

不同施肥处理对设施土壤团聚体内颗粒有机碳含量的影响^①

陈茜¹, 梁成华^{1*}, 杜立宇¹, 陈新之¹, 王峰²

(1 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110161; 2 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

摘要: 以 19 年的设施蔬菜栽培长期定位试验土壤为材料, 采用团聚体和土壤有机 C 物理分组方法, 研究了长期不同施肥处理对团聚体内颗粒有机 C (POM C) 含量变化的影响。结果表明, 长期施肥使 $<53\ \mu\text{m}$ 团聚体向微团聚体和大团聚体转化, 有利于 POM C 的富集。长期施用有机肥和有机无机肥配施处理的土壤大团聚体内微团聚体之间的粗 POM 和单施无机肥处理的粗 POM 平均 C 含量要比不施肥处理高 6.97 倍和 4.8 倍。施肥对细 POM C 含量的影响没有明显规律, 但土壤细 POM C 的含量远远大于粗 POM C。长期施用有机肥料或配施无机肥 (除 AN 处理外) 还提高了大团聚体包裹的微团聚体内 (intra-mM) 的和游离微团聚体内的 (free intra-m) POM C 含量, 而无机肥的施用却导致了二者 C 含量下降 22.5%~21.1%。

关键词: 长期定位施肥; 土壤团聚体; 土壤有机碳; 有机碳物理分组

中图分类号: S158.3; S152.4

土壤有机 C (SOC) 对增强土壤中土粒的团聚性、促进团粒结构的形成、调节土壤通气性、以及提高土壤肥力和生产力具有不可替代的作用^[1]。土壤颗粒有机 C (POM) 是土壤有机 C 库的重要组成部分, 它对土壤的持续利用和缓解大气 CO_2 的升高具有重要意义^[2]。对于农业土壤来说, 施肥和作物残茬是土壤颗粒有机 C (POM C) 的重要来源, 但由于耕作和施肥方式的不同, 导致土壤 POM C 的质量在不同土地利用方式之间存在较大差异。这些差异主要表现在不同粒级的土壤团聚体中 POM C 的结合形态和含量的不同^[3-6]。

借助土壤有机 C 物理分组方法可以研究土壤 POM C 的质量及其对土壤肥力的影响, 其中, 有机 C 的物理分组方法能够根据土壤团聚体对有机 C 的保护程度将 POM C 分成相对同质的, 但具有不同功能意义的组分。与其它方法比较这种分组方法具有很多优点^[7]。本文采用物理分组法研究了长期不同施肥处理对设施蔬菜栽培土壤有机 C 物理组分中 POM C 含量的影响。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 试验地概况 研究区位于沈阳农业大学园艺学院蔬菜保护地长期定位肥料试验基地 (北纬 $41^\circ 31'$, 东经 $123^\circ 24'$), 土壤类型为草甸土。该长期定位试验已经连续进行了 19 年, 其中 1988—1996 年 8 年时间完成了两个露地蔬菜栽培轮作循环, 1996 年将定位土壤分层搬到塑料大棚开始设施蔬菜栽培微区定位试验, 栽培蔬菜为番茄和黄瓜, 试验连续进行至今^[8]。本研究的供试土壤采自不施肥 (B)、施用无机肥 (BN、BNPK)、有机肥 (A) 和有机无机肥配施 (AN、ANPK) 6 个处理小区。

