

根据化学组分的多元统计分析探讨长江下游 下、中石炭统白云岩的时代划分与对比

严幼因

武耀诚

(南京地质矿产研究所)

(南京大学地质系)

一、问题的提出

长江下游苏浙皖地区黄龙组底部普遍发育一套白云岩,厚度数米至数十米不等。白云岩层的分布情况,大致以丹阳—怀宁一线为界,南北两区各有不同。北区,在茅山以西宁镇—巢县一带,其层位位于和州组之上,黄龙组之下。南区,在茅山以东宜兴、长兴、广德及宣城、铜陵、贵池一带,其层位位于黄龙组底部,与高骊山组或五通组呈假整合接触,底部普遍发育一层石英砾岩。关于这套白云岩的成因和时代归属问题,自1959年夏邦栋提出“老虎洞白云岩”以来,教学、科研和生产单位的广大地质工作者先后做过很多研究工作。就时代归属而言,目前存在各种不同观点,归纳起来,大致有如下四种意见: 1. 一层论,即北区、南区的白云岩均属中石炭统黄龙组底部(朱绍隆等,1974,胡世忠,1981); 2. 二层论,北区称老虎洞白云岩(或老虎洞组),时代为早石炭世晚期(或纳缪尔早期)。南区的白云岩属中石炭统黄龙组底部(夏邦栋,1959⁽¹⁾,陈华成等,1979⁽²⁾,陈敏娟等,1980⁽³⁾,夏广胜等,1980⁽⁴⁾,沈喜伦,1982⁽⁵⁾); 3. 三层论,第一层白云岩即老虎洞白云岩,分布在苏南茅山以西地区,时代为纳缪尔A期。第二层为丁山白云岩,分布在苏南茅山以东地区,时代为巴什基尔晚期。第三层为花石山白云岩,时代为莫斯科初期。(俞学光,1978); 4. 穿时论,即老虎洞白云岩与黄龙组底部白云岩为穿时现象,相当异期同相(张瑛等1983⁽⁶⁾)。

另外,老虎洞白云岩的上覆地层团块状白云质巨晶灰岩(通称“粗晶灰岩”)的时代归属及与南区黄龙组底部白云岩如何对比,也是一个尚待解决的问题。夏邦栋(1959)认为,在白云岩之上粗晶灰岩之下,有一层全由下伏层之白云岩碎块组成的底砾岩存在,白云岩与粗晶灰岩之间为平行不整合接触(即李四光1939年提出的“淮南运动”)——这一观点已被部分地质工作者所接受;而张瑛等(1983)则认为,老虎洞白云岩的厚度应当包括上述具有白云岩块的粗晶灰岩在内。

白云岩层是长江下游层控矿床的有利层位,搞清这套白云岩的时代归属具有重要意义。但是白云岩的沉积环境不利于生物的生存与繁殖,用传统的生物地层学方法研究白云岩地层的划分与对比,往往十分困难。特别是,该区白云岩为一套典型的潮间—潮上

沉积环境的复杂岩性系列,具高度的变异性,诸如局部沉积环境的变异、白云化和去白云化作用的程度、陆源碎屑汇集的程度和随机高能事件(如风暴和震碎等)的影响等,单纯运用岩石地层学的方法,更是难以奏效。

本文以岩石、地层化学组分(其中包括常量元素和微量元素)的含量和相关结构为依据,运用多元统计的方法,对化验数据进行电算处理,也就是说,用统计分析与传统的岩石地层学研究相结合的方法,总结归纳出大量的统计规律和有用信息,为解决该地层的划分和对比带来了令人鼓舞的效果。

本文立论和使用的方法是以岩石化学组分的时空规律作为地质依据的。这些规律如同“化石”一样,同样是地质历史的见证。因为岩石的化学组分在地质历史的发展过程中,无时无刻不在发生变化,那些作为区域性因素出现的尤其是那些对时代划分起决定作用的较大变动,必然在岩石及其地层的化学组分上打上深刻的印记。一个岩石样品的化验结果,基本上反映了它自形成之日起直到被采样为止的全部地质经历,包括原始沉积、成岩作用、后生变化、变质作用、风化作用等各种周期性和非周期性地质作用的综合结果。因此,岩石、地层化学组分包含着丰富的时空信息,这就为地层的划分和对比提供了物质基础。

本文的主要目的是用多元统计方法解决白云岩地层的划分、对比问题。因此,对数学模型不作深入的探讨,也尽量回避一些繁杂的公式和参数,只重点阐述选用不同方法的依据和结论。另外,在总结岩石、地层化学组分的分布规律时,还涉及到大量的金属元素地球化学规律,虽然它们对分析成矿条件具有一定的参考价值,但这已超出本文讨论的范畴,因而也不准备对这方面的问题作深入探讨。

二、解决问题的途径与方法

本文通过典型剖面(北区:江宁孔山、大连山,巢县银屏王家村、凤凰山剖面;南区:宜兴丁山青龙山,广德坡山,宣城王胡村剖面)的系统采样与研究,重点解决如下几个问题:1.北区巨晶灰岩的时代归属;2.南区黄龙组底部白云岩的划分及与北区老虎洞组的对比;3.凤凰山剖面的地层划分与对比。

解决问题的主要技术手段:

1. 野外系统观测、采样。

实测剖面7条,按1米左右等间隔系统采样,共采样144个。分析项目包括化学分析的常量组分CaO、MgO、K₂O、Na₂O、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、P₂O₅和直读光谱定量分析的Zn、Mn、Co、Cu、Ni、Sr、Ti、Pb、Ba、Cr、V共19个化学组分;

2. 镜下岩石薄片鉴定133片*;

3. 化验数据的多元统计分析,全部电算处理在国产TQ-16机上进行。涉及到的多元统计方法有对应分析、判别分析、聚类分析、模糊K-均值聚类分析、剖面对比的移动相关分析、趋势面分析及数据的正态转换技术等。

* 薄片鉴定全部由毕仲其同志完成。

三、主要成果及地质解释

(一) 岩石地层学特征

剖面描述见本期《苏浙皖地区黄龙组下部白云岩实测地层剖面》一文。

(二) 化学组分的多元统计分析

1. 北区地层化学组分的时代标志

作为地层划分和对比的可靠标志，必须选择那些在时间上变化灵敏，在空间上相对稳定的因素为指标。只有满足了这样的要求，才能起到“标准化石”的作用。然而，化学组分通常具有较强的随机性，利用这种指标远比利用标准化石复杂得多。当借助于多元统计方法处理化验数据时，必须首先了解其统计特性，尽量排除随机干扰，取其规律

