

长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响^①

刘中良^{1,2}, 宇万太^{1*}, 周桦¹, 徐永刚¹, 黄宝同¹

(1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤团聚体组成和土壤养分状况是评价土壤肥力的两个重要指标。不同粒级的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。本文通过比较长期施肥对土壤团聚体的分布和对土壤养分在团聚体分布变化的影响, 全面评价长期施肥对改善土壤肥力状况的作用。结果表明: 长期施肥减少 >5 mm 的非团粒结构的数量, 增加 0.25~5 mm 团聚体的含量, 改善了土壤的物理结构; 土壤大团聚体中含有更多的全 C、全 N、全 P, 因此大团聚体对养分的保持有重要作用; 施肥对速效养分含量影响显著, 碱解 N 含量随粒级的减小而增加, 有利于作物的吸收; 肥料的施加使得小粒级团聚体对土壤养分储量的贡献率越来越突出, 更利于养分的供给。此外, 研究还发现耕作条件下有机无机肥配施不利于较小粒级团聚体全 N 和全 P 的保持。

关键词: 长期施肥; 土壤养分; 团聚体; 养分贡献率

中图分类号: S158.2

土壤结构是调控土壤物理、生物过程和土壤有机质分布的重要因素之一, 土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[1]。团聚体是在成土母质、微生物、植物残体及分泌物的综合作用下形成的。一方面, 土壤成土条件、水热条件、植被覆盖等因素影响土壤团聚体的形成; 另一方面, 土壤团聚体的形成通过影响土壤透气性、土壤导水率等作用间接地影响作物产量。因此, 团聚体是形成良好土壤结构的物质基础, 能够综合地反映土壤整体的肥力状况^[2]。肥料的长期施用将改变土壤系统中物质的循环, 增强土壤 N、P 和 K 养分供应^[3]。长期施肥还对土壤团聚体的形成及稳定产生直接或间接的影响, 进而导致土壤养分在团聚体中的分布发生变化。不同粒级的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^[4]。国内外对土壤肥力和团聚体关系的研究较多。汪景宽等^[5]研究表明施用有机肥有利于团聚体内 0.053 ~ 0.25 mm 颗粒有机物质 (POM) 的积累, 是施用有机肥条件下黑土团聚体内碳固定的主要形式。李辉信等^[6]指出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。邵明安等^[7]研究表明: 2 ~ 5 mm 团聚体含量与土壤有机 C、全 N 以及 NO₃⁻-N 之间呈显著正相关关系; 而 0.25 ~ 1 mm

团聚体与土壤全 N 含量以及 NO₃⁻-N 含量呈显著负相关关系。Haynes 和 Naidu^[8]指出施用 P 肥可以促进 Al³⁺ 和 Ca²⁺ 的粘结作用, 从而促进团聚体的形成。过去对土壤团聚体内养分的研究主要集中在 C、N 方面, 对 P、K 等养分的研究仅局限在微团聚体中^[4], 对 >0.25 mm 团聚体内主要养分含量的研究则相对较少。本文采用干筛的分析方法, 通过比较长期施肥对土壤团聚体的分布和对土壤主要养分在团聚体分布变化的影响, 全面评价长期施肥对改善土壤肥力状况的作用。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在中国科学院沈阳生态实验站进行, 试验地位于 41°32'N、123°23'E, 属暖温带湿润-半湿润大陆季风气候, 四季分明, 雨热同季, 年平均气温 7°C ~ 8°C, 最高月 (7月) 平均气温 24°C, 最低月 (1月) 平均气温 -13°C, >10°C 活动积温 3 300°C ~ 3 400°C, 太阳总辐射为 5 410 ~ 5 600 kJ/cm², 无霜期 147 ~ 164 天, 年降雨量约 700 mm。

试验区土壤为潮棕壤, 试验开始前该土壤的基本性状为: 土壤全 C 含量为 12.12 g/kg, 全 N 为 1.13 g/kg, 全 P 为 0.44 g/kg, 全 K 为 16.4 g/kg, 速效 P 为

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (31000206, 31070547) 和国家科技支撑计划课题项目 (2007BAD89B02) 资助。

* 通讯作者 (wtu@iae.ac.cn)

作者简介: 刘中良 (1986—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事土壤养分循环的研究。E-mail: liuzhongliang0616@sina.com

10.6 mg/kg, 速效 K 88 mg/kg, pH 为 6.5; 含粗砂 (0.25~2 mm) 2.54%, 细砂 (0.05~0.25 mm) 22.05%, 粉粒 (0.002~0.05 mm) 53.99%, 黏粒 (<0.002 mm) 20.85%。

1.2 试验设计

长期定位试验始于 1990 年, 共设 12 个处理, 为了解单施化肥和配施有机肥对土壤结构的影响及其养分的分布问题, 本研究选取其中 3 个典型处理: ①不施肥 (CK); ②施 N、P、K 化肥 (NPK), N 肥为尿素, 用量为纯 N 150 kg/hm², P 肥为重过磷酸钙, 用量为纯 P 25 kg/hm², K 肥为硫酸钾, 用量为纯 K 60 kg/hm²; ③N、P、K 化肥 + 循环猪圈肥 (NPK+OM), N、P、K 化肥用量同②, 循环猪圈肥为该处理每年收获作物籽实的 80% 喂猪, 大豆秸秆全部和玉米秸秆的 50% 经粉碎后掺土垫圈, 翌年春猪圈肥循环返回本处理, 因此猪圈肥的养分含量取决于前一年的作物和秸秆产量。自 1991 年起每年施用猪圈肥, 平均每年养分返还量为纯 N 58.3 kg/hm², 纯 P 14.0 kg/hm², 纯 K 35.8 kg/hm²。各处理重复 3 次, 小区面积为 162 m², 轮作方式为大豆-玉米-玉米, 每年一季。

