

下辽河平原不同生态系统土壤呼吸动态变化

宇万太, 马 强, 沈善敏, 张 璐, 姜子绍

(中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘 要: 利用长期定位试验对下辽河平原农田生态系统、人工林生态系统和草地生态系统等土壤呼吸状况进行了分析, 探讨了不同生态系统土壤呼吸强度的季节变化规律及其主要影响因素。结果表明: 下辽河平原不同生态系统土壤呼吸强度季节动态变化趋势基本一致, 土壤呼吸强度高峰首先出现在水、热条件适宜的夏季, 而后在秋季由于有机物归还量增加, 且水热条件亦较适宜的情况下再一次出现高峰; 在农田生态系统中, 施肥可明显增强土壤呼吸作用, 两年平均土壤呼吸强度 NPK + M 与 NPK 分别比 CK 处理提高 70% 和 40%; 在草地生态系统中, 有机物归还和人类活动是影响土壤呼吸的主要因素, 其强度变化顺序为: 每年收获移出 > 荒地 > 裸地; 人工林生态系统虽有一定有机物输入, 但其数量有限, 呼吸强度低于农田生态系统和草地生态系统。

关键词: 土壤呼吸; 生态系统; 季节变化

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)01-0122-08

土壤呼吸是指土壤释放 CO_2 的过程, 主要是由微生物生命活动和根系呼吸产生, 另有极少部分是由土壤动物和化学氧化释放。作为生态系统功能的一个重要过程, 土壤呼吸往往被视为土壤生物活性和土壤肥力及透气性的指标而受到重视^[1-3]。在全球气候变化成为公众关心的科学和社会热点问题的今天, 土壤呼吸作为生物圈碳的主要输出途径和大气 CO_2 重要给源, 其精确测定已成为全球变化研究中的关键问题之一^[4]。

土壤呼吸作为一个复杂的生物学过程, 受到多种因素的影响。这使得土壤呼吸一方面具有某种规律性, 另一方面又表现出不规则的变化。土壤呼吸不仅受到温度^[5]、湿度^[6]、土壤 pH 值^[7]和风速^[8]等环境条件的影响, 且在同一气候 - 土壤环境条件下还受不同生态系统及有关生物过程如植被状况、土壤动物^[9,10]等以及人为因素, 如土地利用^[11]、森林砍伐^[12]和环境污染^[13]等的影响。由于土壤呼吸不仅对环境因子变化敏感, 而且具有高度的时空变异性^[14], 因此探明同一气候条件下不同生态系统土壤呼吸的变化范围、季节动态及其影响因子, 可为区域土壤碳的估算提供参考依据。

下辽河平原总耕地面积 209 万 hm^2 , 是辽宁省粮食主产区, 其间分布多种生态系统, 本研究利用位于下辽河平原的中国科学院沈阳生态试验站一组长期定位试验, 结合同时期气象观测资料, 对不同土地

利用条件下土壤呼吸变化进行了两年系统全面地观测, 以期推算下辽河平原不同生态系统土壤碳循环排放通量奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地点位于下辽河平原的中科院沈阳生态试验站 ($41^\circ 31' \text{N}$, $123^\circ 24' \text{E}$), 属暖温带半湿润大陆性气候, 年平均温度 $7^\circ \text{C} \sim 8^\circ \text{C}$, $\geq 10^\circ \text{C}$ 活动积温为 $3\ 300^\circ \text{C} \sim 3\ 400^\circ \text{C}$, 太阳总辐射量为 $5\ 410 \sim 5\ 600 \text{ kJ/cm}^2$, 年降雨量为 700 mm, 干燥度 0.9, 为半湿润向半干旱过渡区, 无霜期为 147 ~ 164 d。

1.2 田间试验设计

试验设 7 个处理, 分别代表 3 种生态系统, 具体如下: 农田生态系统: ① CK, 不施任何肥料; ② NPK, N 肥用量 150 kg/hm^2 , P 肥用量 25.0 kg/hm^2 , K 肥用量 60.0 kg/hm^2 ; ③ 化肥 NPK + M, NPK 化肥配施循环猪圈肥, 其中 NPK 用量同处理 ②, 循环猪圈肥为每年 80% 收获产品经喂饲 - 堆腐后以猪圈肥形式返回本处理, 有机肥、P 肥、K 肥与 30% N 肥播种期作为基肥施入, 70% N 肥于 6 月中下旬玉米拔节期追施, 农田生态系统种植作物均为玉米。草地生态系统: ④ 裸地, 指每年数十次铲除地表草芽, 保持地表无植被, 呈裸露状态; ⑤ 每年收获移出, 指撈荒后任杂草等植被自然生长, 但每年秋季收割地上

收稿日期: 2009-03-19

基金项目: 中国科学院创新项目 (KZCX2 - YW - 407, KZCX2 - YW - 405); 自然科学基金项目 (40701067); 国家科技支撑计划课题“东北黑土区地力衰减农田综合治理技术模式研究与示范” (2008BADA7B08)

