

文章编号: 1000-0550(1999)03-0355-06

下扬子地区上泥盆统五通组沉积构造及其地球化学特征^①

朱立华¹ 张传林¹ 仲健华² 邹成娟² 高南华²

1(南京大学地球科学系 南京 210093)

2(江苏石油勘探局物研院 南京 210046)

摘要 总结了下扬子区晚泥盆世五通组典型的沉积构造, 如风暴砾滩、冲洗交错层理、滩脊、三脊波痕、植物化石及遗迹化石埋藏相特征等。全定量分析了泥岩类的主化学组成及微量元素, 其主化学组成具有高 SiO₂ 含量、高 K₂O/Na₂O 比值, 低 MgO, Zr, Hf 组合特征显示近源沉积特征, 与下伏下古生界有显著差别, B, Ga, Ba, Sr, Rb 等元素反映出滨海及海陆交互的沉积环境。综合分析沉积构造、沉积地球化学及区域地质特征, 认为五通组形成于弧后前陆盆地, 其沉积过程是一个海侵过程, 这一大地构造背景一直延续到早石炭世末。

关键词 五通组 下扬子区 弧后前陆盆地

第一作者简介 朱立华 男 1963 年出生 高级工程师 博士 石油勘探

中图分类号 P588.2 **文献标识码** A

1 概述

下扬子板块与华南板块的拼合发生于志留纪末, 由此形成南方统一的大陆(图 1)。下扬子地区自震旦纪以来, 除了缺失早中泥盆世沉积建造外, 各期的沉积地层均有出露^[1]。晚泥盆世五通组(D₃w)作为分隔早、晚古生代承前启后的沉积建造, 对探讨下扬子区大地构造演化、油气盆地的形成与发展具有重要的理论与实践意义^[2]。

对于五通组的沉积环境的认识, 早期曾作为一套陆相的石英砂岩建造(安徽省区测队, 1989), 八十年代后期, 随着下扬子地区油气盆地的研究不断深入, 吴贤涛^[9]等、张国栋^[13, 14]、吕洪波^[5]、赵澄标^[15]等相继对五通组的沉积环境做了进一步研究, 但仍存在较大的分歧。

我们在大量的野外调查基础上, 全面厘定了五通组一些典型的沉积构造特征。首次系统地采集了地球化学样品, 对其部分常量元素及典型的微量元素如 B、Ga 等进行全定量分析, 试图从地球化学角度对下扬子区五通组的沉积环境做更进一步的深入研究。

2 典型沉积构造特征

沉积构造是指沉积岩各个组成部分之间的空间

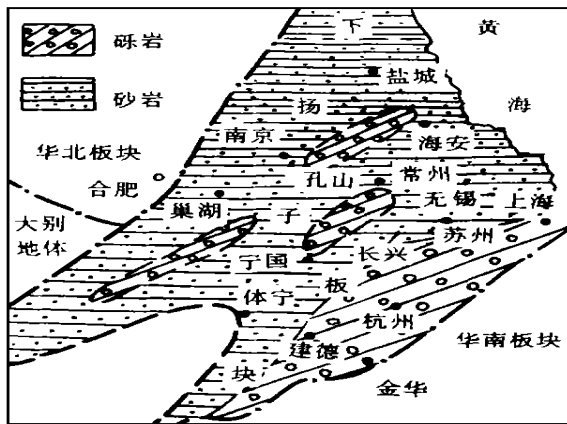


图 1 下扬子地区大地构造及沉积区划图

Fig. 1 Geotectonic map and sedimentary province of the Lower Yangtze Region

分布和排列方式, 它对于研究沉积环境具有重要意义, 笔者在野外观察并记录了五通组的一系列典型沉积构造特征, 如风暴砾滩、冲洗交错层理、板状交错层理、三脊波痕等。

2.1 风暴砾滩

在孔山东坡盘山公路边, 出露的地层是 D₃w 的底部。这一层内, 下部是数米厚的石英粗砂岩, 顶部

① 国家教委高校博士点基金资助(RFDP)

是 20 cm 厚的砾石层,具反粒序特征。砾石层横向连续,无间断。砾石形态主要是盘状、圆状,磨圆度较好,最大砾径 6 cm。砾滩中以盘状、扁平状砾石形态占绝对优势,这一特征是风暴浪高能磨蚀、分选的产物。不少学者都把这种特殊的盘状、扁平状砾石形态作为海滩环境^[4,5],特别是作为风暴成因的鉴定标志。砾滩中的砾形态和分选具有明显的分带性。这种分带性在垂向层序中,一般表现为向上变粗的反粒序,即从底部沙层带,逐渐向上变为叠瓦构造带,大盘状砾石带。风暴砾滩的发育首先要有强的水动力条件,其中包括强沿岸流作用;其次还要有丰富的物源或适于组成砾滩的物质供应。因此我们认为五通组的这层底砾岩是近源滨岸风暴沉积。

