

施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响

姜继韶^{1,2}, 郭胜利^{1,3,4*}, 王蕊⁴, 刘庆芳⁴, 王志齐³, 张彦军³, 李娜娜³, 李如剑³, 吴得峰⁴, 孙棋棋^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100)

摘要: 了解施氮对土壤呼吸和温度敏感性的影响,是研究农田土壤呼吸变化的重要环节,对预测农田土壤呼吸变化具有重要意义. 基于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站的氮肥管理试验,于 2013 年 4 月至 2014 年 9 月利用 LI-8100 系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA) 监测施氮和不施氮条件下旱地春玉米生长季土壤呼吸、温度、水分以及根系生物量的变化,研究施氮条件下生物与非生物因素对土壤呼吸速率和温度敏感性(Q_{10})的影响. 施氮显著提高了生长季土壤的累积呼吸量($P < 0.05$),与不施氮相比,施氮处理累积呼吸量 2013 年提高了 35% 2014 年提高了 54%. 但施氮显著降低了土壤呼吸温度敏感性($P < 0.05$),施氮处理的 Q_{10} 较对照 2013 年降低了 27% 2014 年降低了 17%. 施氮显著提高了春玉米产量、地上部生物量和根系生物量($P < 0.05$). 施氮处理根系生物量较不施氮处理 2013 年提高了 0.32 倍 2014 年提高了 1.23 倍. 施氮对土壤温度和水分无显著影响,根系生物量是施氮条件下导致土壤呼吸差异的重要生物因素.

关键词: 施氮; 春玉米; 土壤呼吸; Q_{10} ; 根系生物量; 黄土高原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1802-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.05.040

Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau

JIANG Ji-shao^{1,2}, GUO Sheng-li^{1,3,4*}, WANG Rui⁴, LIU Qing-fang⁴, WANG Zhi-qi³, ZHANG Yan-jun³, LI Na-na³, LI Ru-jian³, WU De-feng⁴, SUN Qi-qi^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Understanding the effects of nitrogen fertilization on soil respiration rate and its temperature sensitivity (Q_{10}) is of critical importance to predict the variability of soil respiration in cropland. A field experiment was established in a rain-fed spring maize cropland (*Zea mays* L.) in the State Key Agro-Ecological Experimental Station in the Loess Plateau in Changwu County, Shaanxi Province, China. The experiment comprised of two treatments: no N-fertilizer application (CK) and N-fertilizer application with 160 kg N·hm⁻² (N). Soil respiration rate, soil temperature, soil moisture, yields, aboveground biomass and root biomass were measured in two continuous spring maize growing seasons from April 2013 to September 2014. The cumulative soil CO₂ emissions were increased by 35% in 2013 and 54% in 2014 in N treatment as compared to CK treatment. Though nitrogen fertilization significantly increased the cumulative soil CO₂ emissions ($P < 0.05$), it did decrease evidently the temperature sensitivity of soil respiration ($P < 0.05$). The Q_{10} values in N treatment were decreased by 27% and 17% compared with CK treatment in 2013 and 2014, respectively. Nitrogen fertilization significantly increased the maize yields, aboveground biomass and root biomass ($P < 0.05$). Root biomasses in N treatment were 32% and 123% greater than those in CK treatment of 2013 and 2014, respectively. Nitrogen fertilization had no marked influence on soil temperature or moisture. Root biomass was a critical biotical factor for variation of soil respiration under nitrogen fertilization.

Key words: nitrogen fertilization; spring maize; soil respiration; Q_{10} ; root biomass; Loess Plateau

全球每年土壤呼吸碳通量达到 75 Pg,是全球碳循环中重要的流通途径,约是化石燃料燃烧释放 CO₂ 的 11 倍^[1]. 农田面积约占地表陆地面积的 12%^[2],而且陆地土壤有机碳库中,农业土壤碳库受到强烈人为的干扰,其 CO₂ 的年释放量高达 78 Tg^[3]. 农田土壤呼吸微小的变化都会显著影响大气中 CO₂ 的浓度,且在较短的时间尺度上能够影响土壤碳库^[4]. 因此,测定农田土壤呼吸对于精准评估

陆地生态系统碳循环具有重要意义.

