

秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响

张庆忠, 吴文良*, 王明新, 周中仁, 陈淑峰

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094)

摘要: 2003 年 10 月至 2004 年 9 月期间在华北平原冬小麦-玉米轮作的高产粮区开展了土壤温度、秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸影响的研究。土壤类型是砂姜黑土。试验共设 6 个处理, 分别是 N1、N1+W、N2+W、N3+W、N1+W+O 和 N2+W+M, 其中 N1、N2 和 N3 表示 3 个施氮水平(纯 N 计, 下同), 分别是 200 kg hm^{-2} 、 400 kg hm^{-2} 和 600 kg hm^{-2} , W 表示小麦秸秆还田, M 表示玉米秸秆的 1/3 还田, O 表示施用有机肥(每年施用鸡粪 $30 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$)。土壤呼吸采用碱液吸收法测定, 每个处理 6 次重复, 结果表明: (1) 土壤呼吸季节动态明显, 夏季高冬季低, 土壤呼吸排放速率与 5cm 深度地温线性拟合最好 ($R^2 = 0.63 \sim 0.74, p < 0.001$), 而与地表温度线性拟合最差。各处理土壤呼吸的年通量在 $5650 \sim 7061 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (纯 C 计, 下同), 随着秸秆还田量的增加, 土壤呼吸通量显著增加 ($p = 0.05$), 随着施氮量的增加土壤呼吸通量也增加, 但只有施氮量相差 400 kg hm^{-2} 时, 土壤呼吸通量差异显著 ($p = 0.05$), 施用有机肥的处理土壤呼吸通量最高, 有机肥施用后 1~2 个月, 有机肥快速分解, 表现为高的土壤呼吸通量。由土壤呼吸与 5cm 深度地温指数拟合方程求得的 Q_{10} 值在 1.86~2.26 之间。

关键词: 土壤温度; 秸秆还田; 氮肥; 土壤呼吸

文章编号: 1000-0933(2005)11-2883-05 中图分类号: Q948, S154.1 文献标识码: A

The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration

ZHANG Qing-Zhong, WU Wen-Liang*, WANG Ming-Xin, ZHOU Zhong-Ren, CHEN Shu-Feng (College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (11): 2883~2887.

Abstract This study was conducted to examine the effects of N fertilization and amendments of crop residue on soil respiration in a farm with winter wheat-maize rotation in the North China Plain during Oct. 2003 ~ Sept. 2004. Six treatments included N1, N1+W, N2+W, N3+W, N1+W+O, and N2+W+M, where N1, N2, and N3 (Pure N, the same below) were 200, 400, and $600 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively; W was the amendments of wheat residue; M was the amendments of maize residue; and O was 30 m^3 chicken manure $\text{hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Soil respiration was measured using alkali absorption method with six replicates for each treatment.

Soil respiration had obvious seasonal variation, with the highest flux in summer and the lowest flux in winter. Soil respiration showed positive correlation with soil temperature at 5 cm depth ($R^2 = 0.63 \sim 0.74, p < 0.001$) with temperature sensitivity (Q_{10}) varying from 1.86 to 2.26. Total annual soil respiration was ranged from $5650 \sim 7060 \text{ kg hm}^{-2}$ (pure C, the same blow). Both manure application and amendments of crop residue had significantly positive impacts on soil respiration. There was significant difference in annual soil respiration under fertilization treatments of 200 kg hm^{-2} and 600 kg hm^{-2} . However, soil respiration under fertilization treatment of 400 kg hm^{-2} showed no difference with those under 200 kg hm^{-2} or 600 kg hm^{-2} . Soil respiration was the highest in the N1+W+O treatment, and occurred during 1~2 months after manure application. Our results suggest that enhanced soil respiration may offset the potential increment in soil organic carbon under

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30270220)

收稿日期: 2005-02-24; 修订日期: 2005-09-08

作者简介: 张庆忠(1974~), 男, 山东郓城人, 博士生, 主要从事农业生态学和生物地球化学循环研究. E-mail: ecologyouth@sohu.com

