

辉长岩韵律层厚度的分形结构与模拟计算

——以攀枝花层状侵入体为例

欧新功, 金淑燕, 金振民

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 运用分形理论对四川攀枝花层状侵入体的韵律层厚度进行分维计算, 并结合计算机模拟手段, 对韵律层理的成因进行了探讨. 通过分形计算表明, 攀枝花层状侵入体的韵律层在厚度上具有分形结构, 其分维数介于 1.4~1.8 之间, 不同级别韵律层的厚度分维数不同, 韵律演化的级别越高, 厚度分维数越大. 通过模拟计算的韵律色度分维数与实测韵律层的厚度分维数比较接近, 变化规律也比较相似, 这不仅说明在韵律的演化过程中, 厚度和色率之间有一定的内在联系, 也说明了重力在韵律形成机制中是一个重要的影响因素. 地球的重力作用与地球的其他物理化学作用在空间和时间上耦合, 形成了这种具有时空分形结构的韵律现象.

关键词: 层状侵入体; 辉长岩韵律层; 分形结构; 计算机模拟; 攀枝花.

中图分类号: P588.124; P628+.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)06-0603-06

作者简介: 欧新功(1974—), 男, 在读博士, 2000年6月毕业于中国地质大学(武汉), 获硕士学位, 主要研究方向为大陆深部构造及岩石物理学.

0 引言

分形理论^[1]创立于 20 世纪 70 年代中期, 其研究对象为自然界和社会活动中广泛存在的复杂无规则但具有自相似性的系统. 分形理论借助自相似原理洞察隐藏于混乱现象中的精细结构, 为人们从局部认识整体, 从有限认识无限提供了新的方法论, 为不同学科发现规律性提供了崭新的语言和定量描述. 在地球系统中, 许多地质现象的空间展布具有分形结构. 从微观的晶体生长、准晶体形成到宏观的海岸线、地形地貌、断层体系以及地震运动等的空间结构都呈分维结构. 对这些现象的研究还产生了一门新的分支学科——分形地质学, 它是分形理论同地质学相结合的产物, 是非线性地质学的一个重要组成部分^[2], 它从形态、过程和机理的角度探索地质事物存在、发生和发展的规律. 分形理论在地质学领域的广泛应用, 为地质学定量化研究提供了一定的理论基础. 一些看起来较为混乱复杂的地质现象, 通过分形理论的深入研究, 均可反映其尺度不变性和自相

似性, 以便更好地把握地质现象的本质特征^[3~5], 这方面的运用在成矿预测^[6]、工程与断裂体系^[7]、地震^[8]甚至大陆山链和韧性剪切带^[9]等方面都有比较好的效果.

研究对象的分形特征一般用分维值来描述, 其定义^[10]为:

$$N \propto r^{-D}$$

其中 N 为尺度大于 r 的物体个数, 即累积频率; D 定义为某一分形体的分维值, 它反映分形体形态结构的复杂程度. 分维值常见的表示方法有 Hausdorff 维、关联维、信息维等几种不同的形式. 在对攀西层状侵入体韵律层的研究中, 已有的研究成果基本上都用关联维对韵律层的成因做了定性研究^[11,12], 或者从分形动力学方面进行了探讨^[13]. 本文以攀枝花层状辉长岩岩体为对象, 利用对手标本尺度韵律厚度的精确统计, 对韵律层厚度的频率分布进行计算, 并结合计算机模拟进行了讨论.