土壤呼吸主要由土壤微生物呼吸和根系呼吸两部分组成,其中根系呼吸约占土壤呼吸的 10% ~ 90%^[5]. 土壤呼吸不仅与土壤温度和水分等非生物

收稿日期: 2014-10-24; 修订日期: 2014-12-02

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103039)

作者简介: 姜继韶(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为土壤碳循环及生态环境, E-mail: jiangjishao@163.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

因素有关^[6,7] 而且也受制于生物因素,如土壤有机碳、微生物量碳和根系生物量等^[8,9]。农业管理措施(如施肥)直接改变了土壤环境,如土壤温度、水分、pH、通气性和土壤有机碳等^[4],而且还能改变微生物的活性和种类以及作物根系^[10,11]。这些生物因素和非生物因素显著影响了微生物呼吸和根系呼吸过程,最终影响了土壤呼吸及其温度敏感性。

施肥是农业生态系统中重要的管理措施,其中氮肥是农业生产中需求量最大的化肥品种。已有研究结果显示,氮肥对土壤呼吸的影响尚未取得共识。观点1 施氮显著提高了土壤呼吸。王重阳等^[12]发现施用氮肥与不施氮相比,玉米土壤呼吸提高了12%。其他研究也得到了相似的结果^[10,13]。其原因可能是氮肥的加入增加了微生物的生物量,促进了作物根系生长,降低了有机碳 C:N^[14],然而也有研究认为呼吸的增加是由于氮肥的加入增加了根系生物量,提高了根系呼吸,而不是因为有机碳分解的增加^[15]。观点2 施氮抑制了土壤呼吸。Ding 等^[16]报道氮肥的加入使土壤呼吸降低了7%,Mo 等^[17]和 Foereid 等^[18]也发现了相似的结论。呼吸降低的原因可能是氮肥的加入降低了根系生物量和微生物生物量。观点3 施氮对土壤呼吸无显著影响。原因可能是氮肥的加入虽然增加了根系生物量,却降低了微生物生物量,最终对土壤呼吸无明显的影响作用^[19]。此外,Ding 等^[16]发现施氮增加了玉米呼吸的温度敏感性,但是刘晓雨等^[20]在研究太湖地区油菜时却发现了相反的结论。因此,氮肥的投入对土壤呼吸及其温度敏感性的影响机制尚不清楚。

我国黄土高原地面积 60 万 km²,属于半干旱湿润性季风气候,其中农田面积 14.58 万 km²^[21],70% 的农田属于雨养农业,土壤比较贫瘠,总氮仅为 0.042%~0.077%^[22],因此氮肥投入成为保证本地区粮食产量的主导因素。虽然本地区已有少量施氮对土壤呼吸影响的研究,但是都集中在冬小麦的研究上^[10,23]。而春玉米光合效率高,生长期与降水季节分布相吻合,其单位面积产量 4 812 kg·hm⁻²,是黄土高原地区禾谷类单产最大的作物^[24],作为本地区目前主要的饲料作物,春玉米土壤呼吸变化机制一直以来缺少相关的研究和报道。

本研究选取黄土旱塬区雨养条件下春玉米作为对象,探讨施氮对土壤呼吸速率及其呼吸温度敏感性的影响,并分析土壤呼吸与非生物因素(土壤温度和水分)和生物因素(地上部生物量和根系生物量)的关系。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验位于陕西省长武县的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(东经 107°40′,北纬 35°12′,海拔 1 220 m)。试验站处于黄土高原南部的渭北旱塬,为我国典型雨养农业区。试验所在地为半干旱湿润性季风气候,1985~2013 年均降水量为 560 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。7~9 月的降水量占年总量的 57% 左右,年平均蒸发量为 1 565 mm,年平均气温 9.2℃,大于 10℃ 积温为 3 029℃,年日照时数为 2 230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ·cm⁻²,无霜期 171 d。土壤为黏壤质黑垆土,0~20 cm 土层 SOC 含量为 6.50 g·kg⁻¹,全 N 含量 0.80 g·kg⁻¹,速效 P 含量 5 mg·kg⁻¹,pH 8.4,CaCO₃ 含量 10.5%,黏粒含量(<0.002 mm) 24%。

1.2 试验设计与管理

试验于 2013 年 4 月至 2014 年 9 月在试验站春玉米地进行,共计 2 个连续的生长季,供试品种为先玉 335。采用半覆膜种植方式,供试地膜为 0.008 mm×750 mm 微地膜,株行距 30 cm×60 cm,密度 57 000 株·hm⁻²。本研究设对照 CK(不施氮肥)、N(施氮肥)两个处理,重复 3 次,随机区组排列,小区长 17.5 m,宽 5.5 m,小区间距 0.5 m,区组间距 1 m,四周路宽 1 m。N 处理施氮量为 160 kg·hm⁻²,以含氮量 46% 的尿素为氮源。各处理施磷肥 26 kg·hm⁻²,以含 P₂O₅ 12% 的过磷酸钙为磷源。所有肥料在播种前一次性作为基肥均匀撒施,然后翻入 0~20 cm 土壤。春玉米在 2013 年 4 月 24 日播种,9 月 9 日收获;2014 年 4 月 30 日播种,9 月 15 日收获。玉米生育期间气温和降雨量情况见图 1。

