

长期施氮和水热条件对夏闲期土壤呼吸的影响

张芳¹, 郭胜利^{1,2*}, 邹俊亮¹, 李泽¹, 张彦军¹

(1. 西北农林科技大学资源与环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要:在黄土高原地区, 夏季休闲期既是高温多雨期也是土壤微生物强烈活动期. 研究该时期土壤呼吸变化与土壤水分、温度和施氮之间关系, 有助于深入理解农田生态系统土壤呼吸的时空变异性及其影响因素. 本研究以 1984 年设立在黄土旱塬区长期田间定位试验为平台, 选取了 5 个不同施氮处理(N0、N45、N90、N135 和 N180), 于 2009 年夏闲期监测施氮处理土壤呼吸的动态变化特征及对应土壤温度和水分, 分析土壤呼吸变化特征和土壤温度水分、施氮对其的影响. 结果表明, 夏闲期土壤呼吸速率随施氮水平的提高由 $1.24 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 增大到 $1.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 休闲期土壤呼吸累积量 [$6.20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 与生育期 [$6.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 相近. 土壤呼吸与土壤水分、土壤温度的双变量模型显著优于单变量模型. 施氮、土壤温度、水分作为变量的三因素模型比土壤温度、水分作为变量的二因素模型能更好地说明土壤呼吸的实际变化. 施氮可以单独解释 8% 的土壤呼吸变异. 区别于以往土壤呼吸单变量模拟方程, 本研究为深入分析农田土壤呼吸多维影响因素及其模拟提供了参考.

关键词: 休闲期; 土壤呼吸; 施氮; 土壤水分; 土壤温度; 双变量模型

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3174-07

Effects of Nitrogen Fertilization, Soil Moisture and Soil Temperature on Soil Respiration During Summer Fallow Season

ZHANG Fang¹, GUO Sheng-li^{1,2}, ZOU Jun-liang¹, LI Ze¹, ZHANG Yan-jun¹

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

Abstract: On the loess plateau, summer fallow season is a hot rainy time with intensive soil microbe activities. To evaluate the response of soil respiration to soil moisture, temperature, and N fertilization during this period is helpful for a deep understanding about the temporal and spatial variability of soil respiration and its impact factors, then a field experiment was conducted in the Changwu State Key Agro-Ecological Experimental Station, Shaanxi, China. The experiment included five N application rates: unfertilized 0 (N0), 45 (N45), 90 (N90), 135 (N135), and 180 (N180) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The results showed that at the fallow stage, soil respiration rate significantly enhanced from 1.24 to $1.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ and the average of soil respiration during this period [$6.20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] was close to the growing season [$6.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]. The bivariate model of soil respiration with soil water and soil temperature was better than the single-variable model, but not so well as the three-factor model when explaining the actual changes of soil respiration. Nitrogen fertilization alone accounted for 8% of the variation soil respiration. Unlike the single-variable model, the results could provide crucial information for further research of multiple factors on soil respiration and its simulation.

Key words: fallow season; soil respiration; nitrogen fertilization; soil moisture; soil temperature; bivariate model

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^[1-3]. 已有研究表明, 外源氮素的输入对土壤呼吸的影响表现为 3 种不同结果: 促进作用^[4-7]、抑制作用^[8-11]或无显著影响^[12,13]. 土壤呼吸主要由根系呼吸和土壤微生物呼吸两部分构成^[14,15], 且土壤微生物呼吸约占土壤总呼吸的 40%~70%^[15-17]. 因此, 研究土壤微生物呼吸变化与土壤氮素间的关系有助于理解土壤呼吸变化的来源及其规律.

夏季休闲(7~9月)是黄土高原地区农业生产实践中一项重要的耕作制度^[18]. 这一时期的土壤呼吸尽管没有作物根系呼吸的参与, 但由于夏季休闲期长达 3 个月且高温多雨, 土壤微生物活动强烈. 此

外, 夏闲期大量作物残茬输入土壤. 而土壤氮素含量是影响土壤微生物活性和作物根茬矿化分解的重要因素^[19,20]. 长期施用氮肥不仅提高了作物产量而且改变了土壤氮素含量及其生物性状^[21], 尤其提高了土壤有机碳氮含量. 土壤温度和水分含量也是影响土壤呼吸最主要的环境因子^[22-24], 但其影响方式在不同条件下存在一些差异^[23,25-29].