1.3 样品采集及分析

样品采自 2009 年 10 月秋收之后。采集表层 0~15 cm 土样, 每个处理随机取 3 个样点混合为一个土样。土壤团聚体分析: 采用李辉信等^[6]提出的分离方法。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扳成不同大小的土壤团聚体, 然后在室温条件下风干。称取约 100 g 土样置于罗列好的筛子内, 左右震荡 2 min (大约 100 次), 进行干筛 (重复 3 次), 分离出 >5、3~5、2~3、1~2、0.5~1、0.25~0.5 和 <0.25 mm 土壤团聚体。

土壤碱解 N、全 P、速效 P、速效 K、CEC 分别采用碱解扩散法、无水碳酸钠熔融法、Olsen 法、乙酸铵浸提-火焰光度法、乙酸铵交换法测定^[9]; 土壤有机 C 和全 N 采用元素分析仪测定 (Elementary III, 德国)。

1.4 数据分析

土壤表层 (15 cm) 养分储量由式 (1)^[10-11]求得,

养分储量 = 土壤体积质量 × 养分含量 × 土层深度 × 土地面积 (1)

式中, 土壤体积质量单位为 kg/m³, 养分含量单位是 kg/kg, 土层深度单位是 m, 土地面积为 m²/hm², 因此

养分储量单位为 kg/hm²。

各级别团聚体中养分对土壤养分总储量的贡献率用式 (2)^[12]进行计算,

团聚体的养分贡献率 =

$$\frac{\text{该级团聚体中养分含量} \times \text{该级团聚体的含量}(\%)}{\text{土壤中养分含量}} \times 100\% \quad (2)$$

所有测定结果用 Excel 进行整理和初步分析, 用 SPSS 进行方差分析, 多重比较采用 LSD 检验, 显著水平 (p<0.05)。

2 结果与分析

土壤团聚体组成和土壤养分状况是评价土壤肥力质量的两个重要指标。长期施肥能使土壤有机 C 明显得到积累, 因此, 必然会对土壤团聚体的形成有一定的改善作用。同时, 土壤养分在团聚体间的分布也存在一定规律。

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体分布的影响

不同粒径的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^[4]。本研究发现通过连续 20 年的长期培肥试验, 团聚体的含量发生了明显变化。由表 1 可以看出, 各处理团聚体构成均以 >5 mm 团聚体含量最高, 2~3 mm 团聚体含量最低。表明潮棕壤耕层团聚体构成以 >5 mm 团聚体为主。与不施肥处理相比, 施肥处理 >5 mm 团聚体含量显著降低, <5 mm 各团聚体含量均呈增加的趋势, 且随着粒级的减小这种趋势越来越明显, 此结果与汪景宽等^[13]的研究结果一致, 但与湿筛得到的结果相差很大^[14]。而李辉信等^[15]通过干筛的方法研究不同施肥处理对红壤水稻土团聚体分布的影响发现, 施用有机肥特别是有机肥和无机肥配施有利于增加 1~3 mm 和 0.25~1 mm 团聚体含量。说明土壤质地对土壤团聚体的分布有很大影响。通过肉眼观察和手触发现, >5 mm 大团聚体大多呈立方体形, 长、宽、高三轴大体近似, 边面棱不甚明显, 属于土壤结构体中的块状结构体。而块状结构在土壤质地比较黏重、缺乏有机质的土壤中容易形成, 特别是土壤过湿或过干耕作时最易形成^[16]。块状结构内部紧实, 孔性很差, 不利于植物的生长。说明通过长期施肥能够改变土壤团聚体的分布, 肥料的施用可以缓解块状结构体的形成, 提高 <5 mm 团聚体的含量, 改善土壤结构, 且有机无机肥配施效果优于单施无机肥。

表 1 不同施肥处理土壤团聚体组成 (%)

Table 1 The composition of aggregates under different fertilizer treatments

处理	>5 mm	3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
CK	36.10 A a	11.38 B bc	7.46 C d	9.18 B cd	12.21 B b	10.52 C bc	12.79 C b
NPK	29.87 B a	12.12 A cd	8.01 B e	9.41 B de	12.57 B c	11.22 B cd	16.29 B b
NPK+OM	20.69 C a	12.05 A c	8.93 A e	10.43 A d	14.34 A b	13.18 A b	19.87 A a

注: 不同大写字母表示同一团聚体粒级不同施肥处理之间差异显著 ($p < 0.05$), 不同小写字母表示同一施肥处理不同团聚体粒级之间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

2.2 不同施肥处理对土壤团聚体主要养分含量的影响

2.2.1 不同施肥处理对土壤团聚体有机 C 含量的影响

如图 1 所示, 各处理团聚体中有机 C 含量因粒级而异。随土壤团聚体直径逐渐增大, 其中的有机 C 含量呈现出逐渐增加的趋势。这说明土壤团聚体的形成与土壤有机 C 有直接联系, 这一结论已得到了广泛证实。Jastrow 等^[17]利用 ¹³C 示踪法证实大团聚体比微团聚体含更多的有机 C。Six 等^[18]认为大团聚体是较小粒级团聚体通过有机物胶结形成, 所以有机 C 含量随着团聚体粒径的增大而增加。同时也有人得出不同的

