科学通报 2010 年 第 55 卷 第 13 期: 1247 ~ 1254
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应

李荣平[①②③], 周广胜[①④*], 王宇[①③]

① 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;
② 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016;
③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;
④ 中国气象科学研究院, 北京 100081
* 联系人, E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

2009-07-08 收稿, 2010-01-07 接受
国家杰出青年科学基金(批准号: 40625015)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB400502)资助项目

摘要 对 2004~2007 年连续 3 a 玉米农田生态系统非生长季(10 月 16 日~翌年 4 月 30 日)的涡度相关系统测量数据分析表明, 玉米农田生态系统非生长季的日土壤呼吸值为 1.08~4.08 g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 日最低值均出现在 11 月下旬. 整个非生长季平均土壤呼吸值为(456.06±20.01) g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 占生长季净生态系统生产力的 11%, 土壤呼吸月平均最低值主要出现在 1, 2 月份. 非生长季日土壤呼吸的季节变化均呈非生长期起始期和终止期高、中间期低的变化态势. 当 10 cm 土壤温度高于 0℃时, 土壤呼吸与土壤温度呈显著二次曲线关系(P<0.001), 解释率为 38%~70%; 当 10 cm 土壤体积含水量大于 0.1 $m^3 \cdot m^{-3}$ 时, 土壤呼吸与土壤体积含水量呈显著二次曲线关系(P<0.001), 解释率为 18%~60%. 选取土壤温度高于 0℃时的观测资料, 耦合土壤温度和土壤含水量可得到更好的土壤呼吸模拟模型, 解释率达 53%~79%, 土壤呼吸模拟值与观测值的回归估计标准误差为 2.7%~11.8%. 非生长季土壤呼吸是生长季土壤呼吸的 22.4%, 在东北地区玉米农田生态系统碳收支评估中具有重要作用.

关键词
土壤呼吸
非生长季
土壤温度
土壤含水量
玉米

增加陆地生态系统对大气二氧化碳(CO_2)的吸收是缓解日益增高的大气温室气体浓度的一种有效途径. 农业用地占陆地表面的 12%[1], 深刻理解农田生态系统碳交换有助于更准确地估算陆-气碳交换[2]. 近年来, 关于农田生态系统 CO_2 收支的研究主要量化了不同农田生态系统生长季 CO_2 交换量及其对环境因子的响应[3~8], 为理解农田生态系统碳循环[9]及评估农田生态系统吸收大气 CO_2 的潜力提供了理论支持[10].

研究表明[11,12], 冬季的土壤呼吸是年碳收支的重要组成部分, 因为大部分凋落物出现在冬季[13]. 尽管农田生态系统不同于自然生态系统, 但非生长季农田生态系统土壤呼吸仍然占生长季生态系统呼吸的 15%~25%[3], 在农田生态系统碳收支中占有重要地位. 同时, 由于大气中 CO_2 浓度的升高, 北半球中高纬度地区冬季温度升高速度加快, 可能导致该区域农田生态系统非生长季向大气排放更多的 CO_2. 农田生态系统非生长季净碳交换近似于土壤的异养呼吸, 深刻理解农田生态系统非生长季土壤呼吸动态及其控制因子, 有助于农田生态系统碳收支的准确评估. 然而, 目前国内外关于中高纬度农田生态系统非生长季碳交换及其环境影响的研究仍较少.

东北地区是我国重要的粮食基地. 其中, 玉米农田占据重要地位. 东北三省的玉米播种面积占全国玉

英文版见: Li R P, Zhou G S, Wang Y. Responses of soil respiration in non-growing seasons to environmental factors in a maize agroecosystem, Northeast China. Chinese Sci Bull, 2010, 55, doi: 10.1007/s11434-010-0181-8

米播种面积 26.6%, 占三省农作物播种面积的 43.4%, 且玉米播种面积呈递增趋势[14]. 对于该地区玉米农田生态系统非生长季的碳通量动态及其控制因子的研究, 有助于准确评估该地区农田生态系统的碳交换.

本研究试图通过锦州玉米农田生态系统 2004~2007 年连续 3 a 的非生长季涡度相关观测数据, 分析玉米农田生态系统非生长季碳通量动态及其控制因子. 主要目标有: (1) 确定玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸的季节分布特征; (2) 明确影响玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用的关键环境因子; (3) 建立玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用的模拟模型.

1 研究区域与方法

(ⅰ) 研究区域. 研究区域位于中国气象局大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站(41°8′53″N, 121°12′6″E, 海拔 23 m). 该地区属温带季风性气候, 夏天温暖湿润, 冬天寒冷干旱. 年均气温 9℃, 最冷月 1 月平均气温–8℃, 最暖月 7 月平均气温 24.4℃. 年均降水量约 690 mm, 其中 70%发生在夏季(6~8 月). 玉米生长季为每年的 5 月初到 9 月末. 表层土壤为棕壤, pH 为 6.3, 土壤有机质含量为 0.6%~0.9%[15].

