

下扬子地区晚中生代C型埃达克岩研究进展与展望

——以长江中下游地区晚中生代为例

陈藤吉, 贾悦, 李明杰, 范艳芹

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年3月26日; 录用日期: 2026年5月11日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

中国东部下扬子地区晚侏罗世 - 早白垩世广泛发育大陆型C型埃达克岩, 岩石组合以花岗闪长岩、英云闪长岩、安山岩、英安岩为主, 属钙碱性系列。其地球化学表现为高硅、高铝、富钾、低镁、高Sr/Y与La/Yb比值、低Y及重稀土、弱负铷异常, Na_2O/K_2O 比值接近1, 同位素以富集型为特征, 与环太平洋O型埃达克岩差异显著。该类岩石为加厚大陆下地壳玄武质岩石高压部分熔融形成, 残留相以石榴石 + 角闪石为主, 形成于古太平洋板块俯冲远程效应、华北克拉通破坏与地壳加厚 - 岩石圈减薄的构造背景, 与Cu-Au等矿床密切耦合, 具重要构造指示与找矿意义。当前研究在判别标准、动力学过程与成矿机理上仍存争议, 未来需多方法定量约束深化认识。

关键词

C型埃达克岩, 地球化学特征, 加厚下地壳, 构造背景, 成矿意义, 中国东部

Research Progress and Outlook on Late Mesozoic C-Type Adakites in the Lower Yangtze Region

—A Case Study of the Late Mesozoic in the Middle-Lower Yangtze River Area

Tengji Chen, Yue Jia, Mingjie Li, Yanqin Fan

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: March 26, 2026; accepted: May 11, 2026; published: May 29, 2026

文章引用: 陈藤吉, 贾悦, 李明杰, 范艳芹. 下扬子地区晚中生代 C 型埃达克岩研究进展与展望[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(5): 782-791. DOI: 10.12677/ag.2026.165071

Abstract

Late Jurassic-Early Cretaceous in eastern China is widely distributed with continental-type C-type adakites, dominated by granodiorite, tonalite, andesite and dacite, belonging to the calc-alkaline series. Geochemically, they are characterized by high silica, high alumina, potassium enrichment, low magnesium, high Sr/Y and La/Yb ratios, low Y and heavy rare earth elements, weak negative Eu anomalies, and Na₂O/K₂O ratio close to 1, with enriched isotopic compositions, distinctly different from circum-Pacific O-type adakites. These rocks were generated by high-pressure partial melting of mafic rocks in the thickened continental lower crust, with garnet and amphibole as residual phases. They formed in a tectonic setting involving the remote effect of Paleo-Pacific plate subduction, North China Craton destruction, and crustal thickening–lithospheric thinning, and are closely associated with Cu-Au mineralization, providing significant implications for tectonic evolution and mineral exploration. Controversies remain in discrimination criteria, dynamic processes and metallogenic mechanisms, and future studies require multi-method quantitative constraints.

Keywords

C-Type Adakite, Geochemical Characteristics, Thickened Lower Crust, Tectonic Setting, Metallogenic Significance, Eastern China

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国东部晚侏罗世–早白垩世广泛发育一套具有埃达克岩地球化学属性的火山–侵入岩，与区域大规模成矿作用密切耦合。与环太平洋典型 O 型埃达克岩不同，中国东部下扬子地区埃达克岩普遍富钾、低镁、低 Cr-Ni，显示大陆地壳熔融特征，被划分为 C 型埃达克岩[1] [2]。

长期以来，中国东部下扬子地区埃达克岩的成因、源区性质及构造背景一直是研究热点，其形成机制不仅关系到中国东部高原演化、古太平洋板块俯冲效应，也直接制约 Cu-Au 等矿产的成矿预测[3]-[5]。本文以中国东部下扬子地区埃达克岩为研究对象，系统总结其岩石学、地球化学特征、成因类型、形成机制及构造意义，为区域构造演化与矿产勘查提供依据。

2. 中国东部埃达克岩的岩石学特征

中国东部下扬子地区晚中生代埃达克岩以侵入岩与火山岩共生为特征，岩石组合主体为花岗闪长岩、英云闪长岩、石英闪长岩等中酸性侵入岩，以及安山岩、英安岩等火山岩，整体属于钙碱性系列，未见典型玄武岩及玄武安山岩端元组分[2]。岩石呈浅灰–灰白色，块状构造，侵入岩多为中粗粒花岗结构、似斑状结构，火山岩以斑状结构、基质隐晶质结构为主，斑晶与基质组分分带清晰，保留较完整的岩浆结晶记录[2]。主要造岩矿物以斜长石、角闪石、黑云母为核心组合，斜长石呈自形–半自形板状，为更富钠的更长石–中长石，含量普遍较高，环带结构发育，未见明显钾长石巨晶，反映岩浆富钠贫钾的原始特征[6]。角闪石以浅绿色角闪石为主，呈柱状、针状产出，为高压环境下稳定的典型矿物，指示岩石形成于深部地壳的高压熔融条件；黑云母呈片状，多与角闪石共生，Mg[#]值较低，显示壳源为主的属性特征。副矿物主要为磷灰石、锆石、榍石及磁铁矿，未见橄榄石、紫苏辉石等典型幔源矿物，与洋壳俯冲成

