

# 中亚热带红土与水稻土铁锰结核 理化特性与形成环境对比

叶玮<sup>1</sup>, 郑万乡<sup>1</sup>, 李凤全<sup>1</sup>, 朱丽东<sup>1</sup>, 杨立辉<sup>2</sup>, 李建武<sup>1</sup>

(1. 浙江师范大学旅游与资源管理学院, 浙江 金华 321004; 2. 安徽师范大学, 安徽 芜湖 241000)

**摘要:** 通过中亚热带第四纪红土和金衢盆地现代水稻土中铁锰结核的理化特征对比发现, 水稻土铁锰结核的外部特征、内部结构以及化学组成与第四纪红土中的结核既具有一定的相似性又存在着明显差别。第四纪红土中的结核与水稻土中的结核都是在干湿交替的环境中发育形成的。水稻土中结核的形成是水稻生长期的渍水、还原作用和收获后的控水、弱氧化作用交替进行的结果, 形成时间短暂, 环境较为稳定; 第四纪红土结核的形成是气候环境周期性干湿变化的结果, 结核淀积时段气候干热, 氧化作用强烈, 反映第四纪红土形成环境的不稳定性。

**关键词:** 第四纪红土; 水稻土; 铁锰结核

**中图分类号:** S151.1

**文献标识码:** A

第四纪红土在中国中亚热带地区广泛分布, 其中往往多有铁锰结核淀积。关于第四纪红土的形成环境至今仍然存在争论, 如何有效地从红土记录中提取信息, 较为精确地重建红土形成之古地理环境成为当前中国南方第四纪环境研究中亟待解决的难题。近年来作者在从事红土研究过程中思索, 作为一种沉积物中的新生体, 红土中结核的出现应该具有特定的环境意义。因此, 研究现代环境条件下形成的土壤结核特征将可成为深入研究红土沉积环境的良好切入点。相关研究发现, 在中国南方, 甚至北方的部分地带性土壤中都有铁锰结核发育。傅桦等<sup>[1]</sup>对白浆土中的铁锰结核形态研究表明, 其外形多种多样, 或呈球状、椭圆状, 或似球状以及不规则形状。赵景波<sup>[2]</sup>发现黄土古土壤层的铁质结核主要有椭球状、柱状和板状, 并认为铁质结核是沿裂隙、孔洞发育的。章明奎<sup>[3]</sup>利用颜色的差异将浙江红壤中发育的结核分为3类, 红色结核, 黄色结核和黑色结核, 而不同的结核形态反映了不同的成土环境。潘根兴等<sup>[4]</sup>用偏光显微镜观察铁锰结核的内

部形态与物质组成更进一步肯定了铁锰结核的形成经历了环境的变迁。White和Bums认为, 同心圆微构造是季节性干湿交替使铁、锰分层的结果, 环带特性记录着土壤铁锰结核的氧化还原历史, 可以用来推断土壤所经历的主要氧化还原的变化<sup>[5,6]</sup>。黄成敏等<sup>[7]</sup>在研究干湿变性土中的结核发现地貌陡峭、排水迅速的地表残留铁质结核, 而地表平坦或低洼的则形成碳酸盐结核。显然, 现代土壤结核具有环境指示意义。野外调查发现, 地处中亚热带的浙江金衢盆地中第四纪红土广泛分布, 盆地中的水稻土也发育有铁锰结核。因此, 本文选择金衢盆地水稻土结核为研究对象, 试图通过现代土壤与第四纪红土结核理化特征的对比分析, 以今论古, 确定第四纪红土中结核的形成环境, 为中国南方第四纪红土记录研究的深入提供参考。

## 1 研究区概况

金衢盆地地处浙江中部, 是亚热带东南丘陵

收稿日期 (Received date): 2007-11-25; 改回日期 (Accepted): 2008-03-01.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40571067), 浙江省自然科学基金资助项目 (项目批准号: (X506313)). [National Natural Science Foundation of China. No. 40571067, Natural Science Foundation of Zhejiang Province of China No. X506313]

