

# 不同碳氮管理措施对春玉米农田土壤呼吸的影响

王碧胜<sup>1</sup>, 武雪萍<sup>1\*</sup>, 于维水<sup>1</sup>, 杨毅宇<sup>1,3</sup>, 王相玲<sup>1</sup>, 李景<sup>1</sup>, 梁国鹏<sup>1</sup>, 蔡典雄<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081;  
2. 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081; 3. 山西农业大学, 山西 太谷 030801)

**摘要:** 基于山西省寿阳旱作试验区长期定位试验, 以春玉米农田为研究对象, 探讨了不同碳氮管理措施对春玉米农田土壤呼吸的影响及土壤呼吸与土壤温度的关系。结果表明: 碳氮处理土壤呼吸高于无肥区, 其中施用化肥 105 kg·hm<sup>-2</sup>、秸秆 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>、有机肥 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>时, 土壤呼吸速率最低, 为 2.24 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 与无肥区差异不显著; 施用化肥 31 kg·hm<sup>-2</sup>、秸秆 5 121 kg·hm<sup>-2</sup>、有机肥 4 500 kg·hm<sup>-2</sup>时, 土壤呼吸速率最高, 达 3.51 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 高出无肥区 72.0%。化肥、秸秆、牛粪编码值与土壤呼吸速率满足关系式  $y = 2.2 - 0.1x_1 + 0.2x_2 - 0.2x_1x_3 + 0.2x_1^2 + 0.1x_2^2 + 0.1x_3^2$ , 当化肥、秸秆、牛粪用量分别为 131、1 500、3 750 kg·hm<sup>-2</sup>时, 土壤呼吸速率达到最小值 2.075 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 该施肥配方可为当地春玉米生产施肥管理提供参考依据。土壤呼吸与土壤温度间存在  $y = aT^b$  显著相关关系, 可解释两者间变异的 46.9% ~ 81.2%,  $Q_{10}$  变化范围为 1.86 ~ 4.71。综上可知, 合理的碳氮管理措施可有效控制 CO<sub>2</sub> 的排放, 并影响土壤呼吸对土壤温度的敏感性。

**关键词:** 碳氮管理; 土壤呼吸; 土壤温度

**中图分类号:** S153; S152

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-6257 (2015) 04-0001-07

土壤呼吸是土壤碳库和大气碳库进行交换的主要途径, 包括土壤中的植物根系呼吸、土壤动物和微生物呼吸以及含碳矿物质的化学氧化作用产生释放 CO<sub>2</sub> 的过程, 其中最重要的组成部分为植物根系的自养呼吸和土壤动物以及微生物的异养呼吸<sup>[1-3]</sup>。土壤通过呼吸作用向大气释放 CO<sub>2</sub> 的年通量为  $5.0 \times 10^{16} \sim 7.5 \times 10^{16}$  g, 占陆地生态系统与大气之间碳交换总量的 2/3<sup>[4]</sup>。土壤呼吸相对微小变化就会导致大气浓度的巨大改变, 从而影响全球气候变暖<sup>[5-6]</sup>。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 农业源排放的 CO<sub>2</sub> 占人为温室气体排放量的 21% ~ 25%<sup>[4]</sup>。目前, 关于耕作措施对土壤呼吸的研究较全面<sup>[7-9]</sup>, 针对养分对土壤呼吸的研究主要集中于化肥 (氮肥) 或化肥与秸秆覆盖、化肥与有机肥结合方面<sup>[8,10-11]</sup>, 关于有机肥、秸秆还田、化肥配施

对土壤呼吸的研究还很少见。已有研究表明, 碳氮投入可提高土壤质量, 显著增加土壤呼吸速率<sup>[8,10]</sup>, 李昌珍等<sup>[12]</sup>研究了秸秆覆盖和施肥对土壤呼吸速率的影响, 得出施氮肥可明显提高土壤呼吸速率的结论。胡诚等<sup>[13]</sup>通过有机肥试验表明, 随着有机肥施用量的提高, 土壤呼吸随之增加。碳氮投入最根本的目的是提高农田土壤肥力, 如何在保障增加土壤肥力的同时, 控制 CO<sub>2</sub> 的排放, 减少土壤呼吸, 达到双赢的效果, 正是本文研究的重点。此外, 目前我国对农田土壤呼吸的研究多集中在黄淮海和长江中下游一带地区<sup>[8]</sup>, 旱地春玉米是中国北方主要的旱地种植作物, 在北方旱地生态系统中占据重要地位, 其农田土壤呼吸对碳排放的影响不可忽视。因此, 本文基于山西寿阳县长期试验基地春玉米农田土壤, 研究化肥、秸秆、牛粪不同配施水平对土壤呼吸的影响及土壤温度与土壤呼吸的关系, 以期减少温室气体排放和农田固碳提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于山西省晋中地区寿阳县宗艾镇。该地区属中纬度暖温带半湿润偏旱大陆性季风气候

收稿日期: 2014-12-22; 最后修订日期: 2015-01-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2013AA102901); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201203077)。

作者简介: 王碧胜 (1988-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 从事农业水资源利用研究。E-mail: wangbisheng2@126.com。

