

夜间增温对麦田土壤呼吸速率的影响

张耀鸿^{1,2,3}, 楚岱蔚^{1,2}, 谢晓金^{1,2}, 王琳^{1,2}

(1.南京信息工程大学, 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2.南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3.中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘要:全球气候变暖呈现明显的非对称性,夜间气温和冬、春季的增温趋势显著,采用田间开放式被动增温系统研究夜间增温对南京地区麦田土壤呼吸速率不同组分(根际呼吸速率和土壤基础呼吸速率)的影响机制。结果显示,夜间增温处理下麦田土壤总呼吸速率、根际呼吸速率的季节平均值分别为 4.32 、 $3.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 比对照小区分别增加了 10.0% 、 15.4% , 表明夜间增温显著促进了土壤总呼吸强度和根际呼吸。从不同生育期来看, 增温处理下孕穗期(4月8日至4月18日)的根际呼吸速率增加了 34.6% ~ 44.2% , 而生长后期(5月9日至5月17日)则降低了 31.4% ~ 40.4% 。相反, 夜间增温抑制了孕穗期的基础呼吸速率, 而在一定程度上促进了冬小麦生长后期的基础呼吸速率。研究表明, 夜间增温对麦田土壤根际呼吸速率具有促进作用, 而在一定程度上对土壤基础呼吸速率具有抑制效应, 可能是通过改变作物生物量、养分吸收等特性, 从而影响到作物根系与土壤微生物之间的养分竞争所致。

关键词:夜间增温; 根际呼吸速率; 土壤基础呼吸速率

中图分类号: S152.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)07-1389-07 doi:10.11654/jaes.2013.07.016

Effect of Nighttime Warming on Soil Respiration in Winter Wheat Soil

ZHANG Yao-hong^{1,2,3}, CHU Dai-wei^{1,2}, XIE Xiao-jin^{1,2}, WANG Lin^{1,2}

(1.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Climate warming presents significantly asymmetric trends with greatly seasonal and diurnal differences, greater temperature elevations existing in the winter–spring season than in the summer–autumn season and at the nighttime than at the daytime. We performed field warming experiment under the technique of passive nighttime warming to investigate the impacts of night warming on rhizospheric respiration and soil basal respiration during winter wheat growing stages. A LI-8100 carbon flux system was used to measure seasonal variation in soil respiration components during key growing stages. The results showed that seasonal averaged values of total soil respiration and rhizospheric respiration under nighttime warming condition were $4.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and $3.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and were 10.0% and 15.4% higher than the control treatments, respectively. This indicated that nighttime warming significantly increased total soil respiration and rhizospheric respiration in winter wheat soil. When taking the different growing stages into account, warming increased rhizospheric respiration during booting stages by 34.6% ~ 44.2% , whereas decreased it during late growing stage by 31.4% ~ 40.4% . In contrast, nighttime warming decreased soil basal respiration during booting stages and to some extent promoted it during late growing stages. It could be concluded that nighttime warming stimulated rhizospheric respiration and to some extent inhibited soil basal respiration, which resulted from nutrient competition between crop roots and soil microorganism as a result of the increase of plant biomass and nutrient uptake of wheat under warming.

Keywords: nighttime warming; rhizospheric respiration; soil basal respiration

收稿日期: 2012-12-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41103039, 41205087); 土壤与农业可持续发展国家重点实验室开放课题(Y052010031); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 江苏省高校优秀青年教师和校长境外研修计划项目

作者简介: 张耀鸿(1977—), 男, 山西汾阳人, 博士, 副教授, 主要从事地气交换与全球变化研究。E-mail: yhzhang@nuist.edu.cn

自工业革命以来,由于人类活动的影响,大气中温室气体浓度尤其是 CO_2 浓度快速上升,加速了全球气候变暖趋势。据气候模型估算,近 100 年来全球地表平均气温升高了 $0.4\sim 0.8\text{ }^\circ\text{C}$ ^[1],而且,到 21 世纪末地表温度可能将再升高 $1.4\sim 5.8\text{ }^\circ\text{C}$ ^[2]。我国地表平均气温近 50 年来上升了 $1.1\text{ }^\circ\text{C}$,高于全球平均增温幅度,并预计到 2100 年将升高 $2.2\sim 4.2\text{ }^\circ\text{C}$ ^[3]。据 IPCC (2007 年)第 4 次评估报告显示,全球气温在快速递升时呈现出明显的不对称性,即冬、春季与夜间的增幅分别显著高于夏、秋季和白天,其中夜间最低气温比白天最高气温的增幅高出 1 倍^[2]。房世波等报道春季夜间增温可导致冬小麦产量下降 27%^[4];田云录等却发现夜间增温处理下南京地区冬小麦单位面积产量提高了 18%^[5]。也有研究认为,夜间增温对冬小麦的区域影响,不能简单地外推到我国其他冬麦种植区^[6]。冬小麦生育期的绝大部分时期发生于冬、春季节,这种非对称性增温可能通过作用于植株的生长发育,进而深刻影响麦田生态系统的碳循环过程。

