

中国东南部花岗岩类的 Nd 模式 年龄与地壳演化*

沈渭洲^{①②} 凌洪飞^{①②} 李武显^① 王德滋^①

(^①南京大学地球科学系, ^②南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京 210093)

摘要 中国东南部不同时代花岗岩类 Nd 模式年龄的空间分布具有一定的规律性, 即 $t_{DM} > 1\ 800\ \text{Ma}$ 的花岗岩体主要分布于浙西南-闽西北、武夷山两侧和万洋山-诸广山 3 个区域内, 而 $t_{DM} < 1\ 600\ \text{Ma}$ 的中生代花岗岩体则主要分布于赣杭构造带、南岭纬向构造带和浙闽沿海 3 个带内. 对这一空间分布格局的形成作了初步探讨. 结合基性、超基性岩石的年代学数据, 认为中国东南部地壳生长具幕式特征, 其中以早-中元古代地壳生长事件最为重要.

关键词 花岗岩类 Nd 模式年龄 地壳形成事件 低 t_{DM} 花岗岩带 中国东南部

1 方法原理及其局限性

地壳岩石的 Nd 模式年龄是基于地幔物质被提取进入大陆壳后所经历的壳内作用(包括侵蚀、沉积、变质及熔融)过程中, 其 Sm/Nd 值保持不变. 在这一前提条件下, 地壳岩石 Sm-Nd 同位素组成的变化将反映它们从地幔储库中分离时间的差异. 通常认为, 相对于亏损地幔(DM)计算的 Nd 模式年龄(t_{DM})更能反映地壳岩石从地幔储库中提取以来所经历的时间^[1]. 目前对亏损地幔 Nd 同位素组成及其演化特征还存在不同的看法, 以及在地幔物质被提取进入大陆地壳后所经历的壳内作用过程中, Sm 和 Nd 之间有可能发生进一步分馏, 导致计算的 Nd 模式年龄偏离真实的地壳形成年龄. 因此, 在对 Nd 模式年龄数据进行解释时, 一般应考虑到约 200 Ma 的不确定性.

锆石是一种相当稳定的副矿物, 在壳内作用过程中, 其 U-Pb 同位素体系一般能保持封闭. 因此, 火成岩、沉积岩与变质岩中继承锆石(或捕获锆石)的 U-Pb 年龄也被用于探讨大陆地壳的形成与演化^[2,3]. 但由于目前还无法区分所研究的继承锆石是地幔岩浆作用的产物, 还是大陆壳重熔岩浆作用形成的, 因此应用继承锆石 U-Pb 年龄来研究大陆壳形成与演化也具有不确定性.

由此可知, 利用 Nd 模式年龄来研究大陆壳的形成与演化是大尺度和粗线条的, 它和地幔岩浆作用产物精细的年代学研究是有区别的. 但若和继承锆石 U-Pb 年龄, 特别是和基性、超基性岩石精细的年代学数据相结合, 花岗岩类的 Nd 模式年龄对于研究大陆壳的形成与演化是十分有效的. 这在对美国西部^[4]、西南部^[5]以及加拿大格林维尔省^[6]花岗岩类的研究中得到

了充分的证实.

对华南花岗岩类的 Nd 模式年龄研究始于 80 年代末期, 近期已引起人们普遍的关注^[7~12]. 现有的研究表明, 华南花岗岩类 Nd 模式年龄的空间分布总体上表现出向东南沿海逐渐变年轻的趋势; 华南陆壳具幕式生长特征; 华南地区可划分出若干个地壳年龄省, 并存在一些 t_{DM} 年龄低, e_{Nd} 值较高, I_{Sr} 值变化大, 且呈 NE 向分布的花岗岩带, 后者在空间上与中生代盆地的展布方向相吻合.

2 地质背景

如图 1 所示, 本文研究区包括浙江、福建和江西全省及毗邻的皖南、湘东和粤北地区. 横贯本区的浙赣铁路线可近似作为研究区内一级大地构造单元的分界线. 位于浙赣线北侧的叫扬子地块, 位于其南侧的称华夏地块. 根据最新的年代学资料, 这两个地块的基底都是由早元古代和中元古代变质岩组成. 华夏地块有早元古代八都群、麻源群和中元古代陈蔡群(龙泉群)和马面山群, 扬子地块有早元古代星子群和中元古代双桥山群和上溪群. 基底变质岩之上覆盖着晚元古代浅变质岩和显生宙沉积岩.