因的 O 型埃达克岩存在显著矿物学差异[7] [8]。

与环太平洋岛弧典型埃达克岩相比,中国东部下扬子地区埃达克岩普遍缺乏单斜辉石及反应边结构,岩浆上升过程中与地幔楔相互作用较弱,矿物成分更接近大陆下地壳部分熔融产物[9] [10]。整体岩石学特征表明,中国东部下扬子地区埃达克岩为典型陆内构造背景下的产物,矿物组合与结构构造均指示其形成于加厚大陆下地壳环境,与俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩存在明显岩石学区别(图 1)。图 1 右侧所示晚中生代四种构造动力学模型中,正常俯冲模型难以解释下扬子弧后内陆环境与壳源富钾特征;低角度俯冲伴随板块后撤模型,可较好约束区域挤压加厚与伸展减薄的构造转换,匹配埃达克岩形成条件;平板俯冲叠加断裂陷落与板块后撤模型,能解释陆内强烈变形与岩浆时空分布;非同步俯冲板块后撤模型则体现俯冲过程的不均一性。综合对比,低角度俯冲与平板俯冲叠加后撤的动力学过程,更符合下扬子地区 C 型埃达克岩的成因与构造背景(图 1)。

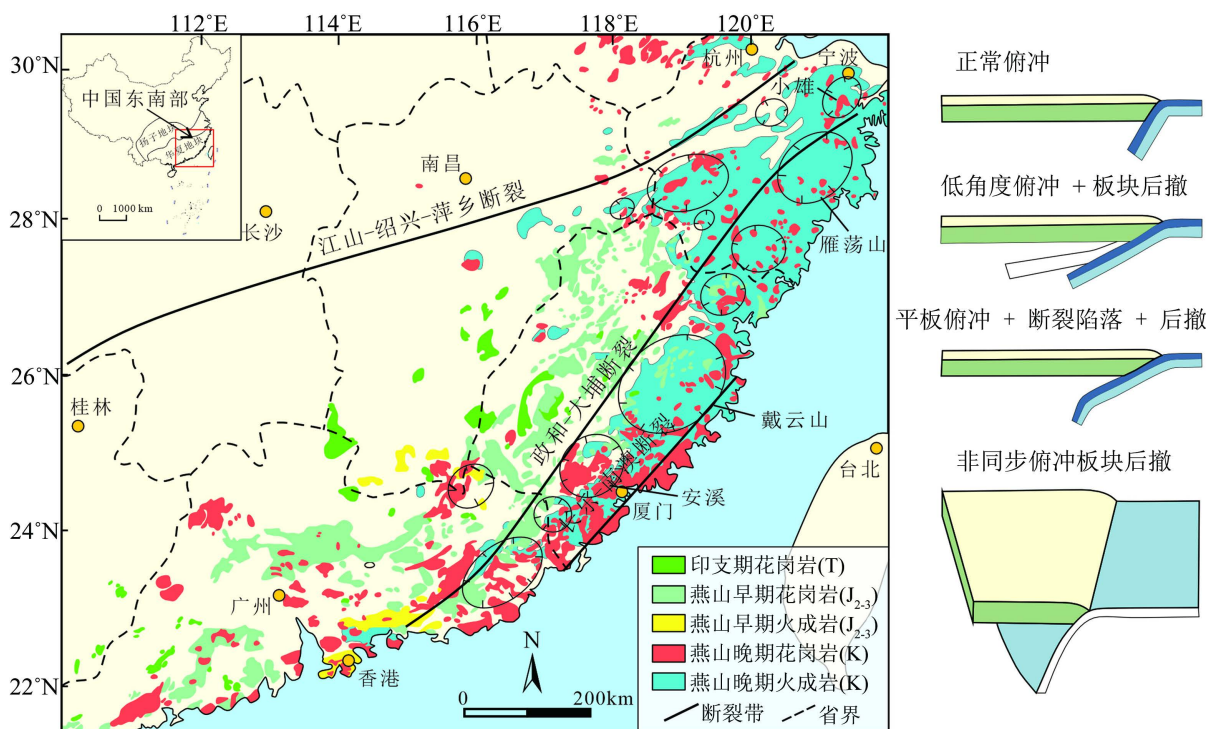


Figure 1. Distribution map of Mesozoic granites and volcanic rocks in southeast China and late Mesozoic geodynamic model
图 1. 中国东南部中生代花岗岩 - 火山岩分布简图与晚中生代地球动力学模型

