

秸秆还田配施腐秆剂下不同氮肥运筹对土壤养分及活性有机碳库的影响

何治逢¹, 王时聪¹, 尹众¹, 王鑫¹, 柴如山¹, 邬刚^{2*}, 刘荣³, 师焕芝⁴, 马超¹
(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 3. 安徽六国化工股份有限公司, 铜陵 244021; 4. 合肥市农业经济技术服务管理总站, 合肥 230091)

摘要: 为探明秸秆促腐还田条件下沿淮地区不同氮肥运筹对土壤养分及活性有机碳库的影响, 为秸秆还田后氮肥的合理施用提供依据, 通过沿淮麦田的定位试验, 设置 4 个处理, 分别为稻秸还田+腐秆剂 (CN₅₂, C/N=52:1)、稻秸还田+腐秆剂+增基减拔施 N 肥 (CN₁₁, C/N=11:1)、稻秸还田+腐秆剂+常规施肥 (CN₁₇, C/N=17:1) 和稻秸还田+腐秆剂+减基增拔施 N 肥 (CN₂₂, C/N=22:1), 并对耕层土壤养分、不同形态碳素、不同形态碳素有效率和碳库管理指数等进行分析。结果发现: 土壤碱解氮以 CN₁₇ 最高, 为 166.23 mg·kg⁻¹, 而土壤速效磷和速效钾以 CN₁₁ 最高, 分别为 22.12 和 138.75 mg·kg⁻¹; 土壤总有机碳、活性有机碳、可溶性有机碳、活性有机碳有效率和可溶性有机碳有效率均以 CN₁₁ 最高, 分别为 15.52 g·kg⁻¹、11.87 g·kg⁻¹、38.04 μg·kg⁻¹、76.49% 和 0.25%; 土壤碳库管理指数也以 CN₁₁ 最高, 为 204.19; 土壤养分含量、碳素有效率与土壤碳库指数的相关性最高。总之, 沿淮地区稻秸促腐还田施用氮肥调节土壤初始 C/N 至 11 时, 土壤养分含量、有机碳中活性组分含量及其有效率和土壤碳库管理指数的提升效果最大。

关键词: 秸秆还田; 腐秆剂; 氮肥运筹; 土壤养分; 活性有机碳; 沿淮地区

中图分类号: S154.3; S147.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2022)03-0462-07

Effects of different nitrogen application methods on soil nutrients and labile organic carbon pool under the condition of straw returning with straw-decomposing microbial inoculant

HE Zhifeng¹, WANG Shicong¹, YIN Zhong¹, WANG Xin¹, CHAI Rushan¹,
WU Gang², LIU Rong³, SHI Huanzhi⁴, MA Chao¹

(1. Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031; 3. Anhui Liuguo Chemical Co., Ltd., Tongling 244021; 4. Hefei Agricultural Economic and Technological Service Management Station, Hefei 230091)

Abstract: In order to provide a basis for rational application of nitrogen fertilizer after straw returning, a field experiment was carried out in area along Huaihe River to explore the effects of different nitrogen application methods on soil nutrients and labile organic carbon pool under the condition of straw returning with straw-decomposing microbial inoculant. Four treatments: rice straw returning + straw-decomposing microbial inoculant (CN₅₂, C/N = 52:1), rice straw returning + straw-decomposing microbial inoculant + fertilized more N base fertilizer (CN₁₁, C/N = 11:1), rice straw returning + straw-decomposing microbial inoculant + recommended N fertilizer (CN₁₇, C/N = 17:1) and rice straw returning + straw-decomposing microbial inoculant + fertilized less N base fertilizer (CN₂₂, C/N = 22:1) were set to analyze soil nutrients, different forms of carbon, different forms of carbon efficiency and carbon pool management index. The results showed that: CN₁₇ treatment had the highest soil available N, which was 166.23 mg·kg⁻¹, CN₁₁ treatment had the highest soil available P and K, which were 22.12 and 138.75 mg·kg⁻¹, respectively;

收稿日期: 2021-10-10

基金项目: 安徽省自然科学基金 (1808085MD97), 国家自然科学基金 (32071628, 41877099), 安徽省重大科技专项 (18030701188), 安徽省农业科学院学科建设项目 (2021YL086) 和安徽农业大学大学生创新创业项目 (XJDCXJDC2020468, XJDC2020492) 共同资助。

作者简介: 何治逢, 硕士研究生。E-mail: 1414537441@qq.com

* 通信作者: 邬刚, 副研究员。E-mail: gangw1987@163.com

CN₁₁ treatment had the highest soil total organic carbon, labile organic carbon, soluble organic carbon, labile organic carbon efficiency and soluble organic carbon efficiency, which were 15.52 g·kg⁻¹, 11.87 g·kg⁻¹, 38.04 μg·kg⁻¹, 76.49% and 0.25%, respectively; the highest carbon pool management index (CPMI) of CN₁₁ was 204.19; correlation analysis showed that the soil nutrient content and carbon efficiency were better related to the soil carbon pool index (CPI). In conclusion, under the condition of rice straw returning to promote decay in region along Huaihe River, applying nitrogen fertilizer to adjust the initial C/N ratio of soil to 11 is the most effective way to improve soil nutrient content, the content and efficiency of labile components in organic carbon and soil carbon pool management index.

