

陈 鑫, 刘 勤, 张 刚. 太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 874-883.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2021.04.009

太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响

陈 鑫^{1,2,3}, 刘 勤^{1,3}, 张 刚^{1,3}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院常熟农业生态实验站, 江苏 苏州 215555)

摘要: 为研究太湖流域长期不同轮作方式和施氮水平对稻田土壤肥力指标、水稻产量的影响, 设置了轮作方式(休闲-水稻、小麦-水稻、紫云英-水稻、蚕豆-水稻)和施氮水平(0 kg/hm²、120 kg/hm²、180 kg/hm²、240 kg/hm²、300 kg/hm²) 2 因素。结果表明, 与冬季休闲模式相比, 绿肥作物轮作模式稳定了土壤 pH, 提高了土壤含水量和水稳性微团聚体含量, 提高了土壤养分含量和微生物生物量氮含量; 同时, 施肥水平影响了土壤肥力水平, 与绿肥作物轮作不施氮相比, 适量施氮(120~240 kg/hm²) 优化了土壤物理结构, 促使养分含量提升, 提高了微生物生物量氮含量。进行周年绿肥作物轮作后水稻产量获得一定提升, 且在施氮量为120~180 kg/hm²时水稻产量较高。综上所述, 绿肥作物轮作模式有效提高了土壤肥力, 降低了最佳施氮量, 并使水稻产量显著增加。为兼顾养分利用水平、土壤肥力及环境效益、经济效益, 推荐将绿肥作物-水稻轮作模式下稻季施氮量降低至 120 kg/hm²左右。

关键词: 水旱轮作; 绿肥; 施氮水平; 土壤肥力; 水稻产量

中图分类号: S511.047 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2021)04-0874-10

Effects of different crop rotation modes on soil fertility and rice yield in Taihu Region

CHEN Xin^{1,2,3}, LIU Qin^{1,3}, ZHANG Gang^{1,3}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changshu Agroecological Experimental Station, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215555, China)

Abstract: To study the effects of long-term different crop rotations and nitrogen application levels on soil fertility indices and rice yield in Taihu basin, two factors of crop rotation (winter fallow-rice rotation, winter wheat-rice rotation, Chinese milk vetch-rice rotation and broad bean-rice rotation) and nitrogen application level (0 kg/hm², 120 kg/hm², 180 kg/hm², 240 kg/hm², 300 kg/hm²) were settled. The results showed that, compared with winter fallow mode, green manure crop rotation mode could maintain soil pH, increase soil moisture and improve soil water-stable microaggregates content, while contents of soil nutrients and soil microbial biomass nitrogen was also improved. Meanwhile, soil fertility level was influenced by fertilization level, and compared with green manure crop rotation without nitrogen fertilizer, appropriate application of nitrogen fertilizer (120~240 kg/hm²) improved soil physical structure, thus promoted contents of nutrients and microbial biomass nitrogen. Compared with winter fallow mode, rice yield increased under the mode of successive green manure crop rotations, and rice yield was high under 120~180 kg/hm² nitrogen applications. In summary, green manure crop rotation mode effectively improved soil fertility, decreased the appropriate nitrogen application and sig-

nificantly increased rice yield. In consideration of balancing nutrient utilization level, soil fertility, environmental benefits and economic benefits, it is recommended to reduce nitrogen application in paddy fields to 120 kg/hm² under green manure crop-rice rotation mode.

Key words: upland crop-rice rotation; green manure; nitrogen application level; soil fertility; rice yield

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0200604); 国家自然科学基金(31400464)

作者简介: 陈 鑫(1995-), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分及土壤微生物变异等相关研究。(E-mail) chenxin@issas.ac.cn

通讯作者: 刘 勤, (E-mail) qliu@issas.ac.cn

太湖地区是中国重要的稻米产区,为保持高产,区域内化肥用量高达300~350 kg/hm²,远超当地推荐施肥量。过量施肥不仅导致化肥利用率降低、土壤肥力下降等问题^[1],同时还造成严重的农业面源污染。夏水稻-冬小麦是该地区一种主要的耕作模式,但是由于劳动力成本高、小麦产量及质量均不高,且麦季养分淋失严重^[2]等问题,冬季农田闲置也较为常见。近年来,中国多地按照国家战略部署,积极探索耕地轮作休耕制度。科学合理的轮作休耕模式与方法对于中国农业未来发展具有重要意义^[3]。太湖地区冬季种植绿肥作物^[4],进行稻前还田,达到“以田养田”“以地养地”,对提高稻田土壤肥力、保持水稻高产稳产、环境友好具有重要作用^[5-7]。

研究发现,绿肥作物轮作还田对提高土壤有机质、易氧化有机碳、腐殖酸、全氮、碱解氮及磷钾含量均有着重要作用^[8-9],从而总体上提高了土壤肥力水平。此外,豆科绿肥可以通过固定大气中的氮气以减少施氮量,从而降低土壤氮素损失^[5,10-12],通过提供有机质和微量元素平衡土壤的养分供应,并通过改变酶活性提高N、P、S等元素的有效性,通过控制矿化过程使水稻-绿肥作物轮作模式下土壤微生物多样性和丰度获得提高^[13],提高作物养分吸收水平^[11,14-16],增加作物产量^[17],同时控制杂草^[18]。目前,基于双季稻区绿肥作物轮作模式的培肥、增产效果已有研究报道。而太湖地区水旱轮作下长期休耕

轮作、种植绿肥及不同施氮水平对稻田土壤肥力、水稻产量影响的研究报道较少。本研究利用已运行11年的长期定位试验,研究长期休耕轮作、种植绿肥作物、稻季补充氮肥对稻田土壤肥力及水稻产量的影响,研究结果对制定科学休耕轮作技术模式、实现农业可持续发展具有重要指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验设计

长期试验点位于常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站内(123°38' E, 31°33' N),始于2008年6月。供试土壤为湖相沉积物发育的乌栅土,土壤本底(2008年)理化性质如下:pH 7.6,有机质含量38.20 g/kg,全氮含量2.17 g/kg,全磷含量0.82 g/kg,速效磷含量13.10 mg/kg,速效钾含量174.00 mg/kg。供试水稻为南粳46。设置轮作方式(休闲-水稻、小麦-水稻、紫云英-水稻、蚕豆-水稻)和施氮水平(0 kg/hm²、120 kg/hm²、180 kg/hm²、240 kg/hm²、300 kg/hm²)2因素。施肥和轮作方案见表1。

