

侵蚀红壤中结合态腐殖质及其与水稳性团聚体的关系^①

刘 威, 王春燕, 黄 丽*

(华中农业大学农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘 要:以亚热带地区 3 种侵蚀程度(依据其植被、坡度以及土层厚度不同分为轻度、中度和严重侵蚀)的红壤为供试材料,利用湿筛法获得粒径 >4 、 $2\sim 4$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.25\sim 0.5$ mm 的水稳性团聚体,分析侵蚀红壤和团聚体中 3 种结合态(紧结态、松结态和稳结态)腐殖质含碳量的分布特征,及其对 >0.25 mm 团聚体稳定性的影响。结果表明:随着红壤侵蚀程度的增强,3 种结合态腐殖质的含碳量均逐渐减小。在轻度侵蚀的红壤中,随着团聚体粒径的增大,其紧结态和松结态腐殖质的含碳量逐渐升高,稳结态腐殖质的含碳量逐渐降低;但是在中度和严重侵蚀红壤中,不同粒径团聚体的 3 种结合态腐殖质的含碳量基本相同。侵蚀红壤的紧结态、松结态腐殖质的含碳量与其 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量均呈极显著正相关(r 分别为 0.88, 0.74),说明土壤中腐殖质与矿物质的结合方式和松紧程度不一样,其对侵蚀红壤的结构具有不同的影响。

关键词:侵蚀红壤;结合态腐殖质;水稳性团聚体;稳定性;有机质

中图分类号: S153

红壤区是我国土壤侵蚀最为严重的地区之一,土壤侵蚀面积达 25 万 km^2 ,占东南部红壤面积的 22%,是我国水土流失治理的重点区域之一^[1]。该区由于受季风气候影响,降雨集中、强度大,土壤侵蚀严重,加上人类对土地的不合理利用,土壤退化十分严重,特别是水土流失造成土壤肥力退化的现象普遍存在。有研究表明,我国红壤区处于轻度、中度和严重退化的土壤面积分别占 21.5%、49.5% 和 29.0%^[2],随着土壤侵蚀的发展,侵蚀红壤的生产力进一步下降^[3]。

土壤结构是影响土壤侵蚀的重要因子^[4]。在土壤结构体中,团粒结构具有水稳性、力稳性和多孔性等良好的物理性能,是肥沃土壤的结构形态。红壤团聚体的稳定性很大程度上决定于土壤胶结物质的类型和它们间的联结力,其主要表现是水稳性^[5]。大量研究表明, >0.25 mm 水稳性团聚体的数量可以判别土壤结构的好坏,表征土壤抗侵蚀能力的强弱^[6];随着土壤侵蚀程度的加剧, >0.25 mm 水稳性团聚体有减少的趋势^[7]。提高水稳性团聚体的数量和质量,是提高土壤抗侵蚀能力的有效途径^[7]。南方非耕地的结构稳定性主要取决于无机胶结物的组成^[8]。有研究报道,第四纪黏土红壤黏粒含量高, <0.25 mm 微团聚

体的形成主要取决于黏粒和三氧化物的黏结作用^[8]。相比无机胶结物,有机质胶结形成的团聚体具有较强的水稳性^[8]。在北方黑土中,有机质的含量高,其胶结作用是形成水稳性团聚体的主要因素^[9],而在有机质含量偏低的红壤等南方土壤中,有机胶结物的作用没有得到重视。

腐殖质作为有机质的重要组成部分,对于土壤结构、肥力水平和养分状况都有一定的表征作用。土壤中的腐殖质只有一小部分以游离态形式存在,而绝大部分则与矿物质相结合成有机无机复合体,即结合态腐殖质^[10]。张电学等^[11]研究表明,由于结合的方式和松紧程度不一,结合态腐殖质一般可分为紧结态、松结态和稳结态,它们在固碳和肥力特征上各不相同。

不同结合形态腐殖质对土壤结构状况具有不同的影响,对土壤的肥沃状况也有很大的影响。韩志卿等^[12]对红壤的研究得出,相比其他形态的腐殖质,紧结态腐殖质与土壤肥力的关系最密切,它在标志土壤肥力方面有重要的意义。因此紧结态腐殖质可以在一定程度上评价土壤质量。雷加容等^[13]对紫色土的研究发现,土壤松结合态腐殖质的含量越高,土壤腐殖质的活性越强,土壤肥力越高。宇万太等^[14]研究

基金项目:国家自然科学基金项目(41271252)和中央高校基本科研业务费专项基金项目(2013PY002)资助。

* 通讯作者(daisyh@mail.hzau.edu.cn)

