

# Statistical Analyses of Geochemistry of the Limestone from the Neoproterozoic Zhangqu Formation in Northern Anhui Province

Liangbing Wang, Linhua Sun, Huili Cao, Yupeng He, Yuhang Wang

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui  
Email: 1162801097@qq.com, sunlinh@126.com

Received: Mar. 21<sup>st</sup>, 2018; accepted: Apr. 9<sup>th</sup>, 2018; published: Apr. 16<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

Geochemistry has played important roles for the research of sedimentary geology. In this study, the limestone from the Neoproterozoic Zhangqu Formation in the National Geological Park of the Lingbi Stone has been taken as a research object and the geochemistry of the rocks has been measured based on the systematic collection of samples, and then analyzed by statistical analyses. The results indicate that the geochemical compositions of the limestone rocks from the upper and lower formation are different with each other, and both of them are characterized by high Ca contents with low other elements, which is probably related to the change of the sedimentary environment. Based on the statistical analyses (including correlation, cluster and factor analyses), the 10 kinds of elements have been classified to be 3 categories: the Al-K-Ti-Fe (representing the terrigenous detrital), the Ca-P (representing the marine facies) and the Mg-Mn-Zr-Ni (other). And three ratios (Al/Fe, Ca/P and Al/P) have been constructed for the discussion of the terrigenous, marine characteristics and the contribution of terrigenous versus marine, which was then applied for the analyses of the sedimentary environment of the Zhangqu Formation, and then found that there was no significant change of the marine environment during the formation of the lower and upper Zhangqu Formation, but the terrigenous contribution changed significantly.

## Keywords

Geochemistry, Limestone, Sedimentary Environment, Statistical Analysis, Neoproterozoic

## 皖北新元古代张渠组灰岩地球化学数理统计分析

王梁冰, 孙林华, 曹慧丽, 何玉鹏, 王雨航

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州  
Email: 1162801097@qq.com, sunlinh@126.com

收稿日期：2018年3月21日；录用日期：2018年4月9日；发布日期：2018年4月16日

## 摘要

地球化学在沉积学研究中发挥了重要作用。本研究以灵璧石国家地质公园新元古代张渠组灰岩为研究对象，在系统采样的基础上测试了其岩石地球化学组成，并进行了数理统计分析。结果表明，张渠组上下部灰岩中元素组成存在差异，主体表现出高的Ca含量，但其他元素含量相对较低，这种差异可能与其沉积环境变化有关。基于数理统计分析(相关性、聚类及因子分析)，10种元素被划分为3类：代表陆相的Al-K-Ti-Fe、代表海相的Ca-P和代表其他的Mg-Mn-Zr-Ni。在此基础上，构建出了用于探讨陆源、海相特征及陆海相对贡献的Al/Fe、Ca/P和Al/P比值，并被应用于张渠组沉积环境分析，发现张渠组上下部的海相环境无明显差异，但陆源贡献上变化显著。

## 关键词

地球化学，灰岩，沉积环境，数理统计分析，新元古代

Copyright © 2018 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

## 1. 引言

岩石地球化学是研究岩石的化学组成，包含其成分的来源、含量、分布、种类及化学变化的地球科学，是近代岩石学和地球化学的交叉学科。通过研究各类岩石中的主、微量元素和同位素组成，进而分析岩石的源区、成因、演化和构造环境等基础理论问题。在沉积学领域，地球化学在古地理环境分析、海陆相地层划分、物源成分分析以及古气候条件研究等多个方面发挥了重要作用[1] [2] [3] [4]。