本研究通过监测休闲期施氮处理土壤呼吸、土壤水分和土壤温度的动态变化特征, 以分析农田土

收稿日期: 2010-12-04; 修订日期: 2011-05-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504)

作者简介: 张芳(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环及生态环境, E-mail: xiaoyufei2008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

壤微生物呼吸变化特征及其与氮肥和环境因素的关系.

1 材料与方法

1.1 试验地的自然条件

长期试验始于 1984 年,试验区地处黄土高原南部渭北旱原上的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”.试验区地势平坦,海拔 1 200 m,属于半干旱半湿润季风气候,为我国典型雨养农业区.1985~2008 年间年均降水量为 586 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm.休闲期(7~9 月)降水量占年总量的 57% 左右.年平均气温 9.4℃, > 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.研究区土壤为黏壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松.1984 年耕层土壤含有机碳为 6.50 g·kg⁻¹,全氮含量 0.62 g·kg⁻¹,碱解氮 37.0 mg·kg⁻¹,速效磷 3.0 g·kg⁻¹,速效钾 129.3 mg·kg⁻¹, CaCO₃ 10.5%, pH 8.4,黏粒含量(<0.002 mm)24%.试验地 N、P 含量较低,钾素丰富,呈微碱性反应.土壤容重为 1.3 g·cm⁻³,土壤田间持水量 21%~23.8%,凋萎含水量 9%~12%.土壤容重和土壤田间持水量、土壤凋萎含水量与 1984 年相比并没有显著变化^[30].

2009 年休闲期(7~9 月)总共降水 260.9 mm,降雨 24 次,>15 mm 降雨 7 次,较同期平均降雨量偏低(314.6 mm).休闲期最高气温 30.54℃,最低气温 14.22℃,平均气温 21.59℃,与同期月平均气温(19.40℃)相近.

1.2 试验设计与管理

试验始于 1984 年,在同一施磷(39 kg·hm⁻²)的基础上,设 5 个氮肥水平处理:0、45、90、135 和 180 kg·hm⁻²,3 次重复,区组随机排列.小区面积 24 m²(长 6 m,宽 4 m),区间距 0.3 m,区组间距 0.8 m,周边宽 1 m.供试品种为冬小麦(*Triticum aestivum* L.),一年一茬.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.冬小麦收获(次年 6 月)后土壤休闲,期间圆盘耙耕机(深度 20 cm)松土蓄墒,播种前再耕翻,准备下一茬冬小麦苗床.氮、磷肥分别为尿素、三料磷肥,在播种前作为基肥一次撒施地表后耕翻入土.2009 年小麦收获时间为 6 月 23 日,翻耕保墒蓄水时间为 7 月 23 日,施肥播种时间为 9 月

16 日和 17 日.

1.3 土壤呼吸、水分和温度的测定

土壤呼吸速率采用闭路式土壤碳通量测量系统进行测定,测定仪器型号为 LI-8100(LI-COR, Lincoln, NE, USA).于测定前 24 h 在每个小区内安置测定基座(基座为直径 20 cm 的 PVC 管)去除基座内的一切活体,基座安置后不再移动,以避免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.

小麦收获后,2009 年 7 月 7 日开始至 2009 年 9 月 11 日,除阴雨天气和其他处理测定外,该试验选取的处理共进行了 36 次测定.每个测定日的上午 08:00~11:00 点在试验小区内进行田间土壤呼吸测定.测定时将土壤呼吸仪放在基座上密封,5 min 可完成一个小区的测定,每试验小区重复测定 2 次,每处理共计 6 次重复;6 次平均作为当日该区的土壤呼吸速率值.生育期土壤呼吸测定过程和夏闲期相同,共进行 10 次测定.土壤水分采用烘干法测定.每个处理 3 次重复,取 3 次重复的平均值作为该次的土壤含水量.使用数字显示温度计测定土壤温度.水分和温度测定均涉及到 0~10 cm 土层深度.气温和降水等气象资料数据来自中国科学院长武黄土高原农业生态试验站自动气象观测系统.

