

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.029

秸秆还田下水氮耦合对黑土稻田 CH₄ 排放与产量的影响

张忠学^{1,2} 韩羽^{1,2} 齐智娟^{1,2} 陈鹏^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明秸秆还田下水氮耦合对黑土稻田 CH₄ 排放的影响, 探寻节水、减排、增产的水肥管理模式, 在秸秆还田的基础上, 以常规淹灌配施常量氮肥的处理为对照, 设置了常规淹灌和控制灌溉两种灌溉方式, 并设置 4 个氮肥梯度, 采用静态箱-气相色谱法观测各处理的 CH₄ 排放通量, 分析了水氮耦合下稻田土壤氧化还原电位、各生育阶段土壤铵态氮含量、硝态氮含量和秸秆腐解率的变化, 以及各因子对稻田 CH₄ 排放的影响, 同时综合产量计算了减排效益。结果表明: 秸秆还田下常规淹灌 CH₄ 排放通量、累积排放量显著高于控制灌溉 ($P < 0.05$), 且随着施氮量的增加, CH₄ 排放通量、累积排放量显著增加 ($P < 0.05$); 与对照相比, 常规淹灌增施氮肥使 CH₄ 累积排放量增加 16.24% ($P < 0.05$), 产量降低了 2.01%; 在常规淹灌下适当减施氮肥不但对产量无显著影响, 还使得 CH₄ 累积排放量降低 18.59% ($P < 0.05$); 若采取控制灌溉减量施氮, 与对照相比, 则使得 CH₄ 累积排放量降低 62.71% ($P < 0.01$), 产量提高 21.16% ($P < 0.05$)。通过相关性分析发现, 施氮量、灌溉方式以及二者的交互作用对 CH₄ 排放影响显著; 水氮耦合下稻田土壤铵态氮含量、秸秆腐解率与 CH₄ 排放呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 土壤氧化还原电位与 CH₄ 排放呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。综合减排效益分析, 秸秆还田下采用控制灌溉、并适量减施氮肥可以使经济效益最大化, 达到节水、减排、增产的目的。

关键词: 秸秆还田; 水氮耦合; CH₄ 排放; 水稻产量; 减排效益

中图分类号: S511; S154.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0254-09 OSID: 

Effect of Water and Nitrogen Coupling on CH₄ Emission and Rice Yield in Black Soil Paddy Fields with Straw Returned to Field

ZHANG Zhongxue^{1,2} HAN Yu^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} CHEN Peng^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of Efficient Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore the effect of water and nitrogen coupling on CH₄ emission in black soil paddy fields with straw returned to field, explore the water and fertilizer management mode of saving water and reduce emissions, and achieve the goal of yield increassing, on the basis of straw returning to the field, two irrigation modes of conventional flooding irrigation and controlled irrigation were set up, and four nitrogen fertilizer gradients were set up. The CH₄ emission fluxes of each treatment were observed by static box gas chromatography, the water and nitrogen were analyzed. Under the coupling, the redox potential of paddy soil, the content of soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen in each growth stage, the change of straw decomposition rate, and the influence of each factor on CH₄ emission in paddy field were calculated. The results showed that the CH₄ emission flux and cumulative emission of conventional flooding irrigation were significantly higher than that of control irrigation ($P < 0.05$), and the CH₄ emission flux and cumulative emission were increased significantly with the increase of nitrogen application level ($P < 0.05$); compared with normal irrigation, the cumulative emission of CH₄ was increased by 16.24% ($P < 0.05$) and the yield was decreased by 2.01% on average with the increase of

收稿日期: 2019-10-31 修回日期: 2019-11-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)和国家自然科学基金面上项目(51779046)
作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com
通信作者: 齐智娟(1987—),女,讲师,博士后,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

nitrogen application. Under conventional flooding irrigation, the application of nitrogen fertilizer had little effect on the yield, but also reduced the cumulative emission of CH₄ by 18.59% ($P < 0.05$); if the application of nitrogen reduction was under controlled irrigation, the cumulative emission of CH₄ was decreased by 62.71% ($P < 0.01$), and the yield was increased by 21.16% ($P < 0.05$). Through the correlation analysis, it was found that the amount of nitrogen application, irrigation method and their interaction had a significant impact on CH₄ emissions; under the coupling of water and nitrogen, the content of ammonium nitrogen in paddy soil, the decomposition rate of straw and CH₄ emissions had a significant positive correlation ($P < 0.05$), and the redox potential of soil had a significant negative correlation with CH₄ emissions ($P < 0.05$). In consideration of comprehensive emission reduction benefits, the economic benefits can be maximized by using controlled irrigation and appropriate nitrogen fertilizer reduction under straw returning, so as to achieve the purpose of water saving, emission reduction and production increase.

Key words: straw returned to field; water and nitrogen coupling; CH₄ emission; rice yield; emission reduction benefit

0 引言

CH₄ 是温室气体的重要组成部分,对温室效应的贡献率达 5%,仅次于 CO₂ 的 60%^[1]。农业活动是 CH₄ 的重要排放来源,其中稻田 CH₄ 排放量占大气总来源的 8%~13%^[2]。黑龙江省作为水稻种植大省,2018 年全省水稻种植面积达 378.4 万 hm²,水稻产量 2 685.5 万 t,占全国水稻产量的 12.7%,在粮食生产和保障国家粮食安全方面起到了举足轻重的作用^[3]。因此,对寒地黑土稻田进行 CH₄ 的减排研究具有重要意义。

CH₄ 是由产 CH₄ 菌在极度厌氧环境中分解有机物产生的一种有机气体,改善土壤水分环境与调节氮肥施用量对 CH₄ 排放有着重要影响^[4]。有研究^[5-7]发现,节水灌溉不但可以改变根层土壤的水气状况、减少稻田 CH₄ 排放,还可以有效提高土壤氮素有效性,提高水稻对土壤氮素的吸收利用量,提高水分利用效率。施肥是保证水稻高产、优质、高效的基础^[8],但东北平原区农民为追求高产而大量施用化肥,有的施氮量已高达 300 kg/hm²,过量的氮肥投入导致土壤氮素大量累积,使氮肥利用率下降,并对环境造成污染^[9]。使用秸秆还田代替部分化肥,不但可以缓解氮、磷、钾的比例失调,提高农作物产量和品质^[10],还能提高土壤通气性、增加土壤有机质、改良土壤团粒结构、增加土壤孔隙度、降低土壤容量,促进土壤水肥气热平衡,提高微生物活力和促进作物根系发育^[11]。然而,秸秆腐解过程需要消耗一定的土壤氮素^[12],在秸秆还田而不配合水肥调控的情况下容易造成减产^[13]。因此,在秸秆还田下寻求合理的水肥管理模式,既能充分利用黑土高肥力的优势来减少氮肥投入、提高氮肥利用效率,也能在保证高产的前提下达到 CH₄ 减排效果。