2.2 冲洗交错层理

交错层理在五通组砂岩中最为常见。在孔山的 D₃w 中部的一组交错层总厚度 0.5 m,层面产状 0° \angle 86°,两个方向的层理面产状分别为 348° \angle 70°,185° \angle 79°,交错纹层的形状为楔状或板状,平直且延伸较长,纹理厚度 1~2 cm。通过赤平投影恢复层面为水平状态,得到两组斜层理面产状,分别为 213° \angle 20°,20° \angle 16°,倾向刚好相反,为典型的冲洗交错层理或叫海滩加积层理,是平坦海滩或沿岸砂坝向海倾斜坡面上的沉积物由于波浪的向岸与离岸往复冲洗作用而成,它常被误认为水平层理。所以,该处的沉积环境是潮坪。据此推断此处当时古岸线是 220°(脊线走向)方向延伸。

2.3 板状交错层理

在 D₃w 中部发育渐近的板状交错层理,层组厚度 1 m,这些板状交错层理是由于沙波迁移而形成的(图 2)。它的层组规模变化较大,但厚度小于 1 m 的常见。板状层组的前积层不是渐近的就是面状的,平面图上,板状层组的前积层是直的或微微地朝下游方向前凸或后凹^[4]。

2.4 滩脊

发育于五通组中部(锡惠公园),两个脊线之间的距离一般为 5 m 左右,脊线平直,波面光滑,在靠近上面脊处有许多石英质砾石,砾石直径 1~2 cm,个别达 5 cm,磨圆度中等。该脊的上面岩层中有清晰的斜层理。滩脊是高潮带与低潮带的分界,涨潮时,海水带着砂等物质在靠近上面的脊处沉积,落潮时海水携带的沉积物在靠近下面的脊处沉积,这样就形成了一高一低两条脊。由于海水的反复淘洗,便形成了由高纯度石英砂组成的波面。特大潮时,

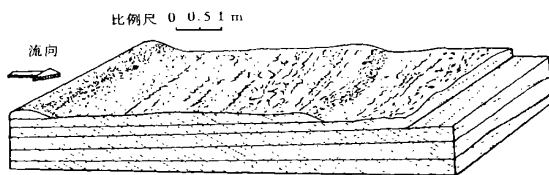


图 2 因沙波迁移而形成的板状交错层理形式(模式图)

Fig. 2 Tabular cross-bedding formed by sand ripple migration

海水越过了滩脊,滩脊以上的交错层理便是这时候形成的。滩脊是典型的潮坪沉积构造,根据滩脊和斜层理的方向可推测出,无锡的西北方向古时存在着低缓的陆地,此陆地可能是低缓的滨海岛屿。

2.5 三脊波痕

据吕洪波报导^[5],在无锡小轮自行车厂附近采石厂的五通组坡面上,发现三脊波痕,波高达 10~20 cm 以上,波长 0.5~2 m 以上。三脊波痕的砂体表面上有灰白色的泥砾,泥砾直径 2~30 cm 不等。磨圆度较差,具有同生变形。三脊波痕是近源风暴沉积的重要识别标志。

2.6 植物化石及遗迹化石

亚鳞木化石在五通组的中上部地层中很常见,在三脊波痕的砂体表面也有所见,长的有 2 米多。在潮坪环境中,砂岩体表面类似亚鳞木的植物化石也是常见的^[16]。三脊波痕上的亚鳞木可能生长于滨岸沼泽区,被风暴流带到此处而沉积于三脊波痕上。此处亚鳞木并不能作为当地陆相沉积的标志。离三脊波痕不远处的砂体表面见亚鳞木化石。

据夏邦栋等研究^[11],在五通组发现以 *Cochilichnus* sp; *Bifungites* sp; *Phycodes* cf. *Circinatum* Richter; *Palaephyucus* sp; *Lockeia* sp; *Chondrites* sp; *Chondrites* Type C *Osgood*; *Gordia* sp. 等为代表的遗迹化石,这些遗迹化石大部分形成于滨海或海湾环境,尤其是 *Cochilichnus*, *Loceia*; *Chondrites* Type C 和 *Phycodes* 的面貌特征,显示了典型的滨海沉积环境。