试验用肥料为尿素(46.0% N)、氯化钾(49.8% K₂O)、普钙(5.24% P₂O₅)。紫云英-水稻、蚕豆-水稻轮作下稻前绿肥全量还田。袁嫚嫚等^[5]研究发现,紫云英和蚕豆还田分别提供氮素32.8 kg/hm²及68.8 kg/hm²。小麦-水稻轮作模式下小麦根茬还田。每个处理设3个重复,小区面积为25.76 m²,随机排列。

表1 施肥轮作处理方案

Table 1 Fertilization and crop rotation design

轮作方式	施肥处理	稻季施肥量(kg/hm ²)			麦季施肥量(kg/hm ²)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
冬休闲(FR)	F240	240	20	60			
冬小麦(WR)	W240	240	20	60	255	30	60
紫云英(CR)	C0	0	20	60			
	C120	120	20	60			
	C180	180	20	60			
	C240	240	20	60			
	C300	300	20	60			
冬蚕豆(BR)	B0	0	20	60			
	B120	120	20	60			
	B180	180	20	60			
	B240	240	20	60			
	B300	300	20	60			

处理代码中数字0、120、180、240、300分别代表稻季施氮量(kg/hm²)。下同。

1.2 试验样品采集与测定

2019 年 11 月 3 日水稻收获后分别采集表层土壤(0~10 cm)和亚层土壤(10~20 cm)样品,同一小区采集 8 个点,并将土壤样品充分混合,去除植株根系以及小石砾后装入自封袋,一部分立即带回实验室过 20 目筛后测定速效养分含量,一部分风干后分别过 20 目、100 目筛后用于土壤理化性质测定。水稻产量通过全小区籽粒风干质量计算。

土壤含水量采用烘干法测定,土壤水稳性团聚体含量采用湿筛法分离(筛孔孔径分别为 0.053 mm、0.250 mm、0.500 mm、1.000 mm、2.000 mm),pH 采用电极法测定,使用 Mettler Toledo FiveGo3(水土质量比为 2.5:1.0),土壤有机质(SOM)含量采用重铬酸钾氧化法测定,全氮(TN)含量采用半微量凯氏法测定,碱解氮含量采用碱液扩散法测定,铵态氮、硝态氮用 2 mol/L KCl 浸提后分别以靛酚蓝比色法和 220 nm/275 nm 分光光度法测定,全磷(TP)含量使用酸溶-钼锑抗比色法测定,有效磷(AP)含量采用 Olsen 法测定,速效钾(AK)含量采用火焰光度法测定。具体参照《农业化学分析方法》^[19]。平均质量直径(MWD)按照下列公式进行计算:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i \times d_i$$

式中, w_i 代表粒径范围内团聚体平均直径(0.053 mm 筛以 0.053 mm 计, 2 mm 筛以 2 mm

计), d_i 代表相应粒径范围团聚体质量占风干土壤总质量的百分比(%)。

土壤微生物生物量氮(SMBN)采用三氯甲烷熏蒸-浸提法测定^[20],土壤微生物生物量氮转化系数为 0.45。SMBN 含量采用以下公式计算: SMBN 含量=(熏蒸土壤微生物生物量氮-未熏蒸土壤微生物生物量氮)/0.45。

1.3 数据处理及分析

采用 Microsoft Excel 2016 及 RStudio Version 1.2.5033 软件对数据进行分析,采用 SPSS 21.0 进行方差分析(ANOVA)及差异显著性检验(Duncan's 法, $\alpha=0.05$)。采用 Origin 2017 (OriginLab Corporation)及 RStudio Version 1.2.5033 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同轮作方式及施氮量对土壤含水量和不同粒径团聚体的影响

如表 2 所示,与冬季休闲处理相比,紫云英轮作模式显著提高了土壤含水量($P<0.05$),紫云英(C240)、蚕豆轮作模式(B240)使土壤表层含水量分别提高 12.9%、5.8%,不同轮作方式对土壤亚层含水量未见显著作用。紫云英、蚕豆轮作下不同施氮水平对土壤含水量影响不明显。不同轮作模式、施氮水平对土壤平均质量直径未见显著作用。

表 2 不同轮作模式对土壤含水量和土壤平均质量直径的影响

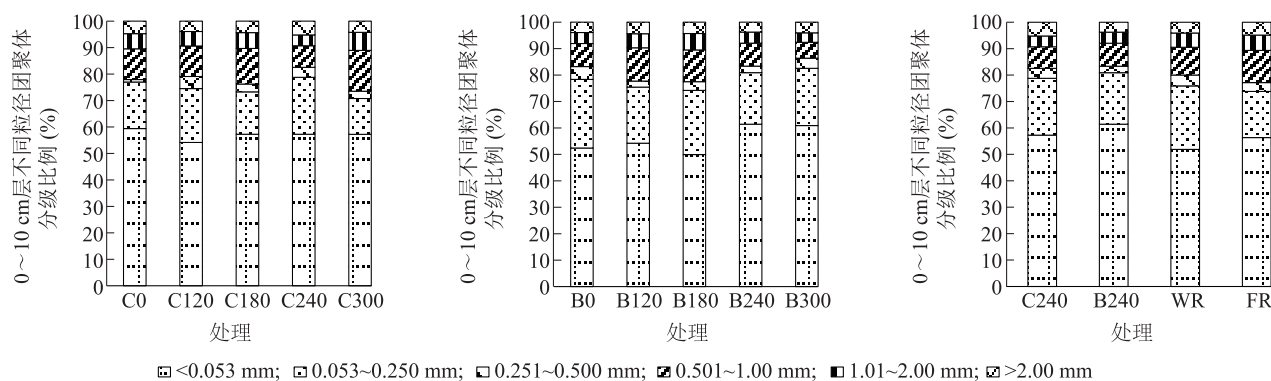
Table 2 Effects of different crop rotations on soil moisture and mean weight diameter

