

不同施氮水平下旱作玉米田土壤呼吸速率与土壤水热关系

张俊丽, 廖允成, 曾 爱, 刘 杨, 林 杰, 王永平

(西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为探讨不同施氮量对旱作玉米田土壤呼吸速率的影响, 设置 0(CK)、80、160、240、320 kg·hm⁻² 5 个氮肥水平, 分析不同施氮水平下土壤呼吸速率动态变化及其与土壤温度和土壤含水量间的关系。结果表明: 夏玉米生长季土壤呼吸速率呈单峰变化曲线, 于播种后 52 d 左右达到最大值, 成熟收获时降至最低; 土壤呼吸总量(S_r)与施氮量(n)满足关系式 $S_r = 1\ 204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n})$ 。土壤温度和土壤水分是影响土壤呼吸速率的主要因素, 5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率呈显著正相关, 土壤呼吸速率随土壤温度升高呈指数增加, 土壤温度可以解释旱作农田土壤呼吸速率季节变化的 62.31%~78.66%; 土壤水分和温度相互协调共同调控土壤呼吸, 两者可以解释旱作玉米田土壤呼吸季节变化的 79.63%~85.87%。

关键词: 土壤呼吸速率; 氮肥; 夏玉米; 旱作农田; 土壤温度; 土壤含水量

中图分类号: S152.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)07-1382-07 doi:10.11654/jaes.2013.07.015

Effects of Different Levels of N Fertilizer on Soil Respiration, and Its Relation to Soil Moisture and Soil Temperature Under Rainfed Land of Summer Maize

ZHANG Jun-li, LIAO Yun-cheng, ZENG Ai, LIU Yang, LIN Jie, WANG Yong-ping

(College of Agronomy, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: An experiment was conducted to explore the effects of different levels of nitrogen fertilizer on soil respiration and on the factors which affecting the soil respiration, especially soil moisture and soil temperature, in the arid condition. Summer maize crop was planted by applying the five different N fertilizer levels, including 0 kg N·hm⁻²(CK), 80 kg N·hm⁻²(N1), 160 kg N·hm⁻²(N2), 240 kg N·hm⁻²(N3) and 320 kg N·hm⁻²(N4). Data regarding average soil respiration showed a single peak curve. maximum respiration rate was recorded after 52 days of planting and the minimum was recorded near to maturity stage. Soil respiration increased with the increase of nitrogen fertilizer level. The equation i.e. $S_r = 1\ 204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n})$ was used to measure the total amount of soil respirations by applying the different levels of N fertilizer. Minimum total soil respiration was recorded in case of CK, while maximum but statistically at par respirations were recorded in case of N3 and N4. Soil temperature and soil moisture significantly affected the soil respirations. There was a significant positive correlation between 5 cm soil depth temperatures and soil respiration. Soil respiration exponentially increased with the increase of soil temperature, and 62.31%~78.66% variations in it were recorded due to the seasonal variations. Soil temperature and soil moisture interacted with each other and ultimately affected soil respirations. Both two factors showed 79.63%~85.87% variations in seasonal soil respirations from the field under the rainfed condition.

Keywords: soil respiration; nitrogen fertilizer; summer maize; arid farming land; soil temperature; soil moisture

温室气体增加导致气候变暖是目前备受人们关注的全球性环境问题^[1], CO₂ 是最重要的温室气体之

一, 而农田土壤 CO₂ 积累量占到人类活动释放到大气 CO₂ 的 1/4^[2], 土壤呼吸释放 CO₂ 是农田碳库向大气碳库输入碳的主要途径, 土壤呼吸速率相对微小的变化都会显著改变大气中 CO₂ 浓度和地球碳循环, 从而影响全球气候变化^[3]。因此, 农田土壤已被认为是大气 CO₂ 的重要源^[2-4]。施用氮肥是提高作物产量、维持和改善土壤肥力的主要措施之一^[5], 但施氮过量常导致不必要的氮素损失和温室气体排放^[2]。目前关于施氮

收稿日期: 2013-03-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31071375, 31171506); 西北农林科技大学国际科技合作项目; 西北农林科技大学基本科研业务费专项资金项目; 高等学校学科创新引智计划(B12007)