作者简介: 宇万太 (1964 -), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 研究员, 主要从事农业生态系统物质循环研究。

通讯作者: 马 强 (1978 -), 男, 辽宁鞍山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业生态系统水分、养分管理研究。E-mail: qma@iae.ac.cn。

植被,测生物量,分析带走的养分量,上述处理试验开始年份均为 1990 年;⑥荒地,1995 年前为杨树林地,1995 年洪水淹没之后变为荒地,之后一直处于自然杂草状态。人工林生态系统:⑦人工林,试验开

始为 1988 年,种植杨树。

1.3 试验地基本情况

试验地土壤为潮棕壤,2001 年测定土壤呼吸之前各处理土壤基本理化性质见表 1。

表 1 试验地的基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical factors of study site

处理 Treatments	全碳 (g/kg) Total C	全氮 (g/kg) Total N	全磷 (g/kg) Total P	全钾 (g/kg) Total K	速效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	pH
CK	10.77	0.92	0.35	15.9	2.64	88.10	6.4
NPK	11.40	0.97	0.43	16.1	10.64	102.60	6.3
NPK + M	11.83	1.13	0.46	16.4	15.11	107.40	6.3
裸地 Bare land	11.71	0.88	0.43	16.5	11.66	110.54	6.4
每年收获移出 Moving land	11.54	1.20	0.44	16.2	7.26	115.25	6.5
荒地 Waste land	12.59	1.13	0.48	17.1	9.59	123.10	6.7
人工林 Plantation	10.28	0.89	0.41	14.6	4.98	118.38	6.6

1.4 研究方法

1.4.1 常规理化性质测定方法 土壤全碳、全氮用元素分析仪测定 (Elementar III, 德国); 全 P 采用 Na_2CO_3 熔融, 钼锑抗还原比色法; 全 K 采用 NaOH 熔融, 火焰光度法; 速效 P 采用 Olsen 法; 速效 K 采用乙酸铵浸提, 火焰光度法; pH 采用酸度计, 水:土 = 2.5:1。每次测定时,要同时测定土壤含水量。同时测定该天的土壤温度(分地表和 5 cm 两个层次,及早 8 点、中午 14 点和晚 20 点 3 个时刻)。

1.4.2 土壤呼吸测定方法 土壤呼吸测定时间从 2001 年 4 月 16 日至 2002 年 10 月 30 日,跨 2 个玉米生育期,每隔 15 d 左右进行 1 次测定,共测定 29 次;每次各试验处理均采集 3 个新鲜土壤样品,每个土壤样品为 5 点混合,采样深度为 20 cm,过 2 mm 筛,采用静态碱液吸收法测定土壤呼吸量,即称取 20 g 新鲜土壤于培养瓶中,在土壤自然湿度条件下 28℃ 密闭恒温培养 24 h,利用 NaOH 吸收释放的 CO_2 ,用标准 HCl 滴定剩余的 NaOH;另设不加土壤的空白对照,通过两者之差计算出土壤呼吸强度。滴定时用 BaCl_2 溶液做 Na_2CO_3 的沉淀剂,用酚酞作指示剂,由粉红色滴至无色,完成土壤呼吸强度测定。每个土壤样品 2 次重复,由此,图 1 与图 2 中每一点为 6 个数据的平均值。由于样品从采集到实验室培养,中间间隔时间较短,对土壤呼吸强度不会产生大的影响。测定土壤呼吸的同时,利用烘干法测定土壤样品的干率。计算土壤呼吸速率公式如下:

$$F = \frac{(V_0 - V_1) \times N_{\text{HCl}} \times 44 \times 10^3}{2W}$$

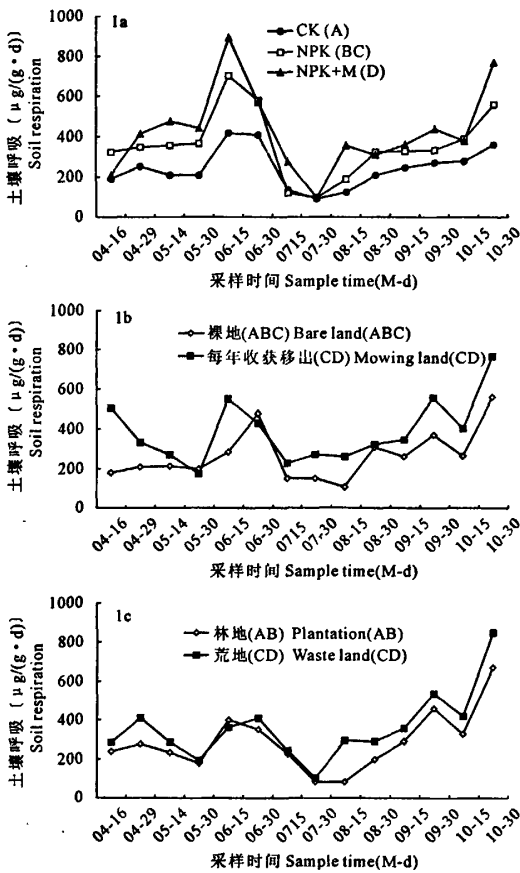
式中, F 为土壤呼吸速率 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$]; V_0 为空白滴