3. 中国东部下扬子地区埃达克岩的地球化学特征

3.1. 全岩主量元素

中国东部下扬子地区晚中生代广泛发育的埃达克质岩石,以独特的地球化学组成区别于环太平洋典型大洋型(O型)埃达克岩,整体归属于大陆型(C型)埃达克岩,是揭示区域地壳增生、壳幔相互作用及构造动力学演化的关键载体[1] [2] [7]。主量元素组成上,中国东部下扬子地区埃达克岩普遍具有高硅、高铝、富钾、低镁的特征, SiO₂ 含量普遍大于 56%,多集中于 62%~68%,属于中酸性钙碱性岩石系列; Al₂O₃ 含量普遍高于 15%,显示显著高铝属性,反映源区部分熔融过程中斜长石未发生明显残留或分离结晶作用[11]-[13]。岩石整体属于高钾钙碱性系列, Na₂O 含量介于 4.0%~4.5%, K₂O 含量多在 3.6%~4.2%

之间, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值接近 1.0, 显著区别于环太平洋岛弧 O 型埃达克岩 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ 的特征, 明确指示其源区以大陆地壳物质为主[6] [9] [14]。MgO 含量普遍低于 3%, Mg# 值较低, Cr、Ni 等相容元素含量显著低于高镁埃达克岩, 表明岩浆上升过程中与地幔橄榄岩相互作用较弱, 未发生明显地幔物质混染, 仅局部地区如滁州、管店等地因下地壳拆沉与地幔反应出现相对高镁特征[7] [15]。

3.2. 全岩微量元素

微量元素方面, 中国东部下扬子地区埃达克岩呈现典型埃达克岩配分模式, Sr 含量普遍大于 400×10^{-6} , 多在 $520 \times 10^{-6} \sim 610 \times 10^{-6}$ 之间, 局部高镁样品可达 1000×10^{-6} 以上, 表现为强烈富集 Sr 的特征; Y 含量小于 18×10^{-6} , Yb 含量低于 1.9×10^{-6} , 重稀土元素显著亏损, 符合源区存在石榴石残留的地球化学指示[1] [11] [13]。岩石 Sr/Y 比值多介于 33~69 之间, La/Yb 比值大于 20, 显著高于正常岛弧钙碱性岩石, 进一步约束其形成于高压熔融环境, 残留相以石榴石和角闪石为主[6] [15]。

稀土元素总量中等, 轻稀土明显富集, 重稀土强烈亏损, 稀土配分曲线呈右倾型, 无明显负铈异常或仅表现为弱负铈异常, Eu/Eu* 值多介于 0.85~0.93 之间, 表明斜长石在源区部分熔融过程中不稳定, 并未构成主要残留相[13] [15] (图 2)。

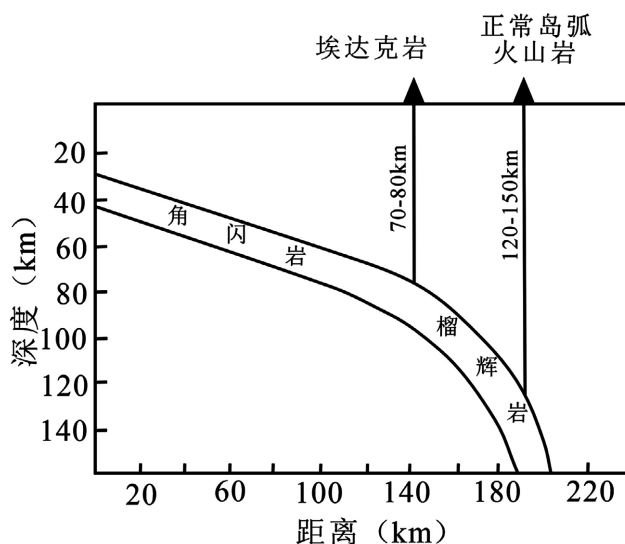


Figure 2. The schematic diagram for adakitic magma
图 2. 埃达克岩岩浆形成示意图

3.3. 同位素特征

同位素地球化学特征为大陆下地壳成因提供了直接约束, 中国东部下扬子地区埃达克岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值多高于 0.705, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值以负值为主, 富集放射性成因锶与钕, 与俯冲洋壳熔融形成的 O 型埃达克岩亏损同位素特征存在显著差异[1] [2] [9]。

锆石 Hf 同位素数据显示, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值多为负值, 二阶段模式年龄古老, 指示岩浆起源于古老大陆下地壳的部分熔融, 下扬子冶山、华北北缘沙峪口等典型岩体均获得一致认识[7] [15] [16]。

综合主量、微量及同位素地球化学特征可见, 中国东部下扬子地区埃达克岩为加厚大陆下地壳玄武质岩石在高压条件下部分熔融的产物, 形成过程受陆内构造环境控制, 与古太平洋板块俯冲引发的地壳加厚、岩石圈减薄及深部热扰动存在密切动力学联系, 同时与斑岩型 Cu-Au 矿床具有密切时空及成因联系, 具有重要的构造指示与找矿意义(表 1) [6] [13] [14]。

Table 1. Geochemical parameters of C-type adakites in Eastern China**表 1.** 中国东部下扬子地区 C 型埃达克岩地球化学参数表

