

# 模拟增温对小麦生长、土壤酶活性和呼吸的影响

高丽莉<sup>1</sup>, 李凤丹<sup>2</sup>

(1.甘肃农业职业技术学院 园林工程系, 兰州 730020; 2.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127)

**摘 要:**为了探明全球增温对我国小麦生长及根区土壤特性的影响。运用开顶式生长室(Open-top Chamber, OTC)的连续 3 年控制实验,监测和模拟了全球增温系统对小麦生长、土壤酶活性和呼吸的影响,对提高我国小麦的优质高产提供了基础支撑。结果表明:整个生长期内,小麦土壤湿度和温度均呈季节变化特征,其中在 CK 和 OTC 处理下,小麦土壤温度随着季节的变化呈先增加后降低趋势,相同时期土壤温度基本表现为 OTC>CK;CK 和 OTC 处理下小麦土壤湿度随着季节的变化呈相反的变化趋势,相同时期土壤湿度基本表现为 OTC<CK,在返青期差距达到最大,差距达到最小。模拟增温显著增加了小麦根区土壤呼吸和土壤酶活性,随生长期的变化,CK 和 OTC 处理下土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶和土壤呼吸呈先增加后降低趋势,相同时期土壤呼吸和土壤酶活性基本表现为 OTC>CK,在小麦的整个生长期,CK 和 OTC 处理下土壤呼吸和土壤酶活性分别与土壤温度呈显著的指数关系( $p<0.05$ )。模拟增温显著增加了小麦生长特性,小麦生长特性各指标均表现为 OTC>CK,其中小麦株高、叶面积指数和穗粒数均表现为 OTC>CK( $p<0.05$ ),比叶重、R/S 没有显著差异( $p>0.05$ )。综合分析表明:模拟增温有利于小麦的生长和根区土壤酶活性和呼吸的提高。

**关键词:**增温;小麦;生长特征;土壤酶活性;土壤呼吸

**中图分类号:**S161.2; S154.2; S152.7

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2019)06-0359-05

## Effect of Simulated Temperature Enhancement on Wheat Growth, Soil Enzyme Activity and Respiration

GAO Lili<sup>1</sup>, LI Fengdan<sup>2</sup>

(1.Department of Garden Engineering, Gansu Agriculture Technology College, Lanzhou 730020, China;

2.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of global warming on the growth of wheat and the root soil characteristics in China, we monitored and measured the the growth characteristics of wheat and soil enzyme activity and respiration in root area by using the open-top chamber (OTC) by three years, providing the basic data for improving the quality and the yield of wheat of China. The results are as follows: In the whole of the growing season, the soil temperature of OTC and CK first increased and the decreased with the seasonal change with the order of OTC<CK, while soil humidity of OTC and CK showed the opposite change trend with soil temperature with the order of OTC>CK. The difference reached the maximum in the rejuvenating period and reached the minimum in the mature period. The simulated temperature enhancement increased soil respiration and soil enzyme activity in root zone of the wheat during the growth period of wheat. Soil urease, invertase, acid phosphatase and sucrase and soil respiration showed increased at first and then decreased with the seasonal change. Soil enzymatic activities and soil respiration rate of OTC was greater than those of in the same growth period. In the whole growing season of wheat, soil respiration rate and soil enzyme activity had the significant exponential relationship with soil temperature, respectively ( $p<0.05$ ). The simulated temperature enhancement increased the growth characteristics of wheat in the mature period of wheat. Wheat height, leaf area index and grain number per area of OTC were greater than those of CK ( $p<0.05$ ). There were no significant differences in specific leaf weight and R/S ( $p>0.05$ ). The simulated temperature enhancement is benefit to the growth of

收稿日期:2018-11-03

修回日期:2019-01-10

资助项目:甘肃省科技厅支撑项目“气候变化应对小麦适应性初探”(1506RJZA012)

第一作者:高丽莉(1978—),女,甘肃白银人,硕士,讲师,主要从事作物栽培研究。E-mail:GAO\_lee@163.com

wheat, and improves soil enzyme activity and soil respiration in the root zone of wheat.

