中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响

李威，成永旭，孙颖，刘小飞，刘明明，陈焕根，李嘉尧

引用本文:
李威, 成永旭, 孙颖, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1051–1060.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200056

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响

Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization

中国生态农业学报. 2016, 24(12): 1633–1642 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160357

秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响

Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils

中国生态农业学报. 2016, 24(11): 1456–1463 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160405

秸秆还田对关中地区麦玉复种体系土壤氨排放的影响

Effect of straw returning on ammonia emissions from soil in a wheat–maize multiple cropping system in the Guanzhong region, China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(4): 513–522 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190627

小麦–玉米秸秆连续还田对土壤有机质红外光谱特征及氮素形态的影响

Effect of continuous wheat and maize straw incorporation on soil nitrogen and Fourier transform infrared spectroscopic (FTIR) characterization of soil organic matter

中国生态农业学报. 2015(8): 973–978 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150220

有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响

Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat–rice system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 405–412 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190617

中国生态农业学报(中英文) 2020 年 7 月 第 28 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2020, 28(7): 1051−1060

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200056

李威, 成永旭, 孙颖, 刘小飞, 刘明明, 陈焕根, 李嘉尧. 秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 1051−1060

LI W, CHENG Y X, SUN Y, LIU X F, LIU M M, CHEN H G, LI J Y. Effects of nitrogen fertilizer and returning straw on aquaculture water, soil nutrients, and enzyme activity in rice-crayfish fields during winter and spring[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 1051−1060

秸秆还田配施氮肥对冬春季稻虾田水质、土壤养分及酶活性的影响*

李 威[1], 成永旭[1], 孙 颖[1], 刘小飞[1], 刘明明[1], 陈焕根[2], 李嘉尧[1**]

(1. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心/上海海洋大学上海水产养殖工程技术研究中心/上海海洋大学农业部淡水水产种质资源重点实验室 上海 201306; 2. 江苏省渔业技术推广中心 南京 210036)

摘 要: 为探究稻虾种养模式冬春季节合理的秸秆还田方式, 本研究以秸秆还田配施氮肥调节 C/N 为切入点, 在 2017 年 12 月—2018 年 5 月通过田间试验, 设秸秆不还田不施氮肥(对照, CK)、秸秆还田 C/N 为 35(S)、秸秆还田配施氮肥 C/N 为 25(SN1)、秸秆还田配施氮肥 C/N 为 15(SN2)以及单施氮肥处理(N1)。探讨秸秆还田不同 C/N 对冬春季稻虾田养殖水体、土壤养分及酶活性的影响。结果表明: 1)CK 处理后期的水体总磷含量最低, 各处理水体总氮含量在还田前期变化幅度不大; 不同处理水体铵态氮含量低于克氏原螯虾安全耐受限度。2)秸秆还田后, SN2 处理显著增加了土壤有机质含量, 同时土壤硝态氮含量较还田前增加 240%; 秸秆还田降低了土壤容重, SN2 处理组容重最低。3)N1 和 SN2 处理提高了土壤多酚氧化酶活性, 其中 SN2 处理组酶活性最高。在 3 种秸秆还田处理中, SN2 处理土壤脲酶活性高于其他处理, N1 处理前期表现出较高酶活性, 后期开始降低。综上, 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 为 15 在稻虾田土壤养分含量、酶活性等方面优于其他处理。

关键词: 稻虾种养; 碳氮比; 秸秆还田; 氮肥; 土壤酶

中图分类号: S365 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Effects of nitrogen fertilizer and returning straw on aquaculture water, soil nutrients, and enzyme activity in rice-crayfish fields during winter and spring*

LI Wei[1], CHENG Yongxu[1], SUN Ying[1], LIU Xiaofei[1], LIU Mingming[1], CHEN Huangen[2], LI Jiayao[1**]

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University / Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University / Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Fisheries Technology Extension Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

* 国家重点研发计划课题(2019YFD0900304)、安徽省中央引导地方科技发展专项资金(201907d06020008)、农业农村部和国家发改委产业强镇项目(发改农经 2019-245)、上海市高水平大学建设研究项目(A1-2801-18-1003)和上海市水产高效生态养殖研究与支撑平台能力提升(A1-3201-19-3003)资助

** 通信作者: 李嘉尧, 主要从事稻渔种养模式和虾蟹类营养饲料研究。E-mail: jy-li@shou.edu.cn
李威, 主要从事稻虾综合种养模式中秸秆还田技术的研究。E-mail: leewei1226@163.com

收稿日期: 2020-02-01 接受日期: 2020-03-06

* This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFD0900304), the Special Fund for Centrally-guided Local Science and Technology Development in Anhui Province (201907d06020008), the Industrial Strong Town Project of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs and the National Development and Reform Commission of China (2019-245), Shanghai High-level University Construction Research Project (A1-2801-18-1003), and the Research on Efficient Ecological Aquaculture of Aquatic Products and Improvement of Supporting Platform Capacity in Shanghai (A1-3201-19-3003).

** Corresponding author, E-mail: jy-li@shou.edu.cn

Received Feb. 1, 2020; accepted Mar. 6, 2020

Abstract: The integrated rice-crayfish breeding model is an ecological agriculture model that combines paddy field plantation and crayfish (*Procambarus clakii*) cultivation. This model both guarantees food production and increases economic benefits. At present, research relating to this model is focused on the efficiency of crayfish culture technology, while information regarding straw resource utilization under this model has not been reported. Rice straw is rich in nitrogen, phosphorus, and potassium. However, if improperly handled and directly immersed in water, its degradation process will cause deterioration of water quality and pollution of soil. Therefore, returning straw to the field not only effectively uses resources, but also avoids the risks caused by random straw disposal. In order to explore the optimal model for returning straw during winter and spring (when crayfish are breeding), we carried out a field experiment to study the effects of different C/N ratios of straw returning on cultured water, soil nutrients, and enzyme activity in Dec. 2017 to May 2018. The experiment consisted of five treatments: straw removal without fertilizer (CK), straw returned without N fertilizer (C/N ratio of 35∶1, S), straw returned with N fertilizer (adjusted C/N ratio of 25∶1, SN1), straw returned with N fertilizer (adjusted C/N ratio of 15∶1, SN2), and N fertilizer without straw returned (N1). The results showed that total phosphorus (TP) content was the lowest in the CK treatment at the later stage of straw returning period. The total N content in each period was the lowest in CK treatment, followed by SN2 treatment. The ammonia nitrogen (NH_4^+-N) content in the treated water was lower than the safe tolerance limit of the crayfish. Additionally, the soil organic matter content increased under straw returning; the most significant result was obtained in SN2 treatment, with an increase of 56.1% compared to before the field experiment. Soil nitrate nitrogen (NO_3^--N) content in SN2 treatment increased by 240% compared to that before straw returning. Returning straw reduced bulk density of soil. The SN2 treatment recorded the lowest bulk density overall. Finally, we found that N1 and SN2 treatments could increase soil polyphenol oxidase activity; activity was highest in SN2 treatment group. Among three straw returning treatments, soil urease activity in SN2 treatment was lower than that in other treatments only in the first month after returning to the field. N1 treatment showed higher enzyme activity in the early experimental stage and began to decrease in the later stage. Overall, the results suggest that an optimal C/N ratio for returning straw with N fertilizer was 15∶1, in terms of soil nutrient content and enzyme activity.

