

高产农田生态系统土壤有机碳的输出规律及其影响因素^①

孟凡乔^② 吴文良

(中国农业大学资源与环境学院)

摘 要 本研究以吨粮县山东桓台为试验基地,分析高产条件下不同秸秆还田模式和氮肥水平对土壤有机碳输出——土壤呼吸的影响及其变化规律。研究表明,土壤呼吸与温度的相关程度较大,且与日平均气温和地温有较好的指数关系。高产(吨粮)条件下土壤呼吸的强度在(CO₂) 3 142~5 057 g·m⁻²·a⁻¹之间。有机肥处理的土壤呼吸强度大于其他处理,小麦和玉米秸秆全部还田处理>小麦秸秆还田处理>秸秆焚烧处理。

关键词 高产; 秸秆还田; 土壤呼吸

分类号 S181; S153.621

Output of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in High Yield Farmland Ecosystem

Meng Fanqiao Wu Wenliang

(College of Resource & Environment Sciences, CAU)

Abstract The study analyses the influence of crop straw return and nitrogen fertilizer application on soil organic matter output-soil respiration in Huantai County, which is famous for its high grain yield (>15 000 kg·hm⁻²·a⁻¹). The results indicate that soil respiration is more correlated with temperature, especially with air temperature. The relationship between soil respiration and air temperature can be stimulated by exponential equation well. Under the yield level of >15 000 kg·hm⁻²·a⁻¹, soil respiration capacity is within the range of CO₂ 3 142~5 057 g·m⁻²·a⁻¹. Organic fertilizer can increase the evolution of soil CO₂. The soil respiration of wheat straw return+corn straw return treatment is higher than that of wheat straw return treatment, and the latter treatment is higher than that of crop straw burning treatment.

Key words high yield; crop straw return; soil respiration

土壤有机碳输出的主要形式是土壤呼吸,即 CO₂。土壤呼吸的重要性在于,一方面可以说明土壤生物和根系利用有机物质所进行的新陈代谢强度,是土壤生物活性的重要指标。据估计,在植物生长期,约有 30%~60%的净光合产物由地上部分转移到根系,其中根系释放到根际土壤的有机物(包括植物根系和微生物呼吸作用释放的 CO₂)数量约占运输到地下部分全部光合产物的 40%~80%,占植株光合产物的 15%~40%。这些有机物质绝大部分以 CO₂ 的形式释放出来,还有一小部分转化成微生物量碳及其代谢产物^[1]。另一方面,土壤呼吸可以为

收稿日期: 1999-06-01

①国家自然科学基金重点项目“高产粮区农业生态系统内生资源培育机制及调控途径研究”(39630070)。

②孟凡乔,北京圆明园西路2号中国农业大学(西校区),100094

作物的光合作用提供 CO_2 。许多研究表明,在特定气候条件下,高产农田 CO_2 可能亏缺,限制了作物的光合生产力^[2]。大气 CO_2 浓度倍增(350×10^{-6} 到 700×10^{-6})将增加植物光合速率、提供水分利用效率和养分利用效率^[3]。此外,大气环境中 CO_2 浓度的高低对温室效应有很大影响,是全球气候变化研究的重要内容^[4]。

高产农田具有肥料投入高、秸秆和籽粒产出也很高的特点。土壤的有机碳不论是在转换率还是在数量方面,都不同于中低产农田。因此,研究土壤呼吸的规律和影响因素,特别是在高产条件下对其进行分析和探讨,对于了解高产农田的土壤碳素平衡、调控土壤碳素水平具有十分重要的意义。

1 研究材料与方法

1.1 试验设置

山东桓台县是我国长江以北第一个“吨粮县”,自1990年以来连续8年全县平均粮食单产获吨粮。本研究地点位于桓台县唐山镇郭家村。田间试验共设置了10个处理,3次重复。试验主要对秸秆还田的方式、氮肥水平以及有机肥施用3方面进行控制(表1)。

