

# 土壤有机质含量对红壤性稻田残留氮在团聚体内分布的影响

王 静<sup>1</sup>, 唐 刚<sup>1</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>, 付文涛<sup>1</sup>, 刘桃菊<sup>1</sup>, 曾勇军<sup>1</sup>, 陈 金<sup>2</sup>, 黄 山<sup>1\*</sup>

(1. 江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西 南昌 330045;

2. 江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所, 江西 南昌 330200)

**摘 要:** 化肥氮的残留及其分布对后季作物氮素供给和氮素损失均有重要影响。通过在田间试验中设置 <sup>15</sup>N 标记微区, 在相同施氮量 (150 kg/hm<sup>2</sup>) 条件下, 明确低有机质、中有机质和高有机质红壤性稻田化肥氮的残留量及其在不同粒径土壤团聚体中的分布。结果表明: 与低有机质土壤相比, 中有机质和高有机质土壤大团聚体 (0.25 ~ 2 mm) 的比例较高, 而粘粉粒 (<0.053 mm) 的比例较低。不同粒径团聚体的全氮含量均随土壤有机质含量的提高而显著升高。在相同氮肥投入下, 化肥氮在中有机质和高有机质土壤中的残留量较低有机质土壤显著增加, 增幅分别为 60.08% 和 93.93%。与低有机质土壤相比, 高有机质土壤中的残留氮在大团聚体、微团聚体 (0.053 ~ 0.25 mm) 和粘粉粒中的含量分别显著增加了 76.58%、108.32% 和 110.85%。土壤残留氮主要分布在大团聚体中 (42.87% ~ 46.81%)。随土壤有机质含量的升高, 残留氮在大团聚体中的比例有所下降, 而在粘粉粒中的比例有所升高, 但均未达显著水平。因此, 培肥地力不仅能够提高土壤大团聚体的比例, 促进土壤团粒结构的形成, 还有利于土壤对残留氮的固持, 从而降低红壤性稻田的氮素损失。

**关键词:** 土壤有机质; 红壤; 稻田; 残留氮; 土壤团聚体

氮素是维持作物生长的核心元素之一, 也是作物优质高产的关键<sup>[1]</sup>。我国南方红壤性稻田面积广, 且光水热资源丰富, 生产潜力大, 对保障我国粮食安全具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。但受成土母质、不合理氮肥施用等因素的影响, 该区土壤板结、酸化及退化等问题日益加剧<sup>[2]</sup>, 且有机质水平总体偏低<sup>[2, 4]</sup>, 导致产量受限、氮肥效率较低、氮素损失严重<sup>[1-2]</sup>。彭卫福等<sup>[5]</sup>前期对不同肥力下红壤性水稻土氮素利用效率的研究表明, 提升土壤有机质含量能显著提高水稻产量和氮素吸收, 增加土壤对化肥氮的固持, 从而降低氮肥损失率。但是, 高有机质土壤提高化肥氮固持能力的原因还不甚清楚。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单位, 是赋存氮素的主要场所<sup>[6]</sup>。土壤团聚体组成及其养分分布对作物生长和土壤肥力至关重要<sup>[6-7]</sup>。因此, 增

强土壤团聚体对氮素的固持有利于降低氮素的损失和作物持续增产。氮素在不同粒径团聚体中的分布受土地利用方式<sup>[8]</sup>、耕作制度<sup>[6, 9]</sup>、施肥<sup>[10-11]</sup>和土壤属性<sup>[12]</sup>等多个因素的影响。长期定位试验表明<sup>[10, 13-14]</sup>, 施肥能改善土壤结构, 提高 >0.25 mm 大团聚体的数量, 降低微团聚体在土壤中的比例, 且有利于有机碳、氮在各粒径团聚体<sup>[14-15]</sup>, 特别是大团聚体中的积累<sup>[16]</sup>。其中, 残留氮的固定是对土壤氮库的有效补充<sup>[17]</sup>, 对作物后效长达数十年<sup>[18]</sup>。长期培肥地力能增强土壤对残留氮的固持, 降低氮素损失<sup>[5]</sup>。但目前对残留氮的研究主要集中在整体土壤<sup>[5, 17, 19]</sup>, 有关土壤有机质对红壤性稻田残留氮在团聚体内分布的影响则鲜见报道。本研究以土壤有机质含量为标准选取试验稻田开展 <sup>15</sup>N 标记微区试验, 探究不同有机质水平下土壤团聚体组成以及前季化肥残留氮在各粒径团聚体中的分布特征, 以期减少红壤性稻田氮素损失和优化田间氮素管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2020 年的早稻季 (3 ~ 7 月) 在江西省红壤研究所 (28° 15' 30" N, 116° 20' 24" E) 内进