1.4 土壤有机碳的测定

于 2009 年 6 月 23 日(小麦收获)后,使用直径为 3 cm 的土钻采集土样,深度为 0~20 cm.每一处理各有 3 个重复(小区),在每一小区各采集 5 钻均匀混合,土样风干,磨细过筛后,测定土壤有机碳^[31].

1.5 土壤累积呼吸量计算

$$F = R_s \times 3\,600 \times 24 \times 44 \div 10^6$$

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \div (t_{i+1} - t_1)$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率; F 为 CO₂ 日排放通量; M 为土壤呼吸日累积量; i 为土壤呼吸测定次数; t 为采样时间或呼吸测定对应天数.

1.6 数据分析

应用 Sigmpilot 10.0 软件分析休闲期土壤呼吸变化、土壤温度和土壤水分与土壤呼吸之间相关性等并制作其动态变化图;采用 SAS 8.1(SAS Inst., 1999)软件中非均衡数据方差分析(Proc GLM 程序包)和最小显著差异法(LSD)比较不同施氮处理下土壤呼吸速率、土壤温度和水分差异显著性.休闲期和生长季土壤呼吸累积量的差异分析,采用 SAS 8.1 软件包中 Proc TT 程序包按照施氮处理逐

一进行,显著差异水平设定为 $\alpha = 0.05$. 鉴于施氮、土壤水分和土壤温度对整个观测期间的土壤呼吸都有显著影响,本研究应用多因素方差分析的方法分析了氮肥、土壤温度和水分各自及其交互作用对土壤呼吸的影响. 在分析整个观测期间施氮处理对土壤呼吸影响时,将土壤温度和水分作为协变量,通过协方差分析来研究施氮水平对土壤呼吸的影响.

土壤温度是影响土壤呼吸的主导因素,两者之间的关系常用指数方程来模拟. 在夏季黄土旱塬区,因土壤水分一般较低且干湿变化频繁,土壤水分变化对土壤呼吸的影响不容忽视,因此本研究采用 Tang 等^[32]的双变量模型研究土壤温度和水分与土壤呼吸之间的关系:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} f(\theta)$$

式中, F [$\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 为土壤呼吸速率; T ($^{\circ}\text{C}$) 为土壤 0~10 cm 土层温度; θ (%) 为土壤 0~10 cm 土层水分; β_0 和 β_1 为模型参数.

试验数据预处理结果表明,当土壤含水量 < 18% 时,土壤呼吸随土壤含水量的增加而增加;土壤含水量 > 18% 时,土壤呼吸随土壤含水量的增加而

降低. 因此,上述双变量模型可具体为:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} e^{\beta_2 \theta + \beta_3 \theta^2}$$

式中 β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 为模型参数.

因施用氮肥对土壤呼吸具有显著影响,为此在双变量模型的基础上,本研究又将施氮作为变量引入模型,以进一步研究施氮、土壤温度和水分三者对土壤呼吸的影响:

$$F = \beta_0 e^{\beta_1 T} e^{\beta_2 \theta + \beta_3 \theta^2} e^{\beta_4 N}$$

式中, β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 为模型参数; N 为施氮水平 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

2 结果与分析

2.1 施氮水平对夏闲期土壤呼吸速率的影响

休闲期土壤呼吸速率变化剧烈,具有明显的波动特性,但不同施肥措施呈现相似的动态变化格局(图1). 7月7日~8月15日呼吸速率较高,均值为 $1.90 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 变化幅度为 $0.69 \sim 3.60 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$; 8月中旬后,由于温度降低,土壤呼吸速率整体下降,均值仅为 $0.98 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 波动幅度为 $0.32 \sim 1.54 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$.