定时消耗标准 HCl 的体积 (mL); V_1 为样品滴定时消耗标准 HCl 的体积 (mL); N_{HCl} 为标准 HCl 浓度 (mol/L); 44 为二氧化碳的摩尔质量 (g/mol); W 为烘干土质量 (g)。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸的季节变化

各生态系统土壤呼吸量季节变化列于图 1 和图 2,从图中可以看出,无论是何种生态系统,土壤呼吸均存在明显季节变化。对农田生态系统而言(图 1a 和图 2a),随着冬季的结束,土壤温度升高,土壤水分含量逐渐下降,此时土壤呼吸强度有一个上升的过程,之后,随着土壤湿度的进一步降低,土壤呼吸转而下降,下降的幅度取决于土壤湿度的变化,湿度变化大,则土壤呼吸下降幅度也大;6 月中下旬,追肥后土壤呼吸达到一个较高水平,而后迅速降低,这是由于追施氮肥过程对土壤的扰动刺激了土壤呼吸^[15],也为土壤中微生物提供了充足的碳源和氮源,土壤微生物活动加强,促进了有机物分解,导致土壤呼吸速率增加^[16],进入 7~8 月份之后,随温度继续升高,土壤呼吸最适水分含量随之升高^[17],但由于这一时期该地区降水波动大,水分条件严重制约了土壤呼吸作用,使这一时期土壤呼吸强度迅速下降。2001 年与 2002 年相比农田生态系统土壤呼吸最高值出现较早(6 月 15 日),NPK + M、NPK 和 CK 处理的呼吸强度分别为 896、703 和 421 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,而 2002 年 NPK + M 最高值分别出现在 8 月 7 日与 10 月 3 日,NPK 的最高值出现在 5 月 15 日,同时 NPK + M 处理也有较高土壤呼吸强度,这些



(图例括号中字母不同表示不同处理土壤呼吸强度差异显著, $P < 0.05$, 下同。

Letters in the bracket mean significant difference at $P < 0.05$ level, and they are the same in the follows.)

图 1 2001 年不同利用条件下土壤基础呼吸季节变化

Fig.1 Seasonal fluctuation of soil basic respiration rate with different management systems in 2001

均与相应时期土壤水分含量密切相关,土壤呼吸最高值出现时期,土壤水分含量无一例外达到该年份的极值,尤其 2002 年土壤水分从 7 月 10 日的最低值逐渐回升,土壤呼吸速率,特别是 NPK + M 处理迅速升高,并达到最大值,说明在温度与养分条件得到满足情况下,水分成为影响土壤呼吸的关键因子。同样情况出现在土壤呼吸速率较低情况下,2001 年 7 月 30 日 NPK + M、NPK 和 CK 处理的呼吸强度降至全年最低,分别为 $97 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 、 $97 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$ 和 $92 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,此时农田土壤水分含量最低(图 3a),2002 年,7 月 10 日土壤含水量降至最低,土壤呼吸强度亦为最低,NPK + M 处理和 NPK 处理分别为 193 、 $172 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{d})$,而后随土壤水分条件改善,土壤呼吸速率显著提高。2002 年 CK 处理因无化学养分投入且土壤水分变化相对平稳,致使 CK 土壤呼吸季节波动

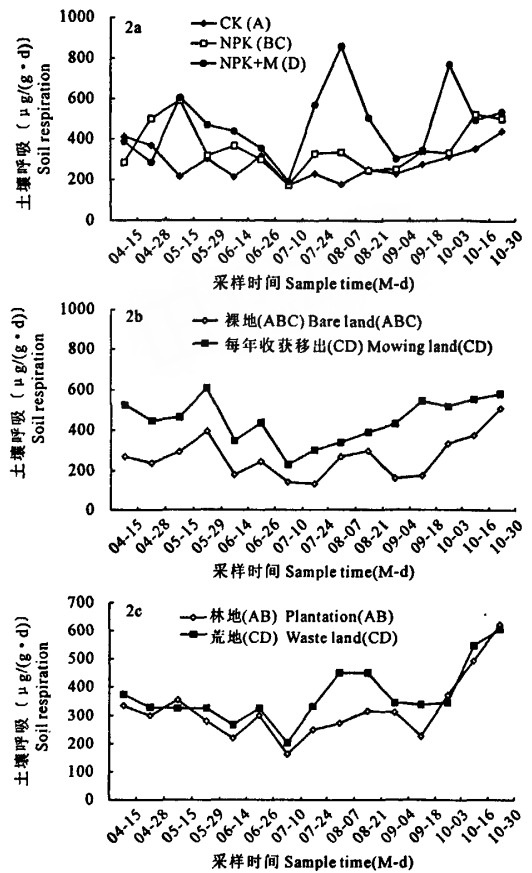


图 2 2002 年不同利用条件下土壤基础呼吸季节变化

Fig.2 Seasonal fluctuation of soil basic respiration rate with different management systems in 2002