Key words: straw returning; straw-decomposing microbial inoculant; nitrogen fertilizer application approach; soil nutrients; labile organic carbon; area along Huaihe River

沿淮地区的农业自然资源条件优越, 是我国主要粮食产区之一^[1]。但是近年来, 沿淮区仍以重化肥而轻有机肥的施肥方式为主, 作物施肥量过大, 特别是氮肥的过量施入, 造成肥效和土壤质量下降^[2]。因此, 通过农业技术措施培肥地力来改善土壤质量, 对提高沿淮地区农田生产力和粮食产量具有重要意义。

土壤有机碳和氮磷钾等养分是土壤肥力的核心因子^[3]。土壤有机碳可划分为活性和惰性两部分, 土壤活性有机碳因其周转迅速, 直接影响土壤微生物活性, 故对农业生产措施的反应更灵敏, 可更好地指示土壤质量。土壤碳库决定着农田土壤质量和农业可持续发展的程度。土壤碳库管理指数评价某项培肥措施下土壤碳库的有效性和土壤肥力的变化^[4]。因此, 研究某项农业技术措施下土壤活性有机碳含量和土壤碳库管理指数的变化情况, 对评价该措施土壤培肥的效果具有重要意义。

农作物秸秆含有丰富的氮、磷、钾和微量元素以及大量的木质素和纤维素等有机物^[5], 将其合理还田能够提高土壤养分和有机质的含量^[6]。然而, 当前因还田秸秆腐解缓慢易造成诸如土壤碳氮比失调、耕作困难、作物产量下降、病虫害增加等问题而难以推广^[7-8]。近年来, 一些学者提出了基于腐秆剂应用的秸秆促腐还田培肥模式, 缓解常规秸秆还田引起的不利影响^[9-10]。但腐秆剂作为一种新型微生物产品, 其田间应用功能并不稳定, 易受配套农艺措施的影响^[1]。秸秆促腐还田配施氮肥可以调解 C/N 比, 提高秸秆腐解速率, 缓解秸秆分解过程中微生物对无机氮素的竞争利用, 为作物生长提供养分^[11-13]。前人研究表明, 秸秆还田配施氮肥调节 C/N 为 15 时, 可显著增加土壤有机质和碱解氮的含量^[14]。王保君等^[15]发现秸秆还田施氮量为 240 kg·hm⁻² 时, 稻田土壤速效磷和速效钾含量较不施氮分别显著增加了 43.16% 和 31.86%。但现阶段的研究主要集中在腐秆剂配合氮肥施用对秸秆还田的培肥效果和作物增产方面, 鲜有从不同氮肥运筹方式下的角度研

究短期秸秆还田配施腐秆剂对土壤养分和活性有机碳库的影响。考虑到外源腐秆菌的引入会使得土壤中土著菌的数量和群落结构发生改变, 势必会影响秸秆腐解的最适 C/N^[16]。因此, 亟需开展秸秆促腐还田条件下的氮肥运筹方案研究, 明确腐秆剂使用后的氮肥最佳基追比。

为此, 本研究通过布置在沿淮稻麦轮作区的定位试验, 对比不同初始 C/N 对稻秸促腐还田后土壤养分、活性碳含量和土壤碳库特征的影响, 分析它们的相关性, 以期明确沿淮地区秸秆还田施用腐秆剂的氮肥最佳基追比, 为该地区秸秆资源和氮肥的合理利用以及土壤的培肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在安徽省霍邱县宋店乡(116°32' E, 32°36' N)的小麦季进行。该地位于淮河流域南岸, 属北亚热带季风气候, 年均积温、年均降雨量和年均气温分别为 5 623 °C、951.3 mm 和 15.4 °C。供试土壤为水稻土, 试验前耕层土壤(0~15 cm) pH 6.05, 有机质 21.3 g·kg⁻¹, 全氮 1.12 g·kg⁻¹, 全磷 0.40 g·kg⁻¹, 全钾 15.42 g·kg⁻¹, 碱解氮 112.0 mg·kg⁻¹, 速效磷 21.2 mg·kg⁻¹, 速效钾 180.0 mg·kg⁻¹。种植制度为水稻-小麦轮作。

