中国科学：地球科学 SCIENTIA SINICA Terrae 2026 年 第 56 卷 第 9 期： 3324–3340
论 文
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

# 中亚造山带内古大洋核杂岩的识别：以新疆北部洪古勒楞蛇绿岩为例

杨正宇[1,2,4]，龚小晗[3*]，李天义[1]，罗启松[2]，Riccardo TRIBUZIO[4]，林会喜[1]，许继峰[2*]

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院，北京 100089
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院，北京 100083
3. 中国地质大学(北京)海洋学院，北京 100083
4. Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Pavia, Pavia 27100, Italy
* 通讯作者，E-mail：xiaohangong2019@163.com(龚小晗)，jifengxu@cugb.edu.cn(许继峰)

2025-12-06收稿，2026-05-13修回，2026-06-01接受，2026-08-12网络版发表
国家科技重大专项项目(2025ZD1004701)和国家重点研发计划项目(2020YFA0714800)资助

**摘要** 大洋核杂岩是慢速-超慢速洋脊系统非对称扩张的典型产物和标志，造山带内古大洋核杂岩的识别对于准确限定古洋盆的属性与演化具有重要意义。中亚造山带是显生宙最大的增生型造山带，其形成演化与古亚洲洋内的微陆块、岛弧、海山、洋底高原等不易俯冲的地体拼贴密切相关，然而是否存在古大洋核杂岩的拼贴目前尚不清楚。本文对新疆西准噶尔地区的洪古勒楞蛇绿岩开展了系统的野外剖面、年代学、岩石学和Sr-Nd-Os同位素地球化学研究，重建了其壳-幔结构和物质组成。研究表明：(1)洪古勒楞蛇绿岩发育相对完整的下洋壳-地幔序列，缺失上洋壳单元，在岩石组合和结构上类似于慢速扩张脊岩石圈；(2)下洋壳的形成时代为506–475 Ma，总体具有N-MORB地球化学特征，亏损的Nd同位素($\varepsilon_{Nd}(t)$=+6.3–+8.9)和锆石Hf同位素($\varepsilon_{Hf}(t)$=+13.8–+17.2)表明母岩浆来源于亏损MORB地幔；(3)地幔单元整体较为亏损，反映了较高的熔体抽离程度，且部分样品的Re亏损模式年龄(约0.5 Ga)与壳层岩石的形成时代在误差范围内一致。系统对比洪古勒楞蛇绿岩与现今慢速洋脊系统，我们认为其很可能是构造拼贴到中亚造山带内的古大洋核杂岩，为理解中亚造山带的物质组成与演化提供了新的证据。

**关键词** 中亚造山带，洪古勒楞蛇绿岩，古大洋核杂岩，慢速扩张脊，古亚洲洋

## 1 引言

大洋核杂岩主要形成于贫岩浆供给的慢速至超慢速扩张洋中脊环境，其形成机制与洋脊的不对称扩张及慢速扩张脊正断层体系的活动密切相关(Cannat等，2006；Smith等，2006，2008)。在全扩张速率<55 mm的洋脊，轴部岩浆房表现为间歇性的岩浆供给，并促进了大洋核杂岩的发育。大洋核杂岩产出于转换断层与洋中脊交界处，拆离断层与岩浆的相互作用使其大洋岩石圈结构与“彭罗斯型”蛇绿岩的层状结构不同，具体表现为以穹窿状橄榄岩/辉长岩为核心的正地形被不连续的火山岩覆盖(Cannat，1993，1996)。蛇绿岩是保存在造山带中的古大洋岩石圈残片(Dilek和Furnes，2014)。近年来的研究表明，造山带内出露的一些不具有完整壳层序列的蛇绿岩体可能并非后期造山过程中构造肢解的结果，而是代表了形成于慢速-超慢速扩张脊环境的古大洋核杂岩(例如：Chenaillet岩体(Manatschal等，2011)、普兰岩体(Liu等，2014)和Refahiye(Liu等，2024))。前人对于这些潜在的古大洋核杂岩开展了详细的结构构造解析(Miranda和Dilek，2010；Balestro等，2015；Ao等，2016)、拆离断层识别(Manatschal等，2011)、断层岩石性质(Boschi等，2006)、断层相关的流体-橄榄岩蛇纹石化作用(Nur-

中文引用格式：杨正宇, 龚小晗, 李天义, 罗启松, Tribuzio R, 林会喜, 许继峰. 2026. 中亚造山带内古大洋核杂岩的识别：以新疆北部洪古勒楞蛇绿岩为例. 中国科学: 地球科学, 56(9): 3324–3340, doi: 10.1360/SSTe-2025-0428
英文引用格式：Yang Z, Gong X, Li T, Luo Q, Tribuzio R, Lin H, Xu J. 2026. Identification of paleo-oceanic core complexes in the Central Asian Orogenic Belt: A case study of the Hongguleleng ophiolite in northern Xinjiang. Science China Earth Sciences, 69(9): 3275–3291, https://doi.org/10.1007/s11430-025-1984-7