**Keywords:** temperature enhancement; wheat; growth characteristics; soil enzyme activity; soil respiration

在社会经济不断深入发展的过程中,居民生活得到了不断改善,但是在对自然资源进行开发利用的过程中也产生了明显的环境问题,对于生态系统健康发展产生了不利影响,原有的气候生态被改变<sup>[1-2]</sup>,气温上升、冰川融化等问题日益突出,使得可持续发展受到了较大挑战,且农业生产也深受影响。随着二氧化碳排放量的不断上升,局地气温上升明显<sup>[3]</sup>,呈现了典型的气候变暖问题,这不仅导致冰川融化加剧,迫使海平面上升,最终导致温室效应的产生<sup>[4-5]</sup>,并带来了较大的影响,不仅直接影响植被生长发育,还影响动植物新陈代谢等。由于气温上升给农作物生长带来了巨大影响,不少学者开展了此方面研究,深入探讨了农作物生长机理的改变,以寻求提升作物抗逆性的途径。对于作物生长初期而言,其发芽状况受到气温的直接影响,过高的温度不利于水分保持及胚芽萌发<sup>[6]</sup>,从而明显降低了其嫩芽成活率,对幼苗生长产生了不利影响;而在其后期生长发育过程中,高温天气不利于作物开花,对于花粉传播也产生不利影响,且在气温过高的情况下籽粒不够饱满,最终降低的是作物产量<sup>[7]</sup>。此外,微生物活动也受到温度的直接影响,过高的温度不适宜微生物进行有效的有机质分解,同时对于其新陈代谢也起着抑制作用,而养分作用的发挥也离不开适宜的温度,光合作用更是与日照息息相关,因此温度不仅能直接作用土壤生态,更能间接地影响着土壤生态<sup>[8]</sup>。综合来看,农作物的生长环境受到气候的直接影响,其抗逆性受到气候条件的制约,其生长的土壤环境等也被改变。

对于我国而言,主要的粮食作物是小麦、水稻,水稻因其产量高等优点在南方大面积种植<sup>[9]</sup>,而小麦在北方大面积种植,成为北方大部分地区最主要的粮食作物,其不仅产量较高,更具有较强的生态适应性,因其种植面积广,甚至可以说在调节气候方面起着重要意义<sup>[10]</sup>。对于内陆甘肃而言,其小麦面积已由原来的 133 万  $\text{hm}^2$  下降到了 100 万  $\text{hm}^2$ ,主要原因在于种植结构的调整,随着种植技术的提升<sup>[11-12]</sup>,该省在“十二五”时期开展了优质品种的推广,以确保“稳面积提单产”。当前全球变暖成为事实的情况下,作物生长已经不可避免地受到了影响,因此探讨气温升高如何影响小麦生长发育及土壤的理化机理及生态适应性<sup>[13]</sup>具有重要的现实意义,可为提升小麦产量和质量奠定基础。基于此,本研究在前人研究的基础上,通过小尺度的生态模拟来进行小麦的控制试验,在模

拟增温的条件下探究小麦的生长发育特点,同时分析此影响下土壤的理化特性等,进而一方面从小麦生长的角度来分析小麦对气温上升的响应,另一方面从土壤的角度来分析增温对土壤的影响,从而提升小麦适应性,更好地保障甘肃省粮食种植安全,以期为优质高产小麦育种提供有益参考和借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验由 2015 年开始,连续进行 3 年增温试验,在试验过程中选择的是甘肃农业大学校内春小麦试验田,具体品种是“兰天 35 号”,增温处理贯穿在整个小麦生长期。该试验区域年均气温接近  $8.5^\circ\text{C}$ ,年均降雨量为 550 mm,该区域土壤类型为黄绵土,土壤 pH 值 7.86,有机碳 8.03 g/kg,全氮 0.89 g/kg,全磷 0.86 g/kg,有效磷 35.02 mg/kg,速效氮 18.31 mg/kg。