样品类型	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Na ₂ O/K ₂ O	MgO	Sr	Y	Yb	Sr/Y	La/Yb	Eu/Eu*	数据来源
花岗闪长岩	64.32	15.87	4.21	3.85	1.09	2.15	586	14.3	1.52	41	26.8	0.89	[3]
英云闪长岩	66.15	15.62	4.08	3.69	1.11	1.86	612	13.7	1.47	44.7	28.3	0.91	[2]
石英闪长岩	62.87	16.13	4.35	3.92	1.11	2.43	543	15.1	1.59	36	24.1	0.87	[6]
安山岩	61.54	16.38	4.42	4.01	1.1	2.67	521	15.8	1.65	33	22.7	0.86	[7]
英安岩	65.71	15.75	4.16	3.78	1.1	1.94	597	14	1.5	42.6	27.4	0.9	[6]
全岩	61.54	15.62	4.08	3.69	1.09	1.86	521	13.7	1.47	33	22.7	0.86	
统计范围	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	~	
平均值	66.15	16.38	4.42	4.01	1.11	2.67	612	15.8	1.65	44.7	28.3	0.91	
±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	
标准差	1.76	0.30	0.14	0.13	0.01	0.32	37	0.8	0.07	4.7	2.3	0.02	
埃达克岩 判别标准	≥56	≥15	-	-	≈1	<3	>400	≤18	≤1.9	>20~40	>10	弱负 异常	[11]

注: $Eu/Eu^* = Eu_n / (Sm_n \times Gd_n)^{1/2}$, 采用球粒陨石标准化; 主量元素单位为 wt%, 微量元素单位为 $\times 10^{-6}$ 。

4. 中国东部下扬子地区埃达克岩的成因类型

中国东部下扬子地区晚中生代埃达克岩在成因类型上整体属于大陆型 C 型埃达克岩, 与洋壳俯冲熔融形成的 O 型埃达克岩具有明显区别, 其形成与大陆地壳加厚、壳幔相互作用及区域深部动力学过程密切相关[1] [2] [7] [12]。大量地球化学与同位素证据显示, 该区埃达克岩并非直接来自俯冲洋壳熔融, 而是加厚大陆下地壳玄武质岩石高压部分熔融的产物, 源岩包括前寒武纪变质基性岩及中生代玄武岩浆底侵形成的下地壳岩石, 这一认识在燕辽、长江中下游、郟庐断裂带等地区均得到广泛验证[6] [9] [15]。

晚中生代古太平洋板块持续俯冲引发区域地壳显著加厚, 下地壳进入高压环境, 加之软流圈上涌提供热源, 促使玄武质源岩发生部分熔融, 熔融残留相以石榴石和角闪石为主, 从而形成高 Sr/Y、低 Y 和重稀土亏损的典型地球化学特征[3] [11] [13] [14]。中国东部下扬子地区埃达克岩普遍富钾、 $Na_2O/K_2O \approx 1$ 、Mg# 与相容元素偏低, 同位素组成以富集型为主, 进一步支持加厚下地壳成因[2] [15] [17]。部分地区发育高镁埃达克质岩, 指示岩浆在上升过程中与地幔楔发生物质交换, 与下地壳拆沉及壳幔反应有关[15] [18]。此外, 底侵玄武岩提供的热量与流体促进了岩浆形成, 并提升氧逸度, 为 Cu-Au 成矿创造了条件[4] [19] [20]。

总体而言, 中国东部下扬子地区埃达克岩以 C 型埃达克岩为主体, 可分为典型加厚下地壳熔融型与拆沉 - 壳幔作用型两个亚类, 记录了华北克拉通破坏与岩石圈减薄的动力学背景, 具有重要的构造与成矿指示意义(图 3) [6] [14] [21]。

4.1. 源区性质

中国东部下扬子地区晚中生代埃达克岩的源区以加厚大陆下地壳玄武质岩石为主体, 并非年轻俯冲洋壳部分熔融产物, 这一认识已被大量岩石学、地球化学与同位素数据所证实[1] [2] [7] [12]。其源岩主要包括前寒武纪变质玄武岩、辉长岩以及中生代幔源玄武岩浆底侵形成的基性岩, 具有明显的陆壳属性[9] [14] [15]。Sr-Nd-Hf 同位素组成以富集特征为主, $^{87}Sr/^{86}Sr > 0.705$ 、 $\epsilon_{Nd}(t)$ 与 $\epsilon_{Hf}(t)$ 多为负值, 古老二阶段模式年龄进一步指示岩浆起源于古老大陆下地壳[13] [15] [16]。岩石低 Y、低重稀土、高 Sr/Y 及弱负 Eu 异常特征表明, 源区熔融残留相为石榴石与角闪石, 斜长石不稳定, 形成于大于 1.5 GPa 的高压环境[3] [4] [11]。局部高镁样品显示源区存在少量地幔物质混染, 与下地壳拆沉及壳幔相互作用有关[6] [19]。

