

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*

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 以三种侵蚀程度的红壤(轻度、中度、严重)为供试材料,研究其 >0.25 mm 水稳性团聚体中的养分(全氮、全磷、全钾、有机质)和不同形态有机碳(易氧化态和难氧化态)的含量状况和分布特点。结果表明:随着红壤由轻度、中度到严重侵蚀的变化, >0.25 mm 水稳性团聚体中有机质、全氮和全磷含量逐渐降低; >0.25 mm 水稳性团聚体中的养分对土壤养分的贡献率为 $[>4 \text{ mm}] > [0.5 \sim 1 \text{ mm}] > [1 \sim 2 \text{ mm}] > [2 \sim 4 \text{ mm}] > [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$; 侵蚀红壤的全氮、全磷和有机质均与 >0.25 mm 水稳性团聚体含量显著正相关。土壤有机碳、易氧化有机碳和难氧化碳的含量随着红壤侵蚀程度的增强逐渐降低,并且均与 >0.25 mm 水稳性团聚体、有机质、全氮、全磷呈极显著正相关。有机质氧化稳定性系数与不同粒径水稳性团聚体、土壤有机质、全氮和全磷均呈负相关。

关键词 侵蚀红壤; 养分; 水稳性团聚体; 易氧化碳; 难氧化碳; 有机质氧化稳定性

中图分类号 S158 **文献标识码** A

红壤广泛分布于我国热带和亚热带地区,这些地区气候条件优越,光热充足,生长季节长,土地的生产潜力很大。在我国,红壤地区是稻米、茶、丝、甘蔗等的主要产区,但红壤的侵蚀面积占了 22%。由于降雨量大,土壤淋溶作用强,加上长期受人类不合理利用的影响,部分地区土壤肥力衰退,土壤结构性状也遭到破坏^[1]。因此,对红壤结构和肥力的研究,对于防治红壤侵蚀和改善土壤肥力状况具有重要意义^[2]。

有研究认为,团聚体稳定性与土壤抗蚀性存在必然联系^[3]。而团聚体是土壤的重要组成部分,是衡量土壤物理性质好坏,表征土壤肥力的一个重要指标,并且团聚体的变化与土壤养分含量密切相关。研究表明,土壤中的氮素、磷素和钾素含量与水稳性大团聚体 (>0.25 mm) 呈极显著正相关^[4],这些元素能提高土壤中有机碳的含量和促进大团聚体的形成^[5]。研究发现,土壤中大量的有机碳和氮储存在 $0.25 \sim 2$ mm 的团聚体中^[6]。也有研究表明,水稳性团聚体主要由不稳定的有机质胶结而成^[7-8],而易氧化碳是土壤有机碳的敏感因子,可以指示土壤有机质的早期变化,是土壤有机碳中周转

最快的组分^[9],并与土壤有机碳、全氮、全磷存在显著关系^[10];难氧化碳的含量越高,有机质就越稳定,而土壤有机质的氧化稳定性是反映有机质质量的重要指标,对评价土壤肥力状况有着重要意义,研究表明,有机质氧化稳定性与土壤肥力负相关^[11]。

20 世纪七八十年代以来,国外学者对土壤团聚体的研究较多,但着重于对团聚体结构形成和破坏机制、及其储存养分能力的研究^[8-9,12-13],其中一种认为首先形成微团聚体,然后由胶结物质胶结形成大团聚体;另一种认为首先形成大团聚体,在大团聚体内部形成新的微团聚体。我国学者则对影响团聚体中养分分布的因素探讨较多^[5,14-15]。对于红壤地区,主要是研究植被、土地利用方式、开垦年限、肥力水平、施肥方式等条件下团聚体组成及养分分布特征^[15-16],着重在提高土壤中养分含量和促进团聚体的形成,而对于侵蚀红壤中养分状况、有机质氧化稳定性与水稳性团聚体之间关系的研究较少^[2]。为此,本文对不同侵蚀程度红壤水稳性团聚体中的养分(有机质、全氮、全磷、全钾)和不同形态有机碳进行研究,以阐明有机碳和养分在水稳性团聚体中的分布特点,探讨水稳性团聚体和有机碳

* 国家自然科学基金项目(40971143)和华中农业大学自主科技创新基金(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: dongxue881210@yahoo.cn

收稿日期:2012-07-26;收到修改稿日期:2012-11-02

的关系及其对红壤养分的影响,为侵蚀红壤的肥力提高和合理开发利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤为红壤,采自湖南省长沙市,湖北省咸宁市和赤壁市。地理位置为 N 28° ~ 30°, E 113° ~ 114°,海拔 41 ~ 77 m。每个地区依据其植被、坡度状况采取轻度侵蚀、中度侵蚀和严重侵蚀程度的表层土壤(20 cm 左右),共计 19 个土样(其中轻度和中度侵蚀土样各 7 个,严重侵蚀的 5 个)。轻度侵蚀

红壤多取自园地和林地,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。土壤母质均为第四纪沉积物(Q₂)。

