

不同施肥和秸秆还田措施对稻麦轮作系统碳氮流失的影响

赵 峥¹, 周德平¹, 褚长彬¹, 吴淑杭^{1,2}

(1. 上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

摘要: 过量施肥和秸秆的处理问题一直是制约我国农业生态可持续发展的阻碍, 并因此产生了诸多环境问题。采用 DNDC 模型对减量化施肥和秸秆还田措施下稻麦轮作系统中碳氮的迁移转化过程进行模拟, 从而筛选适用于上海地区稻麦轮作系统中的最佳农田管理措施。结果表明: 减量化施肥与秸秆还田均能显著影响稻麦轮作系统的氮素流失、温室气体排放和土壤碳储量变化。75%CK+SR 处理即减量 25% 施肥量同时采用秸秆还田是适用于上海地区稻麦轮作系统中的最佳农田管理措施, 能够在获得最佳水稻产量的同时有效减少 41.67% 的氮素流失量和 51.85% 的 N₂O 排放量。虽然秸秆还田会增加稻麦轮作系统的 CH₄ 排放量, 但同时也能显著增加土壤的碳储量。减量化施肥 50% 的处理(50%CK 和 50%CK+SR) 则会导致水稻减产 3.06%~9.90%。与目前上海地区传统的田间管理措施 CK 相比, 75%CK+SR 能够有效改善稻麦轮作系统的生态环境效益。研究结果为我国稻麦轮作系统碳氮流失的控制提供了参考。

关键词: 稻麦轮作; 秸秆还田; 施肥; 碳氮流失; DNDC 模型

中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)03-0036-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.03.006

Impacts of Different Fertilization and Straw Returning Measures on the Loss of Carbon and Nitrogen in Rice-Wheat Rotation System

ZHAO Zheng¹, ZHOU Deping¹, CHU Changbin¹, WU Shuhang^{1,2}

(1. *Eco-environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403*; 2. *Shanghai Engineering Research Centre of Low-carbon Agriculture (SERCLA), Shanghai 201415*)

Abstract: Over-fertilization and straw returning were the vital issues that restrict the sustainable development of agricultural ecosystems in China. In this study, a process-based biogeochemical model-DNDC was adopted to simulate carbon (C) and nitrogen (N) loss from rice-wheat rotation system under different fertilization and straw returning measures, and then identify the best management practice in rice-wheat rotation system in Shanghai. The results indicated that reducing fertilization and straw returning could significantly impacts N loss, greenhouse gas (GHG) emissions and soil C storage in rice-wheat rotation ecosystem. Reducing fertilization by 25% combined with straw returning (75%CK+SR) was identified as the best management practice in rice-wheat rotation ecosystem by DNDC model, which could significantly reduce N loss by 41.67% and reduce N₂O emissions by 51.85%, respectively, while maintained the best rice yields. Straw returning would increase CH₄ emissions from rice-wheat rotation ecosystem, while significantly enhanced soil C storage. In addition, reducing fertilization by 50% (50%CK and 50%CK+SR) would lead to rice yields reduction by 3.06%~9.90%. Compared with traditional practice (CK), the identified best management (75%CK+SR) could efficiently improve ecological environmental benefit in the rice-wheat rotation. The results also provides reference for the control of C and N loss in the rice-wheat rotation in China.

Keywords: rice-wheat rotation; straw returning; fertilization; loss of carbon and nitrogen; DNDC model

我国是世界上最大的水稻生产国, 用占世界约 20% 的水稻种植面积生产出了占世界约 30% 的稻米产量。水稻也是我国的主要粮食作物之一, 种植模式多种多样, 其中稻麦轮作是主要的种植模式之一。在

收稿日期: 2018-01-09

资助项目: 上海市科委科研计划项目(14391901502); 上海市农业科学院卓越团队建设计划项目(农科创 2017(A-03)); 低碳循环农业创新工程项目(沪农科攻字(2015)第 1-3-2 号)

