



扬子区寒武系底部含磷岩系沉积特征对比与成矿规律

曹金鑫^{1,2}, 陈吉艳^{1,2}, 汪龙波^{1,2}

1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;
2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025

摘 要: 扬子区寒武系底部含磷岩系主要蕴藏于梅树村期地层中, 因沉积相类型多样, 含磷岩系复杂, 沉积厚度变化大, 含大量磷矿资源而具有重要的研究价值. 对研究区 13 条含磷岩系剖面进行野外勘察和大区域横纵向综合对比研究, 结果表明: 含磷岩系沉积层序自下而上显示颗粒由粗变细, 层理类型由交错层理、波状层理及粒序状层理转为平行层理, 生物屑减少至消失; 自西向东沉积微相大致由浅水缓坡、深水缓坡过渡为大陆坡、深海; 碳酸盐岩、硅质岩、磷块岩及部分粉砂质黏土岩过渡为硅质岩、碳质页岩、结核状磷块岩. 沉积微相对磷块岩的形成具有一定的控制作用. 云南梅树村组中谊村段下段、贵州织金戈仲伍组下段及贵州清镇桃子冲组下段含磷岩系为下矿层; 梅树村组中谊村段上段、戈仲伍组上段及桃子冲组上段含磷岩系为上矿层; 贵州金沙、习水、遵义、开阳、镇远等地牛蹄塘组, 贵州天柱、铜仁的留茶坡组与江西上饶、浙江江山荷塘组及江苏南京幕府山组含磷岩系为顶部矿层.
关键词: 寒武系; 含磷岩系; 沉积特征; 矿层; 扬子区

SEDIMENTARY CHARACTERISTICS AND METALLOGENIC REGULARITY OF PHOSPHORIC ROCK SERIES AT THE BOTTOM OF CAMBRIAN STRATA IN YANGTZE REGION

CAO Jin-xin^{1,2}, CHEN Ji-yan^{1,2}, WANG Long-bo^{1,2}

1. School of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
2. Key Laboratory for Karst Georesources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: The phosphoric rock series at the bottom of Cambrian in Yangtze region are mainly contained in the strata of Meishucunian Age. It is worth studying for the various sedimentary facies, complex phosphoric rock series, great variation of sedimentary thickness and large amount of phosphate resources. Through field survey and comparison study of 13 phosphoric rock series profiles in the area, the sedimentary sequence show that, from bottom to top, the grains change from coarse to fine, from cross bedding, wave bedding and graded bedding to parallel bedding, and the bioclasts decrease to disappear; From west to east, the sedimentary microfacies generally change from shallow gentle slope and deepwater gentle slope to continental slope and deep sea, which control the formation of phosphorites to a certain extent. The carbonate rocks, siliceous rock, phosphorites and some silty clay rock transform into siliceous rocks, carbonaceous shale and nodular phosphorites. The phosphoric rock series in the lower section of Zhongyicun

收稿日期: 2021-03-30; 修回日期: 2021-06-14. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于同步辐射 XAFS 实验技术对贵州织金含磷矿床稀土元素赋存特征研究”(51164004).

作者简介: 曹金鑫 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为沉积矿床及磷矿床地质, 通信地址 贵州省贵州大学资源与环境工程学院, E-mail// JXCao1996@126.com

通信作者: 陈吉艳 (1975—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为磷矿沉积及其地球化学特征, 通信地址 贵州省贵州大学资源与环境工程学院, E-mail// cgy2010@163.com

Member of Meishucun Formation in Yunnan, the lower member of Gezhongwu Formation in Zhijin and lower member of Taozichong Formation in Qingzhen of Guizhou are the lower ore beds; while the phosphoric rock series in the upper section of Zhongyicun Member of Meishucun Formation, the upper member of Gezhongwu Formation and upper member of Taozichong Formation are the upper ore beds. The phosphoric rock series in the Niutitang Formation in Jinsha, Xishui, Zunyi, Kaiyang and Zhenyuan of Guizhou, the Liuchapo Formation in Tianzhu and Tongren of Guizhou, the Hetang Formation in Shangrao of Jiangxi and Jiangshan of Zhejiang, and the Mufushan Formation in Nanjing of Jiangsu are the top ore beds.

Key words: Cambrian; phosphoric rock series; sedimentary characteristics; ore bed; Yangtze region

扬子区梅树村期形成了一系列的磷矿，主要分布在靠康滇列岛的东侧，呈明显的方向性展布，沿着扬子地块西缘形成一条长约 800 km，宽约 40~60 km 的南北向成矿带^[1]，包括云南昆阳^[2-3]、东川^[4]，四川雷波^[5]、马边^[6]，贵州织金^[7-10]等，形成 5 个成磷区，即王家湾-渔户村区、东川-德泽区、织金区、峨眉山区、雷波-马边区，其中以王家湾-渔户村区、东川-德泽区、

雷波-马边为主要成磷区。王家湾-渔户村成磷区边缘及其之间均为较浅水的水下隆起区，如其北缘为曲靖-嵩明近东西向水下隆起呈障壁岛，构成了一个有利于磷质聚集的半局限盆地^[1]。东川-德泽区以及雷波-马边区的沉降幅度大于 200 m，古地理控制易在此地形成大规模磷矿^[11]。

水动力较强的浅水环境，生物繁盛，由于水动力扰

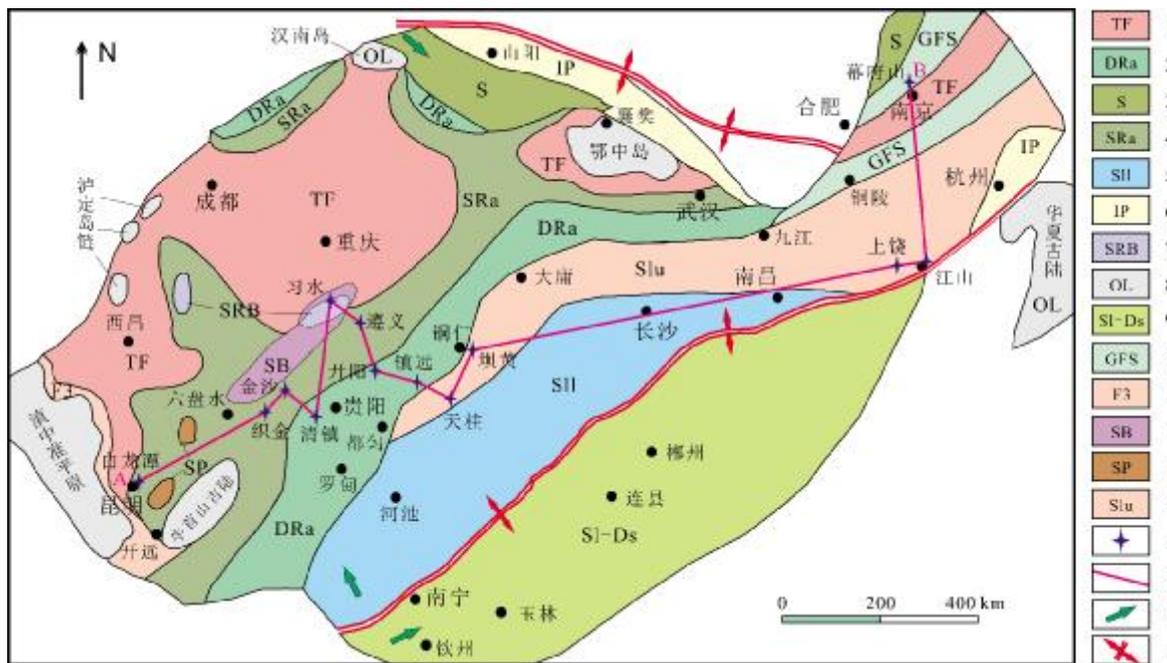


图 1 扬子区早寒武世沉积古地理图

(据文献[23]修改)

Fig. 1 Early Cambrian sedimentary paleogeographic map of the Yangtze region

(Modified from Reference [23])

- 1—潮坪(tidal flat); 2—深水缓坡(deepwater gentle slope); 3—台内浅滩(intra-platform shoal); 4—浅水缓坡(shallow gentle slope); 5—下斜坡(lower slope); 6—孤立台地(isolated platform); 7—浅水缓坡浅滩(shallow-water gentle slope and shallow beach); 8—古陆(ancient continent); 9—大陆坡-深海(continental slope-deep sea); 10—缓斜坡(gentle slope); 11—前滨(foreshore); 12—风暴浅滩(storm shoal); 13—陆棚(continental shelf); 14—上斜坡(upper slope); 15—研究剖面位置(location of the study section); 16—剖面线(section line); 17—海侵方向(transgressive direction); 18—拉张板块边界(boundary of pull-apart plate)