### 1.2 试验设计和方法

试验中将小麦种植在开顶生长室内,模拟增温利用国际通用方法,同时通过随机设区的方式建立 5 套生长室;然后在其中设置长、宽均为 2 m 的试验小区共 10 个,要求高度达到 2.5 m,并用氟化玻璃构造,玻璃厚度为 0.8 cm,为了降低气体交换则需要顶部开口且略收紧;之后将其中的 5 个小区分为增温区开顶式生长室(OTC),为了加强试验对比,特设置 5 个试验小区为对照组(CK)。为了进行模拟增温,各个生长室布放 1 000 W 的红外辐射加热管,增温采取全天候的模式,为了提升增温效果一致,则要求温差低于  $0.2^\circ\text{C}$ ,对照组则无需加热处理。本试验小区内采取砖石质栈道,这样能够尽可能地降低动物对小麦的破坏,为了降低试验误差,本试验区内小麦管理举措一致。此外,为了进行数据收集,各个试验小区均布放了 AR5 数据采集器,每间隔 1 h 进行 1 次地面温度及湿度的数据采集,同时对土层 10 cm 的温度和湿度进行测量,土壤含水量的监测每周 1 次。

为准确测量土壤呼吸,在试验小区的边缘布放土壤呼吸底座,要求直径及高度分别为 20, 10 cm,同时对其中的杂草定期清理以提升测量准确性。此外,为提前平衡起生态环境,提前 1 个月在土壤中将 PVC 测量圈布放其中,并在上午定期进行土壤呼吸数据采集,频率为每周 1 次。

### 1.3 小麦生长各指标测定

为了进行成熟叶片的指标测定,本试验于 2016

年—2017 年 8 月底进行地上生物量采集,以 0.25 m<sup>2</sup> 为单位进行小麦地上部分收割,并分别在 OTC 和 CK 小区内进行,之后将采集的成熟叶片送回实验室,首先 65℃ 烘干处理,待其达到恒重则备用指标测量。然后进行土壤采集,要求从地表向下 15 cm,重量超过 2 kg,速封后带回,在过筛前去除杂质,置于 4℃ 下保存。

1.3.1 小麦生长和生理指标的测定

(1) 小麦的生理指标在各个小区选取 10 株小麦,要求长势基本接近,之后对株高、茎粗进行测量,要求精度达到 0.01 cm;然后利用扫描仪对其叶面积进行测定,最后在收割,在其晒干后称重<sup>[14]</sup>。

