

# 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响

董林林 王海侯 陆长婴 金梅娟 朱兴连 沈园 沈明星\*

(国家农业科学土壤质量相城观测试验站/江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏苏州 215155)

**摘要** 秸秆还田可以补充作物生长所需的营养元素,也是提升土壤质量、构建肥沃耕层的关键措施。为揭示长期稻麦秸秆还田对土壤氮组分变化的影响,选取了江苏太湖地区稻田土壤为研究对象,设置了稻麦秸秆均不还田(NRW)、麦秆还田+稻秆不还田(W)、稻秆还田+麦秆不还田(R)、稻麦秸秆均半量还田(HRW)和稻麦秸秆均全量还田(ARW)共5个处理,研究秸秆还田量和秸秆类型对土壤全氮及氮组分构成变化的影响。结果表明:与2007年相比,2017年除NRW处理外,其他处理土壤全氮和重组氮都增加,稻秆还田处理土壤全氮和重组氮含量最高;所有处理土壤轻组分有机质中氮含量都下降,ARW处理土壤轻组分有机质中氮含量下降最多,为 $8.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;各处理间碱解氮没有明显差异;秸秆还田处理10年后,稻秆还田处理硝态氮和铵态氮含量均最高。秸秆是土壤氮素的重要物质来源,增加效果取决于秸秆类型和还田量。轻组分有机质中的氮含量变化对秸秆还田反应更敏感,重组氮相对稳定,是维持土壤肥力的关键组分,随着秸秆还田时间的延长,土壤全氮与氮组分之间的相关关系发生变化。稻秆全量还田+麦秆不还田更有利于提升土壤氮素水平。

**关键词** 秸秆还田;轻组和重组;铵态氮;硝态氮

**Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition.** DONG Lin-lin, WANG Hai-hou, LU Chang-ying, JIN Mei-juan, ZHU Xing-lian, SHEN Yuan, SHEN Ming-xing\* (*National Agricultural Experimental Station for Soil Quality in Xiangcheng/ Taihu Research Institute of Agricultural Sciences, Suzhou 215155, Jiangsu, China*).

**Abstract:** Straw returning to soil can supplement soil nutrients required for crop growth, fertilize soil, and improve soil quality. To explore the long-term effect of straw returning on soil total nitrogen and its composition, herein, five treatments including no rice straw + no wheat straw returning (NRW), no rice straw + all wheat straw returning (W), all rice straw + no wheat straw returning (R), half rice straw + half wheat straw returning (HRW), and all rice straw + all wheat straw returning (ARW) were conducted in triplicate in Taihu Lake region, China. The effects of both straw amount and type were examined. Compared with the results obtained in 2007, the results herein obtained in 2017 showed that after 10 years of straw returning, soil total nitrogen and heavy fraction nitrogen increased, while light fraction organic matter decreased. Among the five treatments, ARW had the largest decrease in light fraction nitrogen of  $8.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; the R treatment had the highest contents of both total and heavy fraction nitrogen, and also the highest contents of ammonium and nitrate. There was no significant difference in alkali-hydrolyzable nitrogen among the five treatments. These results indicated that crop straw was the critical material source for soil nitrogen, and that the effects of straw returning on soil nitrogen depended on the type and amount of crop straw returned to soil. The changes of light fraction nitrogen were more sensitive to straw returning, while the heavy fraction nitrogen was relatively stable, which was the key fraction sustaining soil fertility. With the prolonging of straw returning, the relationship between the total nitrogen and different nitrogen components changed. The processing manner of all rice straw returning + no wheat straw returning was the way that could most significantly enhance soil nitrogen content.

**Key words:** straw returning; light and heavy fraction; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen.

本文由国家重点研发计划项目(2016YFD0300207)、江苏省重点研发计划项目(BE2018317)和苏州市农业科学院科研基金项目(8111705)资助。This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFD0300207), the Natural Key Research and Development Program of Jiangsu Province (BE2018317), and the Foundation of Suzhou Academy of Agricultural Sciences (8111705).

2018-12-01 Received, 2019-02-20 Accepted.

