

# 浙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

王保君<sup>1</sup>, 金海刚<sup>2</sup>, 张红梅<sup>1</sup>, 沈亚强<sup>1</sup>, 陈贵<sup>3</sup>, 鲁晨妮<sup>3</sup>, 程旺大<sup>1</sup>

(1.嘉兴市农业科学研究院 生态环境研究所, 浙江 嘉兴 314016; 2.海宁市农业农村局, 浙江 嘉兴 314400; 3.嘉兴市农业科学研究院 生物技术研究, 浙江 嘉兴 314016)

**摘要:**为了明确浙北地区秸秆全量还田下单季晚粳稻适宜的施氮量,通过大田试验,采用随机区组设计,根据当地农户施肥习惯,设置 4 种施氮水平(以纯氮计, $N_0$ ,不施氮; $N_L$ ,165 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_M$ ,240 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_H$ ,315 kg/hm<sup>2</sup>),研究了浙北地区秸秆全量还田下氮肥调控对单季晚粳稻生长和土壤养分、碳库的影响。结果表明: $N_M$ 和  $N_H$ 的水稻分蘖数、株高、叶面积系数、叶绿素含量及地上部分干物质重均高于其他处理。在稻田土壤方面, $N_M$ 的土壤速效磷和速效钾含量较  $N_0$ ,  $N_L$ 和  $N_H$ 处理分别显著( $p<0.05$ )增加了 43.16%,30.13%,13.13%和 31.86%,22.13%,15.81%; $N_M$ 的可溶性有机碳和微生物有机碳含量较  $N_0$ 和  $N_L$ 处理分别显著( $p<0.05$ )增加了 88.47%,13.99%和 37.10%,15.39%。在产量方面, $N_M$ 的产量最高,较  $N_0$ ,  $N_L$ 和  $N_H$ 处理分别增产 51.70%,15.39%,9.45%。综上所述,在本试验条件下,秸秆全量还田施用 240 kg/hm<sup>2</sup> 纯氮为浙北地区单季晚粳稻最佳氮肥调控模式。

**关键词:**水稻; 秸秆全量还田; 氮肥; 植物生长; 养分; 碳库

中图分类号:S147.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0060-07

## Effects of Nitrogen Application on Late Single Season Japonica Rice Growth, Soil Nutrient and Carbon Pool Under Full Straw Returning in Northern Zhejiang Province

WANG Baojun<sup>1</sup>, JIN Haigang<sup>2</sup>, ZHANG Hongmei<sup>1</sup>,

SHEN Yaqiang<sup>1</sup>, CHEN Gui<sup>3</sup>, LU Chenni<sup>3</sup>, CHENG Wangda<sup>1</sup>

(1.Institute of Eco-environmental Sciences, Jiaxing Academy of Agricultural Science,

Jiaxing, Zhejiang 314016, China; 2.Haining Agricultural and Rural Bureau, Jiaxing, Zhejiang 314400, China;

3.Institute of Biotechnology Research, Jiaxing Academy of Agricultural Science, Jiaxing, Zhejiang 314016, China)

**Abstract:** In order to determine the appropriate nitrogen application amount of single season late japonica rice under the full amount of rice straw returning to field in northern Zhejiang Province, the field experiment was carried out, and the random block group design was adopted. Four nitrogen application levels such as no nitrogen application ( $N_0$ ), 165 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_L$ ), 240 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_M$ ), and 315 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_H$ ) were set according to the fertilization practice of local farmers. We investigated the effects of nitrogen application on the growth, soil nutrients and carbon pool of single-season late japonica rice in northern Zhejiang Province under the condition of full straw returning to field. The results showed that: rice tillering number, plant height, leaf area index, chlorophyll content and dry matter of aerial part weight under treatments of  $N_M$  and  $N_H$  were higher than other treatments; in terms of paddy under the straw returning full amount, the soil available phosphorus, available potassium of  $N_M$  significantly increased by 43.16%, 30.13%, 13.13% and 31.86%, 22.13%, 15.81% ( $p<0.05$ ), respectively, compared with  $N_0$ ,  $N_L$  and  $N_H$  treatments; the dissolved organic carbon and the soil microbial biomass organic carbon of  $N_M$  significantly increased by 88.47%, 13.99% and

收稿日期:2020-06-11

修回日期:2020-06-22

资助项目:嘉兴市科技计划(2017AZ13025,2016BZ26006,2018AY11020);浙江省农业重大技术协同推广计划(2019XTGLY01);浙江省重大研发计划(2016C02050-3)

第一作者:王保君(1990—),男,山西繁峙县人,硕士,助理农艺师,主要从事耕作制度与农业生态研究。E-mail:wbj19901012@163.com

通信作者:程旺大(1971—),男,浙江桐乡人,博士,研究员,主要从事农业生态与环境研究。E-mail:chwd228@163.com

37.10%, 15.39% ( $p < 0.05$ ), respectively, compared with  $N_0$  and  $N_L$  treatment; in terms of yield, the highest yield was found in treatment  $N_M$ , which was 51.70%, 15.39% and 9.45% higher than  $N_0$ ,  $N_L$  and  $N_H$  treatments, respectively. In conclusion, under the setting conditions of this experiment, pure nitrogen rate of 240 kg/hm<sup>2</sup> was the best nitrogen fertilizer regulation model for single-season late japonica rice in northern Zhejiang Province under the full straw returning to the field.

