

长期传统耕作对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响

周振方, 胡雅杰*, 马 灿, 薛天柱, 郭 映, 魏国孝

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 通过野外调查取样,并结合室内实验分析,对甘肃会宁县丘陵地区不同耕作年限黄绵土耕地不同土层(0~20 cm, 20~40 cm)土壤团聚体分布及稳定性和水稳性团聚体有机碳含量进行研究。结果表明:未经开垦土壤团聚体稳定性最好,耕作明显地破坏土壤团聚体,降低其稳定性;经过70 a以上时间开垦,0~20 cm和20~40 cm土层 ≥ 0.25 mm直径水稳性团聚体含量分别下降了40.5%和12.5%。耕作层水稳性团聚体平均重量直径和几何均重直径比亚表层平均大了10%,两土层之间的差异随着耕作年限变小。0~20 cm土层, > 2 mm和0.25~0.106 mm直径水稳性团聚体有机碳含量较高;20~40 cm土壤各直径水稳性团聚体有机碳含量差异不明显,耕作层以及亚表层水稳性团聚体有机碳含量整体表现出不断下降的趋势。平均重量直径和几何均重直径与土壤有机碳之间很好的相关性表明团聚体对于有机碳的保持作用关键。

关键词: 团聚体;有机碳;传统耕作

中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0145-07

团聚体是维持土壤质量的物质基础,对土壤的许多理化性质有着重要影响^[1]。土壤肥力水平,不仅取决于团聚体的大小,而且与它们的组成比例也密切相关^[2]。土壤有机质被认为是土壤质量的指示标志,对形成稳定的土壤结构起着重要作用,同时能够影响团聚体质量以及不同直径团聚体分布状况^[3,4]。团聚体的形成反过来也能影响有机质的分解以及转化速率^[5-6]。稳定的团聚体能够对赋存于其中的有机碳形成有效保护,通常大团聚体($R \geq 0.25$ mm)能够储存更多的有机碳,但是容易被破坏,形成微团聚体($R \leq 0.25$ mm),微团聚体对有机碳具有较强的物理保护作用,通常被认为是碳吸存的主要场所^[4]。传统耕作(conventional tillage)破坏土壤团聚结构,使得有机碳失去保护而暴露出来,同时在耕作过程中土壤水分及温度均能得到改善,土壤通气性变好,使得微生物活性以及数量得到提高和增加,加速了失去保护的有机碳的分解;其次,传统的耕作一般指将地面以上作物从耕地移走,导致以地面凋落物形式回归土壤的有机碳量下降;同时耕作本身就会使得土壤变得更加松动,这就增加了土壤的易受侵蚀性,也是造成耕地有机碳下降的一个重要因素。由草地开垦为农田,土壤有机碳下降明显^[7-9],下降变化范围为10%~60%,耕作层下

降幅度最大(32%~60%)^[10]。

黄土高原水土流失严重,生态环境极其脆弱,土壤有机质含量约为10 g/kg,耕地土壤侵蚀模数达60 t/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),传统的耕作模式包括土地翻耕、移走作物残渣以及杂草清除都会导致回归农田的有机碳数量减少,土壤质量退化^[11]。加之特殊的地形以及降水特征,大量的土壤特别是养分含量相对较高的表层土壤最先流失。因此,研究该地区土壤有机碳与团聚体稳定性显得非常重要。目前关于黄土高原丘陵沟壑区土壤有机碳及团聚体分布的研究多集中在不同土地利用类型以及不同地形条件,不同年限耕作对于团聚体稳定性及有机碳分布的研究还不多见。本文以典型的黄土高原丘陵地区甘肃省会宁县为研究区,通过分析不同耕作年限土壤团聚体稳定性及有机碳的分布,以期揭示耕作对二者的影响。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地为甘肃省会宁县兰州大学半干旱区流域地表过程与环境变化试验站(N35°41', E105°24', 海拔1 920 m)附近农耕地。研究区为典型的黄土高原丘陵沟壑区,属暖温带半干旱季风气候,年平均降水量340 mm,年平均蒸发量1 800 mm,年平均气温介

收稿日期:2012-07-14

基金项目:国家自然科学基金创新群体项目(40721061)

作者简介:周振方(1988—),男,河南兰考人,硕士研究生,主要从事干旱区土壤水分与养分方面的研究。E-mail: zhouzfl1@lzu.edu.cn。

* 通信作者:胡雅杰,主要从事干旱区水文水资源及环境方面的研究。E-mail: hujj118@163.com。

于 2.0℃~8.5℃,全县约有农耕地 20.3 万 hm^2 ,侵蚀模数介于 50~100 $\text{t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$ ^[12],选择该地区广泛分布的黄绵土耕地作为研究对象,黄绵土有机质含量低且容易受到侵蚀^[8]。