作者简介: 张俊丽(1985—), 女, 在读博士, 研究方向为高效农作制度和农业生态。E-mail: junlizhang2011@163.com

* 通信作者: 廖允成 E-mail: yunchengliao@163.com

量对农田土壤呼吸速率的研究主要为增施有机肥^[6]和氮磷钾配施^[7],研究作物多为冬小麦^[2,5,8]和春玉米^[4,9],并且研究结果多集中在土壤温度与土壤呼吸速率关系的分析^[4,6-7,9]。有研究表明,土壤温度和土壤水分是影响旱作农田土壤呼吸的关键因子,两者相互作用共同调控土壤呼吸^[1,10-11]。旱作条件下,对不同肥力梯度尿素单施对夏玉米田土壤呼吸速率的影响及土壤呼吸速率与土壤水热的关系尚缺乏系统研究,并且夏玉米是西北地区“压夏扩秋”的主要粮食作物^[12],研究夏玉米田土壤碳排放对探讨节能减排有重要意义。因此,本研究在旱作农田基础上,探讨不同施氮量夏玉米田土壤呼吸排放特征及其与土壤水热的相互关系,以期补充完善土壤呼吸排放机理,制定科学有效的土壤碳调控管理措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2010年在西北农林科技大学标本区试验田进行(E108°10', N34°21'),土壤为壤土,0~20 cm层土壤有机质 12.19 g·kg⁻¹、全氮 1.43 g·kg⁻¹、速效磷 18.12 mg·kg⁻¹、速效钾 120.64 mg·kg⁻¹、pH 7.30。

前茬作物冬小麦收获后,旋耕试验田。试验共设置5个处理,氮肥采用尿素(N素质量分数为46%),施氮量为0 kg·hm⁻²(CK)、80 kg·hm⁻²(N1)、160 kg·hm⁻²(N2)、240 kg·hm⁻²(N3)、320 kg·hm⁻²(N4)。上述各处理均以过磷酸钙(P₂O₅质量分数为12%)750 kg·hm⁻²作底肥一次性施入。施氮、磷量均为纯氮、纯磷量。

玉米品种为巡天19号,播种量90 kg·hm⁻²,行距60 cm,株距25 cm。小区面积6 m×9 m=54 m²,3次重复,随机区组排列。于6月20日播种,10月15日收获,整个生长季不浇水。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤呼吸速率测定

土壤呼吸速率采用GXH-3010E1型便携式红外CO₂气体分析仪(北京华云仪器有限公司生产)测定^[12]。耕作播种后,将大盖和仪器底座封闭嵌入土壤5 cm,外围填土,打平,各取样点固定一个底座。观测时,将进出气管与仪器相连,测定样点初始CO₂质量分数,然后拧紧小盖,接通小盖风扇电源,使容器内气体充分混合,一定时间后,记录该样点CO₂即时质量分数。土壤呼吸速率计算公式:

$$R=k(X_2-X_1)H/\Delta t$$

式中: R 为土壤呼吸速率,mg·m⁻²·h⁻¹; k 为换算系数,

$k=1.80$ (25℃,1个标准大气压); X_1 、 X_2 分别为测定时CO₂初始质量分数和测定结束后即时质量分数,mg·kg⁻¹; H 为容器高,m; Δt 为测定时间变化,h。

具体测定时间为6月19日至10月15日,每10 d观测1次(若有降雨进行适当调整),每次每处理重复测定3次,测定时间为9:00—11:00^[10,13]。

1.2.2 土壤温度测定

采用曲管地温计测定土壤温度。夏玉米播种后,将曲管地温计埋至作物行间,每小区3套。每次土壤呼吸速率测定的同时读取5、10、15、20 cm层土壤温度值。

1.2.3 土壤含水量测定

采用烘干称量法测定土壤含水量,每次土壤呼吸速率测定的当天,用土钻取0~40 cm土壤样品(每10 cm为一层),3次重复。

1.3 数据处理

采用公式(1)计算土壤呼吸总量;非线性回归分析法(公式2)分析土壤温度与土壤呼吸速率的关系;土壤呼吸敏感系数(公式3)分析土壤呼吸速率对温度的敏感性;多元回归分析法(公式4)分析土壤水分和温度与土壤呼吸速率的关系。

$$S_r = \sum_{i=1}^n \left[\frac{R_{i+1} + R_i}{2} (t_{i+1} - t_i) \times 24 \right] \quad (1)$$