供试玉米(*Zea mays* L.)农田占地 43 hm^2, 地面宽广平整, 满足涡度相关系统对水、碳和能量的测量要求. 该区域自从 1949 年以来就种植玉米, 在生长季不进行灌溉, 播种前实行条翻, 每年每公顷施氮肥 300 kg, 播种前一次性施到农田中.

(ⅱ) 观测方法. 自 2004 年 6 月开始, 利用涡度相关技术同步测量玉米生态系统的 CO_2、水和能量通量. 涡度相关系统由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific, Inc.)和开路 CO_2/H_2O 红外气体分析仪(IRGA)(LI 7500, LI-COR, Inc.)组成. 潜热、感热和 CO_2 通量的观测高度为 3.5 m. 同时测量的气象变量包括 2.5 m 和 4 m 的气温和湿度(HMP45C, Campbell Scientific, Inc.), 3.5 m 的净辐射(CNR1, Kipp 和 Zonen, Netherlands)以及 4 m 的光合有效辐射(Li190SB, LI-COR, Inc.), 5, 10, 15, 20, 40 和 80 cm 的土壤温度(Model HFT01SC, Campbell Scientific Inc.), 10, 20, 30, 40 和 50 cm 的土壤水分含量(Eazy-AG50, Sentek Inc.).

(ⅲ) 数据处理. 本研究主要利用 3 个非生长季(分别为 2004 年 10 月 16 日~2005 年 4 月 30 日、2005 年 10 月 16 日~2006 年 4 月 30 日和 2006 年 10 月 16 日~2007 年 4 月 30 日)的数据. 使用 EdiRe 软件(http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/)对 CO_2、潜热和感热的 10 Hz 原始数据进行坐标旋转、WPL 校正和异常值剔除, 最终转化成 30 min 数据. 由于传感器损坏、电力不足、雨天、仪器维护标定等原因, 3 个非生长季缺失数据分别为 15.1%, 6.7%和 17.7%. 对于连续缺失 5 d 以上的数据, 不进行插补; 其余由于雨天、异常值、夜间摩擦风速小等原因而剔除的数据采用日平均值法 7 d 的滑动平均进行插值[16].

所有数据分析均利用 Kaleidagraph 3.6 和 SPSS 13.0 统计分析软件完成. 由于数据缺失产生不同的样本数, 采用 t 检验比较 2004 和 2005 年的 11 月、2006 和 2007 年 4 月的土壤呼吸, 利用单因素方差分析(one-way ANOVA) 和 Turkey 多重检验法比较 12 月、1 月、2 月、3 月在不同年份之间的土壤呼吸差异. 土壤温度和土壤含水量均采用地下 10 cm 处的观测值. 采用二次曲线回归模型分别拟合非生长季土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系. 利用非线性回归模型模拟分析非生长季土壤呼吸与土壤温度和土壤含水量的关系.

2 结果与讨论

2.1 非生长季土壤呼吸日变化特征

在 3 个玉米非生长季中, 日土壤呼吸值变化范围为 1.08~4.08 g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 远低于北美温带区的大豆玉米轮作农田生态系统非生长季最高呼吸值(17.1 g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)[3], 可能是局地气候、土壤(深层粉质黏土)和农业措施(免耕)的差异所致; 也低于 Han[17]在本试验地测得的非生长季末期(2005 年 5 月 4 日)日土壤呼吸通量(4.98 g $CO_2 \cdot m^{-2}$), 可能与观测方法(Li-6400- 09 土壤呼吸观测系统)有关.

非生长季土壤呼吸的季节变化均呈非生长季起始期和终止期高、中间期低的变化态势. 土壤呼吸日最低值均出现在 11 月下旬, 分别是 2004 年 11 月 24 日、2005 年 11 月 29 日和 2006 年 11 月 26 日. 这可能是因为 11 月份的土壤温度低于 0℃(图 1(a)), 土壤湿度也最低, 并开始结冰(图 1(b))所致. 尽管土壤结冰, 但还存在土壤呼吸, 有时甚至增加. 这是因为在冻融潜伏期, 当首次–7℃低温导致土壤完全被冻时, 活着的微生物种群的 30%被杀死[18], 但是微生物呼