1.1.2 采样方法 土样于 2007 年 4 月定植前采集, 每个小区随机采集 5 点, 取样深度为 0~20 cm, 混匀、风干备用。

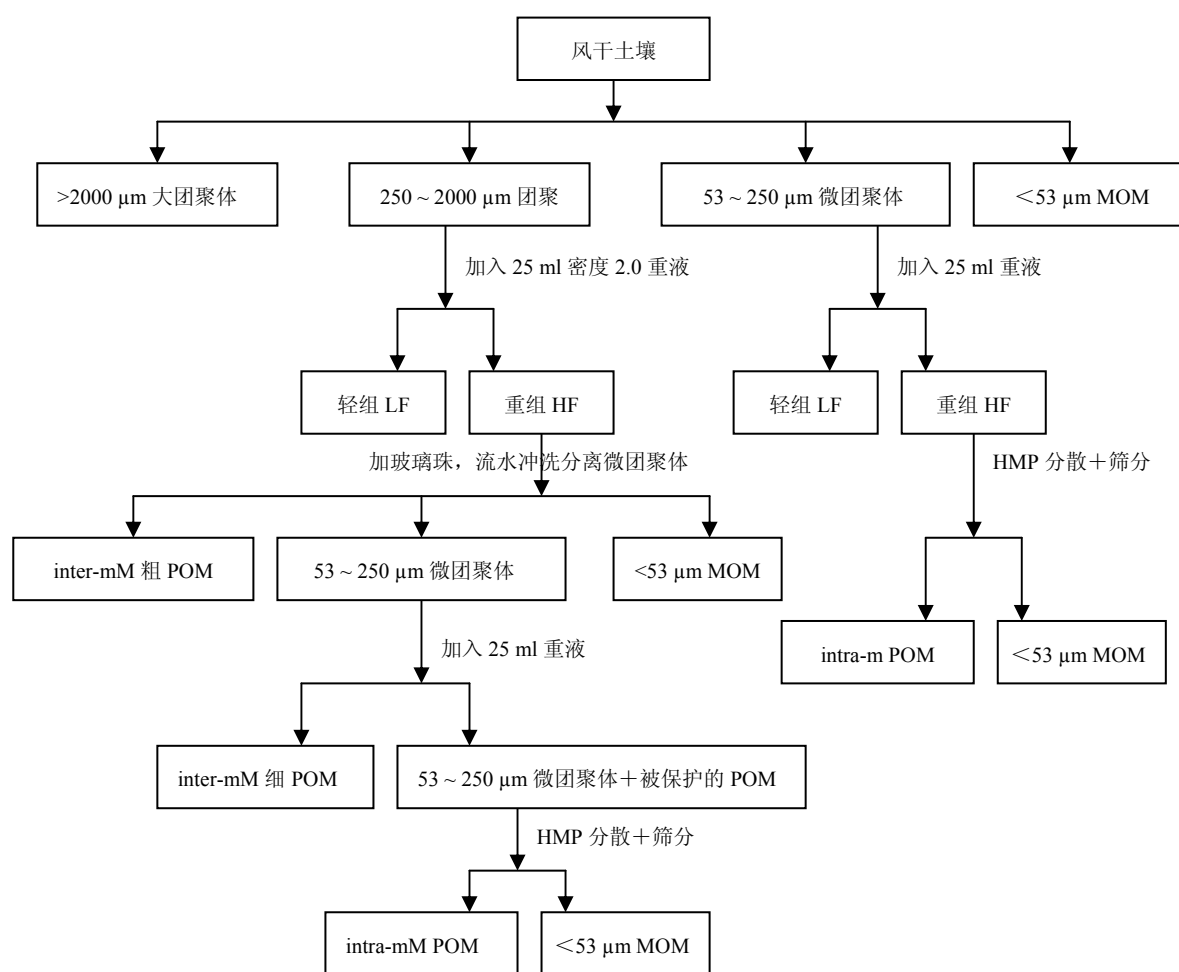
1.2 分析方法

1.2.1 团聚体和游离轻组的分离 团聚体的分离采用 Elliott^[9] 的湿筛分组法。将风干土样依次通过一个连续的 3 个大小为 2000、250 和 $53\ \mu\text{m}$ 的筛子, 获得 4 个粒级的团聚体。游离轻组 (LF) 的分离采用 Dalal 和 Mayer 方法^[10]。与不同粒级大小团聚体联合在一起的轻组, 通过 $2.0\ \text{g/cm}^3$ 的溴仿进行密度浮选而被分离。分离轻组后, 剩下的土壤用 95% 酒精洗去重液, 用于下一步的试验 (图 1)。

^①基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571266) 资助。

* 通讯作者 (liang110161@163.com)

作者简介: 陈茜(1982—), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事农业生态与环境方面的研究。E-mail: qianqian0702@yeah.net



LF 为轻组, HF 为重组, MOM 为矿物结合有机物, 粗 POM 为团聚体内 250 ~ 2000 μm 颗粒有机物, 细 POM 为团聚体内 53 ~ 250 μm 颗粒有机物, HMP 为六偏磷酸钠, inter-mM 为大团聚体内微团聚体之间, intra-mM 为大团聚体包裹的微团聚体内, intra-m 为游离的微团聚体内