第一作者: 赵峥(1988—), 男, 博士, 主要从事农田生态研究。E-mail: zhaozheng24@qq.com

通信作者: 吴淑杭(1970—), 男, 研究员, 主要从事环境微生物研究。E-mail: wushuhang88@163.com

过去的几十年中,化肥的使用对我国水稻产量的迅速增长做出了巨大贡献,然而,大量施肥也产生了一系列的环境问题^[1]。目前,我国农田中的施肥量普遍处于过量水平,高于作物生长对养分的实际需求,这就导致一部分养分流失到了周边环境中,引起了严重的农业面源污染问题,如地表水体的富营养化、地下水的硝酸盐污染以及温室效应等^[2-3];另一方面,秸秆的处理问题也是我国稻麦轮作系统中的难题之一,传统的焚烧方式所产生的大量颗粒物对大气环境造成了严重的污染^[4-5]。因此,解决我国稻麦轮作系统中的过量施肥与秸秆处理问题迫在眉睫。

近年来,关于稻麦轮作系统中减量化施肥与秸秆还田开展了大量研究,主要集中于对作物产量、土壤养分、土壤理化性状以及养分流失的影响等方面。相关研究^[6-7]表明,过量施肥是导致农田养分流失和农业面源污染的主要原因,降低施肥量是控制土壤养分流失的有效手段。王静等^[8]研究表明,在太湖流域采用保护性耕作与平衡施肥能够大大降低稻田氮素流失潜能,同时增加水稻产量;李旭等^[9]研究表明,控释尿素和减氮施肥能够显著降低稻田氮素的径流和渗漏流失,是控制农业面源污染的重要手段。另一方面,韩新忠等^[10]研究表明,50%的秸秆还田量能显著增加水稻产量,同时也能显著提高土壤酶活性和土壤微生物含量;刘秋霞等^[11]研究表明,秸秆还田能够在一定程度上替代钾肥的施用,同时提高水稻产量,对稻田钾素的可持续管理具有重要意义;杨林章等^[12]研究表明,长期施肥与秸秆还田能够有效提高土壤有机碳的累积速率,提高稻田系统土壤有机碳库的缓冲性和长期稳定性。诸多研究^[13-14]均表明,秸秆还田措施能在不同程度上增加水稻产量,改善土壤肥力与理化性状。然而,目前有关减量化施肥和秸秆还田组合处理对稻麦轮作系统碳氮循环过程影响方面的研究较少,对于施肥量和秸秆还田的最佳组合仍不明确。

本研究以我国南方典型的稻麦轮作系统为研究对象,采用 DNDC 模型对不同施肥水平和秸秆还田措施组合条件下土壤碳氮的迁移转化过程进行追踪模拟,筛选出适用于我国稻麦轮作系统中最佳的管理措施,在保证作物产量、改善土壤肥力的同时减少土壤的养分流失,为我国稻麦轮作系统的生态可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

上海市位于长江入海口,属黄浦江流域,气候类型为典型的亚热带季风型气候,全年四季分明,日照

充足,雨量充沛,年平均气温 15.6 °C,年降水量 1 185 mm,无霜期 225 d。上海地区属我国南方典型的稻作农区,种植制度以稻麦轮作为主。上海每年约有秸秆 160 万 t,近年来在上海市政府秸秆综合利用扶持政策的推进下,上海的秸秆还田率已达 80%以上,普遍已达到全量还田,还田方式以粉碎之后翻入为主。上海市松江区将秸秆还田制度与家庭农场承包制度相结合,进一步推进了秸秆还田制度的实施。根据我国“十三五”的发展规划,“化肥农药双减”是我国农业生产过程中的重要措施。近年来,减量化施肥也已在上海地区的稻麦轮作系统中被普遍采用。减量化施肥和秸秆还田是实现上海地区稻麦轮作系统可持续发展的重要措施。

