江西井冈山地区寒武-奥陶纪地层的Sm-Nd同位素组成及其构造意义

沈渭洲, 凌洪飞, 舒良树, 张芳荣, 向磊

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093;

江西省地质调查研究院, 南昌 330030

E-mail: wzshen@nju.edu.cn

2008-10-06 收稿, 2008-11-24 接受

国家自然科学基金重点项目(批准号: 40634022)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 40572118)和教育部博士点基金项目(批准号: 20060284008)资助

摘要 研究的井冈山地区位于扬子地块与华夏地块之间, 在早古生代寒武-奥陶纪时期沉积了巨厚的泥砂质韵律岩层夹碳酸盐岩和含炭岩层。它们具有低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-13.9 \sim -7.9$)和古老的 Nd 模式年龄($1842 \sim 2375$ Ma), 数据点在 $t_{\text{DM}}-t_{\text{Str}}$ 图上远离一致线分布, 在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) - t_{\text{Str}}$ 图上都位于华南元古代地壳演化区域内。这些特征表明, 本区寒武系和奥陶系主要是古元古代古老地壳组分再循环作用产物, 物源以华夏地块区成熟度较高的陆源碎屑沉积岩为主。奥陶系爵山组和对耳石组的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-10.5 \sim -7.9$)位于上述范围的高端, Nd 模式年龄($1842 \sim 2059$ Ma)位于上述范围的低端, 反映在它们沉积时期内, 来自古元古代晚期-新元古代早期新生地壳物质的加入相对明显。鉴于在华夏地块和扬子地块东南缘范围内, 早古生代地层的 Nd 模式年龄都大于 1800 Ma, 没有发生明显的降低, 反映在这些地区不存在早古生代亏损地幔来源岩浆活动。

关键词

寒武纪-奥陶纪地层

Nd 同位素

古元古代

江西井冈山

Sm和Nd同属稀土元素, 离子半径和地球化学性质相似, 都具有强的抗扰能力, 在水中的溶解度很小, 陆源碎屑物质在风化、搬运、沉积和成岩过程中产生的Sm-Nd分馏可以忽略不计。因此, 沉积岩的Nd模式年龄(t_{DM})一般可代表其源区物质从地幔中分离以来所经过的时间。由于沉积碎屑来自物源区出露的不同时代岩石, 因此沉积岩的Nd模式年龄通常代表其物源区岩石的平均地壳存留年龄。如果在沉积岩形成过程中, 有新的亏损地幔来源物质加入, 沉积物的Nd模式年龄将降低, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值将升高, 其变化程度可以反映一个地区地壳演化过程中是否有地幔物质加入^[1,2]。

已有的研究表明, 不同构造单元的地壳, 由于其

形成及演化历史不同而可能具有不同的平均地壳存留年龄^[3~14]。因此, 对某一区域的沉积岩进行详细的Sm-Nd同位素研究, 不仅可以查明沉积岩的物源区, 而且还可以为该区域的构造单元划分、陆壳的形成与演化等提供重要的依据^[9,15,16]。

在井冈山及其相邻地区, 早古生代地层出露广泛, 但前人对这一套地层的研究程度相对薄弱, 仅对其中早寒武世黑色页岩进行过一些研究^[17~21], 而对该区广泛出露的碎屑沉积岩的研究很少^[22], 从而影响了对区域构造演化的认识。本文首次对井冈山地区广泛出露的寒武-奥陶系沉积岩进行较为系统的Sm-Nd同位素研究, 查明它们的物质来源, 以便为该区域地壳演化以及有关华南地区加里东期构造属性

引用格式: 沈渭洲, 凌洪飞, 舒良树, 等. 0B 江西井冈山地区寒武-奥陶纪地层的 Sm-Nd 同位素组成及其构造意义. 科学通报, 2009, 54: 1562~1569

Shen W Z, Ling H F, Shu L S, et al. Sm-Nd isotope compositions of Cambrian-Ordovician strata at the Jianggangshan area in Jiangxi Province: Tectonic implications. Chinese Sci Bull, 2009, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0214-3