研究区内不同时代和不同成因类型花岗岩类分布极为广泛. 经广大地质研究人员近 80 年

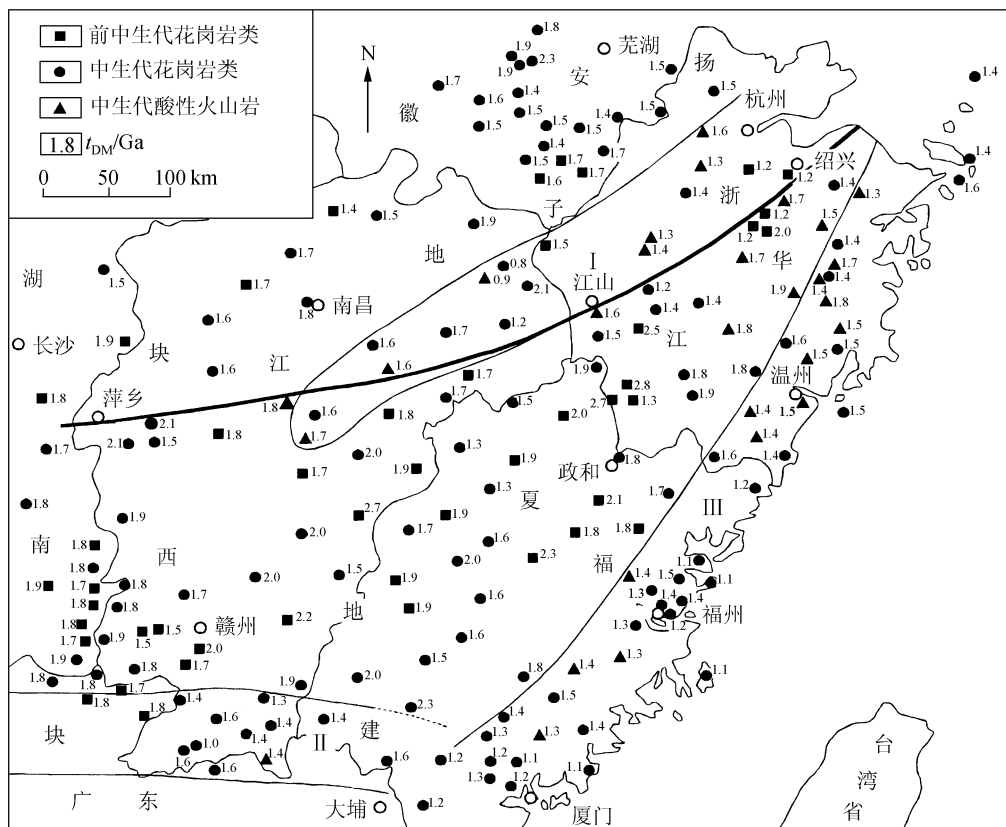


图 1 中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄分布图

I ~ III 代表中生代花岗岩类 3 个低 t_{DM} 带. 图中数据点稀缺地区为沉积岩、变质岩和第四系分布区

的努力, 业已查明, 中国东南部花岗岩浆活动具明显的多旋回性, 包括吕梁期、晋宁期、加里东期、海西-印支期和燕山期. 其中以燕山期花岗岩浆活动最为强烈, 它遍布整个研究区域, 空间分布上主要受 NE 和 NNE 向大断裂控制. 研究区内花岗岩类的物质来源复杂, 不同成因类型花岗岩类发育齐全, 其中以 S 型花岗岩为主并主要分布于上虞-政和-大埔断裂以西的大陆板块内部, I 和 A 型花岗岩类主要分布于浙闽沿海地区及板内大断裂带附近, M 型花岗岩类则沿江绍断裂带分布.

