

添加玉米秸秆对黄棕壤有机质的激发效应^①

苗淑杰, 乔云发*, 王文涛, 施雨涵

(南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 玉米秸秆还田是培肥地力的一项重要措施, 但是玉米秸秆添加后会改变土壤原有有机质的矿化过程, 即引起激发效应, 从而影响土壤碳平衡和周转。因此, 适量秸秆还田将是高效且环境友好的提升土壤生产潜力的关键。本试验以黄棕壤为研究对象, 设不添加玉米秸秆对照(CK)和添加占干土重的 1%、5% 和 9% 的粉碎玉米秸秆处理进行室内培养, 分析土壤 CO₂ 释放动态及激发效应。试验结果表明, 添加不同量玉米秸秆后, 土壤 CO₂ 释放速率和累积量呈现出抛物线型变化趋势。在培养前期, 各处理土壤 CO₂ 释放速率表现为 9% > 5% > 1% > CK, 到培养的第 8 天左右, 添加 5% 玉米秸秆的土壤 CO₂ 释放速率超过了添加 9% 玉米秸秆的土壤, 在培养后期, 所有处理的土壤 CO₂ 释放速率慢慢地趋于一致。从累积 CO₂ 释放量来看, 添加 5% 玉米秸秆的处理比 9% 玉米秸秆的处理土壤总 CO₂ 释放量高, 表明添加 5% 秸秆的处理对微生物群落和微生物活性的作用最大。在整个培养阶段, 玉米秸秆添加对土壤有机质的激发效应均为负值, 而加入的玉米秸秆并没有完全矿化, 从而使土壤有机碳含量因添加玉米秸秆而升高。这些结果表明, 添加玉米秸秆有利于提高黄棕壤土壤有机碳含量, 在本试验的短期培养过程中以土壤干重 9% 的添加量增加最多。

关键词: 有机碳; 激发效应; 矿化; 玉米秸秆; 黄棕壤

中图分类号: S153.6⁺21 文献标识码: A

秸秆还田是目前备受关注的改善土壤肥力的重要措施之一。据报道, 我国每年的秸秆资源总量在 $7.62 \times 10^8 \sim 8.41 \times 10^8$ t^[1] 左右, 大概占全球总量的 30%^[2]。数量如此庞大的作物秸秆是一个相当巨大的资源, 但在我国, 大部分秸秆在田头被直接焚烧了, 这不仅造成资源的极大浪费, 也严重破坏了大气环境。近年来, 雾霾天气越来越严重, 焚烧秸秆是其中一个非常重要的原因。由此看来, 秸秆还田是具有“双刃剑”效果的土壤管理措施。

有机质作为土壤重要组成部分之一, 它不但影响着土壤的水、肥、气、热等肥力要素, 还影响着土壤生化过程。土壤有机质矿化是在微生物利用土壤中活性有机质完成自身代谢的过程, 该过程伴随土壤养分的释放以及温室气体的形成^[3]。土壤有机质的矿化速率与其自身稳定性、微生物数量和活性密切相关。外源碳的加入常常会影响土壤有机质的矿化过程, 也就是加入有机或矿质材料引起土壤有机质的矿化速度发生变化, 即激发效应^[4-5]。植物材料降解输入土壤中的有机碳是主要的土壤碳源, 维系着土壤有机质的

矿化平衡, 是影响土壤碳含量和成为大气 CO₂ 浓度的关键因子^[2]。目前关于秸秆还田的研究已经很多, 比如, 秸秆与耕作结合^[6-7], 秸秆还田量^[8]对土壤养分、酶活性和水分等的影响, 但是, 对土壤有机质激发效应的研究较少。

本研究以玉米秸秆还田为研究对象, 通过室内培养试验探究玉米秸秆不同添加量对土壤有机质激发效应的影响, 来探明玉米秸秆还田对土壤碳平衡和周转的影响, 从而指导秸秆还田实践过程, 达到效果最优且环境友好。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和有机物料

试验所用土壤取自南京市浦口区油菜田耕层 0~20 cm 土壤, 多点取样, 混合为一个样品。带回实验室后, 土样均匀摊平, 置于阴凉通风处自然风干, 之后过 2 mm 筛, 测定其含水量、田间持水量及碳氮含量。将 ¹³C 标记的玉米秸秆烘干粉碎, 过 0.25 mm 筛, 该玉米秸秆有机碳含量为 41.5%。

