

# 长期施肥对小麦-玉米轮作土壤微团聚体组成和分形特征的影响\*

龚伟<sup>1,2</sup> 颜晓元<sup>1†</sup> 蔡祖聪<sup>1</sup> 王景燕<sup>2</sup>

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 四川农业大学林业生态工程省级重点实验室, 四川雅安 625014)

**摘要** 通过对华北平原小麦-玉米轮作农田生态系统 18 a 田间施肥试验, 研究了长期不同施肥处理对耕层 (0~20 cm) 土壤微团聚体组成及分形维数 ( $D$ ) 的影响, 并探讨了特征微团聚体组成比例 (PCM,  $< 20 \mu\text{m}/(250\sim 20) \mu\text{m}$ )、微团聚体测定中  $< 20 \mu\text{m}$  与  $2\ 000\sim 20 \mu\text{m}$  粒级含量的比值 (RMD,  $< 20 \mu\text{m}/(2\ 000\sim 20) \mu\text{m}$ ) 和  $D$  与土壤肥力之间的关系。施肥处理包括化肥 NPK 不同组合 (NPK、NP、NK、PK), 全部施用有机肥 (OM), 1/2 有机肥+化肥 NPK (1/2OMN) 及不施肥 (CK) 共 7 个处理。各施肥处理均能降低土壤 PCM、RMD 和  $D$ , 提高土壤有效养分含量和酶活性。各处理土壤 PCM、RMD 和  $D$  均为 OM 处理最低, 且有机肥与化肥 NPK 配施低于单施化肥各处理, 而化肥处理中 NPK 均衡施用的降低效果最好。土壤 PCM、RMD 和  $D$  与作物产量、有机质和碱解氮含量及酶活性之间相关性较好, 且 PCM、RMD 和  $D$  三者两两之间也具有较好的相关性。说明施用有机肥、有机肥与化肥 NPK 配施及化肥 NPK 均衡施用是改善微团聚体组成、降低 PCM、RMD 和  $D$  及提高土壤保肥和供肥能力的关键; PCM、RMD 和  $D$  均可作为评价长期施肥作物系统土壤肥力的综合性定量指标。

**关键词** 长期施肥; 微团聚体组成; 特征微团聚体; 分形维数; 土壤肥力

**中图分类号** S152.32; S158.5

**文献标识码** A

土壤肥力是土壤的基本属性, 是土壤物理、化学和生物性质的综合反映, 也是影响作物生长发育和产量的关键因素之一<sup>[1]</sup>。土壤肥力的维持和提高从根本上决定了人类生存所需的物质和能量等的获得程度及其可持续性<sup>[2]</sup>。对土壤肥力实质的系统研究表明, 不同粒级的微团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用, 土壤微团聚体及其适宜的组合是土壤肥力的物质基础<sup>[3]</sup>, 其组成密切影响着土壤的保水和供水性能, 是土壤中水分和养分保贮和释供的关键机制, 与土壤肥力水平存在着明显的相关关系, 可以作为衡量土壤肥力的综合指标<sup>[4]</sup>。陈恩凤等<sup>[3]</sup>对我国主要农业土壤大、小粒级土壤微团聚体的组成比例与土壤肥力的关系进行研究时发现, 特征微团聚体组成比例 ( $< 10 \mu\text{m}/(250\sim 10) \mu\text{m}$ ) 能比较综合地反映土壤对于水肥的保供性能, 可作为评断土壤肥力水平的有用指标。龚伟等<sup>[5]</sup>先前对林业土壤微团聚体组成的研究提出, 微团聚体测定中  $< 20 \mu\text{m}$  与  $2\ 000\sim 20 \mu\text{m}$  粒级含量的比值 ( $< 20 \mu\text{m}/(2\ 000\sim 20) \mu\text{m}$ ) 的高低也应该能够用来表征土壤肥力的高低。土壤是具有不规则形状和自相似性的多孔介质, 具有分形特性<sup>[6]</sup>。杨培岭等<sup>[7]</sup>提出用粒径的重量分布取代粒径的数量分布直接计算粒径分布的分形维数, 表征土壤粒径的大小组成和质地组成的均匀程度, 并在一定程度上使其定量化, 是描述土壤结构特征的新方法。目前, 有关长期施肥对土壤特征微团聚体组成比例方面的研究报道较少<sup>[8-10]</sup>, 而有关长期施肥对土壤微团聚体分形特征方面的研究尚未见报道。鉴于此, 本研究以河南省封丘县的中国科学院封丘农业生态国家实验站为平台, 研究长期施肥条件下小麦-玉米轮作系统不同施肥处理土壤微团聚体组成比例、分形维数、养分含量和酶活性变化, 对深入认识土壤性质变化规律与施肥关系, 制定合理的施肥措施与促进农业生态系统可持续发展具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

\*中国科学院知识创新工程重要方向项目 (kzcx2-yw-406-2, kzcx2-yw-312) 资助

†通讯作者

作者简介: 龚伟 (1980-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 博士后, 主要从事土壤生态方面研究工作。E-mail: gongwei@sicau.edu.cn; 电话: 13981601095