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2009-54-11-1562>

的认识提供重要的依据。

1 地质背景

研究区位于华南加里东造山带中段,北以江山-萍乡断裂带与江南新元古代造山带相望,南以政和-大埔断裂带与东南沿海晚中生代花岗质火山-侵入杂岩带相接(图 1)。区内存在三套岩石地层单元,即①前震旦纪变质基底单元,②震旦系(原上震旦统陡山沱组+灯影组)、寒武系、奥陶系浅变质单元,中泥盆世开始的稳定沉积盖层。

寒武系和奥陶系地层在江西境内分布很广,尤以井冈山地区最为发育(图 1)。在该区,寒武系和奥陶系不仅出露齐全,出露面积超过 3000 km²,厚度达 3000 m,而且普遍经受了强烈褶皱变形和低绿片岩相区域变质作用。

奥陶系是一套以泥砂质成分为主的沉积建造,

根据沉积特征、岩石组合和化石组合特征,自下而上可划分为爵山沟组(O₁)、对耳石组(O₁₋₂)和石口组(O₂₋₃),它与下覆的寒武系为连续过渡关系。由于志留系缺失,奥陶系常被泥盆系地层不整合覆盖。寒武系是一套由泥砂质碎屑组成的岩层,近底部常见炭硅质岩层,自下而上可划分为牛角河组、高滩组和水石组,它与下覆震旦系呈整合接触^[23]。

在奥陶系中,爵山沟组中上部为绿泥绢云千枚岩与细粒岩屑杂砂质板岩互层,下部为含炭绿泥绢云千枚岩、板岩。对耳石组岩性为含炭含粉砂(绿泥)绢云板岩、(含炭)绿泥绢云千枚岩夹含炭硅质板岩、硅质板岩。石口组岩性以变余中细粒长石石英杂砂岩和绢云板岩为主,并夹有绿泥绢云千枚岩。

在寒武系中,牛角河组岩性以含炭绿泥绢云千枚岩、中细粒长石石英砂质板岩与含炭二云千枚岩为

图 1 井冈山地区地质略图及采样点分布图

据 1:5 万井冈山幅和衙前幅地质图简化。1, 晚白垩世地层; 2, 早侏罗世地层; 3, 中泥盆世地层; 4, 中奥陶-晚奥陶世石口组; 5, 早奥陶-中奥陶世对耳石组; 6, 早奥陶世爵山沟组; 7, 晚寒武世水石组; 8, 中寒武世高滩组; 9, 早寒武世牛角河组; 10, 地质界线/角度不整合界线; 11, 断层; 12, 地层产状; 13, 地层倒转产状; 14, 采样位置。 , 绍兴-江山-萍乡断裂带; , 丽水-政和-大埔断裂带

主。高滩组岩性以中细粒长石石英砂质板岩与含炭绢云千枚岩为主，局部见有变余含砾粗砂岩和板岩。水石组岩性以变余中细粒长石石英砂质板岩与含炭千枚岩互层为主。

2 样品和分析方法

本文研究样品的采样位置见图 1。为了能在更大范围内研究物源区的平均地壳存留年龄，所选择的分析样品都是细粒碎屑沉积岩，岩石类型包括板岩、千枚岩、杂砂岩等。

Sm-Nd 同位素组成由中国科学院地质与地球物理研究所同位素实验室测定。Sm、Nd 含量采用稀释法测定，同位素比值测定采用 MAT-262 固体同位素质谱计。Nd 同位素比值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化。对国际标样 BCR-2 测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512636 \pm 10$ ，对 Jndi-1 标样测定的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512112 \pm 11$ 。实验室 Sm、Nd 的全流程本底为 $5 \times 10^{-11} \text{ g}$ 。

3 结果和讨论

3.1 寒武-奥陶系的 Sm-Nd 同位素特征

由表 1 所列的分析数据可知，井冈山地区寒武-

奥陶系的 Sm/Nd 比值(0.148~0.204)虽然在陆壳岩石的变化范围内(0.15~0.24)^[24]，但变化相对明显。考虑到碎屑沉积岩的 Nd 模式年龄与其 Sm/Nd 比值呈明显的相关变化^[25]，因此只有采用两阶段模式^[26-28]进行计算，才能在最大程度上减少因 Sm-Nd 分馏而对 Nd 模式年龄计算值产生的影响，使计算值能更确切地反映沉积岩物源区出露岩石的平均地壳存留年龄^[15,25,28]。