3 样品和数据来源

为了使中国东南部花岗岩类(包括酸性火山岩)的 Nd 模式年龄制图真实、可信, 本文在前人研究基础上又补充采集了 58 个花岗岩体(包括少量酸性火山岩)样品(Sm-Nd 同位素分析由中国科学院地质研究所同位素实验室完成), 以使样品的空间分布更趋合理, 更具代表性. 本文所引用的数据是在国内外刊物上正式发表的. 这些数据或是在国外的实验室, 或是在国内几个权威的实验室测试的. 在一个岩体有多个数据的情况下, 一般仅选择一个具代表性的. 为了最大限度减少因地壳演化阶段内 Sm-Nd 分馏对 Nd 模式年龄计算值产生的影响, 本文采用陈江峰等人^[12]给出的两阶段模式年龄计算参数对所使用的数据重新进行计算.

4 讨论

4.1 不同时代花岗岩类 Nd 模式年龄特征

如图 2 所示, 在前中生代花岗岩体中, 早元古代吕梁期花岗岩具有最古老的 t_{DM} 年龄(2 829 ~ 2 526 Ma)^[13,14], 它们仅分布于浙西南八都群出露区域内, 而且与其中片麻岩的 t_{DM} 年龄(3 319 ~ 2 608 Ma)比较相似. 在晚元古代晋宁期花岗岩体中, 沿江绍断裂带分布的晋宁期花岗岩具有最低的 t_{DM} 年龄(1 184 ~ 1 169 Ma)^[15], 且与该区出露的双溪坞群细碧角斑岩的值(1 281 ~ 1 158 Ma)十分相似; 沿扬子地块东南缘分布的晋宁期花岗岩体具有较高的 t_{DM} 年龄(1 748 ~ 1 636 Ma)^[15], 它们也与所在区域内基底变质沉岩的值(皖南上溪群为 1 697 ~ 1 406 Ma), 赣西北九岭群为 1 715 ~ 1 650 Ma)相吻合. 在古生代花岗岩体中, 除上犹(1 487 Ma)、陡水(1 508 Ma)^[7]及墩头(1 315 Ma)^[16]岩体具有较低的 t_{DM} 年龄外, 其余岩体均具有较高的 t_{DM} 年龄(2 298 ~ 1 679 Ma, 个别达 2 689 Ma), 且与它们所在区域内出露的基底变质岩的值(2 608 ~ 1 615 Ma)亦相一致. 上述这些特征表明, 前中生代花岗岩体主要是由地壳物质衍生的.

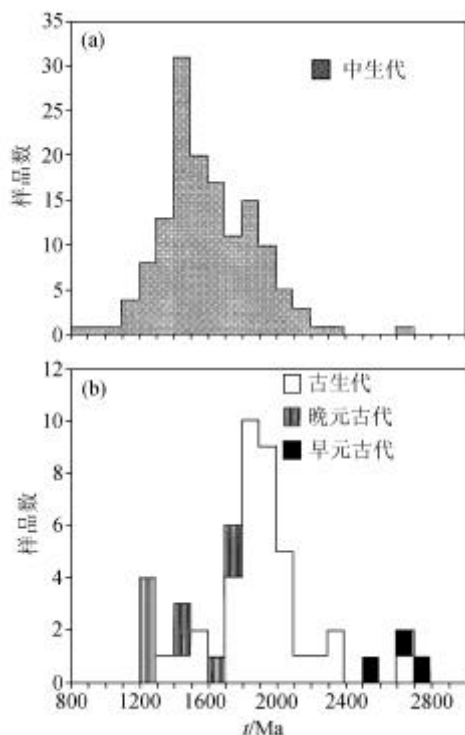


图 2 中国东南部花岗岩类 Nd 模式年龄频率直方图

中生代花岗岩体的 Nd 模式年龄变化大(2 281 ~ 784 Ma), 在频率直方图上, 它呈单一的正态分布, 与前中生代花岗岩体呈多峰分布区别明显(图 2). 中生代花岗岩体 Nd 模式年龄空间分布的一个最明显的特征是 $t_{DM} < 1\ 600$ Ma 的花岗岩体呈明显的带状分布(图 1). 除浙闽沿海的中生代花岗岩体因 t_{DM} 年龄较低(一般 $< 1\ 400$ Ma =, e_{Nd} 值较高(一般 > -6), I_{Sr} 值较低(一般 < 0.709), 反映受到地幔组分影响较明显外, 其余中生代花岗岩体可能也主要来源于所在区域内的基底变质岩.