式中: S_r 为土壤呼吸总量,g·m²; R 为土壤呼吸速率,mg·m⁻²·h⁻¹; i 为采样次数; t 为采样时间,即播种后天数,d。

$$R = ae^{bT} \quad (2)$$

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

$$R = a + bT + cW + dTW \quad (4)$$

式中: R 为土壤呼吸速率,mg·m⁻²·h⁻¹; T 为地温,℃; W 为土壤质量含水量,%; a 、 b 、 c 、 d 均为参数。

所有数据采用Excel和DPS软件处理,Duncan新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸速率动态变化

由图1可知,夏玉米生长季,不同施氮水平下土壤呼吸速率呈不对称单峰型曲线(图1)。播种前,土壤呼吸速率均较低,播种后,试验区进入雨季,降雨量增加,气温适宜,并且氮肥的施入为微生物活动提供了充足的碳源和氮源,土壤微生物呼吸逐渐增强^[9],播种后7 d,夏玉米开始进入苗期,玉米根呼吸逐渐增强,且根生长产生的分泌物进一步促进土壤微生物呼

吸^[4],从而表现为土壤呼吸速率迅速增加。土壤呼吸速率于播种后 52 d 左右达到最大值。此后,随生育时期推进,作物生长减缓,逐渐衰老,根系活力降低,并且气温也逐渐降低,降雨减少,土壤含水量降低,综合表现为土壤呼吸逐渐减弱,至成熟收获期降至最低。生长季内,土壤呼吸速率随施氮量增加而增加,方差分析表明,各施氮处理(N1、N2、N3、N4)土壤呼吸速率均显著($P<0.05$)高于不施氮处理(CK),N4 和 N3 土壤呼吸速率差异不显著($P>0.05$),其他施氮处理两两间均达到显著差异($P<0.05$)。

整个生长季,CK、N1、N2、N3、N4 处理土壤呼吸总量分别为 1 015.582、1 167.642、1 187.909、1 202.055、1 210.246 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,且土壤呼吸总量(S_r)与施氮量(n)满足逻辑斯底模型,方程为

$$S_r = 1\,204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n}) \quad (R^2 = 0.995\,1, P = 0.004)$$

由此可以看出,在一定施氮量范围内,土壤呼吸总量随施氮量的增加而增加。方差分析表明,各施氮处理土壤呼吸总量显著高于不施氮处理($P<0.05$),N3 和 N4 土壤呼吸总量差异不显著($P>0.05$),其他施肥

处理两两间均达到显著差异($P<0.05$)。

2.2 土壤呼吸速率与土壤水热关系

2.2.1 土壤温度与土壤呼吸速率的关系

夏玉米生长季,土壤温度与日均温变化趋势一致,均表现为先增后降,于播种后 52 d 左右达到最大值,成熟收获时降至最低(图 2)。不同土层土壤温度有差异,播种后 0~89 d,随土层深度增加,土壤温度逐渐降低,5 cm 和 10 cm 土壤温度差异不显著,但两者均显著高于 15 cm 和 20 cm 土壤温度($P<0.05$);播种后 90~118 d,土壤温度均值表现为 20 cm>15 cm>10 cm>5 cm,且 15 cm 和 20 cm 土壤温度差异不显著($P>0.05$),5 cm 和 10 cm 土壤温度差异也不显著($P>0.05$)。

各层土壤温度与土壤呼吸速率相关分析结果显示,5 cm 土壤温度与土壤呼吸速率的相关性最为显著。因此,用 5 cm 土壤温度分析土壤温度与土壤呼吸速率的关系。回归分析表明(图 3),土壤呼吸速率随土壤温度升高呈指数增加,土壤温度可以解释土壤呼吸季节变化的 62.31%~78.66%。不同施氮量下,N2 和 N3 处理土壤温度与土壤呼吸速率相关性最高, R^2 分