1.2 试验材料

供试作物为小麦, 品种为周麦 23。还田秸秆为水稻秸秆, 其有机碳 425.5 g·kg⁻¹, 全氮 8.24 g·kg⁻¹, 全磷 1.05 g·kg⁻¹, 全钾 18.0 g·kg⁻¹。氮肥选用尿素(N 46%), 磷肥选用过磷酸钙(P₂O₅ 12%), 钾肥选用氯化钾(K₂O 60%)。腐秆剂选用商品有机废物发酵菌曲(粉末), 包含枯草芽孢杆菌(2.21×10⁸ cells·g⁻¹)、嗜热脂肪地芽孢杆菌(0.005 4×10⁸ cells·g⁻¹)、青天链霉菌(0.17×10⁸ cells·g⁻¹)和白链霉菌(2.76×10⁸ cells·g⁻¹)。

1.3 试验设计

试验采用随机区组设计, 共设 4 个处理: ① 秸

秆还田+腐秆剂 (CN₅₂, C/N = 52:1); ② 秸秆还田+增基减拔施 N 肥+腐秆剂(CN₁₁, C/N = 11:1); ③ 秸秆还田+常规施肥+腐秆剂 (CN₁₇, C/N = 17:1); ④ 秸秆还田+减基增拔施 N 肥+腐秆剂 (CN₂₂, C/N = 22:1)。水稻秸秆还田量为 6 000 kg·hm⁻², 各处理均

将用量为 30 kg·hm⁻²的腐秆剂均匀撒施到铺好粉碎秸秆 (长度为 10 cm 左右) 的田内并立即翻耕, 翻耕深度为 15 cm。每个处理 3 次重复, 小区面积为 24 m²。试验各处理施肥方案见表 1。

表 1 田间小区试验施肥量
Table 1 Fertilization application rates in field plot experiment

处理	N/ (kg·hm ⁻²)		P ₂ O ₅ 基肥/(kg·hm ⁻²)	K ₂ O 基肥/(kg·hm ⁻²)
	基肥	拔节肥		
CN ₅₂	-	-	-	-
CN ₁₁	187.5	7.5	45.0	52.5
CN ₁₇	105.0	90.0	45.0	52.5
CN ₂₂	67.5	127.5	45.0	52.5

1.4 样品采集与测定

小麦收获后, 用土钻在各小区内按“五点对角线法”法采集耕层土壤 (0 ~ 15 cm) 5 个点混合, 一部分风干过筛用于测定土壤养分和总有机碳等指标, 一部分保存于 4 °C 冰箱中用于测定土壤微生物量碳和可溶性有机碳等指标。总有机碳、土壤活性有机碳、土壤微生物量碳和土壤可溶性有机碳的测定和计算方法分别参照文献[17-20]; 土壤养分测定参照常规分析方法[21]。

1.5 数据计算和分析

活性有机碳有效率 A_{LC} (%), 微生物量碳有效率 A_{MC} (%), 可溶性碳有效率 A_{DC} (%), 碳库指数 (CPI)、碳库活度 (L)、碳库活度指数 (LI) 以及碳库管理指数 (CPMI) 的计算方法参照文献[22]。

采用 One-way ANOVA 和 Duncan 多重比较法 ($P < 0.05$) 分析不同氮基肥用量下土壤养分、不同形态碳素、活性碳有效率及碳库管理指数的差异; 采用皮尔逊相关性检验分析土壤不同形态碳素有效率、碳库管理指数和土壤肥力指标之间的相关性。统计分析和图形制作分别由软件 SPSS19.0 和 Origin 9.0 实现。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量

不同处理对土壤主要养分含量的影响结果 (表 2) 显示, 施氮肥处理 (CN₁₇、CN₁₁ 和 CN₂₂) 土壤全量养分含量均略高于对照不施氮肥处理 (CN₅₂), 土壤全氮和全磷的增加量介于 0.06 ~ 0.12 g·kg⁻¹、0.00 ~ 0.03 g·kg⁻¹, 差异不显著 ($P > 0.05$)。不同处理之间土壤速效养分含量差异显著 ($P < 0.05$)。施氮肥处理 (CN₁₇、CN₁₁ 和 CN₂₂) 皆显著提高了土壤中的碱解氮含量, 其中以处理 CN₁₇ 最高, 比对照处理增加了 57.5%, 处理 CN₁₁、CN₂₂ 分别增加了 24.1% 和 23.0%; 处理 CN₁₁ 的速效磷含量最高, 较对照处理增加了 38.3%, 差异显著 ($P < 0.05$); 处理 CN₂₂ 则增加了 18.7%, 差异显著 ($P < 0.05$); 处理 CN₁₇ 增加了 3.1%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。处理 CN₁₁ 的速效钾含量同样处于最高水平, 较对照处理增加了 14.0%, 差异显著 ($P < 0.05$), 而处理 CN₁₇ 和 CN₂₂ 的速效钾含量则分别降低了 0.3% 和 2.4%, 差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 2 不同氮基肥用量对土壤主要养分含量的影响

