农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

超级稻田碳氮库管理指数在等养分不同有机物料处理下的动态变化

王开悦, 廖育林, 鲁艳红, 蔡岸冬, 张志伟, 陈旋, 秦晓波

引用本文:
王开悦, 廖育林, 鲁艳红, 蔡岸冬, 张志伟, 陈旋, 秦晓波. 超级稻田碳氮库管理指数在等养分不同有机物料处理下的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1758-1767.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1258

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绿肥配施减量化肥对土壤固氮菌群落的影响
方宇, 王飞, 贾宪波, 林陈强, 张慧, 陈龙军, 陈济琛
农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1933-1941 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0509

翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对水稻Cu吸收转运的影响
喻成龙, 汤建, 喻惟, 倪国荣, 谢志坚, 康丽春, 荣勤雷, 周春火
农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2095-2102 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0549

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应
贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣
农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942-1951 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725

3种有机物料对土壤镉有效性及水稻镉吸收转运的影响
范晶晶, 许超, 王辉, 朱捍华, 朱奇宏, 张泉, 黄凤球, 黄道友
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2143-2150 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0187

紫云英翻压条件下生物炭基肥配施量对水稻Cd迁移累积的影响
喻成龙, 汤建, 郑琴, 倪国荣, 谢志坚, 荣勤雷, 郭乃嘉, 王惠明, 周春火
农业环境科学学报. 2020, 39(11): 2554-2560 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0759

关注微信公众号，获得更多资讯信息

王开悦，廖育林，鲁艳红，等. 超级稻田碳氮库管理指数在等养分不同有机物料处理下的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(8): 1758-1767.

WANG K Y, LIAO Y L, LU Y H, et al. Dynamic changes in carbon and nitrogen pool management indexes in super rice fields treated with various organic materials and equal nutrients[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(8): 1758-1767.

超级稻田碳氮库管理指数在等养分不同有机物料处理下的动态变化

王开悦[1]，廖育林[2]，鲁艳红[2]，蔡岸冬[1]，张志伟[1,3]，陈旋[1]，秦晓波[1*]

（1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/中国农业科学院农业农村碳达峰碳中和研究中心/农业农村部农业环境重点实验室，北京 100081；2.湖南省土壤肥料研究所，长沙 410125；3.南京信息工程大学环境科学与工程学院，南京 210044）

摘　要：为比较等养分条件下不同有机物料还田对稻田土壤碳氮库管理指数的影响，揭示水稻不同生育期碳氮库管理指数动态变化及其与产量和收获指数的关系，在湖南省长沙市，选择超级稻种植系统为研究对象进行大田试验。共设置5个等养分投入处理，分别为单施化肥（F）、化肥+水稻秸秆全量还田（FS）、化肥+紫云英全量还田（FM）、化肥+秸秆、紫云英全量还田（FMS）、化肥+秸秆、紫云英全量还田+熟石灰（FMS+Ca），并在水稻5个不同生育期（移栽返青期、分蘖期、孕穗期、灌浆期、成熟期）采集土样，测定土壤有机碳（SOC）、可溶性有机碳（DOC）、总氮（TN）、可溶性总氮（TDN）含量，计算碳库管理指数（CPMI）、氮库管理指数（NPMI）。结果表明：不同处理下的CPMI整体动态变化趋势为移栽返青期降低后缓慢回升，在水稻生育末期紫云英-秸秆联合还田处理FMS（87.18）和FMS+Ca（80.59）的CPMI显著高于F处理（62.53）和FS处理（62.64）（$P<0.05$）；NPMI在分蘖期与成熟期出现了两次急剧下降，并在水稻生育末期FMS+Ca处理（57.58）的NPMI显著高于F处理（45.64）和FS处理（42.70）（$P<0.05$）；与F处理相比，有机无机配施（FS、FM、FMS）处理下作物产量提高了2.19%~2.94%；水稻灌浆期的CPMI与产量和收获指数均呈显著正相关关系。研究表明，紫云英还田代替部分化肥施用能在保证产量的基础上扩容稻田土壤碳氮库，紫云英-秸秆联合还田对提升水稻不同生育期CPMI、NPMI的综合效果最佳。

关键词：等养分投入；超级稻；紫云英和秸秆联合还田；不同生育期；碳库管理指数；氮库管理指数

中图分类号：S511　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-2043(2023)08-1758-10　　doi:10.11654/jaes.2022-1258

Dynamic changes in carbon and nitrogen pool management indexes in super rice fields treated with various organic materials and equal nutrients

WANG Kaiyue[1], LIAO Yulin[2], LU Yanhong[2], CAI Andong[1], ZHANG Zhiwei[1,3], CHEN Xuan[1], QIN Xiaobo[1*]

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences / Agricultural and Rural Carbon Peak and Carbon Neutral Research Center / Key Laboratory for Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; 2. Soils and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To compare the effects of various organic materials returned to paddy fields on soil carbon and nitrogen pool management

收稿日期：2022-12-08　　**录用日期：**2023-02-27

作者简介：王开悦（1998—），女，山东潍坊人，硕士研究生，主要从事稻田固碳减排研究。E-mail：w163ky@163.com

***通信作者：**秦晓波　E-mail：qinxiaobo@caas.cn

基金项目：“十四五”国家重点研发计划项目（2021YFD1700202）；江西省中央引导地方科技发展资金项目（20221ZDH04057）；国家自然科学基金项目（41775157）

Project supported: “The 14th Five-Year Plan” National Key Research and Development Program of China (2021YFD1700202); Jiangxi Provincial Central Leading Local Science and Technology Development Fund Project (20221ZDH04057); The National Natural Science Foundation of China (41775157)

indexes under equal nutrient conditions, the dynamic changes of carbon and nitrogen pool management indexes at different growth stages of rice and their relationships with yield and harvest index were assessed. Thus, a scientific basis was provided for straw resource utilization and soil carbon and nitrogen pool expansion in paddy fields. The field experiment was conducted in Changsha, Hunan Province, and the super-hybrid rice planting system was selected as the research object. Five equal nutrient inputs were used: single application of fertilizer (F), fertilizer + total rice straw returning (FS), fertilizer + total Chinese milk vetch returning (FM), fertilizer + total Chinese milk vetch returning+total rice straw (FMS), and fertilizer + total Chinese milk vetch returning+ total rice straw + slaked lime (FMS+Ca). Soil samples were collected at five growth stages (transplanting stage, tillering stage, booting stage, filling stage, and maturity stage) to determine the concentrations of soil organic carbon (SOC), soluble organic carbon (DOC), total nitrogen (TN), and soluble total nitrogen (TDN) and to calculate the carbon pool management index (CPMI) and nitrogen pool management index (NPMI). The following results were obtained: the overall dynamic change trend of CPMI under different treatments showed that the transplanting stage decreased and then slowly increased. The CPMIs of the FMS (87.18) and FMS+Ca (80.59) treatments were significantly higher than that of the F (62.35) and FS (62.46) treatments ($P<0.05$). NPMI showed two sharp declines during the growth period, and at the end of the growth period, the NPMI of the FMS+Ca treatment (57.85) was significantly higher than that of the F (54.64) and FS (42.70) treatments ($P<0.05$). Compared with F treatment, organic and inorganic treatments (FS, FM, and FMS) increased the crop yield by 2.19% to 2.94%; CPMI at the grain filling stage was positively correlated with the yield and harvest index. The following conclusions were reached: the soil carbon and nitrogen pool of paddy field could be expanded on the basis of maintaining constant yield. Chinese-milk vetch-rice straw combined with returning to the field had the best comprehensive effect on enhancing CPMI and NPMI of rice at different growth stages.

