

几种侵蚀红壤有机无机复合状况及其 与土壤养分的关系*

王春燕 黄 丽[†] 谭文峰 蔡崇法 胡红青

(华中农业大学农业部亚热带农业资源与环境重点实验室,武汉 430070)

摘 要 用傅积平改进法测定了亚热带 3 种(轻度、中度和严重)侵蚀红壤的有机无机复合状况,并分析了其与土壤养分的关系。试验得出:随着红壤由轻度、中度到严重侵蚀的变化,土壤养分(有机质、全氮和全磷)含量逐渐减小;供试红壤腐殖质的结合形态主要以紧结合态和松结合态为主,稳结合态腐殖质含量最少;随着红壤侵蚀程度的增强,结合态腐殖质含量和有机无机复合量均减少,土壤有机无机复合度变化不明显。土壤复合量与结合态腐殖质、团聚体水稳性呈极显著正相关,有机无机复合度与它们也正相关。红壤的养分因子中,全氮、全磷和有机质与土壤结合态腐殖质的相关性较好,而全钾和阳离子交换量与土壤结合态腐殖质的相关性不大。3 种结合态腐殖质中,紧结合态与红壤养分(全氮、全磷和有机质)的相关性最高。

关键词 侵蚀红壤;有机无机复合;结合态腐殖质;土壤养分;团聚体
中图分类号 S158 **文献标识码** A

土壤有机无机复合被认为是土壤发生与土壤肥力形成的重要过程之一^[1]。熊毅^[2]指出,有机无机复合的程度可以用来评价肥力。有研究认为复合体组成能够表征土壤肥力,不同复合体的养分含量不同,其对土壤肥力的贡献也不同^[3,4]。土壤有机无机复合体不仅是研究土壤肥力、揭示肥力本质的有效途径,也是稳定性团聚体形成的重要机制和物质基础^[5]。因此研究有机无机复合状况对土壤性质的影响十分必要。

国外相关的研究多考虑有机无机复合体与土壤肥力的关系,着重于不同大小有机无机复合体的肥力特点、土壤养分在有机无机复合体中的分布,但涉及土壤复合量、有机无机复合度以及腐殖质不同结合形态的研究不多^[6~8]。近年来,我国学者对黑土、棕壤、潮土、水稻土、褐土、栗钙土等的有机无机复合状况,腐殖质结合形态进行了大量研究,主要探讨其对土壤养分的影响^[9,10],而对红壤,尤其是侵蚀红壤的研究较少。为此,本文分析南方 3 种侵蚀红壤有机无机复合状况及相关的土壤肥力因子、水稳性团聚体的数量,探讨红壤有机无机复合

状况对水稳性团聚体的形成和供肥性能的影响,旨在从腐殖质结合状态的角度探讨有机无机复合对红壤肥力作用的机理,以及土壤侵蚀引起红壤肥力降低的原因,为侵蚀红壤的治理和保护提供理论依据。

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。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(见中华人民共和国行业标准-土壤侵蚀分类分级标准,SL190-96)的表层(0~20 cm)土壤,共计 19 个土样。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水稳性的测定。采样区基本情况如表 1。

