

施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响

高会议^{1,2}, 郭胜利^{2,3,*}, 刘文兆^{2,3}, 车升国²

(1. 中国科学院合肥智能机械研究所, 合肥 230031 ; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100 ; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要 : 为评价土壤呼吸对施氮的响应, 于 2008 年 3 月 ~ 2009 年 3 月, 监测了黄土旱塬区长期不同施氮水平条件下小麦连作系统中土壤呼吸日变化、季节变化以及不同生育期土壤可溶性碳(dissolved organic C, DOC)、微生物量碳(soil microbial biomass C, MBC)、土壤有机碳(soil organic C, SOC)和土壤全氮(soil total N, STN)的含量变化. 研究涉及 5 个施氮水平(以 N 计) 0(N₀)、45(N₄₅)、90(N₉₀)、135(N₁₃₅)和 180(N₁₈₀) kg/hm². 结果表明, 施氮量为 0 ~ 90 kg/hm² 时, 土壤呼吸速率随施氮量的增加而显著升高, 90 ~ 135 kg/hm² 时, 土壤呼吸速率随施氮量的增加略有增加; 135 ~ 180 kg/hm² 时, 随着施氮量的增加土壤呼吸呈降低趋势. 在一年监测期间, N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀ 波动范围(以 CO₂ 计) 分别为 0.27 ~ 2.01、0.36 ~ 2.26、0.58 ~ 2.56、0.65 ~ 2.94 和 0.58 ~ 2.6 μmol/(m² · s). 在季节变化尺度上, 土壤呼吸具有显著的活跃期(3 ~ 10 月) 和微弱期(11 月 ~ 次年 2 月). 施氮显著影响 DOC、MBC 含量变化. 土壤呼吸速率与 DOC、MBC 呈显著正相关, 而与土壤碳氮比(C/N)呈显著负相关关系.

关键词 : 施氮水平 ; 土壤呼吸速率 ; 土壤可溶性碳 ; 微生物量碳 ; 土壤碳氮比
中图分类号 : X171.1 文献标识码 : A 文章编号 : 0250-3301(2010)02-0390-07

Effects of Nitrogen Rates on Soil Respiration in Winter Wheat Cropping System in Semi-Arid Regions on Loess Plateau

GAO Hui-yi^{1,2}, GUO Sheng-li^{2,3}, LIU Wen-zhao^{2,3}, CHE Sheng-guo²

(1. Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 23003, China ; 2. College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China ; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract : To evaluate effects of nitrogen rates on soil respiration, we measured the diurnal and seasonal dynamic changes and the contents of the soil organic carbon (SOC), soil dissolved organic carbon (DOC), soil microbial biomass carbon (MBC), and total soil nitrogen (TSN) under different growing seasons of winter wheat under the continuous systems from March in 2008 to March in 2009 at Changwu ecological station of the Chinese Academy of Sciences. The experiment consists of five nitrogen rates : 0 (N₀), 45 (N₄₅), 90 (N₉₀), 135 (N₁₃₅), and 180 (N₁₈₀) kg/hm². Soil respiration rate significantly enhanced with increasing nitrogen rate ranging from 0 to 90 kg/hm² and increased little from 90 to 135 kg/hm², but decreased with increasing nitrogen rate from 135 to 180 kg/hm². At the seasonal change scale, there were an active phase of soil respiration from March to October and a weak phase of soil respiration from November to February. At the annual change scale, the fluctuate range of the treatments N₀, N₄₅, N₉₀, N₁₃₅, and N₁₈₀ were 0.27-2.01 μmol/(m² · s), 0.36-2.26 μmol/(m² · s), 0.58-2.56 μmol/(m² · s), 0.65-2.94 μmol/(m² · s), and 0.58-2.6 μmol/(m² · s), respectively. Nitrogen fertilization significantly affected the dynamic changes of DOC and MBC. There were significant positive correlations between soil respiration rate and DOC and MBC, while significant negative correlations with the C/N ratio.

Key words : nitrogen rates ; soil respiration rate ; soil dissolved organic carbon (DOC) ; soil microbial biomass carbon (MBC) ; C/N ratio

土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要生态过程. 通过土壤呼吸排放到大气 CO₂ 高达 68 ~ 100 Pg/a, 约占大气 CO₂ 总量的 10%^[1,2]. 氮输入(氮沉降和人为施氮) 是影响陆地生态系统土壤呼吸过程的重要因素^[3,4]. 增施氮肥是提高农田生态系统产量、维持和改善土壤地力的重要养分管理措施. 截止到 2008 年全球氮素产量 1.314 亿 t^[5], 我国作为世界最大的发展中国家, 每年消耗的肥料 N > 24Tg, 大约

约是全世界肥料氮使用量的 30% 左右. 因此, 了解施氮对农田生态系统中土壤呼吸的影响具有重要意义.

