

刘益珍,姜振辉. 稻田水旱轮作生态效应研究进展及发展建议[J]. 江苏农业科学,2019,47(20):19-23.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.20.005

稻田水旱轮作生态效应研究进展及发展建议

刘益珍,姜振辉

(浙江大学环境与资源学院,浙江杭州 310058)

摘要:水旱轮作是克服水稻连作障碍的有效途径。本文从稻田水旱轮作对水稻增产效应、土壤理化性状、土壤生物学特性、病虫害生态调控以及温室气体减排效应 5 个方面综述了国内外关于水旱轮作生态效应的最新研究进展,指出了目前我国稻田水旱轮作面临的主要问题。最后,结合水旱轮作的模式特点提出,可以通过协调土壤养分,根据作物养分需求精准施肥;重视有机肥的使用,有效利用秸秆还田技术;改进农业管理措施,探索应用生物炭技术;多种农作技术综合应用,在发展高效高产栽培技术等方面加以改进,并对水旱轮作的研究方向进行展望,以期为实现我国农业生产中作物高产和环境友好的目标提供科学策略。

关键词:稻田;水旱轮作;生态效应;研究进展;发展建议

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)20-0019-05

南方稻田耕作制度在我国农业发展中占有重要地位,对我国的水稻生产起着举足轻重的作用^[1]。目前我国南方稻区主要以单季稻或“冬闲一稻一稻”的连作种植模式为主,由于实行长期连作以及长期依赖化学肥料,有机肥的使用较少,逐渐出现了稻田土壤养分失去平衡、作物抗病虫害能力下降、稻田碳足迹增加和农田生态环境恶化等一系列问题,造成农田可持续利用能力下降,进而影响作物的产量和品质,对我国的粮食安全和农业生态环境造成威胁^[2]。

Chen 等的研究表明,稻田水旱轮作是克服水稻连作障碍的有效途径^[3]。水旱轮作是指在同一田块上,按季节有序地交替种植水稻和旱地作物(如小麦、玉米、油菜、蔬菜、棉花等)的一种种植模式,其中小麦—水稻和油菜—水稻轮作种植模式应用最为广泛。水旱轮作系统的显著特征是土壤水热条件交替变化,该系统遵循用地养地、高效高产和协调发展的原则,对维护农业生态系统的良性循环和维持农田的地力、保障粮食安全具有重要的理论和实践参考价值^[4-5]。然而,近年来这一体系也面临着生产力下降或徘徊不前、养分管理不合理及环境污染严重等问题^[6]。因此,本文在查阅了国内外相关文献资料的基础上对水旱轮作的水稻增产效应、土壤理化性状、土壤生物学性状、病虫害调控以及农田温室气体减排

等生态效应特征进行综合评价,指出水旱轮作系统存在的问题,并在此基础上进一步提出发展建议,以解决水旱轮作系统中作物生产、资源利用和环境风险之间的矛盾,为发展节本简化、环境友好、生态高效的可持续性农业提供参考。

1 稻田水旱轮作的生态效应

1.1 水稻增产效应

稻田水旱轮作可促使水稻分蘖早、快、数量多,提高叶面积扩展指数和叶绿素含量,使地上部干物质积累量明显增多,增加有效穗数和结实率,从而提高水稻产量^[7-9]。Linh 等研究发现,水旱轮作能明显促进水稻根系对土壤养分的吸收,轮作后的水稻株高、千粒质量、每穗实粒数、根系深度、秸秆产量和水稻产量与传统的水稻连作相比,均有一定程度的提高^[10]。由于水旱 2 季作物对养分的吸收规律不同会导致土壤的养分积累特点和产出有所差异,不同的水旱轮作体系对作物产量的影响各不相同^[3]。合理有效的水旱轮作模式一般能够使得农业产量增加 5%~8%,高效的轮作方式则能够使农作物产量增长达到 10%~15%,有的轮作方式则更高,甚至能够达到 20% 左右^[11]。然而,也有研究认为,水旱轮作对作物产量增加的效果不明显,长期的水旱轮作甚至会降低作物产量^[12]。作物的生长及产量除了受水旱轮作体系中土壤干湿交替变换的影响外,还与旱季作物和水稻季的施肥种类和数量有很大的关系,养分缺失会导致作物减产,过量施肥则可能造成作物对肥力的奢侈吸收,也会起不到增产作用^[13]。总之,水旱轮作对水稻产量的影响与轮作模式、土壤类型、施肥情况等一系列因素有关,水稻的最佳增产效应应该

