

农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳 组分和团聚体稳定性的影响

杨长明^{1,2}, 欧阳竹², 杨林章³, 董玉红²

(1. 同济大学长江水环境教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所禹城站, 北京 100101;
3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:作为土壤质量的重要指标,土壤有机碳及其组分在土壤许多物理、化学和生物特性中发挥着重要作用。以在华北平原具有代表性的禹城市作为研究区域,系统研究和分析了该地区不同农业土地利用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响。结果表明:与传统小麦-玉米轮作的粮田相比,果树和苜蓿栽培明显增加了土壤总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量,同时也显著提高了土壤易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、轻组有机碳(LFOC)和水溶性有机碳(WSOC)含量和分配比例。果园土壤微生物量C(MBC)和可矿化碳(MNC)较传统粮田的土壤分别增加了34.0.5%和66.3%。果树栽培还明显增加了土壤>250 μ m水稳性团聚体(WSA)的含量,同时减少了土壤粘粒分散率(CDR)。苜蓿栽培也显著提高了土壤MBC和MNC含量以及团聚体稳定性。温室大棚栽培前期(2~3a)的土壤TOC和TN较传统粮田略有增加,但随着耕作历史的增加,土壤TOC和TN呈现逐年下降的趋势。与传统粮田相比,温室大棚内的土壤LOC、POC、LFOC和WSOC含量与比例均有明显下降,这种下降幅度随栽培历史的延长而明显增加。7~10a温室大棚栽培的土壤EOC、POC、LFOC和WSOC含量较传统粮田分别下降了31.3%,41.7%,35.6%和42.1%。温室大棚栽培的土壤MBC和MNC较传统粮田的土壤平均分别低15.9%和10.1%。温室大棚栽培,特别是长期栽培降低了土壤中>250 μ m水稳性团聚体的含量和粘粒的稳定性。相关分析表明,土壤>250 μ m水稳性团聚体的含量与所测定的有机碳组分含量皆成明显的正相关,特别是POC、LFOC和MBC与WSA达到极显著相关,相关系数分别为0.912,0.893,0.856。这表明,土壤POC、LFOC和MBC对维持土壤团聚体稳定性具有更为重要意义。

关键词:华北平原;农业土地利用方式;有机碳组分;微生物生物量碳;团聚体稳定性

文章编号:1000-0933(2006)12-4148-08 中图分类号:S153.6 文献标识码:A

Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the Northern China Plain

YANG Chang-Ming^{1,2}, OUYANG Zhu², YANG Lin Zhang³, DONG Yu-Hong² (1. Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4148~4155.

Abstract:As an essential indicator of soil quality, soil organic carbon (SOC) and its fractions play an important role in soil chemical, physical, and biological properties. The effects of agricultural land uses on soil organic carbon fractions and aggregate stability were studied in an Fluvo-aquic soil in Yucheng city, Shangdong Province of Northern China. Five agricultural land uses were investigated as following: () crop field with wheat-maize rotation, () orchard field, () clover field, () greenhouse vegetable cultivation (2~3a), and () greenhouse vegetable cultivation (7~10a). Orchard soils showed highest total organic

基金项目:国家重点基础研究发展项目“973”前期专项资助项目(2003CCB001)

收稿日期:2005-08-28;修订日期:2005-12-10

作者简介:杨长明(1973~),男,安徽巢湖人,博士,主要从事土壤和湿地环境退化过程及其机理研究。E-mail:cmyang@mail.tongji.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Key Research Project (No. 2003CCB001)

Received date: 2005-08-28; Accepted date: 2005-12-10

Biography: YANG Chang-Ming, Ph. D, Associate professor, mainly engaged in soil and wetland degradation process and its mechanisms. E-mail: cmyang@mail.tongji.edu.cn

carbon (TOC) followed by clover field and greenhouse cultivation (2—3a) soils. By fractionalizing SOC, Orchard and clover soils showed significantly ($p < 0.05$) higher soil easily oxidizable C (EOC), particulate organic C (POC), light fraction organic C (LFOC) and water-soluble organic C (WSOC), relative to wheat-maize rotation. For orchard soils, the proportions of EOC, POC, LFOC, and WSOC as a percent of TOC were highest among all the agricultural land uses. Fruit cultivation increased soil microbial biomass carbon (MBC) and soil mineralisable organic carbon (MNC) by 34.0 % and 66.3 %, respectively, as compared to the wheat-maize rotation. Fruit cultivation increased significantly ($p < 0.05$) the content of soil water-stable aggregate $> 250\mu\text{m}$ (WSA), as well as decreased soil clay dispersion rate (CDR). Conversion of crop field with wheat-maize rotation into clover cultivation also greatly improved soil MBC, MNC, and soil aggregate stability.