1.2 DNDC 模型简介

DNDC 模型是一个用于模拟和追踪农业生态系统中碳和氮的生物地球化学循环的过程模型。其中,DN(Denitrification)指的是反硝化作用,DC(Decomposition)指的是土壤有机质的分解作用,DNDC 模型以这 2 个作用为核心,结合一系列来自于物理、化学和生物学的经典法则和经验方程,从而实现对农作物产量、土壤碳氮变化、养分流失以及温室气体排放的模拟^[15]。DNDC 模型发展于上世纪 90 年代,由美国新罕布什尔大学的 Gilhespy 等^[16]开发建立,最初的目的是用于北美地区农田中土壤碳储量变化和温室气体排放的模拟。在过去的 20 多年中,DNDC 模型已在世界范围内不同国家、地区以及不同农业生态系统中得到了应用和验证,成功模拟了不同农田管理措施对作物产量、土壤养分变化以及营养元素流失的影响^[17-18]。DNDC 模型于 21 世纪初引入我国,并广泛应用于我国各类农田生态系统中,用于指导我国的农业生产过程。当经过一系列的参数修正和本地化验证之后,目前 DNDC 模型已成功应用于我国的稻麦轮作系统,用于模拟不同农田管理措施下稻麦轮作系统中碳和氮的迁移转化过程^[19]。本研究采用经过验证的 DNDC 95 版本,采用模型的点位模拟功能模拟上海松江区(30.93° N,121.07° E)典型稻麦轮作系统中不同施肥量和秸秆还田措施对系统碳氮流失的影响。DNDC 模型点位模拟所需的输入参数包括气象数据、土壤理化性质数据和农田管理措施数据 3 类,其中气象数据来源于当地气象站,土壤理化性质数据来源于模拟地块的实地采样和分析测定,农田管理措施数据则来源于试验地的实地调研和试验过程中的记录。模拟地块土壤的基础理化性质:碱解氮 154.06 mg/kg,有效磷 26.27 mg/kg,速效钾 115.03 mg/

kg,有机质 32.53 g/kg,容重 1.27 g/cm³,pH 7.25。水稻季除烤田期外田面保持淹水状态,田面水高度约为 7~8 cm,松江区稻田田埂高度约为 10 cm,当降雨量超过 20 mm 时就有可能产生地表径流,经测定当地稻田土壤的渗漏速率约为 0.8 mm/d。

1.3 模型验证与情景模拟

验证模型是模型研究的前提条件,在本研究中 DNDC 模型的验证过程基于 2013 年野外定位试验所获得的实测数据进行,对 DNDC 模型模拟稻田氮素流失、温室气体排放和水稻产量的可行性进行验证,验证后的模型即可应用于不同农田管理措施下稻田碳氮循环过程的模拟。模拟试验基于 2015 年上海松江区实际的气象条件(每日降雨量和最高、最低气温)和土壤条件(耕层土壤碳氮含量、土壤质地、容重、孔隙度、pH 等)作为基础情景进行不同施肥和秸秆还田措施下稻麦轮作系统碳氮循环过程的模拟。水稻在每年的 6 月种植,10 月收获,小麦在 11 月种植,次年的 5 月收获。在每季作物种植前采用常规方式进行犁地,犁地深度 20 cm。基础情景的施肥量参照松江当地习惯,其中稻季总施肥(N)量 344 kg/hm²,分 3 次施用,麦季总施肥(N)量 200 kg/hm²,分 2 次施用。以基础情景为参照,模拟试验针对稻季农田管理措施共设置全量施肥(CK)、减量 25%(75%CK)和减量 50%(50%CK)3 个施肥水平,同时与是否秸秆还田(SR)进行组合,共设置 6 个模拟情景,各模拟情景的具体管理措施见表 1,其中秸秆还田方式为全量粉碎后翻入土壤。水稻生长过程中田面保持淹灌,在拔节后期进行烤田,烤田期 10 d。模拟试验对麦季不设置任何处理(参照当地习惯)。其他农田管理措施以当地农民的常规操作为准。