如表 1 所示，井冈山地区寒武-奥陶纪沉积岩具有古老的 Nd 模式年龄，寒武纪地层为 2064~2375 Ma (平均为 2240 Ma)，奥陶纪地层为 1842~2222 Ma (平均为 2097 Ma)，它们的 Nd 模式年龄都大于 1800 Ma，而且与其地层年龄(t_{Str})之间的差异高达 1300 Ma 以上，在 $t_{\text{DM}}-t_{\text{Str}}$ 图上，数据点远离一致线分布(图 2(a))。计算的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值，寒武系为 -13.9~-10.4 (平均为 -12.4)；奥陶系为 -12.7~-7.9 (平均为 -11.1)，在 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)-t_{\text{Str}}$ 图上，数据点都位于华南古元古代地壳演化域^[29]内(图 2(b))。这些特征清楚表明，井冈山地区寒武-奥陶纪碎屑沉积岩主要是古元古代古老地壳组分再循环作用产物。但应当指出的是，研究区内寒武系-奥陶系地层的

表 1 寒武-奥陶纪地层的 Sm-Nd 同位素组成

样品号	层位	t_{Str}/Ma	Sm (10^{-6})	Nd (10^{-6})	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	t_{DM}/Ma
JX-1	石口组	455	5.729	31.65	0.1094	0.511732(± 11)	-12.6	2212
JX-2	石口组	455	7.028	39.81	0.1067	0.511767(± 10)	-11.8	2145
JX-3	石口组	455	6.371	33.68	0.1144	0.511741(± 13)	-12.7	2222
JX-4	石口组	455	9.287	52.06	0.1079	0.511733(± 14)	-12.5	2204
JX-5	石口组	455	4.513	24.43	0.1117	0.511759(± 10)	-12.2	2181
JX-6	石口组	455	8.338	49.95	0.1009	0.511750(± 12)	-11.8	2145
JX-7	对耳石组	470	2.438	13.82	0.1066	0.511957(± 13)	-7.9	1842
JX-8	对耳石组	470	2.776	15.04	0.1116	0.511846(± 12)	-10.4	2042
JX-9	爵山沟组	480	3.965	21.88	0.1096	0.511840(± 11)	-10.2	2041
JX-10	爵山沟组	480	7.218	38.02	0.1148	0.511896(± 11)	-9.5	1978
JX-11	爵山沟组	480	6.524	35.77	0.1103	0.511831(± 10)	-10.5	2059
JX-12	水石组	495	4.199	22.37	0.1135	0.511837(± 14)	-10.4	2064
JX-13	水石组	495	8.588	45.92	0.1131	0.511695(± 11)	-13.1	2285
JX-14	水石组	495	17.11	75.26	0.1374	0.511907(± 13)	-10.5	2077
JX-15	高滩组	510	6.255	35.35	0.1070	0.511677(± 11)	-12.9	2281
JX-16	高滩组	510	5.225	28.04	0.1127	0.511658(± 11)	-13.7	2342
JX-18	高滩组	510	5.954	30.25	0.1190	0.511668(± 8)	-13.9	2360
JX-19	牛角河组	530	5.947	31.64	0.1136	0.511639(± 14)	-13.9	2375
JX-21	牛角河组	530	11.85	67.79	0.1057	0.511749(± 11)	-11.2	2159
JX-22	牛角河组	530	9.946	55.04	0.1092	0.511722(± 12)	-12.0	2220

a) t_{Str} 为地层年龄，它是根据 Gradstein 等人^[30]制订的地质年代表估计的；括号内数字代表 2σ 误差；如 0.511767 ± 11 代表 0.511767 ± 0.000011 ；Nd 模式年龄采用两阶段模式^[28]进行计算，计算公式： $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln\{1 + [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}}](e^{\lambda t} - 1)] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}} - (^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}}]\}$ 式中： $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{C}} = 0.118$ ； $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.513151$ ； $(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{DM}} = 0.2136$ ； t 是指地层形成年龄

图2 寒武-奥陶纪沉积岩的 $t_{DM}-t_{Str.}$ (a)和 $\epsilon_{Nd}(t)-t_{Str.}$ (b)图解
实心圆为奥陶纪沉积岩; 空心方块为寒武纪沉积岩