Greenhouse vegetable cultivation (2—3a) had slightly higher TOC, LOC, POC, LFOC and WSOC than the wheat-maize rotation. However, TOC and the investigated soil organic fractions f unchangeably declined with the increase of cultivation period. Soil LOC, POC, LFOC and WSOC for greenhouse vegetable cultivation (7—10a) decreased by 31.3 %, 41.7 %, 45.6 % and 42.1 %, respectively, compared to the wheat-maize rotation. Greenhouse vegetable cultivation showed significantly ($p < 0.05$) lower soil MBC and MNC than the wheat-maize rotation. Greenhouse cultivation (7—10a) decreased soil WSA, and increased CDR, as compared to the wheat-maize rotation. Correlation analysis showed that soil WAS and CDR was significantly ($p < 0.01$ or $p < 0.05$) related to SOC and its fractions. More significant ($p < 0.01$) correlations between WSA and POC, LFOC, and MBC were found with the coefficients (r) of 0.912, 0.893, 0.856, which suggests that POC, LFOC, and MBC play a vital role in maintaining soil aggregate stability.

Key words: Northern China Plain; agricultural land uses; organic carbon fractions; microbial biomass C; soil aggregate stability

土壤有机碳(SOC)由于其在土壤物理、化学和生物学特性中发挥着极其重要的作用,故被认为是土壤质量的一个重要指标^[1~3]。但是,由于土壤中总有机碳(TOC)可能在较短时间内对因农业管理措施改变导致的变化比较缓慢^[4],因此,通过总有机碳的测定很难及时、准确反映土壤质量的内在变化。过去一些研究结果已表明,农业土壤有机碳中某些组分在维持土壤质量中发挥着更大的作用^[5~7],特别是土壤中活性有机碳(LOC)、轻组有机碳(LFOC)和颗粒有机碳(POC)的含量对不同耕作方式的反应较总有机碳更为迅速^[8~10]。因此,与土壤总有机碳相比,这些组分有机碳更可能作为反映土壤质量变化的敏感性指标。对森林土壤研究也表明,土壤LFOC和POC对土地利用方式的改变的反应较为敏感,可作为土壤表征C库变化的敏感性指标^[11]。土壤微生物生物量C虽然只占土壤总有机碳极少的一部分(一般约为5%~8%),但是由于其具有较高的活性和动态性,土壤微生物生物量C在养分循环和维持生态系统功能中发挥重要的作用^[12,13]。基于土壤有机碳组分在本质特性的差异,测定某些更小或更为活泼的土壤有机碳组分含量和分布特征对于表征因土壤管理措施引起的土壤有机碳质量的改变具有重要意义。

华北平原是我国重要的粮食生产基地,潮土是该地区分布最广,并具有代表性的土壤类型。传统小麦-玉米轮作是该地区主要的农业土地利用方式。近20a来,随着市场经济的发展和农业产业结构的不断调整,该地区果蔬种植发展迅速,粮食种植面积在呈现不断下降趋势。农业土地利用方式的转变将不可避免带来土壤质量的变化。目前关于该地区农业土地利用改变对土壤有机碳及其组分的研究尚未见报道。本文通过对禹城地区不同农业土地利用方式下的土壤有机碳组分和团聚体稳定性指标的测定和分析,旨在揭示华北平原农业土地利用改变对土壤质量的影响机制,为该地区土壤资源质量的调控和可持续利用提供理论依据。

1 研究区域自然概况与研究方法

1.1 研究区域自然概况

选择在华北平原具有代表性的禹城市作为研究区域,该市地处鲁西北(东经116°22'~116°45',北纬36°40'~37°12'),属暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温13.1℃,降雨量582mm,水面蒸发力952mm,太阳辐射总量5225MJ·m⁻²,日照时数2640h,大于0℃积温为4951℃,大于10℃积温为4441℃,无霜期200d,光热资源丰富,雨热同期,有利于农业生产。该地区地貌类型为黄河冲积平原,土壤母质为黄河冲积物,土壤类型为潮土,

表土质地为轻-中壤土。小麦-玉米轮作一直是该地区主要的农业土地利用方式。自 20 世纪 80 年代末,随着农业产业结构的调整,该地区果树和大棚蔬菜种植面积不断扩大。2002 年该地区蔬菜大棚面积和果园面积分别约为 15320hm² 和 2073hm²,较 1985 年分别增加了 314 %和 158 %。

1.2 研究方法

1.2.1 农业土地利用类型的选择 根据禹城地区农业结构布局特征,本研究将该地区农业土地利用类型分为:()传统的小麦-玉米轮作粮田,施肥以化肥为主;()果园,包括苹果园和桃园,耕作历史一般在 7a 以上,施肥以农家有机肥为主;()苜蓿地,施肥以有机肥和化肥配施为主,每年苜蓿作为饲料收割 4~5 次,留 4~5cm 残茬;耕作历史一般在 7a 以上;()温室大棚用地,主要包括西红柿,黄瓜和青菜栽培,每年收获 4~5 茬,施肥以化(氮)肥为主,少量施以有机肥,耕作较为频繁。大棚顶膜覆盖期一般从 11 月至翌年 5 月份。根据其栽培历史又可分为 2 种类型,即 2~3a 和 7~10a;(3)果园,耕作历史一般为 7~10a,施肥以农家肥为主,少耕或免耕。温室大棚用地、果园和苜蓿地之前皆为传统的小麦-玉米轮作的粮田。每个农业土地利用类型各选 3~4 块样方,样方面积约为 50m²。