Table 2 Effects of different amount of nitrogen-based fertilizer on soil major nutrients

处理	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾 / (mg·kg ⁻¹)
CN ₅₂	1.09 ± 0.01 ^a	0.48 ± 0.02 ^a	14.43 ± 0.15 ^a	105.56 ± 0.00 ^c	15.99 ± 0.68 ^c	121.67 ± 5.14 ^b
CN ₁₁	1.16 ± 0.12 ^a	0.51 ± 0.05 ^a	14.36 ± 0.24 ^a	131.04 ± 2.97 ^b	22.12 ± 1.69 ^a	138.75 ± 5.10 ^a
CN ₁₇	1.21 ± 0.01 ^a	0.48 ± 0.03 ^a	14.40 ± 0.26 ^a	166.23 ± 7.48 ^a	16.48 ± 0.82 ^{bc}	121.25 ± 9.19 ^b
CN ₂₂	1.15 ± 0.08 ^a	0.51 ± 0.04 ^a	14.31 ± 0.12 ^a	129.83 ± 6.19 ^b	18.98 ± 1.03 ^b	118.75 ± 7.14 ^b

注: 同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 土壤不同形态碳的含量及活性碳有效率

除可溶性碳外, 秸秆促腐还田配施氮肥较不施氮肥可不同程度地增加土壤碳含量及其有效率 (表

3)。其中, 处理 CN₁₇、CN₁₁ 和 CN₂₂ 的总有机碳含量较 CN₅₂ 分别增加 4.3%、16.6% 和 7.7%, 差异显著 ($P < 0.05$); 活性有机碳含量分别增加 13.4%、28.2%

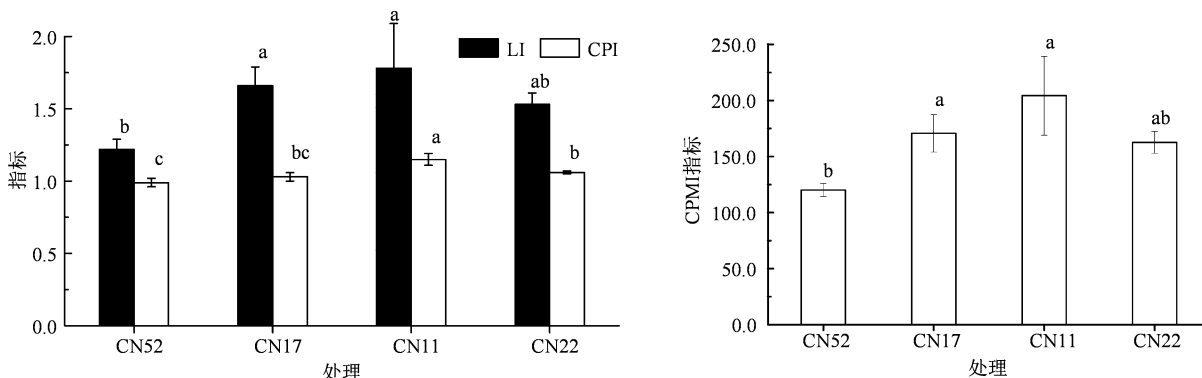
和 14.8%，差异显著 ($P < 0.05$)；微生物生物量碳分别增加 4.5%、3.8%和 4.2%，差异不显著 ($P > 0.05$)；可溶性有机碳含量仅 CN₁₁ 较对照处理显著增加了 149.0% ($P < 0.05$)，CN₁₇ 和 CN₂₂ 则分别降低了 66.8% ($P < 0.05$) 和 17.7% ($P > 0.05$)；CN₁₇ 和 CN₁₁ 的活性有机碳有效率较对照处理分别增加了 8.7% 和

9.9%，差异显著 ($P < 0.05$)，而处理 CN₂₂ 增加了 6.6%，差异不显著 ($P > 0.05$)；微生物生物量碳有效率除 CN₁₇ 较对照处理增加了 0.4% 外，CN₁₁ 和 CN₂₂ 分别降低了 11.1% 和 3.6%，差异不显著 ($P > 0.05$)；可溶性有机碳有效率仅 CN₁₁ 显著增加 127.3%，CN₁₇ 和 CN₂₂ 分别显著降低 63.6% 和 18.2% ($P < 0.05$)。

表 3 不同处理对不同形态碳含量及活性碳有效率的影响

Table 3 Effects of different treatments on different forms of carbon contents and labile organic carbon efficiency