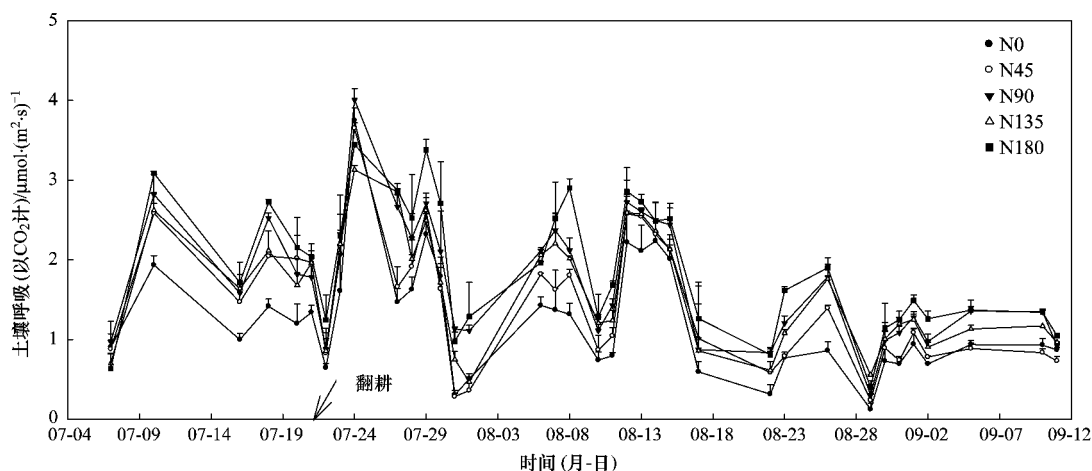


图1 休闲期不同施氮条件下土壤呼吸变化

Fig. 1 Dynamics of soil respiration during fallow stage with different N rates

5个施氮水平 0、45、90、135 和 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 分别表示为 N0、N45、N90、N135、N180. 由图1可以看出,休闲期土壤呼吸速率呈 $\text{N180} > \text{N90} > \text{N135} > \text{N45} > \text{N0}$ 的趋势. 整个休闲期观测过程, N0 处理平均土壤呼吸为 $1.24 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, 较 N0 处理, N45 处理 [$1.46 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 提高 17.7%, N135 处理 [$1.61 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 提高 29.8%, N90 处理 [$1.75 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 提高 41.1%, N180 处理 [$1.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 则提高

54.0%. 通过协方差分析可知,去除土壤温度、水分影响后,施氮对土壤呼吸的影响表现为 N0 与 N180、N90, N45 与 N180 间土壤呼吸速率的差异达极显著水平 ($P < 0.01$), N0 与 N135 间差异达显著水平 ($P < 0.05$), 其余处理间差异均不显著 ($P > 0.05$). 依据 2009 年 7、8 和 9 月期间所测定的试验数据对休闲期土壤二氧化碳累计排放量进行估算, N0、N45、N90、N135、N180 处理下的值约为 288、357、431、395 和 $468 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$.

2.2 土壤温度、水分

不同施氮水平下 10 cm 处土壤温度动态变化格局相似[图 2(c)],差异性不显著($P > 0.05$). 整个休闲期土壤温度变化幅度较大,其中 7 月 7 日至 8 月 17 日土壤温度较高,最高达 24.0℃、最低为 18.9℃,平均值为 21.6℃;8 月中旬后,各处理土壤温度降低,9 月 10 日下降至最低,仅为 15.4℃. 整个休闲期平均土壤温度约为 20.3℃.

夏闲期土壤体积含水量波动较为剧烈,为

3.2% ~ 33.1% [图 2(b)],但处理间差异并不显著($P > 0.05$). 雨季开始前(7 月 7 日),由于持续干旱,土壤水分处于严重亏缺状态,体积含水量仅为 3.2%;7 月 8 日~8 月 6 日,由于降水较为频繁(12 次)、雨量大(156.4 mm,为平均年降雨量的 26.8%),土壤含水量得到改善,平均为 24.3%. 但 8 月 7 日~8 月 15 日,由于高温、少降雨和快蒸发,土壤含水量逐渐降低至 16.9%. 8 月 17 日后,降水增加、气温降低,土壤含水量维持在 28.9%.