(2) 根冠比(R/S)为了测量小麦的地下生长部分,将其根系挖出,并利用塑料袋将地上及地下部分分开,过 40 目筛后流水冲洗,在最终称重之前在 65℃ 下烘干。

(3) 叶片的养分。首先采集成熟叶片并将其洗净,之后再烘干粉碎,分别利用染色法、比色法对可溶蛋白及糖进行测定<sup>[15]</sup>。

1.3.2 小麦土壤酶活性的测定 针对不同生长阶段

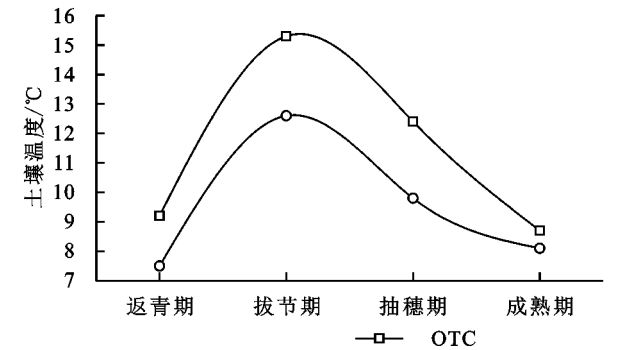


图 1 模拟增温对小麦根区土壤温度和湿度的影响

2.2 模拟增温对小麦根区土壤酶活性的影响

由图 2 可知,模拟增温显著影响了小麦根区土壤酶活性,OTC 土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶变化范围为 2.6~8.5,1.6~4.9,1.9~7.6,0.9~4.2 mg/(g·d),CK 土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶变化范围为 2.3~8.1,1.5~4.1,1.8~5.3,0.8~4.1 mg/(g·d);随生长期的变化,土壤脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和蔗糖酶呈先增加后降低趋势,在抽穗期达到最大,相同时期小麦土壤酶活性均表现为 OTC>CK;与 CK 相比,在不同生长时期,OTC 小麦土壤脲酶分别高出 13.04%,10.42%,4.94%,5.13%;土壤转化酶分别高出 6.67%,18.75%,19.51%,3.85%;土壤碱性磷酸酶分别高出 5.56%,7.69%,43.40%,−2.78%;土壤蔗糖酶分别高出 12.50%,19.05%,2.44%,12.50%。土壤酶活性与土壤温度进行回归分析,筛选出最佳拟合曲线(一元指数模型),由表 1 可知,在小麦的整个生长期,OTC 和 CK 土壤

的小麦,分别按照上述方法进行土样采集,并对土壤养分进行指标测定,对其蔗糖及脲酶活性的测定借助于比色法进行,对转化酶活性的测定借助于光度法<sup>[16]</sup>。

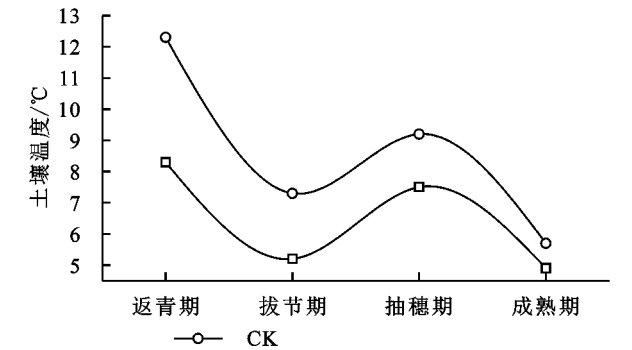
1.4 数据分析

采用 SPSS 21.0 和 Excel 2007.0 进行方差分析(One-way ANOVA)和数据统计,LSD 检验各处理之间的显著性。

2 结果与分析

2.1 模拟增温对小麦根区土壤温度和湿度的影响

由图 1 可知,小麦的整个生长期土壤温度和湿度均呈现出季节性变化规律,OTC 和 CK 土壤温度变化范围为 9.2~15.3℃,7.5~12.6℃,随着生长季的增加呈先增加后降低趋势,在拔节期最大,相同时期土壤温度均表现为 OTC>CK,二者之间在拔节期和抽穗期差距较大,在二者差距最小。OTC 和 CK 土壤湿度变化范围为 4.9%~8.3%,5.7%~12.3%,随着生长季的增加呈先降低后增加而后降低趋势,相同时期土壤湿度均表现为 OTC<CK。



酶活性和土壤温度呈显著的指数关系( $p<0.05$ ),且 OTC 土壤对温度具有较高的敏感性。

表 1 小麦根区土壤酶活性与增温的指数关系

土壤酶	处理	最佳拟合方程	$R^2$	$F$	$p$
脲酶	OTC	$y=0.863e^{0.015x}$	0.812	125.36	**
	CK	$y=1.125e^{0.369x}$	0.756	136.25	**
转化酶	OTC	$y=1.059e^{0.146x}$	0.789	113.78	**
	CK	$y=2.154e^{0.258x}$	0.804	102.59	**
酸性磷酸酶	OTC	$y=0.698e^{0.158x}$	0.652	71.25	*
	CK	$y=1.147e^{0.247x}$	0.623	63.20	*
蔗糖酶	OTC	$y=1.023e^{0.187x}$	0.851	114.79	**
	CK	$y=0.956e^{0.306x}$	0.812	123.62	**

注: $y$  为土壤酶活性, $x$  为土壤温度,\* 代表  $p<0.05$ ,\*\* 代表  $p<0.01$ ,下表同。

2.3 模拟增温对小麦根区土壤呼吸的影响

由图 3 可知,模拟增温显著影响了小麦根区土壤

呼吸,OTC 和 CK 土壤呼吸变化范围为 1.62~6.24, 1.52~6.19  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;随生长期的变化,土壤呼吸呈先增加后降低趋势,在抽穗期达到最大,相同时期小麦土壤呼吸均表现为  $\text{OTC}>\text{CK}$ ;与 CK 相比,

