

文章编号: 1000-0550(2006)05-0705-09

太平洋海山地形与钴结壳资源分布的分形研究^①

章伟艳^{1,2} 张富元² 杨克红^{1,2} 胡光道¹ 杨胜雄³ 程永寿⁴ 赵国军⁵

(1 中国地质大学数学地质遥感地质研究所 武汉 430074 2 国家海洋局第二海洋研究所 国家海洋局海底科学重点实验室 杭州 310012
3. 国土资源部广州海洋地质调查局 广州 510760 4. 国家海洋信息中心 天津 300174 5 浙江省水利水电勘测设计院 杭州 310002)

摘要 通过海山地形与钴结壳资源量的分形研究表明, 海山地形与钴结壳资源量间呈多重分形分布。海山坡度与资源量分形呈三段式, 引起海山坡度与资源量分段分形的原因是不同类型结壳分布叠加的结果。水深—资源量分形呈三到四段式, 引起水深—资源量复杂分形的原因可能与海山基底洋壳有关, 海山基底洋壳年龄老于 165 Ma 的海山呈四段式分布, 而小于 165 Ma 的海山呈三段式分布。同一区域或不同区域内海山地形与资源分布各不相同。

关键词 太平洋海山 钴结壳 地形 资源量 分形

第一作者简介 章伟艳 女 1972 年出生 硕士 海洋地质 E-mail: ZWY885@163.com

中图分类号 P736 **文献标识码** A

太平洋海山是超级地幔柱形成的板内海洋平顶山, 经过漫长地质时期漂移、垂直升降等构造运动和如今还在进行的侵蚀、沉积作用^[1], 从赤道太平洋迁移到现在的位置, 并由出露水面到今天山顶位置约在水下 1 400 ~ 1 700 m, 形成了复杂的海山地形, 从而也控制了海山表面的结壳展布。研究表明, 影响钴结壳分布的主要地形因素是海山坡度和水深。早在 1988 年 Hein 等人就发现^[2], 坡度稳定是海山上钴结壳生长的必要条件之一, 因为后期火山活动可以诱发滑坡的发生, 影响海山的稳定性, 破坏火山活动间歇期内形成的钴结壳生长层。随后 Yanazaki T 等^[3,4] 研究发现钴结壳的分布及其类型与其分布地的坡角大小关系密切: 坡度为 0° ~ 3° 时, 以钴结核为主; 3° ~ 7° 时, 一般有沉积物覆盖; 7° ~ 15° 时, 为结核、结壳过渡区, 随坡度增大结壳所占比例逐渐增大; 坡角大于 15° 时, 以钴结壳为主。初凤友等利用采样、视像等资料对中太平洋 CM2 海山的地形研究认为: 海山坡度太缓、太陡均不利于结壳的生长发育; 在海山坡度较大的斜坡处生长的结壳多呈平板状的板状结壳, 而在坡度较小的平坦低洼处生长的结壳多呈波纹状或枕状的砾状结壳、钴结核^[5]。2001 年俄罗斯南方海洋地质勘探联合体利用 k/v“Gelendzik”(格连吉克号) 在麦哲伦海山的 IOAN 海台上打了 7 个浅钻, 结果表明, 海台平坦处的结壳厚度和有用金属含量均比斜坡上结壳的大和高^[6]。可以看出, 不同的学者采用不同的研究方法得到了不同的结果, 那么, 海山表面形

态与钴结壳资源分布间究竟存在着什么样的关系呢? 这也许正是分形地质学的任务之一。日益增多的资料表明, 矿产资源的分布属于分形分布^[7], 这一事实是我们进行太平洋海山地形与资源量分布分形研究的基础。本文针对这一问题, 通过海山地形与钴结壳资源间的分形研究, 分析海山地形和结壳资源分布间的关系, 这对于我们了解海山上结壳的生长机制和分布规律具有一定的作用。

1 分形几何简介

分形理论是近些年来才出现的一种具有强大生命力的新工具, 分形分布满足下面的关系式:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (1)$$

则定义了一个分维分布, D 称为分维数, 分维数可以是整数, 也可以是分数。即在双对数坐标上, $N(r)$ 与 r 成直线关系, 说明研究对象具有线性分形特征, 直线的斜率就是其分维值。 r 为特征尺度; $N(r)$ 为与特征尺度 r 有关的物体数目; C 为常数^[8]。

2 海山地形与钴结壳资源量的分形方法

2.1 海山坡度与钴结壳资源量的分形方法

钴结壳采样点不是规则化网格, 局部区域可能采样较密或较稀甚至未取。若直接用原始地质取样点数据进行坡度—资源量分布研究, 不能真实地反映区

① 中国大洋“十五”项目 (DY105-01-01-5 和 DY105-01-04-1)、科技部资助项目 (2004DIB3J086)、908 专项 (908 02-05-03) 资助。

收稿日期: 2005-10-30 收修稿日期: 2006-03-20

域内坡度值的分布特征,也即是说,普通的统计方法并未考虑样品空间分布和统计特征随空间度量尺度的变化性^[9,10]。通常浓度—面积法^[11,16]计算大于含量值 c_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$; n 为含量值分组数)的面积 S ($C > c_i$),然后在双对数坐标下考察 $c_i \sim S(C > c_i)$ 间是否存在幂率关系即分形。该法可以弥补原始采样数据分布不规则的不足。本次也采用该原理方法探寻海山坡度与钴结壳资源量的关系。具体做法是根据邻近区域法划分每个测站的控制区域,然后按 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 网格计算各点位的坡度,坡度计算方法见文献[17],并按各点位分布所在区域的丰度值计算各单元网格的资源量,得到每个点位控制面积的资源量,同时对各点位不同坡度范围的资源量分布情况进行统计。记 $N(s)$ 为点位坡度大于 s 值的所有区域面积内的资源量,显然随着坡度 s 值的增大,所围成的面积 $N(s)$ 是递减函数。这样得到了数据 $(N(s_1), N(s_2), \dots, N(s_n))$ 和 (s_1, s_2, \dots, s_n) , 将这些数据代入分形模型中,求出相应的分维数的估计量。