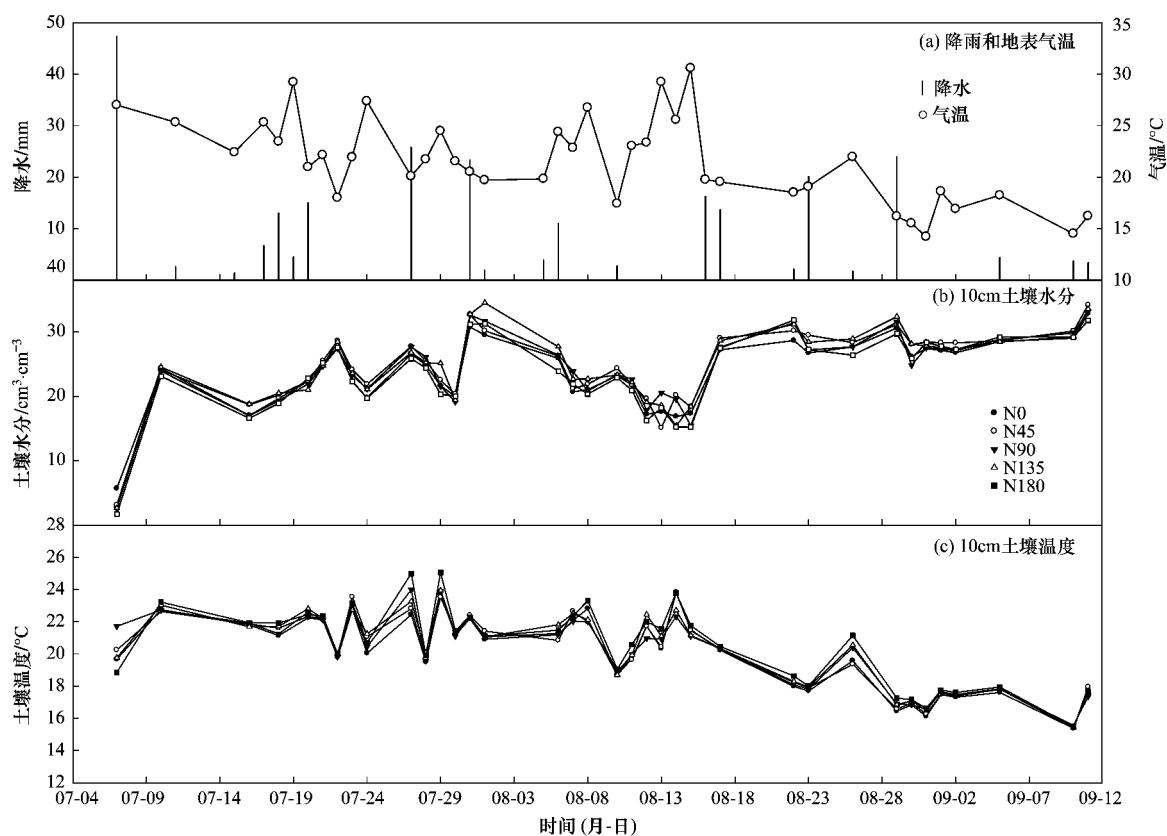


图 2 休闲期环境因子动态变化

Fig. 2 Dynamics of environmental factors during fallow stage

3 讨论

3.1 施氮对休闲期土壤呼吸的影响

生育期(3~6 月和 10 月)土壤呼吸累积量的平均值 [$6.95 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 与休闲期 [$6.20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 基本相当(表 1),同一施氮处理下生育期和休闲期土壤呼吸累积量间的差异不显著,不同施氮处理下休闲期土壤呼吸累积量间的差异显著,且随着施氮水平的提高而增大. 这些结果表明冬小麦收获后,尽管根系呼吸消失,但土壤微生物呼吸显著增强致使土壤总呼吸速率并没有显著降低. 休

闲期土壤微生物呼吸增强可能与这一时期土壤水分改善、温度升高以及作物根茬的残留有关. 尤其由于雨季导致的土壤水分改善极有可能是导致土壤微生物呼吸提高的主要因素. 2009 年观测期间,休闲期(7~9 月)降雨量(174.2 mm)显著高于生育期(112.7 mm). 10 cm 土层土壤平均含水量休闲期(24.3%)也显著高于生育期(19.1%). 土壤水分含量的增加,可以显著改善土壤的理化性质,改善微生物的生理状况,从而使土壤微生物呼吸提高^[33]. 此外,10 cm 土层土壤平均温度休闲期(20.1℃)高于生育期(18.9℃). 土温的升高也提高了土壤微生物

的活性.

