

变泥质岩的深熔作用与具铈(Ce)负异常熔体的成因

曾令森¹, Mihai DUCEA², Jason SALEEBY³

(1. 中国地质科学院 地质研究所 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037; 2. 美国亚利桑那大学 地质系, 亚利桑那州 85721, 美国; 3. 美国加州理工学院 地质与行星科学系, 加州 91125, 美国)

摘要: 对美国加州南 Sierra Nevada 岩基中一个典型的中生代变质表壳岩及其混合岩带进行了详细的野外观察和元素地球化学研究。研究发现: 在持久(约为 150 Ma)的花岗岩侵位作用下, 早白垩世变泥质岩发生达角闪岩相的中高级变质作用和部分熔融, 导致 Isabella 混合岩的形成; 浅色体具有和变泥质岩及混合岩近平行的 REE 分布模式, 但浅色体的 LREE 含量相对较低; 和变泥质岩相似, 混合岩中的浅色体具有显著的 Ce 负异常。野外观测、岩相观察及元素地球化学特征表明, 浅色体显著的 Ce 负异常是继承了原岩的 Ce 负异常特征, 而不是由于副矿物(磷灰石、独居石或锆石)的差异溶解或结晶分异作用造成的。早白垩世变泥质岩(浅色体的原岩)主要由泥质及沙质海相沉积物组成, 局部夹基性火山灰和火山碎屑, 形成于与大陆岛弧密切相关的浅海环境。原岩的 Ce 负异常反映了较还原的浅海沉积环境。具有 Ce 负异常浅色体的产出表明, 如果俯冲带上的沉积岩在俯冲过程中发生部分熔融作用并且所产生的熔体参与大洋型岛弧岩浆作用, 最终可以导致具有 Ce 异常的基性岩浆生成。

关键词: 混合岩; 浅色体; 深熔作用; 铈负异常; Sierra Nevada 岩基

中图分类号: P588.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)05-0425-06

The formation of leucosomes with pronounced negative Ce anomalies from metasediment partial melting: Implications for the origins of Ce anomalies in oceanic island arc lavas

ZENG Ling_sen¹, Mihai DUCEA² and Jason SALEEBY³

(1. Key Laboratory for Continental Dynamics, MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Department of Geological Sciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA; 3. Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA)

Abstract: As a result of protracted granitic magmatism (~ 150 myr) in the extinct Mesozoic Sierran continental arc, California, the metasedimentary framework rocks had undergone up to amphibolite facies intermediate_ to high_grade metamorphism and partial melting of labile wall rocks within the proximity of invading plutons. These partial melting processes resulted in the formation of a number of migmatite complexes in the southern Sierra Nevada batholith. Such well_preserved migmatite complexes provide a natural laboratory to investigate the geochemistry of metasediment_derived melts. Rare earth element geochemistry data on the Goat Ranch migmatite complex, one of the best preserved migmatite complexes, show that the leucosomes, migmatites, and metapelites have: (1) pronounced negative Ce anomalies; (2) subparallel chondrite_normalized REE distribution patterns; (3) leucosomes have lower LREE contents than those in migmatites and pelites; and (4) contrary to the migmatites and pelites, leucosomes have various Eu anomalies. The Isabella metapelites contain a fair amount of graphite as shown in whole rock dissolution experiments and petrographic observations, which suggest that they are strongly reduced metasediments. A similar conclusion was also reached from previous studies on mineral geochemistry of biotites from these rocks and adjacent granitoids. These data and previous Sr, Nd isotopic composition data on the leucosomes, migmatites and metapelites demonstrate that pronounced negative Ce anomalies in leucosomes were inherited from their source rocks, not due to differential dissolution or fractionation crystallization of accessory phases (e. g. apatite, monazite or zir_

收稿日期: 2005-07-15; 修订日期: 2005-07-28

基金项目: 美国自然科学基金项目(EAR_9815024, EAR_0087347)

作者简介: 曾令森(1970-), 男, 博士, 主要从事构造地质学、构造地球化学、放射性同位素地球化学及构造地貌学的研究, E_mail: lzeng@ccsd.cn.

con) during partial melting of metapelites. The finds from this study also suggest that if sediments with Ce anomalies above a subduction zone are introduced into the island arc magma source regime via either subduction or subduction erosion, and participate in island arc magmatism, then sediment-derived melts can contribute to the formation of those arc magmas with negative Ce anomalies.

