

胡启良, 杨滨娟, 刘宁, 等. 绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 16-26.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.06.002

绿肥混播下不同施氮量对水稻产量、 土壤碳氮和微生物群落的影响

胡启良, 杨滨娟, 刘宁, 黄国勤

江西农业大学生态科学研究中心, 南昌 330045

摘要 为探究绿肥混播与氮肥配施对水稻产量、土壤碳氮和微生物群落的影响, 明确影响微生物群落结构的主要环境因子, 在紫云英与油菜混播的条件下, 设置不施氮(CK)、常规施氮(MRN)与减施氮肥常规量20%、40%、60%(MRN1、MRN2、MRN3)共5个处理, 测定水稻产量及构成要素、土壤碳组分、土壤氮组分和微生物群落相对丰度, 分析碳氮对微生物群落的影响。结果显示: 与CK相比, 早稻产量增加24.42%~39.23%, 晚稻增产19.34%~31.59%, 处理MRN1早稻和晚稻的产量最高; 与CK相比, MRN1处理的确态氮、铵态氮、碱解氮含量分别显著高出22.07%、19.05%、11.20% ($P < 0.05$)。土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳的含量随施氮减少而增加; 土壤硝态氮和碱解氮含量随施氮量的减少而降低。优势细菌是绿弯菌门、变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、厚壁菌门; 增施氮肥增加了细菌群落的均匀度指数。碱解氮、硝态氮、铵态氮与优势菌群呈负相关关系; 微生物量氮、易氧化有机碳、可溶性有机碳与优势菌群呈正相关关系; 对细菌群落结构影响最大的环境因子是碱解氮、微生物量氮和可溶性有机碳。以上结果表明, 绿肥混播与减氮20%提升了水稻产量和土壤无机氮含量, 增加了优势细菌群落丰度, 有利于稻田减排增效, 并维持稻田生态系统稳定。

关键词 绿肥混播还田; 水稻产量; 减施氮肥; 土壤碳氮; 微生物群落; 稻田生态平衡

中图分类号: S142; S154.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)06-0016-11

我国农业生产每年大约使用0.3亿t氮肥, 约占全球农业氮肥使用量的30%^[1]。有研究表明, 我国的氮肥利用率仅有30%^[2], 远低于西方发达国家。过量施用氮肥, 不仅导致大量氮素盈余和地下硝酸盐污染^[3], 破坏了农田生态环境, 而且会降低作物产量和农产品品质^[4], 目前我国农业生产特别是在水稻生产中普遍存在过量施用氮肥和氮肥利用率偏低的情况, 严重影响了稻田生态系统的稳定性和可持续性^[5], 不利于农业的可持续发展。因此, 如何提高氮肥利用效率, 缓解稻田农业环境压力, 维持土壤健康, 是当前农业研究的重要方向。

绿肥作为有机物还田为土壤增加丰富的养分、促进土壤中难溶性养分转化、改善土壤理化性状、增加土壤微生物活动以及有利于水土保持^[6]。紫云英

与油菜混播, 充分利用光、温、水资源和生态位差, 较单播绿肥养分供给、提高水稻产量和培肥土壤效果更好。黄建余等^[7]研究表明, 紫云英与油菜混播的鲜草还田总量较紫云英单播处理高出了7 395~9 795 kg/hm²。张秋丽等^[8]研究表明, 紫云英与油菜以合适的比例混播可显著提升后茬水稻产量。绿肥间作能显著提高土壤养分利用效率和土壤微生物量, 影响微生物活性和群落结构^[9-10]。有研究表明在保证水稻稳产的前提下, 紫云英能够代替20%~40%的化肥^[7]。夏文建等^[11]研究表明, 绿肥还田能够有效增加表层土壤的有机碳和可溶性有机碳的含量, 有研究表明, 绿肥还田能增加土壤总有机碳、轻组有机碳和可溶性有机碳的含量^[12-13], 张迪等^[14]研究结果表明, 增施有机肥可以显著增加水稻土可溶性有机

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300208); 国家自然科学基金项目(32160528; 41661070); 江西农业大学生态学“十三五”校级重点(建设)学科专项

胡启良, E-mail: hu_qiliang@163.com

通信作者: 黄国勤, E-mail: hgqjxes@sina.com

碳、微生物量碳以及易氧化有机碳含量;肖小平等^[15]研究表明稻草还田下短期内的减氮不会显著降低土壤的全氮含量,但会显著降低土壤的碱解氮含量。土壤C/N变化会影响土壤微生物量和有机肥中的元素固定与释放,进而影响土壤肥力和土壤碳氮循环^[16-17]。倡国涵等^[18]研究表明,长期种植绿肥能够提高农田土壤中细菌、真菌和放线菌的丰度以及土壤微生物量碳的含量。不同的施肥措施不仅影响着土壤的理化性质,也影响着微生物生长发育所需要的养分、水分、空气、酸碱度、渗透压和温度等;绿肥翻压还田与减施氮肥改变能够改变土壤“碳”源和“氮”源^[20],从影响土壤微生物群落结构。

目前关于绿肥还田与减施氮肥的研究,大多关注后茬作物产量和土壤养分,而关于土壤碳氮和微生物群落结构的研究较少。本研究探讨在绿肥混播还田下,减施氮肥对土壤活性有机碳组分和氮组分的影响及微生物多样性和群落结构的变化,旨在为提升稻田产量、土壤肥力和维持生态系统平衡提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年9月—2021年11月,在江西农业大学科技园水稻试验田(28°46'N,115°55'E)进行。试验地属于亚热带季风性湿润气候,年均太阳总辐射量为 4.79×10^{13} J/hm²,年均日照时数为1 852 h,年均日温 ≥ 0 °C的有效积温达6 450 °C,年降水量1 665.7 mm,年平均气温17.1~17.8 °C。供试验土壤为发育于第四纪的红黏土,为亚热带典型红壤分布区。试验开始时有机质含量(34.93±0.41) g/kg,全氮含量(2.00±0.02) g/kg,有效磷含量(15.58±1.41) mg/kg,速效钾含量(41.73±1.08) mg/kg,pH值4.98±0.02。

1.2 供试材料

供试作物与品种:紫云英(余江大叶籽)、油菜(中油5号)、早稻(中嘉早17)、晚稻(天优华占)。

1.3 试验设计

在冬季种植紫云英18.75 kg/hm²+油菜3.75 kg/hm²的条件下,设置0、150、120、90和60 kg/hm²5个施氮水平(CK、MRN、MRN1、MRN2、MRN3)共5个处理,3个重复,15个小区,每小区面积为16.5 m²(5.5 m × 3 m),小区间用高30 cm的水泥埂隔开,试