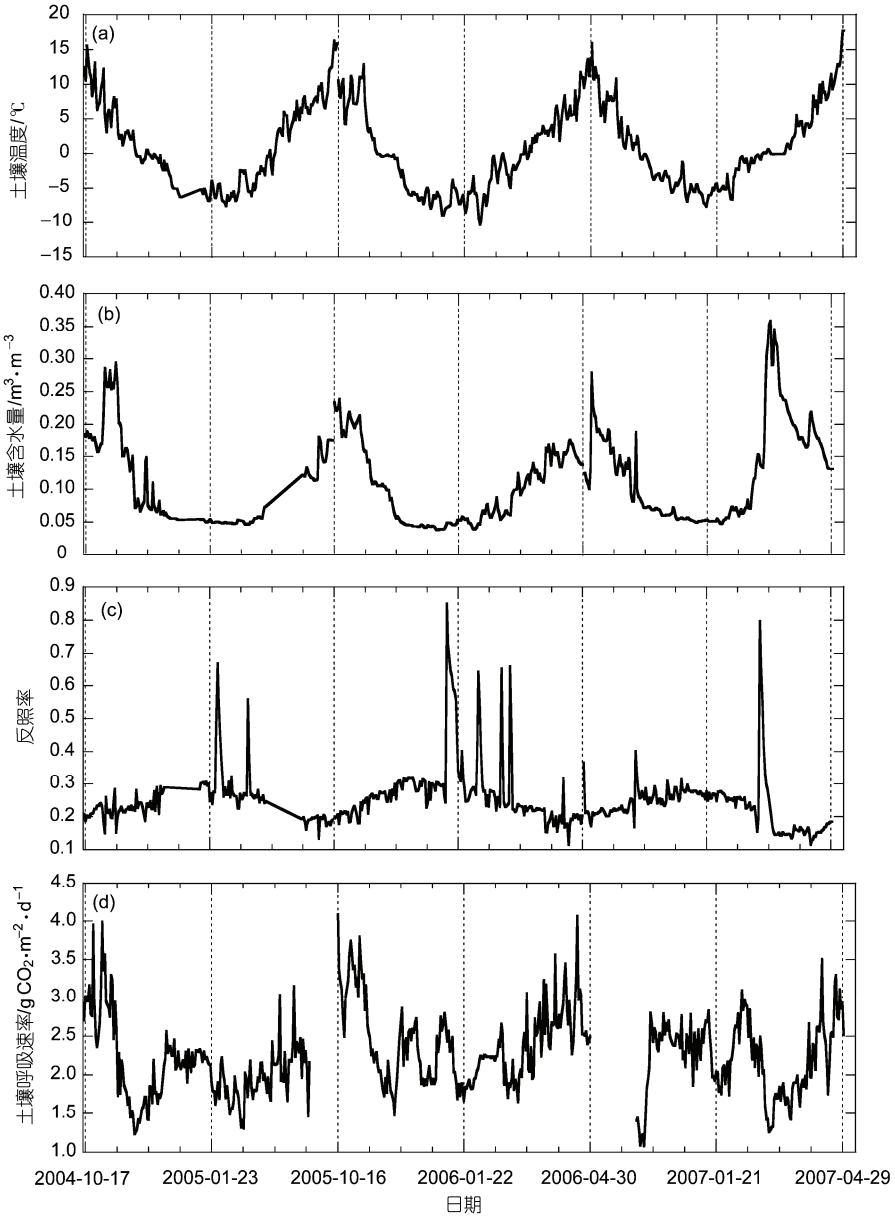


图 1　2004~2007 年玉米农田生态系统非生长季的土壤温度(a)、土壤含水量(b)、反照率(c)和土壤呼吸速率(d)的日变化特征

吸仍然在进行[19,20]; 同时, 冬季的土壤呼吸来源于夏季产生的土壤中封闭的气体或者是冬季微生物的土壤呼吸[11]. 在非生长季中期(12 月~翌年 2 月), 土壤呼吸表现为起伏的波动, 这主要是由于雪的覆盖(反照率增大(图 1 (c))和冻融交替导致的. 而在接近生长季开始的 3~4 月, 日土壤呼吸值呈先降低而后增加的趋势(图 1(d)), 与土壤温度和土壤湿度的变化趋势一致(图 1(a), (b)). 已有研究表明[3], 农田生态系统非生长季日呼吸与 10 cm 土壤温度紧密相关.

2.2　非生长季土壤呼吸作用月变化特征

玉米农田生态系统非生长季(11 月~翌年 4 月)月均土壤呼吸分别为 66.18±5.15, 69.29±7.75, 66.96±2.01, 59.76±10.10, 64.03±10.80 和(80.24±5.90) g $CO_2 \cdot m^{-2}$. 整个非生长季平均土壤呼吸为(456.06± 20.01) g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 与 Verma 等人[3]的研究结果(450~680 g $CO_2 \cdot m^{-2}$)相近. 韩广轩[17]利用 Li-6400-09 土壤呼吸观测系统对锦州玉米生态系统生长季土壤呼吸的观测得到, 生长季土壤呼吸速率的平均值为 11.95 g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 本研

究得到非生长季的土壤呼吸速率平均值为 2.31 g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$, 为生长季的 19.4%. 3 a 平均非生长季的总土壤呼吸值是生长季总土壤呼吸的 22.4%, 与 Verma 等人[3]得到的 15%~25%接近. 李祎君[21]利用涡度相关观测数据对锦州玉米农田生态系统的碳收支分析表明, 2005 年该系统的净碳收支为吸收 1719.41 g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 而该系统生长季的总土壤呼吸为 2007.60 g $CO_2 \cdot m^{-2}$[17], 2005 年该系统的总初级生产力为 4182.4 g $CO_2 \cdot m^{-2}$, 由此玉米同化固定的大气 CO_2 约 11%在非生长季返回大气中.