动改造,容易使磷富集,而水动力相对弱的浅水洼地,虽然形成的含磷岩系厚度大,但磷含量偏低^[12]. 磷块岩成矿与沉积微相具有一定的关系. 孟永龙^[13]对白龙潭磷矿的地质特征进行了探讨,认为白龙潭磷矿为典型的钙硅质磷矿. 杨瑞东等^[14]探讨了黔中磷块岩沉积特征,认为潮间至潮下高能环境是磷块岩形成的主要环境. 谢宏^[15]对铜仁坝黄磷矿进行了研究,认为磷块岩是大陆边缘海盆较深水沉积产物. Anouar 等^[16-17]对磷矿中的同位素、稀土元素进行了研究,认为磷矿形成于缺氧的半干旱半湿润气候;前人^[18-20]还针对贵州磷矿中稀土元素的赋存状态特征进行了研究. 雷加锦等^[21]对扬子东区磷结核进行研究,认为磷结核与微生物密

切相关,微生物是使磷淀积的重要营力. 贺瑾瑞等^[22]对比研究了云南白登浅海相磷块岩和青龙峭陆相磷块岩. 扬子区磷矿床前人在沉积特征、成矿模式等众多方面形成了较多的资料成果,但整个扬子区寒武系底部含磷岩系地层及沉积特征横纵向综合对比报道较少,仅限于大区域横向或小范围纵向的对比研究,因此,作者以形成大型磷矿的扬子西区为主要研究区,以形成磷结核的扬子中、东区作为对比,选取扬子区寒武系底部含磷岩系 13 条较典型的剖面进行调查采样,并从含磷地层沉积特征着手,对比分析不同地区含磷岩系异同,为了解该类型矿床区域成矿规律提供科学依据.

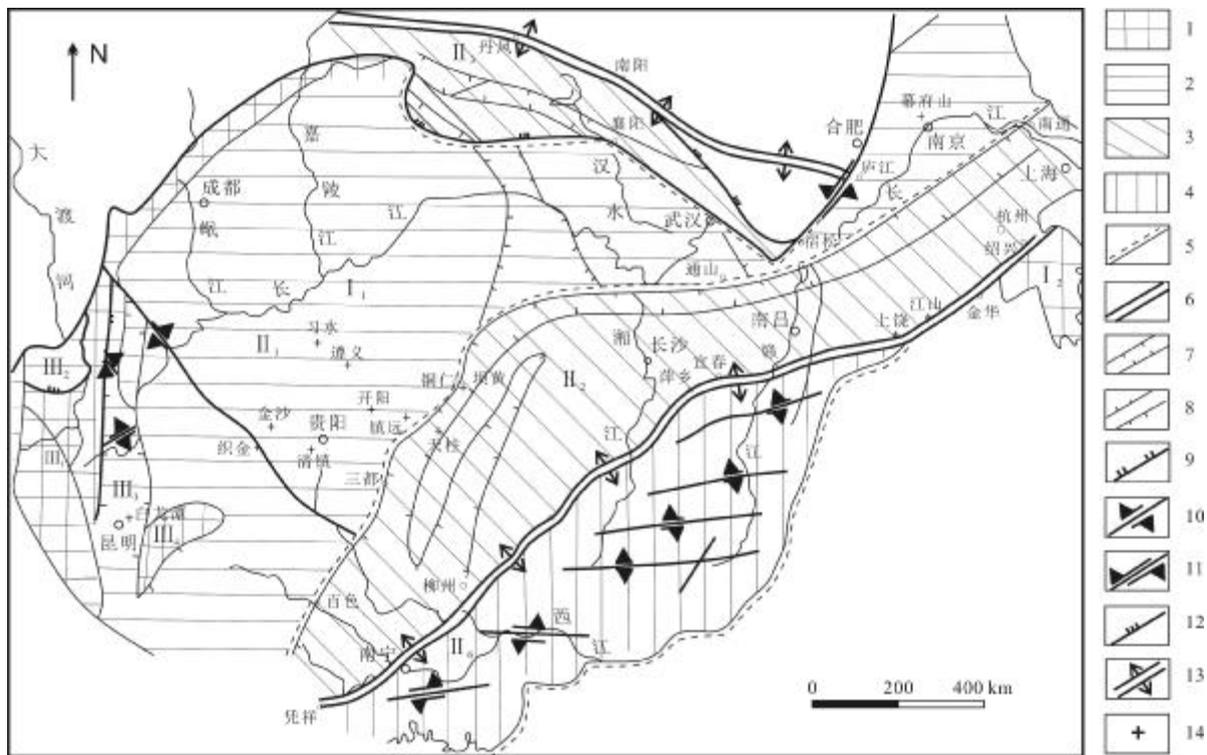


图 2 扬子区早寒武世构造略图
(据文献[25]修改)

Fig. 2 Early Cambrian tectonic sketch map of the Yangtze region
(Modified from Reference [25])

1—克拉通古陆区 (craton paleocontinent); 2—克拉通沉积区 (craton sedimentary area); 3—大陆边缘带 (continental margin); 4—初始洋盆 (initial oceanic basin); 5—II 级构造单元界线 (boundary of second-order tectonic unit); 6—I 级构造单元界线 (boundary of first-order tectonic unit); 7—地堑 (graben); 8—地垒 (horst); 9—逆断层 (reverse fault); 10—走滑断层、转换断层 (strike-slip fault, transform fault); 11—中生代陆内转换断层 (Mesozoic intracontinental transform fault); 12—中生代推覆断层 (Mesozoic nappe fault); 13—扩张中心 (spreading center); 14—采样点 (sampling site); I₁—扬子陆块 (Yangtze block); I₂—华夏陆块 (Cathaysian block); II₁—扬子克拉通沉积区 (sedimentary area of Yangtze craton); II₂—扬子东南大陆边缘 (continental margin of southeast Yangtze block); II₃—扬子北部大陆边缘 (continental margin of northern Yangtze block); II₄—华南初始洋盆 (initial oceanic basin of South China Plate); III₁—川滇台隆 (Sichuan-Yunnan paleohigh); III₂—九龙门-锦屏物拉槽 (Jiulongmen-Jinping aulacogen); III₃—昭觉-昆明台凹 (Zhaojue-Kunming concave); III₄—牛首山台隆 (Niushoushan paleohigh)

1 区域地质概况

中国南方寒武纪构造背景属于加里东构造旋回(包括震旦纪)的中期,基本上是震旦纪构造发展的延续,主要构造单元均具明显的继承性.在加里东时期,中国南方由扬子板块和华夏板块两大板块组成,两大板块以江山-绍兴转换断层及其控制的华南盆地为界,华南盆地是在晋宁晚期残留盆地背景上发展起来的^[23].扬子区早寒武世梅树村期早期,扬子地台为一屹立于大洋盆地中的台地(克拉通),四周分别为滇青藏海盆、川西海盆、秦岭海槽和南华海槽.在其西南边缘有一些零星孤立的岛链,整个地势呈现出西高东低的局势,由西部海岛或隆起向东经海湾—台地斜坡渐入盆地.西部水浅,气候温暖干燥,为局限至半局限海湾的潮坪环境,又面临东南而来的洋流^[24],为磷质来源、生物衍生、成磷聚集、成矿创造了极为有利的条件,从而形成一套含磷碳酸盐沉积,其沉积古地理图见图 1.

在寒武纪时期,扬子古板块西缘因受康滇古陆和龙门山岛链隆升的影响,整个板块显示西高东低台地相的沉积特征(如图 2).在此时期,根据活动构造的性质可以将中国南方划分为华南裂谷区(包括华南盆地、华夏西北大陆边缘和扬子东南大陆边缘)、扬子陆块北缘裂谷带、扬子陆块块断构造活动带(扬子克拉通)及

华夏克拉通 4 个构造区,其中华南裂谷是规模最大的构造带^[25].梅树村期沉积明显受到块断差异运动的控制,在扬子区形成隆、凹的构造.隆、凹构造包括昭觉-昆明盆地、川黔浅水碳酸盐台地(包括川黔潮上泥坪、黔中台地边缘浅滩)、龙门山-大巴山台地边缘斜坡、黔湘鄂台地边缘斜坡、黔湘鄂皖盆地,它们是控制扬子区寒武系底部含磷岩系(磷结核)形成的主要构造因素^[25].

2 含磷岩系地层与成矿特征

扬子区寒武系底部含磷岩系主要分布于云南东部和黔北及黔西北地区,主要赋存于云南梅树村组中谊段和筇竹寺组八道湾段底、顶部,贵州冒龙井段和戈仲伍组;而向东的贵州铜仁、天柱、以及江西上饶、浙江江山、江苏南京等地含磷岩系主要赋存于牛蹄塘组、留茶坡组及荷塘组(表 1)^[26].根据扬子区寒武系含磷岩系特点,作者自西向东勘查了 13 条剖面,绘制了部分具代表性的剖面图,并将各地层及成矿特征分述如下.

