

# 不同施肥处理对红壤性水稻土团聚体的分布及有机碳、氮含量的影响<sup>①</sup>

郭菊花, 陈小云, 刘满强, 胡锋, 李辉信\*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 土壤采自江西省红壤研究所历经 22 年的肥料定位试验地, 各施肥处理为: 不施肥 (CK)、施 N 肥 (N)、施 P 肥 (P)、施 K 肥 (K)、施 N、P 肥 (NP)、施 N、K 肥 (NK)、施 N、P、K 肥 (NPK)、施双倍 N、P、K 肥 (2NPK)、施 N、P、K 肥和有机肥 (NPK+OM)。研究了不同施肥处理对水稻土团聚体分布的影响以及土壤有机 C、N 在各级团聚体上赋存的情况。研究表明: 有机 C、N 主要分配在 2~0.25 mm 的大团聚体上, C/N 比随着团聚体粒级的减少而降低; 水稻土团聚体的形成与有机 C(SOC) 密切相关, 表现出与“层次性”机制相符的现象; 施 P、K、NK 肥和 NPK+OM 显著提高大团聚体的含量和团聚体的稳定性; NPK+OM 也显著提高土壤有机 C、N 和各级团聚体上的有机 C、N 的含量。

**关键词:** 长期肥料试验; 水稻土; 团聚体稳定性; 有机碳、氮

**中图分类号:** S158.3; S152.4

土壤有机质 (SOM) 是陆地 C 库储量的主要组成部分, 其微小的变化就能影响大气中 CO<sub>2</sub> 和气候变化, 对全球温室效应具有深远的影响<sup>[1]</sup>。同时土壤有机质的含量又是衡量土壤肥力高低的重要标准之一。鉴于有机质的重要功能, 保持土壤稳定性、控制影响稳定性的因子是十分必要的。影响有机质的稳定机制有 4 个<sup>[2-3]</sup>: ①有机质的难降解性; ②土壤内在的化学稳定性; ③土壤团聚体的物理保护; ④土壤生物的自身保护。土壤团聚体的物理保护作用是对土壤有机质物理稳定性贡献最大的方面。土壤团聚体具有一定的稳定性, 可以抵抗诸如土壤水分和溶质渗透, 土壤侵蚀、压实和结壳<sup>[4]</sup>, 这种能力是团聚体对土壤有机质物理保护机制的重要基础。土壤有机质和土壤结构相互作用紧密<sup>[5-6]</sup>: 有机质粘合主要的矿物颗粒形成稳定的团聚体, 相反, 稳定的团聚体又可以对其他可矿化的有机质进行物理保护。国内外目前对团聚体的形成、稳定性以及与土壤有机 C 和土壤肥力关系的研究已取得了一定的进展<sup>[7-8]</sup>, 但对不同施肥处理, 特别是化肥处理对水稻土团聚体的分布及有机 C、N 在各级团聚体中分配, 目前仍然研究得较少。本文就不同施肥处理对水稻土团聚体分布及 C、N 含量的影响进行了研究, 进一步阐明有机 C 与团聚体之间的关系, 深入

了解水稻土有机 C 的稳定机制。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验处理和供试土壤

红壤性水稻土化肥 (肥料) 长期定位试验设在江西进贤江西省红壤研究所内。试验始于 1981 年, 以“稻-稻-冬闲”耕作制为基础。试验设 9 个处理: ①不施肥 (CK); ②施 N: 90 kg/(hm<sup>2</sup>·季) (N); ③施 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>: 45 kg/(hm<sup>2</sup>·季) (P); ④施 K<sub>2</sub>O: 75 kg/(hm<sup>2</sup>·季) (K); ⑤施 N、P 肥 (NP); ⑥施 N、K 肥 (NK); ⑦施 N、P、K 肥 (NPK); ⑧施双倍 N、P、K 肥 (2NPK); ⑨施 N、P、K 肥 + 有机肥 (早稻为紫云英, 晚稻为猪粪) 22500 kg/(hm<sup>2</sup>·季) (NPK+OM)。有机肥和钙镁磷肥作基肥施用, 尿素和 KCl 在水稻返青后和分蘖盛期分两次追肥。

各小区面积 46.67 m<sup>2</sup>, 3 次重复, 随机排列。小区间用水泥埂隔开, 其地下埋深 30 cm, 地上 20 cm。供试土壤为第四纪红黏土发育的水稻土, 1981 年试验开始前土壤基本性状如表 1 所示。