作者简介 (Biography): 叶玮 (1957-), 女, 博士, 研究员, 主要从事环境变化方面的研究工作。[Ye Wei (1957-), female, doctor, professor mainly in climate change.] E-mail: ygl29@zjnu.cn

区的中新生代红层盆地之一,周边为断裂构造控制,地层为中生代红色沉积岩系。盆地地势南北高,中部低,为走廊式盆地。以金衢盆地东段为主体,四周错落分布着永康、武义、浦江等小盆地,构成环状相间的盆地群。盆地中部为地势低平、起伏和缓的冲积平原,南部和东部地势高峻,群山盘结,北部以低山丘陵为主。研究区属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,光照充足。年平均气温 16.6~17.7℃,年平均降雨量 1 303~1 447 mm,盆地地带性土壤为红壤,人工栽培形成的水稻土是区域具有代表性的农业土壤,属于华中水稻土区<sup>[8]</sup>,其土壤发生层包括耕作层、犁底层、渗育层和斑纹层。第四纪红土主要分布在山前丘陵地区的台地和河流高阶地上,可分为加积型和风化壳型等不同类型。加积型红土通常由下而上依次为基岩层、风化砾石层、网纹红土层和均质红土层,与分布在江西、湖南等中亚热带地区的第四纪红土在地层和沉积结构方面具有良好的可对比性。金衢盆地发育在红色砂岩、粉砂岩之上的风化壳型红土其网纹化作用也很强烈。

2 材料与实验方法

在金衢盆地中,不论是在基岩之上形成的风化壳剖面,还是加积型红土沉积剖面,多有结核成层分布。在第四纪加积型红土剖面中,结核往往集中出现在网纹红土与均质红土交界处;在金华地区水稻土剖面上,结核集中出现在犁底层(图 1)。

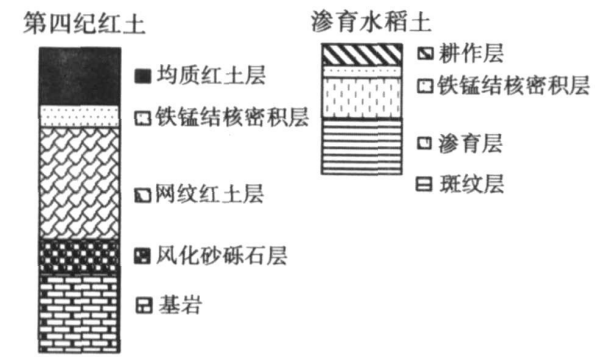


图 1 第四纪红土与渗育水稻土综合剖面  
Fig 1 The profiles of the paddy soil and the quaternary red earth in Jinhua Zhejiang

结核样品的采集分别采用了剖面捡拾(较大颗粒的结核)和样品淘洗富集的方法。室内用湿筛法将采回的土壤样品过 230 目筛子,溶液在大烧杯内

沉淀后用烘箱烘干,筛子内的样品烘干后挑检出结核样品备用。①对结核样品进行显微镜下观察。详细记录结核的大小、形态和表面特征,并对其进行统计与分析。②将烘干的结核样品与其母质样品分别用碾磨机磨 20 s 成细粉状,分别取 4 g 用压片法制成塑料环片,用 XRF 法测定样品化学组成。测试完成于浙江师范大学地理过程实验室,仪器为 Panalitical 公司产 Axios X 荧光光谱议,分析过程采用国家标准沉积物样 GSD-1 全程监控。主要元素质量分数的绝对偏差为 1.0%~1.5%,最大分析误差小于 0.5%。

3 实验结果与讨论

3.1 铁锰结核的形态特征

3.1.1 外部特征(表 1)

表 1 水稻土与第四纪红土结核外部特征对比表

Table 1 The exterior characteristic of nodules				
结核	大小	颜色	形态	莫氏硬度
水稻土 结核	一般 < 3 mm, 80%	红褐色和	球形或	类球形为 3~
	颗粒 < 1.5 mm	黑褐色	类球形	5, 平均为 4 球形为 4~6 平均为 5
红土 结核	大小不一,最大可达 10 mm 以上,最小不足 1 mm	红、土黄和黑色	板状、椭球形、球状和不规则状	2~5 平均为 4