表 1 各模拟情景的施肥方案与秸秆还田措施

单位:kg/hm²

模拟情景	基肥 (碳酸氢铵)	追肥 1 (尿素)	追肥 2 (尿素)	总施 肥量	秸秆 还田
CK	68	138	138	344	-
CK+SR	68	138	138	344	+
75%CK	51	104	104	259	-
75%+SR	51	104	104	259	+
50%CK	34	69	69	172	-
50%CK+SR	34	69	69	172	+

注:其中 CK 表示全量施肥的常规对照,SR 表示秸秆还田;一表示秸秆不还田,十表示秸秆还田;施肥量用 N 含量(kg/hm²)表示。

1.4 数据分析

本研究中模拟试验所需的基础数据来自于上海松江区稻麦轮作农田的实地取样与调研,试验结果的获得来自于 DNDC 模型 95 版本点位模拟功能的情

景模拟,同时根据模型的不确定性分析给出了模型模拟结果的不确定范围。数据的处理和分析采用 Excel 2010 进行,图表的绘制采用 Origin 8.0 进行。

2 结果与分析

2.1 DNDC 模型的验证

基于 2013 年野外定位试验所获得的实测数据对 DNDC 模型模拟上海地区传统施肥(N)条件下(300 kg/hm²)稻田的氮素流失、温室气体排放和水稻产量的可行性进行验证。经过一系列的参数修正之后, DNDC 模型基本能够准确模拟稻麦轮作系统中稻季的氮素流失、CH₄ 和 N₂O 排放以及水稻的产量,模拟结果如表 2 所示。结果显示模拟值和实测值之间的相对标准偏差为 -13.03%~12.88%,均在可接受范围内,其中, DNDC 模型高估了稻田的 CH₄ 排放量,而低估了稻田的氮素流失量、N₂O 排放量和水稻产量。总的来说, DNDC 模型可以应用于稻麦轮作系统碳氮循环过程的模拟,更多关于 DNDC 模型参数修正和验证的详细内容可参考前期研究^[19]。

表 2 DNDC 模型模拟稻田氮流失和 GHGs 排放的验证

单位:kg/hm²

DNDC 模型验证	氮流失		GHGs 排放		产量
	径流	渗漏	CH ₄	N ₂ O	
实测值	14.73	6.13	80.83	2.10	8310.00
模拟值	12.81	5.87	91.24	1.87	8047.00
相对标准偏差/%	-13.03	-4.27	12.88	-10.95	-3.16

注:氮流失量用 N 含量(kg/hm²)表示。下同。

2.2 不同施肥与秸秆还田措施对氮素流失的影响

稻麦轮作系统是典型的水旱轮作模式,稻季除了中期烤田以外田面长期处于淹水状态,由于受灌溉和降雨等因素的影响,地表径流和渗漏是导致稻麦轮作系统氮素流失的主要途径。由图 1 可知,目前上海地区稻麦轮作系统中传统管理方式 CK 导致的氮流失量最高,达 37.8 kg/hm²,占总施肥量的 6.95%。减量化施肥和秸秆还田均能有效降低稻麦轮作系统的氮流失量。其中,50%CK+SR 处理氮流失量最低,为 17.1 kg/hm²,与 CK 处理相比能够减少 54.76%的氮流失。对比秸秆还田和减量化施肥 2 种农田管理措施发现,25%的减量化施肥力度对稻麦轮作系统氮素流失的减排效果略优于秸秆还田措施。而对比地表径流和渗漏两种流失途径可以看出,渗漏流失是导致稻麦轮作系统氮素流失的主要途径,主要原因可能是渗漏流失在稻季和麦季均会产生,而地表径流流失由于受稻田田面水的影响,仅在稻季产生。