本文通过田间试验观测秸秆还田水氮耦合下寒

地黑土稻田 CH₄ 排放通量的变化规律、土壤铵态氮和硝态氮含量变化、土壤氧化还原电位动态变化以及秸秆腐解率的变化,分析土壤铵态氮和硝态氮含量、土壤氧化还原电位及秸秆腐解率对稻田 CH₄ 排放的影响,并结合产量综合进行减排效益分析,以期对秸秆还田下寒地黑土稻田的节水、减排、增产提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 5—10 月在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站进行,该站位于绥化市庆安县和平镇(东经 127°40′,北纬 46°58′),为典型寒地黑土分布区,属寒温带大陆性季风气候,多年平均气温 3℃,有效积温 2 300~2 500℃,多年平均降水量 550 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm,太阳辐射量为 4 000~4 300 MJ/(m²·a)。作物水热生长期 156~171 d,全年无霜期 128 d。供试土壤为黑土,在本试验之前已进行两年的秸秆还田试验。泡田之前,对试验小区 0~20 cm 土层进行 5 点对角取样后混合,分析主要的土壤理化性质:pH 值 6.40、有机质质量比 41.80 g/kg、全氮质量比 1.51 g/kg、全磷质量比 15.61 g/kg、全钾质量比 19.86 g/kg、碱解氮质量比 148.27 mg/kg、速效磷质量比 24.22 mg/kg、速效钾质量比 156.13 mg/kg。

1.2 试验设计

试验采用控制灌溉(以下简称控灌,C)和常规淹灌(以下简称淹灌,F)两种水分管理模式,不同灌溉模式水分管理见表 1。秸秆还田(S)还田量为 6 t/hm²,水稻秸秆于秋季水稻收获后,将秸秆切成 6~7 cm 碎段施入稻田,随后经翻耕作业将碎秸秆压入 15~20 cm 土中,做到翻压严、无立茬。设置 4 个氮肥水平:施氮量 85(N1)、110(N2)、124(N3),

常氮)、135 kg/hm² (N4)。设置常灌常氮 (FSN3) 为对照,以及 FSN1、FSN2、FSN4、CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 共 8 个处理,每个处理 3 次重复,共计 24 个小区。每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m)。小区四周

作隔渗处理,隔渗材料为塑料板 and 水泥埂,在小区中央离田埂 0.5 m 处预埋方形白钢底座 (50 cm × 50 cm),底座嵌入土壤 5 cm 深作为采样点,用于放置人工采样静态箱。各小区单独排灌,进水用水表计量。

表 1 不同灌溉模式水分管理

Tab. 1 Water management of different irrigation modes

灌溉方式	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0 ~ 30 mm	0 ~ 0. 7θ _s	0 ~ 0. 7θ _s	晒田	0 ~ 0. 8θ _s	0 ~ 0. 8θ _s	0 ~ 0. 7θ _s	落干
常规淹灌	0 ~ 30 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	晒田	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	0 ~ 50 mm	落干

注:θ_s 为根层土壤饱和含水量;“~”前数据为水分控制下限,“~”后数据为水分控制上限。

供试水稻品种为当地主栽品种“绥粳 18”,种植密度为 30 cm × 10 cm,每穴 3 株。供试化肥分别为尿素 (含 N 46%)、过磷酸钙 (含 P₂O₅ 12%)、氯化钾 (含 K₂O 60%)。各处理氮肥按照基肥、蘖肥、穗肥比例为 4.5:2:3.5 分施;各处理施用 P₂O₅ 45 kg/hm², K₂O 80 kg/hm²,钾肥分基肥和 8.5 叶龄 (幼穗分化期)两次施用,前后比例为 1:1,磷肥作基肥一次施入。水稻于 5 月 7 日施基肥,5 月 15 日插秧,6 月 6 日施蘖肥,7 月 15 日施穗肥;返青期为 5 月 15 日—6 月 6 日,分蘖期为 6 月 7 日—7 月 8 日,7 月 9—15 日晒田,拔节期为 7 月 16—22 日,抽穗期为 7 月 23 日—8 月 13 日,乳熟期为 8 月 14—22 日,黄熟期为 8 月 23 日—9 月 11 日。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理与当地农作习惯相同。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 CH₄ 的采集与测定

于 2019 年 5—9 月进行田间 CH₄ 采集,于水稻移栽后每隔 7 d 采集气体样品,每次采取 3 个平行样,生育旺盛阶段加测,如遇强降雨天气则推迟取样时间。采用静态箱法^[14]取气体样品,静态箱由 5 mm 厚的透明有机玻璃制成,箱体外部用锡纸密封隔温。水稻生育前期箱体高度 60 cm,生育后期箱体高度增加至 110 cm。箱内顶部安装微型电风扇及数字温度计的温度探头,用来校正取样过程中箱内温度升高引起的气体质量计算误差。箱体侧面接入采气管,采气管进入箱内 25 cm,采气管末端连接三通阀,分别连接采气袋与注射器 (50 mL)。每个处理分别在 0、10、20、30 min 各采集 1 次,每次以连续抽取 2 次作为 1 个气体样品,转入采气袋内。该试验站位于黑龙江省第四积温带,昼夜温差较大,因此将采样时间安排在 10:00—14:00 之间进行,此时采样最能代表当日气体排放平均水平^[15],气体样品采用气相色谱仪 (GC-2010Plus,日本)测定。

1.3.2 土壤铵态氮、硝态氮的采集与测定

于水稻各个生育期末分别在各小区中部用稻田

专用土钻 (PSS5030 型) 采用“Z”字法取 5 点 0 ~ 20 cm 土层田间土样,充分混匀后立即带回实验室测定。新鲜土壤样品采用 AA3 型连续流动分析仪 (Seal Analytical GmbH,德国)测定铵态氮、硝态氮含量,同时采用干燥法测定土壤含水量。

