

氧化铁辅助农业固碳减排的技术探索

周 萍, 潘根兴, 张旭辉, 宋祥云, 李恋卿

(南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 南京 210095)

摘 要:通过选取水稻秸秆、猪粪、污泥和颗粒有机肥,添加氧化铁后分别进行室内好气培养(25℃)和田间填埋矿化(夏季),以探索农业固碳减排的技术途径。结果表明,室内好气培养条件下,氧化铁明显降低了水稻秸秆、猪粪、污泥和颗粒有机肥的CO₂释放速率,整个培养期间的CO₂累积释放量分别由未添加氧化铁的10 934.45、5 426.12、5 288.43和794.90 mg CO₂-C·kg⁻¹降低为添加氧化铁的125.47、1 535.15、1 473.36和498.72 mg CO₂-C·kg⁻¹,以水稻秸秆的效果最为显著。田间填埋条件下,除了颗粒有机肥的有机碳降解速率基本未受氧化铁影响外,其余3种有机物料在每一取样阶段的有机碳降解速率均受到了氧化铁的有效抑制。填埋90 d后,水稻秸秆、猪粪和污泥的有机碳降解速率分别由未添加氧化铁的34.06%、14.91%和19.90%降低为添加氧化铁的24.25%、9.45%和14.24%,也以水稻秸秆的效果最为显著。可见,无论是室内好气培养还是田间填埋矿化,氧化铁均表现出对有机物料矿化降解的有效抑制作用,具有明显的有机碳固持能力。

关键词:固碳减排;有机碳矿化;有机物料;氧化铁;好气培养;田间填埋

中图分类号:X16 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)12-2590-06

An Approach of C Sequestration and Mitigation Inspired by Ferric Oxide from Paddy Soil

ZHOU Ping, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui, SONG Xiang-xun, LI Lian-qing

(Institute of Resources, Ecosystem and Environment of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to explore the approach and method of C sequestration and mitigation, the effect of ferric oxide on reducing the mineralization of organic materials (rice straw, pig manure, sewage sludge and granule organic fertilizer) under aerobic incubation and field landfill conditions was explored and elucidated. The results showed that ferric oxide significantly decreased the C mineralization rate of organic materials at each incubation time, it resulted in a significant reduction of the cumulative evolution of CO₂ from organic materials during the early incubation period of 23 days, from 10 934.45, 5 426.12, 5 288.43 and 794.90 mg CO₂-C·kg⁻¹ to 125.47, 1 535.15, 1 473.36 and 498.72 mg CO₂-C·kg⁻¹ for rice straw, pig manure, sewage sludge and granule organic fertilizer respectively, being more distinct for rice straw. Under the field landfill condition, except for granule organic fertilizer, the organic carbon remained for rice straw, pig manure and sewage sludge, sampled and determined after 30, 60 and 90 days since the beginning of field landfill process, was distinctively higher in organic materials granulated with Fe oxyhydrates than in those granulated with deionized-water. The decomposition rate of organic materials during the entire 90 days of field landfill was reduced by ferric oxide from 34.06%, 14.91% and 19.90% to 24.25%, 9.45% and 14.24% for rice straw, pig manure and sewage sludge respectively, being more distinct for rice straw. Both of aerobic incubation and field landfill indicated distinct effect of ferric oxide on reducing the C mineralization and decomposition in organic materials.

Keywords: C sequestration and mitigation; C mineralization; organic materials; ferric oxide; aerobic incubation; field landfill

随着温室气体浓度的不断增加,全球气候变暖已成为不争的事实。因此,寻求减少温室气体排放、增加陆地生态系统碳汇以缓解气候变化的固碳减排的技

术途径已变得越来越迫切^[1-3]。目前,国际上开展对耕地土壤固碳潜力及其实现途径的分析研究以及为制定CO₂排放清单及提出减排配额的依据的研究也已经越来越活跃^[4-9]。土壤固碳和农业减排作为一项有效减缓温室效应的重要途径已受到国际社会的积极重视,相关的区域和国际合作计划正在开展和实施当中^[10],各国也已纷纷出台相关政府措施以加强应对气候变化的能力。我国政府高度重视全球气候变化问题,先

收稿日期:2009-09-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40231016);国际合作重大项目(40710019002)