通讯作者: 蔡典雄, E-mail: caidianxiong@caas.cn; 武雪萍, E-mail: wuxueping@caas.cn。

区,年平均气温 7.4℃,海拔 1 066 ~ 1 159 m,年均降水量 520 mm,年均蒸发量约为 1 700 ~ 1 800 mm,无霜期 130 d 左右。2012 ~ 2013 年各月份的降水量如图 1 所示。当地季节温差大,水土流失与土壤侵蚀严重,试验区选在地势较平缓的褐土上,质地为砂质壤土,属于全年无灌溉雨养地。土壤基本理化性状为有机质 25.7 g · kg<sup>-1</sup>,全氮 1.04 g · kg<sup>-1</sup>,碱解氮 54.0 mg · kg<sup>-1</sup>,有效磷 (P) 7.3 mg · kg<sup>-1</sup>,速效钾 (K) 84.0 mg · kg<sup>-1</sup>,pH 值 7.87。

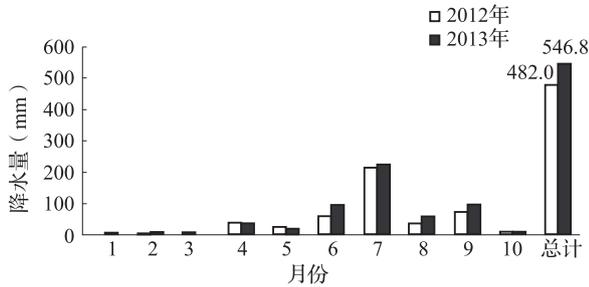


图 1 试验地 2012 ~ 2013 年各月份降水量

## 1.2 试验设计

本试验供试作物为当地春玉米优势品种,以化肥 (F)、秸秆 (S)、牛粪 (M) 为试验因素,采用 311 - A D 饱和设计,即 3 因素 11 个处理,同时设一无肥对照区,小区面积为 6 m × 6 m;采用秋耕秋施肥方式处理农田土壤。各小区设计及施肥量见表 1,其中  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别为化肥、秸秆、牛粪的编码值。2012 年 8 月 ~ 2013 年 10 月在玉米各生育期固定时间测定土壤呼吸速率及土壤温度。

表 1 试验设计方案

处理	$x_1$	$x_2$	$x_3$	化肥 (F) (kg · hm <sup>-2</sup> )	秸秆 (S) (kg · hm <sup>-2</sup> )	牛粪 (M) (kg · hm <sup>-2</sup> )
1	0	0	2	105	3 000	6 000
2	0	0	-2	105	3 000	0
3	-1.414	-1.414	1	31	879	4 500
4	1.414	-1.414	1	179	879	4 500
5	-1.414	1.414	1	31	5 121	4 500
6	1.414	1.414	1	179	5 121	4 500
7	2	0	-1	210	3 000	1 500
8	-2	0	-1	0	3 000	1 500
9	0	2	-1	105	6 000	1 500
10	0	-2	-1	105	0	1 500
11	0	0	0	105	3 000	3 000
12				0	0	0

## 1.3 观测指标

土壤呼吸测定采用红外气体分析 (IRGA) 法,通过 Li - 6400 便携式光合仪和 Li - 6400 - 09 土壤呼吸室完成,在春玉米的播种期、苗期、拔节期、大喇叭口期、灌浆期、成熟期分别选取一天在 8:00 ~ 10:00 进行土壤呼吸的测定,此时土壤呼吸速率最接近 24 h 均值<sup>[14]</sup>,每个处理测定 3 组重复,具体测量方法参考张丁辰等<sup>[8]</sup>、韩广轩等<sup>[15]</sup>的研究。测定前 24 h 将测定 PVC 基座随机放置各个小区,清除 PVC 基座内的杂草及有机物质,避免干扰呼吸速率测定。

在测定土壤呼吸的同时用酒精温度计测定当天 5 cm 土壤温度<sup>[7-8]</sup>。

## 1.4 数据分析与处理

土壤呼吸与土壤温度关系拟合方程:  $y = aT^b$

土壤呼吸对土壤温度的敏感系数方程:  $y = ae^{bT}$ ,  $Q_{10} = e^{10b}$

式中  $y$  为土壤呼吸速率 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $T$  为土壤温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $a$ 、 $b$  为模拟计算值。

根据徐中儒<sup>[16]</sup>所述,采用二次多项式回归模型研究土壤呼吸与化肥、秸秆、牛粪之间的关系:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^3 b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^3 b_{jj} x_j^2$$

其中,  $b_0$ : 常数项;  $b_j$ : 一次项回归系数;  $b_{ij}$ : 交互项回归系数;  $b_{jj}$ : 二次项回归系数。

试验数据的处理、统计、分析及图表的制作通过 Excel 2007 和 Sigmaplot 10.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同碳氮管理措施下土壤呼吸速率变化