Keywords: equal nutrient input; super-hybrid rice; rice straw and Chinese milk vetch return to the field jointly; different growth periods; carbon pool management index; nitrogen pool management index

我国在2015年实施“化肥农药零增长”政策，有机肥代替部分化肥已成为减少化肥施用量的关键[1-2]。目前研究显示，有机肥还田后会对土壤活性碳氮含量[3]、作物养分吸收[4]、作物产量[5]等产生直接影响。土壤活性碳在土壤全碳中占比较小，但易被作物吸收利用，能体现土壤细微的变化[6]。碳库管理指数（CPMI）最早由Blair和Lefroy提出[7]，是一项综合土壤活性碳数量与质量的指标，能够灵敏地反映外界措施对土壤质量和肥力的影响。后人在CPMI的基础上改进、引申出氮库管理指数（NPMI）[8-10]，与CPMI相似，NPMI常用来表征外界措施引起土壤活性氮素的变化，体现土壤氮素供应能力。因此研究有机肥代替部分化肥对CPMI和NPMI的影响，对减少氮肥施用、提高土壤肥力与作物产量的意义重大。李小磊等[11]基于长期定位试验的研究结果表明，与单施化肥相比，在其基础上对双季稻田早稻绿肥还田，晚稻施用猪粪和稻草冬季还田能显著提高0~20 cm土层处的CPMI。Chen等[12]基于4年连续不同地点相同处理的秸秆还田试验表明，与秸秆不还田相比，秸秆还田能提升1.4~1.6倍的CPMI，具体提升效应受试验地点影响（环境、气候）。肖小平等[13]对冬季覆盖作物还田的研究显示，与黑麦草、油菜还田相比，紫云英还田提高了双季稻田CPMI。Liu等[14]发现，富氮生物炭的投入会降低稻田土壤CPMI。目前关于NPMI的研究表明种植方式、有机肥用量、水肥管理等都是影响NPMI的重要因素[9]。以往研究多限于单一有机物料投入或基于常量施用化肥的基础上再施用有机肥，且对水稻不同生育期CPMI、NPMI的动态研究较少。因此，本研究通过大田试验，利用有机肥代替部分化肥且基于等养分投入的试验设计，研究不同有机物料还田对水稻不同生育期稻田土壤CPMI和NPMI动态变化的影响，分析有机物料还田下CPMI、NPMI的动态变化及其对产量、收获指数及水稻氮素吸收的影响，在保证粮食产量的基础上响应“国家化肥农药零增长”政策，同时为我国稻田绿色投入品和土壤碳氮扩库增容政策措施提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2020年10月至2021年9月在湖南省长沙市长沙县高桥农业科技示范园（28.46°N，113.34°E）内开展，该地区属于亚热带季风气候，年均温16.8 ℃，年降水量约1 504 mm，本试验开始前6年为单季优质稻和冬种紫云英轮作系统。试验期间月均温和月降水量见图1，试验前0~20 cm耕层土壤理化性质见表1。

1.2 试验设计

田间试验采用随机区组设计，共设置3次重复，

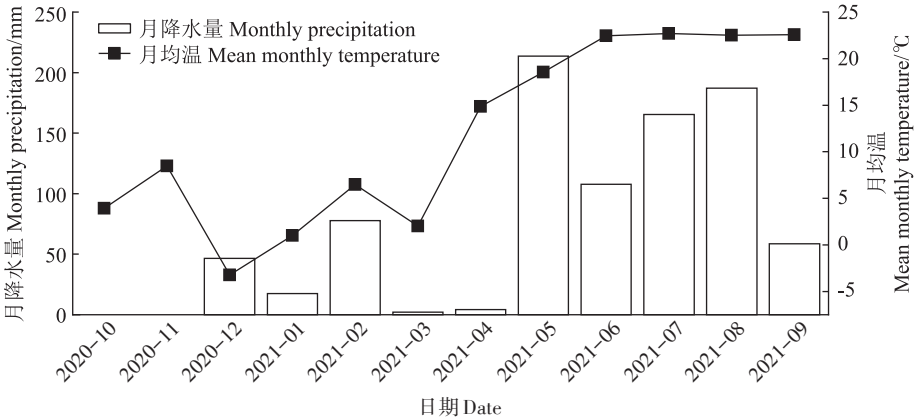


图1 试验期间的月降水量和月均温

Figure 1 Monthly precipitation and monthly mean temperature during the experiment

表1 试验开始前土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil before the test

全碳 TC/(g·kg^{-1})	可溶性有机碳 DOC/(mg·kg^{-1})	全氮 TN/(g·kg^{-1})	可溶性总氮 TDN/(mg·kg^{-1})	容重 BD/(g·cm^{-3})
17.67	190.00	1.98	36.90	1.36

小区面积为4 m×7.5 m=30 m^2，相邻小区间留出一定宽度的保护行。水稻品种选用籼型两系超级杂交稻“晶两优华占”，推荐移栽秧龄为30 d，移栽密度为25 cm×30 cm，每穴2株。紫云英品种选用“湘紫一号”。共设置5个等养分投入处理，分别是：(1)单施化肥(F)；(2)冬闲期水稻秸秆还田(FS)，上季水稻收获后秸秆在紫云英播种后全量覆盖还田；(3)冬闲期种植绿肥还田(FM)，上季水稻收获后秸秆全部移出田间后播种绿肥；(4)冬闲期水稻秸秆还田+种植绿肥还田(FMS)，上季水稻收获后秸秆全量覆盖还田并种植绿肥；(5)冬闲期水稻秸秆还田+种植绿肥还田+生石灰(FMS+Ca)(详细内容参考文献[15])，上季水稻收获后秸秆全量覆盖还田并种植绿肥，水稻季施熟石灰3.375 kg·小区$^{-1}$，具体施肥处理如表2。

