

不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响*

乔云发¹ 苗淑杰² 王树起¹ 韩晓增^{1†} 李海波¹

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 哈尔滨 150081)

(2 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150059)

摘要 基于中国科学院海伦生态实验站的长期定位试验, 采用静态箱式法研究了玉米生长期间不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响。结果表明, 在玉米生长期间, 土壤呼吸速率表现出明显的季节性变化, 分别在出苗后 23、37、50、63、87、110 d 出现峰值, 其中最大峰值出现在出苗后第 87 天, 其后土壤呼吸速率呈下降趋势, 直到玉米收获, 而根际呼吸速率的季节性变化规律与土壤呼吸相似, 土体呼吸速率则主要受气温变化影响; 玉米生长显著影响土壤呼吸, 土壤呼吸速率的变化基本与玉米生长规律相一致, 随生长而增加, 随衰老而减小; 施肥对土壤呼吸速率、根际呼吸速率有明显的影响, 但对土体呼吸速率影响较小, 从整个玉米生长期来看, NPKOM 处理的土壤呼吸速率和根际呼吸速率最高, 其中 NPKOM 处理土壤呼吸速率为 $C 27.5 \sim 474 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, NPK 处理和 NP 处理变化范围相近, 分别为 $C 25.9 \sim 339 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $C 29.5 \sim 358 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, NK 处理与 CK 处理变化范围分别为 $C 28.4 \sim 208 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $C 22.1 \sim 184 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$; 施肥对土壤呼吸量和根际呼吸量有显著的影响, 表现为 $\text{NPKOM} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{CK} > \text{NK}$; 在整个玉米生育期中, 土壤呼吸累积量在拔节孕穗期和乳熟期出现两个峰值, 表现为双峰曲线的变化规律, 而土体呼吸累积量只在拔节孕穗期出现峰值, 呈抛物线型, 根际呼吸量在苗期最低, 乳熟期最高, 乳熟期后, 根际呼吸量下降。

关键词 土壤呼吸; 根际呼吸; 土体呼吸; 长期施肥; 玉米

中图分类号 S154 **文献标识码** A

全球气候变暖是当今世界面临的重要环境问题, 其主要是由于大气中温室气体 (CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等) 浓度不断增加引起的, 其中二氧化碳 (CO_2) 被认为是引起全球气候变暖的重要的温室气体之一, 而且大气中 CO_2 的浓度每年还在以 0.5% 的速度递增^[1~4]。农田作为一种主要的土地利用方式, 是 CO_2 排放重要的源和汇^[2]。土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节, 也是陆地生态系统将碳素以 CO_2 形式归还到大气的主要途径, 估计全球每年达 $75 \text{ Pg C}^{[5]}$, 对其进行系统精确的测定已成为全球气候变化研究的重点。土壤呼吸包括三个生物学过程, 即土壤微生物呼吸、植物根系呼吸和土壤动物呼吸, 和一个非生物学过程即含碳矿物质氧化与分解释放^[6, 7], 在生态系统中, 土壤呼吸主要受植物类型和植物生长的影响^[8, 9], 施肥是提高植物产量的关键措施之一, 施肥必然影响植物生长, 但土壤施肥与

土壤呼吸的关系方面的报道尚比较少见^[10]。近年来, 随着全球气候变化研究成为公众和科学界关注的热点之一, 土壤呼吸与大气温室效应关系已经受到土壤学家的关注。国外对土壤呼吸的研究开展较早, 文献较多^[11], 目前国内对森林生态系统、青藏高原和草原生态系统的 C 排放研究已多见报道^[12], 而对农田生态系统特别是黑土农田的研究还很少。农田系统是受人类活动影响较大的陆地生态系统, 受长期施肥的影响, 必然引起土壤中微生物群落结构与活性的变化, 进而影响土壤有机碳的转化及 CO_2 的排放。探讨农田系统的土壤呼吸, 精确测定 CO_2 的排放通量, 对于揭示大气“失踪的碳”产生的原因以及寻找减缓土壤机碳分解的对策和措施具有重要的指导意义。因此, 研究土壤呼吸对长期施肥的响应机制将为深入了解农田系统的土壤呼吸提供重要的理论支持。

基于上述分析, 本试验研究了东北松嫩平原黑

* 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2005CB121101)、黑龙江省自然科学基金项目 (C200615) 和中国科学院东北地理与农业生态研究所学科前沿领域项目 (KZCX3-SW-NA3-26) 资助

† 通讯作者, E-mail: xdhshzh@mail.hrb.il.cninfo.net

作者简介: 乔云发 (1976~), 男, 黑龙江讷河人, 硕士, 助理研究员, 主要研究土壤碳、氮循环与全球变化。E-mail: qiaoyunfa@163.com