图 2 所示为各处理整个测定期内 9 次生育期土壤呼吸速率测量的平均值,由图可知,除了第 2、4、10、11 处理外,其他各处理与无肥区之间均表现出显著性差异;在施肥的 11 个处理中,第 5 处理的土壤呼吸速率最高,达到  $3.51 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高出无肥区 ( $2.04 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 72.0%,处理 11 土壤呼吸速率最低,为  $2.24 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高出无肥区 9.8%。试验结果与养分的不同配合用量有关,第 5 处理投入肥料的 C/N 接近 30:1,处理 11 的 C/N 接近 13:1,而土壤 C/N 严重影响土壤微生物的生命活动,进而影响土壤呼吸速率,由此可知,合理的碳氮管理措施可以调控土壤呼吸速率,有效控制 CO<sub>2</sub> 的排放。

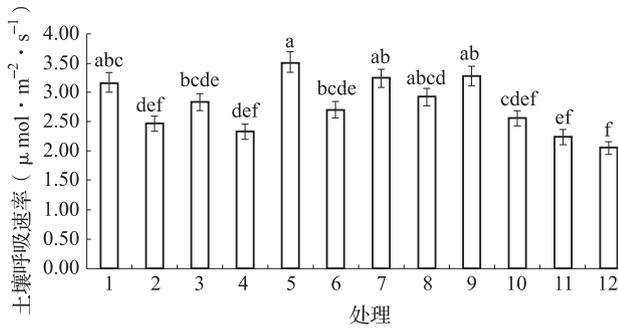


图2 不同处理土壤呼吸速率

注：图柱上不同小写字母代表处理间差异显著，P < 0.05。

## 2.2 化肥、秸秆、牛粪对土壤呼吸的影响

### 2.2.1 回归方程的建立

根据表2所示，观测期内各处理土壤呼吸速率的平均值与不同施肥变量，建立化肥、秸秆、牛粪用量与土壤呼吸速率之间的二次多项式方程：

$$y = 2.2 - 0.1x_1 + 0.2x_2 - 0.2x_1x_3 + 0.2x_1^2 + 0.1x_2^2 + 0.1x_3^2 \quad (1)$$

y 为土壤呼吸速率的估计值；x<sub>1</sub> 为化肥用量编码值；x<sub>2</sub> 为秸秆用量编码值；x<sub>3</sub> 为牛粪用量编码值。

经过对回归方程的 F 检验，得出 F = 4.15，查 F 表，F<sub>0.01</sub> (10, 20) = 3.37，而有 F > F<sub>0.01</sub> (10, 20)，差异极显著，所求得回归方程能够反映实际情况，可以用来预测试验中土壤呼吸速率。

表2 各处理土壤呼吸速率

处理	土壤呼吸速率 (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )			总平均值
	1	2	3	
1	2.64	3.15	3.69	3.16 ± 0.53abc
2	2.01	2.38	2.99	2.46 ± 0.49def
3	3.14	3.10	2.26	2.83 ± 0.50bcde
4	2.53	2.23	2.23	2.33 ± 0.17def
5	3.16	3.44	3.94	3.51 ± 0.40a
6	2.51	2.69	2.91	2.70 ± 0.20bcde
7	3.13	3.31	3.27	3.24 ± 0.09ab
8	2.85	3.13	2.76	2.91 ± 0.19abcd
9	2.82	3.21	3.83	3.29 ± 0.51ab
10	2.15	3.06	2.44	2.55 ± 0.46cdef
11	2.02	2.45	2.27	2.24 ± 0.22ef
12	2.49	1.88	1.76	2.04 ± 0.39f

注：总平均值后不同小写字母代表处理间差异显著 (P < 0.05)，±后数值为标准差。

### 2.2.2 单因素对土壤呼吸速率的影响

采用“降维法”<sup>[17-18]</sup>把回归方程中的任意两个自变量编码值取零水平，可以求出另一自变量与土壤呼吸速率之间的一元二次回归方程：

当秸秆、牛粪为零水平时，化肥：

$$y = 2.2 - 0.1x_1 + 0.2x_1^2 \quad (2)$$

当化肥、牛粪为零水平时，秸秆：

$$y = 2.2 + 0.2x_2 + 0.1x_2^2 \quad (3)$$

当化肥、秸秆为零水平时，牛粪：

$$y = 2.2 + 0.1x_3^2 \quad (4)$$

将各自变量的编码值代入方程 (2) ~ (4)，得到对应的 y 值并绘出图3。从图中可以看出，各曲线开口向上，可知各因素存在使土壤呼吸速率取得最小值的点。解各方程，得 x<sub>1</sub> = 0.25、x<sub>2</sub> = -1、x<sub>3</sub> = 0 时，即对应的化肥用量为 118 kg·hm<sup>-2</sup>、秸秆用量为 1500 kg·hm<sup>-2</sup>、牛粪用量为 3000 kg·hm<sup>-2</sup>，得到单因素影响下土壤呼吸速率的最小值分别为 2.18、2.10、2.20 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>；当 x<sub>1</sub> > 0.25、x<sub>2</sub> > -1、x<sub>3</sub> > 0 时，土壤呼吸速率随着化肥、秸秆、牛粪用量的增加而增大，当 x<sub>1</sub> < 0.25、x<sub>2</sub> < -1、x<sub>3</sub> < 0 时，土壤呼吸速率随着化肥、秸秆、牛粪用量的增加而减小。从图中各曲线的开口幅度以及土壤呼吸速率的变化幅度可以看出，化肥用量对土壤呼吸速率的影响最大，秸秆次之，牛粪最小。