收稿日期:2018-07-04

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0300203-4)。

作者简介:刘益珍(1994—),女,四川达州人,硕士研究生,主要从事农业面源污染控制研究。E-mail:suxiangxue12345@163.com。

通信作者:姜振辉,博士研究生,主要从事水旱轮作生态效应研究。

Tel:(0571)88982007;E-mail:jiangzh1990@126.com。

[75] Zhang B, Salituro G, Szalkowski D, et al. Discovery of a small molecule insulin mimetic with antidiabetic activity in mice [J]. Science, 1999, 284 (5416): 974-977.

[76] Harper J K, Arif A M, Ford E J, et al. Pestacin: a 1,3 - dihydro isobenzofuran from *Pestalotiopsis microspora* possessing antioxidant and antimycotic activities [J]. Tetrahedron, 2003, 59 (14): 2471-2476.

[77] 王志伟,纪燕玲,陈永敢. 植物内生菌研究及其科学意义 [J]. 微生物学通报, 2015, 42 (2): 349-363.

[78] Sipiing Z, Bin A C, Xiong G, et al. Diversity analysis of endophytic bacteria within *Azolla microphylla* using PCR - DGGE and electron microscopy [J]. Journal of Agricultural and Biotechnology, 2008, 16 (3): 508-514.

从多个方面综合考虑。

1.2 土壤理化性状

多数研究表明,水旱轮作能改善土壤理化性质,消除长期淹水对土壤结构的不良影响,增加土壤的团粒结构,并有效阻止土壤酸化和土壤的次生潜育化^[3,14],对土壤容重和土壤团聚体的形成及稳定性也有一定的影响^[15-16]。在水旱轮作系统中,土壤季节性的干湿交替使土壤的氧化还原过程更替进行,土壤中一些养分元素形态和有效性也随之变化^[3,17]。淹水条件下土壤中的 Fe^{3+} 、 Mn^{4+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 分别被还原成 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 NH_4^+ 、 S^{2-} 、P、K、Si、Mo、Cu 和 Co 等元素的有效性提高,同时 N、S、Zn 等元素的有效性降低^[18-19];旱作条件会增加土壤的氧化还原电位,土壤中的部分养分元素被氧化生成高价态的难溶性沉淀,该元素对植物的有效性降低^[6]。同时,土壤有机质的矿化和腐殖化过程以及土壤中的碳氮循环也受到干湿频繁交替的影响^[16,20]。在水稻生长季节,有机物会在还原细菌的作用下进行嫌气分解,促进甲烷的产生^[21],此时土壤中的氮主要以有利于水稻吸收和利用的铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)形式存在^[22]。在旱季作物生长季节,良好的通气条件使土壤处于氧化状态,促进了土壤有机质矿化,也加速了土壤有机质的流失^[23];同时由于好氧状态下土壤有机质矿化产生的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 更易硝化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,有利于旱季作物的吸收和利用^[24]。总体来说,水旱轮作厌氧和好氧状态的频繁交替循环加速了土壤碳氮的循环,导致土壤有机质分解的速度更快,这有助于促进土壤养分的释放,提高土壤中速效 N、P、K 含量^[15]。水旱轮作系统中土壤理化性状的变化可能受多种因素的影响,不同轮作体系具有不同的特点,其中还有许多问题有待今后进一步研究解决。