1.2 采样方法

选择五处相对较为平坦的谷地,其中一处为原始荒地,其余四处分别为不同开垦年限的传统耕作的农耕地,农作物为当地广泛种植的玉米,采样时间

为 2011 年 10 月上旬,原始荒地分布在农耕地附近。采样过程中对土壤剖面进行观察比对,确保同一取样深度的土壤类型一致。采用对角线法进行取样,取样深度分别为 0~20 cm(耕作层)和 20~40 cm(亚表层)。采取的原状土带回实验室,沿自然结构的裂隙用手掰成不小于 10 mm 的土块,然后风干一周。之后同一处样地的相同土层的 5 个土样混合成一个待测土样。样点基本情况见表 1。

表 1 试验样点基本情况

Table 1 Properties of tested lands

耕作年限 Cultivation age /a	海拔 Elevation /m	坡度 Slope /(°)	土壤深度 Soil depth /cm	含水率 Water content /%	容重 Bulk density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤有机碳 Soil organic carbon /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CaCO ₃ 含量* CaCO ₃ content /($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤质地 Particle size/%		
								砂粒 0.05~2mm Sand	粉粒 0.002~0.05mm Silt	粘粒 <0.002mm Clay
0	1958	<5	0~20	13.8(0.8)	0.98(0.02)	11.55(0.29)	140.07(4.33)	14.9(0.5)	67.8(0.5)	17.3(0.7)
			20~40	14.7(0.5)	1.04(0.02)	6.85(0.14)	109.88(4.66)	14.8(0.8)	68.4(0.9)	16.8(0.7)
1	1937	0	0~20	20.7(1.0)	1.24(0.03)	6.85(0.09)	94.43(3.51)	16.8(0.3)	68.3(0.4)	15.0(0.5)
			20~40	21.2(1.0)	1.19(0.02)	4.91(0.23)	92.15(6.10)	16.5(0.5)	67.6(0.4)	15.9(0.6)
5	1940	0	0~20	16.6(0.8)	1.18(0.04)	5.41(0.09)	94.85(2.64)	15.3(0.3)	66.8(0.3)	17.9(0.7)
			20~40	16.7(4.9)	1.29(0.07)	4.22(0.08)	106.88(8.12)	15.7(0.3)	66.8(0.4)	17.5(0.3)
10	1935	<5	0~20	18.1(1.2)	1.32(0.02)	5.89(0.17)	136.58(3.46)	18.0(0.4)	66.1(0.2)	15.9(0.5)
			20~40	17.8(0.9)	1.22(0.04)	5.60(0.08)	154.17(2.02)	18.5(0.8)	66.8(0.6)	14.7(0.8)
>70**	1941	0	0~20	22.8(1.4)	1.34(0.04)	5.25(0.11)	147.00(2.69)	15.6(0.5)	68.4(0.5)	16.0(0.7)
			20~40	21.8(1.6)	1.34(0.06)	5.35(0.10)	127.45(4.35)	14.8(0.4)	67.3(0.7)	17.9(0.6)

注:* 碳酸盐含量用 CaCO₃ 质量分数(g/kg)表示; ** 通过询问当地 80 岁左右老人获知;括号中数据表示标准差。

Note: Carbonte content is denoted by the mass fraction of CaCO₃; ** The cultivation age was obtained from local aged people around 80 years old; Date in parentheses indicate the standard deviation.

1.3 样品测定与分析

风干性团聚体组成的测定采用干筛法。首先用四分法从待测样品中取得约 400 g 样品,然后通过 5 mm 和 2 mm 套筛进行人工筛分,得到 >5 mm、5~2 mm 以及 <2 mm 三组样品,称重即得到三级风干性团聚体含量。水稳性团聚体含量的测定综合参考 Kemper^[13]和 Nimmo^[14]所采用的方法。依据 3 级干筛团聚体的百分比例分别称取并混合成约 100 g 待测样品,重复 3 次。然后将新得到的样品放置在一组新的套筛上,这组套筛由上至下由孔径分别为 2 mm,1 mm,0.5 mm,0.25 mm 以及 0.106 mm 的筛子组成,整套筛子由筛架固定,放置在水桶中,底部离桶底 5 cm 高。向桶中加水至水面刚接触 2 mm 筛网,样品毛管浸润 5 min,然后启动电源,使套筛以每分钟 30 次的频率,振幅 3 cm 上下振荡 30 min,完成以后,将留在各筛子上的团聚体冲洗到铝盒中,置于通风橱中于 60℃下蒸干,称重,减掉事先已称重的铝盒重量,得到其中团聚体重量。土壤容重采用环

刀法,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法^[15],土壤含水率采用时域反射法,土壤粒度的测定采用马尔文 Mastersizer 2000,并参考杨金玲等^[16]对颗粒组成和质地的转换方法,土壤碳酸盐含量测定原理:土样与盐酸反应产生 CO₂,由其体积换算为 CaCO₃ 的质量即为土壤所含碳酸盐相当于 CaCO₃ 的质量。基本数据见表 1。