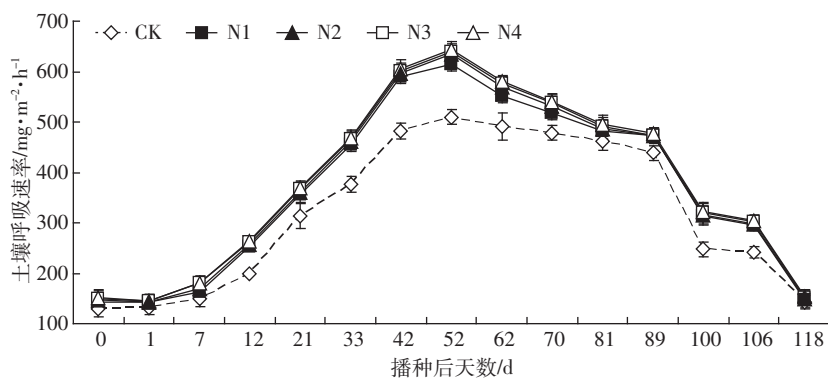


图 1 不同施氮水平下夏玉米田土壤呼吸速率变化

Figure 1 Changes in soil respiration from the field of summer maize crop in different nitrogen levels

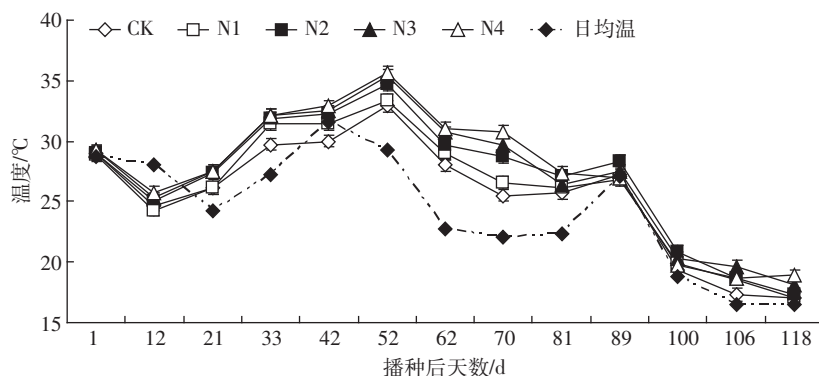


图 2 不同施氮水平下夏玉米田 5 cm 土壤温度和日均温变化曲线

Figure 2 Changes in 5 cm soil depth temperature and average daily temperature in different nitrogen levels

别为 0.786 6、0.777 5; 其次为 N1 和 N4; CK 最低, R^2 为 0.623 1。

根据回归指数方程计算土壤呼吸敏感系数 (Q_{10}), 结果表明, CK、N1、N2、N3、N4 处理温度敏感系数分别为 1.776、1.804、1.822、1.786、1.769, 表现为 $N2 > N1 > N3 > CK > N4$, 说明土壤中施加一定量氮肥, 土壤呼吸的温度敏感性明显增加, 但施氮量超出一定范围后, 其温度敏感性转而降低。不同测定日期, 土壤呼吸温度敏感系数也有差异。整个生长季, Q_{10} 为 1.377~2.435。其中, 夏玉米拔节期至抽雄期(播种后 21~52 d) Q_{10} 较大, 为 1.786~2.435; 生长初期(播种后 0~12 d) 和生育后期(播种后 100~118 d) Q_{10} 较小, 为 1.377~

1.786。

2.2.2 土壤水分与土壤呼吸速率的关系

有研究表明, 除土壤温度外, 土壤水分也是影响旱作农田土壤呼吸速率的主要因素^[15,10]。土壤水分通过影响植物根系分布及土壤微生物群落组成, 进而改变土壤呼吸^[1,15]。对夏玉米生长季土壤呼吸与土壤含水量进行相关分析可知, 两者相关性并不显著, 但土壤呼吸的峰值(播种后 52 d 和播种后 89 d)与土壤含水量同步(图 4)。试验区夏玉米生长季降雨量占年降雨量的 63.28%~70.55%, 且气温较高, 水分蒸发量大, 水分曲线波动明显, 土壤水分变化与温度变化关系密切, 因此在分析土壤水分与土壤呼吸的关系时不能忽