1 地质背景与研究状况

韵律层成因的争论也很多^[18~23]。我国攀西地区的辉长岩体是层状侵入体最典型的例子之一,它的韵律嵌套结构具有较好的自相似性。该区在大地构造位置上位于扬子地块西南缘,四周均以深大断裂与周围地质单元相接,总体上南宽北窄,形如帚状。区内发育大型的近南北向断裂带,并沿断裂走向分布大量层状侵入体,其中攀枝花层状侵入体由于采矿而使韵律层出露良好。攀枝花层状辉长岩质侵入体长 19 km,宽 2 km,厚 2 000~3 000 m,呈岩床状分布。岩体走向北东,倾向北西,倾角 50°~60°,岩体呈单斜层状。岩体的主要岩石类型为辉长岩,矿物组成以含钛普通辉石和斜长石为主,部分层内含有橄榄石和磷灰石。斜长石以拉长石为主,An 多集中在 An55—An70 之间,具半自形不等粒的特点;含钛普通辉石也具有它形—半自形不等粒结构的特点,大颗粒呈短柱状,粒径 2~7 mm,解理发育。岩体在总体上分为上、中、下 3 层,有时为上下 2 层,每一层的矿物成分、色率、长石碱性度等特征从层的底部到层的顶部渐变;每一层又可划分为 3 层。这样,层中有层,层层镶嵌,直至 5~6 个嵌套层。岩体的内部分层以及层层嵌套的特征表明了这是一种具有自相似结构的复杂几何体,即层状岩体的韵律结构具有分形的特征。

根据这样一种认识,人们开始应用分形理论对攀西地区层状岩体的韵律层进行研究。岑况等^[13]提出用类似于 Cantor 分形集合法构筑重力分异时空分形集合,并与攀枝花层状岩体野外观察的韵律颜色以及岩体实测的矿物成分、长石的 An 牌号进行了对比,发现岩体实测数据与构筑的时空分形理论图示很相似,指出该岩体的韵律结构在成因上具有时空分形结构的特征。钟玉芳等^[11]等运用关联维的相关理论^[5]对攀西红格岩体的主要成矿元素(TFe, Ti, Cu, V, Co)的含量进行计算,并作出了双对数图,认为层状韵律嵌套的形成可能受 5 种实质性状态变量的控制。马芳等^[12]对攀西白马岩体的其他元素(或元素组合)作了类似的计算,推测该岩体韵律的形成受 7 个状态变量的控制。这些研究成果对进一步认识攀西地区层状韵律的成因作了很好的探索,为后继研究提供了相应的研究思路。

2 韵律层的厚度分形

对攀西层状侵入体进行分形研究的难点在于:

(1)分形对象的选取比较困难,因为所选取的对象不仅要量化,而且最好具有时空结构;(2)不同分形对象之间的分维(或关联)关系不好确定;(3)分形的研究结果很难同韵律层的成因直接联系起来。这些因素直接影响着对韵律层的分形研究。攀枝花层状岩体的韵律结构不仅体现在矿物成分、岩相等的变化上,在韵律层的厚度上也有规律性变化:较厚的韵律层是由较细的韵律层逐级嵌套形成的。这些韵律层是岩浆在复杂物理化学条件下形成的,厚度是韵律外在的直接表现之一,对不同级别韵律层厚度的研究,可对揭示韵律的形成机制提供有意义的信息。

鉴于大尺度韵律的厚度难以精确测量,且数据偏少,分形计算的难度较大。根据分形理论的自相似原理,对小尺度韵律的研究可以反映大尺度(整体)的变化规律,因此选取露头和本尺度的韵律层进行研究。标本的选取基于以下条件:(1)韵律明显且界线较清楚;(2)能连续测得 50 层以上的韵律厚度;(3)韵律的厚度变化有一定幅度。这样选择主要是便于分形研究的结果具有代表性。文中选取攀枝花辉长岩体兰家火山剖面中相当于第 4 级和第 5 级韵律的标本进行研究,利用分形理论探讨韵律层厚度的频率分布关系。

由于研究的具体对象不同,其分维数计算的具体形式也有多种。广义维的定义如下:

$$D_q = \lim_{r \rightarrow 0} \lim_{q_i \rightarrow q} [1/(q_i - q)] \ln \sum_i P_i^{q_i} / \ln r, \\ q = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots, \infty.$$