1.3 样品采集与测定

在水稻移栽返青期、分蘖期、孕穗期、灌浆期和成熟期，分别对应2021年6月11日、6月21日、7月1日、8月9日、9月6日，于每个小区内按照“S”型路线，采用多点混合取样法用土钻取0~15 cm深度土壤，置于-18 ℃冰箱内冷冻保存待测。供试样品土壤有机碳(SOC)、总氮(TN)、无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)、可溶性有机氮(TON)在湖南省土壤肥料研究所农化检测中心测定，易溶解有机碳(DOC)、可溶性总氮(TDN)在中国科学院亚热带农业生态研究所测定[16]。在水稻收获前1 d，在各小区选取有代表性的5蔸水稻植株测定株高。随后将植株的茎、穗和根部分开，于105 ℃杀青30 min，80 ℃烘干至恒质量后测定各部分干质量。在水稻成熟期按各小区收割水稻，脱粒后晒干测定稻谷产量。

1.4 碳库管理指数、氮库管理指数、氮素吸收量、氮素收获指数计算

本研究以试验开始前的土壤作为参照土壤，用Blair等[7]提出的方法计算各处理碳库管理指数，具体计算如下：

碳库指数(CPI)=样本总有机碳含量/参照总有机

表2 不同处理具体施肥(kg·hm^{-2})

Table 2 Specific fertilization under different treatments(kg·hm^{-2})

处理 Treatment	化肥 Chemical fertilizer			紫云英 Chinese milk vetch			水稻秸秆 Rice straw			熟石灰 Slaked lime	合计 Total		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O		N	P_2O_5	K_2O
F	210.00	75.00	120.00	—	—	—	—	—	—	0	210.00	75.00	120.00
FS	177.45	59.14	42.83	—	—	—	32.55	15.86	77.17	0	210.00	75.00	120.00
FM	152.99	65.67	83.98	57.01	9.33	36.02	—	—	—	0	210.00	75.00	120.00
FMS	120.44	49.81	6.81	57.01	9.33	36.02	32.55	15.86	77.17	0	210.00	75.00	120.00
FMS+Ca	120.44	49.81	6.81	57.01	9.33	36.02	32.55	15.86	77.17	1 125.00	210.00	75.00	120.00

碳含量 (1)

碳库活度(CL)=样本可溶性有机碳含量/样本非可溶性有机碳含量 (2)

碳库活度指数(CLI)=样本碳库活度/参照碳库活度 (3)

碳库管理指数(CPMI)=碳库指数×碳库活度指数×100 (4)

氮库管理指数的具体计算如下：

氮库指数(NPI)=样品总氮含量/参照总氮含量 (5)

氮库活度(NL)=样本可溶性氮含量/样品非可溶性氮含量 (6)

氮库活度指数(NLI)=样本氮库活度/参照氮库活度 (7)

氮库管理指数(NPMI)=氮库指数×氮库活度指数×100 (8)

在Blair公式的基础上，研究者常与具体的研究目标相结合，对CPMI和NPMI的计算公式进行扩展引申[10,17-19]。本研究中，以SOC与DOC之差计算非可溶性有机碳，以TN与TDN之差计算非可溶性氮。

稻谷(茎秆)氮素吸收量=稻谷(茎秆)质量×含氮量 (9)

地上部氮素吸收量=稻谷氮素吸收量+茎秆氮素吸收量 (10)

氮素收获指数 = 籽粒吸氮量/地上部总吸氮量×100 (11)

1.5 数据处理和统计分析

使用Excel(v.2010，Microsoft)初步整理数据，使用SPSS(v.23.0，IBM)进行数据标准误差计算和方差分析，使用最小显著性检验(LSD)法比较不同处理间的差异显著性[20]；使用Pearson双侧检验进行相关性分析，在0.05水平和0.01水平检验相关系数显著性；进行回归方程模拟，用回归系数最简比表示概念图中相关关系；使用Origin(OriginLab 2021)软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下NH_4^+-N、NO_3^--N、DON占TDN比例的动态变化

伴随水稻生长发育，不同处理间的无机氮(NH_4^+-N、NO_3^--N)占比逐渐升高，DON占比逐渐减少(图2)。在水稻生育末期，添加紫云英处理的无机氮占TDN的百分比分别为FM 90.11%、FMS 93.14%、FMS+Ca 83.69%，无紫云英添加处理为F 82.21%、FS 78.80%。

2.2 不同处理下DOC、TDN的动态变化

土壤DOC含量整体表现为先降低后升高的趋势(图3A)，但因不同处理、不同生育期产生差异。除分蘖期外，水稻不同生育期DOC含量的最大值均出现在紫云英-秸秆联合还田处理组(FMS、FMS+Ca)。在水稻成熟期，DOC含量表现为FMS>FMS+Ca>FM>FS>F，其中FMS的DOC含量显著高于F 39.24%，显著高于FS 39.04%(P<0.05)。

土壤TDN含量变化规律表现为移栽返青期最高，分蘖期骤降，并在成熟期出现第二次骤降(图3B)。在水稻移栽返青期和孕穗期，F处理的TDN含量最高，在水稻另外3个生育期(分蘖期、灌浆期、成熟期)紫云英-秸秆联合还田处理组(FMS、FMS+Ca)的TDN含量最高，分别为41.25、46.80、21.45 mg·kg^{-1}。在成熟期时，不同处理下的TDN大小顺序表现为

