



秸秆还田配施氮肥对稻田土壤活性碳氮动态变化的影响

王士超^{1,2}, 闫志浩¹, 王瑾瑜¹, 槐圣昌¹, 武红亮¹, 邢婷婷¹, 叶洪龄¹, 卢昌艾¹

(¹中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地保育技术国家工程实验室/中国农业科学院土壤质量重点实验室, 北京 100081;

²中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021)

摘要:【目的】土壤微生物量碳氮和水溶性有机碳氮是土壤中最活跃的碳氮组分, 是衡量土壤碳氮周转与养分有效性的重要指标。探讨秸秆配施氮肥、氮肥用量及基追比例对稻田土壤微生物量碳氮、水溶性有机碳氮、易氧化有机碳和速效氮的影响, 明确秸秆还田条件下水稻生长季不同氮肥用量与基追比的土壤活性碳氮变化特征, 为稻麦轮作区秸秆还田的氮肥管理提供理论依据。【方法】2012—2015年在湖北省荆门市田间试验中设置施氮量、秸秆配施氮肥和施氮时期3个大田试验。施氮量: 不施氮(N0), 推荐施氮(165 kg·hm⁻², N165), 习惯施氮(195 kg·hm⁻², N195); 秸秆配施氮肥: 秸秆移除(CK), 秸秆还田(移栽前将上季小麦秸秆全部还田, S), 秸秆还田+习惯施氮量(SN), 秸秆还田+推荐施氮量(SF), 秸秆还田+推荐施氮量+腐解菌剂(SM); 施氮时期: 基施: 拔节期: 抽穗期氮肥施用比例为7:3:0(R1), 5:3:2(R2), 10:0:0(R3)。【结果】秸秆还田+习惯施氮量(SN)显著提高了水稻拔节期土壤微生物量碳(SMBC)含量, 但是其成熟期水溶性有机碳含量(DOC)显著降低。秸秆还田+推荐施氮量(SF)显著提高了水稻拔节期土壤水溶性有机氮含量(DON)。腐解菌剂的施用显著降低了水稻成熟期DON含量, 拔节期易氧化有机碳含量(ROC)也显著降低。秸秆还田下增加氮肥用量显著提高了水稻抽穗期和灌浆期土壤速效氮含量(AN); 推荐施氮处理(165 kg N·hm⁻²)的DON和AN含量显著升高; 农民习惯施氮处理(195 kg N·hm⁻²)降低了DON和AN含量; 增加追施氮肥比例对土壤SMBC和DOC含量无明显影响, 但提高了水稻拔节期SMBN和ROC含量。【结论】施氮量及其基追比是影响秸秆还田下稻田土壤活性碳氮含量的主要因素, 合理配施氮肥能提高土壤微生物量碳、速效氮及水溶性有机氮等活性碳氮组分含量, 增加追肥比例也能提高水稻生育期内土壤活性碳氮含量。

关键词: 稻田; 秸秆还田; 施氮量; 氮肥基追比; 微生物量碳氮; 水溶性有机碳氮

Nitrogen Fertilizer and Its Combination with Straw Affect Soil Labile Carbon and Nitrogen Fractions in Paddy Fields

WANG ShiChao^{1,2}, YAN ZhiHao¹, WANG JinYu¹, HUAI ShengChang¹, WU HongLiang¹,
XING TingTing¹, YE HongLing¹, LU ChangAi¹

(¹Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ National Engineering Laboratory for Improving Arable Land/Key Laboratory of Soil Quality, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

²Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021)

Abstract: 【Objective】 Soil microbial biomass carbon & nitrogen (N) (SMBC & SMBN) and water soluble organic carbon & nitrogen (DOC & DON) are the active pools in soil, which are essential indexes for assessing soil carbon and nitrogen turnover and

收稿日期: 2019-05-16; 接受日期: 2019-06-26

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201503122)

联系方式: 王士超, E-mail: wangshao@163.com. 通信作者卢昌艾, E-mail: luchangai@caas.cn

nutrient availability for providing scientific information and guidelines and nitrogen management under straw returning in rice-wheat rotation system. The objective of the study was to investigate the effects of straw incorporation, nitrogen application rate and basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers on the SMBC, SMBN, DOC, DON, ROC and AN at paddy field, so as to explicit the optimal nitrogen rate and basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers under the straw incorporation condition. 【Method】A 4-year field experiment with straw incorporation matched with nitrogen fertilizer was conducted in rice cropping system from 2012 to 2015 in Jingmen city, Hubei Province. Three field experiments including different nitrogen application, straw incorporation combined with nitrogen fertilization and different ratios of base N to dressing N. Field experiments included: (1) different nitrogen rates, including No N fertilizer (N0), Optimal N fertilizer ($165 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, N165), the farmer common N rate ($195 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, N195); (2) different straw incorporation combined with nitrogen fertilization: straw removal (CK), straw incorporation (wheat straw incorporation before rice transplanting, S), straw incorporation matched with farmer common N rate (SN), straw incorporation matched with optimal N rate (SF), SF plus straw decomposing microbial inoculants (SM); (3) three basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers in the shooting and heading stage: 7 : 3 : 0 (R1), 5 : 3 : 2 (R2); 10 : 0 : 0 (R3). 【Result】The results showed that the SMBC content significantly increased at rice jointing stage and the DOC content obviously decreased after the maturity under the SN treatment. The DON content increased under the SF treatment at rice jointing stage. DON and ROC contents decreased under the SM treatments at the maturity and jointing stage. The AN content increased in the SF treatment at rice heading and grain filling stage. Appropriate N application rate ($165 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$) was favorable to increasing the DON and AN in soil. However, the DON and AN contents decreased under high application rate of N fertilizer ($195 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$). The higher proportion of topdressing fertilizer increased the SMBN and ROC contents at rice jointing stage, but had no impacts on the SMBC and DOC contents. 【Conclusion】Nitrogen rate and basal/topdressing ratios were main factor for determining active soil carbon and nitrogen contents under straw incorporation in Paddy field. Appropriate nitrogen fertilizer could increase SMBC, AN, and DON contents, and the higher topdressing fertilizer could also increase active soil carbon and nitrogen contents during rice growth stage.

Key words: paddy field; straw incorporation; nitrogen application rate; basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers; soil microbial biomass carbon/nitrogen (SMBC/SMBN); water soluble organic carbon/nitrogen (DOC/DON)

0 引言

【研究意义】土壤微生物量碳氮和水溶性有机碳氮是土壤中最活跃的碳氮组分, 与土壤碳氮周转、作物生长和生态环境变化密切相关, 是人们关注的焦点问题之一^[1-4]。虽然土壤活性碳氮库占土壤全碳氮库的比例较小^[3], 但对农田管理措施(如秸秆还田、免耕和施肥等)的改变十分敏感, 对碳氮的转化与迁移起着不可替代的作用, 在一定程度上可作为土壤养分有效性的指标^[5-7]。因此, 研究不同秸秆配施氮肥处理、施氮水平和氮肥的基追比下, 土壤活性碳氮组分在水稻生长期内的变化特征, 不仅可以明确碳氮养分在土壤中的分配和转化, 也可以根据水稻不同生育时期土壤碳氮的响应规律提出合理的秸秆配施氮肥、施氮量和氮肥的基追比。【前人研究进展】关于稻田秸秆还田和施氮量对土壤活性碳、氮库的研究多集中于长期定位试验, 且已得到了较为相似的结论, 秸秆还田下增施氮肥能提高土壤微生物量碳氮含量, 增加作物产量^[8-10]。但对于短期内稻田不同生育时期土壤活性碳、氮库的动态变化结论并不统一。王丹丹等^[11]在湖北省随州的研究结果表明, 秸秆还田使稻田土壤水溶性有