轮作方式	施肥水平	土壤表层		土壤亚层	
		含水量(%)	平均质量直径(mm)	含水量(%)	平均质量直径(mm)
FR	F240	25.23±2.64B	0.34±0.04A	23.33±0.96A	0.38±0.03A
WR	W240	26.18±1.77AB	0.32±0.03A	20.52±4.42A	0.41±0.03A
CR	C0	27.79±1.21a	0.33±0.03a	22.65±2.33b	0.29±0.08a
	C120	27.57±1.72a	0.32±0.01a	24.37±0.88b	0.36±0.07a
	C180	28.26±2.18a	0.34±0.02a	25.31±1.84ab	0.37±0.01a
	C240	28.49±1.68aA	0.30±0.04aA	23.30±1.48bA	0.36±0.04aA
	C300	24.88±0.80b	0.36±0.05a	26.42±1.85a	0.37±0.04a
BR	B0	29.37±2.95a	0.29±0.02ab	25.16±0.66a	0.33±0.02a
	B120	25.89±1.90a	0.33±0.01a	23.12±1.20ab	0.41±0.03a
	B180	24.86±2.69a	0.34±0.03a	22.25±0.50b	0.37±0.09a
	B240	26.69±1.10aAB	0.27±0.02bA	23.82±0.72abA	0.30±0.06aA
	B300	26.24±1.44a	0.26±0.03b	24.13±1.17a	0.34±0.05a

轮作方式和施肥处理见表 1。不同小写字母代表不同施氮水平下组内差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表不同轮作处理间存在显著差异($P<0.05$)。

土壤各粒径团聚体含量如图 1、图 2 所示,与冬季休闲相比,紫云英轮作使水稳性大团聚体(粒径>0.250 mm)含量降低4.0%~24.8%,使水稳性微团聚体(粒径范围为0.053~0.250 mm)含量提高12.3%~23.1%;蚕豆轮作使水稳性大团聚体含量降低28.0%~31.3%,使水稳性微团聚体(粒径范围为

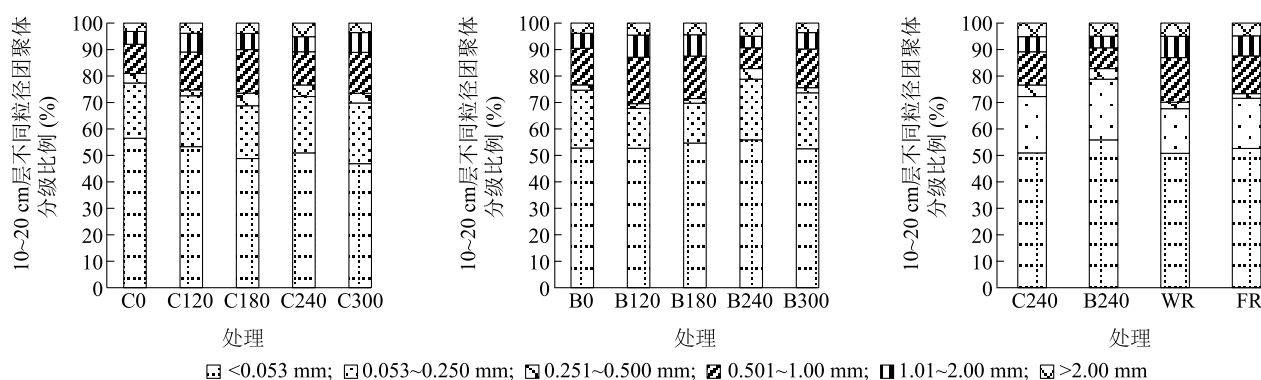
0.053~0.250 mm)含量提高11.3%~20.9%;稻麦轮作下表层土壤微团聚体含量增加37.6%,亚层土壤大团聚体含量增加15.4%。在紫云英轮作下,与轮作不施氮处理相比,施氮促使土壤水稳性团聚体含量增加;在蚕豆轮作下,施氮量为0~180 kg/hm²时土壤水稳性团聚体含量较高。



轮作方式和施肥处理见表 1。

图 1 不同处理对表层土壤(0~10 cm)不同粒径水稳性团聚体含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on the contents of water stable aggregates with different diameters-from 0~10 cm soil layer



轮作方式和施肥处理见表 1。

图 2 不同处理对亚层土壤(10~20 cm)不同粒径水稳性团聚体含量的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the contents of water stable aggregates with different diameters-from 10~20 cm soil layer

2.2 不同轮作方式及施氮量对土壤 pH 和养分含量的影响

如表 3 所示,与冬季休闲相比,稻麦轮作处理表层土壤 pH 显著降低($P<0.05$),而紫云英轮作(C240)和蚕豆轮作(B240)将土壤表层 pH 分别提高了0.4 和 0.2;不同轮作方式对土壤亚层 pH 没有显著影响。紫云英轮作下施氮量为 300 kg/hm²时亚层土壤 pH 显著($P<0.05$)低于施氮量为0~240 kg/hm²的处理,蚕豆轮作下施氮量为 180 kg/hm²时 pH 明显低于其他施氮量处理。

在各轮作处理、施氮水平间 SOM 含量未见显著差异,但与冬季休闲相比,不同施氮量下紫云英轮作使 2 个土层 SOM 含量提高1.2%~20.8%,蚕豆轮作使 SOM 含量提高0~14.5%,稻麦轮作下 SOM 含量基本与冬季休闲相等(表 3)。

由表 3 可以看出,与冬季休闲相比,多元化轮作方式显著提高了稻田土壤 TP 含量,紫云英轮作、蚕豆轮作、稻麦轮作分别使 2 个土层土壤 TP 含量提高5.3%~7.5%、10.7%~13.8%和 6.7%~11.3%。稻麦轮作下稻田表层土壤 AP 含量明显高于其他处理($P<$

0.05),紫云英轮作下表层土壤 AP 含量相对较低。与冬季休闲相比,蚕豆轮作、稻麦轮作模式使 AK 含量分别提高了4.3%~16.8%、7.4%~45.8%,而紫云英轮作模式对 AK 含量未见明显作用。其中,稻麦轮作模式下 AP、AK 含量整体较高,这主要是由于周年麦季施入磷钾肥引致的有效养分含量提升。