1.3.3 土壤氧化还原电位的测定

采集气体的同时用 QX6530 型智能便携式氧化还原电位仪 (中国科学院南京土壤研究所)观测土壤氧化还原电位。测量时在小区内用土钻随机取 3 点 0 ~ 20 cm 新鲜土样,每次取出后迅速将电极插入土样约 2 cm,平衡 5 min 后,待仪器显数稳定时读数。

1.3.4 秸秆腐解率的测定

采用尼龙袋法,将 2018 年收获的风干稻草秸秆剪成 5 cm 长的小段共 18 g,充分混合均匀后装入尺寸为 15 cm × 20 cm 尼龙袋并封口,将尼龙袋编号并记录秸秆具体质量。于秸秆还田小区内随机埋置尼龙袋,并作标记,将尼龙袋垂直埋入,填土并压实,尼龙袋上端与地表持平,与生产上秸秆混拌还田深度基本一致,深度约为 15 cm。试验开始后于水稻每个生育阶段末取出,洗去泥土用干燥法 (洗干净的秸秆放进干燥箱,75℃下干燥 24 h)测未分解秸秆质量。

1.3.5 产量及减排效益

水稻成熟期在每个小区取代表性 5 穴植株,风干后考种;各小区除掉 2 行边行,全部收获晒干后称量,同时用谷物水分测定仪 (Kett PM-8188 型,日本三久股份有限公司)测定稻谷含水率,并按 14.5% 标准含水率折算经济产量。综合氮肥成本、产量收益以及 CH₄ 排放的碳信用计算各处理的减排效益。

1.4 计算方法

稻田 CH₄ 排放通量计算公式^[16]为

$$F = \rho h \frac{dC}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{p}{p_0}$$

式中 F ——CH₄ 排放通量,mg/(m²·h)

ρ ——标准状态下 CH₄ 密度,取 0.714 mg/m³
 h ——箱体有效高度,m
 dC/dt ——采样过程中采样箱内气体浓度变化率,mL/(m³·h)
 T ——采样箱内的平均温度,℃
 p ——采样箱内气压
 p_0 ——标准大气压

CH₄ 累积排放量计算公式^[17]为

$$E_c = \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (2)$$

式中 E_c ——CH₄ 累积排放量,kg/m²
 n ——稻季观测次数
 F_i 、 F_{i+1} ——第 i 次和第 $i+1$ 次采气时 CH₄ 排放通量,mg/(m²·h)

其中 $t_{i+1} - t_i$ 为第 i 次和第 $i+1$ 次采样时间间隔,d。

秸秆腐解率计算公式^[18]为

$$D = (M_0 - M_1) / M_0 \times 100\% \quad (3)$$

式中 M_0 ——试验前秸秆质量,g

M_1 ——残余秸秆质量,g

减排效益计算公式^[19]为

$$R = A + C_c - B \quad (4)$$

式中 R ——总收益,元/m²

A ——水稻产量收益,按当地水稻价格计算,元/m²

C_c ——碳信用,元/m²

B ——氮肥成本,按当地价格计算,元/m²

1.5 数据分析

试验数据采用 WPS 2019 和 SPSS 19.0 进行统计分析。均值之间的多重比较利用 LSD 法,统计显著性假设为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 稻田 CH₄ 排放通量的变化

淹灌与控灌模式下各处理 CH₄ 排放通量的季节变化如图 1 所示,整个生育期内不同灌溉模式下各处理 CH₄ 排放通量变化趋势相似。返青期由于两种灌溉模式皆为淹水,各处理的 CH₄ 排放通量在同一较低水平。由于蘖肥的施加,使得各处理 CH₄ 排放通量明显上升,在分蘖期内出现了峰值,其中 FSN1、FSN2 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理分别减小了 26.83% ($P<0.05$)、8.89%,FSN4 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理增加了 8.56%;CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理分别减小了 76.57%、66.13%、61.53%、49.60% ($P<0.01$)。由于晒田改变了土壤水分条件和通气

性,各处理 CH₄ 排放通量又降至同一较低水平。晒田结束后,控水施穗肥使得各处理 CH₄ 排放通量再次达到高峰,其中 FSN1、FSN2 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理分别减小了 30.56%、21.13% ($P<0.05$),FSN4 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理增加了 13.00% ($P<0.05$);CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理的 CH₄ 排放通量较 FSN3 处理分别减小 67.52%、65.01%、56.21%、39.79% ($P<0.05$)。秸秆还田下,除返青期外,控灌的 CH₄ 排放通量明显低于淹灌,说明控灌对 CH₄ 减排效果明显;两种灌溉模式下,增施氮肥会增加稻田 CH₄ 的排放。

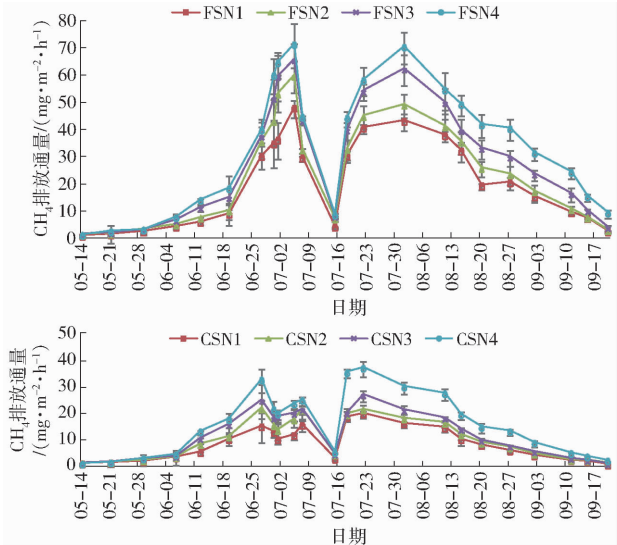


图 1 不同灌溉施肥模式下各处理 CH₄ 排放通量变化曲线
Fig.1 Variations of CH₄ emission flux under different irrigation and fertilization modes