公式中 P_i 是覆盖概率,当用边长为 r 的小盒子去覆盖分形结构时, P_i 是分形结构中某些点落入小盒子的概率。当 q 取不同的值时, D_q 表示不同的分维。针对攀枝花层状岩体的韵律层这样一个具体问题,选取韵律层的厚度作为分形对象, h 为给定的一个厚度值, P_i 记录所测韵律的厚度值中大于给定 h 值的个数(N),其厚度分维计算的数学模型为:

$$D_i = - \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\ln N(h)}{\ln h}.$$

根据实际测量到的韵律层厚度,适当取不同的 h 值,会得出一系列相对应的 N 值(表 1),对这些相对应的数据对分别求常用对数,并把对数值投影在二维坐标平面内,然后对投影点用最小二乘法进行拟合,所得直线的斜率即为厚度分维值 D_h (图 1)。通过计算,得出攀枝花层状侵入体第 4 级韵律层中浅色层的厚度分维数为 1.716(图 1a),暗色层的厚度律层中浅色层 $D=1.410$ (图 1c),暗色层 $D=1.692$

表 1 攀枝花层状侵入体韵律层厚度的频率分布

Table 1 Frequency distribution of thickness of rhythmic layer in Panzihua intrusion

实测韵律层厚度的频率分布(第 4 级韵律)							
浅色层(以斜长石为主)				暗色层(以单斜辉石为主)			
<i>h</i> /mm	<i>N</i>	lg(<i>h</i> /mm)	lg <i>N</i>	<i>h</i> /mm	<i>N</i>	lg(<i>h</i> /mm)	lg <i>N</i>
0.8	44	-0.097 0	1.643 5	0.8	38	-0.096 9	1.579 8
1.0	30	0.000 0	1.477 1	1.0	33	0.000 0	1.518 5
1.2	27	0.079 2	1.431 4	1.2	29	0.079 2	1.462 4
1.5	18	0.176 1	1.255 3	2.0	15	0.301 0	1.176 1
2.0	11	0.301 0	1.041 4	2.5	11	0.397 9	1.041 4
3.0	6	0.477 1	0.778 2	4.0	4	0.602 1	0.602 0
4.0	3	0.602 1	0.477 1	6.0	2	0.778 2	0.301 0
平均层厚 1.65 mm	$D_h=1.716\ 35$			平均层厚 1.64 mm	$D_h=1.645\ 39$		
实测韵律层厚度的频率分布(第 5 级韵律)							
浅色层(以斜长石为主)				暗色层(以单斜辉石为主)			
<i>h</i> /mm	<i>N</i>	lg(<i>h</i> /mm)	lg <i>N</i>	<i>h</i> /mm	<i>N</i>	lg(<i>h</i> /mm)	lg <i>N</i>
0.2	35	-0.699 0	1.544 1	0.4	50	-0.397 9	1.699 0
0.3	29	-0.522 9	1.462 4	0.5	35	-0.301 0	1.544 1
0.4	22	-0.398 0	1.342 4	0.6	26	-0.221 9	1.415 0
0.6	15	-0.259 6	1.176 1	0.8	18	-0.096 9	1.255 3
1.0	6	0.000 0	0.778 2	1.0	12	0.000 0	1.079 2
1.5	3	0.176 1	0.477 1	1.2	8	0.079 2	0.903 1
2.0	2	0.301 0	0.301 0	1.4	6	0.146 1	0.778 2
平均层厚 0.72 mm	$D_h=1.409\ 61$			平均层厚 0.86 mm	$D_h=1.692\ 47$		

(图 1d), 平均 $D_{h_5}=1.551$.

3 讨论和结论

仅仅计算出不同级别韵律层厚度的分维值是不够的, 应进一步深入分析其与韵律形成机制之间的联系. 攀枝花层状岩体的宏观韵律特征表现在两个方面: 一是韵律层厚度的变化, 不同尺度的韵律层厚度不同, 且大(厚)韵律内嵌套小(细)韵律; 另一个是岩石色率的变化, 用不同的尺度观察, 从几十 m 到几 mm, 岩体韵律总能呈现明暗(或黑白)相间的条带. 实际上, 无论是韵律的厚度或是韵律的色率, 都是岩浆在一系列复杂的物理化学条件下演化的结果, 二者之间的内在联系体现在分形特征上. 由于系统测定韵律色率的变化比较困难, 这里结合野外岩石色率的变化规律, 建立一个数学模型, 利用计算机模拟生成不同色率韵律层, 并利用计算机生成的数据进行色率频度的分形计算, 将计算结果与实测韵律层厚度的分形结果进行对比, 找出相似的变化规律和内在联系.