如表 1 所示,水稻土中的结核在形态特征上相对简单,为规则的球形,个体较小,这和江西进贤水稻土中结核粒径大小非常类似<sup>[9]</sup>;第四纪红土中结核个体大小不一,形态复杂多样。从形成环境分析,水稻生长季节耕层和犁底层饱水呈还原态,犁底层的滞水作用使心土层不饱水而呈氧化状态;水稻成熟后土壤逐步落干,全剖面呈氧化态。处于还原态的土壤,在溶解和络合等淋溶作用下,铁、锰离子从固相转为液相,叠加在还原作用之上,铁、锰元素发生淋溶<sup>[8]</sup>;土壤环境变为氧化态,铁锰元素被氧化淀积。显然,人为控制下的水稻土干湿周期变化是规律、稳定而且频繁的,渍水环境溶液的浓度也比较均匀,铁锰物质可以围绕核心淀积,形成了球形结核。从形态比较推断,第四纪红土结核形成环境不及水稻土稳定,而和白浆土接近。控制氧化还原过程交替进行的气候干湿变化幅度大,时间长短不一,

由气候旋回导致的土体含水量变率大, 铁锰结核既可沿某些核心淀积, 也可能沿裂隙和孔洞发育。所以, 结核不但个体大, 而且形态多样。

### 3.1.2 内部结构

谭文峰等<sup>[10]</sup>对武汉黄棕壤中铁锰结核的研究发现, 结核内部的环状结构明显, 类似于树的年轮, 每一环带都记录了当时不同的环境信息; 单连芳<sup>[11]</sup>对几个不同产地的铁锰结核的研究表明, 不同产地的结核其内部有着不同的结构。

通过显微镜观察, 金华水稻土中的铁锰结核的内部结构特征大致可分为两种类型:

#### 1. 无硅质内核

该类结核其外部形态为圆形或椭圆形, 结核的表面光滑。如图 2(2p)所示, 结核内部呈红褐色, 质地均一, 内部无核, 碾磨后较粘。颗粒大小一般处于 1~1.5 mm 左右, 在剖面中多处于 P 层。

#### 2. 有硅质内核

有核的结核其外部呈类球形, 表面不如球形结核光滑。结核内部有明显的核心(图 2(4p)), 中心的颜色有黑色与红色两类, 其中含有相对较粗大的石英砂颗粒, 但水稻土中结核没有明显的环带结构, 只能辩明核与外壳。

第四纪红土剖面结核的内部结构大致也可分为 2 类:

#### 1. 不规则结核

其特点是内部结构质地较均一, 颜色成褐红色, 含有较多的砂粒, 结核磨圆度较差, 且具有个体越大结晶程度愈差的特点。

#### 2. 规则结核

该类结核外部特征较为圆滑, 磨圆度较好, 其内部由不同色调的环带组成, 结晶程度好(图 3)。结核中心有一个核, 其核心多由碎屑(如砂粒、岩屑等)或矿物晶体组成。此类结核以近似球状居多, 个体较小, 一般 < 4 mm。

张民等的研究发现, 表面光滑的球形结核内部在电镜下可观察到明显的铁、锰淀积带, 不规则结核颗粒内部铁、锰是散乱的和随机的分布<sup>[12]</sup>。根据谭文峰对武汉黄棕壤中铁锰结核环带结构的研究结果, 结核是在不断地形成(沉淀)–消散(溶解)平衡中缓慢生长, 并不是简单的由土壤干湿交替所致, 它很可能是全球气候变化或新构造运动的地质作用下, 土壤环境巨大波动条件下形成的。结核在生长