Key words: migmatite; leucosome; partial melting; Ce anomaly; Sierra Nevada batholith

深入了解大陆地壳物质,尤其是变沉积岩部分熔融产生熔体的元素和放射性同位素地球化学特征,不仅是提高认识大型花岗岩岩基的地球化学动力学过程的重要一环,而且能为解译某些岛弧型基性岩浆中沉积岩特性的来源提供重要佐证。在大型花岗岩岩基中,岩浆侵入导致表壳岩的高级变质作用及部分熔融作用发生。部分熔融产生的熔体只能做有限的迁移,保存在母岩中形成混合岩(曾令森等,2004)。这些混合岩为研究泥质岩深熔作用的地球化学特征及部分熔融反应过程提供了极好的野外实验室。例如,最近对美国加州南 Sierra Nevada 岩基中的 Isabella 混合岩的高精度 Sr-Nd 同位素研究揭示,变泥质岩的部分熔融体记录了高达 $4\epsilon_{Nd}$ 单位 $\{\epsilon_{Nd} = [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} / (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{球粒陨石}} - 1] \times 10^4\}$ 的 Nd 同位素不平衡和微弱的 Sr 同位素不平衡(Zeng *et al.*, 2005a)。野外实测结果证实了长期以来困惑地球化学家的岩石部分熔融中可能存在的 Nd 同位素不平衡。另一方面,厘定母岩为变沉积岩的混合岩中浅色体的地球化学特征可为限定基性岩浆的沉积岩组分来源提供重要的数据,进一步区分基性岩浆的成岩模式,特别是岛弧型基性岩浆。

和严格的三价稀土元素相比,Ce 和 Eu 的地球化学行为差别很大。在氧化环境下,三价 Ce 氧化为四价 Ce,形成难以溶解的氧化物;而在还原环境下,三价 Eu 还原为二价 Eu,某些矿物(如斜长石)优先摄取二价 Eu,从而导致常见的 Ce 和 Eu 异常。对于海水、深海沉积物及风化土壤,Ce 异常比较常见(Elderfield and Greaves 1981; De Barr *et al.*, 1985, 1988; Elderfield *et al.*, 1990; Braun *et al.*, 1990; Taylor and McLennan, 1995; Bau *et al.*, 1999; Pan and Stauffer, 2000),但在基性火成岩中,仅有很少的报道(Jakes and Gill, 1970; Heming and Rankin, 1979; Dixon and Batiza, 1979; White and Patchett, 1984; Hole *et al.*, 1984; Ramsay *et al.*, 1984)。另外在幔源包体中,Neal and Taylor(1989)和 Luo 等(2004)分别报道了具有 Ce 负异常的幔源包体,而 Zou 等(2004)报道了来自于我国福建新生代玄武岩中具 Ce 正异常的包体。由于实验结果表明岩浆过程不可能产生 Ce 异常(Schreiber *et al.*, 1980),所观测到的 Ce 异常往往归结为那些曾参与地表过程(沉积作用或风化作用)的组分参与成岩过程,如一些大洋岛弧中具有 Ce 负异常的基性岩浆岩要求沉积物参与部分熔融。但沉积岩的部分熔融作用能否产生具有 Ce 异常的熔体始终是一个悬而未决的问题,既没有实验结果,也没有野外实测数据来验证。为解决这个问题,笔者对美国加州的南 Sierra Nevada 岩基中的 Isabella 混合岩带进行了细致的野外观测、样品采集和主要及微量元素的分析,以确定未发生部分熔融的变沉积岩、浅色体及混合岩的地球化学特征,进而探讨源自

于变沉积岩的部分熔融体的 Ce 异常的来源和意义。

1 地质背景

美国加州南 Sierra Nevada 岩基是 Sierra Nevada 复合岩基的一部分,主要由年龄为 80~120 Ma 的花岗质岩石组成。研究区位于南 Sierra Nevada 岩基中 Isabella 湖的南边(图 1),属于总体成北西向分布的 L₁SCR(Strongly Contaminated Reduced L₁type)花岗岩带的东南端,该带中的花岗岩与其东部及西部的花岗岩相比,具有较高的表壳岩组分,来源于高度还原的变沉积岩(Ague and Brimhall, 1987),在研究区内,变沉积

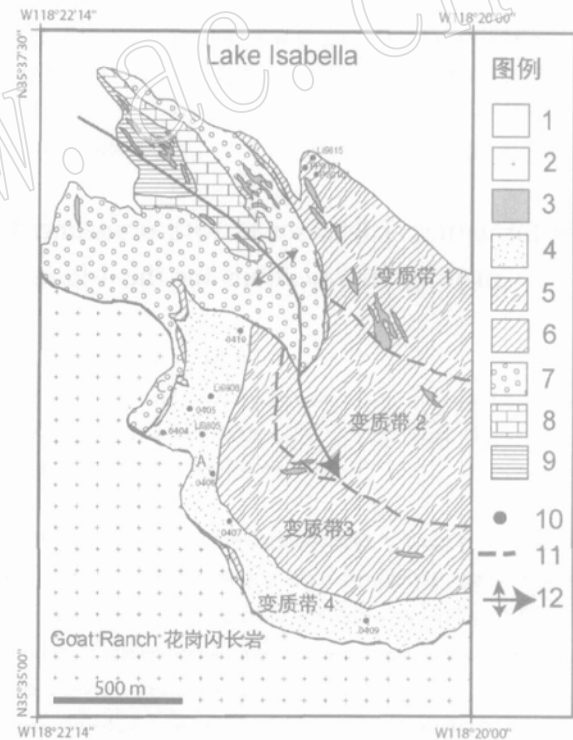


图 1 美国加州南 Sierra Nevada 花岗岩岩基中 Goat Ranch 地区的地质图

Fig. 1 Simplified geological map of the Goat Ranch area, southern Sierra Nevada, California