收稿日期 2009-04-01 ; 修订日期 2009-07-29
基金项目 : 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-424-2)
作者简介 : 高会议 (1982 ~) , 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环与生态环境, E-mail : gaohuiyi0701@163.com
* 通讯联系人, E-mail : slguo@ms.iswc.ac.cn

目前已有的研究发现,外源氮素的输入对土壤呼吸速率的影响表现为3种不同结果:促进作用^[6-9]、抑制作用^[10-13]或无显著影响^[14-17]。但上述研究获取的结果主要集中于林地土壤。限于试验的困难性,有的是基于施肥与不施肥2个处理间的比较,试验处理设置较少;另一个是短期试验条件下的监测结果。土壤呼吸包括3个组分:根系呼吸、土壤微生物(和动物)呼吸和有机物的氧化分解。土壤表观呼吸速率的高低是这3种呼吸综合作用的结果。长期外源氮的输入会改变土壤碳氮比^[4,18],影响土壤微生物的群落结构组成以及土壤微生物的功能和活性,进而影响土壤呼吸^[4,19]。但施氮改善土壤生产力,提高有机碳的输入有关,促进根系或根际土壤呼吸^[20-26]。因此,土壤有机碳组分和土壤碳氮比可能是调控土壤呼吸的重要因素。从施氮水平入手,通过监测农田土壤呼吸的日变化、年变化和土壤有机碳组分变化,探讨土壤呼吸与碳组分、土壤碳氮比的关系有助于深入理解施氮影响土壤呼吸的机制。

1 材料与方法

1.1 试验地点

长期试验始于1984年,位于陕西省长武县十里铺村(东经107°40',北纬35°12'),为“中国科学院长武黄土高原农业生态试验站”。试验位于黄土高原南部的渭北旱塬上(地势平坦,海拔1200 m),为我国典型雨养农业区。土壤为粘壤质黑垆土,0~20 cm土层土壤有机碳含量为6.50 g/kg,全N含量0.80 g/kg, Olsen P含量5 mg/kg, pH 8.4, CaCO₃含量10.5%,粘粒含量(<0.002 mm)24%。试验所在地为半干旱湿润性季风气候,1985~2008年的年均降水量为560 mm,其中最高年份为954 mm,最低年份为296 mm。休闲季(7~9月)降水量占年总量的57%左右。地下水位距离地表80 m以上。年平均气温9.2℃, >10℃积温为3029℃,年日照时数为2230 h,日照率为51%,年辐射总量为484 kJ/cm²。平均年蒸发量(PET)为1565 mm。

1.2 试验设计与管理

黄土旱塬区长期肥料定位试验开始于1984年。试验开始前,所在试验地一直用于种植作物(小麦)。1984年,在同一施磷(39 kg/hm²)的基础上,设5个氮肥水平处理:0、45、90、135和180 kg/hm²,按照随机区组3次重复的方式布设在田间。种植体系为一年一茬,供试作物为冬小麦(*Triticum aestivum* L. 品种为“长武131”系列)。小区面积6 m×4 m,

小区间距0.3 m,四周保护行1 m。一般9月下旬播种(播量150~190 kg/hm²,行距20 cm),作物生长期人工及时去除杂草。成熟期人工收割,所有地上部被移出小区,地表残留麦茬高度5 cm左右。收获小区面积的1/2用于估算单位面积地上部生物量和籽粒产量。冬小麦收获(次年6月)后土壤休闲,期间圆盘耙机耕(深度20 cm)松土蓄墒,播种前再耕翻,准备下一茬冬小麦苗床。作物生长期及时防治病虫害。氮、磷肥分别为尿素、三料磷肥,在播种前撒施地表后耕翻入土。

1.3 土壤呼吸的测定

土壤呼吸速率测定采用开路式土壤碳通量测量系统,测定仪器型号为LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA;气室型号为8100-103,20 cm便携测量室)。测定前在每个小区内安置测定基座(基座为直径20 cm×12 cm的PVC管,埋入地下7~9 cm,同时去除基座内的一切活体),为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏,在测定基座安置24 h后再进行测定,从而避免了由于安置气室基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动^[27-28]。

分别于春季(2008-04-23)、夏季(2008-06-21)、秋季(2008-10-01)、冬季(2008-11-18)以24 h为一周期,每间隔2 h测定一次土壤呼吸,重复2次,取平均值,以获取四季土壤呼吸日变化动态。