*国家“十一五”科技支撑计划项目(No. 2006BAD05B09)和湖北省自然科学基金项目(No. 2005ABA139)资助

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

作者简介:王春燕(1979~),女,硕士研究生,主要从事土壤环境化学方面的研究

收稿日期:2006-11-04;收到修改稿日期:2007-04-24

表 1 采样区基本情况

Table 1 Basic situation of sampling sites

侵蚀程度 Erosion degree	样号 No.	取样地点 Sampling site	地理位置 Situation	剖面方向 Section direction	植被及利用 Vegetation and land use	海拔 Altitude (m)
轻度侵蚀 Slight erosion	QX1	咸宁	N30 0.39 E114 20.11	西 West	次生林	50
	QX2	咸宁	N30 1.24 E114 21.33	东南 Southeast	杂草,荒地	45
	QC3	长沙	N28 12.27 E113 3.63	东 East	灌木丛	68
	QC4	长沙	N28 12.31 E113 3.63	北 North	茅草,荒地	71
	QB5	赤壁	N29 41.11 E113 49.22	西 West	果园	63
	QB6	赤壁	N29 35.12 E113 44.22	西 West	茶园,园地	77
	QB7	赤壁	N29 47.73 E113 54.02	西 West	杂草,荒地	77
中度侵蚀 Medium erosion	ZX1	咸宁	N29 58.01 E114 21.53	北 North	竹林,林地	55
	ZX2	咸宁	N29 57.73 E114 21.58	北 North	茅草,荒地	54
	ZX3	咸宁	N29 58.99 E114 21.76	西南 Southwest	竹林,林地	50
	ZX4	咸宁	N29 3.71 E114 17.41	北 North	黄豆,农田	46
	ZC5	长沙	N28 12.67 E113 3.95	南 South	杂草,荒地	75
	ZB6	赤壁	N29 40.88 E113 46.94	西 West	杂草,荒地	57
	ZB7	赤壁	N29 45.96 E113 55.95	西 West	杂草,荒地	77
严重侵蚀 Severe erosion	YX1	咸宁	N29 58.02 E114 21.52	北 North	裸地	57
	YX2	咸宁	N29 57.72 E114 21.58	北 North	灌木丛	41
	YC3	长沙	N28 12.67 E113 3.94	东 East	裸地	73
	YB4	赤壁	N29 37.12 E113 46.33	西 West	杂草,荒地	71
	YB5	赤壁	N29 37.12 E113 46.33	西 West	杂草,荒地	71

Xianning; Changsha; Chibi

1.2 试验方法

1.2.1 团聚体稳定性的测定^[11] 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,震动 30 min (30 次 min⁻¹) 后,将筛组分开。留在各级筛子上的土,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。

1.2.2 土壤基本理化性质的测定^[11] 有机质用重铬酸钾外加热法;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);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 (HG3 火焰光度计测定)。实验均设置 3 次重复。

1.2.3 腐殖质结合形态的测定^[12] 采用傅积平改进法:首先用相对密度为 1.8 的溴仿-乙醇混合

体提取土壤重组,然后用 0.1 mol L⁻¹ NaOH (pH12.4) 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⁻¹ NaOH-0.1 mol L⁻¹ Na₄P₂O₇ 混合液 (pH13) 提取稳结合态腐殖质;残渣中为紧结合态腐殖质。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。

有机无机复合度 (%) = $HC \times HW \times 100 / (SW \times SC)$

土壤复合量 (g kg⁻¹) = $HC \times HW / SW$
式中,HC 为重组有机碳含量 (g kg⁻¹),HW 为重组样品质量 (g),SW 为土壤样品质量 (g),SC 为土壤有机碳含量 (g kg⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力状况

不同侵蚀红壤的基本肥力状况见表 2。可以看出,土壤为酸性,pH 值在 4.41 ~ 5.01 范围内变化。

轻度侵蚀的土壤有机质含量均在 20 g kg^{-1} 以上,中度侵蚀的平均为 15.5 g kg^{-1} ,严重侵蚀的含量均低于 10 g kg^{-1} 。这说明侵蚀越严重,土壤有机质含量越低。轻度侵蚀红壤中,全氮含量最高的是长沙的 QC3 (为 2.03 g kg^{-1}),最低的是咸宁的 QX2 (为 0.820 g kg^{-1}),平均值为 1.17 g kg^{-1} ;中度侵蚀的平均为 0.656 g kg^{-1} ;严重侵蚀的最低,只有 0.304 g kg^{-1} 。这说明,供试红壤的侵蚀程度越严重,全氮含量越低。3 种侵蚀红壤,土壤全磷含量的平均值分别为 0.056 、 0.034 和 0.012 g kg^{-1} ,也基本符合有

机质和全氮的变化规律;土壤全钾和阳离子交换量随土壤侵蚀程度变化的趋势不明显,这可能因为其主要受土壤矿物类型和数量的影响,没有明显的规律性^[13]。

轻度侵蚀土壤中, $>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体含量为 $63.5\% \sim 75.5\%$,变幅较小,平均为 69.8% ;中度侵蚀的变化范围在 $54.9\% \sim 72.3\%$,平均为 60.3% ;而严重侵蚀土壤的团聚体含量最少,仅为 $35.8\% \sim 47.3\%$,平均为 41.8% 。可见,侵蚀程度越高,水稳性团聚体含量越低。