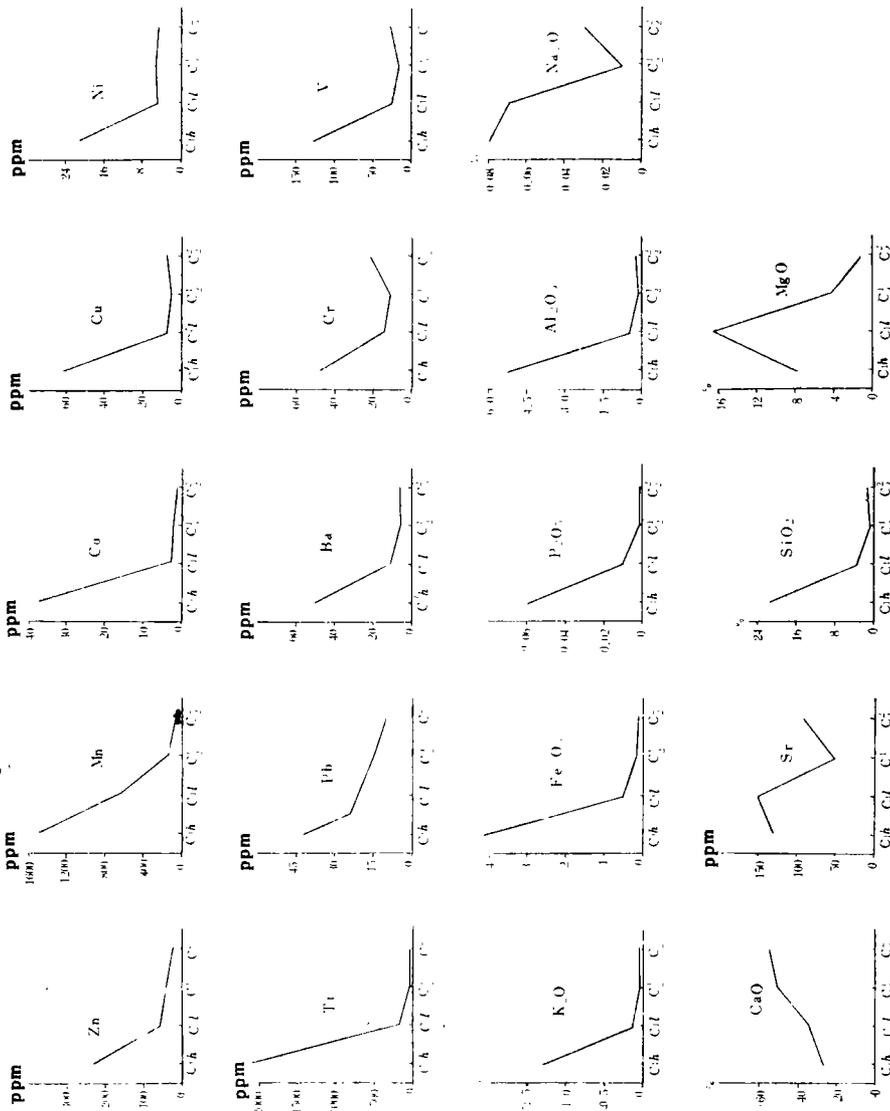


图1 北区下、中石炭统孔山、大连山、银屏剖面19个化学组分的含量变化曲线图

性因素进行研究，必要时还要研究其频率分布特征，进行正态转换，以提高分析效果。

(1) 地层化学组分自下而上的变化规律 将孔山、大连山、银屏王家村三条代表性剖面的77个样品，按前人的地层划分意见，自下而上概括为和州灰岩、老虎洞白云岩、巨晶灰岩、纯灰岩四种岩性层位，分别计算出19个变量（即化学组分）的平均值和相关系数，作成平均值变化曲线图和R型聚类谱系图（图1，图2—图5）。

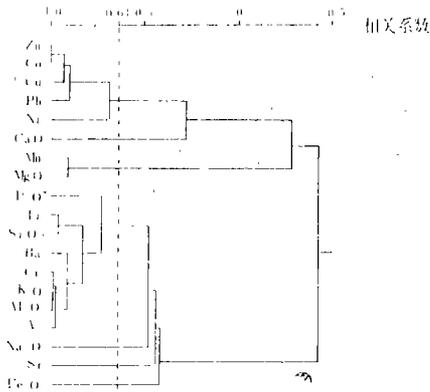


图2 北区孔山、大连山、银屏剖面
和州灰岩 R型聚类谱系图

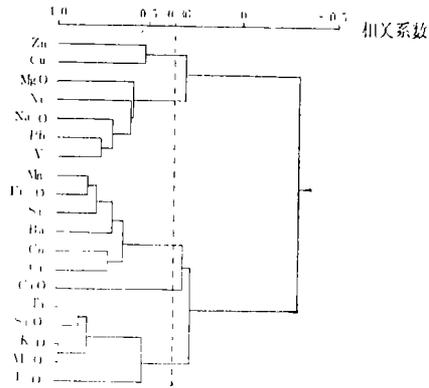


图3 北区孔山、大连山、银屏剖面
老虎洞白云岩 R型聚类谱系图

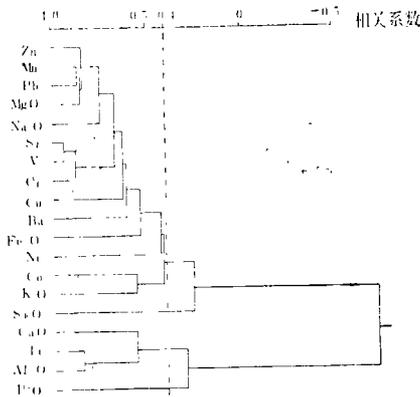


图4 北区孔山、大连山、银屏剖面
巨晶灰岩 R型聚类谱系图

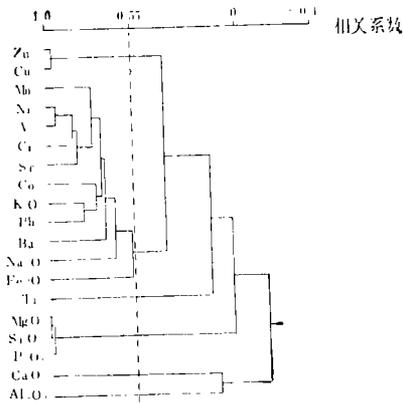


图5 北区孔山、大连山、银屏剖面
黄龙灰岩 R型聚类谱系图

由图1看出，19个变量自下而上的演化趋势有如下四种类型：1) 自下而上逐渐降低的化学组分有Zn、Mn、Co、Pb、Fe₂O₃、MgO、Sr、Cr、V、K₂O、Ba、SiO₂、Al₂O₃，其中和州灰岩MgO的含量低于老虎洞白云岩，纯灰岩的Sr、Cr、V、K₂O、Ba、SiO₂、Al₂O₃又高于巨晶灰岩；2) CaO自下而上逐渐增高；3) Cu、Ni在老虎洞白云岩、巨晶灰岩和纯灰岩中的含量基本一致，唯独在和州灰岩中明显增高；4) Ti、Na₂O、P₂O₅在巨晶灰岩和纯灰岩中含量基本一致，且最低，自老虎洞白云岩至和州灰岩明显增高。

从含量的演化趋势来看,以第1、第2种类型的化学组分具明显的时代特征。

(2) 地层化学组分的相关结构 图2至图5给出了四个岩性层位19个变量的R型聚类谱系图。从这些图中可以看出,化学组分之间的成因联系由老到新大致有如下演化规律:

1) 粘土质组分的共生组合,自下而上逐渐减弱以至消失。由图2可见,和州灰岩中 K_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、Ti、 P_2O_5 (Cr、V、Ba)密切相关,其相关系数在0.73以上(在信度5%下,相关系数临界值用虚线标注在图2—图5中),老虎洞白云岩含有相应的组合 K_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、Ti、 P_2O_5 (>0.53 —相关系数,下同),巨晶灰岩为Ti、 Al_2O_3 、 P_2O_5 (CaO)组合(>0.3),纯灰岩为 SiO_2 、 P_2O_5 (MgO)组合(0.99),这些特征反映了和州灰岩中粘土质成分占一定优势,Cr、V与粘土矿物相伴生。老虎洞白云岩的粘土质组分仍为一稳定组合。而巨晶灰岩和纯灰岩则明显不同。

2) Fe_2O_3 与Mn的特征。老虎洞白云岩中 Fe_2O_3 与Mn密切相关(0.83),并与Sr、Ba共生;Sr的含量为151.51PPm,居各层位之首。巨晶灰岩中 Fe_2O_3 与Mn的相关系数为0.73,纯灰岩为0.65,和州灰岩为0.32。在和州灰岩和纯灰岩中 Fe_2O_3 均具有较强的独立性(图2,图5)。巨晶灰岩中 Fe_2O_3 与Mn虽有一定联系,并与Sr、Ba、MgO在同一个相关组合中(图4)。但由于去白云化作用的影响,随MgO的降低, Fe_2O_3 、Mn、Sr、Ba的含量均有明显下降。和州灰岩中 Fe_2O_3 、Mn含量最高,Mn与MgO的相关系数为0.91, Fe_2O_3 具显著的独立性,这一特点表明 Fe_2O_3 与Mn并非同源。而老虎洞白云岩的 Fe_2O_3 、Mn、Sr、Ba为同源组合。

3) MgO的地球化学行为。MgO在目标地层中的作用举足轻重,它除了对岩石基本类型起决定作用外,还在岩石成因上起着十分重要的作用。

在和州灰岩中,MgO与Mn密切相关(0.91),构成一个独立的组合,表明二者之间有成因联系,而与其它组分不相干。老虎洞白云岩中与MgO有成因联系的组分是 Na_2O (0.59)、Ni(0.53)、Pb(0.52)、V(0.42),但相关较松弛。巨晶灰岩中与MgO有关的为Pb(0.86)、Mn(0.83)、Zn(0.84)、 Na_2O (0.67),其相关程度较强,表现了去白云化作用的特点,即随MgO的降低,明显地带出了Pb、Zn、Mn、 Na_2O 等组分。纯灰岩的MgO与 SiO_2 (1.0)、 P_2O_5 (0.99)密切相关,但含量甚微,表现了正常海水中的组分特征。