机碳含量提高了 55.5%。有研究表明, 施氮显著增加了土壤微生物量碳含量, 而土壤微生物量氮含量没有显著变化^[12]。【本研究切入点】土壤微生物量碳氮和水溶性碳氮含量的高低能综合反映微生物对有机物分解和利用^[13], 但就不同秸秆配施氮肥处理、施氮水平和氮肥的基追比对水稻生长期土壤活性碳、氮库影响的研究鲜有报道。【拟解决的关键问题】本研究拟通过设置秸秆还田方式下施氮量、氮肥基追比与秸秆促腐菌剂的定位试验, 研究秸秆还田与施氮量对稻田土壤活性碳氮组分的影响, 旨在找到秸秆还田方式下的适宜氮肥用量与比例, 为稻麦轮作区秸秆还田的氮肥管理和氮肥减量增效提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验布置在湖北荆门市五三农场(N $30^{\circ}42'$ — $31^{\circ}05'$, E $112^{\circ}47'$ — $112^{\circ}58'$)。试验区位于长江中下游平原, 属于亚热带季风气候, 年均降雨量为 $1\,140 \text{ mm}$, 主要集中于 5—8 月, 年均气温 16.2°C , 无霜期 260 d , 日照时数 $1\,963.9 \text{ h}$ 。水田秸秆还田与氮肥配施定位试验开始于 2012 年 10 月, 种植制度为一年两熟

制, 小麦-水稻轮作。土壤类型为水稻土, 土壤质地为黏壤土, 成土母质为近代河流冲积母质。试验开始时耕层土壤有机质 $26.21 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.63 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 有效磷 $24.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $163.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pH 6.61。

1.2 试验设计

大田试验设计分为施氮量处理、秸秆配施氮肥处理和施氮时期(基肥、追肥比例)处理(表1)。施氮量分为3个处理: 不施氮肥(N0); 尿素-N $165 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N165); 尿素-N $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N195)。水稻季磷(P_2O_5)用量均为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾(K_2O)用量均为 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷钾肥全部基肥, 尿素的基肥-拔节期分别为7:3。

秸秆配施氮肥包括5个处理: 秸秆移除(CK); 秸秆还田(移栽前将上季小麦秸秆全部还田); 秸秆还田+习惯施氮量(SN); 秸秆还田+推荐施氮量(SF); 秸秆还田+推荐施氮量+腐解菌剂(SM)。农民习惯施氮量为尿素-N $195 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 推荐施氮量为尿素-N $165 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。腐解菌剂的用量为 $30 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。水稻季磷(P_2O_5)用量均为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾(K_2O)用量均为 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷钾肥全部基肥, 尿素的基肥-拔节期分别为7:3。小麦秸秆的还田量为 $4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 玉米秸秆的还田量为 $7.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

施氮时期分为3个处理: 基肥: 拔节期: 抽穗期氮肥施用比例为7:3:0(R1); 5:3:2(R2); 10:0:0(R3)。水稻季磷(P_2O_5)用量均为 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 钾(K_2O)用量均为 $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷钾肥全部基肥。尿素的基肥-拔节期分别为7:3, 基肥-拔节期-抽穗期分别为5:3:2, 基肥-追肥为10:0。

每个处理重复4次, 小区面积为 40 m^2 , 随机区组排列。本研究中供试的磷肥和钾肥分别为磷酸钙和氯化钾, 秸秆为上一季收获麦秆($4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)和稻秆($7.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。水稻于6月中旬移栽, 农田管理措施与当地农民常规管理一致。

1.3 土样采集

分别于2015年水稻返青期(6月24日)、拔节期(7月4日)、分蘖期(7月25日)、抽穗期(8月16日)、灌浆期(8月27日)和成熟期(10月15日), 在上述试验田对应处理采集耕层(0—20 cm)土壤样品, 各重复采3个点组成混合样。

1.4 测定项目与分析方法

土壤微生物量碳氮: 土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法^[14-15], 以水土比4:1加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液, 振荡30 min, 提取待测液, 用

TOC-5050分析仪测定其中微生物量碳氮含量。土壤微生物量碳氮含量为熏蒸和未熏蒸土壤浸提液中碳/氮含量之差^[16-17]; 土壤水溶性有机碳、氮: 土壤水溶性有机碳、氮采用去离子水浸提(水土比5:1)土样, 浸提液通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 用 TOC-5050 分析仪测定滤液中水溶性有机碳、氮含量; 易氧化有机碳含量采用 KMnO_4 氧化比色法测定^[18]; 速效氮采用 KCl 溶液浸提, 流动分析仪(AA3, BRAN-LUEBBE)测定。土壤全氮含量的测定采用半微量凯氏定氮法进行; 有机质含量采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定; 测定土壤速效磷含量, 采用 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提, 钼锑抗比色法; 采用 $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵浸提, 火焰光度计测定土壤速效钾含量^[19]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2013 和 sigmaplot 12.5 对数据进行统计, 利用 SAS 8.0 对不同处理土壤养分指标的差异进行方差分析及显著性检验。

2 结果

2.1 秸秆配施氮肥对土壤微生物量碳氮、可溶性有机碳氮和易氧化有机碳的影响

2.1.1 对土壤微生物量碳氮的影响 由表2可见, 与秸秆移除相比, 在水稻拔节期秸秆还田处理0—20 cm 土层土壤微生物量碳(SMBC)含量分别增加了2.3倍、5.0倍、3.8倍和2.0倍, 其中SN处理SMBC的增幅达到显著水平, 其他生育时期处理间差异未达到显著水平。随着水稻的生长, SMBC含量有所提高, 在水稻灌浆期达到最大值, 较拔节期增加了58.8%。

整个生育期内SF和SM处理SMBN含量分别较CK增加了0.7%和7.5%。

2.1.2 对土壤水溶性有机碳氮的影响 与秸秆移除相比(表3), SM处理使水稻成熟期0—20 cm 土层DOC含量显著降低, 而拔节期各秸秆还田处理均使0—20 cm 土层DON含量增加, 增幅为6.2%(S)、41.2%(SN)、65.9%(SF)和21.6%(SM), 其中SF处理的增幅达到显著水平。水稻的整个生育期内, 秸秆还田处理增加了0—20 cm 土层DON含量。随着水稻的生长, DOC含量先增加, 到分蘖期达到最大值, 平均为 $1181.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 然后逐渐降低, DON含量在灌浆期达到最大值, 平均为 $15.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

2.1.3 对土壤易氧化有机碳和速效氮的影响 各秸秆还田处理ROC和AN均较秸秆移除处理有所提高(表4)。与秸秆移除(CK)相比, SN、SF和SM

表 1 水稻田间试验处理及肥料用量
Table 1 Treatments and fertilizer application rate in field experiment