1—第四系; 2—白垩纪花岗闪长岩; 3—白垩纪浅色花岗岩; 4—混合岩; 5—白垩纪泥质岩; 6—白垩纪大理岩; 7—侏罗纪石英岩; 8—三叠纪大理岩; 9—三叠纪泥质岩; 10—采样点; 11—变质分带边界; 12—褶皱轴

1—Quaternary; 2—Cretaceous granodiorite; 3—Cretaceous leucogranite; 4—migmatite; 5—Cretaceous metapelite; 6—Cretaceous marble; 7—Jurassic quartzite; 8—Triassic marble; 9—Triassic metapelite; 10—sampling site; 11—metamorphic zonation; 12—fold axis

岩主要包括三叠纪的变质泥岩、侏罗纪的大理岩和石英岩、早白垩世的大理岩和变泥质岩。这套变沉积岩组成 Isabella 表壳岩系列, 是王子变沉积岩层序在南 Sierra Nevada 的一部分 (Saleeby and Busby, 1993; Saleeby, 1999)。早白垩世变泥质岩主要由泥质及沙质海相沉积物组成, 局部夹基性火山灰和火山碎屑, 形成于与大陆岛弧密切相关的浅海环境。岩相学观察及全岩的溶解实验都表明三叠纪及早白垩世变泥质岩都含有一定量的石墨, 表明这些变沉积岩具强还原特征, 和 Ague and Brimhall (1987) 的推论一致。持续的花岗岩侵位导致中生代以前的表壳岩发生高级变质作用, 在邻近花岗岩侵入体的部位, 表壳岩中易熔融的部分往往发生部分熔融, 形成混合岩 (Pickett and Saleeby, 1994; Zeng and Saleeby, 2003; Zeng *et al.*, 2005a)。

时代大约为 100 Ma (U-Pb 锆石年龄和 Sm-Nd 石榴石-全岩年龄) 的 Goat Ranch 花岗闪长岩侵位于 Isabella 表壳岩之中 (Saleeby, 1999), 导致早白垩世泥质岩发生绿片岩相至角闪岩相的低-中高级变质作用, 并且在靠近花岗闪长岩的部位发生局部熔融, 形成典型的混合岩。早白垩世变泥质岩中的基性火山物质发生角闪岩相变质作用, 形成角闪岩也证明了具有较高的变质温度。在研究区, Goat Ranch 花岗闪长岩的侵位深度及温度分别为 0.3~0.4 GPa (相当于 9~12 km 深度) 和 750~800 °C (Elan, 1986; Pickett and Saleeby, 1993, 1994; Dixon, 1995; Ague, 1997)。野外及岩相学的研究表明, 早白垩世变泥质岩记录了由于邻近花岗岩体侵位的影响, 部分熔融程度及变形构造的系统变化 (曾令森等, 2004)。在远离花岗闪长岩体的地方温度较低, 为 450~500 °C, 这套变沉积岩矿物组合由十字石、钾长石、石英、黑云母、斜长石及少量白云母和夕线石组成, 副矿物为磷灰石、独居石和锆石。随着变沉积岩相对于花岗闪长岩体距离的减小, 变质温度逐渐升高, 夕线石代替十字石, 局部出现孤立的长英质浅色体。随着距离的进一步减小, 温度进一步升高, 部分熔融程度逐渐增强, 长英质浅色体形成相互联通的网状构造, 而暗色体和中色体呈透视镜体被浅色体所包围。在高度混合岩化带中, 浅色体主要由石英、斜长石、钾长石组成, 而暗色体主要由黑云母和夕线石组成。浅色体和暗色体的矿物组合特征表明: 浅色体为部分熔融体, 而暗色体为部分熔融的残留体。

2 数据及结果

笔者对美国加州南 Sierra Nevada 岩基中的 Goat Ranch 混合岩杂岩体中的混合岩、混合岩中的浅色体及未混合岩化的变泥质岩进行了详细的元素地球化学分析, 以确定其稀土元素地球化学特征。全岩的主要元素地球化学成分是应用 XRF 方法, 稀土元素利用 ICP-MS 在美国华盛顿州立大学地质系地球化学实验室测试的, 具体分析流程及测试精度见 Johnson 等 (1999), 所得结果见表 1。