1.3 土壤呼吸、温度和水分的测定

土壤呼吸速率测定采用闭路式土壤碳通量测量系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA)。测定前在每个小区玉米行间安置基座(基座为 PVC 管:高 12 cm,直径 20 cm,埋入地下 10 cm 左右),同时去除基座内的一切活物,为减少安置基座对土壤系统的干扰而引起短期呼吸速率波动,需要在基座安置 24 h 之后再进行测定。土壤温度利用 LI-8100 自带的土壤温度计测定,土壤水分则采用 FDR(ML 2X, Delta-T Devices Ltd, UK)测定。

在玉米生长期,选择晴好天气在 09:00~11:00 进行土壤呼吸速率、温度和水分的测定,平均

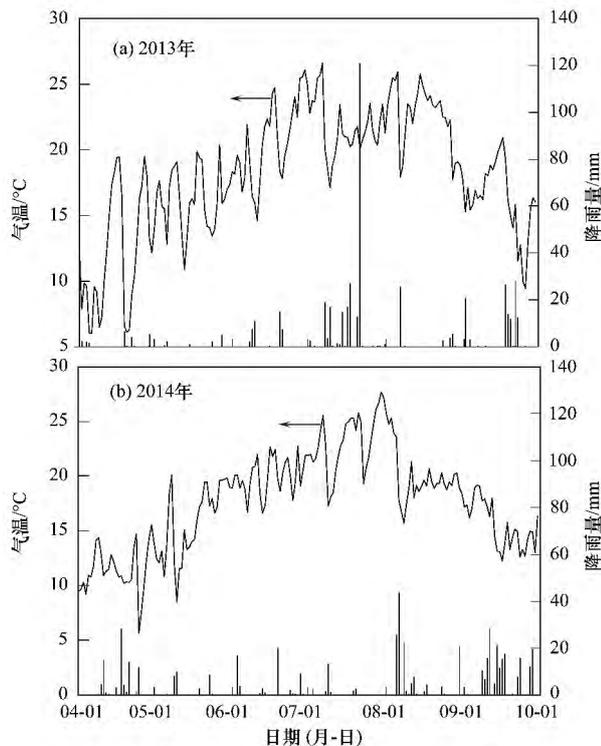


图1 生长季日平均气温和日降雨量
Fig. 1 Mean daily temperature and daily precipitation during the growing seasons

每 10 d 测定 1 次。每个试验小区重复 2 次,每处理共计 6 次重复,6 次的平均值作为当日的土壤呼吸速率。

1.4 产量、地上部分生物量和根系生物量的测定

玉米收获时期,每个小区选取 16 m² (共 90 株玉米),掰下玉米后称重,然后从中选取 15 个(能代表本小区实际情况)带回脱粒后自然风干,称重,以此计算产量,每个处理 3 个重复。同时每个小区选取 3 株玉米,齐地面切断,带回 80℃ 烘干至恒重,计算地上部干重,每个处理 3 个重复。玉米收获后在一个小区内,利用根钻(直径 9 cm)分别在行间、株间和株上取钻 0~20 cm 土壤,利用游标卡尺将细根(直径 < 2 mm)拣出,冲洗并 80℃ 烘干至恒重,3 钻之和作为本小区的根系生物量,每个处理 3 个重复。

1.5 数据处理与统计分析

试验数据用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 9.1 软件进行统计,利用 SAS 软件包中的 PROC GLM(SAS 9.1, SAS Institute) 程序进行土壤呼吸、温度和水分方差分析,用以比较不同施氮处理对土壤呼吸、温度和水分之间的差异。用 Sigmaplot 10.0 绘制土壤呼吸速率、温度、水分的动态变化图;同时采用内插法计算各处理生长季的累积呼吸量。

土壤呼吸与土壤温度的关系采用指数关系:

$$R = \beta_0 e^{\beta_1 T} \quad (1)$$

式中 R 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], T 为土壤 0~5 cm 土层温度 (°C), β_0 是反映土壤基础呼吸高低的参数,与土壤生物性状有关, β_1 是土壤呼吸温度敏感性的参数。

土壤呼吸与土壤水分的关系采用二次函数关系:

$$R = \beta_2 \theta^2 + \beta_3 \theta + \beta_4 \quad (2)$$

式中 R 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$], θ 为土壤水分(体积比), β_2 、 β_3 、 β_4 为常数。