1.2 试验方法

所取土壤样品,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。土壤有机质用丘林法;pH 用电位法(水土比 1:2.5,奥力龙 868 型 pH 计测定);土壤质地用吸管法(采用国际制质地分类系统);阳离子交换量用 NH₄OAC 浸提法;土壤全氮用半微量开氏法;全磷用混合酸消化法;全钾用 NaOH 熔融、火焰光度法(HG-3 型火焰光度计测定)^[17]。供试土样基本理化性质见表 1。

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 Sample code	取样地点 Sampling site	质地 Texture	有机质 OM (g kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	>0.25 mm 水稳性团聚体 >0.25 mm WSA(%)
轻度侵蚀 Slight erosion	QX1	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	22.92	0.88	0.04	9.79	71.2
	QX2	咸宁 ^①	黏土 ^⑤	22.26	0.82	0.04	9.41	67.1
	QC3	长沙 ^②	壤黏土 ^④	41.16	2.03	0.10	10.18	75.0
	QC4	长沙 ^②	黏壤 ^⑥	32.58	1.32	0.07	10.57	63.5
	QB5	赤壁 ^③	重黏土 ^⑦	27.73	0.84	0.02	11.62	75.5
	QB6	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	22.89	1.21	0.06	10.60	70.9
	QB7	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	20.57	1.09	0.06	8.81	65.7
中度侵蚀 Medium erosion	ZX1	咸宁 ^①	黏壤 ^⑥	12.93	0.38	0.02	9.99	59.9
	ZX2	咸宁 ^①	粉壤 ^⑧	17.51	0.75	0.04	8.68	54.9
	ZX3	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	16.80	0.85	0.05	9.42	64.0
	ZX4	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	17.98	0.83	0.04	9.69	63.0
	ZC5	长沙 ^②	黏土 ^⑤	16.28	0.44	0.02	8.32	58.9
	ZB6	赤壁 ^③	砂黏壤 ^⑨	11.91	0.54	0.03	10.99	49.3
	ZB7	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	15.31	0.80	0.04	9.82	72.3
严重侵蚀 Severe erosion	YX1	咸宁 ^①	粉壤 ^⑧	6.38	0.22	0.01	9.42	47.0
	YX2	咸宁 ^①	壤黏土 ^④	5.20	0.44	0.01	10.88	47.3
	YC3	长沙 ^②	重黏土 ^⑦	5.97	0.23	0.01	10.86	39.5
	YB4	赤壁 ^③	壤黏土 ^④	8.99	0.33	0.02	9.93	39.3
	YB5	赤壁 ^③	黏土 ^⑤	5.33	0.30	0.01	11.37	35.8

①Xianning; ②Changsha; ③Chibi; ④Loamy clay; ⑤Clay; ⑥Clay loam; ⑦Heavy clay; ⑧Silt loam; ⑨Sandy clay loam

土壤团聚体稳定性测定用沙维诺夫法^[18]分级(干、湿筛法),计算不同粒径团聚体和 >0.25 mm 水稳性团聚体(Water stable aggregate, WSA)百分含量^[2]。将各级土壤团聚体的比例和不同粒径团聚体的养分含量进行计算,即团聚体的贡献率(%) = 该级团聚体中养分含量 × 该级团聚体的比例 × 100 / 土壤中养分含量。可得各级团聚体对土壤养分的

贡献率(表 2)。

利用 K₂Cr₂O₇的氧化特性,调节其浓度和反应时的温度,使其具有不同的氧化能力,以测定腐殖质的氧化稳定性。按 HB、TI-DPHH 法,用 0.2 mol L⁻¹ K₂Cr₂O₇与浓 H₂SO₄按 1:1 的比例混合在 170℃ ~ 180℃下与样品煮沸 5 min,这样氧化的有机碳通常在 90%以上,一般以此可作为计算腐殖质总量的基

础; $0.1 \text{ mol L}^{-1} \text{ K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 与浓 H_2SO_4 按 1:1 的比例混合在 $130^\circ\text{C} \sim 140^\circ\text{C}$ 与样品共煮 5 min,作为计算易氧化腐殖质的基础。以氧化稳定性系数 K_{os} 作为衡量腐殖质氧化稳定性的指标, $K_{os} = (b - a)/a$,式中, a 为易氧化腐殖质含量(g kg^{-1}), b 为腐殖质总量(g kg^{-1}), $b - a$ 为难氧化腐殖质(g kg^{-1})^[19]。

