

杨士红,刘晓静,罗童元,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田温室气体排放影响研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):5-9.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.002

生物炭施用对节水灌溉稻田温室气体排放影响研究进展

杨士红, 刘晓静, 罗童元, 徐俊增
(河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:对稻田温室气体排放特征,影响因素,水稻节水灌溉技术及其环境效应,生物炭在农业上的应用及其对农田土壤温室气体的减排效应进行了总结分析。针对节水灌溉引起稻田土壤有机碳含量降低的问题,提出应该从水稻节水灌溉技术与生物炭施用技术相结合的角度开展稻田温室气体排放规律及其对水碳联合调控的响应,节水稳产、固碳减排的稻田水碳管理模式等新的研究。

关键词:稻田;节水灌溉;生物炭;温室气体排放;土壤有机碳

中图分类号: S274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)10-0005-05

温室气体引起的全球变暖和臭氧层破坏是当今世界备受关注的环境问题。世界气象组织(WMO)在其年度报告《2012年温室气体公报》中指出,从1990年至2012年间,由于CO₂、CH₄和N₂O等温室气体的排放,全球气候暖化效应增加了32%^[1]。农业生产活动排放的CO₂、CH₄和N₂O等温室气体总量介于电热生产与尾气之间,成为全球温室气体的第

二大重要来源,其中相当一部分来自农田生态系统^[2]。稻田作为温室气体排放的重要源受到国内外的普遍关注^[3-4]。

为了缓解农业水资源供需矛盾,节水灌溉技术在我国得到了大面积推广应用,在有效缓解水资源供需矛盾的同时,水分状况的改变使农田生态环境包括土壤理化特性、“四水”转化、碳氮磷元素循环等发生一系列的变化。因此,节水灌溉的农田环境效应成为相关学科研究的热点。与此同时,生物炭施用作为一种先进的农田碳管理技术,在农业上的应用及其农业环境效应成为土壤、环境等相关学科研究的热点之一。大量研究表明生物炭施用具有改善土壤性质、提升耕地生产性能、提高作物生产能力和减排温室气体的作用^[5-10]。

在综述稻田温室气体排放特征、影响因素、水稻节水灌溉技术及其环境效应,生物炭在农业的应用及其对农田土壤温

收稿日期:2016-01-11

基金项目:国家自然科学基金(编号:51209066,51579070);中央高校业务费项目(编号:2014B17114);江苏省高校优秀科技创新团队项目。

作者简介:杨士红(1983—),男,山东蒙阴人,博士,副教授,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。E-mail:ysh7731@hhu.edu.cn。

[11]唐珂. 国外农业物联网技术发展及对我国的启示[J]. 中国科学院院刊,2013,28(6):700-707.

[12]Gutierrez M, Alegret S, Caceres R, et al. Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 57(1): 12-22.

[13]Yazdi S H, White I M. Optofluidic surface enhanced Raman spectroscopy microsystem for sensitive and repeatable on-site detection of chemical contaminants[J]. Analytical Chemistry, 2012, 84(18): 7992-7998.

[14]Potyrai R A, Nagraj N, Tang Z, et al. Battery-free radio frequency identification(RFID) sensors for food quality and safety[J]. Food Chemistry, 2012, 60(35): 8535-8543.

[15]Śliwińska M, Wiśniewska P, Dymerski T, et al. Food analysis using artificial senses[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(7): 1423-1448.

[16]Peng H, Wang S, Zhang Z, et al. Molecularly imprinted photonic hydrogels as colorimetric sensors for rapid and label-free detection of vanillin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(8): 1921-1928.

[17]Cerovic Z G, Ghazlen N B, Millhade C, et al. Nondestructive diagnostic test for nitrogen nutrition of grapevine (*Vitis vinifera* L.) based on dual leaf-clip measurements in the field[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(14): 3669-3680.

[18]周洁. 世界主要发达国家物联网的发展现状[J]. 企业技术开发:学术版, 2012, 31(10): 92-93, 95.

[19]海宁. 国际物联网技术发展动向[J]. 上海信息化, 2012(11): 82-85.