© 2026《中国科学》杂志社

iel等，2009)以及特殊岩石(如苏长岩)的成因机制(Liu等，2014)研究。另一方面，对古大洋核杂岩壳-幔结构和成分剖面的恢复及与现代大洋核杂岩系统的对比研究相对较少。

中亚造山带位于东欧克拉通、西伯利亚克拉通、塔里木克拉通和华北克拉通之间(图1A)，是全球规模最大的显生宙增生型造山带。其形成演化由古亚洲洋内一系列微陆块、洋内弧、洋底高原、海山、增生杂岩等不易俯冲地体拼贴而成(Xiao等，2013，2015)，然而是否存在古大洋核杂岩的拼贴目前尚不清楚。位于新疆北部的西准噶尔洪古勒楞蛇绿岩(图1)，是中亚造山带内保存较为完好的蛇绿岩之一，特别是下洋壳-地幔岩石序列，与现今慢速扩张环境观察到的极为相似。本文对洪古勒楞蛇绿岩进行了系统的野外剖面、年代学、岩石学和Sr-Nd-Os同位素地球化学研究，提出洪古勒楞蛇绿岩为拼贴到中亚造山带内的古大洋核杂岩，其结构组成类似于大西洋中部Atlantis Massif大洋核杂岩，古大洋核杂岩拼贴可能是中亚造山带蛇绿岩就位的重要方式之一。

## 2 地质背景

西准噶尔造山带位于西南中亚造山带，南部毗邻天山造山带，北部为阿勒泰造山带，西部与哈萨克斯坦板块相邻，东部为准噶尔盆地。西准噶尔造山带广泛发育古生代增生杂岩和与俯冲相关的弧岩浆岩(Xu等，2012，2013；Ren等，2014)，是无前寒武纪基底的增生杂岩体系(Choulet等，2012；Han和Zhao，2018)。根据地质特征和演化历史可分为北、中、南三个构造带(图1C)，本文重点关注西准噶尔北部构造带。

西准噶尔北部自北向南由呈东西向展布的晚古生代扎尔玛-萨吾尔弧和早古生代博什切库尔-成吉思弧组成，两者被库吉拜-和布克赛尔蛇绿混杂岩带分隔(朱永峰等，2006；张元元等，2010；Zheng等，2019)。库吉拜-和布克赛尔蛇绿混杂岩带自东向西包括洪古勒楞、和布克赛尔、库吉拜、额敏蛇绿岩(朱永峰等，2006；张元元等，2010；Zhao和He，2014；都厚远等，2017)，其形成时代主体在520–472 Ma之间，形成环境包括俯冲型(舍建忠等，2016；Yang等，2022)和洋中脊型(Zhao和He，2014；Xie等，2021)。和布克赛尔出露变质流纹岩(431±2 Ma)，被认为是和布克赛尔蛇绿岩的钉合岩体(杨亚琦等，2018)。洪古勒楞-和布克赛尔地区发育早奥陶世古海山(Yang等，2020)，谢米斯台山出露晚志留世-早泥盆世A型花岗岩、闪长岩和钾长石花岗岩(Chen等，2010)，侵入于早志留世的弧玄武岩、安山岩和凝灰岩中(孟磊等，2010)。博什切库尔-成吉思弧主要包括早泥盆世火山岩(424–394 Ma)(Shen等，2012)、辉长岩、埃达克质花岗闪长岩、I型及A型花岗岩(434–392 Ma；Chen等，2010，2015；Yin等，2017，2018)。扎尔玛-萨吾尔弧主要由泥盆纪-二叠纪(346–321 Ma)火山岩、火山碎屑岩、海相泥岩、灰岩、硅质岩，石炭纪-二叠纪花岗岩体及少量中奥陶世-志留纪海相砂岩、凝灰岩和火山碎屑岩组成。

洪古勒楞蛇绿岩呈北东-南西向延伸，与区域上地层走向一致，整体出露面积约70 $km^2$(白文吉和周美付，1991；白文吉和Robinson，1995)，与中奥陶统布鲁克其组($O_2b$)呈混杂堆积(图2)。中奥陶统布鲁克其组下部以岩屑晶屑凝灰岩夹块状豹皮灰岩为主，上部由中厚层砂质灰岩夹钙质凝灰砂岩和紫色块状凝灰砂岩组成。蛇绿岩东南侧被中志留统沙尔布尔组凝灰砂岩-粉砂岩-凝灰岩覆盖，向东被上志留统克克雄库都克组安山质晶屑凝灰岩-凝灰粉砂岩覆盖，北侧被中泥盆统呼吉尔斯特组凝灰质砂岩夹硅质灰岩覆盖(杨震等，2016；Xie等，2021)。蛇绿岩与古生代地层呈断层接触，沿断裂带发育硅化和碳酸岩化作用(Xie等，2021)。