验前各小区土壤肥力均匀一致,每小区施肥量见表1,两边设有保护行,保护行宽度为30 cm。

紫云英于2020年9月29日撒播,不施肥;油菜于2020年11月11日撒播,不施肥。早稻于2021年3月25日播种,5月3日移栽,7月21日收获;晚稻于6月27日播种,7月28日移栽,10月24日收获。化肥种类及其用量参照当地常规施肥:氮肥(N)150 kg/hm²,钾肥(K₂O)120 kg/hm²,磷肥(P₂O₅)90 kg/hm²。氮肥(N 46%)按基肥:分蘖肥:穗肥=3:4:3,钾肥(K₂O 60%)按分蘖肥:穗肥=7:3施入,钙镁磷肥(P₂O₅ 12%)全部做基肥施入。

表1 紫云英油菜混播与减氮试验设计

Table 1 Experimental design of mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed and reduced application of nitrogen fertilizer kg/hm²

处理 Treatment	早稻施氮量 Nitrogen application to early rice	晚稻施氮量 Nitrogen application to late rice
CK	0	0
MRN	150	150
MRN1	120	120
MRN2	90	90
MRN3	60	60

注 Note: CK:紫云英、油菜混播+不施氮肥 Mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed+no nitrogen; MRN:紫云英、油菜混播+100%氮肥 Mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed+conventional nitrogen application; MRN1:紫云英、油菜混播+减施20% Mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed+reduced nitrogen application by 20%; MRN2:紫云英、油菜混播+减施40% Mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed+reduced nitrogen application by 40%; MRN3:紫云英、油菜混播+减施60%氮肥 Mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed+reduced nitrogen application by 60%。下同 The same as follows.

1.4 样品采集与测定

1)水稻测产及考种。于早晚稻成熟期,各小区普查20蔸作为有效穗计算的依据,用平均法在各小区随机选取有代表性的水稻植株5蔸,风干后作为考种材料。用清水漂洗,去空秕粒晾干后,用1/100分析天平测千粒重(干质量);每小区单打实收作为实际产量。水稻考种项目包括有效穗数、结实率、每穗粒数、千粒重。

2)土壤活性有机碳测定。于晚稻收获后,每小区按5点法取土样,取0~15 cm的耕作层土壤,混合均匀,一部分土壤自然风干,除去杂质过筛,存放于

4℃冰箱用于活性有机碳的测定。土壤总有机碳测定采用重铬酸钾外加热法;活性有机碳采用333 mmol/L高锰酸钾氧化法测定;可溶性有机碳采用水提取、过滤方法测定;微生物量碳采用氯仿熏蒸K₂SO₄浸提法测定;易氧化有机碳采用333 mmol/L高锰酸钾氧化-比色法测定。

3)土壤微生物测定。于晚稻收获后,在每小区进行随机5点取作物根际土样,混匀后立即用液氮冷冻并有一80℃冰箱保存,委托美吉生物医药科技有限公司进行高通量测序。首先采用美国QIAGEN公司的DNeasy® PowerSoil® Pro Kit试剂盒提取土壤样品中的微生物DNA,然后用超微量分光光度计测定DNA浓度和纯度,采用1%琼脂糖凝胶电泳检测DNA完整性。使用引物338F: ACTCCTACGGGAGGCAGCAG和引物806R: GGACTACHVGGGTWCTAAT对微生物的16S rRNA进行PCR扩增。使用2%琼脂糖凝胶电泳检测产物。对PCR产物鉴定、纯化及定量,构建Miseq文库,最后利用Illumina公司的Miseq PE300平台进行测序。

1.5 数据处理

Miseq测序得到的PE reads首先根据overlap关系进行拼接,同时对序列质量进行质控和过滤,区分样本后根据97%的相似度对序列进行OTU聚类分析和物种分类学分析;基于OTU聚类分析结果,计算真菌、细菌群落丰度指数、均匀度指数、多样性指数、覆盖度指数,利用美吉云平台对微生物群落进行

Alpha多样性分析、物种组成分析、样本比较和环境因子关联分析。

采用Microsoft Excel 2019进行数据统计;用SPSS 25.0系统软件进行数据处理和方差分析,采用单因素(one-way ANOVA)和Duncan's法进行方差分析和多重比较,用Origin 8.0作图。

2 结果与分析

2.1 减氮对水稻产量的影响

如表2所示,紫云英与油菜混播下不同减氮水平对水稻产量和产量构成要素有一定影响。各处理的实际产量均与不施肥处理(CK)差异显著($P<0.05$),与对照相比,早稻增产24.42%~39.23%,晚稻增产19.34%~31.59%,早稻和晚稻均是处理MRN1增产效果最好,且晚稻除MRN2外,与其他处理间均差异显著($P<0.05$)。另外,从各产量构成要素来看,早晚稻减氮均以处理MRN1有效穗数最多,早稻处理MRN、MRN1、MRN2的有效穗数显著高出CK 8.41%~23.93% ($P<0.05$),晚稻各处理均显著高于CK ($P<0.05$),高出16.91%~27.73%。从千粒重来看,早稻处理MRN3显著高于CK ($P<0.05$),高出5.00%;晚稻时期各处理均显著高出CK 1.62%~2.54% ($P<0.05$)。但早晚稻各处理的每穗粒数和结实率均差异不显著($P>0.05$)。整体上,与常规施氮处理相比,减氮20%处理不会降低水稻产量反而会增产。

表2 不同施氮量对水稻产量和构成要素的影响

Table 2 Effects of different nitrogen application rates on rice yield and components

品种 Variety	处理 Treatment	有效穗数/($\times 10^4/\text{hm}^2$) Effective panicle number	每穗粒数 Grain number per spike	结实率/% Seed setting rate	千粒重/g 1 000-grains weight	实际产量/(kg/hm^2) Actual yield
早稻 Early rice	CK	224.74±10.28b	143.11±7.15a	62.54±3.39a	24.21±0.45b	5 491.18±447.05b
	MRN	272.73±13.20a	145.08±10.50a	59.33±3.99a	25.16±0.22ab	7 094.00±128.31a
	MRN1	278.51±10.10a	149.68±7.48a	60.00±4.98a	25.08±0.30ab	7 645.45±89.54a
	MRN2	277.21±20.18a	145.89±3.31a	59.09±8.88a	24.57±0.28ab	6 945.45±279.93a
	MRN3	243.63±14.14ab	141.34±12.05a	67.59±0.57a	25.42±0.05a	6 832.32±470.72a
晚稻 Late rice	CK	195.29±8.35b	179.58±2.25a	76.67±1.59a	22.80±0.10c	6 334.34±241.54c
	MRN	228.32±6.94a	183.17±1.34a	71.18±1.88a	22.98±0.12bc	7 661.62±129.66b
	MRN1	249.44±10.12a	170.13±15.21a	75.05±1.34a	23.17±0.05ab	8 335.35±92.40a
	MRN2	229.97±6.77a	181.66±8.54a	74.58±1.61a	23.38±0.03a	7 925.25±247.28ab
	MRN3	228.35±12.36a	172.52±9.34a	75.76±1.6a	23.18±0.16ab	7 559.6±252.74b