土壤呼吸作用作为土壤碳库的主要输出途径和大气 CO_2 的重要来源,已经成为全球碳循环研究的核心问题,对于深入理解全球气候变化有着极为重要的意义。温度变化强烈影响土壤呼吸过程,其通过影响植物叶片光合作用、根系生长、土壤微生物组成及活性、土壤水分以及土壤养分循环等关键过程进而调控土壤呼吸强度^[7],但有关温度升高对土壤-植物系统中土壤呼吸过程的研究结果却很不一致^[8-10]。一般认为,土壤呼吸主要包括根系呼吸、微生物分解有机质的基础呼吸、根际微生物呼吸以及根系分泌物或植物残体对土壤微生物的激发效应等^[11]。通常可将土壤呼吸作用简化并划分为两部分:根际呼吸和土壤基础呼吸,其中根际呼吸是植物根系呼吸和根际微生物分解有机物质释放 CO_2 的总和。定量评估土壤呼吸不同组分(根际呼吸、基础呼吸)对温度升高的响应,将有助于预测未来气候变暖背景下农田土壤的净碳损失与碳积累,对了解农田生态系统的碳收支和碳循环生态过程的微观机理具有重要意义。虽然前人已对增温条件下自然生态系统土壤呼吸速率进行了较多的观测试验^[12-14],但有关夜间增温条件下麦田土壤根际呼吸和土壤基础呼吸变化规律的研究却十分鲜见。

有关夜间增温对冬小麦生长发育以及产量影响的研究已有较多报道,而对农田系统地下生态过程,尤其是土壤呼吸过程则鲜有报道。本研究试图采用开放式增温系统对冬小麦进行夜间增温,研究麦田根际

呼吸速率和土壤基础呼吸速率对非对称性气候变暖的实际响应,分析增温条件下作物生长特性对农田土壤呼吸速率不同组分的影响,以期评估未来全球变化背景下农田生态系统碳排放通量的变异规律提供基础资料和参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2010—2011 年在南京信息工程大学农业气象试验站($32^\circ 07' \text{N}$, $118^\circ 50' \text{E}$)进行。该试验站属于亚热带季风性气候,当地多年平均温度为 $15.6\text{ }^\circ\text{C}$,多年平均降水量为每年 1100 mm,平均日照时数超过 1900 h,无霜期 237 d。该地区小麦播种期在 10 月下旬到 11 月上旬,收获期在 5 月底到 6 月初,生育期约 210 d。供试土壤为潴育型水稻土,耕层土壤质地为壤质黏土。耕层土壤理化性质见表 1。

表 1 试验点土壤的理化特征

Table 1 Soil property in the experimental sites

土壤测定项目	测定值
土壤 pH	6.8
土壤有机碳/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	15.6
土壤全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.12
土壤速效磷/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	16.3
土壤速效钾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	62.8

1.2 试验设计

本试验参照 Emmett 等^[15]的被动式夜间增温方法进行,采用铝铂玻纤布将地面发射出的红外线反射回地面,从而减少热量损失,达到夜间升温效果。试验设两个处理:常温对照(CK)、夜间增温(W,增温时间为 19:00—次日 7:00),田间小区面积 $3\text{ m}\times 4\text{ m}$,实际增温面积为 $2\text{ m}\times 3\text{ m}$ (边际效应所致),每个处理重复 4 次。在冬小麦整个生育期(11 月 1 日—5 月 20 日),于每日 19:00 覆盖,次日 7:00 揭开,反射膜距小麦冠层约 25 cm。为消除增温处理对降水的影响,在雨雪天不覆盖反光膜。为避免增温设施被破坏,风速大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时也不覆盖。