**Keywords:** rice; total rice straw returning; nitrogen; plant growth; soil nutrient; carbon pool

水稻是我国重要的粮食作物,同时也是栽培过程中耗氮量较高的作物<sup>[1]</sup>。氮肥作为提高水稻产量的重要营养元素<sup>[2]</sup>,过量施用不仅促使水稻徒长,田间病虫害加重,水稻子粒的充实度下降<sup>[3]</sup>,而且会造成土壤肥力下降<sup>[4]</sup>。此外,氮肥施用越多,流失到环境中的风险也随之增加,势必对农田生态环境造成不利影响<sup>[4]</sup>。农业农村部在“十三五”规划中明确提出,截至2020年要实现化肥使用量零增长的目标<sup>[5]</sup>。因此,在当前水稻生产过程中,明确合理的氮肥用量显得尤为重要。

作物秸秆作为可再生资源,氮、磷、钾等矿质营养元素含量比较丰富。秸秆还田可以循环补充土壤养分,是我国秸秆资源化利用的主要方式<sup>[6]</sup>,也是提高氮肥利用率的有效途径<sup>[7]</sup>。但是由于稻草的碳氮比(C/N)较高,稻草还田会争夺土壤中的养分,短时间内降低土壤有效氮含量,从而造成水稻生长前期缺氮的现象<sup>[8]</sup>。因此,在水稻秸秆全量还田下,合理的施用氮肥对土壤培肥和水稻增产都具有重要的意义。关于秸秆还田和氮肥调控对水稻生长和土壤质量方面的报道不少<sup>[9-10]</sup>。但是,大多数报道只侧重于秸秆还田和氮肥调控对水稻生长或土壤质量等单方面的研究<sup>[11-12]</sup>。其中,裴鹏刚等<sup>[8]</sup>研究表明,秸秆还田耦合氮肥可以促进水稻茎蘖发生和有效穗形成,增加光合同化物积累;张刚等<sup>[13]</sup>研究发现,在麦秸全量还田下,合理的施用氮肥,可以减少氮肥损失,提高氮肥利用率,增加水稻产量;王倩倩等<sup>[14]</sup>研究发现,在秸秆还田条件下,氮磷钾合理配施以及添加微生物菌剂可以提高土壤过氧化氢酶、转化酶和脲酶活性;徐学池等<sup>[15]</sup>研究发现,在秸秆还田条件下,施用氮肥对土壤革兰氏菌群落结构、可溶性有机碳含量以及有机碳矿化速率产生一定程度的影响。目前,单季晚粳稻已经成为浙江省粮食生产的主体种植模式。然而,在秸秆全量还田背景下,关于浙北地区氮肥调控对单季晚粳稻生长和稻田土壤方面影响的研究很少。本研究通过大田小区试验,以浙北地区种植面积最大的单季晚粳稻为研究对象,研究秸秆全量还田下,氮肥调控对单季晚粳稻生长和土壤养分、碳库的影响,以期为浙北地区单季晚粳稻绿色高质量生产,提供合理的施肥策略,优化农业资源利用提供科学依据。

## 1 试验区概况

浙江北部水稻区主要包括嘉兴市、湖州市和杭州市北部,其中嘉兴市种植面积最大,历来是浙江省水稻主产区,目前以单季常规晚粳稻种植为主,2019年单季常规晚粳稻种植面积占全市水稻面积的80.6%。试验于2017年在浙江省嘉兴市秀洲区王江泾镇双桥村嘉兴市农科院试验园区(120°42'42"E, 30°50'20"N)进行。试验区位于浙江省北部,属于亚热带季风气候区,年平均气温15.5℃,年均降水量1 194 mm,年均日照时数1 950 h,无霜期245 d。试验地为青紫泥土,试验条件能较好代表当地生产一般水平,0—20 cm土层基本养分状况为:有机质30.28 g/kg,全氮2.31 g/kg,速效磷13.52 mg/kg,速效钾56.13 mg/kg,铵态氮21.52 mg/kg,硝态氮6.28 mg/kg, pH值6.45。2017年试验点月平均温度和降水情况见图1。