收稿日期: 2007-01-08; 收到修改稿日期: 2007-04-03

土区玉米田长期施肥对土壤呼吸的影响,为东北黑土农田生态系统 CO₂排放通量变化规律、全球气候变化及估算黑土农田生态系统的 CO₂排放量研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于黑龙江省海伦市的中国科学院海伦

农业生态实验站(N47°27',E126°55'),该站处于我国东北黑土区的中心,地形较为平坦,海拔高度 240 m 左右,属于温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,四季分明,雨热同季,年平均气温 1.5℃,10℃活动积温 2 600~2 800℃,无霜期 125~135 d,年降雨量 500~600 mm。试验开始于 1991 年,玉米—大豆—小麦轮作,一年一熟制,当季作物为玉米。供试土壤为典型黑土,土壤母质为第四纪黄土状母质,其土壤基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil (0~20 cm)

土壤 Soil	有机碳 Organic C (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N (mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)
黑土 Black soil	28.0	2.21	1.61	30.2	240	41.2	229

1.2 试验设计

试验共设 5 个处理:(1)无肥(CK);(2)化肥 NP(NP);(3)化肥 NK(NK);(4)化肥 NPK(NPK);(5)化肥 NPK+有机肥(NPKOM),4 次重复,小区面积 63 m²,随机排列。化学氮肥为尿素、磷肥为磷酸二铵、钾肥为硫酸钾,有机肥为腐熟猪粪。有机肥在每年 10 月份秋季整地时一次性施入;大豆和小麦春季播种时全部化肥作基肥;玉米 1/3 氮肥、全部磷钾肥在春季播种时作基肥,剩余 2/3 氮肥在拔节期作为追肥,施肥量见表 2。

表 2 施肥量

Table 2 Fertilization rates (kg hm⁻²)

作物 Crops	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)	OM
玉米 Maize	112.5	45.00	30.00	22 500
大豆 Soybean	20.25	51.75	18.75	22 500
小麦 Wheat	112.5	45.00	30.00	22 500

1.3 样品采集与分析

采用静态箱法采集气体样品,移动采气箱体积为 70 cm×20 cm×9 cm,并配有两个混合器。采样箱底座分两种:一种用于测定土壤呼吸(R_p),玉米根系可以自由进入采样箱底座内;另一种用于测定土体呼吸(R_b),阻止玉米根系进入采样箱底座。

从出苗后第 2 天开始采样,每周采样 2 次,采样时间每周一和周四上午 10:00~12:00 之间,直至玉米成熟。采样时,首先开动混合器,然后将采样箱置于采样底座上,并用水密封,按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 50 ml 注射器从采气箱中部的采气孔插

入,来回抽动 3 次以便完全混匀气体,抽出 20 ml 注入体积为 18 ml 的真空瓶内。采样按区组进行,以减少土壤呼吸的日变化影响,同时测定采样箱内的气温。

将采气瓶带回实验室,使用气相色谱分析仪(Shimadzu GC2010)测定样品中 CO₂浓度。气相色谱用 80/100 目的 Chromosorb102 柱,高纯氮为载气,氢火焰检测器(FID)。

1.4 结果计算

1.4.1 气体排放速率计算

$$F_{CO_2} = \frac{(d_c/d_t) \times V/A \times 273/(273+T)}$$

式中, F_{CO_2} :CO₂排放速率,单位为 C mg m⁻² h⁻¹; ρ :标准状态下 CO₂的密度; (d_c/d_t) :气体浓度随时间的变化率; V :采样箱的有效空间体积,等于 16.8 dm³; A :采样箱所覆盖的土壤面积,等于 0.14 m²; T 为采样时的采样箱内气体温度。

