

长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响

黄欠如^{1,2}, 胡 锋¹, 袁颖红¹, 刘满强¹, 李辉信^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 江西红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘 要: 利用干筛法研究了红壤性水稻土连续施肥 23 年后, 各粒径土壤团聚体含量及其特征值变化。结果表明: 施用有机肥 (NPKM、OM) 与 CK 相比, 可提高粒径 3~5 mm 土壤团聚体含量 25.4%~24.6%, 并分别降低粒径 0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量 70.6%~71.1% 和 113.6%~121.7%, 差异达显著水平; 单施化肥处理 (N、NP、NPK) 与 CK 相比, 各粒径土壤团聚体含量无明显差异, 表明施肥对红壤性水稻土团聚体的影响主要受有机肥的控制。施用有机肥显著提高红壤性水稻土团聚体的平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD), 而降低团聚体的分形维 D 值; 水稻土团聚体的 MWD、GMD 与 >3 mm 团聚体含量和水稻年产量存在显著的正相关, 而团聚体分形维 D 值则与 >3 mm 团聚体含量和水稻年产量存在显著的负相关, 因而土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维 D 值可较客观地反映土壤肥力的状态。不同施肥处理的水稻年产量与粒径 3~5 mm 团聚体含量呈显著正相关而与 0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量呈显著负相关, 表明红壤性水稻土团聚体干筛分析条件下, 粒径 3~5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量可作为红壤性水稻土土壤肥力表征的物理性指标。

关键词: 团聚体特征; 红壤性水稻土; 长期施肥; 干筛法

中图分类号: S152.4

土壤团聚体是土壤肥力的中心调节器, 影响土壤的许多物理化学性质。近几十年来, 国内外对土壤团聚体的形成与影响因素等进行了大量的研究。Elliott 等^[1-2]认为大团聚体首先形成, 小团聚体再形成于大团聚体内部的有机质颗粒周围; 或是当有机质分解, 大团聚体破碎后形成小团聚体。Tisdall^[3]和 Lades^[4]则认为大团聚体是微团聚体形成后根系和菌丝的缠绕作用形成的。Mbagwu^[5]研究了耕作措施对土壤团聚体稳定性的影响, 发现耕作使土壤团聚体的稳定性降低, 各级大小团聚体中 N、P 的含量较未耕作土壤低。Wright 等^[6]也研究了不同的耕作管理措施对土壤团聚体稳定性的影响。李映强和曾觉廷^[7]研究了不同耕作制下水稻土有机质及其团聚作用的变化。彭新华等^[8]研究了土壤有机质对土壤水稳性团聚体形成的影响。总之, 土壤团聚的变化是诸多因子影响的综合结果, 但对种植制度相对一致的情况下, 施肥种类是影响土壤物理性质变化的关键因子。种植水稻是我国最主要的农业土地利用方式, 长期以来高量肥料投入和土地集约化利用, 改变了水稻土的结构性质^[9]。不同施肥对红壤性水稻土团聚体及微团聚体影响的研究已有报道^[10-11]。在土壤团聚体研究方法上, 这些研究大多只注

重湿筛法, 而对团聚体的干筛法应用很少。湿筛法研究结果显示土壤团聚体与土壤侵蚀之间存在很强的负相关, 但是湿筛法也存在一些问题, 如土壤团聚体过筛时易受到破坏以及前期处理土样时不破坏土壤团聚体结构很难掌握等^[12-14]。本文采用干筛法, 根据 23 年的长期肥料定位试验, 开展不同施肥对土壤各粒径团聚体的影响研究, 为评价施肥对土壤团聚体影响提供新的尝试。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验地点设在江西省进贤县江西省红壤研究所 (116°20'24" N, 28°15'30" E), 为典型低丘红壤地区 (海拔高度 25~30 m, 坡度 5°)。气候条件优越, 年均雨量 1549 mm, 年蒸发量 1100~1200 mm; 干湿季节明显, 3—6 月为雨季, 降雨量占全年雨量 61%~69%; 7—9 月为旱季, 蒸发量占全年蒸发量的 40%~50%; 无霜期 289 天, 年积温 6480; 年均气温 17.3, 最冷月气温 (1 月) 为 4.6, 极端最低温可达 -10 左右, 并常伴有雨雪或冰冻; 夏季晴旱酷热, 最热月 (7 月) 平均气温一般在 28.0~29.8, 极端最高温达 40 以上; 日照时