### 1.2 土样采集

2003 年 7 月中旬采集水稻土耕层原状土样, 带回实验室自然风干, 剔除大的植物残体和石块, 过 8 mm 筛继续风干后装入密封袋中待用。

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371059) 资助。

\* 通讯作者 (huixinli@njau.edu.cn)

作者简介: 郭菊花 (1982—), 女, 江苏苏州人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态与环境方面的研究。E-mail: chongzidf@yahoo.com.cn

表 1 供试红壤水稻土表层 (0~15 cm) 土壤基本性状

Table 1 The basic properties of red paddy top soil

pH	有机 C (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	全 K (g/kg)	有效 P (mg/kg)	有效 K (mg/kg)	黏粒 (<0.001 mm) (g/kg)
6.9	16.31	1.49	0.48	10.39	5.27	80.52	241.0

### 1.3 测定方法

1.3.1 土壤团聚体的分离 土壤团聚体分离的方法是在 Six<sup>[9]</sup>的基础上稍作修改。用湿筛分离的方法将土样分离成 >2 mm、2~0.25 mm、0.25~0.053 mm、<0.053 mm 4 个级别的团聚体。制得样品在 50℃ 下烘干 24 h 后称重。

1.3.2 团聚体的稳定性 团聚体的稳定性用平均重量直径 (MWD) <sup>[10-11]</sup> 来描述:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i$$

式中  $r_i$  是第  $i$  个筛子的孔径 (mm),  $r_0=r_1$ ,  $r_n=r_{n+1}$ ,  $n$  为筛子的数量,  $m_i$  是第  $i$  个筛子上颗粒百分比。

1.3.3 有机 C、N 测定 土壤原土及各级团聚体烘干称重后磨细过 0.015 mm 筛, 进行 C、N 含量的测定。有机 C 用  $H_2SO_4-K_2CrO_7$  外加热法测定, 全 N 用凯氏法测定<sup>[12]</sup>。

### 1.4 统计分析

不同施肥处理之间利用 SPSS13.0 软件进行方差分析 (ANOVA), 均值的多重比较采用 Duncan 和 LSD 检验, 并用不同字母表达显著性差异, 显著性水平 ( $p \leq 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 施肥对土壤不同大小团聚体的分布和团聚体稳定性的影响

不同施肥处理对水稻土团聚体的分布有显著的影响 (图 1)。总体上, 2~0.25 mm 的大团聚体分布是最多的, 所占比例达 39.59%~54.76%。与未施肥的 CK 相比, 各个化肥处理对 2~0.25 mm 大团聚体都有增加的趋势。不过单施 N 肥各级团聚体含量的变化趋势不大。与 CK 相比, 单施 P、K 肥, 施 NK 肥和有机无机配施 (NPK+OM) 显著提高了 >2 mm 和 2~0.25 mm 大团聚体的含量, 降低了 0.25~0.053 微团聚体和 <0.053 mm 黏砂粒的含量。不同化肥处理对团聚体的分布趋势也有影响, 单施 P 肥的 >2 mm 大团聚体含量显著高于其他化肥处理, 而黏砂粒的含量与其他化肥处理相比是最低的; 2NPK 与 NPK 处理相比, 只显著增加了 2~0.25 mm 大团聚体的含量。而在施化肥的基础上

增施有机肥后, 显著提高了 >2 mm 大团聚体的含量, 并显著降低了 0.25~0.053 mm 微团聚体和 <0.053 mm 黏砂粒的含量。

团聚体的平均重量直径 (MWD) 体现了土壤结构的稳定性, 单施 P、K 肥和施 NK 肥以及 NPK+OM 与 CK 相比, 显著提高了 MWD。单施化肥处理间表现出  $P>K>N$ , 2NPK 与 NPK 相近。在相同 NPK 用量下, 有机无机肥配施 > 单施无机肥 (图 2)。

### 2.2 施肥对土壤总有机 C、N 含量的影响

与未施肥的 CK 相比, 长期单施化肥处理对土壤有机 C 的含量有一个增加的趋势, 有 K 组合处理的土壤有机 C 含量显著高于其他化肥处理; 2NPK 与 NPK 相比, 有机 C 的含量基本保持一致水平。NPK+OM 与 CK 及各化肥处理相比, 土壤有机 C 明显增加, 差异达显著水平 (图 3)。土壤有机 N 与有机 C 的变化趋势总体上是相似的。