4) CaO的地球化学行为。尽管CaO的含量表现出由老到新逐步增高的规律性变化,但由图2—图5可以看出,CaO在成因上具明显的独立性,只在巨晶灰岩中以相关系数0.57的水平,与Ti、 Al_2O_3 有松弛的联系。这一特点表明,多数组分不受CaO的制约。

5) 金属元素的特征。和州灰岩的Zn、Co、Cu、Pb(Ni)为一强相关组合(>0.90)。这些元素的含量很高,构成本区以有色金属高浓度共生组合为特征的层位。老虎洞白云岩主要包含二个组合,一为与MgO、 Na_2O 有关的V、Pb、Ni组合(>0.61),一为Cu、Zn组合(0.53)。巨晶灰岩具有一个与MgO、 Na_2O 相关的元素组合,其中与MgO、 Na_2O 联系最密切的是Zn、Mn、Pb组合(>0.75),其次是Sr、V、Cr组合(>0.67)和Cu(>0.63)。这些元素都在去白云化作用中,随着MgO、 Na_2O 的降低

而明显地被带出。纯灰岩中Zn、Cu相关(0.96),但独立性强,含量低,Ni、V、Cr、Sr、Mn、Co、K₂O、Pb、Ba之间有相当广泛的联系(>0.71)。这一组合在含量上略高于巨晶灰岩,反映了正常海永中金属元素的组合特征。

综上所述,北区地层化学组分的变化,自下而上,有明显的规律性。我们感兴趣的只是从这些规律中提取对地层划分、对比有指导意义的数字指标。从这一目的出发,是否可以直接利用19个变量的含量变化去解决地层问题呢?如果对一个岩性系列较为简单的地区,这也许有一定效果。但对象本区这样一个以白云岩为主的复杂岩性系列,事情就不那么简单了。这是因为:①不同时代的地层可以有类似的岩性,而类似的岩性往往又具有某些类似的化学组分特征,如果不区分每个化学组分的时代意义,那岂不是把本来属于不同层位的地层人为地扯在一起进行不恰当的岩性划分与对比吗?②同一时代的地层可以有不同的岩性,而不同的岩性往往又具有不同的化学组分特征,如果不考虑每个化学组分的时代意义,那岂不又是把本来属于同一层位的地层仅因岩性上的差异被人为地割裂开来而不能对比了吗?

解决这个问题的关键,应采用多元统计分析中的成因解析技术,把带有各种地质经历印记的大量原始数据,按照不同的物理意义进行分析,从中分离出对划分地层有实际意义的指标。这种指标已不是某种化学组分的含量,而是原始化学组分的某种线性组合。下面采用的对应分析就是一种常用的方法。

(3) 对应分析 根据北区孔山、大连山、银屏王家村三条剖面的77个样品19个变量的化验数据所作的对应分析,前三个主因子的特征值累计百分比为88%,反映了原始数据的绝大部分信息。主要成果反映在F₁F₂因子平面图(图6)和F₁F₃因子平面图(图7)上。

由图6可见,分布在F₁因子正端的变量为Ti、K₂O、Al₂O₃、SiO₂、P₂O₅,落在该区的样品为孔山、大连山、银屏王家村3条剖面中和州组的泥岩。其余绝大多数样品落在F₁因子的负端,部分生物碎屑灰岩、泥灰岩落在二者之间。因此,F₁因子的物理意义是反映岩石中泥质成分的多寡。集中在F₁负端的碳酸盐岩样品,它们沿着F₂因子轴又有着规律性分布。分布在F₂负端下方的样品是和州灰岩,向上过渡为老虎洞白云岩,再向上至F₂因子正端则全部为巨晶灰岩和纯灰岩,而且巨晶灰岩和纯灰岩交错重迭,显然,F₂因子的物理意义是碳酸盐岩的岩性分类。

综合F₁、F₂因子所代表的物理意义,图6所展示的样品点群只能是样品的岩性分类,不能提供时代信息。

图7为F₁F₃因子平面图,其中F₁所代表的意义前已叙及。F₁负端仍分布着碳酸盐岩样品,但它们沿F₃轴的分布与F₂显著不同。F₃负端的下方为和州灰岩,依次向上,随F₃因子得分的增高,逐渐由老虎洞白云岩过渡为巨晶灰岩,最上方为纯灰岩。从图中三条不同虚线可分别看出孔山、大连山、银屏王家村三条剖面由老到新的演化特点。尽管银屏剖面比孔山、大连山剖面的相应层位向上移动了一个距离,但基本规律仍是一致的。显然F₃因子具有时代意义,它为我们提供了北区地层自下而上表现在化学组分上的时代信息。与这种信息有密切关系的变量,主要是Zn、Mn、Co、Sr、Ba、Cr、V、CaO、Fe₂O₃,9个化学组分。

探讨长江下游下、中石炭统白云岩的时代划分与对比

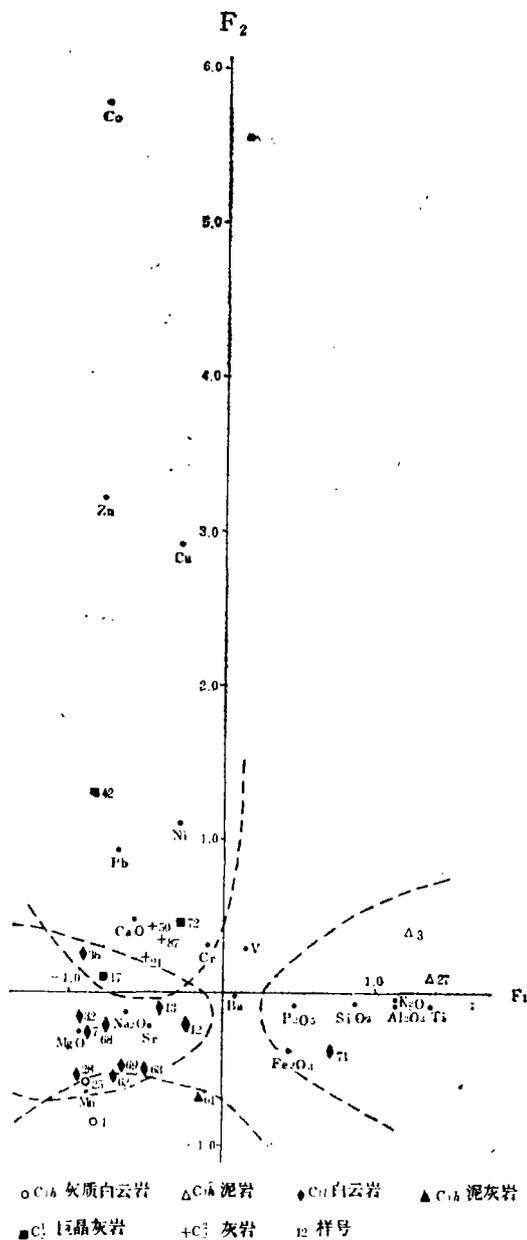


图6 北区下、中石炭统对应分析 F_1 、 F_2 因子平面图

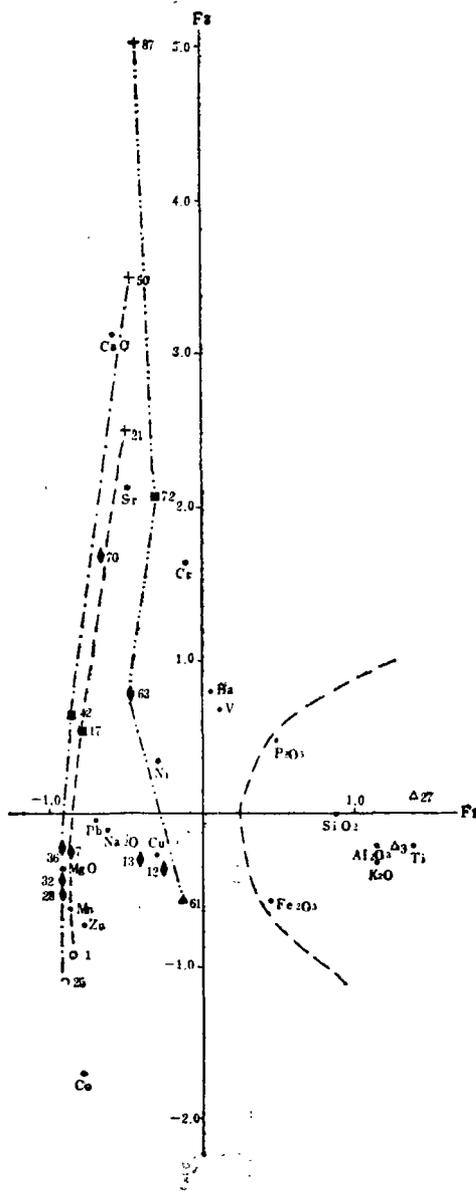


图7 北区下、中石炭统对应分析 F_1 、 F_3 因子平面图

对每个样品来说， F_3 因子得分的大小指示着沉积时代的早晚： F_3 值愈小，时代越早； F_3 值愈大，时代越晚。除少数样品有随机波动外，总体趋势是十分明显的。图8、9显示了孔山、大连山剖面自下而上全部样品的 F_3 因子得分变化曲线。银屏王家村、凤凰山剖面也具有同样规律。