皖北地区新元古代地层因为其独特性(产出灵璧石等多种独特岩石)，而吸引了很多学者的关注，一系列研究得以展开。如郭峰等[5]通过岩石学及沉积学的研究方法得出 MTS 碳酸盐岩的宏观微旋回特征及岩石学特征，指示其主要形成并发育于稳定克拉通浅海潮下环境；刘燕学等[6]通过对同位素的研究得到白齿构造碳酸盐岩是中、新元古代沉积的一个标志，具有特殊的时限意义，其存在于大约 1600~650 Ma 之间；孟祥化等[7]通过对中朝板块燕山、吉辽和徐淮地区新元古代地层的沉积学、旋回地层学、锶同位素地层学以及(白齿构造)碳酸盐岩事件和海平面变化研究，提出了北华系的地层划分和对比方案的结论；旷红伟等[8]通过岩石学、地层学的研究方法得到吉辽地区的白齿碳酸盐岩主要是生物成因；苏玲等[9]通过对岩石及古地理方面的研究得出白齿构造总是发育在比叠层石系列更深的水体和软泥环境中；陈留勤等[10]通过沉积学及层序地层学方面的研究认为白齿碳酸盐岩在中新元古代集中发育的事实可能反映了有利的物理、化学和生物条件在地质历史上的唯一结合。

在这套地层中，张渠组因为其丰富的灵璧石种类产出，尤其是磬石和白齿构造的存在且明显不同于其他层位而备受关注，但目前缺乏针对性的研究，尤其是地球化学研究，这无疑大大制约了对张渠组沉积环境乃至多种灵璧石，尤其是磬石和白齿构造成因的理解。

本文以灵璧石国家地质公园核心园区磬云山(位于灵璧县渔沟镇东部)的张渠组地层为研究对象，在野外调查的基础上，对其上下部进行了系统采样，并利用 X 荧光光谱仪进行了元素地球化学组成测试，进

而对数据进行了数理统计分析，目的是查明元素之间的相互关系，进而构建具有不同意义的元素地球化学比值，从而分析其沉积环境变化。之所以进行数理统计分析，主要是因为几个方面的原因：一是现有的可用于碳酸盐岩的地球化学元素比值或者图解极其有限，二是从元素成因的角度来看，一个元素可能存在多种成因(来源或者存在形式)，以往构建的元素比值可能并不具有普适性。以沉积岩中的 Ca 元素为例，其可以受制于碳酸盐矿物(如方解石，可能与海相有关)，也可以受制于硅酸盐矿物(如斜长石，可能与陆相碎屑有关)，如果在分析沉积环境过程中简单地将其与海相关联，可能会导致分析结果的错误。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 区域地质概况

研究区域位于华北板块南缘的淮北凹陷带[11]，进一步细分可以划分为灵璧台隆，乔秀夫[12]等称之为古郯庐带。该地区的构造格局主要受控于燕山期太平洋板块的北西向挤压作用。在地层分区上，可以划分为华北地层大区晋冀鲁豫地层分区徐州-宿县地层小区。本研究区域位于安徽省宿州市灵璧县北部渔沟镇(图 1)。研究区域内新元古代地层从下往上依次为贾园组、赵圩组、倪园组、九顶山组、张渠组、魏集组、史家组和望山组。在岩石组成上，包括砂质灰岩、灰岩、白云质灰岩及砂岩等，整体为海相沉积环境。

### 2.2. 样品采集与测试

研究样品采自渔沟镇灵璧石国家地质公园内张渠组下部和上部，各采集 15 个样品，共计 30 个样品。张渠组下部为薄层灰黑色微晶灰岩，上部为灰色-浅灰色微晶灰岩。全岩样品首先去除岩石表面的粉尘，然后采用切割机切割岩石样品并选取岩石样品平整的新鲜面清洗烘干后进行测试。样品测试分析采用 X 荧光光谱仪(天瑞 EDX5500H)完成。