2 结果

2.1 土壤养分与水稳性团聚体的关系

2.1.1 水稳性团聚体中养分的分布

土壤养分和性质差异的主要内在原因之一是团聚体颗粒组

成的不同^[4-5]。同时,有机碳、氮和磷可以不同的形态存在于土壤中,并且在土壤肥力演变中具有不同的稳定性和变化趋势^[15-16]。图 1a 显示,轻度侵蚀团聚体中的有机碳在 $12.21 \sim 15.74 \text{ g kg}^{-1}$ 范围内,中度侵蚀的变化区间为 $7.62 \sim 9.39 \text{ g kg}^{-1}$,严重侵蚀的最低,为 $1.69 \sim 2.29 \text{ g kg}^{-1}$ 。由此可见,随着侵蚀程度的逐渐增强,团聚体中有机碳含量逐渐减少。在轻度和中度侵蚀土壤中,团聚体粒径越大,有机碳含量越高;而在严重侵蚀土壤中,有机碳含量随着团聚体直径的增大而减小,依次为 $[>4 \text{ mm}] < [2 \sim 4 \text{ mm}] < [1 \sim 2 \text{ mm}] < [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$ 。

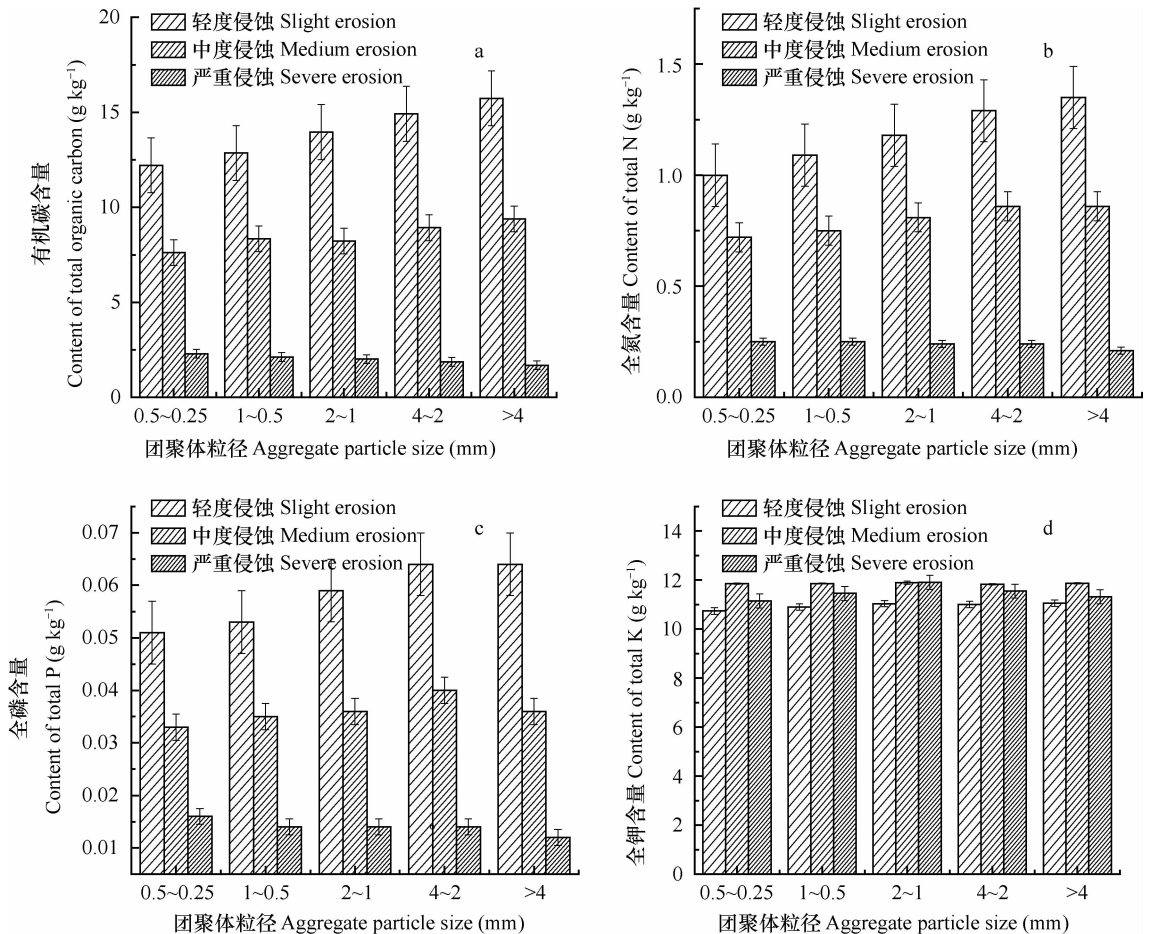


图 1 不同粒径团聚体中养分含量

Fig. 1 Contents of nutrients in different fractions of aggregates

轻度、中度、严重侵蚀土壤团聚体的全氮含量分别在 $1.0 \sim 1.35 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.72 \sim 0.86 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.21 \sim 0.25 \text{ g kg}^{-1}$ 范围内。说明侵蚀程度增强引起土壤氮素储量的减少。由图 1b 可以看出,在轻度和中度侵蚀的土壤中,全氮含量的变化依次为: $[>4 \text{ mm}] > [2 \sim 4 \text{ mm}] > [1 \sim 2 \text{ mm}] > [0.25 \sim$