收稿日期: 2021-11-19; 录用日期: 2022-05-12

基金项目: 国家自然科学基金 (31960397, 32060431); 国家重点研发计划 (2016YFD0300903); 江西省水稻产业技术体系专项 (JXARS-02-03); 中青年科技创新领军人才专项 (赣科计字 [2018] 175 号)。

作者简介: 王静 (1995-), 在读硕士研究生, 主要从事作物高产理论与技术研究。E-mail: 1727589470@qq.com。

通讯作者: 黄山, E-mail: ecohs@126.com。

行。该地属于典型亚热带湿润气候,年平均降水量 1600 ~ 1700 mm,年平均气温 17.7 ℃。在地形和母质(第四纪红色粘土发育而来)相同、管理措施一致的稻田中,以土壤有机质含量为参考标准,筛选出低有机质(L)、中有机质(M)和高有机质(H)的3块试验田。3块试验田耕层(0 ~ 15 cm)土壤基本理化性质见表1。

表1 不同有机质含量红壤性稻田基本理化性质

| 处理          | pH  | 有机质<br>(g/kg) | 总氮<br>(g/kg) | 容重<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 砂粒<br>(%) | 粉粒<br>(%) | 粘粒<br>(%) |
|-------------|-----|---------------|--------------|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 低有机质<br>(L) | 5.2 | 20.3          | 1.2          | 1.3                        | 22        | 56        | 22        |
| 中有机质<br>(M) | 5.3 | 28.5          | 1.8          | 1.2                        | 23        | 55        | 22        |
| 高有机质<br>(H) | 5.3 | 37.7          | 2.2          | 1.1                        | 22        | 54        | 24        |

## 1.2 试验设计

在选取的L、M和H稻田上开展田间试验和<sup>15</sup>N标记微区试验。每块稻田设置3个重复,小区(5 m×5 m)用0.5 m田埂并覆塑料薄膜隔开,防止串肥。另在每个小区内放置直径30 cm、高40 cm、厚约2 mm的PVC管,嵌入耕层30 cm,形成微区。

水稻品种选用柴两优2012。采用水育秧方式,3月26日播种。4月27日施基肥,4月28日人工移栽,移栽密度(行距×株距)为25 cm×14 cm,微区内栽插2穴,每穴3苗。5月5日施分蘖肥,6月3日施穗肥。施氮量(尿素)为150 kg/hm<sup>2</sup>,分基肥、蘖肥、穗肥(5:2:3)3次施用。钾肥(氯化钾)施用量为K<sub>2</sub>O 75 kg/hm<sup>2</sup>,分基肥和穗肥(5:5)2次施用。磷肥(钙镁磷肥)施用量均为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>,基肥一次性施用。微区内肥料用量和施用方式与大田相同,只是尿素使用的是<sup>15</sup>N同位素标记尿素(上海化工研究院生产,丰度为20.16%)。3块田上一季水稻收获后的秸秆均原位还田。整个水稻生育期保持2~3 cm淹水层,严防病、虫、草害。

## 1.3 测定项目及方法

### 1.3.1 土样采集及团聚体分级

水稻收获后,在微区内用5点取样法取0~15 cm耕层土样,同时用环刀法测量土壤容重。待土样自然风干,沿自然裂缝将土样逐渐掰成1 cm小块后,轻轻碾碎并过2 mm筛。取过筛土样30 g,用湿筛法<sup>[20]</sup>筛出大团聚体(0.25~2 mm)、微团

聚体(0.053~0.25 mm)和粘粉粒(<0.053 mm),然后放入60 ℃恒温烘箱中烘干至恒重,称重。

### 1.3.2 土壤全氮含量和化肥<sup>15</sup>N丰度的测定

采用Kjeltec 8400全自动凯氏定氮仪(福斯集团公司,丹麦)测定各粒径团聚体的全氮含量<sup>[21]</sup>。用EA-DELTA plus XP型稳定同位素比率质谱仪测定<sup>15</sup>N丰度。相关指标计算公式如下<sup>[22-23]</sup>:

土壤全氮在该粒径团聚体中的分布比例(%)=该粒径团聚体中土壤全氮含量/土壤团聚体全氮总量×100 (1)

<sup>15</sup>N残留量(g/m<sup>2</sup>)=土壤全氮含量×土壤容重×土层厚度/100×1000×(土样<sup>15</sup>N丰度-土壤自然丰度)/(化肥<sup>15</sup>N丰度-土壤自然丰度) (2)

土壤残留<sup>15</sup>N在该粒径团聚体中的分布比例(%)=该粒径团聚体<sup>15</sup>N残留量/土壤团聚体<sup>15</sup>N残留总量×100 (3)

## 1.4 数据分析

采用SPSS 17.0进行方差分析,采用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较(α=0.05)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机质含量下土壤团聚体组成特征

中有机质土壤上大团聚体的比例最高,且显著高于低有机质土壤(P<0.05),但是与高有机质土壤差异不显著(图1)。中有机质土壤上粘粉粒的比例显著低于低有机质土壤(P<0.05)。与低有机质土壤相比,高有机质土壤大团聚体的比例较高,而粘粉粒的比例较低,但均未达到显著差异水平。

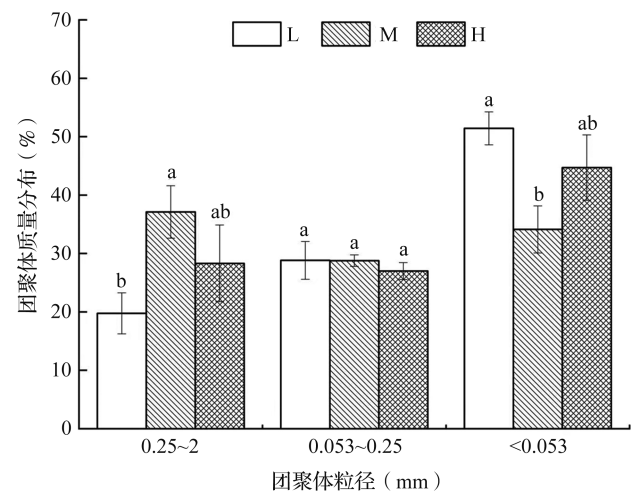


图1 不同有机质含量下土壤团聚体组成

注:不同小写字母表示同一粒径团聚体中不同有机质含量土壤间存在显著性差异(P<0.05),误差线表示标准差。图2、3、5、6同。

且低有机质、中有机质和高有机质土壤微团聚体及粘粉粒的总和均高于大团聚体, 分别达 80.25%、62.89% 和 71.69%。

## 2.2 不同有机质含量下全氮在土壤团聚体上的分布特征

与低有机质土壤相比, 在中有机质和高有机质土壤上大团聚体、微团聚体和粘粉粒的全氮含量均显著增加 (图 2), 而且高有机质土壤各粒径团聚体的全氮含量也显著高于中有机质土壤 ( $P<0.05$ )。中有机质和高有机质土壤均以微团聚体上的全氮含量最高, 分别达 2.60 和 4.06 g/kg。

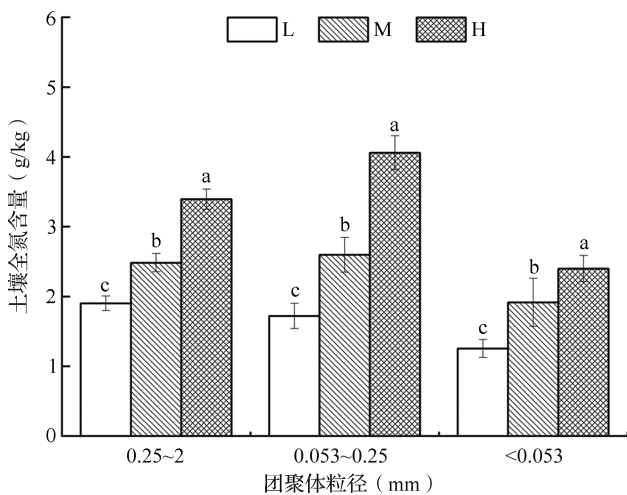


图2 不同有机质含量下土壤团聚体全氮含量的差异

与低有机质土壤相比, 高有机质土壤全氮在大团聚体和粘粉粒中的比例显著降低 ( $P<0.05$ ), 而在微团聚体中的比例显著提高了 5.93% (图 3)。与低有机质土壤相比, 中有机质土壤全氮在大团聚体中的比例显著降低了 3.45%, 而在微团聚体和