表1 试验处理

试验处理编号	试验处理说明
①全还	全还——小麦秸秆和玉米秸秆全部还田;
②麦还	麦还——小麦秸秆还田;
③全还+氮肥1	氮肥1——当地常规氮肥水平,为纯 N $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;
④麦还+氮肥1	
⑤全还+氮肥2	氮肥2——比当地常规氮肥水平低20%,为纯 N $480 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;
⑥麦还+氮肥2	
⑦全还+氮肥3	氮肥3——比当地常规氮肥水平高20%,为纯 N $720 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;
⑧麦还+氮肥3	
⑨全还+氮肥2+有机肥	有机肥为猪粪,用量 $30 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。
⑩焚烧+氮肥1	焚烧——小麦秸秆和玉米秸秆全部焚烧。

1.2 土壤呼吸测定

本试验 CO_2 的测定每2周1次,连续测定1年。每次测定 CO_2 释放量的同时测定土壤含水量(0~20 cm)和10 cm地温。采用原位静态方法对田间土壤呼吸进行分析,主要参考 Singh 等的方法^[5]。将内径为15.1 cm、长约25 cm的硬塑料圆筒纵向埋入土壤10 cm。测定时把盛有NaOH溶液的小吸收瓶(内径6.5 cm,高8 cm)置于隔离圆筒内,将圆筒的上方用平板玻璃盖上密封(凡士林抹边)。从土壤中释放的 CO_2 被碱液吸收。一段时间后(本试验采用24 h),取出吸收瓶,密闭,马上拿回实验室用盐酸滴定未参与吸收 CO_2 的NaOH,换算出吸收的 CO_2 量。试验装置见图1^[5]。滴定时用 BaCl_2 溶液做 Na_2CO_3 的沉淀剂,滴定指示剂采用酚酞。

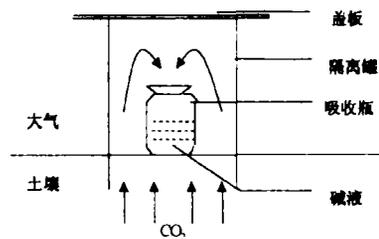


图1 土壤呼吸试验装置^[5]

1.3 土壤含水量

用铝盒烘干法测定。

1.4 土壤地温

采用热敏电阻法。灵敏度可以达到 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热敏电阻采用北京玻璃仪器厂生产的 TL 型。测定范围为 $-20\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 数据处理和分析

数据分析采用 Micro Excel 和 SAS 软件。

2 结果分析

2.1 土壤呼吸的动态变化规律及其影响因素

从土壤呼吸的数据和变化(图 2)可以看出,土壤呼吸在全年的变化规律是:从 10 月底开始,到第 2 年的 3 月上旬,土壤呼吸处于较低水平, CO_2 一直维持在 $2\sim 5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;从 3 月下旬开始,土壤呼吸的数量逐渐增加,到 8 月达到最大, CO_2 维持在 $25\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 水平,然后又逐渐降低。与这段时间的气温、地温和土壤含水量进行比较,可以看出土壤呼吸的变化规律与气温和地温很类似,而与土壤含水量的变化规律相差很大。土壤呼吸和土壤含水量、日平均气温、 10 cm 地温的相关系数分别为 0.01 、 0.91 和 0.89 ,进一步说明土壤的呼吸更容易受到温度的影响。将土壤含水量、土壤地温和气温分别与土壤呼吸做散点图,利用曲线方程进行模拟(图 3),可以发现土壤呼吸与土壤地温和气温的关系均呈指数曲线,也就是说,随着温度的升高,土壤呼吸的增加幅度变大。其中,气温与土壤呼吸曲线的相关系数更大,说明气温比地温对土壤呼吸的影响作用更大。