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503116-03)和南京信息工程大学引进人才项目资助。

* 通讯作者(qiaoyunfa@163.com)

作者简介: 苗淑杰(1975—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 教授, 主要从事碳循环与激发效应研究。E-mail: miaoshujie@126.com

1.2 培养方法

2016 年 10 月 25 日开始进行培养试验，设不添加玉米秸秆对照(CK)和添加占干土重的 1%、5% 和 9% 的粉碎玉米秸秆处理，共 4 个处理，3 次重复。称 100.00 g 干土，装入 500 ml 避光培养瓶。按照处理要求混入相对应量的玉米秸秆，充分混匀，然后轻微压实使土样容重为 1.1 g/cm³。根据称重法，用蒸馏水调节土壤水分至田间持水量的 60%，置于 25 °C 的恒温培养箱中培养。培养过程中，通过重量法补充因自然蒸发等原因损失的水分，使其保持衡重。在培养后的第 1、5、10、15、20、25 和 30 天，测定各处理土壤呼吸速率，即 CO₂ 的释放速率^[9]。同时测定 CO₂ 气体中的 ¹³C 丰度，根据 CO₂ 释放量计算试验过程中土壤有机碳的矿化速率、累积矿化量及玉米秸秆对土壤有机碳的激发效应^[2]。在培养第 30 天采集气体完成后，将培养瓶置于冰箱迅速冷冻，抑制土壤中微生物活性，以用于后续的有机碳、微生物生物量碳、全氮等指标的测定。

1.3 数据计算与分析

土壤 CO₂ 释放速率

$$R_{CO_2} = \frac{CO_{2-c}}{W_{土壤} \times T} \quad (1)$$

式中：R_{CO₂}：土壤 CO₂ 释放速率 (g/(kg·d))；CO_{2-c}：土壤释放出来的 CO₂ 量 (g/kg)；W_{土壤}：土壤干重 (kg)；T：培养时间 (d)。

累积 CO₂ 释放量

$$C_{CO_2} = \sum_1^{30} (R_{CO_2} \times T) \quad (2)$$

式中：C_{CO₂}：累积 CO₂ 释放量(g/kg)；R_{CO₂}：土壤 CO₂ 释放速率(g/(kg·d))；T：培养时间 (d)。

更新率 F

$$F(\%) = \frac{{}^{13}CO_{2处理} - {}^{13}CO_{2对照}}{{}^{13}C_{秸秆} - {}^{13}CO_{2对照}} \times 100 \quad (3)$$

式中：¹³CO₂ 处理和 ¹³CO₂ 对照 分别为加秸秆和未加秸秆土壤释放出来的 CO₂ 中的 ¹³C 丰度(%)，¹³C_{秸秆} 是秸秆中的 ¹³C 丰度(%)。

玉米秸秆矿化释放 CO₂ 量

$$C - CO_{2秸秆} = CO_{2-c} \times F \quad (4)$$

土壤有机质矿化量

$$M_{SOM} = CO_{2处理} - CO_{2秸秆} \quad (5)$$

式中：M_{SOM}：土壤有机质矿化量(g/kg)；CO₂ 处理是添加秸秆后土壤释放出来的 CO₂ 量(g/kg)，CO₂ 秸秆 是玉米秸秆矿化释放出来的 CO₂ 量(g/kg)。

玉米秸秆矿化率

$$MR(\%) = \frac{C - CO_{2秸秆}}{C_{input}} \times 100 \quad (6)$$

式中：MR：玉米秸秆矿化率(%)；C-CO₂ 秸秆：来自于秸秆碳矿化所释放的 CO₂ 量 (g)；C_{input}：加入秸秆的总碳量(g)。

激发效应

$$PE(\%) = \frac{CO_{2处理} - CO_{2对照}}{CO_{2对照}} \times 100 \quad (7)$$

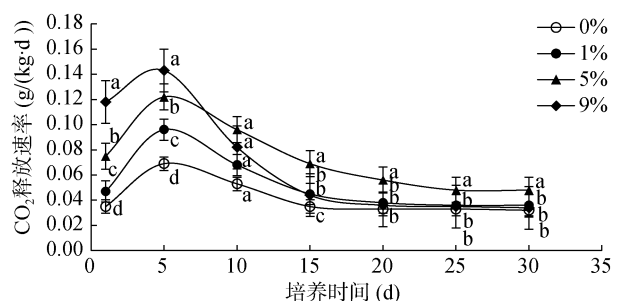
式中：PE：激发效应(%)；CO₂ 处理：处理土壤释放的 CO₂ 量(g/kg)；CO₂ 对照：未加秸秆处理释放出来的 CO₂ 量(g/kg)。