表 2 供试土样部分理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of soils tested

侵蚀程度 Erosion degree	样号 No.	质地 Texture	pH	有机质 OM	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	阳离子交换量 CEC	$>0.25 \text{ mm}$ 水稳性团聚体 $>0.25 \text{ mm WSA} (\%)$
				(g kg ⁻¹)				(cmol kg ⁻¹)	
轻度侵蚀 Slight erosion	QX1	壤黏土	5.01	22.9	0.88	0.04	9.79	15.6	71.2
	QX2	黏土	4.41	22.3	0.82	0.04	9.41	16.4	67.1
	QC3	壤黏土	4.65	41.2	2.03	0.10	10.2	35.4	75.0
	QC4	黏壤土	4.41	32.6	1.32	0.07	10.6	28.0	63.5
	QB5	重黏土	4.80	27.7	0.84	0.02	11.6	16.7	75.5
	QB6	壤黏土	4.89	22.9	1.21	0.06	10.6	14.6	70.9
	QB7	壤黏土	4.78	20.6	1.09	0.06	8.81	23.2	65.7
中度侵蚀 Medium erosion	ZX1	黏壤土	4.58	12.9	0.38	0.02	9.99	13.3	59.9
	ZX2	粉壤土	4.94	17.5	0.75	0.04	8.68	14.7	54.9
	ZX3	壤黏土	5.00	16.8	0.85	0.05	9.42	15.1	64.0
	ZX4	壤黏土	4.79	18.0	0.83	0.04	9.69	22.4	63.0
	ZC5	黏土	4.49	16.3	0.44	0.02	8.32	15.6	58.9
	ZB6	砂黏壤	4.65	11.9	0.54	0.03	11.0	19.5	49.3
	ZB7	壤黏土	4.92	15.3	0.80	0.04	9.82	16.1	72.3
严重侵蚀 Severe erosion	YX1	粉壤土	4.57	6.38	0.22	0.01	9.42	11.1	47.0
	YX2	壤黏土	4.48	5.20	0.44	0.01	10.9	18.0	47.3
	YC3	重黏土	4.41	5.97	0.23	0.01	10.9	16.0	39.5
	YB4	壤黏土	4.94	8.99	0.33	0.02	9.93	19.9	39.3
	YB5	黏土	4.49	5.33	0.30	0.01	11.4	20.5	35.8

Loam clay; Clay; Clay loam; Heavy loam; Silt loam; Sandy loam

表 2 显示,轻度侵蚀红壤中,长沙采样区的有机质含量平均为 36.9 g kg^{-1} ,全氮含量平均为 1.68 g kg^{-1} ,阳离子交换量平均为 $31.7 \text{ cmol kg}^{-1}$,较其他两个采样区的稍高。另外两种侵蚀土壤的采样点之间没有明显的不同。

植被和利用方式也会对土壤养分产生影响。由表 1 可知,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。表 2 显示,供试红壤的养分含量基本符合轻度侵蚀 $>$ 中度侵蚀 $>$ 严重侵蚀的规律。综合表 1、表 2 可以得出,植被覆盖和合理的利用方式可以保留养分,提高土壤的抗蚀性。

2.2 有机无机复合状况和结合态腐殖质

2.2.1 腐殖质的有机无机复合状况 不同侵蚀红壤的有机无机复合度不同。表 3 显示,轻度侵蚀红壤的有机无机复合度在 $73.18\% \sim 92.04\%$ 范围变

化,平均为 83.71%;中度侵蚀红壤为 72.42% ~ 93.76%,平均为 84.43%,两种侵蚀红壤的有机无机复合度差别不大。严重侵蚀红壤的有机无机复合度

平均为 62.60%,小于轻度和中度侵蚀的。可见,随侵蚀程度的增强,供试红壤有机无机复合度的变化规律不明显。

表 3 有机无机复合状况以及三种结合态腐殖质的含碳量

Table 3 Organo-mineral complexing status and the content of organic carbon in three different types of combined humus

