

氮肥施用对玉米根际呼吸温度敏感性的影响

张耀鸿^{1,2}, 朱红霞^{1,2}, 李映雪^{1,2}, 黄宾宾^{1,2}, 彭晓丹^{1,2}, 左小瑞^{1,2}, 余焰文^{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)

摘 要:为研究氮肥施用对玉米根际呼吸和土壤基础呼吸温度敏感性的影响,采用动态密闭气室红外 CO₂ 分析法,于 2010 年进行田间试验,该试验设 4 个处理:裸地不施氮肥(CK)、裸地施氮肥(CK-N)、种植玉米不施氮肥(M)、种植玉米施加氮肥(M-N),观测玉米田土壤呼吸各组分的日变化规律,同时观测土壤温度、气温等环境因子。结果表明,不种植玉米处理(CK 和 CK-N)土壤呼吸速率(土壤基础呼吸)为 0.57~1.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,施加氮肥对土壤基础呼吸没有显著影响;种植玉米条件下,施氮处理(M-N)的季节平均土壤呼吸速率为 3.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,显著高于不施氮处理(M),增幅达 31.9%。CK 和 CK-N 处理的土壤基础呼吸温度敏感系数 Q_{10} 分别为 1.20、1.25,而不施氮和施氮条件下玉米根际呼吸的 Q_{10} 值则分别为 1.27、1.49。施加氮肥导致玉米根际呼吸温度敏感性明显增强(Q_{10} 值增大),而土壤基础呼吸的温度敏感性则无明显变化,两种效应的叠加使得种植玉米土壤的总呼吸速率温度敏感性明显增加。

关键词:氮肥;根际呼吸;土壤基础呼吸;温度敏感性

中图分类号:S152.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)10-2033-07

Effects of Nitrogen Fertilization on Temperature Sensitivity of Rhizosphere Respiration During Maize Growing Stages

ZHANG Yao-hong^{1,2}, ZHU Hong-xia^{1,2}, LI Ying-xue^{1,2}, HUANG Bin-bin^{1,2}, PENG Xiao-dan^{1,2}, ZUO Xiao-rui^{1,2}, YU Yan-wen^{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)

Abstract: Field experiment was carried out in 2010 in order to investigate the effects of nitrogen (N) fertilization on the temperature sensitivity of maize rhizospheric respiration and soil basal respiration during maize growing stages. Dynamic closed chamber infrared CO₂ analysis was used to measure diel variation in soil respiration components during key growing stages. Environmental factors such as soil temperature and air temperature were also measured. Four treatments were set up in the experiment, i.e., unplanted and N-unfertilized (CK), unplanted but fertilized with 300 kg·N·hm⁻² (CK-N), planted maize (*Zea mays* L.) but N-unfertilized (M), and planted maize and fertilized with 300 kg·N·hm⁻² (M-N). In unplanted soils (CK and CK-N), soil respiration rate (soil basal respiration) ranged from 0.57 to 1.23 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and N fertilization had less effect on soil basal respiration. On the other hand, in planted soils, the seasonal averaged soil respiration rate in M-N treatment amounted to 3.14 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, and was 31.9% higher than that in M treatment. This increment mainly occurred at tasselling and flowering stages. The Q_{10} values (temperature sensitivity coefficients) for unplanted treatments (CK and CK-N) were 1.20 and 1.25, respectively, while the Q_{10} values for planted treatments (M and M-N) were 1.27 and 1.49. N fertilization evidently increased temperature sensitivity coefficients of maize rhizospheric respiration, but had less effect on those of soil basal respiration. Thus, superposition of the two effects led to apparent increase in temperature sensitivity coefficients of total respiration rate in maize-planted field.

