

不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体 及有机碳分布的影响

刘恩科^{1,2}, 赵秉强^{3,*}, 梅旭荣^{1,2}, HWAT Bing-So⁴, 李秀英³, 李娟³

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081;

3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4. Griffith School of Engineering, Griffith University, Nathan, Q 4111, Australia)

摘要:以国家褐潮土 16a 的长期肥料试验为平台(北京昌平),研究长期不同施肥对耕层土壤水稳定性团聚体及其有机碳的影响。主要研究结果:与耕种农田土壤相比,长期撂荒(CK0)可以提高水稳定性大团聚体的含量及其有机碳含量和储量。而农田耕作后,破坏了水稳性大团聚体,相应地增加水稳性微团聚体的含量。与长期不施肥种植作物(CK)相比,长期施氮磷钾肥(NPK)、氮磷钾配施有机肥(NPKM)和氮磷钾秸秆还田(NPKS)处理对水稳性团聚体数量分布和平均重量直径(MWD)有显著影响,其中对 $>2\text{mm}$ 和 $0.25-2\text{mm}$ 水稳性大团聚体的促进作用最明显,说明施肥处理增加的新碳主要向 $0.25-2\text{mm}$ 和 $>2\text{mm}$ 团聚体富集。在不同水平水稳性团聚体中, $>2\text{mm}$ 和 $0.25-2\text{mm}$ 两个级别的水稳性大团聚体有机碳的含量显著高于 $0.053-0.25\text{mm}$ 和 $<0.053\text{mm}$ 水稳性微团聚体。化肥与有机肥配施(NPKM)处理可提高水稳性大团聚体含量,改善土壤团聚体的结构。长期小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPKF)各级团聚体中有机碳的含量高于长期小麦-玉米轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPK)。

关键词:长期肥料试验;水稳定性团聚体;有机碳;碳储量

Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application

LIU Enke^{1,2}, ZHAO Bingqiang^{3,*}, MEI Xurong^{1,2}, HWAT Bingso⁴, LI Xiuying³, LI Juan³

1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS, Beijing 100081, China

2 Key Laboratory of Dryland Farming and Water-Saving Agriculture, MOA, Beijing 100081, China

3 Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China

4 Griffith School of Engineering, Griffith University, Nathan, Q 4111, Australia

Abstract: We investigated the effects of 16 years long-term fertilizer experiment on aggregate size distribution and the carbon in aggregates of a Drab Fluvo-aquic soil in Beijing. Six treatments were chosen for this work: Four were in a wheat-maize rotation receiving either no fertilizer (CK), mineral fertilizers (NPK), mineral fertilizers plus farmyard manure (NPKM) or mineral fertilizers with maize straw incorporated (NPKS). One was in a wheat-maize/wheat-soybean rotation receiving NPK (NPKF). The other was abandoned arable land (CK0) growing weeds. The amount of chemical fertilizer applied per year was 150 kg N hm^{-2} , $75\text{ kg P}_2\text{O}_5\text{ hm}^{-2}$, $45\text{ kg K}_2\text{O hm}^{-2}$, $22.5\text{ t manure hm}^{-2}$ and $2.25\text{ t maize straw hm}^{-2}$. Soil samples were separated into four aggregate-size classes ($>2\text{mm}$, $0.25-2\text{mm}$, $0.053-0.25\text{mm}$ and $<0.053\text{mm}$). The results shows than the amount of $>2\text{mm}$ water-stable aggregates and organic carbon were found to be higher in long-term abandoned arable land than those in cultivated arable land soils. Macro-aggregates are more susceptible to disruptive forces induced by cultivation, which are less than micro-aggregates. Compared to no fertilizer application treatment (CK), long-term fertilizer application (NPK, NPKM and NPKS) had a significant influence on aggregate size

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD29B01; 2006BAD29B02);中国博士后科学基金资助项目(20080440461);国家自然科学基金资助项目(30471012);国家基础研究重大项目前期研究专项资助项目(2001CCB00800, 2003CCB00300)