2.2 土壤铵态氮、硝态氮含量的变化

水稻不同生育阶段的土壤铵态氮、硝态氮含量变化如图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$))所示。两种灌溉模式下的土壤铵态氮、硝态氮含量变化规律相同,土壤铵态氮、硝态氮含量由 SN1 处理到 SN4 处理依次增加,说明随着施氮量增加,土壤铵态氮、硝态氮含量随之增加。相同施氮量下的控灌比淹灌的土壤铵态氮含量平均高 36.50% ($P<0.05$),土壤硝态氮含量高 10.61% ($P<0.05$),说明控灌可以显著提高土壤铵态氮、硝态氮含量。施加穗肥后,分蘖期的 FSN1、FSN2、FSN3、FSN4 处理土壤铵态氮含量较返青期分别增长了 16.28%、31.68%、23.97%、40.61%,土壤硝态氮含量较返青期分别降低了 29.80%、29.04%、16.38%、10.81%;CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理土壤铵态氮含量较返青期分别增长了 6.77%、35.70%、31.60%、36.07%,土壤硝态氮含量较返青期分别降低了 15.49%、23.39%、30.17%、27.96%。施加穗肥后,各处理与拔节期相比,

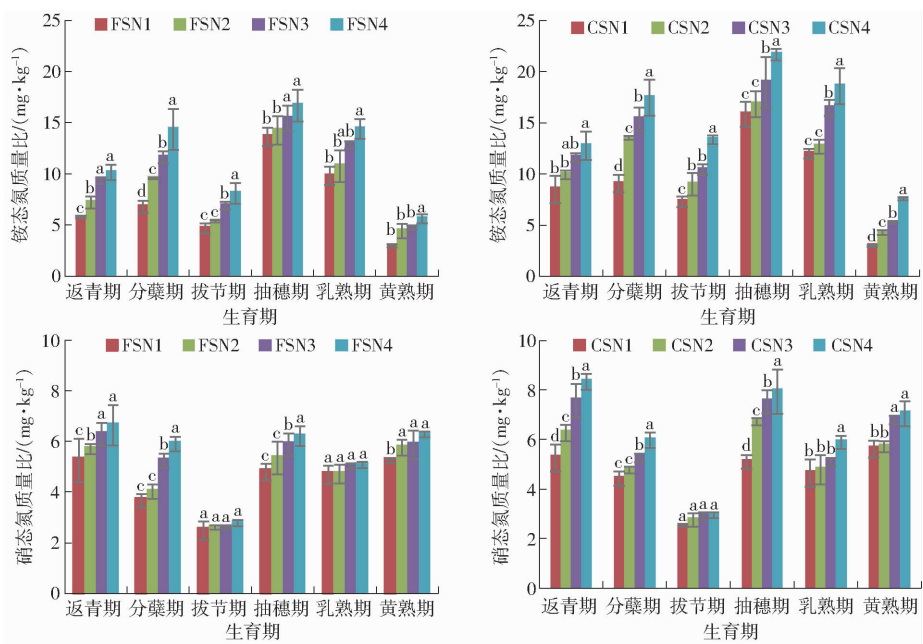


图2 不同灌溉施肥模式下土壤铵态氮、硝态氮含量变化

Fig.2 Changes of soil ammonium and nitrate nitrogen content under different irrigation and fertilization modes

FSN1、FSN2、FSN3、FSN4 处理土壤铵态氮含量分别增长了 184.42%、158.03%、119.91%、102.84%，土壤硝态氮含量分别增长了 89.90%、101.42%、120.47%、118.79%；CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理土壤铵态氮含量分别增长了 113.83%、84.86%、80.29%、61.46%，土壤硝态氮含量分别增长了 97.84%、138.94%、152.78%、163.50%。

2.3 土壤氧化还原电位的动态变化

两种灌溉模式下,各处理的土壤氧化还原电位(E_h)变化如图3所示。两种灌溉模式的土壤 E_h 变化规律相似,皆在水稻移栽后逐渐降低至最低,随后增加至较高水平保持稳定。返青期内,由于水管理相同,淹灌与控灌处理的土壤 E_h 无明显差异($P>0.05$)。施加蘖肥后,淹灌处理的土壤 E_h 较控灌有明显的下降趋势,且两种灌溉模式的土壤 E_h 在6月28日左右均达到全生育期最低值。其中,FSN1、FSN2 处理的土壤 E_h 较 FSN3 处理高 23.70%、7.58%；FSN4 处理的土壤 E_h 较 FSN3 处理低 13.27%；CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理的土壤 E_h 较 FSN3 处理高 83.41%、58.29%、54.98%、39.81% ($P<0.05$)。两种灌溉模式的土壤 E_h 在达到最低后逐渐上升,晒田显著增加了土壤 E_h ($P<0.05$)。其中,FSN1、FSN2 处理的土壤 E_h 较 FSN3 处理高 76.84%、37.89% ($P<0.05$),FSN4 处理土壤 E_h 较 FSN3 处理低 15.79%；CSN1、CSN2、CSN3、CSN4 处理土壤 E_h 较 FSN3 处理高 203.16%、173.68%、161.05%、148.42% ($P<0.01$)。可以看出,秸秆还田下两种灌溉模式的土壤 E_h 随着施氮量的增加逐

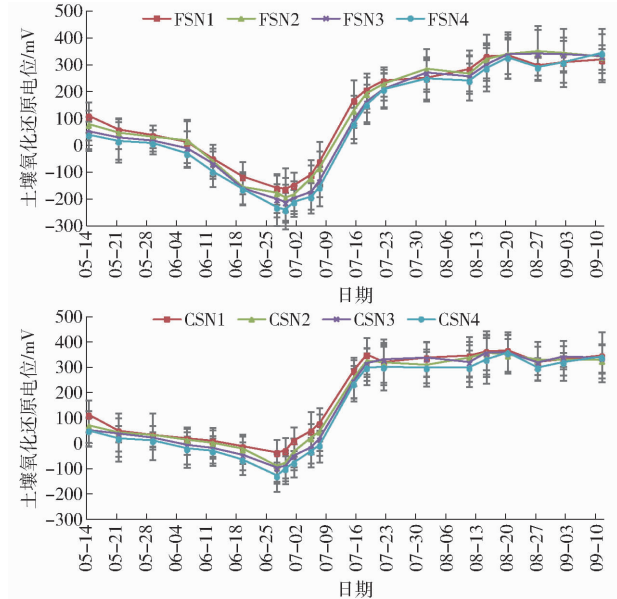


图3 不同灌溉施肥模式下各处理土壤氧化还原电位动态变化曲线

Fig.3 Dynamic curves of soil redox potential under different irrigation and fertilization modes