$\epsilon_{Nd}(t)$ 值和Nd模式年龄的变化相对明显,尤其是奥陶系爵山沟组和对耳石组的Nd模式年龄(1842~2059 Ma)低于其他层位(2064~2375 Ma), $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(-10.5和-7.9)高于其他层位(-13.9~-10.4). 在 $t_{DM}-t_{Str.}$ 图上,数据点相对靠近一致线分布,在 $\epsilon_{Nd}(t)-t_{Str.}$ 图上,数据点主要位于华南元古代地壳演化域的中上部位,反映在爵山沟组和对耳石组沉积时期可能有较多的古元古代晚期新生地壳物质加入.

3.2 寒武-奥陶系的物源区

上述 Sm-Nd 同位素研究表明,井冈山地区寒武-奥陶纪沉积岩主要是古老地壳组分再循环作用产物.那么,这些组分来自何方? 本文拟从以下几方面进行探讨:

(1) 从空间位置看(图 1 左上方),在井冈山地区这样一个沉积盆地内,寒武-奥陶纪沉积时期的物源区岩石可能包括华夏地块与扬子地块东南缘范围内出露的元古代基底变质岩.这些岩石既包括以砂岩、泥岩、板岩、千枚岩、片岩、变粒岩、片麻岩等为主夹碳酸盐沉积的碎屑沉积岩,也包括火山-沉积岩系^[31].

(2) 根据目前出露的元古宙变质沉积岩的Nd模式年龄资料(图 3, 4),无论是华夏地块还是扬子地块东南缘,都普遍存在古老地壳组分,它们都有可能成为井冈山地区早古生代沉积岩的物源区.但从图 3, 4的对比中发现,扬子地块东南缘基底变质沉积岩Nd模式年龄大于2.0 Ga的数据屈指可数,华夏地块区基底变质沉积岩Nd模式年龄大于2.0 Ga的数据占一半以上.而在研究区域内,90%的数据都大于2.0 Ga.由此可知,井冈山地区寒武-奥陶纪沉积岩的Nd模式年龄与华夏地块基底变质沉积岩的值十分相似,而与扬子地块东南缘基底变质沉积岩的值区别较为明显,表明华夏地块区基底变质岩应是研究区内寒武-奥陶纪沉积岩的主要物源区.

图3 井冈山地区早古生代地层与华夏地块和扬子地块基底变质岩的Nd模式年龄频率直方图

原始数据主要引自文献[6, 7, 9, 11, 31~39], Nd模式年龄采用两阶段模式计算

图4 华南地区基底变质岩Nd模式年龄分布图

数据来源同上, 同一个地区有多个年龄数据时一般采用平均值; —, 绍兴-江山-萍乡断裂带; —, 丽水-政和-大埔断裂带

(3) 已有资料表明, 闽西南地区寒武-奥陶纪沉积岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-15.1 \sim -12.8$ (平均为 -13.6), Nd模式年龄为2259~2467 Ma (平均为2343 Ma)^[11]; 扬子地块东南缘寒武-奥陶纪沉积岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-11.6 \sim -9.6$ (平均为 -10.6), Nd模式年龄为1820~1900 Ma (平均为1867 Ma)^[9], 两者之间差异十分明显. 这种差异是由其附近物源区出露岩石成分的差异所引起的. 扬子地块东南缘寒武-奥陶纪沉积岩物源区出露的是一套成熟度较低的中-新元古代火山-沉积岩系^[31,35]; 闽西南地区寒武-奥陶纪沉积岩物源区出露的则是一套成熟度较高的古-中元古代陆源碎屑沉积岩^[31,34]. 在井冈山地区, 寒武-奥陶纪沉积岩的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-13.9 \sim -7.9$)和Nd模式年龄(1842~2375 Ma)介于上述两个地区之间, 其中奥陶系爵山沟组和对耳石组的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(分别为 $-10.5 \sim -9.5$ 和 $-10.4 \sim -7.9$)和Nd模式年龄(分别为1978~2059和1842~2042 Ma)与扬子地块东南缘的较为接近.