应用坡度—资源量的数据,在 $\lg s - \lg N(s)$ 坐标中投点。如果这些数据点分布在一条直线上的话,分维数 D 可以利用直线的斜率直接求出;如果这些散点大致分布在二段或二段以上直线上时,可采用分段拟合的方法。事实上,各分界点有的明显,有的不明显,为了提高分界点确定的客观性,在各个区间内用最小二乘法进行回归,即找出合适的分界点 r_i , 使各区间拟合的直线与原始数据点之间的剩余平方和 E_i ($i=1, 2, \dots$) 在各区间的总和为最小,并且保证每个区间回归方程的显著性。

2.2 海山水深与钴结壳资源量的分形方法

为了寻找水深对钴结壳资源分布的影响,对不同水深范围的资源量分布情况进行研究。大量调查数据表明,钴结壳赋存水深一般为 $300 \sim 3500 \text{ m}$ ^[18],因此可以假定海山钴结壳分布的底界为 3500 m 等深线,进行资源量计算时仅对 $< 3500 \text{ m}$ 水深以浅的海山面积进行计算。记 $N(r)$ 为以水深等值线 r 值与结壳分布底界所围成的面积内的资源量,显然 $N(r)$ 是递减函数。这样得到了数据 $(N(r_1), N(r_2), \dots, N(r_n))$ 和 (r_1, r_2, \dots, r_n) , 将这些数据代入分形模型中,求出相应的分维数的估计量。同样对数据点分布不在一条直线上的话,采用上述方法进行分段拟合。

3 计算结果

本文选择我国在中、西太平洋调查的四个区域

(麦哲伦海山区、威克—马尔库斯海山区、中太平洋海山区、莱恩群岛)进行海山地形与资源量的分形研究。

3.1 海山坡度—资源量分形

根据上述坡度—资源量分形计算方法, WMA 等 12 座海山坡度 s 与资源量 $N(s)$ 的散点图见图 1, 拟合参数见表 1, 各区间的回归方程均呈显著性。从图上可以看出: 它们基本上有一个共同的特点, 那就是呈三段式分布, 而且随着坡度的增大分维数也逐渐增大。如 WME 海山, $< 15^\circ$ 的坡度—资源量的分维数是 0.2169 , $15^\circ \leq s < 23^\circ$ 的坡度—资源量的分维数是 2.2653 , $\geq 23^\circ$ 坡度—资源量的分维数是 15.477 。 15° 和 23° 为坡度对 WME 海山钴结壳资源分布控制的异常值, 可以作为钴结壳资源量评估、矿区圈定的参考值。什么原因引起地形—资源量分段分形的呢? 本次挑选海山测站网度较密的麦哲伦 WME 海山和威克—马尔库斯 CCL 海山, 按上述坡度分段进行结壳类型参数统计(见表 2 和图 2、图 3)。WME 海山 $< 15^\circ$ 区域基本上位于山顶平台 (1700 m 以浅) 和山坡下部 (3500 m 以深) 区域, 结壳主要分布于山顶平台, 板状结壳较发育, 平均厚度达 4.8 cm , 也有部分砾状结壳及结核, 砾状结壳平均厚度为 0.64 cm ; $15^\circ \sim 23^\circ$ 区域主要分布于 $1700 \sim 3500 \text{ m}$ 海山边坡中下部, 成环带状, 结壳主要以板状为主, 平均厚度为 3.49 cm , 砾状少见, 无结核; $\geq 23^\circ$ 的陡坡带主要分布于海台以外山坡的中上部, 坡度很陡, 呈星散状分布, 结壳主要以板状结壳为主, 平均厚度为 4.92 cm , 砾状较少, 无结核。CCL 海山 $< 8^\circ$ 区域位于山顶平台及山坡下部 (3500 m 以深) 区域, 结壳类型较复杂, 三种类型结壳中板状稍多, 其次为砾状结壳、钴结核, 各类型的平均厚度分别为 2.53 cm 、 1.45 cm 、 1.27 cm ; $8^\circ \sim 18^\circ$ 区域主要分布于 $1500 \sim 3500 \text{ m}$ 海山边坡中下部, 成环带状, 三种类型结壳均较发育, 但仍以板状结壳为主, 其次为砾状结壳和钴结核, 平均厚度分别为 4.23 cm 、 0.88 cm 、 0.95 cm ; $\geq 18^\circ$ 的陡坡带主要分布于海台以外山坡的中上部及尖顶海山顶部, 坡度很陡, 呈零星散状, 主要以板状结壳为主, 平均厚度为 3.22 cm , 砾状结壳和钴结核未见, 尖顶海山顶部结壳发育相对较好。由此可以看出, 不同海山不同坡度段的结壳发育各不相同, 同一座海山不同坡度段的结壳类型组合也不同。这可能是由于海山边坡为陡坡带, 受地震、火山喷发、重力滑坡、海浪的侵蚀、地表径流的侵蚀等外界因素影响, 砾状结壳和钴结核滚落到山