2.2 减氮对土壤活性有机碳及组分的影响

在紫云英与油菜混播还田的条件下,不同减氮量对晚稻成熟期土壤活性有机碳组分的影响如表3所示。处理MRN1的土壤有机碳含量最高,高出处理CK 17.53%。处理MRN2的微生物量碳含量最

高,高出CK 16.05%。处理MRN1的活性有机碳含量最高,高出处理CK 8.53%。土壤可溶性有机碳和易氧化有机碳含量均是CK最高,且呈现出随施氮减少而增加的规律。

表3 不同施氮量下土壤活性有机碳及组分含量

Table 3 Soil active organic carbon and its components under different nitrogen application rates

处理 Treatment	有机碳/(g/kg) Organic carbon	微生物量碳/(mg/kg) Microbial biomass carbon	可溶性有机碳/(g/kg) Dissolved organic carbon	活性有机碳/(g/kg) Active organic carbon	易氧化有机碳/(g/kg) Easily oxidized organic carbon
CK	16.47±0.66a	467.44±6.42a	0.33±0.02a	2.74±0.12a	3.12±0.12a
MRN	18.47±0.50a	509.33±37.63a	0.29±0.02a	2.81±0.13a	2.83±0.07a
MRN1	19.36±0.36a	535.76±4.46a	0.31±0.01a	2.97±0.20a	2.97±0.09a
MRN2	18.32±0.32a	542.48±19.00a	0.32±0.03a	2.85±0.29a	3.00±0.06a
MRN3	17.98±0.36a	536.52±25.62a	0.32±0.01a	2.84±0.04a	3.03±0.09a

2.3 减氮对土壤氮素的影响

在紫云英与油菜混播还田的条件下,不同施氮量对晚稻成熟期土壤氮组分的影响如表4所示。各施氮肥处理的全氮含量均显著高于CK,高出13.75%~22.31%。处理MRN和处理MRN1的硝态

氮含量显著高于处理CK,高出了22.07%~22.84%。处理MRN1的铵态氮含量显著高于CK,高出19.05%。处理MRN和处理MRN1的碱解氮含量显著高于处理CK,高出11.20%~11.39%。土壤硝态氮和碱解氮含量随施氮量的减少而降低。

表4 不同施氮量下土壤氮组分含量

Table 4 Soil active nitrogen components under different nitrogen application rates

处理 Treatment	全氮/(g/kg) Total N	硝态氮/(mg/kg) NO ₃ ⁻ -N	铵态氮/(mg/kg) NH ₄ ⁺ -N	碱解氮/(mg/kg) Alkali hydrolyzed nitrogen	微生物量氮/(mg/kg) Microbial biomass nitrogen
CK	1.67±0.01b	6.69±0.11b	4.78±0.17b	119.9±3.22b	52.54±1.47a
MRN	2.05±0.05a	8.22±0.50a	5.51±0.29ab	133.57±2.48a	54.93±3.07a
MRN1	1.90±0.05a	8.17±0.11a	5.69±0.21a	133.33±6.14a	55.77±1.94a
MRN2	1.93±0.05a	7.48±0.22ab	5.38±0.27ab	131.02±4.09ab	55.28±1.27a
MRN3	1.92±0.05a	7.54±0.37ab	5.27±0.17ab	126.47±1.72ab	57.95±1.47a

2.4 土壤碳氮相关性分析

不同施氮水平下土壤碳库和氮库的相关性如表5所示。各项碳库指标间,土壤可溶性有机碳、活性有机碳和易氧化有机碳三者互相呈显著正相关($P<0.05$)。各土壤氮库指标间,土壤全氮、碱解氮、硝态氮和铵态氮三者互相呈显著正相关($P<0.05$)。有机碳含量与其余碳指标呈负相关($P>0.05$),与碱解氮、硝态氮、铵态氮呈显著正相关($P<0.05$)。微生物量碳与其余碳指标呈正相关,与全氮、碱解氮、硝态氮呈显著负相关($P<0.05$),与铵态氮也是负相关。微生物量氮与活性有机碳指标呈正相关($P>0.05$),但与有机碳呈显著负相关($P<0.05$);

与碱解氮、铵态氮呈显著负相关($P<0.05$)。

2.5 土壤样品的注释评估

从微生物群落的Pan/Core OTU分析曲线(图1)可以看出,每个处理土壤微生物的Pan Core OTU数由2个样本增加到3个样本时,曲线接近平缓,继续增加处理重复数量,微生物的Pan Core OTU数不会有大的变化。细菌群落Pan OTU数的表现顺序为MRN1>CK>MRN2>MRN3>MRN,细菌群落Core OTU数的表现顺序为MRN2>CK>MRN3>MRN1>MRN。

通过高通量测序共获得优化序列843 800条,351 572 912 bases,平均长度416 bp。物种注释共获

表5 不同施氮量下土壤碳和氮的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil carbon and nitrogen under different nitrogen application rates

指标 Index	TOC	SMBC	DOC	AOC	ROC	TN	AN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	SMBN
TOC	1									
SMBC	-0.398	1								
DOC	-0.196	0.510	1							
AOC	-0.077	0.089	0.779**	1						
ROC	-0.149	0.041	0.526*	0.539*	1					
TN	0.495	-0.558*	-0.069	0.133	0.006	1				
AN	0.558*	-0.575*	-0.301	0.147	0.072	0.661**	1			
NO ₃ ⁻ -N	0.613*	-0.657**	-0.385	-0.097	-0.348	0.696**	0.573*	1		
NH ₄ ⁺ -N	0.796**	-0.495	-0.222	0.002	0.153	0.390	0.602*	0.557*	1	
SMBN	-0.592*	0.474	0.413	0.174	0.041	-0.387	-0.526*	-0.459	-0.595*	1

注: TOC表示土壤有机碳, SMBC表示微生物量碳, DOC表示可溶性有机碳, AOC表示活性有机碳, ROC表示有氧化有机碳, TN表示全氮, AN表示碱解氮, SMBN表示微生物量氮。Note: TOC represents soil organic carbon, SMBC represents microbial biomass carbon, DOC represents soluble organic carbon, AOC represents active organic carbon, ROC represents readily organic carbon, TN represents total nitrogen, AN represents alkali-hydrolyzable nitrogen, SMBN represents microbial biomass nitrogen.