Keywords: nitrogen fertilizer; rhizospheric respiration; soil basal respiration; temperature sensitivity

收稿日期: 2011-04-05

基金项目: 江苏省高校自然科学研究计划项目(08KJB210001); 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; 南京信息工程大学科研基金(20080330)

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

温室效应所引起的全球变暖问题已经引起了人们的广泛关注,CO₂是最主要的温室气体,近几十年来在大气中的浓度持续上升。陆地生态系统有机碳库的稳定性及其减少温室气体排放已经被国际社会公认为是减缓气候变化的重要途径之一^[1]。土壤是主要的陆地生态系统碳库,总储存量达到1394 Pg C(1 Pg=10¹⁵ g),大约是大气中碳总量(750 PgC)的2倍,陆地生物碳总储量(560 PgC)的3倍^[2]。作为一个关键的生态过程,土壤呼吸作用是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。

农田管理措施强烈地影响土壤有机碳库的平衡。施肥是农田生态系统的增产措施之一。据估算,在施用化肥条件下我国农田土壤的固碳潜力为21.9 Tg C·a⁻¹^[3]。迄今为止,有关氮肥对土壤-作物系统中土壤呼吸影响的研究报道不尽一致^[4-6]。土壤呼吸是一个复杂的生态学过程,植被类型、土壤微生物组成及活性、土壤温度、土壤水分、土壤养分循环过程等多种因素及其变化都会影响土壤呼吸强度^[7],其中温度因子对土壤呼吸的作用尤为显著。在土壤系统中,土壤微生物的数量、组成以及活性对温度因子非常敏感,温度因子引起的土壤异养呼吸的变化对土壤碳库有着重要影响^[8]。土壤中存在不同周转时间的碳库,其温度敏感性不同,周转时间短的碳库的温度敏感性可能低于周转时间长的碳库^[9]。虽然前人已对施加氮肥条件下农田土壤呼吸速率进行了较多的观测试验,但施加氮肥后土壤呼吸温度敏感性变化规律的研究却十分鲜见。

本研究试图通过田间观测试验,分析施加氮肥对农田土壤呼吸温度敏感性的影响,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 试验地点概况

田间试验在南京信息工程大学农业气象试验站进行。该区域位于北纬32.0°,东经118.8°,海拔高度约22 m。年均降水为1100 mm,年均气温为15.6℃。供试土壤为潴育型水稻土,耕层土壤质地为壤质黏土。2010年5月试验开始前土壤的基本理化性质为:pH6.8,有机碳4.23 g·kg⁻¹、全氮0.66 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验设4个处理:裸地不施氮肥(CK)、裸地施加氮肥300 kg·hm⁻²(CK-N)、种玉米不施氮肥(M)和种

玉米施加氮肥300 kg·hm⁻²(M-N),每个处理重复3次。小区面积为4 m×8 m,随机区组排列。于2010年4月28日将磷肥(100 kg·hm⁻²)和钾肥(150 kg·hm⁻²)作为基肥全部施入每个试验小区;施氮处理小区中氮肥分基肥(150 kg·hm⁻²)和追肥(150 kg·hm⁻²)两次施入,其中追肥于6月26日施用。2010年5月7日点播玉米,品种为雪糯6号,行距和株距分别为60 cm和40 cm。2010年5月15日出苗,在玉米生长期及时拔除杂草,8月12日收获。

1.3 土壤呼吸测定

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,土壤呼吸室放置在PVC圈上,在土壤测定前24 h将PVC圈插入土壤中。在整个观测过程中PVC圈埋设位置保持不变。分别于玉米拔节期(6月12日)、抽穗期(6月28日)、开花期(7月15日)和成熟期(8月2日)进行4次土壤呼吸速率日变化测定。采样时间为每个测定日的6:00—18:00,每2 h测定1次,共测定7次。

1.4 环境因子测定

每次进行气体样品采集的同时测定空气温度、土壤温度等环境因子指标。土壤温度采用土壤热电偶探针插入5 cm深度土壤进行测定。

1.5 数据分析

所有的统计分析在Excel和SPSS 13.0软件中进行。为分析土壤呼吸与温度的关系,采用 $R_s=ae^{bT}$ 指数函数进行拟合(R_s 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, a 、 b 为拟合系数),采用 $Q_{10}=e^{10b}$ 对 Q_{10} 土壤呼吸的温度敏感性进行计算。