作者简介:周 萍(1982—),女,江苏滨海人,博士生,主要从事土壤有机碳及其组分化学研究。E-mail:zhouping229@yahoo.com.cn

通讯作者:潘根兴 E-mail:panggenxing@yahoo.com.cn

后采取了一系列行动来应对全球气候变化的挑战,目前温室气体减排、生物固碳技术和固碳工程已被列入我国中长期科学技术发展规划。生物固碳作为一种目前最安全有效经济的固碳减排方式,已经引起了国际社会的普遍关注,成为众多学科交叉研究的热点领域之一^[1]。目前温室气体的生物固碳减排措施主要包括生物质能源利用、农田和草原土壤固碳、造林、再造林及减少伐木等^[12-13]。提高农田土壤碳储量亦即是生物固碳的措施之一,我国目前仅提高农业秸秆利用率就可由当前的每年净排 9 500 万 t C 变为从大气中吸收 8 000 万 t C^[14-16]。

降低农业生产的温室气体排放,提高农业土壤的碳储量,也就是做到了农业的固碳减排。农业生产的温室气体排放中以 CO₂ 的排放占到首位,要做到农业的固碳减排,就要尽量降低农业碳排放,如降低土壤有机质的矿化、增强土壤固定新鲜有机碳的能力以及减少农业秸秆的焚烧等等。在已有稻田土壤固碳机理研究的基础上,如何运用这种固碳机制来辅助农业有机碳固定减排的技术,以降低农业土壤的二氧化碳释放,实现农业的有效固碳,为应对气候变化做出相应的贡献,将有着重要的意义。本课题组对稻田土壤的研究表明,氧化铁贡献于有机碳的保护与稳定^[7],据此考虑是否可通过添加氧化铁来抑制有机物料矿化释放二氧化碳以达到固碳减排的目的。本文通过选取几种有机物料添加氧化铁以寻求降低其二氧化碳排放的方法,进行相关的研究探索,为发展稻田土壤固碳减排技术提供相应支持。

1 材料与方法

1.1 供试有机物料

收集 4 种有机物料:污泥、猪粪、水稻秸秆和颗粒有机肥,室内自然风干。其中城市污泥采自南京市污水处理厂,猪粪和水稻秸秆取自江浦农场,颗粒有机肥购于江苏省农科院。将粒度大于 5 cm 的污泥、猪粪先进行碾压粉碎处理;水稻秸秆用铡刀按 5 cm 左右的长度进行切割。污泥、猪粪平铺于干净的塑料布上,常温通风下定期翻动,自然风干;秸秆放置于 60 ℃ 的烘箱中烘干数小时至恒重。将风干后的污泥、猪粪置于碾压板上,用研磨杖研磨通过 60 目尼龙筛;将烘干后的水稻秸秆放入粉碎机中粉碎,并通过 60 目尼龙筛。

1.2 氢氧化铁胶体的制备

称取一定量固体 Fe(NO₃)₃,用去离子水溶解定容,制得 0.2 mol·L⁻¹ 的 Fe(NO₃)₃ 溶液。将溶液转移至玻

璃烧杯中,烧杯放置于磁力搅拌器上高速搅拌,缓慢向烧杯中滴加浓氨水调节 pH,直至产生红褐色的胶体为止,从而制得氢氧化铁胶体。

1.3 有机物料造粒

分别称取适量污泥、猪粪或水稻秸秆的有机物料粉末于塑料容器内,用大容量喷壶喷洒氢氧化铁胶体或去离子水湿润有机物料粉末。振荡造粒后收集小于 3 mm 且粒径大小均匀的颗粒,剩余物用软毛刷轻压疏松分散,重新造粒。颗粒有机肥直接喷洒氢氧化铁胶体于表面。将收集到的颗粒分散平铺于干净塑料布上,自然风干 8~15 d,直到颗粒坚硬干燥,轻捏不易破碎为止。最后得到污泥、猪粪或水稻秸秆的水造颗粒、氢氧化铁造颗粒,以及颗粒有机肥的氢氧化铁包膜颗粒。

1.4 室内好气培养

分别称取上述颗粒样品 5 g 放入 125 mm 培养瓶中,然后向瓶中准确滴加去离子水至各有机物料最大持水量的 60%,随即用硅胶塞塞住瓶口,并用 704 胶密封瓶和塞子之间的空隙。硅胶塞的中间有一小孔,内插玻璃管,管外再套一段硅胶软管,以适合的硅胶塞塞紧软管通口,作为气体采样口,立即采集瓶内气体测定其 CO₂ 浓度作为初始浓度,然后放入 (25±1)℃ 的恒温培养箱中。12 h 后采气测定瓶中 CO₂ 浓度,然后拔下硅胶塞,室内换气 30 min,盖上硅胶塞,再放入恒温培养箱中,按照排好的时间表,按照上面的步骤反复进行测定,同时用不加样品的培养瓶作为对照,培养时间为 27 d。