试验 Experiment	处理 Treatment	基肥 Basal fertilizers (kg·hm ⁻²)					追肥 Top-dressed nitrogen (kg·hm ⁻²)
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	秸秆 Straw	菌剂 Microbial inoculants	
秸秆配施氮肥 Straw incorporation combined with nitrogen fertilization	小麦秸秆移除 Wheat straw removal (CK)	195	60	90	0	0	0
	小麦秸秆全量还田 Wheat straw incorporation (S)	0	60	90	4500	0	0
	全量秸秆+习惯施氮量 Straw incorporation matched with farmer common N rate (SN)	136.5	60	90	4500	0	58.5
	全量秸秆+推荐施氮量 Straw incorporation matched with optimal N rate (SF)	115.5	60	90	4500	0	49.5
	全量秸秆+推荐施氮量+腐熟菌剂 SF plus straw decomposing microbial inoculants (SM)	115.5	60	90	4500	30	49.5
	不施氮肥 No nitrogen fertilizer (N0)	0	60	90	4500	0	0
氮肥用量 Nitrogen rate	总施氮量为 165 kg·hm ⁻² Optimal nitrogen fertilizer (N165)	115.5	60	90	4500	0	49.5
	总施氮量为 195 kg·hm ⁻² Farmer common nitrogen rate (N195)	136.5	60	90	4500	0	58.5
	小麦秸秆全量还田，基施：拔节期：抽穗期氮肥施用比例 为 7 : 3 : 0	115.5	60	90	4500	0	49.5
氮肥基追比 Basal/topdressing ratio of nitrogen fertilizer	Basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers in the shooting and heading stage: 7 : 3 : 0 (R1)						
	小麦秸秆全量还田，基施：拔节期：抽穗期氮肥施用比例 为 5 : 3 : 2 R2	82.5	60	90	4500	0	82.5
	Basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers in the shooting and heading stage: 5 : 3 : 2 (R2)						
	小麦秸秆全量还田，基施：拔节期：抽穗期氮肥施用比例 为 10 : 0 : 0 R3	165	60	90	4500	0	0
	Basal/topdressing ratios of nitrogen fertilizers in the shooting and heading stage: 10 : 0 : 0 (R3)						

表 2 不同秸秆配施氮肥处理的土壤微生物量碳氮含量
Table 2 SMBC and SMBN contents under straw incorporation matched with nitrogen fertilizer (mg·kg⁻¹)

测定 项目 Index	处理 Treatment	采样时期 Growth stage						平均值 Average
		返青期 Regreening	拔节期 Shooting	分蘖期 Tillering	抽穗期 Heading	灌浆期 Grain-filling	成熟期 Maturity	
SMBC	CK	1314.1±479.0a	203.2±83.2b	1833.9±763.1a	3186.3±510.3a	1840.8±1185.5a	2349.8±1082.2a	1788.0a
	S	1871.7±332.6a	674.3±492.9ab	997.1±577.4a	2252.5±1539.7a	3290.9±1248.4a	815.2±771.7a	1650.3a
	SN	1170.0±667.2a	1217.6±900.8a	1310.6±492.0a	1245.4±551.5a	2905.6±1590.9a	1580.6±1686.9a	1571.6a
	SF	1414.0±505.7a	965.8±518.9ab	1926.6±1885.6a	1585.5±1690.7a	1833.5±1017.4a	2278.2±2227.5a	1667.3a
	SM	1947.4±526.4a	604.8±588.6ab	1213.7±782.2a	1602.3±530.0a	2384.8±749.0a	1455.0±934.2a	1534.7a
	平均值 Average	1543.4B	733.1C	1456.4BC	1974.4AB	2451.1A	1695.8AB	
SMBN	CK	35.0±3.1a	14.1±6.1a	22.5±3.7a	36.4±30.6a	23.0±1.6a	29.2±19.6a	26.7a
	S	25.5±2.8a	37.0±33.7a	20.6±11.3a	39.9±6.0a	17.2±8.1a	13.1±8.1a	25.6a
	SN	26.9±9.5a	12.4±3.3a	12.5±5.8a	16.5±10.9a	20.7±12.1a	16.8±7.4a	17.6a
	SF	37.2±19.9a	44.6±22.7a	16.2±10.3a	23.3±22.6a	22.1±6.9a	18.0±9.5a	26.9a
	SM	35.0±3.1a	28.2±14.1a	30.9±25.1a	30.2±16.8a	25.8±15.9a	22.0±16.0a	28.7a
	平均值 Average	31.9A	27.2A	20.5A	29.3A	21.8A	19.8A	

表中数值为平均值±标准差(n=4)；小写字母表示同一土壤养分指标不同秸秆配施氮肥处理的比较，大写字母表示不同采样时期间的比较，不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同
The data in the table indicates as means±SD; The small letters show comparison between different cultivation models, nitrogen fertilizer rate or fertilization treatments, capital letters show comparison between different growth stages, different letters mean significance at 5% level. The same as below

表 3 不同秸秆配施氮肥处理土壤水溶性有机碳氮含量

Table 3 DOC and DON contents under straw incorporation matched with nitrogen fertilizer (mg·kg⁻¹)

测定项目 Index	处理 Treatment	采样时期 Growth stage						平均值 Average
		返青期	拔节期	分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期	
		Regreening	Shooting	Tillering	Heading	Grain-filling	Maturity	
DOC	CK	592.0±141.6a	788.1±164.8a	956.3±116.6a	1156.6±355.6a	831.3±357.1a	843.8±268.0a	861.4a
	S	621.1±46.3a	567.7±98.1a	1628.0±274.3a	1035.4±741.5a	755.7±146.1a	541.6±324.9ab	858.2a
	SN	488.3±95.4a	702.8±109.8a	1183.7±264.6a	1193.7±489.7a	882.6±154.5a	541.1±352.6ab	832.0a
	SF	617.6±134.0a	766.7±233.2a	1055.6±255.5a	1086.9±381.9a	695.4±245.2a	690.7±235.2ab	818.8a
	SM	805.9±224.1a	518.9±484.2a	1081.8±163.4a	1367.1±265.4a	908.6±333.9a	308.4±48.7b	831.8a
	平均值 Average	625.0B	668.8B	1181.1A	1168.0A	814.7B	585.1B	
DON	CK	8.8±2.7a	9.7±4.3b	13.2±7.5a	13.0±1.0a	15.4±3.3a	12.9±2.3ab	12.1a
	S	10.5±4.7a	10.3±3.0ab	17.3±5.2a	14.8±3.8a	13.9±2.5a	10.5±2.4b	12.9a
	SN	11.3±4.9a	13.7±6.4ab	17.1±2.2a	16.2±1.8a	15.5±2.2a	10.1±3.5ab	14.0a
	SF	16.0±12.3a	16.1±2.0a	14.2±2.2a	12.6±3.7a	13.6±2.5a	8.7±2.3b	13.5a
	SM	17.5±1.7a	11.8±1.8ab	13.2±2.9a	14.3±1.9a	18.8±2.8a	7.7±1.5a	13.9a
	平均值 Average	12.9AB	12.3AB	15.0A	14.2A	15.4A	10.0B	

表 4 不同秸秆配施氮肥处理土壤易氧化有机碳和速效氮含量

Table 4 ROC and AN contents under straw incorporation matched with nitrogen fertilizer (mg·kg⁻¹)

测定项目 Index	处理 Treatment	采样时期 Growth stage						平均值 Average
		返青期	拔节期	分蘖期	抽穗期	灌浆期	成熟期	
		Regreening	Shooting	Tillering	Heading	Grain-filling	Maturity	
ROC	CK	5.2±0.4a	4.6±0.1a	4.5±0.3a	5.0±0.3a	4.5±0.4a	4.0±0.2a	4.6a
	S	5.1±0.5a	4.5±0.4a	4.8±0.4a	5.1±0.6a	4.1±0.2a	4.1±0.2a	4.6a
	SN	5.0±0.3a	4.9±0.2a	4.7±0.2a	5.0±0.4a	4.4±0.4a	4.2±0.4a	4.7a
	SF	5.2±0.1a	4.6±0.2a	5.0±0.2a	5.5±0.4a	4.6±0.4a	4.3±0.3a	4.9a
	SM	5.5±0.4a	4.1±0.4b	5.0±0.4a	5.0±0.3a	4.5±0.3a	4.4±0.3a	4.7a
	平均值 Average	5.2A	4.6BC	4.8B	5.1A	4.4CD	4.2D	
AN	CK	8.2±2.9a	18.8±4.5a	11.3±3.5a	10.2±0.2c	5.0±2.3b	22.6±11.0a	12.7a
	S	20.0±11.8a	26.9±12.2a	10.4±2.1a	11.2±0.9bc	10.9±5.9ab	10.9±12.5a	15.0a
	SN	16.9±4.0a	29.9±19.2a	11.9±3.9a	14.3±2.4a	13.4±6.1ab	18.1±26.4a	17.4a
	SF	18.1±19.8a	32.6±17.2a	11.7±0.2a	12.8±2.0ab	15.1±3.1a	5.1±1.0a	15.9a
	SM	28.5±18.9a	27.2±14.4a	13.8±3.9a	11.7±0.9bc	13.4±7.1ab	31.1±30.5a	20.9a
	平均值 Average	18.3B	27.0A	11.8B	12.0B	11.6B	17.6B	