各年同期相比, 11 月份和 1 月份的土壤呼吸速率差异不显著(P>0.1), 这主要是由于同期的土壤温度差异不显著所致; 各年同期相比, 其他月份间差异显著(P<0.05)(图 2(c)), 主要是因为土壤温度、土壤水分或其他环境要素的影响所致. 根据当地气象观测站记录, 2007 年 3 月 4 日发生一场暴雪事件(折合降水量 34.8 mm), 地表反照率急剧升高, 达到 0.79, 使得 2007 年 3 月份的土壤呼吸显著小于其他两年(P<0.05); 另外, 一些土壤动物在这场春雪事件中被冻死, 也是 4 月份土壤呼吸小于 2006 年同期的原因. 最高气温有助于凋落物的分解. 除 12 月和 4 月, 其他月份的最高气温与土壤呼吸呈相似的变化趋势(图 2(b), (c)). 各年 12 月份土壤温度都低于 0℃(图 2(a)), 而且各年 12 月份的最高气温也都接近 0℃, 很少发生冻融现象, 当温度降至 0℃以下时, 土壤呼吸与土壤温度解耦联[22], 仅仅依靠温度无法解释土壤呼吸的差异. 因此, 12 月份的土壤呼吸在各年之间的差异还有待于进一步研究.

非生长季的月土壤呼吸变化呈两端高、中间低的趋势, 最低值主要出现在 1, 2 月份, 与已有研究结果相同[11], 这是因为重复冻融过程可能加剧对微生物种群的毁坏, 进而降低土壤呼吸活动[23].

2.3 非生长季土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系

研究表明[24~26], 土壤呼吸受土壤温度和土壤湿度的影响. 本研究表明, 玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系因环境条件的变化而异. 当土壤温度高于 0℃时, 土壤呼吸与土壤温度呈显著二次曲线关系(P<0.001)(图 3(a)~(c)), 在 3 个年度非生长季的模拟解释率分别达到 47%, 38%和 70%(表 1). Mielnick 和 Dugas[25]发现德克萨斯州高草的草原土壤呼吸(包含根系自养呼吸和土壤异养呼吸)与土壤温度呈指数关系, 其中根系自养呼吸对土壤温度的响应更强烈[27,28]. Van't Hoff[29]最初提出的指数方程和 Arrhenius[30]提出的酶反应方程能较好地描述土壤呼吸与温度的关系. 据此, 国内外研究者[31,32]针对具体的研究地点建立了土壤呼吸与温度的关系. 但是, 在较低的温度范围内, 简单的幂函数方程较 Arrhenius 模型和指数模型对温度变化的响应更敏感[32]. 由于东北地区的非生长季都处于低温时期, 本研究得到的抛物线函数能够更好地响应温度的变化. 当土壤含水量大于 0.1 $m^3 \cdot m^{-3}$ 时, 土壤呼吸与土壤含水量呈显著二次曲线关系(P<0.001)(图 3(d)~(f)), 与 Mielnick 和 Dugas[25]的研究结果相似, 3 个年度非生长季的解释率分别为 36%, 60%和 18%(表 1). 由于湿度对土壤呼吸的产生和传输过程的复杂调节机制, 土壤呼吸对湿度的响应不一致, 如土壤呼

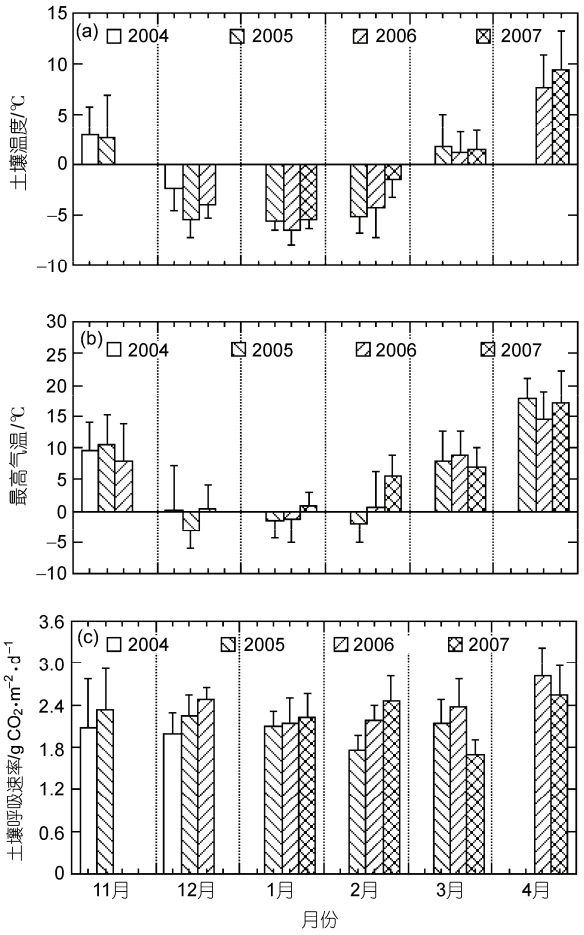


图 2 玉米农田生态系统非生长季各月的平均土壤温度(a)、最高气温(b)和土壤呼吸速率(c)