数据分析采用 Excel 2016 进行数据整理及图表绘制，用 SPSS 20 分析统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA, P<0.05)及 LSD 两两显著性比较分析。

2 结果与分析

2.1 玉米秸秆添加对土壤 CO₂ 释放速率的影响

经过 30 d 室内培养试验，土壤有机质的矿化规律及添加玉米秸秆对其影响情况如图 1 所示。从整体情况来看，不同玉米秸秆添加量处理的土壤有机质矿化速率变化趋势基本一致，呈现出两个比较明显的阶段。第一阶段在培养后的 0~15 d，也就是培养初期，矿化速率呈先迅速升高而后又快速下降的走势，变化幅度较大，该阶段持续时间较短，但矿化量大。在培养后第 5 天各处理间有显著差异，与对照处理相比，添加 1%、5% 和 9% 玉米秸秆的处理土壤的 CO₂ 释放速率分别增加 39.1%、76.8% 和 107.3%。第二阶段从培养后第 15 天至培养结束，CO₂ 释放速率持续下降，CO₂ 释放缓慢，该阶段持续时间较长，但矿化量小。随着培养时间延长，添加 1% 及 9% 玉米秸秆的处理与未添加玉米秸秆对照处理的 CO₂ 释放速率趋于一致，但是，添加 5% 玉米秸秆的处理 CO₂ 释放速率仍然显著高于其他处理。



(图中小写字母不同表示同一培养时间不同玉米秸秆处理间差异显著(P<0.05)，下图同)

图 1 玉米秸秆添加对土壤 CO₂ 释放速率的影响

对比不同玉米秸秆量处理土壤 CO_2 释放速率发现,在培养前期, CO_2 释放速率随着秸秆量的增加也相应地增加,并且添加 9% 与 5% 的处理 CO_2 释放速率要明显高于 1% 与对照处理;但随着培养时间的延长,在培养中期,添加 5% 秸秆的处理 CO_2 释放速率超过了添加 9% 秸秆的处理。原因可能是在培养前期,土壤微生物群落处于碳贫瘠状态,加入的秸秆量越大,为土壤微生物提供的可利用碳源越多,提高了微生物活性和数量,而使呼吸速率明显增强;到了培养的中后期,秸秆碳的矿化已经趋于平稳,释放出来的微生物可用碳量逐渐降低,高秸秆添加量处理(9%)释放出来的碳不能满足前期微生物数量和活性大幅增加对碳的要求,从而抑制了土壤微生物的活性,最终导致微生物呼吸速率减弱。而 5% 秸秆量添加处理,既能在前期促进微生物群落数量和活性的适度增加,又能保证中后期这些微生物对碳的需求,所以出现中后期呼吸速率较高的现象。这些结果说明,微生物活性对于外加碳源的响应是一个短暂而强烈的过程,大量的可利用有机碳在培养前期被矿化。这与 Jha 等^[10]研究发现的土壤碳矿化速率随着培养时间的延长而降低的结论是一致的。

2.2 玉米秸秆添加对土壤 CO_2 累积释放量的影响

土壤 CO_2 累积释放量受添加玉米秸秆量的影响,如图 2。未添加秸秆对照处理土壤 CO_2 累积释放量为 0.04 ~ 1.27 g/kg 土;加入 1%、5% 和 9% 玉米秸秆后,培养结束后 CO_2 累积释放量分别为 1.60、2.24 和 2.07 g/kg 土。这些结果表明,添加玉米秸秆明显影响土壤有机质的矿化能力以及土壤累积 CO_2 释放量。比较各处理 30 d 的累积 CO_2 释放量发现,累积 CO_2 释放量由高到低依次为 5% > 9% > 1% > CK。5% 玉米秸秆处理土壤的累积 CO_2 释放量比 9% 处理的高,原因可能是 5% 秸秆添加处理适度地提升了土壤中微生物的数量和活性,在培养的 30 d 内,5% 秸秆矿化和对土壤原有有机质的矿化所释放的有机碳量能够满足微生物对碳源的需求,进而促进土壤原有有机碳矿化,而 9% 秸秆处理因后期矿化速率降低的限制,加上残留的大量惰性碳不能被微生物利用,从而使土壤累积 CO_2 释放量受到抑制。同时,9% 秸秆处理外加大量玉米秸秆中释放出来的较多易被矿化的碳抑制了微生物对土壤原有有机碳的矿化^[11]。