较小,但其最低值仍出现在农田水分含量最低的这一时期;进入 10 月之后,下辽河平原通常会有一个“小阳春”,即土壤温度不致过低导致微生物停止活动,土壤呼吸所需水分条件要求也较易满足,加之秋季植被返还土壤,有机物量增多,这些因素共同作用使土壤呼吸也有一定幅度上升。从 2 年结果来看农田生态系统土壤呼吸季节变化规律存在差异,2 年间呼吸速率最高与最低值出现时期不同,这主要受温、湿度与土壤养分及作物生长等共同作用影响。2001 年不同施肥处理土壤呼吸变化趋势基本同步,而 2002 年 NPK + M 处理土壤呼吸波动较 NPK 及 CK 处理更大,且变化趋势也并不完全同步,可见养分间差异在这一年对土壤呼吸的影响更为显著。同时,不同施肥处理 2002 年平均土壤呼吸速率均大于 2001 年,NPK + M、NPK 与 CK 处理 2 年的平均呼吸

速率分别为:473、360、285 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 和 429、359、244 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$,且前者土壤呼吸波动较小。

林地和草地土壤呼吸强度变化幅度没有农田生态系统高,出现峰值的时间也不同,但变化趋势基本一致(图 1b,1c 和 2b,2c),2001 年土壤呼吸分别在 6 月中下旬和 10 月出现高峰,而 2002 年除荒地处理外,其它处理峰值分别出现在 5 月中旬至 6 月上旬的初夏和 10 月,由于荒地处理土壤营养条件较好,在水分条件改善的 8 月,其土壤呼吸迅速加强,出现了第一个峰值,其与 NPK+M 处理相似,且强度持续时间长于 NPK+M 处理。造成 2002 年土壤呼吸强度峰值较 2001 年出现早的原因可能是由于 2002 年 6 月各旬 0~5 cm 土层温度较 2001 年低 3℃~5℃,致使本该有所增强的土壤呼吸强度未能充分体现,使 2002 年 5 月下旬至 6 月上旬土壤呼吸表现出较高峰值,且 2001 年由于 5 月中下旬土壤水分持续偏低,严重影响了土壤呼吸作用,导致 6 月中下旬土壤

呼吸增强表现得更为显著;这也从另一个角度说明温度和湿度是影响土壤呼吸强度的两个重要因素,特定条件下二者相互促进,同时亦可能表现出相互制约作用^[18]。与农田生态系统不同的是,两生态系统土壤呼吸的最高值均出现在 10 月,造成这种现象的原因是由于秋季林地和草地归还到土壤中的有机物料增多且集中,此时土壤温、湿度相对适宜,有机物料分解迅速,因此释放出较多的 CO_2 ,表现出较高呼吸强度。不同生态系统间,草地生态系统土壤呼吸强度以每年收获移出处理最高,而林地土壤呼吸强度仅高于裸地处理,说明林地虽有一定有机物料归还,但归还量仍不及每年收获移出与荒地处理。各处理 2001 年平均土壤呼吸速率均低于 2002 年,2 年林地、荒地、每年收获移出与裸地平均土壤呼吸速率分别为 286、360、387、266 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 和 321、371、450、267 $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot\text{d})$ 。

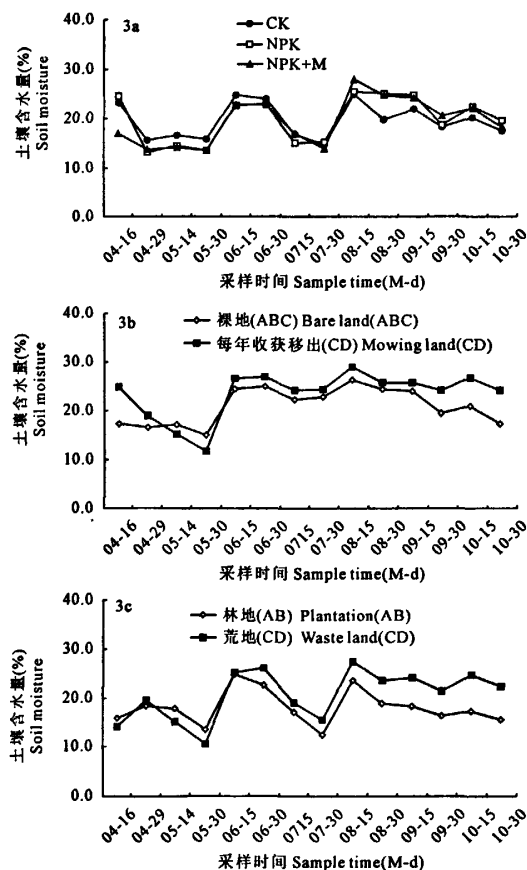


图 3 2001 年不同施肥处理 0~20 cm 土壤含水量季节变化
Fig.3 Seasonal fluctuation of soil moisture at 0~20 cm depth with different management systems in 2001