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: wuwenl@cau.edu.cn

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (No. 30270220)

Received date: 2005-02-24; Accepted date: 2005-09-08

Biography: ZHANG Qing-Zhong, Ph. D. candidate, mainly engaged in agro-ecology and biogeochemical cycling. E-mail: ecologyouth@sohu.com

manure application and amendments of crop residue

Key words: soil temperature; crop residue amendment; nitrogen; soil respiration

全球土气界面 CO_2 的通量相当可观, 据估计高达 $68 \sim 77 \text{ Pg a}^{-1}$, 是大气 CO_2 -C 库的 10%, 因此, 即使土壤呼吸微小比例的变化都会对大气中 CO_2 的浓度产生重要影响^[1]。土壤呼吸是土壤环境中生物学和生物化学综合作用的结果, 严格意义上讲是指未受扰动土壤中产生 CO_2 的所有代谢作用, 它包括 3 个生物学过程(土壤有机质的分解和土壤微生物的呼吸、植物根系的呼吸、和土壤动物的呼吸)和一个非生物学过程(含碳矿物质的化学氧化作用)^[2]。土壤呼吸是生态系统碳循环的一个重要组成部分, 许多管理措施都会影响到土气界面的 CO_2 通量, 进而影响全球大气 CO_2 的浓度, 土壤 CO_2 呼吸通量观测可为土壤管理对土壤有机碳的影响提供早期估计^[3]。

尽管目前已有华北平原单季^[4,5]或全年^[6]农田土壤呼吸的报道, 但是农田生态系统作为陆地生态系统的一个重要组成部分, 受人类活动的干扰最大, 因此, 为了精确计算我国农田土壤碳排放的清单, 仍然有必要对农田土壤呼吸动态进行深入研究。本文即通过对华北平原高产农区冬小麦-玉米轮作农田生态系统土壤 CO_2 排放的测定, 研究了农田土壤呼吸的动态规律以及秸秆还田和施氮等管理措施对土壤呼吸的影响。

1 材料与方

1.1 试验地概况

试验地位于山东省桓台县, 长期实行冬小麦-玉米轮作制度。该县境内气候温和, 四季分明, 光照充足, 霜期短, 属暖温带大陆性季风气候。年平均气温 $11.8 \sim 12.9$, 多年平均降水量 600 mm 左右, 多集中在 6、7、8 三个月份, 无霜期为 189~207d, 平均 198d。土壤类型为砂姜黑土, 表层 0~20 cm 土壤基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

本研究依据当地的实际生产管理情况布置大田试验, 共设 3 个施氮水平(纯 N 计, 下同): 200 kg hm^{-2} (N1)、 400 kg hm^{-2} (N2) 和 600 kg hm^{-2} (N3, 当地平均施氮水平), 和 3 种秸秆还田方式: 秸秆不还田、小麦秸秆还田(W, 当地最为普遍的秸秆利用方式)、和双还田(W+M, 小麦秸秆的全部加玉米秸秆的三分之一), 并增加一个有机肥处理(O, 鸡粪 $30 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。试验共 6 个处理: (1)N1; (2)N1+W; (3)N2+W; (4)N3+W; (5)N1+W+O; (6)N2+W+M。

通过处理(1)和(2)的比较, 可以得到小麦秸秆还田对土壤呼吸和土壤有机碳的影响; 通过处理(2)(3)(4)之间的比较可以得到在小麦秸秆还田的情况下, 施氮对土壤呼吸和土壤有机碳的影响; 处理(3)和(6)的比较可以得到还田量增加对土壤呼吸和土壤有机碳的影响, 处理(2)和(5)比较可以得到施用有机肥对土壤呼吸的影响。

基肥为过磷酸钙和氯化钾, 于每年秋季冬小麦播种前施入, 施肥量分别为 P: 375 kg hm^{-2} 和 K: 225 kg hm^{-2} 。氮肥施用尿素, 其施用方案是冬小麦和夏玉米各占其半, 施用总氮量的 $1/4$ 作为基肥, 小麦拔节期追肥 $1/4$, 玉米季分两次追肥, 各追施 $1/4$ 。