施氮条件下休闲期土壤呼吸的变化源于氮肥的长期效应和短期结果. 长期施氮提高了作物生产力, 促进了作物地下部根茬及其分泌物输入, 进而促进了土壤有机碳积累. 本研究中 N45、N90、N135、N180 处理较 N0 处理土壤有机碳含量分别提高了 20.4%、27.0%、32.9%、35.9%. 土壤有机碳通过影响土壤微生物活动进一步来影响土壤呼吸. 本研究中不同施氮水平下土壤有机碳含量和土壤呼吸速率具有很好的相关性, 相关系数达 0.94. 在试验观测期间, 施氮显著提高了作物产量, 从 N0 ~ N180, 小麦籽粒产量依次为 0.98、2.36、3.82、4.26、4.47 Mg·hm⁻², 表明施氮促进了作物地上部的生长, 从而使更多的有机物质进入土壤, 加上该时期温度水分条件适宜, 土壤微生物的活动, 尽管此时已经没有了根系呼吸的直接参与但土壤呼吸速率依然较大. 本研究中不同施氮水平下地上部生物量和土壤呼吸速率的相关系数为 0.89, 略低于土壤有机碳和土壤呼吸的相关系数.

表 1 施氮条件下生育期和休闲期土壤呼吸变化¹⁾

Table 1 Soil respiration during growing season and fallow season under N fertilization

施氮处理	土壤呼吸/g·(m ² ·d) ⁻¹	
	生育期 (3~6、10月)	休闲期 (7月7日~9月11日)
N0	5.59 ± 0.39Da	4.92 ± 0.44Da
N45	6.31 ± 0.14CDa	5.83 ± 0.22Ca
N90	6.94 ± 0.25BCa	6.66 ± 0.09Ba
N135	8.37 ± 0.15Aa	6.35 ± 0.33BCa
N180	7.53 ± 0.42Ba	7.26 ± 0.30Aa

1) 表中数据表示方法为: Mean ± standard error; 大写字母为 $P < 0.05$ 时生育期和休闲期土壤呼吸在不同施氮处理上的差异显著性; 小写字母为 $P < 0.05$ 时同一施氮处理上生育期和休闲期土壤呼吸的差异显著性

3.2 施氮与水分、温度相互作用下土壤呼吸的变化特征

土壤温度、土壤水分和施氮都是影响土壤呼吸的重要因素(表2), 其中施氮水平、土壤水分、土壤温度单因素及三因素交互作用对土壤呼吸的影响达到极显著水平; 施氮水平和土壤水分、施氮水平和土壤温度两因素的相互作用对土壤呼吸的影响未达显著水平.

目前, 大量研究报道了土壤呼吸与土壤水分或土壤温度单变量关系模型^[27,28,34~36]. 本研究结果显示, 双变量关系模型显著优于单变量模型(表3). 双变量模型进一步揭示了土壤干湿变化剧烈的地区土壤呼吸与土壤温度和水分的关系. 常量系数 β_0 是很重要的参数, 它反映了土壤基础呼吸的大小. 土壤基础呼吸与土壤有机碳含量、土壤微生物等生物性状密切相关. 由表3可以看出, 较不施氮肥处理(N0), 低量施氮处理(N45)条件下土壤基础呼吸略有提高, 但高氮水平则会抑制土壤基础呼吸. 这与目前已有的一些研究结果^[37,38]不同, 具体原因有待进一步的探讨.

表 2 施肥、水热三因子影响下土壤呼吸方差分析¹⁾

Table 2 Variance analysis for soil respiration with N fertilization, soil temperature and soil moisture

变异来源	自由度 (DF)	平方和 (SS)	均方 (MS)	F 值	Pr > F
NRATE	4	9.74	2.43	7.47	<0.000 1
SW	1	20.31	20.31	62.30	<0.000 1
ST	1	25.29	25.29	77.55	<0.000 1
SW × NRATE	4	0.24	0.06	0.18	0.947 5
ST × NRATE	4	1.19	0.30	0.91	0.457 4
SW × ST × NRATE	5	5.50	1.10	3.38	0.006 3

1) NRATE 为施氮水平, SW 为土壤含水量, ST 为土壤温度

表 3 不同施氮条件下土壤温度、水分和土壤呼吸的关系模型¹⁾

Table 3 Modelling the effects of soil temperature and the moisture on soil respiration under N fertilization

