

稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展^①

史 然¹, 陈晓娟¹, 沈建林¹, 葛体达^{1*}, 隋方功^{2*}, 童成立¹, 吴金水¹

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 2 青岛农业大学资环学院, 青岛 266109)

摘 要: 秸秆还田是水稻生产中普遍采用的一项措施, 具有固碳和促进养分元素循环、减少生产中的化肥施用等生态环境功能, 但亦存在温室气体排放问题。鉴于秸秆还田对稻田产生固碳和温室气体增排的双重效果, 本文综述了稻田生态系统秸秆资源利用现状, 探讨了秸秆还田的土壤增碳效应, 总结了秸秆还田下的温室气体(CO₂、N₂O 和 CH₄)排放过程及其微生物过程机理。提出了应加强秸秆还田增碳过程中的物理-化学过程与微生物过程的耦合机理及其对固碳功能的作用机理、稻田温室气体产生机制与控制途径的研究, 以实现稻田土壤固碳减排增汇和增产的共轭双赢作用。

关键词: 土壤增碳; 温室气体排放; 秸秆还田; 稻田土壤

中图分类号: S153.5

水稻在我国粮食安全中具有举足轻重的地位。我国稻田总面积达 3 400 万 hm², 是世界上面积最大的国家之一, 我国的稻田主要分布在亚热带地区, 该区稻田占全国总面积的 31.4%^[1]。稻田土壤是在长期植稻下形成的具有高生产力的耕作土壤, 同时具有大气、水体净化以及固碳等重要环境功能。稻田生态系统是一个重要的碳汇, 可能是消纳“未知碳”的主要场所之一, 对减缓大气 CO₂ 浓度升高起着不可忽视的作用^[2-4]。研究表明, 近 30 年来我国亚热带区稻田土壤有机碳含量呈上升趋势, 具有明显的碳汇功能^[1]。然而, 由于淹水造成土壤-水-大气界面的独特的还原厌氧环境, CH₄ 排放显著增加。而且近年来, 一些地区由于施氮量的增加和不合理性, 导致土壤养分增加, 干湿交替环境的变化加速了氮素的转化, N₂O 排放加剧, 已经构成大气温室效应的主要来源之一。土壤有机碳转化和积累是土壤物理、化学、生物过程和肥力的物质基础, 与土壤固碳作用和温室气体产生与排放密切相关。

我国亚热带地区秸秆资源丰富, 是优良的有机肥源。亚热带稻田土壤有机碳积累较快^[5-6], 这主要归因于过去 30 年来水稻产量持续增加导致有机残体

输入量以及有机肥料施用量的增加^[1,7]。然而, 稻田施用秸秆等有机肥, 在增加土壤有机质积累的同时易引起 CH₄ 等温室气体的大量排放^[8-9], 因此, 稻田的秸秆还田是把“双刃剑”, 有时甚至是个误区。再者, 由于稻田生产的秸秆量超出其还田利用量, 每年约 30% ~ 50% 的秸秆被焚烧, 既浪费了大量的有机资源, 又造成环境污染和温室气体(NO_x, CH₄ 和 CO₂) 排放的增加。因此, 开展典型稻田生态系统秸秆还田的增碳动态及温室气体(CO₂、N₂O 和 CH₄)排放机制的研究, 阐明秸秆还田增碳过程中的物理-化学过程与微生物过程的耦合机理及其对固碳功能的作用机理, 揭示稻田秸秆还田过程中温室气体产生过程及减排调控机制, 对提高稻田生产力、增强固碳功能, 控制温室气体排放具有重要的科学意义和实践价值, 为水稻生产安全高效的持续发展与环境保育, 为推动农业生产走向资源节约型和环境友好型社会建设提供重要的科技支撑, 使我国在履行碳减排国家公约(UNFCCC)中处于有利地位。因此, 本文就稻田秸秆还田的土壤增碳及甲烷、氧化亚氮减排效应和机理方面的最新成果作一评述, 以期对我国该方面研究有所促进。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101247)、湖南省自然科学基金项目(11JJ4030)和中科院亚热带农业生态过程重点实验室开放基金项目(2010-2012)资助。

* 通讯作者(gtd@isa.ac.cn; fgsui@qau.edu.cn)

作者简介: 史然(1988—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事全球变化和碳循环方面研究。E-mail: shine229211@yahoo.com.cn