如图 1 所示, $t_{DM} > 1\ 800$ Ma 的花岗岩体主要分布于浙西南-闽西北、武夷山两侧和万洋山-诸广山 3 个区域内. 前两个区域与八都群、麻源群等古老变质岩的出露范围基本一致, 但在万洋山-诸广山区域内, 古老变质岩可能由于巨厚古生代地层的覆盖而被深埋于地下. 汤湖和挂东等花岗岩体含有 2 471 ~ 2 400 Ma 继承锆石^[17]就足以证实这种推测是合理的. 这表明, 这些具有古老 Nd 模式年龄的花岗岩体是由先存古老地壳部分熔融形成的.

4.2 中国东南部的地壳形成事件

虽然地壳岩石的 Nd 模式年龄及其中继承锆石 U-Pb 年龄的频率分布可为查明大陆壳的形成时间提供重要的依据, 但确切的地壳形成事件通常只能借助于地幔来源基性、超基性岩石精细的年代学研究才能厘定. 由图 3 可知, 中国东南部花岗岩类的 Nd 模式年龄及各类地壳岩石中继承锆石的 U-Pb 年龄^[3,17~19]呈明显的多峰形式分布, 反映中国东南部大陆壳具幕式生长特征. 现结合已有的年代学数据, 对中国东南部的地壳形成事件讨论如下.

4.2.1 晚太古代形成事件

太古代是全球地壳的一个最重要的形成时期, 大约有半数以上的地壳是在这一时期形成的^[17]. 在华北地区, 太古代地壳的分布相当广泛^[17]. 但在中国东南部

区域, 虽然一些 Sm-Nd 全岩等时年龄显示有晚太古代地壳存在, 如建宁伊家湾斜长角闪岩为 $2\ 682 \pm 148$ Ma^[20], 浦城丘源斜长角闪岩为 $2\ 678 \pm 41$ Ma^[21], 但由于这些等时线的 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 值变化小(< 0.02), 年龄误差大, 因而可信度较低. 对建宁伊家湾斜长角闪岩中结晶锆石采用 SHRIMP 法测定的 U-Pb 年龄 $1\ 766 \pm 19$ Ma^[22]显著偏低更进一步证实, 使用这些等时年龄应非常慎重. 在华南地区有可信同位素年龄数据证实有晚太古代地壳存在的唯一地区是扬子板块核部的崆岭杂岩, 其中 TTG 片麻岩中锆石 U-Pb 年龄为 2 900 ~ 2 600 Ma, 斜长角闪岩的 Sm-Nd 全岩等时年龄为 $2\ 742 \pm 83$ Ma. 显然, 仅仅由崆岭杂岩作为蚀源区不可能在远离扬子板块核部的中国东南部广大地区内发现有那么多晚太古代 Nd 模式年龄和继承锆石 U-Pb 年龄数据. 那么, 除崆岭杂岩以外的晚太古代地壳在哪里?是至今未发现还是因为它们出露范围不大而早已被剥蚀掉?它们最初是和扬子板块相对应的一个独立的古板块(华夏板块)还是以一些微陆块形式存在于扬子板块以南的古华南海中?这是一个迄今尚未完全解决并值得进一步研究的十分重要的问题.

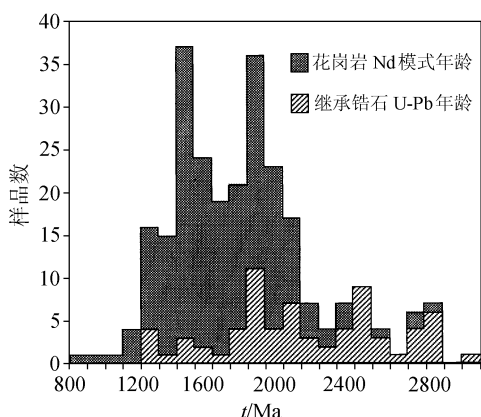


图 3 中国东南部花岗岩类 Nd 模式年龄及各类地壳岩石中继承锆石 U-Pb 年龄频率直方图
花岗岩类数据来源同图 1, 继承锆石 U-Pb 年龄数据引自文献[3, 8, 17 ~ 19]