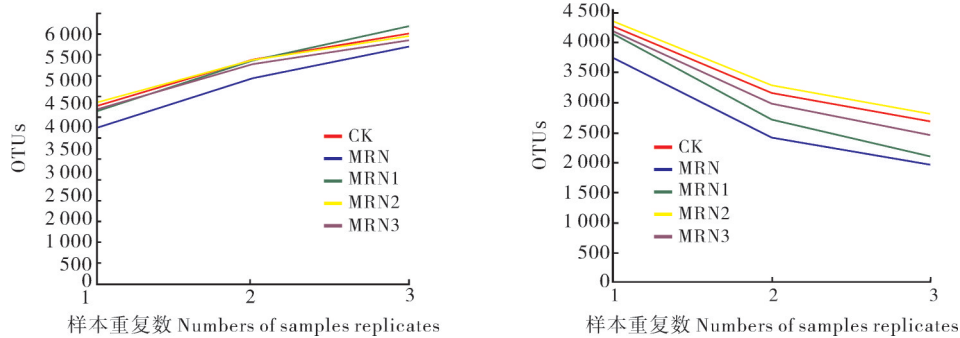


图1 不同施氮量下土壤细菌群落Pan/Core OTU分析

Fig.1 Pan/Core OTU analysis of soil bacterial community under different nitrogen application rates

得门水平物种 59 个, 属水平物种 947 个, OTU 水平 7 622 个。在晚稻成熟期的土壤样品中, 处理 MRN 含 OTUs 5 693 个, 其中特有的 OTUs 111 个; 处理 MRN 含 OTUs 5 693 个, 其中特有的 OTUs 111 个; 处理 MRN1 含 OTUs 6 183 个, 其中特有的 OTUs 173 个; 处理 MRN2 含 OTUs 5 945 个, 其中特有的 OTUs 67 个; 处理 MRN3 含 OTUs 5 844 个, 其中特有的 OTUs 36 个; 处理 CK 含 OTUs 6 006 个, 其中特有的 OTUs 69 个(图 2)。处理 MRN1 的总 OTUs 数和独有 OTUs 数都是最高的。

2.6 减氮对土壤微生物群落多样性的影响

不同施氮处理土壤细菌群落 Alpha 多样性指数分析(表 6)结果显示, 处理 MRN 的 Simpson even 指数显著高于 CK, 高出 28.57%, 减施氮肥降低了细菌群落的均匀度指数。处理 MRN2 的 Sobs 指数最高,

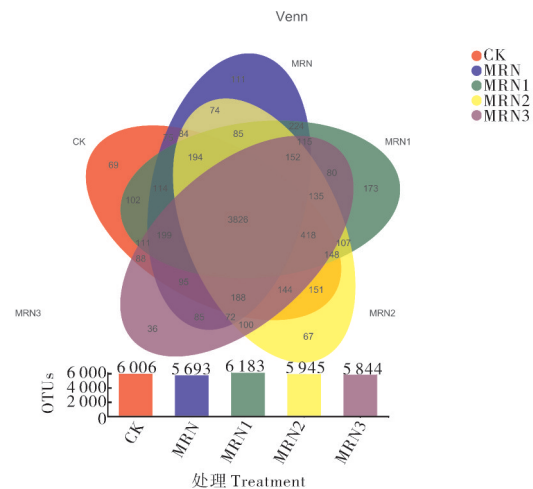


图2 不同施氮量下土壤细菌群落 OTUs 分布的 Venn 图

Fig.2 Venn diagram of OTUs distribution of soil bacterial community under different nitrogen application rates

处理MRN最低,适当减施可增加细菌群落丰富度。除处理MRN2外,细菌多样性指数随施氮量的减少而降低。

2.7 土壤微生物物种组成分析

紫云英、油菜混播下不同施氮量处理土壤微生物群落 在门水平的优势物种丰度如图3所示。排名前5的优势细菌是绿弯菌门、变形菌门、酸杆菌门、放线菌门、厚壁菌门,其中绿弯菌门(*Chloroflexi*)在所研究的门类中占17.56%~18.92%,变形菌门(*Proteobacteria*)在所研究的门类中占14.33%~17.92%,酸杆菌门(*Acidobacteriota*)在所研究的门类中占14.29%~17.43%,放线菌门(*Actinobacteriota*)在所研究的门类中占9.31%~12.61%,厚壁菌门(*Fir-*

表6 不同施氮量下细菌群落多样性指数

Table 6 Diversity index of microbial community under different nitrogen application rates

处理 Treatment	Sobs	Simpson even	Shannon	Coverage
CK	52.00±2.00a	0.17±0.00b	2.57±0.03a	1.00±0.00a
MRN	49.00±0.58a	0.19±0.01a	2.62±0.01a	1.00±0.00a
MRN1	51.00±1.53a	0.18±0.01ab	2.60±0.05a	1.00±0.00a
MRN2	52.33±0.33a	0.17±0.00b	2.55±0.00a	1.00±0.00a
MRN3	52.00±2.00a	0.17±0.01ab	2.57±0.01a	1.00±0.00a

micutes)在所研究的门类中占5.38%~7.70%,各处理间细菌数量占比无显著性差异($P>0.05$)。

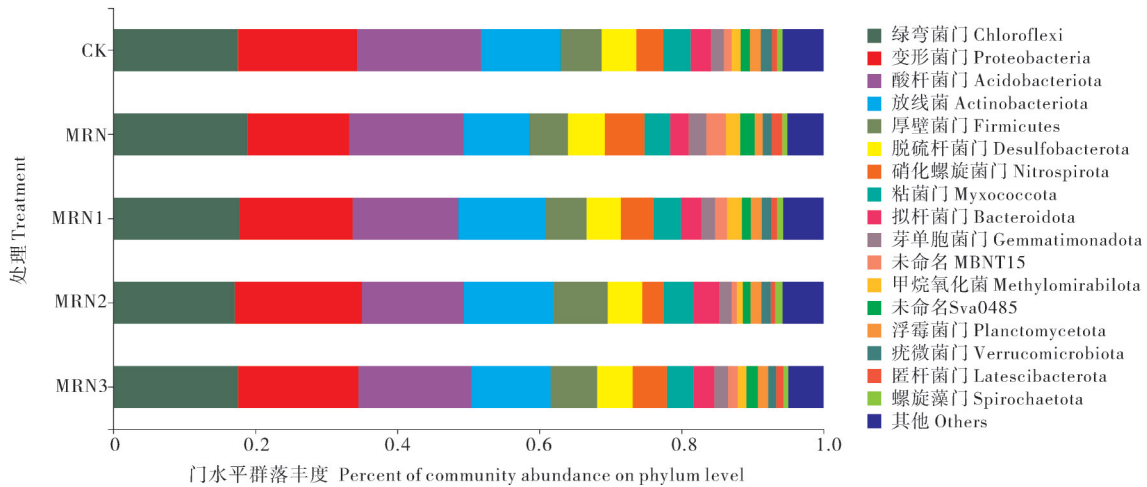


图3 不同施氮量下土壤细菌群落的优势物种丰度(门水平)