[20]刘德娟,周琼,曾玉荣. 日本都市农业的发展现状及多功能性[J]. 世界农业, 2015(4): 155-160.

[21]邢晓柳. 中日农业科技发展比较研究[J]. 世界农业, 2014(7): 135-138.

[22]许缘,金德俊. 日本:一半以上农户选择使用农业物联网[EB/OL]. (2014-07-04)[2015-10-10]. <http://world.xinhua08.com/a/20140704/1351543.shtml? f=arelated>.

[23]许缘. 日本农业“触网”不只为高收益[J]. 农机质量与监督, 2014(8): 40-41.

[24]传感器技术向微型化、智能化和可移动性发展[EB/OL]. (2012-09-29)[2015-10-10]. http://www.5lian.cn/html/2012/chuanganqi_0929/34687.html.

室气体减排效应的基础上,提出了今后研究需要关注的问题。

1 稻田温室气体排放

1.1 甲烷

稻田是大气 CH₄ 的主要排放源之一^[11],随着水稻种植面积的不断增加,稻田 CH₄ 排放量将进一步增大^[8]。IPCC 排放情景特别报告指出,由于灌溉水稻面积的持续增加,水稻的 CH₄ 排放量将会在 2005—2020 年间增加 16%^[2]。因此,农田尤其是稻田 CH₄ 排放一直是相关学科研究的热点之一。国内外学者针对稻田 CH₄ 的排放特征及影响因素进行了大量研究,发现稻田 CH₄ 排放主要受土壤理化特性、水稻生长及其品种、施肥种类、耕作制度、土壤水分状况及水分管理等因素的影响;并提出了有机肥和化肥结合施用、推行节水灌溉技术、施用稻田 CH₄ 抑制剂、采用半干旱栽培技术等稻田 CH₄ 减排措施。

稻田 CH₄ 的排放是稻田土壤中 CH₄ 的产生、再氧化及向大气传输 3 个过程综合作用的结果,所有这些过程受土壤性质、水稻生长、农业管理以及气候条件等多种因素的影响。但研究表明,稻田 CH₄ 排放呈现一定的规律性,即稻田 CH₄ 排放有日变化、季节变化、年际变化及空间变化等规律。稻田 CH₄ 的排放具有明显的日变化规律。国内外的多项研究表明,稻田 CH₄ 排放呈现出日间极大值型、夜间极大值型和随机型 3 种不同的日变化类型^[3]。稻田 CH₄ 的排放也具有明显的季节变化规律,其基本形式为 3 峰型,分别发生在水稻生长期(返青期)、中期(分蘖、拔节期)和后期(黄熟期)^[12]。稻田 CH₄ 排放具有较大的年际差异。其主要原因是稻田年际间有机质的加入量和受降雨等因素影响的田间水分状况等存在很大差异。

有研究表明,CH₄ 排放与非水稻生长期的降雨量正相关,而与水稻生长季的降雨量负相关^[11]。土壤质地决定了土壤通透性和土壤有机质的分解速率,因而能影响土壤氧化还原电位(Eh)和对产生 CH₄ 微生物的基质的供应,进而对稻田 CH₄ 排放产生影响。焦燕等研究了江苏各地 18 种水稻土的理化性质对 CH₄ 排放的影响,结果表明 CH₄ 排放与土壤沙粒含量呈正相关,与黏粒含量呈负相关^[13]。重质土壤 Eh 缓冲容量较大,当稻田土壤由排水良好的状态进入到淹水状态后,土壤 Eh 下降速率较慢,达到产 CH₄ 菌活动所需要的土壤 Eh 的时间较长,因而排放的 CH₄ 较少^[14]。土壤中一切能够影响土壤 Eh 的物质含量均能通过影响土壤 Eh 而影响 CH₄ 排放。研究表明 CH₄ 的产生必须在土壤严格厌氧,土壤 Eh 下降到 -150 ~ -100 mV 以后^[14]。土壤 pH 值影响有机质分解和产 CH₄ 菌活性,是微生物代谢过程中的重要因子。大多数产 CH₄ 菌活动的适宜 pH 值在中性或中性偏碱的范围,当 pH 值 > 8.75 或 pH 值 < 5.75 时,土壤中 CH₄ 的形成几乎完全被抑制^[15]。土壤温度影响土壤微生物的活性,进而直接影响稻田 CH₄ 的产生和排放。总的来说,土温的升高促进稻田 CH₄ 的排放。一般来说,施用不同种类肥料的稻田 CH₄ 排放量的大小顺序为有机肥 > 化肥 + 有机肥 > 沼泽肥 > 化肥^[3]。Huang 等研究表明,淹水稻田 CH₄ 季节排放总量与水稻地上干物质质量呈显著正相关^[16]。耕作制度对稻田 CH₄ 排放有明

