

碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素组成在古气候、古海洋环境研究中的应用

严兆彬¹, 郭福生^{1,2}, 潘家永³, 郭国林¹, 张曰静¹

(1. 东华理工学院 地球科学与资源信息管理系, 江西 抚州 344000;

2. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100029;

3. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要: 碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素研究是地球化学重要的示踪手段之一, 它可以为研究古气候、古环境的变化提供定量的依据。研究结果表明: $\delta(^{13}\text{C})$ 的高值对应海平面的上升和有机碳埋藏速率的增加, $\delta(^{13}\text{C})$ 的低值则对应了海平面的下降和有机碳埋藏速率的降低; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与海平面变化呈负相关性; $\delta(^{18}\text{O})$ 常作为判断碳酸盐是否受后期变化的标志之一。用海相碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素示踪古气候、古海洋环境, 一般要求 $(\text{Mn}/\text{Sr}) < -10 \times 10^{-3}$, $\delta(^{13}\text{C})$ 与 $\delta(^{18}\text{O})$ 不呈正相关关系。

关键词: 碳酸盐岩; 碳同位素; 氧同位素; 锶同位素; 古气候; 古海洋环境

中图分类号: P597. 2; P53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2005)01-0053-04

1 引言

海相碳酸盐岩 C, O, Sr 同位素分析是古气候、古海洋环境研究的一种常用手段。大量研究表明, 古代海相碳酸盐岩的稳定同位素的组成能近似地反映古海洋稳定同位素的组成^[1-4]。因此, 研究海相碳酸盐岩稳定同位素的组成对了解古海平面变化、构造活动、全球气候冷暖变化、生物灭绝以及古海水温度、盐度等具有十分重要的意义^[5,6]。

2 C, O, Sr 同位素组成如何示踪古气候、古海洋环境的变化

2.1 $\delta(^{13}\text{C})$ 与生物埋藏量、埋藏速度密切相关

对于碳同位素而言, 由于自然界碳基本上储藏在有机碳(还原碳)和无机碳(氧化碳)两大碳库内, 两者的 $\delta(^{13}\text{C})$ 平均值大约相差 25×10^{-3} ^[7]。因此, 在影响海相碳酸盐岩碳同位素的众多因素中, 沉积时有机碳氧化与相对埋藏量是最重要的^[5,6]。当海

洋生物量高使得被埋藏的有机碳量增加时, 意味着从海水中清除轻碳同位素增加, 这样, 海洋库溶解的无机碳同位素组成变重, 引起海洋沉积无机碳酸盐的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值增加, 反之亦然。因此, 海洋灰岩的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值增高, 意味着该沉积时期的海洋生产力高; 海洋灰岩的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值降低, 意味着该沉积时期的海洋生产力低。有机碳的相对埋藏量一般取决于 3 个因素: ①生物的大量繁殖或灭绝(减少)。在地球环境适宜期, 表层水的营养成分充足, 那些营光合作用的藻类大量繁殖, 在光合作用过程中, 它们可以优先吸收轻同位素¹²C, 导致水体中重同位素¹³C 的组分含量相对增加, 对应地史沉积的碳酸盐岩中相对富集¹³C。环境恶化期, 对生物生产能力造成巨大影响, 导致大量死亡或灭绝时, 海洋生物对轻碳的分馏就急剧减少或中止, 使得海水中的¹²C 富集, ¹³C 相对贫化。而整体反映在沉积物中则是生物大量繁殖对应着 $\delta(^{13}\text{C})$ 的高值, 生物大量减少或灭绝对应着 $\delta(^{13}\text{C})$ 的低值^[8,9]。②全球气候的冷暖变化。据现代生物学研究表明, 生物能承受的高温极限变化范围仅仅为 1~5℃之间^[8]。冰期海平面下降和全球的温度降低, 温度的大幅度变化, 必然导致狭温生物的

收稿日期: 2004-04-20; 修订日期: 2004-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(40272080)资助。