侵蚀程度 Erosion degree	样号 No.	有机无机复合度 Organo-mineral complexing degree (%)	土壤复合量 Content of soil complexes	紧结合态腐殖质含 碳量 Carbon content in tightly-combined humus	松结合态腐殖质含 碳量 Carbon content in loosely-combined humus	稳结合态腐殖质含碳量 Carbon content in stably-combined humus
				(g kg ⁻¹)		
轻度侵蚀 Slight erosion	QX1	81.36	10.82	6.98	3.23	0.92
	QX2	82.03	10.59	6.46	3.99	0.66
	QC3	73.18	17.47	11.15	5.56	1.55
	QC4	83.54	15.79	9.66	5.98	0.70
	QB5	87.28	14.04	8.86	4.84	1.07
	QB6	92.04	9.60	6.81	4.69	0.73
	QB7	86.90	10.37	6.76	3.51	0.60
	平均值 Average		83.71	12.67	8.10	4.54
中度侵蚀 Medium erosion	ZX1	72.42	5.43	4.14	3.63	0.53
	ZX2	79.62	8.09	5.63	2.04	0.69
	ZX3	93.76	9.14	5.91	2.86	0.74
	ZX4	91.29	12.12	5.62	3.52	0.89
	ZC5	81.91	7.73	6.81	2.12	0.72
	ZB6	85.65	5.92	4.18	1.83	0.22
	ZB7	85.70	7.61	4.61	2.77	0.58
	平均值 Average		84.43	8.01	5.27	2.68
严重侵蚀 Severe erosion	YX1	71.09	1.52	1.24	0.17	0.17
	YX2	74.08	2.23	1.39	1.00	0.28
	YC3	71.19	2.46	1.67	0.80	0.06
	YB4	49.79	2.60	1.65	0.82	0.03
	YB5	76.60	2.37	1.49	0.71	0.22
	平均值 Average		62.60	2.24	1.49	0.70
样点总平均 Total average		77.11	7.64	4.74	2.64	0.56

轻度侵蚀红壤的土壤复合量在 9.60 ~ 17.5 g kg⁻¹ 范围内变化,平均为 12.7 g kg⁻¹;中度侵蚀的平均为 8.01 g kg⁻¹;严重侵蚀的仅 2.24 g kg⁻¹。这说明,土壤复合量随着侵蚀程度的增强而减小,侵蚀越严重,复合量越小。这与 Tiessen 等^[14]的研究结果

相似,他认为土壤复合量影响土壤结构,进而影响土壤侵蚀,侵蚀程度越大,土壤复合量越小。

由以上分析知,侵蚀红壤的有机无机复合量为轻度侵蚀 > 中度侵蚀 > 严重侵蚀。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。可见,种植植被可以提高土壤的复合量,这可能是因为植被通过改变土壤有机物的数量和质量而影响有机碳的储存量、组成和稳定性,使土壤有机质增多,进而增加了土壤中有有机无机复合的机会,最终使轻度侵蚀红壤的复合量最大。

2.2.2 三种结合态腐殖质的含碳量 表3显示,轻度侵蚀红壤中,紧结合态腐殖质含碳量为 $6.46 \sim 11.2 \text{ g kg}^{-1}$,平均为 8.10 g kg^{-1} ;松结合态腐殖质的含碳量为 $3.23 \sim 5.56 \text{ g kg}^{-1}$,平均为 4.54 g kg^{-1} ;稳结合态平均为 0.89 g kg^{-1} 。中度侵蚀红壤中,紧结合态、松结合态、稳结合态腐殖质含碳量平均分别为 5.27 、 2.68 和 0.62 g kg^{-1} 。严重侵蚀的最低,依次为 1.49 、 0.70 和 0.15 g kg^{-1} 。可见,随着土壤侵蚀的增强,3种结合态腐殖质的含碳量均逐渐减小。这说明,侵蚀在减少红壤有机质的同时,也会使红壤中与矿质复合的腐殖质量减少。这可能因为与矿质复合的腐殖质是有机质的重要组成部分,有机质总量减少,参与形成有机无机复合体的腐殖质即结合态腐殖质的含量也减少^[15]。

