

农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究*

戴万宏^{1,2}, 王益权¹, 黄耀², 刘军¹, 赵磊¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

[摘要] 采用静态箱和气相色谱法, 对不同施肥条件(CK, NP, 秸秆 + NP) 下的土壤呼吸进行了连续 1 年的观测研究。结果表明, 黄土农田土壤的呼吸速率呈明显的季节性变化, 以 7 月上旬最大, 冬季最小; 土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素, 二者间存在极显著的幂函数相关关系 ($P < 0.01$); 长时期夏季干旱造成的土壤水分胁迫也明显影响土壤呼吸速率; CK, NP 和秸秆 + NP 3 种培肥措施下, 土壤 CO₂ 年排放量估计值分别为 1 353, 1 604 和 1 769 g/m²; 不同培肥措施长期实施对土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量有明显影响, 其大小顺序为 秸秆 + NP > NP > CK。

[关键词] 黄土; 土壤培肥; 土壤呼吸; 农田生态系统; CO₂ 释放

[中图分类号] S152.6

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2004)12-0001-07

土壤呼吸是土壤向大气释放 CO₂ 的过程, 包括土壤微生物呼吸、植物根系呼吸、土壤动物呼吸以及含碳矿物质化学氧化等土壤中产生 CO₂ 的所有代谢过程^[1]。CO₂ 是引起全球气候变化的重要温室气体, 其强烈的温室效应对全球气候变暖的贡献远超过其他温室气体, 工业革命后大气中 CO₂ 浓度持续升高, 由此引起的全球气候变暖已成为人们关注的重大科学问题之一^[2,3]。土壤是仅次于海洋的全球第二大有机碳库(约 1.394×10^{18} g), 是大气 CO₂ 的重要来源^[4], 土壤呼吸在全球 CO₂ 地 - 气交换和大气 CO₂ 浓度变化中起着重要作用^[5]; 据估计^[6], 全球土壤每年向大气排放的碳量高达 68×10^{15} g, 约占全球总排放量的 5%~20%, 人类活动等造成的全球土壤有机碳储量下降已使大气中的 CO₂ 浓度提高了近 140 $\mu\text{L/L}$ ^[7]。因此, 研究土壤呼吸并准确预测土壤向大气的 CO₂ 排放量, 对探讨全球变化及其对未来人类生存环境的反馈影响具有十分重要的意义。

土壤呼吸的研究可以追溯到 19 世纪末, 但直到 20 世纪中期, 土壤呼吸作为评价土壤生物活性、土壤肥力及土壤透气性的指标才日益受到重视^[8,10]。近年来, 随着全球气候变化成为人们关注和研究的热点问题, 土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的最

重要环节及土壤碳库的主要输出途径和大气 CO₂ 的重要来源, 已经成为全球碳循环研究中倍受科学家关注的核心问题^[5,11]。国内外广泛开展了自然生态系统(森林和草地)中土壤呼吸的系统观测及其受环境因素影响的研究工作^[5,12,13], 而对陆地生态系统中受人为活动影响最大且碳循环最为频繁的农田生态系统土壤呼吸的系统观测则较少^[14,15]。

本研究选择黄土高原地区气候复杂多变、农业历史悠久的陕西关中农田生态系统, 对不同培肥措施长期实施后的农田土壤呼吸进行了连续 1 年的观测研究, 旨在了解黄土呼吸速率的动态变化规律及其受土壤温度、水分和人为培肥措施的影响, 以为农田土壤 CO₂ 排放量的准确估计提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于西北农林科技大学教学试验农场内, 该农场地处黄土高原南部的黄土台塬上, 地势平坦, 农业历史悠久。海拔 550 m; 光、热资源比较丰富, 年均温度 12.9 $^{\circ}\text{C}$, 大于 10 $^{\circ}\text{C}$ 积温 4 185 $^{\circ}\text{C}$; 年均降水量 635.1 mm, 降水量年际变化大, 年度内分布极不均匀, 7 月降水量占全年 1/2 左右; 年均蒸发量 993.2 mm; 该地区干旱频繁发生(主要有冬