温度敏感系数:

$$Q_{10} = e^{10\beta_1} \quad (3)$$

式中 Q_{10} 为温度敏感系数,表示温度每升高 10℃,土壤呼吸所增加的倍数。

2 结果与分析

2.1 施氮对玉米生长季土壤呼吸速率和累积呼吸量的影响

施氮显著提高了玉米生长期间的土壤呼吸速率 ($P < 0.05$),见图 2 和图 3。玉米生长期间土壤呼吸速率都呈现单峰变化趋势,与土壤温度的变化趋势和物候期基本一致,但是与土壤水分的变化趋势相差较大。玉米播种和收获前期土壤呼吸速率较低,在玉米的生长旺盛期(拔节和抽雄期)较高。2013 年 CK 土壤呼吸速率变化范围为 0.7~4.16 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,均值为 2.46 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$;施氮处理为 1.66~5.45 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,均值为 3.33 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。与 CK 相比,施氮处理平均速率提高了 35%。各处理土壤呼吸峰值均出现在 6 月 25 日,分别为 4.16 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 5.45 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。2014 年土壤呼吸速率整体小于 2013 年,不施氮与施氮处理的变化范围分别 0.91~2.96 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 1.25~3.55 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,与 CK [1.84 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 相比,施氮处理 [2.35 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 的平均速率提高了 28%。2014 土壤峰值出现时间大致与 2013 年相近,为 7 月 5 日的 2.96 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 和 3.55 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 。到玉米收获前期,随着温度的下降和生长的结束,土壤呼吸开始下降,但是 CK 下降速度较快。

施氮显著提高了玉米生长季土壤呼吸累积量 ($P < 0.05$)。2013 年 CK 和施氮处理累积呼吸量分别为 350 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 473 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$,与 CK 相比,施氮处理

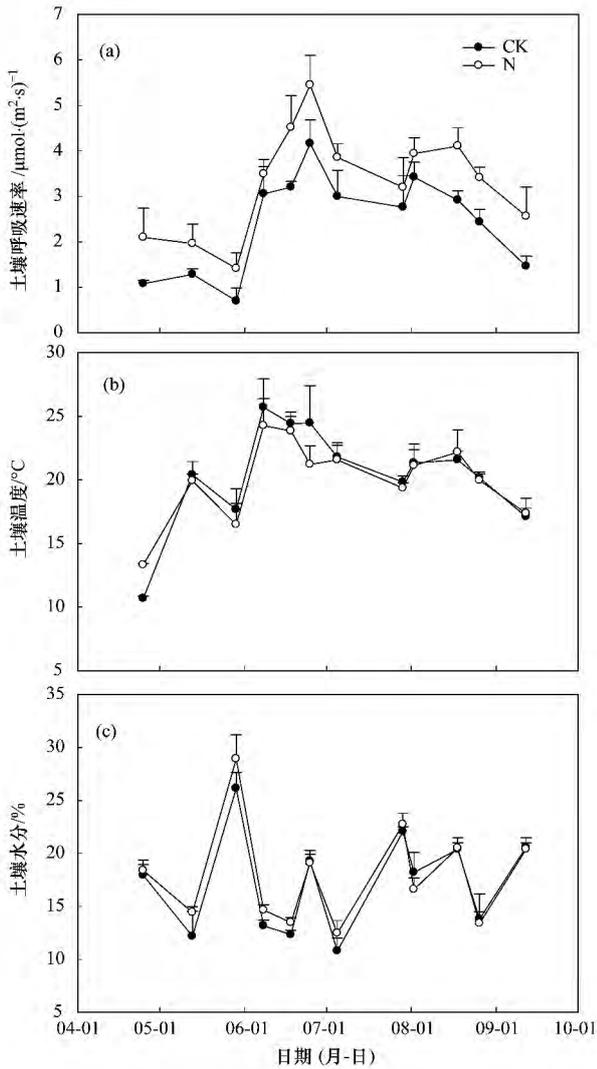


图 2 2013 年生长季土壤呼吸、温度和水分变化特征

Fig. 2 Dynamics of soil respiration , temperature and moisture during the growing season in 2013