## 3 野外特征与样品描述

对洪古勒楞蛇绿岩三条野外剖面进行了踏勘及测量(图2)。aa′剖面平行于地层延伸方向约7 km，方辉橄榄岩和橄长岩混杂，西南部出露纯橄岩和辉长岩侵入体。bb′剖面以橄长岩和辉长岩为主体的壳层序列，沿东西向延伸约6 km，出露辉绿岩和长英质侵入体，辉长岩顶部被中奥陶统硅质碎屑岩覆盖。cc′剖面为穿蛇绿岩剖面，从底部到顶部约3 km，橄榄岩、橄长岩和辉长岩厚度比例约0.8:1:1.2。辉长岩中出露少量块状玄武岩，火山沉积岩覆盖于辉长岩之上。

地幔橄榄岩为方辉橄榄岩，部分蚀变为蛇纹岩，分布在混杂岩西侧和西南侧。西侧的橄榄岩(靠近a侧)蚀变严重，沿探槽出露蛇纹岩及块状铬铁矿，橄榄岩被泥盆纪黄色砂岩覆盖(网络版附图S1)。西南侧的橄榄岩(靠近a′侧)较新鲜，局部可见5 cm厚的辉长岩脉侵入(图3B)，橄长岩旁出露含铬铁矿(约5–10 vol%)纯橄岩，接触关系不明，橄榄岩上部被数米厚的富橄榄石橄长岩覆盖。

壳幔过渡带包括含辉石脉、含斜长石纯橄岩和含铬铁矿纯橄岩组合。含辉石脉、含斜长石纯橄岩主要出露在混杂岩西侧(靠近a)。纯橄岩含弥散状斜长石脉和斜方辉石脉，与细粒辉长岩体呈过渡性接触(图3C和3D)，局部出露10 m厚含铬铁矿纯橄岩(靠近a′)。