结论。李辉信等^[15]通过对不同施肥处理下红壤团聚体有机 C 分布的研究则发现, 从团聚体粒径 >3 mm 至 0.05~0.25 mm, 团聚体粒径越细, 有机 C 含量越高, 以 0.05~0.25 mm 粒径有机 C 含量最高, 而 <0.05 mm 团聚体中有机 C 含量低于其他粒级土壤团聚体。这可能与土壤本身的性质有关, 不同土壤中团聚体形成的胶结物质的种类和数量有很大差别。一般认为在土壤有机质含量较高、黏粒和氧化铁铝含量较低的土壤中, 有机质的作用占主导地位; 而在有机质含量不高、黏粒和氧化铁铝较高的土壤中, 团聚体的形成主要靠黏粒的内聚力及铁铝氧化物的胶结作用^[19-21]。

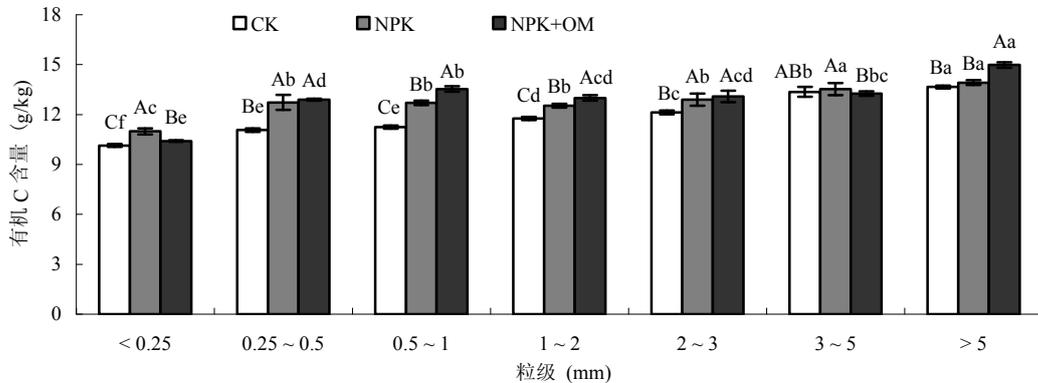


图 1 不同施肥处理团聚体中有机 C 含量

Fig. 1 The contents of organic C in aggregates under different fertilization treatments

NPK+OM 处理 0.5~1 mm 团聚体有机 C 含量明显高于 1~2 和 2~3 mm 两个粒级且差异显著, 表明有机 C 在各粒级的分布发生了变化, 其原因可能是施肥处理下土壤根系增加, 尤其是 0.5~1 mm 团聚体细小根系较多且不易完全清除造成的。比较各粒级团聚体有机 C 含量, 无肥处理明显低于施肥处理, 但 NPK+OM 处理下 <0.25 mm 团聚体有机 C 含量明显低于 NPK 处理, 两处理下 0.25~0.5 mm 和 2~3 mm 团聚体有机 C 含量没有显著差别。这是由于不同施肥处理对作物生长影响形成的有机残茬量不同, 导致同

一粒级团聚体中有机 C 含量因施肥种类而异^[22]。有机肥作为土壤有机质来源进入土壤势必会造成土壤 C 素含量增加^[23], 但是有机肥施入后土壤微生物量增加, 加速了有机质的分解, 尤其是没有物理保护的较小粒级的团聚体有机质的分解, 因此出现了有机肥处理下 <0.25 mm 团聚体有机 C 含量明显降低的现象。

2.2.2 不同施肥处理对土壤团聚体全 N 含量的影响

由图 2 可见, 全 N 在各粒级之间的变化不是很大, 其变异系数分别为 2.44% (CK)、3.42% (NPK) 和 6.33% (NPK+OM), 但仍表现出随粒径增大全 N 含

量升高的趋势，这可能与团聚体有机 C 含量有关。通过比较不同处理对团聚体全 N 含量的影响得知，施肥处理各粒级团聚体全 N 含量均明显高于不施肥处理；配施有机肥处理与单施化肥相比，显著增加了 >3 mm 团聚体全 N 含量，减少了 <1 mm 团聚体全 N 含量，

但仅在 0.5~1 mm 粒级差异显著。分析其原因，一方面可能与土壤各粒级团聚体有机 C 含量有关，因为 C、N 的变化通常都是同步的，不同粒级中有机 C 含量存在差异，全 N 含量也必然存在差异^[22]；另一方面可能是长期施用有机肥增加了较小团聚体的 N 素淋失^[24]。

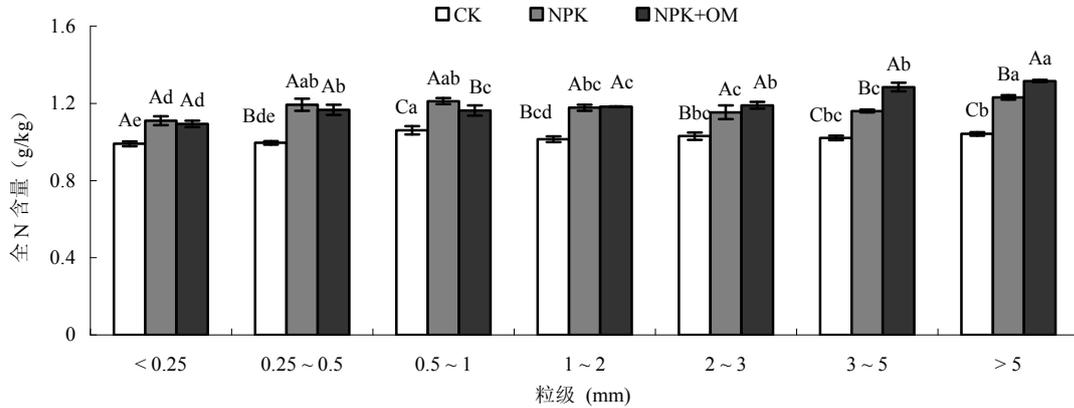


图 2 不同施肥处理团聚体中全 N 含量

Fig. 2 The contents of total N in aggregates under different fertilization treatments