作者简介: 严兆彬(1978), 男, 河南沈丘人, 硕士研究生, 主要从事沉积岩方面的研究。

大量死亡或灭绝,海洋生产力也随之降低,导致海水的 ^{13}C 的下降。从另一个角度看,由于海水表层温度降低,海水表层溶解的大气 CO_2 含量增加,大气中更富轻碳同位素,对应沉积期中的碳酸盐岩的 $\delta(^{13}\text{C})$ 也会有所下降。③海洋有机碳的埋藏速率明显受控于海平面的变化^[10,11]。海平面上升期,一方面有机碳的埋藏速率增加,另一方面古陆氧化面积减小,因剥蚀而带入海洋的有机碳也随之减少,从而导致溶于海水中的 CO_2 富 ^{13}C ,与之平衡的碳酸盐岩的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值也相应增高^[6,12]。反之,海平面下降期,大陆面积增大,由于氧化剥蚀进入海洋的有机碳的数量增加,同时,海洋中的有机质埋藏速率降低^[13],造成大量的 ^{12}C 进入海水,使得海相碳酸盐的 $\delta(^{13}\text{C})$ 值降低。从中可以看出, $\delta(^{13}\text{C})$ 的高值对应着海平面的上升期, $\delta(^{13}\text{C})$ 的低值对应着海平面的下降期^[6]。

2.2 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与海平面变化密切相关

锶在海水中存留的时间为 $4 \times 10^3 \text{ a}$,而锶同位素在海水中的混合作用只需 $1\,000 \text{ a}$,所以某一地质历史时期全球范围内海水中锶的同位素组成是均一的^[14]。地质历史中海水中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值又是随时间变化的^[15],某一地史时期海平面的升降也是时间的函数,海平面升降又和构造活动密切相关,具体反映在锶同位素的组成上:海洋中的锶主要有两个来源,由大陆河流排入海洋的大陆古老岩石风化成因锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的全球平均值为 $0.711\,9$)和由洋中脊热液交换和海底玄武岩的热液蚀变供应的锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的全球平均值为 $0.703\,5$)^[16,17],因此,锶同位素是海平面变化的灵敏指示剂^[4,5]。当海平面下降时,陆地暴露面积增大,由大陆风化作用进入海洋的陆源锶增加,从而引起海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的相对增高,当海平面上升时,一方面由于陆地面积减少,由风化带入海水的陆源锶减少,另一方面,海平面上升期多对应海底扩张加速期,此时海底热液活动剧烈,由此进入海水的幔源锶增加,使得海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值相对变小。整体而言,海平面变化和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化呈负相关性^[18,19]。

2.3 $\delta(^{18}\text{O})$ 值在判别古海洋环境中的作用

碳酸盐岩氧同位素组成易受后期构造、热液及大气降水等影响,一般古老地层的 $\delta(^{18}\text{O})$ 的指相意义较差^[5,20],利用这一特征, $\delta(^{18}\text{O})$ 常作为判断碳酸盐是否受后期变化的一个标志^[21]。对于能够较好地反映地史沉积期的 $\delta(^{18}\text{O})$,也能从一定程度上反映大陆冰川的凝聚和消融^[22-25],因为在冰期多伴随着海平面的下降、盐度升高,轻氧同位素被圈闭

在冰盖中,则造成海水中 $\delta(^{18}\text{O})$ 增大。间冰期冰川大规模的消融,同时轻氧同位素也从冰盖中释放出来,海平面上升,盐度降低,使得海水中的 $\delta(^{18}\text{O})$ 降低。碳酸盐岩的 $\delta(^{18}\text{O})$ 值也是推测古海水盐度和古海水温度的一个重要指标。其理论基础是由 Keith 和 Weber(1964)^[26]综合利用灰岩的 ^{18}O 和 ^{13}C 而提出的盐度公式:

$$Z = 2.048 \times (\delta(^{13}\text{C}) + 50) + 0.498 \times (\delta(^{18}\text{O}) + 50)$$

式中的 $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 均用 PDB 标准, Z 值可用来区分灰岩为海相灰岩或淡水灰岩。又有现代学者利用 Z 值的相对大小来讨论古盐度的相对变化,国内许多地质工作者在这方面做了大量、深入的研究^[8,25,27,28]。