1.4.2 土壤累积呼吸量的计算

$$M = (F_{i+1} + F_i)/2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24$$

式中, M :土壤累积呼吸量; F :CO₂排放速率; i :采样次数; t :采样时间即出苗后天数。

1.4.3 根际呼吸的计算 根际呼吸(R_r)为土壤呼吸(R_p)减去同条件下的土体呼吸(R_b),即:R_r = R_p - R_b。

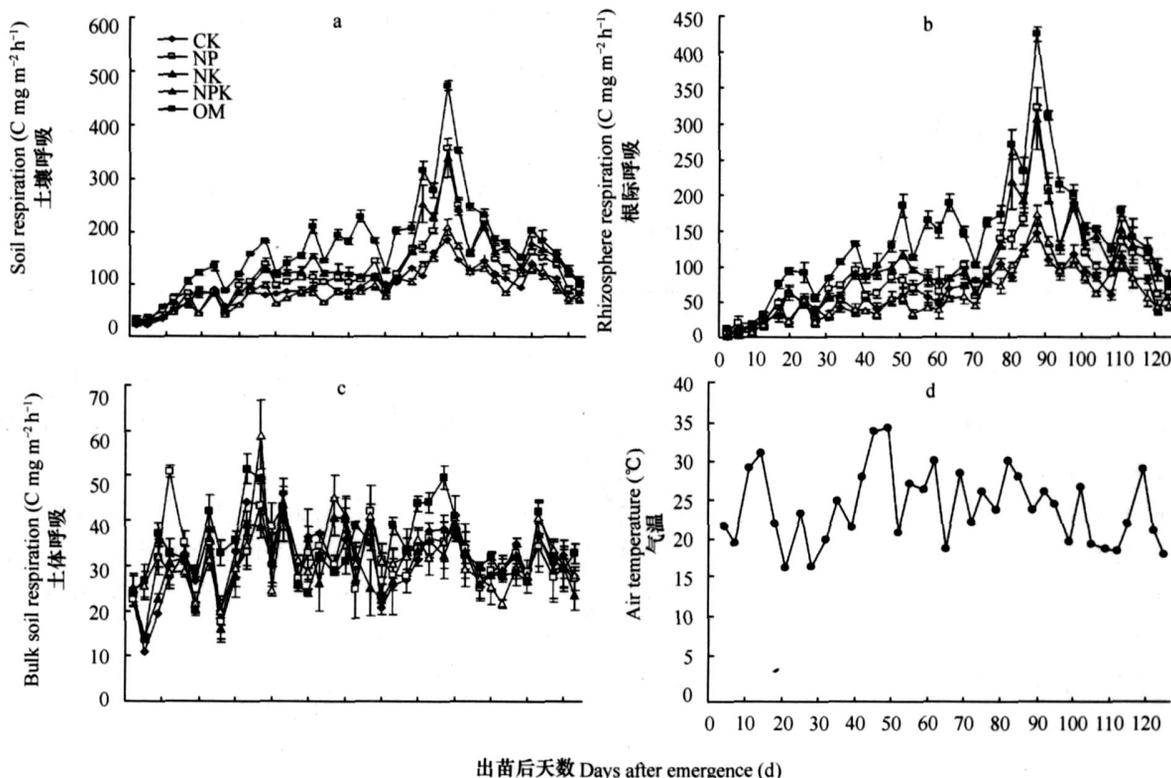
2 结果与分析

2.1 土壤呼吸的季节变化

从图 1a 可见,在种植玉米条件下,土壤呼吸速

率具有一定的季节性变化且与作物生长有着密切联系。玉米出苗 2 d 后,土壤呼吸速率随生长时间延长而出现波动,分别在出苗后 23、37、50、63、87、110 d 出现峰值,其中最大峰值出现在出苗后第 87 天,其后土壤呼吸速率呈下降趋势,直至玉米收获。生育期内,NPKOM 处理的土壤呼吸速率变化范围为 C 27.5 ~ 474 mg m⁻² h⁻¹;NPK 处理和 NP 处理变化范围相近,分别为 C 25.9 ~ 339 mg m⁻² h⁻¹ 和 C

29.5 ~ 358 mg m⁻² h⁻¹;NK 处理与 CK 处理变化范围分别为 C 28.4 ~ 208 mg m⁻² h⁻¹ 和 C 22.1 ~ 184 mg m⁻² h⁻¹。玉米根际呼吸速率的季节变化趋势与土壤呼吸相一致(图 1 b)。而土体呼吸速率变化主要受气温影响,施肥对其影响较小(图 1 c、图 1 d)。不同施肥处理间,NPKOM 处理土壤呼吸速率最大,而 NPK 处理和 NP 处理次之,NK 处理和 CK 处理呼吸速率最小。



a. 土壤呼吸 Soil respiration; b. 根际呼吸 Rhizosphere respiration; c. 土体呼吸 Bulk respiration; d. 气温 Air temperature

图 1 玉米生长期间土壤呼吸速率的变化规律

Fig. 1 Seasonal variation of soil respiration rate throughout the maize growth period

表 3 表明,在玉米各个生长阶段,土壤呼吸速率均显著高于土体的呼吸速率。土壤呼吸速率呈现出单峰曲线变化规律,在抽穗开花期的土壤呼吸速率出现最大峰值,此后,玉米生长开始进入生殖生长,光合产物主要用于地上部生长,转移到根系中的相对减少,土壤呼吸速率逐渐降低。籽粒成熟后,随着光合产物向根系输送量增加,土壤呼吸速率开始增加。整个生育期平均来看,土壤呼吸速率变化规律为 NPKOM > NPK > NP > CK > NK,最大呼吸速率比最小呼吸速率增加 89.2%,其中 NPKOM 处理的土壤呼吸速率显著高于其他各施肥处理,而 NPK 处理与 NP 处理、CK 处理和 NK 处理间差异不大,NP 处理土壤呼吸速率较 NK 处理增加了

