

侵蚀红壤腐殖酸组分特点及其对水稳性团聚体的影响*

董 雪 王春燕 黄 丽[†] 谭文峰 胡红青

(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 在华中地区采集不同侵蚀程度(轻度、中度、严重)的红壤,利用干湿筛法获得不同粒径的水稳性团聚体(>0.25 mm)。通过测定不同粒径水稳性团聚体(>0.25 mm)的腐殖酸组分(胡敏酸和富里酸)碳量,以及向不同侵蚀程度的各粒径团聚体(>0.25 mm)中添加不同浓度(0.06 、 0.6 g L⁻¹)的胡敏酸,分析侵蚀红壤腐殖酸组分特点及其对水稳性团聚体的影响。结果表明:随着侵蚀程度的增加,供试红壤和水稳性团聚体(>0.25 mm)的腐殖酸组分含量减少;轻度和中度侵蚀红壤中,大粒径(>4 和 $2\sim4$ mm)水稳性团聚体的胡敏酸碳量较小粒径($1\sim2$ 、 $0.5\sim1$ 和 $0.25\sim0.5$ mm)的高;同种侵蚀程度下,除严重侵蚀红壤中 $2\sim4$ mm 团聚体的富里酸碳量与 $1\sim2$ mm 团聚体中的有显著差异外,不同粒径团聚体中富里酸碳量差别不大。3 种侵蚀程度红壤的胡富比总体上小于 1,其中中度侵蚀红壤和各粒径水稳性团聚体的胡富比均大于其他两种侵蚀程度的。腐殖酸组分与水稳性团聚体(>0.25 mm)含量呈极显著正相关,与胡敏酸碳量的相关系数最大($r = 0.85^{**}$, $n = 19$)。添加不同浓度(0.06 和 0.6 g L⁻¹)胡敏酸后,3 种侵蚀程度红壤各粒径水稳性团聚体(>0.25 mm)的含量均增加,且小粒径团聚体($1\sim2$ 、 $0.5\sim1$ 和 $0.25\sim0.5$ mm)的增加量要高于大团聚体($2\sim4$ 、 >4 mm)的。

关键词 侵蚀红壤;水稳性团聚体;腐殖酸组分;胡敏酸;富里酸

中图分类号 S158 **文献标识码** A

我国南方红壤地区占我国国土面积的 1/5,耕地占全国的 30%,是重要的粮食和经济作物产地^[1-2],但由于红壤地区以丘陵地形为主,降雨集中且强度大,水土流失严重,土壤结构遭到严重破坏,再加上人类对土地的不合理利用和对生态环境的破坏,土壤侵蚀问题十分严重^[3-4]。而良好的土壤结构和组分分布不仅可以防止水土流失,更能提高土壤生产潜力^[4-5]。因此深入研究土壤结构及其组分与土壤侵蚀的关系,了解它们之间的作用机理,对防止土壤肥力退化和改善生态环境具有重要意义^[2,6]。

研究发现,水土流失造成土壤退化的主要标志是土壤有机质的流失和团聚体的崩解^[4,7]。团聚体的稳定性是土壤侵蚀的表征指标^[8-9],土壤有机质和无机氧化物是团聚体形成的重要胶结物质^[10-11]。而腐殖质是有机质的主体^[12],对团聚体的稳定性有

重要作用。腐殖质是腐殖质的主要组分,不同的腐殖质组分对团聚体形成的作用不同。腐殖质中胡敏酸含量是影响团聚体稳定性的重要因素,而富里酸对团聚体的影响相对较弱^[5]。研究认为,胡敏酸含量较高的土壤,较利于土壤团聚体的形成,而富里酸对土壤团聚体的贡献不大^[13-14]。也有研究认为,单施腐殖质也能提高各粒径团聚体中胡敏酸和富里酸的含量^[15],从而有利于土壤中腐殖质的积累和团聚体的形成。胡富比一般用来表示土壤腐殖质的组分特征,其比值可反映土壤的腐殖化程度^[5],能在一定程度上反映对团聚体的形成和水稳性的影响。研究表明,红壤中铁铝氧化物不仅可以影响有机质的积累,增加土壤腐殖质的氧化稳定性^[16],而且不同形态的铁铝氧化物对团聚体稳定性的贡献率不同。有研究认为铁铝氧化物和黏粒含量低的土壤更容易受到侵蚀^[17],土壤黏粒 $< 20\%$ 、

* 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(2012SC30)资助

[†] 通讯作者, E-mail: daisyh@mail.hzau.edu.cn

作者简介:董 雪(1988—),女,硕士研究生,主要从事土壤化学方面的研究。E-mail: dxue88@126.com

收稿日期: 2013-02-03; 收到修改稿日期: 2013-05-07

有机碳 <3% 和游离铁、铝 <2% 时会降低土壤水渗透率,增加土壤径流水,从而使土壤遭受侵蚀^[18],团聚体遭到破坏。

国外关于有机质影响团聚体稳定性的报道很多^[8,10,12,14,19],但多从有机质的角度来考虑。国内学者对团聚体中有机质的分布规律^[20]、不同施肥方式对团聚体的影响^[21-22]、腐殖酸特性^[7,23-24]等方面的研究较多。对于红壤地区,主要是对团聚体中养分分布特点及其对水稳性团聚体的影响^[25]、团聚体对土壤侵蚀机理影响^[4]等方面的研究,而对腐殖酸不同组分和团聚体的关系研究较少^[15],对腐殖质在团聚体形成中的胶结机理研究也不够深入。为此,本研究从土壤抗蚀性的重要影响因子——水稳性团聚体和腐殖酸出发,探讨不同的腐殖酸组分对侵蚀红壤结构的影响,以期为我国红壤地区的水土保持、土壤改良和生态环境的改善提供科学依据和理论参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自我国亚热带、华中地区红壤分布广泛的湖南省长沙市、湖北省咸宁市和赤壁市,采样区地处 N 28 ~ 30°、E113 ~ 114°,海拔 41 ~ 77 m;热量充足、雨量充沛,利用方式多为荒地、林地和农地^[25],主要矿物多为 1.4 nm 过渡矿物、水云母和高岭石。每个地区依据其植被、坡度以及土层厚度等用多点混合样(采样面积为 200 ~ 400 m²,按梅花形采集)的方法,采集轻度、中度和严重侵蚀的表层(0 ~ 20 cm)土壤,土壤侵蚀分级标准参见文献[2],共计 19 个土样(其中轻度侵蚀土壤地形坡度为 5° ~ 25°,植被覆盖率为 60% ~ 75%,共采集 7 个土样;中度的坡度为 15° ~ 35°,植被覆盖率为 45% ~ 60%,共采集 7 个土壤;严重的坡度为 >35°,植被覆盖率为 30% ~ 45%,共采集 5 个土样)。所采土样的成土母质均为第四纪沉积物(Q₂)。所取土样,一部分风干制样,用于基本性质的分析,另一部分用于团聚体的制备^[20]。