2.3 不同施肥与秸秆还田措施对温室气体排放的影响

由图 2 可知,秸秆还田会大大增加稻麦轮作系统的

CH₄ 排放量,约为非秸秆还田处理的2倍。而减量化施肥对稻麦轮作系统 CH₄ 的排放没有显著影响。由图3可知,与 CH₄ 的排放规律不同,减量化施肥和秸秆还田均能有效减少稻麦轮作系统 N₂O 的排放量,各处理 N₂O 排放量的变化范围为 0.6~4.2 kg/hm²,其中,50%CK+SR 处理的 N₂O 排放量最低,与 CK 处理相比降低了 85.71%。与秸秆还田相比,25%程度的减量化施肥对稻麦轮作系统 N₂O 的减排效果更佳。

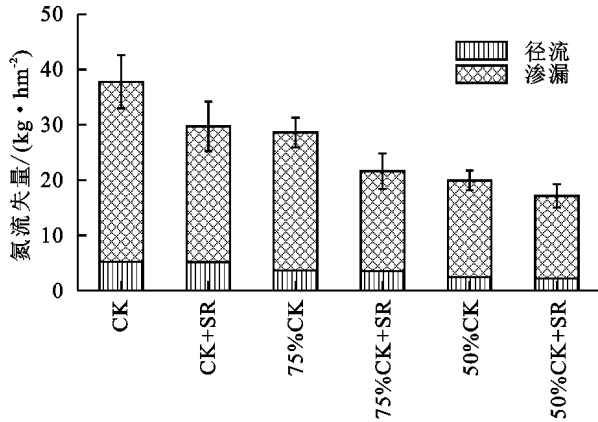


图1 不同施肥与秸秆还田条件下稻麦轮作系统氮素流失量

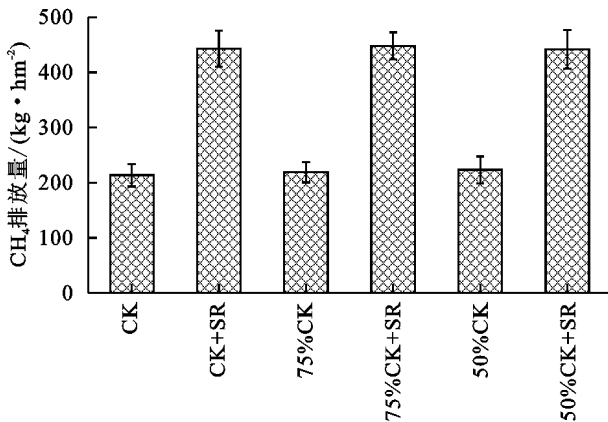


图2 不同施肥与秸秆还田条件下稻麦轮作系统 CH₄ 排放通量

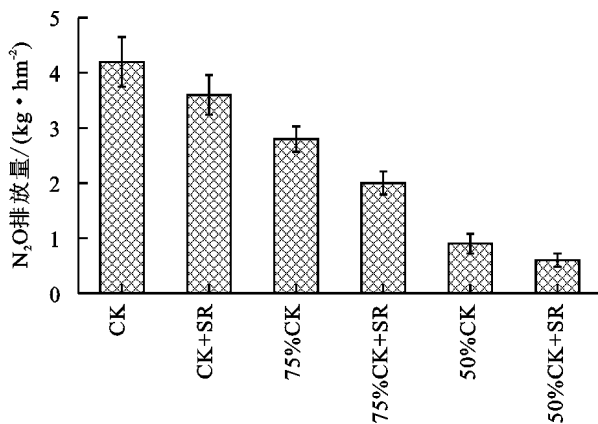
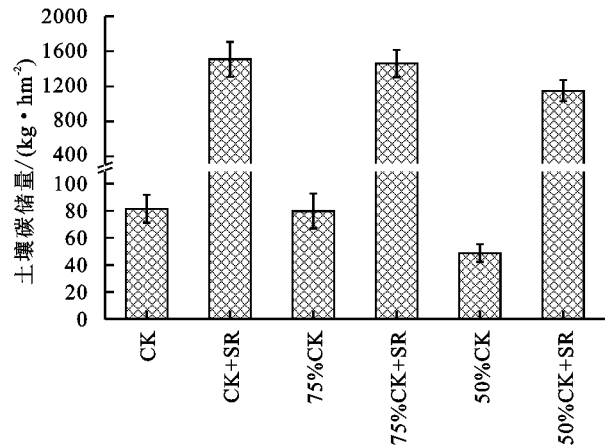