36.8%。在玉米生长的不同阶段,土体呼吸速率也表现出明显的季节性变化,但其变化趋势没有土壤呼吸速率变化明显。各施肥处理间,土体呼吸速率与土壤呼吸速率表现略有不同,土体呼吸速率为 NPKOM > NK > NP > CK > NPK。比较来看,NPKOM 处理显著高于其他各施肥处理,最大与最小呼吸速率相差 13.6%,但其他各施肥处理间差异不大,尤其是 NP 处理土体呼吸速率较 CK 处理仅增加了 2.6%,NPK 处理土体呼吸速率较 NP 处理增加了 5.3%,CK 处理土体呼吸速率较 NK 处理增加 3.2%。可见,施用化肥虽然增加了土壤呼吸速率,但对土体呼吸速率的影响不大,而有机肥对增加土体呼吸速率起着非常重要的作用。

表 3 玉米各生长时期的土壤呼吸速率

Table 3 Soil respiration rate at each growing stage (C, mg m⁻² h⁻¹)

处理 Treatments	苗期 Seedling		拔节孕穗期 Elongating booting		抽穗开花期 Earing-flowering		乳熟期 Milky-ripening		成熟期 Ripening		全生育期 Whole	
	土壤 Soil	土体 Bulk	土壤 Soil	土体 Bulk	土壤 Soil	土体 Bulk	土壤 Soil	土体 Bulk	土壤 Soil	土体 Bulk	土壤 Soil	土体 Bulk
	CK	60.4	19.9	94.0	26.1	184	38.3	140	27.0	83.8	27.7	95.3
NP	97.7	17.7	109	24.8	358	35.3	163	28.6	90.6	27.2	125	31.8
NK	61.3	20.0	84.5	30.4	208	35.3	129	28.0	72.5	28.0	91.0	32.0
NPK	83.9	16.0	115	32.2	339	32.3	179	26.6	104	23.6	131	30.2
NPKOM	119	32.8	229	39.0	474	49.6	203	26.7	105	32.8	172	34.3

2.2 不同施肥处理的根际呼吸量变化

根际呼吸是植物根系呼吸和根际微生物分解由植物光合产物转移到根际环境中的部分有机物的微生物呼吸的总和^[13]。在忽略植物生长对土壤有机质分解的激发效应条件下,土壤呼吸总量减去土体呼吸就可以看作是植物根际呼吸^[9]。表 4 表明,玉米各生长阶段,根际呼吸量在 CO₂-C 175 ~ 1 270 kg hm⁻² 之间,苗期根际呼吸量最低,乳熟期最高。苗期开始,由于转移到根的光合产物逐渐增多,根际呼吸的比例逐

渐增大,乳熟期后,大量光合产物转移至籽粒,使根际呼吸量下降。从整个生育期根际呼吸量来看,各处理根际呼吸量变化为:NPKOM > NPK > NP > CK > NK。比较而言,NPKOM 处理根际呼吸量较 NPK 处理增加了 34.8%,NPK 处理较 NP 处理增加了 7.6%,NPK 处理较 NK 处理增加了 68.7%,而 NPK 处理较 CK 处理增加了 58.6%。由此可见,化肥配施有机肥能显著地促进玉米的根际呼吸,而 NPK 配合施用对玉米根际呼吸的效果也好于不施肥和其他施肥处理。

表 4 玉米各生长时期的根际呼吸量及占土壤呼吸的比例

Table 4 Cumulative rhizosphere respiration (C, kg hm⁻²) and contribution of rhizosphere respiration to soil respiration (%) at each growing stage

处理 Treatments	苗期 Seedling		拔节孕穗期 Elongating booting		抽穗开花期 Earing-flowering		乳熟期 Milky-ripening		成熟期 Ripening		全生育期 Whole	
	CRR ¹⁾	%	CRR	%	CRR	%	CRR	%	CRR	%	CRR	%
	CK	175	48.1	443	60.6	525	74.0	598	76.6	248	74.4	1 989
NP	235	52.7	690	68.7	724	78.6	936	83.6	342	81.2	2 927	74.9
NK	142	41.5	396	54.1	474	70.3	616	78.6	243	73.8	1 870	65.6
NPK	205	52.4	792	72.0	794	82.1	976	84.6	388	82.1	3 155	77.3
NPKOM	346	59.4	1 084	77.6	1 127	83.3	1 270	87.1	427	82.6	4 255	80.2