$0.5 \text{ mm}]$ 。与已有研究大团聚体中有机碳、氮含量明显高于小团聚体的结果^[13]相似。

轻度、中度和严重侵蚀红壤团聚体的全磷含量分别为 $0.05 \sim 0.06 \text{ g kg}^{-1}$ 、 $0.03 \sim 0.04 \text{ g kg}^{-1}$ 和 $0.01 \sim 0.02 \text{ g kg}^{-1}$,可见,团聚体的全磷含量随着侵蚀程度的增强而降低。图 1c 显示,不同粒径团聚体

中全磷含量的变化与全氮和有机质的变化较一致。轻度和中度侵蚀红壤的全磷含量为: $[> 4 \text{ mm}] > [2 \sim 4 \text{ mm}] > [1 \sim 2 \text{ mm}] > [0.5 \sim 1 \text{ mm}] > [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$, 严重侵蚀红壤的全磷含量为 $[> 4 \text{ mm}] < [2 \sim 4 \text{ mm}] < [1 \sim 2 \text{ mm}] < [0.5 \sim 1 \text{ mm}] < [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$ 。

三种侵蚀红壤团聚体中全钾含量为 $10.74 \sim 11.87 \text{ g kg}^{-1}$, 变化很小(图 1d); 中度侵蚀红壤的全钾含量较高, 为 $11.83 \sim 11.90 \text{ g kg}^{-1}$; 而轻度侵蚀红壤的最低, 为 $10.74 \sim 11.05 \text{ g kg}^{-1}$, 说明土壤侵蚀对土壤钾素含量的影响较小。这可能是红壤的钾素主要受成土矿物类型和数量影响的缘故^[20]。

2.1.2 水稳性团聚体中养分含量对土壤养分的贡献 由表 2 可见, 轻度侵蚀红壤中, 水稳性团聚体对土壤有机质、全氮和全磷的贡献率为 $[> 4 \text{ mm}] >$

$[0.5 \sim 1 \text{ mm}] > [2 \sim 4 \text{ mm}] > [1 \sim 2 \text{ mm}] > [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$, 对土壤全钾的贡献率则与中度侵蚀红壤团聚体的贡献率一致, 均为 $[> 4 \text{ mm}] > [0.5 \sim 1 \text{ mm}] > [1 \sim 2 \text{ mm}] > [2 \sim 4 \text{ mm}] > [0.25 \sim 0.5 \text{ mm}]$ 。对轻度和中度侵蚀红壤来说, $> 4 \text{ mm}$ 团聚体的贡献率最高, 平均为 16.66% , 这与已有研究得出的土壤中大团聚体 ($> 5 \text{ mm}$) 贡献率最高的结论^[21] 相类似。 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 团聚体对土壤养分的贡献率最低, 变化范围为 $8.22\% \sim 12.65\%$; $2 \sim 4 \text{ mm}$ 团聚体的贡献率居中, 为 $7.63\% \sim 14.75\%$, 虽然 $2 \sim 4 \text{ mm}$ 团聚体的养分含量很高(图 1), 但是由于土壤中此级别的团聚体含量较低, 所以其贡献率较低^[22]。严重侵蚀红壤中, 水稳性团聚体对土壤养分的贡献率没有一定的规律性, 但 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 团聚体的贡献率普遍较低, 平均仅为 3.43% 。

表 2 不同粒径团聚体对土壤养分含量的贡献率

Table 2 Contributing rates of aggregates of various fractions to the totals of soil nutrients (%) ($n = 19$)

项目 Item	侵蚀程度 Erosion degree	$> 4 \text{ mm}$	$4 \sim 2 \text{ mm}$	$2 \sim 1 \text{ mm}$	$1 \sim 0.5 \text{ mm}$	$0.5 \sim 0.25 \text{ mm}$	$< 0.25 \text{ mm}$
有机质 OM	轻度侵蚀 ^①	14.38	12.03	11.97	14.28	8.22	39.12
	中度侵蚀 ^②	15.64	7.63	9.96	12.50	8.63	45.64
	严重侵蚀 ^③	17.80	5.29	5.70	7.51	2.35	61.35
全氮 Total N	轻度侵蚀 ^①	16.58	13.97	13.59	16.30	9.10	30.46
	中度侵蚀 ^②	19.61	10.03	13.43	15.27	11.10	30.56
	严重侵蚀 ^③	8.35	2.18	3.91	5.06	2.68	77.82
全磷 Total P	轻度侵蚀 ^①	16.87	14.75	14.46	16.91	9.92	27.09
	中度侵蚀 ^②	15.87	9.00	11.64	13.73	9.91	39.85
	严重侵蚀 ^③	3.74	12.08	12.40	15.78	4.67	51.33
全钾 Total K	轻度侵蚀 ^①	15.69	13.78	14.70	18.81	11.23	25.79
	中度侵蚀 ^②	18.62	9.11	13.57	16.75	12.65	29.30
	严重侵蚀 ^③	4.21	11.56	11.92	14.30	4.04	53.97