处理	总有机碳/ (g·kg ⁻¹)	活性有机碳/ (g·kg ⁻¹)	微生物生物量碳/ (μg·g ⁻¹)	可溶性有机碳/ (μg·g ⁻¹)	活性有机碳 有效率 A _{LC} /%	微生物生物量碳 有效率 A _{MC} /%	可溶性有机碳 有效率 A _{DC} /%
CN ₅₂	13.31 ± 0.40 ^c	9.26 ± 0.24 ^c	370.43 ± 46.63 ^a	15.28 ± 1.67 ^b	69.57 ± 1.21 ^b	2.79 ± 0.41 ^a	0.11 ± 0.01 ^b
CN ₁₁	15.52 ± 0.49 ^a	11.87 ± 0.62 ^a	384.66 ± 9.68 ^a	38.04 ± 1.03 ^a	76.49 ± 3.49 ^a	2.48 ± 0.13 ^a	0.25 ± 0.01 ^a
CN ₁₇	13.88 ± 0.41 ^b	10.50 ± 0.44 ^b	387.25 ± 62.63 ^a	5.07 ± 1.83 ^c	75.61 ± 1.41 ^a	2.80 ± 0.48 ^a	0.04 ± 0.01 ^d
CN ₂₂	14.33 ± 0.13 ^b	10.63 ± 0.24 ^b	386.05 ± 58.29 ^a	12.58 ± 0.27 ^b	74.18 ± 0.98 ^{ab}	2.69 ± 0.41 ^a	0.09 ± 0.00 ^c



LI: 碳库活度指数; CPI: 碳库指数; CPMI: 碳库管理指数。

图 1 不同处理小麦季土壤 LI、CPI 和 CPMI 的变化

Figure 1 Changes of LI, CPI and CPMI in soil during wheat season under different treatments

表 4 碳素有效率、碳库管理指数与土壤养分的相关性

Table 4 Relationships between soil fertility and ALC, AMC, ADC and CPMI

项目	全氮	全磷	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	微生物 生物量碳	可溶性 有机碳	活性 有机碳	总有 机碳
活性有机碳有效率	0.336	0.113	0.081	0.548	0.500	0.334	0.105	0.238	0.837	0.553
微生物生物量碳 有效率	-0.333	-0.523	0.591*	0.152	-0.428	-0.094	0.905**	-0.346	-0.375	-0.467
可溶性有机碳 有效率	-0.160	0.177	-0.010	-0.413	0.737**	0.674*	-0.064	0.997**	0.556	0.695
碳库活度指数	0.273	0.085	0.104	0.472	0.511	0.371	0.057	0.313	0.843	0.564
碳库指数	0.355	0.584*	-0.249	0.125	0.958**	0.584*	-0.038	0.754**	0.914	0.999*
碳库管理指数	0.324	0.240	0.021	0.396	0.688*	0.482	0.032	0.476	0.942	0.738

注: *和**分别表示显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.001$) 相关。

2.3 土壤碳库管理指数

小麦季不同处理的碳库活度管理指数 (LI)、碳库指数 (CPI) 和碳库管理指数 (CPMI) 如图 1 所示。秸秆促腐还田配施氮肥后土壤的 LI、CPI 和 CPMI 值整体高于不施氮肥处理 CN₅₂。CN₁₇、CN₁₁ 和 CN₂₂ 的 LI 值较 CN₅₂ 分别增加 36.1%、45.9% 和 25.4%，CPI 值分别增加 4.0%、16.1% 和 7.1%，CPMI

值分别增加 42.1%、70.0% 和 35.4%。且处理 CN₁₇、CN₁₁ 与处理 CN₅₂ 间 LI、CPMI 值的差异达显著水平 ($P < 0.05$)，处理 CN₁₁、CN₂₂ 与 CN₅₂ 间 CPI 值的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤不同形态碳素有效率、碳库管理指数与土壤养分的相关性

相关性分析结果表明，土壤微生物生物量碳有

效率与全钾、微生物生物量碳分别存在显著正相关 ($P < 0.05$) 和极显著正相关关系 ($P < 0.01$); 土壤可溶性有机碳有效率与速效钾显著正相关 ($P < 0.05$), 与速效磷和可溶性有机碳极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤碳库指数 (CPI) 与全磷和总有机碳显著正相关 ($P < 0.05$), 与速效磷和可溶性有机碳极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤碳库管理指数和速效磷显著正相关 ($P < 0.05$) (表 4)。