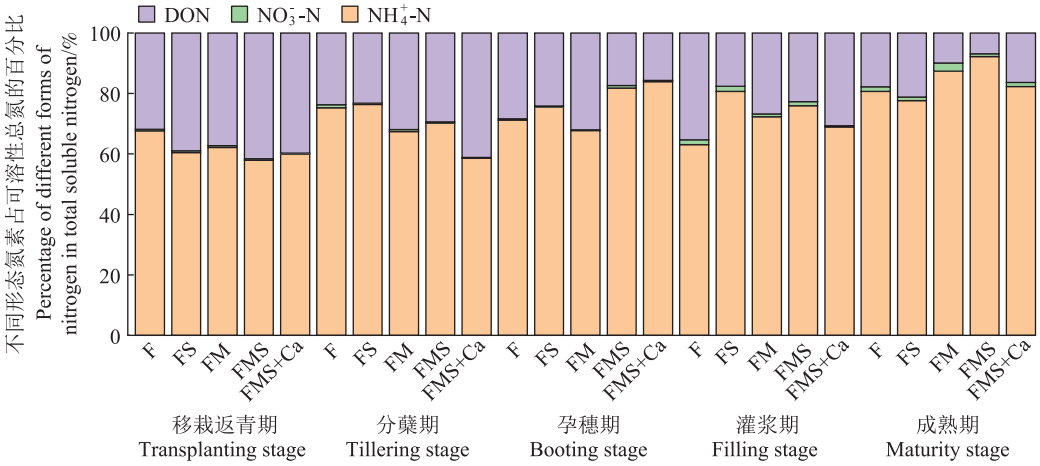
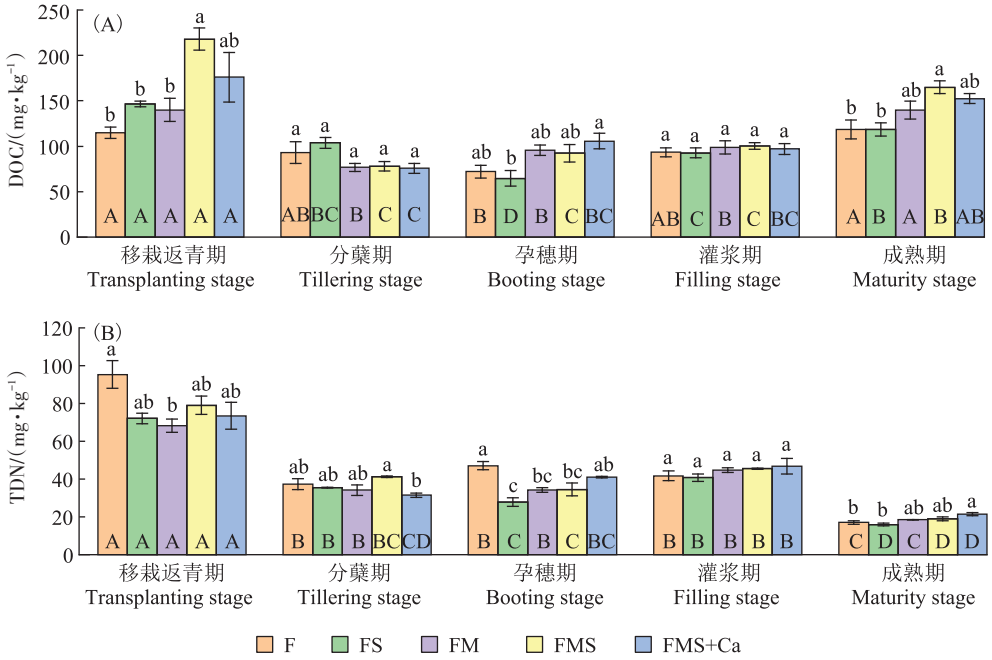


图2 不同处理、不同生育期下3种可溶性氮占可溶性总氮的百分比

Figure 2 Percentages of three kinds of soluble nitrogen in total soluble nitrogen under different treatments and different growth periods



图中不同小写字母表示同一生育期内处理间差异显著(P<0.05),不同大写字母表示同一处理下不同生育期间的差异显示(P<0.05)。
Different lowercase letters in the figure indicate significant differences between treatments during the same growth period(P<0.05), different capital letters indicate significant differences between different fertility periods under the same treatment(P<0.05).

图3 不同生育期DOC、TDN的含量

Figure 3 Contents of DOC and TDN in different growth stages

FMS+Ca>FMS>FM>F>FS,其中FMS+Ca的TDN含量显著高于F 25.95%,显著高于FS 34.65%(P<0.05)。

2.3 不同处理下碳库管理指数、氮库管理指数的动态变化

CPMI在水稻生育期内的动态变化表现为先下降后回升的趋势,且有机无机肥配施(FS、FM、FMS、FMS+Ca)处理下不同生育期的CPMI整体表现优于F(表3)。移栽返青期FMS处理下CPMI最高(115.65),显著高于F(90.40%)、FS(49.05%)和FM(56.36%)(P<0.05);孕穗期时FMS+Ca处理的CPMI最高(55.80),显著高于FS(63.59%)(P<0.05);而在水稻成熟期,FMS>FMS+Ca>FM>FS>F,FMS的CPMI显著高于F(39.41%)和FS(39.18%)(P<0.05)。

NPMI在水稻生育期内动态变化表现为移栽返青期表现出最大值,在分蘖期急剧下降,伴随水稻生育在孕穗期和灌浆期缓慢回升,并在成熟期出现第二次骤降(表3)。移栽返青期和孕穗期NPMI的最大值均出现在F处理,另外3个生育期(分蘖期、灌浆期、成熟期)NPMI的最高值均出现在紫云英-秸秆联合还田处理(FMS或FMS+Ca)中。在移栽返青期F处理的NPMI显著高于FS(32.98%)、FM(41.19%)(P<0.05);在成熟期,各处理间NPMI大小顺序表现为FMS+Ca>FMS>FM>F>FS。

2.4 不同处理下的水稻株高、干物质量、产量和收获指数

不同处理下的水稻株高、各部分干物质量、产量和收获指数见表4。FMS+Ca与F的株高接近,高出其他处理0.96%~2.80%;FS的茎干质量和穗干质量最大,分别高出其他处理12.08%~30.54%和1.24%~23.96%;FMS的根干质量最大,高于其他处理6.71%~21.32%,但FMS+Ca的根干质量最小;各处理间的产量表现为FM>FS>FMS>F>FMS+Ca,FM、FS、FMS的产量较F相比提升了2.19%~2.94%;不同处理间的收获指数表现为FMS>FM>FMS+Ca>FS>F,与无紫云英添加处理相比,紫云英添加(FM、FMS、FMS+Ca)处理下的收获指数提高了0.59%~5.20%。

2.5 不同处理下的水稻氮素吸收量、氮素收获指数

FS与其他处理相比,各部分氮素吸收量最高,氮素收获指数最低(表5),其茎秆氮素吸收量显著高于添加紫云英处理,高出FM 51.27%、FMS 42.46%、FMS+Ca 80.41%(P<0.05),但氮素收获指数显著低于添加紫云英处理,低于FM 10.12%、FMS 10.13%、FMS+Ca 13.53%(P<0.05),这可能是水稻对不同外源养分吸收、利用、转化能力存在差异性导致的。

表3 不同生育期碳库管理指数和氮库管理指数

Table 3 Carbon pool management index and nitrogen pool management index at different growth stages

项目 Item	处理 Treatment	移栽返青期 Transplanting stage	分蘖期 Tillering stage	孕穗期 Booting stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage
CPMI	F	60.74±3.34b	49.05±6.24a	37.90±3.81ab	49.23±1.50a	62.53±3.19b
	FS	77.59±1.59b	54.78±3.12a	34.11±4.42b	48.88±1.66a	62.64±3.99b
	FM	73.96±6.73b	40.46±2.40a	50.50±3.02ab	52.01±2.23a	73.78±5.20ab
	FMS	115.65±6.44a	41.09±2.65a	48.66±5.01ab	52.82±1.89a	87.18±2.16a
	FMS+Ca	93.34±14.47ab	39.86±2.90a	55.80±4.57a	51.11±1.84a	80.59±1.67a
NPMI	F	264.77±21.44a	100.55±8.00ab	127.76±5.92a	113.17±4.28a	45.64±2.36bc
	FS	199.10±7.78b	95.96±0.53ab	75.90±3.43c	110.44±1.05a	42.7±1.85c
	FM	187.53±10.41b	92.67±7.61ab	92.72±3.58bc	121.36±1.73a	49.54±0.31bc
	FMS	218.22±13.61a	112.27±0.91a	93.39±9.63bc	123.23±0.43a	50.73±2.66ab
	FMS+Ca	203.55±19.68ab	85.05±3.20b	111.40±1.36ab	127.20±11.61a	57.58±1.31a

注：同一列中不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note：Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments（$P<0.05$）. The same below.