1) CRR: 根际呼吸量 Cumulative rhizosphere respiration

2.3 不同施肥处理的土壤呼吸量和呼吸速率变化

由表 5 知,在玉米生长的 5 个生育期中,每个生育期的土壤呼吸累积量差异较大,在拔节孕穗期和乳熟期出现两个土壤累积峰,表现出双峰曲线的变化规律。而土体呼吸累积量与土壤呼吸累积量不同,玉米 5 个生育期中,只有拔节孕穗期出现峰值,呈抛物线型。生育期内,NPKOM 处理土壤呼吸量显著高于其他处理,为 CO₂-C 5 305 kg hm⁻²;NPK 次

之,为 4 086 kg hm⁻²;NP 处理为 3 907 kg hm⁻²;NK 处理土壤呼吸量远小于上述处理,接近于 CK 处理,分别为 CO₂-C 2 850 和 2 916 kg hm⁻²。长期施用化肥对土体呼吸量的影响较小,CK、NP、NK 和 NPK 处理间差异不显著,但化肥配施有机肥增加了土体呼吸量,NPKOM 处理土体呼吸量高于其他四种施肥处理,为 CO₂-C 1 050 kg hm⁻²。

表 5 玉米各生长时期的土壤呼吸量

Table 5 Cumulation soil respiration at each growing stage (C, kg hm⁻²)

处理 Treatments	苗期 Seedling		拔节孕穗期 Elongating booting		抽穗开花期 Earing-flowering		乳熟期 Milky-ripening		成熟期 Ripening		全生育期 Whole	
	土壤	土体	土壤	土体	土壤	土体	土壤	土体	土壤	土体	土壤	土体
	Soil	Bulk	Soil	Bulk	Soil	Bulk	Soil	Bulk	Soil	Bulk	Soil	Bulk
CK	364	189	730	287	709	184	781	182	333	85	2 916	927
NP	446	211	999	309	920	196	1 120	183	422	80	3 907	980
NK	341	200	724	328	675	201	783	167	326	83	2 850	980
NPK	392	186	1 102	310	969	175	1 154	178	470	83	4 086	931
NPKOM	582	236	1 396	311	1 353	226	1 458	188	516	89	5 305	1 050

3 讨论

3.1 土壤呼吸的季节变化

长期施肥对土壤呼吸季节变化的影响,因作物生长阶段、气候条件、土壤类型、耕作制度、施肥方式和水分管理条件的不同而有所差异。本研究中,影响土壤呼吸季节变化的因素主要为施肥、玉米生长以及气候条件。从玉米生长期期间的土壤呼吸速率变化中(图 1a)可以看出,土壤呼吸速率与玉米生长发育规律相一致,先随玉米生长而增加,到一定时期达到最大,然后随玉米衰老而下降。这主要是由于玉米生长期期间,土壤呼吸的物质基础来源于玉米根系转移至地下的同化产物,当玉米转移至根系的同化产物多时,地下的呼吸作用也旺盛^[10]。植物生长所需要的矿质营养和水分大部分是靠根系从土壤中吸收的,而根系吸收养分和水分则需要消耗代谢产物,这部分能量则由植物地上部分的同化产物提供。所以植物生长与土壤呼吸是相互协调和统一的^[14]。

玉米生长期期间,除了施肥的影响外,土壤呼吸主要受气温和玉米根系两个因素影响。随着玉米的生长,气温对土壤呼吸的影响越来越小,而玉米根系对土壤呼吸逐渐起主导作用。NPKOM 处理和 NPK 处理相比,NPK 配施有机肥对玉米生长的效果要好于 NPK,从而促进玉米生长,根系发达,增加土壤呼吸量;另一方面,施用有机肥不但可以提高土壤中潜在矿化分解的有机碳含量,而且能增强土壤呼吸的强度;施用有机肥还可以增大土壤有机碳的矿化速率常数,加快土壤呼吸的进程,使土壤有机质中的无机养分循环加快,随时满足作物生长对无机养分的需

求,能显著提高土壤养分的有效性,改善土壤的供肥能力。施用有机肥既能促进部分土壤有机碳的快速矿化分解,也能使土壤有机质在土壤中积累,提高土壤有机质的含量,改善土壤的肥力状况,提高土壤的质量。NPK 处理和 NP 处理的土壤呼吸变化相似,因为黑土含钾量非常高,作物需要的钾素,土壤本身可以满足,因此,黑土上施用钾肥效果不明显,玉米生长也没有显著差异。NK 处理,由于长期施用氮钾肥,加速土壤磷素的消耗,土壤速效磷含量只有 10 mg kg⁻¹,磷素成为玉米生长的限制因素,而无肥处理(CK),由于长期不施肥,土壤速效养分较低,但速效磷含量较 NK 处理略高。NK 处理和 CK 处理玉米生长缓慢,土壤呼吸较低,且差异不显著。