当地灌溉条件便利, 试验期间视干旱情况共灌溉 3 次, 每次灌水 $750 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$, 保持作物生长基本不受干旱的胁迫。

1.3 土壤呼吸测定方法

试验从 2003 年 10 月开始到 2004 年 10 月结束, 视作物生长和天气情况对所有处理土壤呼吸进行同步监测, 测定方法为碱液吸收法^[7]。每个处理土壤呼吸的测定设 6 次重复。将内径 15 cm、高 25 cm 的 PVC 管一端插入土壤 5 cm, 每次放入盛有 20 mL 浓度为 1 mol/L NaOH 溶液的玻璃瓶一个, 瓶口直径 6 cm, 置于距地面约 2 cm 的托架之上, 然后密封 PVC 管的顶端, 24h 后取出盛 NaOH 溶液的玻璃瓶用标准盐酸滴定。该试验需要一个对照, 方法是将 6 个 PVC 管底端密封放置在田间, 测定时同样将盛有碱液的玻璃瓶置于其中, 然后密封上端, 吸收 PVC 管原有空气中 CO_2 。根据如下公式计算 CO_2 的排放速率:

$$C = \frac{(V_1 - V_2) \times N \times E}{a}$$

式中, C 为排放的 C 或 CO_2 的通量 ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); V_1 为中和对照处理中碱液所消耗的酸的体积 (mL); V_2 为中和土壤呼吸处理中碱液所消耗的酸的体积 (mL); N 为盐酸的摩尔浓度; E 为重量转换系数; 用 C 表示时 $E = 6$, 用 CO_2 表示时 $E = 22$; a 为 PVC 管内圆的面积 (m^2)。

2 结果与分析

2.1 农田土壤呼吸的季节动态与总量



表 1 试验地耕层土壤(0~20 cm)理化性状

Table 1 Characteristics of Top Soil (0~20 cm) in Experimental Field

SOM (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效氮 A available N (mg/kg)	速效磷 A available P (mg/kg)	速效钾 A available K (mg/kg)	CaCO_3 (g/kg)	pH (水土 比 2.5:1)
14.3	0.93	48	38	86	63.8	8.19

由图 1 可知土壤呼吸呈明显季节变化。总体趋势是夏季高冬季低, 最高值出现在 7 月 5 日(10 月 1 日后 279d), 超过 $4.00 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 最低值出现在 2003 年 11 月 22 日至次年 3 月 9 日期间, 土壤呼吸的通量在 $0.53\sim 0.78 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 相信随着温度的进一步降低, 土壤呼吸还会随之降低。

在各个季节, 土壤呼吸的通量随温度变化也有波动。10 月末, $\text{N1}+\text{W}+\text{O}$ 处理土壤呼吸通量在 $2.0 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 以上, 其余各处理土壤呼吸通量则在 $0.8\sim 1.4 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间。自 10 月末到封冻(11 月 22 日)前, 随温度的降低土壤呼吸呈波动下降状态。2004 年开春后, 气温回升很快, 3~4 月份的土壤呼吸通量也呈快速波动上升态势。到了 5 月份, 气温逐渐平稳, 土壤呼吸通量也在 $2.50 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 左右徘徊。8 月 10 号以后气温回落, 土壤呼吸开始逐渐降低, 到了玉米收获时(2004 年 9 月 17 日), 土壤呼吸已降到 $1.60 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 左右。

就土壤呼吸的总量来看, 在本试验的一个完整轮作年(2003 年 10 月~2004 年 10 月), 土壤呼吸的通量在 $5650\sim 7060 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间(图 2)。各处理土壤呼吸通量的大小顺序是: $\text{N1}+\text{W}+\text{O} > \text{N2}+\text{W}+\text{M} > \text{N3}+\text{W} > \text{N2}+\text{W} > \text{N1}+\text{W} > \text{N1}$ 。

