

管理措施对农田生态系统土壤呼吸的影响

陈书涛^{1,2}, 朱大威^{2,3}, 牛传坡^{2,4}, 邹建文², 王超^{2,5}, 孙文娟^{2,5}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 3. 江苏省农业科学院, 南京 210014; 4. 徐州市气象局, 徐州 221002; 5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要: 为研究管理措施(氮肥施用和耕翻措施)对农田土壤呼吸的影响, 采用静态暗箱-气相色谱法对农田生态系统的土壤呼吸作用进行了5个生长季(2002~2003年小麦, 2003年玉米、大豆, 2003~2004年小麦, 2004年玉米, 2004~2005年小麦)的野外观测试验。结果表明, 冬小麦基肥(2002-11-09)、返青肥(2003-02-14)和拔节肥(2003-03-26)施用后2周内氮肥施用处理的土壤呼吸速率明显高于对照, 但不同施氮水平间的土壤呼吸速率无显著差异。耕翻对土壤呼吸的影响效应受到前茬作物类型的制约。在2003~2004年的冬小麦生长季(其前茬种植的作物为水稻), 不耕和浅耕处理的平均土壤呼吸速率之间无显著差异($p > 0.05$)。在2004年玉米生长季浅耕比不耕处理显著增加了土壤呼吸速率($p < 0.05$), 而在后茬的2004~2005年小麦生长季浅耕比不耕又显著降低了土壤呼吸速率($p < 0.05$)。在前茬作物为水稻的麦田(2004~2005年小麦生长季), 深耕比不耕处理显著增加了土壤CO₂排放量。不同管理措施下, 农田土壤呼吸与土壤温度的关系均可用指数方程描述, 针对不同管理措施下拟合得到的指数方程求得的 Q_{10} 值在1.26~3.60之间变异, 其均值为2.08。而将所有管理措施下的标准化土壤呼吸速率与土壤温度进行拟合也可发现二者间存在指数关系, 此时求得的 Q_{10} 为1.66。根据土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响规律, 建立的温度影响函数(指数函数)和湿度影响函数(二次函数)耦合的模拟模型可解释54%的土壤呼吸变异($R^2 = 0.54$, $n = 463$, $p < 0.0001$)。

关键词: 管理措施; 农田; 土壤呼吸; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2858-08

Effects of Management Regime on Soil Respiration from Agroecosystems

CHEN Shu-tao^{1,2}, ZHU Da-wei^{2,3}, NIU Chuan-po^{2,4}, ZOU Jian-wen², WANG Chao^{2,5}, SUN Wen-juan^{2,5}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 4. Xuzhou Meteorological Bureau, Xuzhou 221002, China; 5. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to examine the effects of management regime, such as nitrogen application and plowing method, on soil respiration from farmland, the static opaque chamber-gas chromatograph method was used to measure soil CO₂ fluxes *in situ*. The field measurement was carried out for 5 growing seasons, which were the 2002-2003 wheat, 2003 maize and soybean, 2003-2004 wheat, 2004 maize and 2004-2005 wheat seasons. Our results showed that soil respiration increased in fertilizer-applied treatments compared with no fertilizer treatment after 3 times of fertilizer application on 9 November 2002, 14 February and 26 March 2003. And the most obvious increase appeared following the third fertilizer application. No significant difference in soil respiration was found among several fertilizer application treatments. The effect of plowing depth on soil respiration was contingent on preceding cropping practice. Over the 2003-2004 wheat-growing seasons (its preceding cropping practice was rice paddy), mean soil respiration rates were not significant different ($p > 0.05$) between no plowing treatment and shallow plowing treatment. The shallow plowing treatment CT2 led to higher soil CO₂ losses compared with no plowing treatment of NT2 in the 2004 maize-growing season; however, the significant higher ($p < 0.05$) soil respiration rates occurred with no plowing treatment of NT3 in the following 2004-2005 wheat-growing season. Intensive plowing (25 cm depth), compared with no plowing practice (NT4), increased soil respiration significantly during the 2004-2005 wheat-growing season. Regression analysis showed that the exponential function could be employed to fit the relationship between soil respiration and temperature. The exponential relationship yielded the Q_{10} values which were varied from 1.26 to 3.60, with a mean value of 2.08. To evaluate the effect of temperature on soil respiration, the CO₂ emission fluxes were normalized for each treatment and each crop growing season. Plotting the normalized soil respiration against the temperature, the exponential relationship between these two parameters becomes obvious. The temperature coefficient Q_{10} was then evaluated as 1.66 according to the exponential relationship. Further investigation indicated that soil respiration could be well simulated by an empirical model in which the effects of both soil temperature and moisture on soil respiration were considered. This model described 54% variances of the measured 463 soil respiration rates, with a R^2 of 0.54 and a p value less than 0.0001.