1.2 实验方法

1.2.1 水稳性团聚体(water-stable aggregates, WSA)的制备和腐殖酸组分的测定 不同粒径水稳性团聚体(>0.25 mm)的制备用沙维诺夫干、湿筛法^[26],水稳性团聚体含量参见文献[20];有机质用重铬酸钾外加热法测定^[27];游离态铁铝氧化物

(Free iron oxides, Fe_d; Free aluminum oxides, Al_d)含量采用 DCB 法提取,等离子发射光谱(ICP)测定^[24]。非晶形铁铝氧化物(Amorphous iron oxides, Fe_o; Amorphous aluminum oxides, Al_o)含量用草酸铵缓冲液提取,等离子发射光谱(ICP)测定^[24]。腐殖酸碳(Humus acid carbon, HC)、胡敏酸碳(Humic acid, HA)用焦磷酸钠-重铬酸钾法测定^[28],富里酸碳(Fulvic acid, FA)为腐殖酸碳量与胡敏酸碳量的差值;胡富比(HA/FA)为胡敏酸与富里酸碳量的比值^[24]。供试土样腐殖酸组分及水稳性团聚体含量见表 1。

1.2.2 土壤胡敏酸(HA)的添加实验 用前述测定腐殖酸组成的方法从有机质含量较高的土壤中提取胡敏酸,即依次从 QX1、QB5 和 QC3 中提取胡敏酸。分别称取经纯化、烘干后的各胡敏酸样品 0.015 g 和 0.15 g,溶于 250 ml 蒸馏水中,使其浓度分别为 0.06 g L⁻¹ 和 0.6 g L⁻¹。取咸宁、赤壁、长沙的轻度、中度和严重侵蚀红壤,分别为 QX2、QB5、ZX1、ZB7、YX2 和 YC3,共 6 个土样,分别过 4 mm 筛。每个土样各取 150 g 土两份,按地区对应加入上述两种浓度的胡敏酸溶液 250 ml,稳定 30 d 后风干,测定土壤团聚体的水稳性^[14]。

1.3 统计方法

数据处理用 Excel 2007,数据分析用 SPSS 18,作图用 Origin 8.0。

2 结果与讨论

2.1 侵蚀红壤的基本性质与腐殖酸组分碳量

表 1 显示,侵蚀红壤质地较黏重,多为壤黏土和黏土,pH 为 4.41 ~ 5.01,为酸性土壤。轻度侵蚀的土壤有机质含量均在 20.00 g kg⁻¹ 以上,中度侵蚀的平均为 15.53 g kg⁻¹,严重侵蚀的含量均低于 10.00 g kg⁻¹。轻度侵蚀红壤多取自于园地和林地,中度侵蚀红壤主要为荒地和农田,而严重侵蚀红壤多为荒地和裸地。轻度、中度、严重侵蚀红壤的非晶形氧化铁平均值分别为 0.94、0.87、0.62 g kg⁻¹。非晶形铝的变化范围的 0.70 ~ 1.87 g kg⁻¹,其中轻度侵蚀红壤的平均值分别较中度和严重的高 0.21 和 0.53 g kg⁻¹。严重侵蚀红壤游离氧化铁的平均值为 31.32 g kg⁻¹,较轻度和中度侵蚀的高。轻度、中度和严重侵蚀红壤中,游离氧化铝随侵蚀程度的变化不大,均在 3.30 g kg⁻¹ 左右。

表 1 供试土样的基本理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of the tested soils

侵蚀程度 Erosion degree	样号 No.	取样地点 site	质地 Texture	植被及利用 Vegetation cover and land use	pH	有机质 OM (g kg ⁻¹)	Fe ₂ O ₃		Al ₂ O ₃	
							Fe _d (g kg ⁻¹)	Fe _o (g kg ⁻¹)	Al _d (g kg ⁻¹)	Al _o (g kg ⁻¹)
轻度 Slight erosion	QX1	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	次生林 ^⑩	5.01	22.92	17.51	1.19	2.54	1.36
侵蚀	QX2	咸宁 ^①	黏土 ^⑤	杂草,荒地 ^⑪	4.41	22.26	24.76	0.94	3.06	1.84
Slight	QC3	长沙 ^②	壤黏土 ^④	灌木丛 ^⑫	4.65	41.16	26.31	1.02	3.29	1.45
erosion	QC4	长沙 ^②	黏壤 ^⑥	茅草,荒地 ^⑪	4.41	32.58	27.84	0.90	3.83	1.60
	QB5	赤壁 ^③	重黏土 ^⑦	果园 ^⑬	4.80	27.73	31.06	0.80	5.94	1.87
	QB6	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	茶园,园地 ^⑭	4.89	22.89	22.34	1.05	3.57	1.37
	QB7	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	杂草,荒地 ^⑪	4.78	20.57	23.78	0.70	2.88	0.88
中度 Medium erosion	ZX1	咸宁 ^①	黏壤 ^⑥	竹林,林地 ^⑮	4.58	12.93	19.97	0.85	2.67	1.13
侵蚀	ZX2	咸宁 ^①	粉壤 ^⑧	茅草,荒地 ^⑪	4.94	17.51	24.87	0.66	2.60	1.16
Medium	ZX3	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	竹林,林地 ^⑮	5.00	16.80	23.72	0.90	2.90	1.29
erosion	ZX4	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	黄豆,农田 ^⑯	4.79	17.98	28.72	1.18	2.84	0.93
	ZC5	长沙 ^②	黏土 ^⑤	杂草,荒地 ^⑪	4.49	16.28	24.51	0.62	3.98	1.71
	ZB6	赤壁 ^③	砂黏壤 ^⑨	杂草,荒地 ^⑪	4.65	11.91	20.85	1.04	4.03	1.57
	ZB7	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	杂草,荒地 ^⑪	4.92	15.31	18.92	0.85	2.99	1.10
严重 Severe erosion	YX1	咸宁 ^①	粉壤 ^⑧	裸地 ^⑰	4.57	6.38	28.04	0.66	2.66	1.09
侵蚀	YX2	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	灌木丛 ^⑫	4.48	5.20	29.34	0.46	2.94	0.94
Severe	YC3	长沙 ^②	重黏土 ^⑦	裸地 ^⑰	4.41	5.97	29.79	0.39	3.05	0.70
erosion	YB4	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	杂草,荒地 ^⑪	4.94	8.99	30.57	0.89	4.84	1.17
	YB5	赤壁 ^③	黏土 ^⑤	杂草,荒地 ^⑪	4.49	5.33	38.87	0.68	2.79	0.86

①Xianning; ②Changsha; ③Chibi; ④Loamy Clay; ⑤Clay; ⑥Clayey Loam; ⑦Heavy Clay; ⑧Silty Loam; ⑨Sandy Clay Loam; ⑩Secondary Forest; ⑪Weeds, waste land; ⑫Bush; ⑬Orchard; ⑭Tea garden; ⑮Bamboo, woodland; ⑯Soybean, farmland; ⑰Barren

