

The Characteristics of the Biostratigraphic Chemical Elemental Combinations and Taphonomic Environmental Analyses of the Latest Miocene Deposits in Zhaotong, Yunnan

Yuguang Zhang¹, Xueping Ji², Zhiheng Li³, Liya Fu⁴, Jiyun Yin⁵, Di Liu¹

¹Beijing Museum of Natural History, Beijing

²Yunnan Institute of Cultural Relics and Archaeology, Kunming

³Jackson School of Geosciences, University of Texas, Austin, USA

⁴Chuxiong Museum, Chuxiong

⁵Yunnan Land and Resources Vocational College, Kunming

Email: towyu@sohu.com

Received: Oct. 29th, 2014; revised: Nov. 30th, 2014; accepted: Dec. 8th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

We collected 16 samples from the 11 fossiliferous layers respectively within Zhaotong Formation in Shuitangba, representing the late Miocene lacustrine deposits of Shaoyang District, Zhaotong Yunnan. 19 biogenic elements were analyzed from these samples using ICP-AES (Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry). Based on the biogeochemical theory, the results indicate the potential reason of the abundant vertebrate fossil assemblages preserved in the basin during latest Miocene. Chromium and strontium were ingested through food and water by the animals inhabited around; the two elements reached in a high abnormal level in organism by long term accumulation, caused the physiological function disorder of these animals and finally led to the regional faunal extinction. In addition, according to the characteristics of the chemical composition and the sedimentary features of the fossiliferous beds, the paleoenvironment of the region was considered as lakes, swamps or off-shore lake with low hydrodynamic condition; climate also experienced the gradual shift from humid and warm to dry condition during latest Miocene.

Keywords

Latest Miocene, Biostratigraphy, ICP-AES, Palaeoenvironment, Zhaotong of Yunnan

云南昭通中新世晚期生物地层 化学元素的组合特征及古埋藏环境分析

张玉光¹, 吉学平², 李志恒³, 付丽娅⁴, 尹济云⁵, 刘 迪¹

¹北京自然博物馆, 北京

²云南省文物考古研究所, 昆明

³美国德克萨斯州立大学杰克逊地球科学学院, 奥斯丁, 美国

⁴楚雄州博物馆, 楚雄

⁵云南国土资源职业学院, 昆明

Email: towyu@sohu.com

收稿日期: 2014年10月29日; 修回日期: 2014年11月30日; 录用日期: 2014年12月8日

摘 要

文中对云南昭通市昭阳区水塘坝中新世晚期湖沼相沉积地层昭通组剖面11层含化石层逐层共采集16件分析样品, 并采用电感耦合等离子体原子发射光谱法对样品中与生物体生存关系密切的19种元素进行了测试。根据分析数据同时结合生物地球化学理论推断得出: 昭通地区中新世晚期沉积盆地大量不同种类动物化石丰富埋藏极有可能是因这些动物长期通过食物、饮水等途径, 将铬、锶元素摄入动物体内并不断累积, 从而造成生物体内铬、锶元素的高异常含量, 长期作用导致动物正常的生理机能发生紊乱, 故而在此大规模的埋藏保存。此外, 依据元素的化学组成特征和化石层沉积环境的分析, 认为该地区中新世晚期应该属于流水较弱的湖泊沼泽地带, 以及滨湖相环境, 气候条件曾经历了由较温暖潮湿向逐渐干燥转变的过程。

关键词

中新世晚期, 生物地层, 电感耦合等离子体原子发射光谱法, 古环境, 云南昭通

1. 引言

自2007年至2010年, 本文作者等人连续3次在昭通市昭阳区太平办事处太平村水塘坝湖沼相沉积盆地中进行野外发掘, 这里亦是国内地学界著名的昭通褐煤盆地所在地, 分别于昭通组褐煤层、含砾粉砂层以及螺壳层等共11个野外含化石层(考古发掘过程中, 根据岩性、堆积层进行的分层记录, 厚度约有18 m)中发掘出土了中新世末期的鸟类骨骼化石达1200余件。此外, 还出土了其他类型的伴生脊椎动物骨骼化石, 如长鼻类昭通剑齿象、灵长类、食肉类、偶蹄类、奇蹄类、啮齿类、兔形类及鱼类等。经统计分析后认为, 在昭通地区发现数量和种类如此之多的脊椎动物化石, 特别是众多的鸟类骨骼化石保存, 开创了迄今为止在云南地区所产新近纪鸟类化石最多的记录。大量不同类型生物的集群埋藏保存, 对于探讨昭通地区中新世晚期生物生存环境以及如此富集的原因提供了实证。