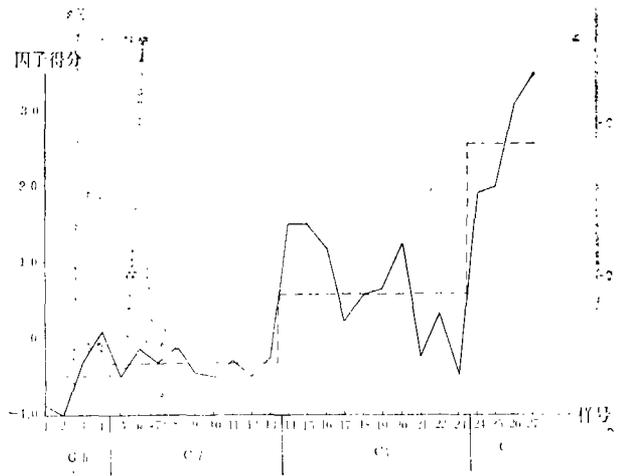


图8 大连山剖面下、中石炭统 F_3 因子得分曲线图

综上所述，通过对应分析，选定 F_3 因子样品得分作为时代标志，其变量组合主要为Zn、Mn、Co、Sr、Ba、Cr、V、CaO、 Fe_2O_3 9个化学组分。也就是说，这9个化学组分对时代划分具有决定意义。

2. 北区巨晶灰岩的时代归属

鉴于巨晶灰岩缺乏化石作为确定时代的依据，要解决它的时代问题，必须另辟蹊径。本文经对应分析，提取 F_3 因子作为时代标志，由图7可知，巨晶灰岩与其上覆的纯灰岩和下伏的老虎洞白云岩在时代标志上都有明显区分。据此，可对其时代归属作如下分析：

在北区77个样品的基础上，按剖面的层位计算样品均值，归并为23个单层，选择Zn、Mn、Co、Sr、Ba、Cr、V、CaO、 Fe_2O_3 9种化学组分为变量，依据费歇准则进行三类二维判别分析⁽⁹⁾，把孔山、大连山、银屏王家村三条剖面的和州灰岩(第1类)、老虎洞白云岩(第2类)、纯灰岩(第3类)作为已知的三类，利用二个判别函数构成二维平面上的二个坐标，决定待判层位巨晶灰岩(第0类)的时代归属，判别结果见表1和图10。

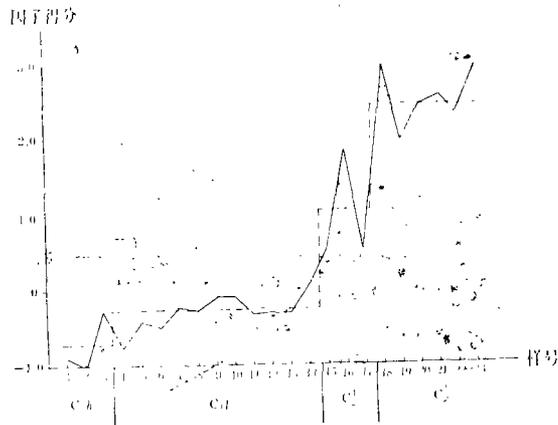


图9 孔山剖面下、中石炭统 F_3 因子得分曲线图

探讨长江下游下、中石炭统白云岩的时代划分与对比

表1 北区下、中石炭统三类二维判别分析结果表

剖面	层号	初始分类	判别得分		判别分类	剖面	层号	初始分类	判别得分		判别分类
			D ₁	D ₂					D ₁	D ₂	
大连山	14	3	0.164	0.876	3	银屏	23	3	0.209	0.774	3
	13	0	0.141	0.440	3		22	0	0.222	0.742	3
	12	2	0.096	0.191	2		21	2	0.101	0.202	2
	11	2	0.108	0.154	2		20	2	0.089	0.454	2
	10	2	0.086	0.199	2		19	2	0.028	0.072	2
	9	2	0.099	0.177	2		18	2	0.079	0.220	2
	8	1	0.639	0.301	1		17	2	0.110	0.158	2
孔山	7	3	0.199	0.724	3	16	2	0.074	0.188	2	
	6	0	0.198	0.582	3	15	1	0.655	0.240	1	
	5	2	0.110	0.263	2	综合	C ₂ L	0.191	0.791	3	
	4	2	0.124	0.152	2		C ₁ L	0.091	0.201	2	
	3	2	0.082	0.192	2		C ₁ h	0.655	0.223	1	
	2	2	0.094	0.197	2						
	1	1	0.669	0.137	1						

图10表明, 已知三类的重心(即均值判别得分, 用粗体符号表示)有明显区分, 待判的三个巨晶灰岩层位全部落入纯灰岩区内, (其中, 6号样为孔山巨晶灰岩层, 13号样为大连山巨晶灰岩层, 22号样为银屏王家村巨晶灰岩层), 可见, 巨晶灰岩在时代上更接近于纯灰岩。因此, 下、中石炭统的分界应划在巨晶灰岩之下。

3. 南区白云岩段的化学组分特征及其时代标志

采用类似北区的研究方法, 对南区丁山、坡山、王胡村三条剖面的39个样品19个变量的原始数据作了对应分析。为了增强南区样品的代表性, 提高统计效果, 对化验数据均做了正态转换^[7]。对应分析的结果, 前三个主因子的特征值累计百分比为94%。在F₁、F₂因子平面图(图11)中, F₁因子轴的正端为石灰岩样品, 负端为白云岩样品, 二者之间为白云质灰岩, 可见, F₁因子的物理意义也只在于区分岩性。白云岩样品在F₂因子上按时代早晚却有了明显的区分, 三条剖面各层位的F₂因子得分如图11中虚线所示, 随F₂值由大到小(由正端到负端), 相应也都反应了地层时代由老到新的演化。其有关的变量组合为SiO₂、Na₂O、

