

耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素研究

李江涛¹, 钟晓兰², 赵其国³

1. 广州大学地理科学学院, 广东 广州 510006; 2. 华南农业大学信息学院, 广东 广州 510642;

3. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008;

摘要: 稳定的土壤团聚结构对种子发芽、根系发育、作物生长以及有机碳保护有着重要的影响, 深入了解人为扰动下土壤团聚体稳定性影响因素有着重要意义。选择两种不同母质发育土壤上长期施用畜禽粪便和化肥 5 个田块耕层土壤团聚体为供试土壤, 采用相关分析、因子分析和回归分析方法探讨了土壤有机碳库、土壤养分和理化性质与团聚体稳定性间的关系。研究表明, 与施用化肥比较, 施用畜禽粪便显著提高了土壤团聚体稳定性; 不同母质类型土壤上, 海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性显著高于河相冲积物母质土壤。相关分析结果表明溶解性有机碳 (包括 DOC 和 HWOC) 和总磷含量与土壤团聚体稳定性显著或极显著相关; 因子分析结果显示, 土壤化学因子是第一影响因素, 土壤碳库因子是第二影响因素, 其中海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性主要受土壤化学因子影响; 河相冲积物母质土壤团聚体稳定性主要受土壤碳库因子影响, 施用化肥土壤受两个因素影响均较小。回归分析结果显示热水提取态有机碳和钙是本研究条件下影响土壤团聚体稳定性的主要因素。

关键词: 土壤团聚体稳定性; 人为扰动; 影响因素; 因子分析; 回归分析

中图分类号: S152 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5906 (2009) 06-2354-06

土壤团聚体稳定性是影响土壤肥力和环境问题关键因素之一。团聚体对物理胁迫的回复力决定了土壤对结皮和侵蚀、种子发芽、根系发育和作物生长的敏感度^[1, 2]以及通过物理保护机制储存有机碳的能力^[3]。因此, 土壤团聚体稳定性受到广泛关注。

有关团聚体稳定性影响因素已有较多报道^[4, 5], 土壤质地、粘土矿物类型、钙、镁等阳离子的含量、铁和铝氧化物以及土壤有机碳被认为是影响土壤团聚体稳定性的主要因素^[6], 甚至不同大小团聚体的形成和稳定性因素也是不同的^[7]。然而以往的研究大多数只关注单一条件变化下土壤团聚体稳定性影响, 例如, 同一土壤上不同施肥^[8]、不同植被条件^[9]、不同利用方式^[10]、不同耕作制度^[11]下土壤团聚体稳定性变化, 或在实验室模拟研究某一条件变化对土壤团聚体稳定性影响^[12], 而有关于多重条件作用下土壤团聚体稳定性影响因素研究报道较少。另外, 长期的耕作和施肥扰动下, 土壤团聚体的周转速明显快于自然土壤, 其形成和稳定机制和影响因素也与自然土壤有别。因此, 在人为土壤上探讨长期耕作和施肥扰动下土壤团聚体稳定性影响因素具有重要科学意义。

本文选择两种母质发育土壤上, 受长期耕作和施肥扰动影响最大的稻麦轮作耕层土样作为供试土壤, 采用相关分析、回归分析和因子分析等方法,

探讨土壤团聚体中有机碳库、阳离子、理化性质变化与团聚体稳定性间的关系, 以期对影响团聚体稳定性因素有更全面、更深入的理解。

1 材料和方法

1.1 土壤样品采集

供试土壤分别采自江苏省海安县海安镇长期施用鸡粪 (HCM)、猪粪 (HPM) 和化肥 (HCF) 和大公镇长期施用鸡粪 (DCM) 和化肥 (DCF) 的五个稻麦轮作土壤田块。其中海安镇土壤为里下河冲积物母质发育形成的土壤; 大公镇土壤为海相沉积物发育形成的土壤, 土壤质地均为砂壤土, 每个处理均重复 3 次。