我们在孔山五通组中部的厚层石英砂岩层面上首次发现几个圆形凹坑,坑的边界清晰,坑底平滑,一侧深,一侧浅,且深的一边有锐角的边,整体形态有些象马蹄形,直径约 6 cm。在该处见到这样的坑至少 5 个,它们之间的前后距离约为 25 cm。这些圆坑和 Weimer 所介绍的潮坪上恐龙的足迹非常相

表1 五通组泥岩主化学成分、微量元素全定量分析及有关参数表
Table 1 Geochemical composition, trace elements and related parameters
of the mudstone from Wutong Formation

分析元素	地区	孔山	孔山	孔山	无锡	无锡	苏州	杭州	建德	巢湖	巢湖	巢湖	巢湖	宁国	长兴	长兴
	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	样品号	90942	90954	90956	90910	90918	D2	D17	D27-1	D27-2	D29	D33	D34	D46	D52	D54
Ba $\times 10^{-6}$	330	374	222	535	248	301	178	332	298	451	309	122	582	438	294	
Ga $\times 10^{-6}$	24.9	31.2	20.3	38.2	20.2	31.2	22.8	28.6	16.3	41.3	21.6	7.6	22.0	27.4	24.9	
Sr $\times 10^{-6}$	258.9	519.5	27.2	108.4	26.0	65.1	57.0	110.1	123.1	54.9	73.4	26.4	76.8	65.5	33.9	
Cu $\times 10^{-6}$	13.2	20.9	3.8	4.1	4.2	21.2	13.1	40.4	3.6	18.4	10.6	10.9	26.2	23.5	27.1	
Ni $\times 10^{-6}$	12.1	23.8	0.6	6.5	5.0	20.4	10.3	12.9	7.4	17.0	15.8	4.9	33.4	16.5	14.6	
Rb $\times 10^{-6}$	104.8	115.3	46.4	179.3	73.7	53.5	66.6	113.0	62.2	156.4	89.9	12.6	167.4	169.3	186.0	
B $\times 10^{-6}$	72.2	76.3	73.9	175.0	95.1	66.3	72.5	70.3	55.0	199.0	112.3	92.6	96.1	78.2	152.5	
V $\times 10^{-6}$	115.3	139.7	88.2	156.1	68.4	185.8	114.7	133.1	97.0	161.5	101.4	38.1	145.0	100.9	109.4	
Cr $\times 10^{-6}$	113.5	144.4	101.5	16.4	47.0	221.3	219.5	91.6	58.4	3.5	78.4	101.8	50.0	70.6	23.4	
Zr $\times 10^{-6}$	201.3	202.6	224.5	271.3	269.5	283.5	312.5	231.9	298.6	261.3	256.3	251.6	242.5	289.7	313.2	
Hf $\times 10^{-6}$	5.1	6.0	5.8	7.1	8.2	6.9	8.4	6.6	6.8	6.9	6.8	7.0	7.8	8.3	8.9	
Rb/K $\times 10^3$	5.2	6.0	4.8	5.5	5.5	5.4	4.4	4.8	5.4	3.8	5.3	6.4	4.3	5.5	4.4	
Ba/Ga	2.9	2.4	3.6	4.6	4.7	2.1	3.2	2.5	3.4	4.8	5.2	12.2	4.4	2.9	6.1	
R ^②	-0.098	-0.19	-0.013	0.141	0.082	-0.230	-0.061	-0.0168	-0.030	0.817	0.134	0.281	0.056	-0.112	0.256	
TiO ₂ %	0.94	0.88	0.82	1.28	0.74	1.17	0.97	1.22	0.99	1.75	1.13	0.52	0.92	0.94	1.10	
SiO ₂ %	69.12	70.23	75.14	68.37	71.35	67.61	69.88	71.63	72.39	76.37	74.38	68.49	66.37	71.33	72.42	
Fe%	1.86	3.63	1.15	0.91	0.87	5.23	5.85	8.37	3.33	1.81	3.05	1.27	4.01	2.29	1.97	
MnO ₂ %	0.006	0.010	0.005	0.006	0.005	0.008	0.013	0.005	0.006	0.011	0.034	0.006	0.118	0.007	0.009	
CaO%	0.14	0.18	0.15	0.13	0.15	0.24	0.19	0.23	0.15	0.11	0.21	0.18	0.14	0.14	0.11	
K ₂ O%	2.43	2.31	1.61	3.97	1.62	1.20	1.83	2.84	1.39	5.02	2.05	2.4	4.63	3.76	5.04	
Na ₂ O%	0.31	0.22	0.15	0.41	0.40	0.14	0.20	0.16	0.24	0.47	0.19	0.17	0.48	0.32	0.48	
MgO%	0.40	0.50	0.15	0.39	0.18	0.15	0.16	0.25	0.24	0.55	0.43	0.08	0.81	0.47	0.24	