施氮处理	单变量方程					
	温度指数方程	R^2	P	水分一元二次方程	R^2	P
N0	$F = 0.073 5e^{0.138 0T}$	0.26	=0.002 4	$F = 0.24 + 0.21\theta - 0.006 7\theta^2$	0.47	<0.000 1
N45	$F = 0.062 6e^{0.152 9T}$	0.38	<0.000 1	$F = 0.21 + 0.25\theta - 0.007 5\theta^2$	0.58	<0.000 1
N90	$F = 0.136 1e^{0.124 2T}$	0.35	=0.000 1	$F = 0.53 + 0.22\theta - 0.006 7\theta^2$	0.45	<0.000 1
N135	$F = 0.061 7e^{0.157 4T}$	0.49	<0.000 1	$F = 0.19 + 0.23\theta - 0.006 6\theta^2$	0.55	<0.000 1
N180	$F = 0.126 5e^{0.129 8T}$	0.54	<0.000 1	$F = 0.18 + 0.29\theta - 0.008 7\theta^2$	0.64	<0.000 1
施氮处理	双变量方程		R^2	P		
	$F = 0.160 2e^{0.049 8T}e^{0.176 8\theta - 0.005 6\theta^2}$		0.56	<0.000 1		
	$F = 0.184 2e^{0.048 3T}e^{0.182 8\theta - 0.005 6\theta^2}$		0.67	<0.000 1		
	$F = 0.087 1e^{0.096 5T}e^{0.134 5\theta - 0.003 7\theta^2}$		0.63	<0.000 1		
	$F = 0.101 6e^{0.074 3T}e^{0.162 2\theta - 0.004 4\theta^2}$		0.75	<0.000 1		
	$F = 0.122 8e^{0.072 1T}e^{0.161 2\theta - 0.004 5\theta^2}$		0.75	<0.000 1		

1) $F[\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ 为土壤呼吸速率, $T(^{\circ}\text{C})$ 为土壤温度, $\theta(\%)$ 为土壤含水量

除土壤温度和水分外,施氮措施也是土壤呼吸的重要影响因素(表2). 不考虑施氮因素时,5个处理的土壤温度、水分和土壤呼吸的关系模型为:

$$F = 0.1092e^{0.0791T}e^{0.1512\theta-0.0044\theta^2}$$

$$(R^2 = 0.57, P < 0.0001)$$

考虑施氮因素时,施氮、土壤温度、水分和土壤呼吸的关系模型为:

$$F = 0.0944e^{0.0721T}e^{0.1582\theta-0.0046\theta^2}e^{0.0026N}$$

$$(R^2 = 0.65, P < 0.0001)$$

式中 N 为施氮水平 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

由此可以看出,引入施氮变量后模型的决定系数进一步提高. 因此,在模拟农田土壤呼吸变化时,除考虑土壤温度、水分等环境因子影响外,亦应考虑施氮等管理措施的影响. 区别与以往大量土壤呼吸单变量模拟方程,本研究比较了土壤呼吸的单变量、双变量以及三变量模拟方程,为深入研究农田土壤呼吸多维影响因素及其模拟提供了参考.

4 结论

(1) 黄土旱塬区农田休闲期土壤呼吸速率变化剧烈,最大值为 $4.01 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,最小值为 $0.13 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,平均值为 $1.44 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 随着施氮水平的提高土壤呼吸速率由 $1.24 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 增大到 $1.91 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$. 休闲期(7月7日~9月11日)土壤呼吸累积量 [$6.20 \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 与生育期[3~6、10月, $6.95 \text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 相近.

(2) 在干湿变化剧烈的夏闲期,土壤呼吸与土壤水分、土壤温度的双变量模型显著优于单变量模型. 施氮、土壤温度、水分作为变量的三因素模型比土壤温度、水分作为变量的二因素模型能更好地说明土壤呼吸的实际变化. 施氮可以单独解释8%的土壤呼吸变异. 区别于以往土壤呼吸单变量模拟方程,本研究为深入分析农田土壤呼吸多维影响因素及其模拟提供了参考.