收稿日期:2009-02-02; 修订日期:2009-10-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bqzhao@163.com

distribution and aggregate stability, and had most effectively accelerate the formation of groups of $>2\text{mm}$ and $0.25 - 2\text{mm}$ aggregates, that show the newly enriched organic carbon mostly appeared in aggregate fractions $>2\text{mm}$ and $0.25 - 2\text{mm}$. The SOC concentration was greater for macro-aggregates ($>2\text{mm}$ and $0.25 - 2\text{mm}$) than micro-aggregates ($0.053 - 0.25\text{mm}$ and $<0.053\text{mm}$) in the abandoned arable land and cultivated arable land soils. After applying mineral fertilizers plus farmyard manure (NPKM), the contents of macro-aggregates increased significantly, being beneficial to the improvement of soil structure. The content of SOC in aggregates was higher in wheat-maize/wheat-soybean rotation cropping system compared to continuous wheat-maize cropping system.

Key Words: long-term fertilizer experiment; water-stable aggregates; organic carbon; carbon storage

土壤有机碳是耕地土壤肥力的重要组成部分,是土壤质量和功能的核心^[1]。国内外研究表明,影响土壤肥力的关键因子是土壤碳素,任何土壤质量的变化都与土壤碳素数量和质量的改变密切相关^[2-3]。土壤有机碳又是陆地生态系统最重要和最活跃的碳库,近几十年来,由于 CO_2 和 CH_4 等温室气体浓度的升高而导致全球变暖以及由此引发的一系列严重的环境问题,使得土壤有机碳也越来越多被认为是影响全球变暖的温室气体的源和汇,土壤有机碳库的稳定与否,对全球碳平衡将会产生重要的影响。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元^[4],而土壤有机碳是影响土壤团聚结构的最重要因素之一^[5],并且团聚体形成作用被认为是土壤碳固定的最重要机制。研究表明,土壤有机碳库储量与水稳性团聚体关系密切^[6],有机碳含量随团聚体粒径的增大而增加,且大团聚体比微团聚体含有更多初期不稳定的新成有机物质^[7]。潘根兴等^[1]认为不同农业管理措施对土壤固碳的影响主要是通过对土壤微团聚体更新与转化的改变,从而使有机碳的保护机制发生变化所致。谢锦升等^[8]在研究裸地植被恢复中认为,有机物质输入的增加促进了团聚体的形成,从而改变了土壤团聚体有机碳含量和分配比例。安婷婷等^[9]研究认为,施用有机肥显著增加了土壤的团聚化作用,可在一定程度上抵消耕作对团聚体的破坏作用,减缓团聚体的周转。Yang 等^[10]研究认为大团聚体中有机碳含量较高。Six 等^[11]研究发现,在 2:1 粘类矿物土壤中,大团聚体中有机碳的含量是微团聚体有机碳含量的 1.6 倍。

施肥是影响土壤质量演化及其可持续利用最为深刻的农业措施之一。前人关于施肥对土壤的物理、化学以及生物学性质做了大量的研究^[12-13]。近 20a 来,对土壤团聚体与有机碳之间相互关系的研究得到不断加强。因此,本研究是以北京昌平区国家褐潮土土壤肥力与肥料效益长期监测基地的长期肥料试验为研究平台,研究了长期施用化肥、有机肥、秸秆还田以及轮作措施对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布的影响,为建立合理的施肥制度,更好地为我国实现粮食安全生产及缓解 CO_2 减排压力双赢战略提供理论基础和参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验在“国家褐潮土土壤肥力与肥料效益监测基地”的大田长期肥料定位试验中进行。监测基地位于北京市昌平区,北纬 $40^\circ 13'$,东经 $116^\circ 14'$,海拔高度 43.5 m,年平均温度 11°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 4500°C ,年降雨量 600 mm,年蒸发量 1065 mm,无霜期 210 d,灾害性天气主要是春旱和夏季暴雨。试验始于 1990 年,土壤母质为黄土性物质,属褐潮土,试验开始时耕层土壤理化性质为:有机质 $12.31\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.81\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全钾 $14.58\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $4.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $65.27\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、缓效钾 $407.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 pH 8.22。

1.2 试验处理

试验设置冬小麦-夏玉米复种连作和小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作两种不同种植制度,其中冬小麦-夏玉米复种连作种植制度(种植方式 I)包括 4 个处理,分别为:(1)对照(CK,不施肥,但种植作物)、(2)氮磷钾(NPK)、(3)氮磷钾+猪厩肥(NPK+M)和(4)氮磷钾+玉米秸秆(NPK+S);小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作种植制度(种植方式 II)包括 1 个施肥处理为氮磷钾+种植方式 II(NPKF)。另外试验还设置 1 个长期撂荒