1.2.2 土壤样品的采集与处理 采样时间为 2003 年 10 月 20 日。采用 S 形的布点方法对每块样地进行采样,在各个样地内布设 15 个点,除去表面枯叶和秸秆后,用内径为 5cm 的土钻取 0~15cm 土壤样品,同时用 100cm³ 环刀测定土壤容重。将各个样方的土样混合,制成混合样,然后用四分法取出足够的样品。新鲜土样通过 2mm 筛后,一部分风干后,用于土壤理化指标的测定,另一部分于冰箱内冷藏(4℃, < 72h),以作微生物生物量 C 和可矿化 C 分析之用。土壤有机碳(SOC)以 K₂Cr₂O₇ (稀释热法)进行测定^[14];土壤总氮采用开氏消煮法^[15]。其它理化指标按常规测定方法^[14]。

1.2.3 土壤有机碳组分分离 土壤易氧化有机碳(EOC)根据 Blair 等描述的方法进行测定^[16]。称取一定量的待测土壤样品(约含有机碳 15~30mg)与 333mmol L⁻¹ KMnO₄ 溶液反应 1h,土壤中 EOC 的含量可利用分光光度计法,由被还原的 KMnO₄ 数量所决定。

土壤轻组分有机碳(LFOC)是介于新鲜作物残体和稳态有机质的一种过度状态,它可以利用一定密度的重液,通过浮选法进行分离^[17]。本次实验是将过 2mm 筛的风干土样 20.0g,放在装有 200ml 密度为 1.8 g cm⁻³ 的 NaI 溶液的玻璃离心管中,搅拌震荡数秒后,用 NaI 溶液将附着在管壁和玻璃棒上的颗粒洗入悬浮液中,静置 30min 后放置离心机中进行离心(825r 30min⁻¹)。利用玻璃滤纸对悬浮液进行真空过滤,并用去离子水洗去剩余的 NaI 溶液。将浮在滤纸上物质放 65℃ 的烘箱中烘干 12h,烘干后称量,然后进行有机碳含量分析。

土壤中颗粒有机碳组分(POC)(53~2000μm)的分离是根据 Cambardell 和 Elliott 的方法^[18],并作了一些改进。具体方法为:称取 20g 风干土样(<2mm)放入 100ml (NaPO₃)₆ (5g L⁻¹) 的溶液中,先手摇 15min,然后放入往复式震荡机(90r min⁻¹)中震荡 18h。土壤悬浮液过 53μm 筛,并反复用去离子水冲洗。将滞留在网筛上的物质放在 60℃ 下烘干 12h。称重、研磨过 0.5mm 孔筛用作有机碳分析之用。

水溶性有机碳(WSOC)的测定方法:称取 20g 新鲜土样放入 50ml 蒸馏水中震荡 1h,过滤,然后将滤液收集起来进行离心 15min(1000r/min)。将浮在表层的物质通过抽吸装置,用带有孔径为 0.45μm 的滤膜进行过滤。澄清的滤液中的总有机碳即为水溶性有机碳。

1.2.4 土壤微生物生物量 C 和可矿化 C 的测定 土壤微生物量 C:取相当于烘干土 50g 的新鲜土样 5 份于烧杯中,3 份放入真空干燥器中,同时在干燥器内放入盛氯仿和水的小烧杯,抽气直至氯仿沸腾,将干燥器放置温室 25℃ 下熏蒸 24h。除去氯仿,加 0.5mol/L K₂SO₄ 提取液(土:水=1:2),在往复式振荡机上振荡 30min,过滤。与此同时,另两份土样直接加入 0.5mol/L K₂SO₄ 提取液,振荡过滤。提取液中 C 的测定用重铬酸钾-硫酸消煮,硫酸亚铁滴定法;土壤微生物 C 含量以熏蒸和未熏蒸土样 0.5mol/L K₂SO₄ 提取液中 C 含量之差乘以转换系数 KEC 得到^[19]。

土壤可矿化碳(MNC)通过室内培养法进行估算,即称取新鲜土样 25g 放入玻璃瓶中,用蒸馏水调至最大

田间持水量,在室温为 25 ℃下密封培养 30d。所释放的 CO₂ 用 10mm 浓度为 1mol/L NaOH 的溶液吸收。在培养过程中,每隔 3d 用 HCl 溶液滴定法计算累计 CO₂ 释放量^[20]。