2008年3月~2009年3月,选择晴好天气在08:00~12:00进行田间测定(便于与前人研究结果相比较;同时,此时段可以很好的代表1 d的平均呼吸速率)。2008年3~10月,每月的10号左右和20号左右测定,11月~次年3月,每月18号测定1次。每试验小区重复2次,每处理共计6次重复;6次平均作为当日测定的土壤呼吸速率值,一年内共测定20次。

1.4 土壤有机碳组分测定

2008年,分别于冬小麦的返青期(2008-04-02)、拔节期(2008-04-23)、抽穗期(2008-05-14)、灌浆期(2008-05-28)和收获期(2008-06-22)采集土样。每小区以“S”形采集5钻土样(0~20 cm),制成混合土样6个处理,每处理3次重复,共计采集18个土样。分析新鲜样品的土壤可溶性碳(DOC,硫酸钾溶液浸提-碳自动分析仪法)和土壤微生物量碳(MBC,氯仿熏蒸硫酸钾浸提-碳自动分析仪法)^[29],同时测定其水分含量(烘干法)。

1.5 数据处理

统计分析采用SAS8.1(SAS Inst., 1999)软件

和 Excel 进行,当 F 检验显著时,进行各处理间的方差分析.

2 结果与分析

2.1 施氮量对土壤呼吸日变化的影响

施氮水平对土壤呼吸速率日变化格局无明显影响,施氮明显提高了土壤呼吸速率,但当施氮量达到一定量后,再增施氮肥,土壤呼吸速率呈降低的趋势(图 1).07 00 左右不施氮处理(N_0)和低氮肥处理(N_{45})土壤呼吸速率大小相近,高氮处理(N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180})相近,且明显高于 N_0 、 N_{45} .08 00 ~ 14 00, N_{45} 、 N_{90} 和 N_{135} 土壤呼吸速率迅速升高,而 N_0 和 N_{180} 土壤的呼吸速率升高相对缓慢,施氮与不施氮之间的差异随时间的推移呈增加趋势,在 14 00 左右,不施氮

与施氮之间的差异达到最大,同时各处理土壤呼吸速率也达到 1d 中的最高值;不同处理间大小为: $N_{45} < N_{90} < N_{180} < N_{135}$. 14 00 ~ 次日 03 00,各施氮处理基本保持平行减低趋势,且高氮肥处理(N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180})间土壤呼吸速率差异不明显.03 00 左右,各施氮处理达到 1d 中的最低值,03 00 ~ 06 00,各施氮处理土壤呼吸速率逐步升高.从土壤呼吸的日平均数值看(以 CO_2 计,下同), N_0 最低 [$1.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];相对于 N_0 、 N_{45} [$1.34 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 提高了 36%; N_{90} [$1.85 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 的提高量最高,达到 83%; N_{135} 为 $1.84 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, N_{180} 为 $1.81 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,与 N_{90} 差异不明显. N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 土壤呼吸速率日平均明显高于 N_0 、 N_{45} .