Key words: management regime; farmland; soil respiration; soil temperature; soil moisture

收稿日期: 2008-11-29; 修订日期: 2009-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40765003, 40875057); 教育部博士点基金项目(200803071010)

作者简介: 陈书涛(1978~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为温室气体排放与全球变化, E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn

目前,人类活动所导致的温室气体排放量增加是造成全球变暖的主要原因. CO_2 是最主要的温室气体.农田土壤有机碳含量的增减是特定农田生态系统成为碳源或碳汇的标志,而农田土壤 CO_2 排放(即土壤呼吸)则是有机碳含量长期变化状况的短期表征因子^[1].与其他生态系统相比,农田生态系统受人类影响更大,农业管理制度(如肥料施用、耕作措施等)会改变土壤和作物生长条件,从而影响到土壤呼吸作用.

有研究表明氮肥施用会显著增加土壤呼吸量^[2,3];也有研究者认为氮肥施用对土壤呼吸的影响不明显^[4,5];还有研究表明氮肥施用类型和施用方式的不同也会造成土壤呼吸量的差异^[6,7].另外,虽然人们对耕翻措施对农田土壤呼吸的影响进行了一些研究,但这些研究大多为短期观测试验,缺乏对土壤呼吸变异状况的长期观测资料.同时,系统地探讨不

同管理措施(氮肥施用、耕翻措施)下土壤温度和湿度对农田土壤呼吸的影响规律研究也不多见.

本研究以华东地区典型农田生态系统为对象,系统地分析了典型农业管理措施(氮肥施用、耕翻措施)对农田土壤呼吸的影响,以期了解土壤呼吸的变异规律和农田温室气体排放清单的制定提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验点气候与土壤特性

大田试验在南京近郊江苏省农业科学院(32.0°N, 118.8°E)进行.该地区属典型的长江中下游亚热带季风气候,年平均降水量 1 107 mm,平均气温 15.6℃.水稻-冬小麦、玉米-冬小麦、大豆-冬小麦轮作方式为当常见的农业种植制度.试验地土壤基本理化性质如表 1 所示.

表 1 试验地 0~20 cm 土壤理化性质
Table 1 Soil (0-20 cm) physical and chemical properties for the experimental site

有机质/g•kg ⁻¹	全氮/g•kg ⁻¹	速效磷/mg•kg ⁻¹	速效钾/mg•kg ⁻¹	容重/g•cm ⁻³	> 0.02 mm 砂粒/%	pH
16.7	1.1	12.0	116.4	1.27	29.1	6.1

1.2 试验设计与田间管理

2002~2003 年冬小麦生长季的田间试验主要研究不同化肥氮施用对土壤呼吸的影响.供试冬小麦品种为扬麦 158.麦田设置 1 个不施化肥氮处理 N0 和 3 个化肥氮处理 N100、N200、N300,其化肥氮施用量分别为 0、100、200、300 kg•hm⁻². N100、N200、N300 处理的化肥氮(尿素)分基肥(2002-11-09)、返青肥(2003-02-14)和拔节孕穗肥(2003-03-26) 3 次施入,各次比例均为 0.30:0.45:0.25.过磷酸钙和氯化钾作为基肥于播种前(2002-11-09)一次性施入.

2003 年夏生长季的供试秋熟作物为大豆、玉米,种植 2 种作物的处理的代码分别为 S、M.大豆、玉米品种分别为南农 88-31、苏玉(糯)一号.大豆地未施 N 肥;以尿素形式向玉米地施用 300 kg•hm⁻²化肥氮.过磷酸钙和氯化钾作为基肥于作物播种前一次性施入.

2003~2004 年冬小麦、2004 年玉米、2004~2005 年冬小麦 3 个生长季的田间试验主要研究不同耕翻措施对土壤呼吸的影响,试验设计如表 2 所示.浅耕和深耕处理在耕翻后进行人工整平,保持土壤均一性,不耕处理用一层薄土覆盖种子以保证出苗,用除

草剂控制杂草.2003~2004 年冬小麦、2004 年玉米、2004~2005 年冬小麦 3 个生长季分别以尿素形式施用化肥氮 200、300、180 kg•hm⁻².过磷酸钙和氯化钾均作为基肥于 3 个生长季播种前施入.

表 2 2003~2005 年不同耕翻处理的田间试验设计
Table 2 Field experimental design for different plowing treatments from 2003 to 2005

生长季	耕翻深度/cm	前茬作物	代码
2003~2004 年冬小麦	0	水稻	NT1
	12	水稻	CT1
2004 年玉米	0	冬小麦	NT2
	12	冬小麦	CT2
2004~2005 年冬小麦	0	玉米	NT3
	12	玉米	CT3
	0	水稻	NT4
	12	水稻	CT4
	25	水稻	DP

1.3 气样的采集、分析与通量计算

测定冬小麦田、大豆田土壤呼吸的装置为 14 cm 直径的圆形采样底座和配套的 30 cm 高圆柱形采样箱,底座设在作物植株之间,尽量保证底座内的作物

根系密度与田间实际根系密度基本一致,在每个处理设 5 个重复;测定玉米田土壤呼吸装置为 0.5 m × 0.5 m 方形采样底座和 0.5 m × 0.5 m × 0.5 m 不锈钢采样箱,底座设置在行间,经常性地除去底座内植物,分别于大豆、玉米、小麦播种前在各试验小区放置并固定采样底座,采样时将采样箱罩在底座上并在其槽内注水密封,箱内装有微型风扇以保持气体均匀混合.