图1 团聚体和有机碳物理分组流程

Fig. 1 Physical fractionation scheme of aggregate and aggregate-associated organic matter

1.2.2 分离大团聚体内的微团聚体 粗POM、细POM、微团聚体内部的POM的分离采用Six等^[11]方法。将10.000 g大团聚体浸入顶部有250 μm 网眼筛子的去离子水中,加入50个玻璃珠(直径4 mm)轻轻摇动。同时将连续平稳的水流通过筛子,确保所释放出来的微团聚体被立即冲进一个53 μm 筛子,避免被玻璃珠的进一步破坏。当所有大团聚体被破碎完全后,粗POM仍留在250 μm 网眼的筛子上,细POM、微团聚体内的POM采用密度浮选和分散法被分离开。

1.2.3 有机C测定 土壤有机C含量及分离得到的各组分的有机C含量采用元素分析仪测定(Elementar II, 德国),其原理是土壤有机C在高温条件下燃烧释放出 CO_2 ,并用TCD监测器检测其C含量。

1.2.4 统计分析 所有测定结果应用Excel 2003、SPSS13.0统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理中各粒级团聚体的分布

表1是不同施肥处理中各粒级团聚体的分布状况。从表1中看出,在不施肥处理(B)中,>2000、250 ~ 2000、53 ~ 250 μm 和<53 μm 4个粒级团聚体的含量分别占1.63%、18.26%、63.70%和16.41%。与对照处理(B)比较,各施肥处理的>2000 μm 大团聚体所占比例显著增加,但不同施肥处理之间的差异较大,大小顺序为:有机无机肥配施处理(AN、ANPK)>有机肥处理(A)>无机肥处理(BN、BNPK);长期

施用有机肥和有机无机肥配施显著提高了 250 ~ 2000 μm 大团聚体含量, 降低了 53 ~ 250 μm 的微团聚体和 <53 μm 的矿物结合有机物的含量。然而, 单施无机肥处理与之不同, 施用无机肥降低了 <53 μm 矿物结合有机物的含量, 但并没有提高 250 ~ 2000 μm 大团聚体的含量, 而是使 53 ~ 250 μm 粒级微团聚体的含量有所提高。这一现象说明, 虽然长期施用有机肥

和无机肥均能降低小粒级矿物结合有机物的含量, 促进土壤团聚体的形成, 但施用有机肥及有机肥和无机肥配合施用更有利于大团聚体的形成。近年来的一些研究也表明, 施肥特别是有机肥有利于大团聚体的形成, 使有机质优先积累在大团聚体中, 进而影响了 POM C 的含量^[2,12]。

表 1 不同施肥处理中各粒级团聚体百分含量 (%)

Table 1 Aggregate-particle-size distributions under different fertilization treatments

处理	团聚体粒级 (μm)			
	>2000	250 ~ 2000	53 ~ 250	<53
B	1.63 c	18.26 c	63.70 b	16.41 a
BN	2.43 b	16.12 c	67.37 a	14.08 ab
BNPK	2.86 b	16.88 c	65.98 ab	14.28 ab
A	2.88 b	22.68 b	61.13 bc	13.30 b
AN	4.91 a	27.90 a	56.67 cd	10.51 bc
ANPK	3.25 b	27.22 a	59.54 c	9.99 c

注: 同列中字母不同表示差异达显著水平 ($p < 0.05$)。

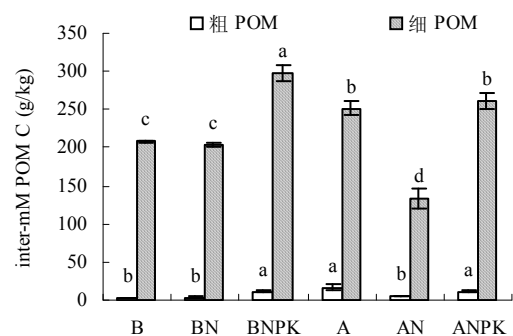
2.2 团聚体内的颗粒有机物

由于 >2000 μm 大粒级团聚体在全土中所占的百分含量很低 (1.63% ~ 4.91%), 对这部分团聚体的 POM 含量做进一步分析比较困难, 因此本文仅就 250 ~ 2000 μm 和 53 ~ 250 μm 粒级团聚体中 POM 的物理组分进行分析, 不包括 >2000 μm 粒级团聚体中的组分。