在不同生长时期,OTC 小麦土壤呼吸分别高出 6.58%,10.49%,0.81%,36.65%;由表 2 可知,在小麦的整个生长期,OTC 和 CK 土壤酶活性和土壤温度呈显著的指数关系( $p<0.05$ )。

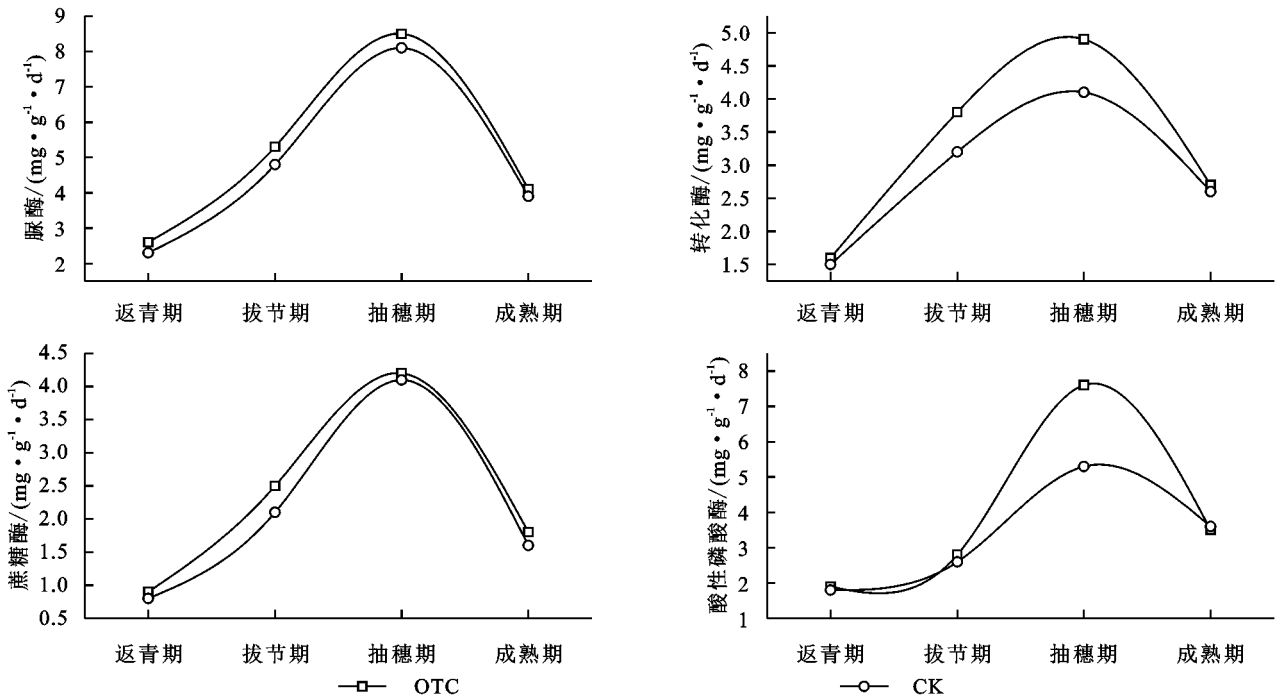


图 2 模拟增温对小麦土壤酶活性的影响

表 2 小麦土壤呼吸与增温的指数关系

处理	最佳拟合方程	$R^2$	$F$	$p$
OTC	$y=0.9575\text{e}^{0.753 \cdot x}$	0.753	128.75	**
CK	$y=1.239\text{e}^{0.046 \cdot x}$	0.796	136.59	**

2.4 模拟增温对小麦生长特性的影响

由表 3 可知,模拟增温显著影响了小麦生长特性。小麦生长特性各指标均表现为  $\text{OTC}>\text{CK}$ ,其中小麦株高、叶面积指数和穗粒数均表现为  $\text{OTC}>\text{CK}$  ( $p<0.05$ ),比叶重、R/S 没有显著差异( $p>0.05$ );与 CK 相比,OTC 小麦株高、茎粗、叶面积指数(LAI)、比叶重、