1 稻田生态系统秸秆资源利用现状

作物秸秆是一种宝贵的可再生有机资源,在我国来源丰富且数量巨大,每年秸秆产生量约 6 亿 t^[10-12],其中稻谷、小麦、玉米 3 种粮食作物所产生的秸秆量占总量的 76% 左右^[13-14]。我国南方地区产量约占全国秸秆总量的 50% 左右,其中秸秆约占 50%~60%^[15]。有机资源不但含有大量养分,而且含有多种微量养分,其合理施用同样可以提高作物产量。如秸秆(干)含有机碳 418 g/kg,氮 6.0 g/kg,磷 0.7 g/kg,钾 20.7 g/kg,还含有中微量元素^[16],是一种很好的有机资源。据估算,我国每年生产的秸秆中总养分含量为 1.633×10^7 t,其中 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 4.9×10^6 、 1.6×10^6 、 9.8×10^6 t,相当于 1999 年全国化肥用量的 40%^[17]。因此,秸秆等有机物可作为再生资源加以利用^[18]。然而,随着农业生产和农村能源事业的不断发展,农作物秸秆资源出现了大量剩余,还田再利用的秸秆目前仅占我国秸秆资源总量的 30% 左右,大量的秸秆被付之一炬,这不仅浪费宝贵的有机资源,还造成大气污染、土壤结构恶化和温室气体排放量的增加等一系列问题^[19]。

联合国粮农组织(WFO)、国际肥料工业学会(IFA)、国际植物营养研究所(IPNI)也相继提出了“土壤养分综合管理”理念^[20],提倡综合循环利用农田生态系统内的作物秸秆资源。近年来,欧洲、美国、中国、印度等也通过政策、法律等手段来促进作物秸秆资源还田(土)以提升土壤肥力、增加农业固碳减排和减少燃烧作物秸秆对大气的污染。2006 年以来,我国南方 6 省启动土壤有机质提升试点补贴项目,大力推广秸秆还田。

2 秸秆还田的土壤增碳效应

施用秸秆等有机资源是提高土壤有机质含量的有效措施。秸秆还田增加的土壤有机质多与土壤矿质胶体复合,但以紧结态和松结态为主^[21]。秸秆直接还田可以提高稻田土壤有机质和腐殖质含量,但土壤有机质积累量和腐殖化程度受还田量的影响^[22]。土壤有机碳含量与作物残留物返还量呈线性关系,因此作物残留物是决定土壤有机碳含量的关键因子。对于增加稻田土壤碳汇来说,秸秆还田是一项重要而又切实可行的措施,在当前的耕种制度下,最经济而且易于推广。增加有机物质输入是增加农田土壤固碳的重要途径^[23]。

施用秸秆等有机资源是提高土壤肥力与持续生产力^[19, 24]和增加土壤固碳量的重要措施^[23]。刘守龙

等^[25-26]和王开峰^[27]对湖南省的国家稻田肥力长期监测点的研究结果显示,施用秸秆等有机物料稻田土壤有机质约增加了 50%~120%,而稻谷产量在 1990 后并未表现出明显的增加。张国荣等^[28]在中国农业科学院祁阳红壤试验站的研究也得到相似的结果。潘根兴和赵其国^[29]对太湖和江西稻田土壤的研究结果也表明,随着稻田土壤有机质含量的增加,其对稻谷的增产效率呈指数递减。朱瑞祥等^[30]的定位试验表明,秸秆还田可显著增加土壤有机质含量,但施入过多量的秸秆会使有机质增加的比率降低。武志杰等^[31]的研究也表明,玉米秸秆直接还田或间接还田是提高土壤有机质含量及其活性和改善土壤肥力状况重要措施,建议玉米秸秆的施入量应为当年生产量的 30%~50%。朱捍华等^[32]通过 6 年田间定位试验研究表明,与施用化肥相比,秸秆易地还土下丘陵红壤有机质含量增加 5.8%~28.9%,同时土壤物理性质也明显得到改善。