辉长质岩石由富橄榄石橄长岩、橄长岩、富单斜辉石橄长岩(单斜辉石>20 vol%)、橄榄辉长岩和辉长岩组成(图4B)。混杂岩西南侧(靠近a′)富橄榄石橄长岩，橄

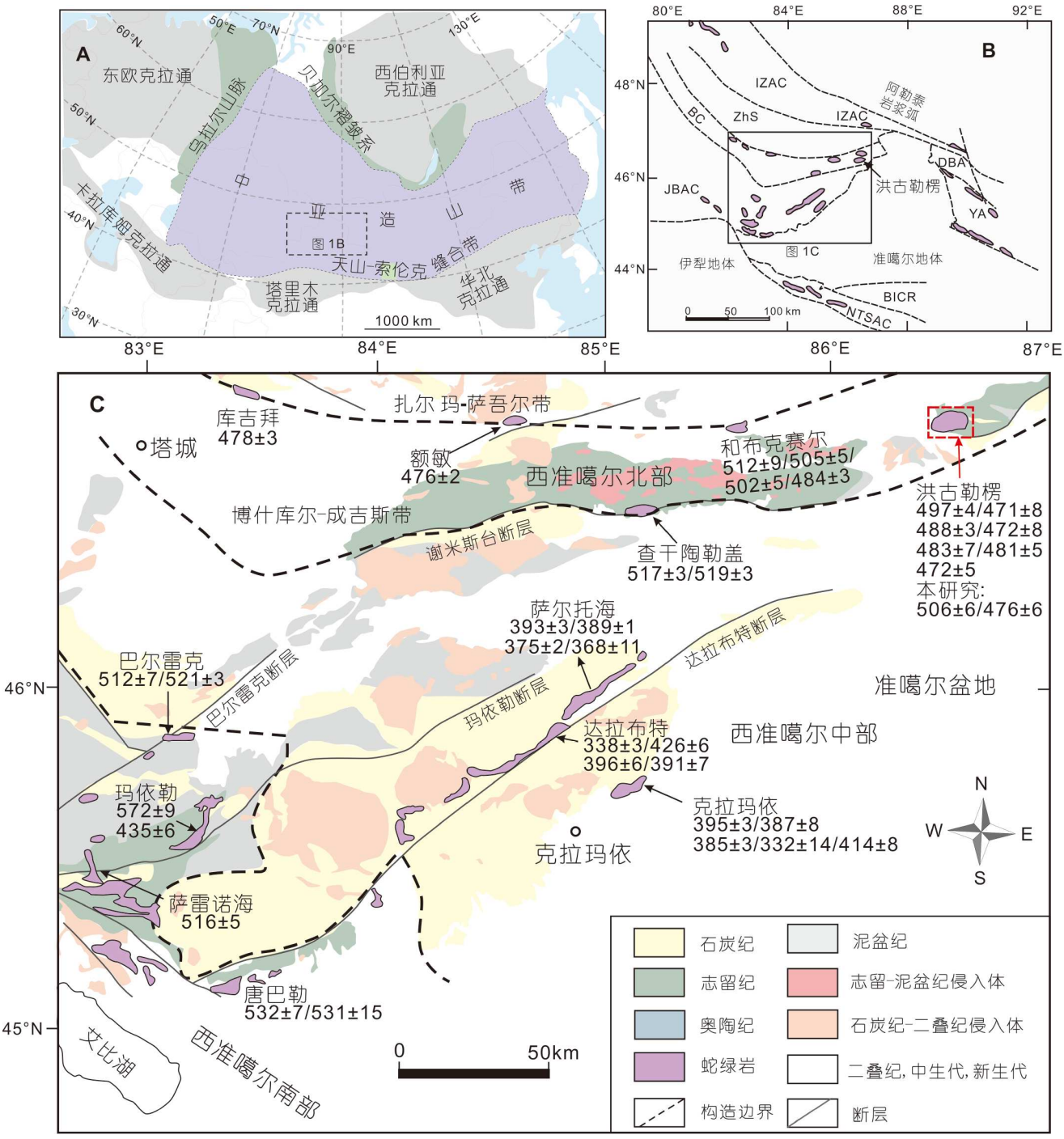



**图 1**　中亚造山带大地构造位置及西准噶尔地质图与蛇绿岩分布图。(A) 中亚造山带大地构造位置示意图；(B) 准噶尔-天山地区蛇绿岩分布示意图；(C) 西准噶尔区域地质图。西准噶尔地质图据Xu等(2012)和Yang等(2013)修改，(C)中标注的蛇绿岩年龄来源见网络版附表S1

长岩与含铬铁矿纯橄岩交替出现(图3A)。东侧(靠近b′)橄长岩与辉长岩交替出现，表面被第四纪沉积物相隔。橄长岩主体1 km厚，发育橄榄石和斜长石的互层层理。局部见富橄榄石橄长岩(深色)与橄长岩(浅色)交替互层，厚度为10–15 cm，延伸数十米长(图3E)。辉长岩约1.5 km厚，覆盖于橄长岩之上，粒度从巨晶变化到粗-细晶，辉长岩发育单斜辉石与斜长石的互层层理，野外地形较高(图3G)。东侧(靠近b′)出露5–10 m厚的富单斜辉石橄长岩和橄榄辉长岩(图3F)。