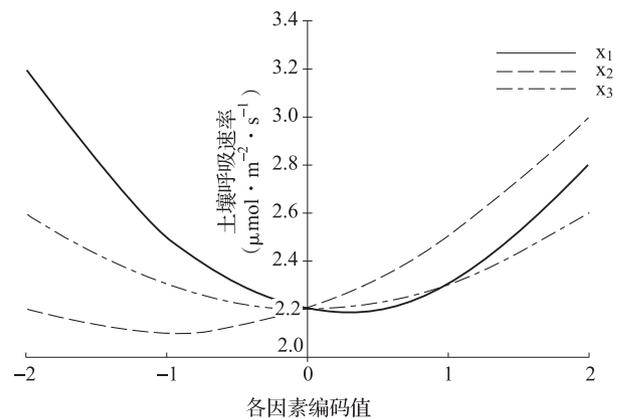


图3 各因素不同水平下对应的土壤呼吸速率

注：x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub> 分别代表化肥、秸秆、牛粪用量编码值，下同。

### 2.2.3 各因素交互作用对土壤呼吸速率的影响

化肥、秸秆交互作用对土壤呼吸速率的影响。对方程 (1) 进行“降维法”处理，将牛粪水平规定为零，得到化肥、秸秆互作对土壤呼吸速率影响的方程：y = 2.2 - 0.1x<sub>1</sub> + 0.2x<sub>2</sub> + 0.2x<sub>1</sub><sup>2</sup> + 0.1x<sub>2</sub><sup>2</sup>。

根据方程及编码值作化肥、秸秆的交互作用图(图4)。从图4显示及计算可知,当 $x_1 = 0.25$ 、 $x_2 = -1$ ,即化肥用量为 $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、秸秆用量为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤呼吸速率达到最小值 $2.09 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 $-2 < x_1 < 0.25$ 、 $-2 < x_2 < -1$ 时,土壤呼吸速率随着 $x_1$ 、 $x_2$ 的增加而减小;而无论 $x_1$ 或 $x_2$ 处在什么水平,土壤呼吸速率都随 $x_2$ 或 $x_1$ 的增加先减小后增加;土壤呼吸速率随 $x_1$ 变化的幅度大于 $x_2$ ,说明 $x_1$ 与 $x_2$ 互相作用时, $x_1$ 对土壤呼吸速率的影响比 $x_2$ 大。

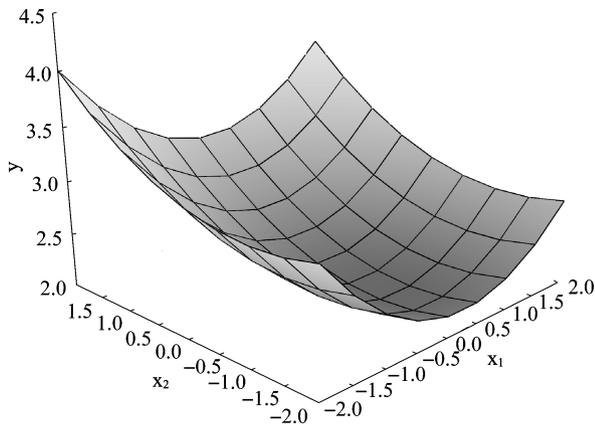


图4 化肥、秸秆交互作用对土壤呼吸速率的影响

化肥、牛粪交互作用对土壤呼吸速率的影响。将秸秆水平规定为零,由(1)式得到化肥、牛粪交互作用对土壤呼吸速率影响的方程: $y = 2.2 - 0.1x_1 - 0.2x_1x_3 + 0.2x_1^2 + 0.1x_3^2$ 。

根据方程及编码值作化肥、牛粪的交互作用图,如图5所示。从图中显示及计算结果可知,当 $x_1 = 0.5$ 、 $x_3 = 0.5$ ,即化肥用量为 $131 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、牛粪用量为 $3750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤呼吸速率达到最小值 $2.18 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 $-2 < x_1 < 0.5$ 、

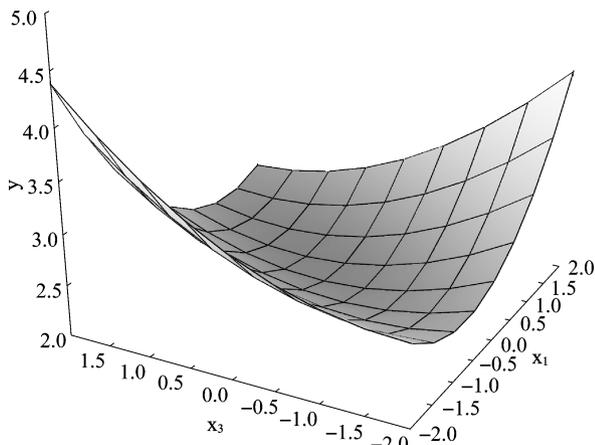


图5 化肥、牛粪交互作用对土壤呼吸速率的影响

$-2 < x_3 < 0.5$ 时,土壤呼吸速率随着 $x_1$ 、 $x_3$ 的增加而减小;无论 $x_1$ 或 $x_3$ 处在什么水平,土壤呼吸速率都随 $x_3$ 或 $x_1$ 的增加先减小后增加;土壤呼吸速率随 $x_1$ 变化的幅度大于 $x_3$ ,说明 $x_1$ 与 $x_3$ 互相作用时, $x_1$ 对土壤呼吸速率的影响比 $x_3$ 大。