Keywords: Rice-crayfish breeding; C/N ratio; Straw returning; N fertilizer; Soil enzyme

稻虾综合种养模式属于一种稻田种养结合的生态农业模式，即在稻田中养殖克氏原螯虾(小龙虾，*Procambarus clakii*)，近年来发展迅速，获得较好的效益。目前，对于该模式的研究主要集中于小龙虾的养殖技术[1]、营养品质[2]以及该模式下土壤微生物群落组成的变化[3]，但对稻虾种养生态系统中的秸秆循环利用对土壤理化性质及酶活性方面鲜有报道。根据中国小龙虾产业发展报告[4]，2018 年稻虾种养模式养殖面积为 84 万 hm^2，因此产生的秸秆资源非常丰富。秸秆还田作为改善土壤环境和提高土壤肥力的一种重要方式已经被广泛认可[5-6]。已有研究表明，在单独种植农作物的土壤实施秸秆还田可以显著提高土壤全氮、全钾含量，增加腐殖质含量，提高土壤肥力[7]；与秸秆不还田处理相比，秸秆还田可以增加土壤脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶的活性[8]。土壤酶作为土壤组分中最活跃的有机组分之一，与营养元素转移、有机质的矿化分解、能量转移等密切相关[9]。脲酶是一种专一的水解酶，可以把尿素分解为铵态氮，利于土壤有机态氮向有效态氮转化，被植物吸收利用[10]。土壤多酚氧化酶参与土壤中芳香族化合物的转化，在腐殖化过程起着重要作用，可以修复土壤环境[11]。

但是禾本科植物秸秆的 C/N 一般较高，土壤微生物自身的 C/N 比较低，因此单独还田会造成微生物与作物争夺土壤无机氮的现象，由于秸秆自身的组成成分不易改变，可以通过添加一定的氮素促进秸秆的分解，提高土壤无机氮含量[12]。因此秸秆还田配施氮肥不仅可以减少秸秆分解过程中微生物对氮素的固持[13]，更能增加土壤速效养分和微生物量碳、氮[14]。在中国，氮肥的使用量通常大于作物的需求，例如在中国东部和东南部以及华北平原的传统农业中，氮肥的年施用量为 550~600 $kg·hm^{-2}$，几乎是最高粮食产量和氮素吸收所需最低施用量(约 180 $kg·hm^{-2}$)的 3 倍[15-16]，大部分氮素通过渗漏淋溶被损失掉。虽然研究表明秸秆还田时要配施一定的氮肥，但是秸秆中氮素资源丰富，实行秸秆还田可以减少氮肥施用量，部分解决过量施用氮肥引发的环境污染问题[17]。同时有研究表明，秸秆还田下配施适量的氮肥可以提高水稻对氮肥的利用率，减少氮肥的损失[18]。

由于稻虾种养模式周年长期淹水，秸秆泡田处理和盲目施用化肥不仅造成田面水污染、污染土壤环境，而且增加养殖成本，目前已成为该模式的主要生态问题[19-20]。因此充分利用秸秆资源，改变氮肥的施用量，是稻虾种养模式稳定长期发展的关键措施之一。本试验以秸秆还田配施氮肥调整 C/N 为切入点，通过调节秸秆还田输入的 C/N 对稻虾冬春季养殖水体、土壤养分以及土壤酶活性的影响，旨

在为稻虾种养冬春季合理秸秆还田提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验在上海海洋大学崇明基地(31°34′N, 121°33′E)进行, 地处上海市崇明区竖新镇。试验地属于亚热带海洋性季风气候, 温和湿润, 年均日照数 2 094.2 h, 年平均气温 15.2 ℃, 无霜期 229 d, 雨水充沛, 年平均降雨量 1 025 mm, 试验期间试验地气温、水温和降雨情况如图 1 所示。

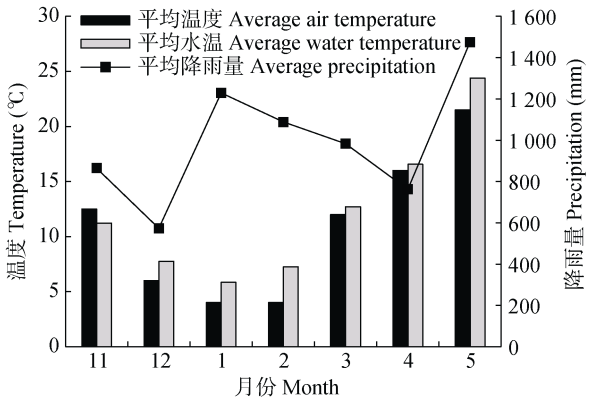

图 1　试验地 2017—2018 年逐月气温、水温、降雨量
Fig. 1　Monthly air temperature, water temperature, and precipitation in the test site from 2017 to 2018

供试土壤为砂壤土, 试验开始前 0~20 cm 土层土壤总氮 0.62 g·kg^{-1}, 总磷 0.33 g·kg^{-1}, 有机质 5.58 g·kg^{-1}, 速效磷 4.31 mg·kg^{-1}, 速效钾 18.11 mg·kg^{-1}, 铵态氮 4.43 mg·kg^{-1}, 硝态氮 3.10 mg·kg^{-1}, pH 6.7。供试水稻品种为‘南粳 46’。试验所用氮肥均为尿素(N, 46.4%)。