在过去的研究中, 不同的研究者采用了不同的铈异常

(Ce/Ce^{*}) 的定义, 海洋地球化学家往往采用北美页岩作为标准来计算大洋沉积物或海水的铈异常, 而固体地球化学家多采用球粒陨石为标准来计算岩石中的铈异常。不管采用那种方式, 不会影响结果的讨论。本文采用下述公式来计算铈 (Ce) 异常: $Ce/Ce^* = (Ce)_N / [(La)_N \times (Pr)_N]^{1/2}$, 其中 N 代表球粒陨石为标准对数据标准化, 球粒陨石标准化数据采用 Sun and McDonough (1989)。

浅色体、混合岩和变泥质岩的 SiO₂ 含量分别为 69.59%~80.91%、62.07%~68.73% 和 63.01%~64.95%, Al₂O₃ 含量分别为 14.37%~17.57%、17.53%~20.54% 和 21.52%~23.42%。样品 Li9805 和 Li9808 含有较多的浅色体, 它们的 SiO₂ 含量相对较高, 而 Al₂O₃ 含量相对较低。其他的混合岩与变沉积岩具有相近的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量 (表 1)。

混合岩和变沉积岩具有相近的 LREE 含量, 变化范围分别为 154.7×10^{-6} ~ 181.6×10^{-6} 和 166.3×10^{-6} ~ 186.2×10^{-6} 。而浅色体具有相对较低的 LREE 含量, 变化范围为 54.1×10^{-6} ~ 154.7×10^{-6} (表 1)。变沉积岩和混合岩具有相近 (La/Yb)_N 比值, 分别为 9.17~10.22 和 8.28~10.17。而浅色体的 (La/Yb)_N 比值变化较大, 为 1.51~9.08, 反映了部分熔融过程中浅色体的 LREE 相对于母岩相对亏损。

浅色体、混合岩和泥质岩的 Ce/Ce^{*} 值分别为 0.684~0.696、0.690~0.698 和 0.657~0.678, 它们具有相似且显著的 Ce 负异常 (图 2)。从图 2 中可以看出: 和变泥质岩相似, 混合岩中的浅色体具有 Ce 负异常; 浅色体具有和变泥质岩及混合岩近平行的 REE 分布模式。

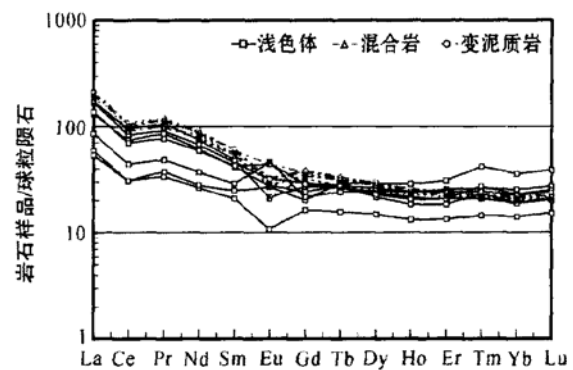


图 2 变泥质岩、混合岩及浅色体的稀土元素分布特征图

Fig. 2 REE diagram showing REE characteristics of leucosomes, migmatites and metapelites

3 浅色体的铈负异常成因及意义

3.1 浅色体的铈负异常成因

浅色体具显著 Ce 负异常的原因有两种可能: 副矿物的差异溶解或结晶分异作用, 或继承了原岩的 Ce 负异常。野外观

表1 美国加州南 Sierra Nevada 岩基中 Isabella 混合岩中浅色体、混合岩和变沉积岩的主要元素 ($w_B/\%$) 和稀土元素 ($w_B/10^{-6}$) 组成

Table 1 Major and rare earth element compositions of metapelites, migmatites and leucosomes from the Isabella migmatite complex, southern Sierra Nevada batholith, California

