

黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态

高会议¹, 郭胜利^{1,2,*}, 刘文兆^{1,2}, 车升国¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘要: 依据黄土旱塬区黑垆土上中国科学院长武站长期定位试验 (始于 1984 年), 于 2008 年 3 月到 6 月, 测定了冬小麦连作系统中返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和收获期土壤呼吸日变化、生育期变化以及土壤可溶性有机碳 (Dissolved organic C, DOC) 和微生物量碳 (Soil microbial biomass C, MBC), 研究了施肥措施对土壤呼吸、DOC 和 MBC 的影响以及土壤呼吸与碳组分之间的关系。研究涉及 6 个处理: 休闲地 (F)、不施肥 (CK)、有机肥 (M)、氮肥 (N)、氮磷肥 (NP) 和氮磷有机肥 (NEM)。结果表明, 冬小麦连作系统中土壤呼吸的日变化格局呈单峰曲线, 最高值出现在 12:00 左右 (拔节期) 和 14:30 左右 (成熟期), 最小值出现在 0:00 ~ 3:00 之间或 6:00 左右; 冬小麦土壤呼吸速率拔节期最高, 其次是灌浆后期, 抽穗期最低; 不同施肥条件下, 各生育期土壤呼吸速率大小顺序: NEM > M > NP > N > CK > F。土壤水分亏缺是导致抽穗期和灌浆期土壤呼吸速率降低的重要原因。各施肥处理 DOC 含量高低顺序为灌浆期 > 抽穗期 > 成熟期 > 返青期 > 拔节期; 除 M, NEM 处理 MBC 含量拔节期 > 灌浆期外, 各施肥处理 MBC 含量高低顺序为成熟期 > 抽穗期 > 灌浆期 > 拔节期 > 返青期。同一处理不同生育期土壤呼吸速率与 DOC, MBC 的相关性较低, 但同生育期不同施肥处理土壤呼吸与土壤有机碳组分间存在显著的相关性。以 F 处理土壤呼吸为基础, 估算 CK, N 和 NP 处理生育期根系对土壤呼吸的平均贡献率依次为 36%、45% 和 54%。

关键词: 土壤呼吸; 土壤可溶性碳; 土壤微生物量碳

文章编号: 1000-0933 (2009) 05-2551-09 中图分类号: S181, S154. 1, S314 文献标识码: A

Soil respiration and carbon fractions in winter wheat cropping system under fertilization practices in arid-highland of the Loess Plateau

GAO Hui-Yi¹, GUO Sheng-Li^{1,2,*}, LIU Wen-Zhao^{1,2}, CHE Sheng-Guo¹

¹ College of Resource and Environment, Northwest A & F University

² Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resource, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (5): 2551 ~ 2559.

Abstract: Based on a long-term location experiment on Caliche soil in Changwu Station of Chinese Academy of Sciences, Changwu, Shaanxi, China, we monitored diurnal changes and seasonal changes of CO₂ flux from soils in a continuous winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system by LF-8100 automated soil CO₂ flux system, and soil dissolved organic carbon (DOC), soil microbial biomass carbon (MBC) were also measured during returning green, heading, jointing, filling and mature stages during the wheat growing period. Six fertilization practices arranged as a block with 3 replicates from the long-term experiment were selected, which consists of fallow (F), control (CK), farm yard manure (M, 75 t·hm⁻²), nitrogen (N, 120 kg·hm⁻²), nitrogen and phosphorus (NP, 120 kg N·hm⁻², 39 kg P·hm⁻²), and nitrogen and phosphorus plus farm yard manure (NEM, 120 kg N·hm⁻², 39 kg P·hm⁻², 75 t·hm⁻²). The soil CO₂ flux showed significant diurnal changes and seasonal changes. For the diurnal changes, the soil CO₂ flux rate followed a single peak curve with time, and the maximum of soil respiration appeared about at 12:00 or 14:30, and the minimums between 0:00

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目资助 (KZCX2-YW-424-2); 国家自然科学基金资助项目 (40771125)

收稿日期: 2008-10-29; 修订日期: 2009-03-23

* 通讯作者 Corresponding author E-mail: slguo@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

to 3:00 or about 6:00. Fertilization significantly increased soil CO₂ flux rate, and the order of CO₂ flux rate under different fertilizations followed as NPM > M > NP > N > CK > F. For the seasonal changes, the soil CO₂ flux rate was highest during the jointing stage, followed by late filling stage, and minimum rate appeared during heading stage. Soil water deficit contributed to most of reduction of soil CO₂ flux rate during heading and filling stage. Fertilization significantly affect MBC and DOC, there were significant seasonal changes in DOC and MBC. For DOC, the order was filling stage > heading stage > mature stage > turning green stage > jointing stage in all treatments. For MBC, the order followed as mature stage > heading stage > filling stage > jointing stage > returning green stage, and except manure treatments (M, NPM), MBC in jointing stage was more than in filling stage in all treatments. The relationships between DOC, MBC and soil CO₂ flux rate under different growth stages was low under the condition of same fertilization, on contrast, the relationships between DOC, MBC and soil respiration rate were significant under different fertilizations. Soil respiration measurement using the root-exclusion technique indicated that fertilization enhance root respiration. Averaged cross the growing stages, the contribution of the root respiration to soil respiration in CK, N and NP treatment, were 36%, 45% and 54%, respectively.