轻度侵蚀红壤中,紧结合态腐殖质的含碳量平均为 8.10 g kg^{-1} ,松结合态的平均为 4.54 g kg^{-1} ,稳结合态的则为 0.89 g kg^{-1} ,其在结合态腐殖质中的百分含量依次为 59.86% 、 35.55% 、 6.59% 。中度侵蚀红壤,3种结合态腐殖质的比例依次为 61.49% 、 31.27% 和 7.22% ;严重侵蚀的则分别为 63.68% 、 29.91% 和 6.41% 。由此可见,在3种侵蚀红壤中,紧结合态腐殖质含量均最高,约占土壤结合态腐殖质总量的 60% ;松结合态次之,平均约为 33% ;稳结合态最小,比例仅 7% 。这说明,供试红壤中,腐殖质的结合形态均以紧结合态和松结合态为主,稳结合态最低。这与何斌等^[16]对南方红壤结合态腐殖质组成结构的研究结果一致。

由表3可以看出,长沙的轻度侵蚀红壤中,结合态腐殖质的含碳量较咸宁和赤壁同侵蚀程度的高。这可能是因为长沙土壤的有机质含量较高(表1),从而与无机矿物形成复合体的有机物质即结合态腐殖质的含量也会相应增多。温善菊^[17]的研究也曾得出,有机质含量较高的土壤,其结合态腐殖质含量也较高。

植被和利用方式也会对土壤结合态腐殖质含量产生影响。由表1可知,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。表3显示,供试红壤的结合态腐殖质含量为轻度侵蚀 > 中度侵蚀 > 严重侵

蚀。可见,植被覆盖和合理的利用方式可以使红壤有较高的结合态腐殖质含量。

2.3 有机无机复合状况与团聚体的关系

2.3.1 土壤有机无机复合量与复合度 土壤有机无机复合量与有机质、结合态腐殖质呈极显著正相关(表4)。有机质是形成复合体的重要因子,因此其相关性最好($r = 0.9808^{**}$)。这与 Bronick 和 Lal^[18]得到的增加土壤有机质可以明显提高水稳性团聚体含量的结果较为一致。土壤复合量与松结合态、稳结合态以及紧结合态腐殖质的相关性系数分别为 0.9472 、 0.8626 和 0.9933 ,可见,供试红壤复合量主要由松结合态和稳结合态腐殖质构成,紧结合态腐殖质对土壤复合量的影响最大。

如表4所示,土壤复合量与水稳性团聚体存在极显著的相关性($r = 0.8540^{**}$),这说明土壤复合量是影响团聚体稳定性的重要因素。何斌等^[16]研究也曾表明,有机无机复合与土粒团聚的关系是通过有机无机复合量来体现的。土壤复合量与复合度显著相关($r = 0.5594^{*}$),可见侵蚀红壤的有机质较少以游离形式存在,大部分有机物质与无机胶体形成有机无机复合体。

土壤有机无机复合度反映了土壤中总有机碳、游离态有机碳和结合态腐殖质碳之间的关系。有机无机复合度与胶结物质的关系比较复杂,有机无机复合度与有机质呈现正相关性,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。

有机无机复合度与水稳性团聚体存在极显著的相关性($r = 0.5703^{**}$)。但相关系数没有土壤复合量大($r = 0.8540^{**}$)。这说明有机无机复合度在一定程度上可以反映土壤有机和无机部分复合的数量,表现水稳性团聚体形成的状况。

2.3.2 团聚体的水稳性 如表4所示,供试红壤水稳性团聚体与土壤有机质、松结合态腐殖质、紧结合态腐殖质以及土壤复合量均呈极显著的正相关。有研究发现,腐殖质的不同结合形态对土壤结构形成的影响不同^[19],供试红壤的3种结合形态中,紧结合态与水稳性团聚体的相关性最大($r = 0.8836^{**}$, $n = 19$)。这说明,由于与矿物质结合的方式和松紧程度不同,参与土壤有机无机复合的有机物质对土壤结构也具有不同的影响,这可能是由于紧结合态腐殖质是与土壤矿物(主要是黏土矿物)部分结合较紧且较稳定的腐殖质部分,由紧结合态

腐殖质胶结形成的团粒结构较牢固,不易被微生物所分解,抵抗外界破坏的能力较强,稳定性较好,因

此其与水稳性团聚体的关系最密切,这与 Maria 等^[20]的研究结果一致。

表 4 有机无机复合与土壤团聚体的相关系数

Table 4 Correlation coefficient between organo-mineral complexing and aggregates ($n=19$)