生物地球化学作为研究地质历史时期生物与环境之间的相互影响关系, 从而反映在生物体的化学组成、生物体参与的元素迁移和富集的地球化学过程中。之前曾有过对自贡恐龙骨骼及围岩取样进行中子活化分析, 通过对放射性铀元素的异常探讨成批恐龙死亡的原因[1]。也有对恐龙蛋化石蛋壳内痕量元素

的含量异常分析,从而探讨蛋壳结构的变化来推断恐龙灭亡于环境的关系等[2][3]。因此,借助先进的分析测试方法从生物地球化学角度来讨论生物地层中元素的组成特点、变化规律,特别是微量元素对生物体生命所产生的影响作用,为进一步了解昭通的化石埋藏环境和集群埋藏的原因等具有重要的现实意义。

根据野外地层剖面的岩性特征分析,野外化石层主要由泥质粉砂层、褐煤层、炭泥层等组成,成岩性差,所以较为实用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)来分析沉积物及化石的元素含量组成。同时此种方法具有分析速度快,干扰少、灵敏度高,线性范围宽,能够对常量元素和微量元素进行同时测定,能适应复杂体系的微量或痕量元素分析等明显的优势,在生物及地质环境样品分析等领域中得到了广泛的应用。如用于区域土壤中的化学元素组成和生物体微量元素含量,均取得较好的效果[4][5]。

2. 实验部分

2.1. 仪器及工作参数

本分析测试是由北京市理化分析测试中心完成的,所使用仪器电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)(厂家:Thermo,型号:iCAP-6300)。优化后的仪器参数为:泵速:50 rpm;辅助气流量:0.5 L/min;射频(RF)功率:1150 Watt;垂直观测高度:12 mm。选用的分析元素波长(nm):Al 396.1, As 193.7, Ba 455.4, Ca 393.3, Co 238.8, Cr 267.7, Cu 324.7, Fe 259.9, K 766.4, Li 670.7, Mg 280.2, Mn 257.6, Na 588.9, Ni 221.6, P 177.4, Pb 220.3, Sr 407.7, Y 371.0, Zn 213.8。

2.2. 试剂

HCl、HNO₃、HF 和 HClO₄ 为优级纯,实验用水为二次去离子水。

2.3. 野外采样

在昭通市昭阳区太平办事处太平村水塘坝野外含化石地层附近开采出一套新鲜剖面,所出露的含化石层按照岩性组成、生物埋藏组合等特征将剖面分为11层,并分别自上而下逐层采样置入封口塑料袋内,野外采集的每件样品量为5~10 g。其中,对上面9层含化石较为分散的层位取样数较少,每层在层界附近采样1件,但对10、11层含化石数量较为丰富的层位增加采样数,每层2件。整套剖面共采集样品16件,其中既有化石围岩样品,也有动物骨骼样品,还有褐煤样品。经实验室依程序逐步处理后,用于进行分析(表1)。

2.4. 样品前处理及实验方法

1) 称取0.5 g(精确到0.0001 g)样品于聚四氟乙烯微波消解罐内,加入3 mL 硝酸,3 mL 盐酸,2 mL 氢氟酸,加盖浸泡30min,按下列微波消解程序进行消解。消解后,试液全部转入25.0 mL 容量瓶中,以二次去离子水少量多次洗涤微波消解罐,洗液合并至容量瓶中并定容至刻度,混匀备用,同时作试剂空白。上清液用于测试As、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、P、Pb、Zn元素。

2) 将混匀后的消解液取出10mL于聚四氟乙烯烧杯中,加入2 mL 混酸(硝酸:高氯酸=1:1)电热板加热消解至试液澄清。加热赶酸至消解液剩余0.5~1 mL左右,冷却至室温,试液转入10 mL 容量瓶中,以二次去离子水少量多次洗涤烧杯,洗液合并至容量瓶中并定容至刻度,混匀备用,同时作试剂空白。此溶液用于测试Al、Ba、Ca、Fe、K、Li、Mg、Na、Sr、Y元素。