① 样品由南京大学现代分析中心测试 ② R=4407.5B-16700Ga

象。我们认为,这些圆坑是两栖类在滨岸沉积物上留下的足迹。这也说明了该处是滨岸环境。

3 沉积地球化学特征

笔者选择了苏、浙、皖地区15个泥岩和泥质粉砂岩标本做了部分主化学成分及B等11个微量元素的全定量分析,样品分布位置见图1,分析结果见表1。

3.1 B元素

海水及河水中碎屑物质及自生粘土物质是吸附硼的主要物质。吸附作用的强弱与溶液硼的浓度、盐度、温度、时间、粘土物质的表面积有关。河水中的硼的含量较低,只有海水的1/400。因硼与伊利石有较强的亲和力,而海洋中的泥质物质又是以伊

利石、蒙脱石、绿泥石为主,所以,一般地海相沉积的岩石中硼的含量要大于陆相的,海相一般大于 100×10^{-6} ,陆相一般低于 70×10^{-6} 。从表1看出,15个样品中有10个介于 $70 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 之间,只有2个样品低于 70×10^{-6} 。有3个样品大于 100×10^{-6} ,这些说明样品产地的沉积环境大多数为介于海相与陆相之间的滨海环境,少部分为广海相,个别为陆相。

3.2 Ga元素

与硼相反,镓的含量一般富集在淡水泥质物中,因此它们含量的比值可以指示古盐度。陆相环境B/Ga值一般小于3.0~3.3,而正常海相大于4.5~5.0,介于它们之间的为过渡相。对15个样品做B/Ga比值分析(见表1),有7个样品显示过渡相特

征, 5 个显示陆相特征, 3 个显示广海特征。王益友等人利用现代已知沉积环境样品作判别分析处理^[7,8], 得到海相判别值 $R_1=11.5172$, 陆相为 $R_2=-10.5019$, 两组判别分界值 $R_0=-1.1861$ 。判别函数式为: $R=440.755B-167.00Ga$, 将待判别样品的两个变量的相应值代入判别函数求出 R , 如果样品的差别值 R 位于 R_0 的 R_1 一边, 则指定样品为海相, 如果位于 R_2 一边则指定样品为陆相。笔者对 15 个样品的 R 值的判别, 结果见表 1, 全部样品的 R 值均位于 R_0 与 R_1 之间, 但都非常接近 R_0 , 明显地显示滨海相特征。

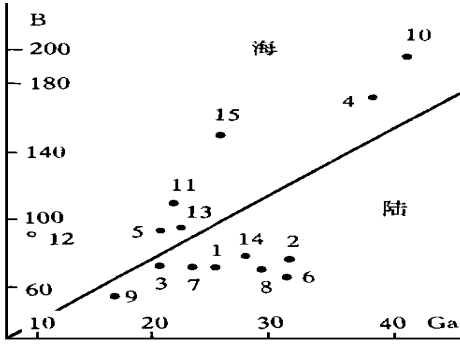


图 3 五通组 B-Ga 图解

Fig. 3 B-Ga diagram for pelite from Wutong Formation

根据 B、Ga 的值作出的含量点聚图(图 3)可以看出, 7 个样落入海相区, 8 个样落入陆相区, 尤其是大部分点在海陆分界线附近, 充分说明海陆交互过渡的沉积特征。从现代近海沉积物的研究发现^[7,8], 滨海相的泥质沉积物中 B、Ga、Rb 元素含量变化, 同时受到陆源区源岩性质、海水盐度及海解作用的影响, 尤其是这些因素通过对粘土矿物晶体的作用导致 B、Ga、Rb 在泥质沉积物中形成有规律的含量分布。经对比研究, 所采集的样品大部分与现代滨岸沉积物相似, 部分与近海沉积物相当。