收稿日期: 2010-02-20; 收到修改稿日期: 2010-07-25

试验在中国科学院封丘农业生态国家实验站(35°00'N, 114°24'E)内进行。该地区属半干旱、半湿润的暖温带季风气候区,年平均降水量605 mm,主要集中于7月至9月,年蒸发量1 875 mm,年平均气温为13.9℃,无霜期220 d左右。供试土壤为轻壤质黄潮土。试验开始于1989年秋,采用小麦-玉米一年两熟种植方式,土壤耕作和作物收获均采用传统的人工方式进行。试验开始前土壤耕层(0~20 cm)的理化性质为:有机质5.83 g kg<sup>-1</sup>、全氮0.445 g kg<sup>-1</sup>、全磷0.50 g kg<sup>-1</sup>、全钾18.6 g kg<sup>-1</sup>、有效磷1.93 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾78.8 mg kg<sup>-1</sup>和pH8.65,土壤肥力呈缺氮和磷,富钾。试验设7个处理:(1)化学肥料氮磷钾(NPK);(2)有机肥(OM);(3)有机肥料氮和化肥氮各半(1/2OMN);(4)化学肥料氮磷(NP);(5)化学肥料磷钾(PK);(6)化学肥料氮钾(NK);(7)不施肥(CK,对照),每处理重复4次。小区面积47.5 m<sup>2</sup>。完全的化肥(NPK)处理,每季小麦肥料用量,尿素N 150 kg hm<sup>-2</sup>,过磷酸钙P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg hm<sup>-2</sup>,硫酸钾K<sub>2</sub>O 150 kg hm<sup>-2</sup>;每季玉米肥料用量,尿素N 150 kg hm<sup>-2</sup>,过磷酸钙P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 60 kg hm<sup>-2</sup>,硫酸钾K<sub>2</sub>O 150 kg hm<sup>-2</sup>。每季作物,NPK、OM和1/2OMN处理施用的氮磷钾养分量相同,有机肥处理中磷和钾不足部分以化肥磷和钾补充,NP、PK和NK处理与NPK处理相比只少施了氮磷钾养分中相应的某一肥料,其余相同。有机肥由粉碎的小麦秸秆、大豆饼和棉籽饼按100:40:45比例混合,经2月的堆制发酵而成,依据有机肥中氮含量确定有机肥用量<sup>[11]</sup>,OM和1/2OMN处理有机肥施用量分别为2 758 kg hm<sup>-2</sup>和1 379 kg hm<sup>-2</sup><sup>[12]</sup>。

## 1.2 样品采集与测定

于2007年小麦收割后,在每个试验小区内采用蛇形五点取样法取表层土壤(0~20 cm)进行混合,土样带回实验室自然风干后,测定土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量,蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性,以及微团聚体组成和颗粒组成。测定方法:碱解氮采用碱解-扩散法;有效磷采用0.5 mol L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用1 mol L<sup>-1</sup> 乙酸铵浸提-火焰光度法<sup>[13]</sup>;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法;磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法;脲酶采用靛酚蓝比色法<sup>[14]</sup>;土壤微团聚体组成和颗粒组成均采用吸管法<sup>[13]</sup>。土壤团聚度=(>0.05 mm 微团聚体分析值->0.05 mm 机械组成分析值)/>0.05 mm 机械组成分析值<sup>[15]</sup>。

陈恩凤等<sup>[16]</sup>以10 μm为界划分大、小级别的微团聚体,并将它们称为特征微团聚体。微团聚体组成的测定方法与土壤颗粒组成方法相似,土壤粒级划分方案包括国际制、美国制、前苏联制和中国制<sup>[17]</sup>。因此,以10 μm为界的特征微团聚体的划分便不适用于应用国际制和美国制土粒划分所获土壤微团聚体粒径分布研究。因此,本文拟采用先前报道的方法,以20 μm为界划分大、小级别的团聚体<sup>[5]</sup>,并以此计算特征微团聚体组成比例(PCM, <20 μm/(250~20) μm)及微团聚体测定中<20 μm与2 000~20 μm粒级含量的比值(RMD, <20 μm/(2 000~20) μm),此方法适用于应用国际制和美国制土粒划分所获土壤微团聚体粒径分布研究。

不同施肥处理2007年小麦收割后土壤有机质含量、颗粒组成及其他物理性质参见文献[18],历年作物平均产量参见文献[19]。文中数据统计和分析采用SPSS10.0软件,不同施肥处理土壤各变量之间的显著性检验采用单因子方差分析(ANOVA)和最小显著极差法(SSR)。

## 1.3 分形维数模型

参照文献[5,7,20]。具有自相似结构的多孔介质——土壤,由大于某一粒径 $d_i$ ( $d_i > d_{i+1}$ ,  $i = 1, 2, \dots$ )的土粒构成的体积 $V(\delta > d_i)$ 可由类似Katz的公式表示:

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

式中, $\delta$ 为码尺,A、k为描述形状、尺度的常数。

通常粒径分析资料是由一定粒径间隔的颗粒重量分布表示的,以 $\bar{d}_i$ 表示两筛分粒级 $d_i$ 与 $d_{i+1}$ 间粒径的平均值,忽略各粒级间土粒比重 $\rho$ 的差异,即 $\rho_i = \rho$ ( $i = 1, 2, \dots$ ),则:

$$W(\delta > \bar{d}_i) = V(\delta > \bar{d}_i) \rho = \rho A [1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D}] \quad (2)$$