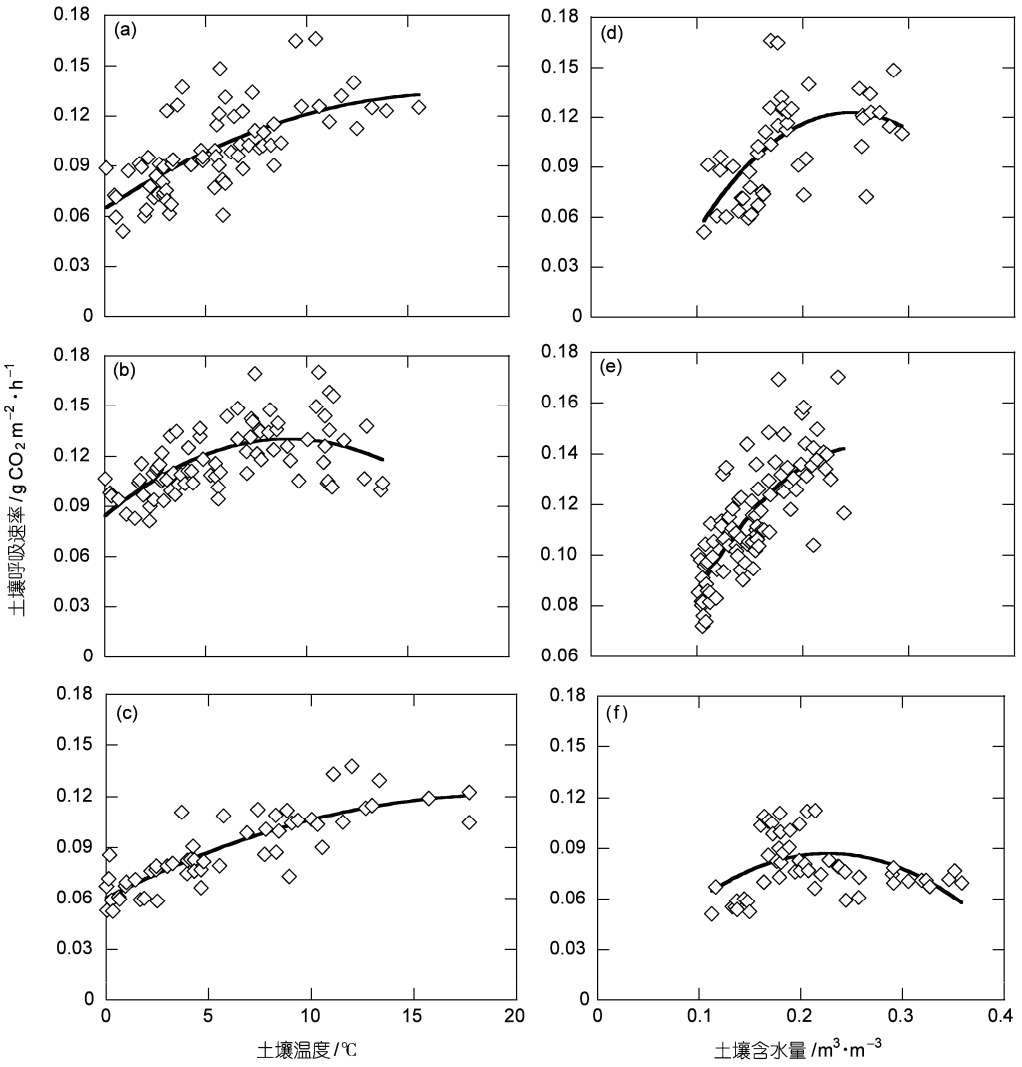


图 3　玉米农田生态系统在 2004~2005 年、2005~2006 年和 2006~2007 年的 3 个非生长季(10 月 16 日~翌年 4 月 30 日)土壤呼吸速率与土壤温度((a)~(c))和土壤含水量((d)~(f))的关系

表 1　玉米农田生态系统非生长季(10 月 16 日~翌年 4 月 30 日)土壤呼吸分别与土壤温度和土壤含水量的关系

年度	拟合方程 a)	解释率	n b)	P c)
2004~2005	$y=-0.0002x_1^2+0.0079x_1+0.0646$	0.4671	71	<0.001
2005~2006	$y=-0.0006x_1^2+0.0102x_1+0.0842$	0.3815	81	<0.001
2006~2007	$y=-0.0002x_1^2+0.0066x_1+0.0595$	0.7160	55	<0.001
2004~2005	$y=-3.3922x_2^2+1.6602x_2-0.0803$	0.3591	47	<0.001
2005~2006	$y=-2.3101x_2^2+1.1947x_2-0.0115$	0.6036	92	<0.001
2006~2007	$y=-1.7012x_2^2+0.7722x_2-0.0005$	0.1781	55	<0.001

a) y, 土壤呼吸(g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); x_1, 土壤温度(℃); x_2, 土壤含水量($m^3 \cdot m^{-3}$); b) 样本数; c) F 显著性检验