2006 年 5 月分别采集施用畜禽粪便和化肥试验区耕层原状土壤, 用硬质盒把土壤带回实验室。在土壤塑限含水量条件下, 沿土壤自然破碎面轻轻将原状土壤掰开, 自然风干后过筛, 选取 5~8 mm、3~5 mm 以及 1~3 mm 土壤团聚体测定其水稳定性 (重复三次), 同时选取部分团聚体样品测定团聚体中土壤有机碳、土壤颗粒有机碳、全 Ca、全 Mg 等其他土壤理化性质, 土壤团聚体中的各项基本性质见表 1。

1.2 测定方法

土壤团聚体水稳定性采用 Le Bissonnais^[1]方法略作修改进行测定。取 5 g 制备好的土壤团聚体 (3 次重复) 缓慢浸没在盛有 50 ml 蒸馏水的 250 ml 的

基金项目: 中国科学院知识创新项目 (KZCX3-SW-435); 广州大学博士启动基金 (LJT1-1001); 广州大学新苗计划基金 (LJT1-1002)

作者简介: 李江涛(1976 年生), 男, 博士, 主要从事土壤地理与土壤生态研究。E-mail: ljtgzhu@163.com

收稿日期: 2009-10-17

表 1 土壤团聚体中土壤属性及土壤有机碳库含量
Table 1 Soil attributes and soil organic pools in soil aggregates sampled from cultivated horizon

处理和土壤 团聚体大小		w/(g·kg ⁻¹)				w/(mg·kg ⁻¹)				pH (H ₂ O)	电导率 γ/(μs·cm ⁻²)	w/(mg·g ⁻¹)			
		全氮	全磷	全钾	有机碳	颗粒有 机碳	溶解性有 机碳	热水提取态 有机碳	土壤碳水 化合物			Ca	Fe	Mg	Na
HCM	5~8 mm	1.94	0.939	15.25	17.10	2.67	206.34	565.85	5584.39	7.57	274.25	2.59	17.01	5.28	9.74
	3~5 mm	2.01	0.959	16.24	17.80	2.69	209.27	584.39	5651.71	7.27	249.96	2.59	17.55	5.65	10.31
	1~3 mm	2.12	0.995	15.97	18.03	3.12	173.17	598.05	5790.24	7.38	237.82	2.31	16.57	5.68	10.24
HPM	5~8 mm	2.08	0.948	16.19	19.57	3.29	208.54	680.98	6431.22	6.96	250.98	2.33	17.43	5.59	10.51
	3~5 mm	2.32	0.971	14.97	20.38	3.36	218.78	755.12	6507.32	6.86	278.30	2.52	17.10	5.53	10.04
	1~3 mm	2.36	0.958	15.05	21.39	4.37	226.10	788.29	6566.83	6.84	287.41	2.65	17.34	5.59	9.93
HCF	5~8 mm	1.58	0.600	15.55	15.03	2.52	144.63	462.44	4739.51	6.06	243.89	2.24	17.29	5.66	10.19
	3~5 mm	1.58	0.612	15.92	15.48	2.51	187.80	485.85	4776.59	6.04	276.28	1.92	17.01	5.66	10.47
	1~3 mm	1.62	0.643	14.76	15.96	3.05	182.44	523.90	4850.73	6.02	271.22	1.76	17.17	4.35	9.44
DCM	5~8 mm	1.61	0.888	14.03	13.21	1.89	201.46	460.49	4583.41	7.95	449.33	13.12	15.65	5.70	10.00
	3~5 mm	1.63	0.827	14.93	13.44	1.98	181.22	509.27	4685.85	7.90	524.22	12.12	15.64	6.33	9.75
	1~3 mm	1.69	0.861	14.53	14.05	1.92	215.12	575.61	4733.66	7.98	549.52	11.64	15.36	7.45	10.73
DCF	5~8 mm	1.36	0.797	14.01	11.46	1.76	188.29	455.61	3921.95	8.10	542.43	12.71	15.59	6.79	10.66
	3~5 mm	1.43	0.792	14.95	11.69	1.59	208.54	492.68	4104.39	8.06	616.31	11.90	15.22	7.30	11.29
	1~3 mm	1.47	0.812	14.14	12.62	1.95	195.37	508.29	4329.76	8.02	623.39	11.87	14.56	6.85	10.41