### 2.3 施肥对不同大小团聚体上有机 C、N 含量及分配的影响

2.3.1 不同大小团聚体上的有机 C、N 含量 有机 C 的含量以 <0.053 mm 的黏砂粒最低。单施 N、P、K 肥对团聚体上有机 C 含量的影响与 CK 有相同的趋势, 从大团聚体到微团聚体, 有机 C 的含量都有下降的趋势; NPK+OM 处理与 CK 及各化肥处理相比, 显著提高了各级团聚体上有机 C 的含量。有机 N 与有机 C 存在类似的趋势, 但在微团聚体和黏砂粒上含量相对较高, 特别是施 K 肥的处理, 微团聚体上有机 N 的含量甚至高出大团聚体 (图 4)。

图 5 反映了不同施肥处理对团聚体有机 C、N 比的影响。总体上, 大团聚体的 C/N 比值都高于微团聚体, 黏砂粒的 C/N 比相对最低。

2.3.2 有机 C、N 在不同大小团聚体上的分配 将团聚体有机 C、N 含量分别乘以团聚体占土壤的百分含量获得团聚体占原土有机 C、N 的含量, 从而可以获得原土有机 C、N 在各团聚体上的分配或各团聚体对原土有机 C、N 的贡献 (图 6)。总体上, 有机 C 主要分配在 2~0.25 mm 的大团聚体上, 黏砂粒聚集的 C 是最少的。各化肥处理与 CK 相比, 2~0.25 mm 大团聚体有机 C 的含量都有增加的趋势, 黏砂粒上有机 C 的含量有降低的趋势。NPK+OM 处理与 CK 相比, 显