导致爵山沟组和对耳石组 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值升高和Nd模式年龄降低的原因可能是, 在它们沉积时期内有同期亏损地幔来源物质或物源区中存在的新生地壳物质加入. 由于迄今为止无论是在华夏地块还是在扬子地块东南缘范围内, 尚未有可信的地球化学数据能够证实在早古生代地层中有亏损地幔来源火山岩层的存在, 因而此时物源区古元古代晚期新生地壳物质的加入应是爵山沟组和对耳石组 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值升高和Nd模式年龄降低的主要原因. 另一方面, 更为年轻的中元古代晚期-新元古代早期的新生地壳加入也能产生类似的结果. 根据现有资料, 在华夏地块, 尤其是在扬子地块东南缘的元古代地层中, 都有这种中元古代晚期-新元古代早期的新生地壳存在. 在华夏地块内有马面山群中的变基性火山岩^[40,41]、陈蔡群(和龙泉群)中的斜长角闪岩^[34,42]、江西弋阳、乐安等地区周谭群中的斜长角闪岩^[43,44]. 在扬子地块东南缘有皖南伏川和赣东北地区的元古代蛇绿混杂岩^[45~47]、

赣东北地区双桥山群中的基性火山岩^[35]、浙江西裘双溪坞群和广西龙胜地区丹洲群中的细碧角斑岩^[48,49]、桂北四堡群中的镁铁质-超镁铁质岩石^[50]、湖南益阳、南桥地区冷家溪群和板溪群中的玄武岩^[51]和皖南上溪群中的基性火山岩^[36,52,53]等。这些新生地壳的Nd模式年龄基本上都低于 1.6 Ga。在元古代变质沉积岩中,也有不少样品的Nd模式年龄也低于 1.6 Ga (图 3, 4), 甚至由这些新生地壳改造形成的新元古代中酸性火山岩和花岗岩类^[54,55]的Nd模式年龄也都低于 1.7 Ga。无论如何, 爵山沟组和对耳石组较低的Nd模式年龄和较高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值反映在它们沉积时期内, 上述新生地壳物质加入的影响比较明显。

3.3 寒武-奥陶纪地层 Nd 模式年龄的构造意义

在成冰纪时期, 华南陆块地区可能由于地幔柱上拱或者岩石圈拉张^[56~58]而发生裂解事件。由于这一裂解事件的影响, 原先的华夏地块被肢解成许多次级块体, 如武夷、赣中南、云开等块体。在这些裂解的块体之间是裂谷(或海槽)还是大洋, 对于确定华南地区早古生代时期的大地构造属性具有十分重要的意义。

早先被认为属于早古生代岛弧火山岩的政和县城郊玄武岩的Rb-Sr全岩等时线年龄为 (560.8 ± 14) Ma^[59], 但经采用锆石SHRIMP U-Pb法定年获得的政和城边辉绿岩^[60]和流纹岩^[61]的年龄不是加里东期, 而是新元古代(分别为 (795 ± 7) 和 (818 ± 9) Ma); 诸暨化泉辉长岩的锆石SHRIMP U-Pb年龄 $((858 \pm 11)$ Ma)^[62]也属于新元古代。迄今为止, 还没有确切的年代学资料能够证实华南地区存在加里东期岛弧火山岩或蛇绿混杂岩。因此, 在上述裂解的块体之间是浅海而不是大洋^[22,63]。下列重要的野外地质证据也充分表明, 井冈山地区在早古生代时期属于浅海沉积环境: 寒武纪和奥陶纪岩层均为泥砂质韵律层夹碳质层和灰岩层; 在赣南及武功山地区的震旦-寒武纪地层中发育有浅海沉积的灰岩、钙质砂岩透镜体

及高炭质层, 在大余-崇义一带的奥陶纪地层中也发现有厚度>60 m的灰岩地层; 寒武纪和奥陶纪地层中已发现腕足类和腹足类等浅海生物化石^[23];