2.2.1 250 ~ 2000 μm 大团聚体内微团聚体之间 (inter-mM) 的 POM C 含量 由于不同肥料在土壤中的分解速率和残留量上的差异以及对作物生长影响形成的有机残茬的不同, 导致不同施肥处理、同一粒级团聚体中有机 C 含量因施肥种类而异。相对于不施肥处理来说, 长期施用无机肥料或有机肥均提高了土壤粗 POM C 含量 (图 2)。施用有机肥 (A) 和有机无机肥配施处理 (AN、ANPK) 土壤粗 POM C 平均含量 (10.81 g/kg) 和单施无机肥处理 (BN、BNPK) 的粗 POM C 平均含量 (7.52 g/kg) 要比不施肥处理 (B) (1.55 g/kg) 高 6.97 倍和 4.85 倍; 土壤细 POM C 含量的变化规律与粗 POM C 不尽相同, 单施 NPK 处理 (BNPK) 的土壤细 POM C 含量最高, 达到 296.7 g/kg, 其次为有机肥与无机肥配合施用 (ANPK) (261.05 g/kg) 和单施有机肥 (A) (251.95 g/kg) 处理, 而有机肥与 N 肥配合施用 (AN) 处理的含量最低, 仅为 133.25 g/kg。

另外, 由于土壤团聚体中的不同粒径有机 C 含量

受土壤有机质平衡与矿化速率的影响^[13], 所以不同粒级团聚体中 POM C 含量因粒径而异 (图 2), 本试验结果表明, 从粗 POM 到细 POM, 团聚体粒径愈细, 有机 C 含量愈高, 土壤细 POM C 含量远远大于粗 POM C 含量。这一结果进一步表明土壤细 POM C 的分解速率比粗 POM C 慢很多, 对有机 C 固持极其重要^[14]。



注: 图中小写字母的不同表示不同处理同一组间分析差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图 2 不同施肥处理对 inter-mM POM C 含量的影响

Fig.2 Effects of different fertilization treatments on contents of POM C in inter-mM

当今国内外许多研究表明, 大团聚体内微团聚体之间 POM 是微生物生长和活性的保证, 对大团聚体及其内的微团聚体的形成和稳定都具有重要作用^[15-19],

而施肥等有机肥管理措施的影响一般也都首先体现在大团聚体上^[20-22]。肥料的分解残体是形成POM的基础, 施入肥料后其分解残体激发微生物活性, 形成真菌和多糖^[23], 这些物质胶结土壤颗粒形成大团聚体^[18,19,24]。在这一过程中, 粗POM不但形成且合并成大团聚体, 随后粗POM进一步分解破碎成细POM。由于团聚体内的物理保护, 包含在大团聚体内细POM的分解速率较慢^[9], 因此, 细POM形成了稳定的团聚体它有助于施肥条件下C碳的累积, 同时它还可以作为C累积的指示者。上述数据显示, 长期施用有机肥或配施化肥显著增加了intra-mM POM C含量, 特别是对细POM影响显著。这表明, 长期施用有机肥不仅对设施蔬菜栽培土壤团聚体的形成和保持具有重要作用中, 而且对SOC的固定和积累具有重要影响。这个结果与其他土壤长期施肥试验结果相一致^[6,25], 进一步支持intra-mM POM, 特别是细POM对不同施肥措施响应非常灵敏的观点。