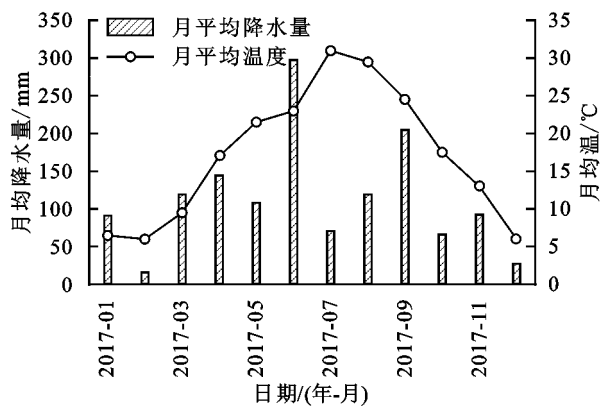


图1 2017年试验点降水和气温变化

## 2 试验设计与数据处理

### 2.1 试验设计与大田管理

本试验试供的常规晚粳稻品种为“秀水134”,当水稻叶龄5叶时,于2017年6月25日进行人工移栽,行株距为20 cm×16.7 cm,每穴2株。

试验根据当地施肥水平(以纯氮计),设置4个处理: $N_0$ ,不施氮; $N_L$ ,165 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_M$ ,240 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_H$ ,315 kg/hm<sup>2</sup>。按随机区组排列,3次重复,共12个小区。小区面积为36 m<sup>2</sup>(6 m×6 m),各小区筑埂宽度为40 cm,用塑料薄膜包裹,防止肥水互串。秸

秆全量还田操作流程:根据当地生产实际情况,2016 年水稻收获后,通过人工粉碎将稻草粉碎成 5~10 cm 的秸秆全部还田,还田量约为 7 500 kg/hm<sup>2</sup>,冬前翻耕晒垡,用于 2017 年开展试验。试验试供氮肥为中颗粒尿素(N≥46%,河南心连心化肥有限公司生产),试供钾肥为氯化钾(K<sub>2</sub>O≥60%,中化化肥有限公司生产),试供磷肥为粒状过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥12%,海盐北洋磷原物质有限公司生产)。其中,氮肥基肥(2017 年 6 月 24 日)、分蘖肥(2017 年 7 月 11 日)、穗肥(2017 年 8 月 7 日)施用比例为 2:1:1,P,K 肥施用量分别为 42,150 kg/hm<sup>2</sup>,均作基肥施用(表 1)。水稻生长期各处理的水浆管理模式和病、虫、草害防治措施保持一致。2017 年 11 月 13 日进行水稻收获。

表 1 各处理肥料施用量及施肥时间

处理	秸秆全量 还田	施肥 方式	化学肥料施用量 [N:P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> :K <sub>2</sub> O]/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	施用时间 (年-月-日)
N <sub>0</sub>	是	基肥	0:45:150	2017-06-24
		分蘖肥	0:0:0	2017-07-11
		穗肥	0:0:0	2017-08-07
N <sub>L</sub>	是	基肥	82.5:45:150	2017-06-24
		分蘖肥	41.25:0:0	2017-07-11
		穗肥	41.25:0:0	2017-08-07
N <sub>M</sub>	是	基肥	120:45:150	2017-06-24
		分蘖肥	60:0:0	2017-07-11
		穗肥	60:0:0	2017-08-07
N <sub>H</sub>	是	基肥	157.5:45:150	2017-06-24
		分蘖肥	78.75:0:0	2017-07-11
		穗肥	78.75:0:0	2017-08-07

2.2 样品采集及指标测定

2.2.1 样品采集 在水稻分蘖期(移栽后 25 d)、齐穗期(移栽后 45 d)和灌浆期(齐穗后 20 d)分别取有代表性的水稻植株 20 穴,带回实验室用于测定水稻的干物质重。水稻收获前,每小区随机取 20 穴水稻植株样,用网袋装好带回实验室,进行室内考种(测定水稻的穗粒数、千粒重和结实率等指标)。在水稻收获前 1 d 进行土样采集,采用五点取样法使用土钻采集土层深度为 0—20 cm 的土壤样品,混合均匀后带回实验室,用于土壤养分和碳库的检测。

2.2.2 指标测定 各小区定点 20 穴作为观测点,测量和统计水稻分蘖期(移栽后 25 d)、齐穗期(移栽后 45 d)的株高和茎蘖数;在水稻分蘖期(移栽后 25 d)、齐穗期(移栽后 45 d)和灌浆期(齐穗后 20 d)测定水稻叶绿素含量、叶长、叶宽。其中,水稻叶绿素含量用 SPAD-502 测定(Konica minolta,日本),叶面积指数

采用长×宽积系数法计算获取<sup>[16]</sup>;在水稻分蘖期(移栽后 25 d)、齐穗期(移栽后 45 d)和灌浆期(齐穗后 20 d)取好的水稻植株样,105℃下杀青 30 min,80℃烘干至恒重后称重,计算干物质质量;水稻收获前,田间小区统计水稻穗数,室内考查穗粒数、结实率、千粒重等指标。水稻理论产量通过有效穗数、穗粒数、结实率、千粒重的乘积获得。水稻成熟后,各小区单独收割脱粒晒干,进行测产。