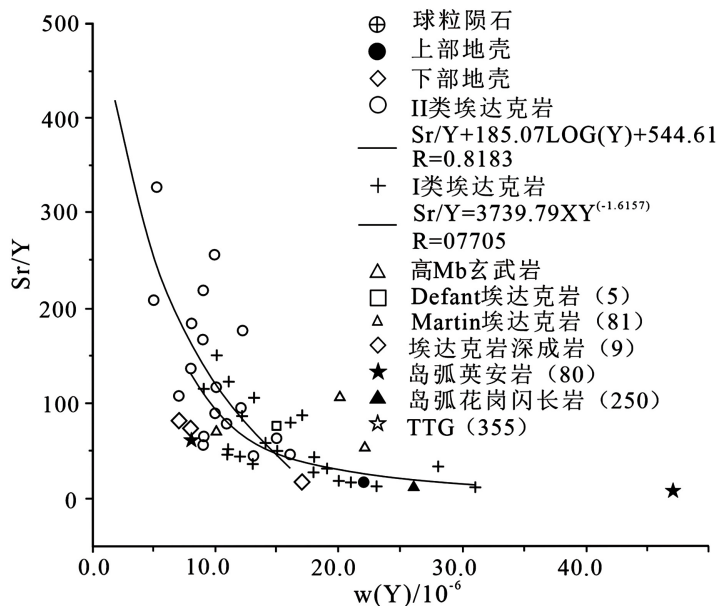


Figure 3. Characteristics of adakites in Sr/Y-w(Y) scatter diagram

图3. 埃达克岩在 Sr/Y-w(Y) 散点图上的分布情况

4.2. 形成机制

中国东部下扬子地区晚中生代埃达克岩的形成受控于加厚大陆下地壳高压部分熔融机制，是区域构造挤压、地壳增厚与深部热扰动共同作用的产物[3] [12] [22]。实验岩石学定量研究表明，玄武质源岩在压力 ≥ 1.5 GPa (对应地壳深度 > 50 km)、温度 $850^{\circ}\text{C}\sim 1050^{\circ}\text{C}$ 、熔体含水量 $\geq 5\%$ 的条件下部分熔融，残留相以石榴石 + 角闪石为主，可形成典型埃达克质熔体。下扬子地区埃达克岩的主微量元素组成与上述实验结果高度吻合，其形成温压条件约为 $1.6\sim 2.0$ GPa、 $900^{\circ}\text{C}\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，源区熔融程度约 $10\%\sim 20\%$ ，初始熔体含水量约 $6\%\sim 8\%$ 。晚中生代古太平洋板块向欧亚大陆俯冲产生远程挤压效应，导致区域地壳显著加厚，下地壳进入榴辉岩相或高压麻粒岩相条件[13] [14]。同时，岩石圈减薄与软流圈上涌提供充足热源，促使玄武质下地壳在高温条件下发生部分熔融[1] [7]。部分地区因下地壳拆沉，埃达克质熔体与地幔楔橄榄岩发生反应，形成高镁埃达克岩[15] [18]。

此外，幔源玄武岩浆底侵与流体加入进一步促进熔融并提升氧逸度，最终形成兼具壳源属性与成矿潜力的 C 型埃达克岩[4] [19] [23]。

4.3. 与 O 型埃达克岩的根本区别

中国东部下扬子地区 C 型埃达克岩与环太平洋俯冲带 O 型埃达克岩在物质来源、地球化学组成、形成条件及构造背景上存在本质差异。O 型埃达克岩由年龄小于 25 Ma 的年轻热洋壳俯冲熔融形成[1] [10] [12]，而中国东部下扬子地区埃达克岩起源于加厚大陆下地壳玄武质岩石的部分熔融，二者源区性质截然不同[1] [11] [14]。地球化学方面，O 型埃达克岩富钠贫钾， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值普遍大于 2， $\text{Mg}^{\#}$ 、Cr、Ni 含量较高，同位素组成偏亏损；中国东部下扬子地区 C 型埃达克岩相对富钾， $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值接近 1，相容元素含量偏低，Sr-Nd-Hf 同位素以富集特征为主，指示明显陆壳属性[2] [7] [15]。构造背景上，O 型埃达克岩形成于洋内俯冲或活动大陆边缘环境，而中国东部下扬子地区 C 型埃达克岩产于陆内加厚地壳背景，与古太平洋板块俯冲远程效应及华北克拉通破坏相关[3] [9] [13]。上述差异明确表明，中国东部下扬子地区埃达克岩不属于典型洋壳熔融产物，而是大陆构造动力学过程的重要岩石记录(表 2) [7] [24] [25]。

Table 2. Comparison between O-type adakite and C-type adakite in Eastern China
表 2. O 型埃达克岩与中国东部 C 型埃达克岩对比

项目	O 型埃达克岩	中国东部 C 型埃达克岩
Na ₂ O/K ₂ O	>2	≈1
K ₂ O	低	高
Mg、Cr、Ni	较高	低
源区	俯冲洋壳	加厚下地壳
构造	俯冲带	陆内加厚地壳