处理 ROC 含量分别增加了 2.2%、6.5%和 2.2%；S、SN、SF 和 SM 处理 AN 含量分别增加了 18.1%、37.1%、25.2%和 64.6%。随着水稻的生长，ROC 含量随之增加，抽穗期达到峰值，平均为 5.1 mg·kg⁻¹（接近于返青期），AN 含量在拔节期达到最大值，平均为 27.0 mg·kg⁻¹。

2.2 施氮量对土壤微生物量氮、水溶性有机氮和速效氮的影响

2.2.1 对土壤微生物量氮的影响 水稻返青期、灌浆

期和成熟期均随施氮量的增加，0—20 cm 土层 SMBN 含量增加（图 1）。与不施氮（N0）相比，N165 和 N195 处理 SMBN 的平均含量分别增加了 19.6%、65.3%，20.3%、28.5%和 28.2%、36.4%。随着水稻的生长，SMBN 含量到拔节期达到最大值。水稻整个生育期内，N195 处理 SMBN 平均含量高于 N0 处理。

2.2.2 对土壤水溶性有机氮的影响 图 2 表明，在水稻返青期和拔节期 N195 处理 0—20 cm 土层 DON 含量均高于 N0 处理，到水稻灌浆期，N195 处理 DON

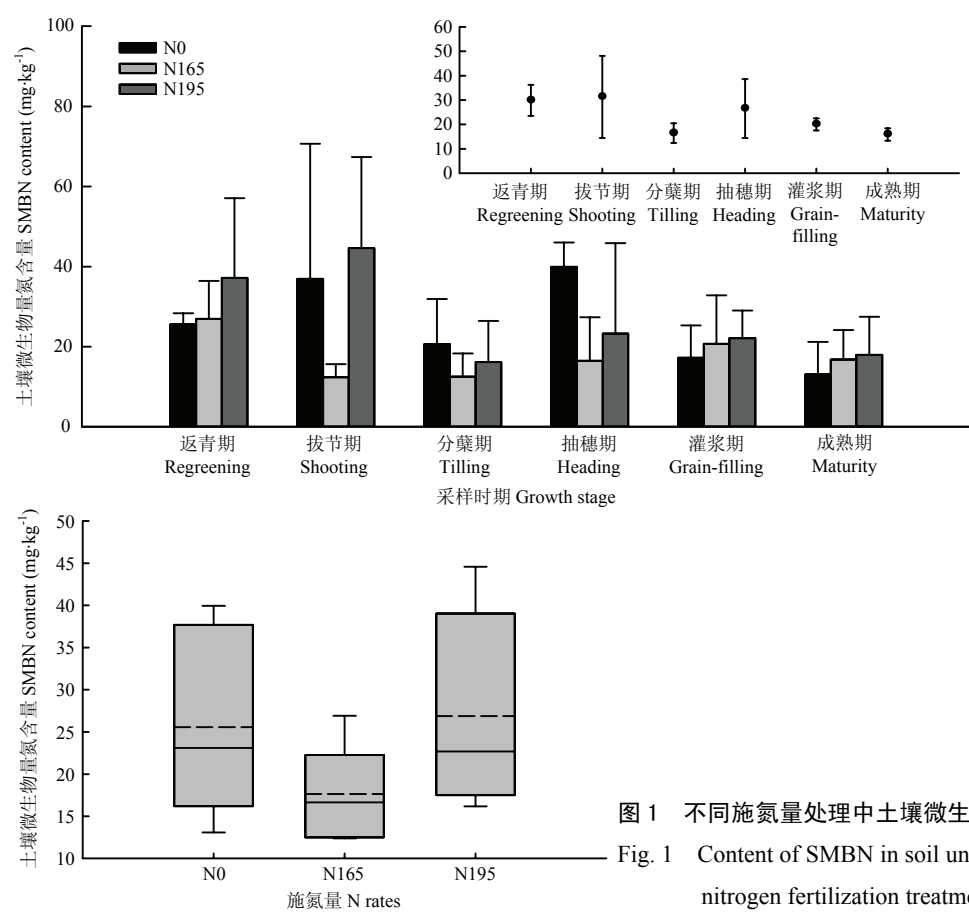
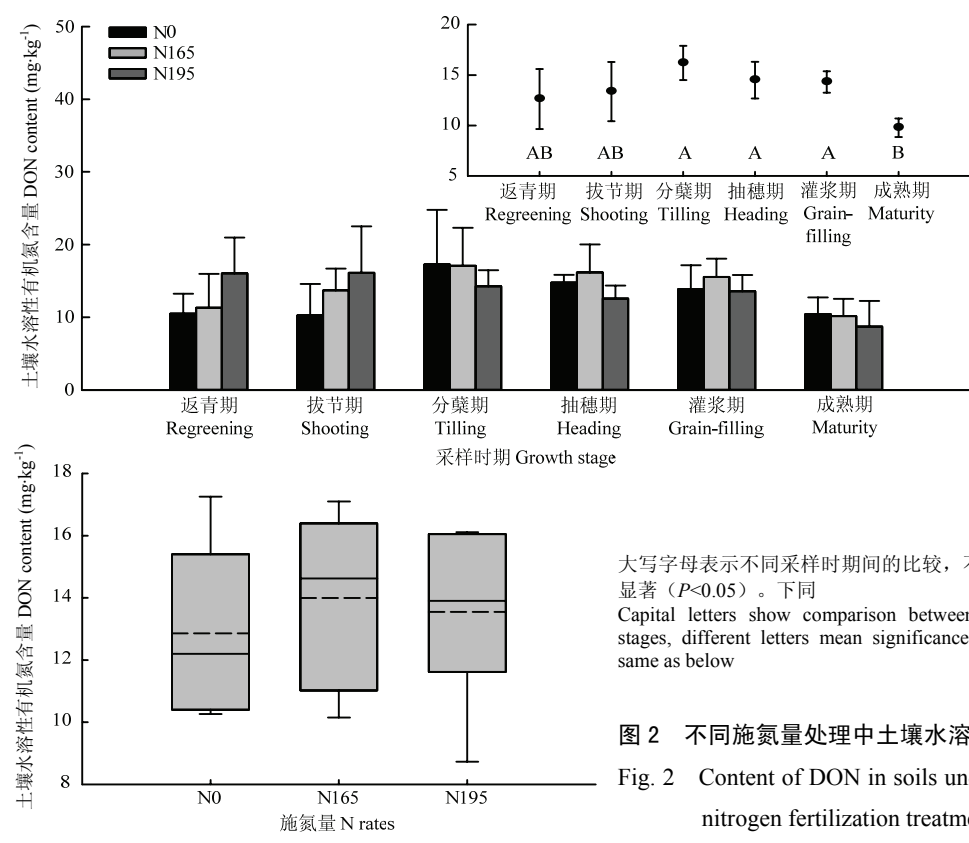


图 1 不同施氮量处理中土壤微生物量氮含量
Fig. 1 Content of SMBN in soil under the different nitrogen fertilization treatments



大写字母表示不同采样时期间的比较，不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同
Capital letters show comparison between different growth stages, different letters mean significance at 5% level. The same as below

图 2 不同施氮量处理中土壤水溶性有机氮含量
Fig. 2 Content of DON in soils under the different nitrogen fertilization treatments