烧杯中,浸泡 10 min 后将土壤移入 0.05 mm 筛子中,将装有土壤的筛在酒精中上下轻微震荡 20 次(振幅为±2 cm),烘干后对分散土壤团聚体进行颗粒分级。

团聚体的稳定性采用标准化平均质量直径(Nomal Mean Mass Diameter, NMMD)进行描述。其计算公式如下:

$$NMMD = \frac{MMD}{r_{max} - r_{min}} \quad (1)$$

式中 r_{max} 为最大初始筛孔径, r_{min} 为最小筛子孔径; MMD 表示平均质量直径,其计算公式为:

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

式中 r_i 是第 i 个筛子的孔径(mm), $r_0=r_1$, $r_n=r_{n+1}$; m_i 为第 i 个筛子中颗粒百分比, n 为筛子的数量。

土壤总有机碳(SOC): $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法。颗粒有机碳(Particulate Organic Carbon, POC)采用 Cambardella and Elliott^[13] 物理方法分离,氧化法测定。溶解性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)和热水提取态有机碳(Hot Water Extractable Organic Carbon, HWOC)采用 Ghani 等^[14]和 Gregorich 等^[15]方法略加改进进行提取; DOC 和 HWOC 采用 TOC 自动分析仪(岛津 TOC-5050)测定。土壤总碳水化合物态碳(Soil Carbohydrates Carbon, SCC)采用稀硫酸水解^[16,17], 蒽酮-硫酸比色法测定^[18]。土壤全氮(TN): 半微量开氏法; 土壤全氮土壤全磷(TP): 氢氟酸-高氯酸消煮钼锑抗比色法; 土壤全钾(TK): 氢氟酸-高氯酸消煮, 火焰光度计法; pH

值: pH 计测定; 电导率(EC): 电导率仪测定; 土壤阳离子交换量(CEC): 中性醋酸铵浸提法。土壤团聚体中的 Ca、Mg、Fe、Na 含量采用三酸消化提取, ICP 法测定(具体分析见鲁如坤主编的《土壤农业化学分析》^[19])。

1.3 统计分析

采用 SPSS14.0 软件对试验数据进行回归分析、相关分析、因子分析; 差异显著性采用 LSD 法进行检验。图采用 Origin7.5 软件绘制。

2 结果分析

2.1 土壤团聚体稳定性

农业管理措施对团聚体胶结剂质量和保存时间影响较大, 必然影响土壤团聚体的形成和稳定^[20]。长期耕作和施肥作为重要的农业管理措施也必将对土壤团聚作用产生影响。图 1 结果表明, 施用化肥土壤 NMMD 为 0.19~0.34, 施用鸡粪土壤为 0.23~0.43, 而施用猪粪土壤 NMMD 最高, 达 0.48 以上, 为施化肥(HCF)土壤 2 倍左右。统计分析结果显示, 施用畜禽粪便土壤 NMMD 显著高于施用化肥土壤($p<0.05$), 表明长期施用畜禽粪便显著地提高了土壤团聚体稳定性。这主要与长期施用化肥降低了土壤孔隙度、增加了土壤紧实度, 从而对土壤结构产生破坏作用^[21]等因素有关, 而长期施用有机肥或者有机-无机肥配施能使土壤孔隙度、土壤有机碳含量显著增加^[22], 从而改善了土壤结构性, 提高了土壤团聚体稳定性。由图 1 同时可知, 所有土壤团聚体稳定性指数 NMMD 均 <0.5 , 且随着团聚体粒径的减小, NMMD 表现为逐渐增加的趋势。说明长期的耕作扰动对土壤团聚体稳定性产