绿肥作物轮作并配施适量氮肥对土壤养分维持和提高具有非常重要的作用。在紫云英轮作下,施

氮水平未显著影响 TP 含量,而在施氮量为 180 kg/hm²时,表层土壤 AP 含量明显高于其他处理,施氮量为120~240 kg/hm²时 AK 含量明显降低($P<0.05$)。蚕豆轮作下,B240、B300 处理显著提高了 TP 含量($P<0.05$),提高了10.7%~12.7%;施氮量为240~300 kg/hm²时 AP 含量显著提高($P<0.05$),施氮量为180~240 kg/hm²时 AK 含量较低($P<0.05$)(表3)。

表3 不同轮作模式对土壤 pH、有机质及磷钾含量的影响

Table 3 Effects of different crop rotations on soil pH, organic matter (SOM) content, total phosphorus (TP) content, available phosphorus (AP) content and available potassium (AK) content

土层	施肥处理	土壤养分指标				
		pH	土壤有机质(SOM) 含量(g/kg)	全磷(TP) 含量(g/kg)	有效磷(AP) 含量(mg/kg)	速效钾(AK) 含量(mg/kg)
表层	F240	7.1±0.2B	38.30±3.61A	0.80±0.01B	13.87±4.16AB	71.3±3.9B
	W240	6.7±0.0C	40.28±1.12A	0.89±0.04A	18.55±4.51A	83.7±4.9A
	C0	7.3±0.2a	42.11±4.08a	0.90±0.05a	10.80±0.64b	92.0±5.9a
	C120	7.4±0.3a	44.46±3.63a	0.88±0.02a	10.90±0.30b	70.3±6.6b
	C180	7.6±0.2a	40.85±0.05a	0.88±0.01a	14.75±1.14a	88.0±7.8a
	C240	7.5±0.1aA	42.70±3.13aA	0.86±0.04aAB	9.66±1.46bB	70.7±4.0bB
	C300	7.2±0.1a	38.77±5.09a	0.83±0.06a	14.68±2.07a	97.3±7.4a
	B0	7.1±0.2ab	38.85±1.04a	0.82±0.02b	10.98±1.11b	119.0±4.3a
	B120	7.1±0.1ab	38.40±0.52a	0.80±0.04b	10.58±2.64b	116.7±8.4a
	B180	6.9±0.2b	38.73±1.23a	0.79±0.02b	9.14±0.74b	91.0±4.9b
	B240	7.3±0.2abAB	43.92±2.69aA	0.91±0.01aA	16.67±2.05aAB	83.3±1.2bA
	B300	7.4±0.2a	39.92±4.36a	0.90±0.03a	13.24±2.28ab	112.7±5.2a
亚层	F240	7.4±0.2A	30.37±2.09AB	0.75±0.02B	9.06±1.38A	63.3±3.3B
	W240	7.3±0.2A	29.33±1.11B	0.80±0.01AB	14.04±3.68A	92.3±6.9A
	C0	7.7±0.2a	35.56±2.03a	0.83±0.07a	13.54±0.48a	99.7±3.3a
	C120	7.7±0.1a	36.68±2.55a	0.83±0.01a	15.56±1.06a	66.3±2.6b
	C180	7.9±0.1a	34.43±2.17a	0.82±0.01a	14.33±1.44a	61.7±5.8b
	C240	7.7±0.1aA	33.89±2.33aA	0.79±0.04aAB	12.43±1.79abA	64.0±1.6bB
	C300	7.3±0.2b	35.89±3.14a	0.82±0.06a	9.55±2.19b	63.3±5.7b
	B0	7.5±0.1ab	33.18±3.40a	0.79±0.05ab	10.32±1.46bc	96.3±6.5a
	B120	7.5±0.2ab	30.75±0.39a	0.76±0.04b	8.55±1.25c	98.7±4.5a
	B180	7.3±0.2b	30.38±1.34a	0.74±0.04b	12.85±1.84ab	93.3±5.4a
	B240	7.8±0.2aA	33.83±0.44aA	0.83±0.01abA	14.66±1.89aA	66.0±7.3bB
	B300	7.9±0.1a	32.94±2.95a	0.86±0.04a	15.07±2.24a	66.7±6.8b

施肥处理见表1。不同小写字母代表不同施氮水平下组内差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表不同处理间存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 不同轮作方式及施氮量对土壤氮组分及含量的影响

如表4所示,紫云英及蚕豆轮作整体上显著提高了土壤 TN 和亚层土壤 AN 含量($P<0.05$)。与冬季休闲相比,紫云英轮作(C240)使土壤 TN、AN 含

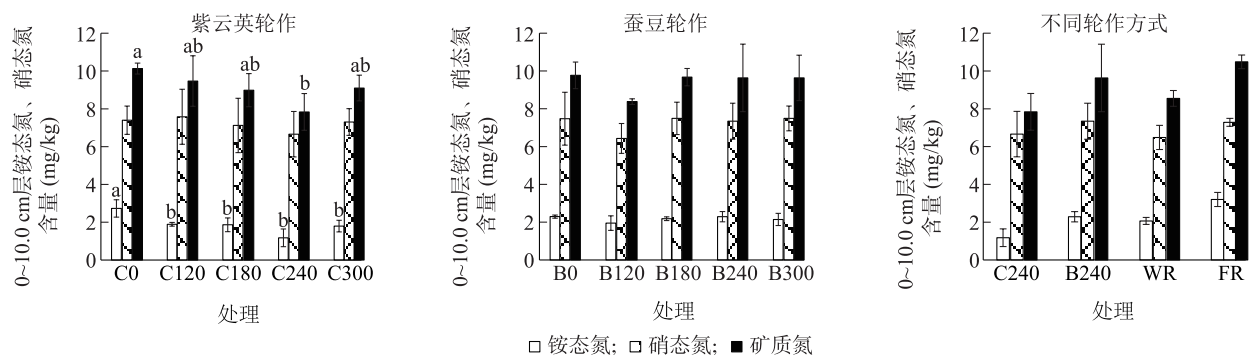
量分别提高了18.3%~21.0%、6.3%~25.5%,蚕豆轮作(B240)下 TN、AN 含量分别提高了15.7%~29.2%、7.9%~12.7%,稻麦轮作处理对土壤 TN、AN 未见显著作用。同时,紫云英及蚕豆轮作模式降低了土壤矿质氮含量(图3和图4)。