含量有所下降,导致 DON 含量低于 N0 处理。水稻抽穗和灌浆期 N165 处理 DON 含量高于 N0 和 N195 处理。在水稻整个生育期中,N165 和 N195 处理均较 N0 处理提高了 DON 含量,提高幅度分别为 8.5%和 5.0%。

2.2.3 施氮量对土壤速效氮的影响 0—20 cm 土层 AN 平均含量在 15.1—17.4 mg·kg⁻¹ 之间(图 3)。水稻拔节期、抽穗期和灌浆期 N165、N195 处理 0—20 cm 土层 AN 含量均高于 N0 处理,到水稻成熟期,N195 处理 AN 含量急剧下降,导致 0—20 cm 土层 AN 含量低于 N0 处理。施氮肥使 AN 含量有所增加,但未达到显著水平。

2.3 施氮时期对土壤微生物量碳氮、水溶性有机碳氮、易氧化有机碳和速效氮的影响

2.3.1 对土壤微生物量碳氮的影响 与 R2 相比(图 4),R1 和 R3 水稻拔节期土壤微生物碳含量明显增加,而收获后 R3 处理 SMBC 含量明显降低。

随着水稻的生长,3 个施肥时期处理 0—20 cm 土层 SMBC 含量呈上升趋势,到成熟期达到最大值;与 R3 相比,R1 和 R2 处理水稻拔节期 0—20 cm 土层 SMBN 含量分别提高了 3.6 和 2.5 倍,且 R1 处理显著高于其他处理($P < 0.05$)。增加追肥比例使成熟期 SMBC 和 SMBN 含量有所增加,但未达到显著水平。

2.3.2 对土壤易氧化有机碳和速效氮的影响 不同时期各处理 0—20 cm 土层 ROC 和 AN 含量分别在 4.0—5.5 和 10.5—44.4 mg·kg⁻¹ 之间,平均分别为 4.8 和 20.4 mg·kg⁻¹(图 5)。与 R1 相比,R2 处理使水稻拔节期 0—20 cm 土层 ROC 含量的增加达到了显著水平,增幅为 8.7%。增加追肥比例提高了水稻分蘖期 AN 含量,但处理间差异不显著。随着水稻的生长,ROC 和 AN 含量均先升高后下降,分别到抽穗期和拔节期升到最大。

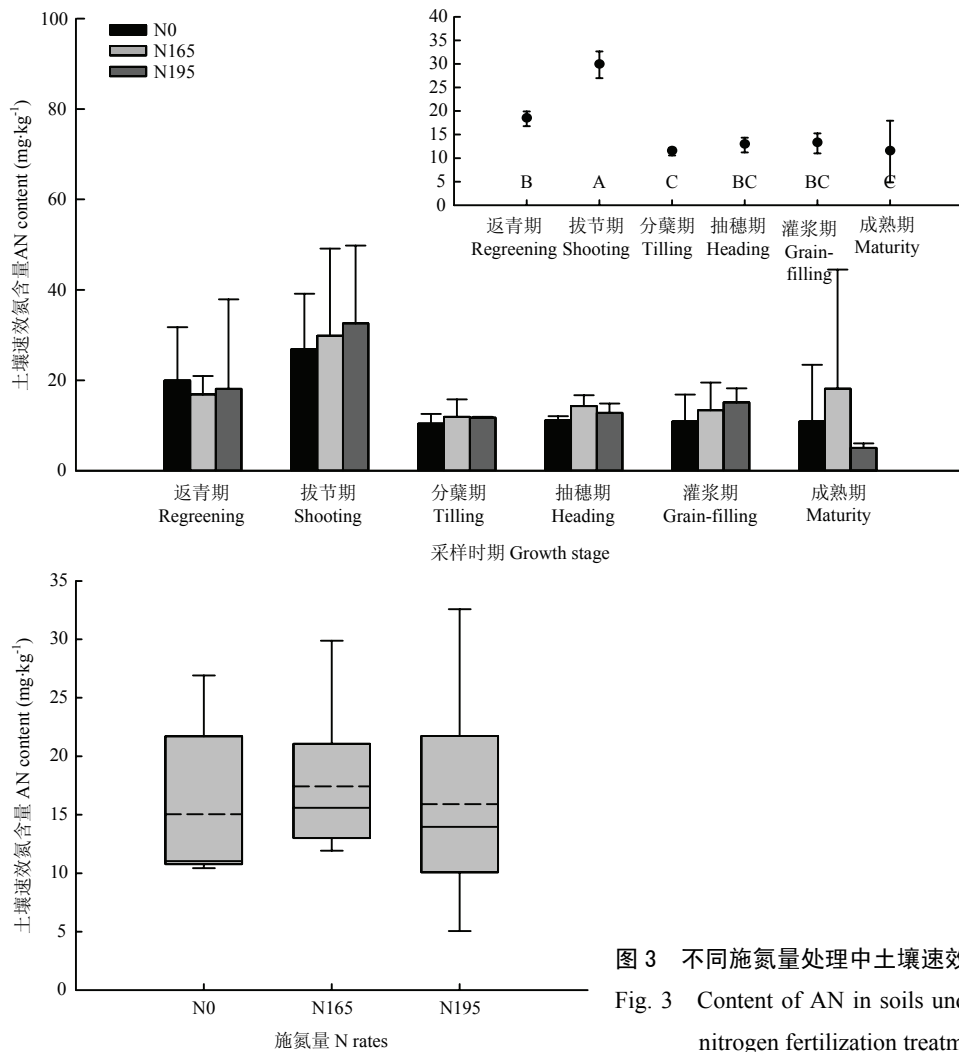


图 3 不同施氮量处理中土壤速效氮含量

Fig. 3 Content of AN in soils under the different nitrogen fertilization treatments