2 结果与分析

2.1 土壤总呼吸和土壤基础呼吸的日变化

玉米4个生育期的测定结果表明,M-N和M处理的土壤呼吸均呈现单峰变化规律,即12:00或者14:00时的呼吸速率最高,6:00或18:00时的呼吸速率相对较低(图1)。整个生长期M-N处理的土壤呼吸速率普遍高于M处理。将每个测定日7个采样时间点测定的土壤总呼吸速率取算术平均值,可得拔节期、抽穗期、开花期和成熟期的M-N土壤总呼吸速率分别为2.09、3.83、4.65 μmol·m⁻²·s⁻¹和1.97 μmol·m⁻²·s⁻¹,而M处理的土壤呼吸速率分别为1.80、2.84、3.18 μmol·m⁻²·s⁻¹和1.69 μmol·m⁻²·s⁻¹。其中,抽穗期和开花期的M-N与M处理之间的差异达到显著水平($P<0.05$)。可见,4个时期采样中,施加氮肥显著促

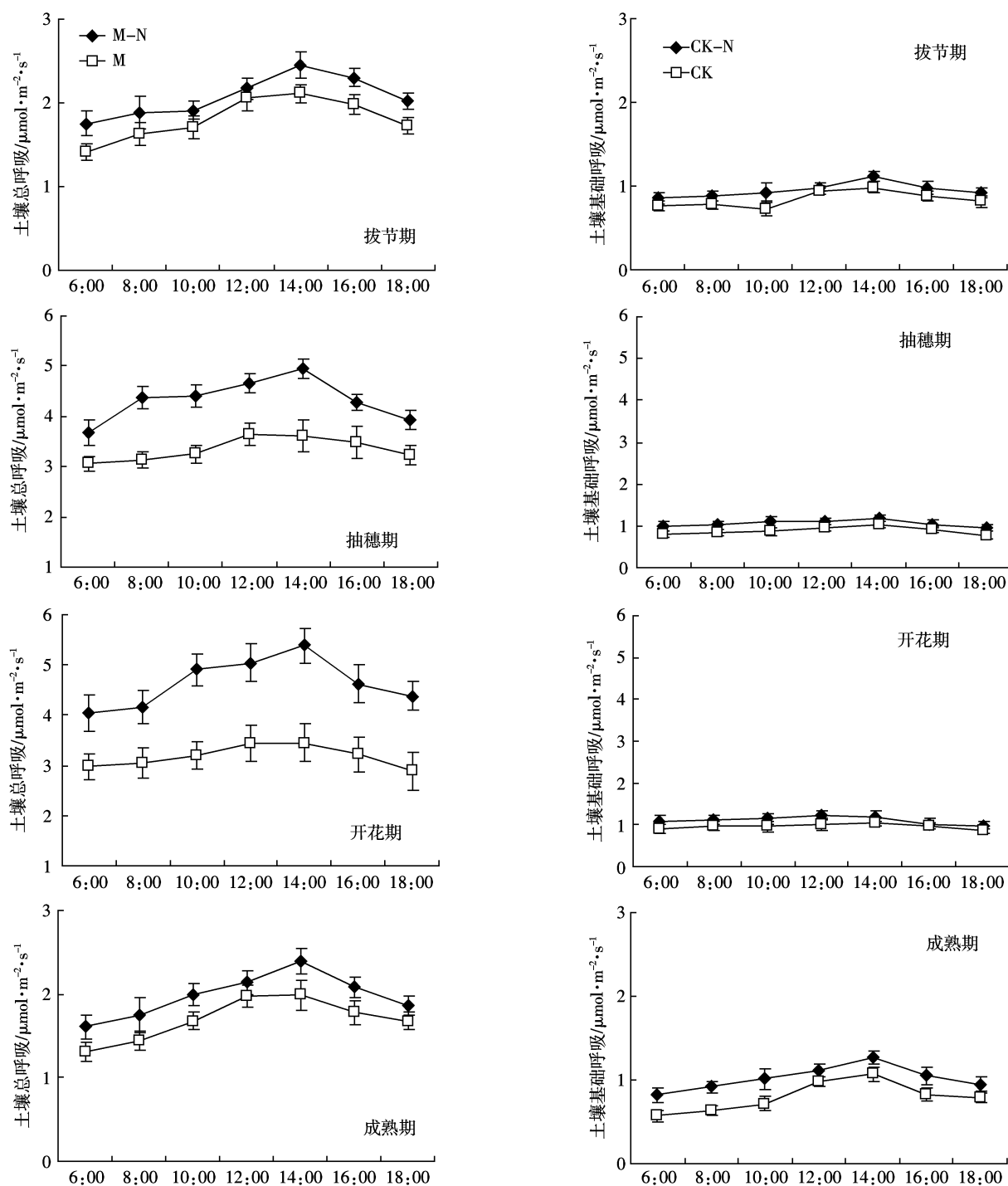


图1 种植玉米土壤和裸地土壤在4个生育期的土壤呼吸速率日变化特征

Figure 1 Temporal variations in maize-planted soil respiration and the bare soil respiration

进了抽穗期和开花期玉米田的土壤呼吸作用。

与种植玉米的土壤呼吸作用相类似,CK-N 和 CK 处理的裸地土壤基础呼吸速率也呈现单峰变化规律。在4个采样日中,CK-N 的土壤呼吸速率也普遍高于 CK 处理,但是总体来讲,施加氮肥对裸地土壤呼吸的促进作用比对种植玉米土壤呼吸速率的促进

作用要小得多。

2.2 玉米根际呼吸占土壤呼吸的比例