从施肥和土温变化影响土体呼吸角度来看(图 1c、图 1d),土体呼吸主要是土壤微生物呼吸,微生物活性受温度和碳源影响较大,而土壤呼吸速率则是这两种因素的综合表现^[15]。首先,从温度角度讲,土壤中绝大多数微生物最适生长温度在 25 ~ 40,随温度升高,土壤微生物活性增强,当温度过低或过高时,微生物停止生长或死亡^[15]。由图 1c 和图 1d 可知,土体呼吸变化趋势与土温变化趋势相似。而化肥和有机肥(NPKOM)长期配合施用,由于土壤中供给微生物的碳源增加,微生物活性增强,土体呼吸较其他施肥处理高。而 CK、NP、NK 和 NPK 处理,由于气温相同,土壤中供微生物直接利用的碳含量相近,玉米整个生育期土体呼吸处理间差异不显著。

3.2 土壤呼吸速率及呼吸量

根际呼吸是有植物生长的生态系统中土壤呼吸的主要组成部分,相当大的一部分光合产物通过根际呼吸损失掉^[16],Domanski 等^[17]研究表明,禾谷类

和草类的根际呼吸占土壤呼吸的比例变化在51%~89%之间,而杨兰芳等^[10]报道玉米全生育期中,根际呼吸在土壤呼吸中占93%~95%,可见作物种类不同,根际呼吸占土壤呼吸的比例差别较大。在本试验研究条件下,玉米全生育期中,根际呼吸占土壤呼吸的比例变化范围为41%~87%之间,平均达65%以上,这较杨兰芳的研究结果低,原因可能是由于田间条件下玉米根系范围广所致。从全生育期的变化情况看,各施肥处理中根际呼吸占土壤呼吸的比例变化为:NPKOM>NPK>NP>CK>NK。比较而言,NPKOM处理根际呼吸速率较NPK处理增加了2.9个百分点,NPK处理较NP处理增加了2.6个百分点,NPK处理较NK处理增加了11.7个百分点,而NPK处理较CK处理增加了9.1个百分点。由此可以看出,化肥配施有机肥不仅增加了根际呼吸量,而且提高了根际呼吸占土壤呼吸的比例。在玉米不同生长阶段,虽然NPKOM处理土壤呼吸累积量(表5)大于NPK处理和NP处理,但这三个处理的根际呼吸量占土壤呼吸的比例统计上差异不显著。主要有三个方面原因,一是由于计算根际呼吸量是采用差减法得到的,忽略了根系分泌物激发效应,Fu和Cheng^[9]研究表明,大豆和向日葵对土壤有机质分解的激发效应为正效应,分别达到69.9%和38.5%,而高粱和苋菜则是负效应,分别为9.2%和5.1%;二是由于长期施用有机肥,导致NPKOM处理的土体呼吸增强(表5),相应地对总土壤呼吸的贡献也增大;三是本试验为田间试验,土体采样箱底座高30cm,采样箱下口可能有少量的根系进入,使根际呼吸对土壤呼吸的比例降低。

本试验条件下,施化肥对土体呼吸无显著影响,而NPKOM处理略高,化肥对土壤呼吸过程的影响主要依赖于土壤有机质的水平,在施用有机肥的情况下,土壤有机质的含量提高,对土壤呼吸的影响明显,而在不施有机肥的处理中,土壤有机质含量低,而且,新鲜的土壤有机物质的数量少,土壤有机质稳定,化肥对土壤呼吸过程的影响不明显。不施有机肥的处理土壤呼吸所释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的速率和释放的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 的累积量一直低于施用有机肥的处理,说明有机肥的施用一方面能增加用于土壤呼吸的有机质的数量,另一方面能显著增强土壤微生物的活性,提高土壤的呼吸强度,增加土壤有机质的矿化分解量^[18]。在玉米生育期,施肥对土壤呼吸有显著影响,说明施肥对土壤呼吸差异来自于植物。施肥处理(NK除外)的土壤呼吸速率和呼吸总量显著高于