云南白龙潭磷矿位于东川-德泽成磷区,赋矿地层主要为梅树村组中谊村段,其岩性柱状图见图 3.该磷矿分布于东、西两支小江断裂之间,属大型浅海相沉积的磷块岩矿床,含矿层总厚约 58.74 m^[1],矿体呈层状产出,层位稳定.赋矿地层上部为细晶白云岩夹白

表 1 扬子区寒武系底部含磷岩系岩石地层表

Table 1 Lithostratigraphy of phosphoric rocks at the bottom of Cambrian in Yangtze region

统	组	云南白龙潭	贵州织金-金沙			贵州清镇		贵州习水-遵义-镇远-铜仁			贵州天柱			江西上饶-浙江江山	江苏南京
下寒武统	筇竹寺组	八道湾段	明心寺组			牛蹄塘组		牛蹄塘组	九门冲组	木冒组	九门冲组	木冒组	渣拉沟组	荷塘组	幕府山组
			牛蹄塘组												
	梅树村组	大海段	灯影组	大岩段	戈仲伍组	桃子冲组		灯影组	留茶坡组		留茶坡组		灯影组		
		中谊村段													小歪头山段
上震旦统	灯影组	白岩峭段	冒龙井段			灯影组	阿坝寨段	留茶坡组		留茶坡组					

注:据文献[27]修改.

地层	分层	层厚 /m	岩性柱	岩性描述
中 宜 村 段	3	4.3		灰黑色薄-中厚层致密磷块岩夹灰褐色薄层状白云质磷块岩
	2	5.5		深灰色薄层状磷质白云岩,胶磷矿呈砾状,层纹状及不规则分布,浅灰、灰白色中厚层粉晶白云岩,下部夹黑白相间层状构造的黑色硅质条带
	1	9.5		浅灰、深灰色白云质条带致密磷块岩,深灰色薄层状致密磷块岩与浅灰色白云质磷块岩互层(单层约4~12 cm)

图 3 云南白龙潭早寒武世梅树村组中宜村段岩性柱状图
Fig. 3 Lithological column of Zhongyicun Member, Meishucun Formation in Bailongtan, Yunnan

云质磷块岩及瘤状含磷白云质灰岩;中部为磷矿层,以条带状磷块岩、条纹状磷块岩及硅质磷块岩为主,发育透镜状层理;下部为深灰色白云质灰岩夹黑色硅质岩. 矿石结构有微粒或泥晶结构、内碎屑结构、纤维聚晶结构及生物碎屑结构等,以碎屑结构为主. 矿石构造有致密块状构造、粒状块状构造、条带状构造、水平条带状构造、波状条带状构造、条纹状构造等. 岩石具有水平层理、波状层理及粒序层理构造,其次还见有交错层理,波痕构造等. 根据矿石结构构造,将白龙潭磷块岩分为泥晶磷块岩、白云质磷块岩、致密磷块岩、硅质磷块岩、泥质磷块岩及生物碎屑磷块岩等,致密磷块岩是寒武系底部重要的磷块岩类型.

贵州织金磷矿区大地构造处于黔中隆起西南端,属典型的扬子区地层. 磷矿床位于戈仲伍-果化背斜及张维背斜北西翼近轴部. 含磷岩系由上、下两段构成. 下段以薄至中厚层白云质生物屑砂砾屑磷块岩与含磷白云岩交替沉积为主,以波状、透镜状及双向交错等层理为主,微生物及带壳小动物化石丰富,称戈仲伍组. 戈仲伍组底部以砾屑白云岩与下伏灯影组(表 1)冒龙井段分界,其顶部以硅质粉屑磷块岩与上覆牛蹄塘组下段分界,其岩性柱状图如图 5 所示. 含磷岩系上段为含磷黑色黏土岩和粉砂岩,厚 7~8 m,底部 0.4~0.5 m 内含硅质磷块岩结核及似层状透镜体,此即牛

蹄塘组下段. 磷块岩矿层主要位于戈仲伍组和牛蹄塘组底部. 矿石类型主要有生物内碎屑磷块岩、凝胶磷块岩和结核状磷块岩,以生物内碎屑磷块岩为主. 含磷岩系厚 7.8~32.8 m,上部为结核状、透镜状硅质磷块岩层,中部为白云质炭质粉屑磷块岩层,下部为白云质生物屑砂砾屑磷块岩、含磷白云岩以及一些凝胶状磷块岩. 含磷岩系层序结构特征:岩石颗粒粒度由下向上变细,底层为角砾向上渐变为粉屑—泥及粉屑;岩石层理构造由下部波状、透镜状以及双向交错层理向上部微波—水平状层理变化,反映了沉积介质由动荡(潮汐作用)转为宁静的环境演变,显示了海侵程度的加深;小壳动物化石富集,在下部岩层组合段,普遍形成生物碎屑结构(图 6e、f),向上数量渐少,至上部段趋于消失;下部薄至中厚层含磷生物屑白云岩与薄层白云质生物屑磷块岩的交错沉积,潮汐作用强烈,形成的磷块岩品位虽较贫(一般 P_2O_5 为 8%~15%),但其厚度和矿石储量却很大,是主要的含磷层位. 矿石构造有致密块状、块状、条带状构造,脉状、波状构造(图 6)等.

贵州金沙岩孔磷矿位于金沙向斜东翼,含磷岩系主要是寒武系牛蹄塘组. 区内出露地层为灯影组(表 1)白云岩;牛蹄塘组黑色碳质页岩、硅质岩、硅质磷块岩及生物屑砂屑磷块岩,硅质岩与浅灰色白云质磷块岩互层,白云质含量较高;明心寺组灰色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质页岩、底部偶夹凝灰岩透镜体,含丰富的三叶虫化石及金顶山组黄绿色粉砂质页岩等. 磷块岩层较薄,仅 0.1 m 左右,上覆硅质岩及互层约 6 m,白云质含量较多.

贵州清镇含磷岩系分布区主要出露有震旦系灯影组(表 1)浅灰、灰白色薄层—中厚层状含粉屑泥—微晶白云岩;寒武系桃子冲组黑色薄层含磷硅质岩、含磷生物碎屑白云质硅质岩,具水平细纹—条带状层理,含小壳化石和海绵骨针等;寒武系牛蹄塘组下段灰黑色薄层、中厚层状碳质黏土质粉砂岩及碳质页岩等. 与织金地区相比,其特点是水平纹层发育,磷块岩层仅 0.3 m,而含磷白云岩较厚,可达 22 m 左右.

贵州习水含磷岩系分布区位于桑木场背斜轴部,矿区主要出露有震旦系灯影组(表 1)白云岩、大岩段白云质磷块岩及牛蹄塘组硅质岩夹黑色碳质页岩^[28]. 硅质岩夹黑色碳质页岩较厚,可达 30 m,而白云质磷块岩层较薄,仅 0.3 m,但磷块岩层含小壳化石和藻类