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下,种植玉米的土壤总呼吸减去不种玉米的裸地土壤呼吸就可以看作是植物根际呼吸。根际呼吸占土壤呼

吸的比例可以反映植物光合产物在土壤呼吸中的作用。图 2 表明,在玉米生长期,日平均根际呼吸速率占日平均土壤总呼吸速率的比例在 48%~76%之间。在玉米开花期之前,随着植物生长进程其比例逐渐增大。M-N 处理的日平均根际呼吸速率(根据每日 7 次的测定结果计算算术平均值)占日平均土壤总呼吸速率的比例总体上高于 M 处理(成熟期除外),特别是在抽穗期、开花期采样日,M-N 比 M 处理分别高 22.9%和 21.4%。以 4 个时期的日平均根际呼吸速率取平均值,可得 M-N 和 M 处理的根际呼吸速率占土壤总呼吸速率的比例分别为 62.6%和 56.9%。这说明玉米生长期内施加氮肥对根际呼吸速率具有明显的促进作用。

2.3 根际呼吸和土壤基础呼吸的温度敏感性

将 M-N 和 M 处理的根际呼吸分别与其对应的 5 cm 土壤温度进行一元指数回归拟合,结果表明,M-N 和 M 处理的根际呼吸与土壤温度之间的关系均可用指数方程来描述(表 1)。无论是在拔节期、抽

穗期、开花期还是成熟期,M-N 处理拟合方程的决定系数 R^2 均高于 M 处理。 Q_{10} 是指温度每增加 10 ℃土壤呼吸所增加的倍数,可用于表示温度对土壤呼吸的影响效应。本试验中,M-N 处理的 Q_{10} 值在 1.39~1.71 之间,明显高于 M 处理的 Q_{10} 值范围 1.21~1.37。这表明施加氮肥处理后,玉米根际呼吸的温度敏感性明显增加。