1.2　试验设计

试验于 2017—2018 年稻虾种养冬春季进行, 采取田间小区试验, 小区面积 125 m^2(12.5 m×10 m), 小区四周用水泥砌围, 之间隔着 1 m 宽的土埂。按小区面积的 10%在四周开“回”字沟, 环沟深度为 0.6 m, 上宽 0.5 m, 下宽 0.3 m。共设置 5 种处理: 秸秆不还田不施氮肥(CK)、单施氮肥(N1)、秸秆还田不施氮肥(S, 碳氮比为 35)、秸秆还田配施氮肥(SN1, 碳氮比为 25)、秸秆还田配施氮肥(SN2, 碳氮比为 15)。水稻于 2017 年 11 月 9 日收割完毕, 秸秆还田量为 1 500 kg·hm^{-2}, 秸秆经自然风干后, 粉碎成 3~5 cm 的段状, 于 2017 年 12 月 20 日铺盖于土壤表面, 氮肥均匀泼洒在水稻种植平台上, 各处理统一浅耕 15 cm, 加水保持水位在平台以上 30 cm, 试验塘水位明显下降时, 加水至统一水位线, 冬季水位线在平台以上 30 cm, 春季水位线在平台以上 40 cm。每个处理 3 个重复, 不同处理小区随机排列, 每个小区均有独立的进排水口, 保证不同处理的水环境相互独立。在每个试验小区环沟内由秋季保留下的喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)面积占环沟总面积的 30%左右, 待春季生长速度加快时及时打捞控制面积。2018 年 3 月 20 日, 除对照处理外每个试验塘放养 5 kg 平均规格为(5±2) g 的幼虾。试验期间, 每天傍晚 17:00 按小龙虾体重的 5%投喂商业配合饲料(浙江澳华饲料有限公司), 根据天气状况和小龙虾体重变化灵活改变投喂量。饲料主要营养成分为: 粗蛋白(干重)28.60%、小麦粉 28.3%、菜粕 27.5%、花生粕 8%、豆粕 8%、棉粕 6%、总脂(干重)4.34%、鱼粉 4%, 试验结束后收获成虾。具体试验设计如表 1 所示。

表 1　各试验处理的秸秆和氮肥施用量及 C/N
Table 1　Application rates of rice straw and urea, and C/N ratios of the experimental treatments

处理 Treatment	代码 Code	秸秆 Straw (kg·hm^{-2})	氮 Nitrogen (kg·hm^{-2})	折合成尿素 Converted to urea (kg·hm^{-2})	碳氮比 C/N ratio
对照 Control	CK	—	—	—	—
单施氮 Single N fertilizer	N1	—	13	28	—
单施秸秆 Single straw	S	1 500	—	—	35
秸秆还田配施氮肥 1 Straw return with N fertilizer 1	SN1	1 500	13	28	25
秸秆还田配施氮肥 2 Straw return with N fertilizer 2	SN2	1 500	22	47	15

1.3　样品采集与测定

1.3.1　样品采集

在 2017 年 12 月 14 日、2018 年 1 月 21 日、2 月 25 日、3 月 30 日、4 月 16 日、5 月 20 日采集土壤和水质样品。每个小区按“五点法”采集土壤表层土(0~20 cm), 装入自封袋, 带回实验室剔除可见的动、植物残体和石块等杂质, 自然阴干后过 0.425 mm 筛网。一部分用于测定土壤理化性质, 一部分用于测定土壤酶活性。用环刀采集土壤, 放入烘箱中, 在 100 ℃下烘干至恒重, 利用土壤干重和湿重的差值计算容重。在环沟四周每条边的中心点采集水质样品, 每个点用采水器采集距离水面

30 cm 水体 500 mL；一部分水样用于测定水体总氮(TN)、总磷(TP)浓度，一部分水样经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后用于测定铵态氮(NH_4^+-N)、亚硝态氮(NO_2^--N)浓度。

1.3.2 测定方法

水体 TN 采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定，水体 TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法测定，NH_4^+-N、NO_2^--N 采用全自动间断化学分析仪(CleverChem380，德国)测定。水体 pH、水温、溶解氧(DO)采用哈希多参数水质测量仪(HQ40d，美国)测定。试验中所用试剂、药品均购自国药集团化学试剂有限公司。

土壤 pH 采用电位测定法(土水比为 1∶2.5)测定，土壤 TN 采用半自动凯氏定氮蒸馏法测定，土壤速效钾采用火焰光度法测定，土壤有机质、铵态氮、硝态氮、TP、速效磷、脲酶、酸性蛋白酶、纤维素酶、多酚氧化酶采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒测定。其中有机质采用重铬酸钾容量法、铵态氮采用靛酚蓝比色法、硝态氮采用酚二磺酸比色法、土壤 TP 和速效磷采用钼锑抗比色法、脲酶采用靛酚蓝比色法、酸性蛋白酶采用茚三酮比色法、纤维素酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定。

1.4 数据分析与处理

所有试验数据均采用平均值±标准误差表示。采用 Microsoft Excel 2016 软件处理数据和做图，用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、Person 相关性分析，利用 Duncan 法进行组间差异性分析，差异显著性水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对养殖水体 TN、TP、NH_4^+-N 动态变化的影响

在整个试验期间，养殖水体的 pH 为 7.45~8.64，温度为 4.90~28.7 ℃，溶氧为 2.37~16.95 mg·L^{-1}。各处理组 NO_2^--N 浓度很低，小于 0.005 mg·L^{-1}，对小龙虾生长无影响，可忽略不计。水体的 TN、TP、NH_4^+-N 的变化情况如图 2 所示。试验期间，除 4 月份 SN1 处理 NH_4^+-N 浓度较高外，其他采样时期 SN1、SN2 处理 NH_4^+-N 浓度均低于 N1、S 处理。CK 组水体 NH_4^+-N 浓度变化幅度不大且保持较低水平，不同处理 6 次采样的 NH_4^+-N 浓度平均值大小为 S>N1>SN1>SN2>CK。S、SN1、SN2 处理水体 TN 浓度在 4、5 月份采样中随着还田 C/N 降低呈现降低的趋势，S、SN1 在 3 月份以后开始快速上升，在最后一次采样中达最大值。由图 2C 可以看出，水体 TP 浓度在刚还田后骤然降低然后缓速升高，在 3 月份以后各处理快速升高，在最后两次采样中，CK 组水体 TP 浓度低于其他处理组。