显影响,传统的冬水田平作稻田 CH₄ 排放极显著高于水旱轮作和厢作免耕稻田,显著高于垄作稻田,水旱轮作对稻田 CH₄ 的减排作用最显著^[17]。

水分管理是影响农田 CH₄ 排放的重要因素之一^[11,18-19],对涉及农田 CH₄ 排放的各个基本过程有决定性的影响。水分管理通过影响土壤通透性及氧化还原状态,影响稻田 CH₄ 产生、排放及氧化^[20]。稻田水层限制了大气中氧气向土壤传输,使土壤形成厌氧还原环境,为产 CH₄ 细菌的生长和活性提供必要条件。所以,淹水(至少是水分饱和)是稻田产生和实质性排放 CH₄ 的先决条件。大量的研究表明水稻生长期持续淹水有利于 CH₄ 的产生和排放^[21-22]。与持续淹水相反,间歇灌溉、控制灌溉等的水分管理模式抑制了稻田 CH₄ 的产生,能大量减少稻田 CH₄ 的排放^[23-24]。

1.2 氧化亚氮

土壤中 N₂O 的产生主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成的,这是一个复杂的物理、化学和生物学过程。除此之外,还可能还有其他过程参与。早期研究认为稻田处于强还原状态,产生大量的 CH₄ 和微量的 N₂O,关注稻田 N₂O 排放的研究较少,但随着水稻节水灌溉技术的大面积应用,加大了稻田 N₂O 的排放,因此,近年来针对水分管理对稻田 N₂O 排放特征及机理的影响进行了较多研究。

关于水分管理对稻田 N₂O 排放的影响,目前已经做了较多的研究^[25-27]。结果表明,持续淹水稻田 N₂O 排放量很低,很多研究中对其忽略不计^[18,26],这也是早期关于农田 N₂O 排放的研究主要集中在旱作农田的原因;晒田及干湿交替可以加剧稻田 N₂O 排放^[21],但 N₂O 排放的增加幅度由晒田及土壤脱水程度决定^[28];节水灌溉稻田 85.7% ~ 98.65% 的 N₂O 排放量发生在干湿交替期^[29],土壤干湿交替使得硝化作用和反硝化作用交替进行,从而促进了 N₂O 排放;此外,土壤由湿变干对 N₂O 排放的影响要高于土壤由干变湿^[30-31]。徐华等通过田间试验研究土壤水分对稻田 N₂O 排放的影响,发现各处理在持续淹水、烤田及干湿交替阶段的 N₂O 平均排放通量分别为 1.02、47.99、23.87 μg/(m²·h)^[32]。烤田及干湿交替明显增加了稻田 N₂O 排放量,相对于持续淹水,烤田及干湿交替使各处理平均 N₂O 排放通量分别增加 47 倍和 23 倍。李香兰等同样发现,水稻移栽后烤田开始前土壤持续淹水,尽管占总施氮量 80% 的氮肥在此期间施入,但稻田 N₂O 排放通量一直维持在较低水平^[33];N₂O 排放峰值出现在水分剧烈变化的烤田及随后复水期且在此期间 N₂O 排放量占水稻生长期 N₂O 排放总量的 70% ~ 94%,说明水稻生长期稻田土壤 N₂O 排放通量主要受土壤水分状况的影响。Jiao 等通过田间试验发现间歇灌溉稻田的 N₂O 排放量比淹水稻田增加了 23.72%^[26]。Zou 等也发现晒田及干湿交替加剧了稻田 N₂O 的排放^[21]。