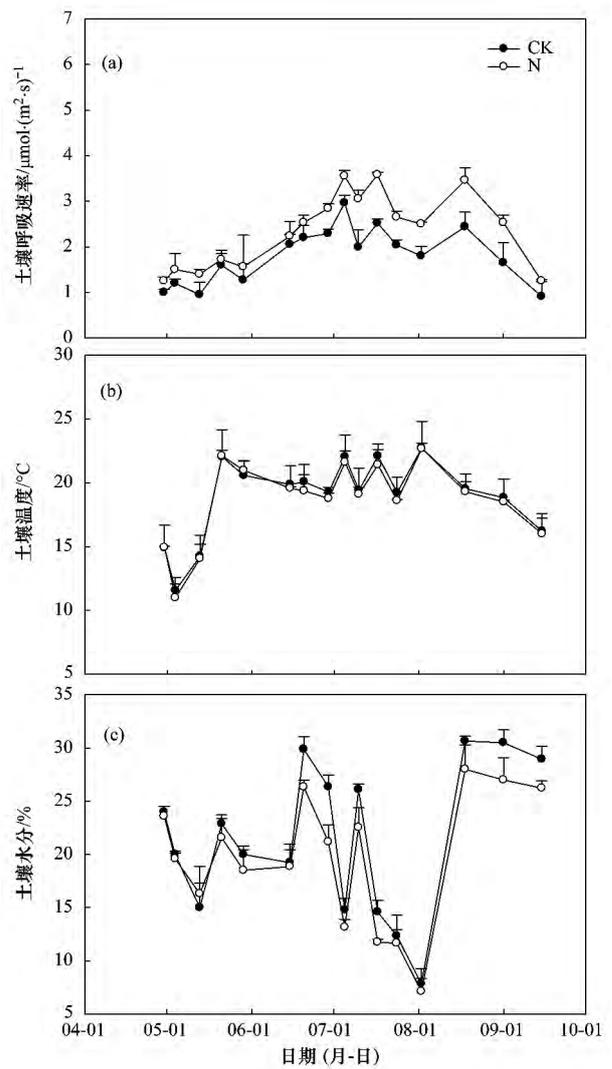


图 3 2014 年生长季土壤呼吸、温度和水分变化特征

Fig. 3 Dynamics of soil respiration , temperature and moisture during the growing season in 2014

提高了 35% . 2014 年各处理分别为 224 g·m⁻² 和 345 g·m⁻² , 与 CK 相比 , 施氮处理提高了 54% (图 4) .

2.2 施氮对玉米生长季土壤呼吸温度敏感性的影响

试验期间观测的土壤呼吸与温度数据之间有很好的指数相关关系 (P < 0.05 , 表 1 和图 5) , 土壤温度可以解释土壤呼吸季节变化的 51% ~ 69% . 尽管施氮显著提高了土壤呼吸累积量 (图 4) , 但是却显著降低了土壤呼吸温度敏感性 (P < 0.05) . 2013 年 CK 和施氮处理的 Q₁₀ 分别为 3.37 和 2.46 , 与 CK 相比 , 施氮处理的 Q₁₀ 降低了 27% ; 2014 年 CK 和施氮处理的 Q₁₀ 分别为 2.55 和 2.10 , 施氮处理较对照降低了 17% .

2.3 施氮对玉米生长季土壤温度、水分的影响

施氮对土壤温度无显著性影响 (P > 0.05) (图

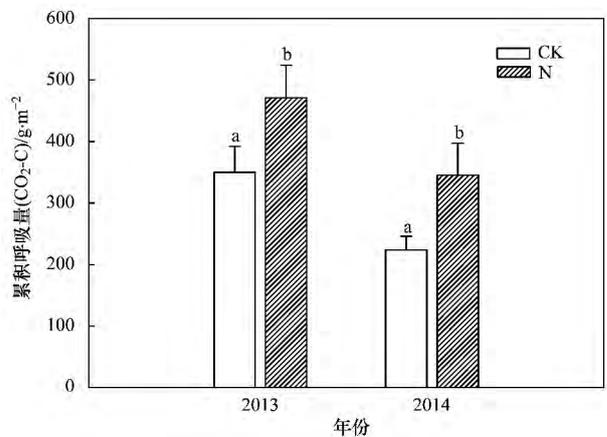


图 4 生长季土壤累积呼吸量比较

Fig. 4 Cumulative soil respiration during growing seasons

2 和图 3) . 各处理 5 cm 土壤温度与气温变化基本一致 , 呈现先升高后降低的趋势 . 4 月土壤温度逐

表 1 生长季土壤呼吸与温度的统计分析

Table 1 Statistical analysis of relationship between soil respiration and temperature during growing seasons

年份	处理	指数方程	R^2	P	Q_{10}
2013	CK	$y = 0.208e^{0.121x}$	0.69	<0.01	3.37
	N	$y = 0.516e^{0.0899x}$	0.53	<0.01	2.46
2014	CK	$y = 0.297e^{0.0936x}$	0.61	<0.01	2.55
	N	$y = 0.559e^{0.0741x}$	0.51	<0.01	2.10

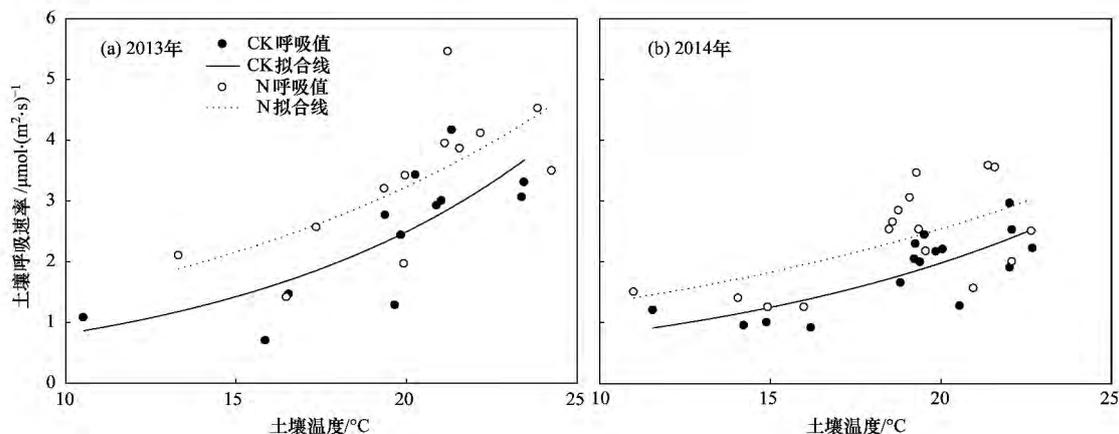


图 5 生长季土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig. 5 Relationship between soil respiration and temperature during growing seasons