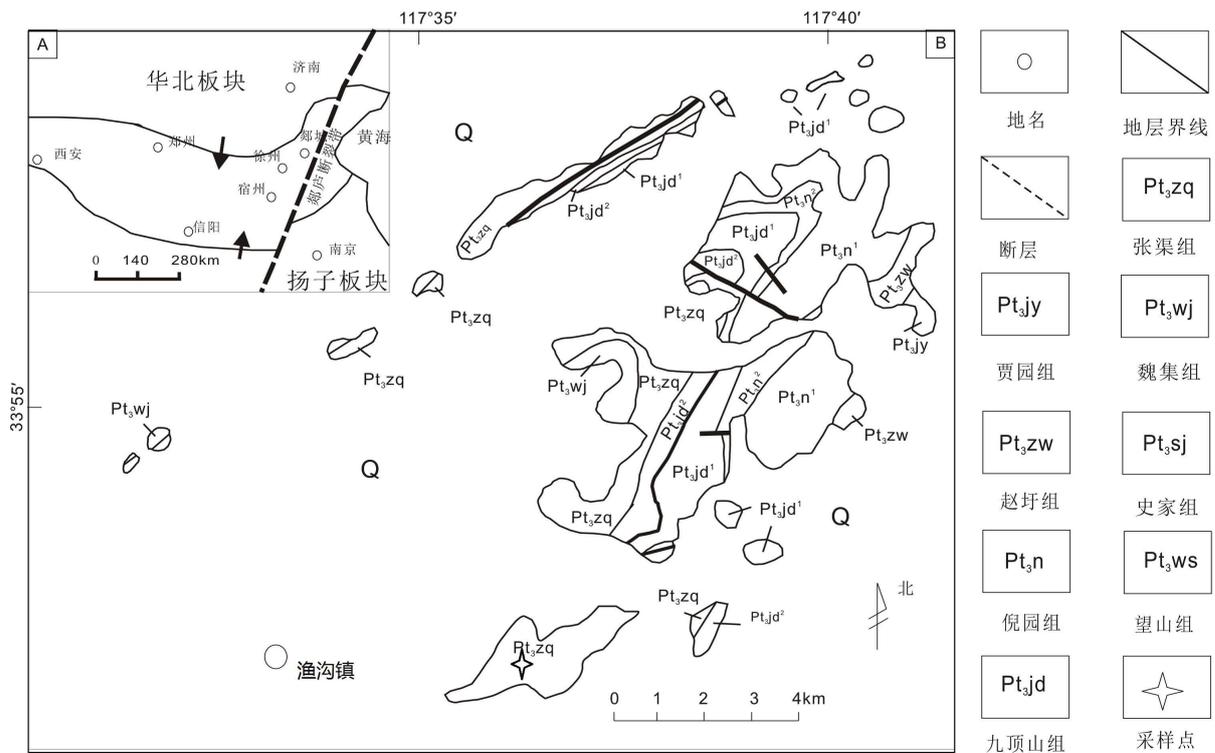


Figure 1. Geological map of the study area  
图 1. 研究区地质图

### 3. 元素含量特征

样品测试结果见表 1。从表 1 可以看出, 张渠组下部灰岩中 Ca 含量相对较高, 介于 54.1%~56.5%之

**Table 1.** Concentration of trace elements (%), H and BH are lower and upper ones, respectively

**表 1.** 微量元素组成(%), H 和 BH 分别为下部和上部样品

样品	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Ni	P	Ti	Zr
H1	0.046	54.1	0.142	0.412	0.470	0.005	0.027	0.334	0.000	0.053
H2	0.110	55.1	0.197	0.534	0.459	0.012	0.031	0.349	0.012	0.075
H3	0.135	55.6	0.582	0.499	0.520	0.006	0.030	0.351	0.008	0.007
H4	0.074	55.1	0.877	0.431	0.476	0.005	0.029	0.349	0.011	0.092
H5	0.000	56.1	0.128	0.423	0.504	0.013	0.036	0.356	0.000	0.087
H6	0.232	55.3	0.358	0.542	0.514	0.009	0.030	0.352	0.023	0.090
H7	0.116	55.7	0.384	0.483	0.500	0.008	0.028	0.350	0.008	0.028
H8	0.009	56.5	0.093	0.353	0.490	0.010	0.029	0.356	0.002	0.061
H9	0.000	55.6	0.135	0.430	0.526	0.013	0.033	0.361	0.000	0.118
H10	0.151	54.9	0.383	0.462	0.560	0.009	0.029	0.348	0.005	0.104
H11	0.067	55.4	0.187	0.504	0.505	0.009	0.029	0.359	0.000	0.043
H12	0.000	55.9	0.119	0.381	0.550	0.012	0.032	0.356	0.006	0.111
H13	0.177	54.8	0.489	0.454	0.503	0.012	0.026	0.343	0.019	0.088
H14	0.290	54.4	0.467	0.600	0.547	0.014	0.033	0.339	0.014	0.098
H15	0.000	56.4	0.115	0.534	0.517	0.013	0.030	0.356	0.000	0.084
平均值	0.094	55.4	0.310	0.469	0.509	0.010	0.030	0.351	0.007	0.076
BH1	1.32	48.8	2.29	1.36	0.604	0.037	0.029	0.309	0.057	0.045
BH2	0.356	53.9	0.686	0.633	0.538	0.025	0.028	0.338	0.024	0.074
BH3	0.090	55.6	0.326	0.484	0.522	0.009	0.026	0.351	0.018	0.080