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: smxwwj@163.com

秸秆是重要的有机物料,秸秆还田可为作物生长提供必需的 C、N 等营养元素,也能改善土壤通气疏水性,是构建肥沃耕层、提升土壤质量的重要措施<sup>[1-2]</sup>。目前,秸秆还田对农田系统的影响主要集中在两个方面。一方面是秸秆还田对土壤属性及环境的影响,多数研究认为秸秆还田后,可以改善土壤质量,提升土壤肥力。如 Li 等<sup>[3]</sup>研究认为,秸秆还田可增加土壤氮含量,玉米秸秆全量还田处理可降低  $\text{NH}_3$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放,增加土壤氮含量;Li 等<sup>[4]</sup>研究认为,受施肥的影响,来源于还田秸秆的轻组有机质分解速率变慢,从而使土壤中矿质氮的含量降低。Murphy 等<sup>[5]</sup>在墨西哥的研究表明,秸秆还田可降低化肥氮的流失,有助于化肥的减量施用。Wang 等<sup>[6]</sup>在湖南省祁阳试验站的研究表明,长期向酸性土壤中投加有机物料可增加土壤对有机和无机氮的固存能力。秸秆还田可提高土壤中脱氢酶、糖苷酶等多种酶的活性,进而影响土壤有机质含量、微生物量和保水性等肥力属性<sup>[7-10]</sup>。另一方面是秸秆还田对作物产量的影响,多数研究认为秸秆还田可增加作物产量,仅少数研究认为秸秆还田对作物产量变化无影响。Houshyar 等<sup>[11]</sup>在伊朗的研究结果表明,秸秆焚烧还田是增加作物产量的有效措施之一。Mu 等<sup>[12]</sup>在河南省文县试验站的研究显示,秸秆还田可以增加小麦产量。Huang 等<sup>[13]</sup>通过 Meta-analysis 方法研究的结果认为,秸秆还田处理下作物产量最低,但作物产量会随着秸秆还田时间的延长而增加。长期进行秸秆还田可增加土壤氮素水平,适量减施氮肥不仅能保证作物不减产,还可增加土壤有机碳含量,改变土壤碳氮比,影响微生物对有机氮的矿化和矿质氮的固持<sup>[2,14]</sup>,减少氮素硝化淋溶,增加作物千粒重和产量<sup>[12,15-17]</sup>。因此,秸秆还田已成为一种公认的绿色、经济的秸秆处理措施,更是影响稻田生态系统氮素循环的重要因素<sup>[18-20]</sup>。

太湖地区是我国重要的粮食产区之一,受益于亚热带季风气候,水旱轮作是该区主要的种植模式,其中,以稻麦轮作最为常见。在进行粮食生产的同时,产生了大量的秸秆,如何正确、合理地处理粮食生产过程中产生的秸秆,是关系区域高效生产和土壤质量提升的关键。为此,本研究以太湖地区稻麦两熟制农区土壤为研究对象,通过对比分析稻麦秸秆差异化还田 10 年后土壤全氮、轻组分氮和重组分氮等不同赋存形式氮素的变化特征,揭示秸秆还田对土壤氮素变化的影响,以期该区实施合理的秸秆还田措施提供可靠的数据支撑和理论依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 试验地概况

试验设在江苏太湖地区农业科学研究所国家农业科学土壤质量相城观测试验站 ( $31^{\circ}27'45''\text{N}$ ,  $120^{\circ}25'57''\text{E}$ ), 该区年均温度  $15.7^{\circ}\text{C}$ , 降雨量 1128 mm, 年均光照时长 3039 h,  $>10^{\circ}\text{C}$  有效积温  $4947^{\circ}\text{C}$ , 为水稻-冬小麦轮作种植制度。本试验始于 2007 年 6 月水稻生长季, 土壤类型属壤质黄泥土, 试验前 0~20 cm 土壤有机质  $33.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 全氮  $1.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 碱解氮  $111.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 有效磷  $35.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 速效钾  $82.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 容重  $1.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , pH 值 6.1。

### 1.2 试验设计

试验共设 5 个处理: 稻麦秸秆均全量还田 (ARW); 稻麦秸秆均半量还田 (HRW); 稻秸秆全量还田, 麦秸秆不还田 (R); 麦秸秆全量还田, 稻秸秆不还田 (W); 稻麦秸秆均不还田 (NRW) 作为对照; 随机区组设计, 每个处理重复 3 次, 小区面积  $5\text{ m}\times 6.5\text{ m}$ 。不同还田模式处理的秸秆还田方式采用切碎后耕翻或旋耕。所有处理稻麦根茬全部原位还田, 根茬高度 5 cm 左右, 2007 年 6 月为第一季小麦秸秆还田。

供试水稻品种为‘苏香粳 1 号’, 人工移栽行距为 23.3 cm、株距 13.3 cm, 每穴 3 苗, 10 月 20 日收获。各处理氮肥 (纯氮)、磷肥 (五氧化二磷) 和钾肥 (氧化钾) 用量分别为 225、90、180  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 氮肥按基肥: 分蘖肥: 穗肥 = 4: 3: 3 施用, 磷肥一次性基施, 钾肥作基肥和穗肥施用, 每次 50%, 分蘖肥和穗肥分别于 6 月底和 8 月初投施。水稻生长期水分管理采用前期浅水 (6 月底至 7 月底)、中期烤田 (7 月底至 8 月上旬)、后期干湿交替 (8 月中旬至收获前 15 d) 的管理模式, 其他田间管理措施同一般大田。

供试小麦品种为‘扬麦 3 号’。化肥用量为纯 N 225.0  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  90.0  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  150.0  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , 所有处理各小区化肥用量相同。全田折施尿素 42.5 kg, 其中基肥 20.0 kg, 分蘖肥 10.0 kg, 长粗肥 5.0 kg, 穗肥 7.5 kg。氮肥运筹适当增加前期用量, 基蘖肥 65%~70%, 磷肥作基肥一次性施入, 钾肥基肥和穗肥各一半。

### 1.3 测试指标

由于没有保存 2007 年 6 月试验初始时的土壤样品, 因此本研究测定了 2007 年 10 月和 2017 年 10 月采集的 0~20 cm 土壤全氮、轻组分有机质中氮、

重组氮、碱解氮含量,2007 年 10 月土壤没有测定硝态氮( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )和铵态氮( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ),2017 年测定了土壤硝态氮和铵态氮.土壤全氮采用半微量凯氏法,碱解氮采用碱解扩散法,铵态氮采用靛酚蓝比色法,硝态氮采用紫外分光光度法,测定方法参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[21]</sup>.轻组分有机质中氮和重组氮采用改进的比重法测定土壤轻组分(比重小于 1.8)和重组分(比重大于 1.8)含量<sup>[21-23]</sup>,重组氮采用凯氏法测定,轻组分有机质中氮借助元素分析仪测定 (Analytik Jena AG Multi N/C 3100, Germany).