1.3 土壤生物学特性

土壤微生物和酶活性能够促进土壤养分循环和能量转化,对作物的生长发育和土壤肥力具有重要的调节功能^[25-26]。在水旱轮作体系中,干湿交替的环境改变了土壤的结构和通气性,对土壤微生物的组成、丰度、多样性和活性都有显著的影响^[27-29]。Murugan 等的研究表明,豆稻轮作田的微生物数量明显高于水稻单作^[30]。陈晓娟等研究了不同耕作方式下土壤微生物的特性,结果表明,水旱轮作地块的细菌和真菌丰度比值以及革兰氏阳性菌的相对含量明显高于旱地和稻田连作土壤^[31]。土壤微生物活性的改变会增加土壤中作物所需营养元素的可用性,从而促进作物的生长。对于土壤酶活性的变化趋势,董艳等的研究表明,与连作相比,水旱轮作可以促进土壤的生化反应,提高土壤酶活性^[32]。Roldán 等研究发现,对连作棉田土壤实施棉花—水稻轮作后,土壤过氧化物酶、磷酸酶、蔗糖酶活性均有了很大程度的提高^[33]。目前,大多数短期田间试验研究表明,合理的水旱轮作对土壤微生物和酶活性具有积极的影响,可以促进作物的生长和提高作物的产量。

1.4 病虫害生态调控效应

合理的水旱轮作是改善农田生态环境、减轻作物病、虫、草害的有效措施^[34]。在水旱轮作系统中,稻田在淹水时期趋于无氧状态,旱作时期则处于好氧状态,很少有生物能同时适应有氧和无氧 2 种环境^[19]。因此,水旱轮作系统中土壤的干湿交替变化形成了不利于病虫害蔓延的生态环境,有助于防

止某些病虫害的发生,进而促进农作物的增产^[35]。黄国勤等的研究表明,与水稻连作相比,水旱轮作处理在病、虫、草害等方面都有不同程度的减少^[36]。Fujisaka 等研究发现,淹水条件能促使油菜菌核病、小麦条斑病、烟草立枯病等旱田病原菌向死亡或减少的方向发展^[37]。然而也有研究表明,水旱轮作会增加某些病虫害的传播和影响范围^[38]。Nagarajah 等的研究发现,原本只危害水稻的茎腐病和叶枯病等,水旱轮作后既危害水稻又危害小麦^[39]。此外,由于水田和旱田杂草的生态习性有所不同,水旱轮作能明显地降低田间杂草密度,减少田间杂草的种类,有效防止杂草的疯长^[21,40]。强胜等的试验发现,水稻—棉花轮作体系下的自然杂草密度明显低于连作棉田,其中杂草的种群数量和群落结构在两者之间也有显著的差异^[41]。也有研究报道,水旱轮作能抑制杂草的生长量,但对杂草种类的影响较小。谭景艾等的研究表明,与水稻—休闲处理相比,水稻—绿肥轮作对水稻田中生长的杂草种类无影响,主要杂草仍然为鸭舌草和稗草,但其发生程度显著减少^[42]。总体来说,水旱轮作中反复的水旱交替,对于某些土传病虫害和杂草实现生态防治是可能的,但关于这些病虫害的发生规律和解决措施还需要深入探索^[43]。