1.5 田间填埋矿化

将污泥、猪粪、水稻秸秆颗粒样品的水造颗粒和氢氧化铁造颗粒,颗粒有机肥颗粒及其氢氧化铁包膜颗粒分别装入 300 目的尼龙网袋 (10 cm × 13.5 cm),并将袋口密封,于 2008 年 5 月 20 日埋入吴江市金家坝镇表土层深约 15 cm 的农田中,袋顶离地面约 5 cm,地表不栽种作物,每种有机物料的处理设置 3 个重复,随机排列,于埋入之日起第 30、60、90 d 时取样。样品风干后磨碎过 60 目筛,用元素分析仪测定其有机碳含量,并计算有机碳的降解速率。

2 结果与分析

2.1 室内好气培养下有机物料的矿化

培养期间各有机物料的 CO₂ 释放动态如图 1 所示。整个培养期间,水稻秸秆的 CO₂ 释放速率在第 1 d 即达到最高峰 1 571.32 mg CO₂-C kg⁻¹·d⁻¹。此后 CO₂

释放速率逐渐降低,第 15 d 后基本达到稳定,而添加氧化铁后,水稻秸秆的 CO_2 释放速率显著降低,最高峰仅为 $14.25 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。猪粪在添加氧化铁下的 CO_2 释放速率也是一直明显低于未添加氧化铁下,在第 1.5 d 达到最高峰 $143.40 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,第 13 d 后达到稳定,而未添加氧化铁下,猪粪的 CO_2 释放速率的变幅较大,最大释放速率出现在第 1 d,为 $400.93 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。污泥添加氧化铁的 CO_2 释放速率在第 1.5 d 达到最高峰 $1176.89 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,此后逐渐减小,到第 13 d 基本稳定,而添加氧化铁后 CO_2 释放速率显著降低,最高仅为 $133.13 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。同样,氧化铁也明显降低了颗粒有机肥的 CO_2 释放速率,未添加氧化铁下,其最高峰在第 1 d 达到 $78.50 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,添加氧化铁后,其最高峰降为第 4 d 的 $52.96 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

各有机物料的 CO_2 释放一般在室内好气培养第 23 d 达到稳定。通过计算各有机物料培养前 23 d 的 CO_2 累积释放量,可进一步看出氧化铁对有机物料矿化释放 CO_2 的抑制作用,如图 2 所示。未添加氧化铁下,水稻秸秆、猪粪、污泥和颗粒有机肥的 CO_2 累积释放量分别为 $10\,934.45$ 、 $5\,426.12$ 、 $5\,288.43$ 和 794.90

$\text{mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}$,而添加氧化铁后,其 CO_2 累积释放量分别显著减少为 125.47 、 $1\,535.15$ 、 $1\,473.36$ 和 $498.72 \text{ mg CO}_2\text{-C}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中以水稻秸秆的 CO_2 释放量最低,其减少的量也明显最大。可见,氧化铁能够有效地固持有机物料中的有机碳,减少其在有机物料降解过程中释放出 CO_2 ,且以在水稻秸秆中的效果最显著。