式中, $W(\delta > \bar{d}_i)$ 为大于 $\bar{d}_i$ 的累积土粒重量。以 $W_0$ 表示土壤各粒级重量的总和,由定义有 $\lim_{i \rightarrow \infty} \bar{d}_i = 0$ ,则由式(2)得:

$$W_0 = \lim_{i \rightarrow \infty} W(\delta > \bar{d}_i) = \rho A \quad (3)$$

由式(2)和式(3)导出:

$$W(\delta > \bar{d}_i)/W_0 = 1 - (\bar{d}_i/k)^{3-D} \quad (4)$$

设  $\bar{d}_{\max}$  为最大粒级土粒的平均直径,  $W(\delta > \bar{d}_{\max}) = 0$ , 代入式(4)有  $k = \bar{d}_{\max}$ 。由此得出土壤颗粒的重量分布与平均粒径间的分形关系式:

$$W(\delta > \bar{d}_i) / W_0 = 1 - (\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})^{3-D} \quad (5)$$

或  $(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})^{3-D} = W(\delta < \bar{d}_i) / W_0 \quad (6)$

对上式两边取对数, 即得:

$$(3-D) \lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max}) = \lg[W(\delta < \bar{d}_i) / W_0] \quad (7)$$

分别以  $\lg(W_i / W_0)$ 、 $\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})$  为纵、横坐标, 不难看出  $3-D$  是  $\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{\max})$  和  $\lg(W_i / W_0)$  的实验直线的斜率,  $D$  为土壤分形维数。因此, 测定  $D$  即可用回归分析方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤微团聚体组成

土壤微团聚体是有机-无机复合体经过多次聚合而形成, 以不同粒级微团聚体的形式组合在土体内。土壤微团聚体的形成依赖于土壤管理水平, 长期培肥能使土壤有机质呈不同程度的积累, 这必然对微团聚体形成有一定改善作用。由表 1 可知, 各处理 250~50  $\mu\text{m}$ 、50~20  $\mu\text{m}$ 、20~2  $\mu\text{m}$  和 <2  $\mu\text{m}$  微团聚体含量分别为 49.46%~52.95%、30.83%~35.72%、6.183%~13.23% 和 3.707%~5.464%。与 CK 处理的相比, 各施肥处理的 <2  $\mu\text{m}$  和 20~2  $\mu\text{m}$  粒级含量分别降低 8.1%~32.2% 和 4.2%~53.2%, 两者含量除 PK 和 NK 处理的以外其他施肥处理的均与 CK 处理的达到显著差异水平; 相反, 各施肥处理的 50~20  $\mu\text{m}$  和 250~50  $\mu\text{m}$  粒级含量分别增加 1.9%~15.9% 和 0.6%~7.1%, 50~20  $\mu\text{m}$  粒级含量除 OM、1/2OMN 和 NPK 处理的以外其他施肥处理的均与 CK 处理的无显著差异性, 250~50  $\mu\text{m}$  粒级含量除 OM 处理的以外其他施肥处理的均与 CK 处理的无显著差异性。说明 250~50  $\mu\text{m}$  粒级含量是微团聚体组成的主体, 其次是 50~20  $\mu\text{m}$  粒级含量, 施肥有利于 >20  $\mu\text{m}$  粒级微团聚体含量的增加和 <20  $\mu\text{m}$  粒级微团聚体含量的降低。

施肥对特征微团聚体组成比例 (PCM, <20  $\mu\text{m}$ /(250~20)  $\mu\text{m}$ ) 和微团聚体测定中 <20  $\mu\text{m}$  与 2 000~20  $\mu\text{m}$  粒级含量的比值 (RMD, <20  $\mu\text{m}$ /(2 000~20)  $\mu\text{m}$ ) 影响显著 (表 1)。与 CK 处理的相比, OM 和 1/2OMN 处理的 PCM 值分别降低 51.9% 和 43.3%, NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别降低 36.5%、25.3%、12.0% 和 6.4%, 除 PK 和 NK 处理的以外其他施肥处理的均显著低于 CK 处理的, OM 处理的显著低于化肥处理的 (NPK、NP、PK 和 NK); OM 和 1/2OMN 处理的 RMD 值分别降低 52.2% 和 43.9%, NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别降低 36.5%、25.7%、12.6% 和 6.5%, 除 NK 处理的以外其他施肥处理的均显著低于 CK 处理的, OM 处理的显著低于化肥处理的。

团聚度是指小的土壤颗粒中发生团聚作用, 转化为更大的团聚体的百分数, 是表征土壤结构、土壤抗蚀性的一个重要的指标。团聚度越大, 团聚体越多, 保水保肥的能力也相应越强<sup>[21]</sup>。与 CK 处理的土壤团聚度相比, OM 和 1/2OMN 处理的分别增加 208.1% 和 142.7%, NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别增加 121.1%、104.6%、72.2% 和 30.5%, 除 NK 处理的以外其他施肥处理的均显著高于 CK 处理的, OM 处理的显著高于化肥处理的。因此, 不同处理团聚度的差异说明长期施肥所导致的土壤保水保肥能力的差异。

表 1 施肥对微团聚体组成和分形维数的影响

Table 1 Effects of fertilization on composition and fractal dimension of soil micro-aggregates