3.3 Zr、Hf 元素

利用赋存于重矿物的高场强元素如 Zr、Hf 等可以反映沉积盆地内物源运移方向。Zr、Hf 元素赋存的重矿物具有近水域沉积特征, 远水域区元素含量迅速下降。从图 4 可看出, 在下扬子区由南东向北西方向, Zr、Hf 含量逐渐降低, 这说明沉积物运移的主要方向是由南东向北西的。另外, 五通组与本区的晚志留世及早二叠世的 Zr、Hf 组成明显不同, 而此区的早石炭世的 Zr、Hf 组成与五通组相似, 因此, 晚志留世未及早石炭末均是沉积盆地性质发生变化

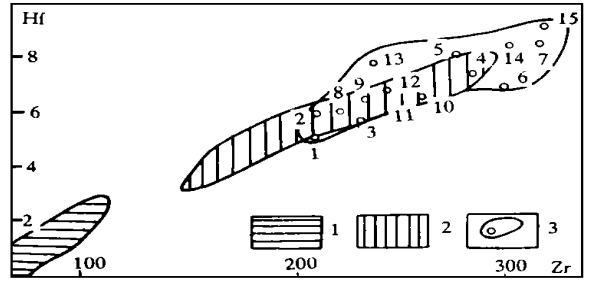


图 4 下扬子区上志留统、晚泥盆统五通组二叠系泥质岩 Zr-Hf 图解

1. 二叠系; 2. 上志留统; 3. 五通组

Fig. 4 Zr-Hf diagram for pelites from Upper Silurian, Lower Devonian (Wutong Fm.) and Permian

的时期(图 4)。

3.4 Rb、Ba、Sr 元素

据 F. A 肯姆贝尔和 G. D 威廉姆斯的研究表明^[6], Rb/K 比值随盐度而变化, 一般正常的海相页岩中 Rb/K 比值大于 0.006, 而微咸水的页岩中 Rb/K 比值大于 0.004, 淡水沉积物中均为 0.004 以下。对 15 个样品进行 Rb/K 比值分析(表 1)发现, 有 12 个样品的 Rb/K 值介于 0.004~0.006 之间。有两个在 0.006 以上, 有一个在 0.004 以下。几乎都在 0.004~0.006 附近, 偏离不大, 所以这些样品处的沉积环境绝大多数为海陆过渡相。

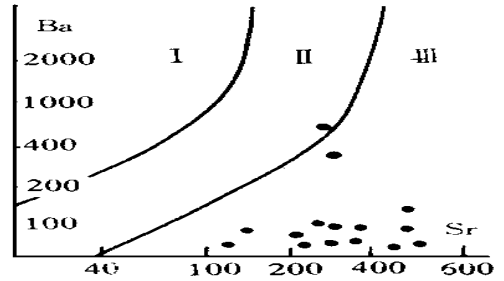


图 5 五通组泥岩类 Ba-Sr 图解

I. 淡水区; II. 半咸水区; III. 咸水区

Fig. 5 Ba-Sr diagram for pelite from Wutong Fm.

根据 Ba 和 Sr 的含量关系的古海水盐度特征与 Rb/K 所反应的古海水盐度特征有一定的差异, 15 个样品中, 除 2 号样落入半咸水区外, 其余均位于咸水区(图 5), 这种差异可能是由于成岩作用导致 Rb、K、Ba、Sr 的不同程度的迁移所造成的。

3.5 主化学组分

利用砂岩、泥质岩的主化学成分, 可以有效地判

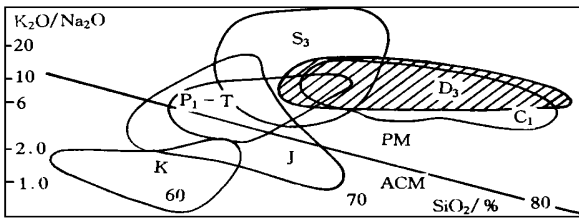


图 6 下扬子区古生界、中生界泥质岩 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解
(阴影部分为五通组分布区, 其余时代泥岩分布范围据徐守礼博士后研究报告)

PM: 被动大陆边缘 ACM: 主动大陆边缘

Fig. 6 K_2O/Na_2O-SiO_2 diagram for pelites from paleozoic and Mesozoic in the Lower Yangtze region

扬子区自晚泥盆世开始, 接受五通组沉积, 其沉积构造及沉积地球化学特征表明, 五通组的沉积过程是一个典型的海侵过程。由于浙东南地体与闽西北地体(岛弧型地体)在志留纪末碰撞而产生冲断构造及在下扬子板块一侧接受沉积, 形成典型的前陆弧后盆地沉积建造, 根据近年来石油钻井及区域资料编制的五通组区域岩性特征分析, 前陆盆地的沉积拗陷中心在下扬子区南部浙西地区, 中部泾县—常州一带为前陆斜坡, 铜陵—南陵及休宁—宁国为中央隆起带。弧后前陆盆地沉积一直持续到早石炭世末。