然而,以往的研究往往只关注秸秆还田条件下稻田固碳或者增排的一个方面,因此不能对稻田排放的温室气体的净全球增温潜势做出全面的评价。而已有的估算农田净全球增温潜势的研究,通常是借助于长期定位试验中土壤有机碳含量的年际动态并结合模型来计算年度土壤固碳量,并进一步通过 CH₄ 和 N₂O 排放量的估算或监测来计算 CO₂、N₂O 和 CH₄ 3 种温室气体的净全球增温潜势^[33-36]。如逯非等^[37]采用模型对我国秸秆还田下的土壤固碳和甲烷增排作出了估算,发现我国秸秆还田增排的 CH₄ 所导致的全球增温潜势平均为土壤固碳减排潜势的 2.18 倍,而在湖南、江西、广东、广西等我国亚热带双季稻区,这个比值更是高达 3.50~5.24。然而,对于模型的结果却很少有实地监测结果来验证。此外,虽然我们通过长期定位试验能够估算出土壤的年固碳量,然而对于影响土壤有机碳变化的各个碳收支过程却不能定量评价,从而不利于土壤固碳机理的解释。因此,迫切需要开展对于短期(如 1~2 年)或者一个作物生长季内稻田秸秆还田土壤固碳效果的研究,并在此基础上结合 CH₄ 和 N₂O 排放监测定量温室气体净排放。

3 秸秆还田下的温室气体排放过程及机制

20 世纪 80 年代初期开始,我国对陆地生态系统 CH₄ 和 N₂O 的排放有所研究,主要从土壤理化性质、气候因子、水肥管理、种植和耕作措施等方面进行观测,取得了一定的研究结果。为准确评估我国稻田的 CH₄ 和 N₂O 的排放量提供了依据^[38-40]。

全球稻田 CH_4 的总排放量约为 35 ~ 56 Tg, 中国约占其 1/4^[41]。稻田甲烷的排放是由稻田土壤中 CH_4 的产生、再氧化及传输 3 个过程共同作用的结果。目前对于 CH_4 排放 3 个过程往往仅侧重于某一方面, 没有将这 3 个过程系统化, 绝大多数工作是研究某些因素对稻田 CH_4 排放的整体作用。国内稻田 CH_4 排放的研究主要集中于 CH_4 排放的影响因素、排放量的估算和时空变化方面^[39]。稻田施用秸秆等有机肥显著增加土壤温室气体排放, 尤其是甲烷的排放^[42]; 施用秸秆后稻田土壤甲烷排放通量增加 2 ~ 25 倍^[43-46]。施用有机肥比等量氮肥导致更多 CH_4 排放^[41,47]。蒋静艳等^[48]和 Naser 等^[49]研究表明, 稻田 CH_4 排放量随有机肥施用量的增加而增加。施用不同有机肥也影响温室气体排放, 稻田施用秸秆 CH_4 排放量显著高于厩肥^[46,50]。不同有机肥种类及用量也可导致不同的 CH_4 排放量^[44, 51]。Zou 等^[52]对稻麦轮作体系的 CH_4 和 N_2O 排放进行了监测, 结果表明稻季麦秸还田能增加稻田甲烷排放达 2.5 倍, 但减少 19% 的 N_2O 排放。Ma 等^[53]对稻麦轮作体系秸秆还田下稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量进行监测也表明, 稻季秸秆还田较秸秆不还田能增加 CH_4 排放 3 ~ 11 倍, 但能显著降低 N_2O 排放达 30%。石生伟^[54]对双季稻区秸秆还田下 CH_4 和 N_2O 排放进行监测表明, 与秸秆不还田相比, 秸秆还田增加了 CH_4 排放达 1.4 ~ 2.8 倍, 增加 N_2O 排放达到 2.1 ~ 2.9 倍。以上研究表明, 稻田秸秆还田会显著增加 CH_4 排放, 但对 N_2O 的影响不一致, 即水旱轮作下的稻田秸秆还田能减少 N_2O 排放, 但双季稻田则表现出 N_2O 排放增加。对于前一种现象, 研究人员解释为由于秸秆的 C:N 比较高使得土壤无机氮被微生物所固定而导致 N_2O 排放量减少^[52-53]。但这种解释不适应于双季稻田, 其是否是因为两种体系所固有的差别造成的还有待于进一步研究证实^[54]。

近年来, 产甲烷古菌的研究成为新的 CH_4 排放机理研究热点。确认水分管理、施肥、水稻类型是管理措施中影响 CH_4 排放最为主要的因素。稻田 CH_4 排放的季节变化与地理位置密切相关, 而日变化包括 4 种类型, 不同区域间 CH_4 排放存在显著差异^[41]。近年来, 关于 CH_4 排放机理尤其是产甲烷古菌方面的研究得到了较多的重视。但 IPCC 最新报告指出, 全球大气中 CH_4 浓度正趋于平衡, 在近 20 年中仅由 1 715 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 上升到目前的 1 750 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[4]。可以认为, 国际上对于 CH_4 排放的关注和研究将趋于冷淡, 稻田 CH_4 排放对全球“温室效应”的贡献亦远没有过