4.2.2 早-中元古代地壳形成事件 早-中元古代 $1\ 900 \pm 200$ Ma 是研究区域内一次最重要的地壳形成事件, 区内广泛分布的八都群、麻源群与星子群正是这一地壳形成事件产物, 其主要依据如下。

(1) 如图 3 所示, 花岗岩类 Nd 模式年龄和地壳岩石中继承锆石 U-Pb 年龄在早-中元古代时期呈明显的峰值分布。

(2) 区内基性-超基性岩石可信的年龄数据介于 $1\ 900 \pm 200$ Ma 范围内: 如建宁伊家湾斜长角闪岩中结晶锆石 U-Pb 年龄 $1\ 766 \pm 19$ Ma^[22], 建阳麻沙斜长角闪岩与变粒岩的 Sm-Nd 全岩等时年龄 $2\ 116 \pm 22$ Ma, 龙泉朱黄变基性火山岩的 Sm-Nd 全岩等时年龄 $2\ 014 \pm 43$ Ma, 龙泉汤源斜长角闪岩中锆石 U-Pb 年龄 $1\ 831 \pm 0.7$ Ma, 庐山星子群斜长角闪岩中锆石 U-Pb 年龄 $1\ 869 \pm 40$ Ma 和怀宁洪镇斜长角闪岩 Sm-Nd 内部等时年龄 $1\ 895 \pm 72$ Ma 等。

(3) 侵入八都群或与之呈过渡关系的花岗岩体中锆石 U-Pb 年龄均介于 $2\ 000 \sim 1\ 800$ Ma 之间: 如渤海花岗闪长岩为 $1\ 871 \pm 30$ Ma, 坑下片麻状花岗岩为 $1\ 872 \pm 18$ Ma, 下际二长花岗岩为 $1\ 975 \pm 80$ Ma, 里庄二长花岗岩为 $1\ 870 \pm 36$ Ma, 田后花岗闪长岩为 $1\ 832 \pm 80$ Ma, 三枝树片麻状花岗岩为 $1\ 863 \pm 44$ Ma, 淡竹花岗闪长岩为 $1\ 837 \pm 67$ Ma, 泉坑二长花岗岩为 $1\ 889 \pm 95$ Ma^[18]。这些年龄数据清楚表明, 八都群是早元古代地壳形成事件产物。

(4) 一些变质岩的变质年龄也介于 $2\ 000 \sim 1\ 800$ Ma 之间: 如东海灵峰井正片麻岩的 Rb-Sr 全岩等时年龄为 $1\ 806$ Ma, 岱山大衢岛片岩的 Rb-Sb 全岩等时年龄为 $1\ 972$ Ma, 遂昌龙殿陈蔡群变质岩的 Rb-Sr 全岩等时年龄为 $1\ 813$ Ma。虽然对这些年龄数据的解释还不完全一致, 但它们的原岩形成于早元古代是很清楚的。

4.2.3 中元古代地壳形成事件 在图 3 中, 在 $1\ 400$ Ma 附近有一个明显的峰值。精细的年代学研究表明, $\sim 1\ 400$ Ma 的地壳在研究区内的分布还是比较广的, 如福建泰宁宝石变角斑岩锆石 U-Pb 年龄 $1\ 438 \pm 41$ Ma, 浙江龙泉斜长角闪岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 376 \pm 82$ Ma, 陈蔡群斜长角闪岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 279 \pm 57$ Ma, 龙泉群斜长角闪岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 347 \pm 39$ Ma, 浙西南斜长角闪岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 356 \pm 134$ Ma 等。

4.2.4 中-晚元古代地壳形成事件 虽然在图 3 中花岗岩类 Nd 模式年龄和继承锆石 U-Pb 年龄在中-晚元古代时期($1\ 000 \pm 100$ Ma)并没有形成峰值分布, 但在研究区内, 这一时期地壳形成事件还是比较明显的, 且主要分布于扬子板块东南缘: 如绍兴西裘细碧角斑岩 Sm-Nd 内部等时年龄 $1\ 012 \pm 28$ Ma, 开化松木坞群细碧岩锆石 U-Pb 年龄 950 ± 25 Ma, 伏川蛇绿岩 Sm-Nd 内部等时年龄 $1\ 204 \pm 30$ Ma, 樟树墩蛇绿岩 Sm-Nd 内部等时年龄 $1\ 034 \pm 24$ Ma, 宜丰组细碧角斑岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 036 \pm 27$ Ma, 德兴铁罗山组基性火山岩 Sm-Nd 全岩等时年龄 $1\ 113 \pm 53$ Ma, 建瓯马面山群变石英角斑岩中锆石 U-Pb 年龄 $1\ 100 \pm 19$ Ma 等。