* [收稿日期] 2003-11-20

[基金项目] 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412500)

[作者简介] 戴万宏(1965 -), 男, 陕西渭南人, 副研究员, 博士, 主要从事土壤肥力和农田土壤温室气体排放研究。

E-mail: dwh@dq.cern.ac.cn

旱、春旱和伏旱,属暖温带半湿润易旱的大陆性季风气候区^[16]。冬小麦-夏玉米 1 年两熟是当地典型的轮作制度。

试验地土壤为瘠土(土垫旱耕人为土),粉砂粘壤质地,土质疏松,土层深厚,土壤透水、透气,农艺性状良好。

1.2 试验处理与研究方法

土壤呼吸动态的连续观测研究在已连续 23 年

表 1 供试土壤基本性状

Table 1 The basic properties of tested soils

培肥措施 Fertilization	有机质/(g kg ⁻¹) Organic matter	容重/(g cm ⁻³) Bulk density	物理性粘粒/% Physical clay content	>0.25 mm 团聚体/% Aggregate content
无肥对照(CK) No fertilizer	13.11	1.33	46.94	79.95
化肥(NP) Chemical fertilizer	14.78	1.36	47.31	82.26
秸秆+NP Straw+NP	19.66	1.16	45.84	87.75

土壤呼吸测定采用静态箱、气相色谱法。从 2001-03 冬小麦返青开始至 2002-03 底结束,每隔 10 d 左右观测 1 次,每次观测均在上午 9:00-12:00 进行。观测时,先小心剪除作物行间杂草,然后根据作物种植情况,在每一处理小区内的作物行间均匀布设 3 个静态箱(铁皮圆桶,直径 14 cm,高 17 cm);静态箱插入土内,压实箱外壁土壤以防漏气,然后用密封性能良好的注射器间隔一定时间采取箱内气体样品,用气相色谱仪(日立 633-30 型)测定其中 CO₂ 含量,依据静态箱内 CO₂ 浓度的变化用下式计算土壤呼吸速率:

$$R_s = \frac{C \times V}{S \times t} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times k$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率; C 为间隔 t 时间 2 次取样测定的 CO₂ 浓度差; V 为静态箱净体积; S 为静

态箱底面积; P 为大气压力; T 为测定时温度; T_0 和 P_0 分别为标准状态下的气温(273 K)和气压(101.325 kPa); ρ 为标准状态下 CO₂ 密度; k 为单位换算系数。