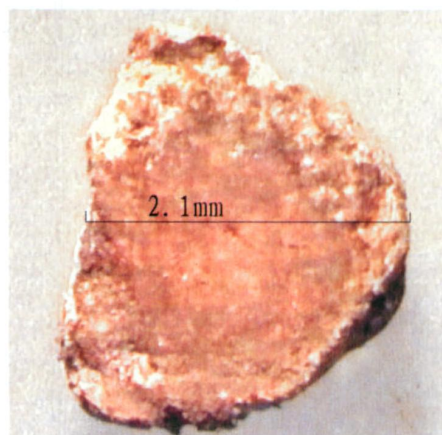
的前期和生长的后期两个阶段, 土壤环境变化差异较大<sup>[10]</sup>。Pillippe 等则发现, 具有同心圆微构造结核形成于排水良好的土壤中, 排水不良的土壤中则有扩散状凝团形成<sup>[13]</sup>。由此推测, 第四纪红土中铁锰结核也是在经历多次显著的干湿交替变化的环境中形成的, 而且这种交替是长时间尺度的, 干湿差别显著, 干旱的气候导致了结核的形成, 也造成结核淀积的阶段终结。与现代水稻土相比, 第四纪红土结核形成于排水良好的沉积环境, 其氧化过程漫长, 并且氧化速度不均匀, 在缓慢的氧化作用下形成规则球形结核, 而在快速的氧化过程中形成不规则结核。

### 3.2 铁锰结核的常量元素组成

由表 2 可知, 第四纪红土和水稻土结核的化学组成均以  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{MnO}_2$  为主, 但含量存在明显差别。红土结核的  $\text{SiO}_2$  含量是相应土体的 70.18%, 而水稻土结核的  $\text{SiO}_2$  含量仅为水稻土含量的 54.44%, 反映水稻土脱硅作用强于第四纪红土。与相应土体相比, 结核中的  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO}_2$  明显聚集, 但第四纪红土结核和水稻土结核铁、锰富集程度不同。水稻土结核铁、锰含量分别为相应土体的 6.4 和 2.4 倍(表 3), 锰的富集程度低于铁, 表明在水稻土环境下锰的活动性高于铁, 这和前人的研究是一致的。前人研究发现, 红壤经种植水稻后, 受频繁进行的氧化还原作用, 铁锰迁移能力大为增强, 其中锰的水迁移系数接近钙<sup>[14-15]</sup>。因此, 水稻土结核对铁的富集作用揭示了土体较弱的氧化作用和氧化环境。相反, 第四纪红土中结核铁、锰含量分别为相应土体的 1.72 和 52.9 倍, 锰的富集远远高于铁。铁锰的氧化还原受 pH 和 Eh 的控制。低 pH 和通气不良的土壤中, 离子态  $\text{Mn}^{2+}$  含量较高, 因为当介质呈酸性, 锰以离子的形式溶解于水溶液中, 碱性介质中则形成锰的沉淀; Eh 为负时形成  $\text{Mn}^{2+}$ , Eh 为正时形成 +3 + 4 价锰<sup>[16]</sup>。显然, 锰比铁易还原而难氧化。由此推测, 水稻生长期有稳定的渍水时段, 上层土体水分饱和, 该时段又对应于高温天气, 土壤中溶解作用强烈, 而且有机物质的络合也增加了铁锰元素的迁移性。水稻收获后, 土壤控干, 铁和少量锰在弱氧化环境下发生淀积。比较而言, 红土的沉积环境更为复杂。推测, 湿润时期, 铁锰元素还原并发生迁移; 干旱时段, 土体排水状况良好, pH 值升高, 氧化作用非常强烈, 铁、锰元素被氧化富集。



2p - 洪源村犁底层



4p-李家村犁底层

图2 浙江金华水稻土铁锰结核的内部结构

Fig. 2 The internal construction of ferromanganese nodules in the paddy soil of Jinhua, Zhejiang

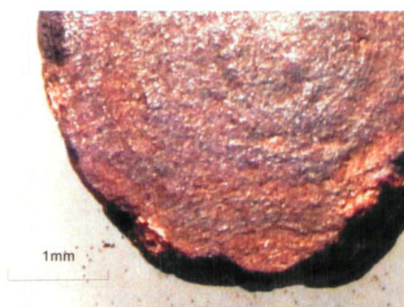


图3 第四纪红土中规则铁锰结核的内部结构

Fig. 3 The internal construction of regular ferromanganese nodules in the Quaternary red earth