秸秆、牛粪交互作用对土壤呼吸速率的影响。将化肥水平规定为零,由(1)式得到秸秆、牛粪交互作用对土壤呼吸速率影响的方程: $y = 2.2 + 0.2x_2 + 0.1x_2^2 + 0.1x_3^2$ 。

根据方程及编码值作化肥、牛粪的交互作用图,如图6所示。从图中显示及计算结果可知,当 $x_2 = -1$ 、 $x_3 = 0$ ,即秸秆用量为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、牛粪用量为 $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,土壤呼吸速率达到最小值 $2.10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当 $-2 < x_2 < -1$ 、 $-2 < x_3 < 0$ 时,土壤呼吸速率随着 $x_2$ 、 $x_3$ 的增加而减小;无论 $x_2$ 或 $x_3$ 处在什么水平,土壤呼吸速率都随 $x_3$ 或 $x_2$ 的增加先减小后增加;土壤呼吸速率随 $x_2$ 变化的幅度大于 $x_3$ ,说明 $x_2$ 与 $x_3$ 互相作用时, $x_2$ 对土壤呼吸速率的影响比 $x_3$ 大。

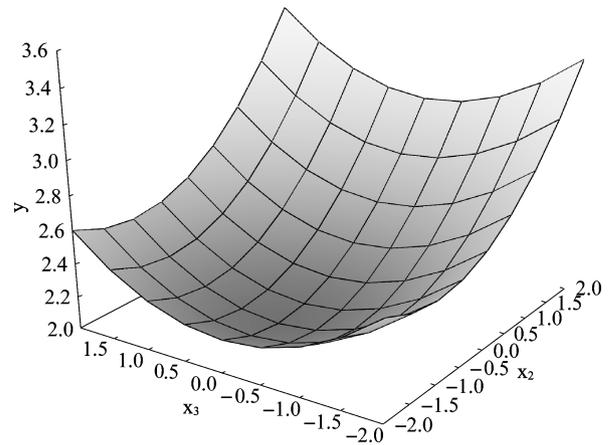


图6 秸秆、牛粪交互作用对土壤呼吸速率的影响

### 2.2.4 土壤呼吸速率的最优方案

对方程进行最优解求解可知:当 $x_1 = 0.5$ 、 $x_2 = -1$ 、 $x_3 = 0.5$ 时,代入方程(1)得到最小呼吸速率值 $2.075 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此时,对应的化肥用量为 $131 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,秸秆用量为 $1500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,牛粪用量为 $3750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。可知,化肥、秸秆、牛粪三者的配合使用能更好的调控土壤呼吸。

### 2.3 不同碳氮管理措施下土壤呼吸与土壤温度的关系

本试验中采用 $y = aT^b$ 乘幂方程来模拟土壤呼吸与土壤温度之间的关系,式中 $y$ 为土壤呼吸速率, $T$

为土壤温度, a、b 为方程模拟计算值。由各处理不同生育期土壤 5 cm 土层处温度与土壤呼吸速率值进行拟合得到图 7 结果, 可知, 各碳氮管理措施下土壤呼吸速率与土壤温度的相关性均达到显著水平, 且土壤温度和土壤呼吸的变异有 46.9% ~ 81.2% 可用该相关关系解释, 处理 10 和处理 6 土壤温度与土壤呼吸速率相关性最高,  $R^2$  分别为 0.812 和 0.794, 无肥区处理 12 相关性最差,  $R^2$  为 0.469, 说明施肥

可以提高土壤温度对土壤呼吸的影响。从土壤呼吸的温度敏感系数  $Q_{10}$  来看, 处理 1 至处理 12 的  $Q_{10}$  值依次为 2.97、3.29、3.90、2.44、3.25、3.32、4.71、4.26、3.71、3.13、1.86、2.05, 可知不同碳氮管理措施下土壤呼吸对土壤温度的敏感性差异明显, 土壤呼吸的温度敏感性并不是随着施肥量的增加而一直增加, 合理的碳氮管理措施能调控土壤呼吸速率的温度敏感系数。