处理(CK0),即不施肥,不种植作物处理,植物自然生长,不人为扰动土壤,每年植物生物量约为 $1.0\text{—}1.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

其中,氮肥(N)为尿素,磷肥(P)为过磷酸钙,钾肥(K)为氯化钾,施用量分别为 $\text{N } 150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;M 为猪厩肥,用量 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (干重);S 为玉米秸秆,用量 $2.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (干重)。化肥于小麦和玉米(大豆)播种前一次性施入,厩肥和秸秆在施入化肥的基础上每年施用 1 次,于小麦播种前做基肥。小区处理面积 200 m^2 ,为大区对比试验,未设重复。

1.3 测试方法

2006 年 6 月 13 日小麦收获后在田间取样,每个处理分为 3 个重复取样小区,取 0—20cm 耕层土壤。3 个取样小区再分别取 3 个点的土壤作为该取样小区的样品。田间采取原状土样,室内自然风干,当土壤含水量达到塑限时,用手把大土块沿自然破碎面轻轻掰开,剔除大的植物残体和石块等,过 8mm 筛后继续风干备用。

依据 Elliott^[14] 土壤团聚体湿筛法测定方法。具体方法为:将样品放置于孔径自上而下为 2mm,0.25mm 和 0.053mm 的各级套筛之上,先用水缓慢湿润后,再放入水中;在整个套筛处于最下端时,最顶层筛的上边缘保持低于水面,竖直上下振荡 5 min;收集各级筛层团聚体并分别转移至铝盒当中,由于 $>2\text{ mm}$ 和 $0.25\text{—}2\text{ mm}$ 水稳性大团聚体中含有较多的根系,在烘干前仔细剔除可见根系,然后烘干称重,计算得到各级团聚体的质量百分比,并将样品磨碎过 100 目筛,测定土壤各级团聚体有机碳的含量。

把 $>250\mu\text{m}$ 粒级的团聚体称为水稳性大团聚体(Macro-aggregate),而 $<250\mu\text{m}$ 粒级的团聚体为水稳性微团聚体(Micro-aggregate)。

土壤养分的测定参照《土壤农化分析》中的有关方法^[15],有机质用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。

1.4 数据处理

数据经 Excel 整理后,采用 SPSS 16.0 软件包进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析,不同处理之间多重比较采用 LSD(Least-significant difference)方法,然后经过 t 检验($P < 0.05$)。绘图由 SigmaPlot 10.0 软件完成。

团聚体稳定性一般采用平均重量直径(MWD)表示:

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

式 1, r_i 是第 i 个筛子孔径(mm), $r_0 = r_1$, $r_n = r_{n+1}$, m_i 为第 i 个筛子的破碎团聚体重量百分比。

供试土壤各级团聚体的养分储量和对养分的贡献率分别采用式(2)和式(3)进行计算:

耕层团聚体的有机碳储量 = 该团聚体中有机碳含量 $\times$ 该级团聚体的含量(%) $\times$ 容重 $\times$ 耕层的体积 (2)

$$\text{团聚体中有机碳贡献率} = \frac{\text{该级团聚体中有机碳含量} \times \text{该级团聚体的含量}(\%)}{\text{耕层土壤中有有机碳含量}} \times 100\% \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体分布及稳定性的影响

从表 1 可以看出,不同的施肥处理对水稳性团聚体分布有显著的影响,与农田土壤(NPK、NPKM、NPKF、NPKS)相比,长期撂荒的土壤(CK0)可显著提高水稳性大团聚体的比例。与 CK 相比,长期施肥(NPK、NPKM、NPKF、NPKS)提高了 $>2\text{ mm}$ 水稳性团聚体和 $0.25\text{—}2\text{ mm}$ 水稳性团聚体的含量,相应地降低了 $0.053\text{—}0.25\text{ mm}$ 水稳性微团聚体和 $<0.053\text{ mm}$ 粘沙粒的含量,特别是 NPKM 处理水稳性大团聚体含量达到了 57.3%。