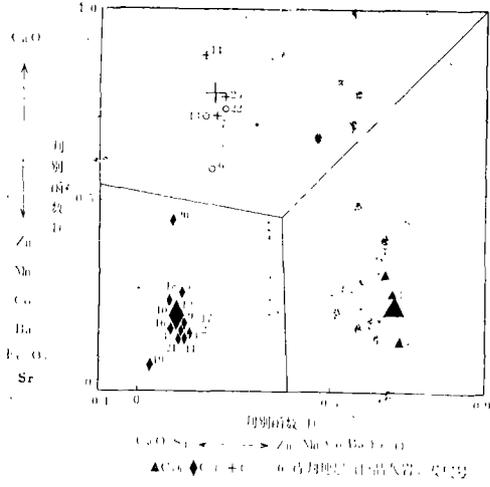


图10 北区下、中石炭统三类二维判别得分图

Fe₂O₃、Al₂O₃、K₂O、Ti、Mn、P₂O₅、Ni、CaO。三条剖面由下而上的F₂因子得分变化曲线图见图12—图14。

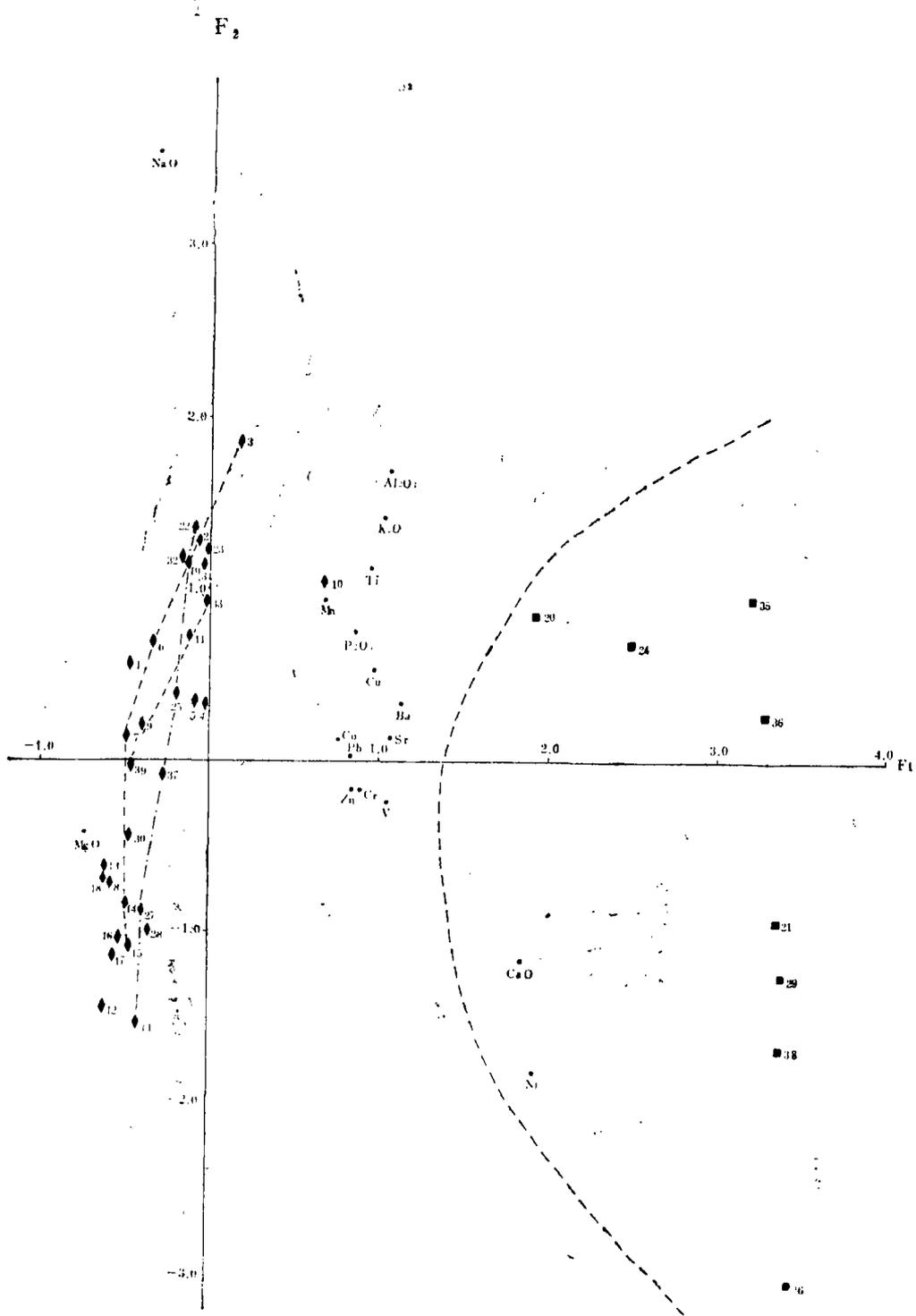


图11 南区白云岩段对应分析F₁F₂因子平面图

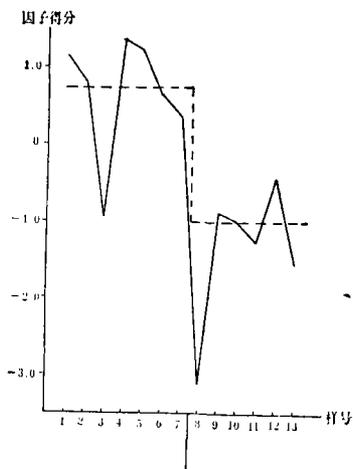


图12 坡山剖面时代不明地层 F_2 因子得分曲线图

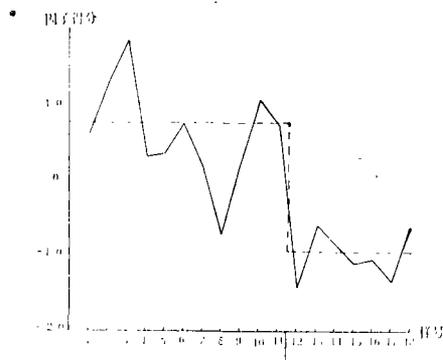


图13 丁山剖面时代不明地层 F_2 因子得分曲线图

从上述三个图中可以看出二条共同规律：一是 F_2 因子得分在总体上随层位由老到新作由高到低的规律变化；二是因子得分的变化不是直线下降，而是呈阶梯状跳跃式变化。这一特点在北区孔山、大连山剖面（图8、图9）也同样存在，而且其中的突变点又恰恰是地层的划分界线。这就给了我们一个很有意义的启示：南区白云岩段并不是单一的一套白云岩地层，其中应该存在一条明显的地层界线。这为解决南、北两区白云岩的地层对比，提供了一条新的信息。

有关南区白云岩段的进一步划分问题，后面再作详述。现仅就整个白云岩段的化学组分相关结构作一介绍。

图15、图16为丁山、坡山剖面R型聚类谱系图。由图中可以看出，二条剖面化学组分的相关结构十分相似，都含有一个Ti、 K_2O 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 组合（丁山0.90，坡山0.87），相关十分显著，表明 Fe_2O_3 与粘土质组分有着密切的成因联系。另外，它们也都含有一个Co、Cr、V、Ni组合（丁山0.53，坡山0.61）。

4. 南区白云岩段与北区下、中石炭统的对比

南区白云岩段是否应进一步划分？如何划分，其界线在哪里？它们与北区如何对比？所有这些问题都将在下面通过多种途径逐一加以讨论。

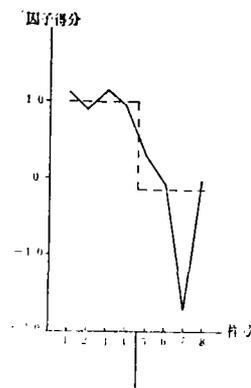


图14 王胡村剖面时代不明地层 F_2 因子得分曲线图

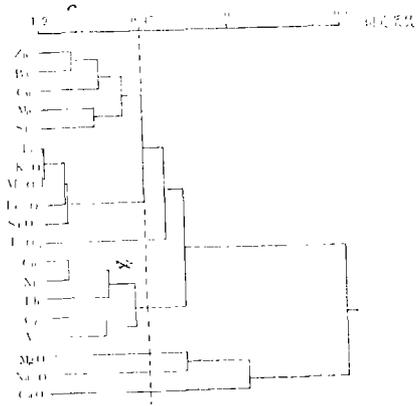


图15 南区丁山剖面白云岩段R型聚类谱系图

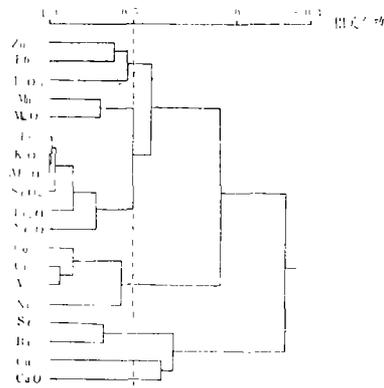


图16 南区坡山剖面白云岩段R型聚类谱系图

1) 模糊K—均值聚类分析^[8]。考虑到南、北两区的沉积环境有所不同,其内部的变异南区比北区大。加之,两区物质来源、去白云化程度、构造运动的影响也有不同,这就

表2 南区丁山、坡山、王胡村剖面与孔山、大连山、银屏剖面的模糊K—均值聚类的部分结果(正态变量,剔除CaO、MgO)