2.2.2 250 ~ 2000 μm 大团聚体包裹的微团聚体内 (intra-mM) 及 53 ~ 250 μm 游离微团聚体内 (intra-m) 的 POM C 含量 不同施肥处理对 intra-mM 及 intra-m POM 的影响较大(图3)。在 intra-mM POM 中, 除有机肥与 N 肥配施处理 (AN) 外, 单施有机肥 (A) 和有机肥与 NPK 配合施用处理 (ANPK) 与对照处理 (B) 有显著的差异, intra-mM POM C 含量增幅达到 1.29% 和 1.20%; 在 intra-m POM 中, 有机肥 (A) 和有机无机肥配施处理 (AN、ANPK) 提高了 POM C 含量, 但与不施肥处理 (B) 相比差异不显著。单施无机肥料处理 (BN、BNPK) 对提高 intra-mM 和 intra-m POM C 没有明显效果, 而且与不施肥处理 (B) 相比, 导致了 POM C 浓度下降 22.5% ~ 21.1%。图3还表明, 不同施肥处理对不同团聚体结构位置上的 POM C 含量影响程度不同。在对照处理 (B) 中, intra-m POM C 含量比 intra-mM POM C 含量高 1.07 倍, 而在 BN、BNPK、A、AN 和 ANPK 处理中, intra-m POM C 含量分别高出相应处理的 2.98、2.0、1.09、1.94 和 1.14 倍。长期施用有机肥对保持 intra-mM 与 intra-m POM C 的比值有利, 而长期施用无机肥将提高 intra-m POM C 的含量。

上述结果表明, 长期单独施用无机肥料对土壤C固定没有明显的效果。这一结果与Yang等^[26]的试验所得结果相同。近来很多研究陆续阐述了大团聚体内POM在微团聚体形成和稳定中的地位及微团聚体对有机C储备和稳定的作用^[11,15,27-28]。Six等^[7]研究表明, 微团聚体保护的POM形成了一个SOC库, 它对于生态

系统的变化是敏感的, 是描述整个SOC储备的一个实质的量, 它的稳定化是长期的。本研究中, 有机肥的施用没有显著增加游离微团聚体结合的POM C, 而是显著增加了大团聚体内与微团聚体结合的POM C。这说明有机肥的施用促进大团聚体内的细POM与黏土矿物颗粒和微生物副产物形成了新的大团聚体内的微团聚体, 受大团聚体保护的微团聚体更为稳定, 它有利于C的累积。同时大量的POM C也积累在游离微团聚体内, intra-mM POM及intra-m POM 的总和组成了微团聚体内部总的稳定的POM组分, 由于微团聚体保护的有机C周转速率低, 在长期有机C稳定和储备中具有重要作用^[7,17,29]。

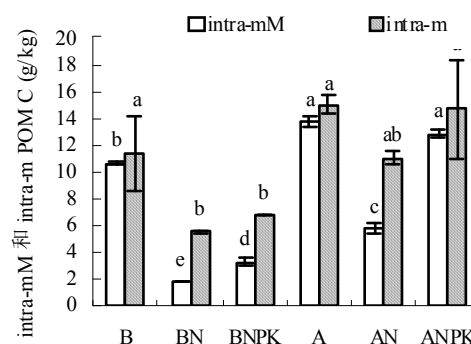


图3 不同施肥处理对 intra-mM 和 intra-m POM C 含量的影响

Fig 3 Effects of different fertilization treatments on contents of POM C in intra-mM and free intra-mM

3 结论

在设施蔬菜栽培条件下, 长期不同施肥处理提高了大团聚体内微团聚体之间的粗、细 POM C 含量, 其中, 有机肥和有机无机肥配施处理下的 POM C 含量要比单施无机肥处理高; 施用有机肥或有机肥与 NPK 化肥配施对提高大团聚体包裹的微团聚体内 (intra-mM) 和游离微团聚体内的 (intra-m) POM C 含量具有重要作用, 而长期单施无机肥对保持和提高 POM C 含量不利, 长期施用有机肥或有机肥与无机肥配合施用是保持和提高土壤 POM C 含量的重要措施。

参考文献:

- [1] Karlen DL, Mausbach MJ, Doran JW, Cline RG, Harris RF, Schuman GE. Soil quality: an concept definition and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 4-10
- [2] 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): 912-917