微波消解程序为:室温5min升温至80℃,保持3 min;4 min升温至120℃,保持3 min;4 min升温至160℃,保持3 min;2 min升温至180℃,保持15 min,自然降至室温。

所用于分析元素的波长分别为:Al 396.1 nm; As 193.7 nm; Ba 455.4 nm; Ca 393.3 nm; Co 238.8 nm;

Table 1. Biostratigraphical column and sampling position of latest Miocene in Zhaotong, Yunnan Province
表 1. 云南昭通中新世晚期生物地层柱状图及样品位置

地层柱状图	分层及厚度(m)	样品编号及位置	岩性描述
全新统	>0.3		浮土层: 黄褐色土壤、亚沙土, 偶夹玄武岩细角砾。
昭 通 组	第①层 3.7 m	ZTS-1	粘土层: 分两个沉积旋回。上旋回为灰白色中厚层状粘土, 具蜡状光泽, 可塑性良好, 有不明显的平行层理, 底部为 4~5 cm 的砂砾层, 砾石成分为玄武岩, 砾径 2~4 mm, 分选较好。下旋回上部为灰白色薄层状粘土, 平行层理发育; 中部为灰白色薄层状粉砂质粘土, 具平行层理; 下部为灰白色中层粉砂岩, 层面平整。底部为 4~5 cm 厚的褐黄色细砂砾层及 3~4 cm 厚深灰色层, 二者均含螺壳。
	第②层 2.5 m	ZTS-2	粉砂层: 主要为浅灰色中厚层状粉砂, 中间夹 2~4 cm 厚的细砾石层, 砾石成分为玄武岩, 砾径 2~20 mm, 无分选, 无定向。顶部为 25 cm 厚的浅灰色层纹状粘土, 发育平行层理。中部显断续平行层纹, 下部沿层面夹两层螺壳碎片, 底部呈微薄层状, 风化后易为碎片。
	第③层 0~7.0 m	ZTS-3	砾石层: 该层厚度变化较大, 砾石主要为玄武岩, 偶有玛瑙和石英, 称次菱角状, 砾径 2~7 cm, 无分选, 无定向。
	第④层 0~1.7 m	ZTS-4	粉砂层: 该层局部地区出现, 由北至南逐渐尖灭。岩性为灰绿色似层状粉砂, 不显层理。中部夹细砾和螺壳, 砾石主要为玄武岩, 偶有玛瑙和石英, 称菱角-次菱角状, 砾径 3~20 mm, 无分选, 无定向。
	第⑤层 0~0.9 m	ZTS-5	含砾粉砂层: 该层在化石点北端厚, 南端薄至尖灭。岩性为深褐色似层状含砾粉砂, 具平行层理, 砾石主要为玄武岩, 偶有少量玛瑙和石英, 砾径 5~40 mm, 无分选, 少量砾石长轴平行层面。含较多碳化木、螺壳和鸟及哺乳动物化石, 是主要含化石层。
	第⑥层 0.4 m	ZTS-6-1	粉砂层: 该层比较稳定, 分布较广。岩性为灰褐色中厚层状粉砂, 平行层理发育, 上部含少量破碎螺壳, 下部含较多完整的细小螺壳(大小 3 mm 左右)。
	第⑦层 1.2 m	ZTS-7	
	第⑧层 1.7 m	ZTS-8	褐煤层: 该层比较稳定, 为褐色褐煤, 质轻, 具平行层理和小型波状层理。含较多碳化木及植物化石。
	第⑨层 0.4 m	ZTS-9	炭泥层: 该层比较稳定, 为黑褐色微薄层状泥炭, 平行层理发育, 偶含玄武岩砾石, 砾石呈菱角状, 砾径 10~30 mm, 分布随机, 无定向, 无分选。
	第⑩层 3.4 m	ZTS-10-1 ZTS-10-2	泥质粉砂层: 该层比较稳定, 为褐色厚层状泥质粉砂, 具一定可塑性, 不显层理。
	第⑪层 >5.0 m	ZTS-11-5\ZTS-11-6 ZTS-11-11\ZTS11-12	含砾泥质粉砂层: 该层是主要的化石层。岩性为褐色、深褐色含砾泥质粉砂, 含较多螺化石, 螺壳多已破碎, 常以砾石相伴。砾石主要为玄武岩, 称次菱角-次圆状, 砾径 3~30 mm, 无分选, 无定向。含鸟及哺乳动物化石。
			褐煤层: 是主要的煤矿层, 为褐色厚层状褐煤, 质轻, 具平行层理和小型波状层理。含较多的碳化及植物化石。