土壤 C/N 是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的指标，它的演变趋势对土壤 C、N 循环有重要影响。土壤有机 C 的分解受土壤微生物的 C、N 平衡的影响^[25]。因此土壤的 C/N 在很大程度上影响其分解速率。如图 3 所示，不同处理下的 C/N 表现

出 CK > NPK > NPK+OM 规律，这可能与施加 N 肥有关。比较不同粒级间 C/N 发现，各处理均表现出随粒级的增大 C/N 升高的趋势。说明新鲜有机物质及半分解的有机物主要存在于大团聚体中^[17-18]。

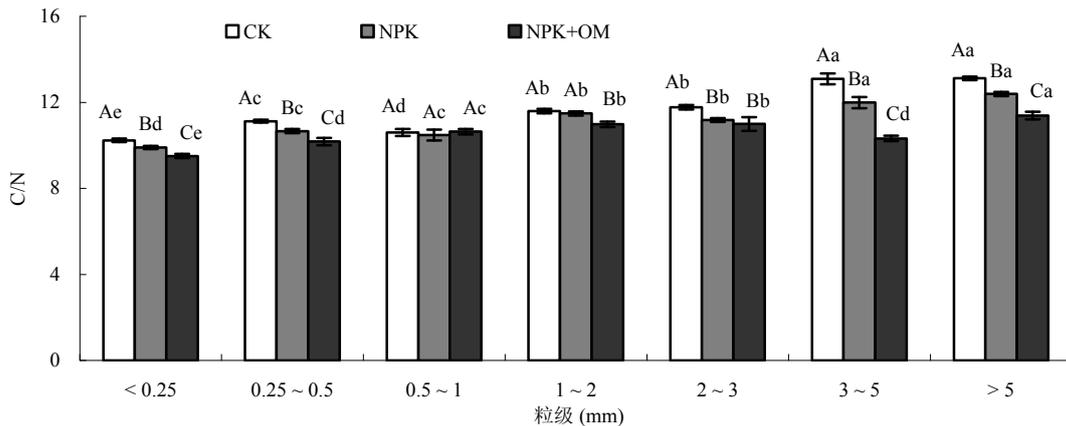


图 3 不同施肥处理下团聚体 C/N

Fig. 3 The ratios of C and N in aggregates under different fertilization treatments

2.2.3 不同施肥处理对团聚体全 P 含量的影响

由图 4 可以看出，CK 处理下 0.5~1 mm 和 >5 mm 团聚体全 P 含量最高，<0.25 mm 和 2~3 mm 团聚体全 P 含量最低；NPK 处理各粒级团聚体之间全 P 含

量变化不大，其变异系数仅为 2.8%；NPK+OM 处理 1~2 mm 团聚体全 P 含量最高，<0.25 mm 团聚体全 P 含量最低。虽然总体上有机无机肥配施处理全 P 含量 (0.68 g/kg) 高于单施化肥处理 (0.64 g/kg)，但

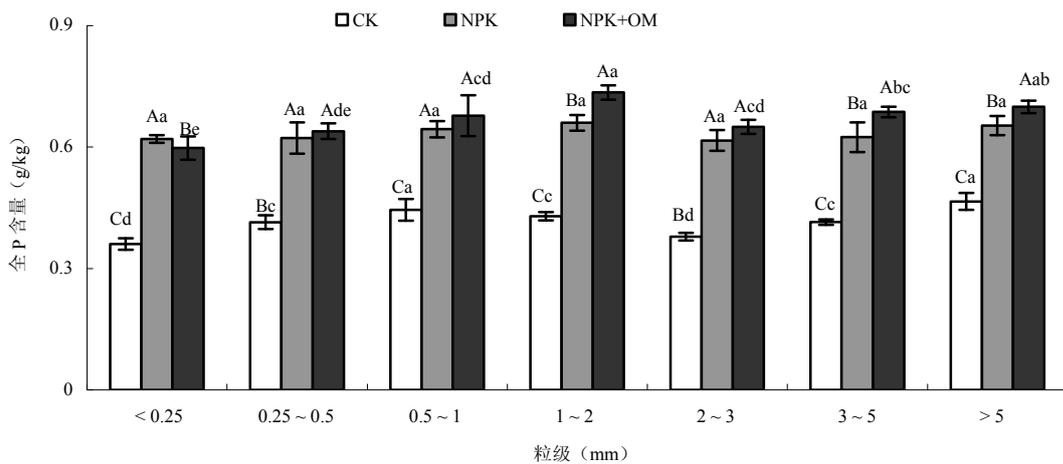


图 4 不同施肥处理团聚体中全 P 含量

Fig. 4 The contents of total P in aggregates under different fertilization treatments