1.4 数据处理

团聚体的平均重量直径(mean weight diameter, MWD)和几何平均直径(geometric mean diameter, GWD)计算参考 Van Bavel^[17]和 Mazurak^[18]的计算公式:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{R}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{R}_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

其中, \bar{R}_i 为某级别团聚体平均直径; w_i 为该级别团聚体干重。

团聚体破坏率(destruction ratio, DR) 计算参照李明德等^[19] 计算方法:

$$DR = \frac{w_{DA > 2mm} - w_{WA > 2mm}}{w_{DA > 2mm}} \times 100\% \quad (3)$$

其中, $w_{DA > 2mm}$ 为干筛处理下直径 > 2 mm 团聚体含量; $w_{WA > 2mm}$ 为湿筛处理下直径 > 2 mm 团聚体含量。

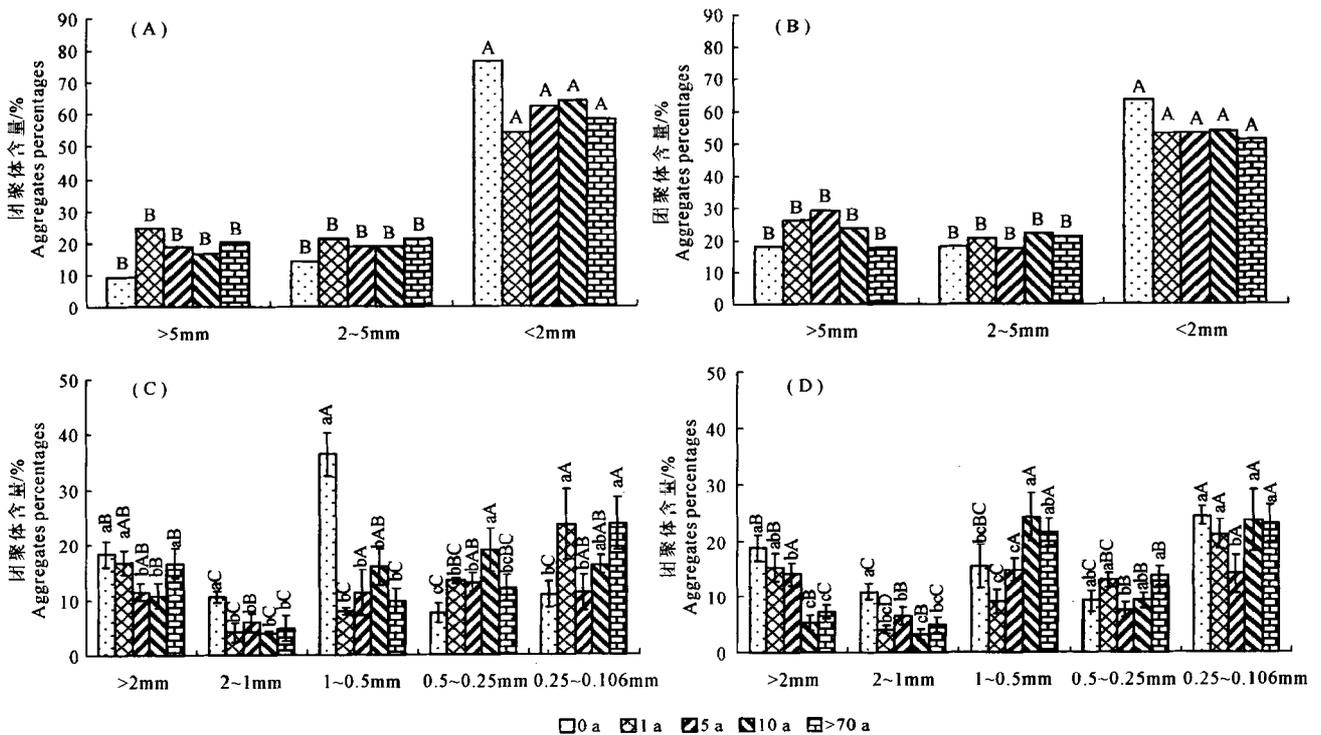
试验数据统计分析采用 SPSS 13.0 软件, 不同开垦年限以及各级团聚体之间显著性差异分析采用单因素方差分析方法(ANOVA), 并用最小显著性差异方法进行检验, 数据处理等在 Microsoft Excel 中进行。

2 结果与分析

2.1 开垦对土壤团聚体分布的影响

如图 1(A, B)所示, 对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 干筛处理下不同直径团聚体含量在不同开垦年限下差异不明显, 但比较看来, < 2 mm 团聚体含量均超过了总重的 50%, 明显高于其他两组团聚体含量, > 5 mm 和 2~5 mm 团聚体含量没有显著性差异, 这说明研究区较大直径团聚体含量低, 这可能与