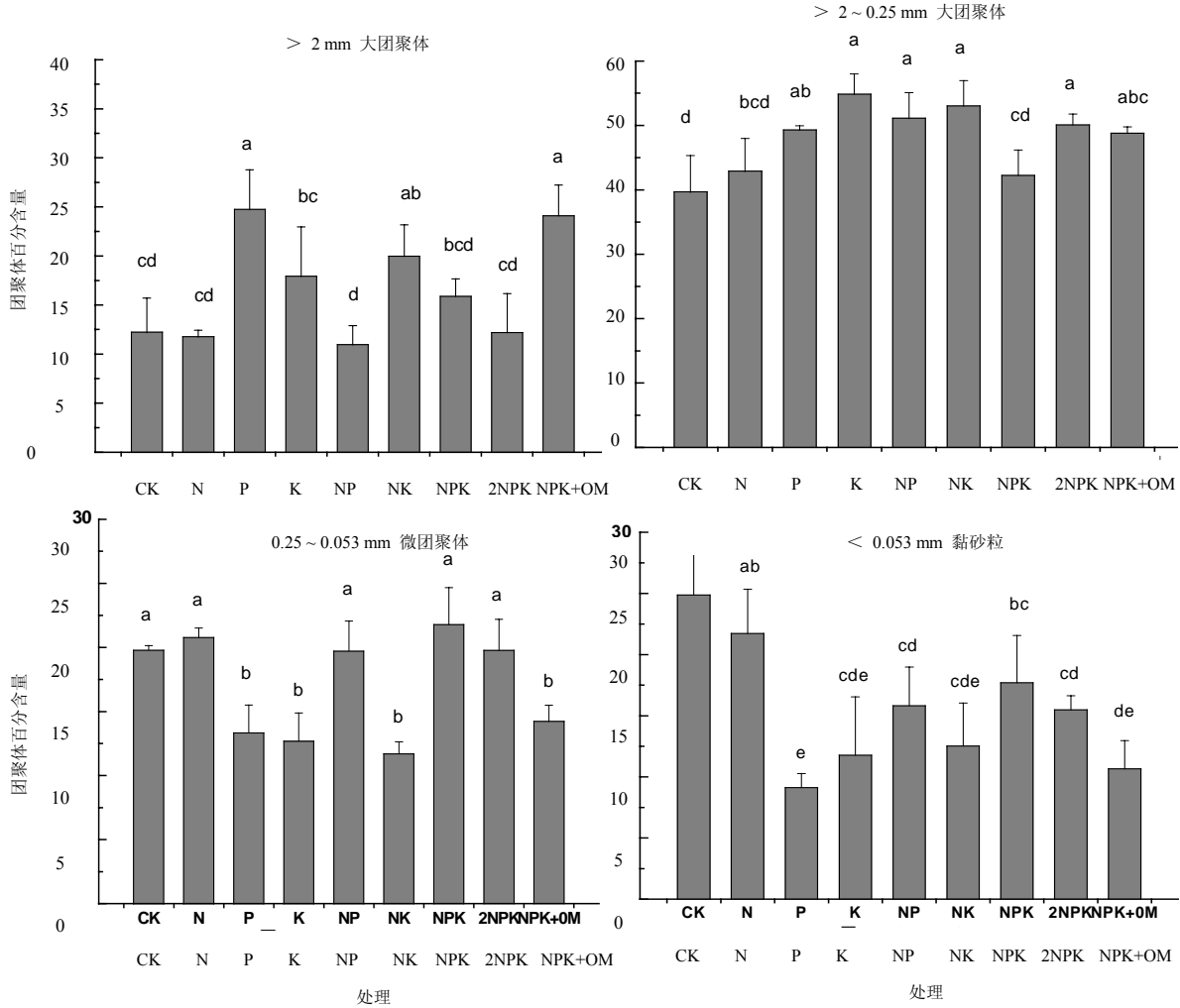


图1 不同施肥处理对团聚体分布的影响

Fig. 1 Aggregate size distribution in soils different in fertilizer management practice

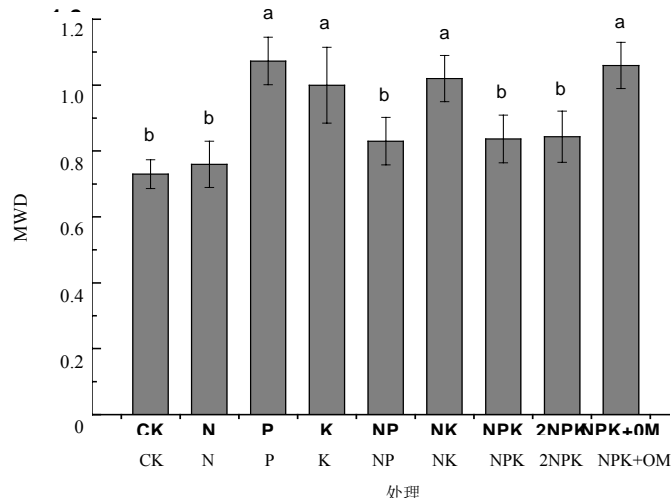


图 2 不同施肥处理对团聚体平均重量直径 MWD 的影响

Fig. 2 Mean weight diameter (MWD) of aggregates in soils different in fertilizer management practice