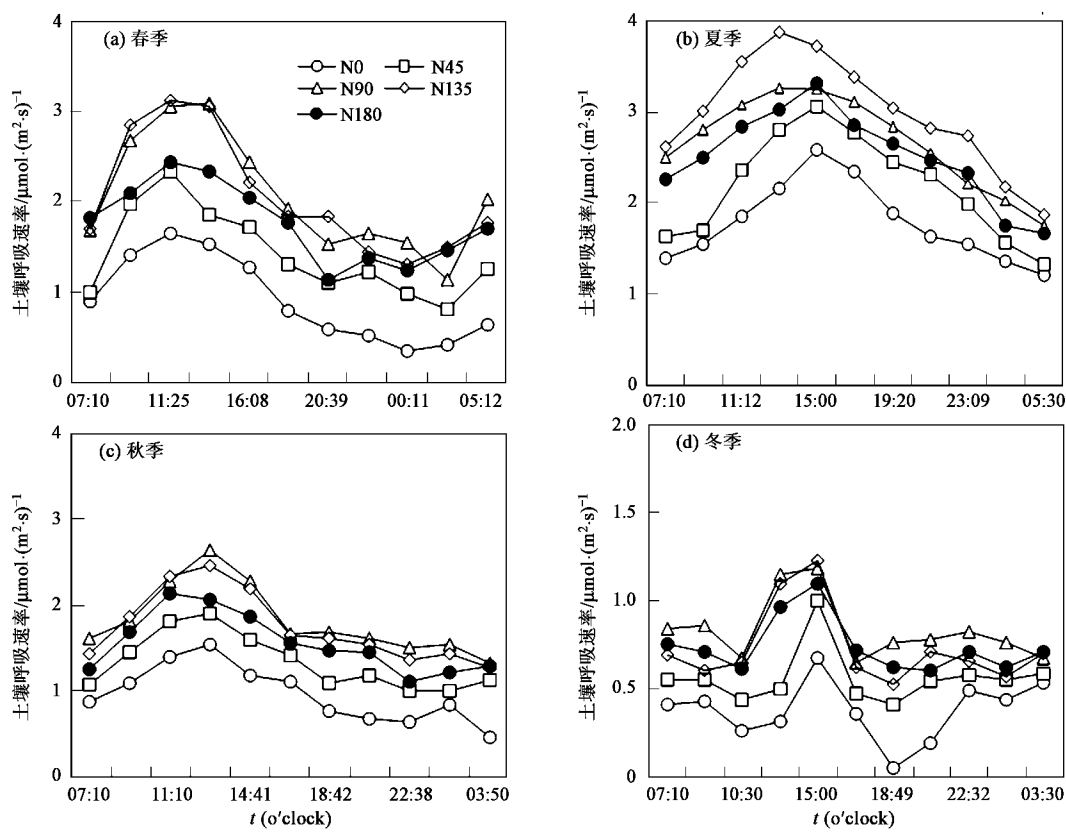


图 1 不同季节不同施氮水平下土壤呼吸速率日变化
Fig. 1 Daily changes of soil respiration under different nitrogen rates

2.2 施氮量对土壤呼吸季节动态的影响

整个测定之中土壤呼吸可以明显地区分为:土壤呼吸活跃期(3 ~ 10 月)、土壤呼吸微弱期(11 月 ~ 次年 2 月)(图 2).施氮量对土壤呼吸速率季节变化格局的影响不明显,不同施氮处理间土壤呼吸速率高低变化因季节基本一致.在一年监测期间, N_0

土壤呼吸速率为最低,全年平均为 $1.19 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,波动范围为 $0.27 \sim 2.01 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;与 N_0 相比, N_{45} [$1.48 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 土壤呼吸提高了 24%,其波动范围为 $0.36 \sim 2.26 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{135} [$1.91 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 的提高量最高,达到了 60%,其波

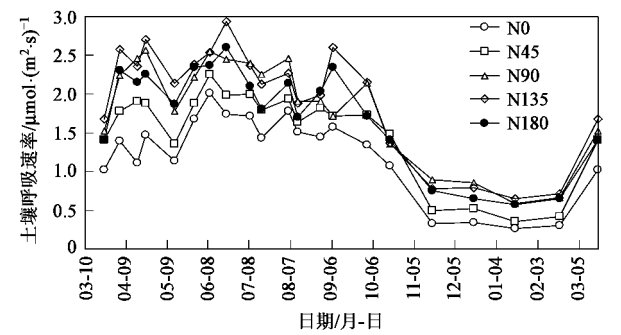


图2 不同施氮水平下土壤呼吸季节变化规律
Fig.2 Seasonal variations of soil respiration under different nitrogen rates

动范围为 0.65 ~ 2.94 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{90} [1.87 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,0.58 ~ 2.56 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]、 N_{180} [1.83 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,0.58 ~ 2.6 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 的提高量略低于 N_{135} ,分别提高了 57%、54% .在土壤呼吸活跃期(3 ~ 10 月) ,各处理土壤呼吸速率的绝对量相对较高 ,且施氮提高的绝对量也较高[N_{45} , 0.3 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{90} 、 N_{180} ,0.7 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; N_{135} 0.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] .土壤呼吸微弱期(11 月 ~ 次年 2 月) ,各处理的土壤呼吸速率的绝对量很

表1 施氮水平对土壤可溶性碳(DOC)和微生物量碳(MBC)含量的影响¹⁾/mg · kg⁻¹
Table 1 Effects of N rates on DOC and MBC in winter wheat cropping system/mg · kg⁻¹

类型	日期 (月 · 日)	施氮水平				
		N_0	N_{45}	N_{90}	N_{135}	N_{180}
DOC	返青期 03-24	14.8 ± 2.0	15.0 ± 2.3	17.2 ± 1.5	19.0 ± 1.8	18.3 ± 2.6
	拔节期 04-23	17.3 ± 3.1	16.9 ± 6.1	17.2 ± 8.0	20.5 ± 4.4	21.2 ± 3.6
	抽穗期 05-14	26.7 ± 1.8	39.7 ± 2.3	40.8 ± 4.3	40.6 ± 3.6	47.4 ± 3.2
	灌浆期 05-28	33.1 ± 5.2	43.4 ± 3.8	53.4 ± 3.2	53.8 ± 4.4	57.3 ± 4.5
	成熟期 06-22	18.6 ± 1.5	23.7 ± 4.6	24.9 ± 2.1	25.0 ± 2.2	28.9 ± 2.6
	整个生育期	22.1 ± 7.6a	27.7 ± 13.1a	30.7 ± 15.0b	31.8 ± 14.0b	34.6 ± 17.0b
MBC	返青期 03-24	202.9 ± 31	204.8 ± 40	237.8 ± 59	249.2 ± 37	241.2 ± 14
	拔节期 04-23	117.0 ± 36	164.0 ± 34	137.5 ± 47	140.7 ± 44	119.0 ± 19
	抽穗期 05-14	44.2 ± 18	43.9 ± 29	49.1 ± 24	49.8 ± 28	50.6 ± 30
	灌浆期 05-28	96.3 ± 35	105.4 ± 31	91.3 ± 29	106.9 ± 24	70.9 ± 36
	成熟期 06-22	215.3 ± 27	218.0 ± 25	294.6 ± 20	269.1 ± 35	282.3 ± 29
	整个生育期	135.2 ± 67a	147.2 ± 73a	162.1 ± 102b	163.15 ± 94b	152.8 ± 104b