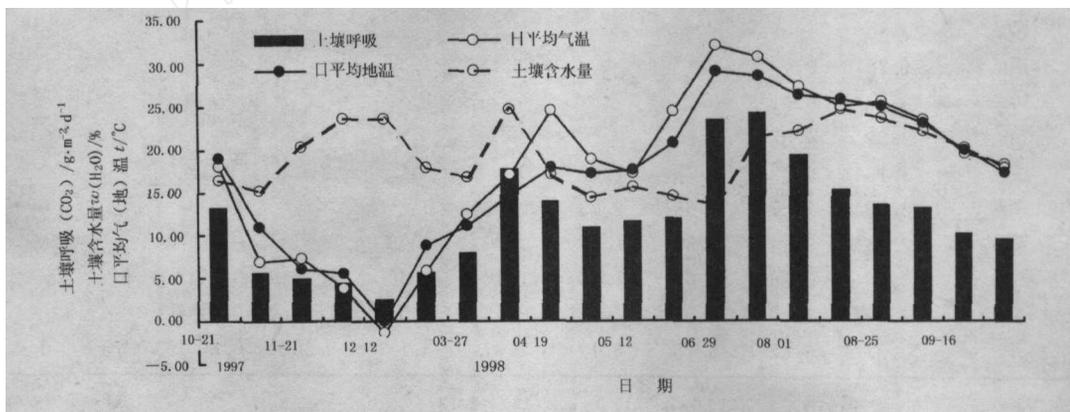


图 2 土壤呼吸的变化曲线

利用土壤呼吸与日平均气温的关系方程,可以求出全年各个试验处理每天的 CO_2 释放量,进而求出全年的 CO_2 释放数量。本研究 10 个处理的全年土壤呼吸强度为:

- | | |
|--|--|
| ①全还: $\text{CO}_2\ 3\ 344.83\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ | ⑤全还+氮肥 2: $\text{CO}_2\ 4\ 575.43\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ |
| ②麦还: $\text{CO}_2\ 3\ 479.45\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ | ⑥麦还+氮肥 2: $\text{CO}_2\ 3\ 517.22\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ |
| ③全还+氮肥 1: $\text{CO}_2\ 3\ 814.69\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ | ⑦全还+氮肥 3: $\text{CO}_2\ 3\ 875.24\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ |
| ④麦还+氮肥 1: $\text{CO}_2\ 3\ 142.24\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ | ⑧麦还+氮肥 3: $\text{CO}_2\ 3\ 512.91\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ |

⑨全还+氮肥2+有机肥: CO_2 5 057.00 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

⑩秸秆焚烧+氮肥1: CO_2 3 260.41 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

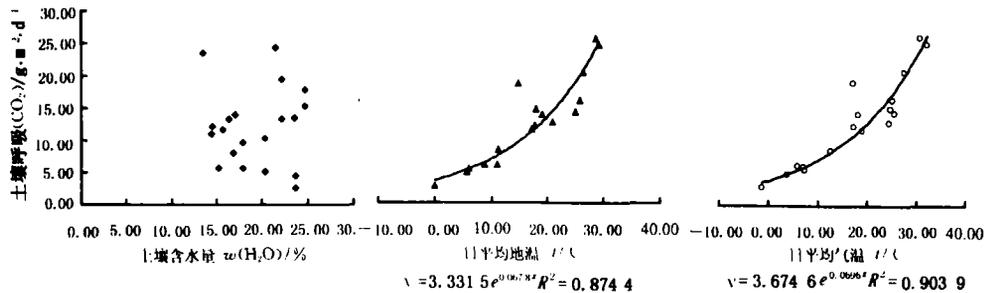


图3 土壤呼吸与土壤含水量、土壤10 cm地温和日平均气温的曲线模拟

2.2 不同秸秆还田模式和氮肥水平对土壤呼吸的影响

不同秸秆还田模式和氮肥水平条件下土壤呼吸强度是不同的。对各个试验处理的全年平均土壤呼吸进行比较,各个处理的大小顺序是:9>5>7>3>2>6>8>1>10>4。也就是说,有机肥处理的土壤呼吸强度最高,麦还+氮肥1的最低,焚烧处理的次之。在施氮肥的情况下,全还的呼吸强度大于麦还,且高于不施氮肥的全还和麦还处理。在施氮肥的情况下,土壤呼吸强度的大小顺序是氮肥2>氮肥3>氮肥1。