BH4	1.04	49.6	1.34	0.773	0.671	0.049	0.029	0.308	0.050	0.106
BH5	1.17	48.7	1.37	0.883	0.659	0.049	0.023	0.308	0.056	0.101
BH6	0.282	54.5	0.449	0.656	0.535	0.011	0.033	0.350	0.016	0.084
BH7	1.18	49.1	1.41	0.834	0.681	0.048	0.024	0.308	0.056	0.106
BH8	1.42	47.3	1.51	1.06	0.719	0.047	0.023	0.293	0.072	0.096
BH9	1.19	49.0	1.36	1.19	0.687	0.046	0.029	0.311	0.057	0.104
BH10	0.331	54.5	0.369	0.693	0.560	0.014	0.025	0.349	0.024	0.083
BH11	0.364	54.3	0.299	0.629	0.546	0.012	0.023	0.340	0.028	0.077
BH12	0.847	51.8	0.628	0.685	0.573	0.010	0.028	0.328	0.036	0.065
BH13	0.296	54.9	0.395	0.586	0.525	0.012	0.024	0.357	0.028	0.081
BH14	0.317	54.5	0.466	0.600	0.556	0.010	0.029	0.340	0.008	0.084
BH15	0.160	55.1	0.334	0.483	0.477	0.010	0.028	0.345	0.023	0.078
平均值	0.691	52.1	0.881	0.770	0.590	0.026	0.027	0.329	0.037	0.084

间, 平均为 55.4%, 其他元素的含量相对 Ca 而言较低, Al、Fe、K、Mg、Mn、Ni、P、Ti 和 Zr 含量的平均值分别为 0.094%、0.310%、0.469%、0.509%、0.010%、0.030%、0.351%、0.007% 和 0.076%。所有元素含量从高到低依次为 Ca > Mg > K > P > Fe > Al > Zr > Ni > Mn > Ti。

相比较而言, 张渠组上部薄层灰岩具有相对下部偏低的 Ca 含量, 其平均值为 52.1%, 而 Al、Fe、K、Mg、Mn、Ti 和 Zr 则相对上部灰岩偏高, 其含量分别为 0.691%、0.881%、0.770%、0.590%、0.026%、0.037% 和 0.084%, Ni 和 P 含量相对上部灰岩偏低, 其平均值分别为 0.027% 和 0.329%。

## 4. 数理统计分析

### 4.1. 元素的相关性分析

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的变量元素进行分析, 从而衡量两个变量因素的相关密切程度。在地球化学研究中, 通常将相关性好的元素考虑成具有共同的来源[11]。而对于沉积岩而言, 相关性好的元素可能更好地反映元素的共生组合关系。因为不同的元素组合反映了不同的沉积地球化学特征以及影响它们形成的各种古构造、气候条件[12], 因此物源相近的沉积物, 或者形成于相似地质条件环境的沉积物, 其元素组合也相近。对于本文而言, 查明元素之间的关系, 可以为寻找同源元素提供信息。