由表 2 可以看出,轻度侵蚀红壤中,腐殖酸碳量变化范围为 2.10 ~ 4.60 g kg⁻¹;中度和严重侵蚀红壤的分别为 1.40 ~ 2.42、0.56 ~ 0.88 g kg⁻¹。轻度侵蚀红壤中,胡敏酸和富里酸碳量分别为 0.84 ~ 1.96 和 1.26 ~ 2.63 g kg⁻¹;中度侵蚀的胡敏酸和富里酸碳量变化范围分别为 0.68 ~ 1.14 和 0.66 ~ 1.68 g kg⁻¹;严重侵蚀红壤,胡敏酸和富里酸碳量的平均值分别为 0.17 和 0.57 g kg⁻¹。轻度、中度、严重侵蚀红壤,HA/FA 的平均值分别为 0.74、0.85 和 0.31。3 种侵蚀红壤中,除 ZX1 和 ZX3 (HA/FA 分别为 1.11 和 1.32) 两个样点外,供试土壤的 HA/FA 均小于 1,即富里酸含量大于胡敏酸,这可能因为亚热带区充足的水热条件不利于胡敏酸的形成^[23]。轻度侵蚀红壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体的含量变化范围为 63.56% ~ 75.58%,中度侵蚀红壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体的为 49.37% ~ 72.34%,严重的为 35.87% ~ 47.35%。

由此可见,随着红壤侵蚀程度的增强,土壤的有机质、非晶形铁铝氧化物、腐殖酸、胡敏酸、富里酸及 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量均逐渐减小,并且轻度和中度侵蚀红壤的 HA/FA 均大于严重侵蚀的。可能由于轻度侵蚀红壤多取自于园地和林地,中度侵蚀红壤主要为荒地和农田,而严重侵蚀红壤多为荒地和裸地,其植被和利用方式不同造成红壤有机质、腐殖酸组分、不同铁铝氧化物含量不同,进而影响水稳性团聚体的形成。有研究表明,有机质和腐殖酸与水稳性团聚体的含量呈极显著正相关,能促进水稳性团聚体的形成^[20,29],并增加土壤的抗蚀性。也有研究认为非晶形铁(Fe_o)对团聚体稳定性的贡献较大^[30];而非晶形铝(Al_o)能够作为粉粒大小的土壤颗粒中基本的胶结物质,主导团聚体稳定性从而增加土壤的抵抗能力^[31]。

表 2 供试红壤的腐殖酸碳及水稳性团聚体的含量

Table 2 Contents of humus acid carbon (HC) and water-stable aggregates (WSA) in tested Ultisols

侵蚀程度	样号	腐殖酸碳	胡敏酸碳	富里酸碳	胡富比	水稳性团聚体
Erosion degree	No.	HC (g kg ⁻¹)	HA (g kg ⁻¹)	FA (g kg ⁻¹)	HA/FA	WSA (%) (> 0.25 mm)
轻度	QX1	3.32	1.32	2.01	0.66	71.2
侵蚀	QX2	2.10	0.84	1.26	0.67	67.1
Slight	QC3	4.60	1.96	2.63	0.75	75.0
erosion	QC4	3.55	1.61	1.94	0.83	63.5
	QB5	4.16	1.67	2.49	0.67	75.5
	QB6	3.39	1.44	1.95	0.74	70.9
	QB7	2.79	1.30	1.49	0.88	65.7
中度	ZX1	1.40	0.74	0.66	1.11	59.9
侵蚀	ZX2	1.87	0.90	0.97	0.92	54.9
Medium	ZX3	1.71	0.97	0.74	1.32	64
erosion	ZX4	2.32	1.14	1.19	0.96	63.0
	ZC5	2.16	0.95	1.21	0.49	58.9
	ZB6	2.42	0.74	1.68	0.44	49.3
	ZB7	1.67	0.68	0.98	0.70	72.3
严重	YX1	0.67	0.19	0.49	0.40	47.0
侵蚀	YX2	0.88	0.22	0.66	0.34	47.3
Severe	YC3	0.56	0.12	0.45	0.27	39.5
erosion	YB4	0.69	0.13	0.56	0.24	39.3
	YB5	0.88	0.21	0.68	0.30	35.8

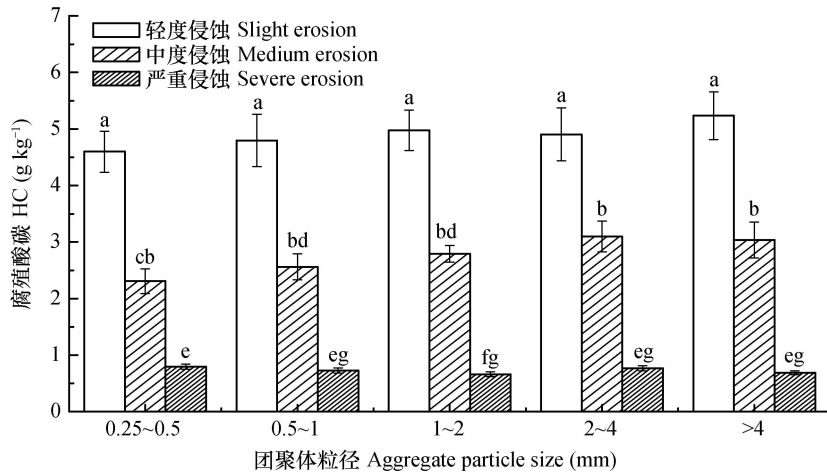
2.2 侵蚀红壤团聚体的腐殖酸组分

2.2.1 腐殖酸碳量 轻度、中度、严重侵蚀红壤中,土壤的腐殖酸碳量平均值分别为 3.41、1.94 和 0.74 g kg⁻¹(表 2),而轻度侵蚀团聚体中腐殖酸碳量为 3.41 ~ 6.75 g kg⁻¹;中度和严重侵蚀红壤团聚体中腐殖酸碳量分别为 1.70 ~ 4.58 g kg⁻¹ 和 0.55 ~ 0.95 g kg⁻¹(图 1)。可见,随着侵蚀程度的增加,土壤和各粒径团聚体的腐殖酸碳量降低。并且轻度和中度侵蚀红壤的腐殖酸碳量基本低于各粒径团聚体的,而严重侵蚀红壤的腐殖酸碳量基本高于团聚体的。这可能是因为,轻度和中度侵蚀红壤的有机质含量较高(表 2),其中团聚体的形成主要靠有机质的胶结作用,因此团聚体中的腐殖酸含量较土壤的高;而严重侵蚀红壤中,有机质含量较低,团聚体中的有机质达到一定程度之后才会进一步胶结形成大团聚体^[21]。

由图 1 可以看出,不同侵蚀程度下,不同粒径团聚体腐殖酸碳量之间有显著性差异,这表明,土壤

侵蚀对团聚体中的腐殖酸含量影响较大,即随着侵蚀程度的增强,各粒径水稳性团聚体中腐殖酸含量降低。轻度侵蚀程度各粒径团聚体中腐殖酸碳量之间无显著差异;中度侵蚀红壤中,>4 和 2 ~ 4 mm 的团聚体腐殖酸碳量平均值分别为 3.03 和 3.10 g kg⁻¹,0.25 ~ 0.5 mm 团聚体的平均值为 2.31 g kg⁻¹,且 >4 和 2 ~ 4 mm 的团聚体与 0.25 ~ 0.5 mm 之间差异显著,其他粒径之间无显著差异;严重侵蚀红壤的 1 ~ 2 和 0.25 ~ 0.5 mm 团聚体腐殖酸碳量的变化范围分别为 0.55 ~ 0.79 和 0.68 ~ 0.95 g kg⁻¹,且 1 ~ 2 mm 团聚体与 0.25 ~ 0.5 mm 的团聚体有显著差异。