1.5 温室气体减排效应

为促进农田温室气体减排,国内外已有学者对水旱轮作生产体系下温室气体的排放作了大量研究。Linguist 等的研究表明, CH_4 主要来源于稻田系统,因为稻田表面的淹水层为 CH_4 的产生和排放提供了良好的厌氧环境^[44], N_2O 则主要来自旱地系统和水稻烤田期^[45]。与水稻连作相比,水旱轮作系统中干湿的转化可能会导致 CH_4 和 N_2O 的排放呈“污染交换”的形式^[46],即水田转为旱地可以明显减少甲烷的排放量^[47-49],但土壤的干湿交替使土壤的嫌气和通气状态交替发生,会加快土壤中的硝化和反硝化过程,从而增加 N_2O 的产生量和排放量^[50]。Weller 等的研究表明,将水稻连作模式转变为水旱轮作模式, CH_4 排放量减少了 61% ~ 88%^[48]。此外,施肥也是影响水旱轮作系统中温室气体排放的重要因素,其中氮肥施用是 N_2O 出现排放高峰的主要驱动力^[51],而施用有机肥如秸秆还田等能为产甲烷菌提供极为丰富的产 CH_4 基质,会导致稻田 CH_4 的排放量增加^[52]。Liu 等的研究表明,施用 Fe(Ⅲ)肥增加了稻麦轮作周期 N_2O 的排放量,但显著减少了 CH_4 和 CO_2 的排放量^[53]。总而言之,水旱轮作种植模式会影响农田温室气体的排放,但栽培耕作方式、水肥管理措施等区域性差异以及土壤、气候等自然因素也会导致农田 CH_4 和 N_2O 的产生和排放规律不尽相同。因此,在以后的研究中,可从整个水旱轮作系统的角度出发,利用碳足迹(指某种活动引起的或某种产品在其生命周期内积累的直接和间接温室气体的总排放量)的评价方法^[54],估算水旱轮作生产过程中碳足迹的时空变化特征,分析 CH_4 和 N_2O 排放引起的综合温室效应潜势,可以为农业低碳排放提供科学的策略。

2 发展建议

目前我国水旱轮作体系中,养分的投入主要以施用化肥为主,有机肥施用较少,同时由于对土壤养分在水旱轮作系统内的流动缺乏充分的认识,多数农户在肥料调控方面往往

忽视了土壤干湿交替和作物季节间的转化对土壤养分释放与利用的影响,也没有考虑到作物对养分元素的需求规律,肥料施用不合理现象比较常见。不合理的施肥方式,不仅影响了水旱轮作的生产力,其导致的资源浪费和生态环境问题也引起了社会各界的广泛关注。因此,挖掘水旱轮作系统的生产潜力,实现该体系养分资源的高效利用,减轻其对环境的负面影响对我国农业的可持续发展具有重要意义。笔者通过查阅文献了解了近几年来农业田间管理措施的发展情况,为优化水旱轮作系统养分管理提出以下 4 点建议。

2.1 协调土壤养分,根据作物养分需求精准施肥

在水旱轮作系统中,养分的投入主要是氮磷钾肥的施用,但传统的施肥观念和技术更多注重的是在目标上追求产量,忽略了环境和产量的协调。在实际的田间管理中,氮肥的施用可遵循以推荐施肥量($150 \sim 250 \text{ kg/hm}^2$)为主^[55],同时通过作物诊断(应用 ISPAD 仪或硝酸盐反射仪)等方式根据作物不同时期的养分吸收规律微调为辅的原则^[6]。由于磷在旱季土壤中易被固定,当季施用的磷肥大部分以固定态或有效态的形式残留在土壤中^[56]。而稻田淹水条件可以促进土壤中磷的释放,水稻能有效利用旱季施用的磷肥^[57]。因此,磷肥的施用可遵循“重旱轻水”的原则,旱季适量施用以满足作物需求,稻季可适当减少磷肥的用量以挖掘土壤磷的潜力。土壤中速效钾随干湿交替环境的变化和有效磷类似,在固钾能力比较强的土壤中,淹水条件会解离出含钾矿物中的钾,旱作土壤中这种情况则不易发生^[58]。为缓解土壤缺钾现状、提高钾肥的利用率,对于钾肥的管理可以考虑旱季多施,水稻季少施的策略。总体来说,水旱轮作中肥料的施用可以遵循控氮减磷、适量补钾的原则,同时可根据不同轮作体系作物的营养需求规律,利用测土配方施肥技术合理调整肥料用量,从轮作系统的角度实施养分资源的优化配置和综合管理,建立科学的施肥体系。