施肥对土壤各粒级团聚体的分布因肥料种类和种植制度的不同而异,在 $>2\text{ mm}$ 水稳性团聚体中,氮磷钾化肥配施猪厩肥(NPKM)显著高于其它 3 个施肥处理(NPK、NPKS、NPKF),长期化肥秸秆还田(NPKS)和小麦-玉米 $\rightarrow$ 小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥(NPKF)的处理显著高于长期小麦-玉米轮作并施氮磷钾化肥(NPK)处理,在 $0.25\text{—}2\text{ mm}$ 水稳性团聚体中,长期小麦-玉米 $\rightarrow$ 小麦-大豆复种轮作(NPKF)可以提高此粒径团聚体的含量。

表 1 不同施肥处理对水稳性团聚体分布的影响/%

Table 1 Aggregate size distribution under long-term different fertilization treatments/%

处理 Treatments	大团聚体 Macro-aggregate			微团聚体 Micro-aggregate		
	>2mm	0.25—2mm	总和 Sum	0.053—0.25mm	<0.053mm	总和 Sum
CK	4.5 e	18.8 d	23.2 e	54.4 a	22.3 a	76.8 a
NPK	9.0 d	25.0 bc	34.0 d	50.0 a	15.9 b	66.0 b
NPKM	25.3 b	32.0 a	57.3 b	33.8 c	8.9 c	42.7 d
NPKS	13.6 c	28.8 b	42.5 cd	48.6 ab	8.9 c	57.5 bc
NPKF	13.3 c	34.1 a	47.4 c	45.2 b	7.4 c	52.6 c
CK0	42.2 a	23.5 c	65.6 a	25.5 d	8.9 c	34.4 e

表中的小写字母表示 5% 水平的差异显著性,下同

从图 1 中可以看出,从长期撂荒(CK0)到施肥土壤(NPK、NPKM、NPKS、NPKF),再到不施肥但种植的对照(CK)土壤,土壤团聚体平均重量直径依次下降,平均重量直径大小依次为:CK0 > NPKM > NPKF > NPKS > NPK > CK,说明人为耕作土壤可以降低土壤团聚体的水稳定性。在耕种农田土壤中,施肥可以增加土壤团聚体的水稳定性,特别是氮磷钾配施有机肥(NPKM)团聚体的水稳定性最高,长期秸秆还田(NPKS)和小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥(NPKF)团聚体水稳定性显著高于长期小麦-玉米轮作并施氮磷钾化肥(NPK)。与 CK 相比,长期小麦-玉米轮作并施氮磷钾化肥(NPK)也显著提高了土壤团聚体的水稳定性。

2.2 不同施肥处理对不同粒级水稳性团聚体中有机碳含量的影响

从表 2 中可以看出,各施肥处理中,>2mm 和 0.25—2mm 两个级别的水稳性大团聚体有机碳的含量显著高于 0.053—0.25mm 和 <0.053mm 水稳性微团聚体。在同一级别水稳性团聚体中,NPKM 处理有机碳含量最高,其次为 CK0 处理。NPKM 和 NPKS 处理与 NPK 处理相比,从粒径>2mm 至<0.053mm 的团聚体有机碳含量分别增加了 35.7%、44.9%、35.2%、10.3% 和 7.4%、23.1%、7.1%、0.2%,说明长期增施外源有机物质可以增加土壤各级水稳性团聚体有机碳的含量,尤其是显著增加了水稳性大团聚体有机碳的含量。与长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)相比,长期小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPKF)也可增加有机碳的含量,但相对于 NPKM 处理,增幅较少。与 CK 相比,长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)增加了各级别水稳性团聚体的有机碳含量,从粒径>2mm 至<0.053mm 的团聚体有机碳含