表4 水稻株高、各部分干质量、产量及收获指数

Table 4 Plant height，dry weight，yield and harvest index of rice

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎干质量/(g·蔸$^{-1}$) Stem dry weight/(g·bag^{-1})	穗干质量/(g·蔸$^{-1}$) Ear dry weight/(g·bag^{-1})	根干质量/(g·蔸$^{-1}$) Root dry weight/(g·bag^{-1})	产量 Yield/(kg·hm^{-2})	收获指数 Harvest index/%
F	115.05±3.52a	53.29±2.37a	65.30±2.90a	28.69±4.10a	8 894.44±161.46a	54.98a
FS	113.95±1.91a	60.16±5.11a	74.37±4.50a	28.41±3.47a	9 108.33±216.06a	55.29a
FM	112.07±0.72a	52.15±2.28a	69.13±0.52a	26.45±0.93a	9 156.56±126.06a	56.83a
FMS	112.41±1.70a	53.68±2.32a	73.54±2.40a	30.62±3.62a	9 089.89±46.04a	57.84a
FMS+Ca	115.21±1.76a	46.09±4.14a	59.99±4.07a	25.24±4.66a	8 822.22±232.32a	56.50a

表5 不同处理氮素吸收量和氮素收获指数

Table 5 Nitrogen uptake and nitrogen harvest indices under different treatments

处理 Treatment	稻谷氮素吸收量/(g·蔸$^{-1}$) Nitrogen uptake of rice/(g·bag^{-1})	茎秆氮素吸收量/(g·蔸$^{-1}$) Nitrogen uptake of stem/(g·bag^{-1})	地上部氮素吸收量/(g·蔸$^{-1}$) Above-ground nitrogen uptake/(g·bag^{-1})	氮素收获指数 Nitrogen harvest index/%
F	0.99±0.04a	0.49±0.02ab	1.48±0.02ab	67.78±1.22ab
FS	1.02±0.07a	0.62±0.04a	1.64±0.11a	62.18±0.29b
FM	0.88±0.05a	0.41±0.04b	1.29±0.08ab	68.41±2.14a
FMS	0.94±0.03a	0.44±0.04b	1.38±0.06ab	68.48±1.82a
FMS+Ca	0.78±0.08a	0.34±0.03b	1.12±0.11b	70.59±1.29a

2.6 相关性分析

确保产量提升是试验进行的前提和基础，本研究结果显示：产量分别与灌浆期的CPMI和分蘖期的NPMI呈显著正相关关系（$P<0.05$）（图4、图5）；收获指数是评价作物产量水平和栽培成效的重要指标，本试验中，收获指数分别与移栽返青期、孕穗期、灌浆期和成熟期4个生育期的CPMI呈显著正相关关系（$P<0.05$）；稻谷氮素吸收量是影响水稻品质和产量的关键因素，本试验中，稻谷氮素吸收量与分蘖期的CPMI呈显著正相关关系（$P<0.05$），且水稻产量与稻谷氮素吸收量、收获指数均呈显著正相关关系（$P<0.05$），这均为调节水稻产量的关键因素。

3 讨论

3.1 等养分条件下不同绿肥还田对水稻不同生育期碳库管理指数的动态影响

CPMI作为土壤有机质总量及其质量变化较为系统和敏感的监测指标[21]，常用来反映农艺措施对土壤有机质变化的影响[22-23]。在本研究中，CPMI在水稻不同生育期下的动态变化趋势一致，表现为在分蘖期出现降低后缓慢上升。本研究结果显示，与单独施用化肥相比，在有机无机配施的基础上添加紫云英能显著提高CPMI，其中以紫云英-秸秆联合还田效果最佳。紫云英-秸秆联合还田在生育季初期（移栽返青