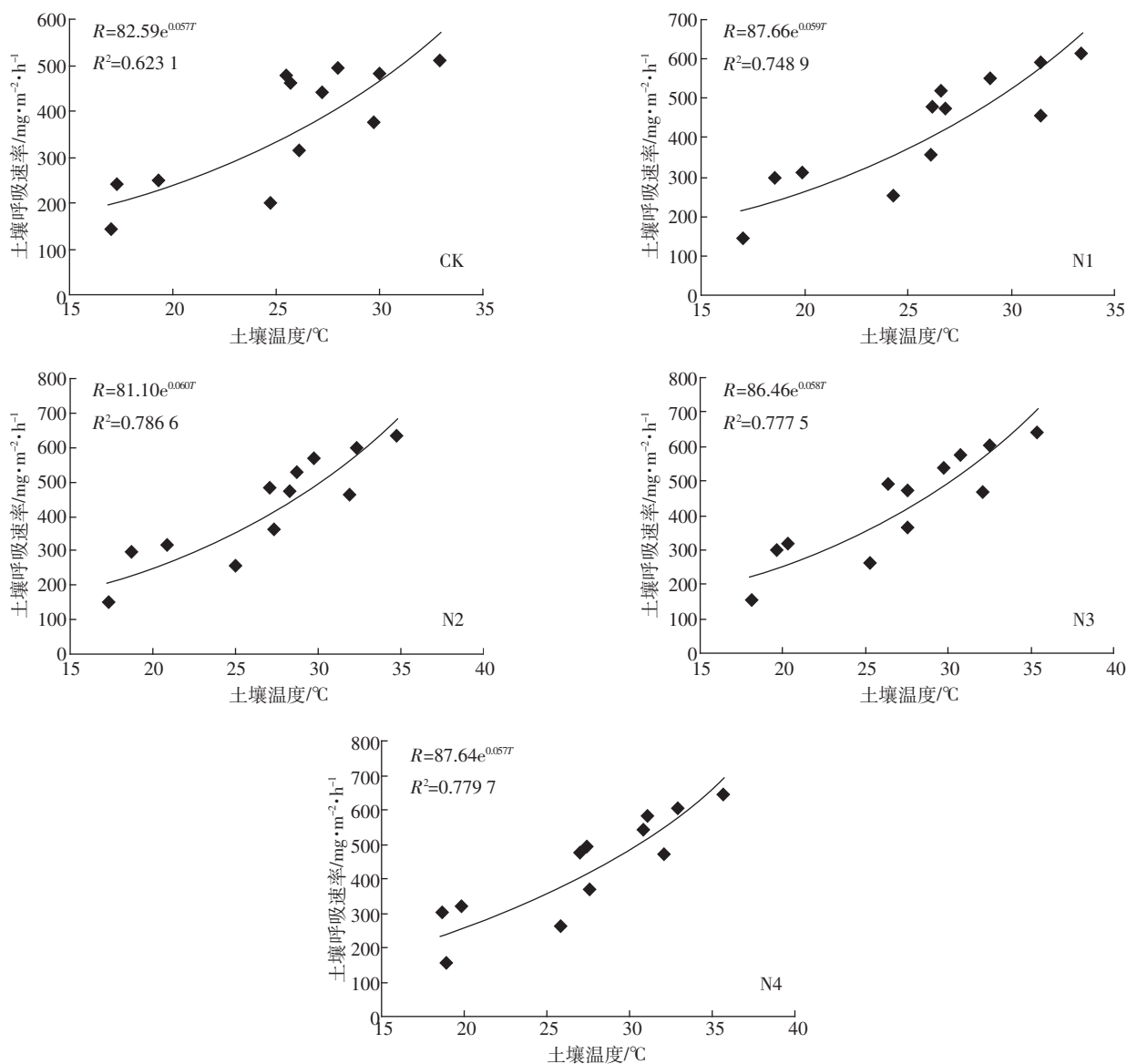


图 3 不同施氮水平下土壤呼吸速率与 5 cm 土壤温度的关系

Figure 3 Relationships between soil respiration and 5 cm soil depth temperature in different nitrogen levels

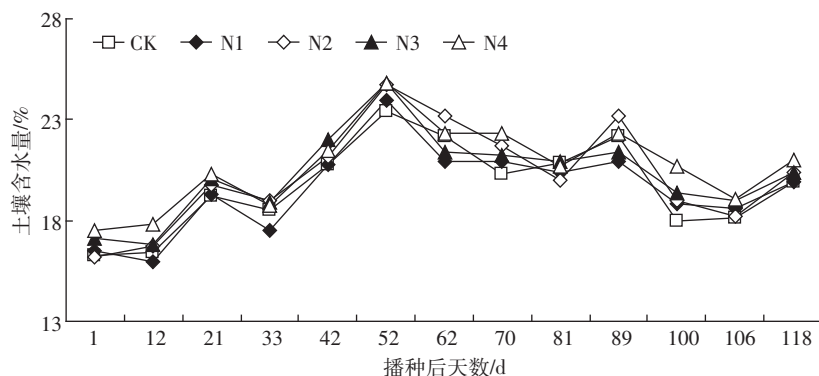


图4 不同施氮水平下夏玉米田 0~40 cm 土壤平均含水量变化曲线

Figure 4 Changes in average soil moisture from 0~40 cm soil depths in different nitrogen levels