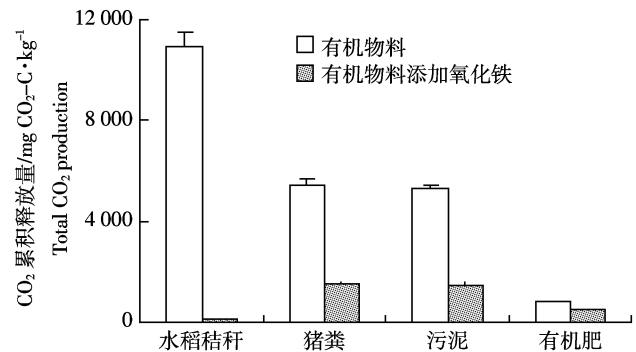


图 2 供试有机物料的 CO_2 累积释放量

Figure 2 Total CO_2 productions of studied organic materials

2.2 有机物料的田间矿化降解

填埋期间各有机物料在各取样时段的有机碳含量如图 3 所示。填埋前,添加氧化铁下各有机物料的

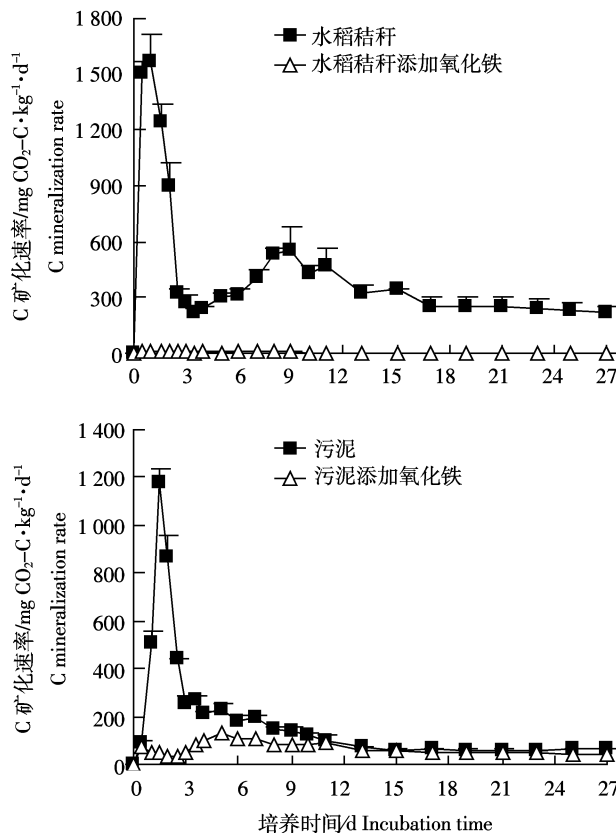
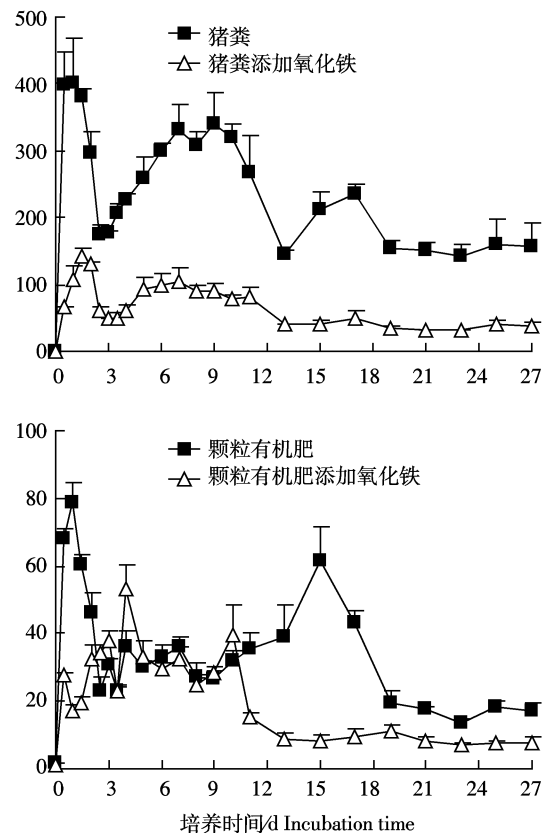


图 1 培养期间供试有机物料的 C 矿化速率

Figure 1 C mineralization rate of organic materials during the incubation time



有机碳含量与未添加氧化铁的相近,分别为:水稻秸秆 $374\sim 377\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、猪粪 $274\sim 277\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、污泥 $147\sim 148\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和颗粒有机肥 $231\sim 234\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。填埋 30 d 后,各有机物料的有机碳含量分别减少到:水稻秸秆 $277\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、猪粪 $252\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、污泥 $119\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、颗粒有机肥 $209\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。添加氧化铁的水稻秸秆、猪粪和污泥,其残留有机碳的含量明显高于未添加氧化铁下,分别为 $309\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $268\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $129\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而颗粒有机肥添加氧化铁的有机碳含量与未添加氧化铁下的没有差异。填埋 60 d 和 90 d 后,水稻秸秆和猪粪的有机碳含量依然有明显减少的趋势,但是添加氧化铁下,有机碳残留量依然明显高于未添加氧化铁下。而污泥和颗粒有机肥在填埋 30 d 后,其有机碳含量基本保持稳定。也就是说,田间条件下,除了颗粒有机肥外,氧化铁能够明显抑制有机物料的矿化,其固持有机碳的效果十分显著。