3 讨论

3.1 不同氨基肥用量对土壤养分含量的影响

前人研究表明, 秸秆还田后施用氮肥可以促进秸秆分解、腐熟过程, 减少微生物对土壤氮的固持, 增加土壤氮素有效性, 为作物后期生长提供养分^[23]。本研究也得出了类似的结果, 秸秆促腐还田配施氮肥的处理土壤速效养分含量显著高于不施氮肥的处理, 增施氮肥的处理 CN₁₁ 速效磷、钾含量和平衡施氮的处理 CN₁₇ 碱解氮含量显著高于其他处理 ($P < 0.05$) (表 2)。这主要是因为处理 CN₁₇ 中充足的基肥氮素可以缓解作物与微生物之间对氮素的竞争, 有利于提高微生物的数量和活性, 使土壤微生物更好地参与土壤养分的循环过程中^[24]。到了作物生长的中后期, 土壤微生物群落演替, 先前被固持的氮素从微生物体内开始释放出来, 土壤碱解氮含量骤升^[25], 然而处理 CN₁₁ 较高的氮投入导致大量氮素在土壤中累积, 这不利于微生物的存活, 限制了土壤微生物对磷、钾的吸收^[26], 故使得平衡施肥的处理 CN₁₇ 维持了最高的碱解氮含量, 增施氮肥的处理 CN₁₁ 维持了最高的速效磷和速效钾含量 ($P < 0.05$)。处理 CN₁₁ 速效磷含量之所以最高, 可能是因为施氮量偏高使得铵基肥料氧化释放质子进而导致土壤酸化, 提高了土壤中某些对磷利用能力强的微生物的丰度^[27], 使得速效磷含量上升。相比对照处理 CN₅₂, 处理 CN₂₂ 也会显著提高土壤碱解氮和速效磷的含量。这是因为在秸秆自身 C/N 较高时, 基肥减施氮肥和拔节期增施氮肥同样可以调节 C/N 比, 满足秸秆腐解需要, 从而增加土壤碱解氮含量^[28]。氮添加在一定程度上增加了土壤中 N 的含量, 但较高的氮添加可能也会造成土壤酸化^[29], 使得土壤中有效磷含量增加^[30]。至于土壤全量养分含量, 促腐还田配施氮肥的处理总体上高于对照, 但差异不显著, 则可能是因为田间条件下影响结果差异因素的复杂性, 使得部分全量养分的增加趋势未达到统计学显著水平, 但是也能在一定程度上反映处理的效果。

3.2 不同氨基肥用量对土壤不同形态碳素及活性碳有效率的影响

本研究显示, 秸秆促腐还田配施氮肥的处理有机碳不同组分显著高于不施氮肥的处理。这一结果与郭万里等^[31]研究发现类似: 与不施氮肥对比, 秸秆还田配施 50 和 100 kg·hm⁻² 氮肥时, 土壤中各活性有机碳 (SOC、MBC、EOC 以及 DOC) 均显著增加。秸秆中富含大量的碳、氮是增加土壤有机碳的重要来源^[18], 当秸秆、腐秆剂和化肥施入土壤后, 增强了土壤中有关微生物的新陈代谢。因此, 相关的土壤酶活性得到显著提升, 从而促进秸秆的腐解和养分的释放^[32]。高施氮量不仅有利于作物生长, 同时也促进了根际碳沉积, 使得土壤不同形态碳素含量上升^[33]。本研究还发现: 增基减拔施 N 肥的处理 CN₁₁ 的总有机碳、活性有机碳、可溶性有机碳和可溶性有机碳有效率显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。前人也得到了类似的结果, 如 Guo 等^[34]发现在作物生长施基肥的时候, 施入充足的氮肥可以提高水稻秸秆的腐解速率, 促进更多秸秆碳素的释放; 也有研究指出当作物基肥施入比例过大时, 土壤有机碳含量和土壤酶活性也会更高^[35]。综上, 秸秆还田配施腐秆剂下适量提高基肥氮比例, 可以增加土壤酶活性, 促进水稻秸秆碳素分解, 提高土壤碳素水平。

3.3 不同氨基肥用量对土壤碳库指数、碳库活度指数和碳库管理指数的影响

相较于处理 CN₅₂, 本研究中秸秆促腐还田下添加不同比例的氮肥均能显著提高土壤碳库活度指数、碳库指数和碳库管理指数, 且增基减拔施 N 肥的处理 CN₁₁ 对上述指标的提升幅度最大 ($P < 0.05$) (图 1)。与单施秸秆相比, 处理 CN₁₁ 最有利于土壤碳库指数和碳库管理指数的提高。这是因为碳库活度指数和碳库指数分别决定于土壤活性有机碳和有机碳^[22], 而处理 CN₁₁ 显著增加了土壤活性有机碳和有机碳含量, 所以 LI 和 CPI 最高, 使得 CPMI 表现为增加, 这与马艳芹等^[36]对不同氮肥用量下紫云英还田的土壤碳库管理指数的研究结果大体一致。相关性分析表明: 土壤养分、不同形态碳素和土壤碳库指数 (CPI) 呈显著 (或极显著) 相关的指标最多, 和土壤碳库管理指数 (CPMI) 相关的指标最少 (表 4)。该结果与马超等^[10]的研究结果不一致, 这或可归因于前人的试验并未关注氮肥施用量, 而本试验通过施氮调控了秸秆还田的初始 C/N。诸多研究表明, 外加新鲜有机质能够通过激活土壤中多种微生物活性提高对土壤固有有机质的降解^[37-38]。本试验中, 作为外源有机质的稻秸 C/N 高