2.3 玉米秸秆添加对土壤有机质的激发效应

根据外源碳对土壤有机质激发效应的机制,外源有机碳加入到土壤后,土壤释放的 CO_2 主要有两个方面的来源:一是外源碳矿化释放出 CO_2 ;二是外

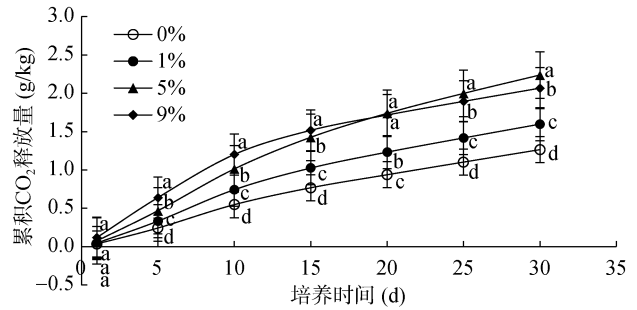


图 2 玉米秸秆添加对土壤累积 CO_2 释放量的影响

源碳中的可利用碳源,提高/降低了土壤微生物的活性,使微生物矿化土壤有机质的能力相应增强/减弱,从而释放出更多/较少的 CO_2 。其中第二个来源就是所谓的激发效应^[11]。由图 3 可以看出,在本试验条件下,外加玉米秸秆对土壤原有有机质的矿化产生了负激发效应,并且随着培养时间的延长,激发效应逐渐降低。也就是说,在本试验条件下,外加的玉米秸秆对土壤原有有机质的矿化产生了抑制作用,试验中测得的 CO_2 释放全部来自于微生物对外加玉米秸秆的分解,即对玉米秸秆中可利用碳的矿化。

比较而言,5% 玉米秸秆所产生的激发效应明显高于 9% 玉米秸秆所产生的激发效应,这是因为 5% 秸秆处理,秸秆矿化释放出来的可利用碳激活了土壤中因碳贫瘠而休眠的微生物,促进它们对土壤原有有机质的矿化,产生激发效应;而 9% 秸秆处理,因秸秆矿化释放出来较多的可利用碳,用来满足微生物对碳的需求,反而抑制了微生物通过矿化土壤原有有机碳获得碳源的需求^[12-13]。该结论在相关研究中多次报道,已经被广大研究者认同。但加入 1% 玉米秸秆的处理,由于其加入的可供微生物利用的有效外源碳量过少,其对微生物活性的激发程度还很低,所以激发效应明显低于添加 5% 玉米秸秆的处理。

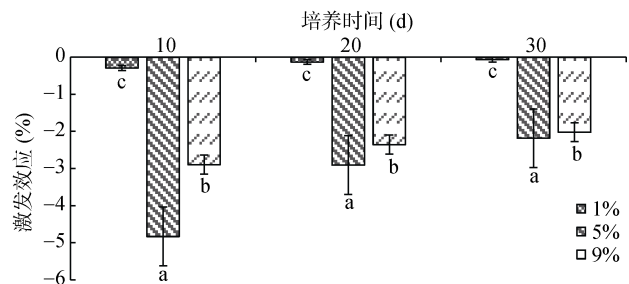


图 3 玉米秸秆添加对土壤有机质的激发效应

2.4 玉米秸秆添加对土壤有机碳含量的影响

添加玉米秸秆培养 30 d 后,1%、5% 和 9% 玉米秸秆添加处理土壤有机碳含量分别是 24.3、27.5

和 31.1 g/kg。相比培养前土壤有机碳含量(20.63 g/kg), 培养 30 d 后, 各处理有机碳含量分别增加 17.7%、33.4% 和 50.6%。从图 4 中不难发现, 添加玉米秸秆的处理都增加了土壤有机碳的含量($P < 0.05$)。然而, 未加玉米秸秆的对照处理, 经过 30 d 的培养后, 其土壤有机碳含量为 19.4 g/kg, 比培养前土壤有机碳下降了 6.2%。这些结果表明外加玉米秸秆可以增加土壤有机碳含量, 这与棉田试验的结果一致^[14], 且外加玉米秸秆越多, 土壤有机碳含量增加量也越大。然而, 本研究仅仅是 30 d 的短期培养试验的结果, 从 CO_2 释放速率可以看出(图 1), 在培养结束时, 矿化过程仍然在进行, 因此, 还不能做出最后判断。为了阐明秸秆还田对黄棕壤有机碳的影响, 需要延长培养时间, 同时进行田间试验进行检验。