将 CK-N 和 CK 处理的土壤呼吸分别与其对应的土壤温度进行一元指数回归拟合,CK-N 和 CK 处理的土壤呼吸与土壤温度之间的关系也均可用指数方程来描述(表 1)。在 4 个测定时期,CK-N 处理拟合方程的决定系数 R^2 均略高于 CK 处理,与根际呼吸相类似。施氮条件下裸地土壤呼吸的温度敏感性略有增加, Q_{10} 值范围为 1.17~1.38。与种植玉米土壤相比,裸地土壤中氮肥的这种促进作用明显偏低。这表明施加氮肥条件下,尽管玉米根际呼吸和土壤基础呼吸的温度敏感性都增加,但是根际呼吸的响应度表现得更明显。

2.4 土壤总呼吸速率的温度敏感性

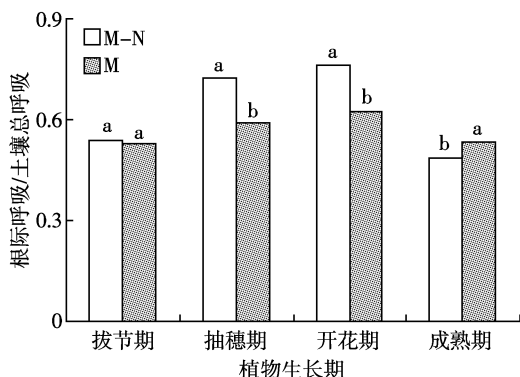
将 M-N 和 M 处理的土壤总呼吸速率分别与其对应的土壤温度、气温进行一元指数回归拟合,结果表明,M-N 和 M 处理的土壤呼吸与土壤温度、气温之间的关系均可用指数方程来描述(图 3)。其中,M-N 和 M 处理的土壤呼吸与土壤温度拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.45、0.45,均高于土壤呼吸与气温拟合方程的决定系数;且 Q_{10} 值分别为 2.17、1.97,均高于土壤总呼吸与气温拟合方程求得的 Q_{10} 值(分别为 1.96、1.76)。这说明与气温变化相比,种植玉米的土壤总呼吸速率对土壤温度变化的响应度更加明显。

从图 3 还可以看出,施加氮肥促进了玉米田土壤总呼吸速率的温度敏感度。这主要是由于施加氮肥导致植物根际呼吸的温度敏感性明显增加,而土壤基础呼吸的温度敏感性变化不大,两种效应的叠加使得玉米地土壤总呼吸速率的温度敏感性明显增加。根据图 3 的一元指数方程,在地温和气温变化条件下计算得到的 M-N 处理的 Q_{10} 值分别比 M 处理高出 10.0%和 11.6%。

3 讨论

3.1 氮肥对种植玉米土壤呼吸作用的影响

不同研究者关于氮肥对土壤呼吸影响的研究结论并不一致,有促进^[4-5]、抑制^[10-11]或无影响^[6] 3 种结论。本试验中,在种植玉米土壤上施加氮肥明显提高



不同处理在同一生长期,不同字母表示差异显著
图 2 玉米不同生长期根际呼吸占土壤总呼吸速率的比例
Figure 2 Ratio of rhizosphere respiration to soil respiration at different growing stages

表 1 土壤呼吸速率与土壤温度的关系

Table 1 The relationship between soil respiration rate and soil temperature

	生育期	施加 N 肥		不施 N 肥	
		R^2	Q_{10}	R^2	Q_{10}
根际呼吸	拔节期	0.931**	1.71	0.648**	1.37
	抽穗期	0.771**	1.40	0.575*	1.21
	开花期	0.753**	1.45	0.739**	1.24
	成熟期	0.955**	1.39	0.899**	1.24
基础呼吸	拔节期	0.500*	1.24	0.601*	1.20
	抽穗期	0.536*	1.17	0.864**	1.10
	开花期	0.532*	1.19	0.686**	1.18
	成熟期	0.813**	1.38	0.853**	1.32