作者简介:刘威(1990—),男,湖北鄂州人,硕士研究生,主要从事土壤化学方面的研究工作。E-mail: lwsoils@163.com

了黑土水稳性和土壤养分的关系,发现腐殖质的 3 种结合状态中,紧结态腐殖质与土壤养分(全氮、全磷和全钾)的相关性最好,松结态腐殖质的次之,稳结态的最小。张靓等^[15]研究表明土壤复合状况与土壤团聚程度密切相关。王春燕等^[16]研究表明,有机无机复合度与有机质呈正相关,土壤有机质增多,有机无机复合度增加,但有机无机复合度与腐殖质结合状态(松结合态、稳结合态和紧结合态)无明显的相关性。不同肥力水平下,土壤腐殖质的组成和性质不同。刘树庆等^[17]对潮土及潮褐土的研究表明,随着土壤肥力的提高、熟化度的增强,松结合态腐殖质增多,紧结合态的减少,松/紧比值增大。杨振强和林成谷^[18]发现长期有机培肥、肥力较高的褐土,其腐殖质的复合碳量、松结态和紧结态腐殖质的含量也较高。可见,土壤中 3 种结合态腐殖质与土壤养分、团聚体稳定性等都有不同程度的关联。

以上相关的研究多针对施肥措施对于土壤腐殖质结合形态的影响^[11,19-20],有关侵蚀红壤中腐殖质结合形态及水稳性团聚体关系的研究,特别是不同粒径的团聚体中结合态腐殖质变化特征的报道较少。同时,紧结态、松结态和稳结态腐殖质对土壤结构的影响机制有待进一步探讨。为此,本文以 3 种侵蚀程度(轻度、中度和严重)的红壤为供试材料,分析红壤及其团聚体中结合态腐殖质的组成和变化特征,探讨侵

蚀红壤中有机胶结物(结合态腐殖质)对水稳性团聚体形成的影响。通过研究侵蚀红壤中结合态腐殖质在不同团聚体中的分布规律,揭示结合态腐殖质与土壤结构之间的关系,为减少红壤水土流失、防治红壤质量退化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土样

供试土壤取自亚热带的湖南省长沙市、湖北省咸宁市和赤壁市。采样区气候温暖,年平均温度 16℃ ~ 18℃,雨量充沛,年降水量约 1 800 mm,水热等自然条件优越。成土母质均为第四纪沉积物(Q₂)。每个地区依据其植被、坡度以及土层厚度采取轻度侵蚀、中度侵蚀和严重侵蚀(土壤侵蚀分类分级标准,SL190-96)的表层(0~20 cm)土壤。轻度侵蚀红壤多取自园地和林地,坡度为 5°~25°,植被覆盖率达到 60%~75%;中度侵蚀红壤主要为农田和荒地,坡度为 15°~35°,植被覆盖率 45%~60%;而严重侵蚀红壤多为荒地和裸地,坡度在 35°以上,植被覆盖率只有 30%~45%。共取 19 个土样,其中轻度和中度侵蚀土样各 7 个,严重侵蚀土样 5 个。所取土样自然风干,一部分制样用于基本性质的分析,一部分用于团聚体水稳性的测定。采样区地基本概况见表 1。

表 1 采样区的基本情况
Table 1 Basic information of sampling sites

侵蚀程度	样品编号	取样地点	地理位置	植被及利用	海拔(m)
轻度侵蚀	QX1	咸宁	30°0.39'N, 114°20.11'E	次生林	50
	QX2	咸宁	30°1.24'N, 114°21.33'E	杂草,荒地	45
	QC3	长沙	28°12.27'N, 113°3.63'E	灌木丛	68
	QC4	长沙	28°12.31'N, 113°3.63'E	茅草,荒地	71
	QB5	赤壁	29°41.11'N, 113°49.22'E	果园	63
	QB6	赤壁	29°35.12'N, 113°44.22'E	茶园,园地	77
	QB7	赤壁	29°47.73'N, 113°54.02'E	杂草,荒地	77
中度侵蚀	ZX1	咸宁	29°58.01'N, 114°21.53'E	竹林,林地	55
	ZX2	咸宁	29°57.73'N, 114°21.58'E	茅草,荒地	54
	ZX3	咸宁	29°58.99'N, 114°21.76'E	竹林,林地	50
	ZX4	咸宁	29°3.71'N, 114°17.41'E	黄豆,农田	46
	ZC5	上沙	28°12.67'N, 113°3.95'E	杂草,荒地	75
	ZB6	赤壁	29°40.88'N, 113°46.94'E	杂草,荒地	57
	ZB7	赤壁	29°45.96'N, 113°55.95'E	杂草,荒地	77
严重侵蚀	YX1	咸宁	29°58.02'N, 114°21.52'E	裸地	57
	YX2	咸宁	29°57.72'N, 114°21.58'E	灌木丛	41
	YC3	长沙	28°12.67'N, 113°3.94'E	裸地	73
	YB4	赤壁	29°37.12'N, 113°46.33'E	杂草,荒地	71
	YB5	赤壁	29°37.12'N, 113°46.33'E	杂草,荒地	71