2.2 重视有机肥的使用,有效利用秸秆还田技术

在提倡高效、低碳、生态农业的需求下,秸秆还田作为一项有效的生态农业措施被大力推广^[59]。其中覆盖和翻压是目前农业生产中秸秆还田的 2 种主要方式。有研究表明,在稻麦轮作系统中,将水稻和小麦秸秆翻压填埋还田可以显著提高土壤有机质含量和改善土壤质量^[60-61]。还田后秸秆释放的氮、磷、钾以及其中微量营养元素能够被作物吸收利用,可代替部分化肥的使用^[62]。但是,与单施秸秆或单施化肥相比,秸秆配施化肥培肥土壤和作物增产的效果更佳^[63]。Kasteel 等的研究表明,秸秆覆盖还田可以有效提高作物产量和降低土壤水分无效蒸发^[64]。在水旱轮作系统中,结合土壤干湿交替的特点,可以采用旱季作物秸秆粉碎翻压入稻田土壤,稻草秸秆覆盖于旱作土壤表面,再配施化肥的还田措施,这样不仅能有效利用 2 季作物秸秆中的养分,缓解传统农业生产对化肥的依赖,还能改善土壤理化性状和提高水分利用率,具有广泛的应用前景。

2.3 改进农业管理措施,探索应用生物炭技术

生物炭具有比表面积大、含碳率高、多孔结构等特点,有研究表明,在农业生产中将生物炭均匀撒至土壤表面并与耕层土壤均匀混合,可以改变耕层土壤的理化性质,提高土壤肥力,有利于促进作物增产和温室气体减排^[65-66]。生物炭对

NH_4^+ 、 NO_3^- 等具有较好的吸附效果,减少了土壤中氮素流失,同时吸附的氮素可以被植物再利用,提高了养分的利用率^[67-68]。肖亚楠等的研究表明,在节水灌溉稻田中施加生物炭不仅可以提高水稻产量和水分利用率,还能有效减少 CH_4 的排放量^[69]。裴俊敏等的研究表明,施加生物炭可改善土壤性质,抑制土壤 CO_2 排放,快速提高农田有机质的含量^[70]。在农田中施加生物炭对农业生产和土壤改良具有积极的影响,将其运用到水旱轮作种植模式中,具有提升作物产量和防治生态环境污染的潜力价值,但目前关于在水旱轮作系统中施用生物炭的研究还相对较少,还有很多方面需要进一步探索。

2.4 多种农作技术综合应用,发展高效高产栽培技术

水旱轮作系统是一个综合多种影响因素的复杂系统,在实际的农业生产中,可考虑将垄作覆盖、少耕免耕等保护性农业技术与秸秆还田、精准定量施肥、施控释肥以及病虫草害综合防控等农作技术结合使用,发展高效高产栽培技术,以避免单一某项技术的缺陷,扬长避短。这不仅可以减少化肥、农药等的使用量,还有利于提高土壤质量和改善环境污染,对可持续、绿色生态农业的发展具有极其重要的意义。

3 总结与展望

近年来,许多学者对水旱轮作种植模式下作物产量、土壤性质和农田温室气体排放等方面进行了研究。大量研究结果表明,与水稻连作相比,合理的水旱轮作有助于促进作物产量增长,改善土壤理化性质和有效提高土壤质量^[11,19,21]。同时,水旱交替形成的特殊生态系统提高了土壤微生物的数量和多样性,增加了土壤的酶活性,对防治作物病虫草害和减少农业温室气体排放量也有积极的影响。但目前该体系也面临着生产力徘徊不前或下降、资源配置不合理、农业面源污染严重等一系列问题。为解决该系统存在的问题,可以考虑从轮作体系中作物的生理生化指标及作物根际微生态效应等方面展开研究,了解水旱轮作系统的作用机制及水分、养分状况的周期性变化规律,不断改进肥料管理策略和优化传统农业技术,力图从资源高效利用和环境安全、土壤与作物生态效应等角度出发,建立水旱轮作的养分资源综合管理体系,以实现我国农业生产资源高效、作物高产和环境友好的总体目标。

参考文献:

- [1] 黄国勤. 南方稻田耕作制度可持续发展面临的十大问题[J]. 耕作与栽培, 2009(3): 1-2, 5.
- [2] 官春云, 黄 璜, 黄国勤, 等. 中国南方稻田多熟种植存在的问题及对策[J]. 作物杂志, 2016(2): 1-7.
- [3] Chen S, Zheng X, Wang D Y, et al. Effect of long-term paddy-upland yearly rotations on rice (*Oryza Sativa*) yield, soil properties, and bacteria community diversity[J]. The Scientific World Journal, 2012(3): 279641.
- [4] Bakhshandeh S, Corneo P E, Mariotte P, et al. Effect of crop rotation on mycorrhizal colonization and wheat yield under different fertilizer treatments[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2017, 247: 130-136.
- [5] 杨滨娟, 孙 松, 陈洪俊, 等. 稻田水旱轮作系统的能值分析和可持续性评价[J]. 生态科学, 2017, 36(1): 123-131.