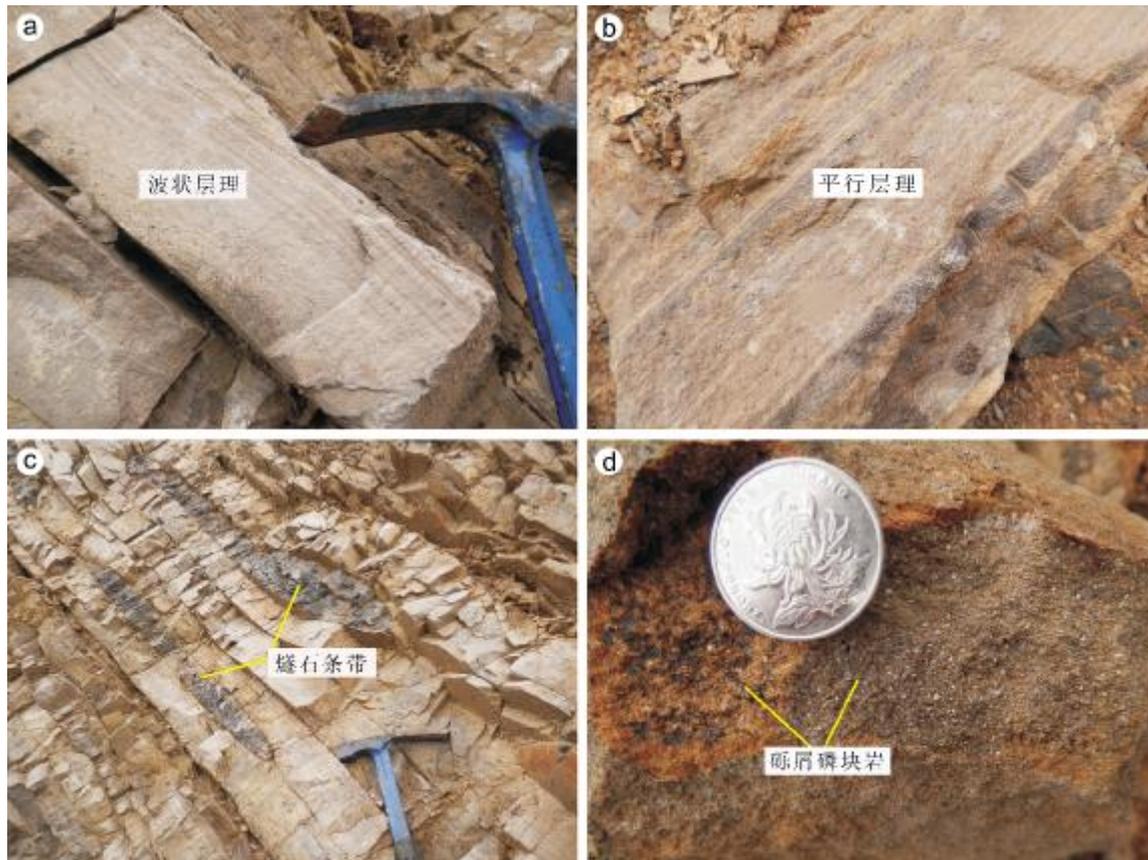


图4 云南白龙潭早寒武世梅树村期磷块岩沉积结构构造图

Fig. 4 Sedimentary structures and textures of phosphorites of Early Cambrian Meishucun stage from Bailongtan, Yunnan

a—浅灰色致密块状磷块岩(light gray dense massive phosphorite); b—灰褐色条带状磷块岩,具碎屑状结构(taupe banded phosphorite with clastic texture); c—层状白云质磷块岩(stratified dolomitic phosphorite); d—砾屑状磷块岩(rudaceous phosphorite)

化石。

贵州遵义松林磷矿位于金顶山穹窿构造的中部,穹窿核部为前震旦系板溪群,含磷岩系主要有灯影组(表1)白云岩,白云岩有硅化现象,偶夹黑色碳质页岩,内部可见呈脉状、网络状分布的方解石;寒武系牛蹄塘组下部为磷块岩、黑色硅质岩,牛蹄塘组上部为黑色碳质页岩与灰绿色页岩。出露于寒武系底部的矿体主要由黑色硅质凝胶状磷块岩和结核状磷块岩组成,其中磷质结核夹于含黄铁矿泥岩层中,位于凝胶状磷块岩上层;凝胶状磷块岩层硅化强烈,含大量渗流豆;磷结核层与磷块岩均比较薄,仅0.4 m。

贵州开阳含磷岩系分布区位于南北向洋水背斜上,断裂发育,以走向断层为主,矿区出露地层由核部至翼部依序为前震旦系板溪群清水江组,上震旦统马路坪组、洋水组和灯影组(表1)及下寒武统牛蹄塘组和明心寺组等。含磷岩系主要为硅质磷质白云岩、硅

质磷块岩,小壳动物化石含量少,化石保存不完整,水平层理发育,磷质含量低,岩系顶部的碳质页岩夹磷结核。

贵州镇远含磷岩系主要为灯影组(表1)浅灰、灰白色薄层—中厚层状含粉屑泥—微晶白云岩;牛蹄塘组黑色薄层状含磷硅质岩、含泥硅质岩、含磷生物碎屑白云质硅质岩,具水平细纹—条带状层理;牛蹄塘组下段为灰黑色薄层碳质黏土质粉砂岩及碳质页岩,泥质含量较高。

贵州天柱含磷岩系分布区位于坪地向斜构造东南翼,出露有新元古代南沱组、陡山沱组、留茶坡组(表1),下寒武统牛蹄塘组、明心寺组、耙榔组、清虚洞组等。磷结核矿层主要分布于下寒武统牛蹄塘组,呈卵圆状、球状(图7a),磷结核矿层较薄厚仅为0.2 m,磷结核较小,矿层顶部为铁质泥岩和一层较厚的碳质页岩,但不含有磷结核。

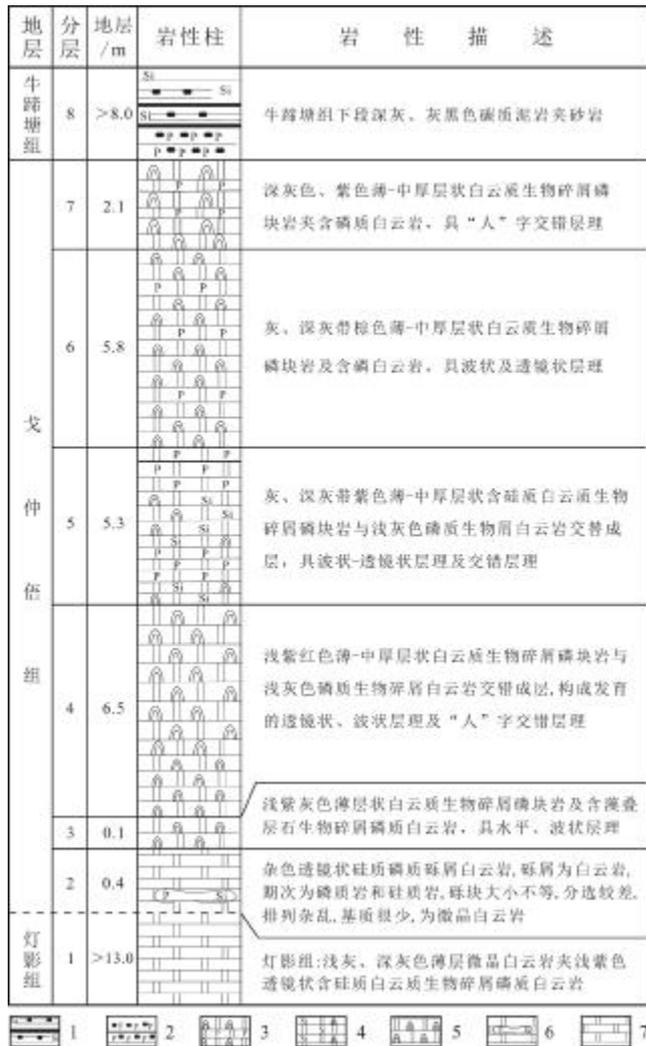


图 5 贵州织金早寒武世戈仲伍组岩性柱状图

Fig. 5 Lithological column of Early Cambrian Gezhongwu Formation in Zhijin, Guizhou

1—碳质泥岩、砂岩(carbonaceous mudstone, sandstone); 2—粉砂质磷块岩(silty phosphorite); 3—生物碎屑磷块岩夹磷质白云岩(bioclastic phosphorite with phosphoric dolomite); 4—含硅质生物碎屑磷块岩(siliceous bioclastic phosphorite); 5—白云质生物碎屑磷块岩(dolomitic bioclastic phosphorite); 6—透镜状硅磷质白云岩(lenticular siliceous and phosphoric dolomite); 7—磷质白云岩(phosphoric dolomite)

贵州铜仁坝黄含磷岩系分布区位于坝盘背斜近南西倾末端之南东翼部,岩层倾斜较缓,一般小于 10°。磷块岩产于寒武系-震旦系跨界的留茶坡组(表 1)顶部及寒武系九门冲组下段底部。留茶坡组上下两层为碳质页岩,中间有碳质泥岩、硅质岩和磷块岩的分层,碳质页岩中少见磷结核。

浙江江山含磷岩系分布区位于扬子地台与华南褶皱系的交接部位,由于太平洋板块向欧亚板块俯冲,受

强烈的南东方向挤压作用,形成北东向的印支期褶皱、断裂以及其他伴生和派生构造,组成了本区的构造格架^[29]。区内出露有寒武系荷塘组(表 1)黑色碳质页岩夹磷质结核、磷质透镜体及硅质岩透镜体,磷结核较小,但结核数量较多。

江西上饶含磷岩系为早寒武世荷塘组(表 1)黑色碳质页岩夹磷质结核及磷质透镜体(图 7b),磷质结核呈卵圆状、球状、透镜状,黑色页岩层较厚,一般为 10~30 m,分布于岩系上、下层,中间层为深灰色硅质透镜体。

江苏南京含磷岩系为幕府山组黑色碳质页岩夹磷质结核,磷质结核较大(图 7c)。

3 含磷岩系建造类型及特征

扬子地块寒武系底部梅树村早期的海域由于受古构造和古地形的控制,形成 2 个不同的沉积区,即扬子西区和扬子东区^[12]。扬子西区为陆表海或前陆盆地的碳酸盐台地相区,扬子东区为外陆架盆地相区^[30]。受沉积环境的控制,含磷岩系的地层沉积特征各不相同。根据其岩性、沉积构造等特点,叶连俊^[12]将此时期中国主要的成磷区扬子西区陆表海碳酸盐台地相区分为碳酸盐岩-硅质岩-磷块岩、碳酸盐岩-磷块岩、碳酸盐岩、硅质岩-碳酸盐岩及页岩-硅质岩 5 种建造类型。这几种建造类型及其特点,体现出扬子区寒武系底部含磷地层的沉积特征如下。