吸作用与湿度的关系可以表示为自然对数关系[33]、抛物线方程[25]和双曲线方程[34]. 本研究得到的土壤呼吸与湿度的抛物线关系是针对非生长季的, 土壤呼吸主要来自于微生物分解, 土壤含水量的增加导

致底物扩散增加并使氧气扩散受阻, 从而使得土壤呼吸与温度表现出抛物线关系. 相反, 当土壤温度低于 0℃、土壤含水量小于 0.1 $m^3 \cdot m^{-3}$ 时, 土壤呼吸与土壤温度、土壤含水量的关系不显著 (P>0.05), 与 Grogan 和 Chanpin[35]报道的冬天冻原植被下土壤呼吸的研究结果相似. 当土壤温度低于 0℃时, 土壤冻结, 土壤含水量保持在 0.1 $m^3 \cdot m^{-3}$ 以下(图 1(a), (b)), 土壤呼吸与土壤温度解耦联, 土壤温度难以解释土壤呼吸. 因此, 当土壤温度高于 0℃时, 可以采用土壤呼吸与土壤温度和土壤水分的关系对玉米农田生态系统非生长季的土壤呼吸进行模拟.

根据 3 a 的观测数据, 利用非线性方程模拟土壤温度和湿度对呼吸作用的影响, 结果表明, 土壤温度 10℃和土壤湿度 0.2 $m^3 \cdot m^{-3}$ 可能为该试验观测期间田间土壤生物活性最适宜的条件. 在 3 个玉米非生长季中, 日土壤呼吸值变化在 1.08~4.08 g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ (图 1(d)), 最大值是最小值的 4 倍多. 土壤温度在 0~10℃时, 土壤呼吸变化速率较大(图 3(a)~(c)). 东北地区是一个气候变暖显著的地区, 冬季变暖(0.63℃/10 a)和春季变暖(0.49℃/10 a)特别明显[36]. 这可能导致玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸的成倍增长, 增长限度达 4 倍, 从而将导致大气 CO_2 浓度的进一步增加.

2.4 非生长季土壤呼吸动态模拟

由于玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度均呈显著的二次曲线关系(图 3, 表 1), 可能存在一个耦合两因子的土壤呼吸模拟模型. 采用非线性拟合方程(1)模拟土壤呼吸与土壤温度和土壤湿度的综合关系.

$$y = (ax_1^2 + bx_1 + c)(dx_2^2 + ex_2 + f), \quad (1)$$

式中, y 为土壤呼吸(g $CO_2 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); x_1 为 10 cm 的土壤温度(℃); x_2 为 10 cm 的土壤含水量($m^3 \cdot m^{-3}$); a, b, c, d, e 和 f 为常数项.

选取 3 个年度非生长季中的观测资料, 利用此方程模拟土壤呼吸, 模拟值和观测值表现相似的变化格局, 方程的解释率分别为 70%, 53%和 79%(表 2); 模拟值和观测值的回归估计标准误差占平均土壤呼吸的比例分别为 10.7%, 11.8%和 2.7%; 模拟值和观测值的回归斜率分别为 0.69, 0.53 和 0.86(图 4(a)~(c), 表 2). Mielnick 和 Dugas[25]将指数方程与抛物线函数结合描述了德克萨斯州高草草原土壤呼吸对土壤温度和湿度变化的响应, 模型解释率为 52%, 斜率为 0.52, 回归估计偏差是平均土壤呼吸的 39%. 尽管非