去认为的那样严重。

N_2O 对于气候变暖的效应约为等量 CO_2 的 296 倍, 是重要的温室气体之一^[55]。1994 年全球 N_2O 排放总量 17.7 Tg N, 其中人类活动(包括农田)占总量 45.8%, 农业(土壤)年排放占总排放量的 23.7%^[3]。我国 1995 年农田 N_2O 排放 398 Gg N, 其中旱地排放 310 Gg N, 稻田 88 Gg N^[38]。硝化、反硝化作用是产生 N_2O 的基本过程。稻田土壤 N_2O 排放影响因素包括土壤温度、湿度、微生物种类和数量, 以及有机质含量、通气状况、硝酸根、根际环境以及农事活动等。有机肥和氮肥对稻田 N_2O 排放的影响, 不同学者有不同的研究结果, 有的研究发现氮肥比有机肥能促进更多 N_2O 排放^[56], 而曾江海等^[57]研究却发现施用有机肥后 N_2O 的排放显著高于施氮肥处理。

关于 N_2O 排放的研究还包括其排放量估算和时空变化、模型预测等方面。但目前研究的热点问题主要集中于其排放机理方面。尽管国际上公认硝化与反硝化过程是 N_2O 排放的来源, 但对该过程的微生物作用机理仍然认识不足。陆地生态系统中硝化作用主要由氨氧化细菌和亚硝酸氧化菌实现。近年的研究发现, 氨氧化古菌在硝化作用中也具有重要作用^[58]。有学者提出, 有些硝化细菌不仅能够进行硝化作用, 也能够进行反硝化作用, 这种类型的反硝化作用是土壤中 NH_4^+ 以 NO 或 N_2O 形式丢失的主要途径^[59-60]。总体上, 分子生物学技术在研究土壤功能微生物及其生物化学过程领域发挥越来越突出的作用, 特别是能获得比传统方法更多的土壤微生物种群, 将成为研究 N_2O 排放微生物作用机理的关键手段。

4 小结与展望

综上所述, 鉴于秸秆还田在水稻生产中的普遍性及对稻田温室气体排放的重要影响, 准确评价秸秆还田下稻田温室气体排放而产生的净全球增温潜势并阐明其固碳减排机制, 将对计算我国稻田温室气体排放清单及稻田温室气体减排提供重要依据。然而, 目前对秸秆还田下的稻田土壤增碳动态及温室气体排放效应的认识仍然相当有限, 特别是下列关键科学问题:

(1) 施用秸秆等有机资源是提高土壤肥力与持续生产力和增加土壤固碳量的重要措施。但是, 秸秆还田对于稻田土壤有机质积累起多大作用等问题仍然缺乏深入的认识。秸秆还田增碳效应是否与稻田的特殊物理化学环境(氧化-还原变化过程)存在必然的耦合机制, 其物理-化学过程和微生物过程的耦合机

理如何, 仍缺乏系统的研究和理论认识。

(2) 稻田土壤有机质积累是否必然会引起 CH_4 和 NO_2 排放量的增加, 如果这样, 应采取何种调控手段减少 CH_4 和 NO_2 排放? 或是应当将稻田土壤有机质含量控制在什么水平才能达到稻田土壤固碳减排增汇和增产的共轭双赢作用? 这些问题都有待于研究和回答。

参考文献:

- [1] Wu J. Carbon accumulation in paddy ecosystems in subtropical China: Evidence from landscape studies[J]. *European Journal of Soil Science*, 2011, 62: 29–34
- [2] IPCC. Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations[M]. UK and NY, USA: Cambridge University Press, 1995
- [3] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis (IPCC Third Assessment Report) [M]. UK and NY, USA: Cambridge University Press, 2001
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. NY, USA: Cambridge University Press, 2007
- [5] Huang Y, Sun WJ. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51: 1 785–1 803
- [6] Pan GX, Li LQ, Wu LS. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79–92
- [7] Sun WJ, Huang Y, Zhang W. Estimating topsoil SOC sequestration in croplands of eastern China from 1980–2000[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47: 261–272
- [8] Cai ZC, Tsuruta H, Minami K. Methane emissions from rice fields in China: Measurements and influencing factors [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105: 17 231–17 242
- [9] Ma J, Ma E, Xu H, Yagi K, Cai Z. Wheat straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41: 1 022–1 028
- [10] 王秋华. 我国农村作物秸秆资源化调查研究[J]. *农村生态环境*, 1994, 10(4): 67–71
- [11] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. *土壤通报*, 2001, 32(5): 209–231
- [12] 安成立, 杜建, 岳秀琴. 作物秸秆高效综合利用途径探析[J]. *中国资源综合利用*, 2004, 1(6): 25–27
- [13] 韩鲁佳, 闰巧娟, 刘向阳. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*, 2003, 18(3): 87–91
- [14] 曹国良, 张小曳, 郑方成, 王亚强. 中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J]. *资源科学*, 2006, 28 (1): 9–13
- [15] 朱奇宏, 黄道友, 刘守龙. 红壤丘陵区农作物秸秆综合利用现状与展望[J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1 482–1 486
- [16] 沈裕琥, 黄相国, 王海庆. 秸秆覆盖的农田效应[J]. *干旱地区农业研究*, 1998, 16(1): 45–50
- [17] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 张福锁, 王运华. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. *华中农业大学学报*, 2002, 21(3): 242–247
- [18] Edmeades DC. The long-term effects of manures and fertilizers on soil productivity and quality: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, 66: 165–180
- [19] Pathak H, Singh R, Bhatia A, Jain N. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. *Paddy and Water Environment*, 2006, 4: 111–117
- [20] Lal R. Soil management in the developing countries[J]. *Soil Science*, 2000, 165: 57–72
- [21] 刘鹏程, 丘华昌. 稻草覆盖还田与土壤有机无机复合[J]. *土壤通报*, 1998, 24(6): 276–277, 255
- [22] 陈世正, 杨邦俊, 宋光煜, 魏朝富, 袁玲, 高明. 稻草还田对土壤肥力与作物产量的影响[J]. *土壤肥料*, 1995, 4: 13–17, 42
- [23] Lal R. Global potential of soil C sequestration to mitigate the greenhouse effect[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2003, 22: 151–184
- [24] Wild A. Russell's Soil Conditions and Plant Growth[M]. Longman, New York, USA: Nabu Press, 1988: 564–607
- [25] 刘守龙, 童成立, 吴金水. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1 228–1 233
- [26] 刘守龙, 童成立, 吴金水. 等氮条件下有机无机肥配比对水稻产量的影响探讨[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 106–112
- [27] 王开峰. 亚热带稻田土壤质量对长期施肥的响应研究(博士学位论文)[D]. 长沙: 中国科学院亚热带农业生态研究所, 2007
- [28] 张国荣, 李菊梅, 徐明岗. 长期不同施肥对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(2): 543–551
- [29] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384–393
- [30] 朱瑞祥, 薛少平, 张秀琴. 机械化玉米秸秆还田对土壤水肥状况的动态研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(4): 39–42
- [31] 武志杰, 张海军, 许广山. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 539–542
- [32] 朱捍华, 黄道友, 刘守龙, 朱奇宏. 稻草易地还土对丘陵红壤有机质和主要物理性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2 497–2 502
- [33] Li CS, Salas W, DeAngelo B, Rose S. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35: 1 554–1 565