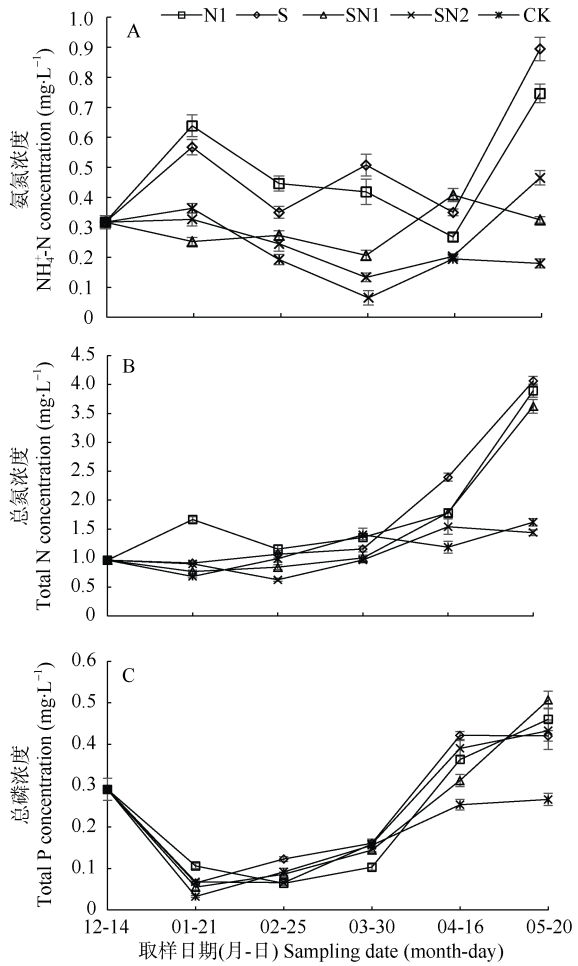

图 2 秸秆还田期间不同 C/N 比处理下的稻虾田水体 NH_4^+-N(A)、总氮(B)和总磷(C)浓度

Fig. 2 Concentrations of NH_4^+-N (A), total nitrogen (TN, B) and total phosphorus (TP, C) in water of rice-crayfish fields under different treatments during the straw returning period

2.2 秸秆还田配施氮肥对土壤养分含量的影响

秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤速效磷的影响表现为 SN1>SN2>S>CK>N1，SNI 处理的土壤速效磷含量显著高于其他处理，而 N1 处理显著低于其他处理，表明适宜的秸秆还田 C/N 可以显著增加土壤速效磷含量(图 3A)。

由图 3B 可以看出，不同秸秆还田处理对土壤有机质的影响差异显著，各处理均高于 CK 处理。伴随着秸秆还田配施氮肥调节 C/N 的降低，有机质呈现

先降低后升高的趋势, SN2 处理显著高于 S、SN1 处理组。与还田前土壤有机质含量相比较, 除 CK 处理外, 其他处理都提高了有机质的含量, 其中 SN2 处理增加了 56.1%。

不同秸秆还田处理还会影响土壤铵态氮和硝态氮含量。S、SN1、SN2 处理土壤硝态氮含量均高于 N1 处理, 且 3 个处理 C/N 越低土壤硝态氮含量越高, 其中 SN2 处理组显著高于 S、SN1 处理, 较还田前增加 240%, 但与 CK 处理无显著差异(图 3C)。而 S、SN1、SN2 处理土壤铵态氮含量虽然显著高于 N1 处理, 但是随还田 C/N 降低而降低, S、SN1、SN2 处理间无显著差异(图 3D)。不同秸秆还田处理土壤无机氮含量随 C/N 降低而升高, SN2 处理组土壤无机氮含量最高, 与 CK 无显著差异, 各处理组均显著高于 N1(图 3E)。

2.3　秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤容重动态变化的影响

秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤容重的影响如图 4 所示。整个试验期内, 随着还田时间的延长, SN2 处理土壤容重一直在下降, 其他几种处理呈现先下降后上升再下降的规律性变化。CK 处理在各采样期内均高于其他 4 种处理, N1 处理在 2 月 25 日之后呈现缓慢升高的趋势。秸秆还田的 3 个处理中, S、SN1 处理的土壤容重均高于 SN2 处理。这 5 种处理在各个时期相较于还田前, 土壤容重都处于下降状态。从试验结果来看, 稻虾田进行秸秆还田可以降低土壤容重。

2.4　秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤酶活性动态变化的影响

秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤脲酶活性的影响如表 2 所示。N1 处理在采样前期表现出较高的脲酶活性, 但是在 4、5 月份脲酶活性急剧下降显著低于其他处理。在试验期间, S 处理组土壤脲酶活性一直高于 CK 处理, 表明秸秆单独还田可以提高土壤脲酶活性。总体来看, 秸秆还田配施氮肥处理提高了 2 月份、3 月份、4 月份采样时的土壤脲酶活性, 其中以 SN2 处理组效果最好。

在整个还田试验期间, SN1 处理土壤酸性蛋白酶活性波动较小, 其他各处理 3、4 月份酶活性较高(表 2)。3 月份之前秸秆还田配施氮肥处理土壤酸性蛋白酶活性高于秸秆不还田处理, 3 月份 SN2 处理显著高于其他处理, 3 月份以后 S、SN1 处理均低于对照处理。S、SN1 和 SN2 处理相比, 除 2 月份采样外, 其余采样时期 SN2 处理均高于其他两个处理组, 并且在 3—5 月份采样中显著高于 S、SN1 处理。