在 2002 ~ 2003 年小麦生长季,在 N0、N100、N200、N300 处理的 3 次氮肥施用(2002-11-09、2003-02-14、2003-03-26)后每天测定土壤呼吸,持续 2 周左右;而对 N200 处理则进行整个生长季的土壤呼吸观测.在 2003 ~ 2005 年的 4 个生长季,玉米、大豆和小麦播种后直到作物成熟期间一般每周采集气样 1 ~ 2 次;在 2003 ~ 2004 年小麦、2004 年玉米和 2004 ~ 2005 年小麦生长季,为研究耕翻效应,于田间耕翻后每天观测 1 次.在各采样点每次采气样 5 个,每个间隔 5 min.采集的气样当天在实验室用改装的 Agilent 4890D 气相色谱仪分析 CO₂ 浓度.载气为 99.999% 高纯氮,柱温 55℃.CO₂ 在镍触媒催化下转化为 CH₄,继而以 FID 检测器测定,检测温度 200℃,用 HP 软件分析求得气体的浓度^[8].通过对每组 5 个样品的 CO₂ 混合浓度与相对应的采样间隔时间(0、5、10、15、20 min)进行直线回归,可求得该采样点 CO₂ 气体的排放速率.继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、CO₂ 分子量等,求得单位面积的土壤 CO₂ 排放量^[9].

1.4 环境因子测定

在采集气体样品的同时,采用 Temp Log 每隔 1 h 自动记录试验地土壤温度,于播种前埋入 10 cm 深土壤中;采用 MPM-160 水分计测定 10 cm 深土壤湿度.

2 结果与分析

2.1 不同化肥氮施用处理的土壤呼吸

双因素(肥料处理、时间)方差分析结果表明:麦田 3 次施肥后,氮肥处理间土壤呼吸速率没有显著差异,而施肥处理与未施肥处理的土壤呼吸速率则存在显著差异(第 1 次施肥)或极显著差异(第 2、3 次施肥);不同时间的土壤呼吸速率存在极显著差异,这可能与土壤温度、湿度的变异有关.由于 3 个施肥处理土壤呼吸没有显著差异,可将 3 个处理合并为一个处理,图 1 显示了将 3 个无显著差异的施肥处理 N100、N200、N300 合并后的土壤呼吸(+N)以及未施肥处理的土壤呼吸(N0)的动态变化.从总体上看,2003-02-14[图 1(b)]施肥后土壤呼吸速率较低,2002-11-09[图 1(a)]施肥后的土壤呼吸速率稍高于 2003-02-14,而 2003-03-26[图 1(c)]施肥后土壤呼吸速率普遍很高,这与 3 次施肥期间的温度高低情况一致,同时,2003-02-14 施肥后土壤呼吸速率呈逐渐增加趋势,这也与越冬后气温逐渐回升、土壤温度升高有关.图 1 表明,3 次施肥后,施肥处理比未施肥条件下的土壤呼吸速率均有所增加,特别是 2003-02-14、2003-03-26 施肥后,氮肥的添加对于土壤呼吸的促进作用比第 1 次施肥更加明显.

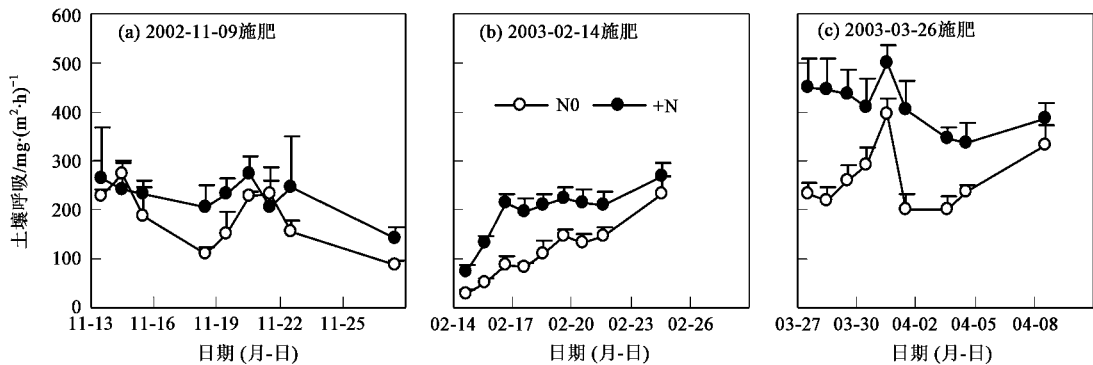


图 1 3 次施肥后土壤呼吸速率变化动态

Fig.1 Dynamics of soil respiration rates following three fertilizations

2.2 耕翻措施对土壤呼吸的影响

方差分析表明,耕翻对土壤呼吸的影响与前茬的作物种植制度有关(表 3).在 2003 ~ 2004 年的冬小麦生长季(其前茬种植的作物为水稻),不耕和浅

耕处理的平均土壤呼吸速率之间无显著差异($p > 0.05$).在 2004 年玉米生长季,浅耕比不耕处理显著增加了土壤呼吸速率($p < 0.05$),而在后茬的 2004 ~ 2005 年小麦生长季浅耕比不耕又显著降低了