图3 不同施肥与秸秆还田条件下稻麦轮作系统 N₂O 排放通量

2.4 不同施肥与秸秆还田措施对土壤碳储量变化的影响

土壤碳储量是衡量土壤肥力的重要指标。由图

4可知,常规施肥和减量化施肥在非秸秆还田条件下对稻麦轮作系统土壤碳储量的影响不大,土壤碳储量没有显著变化。而秸秆还田处理能大大提高稻麦轮作系统土壤的碳储量,在常规施肥和减量化施肥条件下均有显著效果。其中,常规施肥条件下进行秸秆还田对土壤碳储量的固持效果最佳,为 1 509 kg/hm²,而当施肥水平减量 50%时,秸秆还田对土壤有机碳储量的固持效果有一定的降低,为 1 149 kg/hm²,这可能与减量化施肥 50%条件下土壤养分的供应不足有关,此时作物对土壤养分的吸收要大于养分供给充足的土壤。总的来说,秸秆还田是增加稻麦轮作系统土壤碳储量的重要措施,而减量化施肥对土壤碳储量的影响不明显。



注:土壤碳储量用 C 含量(kg/hm²)表示。下同。

图4 不同施肥与秸秆还田条件下稻麦轮作系统土壤碳储量变化

2.5 不同施肥与秸秆还田措施对水稻产量的影响

施肥是影响水稻产量的关键因素。由图5可知,上海地区的常规施肥量和减量 25%的施肥量无论是在秸秆是否还田的情况下,均不会对水稻产量产生明显影响,各模拟情景水稻均能达到最佳产量 10 000 kg/hm²。而当施肥量减量 50%时,水稻产量出现了下降,与 CK 处理相比,非秸秆还田的处理 50%CK 减产了 3.06%,而秸秆还田处理 50%CK+SR 处理则减产了 9.90%。