视土壤温度的影响^[15]。进一步采用多元回归法分析土壤水热与土壤呼吸的关系可知,不同施氮水平下,土壤水分和土壤温度可以解释旱作农田夏玉米生长季土壤呼吸速率季节变化的 79.63%~85.87%。土壤温度和土壤水分对土壤呼吸的影响表现为 $N2 > N1 > N3 > CK > N4$,与土壤温度对土壤呼吸速率的敏感系数排序一致(表 1)。这说明 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量下,土壤呼吸对土壤水热更为敏感,施氮量超出一定范围后其敏感性反而下降。

表 1 不同施氮水平下土壤呼吸速率与
土壤水分和土壤温度拟合方程

Table 1 Relationships between soil respiration, soil temperatures and soil moistures in different nitrogen levels

处理	拟合方程	R^2	F	P
CK	$R=442.29-9.52W-11.25T+0.041TW$	0.798 5	205.010	0.002 1
N1	$R=437.56-6.90W-11.94T+0.043TW$	0.819 2	142.386	0.002 0
N2	$R=399.68-5.53W-10.80T+0.045TW$	0.858 7	149.260	0.000 6
N3	$R=545.91-12.09W-12.40T+0.038TW$	0.801 2	189.576	0.000 8
N4	$R=506.70-8.46W-12.71T+0.036TW$	0.796 3	170.123	0.000 9

3 讨论

3.1 不同施氮水平对土壤呼吸速率的影响

夏玉米生长季,土壤呼吸速率季节变化为先增后降的不对称单峰曲线,于夏玉米播种后 52 d 左右达到最大值,成熟收获时降至最低。苗期至抽雄期迅速增加,抽雄期后缓慢下降,这主要是因为玉米出苗后,根系生长加快,根生长呼吸和根系生长产生的分泌物促进土壤微生物呼吸^[14],并且施用氮肥为作物生长提供大量矿质营养,微生物活性增强,作物根系生长迅速,表现为土壤呼吸速率增加;生育后期作物逐渐衰老,土壤温度降低,玉米根系活力下降,呼吸速率降低^[2]。这与

韩广轩等^[16-17]的研究结果一致。

关于施氮量与土壤呼吸速率的关系,国内外进行了大量的研究,结果有 3 种:促进、抑制和无显著影响^[5]。研究表明,土壤呼吸速率随施氮量增加而增加,这与吕佩毓等^[4]、王立刚等^[7]、张耀鸿等^[9]的研究结果一致。夏玉米生长季,土壤呼吸总量与施氮量呈显著正相关,土壤呼吸总量(S_r)与施氮量(n)满足关系式 $S_r = 1\,204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n})$,说明在一定施氮范围内,土壤呼吸总量随施氮量增加而增加。增施氮肥可促进土壤呼吸可能有以下原因^[2,4-5,9,14,18-19]:(1)氮素不足会影响微生物活性,向土壤中施加氮肥后,土壤 C/N 降低,使微生物增殖并分解更多的土壤有机质,促进土壤碳排放;(2)增施氮肥能增强植物光合作用,从而提供给根系和土壤的光合产物增加;(3)增施氮肥可促进作物根系生长,促进根呼吸;(4)增施氮肥后提供给微生物有效氮增加,促进微生物呼吸。

3.2 土壤呼吸速率与土壤水热关系分析

有研究表明,土壤水分和温度是影响土壤呼吸速率的关键因子^[1,10-11]。夏玉米生长季,土壤呼吸速率随温度升高呈指数增加。有研究表明,微生物呼吸作用和根系呼吸对土壤温度变化敏感^[17],一定范围内环境温度增加可促进土壤微生物活性,加速有机质分解,产生 CO_2 ,同时,土壤温度增加可直接影响植物根系生长,影响土壤呼吸^[17]。土壤呼吸的温度敏感系数(Q_{10})可反映温度变化前后呼吸作用的变化规律,对了解未来气候变暖条件下旱作农田土壤呼吸速率变化有指导意义^[9]。整个生长季, Q_{10} 为 1.377~2.435,其中,拔节期至抽雄期 Q_{10} 较大,生长初期和生育后期 Q_{10} 较小,这与韩广轩等^[17]的研究结果相同。研究表明,土壤呼吸的温度敏感系数由大到小依次为 $N2 > N1 > N3 > CK > N4$,显示 $160 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量土壤呼吸速