1.2.5 土壤水稳性团聚体和粘粒分散系数的测定 土壤中 > 250μm 水稳性团聚体 (WSA) 含量通过湿筛法进行测定。称取约 20g 风干土样 (1 ~ 10mm), 利用孔径为 250μm 的筛子在圆柱型容器中湿筛 10min。同时,以每秒 30 下的频率进行敲击。湿筛后,将容器用手反复倒置 10 次,然后计算大于 250μm 水稳性团聚体的含量。

土壤粘粒分散性根据 Burt 等的方法^[21],稍作修改:将称取处理好的风干土 (< 3mm) 1.5000g 移入 250ml 的容器中,用去离子水将容器加满至 250ml。将容器在以 90r/min 的震荡器上进行震荡约 3h,被分散粘粒 (< 0.002mm) 的数量利用浊度计,并通过绘制每种类型粘粒含量与浊度的标准曲线进行测定。用被分散的粘粒占总粘粒的比例作为土壤粘粒分散率 (DCR)。

1.3 数据统计与分析

所有试验数据通过 ANOVA 变异分析程序进行统计分析。采用邓肯新复检验法 (Duncan's New Multiple Range Test) 对不同农业土地利用方式的差异进行统计估计。不同农业土地利用方式在 5 % 的概率水平视为显著。所有数据测定结果以平均值 ± 标准误的形式表达。通过回归分析和回归系数描述土壤中 > 250μm 水稳性团聚体含量和粘粒分散率与土壤有机碳组分的相关性程度。以上统计分析均利用 SPSS(10.0) 软件进行。

2 结果与分析

2.1 农业土地利用方式对潮土土壤总有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 的影响

图 1 为不同农业土地利用方式下土壤总有机碳 (TOC) 和总氮的测定结果。TOC 含量以果园土壤为最高,其次为苜蓿地土壤 (图 1(a))。与传统农田相比,果园和苜蓿栽培土壤 TOC 分别提高了 54.8 % 和 33.1 %。较传统农田相比,温室大棚栽培前 2 ~ 3a 对土壤有机碳略有增加,但随着温室大棚的年限的增加,土壤 TOC 出现下降的现象。与土壤 TOC 变化不同,温室大棚显示了最高的土壤总氮 (TN) 含量,而且随着大棚年限的增加,TN 增加更为明显 (图 1(b))。果园和苜蓿地土壤 TN 较传统粮田也有明显 ($p < 0.05$) 的增加,且苜蓿栽培对 TN 的增加幅度要高于果园。

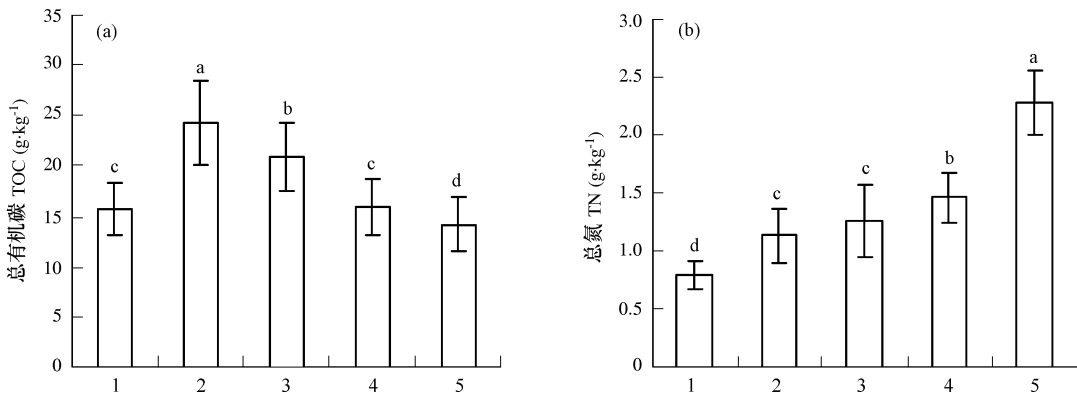


图 1 不同农业土地利用方式对潮土土壤总有机碳 (TOC) (a) 和总氮 (TN) (b) 的影响

Fig. 1 Effect of agricultural land uses on soil total organic carbon (TOC) (a) and total nitrogen (TN) (b) Thin bars represent standard errors

1. 传统粮田 Wheat-maize rotation; 2. 果园 Orchard field; 3. 苜蓿地 Clover field; 4. 温室大棚 (2 ~ 3a) Greenhouse vegetable cultivation (2 ~ 3a); 5. 温室大棚 (7 ~ 10a) Greenhouse vegetable cultivation (7 ~ 10a); 下同 the same below

2.2 农业土地利用方式对土壤有机碳组分含量与分配的影响

通过对不同农业土地利用方式下的土壤有机碳进行组分分离和测定,结果显示,土壤易氧化有机碳 (EOC)、颗粒性有机碳 (POC)、轻组分有机碳 (LFOC) 和水溶性有机碳 (WSOC) 含量变化范围分别为 1.27 ~ 3.78g · kg⁻¹、3.72 ~ 12.56g · kg⁻¹、3.98 ~ 11.31g · kg⁻¹ 和 10.21 ~ 23.84mg · kg⁻¹, 其占 TOC 的比例平均分别为 12.0 %、36.6 %、34.2 % 和 0.08 %。由表 1 可明显看出,不同农业土地利用方式下土壤易氧化有机碳 (EOC)、颗