Fig.3 Abundance diagram of dominant species of soil bacterial community under different nitrogen application rates (phylum level)

紫云英、油菜混播条件下不同施氮量细菌群落 门水平与物种Circos关系如图4所示,在细菌群落中丰度排名前5的门分类水平物种在CK、MRN、MRN1、MRN2、MRN3处理的占比,各处理中绿弯菌门(*Chloroflexi*)分别占20%、21%、20%、19%、20%,变形菌门(*Proteobacteria*)分别占21%、17%、19%、21%、22%,酸杆菌门(*Acidobacteriota*)分别占22%、20%、19%、18%、20%,放线菌门(*Actinobacteriota*)分别占20%、16%、22%、22%、20%,厚壁菌门(*Firmicutes*)分别占19%、17%、19%、25%、21%。

2.8 土壤微生物群落与环境因子的关系

土壤细菌群落与碳氮组分的冗余分析(RDA)(图5)显示,土壤细菌群落32.43%的变异可被第一排序轴解释,23.12%的变异可被第二排序轴解释。

排名前5的门水平优势菌群均在RDA1轴的负半轴,方向大致相同,说明土壤碳氮组分对优势细菌群落的影响是相同的。环境因子中,对细菌群落影响最大的是碱解氮、微生物量氮和可溶性有机碳,碱解氮、硝态氮、铵态氮与优势菌群呈负相关关系;微生物量氮、易氧化有机碳、可溶性有机碳与优势菌群呈正相关关系。酸杆菌门、绿弯菌门与土壤铵态氮、总有机碳、活性有机碳呈负相关,与土壤微生物量呈正相关。

3 讨论

紫云英与油菜混播还田后,适当减施氮肥不会降低水稻产量;混播处理中,减氮20%的实际产量最高。减施氮肥降低了土壤全氮、硝态氮、铵态氮和碱解氮含量,增加了可溶性有机碳和易氧化有机碳含

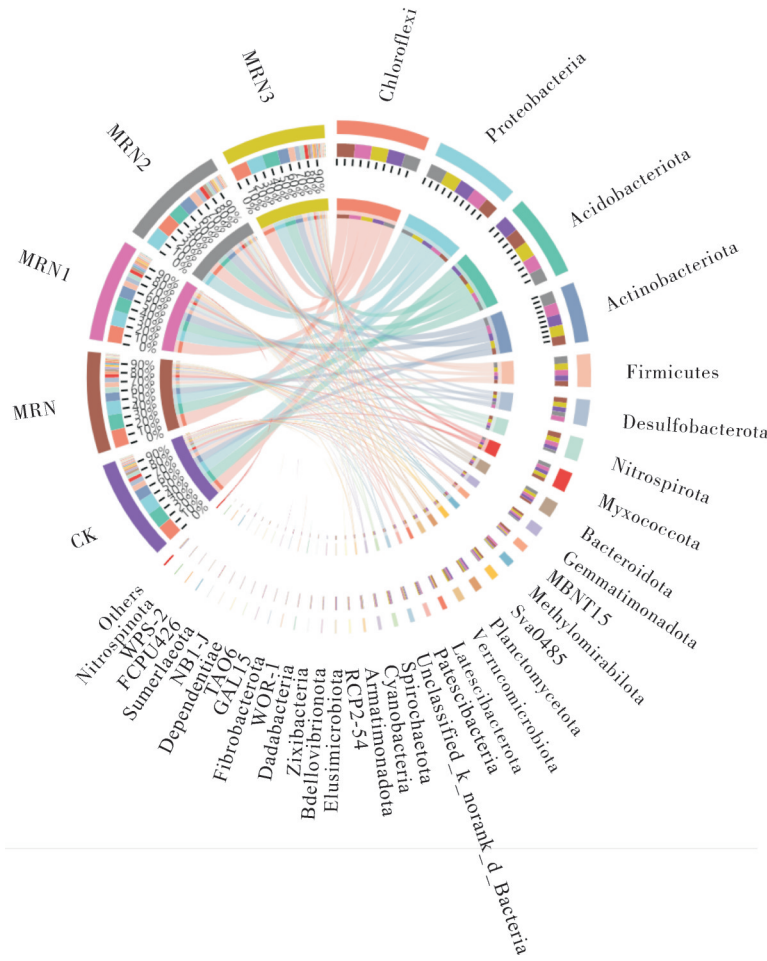


图4 不同施氮量下样本与物种的Circos图

Fig.4 Circos diagram of samples and species under different nitrogen application rates

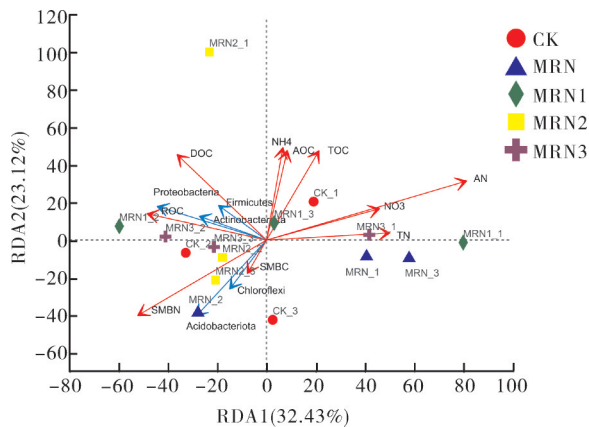


图5 不同施氮量下的土壤细菌群落与碳氮的RDA分析
Fig.5 RDA analysis of soil bacterial community and carbon and nitrogen under different nitrogen application rates

量。碱解氮、微生物量氮和可溶性有机碳是影响细菌群落的主要环境因子;施氮量会影响土壤微生物群落结构,减施氮肥会降低细菌群落均匀度指数,减

施氮肥可增加优势菌门的相对丰度。

3.1 不同施氮量对水稻产量的影响

施用氮肥是提高作物产量的重要手段。紫云英、油菜混播可以充分利用光、热、水、养分、土地资源。王吕等^[21]研究表明绿肥稻秆协同还田在减氮20%~30%的条件下可以保证水稻产量不下降且有所增加;郭晓彦等^[22]的研究结果表明在绿肥翻压的条件下,减氮60%较减氮80%的增产效果好;张俊莹等^[23]研究结果表明当减氮量超过10%时,随着氮肥量的减少水稻产量逐渐降低。黄晶等^[24]通过长期定位试验证明了绿肥紫云英替代氮肥的可行性,试验表明减少化学氮肥用量20%~40%,不会降低稻谷产量。本研究结果表明紫云英油菜混播还田与减氮40%可保持水稻产量不下降,减氮20%可增加7.77%~8.79%的产量。因此,在冬种紫云英与油菜的高效绿肥还田模式下,适当减施氮肥不会降低水稻产量,反而有略微增产效果。