2.2.2 胡敏酸碳量 表 2 显示,轻度侵蚀红壤的胡敏酸碳量最高,平均为 1.45 g kg⁻¹;不同粒径团聚体的胡敏酸含碳量为 0.75 ~ 2.39 g kg⁻¹。中度侵蚀红壤和团聚体的胡敏酸碳量分别为 0.87 和 0.53 ~ 1.38 g kg⁻¹。严重侵蚀红壤和团聚体的胡敏酸碳量较低,均在 0.27 g kg⁻¹以下。这说明,随着红



注: 小写字母不同, 代表不同侵蚀程度下不同粒径团聚体间差异显著, 显著水平为 $\alpha=0.05$ 。下同
 Note: Different lowercase letters represent significant difference between fractions of aggregates subjected to different degrees of soil erosion at the 0.05 level. The same below

图 1 不同粒径团聚体中腐殖酸碳量

Fig. 1 Contents of HC in different fractions of aggregates

壤侵蚀程度的增加, 土壤和团聚体的胡敏酸碳量均逐渐减小, 这与上面得出的腐殖酸的变化规律一致 (图 1)。轻度侵蚀程度下, 比较相邻粒径团聚体可以发现, 其胡敏酸碳量差别较小。这可能是由于, 胡敏酸是团聚体形成中起主要作用的胶结物质, 而团聚体是多级团聚的产物, 大团聚体在较小一级团聚体的基础上逐步胶结而成^[21], 因而相邻粒径团聚体胡敏酸碳量的差异较小。而中度侵蚀红壤的 2~4 mm 团聚体中胡敏酸碳量与 0.25~0.5 mm 和 0.5~1 mm 团聚体中的有显著差异。轻度和中度侵蚀红壤中, 大粒径 (>4 和 2~4 mm) 水稳性团聚体的胡敏酸 (HA) 碳量较小粒径 (1~2、0.5~1 和

0.25~0.5 mm) 的高; 严重侵蚀红壤的 0.25~0.5 mm 团聚体中胡敏酸碳量与 1~2 mm 和 >4 mm 团聚体中的也有显著差异, 并且小粒径团聚体 (0.25~0.5 mm) 中胡敏酸含量较土壤和其他粒径的高。这说明红壤遭到严重侵蚀后, 团聚体被破坏, 表层土和腐殖质等大量流失, 裸露出的新的土壤重新形成水稳性团聚体, 而新的水稳性团聚体的形成是由小粒径团聚体开始逐步胶结形成大团聚体, 并且只有小团聚体中的有机质达到一定程度之后, 小团聚体才会进一步复合形成大的团聚体^[21], 因此严重侵蚀红壤 0.25~0.5 mm 团聚体中胡敏酸含量较高。

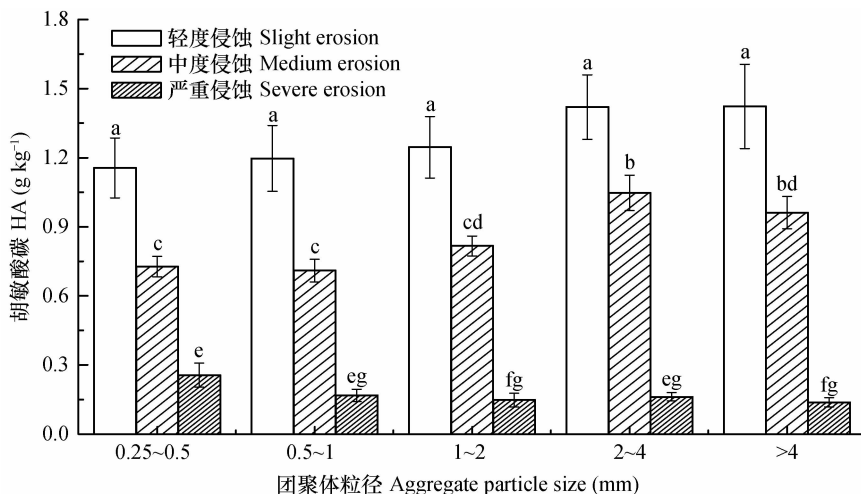


图 2 不同粒径团聚体中胡敏酸碳量

Fig. 2 Contents of HA carbon in different fractions of aggregates

2.2.3 富里酸碳量 由图3可以看出,3种侵蚀红壤中,同一粒径的团聚体富里酸碳量之间有显著性差异。轻度侵蚀红壤的富里酸碳量最高,平均为 1.97 g kg^{-1} (表2),不同粒径团聚体的富里酸碳量变化范围为 $2.50 \sim 5.16 \text{ g kg}^{-1}$;中度侵蚀红壤的富里酸碳量平均为 1.06 g kg^{-1} ,团聚体的为 $1.18 \sim 3.31 \text{ g kg}^{-1}$;严重侵蚀红壤,土壤和团聚体的富里酸碳量较低,在 $0.44 \sim 0.68 \text{ g kg}^{-1}$ 范围内变化。可见,轻度和中度侵蚀红壤水稳性团聚体的富里酸碳

量基本高于土壤的;随着红壤侵蚀程度的增强,土壤和团聚体的富里酸碳量均逐渐减小,这与腐殖酸和胡敏酸的变化规律一致。同种侵蚀程度下,除严重侵蚀红壤的 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 团聚体中富里酸碳量与 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 团聚体中的有显著差异,不同粒径之间的富里酸碳量差异均不显著。可能是因为大团聚体是在小团聚体的基础上逐渐胶结而成的,因而相邻团聚体的有机质含量差异较小,富里酸作为有机质的主要组分,也有相应的现象。

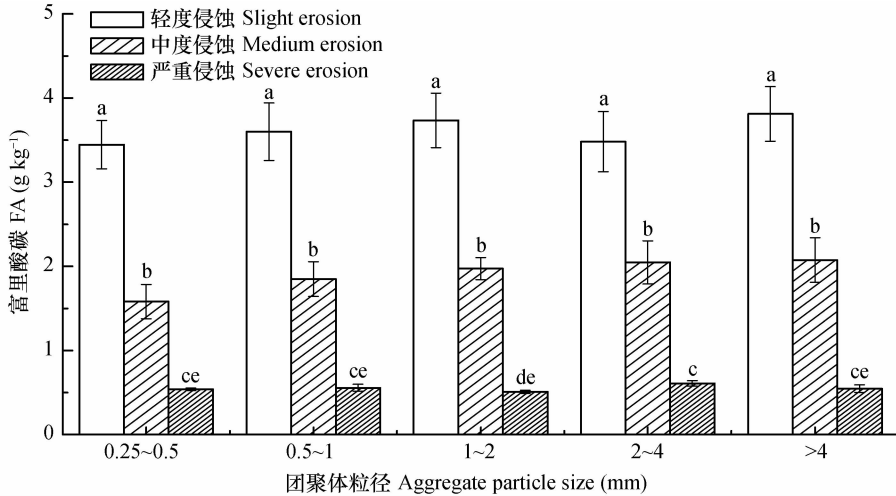


图3 不同粒径团聚体中富里酸碳量

Fig. 3 Contents of FA in different fractions of aggregates

2.2.4 胡富比(HA/FA) 供试红壤的HA/FA均小于1(表3),可见供试红壤的腐殖化程度较弱,这是由研究区的生物气候等条件所决定的^[5]。红壤区气候温暖,降雨量充沛,这不利于土壤的腐殖化过程,但有机质的矿化作用较强烈,因而形成的胡敏酸较少^[6]。