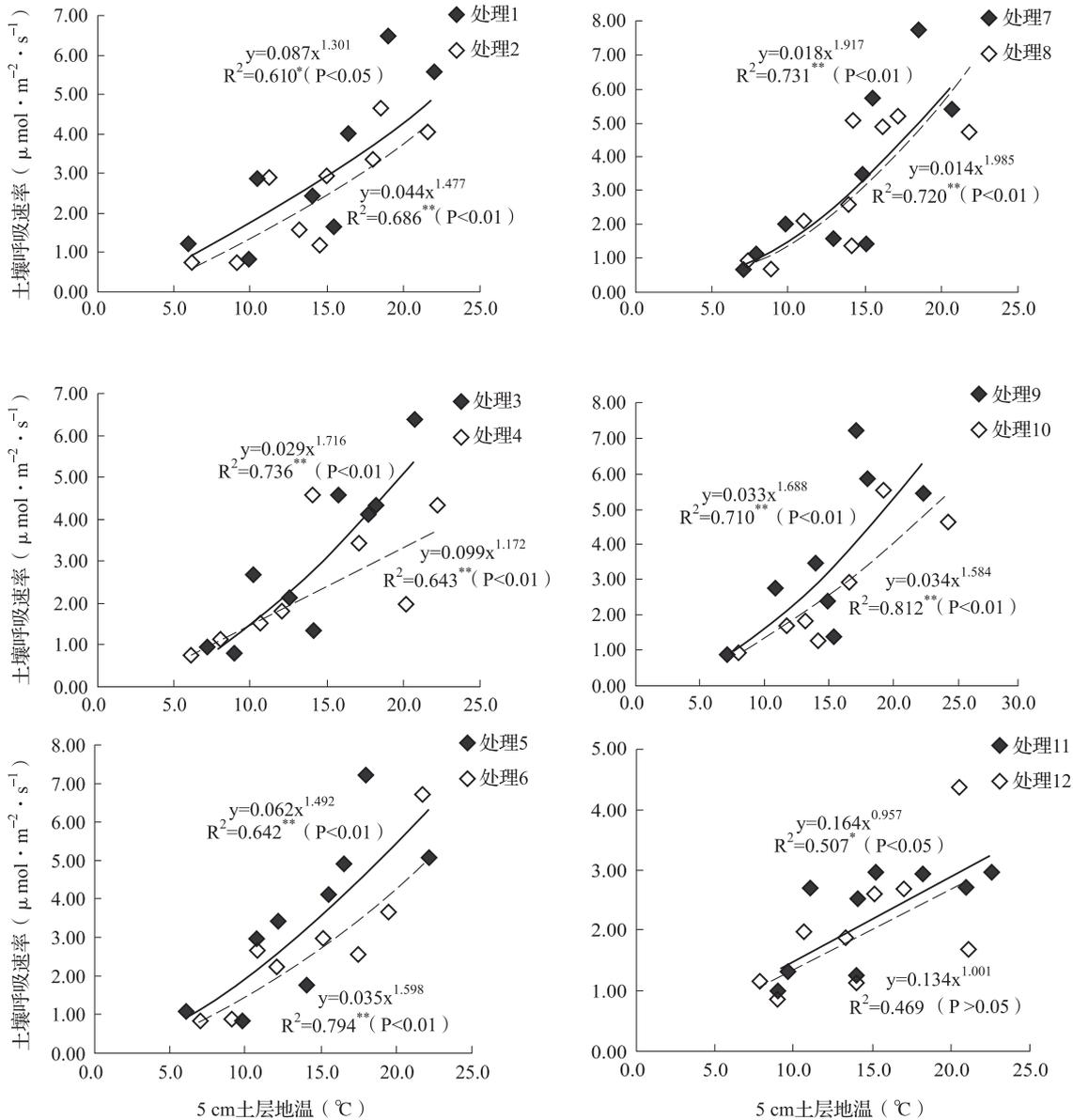


图 7 不同碳氮管理措施下土壤呼吸速率与土壤温度的关系

注: 图中 “\*” 表示土壤温度和土壤呼吸速率显著相关, “\*\*” 表示极显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 不同碳氮管理措施对土壤呼吸的影响

玉米生长期, 各养分处理土壤呼吸速率之间

差异显著, 肥料投入对土壤呼吸速率影响显著。杨兰芳等<sup>[19]</sup>通过盆栽试验研究了玉米在不同氮水平下的土壤呼吸, 发现施用高氮的土壤呼吸速率比施用低氮的高 28%。张俊丽等<sup>[11]</sup>研究发现, 土壤呼