R/S、穗粒数和千粒重分别高出 14.49%,19.510%, 1.57%,15.70%,3.25%,32.82%,8.14%。

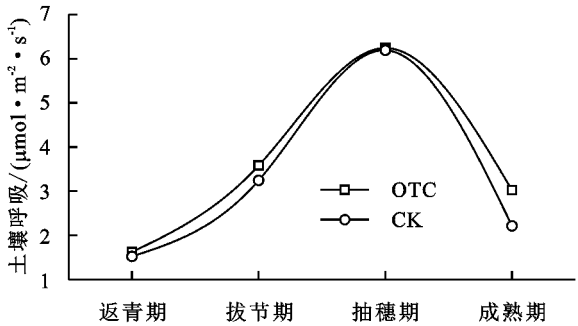


图 3 模拟增温对生长期小麦土壤呼吸的影响

表 3 模拟增温对小麦生长特性的影响

处理	株高/ cm	茎粗/ cm	叶面积 指数	比叶重/ ( $\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ )	R/S	穗粒数/ 个	千粒重/ g
OTC	53.06±5.16a	0.49±0.08a	7.75±0.32a	6.78±0.24a	1.27±0.16a	35.69±3.36a	46.78±3.18a
CK	46.32±3.12b	0.41±0.03b	7.63±0.56b	5.86±0.35a	1.23±0.13a	26.87±3.25b	43.26±2.35b

注: 同列相同小写字母表示在 0.05 水平差异不显著。

3 讨论与结论

为了探究温度对作物的生长发育影响,常用模拟增温的方法进行试验对比分析,其中开放式红外增温较为常用<sup>[17-18]</sup>。本研究通过小尺度的生态模拟来进行小麦的控制试验,在模拟增温的条件下探究小麦的生长发育特点,同时分析此影响下土壤的理化特性

等,进而一方面从小麦生长的角度来分析小麦对气温上升的响应,另一方面从土壤的角度来分析增温对土壤的影响。通过试验发现,就整个小麦生长季而言,同期内 OTC 条件下土壤温度高于对照组 CK,而湿度则与之相反,这也印证了以往学者的研究<sup>[19-21]</sup>。在增温处理下,土壤温度上升,但湿度下降,植株长势快,具有更多的分蘖,同时具有更大的叶面积,比叶重



及 $R/S$ 也更高,这说明在增温处理下小麦生长发育得以提升<sup>[19-21]</sup>,究其原因在于增温促进了小麦的光合作用,加速了物质合成,发达的根系利用吸收土壤的养分和水分以促进小麦生长发育,因此来说,本试验的增温处理对小麦的光合作用和新陈代谢起着重要的促进作用,这也是小麦对温度的适应机理之一<sup>[8-10]</sup>。

作为小麦生长发育的基础,物质和能量代谢明显受到温度影响<sup>[22]</sup>。在试验过程中的相同时期,增温处理下的小麦叶绿素含量上升,从而提升了光合作用能力,利于物质和能量转化,利于小麦生长发育和产量的提升;此外,可溶性蛋白及糖含量也不断上升<sup>[5-6,22]</sup>,在此影响下,小麦机体构建物质的能力提升,有利于营养干物质的积累<sup>[23]</sup>。对于小麦而言,不同的生长期对增温的反应不尽相同,但整体来说增温利于小麦生长,主要原因在于不同温度下小麦合成及分解营养物质的能力有所差异,此外,土壤温度对微生物活动产生了影响,进而微生物活动参与到小麦对养分的利用。

土壤生物化学反应不仅受到酶活性的直接制约,同时还和土壤呼吸密切相关,生化反应的方向受到这两方面的影响,而且反应强度也受到制约<sup>[18]</sup>。温度作为重要的环境因子,在酶活性作用过程中发挥着无可替代的作用,尤其是当前温度上升已然成为事实的情况下,酶活性对于土壤及作物生长尤为重要<sup>[24-26]</sup>。通过实现发现,在OTC处理下小麦试验区的土壤呼吸得以明显提升,而且土壤酶活性也得到了明显增强<sup>[18]</sup>,这也印证了以往学者的研究;此外,研究得知温度与土壤呼吸、酶活性之间存在显著的指数关系<sup>[20]</sup>,这表明在温度上升的情况下,对土壤呼吸和酶活性起促进作用,而且土壤养分有效性也得以提升,利于土壤微生物活动和新陈代谢,从而增强土壤物质循环和能量转化<sup>[25-26]</sup>,提升土壤活性和肥力,最终利于作物生长发育。