1)数据后字母表示在 0.05 水平上的差异

3 讨论

3.1 施氮量与土壤呼吸的关系

关于氮输入对土壤呼吸的影响 ,国内外进行了大量的研究 ,但结果有 3 种 :氮输入对土壤呼吸强度有促进作用、抑制作用或无显著影响.张庆忠等^[30]、陈述悦等^[31]和王立刚等^[32]研究结果表明 ,华北农田土壤呼吸随着施氮量增加而增强 ,但施氮量对土壤呼吸的影响不灵敏.而孟凡乔等^[33]在华北麦田中

低[0.27 ~ 0.86 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] ,但施氮对土壤呼吸速率的提高率较高(N_{45} ,45% ; N_{90} ,142% ; N_{135} ,37% ; N_{180} ,113%).

2.3 施氮水平对土壤有机碳组分的影响

施氮水平显著影响土壤可溶性碳(DOC)含量变化(表 1).5 个小麦生育期平均 , N_0 处理的土壤 DOC 含量最低(22.09 mg/kg) ;与 N_0 相比 , N_{45} 、 N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 处理 DOC 含量分别提高了 25%、39%、44%、57% . N_0 与 N_{45} 差异不显著($p > 0.05$) ,与 N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 间差异达到极显著性水平($p < 0.01$) ; N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 处理间差异不明显($p > 0.05$).各处理土壤 DOC 返青后逐渐升高到灌浆期达到最高 ,随后又降低.

施氮显著提高了 MBC 含量.5 个生育期平均 , N_0 处理 MBC 含量较低(135.2 mg/kg) ;相对 N_0 而言 , N_{45} 、 N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 分别提高了 8%、20%、21%、13% ,呈现随施氮量变化先增加后减低的趋势 ; N_0 与 N_{45} 差异性不显著($p > 0.05$) ,与 N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 间差异达到显著性水平($p < 0.05$) , N_{90} 、 N_{135} 、 N_{180} 间差异不显著($p > 0.05$).各处理 MBC 含量在抽穗期最低 ,成熟期最高 ,其原因有待进一步研究.

的研究表明 ,施氮抑制土壤 CO_2 的排放 ,表现为不施氮处理土壤呼吸速率最高. Kowalenko 等^[34]在实验室内培养结果显示 ,氮输入可以抑制休闲农田土壤 CO_2 释放速度 ,降低微生物活性.杨兰芳等^[17]盆栽试验表明 ,施氮对裸地土壤呼吸影响不显著 ,有作物条件下 ,高氮(N 300 kg/hm²)处理土壤呼吸速率显著($p < 0.05$)高于低氮(N 150 kg/hm²)处理.在短期培养试验中 , N 以尿素形式施入时表现出增强微生物呼吸作用^[35] ,而在长期培养中 ,施入尿素可

抑制微生物呼吸^[36]. Paustian 等^[15]在瑞典大麦田中的研究表明,施氮与未施氮处理下具有相似的土壤呼吸速率^[32]. Jacinthe 等^[16]通过不施氮处理与施氮 224 kg/(hm²·a)处理的土壤呼吸相比,发现施氮量对土壤呼吸没有显著影响. 本研究表明,土壤呼吸速率随着施氮量的增加而增加,但当施氮量达到某一值(N₁₃₅ kg/hm²)时,再增施氮肥其土壤呼吸速率则呈降低趋势. 其原因可能与地上部生物量积累有关.