- [6] 范明生, 江荣凤, 张福锁, 等. 水旱轮作系统作物养分管理策略[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 424–432.
- [7] Xuan D T, Guong V T, Rosling A, et al. Different crop rotation systems as drivers of change in soil bacterial community structure and yield of rice, *Oryza sativa* [J]. Biology & Fertility of Soils, 2012, 48(2): 217–225.
- [8] Filizadeh Y, Rezazadeh A, Younessi Z. Effects of crop rotation and tillage depth on weed competition and yield of rice in the paddy fields of Northern Iran [J]. Journal of Agricultural Science & Technology, 2010, 9(2): 99–105.
- [9] 王人民, 丁元树, 陈锦新. 稻田年内水旱轮作对晚稻产量及生长发育的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1996, 22(4): 412–417.
- [10] Linh T B, Sleutel S, Guong V T, et al. Deeper tillage and root growth in annual rice – upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 154: 44–52.
- [11] Seong – Tak Y, Young – Jung K, In – Ho J, et al. Growth and yield characteristics of foxtail millet, proso millet, sorghum and rice in paddy – upland rotation [J]. Korean Journal of Crop Science, 2015, 60(3): 300–307.
- [12] Ladha J K, Dawe D, Pathak H, et al. How extensive are yield declines in long – term rice – wheat experiments in Asia? [J]. Field Crops Research, 2003, 81(2/3): 159–180.
- [13] Liu N J, Li X Y, Waddington S R. Soil and fertilizer constraints to wheat and rice production and their alleviation in six intensive cereal – based farming systems of the Indian sub – continent and China [J]. Food Security, 2014, 6(5): 629–643.
- [14] Zhou W, Lv T F, Chen Y, et al. Soil Physicochemical and biological properties of paddy – upland rotation: a review [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 856352.
- [15] Motschenbacher J, Brye K R, Anders M M. Long – term rice – based cropping system effects on near – surface soil compaction [J]. Agricultural Sciences, 2011, 2(2): 117–124.
- [16] 彭星辉. 稻田复种制对土壤理化性状的影响及其经济效益分析[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(13): 3921–3923.
- [17] Fong J D M, Masunaga T, Sato K. Control of micronutrients availability in soil and concentration in rice grain through field water management [J]. Journal of Agricultural Science, 2015, 7(5): 163–174.
- [18] Morales L A, Vázquez E V, Paz – Ferreiro J. Spatial and temporal variability of Mehlich – 1 extractable Fe, Mn and Zn over a rice field as a function of lime amendment [J]. Stochastic Environmental Research & Risk Assessment, 2011, 25(8): 1039–1048.
- [19] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice – wheat cropping systems: issues and challenges [J]. Field Crops Research, 2001, 69(2): 93–132.
- [20] Nishida M. Decline in fertility of paddy soils induced by paddy rice and upland soybean rotation, and measures against the decline [J]. Japan Agricultural Research Quarterly, 2016, 50(2): 87–94.
- [21] Zheng H B, Huang H, Zhang C M, et al. National – scale paddy – upland rotation in Northern China promotes sustainable development of cultivated land [J]. Agricultural Water Management, 2016, 170: 20–25.