坡下部, 而山顶平台则由于坡度稳定, 不会发生滚落事件, 造成山顶平台和山坡中下部多种类型结壳组合

混杂堆积, 而陡坡带则仅保存板状结壳, 从而导致海山坡度—资源量的分段分形。

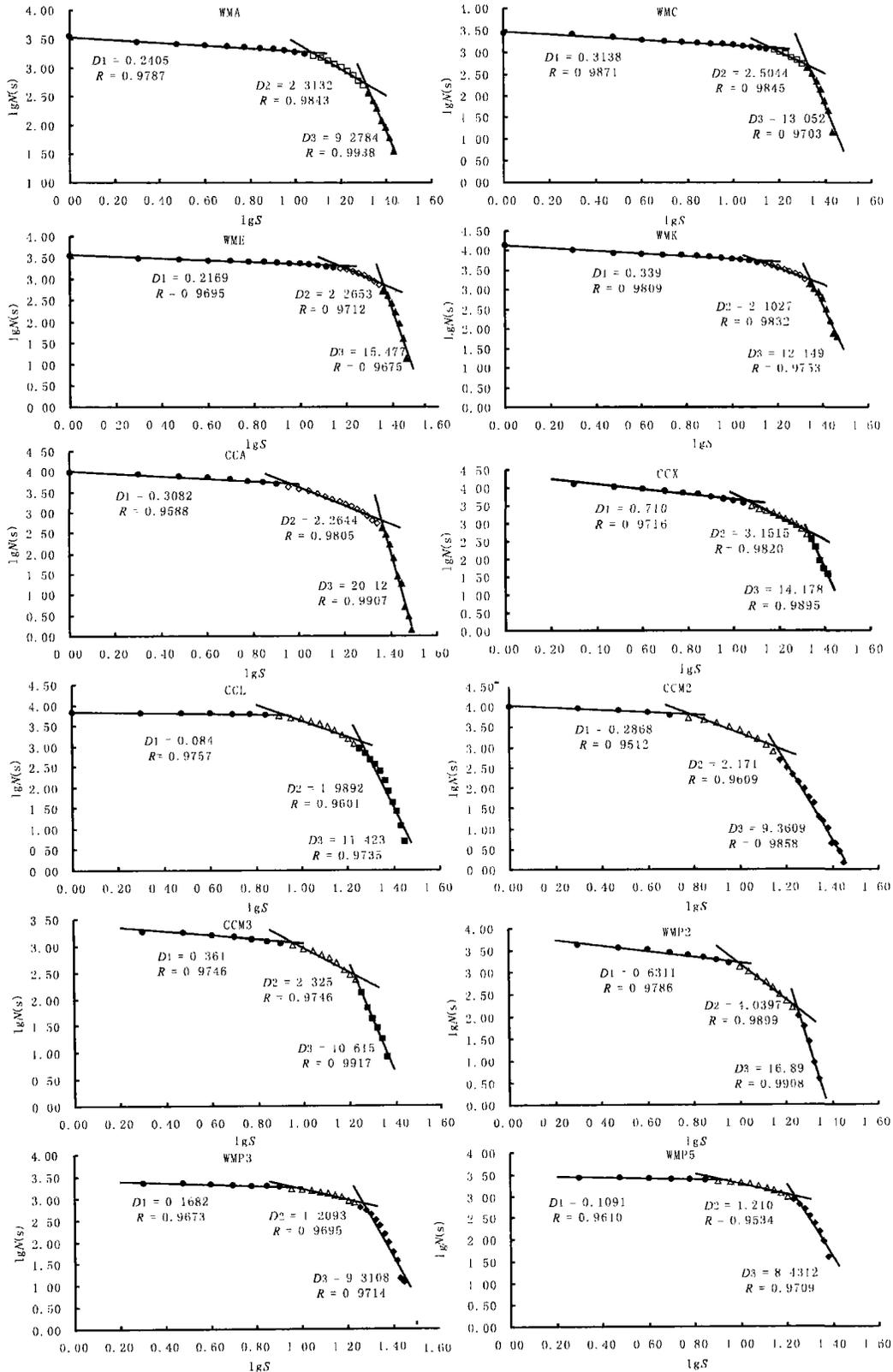


图 1 中、西太平洋 12 座海山坡度—资源量分布图

Fig 1. Double logarithm diagram of slope and resource quantity on 12 seamounts in centralwest Pacific

表 1 各海山区坡度—资源量分段分维值统计表

Table 1 Fractal results of seamount slope and resource quantity in various regions

海山区	海山	第一段坡度	第一段分维值	第二段坡度	第二段分维值	第三段坡度	第三段分维值	拟合残差
麦哲	WMA	$< 12^\circ$	0.2405	$12^\circ \leq s < 21^\circ$	2.3132	$\geq 21^\circ$	9.2784	0.021
	WMC	$< 15^\circ$	0.3138	$15^\circ \leq s < 21^\circ$	2.5044	$\geq 21^\circ$	13.0520	0.103
伦	WME	$< 15^\circ$	0.2169	$15^\circ \leq s < 23^\circ$	2.2653	$\geq 23^\circ$	15.4770	0.140
	WMK	$< 14^\circ$	0.3390	$14^\circ \leq s < 22^\circ$	2.1027	$\geq 22^\circ$	12.1490	0.103
中太	CCA	$< 9^\circ$	0.3082	$9^\circ \leq s < 23^\circ$	2.2644	$\geq 23^\circ$	20.1200	0.166
	CCX	$< 12^\circ$	0.7100	$12^\circ \leq s < 22^\circ$	3.1515	$\geq 22^\circ$	14.1780	0.052
威克一	CCL	$< 8^\circ$	0.0840	$8^\circ \leq s < 18^\circ$	1.9892	$\geq 18^\circ$	11.4230	0.326
马尔	CCM2	$< 6^\circ$	0.2868	$6^\circ \leq s < 15^\circ$	2.1700	$\geq 15^\circ$	9.3600	0.175
	CCM3	$< 9^\circ$	0.3610	$9^\circ \leq s < 18^\circ$	2.3250	$\geq 18^\circ$	10.615	0.039
莱斯	WMP2	$< 10^\circ$	0.6311	$10^\circ \leq s < 18^\circ$	4.0397	$\geq 18^\circ$	16.8900	0.047
	WMP3	$< 9^\circ$	0.1682	$9^\circ \leq s < 18^\circ$	1.2093	$\geq 18^\circ$	9.3108	0.216
	WMP5	$< 8^\circ$	0.1091	$8^\circ \leq s < 17^\circ$	1.2100	$\geq 17^\circ$	8.4312	0.095