样品	浅色体							混合岩				变泥质岩		
	L0404	L0405	L0405B	L0406	L0407	L0409	L0410	R0407	R0410	Li9805	Li9808	PP0101	PS0101	Li9815
SiO ₂	80.91	74.97	75.08	78.37	75.67	70.25	69.59	62.07	63.94	67.94	68.73	63.08	64.95	63.01
Al ₂ O ₃	14.48	16.99	17.00	14.37	14.58	17.57	17.41	20.04	20.54	18.11	17.53	23.17	23.42	21.52
TiO ₂	0.086	0.38	0.38	0.05	0.05	0.52	0.51	1.02	0.98	0.83	0.85	0.99	0.93	0.87
FeO	0.86	1.85	1.87	0.62	0.76	3.81	3.78	7.26	5.70	5.45	4.86	6.10	4.94	6.82
MnO	0.033	0.05	0.06	0.01	0.01	0.06	0.07	0.11	0.08	0.08	0.14	0.05	0.03	0.04
CaO	0.54	1.64	1.56	0.74	0.95	0.57	0.61	0.76	0.64	0.76	0.70	0.25	0.22	0.25
MgO	0.18	0.54	0.56	0.10	0.14	1.02	1.00	2.16	1.49	1.82	1.40	1.64	1.59	2.09
K ₂ O	0.36	0.47	0.52	1.45	4.59	3.61	3.68	3.52	3.10	2.25	2.33	2.52	1.82	2.83
Na ₂ O	0.72	2.06	2.00	2.53	2.13	1.88	1.89	1.47	1.74	0.90	1.19	0.84	0.54	0.39
P ₂ O ₅	0.083	0.11	0.11	0.11	0.13	0.14	0.14	0.12	0.14	0.18	0.16	0.18	0.08	0.32
Total	98.25	99.06	99.14	98.35	99.01	99.43	98.68	98.53	98.35	98.31	97.90	98.81	98.52	98.14
La	13.88	39.01	40.39	12.58	20.15	30.98	32.17	48.01	47.88	40.88	48.54	50.52	49.46	45.31
Ce	18.45	50.82	56.95	18.58	26.72	44.64	42.66	64.45	63.13	54.51	64.73	65.25	61.53	58.46
Pr	3.01	8.06	9.54	3.36	4.33	7.63	6.90	10.37	10.12	8.77	10.18	10.70	10.19	9.42
Nd	11.92	30.68	34.21	12.72	16.74	27.93	26.67	40.43	39.81	34.84	39.63	41.42	38.81	36.63
Sm	3.07	6.70	7.05	3.66	4.22	6.12	6.26	8.95	8.74	7.77	8.78	9.03	8.10	7.98
Eu	0.60	1.80	1.20	1.50	2.58	1.55	2.48	1.81	2.50	1.16	1.74	1.79	1.61	1.50
Gd	3.20	5.79	5.39	3.97	4.24	4.83	5.67	7.59	7.36	6.73	7.36	7.51	6.29	6.96
Tb	0.57	0.96	0.98	1.06	0.88	0.98	1.01	1.21	1.16	1.11	1.17	1.20	1.01	1.15
Dy	3.58	5.83	5.22	7.12	6.02	5.55	6.37	7.11	6.72	6.73	6.84	7.13	6.13	6.80
Ho	0.73	1.19	1.03	1.60	1.35	1.14	1.34	1.43	1.32	1.34	1.39	1.43	1.27	1.36
Er	2.12	3.31	2.92	4.89	4.03	3.28	3.81	3.94	3.60	3.73	3.69	3.84	3.49	3.68
Tm	0.35	0.50	0.56	1.02	0.63	0.66	0.59	0.58	0.51	0.55	0.55	0.58	0.52	0.54
Yb	2.28	3.06	3.08	5.78	4.14	3.71	3.67	3.68	3.26	3.42	3.53	3.62	3.35	3.42
Lu	0.37	0.49	0.51	0.94	0.66	0.61	0.58	0.58	0.51	0.54	0.55	0.58	0.53	0.53
Ce/Ce*	0.6844	0.6871	0.6955	0.6855	0.6857	0.6960	0.6864	0.6925	0.6876	0.6902	0.6981	0.6728	0.6570	0.6784
Eu/Eu*	0.5813	0.8776	0.5888	1.1968	1.8522	0.8684	1.2641	0.6669	0.9466	0.4871	0.6573	0.6601	0.6850	0.6112
Sm/Nd	0.2576	0.2184	0.2062	0.2877	0.2521	0.2192	0.2347	0.2214	0.2195	0.2230	0.2215	0.2180	0.2087	0.2179
(La/Gd) _N	3.63	5.64	6.28	2.65	3.98	5.38	4.75	5.30	5.45	5.09	5.52	5.63	6.59	5.45
(La/Yb) _N	4.21	8.83	9.08	1.51	3.37	5.78	6.07	9.03	10.17	8.28	9.52	9.66	10.22	9.17
LREE	54.13	142.86	154.72	56.37	78.98	123.67	122.81	181.61	179.54	154.66	180.96	186.22	175.99	166.26

Ce 异常 (Ce/Ce^*) 和 Eu 异常 (Eu/Eu^*) 分别按公式 $Ce/Ce^* = (Ce)_N / [(La)_N \times (Pr)_N]^{1/2}$ 和 $Eu/Eu^* = (Eu)_N / [(Sm)_N \times (Gd)_N]^{1/2}$ 来计算, N 为球粒陨石标准化, 球粒陨石标准化值来自于 Sun and McDonough (1989)。