通过计算各有机物料在填埋 90 d 后的降解速率(图 4),可以进一步阐明氧化铁对有机碳矿化的这种抑制作用。未添加氧化铁下,水稻秸秆、猪粪和污泥田间填埋矿化 90 d 的有机碳降解速率分别为 34.06%、14.91%和 19.90%,添加氧化铁后,有机碳降解速率分别明显下降为 24.25%、9.45%和 14.24%。这一结果表

明,人为添加氧化铁抑制有机物料矿化降解的方法具有被实施应用作为较大规模的有机物料无污染无害化处理的潜力。而颗粒有机肥两种处理下的有机碳降解速率分别为 11.82%和 12.69%,没有明显差异。

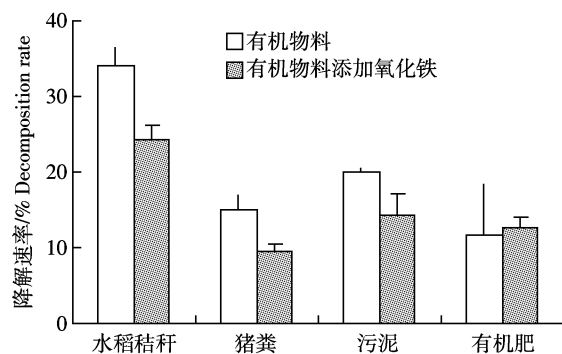


图 4 供试有机物料田间填埋的有机碳降解速率

Figure 4 Decomposition rates of organic materials after field mineralization

3 讨论

稻田土壤在一定条件下形成的“鳃血”有助于有机碳的保存和土壤肥力的提高,主要为高含量的氧化铁铝与有机质的稳定复合体。国外已有关于人为添加氧化铁抑制稻田甲烷排放的研究。这些研究指出,稻

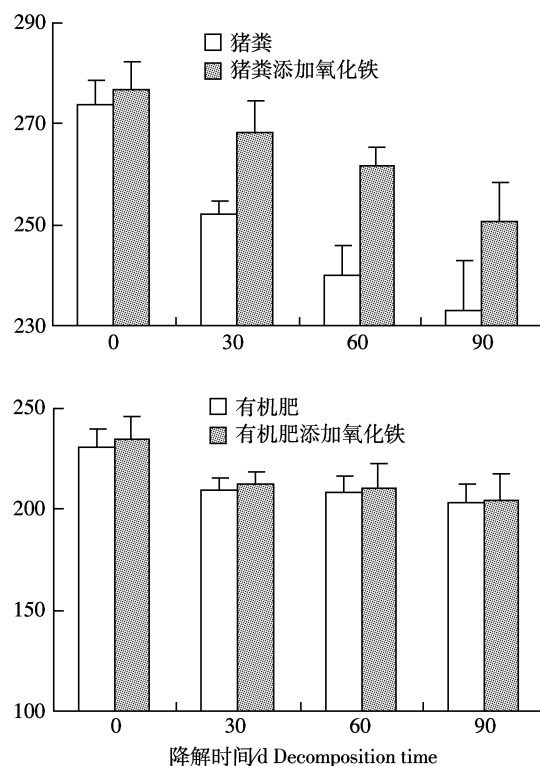
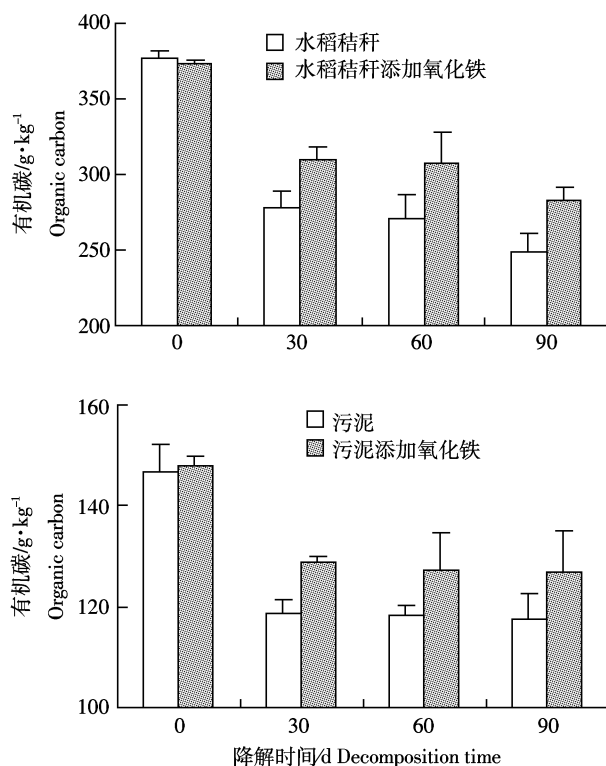