土壤呼吸测定的同时,测定田间 05, 515, 1525 cm 土层含水量以及地表温度和 5, 10, 20 cm 深度处的土壤温度。

2 结果与讨论

2.1 土壤呼吸速率的季节动态

1 年的观测结果(图 1)表明,不同培肥措施长期实施后所形成的不同肥力土壤间,土壤呼吸速率具有一致的波动规律,均呈现出明显、复杂的季节动态变化。

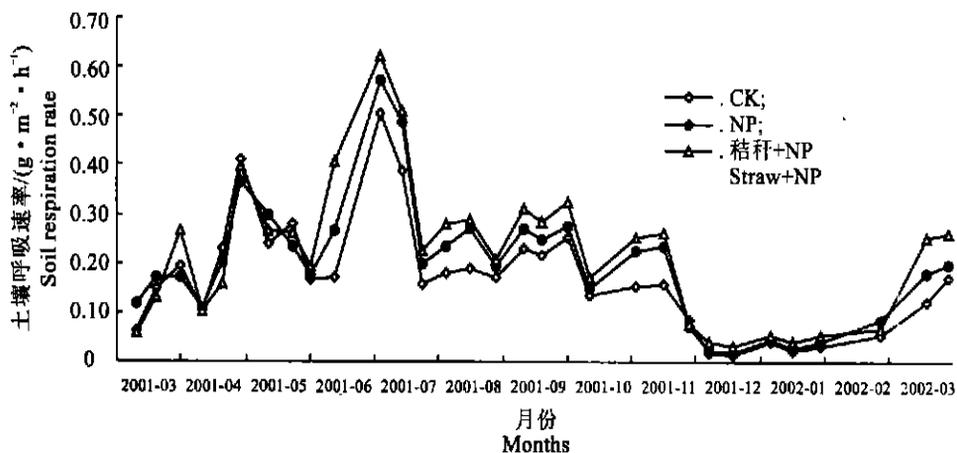


图 1 土壤呼吸速率的季节动态变化

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil respiration rate

春季土壤呼吸速率总体呈上升趋势,夏季的 2001-07 初达到最高(0.490.62 g/(m²·h)),秋季则总体呈下降趋势,冬季降到最低(0.020.03 g/(m²·h));由此可见,土壤呼吸速率季节的动态变化与土壤温度的季节性动态变化(图 2)具有相似性。但本研究观测到的土壤呼吸季节动态较一般报道^[15,18,19]的单峰型季节动态要复杂得多,这主要是

因为试验地在连续观测的 1 年中气候出现异常,2001-05-2001-08 出现了长时期极端严重的夏季干旱,土壤温度和水分这 2 个决定土壤呼吸的重要因素极不协调(图 2),再加上 2001-04 上旬的强烈倒春寒、下旬的春灌以及 2001-06 作物收获等气候和人为因素的影响。

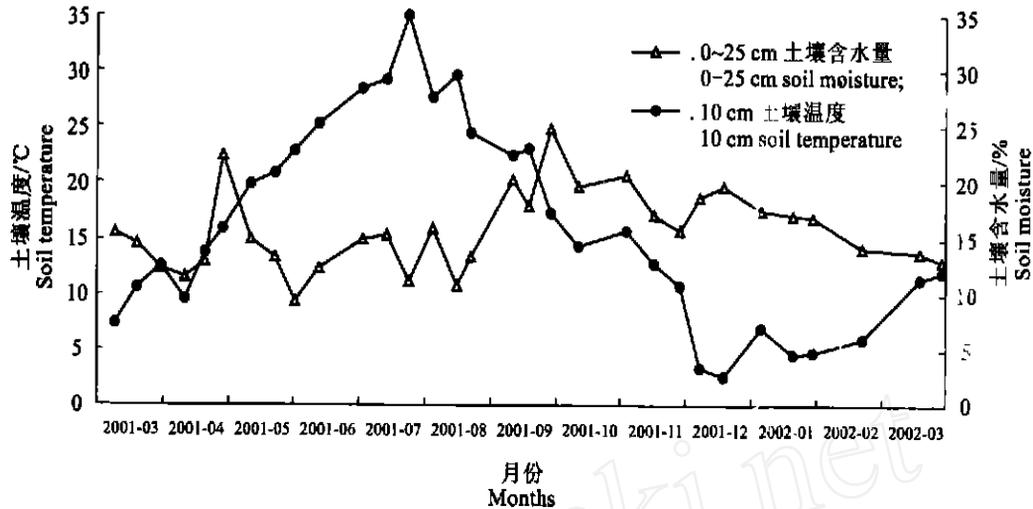


图 2 土壤温度和含水量的季节动态变化(NP 处理)

Fig. 2 Seasonal dynamics of soil temperature and soil moisture (NP treatment)