粒性有机碳(POC)、轻组分有机碳(LFOC)和水溶性有机碳(WSOC)含量和分配比例存在明显差异。与传统小麦-玉米农田土壤相比较,果园土壤 EOC、POC、LFOC 和 WSOC 的含量分别提高了 104.3 %、124.6 %、136.4 %和 106.4 %,苜蓿地土壤则分别提高了 61.1 %、64.7 %、74.7 %和 40.0 %。而且,果园和苜蓿栽培也明显提高了 EOC、POC 和 LFOC 在 TOC 所占的比例。

表 1 农业土地利用方式对土壤活性有机碳、颗粒有机碳和轻组分有机碳的影响^{*}

Table 1 Effect of agricultural land uses on soil easily-oxidisable organic carbon (EOC), particulate organic carbon (POC), light fraction carbon (LFOC) and water-soluble organic carbon (WSOC)

农业土地利用方式 Agricultural land uses	EOC (g kg ⁻¹)	EOC/TOC (%)	POC (g kg ⁻¹)	POC/TOC (%)	LFOC (g kg ⁻¹)	EOC/TOC (%)	WSOC (mg kg ⁻¹)	WSOC/TOC (%)
传统粮田 Wheat-maize rotation	1.85c(0.43)	11.8	5.61c(0.83)	35.7	4.78c(0.73)	30.4	12.5c(2.25)	0.08
果树栽培 Fruit cultivation	3.78a(0.75)	15.6	12.6a(2.25)	51.7	11.3a(2.02)	46.5	25.8a(4.79)	0.11
苜蓿地 Clover field	2.98b(0.55)	14.2	9.24b(1.43)	44.2	8.35b(1.41)	40.0	17.5b(3.12)	0.09
设施栽培 (2~3) Greenhouse vegetable cultivation (2~3)	1.63c(0.39)	9.62	4.43d(0.86)	28.4	4.12cd(0.77)	25.9	11.1c(1.85)	0.07
设施栽培 (7~10) Greenhouse vegetable cultivation (7~10)	1.27d(0.44)	8.94	3.27e(0.67)	23.1	3.08d(0.82)	28.0	7.24d(1.32)	0.07

^{*}表中数据为平均值,括号内为标准误,字母相同表示差异不显著;字母不同表示 $p < 0.05$ 水平的显著差异 The data in table were expressed as means; The data in parenthesis denote S. E. Means followed the same letter are not significantly different at 5 % level by Duncan's multiple range test

传统粮田改变为温室大棚蔬菜种植后降低了土壤 EOC、POC、LFOC 和 WSOC 的含量和分配比例,其中温室大棚(2~3a)土壤 EOC、POC、LFOC 和 WSOC 含量较传统小麦-玉米粮田分别降低了 11.9 %、21.0 %、13.8 %和 11.2 %,而温室大棚(7~10a)降低幅度更大,分别为 31.3 %、41.7 %、35.6 %和 42.1 %。表明,在现有的农业管理措施下,长期温室蔬菜栽培的农业土地利用方式不利于土壤有机碳质量的改善。

2.3 农业土地利用方式对土壤微生物碳和可矿化碳的影响

土壤微生物生物量碳(MBC)和可矿化碳(MNC)是土壤活性有机碳的重要组成部分,而且在土壤 C 循环和周转中起着关键性的作用。图 2 为不同农业土地利用方式下表层土壤微生物生物量碳(MBC)和累积可矿化碳(MNC)的测定结果。由图 2 可明显看出,土壤微生物生物量碳(MBC)和累积可矿化碳(MNC)以果园土壤为最高,苜蓿地次之,温室大棚平均为最低。与传统小麦-玉米农田土壤相比较,果园土壤 MBC 和 MNC 分别增加了 34.0 %和 66.3 %。温室蔬菜栽培则降低了土壤 MBC 和 MNC,特别是温室大棚(7~10a)土壤 MBC 和 MNC 较传统小麦-玉米农田土壤相比较,分别下降了 20.5 %和 12.6 %,表明,传统小麦-玉米农田改变为温室大棚后,大大降低了土壤微生物生物量 C 和累积可矿化 C 的含量。