Key Words: soil respiration; soil dissolved organic carbon; soil microbial biomass carbon

土壤呼吸是影响大气 CO₂浓度的关键生态过程。通过土壤呼吸排放到大气中的 CO₂高达 68 ~ 100 PgC·a⁻¹ [11], 约占大气 CO₂总量的 10% [21]。因此,土壤 CO₂通量的微小变化可对全球气候变化和碳循环产生重大影响 [11]。农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分,也是人类活动干扰最为强烈的生态系统,其 CO₂排放量占人为温室气体排放量的 21% ~ 25% [31]。因此,了解农田生态系统土壤呼吸特征及其影响因素对准确评估陆地生态系统碳收支具有重要的意义。

近年来,在我国东北 [4,5]、黄淮海平原地区 [6~9]、长江中下游地区 [10~12]等地相继开展了农田土壤呼吸的有关研究。水热因子、作物生物学特性、施肥、耕作措施等是造成农田生态系统土壤呼吸作用时空变异的主要因素 [13]。我国地域辽阔、气候和管理措施复杂,加强不同区域典型农田生态系统土壤呼吸过程及其影响因素研究,对揭示土壤呼吸空间异质性和制定合理减排措施具有重要意义。

黄土高原是我国古老的旱地农业区。区域气候干旱,土壤贫瘠,为我国主要的中低产区之一 [14]。但自 1980年以来,肥料大量投入和新品种的改良应用,极大地提高了土壤生产力和土壤有机碳储量 [15,16],但施肥和作物产量提高条件下土壤 CO₂排放有何变化、土壤有机碳提高对土壤呼吸又有何影响尚不清楚。与同纬度的黄淮海地区相比,由于热量不足,该地区每年一季作物或者两年三季作物。冬小麦是该地区主要的粮食作物,了解冬小麦生育期内土壤呼吸变化规律对于评价该地区农田土壤碳的源汇问题及释放机理具有重要的意义。本研究以田间定位试验为基础,研究了不同施肥条件下,旱地小麦系统中土壤呼吸的日变化和生育期内动态变化,生育期土壤有机碳组分动态变化并讨论了土壤有机碳组分与土壤呼吸的关系。

1 材料与方 法

1.1 试验地的自然条件

长期试验在长武站(中国科学院生态研究网络 CERN 台站)进行,该区位于陕西省长武县(东经 107°40', 北纬 35°12'),海拔 1200 m。属于典型的黄土旱塬区,半干旱湿润性季风气候。1984 ~ 2007年间年均降水量为 586 mm,其中最高年份为 954 mm,最低年份为 296 mm。7 ~ 9月份降水量占年总量的 49%左右。年平均气温 9.4℃,大于 10℃积温为 3029℃,年日照时数为 2230 h,日照率为 51%,年辐射总量为 484 kJ·cm⁻²,无霜期 171d。土壤为粘壤质黑垆土,母质为中壤质马兰黄土,土层深厚,土质疏松。布设试验前 0 ~ 20cm 耕层土壤含有有机碳 6.50g·kg⁻¹,全氮 0.62 g·kg⁻¹,碱解氮 37.0mg·kg⁻¹,速效磷 3.0 g·kg⁻¹,速效钾 129.3mg·kg⁻¹,CaCO₃ 10.5%,pH 8.4 试验地 N、P 含量较低,钾素丰富,呈微碱性反应 [14~16]。

1.2 试验设计与管理

试验始于 1984年 9月,11种轮作方式与 7种施肥制度(不完全组合),共 36个处理。3次重复,随机区

组排列^[17]。小区面积 10.3m × 6.5m,小区间距 0.5m,区组间距和周边宽各 1.0m。本研究选取其中的冬小麦 (*Triticum aestivum* L.) 连作 5 个施肥水平对照 (CK)、单施有机肥 (M)、单施氮肥 (N)、氮磷配施 (NP)、氮磷 + 有机肥 (NPM) 和休闲地处理 (F) (表 1)。

供试作物为冬小麦 (小麦品种为长武 131 系列), 连作种植, 每年 1 茬作物, 播种期为 9 月下旬 (播量 150 ~ 190 kg · hm⁻², 行距 20 cm), 试验期间管理措施同大田, 翌年 6 月收获后土壤休闲, 期间圆盘耙机耕 (深度小于 20 cm) 松土蓄墒。全部肥料均于播种前作基肥 1 次施入耕层。

1.3 土壤呼吸的测定

土壤呼吸速率测定采用开路式土壤碳通量测量系统, 测定仪器型号为 LF-8100 (LFCOR, Lincoln, NE, USA)。2008 年 3 月底 (小麦返青) ~ 6 月下旬 (作物收获), 分别于每月的中旬和下旬选择晴天上午进行田间测定, 每试验小区重复 2 次, 每处理共计 6 次重复; 同时, 分别于小麦拔节期 (2008-04-23)、成熟期 (2008-06-21) 以 24h 为 1 周期, 每间隔 2h 测定 1 次土

壤呼吸, 以获取土壤呼吸日变化动态。测定前在每个小区内安置测定基座 (去除基座内的一切活体), 为了减少安置测定基座对土壤系统的破坏, 在测定基座安置 24h 后再进行测定, 从而避免了由于安置测定基座对土壤扰动而造成的短期呼吸速率波动^[18]。