5. 中国东部下扬子地区埃达克岩形成的构造背景

中国东部下扬子地区晚中生代埃达克岩的形成,受控于古太平洋板块俯冲、华北克拉通破坏与大陆地壳加厚-减薄联动的区域构造动力学背景,是晚侏罗世-早白垩世区域构造-岩浆事件的典型岩石学响应[3] [5] [14]。晚中生代时期,古太平洋板块以较高角度向欧亚大陆俯冲,产生强烈的远程挤压效应,造成华北克拉通东部地壳显著加厚,局部地壳厚度超过 50 km,下地壳进入高压麻粒岩相至榴辉岩相转变带,为埃达克质岩浆的形成提供了关键压力条件[7] [9] [13]。伴随俯冲过程,洋壳持续脱水并诱发地幔楔对流与软流圈上涌,大量幔源热源与流体输入至加厚下地壳底部,促使玄武质下地壳发生高压部分熔融,最终形成具有 C 型地球化学属性的埃达克质岩浆[1] [4] [12]。早白垩世区域构造体制由挤压逐步向伸展转换,岩石圈大规模减薄、地壳拆沉与壳幔作用显著增强,部分埃达克质熔体在上升过程中与地幔橄榄岩发生反应,形成少量高镁埃达克岩,记录了由挤压加厚向伸展减薄过渡的动力学信息[15] [21]。

地球动力学模拟结果表明,当古太平洋板块以较高角度(约 30°~50°)俯冲、速率为 5~10 cm/yr 时,板块脱水诱发地幔楔角流与软流圈上涌,导致弧后区域地壳挤压增厚(>50 km),同时板片回卷(slab rollback)可使内陆应力场由挤压转为张性,软流圈热物质上涌使地温梯度升高至约 20°C~30°C/km,为下地壳部分熔融提供热源。

整体而言,中国东部下扬子地区埃达克岩形成于活动大陆边缘后方陆内构造环境,既受板块俯冲远程控制,又与华北克拉通破坏、地壳增生及深部热扰动密切耦合,是揭示中国东部下扬子地区晚中生代构造转换与岩石圈演化的重要标志。下扬子地区位于弧后陆内环境,晚侏罗世地壳厚度超过 50 km,地壳应力以水平挤压为主;早白垩世构造体制转换为伸展,岩石圈大规模减薄,记录了从挤压加厚向伸展减薄的完整演化过程[6] [19] [21]。

6. 成矿意义

中国东部下扬子地区晚中生代 C 型埃达克岩与区域斑岩型、矽卡岩型及浅成低温热液型 Cu-Au-Mo 矿床存在紧密的时空、成因联系,具备显著的成矿专属性与重要的找矿指示意义[4] [6] [19]。埃达克质岩浆源于加厚下地壳高压熔融,具有高氧逸度($\Delta FMQ > +2$)、富水(初始含水量 6%~8%)、富硫等特征。可高效萃取源区与地幔中的 Cu、Au、Mo 等成矿金属元素,为成矿作用提供了关键的物质与流体条件[13] [14] [26]。角闪石脱水分解所释放的大量富挥发分流体,能够显著降低岩浆固相线温度并促进金属元素迁移富集,是驱动成矿流体循环与矿质沉淀的核心动力[12] [15] [23]。与 O 型埃达克岩相比,中国东部下扬子地区 C 型埃达克岩虽以壳源为主,但部分岩体受幔源物质混染与玄武岩浆底侵影响,氧逸度进一步提升,使亲铜、亲金元素以硫酸盐形式稳定进入熔体,在构造扩容带与有利岩性接触部位快速沉淀成矿[3] [7] [15]。在岩浆演化过程中,高氧逸度使硫主要以硫酸盐(SO₄²⁻)形式存在,从而抑制硫化物达到饱和,阻止

Cu、Au 等亲铜元素过早进入硫化物相而亏损。实验测定的 Cu 在硅酸盐熔体与硫化物之间的分配系数可达 500~1000，一旦硫化物饱和，熔体中 Cu 含量将急剧下降。埃达克质岩浆因高氧逸度而延迟硫化物饱和，使 Cu、Au 在熔体中持续富集，直至岩浆上升到浅部发生流体出溶，硫化物快速沉淀形成富铜金矿石。长江中下游、燕辽、胶东等重要成矿带内，大量大型 - 超大型 Cu-Au 矿床均与埃达克质岩浆活动密切伴生，证实埃达克岩是区域找矿的关键岩石学标志[9] [21] [27] [28]。

7. 存在问题与研究趋势

中国东部下扬子地区发育典型 C 型埃达克岩，以高钾、高 Sr/Y、弱负 Eu 异常为特征，岩浆起源于加厚大陆下地壳玄武质岩石的高压部分熔融，残留矿物为石榴石与角闪石，形成于晚中生代地壳加厚 - 岩石圈减薄的构造背景，受古太平洋板块俯冲远程控制，中国东部下扬子地区埃达克岩与 Cu-Au 成矿关系密切，具有重要的构造指示与找矿意义[29]-[32]。