1.4 数据处理

采用单因素方差分析和 Duncan 法检验秸秆还田处理前后土壤全氮及氮组分之间的差异 ( $\alpha = 0.05$ ).Pearson 相关分析用于检验秸秆还田处理后土壤全氮与氮组分之间的关系.数据处理和分析借助 SPSS 和 Excel 软件进行,图表中数据为平均值±标准偏差.

2 结果与讨论

2.1 秸秆还田对土壤有机质组分变化的影响

2007 年与 2017 年秸秆还田试验各处理有机质组分变化如表 1 所示.与 2007 年相比,经过不同秸秆还田处理后,土壤有机质含量均增加,但是增加幅度与还田秸秆类型和还田量关系密切.稻麦秸秆均不还田或麦秆还田处理下,土壤有机质含量增加不明显,其他处理下土壤有机质含量增加显著,稻麦秸秆均全量还田处理的土壤有机质增加最多,为  $11.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .5 种处理下重组分有机质含量的变化与土壤总有机质含量的变化一致,2017 年各处理的轻组分有机质含量也呈现增加的趋势,但仅稻麦秸秆全量还田处理下轻组分有机质含量增加显著.由于大量的秸秆还田,土壤轻组分有机质所占的比重由

2007 年的 11.9%增加至 2017 年的 13.8%,重组分有机质所占的比重下降,稻麦秸秆全量还田处理下重组分有机质所占比重由 2007 年的 88.5%降至 2017 年的 82.6%,下降显著.与前期的相关研究结果相似,秸秆还田有利于增加土壤有机质含量<sup>[24]</sup>,改变土壤有机质组分构成.

2.2 秸秆还田对土壤全氮变化的影响

如图 1 所示,经过 10 年的秸秆差异化还田后,若不考虑秸秆还田量和还田类型不同造成的差异,试验土壤全氮平均含量从 2007 年的  $1.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  增加到 2017 年的  $1.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均增加了  $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,年均增幅为 3.5%,差异显著.各处理的变化并不相同,NRW 土壤全氮由 2007 年的  $1.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  降低至 2017 年的  $1.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,降低了  $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、平均年降幅 0.05%;W、R、HRW 和 ARW 处理的土壤全氮平均含量分别由 2007 年的 1.25、1.32、1.32 和  $1.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  增加到 2017 年的 1.7、1.97、1.52 和  $1.89 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均而言,分别增加了  $0.45$ 、 $0.65$ 、 $0.2$  和  $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增幅 0.45%、0.65%、0.2%和 0.5%,稻秆全部还田而麦秆不还田(R)和稻麦秸秆均全量还田(ARW)处理下土壤全氮含量增加最显著.2017 年不同处理土壤全氮比 2007 年增加了 1.6%~98.1%,平均为 25.4%,高于 Zhao 等<sup>[25]</sup>的研究结果.稻秆全部还田而麦秆不还田处理下土壤全氮含量最高,且与稻麦秸秆均半量还田(HRW)处理间存在显著差异;其次是稻麦秸秆均全量还田处理的土壤全氮含量,稻麦秸秆均不还田处理土壤全氮含量降低不明显,可见,稻麦秸秆是提升土壤全氮含量水平的重要物质来源<sup>[2]</sup>.这些结果说明稻秆和麦秆还田对土壤全氮变化的效应存在差异,这种差异一方面是源于他们自身的物质组分差异,另一方面是受气温和降水、土壤水热状况、微生物和施肥等

表 1 不同秸秆还田处理土壤有机质组分构成  
Table 1 Composition of soil organic matter fractions under different straw returning treatments

处理 Treat- ment	SOM		LFOM				HFOM			
	(g · kg <sup>-1</sup> )		含量 Content (g · kg <sup>-1</sup> )		占比 Percentage (%)		含量 Content (g · kg <sup>-1</sup> )		占比 Percentage (%)	
	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017	2007	2017
NRW	32.0±1.1a	35.1±1.0a	3.7±0.8a	5.4±1.5a	11.4±2.2a	15.7±4.6a	28.3±0.7a	29.6±2.2a	88.6±2.2a	84.3±4.6a
W	33.3±1.1a	36.5±1.0a	4.0±0.1a	4.0±0.6a	11.9±0.7a	11.1±1.7a	29.3±1.1a	32.5±0.9a	88.1±0.7a	89.0±1.7a
R	31.0±0.8b	38.3±1.2a	3.2±4.5a	4.4±0.9a	10.2±0.7a	11.4±2.2a	27.8±0.9b	34.0±1.0a	89.8±0.7a	88.6±2.2a
HRW	30.9±1.3b	36.7±1.3a	4.5±1.3a	5.0±1.1a	14.3±3.5a	13.7±2.9a	26.4±0.2b	31.7±1.5a	85.8±3.5a	86.3±2.9a
ARW	27.7±3.5b	39.1±0.9a	3.1±0.2b	6.8±0.8a	11.5±1.8a	17.4±1.6a	24.6±3.5b	32.3±0.2a	93.4±3.3a	82.6±1.6b