1.4 土壤样品的采集与测定方法

2008 年, 分别于冬小麦的返青期 (2008-04-02)、拔节期 (2008-04-23)、抽穗期 (2008-05-14)、灌浆期 (2008-05-28) 和收获期 (2008-06-22) 采集土样。每小区以“S”形采集 5 钻土样 (0 ~ 20 cm), 制成混合土样, 6 个处理, 每处理 3 次重复, 共计采集 18 个土样。测定新鲜土样的水分含量 (烘干法); 新鲜土样风干, 过筛, 分析土壤可溶性碳 (DOC, 硫酸钾溶液浸提 碳自动分析仪法) 和土壤微生物量碳 (MBC, 氯仿熏蒸硫酸钾浸提 碳自动分析仪法)^[19, 20]。

1.5 数据处理

统计分析采用 SAS8.1 (SAS Inst., 1999) 软件和 Excel 进行, 当 *F* 检验显著时, 进行各处理间的方差分析。

2 结果与分析

2.1 施肥措施对土壤呼吸日变化的影响

不同施肥管理措施下土壤呼吸速率昼夜变化特征均呈单峰曲线, 但具有明显的波动性 (图 1)。冬小麦拔节期土壤呼吸速率高值出现在 12:00 左右, 随后逐步降低, 在 0:00 到 3:00 之间降至最低值逐步回升。成熟期峰值出现在 14:30 左右; 最低值出现在凌晨 5:00 ~ 6:00 之间。与日温度变化基本同步, 其原因一方面可能是在微生物适宜范围内, 随着温度的升高微生物活性增强, 土壤有机质的分解和 CO₂ 产生的强度提高; 另一方面可能是由于气体的扩散和对流速度的加快^[10]。一日之内不同施肥处理土壤呼吸速率大小顺序为: NPM > M > NP > N > CK > F。相对于作物小区, 休闲地 (F) 的土壤呼吸值最低, 一天中的变化趋势跟其他处理一致, 但高值出现时间存在一定的延迟效应。

2.2 生育期不同施肥处理土壤呼吸动态变化特征

从返青期到收获期的观测期间, 土壤呼吸生育期变化总体表现为返青后迅速增加, 到拔节期达到整个观测期间的最高值, 随后逐渐降低, 至抽穗期降低到最低, 灌浆期又迅速升高之后进一步降低直至收获 (图 2)。与种植作物小区相比, 休闲地 (F) 土壤呼吸的生育期变化相对稳定从作物返青期一直到 5 月下旬, 其土壤呼

表 1 从长武长期定位试验选择的轮作施肥处理

Table 1 Treatments selected from the long-term experiment in Changwu Station

处理 Treatment	肥料 Fertilizers*		
	N kg · hm ⁻²	P kg · hm ⁻²	M t · hm ⁻²
休闲 F	0	0	0
不施肥 CK	0	0	0
施氮 N	120	0	0
氮磷配施 NP	120	39	0
有机肥 M	0	0	75
氮磷有机肥 NPM	120	39	75

F: fallow 休闲; CK: Nil; N: 尿素 Urea; P: 磷肥 Superphosphate; M: 有机肥 Familyard manure; * 单季作物施肥量; Fertilization rate per crop

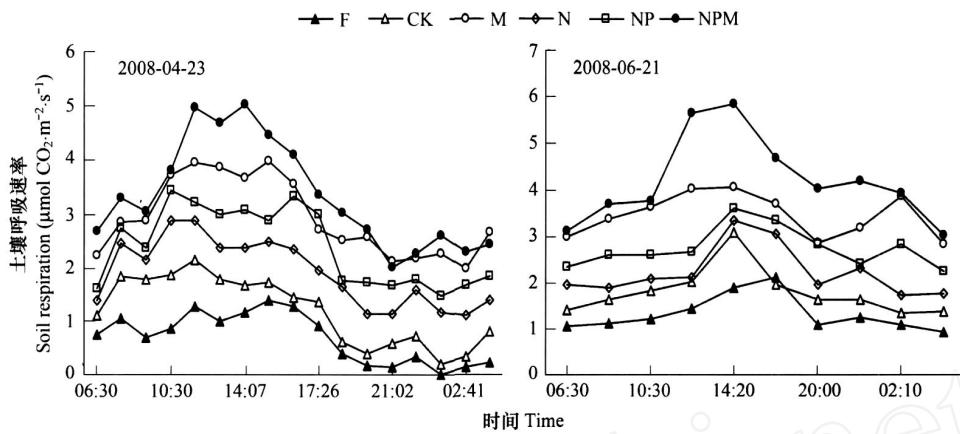


图 1 不同施肥条件下土壤呼吸日变化规律

Fig 1 Diurnal variation of soil respiration under different fertilization practices

吸速率一直在 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间波动,6月初开始升高,中旬达到最高值 ($2.2 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。冬小麦种植小区的土壤呼吸包括植物根呼吸、土壤微生物呼吸和土壤动物呼吸 3 个生物过程和含碳物质化学氧化作用的非生物过程,而休闲地土壤呼吸则主要是土壤微生物呼吸和含碳物质氧化产生的 CO_2 的释放。因此,在所有处理中,休闲处理的各时期土壤呼吸速率最低。各生育期不同施肥处理间的大小顺序一直是有机肥处理 (NPM,M) (化肥处理 (N,NP) (对照处理 (CK) (休闲处理 (F)。施肥显著影响土壤呼吸速率。整个观测过程平均,CK处理为 $1.8 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,N处理 ($2.1 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)较 CK提高 17%、NP处理 ($2.4 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)提高 30%,有机肥处理 (M,NPM) ($3.0 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)提高 66%。有机肥处理土壤呼吸速率表现较高的原因可能是:(1)有机肥为土壤微生物提供丰富的碳源,促进微生物活动和生长繁殖,提高酶的活性,从而促进土壤微生物所产生的生物化学过程和根系的分泌活动,同时加大了有机质的分解速率,增强了土壤呼吸作用^[7];(2)有机肥中含有大量的微生物,增加土壤微生物数量。