1.2 土壤水稳性团聚体的测定

用湿筛法^[21]获得不同粒径的水稳性团聚体：用四分法将一定质量的风干土样通过孔径依次为 4、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛，分别称重计算出各级干筛团聚体占土壤总量的百分率，并按干筛的比例配成 50 g 风干土样，放入已注水的团粒分析仪(FT-3 型电动团粒分析仪，中国科学院南京土壤所设备厂)中，震动 30 min (30 次/min，上下振幅 4 cm) 后，将筛组分开。留在各级筛子上的土壤，用水洗入铝盒中，静置，倒出上部清液，置于电热板上蒸干，再于烘箱中(105℃)烘干，称重，重复 3 次。计算 >0.25 mm 水稳性团聚体(water stable aggregate, WSA) 百分含量。 $WSA (>0.25 \text{ mm}) \% = >0.25 \text{ mm 各级团聚体的烘干重 (g)} \times 100 / \text{烘干样品重 (g)}$ 。

1.3 结合态腐殖质的提取与测定

将以上过筛得到的 >4、2~4、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 的土壤水稳性团聚体，采用傅积平^[10]改进法进行松结态、稳结态和紧结态 3 种结合态腐殖质的提取和分析。首先用相对密度为 1.8 的溴仿-乙醇混合体分离出土壤重组，然后用 0.1 mol/L NaOH (pH 12.4) 反复处理重组土样，直至提取液无色或接近无色，提取部分为松结合态腐殖质；接着按

同样方法用 0.1 mol/L NaOH 和 0.1 mol/L $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 混合液(pH 13) 提取稳结合态腐殖质；残渣为紧结合态腐殖质。最后用重铬酸钾外加热法测定 3 种提取液中结合态腐殖质的含碳量。

1.4 土壤基本理化性质的测定

土壤质地用吸管法(采用国际制质地分类系统)；pH 用电位法(水土比 2.5 : 1，奥利龙 868 型 pH 计测定)；土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法；阳离子交换量用 1 mol/L 的 NH_4AC 浸提法。实验均设置 3 次重复。

1.5 计算与统计方法

紧、松、稳结合态腐殖质的比率(%) = 紧、松、稳结合态腐殖质的含碳量/原土总有机碳含量 $\times 100\%$ ；结合态腐殖质总回收率(%) = 3 种结合态腐殖质含碳量之和/原土总有机碳含量 $\times 100\%$ 。以上计算方法依据张鼎华等^[22]的分析方法。

实验结果用 SPSS17.0 进行方差分析和显著性检验，Excel 软件作图。

2 结果与分析

2.1 侵蚀红壤的基本理化性质

供试红壤为酸性，pH 4.41 ~ 5.01(表 2)。轻度、中度和严重侵蚀红壤的平均 pH 分别是 4.71、4.76 和

表 2 供试土样的部分理化性质
Table 2 Physical and chemical properties of soils tested

侵蚀程度	样品编号	质地	pH	SOC(g/kg)	CEC(cmol/kg)	WSA(%)
轻度侵蚀	QX1	壤黏土	5.01	13.3	15.6	71.2
	QX2	黏土	4.41	12.9	16.4	67.0
	QC3	壤黏土	4.65	23.9	35.4	74.9
	QC4	黏壤土	4.41	18.9	28.0	63.6
	QB5	重黏土	4.80	16.1	16.7	75.6
	QB6	壤黏土	4.89	13.3	14.6	70.9
	QB7	壤黏土	4.78	11.9	23.2	65.7
中度侵蚀	ZX1	黏壤土	4.58	7.5	13.3	59.9
	ZX2	粉壤土	4.94	10.2	14.7	54.9
	ZX3	壤黏土	5.00	9.7	15.1	64.1
	ZX4	壤黏土	4.79	10.4	22.4	63.1
	ZC5	黏土	4.49	9.4	15.6	59.0
	ZB6	砂黏壤	4.65	6.9	19.5	49.4
	ZB7	壤黏土	4.92	8.9	16.1	72.3
严重侵蚀	YX1	粉壤土	4.57	3.7	11.1	47.1
	YX2	壤黏土	4.48	3.0	18.0	47.3
	YC3	重黏土	4.41	3.5	16.0	39.5
	YB4	壤黏土	4.94	5.2	20.0	39.4
	YB5	黏土	4.49	3.1	20.5	35.9