处理 Treatment	粒径含量 Distribution of soil particle-size (%)					RMD	PCM	团聚度 <sup>①</sup> (%)	分形维数 <sup>②</sup>	相关系数 <sup>③</sup>
	2 000~250 $\mu\text{m}$	250~50 $\mu\text{m}$	50~20 $\mu\text{m}$	20~2 $\mu\text{m}$	<2 $\mu\text{m}$					
OM	1.847a	52.95a	35.31a	6.183d	3.707d	0.110e	0.112d	20.18a	2.479e	0.942**
1/2OMN	1.691ab	51.16ab	35.72a	7.154cd	4.268c	0.129de	0.132cd	15.90b	2.504d	0.930**
NPK	1.616ab	50.46ab	35.24a	8.180bc	4.499bc	0.146cd	0.148bc	14.48bc	2.515cd	0.944**
NP	1.557ab	50.21ab	33.66ab	9.765b	4.800bc	0.171c	0.174b	13.40bc	2.529bc	0.947**
PK	1.531b	50.06ab	31.67b	11.727a	5.006ab	0.201b	0.205a	11.28cd	2.548ab	0.949**
NK	1.119c	49.76b	31.41b	12.672a	5.022ab	0.215ab	0.218a	8.55de	2.543ab	0.949**
CK	1.021c	49.46b	30.82b	13.225a	5.464a	0.230a	0.233a	6.55e	2.552a	0.949**

①Degree of aggregation, ②Fractal dimension, ③Correlation coefficient. 同列不同字母表示处理间差异显著 ( $p < 0.05$ ) Different

letters within the same column mean significant difference among treatments at 0.05 level; \*\* $p < 0.01$ . 下同 The same below

## 2.2 土壤微团聚体分形维数

运用回归分析方法, 计算出不同处理土壤微团聚体分形维数 ( $D$ ) 在 2.479~2.552 之间, 其回归分析的相关系数在 0.930 以上, 均达到极显著线性相关 (表 1)。土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数, 表现出黏粒含量越高、质地越细、分形维数越高, 除了黏粒含量对土壤颗粒粒径分布的分形维数影响很大外, 单一粒级的集中程度对分形维数也会产生重要的影响<sup>[20]</sup>。因此, 对各粒级含量 ( $X$ ) 与  $D$  进行回归分析, 其关系式如下: 250~50  $\mu\text{m}$ ,  $D=2.941-0.008X$  ( $r=-0.589, p < 0.01$ ); 50~20  $\mu\text{m}$ ,  $D=2.728-0.0061X$  ( $r=-0.626, p < 0.01$ ); <20  $\mu\text{m}$ ,  $D=2.414+0.0075X$  ( $r=0.926, p < 0.01$ ); 20~2  $\mu\text{m}$ ,  $D=2.438+0.0087X$  ( $r=0.899, p < 0.01$ ); <2  $\mu\text{m}$ ,  $D=2.332+0.0411X$  ( $r=0.942, p < 0.01$ )。分形维数与 <20  $\mu\text{m}$ 、20~2  $\mu\text{m}$ 、<2  $\mu\text{m}$  粒级含量之间呈极显著正相关, 而与 250~50  $\mu\text{m}$ 、50~20  $\mu\text{m}$  粒级含量呈极显著负相关, 说明 20~2  $\mu\text{m}$  和 <2  $\mu\text{m}$  粒级含量越高  $D$  值越大。与 CK 处理的相比, 施肥处理的  $D$  值降低较少为 0.4%~2.9%, 除 PK 和 NK 处理的以外其他施肥处理的均显著低于 CK 处理的, 且 OM 处理的均显著低于化肥处理的。施肥导致  $D$  值降低原因与施肥提高有机质胶体含量促进小粒级微团聚体胶结形成大粒级微团聚体或团聚体有关。

## 2.3 土壤有效养分含量

土壤矿物质是土壤的骨骼, 碳、氮、磷和钾等元素的含量状况不仅能够反映土壤的总体肥力, 而且是评价管理措施优劣的主要指标, 还可以阐明土壤对植物营养成分的供应状况<sup>[22]</sup>。土壤碱解氮包括无机的矿物态氮和部分有机物质中易分解的、比较简单的有机态氮, 能反映出近期土壤氮素的供应状况, 有效磷含量是衡量土壤磷素供应状况的较好的指标, 速效钾是植物根系吸收的直接钾素供应源<sup>[23]</sup>。由表2可知, 与 CK处理的相比, OM和1/2OMN处理的碱解氮含量分别增加161.7%和97.0%, NPK、NP、PK和NK处理的分别增加52.7%、39.5%、28.6%和10.5%, 除NK处理的外, 其他施肥处理的均显著高于CK处理的, 有机肥处理(OM和1/2OMN)的显著高于化肥处理的; OM和1/2OMN处理的有效磷含量分别增加752.2%和608.7%, NPK、NP、PK和NK处理的分别增加504.3%、452.2%、1943%和8.7%, 除NK处理的以外其他施肥处理的均显著高于CK处理的, PK处理的显著高于有机肥处理和其他化肥处理; OM和1/2OMN处理的速效钾含量分别增加207.7%和179.6%, NPK、NP、PK和NK处理的分别增加210.5%、15.1%、369.2%和418.5%, 除NP处理的外, 其他施肥处理的均显著高于CK处理的, NK和PK处理的显著高于有机肥处理和其他化肥处理。说明施肥有利于土壤有效养分含量增加。