4.3 中生代花岗岩体的低 t_{DM} 带及其构造意义

Gilder 等人(1996)发现, 华南地区中生代花岗岩体存在一个富 Sm 和 Nd, e_{Nd} 值较高, I_{Sr} 值高而变化, 呈 NE 向分布的低 t_{DM} 带(十-杭带), 它在空间上与两个主要的中生代盆地一致。Chen 和 Jahn (1997)考虑到万洋山-诸广山地区花岗岩体的 t_{DM} 年龄均大于 $1\ 700$ Ma, 将 Gilder 等人提出的十-杭带肢解成两个带: N1 带从赣南的上犹、陡水岩体至赣东北的德兴、灵山岩体, S2 带从湖南的千里山岩体至广西中部的昆仑关岩体, 并同时提出存在另一个 NE 向带(S3 带), 它从赣南的岩背、关西岩体向南西延伸至广西东南部的清湖岩体。

本文在前人研究和补充测定的 50 多个中生代花岗岩体(包括少量酸性火山岩)Sm-Nd 同位素组成基础上,认为中国东南部中生代花岗岩体存在 3 个低 t_{DM} 带。

(1) I 带始于江西相山,经东乡、德兴至浙江建德、桐庐,空间上,它与赣杭构造带完全一致(图 1)。赣杭构造带是一个从晋宁期以来长期活动的构造带,它的东段(江绍段)是华夏板块与扬子板块的拼贴带。沿这一拼贴带分布的晋宁期花岗岩体具有低的 t_{DM} 年龄(1 184 ~ 1 169 Ma),高的 e_{Nd} (> 4.0)和低的 I_{Sr} 值(< 0.704)^[15]。自晚侏罗世,特别是早白垩世末以来,赣杭构造带再次发生拉张,形成红盆断陷带。见有少量碱性花岗岩体(横峰港边石英正长岩),但没有双峰式火山岩。在这一带内除大茅山岩体外,其余中生代花岗岩体(包括酸性火山岩)的 t_{DM} 年龄低于 1 700 Ma, e_{Nd} 值 > -8 , I_{Sr} 值低于 0.710。

(2) II 带位于闽南(永定、上杭、武平)-赣南(寻乌、安远、龙南、定南)-粤北(南雄、始兴)地区,并有可能向西经湘南延伸至广西东北部的钟山、贺县地区(这些地区中生代花岗岩的 t_{DM} 年龄为 1 491 ~ 1 168 Ma^[10, 23])。它在空间上呈近东西向分布,与南岭纬向构造带一致。在这一东西向带内,有双峰式火山岩(如赣南的龙南、寻乌地区与闽南的永定地区),晶洞(碱性)花岗岩(如赣南地区的关西、陂头、黄埠、塔背与大峰脑岩体,闽南永定地区王寿山与大山里岩体)以及粤北地区(翁源、南雄、始兴等地)的基性岩脉带。根据碱性花岗岩和双峰式火山岩的形成时代推测,本区自中侏罗世开始已处于拉张构造环境。在这一带内,中生代花岗岩体的 t_{DM} 年龄低于 1 600 Ma, e_{Nd} 值大于 -8 , I_{Sr} 值低于(0.706~0.731)。

(3) III 带位于闽、浙沿海地区。在这一带内有大量晚中生代钙碱性和碱性花岗岩体(如福建乌山、金刚山、新村、魁歧与太姥山等岩体和浙江的平水宫、青田与桃花岛等岩体)和双峰式火山岩(如福建的永泰、德化与闽清盆地,浙江的山门、新昌、天台与勤县盆地等),反映本区自早白垩世末以来处于拉张构造环境,它很可能同太平洋板块向亚洲大陆俯冲引起的弧后拉张有关。在这一带内,中生代花岗岩体(包括酸性火山岩)的 t_{DM} 年龄小于 1 600 Ma, e_{Nd} 值大于 -6 , I_{Sr} 值小于 0.709。