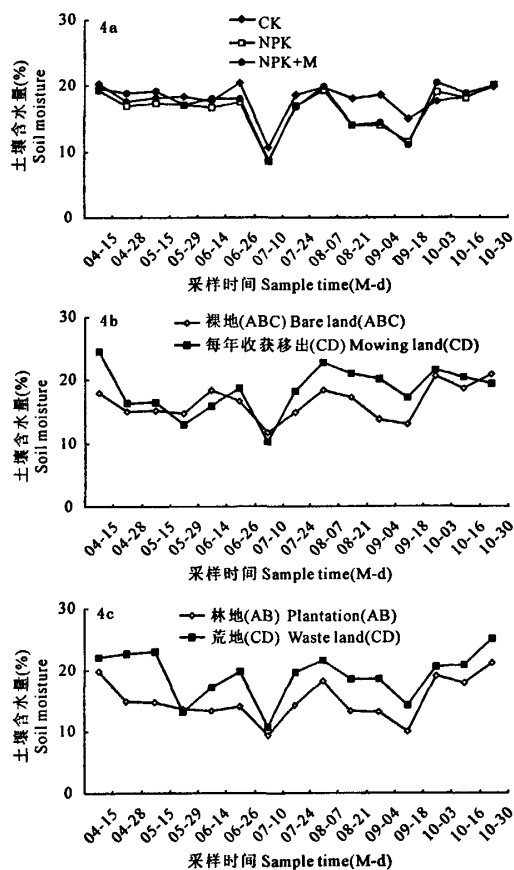


图 4 2002 年不同施肥处理 0~20 cm 土壤含水量季节变化
Fig.4 Seasonal fluctuation of soil moisture at 0~20 cm depth with different management systems in 2002

通过比较 3 种生态系统发现,受人类活动影响大的生态系统,土壤呼吸强度变化频繁且波动大,而受人类活动干扰小的生态系统,例如林地,土壤呼吸强度变化比较平稳,波动幅度不大,这主要是由于林地土壤温、湿度变化不像农田生态系统那样剧烈^[19],季节间农田土壤湿度平均变异系数为 22.3%,而林地为 19.6%,使林地土壤呼吸强度虽有变化,但总体比较平稳。

2.2 影响土壤呼吸的因素

2.2.1 土壤湿度和温度 土壤基础呼吸来自土壤中生物,主要是微生物的生命活动,因此,各种影响土壤生物活动的因素如土壤温度、湿度、有机碳源等均可影响土壤呼吸强度。

上层土壤的湿度随降水季节变化而剧烈波动(图 3.4),通常一年中有若干时段土壤湿度可下降到相当低的水平,抑制了土壤呼吸的正常进行,直接导致土壤呼吸作用减弱,如 2001 年 5 月和 7 月中、下旬,2002 年 7 月中旬和 9 月下旬,农田耕层的土壤湿度均很低,这些时段农田耕层土壤的呼吸均较弱;草地和林地的土壤湿度变化不如农田剧烈,土壤呼吸的波动较农田相对平缓。

以往研究发现,温度也是影响土壤呼吸作用最为直接的因子^[20,21],农田土壤温度随着季节的变化,呈现有规律的波动,与土壤呼吸的关系也相当密切,根据测定的土壤呼吸强度与表层土壤温度和 5 cm 深度土壤温度相关分析,得到表 2。总体上,本研究中土壤呼吸速率均有随温度升高而降低的趋

势,在受外界养分供给影响较少的处理表现尤为明显。其中对于农田生态系统而言,仅对照处理与土温存在相关性,而 NPK 处理或 NPK + M 处理土壤呼吸强度与土壤温度之间的相关性未达到显著水平。但这种相关性在低温时的拟合效果明显好于高温时的拟合效果,温度较低时,土壤呼吸速率的散点聚集在拟合曲线附近,随着温度的升高,土壤呼吸速率的散点却渐渐发散开来^[22],这说明在温度较低时,根系和土壤微生物的代谢活动主要受温度变化控制;随温度升高,其不再是限制因子,此时根系和土壤微生物的生命活动更易受到其它因素的影响和制约^[23]。同时,随着温度的升高,地表植被逐渐进入旺盛生长期,此时作物对土壤养分吸收能力已达全年最高水平,致使微生物缺乏足够的养分维系其高强度的生命活动,且这一时期土壤水分波动较大,使土壤呼吸强度降低;而在春秋两季,由于温度较为适宜,养分状况较好,多种因素共同作用下土壤呼吸强度可达较高水平,这也与下辽河平原地区秋季“小阳春”气象条件的出现有关。可见在野外条件下养分条件与温度共同影响着土壤呼吸作用,这亦可由农田生态系统中 NPK 与 NPK + M 处理其土壤呼吸速率与温度间关系看出。虽这两个处理也具有上述土壤养分被植物吸收等自然过程,但其土壤呼吸速率却与温度无其他处理所呈现的相关性,说明施肥与追肥等养分管理措施明显影响了土壤呼吸的季节变化过程,使其与自然状况相比存在明显差异,可见养分对土壤呼吸的影响作用不容忽视。