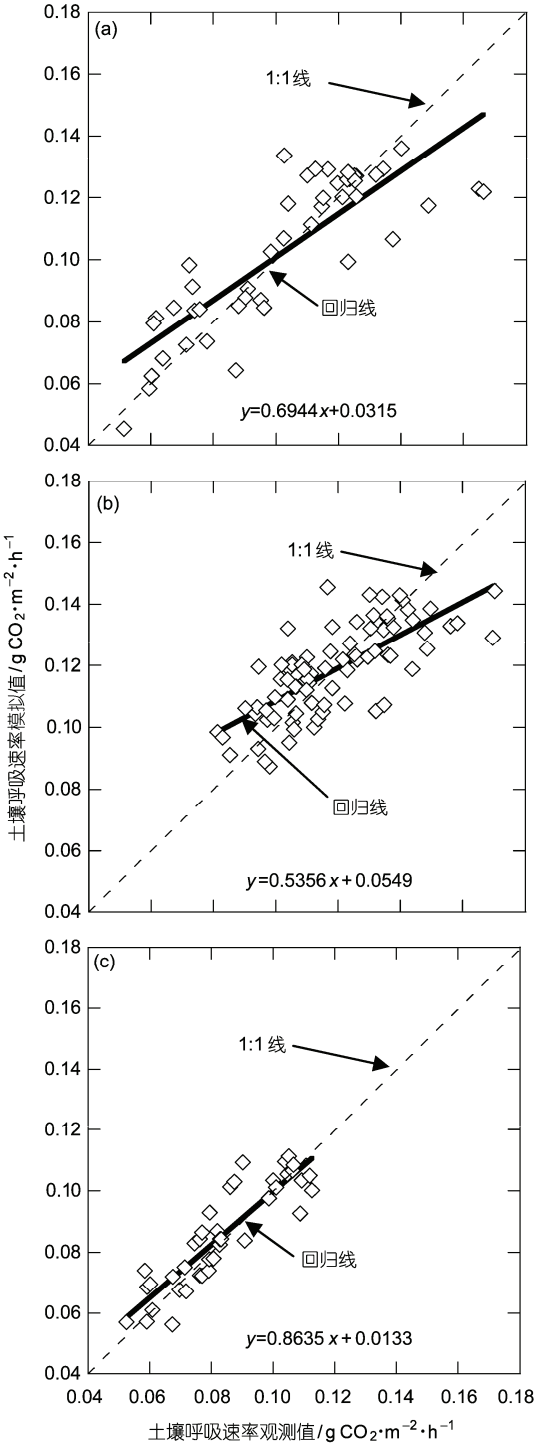


图 4 玉米农田生态系统在 2004~2005 年(a)、2005~2006 年(b)和 2006~2007 年(c)的 3 个非生长季(10 月 16 日~翌年 4 月 30 日)的土壤呼吸速率的观测值与模拟值

表 2 基于土壤温度和土壤水分的玉米农田生态系统非生长季(10 月 16 日~翌年 4 月 30 日)的土壤呼吸非线性模型的参数估计和模型验证

年度	*a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	解释率	回归估计标准误差	$n^{a)}$	$P^{b)}$
2004~2005	–0.002	0.051	0.279	–4.856	2.426	–0.063	0.70	10.7%	46	<0.001
2005~2006	–0.001	0.019	0.300	0.272	0.666	0.215	0.53	11.8%	81	<0.001
2006~2007	–0.001	0.028	0.176	2.879	–1.094	0.407	0.79	2.7%	41	<0.001

a) 样本数; b) *F* 显著性检验

生物因子与生物因子, 如凋落物和生长季的总初级生产力等[15], 共同影响着土壤呼吸. 但本研究着眼于非生长季, 影响土壤呼吸作用的因子主要是非生物因子. 从拟合效果来看, 所建模型较同类模型能够更好地模拟该地区玉米农田生态系统非生长季的土壤呼吸动态. 同时, 该模型较好地模拟了低温条件(0~10℃)下玉米农田生态系统异养呼吸对土壤湿度和土壤温度的响应, 有助于准确评估玉米农田生态系统的碳收支.

3 结论

中、高纬度地区主要以单季作物为主, 且生长季大多短于非生长季, 因此, 非生长季作为主要碳源, 在生态系统碳收支评估中具有重要地位. 本研究分析了东北地区玉米农田生态系统 3 个年度(2004~2007年)的非生长季土壤呼吸动态. 3 个玉米非生长季的日土壤呼吸值变化范围为 1.08~4.08 g $CO_2\cdot m^{-2}$, 平均为 2.31 g $CO_2\cdot m^{-2}$, 约为生长季土壤呼吸值的 19.4%. 玉米农田生态系统非生长季(11 月~翌年 4 月)的月均土壤呼吸分别为 66.18±5.15, 69.29±7.75, 66.96±2.01, 59.76±10.10, 64.03±10.80 和(80.24±5.90) g·CO_2 m^{-2}. 整个非生长季平均土壤呼吸为(456.06±20.01) g $CO_2\cdot m^{-2}$, 约为生长季总土壤呼吸的 22.4%. 每年作物同化固定的大气 CO_2 约有 11%在非生长季返回大气中.

土壤温度和土壤含水量是控制东北地区玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸的两个主导环境因子, 基于土壤温度与水分建立的土壤呼吸模型可以较好地模拟玉米农田生态系统非生长季的土壤呼吸动态. 土壤温度低于 0℃时, 土壤呼吸与土壤温度解耦联, 此时不能利用土壤温度模拟土壤呼吸; 土壤温度高于 0℃时, 非生长季土壤呼吸主要受土壤温度和水分的影响. 玉米农田生态系统非生长季的土壤呼吸模型反映了玉米农田生态系统的异养呼吸, 可以用于估算生长季的土壤异养呼吸, 有助于准确估算东北地区玉米农田生态系统的碳收支. 当土壤温度低于 0℃、气温高于 0℃时, 土壤出现冻融交替过程, 除温度和水分对土壤呼吸的直接作用外, 土壤冻融交替亦将引起诸如底物有效性、土壤理化性质、土壤微生物等众多因子的变化, 进而影响土壤呼吸与微生物活动[37]. 但研究表明, 冻结土壤中凋落物的分解和土壤呼吸作用仍然在进行[11,12,38]. 本研究也发现, 从 11 月到 2 月期间, 土壤呼吸呈明显起伏波动, 可能主要由冻融交替造成. 因此, 有关冻融交替下的土壤呼吸机制有待于进一步研究.