表 2 施肥对土壤养分含量和酶活性的影响

Table 2 Effects of fertilization on soil nutrient content and enzyme activity

处理 Treatment	有机质 Organic matter ( $\text{g kg}^{-1}$ )	碱解氮 Hydrolysis N ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	有效磷 Available P ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	速效钾 Available K ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	蔗糖酶 Invertase ( $\text{glucose mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	脲酶 Urease ( $\text{NH}_3\text{-N mg g}^{-1} \text{d}^{-1}$ )	磷酸酶 Phosphatase ( $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ mg } 100\text{g}^{-1} 2\text{h}^{-1}$ )
OM	16.21a	86.9a	19.6b	164.6c	29.0a	0.357a	8.36a
1/2OMN	12.34b	65.4b	16.3bc	149.6d	25.0b	0.290b	6.52b
NPK	9.63c	50.7c	13.9c	166.1c	22.1c	0.241c	5.26c
NP	8.98cd	46.3cd	12.7c	61.6e	21.0c	0.238c	4.64d
PK	8.36de	42.7d	47.0a	251.0b	18.1d	0.221c	4.08e
NK	7.30ef	36.7e	2.5d	277.4a	17.1d	0.214c	3.85e
CK	6.75f	33.2e	2.3d	53.5e	16.2d	0.177d	3.74e

## 2.4 土壤酶活性

土壤酶是土壤的组成成分之一, 数量虽少, 但作用很大, 并且作为表征土壤肥力的一个重要指标, 与土壤的环境条件也有着密切联系<sup>[24]</sup>。由土壤微生物生命活动和植物根系产生的土壤酶, 不但在土壤物质转化和能量转化过程中起主要的催化作用, 而且通过它对进入土壤的多种有机物质和有机残体产生的生命化学转化, 使生态系统的各组分间有了功能上的联系<sup>[25]</sup>。由表 2 可知, 与 CK 处理的相比, OM 和 1/2OMN 处理的蔗糖酶分别增加 79.0% 和 54.3%, NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别增加 36.4%、29.6%、11.7% 和 5.6%, 除 PK 和 NK 处理的以外, 其他施肥处理均显著高于 CK 处理的, 且有机肥处理的显著高于化肥处理的; OM 和 1/2OMN 处理的脲酶分别增加 101.7% 和 63.8%, NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别增加 36.2%、

34.5%、24.9%和 20.9%，施肥处理的均显著高于 CK 处理的，且有机肥处理的显著高于化肥处理的；OM 和 1/2OMN 处理的磷酸酶分别增加 123.5%和 74.3%，NPK、NP、PK 和 NK 处理的分别增加 40.6%、24.1%、9.1%和 2.9%，除 PK 和 NK 处理的外，其他施肥处理的均显著高于 CK 处理的，且有机肥处理的显著高于化肥处理的。不同处理土壤酶活性均表现出相同的变化规律，施肥有利于增加土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性，其中施用有机肥的效果显著优于施用化肥。

## 2.5 相关性分析

由表 3 可知，不同处理土壤 PCM、RMD 及 *D* 三者两两之间均呈极显著正相关；PCM、RMD 和 *D* 与作物历年平均产量(小麦+玉米)、土壤有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶之间呈极显著负关系，而与有效磷和速效钾之间相关性较低且未达显著水平。说明 PCM、RMD 和 *D* 随作物产量、土壤有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性的增加而降低。

表 3 土壤微团聚体组成和分形维数与有效养分、酶活性及作物历年平均产量的线性关系( $n=28$ )

Table 3 Linear relationship of the composition and fractal dimension of micro-aggregates with available nutrients, enzyme activity and mean annual crop yield

项目 Item	产量 <sup>①</sup>	有机质 <sup>②</sup>	碱解氮 <sup>③</sup>	有效磷 <sup>④</sup>	速效钾 <sup>⑤</sup>	蔗糖酶 <sup>⑥</sup>	脲酶 <sup>⑦</sup>	磷酸酶 <sup>⑧</sup>	PCM	RMD
PCM	-0.810**	-0.792**	-0.842**	-0.155	0.071	-0.853**	-0.785**	-0.838**	1.000	1.000**
RMD	-0.812**	-0.797**	-0.845**	-0.163	0.067	-0.856**	-0.789**	-0.840**	1.000**	1.000
分形维数 <sup>⑨</sup>	-0.691**	-0.845**	-0.873**	-0.034	0.057	-0.877**	-0.822**	-0.884**	0.919**	0.919**

①Crop yield, ②Organic matter, ③Hydrolysis N, ④Available P, ⑤Available K, ⑥Invertase, ⑦Urease, ⑧Phosphatase, ⑨Fractal dimension. \*\* $p < 0.01$