致谢: 本文是在郭令智教授、秦顺亭教授指导下完成, 在此谨致谢忱。

参 考 文 献

断沉积盆地的构造环境^[3]。一般来说, 被动大陆边缘有较高的 K_2O/Na_2O 比值, Fe_2O_3, MgO 含量低特征。五通组的 K_2O/Na_2O 值一般大小 10, MgO 均小于 1%, 显然属于被动大陆边界。Roser 根据 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解来判断岩石形成构造环境, 实质上这一图解是碎屑物源与构造环境的综合体现。图 5 给出五通组在 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解中的分布范围, 同时也标出了 S_3, C_1, P_1-T, J, K 等时期泥质岩及碎屑岩的分布范围, 从图上可以看出, 早石炭世是晚泥盆世沉积环境的继续, 而与 S_3, P_1-T 及 J, K 形成明显差异, 尤其是 S_3 与 D_3 的差异, 应是构造体制转换的记录。

4 结 论

通过以上的研究, 可以认为: 苏、浙、皖地区的晚泥盆世五通组是以滨海相沉积为主, 间有三角洲、沼泽等一套陆缘沉积建造。

由于下扬子区震旦纪以来, 仅缺失早、中泥盆世沉积, 五通组不整合于下伏下古生界之上。因此, 五通组对于下扬子地区是一个沉积盆地发展演化的转折标志。

根据前人对下扬子地区晚震旦世至志留纪沉积建造的研究成果^[10, 11], 我们认为下扬子地区在晚震旦世至志留纪期间, 为被动大陆边缘拉张(主要在下扬子北部)和弧后拉张(主要在南部)两种深部地质背景下的拉张盆地。在志留纪末, 由于浙东南地体与闽西北地体的碰撞作用达到高峰, 造成下扬子地区整体抬升, 使得该区缺失早中泥盆世的沉积。下

- 1 安徽省地矿局区测队, 安徽地质志, 泥盆系和石炭系分册[M]. 合肥: 安徽科技出版社, 1989. 206
- 2 丁道桂, 李萍, 吕俊祥, 下扬子区晚古生代含油气盆地原型[J]. 石油实验地质, 1987, 9(3): 272~281
- 3 方邮森, 任磊夫. 沉积岩石学教程[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 337
- 4 科林森 J D, 汤普森 D B. 沉积构造(中译)[M]. 北京: 地质出版社, 1988. 164
- 5 吕洪波. 苏南五通组风暴沉积与三脊波痕[J]. 石油与天然气地质, 1992, 13(3): 284~292
- 6 刘英俊. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 548
- 7 王益友, 郭文莹, 张国栋. 几种地化标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学报, 1979, 2: 52~61
- 8 王益友, 吴萍. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志[J]. 同济大学报, 1983, 4: 80~87
- 9 吴贤涛, 胡斌, 王观忠. 苏南皖东五通群观山组的近岸风暴沉积与潮道沉积[J]. 石油实验地质, 1986, 8(4): 351~361
- 10 夏邦栋, 吕洪波. 一个已埋藏的造山带探讨[J]. 沉积学报, 1990, 8(2): 1~8
- 11 夏邦栋, 吕洪波. 苏浙皖地区沉积大地构造演化[J]. 地质学报, 1988, 4(3): 01~310
- 12 俞鸿年, 卢华复. 构造地质学原理[J]. 北京: 地质出版社, 1986. 345
- 13 张国栋, 朱静昌, 王益友. 苏皖地区晚泥盆世五通组海侵及其沉积环境讨论[J]. 地质评论, 1987, 33(1): 69~77
- 14 张国栋, 王益友, 朱静昌等. 现代滨岸风暴沉积——以舟山普陀岛骨尖岛为例[J]. 沉积学报, 1987, 1(2): 17~28
- 15 赵澄标. 试论安徽巢县五通组沉积相[J]. 石油与天然气地质, 1988, 9: 40~45
- 16 Weimer R J, Howard J D, Lindsay D R. Tidal Flats. In: Scholle P A, Spearing D, eds. Sandstone Depositional Environment[s]. C. J. A. A. P. G., Tulsa Oklahoma, 1982. 191~246