- [34] Mosier AR, Halvorson AD, Reule CA, Liu XJ. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in Northeastern Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35: 1 584–1 598
- [35] Qiu JJ, Li CS, Wang LG, Tang HJ, Li H, Ranst EV. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23: GB1007, doi:10.1029/2008GB003180
- [36] Shang QY, Yang XX, Gao CM, Wu PP, Liu JJ, Xu YC, Shen QR, Zou JW, Guo SW. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2010, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02374.x.
- [37] 逯非, 王效科, 韩冰, 欧阳志云, 郑华. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 99–108
- [38] Xing GX. N₂O emission from cropland in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 52: 249–254
- [39] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. *土壤*, 1999, 31(5): 266–269
- [40] Neff JC, Holland EA, Dentener FJ. The origin, composition and rates of organic nitrogen deposition: A missing piece of the nitrogen cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2002, 57/58: 99–36
- [41] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理[J]. *大气科学*, 1998, 22(4): 600–612
- [42] Guo L, Lin E. Carbon sink in cropland soils and the emission of greenhouse gases from paddy soils: A review of work in China[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2001, 3: 413–418
- [43] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 36: 559–610
- [44] Wassmann R, Buendia LV, Lantin RS. Mechanisms of crop management impact on methane emissions from rice fields in Los Baños, Philippines[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 107–119
- [45] Corton TM, Bajita JB, Grospe FS. Methane emission from irrigated and intensively managed ricefields in central Luzon (Philippines) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 37–53
- [46] 秦晓波, 李玉娥, 李克樱. 不同施肥处理稻田甲烷和氧化亚氮排放特征[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 143–148
- [47] Setyanto P, Makarim AK, Fagi AM, Wassmann R, Buendia LV. Crop management affecting methane emissions from irrigated and rainfed rice in Central Java (Indonesia) [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000, 58: 85–93
- [48] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 552–556
- [49] Naser HM, Nagata O, Tamure S. Methane emission from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53: 95–101
- [50] 邹建文, 黄耀, 宗良纲. 稻田不同种类有机肥施用对后季麦田 N₂O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2003, 27(7): 1 264–1 268
- [51] 陈美慈, 闵航, 赵宇华, 吴伟祥. 有机肥和无机肥对水稻土产甲烷的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 1998, 4(15): 366–370
- [52] Zou JW, Huang Y, Jiang JY. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: GB2021, doi:10.1029/2004GB002401
- [53] Ma J, Li XL, Xu H, Han Y, Cai ZC, Yagi K. Effects of nitrogen fertiliser and wheat straw application on CH₄ and N₂O emissions from a paddy rice field[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45: 359–367
- [54] 石生伟. 减少稻田 CH₄ 和 N₂O 排放措施的研究(硕士学位论文) [D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- [55] Rodhe H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect[J]. *Science*, 1990, 248: 1 217–1 219
- [56] 熊正琴, 邢光熹, 鹤田治雄, 施书莲, 沈光裕, 杜丽娟. 豆科绿肥和化肥氮对双季稻田氧化亚氮排放贡献的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(45): 704–710
- [57] 曾江海, 王智平, 张玉铭, 宋文质, 王少彬, 苏维瀚. 小麦-玉米轮作期土壤排放 N₂O 通量及总量估算[J]. *环境科学*, 1995, 16(1): 32–35, 67
- [58] Venter JC, Remington K, Heidelberg JF. Environmental genome shotgun sequencing of the Sargasso Sea[J]. *Science*, 2004, 304: 66–70
- [59] Nicolaisen MH, Risgaard-Petersen N, Revsbech NP, Reichardt W, Ramsing NB. Nitrification-denitrification dynamics and community structure of ammonia oxidizing bacteria in a high yield irrigated Philippine rice field[J]. *Fems. Microbiology Ecology*, 2004, 49: 359–369
- [60] Lou YS, Ren LX, Li ZP, Zhang TL, Inubushi K. Effect of rice residues on carbon dioxide and nitrous oxide emissions from a paddy soil of subtropical China[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2007, 178: 157–168

A Review on Application of Rice Straw in Soil Carbon Sequestration and Greenhouse Gases Emission in Paddy Ecosystems

SHI Ran^{1,2}, CHEN Xiao-juan¹, SHEN Jian-lin¹, GE Ti-da^{1*}, SUI Fang-gong^{2*},
TONG Cheng-li¹, WU Jin-shui¹

(1 *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*; 2 *College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China*)

Abstract: Rice straw application is a common measure in rice production, which has some ecological functions, such as carbon (C) sequestration, nutrient cycling promotion and fertilizer reduction etc., however, it also exists the problem of greenhouse gases emission. Considering the dual effects of rice-straw application on C sequestration and greenhouse gas emissions increasing in paddy ecosystem, this paper summarized the current utilization of rice straw resources in rice ecosystem, explored the effects of rice straw incorporation on soil C sequestration, and summarized the greenhouse gas (CO₂, N₂O, and CH₄) emission process and its microbial mechanisms under rice straw incorporation. We suggested that it should be strengthened in the coupling mechanism of the physico-chemical processes and microbial processes during the C sequestration process by rice straw incorporation and its roles in C sequestration, as well as the greenhouse gas emission mechanism in paddy ecosystem and its control measures for the purpose of seeking a win-win solution of soil C sequestration, greenhouse emission reduction and rice productivity enhancement in paddy ecosystem in the future.

Key words: Soil carbon sequestration, Greenhouse gas emission, Rice straw incorporation, Paddy soil