1)碳酸盐岩-硅质岩-磷块岩建造:主要分布于王家湾-渔户村、雷波-马边及宁强宽浪铺等拗陷较深的沉积盆地中。含磷岩系的沉积序列从上到下为白云岩-磷块岩-含磷硅质岩,磷块岩沉积后为一套潮上的白云岩沉积。而在禄劝、会泽及雷波一带大海段上部见有隐晶-粉晶灰岩和瘤状灰岩,岩石发育水平层理、波状层理等,瘤状灰岩含丰富的软舌螺化石^[26]。上述说明梅树村期扬子地块西区的大部分地区海平面有所下降,只在部分拗陷地区沉积了一套较深水的潮下低能的泥晶灰岩和瘤状灰岩。含磷岩系硅质岩位于磷块岩之下,成层性较好。原生沉积构造类型单调,岩石以发育水平层理为主要特征,偶见有透镜状层理。小壳动物化石丰富,说明其沉积环境为水动力活动较弱的潮下低能环境。

2)碳酸盐岩-磷块岩建造:分布于 3 个沉积拗陷

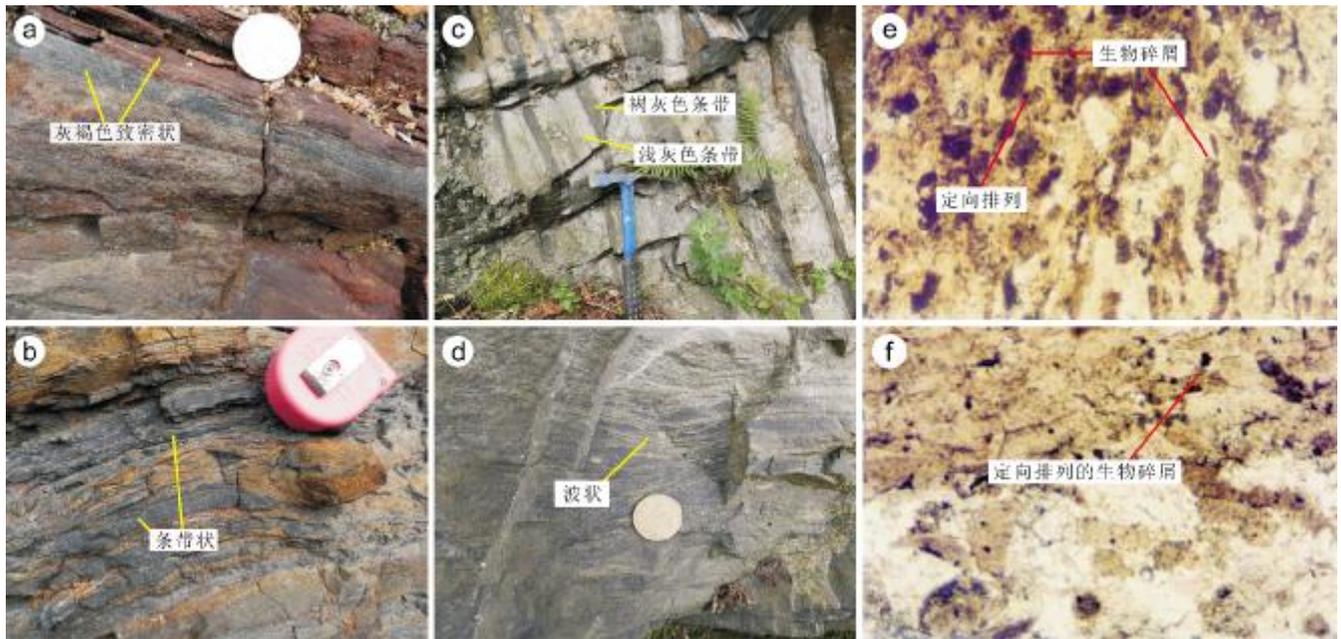


图 6 贵州织金早寒武世梅树村期磷块岩沉积构造及岩石显微镜薄片图

Fig. 6 Sedimentary structures and microscopic sections of phosphorites of Early Cambrian Meishucunian Age from Zhijin, Guizhou
 a—砂屑磷块岩 (arenaceous phosphorite); b—褐灰色条带状磷块岩, 碎屑结构, 块状、条带状构造 (taube banded phosphorite with clastic texture, massive, banded structure); c—条带状磷块岩, 碎屑结构, 块状、条带状构造 (banded phosphorite with clastic texture, massive, banded structure); d—脉状、波状磷块岩, 内细砂屑结构, 块状构造 (vein, wave phosphorite with fine sand texture, massive structure); e—条带状生物碎屑带, 软舌螺、海绵骨针为主, XL-6-9 5×10, 单偏光 (banded bioclastic zone, dominated by hyolithoid and sponge spicule, XL-6-9 5×10, under plane-polarized light); f—条带状生物碎屑带, 软舌螺、海绵骨针为主, W-X2 10×10, 单偏光 (banded bioclastic zone, W-X2 10×10, under plane-polarized light)

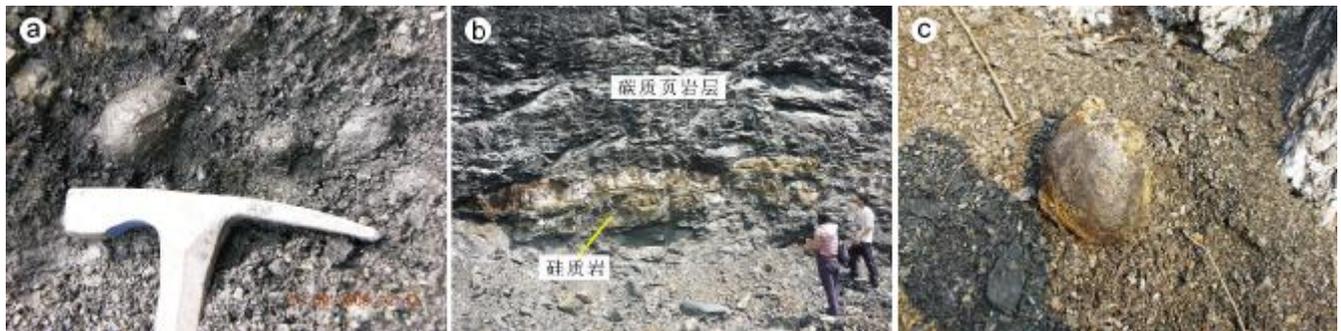


图 7 贵州、江西、江苏早寒武世含磷结核沉积构造照片

Fig. 7 Sedimentary structure photographs of Early Cambrian phosphorite nodules in Guizhou, Jiangxi and Jiangsu
 a—贵州天柱采样点碳质页岩层中磷质结核 (phosphoric nodule in carbonaceous shale of Tianzhu, Guizhou); b—江西上绕采样点厚层碳质页岩中硅质岩透镜体 (siliceous rock lenticle in thick carbonaceous shale of Shangrao, Jiangxi); c—江苏南京碳质页岩中磷结核 (phosphoric nodule in carbonaceous shale in Nanjing, Jiangsu)

盆地的边缘浅水地带, 如晋宁的梅树村、金阳热水河、马边老河坝. 岩石主要为白云岩和磷块岩组成. 在云南昆阳、白龙潭及贵州织金等地, 磷块岩类型主要为泥晶、泥晶—隐粒磷块岩、粒屑磷块岩、团粒磷块岩和生物碎屑磷块岩. 粒屑磷块岩中的基质有磷质、硅质黏

土质及白云质等. 在昆阳、白龙潭等地常发育有鲕粒、复鲕粒, 环绕鲕核的同心层达 20~30 圈^[31]. 贵州织金磷矿主要为白云质磷块岩和生物碎屑磷块岩, 常见生物碎屑呈定向排列造成分带. 岩石最常见的层理有水平层理、透镜状层理和波状层理. 富含小壳动物化石.