本文研究中对上下部岩石进行分开研究, 其相关性分析结果见表 2 和表 3。因为各有 15 个样品, 对应显著性因子  $\alpha = 0.05$  的相关系数临界值为:  $r_{\alpha} = 0.514$ 。从表 2 可以看出, 下部灰岩 Al-K-Ti-Fe、Ca-P 之间具有显著的正相关, 而 Al 和 Ca 之间则表现出显著的负相关。对于上部灰岩而言(表 3), 所有的元素大概分为两组, 且两组之间表现为明显的负相关关系, 其中第一组 Al-Mg-K-Ti-Mn-Fe-Zr 之间具有明显的正相关, 第二组 Ca-P 之间具有明显的正相关。综合来看, 无论上部还是下部灰岩, Al-K-Ti-Fe 之间都具有显著的正相关, 而 Ca-P 之间也具有明显的正相关, 且这种关系表明这些元素之间可能存在成因上的联系[11]。结合前人研究来看, 前者可能反映了陆源碎屑物的贡献(Al 是代表性陆源元素), 而后者则反映了海相的贡献(Ca 为代表性海相元素)。

### 4.2. 聚类分析

聚类分析指基于某些变量将一组研究对象分为相对同质的群组的统计分析技术。在地球科学研究中, 聚类分析应用广泛, 如在污染物来源解析中, 利用 R 型聚类分析将污染物划分为几个不同的类, 每个类

**Table 2.** Results of correlation analysis (lower samples)

**表 2.** 相关性分析结果(下部样品)

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Ni	P	Ti	Zr
Al	1.000									
Ca	-0.604	1.000								
Fe	0.544	-0.388	1.000							
K	0.693	-0.304	0.241	1.000						
Mg	0.230	0.079	-0.024	0.148	1.000					
Mn	-0.023	0.278	-0.474	0.216	0.377	1.000				
Ni	-0.180	0.321	-0.286	0.090	0.317	0.581	1.000			
P	-0.552	0.832	-0.353	-0.213	0.180	0.295	0.411	1.000		
Ti	0.800	-0.382	0.563	0.445	0.002	-0.003	-0.220	-0.366	1.000	
Zr	-0.028	-0.073	-0.113	-0.091	0.383	0.570	0.396	0.100	0.126	1.000

**Table 3.** Results of correlation analysis (upper samples)  
**表 3.** 相关性分析结果(上部样品)

	Al	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Ni	P	Ti	Zr
Al	1.000									
Ca	-0.994	1.000								
Fe	0.917	-0.911	1.000							
K	0.865	-0.841	0.912	1.000						
Mg	0.915	-0.934	0.770	0.725	1.000					
Mn	0.887	-0.923	0.853	0.729	0.918	1.000				
Ni	-0.171	0.178	-0.016	0.023	-0.245	-0.204	1.000			
P	-0.964	0.980	-0.882	-0.781	-0.921	-0.913	0.179	1.000		
Ti	0.954	-0.960	0.864	0.811	0.887	0.896	-0.335	-0.927	1.000	
Zr	0.272	-0.345	0.074	-0.004	0.589	0.545	-0.239	-0.357	0.327	1.000

代表不同的来源[13],而在矿井突水水源识别中,利用 Q 型聚类分析将样品划分为几个不同的类,从而用于判别未知样品的水源[14]。对于本文而言,聚类分析可以发现元素之间的关联(类似于相关性分析),从而为元素对(比值)的构建提供信息。

在本次研究中,对所有元素进行了 R 型聚类分析(聚类方法为 Ward,距离为 Pearson),结果如图 2 所示。从图中可以看出,无论是下部灰岩还是上部灰岩,所有的元素都分为两个大类,但上下部灰岩之间存在一定的区别。其中下部灰岩 Fe-Ti-Al-K 为一类,而 Mg-Zr-Mn-Ni-P-Ca 为一类。上部灰岩 Ca-P-Ni 为一类,而 K-Fe-Ti-Al-Mg-Mn-Zr 为一类。这一结果与相关性分析结果基本上是一致的(除了相关性分析结果中缺少 Ni)。