察和岩石地球化学研究表明, 浅色体代表着变沉积岩部分熔融的产物。起主控作用的部分熔融反应为 (Zeng *et al.*, 2005a, 2005c): 石英+斜长石+H₂O → 熔体和石英+斜长石+白云母+H₂O → 熔体+黑云母。这两个部分熔融反应的反应温度较白云母脱水熔融反应的温度要低。在这些反应中, 黑云母不参与部分熔融反应, 而呈残留体附存于暗色体中。对浅色体、混合岩及变泥质岩的 Sr-Nd 同位素研究发现: 浅色体 Nd 同位素比值和 P₂O₅/Sm/Nd 值呈正相关关系 (Zeng *et al.*, 2005a), 而 LREE 分布曲线几乎和变泥质岩平行, 但 LREE 总体含量要低于母岩。这些特征强烈表明在浅色体形成过程中, 相对于独居石, 磷灰石起主要控制作用 (Zeng *et al.*, 2005a, 2005b)。磷灰石往往具有近水平的球粒陨石标准

化 REE 分布模式和较低的 (La/Yb)_N 值 (Bea *et al.*, 1994), 不同程度的磷灰石溶解于部分熔体中会导致熔体的 REE 配分曲线位置相对于变泥质岩母岩上下平行迁移, 这和浅色体的高度变化但相对较低的 (La/Yb)_N 值一致。但磷灰石和独居石都不具有明显的 Ce 异常, 因此浅色体的 Ce 负异常不是独居石或磷灰石在熔融作用中的分异造成的。锆石是变沉积岩中重要的副矿物之一, 大量的研究都揭示了锆石具有明显的 Ce 正异常并且高度富集 HREE (Heaman *et al.*, 1990; Rubatto, 2002)。如果锆石作为残留相存在, 那么浅色体会具有 Ce 负异常且 HREE 高度亏损, 但所研究的大部分浅色体具有和变沉积岩或混合岩含量相当的 HREE (图 2), 所以可以排除锆石的作用。

Cesare 等 (2005) 通过穆斯鲍尔谱分析了含铁矿物的 Fe^{3+}/Fe_{tot} 值特征, 得出含石墨变沉积岩中黑云母在脱水部分熔融过程中, 三价铁还原为二价铁, 表明其处于部分熔融的还原环境中。Ague 和 Brimhall (1987) 研究了该带花岗岩中的黑云母矿物化学特征, 发现该花岗岩带的还原程度高, 曾受到高度的变质表壳岩的混染作用。该结果同时也表明这些表壳岩的部分熔融作用发生在强还原条件下, 三价 Ce 不可能氧化成四价 Ce, 形成不易溶解的四价 Ce 氧化物。另外, 岩相学观察及全岩的溶解实验都表明三叠纪及早白垩世变泥质岩都含有一定量的石墨, 表明这些变沉积岩具比较还原的特征。因此, 在强还原的变沉积岩的部分熔融过程中, 浅色体中的 Ce 负异常是继承了母岩的 Ce 负异常。

3.2 具有铈负异常浅色体的意义

在氧化环境下, 三价铈氧化形成四价铈, 其反应化学式为: $Ce^{3+} + O^2 \leftrightarrow CeO_2$, 而 CeO_2 在海水中不溶解, 导致海水具铈负异常及相应海相沉积物具铈正异常。相反地, 在还原环境下, 海水中的 Ce 不发生氧化反应, 导致沉积物具 Ce 负异常。过去研究发现大洋岛弧基性火山岩中具有 Ce 负异常的岩浆, 如: Lesser Antilles (White & Patchett, 1984)、马利亚纳 (Dixon and Batiza, 1979; White and Patchett, 1984; Hole *et al.*, 1984)、巴布亚新几内亚 (Heming and Rankin, 1979) 及所罗门群岛 (Jakes and Gill, 1970; Ramsay *et al.*, 1984)。Schreiber 等 (1980) 的实验结果表明岩浆过程不可能使无 Ce 异常的原岩通过熔融过程及岩浆分异作用产生具有 Ce 异常的岩浆。几乎所有的岩浆系统都具有过剩的二价铁, 由于 $Ce^{4+} + Fe^{2+} = Ce^{3+} + Fe^{3+}$ 反应的缓冲作用, 阻止了三价铈氧化形成四价铈, 排除了岩浆过程在 Ce 异常生成过程中的任何贡献。