Cr 267.7 nm; Cu 324.7 nm; Fe 259.9 nm; K 766.4 nm; Li 670.7; Mg 280.2 nm; Mn 257.6 nm; Na 588.9 nm; Ni 221.6 nm; P 177.4 nm; Pb 220.3 nm; Sr 407.7 nm; Y 371.0 nm; Zn 213.8 nm。

3. 结果与讨论

3.1. 样品测试结果与讨论

用于测试的野外采样的 16 个样品, 采用本实验所建立的分析方法对 19 种元素进行测定, 分别是: As、Co、Cr、Cu、Mn、Ni、P、Pb、Zn、Al、Ba、Ca、Fe、K、Li、Mg、Na、Sr、Y, 测试结果见表 2。通过对测试结果中生命元素含量的横纵向比较, 认为下述元素的含量与正常含量相比存在异常, 特对这些元素结合生物体、生存及埋藏环境进行比较分析。

砷(As)元素、铬(Cr)元素在昭通组的剖面中含量的变化表现为动物化石中砷含量较低, 而围岩中的含量则较高, 特别是在 8 层的泥炭层和 11 层的褐煤中的含量明显增加。

砷(As)元素是一种地壳中含量极低的元素, 在宇宙体中含量较高, 它在地壳土壤中含量的高低直接影响到生物体的健康并危及环境。根据表生作用中砷(As)元素的地球化学特征, 在各类土壤中都有一定的含量, 但有 30% 的土壤中的含量低于 5×10^{-6} [1], 在无沉积覆盖的地壳上砷(As)元素的平均含量为 1.9×10^{-6} , 沉积砂岩中砷(As)元素的含量为 1.0×10^{-6} 。在对样品的分析中, 样品 ZTS-1 和样品 ZTS-11-6 褐煤中砷(As)元素的含量较高, 作为近地表样品 ZTS-1 中高含量可能是地表长期风化淋滤沉积的结果, 而褐煤层中含量较高可能源于大量有机物吸附或凝聚而成[6]。在贝壳和象牙骨骼中砷(As)元素的含量都在本

Table 2. Composition of chemical elements in fossils and wall rocks from the upper Miocene in Zhaotong, Yunnan Province (10^{-6} g/g)

表 2. 云南昭通中新世晚期生物地层化石与围岩样品的测试数据对照表(单位: 10^{-6})