达 52, 且本地区主要为需氮量高的水稻-小麦轮作体系^[39], 秸秆促腐还田可以配施一定量的氮肥可以促进秸秆降解, 加速秸秆碳向土壤碳转化, 进而使得土壤 TOC 和速效养分含量上升。而 CPI 与土壤 TOC 相关, 故因不同施氮量引起的 TOC、速效养分上升与 CPI 相关。从表 4 还可得知, 土壤养分、不同形态碳素与 LI 没有相关性, 而 LI 与 CPMI 相关, 因而土壤养分、不同形态碳素和 CPMI 之间相关性较低。所以当施肥措施涉及不同施氮水平时, CPI 与速效养分、不同形态碳素的相关性较好。而马超等^[10]的研究设置了不同水平的 P、K 肥处理, 直接刺激了碳库活性组分含量, 使得土壤肥力与有机碳库发生显著变化, 此时 CPMI 可以对土壤的质量、肥力状况起到很好的指示作用。

4 结论

秸秆促腐还田配施不同比例的氮肥均提高沿淮地区土壤的土壤养分及活性有机碳库, 尤以增基减拔施 N 肥的促腐还田措施 (CN₁₁) 提升效果最为显著。土壤碳库指数与土壤碳库管理指数相比可更好地反映秸秆促腐还田配施氮肥对土壤的培肥效果。值得一提的是, 尽管氮肥施用量仅基肥与拔节肥的施用比例不一致, 而 C/N 比是根据基肥与秸秆量进行计算的, 本研究也未在拔节期前取样, 但是这并不影响不同氮肥运筹方式下秸秆促腐还田对土壤质量影响的研究重点。因此建议在该区进行秸秆还田促腐时, 增施氮肥调节 CN₁₁, 从而实现沿淮地区稻麦轮作系统下秸秆资源和氮肥的合理利用以及土壤的培肥。

参考文献:

- [1] 王文鹏, 毛如志, 陈建斌, 等. 种植方式对玉米不同生长期土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1293-1301.
- [2] 王宜伦, 张许, 谭金芳, 等. 农业可持续发展中的土壤肥料问题与对策[J]. 中国农学通报, 2008, 24(11): 278-281.
- [3] UHM M J, NOH J J, CHON H G, et al. Application effect of organic fertilizer and chemical fertilizer on the watermelon growth and soil chemical properties in greenhouse[J]. Korean J Environ Agric, 2012, 31(1): 1-8.
- [4] BLAIR G J, LEFROY R, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Aust J Agric Res, 1995, 46(7): 1459.
- [5] XU M G, LOU Y L, SUN X L, et al. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation[J]. Biol Fertil Soils, 2011, 47(7): 745-752.
- [6] 王海候, 金梅娟, 陆长婴, 等. 秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 755-764.
- [7] 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.
- [8] 勉有明, 李荣, 侯贤清, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对砂性土壤性质及滴灌玉米生长的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(10): 2343-2351.
- [9] 马超, 周静, 郑学博, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分和小麦产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 30-35.
- [10] 马超, 周静, 刘满强, 等. 秸秆促腐还田对土壤养分及活性有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 915-921.
- [11] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1565-1577.
- [12] 朱远芹, 金梦灿, 马超, 等. 外源氮肥和腐熟剂对小麦秸秆腐解的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(3): 612-619.
- [13] 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.
- [14] 李威, 成永旭, 孙颖, 等. 秸秆还田配施氮肥对冬春季稻田水质、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.
- [15] 王保君, 金海刚, 张红梅, 等. 华北地区秸秆全量还田下氮肥用量对单季晚粳稻生长和土壤养分、碳库的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 60-66.
- [16] 庄睿花, 朱媛媛, 王玉宝, 等. 秸秆配伍腐秆剂还田的最适氮肥运筹方案研究[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(1): 89-94.
- [17] 郑凤君, 王雪, 李景, 等. 免耕条件下施用有机肥对冬小麦土壤酶及活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(6): 1202-1213.
- [18] 李玉梅, 王根林, 孟祥海, 等. 秸秆还田方式对旱地草甸土活性有机碳组分的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(2): 268-276.
- [19] 王健波. 耕作方式对旱地冬小麦土壤有机碳转化及水分利用影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [20] 张华渝, 王克勤, 宋娅丽. 滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 50-57.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [22] 熊翔宇, 程谅. 长期施肥对南方红壤碳库管理指数的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 73-79.
- [23] 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.
- [24] ZHONG Y, YAN W M, SHANGGUAN Z P. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies[J]. Soil Biol Biochem, 2015, 91: 151-159.
- [25] 张丽, 张磊, 鲁剑巍, 等. 添加尿素和秸秆对三熟制水旱轮作土壤各形态氮素的影响[J]. 土壤, 2017, 49(1): 13-18.