率对温度敏感最强,随施氮量增加,敏感性降低。本研究试验田基础土壤氮素水平较高,氮素不是土壤呼吸的限制因子,这可能是施氮量增加至 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤呼吸的温度敏感性反而低于不施氮处理的原因之一。

除土壤温度外,土壤水分是影响土壤呼吸速率的另外一个重要影响因子。有研究表明,土壤水分通过影响植物根系分布、根呼吸以及土壤微生物群落组成,进而影响土壤呼吸^[1],刘爽等^[10]研究表明,土壤水分与土壤呼吸速率呈指数关系,且土壤呼吸速率随施氮量增加而降低。本研究中,单独分析土壤水分与土壤温度关系时,两者相关性不显著,这与李虎等^[1]和陈述悦等^[15]的研究结果一致。王立刚等^[7]和李虎等^[1]研究也表明,土壤水分往往是通过与土壤温度的相互协调,共同影响土壤呼吸速率。韩广轩等^[17]在东北地区夏玉米生长季的研究中指出,土壤水分和温度与土壤呼吸速率的关系可用模型 $R=ae^{bTW_c}$ 、 $R=e^{(a+bT+cW+dTW)}$ 、 $R=a+bT+cW+dTW$ 描述。在一定范围内,温度增加可加速土壤 CO_2 排放,但同时土壤呼吸速率还受土壤水分限制,土壤湿度过低会限制微生物呼吸和根呼吸,土壤湿度过高则会阻塞土壤孔隙,减少土壤 CO_2 排放^[14,17]。本研究中,模型 $R=a+bT+cW+dTW$ 能更好地反映试验条件下土壤水热与土壤呼吸速率关系,研究结果表明,两者可以解释土壤呼吸季节变化的 $79.63\% \sim 85.87\%$ 。这也说明,土壤温度和土壤水分是影响旱作玉米田土壤呼吸速率的关键因素,并且土壤水分对土壤呼吸速率的影响取决于土壤温度的相互协调状况^[11,7]。通过建立模型分析土壤水热与土壤呼吸速率的关系,有助于了解未来气候变化条件下旱作农田土壤碳排放规律。

3.3 其他因素对土壤呼吸的影响

田间条件下,除土壤温度和水分外,土壤呼吸速率还受土壤活性碳氮、微生物活性、植物生物量和土壤 pH 值等的影响^[12,15-16]。其中,土壤活性有机碳和氮可为土壤微生物提供营养和能量,进而影响微生物活动和生长繁殖,表现为土壤呼吸的变化^[5,19]。高会议等^[5]关于黄土旱塬区麦田土壤呼吸变化的研究表明,施氮条件下土壤呼吸与微生物量碳和可溶性碳含量呈显著正相关;杨兰芳等^[19]研究表明,提高土壤活性有机氮可促进微生物呼吸;陈述悦等^[15]研究表明,施用氮肥可降低微生物活性和土壤 pH 值。

综上所述,土壤呼吸受环境因素、生物过程和人

为因素的综合影响,后续研究中需要综合考虑因素间

4 结论

(1)夏玉米生长季,土壤呼吸速率动态变化为不对称单峰型曲线,播种后土壤呼吸速率开始增加,至播种后 52 d 达到最大值,成熟收获时降至最低; $0 \sim 320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量范围内,土壤呼吸速率随施氮量的增加而增加, $80 \sim 320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮量处理土壤呼吸速率均显著高于不施氮处理,施氮处理除 $320 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 施氮处理间土壤呼吸速率差异不显著外,其他处理两两间均达到显著差异。生长季内土壤呼吸总量(S_r)与施氮量(n)满足逻辑斯底方程:

$$S_r = 1\ 204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n})$$

(2)土壤水分和土壤温度是影响旱作玉米田土壤呼吸速率的主要因素。其中,土壤呼吸速率随土壤温度升高呈指数增加,土壤温度可以解释旱作农田土壤呼吸速率季节变化的 $62.31\% \sim 78.66\%$;土壤水分和温度相互协调共同调控土壤呼吸,两者可以解释土壤呼吸季节变化的 $79.63\% \sim 85.87\%$ 。