剖面	样号	模糊聚类隶属度			模糊聚类结果	最终划分意见	剖面	样号	模糊聚类隶属度			模糊聚类结果	最终划分意见	
		1	2	3					1	2	3			
丁山	18	0.20	0.56	0.25	2	上部	坡山	13	0.22	0.56	0.22	2	上部	
	17	0.27	0.39	0.33	2			12	0.23	0.57	0.20	2		
	16	0.25	0.52	0.23	2			11	0.23	0.54	0.23	2		
	15	0.29	0.44	0.27	2			10	0.30	0.45	0.25	2		
	14	0.27	0.52	0.21	2			9	0.18	0.67	0.15	2		
	13	0.23	0.50	0.27	2			8	0.23	0.50	0.27	2		
	12	0.17	0.68	0.16	2			7	0.37	0.21	0.42	3		
	11	0.66	0.15	0.19	1			6	0.55	0.22	0.22	1		
	10	0.52	0.27	0.21	1			5	0.70	0.12	0.17	1		
	9	0.36	0.44	0.20	2			4	0.59	0.22	0.20	1		下部
8	0.29	0.34	0.37	3	3	0.26	0.51	0.23	2					
7	0.44	0.27	0.29	1	2	0.51	0.27	0.22	1					
6	0.63	0.14	0.24	1	1	0.60	0.18	0.22	1					
王胡村	5	0.52	0.17	0.31	1	下部	王胡村	8	0.30	0.51	0.19	2	上部	
	4	0.55	0.15	0.30	1			7	0.26	0.41	0.33	2		
	3	0.57	0.19	0.25	1			6	0.52	0.27	0.21	1		
	2	0.52	0.18	0.30	1			5	0.28	0.56	0.16	2		
	1	0.48	0.24	0.28	1			4	0.52	0.26	0.22	1		
								3	0.60	0.17	0.24	1		
								2	0.59	0.16	0.25	1		下部
								1	0.45	0.29	0.26	1		

使地层对比的难度进一步增大。南区白云岩段内部的分层可能没有明确的指标而具一定的模糊性，因此采用模糊K—均值聚类分析，利用隶属度（未知样品归属某类的程度）的概念来划分地层可能更为有利。

以北区孔山、大连山、银屏王家村剖面的老虎洞白云岩、巨晶灰岩和纯灰岩为已知的1、2、3类，与待判的南区丁山、坡山、王胡村剖面的各个单层共108个样品进行对比。为了防止岩性干扰，从19个化学组分中剔除CaO和MgO，其余17个变量均作正态转换。表2列出了南区三条剖面模糊K—均值聚类的对比结果。

由表2可以看出，三条剖面的白云岩段下部和上部都有明显差别，尽管其过渡部分和个别样品有反常现象，但总的趋势十分明显，而且表中列出的最终划分意见与图12—图14按因子得分划分的界线完全一致。其上部可以与巨晶灰岩对比，下部与老虎洞白云岩大体相当（注意，这里提出的大体相当，是因为下面将证明它们还不能作整体的对比，而只是对比其中的一部分）。

2) 剖面对比的移动相关分析*

图17、图18以大连山剖面（已知）与坡山剖面（待定）为例，从259次削头、截尾

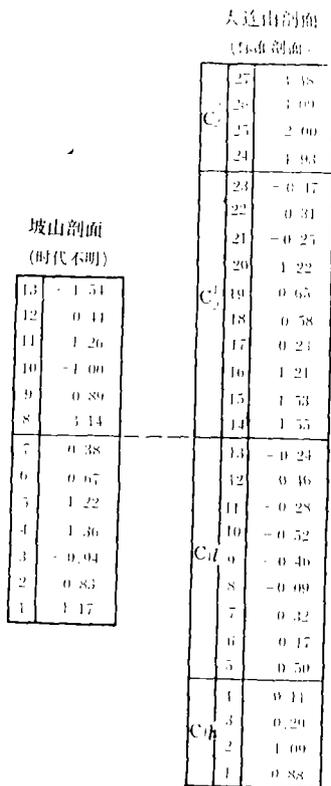


图17 坡山剖面与大连山剖面样品因子得分对比图

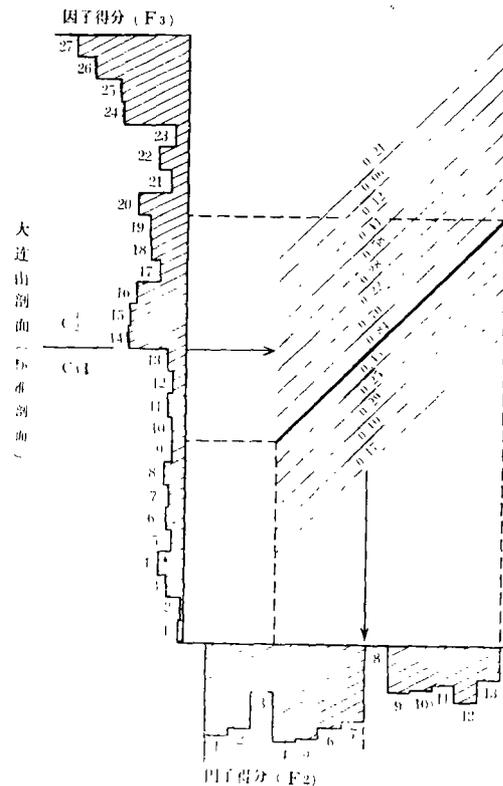


图18 坡山剖面与大连山剖面三次截尾移动相关分析对比图

* 武耀诚，剖面对比的移动相关分析（待刊）。

移动相关系数计算结果中选出的三次截尾移动相关分析图式，其最佳匹配位置（如图中粗黑线所示）的局部相关系数最大值为 -0.84 （因南、北两区沉积环境不同，相关系数的正负无关紧要）。

对比结果表明，坡山剖面样品7与样品8（相当层5与层6之间）之间存在一条地层界线。而且这条界线应与大连山剖面中老虎洞白云岩和巨晶灰岩之间的界线相当。

3) 值得指出的是，上述两种方法尽管从不同角度说明了一个共同问题，即一致认为南区白云岩段应该二分，上部与北区巨晶灰岩对比，下部与北区老虎洞白云岩相当，但对比中没有进一步说明南区白云岩段是与北区老虎洞白云岩的整体对比，还是局部相对比。这就牵扯到北区老虎洞白云岩是否也存在一个需要进一步划分的问题。

为了回答这一问题，在深入研究了北区老虎洞白云岩的化学组分特点之后，发现孔山、大连山剖面老虎洞白云岩的顶部层位相对其下伏层位有一定差异。图19表示的Q型聚类谱系图揭示了它们之间的联系与区别，即两个剖面的上部层位亲近，而和下部层位疏远。

进一步分析剖面资料，可以看出老虎洞白云岩顶部层位的岩石普遍含有陆源石英碎屑，通常称为“含砂白云岩”，其横向分布比较稳定（大连山层3，孔山层3，银屏王家村层5均有分布）。

这一特征应该是区域性构造运动的显示，是淮南运动在北区的反映。由于北区自金陵期至黄龙期为一连续沉积的海盆，早石炭世晚期至中石炭世基本未露出水面，故淮南运动对北区影响微弱。

基于上述认识，我们又把北区孔山、大连山、银屏王家村三条剖面划作已知四类，即老虎洞白云岩为第1类，含砂白云岩为第2类，巨晶灰岩为第3类，纯灰岩为第4类。在此基础上，利用贝叶斯准则进行逐步判别分析，而以丁山剖面白云岩段的上部和下部为待判的第0类。19个组合样品19个变量的判别结果见表3。从判别结果看，丁山剖面白云岩段下部可与北区含砂白云岩相对比，上部则与纯灰岩相当（综合考虑前述各种方法，应包括巨晶灰岩）。这表明北区老虎洞白云岩顶部的含砂白云岩确有分出的必要，它应该作为北区中石炭统的底界。最近，应中锷同志在江宁县大连山老虎洞剖面含砂白云岩层的上部分析出牙形刺*Idiognathoides corrugatus* (Harris et Hollingsworth)，其时代属中石炭世，也证明了上述结论的可靠性。

4) 南区白云岩段下部与上部的化学组分特征。通过南、北两区地层的对比，揭示了南区白云岩段二分的必要性，但是否能进一步在岩性特征上提出明确的划分标志呢？对照剖面描述资料可以看出，下部白云岩以灰岩为主，上部以白云岩夹灰岩为特征。在化学组分特点上（图20），上部层位除CaO、Ni高于下部外，其它组分均低于下部，尤以Zn、Mn、Cu、Ti、Pb、Ba、V、K₂O、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃等更为突出。