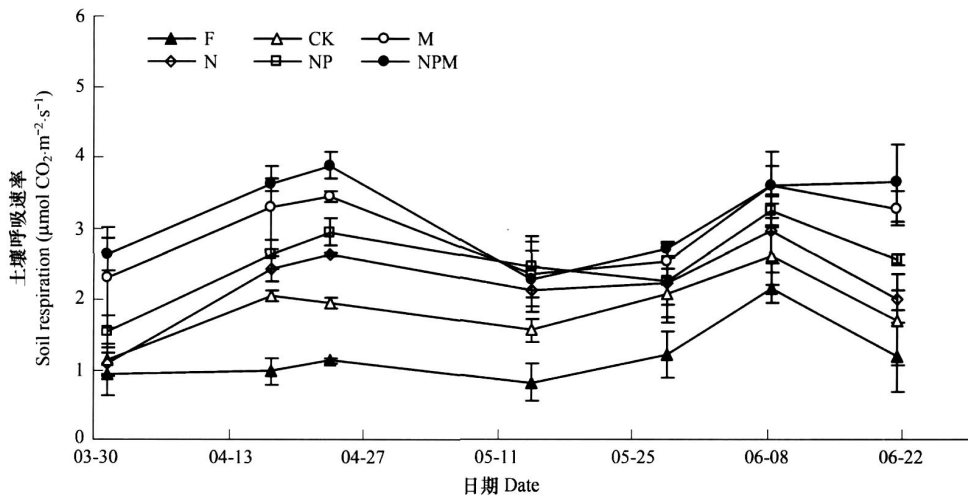


图 2 不同施肥处理条件下土壤呼吸生育期动态变化

Fig 2 Seasonal variation of soil respiration under different fertilization practices

2.3 生育期不同施肥处理土壤可溶性碳、微生物量碳的动态变化

施肥措施显著影响 DOC 含量 (表 2)。多次平均, F 处理 DOC 含量最低 ($19.81 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); CK 处理 DOC 含量 ($24.67 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)略高于 F 处理,与 CK 相比,N 处理 ($26.57 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)略有提高 ($P > 0.05$),NP 处理 ($33.98 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著提高 ($P < 0.01$),有机肥处理 (M, $60.04 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; NPM, $63.96 \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)DOC 含量明显高

于化肥处理 (N, NP), 且处理之间的差异性达到极显著水平 ($P < 0.01$); M 和 NPM 处理之间差异不显著 ($P > 0.05$)。在整个测定期间, 同一处理不同时期 DOC 含量大小为灌浆期 > 抽穗期 > 成熟期 > 返青期 > 拔节期 (表 2)。

表 2 生育期不同施肥处理可溶性有机碳和微生物量碳的动态变化

Table 2 Seasonal variation of dissolvable C, microbial biomass C under different fertilization practices

碳组分 C forms	Growing stages	F	CK	M	N	NP	NPM
DOC ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	返青期 Returning green stage	12.16 \pm 1.0Aa	15.65 \pm 0.7Ab	35.35 \pm 5.0Bd	15.60 \pm 1.4Ab	19.29 \pm 3.2Bc	41.46 \pm 4.3Be
	拔节期 Elongating stage	13.35 \pm 3.0Ba	13.51 \pm 3.1Aa	23.14 \pm 3.5Ab	14.40 \pm 2.5Aa	15.37 \pm 1.2Aa	27.53 \pm 5.5Ac
	抽穗期 Heading stage	25.80 \pm 1.7Ca	30.74 \pm 4.1Cb	89.68 \pm 14.4De	33.43 \pm 2.5Bb	42.48 \pm 5.5Dc	87.42 \pm 6.4Dd
	灌浆期 Filling stage	25.95 \pm 4.4Ca	38.70 \pm 7.7Db	99.12 \pm 12.5Dd	40.22 \pm 6.1Cb	61.06 \pm 15.2Ec	118.80 \pm 18.5Ee
	成熟期 Ripening stage	21.78 \pm 4.7Ca	24.76 \pm 3.7Ba	52.91 \pm 9.1Cc	29.21 \pm 6.5Bb	31.69 \pm 3.3Cb	53.36 \pm 9.9Cc
MBC ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	返青期 Returning green stage	72.8 \pm 15.8Aa	91.8 \pm 21.3Ac	131.6 \pm 36.1Ad	86.8 \pm 17.9Ab	110.5 \pm 20.6Ac	100.4 \pm 19.2Ac
	拔节期 Elongating stage	84.5 \pm 2.1Aa	91.5 \pm 20.7Ab	224.2 \pm 49.6Bd	109.6 \pm 18.1Bb	205.7 \pm 13.4Cc	205.8 \pm 19.4Cc
	抽穗期 Heading stage	134.8 \pm 23.6Ca	182.0 \pm 25.5Cb	372.2 \pm 34.6Cd	202.9 \pm 10.4Dd	252.7 \pm 23.7Dc	361.6 \pm 46.8Dd
	灌浆期 Filling stage	92.9 \pm 24.0Ba	136.8 \pm 18.1Bb	160.8 \pm 29.4Ac	143.2 \pm 21.8Cb	160.3 \pm 45.9Bc	122.7 \pm 19.3Bb
	成熟期 Ripening stage	175.2 \pm 32.1Da	252.1 \pm 13.1Db	382.1 \pm 67.2Cd	250.6 \pm 7.2Eb	340.0 \pm 14.2Ec	365.4 \pm 44.0Dd