- [26] 闫洪奎, 于泽, 王欣然, 等. 基于旋耕玉米秸秆还田条件下土壤微生物、酶及速效养分的动态特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 276-282.
- [27] NING Q, CHEN L, JIA Z J, et al. Multiple long-term observations reveal a strategy for soil pH-dependent fertilization and fungal communities in support of agricultural production[J]. *Agric Ecosyst Environ*, 2020, 293: 106837.
- [28] 张电学, 韩志卿, 刘微, 等. 玉米秸秆直接还田配施促腐剂效应研究 I. 对土壤氮素时空动态变化和作物产量的影响[J]. 河北职业技术师范学院学报, 2003, 17(4): 5-9,14.
- [29] CAMERON K C, DI H J, MOIR J L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review[J]. *Ann Appl Biol*, 2013, 162(2): 145-173.
- [30] 李瑞瑞, 卢艺, 王益明, 等. 氮添加对墨西哥柏人工林土壤碳氮磷化学计量特征及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 384-393.
- [31] 郭万里, 武均, 蔡立群, 等. 不同氮素水平下生物质炭、秸秆添加对陇中黄土高原旱作农田土壤活性有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 283-291.
- [32] 张鑫, 周卫, 艾超, 等. 秸秆还田下氮肥运筹对夏玉米不同时期土壤酶活性及细菌群落结构的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 295-306.
- [33] 王士超, 闫志浩, 王瑾瑜, 等. 秸秆还田配施氮肥对稻田土壤活性碳氮动态变化的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(4): 782-794.
- [34] GUO T, ZHANG Q, AI C, et al. Nitrogen enrichment regulates straw decomposition and its associated microbial community in a double-rice cropping system[J]. *Sci Rep*, 2018, 8(1): 1847.
- [35] 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.
- [36] 马艳芹, 黄国勤. 紫云英还田配施氮肥对稻田土壤碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(1): 129-135.
- [37] 刘少文, 殷敏, 褚光, 等. 土壤氮激发效应及其微生物机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 303-312.
- [38] 田玉强, 陈颖, 欧阳胜男, 等. 外源性碳氮添加对北方半干旱草原土壤有机质矿化的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(6): 1101-1108.
- [39] 宋三多, 刘汉军, 刘轶豪, 等. 沼肥施用对成都平原稻麦轮作土壤及作物养分和重金属含量的影响[J]. 生态科学, 2018, 37(1): 35-41.

安徽农业大学植物保护学院在《自然通讯》发表高水平研究论文

近日, 国际高水平学术期刊《自然通讯》(Nature Communications 影响因子: 14.919) 在线发表了我校植物保护学院绿色农药研发与应用团队题为《芳香碳氧亲电试剂的立体选择性烷基化偶联》(Enantioselective alkylative cross-coupling of unactivated aromatic C-O electrophiles) 的研究论文。

在医药及农药研发过程中, 通过在候选药物分子中引入烷基, 尤其是甲基, 可以显著地调节其生理活性, 改善半衰期、溶解度及靶向选择性等。这种效应通常被称为“神奇的甲基化效应(magic methyl effect)”。因此, 对具有潜在生物活性有机分子进行甲基化修饰已经发展成为新药研发中最常用的策略之一。

我校绿色农药研发与应用团队在实验室前期工作(JACS2021,143, 18380-18387)的基础上, 基于对芳香碳杂键断裂过程立体化学控制规律的深入研究, 通过对催化体系的进一步优化发展了廉价易得含氧化合物参与的立体选择性烷基化反应, 实现了 β -位烷基取代轴手性酚类骨架的高效合成。通过酰代烷基试剂的使用, 进一步将酰代甲基引入到轴手性酚类化合物中。基于机理研究进一步揭示了双配体配位过渡金属物种为该反应中具有催化活性的催化物种。

安徽农业大学为第一通讯单位, 我校曹志超教授为该论文通讯作者, 研究生张子硕、张金同以及团队教师高全副教授为该论文第一作者。该工作得到了安徽农业大学引进高层次人才科研启动经费、安徽农业大学揭榜挂帅项目以及安徽省自然科学基金的支持。