表 3 不同耕翻处理的季节性平均土壤呼吸速率和作物产量¹⁾

Table 3 Seasonal mean soil respiration rates and crop yields for different treatments

生长季	代码	土壤呼吸/ $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$		作物产量/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$	
		平均值	标准误	平均值	标准误
2003 ~ 2004 年冬小麦	NT1	243.3(a)	12.8	417.9(a)	65.6
	CT1	204.8(a)	13.1	458.7(a)	41.6
2004 年玉米	NT2	316.8(a)	12.2	654	
	CT2	359.3(b)	7.6	746.8	
2004 ~ 2005 年冬小麦	NT3	307.1(b)	13.7	634.2(ab)	43.3
	CT3	241.0(a)	13.7	560.0(a)	66.2
	NT4	243.8(a)	6.0	570.5(a)	22.1
	CT4	276.9(b)	12.3	751.5(b)	45.4
	DP	279.3(b)	5.9	725.2(ab)	72.3

1) 2004 年玉米生长季仅有 1 组产量测定数据, 无重复; 在每个生长季, 括号内相同字母表示不同耕翻处理间的土壤呼吸速率或产量没有显著差异($p > 0.05$), 而不同字母则表示存在显著差异($p < 0.05$)

土壤呼吸速率($p < 0.05$). 在其前茬作物为水稻的 2004 ~ 2005 年小麦田, 深耕(25 cm)比不耕处理显著增加了土壤 CO_2 排放量. 此外, 以轮作年的尺度来看, NT2-NT3 和 CT2-CT3 轮作制度下的土壤呼吸速率没有显著差异($p > 0.05$).

总体上看, 12 cm 浅耕处理比不耕处理的作物产量高(表 3). 在 2004 年玉米生长季, 12 cm 浅耕处理 CT2 的产量比不耕处理 NT2 高 $92.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 在小麦生长季, CT4 处理的作物产量最高. 此外, 作物产量的年际间变异比较明显, 2004 ~ 2005 年小麦生长季的作物产量大大高于 2003 ~ 2004 年小麦生长季.

2.3 由土壤温度决定的农田土壤呼吸模型

一元回归分析表明, 除 2004 ~ 2005 年小麦生长季的 NT3 处理外, 其余所有种植旱地作物的农田土壤呼吸与 10 cm 土壤温度均呈指数关系(图 2). 对于这些土壤呼吸与温度存在指数关系的处理而言, 描述二者关系的拟合方程的决定系数 R^2 最大值出现在 2003 年夏的玉米田, 此处理的土壤温度可以解释 82% 的土壤呼吸变异; 而 2004 ~ 2005 年小麦生长季的 CT4 处理的决定系数 R^2 最小, 土壤温度仅能解释 18% 的土壤呼吸变异. 总体上看, 土壤温度是影响旱地土壤呼吸季节性变异的主要因素, 二者关系符合 Q_{10} 定律, 不同农业管理措施处理的土壤呼吸 Q_{10} 数值在 1.26 ~ 3.60 之间变异, 其均值为 2.08(图 3). 这一结果与以往研究基本一致^[1].

为消除处理间土壤呼吸的差异, 以各处理 20℃ 时的土壤呼吸速率为基准, 其他温度下的土壤呼吸速率与之相比, 可得到各处理的标准化土壤呼吸速率, 从而能够对不同管理措施下的农田的土壤呼吸与土壤温度的关系进行归一化分析. 图 4 表明, 所有的标准化土壤呼吸速率与其对应的土壤温度之间存

在明显的指数关系, 标准化土壤呼吸速率随土壤温度的增加而呈指数形式增加. 根据图 4 的指数拟合方程得到的 Q_{10} 值为 1.66. 根据图 4 中回归方程 95% 置信区间的上限和下限可求得 Q_{10} 值的范围在 1.58 ~ 1.73 之间. 利用标准化土壤呼吸与温度的关系求得的 Q_{10} 值 1.66 与图 3 中 Q_{10} 的均值 2.08 较为接近, 然而, 由于标准化后消除了管理措施等因子的影响, 标准化土壤呼吸的 Q_{10} 值的变异范围明显小于图 3 中 Q_{10} 值的变异范围.

2.4 由土壤温度和水分决定的农田土壤呼吸模型

基于前面的分析, 土壤温度为影响旱地农田土壤呼吸的关键因素, 以指数方程作为土壤呼吸模型的温度影响子函数. 虽然本研究中未发现土壤湿度与土壤呼吸的直接相关关系, 但以往大量研究证明, 在某些条件下土壤湿度也往往成为土壤呼吸作用的限制因子^[10, 11], 当土壤含水量过低时, 土壤微生物呼吸所需要的营养物质的输送会受到极大限制, 形成水分胁迫效应^[12 ~ 14]; 而当含水量过高时, 土壤空隙中的水分则会阻碍氧气在土壤中的扩散^[13, 14]. 因此, 笔者假定土壤呼吸作用存在最适的土壤湿度数值, 这个值介于水分胁迫值和水分饱和值之间, 采用二次方程的形式模拟土壤湿度对土壤呼吸的影响:

$$R_s = (0.01e^{0.053t})(-0.03M^2 + 1.76M + 13.25)$$

(1)