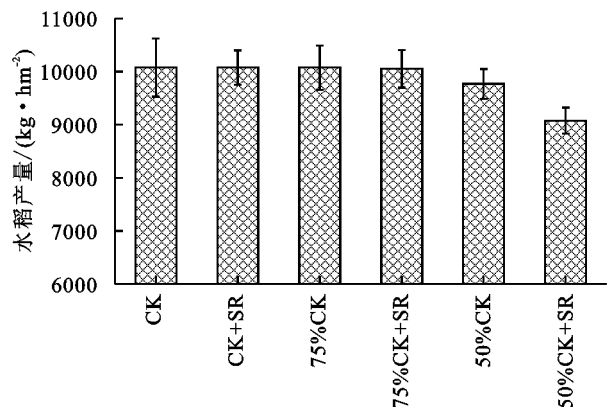


图5 不同施肥与秸秆还田条件下的水稻产量

3 讨论

过量施肥是目前我国农田中普遍存在的现象,化肥的使用虽然对我国的粮食增产做出了非常重要的贡献,但同时也导致了一系列的环境问题。水稻田由于其特殊的水分管理方式和氧化还原条件,是农业面源污染的主要来源之一。我国稻麦轮作系统中过高的施肥量和较低的肥料利用率导致大量的养分流失到周边环境中,进而导致了地表水体的富营养化、地下水的硝酸盐污染以及农田温室气体的排放等,对周边环境造成了严重的污染。因此,减量化施肥势在必行,同时也是改善我国农业生态环境的重要措施。研究表明,减量化施肥对稻麦轮作系统氮素流失和 N_2O 的排放有显著的减排效果。减量化施肥主要影响的是稻麦轮作系统的氮循环过程,当氮素的投入量降低的情况下将必然会影响到氮的各个去向,土壤中氮源及反硝化底物的降低导致了 N 流失和 N_2O 排放量的减少,这也与已有研究^[20]获得的结论一致。值得注意的是,虽然减量 50% 的施肥量对稻麦轮作系统氮素流失和 N_2O 排放的减排效果最佳,但同时也一定程度上导致了水稻减产,这表明减量施肥 50% 有可能导致水稻生长过程中的供氮不足。而 50%CK+SR 处理减产最高的原因可能是与秸秆还田之后的腐熟过程有关,秸秆的腐熟过程实际上是有机碳的分解过程,而有机碳的分解需要达到一定的碳氮比条件才能进行,这就会消耗土壤中一部分的氮,而该处理中施肥投入的氮又进行了 50% 的减量化,从而导致水稻生长过程中供氮不足以及进一步的减产。此外,减量化施肥对稻麦轮作系统 CH_4 的排放和土壤碳储量的变化则没有显著影响。

秸秆的成分主要以碳为主,因此,秸秆还田主要影响的是稻麦轮作系统的碳循环过程。情景模拟结果表明,秸秆还田会显著增加稻麦轮作系统 CH_4 的排放量,同时也能大大增加土壤的碳储量,这是农田中碳投入量增加的必然结果,在实际生产过程中很多采用秸秆还田的农田均证明了这一点^[21]。同时,秸秆还田也会对稻麦轮作系统的氮循环过程产生影响。秸秆还田能够有效的降低稻麦轮作系统氮的渗漏流失,这可能与秸秆还田对土壤理化性质的改善有关^[22]。土壤碳储量的增加会改变土壤的质地,而土壤质地的变化会影响水分在土壤中的渗漏速率,从而进一步影响氮在土壤中的渗漏流失过程。秸秆还田对稻麦轮作系统 N_2O 的排放也有一定的减排效果,这与秸秆还田之后再土壤中的腐熟过程有关^[23]。秸秆的腐熟过程本质上是有机物的分解过程,而有机物

的分解只有在一定的碳氮比条件下才能进行,因此,秸秆的腐熟分解过程将必然会消耗土壤中一部分的氮,而土壤氮含量的降低将进一步影响 N_2O 的产生过程^[24]。秸秆还田条件下土壤有机碳含量的增加对土壤质地的改变也会在一定程度上影响 N_2O 产生之后的排放过程,而秸秆的腐熟与分解过程对土壤氮的消耗也会影响土壤氮的渗漏流失。此外,在施肥量减量 50% 的条件下,秸秆还田的稻田其水稻产量进一步降低,这也说明了秸秆的腐熟和分解过程对土壤氮的消耗,由此使得水稻生长过程中供氮不足的情况进一步加重。总的来说,秸秆还田措施不仅能够影响稻麦轮作系统的碳循环过程,同时也与土壤的氮循环过程密切相关。

4 结论

(1)情景模拟结果表明,75%CK+SR 组合即削减 25% 施肥量同时采用秸秆还田是适合上海地区稻麦轮作系统中的最佳农田管理措施,能够在保证水稻产量的前提下有效降低稻麦轮作系统的氮素流失量和 N_2O 排放量,同时增加土壤的有机碳储量。

(2)与传统处理 CK 相比,75%CK+SR 处理能够减少 41.67% 的氮素流失量和 51.85% 的 N_2O 排放量,但同时也会增加 110.03% 的 CH_4 排放量。

(3)施肥与秸秆还田是影响稻麦轮作系统碳氮循环的关键因素,其中秸秆还田对稻麦轮作系统的氮素流失、温室气体排放和土壤碳储量变化均有显著影响,而减量化施肥仅对氮素流失和 N_2O 排放有显著影响。