采集的土壤全氮用半微量开氏消煮法<sup>[17]</sup>进行测定,铵态氮用靛酚蓝比色法测定<sup>[17]</sup>,硝态氮用紫外分光光度计测定<sup>[17]</sup>,速效磷用碳酸氢钠—钼锑抗比色法测定<sup>[17]</sup>,速效钾用火焰光度计比色法测定<sup>[17]</sup>。土壤总有机碳和可溶性有机碳用重铬酸钾外加热氧化法测定<sup>[17-18]</sup>,土壤易氧化有机碳用高锰酸钾氧化比色法测定<sup>[19]</sup>。土壤微生物碳采用氯仿熏蒸法测定<sup>[20]</sup>。

2.3 数据处理及分析

试验数据用 SPSS 20.0 统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),采用 LSD 法进行多重比较,用 Graphpad Prism 8.0 和 Microsoft Office Excel 2010 软件进行作图制表。

3 结果与分析

3.1 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻生长的影响

3.1.1 对单季晚粳稻株高和分蘖数的影响 由图 2 可知,在秸秆全量还田下,水稻株高和分蘖数随着施氮量的增加而增加。各施氮处理在分蘖期和齐穗期的株高和分蘖数较不施氮处理均显著( $p<0.05$ )增高。同 N<sub>0</sub>相比,N<sub>L</sub>,N<sub>M</sub>,N<sub>H</sub>分蘖期和齐穗期的株高分别显著( $p<0.05$ )增加了 9.67%,10.64%,10.84%和 7.36%,7.85%,11.30%;N<sub>L</sub>,N<sub>M</sub>,N<sub>H</sub>分蘖期和齐穗期的分蘖数分别显著( $p<0.05$ )增加了 50.00%,56.25%,96.87%和 37.84%,54.06%,64.87%。秸秆全量还田下,3 种施氮水平对水稻株高的影响差异不显著。N<sub>H</sub>在水稻分蘖期的分蘖数较 N<sub>L</sub>和 N<sub>M</sub>处理分别显著( $p<0.05$ )增加了 26.00%,31.25%。N<sub>H</sub>在水稻齐穗期的分蘖数较 N<sub>L</sub>处理显著( $p<0.05$ )增加了 23.23%。

3.1.2 对单季晚粳稻叶面积指数的影响 由图 3 可知,在秸秆全量还田下,随着施氮量的增加,水稻生长在不同生育时期(分蘖期和齐穗期)的叶面积指数均呈现逐步增大的趋势。与 N<sub>0</sub>相比,N<sub>H</sub>分蘖期和齐穗期水稻叶面积指数分别显著( $p<0.05$ )增加了 21.77%,49.23%;N<sub>M</sub>齐穗期水稻叶面积指数显著( $p<0.05$ )增加了 36.70%。在本试验条件下,N<sub>M</sub>和 N<sub>H</sub>处理在齐穗期的叶面积指数显著( $p<0.05$ )高于 N<sub>0</sub>和 N<sub>L</sub>处理。

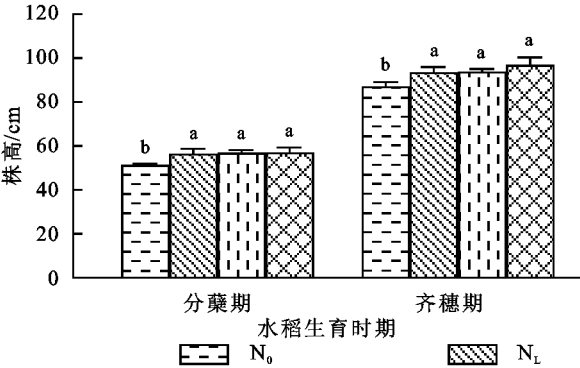


图 2 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻株高和分蘖数的影响

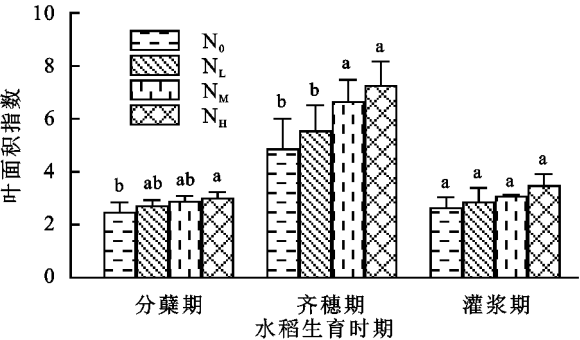


图 3 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻叶面积指数的影响

3.1.3 对单季晚粳稻叶绿素含量的影响 由图 4 可知,在秸秆全量还田下,施用氮肥可以显著增加水稻不同生育时期(分蘖期、齐穗期和灌浆期)叶绿素含量,同  $N_0$  相比,  $N_L$ ,  $N_M$ ,  $N_H$  分蘖期、齐穗期和灌浆期叶绿素含量分别显著( $p<0.05$ )增加了 13.50%, 17.93%, 17.05%; 11.01%, 12.87%, 17.54%; 24.21%, 29.69%, 33.55%。