韵律色率的变化与岩石中不同矿物的含量关系

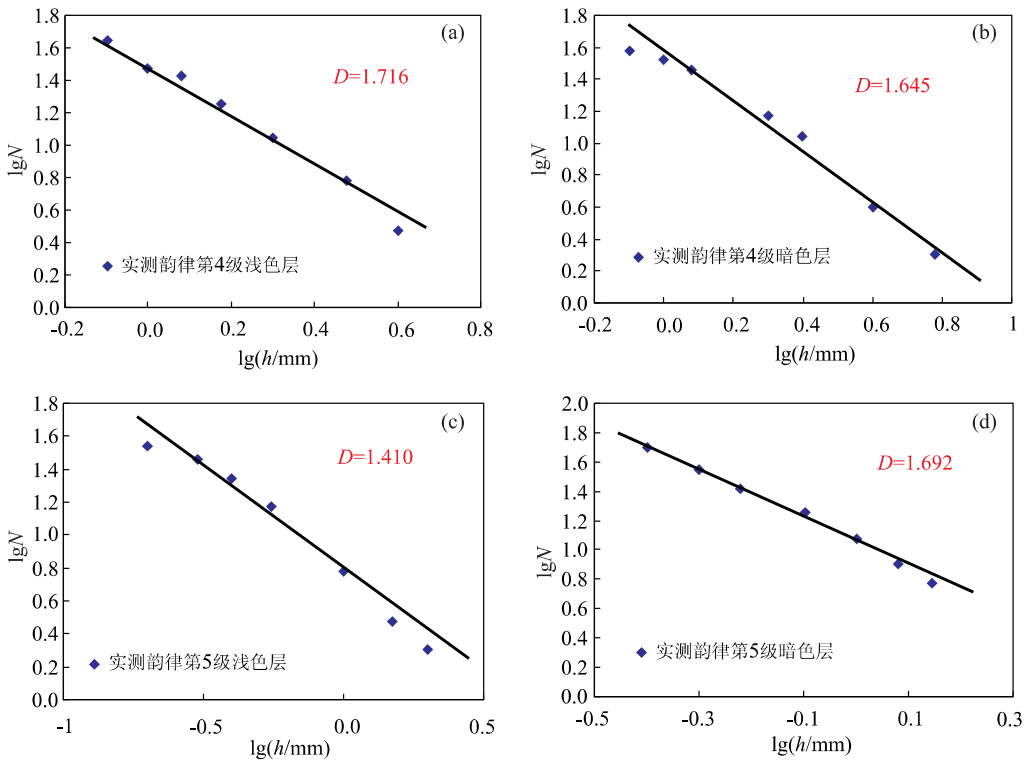


图 1 攀枝花层状侵入体韵律层厚度的分维数

Fig. 1 Thickness fractal dimension of rhythmic layer in Panzihua intrusion

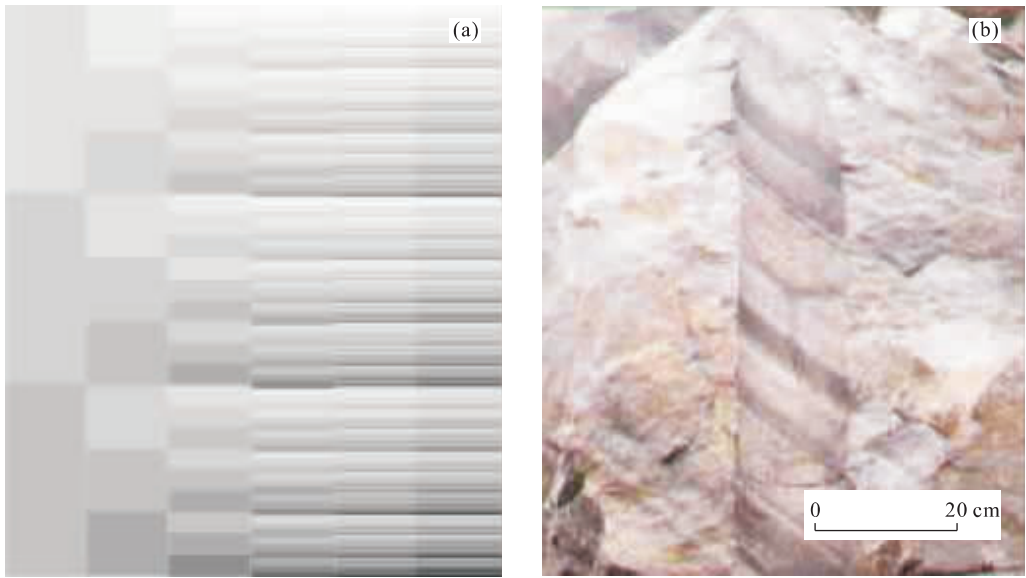


图 2 韵律构造的计算机模拟与天然韵律构造的比较

Fig. 2 Comparison between simulated and natural rhythm

a. 计算机模拟的不同级别的韵律层; b. 攀枝花岩体兰家火山矿带的辉长岩中发育的韵律结构

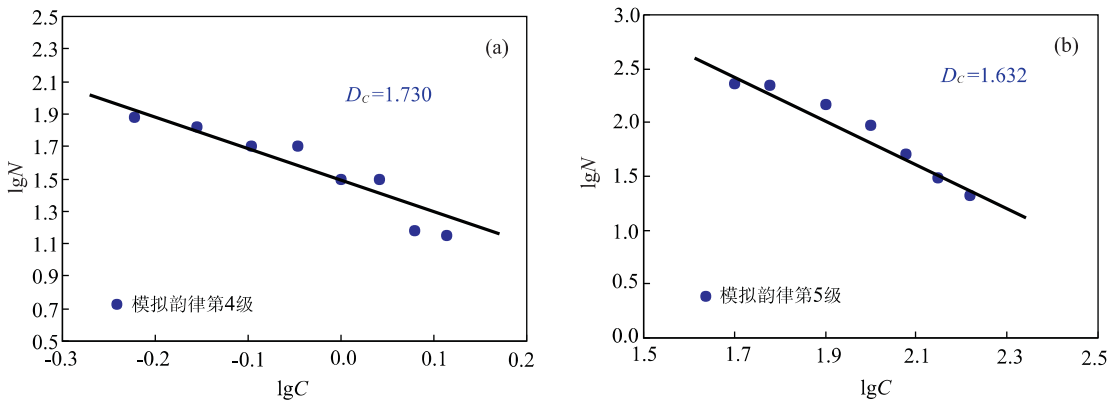


图 3 计算机模拟韵律的色率分维数

Fig. 3 Fractal dimension of color rate in simulated rhythmic layer

密切。攀西层状侵入体岩石中的暗色矿物主要有普通辉石(密度 $\rho=3.23\sim 3.52$)、钛铁矿($\rho=4.72$)、磁铁矿($\rho=4.9\sim 5.2$), 浅色矿物主要为斜长石(中长石 $\rho=2.64\sim 2.67$ 、拉长石 $\rho=2.67\sim 2.72$)。岩浆在就位以后, 随着矿物晶体不断结晶析出, 由于暗色矿物的密度大于浅色矿物, 在重力作用下, 较重的暗色矿物将向岩浆房的下部迁移, 导致下部颜色变暗, 上部颜色变浅。如果说整体和局部都遵循这样的演化规律, 如此反复, 就能形成明暗相间的韵律层。整个岩体的平均色率与岩体中部岩石的平均色率相近。据此考虑的数学模型如下:

假设岩浆原始的平均色率为 C_0 , 经过时间 t_1 的演化之后, 岩浆房上部的平均色率降低 $S\%$, 对应下

部岩浆的平均色率升高 $S\%$, 中部岩浆的色率基本保持不变。在演化时间 t_2 , 上、中、下部再分别按此规律演化, 即第 n 阶岩石的色率变化满足:

$$C_n \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} C_{n_1} = C_n \times (1 - S\%) \\ C_{n_2} = C_n \\ C_{n_3} = C_n \times (1 + S\%) \end{array} \right\}.$$

模拟计算时取 $C_0=1$ (即假设岩浆的平均色率为 1), $S=20$ (即岩浆演化时每阶韵律的色率变化为 20%), 据此编制了计算机程序, 模拟出不同级别的韵律层见图 2a, 与野外岩石的韵律层(图 2b)有很好的相似性。利用模拟数据(表 2)计算出不同级别色率的频度分形结果见图 3, 模拟出第 4 级韵律的色

表 2 计算机模拟韵律层的色率频度分布

Table 2 Frequency distribution of color rate of simulated rhythmic layer

分形演化第 4 级				分形演化第 5 级			
C	N	lg <i>h</i>	lgN	C	N	lg <i>h</i>	lgN
0.6	75	-0.2219	1.8751	0.5	231	1.6990	2.3636
0.7	66	-0.1549	1.8195	0.6	221	1.7782	2.3444
0.8	50	-0.0969	1.6989	0.8	147	1.9031	2.1673
0.9	50	-0.0458	1.6990	1.0	96	2.0000	1.9823
1.0	31	0.0000	1.4914	1.2	51	2.0792	1.7076
1.1	31	0.0414	1.4914	1.4	31	2.1461	1.4914
1.2	15	0.0792	1.1761	1.65	21	2.2175	1.3222
1.3	14	0.1139	1.1461				
$C_0=1.00$		$D_C=1.72955$		$C_0=1.00$		$D_C=1.632288$	

率分维 $D_{C4}=1.730$ (图 3a), 第 5 级色率的 $D_{C5}=1.632$ (图 3b).

通过分形计算表明, 攀枝花层状侵入体的韵律层在厚度上具有分形结构, 其分维数介于 1.4~1.8 之间, 不同级别韵律层的厚度分维数不同, 韵律演化的级别越高, 厚度分维数越大. 通过模拟计算的韵律色度分维数与实测厚度的分维数比较接近, 变化规律也比较相似, 这不仅说明在韵律的演化过程中, 厚度和色率之间有一定的内在联系, 也说明了重力在韵律形成机制中是一个重要的因素, 地球的重力作用与地球其他的物理化学作用在空间和时间上耦合, 形成了这种具有时空分形结构的韵律现象. 於崇文等^[24,25]应用对流和固结的相互作用动力学研究层状岩体, 研究表明: 嵌套韵律层结构是空间分形结构和时间分形结构的耦合和一体化, 是基性—超基性岩浆“对流—固结分离或分凝”过程的自组织临界性所导致的结果.

研究过程中得益于於崇文院士、鲍征宇教授的启迪, 谨致谢意.

参考文献:

[1] Mandelbrot B B. Fractals: forms, chance and dimension [M]. San Francisco: W H Freeman, 1977.
 [2] 申维. 初论分形地质学. 世界地质, 1998, 17(4): 75—84.
 [3] 仪垂祥. 非线性科学及其在地质学中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1995.
 [4] 陈颀. 分形与分维在地球科学中的应用[M]. 北京: 学术期刊出版社, 1988.
 [5] 刘式达, 刘式适. 分形和分维引论[M]. 北京: 气象出版社, 1993.
 [6] 沈步明, 沈远超. 新疆某金矿的分维数特征及其地质意义[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(3): 297—302.