图 3 供试有机物料田间填埋矿化的有机碳残留量

Figure 3 Organic carbon remained in organic materials after field mineralization

田土壤中的氧化铁水平是调节稻田甲烷排放的一个重要的土壤特性^[18-19]。人为增加淹水状态下稻田土壤中的氧化铁水平已被用于评估氧化铁对降低甲烷排放的影响^[20]。通过对几个小区试验和一个大田试验的研究已经表明,添加氧化铁对降低稻田甲烷排放具有明显的影响,这些试验大部分都是在持续淹水条件下进行,但是结果却不尽相同^[20-22]。Huang 等^[23]通过室内厌气培养和盆栽试验研究氧化铁还原与再生对稻田土壤氧化亚氮和甲烷排放的影响,结果表明,在培养前期的 33 d 内,氧化铁还原可刺激氧化亚氮的产生但却降低甲烷的排放;而通过前 4 d 的氧化铁好氧再生,在未来厌气培养的 15 d 内,甲烷排放得到了有效的抑制。盆栽试验下,灌溉下氧化铁还原也刺激了氧化亚氮的释放,但对甲烷排放的抑制作用在试验前期并不明显,反而是在中后期通过再灌溉而得以增强。灌溉条件下氧化铁对甲烷排放的这种抑制作用主要归因于排水时三价铁再生能力的增强,从而指示三价铁对减缓灌溉土甲烷排放的影响机制。以上这些研究均揭示了人为增加氧化铁可有效抑制土壤有机碳的矿化。

目前国内还没有关于这方面的研究报道。前述关于稻田土壤固碳机理的研究^[17]已经表明,氧化铁在稻田土壤有机碳保护与稳定中的重要作用,并被认为是稻田土壤有机碳稳定的重要化学结合机制。因此我们推测是否可通过合理的人为措施增加土壤氧化铁的含量,以达到土壤有机碳的有效固定和累积,从而起到固碳增汇和减排的目的。本文的研究结果实际上证实了我们的这种推测。除了颗粒有机肥外,无论是通过室内好气培养还是田间填埋矿化,氧化铁均能有效抑制有机物料矿化释放二氧化碳。这可作为一种固碳的技术而加以推广应用。我国每年有大量的废弃有机物料被随意堆放或丢弃却不能合理加以利用,这项技术将对减缓有机物料的环境污染产生积极的环境效应和社会效应。因此,我们认为,该项技术具有开发推广的潜力和价值。对于田间填埋条件下未见氧化铁对颗粒有机肥矿化的抑制效果,可能是因为颗粒有机肥作为一种缓效肥料,其本身的降解速率已经较低,从而掩盖了氧化铁的这种抑制作用。但是,相对于添加氧化铁而言,生产颗粒有机肥的成本较高,且堆肥生产过程也会产生温室气体。就固碳减排的经济效益而言,添加氧化铁对于抑制有机物料矿化的成本较低,其净收益可能会优于生产颗粒有机肥料。

鉴于氧化铁对有机物料矿化的抑制作用,可以进

一步考虑,是否可在贫瘠土壤中施用含有氧化铁的有机物料,从而改善土壤结构,提高土壤肥力。对于氧化铁抑制有机物料矿化的机制还有待于进一步的分析,比如可结合前述研究,运用核磁共振和热裂解气相质谱技术深入分析氧化铁对有机碳矿化的这种抑制机理,从而为固碳技术的开发积累相关的基础理论。另外,在固碳机理研究的基础上,还可探索其他的人为固碳技术。比如热裂解的固体产物主要为黑炭物质(charco),其有机碳含量很高且相当稳定,可以考虑通过人为技术,将有机物料裂解生成生物黑炭(biochar),产生的气体物质收集他用,生物黑炭可以作为土壤改良剂。目前国外已有这方面的相关研究报道。