对照土壤呼吸速率和土壤温度、含水量观测结果(图 1、2),结合田间管理措施和作物生长状况的实际观察,娄土农田生态系统中土壤呼吸的季节动态规律可以具体描述如下:2001-03 开春后,冬小麦开始返青,随着温度升高,土壤微生物呼吸和作物根系呼吸逐渐增大,因此土壤呼吸速率逐渐升高,月底达到其第一个峰值(0.200.25 g/(m²·h));2001-04 初该地区遭受强烈倒春寒袭击,温度骤降,土壤呼吸速率随之下降;之后气温再度回升,并在 2001-04-25 通过春灌补充土壤水分,使得土壤呼吸速率快速增大,月底达到其第二个峰值(0.350.39 g/(m²·h));2001-05 小麦生长消耗了大量土壤水分,土壤含水量急剧下降,之后的很长一段时期内,025 cm 土层含水量低于 15%,基本上接近甚至低于该土壤凋萎湿度,虽然温度仍在不断升高,但土壤呼吸速率却呈下降趋势;2001-06 初冬小麦收获后播种夏玉米,由于土壤耕翻、少量降雨以及残留在土壤中的小麦根茬快速腐解的缘故,土壤呼吸速率急剧增大,于 2001-07 初达到全年最高,CO₂ 的释放峰值为 0.49-0.62 g/(m²·h);之后随着小麦根茬快速腐解阶段的结束和土壤水分的限制,土壤呼吸速率快速下降,使得 1 年中温度最高时期的土壤呼吸速率反而处于相

对较低的水平;2001-07 下旬以后,温度持续降低,2001-08 的严重干旱、2001-09 降雨补充土壤水分、玉米的生长、2001-10 初玉米的收获以及施肥和小麦播种等的共同影响,使得土壤呼吸速率在 2001-07 下旬至 2001-11 中旬的较长时期内一直处于相对稳定的较低水平,并小幅波动;2001-11 中旬后温度迅速降低,土壤呼吸速率下降,2001-12-2002-02 的整个冬季,由于受低温的限制,土壤呼吸速率稳定地维持在 1 年的最低水平。

2.2 土壤呼吸速率与土壤温度、水分的关系

由娄土农田土壤呼吸速率季节动态(图 1)与土壤温度、含水量变化(图 2)的比较可以看出,土壤呼吸速率的动态变化与土壤温度的季节动态总体上较为一致,而与土壤水分的季节变化没有明显的一致性。回归分析(表 2,图 3)表明,土壤呼吸速率与地表温度及 5,10 和 20 cm 土层温度均具有极显著的幂函数关系($P < 0.01$),其中土壤呼吸速率与 10 cm 处土温变化可以解释土壤呼吸速率季节变异的 80%左右;土壤呼吸速率与 05,515,1525 cm 土层含水量及 025 cm 土层平均含水量间的相关性不显著($r^2 < 0.05$)。

表 2 土壤呼吸速率与土壤温度的相关性及其温度效应

Table 2 Correlation between soil respiration rate and soil temperature, and its temperature effect

培肥处理 Fertilization	r^2				Q_{10}		
	0 cm	5 cm	10 cm	20 cm	1020	2030	1030
无肥对照(CK) No fertilizer	0.689 4 **	0.771 2 **	0.792 2 **	0.784 5 **	2.32	1.64	1.90
化肥(NP) Chemical fertilizer	0.737 7 **	0.795 8 **	0.806 0 **	0.792 4 **	2.25	1.61	1.81
秸秆+NP Straw+NP	0.700 9 **	0.768 7 **	0.805 1 **	0.804 9 **	2.12	1.55	1.64

注: ** 表示相关显著性达到 1% 水平 ($P < 0.01$); Q_{10} 值是由土壤呼吸速率与 10 cm 土壤温度幂函数回归方程计算得到的值。

Note: ** Means the significance at 1% level; Q_{10} value was calculated by regress power equation between soil respiration rate and soil temperature at the depth of 10 cm.

进一步以 NP 处理为例,分析土壤温度和含水量对土壤呼吸速率的影响。由图 3 可以看出,10 cm 处土壤温度低于 20 时,其呼吸速率观测值均非常规律地随土壤温度升高而升高,其幂函数相关方程的 r^2 可高达 0.894 ($P < 0.01$, $n = 20$); 10 cm 处土壤温度高于 20 时,土壤呼吸速率观测值随土壤温度的变化显得比较分散,二者间无相关性 ($r^2 = 0.075$, $n = 11$),除两个土壤呼吸极高值(2001-07-03