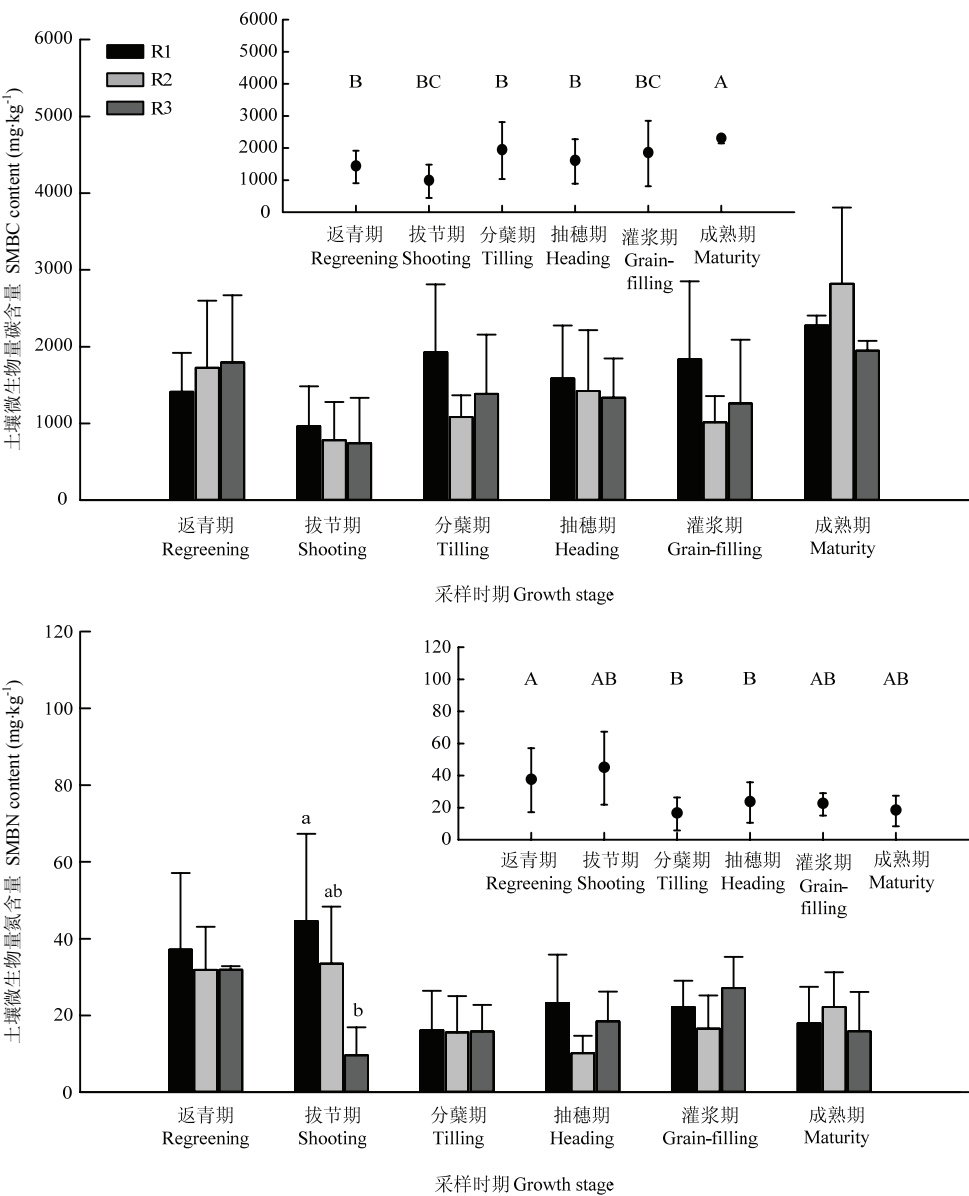


图 4 不同施氮时期处理中土壤微生物量碳氮含量

Fig. 4 Contents of SMBC and SMBN in soils under different nitrogen application time treatments

2.3.3 对土壤水溶性有机碳氮的影响 由图 6 可见，R2 处理明显提高了水稻分蘖期、抽穗期和灌浆期 DOC 和 DON 含量，但均未达到显著水平。基肥比例增加提高水稻拔节期 DOC 含量，返青期和拔节期 DON 含量。在水稻整个生育期中 DOC 和 DON 分别在抽穗期和拔节期达到最大值。

3 讨论

3.1 秸秆还田对土壤活性碳氮含量的影响

本研究中秸秆还田配施氮肥显著提高了土壤活性

碳、氮含量，单施化学氮肥不能显著促进土壤微生物的活动，说明秸秆较无机氮肥对土壤微生物活性和数量的影响更大（表 2—4 和图 1—3）。秸秆移除、秸秆还田+习惯施氮（SN）、秸秆还田+推荐施氮（SF）和秸秆还田+腐解菌剂均以不同方式向土壤中输入碳、氮养分，同时外源碳的大量输入激发了微生物的活性，使微生物大量繁殖。氮肥的施用促进了秸秆的分解，增加了根系分泌物，提高了微生物生物量^[20]。可以看出，秸秆还田配施氮肥显著提高了水稻拔节期土壤表层 SBMC 和 DON 的含量，抽穗期和灌浆期 AN

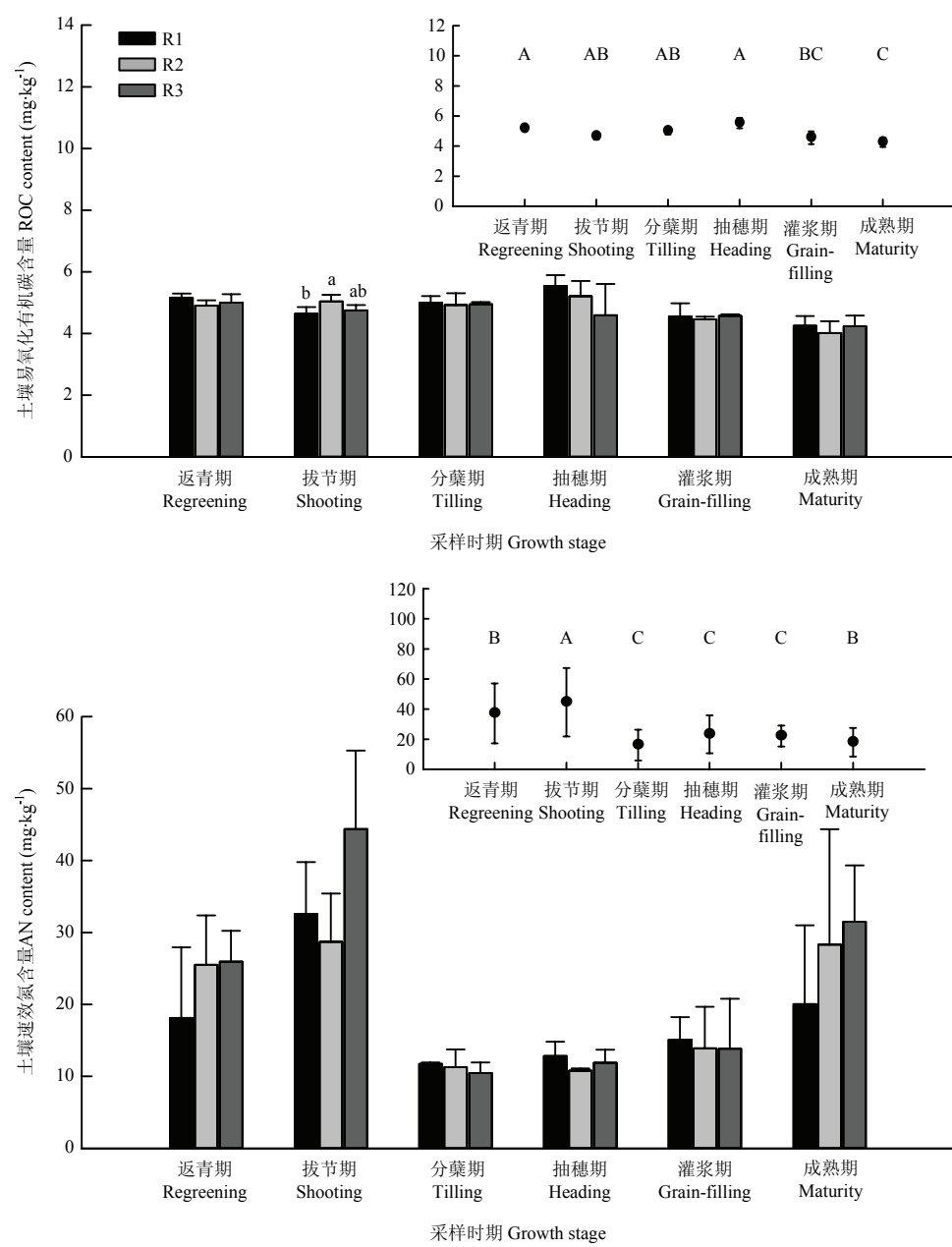


图 5 不同施氮时期处理中土壤易氧化有机碳和速效氮含量

Fig. 5 Content of ROC and AN in soils under the different nitrogen application time treatments

含量也显著增加，但成熟期 DON 含量显著降低。产生这种差异的原因：秸秆还田为土壤微生物的生长和繁衍提供了大量碳源^[21-22]，而氮肥的施用促使原有有机碳的分解，提高了土壤微生物的活性，使微生物大量繁殖，可通过根系分泌物产生大量可溶性有机碳氮，从而提高了 SMBC 含量^[23-24]。

另外，秸秆还田使土壤 C/N 升高，促进了土壤有机氮矿化，使 DON 大量矿化为 AN。而微生物代

谢的主要能量来源是氮素（如 SON、DON 等），大量秸秆碳的投入促进了土壤微生物对 DON 的同化，降低了 DON 的量^[7, 25]。本研究中，秸秆还田降低了土壤 DOC 含量，由于 DOC 是土壤微生物的重要能量来源，微生物量大、活性强反而降低了土壤 DOC 含量^[26]。