表 4 不同轮作模式对土壤全氮 (TN) 及碱解氮 (AN) 含量的影响

Table 4 Effects of different crop rotations on soil total nitrogen (TN) and alkali-hydrolyzed nitrogen (AN) contents

轮作方式	施肥处理	土壤表层		土壤亚层	
		全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	全氮含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)
FR	F240	2.19±0.02C	89.18±8.33A	1.91±0.05B	72.60±6.55B
WR	W240	2.47±0.09BC	99.56±4.81A	1.90±0.13B	80.11±4.82AB
CR	C0	2.69±0.19a	95.98±0.39a	2.20±0.18ab	68.89±9.83b
	C120	2.77±0.18a	86.58±4.91ab	2.11±0.15b	67.47±6.18b
	C180	2.72±0.08a	76.67±1.77c	2.24±0.12ab	66.29±4.06b
	C240	2.65±0.15aAB	94.84±4.62aA	2.26±0.12abA	91.12±5.31aA
	C300	2.36±0.27a	83.54±6.40bc	2.46±0.10a	71.24±7.13b
BR	B0	2.29±0.19b	104.75±7.22a	2.01±0.17ab	78.33±9.69a
	B120	2.49±0.11ab	86.82±5.82c	2.10±0.13ab	77.44±7.05a
	B180	2.60±0.19ab	88.24±1.77c	1.95±0.06ab	76.91±4.06a
	B240	2.83±0.17aA	100.50±2.31abA	2.21±0.08aA	78.33±7.70aAB
	B300	2.62±0.05ab	91.54±4.81bc	1.87±0.19b	78.80±5.21a

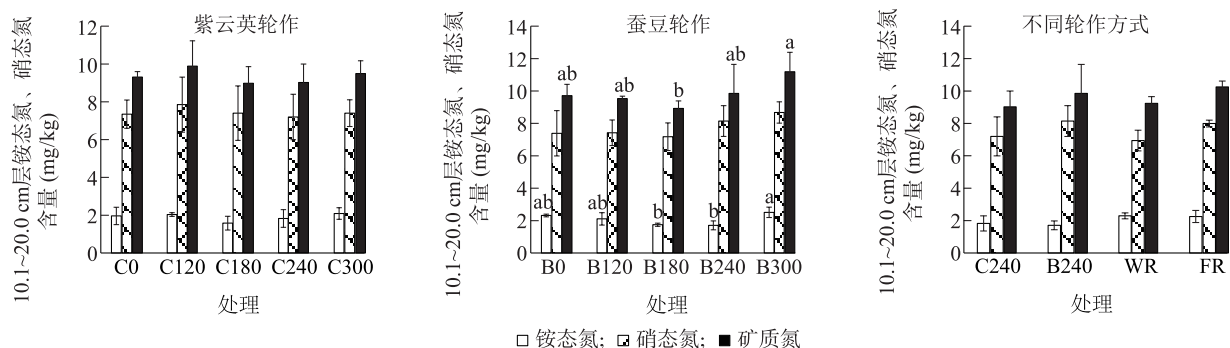
轮作方式和施肥处理见表 1。不同小写字母代表不同施氮水平下组内差异显著 ($P<0.05$), 不同大写字母代表不同轮作方式间差异显著 ($P<0.05$)。



轮作方式和施肥处理见表 1。不同小写字母代表在不同施氮水平间存在显著差异, 不同大写字母代表不同轮作方式间存在显著差异 ($P<0.05$)。

图 3 不同轮作模式对稻田土壤 0~10.0 cm 层铵态氮及硝态氮含量的影响

Fig.3 Effects of different crop rotations on soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of 0~10.0 cm soil layer in paddy fields



轮作方式和施肥处理见表 1。不同小写字母代表在不同施氮水平间存在显著差异, 不同大写字母代表不同轮作方式间存在显著差异 ($P<0.05$)。

图 4 不同轮作模式对稻田土壤 10.1~20.0 cm 层铵态氮及硝态氮含量的影响

Fig.4 Effects of different crop rotations on soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen contents of 10.1~20.0 cm soil layer in paddy fields

由表 4 所示,与 C0、B0 处理相比,化肥氮施入总体上提高了土壤氮素水平,各轮作处理土壤 TN 及 AN 含量均在施氮量为 240 kg/hm²时最高,与 0~240 kg/hm²施氮处理相比,施氮量为 300 kg/hm²时土壤氮素含量降低。同时,施氮显著降低($P<0.05$)了紫云英轮作下表层土壤矿质氮和铵态氮含量(图 3)。蚕豆轮作下亚层土壤矿质氮和铵态氮含量在施氮量为 300 kg/hm²时最高($P<0.05$)(图 4)。

2.4 不同轮作方式及施氮量对土壤微生物生物量氮(SMBN)含量的影响

绿肥轮作还田模式影响了稻田土壤氮素营养过程^[21],进而改变了土壤微生物生物量氮含量。不同轮作方式及施氮水平下 SMBN 含量如表 5 所示,与冬季休闲处理相比,紫云英轮作下表层土壤 SMBN 含量提高了 54.7%($P<0.05$),蚕豆轮作下 SMBN 含量提高了 39.7%~50.4%($P<0.05$),稻麦轮作下 SMBN 含量提高了 10.2%~26.5%。

紫云英轮作下,施肥量为 0~240 kg/hm²时表层土壤 SMBN 含量明显高于 C300 处理,施氮量为 0~180 kg/hm²时亚层土壤 SMBN 含量明显高于 C240、C300 处理。蚕豆轮作下,表层土壤 B120 处理 SMBN 含量最高,亚层土壤 B240 处理 SMBN 含量最高。

2.5 主成分分析(PCA)评估不同轮作方式和施肥处理土壤肥力水平

对各处理土壤物理、化学、生物性质进行主成分分析(图 5),第 1 轴、第 2 轴分别解释 24.6%和 14.5%变异,其中 SOM、SMBN、TN、TP、含水量、粉砂粒含量(<0.053 mm)以及大团聚体(>0.25 mm)含量是第 1 轴的主要因子,微团聚体(0.053~0.25 mm)、TP、粉砂粒(<0.053 mm)含量及土壤 pH 是第 2 轴的主要因子,其中 TP 含量、粉砂粒含量对第 1、2 轴均有较高解释。