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; LFOM: 轻组分有机质 Light fraction organic matter; HFOM: 重组分有机质 Heavy fraction organic matter. NRW: 稻麦秸秆均不还田 No rice straw + no wheat straw returning; W: 麦秸秆全量还田,稻秸秆不还田 No rice straw + all wheat straw returning; R: 稻秸秆全量还田,麦秸秆不还田 All rice straw + no wheat straw returning; HRW: 稻麦秸秆均半量还田 Half rice straw + half wheat straw returning; ARW: 稻麦秸秆均全量还田 All rice straw + all wheat straw returning. 同列不同字母表示同一处理 2007 年和 2017 年间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different letters in the same column indicated significant difference between 2007 and 2017 in the same treatment.



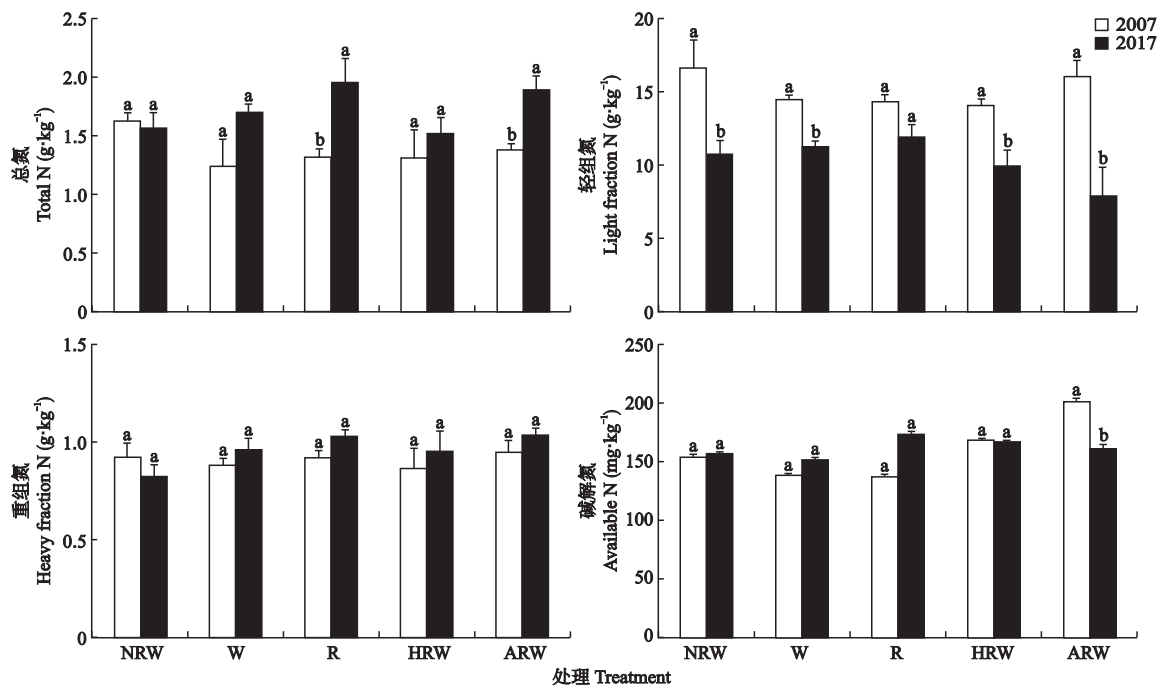


图 1 2007 和 2017 年不同处理土壤全氮、轻组分氮、重组分氮和碱解氮含量  
**Fig.1** Contents of total nitrogen, light fraction nitrogen, heavy fraction nitrogen and available nitrogen in soil under different treatments in 2007 and 2017.

NRW: 稻麦秸秆均不还田 No rice straw + no wheat straw returning; W: 麦秸秆全量还田, 稻秸秆不还田 No rice straw + all wheat straw returning; R: 稻秸秆全量还田, 麦秸秆不还田 All rice straw + no wheat straw returning; HRW: 稻麦秸秆均半量还田 Half rice straw + half wheat straw returning; ARW: 稻麦秸秆均全量还田 All rice straw + all wheat straw returning. 下同 The same below. 不同小写字母表示不同年份间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different small letters meant significant difference among years at 0.05 level.

多种因素的综合影响<sup>[26-28]</sup>.