轻度、中度、严重侵蚀红壤的HA/FA平均值分别为0.74、0.85、0.31。3种侵蚀程度中,严重侵蚀红壤水稳性团聚体的HA/FA平均值为0.33;而轻度和中度侵蚀红壤团聚体的平均值分别为0.36和0.48。可见,轻度和中度侵蚀红壤和水稳性团聚体的HA/FA明显高于严重侵蚀水稳性团聚体的。其中 $>4 \text{ mm}$ 团聚体的HA/FA平均值分别为0.38、0.58和0.29, $1 \sim 2 \text{ mm}$ 团聚体的为0.36、0.43和0.32, $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 团聚体的则为0.34、0.50和0.34。可见,轻度和中度侵蚀红壤的HA/FA均高于这两种侵蚀程度水稳性团聚体的;严重侵蚀红壤的HA/FA与该侵蚀程度各粒径水稳性团聚体的差别不大。

2.3 腐殖酸对水稳性团聚体的影响

腐殖酸组分与 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量均呈极显著正相关(表4)。其中胡敏酸与 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量的相关性为0.858($n=19$),而富里酸的为0.733($n=19$),均达极显著水平,这说明胡敏酸和富里酸均是腐殖质的重要组成部分,对于土壤团聚体的形成有重要作用^[32]。但胡敏酸与 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体的相关性却是最大的,说明胡敏酸较富里酸与 $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体关系密切。这可能与胡敏酸和富里酸在土壤中的形成转化有关。多酚理论强调腐殖物质的形成是由简单到复杂即从富里酸到胡敏酸;木质素理论则相反^[33]。但实际上很可能两种情况共存,但因环境条件不同其优势互为消长,从而导致不同土壤、不同时间和不同条件下胡敏酸与富里酸的比值发生变化^[28]。有研究认为,胡敏酸是水稳性团聚体形成的胶结剂,胡敏酸的芳构化程度、分子大小及功能团的多少均会影响其对团聚体形成的贡献大小^[34]。尽管富里酸的氧化度较胡敏酸高,但在缺氧、多水和高二氧化碳的条件下,富里酸较稳定。而胡敏酸

则正好相反,在通气性差、多水和酸性的条件下,胡敏酸非常活跃^[35-36]。本研究区的红壤处于亚热带气候,雨量充沛,富含铁铝,水土流失严重,pH 呈酸性(表 1),所以,尽管土壤中的胡敏酸含量低(表 2),其性质却非常活跃,而胡敏酸的活化,能对土壤养分吸贮和释放起促进作用^[34],研究表明,土壤养分的增加,会促进水稳性团聚体的形成^[11]。也有研究认为,红壤的腐殖质以富里酸为主,胡富比小于

1,虽然胡敏酸含量很少,其芳构化程度也很低,但是腐殖质分子中芳香环的缩合度、芳构化度和分子量的降低,使腐殖质组成上“年轻化”,有利于土壤结构改善^[37],继而有利于水稳性团聚体的形成。HA/FA 与水稳性团聚体含量存在极显著正相关性,其相关系数为 0.630,这说明,腐殖酸的组成比例也会影响团聚体的水稳性。

表 3 水稳性团聚体的 HA/FA

Table 3 HA/FA of water-stable aggregates

侵蚀程度 Erosion degree	样号 No.	团聚体粒径 Aggregate particle size				
		>4 mm	2~4 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm
轻度侵蚀 Slight erosion	QX1	0.34	0.36	0.33	0.34	0.28
	QX2	0.46	0.48	0.49	0.36	0.34
	QC3	0.56	0.44	0.47	0.36	0.48
	QC4	0.22	0.52	0.33	0.26	0.24
	QB5	0.41	0.42	0.40	0.38	0.39
	QB6	0.39	0.43	0.25	0.39	0.41
	QB7	0.28	0.28	0.17	0.24	0.25
中度侵蚀 Medium erosion	ZX1	0.43	0.36	0.44	0.36	0.42
	ZX2	0.46	0.64	0.38	0.35	0.54
	ZX3	0.41	0.48	0.31	0.25	0.33
	ZX4	0.38	0.31	0.41	0.44	0.56
	ZC5	0.86	0.63	0.37	0.51	0.32
	ZB6	0.53	0.85	0.57	0.51	0.45
	ZB7	0.41	0.61	0.48	0.40	0.98
严重侵蚀 Severe erosion	YX1	0.15	0.18	0.18	0.19	0.35
	YX2	0.26	0.28	0.22	0.25	0.86
	YC3	0.36	0.33	0.47	0.53	0.42
	YB4	0.16	0.25	0.23	0.24	0.26
	YB5	0.41	0.30	0.33	0.36	0.33

表 4 土壤中腐殖酸组分与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量的相关性

Table 4 Relationships of >0.25 mm water-stable aggregates with components of humus acid in soil (n = 19)

组分 Components	回归方程 Regress equation	相关系数 Correlation coefficient
腐殖酸碳 HC	$Y = 8.40X + 40.80$	0.809 **
胡敏酸碳 HA	$Y = 19.27X + 41.60$	0.858 **
富里酸碳 FA	$Y = 13.55X + 41.83$	0.733 **
胡富比 HA/FA	$Y = 26.67X + 41.17$	0.630 **

注:1)Y 表示水稳性团聚体 (>0.25mm)百分含量,X 表示组分;2) ** 表示 0.01 的差异显著性水平 Note : 1) Y stands for percentage of water-stable aggregates (>0.25 mm), and X for components; 2) ** Significant at the 0.01 level

表 5 显示,0.5~1 mm 团聚体中腐殖酸、胡敏酸和富里酸均与该粒级团聚体含量呈极显著正相关,1~2 mm 团聚体中腐殖酸组分均与该粒级团聚体含量呈显著正相关,说明 0.5~1 mm 团聚体是团聚体中的优势粒级,其次为 1~2 mm 和 >4 mm 团聚体^[38]。>4 mm 团聚体中胡敏酸与该粒级团聚体含量呈极显著正相关,腐殖酸和富里酸与该粒级团聚体含量呈显著正相关,说明腐殖酸组分中,胡敏酸较富里酸与水稳性大团聚体含量的关系密切^[13],与图 2 所得结论相同。中度侵蚀红壤中,2~4 mm 团聚体中腐殖酸和富里酸均与该粒级团聚体含量呈显著正相关,而该粒级团聚体中胡敏酸与团聚体含量的相关性并不显著,说明随着侵蚀程度的增加,腐殖酸组分中,富里酸较胡敏酸更促进较大粒径团聚体的形成^[34]。腐殖酸、胡敏酸和富里酸均与 0.25~0.5 mm 团聚体含量相关性不显著,可能因为虽然腐殖酸作为有机质的重要组成部分,是团聚体