样品名称	As	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Co	Li	Mn	Ba	Sr	Y	P	K	Na	Fe	Al	Ca	Mg
ZTS-1	22.9	38.9	197	209	22.8	255	60.7	18.7	1149	1131	157	40.8	6972	8417	6410	126,569	55,185	35,766	5273
ZTS-2	3.56	36.9	56.5	30.3	9.36	88.7	8.67	5.97	317	169	136	18.5	989	6089	234	16,652	19,868	237,768	4857
ZTS-3	8.16	85.2	81.8	36.4	34.1	155	23.8	15.3	385	226	61.3	20.9	1309	3412	1514	96,176	41,619	15,807	5585
ZTS-4	6.41	45.7	53.2	38.6	19.1	83.8	14.7	11.1	327	170	122	20.6	312	8123	381	19,555	30,381	199,110	6485
ZTS-5	4.58	71.4	71.9	48.3	28.5	132	19.9	8.82	439	176	76.9	19.6	512	13,846	443	31,970	43,972	98,904	7663
ZTS-6-1	9.50	55.6	80.5	53.0	12.1	124	20.9	11.2	322	215	126	25.5	715	9265	467	27,195	31,721	162,788	6798
ZTS-6-2	<2.0	3.45	2.54	1.71	4.59	4.97	2.13	<0.05	41.4	127	223	1.58	111	58.4	352	2191	983	416,960	152.0
ZTS-7	6.06	15.1	30.4	27.5	5.66	54.3	7.89	2.47	180	32.1	5.78	<1.5	666	1558	440	14,892	2151	786	769
ZTS-8	14.0	90.2	95.5	43.3	43.7	131	20.7	38.8	301	145	48.9	13.4	402	3849	922	34,601	29,225	17,007	2174
ZTS-9	10.1	63.8	69.6	40.2	38.2	140	24.6	25.6	641	144	54.4	22.2	795	6241	642	32,017	24,007	25,235	2899
ZTS-10-1	8.78	41.2	64.8	25.9	79.3	69.4	22.9	18.7	268	237	68.8	18.3	736	4099	416	19,483	28,793	20,973	3467
ZTS-10-2	<2.0	1.77	1.79	1.80	3.20	3.79	1.96	<0.05	29.9	151	154	1.84	98.2	36.2	340	1085	622	306,356	80.5
ZTS-11-5	<2.0	4.59	0.74	<0.5	2.62	119	<0.5	0.25	620	1851	665	2290	109,017	64.9	1199	3706	946	219,972	637
ZTS-11-11	<2.0	5.25	1.18	2.02	4.59	96.8	2.57	0.83	483	1186	645	930	112,888	85.5	1688	4760	720	207,588	957
ZTS-11-6	18.7	99.1	133	70.8	43.5	174	33.6	50.8	334	248	65.5	52.5	2074	3523	430	34,225	43,542	17,757	4107
ZTS-11-12	8.05	40.9	55.7	23.8	19.5	19.3	5.45	18.4	112	106	35.8	3.64	114	4725	Na	16,801	8333	8193	1540
现生动物平均含量	0.2	0.07	2.4	0.8	2.0	160	0.03	<0.02	<1.0	0.75	14	-	17,000-44,000	>0.74	0.05	0.016	4-100	0.02-8.5	1000

方法的检测限以下,一方面可能是牙齿和骨骼的结构致密,不易吸附;另一主要原因则是沉积时间较短的原因所致。综合分析,昭通中新世晚期环境中砷(As)元素的含量较高,但生物体骨骼中砷(As)元素的含量极低,经推测有理由排除生物体生活时未受到高含量砷(As)元素对身体所造成的影响。

铬(Cr)元素是维持生命所必需的微量元素之一。在地壳中的平均丰度 120×10^{-6} ,沉积型砂岩中的含量增加明显,约为 3500×10^{-6} ,而在碳酸盐中降低,约为 1100×10^{-6} 。陆生动物体内的平均含量极低,约 0.07×10^{-6} ,而在水生(特别海生)动物体内的平均含量略高,约为 $0.2 - 1 \times 10^{-6}$ [7]。一般而言,铬元素在沉积岩的页岩和磷块岩中含量较高[6],泥岩又高于砂岩中。在富含有机质的黑色页岩中往往富集铬元素,可能与有机质富集作用和黑色页岩形成时的还原环境有关。自上而下采集的样品中,岩石样品中铬元素含量较为一致,在 2 个数量级范围之内变化,而且明显低于地壳内沉积砂岩的平均含量,说明昭通组中铬元素含量较低。但是化石样品中铬元素含量相比陆生动物平均含量而言,则高出 2 个数量级,虽然相比围岩略低,但在作为生命体的化石样品中的含量则是很高。综合分析比较化石样品中铬元素与围岩中的含量,围岩中低铬反映早期的沉积环境中铬含量亦即很低,而化石中高含量的铬元素很大程度是来自于生存时期通过食物等介质进行体内,若是后期的吸附交代,首先需要母岩中的含量较高,其次大量有机质亦促成其吸附,而对比以碳酸盐为主的贝壳类、象牙类和以磷酸盐为主的龟壳类化石样品对铬元素的选择性吸收并未表现出明显差异,所以,化石中的高铬应是生物生前摄入体内所残留。