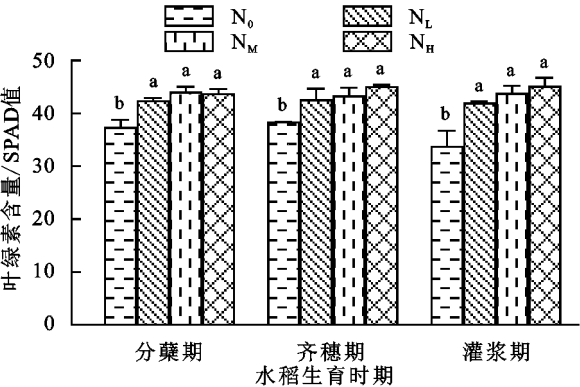


图 4 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻叶绿素含量动态的影响

3.1.4 对单季晚粳稻地上部分干物质重的影响 由图 5 可知,在秸秆全量还田下,随着施氮量的增加,水稻分蘖期的地上部分干物质重逐渐增加,在水稻灌浆期的地上部分干物质重呈“先增后减”的趋势。同  $N_0$  相比,  $N_M$ ,  $N_H$  分蘖期地上部分干物质重分别显著( $p<0.05$ )增加了 62.38%, 88.35%; 齐穗期地上部分干物质重分别显著( $p<0.05$ )增加了 79.58%, 54.56%;  $N_L$ ,  $N_M$ ,  $N_H$  灌浆期

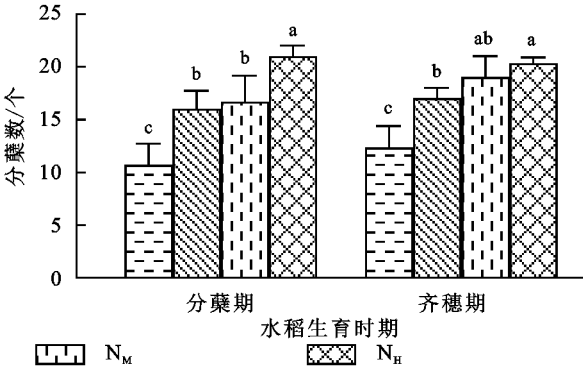


图 5 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻地上部分干物质重动态的影响

3.1.5 对单季晚粳稻产量的影响 由表 2 可知,在产量构成因素方面,随着施氮量的增加,水稻的有效穗数和理论产量均呈“先增后降”的趋势,而水稻的千粒重却逐渐减少。与  $N_0$  相比,  $N_L$ ,  $N_M$ ,  $N_H$  的穗数分别显著( $p<0.05$ )增加了 40.00%, 77.50%, 58.00%;  $N_M$  和  $N_H$  的千粒重则分别显著( $p<0.05$ )降低了 7.52%, 8.48%。在实际产量方面,随着施氮量的增加,水稻的实际产量呈“先增后降”的趋势。同  $N_0$  相比,  $N_M$  和  $N_H$  的水稻产量分别显著( $p<0.05$ )增加了 51.70%, 38.61%。在 3 种施氮水平中,  $N_M$  的实际产量最高。

表 2 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻产量的影响

处理	有效穗数/ (10 <sup>6</sup> 穗·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数/ 粒	结实率/ %	千粒重/ g	理论产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	实际产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )
$N_0$	2.00c	137.07a	93.26a	24.87a	6.41b	5.88b
$N_L$	2.80b	140.45a	89.73a	23.90ab	8.39a	7.73ab
$N_M$	3.55a	144.99a	88.64a	23.00b	9.62a	8.92a
$N_H$	3.16ab	135.31a	87.89a	22.76b	9.25a	8.15a

注:同列数据后跟相同字母表示在 5% 水平差异不显著,下同。

3.2 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻土壤养分的影响

由表 3 可知,在秸秆全量还田下,随着施氮量的增加,稻田土壤的全氮、铵态氮和硝态氮含量逐渐增



加,而土壤的速效磷和速效钾含量呈“先增后降”的趋势。同  $N_0$  相比,  $N_L$  的全氮、速效钾含量显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 8.70%, 7.96%;  $N_M$  的全氮、速效钾、速效磷和铵态氮含量分别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 10.00%, 31.86%, 43.16%, 24.99%;  $N_H$  的全氮、速效钾、速效

磷和铵态氮含量分别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 11.74%, 13.86%, 26.54%, 59.13%。此外, 3 种施氮水平下,  $N_M$  的速效磷含量较  $N_L$  和  $N_H$  处理分别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 30.13%, 13.13%; 速效钾含量较  $N_L$  和  $N_H$  处理分别 ( $p<0.05$ ) 显著增加了 22.13%, 15.81%。

表 3 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻土壤养分的影响

处理	有机质/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	速效磷/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	速效钾/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	铵态氮/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	硝态氮/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )
$N_0$	39.55a	2.30b	10.89c	56.50d	27.33c	8.69a
$N_L$	40.00a	2.50a	11.98c	61.00c	29.75bc	9.81a
$N_M$	41.23a	2.53a	15.59a	74.50a	34.16b	10.96a
$N_H$	40.73a	2.57a	13.78b	64.33b	43.49a	11.26a