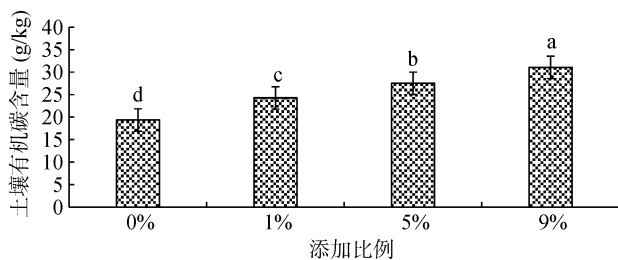


图 4 玉米秸秆添加对土壤有机碳含量的影响

2.5 玉米秸秆添加对土壤全氮含量的影响

玉米秸秆添加培养 30 d 后, 土壤全氮含量见图 5。培养结束后, 添加 1% 玉米秸秆处理的全氮含量为 2.24 g/kg, 相对于土壤原始全氮量增加 23.1%; 添加 5% 玉米秸秆的处理, 全氮含量为 3.07 g/kg, 比原始土壤全氮量增加 68.7%; 添加 9% 玉米秸秆的处理, 全氮含量为 3.46 g/kg, 相对于土壤原始全氮量增加 90.1%。然而, 未添加玉米秸秆的对照处理经过 30 d 试验培养, 土壤全氮含量为 1.48 g/kg, 比土壤原始全氮含量下降 18.7%。这些结果说明外加玉米秸秆可以增加土壤全氮的含量, 并且土壤全氮的含量随着玉米秸秆添加量的增加也相应地有所增加。

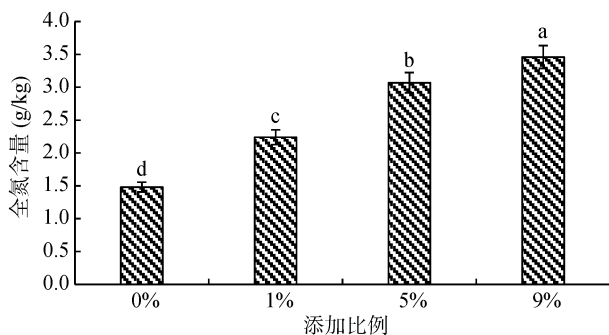


图 5 玉米秸秆添加对土壤全氮含量的影响

2.6 玉米秸秆添加对土壤微生物生物量碳的影响

添加玉米秸秆明显影响土壤微生物生物量碳(图 6)。培养前土样微生物生物量碳为 393.3 mg/kg, 培养结束后, 添加 1% 玉米秸秆的处理微生物生物量碳为 404.3 mg/kg, 较试验前增加 2.8%; 添加 5% 玉米秸秆的处理微生物生物量碳为 561.0 mg/kg, 增加 42.65%; 添加 9% 玉米秸秆的处理微生物生物量碳为 677.3 mg/kg, 增加 72.23%。在各处理中, 添加 5% 和 9% 玉米秸秆处理的微生物生物量碳增加最为显著。

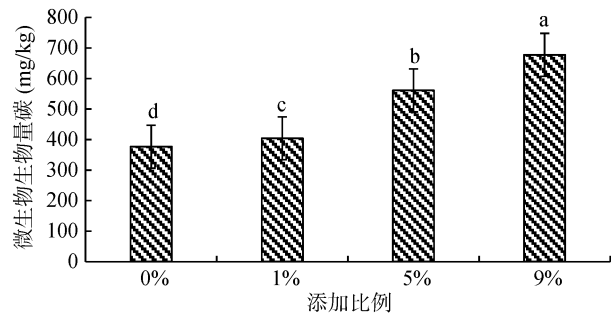


图 6 玉米秸秆添加对土壤微生物生物量碳的影响

对比试验前土壤微生物生物量碳发现, 未添加玉米秸秆的对照处理, 其微生物生物量碳在培养结束后下降了 4.2%。这些结果说明, 添加玉米秸秆可以有效增加土壤微生物生物量碳, 即土壤微生物数量, 而土壤微生物生物量碳随着玉米秸秆添加量的增加也相应增加, 并且增加幅度随玉米秸秆添加量的增大而变大。