① Slight erosion ② Medium erosion ③ Severe erosion

2.1.3 土壤养分与水稳性大团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 的相关性 有研究表明土壤养分含量与团聚体组成密切相关^[4,6], 通过测定不同侵蚀程度红壤养分含量和 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体百分比(见表 1), 得出土壤养分和 $> 0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量的相关系数。其中, 水稳性大团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 与土壤有机质含量相关性最好, 呈极显著正相关 ($r = 0.810^{**}$, $n = 19$)。土壤全氮、全磷与水稳性团聚体也呈极显著正相关, 相关系数分别是 0.748^{**} ($n = 19$)、 0.667^{**} ($n = 19$)。由此可以看出, 土壤有机质、全氮、全磷含量的增加均能促进团聚体 ($> 0.25 \text{ mm}$) 的形成, 这与已有研究得出的土壤养分与团聚体正

相关的结论一致^[4]。全钾和水稳性团聚体负相关, 但其相关性不显著 ($r = -0.179$, $n = 19$), 说明两者相互作用不大, 这与图 1d 显示的土壤侵蚀对土壤钾素含量的影响较小结果一致。

2.2 土壤有机碳与团聚体和养分的关系

2.2.1 侵蚀红壤的有机碳、易氧化碳和难氧化碳

有研究表明, 土壤有机质与团聚体之间的关系最密切, 它是土壤团聚体的主要胶结剂^[22]。前面也得出, 土壤中的有机质含量与水稳性呈极显著正相关 ($r = 0.810^{**}$)。为了更清楚地了解有机质与团聚体的关系, 对不同形态的有机碳(易氧化态和难氧化态)进行了测定。

由表 3 可以看出,轻度、中度和严重侵蚀红壤的有机碳平均值分别为 15.75、9.01、3.69 g kg⁻¹,易氧化碳平均值分别为 11.45、5.94、1.49 g kg⁻¹,难氧化碳的变化范围分别为 3.43 ~ 5.61 g kg⁻¹、2.43 ~ 4.15 g kg⁻¹和 1.61g ~ 3.41g kg⁻¹。可见,随着侵蚀程度的增强,供试红壤的有机碳、易氧化碳和难氧化碳含量均逐渐降低。也有研究发现,土壤侵蚀使土壤总有机碳、易氧化碳和难氧化碳含量降低,土

壤养分供应能力下降^[24]。

氧化稳定性是土壤有机质的一个基本属性,与有机质的抗氧化能力有关。表 3 显示,供试土壤的氧化稳定性系数为 0.30 ~ 1.89。轻度侵蚀红壤氧化稳定性系数的变化范围为 0.30 ~ 0.45,平均值为 0.38;中度侵蚀的大于 0.45,平均为 0.52;严重侵蚀的为 1.15 ~ 1.89,平均值为 1.48。可见,供试红壤氧化稳定性系数为轻度侵蚀 < 中度侵蚀 < 严重侵蚀。

表 3 侵蚀红壤有机碳的氧化稳定性

Table 3 Oxidation stability of organic carbon in eroded red soils

样号 Sample code	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	易氧化碳 Ready-to-oxidize carbon (g kg ⁻¹)	难氧化碳 Hard-to-oxidize carbon (g kg ⁻¹)	氧化稳定性系数 K _{os}
QX1	13.29	9.86	3.43	0.35
QX2	12.91	9.35	3.56	0.38
QC3	23.87	18.35	5.52	0.30
QC4	18.90	13.29	5.61	0.42
QB5	16.08	11.48	4.60	0.40
QB6	13.28	9.57	3.71	0.39
QB7	11.93	8.25	3.68	0.45
ZX1	7.50	5.07	2.43	0.48
ZX2	10.16	6.86	3.29	0.48
ZX3	9.74	6.71	3.04	0.45
ZX4	10.43	7.12	3.31	0.46
ZC5	9.44	5.29	4.15	0.78
ZB6	6.91	4.43	2.47	0.56
ZB7	8.88	6.11	2.77	0.45
YX1	3.70	1.49	2.21	1.48
YX2	3.01	1.40	1.61	1.15
YC3	3.46	1.43	2.03	1.42
YB4	5.21	1.80	3.41	1.89
YB5	3.09	1.29	1.80	1.40

2.2.2 有机碳氧化稳定性与不同粒径团聚体和土壤养分的关系 表 4 显示,供试红壤的有机组分与不同粒径团聚体均呈正相关,其中 >4 mm 团聚体与有机组分呈显著正相关,2 ~ 1 mm 团聚体与易氧化碳呈显著正相关,相关系数为 0.463*。红壤易氧化碳和难氧化碳均与 >0.25 mm 水稳性团聚体呈极显著正相关,相关系数分别为 0.831** 和 0.656***。有研究也发现土壤有机组分与水稳性团聚体显著正相关^[25]。在供试土壤有机碳组分中,易氧化碳与 >0.25 mm 水稳性团聚体的关系较密切,这可能是