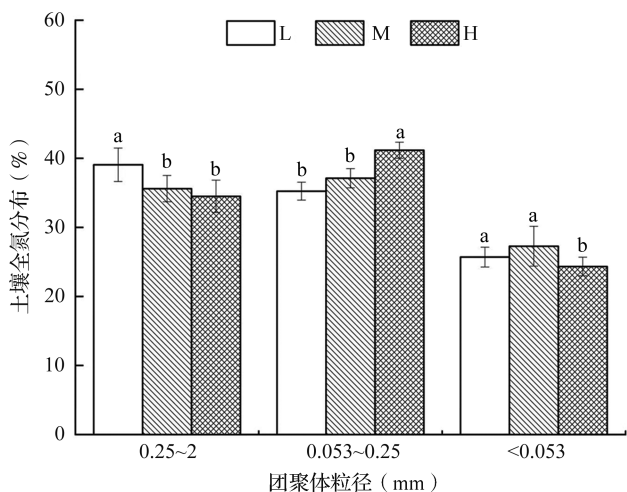


图3 不同有机质含量下土壤全氮在团聚体中的比例

粘粉粒中的比例无显著差异。低有机质土壤的全氮主要分布在大团聚体中 (39.06%), 中有机质和高有机质土壤中全氮则均以微团聚体为主要载体 (37.12% ~ 41.17%)。

## 2.3 不同有机质含量下土壤氮素残留总量

化肥氮的残留总量随土壤有机质含量的上升而提高 (图 4)。在施氮量均为 150 kg/hm<sup>2</sup> 的背景下, 与低有机质土壤相比, 中有机质和高有机质土壤中化肥氮的残留总量显著增加了 60.08% 和 93.93%。

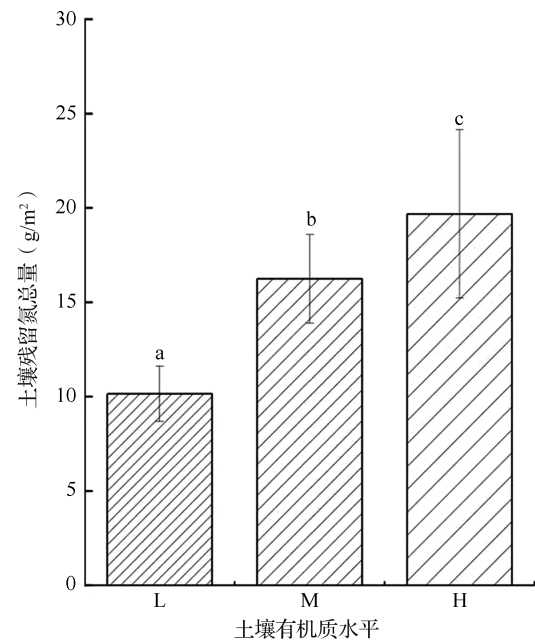


图4 不同有机质含量下土壤中氮肥的残留总量

注: 不同小写字母表示 L、M 和 H 有机质土壤间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。误差线表示标准差。

## 2.4 不同有机质含量下残留氮在土壤团聚体上的分布特征

与低有机质土壤相比, 残留氮在高有机质土壤大团聚体、微团聚体和粘粉粒中的含量显著增加了 76.58%、108.32% 和 110.85% (图 5)。而残留氮在中有机质土壤各粒径团聚体的含量也呈增加趋势, 但与低有机质土壤均未达到显著差异水平。

与低有机质土壤相比, 高有机质土壤残留氮在大团聚体中的比例较低, 而在微团聚体和粘粉粒中的比例较高, 但均未达到显著差异水平 (图 6)。3 种有机质含量土壤的残留氮主要分布在大团聚体中 (42.87% ~ 46.81%), 且不同有机质含量土壤团聚体残留氮的分布比例均随团聚体粒径的减小而下降。