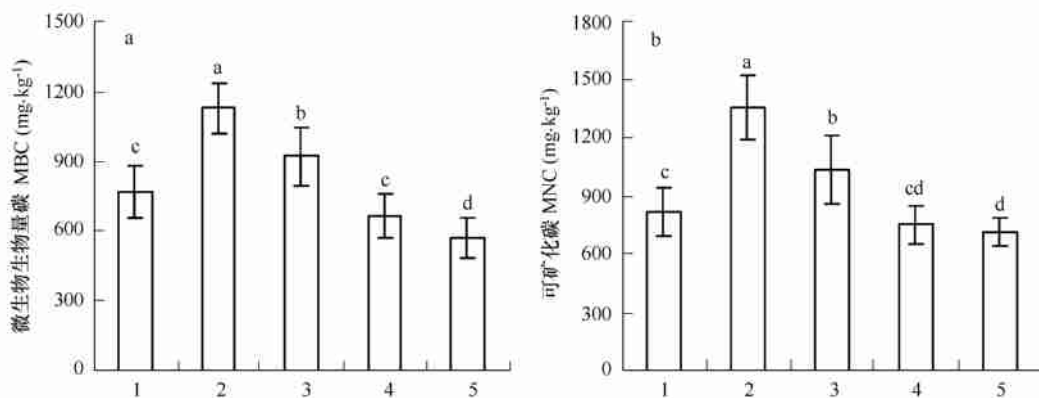


图 2 不同农业土地利用方式对土壤微生物生物量 C 和可矿化 C 的影响

Fig. 2 Effect of agricultural land uses on soil microbial biomass C and mineralizable carbon

[†] 表示标准误 Thin bars represent standard errors,下同 the same below

2.4 农业土地利用方式对土壤团聚体含量和粘粒分散性的影响

土壤中水稳性团聚体含量和粘粒分散率是表征土壤团聚体稳定性的两个重要指标。图 3 为不同农业土地利用方式对土壤 > 250μm 水稳性团聚体含量 (WSA) 和粘粒分散率 (CDR) 的影响。从图 3(a) 明显看出,土壤 > 250μm 水稳性团聚体含量 (WSA) 以果园为最高,苜蓿地次之,温室大棚为最低。与传统小麦-玉米粮田相比,果园和苜蓿地土壤 WSA 分别提高了 118.9 %和 92.1 %。温室大棚 (2 ~ 3a) 和温室大棚 (7 ~ 10a) 土壤 WSA 较传统粮田分别降低了 20.4 %和 41.3 %。与传统小麦-玉米粮田相比,果园和苜蓿地明显 ($p < 0.05$) 降低了土壤粘粒分散率 (CDR),且果园土地利用方式对土壤 CDR 降低效果更为明显 (图 3(b))。温室大棚栽培增加了土壤 CDR,且随着温室大棚种植年数的增加,其增加幅度更为明显。

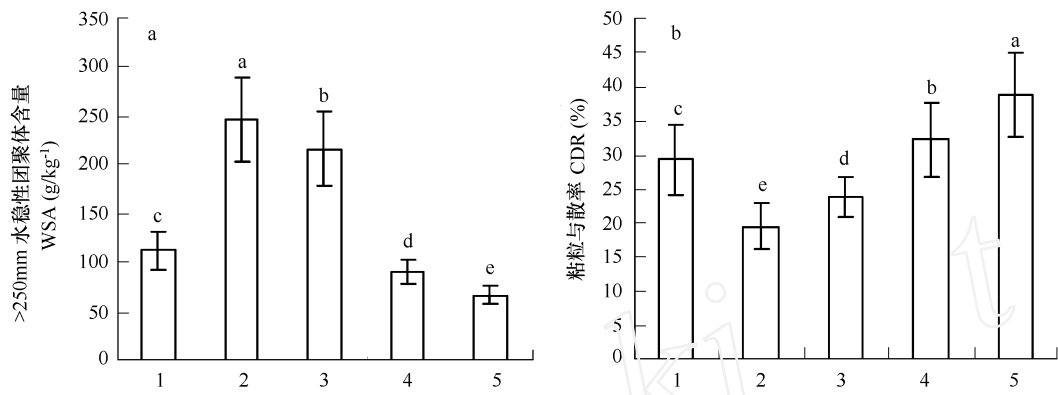


图 3 不同农业土地利用方式对土壤 > 250μm 水稳性团聚体含量和粘粒分散率的影响

Fig. 3 Effect of agricultural land uses on soil > 250 μm water stable aggregates content (WSA) and clay dispersion rate (CDR)

2.5 土壤团聚体稳定性与土壤有机碳及其组分的相关性分析

将不同农业土地利用方式下所测定的土壤团聚体稳定性指标和土壤有机碳及其组分进行相关分析结果显示 (表 2),土壤 > 250μm 水稳性团聚体 (WSA) 含量与所测定的土壤有机碳及其组分含量呈显著的正相关 ($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$),特别是 WSA 与 LFOC、MBC 和 POC 之间的正相关性达到极显著水平,相关系数分别达到 0.893^{**}、0.856^{**}和 0.912^{**}。除 MNC 外,土壤的粘粒分散率 (CDR) 与土壤有机碳及其各组分的负相关性皆达到显著水平 ($p < 0.05$),其中与 LFOC、MBC 和 POC 之间的相关系数 r 分别为 - 0.816^{*}、- 0.805^{*}和 - 0.849^{*}。