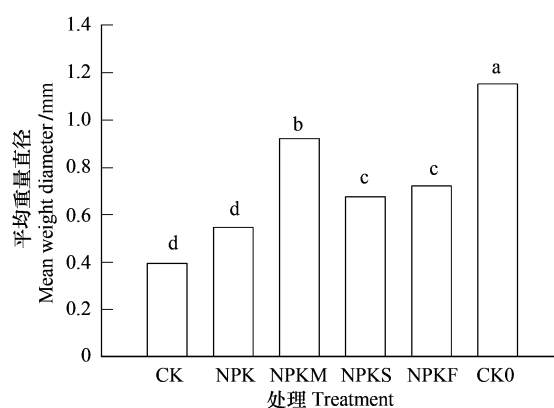


图 1 不同施肥制度对团聚体平均重量直径(MWD)的影响

Fig. 1 Mean weight diameter (MWD) under long-term different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理对不同粒级水稳性团聚体中有机碳含量的影响/(g·kg⁻¹)Table 2 The effect of long-term different fertilization treatments on contents of organic carbon in water stable aggregates different in particle size/(g·kg⁻¹)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate		微团聚体 Micro-aggregate	
	>2mm	0.25—2mm	0.053—0.25mm	<0.053mm
CK	7.41 e	8.60 d	6.12 d	6.16 c
NPK	9.86 d	10.13 c	7.19 c	7.21 b
NPKM	13.38 b	14.67 a	9.72 a	7.96 b
NPKS	10.58 c	12.47 b	7.70 b	7.23 b
NPKF	10.28 c	10.68 bc	7.93 b	7.50 b
CK0	17.20 a	15.85 a	9.23 a	9.11 a
平均 Mean	11.45	11.90	7.98	7.53

量分别增加了 33.1%、17.8%、17.4% 和 17.2%,说明长期施用化肥可增加土壤各团聚体有机碳的含量,并且长期施用化肥主要是增加了 >2mm 团聚体有机碳的含量。

2.3 不同施肥处理对不同粒级水稳性团聚体中有机碳储量的影响

从表 3 中可以看出,CK0 处理水稳性团聚体有机碳储量随团聚体直径逐渐降低而降低;NPKM 处理在 0.25—2mm 级别团聚体有机碳储量最高,其次为 >2mm 级别团聚体;NPKS 和 NPKF 处理水稳性团聚体有机碳的储量均为[0.053—0.25mm 团聚体] > [0.25—2mm 团聚体] > [>2mm 团聚体] > [<0.053mm 团聚体],并且水稳性大团聚体有机碳的储量高于水稳性小团聚体;CK 处理水稳性团聚体有机碳储量依次为[0.053—0.25mm 团聚体] > [0.25—2mm 团聚体] > [<0.053mm 团聚体] > [>2mm 团聚体],水稳性小团聚体有机碳储量高于水稳性大团聚体。

同一级别团聚体,施肥可以提高土壤水稳性大团聚体有机碳储量,而降低了 <0.053mm 粘沙粒团聚体有机碳的储量。长期 NPK 配施猪厩肥的处理(NPKM)与 NPK 处理相比,显著增加了水稳性大团聚体的有机碳储量,降低了水稳性微团聚体的有机碳储量。长期小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPKF)与长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)相比,增加了水稳性大团聚体有机碳的储量,而降低了 <0.053mm 团聚体有机碳的储量,在 0.053—0.25mm 的团聚体上有机碳储量没有显著变化。与 CK 相比,长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)从粒径 >2mm 至 0.053—0.25mm 的团聚体有机碳储量分别增加了 168%、56.1% 和 7.3%,而 <0.053mm 团聚体则降低了 16.8%,说明长期施用化肥显著的增加了土壤水稳性大团聚体的有机碳储量。

表 3 不同施肥处理对不同粒级水稳性团聚体中有机碳储量的影响/(kg·hm⁻²)

Table 3 The effect of long-term different fertilization treatments on total amount of organic carbon in water stable aggregates different in particle size/(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate			微团聚体 Micro-aggregate		
	>2mm	0.25—2mm	总和 Sum	0.053—0.25mm	<0.053mm	总和 Sum
CK	887 e	4328 d	5215 d	8943 ab	3685 a	12629 a
NPK	2374 d	6757 c	9131 c	9595 a	3066 a	12662 a
NPKM	8867 b	12325 a	21192 a	8622 b	1862 b	10484 b
NPKS	3835 c	9554 b	13389 b	9951 a	1704 b	11655 b
NPKF	3613 c	8760 b	12374 b	9506 a	1482 c	10988 b
CK0	16229 a	8312 b	24541 a	5260 c	1806 b	7066 c
平均 Mean	5788.7	8401.4	14190	8620.4	2274.5	10895