- [3] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environ Manag.*, 2003, 33: 528–544
- [4] 沈其荣, 徐阳春. 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
- [5] 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
- [6] Rudrappa L, Purakayastha TJ, Dhyani S, Bhadrarary S. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semiarid sub-tropical India. *Soil Tillage Res.*, 2005, 88: 180–192
- [7] Six J, Callewaert P, Lenders S, Gryze SD. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, 66: 1981–1987
- [8] 杜立宇, 潘大伟, 张鸿玲, 梁成华, 徐志强. 蔬菜保护地不同施肥处理对土壤钾含量的影响. *土壤通报*, 2006, 37(5): 945–949
- [9] Elliott ET. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986, 50: 627–633
- [10] Dalal RC, Mayer RJ. Long-term trends in fertility of soil under continuous cultivation and cereal cropping in southern queensland IV. Loss of organic carbon from different density fractions. *Aust. J. Soil Res.*, 1986, 24: 301–309
- [11] Six J, Elliott ET, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.*, 2000, 32: 2099–2103
- [12] Aoyama MD, Anger DA, Dayegamiye AN. Metabolism of C-labeled glucose in aggregates from soils with manure application. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 295–300
- [13] 张旭辉, 李恋卿, 潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响. *生态学杂志*, 2001, 20(2): 16–19
- [14] 徐江兵, 李成亮, 何园球, 王艳玲, 刘晓利. 不同施肥处理对旱地红壤团聚体中有机碳含量及其组分的影响. *土壤学报*, 2007, 44(4): 675–682
- [15] Denef K, Six J, Merckx R, Paustian K. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 1935–1944
- [16] Gale J, Cambardella CA, Bailey TB. Root-derived carbon and the formation and stabilization of aggregates. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 201–207
- [17] Jastrow JD. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 656–676
- [18] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Total and young organic matter distributions in aggregates of silty cultivated soils. *Eur. J. Soil Sci.*, 1995, 46: 449–459
- [19] Six J, Elliott ET, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 1350–1358
- [20] Kushwaha CP, Tripathi SK, Singh KP. Soil organic matter and water-stable aggregates under different tillage and residue conditions in an tropical dry land agroecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16: 229–241
- [21] Post WM, Kwon KC. Soil carbon sequestration and land use change: Processes and potential. *Global Change Biol.*, 2000, 6: 317–327
- [22] Whalen JK, Hu QC, Liu AG. Compost applications in crease water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2003, 67: 1842–1847
- [23] Guggenberge GS, Frey D, Six J, Paustian K, Elliot ET. Bacterial and fungal cell-wall residues in conventional and no-tillage agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, 63: 1188–1198
- [24] Mikha MM, Rice CW. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 809–816
- [25] Kanchikerimath M, Singh D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat- cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 2001, 86: 155–162
- [26] Yang XM, Zhang XP, Fang HJ. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of northeast China: RothC model simulations. *Environ. Manag.*, 2003, 32: 459–465
- [27] Galdo ID, Six J, Peressotti A, Cotrufo MF. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1204–1213
- [28] Six J, Elliott ET, Paustian K, Doran JW. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grass land soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1367–1377
- [29] Besnard E, Chenu C, Balesdent J, Puget R, Arrouays D. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 495–503

Effects of Different Fertilization Treatments on Organic Carbon Contents of Inter-Aggregate Particulate in Greenhouse Soil

CHEN Qian¹, LIANG Cheng-hua¹, DU Li-yu¹, CHEN Xin-zhi¹, WANG Feng²

(1 Soil and Environment College, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161, China;

2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: A long-term field experiment was carried out in Shenyang, Liaoning Province, northeastern China by using the fractionation techniques of aggregate and soil organic matter (SOM) in order to study the effect of long-term application of fertilizers on organic carbon content of soil intra-aggregate particulate (POM C). The results indicated aggregates $<53\ \mu\text{m}$ under long-term fertilization treatment transformed to microaggregate and macroaggregate, which was propitious to the enrichment of POM. The mean coarse POM C contents of inter-microaggregate within $250 \sim 2000\ \mu\text{m}$ macroaggregate under long-term organic manure or combined with inorganic fertilizers increased by 6.97 and 4.85 times respectively compared with the non-fertilization treatment. Fine POM C content changed erratically under different fertilization treatments. Fine POM C content was significantly higher than coarse POM C. In addition, application of organic manure or combined with inorganic fertilizers increased significantly POM C contents of intra-microaggregate within $250 \sim 2000\ \mu\text{m}$ macroaggregate and free intra-microaggregate (except AN treatment), while inorganic fertilizers decreased them by 22.5% ~ 21.1% .

Key words: Long-term fertilization, Soil aggregate, Soil organic carbon, Physical fractionation