓妮,袁佳双,庞博,等. IPCC AR6 WGⅢ 报告减缓主要结论、亮点和启示[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(5): 531-537. WANG Z N, YUAN J S, PANG B, et al. The interpretation and highlights on mitigation of climate change in IPCC AR6 WGⅢ report[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(5): 531-537.
- [2] 汪和廷,张从合,方玉,等. 中国气候变化对农作物育种策略影响探究[J]. 中国农学通报, 2022, 38(11): 64-74. WANG H T, ZHANG C H, FANG Y, et al. The impact of climate change on crop breeding strategies in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(11): 64-74.
- [3] WANG J H, ZHANG J J, ZHANG P. Rising temperature threatens China's cropland[J]. *Environ Res Lett*, 2022, 17: 084042.
- [4] 郭世博,张方亮,张镇涛,等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响XIV. 东北大豆高产稳产区及农业气象灾害分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(9): 1763-1780. GUO S B, ZHANG F L, ZHANG Z T, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China XIV. Distribution of high-stable-yield zones and agro-meteorological disasters of soybean in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(9): 1763-1780.
- [5] 李红梅,权文婷,张树誉. 气候变暖对陕西中北部冬小麦返青前热量资源的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(4): 53-61. LI H M, QUAN W T, ZHANG S Y. The impact of climate warming on heat resources before the turning green stage of winter wheat in central and northern Shaanxi Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(4): 53-61.

- [6] JUROSZEK P, BARTSCH L, FONTAINE J F, et al. Summary of the worldwide available crop disease risk simulation studies that were driven by climate change scenarios and published during the past 20 years [J]. *Plant Pathology*, 2022, 71(9): 1815–1838.
- [7] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一)[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886–895. ZHAO G C. Study on Chinese wheat planting regionalization(I) [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5): 886–895.
- [8] 高辉明. 北方冬麦区小麦适应气候变化的品种演化规律的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 31. GAO H M. Studying on variety evolution of winter wheat adapting to climate warming in northern winter wheat-production areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013: 31.
- [9] 王斌, 顾蕴倩, 刘雪, 等. 中国冬小麦种植区光热资源及其配比的时空演变特征分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(2): 228–238. WANG B, GU Y Q, LIU X, et al. Analysis of the temporal and spatial changes of photo-thermal resources in winter wheat growing regions in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 228–238.
- [10] 徐朝霞, 苏海报, 江晓东, 等. 气候变暖对冬小麦生长发育、产量和品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(25): 101–105. XU Z X, SU H B, JIANG X D, et al. Climate warming: effects on the growth, yield and quality of winter wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(25): 101–105.
- [11] 苏海报, 陈昆, 江晓东, 等. 夜间增温对南京地区冬小麦生产的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(21): 144–147. SU H B, CHEN K, JIANG X D, et al. Influence of night temperature increase on winter wheat production in Nanjing City[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(21): 144–147.
- [12] FAN Y H, TIAN Z W, YAN Y Y, et al. Winter night-warming improves post-anthesis physiological activities and sink strength in relation to grain filling in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 992.
- [13] 闫鹏, 孙小诺, 杜雄, 等. 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, et al. Effects of artificial warming from late-winter to early-spring on photosynthesis and flag leaf senescence of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2581–2592.
- [14] 田云录, 陈金, 邓艾兴, 等. 开放式增温下非对称性增温对冬小麦生长特征及产量构成的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 681–686. TIAN Y L, CHEN J, DENG A X, et al. Effects of asymmetric warming on the growth characteristics and yield components of winter wheat under free air temperature increased[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 681–686.
- [15] 樊永惠, 李宇星, 马亮亮, 等. 灌浆期高温胁迫下外源水杨酸对小麦旗叶抗氧化生理特性的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(9): 1878–1886. FAN Y H, LI Y X, MA L L, et al. Effects of exogenous salicylic acid on antioxidant physiological characteristics of wheat flag leaves under high temperature stress at grain filling stage[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(9): 1878–1886.