3 碳酸盐岩同位素值是否代表原始组成的判别标志

岩石样品是否保留原始稳定同位素组成尚存在许多争议,判别方法也不尽相同^[29]。利用稳定同位素和微量元素的判别方法主要有 3 种:① Mn/Sr 比值。沉积期后,特别是受大气水循环的影响,碳酸盐岩将发生 Sr , Na 的损失和 Fe , Mn 的加入^[30-34],因此 Mn/Sr 比值是判断海相碳酸盐成岩作用和蚀变程度的一个灵敏指标,人们常将 $(\text{Mn}/\text{Sr}) < 10$ 作为碳酸盐岩保留了原始同位素的判别标志^[27,32,35-38]。一般情况下, $(\text{Mn}/\text{Sr}) < 10$ 的碳酸盐岩未遭受强烈的蚀变,其同位素组成可以代表原始沉积记录, $(\text{Mn}/\text{Sr}) < 2 \sim 3$ 表示样品很好地保持了原始海水的同位素组成^[35]。而 Dcnison 等通过对下古生界泥灰岩研究表明,当样品的 $(\text{Sr}/\text{Mn}) > 2.0$, $\text{Mn} < 300 \times 10^6$ 时最完整地保存原始海水的同位素比值^[18,39]。②氧同位素组成特征。碳酸盐岩的氧同位素组成对蚀变作用灵敏,原岩 $\delta(^{18}\text{O})$ 值会因成岩后的水/岩交换作用明显降低,但定量的研究也无定论,一般情况下当碳酸盐岩的 $\delta(^{18}\text{O}_{\text{PDB}}) < -5 \times 10^{-3}$ 时表示已受蚀变作用影响,当 $\delta(^{18}\text{O}_{\text{PDB}}) < -10 \times 10^{-3}$ 时岩石已发生了强烈的蚀变,样品的氧碳同位素数据已不能使用^[21,40]。而 Kaufman A. J. 等则认为应当将 $\delta(^{18}\text{O}_{\text{PDB}}) < -11 \times 10^{-3}$ 作为界值^[41]。③ $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 的相关性:主要表现在 $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 值的离散性和 $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 值的地层曲线的正相关性。通常认为,如果 $\delta(^{13}\text{C})$ 和 $\delta(^{18}\text{O})$ 数值不具有明显的相关性(即离散),并且它们对应的地层曲线不具有

正相关性, 则反映海相碳酸盐岩基本保存了原始的碳、氧同位素组成^[20, 42-45]。

4 C、O、Sr 同位素在环境判别上的应用

碳酸盐岩中 C、O、Sr 同位素在反映古气候、古海洋环境变化上主要表现为: ① $\delta(^{13}\text{C})$ 值的增加表示为古海洋的生产力提高和(或)全球气候的变暖和(或)海平面的上升, $\delta(^{13}\text{C})$ 值的降低则表示为古海洋的生产力下降和/或全球气候的变冷和/或海平面的下降。② $\delta(^{18}\text{O})$ 值的指相意义较差, 但低值也一定程度反映海平面升高或冰川消融、盐度降低, 高值则可能反映为海平面下降或为全球冰期、盐度升高; 很少有学者单独用氧同位素来研究古环境, 一般是综合利用碳氧同位素研究生物灭绝、海平面升降等。王国庆等(2000)^[8]探讨了贵州紫云剖面 P/T 界面碳氧同位素组成特征与古温度、古盐度、海平面变化和生物灭绝之间的关系, 即 P/T 界面处碳氧同位素值的降低对应着古温度、古盐度的降低和生物的灭绝。郭福生等(2003)^[20]通过对江山碓边剖面碳氧同位素的研究推测出晚寒武世(华严寺组)的碳同位素正漂移对应着一次海平面上升, 且正漂移的峰值处生物繁盛, 随后又迅速减少。此次正漂移对应的海平面上升具有全球性, Matthew R. S. 等(2000)^[46]报导了在美国内华达州中东部、哈萨克斯坦 Malyi Karatau 地区、澳大利亚昆士兰州西北部和我国湘西桃源瓦儿冈等地均有此次碳同位素正漂移。③ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值高反映海平面下降和(或)大陆抬升, 风化剥蚀加快, 比值低则对应着海平面的上升和海底火山热液来源增多。多数研究认为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化曲线与 3 级海平面变化旋回相对应, Setphen (1996)^[47]建立的北美和欧洲大陆志留纪各牙形石带的高分辨率 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化曲线与 3 级海平面升降旋回完全对应。Spooner(1992)^[48]研究发现在最近约 100Ma 时间里, 低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值对应于海底扩张高速期, 同期则陆地面积减少, 而高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值对应于海底扩张低速期, 同期的陆地面积增加。李华芹等(1994)^[49]研究了我国元古代典型剖面的锶同位素组成, 并讨论了海相碳酸盐岩的锶同位素组成与海平面变化等地质事件的关系; 海相碳酸盐岩 C、O、Sr 同位素用于示踪古气候、古海洋环境, 一般要求 $(\text{Mn}/\text{Sr}) < 10$, $\delta(^{18}\text{O}_{\text{PDB}}) < -10 \times 10^{-3}$, $\delta(^{13}\text{C})$ 与 $\delta(^{18}\text{O})$ 不呈正相关关系。