本地区有机质含量以及粘粒含量总体偏低有关。图 1(C, D)显示, 对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 湿筛处理下 2~1 mm 团聚体含量明显较其它直径团聚体含量低, 1~0.5 mm 和 0.25~0.106 mm 团聚体含量占据较大比重。> 2 mm 以及 2~1 mm 团聚体含量随开垦年限呈下降趋势。与原始未经开垦的土壤相比, 经过 70 a 以上传统耕作, 对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤, 大团聚体 ($R \geq 0.25$ mm) 含量分别下降了 40.5% 和 12.5%, 可见传统的农耕作用对于土壤团聚体有明显的破坏作用, 并且这种破坏对于农业活动直接作用的耕作层影响更大。干筛处理下, 0~20 cm 土层, > 2 mm 团聚体含量依次为 23.5%, 46.0%, 37.7%, 35.7% 以及 41.8%; 湿筛处理下 > 2 mm 团聚体含量依次为 18.4%, 16.9%, 11.5%, 10.8% 以及 16.7%, 团聚体破坏率分别为 28.1%, 63.3%, 69.5%, 69.7% 以及 60.0%, 可见开垦后土壤水稳性团聚体含量显著降低, 虽然干筛处理下开垦后土壤团聚体含量均大于荒地团聚体含量, 但大多数团聚体不稳定, 这可能与储存于其中的有机碳随开垦而流失以及粘粒含量较低有关。同样, 干筛处理下, 20~40 cm 土层, > 2 mm 团聚体含量依次为 36.2%, 46.8%, 46.9%, 45.9% 以及 38.8%;



注: A, B 表示干筛处理, C, D 表示湿筛处理; A, C 为 0~20 cm 土层, B, D 为 20~40 cm 土层。显著性水平 $P = 0.05$ 。

Note: Dry (A, B) and water-stable (C, D) aggregates distribution with different cultivation age, A, C in 0~20 cm layer, and B, D in 20~40 cm layer. Values followed by different letters are significantly different at $P = 0.05$.

图 1 不同开垦年限团聚体分布

Fig.1 Distribution of dry and water-stable aggregates with different cultivation age

湿筛处理下依次为 18.7%, 15.2%, 14.0%, 6.0% 以及 7.3%, 破坏率为 48.3%, 67.5%, 70.1%, 86.9% 以及 81%, 破坏率明显大于 0~20 cm 土层, 这可能与该层有机碳含量较耕作层低有关。关于团聚体稳定性的影响因素将在另文讨论。

2.2 开垦对土壤团聚体稳定性的影响

周虎等人^[20]认为在团聚体总量一定的基础上, 土壤的质量与团聚体直径大小以及分布状况关系更加密切。为定量反映团聚体的分布状况和稳定性特

征, 目前有三种参数被用来描述团聚体的稳定性, 分别是 $R_{0.25}$ ($R \geq 0.25$ mm)、MWD 以及 GMD。后两者相对于 $R_{0.25}$ 更加有利于分析土壤团聚体同其它土壤指标之间的关系, 并且从统计学角度讲, MWD 和 GMD 也更能准确描述团聚体分布状况。因此, 参考周虎^[20], 邱莉萍^[21] 以及 Pinheiro^[22] 等人对 MWD 和 GMD 的计算方法, 样品 MWD 和 GMD 计算结果如表 2 所示。

表 2 样地土壤 MWD 和 GMD 值
Table 2 MWD and GMD of sample soils

处理 Treatment	深度 Depth/cm	指标 Index/mm	耕作年限 Cultivation age/a				
			0	1	5	10	> 70
干筛 Dry sieving	0~20	MWD	1.96	3.14	2.70	2.56	2.86
		GMD	1.44	2.15	1.85	1.78	1.97
	20~40	MWD	2.63	3.22	3.35	3.10	2.58
		GMD	1.81	2.20	2.25	2.13	1.86
湿筛 Wet sieving	0~20	MWD	1.60	1.26	0.99	0.96	1.09
		GMD	0.69	0.36	0.32	0.34	0.35
	20~40	MWD	1.44	1.10	1.00	0.88	0.96
		GMD	0.47	0.32	0.31	0.35	0.36
$(MWD_{DS} - MWD_{WS})/MWD_{DS} \times 100\%$	0~20		19%	60%	63%	63%	62%
	20~40		52%	83%	83%	81%	82%
$(GMD_{DS} - GMD_{WS})/GMD_{DS} \times 100\%$	0~20		45%	66%	70%	72%	63%
	20~40		74%	85%	86%	84%	81%

注: DS 表示干筛处理; WS 表示湿筛处理。 Note: DS means dry sieving; WS means wet sieving.