3 结论

添加玉米秸秆后, 显著增加了土壤 CO_2 释放速率和累积释放量。 CO_2 释放速率呈现先迅速增加后快速降低, 随着培养时间延长而趋于一致。培养结束后, 添加玉米秸秆土壤有机碳和氮含量均有显著增加, 且随秸秆添加量的增加而增加, 此外, 外加玉米秸秆均引起土壤有机碳的负激发效应。这些结果进一步证实了我们的推测, 秸秆添加量对土壤微生物的影响要从微生物数量和活性两个方面来考虑。本试验的结果表明, 5% 玉米秸秆添加量处理的激发效应大于 9% 玉米秸秆添加量的处理, 说明了 5% 秸秆添加量可能是在增加土壤微生物数量的同时, 提高了微生物活性, 引起了较强的负激发效应。培养结束后, 各处理土壤碳氮含量均高于培养前, 证实了秸秆添加对土壤有机碳增加的正效应。但是, 本研究仅仅进行了 30 d, 培养结束的时候土壤仍保持着一定的矿化强度, 因此, 并不能完全代表秸秆添加对土壤有机碳的影响情

况,需要进一步进行长期培养试验和田间试验来检验这一结论。

参考文献:

- [1] 王金洲. 秸秆还田的土壤有机碳周转特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2015
- [2] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2518–2525
- [3] 王娇, 张玉龙, 张玉玲, 等. 不同灌溉方式对有机肥碳矿化及土壤活性有机质含量影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1): 37–41
- [4] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对土壤氮矿化、固定与激发效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 223–229
- [5] 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 373–378
- [6] 王淑兰, 王浩, 李娟, 等. 不同耕作方式下长期秸秆还田对旱作春玉米田土壤碳、氮、水含量及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1530–1540
- [7] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522–528
- [8] Miao S J, Ye R Z, Qiao Y F, et al. The solubility of carbon inputs affects the priming of soil organic matter[J]. *Plant and Soil*, 2017, 410(1/2): 1–10
- [9] Jha P, Garg N, Lakaria B L, et al. Soil and residue carbon mineralization as affected by soil aggregate size[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 121: 57–62
- [10] 苗淑杰, 乔云发, 张福韬. 黑土团聚体矿化和小麦秸秆对其的激发效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 218–221
- [11] Felipe B, Irene F T, Teresa H, et al. Can the labile carbon contribute to carbon immobilization in semiarid. Priming effects and microbial community dynamics[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 892–902
- [12] 匡崇婷, 江春玉, 李忠佩, 等. 添加生物质炭对红壤水稻土有机碳矿化和微生物生物量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(4): 570–575
- [13] 魏飞, 黄金花, 马芳霞, 等. 持续棉杆还田对新疆棉田土壤可矿化碳库的影响[J]. 土壤, 2017, 49(2): 295–301

Priming Effect of Maize Straw Addition on Soil Organic Matter in Yellow-brown Soil

MIAO Shujie, QIAO Yunfa*, WANG Wentao, SHI Yuhan

(College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Returning maize straws to soil is an important strategy to increase soil productivity, however, it can affect the mineralization process of soil organic matter (SOM), which is known as the priming effect, and then can further influence the turnover and stability of soil organic carbon (SOC). Thus, suitable maize straw addition is the key factor to improve soil potential productivity associated with high efficiency and friendly environment. In this study, an incubation was carried out to study the effects of maize straws at rates of 0(CK), 1%, 5% and 9% of dry soil on CO₂ emission and priming effect of SOM. Results showed that the rate and accumulation of CO₂ flux displaced parabolic curves with time across all treatments. At the early incubation, the rates of CO₂ flux of all treatments were in an order of 9%>5%>1%>CK, but the rate of CO₂ flux was higher in 5% treatment than in 9% treatment at the later incubation, and tended to be similar for all the treatments at the end. Higher accumulative CO₂ emission in 5% treatment than in 9% treatment indicated that the community and activity of soil microbe were activated by maize straw addition. Negative priming effect with maize straws was observed during incubation, which might induce SOC accumulation. All these indicated that maize straws is beneficial to SOC in yellow-brown soil, with the adding rate of 9% of soil dry weight being better in this study.

Key words: Organic carbon; Priming effect; Mineralization; Maize straw; Yellow-brown soil