2.3 秸秆还田对土壤轻组分有机质中氮含量变化的影响

在不考虑秸秆还田量和类型的影响下, 试验土壤轻组分有机质中氮平均含量从 2007 年的 15.15 g·kg<sup>-1</sup> 降低到 2017 年的 10.39 g·kg<sup>-1</sup>, 平均降低了 4.76 g·kg<sup>-1</sup>, 每年降低约 0.48 g·kg<sup>-1</sup>, 降幅为 4.8%, 下降显著. 从 2007 年到 2017 年, 不同秸秆还田处理土壤轻组分有机质中氮含量的变化亦不相同 (图 1), NRW、W、R、HRW 和 ARW 处理的土壤轻组分有机质中氮含量平均值分别由 2007 年的 16.66、14.55、14.34、14.17 和 16.05 g·kg<sup>-1</sup> 降低到 2017 年的 10.81、11.26、11.94、10.01 和 7.96 g·kg<sup>-1</sup>, 平均分别降低了 5.85、3.29、2.4、3.16 和 8.09 g·kg<sup>-1</sup>. 除稻秸秆全量还田 (R) 处理外, 其他处理下土壤轻组分有机质中氮含量降低显著, 至 2017 年, 稻麦秸秆均全部还田 (ARW) 处理下土壤轻组分有机质中氮含量最低. 稻秆全部还田处理下土壤轻组分有机质中氮含量最高, 且显著高于稻麦秸秆均全量还田 (ARW) 处理下土壤轻组分有机质中氮含量.

稻麦秸秆本身含有一定量的氮素, 经还田后活

性部分会被作物吸收利用, 相对稳定的部分会储存在土壤中, 并逐年累积. 本研究测定结果表明, 稻秆和稻谷中氮含量分别为 7.91 和 12.35 g·kg<sup>-1</sup>, 麦秆和麦粒中氮含量分别为 4.50 和 17.61 g·kg<sup>-1</sup>, 与已有研究结果相似<sup>[29]</sup>. 稻谷和麦粒中氮含量较高, 但全部被带出稻田土壤系统, 稻秆和麦秆中氮含量均低于试验初始土壤轻组分有机质中氮含量, 经过半量或全量还田到土壤中后, 致使土壤中轻组分有机质中氮含量降低, 而且秸秆还田量越大, 土壤轻组分有机质中氮含量越低 (图 1). 轻组分有机质容易被土壤中的微生物矿化分解, 并以营养物质形态存在于土壤中被作物吸收利用. 这些结果说明轻组分有机质中的氮含量对秸秆还田的响应敏感, 能够很好地反映秸秆还田对土壤氮素变化的响应.

2.4 秸秆还田对土壤重组氮含量变化的影响

在不考虑秸秆还田量和类型的影响下, 试验土壤重组氮平均含量从 2007 年的 0.91 g·kg<sup>-1</sup> 增加到 2017 年的 0.96 g·kg<sup>-1</sup>, 平均增加了 0.05 g·kg<sup>-1</sup>, 年均增幅为 0.52%, 增加不显著 (图 1). 从 2007 年到 2017 年, 不同秸秆还田处理之间土壤重组氮含量的增加均不显著. NRW 处理下土壤重组氮由 0.92

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至  $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , W、R、HRW 和 ARW 处理的土壤重组氮含量分别由  $0.89$ 、 $0.92$ 、 $0.87$  和  $0.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至  $0.96$ 、 $1.03$ 、 $0.95$  和  $1.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均而言, 除稻麦秸秆均不还田(NRW)处理土壤重组氮含量降低了  $0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外, 其他秸秆还田处理下土壤重组氮含量略有增加。

水稻和小麦秸秆中纤维素含量分别约  $39.7\%$ 和  $51.2\%$ , 木质素含量分别为  $25.2\%$ 和  $23.9\%$ <sup>[30]</sup>。稻麦秸秆还田后, 不易被作物吸收利用与矿化分解的纤维素、木质素等含氮物质, 会以重组分氮素的形式储存于土壤中, 并累积起来。随着秸秆还田时间的延长, 累积的量增多, 重组氮含量增加, 而且稻秆还田更有利于稳定性更高的重组分氮的累积(图 1)。本研究不同处理 2007 和 2017 年土壤重组氮含量占土壤全氮含量的 40% 以上, 平均而言, 2007 年所有处理土壤重组氮含量占土壤全氮含量的  $68.4\%$ , 2017 年所有处理土壤重组氮含量占土壤全氮含量的  $56.9\%$ , 下降显著。这些结果说明秸秆还田会使土壤轻组分有机质和重组分有机质中的氮含量都降低, 但是会增加轻组分和重组分有机质中的氮量, 且轻组分有机质的增加要快于重组分有机质, 因此土壤全氮含量是增加的。轻组分有机质中氮含量的增加说明土壤供氮供肥能力提高, 有助于提高土壤肥力和作物产量。土壤中, 轻组分有机质氮含量是相对敏感的成分, 能够很好地反映秸秆还田对土壤氮素变化的影响; 而重组氮含量是相对稳定的成分, 对土壤肥力的保持具有决定性作用。