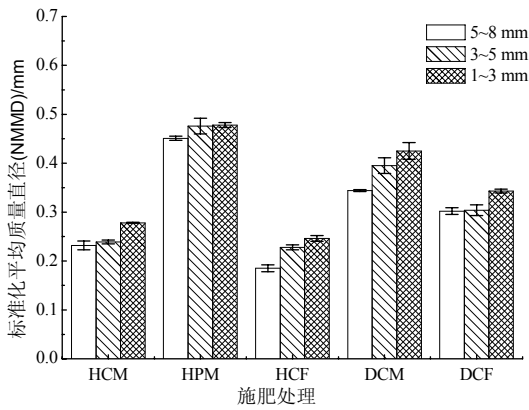


图1 不同施肥条件下土壤团聚体稳定性指数标准化平均质量直径 (NMMD)

Fig. 1 Normal mean mass diameter (NMMD) of soil aggregates in long-term application of fertilizers field

生了较大的影响,土壤团聚体越大影响越明显。

不同母质发育土壤,土壤团聚体稳定性指数 NMMD 差异明显。相同条件下,海相沉积物母质土壤(DCM 和 DCF)上团聚体稳定性指数 NMMD 显著高于河相冲积物母质土壤(HCM 和 HCF)(图 1)。由表 1 可知,海相沉积物母质土壤团聚体中有机碳库含量明显低于河相冲积物母质土壤,而 EC 和 Ca 含量却显著高于河相冲积物母质土壤。有研究表明^[23],有机质能与钙-金属桥键结合为稳定的有机-矿质复合体,从而提高土壤团聚体稳定性。这表明 Ca 与有机物形成的有机-矿质复合体可能是导致海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性显著高于河相冲积物发育土壤的重要原因。

2.2 团聚体稳定性影响因素分析

影响土壤团聚体稳定性因素较多,许多研究表明,土壤有机碳库、Ca、Mg、Fe、Na 以及土壤养

分等均能对土壤团聚体稳定性产生影响^[6]。本文选取 pH (x_1)、TN (x_2)、TP (x_3)、TK (x_4)、SOC (x_5)、POC (x_6)、DOC (x_7)、HWOC (x_8)、SCC (x_9)、EC (x_{10})、Ca (x_{11})、Fe (x_{12})、Mg (x_{13}) 和 Na (x_{14}) 等 14 影响因子,对土壤团聚体稳定性 (NMMD, y) 影响因素进行分析。

2.2.1 相关分析

表 2 中的相关分析结果表明,可溶性有机碳 (DOC) 和热水提取态有机碳 (HWOC) 与 NMMD 间极显著 ($p < 0.01$) 正相关,土壤全磷 (TP) 与 NMMD 表现为显著 ($p < 0.05$) 相关关系;其他因子与土壤团聚体稳定性指数间没有表现出显著 ($p > 0.05$) 的线性相关关系。不同影响因素间相关分析显示,多个指标间存在着显著或极显著相关关系(表 2)。说明 DOC、HWOC、TP 对土壤团聚体稳定性产生了影响,或者它们和团聚体稳定性共同受到某些因素影响而存在相关关系。

2.2.2 因子分析

根据未经最大方差旋转的总方差解释,选择特征根大于 1 的主成份作为解释变量,前 2 个主成份的累积方差贡献率达 82.14%。因子分析要求提取出的公因子有实际含义,但是从表 4 中旋转前的公共因子和原始变量的相关系数可以看出,现在各因子的意义不是很明显。为了使因子载荷矩阵中系数更加显著,可以对初始因子载荷矩阵进行旋转,使因子和原始变量间的关系进行重新分配,从而更容易进行解释(表 3 和表 4)。