因为红壤的水稳性团聚体主要由不稳定的有机质胶结而成的^[7-8],而易氧化碳在土壤中的活性也较大,不稳定,容易分解^[26],所以,易氧化碳与 >0.25 mm 水稳性团聚体的相关性最大。氧化稳定性系数与不同粒径团聚体负相关,其中与 1 ~ 0.5 mm 和 0.5 ~ 0.25 mm 团聚体呈显著负相关,表 2 也得出,在不同侵蚀程度的红壤中,0.25 ~ 0.5 mm 团聚体的贡献率普遍较低。可能是因为大量有机碳分布在 0.25 ~ 2 mm 的团聚体中,且该粒径团聚体中有机质氧化稳定性较高,有机碳较稳定,不易分解,存留时

间长^[6]。

土壤有机组分与有机质、全氮、全磷均呈极显著正相关,而与土壤全钾的相关性不显著。土壤养分与易氧化碳、难氧化碳的相关性大小为有机质 > 全氮 > 全磷 > 全钾;土壤易氧化碳较难氧化碳与土壤养分的关系密切。这可能是因为可以指示土壤有机质早期变化的易氧化碳较难氧化碳敏感,而易氧化碳量表征着土壤能释放的有效肥力的多少;难氧化碳含量的高低,则更多地代表了土壤缓效性养

分贮备的多少,其稳定性决定了这些养分难以转化。因此易氧化碳较难氧化碳与土壤养分关系密切^[27]。有研究表明,土壤有机质的稳定性与土壤肥力呈负相关^[11]。表 4 显示,氧化稳定性系数与有机质、全氮、全磷呈极显著负相关。氧化稳定性系数与土壤全钾成正相关,相关性系数为 0.171。土壤易氧化碳和难氧化碳与全钾含量的相关性系数分别为 0.028 和 -0.138,可见,土壤全钾受土壤易氧化碳和难氧化碳的影响较小。

表 4 氧化稳定性与不同粒径团聚体和土壤养分的相关性

Table 4 Relationships of oxidation stability with aggregates of various fractions and soil nutrients ($n = 19$)

项目 Item	不同粒径团聚体 Particle size fraction of aggregates					>0.25mm 水稳性团聚体 >0.25mm WSA	有机质 OM	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm					
有机碳 Organic carbon	0.532 *	0.296	0.429	0.332	0.299	0.811 **	1.000	0.926 **	0.857 **	0.051
易氧化碳 Ready-to-oxidize carbon	0.517 *	0.293	0.463 *	0.370	0.324	0.831 **	0.996 **	0.937 **	0.865 **	0.028
难氧化碳 Hard-to-oxidize carbon carbon	0.538 *	0.278	0.249	0.148	0.166	0.656 **	0.922 **	0.790 **	0.743 **	-0.139
氧化稳定性系数 K_{os}	-0.445	-0.010	-0.447	-0.545 *	-0.636 *	-0.876 **	-0.730 **	-0.689 **	-0.655 **	0.172

注: * 表示 5% 的差异显著性水平, ** 表示 1% 的差异显著性水平 Note: * Significant at the 0.05 level, ** Significant at the 0.01 level

3 讨论

随着土壤侵蚀程度的增强,供试水稳性团聚体中的有机碳、全氮、全磷含量减少,而严重侵蚀红壤的养分含量却随着团聚体粒径的减小而增大,其原因可能是土壤侵蚀倾向于破坏水稳性大团聚体,大团聚体内部包裹的轻质、细颗粒物质易被地表水流迁移流失^[28],其原有的耕层/表层土壤被破坏,从而显现出原来的亚层土壤,即形成了新的表层土,新的表层土未进行或者只进行了较短时间的有机质积累和团聚体形成,从而造成有机碳的减少。而侵蚀红壤的有机碳和氮素、磷素在团聚体中的分布具有一致性^[4],因此它们的变化趋势也较一致。严重侵蚀红壤,养分含量随着团聚体粒径的减小而增大,与轻度和中度侵蚀土壤的规律相反。可能是因为土壤中的有机质很少以游离态形式存在,在新表层土重新进行有机质积累和团聚体形成的过程中,

有机质与新的表层土中细小的矿质颗粒牢固地结合在一起,形成有机-无机复合体,因此,团聚体颗粒粒径越小,比表面积越大,结合的有机物质就越多^[21]。也有研究认为,只有小团聚体中的有机碳达到一定程度之后,小团聚体才会进一步复合形成大的团聚体^[29]。因此,严重侵蚀红壤中小粒径团聚体有机碳含量要高于大粒径团聚体的有机碳含量。土壤中的氮、磷多以有机形式存在,主要来源于有机物质^[30],因此,氮、磷的变化与有机碳的变化一致。