参考文献:

- [1] 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): 15-20.
LI Hu, QIU Jian-jun, WANG Li-gang. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(4): 15-20.
- [2] 刘合明,刘树庆. 不同施氮水平对华北平原冬小麦土壤 CO_2 通量的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1125-1129.
LIU He-ming, LIU Shu-qing. Effect of different nitrogen levels on soil CO_2 fluxes of winter wheat in North China plain[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1125-1129.
- [3] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7-20.
- [4] 吕佩毓,柴 强,李 广. 不同施氮水平对玉米生长季土壤呼吸的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(11): 1919-1923.
LÜ Pei-yu, CHAI Qiang, LI Guang. Effect of fertilizing nitrogen levels on soil respiration during growing season in maize field[J]. *Pratacultural Science*, 2011, 28(11): 1919-1923.
- [5] 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): 390-395.
GAO Hui-yi, GUO Sheng-li, LIU Wen-zhao, et al. Effects of nitrogen rates on soil respiration in winter wheat cropping system in semi-arid regions on Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 390-395.
- [6] 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.

- ZHANG Qing-zhong, WU Wen-liang, WANG Ming-xin, et al. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11):2883-2887.
- [7] 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):13-17.
- WANG Li-gang, QIU Jian-jun, LI Wei-jiong. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China[J]. *Soils and fertilizers*, 2002(6):13-17.
- [8] 杨玲, 廖允成, 高茂盛, 等. 不同耕作措施下旱作麦田 CO₂ 排放速率与土壤水热关系分析[J]. 西北农业学报, 2011, 20(1):70-75.
- YANG Ling, LIAO Yun-cheng, GAO Mao-sheng, et al. Relationship analysis of CO₂ emission fluxes and soil temperature and moisture in rainfed wheat field with different tillage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(1):70-75.
- [9] 张耀鸿, 朱红霞, 李映雪, 等. 氮肥施用对玉米根际呼吸温度敏感性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):2033-2039.
- ZHANG Yao-hong, ZHU Hong-xia, LI Ying-xue, et al. Effects of nitrogen fertilization on temperature sensitivity of rhizosphere respiration during maize growing stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):2033-2039.
- [10] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤呼吸及其影响因素[J]. 生态学报, 2010, 30(11):2919-2924.
- LIU Shuang, YAN Chang-rong, HE Wen-qing, et al. Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11):2919-2924.
- [11] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作措施对华北农田 CO₂ 排放影响及水热关系分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):47-52.
- ZHANG Yu, ZHANG Hai-lin, CHEN Ji-kang, et al. Effects of different tillage practices on CO₂ emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(4):47-52.
- [12] 张俊丽, Sikander Khan Tanveer, 温晓霞, 等. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):192-199.
- ZHANG Jun-li, Sikander Khan Tanveer, WEN Xiao-xia, et al. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(18):192-199.
- [13] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 山杨白桦混交次生林与原始阔叶红松林土壤呼吸作用比较[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3):348-354.
- WANG Xu, ZHOU Guang-sheng, JIANG Yan-ling, et al. Soil respiration in natural mixed (*Betula Platyphlla* and *Populus Davidiana*) secondary and primary Broad-leaved Korean pine forest[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):348-354.
- [14] Luo Yi-qi, Zhou Xu-hui. 土壤呼吸与环境[M]. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] 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, 19(5):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, 19(5):1552-1560.
- [16] 韩广轩, 周广胜, 许振柱, 等. 玉米地土壤呼吸作用对土壤温度和生物因子协同作用的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3):363-371.
- HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu, et al. Responses of soil respiration to the coordinated effects of soil temperature and biotic factors in a maize field[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(3):363-371.
- [17] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素[J]. 生态学报, 2008, 27(10):1698-1705.
- HAN Guang-xuan, ZHOU Guang-sheng, XU Zhen-zhu. Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10):1698-1705.
- [18] 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. Effect of nitrogen fertilization on soil respiration during maize growth season[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8):2025-2030.
- [19] 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):9-14.
- YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Soil respiration during maize growth period affected by N application rates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):9-14.