3.2 不同施氮量对土壤碳氮的影响

土壤有机碳累积量既与有机物料施用量、施用时间有关,更与当地气候和土壤条件有关^[25],后者会强烈影响有机物料的矿质化和腐殖化过程的强弱。李锦等^[26]研究表明在秸秆还田的情况下,减氮15%、30%不会显著降低土壤有机碳和活性有机碳含量。石柯等^[27]在小麦-玉米轮作试验中发现,减氮20%可以在一定程度上增加土壤有机碳含量。王兴龙等^[28]研究表明,适当减少氮肥施用量的同时配施生物有机肥可提高土壤有机碳、活性有机碳和微生物量碳含量。本研究中紫云英与油菜混播还田后,减氮20%可增土壤有机碳和微生物量碳含量;可溶性有机碳与易氧化有机碳含量随施氮量的增加而减少。原因可能是减施氮肥增加了土壤C/N比,提升了土壤微生物活性,促进绿肥腐解后形成的腐殖质的分解,使得土壤活性有机碳组分含量增加。

减氮施肥的目的是在保证产量的基础上提高氮素利用率,降低氮素损失。罗跃等^[29]研究表明在减施10%~20%常规量氮肥条件下,绿肥还田的土壤氮库贮量较常规量施氮肥处理有上升趋势,但差异未达到显著水平。肖小平等^[15]研究表明稻草还田下短期内的减氮不会显著降低土壤的全氮含量,但会显著降低土壤的碱解氮含量。本研究结果表明在绿肥混播的条件下,较常规施氮和减氮20%处理相比,不施氮肥处理土壤全氮、硝态氮和碱解氮含量显著下降。朱荣等^[30]研究表明与常规施肥相比,减施氮肥能显著降低稻田氨挥发损失总量。本研究中,除减氮20%处理外,其余处理均降低了土壤铵态氮含量。土壤全氮、碱解氮、硝态氮和铵态氮呈显著正相关关系,减施氮肥会降低土壤氮组分含量。

3.3 不同施氮量对微生物群落的影响

在土壤生态系统中,微生物是物质循环和能量流动的重要参与者、维持者和贡献者,承担了碳氮循环等多种重要的生态服务功能。翻压绿肥可为微生物生长繁殖提供充足的碳源及氮源,影响微生物对碳源的利用,从而改变微生物群落的结构及多样性,施肥改变土壤组成和水稻根际环境,从而直接或间接地改变稻田土壤微生物群落结构^[31]。万水霞等^[32]发现施用紫云英绿肥可显著提升土壤细菌丰度。Wang等^[33]通过meta分析综合研究发现氮素施用会降低土壤微生物多样性。本研究中减施氮肥降

低了细菌群落均匀度指数,变形菌门、绿弯菌门和酸杆菌门是门水平上的3个主要优势细菌群落。陈玲等^[34]的稻虾共作试验研究表明,变形菌门、放线菌门、蓝细菌门为主要优势菌群。理鹏等^[35]的有机肥配施研究结果表明,不同处理中丰度最大的菌门均是变形菌门、绿弯菌门和放线菌门。地理位置、土壤类型与耕作方式等的不同会导致稻田细菌群落差异^[36]。

3.4 土壤碳氮对微生物群落的影响

有机碳和氮含量是影响真菌群落分布的主要限制因子^[37],土壤碳氮的有效性是决定土壤微生物多样性和功能多样性的重要因素,微生物群落能够通过调节自身的养分利用效率而适应资源的不平衡^[38]。本研究中,碱解氮、微生物量氮和可溶性有机碳是微生物群落主要影响因子。赵春梅等^[39]研究表明有机碳、有效氮、全氮、碳氮比是影响土壤真菌群落组成的主要因子。本研究中碱解氮、硝态氮、铵态氮和优势细菌群落的相对丰度呈负相关,这可能是农田土壤中增加碳/氮源可促进土壤微生物行使硝化反应、分解纤维素、促进植株生长等功能的细菌其丰度增加,但只增加氮源会降低土壤细菌丰度。

参考文献 References

- [1] 姜海斌,张克强,邹洪涛,等. 减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5405-5413. JIANG H B, ZHANG K Q, ZOU H T, et al. Effects of different fertilization modes on nitrogen leaching loss in rice fields under nitrogen reduction conditions [J]. Environmental science, 2021, 42(11): 5405-5413 (in Chinese with English abstract).
- [2] 史天昊,段英华,王小利,等. 我国典型农田长期施肥的氮肥真实利用率及其演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1496-1505. SHI T H, DUAN Y H, WANG X L, et al. The true nitrogen utilization rate and its evolution characteristics of long-term fertilization in typical farmland in China [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2015, 21(6): 1496-1505 (in Chinese with English abstract).
- [3] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. Environmental pollution, 2006, 43: 117-125.
- [4] 李虹儒,许景钢,徐明岗,等. 我国典型农田长期施肥小麦氮肥回收率的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 336-343. LI H R, XU J G, XU M G, et al. Variation characteristics of nitrogen recovery rate of wheat after long-term fertilization