1.3 二氧化碳

农田生态系统 CO₂ 净通量是经农田排放(土壤呼吸与植物呼吸)与 CO₂ 固定(植物光合作用)之后农田与大气之间的 CO₂ 通量。据估计,大气中 30% 的 CO₂ 来源于农业活动和土地利用方式等转变的过程。因此,深入研究农田生态系统与大气间 CO₂ 净通量的变化规律及其动态过程,对于评估农业

生态系统碳排放及其对温室效应的影响具有重要意义。由于常规灌溉稻田长期处于淹水厌氧状态,稻田 CO_2 净通量、土壤呼吸变化及其变化剧烈程度相对较小,对 CO_2 的农田排放研究主要集中在北方旱田,针对稻田的研究相对较少(仅有的研究主要关注淹水灌溉稻田)。邹建文等利用南京地区稻田 CO_2 排放的测定结果及相关环境和生物要素的测定,估算了稻田 CO_2 净通量,结果表明,水稻移栽后 3 周内表现为碳净排放或弱的净固定,其后碳净固定逐渐增加^[34]。朱咏莉等采用涡度相关技术对我国亚热带淹水灌溉稻田 CO_2 净通量进行了连续监测,结果表明我国亚热带稻田生态系统是大气 CO_2 的汇^[35]。有研究表明,分蘖期排水晒田和成熟期排水引起的稻田土壤水分下降导致排水期稻田 CO_2 排放增加和 CO_2 净吸收减少^[36]。综上所述,目前对稻田温室气体排放的研究主要针对 CH_4 和 N_2O ,较少关注稻田 CO_2 排放(少数研究也只针对淹水灌溉稻田),对稻田 3 种温室气体排放进行综合研究的报道更少。稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的综合排放研究对于准确评估我国稻田的综合温室效应和制定合理的减排措施具有重要意义。

2 水稻节水灌溉技术及其生态环境效应

随着人口的增长和工农业生产的发展,我国水资源紧缺导致的水资源供需矛盾不断加剧,发展节水农业已经成为农业可持续发展的必然选择^[37]。自 20 世纪 90 年代以来,各种水稻节水灌溉技术得到了大面积的推广应用。水稻节水灌溉技术的大面积应用在增加水稻产量的同时为我国节约了大量的农业用水。与此同时,水稻节水灌溉技术的一个共同点就是在水稻某些生育期,稻田田面有一段时间无水层或土壤含水量低于其饱和含水量,使田间的土壤水分状况不同于传统的淹水灌溉稻田。随着水分状况的改变,稻田的生态环境包括土壤理化特性、四水转化、碳氮磷循环等发生变化。因此随着水稻节水灌溉理论研究的不断深入和技术的大面积应用,变化的灌溉措施对稻田生态环境产生的影响受到了广泛关注,并成为相关学科的研究热点。目前,国内外针对节水灌溉稻田环境效应的研究已经取得了一些进展和成果,主要集中在节水灌溉条件下田间小气候变化、稻田 CH_4 与 N_2O 等重要温室气体排放规律、土壤水分养分运移规律和水稻病虫害情况等。研究结果表明,采用水稻节水灌溉模式后稻田株间空气昼夜温差可提高 1~3℃,株间空气湿度降低 1~5 百分点,这种影响在晴天中午表现比较明显,且节水灌溉条件下的田间小气候有利于水稻生长和减轻病虫害与冷湿危害^[38]。水稻节水灌溉模式在节水、增产的同时能够明显减少稻田氮磷损失,提高肥料利用率。已有研究表明,采用各种节水灌溉模式可以减少随渗漏和地表排水中氮磷流失总负荷 20%~40%^[39-41]。其原因为节水灌溉条件下,稻田渗漏量和地表排水量减少,加之土壤透气性及氧化性增加,抑制由渗漏和地表排水中氮磷浓度的提高,致使氮磷负荷减小^[42]。田间试验表明,水稻节水灌溉模式的应用能够明显减少稻田 CH_4 的排放量,采用控制灌溉模式可减少稻田 CH_4 排放量达 82.1%^[43];采用间歇灌溉模式可减少 CH_4 排放 46.6%^[24],与此同时,水稻节水灌溉模式增大了稻田 N_2O 排放量^[28,44],其中间歇灌溉