4 结论

室内好气培养结果表明,氧化铁对水稻秸秆、猪粪、污泥和颗粒有机肥矿化释放二氧化碳具有明显的抑制作用,可有效降低各有机物料的累积矿化量,以对水稻秸秆的效果最为明显。田间自然填埋条件下,氧化铁亦可有效降低水稻秸秆、猪粪和污泥的降解速率,从而有效固持其有机碳含量。人为添加氧化铁抑制有机物料的矿化作为一项固碳技术具有推广应用的潜力和价值,如可用于改善贫瘠土壤的结构,提高其肥力,其机理和具体的推广方法还有待于进一步的验证。

参考文献:

- [1] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤固碳研究的进展与问题[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 901-914.
PAN Gen-xing, LI Lian-qing, ZHENG Ju-feng, et al. Perspectives on cycling and sequestration of organic carbon in paddy soils of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 901-914.
- [2] McCarl B A, Metting F B, Rice C. Soil carbon sequestration[J]. *Climatic Change*, 2007, 80: 1-3.
- [3] 孙文娟,黄耀,张稳,等. 农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 996-1004.
SUN Wen-juan, HUANG Yao, ZHANG Wen, et al. Key issues on soil carbon sequestration potential in agricultural soils[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 996-1004.
- [4] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(11): 1623-1627.
- [5] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter. Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241: 155-176.
- [6] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climatic Change*,

- 2007, 80:25–41.
- [7] Lal R. Carbon management in agricultural soils[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12:303–322.
- [8] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6:317–327.
- [9] Smith P. An overview of the permanence of soil organic carbon stocks: Influence of direct human-induced, indirect and natural effects [J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56:673–680.
- [10] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5):282–289.
- PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(5):282–289.
- [11] 黄永梅, 龚吉蕊, 张新时. 我国开展生物固碳研究的关键科学问题及其研究进展与展望[J]. 中国科学基金, 2008, 5:268–271.
- HUANG Yong-mei, GONG Ji-rui, ZHANG Xin-shi. Key issues in studying biotic carbon sequestration in China [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2008, 5:268–271.
- [12] Hopkin M. The carbon game[J]. *Nature*, 2004, 432:268–270.
- [13] Lal R. Carbon sequestration[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363:815–830.
- [14] 杨学明. 利用农业土壤固定有机碳:缓解全球变暖、提高土壤生产力[J]. 土壤与环境, 2000, 9(3):311–315.
- YANG Xue-ming. Carbon sequestration in farming land soils: An approach to buffer the global warming and to improve soil productivity[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(3):311–315.
- [15] 刘纪远, 王绍强, 陈镜明, 等. 1990—2000 年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化[J]. 地理学报, 2004, 59(4):483–496.
- LIU Ji-yuan, WANG Shao-qiang, CHEN Jing-ming, et al. Storages of soil organic carbon and nitrogen and land use changes in China: 1990–2000[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4):483–496.
- [16] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2):612–619.
- HAN Bing, WANG Xiao-ke, LU Fei, et al. Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2):612–619.
- [17] 周萍, 宋国菡, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制[J]. 土壤学报, 2009, 46(2):263–73.
- ZHOU Ping, SONG Guo-han, PAN Gen-xing, et al. SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2):263–73.
- [18] Watanabe A, Kimura M. Influence of chemical properties of soils on methane emission from rice paddies[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 1999, 30:2449–2463.
- [19] Cheng W, Yagi K, Akiyama H, et al. An empirical model of soil chemical properties that regulate methane production in Japanese rice paddy soils[J]. *Journal of Environ Qual*, 2007, 36:1920–1925.
- [20] Furukawa Y, Inubushi K. Feasible suppression technique of methane emission from paddy soil by Fe amendment[J]. *Nutr Cycl Agroecosys*, 2002, 64:193–201.
- [21] Furukawa Y, Inubushi K. Effect of application of Fe materials on methane and nitrous oxide emissions from two types of paddy soils[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2004, 50:917–924.
- [22] Jäckel U, Russo S, Schnell S. Enhanced Fe reduction by Fe supplement: A strategy to reduce methane emission from paddies [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37:2150–2154.
- [23] Huang B, Yu K W, Gambrell R P. Effects of ferric iron reduction and regeneration on nitrous oxide and methane emissions in a rice soil[J]. *Chemosphere*, 2009, 74:481–486.