项目 Item	土壤复合量 Complexing content	有机无机复合度 Organo-mineral complexing degree	>0.25mm 水稳性团聚体 >0.25mm WSA
有机质 Organic matter	0.980 8 **	0.408 7	0.810 3 **
松结合态腐殖质 Loosly-combined humus	0.947 2 **	0.557 8	0.736 3 **
稳结合态腐殖质 Stably-combined humus	0.862 6 **	0.529 4	0.541 0
紧结合态腐殖质 Tightly-combined humus	0.993 3 **	0.538 5	0.883 6 **
土壤复合量 Complexing content	1.000 0	0.559 4 *	0.854 0 **
有机无机复合度 Organo-mineral complexing degree	0.559 4 *	1.000 0	0.570 3 **

注: *、** 分别表示 5%、1% 的差异显著性水平 Note: *, significant at the 0.05 level; **, significant at the 0.01 level

2.4 腐殖质结合形态与土壤全量养分的关系

腐殖质的 3 种结合状态中,紧结合态与土壤养分各因子的相关性最好,松结合态次之,稳结合态最小(表 5)。可见,紧结合态腐殖质在反映土壤肥力方面有重要的意义^[9]。这可能因为有机无机复合体

中腐殖质与矿物质结合的牢固程度影响土壤团聚体的稳定性和腐殖质的周转速度,从而影响土壤肥力^[21,22]。另一方面,由于供试红壤中,紧结合态腐殖质的含碳量较高,其与土壤黏粒结合形成复合体的机会增多,从而对土壤肥力产生影响。

表 5 腐殖质结合形态与土壤全量养分含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficient between combined humus and content of total nutrients ($n=19$)

腐殖质结合形态 Combined humus	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	阳离子交换量 CEC	有机质 OM
紧结合态 Tightly-combined	0.778 3 **	0.803 9 **	0.128 4	0.523 7	0.938 1 **
松结合态 Loosly-combined	0.754 5 **	0.775 6 **	0.053 6	0.489 6	0.849 6 **
稳结合态 Stably-combined	0.598 1 **	0.591 3 **	0.196 5	0.504 2	0.876 6 **

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

土壤各养分因子中,有机质与结合态腐殖质的相关性最高,与紧结合态、松结合态、稳结合态腐殖质的相关性系数分别为 0.938 1、0.849 6 和 0.876 6,均达到极显著水平。这可能因为有机质是形成有机无机复合体的重要胶结物质,有机质含量增多,形成的有机无机复合体增多,相应的以结合态存在的有机质就会增加^[13]。

其他养分因子中,与 3 种结合态腐殖质相关性较好的是土壤全氮和全磷,这可能因为表层土壤中大约 80% 以上的氮、20% ~ 76% 的磷以有机态存在^[23],因而供试红壤全氮和全磷与土壤结合态腐殖质关系较密切。阳离子交换量与 3 种结合态腐殖质呈正相关,土壤全钾与腐殖质没有明显的关系。宇万太等^[24]研究黑土水稳性与土壤养分关系,也得出

了相同的结论。

3 讨 论

随着红壤侵蚀程度的增强,结合态腐殖质的含碳量减少,土壤复合量也减少。这可能因为结合态腐殖质是与土壤矿物质形成复合体的一种有机质,而黏粒和有机质是复合体形成的重要物质基础,有机质含量增加,复合作用相对活跃,从而使土壤的团聚体增多,复合体含量增加^[25,26];反之土壤有机质含量减少,部分较大的复合体因失去有机物的胶结而变成体积较小的颗粒,从而使土壤复合体即结合态腐殖质减少,进而导致有机无机复合量减少。

腐殖质的 3 种结合形态中,紧结合态与水稳性团聚体的相关性最好。这可能因为土壤腐殖质主要以紧结合态的形式存在,即以胡敏素类形态与矿质黏粒结合,而胡敏素含有较多不易降解的功能基团^[27],在土壤中不活跃,与矿物部分结合较紧,形成的团粒结构较牢固,抵抗外界破坏的能力较强,稳定性较大,因而紧结合态腐殖质与土壤团聚体稳定性的关系最密切^[28]。