无肥处理(CK),化肥和有机肥配施(NPKOM)高于不施有机肥处理,这主要是由于施入有机肥提高了农田土壤有机碳含量,同时改善了土壤理化和生物学性质,使土壤具有良好的通透性和保水性能,从而土壤微生物呼吸强度高于NPK,也为作物根系生长创造了良好的环境条件,增加了根系的生长量和活力,进而增加了 CO_2 的排放量^[19~21]。NPKOM对作物生长的促进作用大于NPK,NPKOM的根系呼吸大于NPK,综合表现为随着玉米生长,NPKOM和NPK处理之间土壤呼吸速率差异逐渐增大。NK处理和NPK处理相比,两个处理施肥量只有磷肥的差异,它们的土壤呼吸速率和呼吸量差异极显著(表3、表5),这主要表现为磷肥效应。长期不施肥的对照(CK)土壤,虽然其有机质含量没有多大下降,但有机质趋于老化,活性降低,土壤肥力和作物生长很差,根系呼吸强度较弱^[18,22]。总之,不同培肥措施长期实施后造成了土壤肥力和作物生长的巨大差异,使得不同培肥处理土壤呼吸速率的呼吸量表现出明显差异。

4 结 论

1) 在玉米生长期间,土壤呼吸速率表现出明显的季节性变化,土壤呼吸速率随生长时间延长而出现波动,分别在出苗后23、37、50、63、87、110 d出现峰值,其中最大峰值出现在出苗后第87天,其后土壤呼吸速率呈下降趋势,直至玉米收获。而根际呼吸速率的季节性变化规律与土壤呼吸相似,土体呼吸速率则主要受气温变化影响。

2) 玉米生长显著影响土壤呼吸,玉米生长中土壤呼吸速率的变化基本与玉米生长规律相一致,随生长而增加,随衰老而减小。

3) 施肥对土壤呼吸速率、根际呼吸速率有明显的影响,但对土体呼吸速率影响较小,从整个玉米生长期来看,NPKOM处理的土壤呼吸速率和根际呼吸速率最高,其次为NPK、NP,而NK和CK最低。

4) 施肥对土壤呼吸量和根际呼吸量有显著的影响,表现为NPKOM>NPK>NP>CK>NK。

5) 在整个玉米生育期中,土壤呼吸累积量在拔节孕穗期和乳熟期出现两个土壤累积峰,表现出双峰曲线的变化规律;而土体呼吸累积量只在拔节孕穗期出现峰值,呈抛物线型;根际呼吸量在苗期最低,乳熟期最高,乳熟期后,根际呼吸量下降。

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. *Tellus*, 1992, 44B: 81 ~ 99
- [2] Lal R, Kimble J, Levine E, *et al.* World soils and greenhouse effect: An overview. In: Lal R, Kimble J, Levine E, *et al.* eds. *Soils and Global Change. Advances in Soil Science.* CRC Press, Boca Raton, USA, 1995. 1 ~ 8
- [3] 姜运生, 李忠佩, 张桃林. 不同利用方式对红壤 CO₂排放的影响. *生态学报*, 2004, 24(5): 978 ~ 983. Lou Y S, Li Z P, Zhang T L. CO₂ emissions from upland and paddy red soils in mid-subtropical (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 978 ~ 983
- [4] 潘志勇, 吴文良, 牟子平, 等. 不同秸秆还田模式和施氮量对农田 CO₂排放的影响. *土壤肥料*, 2006(1): 14 ~ 16. Pan Z Y, Wu W L, Mu Z P, *et al.* Effect of straw-return and nitrogen fertilizer application on the CO₂ emission in farmland (In Chinese). *Soils and Fertilizers*, 2006(1): 14 ~ 16
- [5] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 土壤呼吸对温度升高的适应. *生态学报*, 2004, 24(11): 2 649 ~ 2 655. Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(11): 2 649 ~ 2 655
- [6] 李凌浩, 陈佐忠. 草地群落的土壤呼吸. *生态学杂志*, 1998, 17(4): 45 ~ 51. Li L H, Chen Z Z. Soil respiration in grassland communities in the world (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(4): 45 ~ 51
- [7] 齐志勇, 王宏燕, 王江丽, 等. 陆地生态系统土壤呼吸的研究进展. *农业系统科学与综合研究*, 2003, 19(2): 116 ~ 119. Qi Z Y, Wang H Y, Wang J L, *et al.* The development on the research of terrestrial ecosystem soil respiration (In Chinese). *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2003, 19(2): 116 ~ 119
- [8] Rochette P, Flanagan L B. Quantifying rhizosphere respiration in a corn under field conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 466 ~ 474
- [9] Fu S L, Cheng W X. Rhizosphere priming effects on the decomposition of soil organic matter in C₄ and C₃ grassland soils. *Plant and Soil*, 2002, 238: 289 ~ 294
- [10] 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. *土壤学报*, 2005, 42(1): 9 ~ 15. Yang L F, Cai Z C. Soil respiration during maize growing period affected by N application rates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1): 9 ~ 15
- [11] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. *生态学报*, 1997, 17(5): 469 ~ 476. Liu S H, Fang J Y. Effect factors of soil respiration and the temperature's effects on soil respiration in the global scale (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 469 ~ 476
- [12] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlation and controls. *Biochemistry*, 2000, 48: 71 ~ 90
- [13] Yang L F, Cai Z C. Soil respiration during a soybean-growing season. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 192 ~ 200
- [14] 黄昌勇主编. *土壤学*. 北京: 农业出版社, 1980. Huang C Y, ed. *Soil Science (In Chinese)*. Beijing: Agriculture Press, 1980
- [15] 诸葛玉平, 张旭东, 刘启. 长期施肥对黑土呼吸过程的影响. *土壤通报*, 2005, 36(3): 391 ~ 394. Zhuge Y P, Zhang X D, Liu Q. Effect of long-term fertilization on respiration process of mollisols (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 391 ~ 394
- [16] 彭克明, 裴保义主编. *农业化学*. 北京: 农业出版社, 1980. Peng K M, Pei B Y, eds. *Agriculture Chemistry (In Chinese)*. Beijing: Agriculture Press, 1980
- [17] Domanski G, Kuzjakov Y, Siniakina S V, *et al.* Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2001, 164: 381 ~ 387
- [18] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤 CO₂释放研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(12): 1 ~ 7. Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, *et al.* Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems (In Chinese). *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest (Nature Science Edition)*, 2004, 32(12): 1 ~ 7
- [19] 黄不凡. 绿肥麦秸还田培养地力的研究. 对土壤有机质和团聚体性状的影响. *土壤学报*, 1984, 21(2): 113 ~ 122. Huang B F. Studies on effect of turnover of green-manure and wheat straw into soil on soil fertility. Effect of green-manure and wheat straw on characteristics of aggregates and organic matter in soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1984, 21(2): 113 ~ 122
- [20] 许秀云, 姚贤良, 刘克樱. 长期施用有机肥对红壤性水稻土物理属性的影响. *土壤*, 1996, 28(2): 57 ~ 61. Xu X Y, Yao X L, Liu K Y. Effect of long-term application of organic materials on some physical properties of paddy soils from red soil (In Chinese). *Soils*, 1996, 28(2): 57 ~ 61
- [21] Gansert D. Root respiration and its importance for the carbon balance of beech saplings (*Fagus sylvatica* L.) in a montane beech forest. *Plant and Soil*, 1994, 167: 109 ~ 119
- [22] Ding W X, Meng L, Yin Y F, *et al.* CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 669 ~ 679