干筛处理下, 0~20 cm 土层, 未经开垦土壤 MWD 和 GMD 值最小; 20~40 cm 土层, 未经开垦土壤 MWD 和 GMD 值与大于 70 a 开垦土壤接近, 较其他开垦年限土壤小。湿筛处理下, 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 未经开垦土壤 MWD 和 GMD 值最大。对比两种处理方式结果可知, 未经开垦土壤 MWD 和 GMD 减小值明显小于开垦后土壤, 说明开垦会破坏团聚体结构, 降低土壤团聚体的稳定性。干筛条件下土壤的 MWD 和 GMD 值明显大于湿筛土壤, 这是因为水分的浸泡会导致大量的非水稳性团聚体分解。对于水稳性团聚体, 0~20 cm 土层, 经 70 a 以上开垦, MWD 和 GMD 值分别降低了 31.9% 和 49.3%; 20~40 cm 土层, 两个指标值分别下降了 33.3% 和 23.4%。团聚体水稳性在空间随土壤剖面的变化则表现为耕作层大于亚表层, 耕作层 MWD 和 GMD 值平均比亚表层大了约 10%, 并且随着耕作年限的增大, 上下两个土层之间稳定性差别越来越小, 这就说明耕作对于表层土壤结构的破坏更为

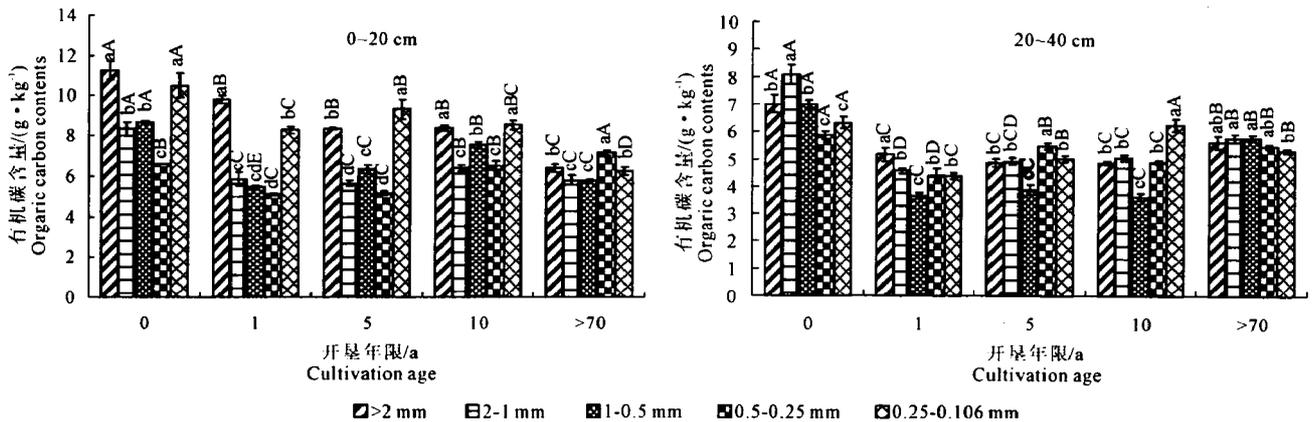
显著。

2.3 开垦对水稳性团聚体有机碳分布的影响

表层土壤中近 90% 的土壤有机碳位于团聚体内, 团聚体和有机碳是指示土壤质量的两种指标, 二者相互作用, 团聚体是有机碳最主要的储存场所, 而有机碳则是团聚体形成过程中的胶结物质^[23-24]。图 2 为不同耕作年限各级别水稳性团聚体中有机碳的含量, 可见, 耕作层团聚体有机碳含量较亚表层高。总体上来讲, 对于耕作层和亚表层土壤, 团聚体有机碳含量表现为随开垦而不断下降的趋势, 并且不同直径团聚体中有机碳含量随开垦向着均匀化方向发展。开垦初期, 各直径团聚体中有机碳含量差别比较明显, 开垦 70 a 以上的土壤, 这种差别变得很小, 基本表现为均匀分布的趋势。0~20 cm 土层, 不同直径团聚体中有机碳含量差别明显, > 2 mm 和 0.25~0.106 mm 直径团聚体中有机碳含量最高, 0.5~0.25 mm 团聚体中含量最低, 这就说明有机碳大多储存于较大团聚体和微团聚体中, 微团聚

体中有机碳含量较高这一结果与郑子成等人研究结果一致,普遍认为,微团聚体是大团聚体分解或者由粘粒与有机物胶结以后形成的产物,通常储存于其中的有机碳不易遭到农耕作用的破坏以及微生物分解而释放,被认为是有机碳吸存的主要场所^[25]。
> 2 mm 团聚体中有机碳含量较高与 Pinheiro

等^[22,26-29]研究结果一致,这是因为较大直径团聚体对于碳的扣留更为有利。20~40 cm 土层,土壤团聚体中有机碳没有表现出明显的高低之分,各级别团聚体有机碳含量之间差别并不明显,相对耕作层,有机碳含量分布得更为均匀,这可能与农耕没有对其直接作用有关。



注:显著性水平 $P = 0.05$ 。

Note: Values followed by different letters are significantly different at $P = 0.05$.