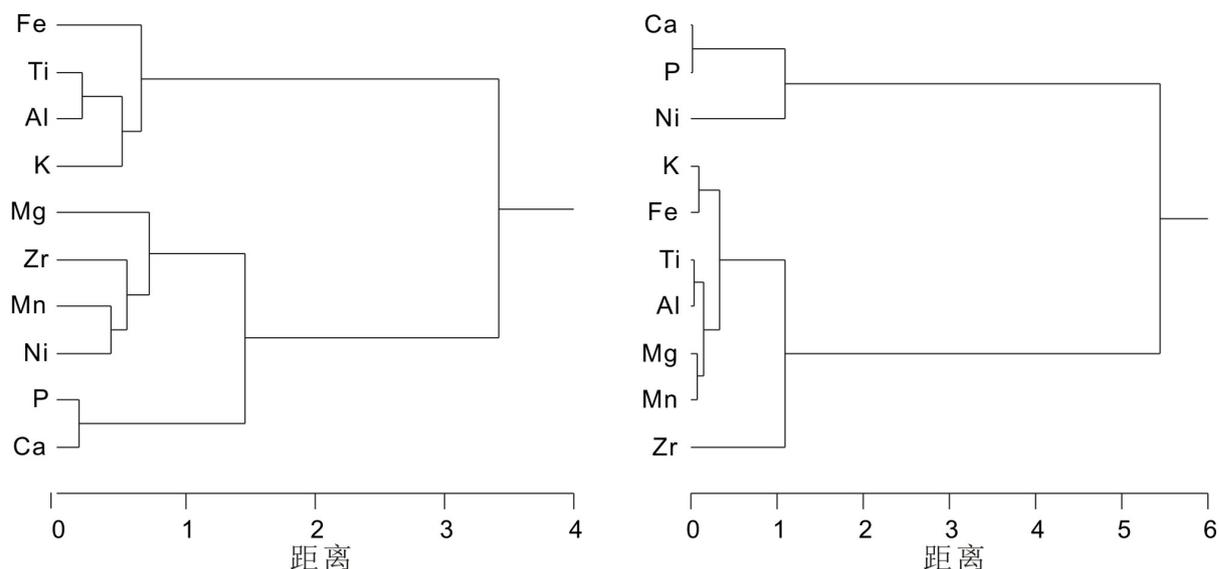
### 4.3. 因子分析

因子分析是基于降维的思想,把多个具有复杂关系的变量合并为几个综合因子的统计分析方法[15]。与相关性和聚类分析类似,被合并为一个因子的几个变量通常都具有成因上的联系[16][17][18]。对于本次研究而言,开展因子分析,可以将现有的多种元素简化为少数几个具有同成因的因子,从而简化元素对的选择和比值的构建。

本次研究对上下部灰岩分别进行了因子分析,结果如表 4 所示。从表中可以看出,在选择特征值大于 1 且进行正交旋转后,下部灰岩共提取出了 3 个因子,其总的方差解释率仅为 56.1%,而上部灰岩仅提取出了 2 个因子,其总的方差解释率仅为 64.0%。对于下部灰岩而言,因子 1 的方差解释率为 19.1%,在 Al、K 和 Ti 上具有较高的正载荷,而在 Fe 上具有中等的正载荷;因子 2 的方差解释率为 24.5%且在 Mn 和 Zr 上具有较高的正载荷,而在 Mg 和 Ni 上具有中等的正载荷;因子 3 的方差解释率为 12.5%且在 Ca 和 P 上具有较高的正载荷。对于上部灰岩而言,因子 1 的方差解释率为 46.0%,在 Al、Fe、K、Mg、Mn 和 Ti 上具有较高的正载荷,而在 Ca、P 上具有较高的负载荷;因子 2 的方差解释率为 18.0%且在 Zr 上具有较高的正载荷,而在 Ni 上具有中等的负载荷。

## 5. 讨论

从上述数理统计分析中可以发现两个方面的问题:1) 不同沉积环境下形成的灰岩在元素组合上存在明显的差异;2) 同一元素在不同沉积环境下形成的灰岩中其来源(或者影响因素)存在不同。因此,如果