随着红壤侵蚀程度的增强,供试土壤有机质的稳定性增强,难氧化碳在总有机碳中的比例逐渐增多。这说明,随着土壤侵蚀程度的增强,土壤有机质的活性减弱。可能是因为轻度侵蚀红壤中,土壤有机碳含量有大团聚体(>0.25 mm) > 微团聚体(<0.25 mm)^[31]的趋势,而大团聚体是由临时性的有机胶结物形成^[7-8],活性较强,因此有机质的稳定性较弱;而在严重侵蚀红壤中,土壤有机碳含量较

低,并且有机质含量有微团聚体($<0.25\text{ mm}$) $>$ 大团聚体($>0.25\text{ mm}$)^[31]的趋势,而微团聚体是由较为稳定的胶结物质胶结^[7-8]而成;也有研究认为,红壤中的铁铝氧化物在有机质的积累和稳定过程中有着重要作用,它们或参与腐殖质键合而形成有机矿质复合体,或通过包蔽在腐殖质胶体表面而降低腐殖质与氧化剂的接触面,结果都将增加土壤腐殖质的氧化稳定性^[25],这些均可能使严重侵蚀红壤的氧化稳定性系数增高。

4 结 论

随着侵蚀程度的增强,全氮、全磷、有机碳、易氧化碳和难氧化碳的含量均减少,但氧化稳定系数逐渐增大。在轻度和中度侵蚀红壤中,不同粒径团聚体中有机质、全氮、全磷含量均随着团聚体粒径的增大而增加; $>4\text{ mm}$ 团聚体对土壤养分的贡献率最高,但 $>4\text{ mm}$ 团聚体中有机质对土壤有机质的贡献率低于其他养分(全氮、全磷和全钾)。严重侵蚀红壤中的各种养分含量随团聚体粒径的增大而减小。不同侵蚀红壤中,不同粒径团聚体中全钾含量变化不明显。土壤养分(有机质、全氮和全磷)含量与 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体呈极显著正相关,有机质的相关性系数最大。有机碳组分中,易氧化碳和难氧化碳均与水稳性团聚体含量呈正相关,土壤易氧化碳与养分的关系较密切。不同粒径的水稳性团聚体、土壤有机质、全氮和全磷均与有机质氧化稳定性系数呈负相关。

参 考 文 献

[1] 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

[2] 王春燕,黄丽,谭文峰,等. 几种侵蚀红壤中有机质和团聚体的关系. 水土保持学报, 2007, 21(3): 52—56. Wang C Y, Huang L, Tan W F, et al. Relationship between organic matter and aggregates in several eroded ultisols (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3): 52—56

[3] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系. 土壤学报, 2011, 48(6): 1133—1140. Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Quantitative relationships of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1133—1140

[4] 杨建国,安韶山,郑粉莉. 宁南山区植被自然恢复中土壤团聚

体特征及其与土壤性质的关系. 水土保持学报, 2006, 20(1): 73—75. Yang J G, An S S, Zheng F L. Characteristics of soil water stable aggregates and relationship with soil properties during vegetation rehabilitation in Ningxia loess hilly region (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(1): 73—75

- [5] 耿瑞霖,郁红艳,丁维新,等. 有机无机肥长期施用对潮土团聚体及其有机碳含量的影响. 土壤, 2010, 42(6): 908—914. Geng R L, Yu H Y, Ding W X, et al. Effects of long-term application of organic manure and chemical fertilizers on organic carbon in aggregates of a sandy loam (In Chinese). Soils, 2010, 42(6): 908—914
- [6] Wright A L, Hons F M. Carbon and nitrogen sequestration and soil aggregation under sorghum cropping sequences. Biol Fert Soils, 2004, 43: 265—272
- [7] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. Plant Soil, 1984, 76: 319—337
- [8] Six J, Bossuyt H, Deryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Till Res, 2004, 79: 7—31
- [9] Zou X M, Ruan H H, Fu Y, et al. Estimating soil labile organic carbon and potential turnover rates using a sequential fumigation-incubation procedure. Soil Biol Biochem, 2005, 37: 1923—1928
- [10] 张俊华,丁维新,孟磊. 海南热带橡胶园土壤易氧化有机碳空间变异特征研究. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2563—2567. Zhang J H, Ding W X, Meng L. Spatial variability of soil labile organic carbon in the tropical rubber plantations of Hainan Province, China (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(11): 2563—2567
- [11] 李方敏,艾天成,饶联鹏. 四湖地区渍害稻田土壤有机质及其氧化稳定性. 长江流域资源与环境, 2003, 13(3): 293—296. Li F M, Ai T C, Rao L P. Organic matter and its oxidability in waterlogged soil in Four-lake region, Hubei Province (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2003, 13(3): 293—296
- [12] Sainju U M, Errill T H, Gelaye S, et al. Soil aggregation and carbon and nitrogen pools under rhizome peanut and perennial weeds. Soil Sci Soc Am J, 2003, 67: 146—155
- [13] Mayssoon M M, Charles W R. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen. Soil Sci Soc Am J, 2004, 68: 809—816
- [14] 袁俊吉,蒋先军,胡宇,等. 不同植被覆盖对养分在土壤水稳性团聚体中分布特征的影响. 水土保持学报, 2009, 23(6): 112—117. Yuan J J, Jiang X J, Hu Y, et al. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates under different vegetation (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 112—117
- [15] 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
- [16] 刘晓利,何园球,李成亮,等. 不同利用方式旱地红壤水稳