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40231016) 资助。

* 通讯作者 (huixinli@njau.edu.cn)

作者简介: 黄欠如 (1966—), 男, 江西樟树人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事土壤生态研究。E-mail: qanruhuang@163.com

数1600 ~ 1900 h。供试土壤为第四纪红黏土发育的水稻土,1981年试验开始时耕层土壤 pH 6.9,有机 C 16.3 g/kg,全 N 1.49 g/kg,全 P 0.48 g/kg,全 K 10.39 g/kg,有效 P (NaHCO₃-P) 4.15 mg/kg,速效 K (NH₄Ac-K) 80.52 mg/kg,黏粒 (<0.001 mm) 241.0 g/kg。

1.2 田间试验设计

稻田肥料定位试验自 1981 年开始,以“稻-稻-冬闲”耕作制为基础,代表区域为红壤丘陵单、双季稻作带。供试早、晚稻品种每 5 年更换 1 次,分别为“红梅早”、“73-07”、“2106”、“华联2号”、“金优64”、“754”、“溪-28”、“威优64”、“晚油3号”和“晚仙923”,实行单产单收。共设 10 个处理,3次重复,小区面积46.67 m²,随机排列。小区间用水泥埂隔开,其地下填深 30 cm,地上 20 cm。本研究择其相关的 6 个处理: CK (不施肥); N; NP; NPK; NPKM; OM。供试肥料有尿素 (N: 90 kg/(hm²·季))、钙镁磷 (P₂O₅:45 kg/(hm²·季))、氯化钾 (K₂O:75 kg/(hm²·季)) 和有机肥 (早稻为紫云英,晚稻为猪粪) (22500 kg/(hm²·季))。有机肥和 P 肥作基肥一次性施用,N 肥和 K 肥在水稻返青期和分蘖盛期按 6:4 比例分 2 次追施。

1.3 测定方法

1.3.1 团聚体颗粒组成 土壤团聚体分离方法是依据 Mendes 等^[12]、Sainju 等^[13]、Schutter 和 Dick^[14]及彭新华等^[15]的方法,并略作修改。采样期为 2003 年 11 月。田间采回的土样 (用硬质铝盒带回),在实验室风干。当土块含水量在室温下风干到土壤塑限 (含水量达 22%~25% 左右) 时,用手轻轻地把大土块沿着自然脆弱带 (failure zone) 扳成不同大小的土壤团聚体,然后在室温条件下风干。把盛有土样的筛子置于摇床 (型号 HY—5A) 上于 270 r/min 的转速下震荡 2 min (根据预备试验结果确定 2 min 足够分离土壤各粒径团聚体),进行干筛 (重复 2 次),分离出 >5 mm、3~5 mm、2~3 mm、1~2 mm、0.5~1 mm、0.25~0.5 mm、0.05~0.25 mm 和 <0.05 mm 土壤团聚体。

1.3.2 团聚体分形特征 描述土壤团聚体分形特征可采用平均重量直径 (mean weight diameter, MWD)、几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD) 以及分形维 (fractal dimension, D) 等^[16-17],其计算公式如下:

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

利用 Katz^[17]的公式表示:

$$V(\delta > d_i) = A \left[1 - \left(\frac{d_i}{k} \right)^{3-D} \right] \quad (3)$$

可以推导出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式^[18]:

$$\frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

因此,取对数后 $\lg \left(\frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right)^{3-D}$ 对 $\lg \frac{W(\delta > \bar{d}_i)}{W_0}$ 和进

行回归分析,即可求出分形维 D 的值。

(1) 和 (2) 式中 MWD 为平均重量,GWD 为几何平均直径, W_i 为平均直径, X_i 为团聚体的重量百分数。

(4) 式中 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间的平均值, $d_{\max}$ 表示最大粒级, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 表示粒级大于 $\bar{d}_i$ 的重量, W_0 表示土壤各粒级重量的总和。