和 2001-07-13)可能是小麦收获后残留根茬快速腐解所致以外,其余 9 次土壤呼吸速率观测值明显偏离(低于)20 以下土壤呼吸速率随温度增加的趋势线,且二者相关性仍很差 ($r^2 = 0.014$, $n = 9$)。而这种情况下,土壤呼吸速率与 025 cm 土层含水量的相关性虽仍不显著,但其指数相关程度却大大提高 ($r^2 = 0.259$, $n = 9$)。

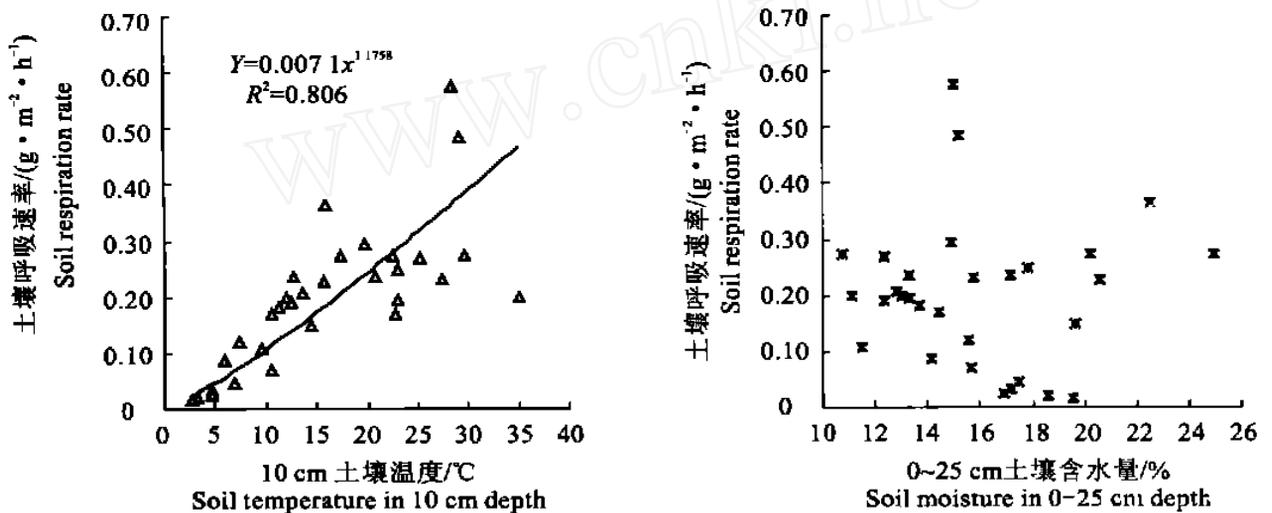


图 3 土壤呼吸速率与土壤温度、含水量的关系(NP 处理)

Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and soil temperature, soil moisture (NP treatment)

Q_{10} 值(温度变化 10 引起的土壤呼吸变化)是描述土壤呼吸温度效应的关键参数^[5,20],用土壤呼吸速率与 10 cm 处土壤温度的幂函数方程计算得到的 Q_{10} 值列于表 2。从表 2 可以看出,10 cm 处土壤温度为 1030 时,黄土农田土壤呼吸的平均 Q_{10} 值为 1.641.90,低于一般观测的 Q_{10} 值(2.0-2.5)^[5,20];不同温度范围, Q_{10} 值明显不同,土壤温度为 1020 时,土壤呼吸 Q_{10} 值为 2.122.32,与其他观测结果^[5,20]完全一致,但在 2030 时,土壤呼吸的 Q_{10} 值为 1.551.64,显著低于一般观测

结果^[5,20]。

土壤呼吸是一个主要包括土壤微生物呼吸和植物根系呼吸的复杂生物学过程,受到多种因素的影响。以往研究^[1,5,10,21]表明,土壤温度和水分是影响土壤呼吸速率的关键环境因素,土壤呼吸随温度升高呈指数增加,土壤含水量对土壤呼吸的影响则较为复杂,往往同时取决于温度的相互协调情况。在本研究的土壤呼吸观测期间,陕西关中地区 2001 年遭遇严重的、长时间的夏季持续干旱,农田生态系统中土壤温度和土壤水分极不协调,土壤温度大于