## 3 讨论

土壤微团聚体在表征土壤肥力方面具有不可忽视的作用，施肥和土地利用方式是影响土壤微团聚体组成的主要因素。不同施肥制度下，由于有机胶结物质的频繁形成与分解，使大、小粒级微团聚体处于动态的相互转化过程中。陈利军等<sup>[2]</sup>和陈恩凤等<sup>[3]</sup>的研究发现，土壤培肥措施可使肥、瘦地特征微团聚体的比例降低，并提出土壤特征微团聚体的比例更能从本质上反映土壤的自然特性及其对外界因子变化的响应，因此更适用于作为表征土壤肥力水平及培肥效果评价的综合指标。不同学者就长期施用有机肥或有机肥与化肥配施对土壤特征微团聚体组成比例( $<10 \mu\text{m}/(250\sim 10) \mu\text{m}$ )的影响作用的研究结果较一致，即长期施用有机肥或有机肥与化肥配施能降低土壤特征微团聚体组成比例，且降低作用优于长期单施化肥<sup>[8-10]</sup>。但长期施用化肥对土壤特征微团聚体组成比例影响作用的研究结果不尽相同，韩志卿等<sup>[10]</sup>和邱莉萍等<sup>[8]</sup>的研究发现，与不施肥对照相比，长期施用化肥也能降低土壤特征微团聚体组成比例；而张靓等<sup>[9]</sup>的研究发现，与不施肥对照相比，长期施用化肥各处理使土壤特征微团聚体比值没有发生根本改变。本研究结果表明，长期施肥能降低 PCM 及 RMD，其降低效果有机肥处理优于化肥处理。这一结果与韩志卿等<sup>[10]</sup>和邱莉萍等<sup>[8]</sup>的研究结果相同。有机胶结物的增加是形成和维持土壤结构的主要方面，土壤有机质水平的提高有利于土壤良好结构的形成和土壤稳定性的提高<sup>[26]</sup>。本研究中，长期施肥直接或间接地影响了作物生长和土中微生物的活动，提高了土壤有机质含量 ( $\text{OM} > 1/2\text{OMN} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{PK} > \text{NK} > \text{CK}$ )，产生更多的土壤有机胶结物质，增加了小粒级微团聚体的团聚度，从而使得  $<20 \mu\text{m}$ 、 $20\sim 2 \mu\text{m}$  和  $<2 \mu\text{m}$  粒级含量降低，而  $250\sim 20 \mu\text{m}$  和  $2000\sim 20 \mu\text{m}$  粒级含量增加，相应的  $<20 \mu\text{m}$  粒级含量与  $250\sim 20 \mu\text{m}$  和  $2000\sim 20 \mu\text{m}$  粒级含量的比值降低，同时土壤微团聚体分形维数也降低。这应该是导致不同施肥处理土壤微团聚体组成和分形维数差异的主要原因。因此，施肥，尤其是有机肥，有利于增加土壤微团聚体的团聚度，使不同粒级微团聚体的比例更趋合理，进而提高土壤水肥调控能力和土壤肥力水平。

自吴承桢等<sup>[20]</sup>提出分形维数是较为理想的土壤物理肥力指标之后，许多学者对土壤团聚体及颗粒分形维数与土壤肥力指标间的关系进行了研究，但对微团聚体分形维数(*D*)与土壤肥力指标间关系的研究报道较少，且研究结果不尽一致。对 *D* 与土壤养分含量、微生物数量和酶活性的相关分析，廖咏梅等<sup>[27]</sup>发现，人为干扰下针叶林 *D* 与土壤有机质呈负相关，仅与 A 层土壤相关性达到显著水平；龚伟等<sup>[5]</sup>发现，天然林及其更新后的人工林 *D* 与有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和微生物数量呈显著负相关；张昌顺等<sup>[28]</sup>发现，毛竹林 *D* 与有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、蛋白酶和微生物数量呈显著负相关；周萍等<sup>[29]</sup>发现，不同恢复年限草地 *D* 与有机质、全氮、碱解氮和硝态

氮呈负相关, 仅与有机质的相关性达到显著水平, 与全磷、速效钾和铵态氮呈正相关, 仅与全磷达到显著水平。有关特征微团聚体组成比例与土壤肥力指标间的关系研究报道也较少, 张靓等<sup>[9]</sup>发现, 特征微团聚体组成比例( $<10\ \mu\text{m}/(250\sim 10)\ \mu\text{m}$ )与有机质呈极显著负相关; 韩志卿等<sup>[10]</sup>发现, 特征微团聚体组成比例与容重呈极显著正相关。本研究结果发现, 土壤  $D$ 、PCM 和 RMD 与作物产量、土壤有机质、碱解氮、蔗糖酶、脲酶和磷酸酶之间呈极显著负相关( $p<0.01$ ), 而与有效磷和速效钾之间相关性较低且未达显著水平。导致这一现象的原因与土壤本身缺氮少磷, 及长期不平衡施肥导致的作物因 PK 处理氮素亏缺和 NK 处理磷素缺而产量较低, 使化学磷肥及钾肥过多集聚于土壤中引起有效磷和速效钾含量较高有关。鉴于此, 去掉 PK 处理只对其他处理进行分析发现,  $D$ ( $r=-0.764, p<0.01$ )、PCM( $r=-0.796, p<0.01$ )和 RMD( $r=-0.798, p<0.01$ )与有效磷呈极显著负相关; 去掉 PK 和 NK 处理只对其他处理进行分析发现,  $D$ ( $r=-0.849, p<0.01$ )、PCM( $r=-0.907, p<0.01$ )和 RMD( $r=-0.911, p<0.01$ )与速效钾呈极显著负相关。但早期陈利军等<sup>[2]</sup>的研究发现, 作物产量与特征微团聚体比值之间无显著的相关关系。这可能与土壤生产力水平受气候、土壤条件等诸多因素的影响有关。