表 2 土壤呼吸强度与土壤表层和 5 cm 土层温度的关系

Table 2 Relationship of soil respiration with temperature of surface soil and 5 cm deep soil

土层 Soil depth	处理 Treatments	2001		2002	
		回归方程 Regression equation	R^2	回归方程 Regression equation	R^2
地表 Surface	CK	$y = -7.58x + 420.7$	0.23*	$y = -8.48x + 462.0$	0.59**
	NPK	$y = -11.86x + 634.7$	0.20	$y = -6.66x + 498.8$	0.18
	NPK + M	$y = -12.48x + 719.2$	0.14	$y = -4.37x + 564.8$	0.03
	裸地 Bare land	$y = -12.32x + 553.3$	0.36*	$y = -7.95x + 433.4$	0.32*
	每年收获移出 Moving land	$y = -19.62x + 843.6$	0.59**	$y = -8.43x + 626.0$	0.33*
	荒地 Waste land	$y = -23.21x + 900.1$	0.68**	$y = -8.85x + 555.8$	0.41**
	林地 Plantation	$y = -19.03 + 729.4$	0.60**	$y = -11.87x + 568.9$	0.62**
5 cm 深度 土层 5 cm Depth	CK	$y = -7.12x + 389.9$	0.22*	$y = -10.23x + 477.9$	0.72**
	NPK	$y = -11.74x + 598.7$	0.19	$y = -9.09x + 531.2$	0.29
	NPK + M	$y = -11.24x + 658.6$	0.11	$y = -2.94x + 528.8$	0.01
	裸地 Bare land	$y = -10.13x + 473.6$	0.23*	$y = -9.76x + 451.4$	0.41**
	每年收获移出 Moving land	$y = -19.42x + 784.0$	0.56**	$y = -10.76x + 653.0$	0.46**
	荒地 Waste land	$y = -21.84x + 806.2$	0.58**	$y = -9.37x + 547.7$	0.39*
	林地 Plantation	$y = -17.81x + 650.5$	0.51**	$y = -13.21x + 570.1$	0.65**

注: * 表示统计检验达到显著水平($P < 0.05$); ** 为极显著水平($P < 0.01$)。

Note: * denotes a significant difference at $P < 0.05$; ** denotes a significant difference at $P < 0.01$.

2.2.2 植被 植被主要是通过影响上层土壤湿度和土壤中易降解有机物料的含量来影响土壤中生物的活动,从而改变土壤的呼吸强度。如上所述,农田上层土壤的湿度变化剧烈,可引起土壤呼吸明显的季节波动;草地和人工林生态系统土壤湿度变化相对较小,土壤呼吸波动幅度降低。

在提供新鲜有机物料的作用方面,草地生态系统中的荒地处理、每年收获移出处理与农田生态系统中 NPK + M 处理土壤每年可获得较多的新鲜有机物料,土壤上层的有机碳含量较高,土壤基础呼吸的平均强度也较高。林地处理土壤每年获得的新鲜有机物料较少,造林 12 a 后上层土壤的有机碳含量较低,土壤呼吸强度也维持在较低水平。裸地土壤呼吸强度研究结果颇令人困惑,保持全年地表光裸,势必大大减少归还土壤的有机碳量,土壤有机碳含量和基础呼吸强度必定十分低下。然而经 12 a,裸地土壤的有机碳含量并未下降^[24],土壤呼吸仍保持一定水平。造成这一现象原因可能是:按植被地上、下部生长的一般规律,地面刚刚露出草芽时,其根系早已在土壤中生长期蔓延并形成一定规模的生物量,频繁地铲除地面草芽,加速了草苗根系的死亡,在一年中数十次铲除地面草苗的作业下,草苗根系的生死周转速率明显快于正常植被生长状况,虽然每次铲除后形成的死根量有限,但一年中有数十次草苗的死根归还土壤,推测其总量仍相当可观,因而尽管裸地处理已进行 12 a,但上层土壤的有机碳含量未明显下降(表 1),土壤基础呼吸仍可保持一定强度。

2.2.3 农田施肥 在其他影响因子相似情况下,施肥是导致土壤呼吸强度差异的重要因素。施肥的作用一是可能直接施入土壤有机碳,如施用有机肥,二是施肥可提高作物根系的活性与生物量,从而影响土壤的有机碳含量和呼吸强度。本研究中对不同施肥制度而言,土壤呼吸强度的变化顺序为 NPK + M > NPK > CK,这一研究结果与前人的研究结果是一致的^[25],从表 1、图 1a 可以清楚看出,NPK + M 处理,耕层土壤有机碳含量较高,土壤呼吸强度也较高。NPK 处理虽未直接施入有机碳,但其作物籽实产量比 CK 处理提高 74%^[26],相信其根系生物量也会显著超过 CK 处理,因此,土壤有机碳含量和基础呼吸强度均可超过对照处理^[27,28]。