紧结合态腐殖质与土壤养分的相关性最好,这是因为供试红壤中,紧结合态腐殖质含量最高,它是腐殖质的主要存在形式,与土壤黏粒结合形成复合体的机会增多,进而对土壤肥力水平产生影响,另一方面,土壤中的主要养分(有机质、全氮和全磷)多是以有机态存在的,其与土壤有机质密切相关。所以紧结合态腐殖质与土壤养分的相关性最好。

综上所述,虽然供试红壤腐殖质的存在形态随着红壤侵蚀程度的加重而有所不同,但紧结合态腐殖质在 3 种结合态腐殖质中的比例均是最高,其与团聚体稳定性以及土壤养分含量的关系最密切。其作用机理有待进一步研究。

致 谢 本论文得到华中农业大学资源与环境学院的齐慧和赵长盛的大力支持,一并表示感谢!

参 考 文 献

- [1] 陈恩凤. 土壤肥力物质基础及其调控. 北京: 科学出版社, 1990. 772 ~ 775. Chen E F. The Material Basis and Regulatory of Soil Fertility (In Chinese). Beijing: Science Press, 1990. 772 ~ 775
- [2] 熊毅, 等. 土壤胶体(第二册). 北京: 科学出版社, 1985. 40 ~ 67. Xiong Y, et al. Soil Colloid (book 2) (In Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 40 ~ 67
- [3] Chaney K, Swift R S. The influence of organic matter on aggregate stability of some British soils. Soil Sci., 1984, 35: 223 ~ 230
- [4] 雷加容, 何毓蓉, 余敖. 紫色土有机无机复合体与土壤肥力的关系. 西南农业学报, 2001, 14(4): 44 ~ 48. Lei J R, He Y R, Yu A. Relationship between organo-mineral colloidal complex and fertility of purple soil (In Chinese). Southwest J. Agr. Sci., 2001, 14(4): 44 ~ 48
- [5] Neal A, Scott C, Vernon C. Soil textural control on decomposition and soil organic matter dynamics. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 1 102 ~ 1 109
- [6] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and soil organic matter: I. Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon. Soil Sci. Soc. Am. J., 2000, 64: 681 ~ 689
- [7] Anderson D W, Tiessen H. Organo-mineral complexes and their study by radiocarbon dating. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48(2): 298 ~ 301
- [8] 王继红, 赵兰坡, 王宇. 土壤胶散复合体组成及其腐殖物特征的研究. 水土保持学报, 2003, 17(5): 253 ~ 256. Wang J H, Zhao L P, Wang Y. The composition and humus characteristics in organo-mineral complex of soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 253 ~ 256
- [9] 韩志卿, 张电学, 陈洪斌, 等. 长期施肥对褐土有机无机复合性状演变及其与肥力关系的影响. 土壤通报, 2004, 35(6): 720 ~ 723. Han Z Q, Zhang D X, Chen H B, et al. The effect of long-term fertilization on the relationship between the development of organic-mineral in cinnamon soil and soil fertility (In Chinese). Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(6): 720 ~ 723
- [10] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: Theory and methodology. Eur. J. Soil Sci., 1996, 47: 425 ~ 437
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000. 129 ~ 154. Bao S D. Analysis of Agricultural Chemistry of Soil (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000. 129 ~ 154
- [12] 傅积平. 土壤结合态腐殖质分组的测定. 土壤通报, 1983, 14(2): 36 ~ 37. Fu J P. The determination of fractions of combined humus (In Chinese). Chin. J. Soil Sci., 1983, 14(2): 36 ~ 37
- [13] 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
- [14] Tiessen H, Stewart J W, Hunt H W. Concepts of soil organic matter transformations in relation to organo-mineral particle size fraction. Plant Soil, 1984, 76(1): 287 ~ 295
- [15] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biol. Biochem., 1996, 28: 665 ~ 676
- [16] 何斌, 温远光, 刘世荣, 等. 英罗港不同红树植物群落土壤腐殖质组成及特性的研究. 土壤学报, 2006, 43(3): 517 ~ 520. He B, Wen Y G, Liu S R, et al. Composition and properties of soil humus of different mangrove communities in Yingluo Bay of Guangxi (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(3): 517 ~ 520