参考文献:

- [1] Emrich K, Fehlt D H. Carbon isotope fluctuation during the precipitation of calcium carbonate[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1970, 8: 363-371.
- [2] Vizer J, Hoefs J. The nature of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ secular trends in sedimentary carbonate rocks[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1976, 40: 1387-1395.
- [3] Scholle P A, Arthur M A. carbon isotopic fluctuation in Cretaceous pelagic limestone: Potential stratigraphic and petroleum exploration[J]. AAPG, 1980, 64: 67-87.
- [4] 黄思静. 上扬子地台区晚古生代海相碳酸盐岩的碳、锶同位素研究[J]. 地质学报, 1997, 71(1): 45-53.
- [5] 李忠雄, 管士平. 扬子地台西缘宁蒗泸沽湖地区志留系沉积旋回及碳、氧同位素特征[J]. 古地理学报, 2001, 3(4): 69-76.
- [6] 彭苏萍, 何宏, 邵龙义, 等. 塔里木盆地—O 碳酸盐岩碳同位素组成特征[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4): 353-357.
- [7] 陈锦石, 闻传芬, 钟华. 古生代海洋碳同位素演化[J]. 地质科学, 1995, 30(4): 264-271.
- [8] 王国庆, 夏文臣. 贵州紫云剖面 P/T 界面附近碳氧同位素的变化及生物灭绝事件[J]. 地学前缘, 2000, 7(2): 339-344.
- [9] 黄思静. 上扬子二叠/三叠系初海相碳酸盐岩的碳同位素组成与生物灭绝事件[J]. 地质科学, 1984, 23(1): 60-67.
- [10] 田景春, 曾允孚. 贵州二叠纪海相碳酸盐岩碳、氧同位素地球化学演化规律[J]. 成都理工学院学报, 1995, (1): 78-82.
- [11] 沈渭洲, 方一亭, 倪琦生, 等. 中国东部寒武系与奥陶系界线地层的碳氧同位素研究[J]. 沉积学报, 1997, (4): 38-42.
- [12] 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等. 中国地层研究[M]. 广州: 广东科技出版社, 2000. 353-349.
- [13] Bard A, Magaritz M, Holser W T. Permian Triassic of the Tethys: Carbon isotope studies[J]. Geologische Rundschau, 1989, 78: 649-677.
- [14] McArthur J M, Burnett J, Hancock J M. Strontium isotopes at K/T boundary: discussion[J]. Nature, 1992, 355(6355): 28.
- [15] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 194-200.
- [16] Palmer M R, Elderfield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Ma[J]. Nature, 1985, 314: 526-528.
- [17] Palmer R, Edmond J M. The strontium isotopic budget of modern ocean[J]. Earth Planet Sci. Lett., 1989, 92: 11-2.
- [18] 李荣西, 魏家庸, 杨卫东, 等. 用 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 研究海平面变化与全球对比问题[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 729-733.
- [19] 蓝先洪. 海洋锶同位素研究进展[J]. 海洋地质动态, 2001, 17(10): 1-3.
- [20] 郭福生, 彭花明, 潘家永, 等. 浙江江山寒武纪碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古环境意义探讨[J]. 地层学杂志, 2003, 27(4): 289-297.
- [21] Derry L A, Kaufman A J, Jacobsen S B. Sedimentary cycling