各粒级之间的表现却不尽相同，<0.25 mm 团聚体全 P 含量 NPK 处理显著高于 NPK+OM 处理，0.25 ~ 0.5 mm、0.5 ~ 1 mm 和 2 ~ 3 mm 团聚体之间没有显著差别，其余各粒级 NPK+OM 处理均显著高于 NPK 处理。由此可见，有机肥的施用可以增加土壤全 P 的含量，但是同时也会增加土壤全 P 的淋失，并且土壤颗粒越小淋失作用越明显，此研究与 Sauer 等^[26]的研究结果一致。刘恩科等^[27]也指出有机肥施入土壤后可增加土壤的有机质含量，有机质可减少无机 P 的固定，并促进无机 P 的溶解，进而加速全 P 的淋失。因此在全 P 含量较高尤其施用有机肥的土壤，提高土壤较大团聚体的比重对土壤全 P 的保护和积累有着重要意义。

2.2.4 不同施肥处理对团聚体速效养分含量的影响

土壤速效 N、P、K 含量的高低，直接关系到土壤结构好与坏、供肥能力的强与弱、作物产出的高与低。营养元素在不同粒径团聚体的保持、供应及转化能力等方面存在差异^[4]，因此对不同团聚体中的速效养分含量的研究有重要意义。宇万太等^[28]研究表明土壤速效养分含量主要受施肥水平和施肥方式的影响。通过连续 20 年的长期施肥定位研究发现（图 5），随粒级的增大各处理碱解 N 含量均有减小的趋势，这可能与团聚体的比表面积有关，小粒级团聚体比表面积较大，有较强的保存和吸附 N 素养分的能力，随颗粒直径的增大，对碱解 N 的吸附量也减小。因此，土壤团聚体粒径越小，其供 N 能力越强。不同施肥处理速效 P 在各粒级团聚体的分布存在差异（图 6）。CK 处

理下速效 P 含量较低且随团聚体粒径的变化没有显著改变，变异系数仅为 5.8%；NPK 处理下 0.25 ~ 0.5 mm 团聚体速效 P 含量最高，3 ~ 5 mm 和 2 ~ 3 mm 团聚体速效 P 含量最低，其他粒级之间没有显著差异；NPK+OM 处理下 >5 mm 团聚体速效 P 含量最高，1 ~ 2 mm 团聚体速效 P 含量最低，其他粒级之间没有显著差异。可见土壤速效 P 在各团聚体中的含量，在很大程度上受施肥处理的影响。不同施肥处理速效 K 在各粒级团聚体的分布差异不大（图 7），CK 处理下各粒级团聚体速效 K 含量没有显著变化，变异系数仅为 3.1%；NPK 处理和 NPK+OM 处理 >5 mm 团聚体速效 K 含量显著高于其他粒级的团聚体，其他粒级之间差异不显著，其原因可能与 >5 mm 团聚体的组成有关，大团聚体是在有机胶结剂的粘结作用下形成的，胶结物质主要是根系和植物残体，其中速效 K 含量丰富。

2.2.5 不同施肥处理对团聚体阳离子交换量（CEC）的影响

CEC 是影响团聚体形成和稳定性的重要因素之一^[29]。施肥处理对团聚体 CEC 影响较小，如图 8 所示呈现 NPK+OM > NPK > CK 的趋势，但是这种趋势在统计学上并不显著，说明土壤的 CEC 主要是由土壤胶体的性质决定的。宇万太等^[28]研究也表明，黏土和有机质的类型及数量极大地影响土壤 CEC 值，进而影响土壤中 >0.25 mm 水稳性团聚体含量。CEC 在各粒级团聚体之间的变化不大，其变异系数分别为 7.5% (CK)、7.1% (NPK)、6.0% (NPK+OM)。但各处理中，<0.25 mm 团聚体 CEC 都显著低于其他粒级，说明 CEC 与团聚体的团聚能力有关，CEC 越低团聚能力越弱。

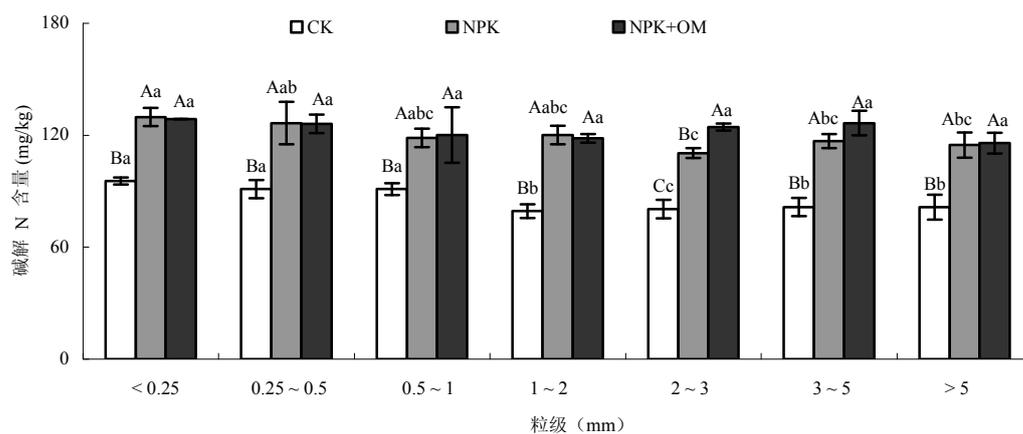


图 5 不同施肥处理团聚体中碱解 N 含量

Fig. 5 The contents of available N in aggregates under different fertilization treatments