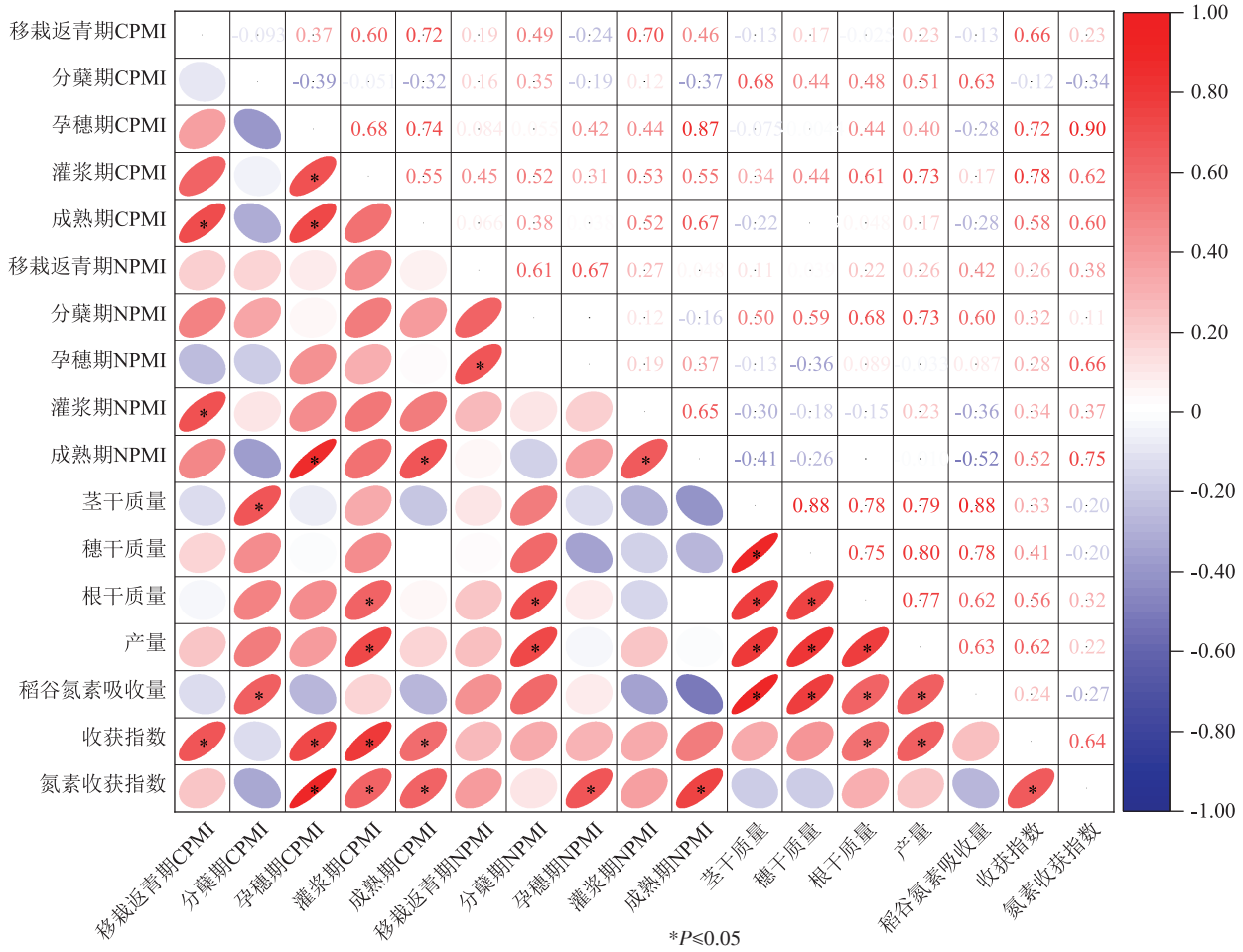


图4 水稻不同生育期碳库管理指数、氮库管理指数与产量、稻谷氮素吸收量、收获指数和氮素收获指数相关矩阵图

Figure 4 Correlation matrix of carbon pool management index, nitrogen pool management index and yield, nitrogen uptake, harvest index and nitrogen harvest index of rice at different growth stages

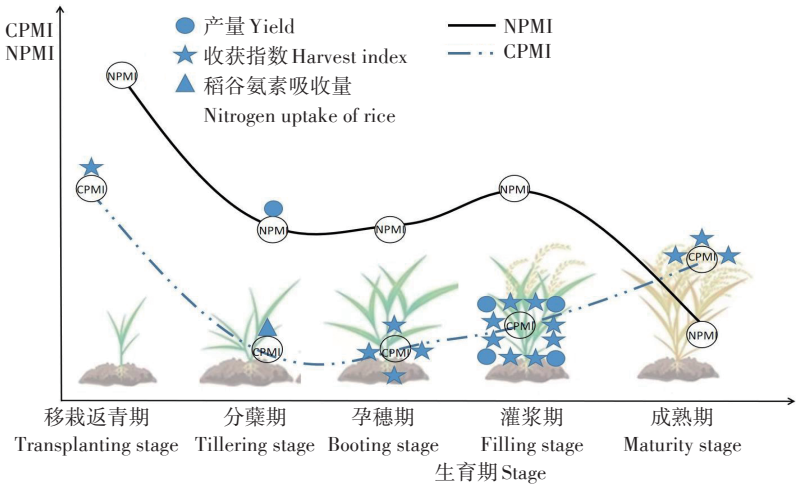


图5 碳库管理指数、氮库管理指数的动态变化与产量、稻谷氮素吸收量和收获指数相关关系概念图

Figure 5 Conceptual diagram of the relationship between the dynamic changes of carbon pool management index and nitrogen pool management index and the yield, nitrogen uptake and harvest index of rice

期)的CPMI显著高于其余处理,这可能是由于紫云英-秸秆联合还田模式产生了较好的激发效应所导致,在此基础上施用熟石灰使得孕穗期的CPMI出现短暂性提升,这可能是由于土壤中加入熟石灰首先改变了土壤pH和微生物活性[24],伴随水稻生长发育,在水稻孕穗期出现最佳效果,同时结合本研究中使用熟

石灰处理的水稻根系干质量最小推断，熟石灰的投入对水稻根系造成损伤从而导致在水稻生育后期土壤碳素养分分解效果差、后力不足，进而造成了在水稻生育后期（灌浆期、成熟期）的CPMI小于不施用熟石灰处理。同时，本研究发现：秸秆与化肥配合还田与单独施用化肥在水稻生育末期的CPMI几乎一致，这与前人的研究结果不同[6,12,25-27]，本研究为第一年开展，稻田土壤中对秸秆腐化利用的微生物菌群丰度和活度较低，导致秸秆腐化效果差[28]，且本研究中秸秆还田方式为直接覆盖还田，该方式与粉碎翻压还田相比对土壤养分的提升效果差[29]，这也是秸秆化肥配施在本研究中还田效果不甚理想的原因。本研究结果显示，与单独施用化肥相比，有机无机配施处理下生长季末期的CPMI提高了0.11~24.65，这与前人研究结果一致：有机无机配施能提高土壤CPMI[30-31]。总体而言，紫云英-秸秆联合还田对土壤CPMI提升效果更加理想，是一种良好的秸秆资源化利用方式。

3.2 等养分条件下不同绿肥还田对水稻不同生育期氮库管理指数的影响

NPMI能反映外界条件对土壤氮及活性氮组分变化的效应[8]。本研究中，NPMI的动态变化表现为在分蘖期和成熟期骤降（图5），这与水稻在这两个时期的生长发育对活性氮素吸收量大有关[32]，同时发现，从发生NPMI骤降前一生育期（移栽返青期、灌浆期）到出现骤降的时期，可溶性无机氮占可溶性总氮的百分比上升，一方面可能是可溶性总氮含量高易发生可溶性氮素径流损失，另一方面是水稻根际和微生物加快了对可溶性有机氮的分解利用，因此导致NPMI骤降、可溶性无机氮素占比上升。谷月[8]对不同有机物还田后滴灌土壤的NPMI研究发现，施用秸秆相比施用牧草和动物粪便对NPMI提升效果更好，但在本研究中，化肥与秸秆配合还田后仅在水稻生育前期（移栽返青期、分蘖期）的NPMI表现出短暂性提升，此后的NPMI均低于其余处理，且本研究中化肥秸秆配施下的CPMI在水稻生育前期（移栽返青期、分蘖期）具有相似表现，结合在本研究中水稻生育前期可溶性有机氮素在可溶性总氮素中占比较高，进一步推测这可能是由于秸秆还田后土壤微生物先对秸秆中易于分解部分进行快速分解和腐化[33]，从而导致生育前期化肥秸秆配施处理下的NPMI、CPMI较高，但在水稻生育后期对秸秆中的纤维素和木质素等难分解养分的腐解率降低[34]。焦欢等[10]研究发现，与对照相比，有机无机配施能分别提高复垦4年和8年土壤的NPMI，本研究结果与其相似，与单独施用化肥相比，除化肥秸秆配施外，其余有机无机配施处理在水稻生长末期的NPMI均有提高，其中在紫云英-秸秆配施化肥的基础上添加熟石灰提升NPMI的效果最佳，这可能是熟石灰的添加一方面对土壤具有杀菌消毒作用，另一方面调节土壤pH，有利于土壤可溶性氮素的增加，进而达到土壤活性氮库扩容的目标。同时本研究发现在水稻生育末期，添加紫云英处理的NPMI优于不添加紫云英处理，且此时期下添加紫云英处理的可溶性无机氮占可溶性总氮的百分比均高于不添加紫云英处理，这进一步说明紫云英作为豆科绿肥代替部分化肥有利于作物对氮素的直接吸收和NPMI的提高。