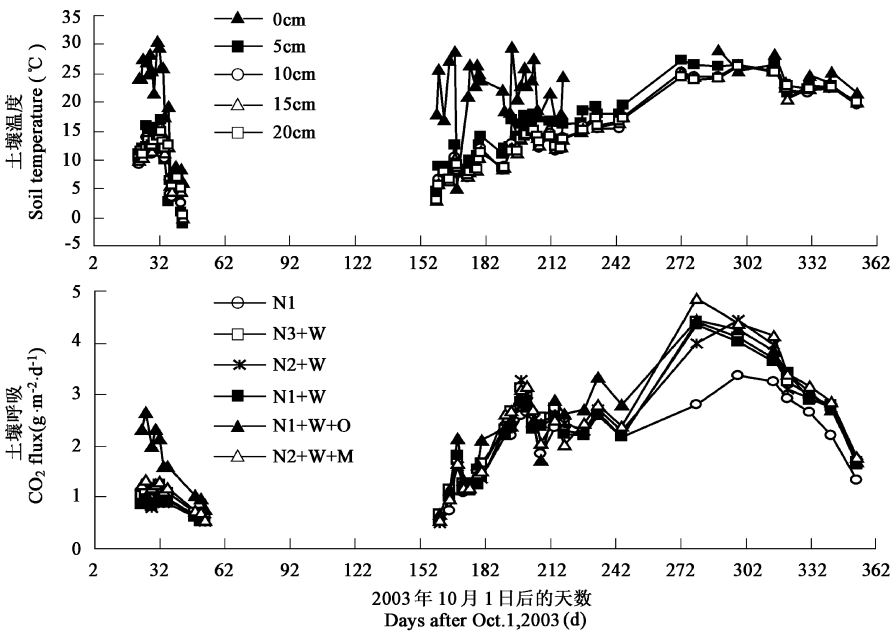


图 1 试验期间土壤呼吸日通量与土壤温度

Fig 1 The relationship between daily carbon dioxide flux and soil temperatures

2 2 土壤温度与作物根系对农田土壤呼吸的影响

各处理土壤呼吸速率和不同深度地温的线性拟合表明, 土壤呼吸速率和 5 cm 深度地温拟合最好 ($R^2 = 0.63\sim 0.74, p < 0.001$), 与 10 cm、15 cm 和 20 cm 地温的拟合也达到极显著水平 ($p < 0.0001$), 土壤呼吸与地表温度拟合最差 ($R^2 = 0.08\sim 0.24, p = 0.005\sim 0.114$), 顺序依次是 $5 \text{ cm} > 10 \text{ cm} > 15 \text{ cm} > 20 \text{ cm} > 0 \text{ cm}$ 。同时, 我们发现呼吸与土壤温度的拟合在不同季节有不同的表现, 换言之, 在有的季节两者的拟合程度与根据全年数据进行的拟合结果可能会不一致。例如本试验中在 10 月份小麦播种后至封冻前, 这一时期土壤呼吸与地表温度拟合程度最好, 而与 5 cm 深度地温拟合最差。土壤呼吸和不同深度土壤温度的拟合程度可能也有季节变化, 推测出现这一现象的原因可能有: (1) 水分状况对土壤呼吸的温度敏感性有一定的影响^[8,9], 因此, 我们推测土壤剖面上土壤含水量的季节变化可能是产生土壤呼吸与不同深度土壤温度的拟合程度随季节变化的原因之一; (2) 小麦播种前的耕作和施肥可能使表层 0~5 cm 的土壤微生物量激增。

根据 5 cm 地温与土壤呼吸日通量作图, 通过指数回归得到土壤呼吸速率与温度的关系式(图 3)。根据指数回归方程可以求出 5~25 范围内的 Q_{10} 值, 即温度增加 10 土壤呼吸增加的倍数 ($Q_{10} = R_{t+10}/R_t$)^[10], 结果是 N1 、 $\text{N1}+\text{W}$ 、 $\text{N2}+\text{W}$ 、 $\text{N3}+\text{W}$ 、 $\text{N1}+\text{W}+\text{O}$ 和 $\text{N2}+\text{W}+\text{M}$ 处理的 Q_{10} 值分别是 2.02、2.26、1.86、2.25、2.21 和 2.10。