形成的重要胶结物质,但因为小粒径水稳性团聚体中有机质以化学保护为主(微生物来源的腐殖质较多,并与黏粒结合),分解慢,有利于长期保存;而大粒级团聚体中有机质以物理保护为主(植物来源的有机质较多),周转较快,且对管理措施反应敏感^[39]。采样点位于亚热带地区,降雨充沛,植被丰富,植物来源的腐殖酸活性较高,易参与较大水稳性团聚体的形成。也可能因为相对于较大粒径的水稳性团聚体而言,尺寸更小的水稳性团聚体的作用受土壤无机组分的影响更大。有研究表明,南方红壤地区的水稳性微团聚体(粒径大小为 0.25~0.5 mm)的主要胶结物质是铁、铝的氧化物,而大团聚体(粒径大小为 >0.5 mm)的主要胶结物质是有机质^[4]。因此,虽然对土壤胶结物质作了不少研究,但对哪一种胶结剂在哪一个粒径团聚中起主要作用以及怎样起作用尚不清楚,相关工作亟待展开。

表 5 团聚体中腐殖酸组分与水稳性团聚体的关系

Table 5 Relationships of water-stable aggregates with components of humus acid in aggregates

组分 Composition	侵蚀程度 Degree of erosion	团聚体粒径 Aggregate particle size				
		0.25~0.5 mm	0.5~1 mm	1~2 mm	2~4 mm	>4 mm
腐殖酸碳 HC	轻度 Slight ($n=7$)	-0.397	0.558	-0.497	0.421	0.514
	中度 Medium ($n=7$)	-0.089	0.399	0.575	0.828*	-0.506
	严重 Severe ($n=5$)	-0.095	0.440	-0.882*	0.513	0.459
	总体 Total ($n=19$)	0.275	0.631**	0.417*	0.360	0.493*
胡敏酸碳 HA	轻度 Slight ($n=7$)	-0.603	0.595	-0.110	0.341	0.471
	中度 Medium ($n=7$)	0.406	0.138	0.074	0.368	-0.434
	严重 Severe ($n=5$)	-0.270	-0.157	-0.763	0.067	-0.765
	总体 Total ($n=19$)	0.277	0.634**	0.395*	0.192	0.539**
富里酸碳 FA	轻度 Slight ($n=7$)	-0.229	0.510	-0.496	0.419	0.397
	中度 Medium ($n=7$)	-0.179	0.414	0.634	0.780*	-0.495
	严重 Severe ($n=5$)	0.633	0.568	-0.768	0.616	0.685
	总体 Total ($n=19$)	0.263	0.619**	0.408*	0.419*	0.452*

注: **表示 0.01 的差异显著性水平, *表示 0.05 的差异显著性水平 Note: ** Significant at the 0.01 level, * Significant at the 0.05 level

2.4 添加胡敏酸对土壤水稳性团聚体的影响

胡敏酸与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量的相关性是最大的($r=0.858^{**}$, $n=19$),说明胡敏酸与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量关系非常密切。但在供试红壤中,胡敏酸对哪一个粒径的团聚体作用显著,增加的团聚体含量是多少? 这些我们并不清楚。因此我们对 3 种侵蚀程度的土壤分别添加不同浓度的胡敏酸,来探究胡敏酸对不同粒径水稳性团

团聚体的团聚效果。

表 6 显示,轻度侵蚀红壤,添加低浓度(0.06 g L⁻¹)的胡敏酸溶液后,QX2 样品的 >4 mm 和 2~4 mm 粒径团聚体含量变化较小;1~2、0.5~1、0.25~0.5 mm 粒径团聚体含量分别增加 0.91、1.19 和 1.49 个百分点。QB5 样品也有相似的结果。用高浓度(0.6 g L⁻¹)的胡敏酸处理后,轻度侵蚀红壤 QB5 样品中,各粒径水稳性团聚体增加量为 [>4]

< [2 ~ 4] < [1 ~ 2] < [0.5 ~ 1] < [0.25 ~ 0.5] mm。中度侵蚀红壤的 ZX1 和 ZB7 两个样品, 添加低浓度的胡敏酸后, 除了 0.25 ~ 0.5 mm 粒径团聚体的增加量为 1.86% 和 2.09% 外, 其余粒径的增幅均小于 1 个百分点; 添加高浓度的胡敏酸后, 两个样品中大团聚体 (> 4 和 2 ~ 4 mm) 的增加量为 0.03% ~ 0.59%, 小团聚体 (1 ~ 2、0.5 ~ 1 和 0.25 ~ 0.5 mm) 的增加量为 1.00 ~ 2.40%, 小粒径水稳性团聚体的增加量均大于 1%。严重侵蚀红壤的 YX2 和 YC3 两个样品, 用低浓度的胡敏酸培养后, 各粒径水稳性团聚体增加量为 0.04% ~ 6.21%; 添加高浓度的胡敏酸后, 水稳性团聚体的增加范围为 0.13 ~ 7.72 个百分点。

可见, 添加不同浓度的胡敏酸后, 各粒径团聚体含量均增加; 添加高浓度胡敏酸后形成的水稳性团聚体要多于添加低浓度胡敏酸的; 严重侵蚀各粒径团聚体的增加量高于轻度和中度侵蚀的; 3 种侵蚀程度中不同粒级团聚体的含量增加量总体上为 [> 4] < [2 ~ 4] < [1 ~ 2] < [0.5 ~ 1] < [0.25 ~ 0.5] mm 的趋势。3 种侵蚀程度团聚体中添加胡敏

酸后, 有小粒径水稳性团聚体含量增幅大于大粒径的趋势, 可能因为 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体为土壤的优势粒级^[38], 且该粒级团聚体也更有利于胡敏酸的形^[40]。有研究认为, 胡敏酸含量与 0.25 ~ 2 mm 粒径的团聚体呈极显著正相关, 并且单位质量团聚体中胡敏酸的含量增加, 更能促进 0.25 ~ 2 mm 粒径团聚体的形成^[22]。而不同粒径团聚体中, 0.25 ~ 0.5 mm 粒径团聚体在添加胡敏酸后增加量最大, 并且严重侵蚀红壤中该粒级团聚体的增加量较其他两种侵蚀红壤的大, 说明添加胡敏酸后小粒径水稳性团聚体是最先形成的, 这也进一步表明有机质对水稳性团聚体中的小团聚体影响较大^[19]。也可能因为尽管所添加的胡敏酸是从同一地点提取的, 但所提取的胡敏酸经过了纯化, 并且和土壤的培养时间也较短, 仅为 30 d。虽然添加的胡敏酸对团聚体的形成起促进作用, 但此过程远没有自然条件下胡敏酸作用于团聚体的复杂, 实验条件和自然条件的不同, 以及团聚体形成过程中所存在的优势粒级等均可能影响试验结果, 具体原因还有待进一步探讨。