3.3 水稻不同生育期碳氮库管理指数对水稻氮素吸收量、产量和收获指数的影响

本研究中，产量与稻谷氮素吸收量、收获指数、氮素收获指数均具有显著正相关性，土壤中的养分通过根系吸收、茎部运输，在水稻穗部表达为结实率、千粒质量等关键因素最终影响水稻产量[35]。水稻氮素吸收受土壤养分、环境、微生物等的影响。与可溶性有机氮相比，可溶性无机氮可直接参与水稻生育和土壤微生物活动。本研究发现，化肥秸秆处理下氮素吸收量最高，但氮素收获指数最低，这说明化肥秸秆还田在本研究中不是最优的还田方式。同时，本研究结果表明，分蘖期是影响水稻产量、稻谷氮素吸收量的关键时期，可能原因是：分蘖期水稻植株叶鞘舒展叶面积增大，光合作用增强，对土壤中活性氮素养分吸收量变大[36]，生育前期植株内部氮素的累积为营养器官的发育和水稻产量的提高奠定了基础。在本研究的水稻分蘖期时，化肥秸秆配施处理下可溶性无机态氮占可溶性总氮比例最高，而水稻氮素吸收受外源氮形态影响，无机氮更易被水稻吸收获取，这可能是导致化肥秸秆配施处理氮素吸收量最大的原因。

另外，本研究发现灌浆期CPMI与产量、收获指数和根干质量均呈显著正相关性。水稻在灌浆期进行蛋白质、淀粉等物质的合成，此时期的碳氮代谢过程复杂[37]，土壤中活性有机碳的数量和质量的提高，一方面影响根系活力和根部营养物质的累积，促进对土壤中养分的吸收、运输和转化[38]，另一方面为土壤微生物的活动提供碳源，提高微生物在此生育期的活性，从而影响剑叶、籽粒养分和水稻产量。因此在已知水稻不同生育期CPMI、NPMI与水稻产量关系的基础上，通过在不同生育期对CPMI和NPMI的调控，如施用有机肥、添加液体氮肥及控制含水量[39]等，提高

CPMI、NPMI以达到直接或间接增加产量的目的。

4 结论

（1）水稻分蘖期是影响稻谷氮素吸收和水稻产量的关键时期。

（2）灌浆期CPMI与水稻产量、收获指数呈正相关关系，可通过调节水稻灌浆期的CPMI，以达到直接或间接提高产量的目的。

（3）与不添加紫云英相比，紫云英还田可提高水稻生育末期的CPMI、NPMI、可溶性无机氮占比和氮素收获指数，说明紫云英作为绿肥还田对涵养保护稻田具有积极作用。

（4）紫云英-秸秆联合还田对水稻不同生育期CPMI、NPMI的综合提升效果最佳，并在生育末期与单施化肥处理产生显著性差异，这表明紫云英-秸秆联合还田在一定程度上能够代替部分化肥，提高土壤活性碳、氮养分并实现扩增碳氮库容。

参考文献：

[1] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1)：175-181. NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality：a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1)：175-181.

[2] QIN X, LI Y, WANG B, et al. Nonlinear dependency of N_2O emissions on nitrogen input in dry farming systems may facilitate green development in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2021, 317：107456.

[3] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 有机肥氮投入比例对双季稻田根际土壤微生物生物量碳、氮和微生物熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4)：1335-1343. TANG H M, LI C, XIAO X P, et al. Effects of different manure nitrogen input ratio on rhizosphere soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quotient in double-cropping rice field [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4)：1335-1343.

[4] 陈香碧, 胡亚军, 秦红灵, 等. 稻作系统有机肥替代部分化肥的土壤氮循环特征及增产机制[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3)：1033-1042. CHEN X B, HU Y J, QIN H L, et al. Characteristics of soil nitrogen cycle and mechanisms underlying the increase in rice yield with partial substitution of mineral fertilizers with organic manure in a paddy ecosystem：a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(3)：1033-1042.

[5] 尹彩侠, 孔丽丽, 李前, 等. 优化施肥条件下有机肥部分替代化肥对水稻产量、养分吸收及转运的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(6)：59-63. YIN C X, KONG L L, LI Q, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic manure on rice yield, nutrients absorption and translocation under optimized fertilization[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(6)：59-63.

[6] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4)：459-465. XU M G, YU R, SUN X F, et al. Effects of long-term fertilization on labile organic matter and carbon management index (CMI) of the typical soils of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(4)：459-465.

[7] BLAIR G, LERFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7)：1459.

[8] 谷月. 有机物料还田对膜下滴灌土壤碳氮的动态影响研究[D]. 长春：吉林农业大学, 2021：10, 27-31. GU Y. Returning organic materials to the field：dynamic impacts on soil carbon and nitrogen drip irrigation[D]. Changchun：Jilin Agricultural University, 2021：10, 27-31.

[9] 宋雅菲. 农艺措施对冀北坝上土壤氮素形态及氮库管理指数的影响[D]. 张家口：河北北方学院, 2019：22-29. SONG Y F. Effects of agronomic measures on soil nitrogen form and nitrogen reservoir management index on dam in northern Hebei Province[D]. Zhangjiakou：Hebei North University, 2019：22-29.

[10] 焦欢, 李廷亮, 高继伟, 等. 培肥措施对复垦土壤轻重组有机碳氮的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5)：208-213, 221. JIAO H, LI T L, GAO J W, et al. Effects of fertilization on light and heavy fractions organic nitrogen in reclaimed soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5)：208-213, 221.

[11] 李小磊, 张玉军, 申凤敏, 等. 长期施肥对红壤性水稻土不同土层活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6)：1189-1201. LI X L, ZHANG Y J, SHEN F M, et al. The effects of long-term fertilization on the labile organic matter and carbon pool management index in different soil layers in red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(6)：1189-1201.

[12] CHEN Z, WANG Q, WANG H, et al. Crop yields and soil organic carbon fractions as influenced by straw incorporation in a rice-wheat cropping system in southeastern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2018, 112(1)：61-73.

[13] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 等. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10)：1202-1208. XIAO X P, TANG H M, NIE Z M, et al. Effects of winter cover crop straw recycling on soil organic carbon and soil carbon pool management index in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10)：1202-1208.