- [22] Do T N, Nishida K A. nitrogen cycle model in paddy fields to improve material flow analysis; the Day – Nhue River Basin case study [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 100(2): 215–226.
- [23] Kumari M, Chakraborty D, Gathala M K, et al. Soil aggregation and associated organic carbon fractions as affected by tillage in a rice – wheat rotation in North India [J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(2): 560–567.
- [24] Lu M, Yang Y H, Luo Y Q, et al. Responses of ecosystem nitrogen cycle to nitrogen addition; a meta – analysis [J]. New Phytologist, 2011, 189(4): 1040–1050.
- [25] Yuan H Z, Ge T D, Zou S Y, et al. Effect of land use on the abundance and diversity of autotrophic bacteria as measured by ribulose – 1, 5 – biphosphate carboxylase/oxygenase (RubisCO) large subunit gene abundance in soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 2013, 49(5): 609–616.
- [26] Acosta – Martínez V, Cruz L, Sotomayor – Ramírez D, et al. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(1): 35–45.
- [27] Venter Z S, Jacobs K, Hawkins H J. The impact of crop rotation on soil microbial diversity: a meta – analysis [J]. Pedobiologia, 2016, 59(4): 215–223.
- [28] Liu D Y, Ishikawa H, Nishida M, et al. Effect of paddy – upland rotation on methanogenic archaeal community structure in paddy field soil [J]. Microbial Ecology, 2015, 69(1): 160–168.
- [29] Nishida M, Sekiya H, Yoshida K. Status of paddy soils as affected by paddy rice and upland soybean rotation in northeast Japan, with special reference to nitrogen fertility [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2013, 59(2): 208–217.
- [30] Murugan R, Kumar S, et al. Influence of long – term fertilization and crop rotation on changes in fungal and bacterial residues in a tropical rice – field soil [J]. Biology & Fertility of Soils, 2013, 49(7): 847–856.
- [31] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 Micro – RespTM 方法 [J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2375–2382.
- [32] 董 艳, 鲁 耀, 董 坤, 等. 轮作模式对设施土壤微生物区系和酶活性的影响 [J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 53–55.
- [33] Roldán A, Salinas – García J R, Alguacil M M, et al. Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions [J]. Geoderma, 2005, 129(3/4): 178–185.
- [34] Holland J M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 103(1): 1–25.
- [35] Ebihara Y, Uematsu S, Nomiya S. Control of *Verticillium dahliae* at a strawberry nursery by paddy – upland rotation [J]. Journal of General Plant Pathology, 2010, 76(1): 7–20.
- [36] 黄国勤, 黄禄星. 稻田轮作系统的减灾效应研究 [J]. 气象与减灾研究, 2006, 29(3): 25–29.
- [37] Fujisaka S, Harrington L, Hobbs P. Rice – wheat in South Asia: systems and long – term priorities established through diagnostic research [J]. Agricultural Systems, 2007, 46(2): 169–187.
- [38] Hilton S, Bennett A J, Keane G, et al. Impact of shortened crop rotation of oilseed rape on soil and rhizosphere microbial diversity in relation to yield decline [J]. PLoS One, 2013, 8(4): e59859.