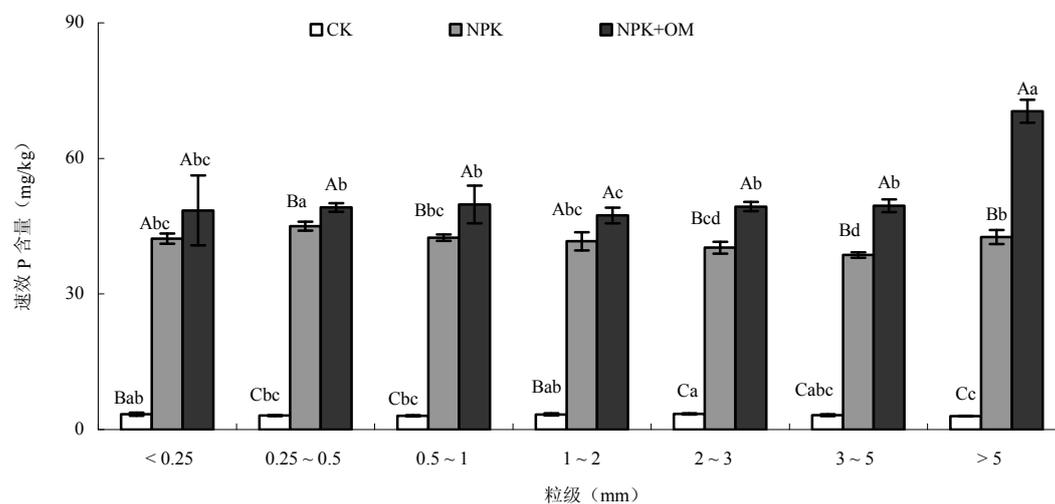


图 6 不同施肥处理团聚体中速效 P 含量

Fig. 6 The contents of available P in aggregates under different fertilization treatments

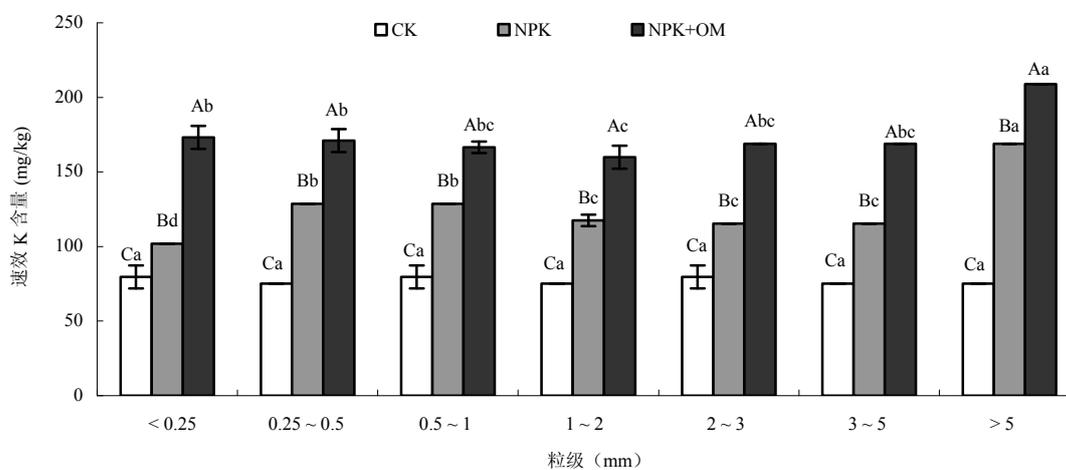


图 7 不同施肥处理团聚体中速效 K 含量

Fig. 7 The contents of available K in aggregates under different fertilization treatments

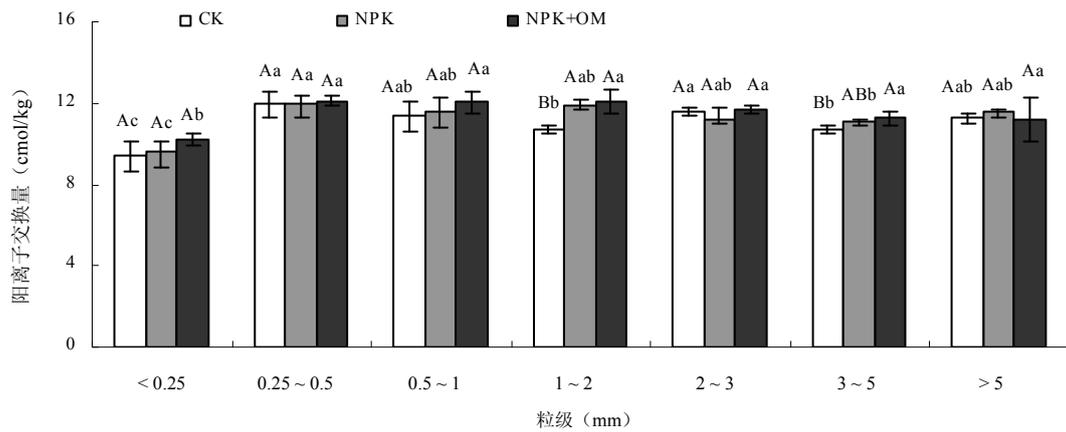


图 8 不同施肥处理团聚体中的阳离子交换量

Fig. 8 Cation exchange capacity (CEC) in aggregates under different fertilization treatments

2.3 土壤团聚体中养分含量对土壤的贡献率

将各粒级土壤团聚体的含量(权数)和不同粒级团聚体中养分进行统一考虑, 不仅能更加详细地反映各粒

级团聚体对土壤基本性质的贡献率, 更能全面地和客观地反映长期进行土壤培肥的作用与效果^[12]。经计算各级别团聚体中养分对土壤养分总储量的贡献率见表 2。

表 2 土壤各级别团聚体对土壤养分储量的贡献率(%)