- [16] 谭凯炎, 房世波, 任三学. 增温对华北冬小麦生产影响的试验研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 902–908. TAN K Y, FANG S B, REN S X. Experiment study of winter wheat growth and yield response to climate warming[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, 70(4): 902–908.
- [17] 韩天富, 李亚贞, 曲潇林, 等. 中国农田小麦和玉米产量时空演变及驱动因素[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 100–108. HAN T F, LI Y Z, QU X L, et al. Spatio-temporal evolutions and driving factors of wheat and maize yields in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(1): 100–108.
- [18] 冯国忠, 王寅, 焉莉, 等. 土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 444–455. FENG G Z, WANG Y, YAN L, et al. Effect of soil type and nitrogen application rate on yield of monocropping spring maize and nitrogen balance in crop field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 444–455.
- [19] 李娜, 张峰举, 许兴, 等. 增温对宁夏北部春小麦叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(24): 9101–9110. LI N, ZHANG F J, XU X, et al. Effects of elevated temperature on photosynthesis of spring wheat in northern Ningxia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24): 9101–9110.
- [20] 姜春明, 尹燕桦, 刘霞, 等. 不同耐热性小麦品种旗叶膜脂过氧化和保护酶活性对花后高温胁迫的响应[J]. 作物学报, 2007, 33(1): 143–148. JIANG C M, YIN Y P, LIU X, et al. Response of flag leaf lipid peroxidation and protective enzyme activity of wheat cultivars with different heat tolerance to high temperature stress after anthesis [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(1): 143–148.
- [21] 张英华, 杨佑明, 曹莲, 等. 灌浆期高温对小麦旗叶与非旗叶器官光合和抗氧化酶活性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(1): 136–144. ZHANG Y H, YANG Y M, CAO L, et al. Effect of high temperature on photosynthetic capability and antioxidant enzyme activity of flag leaf and non-leaf organs in wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(1): 136–144.
- [22] DU X, GAO Z, SUN X N, et al. Increasing temperature during early spring increases winter wheat grain yield by advancing phenology and mitigating leaf senescence[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 812: 152557.
- [23] 郭天财, 王晨阳, 朱云集, 等. 后期高温对冬小麦根系及地上部衰老的影响[J]. 作物学报, 1998, 24(6): 957–962. GUO T C, WANG C Y, ZHU Y J, et al. Effects of high temperature on the senescence of root and top-partial of wheat plant in the later stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1998, 24(6): 957–962.
- [24] 孙波, 郑宪清, 胡锋, 等. 水热条件与土壤性质对农田土壤硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1): 206–213. SUN B, ZHENG X Q, HU F, et al. Effect of temperature, rainfall and soil properties on farmland soil nitrification[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 206–213.
- [25] 王帝里, 孙波, 隋跃宇, 等. 不同气候和土壤条件下玉米叶片叶绿素相对含量对土壤氮素供应和玉米产量的预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 327–335. WANG L L, SUN B, SUI Y Y, et al. Prediction of soil nitrogen supply and maize yields with the relative chlorophyll contents of leaves under different climates and soil conditions[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(2): 327–335.

- [26] FRENNE P D, BRUNET J, SHEVTSOVA A, et al. Temperature effects on forest herbs assessed by warming and transplant experiments along a latitudinal gradient[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 3240–3253.
- [27] 赵红飞, 潘仕球, 乔云发, 等. 增温对冬小麦产量的影响因土壤类型而不同[J]. 中国农学通报, 2021, 37(2): 74–79. ZHAO H F, PAN S Q, QIAO Y F, et al. The responses of winter-wheat yield to elevated temperature varied with soil types[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(2): 74–79.
- [28] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008: 257–260. KONG X S, YI X F. Plant physiology experiment techniques[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008: 257–260.
- [29] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 164–167. LI H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003: 164–167.
- [30] 张亚坤, 宋鹏, 潘大宇, 等. Cu^{2+} 胁迫对大豆生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(12): 89–92. ZHANG Y K, SONG P, PAN D Y, et al. Effects of Cu^{2+} stress on growth and antioxidant enzyme activity of soybean seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 89–92.