2.4 不同粒级水稳性团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率

NPKM 处理 0.25—2mm 团聚体养分贡献率最大,而 CK0 处理 >2mm 团聚体养分贡献率最大,两个处理水稳性大团聚体的养分贡献率达到 70.5% 以上;CK、NPK、NPKS 和 NPKF 处理 0.053—0.25mm 团聚体有机碳的贡献率最高,其次为 0.25—2mm 团聚体,但 NPK、NPKS 和 NPKF 3 种施肥处理的水稳性大团聚体养分贡献率显著高于 CK 处理,贡献率为 41.9%—53.3%。

3 讨论

3.1 水稳定性团聚体分布及其稳定性

长期撂荒(CK0)可提高表层土壤(0—20cm)水稳定性大团聚体含量以及团聚体平均重量直径,主要原因是长期植物残体主要积累在土壤表层,可供微生物维系生命活动的能量充足,从而促进土壤表层的生物活性,包括真菌生长、根和土壤动物区系,有助于在大团聚体内部结合形成微粒有机质,增加其结构稳定性^[16]。土壤进行耕作种植后,>2mm 水稳性大团聚体显著下降,说明耕作优先降低 >2mm 的大团聚体含量。Elliott^[14]和 Sodhia 等^[17]研究认为水稳定性大团聚体的稳定性低于水稳定性微团聚体,所以土壤耕作后大团聚体更容易破裂。

表 4 不同粒级水稳性团聚体中有机碳对土壤有机碳的贡献率 /%

Table 4 Contributing rates of SOC of water stable aggregates in soil organic carbon /%

处理 Treatment	大团聚体 Macro-aggregate			微团聚体 Micro-aggregate		
	>2mm	0.25—2mm	总和 Sum	0.053—0.25mm	<0.053mm	总和 Sum
CK	5.0	24.3	29.2	50.1	20.7	70.8
NPK	10.9	31.0	41.9	44.0	14.1	58.1
NPKM	28.0	38.9	66.9	27.2	5.9	33.1
NPKS	15.3	38.1	53.5	39.7	6.8	46.5
NPKF	15.5	37.5	53.0	40.7	6.3	47.0
CK0	51.3	26.3	77.6	16.6	5.7	22.4
平均 Mean	20.9	32.8	53.7	36.3	10.0	46.3

在农田土壤中,长期氮磷钾配施有机肥(NPKM)处理提高了耕层土壤水稳性大团聚体含量,增加了土壤团聚体的稳定性。安婷婷等^[9]和 Yang 等^[10]也研究发现施用有机肥可以增加水稳性大团聚体含量。长期小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPKF)与长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)相比,也可增加水稳性大团聚体含量,主要原因可能是种植大豆不仅可以降低氮素的损失,还可以增加有机碳源,并且不同作物的根系可以改善土壤的物理结构,有利于大团聚体的形成。

3.2 水稳性团聚体中有机碳含量和储量

在本研究中,长期撂荒不仅增加了水稳性大团聚体的含量,而且还增加了其有机碳的含量,这与梁爱珍等^[18]和 Tisdall 等^[19]研究相似。许多长期试验研究认为,化肥配施有机肥不仅可以增加土壤的有机碳含量,而且相应的增加了各级团聚体有机碳的含量^[20-22]。本研究表明,长期的化肥配施有机肥增加各级团聚体有机碳的含量,特别是显著增加了水稳性大团聚体(>2mm 和 0.25—2mm)有机碳的含量,这个结果表明水稳性大团聚体在有机碳的储存的重要性。长期小麦-玉米→小麦-大豆复种轮作并施氮磷钾化肥的处理(NPKF)与长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)相比,提高了各级团聚体有机碳的含量,这说明不同的作物品种的种植影响团聚体有机碳的分布,产生的原因可能为不同的作物品种其产生的根茬的质量和数量均不同,并且小麦和玉米的根茬中氮的含量比大豆低,所以小麦和玉米根茬的分解速率较慢,相应地产生有机碳较低。与 CK 相比,长期小麦-玉米轮作并施用化肥的处理(NPK)对大团聚体赋存碳的能力有增加的趋势,说明在施肥条件下,团聚体对有机 C 的物理保护主要通过大团聚体来实现。