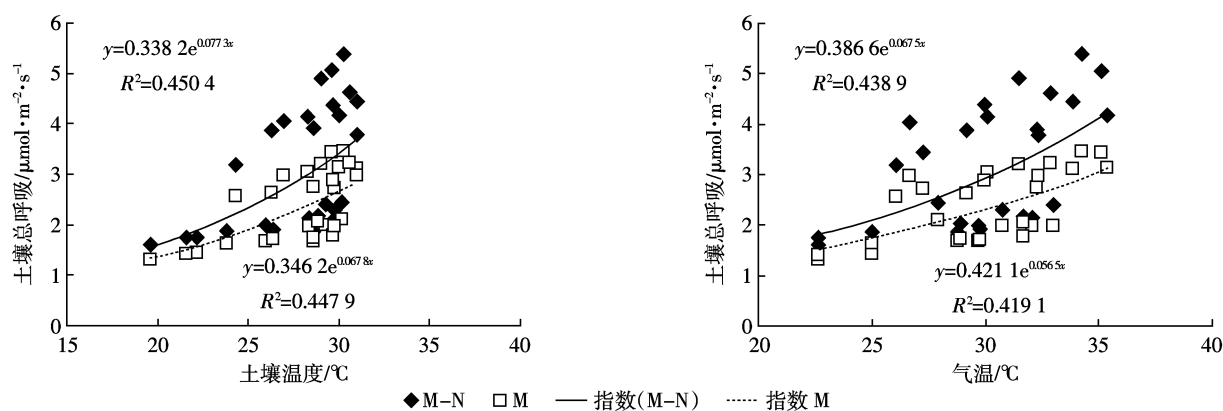


图3 土壤呼吸与土壤温度及气温的关系

Figure 3 Relationship between soil respiration and soil temperature and air temperature

了土壤呼吸速率,这与李建敏等^[12]的研究结果一致。而在裸地条件下,施加氮肥对土壤呼吸无显著影响。这说明不同氮肥水平下的土壤呼吸差异主要来自植物生长的影响。施加氮肥玉米土壤的季节平均呼吸速率比不施氮肥处理高 31.9%,且这种差异主要发生在植物生长中期。在玉米抽穗期施氮土壤的呼吸速率比不施氮处理高出 34.7%,开花期则比不施氮处理高出 46.4%。这与 Ding 等^[10]的研究结果正好相反,他们的田间试验表明,与施氮处理相比,不施氮肥处理的土壤呼吸更高。比较其与本研究土壤的有机碳含量发现,本研究土壤有机碳含量为 $4.23\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,而其田间测定的土壤有机碳含量达到 $7.28\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$,氮肥对土壤呼吸的影响可能与所用土壤的有机碳含量密切相关。

氮是植物生长所必需的营养元素,也是叶绿素的主要成分。施氮增加叶绿素的形成,可以增强叶片光合作用,一方面促进了植物根系生长,另一方面对养分和水分吸收增多,使得根系呼吸增加;施氮还可以提供给微生物有效氮,使微生物活性和数量增加,导致微生物呼吸增加。小麦同位素标记结果表明,高氮处理的根系呼吸比低氮处理高,且土壤中含 ^{14}C 标记的微生物量和根际微生物数量也比低氮处理显著增加^[13]。Johansson 等^[14]用 ^{14}C 标记大麦试验结果表明,高氮和低氮处理的根际呼吸在大麦生长前 30 d 几乎相同,但随后的 19 d 高氮处理的根际呼吸显著比低氮处理高。本试验也证明了不同供氮水平下土壤呼吸的差异主要发生在玉米营养生长和生殖生长并重的抽穗开花期。