SOIL RESPIRATION AFFECTED BY FERTILIZATION IN BLACK SOIL

Qiao Yunfa¹ Miao Shujie² Wang Shuqi¹ Han Xiaozeng^{1†} Li Haibo¹

(1 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China*)

(2 *College of Resource and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150059, China*)

Abstract Diurnal variation of soil respiration affected by fertilization at various growth stages of maize in black soil was investigated with the static dark chamber method and gas chromatograph technique at the Hailun Agricultural Ecology Station. Results show that during the growth stages of maize, soil respiration rate displayed an obvious seasonal curve, with peaks occurring on the 23th, 37th, 50th, 63th, 87th and 110th days after seedling emergence, and the highest on the 87th day, and a downward trend till the crop was harvested. Respiration rate of the rhizospheric soil followed a curve similar to that of the soil, while respiration rate of bulk soil was mainly affected by air temperature. The corn growing in the soil significantly affected soil respiration rate, which rose when the plant grew and decline when it got snile, showing a similar curve. Fertilization also significantly affected the respiration rates of soil and rhizospheric soil, but little of the bulk soil. Based on the entire growth period of maize, Treatment NPKOM was the highest in soil respiration rate and rhizospheric respiration rate, ranging in C 27.5 ~ 474 mg m⁻² h⁻¹; Treatments NPK and NP were quite close, varying in the range of C 25.9 ~ 339 mg m⁻² h⁻¹ and 29.5 ~ 358 mg m⁻² h⁻¹, respectively; and Treatments NK and CK in the range of C 28.4 ~ 208 mg m⁻² h⁻¹ and C 22.1 ~ 184 mg m⁻² h⁻¹, respectively. In terms of the effect of fertilization, the treatments followed an order of NPKOM > NPK > NP > CK > NK. Through the whole growth period of maize, cumulative soil respiration peaked at the elongating-booting stage and milky-ripening stage, following a doublet curve, whereas the cumulative respiration of bulk soil showed a peak at the elongating-booting stage, following a parabolic curve, and that of rhizospheric soil was the lowest at the seedling stage, peaked at the milky-ripening stage, and decline afterwards.

Key words Soil respiration; Rhizosphere respiration; Bulk respiration; Long-term fertilization; Maize