**Figure 2.** Results of cluster analyses (left-lower, right-upper)

**图 2.** 聚类分析结果(左下部右上部样品)

**Table 4.** Results of factor analyses (upper samples)

**表 4.** 因子分析结果(F1-F3 下部样品, F1\*和 F2\*上部样品)

	F1	F2	F3	F1*	F2*
Al	0.889	0.053	-0.385	0.974	0.160
Ca	-0.303	0.076	0.877	-0.969	-0.220
Fe	0.598	-0.345	-0.279	0.971	-0.085
K	0.828	0.151	0.050	0.931	-0.181
Mg	0.222	0.618	0.110	0.860	0.451
Mn	0.013	0.856	0.222	0.879	0.388
Ni	-0.059	0.683	0.382	-0.034	-0.687
P	-0.251	0.210	0.850	-0.941	-0.244
Ti	0.764	0.024	-0.318	0.922	0.290
Zr	-0.153	0.823	-0.294	0.170	0.848
特征值	1.91	2.45	1.25	4.60	1.80
方差解释率	19.1%	24.5%	12.5%	46.0%	18.0%

利用元素(包括其比值等)来分析灰岩的沉积环境, 固定地采用一些元素及其比值可能存在不适用的问题, 反而自己根据研究对象的元素组合关系来选择合适的元素并构建新的元素比值可能更为合适。例如在本次研究对象中, 下部灰岩中 Mg、Zr、Mn 和 Ni 可能主要与海相沉积环境有关, 因为无论是相关性、聚类还是因子分析中都可以发现, 这几个元素与 Ca、P 具有相对密切的关系, 但对于上部灰岩而言, 这几个元素则明显与陆相有着更为密切的关系(图 2)。

从以上分析中可以发现, 对于本研究中的 10 种元素而言, 无论是在上部灰岩还是下部灰岩中, 它们大体上可以分为 3 类: 一是以 Al-K-Ti-Fe 为代表的陆相相关元素, 二是以 Ca-P 为代表的海相相关元素, 三是包括 Mg-Mn-Zr-Ni 在内的变化元素(其来源不稳定, 可能受制于海相也可能受制于陆相)。因此,

Al-K-Ti-Fe 之间的比值应该可以用于分析陆相的特征,反之 Ca-P 之间的比值则可以用于分析海相的特征,而 Al-K-Ti-Fe 与 Ca-P 之间的比值则可能更多的反映了陆相和海相之间的贡献差异。基于这种思想,并结合前人的研究成果,我们构建了如下比值,包括 Al/Fe、Ca/P 和 Al/P,并对其地质意义进行了分析讨论。分别如下:

1) Al/Fe: 因为 Al 和 Fe 均与陆源碎屑有关,因此这一比值主要反映了陆源物质的特征。计算结果表明,下部灰岩中 Al/Fe 为 0~0.648 (平均 0.303),上部灰岩为 0.276~1.35 (平均 0.784)。这种情况说明,张渠组上下部灰岩中的陆相贡献部分在来源上可能发生了改变。

2) Ca/P: 因为 Ca 和 P 均与海相有关,因此这一比值主要反映了海相物质的特征。计算结果表明,下部灰岩中 Ca/P 为 154~162 (平均 158);上部灰岩为 154~161 (平均 158),上下部是一致的。这种情况说明,张渠组上下部灰岩中的海相贡献部分并没有明显的不同,海水的环境(组成特征)相对是稳定的。

3) Al/P: 该比值主要反映海相和陆相贡献的相对变化。下部灰岩中 Al/P 为 0~0.855 (平均 0.268),而上部灰岩的 Al/P 为 0.256~4.85 (平均 2.10),两者存在明显的差异,说明上部灰岩中陆相贡献比例明显增加。这与实际情况是一致的,下部薄层灰岩相对纯净,而张渠组上部中逐渐出现了大量的泥质(如泥灰岩)。

在以往的研究中,有诸多元素及其比值被应用于沉积环境分析,如 Fe/Mn 被用于分析水的深浅[1]、Ca/Sr 被用于分析古海水盐度[2]等等。但从本研究的情况来看,Fe/Mn 反映的是海相-陆相之间的相对贡献,因此可以用于间接分析沉积环境的水深水浅,但对于上部灰岩而言,Fe/Mn 反映的是陆源的变化,因此不适用于水的深浅分析。

## 6. 结论

通过对皖北地区新元古代张渠组上下部灰岩的岩石地球化学数理统计分析,取得了如下认识:

1) 张渠组上下部灰岩中 Ca 含量相对较高,其他元素含量相对较低且上下部灰岩在元素组成上存在差异,可能与沉积环境及物源变化有关;