当前中国东部下扬子地区埃达克岩研究虽已取得丰硕成果，但在成因机制、构造约束、分类标准及成矿规律等方面仍存在诸多争议与薄弱环节。埃达克岩的识别仍以地球化学指标为主，缺乏统一的岩石学与矿物学鉴定标准，实际应用中易与 TTG 岩石、高钾钙碱性岩类混淆，判别体系有待进一步完善[6] [7] [9]。中国东部下扬子地区埃达克岩形成的温压条件、熔融程度与源区组分定量约束不足，加厚地壳的空间范围、形成时限及拆沉动力学过程仍需更多年代学与实验岩石学证据支撑[3] [13] [14]。古太平洋板块俯冲与中国东部下扬子地区埃达克岩成因的内在联系尚未明确，板块俯冲角度、速率及远程效应的时空差异仍缺乏精准限定[21]-[33]。此外，成矿与非成矿埃达克岩的地球化学差异、氧逸度演化特征及流体活动机制尚不清晰，成矿专属性微观机理有待深入揭示[4] [15] [19]。

未来研究趋势应以多方法约束与量化分析为核心，结合锆石 U-Pb 定年、Hf-O 同位素、矿物微区成分及热力学模拟，精准示踪源区性质与岩浆演化过程；建立地球化学、岩石学与构造背景相结合的综合判别体系，深化 C 型埃达克岩成因分类与动力学模式[6] [10] [15]。同时，加强区域对比研究，揭示埃达克岩与华北克拉通破坏、岩石圈减薄及构造转换的内在耦合关系，并围绕成矿关键要素开展系统对比，为中国东部下扬子地区 Cu-Au 等矿产深部找矿提供理论支撑[26] [33] [34]。

8. 争议与讨论

关于中国东部下扬子地区晚中生代 C 型埃达克岩的成因机制，学术界长期存在“加厚下地壳高压部分熔融模型”与“拆沉下地壳熔融 - 壳幔相互作用模型”之争[18] [20] [35] [36]。前者认为，古太平洋板块俯冲的远程挤压效应导致区域地壳显著加厚(>50 km)，玄武质下地壳在高压(>1.5 GPa)条件下发生部分熔融，残留相以石榴石 + 角闪石为主，形成典型的高 Sr/Y、低 Y、低 HREE 且无显著负 Eu 异常的埃达克质岩浆[3] [13]；后者则强调，加厚的镁铁质下地壳或岩石圈地幔因密度反转发生拆沉，沉入软流圈后发生熔融，产生的熔体在上升过程中与地幔橄榄岩反应，形成局部高 Mg[#]、高 Cr-Ni 的高镁埃达克岩[16] [17]。对于下扬子地区主体 C 型埃达克岩而言，大量地球化学与同位素证据更支持加厚下地壳熔融模型[2] [7]。岩石普遍具有富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr > 0.705, ε_{Nd}(t) 多为显著负值)，MgO 含量低于 3%，Mg[#] 值较低，且 Cr、Ni 等相容元素含量远低于高镁埃达克岩，这些特征均与拆沉熔体 - 地幔反应模型预测的高镁、高相容元素特征不符[6] [20]。此外，区域地质压力计估算表明，晚侏罗世下扬子地区地壳厚度普遍超过 45~50 km，为高压部分熔融提供了物理前提[3] [13]。然而，拆沉 - 壳幔模型在解释局部高镁埃达克质岩(如滁州、管店)时具有不可替代的优势，这类岩石的出现很可能指示了加厚地壳演化至伸展减薄阶段的局部拆沉事件[16] [17]。值得注意的是，两种模型并非完全对立，而是可能反映了一个连续的动力学过程：早期挤压加厚导致下地壳高压熔融，形成主体低镁 C 型埃达克岩；晚期构造体制转换为

伸展, 局部加厚下地壳发生拆沉并引发壳幔相互作用, 形成少量高镁埃达克岩[5] [18]。后续研究可采用高分辨率深地震反射成像技术、Re-Os 同位素示踪及高温高压实验模拟, 对下地壳熔融的温压条件、拆沉发生的时限与规模进行定量约束, 以建立更完善的成因演化框架。

9. 结论

中国东部下扬子地区晚中生代广泛产出大陆型 C 型埃达克岩, 岩石组合以花岗闪长岩、英云闪长岩、安山岩、英安岩为主, 具有高 SiO₂、高 Al₂O₃、高 Sr、低 Y 与重稀土、高 Sr/Y 和 La/Yb 比值、弱负 Eu 异常、Na₂O/K₂O ≈ 1 的典型地球化学特征, 完全符合埃达克岩判别标准, 区别于环太平洋 O 型埃达克岩。

该类埃达克岩形成于古太平洋板块俯冲背景下的加厚大陆下地壳高压部分熔融, 残留相以石榴石与角闪石为主, 记录了晚中生代地壳加厚 - 岩石圈减薄与华北克拉通破坏的动力学过程, 与斑岩型 Cu-Au 矿床存在密切成因联系, 具有重要的构造指示与找矿意义。