- [17] 温善菊, 吴景贵, 张显东. 土壤颗粒和肥力关系的研究进展. 延边大学学报, 2005, 27(1): 65~70. Wen SJ, Wu J G, Zhang X D. Relation of soil-particle and fertility (In Chinese). J. Yanbian Univer., 2005, 27(1): 65~70
- [18] Bronick CJ, Lal R. Soil structure and management: A review. Geoderma, 2005, 124: 3~22
- [19] 魏朝富, 谢德体, 李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展. 地球科学进展, 2003, 18(2): 221~227. Wei C F, Xie D T, Li B G. Progress in reserch on soil organo-mineral complexes (In Chinese). Advances in Earth Science, 2003, 18(2): 221~227
- [20] Maria T D, Anna B, Alessandra T, *et al.* Humic substances along the profile of two typic Haploxerert. Geoderma, 2002, 107: 281~296
- [21] 李映强, 曾觉廷. 不同耕作制度下水稻土有机物质变化及其团聚作用. 土壤学报, 1991, 28(4): 404~409. Li Y Q, Zeng J T. Change in organic matter and its role in aggregation of paddy soils under different cropping systems (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(4): 404~409
- [22] Anderson D W, Pal W A, Arnaud R J. Extraction and characterization of humus with reference to clay-associated humus. Can. J. Soil Sci., 1974, 54: 317~323
- [23] Allison F E. Soil organic matter and its role in crop production. Developments in Soil Sci., 1973, 3: 233~240
- [24] 宇万太, 沈善敏, 张璐, 等. 黑土开垦后水稳性团聚体与土壤养分的关系. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2 287~2 291. Yu W T, Shen S M, Zhang L, *et al.* The relationships between water-stable aggregates and nutrient status in black soil after reclamation (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(12): 2 287~2 291
- [25] 于君宝, 刘淑霞, 刘景双, 等. 开垦对黑土有机碳在有机无机复合体分配的影响. 土壤通报, 2004, 35(6): 695~700. Yu J B, Liu S X, Liu J S, *et al.* Effect of tillage on the distribution of black soil organic carbon in organic-mineral complex (In Chinese). Chin. J. Soil Sci., 2004, 35(6): 695~700
- [26] Boix-Fayos C, Calvo-Cases A, Imeson A C, *et al.* Influence of soil properties on the aggregation of some Mediterranean soils and the use of aggregate size and stability as land degradation indicators. Catena, 2001, 44(1): 47~67
- [27] 张奇春, 王光火. 施用化肥对土壤腐殖质结构特征的影响. 土壤学报, 2006, 43(4): 618~623. Zhang Q C, Wang G H. Effect of chemical fertilizer on structure of soil humus (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 618~623
- [28] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1 491~1 494. Shi Y, Chen X, Shen S M. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol., 2002, 13(11): 1 491~1 494

ORGANO-MINERAL COMPLEXING AND SOIL NUTRIENTS IN SEVERAL ERODED ULTISOLS

Wang Chunyan Huang Li[†] Tan Wenfeng Cai Chongfa Hu Hongqing

(Key Laboratory of Subtropical Agricultural Resources and Environment, MOA, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract Soil samples were collected of eroded Ultisols, varying in extent of erosion (slight, medium and severe), in the subtropical China. Organo-mineral complexing status of the samples was determined with the method modified by Fu Jiping and its relationship with soil nutrients was analyzed. Results show that with the extent of erosion rising from slight, medium to severe, the content of soil nutrients (OM, total N and total P) decreased gradually. Tightly-combined and loosely-combined humus dominated in the soils, and the content of stably-combined was the least. With erosion of the soil getting serious, both the contents of combined humus and organo-mineral complexes reduced, but the organo-mineral complexing degree of the soil did not change much. The content of soil complexes was positively related to combined humus and water-stable aggregates, so was the organo-mineral complexing degree. The contents of total N, total P and OM were closely related to combined humus, but the contents of total K and CEC were not. Among the three types of humus, tightly-combined humus was the most closely related to soil nutrients (total N, total P and organic matter).

Key words Eroded Ultisol; Organo-mineral complexing; Combined humus; Soil nutrients; Aggregate