目前关于岛弧型岩浆中的 Ce 负异常的成因有两种观点: 一派认为具 Ce 异常的深海沉积物或表壳物质随俯冲作用进入原岩区, 参与部分熔融, 形成具 Ce 副异常的基性岩浆 (Hole *et al.*, 1984); 另一派则认为俯冲带发生部分熔融的地幔楔受到来自俯冲岩片的脱水交代作用, 导致岩浆的源区具有 Ce 负异常 (White and Patchett, 1984)。但至今并没有足够的证据表明俯冲岩片脱水作用所产生的流体具有 Ce 负异常。大洋岛弧基性岩浆中沉积组分的来源为俯冲洋壳所携带的深海沉积物或俯冲剥蚀作用导致的上盘表壳物质被俯冲到深部 (Clift and Vannucchi, 2004)。不管是何种构造作用促使沉积物导引到大洋岛弧的部分熔融区, 该研究结果表明, 如果具有 Ce 负异常的沉积岩参与大洋岛弧岩浆作用, 所形成的岩浆可以具有不同程度的 Ce 负异常。

4 结 论

通过对美国加州南 Sierra Nevada 岩基中的中生代变质表壳岩及其混合岩带详细的野外观察及元素地球化学研究发现: 在持久 (大约为 150 Ma) 的花岗岩侵位作用下, 早白垩

世变泥质岩发生高级变质作用和部分熔融, 导致 Isabella 混合岩的形成; 和变泥质岩相似, 混合岩中的浅色体具有显著的 Ce 负异常; 浅色体显著的 Ce 负异常是继承了原岩的 Ce 负异常特征, 而不是由于副矿物的分异作用造成的; 早白垩世变泥质岩 (浅色体的原岩) 主要由泥质及沙质海相沉积物组成, 局部夹基性火山灰和火山碎屑, 形成于与大陆岛弧密切相关的浅海环境。原岩的 Ce 负异常反映了较还原的浅海沉积环境; 具有 Ce 负异常的浅色体的发现表明, 如果俯冲带中的沉积岩在俯冲过程中发生部分熔融作用并且所产生的熔体参与岛弧岩浆作用, 最终可以导致形成具有 Ce 异常的基性岩浆。

致谢: 本研究的部分经费得到了国家重点基础研究 (973) 项目 (2003CB716500) 及中国地质调查局国土资源大调查地质调查项目 (121201056606) 的资助。感谢沈其韩院士和任留东研究员对本文提出的许多有益的、建设性的意见。

References

- Ague J J and Brimhall G H. 1987. Granites of the batholiths of California: Products of local assimilation and regional-scale crustal contamination [J]. *Geology*, 15: 63~66.
- Ague J J. 1997. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: implications for the aluminum_in_hornblende barometer [J]. *Geology*, 25: 563~566.
- Bau M. 1999. Scavenging of dissolved yttrium and rare earths by precipitating iron oxyhydroxide: Experimental evidence for Ce oxidation Y-Ho fractionation and lanthanide tetrad effect [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 67~77.
- Bea F, Pereira M D and Stroh A. 1994. Mineral/leucosome trace element partitioning in a peraluminous migmatite (a laser ablation_ICP-MS study) [J]. *Chemical Geology*, 117: 291~312.
- Braun J J, Pagel M, Muller J P, *et al.* 1990. Cerium anomalies in late-eritic profiles [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 781~795.
- Cesare B, Meli S and Nodari L. 2005. Fe^{3+} reduction during biotite melting in graphitic metapelites: another origin of CO_2 in granulites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149: 129~140.
- Clift P and Vannucchi, P. 2004. Controls on tectonic accretion versus erosion in subduction zones: Implications for the origin and recycling of the continental crust [J]. *Review of Geophysics*, 42: RG2001, doi: 10.1029/2003RG000127.
- De Baar H J W, Bacon M P, Brewer P G and Bruland K W. 1985. Rare earth elements in the Pacific and Atlantic Oceans [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49: 1943~1959.
- De Baar H J W, German C R, Elderfield H and van Gaans P. 1988. Rare earth element distribution in anoxic waters of the Cariacou Trench [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 1203~1219.
- Dixon E T. 1995. An Evaluation of Hornblende Barometry Isabella to Tehachapi Region Southern Nevada California [D]. The University of Michigan M. S. Thesis, 178.
- Dixon T H and Baticca R. 1979. Petrology and chemistry of recent lavas in the northern Marianas: Implications for the origin of island arc basalts [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70: 167~