以特征值大于 1 的成分提取为主成分,以 6 个主成分(累积方差贡献为 79.1%)作为综合变量对土壤肥力进行评价。以不同处理土壤累积得分进行排序,结果如表 6 所示,种植绿肥作物明显提高了土壤肥力水平,紫云英轮作下肥力排序为 C240>C120>C0,蚕豆轮作下肥力排序为 B240>B0>B300。

2.6 不同轮作方式和施氮水平对水稻产量的影响

分别选择轮作 1 年、6 年及 11 年共计 3 年的水稻产量数据,分析轮作方式和施氮水平对水稻产量

的影响(表 7)。可以看出,周年轮作下种植绿肥作物均提高了水稻产量,经过 11 年轮作后,C240 和 B240 处理下水稻分别增产 20.6%及 15.5%。随着绿肥作物轮作年限增加,相对增产率(各处理平均产量与冬季休闲处理产量的比值)提高,其中紫云英轮作下增产效率更高。

表 5 不同轮作模式对土壤微生物生物量氮含量的影响

Table 5 Effects of different crop rotations on soil microbial biomass nitrogen content

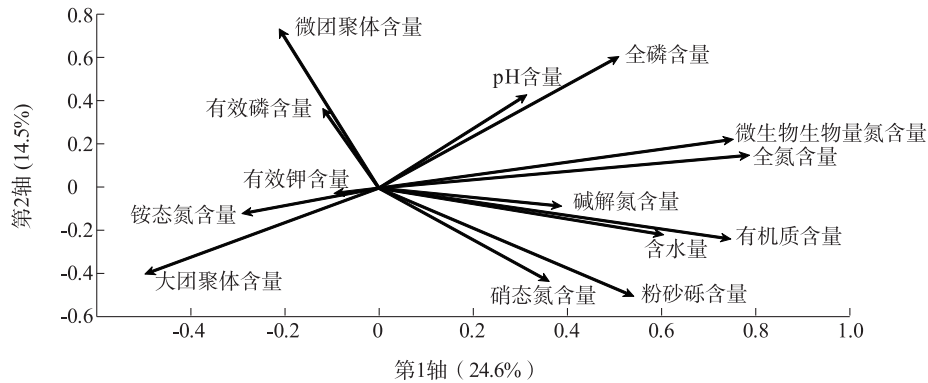
轮作方式	施肥水平	土壤表层微生物生物量氮含量 (mg/kg)	土壤亚层微生物生物量氮含量 (mg/kg)
FR	F240	58.29±4.34B	49.27±6.12B
WR	W240	64.24±2.86B	62.32±7.99AB
GMR			
CR	C0	92.46±4.81a	68.62±3.79bc
	C120	83.42±2.23ab	81.44±3.87a
	C180	77.59±2.22bc	76.05±2.98ab
	C240	90.17±8.29aA	48.75±5.96dB
	C300	69.70±4.15c	63.12±1.55c
BR	B0	67.14±8.26b	67.76±8.69a
	B120	85.48±9.72a	63.88±6.73ab
	B180	66.92±4.29b	49.09±4.03b
	B240	81.44±6.38abA	74.09±3.21aA
	B300	84.38±3.12a	68.87±8.74a

轮作方式和施肥处理见表 1。不同小写字母代表不同轮作方式下组内差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表不同轮作方式间差异显著($P<0.05$)。

由表 7 还可以看出,与 C0、B0 处理相比,施氮明显提高了水稻产量($P<0.05$)。经过多年轮作后,CR 和 BR 轮作模式下施氮量为 120~180 kg/hm²时水稻产量增产率较高,施氮量为 240 kg/hm²时相对增产率分别为 65.0%及 34.8%。施氮量为 120~180 kg/hm²时配合绿肥作物还田处理具有较高的生产效率,施氮量低于前人报道的太湖地区推荐施氮量(205~240 kg/hm²)^[2,22]。

3 讨论

太湖地区为保证高产,大量使用化肥,然而过量施氮造成氮肥利用率降低、水稻品质降低^[23],不利于土壤肥力提高和产量提升,同时也引起了一系列的环境问题。采取多元化的轮作手段可以减少化肥氮的用量,提高土壤肥力^[10,21]、提高作物氮吸收水平和作物品质^[23-25]。休耕轮作、种植绿肥能提高土壤含水量、土壤养分含量^[7,9,25-26],提高土壤微生物生物量氮含量,并最终提高土壤供氮能力^[21-23,26-27]和水稻产量。



轮作方式和施肥处理见表1。不同小写字母代表在不同施氮水平间存在显著差异,不同大写字母代表不同轮作方式间存在显著差异($P<0.05$)。

图5 不同轮作模式下稻田土壤理化和生物性质的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis (PCA) of soil physicochemical and biological properties in paddy soil under different crop rotation modes

表6 不同轮作模式下稻田土壤前6主成分轴得分及肥力综合排名

Table 6 The scores of top 6 PCA axes and the comprehensive rank of soil fertility under different crop rotations

轮作方式	施肥水平	不同成分轴得分						综合排名
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	
FR	F240	-2.37	1.09	-0.41	-0.81	0.82	-0.52	12
WR	W240	-0.99	-0.75	0.55	-1.78	1.20	0.93	10
CR	C0	1.53	0.05	0.08	-0.24	-0.29	-0.91	3
	C120	1.17	-0.07	-0.87	0.86	1.21	-0.26	2
	C180	0.48	-0.03	-1.73	0.69	-0.46	0.50	7
	C240	1.62	-0.50	-0.36	1.23	0.55	-0.12	1
	C300	-1.45	1.00	-1.58	0.17	-0.44	0.70	11
	B0	-0.65	0.13	2.53	0.25	-0.58	0.59	5
BR	B120	-0.88	0.13	0.48	0.87	-1.08	-0.44	9
	B180	-1.69	0.57	0.81	0.81	0.67	-0.52	8
	B240	2.01	-0.68	0.04	-1.63	0.12	0.15	4
	B300	1.22	-0.94	0.46	-0.42	-1.73	-0.12	6

轮作方式和施肥处理见表1。

表7 轮作1年、6年及11年下水稻产量变化

Table 7 Variations of rice yield under successive crop rotations of one year, six years and eleven years