20 的较长一段时期内,025 cm 土层含水量低于 15%,接近甚至低于该土壤凋萎湿度(图 2),作物生长和微生物活动不能正常进行,从而明显影响了土壤呼吸和 CO₂ 的释放过程;土壤呼吸速率在夏季较高温度时期一直处于相对较低水平,土壤温度对土壤呼吸的影响未正常表现出来,因此使得 2030 时的土壤呼吸 Q_{10} 值明显偏低,也使得整个观测期间土壤呼吸速率与土壤温度呈幂函数关系,而非一般认为的指数关系^[1,10,21],同样的原因也使土壤含水量对土壤呼吸速率影响的数量关系表现不显著。

总之,气候多变、干旱频繁的陕西关中塬土地区,农田生态系统土壤呼吸速率主要受土壤温度的影响,土壤含水量对土壤呼吸速率影响的数量关系

不明显,但干旱造成的土壤水分胁迫却对土壤呼吸速率有明显的影响。

2.3 土壤呼吸年 CO₂ 排放量的估计

根据实际观测结果,获得特定时段(9:00-12:00)土壤呼吸速率(R_s)与 10 cm 土壤温度(T)的幂函数回归方程:

$$\text{CK 处理: } R_s = 0.0052 T^{1.2134}$$

$$\text{NP 处理: } R_s = 0.0071 T^{1.1705}$$

$$\text{秸秆 + NP 处理: } R_s = 0.0100 T^{1.0827}$$

利用试验地当地 2001-2002 年观测期间的土壤温度资料,可以计算得到不同培肥措施长期实施后,塬土农田土壤呼吸速率的季节平均值、全年平均值和土壤年 CO₂ 释放量(表 3)。

表 3 不同季节土壤呼吸速率及年 CO₂ 排放量估计值

Table 3 Estimated value of soil respiration rate in different seasons and annual CO₂ evolution

培肥处理 Fertilization	土壤呼吸速率/(g·m ⁻² ·h ⁻¹) Soil respiration rate					年 CO ₂ 释放量/ (g·m ⁻²) Annual CO ₂ evolution	
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	年平均 Annual mean		
无肥对照(CK) No fertilizer	0.1313	0.2911	0.1589	0.0366	0.1514	7.95	1353
化肥(NP) Chemical fertilizer	0.1573	0.3398	0.1894	0.0460	0.1873	7.39	1604
秸秆 + NP Straw + NP	0.1772	0.3627	0.2107	0.0570	0.2019	6.37	1769

从表 3 可以看出,塬土农田生态系统中,不同季节的土壤呼吸速率大小顺序为夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,其中夏季土壤呼吸速率是冬季的 6.37 倍,然而土壤呼吸速率季节平均值仅是利用土壤温度资料所作的估计,并未考虑土壤水分等其他因素的影响,因此持续严重干旱的夏季土壤呼吸速率可能被高估了。表 3 中用 10 cm 土壤温度资料估计得到 CK, NP 和秸秆 + NP 处理的土壤呼吸速率全年平均值,分别与 9:00-12:00 实际观测值的全年加权平均值(0.1514, 0.1822 和 0.2059 g/(m²·h)) 非常接近,由此可以看出,该地区 9:00-12:00 观测的土壤呼吸速率可以作为全天平均值,用于土壤 CO₂ 释放量的估算,因此 9:00-12:00 是关中地区实际观测土壤呼吸速率的特定时段。利用此方法估算的 CK, NP 和秸秆 + NP 3 种培肥处理农田土壤 CO₂ 年释放量分别为 1353, 1604 和 1769 g/m²,其中 NP 和秸秆 + NP 处理的土壤年 CO₂ 释放量估计值,与太行山前平原中等肥力农田土壤年 CO₂ 释放量(16291788 g/m²)^[15] 基本一致,稍低于河北省中、高产集约农田(17261878 g/m²)^[14],这可能与本研究观测期间的持续严重干旱以及农田生态系统的具体