图 2 不同开垦年限水稳性团聚体中有机碳的分布

Fig. 2 Distribution of organic carbon in water - stable aggregates with different cultivation age

2.4 土壤团聚体水稳性的主要影响因素分析

采用 pearson 相关系数法对土壤主要指标两两之间的相关性进行了分析(表 3),结果表明:土壤有机碳含量与 GMD 和 MWD 之间存在明显的正相关性,相关系数 r 分别为 0.96 和 0.81,对相关系数进行检验,均达到了极显著水平($P \leq 0.01$);除了土壤粉粒含量与 MWD 之间有较为明显的相关关系之外,GMD 和 MWD 与土壤碳酸盐以及土壤粘粒含量均没有表现出明显的相关性,尽管该地区土壤碳酸

盐含量相对较高,但并没有对土壤水稳性团聚体的形成起到明显的贡献作用;砂粒含量(粘粒+粉粒含量)与水稳性指标以及土壤有机碳含量呈现出一定的负相关性(正相关性),这与 Jiménez 等^[30]的研究结果是一致的。通过对以上线性相关系数的比较,认为有机碳对水稳性团聚体形成的贡献最大,作为团聚体形成过程中重要的胶结物,有机质含量的减少会导致大团聚体数量的减少和土壤质量的下降。

表 3 土壤主要指标相关关系

Table 3 Correlation coefficients(r) between major indexes

指标 Index	GMD	MWD	SOC	CaCO ₃	Sand	Silt	Clay
GMD	1.00**						
MWD	0.85**	1.00**					
SOC	0.96**	0.81**	1.00**				
CaCO ₃	0.25	0.36	0.32	1.00**			
Sand	-0.40	-0.51	-0.26	0.30	1.00**		
Silt	0.36	0.67*	0.32	0.04	-0.48	1.00**	
Clay	0.21	0.12	0.08	-0.36	-0.81**	-0.13	1.00**

注: * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$ 。

Note: Statistical significance: * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$.

表 4 国内外一些研究结果表明,对于不同地区不同类型土壤,团聚体水稳性的变化均能用土壤有机碳含量解释,这与我们的研究结果是一致的。更

多的学者认为直线方程能更好地拟合二者之间的关系,Spohn 等^[31]则用指数函数反映德国北部地区团聚体稳定性与有机碳的关系。荒地开垦在农耕地之

后,由于传统耕作中只有少量的农家肥的施用,地表以上植物茎秆基本被清理出去,导致输入土壤的有机质减少;土壤的翻耕能增强土壤透水透气性,微生物活性得到增强,同时,翻耕会破坏大团聚体,储存

于其中的有机质失去保护暴露出来,大量有机质会被用来维持植物生长以及微生物活动,导致输出土壤的有机质增加。有机质输入量减少,输出量增加,从而导致土壤中有机质含量的下降。

表 4 不同地区 MWD 和 SOC 相关性研究结果

Table 4 Results of the relationship between MWD and SOC in different areas

研究者 Reference	MWD&SOC 回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	土壤类别 Soil type	耕作方式 Tillage management	地区 Location
Onweremadu et al. ^[28]	$MWD = 29.4 SOC + 29.1$	$R = 0.58$	砂土及砂质壤土 Sand & sandy loam soil	传统耕作 Conventional tillage	尼日利亚东南部 Southeastern Nigeria
Onweremadu et al. ^[28]	$MWD = 29.4 SOC + 29.1$	$R = 0.48$	砂土及砂质壤土 Sand & sandy loam soil	少耕 Minimum tillage	尼日利亚东南部 Southeastern Nigeria
Unger ^[32]	$MWD = 0.80 SOC + 0.46$	$R^2 = 0.598$	黏质壤土 Clay loam soil	传统耕作 Conventional tillage	美国德克萨斯州 Texas, USA
Li et al. ^[33]	线性方程 Linear model	$R^2 = 0.41$	粉砂质壤土 Silty loam soil	传统耕作 Conventional tillage	中国河西走廊 Hexi Corridor, China
Su et al. ^[34]	线性方程 Linear model	$R^2 = 0.582$	粉砂质壤土 Silty loam soil	传统耕作 Conventional tillage	中国河西走廊 Hexi Corridor, China
Spohn et al. ^[31]	指数方程 Exponential model	$R^2 = 0.84$	壤土 Loam soil		德国北部 North German
Spohn et al. ^[31]	指数方程 Exponential model	$R^2 = 0.62$	砂土及砂质壤土 Sand & sandy loam soil		德国西北部 Northwestern German
Chenu et al. ^[27]	线性方程 Linear model	$R^2 = 0.71$	粉砂质壤土 Silty loam soil		法国比利牛斯山 Pyrenees, France
Six et al. ^[35]	$MWD = 0.48 SOC + 51.5$	$R^2 = 0.10$			热带 & 亚热带 Tropics & Subtropics
Six et al. ^[35]	$MWD = 2.18 SOC + 4.27$	$R^2 = 0.44$			温带 Temperate zone
Ivarro - Fuentes et al. ^[36]	线性方程 Linear model	$R^2 = 0.947$	粉砂质黏壤土 Silty clay loam soil		西班牙萨拉戈萨 Zaragoza, Spain
Ivarro - Fuentes et al. ^[36]	线性方程 Linear model	$R^2 = 0.919$	粉砂质黏壤土 Silty clay loam soil		西班牙萨拉戈萨 Zaragoza, Spain