注：SOC 表示土壤有机碳；CEC 表示阳离子交换量；WSA 表示 >0.25 mm 水稳性团聚体。

4.58。19 种供试土样质地多为壤土和黏土。轻度侵蚀的土壤有机碳含量均在 11.9 g/kg 以上，中度侵蚀的平均为 9.0 g/kg，严重侵蚀的含量都低于 5.2 g/kg。可见，不同侵蚀程度红壤之间，土壤有机碳的含量为轻度>中度>严重。这说明侵蚀越严重，土壤有机碳含量越低。侵蚀红壤 >0.25 mm 水稳性团聚体(WSA)和土壤有机碳含量(SOC)之间有显著的正相关($r = 0.81$)。轻度侵蚀红壤阳离子交换量(CEC)较高，平均为 21.4 cmol/kg，中度、重度侵蚀较低，平均为 16.7、17.1 cmol/kg。

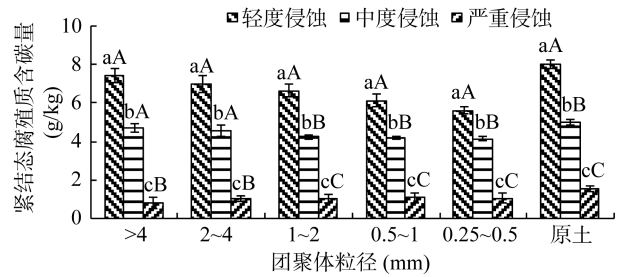
2.2 土壤团聚体中紧结态腐殖质

3 种不同侵蚀程度的红壤及其团聚体之间，紧结合态腐殖质的含碳量均存在显著性差异(图 1)。轻度侵蚀土壤和团聚体中紧结合态腐殖质的含碳量为 5.62~8.05 g/kg，其在 3 种侵蚀红壤中含量最高；中度侵蚀土壤和团聚体的含碳量为 4.16~5.03 g/kg；而严重侵蚀土壤和团聚体的含碳量为 0.81~1.53 g/kg。说明随着红壤侵蚀程度的增强，土壤和团聚体中紧结合态腐殖质的含碳量逐渐减小。这与表 2 中土壤有机碳的变化规律一致，轻度侵蚀红壤的有机碳含量最高，中度侵蚀的次之，严重侵蚀的最低。

在轻度和中度侵蚀的红壤中，随着 >4、2~4、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 团聚体粒径的减小，其中紧结合态腐殖质的含碳量呈下降的趋势，但差异不显著。其在 >4 mm 团聚体中的含量最高，分别为 7.43 g/kg (轻度侵蚀)和 4.69 g/kg (中度侵蚀)；但在 0.25~0.5 mm 团聚体中含量最低，分别为 5.62 g/kg (轻度侵蚀)和 4.16 g/kg (中度侵蚀)。严重侵蚀红壤的紧结合态腐殖质含碳量在 5 种不同团聚体中的变化规律不明显，各粒级团聚体中紧结合态腐殖质的含碳量基本相同，都在 1.00 g/kg 左右。这可能是在轻度和中度侵蚀红壤中有机质的含量较高，有机质是土壤团聚体形成的主要有机胶结物质，以致大团聚体的有机质总量高于小团聚体的，从而使参与形成有机无机复合体的有机质含量增加^[23]。这在一定意义上说明在有机质含量较高的土壤中，团聚体是在有机质胶结的基础上逐步形成的。严重侵蚀红壤的团聚体中结合态腐殖质含量随土壤粒径的变化规律不明显，这可能是由于严重侵蚀红壤团聚体的形成缺少有机质的参与所致。

>4、2~4、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 团聚体中紧结合态腐殖质的含碳量都低于相应土壤中的，但差异不显著(图 1)。5 种粒径的团聚体中，紧结合态腐殖质的含碳量在轻度、中度和严重侵蚀红壤中的范围分别是 5.62~7.43、4.16~4.69、0.81~1.09 g/kg。

原土中分别是 8.05、5.03 和 1.53 g/kg。侵蚀土壤中紧结合态腐殖质的含碳量均比相应团聚体中的高。



(柱图上方不同小、大写字母表示不同粒径不同侵蚀程度间差异在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著，下同)

图 1 土壤和团聚体中紧结合态腐殖质的含碳量
Fig. 1 Carbon contents of tightly combined humus in aggregates and soils

2.3 土壤团聚体中松结态腐殖质

轻度、中度和严重侵蚀红壤及其团聚体中，松结合态腐殖质含碳量的变化范围分别为 3.14~4.18、1.74~2.68、0.41~0.70 g/kg(图 2)。松结合态腐殖质的含碳量在 3 种不同侵蚀程度的红壤之间均存在显著性差异。可见，随着土壤侵蚀程度的增加，团聚体中松结合态腐殖质的含碳量逐渐减小，这与紧结合态腐殖质的变化规律基本一致，也与有机质的变化规律一致。这可能是因为紧结合态腐殖质和松结合态腐殖质是土壤有机质的主要组成。