- in typical farmland in China [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2009, 15 (2) : 336-343 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张璐, 黄晶, 高菊生, 等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5) : 106-112. ZHANG L, HUANG J, GAO J S, et al. Effects of long-term combined application of green manure and nitrogen fertilizer on rice yield and soil nutrient content [J]. *Journal of agricultural engineering*, 2020, 36(5) : 106-112 (in Chinese with English abstract).
- [6] 黄国勤. 江南丘陵区农田循环生产技术研究 I. 江西绿肥生产的发展[J]. *耕作与栽培*, 2008(2) : 1-2, 12. HUANG G Q. Study on circular production technology of farmland in hilly area of Jiangxi I. Development of green manure production in Jiangxi [J]. *Tillage and cultivation*, 2008(2) : 1-2, 12 (in Chinese).
- [7] 黄建余, 廖育林, 鲁艳红, 等. 紫云英与油菜混播对绿肥及早稻产量的影响[J]. *湖南农业科学*, 2021(6) : 34-37, 48. HUANG J Y, LIAO Y L, LU Y H, et al. Effect of mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed on green manure and early rice yield [J]. *Hunan agricultural sciences*, 2021 (6) : 34-37, 48 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张秋丽, 宋安易, 费全凤, 等. 紫云英(蚕豆)与油菜混种对土壤及后茬水稻产量的影响[J]. *上海农业科技*, 2020(5) : 122-123, 128. ZHANG Q L, SONG A Y, FEI Q F, et al. Effects of mixed Chinese milk vetch (broad bean) and rapeseed on soil and rice yield in the next crop [J]. *Shanghai agricultural science and technology*, 2020(5) : 122-123, 128 (in Chinese).
- [9] MIYAZAWA K, MURAKAMI T, TAKEDA M, et al. Intercropping green manure crops: effects on rooting patterns [J]. *Plant and soil*, 2010, 331(1/2) : 231-239.
- [10] TANG X, BERNARD L, BRAUMAN A, et al. Increase in microbial biomass and phosphorus availability in the rhizosphere of intercropped cereal and legumes under field conditions [J]. *Soil biology & biochemistry*, 2014, 75: 86-93.
- [11] 夏文建, 秦文婧, 刘佳, 等. 长期绿肥利用下红壤性水稻土有机碳和可溶性有机碳的垂直分布特征[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(5) : 878-885. XIA W J, QIN W J, LIU J, et al. Vertical distribution characteristics of organic carbon and soluble organic carbon in red paddy soil under long-term utilization of green manure [J]. *Zhejiang agricultural journal*, 2020, 32(5) : 878-885 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王义祥, 王峰, 叶菁, 等. 绿肥还土对红壤有机碳组分的影响[J]. *福建农业科技*, 2019(11) : 65-68. WANG Y X, WANG F, YE J, et al. Effect of returning green manure to soil on organic carbon components of red soil [J]. *Fujian agricultural science and technology*, 2019(11) : 65-68 (in Chinese).
- [13] 魏夏新, 熊俊芬, 李涛, 等. 有机物料还田对双季稻田土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7) : 2373-2380. WEI X X, XIONG J F, LI T, et al. Effects of organic materials returning to field on soil organic carbon and its active components in double-cropping rice fields [J]. *Journal of applied ecology*, 2020, 31(7) : 2373-2380 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张迪, 韩晓增, 侯雪莹. 长期不同施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3) : 654-658. ZHANG D, HAN X Z, HOU X Y. Effects of long-term different fertilization management on active organic carbon and carbon pool management index of black soil [J]. *Soil bulletin*, 2011, 42(3) : 654-658 (in Chinese with English abstract).
- [15] 肖小平, 李超, 唐海明, 等. 秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(3) : 422-430. XIAO X P, LI C, TANG H M, et al. Effects of reducing nitrogen and increasing nitrogen density under straw returning on soil nitrogen storage capacity and nitrogen utilization efficiency in double-cropping rice fields [J]. *Chinese journal of ecological agriculture*, 2019, 27(3) : 422-430 (in Chinese with English abstract).
- [16] 王利利, 董民, 张璐, 等. 不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(9) : 1073-1077. WANG L L, DONG M, ZHANG L, et al. Effects of organic fertilizers with different C/N ratios on microbial biomass of organic agricultural soils [J]. *Chinese journal of ecological agriculture*, 2013, 21(9) : 1073-1077 (in Chinese with English abstract).
- [17] 高凤杰, 马泉来, 张志民, 等. 黑土区小流域土壤氮素空间分布及主控因素研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8) : 2990-2999. GAO F J, MA Q L, ZHANG Z M, et al. Study on spatial distribution and controlling factors of soil nitrogen in small watershed of black soil area [J]. *Journal of environmental sciences*, 2016, 36(8) : 2990-2999 (in Chinese with English abstract).
- [18] 佘国涵, 赵书军, 王瑞, 等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4) : 905-912. SI G H, ZHAO S J, WANG R, et al. Effects of successive years of turning green manure on physical and biological characteristics of tobacco-growing soil [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2014, 20(4) : 905-912 (in Chinese with English abstract).
- [19] 田雅楠, 王红旗. Biolog法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(3) : 50-57. TIAN Y A, WANG H Q. Application of Biolog method in the study of functional diversity of environmental microorganisms [J]. *Environmental science and technology*, 2011, 34(3) : 50-57 (in Chinese with English abstract).
- [20] XIE Z, HE Y, TU S, et al. Chinese milk vetch improves plant growth, development and ¹⁵N recovery in the rice-based rotation system of south China [J/OL]. *Scientific reports*, 2017, 7: 3577 [2022-04-06]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03919-y>.
- [21] 王吕, 崔月贞, 吴玉红, 等. 绿肥稻秆协同还田下氮肥减量的增产和培肥短期效应[J]. *作物学报*, 2022, 48(4) : 952-961. WANG L, CUI Y Z, WU Y H, et al. Short-term effect of increasing yield and fertilizing by reducing nitrogen fertilizer under the cooperative return of green manure rice straw to the field [J]. *Ac-*