3 结论与讨论

1) 干筛处理下,对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,团聚体含量随开垦年限没有表现出明显差异, <2 mm 直径团聚体含量占总重的一半以上, >5 mm 和 2~5 mm 直径团聚体含量差别不明显,这与本地区有机质含量以及粘粒含量总体偏低有关。湿筛处理下,对于 0~20 cm 和 20~40 cm 土层,经过 70 a 以上时间开垦, >0.25 mm 直径水稳性团聚体含量分别下降了 40.5% 和 12.5%,表明传统的耕作对于土壤团聚体有明显的破坏作用,并且这种破坏对于耕作层影响更大。干、湿筛计算(破坏率)结果也表明开垦能明显破坏土壤水稳性团聚体。

2) 干、湿筛 MWD 和 GMD 计算结果表明对于耕作层以及亚表层,未经开垦土壤团聚体最为稳定。整体看来,开垦能明显破坏团聚体,降低团聚体稳定

性。湿筛后,耕作层 MWD 和 GMD 值比亚表层大了约 10%,上下两个土层之间随耕作年限水稳性差别越来越小,这就说明耕作对于表层土壤结构的破坏更为显著。

3) 耕作层和亚表层土壤水稳性团聚体有机碳含量整体随开垦不断下降,并且不同直径水稳性团聚体中有机碳含量随开垦向着均匀化方向发展。

4) 水稳性团聚体指标 GMD 和 MWD 与土壤有机碳有着很好的相关性,与粘粒含量以及碳酸盐含量相关性较差。有机碳绝大部分储存在团聚体中,因此团聚体的稳定对于土壤有机碳的保持作用关键。

参考文献:

- [1] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. Plant and Soil, 1984, 76: 319-

- 337.
- [2] 何淑勤, 郑子成. 不同土地利用方式下土壤团聚体的分布及其有机碳含量的变化[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 7-10.
- [3] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79: 7-31.
- [4] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 119-126.
- [5] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105: 192-199.
- [6] 刘晓利, 何园球. 不同利用方式和开垦年限下红壤水稳性团聚体及养分变化研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 84-89.
- [7] Riezebos H T, Loerts A C. Influence of land use change and tillage practice on soil organic matter in southern Brazil and eastern Paraguay[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 49: 271-275.
- [8] Wu T Y, Schoenau J J, Li F M, et al. Influence of cultivation and fertilization on total organic carbon and carbon fractions in soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 59-68.
- [9] 吴乐知, 蔡祖聪. 农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 118-134.
- [10] 周莉, 李保国, 等. 土壤有机碳的主导影响因素及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [11] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.
- [12] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [13] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution [C]//Dane J H, Topp G C. *Methods of Soil Analysis, Part 1: Physical and mineralogical methods*. Wisconsin, USA: Inc. Madison, 1986: 425-442.
- [14] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregate stability and size distribution [C]//Dane J H, Topp G C. *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical methods*. Wisconsin, USA: Inc. Madison, 2002: 317-328.
- [15] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1984.
- [16] 杨金玲, 张甘霖, 李德成, 等. 激光法与湿筛-吸管法测定土壤颗粒组成的转换机质地确定[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 772-779.
- [17] Van Bavel C H M. Mean weight - diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1949, 14: 20-23.
- [18] Mazurak, Andrew P. Effect of gaseous phase on water - stable synthetic aggregates[J]. *Soil Science*, 1950, 69: 135-148.
- [19] 李明德, 吴海勇, 聂军, 等. 稻草及其循环利用后的有机废弃物还田效用研究[J]. 中国农业科学, 2010, 43(17): 3572-3579.
- [20] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [21] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱, 等. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 364-372.
- [22] Pinheiro E F M, Pereira M G. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a Red Latosol from Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 79-84.
- [23] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 412-418.
- [24] 谭文峰, 朱志峰, 刘凡, 等. 江汉平原不同土地利用方式下土壤团聚体中有机碳的分布与积累特点[J]. 自然资源学报, 2006, 21(6): 973-980.
- [25] Six J, Elliott E T. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no - tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 2099-2103.
- [26] 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[J]. *Soil and Tillage Research*, 2005, 81: 239-252.
- [27] Chenu C, Bissonnais Y L, Arrouays D. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1479-1486.
- [28] Onweremadu E U, Onyia V N, Anikwe M A N. Carbon and nitrogen distribution in water - stable aggregates under two tillage techniques in Fluvisols of Owerri area, southeastern Nigeria[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97: 195-206.
- [29] Yang Z H, Singh B R. Aggregate associated carbon, nitrogen and sulfur and their ratios in long - term fertilized soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95: 161-171.
- [30] Jiménez J J, Lorenz R, et al. Organic carbon and nitrogen in soil particle-size aggregates under dry tropical forests from Guanacaste, Costa Rica-Implications for within-site soil organic carbon stabilization[J]. *Catena*, 2011, 86: 178-191.
- [31] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 42: 1505-1511.
- [32] Unger P W. Aggregate and organic carbon concentration interrelationships of Torrcertic Paleustoll[J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 42: 95-113.
- [33] Li X G, Li F M, Rengel Z, et al. Cultivation effects on temporal changes of organic carbon and aggregate stability in desert soils of Hexi Corridor in China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91: 22-29.
- [34] Su Y Z, Wang F, Zhang Z H, et al. Soil properties and characteristics of soil aggregate in marginal farmlands of oasis in the middle of Hexi Corridor region, Northwest China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2007, 6: 706-714.
- [35] Six J, Feller C, Denef K, et al. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils-effects of no-tillage[J]. *Agronomie*, 2002, 22: 755-775.
- [36] Álvaro-Fuentes J, Arrúe J L, Gracia R, et al. Soil management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 378: 179-182.