在轻度和中度侵蚀的红壤中，5 种团聚体中松结合态腐殖质的含碳量随着粒径的减小呈下降的趋势，但是没有达到显著差异。在轻度和中度侵蚀红壤团聚体的松结合态腐殖质含碳量中，>4 mm 团聚体的最高，分别为 4.18 g/kg (轻度侵蚀)和 2.68 g/kg (中度侵蚀)，但其 0.25~0.5 mm 团聚体中的含碳量最低，轻度和中度侵蚀土壤中分别为 3.14 g/kg 和 1.74 g/kg。严重侵蚀土壤的松结合态腐殖质含碳量在 5 种团聚体中的变化不明显，各粒级团聚体中松结合态腐殖质的含碳量基本相同，都在 0.50 g/kg 左右。

整体来说，除严重侵蚀红壤外，供试红壤与 >4 mm 和 2~4 mm 团聚体中的松结合态腐殖质含碳量相近，

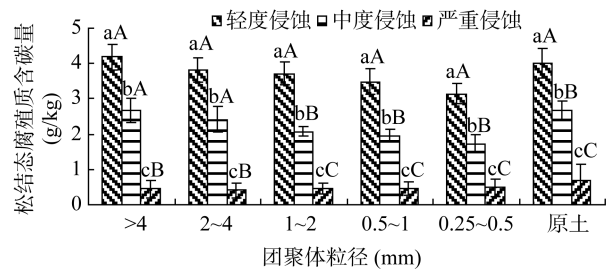


图 2 土壤和团聚体中松结合态腐殖质的含碳量
Fig. 2 Carbon contents of loosely combined humus in aggregates and soils

而比 1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 团聚体的要高。这说明, >4、2~4 mm 的团聚体对土壤松结态腐殖质的含量影响较大, 可能是因为松结态腐殖质在土壤中较活跃^[24-25]。与严重侵蚀的红壤相比, 轻度和中度侵蚀红壤的有机质含量较高, 它们的大团聚体是在小团聚体的基础上, 由有机物质胶结而成的, 有机质在大团聚体中较活跃^[26], 导致这两种侵蚀红壤中的大团聚体(>4 mm、2~4 mm)对土壤松结态腐殖质的影响较大。

同一种红壤中, 紧结态腐殖质的含碳量普遍高于松结态的, 大约是其 2 倍。>4、2~4、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 团聚体之间松结态和紧结态腐殖质的变化规律基本相同, 其随着粒径的减小呈下降的趋势; 3 种不同侵蚀程度之间松结态和紧结态腐殖质的变化规律也基本相同, 为轻度侵蚀>中度侵蚀>严重侵蚀, 且差异显著。

2.4 土壤团聚体中稳结态腐殖质

轻度、中度和严重侵蚀红壤各粒径团聚体中稳结态腐殖质含碳量的变化范围分别为 1.07~1.52、0.57~0.83 和 0.18~0.40 g/kg, 随着侵蚀程度的增强, 红壤团聚体中稳结态腐殖质的含碳量逐渐减小(图 3)。这与紧结态和松结态腐殖质的变化规律基本一致, 也与有机质的变化规律一致。

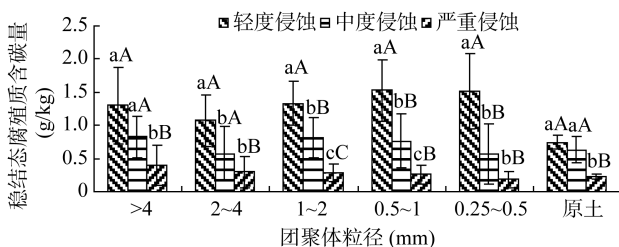


图 3 土壤和团聚体中稳结态腐殖质的含碳量

Fig. 3 Carbon contents of steadily combined humus in aggregates and soils

3 种侵蚀红壤中, 不同粒径团聚体中的稳结态腐殖质变化规律不明显。在轻度侵蚀的红壤中, 随着团聚体粒径的减小, 稳结态腐殖质的含碳量表现出一定的上升趋势, 没有达到显著差异; 其在 2~4 mm 粒径团聚体中的含碳量最低, 为 1.07 g/kg, 在 0.25~0.5 mm 中的含量最高(1.52 g/kg), 是原土含量(0.75 g/kg)的 2 倍之多。在中度和严重侵蚀红壤中, 随着团聚体粒径的减小, 稳结态腐殖质的含碳量表现出一定的下降趋势, 但差异不显著。其中度和严重侵蚀红壤的 >4 mm 团聚体中是最高的, 分别为 0.83 g/kg (中度侵蚀) 和 0.40 g/kg (严重侵蚀); 但其在 0.25~0.5 mm 团聚体中的含碳量最低, 中度和严重侵蚀红壤中分别为