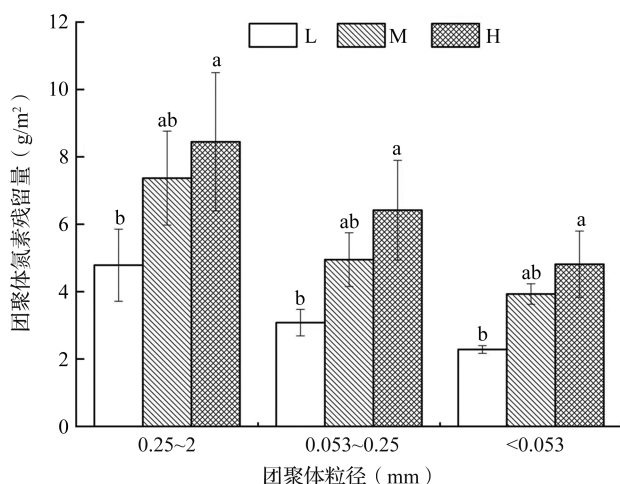


图5 不同有机质含量下土壤团聚体中氮肥的残留量

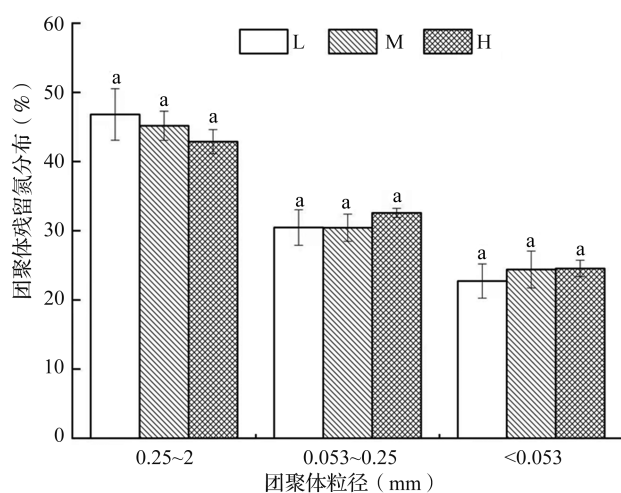


图6 不同有机质含量下土壤团聚体中残留氮的分布

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机质含量对团聚体组成的影响

研究表明,与低有机质土壤相比,大团聚体在中、高有机质土壤中的比例有所上升,粘粉粒的比例有所下降,这与以往的研究相符<sup>[10, 13, 24]</sup>。有机质含量较高的土壤容重较低,透气性更好,微生物活性更强<sup>[5]</sup>,更有利于有机质的持续储存和再积累。且土壤有机质作为团聚体的重要胶结剂,能够促进大团聚体的形成<sup>[25]</sup>,如动植物残体、根系分泌物、真菌菌丝及其代谢产物等均能增强土壤颗粒间的缠绕<sup>[12, 26-27]</sup>,从而提高大团聚体的含量。但邸佳颖等<sup>[28]</sup>研究发现,当有机碳含量升至 30 g/kg 后,大团聚体的比例和稳定性将不再随有机碳含量的提高而增加。此时,土壤颗粒间的团聚效果将被过量大分子有机物质带有的大量电荷及其在颗粒表

面产生的位阻效应减弱,甚至有团聚体结构退化的趋势<sup>[29]</sup>,这可能也是本研究中中有机质土壤大团聚体的比例较高的原因之一。有研究表明,在铁铝氧化物丰富,有机质含量较低的土壤中,铁铝氧化物主导各粒径团聚体的形成,特别是微团聚体的胶结<sup>[30]</sup>。供试的红壤性水稻土由第四纪红色粘土发育而来,即使在有机质含量较高的土壤中,强胶结力的铁铝氧化物也占优势,其与有机质共同决定团聚体组成<sup>[31]</sup>。因此,本研究中发现,3种有机质水平土壤<0.25 mm微团聚体的含量均高于大团聚体。