渐降低;除返青期与乳熟期外,相同日期的控灌土壤 E_h 要显著高于淹灌 ($P<0.05$)。

2.4 秸秆腐解率的动态变化

两种灌溉模式下,各处理的秸秆腐解率变化如图4所示,各处理的秸秆腐解率变化趋势一致。秸秆翻埋后于返青期第1次取出,FSN1、FSN2 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理分别低 45.25%、31.84% ($P<0.05$),FSN4 处理的秸秆腐解率较 FSN3 高 74.3% ($P<0.01$)；CSN1、CSN2 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理分别低 66.90%、19.13%，CSN3、

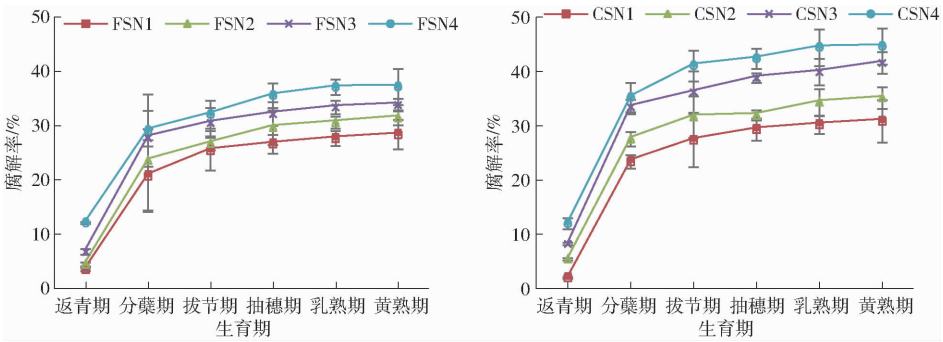


图 4 不同灌溉施肥模式下各处理秸秆腐解率变化曲线

Fig.4 Straw decomposition rates of different treatments under different irrigation and fertilization modes

CSN4 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理高 20.25%、72.21% ($P < 0.05$)。分蘖期取出秸秆后发现, FSN1、FSN2 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理分别低 24.97%、14.85%, FSN4 处理的秸秆腐解率较 FSN3 高 4.72%; CSN1、CSN2 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理分别低 15.56%、0.82%, CSN3、CSN4 处理的秸秆腐解率较 FSN3 处理高 20.18%、26.32%。这表明,两种灌溉模式下,随着施氮量的增加,秸秆腐解率随之升高。但由于返青期水分管理相同,相同施氮量下两种灌溉模式的秸秆腐解率无明显差异。由返青期到分蘖期,各处理的秸秆腐解率显著增加;相同施氮量下,控灌的秸秆腐解率较淹灌高 12.55% ~ 20.62%,说明控灌较淹灌更有利于秸秆腐解。分蘖期后秸秆腐解率较分蘖期前增长缓慢,由分蘖期至黄熟期淹灌的秸秆腐解率只增长了 21% ~ 36%,控灌的秸秆腐解率只增长了 24% ~ 31%,说明水稻分蘖期前是秸秆腐解最快的时期。

2.5 减排效益及相关性分析

各处理的产量及减排效益如表 2 所示。控灌下各处理 CH₄ 累积排放量显著低于淹灌 ($P < 0.05$), 其中 FSN4 处理的 CH₄ 累积排放量较 FSN3 处理高 16.24%, FSN1、FSN2 处理的 CH₄ 累积排放量较

FSN3 处理分别降低了 29.88%、18.59%; CSN4 处理的 CH₄ 累积排放量较 CSN3 处理高 34.43%, CSN1、CSN2 处理的 CH₄ 累积排放量较 CSN3 处理分别降低了 27.87%、13.39%,这表明增施氮肥会显著增加 CH₄ 累积排放量 ($P < 0.05$)。但 FSN2 处理的产量较 FSN3 处理高 1.88%, FSN1、FSN4 处理的产量较 FSN3 分别降低了 26.25% ($P < 0.05$)、2.01%; CSN2 处理的产量较 CSN3 高 4.90%, CSN1、CSN4 处理的产量较 CSN3 处理分别降低了 23.42% ($P < 0.05$)、3.86%。这表明适当减氮不但会降低 CH₄ 的累积排放量,还会有增产的效果,但过度减氮使产量显著降低;增施氮肥不但使 CH₄ 累积排放量显著增加 ($P < 0.05$),还会造成减产;两种灌溉模式相比,CSN2 处理的减肥增产效果高于 FSN2 处理,而且减排效果明显。CSN2 处理较 FSN3 处理的 CH₄ 累积排放量降低了 62.71% ($P < 0.01$),产量增加了 21.16% ($P < 0.05$)。综合碳信用、氮肥成本、产量收益三者计算出总收益,可以看出 CSN2 处理总收益平均高出其他处理 23.39% ($P < 0.05$),说明控灌下适当减氮有利于增产创收。