吸总量 (Sr) 与施氮量 (n) 满足关系式  $Sr = 1\ 204.09 / (1 + e^{-1.69 - 0.02n})$ , 可知在一定范围内土壤呼吸总量随施氮量增加而增加。经单因素方程模拟可知, 本研究中化肥对土壤呼吸的促进作用也存在一个范围, 这和张俊丽等<sup>[11]</sup>的结论相同, 主要是由于在一定范围内氮肥的投入能提高土壤中氮的有效性, 促进植物的生长, 从而提高土壤根系呼吸<sup>[10,20]</sup>。王丙文等<sup>[21]</sup>通过研究不同秸秆还田方式对土壤呼吸的影响, 发现秸秆还田处理的土壤呼吸速率均大于秸秆不还田。张庆忠等<sup>[22]</sup>的研究表明, 秸秆还田对土壤呼吸有显著影响, 随着秸秆还田量的增加, 土壤呼吸通量也增加。试验中在其他施肥量相同时, 增施秸秆的处理 (处理 9) 土壤呼吸速率显著高于无秸秆处理 (处理 10), 主要原因为秸秆投入增加土壤有机质, 促进微生物活动, 从而增加土壤呼吸。胡诚等<sup>[13]</sup>连续 7 年试验, 研究了有机肥、化肥对土壤基础呼吸的影响, 结果表明, 有机肥处理土壤呼吸显著高于施化肥处理和对照。孟磊等<sup>[23]</sup>通过长期定量施肥试验发现, 有机肥 + 化肥处理土壤年呼吸总量显著高于化肥处理和无肥处理。李海波等<sup>[24]</sup>研究了无肥、化肥、化肥 + 有机肥 3 种不同施肥方式下的土壤碳排放, 结果显示生长季土壤碳排放总量化肥 + 有机肥 > 化肥 > 无肥。本试验中有碳氮投入 (化肥、秸秆、牛粪) 的处理土壤呼吸速率均高于无肥对照处理, 与以上研究结果一致; 但也存在处理 2 (F105, S3 000, M0)、处理 4 (F179, S879, M4 500)、处理 10 (F105, S0, M1 500)、处理 11 (F105, S3 000, M3 000) 土壤呼吸速率与无肥处理间无显著差异的现象, 这主要是由于不同碳氮管理的 C/N 不同, 影响土壤微生物活动造成的<sup>[25]</sup>。此外, 根据前人研究结果<sup>[26]</sup>, 这几个处理的产量均显著高于对照处理。由此可知, 合理的碳氮管理措施能够在保障作物产量的前提下, 有效控制土壤呼吸速率, 减少 CO<sub>2</sub> 的排放。

### 3.2 土壤温度对土壤呼吸的影响

据目前研究可知, 土壤温度是影响土壤呼吸最为关键的环境因素之一<sup>[9-11,27]</sup>, 其可以解释土壤呼吸速率季节变化的 70% ~ 90%<sup>[8]</sup>。土壤温度主要是通过直接作用于土壤微生物的代谢过程, 促进或抑制微生物活跃度来对土壤呼吸产生影响, 有研究表明, 微生物的呼吸作用和根系的呼吸在一定范围内随土壤温度的增加而增加<sup>[28-29]</sup>, 这主要是因为一定的温度增加可促进土壤微生物活性, 加速有机质的

分解, 从而增加 CO<sub>2</sub> 的产生。目前研究常用指数模型来建立土壤呼吸速率与土壤温度之间的关系<sup>[10-11,28]</sup>, 同时采用 Q<sub>10</sub> 表示土壤呼吸对温度的敏感性, Q<sub>10</sub> 是温度每升高 10℃ 土壤呼吸增加的倍数。本试验中采用乘幂方程模拟土壤呼吸速率与地温之间的关系效果最好, 不同处理的 Q<sub>10</sub> 值为 1.86 ~ 4.71, 与 Zheng 等<sup>[30]</sup>发现的 Q<sub>10</sub> 介于 1.28 ~ 4.75 相符; 土壤呼吸速率与 5 cm 地温的相关性分析表明, 地温与土壤呼吸之间的变异有 46.9% ~ 81.2% 可用二者之间的幂函数关系来解释, 这与李银坤等<sup>[10]</sup>的研究结论相似。

## 4 结论

4.1 不同碳氮管理下, 春玉米农田土壤呼吸速率均较对照区增加, 其中处理 5 (F31, S5 121, M4 500) 土壤呼吸速率最高, 达到 3.51 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 高出无肥区 (2.04 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 72%, 与无肥区差异显著; 处理 11 (F105, S3 000, M3 000) 土壤呼吸速率最低, 为 2.24 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 仅高出无肥区 9.8%, 与无肥区差异不显著。

4.2 对于试验中春玉米生育期内土壤呼吸, 利用二次回归方程模拟其与化肥、秸秆、牛粪用量之间的关系, 当化肥、秸秆、牛粪用量分别为 118.1、1 500、3 750 kg · hm<sup>-2</sup> 时, 土壤呼吸速率达到最小值 2.075 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, 化肥、秸秆、牛粪的合理配施能有效控制 CO<sub>2</sub> 的排放。

4.3 土壤温度与土壤呼吸速率相关性显著, 各施肥处理 R<sup>2</sup> 均达到显著水平, 但受不同碳氮管理措施影响而大小不同, 变化范围为 0.469 ~ 0.812, 无肥处理 R<sup>2</sup> 最小; Q<sub>10</sub> 值的变化范围为 1.86 ~ 4.71。

## 参考文献:

- [1] Wang X, Piao S, Ciais P, et al. Are ecological gradients in seasonal Q<sub>10</sub> of soil respiration explained by climate or by vegetation seasonality [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42 (10): 1728 - 1734.
- [2] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (7): 778 - 785.
- [3] Li X, Fu H, Guo D, et al. Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. Cropland on the Loess Plateau, Northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42 (2): 337 - 346.
- [4] 王永强, 崔凤娟, 郭小刚. 农田生态系统土壤呼吸文献综述 [J]. *内蒙古农业科技*, 2010, (3): 65 - 67.
- [5] Tokatlidis I S, Koutroubas S D. A review of maize hybrids' de-