表 2 不同坡度段结壳类型统计结果

Table 2 Statistics of different crust types in various seamount slopes

海山	坡度范围 $\hat{\rho}$	分布区域	结壳 测站数 个	板状		砾状		钴结核	
				频数 个	平均厚度 /cm	频数 个	平均厚度 /cm	频数 个	平均厚度 /cm
WME	0~15	山顶平台、山坡下部	33	25	4.80	4	0.64	6	0.56
	15~23	1700~3500 m 边坡中下部	21	16	3.49	1	0.08	0	0.00
	23~32	山坡的中上部	9	9	4.92	1	0.20	0	0.00
CCL	0~8	山顶平台及山坡下部	15	10	2.53	8	1.45	6	1.27
	8~18	1500~3500 m 边坡中下部	38	31	4.23	13	0.88	12	0.95
	18~34	山坡中上部及尖顶海山顶部	5	3	3.22	0	0.00	0	0.00

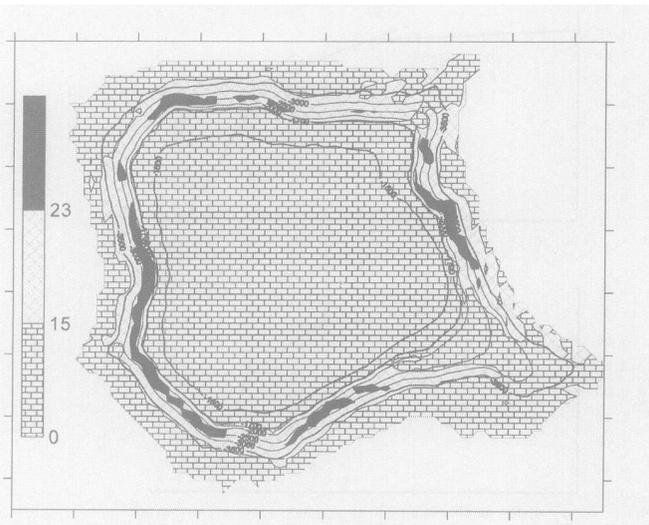


图 2 WME海山地形坡度图

Fig 2 Slope diagram of seamount WME

据上述 12 座海山坡度—资源量分布异常值分布范围,大致可以分成四个区: A 区主要是麦哲伦 WMA、WME、WMK、WMC 海山,其坡度异常值分布较高,下限 $21^\circ \sim 23^\circ$,上限 $12^\circ \sim 15^\circ$; B 区为威克—马尔库斯的 CCM3、CCM2、CCL 海山,异常值下限为 $15^\circ \sim 18^\circ$,上限 $6^\circ \sim 9^\circ$; C 区为中太平洋 CCX、CCA 海山,

异常值下限为 $22^\circ \sim 23^\circ$,上限 $9^\circ \sim 12^\circ$; D 区为莱恩群岛 WMP2、WMP3、WMP5 海山,异常值下限为 $17^\circ \sim 18^\circ$,上限 $8^\circ \sim 10^\circ$ 。总体上坡度异常值区域呈北西—南东向带状展布。

3.2 海山水深—资源量分形

根据上述水深—资源量分形计算方法, WMA 等 12 座海山水深 r 与资源量 $N(r)$ 的散点图见图 4 呈三到四段式不等,拟合参数见表 3 各区间的回归方程均呈显著性。从表 3 可以看出, 12 座海山分维数随水深的变化整体上可分为两大类: 第一类是随着水深的增加而逐渐增大,有 7 座海山,分别是: WMC、CCM3、CCX、CCA、WMP2、WMP3、WMP5 基本上分布于中太平洋海山区和莱恩群岛; 第二类是随着水深的增加,分维数由高转低再逐渐增加,有 5 座海山,分别是: WMK、WME、WMA、CCL、CCM2 基本上分布于麦哲伦海山和威克—马尔库斯海山区。另外,根据水深—资源量的分段数可以将上述 12 海山分为两类: 一类是三段式分布的海山,为 WMK、WME、WMC、CCA、WMP2、WMP3、WMP5、CCX 八座海山,分布于洋壳年龄 (< 165 Ma) 相对较小的区域; 另一类是四段式分布的海山,为 WMA、CCM3、CCM2、CCL 四座海