轮作方式	施肥水平	2009年(轮作1年)水稻 产量(kg/hm ²)	2014年(轮作6年)水稻 产量(kg/hm ²)	2019年(轮作11年)水稻 产量(kg/hm ²)
FR	F240	7 404.6±297.3A	8 239.8±1 415.6AB	7 346.0±917.1A
WR	W240	7 213.7±950.9A	6 571.4±693.0B	8 031.8±1 094.2A
CR	C0	6 692.1±598.9b	6 217.2±609.4b	5 366.2±524.5c
	C120	7 328.2±377.8ab	8 347.0±387.3a	7 629.4±360.6b
	C180	7 875.3±182.6ab	8 693.2±523.7a	8 733.2±520.6a
	C240	7 608.1±324.3abA	8 806.6±312.3aA	8 856.1±478.6aA
	C300	7 671.8±383.0a	8 950.7±86.6a	9 007.5±525.1a
	B0	7 213.7±724.9a	6 475.4±93.5c	6 294.0±195.8b
BR	B120	7 659.0±242.1a	7 669.0±816.9b	8 574.0±966.0a
	B180	8 129.8±377.8a	9 487.6±468.4a	8 879.4±189.9a
	B240	7 302.8±1 344.5aA	8 753.0±411.1abA	8 484.1±366.8aA
	B300	7 112.0±1 283.5a	9 000.1±448.9a	9 001.0±854.1a

轮作方式和施肥处理见表1。不同小写字母代表不同轮作方式下组内差异显著($P<0.05$),大写字母代表不同轮作方式间差异显著($P<0.05$)。

土壤含水量和团聚体组成是土壤物理性质的重要指标。与冬季轮作相比,绿肥作物轮作在一定程度上降低了土壤平均质量直径。同时,绿肥作物轮作下水稳性大团聚体含量降低,水稳性微团聚体含量升高,并最终导致土壤含水量提高。这主要是由于绿肥作物轮作作为土壤提供了有机质,优化了土壤结构,促使土壤微团聚体含量提升,提高了土壤保水保肥能力^[28]。

土壤 pH 及有机质、氮、磷、钾含量等是主要土壤肥力指标,影响作物生长、养分循环与微生物过程。研究结果表明,与冬季休闲及稻麦轮作模式相比,绿肥作物轮作增加了土壤有机物含量,在有机物分解过程中产生许多具有酸性功能基团的弱酸,通过酸基解离和氨基质子化维持了土壤酸碱平衡和土壤 pH 稳定^[29]。绿肥作物轮作缓解了高氮投入下的土壤酸化风险^[30]。此外,绿肥作物轮作提高了土壤有机质含量。绿肥作物能固定大气中的氮气,还田后可提高土壤氮容量^[21]。在本试验中,与冬季休闲相比,绿肥作物轮作下土壤全氮及碱解氮含量均明显提高,但在高氮施入下,氮素矿化、淋溶损失增强,不利于土壤氮库维持与稳定,使土壤供氮能力降低,绿肥作物轮作具有降低养分淋溶风险^[11-12,31]的能力。土壤磷、钾是土壤养分的重要部分,也是作物生长的重要条件。与冬季休闲相比,绿肥作物轮作下土壤磷钾含量获得明显提升,且随着施氮量增加有效磷和速效钾含量增加,这是由于绿肥施入及稻季施氮量增加促使有机磷向无机磷转化,并通过腐殖质包裹,降低了土壤吸附磷含量^[32],最终提高了磷的有效性。但是高氮施入不利于作物养分吸收,与施入 180 kg/hm²氮肥相比,在稻季补充高量氮时水稻拔节期和抽穗期磷吸收能力降低,磷素吸收减缓,土壤全磷含量增加^[33]。

SMBN 是反映土壤微生物生物量大小的一个重要指标,是土壤有机氮中最活跃的部分^[21,34-37],其含量受施肥水平、轮作方式等多因素影响。SMBN 含量改变的本质是土壤氮素和氮循环过程的变化。绿肥作物轮作模式提高了水稻收获季 SMBN,这是由于绿肥具有较高的碳氮比,还田后促进了土壤微生物氮循环过程,诱导了微生物氮固定,提高了 SMBN^[21]。亚层土壤下蚕豆轮作模式显著提高了 SMBN,而紫云英轮作模式下 SMBN 含量与冬季休闲处理无显著差异,这是由于紫云英根系较浅,主要影响表层土壤。施氮水平影响了 SMBN 含量,绿肥作物轮作下施氮量为 120 kg/hm²时的 SMBN 含量均比较高,土壤氮供应和微生物周转速度快。

通过主成分分析对土壤肥力进行综合评价,结

果表明,土壤综合肥力排序为紫云英轮作>蚕豆轮作>稻麦轮作>冬季休闲,且绿肥作物轮作在施氮量为 120~240 kg/hm²时综合肥力较高。

轮作 1 年、6 年及 11 年后的水稻产量变化说明绿肥作物轮作提高了水稻产量,这是由于绿肥作物轮作模式下,绿肥作物提供了均衡的 N、P、K、S 及微量元素等养分供应,促使了土壤氮循环与固定,并活化了养分,促进了作物养分吸收,使作物健康生长^[23,33]。在长期轮作下,紫云英轮作模式增产效率较高。与不施氮相比,施氮显著提高了水稻产量且在施氮量为 120~180 kg/hm²时产量较高,氮肥利用率较高,这是由于绿肥作物轮作模式通过改善土壤微生物群落、提高养分含量降低了推荐施氮量^[2,22,25]。但是绿肥作物轮作还田模式下绿肥种类的选择和还田模式的设置依旧需要进行管理和调整。研究结果表明,绿肥还田后稻田温室气体排放加剧,且不同绿肥作物还田后温室气体排放量也存在差异,黑麦草-水稻-水稻轮作下周年甲烷排放量较冬季休闲双季稻模式增加了 116.73%,而油菜-水稻-水稻模式较冬季休闲双季稻模式甲烷排放增加了 52.45%,但紫云英轮作下甲烷排放降低了 16.33%^[38];同时还田模式也影响温室气体排放,稻草还田配合绿肥还田下稻田增温潜势和温室气体排放强度较稻草还田降低^[39]。

推测未来几十年中,随着磷肥矿资源枯竭,肥料成本将不断上升,绿肥还田具有良好的补充土壤磷、钾的作用。将单一的农田利用模式向多样化的农业轮作模式转变,提倡采用绿肥作物轮作降低磷钾肥投入将越来越成为农业发展的新助力。