参考文献:

- [1] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China [J]. *Plant Production Science*, 2009, 12(1): 3-8.
- [2] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China [J]. *Plant and Soil*, 2009, 319(1/2): 225-234.
- [3] Yoshinaga I, Miura A, Hitomi T, et al. Runoff nitrogen from a large sized paddy field during a crop period [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(2): 217-222.
- [4] Wang Y, Hu C, Zhu B, et al. Effects of wheat straw application on methane and nitrous oxide emissions from purplish paddy fields [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2010, 56(1): 16-22.
- [5] 朱鸿杰,闫晓明,何成芳,等. 秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 344-351.
- [6] 吴俊,樊剑波,何园球,等. 不同减量施肥条件下稻田田

- 面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1561-1566.
- [7] 郑小龙, 吴家森, 陈裴裴, 等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 39-43, 48.
- [8] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1164-1171.
- [9] 李旭, 谢桂先, 刘强, 等. 控释尿素减量施用对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 70-74.
- [10] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.
- [11] 刘秋霞, 戴志刚, 鲁剑巍, 等. 湖北省不同稻作区域秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1548-1557.
- [12] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(6): 883-890.
- [13] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 秸秆还田对水稻固碳特性及产量形成的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2885-2891.
- [14] 李录久, 王家嘉, 吴萍萍, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 254-262.
- [15] Giltrap D L, Li C S, Saggat S. DNDC: A process-based model of greenhouse gas fluxes from agricultural soils [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 136(3/4): 292-300.
- [16] Gilhespy S L, Anthony S, Cardenas L, et al. First 20 years of DNDC (De Nitrification De Composition): Model evolution [J]. *Ecological Modelling*, 2014, 292: 51-62.
- [17] Uzoma KC, Smith W, Grant B, et al. Assessing the effects of agricultural management on nitrous oxide emissions using flux measurements and the DNDC model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2015, 206: 71-83.
- [18] Lugato E, Zuliani M, Alberti G, et al. Application of DNDC biogeochemistry model to estimate greenhouse gas emissions from Italian agricultural areas at high spatial resolution [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 139(4): 546-556.
- [19] Zhao Z, Zhang H L, Li C S, et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai, China with modified DNDC model [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 197: 212-221.
- [20] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 146(1): 103-112.
- [21] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [22] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 等. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1450-1459.
- [23] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526-535.
- [24] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155-165.
- (上接第35页)
- [14] 汤珊珊, 高海东, 李占斌, 等. 坡面覆沙后侵蚀泥沙颗粒分选特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 125-130.
- [15] 汤珊珊, 李占斌, 李聪, 等. 模拟降雨条件下覆沙坡面产流产沙过程研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(5): 139-146.
- [16] Xu G C, Tang S S, Lu K X, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on sand-covered slopes in a region subject to wind-water erosion [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2523-2530.
- [17] Zhang F B, Bai Y J, Xie L Y, et al. Runoff and soil loss characteristics on loess slopes covered with aeolian sand layers of different thicknesses under simulated rainfall [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 244-251.
- [18] 景国臣. 冻融侵蚀及其形式探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2003, 30(4): 111-112.
- [19] 王随继. 黄河中游冻融侵蚀的表现方式及其产沙能力评估[J]. 水土保持通报, 2004, 24(6): 1-5.
- [20] 王飞, 范昊明, 郭成久, 等. 我国两大冻融侵蚀区气候环境变化对比分析[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 173-177.
- [21] 苏远逸, 李鹏, 李占斌, 等. 坡面植被格局对坡沟系统能量调控及水沙响应关系的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 32-39.
- [22] 李占斌, 李社新, 任宗萍, 等. 冻融作用对坡面侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 56-60.
- [23] 李聪. 植被格局对坡沟系统侵蚀输沙过程调控作用试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2015.