表 2 水稻土和红土铁锰结核的常量元素氧化物组成 (%)

Table 2 The major elements oxide composition of ferromanganese nodules in the paddy soil and the Quaternary red earth (%)

结核与母质	SO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	N <sub>2</sub> O	Mn/Fe
2p层结核	27.98	8.08	37.92	12.58	0.47	0.22	0.29	0.09	0.33
2p层母质	76.64	8.34	4.75	3.50	0.47	0.82	0.33	0.20	
4p层结核	53.73	10.05	12.76	17.06	0.89	2.02	0.44	0.92	1.33
4p层母质	73.50	12.82	3.07	8.82	0.53	2.98	0.53	1.20	
水稻土结核平均值	40.87	9.07	25.34	14.82	0.68	1.12	0.37	0.51	0.58
水稻土母质平均值	75.07	10.58	3.91	6.16	0.50	1.90	0.43	0.70	
罗店结核	47.40	10.51	12.64	9.27	0.09	0.72	0.34	0.09	0.73
罗店母质	71.39	13.54	6.01	0.22	0.07	1.23	0.48	0.10	
高村结核	47.24	10.68	10.72	10.29	0.14	0.76	0.31	0.10	0.96
高村母质	63.46	17.76	7.53	0.15	0.09	1.32	0.51	0.11	
红土结核平均值	47.32	10.595	11.68	9.78	0.11	0.74	0.32	0.10	0.84
红土母质平均值	67.42	15.652	6.77	0.19	0.08	1.28	0.49	0.11	

表 3 铁锰结核常量元素化合物富集

Table 3 The enrichment to the major elements of ferromanganese nodules

化合物	红土 (S)	红土结核 (N)	N /S	化合物	水稻土 (S)	水稻土结核 (N)	N /S
	平均值	平均值			平均值	平均值	
SiO <sub>2</sub>	67.425	47.320	0.701 8	SiO <sub>2</sub>	75.075	40.871	0.544 4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.625	10.595	0.678 1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.584	9.066	0.856 6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.770	11.680	1.725 3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.911	25.343	6.480 0
MnO <sub>2</sub>	0.185	9.780	52.864 9	MnO <sub>2</sub>	6.156	14.825	2.408 2
CaO	0.080	0.115	1.437 5	CaO	0.501	0.683	1.363 2
K <sub>2</sub> O	1.275	0.740	0.580 4	K <sub>2</sub> O	1.896	1.122	0.591 8
MgO	0.495	0.325	0.656 6	MgO	0.433	0.370	0.854 5
Na <sub>2</sub> O	0.105	0.950	9.047 6	Na <sub>2</sub> O	0.702	0.505	0.719 4

红土与水稻土结核常量元素含量的另一显著区别是易溶组分钠。钠的氧化物在红土结核中大量富集,是红土的 9 倍;水稻土结核中却只有水稻土的 71.94% (图 4)。钠是易溶组分,在富水条件下极易发生移动。从红土结核中较高钠元素含量分析也证明,红土结核的形成环境不似水稻土那样富水并且渍水。

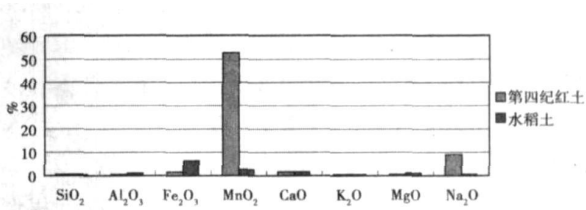


图 4 红土与水稻土结核常量元素化合物富集对比

Fig 4 The enrichment to the major elements of ferromanganese nodules between the quaternary red earth and paddy soil