本试验是在小尺度的控温下进行,难以避免地与自然状态下降温产生差异,因此温度上升对小麦的影响还需要从多个方面进行探究,尤其是自然状态下温度上升对小麦生长发育的作用机理及小麦的响应,此外,水分、光照及二氧化碳通量等微环境因子也会小麦生长产生重要影响,依然有待于进一步研究,这也是未来温度上升对小麦影响需要探究的方向,从而更深入了解温度上升情况下小麦的生长发育过程与机理。

#### 参考文献:

[1] Anthony K R N, Marshall P A, Abdulla A, et al. Operationalizing resilience for adaptive coral reef management under global environmental change[J]. *Global Change*

*Biology*, 2015,21(1):48-61.

[2] Zhu K, Chiariello N R, Tobeck T, et al. Nonlinear, interacting responses to climate limit grassland production under global change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016,113(38):10589-10594.

[3] De Boeck H J, Vicca S, Roy J, et al. Global change experiments: challenges and opportunities[J]. *Bioscience*, 2015,65(9):922-931.

[4] Wu D, Zhao X, Liang S, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change [J]. *Global Change Biology*, 2015,21(9):3520-3531.

[5] Doblas-Miranda E, Martínez-Vilalta J, Lloret F, et al. Reassessing global change research priorities in mediterranean terrestrial ecosystems: how far have we come and where do we go from here[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015,24(1):25-43.

[6] Leong M, Ponisio L C, Kremen C, et al. Temporal dynamics influenced by global change: bee community phenology in urban, agricultural, and natural landscapes[J]. *Global Change Biology*, 2016,22(3):1046-1053.

[7] Prestele R, Alexander P, Rounsevell M D A, et al. Hotspots of uncertainty in land-use and land-cover change projections: a global-scale model comparison[J]. *Global Change Biology*, 2016,22(12):3967-3983.

[8] Sparks A H, Forbes G A, Hijmans R J, et al. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight[J]. *Global Change Biology*, 2014,20(12):3621-3631.

[9] 何红霞,王朝辉,包明,等.栽培模式对旱地小麦产量和籽粒养分含量的影响[J].*应用生态学报*,2018,29(3):818-826.

[10] 车升国,袁亮,李燕婷,等.我国主要麦区小麦产量形成对磷素的需求[J].*植物营养与肥料学报*,2016,22(4):869-876.

[11] 裴雪霞,党建友,张定一,等.不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J].*中国生态农业学报*,2017,25(4):553-562.

[12] 袁亮,赵秉强,林治安,等.增值尿素对小麦产量,氮肥利用率及肥料氮在土壤剖面中分布的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2014,20(3):620-628.

[13] 裴雪霞,党建友,张定一,等.近54年来晋南气候变化及其对旱地小麦产量的影响[J].*麦类作物学报*,2016,36(11):1502-1509.

[14] 陈广凤,陈建省,田纪春.小麦株高相关性状与SNP标记全基因组关联分析[J].*作物学报*,2015,10(2):1500-1509.

[15] 邵庆勤,周琴,王笑,等.不同小麦品种茎秆形态特征和解剖结构对多效唑的响应差异[J].*麦类作物学报*,2018,38(8):995-1003.

1373-1381.

[7] 史鹏博,朱洪涛,孙德智.人工湿地不同填料组合去除典型污染物的研究[J].环境科学学报,2014,34(3):704-711.

[8] 刘曦,赵亚芳,张小玲,等.2012 年洱海地区邓北桥人工湿地和永安江生态护岸植物群落多样性[J].湿地科学,2018,16(1):45-50.