渐增加,到7月达到最大值,到玉米生长后期有所下降.施氮处理土壤温度比CK低了0.3~1.5°C.各处理水分受降雨频率和降雨量的影响而波动较强烈(图2和图3).各处理土壤呼吸在2013年有一个突然的下降,而这时仍处于高温期,可能是因为此时土壤水分过低(10%左右),基本上达到了土壤的萎蔫点,在2014年8月5日也出现了明显的类似现象.但是施氮对土壤水分也无显著性影

响($P > 0.05$).

2.4 施氮对玉米地上部生物量和根系生物量的影响

施氮显著提高了春玉米的产量、地上部分生物量和根系生物量($P < 0.05$)(表2).与不施氮相比,施氮处理产量2013年提高了0.26倍,2014年提高了2.41倍;地上部生物量2013年提高了0.46倍,2014年提高了1.61倍;根系生物量2013年提高了0.32倍,2014年提高了1.23倍.

表 2 春玉米产量、地上部分生物量和根系生物量比较¹⁾

Table 2 Yield, aboveground biomass and root biomass of spring maize in 2013 and 2014

指标	2013年		2014年	
	CK	N	CK	N
产量/ $t \cdot hm^{-2}$	$7.7 \pm 1.3a$	$9.7 \pm 0.8b$	$3.4 \pm 0.9a$	$11.7 \pm 0.6b$
地上部生物量/ $t \cdot hm^{-2}$	$12.9 \pm 1.9a$	$18.8 \pm 2.0b$	$8.2 \pm 1.6a$	$21.4 \pm 4.3b$
根系生物量/g	$11.1 \pm 0.2a$	$14.9 \pm 0.2b$	$7.4 \pm 0.2a$	$16.5 \pm 1.9b$

1) 表中数据表示平均值数 ± 标准偏差; 值后不同字母表示处理间存在显著差异, 否则无显著差异

3 讨论

3.1 施氮对土壤呼吸的影响

本研究结果表明施氮使春玉米生长季土壤呼吸累积量提高了35%~54%(图4),这与Zhang等^[13]和Ding等^[25]的研究结果一致.由于施氮对土壤温度和水分无显著影响,温度只能解释土壤呼吸的季节性变化,所以温度和水分对施氮条件下土壤呼吸

的差异贡献不大^[13].

土壤呼吸主要分为根际呼吸和土壤微生物呼吸^[5].施氮对土壤呼吸的影响是对这两种呼吸综合影响的表现.施氮增加土壤呼吸速率和累积呼吸量可能的原因主要有:一方面,施氮能够显著提高土壤有效态氮含量,促进根系的生长,进而增加根系呼吸.本研究中不施氮和施氮处理2013年春玉米生长季土壤表层硝态氮平均含量分别为 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

和 $12.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 2014 年分别为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 与不施氮相比, 施氮处理 2013 年增加了 3 倍 2014 年增加了 4.7 倍. 施氮促使了根系的生长, 施氮处理的根系生物量增幅高达 0.32 ~ 1.23 倍(表 2). 玉米的根系呼吸占土壤呼吸的 16.8% ~ 43.6%^[26], 土壤呼吸随着根系生物量的增加而增加. 此外, Morell 等^[27] 发现根系生物量的增加促使了根际分泌物的增多, 提高了根际基质的可利用性及其根际微生物的活性. 另一方面, 施氮提高了产量和地上部生物量, 增加了返还土壤作物残余量, 能够提高土壤有机碳含量^[28], 促进了土壤微生物呼吸. 与不施氮相比, 玉米产量 2013 年增幅为 0.26 倍 2014 年高达 2.41 倍, 地上部生物量 2013 年提高 0.46 倍 2014 年 1.61 倍(表 2). 大量的作物残余量和根茬提高了土壤有机碳含量. 有机碳是土壤微生物底物供应的主要来源, 其含量高低直接影响微生物呼吸的大小. 而且在有作物的土壤中有效氮的增加还能够提高微生物的活性和数量^[12], 宇万太等^[29] 发现尿素施入土壤以后, 土壤微生物生物量增加了 24%.