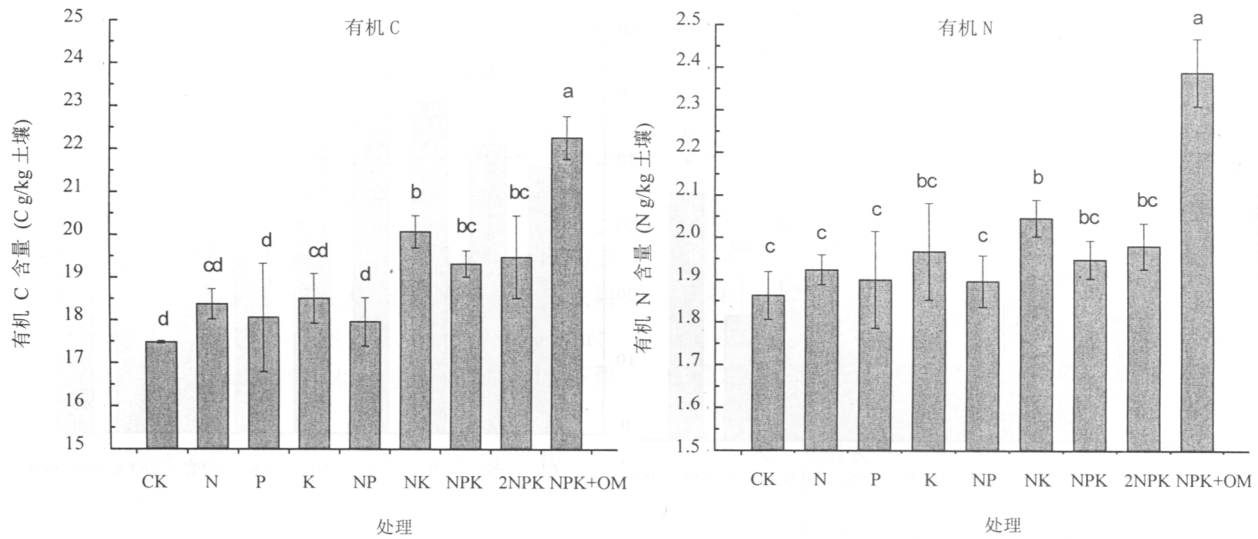


图 3 不同施肥处理对土壤有机 C 和有机 N 的影响

Fig. 3 Effect of fertilizer management practice on soil organic carbon and organic nitrogen

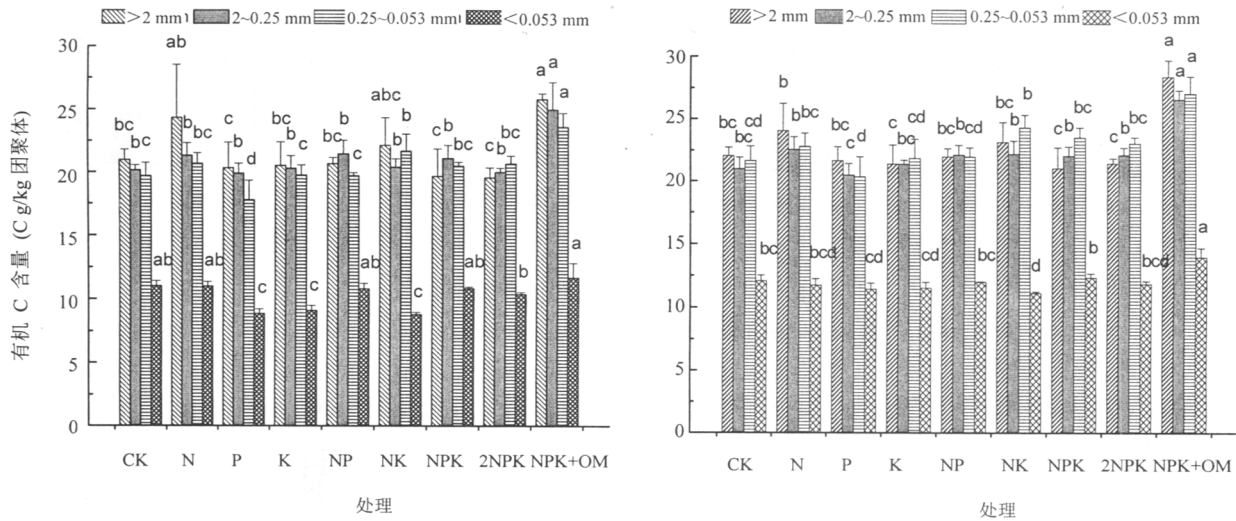


图 4 不同施肥处理对团聚体有机 C 和有机 N 含量的影响 (多重比较为不同处理间同一粒径的团聚体间比较)

Fig. 4 Effect of fertilizer management practice on organic carbon and nitrogen concentrations in aggregates

著增加了大团聚体上有机 C 的含量, 并显著减少了黏砂粒上有机 C 的含量。各化肥处理间也有一定差异, 单施 P 肥的 >2 mm 大团聚体上有机 C 含量最高, 而黏砂粒上的含量却是最低的; 2NPK 与 NPK 相比, 有机 C 在各级团聚体上的分配差异不显著。在施化肥的基础上增施有机肥, 大团聚体上有机 C 的含量都有明

显的增加, 微团聚体和黏砂粒上有机 C 的含量反而显著降低。有机 N 在团聚体上的分配与有机 C 基本相似。增施有机肥对土壤有机 C 和有机 N 含量的提高主要取决于大团聚体有机 C、N 含量的变化, 而对微团聚体和黏砂粒有机 C、N 含量的变化没有单施化肥的处理显著。