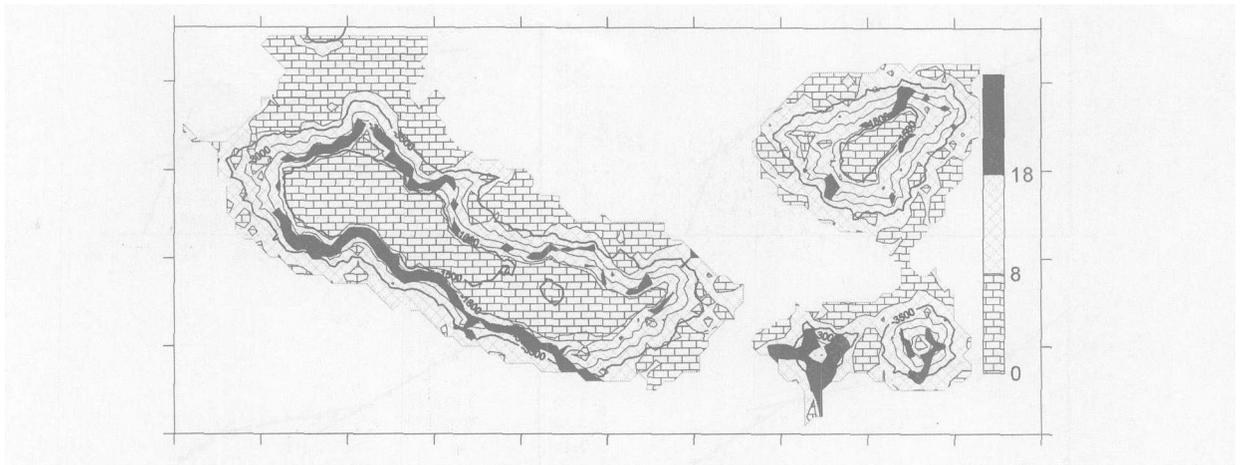


图 3 CCL海山地形坡度图

Fig 3 Slope diagram of seamount CCL

表 3 各海山区水深—资源量分段分维值统计表

Table 3 Fractal results of the water depth and resource quantity on seamounts in various regions

海山区	海山	第一段水深 m	第一段 分维值	第二段水深 m	第二段 分维值	第三段水深 m	第三段 分维值	第四段水深 m	第四段 分维值	拟合 残差
麦哲伦	WMA	<1700	2.2438	1700~2700	1.0032	2700~3200	4.6903	≥3200	17.105	0.0050
	WMC	<2100	0.8673	2100~3200	2.8969	≥3200	18.043	-	-	0.0111
	WME	<1700	6.001	1700~2700	1.7663	≥2700	5.1511	-	-	0.0080
	WMK	<1900	3.6794	1900~2800	1.1912	≥2800	4.8427	-	-	0.0083
中太平洋	CCA	<2500	0.7886	2500~3200	2.2619	≥3200	28.928	-	-	0.0030
	CCX	<2900	0.4579	2900~3200	4.6727	≥3200	16.725	-	-	0.0057
威克马尔	CCL	<1500	3.0111	1500~1900	0.5862	1900~3000	2.0241	≥3000	9.431	0.0180
	CCM2	<1600	2.5724	1600~2700	1.0837	2700~3200	4.2174	≥3200	17.73	0.0050
	CCM3	<2300	0.6534	2300~2900	2.0427	2900~3200	5.2552	≥3200	16.976	0.0040
莱恩	WMP2	<2000	0.2573	2100~2800	1.0155	≥2800	7.2346	-	-	0.0116
	WMP3	<2000	0.2415	2000~2800	1.4869	≥2800	7.2346	-	-	0.0132
	WMP5	<2600	0.6132	2600~3200	3.2574	≥3200	21.563	-	-	0.0139

表 4 各海山地质块段与邻近区域法相结合资源量统计表(坡度法)

Table 4 Statistics of combined application of the nearest domain and geological block to cobalt crust resources on different seamounts (about the fractal of slope)

海山区	海山	第一段		第二段		第三段	
		坡度 \bar{f}	$TS / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$	坡度 \bar{f}	$TS / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$	坡度	$TS / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$
麦哲伦	WMA	<12	1.23	$12 \leq S < 21$	1.16	≥21	1.44
	WMC	<15	0.78	$15 \leq S < 21$	1.00	≥21	1.04
	WME	<15	2.25	$15 \leq S < 23$	2.11	≥23	2.17
	WMK	<14	3.90	$14 \leq S < 22$	3.34	≥22	4.25
中太平洋	CCA	<9	0.96	$9 \leq S < 23$	1.36	≥23	2.01
	CCX	<12	3.44	$12 \leq S < 22$	3.07	≥22	3.75
威克马尔	CCL	<8	1.18	$8 \leq S < 18$	2.07	≥18	1.32
	CCM2	<6	1.73	$6 \leq S < 15$	1.77	≥15	1.59
库斯	CCM3	<9	2.85	$9 \leq S < 18$	3.36	≥18	3.66
	WMP2	<10	0.88	$10 \leq S < 18$	1.24	≥18	0.93
莱恩	WMP3	<9	1.12	$9 \leq S < 18$	1.34	≥18	1.04
	WMP5	<8	0.83	$8 \leq S < 17$	1.08	≥17	0.98