式中, R_s 为标准化土壤呼吸速率 [$\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$], t 为土壤温度(℃), M 为土壤湿度(%), 模型的样本数为 $n = 463$, 而 $R^2 = 0.54$, $p < 0.000 1$. 将模拟的标准化土壤呼吸数值与实测值进行回代检验, 结果证明, 二者具有较好的一致性, 土壤温度和湿度 2 个因子在本研究中可以模拟农田土壤呼吸 54% 的季节

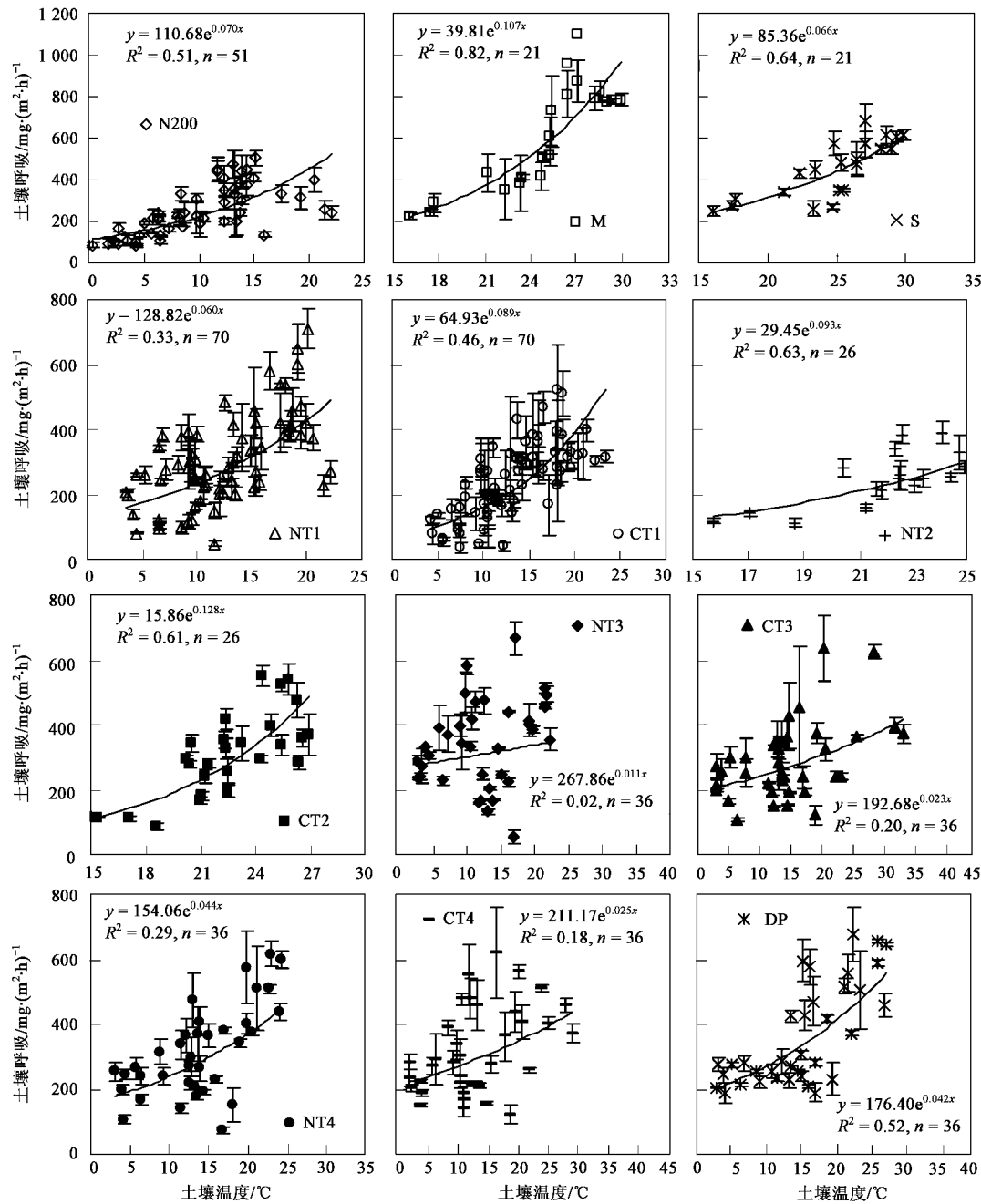


图 2 土壤呼吸与土壤温度的指数关系

Fig.2 Exponential relationship between soil respiration and temperature

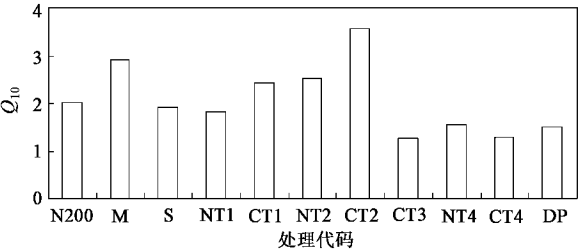


图 3 不同管理措施处理的土壤呼吸温度系数 (Q_{10})

Fig.3 Temperature coefficients (Q_{10}) of soil respiration under different management regimes