- and environmental change in the Late Proterozoic. Evidence from stable and radiogenic isotopes[J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 1317-1329.
- [22] Fischer A G, Arthur M A. Secular variations in the pelagic realm, in *Deep Water Carbonate Environment* (eds. Cook H E and Enos P) [J] *Soc. Econ. Paleont. Miner. Spec. Publ.*, 1977, 25: 19-50.
- [23] Matthews R K, Poore R Z. Tertiary $\delta^{18}\text{O}$ record and glacial-*er* static sea level fluctuations[J]. *Geology*, 1980, (8): 501-504.
- [24] Hoffman A, Gruszczynski M, Malkowski K. On the interrelationship between temporal trends in $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{34}\text{S}$ and in the world ocean[J]. *Jour. Geology*, 1991, 23: 235-270.
- [25] 冯洪真, 刘家润, 施贵军. 湖北宜昌地区寒武系一下奥陶统的碳氧同位素记录[J]. *高校地质学报*, 2000, 6(1): 106-115.
- [26] Kerth M L, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils[J]. *Geoch. Et Cosmoch. Acta*, 1964, 23: 1786-1816.
- [27] 杨遵仪, 殷鸿福, 吴顺宝, 等. 华南二叠—三叠纪过渡期地质事件[M]. 北京: 地质出版社, 1987. 1-379.
- [28] 赵震. 从碳、氧同位素组成看蓟县元古代碳酸盐岩特征[J]. *沉积学报*, 1995, 13(3): 46-53.
- [29] 李心清, 万国江. 碳酸盐岩氧、碳同位素地球化学研究目前面临的几个问题[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 262-268.
- [30] Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system 1: trace elements [J]. *Sediment Petrol*, 1980, 50: 1219-1236.
- [31] Brand U, Veizer J. Chemical diagenesis of a multicomponent carbonate system 2: stable isotopes [J]. *Sediment Petrol*, 1981, 51: 987-997.
- [32] Veizer J. Chemical diagenesis of carbonate rocks: theory and application of trace element technique. In: Arthur M A, Anderson T F, Kaplan I R, *et al.* *Stable Isotopes in Sedimentary Geology*. 1983, III/ 1- III/ 100. short Course Notes 10, SEPM.
- [33] Veizer J. Trace elements and isotopes in sedimentary carbonates [J]. *Reviews in Mineralogy*, 1983, 11: 265-300.
- [34] Bruckschen P, Bruhn F, Meijer, *et al.*, Diagenetic alteration of calcitic fossil shells: Proton microprobe (PIXE) as a trace element tool [J]. *Nuclear Inst Methods Phys Res*, 1995(B), (104): 427-431. .
- [35] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the $\delta^{13}\text{C}$ isotope composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications [J]. *Precambrian Res*, 1995, 73: 27-49.
- [36] Kaufman A. J, Knoll A H, Narbonne G M. Isotopes, ice ages and terminal Proterozoic earth history [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, 95: 6600-6605. .
- [37] Derry L A, Keto L L, Jacobsen S, *et al.* Sr isotopic variations of Upper Proterozoic carbonates from East Greenland and Svalbard [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 2331-2339.
- [38] Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, *et al.* Sr and C isotopic in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton. A paleoenvironmental record during the Cambrian explosion [J]. *Earth Planet. Scie. Lett.*, 1994, 128: 671-681.
- [39] Denison R E, Koepnick B B, Fletcher A, *et al.* Criteria for the retention of original seawater in ancient shelf limestone[J]. *Chemical Geology*, 1994, 112: 131-143.
- [40] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 陡山沱期古海水的硫和碳同位素变化[J]. *科学通报*, 2003, 48(8): 850-855.
- [41] Kaufman A J, Jacobsen S. R., Knoll A. H. The vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater, implications for tectonics and paleoclimate [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1993, 120: 409-430.
- [42] Oing Hairong, Veizer J. Oxygen and carbon isotopic composition of Ordovician brachiopods: Implications for coeval seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(20): 4429-4442.
- [43] Williams D F. Isotope chronostratigraphy: theory and methods[M]. California: Academic Press, 1988, 39-68.
- [44] 王大锐, 白志强. 广西中—上泥盆统界线附近的化学地层学特征[J]. *地层学杂志*, 2002, 26(1): 50-54.
- [45] 王大锐, 冯晓杰. 渤海湾地区下古生界碳、氧同位素地球化学研究[J]. *地质学报*, 2002, 76(3): 400-408.
- [46] Matthew R, Saltzman, Robert L, *et al.* A global carbon isotope excursion (SPICE) during the Late Cambrian: relation to trilobite extinctions, organic-matter burial and sea level[J]. *Palaeogeography*, 2000, 162: 211-223.
- [47] Stephen C, Ruppel Eric W J. High resolution $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ chemostratigraph of the Silurian: implication for event correlation and strontium flux[J]. *Geology*, 1996, 24(9): 831-834.
- [48] Spoomer E T C. The strontium isotopic composition of seawater, and seawater-oceanic crust interaction[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1992, 31: 167-174.
- [49] Li Huaqin, Cai Hong, Qin Zhengyong, *et al.* Strontium isotope compositions of Jixian Middle upper Proterozoic stratotype section and their significances[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1994, (1- 2): 232-244.