0.57 g/kg 和 0.18 g/kg。在 3 种侵蚀红壤的团聚体中, 稳结态腐殖质的含碳量表现出与紧结态和松结态腐殖质不同的变化规律。这可能是稳结态腐殖质反映的是正在进行的松结态腐殖质向紧结态腐殖质转化的速度^[27]。

轻度侵蚀红壤的稳结态腐殖质含碳量(0.75 g/kg) 低于团聚体的(含碳量范围为 1.07~1.52 g/kg)。中度和严重侵蚀红壤团聚体中稳结态腐殖质的含碳量范围分别为 0.57~0.83 g/kg 和 0.18~0.40 g/kg, 其在这两种土壤中分别为 0.63 g/kg 和 0.23 g/kg, 土壤和团聚体的稳结态腐殖质含碳量差异不显著。

与团聚体中紧结态和松结态的腐殖质含碳量相比, 稳结态腐殖质含碳量表现出了不同的变化规律。如在轻度侵蚀的红壤中, 随着土壤团聚体粒径的减小, 紧结态和松结态腐殖质的含碳量都呈下降趋势(图 1 和图 2), 在 >4 mm 团聚体中紧结合态和松结合态腐殖质的含碳量最高(分别是 7.43 g/kg 和 4.18 g/kg), 在 0.25~0.5 mm 团聚体中的含量最低(分别是 5.62 g/kg 和 3.14 g/kg); 但是在轻度侵蚀红壤中的稳结态腐殖质含碳量随着土壤团聚体粒径的减小呈上升趋势(图 3), 2~4 mm 团聚体的含量最低(1.07 g/kg), 0.25~0.5 mm 含量最高(1.52 g/kg)。

在同种侵蚀红壤中, 3 种结合态腐殖质的含碳量表现为紧结态>松结态>稳结态。紧结态腐殖质含碳量占土壤有机碳的比值最高, 45%~60% (表 3); 松结态腐殖质的比值其次, 30% 左右; 而稳结态的最低, 只有 5% 左右。这与易文利等^[28]的研究结果一致。轻度、中度和严重侵蚀红壤有机碳的回收率分别是 85.9%、95.2% 和 78.3%, 与刘淑霞等^[29]的研究结果接近。3 种结合态腐殖质的含碳量在轻度侵蚀红壤与团聚体中都是最高的, 中度侵蚀的其次, 严重侵蚀的最低。

表 3 不同结合态腐殖质含碳量的比率及其总回收率(%)
Table 3 The ratios of different combined humus and its total recoveries

侵蚀程度	3 种结合态腐殖质的比率			总回收率
	紧结态	松结态	稳结态	
轻度侵蚀	51.4	28.8	5.6	85.9
中度侵蚀	58.5	29.8	6.9	95.2
严重侵蚀	45.2	28.9	4.1	78.3

2.5 结合态腐殖质与水稳性团聚体的相关性

不同侵蚀程度的红壤中, 其 >0.25 mm 的水稳性团聚体(WSA)的百分含量是不同的, 其在轻度、中度和严重侵蚀红壤中的含量平均值分别为 69.8%、60.4% 和 41.8%(表 2)。即土壤侵蚀程度越高, 水稳

性团聚体的含量就越低。这和 Huang 等^[30]研究得到的土壤团聚体稳定性与易蚀性呈极显著负相关的结论一致。

杨莹莹等^[31]研究表明,不同粒径团聚体的有机质含量与侵蚀土壤的有机质含量呈显著正相关。3种侵蚀红壤不同粒径的团聚体中,3种结合态腐殖

质的含碳量与 >0.25 mm 的 WSA 都呈极显著正相关(表 4)。不同粒径团聚体的紧结态和松结态腐殖质的含碳量与 >0.25 mm 的 WSA 百分含量的相关系数 r 分别为 0.70 ~ 0.83 和 0.79 ~ 0.84, 稳结态腐殖质的含碳量与 >0.25 mm 的 WSA 百分含量的 r 为 0.58 ~ 0.73。

表 4 结合态腐殖质与>0.25 mm 水稳性团聚体百分含量的相关性($n = 19$)
Table 4 Correlation between combined humus and percentage of >0.25mm water-stable aggregate

结合态腐殖质	团聚体的粒径(mm)					
	>4	2~4	1~2	0.5~1	0.25~0.5	原土
紧结态腐殖质	0.75**	0.70**	0.77**	0.78**	0.83**	0.88**
松结态腐殖质	0.79**	0.81**	0.82**	0.79**	0.84**	0.74**
稳结态腐殖质	0.59*	0.58*	0.73**	0.67*	0.58*	0.54*