公共因子方差估计结果显示,除 Na 和 TK 信息解释量较小外,2 个综合因子对其他影响因子信息解释量均在 71.1% 以上,其中对 SOC 信息解释度最高

表 2 土壤团聚体稳定性影响因素相关分析

Table 2 Correlation analysis between NMMD and soil attributes

	NMMD	pH	TN	TP	TK	SOC	POC	DOC	HWOC	SCC	EC	Ca	Fe	Mg	Na
NMMD	1.00														
pH	0.29	1.00													
TN	0.51	-0.26	1.00												
TP	0.60*	0.47	0.71**	1.00											
TK	-0.18	-0.52*	0.49	0.12	1.00										
SOC	0.38	-0.51	0.96**	0.50	0.59*	1.00									
POC	0.33	-0.59*	0.87**	0.35	0.47	0.95**	1.00								
DOC	0.68**	0.33	0.46	0.63*	-0.12	0.35	0.25	1.00							
HWOC	0.71**	-0.20	0.92**	0.66**	0.31	0.89**	0.84**	0.62	1.00						
SCC	0.49	-0.37	0.98**	0.63*	0.56*	0.98**	0.89**	0.42	0.92**	1.00					
EC	0.19	0.77**	-0.66**	-0.10	-0.73**	-0.80**	-0.77**	0.14	-0.44	-0.72**	1.00				
Ca	0.19	0.82**	-0.66**	-0.03	-0.76**	-0.81**	-0.79**	0.09	-0.49	-0.71**	0.95**	1.00			
Fe	-0.11	-0.78**	0.65**	0.07	0.73**	0.80**	0.77**	-0.02	0.49	0.72**	-0.96**	-0.93**	1.00		
Mg	0.23	0.73**	-0.45	0.04	-0.40	-0.61*	-0.66**	0.17	-0.26	-0.52*	0.85**	0.78**	-0.80**	1.00	
Na	0.05	0.39	-0.34	-0.03	0.01	-0.40	-0.46	0.16	-0.19	-0.35	0.49	0.39	-0.43	0.78**	1.00

*, ** 分别表示 $p < 0.05$, $p < 0.01$ 的显著性水平

为 99.1% (表 4)。较高的公共因子方差估计信息表明, 2 个综合因子解释了影响因素的大部分信息。

从表 3 和表 4 可知, 旋转后第 1 公共因子方差贡献率为 48.70%, 在 pH、EC、Ca、Fe、Mg 上的载荷都很大, 其中在 Ca 上载荷最大, 为-0.920, 反映了土壤化学性质和矿质元素对土壤团聚体稳定性的影响, 简称为土壤化学因子; 第 2 公共因子方差贡献率为 33.44%, 在 TN、TP、SOC、DOC、HWOC 和 SCC 等因子上有较大载荷, 代表着土壤养分和有

表 3 旋转前后各主成份的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率

Table 3 Eigenvalues, proportion and cumulative variance before rotation and rotated of matrix

主成份	旋转前			旋转后		
	特征值	方差贡献率	累积贡献率	特征值	方差贡献率	累积贡献率
PC 1	8.33	59.48	59.48	6.82	48.70	48.70
PC 2	3.17	22.65	82.14	4.68	33.44	82.14

表 4 旋转前后因子载荷矩阵

Table 4 Component matrix of before rotation and rotated

影响因子	旋转前公共因子		旋转后公共因子		公共因子方差估计
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	
pH	-0.654	0.659	-0.827	0.227	0.862
TN	0.879	0.445	0.474	0.837	0.971
TP	0.351	0.837	-0.121	0.899	0.824
TK	0.665	-0.204	0.888	0.130	0.483
SOC	0.970	0.223	0.657	0.693	0.991
POC	0.935	0.107	0.627	0.583	0.885
DOC	0.179	0.824	-0.234	0.797	0.711
HWOC	0.759	0.581	0.328	0.890	0.914
SCC	0.923	0.357	0.564	0.782	0.980
EC	-0.911	0.338	-0.878	-0.180	0.944
Ca	-0.906	0.328	-0.920	-0.179	0.928
Fe	0.907	-0.295	0.880	0.212	0.909
Mg	-0.758	0.451	-0.602	-0.034	0.778
Na	-0.490	0.282	-0.131	-0.066	0.319