2.2.4 有机碳输入土壤的季节过程 在温带的植物生长季,植物的根系分泌物和根毛脱落物随时为土壤输入有机碳供微生物利用,但大量的有机碳输入则是在 10 月前后。此时,农作物成熟收割,根系死亡、腐解;自然植被叶片枯黄、凋落,一部分根系也

开始死亡、腐解,这些集中输入土壤的新鲜有机物料为土壤微生物提供了丰富的有机碳源,土壤呼吸强度得以明显提高。从图 1、图 2 可见,不论植被类型如何,9、10 月间土壤基础呼吸均有明显的上升过程,这主要是因为丰富的有机物料供给为土壤呼吸提高了充足的能源。由于植物输入土壤的这些有机物料不可能在土壤冻结前全部分解完毕,一部分可留存至翌年春季,因此,除非春季少雨土壤干旱,否则土壤呼吸也可在 5、6 月间保持较高水平。

3 讨论

土壤基础呼吸的强度及其季节动态受许多因素控制,当采用野外取样、室内培养测定的方法时土壤呼吸强度主要受土壤温、湿度和土壤中新鲜有机碳源丰富程度的影响。本研究所得结果与相关研究相比^[17],数据范围基本相当,甚至略高于其研究结果,究其原因可能是由于试验设计差异,同时不同气候区和土壤类型区导致土壤类型、土壤有机碳含量及土壤微生物之间差异也是造成试验结果间差异的重要原因。

自然条件下,土壤呼吸强度受土壤温度、湿度影响较大^[29,30]。因此,在初夏水分与温度条件均能得到满足情况下,土壤呼吸会达到一个较高水平,如 2001 年各处理夏季土壤呼吸峰值出现于 6 月 15 日,而 2002 年各生态系统土壤呼吸峰值普遍出现在 5 月中下旬,均在水分、温度条件适宜情况下出现,两年间土壤呼吸峰值出现的时间不同也主要是因为湿度或温度二者其一不能达到土壤呼吸的最适范围所造成;同时,受人类活动影响较小的生态系统,其土壤呼吸强度与温度的相关性好于农田生态系统。生态系统类型与管理方式差异同样对土壤呼吸有着显著的影响,草地生态系统与人工林生态系统由于受外界扰动较小,其土壤湿度等季节性变动较小,土壤呼吸季节变化也较农田生态系统平缓,但由于人工林获得有机物料归还量较少,上层土壤的有机碳含量较低,土壤呼吸也维持在较低水平;农田生态系统土壤呼吸强度明显受施肥制度的影响,施肥供给土壤中微生物充足氮源,尤其是有机肥的施用还直接提供了充足的碳源,增强了土壤微生物活性,促进了有机物分解,导致土壤呼吸速率增加^[16]。在中国东北温带季风气候区,影响土壤基础呼吸的主要因素有水、热的季节变化和土壤中新鲜有机碳源的丰富程度,秋季作物收割、草木凋零后,根系开始死亡、腐解,集中向土壤输入丰富的有机碳源,加之此时土壤温湿度并不对微生物活动和有机物分解构成严重的

限制,致使土壤基础呼吸在 10 月仍可保持在较高水平。也正是这几方面综合作用使秋后“小阳春”季节土壤呼吸出现一个高峰,但不同生态系统,这一过程将会有所不同。

土壤呼吸是全球碳循环的重要组成部分,也是陆生植物固定的 CO_2 返回大气的主要途径^[31],大气中近 10% 的碳由土壤产生,其微小变化就可能对全球碳平衡产生重要影响^[32]。本文正是结合长期定位试验,针对下辽河平原地区不同生态系统土壤呼吸强度及其季节变化进行了研究,从全年平均水平来看,施用化肥及频繁的人为扰动提高了土壤呼吸强度,尤其是有机肥的施用使该处理成为农田生态系统中土壤呼吸强度最高的一种施肥管理模式;与农田生态系统相比,除裸地处理外,草地生态系统土壤呼吸强度与 NPK 处理相当,裸地处理土壤呼吸强度与 CK 处理相似,二者均处于较低水平,而人工林生态系统土壤呼吸强度介于裸地与荒地之间。这些均为准确估算该地区不同生态系统 CO_2 排放、发展合理的耕作与施肥制度以及构建适宜的区域生态景观提供了科学依据。

4 结 论

1) 农田生态系统土壤呼吸每年出现两次峰值,分别在 5 月中下旬至 6 月中下旬的初夏和 10 月末的秋季,这是土壤温湿度变化、养分输入和有机物料归还共同作用的结果,各处理土壤呼吸强度顺序为 $\text{NPK} + \text{M} > \text{NPK} > \text{CK}$;草地生态系统与人工林生态系统土壤呼吸强度最大值出现在秋季,即有机物料集中归还期。

2) 农田生态系统土壤呼吸的季节变化波动大于受人类活动影响小的人工林与草地生态系统,这是缘于人为扰动导致土壤温湿度变化剧烈,进而影响了土壤呼吸强度;同时受人为扰动少的生态系统其土壤呼吸强度与土壤温度之间也具有更好的相关性。

3) 地上植被影响着土壤温、湿度,更直接影响归还土壤的有机物料量,草地生态系统中以每年收获移出处理土壤呼吸强度最高,裸地最低,而人工林生态系统土壤呼吸强度介于裸地与荒地之间;化肥输入也有显著提高土壤呼吸的作用;可见,养分、有机物料输入和人为扰动是影响土壤呼吸的重要外界原因。

参 考 文 献:

[1] Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the pro-

portion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1970, 2: 9—18.