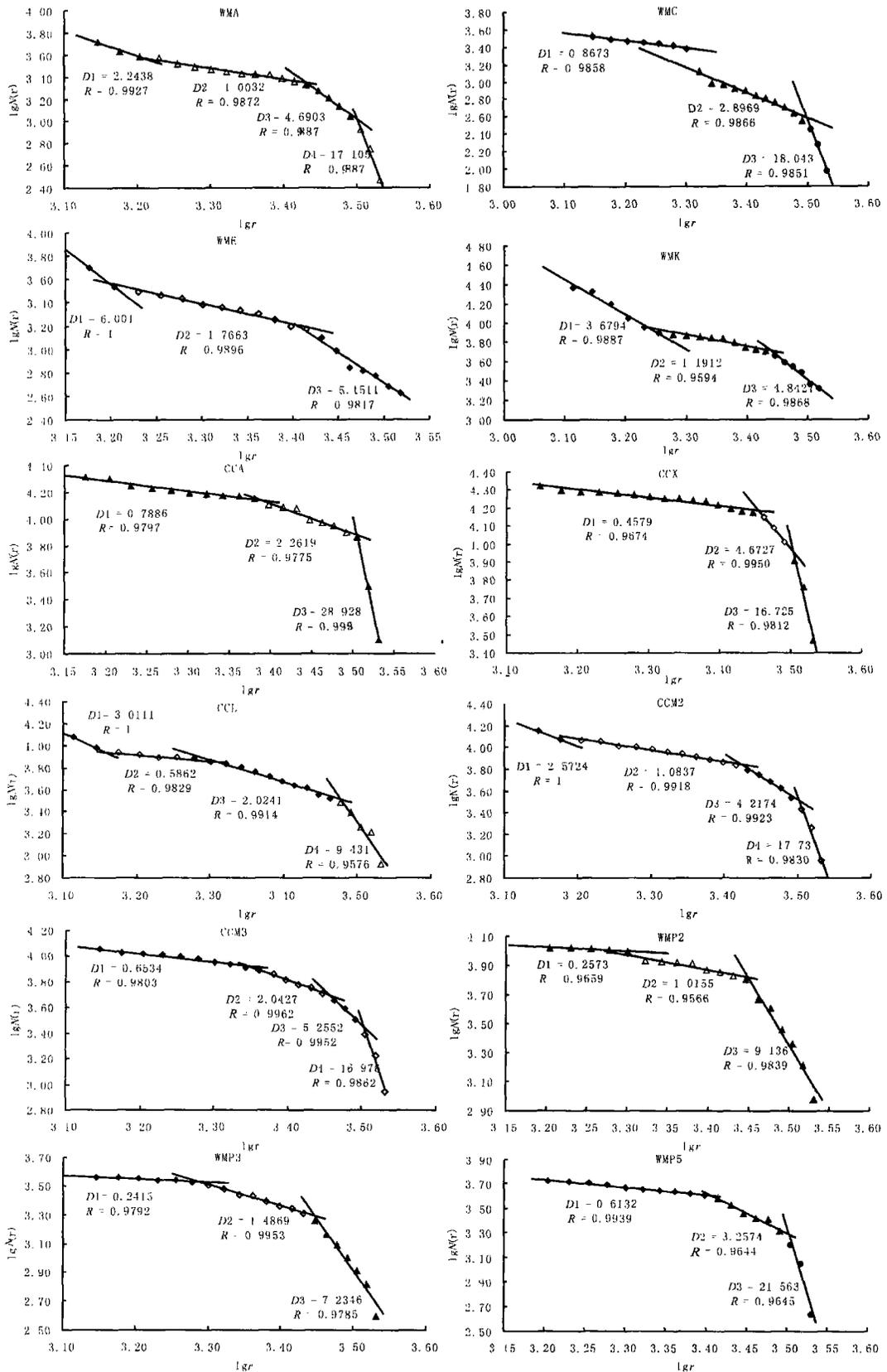
图4 中西太平洋12座海山资源量 $N(r)$ 与水深 r 的对应图

Fig 4 Double logarithm diagram of the water depth and resource quantity on 12 seamounts in central-west Pacific

表 5 各海山地质块段与邻近区域法相结合资源量统计表(水深法)

Table 5 Statistics of combined application of the nearest domain and geological block to cobalt crust resources on different seam counts (about the fractal of water depth)

海山区	海山	第一段		第二段		第三段		第四段	
		水深 h	$T S / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$	水深 h	$T S / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$	水深 h	$T S / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$	水深 h	$T S / (\times 10^4 \text{ t/km}^2)$
麦哲伦	WMA	<1700	1.15	1700~2700	1.35	2700~3200	1.27	≥ 3200	1.06
	WMC	<2100	0.65	2100~3200	1.11	≥ 3200	1.09	-	-
	WME	<1700	2.32	1700~2700	2.20	≥ 2700	2.05	-	-
	WMK	<1900	4.30	1900~2800	3.35	≥ 2800	3.10	-	-
中太平洋	CCA	<2500	1.05	2500~3200	1.20	≥ 3200	1.08	-	-
	CCX	<2900	3.74	2900~3200	3.15	≥ 3200	3.13	-	-
威克-马尔库斯	CCL	<1500	0.98	1500~1900	1.22	1900~3000	1.95	≥ 3000	2.04
	CCM2	<1600	1.65	1600~2700	1.62	2700~3200	1.83	≥ 3200	1.92
莱恩	CCM3	<2300	3.27	2300~2900	3.25	2900~3200	3.18	≥ 3200	3.36
	WMP2	<2000	0.53	2100~2800	1.04	≥ 2800	0.95	-	-
	WMP3	<2000	0.76	2000~2800	0.98	≥ 2800	1.55	-	-
	WMP5	<2600	0.65	2600~3200	1.16	≥ 3200	1.34	-	-