机碳库对土壤团聚体稳定性的影响, 简称为土壤碳库因子。

因子分析结果表明 (图 2), 海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性主要受第一因子影响, 即土壤化学因子是影响其团聚体稳定性的主要因素; 河相冲积物母质土壤长期施用猪粪和鸡粪, 土壤团聚体稳定性主要受第二因素影响, 即土壤碳库因子是影响其团聚体稳定性的主要因素。河相冲积物母质土壤长期施用化肥, 土壤团聚体稳定性较低, 受两个因子的影响均较小。

2.2.3 回归分析

将所选取的全部因子引入进行完全回归分析, 其回归方程为:

$$y = 0.840 - 0.0604 x_1 - 0.454 x_2 + 0.181 x_3 +$$

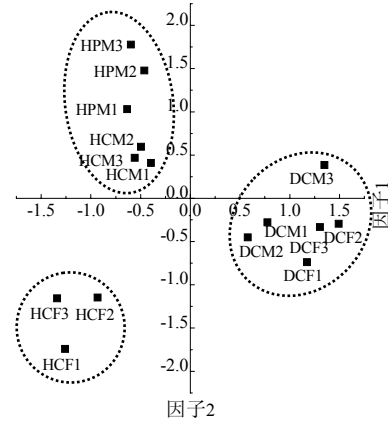


图 2 土壤团聚体稳定性影响因素分析

Fig. 2 Factor analysis of soil aggregate stability

$$0.0497 x_4 - 0.0418 x_6 - 0.00004 x_7 + 0.0022 x_8 + 0.00002 x_9 - 0.0009 x_{10} + 0.0345 x_{11} - 0.0508 x_{12} + 0.0021 x_{13} - 0.0439 x_{14} (F = 94.04, p = 0.08, r^2 = 0.998, SE = 0.01) \quad (3)$$

从回归效果来看, $F = 94.04$, 标准差为 0.01, 影响因子的解释方差为 99.8%, 这说明所选择的 14 个因子完全可以解释外界因子对土壤团聚体稳定性的影响, 由于 $p=0.08 > 0.05$, 说明回归方程没有通过显著性检验。从回归方程 (3) 同时可知, 土壤总有机碳 (x_5) 没有引入完全回归方程, 说明总有机碳对土壤团聚体稳定性可以由其他因素代替; 另外, DOC (x_7)、SCC (x_9) 和 EC (x_{10}) 等因子系数较小, 对本研究中土壤团聚体稳定性影响较小。

将 SOC (x_5)、DOC (x_7)、SCC (x_9) 和 EC (x_{10}) 剔除后, 重新进行完全回归分析, 其回归方程为:

$$y = 0.750 - 0.203x_1 - 0.361x_2 + 0.942x_3 + 0.037x_4 - 0.026x_6 + 0.001x_8 + 0.028x_{11} - 0.004x_{12} + 0.028x_{13} - 0.061x_{14} (F = 25.68, p = 0.003, r^2 = 0.992, SE = 0.22) \quad (4)$$

回归方程 (4) 中的结果显示, 影响因子的解释方差为 99.2%, 显著性水平 $p = 0.003$, 剩余标准差为 0.22, 调整后的相关系数 $R = 0.946$ 。

为了解土壤团聚体稳定性的主要影响因素, 本文采用逐步回归方法进一步研究了影响因素对土壤团聚体稳定性的影响, 其回归方程为:

$$y = -2.97 + 0.001 x_8 + 0.014 x_{11} (F = 55.17, p < 0.001, r^2 = 0.902, SE = 0.03) \quad (5)$$