洪古勒楞橄榄岩为方辉橄榄岩和含斜方辉石脉纯橄岩(图4A)，部分强烈蛇纹石化，保留粒状、碎斑状结构(图4C)。橄榄石滚圆状，被网状蛇纹石部分取代。斜方

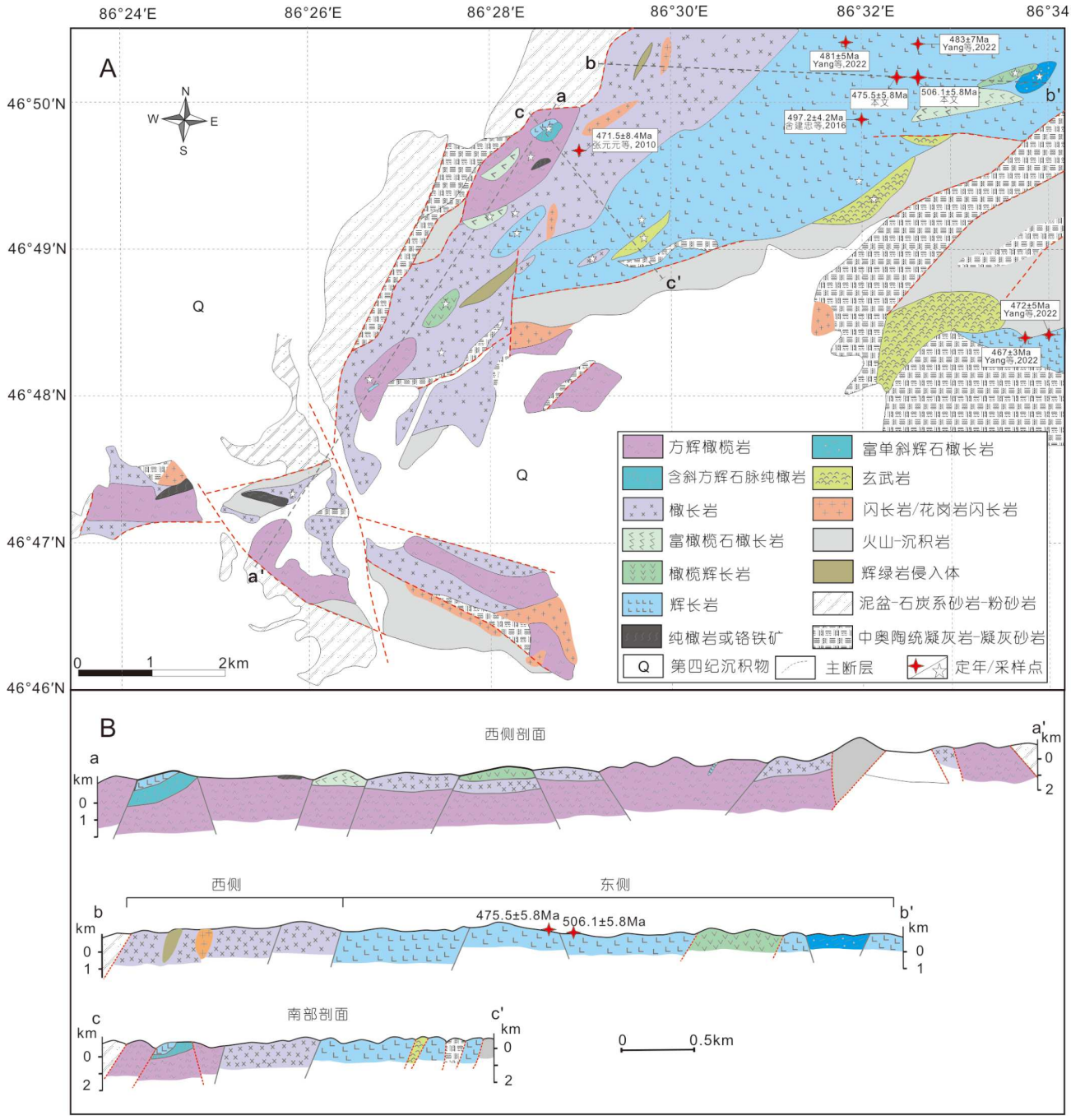



**图 2** 洪古勒楞蛇绿岩地质图及野外剖面图。(A) 洪古勒楞蛇绿岩地质简图，其中标注的部分年龄引自Xie等(2021)和Yang等(2022)；(B) EW-NW-NE向野外地质剖面图

辉石呈半自形和中等粒状，具有波状消光和溶蚀边界，边部被他形单斜辉石和细粒橄榄石填充。尖晶石(≤1 wt.%)为他形晶，局部为蠕虫状分布于蛇纹石基质。含辉石脉纯橄岩可见斜方辉石呈脉状分布于橄榄石基质(图4D)。

下洋壳序列包括橄长岩、橄榄辉长岩和辉长岩(图4B)。富橄榄石橄长岩斜长石为半自形，基本完全蚀变，局部可见包裹滚圆状橄榄石(网络版附图S1C)。橄长岩由中粗粒橄榄石、他形斜长石和尖晶石(<1 wt.%)组成，单斜辉石局部呈叶片状填隙于橄榄石-斜长石边界(图4E)。富单斜辉石橄长岩可见橄榄石呈滚圆状，被单斜辉石和斜长石嵌晶包裹(网络版附图S1D)。橄榄辉长岩由单斜辉石(40 wt.%)、斜长石(34–35 wt.%)和橄榄石(25–26 wt.%)组成，单斜辉石呈嵌晶包裹圆状橄榄石和不规则斜长石(图4F)。辉长岩由中粗粒单斜辉石和斜长石组成，具有




**图 3**　洪古勒楞蛇绿岩野外露头。(A) 橄长岩-富橄榄石橄长岩互层，局部有铬铁矿纯橄岩；(B) 辉长岩脉侵入于橄榄岩；(C) 含斜长石纯橄岩；(D) 方辉橄榄岩内细粒辉长岩与纯橄岩露头；(E) 富橄榄石橄长岩、橄长岩互层分布；(F) 橄榄辉长岩；(G) 辉长岩野外露头

明显的堆积结构，部分辉长岩矿物发生变形，角闪石被明显拉长(图4G)，发育典型的S-C组构(图4H)及具有剪切错动的特征(图4I)。

## 4　分析结果

洪古勒楞辉长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb定年及Hf同位素分析方法和洪古勒楞蛇绿岩全岩主微量元素、全岩Sr-Nd、Re-Os同位素分析方法见网络版附件A。