3.2 施氮量与基追比对土壤活性碳氮含量的影响

土壤活性有机碳的水平是影响土壤微生物的数量

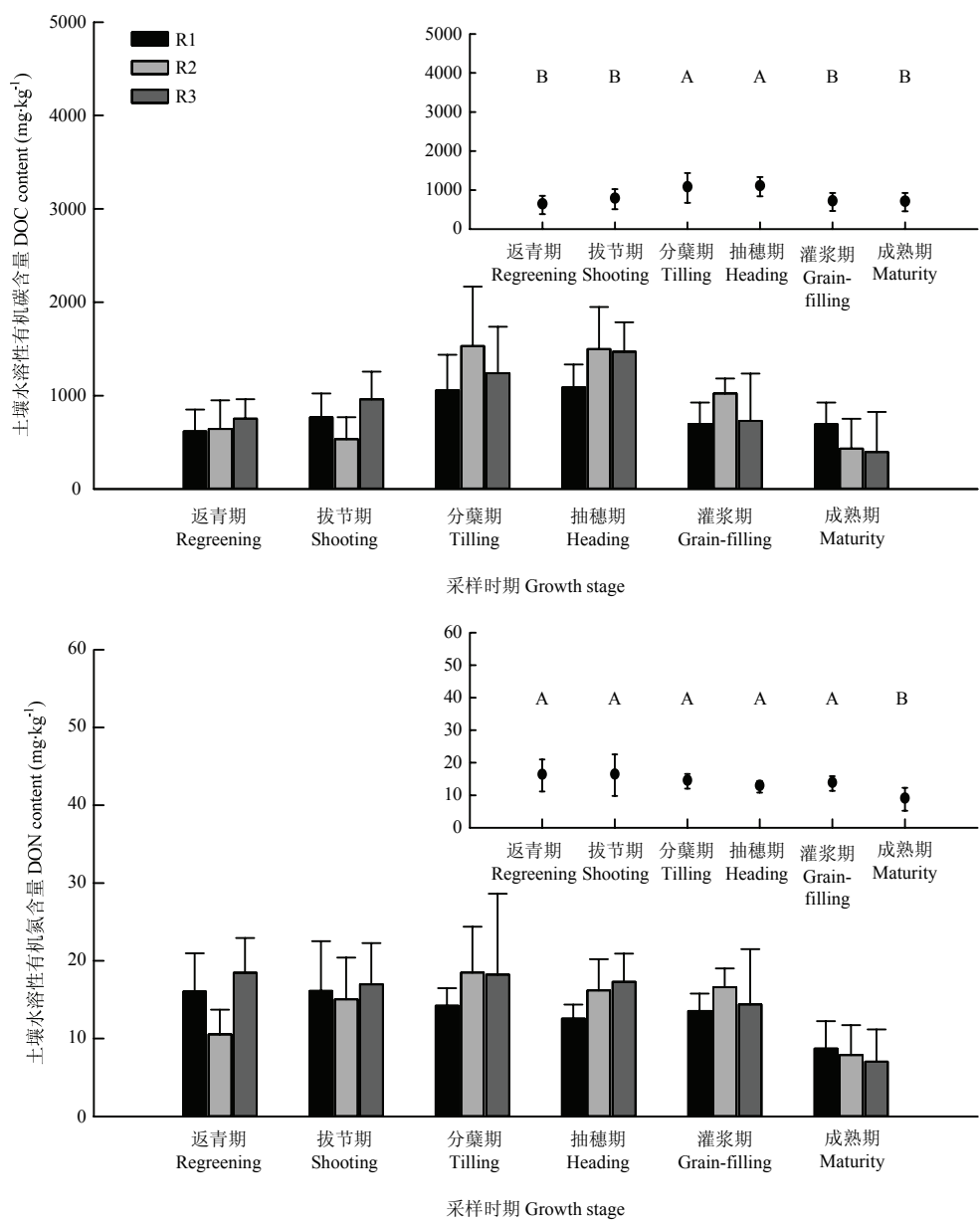


图 6 不同施氮时期处理中土壤水溶性有机碳氮含量

Fig. 6 Content of DOC and DON in soils under the different nitrogen application time treatments

和活性的主要因素，而氮素是微生物代谢的能量来源。高量施氮不仅有利于水稻生长，且促进了根际碳沉积^[27]。据杨馨逸等^[28]研究表明，增加氮肥用量能显著提高土壤微生物数量、微物量碳氮和可溶性有机碳氮含量，而过量施用氮肥则导致土壤微生物数量和活性碳氮组分显著降低。另有研究表明，长期施用氮肥能提高土壤微生物活性及数量，短期施用氮肥对土壤微生物数量影响未达到显著水平^[29]。本研究发现，施氮量对土壤 SMBN、DON 和 AN 影响不大，这与前人的

研究结果一致^[30]。但适量施用氮肥，有助于水稻 SMBN 和 AN 含量的提高，而过量施用氮肥（195 kg·hm⁻²）DON 和 AN 含量反而降低（图 1、2、3），这可能是由于过量施氮导致土壤微生物活性降低，大量累积在土壤中的氮素对土壤微生物有毒害作用，从而制约了微生物的代谢^[31]。

本研究同时发现过量施氮导致土壤 SMBN 含量升高（图 1），这与过量施氮导致土壤中氮的累积量增加有关，氮肥施入土壤后，在很短的时间内转化为

铵态氮,促进了土壤有机氮的矿化。在其他系统(如草地、森林等)也得出了相似的结论^[32-33]。可见,在湖北省当地生产常规施氮量 $195\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的基础上可通过减少施氮量以达到高产优质和改良土壤质量的目标。综合考虑水稻各生育期土壤碳、氮的周转状况,在本试验条件下,施氮量 $165\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 最为合理。

氮肥的基追比对土壤碳、氮影响的研究表明,增加追肥比例不仅可以增加氮素的累积,也能减少作物前期氮素的损失^[34]。杜晶晶等^[35]指出,水稻吸收的氮素,基肥的贡献率仅占6.9%,这也说明基肥的施氮量越高,损失量也越高。本研究表明,基肥比为7:3:0和5:3:2显著提高了水稻拔节期SMBN和ROC含量。可能的原因,氮肥的施用使根系微生物活跃,也就增加了土壤有机氮的含量,使得更多的ROC释放出来。因此,适当增加追肥比例提高了水稻生育期内土壤活性碳氮的含量。

4 结 论

秸秆还田配施氮肥显著提高了水稻生育期内耕层土壤活性碳氮含量,单施氮肥不能显著影响土壤活性碳氮组分,表明秸秆比化学氮肥对土壤活性碳氮组分的影响更大;适当降低氮肥用量有利于提升土壤水溶性有机氮和速效氮的含量;秸秆还田下增加氮肥追肥比例是更为有效的施肥模式,不仅拥有较高的土壤微生物量氮和易氧化有机氮含量,同时亦提高了水稻生育后期土壤活性碳氮含量;微生物量碳氮和水溶性有机碳氮的含量能灵敏地反映秸秆还田下土壤碳、氮的转化。因此,秸秆还田配施适量氮肥,并增加氮肥作为追肥的比例为稻麦轮作区土壤碳氮养分有效利用的最佳施肥方式。