本研究结果说明长期施肥条件下  $D$ 、PCM 和 RMD 在作为土壤肥力诊断指标等方面具有很好的应用潜力。 $D$ 、PCM 和 RMD 愈低, 表征土壤肥力越高。因此,  $D$ 、PCM 和 RMD 可作为定量化描述长期施肥条件下土壤肥力状况的尺度。由于受土壤扰动及有机质胶结作用强弱的不同, 微团聚体组成分析中  $>250\ \mu\text{m}$  粒级含量差异较大, 据报道林业土壤一般为  $0\%\sim 57.6\%$ , 则  $<250\sim 0\ \mu\text{m}$  粒级含量为  $42.4\%\sim 100\%$ <sup>[5,16,28]</sup>; 农业土壤一般为  $0\%\sim 31.5\%$ , 则  $<250\sim 0\ \mu\text{m}$  粒级含量为  $68.5\%\sim 100\%$ <sup>[8-10]</sup>。在土壤扰动轻及有机质胶体含量高的土壤中, 大( $250\sim 10\ \mu\text{m}$  或  $250\sim 20\ \mu\text{m}$ )、小( $<10\ \mu\text{m}$  或  $20\ \mu\text{m}$ ) 粒级微团聚体均有利于形成团聚体( $>250\ \mu\text{m}$ ), 与此同时可能会对特征微团聚体组成比例( $<10\ \mu\text{m}/(250\sim 10)\ \mu\text{m}$  或 PCM)产生不确定的影响, 而对微团聚体分形维数( $<1\ \mu\text{m}$  或  $2\ \mu\text{m}$  粒级含量越低,  $D$  值越低)和  $<10\ \mu\text{m}/(2\ 000\sim 10)\ \mu\text{m}$  或 RMD( $<10\ \mu\text{m}$  或  $<20\ \mu\text{m}$  粒级含量越低, 其比值越低)产生的影响相对较确定。因此, 特征微团聚体组成比例的应用范围有待进一步的研究。

## 4 结 论

18 a 长期施肥后, 与不施肥处理相比, 化肥 NPK 两者或三者之间配施均可降低 PCM、RMD 和  $D$ , 以 NPK 均衡施用最低, NP 次之, PK 和 NK 较高; 与施用化肥相比, 有机肥及有机肥与化肥 NPK 配施对降低 PCM、RMD 和  $D$ , 以及增加微团聚体胶结物质有机质含量的效果更好, 并以完全施用有机肥效果最佳。PCM、RMD 和  $D$  与作物产量、养分含量及酶活性相关性较好, 可以表征长期不同施肥措施对土壤肥力的影响。

## 参考文献

- [1]杨瑞吉, 杨祁峰, 牛俊义. 表征土壤肥力主要指标的研究进展. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(1): 86-91. Yang R J, Yang Q F, Niu J Y. Research progress on soil fertility major indexes (In Chinese). Journal of Gansu Agricultural University, 2004, 39(1): 86-91
- [2]陈利军, 周礼恺. 土壤保肥-供肥机理及其调节IV. 棕壤型菜园土肥力的调节与培育及其作用实质. 应用生态学报, 2000, 11(4): 532-534. Chen L J, Zhou L K. Mechanism of nutrient preservation and supply by soil and its regulation IV. Fertility regulation and improvement of brown earth type vegetable garden soil and their essence (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 532-534
- [3]陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. 土壤学报, 2001, 38(1): 49-53. Chen E F, Guan L Z, Wang J K, et al. Compositional proposition of soil characteristic microaggregates and soil fertility evaluation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1): 49-53
- [4]沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤肥力及其评价指标. 水土保持学报, 2000, 14(2): 15-20. Shen H, Jiang F Q, Du X J, et al. Study on soil fertility of water and soil conservation forest and its evaluation indexes (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(2): 15-20
- [5]龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤微团聚体分形特征研究. 土壤学报, 2007, 44(3): 571-575. Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Fractal features of soil microaggregates in soils under natural and regenerated evergreen broadleaved forests in south Sichuan Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 571-575
- [6]龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤团聚体结构的分形特征. 植物生态学报, 2007, 31(1): 56-65. Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Study on fractal features of soil aggregate structure under natural evergreen broadleaved forest and artificial regenerations in southern Sichuan Province (In Chinese). Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 56-65
- [7]杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征. 科学通报, 1993, 38(20): 1 896-1 899. Yang P L, Luo Y P,