### 4.1　锆石U-Pb年龄及Hf同位素

对洪古勒楞蛇绿岩东段两件辉长岩样品开展LA-ICP-MS锆石U-Pb定年、微量元素及Lu-Hf同位素分析，具体数据见网络版附表S2–S4。

#### 4.1.1　锆石U-Pb年龄

辉长岩锆石边界清晰，内部均一(图5)，弱Eu负异常(Eu/Eu*=0.1–0.6)和正Ce异常(Ce/Ce*=379–16349)，Th/U比值均大于0.4，低La和高$(Sm/La)_N$，极低的U/Yb比值，呈现典型洋壳锆石特征(网络版附图S2)。辉长岩(24HG09B)的$^{206}Pb/^{238}U$年龄范围在486.7–459.6 Ma之间，U-Pb加权平均年龄为475.5±5.6 Ma(MSWD=1.6；图5A)。辉长岩(24HG-10)的$^{206}Pb/^{238}U$年龄为512.2–491.4 Ma，加权平均年龄为506.1±5.8 Ma(MSWD=1.3；图5B)。

#### 4.1.2　锆石Lu-Hf同位素

洪古勒楞辉长岩锆石$^{176}Yb/^{177}Hf$均小于0.1(网络版附表S4)，说明$^{176}Yb$对$^{176}Hf$的影响较小，测试的Hf同位素结果可信。辉长岩(24HG09B)两颗锆石表现为低的$^{176}Lu/^{177}Hf$比值(0.0018–0.0022)和均一的初始$^{176}Hf/^{177}Hf$值为0.282883–0.282912，$\varepsilon_{Hf}(t)$值为+13.8–+14.8(图5)，单阶段亏损地幔模式年龄($T_{DM1}$)为534–498 Ma。辉长岩(24HG-10)的$^{176}Lu/^{177}Hf$比值为0.0024–0.0026，均一的初