Shao 等^[10] 在陕西杨凌田间试验发现小麦生长季土壤呼吸累积量随着施氮量的增加而增加, 与本试验相近的氮肥施用量 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的土壤呼吸累积量比不施氮提高了 34%, 稍低于本试验 2013 施氮处理增幅 (35%), 但是显著低于 2014 年增幅 (54%). 其原因可能是玉米的产量、地上和地下生物量都显著高于小麦. 此外王重阳等^[12] 在对下辽河平原玉米地土壤呼吸的研究中也发现了一致的现象. 但是 Ding 等^[16] 在河南封丘试验站发现玉米生长季土壤呼吸累积量随着施氮量的增加而有所降低, 在与本研究相近施氮量 ($150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的条件下, 其土壤呼吸累积量却下降了 7.4%. 施氮对土壤呼吸的促进或是抑制作用很可能与土壤有机碳中易分解碳的含量有关^[16].

3.2 施氮对土壤呼吸温度敏感性的影响

各处理 Q_{10} 变化范围为 2.02 ~ 3.37, 符合 Zheng 等^[30] 研究农田的 Q_{10} 变化范围 (1.28 ~ 4.75). 本研究中, 施氮显著降低了 Q_{10} , 降幅为 20% 左右. 刘晓雨等^[20] 在研究太湖地区施肥对油菜土壤呼吸影响时也发现施氮处理 ($427.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的呼吸显著高于不施氮处理, 但其呼吸温度敏感性 (1.25) 却显著小于不施氮处理 (3.92). 此外, Mo 等^[17] 也发现施氮处理 ($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 的呼吸温度敏感性 (1.63) 显著小于不施氮处理 (1.70). 土壤呼吸包括根系呼吸

和微生物呼吸, 而根系呼吸和微生物呼吸本身具有不同的温度敏感性^[32], 因此施氮处理 Q_{10} 降低的可能性有多种: 施氮可能同时降低了两者的呼吸温度敏感性; 或是降低一者呼吸温度敏感性, 而对另一者影响不大; 或是一者降低的幅度大于另一者增加的幅度. 本研究中推断极有可能的原因是施氮影响土壤底物质量^[31], 降低了土壤微生物呼吸的温度敏感性, 从而改变土壤呼吸敏感性.

土壤呼吸过程中产生的 CO_2 主要来自于呼吸底物的分解, 底物质量会显著影响土壤呼吸的温度敏感性^[32]. 复杂的底物一般具有较低的分解速率和较高的活化能^[33], 随着底物质量复杂性的增加, 促使发生分解反应所需的能量也随之增加, 具有的活化能越高, 表现为温度敏感性升高, 反之降低^[6]. 本研究中施氮降低呼吸温度敏感性的原因可能是: 施氮一方面可能降低玉米茎叶的 C:N, 从而进入到土壤中作物残余量的 C:N 也随着降低; 另一方面也可能会降低土壤的 C:N, 从而导致供应给微生物的底物易被分解, 具有的活化能变低, 表现为温度敏感性降低. 吕丽华等^[34] 研究表明施氮使成熟期的玉米茎叶的 C:N 下降 45% 左右. 此外, 李欢欢^[35] 也发现施氮降低了土壤的 C:N, 与不施氮相比最大降幅为 18.6%.

但是, 活化能理论仅适于土壤有机碳分解的呼吸温度敏感性, 没有涉及到根系呼吸的温度敏感性^[6], 根系呼吸对温度的响应更加敏感^[36, 37], 施氮也可能会影响根系的温度敏感性. 虽然与施氮相比, 施氮处理根系生物量提高了 0.32 ~ 1.23 倍, 并显著提高了土壤呼吸速率, 这与已有研究相一致^[10, 14, 15], 但是根系生物量与根系呼吸温度敏感性之间的关系尚不清楚. 施氮条件下进一步区分土壤微生物和根系呼吸及其各自的温度敏感性, 是未来需要关注的重点.

4 结论

施氮尽管显著提高了春玉米生长季的土壤呼吸累积量, 但是却显著降低了土壤呼吸温度敏感性. 施氮对非生物因素 (土壤温度和水分) 无显著影响, 但却显著增加了春玉米的产量、地上部生物量和根系生物量. 因此非生物因素 (土壤温度和水分) 对施氮条件下呼吸的差异贡献不大, 根系生物量是施氮条件下呼吸差异的主要生物因素.