- [39] Nagarajah S, Neue H U, Alberto M C R. Effect of *Sesbania*, *Azolla* and rice straw incorporation on the kinetics of NH_4 , K, Fe, Mn, Zn and P in some flooded rice soils[J]. *Plant & Soil*, 1989, 116(1): 37–48.
- [40] 杨滨娟, 黄国勤, 徐 宁, 等. 长期水旱轮作条件下不同复种方式对稻田杂草群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2533–2538.
- [41] 强 胜, 沈俊明, 张成群, 等. 种植制度对江苏省棉田杂草群落影响的研究[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 278–282.
- [42] 谭景艾, 李保同, 潘晓华, 等. 冬种绿肥对早稻病虫草发生及产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(4): 179–184.
- [43] Tang L L, Wan K Y, Cheng C P, et al. Effect of fertilization patterns on the assemblage of weed communities in an upland winter wheat field[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(1): 39–50.
- [44] Linquist B, van Groenigen K J, Adviento – Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2015, 18(1): 194–209.
- [45] Ma Y C, Kong X W, Yang B, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice – wheat rotations with integrated soil – crop system management [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 164: 209–219.
- [46] Stevens C J, Quinton J N. Policy implications of pollution swapping [J]. *Physics & Chemistry of the Earth Parts A/B/C*, 2009, 34(8/9): 589–594.
- [47] Kraus D, Weller S, Klatt S, et al. How well can we assess impacts of agricultural land management changes on the total greenhouse gas balance (CO_2 , CH_4 and N_2O) of tropical rice – cropping systems with a biogeochemical model? [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 104–115.
- [48] Weller S, Janz B, Jörg L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 432–448.
- [49] Weller S, Kraus D, Ayag K R P, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2015, 101(1): 37–53.
- [50] Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. Mitigation options for methane, nitrous oxide and nitric oxide emissions from agricultural ecosystems[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17(1): 83–92.
- [51] Hao Q K, Jiang C S, Chai X S, et al. Drainage, no – tillage and crop rotation decreases annual cumulative emissions of methane and nitrous oxide from a rice field in Southwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 233: 270–281.
- [52] Ma J, Ma E, Xu H, et al. Wheat straw management affects CH_4 and N_2O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022–1028.
- [53] Liu S W, Zhang L, Liu Q H, et al. Fe(Ⅲ) fertilization mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensity in paddy rice – wheat rotation systems in China[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 164: 73–80.
- [54] Yan M, Cheng K, Luo T, et al. Carbon footprint of grain crop production in China – based on farm survey data[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130–138.
- [55] Fan M S, Jiang R F, Liu X J, et al. Interactions between non – flooded mulching cultivation and varying nitrogen inputs in rice – wheat rotations[J]. *Field Crops Research*, 2005, 91(2/3): 307–318.
- [56] 胡 宁, 袁 红, 蓝家程, 等. 岩溶石漠化区不同植被恢复模式土壤无机磷形态特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(24): 7393–7402.
- [57] Gupta R K, Singh Y S, Ladha J K, et al. Yield and phosphorus transformations in a rice – wheat system with crop residue and phosphorus management [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1500–1507.
- [58] 李小坤, 鲁剑巍, 吴礼树, 等. 油菜–水稻轮作下根区与非根区红壤性水稻土钾素变化研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 508–514.
- [59] Wang S C, Zhao Y W, Wang J Z, et al. The efficiency of long – term straw return to sequester organic carbon in Northeast China's cropland[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(2): 436–448.
- [60] Wang X H, Yang H S, Liu J, et al. Effects of ditch – buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice – wheat rotation system[J]. *Catena*, 2015, 127: 56–63.
- [61] Zhu L, Hu N, Yang M, et al. Effects of different tillage and straw return on soil organic carbon in a rice – wheat rotation system[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88900.
- [62] Yin H J, Zhao W Q, Li T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2017, 81(2): 2695–2702.
- [63] Meng F Q, Dungait J A J, Xu X L, et al. Coupled incorporation of maize (*Zea mays* L.) straw with nitrogen fertilizer increased soil organic carbon in Fluvic Cambisol [J]. *Geoderma*, 2016, 304: 19–27.
- [64] Kasteel R, Garnier P, Vachier P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3/4): 360–369.
- [65] Zhang A, Bian R J, Pan G X, et al. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: a field study of 2 consecutive rice growing cycles[J]. *Field Crops Research*, 2012, 127: 153–160.
- [66] Woolf D, Amonette J E, Street – Perrott F A, et al. Sustainable biochar to mitigate global climate change [J]. *Nature Communications*, 2010, 1(5): 56–65.
- [67] Zheng H, Wang Z Y, Deng X, et al. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2013, 206: 32–39.
- [68] Singh B P, Hatton B J, Balwant S, et al. Influence of biochar on nitrous oxide emission and nitrogen leaching from two contrasting soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1224–1235.
- [69] 肖亚楠, 杨士红, 刘晓静, 等. 生物炭施用对节水灌溉稻田甲烷排放的影响[J]. *节水灌溉*, 2017(10): 52–55, 60.
- [70] 裴俊敏, 李金全, 李兆磊, 等. 生物质炭施加对水旱轮作农田土壤 CO_2 排放及碳库的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(3): 72–80.