表 4 铁锰结核微量元素组成

Table 4 The enrichment to the trace elements of ferromanganese nodules

元素	红土 S	红土结核 N	富集系数 N /S	元素	水稻土 S	水稻土结核 N	集系数 N /S
	平均值	平均值			平均值	平均值	
Pb	70.288	2 056.465	29.258	As	7.997	257.825	32.240
Co	37.208	1 029.181	27.661	P	582.638	3 147.334	5.402
As	11.261	116.149	10.314	Ba	566.547	2 879.273	5.082
Ba	300.014	2 833.102	9.443	V	69.560	263.952	3.795
Br	1.172	3.743	3.194	Sc	5.622	13.763	2.448
Sc	9.906	23.163	2.338	Pb	43.367	92.738	2.139
Cu	23.463	47.118	2.008	Zn	66.531	113.285	1.703
P	265.750	509.898	1.919	Cs	8.808	14.597	1.657
Ni	22.104	41.037	1.857	Ni	15.575	25.365	1.629
Zn	67.110	103.251	1.539	Co	55.570	87.127	1.568
V	121.994	172.782	1.416	Br	0.748	1.153	1.541
Ga	19.512	22.870	1.172	Cu	13.398	18.420	1.375
Sr	35.065	36.544	1.042	Ga	14.127	16.762	1.187
Zr	330.373	337.192	1.021	Sr	68.328	73.031	1.069
Ti	6 388.132	5 683.722	0.890	Rb	95.421	75.742	0.794
Rb	93.865	83.472	0.889	Ti	5 177.161	4 074.265	0.787
Nb	23.326	19.362	0.830	Nb	24.642	13.337	0.541
Hf	10.088	8.282	0.821	Zr	353.741	186.919	0.528
Cs	11.887	6.814	0.573	Hf	10.450	4.678	0.448

综上所述, 常量元素的地球化学特征揭示了水稻土与第四纪红土形成环境的差异。水稻土中的结核淀积于弱氧化环境中, 而第四纪红土结核形成于较为强烈的氧化作用和氧化环境下。二者的差别指示第四纪红土结核淀积时期气候较现代金衢盆地干热。

### 3.3 铁锰结核的微量元素组成

由表 4 可知, 第四纪红土结核的微量元素富集顺序为: Pb > Co > As > Ba > Br > Sc > Cu > P > Ni > Zn > V > Ga > Sr > Zr > Ti > Rb > Nb > Hf > Cs, 其中 Pb 和 Co 富集作用强烈; 而水稻土结核的微量元素富集顺序为: As > P > Ba > V > Sc > Pb > Zn > Cs > Ni > Co > Br > Cu > Ga > Sr > Rb > Ti > Nb > Zr > Hf。第四纪红土结核与水稻土结核对 Pb、As 和 Ba 的富集程度均较高, 但水稻土结核 As 高度富集, 而第四纪红土结核 Pb 和 Co 高度富集。从元素富集系数来看, 第四纪红土结核的锰元素与 Pb、Co、As、Ba 具有相似的富集系数, 铁元素与 R、Ni、Zn、V 具有相似的富集系数; 而水稻土结核锰元素与 Sc、Pb 有类似的富集系数, 铁元素与 R、Ba 有类似的富集系数, 这与 B. palmbo 的研究结果在一定程度上是一致的<sup>[17]</sup>。第四纪红土结核锰元素与 Co 的较强相关性, 而水稻土中的锰元素却与 Co 的相关性并不显著, 这可能与水稻土中因水稻的生长对各种元素产生了影响, 微生物会影响锰的有效性有关<sup>[18]</sup>, 水稻土中的微生物比第四纪红土丰富, 因此, 对锰的影响也就大。从结核的微量元素变化进一步证明, 第四纪红土结核形成环境与现代水稻土结核形成环境具有相似之处, 又有明显的不同。

## 4 结论

1. 第四纪红土与水稻土中的结核的外部形态具有一定的相似性。水稻土铁锰结核的大小、形态以及表面特征等相对红土中的铁锰结核要简单的多, 粒径多小于 1.5 mm, 形状为圆球形和类球形; 第四纪红土结核个体大小不均, 形态多样, 除了圆球形之外, 还存在板状、椭球状和不规则状。