不同施氮水平在不同的季节对土壤呼吸作用的影响也不相同. 本实验中,不同季节,土壤 CO₂ 排放量表现为 N₀ 和 N₄₅ 处理夏季排放量最大,其次是春季、秋季,冬季最低. 高氮肥处理(N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀)排放量则表现为春季略高于夏季,其原因可能是与该地区的耕作制度有关. 春季,作物生长对土壤呼吸作用起着主导作用,高氮肥处理(N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀)显著的影响着作物的生长发育,进而影响土壤中的根系呼吸作用和微生物呼吸作用,而对照和低氮肥处理对作物的影响较小;夏季,冬小麦收获(6月中旬)后,土壤进入休闲时期,其土壤呼吸基本上来自土壤生物的呼吸作用和土壤有机底物的氧化分解. 休闲期间,土壤微生物的活性是影响土壤呼吸的主导因素. 在黄淮海地区,李虎等^[37]对典型农田土壤呼吸的研究表明,冬季表现为施氮促进土壤呼吸,但施氮量高[N₂, 134 mg/(m²·h)]低于施氮量低[N₁, 180 mg/(m²·h)];夏季,施氮量高[N₂, 2324 mg/(m²·h)]显著高于施氮量低[N₁, 1251

mg/(m²·h)]和对照[CK, 1183 mg/(m²·h)]. 而陈述悦等^[31]研究指出,冬季,土壤呼吸速率随施氮量增加而增加;夏季则表现为施氮肥抑制土壤 CO₂ 的排放[N₀, 590.86 mg/(m²·h); N₁₀₀, 349.88 mg/(m²·h); N₂₀₀, 415 mg/(m²·h); N₃₀₀, 410.58 mg/(m²·h)]. 盆栽试验表明,对玉米地表现为前期不显著,抽穗开花期和成熟期,高氮处理显著高于低氮^[17].

综上所述,土壤呼吸作用的氮肥效应十分复杂. 影响土壤呼吸的因素除了外源氮素的输入,可能还与土壤有机碳组分、理化性质、植物特性、土壤耕作利用等因素有关.

3.2 土壤碳组分、土壤碳氮比与土壤呼吸的关系

在整个小麦生育期内(除拔节期外),不同处理间 DOC 含量与土壤呼吸之间存在显著($p < 0.05$)的相关关系,其中在返青期和成熟期达到极显著($p < 0.01$)相关(表 2);返青期和成熟期的 MBC 含量与土壤呼吸之间也存在显著($p < 0.05$)的相关关系,其它生育期的相关性较差(表 2);DOC、MBC 生育期平均值含量与土壤呼吸速率生育期平均值之间存在极显著($p < 0.01$)相关关系. 土壤呼吸与 DOC 的相关性优于与 MBC 的相关性. 胡诚等^[38]在华北地区研究指出,土壤基础呼吸与 DOC、MBC 之间呈极显著正相关($p < 0.01$). 而陈旻等^[39]的研究结果表明, MBC 与土壤呼吸强度呈正相关,但相关性不显著($p > 0.05$). 其原因可能与土壤类型等不同有关. 此外,陈旻等^[39]所测定的土壤呼吸不包括根系呼吸.

表 2 同时期不同处理间土壤可溶性有机碳、微生物量碳与土壤呼吸速率的相关关系¹⁾
Table 2 Relationships between soil respiration, DOC, and MBC under different N rates under different nitrogen rates

碳组分	土壤呼吸					
	返青期	拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期	全生育期
DOC	0.953**	0.358	0.737*	0.972**	0.750*	0.893**
MBC	0.961**	0.17	0.462	0.331	0.800*	0.9591**

1) * 表示为显著性水平, ** 表示为极显著性水平,下同

同一处理不同生育期的土壤呼吸与 MBC、DOC 的相关性较差(表 3). 但土壤呼吸与 MBC 的相关性优于与 DOC 的相关性. 在整个生育期,DOC 和 MBC

高低值出现的时期与土壤呼吸高低值出现的时期不一致. 其原因有待进一步研究.

土壤的碳氮比(C/N)在很大程度上影响其分解速率. 本研究中,土壤呼吸速率与土壤 C/N 之间具有极显著($p < 0.01$)线性负相关关系(图 3),与王国兵等^[40]的研究结果基本一致. C/N 降低为生物提供更多的能量,土壤中植物根系和微生物活动增强,土壤呼吸作用因此而增强. 而韩广轩等^[41,42]对玉米生长季土壤呼吸的研究中指出,土壤呼吸与 C/N 的相关性不显著. Brumme 等^[43]在德国温带林的研究和

表 3 同一处理不同时期土壤可溶性碳、微生物量碳与土壤呼吸的相关关系

Table 3 Relationships between soil respiration, DOC, and MBC during the different growing stages

碳组分	土壤呼吸				
	N ₀	N ₄₅	N ₉₀	N ₁₃₅	N ₁₈₀
DOC	0.043	0.422	0.592	0.667	0.313
MBC	0.497	0.781*	0.416	0.841**	0.740*