情况有关。综合考虑陕西关中地区气候状况和农田生态系统的具体情况,可以认为本研究估计的塬土年 CO₂ 释放量代表了该地区干旱年份土壤呼吸向大气释放的 CO₂ 量;但在丰水年和一般年份情况下,这一结果可能偏低,尚需进一步的田间观测。

2.4 不同培肥措施对土壤呼吸的影响

研究结果(图 1,表 3)表明,不同培肥措施明显影响土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量,CK, NP 和秸秆 + NP 处理连续实施 23 年后,土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量具有明显差异,其中夏季和秋季(2001-06-2001-11)的差异最为明显。一般情况下,无肥对照的土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量最低,秸秆还田并配施 NP 的处理最高,长期单施 NP 处理居中,即秸秆 + NP > NP > CK; 秸秆 + NP 处理的年 CO₂ 释放量分别比 NP 处理和 CK 增加了 165 和 416 g/m², NP 处理则比 CK 增加了 251 g/m²;方差分析表明,培肥处理间土壤呼吸速率有极显著差异($F = 22.55$, $P < 0.01$), t 检验进一步表明,3 种培肥处理间,土壤呼吸速率的差异均达到了极显著水平($P < 0.01$)。

土壤呼吸释放 CO₂ 的过程是在土壤物理、化学和生物等多种因子综合作用下完成的,呼吸速率与

土壤肥力有密切关系^[14,15]。本研究是在同一地块,经过 23 年不同培肥措施后肥力差异很大的瘠土土壤上进行的,土壤呼吸观测前,3 种培肥处理土壤的有机质含量、容重、物理性粘粒含量和 > 0.25 mm 团聚体含量均有明显差异(表 1),其中秸秆 + NP 处理土壤的有机质含量和 > 0.25 mm 团聚体含量明显高于 CK 和 NP 处理土壤,而容重和物理性粘粒含量则明显较低,这样就使得不同培肥处理间土壤结构及其化学稳定性明显不同,而土壤结构明显影响土壤水分、温度状况和微生物活动,进一步影响土壤呼吸释放 CO₂ 的过程以及 CO₂ 在土壤中的扩散和传输^[22]。王旭东等^[17]、吕家珑等^[20]对该培肥定位试验的长期研究发现,不同培肥措施明显影响土壤肥力状况和作物生长;连续施用秸秆 + NP 处理较 NP 和 CK 处理明显增加了土壤有机质数量,改善了有机质品质(有机质复合度降低、游离态腐殖质含量增加、松结态腐殖质占全碳的比例增高),增强了土壤有机质活性(氧化稳定性降低),同时显著增加了微生物数量,提高了生物酶活性^[17];连续施用秸秆 + NP 也改善了土壤结构等物理形状,提高了土壤肥力,使作物产量大大提高,同时增加了作物根茬等有机物的还田数量^[20];合理施用化肥(NP)也在很大程度上提高了土壤肥力,增加了作物产量和根茬还田量,增加了土壤有机质和微生物数量,提高了其活性,而长期不施肥的对照土壤,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^[17,20]。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和年 CO₂ 释放量表现出明显差异。

3 结 论

田间连续、定位观测结果表明,不同培肥措施长期实施后,形成的不同肥力土壤具有一致的土壤呼吸速率季节变化规律,但其季节变化较为复杂,7 月上旬土壤呼吸速率达到最大(0.490.62 g/(m²·h)),冬季最低(0.020.03 g/(m²·h));土壤温度是影响土壤呼吸速率的主要因素,土壤呼吸速率随温度升高呈极显著幂函数增加;土壤水分对土壤呼吸速率的影响不明显,但干旱造成的水分胁迫却明显影响着土壤的呼吸速率;不同培肥措施长期实施对土壤呼吸速率和 CO₂ 释放量有明显影响,CK、NP、秸秆 + NP 3 种培肥措施下,土壤 CO₂ 年排放量的估计值分别为 1 353,1 604 和 1 769 g/m²。