#### 3.2 土壤有机质含量对全氮在团聚体中分布的影响

高有机质稻田由于自身储氮量高,加之土壤微生物固氮作用占优势,故其土壤全氮增量较高<sup>[5]</sup>。而团聚体作为全氮的主要储存场所,其内全氮含量也与有机碳高度正相关<sup>[11]</sup>。因此,本研究中中、高有机质土壤各粒径团聚体的全氮含量显著高于低有机质土壤。江春玉等<sup>[32]</sup>研究表明,低肥力和高肥力土壤全氮主要分布在大团聚体中。而本研究结果与Xie等<sup>[15]</sup>在长期定位试验上的结论类似,中、高有机质土壤全氮均以微团聚体为主要载体,但不符合土壤团聚体的层次模型<sup>[33]</sup>。这可能与红壤性水稻土微团聚体胶结剂以铁铝氧化物和1:1型粘土矿物高岭石等为主有关<sup>[29, 32]</sup>。微团聚体中的有机物质较大团聚体中的更难降解,稳定性更高,更新周转较慢<sup>[26, 34]</sup>,更利于碳、氮组分的保存。此外,微团聚体被包裹在大团聚体内,对外界环境的干扰不敏感<sup>[35]</sup>。加之其比表面积大,对 $\text{NH}_4^+$ 等阳离子吸附性较强,故能固持更多的氮素<sup>[36]</sup>。高有机质土壤全氮在微团聚体上的比例较低有机质土壤显著增加,也进一步证实了随着土壤有机质含量的提高,微团聚体对土壤全氮的固持能力更强。

#### 3.3 土壤有机质含量对残留氮在团聚体中分布的影响

研究表明,化肥氮在土壤中的残留总量随土壤有机质含量的升高而显著增加,说明提高土壤有机质水平有利于化肥氮的固持。这可能是土壤有机质含量越高、土壤阳离子交换能力和微生物活性越强<sup>[5]</sup>,同时,团聚体上的土壤胶体和微生物对速效氮的固持作用也更强。此外,30 cm土体中土壤氮库为3000~5000 kg/hm<sup>2</sup>,施入的化肥氮(150

kg/hm<sup>2</sup>) 占总可利用无机氮库的比例相对较小<sup>[37]</sup>。加之土壤氮含量与土壤有机质高度相关, 因此, 相同施氮量下, 在根系发达和微生物数量多的高肥力土壤中植株吸收的氮素更多源于土壤氮, 来自化肥氮的比例小<sup>[5]</sup>, 从而导致了残留氮在土壤中的积累。上述可能也是本研究中高有机质土壤化肥氮在各粒径团聚体上的残留量均较低有机质土壤显著增加的主要原因。已有学者指出, 施入土壤的化肥氮较多的积累在粗粒径团聚体中<sup>[38]</sup>。本研究中, 3种有机质含量的土壤化肥残留氮也主要赋存于大团聚体中。这可能是由于外源新碳主要进入大团聚体<sup>[39]</sup>, 对其内部的微生物数量及活性具有正激发效应<sup>[36, 40]</sup>, 从而增强了大团聚体的固氮能力。相反, 稻田微团聚体内微生物对碳源的利用能力较低<sup>[41]</sup>。而化肥氮进入土壤时虽先被小粒径团聚体吸附, 但在微生物和根系的作用下会渐进被团聚化<sup>[38]</sup>, 致使残留氮在大团聚体中富集。本研究中, 与低有机质土壤相比, 高有机质土壤大团聚体残留氮的含量虽然最高, 但其占残留氮总量的比例有下降的趋势, 而微团聚体残留氮占残留氮总量的比例有上升的趋势。这与残留氮在各粒径团聚体上的含量有关。此外, 微团聚体中以难降解的有机质为主, 更新周期长, 稳定性较高<sup>[26, 34]</sup>, 吸附和保存养分的能力更强<sup>[42]</sup>。甚至有研究估计微团聚体内有机碳的寿命可长达1个世纪<sup>[43]</sup>。但受土壤微生物活性及容重等因素的影响, 有机质含量较高的土壤微团聚体对养分的保持能力可能更强<sup>[44-45]</sup>, 因此, 其固持的残留氮的比例有所增加。与之相比, 高有机质土壤大团聚体养分供给能力更强<sup>[5, 26]</sup>, 其固持的残留氮的比例则相对减少。