3.3 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻土壤碳库的影响

从图 6 可以看出,在秸秆全量还田下,随着施氮量的增加,稻田土壤的可溶性有机碳和微生物碳的含量均呈“先增加后降低”的趋势。与  $N_0$  相比,  $N_L$ ,  $N_M$ ,  $N_H$  的可溶性有机碳分别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 65.33%, 88.47%, 84.28%; 微生物有机碳含量分

别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 18.81%, 37.10%, 30.94%。在 3 种施肥水平下,  $N_M$  的可溶性有机碳和微生物有机碳含量较  $N_L$  处理分别显著 ( $p<0.05$ ) 增加了 13.99%, 6.99%。此外,在本试验条件下,在秸秆全量还田条件下,施用氮肥处理的稻田土壤总有机碳和易氧化有机碳含量差异不显著,这可能与试验开展年限有关。

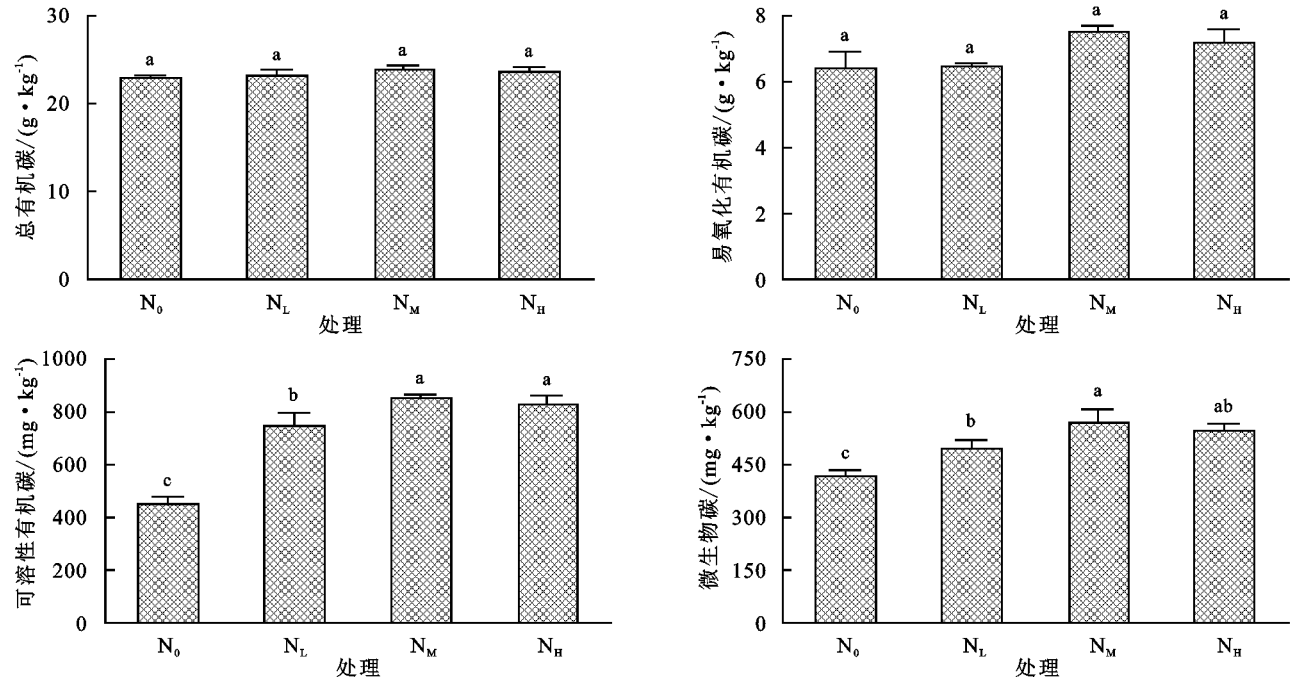


图 6 秸秆全量还田氮肥调控对单季晚粳稻土壤碳库的影响

4 讨论

许多研究已表明,水稻秸秆全量还田配以合理的氮肥调控措施不仅可以促进水稻生长发育和改善稻田土壤品质,还可有效地降低氮肥滥用造成的环境污染问题。水稻分蘖对水稻总产量的贡献占 60% 左右<sup>[21]</sup>。合理施用氮肥可以降低水稻无效分蘖发生,提高水稻成穗率。裴鹏刚等<sup>[8]</sup>研究表明,秸秆还田量为 6 000 kg/hm<sup>2</sup>,施用 270 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥可以促进水

稻分蘖早发,增加水稻分蘖数。本研究发现,在秸秆全量还田下,水稻分蘖期和齐穗期水稻分蘖数均随着施氮量的增加而增加,而在水稻生长后期,中量施氮 (240 kg/hm<sup>2</sup> 纯氮) 的有效穗数最多,与前人的研究结果一致<sup>[22]</sup>。叶面积指数(LAI)作为反映叶片覆盖度、作物长势以及产量潜力的重要指标,对水稻生长和产量形成至关重要。张巍巍等<sup>[23]</sup>研究发现,水稻齐穗期的 LAI 为 5.0~8.0,灌浆期为 4.0~6.0,容易实现高产。本研究表明,在秸秆全量还田下,LAI 随着施氮量的增加而增