化学组分的相关性方面（图21、图22），白云岩段下部Fe₂O₃与Ti、K₂O、Al₂O₃、SiO₂密切相关（0.68），表明Fe₂O₃的富集与侵蚀面和粘土组分有成因联系；而上部

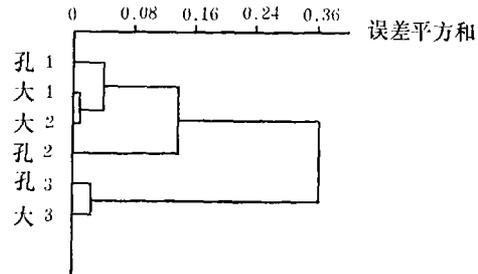


图19 孔山剖面与大连山剖面老虎洞白云岩分层Q型聚类谱系图

地层则 Fe_2O_3 与Mn密切相关(0.94),粘土组合Ti、 SiO_2 、 K_2O 、 Al_2O_3 与Sr、Ba密切(0.51),与 Fe_2O_3 、Mn、 P_2O_5 组合仅有较松弛联系。

通过以上分析,可以看出,大部分金属元素在白云岩段下部有较高的地球化学背景,是成矿的有利层位。

最近,陈华成、王云慧同志在系统地研究了南区白云岩段的鲕类之后,自上而下建立了二个化石带:上部为*Profusulinella*带,下部为*Pseudostaffella*带。他们的研究成果也与上述白云岩段应该二分的结论基本相符。

表3 南区丁山剖面与北区孔山、大连山、银屏剖面四类逐步判别结果表

分区	剖面	地 层 (自下而上)	原 始 类 号	判 别 结 果	后 验 概 率
北 区	孔 山	$C_{11}-1$	1	1	1.00
		$C_{11}-2$	1	1	1.00
		$C_{11}-3$ (含砂)	2	2	1.00
		C_{12} (巨晶)	3	3	1.00
		C_{13}	4	4	1.00
	大 连 山	$C_{11}-1$	1	1	1.00
		$C_{11}-2$	1	1	1.00
		$C_{11}-3$ (含砂)	2	2	1.00
		C_{12} (巨晶)	3	3	1.00
		C_{13}	4	4	1.00
	银 屏	$C_{11}-1$	1	1	1.00
		$C_{11}-2$	1	1	1.00
		$C_{11}-3$	1	1	1.00
		$C_{11}-4$	1	1	1.00
$C_{11}-5$ (含砂)		2	2	1.00	
C_{12} (巨晶)		3	3	1.00	
C_{13}		4	4	1.00	
南 区	丁 山	C_{12} (下)	0	2	1.00
		C_{12} (上)	0	4	1.00

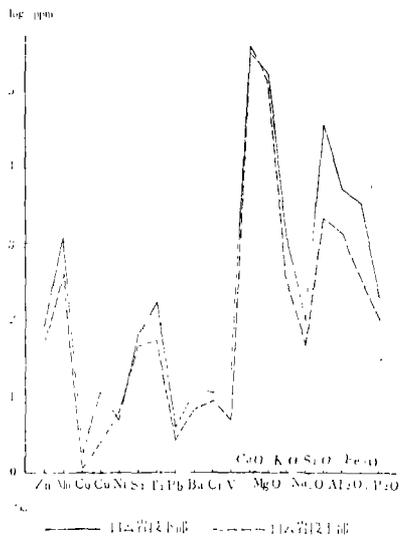


图20 南区白云岩段化学组分含量曲线图

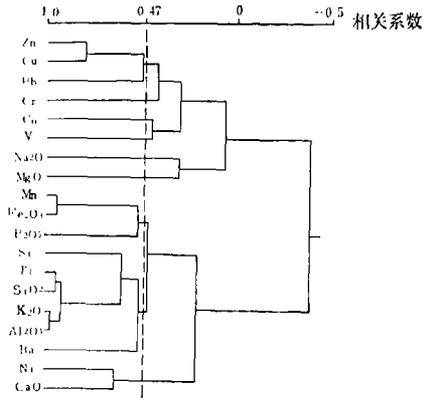


图21 南区白云岩段下部R型聚类谱系图

四、结 论

总括前述，长江下游北区与南区下、中石炭统的划分如下：

- 北区
 - 中石炭统 { 纯灰岩段
 - 黄龙组 { 巨晶灰岩段(底部为含砂白云岩层)
 - 下石炭统 { 老虎洞组(不包括含砂白云岩层)
 - (大塘阶) { 和州组

南区

- 中石炭统黄龙组 { 纯灰岩段
- { 白云岩段

北区与南区的柱状对比见图23。

基于这一对比结果，对该区的沉积环境、构造运动的认识，可初步归纳如下：

古地理环境受古构造控制。石炭纪时，本区地处下扬子凹陷，西北濒淮阳地质，南邻江南古陆。早石炭世晚期，由于受地壳升降运动和水平挤压运动的综合影响，北区与南区古地理面貌显著不同。北区在NW—SE向水平挤压运动的作用下，形成NE—SW向分布的狭长海弯，接受和州期的白云质灰岩和泥灰岩沉积。此时，南区以上升运动为主，遭受侵蚀，缺失和州期沉积。随着这种环境的持续发展，在升降运动和水平运动的

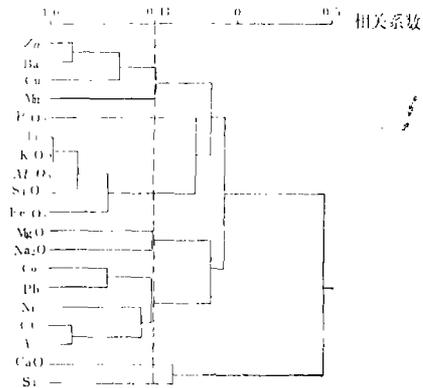


图22 南区白云岩段上部R型聚类谱系图

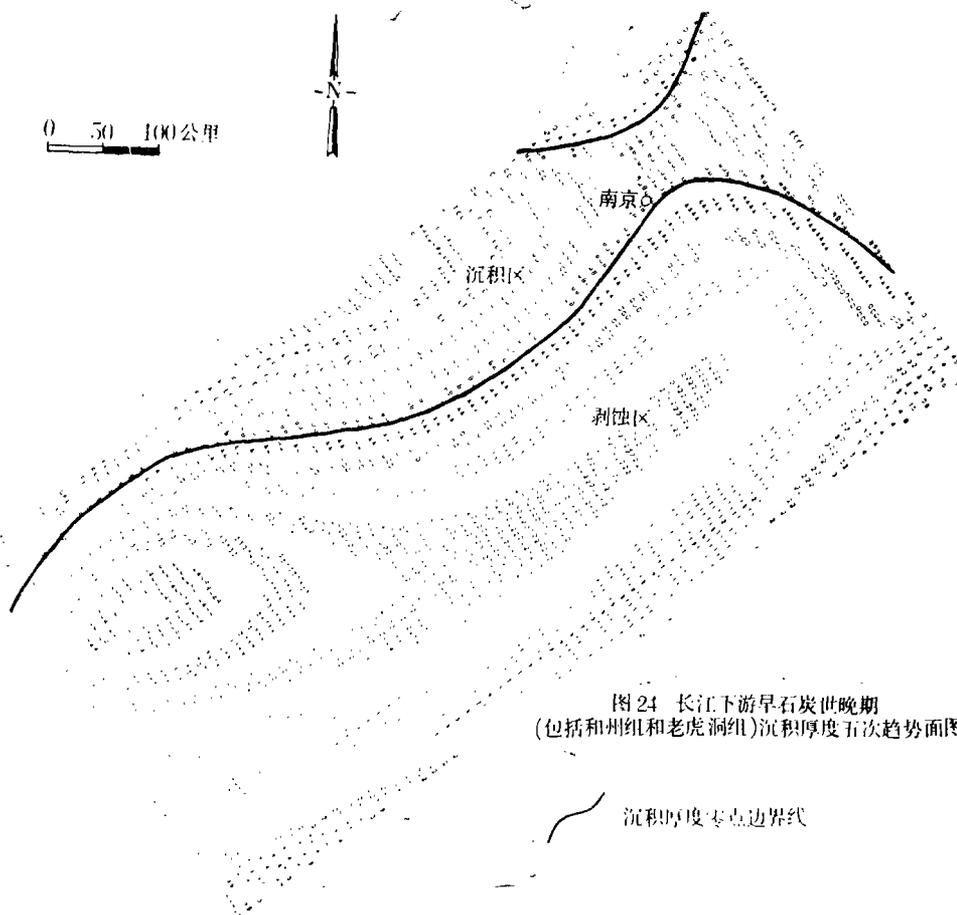


图24 长江下游早石炭世晚期
(包括和州组和老虎洞组)沉积厚度五次趋势面图

沉积厚度零点边界线

中石炭世初期,开始广泛海侵。由于海水来势缓和,时进时出,在南区起伏不平的侵蚀基底上,广泛发育潮坪白云岩沉积,底部普遍发育一层石英砾岩。此时,北区狭长海湾的半封闭环境,在海侵作用的影响下,水流渐趋通畅,惟海水来势缓和,未使沉积环境发生根本改变,仍持续接受白云岩沉积。但在淮南运动的影响下,陆源碎屑显著增加,普遍发育一层含砂白云岩沉积,其层位应与南区黄龙组底部的石英砾岩相当。