注: ** 表示极显著相关($P < 0.01$); * 表示显著相关($P < 0.05$)。

侵蚀红壤中,紧结合态和松结合态腐殖质的含碳量与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量之间的相关系数较高(r 分别为 0.88 和 0.74), 稳结态腐殖质的含碳量与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量的相关系数 ($r = 0.54$) 较低。这可能与不同形态的腐殖质在土壤中的存在形态有关。土壤紧结态腐殖质主要以胡敏素的形式存在,与土壤矿物质结合较紧密,在土壤中不活跃^[32-33]。松结态腐殖质主要是由铁、铝或其水化氧化物联结的有机矿质复合体,而稳结态腐殖质主要是由钙离子联结的有机矿质复合体^[27]。供试土壤呈酸性,其稳结态腐殖质的含碳量在 3 种形态的腐殖质中是最低的,这反映在供试土壤中紧结态和松结态腐殖质与土壤矿物结合紧密,抵抗外界破坏的能力较强,稳定性较好,因此它与水稳性团聚体的关系密切。这与 Maria 等^[34]的研究结果一致。有报道在有机碳含量高的土壤中,有机物质对团聚体的胶结起主要作用,首先胡敏素与土壤颗粒胶结成稳定性的微团聚体,再经新鲜有机胶结物质胶结成较大的团聚体^[35]。虽然三氧化二铁是红壤水稳性团聚体形成的重要胶结物质,但本研究表明在供试红壤中有机质对于其水稳性团聚体形成的作用不容忽视。

3 结论

在 3 种不同侵蚀程度(轻度、中度、严重)的红壤中,随着侵蚀程度的增强,3 种结合态腐殖质(紧结态、松结态和稳结态)的含碳量均逐渐降低。

在轻度和中度侵蚀的红壤中,总体上随着团聚体粒径的减小(>4、2~4、1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm),紧结态和松结态腐殖质的含碳量逐渐降低,稳结态腐殖质的含碳量逐渐升高;在严重侵蚀的红壤中,不同

粒径团聚体中紧结态和松结态腐殖质的含碳量基本保持相同。

3 种侵蚀红壤的团聚体中,紧结态腐殖质的含碳量最高,其次是松结态腐殖质,稳结态腐殖质的含碳量最低。轻度、中度和严重侵蚀红壤的有机碳中分别有 85.9%、95.2% 和 78.3% 以结合态形式存在。在轻度和中度侵蚀的红壤中,对土壤紧结态和松结态腐殖质影响最大的是 >4 和 2~4 mm 的团聚体。腐殖质的 3 种结合形态中,紧结态和松结态腐殖质与土壤水稳性团聚体含量的相关性较好,稳结态的次之。

参考文献:

- [1] 喻荣岗, 杨洁, 王农, 张靖宇, 魏伟, 付涛. 侵蚀红壤区不同水土保持措施的土壤改良效果研究[J]. 中国水土保持, 2012(7): 40-43
- [2] 孙波, 赵其国. 红壤退化中的土壤质量评价指标及评价方法[J]. 地球科学进展, 1999, 18(2): 118-128
- [3] 和利钊, 张杨珠, 刘杰, 孙楠, 曾希柏, 廖超林. 不同施肥和调理剂对侵蚀红壤肥力和抗侵蚀性的修复效应[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 54-63
- [4] 李庆逵. 中国红壤[M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [5] 章明奎, 韩常灿. 浙江省丘陵土壤的抗蚀性[J]. 浙江农业学报, 2000, 12(1): 25-30
- [6] Bryan RB. Development of laboratory instrumentation for the study of soil erodibility[J]. Earth Science, 1968, 2(1): 38-50
- [7] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to run off and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133-149
- [8] 姚贤良, 许绣云, 于德芬. 不同利用方式下红壤结构的形成[J]. 土壤学报, 1990, 27(1): 25-33
- [9] 史奕, 陈欣, 闻大中. 东北黑土团聚体水稳性研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4): 95-98