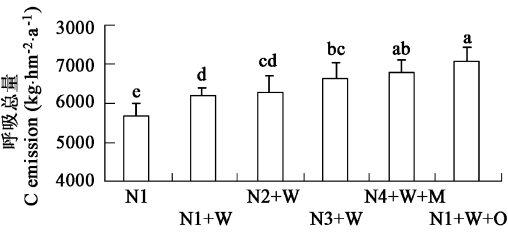


图 2 各处理土壤呼吸的年通量

Fig 2 The annual C flux from each treatment

本试验中,对比 2003 年 10 月末和 11 月初与 2004 年 4 月末 5 月初的土壤温度和土壤呼吸日通量,发现 5~20 cm 土壤温度较为接近,而土壤呼吸通量却相差很大。在水分不成为限制因子的条件下,土壤呼吸和土壤含水量不相关^[3]。因此,温度和水分不是造成上述土壤呼吸差异的主要原因,那么这种差异可能就是根呼吸的差异,特别是 10 月末 11 月初,冬小麦刚刚出苗不久,根系的伸展还不够远,测得的土壤呼吸中可能还不包括根系呼吸。因此,根据这两个不同时期土壤呼吸的差值可以大致求出 4 月末 5 月初根系呼吸所占土壤呼吸的比例。由于前后两个时期有机肥分解释放 CO₂ 的量是不同的,所以无法估计 N1+W+O 处理根系呼吸所占的比例,其余 5 个处理在 4 月末 5 月初根系呼吸占土壤呼吸的比例在 41%~65% 之间。当然,由于秸秆分解在不同时期释放的 CO₂ 也会不同,因此,这一数值只是近似的估计。