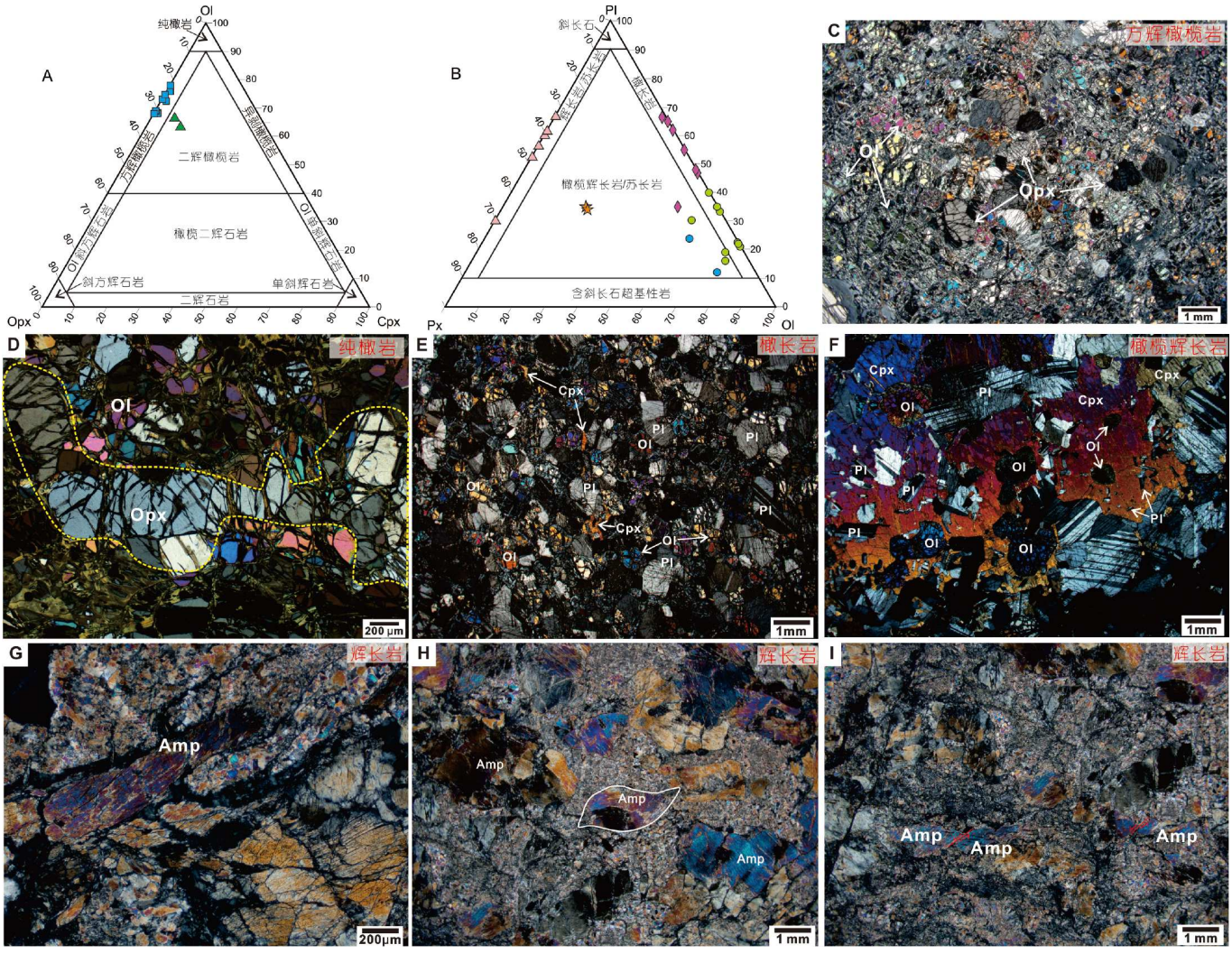



图4　洪古勒楞蛇绿岩岩石类型及显微照片。(A、B) 岩性分类图解；(C) 方辉橄榄岩正交偏光照片；(D) 含斜方辉石纯橄岩正交偏光照片；(E) 橄长岩正交偏光照片；(F) 橄榄辉长岩正交偏光照片；(G–I) 辉长岩正交偏光照片，局部观察到角闪石塑性拉长，发育S-C组构，发生剪切错动等特征。 Ol，橄榄石；Opx，斜方辉石；Cpx，单斜辉石；Px，辉石；Pl，斜长石；Amp，角闪石

始$^{176}Hf/^{177}Hf$值为0.282882–0.282960，$\varepsilon_{Hf}(t)$为+14.2–+17.2(图5)，单阶段亏损地幔模式年龄($T_{DM1}$)为548–429 Ma。

## 4.2　岩石地球化学特征

### 4.2.1　主微量元素

选择9件方辉橄榄岩、2件含斜方辉石脉纯橄岩、3件富橄榄石橄长岩、9件橄长岩、2件富单斜辉石橄长岩、2件橄榄辉长岩及8件辉长岩进行全岩主微量元素分析(网络版附表S5和S6)。氧化物均计算为无水成分。

方辉橄榄岩蛇纹石化程度较高，主量元素与烧失量(LOI=11–14 wt.%)之间无明显相关性。方辉橄榄岩具有较高的MgO(43.6–46.2 wt.%)和Mg#(90–93；Mg/(Mg+$Fe^{2+}$ tot)×100)，在$MgO/SiO_2$和$Al_2O_3/SiO_2$图解上落在地球演化线附近(网络版附图S3)，$Al_2O_3$(0.6–0.9 wt.%)极低，CaO在0.1–1.0 wt.%之间(网络版附图S3)。与大西洋中脊(MAR)橄榄岩相比，洪古勒楞方辉橄榄岩具有相近的全岩MgO/FeO，较高的全岩Ca#(mol(Ca/(Ca+Na)))和略低的Ni值(1740–2262 ppm(1 ppm=1 μg $g^{-1}$)；图6)。

含斜方辉石脉纯橄岩$Al_2O_3$和方辉橄榄岩相当，低于富橄榄石橄长岩的全岩Mg#(74.7–80.1)，具有更低的MgO/FeO和$MgO/SiO_2$比值，在MgO与FeO的对比图和$MgO/SiO_2$，$Al_2O_3/SiO_2$图解中区别于方辉橄榄岩(网络版附图S3)。此外，含斜方辉石脉纯橄岩具有高Ca#(~100)，高Ni(1132–1366 ppm)，低Mg#，在全岩Mg#与Ca#、Ni的对比图上样品相对往左偏移(图6)。从橄长岩到辉长岩，全岩MgO与FeO正相关，与$Al_2O_3$呈负相关关系，全岩Mg#和Ca#(Ca/(Ca+Na)×100)具有正相关关系，与Ni含