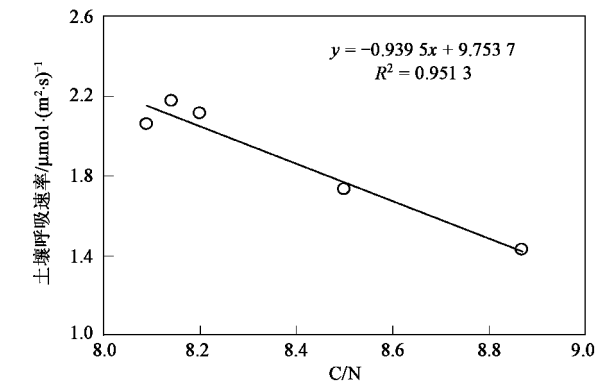


图3 供试不同施肥小区土壤呼吸速率与 C/N 的关系

Fig. 3 Relationships between soil respiration and soil C/N ratio under different nitrogen rates

耿远波等^[44]在我国温带草原温室气体通量的研究中表明,CO₂ 通量与土壤 C/N 呈显著正相关。

4 结论

(1)黄土旱塬区,施氮明显增加土壤呼吸速率。土壤呼吸速率随着施氮量的增加而增强,土壤呼吸强度在 N₁₃₅ 最大,高氮肥处理(N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀)间差异不显著($p > 0.05$)。施氮对 3 ~ 10 月土壤呼吸速率的影响较大。

(2)施氮显著影响 DOC、MBC 含量变化,DOC 含量随着施氮量的增加而增加,随施氮量的增加 MBC 含量先增加后减低。各处理 DOC 含量在返青期最低,灌浆期最高;MBC 含量在抽穗期最低,成熟期最高。

(3)土壤呼吸速率与 DOC、MBC 呈显著($p < 0.05$)正相关关系、与土壤碳氮比(C/N)呈极显著($p < 0.01$)负相关。

参考文献：

[1] Raich J W , Schlesinger W H . The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J] . Tellus Ser B , 1992 , **44** : 81-99 .

[2] Musselman R C , Fox D G . A review of the role of temperate forest in the global CO₂ balance [J] . J Air Waste Manage Assoc , 1991 , **41** : 798-807 .

[3] Cao M K , Woodward F I . Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J] . Nature , 1998 , **393** : 249-252 .

[4] 彭琴 , 董云社 , 齐玉春 . 氮输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响 [J] . 地球科学进展 , 2008 , **23** (8) : 874-883 .

[5] FAO . FAOSTAT [EB/OL] . http : //www . fao . org .

[6] 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 .

[7] Bowden R D , Davidson E , Savage K , et al . Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest [J] . For Ecol Manage , 2004 , **196** : 43-56 .

[8] Burton A J , Pregitzer K S , Ruess R W , et al . Root respiration in North American forests : Effects of nitrogen concentration and temperature across biomes [J] . Oecologia , 2002 , **131** : 559-568 .

[9] Pregitzer K S , Zak D R , Maziasz J , et al . Interactive effects of atmospheric CO₂ and soil-N availability on fine roots of populus tremuloides [J] . Ecol Appl , 2000 , **10** : 18-33 .

[10] Bowden R D , Davidson E , Savage K , et al . Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard forest [J] . For Ecol Manage , 2004 , **196** : 43-561 .

[11] Ding W X , Cai Y , Cai Z C , et al . Soil respiration under maize crops effects of water temperature , and nitrogen fertilization [J] . Soil Sci Soc Am J , 2007 , **71** : 944-951 .

[12] Foereid B A , 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 Biol Biochem , 2004 , **36** : 1075-1085 .

[13] Ding W X , Cai Y , Cai Z C , et al . Diel pattern of soil respiration in N-amended soil under maize cultivation [J] . Atmos Environ , 2006 , **40** : 3294-3305 .

[14] Prescott C E , Kabzems R , Zabek L M . Effects of fertilization on decomposition rate of Populus tremuloides , foliar litter in a boreal forest [J] . Can J For Res , 1999 , **29** : 393-397 .

[15] Paustian K , Andren O , Clarholm M . Carbon and nitrogen budgets of 4 agroecosystems with annual and perennial crops , with and without N-fertilization [J] . Appl Ecol , 1990 , **27** : 60-84 .

[16] Jacinthe P A , Lal R , Kimble J M . Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment [J] . Soil Till Res , 2002 , **67** : 147-157 .

[17] 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 .

[18] 刘德燕 , 宋长春 . 外源氮输入对土壤有机碳矿化和凋落物分解的影响 [J] . 土壤通报 , 2008 , **39** (3) : 675-680 .