CH₄ 排放通量与各因子的相关性分析如表 3 所示,CH₄ 排放通量与各因子的方差分析如表 4 所示。

表 2 各处理的产量与减排效益

Tab.2 Production and emission reduction benefits of each treatment

处理	CH ₄ 累积排放量/ (kg·m ⁻²)	CO ₂ 排放当量 ^[19-20] / (kg·m ⁻²)	CO ₂ 减排量/ (kg·m ⁻²)	碳信用/ (元·m ⁻²)	氮肥成本/ (元·m ⁻²)	产量/ (kg·m ⁻²)	产量收益/ (元·m ⁻²)	总收益/ (元·m ⁻²)
FSN1	5.96 × 10 ^{-2d}	1.49 ^d	63.49 ^e	3.47 ^d	0.26	52.60 ^e	526.0 ^e	529.21 ^e
FSN2	6.92 × 10 ^{-2c}	1.74 ^c	39.31 ^f	2.15 ^e	0.33	72.66 ^c	726.6 ^c	728.42 ^e
FSN3	8.50 × 10 ^{-2b}	2.12 ^b	0 ^g	0 ^f	0.38	71.32 ^c	713.2 ^c	712.82 ^{cb}
FSN4	9.88 × 10 ^{-2a}	2.47 ^a	-34.69 ^h	-1.90 ^g	0.41	69.89 ^c	698.9 ^c	696.59 ^b
CSN1	2.64 × 10 ^{-2f}	0.66 ^g	146.42 ^a	8.01 ^a	0.26	63.08 ^d	630.8 ^d	638.55 ^d
CSN2	3.17 × 10 ^{-2e}	0.79 ^f	133.27 ^a	7.29 ^a	0.33	86.41 ^a	864.1 ^a	871.06 ^a
CSN3	3.66 × 10 ^{-2e}	0.91 ^e	121.02 ^{ab}	6.62 ^b	0.37	82.37 ^b	823.7 ^b	829.94 ^b
CSN4	4.92 × 10 ^{-2de}	1.23 ^{de}	89.44 ^b	4.89 ^c	0.41	79.19 ^b	791.9 ^b	796.38 ^b

注:CO₂ 减排量为各处理较 FSN3 处理的 CO₂ 减少量,同列不同字母表示处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 3 可以看出,土壤铵态氮含量、土壤 E_h 、秸秆腐解率皆与 CH_4 排放通量有显著的相关性,随着土壤铵态氮含量、秸秆腐解率的增加, CH_4 排放通量显著增加;随着土壤 E_h 的增加, CH_4 排放通量显著降低。这表明土壤铵态氮含量、土壤 E_h 、秸秆腐解率皆是影响 CH_4 排放的重要因素;施氮量与灌溉模式及二者的交互作用对 CH_4 排放有着决定性影响。

表 3 CH_4 排放通量与各因子的相关性分析
Tab. 3 Correlation analysis of CH_4 emission flux and various factors

参数	铵态氮含量	硝态氮含量	土壤 E_h	秸秆腐解率
相关系数	0.47 *	-0.12	-0.76 *	0.62 *

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著,下同。

表 4 CH_4 排放通量与各因子的方差分析
Tab. 4 Variance analysis of CH_4 emission flux and each factor

	CH_4 排放通量	铵态氮 含量	硝态氮 含量	土壤 E_h	秸秆 腐解率
施氮量	**	**	*	*	*
灌溉模式	**	*	*	**	*
施氮量 $\times$ 灌溉模式	**	**	*	*	*

注: ** 表示在 0.01 水平上相关性显著。

3 讨论

3.1 秸秆还田下水氮耦合对水稻产量的影响

秸秆直接还田不仅可以减少因秸秆焚烧而产生的环境污染,还可以提高土壤肥力,被认为是秸秆综合利用中最经济有效的方式,也是一种有效的农田培肥措施^[21]。董林林等^[22]发现,秸秆还田还可以增加土壤铵态氮含量、硝态氮含量,在原有施氮水平上施加秸秆,会使土壤含氮量增加,再加上黑土较一般地区土壤肥力偏高,若不调整施肥量,秸秆还田将导致该地区土壤铵态氮含量过高。

水稻虽是喜铵作物,但大量研究^[23-25]表明,过量氮素会对植物生长造成不利影响,最终导致作物减产。这与本研究增施氮肥的结果一致,在常规施肥量的基础上,增施氮肥虽然使土壤氮素含量显著增加,但造成了小幅减产。有研究^[26]表明,排水良好的稻田连续秸秆还田 3 年,减施氮肥不会造成水稻减产,而且在连续还田期间减氮有增产的作用。本试验地已进行了两年的秸秆还田试验,在常规灌溉模式下,施氮 110 kg/hm² 的水稻产量较施氮 124 kg/hm² 的水稻产量仅高了 1.89%。可以看出,秸秆还田下传统的灌溉模式减氮效果并不明显。

要想在减氮的条件下使水稻产量显著增加,就需要提高水稻对土壤氮素的利用率。张绍文等^[27]

认为控制灌溉土壤通透性较好,根区溶氧能力增强,能够使水稻保持较高的根系活力,有利于促进水分及养分的高效吸收利用,进而提高氮肥利用率。本试验在控制灌溉下施氮 110 kg/hm²,水稻产量较常灌常氮增加了 17.46%,说明控灌下减施氮肥的增产效果较淹灌模式明显。而在两种灌溉模式下,施氮 85 kg/hm²使水稻产量均显著降低,说明秸秆还田后适量减氮才能达到增产的效果,过量减氮会造成严重减产。因此,在控灌下施氮 110 kg/hm²时增产效果最好。

3.2 秸秆还田下水氮耦合对稻田 CH_4 排放的影响

近年来,众多学者^[6,28-29]通过水氮调控对寒地稻田 CH_4 排放的影响进行大量研究,而关于寒地黑土秸秆还田对 CH_4 排放影响的研究较少,龚振平等^[30]认为,秸秆还田促进了寒地 CH_4 的排放,但并没有提出具体减排措施。本试验在秸秆还田的基础上,通过水氮调控来实现 CH_4 的减排。

本试验发现,水氮调控可以影响秸秆腐解率、土壤铵态氮含量、硝态氮含量、土壤 E_h 等,这些因素对 CH_4 排放的影响密切相关。秸秆直接还田后,需要通过土壤微生物分解释放养分,本试验发现,随着施氮量的增加,秸秆腐解率显著提高,这与龚振平等^[18]的研究结果一致。但并不是秸秆腐解越快,养分释放越多越好,秸秆腐解需要消耗大量氧气,增强了土壤的厌氧环境,为土壤提供丰富的有机还原性物质,土壤 E_h 随之降低。通过相关性分析发现,土壤 E_h 与 CH_4 排放通量呈负相关,即土壤 E_h 越低, CH_4 排放通量越高,施氮量越高, CH_4 排放通量越高。但王毅勇等^[31]认为,氮肥施用使水稻植株的呼吸作用增强,通过呼吸输入到根系的氧气供应增加,使稻田 CH_4 的氧化加强,从而降低了 CH_4 排放。这可能是因为,本试验进行了秸秆还田,秸秆腐解消耗的氧气量高于根系供应的氧气量,导致 CH_4 排放量增加。因此,本试验在常规施氮的基础上减量施氮,可以减缓秸秆腐解速率,降低有机还原性物质的积累,提高土壤 E_h ,进而减少 CH_4 排放。而过量减氮虽然能显著降低 CH_4 排放,但导致土壤氮素不足,造成严重减产。