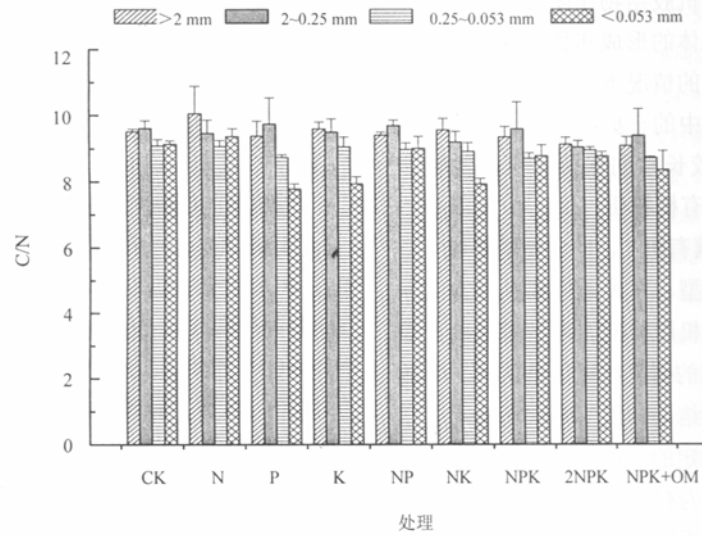


图 5 不同施肥处理对团聚体有机 C、N 比的影响

Fig. 5 Effect of fertilizer management practice on organic carbon/nitrogen ratio in aggregates

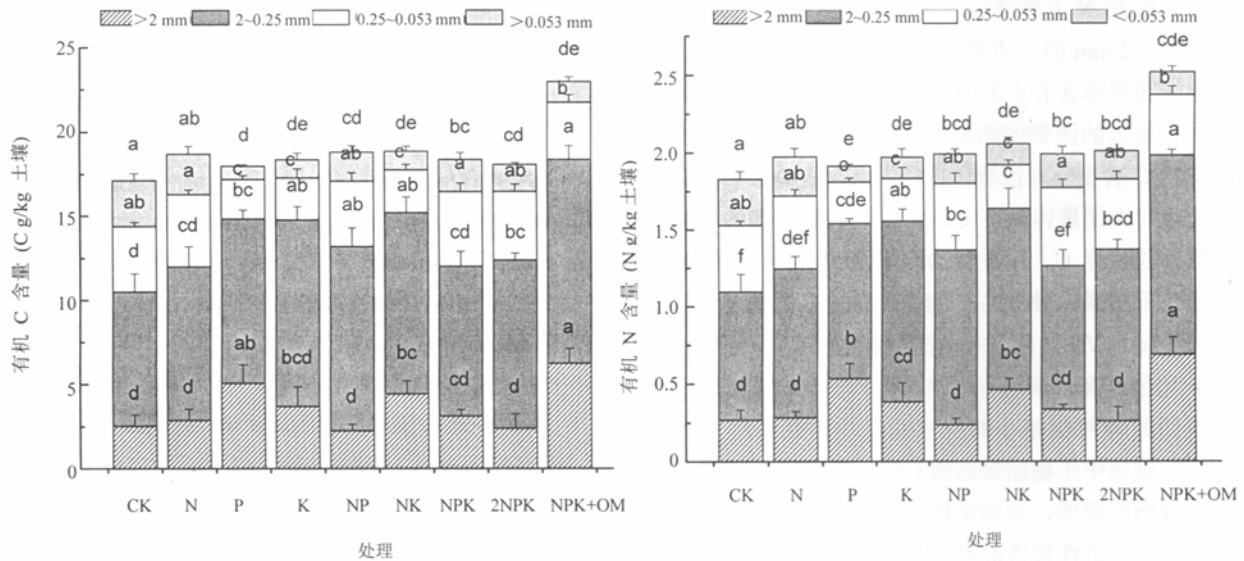


图 6 不同施肥处理对不同大小团聚体有机 C 和有机 N 含量的影响

Fig. 6 Effect of fertilizer management practice on organic carbon and nitrogen concentrations in aggregates of different sizes

### 3 讨论

#### 3.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布及稳定性的影响

在土壤团聚体的形成过程中,胶结物质(有机胶结物质、无机胶结物质和有机无机复合体)起着十分重要的作用<sup>[13-14]</sup>。单施化肥处理对红壤性水稻土有机质的积累无实质贡献(图 3),仅依赖作物根茬是远远不够的,因此无机胶结物在此化肥处理的土壤团聚作用中