- ta crotalaria sinica, 2022, 48(4): 952-961 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郭晓彦, 宋晓华, 刘春增, 等. 紫云英翻压量和化肥用量对水稻生长、产量及经济效益的影响[J]. 山地农业生物学报, 2014, 33(5): 7-12. GUO X Y, SONG X H, LIU C Z, et al. Effects of the amount of Chinese milk vetch and the amount of chemical fertilizer on the growth, yield and economic benefits of rice [J]. Journal of mountain agriculture and biology, 2014, 33(5): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- [23] 张俊莹, 赵立琴, 吴金花, 等. 秸秆还田条件下氮肥减施对稻田土壤养分及酶活性和产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(5): 30-35. ZHANG J Y, ZHAO L Q, WU J H, et al. Effects of reduced application of nitrogen fertilizer on soil nutrients, enzyme activity and yield in paddy field under the condition of straw returning [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021, 33(5): 30-35 (in Chinese with English abstract).
- [24] 黄晶, 高菊生, 刘淑军, 等. 冬种紫云英对水稻产量及其养分吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(1): 88-92. HUANG J, GAO J S, LIU S J, et al. Effects of winter Chinese milk vetch on rice yield and nutrient absorption [J]. Chinese soil and fertilizer, 2013(1): 88-92 (in Chinese with English abstract).
- [25] 王小彬, 蔡典雄, 张镜清, 等. 旱地玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2000(4): 54-61. WANG X B, CAI D X, ZHANG J Q, et al. Effect of returning corn stalk to field in dry land on soil fertility [J]. Chinese agricultural sciences, 2000(4): 54-61 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李锦, 田霄鸿, 王少霞, 等. 秸秆还田条件下减量施氮对作物产量及土壤碳氮含量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 137-143. LI J, TIAN X H, WANG S X, et al. Effects of reducing nitrogen application on crop yield and soil carbon and nitrogen content under the condition of straw returning to field [J]. Journal of Northwest A&F University (natural science edition), 2014, 42(1): 137-143 (in Chinese with English abstract).
- [27] 石柯, 董士刚, 申凤敏, 等. 小麦播量与减氮对潮土微生物量碳氮及土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2646-2663. SHI K, DONG S G, SHEN F M, et al. Effects of wheat sowing rate and nitrogen reduction on microbial biomass carbon and nitrogen and soil enzyme activity in fluvo-aquic soil [J]. Chinese agricultural sciences, 2019, 52(15): 2646-2663 (in Chinese with English abstract).
- [28] 王兴龙, 莫太相, 邱传志, 等. 减氮配施有机肥对土壤碳库及玉米产量的影响[J]. 生态环境学报, 2017, 26(8): 1342-1348. WANG X L, MO T X, QIU C Z, et al. Effects of nitrogen reduction combined with organic fertilizer on soil carbon pool and corn yield [J]. Journal of ecological environment, 2017, 26(8): 1342-1348 (in Chinese with English abstract).
- [29] 罗跃, 卢秉林, 周国朋, 等. 河西绿洲灌区玉米间作绿肥根茬还田的氮肥减施效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(12): 2125-2135. LUO Y, LU B L, ZHOU G P, et al. Effect of nitrogen fertilizer reduction on maize intercropping with green manure stubble and returning to field in Hexi Oasis Irrigation Area [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2021, 27(12): 2125-2135 (in Chinese with English abstract).
- [30] 朱荣, 柳丽丽, 齐永波, 等. 稻田氨挥发和水稻产量对增效复合肥减氮施用的响应[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1935-1943. ZHU R, LIU L L, QI Y B, et al. Response of ammonia volatilization and rice yield in paddy field to nitrogen reduction application of synergistic compound fertilizer [J]. Journal of agricultural environmental sciences, 2021, 40(9): 1935-1943 (in Chinese with English abstract).
- [31] BOWLES T M, ACOSTA-MARTINEZ V, CALDERON F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape [J]. Soil biology and biochemistry, 2014, 68: 252-262.
- [32] 万水霞, 唐杉, 蒋光月, 等. 紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 109-117. WAN S X, TANG S, JIANG G Y, et al. Effects of combined application of Chinese milk vetch and chemical fertilizer on soil microbial characteristics and crop yield [J]. Journal of prataculture, 2016, 25(6): 109-117 (in Chinese with English abstract).
- [33] WANG C, LIU D W, BAI E. Decreasing soil microbial diversity is associated with decreasing microbial biomass under nitrogen addition [J]. Soil biology and biochemistry, 2018, 120: 126-133.
- [34] 陈玲, 万韦韬, 刘兵, 等. 稻虾共作对稻田水体微生物多样性和群落结构的影响[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(1): 141-151. CHEN L, WAN W T, LIU B, et al. Effects of rice-shrimp farming on microbial diversity and community structure in paddy water [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(1): 141-151 (in Chinese with English abstract).
- [35] 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 等. 粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4262-4272. LI P, WU J Q, SHA C Y, et al. Effect of manure and organic fertilizer application on microbial community diversity in paddy soil [J]. Environmental science, 2020, 41(9): 4262-4272 (in Chinese with English abstract).
- [36] ZHU Y G, SU J Q, CAO Z H, et al. A buried Neolithic paddy soil reveals loss of microbial functional diversity after modern rice cultivation [J]. Science bulletin, 2016, 61(13): 1052-1060.
- [37] ZECHMEISTER-BOLTENSTERN S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations [J]. Ecological monographs, 2015, 85(2): 133-155.
- [38] 邹雪峰, 何翔, 李铭刚, 等. 稻油轮作农田土壤碳氮微生物群落多样性特征[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(10): 27-35. ZOU X F, HE X, LI M G, et al. Diversity characteristics of soil carbon

- and nitrogen microbial community in rice tanker farming [J]. *Environmental science and technology*, 2021, 44 (10) : 27-35 (in Chinese with English abstract).
- [39] 赵春梅, 王文斌, 张永发, 等. 不同母质橡胶林土壤真菌群落结构特征及其与土壤环境因子的相关性[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(7) : 1869-1876. ZHAO C M, WANG W B, ZHANG Y F, et al. Structural characteristics of soil fungal communities in different parent rubber forests and their correlation with soil environmental factors [J]. *Journal of south China agriculture*, 2021, 52 (7) : 1869-1876 (in Chinese with English abstract).

Effects of application rates of nitrogen on rice yield, carbon and nitrogen, microbial community in soil under mixed sowing of green manure

HU Qiliang, YANG Binjuan, LIU Ning, HUANG Guoqin

Center for Ecological Sciences, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract Five treatments including no nitrogen application (CK), conventional nitrogen application (MRN) and reduced nitrogen application by 20%, 40% and 60% (MRN1, MRN2 and MRN3) under the condition of mixed sowing of Chinese milk vetch and rapeseed were used to study the effects of mixed sowing of green manure and combined application of nitrogen fertilizer on the rice yield, the carbon and nitrogen and microbial community in soil, and the main environmental factors affecting microbial community structure. The rice yield and its components, the carbon composition, the nitrogen composition and relative abundance of microbial community in soil were measured. The effects of carbon and nitrogen on microbial community were analyzed. Results showed that the yield of early rice and late rice increased by 24.42%-39.23% and 19.34%-31.59% compared with CK treatment. The effect of MRN1 treatment on early rice and late rice was the best. Compared with CK, the content of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen in MRN1 was significantly ($P < 0.05$) increased by 22.07%, 19.05% and 11.20%, respectively. The content of soluble organic carbon and easily oxidized organic carbon in soil increased with the decrease of nitrogen application. The content of nitrate nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen in soil decreased with the decrease of nitrogen application rate. The dominant bacteria were Chloroflexi, Proteobacteria, Acidobacteriota, Actinobacteriota, Firmicutes. Applying nitrogen fertilizer increased the evenness index of bacterial community. The content of alkali-hydrolyzable nitrogen, nitrate nitrogen and ammonium nitrogen was negatively correlated with dominant flora. The content of microbial nitrogen, easily oxidizable organic carbon and soluble organic carbon was positively correlated with dominant flora. The environmental factors having the greatest influence on the bacterial community structure were alkali-hydrolyzable nitrogen, microbial biomass nitrogen and soluble organic carbon. It is indicated that the mixed sowing of green manure and nitrogen reduction by 20% increase the rice yield and the content of inorganic nitrogen in soil, the community abundance of dominant bacteria, which is conducive to the reduction of emissions and the increase of efficiency in paddy fields, and the maintenance of the stability of ecosystem in paddy field.

Keywords mixed sowing of green manure back to the field; rice yield; nitrogen reduction; soil carbon and nitrogen; microbial community; ecosystem balance of paddy field

(责任编辑:张志钰)