模式增加 68.1%,控制灌溉模式增加 130.2%,但均降低了稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合温室效应,间歇灌溉降低 42.5%,控制灌溉降低 23.3%^[28,43]。另外,在灌溉导致的稻田土壤碳转化差异方面,发现在无外加碳源条件下,节水灌溉稻田土壤有机质含量降低、土壤溶解性有机碳含量增加^[45-46]。土壤有机碳含量的变化势必会引起碳排放的改变,但节水灌溉对稻田 CO_2 排放影响的研究很少,另外,节水灌溉模式对稻田温室气体排放的影响,需对 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的排放进行综合评价,并兼顾土壤碳含量的可持续利用。

3 生物炭在农业的应用及其对农田土壤温室气体的减排效应

生物炭一般是指农林废弃物等生物质在缺氧条件下热裂解而形成的稳定的富碳产物^[47]。大量研究认为,生物炭具有含碳率高、孔隙结构丰富、比表面积大、理化性质稳定等特点,农田施用生物炭具有改善土壤性质、提高作物产量及减排温室气体的作用。另外,常规的秸秆还田和有机肥施用在增加土壤碳库的同时,会导致土壤碳排放的激增。因此,近年来生物炭在农业上的应用及其农业环境效应成为土壤、环境等相关学科研究的热点之一。在改善土壤性质方面,首先,生物炭的多孔结构增加了土壤表层的孔隙度,降低了土壤容重^[48],生物炭的孔隙结构使其具有很大的比表面积,从而具有很强的保水、保肥能力,减少了水肥的淋失^[49]。同时,生物炭在热解过程中,原材料中大部分的钙、镁、钾、磷和微量元素以及几乎一半的氮、硫已经进入生物炭中,因此,生物炭作为土壤改良剂可以返还大部分养分到土壤中,提高土壤生产力^[50]。其次,生物炭的应用能够提高土壤 pH 值和增加土壤阳离子交换量。在南方典型老成土的研究结果中表明,生物炭配合肥料施用后土壤 pH 值提高了 0.1~0.46^[51]。同时,研究表明生物炭本身含有丰富的官能团,施入土壤后土壤电荷总量增加,阳离子交换量提高了 20%^[52],最高可比无生物炭土壤增加 1.9 倍,且随施炭量的增加而提高^[53]。同时,在一定范围内,随着生物炭施用量的增加,土壤微生物的数量和活性都显著提高,研究表明生物炭应用可使豌豆根部真菌的繁殖能力增强^[54],当生物炭用量达到 30% 时,菌根菌侵染量显著提高^[55]。

在提高作物产量方面,由于生态条件、气候条件以及土壤类型等区域差别,国内外有不同报道。有研究表明,生物炭通过改善土壤的性质和功能,提高土壤的蓄水保肥能力,增加土壤微生物种群的数量及其活性,促进土壤健康发展,从而提高作物的产量。Uzoma 等将生物炭应用于沙质土壤生产玉米,当生物炭施用量达到 15 t/hm² 和 20 t/hm² 时,产量分别提高了 150% 和 98%^[56]。在施氮量减少 19.9% 的情况下,生物炭基肥处理使水稻的经济产量提高 6.7% 以上^[57]。茹思博等的研究表明,生物炭能够显著提高棉花生长及产量^[58]。但也有相反的结论,张晗芝等通过试验发现,生物炭对玉米苗期的生长有显著的抑制作用,但随着玉米的生长发育,这种抑制作用逐渐消失^[59]。Haefele 等研究发现,比较贫瘠的土壤施入生物炭后对作物的增产效果明显,相对肥沃的土壤施入生物炭并无增产效应,如果不同时施入无机氮肥,甚至会导致作物的减产^[60]。