随后,海侵加大,南区开始出现较多的石灰岩夹层,北区海湾环境也更加通畅,其相应的层位相当巨晶灰岩段。

中石炭世黄龙期,海侵进一步扩大、南、北两区连成一片汪洋,普遍接受纯灰岩沉积。

最后,在本文即将结束之际,我们深深地体会到,在缺少化石依据的情况下,单纯以岩性为基础的传统工作方法,很容易简单地把不同时代而岩性相当的地层对比到一起。实际上一些具有划分时代意义的事件,尽管表面上有时很难看出它们在岩性上有什么反映,也就是说,看不出岩性有什么变化,但岩石化学组分确因事件的影响而发生了某些突变,只不过肉眼不易察觉而已。所谓“岩性界面穿越年代地层单位”的“穿时”

表 4 长江下游下、中石炭统地层对比表

作者地区 地层单位	夏邦栋 1959 宁镇	朱绍隆等 1974 苏皖边界	俞学光 1978 苏南	陈华成等 1979 宣深、巢、无为、宣城	陈敏娟等 1980 宁镇	胡世忠 1981 苏浙皖	沈喜伦 1982		本 1983		文 南、广、宣城 (宜兴、德、宣城)
							宁镇	宜溧、锡区	北、宁镇、巢县	南、宣城	
石炭系	中统	纯灰岩 粗晶灰岩 老虎洞白云岩 丁山白云岩	黄龙组 花石山组 丁山组	上段 下段	黄龙组	纯灰岩 粗晶灰岩 白云岩	黄龙组上段	黄龙组上段	黄龙组	纯灰岩段	纯灰岩段
							老虎洞组 和州组	老虎洞组 和州组	老虎洞组 和州组	白云岩段 (底部石英砾岩)	白云岩段 (底部石英砾岩)
下统	高骊山组 金陵组	高骊山组 金陵组	高骊山组 金陵组	宣城组 王胡村组	老虎洞组 和州组 高骊山组 金陵组	和州组或高骊山组 (王胡村组)	高骊山组	高骊山组	高骊山组	高骊山组	高骊山组 (金陵组)
							和州组(广义)	和州组	和州组	和州组	和州组

现象,就是这种情形的典型代表。“穿时”,这是一个模糊的概念,它只能给地层工作带来混乱。新的地层规范中不再采用这一术语,是完全正确的。诚然,岩石化学组分属微观范畴,不便于野外直接应用。但通过对岩石化学组分的综合研究,指出方向,就不难找到为人们肉眼所能察觉的标志。因为“感觉到了的东西,我们不能立刻理解它,只有理解了的东西才能更深刻的感觉它”。本文的研究过程证实了这个道理。

五、存在问题

北区凤凰山剖面由于岩性特殊,给对比造成了一定困难。本文采用瓦特的误差平方和方法进行Q型聚类分析,分析结果,层1—层4与老虎洞组可以对比,与牙形刺、筴类及珊瑚化石的时代相符,属早石炭世晚期。层5—层7与巨晶灰岩和纯灰岩接近。其中所产瓣鳃类* *Wilkingia cf. regularis* (King),在陕西、宁夏等地均有产出,时代属中、上石炭统。但与珊瑚化石的时代有矛盾。据安灰省区调队资料,珊瑚化石属早石炭世晚期,因此层5—层7这段地层的时代归属有待进一步研究。

本文依据化学组分应用多元统计方法研究地层的划分与对比,还是一种初步尝试。由于水平所限,错误之处在所难免,欢迎批评指正。

本文岩石、化石薄片由磨片室磨制,岩石薄片鉴定由毕中其同志完成,绘图室绘制全部图件,周文曙同志协助送样化验,在此一并致谢。

附表4:

参 考 文 献

- [1] 夏邦栋, 1959, 关于宁镇山脉中石炭纪黄龙灰岩下部白云岩的几个问题。地质论评, 第19卷, 第5期。
- [2] 陈华成等, 1979, 江苏及安徽南部早石炭世地层。地层学杂志, 第3卷, 第4期。
- [3] 陈敏娟、黄建辉, 1980, 再谈宁镇地区老虎洞组的时代。地层学杂志, 第4卷, 第2期。
- [4] 夏广胜、徐家聪, 1980, 安徽巢湖地区早石炭世地层。地层学杂志, 第4卷, 第2期。
- [5] 沈喜伦, 1982, 江苏南部黄龙组底部白云岩的归属问题。地层学杂志, 第6卷, 第4期。
- [6] 张瑛等, 1983, 安徽巢湖地区下石炭统沉积特征。中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊, 第4卷, 第2号。
- [7] 武耀诚, 冯祖钧, 1982, 介绍一种通用的地质变量正态转换方法。地质与勘探, 第10期。
- [8] 朱政嘉, 1982, 模糊K—均值聚类法及其在地质学中的应用。长春地质学院学报, 第3期。
- [9] Divi, S. R., Thorpe, R. I., and Franklin, J. M., 1979, Application of discriminant analysis to evaluate compositional controls of stratiform massive sulfide deposits in Canada; Jour. Internat. Assoc. Mathematical Geology, V 1, No 4, p 391—406.

* 瓣鳃类化石由李金华同志鉴定。

STUDY ON THE STRATIGRAPHICAL DIVISION
AND CORRELATION OF THE DOLOMITES OF
LOWER-MIDDLE CARBONIFEROUS SERIES
IN LOWER YANGTZE AREA BY MULTI-
VARIATE STATISTICAL ANALYSES
OF CHEMICAL COMPOSITION

Yan Youyin

(*Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources*)

Wu Yaocheng

(*Department of Geology, Nanjing University*)

Abstract

The dolomites of Lower-Middle Carboniferous series of Lower Yangtze Area compose a complex, highly variable lithological sequence, deposited in typical intertidal-supratidal environment. The depositional environments of dolomite are unfavourable for existence of organism. The stratigraphical division and correlation of the dolomitic beds by simply applying traditional methods of lithostratigraphy and biostratigraphy consequently lead divergent opinions.

This paper presents a statistical study based on the chemical composition of the dolomite, the analyses of which contain CaO, MgO, K₂O, Na₂O, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, P₂O₅, Zn, Mn, Co, Cu, Ni, Sr, Ti, Pb, Ba, Cr and V of 144 samples from 7 representative stratigraphic sections. A lot of useful information are obtained in the systematical study of the stratigraphical division and correlation of the dolomitic beds. The multivariate statistical methods used include correspondence analysis, discriminante analysis, cluster analysis, fuzzy K-cluster analysis of average value, shift correlation analysis for correlating stratigraphical columns, trend analysis and normal transformation etc,

The authors consider that the paleogeography of the northern area (west of Maoshan) is significantly different from those of the southern area (east of Maoshan) in late period of the Early Carboniferous. The northern area was a NE-SW trending bay of stagnant water in which the dolomite deposited and the southern area was eroded. Due to the effect of Huainan movement, the bottom psephyte was developed beneath the dolomite of the southern area in early periods of the Middle Carboniferous. But this effect was feeble in the north area and only the dolomite containing continental derived sands was deposited. For this reason, this paper suggests that the dolomite containing sands is the lower boundary of the Middle Carboniferous series in the north area, and corresponds to the bottom psephyte of Huanglong formation in the southern area. They are essentially synchronous results of Huainan movement.