钙(Ca)元素是动物骨骼中最重要的元素,也是含量较高的金属元素。其含量与动物的种类、不同部位等差异有关。一般而言,愈是坚硬的骨骼,含钙量就愈高,密度小的骨骼含钙量比较低,牙齿中钙的含量常高于骨骼[8]。样品的分析结果中显示,钙元素的含量在化石中普遍偏高,范围在 20%~41%之间,在褐煤层中的含量极低,其次,骨骼化石中钙的含量高于牙齿中的钙含量,与现生生物钙的赋存截然相反,表明钙元素在这些动物化石中的沉积发生在动物硬体骨骼石化形成过程中,而非活着时期的真实含量反映。

锶(Sr)元素在化石里的含量极高。锶在地壳里的平均丰度是 400×10^{-6} ,沉积砂岩类中的含量为 20×10^{-6} ,一般腐植煤中的平均含量为 $20 - 50 \times 10^{-6}$,碳酸盐中的含量相比较,约 600×10^{-6} [7]。锶元素的分布与钙元素的关系密切,常常通过类质同象置换碳酸盐岩中的钙而富集,沉积岩中的锶和钙多呈正相关关系,此外,锶元素易被粘土矿物吸附,故而在泥岩、页岩中的含量较高[9]。陆生动物的正常含量应在 14×10^{-6} ,对比分析结果,在贝壳、乌龟体板和象牙中的含量明显偏高,在褐煤、泥炭中的锶含量较接近砂岩或略微低于砂岩,也明显高于地壳中的平均含量。锶作为亲骨性元素,进入动物体内很容易沉积在骨骼中,并不断富集[10]。一般而言,在动物的生长过程中,骨骼中钙含量愈高,则锶的沉积愈慢,含量就愈少[8],结合前面钙含量的分布特征和范围,说明这些动物在生存期间骨骼中的钙含量并非高异常,是通过死亡后石化过程进入骨骼中,所以样品显示的锶含量明显偏高应该源于生存期间的长期吸附累计,如来自于水源或植被,而死亡之后后期的沉积作用相对较弱。因此,骨骼中大部分较高含量的锶元素是动物通过饮水或食物等渠道沉积在骨骼中,而一小部分锶元素是在动物死亡后化石形成过程中,渗入到骨骼中,在石化过程中产生的锶元素沉积相对较弱。

镱(Y)元素是一类稀土元素,在地壳中的丰度为 26×10^{-6} ,沉积型砂岩中的平均含量为 40×10^{-6} ,碳酸盐中含量略低,为 30×10^{-6} [7]。在常见的土壤、水系沉积物和岩石中镱元素的含量变化为 $22 - 62 \times 10^{-6}$ [11],样品分析结果反映出剖面从上至下围岩中含量变化均在 $3.64 - 40.8 \times 10^{-6}$ 之间,唯独贝壳中镱元素的含量极低,分别为 1.58×10^{-6} 和 1.84×10^{-6} ,分析是淡水无脊椎动物死亡以后贝壳中仅有的有机物大量降解,从而残留物以碳酸钙为主,所以后期吸附能力较差,导致镱元素的含量极低。而在乌龟壳和象牙等样品中的含量则远大于剖面不同位置围岩中的含量,达到 $930 - 2290 \times 10^{-6}$,这种高含量很大程度上来自于动物死亡后骨骼有机质中亲骨元素吸附作用的结果。

铁(Fe)元素在昭通组采样的剖面中自上而下的围岩中含量均较高, 约为 1.4%~12.7%, 只有化石中铁含量较低, 仅为 $720 - 983 \times 10^{-6}$, 略高于地球上动物平均含量 160×10^{-6} [7], 更接近于现生动物骨骼中几十到几百个 10^{-6} 数量级的含量。铁元素在样品中含量高低有助于探讨当时的沉积环境, 在气候比较湿润和植被茂盛的环境中, 土壤中含量较高的铁元素(Fe^{2+})会随水分迁移渗入到被覆盖的动物骨骼中, 遇到空气、土壤和骨骼中的氧气时, Fe^{2+} 后会被氧化成为 Fe^{3+} 的氧化铁, 而氧化铁不溶于水, 就沉积在骨骼中, 后来随着气候的变迁和环境的改变, 气候逐渐变得干燥, Fe^{2+} 被氧化就会变得缓慢甚至停止, 于是骨骼中铁的沉积就结束[8]。所以, 骨骼中铁的来源除了极少量是自身含有外, 更多是通过后期沉积形成, 同时过高的铁含量也往往反映动物保存环境经历了环境气候比较温暖潮湿到逐渐变干燥的过程。