Table 2 The contribution rates of aggregate fractions to soil nutrient storage

项目	处理	土壤养分储量 (kg/hm ²)	团聚体养分贡献率 (%)						
			<0.25 mm	0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~3 mm	3~5 mm	>5 mm
有机 C	CK	19 489	10.56	9.49	11.18	8.80	7.38	12.39	40.19
	NPK	19 793	13.96	11.14	12.45	9.19	8.05	12.78	32.42
	NPK+OM	19 956	15.99	13.14	15.02	10.48	9.04	12.35	23.98
	平均	19 746	13.50	11.26	15.92	9.49	8.16	12.51	32.20
全 N	CK	1 579	12.38	10.23	12.66	9.10	7.52	11.36	36.76
	NPK	1 819	15.34	11.36	12.93	9.40	7.84	11.93	31.20
	NPK+OM	1 844	18.20	12.87	13.96	10.33	8.90	12.96	22.79
	平均	1 747	15.31	11.49	13.18	9.61	8.09	12.08	30.25
碱解 N	CK	659	14.37	11.29	13.11	8.58	7.07	10.92	34.65
	NPK	978	17.79	11.95	12.55	9.51	7.44	11.92	28.84
	NPK+OM	1 022	20.94	13.62	14.11	10.11	9.10	12.49	19.63
	平均	886	17.7	12.29	13.26	9.4	7.87	11.78	27.71
全 P	CK	131	10.79	10.21	12.73	9.24	6.62	11.05	39.36
	NPK	183	15.93	11.01	12.77	9.79	7.78	11.93	30.77
	NPK+OM	188	17.93	12.72	14.67	11.57	8.77	12.50	21.85
	平均	167	14.88	11.31	13.39	10.2	7.72	11.83	30.66
速效 P	CK	4.82	13.78	10.44	11.86	9.80	8.28	11.54	34.30
	NPK	64.54	16.46	12.07	12.76	9.38	7.70	11.20	30.44
	NPK+OM	82.02	18.13	12.19	13.44	9.30	8.29	11.23	27.43
	平均	59.46	16.12	11.57	12.69	12.3	8.09	11.32	30.72
速效 K	CK	117.84	13.34	10.36	12.73	9.04	7.78	11.20	35.55
	NPK	203.57	12.59	10.94	12.26	8.38	7.00	10.59	38.23
	NPK+OM	271.92	19.54	12.80	13.56	9.47	8.56	11.55	24.54
	平均	197.78	15.16	11.37	12.85	8.96	7.78	11.13	32.77

从表 2 中看出, 施肥后土壤养分储量均有不同程度的提高, 尤其是速效养分。就 7 个级别的土壤团聚体而言, 对土壤有机 C、全 N、碱解 N、全 P、速效 P、速效 K 的贡献率大致有如下规律 (由大到小): >5 mm 团聚体、<0.25 mm 团聚体、0.5~1 mm 团聚体、0.25~0.5 mm 团聚体、3~5 mm 团聚体、1~2 mm 团聚体和 2~3 mm 团聚体, 与土壤团聚体的分布规律基本相一致。不同施肥处理对团聚体中土壤养分储量的贡献率有明显影响。CK 处理 30% 以上的土壤养分集中在 >5 mm 团聚体中, 这是由于土壤中这个级别的团聚体含量占了绝对优势。由于无肥处理下团聚体更新慢^[30], 且养分主要贮存于 >5 mm 块状结构中, 因此养分保持能力强, 这可能是常年不施肥土壤全量养分仍能保持在某一值的原因之一。伴随着肥料的施用, >5 mm 团聚体含量降低, 其他粒径的团聚体含量升高, 且随着粒径的减小团聚体养分贡献率增加越来越明显, 各粒级的团聚体对土壤养分的贡献率趋于均衡, 特别是小粒级的团聚体养分储量升高, 有利于作物对土壤养分的吸收, 对农业生产有重要意义。但是, 养分的保持和释放是一个此消彼长的过程, 养分的释放量提高, 势必不利于养分的保持, 因此在满足作物需求的前提下, 尽量增加大团聚体的数量, 可以达到保肥供肥的目的。免耕条件下土壤结构受到保护, 土壤有机 C 含量增加, 土壤胶结作用增强, 促进土壤的团聚作用, 大粒级团聚体含量增加^[31-32]。陈永利等^[33]认为施用有机肥是实现农业可持续发展的重要手段。然而, 本研究还发现施用有机肥不利于小粒级 (<0.25 mm) 团聚体有机 C (图 1) 的积累, 加速了全 N (图 2)、全 P (图 4) 的淋失。总之, 有机无机肥配施是提高土壤养分含量, 保证土壤肥力长期可持续的重要措施, 但是由于长期的耕作导致土壤结构破坏, 养分流失。因此, 在有机无机肥配施情况下, 尽量减少耕作或者免耕可以达到最佳的经济效益和生态效益。

3 结论

通过长达 20 年的长期定位试验研究发现: 长期施肥尤其是有机-无机肥配施既可以明显改善土壤的物理结构, 又可以增加土壤养分含量, 对农田生态系统的长期持续利用有积极的意义; 土壤大团聚体中含有更多的全 C、全 N、全 P, 因此大团聚体对养分的保持有重要作用; 施肥对速效养分含量影响显著, 碱解 N 含量随粒级的减小而增加, 有利于作物的吸收; 肥料的施加使得养分向小粒级团聚体转移, 有利于养分的供给; 此外, 施肥处理下 (NPK+OM) 由于长期的耕