[14] LIU X, WANG W, PEÑUELAS J, et al. Effects of nitrogen-enriched biochar on subtropical paddy soil organic carbon pool dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 851(2)：158322.

[15] 陈洪儒, 鲁艳红, 廖育林, 等. 等养分投入下冬种紫云英比秸秆还田更有效抑制稻田CH_4的产生和排放[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(8)：1376-1387. CHEN H R, LU Y H, LIAO Y L, et al. Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) is a more effective inhibitor of methane production and emission than straw under equal nutrient condition in paddy field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(8)：1376-1387.

[16] CHEN X, QIN X, LI Y, et al. Residential and agricultural soils dominate soil organic matter loss in a typical agricultural watershed of subtropical China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2022, 338：108100.

[17] 和江鹏, 王雨晴, 赵海超, 等. 春玉米秸秆还田对土壤碳组分及碳

库管理指数的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(21):224-230. HE J P, WANG Y Q, ZHAO H C, et al. Effects of spring corn stalks returning to field on soil carbon components and carbon pool management index[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(21):224-230.

[18] 梁贻仓, 王俊, 刘全全, 等. 地表覆盖对黄土高原土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5):161-167. LIANG Y C, WANG J, LIU Q Q, et al. Effects of soil surface mulching on soil organic carbon and its fractions in a wheat field in Loess Plateau, China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5):161-167.

[19] 赵丹丹, 王俊, 付鑫. 长期定位施肥对旱作农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1):97-102. ZHAO D D, WANG J, FU X. Effect of long-term fertilization on soil organic carbon and its fractions under dryland farming system[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1):97-102.

[20] QIN X, LI Y, GOLDBERG S, et al. Assessment of indirect N_2O emission factors from agricultural river networks based on long-term study at high temporal resolution[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18):10781-10791.

[21] 沈宏, 曹志洪, 王志明. 不同农田生态系统土壤碳库管理指数的研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3):207. SHEN H, CAO Z H, WANG Z M. Study of carborn pool management index in soils under different agroecosystems[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(3):207.

[22] VERMA S, SHARMA P K. Effect of long-term manuring and fertilizers on carbon pools, soil structure, and sustainability under different cropping systems in wet-temperate zone of northwest Himalayas[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007, 44(1):235-240.

[23] XU M, LOU Y, SUN X, et al. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7):745-752.

[24] 张迪, 吴晓霞, 丁爱芳, 等. 生物炭和熟石灰对土壤镉铅生物有效性和微生物活性的影响[J]. 环境化学, 2019, 38(11):2526-2534. ZHANG D, WU X X, DING A F, et al. Effects of hydrated lime and biochar on the bioavailability of Cd and Pb and microbial activity in a contaminated soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(11):2526-2534.

[25] WANG W, LAI D Y F, WANG C, et al. Effects of rice straw incorporation on active soil organic carbon pools in a subtropical paddy field[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 152:8-16.

[26] ZHOU Z, ZENG X, CHEN K, et al. Long-term straw mulch effects on crop yields and soil organic carbon fractions at different depths under a no-till system on the Chengdu Plain, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5):2143-2152.

[27] ZHU L, HU N, ZHANG Z, et al. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system[J]. *Catena*, 2015, 135:283-289.

[28] 郭振威, 李永山, 陈梦妮, 等. 长期秸秆还田和施用有机肥对连作棉田土壤化学性质及微生物数量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(11):177-186. GUO Z W, LI Y S, CHEN M N, et al. Effects of long-term straw returning and organic fertilizer application on the soil chemical properties and microbial quantity of continuous cropping cotton field[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(11):177-186.

[29] QU Y, FENG B. Straw mulching improved yield of field buckwheat (*Fagopyrum*) by increasing water-temperature use and soil carbon in rain-fed farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1):11-16.

[30] 宇万太, 赵鑫, 马强, 等. 长期定位试验下施肥对潮棕壤活性碳库及碳库管理指数的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3):539-544. YU W T, ZHAO X, MA Q, et al. Effect of long-term fertilization on available carbon pool and carbon pool management index in an aquic brown soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(3):539-544.

[31] 张文锋, 袁颖红, 周际海, 等. 长期施肥对红壤性水稻土碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(4):569-575. ZHANG W F, YUAN Y H, ZHOU J H, et al. Effects of long-term fertilization on the carbon management index and double rice yield in red paddy soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(4):569-575.

[32] 张济世, 张琳, 丁丽, 等. 紫云英还田与化肥减量配施对土壤氮素供应和水稻生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10):1-13. ZHANG J S, ZHANG L, DING L, et al. Effects of Chinese milk vetch incorporation and chemical fertilizer reduction on soil nitrogen supply and rice growth[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10):1-13.

[33] 闫超. 水稻秸秆还田腐解规律及土壤养分特性的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015:100-102. YAN C. Studies on decomposition regularity of returning rice straw and soil nutrient properties[D]. Harbin:Northeast Agricultural University, 2015:100-102.

[34] 蔡艳玲, 何美丹. 水稻秸秆降解研究进展[J]. 广东农业科学, 2014, 41(2):120-124, 132. CAI Y L, HE M D. Research progress of rice straws degradation[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(2):120-124, 132.

[35] 张巍巍, 王伯伦, 姚乾, 等. 水稻穗部性状与产量的关系[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(25):11906-11908, 11936. ZHANG W W, WANG B L, YAO Q, et al. Relationship between ear characaters an yield in rice[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(25):11906-11908, 11936.

[36] 赵庆雷, 马惠, 刘奇华, 等. 水肥调控措施对水稻养分吸收及稻谷产量的影响[J]. 西北农业学报, 2022, 31(2):175-182. ZHAO Q L, MA H, LIU Q H, et al. Effect of water and fertilizer regulation measures on rice nutrie absorption and rice yield[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(2):175-182.

[37] 陈晓昕. 灌浆期水稻碳氮代谢物的变化及其对产量品质的影响[D]. 合肥:安徽农业大学, 2021:11-16. CHEN X X. Changes of carbon and nitrogen metabolites at grain filling stage and their effects on yield and quality in rice[D]. Hefei:Anhui Agricultural University, 2021:11-16.

[38] 许京菊. 高产水稻灌浆期稻米品质与根系特征的关系[D]. 扬州:扬州大学, 2022:30-34. XU J J. Relationship between rice quality and root characteristics at grain filling stage of high-yield rice[D]. Yangzhou:Yangzhou University, 2022:30-34.

[39] 陶龙兴, 王熹, 黄效林, 等. 水稻灌浆期间土壤含水量对根系生理活性的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(11):1616-1620. TAO L X, WANG X, HUANG X L, et al. Effects of soil moisture content on physiological activity of rice root system during filling stage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(11):1616-1620.