1.4 数据分析

所有试验数据采用 Excel 2000 和 SPSS 11.5 进行计算和统计分析,并采用 LSD 进行不同处理间差异的显著性检验。

2 试验结果

2.1 土壤团聚状况

红壤性水稻土连续施肥 23 年后,对土壤团聚体的含量和构成产生一定的影响 (表 1)。从表 1 可看出,各处理团聚体构成均以 3~5 mm 团聚体含量为最高 (213.2~267.4 g/kg),其次是 >5 mm 团聚体含量 (198.1~239.4 g/kg),<0.05 mm 团聚体含量最低 (11.0~23.5 g/kg)。表明红壤性水稻土耕层土壤团聚体构成以 >3 mm 团聚体为主 (占团聚体总量的 41.1%~50.6%)。相同处理各团聚体含量相比,>5 mm 团聚体含量与 3~5 mm 团聚体含量显著地高于其他粒径的团聚体含量 ($P < 0.05$),但在 CK 处理中 >5 mm 团聚体含量与 3~5 mm 团聚体含量 (分别为 200.1、213.2 g/kg) 相差不明显 ($P < 0.05$, 下同);而在 N、NP、NPK、NPKM、OM 处理中这两级团聚体含量差异均达到了显著性水平。2~3 mm、1~2 mm 和 0.5~1 mm 团聚体含量显著地高于 0.25~0.5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量,但 2~3 mm、1~2 mm 和 0.5~1 mm 团聚体含量在 CK、N、NP、NPK 处理中无明显差异,而 2~3 mm 团聚体含量在 NPKM 及 OM 处理中明显地高于 1~2 mm 和 0.5~1 mm 团聚体含量。0.25~0.5 mm、0.05~0.25 mm 团聚体含量在各处理中均无明显的差异,但显著地高于 <0.05 mm 团聚体含量。

表 1 长期不同施肥处理红壤性水稻土团聚体含量 (g/kg)

Table 1 Effect of fertilizer application on content of soil aggregation in red soil paddy

处理	> 5 mm	3 ~ 5 mm	2 ~ 3 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
CK	200.1 aA	213.2 bA	150.2 aB	141.7 aB	131.2 aB	74.5 aC	65.7 aC	23.5 aD
N	198.1 aB	239.7 abA	153.2 aC	140.6 aC	129.6 aC	63.5 aD	58.3 aD	17.0 abE
NP	199.6 aB	245.0 abA	150.7 aC	132.9 aC	128.9 aC	62.5 aD	61.0 aD	19.4 abE
NPK	204.1 aB	246.9 abA	153.5 aC	136.7 aC	126.2 aC	59.9 aD	57.5 aD	15.2 abE
NPKM	229.6 aB	267.4 aA	155.0 aC	125.3 aD	117.0 aD	56.2 aE	38.5 bE	11.0 bF
OM	239.4 aB	265.7 aA	156.3 aB	121.0 aC	112.9 aD	55.7 aE	38.4 bE	10.6 bF

注：小写字母为同列相比，大写字母为同行相比，字母不同表示差异达 $P < 0.05$ 显著水平 (LSD 法)。

从表 1 中还可看出，各处理中 > 5 mm、3 ~ 5 mm、2 ~ 3 mm 团聚体含量表现出 OM (156.3 ~ 265.7 g/kg) > NPKM (155.0 ~ 267.4 g/kg) > NPK (153.5 ~ 246.9 g/kg) > NP (150.7 ~ 245.0 g/kg) > N (153.2 ~ 239.7 g/kg) > CK (150.2 ~ 213.2 g/kg)，而其他粒级团聚体含量则表现出完全相反的总趋势。方差分析结果显示，各处理对 3 ~ 5 mm、0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm 团聚体含量影响较大，且表现出施有机肥各处理间 (NPKM、OM)、单施化肥各处理间 (N、NP、NPK) 无明显差异。各处理相比，粒径为 3 ~ 5 mm 团聚体含量，各施肥处理间 (N、NP、NPK、NPKM、OM) 无明显差异，但与 CK 相比，施有机肥 (NPKM、OM) 处理粒径 3 ~ 5 mm 团聚体含量增加显著 (分别为 25.4%、24.6%)，单施化肥 (N、NP、NPK) 处理 3 ~ 5 mm 团聚体含量分别提高 12.4%、14.9%、15.8%，但差异不显著。粒径 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体含量，施有机肥处理 (NPKM、OM) 较单施化肥处理 (N、NP、NPK) 和无肥处理 (CK) 分别减少 49.4% ~ 58.9% 和 70.6% ~ 71.1%，均达显著性差异。单施化肥 (N、NP、NPK) 处理 0.05 ~ 0.25 mm 团聚体含量较 CK 低，但差异不显著；施有机肥 (NPKM、OM) 处理 < 0.05 mm 团聚体含量显著低于单施化肥处理 (降低 38.2% ~ 90.0%) 和 CK 处理 (降低 113.6% ~ 121.7%)。