山,位于洋壳年龄($>165 \text{ Ma}$)相对较老的区域。这可能是由于海山形成过程中,不但经过了水平漂移,而且还存在垂直升降^[19],洋壳较老区域的海山相对于洋壳较轻的海山升降要频繁,因此水深—资源量的关系就更复杂,呈现四段式。由此可以看出,水深—资源量分维数可以用来作为成矿作用空间分布的层次性判断标志。如WMA海山,具有四段式分布,<1700 m水深段的分维值为2.2438,1700~2700 m段的分维值为1.0032,2700~3500 m段的分维值为4.6903, $\geq 3200 \text{ m}$ 水深段的分维值为17.105。1700、2700、3200 m为水深对资源量控制分布的异常值,可以用该水深异常值作为地质块段法资源量计算的块段划分标准。

4 分形方法在资源量评估中的应用

根据坡度—资源量分形,水深—资源量分形研究可以得到每座海山的坡度—资源量、水深—资源量控制异常点,该异常值可以作为地质块段法资源量计算的分段标准。我们知道,邻近区域法可以有效的准确圈定富矿区,而地质块段法具有用综合标准准确圈定矿区范围的优点。把二者结合起来进行资源量评估,可收到既能获得矿块面上信息又能得到其点上信息的功效^[20],还可以定量研究海山各种地形上资源分布情况。资源量是在一定的区域面积(S)和体积(V)内获得的,矿床的单位面积资源量($T S$)的含义是在多大的范围内集中了多少资源量,不妨称之为成矿强度系数,通过该系数的变化规律研究,可望得出表征该类矿床矿化不均匀性(强弱)的统计概念,这对指

导实际的矿产资源评价工作无疑具有重要的现实意义^[21]。因此,本次通过海山坡度—资源量分形、水深—资源量分形研究,找到水深、坡度分段点,结合邻近区域法,采用 $T S$ 参数对各地形段海山资源(表4、5)进行评估。

各海山不同坡度段 $T S$ 值总体分为三大类:一类是低—高一低型,主要位于莱恩群岛和威克—马尔库斯海山(CCL、CCM2),资源集中在 $6^\circ \sim 18^\circ$ 中间段,即在缓坡和陡坡处结壳发育相对稍差;另一类则刚好相反,是高一低—高型,主要位于麦哲伦海山(WMA、WME、WMK)及中太平洋海山(CCX),在陡坡和缓坡处结壳发育良好;最后一类则是低—高—高型,即随着坡度的增加 $T S$ 值逐渐增加,如WMC、CCA和CCM3三个海山。各海山不同水深段 $T S$ 值变化较大,总体上莱恩群岛海山的深水段资源分布较浅水段资源好,而麦哲伦海山、中太平洋海山和威克—马尔库斯海山的则刚好相反,浅水段资源好于深水段资源。不同海山区 $T S$ 值差别明显,这可能是由于不同海山区具有不同的构造演化特征,如四个海山区中以莱恩群岛海山 $T S$ 值最小,这是因为莱恩群岛海山相对其它三个海山区而言海山年龄较轻,结壳生长时间相对较短,结壳发育较差;即便同一海山区不同海山 $T S$ 的差别也较大,如中太平洋CCX和CCA海山,这可能是由于CCA海山为平顶海山而CCX海山为尖顶海山,不同海山类型经历了不同的演化生长环境,导致结壳分布也各不相同。可以看出,利用分形研究结果,将地质块段法与邻近区域法有机结合,可以有效地圈出海山地形资源富集地段,比单一选用任何一种

方法都能有效地圈出资源富集区,另一方面也说明这两种方法相结合进行水深段、坡度块的划分是可行的。

5 结语

通过中西太平洋四个海山区 12 座海山地形与资源量的定量分析表明,海山地形对钴结壳资源量分布不同海山区具有不同的特征,即便同一个海山区不同海山类型也表现出不同的特征。利用分形研究结果,将地质块段法与邻近区域法有机结合,可以有效地圈出海山地形资源富集地段,比单一选用任何一种方法都能有效地圈出资源富集区,另一方面也说明这两种方法相结合进行水深段、坡度块的划分是可行的。

参考文献 (References)