显著性水平为 $\alpha = 0.01$, 相同字母表示处理间没有显著差异 The test results are at significant level of 0.01% based on LSD α test; the same letter in each column indicates that there is no significant difference between the treatments

土壤中微生物量碳主要来源于作物残体和根系残留物的积累, 积累量不同, 土壤微生物得到的碳源数量不同, 使土壤微生物生物量碳在不同的情况下表现出很大的差异。施肥措施影响 MBC 含量变化 (表 2)。多次平均, F 处理的 MBC 含量最低 ($112.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。在小麦连作系统中, CK 处理的 MBC 含量 ($150.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 高于休闲地 (F); 相对于 CK 而言, NP 处理显著提高了其 MBC 的含量 ($213.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 优于 N 处理 ($158.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。施有机肥处理 (M, $254.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; NPM, $235.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 显著提高了 MBC 含量, 差异性达到极显著水平 ($P < 0.01$)。不同处理的 MBC 含量, 在整个生育期内则表现不尽相同。不施肥处理 (F, CK)、化肥处理 (N, NP) 表现为: 成熟期 > 抽穗期 > 灌浆期 > 拔节期 > 返青期; 有机肥处理 (M, NPM) 表现为: 成熟期 > 抽穗期 > 拔节期 > 灌浆期 > 返青期。

3 讨论

3.1 土壤呼吸的日变化和生育期变化

本研究土壤呼吸的日变化呈单峰型, 白天土壤呼吸量显著大于夜间, 这与黄淮海地区的灌溉农田^[6]、长江中下游地区水稻种植区^[10]等土壤呼吸日动态具有一致性。长期休闲区土壤呼吸极值出现时间滞后于作物区, 其原因值得研究。此外, 本研究土壤呼吸速率高峰期和最低值出现的时间也有别与他人的研究结果。本研究中高峰期小麦返青期出现在 12:00 左右, 成熟期出现在 14:30 左右; 拔节期最低值出现在 0:00 ~ 3:00 之间, 成熟期则出现在 5:00 ~ 6:00 之间。而张宪洲等^[21]在青藏高原发现小麦的土壤呼吸速率的最大值和最小值分别发生于 13:00 ~ 14:00 和 5:00 ~ 6:00; 东北玉米地土壤呼吸速率最大值出现在 12:00, 最小值出现在 5:00^[22]。土壤呼吸极值出现时间的差异可能与当地日气温动态变化特征有关。

农田生态系统土壤呼吸动态变化与生育期和作物生育期密切相关。本研究中, 3月中旬后, 随着气温回升, 土壤水分含量较高, 小麦进入返青期, 生长旺盛, 小麦根呼吸作用增强; 由于水热条件的好转, 土壤微生物的活性增强。这两个方面的共同作用使得小麦地的土壤呼吸速率在 4月中下旬小麦拔节期达到高峰期 (图 2)。随后由于土壤含水量急剧下降 (0 ~ 20cm 土层含水量低于 10%), 基本上接近甚至低于该土壤凋萎湿度 (9% ~ 12%), 导致土壤呼吸速率拔节期后呈下降趋势; 5月中旬, 小麦进入旺盛生长的抽穗灌浆时期, 土壤呼吸速率逐渐升高; 在小麦成熟期, 作物叶片枯黄, 光合作用能力下降, 土壤呼吸减弱, 但水分的恢复使得土壤呼吸又重新活跃 (图 3)。因此, 在雨养农业区, 农田土壤呼吸的动态变化不仅与生育期和生育期有关, 土壤水分

的影响不容忽视。在具有灌溉的农田生态系统,土壤呼吸峰值与当地的热量条件和作物生育期具有很好的耦合关系。例如,华北平原玉米地土壤呼吸速率随春季缓慢升高,峰值出现在温度和降水均较高的7月份^[9]。黄淮海平原地区,玉米播种后的30 d和70 d分别是营养生长及营养和生殖生长最旺盛的时期,土壤呼吸作用也在那时达到峰值^[8]。

3.2 土壤呼吸与有机碳组分的关系

在整个测定期间,同一生育期不同处理间 DOC 含量(除抽穗期外)与土壤呼吸之间存在显著的相关关系, MBC 含量(除返青期和灌浆期外)与土壤呼吸之间也存在显著的相关关系(表 3),且土壤呼吸与 DOC 的相关性稍高于与 MBC 的相关性。抽穗期和灌浆期碳组分与土壤呼吸相关性不显著的原因可能与此生育期根系对土壤呼吸的贡献率高于其他生育期有关(表 5)。这与胡诚等^[23]在华北地区的研究结论基本一致。而陈昶等^[24]的研究结果表明,微生物量碳与土壤呼吸强度呈正相关,但相关性不显著。其原因可能与土壤类型等不同有关。此外,陈昶等^[24]所测定的土壤呼吸为基础呼吸,而本研究的土壤呼吸包括作物的根系呼吸。