- Shi Y C. Fractal feature of soil on expression by weight distribution of particle size (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1 896–1 899
- [8]邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶分布. 生态学报, 2006, 26(2): 364–372. Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364–372
- [9]张靓, 梁成华, 杜立宇, 等. 长期定位施肥条件下蔬菜保护地土壤微团聚体组成及有机质状况分析. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 331–335. Zhang L, Liang C H, Du L Y, et al. Effects of long-term localized fertilization on soil micro-aggregate composition and organic matter in sheltered vegetable field (In Chinese). Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(3): 331–335
- [10]韩志卿, 张电学, 王秋兵, 等. 不同施肥制度下褐土微团聚体有机碳活性变化. 水土保持学报, 2008, 22(4): 138–142. Han Z Q, Zhang D X, Wang Q B, et al. Changes of organic carbon activity in cinnamon soil micro-aggregates under different fertilization regimes (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 138–142
- [11]钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报. 土壤学报, 1998, 35(3): 367–375. Qin S W, Gu Y C, Zhu Z L. A preliminary report on long-term stationary experiment on fertility evolution of fluvo-aquic soil and the effect of fertilization (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(3): 367–375
- [12]Ding W, Meng L, Yin Y, et al. CO<sub>2</sub> emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 669–679
- [13]中国标准出版社. 中国林业标准汇编: 营造林卷. 北京: 中国标准出版社, 1998. Standards Press of China. The collection of China forestry standardization afforestation volume (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1998
- [14]关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. Guan S Y. Soil enzyme and its study methods (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [15]张希彪, 上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响. 生态学报, 2006, 26(11): 3 686–3 695. Zhang X B, Shangguna Z P. Effect of human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3 686–3 695
- [16]陈恩风, 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. 土壤学报, 1994, 31(1): 18–28. Chen E F, Zhou L K, Wu G Y. Performances of soil microaggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1994, 31(1): 18–28
- [17]鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 272–288. Lu R K. Analytical methods for Soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 272–288
- [18]龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对华北小麦-玉米轮作土壤物理性质和抗蚀性影响研究. 土壤学报, 2009, 46(3): 520–525. Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical properties and erosion-resistance under wheat-maize rotation system in North China Plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 520–525
- [19]龚伟, 颜晓元, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对小麦-玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响. 应用生态学报, 2008, 19(11): 2 375–2 381. Gong W, Yan X Y, Cai Z C, et al. Effects of long-term fertilization on soil particulate organic carbon and nitrogen in a wheat-maize cropping system (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(11): 2 375–2 381
- [20]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): 162–167. Wu C Z, Hong W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 162–167
- [21]刘玉民, 龙伟, 刘亚敏, 等. 不同种植模式下紫色土养分流失影响因子研究. 水土保持学报, 2005, 19(5): 27–30. Liu Y M, Long W, Liu Y M, et al. Study on influencing factors of nutrient loss under different land use patterns in purple soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 27–30
- [22]汪景宽, 于树, 李丛, 等. 不同肥力土壤各级微团聚体中主要营养元素含量的变化. 水土保持学报, 2007, 21(6): 320–323. Wang J K, Yu S, Li C, et al. Contents of main nutrient elements in varied levels of micro-aggregates of different soils (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 320–323
- [23]龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. 生态学报, 2008, 28(6): 2 536–2 545. Gong W, Hu T X, Wang J Y, et al. Soil carbon pool and fertility under natural evergreen broadleaved forest and its artificial regeneration forests in southern Sichuan Province (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2 536–2 545
- [24]Acosta-Martinez V, Zobeck T M, Gill T E, et al. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils (In Chinese). Biology and Fertility of Soils, 2003, 38: 216–227
- [25]Badiane N N Y, Chotte J L, Pate E, et al. Use of soil enzymes to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions (In Chinese). Applied Soil Ecology, 2001, 18: 229–238
- [26]柳云龙, 吕军, 王人潮, 等. 低丘侵蚀红壤垦种绿化后土壤结构、养分积聚和持水性能. 水土保持学报, 2000, 14(4): 79–82, 98. Liu Y L, Lu J, Han X F, et al. Soil structure, nutrient accumulation and water retention character in eroded hilly red soil after virecence (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(4): 79–82, 98
- [27]廖咏梅, 陈劲松. 米亚罗地区亚高山针叶林在不同人为干扰条件下的土壤分形特征. 生态学杂志, 2005, 24(8): 878–882. Liao Y M, Chen J S. Soil fractal features of subalpine coniferous forests in Western Sichuan under different anthropogenic disturbances (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(8): 878–882
- [28]张昌顺, 范少辉, 漆良华, 等. 闽北典型毛竹林土壤微团聚体分形特征研究. 水土保持学报, 2008, 22(6): 170–175. Zhang C S, Fan S H, Qi L H, et al. Fractal features of soil micro-aggregates under typical *Phyllostachys edulis* forests in northern Fujian Province (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 170–175
- [29]周萍, 刘国彬, 侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征. 草地学报, 2008, 16(4): 793–799. Zhou P, Liu

## Effects of Long-term Fertilization on Composition and Fractal Feature of Soil Micro-aggregates under a Wheat-Maize Cropping System

Gong Wei<sup>1,2</sup> Yan Xiaoyuan<sup>1†</sup> Cai Zucong<sup>1</sup> Wang Jingyan<sup>2</sup>

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(2 *Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China*)

**Abstract** The composition and fractal dimension ( $D$ ) of micro-aggregates in 0~20 cm soil layer were studied on a long-term fertilized field under wheat-maize cropping rotation in North China Plain, and relationships of soil fertility with compositional proportion of characteristic soil micro-aggregates (PCM,  $<20\ \mu\text{m}/(250\sim 20\ \mu\text{m})$ ), ratio of the content of  $<20\ \mu\text{m}$  particle-size to the content of 2 000~20  $\mu\text{m}$  particle-size content in soil micro-aggregates determination (RMD,  $<20\ \mu\text{m}/(2\ 000\sim 20\ \mu\text{m})$ ) and  $D$  were evaluated. The long-term fertilization experiment was designed to include 7 treatments: fertilizer NPK (NPK), organic manure (OM), half organic manure with chemical fertilizer NPK (1/2OMN), chemical fertilizer NP (NP), chemical fertilizer PK (PK), chemical fertilizer NK (NK) and control (CK). After 18 years of fertilization, all the treatments, except CK showed lower values of PCM, RMD and  $D$ , and higher nutrients content and enzyme activity. Among the fertilization treatments, Treatment OM was the lowest in PCM, RMD and  $D$ , followed by Treatment 1/2OMN, and the treatments with chemical fertilizers. Balanced application of fertilizers (Treatment NPK) was lower in PCM, RMD and  $D$  than imbalanced use of fertilizers (Treatments NP, PK, and NK). PCM, RMD and  $D$  were closely related to crop yield, soil organic matter, hydrolysis N, and enzyme activity. The findings indicate that the use of organic manure alone or in combination with fertilizer NPK and balanced application of fertilizer NPK are key to improving soil micro-aggregate composition, decreasing PCM, RMD and  $D$ , and increasing soil nutrient preserving and supplying capacity; and that PCM, RMD and  $D$  can be used as integrated quantitative indexes to evaluate the soil fertility under a long-term fertilization cropping system.

**Key words** Long-term fertilization; Micro-aggregate composition; Characteristic micro-aggregates; Fractal dimension; Soil fertility