2.2 土壤团聚体分形特征

土壤团聚体是具有分形特征的系统^[18-19]。图 1 ~ 3 分别列出了红壤性水稻土连续施肥 23 年后，耕层土壤团聚体的分形特征。各处理的团聚体 MWD、GMD 表现出 OM (分别为 3.54、1.45) > NPKM (分别为 3.48、1.43) > NPK (分别为 3.23、1.35) > NP (分别为 3.18、1.33) > N (分别为 3.17、1.33) > CK (分别为 3.08、1.28) 的趋势。施有机肥处理 (OM、NPKM) 的团聚体的 MWD、GMD 较单施化肥处理 (N、NP、NPK) 分别高 7.7% ~ 11.7% 和 6.0% ~ 9.4%，较 CK 处理分别提高 13.0% ~ 14.9% 和 11.7% ~ 13.2%，均达到了显著性差

异；施有机肥处理间、单施化肥处理间以及单施化肥处理与 CK 间，团聚体的 MWD 和 GMD 值差异不显著。应用回归分析法计算得到不同处理红壤水稻土团聚体粒径分形维 D 值 (图 3)，施有机肥各处理 D 值在

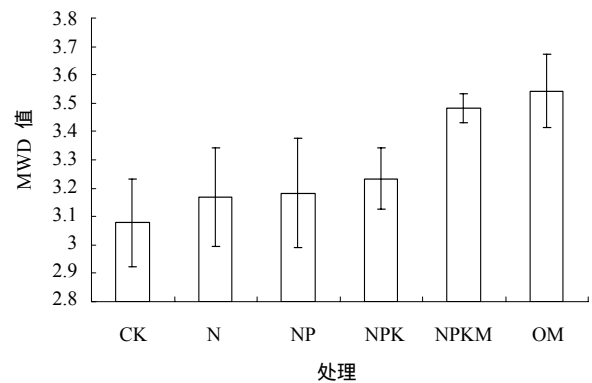


图 1 长期施肥对红壤性水稻土团聚体平均重量直径 (MWD) 的影响

Fig. 1 Effect of long-term fertilization on MWD of soil aggregation in red soil paddy

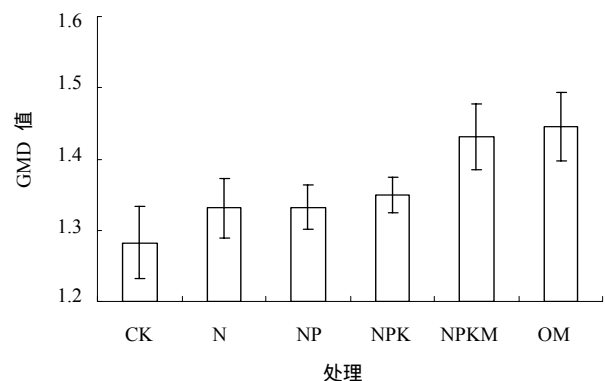


图 2 长期施肥对红壤性水稻土团聚体几何平均直径 (GMD) 的影响

Fig. 2 Effect of long-term fertilization on GMD of soil aggregation in red soil paddy

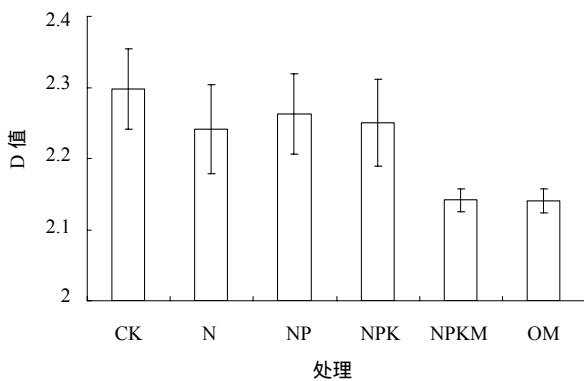


图 3 长期施肥对红壤性水稻土团聚体分形维值 (D) 的影响

Fig. 3 Effect of long-term fertilization on D of soil aggregation in red soil paddy