同一处理不同生育期的土壤呼吸与土壤微生物量碳、可溶性有机碳的相关性很差(表 4),在整个生育期, DOC 和 MBC 高低值出现的时期与土壤呼吸高低值出现的时期也不一致。例如各处理土壤的土壤呼吸最大值出现在拔节期,而 DOC 最大值出现在灌浆期, MBC 的最高值出现收获期。其原因有待进一步研究。

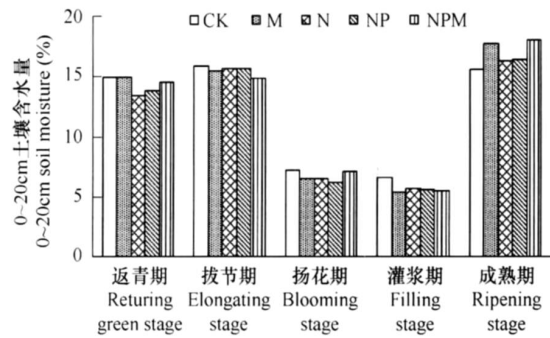


图 3 冬小麦生育期各处理 0~20cm 土壤含水量

Fig 3 Soil water in different fertilization treatments during the growing stages of winter wheat

表 3 同时期不同处理间土壤可溶性有机碳、微生物量碳与土壤呼吸速率的相关关系

Table 3 Relationships between soil respiration, DOC, and MBC under different fertilization practices

碳组分 C forms	土壤呼吸 soil respiration					
	返青期 Returning green stage	拔节期 Elongating stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Ripening stage	全生长期 Whole
DOC	0.993**	0.845**	0.625	0.816*	0.961**	0.918**
MBC	0.702	0.879**	0.753*	0.683	0.954**	0.959**

$r_{0.05} = 0.707, r_{0.01} = 0.834$

表 4 同一处理不同时期土壤可溶性碳、微生物量碳与土壤呼吸的相关关系

Table 4 Relationships between soil respiration, DOC, and MBC during the different growing stages

碳组分 C forms	土壤呼吸 Soil respiration					
	F	CK	N	NP	M	NPM
DOC	0.041	0.444	0.255	0.042	0.540	0.580
MBC	0.071	0.095	0.238	0.624	0.293	0.096

3.3 施肥对根呼吸的影响

根系呼吸作用占总土壤呼吸作用的比例是确定陆地生态系统碳平衡关系和土壤有机碳周转速率的关键参数之一^[25]。蔡祖聪研究小组的结果显示,休闲处理与(休闲+化肥)处理间土壤呼吸并无显著差异^[26]。因此,本研究的 CK、N 处理和 NP 处理的土壤呼吸扣除休闲处理后,可以估算作物根系呼吸的大小^[4,26](表 5)。

施肥措施显著影响根呼吸作用的强弱。在整个生育期中,施肥促进了根系呼吸速率,其大小顺序表现为 NP > N > CK。在整个测定过程中,CK 处理根呼吸速率为 $0.16 \sim 0.87 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,贡献率为 16% ~ 48%; N 处理根呼吸速率为 $0.23 \sim 1.50 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,贡献率为 21% ~ 62%; NP 处理根呼吸速率为 $0.67 \sim 1.82 \mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,贡献率为 43% ~ 67%。施肥影响根呼吸在总呼吸中的贡献率,基本上都表现为在拔节期和抽穗期较高,前期和后期略低的趋势。NP 处理对根呼吸最用的影响返青期最为显著,提高了约 3 倍; N

处理在拔节期和抽穗期较高,约为 0.8 倍。灌浆期,处理间没有差异,这可能与此时的土壤水分较低有关。

表 5 生育期不同施肥处理条件下根系对土壤呼吸的贡献

Table 5 Effects of fertilization on root respiration during the growing stages of winter wheat

施肥处理 Treatment	返青期 green stage		拔节期 elongating stage		抽穗期 heading stage	
	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)
CK	0.16 ± 0.12	16	0.82 ± 0.09	42	0.75 ± 0.16	48
N	0.23 ± 0.13	21	1.50 ± 0.03	57	1.32 ± 0.31	62
NP	0.67 ± 0.18	43	1.82 ± 0.20	62	1.64 ± 0.44	67

施肥处理 Treatment	灌浆期 filling stage		成熟期 ripening stage		整个生育期 whole	
	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)	根呼吸速率 Root respiration	贡献率 (%)
CK	0.87 ± 0.35	42	0.53 ± 0.14	31	0.63 ± 0.29	36
N	1.02 ± 0.56	46	0.81 ± 0.15	41	0.97 ± 0.49	45
NP	1.03 ± 0.33	46	1.37 ± 0.08	54	1.31 ± 0.46	54

本研究中不施肥处理冬小麦根系呼吸的比例平均为 36%,N 处理为 45%,NP 为 54%。NP 处理结果与韩广轩等^[5]的研究结果(根系呼吸的比例为 50%)相近,稍高于张宪洲等^[21]的研究结果(根系呼吸的比例为 40%)。低于孙文娟等^[27]的研究结果(根系呼吸的比例为 40%~64%)。但大约是崔玉亭等^[28]和陈素英等^[29]研究结果的 3 倍。Hanson 等^[30]指出非森林生态系统全年或生长季中根系呼吸作用占土壤呼吸作用比例的均值为 60.4%。Domanski 等^[31]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。本文中土壤呼吸作用中根系呼吸作用所占的比例比较接近上述的研究结果。但 Swinnen^[32]估算出小麦田和大麦田中根系呼吸作用占土壤呼吸作用的比例在 75%~95% 之间。