作可能导致土壤较小粒级团聚体养分流失。因此, 在有机无机肥配施情况下, 尽量减少耕作或者免耕可以达到最佳的经济效益和生态效益。

参考文献:

- [1] 安婷婷, 汪景宽, 李双异. 施肥对棕壤团聚体组成及团聚体中有机碳分布的影响. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(3): 407-409
- [2] Tisdall JM, Oades JM. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163
- [3] 周卫军, 王凯荣, 张光远, 谢小立. 有机与无机肥配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响. 中国农业科学, 2002, 35: 1109-1113
- [4] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 颜丽, 王铁宇, 张继宏, 周礼恺, 陈利军, 李荣华. 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
- [5] 安婷婷, 汪景宽, 李双异, 于树, 朱平. 施用有机肥对黑土团聚体有机碳的影响. 应用生态学报, 2008, 19(2): 369-373
- [6] 黄欠如, 胡锋, 袁颖红, 刘满强, 李辉信. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体特征的影响. 土壤, 2007, 39(4): 608-613
- [7] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841-1848
- [8] Haynes RJ, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure application on soil organic matter content and soil physical condition. *Nutr. Cycl. Agro-Ecosyst.*, 1998, 51: 123-137
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- [10] Guo LB, Gifford RM. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8: 345-360
- [11] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤性水稻土微团聚体有机碳汇的影响. 生态学报, 2004, 24(12): 2961-2966
- [12] 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的分布. 生态学报, 2009, 26(2): 364-372
- [13] 王铁宇, 颜丽, 汪景宽, 关连珠, 朱平. 长期定位监测黑土结构质量指标的分异研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 138-141
- [14] 冷延慧, 汪景宽, 李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2171-2177
- [15] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-427
- [16] 马仁明. 土壤结构体的类型. [2010-05-22]. <http://wenku.baidu.com/view/28566f2fb4daa58da0114a70.html>
- [17] Jastrow JD, Boutton TW, Miller RM. Carbon dynamic of

- aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60: 801-807
- [18] Six J, Paustian K, Elliott ET, Combrink C. Soil structure and organic matter: I. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 681-689
- [19] Arduino E, Barberis E, Boero V. Iron oxides and particle aggregation in B horizons of some soils. *Geoderma*, 1989, 45: 319-329
- [20] Chaney K, Swift RS. The influence of organic matter on aggregate stability in some British soils. *J. of soil Sci.*, 1984, 35: 223-230
- [21] Churchman GJ, Tate KR. Aggregation of clay in different types of New Zealand soils. *Geoderma*, 1986, 37: 207-220
- [22] 徐阳春, 沈其荣. 长期施用不同有机肥对土壤各粒级复合体中 C、N、P 含量与分配的影响. *中国农业科学*, 2000, 33(5): 65-71
- [23] 沈宏, 曹志洪, 徐志红. 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. *土壤学报*, 2000, 37(2): 166-173
- [24] 王艳萍, 高吉喜, 刘尚华, 杜相革. 有机肥对桃园土壤硝态氮分布的影响. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1501-1505
- [25] 齐雁冰, 黄标, 顾志权, 赵永存, 孙维侠, 王志刚, 杨玉峰. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(1): 50-55
- [26] Sauer TJ, Daniel TC, Nichols DJ, West CP, Moore PA, Wheeler GL. Runoff water quality from poultry litter-treated pasture and forest sites. *Journal of Environment Quality*, 2000, 29: 515-521
- [27] 刘恩科, 赵炳强, 胡昌浩, 李秀英, 李燕婷. 长期施氮、磷、钾化肥对玉米产量及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 789-794
- [28] 宇万太, 沈善敏, 张璐, 马强, 赵少华. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系. *应用生态学报*, 2004, 15(12): 2287-2291
- [29] Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: A review. *Geoderma*, 2005, 124: 3-22
- [30] Gulde S, Chung H, Amelung W, Chang C, Six J. Soil carbon saturation controls labile and stable carbon pool dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(3): 605-612
- [31] Jastrow JD. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 656-676
- [32] Alke L. Soil and crop response to different tillage practices in a ferruginous soil in the Nigeriavarma. *Soil and Tillage Research*, 1986, 6: 261-272
- [33] 陈永利, 孙晓丽, 温英楠, 王立辉. 有机肥与可持续农业. *吉林农业*, 2005(5): 24-25

Effects of Long-term Fertilization on Aggregate Size Distribution and Nutrient Content

LIU Zhong-liang^{1,2}, YU Wan-tai¹, ZHOU Hua¹, XU Yong-gang¹, HUANG Bao-tong¹

(1 *Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: Soil aggregates and soil nutrients are two important indicators in soil fertility evaluation. Different sizes of aggregates play various roles in the maintenance, availability and transformation of nutrients. This paper compared the effects of long-term fertilization on the distribution of soil aggregates and soil nutrients in aggregates in order to evaluate the role of long-term fertilization on improving soil fertility. The results showed that long-term fertilization decreased the amount of >5 mm aggregates but increased the percentage of 0.25-5 mm aggregates, thus improved soil structure. Macroaggregate could maintain soil nutrients because it held large amount of soil total C, total N and total P. The effect of fertilization on soil available nutrient was remarkable, soil available N increased with the decrease of aggregate size, which was in favor of plant absorption. In addition, the contribution rate of microaggregates to soil nutrients was intensified with fertilizer application, which was also beneficial for nutrients' uptake. However, microaggregates were unfavorable to preserve total N and total P with the combination of inorganic fertilizer and organic fertilizer.

Key words: Long-term fertilization, Soil nutrient, Aggregate, Nutrient contribution rate