2.14 ~ 2.15 之间, 单施化肥各处理 D 值在 2.24 ~ 2.26 之间, 而 CK 处理 D 值为 2.30。即施有机肥处理 (NPKM、OM) 土壤团聚体粒径分形维 D 值显著地低于单施化肥处理 (N、NP、NPK) 和 CK 处理, 但 NPKM

与 OM 处理间, 以及 N、NP、NPK 和 CK 处理间差异不显著 (图 3)。

2.3 土壤各团聚体含量、土壤团聚体特征及水稻产量相关分析

表 2 列出了各粒径团聚体含量与土壤团聚体的 MWD、GMD、团聚体粒径分布分形维 D 值及 2003 年的水稻年产量 (数据另文阐述) 之间的相关性。从表中可看出, 土壤团聚体的 MWD、GMD 值与粒径 > 5 mm、3 ~ 5 mm 团聚体含量呈极显著的直线相关 ($P < 0.01$), 而与粒径 1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm 团聚体含量存在显著或极显著负相关; 而粒径分布分形维 D 值则与粒径 1 ~ 2 mm、0.5 ~ 1 mm、0.25 ~ 0.5 mm、0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm 团聚体含量存在显著或极显著的正相关, 与粒径 > 5 mm、3 ~ 5 mm 团聚体含量呈极显著的负相关。从表 2 还可看出, 水稻年产量与粒径 3 ~ 5 mm 团聚体含量呈显著的正相关, 与粒径 0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm 团聚体含量呈显著的负相关。

表 2 土壤各团聚体含量与土壤团聚体特征及水稻产量间相关分析 (n = 18)

Table 2 Correlation analysis of content of soil aggregation with aggregation characteristic and yield of rice in red soil paddy

项目	> 5 mm	3 ~ 5 mm	2 ~ 3 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm	0.05 ~ 0.25 mm	< 0.05 mm
MWD	0.868**	0.679**	0.081	-0.828**	-0.809**	-0.879**	-0.528*	-0.588*
GWD	0.815**	0.766**	0.180	-0.751**	-0.767**	-0.874**	-0.637**	-0.717*
D	-0.876**	-0.633**	-0.040	0.847**	0.813**	0.867**	0.467*	0.526*
产量	0.412	0.604*	0.083	-0.083	-0.421	-0.288	-0.786**	-0.483*

注: *, ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著性差异, 下表同。

土壤团聚体各特征值与水稻年产量相关分析结果表明 (表 3), 土壤团聚体的 MWD 值、GMD 值之间呈极显著正相关, 而它们与水稻年产量互相关存在显著正相关; 土壤团聚体的 MWD 值、GMD 值及水稻年产量与土壤团聚体的分布分形维 D 值存在显著负相关。

表 3 土壤团聚体特征及水稻产量间相关分析

Table 3 Correlation coefficient (r) between aggregation characteristics and yield of rice in red soil paddy

项目	MWD	GWD	D	产量
MWD	1			
GMD	0.995**	1		
D	-0.977**	-0.985**	1	
产量	0.924*	0.888*	-0.892*	1

3 讨论

红壤性水稻土连续施肥 23 年后, 对粒径 3 ~ 5 mm、0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm 团聚体含量影响较明显。由于有机质是土壤团聚体的主要胶结剂^[20-23], 土壤中的大团聚体主要是通过有机残体和菌丝胶结形成的, 小团聚体主要是多糖或无机胶体通过阳离子桥而胶结形成的^[24-26]。< 0.25 mm 微团聚体的形成主要取决于土壤黏粒和活性三氧化物的粘结作用; 而 0.25 ~ 10 mm 大团聚体的形成主要取决于有机胶结物质和土壤黏粒的相互作用^[27]。因此, 在红壤性水稻土上施用有机肥 (NPKM、OM) 可促进土壤小团聚体 (粒径 0.05 ~ 0.25 mm、< 0.05 mm) 向大团聚体 (粒径为 3 ~ 5 mm) 转化 (表 1)。本试验中有机肥对粒径 > 5 mm 的团聚体含量影响不明显, 这可能是与施入土壤中的有机肥的量和频繁耕作有关。本试验中单施化肥各处理 (N、