可能起着很重要的作用。单施 P 肥对大团聚体的形成和团聚体的稳定性有明显促进作用,已有研究报道过可能与施用钙镁磷肥中的复盐基作用改善了胶体品质有关<sup>[15]</sup>。单施 K 肥和施 NK 肥的处理同样能促进大团聚体的形成和团聚体的稳定性,可能是土壤含有过量的 K<sup>+</sup>与带负电的黏粒中和形成了团粒结构。而单独施入 N 肥通常认为对土壤存在激发效应<sup>[16]</sup>,加强了土壤微生物的活动,加速有机物质的分解,这可能是造成单施 N 肥对团聚体稳定性无明显促进作用的原因。有

机肥的施入增加了土壤有机胶结物在团聚过程中的作用, 从而能促进土壤团聚体的形成和稳定性, 很多研究也报道过在有机质丰富的情况下, 土壤水稳性团聚体的形成主要依赖于土壤中的有机物质<sup>[17]</sup>。有机无机配施的这种优势说明要较长时间保持团聚体的稳定性, 土壤必须不断地补充有机物质。

### 3.2 不同施肥处理对土壤有机 C、N 含量的影响

很多研究者在土壤类型、气候条件和利用方式不同的前提下, 得出有机无机肥料配施能显著提高土壤有机 C 的含量<sup>[18-20]</sup>, 我们的研究结果也是这样。单施化肥的结果与张负申<sup>[19]</sup>的结论一致, 即均衡施用化学肥料对土壤有机 C 也有一定的促进作用。由于稻茬的残留和长年的淹水种稻, 为有机质的积累提供了物质和环境条件, 其土壤有机质呈逐年上升的趋势, 只是其土壤有机质积累速度比较慢而已。

### 3.3 不同施肥处理对团聚体上有机 C、N 分配及 C/N 比的影响

有机 C、N 主要分配在 2 ~ 0.25 mm 的大团聚体上, 其次是 > 2 mm 的大团聚体。很多研究也报道过大团聚体比微团聚体含有更多的有机 C。S i x 等<sup>[21]</sup>认为大团聚体是较低层的团聚体加上有机物等胶结剂形成的, 所以有机 C 含量随着团聚体粒径的增大而增加。单施化肥处理对大团聚体赋存 C、N 的能力有增加的趋势, 对黏砂粒赋存 C、N 的能力有降低的趋势, 说明在化肥处理下团聚体对有机 C 的物理保护主要通过大团聚体来实现。C / N 比值是有机物腐殖化程度的一个指标, C / N 比值越高, 表明有机物的腐殖程度就越低, 说明土壤团聚体粒级越小其包被的有机物腐解程度越高<sup>[22]</sup>。本试验中土壤团聚体的 C / N 比值是随着团聚体的粒级减小而降低, 说明水稻土在耕作过程中, 大团聚体由于其稳定性较低而易于分散, 这一结果也在一定程度上证实了小团聚体比大团聚体形成的早。

### 3.4 团聚体-有机 C 形成机制的探讨

本试验中, 大团聚体有机 C 含量普遍较高 (相比黏砂粒)、C/N 比值较高 (相比微团聚体和黏砂粒), 同时大团聚体含量较高的处理, 团聚体稳定性也相应提高, 这说明团聚体形成表现出 Tisdall 和 Oades<sup>[23]</sup>提出的层次性机制 (hierarchy concept model) 的现象, 即大团聚体是在微团聚体形成后在有机、无机胶结物质的胶结作用下形成的。按照层次性机制, 微团聚体的有机 C 含量应低于大团聚体, 但本试验中微团聚体有机 C 含量与大团聚体相当, 可能是因为水稻土深受人为因素干扰, 每年的犁耕翻耙及灌溉和晒田的干湿交替

过程造成了这种差异。因此, 该红壤性水稻土表现的某些性质符合层次性机制概念的标准, 但具体的形成机制有待进一步的研究。

## 4 结论

单施 P、K 肥, 施 NK 肥和施 NPK+OM 显著提高了大团聚体的含量和团聚体的稳定性, 对团聚体的稳定性和水稻土有机 C 的保护有重要意义。单施化肥对土壤中有机 C、N 的含量有一定的促进作用; 施 NPK+OM 能显著提高土壤和各级团聚体上有机 C、N 的含量, 显示了有机肥对形成和维持土壤水稳性团聚体的重要意义。有机 C 主要分配在 2~0.25 mm 的大团聚体上, C/N 比值为大团聚体高于微团聚体, 说明微团聚体比大团聚体形成的早, 且稳定性高于大团聚体。该水稻土的团聚体-有机 C 相互作用表现出了团聚体形成的层次性机制的现象, 即大团聚体是微团聚体加上有机、无机胶结剂形成的, 大团聚体的形成和稳定对有机 C 的保护最为关键。