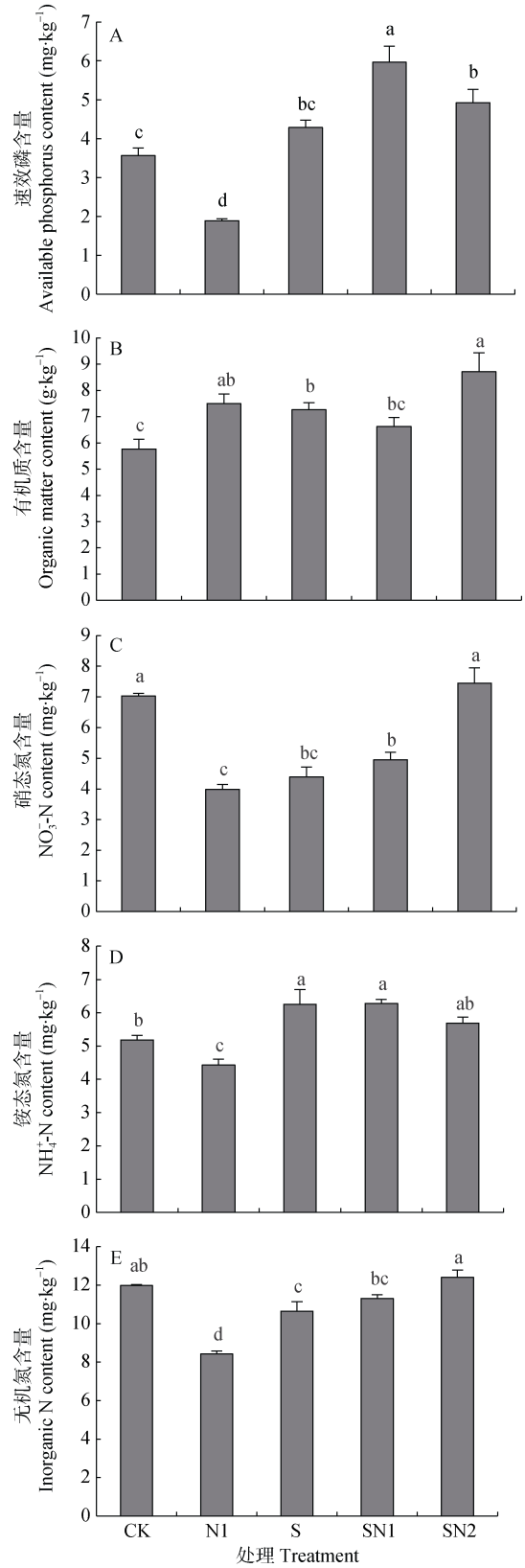

图 3　秸秆还田配施氮肥调整 C/N 对稻虾田土壤养分的影响

Fig. 3　Effects of straw returning with different C/N ratios on soil nutrients contents of rice-crayfish fields

不同小写字母表示不同处理在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

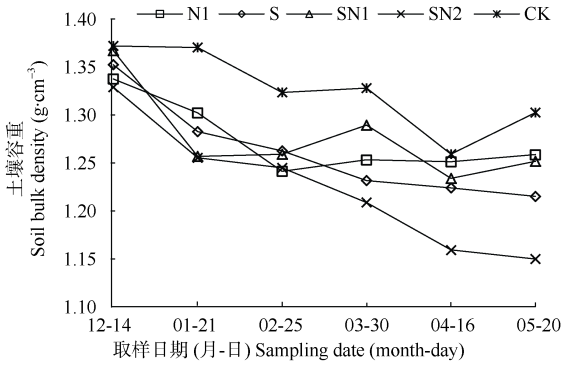

图 4 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对稻虾田土壤容重的影响

Fig. 4 Effects of straw returning with different C/N ratios on soil bulk density of rice-crayfish fields

不同处理土壤纤维素酶活性表现为，N1 处理在 1 月份纤维素酶活性达最大值，之后酶活性开始降低(表 2)。秸秆还田的 3 个处理(S、SN1、SN2)，前期随着 C/N 的降低，土壤纤维素酶活性呈升高的趋势，在 4 月份以后 SN1 处理低于 S、SN2 处理。SN1、SN2 处理纤维素酶活性在 4 月份之前均高于 CK 处理，其中在 3 月份的采样中 SN1、SN2 处理较 CK 处理分别提高 55.15%、11.32%，4 月份之后 CK、SN1、SN2 处理纤维素酶活性大小为 SN2>CK>SN1。综合各采样时期的纤维素酶活性来看，SN2 处理酶活性的平均值略高于其他处理。

不同处理土壤多酚氧化酶活性，在试验期内表现出了相同的变化规律(表 2)：先升高后降低再升高。N1、SN1、SN2、CK 处理在 2 月份酶活性达到峰值，并且 SN2 显著高于其他处理。在 S、SN1、SN2 处理中，除去 4 月份的采样中 SN2 处理酶活性低于 SN1 处理，在其他时期内，随着不同秸秆配施氮肥调节 C/N 值的降低，多酚氧化酶活性呈现升高的趋势，并且 SN2 处理显著高于其他处理。在整个试验期内，N1 处理一直保持较高的酶活性，仅次于 SN2 处理，表明 N1 处理和 SN2 处理能提高土壤多酚氧化酶活性。

3 讨论

3.1 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对养殖水体的影响

本试验水体 TN 浓度在 12 月份至 3 月份变化趋势不明显，也有文献表明在秸秆还田过程中水体铵态氮和总氮含量在 8~10 d 之后趋于稳定[21]。钟君伟

表 2 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤酶活性的影响

Table 2 Effects of straw returning with different C/N ratios on soil enzymes activities of rice-crayfish fields

土壤酶 Soil enzyme	处理 Treatment	取样日期(月-日) Sampling date (month-day)				
		01-21	02-25	03-30	04-16	05-20
脲酶活性 Urease activity ($\mu g \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	N1	13.94±1.57a	9.71±1.03bc	7.86±0.59c	2.53±0.24d	3.72±0.43c
	S	15.80±0.52a	7.60±0.53c	11.97±0.46ab	13.67±0.38a	9.59±0.26a
	SN1	9.35±0.39b	12.70±1.10b	9.29±0.87bc	11.50±0.38b	8.59±0.36a
	SN2	7.53±0.51b	18.88±1.86a	13.72±1.15a	14.38±0.99a	6.78±0.42b
	CK	15.47±1.41a	6.22±0.66c	8.86±1.14c	7.36±0.72c	9.35±0.57a
酸性蛋白酶活性 Acidic protease activity ($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	N1	0.92±0.01c	0.91±0.05b	3.82±0.18b	3.01±0.11a	1.26±0.09bc
	S	1.46±0.07a	0.76±0.05b	1.40±0.09c	1.57±0.09cd	1.11±0.08c
	SN1	1.20±0.07b	1.23±0.01a	1.10±0.08c	1.23±0.08d	1.26±0.06bc
	SN2	1.59±0.08a	1.19±0.08a	5.15±0.20a	2.03±0.15b	2.69±0.16a
	CK	0.45±0.02d	0.94±0.07b	1.17±0.07c	1.88±0.12bc	1.53±0.12b
纤维素酶活性 Cellulase activity ($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	N1	10.10±0.72ab	9.30±0.61a	9.10±0.20a	8.70±0.41b	9.30±0.57b
	S	7.56±0.63c	9.23±0.59a	9.83±0.58a	9.02±0.26b	11.30±0.69a
	SN1	8.90±0.41bc	9.36±0.48a	13.70±0.08a	7.15±0.43c	9.18±0.64ab
	SN2	11.10±0.80a	9.90±0.46a	9.83±0.81b	11.80±0.41a	10.25±0.41ab
	CK	8.83±0.46bc	9.03±0.13a	8.83±0.17b	8.60±0.35b	9.80±0.61ab
多酚氧化酶活性 Polyphenol oxidase activity ($mg \cdot d^{-1} \cdot g^{-1}$)	N1	24.14±0.99a	32.82±0.58b	27.52±0.38a	23.16±0.99ab	26.26±0.41b
	S	20.12±0.42b	23.80±0.32d	24.06±0.28b	20.45±0.58c	24.82±0.30b
	SN1	21.62±0.81b	28.22±0.82c	24.02±0.75b	23.62±0.94a	26.45±1.00b
	SN2	25.12±0.96a	35.68±0.96a	27.90±0.29a	20.76±0.69bc	34.16±1.98a
	CK	21.26±0.22b	25.78±0.91d	25.06±0.66b	20.38±0.32c	23.88±0.91b

同列不同小写字母表示处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments at $P < 0.05$.