References

- [1] 李玲,朱捍华,苏以荣,肖和艾,黄道友,吴金水. 稻草还田和易地还土对红壤丘陵农田土壤有机碳及其活性组分的影响. 中国农业科学, 2009, 42(3): 926-933.
LI L, ZHU H H, SU Y R, XIAO H A, HUANG D Y, WU J S. Effects of rice straw incorporation in situ and ex situ on soil organic C and active organic C in agricultural soils in red soil hilly region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(3): 926-933. (in Chinese)
- [2] 王德建,常志州,王灿,张刚,张斯梅. 稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1073-1082.
WANG D J, CHANG Z Z, WANG C, ZHANG G, ZHANG S M. Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(9): 1073-1082. (in Chinese)
- [3] EMBACHER A, ZSOLNAY A, GATTINGER A, MUNCH J C. The dynamics of water extractable organic matter (WEOM) in common arable topsoils: II. Influence of mineral and combined mineral and manure fertilization in a Haplic Chernozem. *Geoderma*, 2008, 148(1): 63-69.
- [4] XU M G, LOU Y L, SUN X L, WANG W, BANIYAMUDDIN M, ZHAO K. Soil organic carbon active fractions as early indicators for total carbon change under straw incorporation. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(7): 745-752.
- [5] VERESOGLOU S D, CHEN B D, MATTHIAS C R. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 53-62.
- [6] 许轲,刘萌,陈京都,顾海燕,戴其根,马克强,江峰,何理. 麦秸秆全量还田对稻田土壤溶解有机碳含量和水稻产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(3): 430-436.
XU K, LIU M, CHEN J D, GU H Y, DAI Q G, MA K Q, WANG F, HE L. Effects of wheat-straw returning into paddy soil on dissolved organic carbon contents and rice grain yield. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 16(2): 430-436. (in Chinese)
- [7] JONES D L, HEALEY J R, WILLETT V B, FARRAR J F, HODGE A. Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(3): 413-423.
- [8] TIAN K, ZHAO Y C, XU X H, HAI N, HUANG B A, DENG W J. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40-50.
- [9] ZHANG W J, XU M G, WANG X J, HUANG Q H, NIE J, LI Z Z, LI S L, SEON W H, KYEONG B L. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12(4): 457-470.
- [10] 曾骏,郭天文,于显枫,董博. 长期施肥对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响. 土壤通报, 2011, 42(4): 812-815.
ZENG J, GUO T W, YU X F, DONG B. Effect of fertilization on soil active C and C pool management index. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(4): 812-815. (in Chinese)
- [11] 王丹丹,周亮,黄胜奇,李成芳,曹凑贵. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740.
WANG D D, ZHOU L, HUANG S Q, LI C F, CAO C G. Short-term

- effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4): 735-740. (in Chinese)
- [12] HAO Z P, CHRISTIE P, ZHENG J, LI L, CHEN Q, WANG J G. Excessive nitrogen inputs in intensive greenhouse cultivation may influence soil microbial biomass and community composition. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2009, 40(15/16): 2323-2337.
- [13] ZAHIR S, AHMAD S R, HIDAYAT U R. Soil microbial biomass and activities as influenced by green manure legumes and n fertilizer in rice-wheat system. *Pakistan Journal of Botany*, 2010, 42(4): 2589-2598.
- [14] VANCE E D, BROOKES, P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [15] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, JENKINSON D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [16] 杨绒, 赵满兴, 周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 107-111.
- YAN R, ZHAO M X, ZHOU J B. Effects of different conditions on the determination of total nitrogen in solution by persulfate oxidation method. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(12): 107-111. (in Chinese)
- [17] 周建斌, 李生秀. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择. 植物营养与肥科学报, 1998, 4(3): 299-304.
- ZHOU J B, LI S X. Choosing of a proper oxidizer for alkaline persulfate oxidation to determining total nitrogen in solution. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 299-304. (in Chinese)
- [18] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISE L S. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46: 1459-1466.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. *Soil Agro-chemistry Analysis*. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [20] JACKSON L E, CALDERON F J, STEENWERTH K L, SCOW K M, ROLSTON D E. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality. *Geoderma*, 2003, 114(3/4): 305-317.
- [21] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 李保国. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响. 植物营养与肥科学报, 2002, 8(2): 162-167.
- LI G T, ZHAO Z J, HUANG Y F, LI B G. Effect of straw returning on soil nitrogen transformation. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 162-167. (in Chinese)
- [22] SPEDDING T A, HAMEL C, MEHUYS G R, MADRAMOOTOO C A. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(3): 499-512.
- [23] GARDENAS A, AGREN G, BIRD J A, CLARHOLM M, HALLIN S, KATTERER T, KNICKER H. Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions – From molecular to global scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 702-717.
- [24] LEMKE R L, VANDENBYGAART A J, CAMPBELL C A, LAFOND G P, GRANT B. Crop residue removal and fertilizer N: Effects on soil organic carbon in a long-term crop rotation experiment on a Udic Boroll. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1/2): 42-51.
- [25] LEBAUER D S, TRESEDER K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [26] 曾宪楠, 王麟, 孙羽, 宋秋来, 冯延江, 袁媛. 水稻秸秆还田下氮肥对土壤有机碳及碳库管理指数的影响. 黑龙江农业科学, 2016(5): 41-44.
- ZENG X N, WANG L, SUN Y, SONG Q L, FENG Y J, YUAN Y. Effect of N fertilizer application on soil organic carbon and carbon pool management index under rice straw returning. *Heilongjiang Agricultural Science*, 2016(5): 41-44. (in Chinese)
- [27] 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水. 不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ^{13}C 连续标记法. 环境科学, 2014, 35(5): 1933-1938.
- TAN L M, WU H, LI H, ZHOU P, LI K L, WANG J R, GE T D, YUAN H Z, WU J S. Input and distribution of rice photosynthesized carbon in the tillering stage under different nitrogen application following continuous ^{13}C labeling. *Environmental Science*, 2014, 35(5): 1933-1938. (in Chinese)
- [28] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日, 段鹏鹏, 朱玉翠, 齐文. 不同品种小麦下土壤微生物量和可溶性有机物对不同施氮量的响应. 中国农业科学, 2016, 49(7): 1315-1324.
- YANG X Y, LIU XIAO H, HAN X R, DUAN P P, ZHU Y C, QI W. Responses of soil microbial biomass and soluble organic matter to

- different application rates of N: A comparison between Liaochun 10 and Liaochun 18. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1315-1324. (in Chinese)
- [29] LOVELL R D, JARVIS S C, BARDGETT R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 969-975.
- [30] LIANG C, BALSER T C. Microbial production of recalcitrant organic matter in global soils: implications for productivity and climate policy. *Nature Reviews Microbiology*, 2011, 9(1): 75.
- [31] ZHONG Y Q W, YAN WM, SHANGGUAN ZP. Impact of long-term N additions upon coupling between soil microbial community structure and activity, and nutrient-use efficiencies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 91: 151-159.
- [32] LI F L, LIU M, LI Z P, JIANG C Y, HAN F X, CHE Y P. Changes in soil microbial biomass and functional diversity with a nitrogen gradient in soil columns. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64: 1-6.
- [33] TIAN X F, HU H W, DING Q D, SONG M H, XU X L, ZHENG Y, GUO L D. Influence of nitrogen fertilization on soil ammonia oxidizer and denitrifier abundance, microbial biomass, and enzyme activities in an alpine meadow. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 50(4): 703-713.
- [34] 石玉, 于振文. 施氮量及底追比例对小麦产量、土壤硝态氮含量和氮平衡的影响. *生态学报*, 2006, 26(11): 3661-3669.
- SHI Y, YU Z W. Effects of nitrogen fertilizer rate and ratio of base and topdressing on yield of wheat, content of soil nitrate and nitrogen balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(11): 3661-3669. (in Chinese)
- [35] 林晶晶, 李刚华, 薛利红. ^{15}N 示踪的水稻氮肥利用率细分. *作物学报*, 2014, 40(8): 1424-1434.
- LIN J J, LI G H, XUE L H. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(8): 1424-1434. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)