表 6 土壤中添加胡敏酸后水稳性团聚体的变化

Table 6 Change in water-stable aggregates after amendment of HA in soil

样号 No.	处理 ¹⁾ Treatment	水稳性团聚体百分含量 Percentage of water-stable aggregates (%)				
		> 4 mm	2 ~ 4 mm	1 ~ 2 mm	0.5 ~ 1 mm	0.25 ~ 0.5 mm
QX2	CK	3.94	13.92	16.62	20.33	12.42
	低浓度	3.95	13.92	17.53	21.52	13.91
	高浓度	3.99	14.12	18.62	21.23	13.86
QB5	CK	39.34	9.83	9.42	10.84	6.24
	低浓度	39.45	9.89	9.85	11.63	8.01
	高浓度	39.41	9.92	10.21	11.86	7.69
ZX1	CK	10.40	3.23	10.04	19.23	17.12
	低浓度	10.32	3.56	10.53	20.13	18.98
	高浓度	10.58	3.82	11.59	21.63	19.12
ZB7	CK	26.83	7.93	10.82	13.31	13.54
	低浓度	26.97	8.01	11.66	13.90	15.63
	高浓度	26.95	7.96	11.82	14.52	15.40
YX2	CK	4.42	8.60	12.30	19.04	3.02
	低浓度	4.46	8.70	12.56	22.46	5.34
	高浓度	4.55	8.79	12.80	24.70	6.25
YC3	CK	3.61	12.33	9.52	11.41	2.74
	低浓度	3.78	12.46	10.86	15.60	8.95
	高浓度	3.86	12.23	11.19	15.78	10.46

注: 1) 低浓度为 0.06 g L⁻¹; 高浓度为 0.6 g L⁻¹ Note: 1) Low concentration of HA at 0.06 g L⁻¹; High concentration of HA at 0.6 g L⁻¹

3 结 论

轻度、中度和严重侵蚀红壤中,土壤和水稳性团聚体中腐殖质酸组分碳量随着侵蚀程度的增加而减小;轻度侵蚀红壤中,不同粒径团聚体中腐殖酸、胡敏酸、富里酸差异不显著。3种侵蚀程度红壤和其水稳性团聚体的 HA/FA 基本小于 1,而严重侵蚀红壤与其各粒径水稳性团聚体的 HA/FA 均较轻度和中度侵蚀的低。红壤中腐殖质组分与 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量呈极显著正相关,其中与胡敏酸的相关系数最高;而 0.25 ~ 0.5 mm 团聚体中腐殖酸组分与该粒级团聚体含量相关性均不显著。团聚体中腐殖酸组分与不同粒径水稳性团聚体中,团聚体中腐殖酸组分促进优势粒级 0.5 ~ 1 mm 团聚体的形成,其次为 1 ~ 2 mm 和 > 4 mm 的团聚体。添加低浓度 0.06 g L^{-1} 和高浓度 0.6 g L^{-1} 的胡敏酸后,各粒径团聚体含量均增加;添加高浓度胡敏酸后形成的水稳性团聚体多于添加低浓度胡敏酸的;小粒径的水稳性团聚体(1 ~ 2、0.5 ~ 1 和 0.25 ~ 0.5 mm)的增加量要高于大粒径(> 4 和 2 ~ 4 mm);严重侵蚀红壤各粒径团聚体的增加量高于轻度和中度侵蚀的。

参 考 文 献

- [1] 赵其国,徐梦洁,吴志东. 东南红壤丘陵地区农业可持续发展研究. 土壤学报, 2000, 37(4): 433—442. Zhao Q G, Xu M J, Wu Z D. Agricultural sustainability of the red soil upland region in southeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(4): 433—442
- [2] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国行业标准土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007. 北京:中国水利水电出版社, 2008. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 (In Chinese). Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2008
- [3] 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. 土壤, 2009, 41(1): 84—89. Liu X L, He Y Q. Water-stable aggregates and nutrients in red soil under different reclamation years (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(1): 84—89
- [4] 卢金伟,李占斌. 土壤团聚体研究进展. 水土保持研究, 2002, 9(1): 81—85. Lu J W, Li Z B. Advance in soil aggregate study (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9(1): 81—85
- [5] 王晶,何忠俊,王立东,等. 高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究. 土壤学报, 2010, 47(4): 723—733. Wang J, He Z J, Wang L D, et al. Properties of humus and con-

tent of soil aggregates in soils on Gaoligong mountain (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 723—733

- [6] 葛宏力,黄炎和,蒋芳市,等. 闽西红壤侵蚀区生态退化及恢复研究进展. 亚热带水土保持, 2011, 23(3): 16—20, 28. Ge H L, Huang Y H, Jiang F S, et al. Red soil erosion area of Fujian Province ecological degradation and restoration research progress (In Chinese). *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2011, 23(3): 16—20, 28
- [7] 郑粉莉,张成娥. 加速侵蚀对土壤腐殖酸动态变化的影响. 生态学报, 1999, 19(2): 52—57. Zheng F L, Zhang C E. Impact of accelerated erosion on dynamics of soil humic acids (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 52—57
- [8] Barthes B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels. *Catena*, 2002, 47(2): 133—149
- [9] Shi Z H, Yan F L, Li L, et al. Interrill erosion from disturbed and undisturbed samples in relation to topsoil aggregate stability in red soils from subtropical China. *Catena*, 2010, 81(3): 240—248
- [10] 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. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7—31
- [11] 姜灿灿,何园球,刘晓利,等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响. 土壤学报, 2010, 47(4): 715—722. Jiang C L, He Y Q, Liu X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4): 715—722
- [12] Rusanov A, Anilova L. The humus formation and humus in forest-steppe and steppe chernozems of the southern cisural region. *Eurasian Soil Science*, 2009, 42(10): 1101—1108
- [13] 彭福泉,高坤林,车玉萍. 我国几种土壤中腐殖质性质的研究. 土壤学报, 1985, 22(1): 64—74. Peng F Q, Gao K L, Che Y P. Study on properties of some soil humus in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1985, 22(1): 64—74
- [14] Piccolo A, Mbagwu J. Humic substances and surfactants effects on the stability of two tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(3): 950—955
- [15] 刘鸣达,郝旭东,安辉,等. 不同稻蟹模式对土壤团聚体腐殖质特征的影响. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(3): 306—310. Liu M D, Hao X D, An H, et al. Effects of different rice-crab production modes on soil humus characteristics in different aggregates (In Chinese). *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(3): 306—310
- [16] 杨长明,欧阳竹,董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响. 生态学杂志, 2005, 24(8): 887—892. Yang C M, Ouyang Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8): 887—892
- [17] Scholten T. Hydrology and erodibility of the soils and saporlite cover of the swaziland middleveld. *Soil Technology*, 1997, 11(3): 247—262