2) 相关性、聚类及因子分析将元素分为 3 类,Al-K-Ti-Fe、Ca-P 和 Mg-Mn-Zr-Ni,分别代表陆相、海相和其他;

3) 构建了 Al/Fe、Ca/P 和 Al/P,分别用于探讨陆源、海相特征及陆海相对贡献,并发现张渠组上下部的海相环境无明显差异,但陆源贡献上变化显著。

## 基金项目

国家大学生创新创业项目(201710379033)。

## 参考文献

- [1] 余焯,张昌民,李少华,朱锐,秦成岗,张忠涛. 元素地球化学在层序识别中的应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 204-211.
- [2] 陈松,傅雪海,桂和荣,孙林华. 皖北新元古代望山组灰岩微量元素地球化学特征[J]. 古地理学报, 2012, 14(6): 813-820.
- [3] 孙林华,桂和荣,贺振宇. 皖北灵璧地区新元古代灰岩的稀土元素特征[J]. 稀土, 2010, 31(6): 32-40.
- [4] 旷红伟,柳永清,彭楠,刘丽军. 辽东大连新元古代白齿碳酸盐岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 25-40.
- [5] 郭峰,孟祥化,葛铭. 安徽灵璧地区新元古代白齿构造(徽亮晶)碳酸盐沉积及意义[J]. 安徽地质, 2009, 19(3): 176-180.
- [6] 刘燕学,柳永清,旷红伟. 一种严格受控于环境和时间的特殊碳酸盐岩——白齿构造碳酸盐岩[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7): 710-716.

- [7] 孟祥化, 葛铭, 刘燕学. 中朝板块新元古代微亮晶(白齿构造)碳酸盐事件, 层序地层和建系研究[J]. 地层学杂志, 2006, 30(3): 211-222
- [8] 旷红伟, 金广春, 刘燕学, 孟祥化, 葛铭. 从地球化学角度看微亮晶白齿碳酸盐岩形成的环境条件——以吉辽地区新元古代微亮晶碳酸盐岩为例[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(2): 150-155.
- [9] 苏玲, 陈留勤. 叠层石衰减事件及白齿构造碳酸盐岩作用幕——了解前寒武纪碳酸盐岩世界的重要线索[J]. 地质科技情报, 2008, 27(6): 17-22.
- [10] 陈留勤. 白齿构造主要成因模式及时空分布意义[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 245-256.
- [11] Sun, L.H. (2015) Heavy Metals in Groundwater from Deep Seated Aquifer in Northern Anhui Province, China: Source Identification and Quantification. *Fresenius Environmental Bulletin*, **24**, 3467-3472.
- [12] 余光明, 张峭楠, 王成善. 西藏地区侏罗、白垩及第三系地层泥质岩的微量元素聚类分析及成果解释[J]. 沉积与特提斯地质, 1990, 10(5): 1-7.
- [13] 刘寿航, 丁枫, 李跃, 徐忠彪, 徐峰. 聚类分析方法在西藏措勤县诺仓地区地球化学找矿中的应用[J]. 矿床地质, 2014, 33(S1): 1019-1020.
- [14] 孙林华, 桂和荣. 皖北桃源矿深部含水层地下水地球化学数理统计分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 442-447.
- [15] 向东进. 实用多元统计分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2005.
- [16] 时艳香, 纪宏金, 陆继龙, 马力, 段国正. 水系沉积物地球化学分区的因子分析方法与应用[J]. 地质与勘探, 2004, 40(5): 73-76.
- [17] 董庆吉, 陈建平, 唐宇. R 型因子分析在矿床成矿预测中的应用[J]. 地质与勘探, 2008, 44(4): 64-68.
- [18] 赵少卿, 魏俊浩, 高翔, 易建, 陈冲, 翟亚峰, 田宁, 秦志刚, 张文胜. 因子分析在地球化学分区中的应用: 以内蒙古石板井地区 1:5 万岩屑地球化学测量数据为例[J]. 地质科技情报, 2012, 31(2): 27-34.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2163-3967, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)