锌(Zn)元素在现代陆生动物中的平均含量是 160×10^{-6} , 而在地壳中的含量是 87×10^{-6} , 其中沉积型砂岩中的含量是 16×10^{-6} , 碳酸盐中含量为 20×10^{-6} [7]。从样品分析的数据分析, 自上而下所采集的样品中锌元素的含量除了第 1 层中近地表淋滤作用较高外, 达到了 255×10^{-6} 。其他的岩石样品中含量均略高于砂岩中的平均含量, 唯有动物贝壳中的含量极低, 约为 $3.79 - 4.97 \times 10^{-6}$, 可能是螺壳类生物生存时间太短, 来自水体的锌离子未过多交换进入体内, 而乌龟骨骼和象牙中锌元素的含量相比略高, 表明是生存时期通过植物慢慢摄入体内, 经过不断吸收沉积进入到骨骼中。如果是来自于动物死亡后的吸收沉积, 则应表现为贝壳和骨骼中均显示锌元素的高含量, 实则不然。

3.2. 昭通盆地化石层的古环境讨论

在对沉积盆地古环境分析过程中, 化石的保存是十分重要的证据, 特别是不同类型的生物化石的完好保留, 借此更能客观推断和恢复史前生物所发生的环境变化。在已发掘的含化石层中, 经初步鉴定有长鼻类、灵长类、食肉类、偶蹄类、奇蹄类、啮齿类、兔形类、鸟类及鱼类等脊椎动物化石, 它们中除了鱼类是生活在河湖、湖沼环境的淡水类型外, 其他都是陆生动物。尤其在发掘现场有大型长鼻目昭通剑齿象化石骨架完好地保存, 说明剑齿象死亡后埋藏环境的水体较浅, 水动力较弱, 如此才使得骨骼未发生搬运而完整埋藏堆积。

在化石层中, 特别是大量鸟类骨骼化石的发现, 对于恢复古环境而言, 可以提供细微而有效的证据信息。一方面鸟类化石通常只有在水动力较弱的沉积环境下才能较好保存形成, 如通常在河湖相、沼泽相中会有鸟类化石发现; 另一方面鸟类的生存对周围水环境的依赖性很强, 凡是有鸟类化石埋藏保存, 预示该地的古环境是与较弱的水动力环境分不开的。所以, 鸟类化石保存是反映史前生存环境的敏感指示物。化石层出土的鸟类化石中, 经鉴定有大量雁形目鸭科成员和潜鸟目、鸕鷀目等游禽的存在, 它们多栖息生活于淡水河流或湖泊、沼泽区, 很少生活在深水地带; 鸡形目作为地栖型鸟类, 通常栖息于漫生的草莽和荫蔽的植物灌丛间的低山和丘陵地带; 还有诸如鸛形目、鹇形目、鹤形目、鸨形目等涉禽类, 主要生活在内陆开阔的湖泊等地[12]。

此外, 还发现大量的无脊椎动物化石, 如腹足类的田螺化石 *Viviparus tingi*、*Viviparus chutsingensis*、*Tulotomoides kwangsiensis*、*parafassanelus* sp.、*Asthenotonia* sp.、*Bradybaena* sp. [13], 新生代的腹足螺类, 在中国大陆主要为淡水和陆上生活螺类, 海螺仅在台湾可见。密集成层的介形虫类化石, 如斗星介 *Cypridopsis* sp.、玻璃介 *Candona* sp.、球星介 *Cyclocypris*、达尔文介 *Darwinula* [13]等。虽然介形虫生活领域广泛, 如海洋、湖泊、池塘、沼泽、溪流等各类水域中, 其中陆地湖泊、河流、池塘等也是介形虫分布点, 尤其在中国, 新生代陆相沉积地层中多见。