水分管理对 CH_4 排放影响显著,控灌可以增加土壤通气性,减少还原性物质的积累,提高土壤 E_h ,减少 CH_4 排放。王孟雪等^[15]在本研究区通过对控灌稻田的 CH_4 排放研究发现,控灌可以显著减小稻田 CH_4 排放,较淹灌稻田 CH_4 累积排放量降低 34%。本研究发现,添加秸秆后,相同施氮量下控灌 CH_4 累积排放量较淹灌平均降低 54.29%,这可能是因为秸秆还田使淹灌 CH_4 排放增加量高于控灌,

使得控灌减排效果明显。此外,在控灌的基础上施加 110 kg/hm² 的氮素,CH₄ 累积排放量较常灌常氮减少 68.93%,还能显著提升产量,减排效益明显。因此,在寒地黑土进行秸秆还田,应采用控制灌溉的水分管理模式和施氮量为 110 kg/hm²,可以达到减排增产的效果。

4 结论

(1)相同施氮量下,控制灌溉的稻田 CH₄ 排放通量、累积排放量皆显著低于常规淹灌 ($P < 0.05$),控制灌溉较常规淹灌有显著的减排效果;随着施氮量的增加,CH₄ 排放通量、累积排放量显著增加 ($P < 0.05$),施加氮肥促进了 CH₄ 的排放。

(2)稻田 CH₄ 的排放与土壤铵态氮含量、秸秆腐解率呈显著正相关,与土壤 E_h 呈显著负相关关系;施肥与水分管理对稻田 CH₄ 的排放影响显著。

(3)与常量施氮(N3 处理)相比,两种灌溉模式下增施氮肥(N4 处理)均会降低水稻产量 ($P > 0.05$),过量减施氮肥(N1 处理)会显著降低水稻产量 ($P < 0.05$);在常规淹灌条件下适量减施氮肥(N2 处理)对水稻产量无显著影响 ($P > 0.05$),而在控制灌溉条件下适量减施氮肥可使产量显著增加 ($P < 0.05$)。

(4)在寒地黑土区进行秸秆还田,推荐灌溉模式为控制灌溉,施氮量为 110 kg/hm²,可以在实现节水增产的同时,取得最佳的减排效益。

参 考 文 献

- [1] 王娟,熊又升,徐祥玉,等. 土壤温度和氧化还原特性对冷浸田 CH₄ 排放的影响[J]. 湖北农业科学,2014,53(14):3260-3264.
WANG Juan, XIONG Yousheng, XU Xiangyu, et al. Effects of temperature and soil reducing matter on CH₄ flux from cold waterlogged paddy field[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(14):3260-3264. (in Chinese)
- [2] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京:科学出版社,2001:83-172.
- [3] 代滢芸. 2018 年黑龙江省水稻市场分析报告[J]. 黑龙江粮食,2019(5):16-21.
DAI Yingyun. Analysis report on rice market of Heilongjiang Province in 2018[J]. Heilongjiang Grain, 2019(5):16-21. (in Chinese)
- [4] 蔡祖聪,徐华,马静. 稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009:106-155.
- [5] 张忠学,陈鹏,聂堂哲,等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):210-219.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soils [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11):210-219. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181125&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025. (in Chinese)
- [6] 王长明,张忠学,吕纯波,等. 不同灌溉模式寒地稻田 CH₄ 和 N₂O 排放特征及增温潜势分析[J]. 灌溉排水学报,2019,38(1):14-20,68.
WANG Changming, ZHANG Zhongxue, LÜ Chunbo, et al. CH₄ and N₂O emission from paddy field in cold region is impacted by irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1):14-20, 68. (in Chinese)
- [7] 彭世彰,和玉璞,杨士红,等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. 农业工程学报,2013,29(8):100-107.
PENG Shizhang, HE Yupu, YANG Shihong, et al. Mitigation of methane emissions from paddy fields under controlled irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):100-107. (in Chinese)
- [8] 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等. 施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(2):128-134.
MA Yanqin, QIAN Chencheng, SUN Danping, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emissions from soil in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2):128-134. (in Chinese)
- [9] 郝小雨,马星竹,陈苗苗,等. 氮肥配施增效剂实现寒地水稻增产、提质与增效[J]. 水土保持学报,2019,33(4):175-179,307.
HAO Xiaoyu, MA Xingzhu, CHEN Miaomiao, et al. Nitrogen fertilizer combined with synergist improved yield, grain quality and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4):175-179, 307. (in Chinese)
- [10] 刘巽浩,高旺盛,朱文珊. 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- [11] 姚如男,陶卫,李成业,等. 玉米秸秆全量还田条件下氮肥运筹对晚稻产量和土壤化学及微生物特性的影响[J]. 中国稻米,2019,25(1):53-57.
YAO Runan, TAO Wei, LI Chengye, et al. Effects of nitrogen application on yield of late rice, soil chemical and microbial characteristics under the condition of full corn straw returning[J]. China Rice, 2019, 25(1):53-57. (in Chinese)
- [12] 顾福男. 秸秆还田后水稻僵苗的发生及预防对策[J]. 上海农业科技,2012(5):135.
GU Funan. Occurrence and prevention of rice seedling stiffness after straw returning to the field [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2012(5):135. (in Chinese)
- [13] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
ZHAO Shicheng, CAO Caiyun, LI Kejiang, et al. Effects of long-term straw return on soil fertility, nitrogen pool fractions and crop yields on a fluvo-aquic soil in North China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(6):1441-1449. (in Chinese)
- [14] 杜睿,王庚辰,吕达仁,等. 箱法在草地温室气体通量野外实验观测中的应用研究[J]. 大气科学,2001(1):61-70.
DU Rui, WANG Gengchen, LÜ Daren, et al. A study of chamber method for in-site measurements of greenhouse gas emissions from grassland[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001(1):61-70. (in Chinese)