采用温度记录仪(ZDR-4,杭州泽大仪器有限公司),在每一个试验小区实时监测 5 cm 深处土壤温度。各处理的温度数据的记录时间间隔为 15 min,记录时间段为 19:00 至次日 7:00,且以该时段温度平均值作为夜间均温。

供试小麦品种为宁麦 15,属于该地区大面积种

植品种。于 2010 年 10 月 30 日播种,行距为 15 cm,种植密度为 400 株·m⁻²。小麦施肥管理按照当地高产栽培技术规程进行,其中 69 kg N·hm⁻² 的尿素,30 kg P·hm⁻² 的过磷酸钙,75 kg K·hm⁻² 的氯化钾作为基肥在播种前(10 月 25 日)施入土壤中,在 2011 年 3 月 18 日拔节期施加 69 kg N·hm⁻² 的尿素进行追肥。除了自然降水外,本试验采用人工灌溉补水方式满足小麦生育期用水,分别在 12 月 10 日、1 月 15 日和 3 月 26 日对各小区进行人工灌溉,每次灌溉量折合为 80 mm 降水量。播种前进行人工拔草消除杂草对本试验的影响,使用的杀虫剂和杀菌剂种类、剂量与当地的农田管理措施保持一致。2011 年 5 月 20 日收获小麦。

1.3 土壤呼吸速率测定

采用 Li-8100 便携式土壤呼吸分析仪测定土壤呼吸速率。为了减小对土壤表层的干扰,土壤呼吸环在本试验播种小麦前预先埋设好。每个试验小区埋设 7 cm 和 50 cm 的呼吸环各 1 个,分别测定土壤总呼吸速率和基础呼吸速率。因冬小麦的根系主要集中在 0~30 cm 的耕作层,所以 50 cm 深度的呼吸环中几乎不受根系的影响,在此呼吸环上测定的土壤呼吸为土壤基础呼吸速率。从冬小麦孕穗期到成熟期,每 3 d 测定 1 次。在整个冬小麦生育期内呼吸环埋设的位置保持不变。为了减小土壤呼吸日变化的影响,每次测定时段为上午 9:00—11:00。每次测定土壤呼吸速率的同时测定空气温度、土壤温度、土壤水分含量等。土壤温度采用热电偶探针插入 5 cm 深度土壤进行测定。

1.4 植物特性测定

考虑到增温处理对冬小麦生育进程的潜在影响,本试验按照作物的实际生育进程进行取样,冬小麦发育期的观测方法参照农业气象观测规范进行。在小麦生长的孕穗期、开花期、成熟期进行植株地上部取样,样品分为茎、叶、穗、籽粒等不同部位后,70 ℃烘至恒重,测定干物重。采用浓硫酸-双氧水消煮,半微量凯氏定氮法测定植株不同部位的全氮含量。再计算出植株的地上部氮素累积量。在每个试验小区中划出 1 m×1 m 的面积用于测产。将该测产小区中的全部穗子收获,计算籽粒产量,然后分析穗数、每穗粒数、千粒重等指标。

1.5 数据处理

所有数据用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS11.5 软件进行处理和统计分析,用 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 夜间增温对土壤温度和作物产量的影响

在该夜间增温系统处理下,麦田 0~5 cm 的土层温度在拔节期、孕穗期、开花期、成熟期分别升高 1.1、0.8、0.6、0.6 ℃,其中在拔节期和孕穗期试验处理间达到显著差异(表 2)。

表 2 小麦不同生育期夜间被动式增温对土壤温度(0~5 cm)和土壤水分的影响

Table 2 Effect of nighttime warming on soil temperature and soil moisture at different growing stages

测定项目	试验处理	拔节期	孕穗期	开花期	成熟期
土壤温度/℃	CK	10.1b	13.2b	21.5a	23.0a
	W	11.2a	14.0a	22.1a	23.6a
土壤水分/%	CK	15.6a	16.4a	15.3a	17.0a
	W	15.1a	16.3a	14.8a	16.8a

注:不同小写字母表示处理间差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

夜间增温处理在一定程度上降低了各试验点的土壤水分含量。增温条件下,拔节期、孕穗期、开花期、成熟期土壤水分含量平均降低 3.2%、0.6%、3.3% 和 1.2%。方差分析表明,增温区与对照区的土壤水分含量差异没有达到显著水平。增温处理显著提高了小麦地上部氮素累积量,但是对冬小麦的生物产量没有产生显著影响(表 3)。