#### 4 结论

本研究表明, 提升土壤有机质含量可提高大团聚体在土壤中的比例, 促进土壤团粒结构的形成。与低有机质土壤相比, 高有机质土壤全氮及残留氮在各粒径团聚体上的含量均显著增加。不同有机质含量土壤中的残留氮均主要分布在大团聚体上。高有机质土壤残留氮在大团聚体上的比例较低有机质土壤有下降的趋势, 而在微团聚体和粘粉粒上的比例有上升的趋势。因此, 提高土壤有机质含量不仅能改善土壤结构, 还能够增强微团聚体对全氮及残留氮的固持。这有利于残留氮在土壤中保存, 从而降低红壤性稻田的氮素损失。

#### 参考文献:

- [1] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
- [2] 冯兆滨, 王萍, 刘秀梅, 等. 我国红壤改良利用技术研究现状与展望[J]. 江西农业学报, 2017, 29(8): 57-61.
- [3] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应[J]. 土壤学报, 2017, 54(6): 1471-1485.
- [4] 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 1059-1060.
- [5] 彭卫福, 吕伟生, 黄山, 等. 土壤肥力对红壤性水稻土水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(18): 3614-3624.
- [6] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(9): 1558-1570.
- [7] 乔鑫鑫, 王艳芳, 李乾云, 等. 复种模式对豫西褐土团聚体稳定性及其碳、氮分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 380-391.
- [8] 王超, 熊凡, 卢瑛, 等. 利用方式对珠江三角洲耕层土壤团聚体分布及碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 494-501.
- [9] 殷文, 郭瑶, 陈桂平, 等. 绿洲农田土壤团聚体组成及有机碳和全氮分布对秸秆还田方式的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 139-148.
- [10] Jiang M, Wang X, Liu S Y, et al. Variation of soil aggregation and intra-aggregate carbon by long-term fertilization with aggregate formation in a grey desert soil[J]. Catena, 2017, 149(1): 437-445.
- [11] 苏慧清, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 长期施肥棕壤团聚体分布及其碳氮含量变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 924-932.
- [12] 任镇江, 罗友进, 魏朝富. 农田土壤团聚体研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(2): 1101-1105.
- [13] 宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 564-570.
- [14] 荣勤雷, 李若楠, 黄绍文, 等. 不同施肥模式下设施菜田土壤团聚体养分和微生物量特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(7): 1084-1096.
- [15] Xie J Y, Hou M M, Zhou Y T, et al. Carbon sequestration and mineralization of aggregate-associated carbon in an intensively cultivated Anthrosol in north China as affected by long term fertilization[J]. Geoderma, 2017, 296: 1-9.
- [16] 刘小粉, 王清涛, 白双宇, 等. 绿肥根茬还田和化肥用量对土壤团聚性及碳氮分布的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021(3): 220-226.
- [17] 王西娜, 王朝辉, 李华, 等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1202-1212.