- pendence on high plant populations and its implications for crop yield stability [J]. *Field Crops Research*, 2004, 88 (2): 103-114.
- [6] 刘志全, 李万良, 路立平, 等. 2006 年美国玉米高产竞赛的启示 [J]. *玉米科学*, 2007, 15 (6): 144-145.
- [7] 代快, 蔡典雄, 王燕, 等. 不同耕作措施对旱作春玉米农田土壤呼吸影响的研究——土壤温度对土壤呼吸速率的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2010, (6): 64-69.
- [8] 张丁辰, 蔡典雄, 代快, 等. 旱作农田不同耕作土壤呼吸及其对水热因子的响应 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (6): 1916-1925.
- [9] 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (11): 2919-2924.
- [10] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (1): 18-24.
- [11] 张俊丽, 廖允成, 曾爱, 等. 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 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32 (7): 1382-1388.
- [12] 李昌珍, 张婷婷, 杨改河, 等. 秸秆覆盖和施肥对关中灌区夏玉米生长后期土壤呼吸速率的影响 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (3): 411-416.
- [13] 胡诚, 曹志平, 胡婵娟, 等. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及基础呼吸的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15 (5): 63-66.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 徐中儒. 农业试验最优回归设计 [M]. 黑龙江: 黑龙江科学技术出版社, 1988. 260-270.
- [17] 王河银, 刘景辉, 许强, 等. 水有机肥和密度对砂田辣椒产量的影响 [J]. *内蒙古农业科技*, 2011, (3): 44-46.
- [18] 林堃, 李绍武. 应用二次回归饱和 D-最优设计研究甘蔗氮, 磷, 钾肥料效应 [J]. *甘蔗糖业*, 1992, (5): 9-15.
- [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): 9-15.
- [20] 葛高飞, 梁永超. 玉米生长过程中施肥对土壤呼吸和微生物量碳的影响 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27 (18): 73-78.
- [21] 王丙文, 迟淑筠, 田慎重, 等. 不同玉米秸秆还田方式对冬小麦田土壤呼吸的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24 (5): 1374-1380.
- [22] 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.
- [23] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20 (6): 687-692.
- [24] 李海波, 韩晓增. 不同土地利用和施肥方式下黑土碳平衡的研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (1): 16-21.
- [25] 吕贻忠, 李保国. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2006. 159-161.
- [26] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响 [J]. *中国农业科学*, 2000, 33 (4): 54-61.
- [27] 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.
- [28] 王铭, 刘兴士, 李秀军, 等. 松嫩平原西部草甸草原典型植物群落土壤呼吸动态及影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25 (1): 45-52.
- [29] 李会杰, 饶良懿, 宋丹丹, 等. 华北土石山区不同龄组侧柏人工林土壤呼吸及其与环境因子的关系 [J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28 (5): 84-90.
- [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.

**Effects of different carbon and nitrogen managements on soil respiration of spring maize farmland**

WANG Bi-sheng<sup>1</sup>, WU Xue-ping<sup>1</sup>, YU Wei-shui<sup>1\*</sup>, YANG Yi-yu<sup>1,3</sup>, WANG Xiang-ling<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, LIANG Guo-peng<sup>1</sup>, CAI Dian-xiong<sup>1,2\*</sup> (1. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081; 2. Key Laboratory of Dryland Farming and Water-saving Agriculture, Beijing 100081; 3. Shanxi Agriculture University, Taigu Shanxi 030801)

**Abstract:** This research was conducted to explore the effects of C & N management and the main environmental factor, namely soil temperature on soil respiration during spring maize growth period. The results showed that comparing with no fertilizer treatment, carbon and nitrogen managements improved soil respiration obviously, and the emission of CO<sub>2</sub> (y) had been effectively controlled with the use of fertilizer (x<sub>1</sub>), straw (x<sub>2</sub>) and manure (x<sub>3</sub>) reasonably. The soil respiration could be predicted by the ternary quadratic equation  $y = 2.2 - 0.1x_1 + 0.2x_2 - 0.2x_1x_3 + 0.2x_1^2 + 0.1x_2^2 + 0.1x_3^2$ , when  $x_1 = 0.5$ ,  $x_2 = -1$ ,  $x_3 = 0.5$ . It reached the minimum respiration rate value of 2.075 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>, when the amount of fertilizer was 131 kg · ha<sup>-1</sup>, straw amount was 1 500 kg · ha<sup>-1</sup>, manure amount was 3 750 kg · ha<sup>-1</sup>. The relationship between soil respiration and soil temperature was explained by the equation  $y = aT^b$ , the variability between soil temperature and soil respiration rate could be explained was 46.9% ~ 81.2%; the range of temperature-sensitive coefficient Q<sub>10</sub> was 1.86 ~ 4.71.

**Key words:** C & N management; soil respiration; soil temperature