在本区及赣南上震旦统及寒武纪地层中发现有波痕、荷重模、泥砾和小型斜层理等浅海沉积构造; 震旦-奥陶纪地层中普遍发育有同斜倒转褶皱。

沉积岩的Nd模式年龄资料同样可以为判别该地是否存在同期亏损地幔来源岩浆活动提供重要依据。如果存在同期亏损地幔来源火山岩, 那么, 随后形成的沉积岩的Nd模式年龄将会显著降低。例如在扬子地块东南缘, 由于存在新元古代初期形成的蛇绿混杂岩, 导致随后形成的丹洲群上部 and 震旦系下部的Nd模式年龄(1.3~1.4 Ga)明显低于四堡群和丹洲群下部(1.8 Ga左右)^[9,64]。但在华南地区的寒武-奥陶纪沉积岩中, 无论是扬子地块东南缘($t_{\text{DM}} = 1820 \sim 1900$ Ma)^[9], 还是华夏地块范围内的武夷山地区($t_{\text{DM}} = 2259 \sim 2467$ Ma)^[11]和井冈山地区($t_{\text{DM}} = 1842 \sim 2222$ Ma), 它们的Nd模式年龄都大于 1800 Ma, 没有发生明显的降低。这表明在华南广大区域内, 不存在同期早古生代亏损地幔来源岩浆活动。这从一个侧面证实, 华夏地块在成冰纪时期因裂解作用形成的块体之间是浅海而不是大洋^[64]。

4 结论

(1) 井冈山地区大多数寒武-奥陶纪沉积岩具有较低的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和古老的Nd模式年龄, 反映它们主要是古老地壳组分再循环作用产物, 物源以成熟度较高的华夏地块区的陆源碎屑沉积岩为主, 但奥陶系爵山沟组和对耳石组的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值相对较高、Nd模式年龄相对较年轻, 反映在其形成时期, 来自古元古代晚期或更年轻新生地壳物质加入的影响相对明显。

(2) 鉴于在华夏地块武夷山地区和江西井冈山地区以及扬子地块东南缘地区, 寒武-奥陶纪沉积岩的Nd模式年龄都大于 1800 Ma, 没有发生明显的降低, 反映在华南广大区域内, 不存在早古生代亏损地幔来源岩浆活动。

参考文献

- 1 O'Nions R K, Hamilton P J, Hooker P J. A Nd isotope investigation of sediments related to crustal development in the British Isles. *Earth Planet Sci Lett*, 1983, 63: 229—240^[doi]
- 2 Zhao J X, McCulloch M T, Bennett V C. Sm-Nd and U-Pb zircon isotopic constraints on the provenance of sediments from the Amadeus Basin, Central Australia: Evidence for REE fractionation. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56: 921—940^[doi]