- [2] Neilson J W, Pepper I L. Soil respiration as an index of soil aeration [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54: 428—432.
- [3] Reinert W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests [J]. *Ecology*, 1968, 49: 471—483.
- [4] 贾 夏, 赵永华, 韩士杰. 全球大气 CO_2 浓度升高对土壤微生物的影响 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 443—448.
- [5] Buyanovsky G A, Wagner G H, Gantzer C J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 338—344.
- [6] Schlentner R E, Cleve K V. Relationships between CO_2 evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1985, 15: 97—106.
- [7] Baath E, Arnebrant K. Growth rate and response of bacterial communities to pH in limed and ash treated forest soils [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(8): 995—1001.
- [8] Farrell D A, Greacen E L, Gurr C G. Vapor transfer in soil due to air turbulence [J]. *Soil Science*, 1966, 102(5): 305—313.
- [9] Bohlen P J, Edwards C A. Earthworm effects of N dynamics and soil respiration in microcosms receiving organic and inorganic nutrients [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1995, 27(3): 341—348.
- [10] Kretschmar A, Ladd J M. Decomposition of carbon-14 labeled plant material in soil: The influence of substrate location, soil compaction and earthworm numbers [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1993, 25(6): 803—809.
- [11] Chagas C I, Santanoglia O J, Castiglioni M G, et al. Tillage and cropping effects on selected properties of an argiudoll in Argentina [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1993, 26(5—6): 643—655.
- [12] Fernandez I J, Yowhan S, Chuck R, et al. Soil carbon dioxide characteristics under different forest types and harvest [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 1115—1121.
- [13] Komulainen M, Mikola J. Soil processes as influenced by heavy metals and the composition of soil fauna [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1995, 32(1): 234—241.
- [14] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 183—207.
- [15] 戴万宏, 王益权, 黄 耀, 等. 农田生态系统土壤 CO_2 释放研究 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(12): 1—7.
- [16] 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]. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1698—1705.
- [17] 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.
- [18] 孟 磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量与土壤呼吸影响 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 687—692.
- [19] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1537—1542.

- [20] 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.
- [21] 李红生,刘广全,王鸿喆,等.黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J].生态学报,2008,28(9):4009—4106.
- [22] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J].植物生态学报,2003,27(2):202—209.
- [23] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.典型温带草原群落土壤呼吸温度敏感性与土壤水分的关系[J].生态学报,2004,24(4):831—836.
- [24] 宇万太,马 强,赵 鑫,等.不同土地利用类型下土壤活性有机碳库变化[J].生态学报,2007,26(12):2013—2016.
- [25] 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.
- [26] 宇万太,赵 鑫,张 璐,等.长期施肥对作物产量的贡献[J].生态学报,2007,26(2):2040—2044.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 刘洪升,刘华杰,王智平,等.土壤呼吸的温度敏感性[J].地理科学进展,2008,27(4):51—60.
- [30] 刘 惠,赵 平.华南丘陵区典型土地利用类型土壤呼吸日变化[J].生态环境,2008,17(1):249—255.
- [31] William H S, Jeffrey A A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000,48:7—20.
- [32] Raich, Tufekcioglu. Vegetation and soil respiration: correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000,48:71—90.

Seasonal fluctuation of soil respiration with different ecosystems in the lower reaches of the Liaohe River Plain

YU Wan-tai, MA Qiang, SHEN Shan-min, ZHANG Lu, JIANG Zi-shao

(Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China)

Abstract: Soil respiration is one of important sources of CO₂ emitted from biosphere to atmosphere. Based on a long-term monitor results, seasonal fluctuation and main influence factors of soil respiration with different ecosystems in the lower reaches of the Liaohe River plain were analyzed. The results showed that there was a similar seasonal pattern for soil respiration with different ecosystems. The first peak value was in summer with suitable hydrothermal condition, and the second was in autumn. Fertilization could increase soil respiration in agro-ecosystem and the highest soil respiration was in NPK + M treatment, followed by NPK, and the lowest in CK. Compared with CK treatment, soil respiration was increased by 70% and 40% for NPK + M and NPK treatments, respectively. Soil respiration in grass ecosystem was determined by the rate of organic materials returning and human activities. The changes of soil respiration intensity was mowing land > waste land > bare land. Although it had some residues backed to plantation ecosystem, soil respiration in plantation system was still lower than in agro-ecosystem and grass ecosystem.

Keywords: soil respiration; ecosystem; seasonal fluctuation