- 性团聚体及其碳、氮、磷分布特征. 土壤学报, 2009, 46(2): 255—262. Liu X L, He Y Q, Li C L, et al. Distribution of soil water-stable aggregates and soil organic C, N and P in upland red soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 255—262
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 129—154. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 129—154
- [18] Haynes R J. Interactions between soil organic matter status, cropping history, method of quantification and sample pretreatment and their effects on measured aggregate stability. Bio Fert Soils, 2000, 30: 270—275
- [19] 袁可能. 土壤有机矿质复合体研究 I. 土壤有机矿质复合体中腐殖质氧化稳定性初步研究. 土壤学报, 1963, 11(3): 286—287. Yuan K N. Studies on the organo-mineral complex in soil I. The oxidation stability of humus from different organo-mineral complexes in soil (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1963, 11(3): 286—287
- [20] 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. 水土保持研究, 2005, 12(3): 27—29. Zhao S W, Su J, Yang Y H, et al. Influence of the soil structure in loess hilly region of southern Ningxia under different man-made vegetation (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(3): 27—29
- [21] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶分布. 生态学报, 2006, 26(2): 364—372. Qiu L P, Zhang X C, Zhang J. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after long-term fertilization (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364—372
- [22] 孙天聪, 李世清, 邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1841—1848. Sun T C, Li S Q, Shao M A. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(9): 1841—1848
- [23] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—a literature analysis. Soil Biol Biochem, 2009, 41: 1—12
- [24] 田秀平, 姬景红, 韩晓日. 长期施肥对白浆土有机质含量及其氧化稳定性的影响. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 16(2): 12—14. Tian X P, Ji J H, Han X R. Effects of long-term application of fertilizers on the contents and oxidable stability of organic matter in albic soil (In Chinese). Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2004, 16(2): 12—14
- [25] 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
- [26] 刘广深, 许中坚, 徐冬梅. 酸沉降对土壤团聚体及土壤可蚀性的影响. 水土保持通报, 2001, 21(4): 70—74. Liu G S, Xu Z J, Xu D M. Effects of acid deposition on soil aggregate and soil erodibility (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(4): 70—74
- [27] 徐华君. 阿尔泰山山区土壤有机碳氧化稳定性的初步比较分析. 水土保持研究, 2007, 14(6): 27—29. Xu H J. Comparative analysis of the soil organic carbon oxidation stability in Altai Mountain, Xinjiang (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(6): 27—29
- [28] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 74—80. Chen J G, Tian D L, Yan W D, et al. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates (In Chinese). Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2011, 31(5): 74—80
- [29] 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 Till Res, 2012, 124: 170—177
- [30] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Phosphorus in the soil microbial biomass. Soil Biol Biochem, 1984, 16(2): 167—175
- [31] 王春燕. 侵蚀红壤水稳性团聚体中有机质与养分特点. 武汉: 华中农业大学资源与环境学院, 2007. Wang C Y. The characteristics of soil organic matter and nutrient of water-stable aggregates in eroded red soils (In Chinese). Wuhan: College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 2007

EFFECT OF EROSION ON NUTRIENT CONTENT IN AGGREGATES OF DIFFERENT PARTICLE-SIZE FRACTIONS AND STABILITY OF ORGANIC MATTER IN ULTISOLS

DongXue 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 Contents and distributions of nutrients (total N, total P, total K and OM) and organic carbon of different forms (ready-to-oxidize and hard-to-oxidize) in water-stable aggregates (>0.25 mm) in ultisols different in erosion degree (slight, medium and severe) were studied. Results show that with erosion aggravating, the contents of nutrients (OM, total N and total P) in water-stable aggregates (>0.25 mm) gradually decreased. In terms of contribution to

the total of soil nutrients, various fractions of water-stable aggregated a sequence of [>4 mm] > [0.5 ~ 1 mm] > [1 ~ 2 mm] > [2 ~ 4 mm] > [0.25 ~ 0.5 mm]. The contents of total N, total P and OM were significantly and positively related to the content of >0.25 mm water-stable aggregates. The contents of soil total organic carbon, readily-oxidation and hard-oxidation organic carbon took on a falling trend with the enhancing of erosion degree and had the marked positive correlation with >0.25 mm water-stable aggregates, OM, total N and total P, while oxidation stability coefficient of organic matter was negatively related to the contents of water-stable aggregates of various fractions, OM, total N and total P.

Key words Eroded ultisol; Nutrients; Water-stable aggregate; Ready-to-oxidize carbon; Hard-to-oxidize carbon; Organic oxidation stability

(责任编辑:卢 萍)