表 3 增温对冬小麦生理特性的影响

Table 3 Effect of nighttime warming on physiological traits of winter wheat

项目	氮素累积量/g·m ⁻²	生物产量/g·m ⁻²
对照	22.6b	1 744.7
夜间增温	26.6a	1 926.5

2.2 夜间增温对土壤总呼吸速率的影响

图 1 表明,2 个处理的土壤总呼吸速率均表现出明显的季节变化特征。夜间增温处理和对照处理的土壤总呼吸速率分别在 2.29~6.22 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 2.61~5.51 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间波动。增温处理小区的最大、最小土壤总呼吸速率分别发生在 4 月 15 日和 5 月 17 日,而对照处理小区的最大、最小土壤总呼吸速率分别发生在 4 月 22 日和 5 月 9 日。夜间增温处理小区土壤总呼吸速率的季节平均值为 4.32 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比对照处理增加了 10%。从不同生育期来看,夜间增温处理明显促进了冬小麦拔节期的土壤总呼吸速

率,而在一定程度上抑制了冬小麦成熟期的土壤呼吸速率。

2.3 夜间增温对土壤基础呼吸速率、根际呼吸速率的影响

土壤基础呼吸是微生物分解土壤有机质释放 CO_2 的生化过程。区分土壤基础呼吸和根际呼吸对土壤总呼吸的贡献即两者在土壤呼吸中所占的比例对于了解某个特定生态系统的碳收支和生态过程的微观机理均有重要意义。图1表明,两个处理小区的土壤基础呼吸也表现出季节变化特征。夜间增温处理和对照处理的土壤基础呼吸速率分别在 $0.38\sim 1.50\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.59\sim 1.49\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间波动。增温处理与对照处理中土壤基础呼吸速率的季节平均值分别为 $1.03\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.05\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,两个处理间没有达到显著差异。然而,从不同生育期来看,夜间增温处理明显抑制了冬小麦拔节期的土壤基础呼吸速率,在一定程度上促进了冬小麦成熟期的土壤基础呼吸速率。

根际呼吸是土壤呼吸中来源于植物光合产物的部分,在忽略植物生长对土壤有机质分解的激发效应

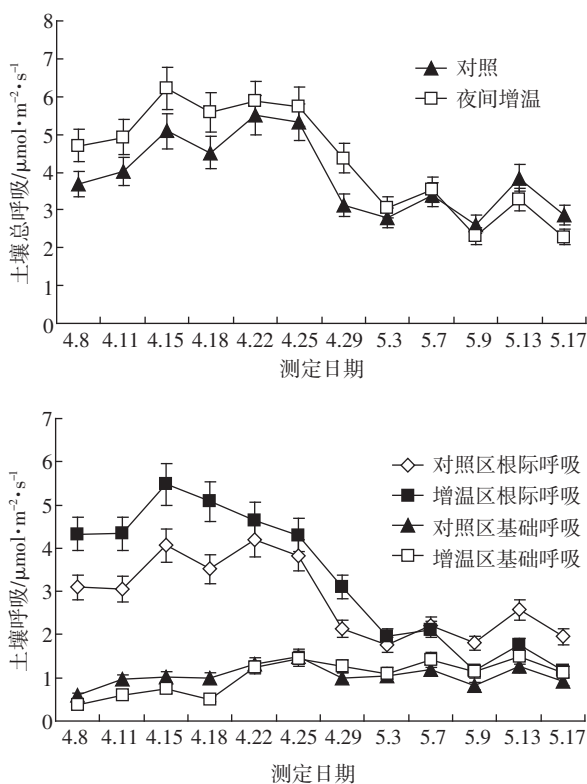


图1 不同试验处理下土壤总呼吸速率、根际呼吸速率、基础呼吸速率的季节变化特征

Figure 1 Seasonal variations of total soil respiration, rhizospheric respiration and basal respiration

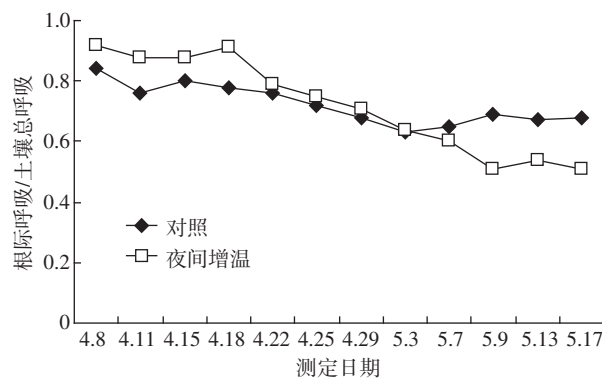


图2 冬小麦不同生长期根际呼吸速率占土壤呼吸速率的比例
Figure 2 Ratio of rhizospheric respiration to total soil respiration at different growing stages