具有低 t_{DM} 年龄的中生代花岗岩体除极大部分分布于上述 3 个带内外,还有一些呈零星分布,如江西浒坑(1 477 Ma)与海螺岭(1 500 Ma)等岩体,浙江的社后(1 421 Ma)^[16]与洪公(1 525 Ma)^[9]等岩体,福建的分水关(1 534 Ma)、光泽(1 291 Ma)与小陶(1 473 Ma)^[24]等岩体。此外,一些古生代花岗岩也具有低的 t_{DM} 年龄,如江西的上犹(1 487 Ma)、陡水(1 508 Ma)^[7]与浙江墩头岩体(1 315 Ma)^[16]。

原则上,低 t_{DM} 花岗岩体可能主要通过两种方式形成:一是由地壳中存留时间短暂的年轻地壳经部分熔融形成,另一是在花岗岩体形成过程中发生了壳-幔混合作用。前一种方式特别适合于解释 I 带的花岗岩体,因为在赣杭构造带内分布的基底变质岩如双溪坞群和双桥山群都是在中-晚元古代时期形成的岛弧火山-沉积岩系,含有较多的地幔组分,且在地壳中存留时间短暂,其 t_{DM} 年龄为 1 699 ~ 1 100 Ma。同时,碱性花岗岩零星分布,双峰式火山岩未见,表明拉张程度没有 II、III 带明显,从而不利于地幔岩浆作用的发生。第二种方式特别适合于 III 带,这不仅因为该带直接位于亚洲大陆边缘,受太平洋板块俯冲影响强烈,而且在许多花岗岩体(如漳洲、福州、平潭岛、青田、普陀与大衢山岛等)^[27]以及一些双峰式火山岩^[28]中,岩浆混合作用的岩石学与地球化学证据明显。因而,壳-幔混合作用可能是闽浙沿海中生代花岗岩体具有低 t_{DM} 的一个主要原因。II 带的情况介于 I 带与 III 带之间,可能更接近于 III 带。但因

在Ⅱ带中一些具低 t_{DM} 的花岗岩体却具有高的 I_{Sr} 值(为铜坑嶂岩体为 0.729, 帽子顶岩体为 0.731^[27], 足洞岩体为 0.719^[28]), 表明这些岩体的壳-幔混合作用发生在花岗岩形成之前, 使放射成因锶有一个相对积累的过程, 即花岗岩可能是由一个相对古老地壳组分和年轻地幔组分组成的混合源区形成的。

5 主要结论

(1) $t_{DM} > 1\ 800\text{ Ma}$ 的花岗岩体主要分布于浙西南-闽西北、武夷山两侧和万洋山-诸广山 3 个区域内, 并与这些区域内出露的古老变质岩的 Nd 模式年龄及继承锆石 U-Pb 年龄基本一致, 反映这些花岗岩体是由古老地壳物质部分熔融形成的。

(2) $t_{DM} < 1\ 600\text{ Ma}$ 的中生代花岗岩体主要分布于赣杭构造带、南岭纬向构造带和浙闽沿海 3 个带内。花岗岩 Nd 模式年龄的年轻化, 在赣杭构造带中可能主要归因于源区物质在地壳中存留时间短暂, 而在另两个带中, 则可能主要同花岗岩形成过程中或形成之前发生的壳幔混合作用有关。

(3) 基性、超基性岩石的年代学数据以及花岗岩类的 Nd 模式年龄与继承锆石 U-Pb 年龄的综合研究表明, 中国东南部地壳具幕式生长特征, 陆壳最初可能形成于晚太古-早元古代时期, 早-中元古代是本区地壳生长最重要时期, 至中、晚元古代, 地壳生长速度明显趋缓。