The impacts of N rates on the growth and Na⁺ accumulation of *Salicornia europaea* L.

LIANG Fei^{1,2}, TIAN Chang-yan¹, ZENG Sheng-he², YIN Chuan-hua¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China;

2. Institute of Farmland Water Conservancy and Soil-fertilizer, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Science, Shihhotze, Xinjiang 832000, China)

Abstract: In order to research the effects of fertilization on Na⁺ accumulation and growth of *Salicornia europaea* L., field experiments were conducted to study the effects of nitrogen levels on the growth, accumulative amounts of Na⁺ *Salicornia europaea* L. The results indicated that the yields of grain, stem, and assimilation shoot increased with N fertilizer application. The relationship between grain biomass, assimilation shoot yield, and the N application rate was in rectilinear correlation. With increasing nitrogen application, the concentration trend of Na⁺ was not significantly changed. The concentration of Na⁺ in assimilation shoot was significantly higher than that in grain and stem. The accumulative amounts of Na⁺ in *Salicornia europaea* L increased with N fertilizer application. Among different nitrogen treatments, the highest Na⁺ accumulative by *Salicornia europaea* L. was N600 (9 668 kg/hm²), which was 4.7 times of CK (2 045 kg/hm²). Under the conditions of this experiment, fertilization could stimulate *Salicornia europaea* L. growth and strengthen the effectiveness of bio-remediation of saline soil.

Keywords: *Salicornia europaea* L.; N rates; Na⁺; accumulation

(上接第 151 页)

Effects of long-term conventional cultivation on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates

ZHOU Zhen-fang, HU Ya-jie*, MA Can, XUE Tian-zhu, GUO Ying, WEI Guo-xiao

(Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Organic matters improve the physical, chemical and biological properties of soil, influence soil structure by binding mineral particles, while cultivation is an important factor influencing the content of soil organic matters. Also soil aggregates are important indicators of soil physical quality, reflecting the impact of land use and management. This study, by selecting five sampling plots with different cultivation age, was conducted to examine the effects of conventional cultivation on soil organic carbon and aggregates in the semiarid Loess Plateau in China. The results showed that the content of water-stable macroaggregates (≥ 0.25 mm) decreased by 40.5% and 12.5% in the layers of 0~20 cm and 0~40 cm after >70 years reclamation, respectively. Aggregates could be broken typically by reclamation. The average values of MWD and GMD in 0~20 cm were nearly 10% higher than in 20~40 cm layer, and the difference decreased with cultivation time. Organic carbon contents of >2 mm and 0.25~0.106 mm water-stable aggregates were much higher in 0~20 cm layer, while it was not obvious in 20~40 cm layer, carbon contents of water-stable aggregates for the whole soil profiles decreased generally with cultivation time. The favorable correlation of MWD and GMD with organic carbon in soil aggregates indicated that aggregates could protect soil organic carbon from erosion.

Keywords: aggregate; organic carbon; conventional cultivation