2. 红土与水稻土结核内部结构也存在差异。第四纪红土结核分为规则与不规则两类: 不规则者质地较均一, 颜色成褐红色, 含有较多的砂粒, 结核磨圆度较差, 且具有个体越大结晶程度愈差的特点。

规则结核其外部特征较为圆滑, 内部具有环带结构, 结晶程度较好。而水稻土铁锰结核分为无硅质与有硅质内核两种: 无硅质的结核粒径多 1~1.5 mm, 其外部形态为圆形或椭圆形, 表面光滑, 结核内部呈红褐色, 质地均一; 有硅质的结核其外部呈类球形, 表面不如球形结核光滑, 结核内部有明显的硅质核心。与红土中规则结核不同的是, 水稻土中的结核没有明显的环带结构。

3. 根据化学组成, 第四纪红土与水稻土中结核都为铁锰结核, 但是第四纪红土中结核中锰、钠元素富集程度高于水稻土, 反映沉积环境的差异。

4. 结核的形态特征、内部结构和化学组成均说明了第四纪红土中的结核形成与水稻土中的结核形成具有一定相似性, 即都是在干湿交替的环境中发育形成的。但是, 水稻土干湿交替规律而且稳定, Eh-pH 变化幅度小, 铁富集高于锰; 与水稻土相比, 第四纪红土结核形成环境复杂, 土体干湿变化和周期长短受气候旋回控制, 气候湿润期铁锰元素还原迁移, 干旱时段氧化作用强烈, 铁锰淀积形成结核, 锰富集程度高于铁。

5. 从第四纪红土结核理化特征推测, 第四纪红土结核形成于干湿交替的氧化环境中, 结核淀积期的气候可能较现代的金衢盆地干热, 反映第四纪环境的剧烈波动。

## 参考文献 (References)

- [1] Fu H, Ding R X. Study on Fe-Mn nodule of Albic soil in Jianghuai Region of Subtropic Zone [J]. *Tropical and Subtropical Soil Science* 1995, 4(2): 102~106 [傅桦, 丁瑞兴. 北亚热带江淮地区白浆土铁锰结核的研究 [J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(2): 102~106]
- [2] Zhao J B. The discovery and research on the Ferriferous clay nodules of 5th paleosol layer in Xi'an and Baoji [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(4): 420~425 [赵景波. 西安和宝鸡第 5 层古土壤铁质粘土结核的发现与研究 [J]. 地理科学, 2002, 22(4): 420~425]
- [3] Zhang M K. Mineralogy of some concretions in red soils from Zhejiang Province, China [J]. *Acta Agricultrae Zhejiangensis* 2000, 12(3): 129~131 [章明奎. 浙江红壤中结核的矿物学研究 [J]. 浙江农业学报, 2000 12(3): 129~131]
- [4] Pan G X, Huang R C, Ding R X. Micromorphological types of ferruginous and manganeseous pedofeatures from Albic soils in North Huai region, Jiangsu [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1991, 14(2): 94~95 [潘根兴, 黄瑞采, 丁瑞兴. 淮北白浆土铁锰质物相形态类型 [J]. 南京农业大学学报, 1991, 14(2): 94~95]
- [5] White G N & Dixon J B. Iron and manganese distribution in nodules