等[22]通过对克氏原螯虾进行急性攻毒试验发现，克氏原螯虾对于 NH_4^+-N 的安全耐受质量浓度为 37.89 mg·L^{-1}，在本试验各处理组中 NH_4^+-N 最高浓度为 0.89 mg·L^{-1}，远低于安全质量浓度。水体 TN 浓度在 3 月份以后高于 1 mg·L^{-1} 的国家III类地表水环境质量标准(主要适用于饮用水源地II级保护区、鱼虾越冬场、水产养殖区等渔业水域等)，但是随着还田 C/N 的降低水体 TN 浓度随之降低。水体 TP 浓度在 4 月份以后高于 0.2 mg·L^{-1} 的国家III类地表水环境质量标准，但是各处理之间差异不显著，表明随着秸秆还田 C/N 的降低没有加剧水体富营养化的风险。由相关性分析可知水温与 TN、TP 呈极显著正相关，相关系数分别为 0.981(P<0.01)和 0.967(P<0.01)，表明由于天气转暖，水温升高，秸秆腐解速度加快，秸秆中 N、P 元素释放到水体中造成 TN、TP 浓度升高。

N1 处理相较于秸秆配施氮肥处理，保持较高的水体 NH_4^+-N 浓度，这是由于水稻秸秆的 C/N 值较大，腐解过程中，微生物为了满足自身生长的需求，需要不断从外界环境中补充氮源，所以固持了部分氮源[23]，因为秸秆施入土壤后，其降解速度会受到自身化学组成成分的影响，一般认为 C/N 为 25 是决定秸秆施入土壤后对土壤氮素固持与否的关键拐点[24]，由于水稻秸秆碳氮比高于 25，因此施入土壤后必然导致土壤微生物对氮素的固持，因此需要补施氮肥来缓解对氮素的固持作用，满足秸秆降解和微生物生长繁殖对氮素的需求。并且在秸秆还田配施氮肥对土壤无机氮含量的影响中，可以得出 S、SN1、SN2 处理组无机氮含量高于 N1 处理组；尽管秸秆在腐解过程中会释放出一些氮素，但是很快被土壤微生物固持，只有很少一部分释放到水体中；同时随着秸秆还田配施氮肥调整 C/N 的减小，水体 NH_4^+-N 浓度呈减小的趋势，表明秸秆还田配施氮肥较单施氮肥能够有效降低氮素向水体的释放，从而有利于降低稻田氮素向外界流失的风险。

3.2　秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤养分的影响

本研究结果表明，秸秆还田可以提高土壤有机质含量，并且 SN2 处理较秸秆还田前增加 56.1%，与 S、SN1 处理差异显著，有相关研究也发现秸秆还田配施化肥应调整 C/N≤20 为宜[25]。分析其原因，一方面与秸秆不还田处理相比，水稻秸秆作为一种有机肥能提升土壤中有机质含量；小龙虾摄食秸秆排泄粪便到土壤中也增加了土壤中有机质的含量[26]。另一方面合适的土壤 C/N，能增强土壤微生物的繁殖，促进秸秆的分解，使秸秆中营养元素释放到土壤中[27]。秸秆还田不仅增加了土壤有机质含量，还可以显著提高土壤磷含量(图 3A)，并且适宜的还田 C/N 比秸秆单独还田更能提高土壤磷含量[28]。究其原因可能是一方面秸秆的施入为土壤输入了一定的磷素；另一方面是因为在秸秆腐解过程中，纤维素和半纤维素含量逐渐降低，比较难降解的木质素含量相对在增加，进而导致了水稻秸秆呈现出疏松多孔的结构，易于吸附秸秆中释放的磷元素[29]。

在本试验中，不同处理对于土壤无机氮含量的影响表明，在稻虾田中氮素主要以 NH_4^+-N 的形式存在。与 CK 处理相比，S、SN1 处理均显著降低了土壤硝态氮含量。原因是由于稻田养殖小龙虾期间一直保持长期淹水的状态，小龙虾筑穴等生物扰动行为改善了稻田土壤的通透性，增加了土壤的孔隙度，同时本试验结果表明秸秆还田也降低了土壤容重，有助于硝化作用的发生，促使土壤铵态氮向硝态氮的转化，致使土壤硝态氮向外界释放[3,30]。目前已有研究发现，硝态氮是土壤氮素向外界释放的主要形式，与硝态氮相比，铵态氮易被土壤胶体和土壤颗粒吸附，不易遭灌溉水淋洗而迅速渗漏[31-32]。综合试验的情况来看，施用氮肥调节不同秸秆 C/N 还田对土壤无机氮含量影响不一致，C/N 越低土壤无机氮含量越高，这表明在秸秆还田时低 C/N 有利于土壤氮素的供应[12]，促进土壤微生物的生长繁殖。

3.3　秸秆还田配施氮肥调节 C/N 对土壤酶活性的影响

土壤酶作为最活跃的土壤有机组分之一，与营养元素转移、有机质的矿化分解、环境质量、能量转移等密切相关[9]。脲酶是一种专一的水解酶，可以把尿素分解为铵态氮，有利于土壤有机态氮向有效态氮的转化，利于植物吸收利用[10]。在本试验中，在还田前期 N1 处理土壤脲酶表现出较高酶活性，在 2 月之后开始下降，表明单施氮肥肥效不持久，在施入土壤前期很快被分解掉。前期脲酶活性高，尿素转化快，短时间内 NH_4^+-N 浓度升高[33]，间接导致了 N1 处理水体铵态氮浓度在前期高于其他处理。但是后期 N1 处理脲酶活性降低，导致土壤中的氮素含量降低，这也是后期 N1 处理下土壤无机氮含量低的原因之一。SN1 处理和 N1 处理氮肥的施用量一致，但是 SN1 处理土壤脲酶一直保持较高的酶活性，表明秸秆还田配施氮肥，可以使肥效更持久；SN2 处理比 SN1 处理施用了更多的氮肥，但是 2—4 月 SN2 处理的脲酶活性显著高于 SN1 处理，表明秸秆还田配施氮肥调节 C/N 为 15 更能提高土壤脲酶活性，提高氮素供应水平。