参考文献

1 Wood S, Sebastian K, Scherr S J. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Agroecosystems. Washington DC: IFPRI, WRI, 2000. 2—36

2 Suyker A E, Verma S B, Burba G G, et al. Gross primary production and ecosystem respiration of irrigated maize and irrigated soybean during a growing season. Agric For Meteorol, 2005, 131: 180—190

3 Verma S B, Dobermann A, Cassman K G, et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rained maize-based agroecosystems. Agric For Meteorol, 2005, 131: 77—96

4 Suyker A E, Verma S B, Burba G G, et al. Growing season carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize. Agric For Meteorol, 2004, 124: 1—13

5 Hollinger S E, Bernacchi C J, Meyers T P. Carbon budget of mature no-till ecosystem in North Central Region of the United States. Agric For Meteorol, 2005, 130: 59—69

6 Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. Agric For Meteorol, 2002, 113: 97—120

7 李俊, 于强, 孙晓敏, 等. 华北平原农田生态系统碳交换及其环境调控机制. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 Ⅰ): 210—223

8 任秀娥, 王勤学, 童成立, 等. 亚热带稻田生态系统土壤呼吸的估算. 科学通报, 2007, 52: 1548—1553
9 West T O, Marland G. Net carbon flux from agricultural ecosystems: Methodology for full cycle analyses. Environ Pollut, 2002, 116: 439—444
10 Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: Contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. Science, 2000, 289: 1922—1925
11 Zimov S A, Davidov S P, Voropaev Y V, et al. Siberian CO_2 efflux in winter as a CO_2 source and cause of seasonality in atmospheric CO_2. Clim Change, 1996, 33: 111—120
12 Oechel W C, Hastings S J, Vourlitis G. Recent change of arctic tundra ecosystems from a net carbon dioxide sink to source. Nature, 1993, 361: 520—523
13 Hobbie S E, Chapin III F S. Winter regulation of tundra litter carbon and nitrogen dynamics. Biogeochemistry, 1996, 35: 327—338
14 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2007. 324
15 Han G X, Zhou G S, Xu Z Z, et al. Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. Soil Biol Biochem, 2007, 39: 418—425
16 Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. Agric For Meteorol, 2001, 107: 43—69
17 韩广轩. 玉米生态系统土壤呼吸动态及其模拟. 博士学位论文. 北京: 中国科学院植物研究所, 2007. 1—3
18 Skogland T, Lomeland S, Goksøyr J. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: Experiments with soil bacteria. Soil Biol Biochem, 1988, 20: 851—856
19 Coxson D S, Parkinson D. Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor litter and soils. Soil Biol Biochem, 1987, 19: 49—59
20 Clein J S, Schimel J P. Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. Soil Biol Biochem, 1995, 27: 1231—1234
21 李祎君. 玉米农田水热碳量动态及其环境控制机理研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院植物研究所, 2008. 78—79
22 Elberling B, Brandt K K. Uncoupling of microbial CO_2 production and release in frozen soil and its implications for field studies of arctic C cycling. Soil Biol Biochem, 2003, 35: 263—272
23 Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. Soil Biol Biochem, 1996, 28: 1061—1066
24 Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environment factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 383—390
25 Mielnick P C, Dugas W A. Soil CO_2 flux in a tallgrass prairie. Soil Biol Biochem, 2000, 32: 221—228
26 Dilustro J J, Collins B, Duncan L, et al. Moisture and soil texture effects on soil CO_2 efflux components in southeastern mixed pine forests. Forest Ecol Manag, 2005, 204: 85—95
27 Boone R D, Nadelhoffer K J, Canary J D, et al. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. Nature, 1998, 396: 570—572
28 Epron D, le Dantec V, Dufrene E, et al. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. Tree Physiol, 2001, 21: 145—152
29 Van't Hoff J H. Etudes de Dynamique Chimique (Studies of Chemical Dynamics). Amsterdam: Frederik Muller and Co, 1885. 1—25
30 Arrthenius S. The effect of constant influences upon physiological relationships. Scand Arch Physiol, 1989, 8: 367—415
31 董云社, 齐玉春, 刘纪远, 等. 不同降水强度 4 种草地群落土壤呼吸通量变化特征. 科学通报, 2005, 50: 473—480
32 Luo Y Q, Zhou X H. Soil Respiration and the Environment. San Diego: Elsevier Inc, 2006. 215—230
33 Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confound factors controlling soil respiration in a temperature mixed hardwood forest. Glob Change Biol, 1998, 4: 217—227
34 Schlentner R E, Van Cleve K. Relationships between CO_2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. Can J Forest Res, 1985, 15: 97—106
35 Grogan P, Chapin III F S. Arctic soil respiration: Effects of climate and vegetation depend on season. Ecosystems, 1999, 2: 451—459
36 高峰, 王宝书. 全球变暖与东北地区气温变化研究. 海洋预报, 2008, 25: 25—30
37 王庆丰. 移栽自不同纬度的落叶松林土壤呼吸研究. 硕士学位论文. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007. 12—13
38 Hobbie S E, Schimel J P, Trumbore S E, et al. Controls over carbon storage and turnover in high-latitude soils. Glob Change Biol, 2000, 6: 196—210