- 3 Michard A, Gurriet P, Soudant M, et al. Nd isotopes in French Phanerozoic shales: External vs. Internal aspects of crustal evolution. *Geochim Cosmochim Acta*, 1985, 49: 601—610[doi]
- 4 陈江峰, 周泰禧, 邢凤鸣, 等. 皖南浅变质岩和沉积岩的 Nd 同位素组成及沉积物物源区. *科学通报*, 1989, 34: 1572—1574
- 5 Maas R, McCulloch M T. The provenance of Archean clastic metasediments in the Narryer of Gneiss Complex, western Australia: trace element geochemistry, Nd isotopes and U-Pb ages for detrital zircon. *Geochim Cosmochim Acta*, 1991, 55: 1915—1932[doi]
- 6 凌洪飞, 沈渭洲, 章邦桐, 等. 江西修水地区震旦纪前后沉积岩的 Nd 同位素组成和物质来源. *岩石学报*, 1992, 8: 190—194
- 7 周新华, Goldstein S L, 赫杰, 等. 皖南浙西地区沉积岩系岩石源区省初步研究. 见: 李继亮, 主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 78—84
- 8 Lan C Y, Lee T, Zhou X H, et al. Nd isotopic study of Precambrian basement of South Korea: Evidence for Early Archean crust? *Geology*, 1995, 23: 249—252[doi]
- 9 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. *岩石学报*, 1996, 12: 359—369
- 10 沈渭洲, 陆怀鹏, 徐士进, 等. 丹巴地区变质沉积岩 Sm-Nd 同位素研究. *地质科学*, 1998, 33: 367—373
- 11 沈渭洲, 于津海, 赵蕾, 等. 南岭东段后太古宙地层的 Sm-Nd 同位素特征与地壳演化. *科学通报*, 2003, 48: 1740—1745
- 12 Chen Y L, Yang Z F. Nd model ages of sedimentary profile from the northwest Yangtze Craton, Guangyuan, Sichuan province, China and their geological implication. *Geochem J*, 2000, 34: 263—270
- 13 陈岳龙, 罗照华, 刘翠. 对扬子克拉通西缘四川康定—冕宁变质基底的新认识——来自 Nd 同位素的证据. *地球科学*, 2001, 26: 279—285
- 14 陈斌, Jahn B M, 王式浣. 新疆阿尔泰古生代变质沉积岩的 Nd 同位素特征及其对地壳演化的制约. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31: 226—232
- 15 Miller J F, Harris N B W. Evolution of continental crust in the central Andes: constraints from Nd isotope system. *Geology*, 1989, 17: 615—617[doi]
- 16 吴福元, 孙加鹏, 张兴洲. 扬子地块南缘晚古生代洋壳存在的 Nd 同位素证据. *岩石学报*, 1998, 14: 22—33
- 17 饶雪峰, 范德廉. 湘中桃江中奥陶统黑色岩系岩石学地球化学及成因. *岩石学报*, 1990, 3: 78—86
- 18 吴朝东, 杨承远, 陈其英. 湘西黑色岩系地球化学特征和成因意义. *岩石矿物学杂志*, 1999, 18: 26—39
- 19 张位华, 姜立君, 高慧, 等. 贵州寒武系底部黑色硅质岩成因及沉积环境探讨. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22: 174—178
- 20 曹双林, 潘家永, 马东升, 等. 湘西北早寒武世黑色岩系微量元素地球化学特征. *矿物学报*, 2004, 24: 415—419
- 21 杨瑞东, 朱立军, 王世杰, 等. 贵州寒武系底部碳同位素异常的地层学和生物学意义. *地质学报*, 2005, 79: 157—164
- 22 柏道远, 周亮, 王先辉, 等. 湘东南南华系-寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代-早古生代构造背景的制约. *地质学报*, 2007, 81: 755—771
- 23 江西省地质矿产局. 江西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1984
- 24 Hawkesworth C J, van Calsteren P W C. Radiogenic isotopes—Some geological applications. In: Henderson P, ed. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984. 375—421
- 25 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 等. 从 Nd 模式年龄谈华南陆壳的形成时间. *南京大学学报(地球科学)*, 1989, 1: 45—57
- 26 DePaolo D J, Linn A M, Schubert G. The continental crustal age distribution: Methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the southwestern United State. *J Geophys Res*, 1991, 96: 2071—2088[doi]
- 27 李献华, 赵振华, 桂训唐, 等. 华南前寒武纪地壳形成时代的 Sm-Nd 和锆石 U-Pb 同位素制约. *地球化学*, 1991, 20: 255—264
- 28 陈江峰, 江博明. Nd, Sr, Pb 同位素示踪和中国东南大陆地壳演化. 见: 郑永飞, 主编. *化学地球动力学*. 北京: 科学出版社, 1999. 262—287
- 29 沈渭洲, 朱金初, 刘昌实, 等. 华南基底变质岩的 Sm-Nd 同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. *岩石学报*, 1993, 9: 115—124
- 30 Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 2004, 27: 83—100
- 31 金文山, 孙大中. 华南大陆深部地壳结构及其演化. 北京: 地质出版社, 1997
- 32 徐步台, 胡永和, 蒋叙良, 等. 浙东沿海火山岩区变质岩的同位素、稀土元素地球化学和地质年代学研究. *浙江地质*, 1989, 2: 52—58
- 33 袁宗信, 吴良士, 张宗清, 等. 闽北麻源群 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年龄研究. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10: 127—131
- 34 胡雄健, 许金坤, 童朝旭, 等. 浙西南前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1991
- 35 马长信, 刘荣贵, 吕桂德, 等. 赣东北前震旦纪地质. 北京: 地质出版社, 1992
- 36 谢奕克, 马荣生, 张禹慎, 等. 华南大陆地壳生长过程与地幔柱构造. 北京: 地质出版社, 1996
- 37 胡恭仁, 章邦桐. 赣中变质基底的 Nd 同位素组成和物质来源. *岩石矿物学杂志*, 1998, 17: 35—40
- 38 张敏. 粤北产铀岩体的年代学和地球化学及铀成矿机制研究. 博士学位论文, 南京: 南京大学地球科学系, 2006
- 39 周新民. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化. 北京: 科学出版社, 2007