性变异(图 5)。

3 讨论

3.1 氮肥施用对土壤呼吸的影响

目前,关于化肥氮施用对土壤呼吸的影响规律和影响机制目前仍没有定论,关于化肥氮施用促进、抑制、不影响土壤呼吸的研究结果均有报道^[2~5, 15~18]。还有研究者认为氮肥施用类型的不同也会造成土壤呼吸量的差异^[6]。

本研究表明,在作物旺盛生长的阶段氮肥的施

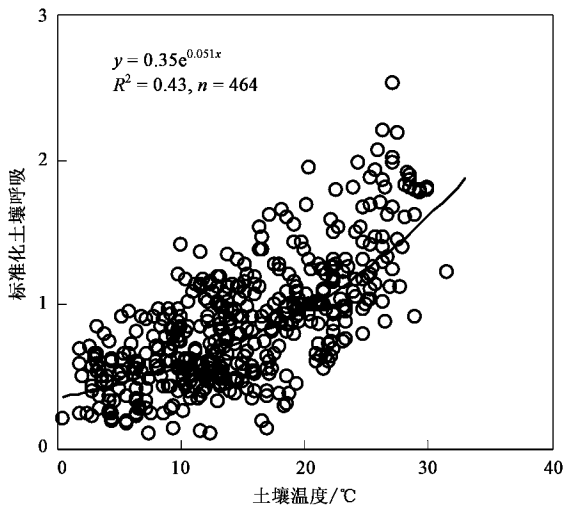


图 4 标准化土壤呼吸与土壤温度的指数关系
Fig. 4 Exponential relationship between normalized soil respiration and temperature

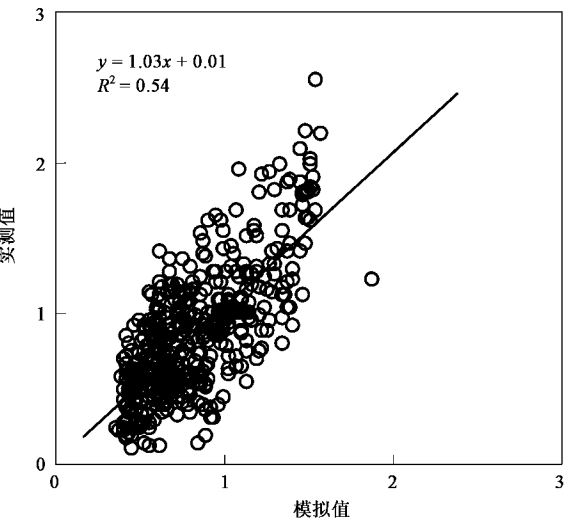


图 5 标准化土壤呼吸实测值与模拟值的关系
Fig. 5 Relationship between measured and modeled normalized soil respiration

用在短期内促进了农田土壤呼吸作用,但是在 3 个氮肥施用梯度上的土壤呼吸量不存在显著性差异,这与以往的相关研究有一致之处^[2,3,18]. 笔者推测,土壤呼吸作用可能受碳氮营养源的双向调节,向土壤中添加氮源可在短期内增加土壤呼吸,但其后土壤呼吸量是否能继续增加可能取决于土壤中碳营养的状况,若碳源缺乏将削弱氮素添加对于土壤呼吸的促进作用,在碳源较充足的条件下,可能土壤呼吸对于氮素就继续表现为正响应. 例如,杨兰芳等^[7]的研究显示,对于裸土,施氮对土壤呼吸没有显著影响,但在种植玉米条件下,高氮和低氮在苗期和拔节

孕穗期的土壤呼吸量没有显著差别,而在抽穗开花期和成熟期,高氮处理的土壤呼吸量显著高于低氮处理,在全生育期,两者间也有显著差异. 由于玉米能将光合作用固定的碳输入到土壤中成为微生物的营养源,那么在施用氮肥的条件下,丰富的碳氮营养便成为土壤呼吸增加的先决条件. 而在土壤有机质含量较少或者外源碳素供应不足的情况下,氮素对土壤呼吸的促进作用则可能体现不出来,这一点也可以从同时施用秸秆和氮肥的情况下土壤呼吸会显著增加这类研究中得到佐证^[4,5,16].

从另一方面来看,氮肥与土壤微生物呼吸之间也存在边际制约效应,研究表明,氮肥施用太多会抑制微生物活性,土壤中含有大量的氮素时,将对微生物的活性和碳素矿化产生负面效应^[19,20],当土壤电导率超过 $0.6 \sim 1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ (大约相当于每 kg 土中含 140 mg 硝态氮)时,一些土壤微生物,如反硝化细菌的活性将发生改变^[21],另外一些研究也证实,添加大量氮源后土壤微生物活性下降^[21,22];与此同时,当营养源大量增加时,植物由于能较容易的获得营养物质,因而不必形成发达的根系便可获得较多营养,也就是说植物根冠比会下降^[23],即使植物的总生物量的提高可能也不能弥补根系生物量的下降^[24],从而根驱动的呼吸作用不会有明显的增加,甚至会有所降低. 总之,这些因素的综合影响可能导致了本研究中各氮肥处理间的土壤呼吸没有明显的差异.