表2 各试验处理土壤呼吸的t检验

处理	⑨	⑤	⑦	③	②	⑥	⑧	①	⑩	④
⑨	0									
⑤	1.28	0								
⑦	2.53*	6.01***	0							
③	2.39*	4.07***	0.56	0						
②	3.13**	6.02***	1.78	1.07	0					
⑥	2.92*	7.27***	4.68***	2.23*	0.33	0				
⑧	2.79**	5.44***	2.33*	1.68	0.30	0.09	0			
①	3.56**	5.28***	2.02	1.39	1.16	0.56	0.41	0		
⑩	3.29**	7.07***	4.57***	3.28**	2.15*	2.54**	1.82	0.71	0	
④	3.33**	6.62***	5.78***	6.12***	2.01	3.17**	2.30*	0.80	0.73	0

*** $t_{0.001}(16)=4.015$; ** $t_{0.01}(16)=2.921$; * $t_{0.05}(16)=2.12$ 。

对试验各个处理全年的土壤呼吸进行均值的差异性显著检验(t-检验)表明,处理5与处理7,3,2,6,8,1,10,4都有0.1%的显著性差异;处理9与其他处理全部到5%的显著性差异,与处理2,8,1,10,4达到1%的显著性差异。处理7与处理6,8,10,4的显著性差异分别达到0.1%,5%,0.1%和0.1%的水平。

3 讨论

3.1 土壤呼吸强度及其影响因素

高产农田生态系统与中低产农田生态系统的区别之一就是元素的循环速率加快,这一点

可以在本研究得到充分验证。崔玉亭^[6]在河北吴桥高产田和中产田测定的土壤呼吸量分别为(CO₂)1 878.5 和 1 725.7 g·m⁻²·a⁻¹。而本研究的土壤呼吸量,最低的处理也比河北高产田高 67%,最高可以达到 1.69 倍。通过分析,发现温度不是原因。因为桓台的年平均气温是 11.8~12.9℃,而吴桥的年平均气温是 12.3℃,差异很小。本研究得到的土壤呼吸强度同样高于邢晓光^[7]在北京的研究结果(最高达 CO₂ 2 478.1 g·m⁻²·a⁻¹)。甚至高于草原土壤的呼吸量(CO₂ 3 500 g·m⁻²·a⁻¹)^[8]。

造成土壤呼吸强度高的因素有很多,耕作是其中非常重要的因素。Biederbeck 等^[9]研究发现,连续种植小麦的地块比休闲-小麦种植方式的地块土壤呼吸高约 1 倍。桓台县种植方式是小麦玉米一年两季,与相同气候条件下的土地比较,光合产物的水平是比较高的。

一般认为土壤呼吸与温度是正相关的,而且在 5~35℃ 之间呼吸的增加呈加速形式。在各个温度指标中,可以发现日平均气温与土壤呼吸的关系更为密切,可以从其关系式及其相关性看出(图 3)。土壤呼吸与土壤温度的关系式不同研究者得到的结果不一样,有的认为是指数形式,有的认为是二次式形式^[10]。本研究通过比较发现,利用指数形式进行模拟有更好的效果。土壤呼吸与土壤含水量的关系比较复杂,例如研究发现在土壤水分田间含水量的 5%~10% 时,CO₂ 产生量很小,但随着土壤水分的增加 CO₂ 产生量增加很快,到水分饱和时产生量最大。饱和点以后微生物的活动由于氧气不足而受到抑制,CO₂ 产生量减少。本研究土壤含水量最低的时间是 06-29,为 13.51%,对应的土壤呼吸为次最高值;土壤含水量最高的时间是 04-13 和 08-16,相对应的土壤呼吸为平均水平。说明了土壤呼吸与土壤含水量之间的复杂关系。在研究中还发现,夏季处理内土壤呼吸的变异程度远比其他季节大,开始认为是由于夏季温度高,密封罐不严。后来对罐密封严格后发现变异仍然很大,有人对这种现象的解释是由于处理内土壤含水量的差异造成的^[11]。尽管土壤含水量与土壤呼吸没有统计学上的相关性,并不能认为它不重要。实际上比较相同温度下的土壤呼吸就可以发现,在土壤温度相同的情况下,在土壤含水量大于 15% 的情况下,土壤含水量越大土壤呼吸强度越大。