2.5 秸秆还田对土壤碱解氮变化的影响

若不考虑不同秸秆还田处理造成的差异, 2007 年和 2017 年试验土壤碱解氮平均含量分别为  $160.89$ 和  $162.47 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 并没有显著变化。各处理碱解氮的变化并不相同(图 1), 在 2007 年 ARW 处理的土壤碱解氮含量最高, 且与 W 和 R 之间差异显著。至 2017 年, NRW、W 和 R 处理碱解氮含量增加, R 处理增加最多, 但不显著; HRW 和 ARW 处理碱解氮降低, ARW 处理下降显著。这些结果表明稻麦秸秆均不还田或仅一种秸秆还田均可增加土壤碱解氮含量, 且稻秆还田的效果优于麦秆还田。HRW 和 ARW 两个处理的碱解氮含量下降, 且 ARW 处理的碱解氮下降显著。秸秆还田对土壤碱解氮变化的影响与秸秆类型、数量和时长之间的关系还有待进一步研究。

2.6 秸秆还田对土壤铵态氮和硝态氮变化的影响

由于 2007 年土壤样品没有测定硝态氮和铵态

氮含量, 因此图 2 仅显示了 2017 年不同处理的土壤硝态氮和铵态氮含量。在稻麦秸秆不还田处理下, 土壤铵态氮含量最低, 平均为  $4.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与秸秆不还田处理相比, W、R、HRW 和 ARW 处理土壤铵态氮含量分别高  $1.28$ 、 $1.93$ 、 $-0.74$  和  $1.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , R 和 ARW 处理下  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量最高, 分别为  $6.62$ 和  $6.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 这说明秸秆还田有助于增加土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量。在稻麦秸秆均不还田或稻麦秸秆半量还田处理下土壤硝态氮含量最低, 平均为  $0.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , W、R 和 ARW 处理土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量均高于秸秆不还田处理, 分别高  $0.09$ 、 $0.27$  和  $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 各处理间土壤  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量没有显著差异。秸秆还田增加了土壤总氮含量, 可增加土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  含量, 但不同类型秸秆腐解形成的含氮物质种类或化学组成影响了土壤中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的形成与迁移转化<sup>[1,31]</sup>。太湖地区土壤肥力水平较高, 能够促进土壤氮素向作物籽粒中转移, 会影响矿质氮的固持与矿化<sup>[2,28]</sup>, 土壤中硝态氮处于较低的水平。秸秆还田有利于土壤对氮的吸附<sup>[32-33]</sup>, 但是这种吸附效果会随着秸秆还田时间的延长而减弱。

2.7 土壤总氮与氮组分之间的相关关系

秸秆还田不同处理下土壤全氮与氮组分之间的

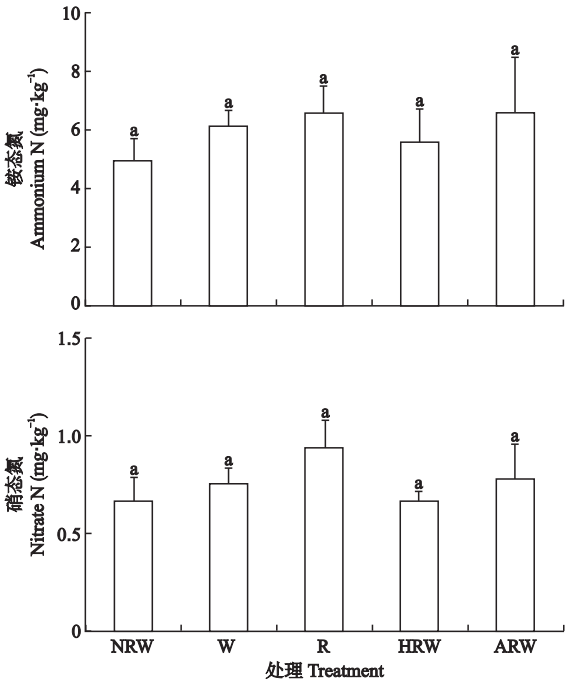


图 2 2007 和 2017 年不同处理土壤铵态氮和硝态氮含量  
Fig.2 Contents of ammonium N and nitrate N in soil under different treatments in 2007 and 2017.  
不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level.

表 2 2007 和 2017 年不同处理土壤全氮与氮组分之间的相关系数  
Table 2 Correlation coefficients of the contents of total nitrogen and its fractions in soil under different treatments in 2007 and 2017

年份 Year	参数 Parameter	NRW	W	R	HRW	ARW
2007	轻组有机质中氮 Light fraction N	-0.949	0.998 *	0.745	-0.322	1.000 *
	重组氮 Heavy fraction N	-0.850	0.951	0.314	0.030	1.000 *
	碱解氮 Available N	-0.974	0.976	0.996	0.229	-1.000 * * *
2017	轻组有机质中氮 Light fraction N	-0.998 *	0.729	-0.996	0.430	-0.996
	重组氮 Heavy fraction N	0.881	0.012	-0.548	-0.856	-0.413
	碱解氮 Available N	0.685	-0.851	0.371	0.715	-0.458
	铵态氮 Ammonium N	-0.954	0.994	0.395	0.952	0.943
	硝态氮 Nitrate N	-0.270	0.521	-0.845	-0.736	0.991

\*  $P<0.05$ ; \* \* \*  $P<0.001$ .