下,土壤总呼吸速率减去土壤基础呼吸速率即为植物根际呼吸速率。图2表明,4月8日、4月11日、4月15日和4月18日的冬小麦根际呼吸速率在增温处理下分别增加了40.0%、41.8%、34.6%、44.2%,表明夜间增温在拔节、孕穗期显著促进了小麦的根际呼吸速率。5月9日、5月13日、5月17日的根际呼吸速率在增温处理下分别降低了34.6%、31.4%、40.4%,表明夜间增温明显抑制了成熟期冬小麦的根际呼吸速率。从整个测定季节周期来看,夜间增温处理小区的根际呼吸速率季节平均值为 $3.29\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,比对照处理增加了15.4%,表明夜间增温显著促进了冬小麦的根际呼吸速率。

2.4 根际呼吸占土壤总呼吸速率的比例

根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例可以反映出植物光合产物在土壤呼吸中的作用。图2表明,在冬小麦生长期,根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例在51%~92%之间,总体变化趋势为随着植物生长进程其比例逐渐减小。在4月8日至4月18日,夜间增温处理区比对照区高出9.5%~16.7%。而在5月9日至5月17日,夜间增温处理区比对照区降低19.4%~26.1%。表明增温处理提高了冬小麦拔节、孕穗期根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例,而降低了成熟期根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例。

3 讨论

关于增温对土壤呼吸速率影响的研究结果,目前还存在很大的不一致性。许多研究者发现,土壤温度是土壤呼吸速率的关键因子,土壤呼吸随温度升高而增加,其与气候变暖存在正反馈过程^[12,15]。Melillo等则发现,增温引起的土壤呼吸速率的增加幅度随着时间

推移逐渐降低,主要是由于土壤中的活性碳逐渐消耗所致^[13]。相反,一些研究认为,温度升高对土壤呼吸过程没有显著影响^[16]。另外,张明乾等还发现,夜间增温对冬小麦田的微生物呼吸具有抑制作用^[8]。本研究发现,夜间增温促进了土壤呼吸速率,与 Rustad 等的研究结果一致^[12]。

土壤温度是控制土壤呼吸速率的主要环境因子^[17],它可能直接影响到土壤水分变化,进而两者交互影响土壤呼吸过程^[18]。一般认为,土壤水分充足的情况下,地温升高通常会提高土壤的微生物活性^[19],从而促进土壤呼吸过程。相反,在土壤水分匮乏情况下,温度升高可能不会促进微生物活性,甚至降低其活性^[20]。本研究中,夜间增温处理虽然在一定程度上降低了土壤含水量,但与对照小区没有达到显著水平。这表明本试验中土壤水分变化不是导致土壤呼吸速率升高的主要原因。陈全胜等发现,水分在较小范围内变化对土壤呼吸速率的影响不明显^[21]。本试验中,夜间增温使得地温在拔节期、孕穗期分别提高 1.1℃、0.8℃,达到了显著水平。且在这两个生育期内,土壤总呼吸速率在增温处理下增加了 22.4%~27.8%,说明土温升高是土壤呼吸速率增加的主要原因。与谭凯炎等的研究结果一致^[6],即夜间增温在冬、春季节对土温升高作用最为显著,且显著提高了土壤呼吸速率。

已有的研究发现,根际呼吸占土壤总呼吸的比例具有很大的不确定性。Rochette 等报道在生长最旺盛期玉米的根际呼吸占到总土壤呼吸的一半左右^[22]。Hanson 等发现小麦生长前期,根呼吸占到土壤呼吸的比例高达 89%~95%^[23]。Kuzakov 等认为,农田土壤中作物根呼吸对土壤呼吸的平均贡献率为 48%^[24]。本研究结果表明,小麦生长期间,根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例在 51%~92%之间,与以上报道基本一致。植物的呼吸作用可以分为生长性呼吸和维持性呼吸,生长性呼吸作用与相对生长速率密切相关。本试验中,2 个温度处理下,4 月中下旬的土壤总呼吸速率均达到最高,随后随着植物生长进程而逐渐减小。这可能主要是因为在此期间,小麦根系的快速生长导致生长性呼吸陡增,从而使得总土壤呼吸速率显著增加;而到灌浆成熟期,小麦根系生物量几乎不再增加,根系呼吸以维持性呼吸为主,导致总土壤呼吸速率明显降低。