4 结论

(1)黄土高原半干旱区,冬小麦连作系统 CO₂ 排放存在明显的日变化和生育期变化规律。峰值出现在 12:00 左右(04-23)和 14:30 左右(06-21);拔节期最低值出现在 0:00~3:00 之间,成熟期则出现在 6:00 左右。土壤 CO₂ 排放通量生育期变化趋势为拔节期最高,其次是成熟期,灌浆期、返青期和抽穗期较低。施肥可以显著提高土壤呼吸速率。

(2)DOC 和 MBC 存在生育期变化,总体趋势大体是:各处理 DOC 含量表现为灌浆期 > 抽穗期 > 成熟期 > 返青期 > 拔节期,除有机肥处理(M,NEM)MBC 含量拔节期 > 灌浆期外,各处理 MBC 含量表现为成熟期 > 抽穗期 > 灌浆期 > 拔节期 > 返青期。

References:

- [1] Xu J B, He Y Q, Li C L, *et al* Relationship between biologically active organic carbon pool and carbon fractions in upland soils different in fertilization. *Soils*, 2007, 39(4): 627 - 632.
- [2] Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, *et al* Contents of WSOC and characteristics of its composition under different fertilization systems. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(5): 724 - 730.
- [3] Lin E D. *Climate Change and the Sustainable Development of Agriculture*. Beijing: Beijing Press, 2001. 1 - 32.
- [4] Qiao Y F, Miao S J. Dynamic changes of soil organic carbon and nitrogen in black soil under long-term fertilization. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3): 545 - 548.
- [5] Hang G X, Zhou G S, Xu Z Z, *et al* Spatial heterogeneity of soil respiration and contribution of root respiration in a maize (*Zea mays* L.) agricultural field. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(12): 5254 - 5251.
- [6] Li H, Qiu J J, Wang L G. Characterization of farmland soil respiration and modeling analysis of contribution of root respiration. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(4): 14 - 20.
- [7] Cheng S Y, Li J, Lu P L, *et al* Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*,

- 2004, 15 (9): 1552 - 1560.
- [8] Meng L, Ding W X, Cai Z C, *et al* Storage of soil organic C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (6): 687 - 692.
- [9] Meng F Q, Guan G H, Zhang Q Z, *et al* Seasonal variation in soil respiration under different long-term cultivation practices on high yield farmland in the North China Plain *Acta Scientiae Circum Stantiae*, 2006, 26 (6): 992 - 999.
- [10] Zheng J F, Zhang X H, Pan G H, *et al* Diurnal variation of soil basal respiration and CO₂ emission from a typical paddy soil after ricer harvest under long term different fertilizations *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12 (4): 485 - 494.
- [11] Zhu Y L, Wu J S, Tong C L, *et al* Responses of CO₂ fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field *Environmental Science*, 2008, 29 (4): 1040 - 1044.
- [12] Zhu Y L, Tong C L, Wu J S, *et al* Seasonal characteristics of CO₂ fluxes from the paddy ecosystem in subtropical region *Environmental Science*, 2007, 28 (2): 283 - 288.
- [13] Han G X, Zhou G S, XU Z Z Research and prospects for soil respiration of farmland ecosystems in China *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32 (3): 719 - 733.
- [14] Guo S L, Zhang Y D, Zhang W J, *et al* Effects of Long-term application of chemical fertilizer on food production and soil quality attributes *Research of Soil and Water Conservation*, 2003, 10 (1): 16 - 22.
- [15] Zhang C X, Hao M D, Xie B C. Effect of application amounts of different chemical fertilizers on soil carbon pool *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37 (5): 861 - 864.
- [16] Guo S L, Wu J S, Dang T H. Effects of crop rotation and fertilization on aboveground biomass and soil organic C in Semi-arid Region *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41 (3): 744 - 751.
- [17] Guo S L, Hao M D, Dang T H. NO₃-N accumulation and its affecting factors in small watershed in gully region of Loess Plateau *Journal of Natural Resources*, 2003, 18 (1): 27 - 43.
- [18] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, *et al* Soil respiration in desert ecosystems of the arid region *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (5): 1911 - 1922.
- [19] Lu R K. The methods of agriculture chemical analysis Beijing: China Agricultural Science Press, 2000.
- [20] WU J S, L N Q M, Huang Q Y, *et al* Soil Microbial Biomass—Methods and Application *Atmosphere*, 2006.
- [21] Zhang X Z, Liu Y F, Zhong H P, *et al* Daily and seasonal variation of soil respiration of farmland in The Tibetan Plateau *Resources Science*, 2003, 25 (5): 103 - 107.
- [22] Wang X, Zhou G S, Jang Y L, *et al* Comparison of soil respiration in Broad-leaved Korean pine forest and reclaimed cropland in Changbai Mountains, China *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (6): 887 - 893.
- [23] Hu C, Cao Z P, Hu C J, *et al* Effects of different manure management practices on soil carbon and basal respiration *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15 (5): 63 - 66.
- [24] Cheng Y, Li Z P, Zhou L X, *et al* Influences of fertilization on microbial biomass and respiration intensity of paddy soils in subtropical China *Soil*, 2008, 40 (3): 437 - 442.
- [25] Liu L X, Dong Y S, Qi Y C. The development on the soil respiration of grassland ecosystem. *Progress in Geography*, 2004, 23 (4): 35 - 42.
- [26] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (12): 4273 - 4280.
- [27] Sun W J, Huang Y, Cheng S T, *et al* CO₂ emission from Soil-Crop System as influenced by crop growth and tissue N content *Environmental Science*, 2004, 25 (3): 1 - 6.
- [28] Cui Y T, Han C R, Lu J D. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high-yield agroecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8 (1): 59 - 64.
- [29] Chen S Y, Hu C S. Soil respiration rate of factor land ecosystem in Taihang Piedmont *Eco-Agriculture Reserarch*, 1997, 5 (2): 42 - 46.
- [30] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, *et al* Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations *Biogeochemistry*, 2000, 48: 115 - 146.
- [31] Domanski G, Knzyakov Y, Siniakina S V, *et al* Carbon flows in the rhizosphere of ryegrass (*Lolium perenne*). *Plant Nutr Soil Sci*, 2001, 164: 381 - 388.
- [32] Swinnen J. Evaluation of the use of a model rhizodeposition technique to separate root and microbial respiration in soil *Plant and Soil*, 1994, 165: 89 - 101.