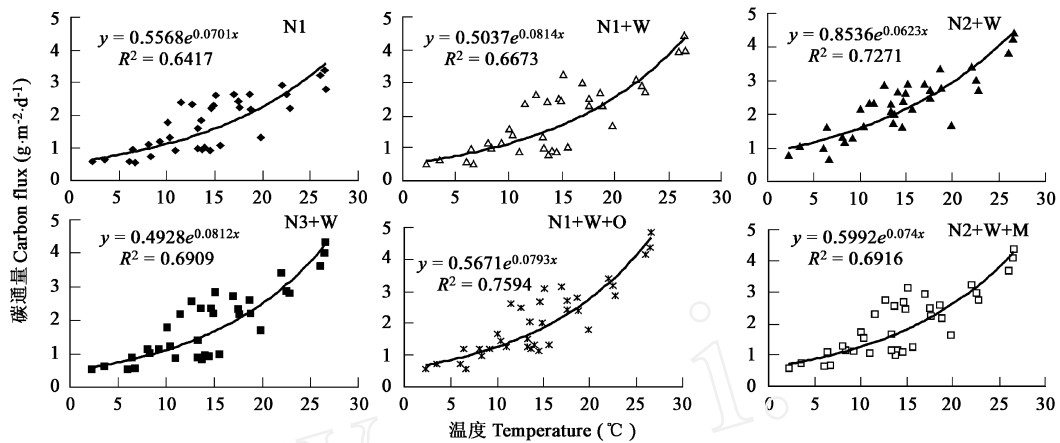


图 3 各处理土壤呼吸与 5 cm 深处地温关系

Fig 3 Relationship between soil respiration rate and temperature at 5 cm

2.3 秸秆还田与施肥对农田土壤呼吸的影响

2.3.1 秸秆还田对土壤呼吸的影响 就全年土壤呼吸的总量来看, N1+W 处理的土壤呼吸是 $6191.7 \text{ kg hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 显著高于 N1 处理的 $5650.7 \text{ kg hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, N2+W+M 处理的土壤呼吸 $6795.6 \text{ kg hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 也显著高于 N2+W 处理的 $6255.5 \text{ kg hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因此,就全年来看秸秆还田对土壤呼吸有显著影响,随着秸秆还田量的增加,土壤呼吸的通量也增加。但是具体到某一特定的阶段和处理,结果可能会有所不同。例如,在 2003 年 10 月小麦播种后到土壤封冻前的这段时间,尽管差异不显著, N1 处理的土壤呼吸日通量总是高于 N1+W 处理,这可能是由于 N1+W 处理在小麦播种前的旋耕使未分解的小麦秸秆残体被均匀混入表层 18 cm 的土壤,导致 C/N 比变宽,影响了微生物的呼吸作用。对于 N2+W+M 处理来说,由于施氮量较高,不存在 C/N 比的问题,所以全年几乎都是 N2+W+M 处理的土壤呼吸通量高于 N2+W 处理。

2.3.2 施氮对农田土壤呼吸的影响 在小麦秸秆还田的条件下,土壤呼吸随着施氮量的增加而增加(图 2), N1+W、N2+W 和 N3+W 处理全年土壤呼吸的通量分别为 6191.7 、 $6255.5 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $6621.5 \text{ kg hm}^{-2}$ 。当施氮量相差 200 kg hm^{-2} 时,土壤呼吸通量的差异并不显著,而当施氮量相差 400 kg hm^{-2} 时,土壤呼吸通量差异显著 ($p = 0.05$)。

有机肥对土壤呼吸的影响是十分显著的,特别是刚刚施入土壤不久, N1+W+O 处理的土壤呼吸日通量显著高于其它处理 ($p = 0.05$)。次年春季,随着土壤温度逐渐升高,土壤呼吸的通量也逐渐升高, N1+W+O 处理的土壤呼吸虽然仍然较高,但已不象刚施入到土壤后那样显著高于其它处理,说明鸡粪中大部分易分解的物质在施入土壤后 1~2 个月内基本分解完毕了。到了玉米季,施用鸡粪处理的土壤呼吸和 N1+W 处理的差异已经不再显著了,甚至在玉米季的 7 次采样中, N1+W+O 处理的土壤呼吸有 3 次低于 N1+W 处理。

就全年来看, N1+W+O 处理的土壤呼吸显著高于 N1、N1+W、N2+W 和 N3+W 处理。N1+W+O 处理和 N1+W 处理相比,前者比后者全年土壤呼吸总量高 14%。

3 讨论与结论

华北平原高产粮区农田土壤呼吸年通量大致在 $5650 \sim 7060 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间,土壤呼吸排放的 C 大约是总净生物量(NPP)C 的 48%~59%。本试验土壤呼吸的总量比其他一些研究的结果稍高一些^[3,6,11~14],这可能是由于试验地土壤中 CaCO₃ 含量很高的缘故(表 1)。朱培立等^[15]的研究结果表明,在秸秆还田量较高时, CaCO₃ 含量高的地块中土壤有机质的分解速度快。

本试验 6 个处理中随着秸秆还田量的增加土壤呼吸年通量显著增加,并且还田后随着时间的推移增加效应逐渐变小。这是由于秸秆分解会先经历一个快速分解的阶段,然后是一个分解速度很慢的阶段,因此,秸秆还田量对土壤呼吸的影响主要在秸秆

还田后不久的一段时间内表现出来。另外值得注意的是,在施氮量低的情况下($200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),如果大量秸秆还田,在开始的阶段反而抑制土壤呼吸,原因可能是由于大量秸秆还田导致 C/N 比太宽,影响了微生物的活动。在施氮量高的条件下,这种情况就不会发生。因此,在大量秸秆还田的条件下,配施一定量的氮肥是必要的。

施氮量对土壤呼吸的影响不灵敏,本试验中,只有在施氮量相差 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 时土壤呼吸年通量才有显著差异。这与王立刚等^[4]和陈述悦等^[5]的结果一致。Jacinthe 等^[16]通过不施氮处理与施氮 $244 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 处理的土壤呼吸相比,发现施氮量对土壤呼吸没有显著影响,其原因就是由于施氮量相差不够多造成的。