[7] 汪华斌, 吴树仁. 分形理论在断裂工程活动性评价中的应用[J]. 地质科技情报, 1998, 17(2): 91—96.
 [8] 郑捷. 研究地震和岩石破裂现象的非线性研究方法[J]. 地球物理学报, 1992, 7(1): 20—30.
 [9] 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. 1—7.
 [10] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1982. 36—41.
 [11] 钟玉芳, 岑况, 马芳. 攀西层状基性—超基性岩体的韵律特征及分形研究[J]. 地质科技情报, 1999, 18(1): 33—38.
 [12] 马芳. 攀西地区层状岩体套叠式韵律的分形研究[J]. 四川地质学报, 1999, 19(1): 11—14.
 [13] 岑况, 钟玉芳. 攀西地区基性超基性岩地球化学及嵌套韵律层的分形动力学研究[J]. 现代地质, 1999, 13(4): 408—414.
 [14] McBirney A R. The Skaergaard layered series. part I. Structure and average compositions [J]. J Petrology, 1989, 30(2): 363—397.
 [15] Mathez E A. Magmatic metasomatism and formation of the Merensky Reef, Bushveld Complex [J]. Contrib Mineral Petrol, 1995, 119(2—3): 277—286.
 [16] Boudreau A E, McCallum I S. Investigations of the Stillwater Complex; Part 5, Apatites as indicators of evolving fluid composition [J]. Contrib Mineral Petrol, 1989, 102(2): 138—153.
 [17] Dunn T. An investigation of the oxygen isotope geochemistry of the Stillwater Complex [J]. J Petrology, 1986, 27(4): 987—997.
 [18] 宋谢炎, 王玉兰, 张正阶, 等. 层状侵入体韵律层形成过程的定量模拟[J]. 地质学报, 1999, 73(1): 37—46.
 [19] Boudreau A E, McBirney A R. The Skaergaard layered series. Part III. Non-dynamic layering [J]. J Petrology, 1997, 38(8): 1003—1020.
 [20] Wiebe R A, Snyder D. Slow, dense replenishments of a basic magma chamber: the layered series of the Newark Island layered intrusion, Nail, Labrador [J]. Contrib Mineral Petrol, 1992, 113: 59—72.
 [21] 鲍征宇. 双扩散对流理论简介及国外研究现状[J]. 地质科技情报, 1989, 8(4): 35—41.
 [22] McBirney A R, Nicolas. The Skaergaard layered series. Part II. Magmatic flow and dynamic layering [J]. J Petrology, 1997, 38(5): 569—580.
 [23] Brandeis G. Constrains on the formation of cyclic units in ultramafic zones of large basaltic chambers [J]. Contrib Mineral Petrol, 1992, 112: 312—328.
 [24] 於崇文. 地质作用的自组织临界过程动力学——地质

系统在混沌边缘分形生长(上)[J]. 地学前缘, 2000, [25] 於崇文, 岑况, 鲍征宇, 等. 成矿作用动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1988. 230.

FRactal Structure and Simulation of Thickness of Gabbro Rhythmic Layer: A Sample from Panzhihua Layered Intrusion

Ou Xingong, Jin Shuyan, Jin Zhenmin

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In this paper, the fractal theory is applied to the fractal calculation of thickness of rhythmic layers in Panzhihua layered intrusion in Sichuan Province, China. In addition, this paper discusses the origin of the rhythmic stratification by means of computer simulation. The fractal research on the thickness of Panzhihua layered intrusion shows an excellent fractal structure with its dimension ranging between 1.4 and 1.8. The fractal dimension of thickness varies with different grades of rhythmic layers. The higher the grade of the rhythmic evolution is, the greater the fractal dimension of thickness is. The fractal dimension of rhythmic color thus simulated is close to that of the thickness of the measured rhythmic layer in addition to similar changing patterns, which indicate that a certain internal association is present between the thickness and the chrominance of the rhythm in the process of the magma evolution, and that the gravity is an important factor of the formation mechanism of the rhythm. The coupling in space and time between earth gravity and other earth physical and chemical effects results in this kind of rhythmic pattern with spatio-temporal fractal structure.

Key words: layered intrusion; gabbro rhythmic layer; fractal structure; computer simulation; Panzhihua.