## 参考文献:

- [1] 李忠佩. 低丘红壤有机碳库的密度及变异. 土壤, 2004, 36 (3): 292-297
- [2] 解宏图, 付时丰, 张旭东, 王晶. 土壤有机质稳定性特征与影响因子研究综述. 土壤通报, 2003, 34 (5): 460-463
- [3] Sollins P, Homnn P, Caldwell BA. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls. Geoderma, 1996, 74: 65-105
- [4] Dinel H, Mehuys GR, Le'vesque M. Influence of humic and fibric materials on the aggregation and aggregate stability of a lacustrine silty soil. Soil Science, 1991, 151: 146-158
- [5] Elliott ET. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50: 627-633
- [6] Pulleman MM, Marinissen JCY. Physical protection of mineralizable C in aggregates from long-term pasture and arable soil. Geoderma, 2004, 120: 273-282
- [7] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展. 土壤学报, 2004, 41 (4): 618-623
- [8] Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil & Tillage Research, 2004, 79: 7-31
- [9] Six J, Callewaert P, Lenders S, Gryze SD. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 1981-1987

- [10] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183
- [11] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Udisols from subtropical China. Geoderma, 2001, 99: 123-145
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 2002: 106-110
- [13] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响. 热带亚热带土壤科学, 1997, 6(3): 198-202
- [14] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模型. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495-1498
- [15] 赖庆旺, 李茶苟, 黄庆海. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究. 土壤学报, 1992, 29(2): 168-173
- [16] 何念祖, 林咸永, 林荣新, 朱炳良, 黄正来, 李马裕, 王宗道, 张悟民. 碳氮磷钾投入量对三熟制稻田土壤肥力的影响. 土壤通报, 1995, 26(7): 5-7
- [17] Adesodun JK, Mbagwu JSC, Oti N. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates of an organic waste amended Ultisol in southern Nigeria. Bioresource Technology, 2005, 96: 509-516
- [18] 马成泽, 周勤, 何方. 不同肥料配合施用土壤有机碳盈亏分布. 土壤学报, 1994, 31(1): 34-4
- [19] 张负申. 不同施肥处理对娄土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响. 河南农业大学学报, 1996, 30(1): 80-84
- [20] Jiang D, Hengsdijk H, Dai TB, Boer DW, Jing Q, Cao WX. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat-maize system in Jiangsu, China. Pedosphere, 2006, 16(1): 25-32
- [21] Six J, Paustain K, Elliot ET, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. Soil Science Society America Journal, 2000, 64: 681-689
- [22] 李江涛, 张斌, 彭新华, 赖涛. 施肥对红壤性水稻土颗粒有机物形成及团聚体稳定性的影响. 土壤学报, 2004, 41(6): 913-917
- [23] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 1982, 62: 141-163

## Effects of Fertilizer Management Practice on Distribution of Aggregates and Content of Organic Carbon and Nitrogen in Red Paddy Soil

GUO Ju-hua, CHEN Xiao-yun, LIU Man-qiang, HU Feng, LI Hui-xin

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** Soil samples were collected from a field that had been under long-term fertilization experiment for 22 years, in the Red Soil Institute of Jiangxi Province in Jinxian County for analysis of effects of fertilization on distribution of aggregates, and organic carbon and nitrogen sequestration in aggregates of different sizes. The experiment had 9 treatments, i.e. ① CK, ② N, ③ P, ④ K, ⑤ NP, ⑥ NK, ⑦ NPK, ⑧ 2NPK and ⑨ NPK+OM. Results showed that organic carbon and nitrogen were mainly sequestered in macroaggregate, 2~0.25 mm in size, and C/N ratio of aggregates decreased with aggregate size. The formation of aggregates in the red paddy soil was closely related with organic carbon content, displaying a phenomenon in conformity with the classical "stratification" mechanism of the aggregate-SOM interactions. The treatments of P, K, NK and NPK+OM prominently increased the content of macroaggregates and stability of aggregates. And the combined treatment of NPK+OM also increased organic carbon and nitrogen concentration in bulk soil and sequestration in aggregates of different sizes.

**Key words:** Long-term fertilizer experiment, Paddy soil, Aggregate stability, Organic carbon and nitrogen