在使用碱液吸收法测定土壤呼吸的时候,要反映不同管理措施对土壤呼吸的影响需要进行大批量的密集监测,通过比较土壤呼吸总量之间的差异获得,一次或者少数几次土壤呼吸的比较难以真实反映不同管理措施对土壤呼吸的影响。本试验中,即使在施氮量相差 $400 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 的情况下,在 35 次采样中,N1+W 处理和 N3+W 处理仅有 3 次土壤呼吸的日通量的差异是显著的。秸秆还田对土壤呼吸的影响也有相同的现象。

References

- [1] Schlesinger W H, Andrew s J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *B iogeochem istry*, 2000, **48**: 7~ 20
- [2] Li Y N, Wang G Y, Li W. Soil respiration and carbon cycle. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(2): 351~ 357.
- [3] Fortin M C, Rochette P, Patey E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. *Soil Science Society of American Journal*, 1996, **60**: 1541~ 1547.
- [4] Wang L G, Qiu J J, Li W J. Study on the Dynamics of Soil Respiration in the Field of Summer-Corn in Huanghuaihai Region in China. *Soil and Fertilizers*, 2002, **6**: 13~ 17.
- [5] Chen 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*, **19**(5): 1552~ 1560.
- [6] Cui Y T, Han C R, Lu J D. Dynamics of organic material decomposition and soil respiration in intensive and high-yield agro-ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(1): 59~ 64.
- [7] Li L H, Wang Q B, Bai Y F, et al. Soil respiration of a Leymus Chinese grassland stand in the Xilin River basin as affected by over grazing and climate. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(6): 680~ 686.
- [8] Wang G C, Du R, Kong Q X, et al. Characteristics of soil respiration in Chinese typical temperate steppe. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(7): 692~ 696.
- [9] Chen Q S, Li L H, Han X G, et al. Temperature sensitivity of soil respiration in relation to soil moisture in 11 communities of typical temperate steppe in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(4): 831~ 836.
- [10] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, **33**: 155~ 165.
- [11] Buyanovsky G A, Wagner G H, Gantzer C J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Science Society of American Journal*, 1986, **50**: 338~ 344.
- [12] Hendrix P F, Han C R, Groffman P M. Soil respiration in conventional and no tillage agroecosystems under different winter cover crop rotations. *Soil & Tillage Research*, 1998, **2**: 135~ 148.
- [13] Chen S Y, Hu C S. Soil respiration rate of farmland ecosystem in Taihang Piedmont. *Eco-Agr. Res*, 1997, **5**(2): 42~ 46.
- [14] Duiker S W, Lal R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil & Tillage Research*, 2000, **54**: 21~ 30.
- [15] Zhu P L, Huang D M, Yu X H, et al. Decomposition of ¹⁴C labeled crop residue in calcareous and non-calcareous soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, **25**(7): 71~ 73.
- [16] Jacinthe P A, Lal R, Kimble J M. Carbon budget and seasonal carbon dioxide emission from a central Ohio Luvisol as influenced by wheat residue amendment. *Soil & Tillage Research*, 2002, **67**: 147~ 157.

参考文献:

- [2] 李玉宁,王关玉,李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘, 2002, **9**(2): 351~ 357.
- [4] 王立刚,邱建军,李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究. 土壤肥料, 2002, **6**: 13~ 17.
- [5] 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, **19**(5): 1552~ 1560.
- [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, **8**(1): 59~ 64.
- [7] 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. 植物生态学报, 2000, **24**(6): 680~ 686.
- [8] 王庚辰,杜睿,孔琴心,等. 中国温带典型草原土壤呼吸特征的实验研究. 科学通报, 2004, **49**(7): 692~ 696.
- [9] 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. 生态学报, 2004, **24**(4): 831~ 836.
- [13] 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.
- [15] 朱培立,黄东迈,余晓鹤,等. ¹⁴C 秸秆在石灰性和非石灰性土壤中的矿化特征. 土壤通报, 1994, **25**(7): 71~ 73.