在农田温室气体减排方面,大量研究表明,生物炭施用能明显改变土壤的理化性质和微生物活性,进而减少农田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放。由于受不同作用条件的影响,生物炭对农田土壤温室气体排放的作用效果不尽相同。Zhang 等在太湖地区的田间试验结果表明,在施氮肥条件下,添加 $40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 的生物炭使稻田土壤 CH_4 排放量增加了 34%,在不施用氮肥条件下,生物炭施用后的 CH_4 排放量更高;对于 N_2O 结论却相反,在施用氮肥条件下,添加生物炭处理的土壤总 N_2O 排放量降低了 40% ~ 51%;而 CO_2 的排放量有略微增加^[8]。Liu 等的研究表明,在稻田淹水条件下,分别添加竹炭和稻秆炭后, CH_4 和 CO_2 的排放量相对对照土壤明显降低^[61]。花莉等综合我国华中、太湖平原、成都平原等地关于生物炭在农田温室气体排放方面影响的研究表明,秸秆炭在抑制农田温室气体排放方面要优于其他生物炭^[62]; $40 \text{ t}/\text{hm}^2$ 的施炭量是一个实现增产减排的较好选择;在施用生物炭条件下,单作物耕作和保护性耕作技术有利于减少农田温室气体的排放;生物炭与氮磷钾有机肥配施比与普通氮肥配施能更有效地减少农田温室气体的排放。综上生物炭施用对农田温室气体排放的研究可以看出,综合考虑生物炭对农田土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放影响的研究还少有报道,另外,随着水稻节水灌溉技术的大面积应用,生物炭施用是否能够与水稻节水灌溉技术结合,两者的结合对水稻生长、产量、土壤有机碳含量及稻田温室气体排放的调控效应有待深入研究。

4 有待进一步研究的问题

(1) 稻田作为温室气体排放的重要源,目前对稻田温室气体排放的研究主要针对 CH_4 和 N_2O ,较少关注 CO_2 排放,更缺少对稻田 3 种温室气体排放的综合评价;因此,稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的综合排放特征研究对于准确评估我国稻田引起的温室效应及制定合理的减排措施具有重要意义。

(2) 在无外加碳源条件下,节水灌溉应用后稻田土壤有机质含量降低,且土壤溶解性有机碳含量增加。土壤有机碳含量的变化势必会引起碳排放的改变,但节水灌溉对稻田 CO_2 排放的影响研究少见报道,同时综合考虑节水灌溉稻田 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 综合排放效应研究有待深入。

(3) 常规的秸秆还田和有机肥施用增加土壤碳库的同时导致土壤碳排放激增,大量研究证明,生物炭施用具有改善农田土壤性质、提高作物产量及减排农田温室气体的作用,作为 2 种有效的稻田温室气体减排措施,生物炭施用和水稻节水灌溉技术两者是否能够结合及如何结合,从而进一步降低稻田温室气体排放,并实现稳产高产及稻田水碳资源的高效利用有待验证。

参考文献:

[1] 世界气象组织. 2013 年度温室气体公报 [EB/OL]. [2015-08-11]. http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ghg/documents/GHG_Bulletin_No_9_zh.pdf.

[2] IPCC. Climate change 2007; Mitigation of climate change contribution of working group III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 63-67.

[3] 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.

[4] 蔡祖聪,徐华,马静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 109-112.

[5] Kleiner K. The bright prospect of biochar [R]. Nature Reports - Climate Change, 2009, 3 (6): 72-74.

[6] Karhu K, Mattilab T, Bergströma I, et al. Biochar addition to agricultural soil increased CH_4 uptake and water holding capacity - Results from a short-term pilot field study [J]. Agriculture, Ecosystem and Environment, 2011, 140 (1): 309-313.

[7] Major J, Rondon M, Molina D, et al. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a colombian savanna oxiso [J]. Plant and Soil, 2010, 333 (1/2): 117-128.

[8] Zhang A F, Cui L Q, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake plain, China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2010, 139 (4): 469-475.

[9] Dominic W, Amonette J E, Street - Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. Nature Communications, 2010, 1 (5): 1-9.

[10] 陈温福,张伟明,孟军,等. 生物炭应用技术研究 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (2): 83-89.