表 2 土壤有机碳组分与土壤水稳性团聚体 (> 250μm) 和粘粒分散率的相关系数 (r)

Table 2 Linear correlation coefficients (r) of the relationship between soil organic carbon fractions and water stable aggregates content (WSA) and clay dispersion rate (CDR)

团聚体稳定性指标 Aggregate stability	土壤有机碳组分 Organic carbon fractions						
	TOC	EOC	LFOC	POC	WSOC	MBC	MNC
WSA	0.782 [*]	0.813 [*]	0.893 ^{**}	0.912 ^{**}	0.723 [*]	0.856 ^{**}	0.769 [*]
CDR	- 0.715 [*]	- 0.754 [*]	- 0.816 [*]	- 0.849 ^{**}	- 0.692 [*]	- 0.805 [*]	- 0.623

显著差异 Denote significant level; * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

3 讨论与结论

有机碳作为土壤的一个重要组成部分,其在维持土壤的物理、化学和生物学特征中起着关键性的作用^[1,3],故被用来作为土壤质量或健康评价的一个不可或缺的指标^[22]。维持和提高土壤有机碳的含量已成为可持续农业管理体系的一个重要目标。但许多研究发现,土壤总有机碳 (TOC) 对因不同管理措施导致的土壤质量的变化不甚敏感^[4,10,11]。近年来,通过一些物理的、化学的和微生物的方法,对土壤有机碳组分特征进行了探索性研究^[12,17~19]。一些研究发现,土壤有机碳某些组分,特别是活性组分与土壤质量的关系更为密

切^[23,24],对不同土地利用方式和农业管理措施的变化反应也更为迅速和敏感^[25]。目前对华北平原潮土的研究也显示,因农业土地利用方式的改变所导致的土壤中总有机碳(TOC)和所测定的不同有机碳组分的变化幅度存在明显差异,EOC、POC、LFOC、MBC 和 MNC 的变化幅度要明显高于 TOC 的变化幅度,说明与 TOC 相比,这几种有机碳组分对因不同农业土地利用方式改变所引起的土壤质量变化更为敏感。

土地利用方式的改变将会对土壤质量产生重大影响,其中主要表现在土壤有机碳及其组分衰减和增加^[10]。通过对土壤有机碳及其不同活性组分进行测定,就可以有效揭示土地利用方式改变对土壤质量的影响及其机理。许多研究表明,将草原和林地开垦为农田后,导致土壤有机碳迅速衰减^[10,19,26]。相反,将农田恢复为林地和草地后,有利于土壤有机碳含量的恢复和增加。将传统的粮田改变成果园、苜蓿地或温室大棚等土地利用方式后,对土壤总有机碳和不同组分有机碳含量产生显著的影响,这主要是由于土地利用方式变化后,改变了农业管理措施,特别是对土壤有机碳含量和质量密切相关的土壤耕作和施肥方式。与传统粮田相比,果园和苜蓿地表现了较高的土壤总有机碳和活性有机碳组分含量,这主要原因可能是由传统粮田改变为果园或苜蓿地后,大大减少了土壤的耕作强度和频率,降低了土壤有机碳,特别是活性有机碳组分的暴露和分解。同时,有机肥料施用对土壤有机碳及其组分的增加也发挥着重要作用。另外,在果园和苜蓿地的土地利用方式下,每年有大量的植物凋零物或残茬进入土壤,这也可能有助于提高土壤有机碳,特别是许多活性有机碳组分含量。

与传统粮田相比,日光温室大棚蔬菜栽培,明显降低了土壤总有机碳和活性有机碳组分含量,这除了在蔬菜栽培过程中的较强的频繁耕作之外,每年较大的生物量的移出和较少有机物质的归还也是导致土壤有机碳及其组分衰减的一个重要原因。据考察,大棚蔬菜栽培每年要收获 4~5 茬,其因收获所带走的生物量大大高于有机物质的添加量。另外,由于温室效应,日光蔬菜大棚内的年平均温度一般要高出棚外约 7~8℃。气温上升使得土壤微生物代谢增强,从而导致土壤有机碳的分解加速^[27,28]。

土壤团聚体稳定性是土壤物理质量的综合体现^[29]。农业土壤团聚体稳定性除了受到土壤本身特征影响之外,土地利用方式和农业管理措施是影响土壤团聚体稳定性的重要因素^[29,30]。研究表明,不同农业土地利用方式下土壤 > 250 μm 水稳性团聚体含量和粘粒分散率表现出显著差异,这主要由于不同农业土地利用方式所导致的土壤管理措施的改变所造成的。从本质上,土壤团聚体稳定性取决于土壤特性,特别是土壤有机碳的含量^[31,32]。本研究中土壤 > 250 μm 水稳性团聚体含量和粘粒分散率与土壤总有机碳的显著相关性,也证明了这一点。同时,也不难发现,与土壤 TOC 相比,土壤 EOC、POC、LFOC 和 MBC 等有机碳组分与土壤团聚体稳定性指标之间的相关性更为显著,说明这几种土壤中有机碳组分对土壤团聚体稳定性的贡献率较土壤总有机碳更大。