从上述特征来看,属于潮坪环境,环境的演化规律从潮下高能带到潮上带。

3)碳酸盐岩建造:主要分布于聚磷拗陷盆地靠古陆的一侧,碳酸盐台地边缘较隆起的地带以及聚磷拗陷盆地之间隆起的部位. 主要分布区有云南昭觉、贵州习水和宜昌. 岩性主要为泥晶、微晶白云岩及亮晶砂砾屑白云岩. 泥晶白云岩中层纹状构造发育, 偶见有小型交错层理. 砾屑白云岩中见有楔型交错层理. 由此看出, 前者是在水动力活动弱的潮下或潮间低能环境中形成的; 后者是在水动力活动强的潮下或潮间高能环境中形成。

4)硅质岩-碳酸盐岩建造:主要分布在陕南和川北的交界地带. 岩性主要为白云岩、灰岩和硅质岩. 含小壳动物化石,但分布不均. 层理简单,发育水平层理和微波状层理,说明是在水动力活动弱的潮下低能环境中形成。

5)页岩-硅质岩建造:主要分布于贵州黔东南天柱、江西上饶、浙江江山、江苏南京. 岩石主要为薄层状黑色碳质页岩与硅质岩互层,含磷结核,黑色碳质页岩厚度从西向东逐渐变厚. 水平层理发育,属水动力活动弱的潮下低能环境。

4 讨论

4.1 含磷岩系地层对比

扬子区早寒武世时期岩相古地理环境比较复杂,其中贵州早寒武世梅树村期最为复杂,沉积相类型和沉积建造多种多样. 云南梅树村期含磷岩系地层主要有筇竹寺组,梅树村组大海段、中谊村段和小歪头山段;贵州此时期含磷岩系复杂多样,分别为灯影组大岩段,戈仲伍组,桃子冲组下段,牛蹄塘组,留茶坡组顶部等;向东的江西上饶、浙江江山一带地层主要为荷塘组及江苏南京幕府山组(表 1). 虽然扬子区在各地划分的组别不同,但在各地同时期沉积的含磷岩系特征类似,因而具有较强的可对比性。

前人对扬子区寒武系含磷岩系沉积特征及地层对比已作了一定的研究工作,如韩豫川等^[1]对扬子地台下寒武统筇竹寺组下段创建了地层对比图,此图涵盖范围大,针对云南梅树村,贵州织金打麻厂、松涛嗅脑,江西庐山观音堂及浙江江山等含磷岩系作了大区域横向地层对比,此图对于相似的大区域地层对比具有较好的参考价值. 吴祥和等^[32]将贵州早寒武世磷矿层作纵向对比,自下而上将贵州含磷岩系分为 3 层:下层矿(I)、上矿层(II)、顶部矿层(“磷质结核层”)(I+II:

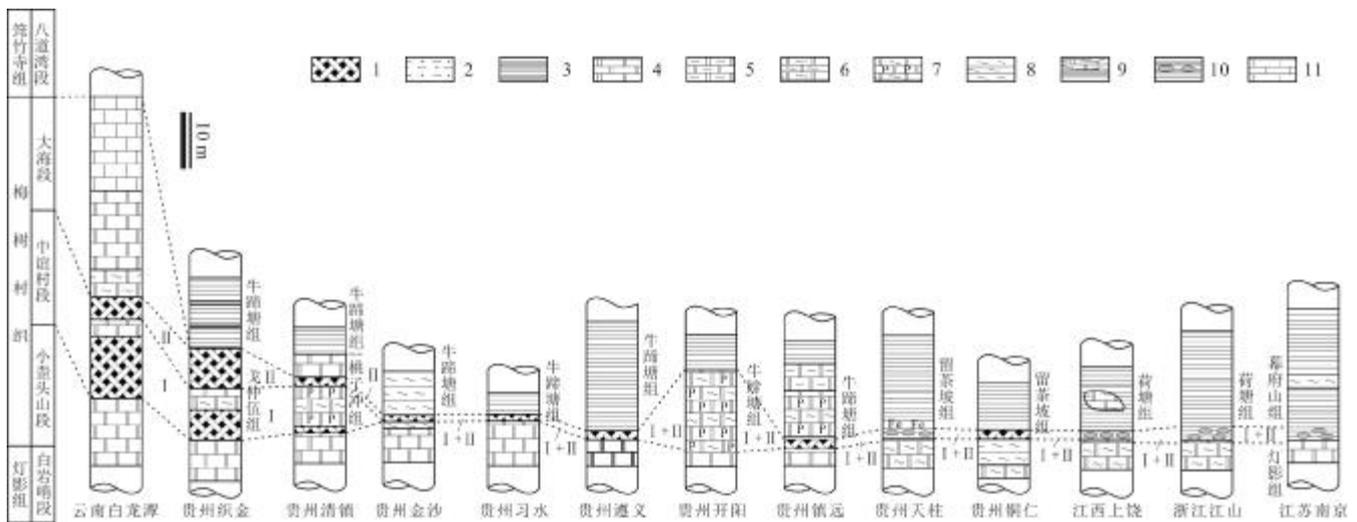


图 8 扬子区寒武系底部含磷岩系地层柱状对比图

Fig. 8 Stratigraphic correlation columns of the Cambrian phosphorite series in Yangtze region

1—磷块岩(phosphorite); 2—粉砂岩(siltstone); 3—碳质页岩(carbonaceous shale); 4—白云岩(dolomite); 5—泥质白云岩(argillaceous dolomite); 6—硅质白云岩(siliceous dolomite); 7—磷质硅质岩(phosphoric siliceous rock); 8—硅质岩(siliceous rock); 9—碳质页岩夹硅质岩透镜体(carbonaceous shale with silicalite lenticle); 10—碳质页岩夹磷质结核(carbonaceous shale with phosphorite nodule); 11—灰岩(limestone); I—1 期成磷作用(phosphogenesis in Phase 1); II—2 期成磷作用(phosphogenesis in Phase 2); I+II—欠补偿凝缩沉积成磷作用(phosphogenesis by undercompensation condensation deposition)

欠补偿凝缩沉积成磷作用),即称为 3 期成磷作用. 由此看出, 前人对扬子区寒武系含磷岩系地层对比研究仅限于大区域横向或小范围纵向的对比研究, 对整个扬子区寒武系底部含磷岩系地层进行横向及纵向综合对比的研究报道较少.

根据吴祥和等^[32]对贵州磷矿沉积的纵向分层, 韩豫川等^[1]对扬子地台下寒武统筇竹寺组下段创建的地层横向对比图及扬子区寒武系底部含磷岩系地层对比表(表 1), 结合扬子区寒武系底部含磷岩系各层位的特点, 综合分析构建出此时期地层柱状对比简图(图 8). 从图 8 可看出, 云南小歪头山段、贵州织金戈仲伍组底部的砾屑白云岩相当于下寒武统梅树村组, 作为成磷期的初始沉积; 贵州灯影组大岩段与冒龙井段为上下关系, 大岩段为梅树村成磷期的沉积, 除顶界见侵蚀间断沉积外, 可与云南梅树村组中谊村段下段、贵州织金戈仲伍组下段及清镇桃子冲组下段进行对比, 此矿层为下矿层(I); 云南梅树村组中谊村段上段、贵州织金戈仲伍组上段及贵州清镇桃子冲组上段与云南梅树村组大海段下段之底界作为成磷期沉积的上界面, 此段为上矿层(II); 贵州金沙、习水、遵义、开阳、镇远、天柱、铜仁含磷岩系为成磷期台地边缘缓坡侵蚀间断面上的滞留沉积, 代表梅树村期含磷岩系整个下部沉积组合段, 这些地区的牛蹄塘组、留茶坡组与江西上饶、浙江江山荷塘组及江苏南京幕府山组可对比, 为顶部矿层(I+II: 欠补偿凝缩沉积成磷作用).

4.2 成磷期古地理及成磷环境分析

早寒武世是中国南方岩相古地理发展史上一个重要阶段, 是在晚震旦世灯影期海退后又一次海侵背景下产生的沉积. 上扬子区南部因受川滇拗陷中深大断裂的控制^[25], 沉积相由西南的古陆向东形成近岸潮坪—浅水缓坡(含磷酸盐岩碳酸盐缓坡)—深水缓坡(含磷结核硅质岩缓坡)—陆坡深水盆地交替的展布格局(图 1). 主要由碳酸盐岩、磷块岩及硅质岩组成扬子缓坡相, 含磷岩系形成西厚东薄的沉积特征, 其沉积模式如图 9.