NP、NPK) 和 CK 处理相比, 各粒径土壤团聚体都无明显差异, 表明施肥对红壤性水稻土团聚体结构的影响主要受有机肥的控制, 化肥的影响不大。

红壤性水稻土施用有机肥可明显提高土壤团聚体的 MWD、GMD 值, 显著降低土壤分形维数值 (图 1~3)。土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维数是反映土壤团粒结构粒径几何形状的参数, 土壤团聚体的 MWD、GMD 值越高, 或土壤团聚体的分布分形维值越低, 表明土壤越具有良好的结构^[28-30]。土壤团聚体各特征值与土壤各粒径团聚体含量间存在显著或极显著的直线关系 (表 2), 说明土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维数均是各粒径土壤团聚体含量的综合反映, 某一粒径团聚体的变化对土壤团聚体的特征都可能产生重要影响。水稻年产量随土壤团聚体各特征值的变化而变化, 呈现出显著的线性关系 (表 3), 表明土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维数值均可较客观地反映土壤肥力的状态, 从而为评价施肥对土壤团聚体的影响提供了新的指标和方法。不同施肥处理的水稻年产量与粒径 3~5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 土壤团聚体含量表现出明显的线性关系 (表 2), 表明红壤性水稻土团聚体干筛分析条件下, 粒径为 3~5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体可为红壤性水稻土土壤肥力的表征提供物理性诊断指标。

4 结论

(1) 红壤性水稻土连续施肥 23 年后, 施用有机肥 (NPKM、OM) 与 CK 相比, 可提高粒径 3~5 mm 的土壤团聚体含量 25.4%~24.6%, 并分别降低粒径 0.05~0.25 mm、<0.05 mm 团聚体含量 70.6%~71.1% 和 113.6%~121.7%, 差异达显著水平; 单施化肥处理 (N、NP、NPK) 与 CK 相比, 各粒径土壤团聚体含量无明显差异, 表明施肥对红壤性水稻土团聚体的影响主要受有机肥的控制, 化肥影响不大。

(2) 土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维数值均是各粒径土壤团聚体含量的综合反映, 某一粒径团聚体的变化对土壤团聚体的特征都可能产生重要影响。红壤性水稻土团聚体的 MWD、GMD 和分形维数值在施用有机肥作用下可明显改善, 且均与水稻年产量存在显著的线性关系, 从而认为土壤团聚体的 MWD、GMD 和分形维数值可较客观地反映土壤肥力的状态。

(3) 不同施肥处理的水稻年产量与粒径 3~5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm 土壤团聚体含量表现出明显的线性关系, 表明红壤性水稻土团聚体干筛分析条件下, 粒径为 3~5 mm、0.05~0.25 mm、<0.05 mm

团聚体可为红壤性水稻土土壤肥力的表征提供物理性诊断指标。

参考文献:

- [1] Elliott ET, Coleman DC. Let the soil work for us. *Ecological Bulletins*, 1988, 39:23-32
- [2] Six J, Paustian K, Elliott ET, Combrink C. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 681-689
- [3] Tisdall JM. Possible role of soil microorganism in aggregation in soils. *Plant Soil*, 1994, 117: 145-153
- [4] Lades JM, Waters AG. Aggregate herarchy in soils. *Australia Journal of soil science*, 1991, 29: 815-828
- [5] Mbagwu JSC. Effects of inoculation with organic substrates on the stability of soil aggregate to water. *Pedologie*, 1989, 39: 159-163
- [6] Wright SF, Starfandl JL, Paltineanu C. Changes in aggregate stability and concentration of glomalin during tillage transition. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63, 1825-1829
- [7] 李映强, 曾觉廷. 不同耕作制度下水稻土有机质变化及其团聚作用. *土壤学报*, 1991, 28(4): 404-409
- [8] 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): 618-622
- [9] 李庆远主编. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 174-175
- [10] 许绣云, 姚贤良, 刘克樱, 黄德凯. 长期施用有机物料对红壤性水稻土的物理性质的影响. *土壤*, 1996, 28(2): 57-61
- [11] 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稳定性的影响. *土壤学报*, 2004, 41(6): 913-917
- [12] Mendes IC, Bandick AK, Dick RP, Bottomley PJ. Microbial biomass and activities in soil aggregates affected by winter cover crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 873-881
- [13] Sainju UM, Terrill TH, Gelaye S, Singh BP. Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizoma peanut and perennial weeds. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67: 146-155
- [14] Schutter ME, Dick RP. Microbial community profiles and activities among aggregates of winter fallow and cover-cropped soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 142-153
- [15] 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): 2177-2183
- [16] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径重量分布表征土壤的分形特征. *科学通报*, 1993, 38 (20): 1896-1899
- [17] Katz AJ, Thompson AH. Fractals and stone pores: Implication for conductivity and poreformation. *Phys. Rev. L.*, 1985, 54 (12): 1325-1328
- [18] Turcotte DL. Fractal fragmentation. *Geography Res.*, 1986, 91 (12): 1921-1926