3.2 秸秆还田模式和氮肥水平对土壤呼吸的影响

本研究的结果表明,有机肥对于土壤呼吸的影响是非常显著的,远大于其他的措施。这与崔玉亭^[6]的研究是非常一致的。至于在显著性检验中与其他处理的差异显著性不如处理 5(全还+低 20%氮肥)明显,是由于有机肥处理的土壤呼吸变异幅度大造成的。

试验是从 9 月的小麦开始的,全还和麦还处理的不同之处是玉米秸秆还田,对土壤呼吸的影响也是非常大的。对 03-11 以前的各次土壤呼吸进行方差分析表明,全还处理大于麦还处理的土壤呼吸,差异可以达到 1% 的显著性水平。而 03-11 以后,则变成了麦还处理大于全还处理。说明玉米秸秆还田以后,其易降解组份基本上在小麦返青以前就分解完毕了。焚烧对土壤呼吸的影响也是非常明显的。比如在 10-20 的测定中,焚烧处理的土壤呼吸比处理 4,处理 3 都低,达到 5% 的显著性水平。但随着时间的增加,这种差异就不明显了,甚至全年的平均值焚烧处理高于麦还处理 4。

氮肥对土壤呼吸的影响不如秸秆明显。全年的大小顺序是氮肥 2>氮肥 3>氮肥 1>不施氮肥。氮肥对土壤呼吸的影响是通过调节土壤的 C/N 进而影响微生物活动起作用的。显然,在桓台县目前施氮量基础上低 20% 是土壤呼吸强度最大的施氮量。这对于土壤有两方面的含义,一方面土壤生物活性最大,可以加速土壤的物质循环,另一方面有可能造成有机碳素散失过快,这在本研究的其他部分给予详细讨论。

参 考 文 献

- 1 王敬国主编. 植物营养的土壤化学. 北京:北京农业大学出版社, 1995, 39~60
- 2 于沪宁, 刘萱, 李建京. 农田作物群体 CO₂ 通量密度与水分利用效率研究. 见: 谢贤群, 于沪宁主编. 作物与水分关系研究. 北京: 中国科技出版社, 1992, 1~9
- 3 Owensby C E, Coyne P I, Ham S M, et al. Biomass production in a tallgrass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated levels of CO₂. *Eco Appl*, 1993, 3: 644~653
- 4 王修兰, 徐师华. 二氧化碳气候变化与农业. 北京: 气象出版社, 1996, 2~4
- 5 Singh K P, Shekhar C. Weight loss in relation to environmental factors during the decomposition of maize and wheat roots in a seasonally dry tropical region, *Soil Biol Biochem*, 1989, 21: 73~80
- 6 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, (1): 59~64
- 7 邢晓光. 农田生态系统土壤有机碳库动态的研究——以北京地区一年两熟麦田为例. 北京农业大学硕士论文, 1988
- 8 Grahammer K, Jawson M D, Skopp J. Day and night soil respiration from a grassland. *Soil Biol Biochem*, 1991, 23(1): 77~81
- 9 Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, Zentner R P. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment. *Soil Biol Biochem*, 1994, 26(12): 1647~1656
- 10 Mathes K, Schriefer Th. Soil respiration during secondary succession: influence of temperature and moisture. *Soil Biol Biochem*, 1985, 17: 205~211
- 11 Reiners N A. Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology* 1968, 49: 471~483