加,且各处理均在水稻抽穗期 LAI 达到最大值。叶绿素是光合作用的主要器官,参与光能的吸收、传递和转化。本研究发现,在秸秆全量还田下,高量施氮(315 kg/hm<sup>2</sup>纯氮)在齐穗期和灌浆期的叶绿素含量最高,但水稻的实际产量并不是最高。这可能是因为在高量施氮条件下,水稻吸收的光能远远超过生理代谢需求,造成叶绿体“冗余”现象。此外,水稻群体较大,叶片间相互遮荫,底层叶片光能吸收减弱,一定程度上降低了 PSⅡ 潜在活性和光合电子传递速率,导致群体光合效率降低,产量降低<sup>[24]</sup>。干物质积累量是作物生长发育的重要指标,也是籽粒产量形成重要的影响因素,水稻抽穗后干物质的生产与产量形成密切相关<sup>[25]</sup>。本研究发现,秸秆全量还田下,施用 240 kg/hm<sup>2</sup>纯氮水稻灌浆期地上部分干物质重显著高于其他处理,且收获时产量最高。

土壤养分是土壤肥力的内在表征。在秸秆全量还田下,合理的配施氮肥可以改善土壤养分状况。本试验表明,秸秆全量还田,施用 240 kg/hm<sup>2</sup>纯氮土壤的速效磷和速效钾含量均显著高于其他处理,说明合理地施用氮肥可以促进秸秆腐解,有利于秸秆中磷、钾养分的释放<sup>[26]</sup>。此外,本研究还发现,在秸秆全量还田下,土壤中铵态氮含量会随着施氮量的增加而增加,氮肥用量是引起土壤铵态氮含量变化的重要因素<sup>[27]</sup>。

秸秆还田不仅是我国秸秆资源化利用的主要方式,也是农田碳源输入的重要途径。本研究发现,在秸秆全量还田下,施氮水平对土壤可溶性碳和微生物碳的影响变化一致,且施氮水平为 240 kg/hm<sup>2</sup>纯氮时,可溶性有机碳和微生物有机碳含量最高。这可能是因为稻草秸秆中的含氮量较低,直接还田往往成为稻田土壤微生物群落丰盈度的限制因子<sup>[28]</sup>。在秸秆全量还田下,合理的施用氮肥可以促进调节土壤 C/N,促进秸秆分解,为微生物的生长和发育提供大量碳源,提高土壤微生物活性<sup>[29]</sup>。同时,微生物大量繁殖通过植物根系分泌物产生大量的可溶性有机碳,从而提高了土壤可溶性有机碳含量<sup>[30]</sup>。

## 5 结论

浙江北部地区在秸秆全量还田下,适宜的氮肥用量对促进单季晚粳稻的生长和改善土壤养分、碳库含量的具有积极的作用。在水稻生长方面,秸秆全量还田,施用 240 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>M</sub>)和 315 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>H</sub>)的水稻分蘖数、株高、叶面积系数、叶绿素含量及地上部分干物质重等各项指标均较优。在土壤养分和碳库方面,随着施氮量的增加,稻田土壤速效钾、速效磷、可溶性有机碳和微生物有机碳含量均呈“先增后减”的

趋势。其中,在秸秆全量还田下,施用 240 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>M</sub>)纯氮,土壤的速效磷和速效钾含量显著高于其他施肥处理,且土壤碳库含量高于其他处理。在产量方面,在秸秆全量还田下,施用 240 kg/hm<sup>2</sup>的氮肥的水稻产量最高。因此,在本试验条件下,秸秆全量还田施用 240 kg/hm<sup>2</sup>纯氮是浙北地区单季晚粳稻种植较为适宜的氮肥调控模式。

## 参考文献:

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.
- [2] 王强,姜丽娜,潘建清,等.缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J].中国农业科学,2018,51(20):3951-3960.
- [3] 杨梢娜,俞巧钢,叶静,等.施氮水平对杂交晚粳“浙优12”产量及氮素利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1120-1125.
- [4] Raza S, Miao N, Wang P Z, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J].Global Change Biology, 2020,24(6):3738-3751.
- [5] 张萌,魏全全,肖厚军,等.生物质炭对贵州黄壤朝天椒减氮的生物效应及氮肥利用率的影响[J].土壤学报,2019,56(5):1201-1209.
- [6] 杨艳华,苏瑶,何振超,等.还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J].应用生态学报,2019,30(2):668-676.
- [7] 潘剑玲,代万安,尚占环,等.秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(5):526-535.
- [8] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,等.秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J].中国水稻科学,2015,29(3):282-290.
- [9] 白娜玲,吕卫光,郑宪清,等.秸秆全量还田条件下减量施氮与碳氮调控对稻麦轮作系统的影响[J].上海农业学报,2019,35(3):63-70.
- [10] 王秋菊,焦峰,刘峰,等.草甸白浆土稻秆氮利用效率及氮素调控对水稻产量的影响[J].农业工程学报,2019,35(11):86-94.
- [11] 肖小军,吕伟生,余跑兰,等.三熟制油菜秸秆还田条件下施氮量对早稻产量形成和氮肥利用率的影响[J].作物杂志,2019,35(2):103-109.
- [12] 王保君,程旺大,陈贵,等.秸秆还田配合氮肥减量对稻田土壤养分、碳库及水稻产量的影响[J].浙江农业学报,2019,31(4):624-630.
- [13] 张刚,王德建,俞元春,等.秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):877-885.
- [14] 王倩倩,尧水红,张斌,等.秸秆配施氮肥还田对水稻土