综合生物地球化学特征及化石层古沉积环境的分析, 认为昭通中新世陆相的含煤层沉积环境, 应该属于流水较弱的湖泊沼泽地带, 以及滨湖相环境, 同时气候条件还经历了由较温暖潮湿到逐渐变干燥的过程。

4. 结论

通过上述对水塘坝中新世晚期昭通组剖面 11 个含化石层中的 16 件样品进行电感耦合等离子体原子发射光谱法分析, 以及根据分析后元素含量组成与沉积环境的相关推断, 得出如下结论:

1) 昭通地区中新世晚期大量生物埋藏的原因极可能是这些动物长期将铬、锶元素摄入体内并累积, 导致动物正常的生理机能发生紊乱, 故而在此大规模的埋藏保存。

2) 依据化石层中元素的化学组成特征和沉积环境的分析, 认为该地区中新世晚期气候条件曾经历了由较温暖潮湿向逐渐干燥转变的过程, 从而有利于化石的形成和保存。

致 谢

本项工作的开展得到云南省考古研究所及昭通市相关部门的大力支持和协助。在野外工作期间, 参与发掘和标本清洗登记的团队成员为此都付出了大量的辛苦劳动, 同时各项基金项目的资助使得工作如期实施。在此一并致以谢意。

基金项目

北京市自然科学基金(编号: 5092010, 5123043)、2010 年北京市新世纪百千万人才工程培养项目、云南省自然科学基金项目(编号: 2010CC010)和美国国家科学基金(National Science Foundation of USA)(BCS 03211893, 1035897)联合资助。。

参考文献 (References)

- [1] 张景华, 周瑶琪等 (1993) 自贡恐龙骨骼 U 超高异常的发现及其意义. *科学通报*, **16**, 1500-1501.
- [2] 王毅民, 朱节清, 李佩贤 (1994) 恐龙蛋壳化石的痕量元素分布特征. *科学通报*, **21**, 2014.
- [3] 陈友红, 朱节清, 王晓红, 王毅民 (1997) 恐龙蛋壳化石微区的元素组成与分布的质子探针研究. *核技术*, **3**, 158-162.
- [4] 李清彩, 赵庆令, 孙宁, 武殿喜 (2008) 电感耦合等离子体发射光谱测定区域地球化学样品中 Cu、Mo、Pb、Sn、W、Zn 元素. *分析实验室*, **12**, 317-319.
- [5] 郭岚, 王蕊, 柳英霞, 万筱芬 (2011) 电感耦合等离子体 - 原子发射光谱法同时不同种类蜂蜜中的 20 种微量元素. *分析科学学报*, **4**, 530-532.
- [6] 雒昆利, 苏文智, 杜美利, 雷福尧 (1995) 南秦岭早古生代石煤的微量元素. *西安矿业学院学报*, **2**, 131-135.
- [7] [俄]罗曼克维奇著, 温春奇译 (1992) 现代生物圈中生命物质的生物地球化学. *国外地质*, **4**, 38-45.
- [8] 杨化中, 宋世战 (1996) 动物化石中的元素分析与研究. *核技术*, **3**, 186-189.
- [9] 李奎, 张玉光, 蔡开基 (1999) 四川盆地侏罗纪恐龙骨骼及红层的微量元素组合特征. 地质出版社, 北京.
- [10] 宋世战, 杨化中, 谷祖刚, 雷桂林, 水永清, 王连宾 (1998) “黄河古象”门齿化石元素分析. *科学通报*, **18**, 1438.
- [11] 徐国栋, 葛建华, 金斌, 程江, 杜谷, 董俊 (2011) X 射线荧光光谱法与电感耦合等离子体 - 原子发射光谱法联用测定土壤、水系沉积物、岩石中 21 种主、次和痕量元素. *光谱实验室*, **1**, 1-6.
- [12] 张玉光, 吉学平, Jablonski, N.G., Su, D.F., 王晓斌, 杨馨, 李志恒, 付丽娅 (2013) 云南昭通中新世末期鸟类动物群的组成及其时代意义. *古生物学报*, **3**, 281-287.
- [13] 沈玉蔚 (1981) 试论云南昭通组的地质时代. *煤田地质与勘探*, **1**, 1-14.