- [18] Singer M J, Bissonnais Y L. Importance of surface sealing in the erosion of some soils from a mediterranean climate. *Geomorphology*, 1998, 24(1): 79—85
- [19] Majumder B, Kuzyakov Y. Effect of fertilization on decomposition of ^{14}C labelled plant residues and their incorporation into soil aggregates. *Soil & Tillage Research*, 2010, 109(2): 94—102
- [20] Huang L, Wang C Y, Tan W F, et al. Distribution of organic matter in aggregates of eroded ultisols, central china. *Soil & Tillage Research*, 2010, 108(1/2): 59—67
- [21] Yu H Y, Ding W X, Luo J F, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizers on aggregation and aggregate-associated carbon in a sandy loam soil. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 170—177
- [22] 李凯, 窦森, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响. *土壤学报*, 2010, 47(3): 579—583. Li K, Dou S, Han X Z, et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3): 579—583
- [23] 窦森, 张晋京, 李凯, 等. 土壤胡敏酸与富里酸热力学稳定性及其驱动因素初步研究. *土壤学报*, 2010, 47(1): 71—76. Dou S, Zhang J J, Li K, et al. Thermodynamic stability of humic acid and fulvic acid in soil and its driving factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 71—76
- [24] 李学垣, 刘凡, 赵玉萍. *土壤化学及实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 1997. Li X Y, Liu F, Zhao Y P. *Textbook of soil chemistry and guide to the experiment* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1997
- [25] 董雪, 王春燕, 黄丽, 等. 侵蚀程度对不同粒径团聚体中养分含量和红壤有机质稳定性的影响. *土壤学报*, 2013, 50(3): 104—111. Dong X, Wang C Y, Huang L, et al. Effect of erosion on nutrient content in aggregates of different particle-size fractions and stability of organic matter in Ultisols (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 104—111
- [26] Haynes R. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 30(4): 270—275
- [27] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [28] 李学垣. *土壤化学*. 高等教育出版社, 2001. Li X Y. *Soil chemistry* (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2001
- [29] 王晶, 何忠俊, 王立东, 等. “三江并流区”暗棕壤腐殖质特性及其与土壤结构的关系. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 53—58, 170. Wang J, He Z J, Wang L D, et al. Relationship on dark 2 brown soil humus distribution and soil structure in Three Parallel Rivers Area (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 53—58, 170
- [30] Duiker S W, Rhoton F E, Torrent J, et al. Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(2): 606—611
- [31] Colazo J C, Buschiazzo D E. Soil dry aggregate stability and wind erodible fraction in a semiarid environment of argentina. *Geoderma*, 2010, 159(1): 228—236
- [32] Mbagwu J, Piccolo A, Mbila M. Water-stability of aggregates of some tropical soils treated with humic substances. *Pedologie*, 1993, 24(4): 269—284
- [33] Stevenson F J. *Nitrogen in agricultural soils*. American Society of Agronomy, 1982
- [34] 刘湛, 成应向, 向仁军. 腐殖质类物质的形态结构及功能研究进展. *科技资讯*, 2006(22): 27. Liu Z, Cheng Y X, Xiang R J. A review on humic substances morphology and fuction (In Chinese). *Science & Technology Information*, 2006(22): 27
- [35] 窦森, 张继宏. 土壤有机质热力学稳定性研究方法//沈阳农业大学. 中国农业资源与环境可持续发展的探讨. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1998: 94—100. Dou S, Zhang J H. Study on the method of thermodynamies stability of soil organic matter (In Chinese)//Shenyang Agricultural University. Study on the sustainable development in chinese agricultural resources and environment. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1998: 94—100
- [36] Tardy Y, Schaul R, Duplay J. Domaines de stabilite thermodynamiques des humus, de la microflore et des plantes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science*, 1997, 324(12): 969—976
- [37] 王景燕, 龚伟, 胡庭兴. 川南坡地不同退耕模式对土壤腐殖质及团聚体碳和氮的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 155—160. Wang J Y, Gong W, Hu T X. Soil humus and aggregate carbon and nitrogen in slop farmland with different de-farming patterns in southern Sichuan Province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2): 155—160
- [38] 仇建飞, 窦森, 邵晨, 等. 添加玉米秸秆培养对土壤团聚体胡敏酸数量和结构特征的影响. *土壤学报*, 2011, 48(4): 781—787. Qiu J F, Dou S, Shao C, et al. Effects of corn stalk application on quantity and structural characteristics of humus acid in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 781—787
- [39] 窦森, 李凯, 关松. 土壤团聚体中有机质研究进展. *土壤学报*, 2011, 48(2): 412—418. Dou S, Li K, Guan S. A review on organic matter in soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 412—418
- [40] 关松, 窦森. 培养条件下土壤腐殖质在黑土团聚体中的分布//土壤资源持续利用与生态环境安全学术会议论文集. 广州, 2009: 105—113. Guan S, Dou S. The distribution of soil humus in black soil aggregates under incubation (In Chinese)//Soil resources sustainable utilization and ecological environment security academic conference proceedings. Guangzhou, 2009: 105—113

CHARACTERISTICS OF HUMUS FRACTION IN EROSION ULTISOLS AND THEIR EFFECTS ON WATER-STABLE AGGREGATES

Dong Xue Wang Chunyan Huang Li[†] Tan Wenfeng Hu Hongqing

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

Abstract Samples of Ultisols different in erosion degree (slight, medium and severe) were collected in Central China and treated with the drying-wetting sieving method for different fractions of water-stable aggregates, >0.25 mm in particle-size. Carbon contents in different components of fuming acid (humic and fulvic acids) in these aggregates were analyzed for characteristics of humic acid in composition, and effects of amendment of different concentrations (0.06 and 0.6 g L^{-1}) of humic acid in the fractions of aggregates from soils different in erosion degree explored. Results show that with erosion aggravating, the content of humic acids in Ultisols and water stable aggregates decreased. In Ultisols slight and medium in erosion, HA carbon content is higher in water-stable aggregates, >4 and $2 \sim 4$ mm in particle size than in water-stable aggregates, $1 \sim 2$, $0.5 \sim 1$ and $0.25 \sim 0.5$ mm in particle size. In Ultisols the same in erosion degree, fractions of aggregates did not differ much in FA carbon content, except for soils severe in erosion degree, where the fraction ($2 \sim 4$ mm) differed sharply from the fraction ($1 \sim 2$ mm) in FA carbon content. HA/FA ratios in all the Ultisols different in erosion degree were generally less than 1 and the Ultisols medium in erosion degree were higher than those slight or severe in erosion degree in HA/FA ratio in all fractions. Humic acid composition was significantly positively related to content of water-stable aggregates (>0.25 mm), and the correlation coefficients of HA carbon content were the highest ($r = 0.85^{**}$, $n = 19$). After amendment of humic acid at 0.06 or 0.6 g L^{-1} , the contents of all fractions of aggregates increased in all the soils different in erosion degree, and the extent of the increase was higher in $1 \sim 2$, $0.5 \sim 1$ and $0.25 \sim 0.5$ mm fractions of aggregates than in $2 \sim 4$ and >4 mm fractions of aggregates.

Key words Eroded Ultisols; Water-stable aggregates; Humus components; Humic acid; Fulvic acid

(责任编辑:卢 萍)