土壤酸性蛋白酶是由微生物活体、动植物残体

分解和动植物根系分泌形成的，具有离体活性，参与土壤的氮素循环[34]。从土壤酸性蛋白酶活性动态变化来看，N1、SN2 处理在 3 月份后酶活性达最高值，表明秸秆还田配施氮肥或者单施氮肥对土壤酸性蛋白酶活性的影响主要在还田中后期。但是 SN1 处理酸性蛋白酶活性在整个还田期间始终没有大的波动，原因可能是该处理秸秆 C/N 对于土壤微生物生长繁殖没有抑制，也没有很好的促进作用，使整个土壤环境一直处于很平稳的状态。秸秆还田 150 d 后，与 CK 处理相比，SN2 处理组土壤酸性蛋白酶活性显著增高，而其他 3 种处理低于 CK 处理。原因可能是该处理降低了土壤容重、增加了其通透性，改善了土壤环境，有效地促进秸秆腐解，加快了养分释放，有利于土壤微生物的生长繁殖，使土壤酶活性得到一定程度的提高[35]。

一般认为，土壤中氧化酶类的活性与腐殖质的合成有关，土壤中水解酶的活性与有机质降解过程有关[34]。整个试验期间内各秸秆还田处理之间，虽然 SN2 处理纤维素酶活性在大部分采样时期较其他处理略高，但是整体纤维素酶活性差别不大。原因一方面可能是各处理的秸秆还田量较少且一致，有研究表明改变碳的输入会对土壤纤维素酶造成显著性的影响[36]；任万军等[35]对秸秆还田对土壤酶活性的影响研究表明，在还田量为 5~6 $t\cdot hm^{-2}$ 前提下，秸秆还田处理土壤纤维素酶活性比不还田处理高 4.5%~29.9%。另一方面稻虾养殖期间长期淹水的环境抑制了土壤纤维素酶活性。

土壤多酚氧化酶参与土壤中芳香族化合物的转化，与土壤中氨基酸、糖类、蛋白质、矿物质等物质反应生成有机质和色素，在腐殖化过程起着重要作用，并可修复土壤环境[11]。在本试验中，S 处理土壤多酚氧化酶活性与 CK 差异不显著，低于 N1 处理，表明单独秸秆还田会抑制土壤中多酚氧化酶的活性[37]。但是，SN2 处理与其他几种处理相比，除 4 月份以外，其他时期显著提高了土壤多酚氧化酶活性。随着秸秆还田 C/N 的降低，土壤多酚氧化酶活性呈线性升高的趋势。表明单独秸秆还田会抑制土壤多酚氧化酶的活性，而秸秆还田配施氮肥调节 C/N 为 15 会显著提高多酚氧化酶活性。

4 结论

1)本研究条件下，单施氮肥会使稻虾田土壤酸性速效磷、无机氮含量降低；秸秆配施氮肥处理可以降低土壤容重，增加土壤酸性速效磷、有机质、铵态氮含量。稻虾田中土壤无机氮素主要以 NH_4^+-N 形式存在，在秸秆还田 C/N 为 15 时无机氮含量最高。

2)土壤多酚氧化酶活性在秸秆还田 C/N 为 15 时最高，随着秸秆还田 C/N 的升高酶活性有降低的趋势；单施氮肥可在短期内增高土壤脲酶活性，秸秆配施氮肥可以保持较长时间的土壤脲酶活性，在秸秆还田 C/N 为 15 时效果最好。

参考文献 References

[1] 李聪，成永旭，管勤壮，等. 用稳定性同位素技术分析稻-虾系统中不同“碳/氮”投喂方式对克氏原螯虾食性的影响[J]. 水产学报, 2018, 42(11): 1778–1786
LI C, CHENG Y X, GUAN Q Z, et al. Using stable isotopes to estimate the effects of different carbon/nitrogen feeds on feeding habit of *Procambarus clarkii* in the rice-crayfish co-culture system[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(11): 1778–1786

[2] 刘永涛，董靖，夏京津，等. 不同饲料对稻田养殖克氏原螯虾肌肉质构特性和营养品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(12): 1996–2004
LIU Y T, DONG J, XIA J J, et al. Effect and evaluation of different feed on texture properties and nutritional quality of *Procambarus clarkii* cultured in rice fields[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(12): 1996–2004

[3] SI G H, PENG C L, YUAN J F, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 2856

[4] 2019 中国小龙虾产业发展报告[J]. 中国水产, 2019, (9): 12–19
China crayfish industry development report(2019)[J]. China Fisheries, 2019, (9): 12–19

[5] 李涛，何春娥，葛晓颖，等. 秸秆还田施氮调节碳氮比对土壤无机氮、酶活性及作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(12): 1633–1642
LI T, HE C E, GE X Y, et al. Responses of soil mineral N contents, enzyme activities and crop yield to different C/N ratio mediated by straw retention and N fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(12): 1633–1642

[6] 杨滨娟，黄国勤，徐宁，等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3779–3787
YANG B J, HUANG G Q, XU N, et al. The effects of returning straw containing fertilizer with varying nutrient ratios on rice yield and soil fertility[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3779–3787

[7] 程曼，解文艳，杨振兴，等. 黄土旱塬长期秸秆还田对土壤养分、酶活性及玉米产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(10): 1528–1536
CHENG M, XIE W Y, YANG Z X, et al. Effects of long-term straw return on corn yield, soil nutrient contents and enzyme activities in dryland of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10): 1528–1536

[8] 胡乃娟，韩新忠，杨敏芳，等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活

性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 371–377
HU N J, HAN X Z, YANG M F, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 371–377

[9] 吕艳杰, 于海燕, 姚凡云, 等. 秸秆还田与施氮对黑土区春玉米田产量、温室气体排放及土壤酶活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1456–1463
LYU Y J, YU H Y, YAO F Y, et al. Effects of soil straw return and nitrogen on spring maize yield, greenhouse gas emission and soil enzyme activity in black soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(11): 1456–1463