- from a young Texas Vertisol[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 1254~1262
- [6] Burns R G & Burns V M. Mechanism for nucleation and growth of manganese nodules[J]. *Nature* (London), 1975 255 130~133
- [7] Huang C M, Wang C S, Tang Y, *et al.* Pedogenic features and forming environment of ustic vertisols and nodules in Yuanmou Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006 37(4): 630~634 [黄成敏, 王成善, 唐亚, 等. 干润变性土及其结核的发生学特征与形成环境探讨[J]. 土壤通报, 2006 37(4): 630~634]
- [8] Xiong Y, Li Q K. Soils in China[M]. Beijing: Science Press, 1990 [熊毅, 李庆远. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1990]
- [9] Gong Z T. Chinese Soil Taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 1999 [龚子同. 中国土壤分类系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999]
- [10] Tan W F, Liu F, Li X Y. Characteristics of band structure in iron-manganese nodules from yellow-brown soil in Wuhan[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 198~202 [谭文峰, 刘凡, 李学垣. 武汉黄棕壤中铁锰结核的环带构造、元素富集特点与环境变化意义[J]. 第四纪研究, 2004 24(2): 198~202]
- [11] Shan L F. Study of ferro-manganese nodules from different places of production[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1984, 4(1): 67~80 [单连芳. 几个不同产地铁锰结核的研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1984 4(1): 67~80]
- [12] Zhang M, Ma L, Luo H Y. Elemental composition and micro-morphological characteristics of iron-manganese concretions[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1997, 28(3): 305~314 [张民, 马丽, 骆洪义. 铁锰结核的元素组成及微形态特征[J]. 山东农业大学学报, 1997 28(3): 305~314]
- [13] Phillippe W R, Bievins R L, Crecchio C *et al.* Distribution of concretions from selected soils of the inner bluegrass region of Kentucky[J]. *Soil Science*, 1972 36: 171~173
- [14] He Q, Chen J F. On the properties of the micro-aggregates of paddy soils derived from Quaternary Red clay[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1962, 12(1): 55~62 [何羣, 陈家坊. 第四纪红土发育的水稻土微团聚体特性的初步研究[J]. 土壤学报, 1962 12(1): 55~62]
- [15] Zhang G L, Gong Z T. Geochemical characteristics of elemental migration in soils under submerged condition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4): 358~365 [张甘霖, 龚子同. 淹水条件下土壤中元素迁移的地球化学特征[J]. 土壤学报, 1993 30(4): 358~365]
- [16] Tan W F. The composition and surface chemistry characteristics of Fe-Mn nodules of several soils in China[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2000 [谭文峰. 我国几种土壤中铁锰结核的物质组成与表面化学组成[D]. 武汉: 华中农业大学, 2000]
- [17] B. Palumbo, A. Bellanca, R. Neri, M. J. Roe. Trace metal partitioning in Fe-Mn nodules from Sicilian soils, Italy[J]. *Chemical Geology*, 2001, 173: 257~269
- [18] Zeng X Z. The Study on Chemical fractions and availability of manganese in upland soil and Paddy soil, Hunan Province of China[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2005. [曾宪军. 湖南省几种成土母质发育的旱土和水稻土锰的化学形态及其有效性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2005]

# The Composition and Depositing Condition of Ferro-manganese Nodules Developed in Quaternary Red Earth and Paddy Soil in Mid-subtropical Zone, China

YE Wei<sup>1</sup>, ZHENG Wanxiang<sup>1</sup>, LI Fengquan<sup>1</sup>, ZHU Lili<sup>1</sup>, YANG Lihui<sup>2</sup>, LI Jianwu<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Resource Management of Zhejiang Normal University, Jinhua 321004 Zhejiang)

2. Anhui Normal University Wuhu 241000 Anhui China)

**Abstract:** The structure and elemental geochemistry of ferro-manganese nodules developed in the paddy soil and the Quaternary red earth were studied. Accumulation mechanisms of Fe-Mn nodules and environmental implication were discussed.

Firstly, the external patterns, internal structure and elemental compositions of Fe-Mn nodules in the paddy soil and the Quaternary red earth have certain similarities, but there are differences in some degree. Secondly, both the nodules in Quaternary red earth and paddy soil resulted from the alternations of the redox. Third, the physical and chemical characteristics of Fe-Mn nodules developed in paddy soil suggest a strong reduction and a poor oxidation process. Compared with the former, the nodules occurred in the Quaternary red earth were deposited in a strong oxidation. This means that the environment was hot and dry during the nodule accumulation. The climate environment was unstable.

**Key words:** Quaternary red earth, paddy soil, the ferro-manganese nodule