[9] 胡世琴.人工湿地不同植被净化污水效果及其氮磷累积研究[J].水土保持研究,2017,24(1):200-206.

[10] 李伟斯,李长虹,徐斌,等.人工湿地植被净化水质效果及其氮磷累积研究[J].水土保持研究,2018,25(3):15-20.

[11] 左倬,陈煜权,成必新,等.不同植物配置下人工湿地大型底栖动物群落特征及其与环境因子的关系[J].生态学报,2016,36(4):953-960.

[12] 张骁栋,李伟,潘旭,等.表流人工湿地氮素形态组成及去除效率研究[J].生态环境学报,2016,25(3):503-509.

[13] 李紫霞,唐晓丹,崔理华.3 种负荷对模拟垂直流人工湿地去除氮,磷效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(2):637-642.

[14] 黄余春,田昆,岳海涛,等.云南高原 4 种湿地植物群落对生活污水 TP、COD 净化效果研究[J].西部林业科学,2012,41(2): 33-37.

[15] 武俊梅,徐栋,张丽萍,等.人工湿地基质再生技术的研究进展[J].环境工程学报,2015,9(11):5133-5141.

[16] 李振灵,丁彦礼,白少元,等.潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J].环境科学,2017,38(9): 3713-3720.

[17] 刘阳,李丹,孙红英,等.模拟人工湿地植物丰富度对硝氮去除及净温室效应的影响[J].生态学杂志,2015,34(8):2173-2180.

[18] 陶敏,贺锋,胡晗,等.碳氧调控下人工湿地净化效果的协同与拮抗研究[J].中国环境科学,2015,35(12): 3646-3652.

[19] 晋凯迪,于鲁冀,陈涛,等.植物碳源调控对人工湿地脱氮效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(10):5611-5616.

[20] 陈咄圳,华进程,郑向群,等.以建筑废砖为填料的人工湿地对农村生活污水的净化效果[J].环境工程,2017,35(9):35-39.

[21] 房昀昊,彭剑峰,宋永会,等.高通量测序法表征潜流人工湿地中不同植物根际细菌群落特征[J].环境科学学报,2018,38(3):911-918.

[22] 张彩莹,杜瑞卿,王岩.季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J].环境工程学报,2016,10(4):1706-1712.

[23] 张长宽,倪其军,杨栋,等.低温条件下高效复合人工湿地对尾水的净化效应[J].环境工程学报,2017,11(4): 2034-2040.

[24] 唐孟煊,吴娟,代嫣然,等.组合式垂直流人工湿地工艺及其污水处理效果[J].环境工程学报,2016,10(3): 1017-1022.

[25] 张玉,徐德福,李映雪,等.2 种动物对复合垂直流人工湿地基质中磷形态的影响[J].环境工程学报,2016,10(5):2413-2419.

[26] 郭士林,叶春,李春华,等.水位波动对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响[J].中国环境科学,2017,37(3): 932-940.



(上接第 363 页)

[16] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等.秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量,酶活性及产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.

[17] 张洁梅,武继承,杨永辉,等.不同节水灌溉方式对小麦产量及水分利用效率的影响[J].节水灌溉,2016(8): 30-32.

[18] 潘复燕,薛利红,卢萍,等.不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(5):928-936.

[19] 张翼,张根峰,曹雯梅.施磷量对旱作区小麦产量及氮、磷、钾利用效率的影响[J].河南农业科学,2015,44(7): 29-31.

[20] 苗艳芳,李生秀,扶艳艳,等.旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系[J].应用生态学报,2014,25(4):1013-1021.

[21] 顾克军,张斯梅,顾东祥,等.稻秸还田与播后镇压对稻茬小麦产量与品质的影响[J].核农学报,2015,29(11): 2192-2197.

[22] 俄胜哲,杨志奇,罗照霞,等.长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响[J].麦类作物学报,2016,36(1):104-110.

[23] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,等.西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响[J].生态学报,2014,34(19):5503-5513.

[24] 张玉娇,李军,郭正,等.渭北旱塬小麦产量和土壤水分对保护性耕作的响应模拟[J].应用生态学报,2015,26(3):800-808.