参考文献:

[1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global

- carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7–20.
- [2] Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, *et al.* Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **131**(1–2): 77–96.
- [3] Zhang H X, Wang X K, Feng Z W, *et al.* Soil temperature and moisture sensitivities of soil CO₂ efflux before and after tillage in a wheat field of Loess Plateau, China [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2011, **23**(1): 79–86.
- [4] Iqbal J, Hu R G, Lin S, *et al.* CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: A case study in Southern China [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, **131**(3–4): 292–302.
- [5] 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 of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, **168**(4): 503–520.
- [6] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 2006, **440**(7081): 165–173.
- [7] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature-dependence of soil respiration [J]. *Functional Ecology*, 1994, **8**(3): 315–323.
- [8] Talmon Y, Sternberg M, Grünzweig J M. Impact of rainfall manipulations and biotic controls on soil respiration in Mediterranean and desert ecosystems along an aridity gradient [J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(2): 1108–1118.
- [9] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(8): 1298–1304.
- [10] Shao R X, Deng L, Yang Q H, *et al.* Nitrogen fertilization increase soil carbon dioxide efflux of winter wheat field: A case study in Northwest China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, **143**: 164–171.
- [11] 孙瑞莲, 朱鲁生, 赵秉强, 等. 长期施肥对土壤微生物的影响及其在养分调控中的作用 [J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(10): 1907–1910.
- [12] 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.
- [13] Zhang X B, Xu M G, Sun N, *et al.* How do environmental factors and different fertilizer strategies affect soil CO₂ emission and carbon sequestration in the upland soils of southern China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, **72**: 109–118.
- [14] Zhang Q, Zak J C. Potential physiological activities of fungi and bacteria in relation to plant litter decomposition along a gap size gradient in a natural subtropical forest [J]. *Microbial Ecology*, 1998, **35**(2): 172–179.
- [15] Liljeroth E, Van Veen J A, Miller H J. Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(8): 1015–1021.
- [16] Ding W X, Yu H Y, Cai Z C, *et al.* Responses of soil respiration to N fertilization in a loamy soil under maize cultivation [J]. *Geoderma*, 2010, **155**(3–4): 381–389.
- [17] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(2): 403–412.
- [18] Foereid B, de Neergaard A, Høgh-Jensen H. Turnover of organic matter in a *Miscanthus* field: effect of time in *Miscanthus* cultivation and inorganic nitrogen supply [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(7): 1075–1085.
- [19] Smolander A, Kurka A, Kitunen V, *et al.* Microbial biomass C and N, and respiratory activity in soil of repeatedly limed and N- and P-fertilized Norway spruce stands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, **26**(8): 957–962.
- [20] 刘晓雨, 潘根兴, 李恋卿, 等. 太湖地区水稻土长期不同施肥条件下油菜季土壤呼吸 CO₂ 排放 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, **28**(12): 2506–2511.
- [21] Liu G B. Soil conservation and sustainable agriculture on the loess plateau: Challenges and prospects [J]. *AMBIO*, 1999, **28**(8): 663–668.
- [22] Zhu X M, Li Y S, Peng X L, *et al.* Soils of the loess region in China [J]. *Geoderma*, 1983, **29**(3): 237–255.
- [23] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态 [J]. *生态学报*, 2009, **29**(5): 2551–2559.
- [24] 李军, 王立祥, 邵明安, 等. 黄土高原地区玉米生产潜力模拟研究 [J]. *作物学报*, 2002, **28**(4): 555–560.
- [25] Ding W X, Meng L, Yin Y F, *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(2): 669–679.
- [26] Zhang Q, Lei H M, Yang D W. Seasonal variations in soil respiration, heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, **180**: 34–43.
- [27] Morell F J, Alvaro-Fuentes J, Lampurlanés J, *et al.* Soil CO₂ fluxes following tillage and rainfall events in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Effects of tillage systems and nitrogen fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, **139**(1–2): 167–173.
- [28] Sainju U M, Senwo Z N, Nyakatawa E Z, *et al.* Tillage, cropping systems, and nitrogen fertilizer source effects on soil carbon sequestration and fractions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2008, **37**(3): 880–888.
- [29] 宇万太, 姜子绍, 柳敏, 等. 不同土地利用方式对土壤微生物生物量碳的影响 [J]. *土壤通报*, 2008, **39**(2): 282–286.
- [30] Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, **41**(7): 1531–1540.
- [31] Craine J M, Morrow C, Fierer N. Microbial nitrogen limitation increases decomposition [J]. *Ecology*, 2007, **88**(8): 2105–2113.

- [32] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性 [J]. 生态学报,2011,31(8): 2301-2311.
- [33] Bosatta E, Ågren G I. Soil organic matter quality interpreted thermodynamically [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(13): 1889-1891.
- [34] 吕丽华,陶洪斌,王璞,等. 施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2008,14(4): 630-637.
- [35] 李欢欢. 施氮对高产小麦根层土壤碳氮变化、植株氮素吸收利用的影响 [D]. 郑州: 河南农业大学,2010. 17-23.
- [36] Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration [J]. Nature, 1998, 396(6711): 570-572.
- [37] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Kitzler B, et al. Experimental forest soil warming: response of autotrophic and heterotrophic soil respiration to a short-term 10 degrees C temperature rise [J]. Plant and Soil, 2008, 303(1-2): 323-330.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014年9月26日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续13次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。