[11] Hadi A, Inubushi K, Yagi K. Effect of water management on greenhouse gas emissions and microbial properties of paddy soils in Japan and Indonesia [J]. Paddy Water Environment, 2010, 8 (4): 319-324.

[12] 王明星. 中国稻田甲烷排放 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 108-133.

[13] 焦燕,黄耀,宗良纲. 土壤理化特性对稻田 CH_4 排放的影响 [J]. 环境科学, 2002, 3 (5): 1-7.

[14] Minamikawa K, Sakai N. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field in Japan [J] Agriculture, Ecosystems and Environment, 2006, 116 (3): 181-188.

[15] Wang Z P, Delaune R D, Masscheleyn P H, et al. Soil redox and pH effects on methane production in a flooded rice soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (2): 382-385.

[16] Huang Y, Sass R L, Fisher F M. Methane emission from Texas rice paddy soils. 2. Seasonal contribution of rice biomass production to CH_4 emission [J]. Global Change Biology, 1997, 3 (6): 491-500.

[17] 张军科,江长胜,郝庆菊,等. 耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放的影响 [J]. 环境科学, 2012, 33 (6): 1979-1986.

[18] Johnson - Beebout S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants [J]. Geoderma, 2009, 149 (1-2): 45-53.

[19] Liu S W, Qin Y M, Zou J W, et al. Effects of water regime during rice - growing season on annual direct N_2O emission in a paddy rice - winter wheat rotation system in southeast China [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408 (4): 906-913.

[20] 李香兰,徐华,蔡祖聪. 水分管理影响稻田甲烷排放研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28 (2): 221-227.