土壤呼吸包括土壤基础呼吸和根际呼吸,其中根际呼吸可分为根系呼吸和根际微生物呼吸^[15],氮肥对

土壤呼吸的影响是对上述呼吸组分综合作用的结果。Johnson 等^[16]发现,氮肥通过刺激土壤有机碳分解来提高土壤呼吸;而 Bloom 等^[17]发现,氮肥主要通过增强根际呼吸来提高土壤呼吸。本研究发现,施用氮肥后裸土土壤呼吸速率增加量范围仅为 $0.15\sim0.22\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而种植玉米条件下土壤呼吸速率增加量范围达 $0.28\sim1.47\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,说明玉米生长条件下氮肥对土壤呼吸的促进作用主要来自植物生长的影响。进一步分析表明,施加氮肥条件下,玉米根际呼吸速率季节平均值增加了 31.2%,显著高于土壤基础呼吸的增量。由此可见,本试验中施用氮肥提高土壤呼吸主要是由于根际呼吸增加所致,这与 Russell 等^[18]的研究结果一致。施氮可促使植物根系生长、分泌物数量和种类增加。根际微生物可以优先利用这些低分子量的根源碳,导致根际微生物活性大大增强,促进根际微生物的呼吸作用,同时可能会引起土壤原有的有机碳分解降低^[19]。

3.2 土壤呼吸的温度敏感性

土壤呼吸的温度敏感系数(Q_{10})是表征呼吸作用的重要指标,这一指标反映了温度变化后呼吸作用的变化规律,对于了解未来气候变暖条件下农田生态系统碳通量的变化规律具有一定的参考意义。本研究表明,施加氮肥后玉米根际呼吸的温度敏感性明显增加(Q_{10} 值增大),而土壤基础呼吸的温度敏感性则无明显变化(Q_{10} 值几乎不变)。综合前人的研究,笔者推断可能有如下 3 方面的原因:第一,本试验所用土壤的有机碳含量很低,只有 $4.23\text{ gC}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于有机碳是土壤微生物呼吸的物质和能量基础,本试验的裸地土壤即使在施氮条件下也会因缺乏有机碳而导致微生物活性一直维持在较低水平^[20],表现为温度敏感系数几

乎不变^[2]。第二,根际呼吸由植物光合产物控制,土壤基础呼吸则由土壤有机质控制。施加氮肥可以提高植物叶片的光合效率,根际微生物呼吸速率将随着光合产物供应变化而在较大范围内上下波动^[20]。第三,氮素是植物生长必需的大量元素之一,在养分相对贫瘠的土壤上施加氮肥后,氮素营养不再是植物生长的限制因子,此时土壤温度极可能成为土壤呼吸作用日变化的主要驱动因子,表现为土壤呼吸速率的温度敏感性增强, Q_{10} 值增大。

在未来全球变暖条件下,如果农田土壤基础呼吸的温度敏感性不变,那么这意味着农田生态系统中土壤原有有机质的分解相对稳定,升温所导致的土壤有机碳分解也不太可能明显增加。另一方面,植物根际呼吸的温度敏感性增强,其对大气环境的 CO_2 净排放量取决于植物根际呼吸排放碳的增量与升温所导致的植物生物量增量的相对值;如果在植物生物量不变的情况下,增温促进根际呼吸增强将意味着更多的光合产物用于根系的呼吸作用,降低了植物的净固碳效率。此外,根际呼吸温度敏感性增强也意味着植物生长对土壤有机质分解的激发效应可能相应增大^[22],而这种激发效应有正有负。目前,我们无法有效区分根际呼吸中根系分泌物和土壤有机碳分解的相对贡献。正是由于土壤呼吸中各个组分温度敏感性的不一致和复杂性,使得今后在这方面的继续研究显得很有必要。

需要指出的是,本试验仅仅对特定作物进行了特定生长时期的观测分析,施肥条件下土壤基础呼吸和根际呼吸的温度敏感性所表现出来的差异是否具有普遍性还不能确定,这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)种植玉米条件下,施氮处理的土壤呼吸速率季节平均值为 $3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比不施氮处理高出31.9%;相反,施加氮肥对裸地农田的土壤基础呼吸则没有显著影响。

(2)施加氮肥导致玉米根际呼吸的温度敏感性增强(Q_{10} 值增大),而土壤基础呼吸的温度敏感性则无明显变化,两种效应的叠加导致种植玉米土壤的总呼吸速率温度敏感性明显增加。

参考文献:

[1] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等.土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳

研究的进展与问题[J].土壤学报,2008,45(5):901-914.

PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):901-914.

[2] Lohila A, Aurela M, Regina K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251:303-317.

[3] 逯非,王效科,韩冰,等.中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J].应用生态学报,2008,19(10):2239-2250.

LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Assessment on the availability of nitrogen fertilization in improving carbon sequestration potential of China's cropland soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(10):2239-2250.

[4] 杨兰芳,蔡祖聪.玉米生长中的土壤呼吸及其受氮肥施用的影响[J].土壤学报,2005,42(1):9-15.

YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):9-15.

[5] 王重阳,王绍斌,顾江新,等.下辽河平原玉米田土壤呼吸初步研究[J].农业环境科学学报,2006,25(5):1240-1244.

WANG Chong-yang, WANG Shao-bin, GU Jiang-xin, et al. CO_2 emission flux from several dry crops and impact factors in the lower reaches of Liaohu Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1240-1244.

[6] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等.华北平原麦田土壤呼吸特征[J].应用生态学报,2004,15(9):1552-1560.

CHEN Shu-yue, LI Jun, LU Pei-ling, et al. Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(9):1552-1560.

[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] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic matter decomposition still a topic of debate[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38:2510-2518.

[9] Eliasson P E, McMurtrie R E, Pepper D A, et al. The response of heterotrophic CO_2 flux to soil warming[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11:167-181.

[10] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Soil respiration under maize crops: Effects of water, temperature, and nitrogen fertilization[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71:944-951.

[11] Wilson H M, Al-Kaisi M M. Crop rotation and nitrogen fertilization effect on soil CO_2 emissions in central Iowa[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39:264-270.

[12] 李建敏,丁维新,蔡祖聪.氮肥对玉米生长季土壤呼吸的影响[J].应用生态学报,2010,21(8):2025-2030.

LI Jian-min, DING Wei-xin, CAI Zu-cong. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8):2025-2030.

[13] Liljeroth E, van Veen J A, Miliier H J. Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations[J]. *Soil Biol-*

- ogy and Biochemistry, 1990, 22:1015–1021.
- [14] Johansson G. Below-ground carbon distribution in barley (*Hordeum vulgare* L.) with and without nitrogen fertilization[J]. *Plant and Soil*, 1992, 144:93–99.
- [15] 金 钊, 董云社, 齐玉春. 综述土壤呼吸各组分区分方法[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4):22–33.
- JIN Zhao, DONG Yun-she, QI Yu-chun. Review on the approaches of separating autotrophic and heterotrophic components of soil respiration[J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(4):22–33.
- [16] Johnson D, Geisinger D, Walker R, et al. Soil pCO₂, soil respiration and root activity in CO₂-fumigated and nitrogen-fertilized ponderosa pine [J]. *Plant and Soil*, 1994, 165:129–138.
- [17] Bloom A J, Sukrapanna S S, Warner R L. Root respiration associated with ammonium and nitrate absorption and assimilation by barley[J]. *Plant Physiology*, 1992, 99:1294–1301.
- [18] Russell A E, Laird D A, Parkin T B, et al. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69:413–422.
- [19] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33:1915–1925.
- [20] 唐燕飞, 王国兵, 阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2008, 32(1):124–128.
- TANG Yan-fei, WANG Guo-bing, RUAN Hong-hua. A review on the sensitivity of soil respiration to temperature[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2008, 32(1):124–128.
- [21] 盛 浩, 杨玉盛, 陈光水, 等. 土壤异养呼吸温度敏感性(Q_{10})的影响因子[J]. 亚热带资源与环境学报, 2006, 1(1):74–83.
- SHENG Hao, YANG Yu-sheng, CHEN Guang-shui, et al. Controls on the temperature sensitivity of soil heterotrophic respiration: Q_{10} variability and analysis[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2006, 1(1):74–83.
- [22] Fu S L, Cheng W X. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C₄ and C₃ grassland soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 238:289–294.