[10] 汪成忠, 胡永红, 周翔宇, 等. 水稻秸秆还田对崇明盐碱地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 132–138
WANG C Z, HU Y H, ZHOU X Y, et al. The influence of rice straw return on soil enzyme activity and microorganism in Chongming saline-alkali[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 132–138

[11] 陈华癸, 樊庆笙. 微生物学[M]. 第 3 版. 北京: 农业出版社, 1979: 179–196
CHEN H G, FAN Q S. Microbiology[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 1979: 179–196

[12] HENRIKSEN T M, BRELAND T A. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth, and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(8): 1121–1134

[13] 倪国荣, 涂国全, 魏赛金, 等. 稻草还田配施催腐菌剂对晚稻根际土壤微生物与酶活性及产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 149–154
NI G R, TU G Q, WEI S J, et al. Effects of straw-returning using agent on microbe and enzyme activity in rhizosphere soils and yield of late rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(1): 149–154

[14] 王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 等. 不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 125–133
WANG N, LUO J L, ZHAO Y H, et al. Effects of different models of wheat straw return on paddy soil microbial activities and community compositions[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(1): 125–133

[15] ZHAO R F, CHEN X P, ZHANG F S, et al. Fertilization and nitrogen balance in a wheat-maize rotation system in North China[J]. Agronomy Journal, 2006, 98(4): 938–945

[16] CUI Z L, ZHANG F S, MIAO Y X, et al. Soil nitrate-N levels required for high yield maize production in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 82(2): 187–196

[17] WU H X, GE Y. Excessive application of fertilizer, agricultural non-point source pollution, and farmers' policy choice[J]. Sustainability, 2019, 11(4): 1165

[18] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877–885
ZHANG G, WANG D J, YU Y C, et al. Effects of straw incorporation plus nitrogen fertilizer on rice yield, nitrogen use efficiency and nitrogen loss[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2016, 22(4): 877–885

[19] 武淑霞, 刘宏斌, 刘申, 等. 农业面源污染现状及防控技术[J]. 中国工程科学, 2018, 20(5): 23–30
WU S X, LIU H B, LIU S, et al. Review of current situation of agricultural non-point source pollution and its prevention and control technologies[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(5): 23–30

[20] 杨滨键, 尚杰, 于法稳. 农业面源污染防治的难点、问题及对策[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(2): 236–245
YANG B J, SHANG J, YU F W. Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(2): 236–245

[21] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 410–418
WANG J, GUO X S, WANG Y Q, et al. Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 410–418

[22] 钟君伟, 朱永安, 孟庆磊, 等. 氨氮对 2 种规格克氏原螯虾的急性毒性研究[J]. 长江大学学报: 自然科学版, 2013, 10(23): 55–59
ZHONG J W, ZHU Y A, MENG Q L, et al. Acute toxicity of ammonia-N to two specifications of *Procambarus clarkii* adult[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2013, 10(23): 55–59

[23] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1741–1749
WU J, GUO X S, LU J W, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1741–1749

[24] KUMAR K, GOH K M. Nitrogen release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34(17/18): 2441–2460

[25] 唐玉霞, 孟春香, 贾树龙, 等. 不同碳氮比肥料组合对肥料氮生物固定、释放及小麦生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 37–40
TANG Y X, MENG C X, JIA S L, et al. Effects of different C/N combinations of fertilizers on biological fixation and release of nitrogen fertilizer and wheat growth[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 37–40

[26] 佀国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻–虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 503–509
SI G H, PENG C L, XU X Y, et al. Effects of rice-crayfish integrated mode on soil microbial functional diversity and

fertility in waterlogged paddy field[J]. Soils, 2016, 48(3): 503–509

[27] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 砂姜黑土秸秆还田配施氮肥的固碳效应分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 756–761
LI W, QIAO Y Q, CHEN H, et al. Carbon storages lime concretion black soils as affected by straw incorporation and fertilization[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 756–761

[28] 汪军, 王德建, 张刚. 秸秆还田下氮肥用量对稻田养分淋洗的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 316–321
WANG J, WANG D J, ZHANG G. Effect of incorporated straw-nitrogen fertilizer on nutrient leaching in paddy soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 316–321

[29] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 等. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3564–3570
LIANG T F, XU S H, LIU K Q, et al. Influence of tillage patterns on incorporated straw nitrogen release and nitrogen utilization of rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3564–3570

[30] 侣国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 61–68
SI G H, PENG C L, XU X Y, et al. Effect of integrated rice-crayfish farming system on soil physico-chemical properties in waterlogged paddy soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 61–68

[31] SPIESS E, HUMPHRYS C, RICHNER W, et al. Does no-tillage decrease nitrate leaching compared to ploughing under a long-term crop rotation in Switzerland?[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 199: 104590

[32] 马臣, 刘艳妮, 梁路, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量和硝态氮残留淋失的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1240–1248
MA C, LIU Y N, LIANG L, et al. Effects of combined application of chemical fertilizer and organic manure on wheat yield and leaching of residual nitrate-N in dryland soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(4): 1240–1248

[33] 闫超, 刁晓林, 葛慧玲, 等. 水稻秸秆还田对土壤溶液养分与酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(5): 1232–1236
YAN C, DIAO X L, GE H L, et al. Effects of rice straw returning on nutrients in soil solution and activities of soil enzymes[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(5): 1232–1236

[34] 关松荫, 张德生, 张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274–278
GUAN S Y, ZHANG D S, ZHANG Z M. Soil Enzyme and Its Study Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274–278

[35] 任万军, 黄云, 吴锦秀, 等. 免耕与秸秆高留茬还田对抛秧稻田土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2913–2918
REN W J, HUANG Y, WU J X, et al. Effects of no-tillage and stubble-remaining on soil enzyme activities in broadcasting rice seedlings paddy field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(11): 2913–2918

[36] 刘星, 王娜, 赵博, 等. 改变碳输入对太岳山油松林土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(4): 655–661
LIU X, WANG N, ZHAO B, et al. Effects of carbon input changes on soil enzyme activities in a *Pinus tabulaeformis* forest at the Taiyue Mountain[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2014, 20(4): 655–661

[37] 陈强龙, 谷洁, 高华, 等. 秸秆还田对土壤脱氢酶和多酚氧化酶活性动态变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 146–151
CHEN Q L, GU J, GAO H, et al. Effect of matching use of straw and fertilizer on the dynamic changes of soil dehydrogenase and polyphenoloxidase activities[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 146–151