- Bannkar V K, Patan J N, Mudholkar A V. Paleooceanographic conditions during the formation of a ferromanganese crust from the Afanasy Nikitin seamount North Central Indian Ocean: Geochemical evidence. *Marine Geology* 1997, 136: 299 ~ 315
- Hein J R, Schwab W C and Davis A S. Cobalt and platinum-rich ferromanganese crusts and associated substrate rocks from the Marshall Islands. *Marine Geology* 1988, 78: 255 ~ 283
- Yanazaki T, Shama R, Tsunasaki K. Microtopographic analysis of cobalt rich manganese deposits on a mid-Pacific Seamount. *Marine Georesources and Geotechnology* 1994, 12(1): 33 ~ 52
- Yanazaki T, Shama R, Tsunasaki K. Influence of distribution characteristics and associated seabed features on exploration of cobalt rich manganese deposits. *Proceeding of the Slope Ocean Mining Symposium, The International Society of Offshore and Polar Engineers* 1995, 119 ~ 129
- 初凤友, 孙国胜, 李晓敏, 等. 中太平洋海山富钴结壳生长习性及其控制因素. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(3): 320 ~ 325 [Chu Fengyou, Sun Guosheng, Li Xiaomin, *et al.* The growth habit and controlling factors of the cobalt rich crusts in seamount of the Central Pacific. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(3): 320 ~ 325]
- 许东禹. 俄罗斯大洋固体矿产资源调查研究进展. *海洋地质动态*, 2002, 18(10): 21 ~ 22 [Xu Dongyu. Research development of Russian Oceanic solid mineral resources. *Marine Geology Letter* 2002, 18(10): 21 ~ 22]
- 连长云, 苏小四. 胶东地区未发现金矿床资源总量的分形估计. *长春科技大学学报*, 2000, 30(1): 24 ~ 27 [Lian Changyun, Su Xiaosi. Fractal estimation for resource extent of gold in Jiaodong exploration field. *Journal of Changchun University of Science and Technology* 2000, 30(1): 24 ~ 27]
- 柏春广, 王建. 一种新的粒度指标: 沉积物粒度分维值及其环境意义. *沉积学报*, 2003, 21(2): 243 ~ 239 [Bai Chunguang, Wang Jian. A new grain size index: grain size fractal dimension of sediment and its environmental significance. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003, 21(2): 243 ~ 239]
- 成秋明. 多重分形与地质统计学方法用于勘查地球化学异常空间结构和奇异性分析. *地球科学—中国地质大学学报*, 2001, 26(2): 161 ~ 166 [Cheng Qiuming. Multifractal and geostatistic methods for characterizing local structure and singularity properties of exploration geochemical anomalies. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences* 2001, 26(2): 161 ~ 166]
- 谢淑云, 鲍征宇. 地球化学场的连续多重分形模式. *地球化学*, 2002, 31(2): 191 ~ 200 [Xie Shuyun, Bao Zhengyu. Continuous multifractal model of geochemical fields. *Geochimica* 2002, 31(2): 191 ~ 200]
- Cheng Q, Bonham G F, Hall G E M, *et al.* Statistical study of trace elements in the soluble organic and amorphous Fe-Mn phases of surficial sediments, Sudbury Basin: I. Multivariate and spatial analysis. *Journal of Geochemical Exploration* 1997, 59(1): 27 ~ 46
- Cheng Q, Agterberg F R, Bonham-Carter G E. A spatial analysis method for geochemical anomaly separation. *Explor Geochem* 1996, 56: 183 ~ 195
- Cheng Q. The perimeter area fractal model and its application to geology. *Mathematic Geology* 1995, 27: 69 ~ 82
- Cheng Q, Agterberg F R, Ballantyne S B. The separation of geochemical anomalies from background by fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration* 1994, 51: 109 ~ 130
- 成秋明. 多维分形理论和地球化学元素分布规律. *地球科学—中国地质大学学报*, 2000, 311 ~ 318 [Cheng Qiuming. Multifractal theory and geochemical element distribution pattern. *Earth Science Journal of China University of Geosciences* 2000, 311 ~ 318]
- 申维. 分形混沌与矿产预测. 北京: 地质出版社, 2002, 1 ~ 69 [Shen Wei. *Fractal and Chaos with Application in Mineral Resource Prediction*. Beijing: Geological Publishing House, 2002, 1 ~ 69]
- 吴信才, 等编著. 地理信息系统原理与方法. 北京: 电子工业出版社, 2002, 181 ~ 185 [Wu Xincan, *et al.*, eds. *Principles and Methods of GIS*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002, 181 ~ 185]
- 沈裕军, 钟祥, 贺泽全. 大洋钴结壳资源研究开发现状. *矿冶工程*, 1999, 19(2): 11 ~ 13 [Shen Yunjun. Zhong Xiang, He Zequan. Present status of investigation and development of ocean cobalt crust resources. *Mining and Metallurgical Engineering* 1999, 19(2): 11 ~ 13]
- 武光海, 周怀阳, 杨树峰, 等. 中太平洋海山演化史及与富钴结壳的关系. *海洋地质动态*, 2003, 19(12): 5 ~ 8 [Wu Guanghai, Zhou Huaiyang, Yang Shufeng, *et al.* Evolutionary history of seamounts in the Central Pacific Ocean and its relation with the Co-Rich crusts. *Marine Geology Letter* 2003, 19(12): 5 ~ 8]
- 武光海, 周怀阳, 杨树峰. 最近区域法与地质块段法在富钴结壳资源量评估中的综合应用. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(4): 87 ~ 92 [Wu Guanghai, Zhou Huaiyang, Yang Shufeng. Combined application of the methods of the nearest domain and geological block to resource evaluation of cobalt rich crust on a seamount in the Pacific. *Marine Geology & Quaternary Geology* 2000, 20(4): 87 ~ 92]

- 21 张贻侠. 矿床模型导论. 北京: 地震出版社, 1993. 2~3 [Zhang Yixia. An Introduction to Mineral Deposit Model. Beijing: Seismological Press, 1993. 2~3]

Fractal Research on Quantity of Cobalt rich Crust Resources Distributed on Seamount Topography in the Pacific

ZHANG Wei yan^{1,2} ZHANG Fu yuan² YANG Ke hong^{1,2} HU Guang dao¹
YANG Sheng xiong³ CHENG Yong shou⁴ ZHAO Guo jun⁵

(1. Institute of Mathematical Geology and Remote Sensing Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074

2. Second Institute of Oceanography, Laboratory of Submarine Geosciences, SOA, Hangzhou 310012

3. Guangzhou Marine Geological Investigation Bureau of MLR, Guangzhou 510760 4. National Marine Information Center, Tianjin 300171;

5. Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310002)

Abstract Results of fractal research on the quantity cobalt rich crust resources distributed on seamount topography show that the multiphase pluses of those data are multifractals. Fractal research on resource quantity distributed on seamount slope has three phases. It may be one of the reasons that there are various types of crust on individual seamount slope phase. The reason fractal research on resource distribution on water depth appears three or four sections are that they are related to seamount base oceanic crust. There are four sections for the older crust more than 165Ma, but there are three sections for the younger crust lower than 165Ma. Individual seamount topography appears various cobalt crust resource in the same region or different region.

Key words Pacific seamount, cobalt crust, topography, resource quantity, fractal