- 40 黄春鹏, 张家元, 詹玉亭. 福建尤溪龙北溪组变质火山岩的 Sm-Nd 同位素年龄研究. 福建地质, 1991, 10: 150—157
- 41 王鹤年, 凌洪飞, 周丽娅, 等. 福建马面山群 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 高校地质学报, 2003, 9: 567—572
- 42 周新华. 东南陆壳构造演化的同位素地球化学制约研究. 见: 于津生, 主编. 中国同位素地球化学研究. 北京: 科学出版社, 1997. 83—98
- 43 胡恭仁, 章邦桐, 王湘云. 赣中相山元古代斜长角闪岩的矿物岩石学特征及同位素地球化学研究. 地球化学, 1998, 27: 217—229
- 44 余达淦, 艾桂根, 黄国夫, 等. 江西周潭群同位素年龄特征及其地质意义. 地球学报, 1999, 20: 195—200
- 45 周新民, 邹海波, 杨杰东, 等. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 科学通报, 1989, 34: 1243—1245
- 46 徐备, 乔广生. 赣东北晚元古代蛇绿岩套的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境. 南京大学学报(地球科学), 1989, (3): 108—114
- 47 周国庆, 赵建新. 华南扬子克拉通东南缘赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素研究. 科学通报, 1991, 36: 129—132
- 48 沈渭洲, 章邦桐, 凌洪飞, 等. 浙江西裘细碧-角斑岩的 Nd, Sr, O 同位素地质研究. 地质学报, 1991, 65: 337—346
- 49 甘晓春, 李献华, 赵凤清, 等. 广西龙胜丹洲群细碧岩锆石 U-Pb 及 Sm-Nd 等时线年龄. 地球化学, 1996, 25: 271—276
- 50 周金城, 王孝磊, 邱检生, 等. 桂北中-新元古代镁铁质-超镁铁质岩的岩石地球化学. 岩石学报, 2003, 19: 9—18
- 51 王孝磊, 周金城, 邱检生, 等. 湖南中-新元古代火山-侵入岩地球化学及成因意义. 岩石学报, 2003, 19: 49—60
- 52 张光第, 姚士新. 安徽歙县-休宁一带海相火山岩的 Sm-Nd 同位素研究及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 1999, 12: 326—331
- 53 陈冠宝, 徐树桐, 陶正, 等. 皖南井潭组变质火山岩 Sm-Nd 同位素年龄及其大地构造意义. 现代地质, 1998, 12: 548—554
- 54 Wu R-X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. Precambrian Res, 2006, 146: 179—212[doi]
- 55 Zheng Y F, Wu R X, Wu Y B et al. Rift melting of juvenile arc-derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. Precambrian Res, 2008, 163: 351—383[doi]
- 56 Li X H, Li Z X, Ge W, et al. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ac. 825Ma? Precamb Res, 2003, 122: 45—83[doi]
- 57 Li Z X, Li X H, Zhou H, et al. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia. Geology, 2002, 30: 163—166[doi]
- 58 Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Res, 2003, 122: 85—109[doi]
- 59 杨树锋, 陈汉林, 武光海, 等. 闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义. 地质科学, 1995, 30: 105—116
- 60 Shu L S, Faure M, Wang B, et al. Late Paleozoic-Early Mesozoic geological features of South China: Response to the Indosinian collision event in Southeast Asia. Compt Rend Geosci, 2008, 340: 151—165[doi]
- 61 Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance. Precambrian Res, 2005, 136: 51—66[doi]
- 62 Shu L S, Faure M, Jiang S Y, et al. SHRIMP zircon U-Pb age, litho-and biostratigraphic analyses of the Huaiyu Domain in South China: Evidence for a Neoproterozoic orogen, not Late Paleozoic-Early Mesozoic collision. Episodes, 2006, 29: 244—252
- 63 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东造山带. 高校地质学报, 2006, 12: 418—431
- 64 周泰禧, 陈江峰, 张巽, 等. 扬子地块东南缘沉积岩的 Nd 同位素研究. 沉积学报, 1995, 13: 39—45