[19] 张亚丽 , 张娟 , 沈其荣 , 等 . 秸秆生物有机肥的施用对土壤供氮能力的影响 [J] . 应用生态学报 , 2002 , **13** (12) : 1575-1578 .

[20] 贾丙瑞 , 周广胜 , 王凤玉 , 等 . 土壤微生物与根系呼吸作用影响因子分析 [J] . 应用生态学报 , 2005 , **16** (8) : 1547-1552 .

[21] Liljeroth E , Kuikman P , Vanveen J A . Carbon translocation to the rhizosphere of maize and wheat and influence on the turnover of native soil organic-matter at different soil-nitrogen levels [J] . Plant Soil , 1994 , **161** : 233-240 .

[22] Vander Krift T A J , Kuikman P J , Moller F , et al . Plant species and nutritional-mediated control over rhizodeposition and root

decomposition [J]. Plant Soil , 2001 , **228** : 191-200.

[23] Zak D R , Pregitzer K S , Curtis P S , *et al.* Atmospheric CO₂ and the composition and function of soil microbial communities [J]. Ecol Appl , 2000 , **10** : 47-59.

[24] 郭胜利 ,高会议 ,党廷辉. 施氮水平对小麦产量和土壤有机碳氮的影响[J]. 植物营养与肥料学报 , 2009 , **15**(4) : 808-814.

[25] 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与土壤碳动态[J]. 生态学报 , 2009 , **29**(4) : 2551-2559.

[26] Song C C , Zhang J B. Effects of soil moisture , temperature , and nitrogen fertilization on soil respiration and nitrous oxide emission during maize growth period in northeast China [J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science , 2009 , **59** : 97-106.

[27] 张丽华 ,陈亚宁 ,李卫红 ,等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸[J]. 生态学报 , 2008 , **28**(5) : 1911-1922.

[28] Zhang L H , Chen Y I , Li W H , *et al.* Abiotic regulators of soil respiration in desert ecosystems [J]. Environ Geol , 2009 , **57** : 1855-1864.

[29] 吴金水 ,林启美 ,黄巧云 ,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京 :气象出版社 , 2006 . 6.

[30] 张庆忠 ,吴文良 ,王明新 ,等. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响[J]. 生态学报 , 2005 , **25**(11) : 2883-2887.

[31] 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.

[32] 王立刚 ,邱建军 ,李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料 , 2002 , **6**(3) : 13-17.

[33] 孟凡乔 ,关桂红 ,张庆忠 ,等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报 , 2006 , **26**(6) : 992-999.

[34] Kowalenko C G , Ivarson K C , Cameron D R. Effect of moisture content , temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils [J]. Soil Biol Biochem , 1978 , **10** : 417-423.

[35] Roberge M R. Respiration rates for determining the effects of urea on the soil surface organic horizon of a black spruce stand [J]. Can J Microbial , 1976 , **22** : 1328-1335.

[36] Martikainen P J , Aarnio T , Taavitsainen V M , *et al.* Mineralization of carbon and nitrogen in soil samples taken from 3 fertilized pine stands-long-term effects [J]. Plant Soil , 1989 , **114** : 99-106.

[37] 李虎 ,邱建军 ,王立刚. 农田土壤呼吸特征及根呼吸贡献的模拟分析[J]. 农业工程学报 , 2008 , **24**(4) : 14-20.

[38] 胡诚 ,曹志平 ,胡婵娟 ,等. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及土壤呼吸的影响[J]. 中国生态农业学报 , 2007 , **15**(5) : 63-66.

[39] 陈旻 ,李忠佩 ,周李祥 ,等. 不同施肥处理对红壤水稻土微生物生物量及呼吸强度的影响[J]. 土壤 , 2008 , **40**(3) : 437-442.

[40] 王国兵 ,郝岩松 ,王兵 ,等. 土地利用方式的改变对土壤呼吸及土壤微生物生物量的影响[J]. 北京林业大学学报 , 2006 , **28**(2) : 73-79.

[41] 韩广轩 ,周广胜 ,许振柱 ,等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间异质性及其根系呼吸作用的贡献[J]. 生态学报 , 2007 , **27**(12) : 5254-5261.

[42] 韩广轩 ,周广胜 ,许振柱. 玉米农田土壤呼吸作用的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学杂志 , 2008 , **27**(10) : 1698-1705.

[43] Brumme R , Beese F. Effects of liming and nitrogen-fertilization on emissions of CO₂ and N₂O from a temperate forest[J]. J Geophys Res , 1992 , **97**(D12) : 12851-12858.

[44] 耿远波 ,章申 ,董云社 ,等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性[J]. 地理学报 , 2001 , **56**(1) : 44-53.