陕西关中地区气候多变、以干旱为代表的气候灾害事件频繁发生,因此农田生态系统土壤 CO₂ 释放量的准确估算需要以高频率、连续多年的观测结果为基础,同时通过生态系统中各种碳库及其相互转化的实时观测,可以清楚地了解农田生态系统碳循环及其收支情况。本文仅是这一研究的初步探索,其结果尚需进一步的试验观测验证。

[参考文献]

- [1] Singh J S, Gupta S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. Botany Review, 1997, 43: 449 - 528.
- [2] Houghton J H, Meira L G, Bruce J. Climate change 1994[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 1995.
- [3] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, 290: 291 - 296.
- [4] Jenkinson D S, Adams D E, Wild A. Model estimates of CO₂ emission from soil in response to global warming[J]. Nature, 1991, 351: 304 - 306.
- [5] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus, 1992, 44: 81 - 99.
- [6] Van Breemen N, Feijtel T C J. Soil processes and properties involved in the production of greenhouse gases, with special relevance to soil taxonomic system[A]. Bouwman A F. Soil and Greenhouse Effect[C]. Chichester: John Wiley and Sons, 1990. 195 - 224.
- [7] 蔡祖聪. 土壤痕量气体研究进展[J]. 土壤学报, 1993, 30(2): 117 - 124.
- [8] Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1970, 2: 9 - 18.
- [9] 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.
- [10] Reiners W A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests[J]. Ecology, 1968, 49: 471 - 483.
- [11] Schlesinger W H. An overview of the carbon cycle[A]. Lai R. Soil and global change[C]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1995. 9 - 25.
- [12] 李凌浩, 王佐忠. 草地群落的土壤呼吸[J]. 生态学杂志, 1998, 17(4): 45 - 51.
- [13] 刘绍辉, 方精云, 青田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸[J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 119 - 126.
- [14] 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[J]. 应用生态学报, 1997, (8): 59 - 64.

- [15] 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[J]. 生态农业研究,1997,5(2):42-46.
- [16] 中国科学院西北水土保持研究所. 武功土壤[M]. 西安:陕西科学技术出版社,1987.1-15.
- [17] 王旭东,张一平,吕家珑,等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学,2000,33(2):75-81.
- [18] 李凌浩,王其兵,白永飞,等. 锡林河流域羊草草原群落土壤呼吸及其影响因子的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(6):680-686.
- [19] Rayment M B, Jarvis P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest[J]. Soil Biology and Biochemistry,2000,32:35-45.
- [20] 吕家珑,张一平,王旭东,等. 长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J]. 应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [21] Kucera C, Kirkham D. Soil respiration studies in tallgrass prairie in Missouri[J]. Ecology,1971,52:912-915.
- [22] Hillel D. Fundamentals of soil physics[M]. New York:Academic Press,1980.

Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems

DAI Wan-hong^{1,2}, WANG Yi-quan¹, HUANG Yao², LIU Jun¹, ZHAO Lei¹

(1 College of Resource and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 LA PC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Soil respiration was measured by static chamber and gas chromatogram method in agri-ecosystems with different long-term fertilization (CK, NP and Straw + NP). The results obtained in one year showed that the seasonal dynamics of soil respiration rate in Lou soil was obvious and relatively complex, and its maximum value appeared in the first ten days of July, while the lowest in winter. Soil respiration rate was significantly correlated with soil temperature, and could be described by power function ($P < 0.01$). Soil water-stress led by longer drought in summer could also influence soil respiration rate obviously. From observed values and model predictions, the annual soil CO₂ emission in agri-ecosystems with different fertilizations was at 1 353 g/m² in farmland without fertilizer (CK), 1 604 g/m² with NP chemical fertilizer (NP), and 1 769 g/m² with corn straw plus NP chemical fertilizer (Straw + NP). The soil respiration rate and annual soil CO₂ emission were affected significantly by different fertilization treatments, and its order was as follows: Straw + NP > NP > CK.

Key words: Lou soil; soil fertilization; soil respiration; agri-ecosystem; soil CO₂ emission