3.2 耕翻措施对农田土壤呼吸的影响

Reicosky 等^[25]指出,不同耕翻措施下土壤呼吸量的大小主要取决于试验区的历史耕作制度、土壤有机碳含量以及还田的有机残体的性质,此外,土壤质地和结构、当地气候条件也对不同耕翻处理的土壤呼吸作用产生不同影响^[25~27]. 到目前为止,很多研究表明,保护性耕作措施是一种减少土壤 CO_2 释放并增加有机碳储量的有效方法,而深度耕翻则会对土壤造成剧烈扰动,增加土壤微生物与空气的接触机会,加剧土壤有机质的氧化,从而增加土壤中 CO_2 向大气的释放量^[26~28]. 但是,也有些研究表明还不能完全确定哪种耕翻措施下的土壤 CO_2 释放量最少,如: Franzluebbers 等^[29]的研究表明,不耕处理的土壤呼吸速率小于 $20 \sim 25 \text{ cm}$ 深耕的处理,但大于 $10 \sim 15 \text{ cm}$ 浅耕的处理;而 Baggs 等^[30]的研究表明,耕翻 15 cm 和不耕处理之间的土壤呼吸量没有显著差异. Alvarez 等^[26]报道 $0 \sim 30 \text{ cm}$ 土壤有机碳含量的大小决定了耕翻后土壤 CO_2 释放量的大小,二

者间关系可用线性方程描述,当土壤有机碳含量很低时,耕翻与不耕处理土壤呼吸量的差异不大.本研究表明,耕翻对土壤呼吸的影响程度受前茬作物类型的制约.笔者推测,前茬作物的差异不仅造成土壤中有有机碳源数量和性质的不同,而且还可能影响土壤的通透性,从而对耕翻效应产生影响,这值得进一步深入研究.

Reicosky 等^[25]报道耕翻后 8 min 内土壤呼吸速率在 $114 \sim 48 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 内变异,但在 3.5 h 后土壤呼吸速率迅速下降到 $8 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,而不耕处理的土壤呼吸量一直在 $0.38 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 左右.由于本研究中未在耕翻后立即进行土壤呼吸的测定,因此前期的土壤呼吸总量估算可能偏低,今后有必要对耕翻初期的土壤 CO_2 脉冲排放峰加强研究,以更准确地对不同耕翻措施下的土壤呼吸作用进行评估.

从 1960 ~ 1980 年,中国大部分农田均采取深耕(约 20 ~ 30 cm)措施,它虽能减少杂草生长量并有利于气体扩散和根生长,但也加剧了土壤侵蚀,并且耕翻成本也较大.1980 年后,随着除草剂的推广使用以及耕翻技术的改进,许多保护性耕作措施(如浅耕或不耕)相继得到推广.据不完全统计,到目前为止,中国农田大约有超过 2 000 万 hm^2 施行了少耕、不耕措施^[31].与传统的深耕相比,实行保护性耕作有利于减少土壤的碳损失量并增加有机质含量^[32].已有研究表明过去近 20 年来实施保护性耕作措施可能大大增加了中国农田土壤有机碳的储量^[33].

另外,从本研究来看,12 cm 旋耕处理的作物产量最高.基于这些结果,笔者认为从深耕向少耕、不耕作方式的转变不会造成作物减产,可以考虑在与本试验地类似的地区推广这种浅耕的耕作方式,充分发挥土壤的固碳作用.

3.3 土壤温、湿度对土壤呼吸的影响

本研究中,综合考虑了以往的研究结果及理论基础,将土壤温度和湿度作为模拟土壤呼吸作用的 2 个关键因子.除土壤温度和湿度外,植物的生理生长状况也是影响土壤呼吸的重要因素,这主要体现在根的生长节律对土壤呼吸的影响,而根的生长节律在某种程度上是独立于温度的.在特定条件下,植物的生长状况对土壤呼吸作用的影响还可能掩盖土壤温度和湿度对土壤呼吸的影响^[34]; Hibbard 等^[35]报道,土壤呼吸速率随叶面积指数的增加而增加,二者关系可用对数方程拟合,同时,土壤呼吸速率与细根生物量之间呈正相关关系.研究植物的生理生长状况对土壤呼吸和 Q_{10} 值的影响是深入认识土壤呼

吸的变异规律并精确模拟土壤呼吸的前提,但目前这方面的研究还相对较少,本研究中的土壤呼吸模拟模型也并未将作物生长的因素考虑在内.今后的研究中综合考虑土壤温度、湿度和植物生理生长状况等因素来模拟土壤呼吸作用的机制模型是关注的重点.

4 结论

(1)化肥氮施用显著促进了麦田土壤呼吸作用,但不同施氮水平间的平均土壤呼吸速率无显著差异.

(2)耕翻对土壤呼吸的影响效应受到前茬作物类型的制约.在 2003 ~ 2004 年的冬小麦生长季,不耕和浅耕处理的平均土壤呼吸速率之间无显著差异.在 2004 年玉米生长季浅耕比不耕处理显著增加了土壤呼吸速率,而在随后的 2004 ~ 2005 年小麦生长季浅耕比不耕又显著降低了土壤呼吸速率.在前茬作物为水稻的 2004 ~ 2005 年小麦生长季,深耕比不耕处理显著增加了土壤呼吸速率.