- 181.
- Elan R. 1986. High grade contact metamorphism at the Lake Isabella North Shore roof pendant Southern Sierra Nevada California: PhD thesis[D]. University of Southern California, 202.
- Elderfield H, Upstill-Goddard R and Sholkovitz E R. 1990. The rare earth elements in rivers estuaries and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 971~ 991.
- Elderfield H and Greaves M J. 1981. Negative cerium anomalies in the rare earth element patterns of oceanic ferromanganese nodules [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 55: 163~ 170.
- Heaman L M, Bowins R C and Crocket James H. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: implications for geochemical tracer studies [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54: 1597~ 1607.
- Heming R F and Rankin P C. 1979. Ce_anomalous lavas from Rabul cadera, Papua New Guinea [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 1351~ 1355.
- Hole M J, Saunders A D, Marriner G F and Tarney J. 1984. Subduction of pelagic sediments: Implications for the origin of Ce_anomalous basalts from the Mariana Islands [J]. *Journal of Geological Society, London*, 141: 453~ 472.
- Jakes P and Gill P. 1970. Rare earth element and the island arc tholeiite series [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 9: 17~ 28.
- Johnson D M, Hooper P R and Conrey R M. 1999. XRF analysis of rocks and minerals for major and trace elements on a single low dilution Li_tetraborate fused bead [J]. *Adv. X-ray Anal.*, 41: 843~ 867.
- Luo Y, Gao S, Yuan H, *et al.*. 2004. Ce anomaly in minerals of eclogite and garnet pyroxenite from Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt: Tacking subducted sediment formed under oxidizing conditions [J]. *Science in China (D)*, 34: 14~ 23.
- Neal C R and Taylor L A. 1989. A negative Ce anomaly in a peridotite xenolith: evidence for crustal recycling into the mantle or mantle metasomatism? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53: 1035~ 1040.
- Pan Y and Stauffer M R. 2000. Cerium anomaly and Th/U fractionation in the 1.85 Ga Flin Flon Paleosol: clues from REE_ and U rich accessory minerals and implications for paleoatmospheric reconstruction [J]. *American Mineralogist*, 85: 898~ 911.
- Pickett D A and Saleeby J B. 1993. Thermobarometry of Cretaceous rocks of the Tehachapi Mountains California: Plutonism and metamorphism in deep levels of the Sierra Nevada batholith [J]. *Journal of Geophysical Research*, 98: 609~ 629.
- Pickett D A and Saleeby J B. 1994. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of Cretaceous intrusive rocks from deep levels of the Sierra Nevada batholith Tehachapi Mountains California [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118: 198~ 215.
- Ramsay W R H, Crawford A J and Foden J D. 1984. Field setting mineralogy chemistry and genesis of arc picrites New Georgia Solomon Islands [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 88: 336~ 402.
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U_Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 184: 123~ 138.
- Saleeby J B and Busby C. 1993. Paleogeographic and tectonic setting of axial and western metamorphic framework rocks of the southern Sierra Nevada California [A]. Dunn G and MacDougall K. *Mesozoic Paleogeography of Western United States_II* [C]. Pacific Section SEPM Book, 71: 197~ 226.
- Saleeby J B. 1999. The Sierra Nevada; Central California's arc [A]. Special Paper - Geological Society of America [C]. 338: 161~ 172.
- Schreiber H D, Lauer H V and Thanyasir T. 1980. The redox state of cerium in basaltic magmas: An experimental study of iron-cerium interaction in silicate melts [J]. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 44: 1599~ 1612.
- Sun S_S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes [A]. Saunders A and Norry M. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological society London Special Publication, 42: 313~ 345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The Geochemical evolution of the continental crust [J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 241~ 265.
- White W M and Patchett J. 1984. Hf_Nd_Sr isotopes and incompatible element abundances in island arcs: implications for magma origins and crust_mantle relations [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 67: 167~ 185.
- Zeng Lingsen, Li Haibing, Xu Zhiqin, *et al.*. 2004. Limited migration of leucosome in a migmatite and effects of progressive partial melting on strain partitioning [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 752~ 757 (in Chinese with English abstract).
- Zeng L and Saleeby J B. 2003. The effects of progressive partial melting of metasedimentary rocks on strain partitioning: A case study from the southern Sierra Nevada batholith California [J]. *Abstracts with Programs - Geological Society of America*, 35(4): 63~ 64.
- Zeng L, Saleeby J B and Asimow P. 2005a. Nd isotope disequilibrium during crustal anatexis: A record from the Goat Ranch migmatite complex southern Sierra Nevada batholith (SNB) California [J]. *Geology*, 33: 53~ 56.
- Zeng L, Asimow P and Saleeby J B. 2005b. Coupling of anatectic reactions and dissolution of accessory phases and the Sr and Nd isotope systematics of anatectic melts from a metasedimentary source [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69: 3671~ 3682.
- Zeng L, Saleeby J B and Ducea M. 2005c. Geochemical characteristics of crustal anatexis during the formation of migmatite at the Southern Sierra Nevada, California [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology* (in Press).
- Zou H, McKeegan K D, Xu X and Zindler A. 2004. Fe_Al_rich tridymite-hercynite xenoliths with positive cerium anomalies: preserved lateritic paleosols and implications for Miocene climate [J]. *Chemical Geology*, 207: 101~ 116.

附中文参考文献

- 曾令森, 李海兵, 许志琴, 等. 2004. 混合岩中浅色体的有限迁移及其对变形分解的影响[J]. *地质学报*, 78(6): 752~ 757.