References:

- [1] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping system. *Soil Till. Res.*, 1997, 43: 131~167.
- [2] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66: 95~106.
- [3] Herrick J E, Wander M M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: Lal, R., et al. eds. *Soil Processes and the Carbon Cycle*, Adv. Soil Sci. CRC Press, Boca Raton, FL, 1998, 405~425.
- [4] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a leithbridge soil. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74: 131~138.
- [5] Wang J, Xie H T, Zhu P, et al. Cannotation and modern analysis method for active soil organic matter (carbon). *Chinese Journal of Ecology*, 2003, 22: 109~112.
- [6] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys. *Soil Science*, 2001, 166: 61~67.
- [7] Chan K Y, Heenan D P, Oates A. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil Till. Res.*, 2002, 63: 133~139.
- [8] Freixo A A, Machado P L, Santos H P. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in

- southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 2002, 64: 221 ~ 230.
- [9] Janzen H H, Campbell C A, Brandt S A. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1799 ~ 1808.
- [10] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, *et al.* Effect of tillage and rotation on organic forms of chernozemic soils in Saskachwan. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166: 328 ~ 335.
- [11] Yang Y S, Liu Y L, Chen G S, *et al.* Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24: 1 ~ 8.
- [12] Powelson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provided an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biol. Biochem.*, 1989, 19: 159 ~ 164.
- [13] Margarita Sicardi, Fernando Garc ía Pr éhac, Lillian Frioni. Soil microbial indicators sensitive to land use conversion from pastures to commercial *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) plantations in Uruguay. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27: 125 ~ 133.
- [14] Lu R K. Method of analysis in soil and agrochemistry. Beijing: Agricultural Press, 1999.
- [15] Nelson D W, Sommers L E. Total nitrogen analysis of soil and plant tissues. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.*, 1980, 63: 770 ~ 778.
- [16] Blair G J, Lefory R D. Soil C fractions based on their degree of oxidation and the development of a C management index for agricultural system. *Aust. J. Agri. Res.*, 1995, 46: 1459 ~ 1466.
- [17] Gregorich E G, Ellert B H. Light fraction and macroorganic matter in mineral soil. In: M. R. Carter ed. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Canadian Society of Soil Science, 1993. 397 ~ 407.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 777 ~ 778.
- [19] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial C. *Soil Biol. Biochem.*, 1987, 19: 703 ~ 707.
- [20] Anderson J P. Soil respiration. In: A. L. Page *et al.* ed. *Methods of soil analysis. Part 2*. 2nd ed. *Agron. Monogr.* 9. ASA and SSSA, Madison, WI, 1982, 831 ~ 871.
- [21] Burt R, Reinsch, Miller W P. A micro-pipette method for water dispersible clay. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 1993, 24: 2531 ~ 2544.
- [22] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1997, 61: 4 ~ 10.
- [23] Campbell M R, Biederbeck V O, McConkey B G. Soil quality-effect of tillage and fallow frequency. Soil organic matter quality as influenced by tillage and fallow frequency in a silt loam in southwestern Saskatchewan. *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 1 ~ 7.
- [24] Wang Q K, Wang S L, Fen Z W, *et al.* Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25: 513 ~ 519.
- [25] Bremer E, Janzen H H, Johnston A M. Sensitivity of total, light fraction and mineralizable organic matter to management practices in a leithbridge soil. *Can. J. Soil Sci.*, 1994, 74: 131 ~ 138.
- [26] Carter M R, Gregorich E G, Angers D A, *et al.* Organic C and N storage, and organic C fractions, in adjacent cultivated and forested soils of eastern Canada. *Soil Till. Res.*, 1998, 47: 253 ~ 261.
- [27] Huang Y, Liu S L, Zong L G, *et al.* Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2002, 13: 709 ~ 714.
- [28] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic C storage. *Soil Biol Biochem*, 1995, 27: 753 ~ 760.
- [29] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 2005, 124: 3 ~ 22.
- [30] Pinheiro E F M, Pereira M G, Anjos L H C. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2004, 77: 79 ~ 84.
- [31] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, 2001, 99: 123 ~ 145.
- [32] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23: 2176 ~ 2183.

参考文献:

- [5] 王晶, 谢宏图, 朱平, 李晓云. 土壤活性有机质(碳)的内涵和现代分析方法概述. *生态学杂志*, 2003, 22 (6): 109 ~ 112.
- [11] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机碳含量及其分配. *生态学报*, 2004, 24, 1 ~ 8.
- [14] 鲁如坤. 土壤和农业化学分析方法. 北京: 农业出版社, 1999.
- [24] 王奎奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. *生态学报*, 2005, 25: 513 ~ 519.
- [27] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. *应用生态学报*, 2002, 13: 709 ~ 714.
- [32] 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, 2176 ~ 2183.