参考文献

- [1] Defant, M.J. and Drummond, M.S. (1990) Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, **347**, 662-665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- [2] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩(Adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 251-256.
- [3] 张旗, 钱青, 王二七, 等. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 2001, 36(2): 248-255.
- [4] 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 275-292.
- [5] 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 41-48.
- [6] 罗照华, 柯珊, 谌宏伟. 埃达克岩的特征, 成因及构造意义[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 436-440.
- [7] 朱弟成, 段丽萍, 廖忠礼, 等. 两类埃达克岩(Adakite)的判别[J]. 矿物岩石, 2002, 22(3): 5-9.
- [8] 朱弟成, 潘桂棠, 段丽萍, 等. 埃达克岩研究的几个问题[J]. 西北地质, 2003, 36(2): 13-19.
- [9] 董申保, 田伟. 埃达克岩的原义, 特征与成因[J]. 地学前缘, 2004, 11(4): 585-594.
- [10] Drummond, M.S. and Defant, M.J. (1990) A Model for Trondhjemite-Tonalite-Dacite Genesis and Crustal Growth via Slab Melting: Archean to Modern Comparisons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **95**, 21503-21521. <https://doi.org/10.1029/jb095ib13p21503>
- [11] Atherton, M.P. and Petford, N. (1993) Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, **362**, 144-146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- [12] Peacock, S.M., Rushmer, T. and Thompson, A.B. (1994) Partial Melting of Subducting Oceanic Crust. *Earth and Planetary Science Letters*, **121**, 227-244. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(94\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0012-821x(94)90042-6)
- [13] Martin, H. (1999) Adakitic Magmas: Modern Analogues of Archaean Granitoids. *Lithos*, **46**, 411-429. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00076-0](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00076-0)
- [14] Kushiro, I. (1990) Partial Melting of Mantle Wedge and Evolution of Island Arc Crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **95**, 15929-15939. <https://doi.org/10.1029/jb095ib10p15929>
- [15] Arculus, R.J. (1994) Aspects of Magma Genesis in Arcs. *Lithos*, **33**, 189-208. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(94\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0024-4937(94)90060-4)
- [16] Kelemen, P.B. (1995) Genesis of High Mg# Andesites and the Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **120**, 1-19. <https://doi.org/10.1007/bf00311004>
- [17] Rapp, P.R. (2002) Experimental Constraints on the Origin of Potassium-Rich Adakites in Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, **18**, 293-302.
- [18] 高山, 金振民. 拆沉作用(Delamination)及其壳-幔演化动力学意义[J]. 地质科技情报, 1997, 16(1): 1-9.
- [19] Petford, N. and Atherton, M. (1996) Na-Rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: The Cordillera Blanca Batholith, Peru. *Journal of Petrology*, **37**, 1491-1521. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.6.1491>
- [20] 张旗, 许继峰, 王焰, 等. 埃达克岩的多样性[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 959-965.

- [21] Deng, W. 青藏高原北部新生代板内火山岩[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [22] Kay, R.W. (1978) Aleutian Magnesian Andesites: Melts from Subducted Pacific Ocean Crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **4**, 117-132. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(78\)90032-x](https://doi.org/10.1016/0377-0273(78)90032-x)
- [23] 谢应雯, 张玉泉. 云南洱海东部新生代岩浆岩岩石化学[J]. 岩石学报, 1995, 11(4): 423-433.
- [24] 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 2002, 21(7): 431-435.
- [25] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(2): 101-108.
- [26] 邓万明, 黄莹, 钟大赉. 滇西新生代富碱斑岩的岩石特征与成因[J]. 地质科学, 1998, 33(4): 412-425.
- [27] 张旗, 王元龙, 张福勤, 等. 埃达克岩与斑岩铜矿[J]. 华南地质与矿产, 2002(3): 85-90.
- [28] 张旗, 秦克章, 王元龙, 等. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu, Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 195-204.
- [29] 刘红涛, 张旗, 刘建明, 等. 埃达克岩与 Cu-Au 成矿作用: 有待深入研究的岩浆成矿关系[J]. 岩石学报, 2004, 20(2): 205-218.
- [30] 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? [J]. 矿床地质, 2001(4): 355-366.
- [31] 张静. 埃达克岩及其成矿作用和相关问题的讨论[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 365-371.
- [32] 武占祖, 陈勇, 梁旭辉. 埃达克岩的研究现状及其趋势[J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(3): 204-208.
- [33] 高建国, 夏既胜, 陈昌勇. 滇西富碱斑岩地球化学特征与金(多金属)矿成矿分析[J]. 大地构造与成矿学, 2000(S1): 44-51.
- [34] 薛步高. 宾川小龙潭斑岩铜矿地质特征及找矿远景探讨[J]. 矿产与地质, 2002, 16(2): 82-86.
- [35] Rapp, R.P. and Watson, E.B. (1995) Dehydration Melting of Metabasalt at 8-32 Kbar: Implications for Continental Growth and Crust-Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, **36**, 891-931. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- [36] Sun, W., Liang, H., Ling, M., Zhan, M., Ding, X., Zhang, H., *et al.* (2013) The Link between Reduced Porphyry Copper Deposits and Oxidized Magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **103**, 263-275. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.10.054>