方程 (5) 显示, 10 个影响因子仅保留了 HWOC (x_8) 和 Ca (x_{11}) 两个因子, 但两个因子对土壤团聚体稳定性影响的解释方差为 90.2%, 且达到极显著水平 ($p < 0.001$)。由方程 (5) 同时可知, HWOC (x_8)、Ca (x_{11}) 与 NMMD (y) 间均表现为显著地正相关关系。由此可见, 热水提取态有机碳和钙是

本研究条件中影响土壤团聚体稳定性的主要因素。

以上分析表明,长期耕作和施肥扰动下,土壤总有机碳(SOC)含量已经不能较好反映土壤团聚体稳定性的变化,仅有很小部分参与团聚体的形成和稳定过程;由于可溶性有机碳(DOC)变化最快、波动最大,对土壤团聚体稳定性影响较小;土壤碳水化合物态碳(SCC)受提取方法的影响,其来源复杂,可能真正来自影响土壤团聚体稳定性胶结剂中的碳比例较小,因此,与团聚体稳定性相关较小;热水提取态有机碳(HWOC)与团聚体稳定性密切相关,是团聚体稳定性的重要影响因素,这可能与HWOC主要来源于根系分泌物、微生物分泌物及其它潜在易分解态有机碳库^[17]等有关;钙(Ca)由于能与土壤有机物、有机胶体复合形成有机-无机复合物而显著影响土壤团聚体稳定性^[23],本试验中,海相沉积母质土壤上团聚体内Ca含量是河相冲积母质土壤Ca含量的5倍以上,其土壤团聚体稳定性也显著高于河相冲积母质土壤。因此,在长期耕作和施肥扰动下,HWOC是河相冲积物母质土壤上团聚体稳定性的主要影响因素,钙与有机物复合形成的有机-无机复合物是海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性的重要因素。

3 结论

长期耕作扰动,使土壤团聚体稳定性均较低;与施用化肥比较,施用畜禽粪便显著提高了土壤团聚体稳定性;不同母质类型土壤上,海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性显著高于河相冲积物母质土壤。相关分析、因子分析以及回归分析结果表明热水提取态有机碳(HWOC)和钙是本研究条件中影响土壤团聚体稳定性的主要因素,其中钙和有机物形成的有机-无机复合物是海相沉积物母质土壤上团聚体稳定性的主要影响因素,而HWOC是河相冲积物母质土壤上团聚体稳定性主要影响因素。

致谢:感谢中国科学院南京土壤研究所王明珠研究员、张斌研究员、刘勤副研究员和南京农业大学张金福硕士在本实验过程中提供的支持和帮助。

参考文献:

- [1] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47: 425-437.
- [2] ANGERS D A, CARON J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 45: 55-72.
- [3] LUTZOW M V, KOGEL-KNABNER I, LUDWIG B, et al. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: development and application of a conceptual model[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171: 111-124.
- [4] AMEZKETA E. Soil aggregate stability: A review[J]. *Journal of sustainable agriculture*, 1999, 14(2): 83-151.
- [5] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: a review[J]. *Geoderma*, 2005, 124: 3-22.
- [6] ABIVEN S, MENASSERI S, CHENU C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability-A literature analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41: 1-12.
- [7] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33: 141-163.
- [8] YOUSEFI M, HAJABBASI M, SHARIATMADARI H. Cropping system effects on carbohydrate content and water-stable aggregates in a calcareous soil of Central Iran[J]. *Soil & Tillage Research*, 2008, 101(1-2): 57-61.
- [9] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 等. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27-28.
ZHAO Shiwei, SU Jing, YANG Yonghui, et al. Influence of the soil structure in Loess Hilly Region of Southern Ningxia under different man-made vegetation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(3): 27-28.
- [10] 杨长明, 欧阳竹, 杨林章, 等. 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[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4148-4155.
YANG Changming, OUYANG Zhu, YANG Lingzhang, et al. Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the northern China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4148-4155.
- [11] PIKUL J L, CHILOM J G, RICE J, et al. Organic matter and water stability of field aggregates affected by tillage in South Dakota[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2009, 73(1): 197-206.
- [12] COSENTINO D, CHENU C, LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and microbial community dynamics under drying-wetting cycles in a silt loam soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(8): 2053-2062.
- [13] CAMBARDELLA C A, ELLIOTT E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 777-783.
- [14] GHANI A, DEXTER M, PERROTT K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [15] GREGORICH E G, BEARE M H, STOKLAS U, et al. Biodegradability of soluble organic matter in maize-cropped soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(3-4): 237-252.
- [16] PICCOLO A, ZENA A, CONTE P A. Comparison of acid hydrolysis for the determination of carbohydrates in soils[J]. *Commun of Soil Sci. Plant Anal.*, 1996, 27: 2909-2915.
- [17] PUGET P, ANGERS D A, CHENU C. Nature of carbohydrates associated with water-stable aggregates of two cultivated soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31: 55-63.
- [18] BRINK R H, DUBACH J P, LYNCH D L. Measurement of carbohydrates in soil hydrolyzates with anthrone[J]. *Soil Science*, 1960, 89: 157-166.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 农业科技出版社. 2000, 1-638.