未受扰动的土壤上,大团聚体是土壤有机碳存储的主要部分(70%—80%),该部分团聚体的周转与土壤有机碳的存储密切相关,因此保护和维持这部分团聚体的稳定性和比例对土壤肥力的可持续性具有重要意义。NPKM 处理在 >2mm 团聚体和 0.25—2mm 团聚体上有机碳的储量较高,并且两个级别的团聚体的养分贡献率也较高,而其它各施肥处理在 0.053—0.25mm 团聚体和 0.25—2mm 团聚体上有机碳储量较高,这进一步说明长期化肥配施有机肥可促进有机碳在大团聚体中的固持。

4 结论

长期休闲撂荒的土壤可显著地影响褐潮土水稳性团聚体分布和稳定性,并且增加了各级团聚体有机碳的含量和储量,而农田耕作破坏了水稳性大团聚体,相应地增加水稳性微团聚体的含量。在不同的施肥措施中,长期化肥与有机肥配施可显著地提高水稳性大团聚体的含量以及团聚体平均重量直径,并增加大团聚体中有机碳的含量和储量。轮作种植大豆可以促进土壤团聚,增加水稳性大团聚体的比例。合理的施肥可增加土壤有机碳的含量,并且可促进新碳向大团聚体富集。

References:

- [1] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of China: Facing the challenge of global change and food security. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384-393.
- [2] Reeves D W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping system. *Soil & Tillage Research*, 1997, 43(1/2):

131-167.

- [3] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, 2002, 66(2): 95-106.
- [4] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effect on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809-816.
- [5] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management; a review. *Geoderma*, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [6] Angers D A, Carter M R. Aggregation and organic matter storage in cool, humid agricultural soils//Carter M R, Stewart B A, eds. *Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1996: 193-211.
- [7] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turn-over and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [8] Xie J S, Yang Y S, Chen G S, Zhu J M, Zeng H D, Yang Z J. Effects of vegetation restoration on water stability and organic carbon distribution in aggregates of degraded red soil in subtropics of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 702-709.
- [9] An T T, Wang J K, Li S Y, Yu S, Zhu P. Effects of manure application on organic carbon in aggregates of black soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(2): 369-373.
- [10] Yang Z H, Singh B R, Hansen S. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long-term fertilized soils. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95(1/2): 161-171.
- [11] Six J, Paustian K, Elliott E T, 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(2): 681-689.
- [12] Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, Jiang R B, Hwat B S. Microbial C and N biomass and soil community analysis using DGGE of 16SrDNA V3 fragment PCR products under different long-term fertilization systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1079-1085.
- [13] Belay A, Claassens A S, Wehner F C. Effect of direct nitrogen and potassium and residual phosphorus fertilizers on soil chemical properties, microbial components and maize yield under long-term crop rotation. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(6): 420-427.
- [14] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3): 627-633.
- [15] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-49.
- [16] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3): 776-783.
- [17] Sodhia G P S, Beria V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system. *Soil & Tillage Research*, 2009, 103(2): 412-418.
- [18] Liang A Z, Zhang X P, Shen Y, Li W F, Yang X M. Distribution of water-stable aggregates and aggregate-associated C in black soil in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(4): 1052-1057.
- [19] Tisdall J M, Oades J M. The effect of crop rotation on aggregation in a red-brown earth. *Australian Journal of Soil Research*, 1980, 18(4): 423-433.
- [20] Green V S, Cavigelli M A, Dao T H, Flanagan D C. Soil physical properties and aggregate-associated C, N and P distribution in organic and conventional crop systems. *Soil Science*, 2005, 170(10): 822-831.
- [21] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81(2): 239-252.
- [22] Li H X, Yuan Y H, Huang Q R, Hu F, Pan G X, Fan H B. Effects of fertilization on soil organic carbon distribution in various aggregates of red paddy soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 422-429.

参考文献:

- [1] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393.
- [8] 谢锦升, 杨玉盛, 陈光水, 朱锦懋, 曾宏达, 杨智杰. 植被恢复对退化红壤团聚体稳定性及碳分布的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 702-709.
- [9] 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.
- [12] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, Hwat Bing So. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析. *生态学报*, 2007, 27(3): 1079-1085.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-49.
- [18] 梁爱珍, 张晓平, 申艳, 李文凤, 杨学明. 东北黑土水稳性团聚体及其结合碳分布特征. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1052-1057.
- [22] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡铎, 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): 422-429.