- [19] Rieu M, Sposito G. Soil Fractal fragmentation, soil porosity and soil water properties. *Application Soil Sci.*, 1991, 55: 1230-1238
- [20] 杨彭年. 石灰性土壤有机质矿质复合体及其团聚性的研究. *土壤学报*, 1984, 21 (2): 144-152
- [21] 姚贤良, 于德芬. 关于集约农作制下土壤结构问题. *土壤学报*, 1985, 22(3): 241-250
- [22] 陈恩凤, 周礼恺, 邱凤琼. 土壤肥力实质的研究. *土壤学报*, 1985, 22(2): 113-119
- [23] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 黄昌勇. 利用方式对土壤水稳性团聚体形成的影响. *土壤学报*, 1997, 34 (4): 34-38
- [24] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163
- [25] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51: 595-605
- [26] Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivation and native grass land soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1367-1377
- [27] 姚贤良, 于德芬. 关于集约农作制下的土壤结构问题: I. 有机物料及其利用方式对土壤结构的影响. *土壤学报*, 1985, 22 (3): 319-327
- [28] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团粒结构的分形特征研究. *土壤学报*, 1999, 36 (2): 162-166
- [29] 张世熔, 邓良基, 周倩, 伍国锋. 耕层土壤颗粒表面的分形维数及其与主要土壤特性的关系. *土壤学报*, 2002, 39(2): 221-226
- [30] 骆东奇, 侯春霞, 魏朝富, 谢德体, 朱波. 旱地紫色土团聚体特征的指标比较. *山地学报*, 2003, 21(3): 348-353

Effects of Long-Term Fertilization on Aggregates Characteristic of Red Paddy Soil

HUANG Qian-ru^{1,2}, HU Feng¹, YUAN Ying-hong¹, LIU Man-qiang¹, LI Hui-xin¹

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

2 Jiangxi Institute of Red Soil, Jinxian, Jiangxi 331717, China)

Abstract: Using the dry sieving method, a study was conducted to investigate effects of long-term (23 years) fertilization on contents and characteristics of soil aggregates in red paddy soil. The long-term fertilization experiment had 6 treatments, i.e. CK (without any fertilization), N (only N fertilizer), NP (combination of N and P fertilizer), NPK (combination of chemical fertilizer), NPKM (combination of chemical fertilizer with manure), and OM (manure). Results showed that content of aggregates of red paddy soil was mainly affected by organic manure. Compared to CK, Treatment NPKM and Treatment OM was 25.4% and 24.6% higher respectively in content of soil aggregates 3~5 mm in size, but 70.6%~71.1% and 113.6%~121.7% lower respectively in content of aggregates 0.05~0.25 mm and <0.05 mm in size. However, there was no obvious difference between Treatment NPK and CK. In addition, the values of MWD (mean weight diameter), GMD (geometric mean diameter) and D (fractal dimension) of soil aggregates in Treatments NPKM and OM all increased dramatically, and it was also found there were significant correlations between the three indexes and crop yield, suggesting that MWD, GMD and D could well cited as indicators of soil fertility. Besides, significant correlations between contents of aggregates 3~5 mm, 0.05~0.25 mm and <0.05 mm in size and crop yields were also observed. It could thus be concluded that these three fractions of aggregates could be used as a good physical indicator to evaluate fertility of red paddy soil.

Key words: Aggregate characteristic, Red paddy soil, Long-term fertilization, Dry-sieving method