- [15] 王孟雪,张忠学.适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N_2O 排放增加水稻产量[J].农业工程学报,2015,31(15):72-79.
WANG Mengxue,ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N_2O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(15):72-79. (in Chinese)
- [16] NIE Tangzhe,CHEN Peng,ZHANG Zhongxue,et al. Effects of different types of water and nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions,yield and water consumption of paddy fields in cold region of China[J]. Environmental Research and Public Health,2019,16(9):1639.
- [17] 田伟,伍延正,汤水荣,等.不同施肥模式对热区晚稻水田 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J].环境科学,2019,40(5):2426-2434.
TIAN Wei,WU Yanzheng,TANG Shuirong,et al. Effects of different fertilization modes on greenhouse gas emission characteristics of paddy fields in hot areas[J]. Environmental Science,2019,40(5):2426-2434. (in Chinese)
- [18] 龚振平,邓乃榛,宋秋来,等.基于长期定位试验的松嫩平原还田玉米秸秆腐解特征研究[J].农业工程学报,2018,34(8):139-145.
GONG Zhenping,DEGN Naizhen,SONG Qiulai,et al. Decomposing characteristics of maize straw returning in Songnen Plain in long-time located experiment[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(8):139-145. (in Chinese)
- [19] 张培栋,李新荣,杨艳丽,等.中国大中型沼气工程温室气体减排效益分析[J].农业工程学报,2008,24(9):239-243.
ZHANG Peidong,LI Xinrong,YANG Yanli,et al. Greenhouse gas mitigation benefits of large and middle-scale biogas project in China[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(9):239-243. (in Chinese)
- [20] 陈素云,吴洪生,李季,等.麦田间作大蒜减排温室气体:兼顾经济环境效益[J].西北农业学报,2017,26(6):832-839.
CHEN Suyun,WU Hongsheng,LI Ji,et al. Effects of winter wheat intercropping with garlic on wheat growth, CH_4 flux emissions and evaluation of economic and environmental benefits[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2017,26(6):832-839. (in Chinese)
- [21] 吴玉红,郝兴顺,田霄鸿,等.秸秆还田与化肥配施对汉中盆地稻麦轮作农田土壤固碳及经济效益的影响[J].作物学报,2020,46(2):259-268.
WU Yuhong,HAO Xingshun,TIAN Xiaohong,et al. Effect of straw returning combined with NPK fertilization on soil carbon sequestration and economic benefits under rice-wheat rotation in Hanzhong basin[J]. Acta Agronomica Sinica,2020,46(2):259-268. (in Chinese)
- [22] 董林林,王海侯,陆长婴,等.秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J].应用生态学报,2019,30(4):1143-1150.
DONG Linlin,WANG Haihou,LU Changying,et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2019,30(4):1143-1150. (in Chinese)
- [23] 杨晓梅,尹昌斌,李贵春,等.氮肥减量及秸秆替代过量氮肥下冬小麦/夏玉米轮作体系氮素淋失风险研究[J].中国农业资源与区划,2016,37(7):116-122.
YANG Xiaomei,YIN Changbin,LI Guichun,et al. Effects of reducing nitrogen application and replacing part of nitrogen fertilizer by crop residue on nitrogen leaching in winter wheat-summer corn system[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning,2016,37(7):116-122. (in Chinese)
- [24] 李菲菲,黄成能,谢深喜,等.施氮过量对桉柑园土壤和树体矿质养分及果实品质的影响[J].南方农业学报,2018,49(4):748-756.
LI Feifei,HUANG Chengneng,XIE Shenxi,et al. Effects of excessive nitrogen application on orchard soil and tree mineral nutrients and fruit quality of Ponkan[J]. Journal of Southern Agriculture,2018,49(4):748-756. (in Chinese)
- [25] 娄庭,龙怀玉,杨丽娟,等.在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J].中国土壤与肥料,2010(2):11-15,34.
LOU Ting,LONG Huaiyu,YANG Lijuan,et al. The effect of fertilizer ratio and rate on soil quality and crop yields in the farmland of excessive use of nitrogenous fertilizers[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2010(2):11-15,34. (in Chinese)
- [26] 王秋菊,焦峰,刘峰,等.草甸白浆土稻秆氮利用效率及氮素调控对水稻产量的影响[J].农业工程学报,2019,35(11):86-94.
WANG Qiuju,JIAO Feng,LIU Feng,et al. Nitrogen utilization efficiency of rice straw and effect of nitrogen regulation technology on yield in meadow albic soil[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(11):86-94. (in Chinese)
- [27] 张绍文,何巧林,王海月,等.控制灌溉条件下施氮量对杂交籼稻 F 优 498 氮素利用效率及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):82-94.
ZHANG Shaowen,HE Qiaolin,WANG Haiyue,et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen use efficiency and grain yield of indica hybrid rice F You498 under controlled intermittent irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers,2018,24(1):82-94. (in Chinese)
- [28] 徐丹.寒地黑土稻田水肥管理与温室气体排放关系研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
XU Dan. Studies on relationship between water and fertilizer managements and greenhouse gas emissions from black soil rice field in cold area[D]. Harbin:Northeast Agricultural University,2016. (in Chinese)
- [29] 王孟雪,张忠学,吕纯波,等.不同灌溉模式下寒地稻田 CH_4 和 N_2O 排放及温室效应研究[J].水土保持研究,2016,23(2):95-100.
WANG Mengxue,ZHANG Zhongxue,LÜ Chunbo,et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy field and their GWPs research in different irrigation modes in cold region[J]. Research of Soil and Water Conservation,2016,23(2):95-100. (in Chinese)
- [30] 龚振平,颜双双,闫超,等.寒地水稻秸秆还田和温度对稻田甲烷排放的影响[J].东北农业大学学报,2015,46(12):8-15.
GONG Zhenping,YAN Shuangshuang,YAN Chao,et al. Effect of rice straw retention and temperature on methane emission in rice field in cold region[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2015,46(12):8-15. (in Chinese)
- [31] 王毅勇,陈卫卫,赵志春,等.三江平原寒地稻田 CH_4 、 N_2O 排放特征及排放量估算[J].农业工程学报,2008,24(10):170-176.
WANG Yiyong,CHEN Weiwei,ZHAO Zhichun,et al. Characteristics and estimation of CH_4 、 N_2O emissions from cold paddy field in the Sanjiang Plain[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(10):170-176. (in Chinese)