相关性如表 2 所示.2007 年和 2017 年土壤全氮与轻组分有机质中氮、重组氮和碱解氮之间的相关性发生了较大变化,而且不同秸秆还田处理相关性变化差异较大.如在 2007 年,NRW 处理轻组分有机质中的氮含量与全氮含量呈不显著负相关,经过 10 年的秸秆还田,2017 年轻组分有机质中的氮含量与全氮含量呈显著负相关,出现这种现象的原因可能是除秸秆还田带入一定量的氮素外,根茬全部还田对土壤氮素的变化也产生了重要影响.不同秸秆还田处理下土壤全氮与氮组分之间相关性的变化也说明土壤全氮与氮组分的变化不仅受还田秸秆的类型和数量的影响,还受其他因素的共同影响.但在秸秆还田情景下土壤氮素及氮组分变化的过程机制尚不清楚,有待进一步研究.

2.8 秸秆还田对水稻产量的影响

2007 年和 2017 年不同处理间水稻产量均没有显著差异(图 3).与 2007 年相比,2017 年麦秆全量还田处理的水稻产量下降了 5.6%,NRW、R、HRW

和 ARW 处理下水稻产量分别增加了 3.3%、9.8%、1.5%和 11.4%,稻麦秸秆全量还田处理下水稻产量最高.综合表 1 可知,秸秆还田既可增加活性较高的轻组分有机质氮含量,也能增加稳定性较高的重组氮含量.活性氮含量增加可为作物生长提供更多的养分,重组氮含量的增加有助于提升土壤肥力,重组氮在矿化分解过程中能更持续、稳定地提供作物生长的营养元素,增加水稻产量.

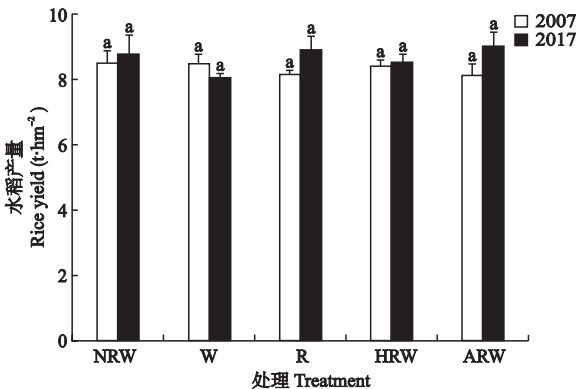
3 结 论

10 年的秸秆还田试验结果表明,秸秆是土壤氮素的重要物质来源,秸秆还田后土壤全氮平均增加了  $0.35\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、轻组分有机质增加了  $1.46\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,重组分有机质增加了  $4.71\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,秸秆还田土壤硝态氮和铵态氮含量也有增加,但增加效果因秸秆类型和还田量的不同存在差异.秸秆还田可以增加土壤中轻组分有机质中氮和重组氮的含量,改变了含氮物质组分.轻组分有机质中的氮含量平均显著降低了  $4.76\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,重组分氮含量平均增加了  $0.05\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增加不明显,轻组分有机质中的氮含量变化对秸秆还田的反应更敏感.秸秆还田增加了土壤中全氮含量,进而影响作物产量.2017 年稻麦秸秆全量还田处理下水稻产量最高,比 2007 年增加了 11.4%,麦秆全量还田后,水稻产量下降了 5.6%,综合而言,稻秆全量还田对提高土壤氮含量和增加水稻产量的效果最好.

参考文献

[1] Cheng Y, Zhang JB, Müller C, et al.  $^{15}\text{N}$  tracing study to understand the N supply associated with organic amendments in a vineyard soil. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**: 983–993

图 3 2007 和 2017 年不同处理水稻产量  
Fig.3 Rice yield of different treatments in 2007 and 2017.  
不同小写字母表示不同年份间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters meant significant difference among years at 0.05 level.