- [10] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组的测定[J]. 土壤通报, 1983, 15(2): 42-69
- [11] 张电学, 韩世卿, 王秋兵, 陈洪斌, 常连生, 于玉桥, 刘东强, 王介元. 不同施肥制度下褐土结合态腐殖质动态变化[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 597-601
- [12] 韩志卿, 张电学, 陈洪斌, 常连生, 于玉桥, 刘东强, 王介元. 长期施肥对褐土有机无机复合性状的演变及其与肥力关系的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 720-723
- [13] 雷加容, 何毓蓉, 余敖. 紫色土有机胶体与肥力关系[J]. 西南农业学报, 2003, 16(4): 85-89
- [14] 宇万太, 沈善敏, 张璐, 马强, 赵少华. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2287-2291
- [15] 张靓, 梁成华. 长期定位施肥对设施土壤有机无机复合体的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007
- [16] 王春燕, 黄丽, 谭文峰, 蔡崇法, 胡红青. 几种侵蚀红壤有机无机复合状况及其与土壤养分的关系[J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 510-517
- [17] 刘树庆, 杜孟庸, 周健学. 不同肥力土壤有机无机复合度及腐殖质结合形态及其肥力关系研究[J]. 土壤通报, 1989, 20(6): 267-270
- [18] 杨振强, 林成谷. 晋中地区不同培肥度的土壤腐殖质的对比研究[J]. 土壤通报, 1992, 23(3): 115-118
- [19] 张鸿岭, 梁成华, 杜立宇, 陈新之, 李纪柏. 长期定位施肥对保护地土壤腐殖质结合形态的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(5): 831-834
- [20] 李建明, 吴景贵, 王利辉. 不同有机物料对黑土腐殖质结合形态影响差异性的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1 609-1 615
- [21] Yoder, RE. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. American Society of Agronomy, 1936, 28(5): 337-351
- [22] 张鼎华, 翟明普, 林平, 贾黎明. 杨树刺槐混交林下沙质土壤腐殖物质特性[J]. 林业科学, 2001, 37(3): 58-63
- [23] 温善菊, 吴景贵, 张显东. 土壤颗粒和肥力关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2005, 27(1): 65-70
- [24] 姜益娟, 郑德明, 吕双庆, 朱朝阳, 伍维模. 新疆农田土壤有机质含量及组成特征[J]. 土壤, 2004, 36(1): 43-45
- [25] Sneh GK, Chander K, Mundra MC. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. Biology and Fertility of Soils, 1999, 29(2): 196-200
- [26] Six J, Elliott ET, Paustian K. Aggregate and organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1 350-1 358
- [27] 徐建民, 袁可能. 土壤结合态腐殖质的形成特点及其结合特征[J]. 土壤学报, 1995, 32(2): 151-581
- [28] 易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 赵海超, 金相灿, 王国栋. 长江中下游浅水湖泊沉积物腐殖质组分赋存特征[J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 21-28
- [29] 刘淑霞, 刘景双, 赵兰坡, 王金达, 于君宝. 吉林省主要耕作土壤中结合态腐殖质组成特征的研究[J]. 吉林农业大学学报, 2002, 24(1): 7 2-76
- [30] Huang L, Wang CY, Tan WF, Hu HQ, Cai CF, Wang MK. Distribution of organic matter in aggregates of eroded Ultisols[J]. Central China. Soil and Tillage Research, 2010, 108(1/2): 59-67
- [31] 杨莹莹, 魏兆猛, 黄丽, 陈家宙, 蔡崇法. 不同修复措施下红壤水稳性团聚体中有机质分布特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 154-158
- [32] Spaccini R, Zena A, Igwe CA, Mbagwu JSC. Carbohydrates in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems[J]. Biochemistry, 2001, 53(1): 1-22
- [33] 方华军, 杨学明, 张晓平. 农田土壤有机碳动态研究进展[J]. 土壤通报, 2003, 34(6): 563-568
- [34] Maria T D, Anna B, Alessandra T, Carmelo D. Humic substances along the profile of two Typic Haploxerert[J]. Geoderma, 2002, 107(3/4): 281-296
- [35] Zhang B, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. Geoderma, 2001, 99(1/2): 123-145

Combined Humus of Eroded Ultisols and Its Relationship with Water-stable Aggregates

LIU Wei, WANG Chun-yan, HUANG Li*

(Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The distribution of combined humus in soil aggregates of particle size ranging from >4, 2–4, 1–2, 0.5–1 and 0.25–0.5 mm in three eroded (according to its vegetation, slope and soil thickness divided into slightly, moderately and severely erosion) Ultisols in subtropical regions of China and its relationship with the average percentage of >0.25 mm water-stable aggregates (WSA) were investigated by using wet-sieving method. Results showed that the carbon contents in three kinds of combined humus (tightly, loosely and steadily) decreased with erosion aggravating. In the slightly eroded soil, the carbon content of tightly and loosely combined humus in aggregates increased with increasing particle size, while the carbon content of steady combined humus decreased. In moderately and severely eroded soil, the carbon contents in the three kinds of combined humus were close in different size aggregates. The carbon content of three kinds of combined humus showed highly significant positive correlation with the percentage of > 0.25 mm water-stable aggregates in soil of different erosion degrees ($r = 0.88$ and 0.74). This showed that the different binding modes and tightness of minerals and humus had different effects on eroded soil structures.

Key words: Eroded Ultisols, Combined humus, Water-stable aggregates, Stability, Organic matter