综上所述,在长期水旱轮作模式下种植绿肥可以降低当地稻田推荐施氮量,有利于改善水稻生长,增加水稻产量,优化稻田土壤物理结构,维持土壤 pH,提高土壤有机质、氮、磷、钾等养分容量和微生物生物量含量。与此同时,绿肥-水稻轮作下适量施氮对提升肥力、保持养分和提高水稻产量起到了重要作用。在太湖地区长期进行紫云英-水稻轮作和蚕豆-水稻轮作制度下,推荐稻季施氮量为 120 kg/hm²。

参考文献:

- [1] QIAO J, YANG L Z, YAN T M, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 103-112.
- [2] 王德建,林静慧,孙瑞娟,等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用

- 量及其对地下水的影响[J].土壤学报,2003,40(3):426-432.
- [3] 钱晨晨,黄国勤,赵其国. 中国轮作休耕制度的应用进展[J].农学学报,2017,7(3):37-41.
- [4] CREWS T E, PEOPLES M B. Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 102(3):279-297.
- [5] 袁嫚嫚,刘勤,张少磊,等. 太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响[J].土壤学报,2011,48(4):797-803.
- [6] 胡安永,刘勤,孙星,等. 太湖地区不同轮作模式下的稻田氮素平衡研究[J].中国生态农业学报,2014,22(5):509-515.
- [7] 高菊生,曹卫东,李本荣,等. 充分利用冬闲稻田大力发展绿肥生产[J].耕作与栽培,2009(2):1-2,12.
- [8] 杨旭燕,何玲,何文寿. 绿肥油菜翻压还田对土壤肥力及玉米产量的影响试验[J].吉林农业,2019(3):56-57.
- [9] 黄涛,汪辰卉,徐力斌,等. 紫云英连续两年还田对水稻产量及土壤肥力的影响[J].上海农业科技,2016(1):103-104,139.
- [10] CAI S Y, PITTELKOW C M, ZHAO X, et al. Winter legume-rice rotations can reduce nitrogen pollution and carbon footprint while maintaining net ecosystem economic benefits[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195:289-300.
- [11] 刘金山,戴健,刘洋,等. 过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):112-120.
- [12] 乔俊,颜廷梅,薛峰,等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J].中国生态农业学报,2011,19(1):24-31.
- [13] HE H B, LI W X, ZHANG Y W, et al. Effects of Italian ryegrass residues as green manure on soil properties and bacterial communities under an Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* L.)-rice (*Oryza sativa* L.) rotation [J]. Soil & Tillage Research, 2020, 196:104487.
- [14] SHARMA P, LAOR Y, RAVIV M, et al. Green manure as part of organic management cycle: effects on changes in organic matter characteristics across the soil profile [J]. Geoderma, 2017, 305:197-207.
- [15] 高菊生,黄晶,杨志长,等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):472-480.
- [16] 钱晨晨,王淑彬,杨滨娟,等. 紫云英与氮肥配施对早稻干物质生产及氮素吸收利用的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(4):563-571.
- [17] TEJADA M, GONZALEZ J L, GARCIA-MARTINEZ A M, et al. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6):1758-1767.
- [18] 牛小霞,牛俊义. 不同轮作制度对定西地区农田杂草群落的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):223-229.
- [19] 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.
- [20] BROOKES P C, LANDMAN A, PRUDEN G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil-nitrogen - a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1985, 17(6):837-842.
- [21] 高嵩涓,曹卫东,白金顺,等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J].土壤学报,2015,52(4):902-910.
- [22] 夏永秋,颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量[J].土壤学报,2011,48(6):1210-1218.
- [23] HU A Y, TANG T T, LIU Q. Nitrogen use efficiency in different rice-based rotations in southern China [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2018, 112(1):75-86.
- [24] 严奉君,孙永健,马均,等. 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):23-35.
- [25] 廖育林,鲁艳红,谢坚,等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):190-195,201.
- [26] 刘小粉,刘春增,潘兹亮,等. 施用绿肥条件下减施化肥对土壤养分及持水供水能力的影响[J].中国土壤与肥料,2017(3):75-79.
- [27] 谢志煌,李彦生,于镇华,等. 秸秆还田与作物氮素利用关系研究[J].土壤与作物,2016,5(4):261-268.
- [28] 张霞,张育林,刘丹,等. 种植方式和耕作措施对土壤结构与水分利用效率的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):250-261.
- [29] 赵士诚,曹彩云,李科江,等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1441-1449.
- [30] 张永春,汪吉东,沈明星,等. 长期不同施肥对太湖地区典型土壤酸化的影响[J].土壤学报,2010,47(3):465-472.
- [31] 张永涛,刘宏斌,王洪媛,等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J].生态学报,2016,36(20):6664-6676.
- [32] 杨丽娟,李天来,周崇峻. 塑料大棚内长期施肥对菜田土壤磷素组成及其含量影响[J].水土保持学报,2009,23(5):205-208.
- [33] 王伟妮,鲁剑巍,何予卿,等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J].中国水稻科学,2011,25(6):645-653.
- [34] 王昂,戴丹超,马旭洲,等. 稻蟹共作模式对土壤微生物量氮和酶活性的影响[J].江苏农业学报,2019,35(1):76-84.
- [35] 张琳瑶,杜祥运,刘大翔,等. 不同修复模式边坡土壤微生物量季节动态——以向家坝工程扰动区为例[J].江苏农业科学,2019,47(13):320-324.
- [36] 陈浩,魏立本,王亚麟,等. 烤烟不同种植施肥模式对土壤养分、酶活性及细菌多样性的影响[J].南方农业学报,2019,50(5):982-989.
- [37] 魏猛,唐忠厚,张爱君,等. 长期不同施肥对潮土微生物量碳、氮的影响[J].江苏农业科学,2020,48(22):307-310.
- [38] RAHEEM A. 绿肥还田对双季稻系统温室气体排放及其相关土壤微生物的影响[D].北京:中国农业科学院,2020.
- [39] 刘威. 冬种绿肥和稻草还田对水稻生长、土壤性质及周年温室气体排放影响的研究[D].武汉:华中农业大学,2015.

(责任编辑:张震林)