扬子区含磷岩系岩石主要由白云岩、磷块岩(扬子东区主要为磷结核)、硅质及泥岩组成, 发育小壳动物化石. 因为该区处于低纬度地区, 海侵及上升洋流作用使梅树村期成为中国重要的成磷期, 构成了我国最大的磷矿成矿带^[12], 其中典型的磷矿如白龙潭磷矿、织金磷矿等. 白龙潭磷矿古地理位置位于川滇陆缘坳^[24](图 1), 其富矿层位中谊村段发育瘤状含磷白云质灰岩、条带状磷块岩、条纹状磷块岩及硅质磷块岩, 并具有致密块状、粒状块状、条带状及波状条带状构造, 岩石还具有波状层理及粒序层理构造, 其次还见有交错层理, 层面上见有波痕构造等(图 4), 均表明其形成于水体较浅、搅动能量大、半干旱的浅水缓坡环境; 织金磷矿也类似, 但与白龙潭不同的是发育有双向交错层理, 并且管壳类生物化石排列具有一定的方向性(图 6), 这种定向表示了水体流动的方向, 并具有生物生存所需要的光照强度, 另外还伴有潮汐作用, 而且随

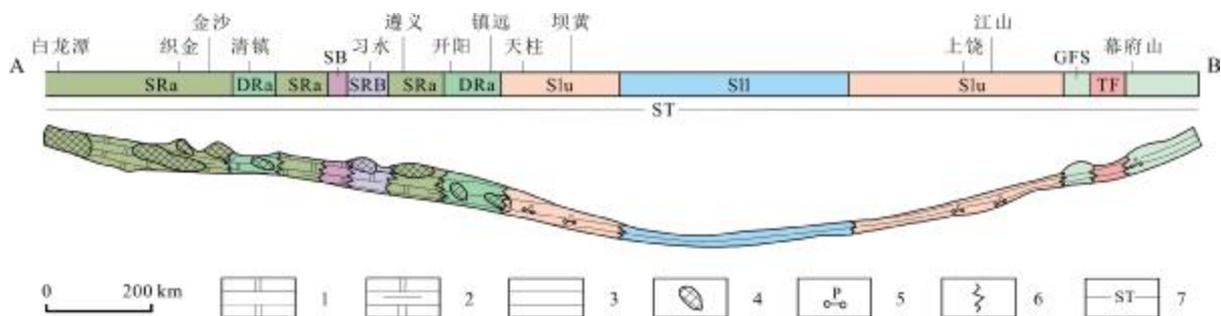


图 9 扬子区早寒武世梅树村期磷矿沉积模式图

(据文献^[23]修改)

Fig. 9 Sedimentary model of phosphorites of Early Cambrian Meishucun Formation in Yangtze region

(Modified from Reference ^[23])

1—白云岩(dolomite); 2—泥质白云岩(argillaceous dolomite); 3—页岩-硅质岩(shale-siliceous rock); 4—磷矿(phosphorite); 5—磷结核(phosphorite nodule); 6—相变线(phase change line); 7—海平面(sea level)

着海侵程度加深,其潮汐作用也减弱至完全消失(图5),说明织金沉积水体较白龙潭深,但也属于高能且光照充足的浅水缓坡环境;至金沙一带,其沉积厚度变薄且不稳定,水平纹层发育,如图9所示,其岩性已逐渐开始向页岩过渡,已不再是浅水高能地带,故而只形成中小型磷矿床;到了开阳一带可见到一些饼状砾,且生物碎屑很少量,硅质岩含量已增高,并发育水平细纹层,说明是潮下较为安静、但伴有间歇震荡的深水缓坡环境;到了上饶、江山以及幕府山一带,就已经发育磷结核,并夹于页岩、碳硅质岩中,属上斜坡、缓斜坡环境,这种环境由于孔隙水的作用^[12],虽然会发生磷的矿化,但只能形成磷结核(如图7),已不具备形成较大磷矿床的条件。

蒲心纯^[25]将中国南方寒武纪古地理进行了详细的分类,结合图1、8、9,笔者认为磷块岩形成区域受到沉积微相一定程度地控制。从西向东,沉积微相大致由浅水缓坡—深水缓坡—上斜坡—下斜坡—缓斜坡—大陆坡—深海,磷块岩由大规模磷矿渐变为小规模磷结核,其中浅水缓坡相是形成磷块岩的有利地理条件,原因是浅水缓坡微相水动力较强,扰动更为强烈,容易使磷块岩等淋滤颠选,且该微相生物繁盛,生物通过生命活动使磷富集,进而使磷品位增高,形成大型磷矿;到了下斜坡、缓斜坡等微相,大多以磷结核为主。对比同一沉积微相,例如浅水缓坡,作者发现白龙潭、织金等地,虽然都属于浅水缓坡微相,其岩性大体相似,都以磷块岩为主,但是其矿体规模、矿层厚度、岩石类型以及品位均具有一定的差异,例如白龙潭矿体规模、矿层厚度要大于织金,织金含大量小壳生物碎屑(如图6),这和其沉积相类型、沉积环境等诸多因素有关,因此作者认为,沉积微相是磷块岩形成的控制因素之一,但不是绝对控制作用。

5 结论

(1)扬子区寒武系底部含磷岩系沉积层序自下而上显示颗粒由粗变细,层理类型由交错层理、波状层理及粒序层理转为水平层理,生物屑减少至消失等层序变化趋势。自西向东由西部(川、滇、黔)碳酸盐岩、硅质岩、磷块岩及部分粉砂质黏土岩向东部(黔东、湘、鄂、皖、浙)为硅质岩、碳质页岩、结核状磷块岩过渡。

(2)根据扬子区寒武系底部含磷岩系地层对比表

及地层柱状对比简图可知,云南梅树村组中谊村段下段、贵州织金戈仲伍组下段及贵州清镇桃子冲组下段含磷岩系为下矿层(I);云南梅树村组中谊村段上段、贵州织金戈仲伍组上段及贵州清镇桃子冲组上段含磷岩系为上矿层(II);贵州金沙、习水、遵义、开阳、镇远等地牛蹄塘组,贵州天柱、铜仁留茶坡组与江西上饶、浙江江山荷塘组及江苏南京幕府山组含磷岩系为顶部矿层(I+II;欠补偿凝缩沉积成磷作用)。

(3)沉积微相对磷块岩的形成具有一定的控制作用,浅水高能且生物繁盛的环境有利于形成高品位磷块岩,水动力较弱的环境形成含磷岩系厚度大,但含磷较低;从西向东,沉积微相由浅水缓坡—深水缓坡—上斜坡—下斜坡—缓斜坡—大陆坡—深海渐变,而磷块岩由大规模磷矿变为小规模磷结核。浅水缓坡沉积微相是最为有利的沉积环境。

参考文献(References):

- [1]韩豫川,夏学惠,肖荣阁,等.中国磷矿床[M].北京:地质出版社,2012:1-723.
Han Y C, Xia X H, Xiao R G, et al. Phosphate deposits in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 1-723. (in Chinese)
- [2]曾允孚,杨卫东.云南昆阳、海口磷矿的富集机理[J].沉积学报,1987,5(3):19-27,185.
Zeng Y F, Yang W D. Mechanism of enrichment of Kunyang and Haikou phospharite deposits, Yunnan China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987, 5(3): 19-27, 185.
- [3]杨帆.昆阳磷矿沉积环境与矿床地球化学[D].北京:中国地质大学,2011.
Yang F. Sedimentary environment and geochemistry of the Kunyang phosphorite deposit in Yunnan province[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011.
- [4]杨杰东,王宗哲.云南晋宁梅树村下寒武统砾屑磷块岩的扫描电镜研究[J].沉积学报,1989,7(2):125-129.
Yang J D, Wang Z Z. Electron microscope study on pebble phosphorites of Meishucun section, Jinning, Yunnan province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1989, 7(2): 125-129.
- [5]郭谢君.雷波莫红磷矿床特征及成因浅析[J].四川地质学报,2013,33(3):276-281.
Guo X J. Geological features and ore genesis for the Mohong phosphorite deposit in Leibo, Sichuan [J]. Acta Geologica Sichuan, 2013, 33(3): 276-281.
- [6]曹学铨,甘国楠,陈天伦.四川马边磷矿磷灰石矿物的研究[J].矿物岩石,1985,5(1):85-96,133.
Cao X D, Gan G N, Chen T L. Apatite minerals from mabian