参考文献:

- [1] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11** (10): 1111-1120.
- [2] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3** (5): 315-322.
- [3] Madritch M D, Hunter M D. Intraspecific litter diversity and nitrogen deposition affect nutrient dynamics and soil respiration [J]. *Oecologia*, 2003, **136** (1): 124-128.
- [4] 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.
- [5] Pregitzer K S, Zak D R, Maziasz J, *et al.* Interactive effects of atmospheric CO_2 and soil-N availability on fine roots of *Populus tremuloides* [J]. *Ecological Applications*, 2000, **10** (1): 18-33.
- [6] Burton A J, Pregitzer K S, Reuss R W, *et al.* Root respiration in North American forests: Effects of nitrogen concentration and temperature across biomes [J]. *Oecologia*, 2002, **131** (4): 559-568.
- [7] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31** (2): 390-396.
- [8] Haynes B E, Gower S T. Belowground carbon allocation in unfertilized and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin [J]. *Tree Physiology*, 1995, **15** (5): 317-325.
- [9] 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.
- [10] Mo J, Zhang W, Zhu W, *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14** (2): 403-412.
- [11] 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]. *Forest Ecology Management*, 2004, **196** (1): 43-56.
- [12] Allison S D, Czimczik C I, Treseder K K. Microbial activity and soil respiration under nitrogen addition in Alaskan boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14** (5): 1156-1168.
- [13] 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 & Tillage Research*, 2002, **67** (2): 147-157.
- [14] Kuzyakov Y. Sources of CO_2 efflux from soil and review of partitioning methods [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38** (3): 425-448.
- [15] 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.
- [16] 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** (3): 944-951.
- [17] Jia B R, Zhou G S, Wang F Y, *et al.* Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38** (4): 653-660.
- [18] 朱显谟. 黄土高原土壤与农业 [M]. 北京: 农业出版社, 1989. 366-369.

- [19] Green C J, Blackmer A M, Horton R. Nitrogen effects on conservation of carbon during corn residue decomposition in soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, **59**(2): 453-459.
- [20] Hadas A, Kautsky L, Goek M, *et al.* Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**(2): 255-266.
- [21] Carreiro M M, Sinsabaugh R L, Repert D A, *et al.* Microbial enzyme shifts explain litter decay responses to simulated nitrogen deposition [J]. *Ecology*, 2000, **81**(9): 2359-2365.
- [22] 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**(2): 217-227.
- [23] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 53-69.
- [24] Reichstein M, Rey A, Freibauer A, *et al.* Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, **17**(4): 1104, doi: 10.1029/2003GB002035.
- [25] Wagai R, Brye K R, Gower S T, *et al.* Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(12): 1501-1509.
- [26] Sotta E D, Meir P, Malhi Y, *et al.* Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon [J]. *Global Change Biology*, 2004, **10**(5): 601-617.
- [27] Keith H, Jacobsen K L, Raison R J. Effects of soil phosphorus availability, temperature and moisture on soil respiration in *Eucalyptus pauciflora* forest [J]. *Plant and Soil*, 1997, **190**(1): 127-141.
- [28] 高会议, 郭胜利, 刘文兆, 等. 施氮水平对黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 390-396.
- [29] 车升国, 郭胜利, 张芳, 等. 黄土区夏闲期土壤呼吸变化特征及其影响因素 [J]. *土壤学报*, 2010, **47**(6): 1159-1169.
- [30] Huang M B, Dang T H, Gallichand J, *et al.* Effect of increased fertilizer applications to wheat crop on soil-water depletion in the Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, **58**(3): 267-278.
- [31] Nelson D W, Sommers L E. Total carbon, organic carbon, and organic matter, in methods of soil analysis (part 2) [A]. In: Page A L, Miller R H, Keeney D R. Chemical and microbiological properties (Second edition) [M]. Wisconsin USA: Madison, 1982. 562-564.
- [32] Tang J, Qi Y, Xu M, *et al.* Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada [J]. *Tree Physiology*, 2005, **25**(1): 57-66.
- [33] Drenovsky R E, Vo D, Graham K J, *et al.* Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition [J]. *Microbial Ecology*, 2004, **48**(3): 424-430.
- [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 Biology and Biochemistry*, 1978, **10**(5): 417-423.
- [35] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪. 长期施肥潮土土壤呼吸的温度和水分效应 [J]. *生态环境*, 2008, **17**(2): 693-698.
- [36] Xu M, Qi Y. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Global Change Biology*, 2001, **7**(6): 667-677.
- [37] Vesterdal L, Raulund-Rasmussen K. Availability of nitrogen and phosphorus in Norway spruce forest floors fertilized with nitrogen and other essential nutrients [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(9): 1243-1251.
- [38] 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.