致谢 本文撰写过程中, 始终得到周新民教授的关心、帮助, 并审阅全文、提出宝贵修改意见, 作者在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 DePaolo D J. A neodymium and strontium isotopic study of the Mesozoic calc-alkaline granitic batholiths of the Sierra Nevada and Peninsular Ranges, California. *J Geophys Res*, 1981, 86: 10470 ~ 10488
- 2 Claesson S, Huhma H, Kinny PD, et al. Svecofennian detrital zircon ages—implications for the Precambrian evolution of the Baltic Shield. *Precamb Res*, 1993, 64: 109 ~ 130
- 3 甘晓春, 赵凤清, 金文山, 等. 华南火成岩中捕获锆石的早元古代-太古宙 U-Pb 年龄信息. *地球化学*, 1996, 25(2): 112 ~ 119
- 4 Bennett V C, DePaolo D J. Proterozoic crustal history of the western United States as determined by neodymium isotopic mapping. *Geol Soc Amer, Bull*, 1987, 99: 674 ~ 685
- 5 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
- 6 Holmden C, Dickin AP. Paleoproterozoic crustal history of the southwestern Grenville Province: evidence from Nd isotopic mapping. *Can J Earth Sci*, 1995, 32: 472 ~ 485
- 7 黄 莹, DePaolo D J. 华南古生代花岗岩 Nd-Sr 同位素研究及华南基底. *岩石学报*, 1989, 5(1): 28 ~ 36
- 8 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, (3): 45 ~ 57
- 9 陈江峰, 周泰禧, 李学明, 等. 中国东南地区中生代岩浆岩的 Sr, Nd 同位素组成及其大地构造意义. 见: 李继亮主编. *中国东南海陆岩石圈结构与演化研究*. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 119 ~ 130
- 10 Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China. *J Geophys Res*, 1996, 101: 16137 ~ 16154
- 11 Chen J F, Jahn B M. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 1998, 284: 101 ~ 133

- 12 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
- 13 王银喜, 杨杰东, 郭令智, 等. 浙江龙泉早元古代花岗岩的发现及基底时代的讨论. 地质论评, 1992, 38(6): 525 ~ 531
- 14 王一先, 赵振华, 包志伟, 等. 浙江花岗岩类地球化学与地壳演化—II. 元古宙花岗岩类. 地球化学, 1997, 26(6): 57 ~ 68
- 15 沈渭洲, 徐士进. 扬子板块周边晋宁期花岗岩类的同位素地球化学特征. 见: 郑永飞主编. 化学地球动力学, 北京: 科学出版社, 1999. 317 ~ 333
- 16 王一先, 赵振华, 包志伟, 等. 浙江花岗岩类地球化学与地壳演化——I. 显生宙花岗岩类. 地球化学, 1997, 26(5): 1 ~ 15
- 17 朱炳泉, 等. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 1998
- 18 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
- 19 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
- 20 付树超, 陈觉民, 林文生. 福建建宁西部上太古界天井坪组(Ar_2t)地质特征. 福建地质, 1991, 10(2): 103~112
- 21 付树超, 张开华. 福建浦城丘源地区晚太古代变质岩地质特征. 福建地质, 1994, 13(3): 193 ~ 200
- 22 Li X H. Timing of the Cathaysia Block formation: constraints from SHRIMP U-Pb zircon geochronology. Episodes, 1997, 20(3): 188 ~ 192
- 23 朱金初, 沈渭洲, 刘昌实, 等. 华南中生代同熔系列花岗岩类 Nd-Sr 同位素特征及成因讨论. 岩石矿物学杂志, 1990, 9(2): 97 ~ 105
- 24 凌洪飞, 沈渭洲, 黄小龙. 福建省花岗岩类的 Nd-Sr 同位素特征及其意义. 岩石学报, 1999, 15(2): 255~262
- 25 Dong Chuanwan, Li Wuxian, Chen Xiaoming, et al. Late mesozoic magma mixing in SE Fujian——Petrologic evidence from the Pingtan igneous complex. Progress in Natural Science, 1998, 8(2): 196 ~ 201
- 26 周金城, 张海进, 俞云文. 浙江新昌早白垩世复合岩流中的岩浆混合作用. 岩石学报, 1994, 10(3): 236 ~ 247
- 27 贺伯初, 刘昌实, 朱金初, 等. 武夷山西坡含锡花岗岩时代及物质来源探讨. 南京大学学报(地球科学), 1990, (1): 53 ~ 62
- 28 袁宗信, 张宗清. 南岭花岗岩类岩石 Sm, Nd 同位素特征及岩石成因探讨. 地质论评, 1992, 38(1): 1 ~ 15