- 酶活性的影响[J].土壤,2017,49(1):19-26.
- [15] 徐学池,苏以荣,王桂红,等.秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J].环境科学,2019,40(6):2912-2919.
- [16] 张浪,周玲红,魏甲彬,等.冬季种养结合对双季稻生长与土壤肥力的影响[J].中国水稻科学,2018,32(3):226-236.
- [17] 鲁如坤.土壤农业化学分析[M].北京:中国农业科学出版社,1999.
- [18] 吕国红,周广胜,周莉,等.土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J].气象与环境学报,2006,22(2):51-55.
- [19] 刘合明,杨志新,刘树庆.不同粒径土壤活性有机碳测定方法的探讨[J].生态环境,2008,17(5):2046-2049.
- [20] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [21] 许轲,唐磊,张洪程,等.不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响[J].农业工程学报,2014,30(13):43-52.
- [22] 章星传,黄文轩,朱宽宇,等.施氮量对不同水稻品种氮肥利用率与农艺性状的影响[J].作物杂志,2018,34(4):69-78.
- [23] 张巍巍,柴永山,孙玉友,等.密度及插秧株数对水稻品种牡丹江 32 生长及产量的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):70-74.
- [24] 徐国伟,陆大克,王贺正,等.干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(5):1225-1237.
- [25] 苏卫,冯跃华,许桂玲,等.秸秆还田与施氮量对喀斯特地区杂交水稻干物质积累和产量的影响[J].核农学报,2019,33(9):1856-1864.
- [26] 汪军,王德建,张刚,等.连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J].水土保持学报,2010,24(5):40-44.
- [27] 袁新民,王周琼.硝态氮的淋洗及其影响因素[J].干旱区研究,2000,17(4):46-52.
- [28] 周国朋,谢志坚,曹卫东,等.稻草高茬—紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J].农业工程学报,2017,33(23):157-163.
- [29] 侯贤清,李荣,吴鹏年,等.秸秆还田配施氮肥对土壤碳氮含量与玉米生长的影响[J].农业机械报,2018,49(9):238-246.
- [30] 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.

(上接第 59 页)

- [9] 沈沉沉.上海市环城绿带生态系统服务功能评价及其价值评估[D].上海:华东师范大学,2011.
- [10] 张小全,朱建华,侯振宏.主要发达国家林业有关碳源汇及其计量方法与参数[J].林业科学研究,2009,22(2):285-293.
- [11] 曾伟生,陈新云,蒲莹,等.基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J].林业科学研究,2018,31(1):66-71.
- [12] 胡砚秋,苏志尧,李佩媛,等.林分生物量碳计量模型的比较研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(1):84-88.
- [13] 张春华,王莉媛,宋茜薇,等.1973—2013 年黑龙江省森林碳储量及其动态变化[J].中国环境科学,2018,38(12):4678-4686.
- [14] 方精云,刘国华,徐嵩龄.我国森林植被的生物量和净生产量[J].生态学报,1996,16(5):497-508.
- [15] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学 D 辑:地球科学,2007,37(6):804-812.
- [16] 曾伟生.云南省森林生物量与生产力研究[J].中南林业调查规划,2005,24(4):1-3.
- [17] 黄从德.四川森林生态系统碳储量及其空间分异特征[D].四川雅安:四川农业大学,2008.
- [18] 刘国华,傅伯杰,方精云.中国森林碳动态及其全球碳平衡的贡献[J].生态学报,2000,20(5):734-739.
- [19] 李海奎,雷渊才.中国森林植被生物量和碳储量评估[M].北京:中国林业出版社,2010.
- [20] Zhao M, Kong Z H, Escobedo F J, et al. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China[J]. Journal of Environmental Management, 2010,91(4):807-813.
- [21] 王祖华,刘红梅,关庆伟,等.南京城市森林生态系统的碳储量和碳密度[J].南京林业大学学报:自然科学版,2011,35(4):18-22.
- [22] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation in China and its relationship with climatic factors[J]. Climatic Change,2006,74(1/3):175-189.
- [23] 毛行元,徐志扬.皖南山区森林碳储量及其动态变化[J].森林与环境学报,2018,38(2):185-190.
- [24] 张春华,居为民,王登杰,等.2004—2013 年山东省森林碳储量及其碳汇经济价值[J].生态学报,2018,38(5):1739-1749.