本试验中,土壤温度升高对土壤呼吸速率不同组分的作用效应各异,即增温处理在拔节、孕穗期促进了根际呼吸速率,抑制了基础呼吸速率;而在成熟期

则抑制了根际呼吸速率,促进了基础呼吸速率。这可能由几方面原因造成:第一,在拔节、孕穗期,土壤增温促进了作物根系的快速生长,从而加剧根系与土壤微生物之间的养分竞争^[25]。有研究表明,夜间增温加速了冬小麦地上部的生长发育,从而加快作物对土壤中有效养分的吸收^[5]。本试验中,4 月中下旬土壤根际呼吸速率在增温处理下增加了 34.6%~44.2%,是导致土壤总呼吸速率增加的主要因素。支金虎等也发现,增温可以提高小麦苗期的根系活力和根系分泌物,促进根系生长^[26]。与之相伴的是,增温条件下根系增强了对土壤中养分的吸收过程,会进一步加剧与土壤微生物的养分竞争,从而降低了微生物活性,使得土壤基础呼吸速率下降。第二,土壤呼吸各组分的温度敏感性不同。Wang 等发现土壤微生物呼吸的温度敏感性大于植物根际呼吸^[27]。本试验中土壤温度随着作物生长进程而逐渐升高,灌浆成熟期的增温处理可能对土壤微生物产生激发效应,进而提高其温度敏感性。第三,与作物生长后期的根系活力下降密切相关。在灌浆成熟过程中,作物暗呼吸主要来自维持呼吸的贡献^[23],维持性呼吸与植物组织中的氮含量存在显著正相关关系^[29]。灌浆期植物体内的氮素再利用(从营养器官向籽粒中转运)过程导致根系活力下降,根呼吸的温度敏感性减小。

夜间增温会显著影响作物的物候期,进而影响到土壤呼吸速率的季节变化动态特征。已有研究发现,温度升高通过缩短灌浆到成熟的时间,从而缩短了作物的生长总时间^[23]。本试验中,夜间增温处理可能促使冬小麦提前成熟,根系老化,使得此时的根际呼吸速率显著低于对照处理。与之相对应的,土壤基础呼吸速率明显增加。

综上所述,夜间增温提高了冬小麦春季拔节期、孕穗期的地表温度。地温升高导致此时的土壤总呼吸速率显著增加。这主要是根际呼吸速率大幅度增加所致。相反,此时的土壤基础呼吸速率降低。冬小麦在夜间增温条件下氮素积累量显著增加,加剧了根系与土壤微生物之间的养分竞争。这是导致增温条件下土壤根际呼吸速率明显增大、基础呼吸速率减小的主要原因。相反,在冬小麦成熟期,夜间增温导致土壤总呼吸、根际呼吸速率均减小,可能与温度升高后作物生育期提前,提早成熟有关。

需要指出的是,本试验仅仅是在特定区域对特定农作物进行了特定生长时期的单一生长季观测分析,农田土壤基础呼吸速率和根际呼吸速率对夜间增温

的响应差异是否具有普遍性还不能确定,还有待大量观测资料的证明,并从机理上进行深入研究。

4 结论

(1)从本试验冬小麦整个生育期来看,南京地区夜间增温条件下,麦田土壤根际呼吸速率的季节平均值为 $3.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比不增温对照区高出 15.4%,土壤总呼吸速率在夜间增温条件下显著增加。

(2)在作物拔节、孕穗期,夜间增温处理的麦田根际呼吸速率比对照提高了 35%~44%,同时抑制了该时期的土壤基础呼吸速率;相反,在作物生长后期,夜间增温处理显著降低了冬小麦的根际呼吸速率,而在一定程度上促进了该时期的基础呼吸速率。

参考文献:

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate change 2001: The scientific basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] IPCC. Climate change 2007 synthesis report of the IPCC fourth assessment report: Summary for policymakers[EB/OL]. <http://www.ipcc.ch>.
- [3] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近 54 年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717-727.
REN Guo-yu, XU Ming-zhi, CHU Zi-ying, et al. Variation of surface air temperature in China over the past 54 years[J]. *Climate and Environmental Research*, 2005, 10(4): 717-727.
- [4] 房世波, 谭凯炎, 任三学. 夜间增温对冬小麦生长和产量影响的实验研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3251-3258.
FANG Shi-bo, TAN Kai-yan, REN San-xue. Winter wheat yields decline with spring higher night temperature by controlled experiments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(15): 3251-3258.
- [5] 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 Yun-lu, CHEN Jin, DENG Ai-xing, 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.
- [6] 谭凯炎, 房世波, 任三学, 等. 非对称性增温对农业生态系统影响研究进展[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 634-641.
TAN Kai-yan, FANG Shi-bo, REN San-xue, et al. Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature in global warming and its effects on agriculture ecosystems[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(5): 634-641.
- [7] Knorr W, Prentice I C, House J I, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming[J]. *Nature*, 2005, 433: 298-301.
- [8] 张明乾, 韩证仿, 陈金, 等. 夜间增温对冬小麦土壤微生物量碳氮及其活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(11): 1464-1470.
ZHANG Ming-qian, HAN Zheng-fang, CHEN Jin, et al. Impact of nighttime warming on soil microbial biomass carbon/nitrogen and activity in main winter wheat cropping areas in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1464-1470.
- [9] 王珍, 赵萌莉, 韩国栋, 等. 模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 98-103.
WANG Zhen, ZHAO Meng-li, HAN Guo-dong, et al. Response of soil respiration to simulated warming and N addition in the desert Steppe[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9): 98-103.
- [10] 刘涛, 张永贤, 许振柱, 等. 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(10): 1043-1053.
LIU Tao, ZHANG Yong-xian, XU Zhen-zhu, et al. Effects of short-term warming and increasing precipitation on soil respiration of desert steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(10): 1043-1053.
- [11] Kuzyakov Y. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 425-448.
- [12] Rustad L E, Norby R J, Mitchell M J, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126: 543-562.
- [13] Melillo J M, Steadler P A, Aber J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system [J]. *Science*, 2002, 298(13): 2173-2176.
- [14] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, et al. Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperature[J]. *Ecological Applications*, 1994, 4: 617-625.
- [15] Emmett B A, Beier C, Estiarte M, et al. The response of soil processes to climate change: Results from manipulation studies of shrublands across an environmental gradient[J]. *Ecosystems*, 2004, 7: 625-637.
- [16] Reth S, Graf W, Reichstein M, et al. Sustained stimulation of soil respiration after 10 years of experimental warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(2): 024005.
- [17] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217-227.
- [18] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53-69.
- [19] Zhou X H, Wan S Q, Luo Y Q. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(4): 761-775.
- [20] Sowerby A, Emmett B, Beier C, et al. Microbial community changes in heathland soil communities along a geographical gradient: Interaction with climate change manipulations[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(10): 1805-1813.
- [21] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理[J]. 生态学报, 2003, 25(5): 972-978.
CHEN Quan-sheng, LI Ling-hao, HAN Xing-guo, et al. Effect of soil moisture on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 25(5): 972-978.

- [22] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn crop under field conditions[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1997, 61:466–474.
- [23] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, et al. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48:115–146.
- [24] Kuzyakov Y, Larionova A A. Root and rhizomicrobial respiration: A review of approaches to estimate respiration by autotrophic and heterotrophic organisms in soil[J]. *Journal Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168:503–520.
- [25] Hodge A, Robinson D, Fitter A. Are microorganisms more effective than plants at competing for nitrogen? [J]. *Trends in Plant Science*, 2000, 5(7):304–308.
- [26] 支金虎, 马永清. PDJ 对不同温度下小麦种子萌发和幼苗根系活力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2007(5):27–31.
- ZHI Jin-hu, MA Yong-qing. Effect of PDJ on seed germination and root activity of wheat seedling under different temperature[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2007(5):27–31.
- [27] Wang W, Guo J X. The contribution of root respiration to soil CO₂ efflux in *Puccinellia tenuiflora* dominated community in a semiarid meadow steppe[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(6):697–703.
- [28] Amthor J S. Respiration and crop productivity[M]. New York:Springer Verlag, 1989:215.
- [29] Ryan M G. Effects of climate change on plant respiration[J]. *Ecological Applications*, 1991, 1:157–167.