- [2] Shan H-X (单鹤翔), Lu C-A (卢昌艾), Zhang J-T (张金涛), *et al.* Effect of maize straw applied with N fertilizer on nitrogen adsorption of winter wheat under different soil fertility. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(1): 35–41 (in Chinese)
- [3] Li J, Yang H, Zhou F, *et al.* Effect of maize residue return rate on nitrogen transformations and gaseous losses in an arable soil. *Agricultural Water Management*, 2019, **211**: 132–141
- [4] Li XG, Jia B, Lv JT, *et al.* Nitrogen fertilization decreases the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **112**: 47–55
- [5] Murphy RP, Montes-Molina JA, Govaerts B, *et al.* Crop residue retention enhances soil properties and nitrogen cycling in smallholder maize systems of Chiapas, Mexico. *Applied Soil Ecology*, 2016, **103**: 110–116
- [6] Wang J, Sun N, Xu MG, *et al.* The influence of long-term animal manure and crop residue application on abiotic and biotic N immobilization in an acidified agricultural soil. *Geoderma*, 2019, **337**: 710–717
- [7] Singh G, Bhattacharyya R, Das TK, *et al.* Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. *Soil and Tillage Research*, 2018, **184**: 291–300
- [8] Mwafurirwa LD, E Baggs LM, Russell J, *et al.* Combined effects of rhizodeposit C and crop residues on SOM priming, residue mineralization and N supply in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **113**: 35–44
- [9] Pinheiro MEF, Boas de Campos DV, de Carvalho Balieiro F, *et al.* Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter. *Agricultural Systems*, 2015, **132**: 35–39
- [10] Li X-H (李新华), Guo H-H (郭洪海), Zhu Z-L (朱振林), *et al.* Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2016, **32**(9): 130–135 (in Chinese)
- [11] Houshyar E, Esmailpour M. The impacts of tillage, fertilizer and residue managements on the soil properties and wheat production in a semi-arid region of Iran. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2018, Doi: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>
- [12] Mu XY, Zhao YL, Liu K, *et al.* Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 2016, **78**: 32–43
- [13] Huang S, Zeng YJ, Wu JF, *et al.* Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2013, **154**: 188–194
- [14] Li J (李 锦), Tian X-H (田霄鸿), Wang S-X (王少霞), *et al.* Effect of nitrogen fertilizer reduction on crop yields, soil nitrate nitrogen and carbon contents with straw returning. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报: 自然科学版), 2014, **42**(1): 137–143 (in Chinese)
- [15] Niu D (牛 东). Effects of Full Rice Straw Returning on Soil Nutrient and Greenhouse Gas Emission in Wheat. Master Thesis. Yangzhou: Yangzhou University, 2017 (in Chinese)
- [16] Zenebe A, Getachew A, Lulseged T. Effects of tillage and crop residue management on runoff, soil loss and crop yield in the humid highlands of Ethiopia. *Agricultural Systems*, 2019, **168**: 11–18
- [17] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson KF. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**: 143–154
- [18] Li W-G (李文革), Li Q (李 倩), He X-X (贺小香). Progress in straw mulching research. *Hunan Agricultural Sciences* (湖南农业科学), 2006(1): 46–48 (in Chinese)
- [19] Dalal RC, Allen DE, Wang WJ, *et al.* Organic carbon and total nitrogen stocks in a Vertisol following 40 years of no-tillage, crop residue retention and nitrogen fertilization. *Soil and Tillage Research*, 2011, **112**: 133–139
- [20] Bakht J, Shafi M, Tariq Jan M, *et al.* Influence of crop residue management, cropping system and N fertilizer on soil N and C dynamics and sustainable wheat (*Triticum aestivum* L.) production. *Soil and Tillage Research*, 2009, **104**: 233–240
- [21] Lu R-K (鲁如坤). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000 (in Chinese)
- [22] Syam KD, Wang JJ, Delaune RD. Characterization of labile organic carbon in coastal wetland soils of the Mississippi River deltaic plain: Relationships to carbon functionalities. *Science of the Total Environment*, 2012, **435–436**: 151–158
- [23] Dong L-L (董林林), Zhang H-D (张海东), Yu D-S (于东升), *et al.* Effect of cultivation and irrigation with sediment laden Yellow River water on SOM composition in profile depth. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2017, **54**(33): 613–623 (in Chinese)
- [24] Chen JH, Gong YZ, Wang SQ, *et al.* To burn or return crop residue on croplands? An integrated analysis of crop residue management in China. *Science of the Total Environment*, 2019, **662**: 1141–1150
- [25] Zhao SC, Li KJ, Zhou W, *et al.* Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, **216**: 82–88
- [26] Liao P, Huang S, van Gestel NC, *et al.* Liming and straw retention interact to increase nitrogen uptake and grain yield in a double rice-cropping system. *Field Crops Research*, 2018, **216**: 217–224
- [27] Arcanda MM, Helgason BL, Lemke RL. Microbial crop residue decomposition dynamics in organic and conven-



tionally managed soils. *Applied Soil Ecology*, 2016, **107**: 347–359

[28] Yang Y-D (杨亚东), Song R-K (宋润科), Zhao J (赵 杰), *et al.* Effects of long-term different fertilization regimes on the abundance and community structure of ammonia oxidizers in paddy soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2018, **29**(11): 3829–3837 (in Chinese)

[29] Xie Z-H (谢志煌), Li Y-S (李彦生), Yu Z-H (于镇华), *et al.* Impacts of residue return on nitrogen utilization in crops: A review. *Soils and Crops* (土壤与作物), 2016, **5**(4): 261–268 (in Chinese)

[30] Zhao M-M (赵蒙蒙), Jiang M (姜 曼), Zhou Z-W (周祚万). The components analysis of several kinds of agricultural residues. *Materials Review* (材料导报), 2011, **25**(8): 122–125 (in Chinese)

[31] Huang T-M (黄婷苗), Zheng X-F (郑险峰), Wang Z-H (王朝辉). Nitrogen release of returned maize straw and its effects on loess N supply and nitrogen uptake by winter wheat in Guanzhong Plain. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2015, **48**(14): 2785–2795 (in Chinese)

[32] Salazar O, Balboa L, Peralta K, *et al.* Effect of cover crops on leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crop rotation in Mediterranean Central Chile. *Agricultural Water Management*, 2019, **212**: 399–406

[33] Cong R-H (丛日环), Zhang L (张 丽), Lu Y-H (鲁艳红), *et al.* Adsorption-desorption characteristics of soil ammonium under long-term straw returning condition. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2017, **23**(2): 380–388 (in Chinese)

---

**作者简介** 董林林,女,1979年生,博士,副研究员.主要从事土壤碳氮循环与全球变化研究. E-mail: jinjindoudou2005@163.com

**责任编辑** 张凤丽

---