(4)土壤温度是影响旱地土壤呼吸季节性变异的主要因素,二者关系符合一阶指数关系.除温度外,土壤湿度也是影响土壤呼吸的重要因素,以土壤温度和湿度建立的模拟方程可解释 54% 的土壤呼吸的季节性变异.

致谢:感谢南京农业大学的陆振华、欧阳宇、王猛、刘子锐、李静远在气体样品采集中给予的帮助.

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*, 1992, **44B**(2): 81-99.
- [2] Gallardo A, Schlesinger W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a warm temperate forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 1994, **26**(10): 1409-1415.
- [3] 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.
- [4] 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): 1522-1560.
- [5] 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.
- [6] 梁巍,岳进,吴劼,等.微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放[J]. *应用生态学报*, 2003, **14**(12): 2278-2280.
- [7] 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, **142**(11): 9-15.
- [8] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O

- emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, **20**(5): 842-844.
- [9] 黄耀. 地气系统碳氮交换——从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 81-83.
- [10] Kiefer R H, Amey R G. Concentrations and controls of soil carbon dioxide in sandy soil in the North Carolina coastal plain [J]. *Catena*, 1992, **19**: 539-559.
- [11] Howard D M, Howard P J A. Relationships between CO₂ evolution, moisture content and temperature for a range of soil types [J]. *Soil Biol Biochem*, 1993, **25**(11): 1537-1546.
- [12] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture [J]. *Soil Biol Biochem*, 1983, **15**(4): 447-453.
- [13] Linn D M, Doran J W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1984, **48**(6): 1267-1272.
- [14] Skopp J, Jawson M D, Doran D W. Steady-state aerobic microbial activity as function of soil water content [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, **54**(6): 1619-1625.
- [15] 黄斌, 王敬国, 龚元石, 等. 冬小麦夏玉米农田土壤呼吸与碳平衡的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(1): 156-160.
- [16] 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.
- [17] 韩广轩, 朱波, 张中杰, 等. 水旱轮作土壤-小麦系统 CO₂ 排放及其影响因素[J]. *生态环境*, 2004, **13**(2): 182-185.
- [18] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究[J]. *西北农林科技大学学报*, 2004, **32**(12): 1-7.
- [19] Michel K, Matzner E. Nitrogen content of forest floor Oa Layers affects carbon pathways and nitrogen mineralization [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34**(11): 1807-1813.
- [20] Chantigny M H, Angers D A, Prévost D, *et al.* Dynamics of soluble organic C and C mineralization in cultivated soils with varying N fertilization [J]. *Soil Biol Biochem*, 1999, **31**(4): 543-550.
- [21] Nilson L O, Wiklund K. Indirect effects of N and S deposition on a Norway spruce ecosystem: an update of findings within the storage project [J]. *Water Air Soil Poll*, 1995, **85**: 1613-1622.
- [22] Thirukkumaran C M, Parkinson D. Microbial respiration, biomass, metabolic quotient and litter decomposition in a lodgepole pine forest floor amended with nitrogen and phosphorous fertilizers [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**(1): 59-66.
- [23] 关义新, 林葆, 凌碧莹. 光、氮及其互作对玉米幼苗叶片光合和碳、氮代谢的影响[J]. *作物学报*, 2000, **26**(6): 806-812.
- [24] 任书杰, 张雷徽, 张岁歧, 等. 氮素营养对小麦根冠协调生长的调控[J]. *西北植物学报*, 2003, **23**(3): 395-400.
- [25] Reicosky D C, Dugas W A, Torbert H A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems [J]. *Soil Till Res*, 1997, **41**(1-2): 105-118.
- [26] Alvarez R, Alvarez C R, Lorenzo G. Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa [J]. *Eur J Soil Biol*, 2001, **37**(3): 161-166.
- [27] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland [J]. *Soil Till Res*, 1999, **53**(1): 29-39.
- [28] Reicosky D C, Lindstrom M J. Fall tillage method: Effect on short-term carbon dioxide flux from soil [J]. *Agron J*, 1993, **85**(6): 1237-1243.
- [29] Franzuebbers A F, Hons F M, Zuberer D A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping [J]. *Soil Till Res*, 1995, **34**(1): 41-61.
- [30] Baggs E M, Chebii J, Ndafa J K. A short-term investigation of trace gas emissions following tillage and no-tillage of agroforestry residues in western Kenya [J]. *Soil Till Res*, 2006, **90**(1-2): 69-76.
- [31] 张海林, 高旺盛, 陈阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. *中国农业大学学报*, 2005, **10**(1): 16-20.
- [32] Holland J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence [J]. *Agr Ecosyst Environ*, 2004, **103**(1): 1-25.
- [33] Pan G, Li L, Zhang Q, *et al.* Organic carbon stock in topsoil of Jiangsu Province, China, and the recent trend of carbon sequestration [J]. *J Environ Qual*, 2005, **17**(1): 1-7.
- [34] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests [J]. *Global Change Biol*, 2001, **7**: 269-278.
- [35] Hibbard K A, Law B E, Reichstein M. An analysis of soil respiration across northern hemisphere temperate ecosystems [J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**: 29-70.