[21] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. 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(2):1-9.
- [22] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochemical Cycles,2004,18(2):GB2018.
- [23] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China[J]. Chemosphere,2012,89(7):884-892.
- [24] 袁伟玲,曹凑贵,程建平,等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估 [J]. 中国农业科学,2008,41(2):4294-4300.
- [25] Cai Z C, Laughlin R J, Stevens R J. Nitrous oxide and nitrogen emissions from soil under different water regimes and straw amendment [J]. Chemosphere,2001,42(2):113-121.
- [26] Jiao Z H, Hou a X, Shi Y, et al. Water management influencing methane and nitrous oxide emissions from rice field in relation to soil redox and microbial community [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis,2006,37(13):1889-1903.
- [27] Yang S S, Lai C M, Chang H L, et al. Estimation of methane and nitrous oxide emissions from paddy fields in Taiwan [J]. Renewable Energy,2009,34(8):1916-1922.
- [28] Peng S Z, Hou H J, Xu J Z, et al. Nitrous oxide emissions from paddy fields under different water managements in southeast China [J]. Paddy Water Environment,2011,9(4):403-411.
- [29] 陈卫卫,张友民,王毅勇,等. 三江平原稻田 N₂O 通量特征 [J]. 农业环境科学学报,2007,26(1):364-368.
- [30] 梁东丽,同延安,Emteryd O,等. 灌溉和降水对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2002,8(3):298-302.
- [31] Xiong Z Q, Xing G X, Zhu Z L. Nitrous oxide and methane emissions as affected by water, soil and nitrogen [J]. Pedosphere,2007,17(2):146-155.
- [32] 徐 华,邢光熹,蔡祖聪,等. 壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N₂O 排放的影响 [J]. 应用生态学报,1999,10(2):186-188.
- [33] 李香兰,徐 华,曹金留,等. 水分管理对水稻生长期 N₂O 排放的影响 [J]. 土壤,2006,38(6):703-707.
- [34] 邹建文,黄 耀,郑循华,等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统-大气 CO₂ 净交换估算 [J]. 科学通报,2004,49(3):258-264.
- [35] 朱咏莉,童成立,吴金水,等. 亚热带稻田生态系统 CO₂ 通量的季节变化特征 [J]. 环境科学,2007,28(2):283-288.
- [36] 朱咏莉,吴金水,朱博宇,等. 排水措施对稻田 CO₂ 通量的影响 [J]. 农业环境科学学报,2007(6):2206-2210.
- [37] 茆 智. 水稻节水灌溉 [J]. 中国农村水利水电,1997(4):45-47.
- [38] Mao Z. Environment impact of water-saving irrigation for rice [C]//FAO. Irrigation scheduling: from theory to practice. Rome: FAO,1996:141-145.
- [39] 崔远来,李远华,吕国安,等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究 [J]. 水科学进展,2004,15(3):280-285.
- [40] 郑世宗,陈 雪,张志剑. 水稻薄露灌溉对水体环境质量影响的研究 [J]. 中国农村水利水电,2005(3):7-8,11.
- [41] 高焕芝,彭世彰,茆 智,等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律 [J]. 节水灌溉,2009(9):1-3,7.
- [42] 茆 智. 水稻节水灌溉在节水增产防污中发挥重要作用 [J]. 中国水利,2009(21):11-12.
- [43] 侯会静. 稻麦轮作农田 CH₄ 和 N₂O 排放对水稻灌溉调控的响应 [D]. 南京:河海大学,2012.
- [44] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management [J]. Plant and Soil,1997,196(1):7-14.
- [45] 杨士红,彭世彰,徐俊增. 控制灌溉稻田部分土壤环境因子变化规律 [J]. 节水灌溉,2008,12:1-4.
- [46] Xu J Z, Yang S H, Peng S Z, et al. Solubility and leaching risks of organic carbon in paddy soils as affected by irrigation managements [J]. Scientific World Journal,2013, Article ID 546750.
- [47] 陈温福,张伟明,孟 军. 生物炭与农业环境研究回顾与展望 [J]. 农业环境科学学报,2014,33(5):821-828.
- [48] Zhang A F, Liu Y M, Pan G X, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain [J]. Plant and Soil,2012,351(1/2):263-275.
- [49] Knowles O A, Robinson B H, Contangelo A, et al. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids [J]. Science of the Total Environment,2011,409(17):3206-3210.
- [50] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases action exchange capacity in soils [J]. Soil Science Society of America Journal,2006,70(5):1719-1730.
- [51] Yuan J H, Xu R K, Zhang H. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures [J]. Bioresource Technology,2011,102(3):3488-3497.
- [52] Laird D A, Fleming P, Davis D D, et al. Impact of biochar amendment on the quality of a typical Midwestern agricultural soil [J]. Geoderma,2010,158(3/4):443-449.
- [53] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in northern Laos: soil physical properties, leaf SPAD and grain yield [J]. Field Crops Research,2009,111(1):81-84.
- [54] Simone E K, Kevin J F, Mathew E D. Effect of charcoal quantity on microbial biomass and activity in temperate soils [J]. Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1173-1181.
- [55] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, et al. Mycorrhizal responses to biochar in soil concepts and mechanisms [J]. Plant and Soil,2007,300(1/2):9-20.
- [56] Uzoma K C, Inoue M, Andry H, et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition [J]. Soil Use and Management,2011,27(2):205-212.
- [57] 陈 琳,乔志刚,李恋卿,等. 施用生物质炭基肥对水稻产量及氮素利用的影响 [J]. 生态与农村环境学报,2013,29(5):671-675.
- [58] 茹思博,赵 靓,苏 倩,等. 生物炭和施氮量对棉花生长及产量的影响 [J]. 新疆农业科学,2013,50(7):1185-1191.
- [59] 张哈芝,黄 云,刘 钢,等. 生物炭对玉米苗期生长、养分吸收及土壤化学性状的影响 [J]. 生态环境学报,2010,19(11):2713-2717.
- [60] Haefele S M, Konboon Y, Wongboon W. Effects and fate of biochar from rice residues in rice based systems [J]. Field Crops Research,2011,121(3):430-440.
- [61] Liu Y X, Yang M, Wu Y M, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar [J]. Journal of Soils and Sediments,2011,11(6):930-939.
- [62] 花 莉,唐志刚,解井坤,等. 生物质炭对农田温室气体排放的作用效应及其影响因素探讨 [J]. 生态环境学报,2013,22(6):1068-1073.