- [18] Sebilo M, Mayer B, Nicolardot B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (45): 18185–18189.
- [19] 李欣欣, 石祖梁, 王久臣, 等. 稻茬冬小麦氮肥吸收、残留和损失特性 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31 (11): 3691–3699.
- [20] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50 (3): 627–633.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 张迪, 姜佰文, 梁世鹏, 等. 草甸黑土团聚体稳定性对耕作与炭基肥施用的响应 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (14): 125–132.
- [23] 王大鹏, 罗雪华, 郭澎湃, 等. 橡胶林氮肥施用后在土壤中的残留、累积和迁移 [J]. *生态环境学报*, 2019, 28 (7): 1361–1368.
- [24] 金亚波, 寇智瑞, 韦建玉, 等. 有机物料对黄壤烟田土壤团聚体组成及土壤肥力的影响 [J]. *西南大学学报 (自然科学版)*, 2020, 42 (8): 9–16.
- [25] 高鸣慧, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆和生物炭还田对棕壤团聚体分布及有机碳含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (11): 1978–1986.
- [26] 张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展 [J]. *北方园艺*, 2020 (21): 131–137.
- [27] Toosi E R, Kravchenko A N, Mao J, et al. Effects of management and pore characteristics on organic matter composition of macroaggregates: evidence from characterization of organic matter and imaging [J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68 (2): 200–211.
- [28] 邸佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22 (10): 1129–1138.
- [29] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (2): 204–208, 239.
- [30] 李朝霞, 蔡崇法, 史志华, 等. 鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探 [J]. *水土保持学报*, 2004, 18 (4): 69–72.
- [31] Zhao J S, Chen S, Hu R G, et al. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides [J]. *Soil & Tillage Research*, 2017, 167: 73–79.
- [32] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态 [J]. *土壤学报*, 2017, 54 (1): 138–149.
- [33] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33 (2): 141–163.
- [34] Totsche K U, Amelung W, Gerzabek M H, et al. Microaggregates in soils [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2018, 181 (1): 104–136.
- [35] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望 [J]. *土壤*, 2018, 50 (5): 853–865.
- [36] 杨洪波, 申艳, 徐明岗, 等. 长期施肥下黑土不同团聚体氮组分的植物有效性差异 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1581–1587.
- [37] 孙昭安, 陈清, 朱彪, 等. 化肥氮对冬小麦氮素吸收的贡献和土壤氮库的补偿 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (3): 413–430.
- [38] 邵兴芳, 申小冉, 张建峰, 等. 外源氮在中、低肥力红壤中的转化与去向研究 [J]. *中国土壤与肥料*, 2014 (2): 6–11.
- [39] 乔丹丹, 吴名字, 张倩, 等. 秸秆还田与生物炭施用对黄褐土团聚体稳定性及有机碳积累的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2018 (3): 92–99.
- [40] 白文娟, 徐华勤, 章家恩. 不同培肥措施对土壤团聚体中微生物特性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2018, 27 (1): 24–30.
- [41] 赵美纯, 李鑫, 王月, 等. 东北黑土旱田改稻田对土壤团聚体微生物群落功能多样性的影响 [J]. *核农学报*, 2020, 34 (12): 2831–2838.
- [42] 杨洪波, 史天昊, 徐明岗, 等. 长期不同施肥下肥料氮在黑土不同团聚体有机物中的固持差异 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (2): 357–364.
- [43] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates [J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51 (4): 595–605.
- [44] 张红雪, 赵壮, 王晓朋, 等. 生物炭对亚热带红壤水稳性团聚体及其碳、氮分布的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2020 (6): 27–33.
- [45] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义 [J]. *土壤学报*, 1994, 31 (1): 18–25.

**Effects of soil organic matter content on the distribution of residual nitrogen in aggregates in a red paddy soil**WANG Jing<sup>1</sup>, TANG Gang<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>, FU Wen-tao<sup>1</sup>, LIU Tao-ju<sup>1</sup>, ZENG Yong-jun<sup>1</sup>, CHEN Jin<sup>2</sup>, HUANG Shan<sup>1\*</sup>

( 1. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045; 2. Soil and Fertilizer &amp; Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang Jiangxi 330200 )

**Abstract:** The amount and distribution of residual mineral nitrogen plays a critical role in nitrogen supply for subsequent crops as well as nitrogen losses. A field experiment was carried out with the <sup>15</sup>N-labelling technique to explore the effect of soil organic matter content on the residue of mineral fertilizer nitrogen in soil aggregates in a red paddy soil under the same nitrogen rate ( 150 kg/hm<sup>2</sup> ). The results showed that compared with that in the low-organic matter soil, the proportion of macroaggregates ( 0.25 ~ 2 mm ) was higher in medium- and high-organic matter soils, while the proportion of silt and clay ( < 0.053 mm ) was lower. The concentration of total nitrogen increased with increasing soil organic matter content in all aggregate sizes. Compared with the low-organic matter soil, the contents of total residual nitrogen in medium- and high-organic matter soils were significantly increased by 60.08% and 93.93% under the same nitrogen input, respectively. Compared with that in the low-organic matter soil, the content of residual nitrogen in the high-organic matter soil increased by 76.58%, 108.32%, and 110.85% in macroaggregates, microaggregates ( 0.053 ~ 0.25 mm ), and silt and clay, respectively. Residual nitrogen was mainly located in macroaggregates ( 42.87% ~ 46.81% ). With the increasing of soil organic matter content, the proportion of residual nitrogen tended to decrease in soil macroaggregates, but tended to increase in silt and clay, albeit with no significant differences. Thus, improving soil fertility can not only increase the proportion of macroaggregates and enhance soil aggregation, but also contribute to the retention of residual mineral nitrogen and thus reduce nitrogen losses in the paddy soil.

**Key words:** soil organic matter; red soil; rice paddy; residual nitrogen; soil aggregates