- phosphorus mine, Sichuan Province [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1985, 5(1): 85–96, 133.
- [7]张杰, 陈代良. 贵州织金新华含稀土磷矿床扫描电镜研究[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(3): 59–64.
Zhang J, Chen D L. Scanning electron microscope study of the ore-bearing REE in Xinhua phosphorite, Zhijin, Guizhou [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2000, 20(3): 59–64.
- [8]张杰, 张覃, 龚美菱, 等. 贵州寒武纪早期磷块岩稀土元素特征 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 1–117.
Zhang J, Zhang Q, Gong M L, et al. REE characteristics of early Cambrian phosphorite in Guizhou [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 1–117.
- [9]高慧, 杨瑞东. 早寒武世早期贵州织金含磷岩系地球化学特征与成磷作用[J]. *地球与环境*, 2005, 33(1): 33–42.
Gao H, Yang R D. Geochemistry and genesis of the early Cambrian phosphorites in Zhijin, Guizhou [J]. *Earth and Environment*, 2005, 33(1): 33–42.
- [10]毛铁, 杨瑞东, 高军波, 等. 贵州织金寒武系磷矿沉积特征及灯影组古喀斯特面控矿特征研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(12): 2374–2388.
Mao T, Yang R D, Gao J B, et al. Study of sedimentary feature of Cambrian phosphorite and ore-controlling feature of old karst surface of the Dengying formation in Zhijin, Guizhou [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(12): 2374–2388.
- [11]陈志明, 陈其英. 扬子地台早寒武世梅树村早期的古地理及其磷块岩展布特征[J]. *地质科学*, 1987, 3(3): 246–257.
Chen Z M, Chen Q Y. Paleogeography of Yangzi platform and the characteristics of the phosphorite distribution of early Meishucun stage, Early Cambrian [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1987, 3(3): 246–257.
- [12]叶连俊, 陈其英, 赵东旭, 等. 中国磷块岩 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 58–123, 151–163.
Ye L J, Chen Q Y, Zhao D X, et al. The phosphorites of China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 58–123, 151–163. (in Chinese)
- [13]孟永龙. 云南省寻甸白龙潭磷矿地质特征及成因探讨 [D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
Meng Y L. Geological characteristic and origin of the phosphate deposits in Bailongtan, Xundian, Yunnan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [14]杨瑞东, 毛铁, 陈吉艳, 等. 黔中寒武系底部磷块岩沉积特征[J]. *矿物学报*, 2017, 37(4): 448–455.
Yang R D, Mao T, Chen J Y, et al. A study on Sedimentary characteristics of phosphate rock at the bottom of the Cambrian in central Guizhou Province, China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2017, 37(4): 448–455.
- [15]谢宏. 应用铈异常示踪沉积构造环境——以贵州铜仁坝黄磷矿为例[J]. *地质与资源*, 2012, 21(4): 406–409.
Xie H. The cerium anomaly tracer for sedimentary tectonic environment: a case study of the Bahuang phosphorite deposit in Tongren, Guizhou Province [J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(4): 406–409.
- [16]Ounis A, Kocsis L, Chaabani F, et al. Rare earth elements and stable isotope geochemistry ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of phosphorite deposits in the Gafsa Basin, Tunisia [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 268(1/2): 1–18.
- [17]Shatrov V A, Voitsekhovskii G V. Reconstruction of phosphate formation environments (from data on distribution of lanthanides) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, 50(10): 850–862.
- [18]Chen J Y, Yang R D. Analysis on REE geochemical characteristics of three types of REE-rich soil in Guizhou Province, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2010, 28(S1): 517–522.
- [19]Yang R D, Gao H, Wang Q, et al. REE enrichment in early Cambrian Gezhongwu Formation phosphorous rock series in Sanjia, Zhijin county, Guizhou province, China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23(6): 760–767.
- [20]Yang R D, Wang W, Zhang X D, et al. A new type of rare earth elements deposit in weathering crust of Permian basalt in western Guizhou, NW China [J]. *Journal of Rare Earths*, 2008, 26(5): 753–759.
- [21]雷加锦, 李任伟, 曹杰. 上扬子区早寒武世黑色页岩磷结核特征及生化淀磷机制[J]. *地质科学*, 2000, 35(3): 277–287.
Lei J J, Li R W, Cao J. The characteristics of black shale-hosted concretionary phosphates and the mechanisms of microbes mediated phosphorus precipitation in Cambrian horizon on Yangtze platform [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(3): 277–287.
- [22]贺瑾瑞, 朱杰勇, 周健, 等. 云南白登浅海相磷块岩与青龙哨陆相磷块岩的对比研究[J]. *地质与资源*, 2009, 18(4): 292–297.
He J R, Zhu J Y, Zhou J, et al. A contrast research between the Baideng shallow-sea facies and Qinglongshao continental facies phosphorite in Yunnan Province [J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(4): 292–297.
- [23]Chen J Y, Yang R D, Wei H R, et al. Rare earth element geochemistry of Cambrian phosphorites from the Yangtze region [J]. *Journal of Rare Earths*, 2013, 31(1): 101–112.
- [24]东野脉兴. 上升洋流与陆缘坳 [J]. *化工矿产地质*, 1996, 18(3): 156–162.
Dongye M X. Upwelling oceanic currents & epicontinental chi [J]. *Geology of Chemical Minerals*, 1996, 18(3): 156–162.

(下转第 27 页/Continued on Page 27)

- [21]张天乐, 王宗良, 胡云中. 腾冲现代热泉系统硅华的矿物学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1997, 16(2): 170-178.
Zhang T L, Wang Z L, Hu Y Z. Mineralogy of geysirite from the Tengchong active hot spring system and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1997, 16(2): 170-178.
- [22]法默 V C. 矿物的红外光谱[M]. 应育浦, 等译. 北京: 科学出版社, 1982: 304.
Farmer V C. Infrared spectrum of minerals[M]. Ying Y P, et al. trans. Beijing: Science Press, 1982: 304. (in Chinese)
- [23]陈全莉, 袁心强, 贾璐. 台湾蓝玉髓的振动光谱表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1549-1551.
Chen Q L, Yuan X Q, Jia L. Study on the vibrational spectra characters of Taiwan blue chalcedony[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1549-1551.
- [24]余炼钢, 张焯. 两块相似石英宝石的谱学鉴别及启示[J]. 超硬材料工程, 2020, 32(4): 62-65.
Yu L G, Zhang Y. Spectrographic identification of two similar quartz gemstones and its enlightenment[J]. Superhard Material Engineering, 2020, 32(4): 62-65.
- [25]雷芳芳. 缅甸硅化木与云南硅化木的岩石学特征对比研究[J]. 景德镇学院学报, 2020, 35(6): 61-64.
Lei F F. A comparative study on the petrological characteristics of petrified wood from Burma and Yunnan[J]. Journal of Jingdezhen University, 2020, 35(6): 61-64.
- [26]贺瑾瑞, 焦润成, 南赞, 等. 北京延庆千家店盆地土城子组古生物化石及古气候沉积环境——延庆地区首次发现疑似恐龙骨骼化石[J]. 地质通报, 2017, 36(8): 1319-1329.
He J R, Jiao R C, Nan Y, et al. A discussion on Tuchenzi fossils and paleoclimate sedimentary environment in Qianjiadian basin of Yanqing County: Suspected dinosaur bones discovered for the first time in Yanqing, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(8): 1319-1329.
- [27]Tian N, Xie A W, Wang Y D, et al. New records of Jurassic petrified wood in Jianchang of western Liaoning, China and their palaeoclimate implications[J]. Science China Earth Sciences, 2015, 58(12): 2154-2164.
- [28]Jiang Z K, Wu H, Tian N, et al. A new species of conifer wood Brachyoxylon from the Cretaceous of eastern China and its paleoclimate significance[J]. Historical Biology, 2021, 33(10): 1989-1995.
- [29]何情, 张建平, 邢立达, 等. 北京延庆千家店地区土城子组恐龙足迹点沉积环境[J]. 地质通报, 2015, 34(9): 1726-1734.
He Q, Zhang J P, Xing L D, et al. Sedimentary environment of Tuchengzi Formation dinosaur track site in Qianjiadian area, Yanqing County, Beijing[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(9): 1726-1734.

(上接第 58 页/Continued from Page 58)

- [25]蒲心纯, 周浩达, 王熙林, 等. 中国南方寒武纪岩相古地理与成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 2-45, 77-105.
Pu X C, Zhou H D, Wang X L, et al. Cambrian lithofacies, paleogeography and mineralization in South China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 2-45, 77-105.
- [26]王崇武, 朱隆光, 阙竟成, 等. 扬子西区早寒武世磷块岩矿床形成的地质背景[J]. 云南地质, 1985, 4(1): 33-58.
Wang C W, Zhu L G, Que J C, et al. Geological setting in which early Cambrian phosphorite deposits formed in the west region of the Yangtze platform[J]. Yunnan Geology, 1985, 4(1): 33-58.
- [27]刘怀仁. 扬子区早寒武世磷块岩沉积相及古地理[J]. 四川地质学报, 1982, 3(2): 88-89.
Liu H R. Sedimentary facies and paleogeography of Early Cambrian phosphorus block in the Yangtze region [J]. Journal of Sichuan Geology, 1982, 3(2): 88-89. (in Chinese)
- [28]贵州省地质矿产局. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1987: 453-500.
Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Guizhou Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 453-500. (in Chinese)
- [29]郭福生. 浙江江山藕塘底组陆源碎屑与碳酸盐混合沉积特征及其构造意义[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 136-141.
Guo F S. Characteristics and tectonic significance of mixing sediments of siliciclastics and Carbonate of Outangdi formation in Jiangshan, Zhejiang Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 136-141.
- [30]夏学惠, 黄青山. 滇池地区沉积磷块岩中胶磷矿矿物学特征及其意义[J]. 矿物岩石地球化学通讯, 1989(1): 56-57.
Xia X H, Huang Q S. Collophane from phosphorites in Dianchi area, Yunnan Province: A mineralogical study[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1989(1): 56-57. (in Chinese)
- [31]汪寿松, 陈其英. 昆阳磷矿磷块岩的矿物组成[J]. 地质科学, 1985(1): 78-86.
Wang S S, Chen Q Y. The mineral composition of the phosphorite of Kunyang[J]. Chinese Journal of Geology, 1985(1): 78-86.
- [32]吴祥和. 贵州磷块岩[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 19-74.
Wu X H. The phosphorites of Guizhou [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 19-74. (in Chinese)