- LU Rukun. Analysis Method of Soil and Agri-chemical[M]. Beijing: China Agricultural Science & Technology Press, 2000.
- [20] JIAO Y, WHALEN J K, HENDERSHOT W H. No-tillage and manure applications increase aggregation and improve nutrient retention in a sandy-loam soil[J]. Geoderma, 2006, 134(1-2): 24-33.
- [21] 赖庆旺, 李茶苟. 红壤性水稻土无机肥连施与土壤结构特性的研究[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 168-174.
- LAI Qingwang, LI Chagou. Effect of continuous application of inorganic fertilizer on soil structure properties of paddy soil derived from red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 168-174.
- [22] 李江涛, 张斌, 彭新华, 等. 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[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 912-917.
- LI Jiangtao, ZHANG Bing, PENG Xinhua, et al. Effects of fertilization on particulate organic matter formation and aggregate stability in paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 912-917.
- [23] CLOUGH A, SKJEMSTAD J O. Physical and chemical protection of soil organic carbon in three agricultural soils with different contents of calcium carbonate[J]. Australian Journal of Soil Research, 2000, 38: 1005-1016.

Influence factors of soil aggregate stability under disturbing of cultivation and fertilization

LI Jiangtao¹, ZHONG Xiaolan², ZHAO Qiguo³

1. School of Geographical Sciences, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China;

2. College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

Abstract: Stabilized soil aggregate structure determines germination and rooting of cultivated plants and the ability of soil to store carbon through physical protection. Therefore, it is very important for better understanding influence factors of soil aggregate stability under human disturbance. Soil aggregates were sampled in five fields with long-term fertilization of organic manure and chemical fertilizer on two type soils and correlation analysis, factor analysis and regression analysis were applied to study the relationship between soil aggregate stability and soil organic carbon pools, selected soil chemical and physical properties. Results showed that soil aggregate stability significant increased in soils with application organic manure comparing with soils applying chemical fertilizer. Stability index of soil aggregate in soil derived from marine sediment was higher than that in soil derived from fluvial deposit. Result of correlation analysis indicated that there was a significant relationship between dissolved organic C, hot water extractable organic C (HWOC), total phosphorus and soil aggregate stability. Factor analysis showed that the first influence factor was soil chemical factor (F1), and the second influence factor was soil carbon pool factor (F2). F2 was the dominant factor influencing soil aggregate stability in soil from fluvial deposit marine sediment, while F1 was the main factor influence soil aggregate stability in soil from marine sediment. Results from regression analysis showed HWOC and Ca was the main factors influence soil aggregate stability in this study.

Key words: soil aggregate stability; human disturbance; influence factor; factor analysis; regression analysis