参考文献:

- [1] 徐江兵, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥处理红壤生物活性有机碳变化及与有机碳组分的关系. *土壤*, 2007, 39 (4): 627 ~ 632.

- [2] 倪进治,徐建民,谢正苗,等. 不同施肥处理下土壤水溶性有机碳含量及其组成特性的研究. 土壤学报, 2003, 40(5): 724 ~ 730.
- [3] 林而达. 气候变化与农业可持续发展. 北京:北京出版社, 2001. 1 ~ 32.
- [4] 乔运发,苗淑杰,韩晓增. 长期施肥条件下黑土有机碳和氮的动态变化. 土壤通报, 2008, 39(3): 545 ~ 548.
- [5] 韩广轩,周广胜,许振柱,等. 玉米农田土壤呼吸作用的空间质异性及其根系呼吸作用的贡献. 生态学报, 2007, 27(12): 5254 ~ 5251.
- [6] 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. 农业工程学报, 2008, 24(4): 14 ~ 20.
- [7] 陈述悦,李俊,陆佩玲,等. 华北平原麦田土壤呼吸特征. 应用生态学报, 2004, 1(9): 1552 ~ 1560.
- [8] 孟磊,丁维新,蔡祖聪,钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687 ~ 692.
- [9] 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. 环境科学学报, 2006, 26(6): 992 ~ 999.
- [10] 郑聚峰,张旭辉,潘根兴,等. 水稻土基底呼吸与 CO₂ 排放强度的日动态及长期不同施肥下的变化. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 485 ~ 494.
- [11] 朱咏莉,吴金水,董成立,等. 稻田 CO₂ 通量对光强和温度变化的响应特征. 环境科学, 2008, 29(4): 1040 ~ 1044.
- [12] 朱咏莉,董成立,吴金水,等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征. 环境科学, 2007, 28(3): 283 ~ 288.
- [13] 韩广轩,周广胜,许振柱. 中国农田生态系统土壤呼吸作用研究与展望. 植物生态学报, 2008, 32(3): 719 ~ 733.
- [14] 郭胜利,周印东,张文菊,等. 长期施用化肥对粮食生产和土壤质量性状的影响. 水土保持研究, 2003, 10(1): 16 ~ 22.
- [15] 张春霞,郝明德,谢佰承. 不同化肥用量对土壤碳库的影响. 土壤通报, 2006, 37(5): 861 ~ 864.
- [16] 郭胜利,吴金水,党廷辉. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响. 中国农业科学, 2008, 41(3): 744 ~ 751.
- [17] 郭胜利,郝明德,党廷辉. 黄土高原沟壑区小流域土壤 NO₃-N 的积累特征及其影响因素. 自然资源学报, 2003, 18(1): 37 ~ 43.
- [18] 张丽华,陈亚宁,李卫红,等. 干旱区荒漠生态系统的土壤呼吸. 生态学报, 2008, 28(5): 1911 ~ 1922.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 吴金水,林启美,黄巧云,等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京:气象出版社, 2006. 6.
- [21] 张宪洲,刘允芬,钟华平,等. 西藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征. 资源科学, 2003, 25(5): 103 ~ 107.
- [22] 王旭,周广胜,蒋延玲,等. 长白山红松阔混交林与开垦农田土壤呼吸作用比较. 植物生态学报, 2006, 30(6): 887 ~ 893.
- [23] 胡诚,曹志平,胡婵娟,等. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及土壤呼吸的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 63 ~ 66.
- [24] 陈旻,李忠佩,周李祥,等. 不同施肥处理对红壤水稻土微生物生物量及呼吸强度的影响. 土壤, 2008, 40(3): 437 ~ 442.
- [25] 刘立新,董云社,齐玉春. 草地生态系统土壤呼吸研究进展. 地理科学进展, 2004, 23(4): 35 ~ 42.
- [26] 蔡艳,丁维新,蔡祖聪. 土壤玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. 生态学报, 2006, 26(12): 4273 ~ 4280.
- [27] 孙文娟,黄耀,陈书涛,等. 作物生长和氮含量对土壤作物系统 CO₂ 排放的影响. 环境科学, 2004, 25(3): 1 ~ 6.
- [28] 崔玉亭,韩纯儒,卢进登. 集约高产农业生态系统有机物分解及土壤呼吸动态研究. 应用生态学报, 1997, 8(1): 59 ~ 64.
- [29] 陈素英,胡春胜. 太行山前平原农田生态系统土壤呼吸速率的研究. 生态农业研究, 1997, 5(2): 42 ~ 46.