- [31] 师箴, 高斯曼, 李彤, 等. 施氮量对不同叶绿素含量小麦生长、产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(9): 1134–1142. SHI Z, GAO S M, LI T, et al. Effect of nitrogen application rate on growth yield and quality of wheat with different chlorophyll content[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(9): 1134–1142.
- [32] 李传梁, 于振文, 石玉, 等. 高产与中产麦田小麦产量和光能及氮素利用效率的差异[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 340–345. LI C L, YU Z W, SHI Y, et al. Differences in wheat yield, light energy and nitrogen use efficiency between high-yield and medium yield wheat fields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 340–345.
- [33] 刘萍, 郭文善, 浦汉春, 等. 灌浆期高温对小麦剑叶抗氧化酶及膜脂过氧化的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2403–2407. LIU P, GUO W S, PU H C, et al. Effects of high temperature during grain filling period on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in flag leaves of wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2403–2407.
- [34] 刘秋霞, 樊永惠, 罗音, 等. 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): 624–631. LIU Q X, FAN Y H, LUO Y, et al. Effect of night warming at different stages on growth characteristics and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(5): 624–631.
- [35] 宋磊, 次仁央金, 王小强, 等. 小麦对高温胁迫的响应机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(36): 6–12. SONG L, TSERING Y J, WANG X Q, et al. Response mechanism of wheat to high temperature stress: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(36): 6–12.
- [36] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 田间增温对半干旱区春小麦生长发育和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(9): 2681–2688. ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effects of increasing field temperature on growth, development and yield of spring wheat in semi-arid area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(9): 2681–2688.
- [37] 傅晓艺, 史占良, 曹巧, 等. 返青至拔节期高温对小麦农艺性状和产量的影响[J]. 河北农业科学, 2020, 24(2): 31–34, 53. FU X Y, SHI Z L, CAO Q, et al. Effect of high temperature from regreening stage to jointing stage on agronomic characters and yield of wheat[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2020, 24(2): 31–34, 53.
- [38] 卞晓波, 陈丹丹, 王强盛, 等. 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, et al. 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.
- [39] 杨锦浩, 李宇星, 张月, 等. 夜间增温对小麦干物质积累、转运、分配及产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(11): 2295–2306. YANG J H, LI Y X, ZHANG Y, et al. Effect of night warming at different stage on dry matter accumulation, transportation, distribution and yield of wheat[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(11): 2295–2306.
- [40] FENG C X, GODBOLD D L, SUN H L, et al. Temperature sensitivity of organic matter mineralization as affected by soil edaphic properties and substrate quality[J]. *Catena*, 2022, 210: 105901.
- [41] ZHAO M X, XUE K, WANG F, et al. Microbial mediation of biogeochemical cycles revealed by simulation of global changes with soil transplant and cropping[J]. *The ISME Journal*, 2014, 8: 2045–2055.
- [42] 孙勇, 曲京博, 初晓冬, 等. 不同施肥处理对黑土土壤肥力和作物产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 45–50. SUN Y, QU J B, CHU X D, et al. Effects of different fertilization treatments on soil fertility and crop yield in black soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(14): 45–50.
- [43] 盛开, 李亚蓉, 张铎, 等. 氮磷钾配施对菊芋产量和生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(3): 81–90. SHENG K, LI Y R, ZHANG D, et al. Effects of combined application of nitrogen, phosphorus and potassium on the yield and physiological characteristics of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(3): 81–90.
- [44] GOMEZ E J, DELGADO J A, GONZALEZ J M. Environmental factors affect the response of microbial extracellular enzyme activity in soils when determined as a function of water availability and temperature[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(18): 10105–10115.
- [45] 刘朝阳. 我国典型农田土壤酶和有机碳分解对升温的响应及机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020: 116–118. LIU C Y. The response and mechanism of soil enzymes and soil organic carbon decomposition to warming in typical farmland of China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020: 116–118.
- [46] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137–3143. YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(11): 3137–3143.