系的一般关系式以及图示法, 对矿山生产实践中有一定实用价值。

参考文献:

[1] 齐亚林, 范宴良, 王生龙, 等. 矿床技术经济评价案例[M]. 北

京: 地质出版社, 1992. 89-95, 245-256.

[2] 徐强, 曹瑞峰. 矿床技术经济评价[M]. 北京: 地震出版社, 1993. 140-144.

[3] 关凤峻, 王文, 张应红. 地质技术经济学[M]. 北京: 地质出版社, 1993. 82-88.

DEGREE OF EFFECTS OF THE MAIN UNCERTAIN FACTORS ON INVESTMENT INCOME RATE IN MINING PRODUCTION

LI Long hu

(No. 6 Institute of Geological Survey of Jilin, Yanji 133001, China)

Abstract: On the basis of sensibility analysis in technical-economic evaluation of mineral deposits, systematic mathematical analysis has been applied to analyse degree of effects of main uncertain factors— proceeds of sale, sales cost, productivity and gross investment on investment income ratio in mining production. Effect of multifactor on investment income ratio also has been discussed.

Key words: technical-economic evaluation of mineral deposits; sensibility analysis; uncertain factors; investment income ratio; degree of effect

(上接第 56 页)

APPLICATION OF C, O AND Sr ISOTOPE COMPOSITION OF CARBONATES IN THE RESEARCH OF PALEOCLIMATE AND PALEOOCEANIC ENVIRONMENT

YAN Zhao bin¹, GUO Fu sheng^{1,2}, PAN Jia yong³, GUO Guo lin¹, ZHANG Yue jing¹

(1. East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China;

2. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geoscience, Beijing 100029, China;

3. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Research on C, O, Sr isotopes of carbonate rocks is one of the geochemical tracers and provides quantitative evidences for paleo-environment and paleoclimate change. The research results reveal that high $\delta(^{13}\text{C})$ represents rise of the sea level and high rate of organic carbon burry, the low $\delta(^{13}\text{C})$ the drop of sea level and the organic carbon burry rate; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio is negatively correlated to eustatic change of sea level, $\delta(^{18}\text{O})$ value is one of the signoture to be trsed to indicate if the carbonate rock was exposed to late re worke. Generally, $(\text{Mn}/\text{Sr}) < 10$, $\delta(^{18}\text{O}_{\text{POB}}) < -10 \times 10^{-3}$, impositively correlated $\delta(^{13}\text{C})$ and $\delta(^{18}\text{O})$ are the prerequisites for C, O, Sr isotopes to trace paleo-climate.

Key words: carbonate; carbon isotope; oxygen isotope; strontium isotope; paleoclimate; paleoceanic environment