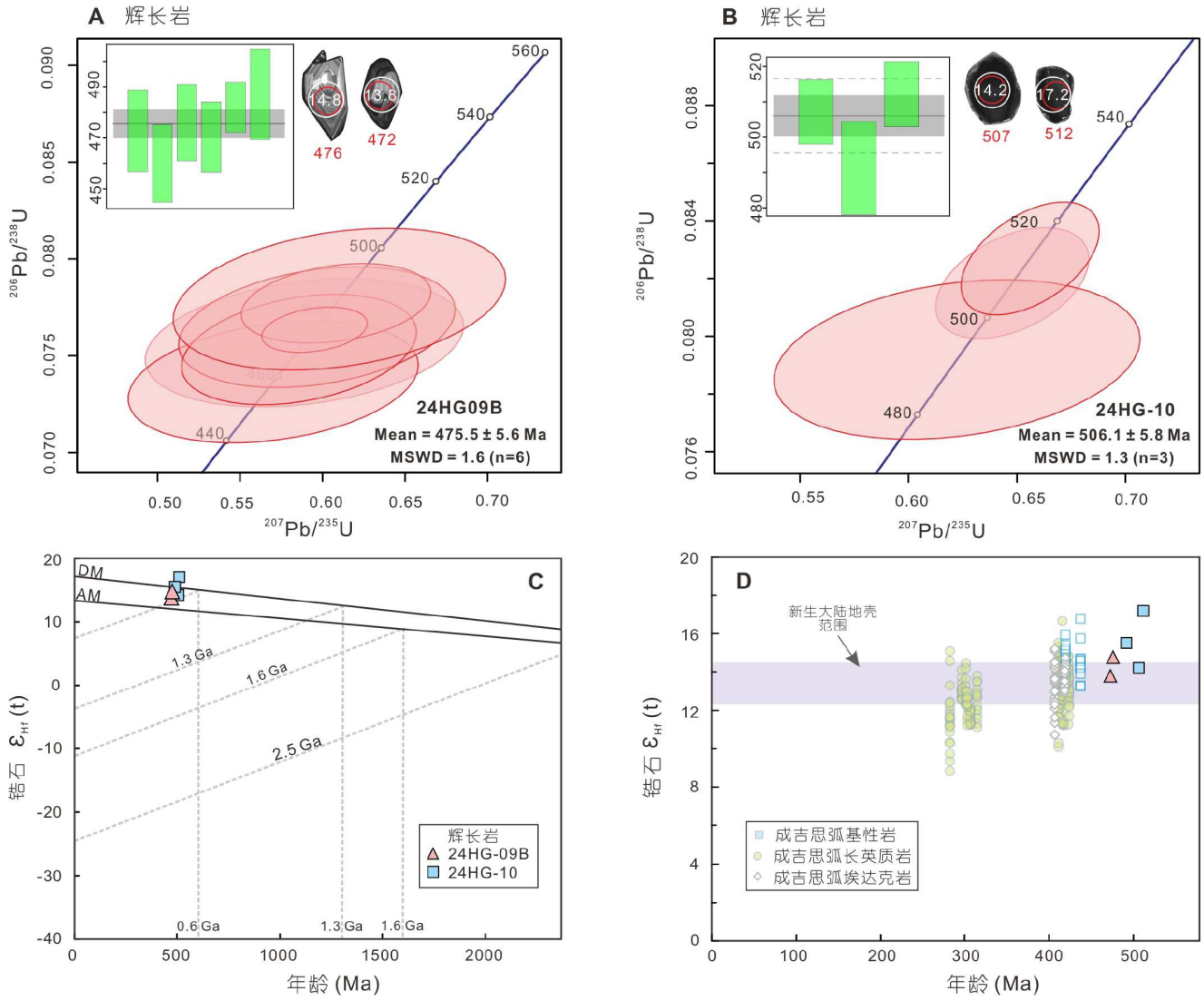



**图 5**　洪古勒楞辉长岩锆石U-Pb年龄谐和图及锆石Hf同位素图解。(A、B) 洪古勒楞辉长岩锆石阴极发光(CL)图、U-Pb年龄谐和图及加权平均年龄(数据以1$\sigma$误差绘制)，从辉长岩中分离出的典型锆石颗粒也一并标于图中。U-Pb 定年分析点以红色圆圈表示，Hf 同位素分析点以白色圆圈表示；(C、D) 辉长岩锆石Hf同位素组成，博什切库尔-成吉思汗(BCA)基性岩、长英质岩及埃达克岩锆石Hf同位素数据引自Yin等(2024)。DM，平均亏损地幔；AM，平均弧地幔

量呈正相关(图6)。含斜方辉石脉纯橄岩和富橄榄石橄长岩具有相近的MgO，但前者具有更高的FeO和更低的$Al_2O_3$，更低的全岩Mg#，相似的Ca#和Ni含量(图6)。

方辉橄榄岩轻微富集轻稀土元素(LREE)($(La/Sm)_N$=1.2–4.5，$(Sm/Yb)_N$=0.1–0.8)，具有负Eu异常及弱正Eu异常(Eu/Eu*=0.3–1.4)。在原始地幔标准化不相容微量元素模式图上(网络版附图S4A和S4B)，方辉橄榄岩表现出Zr、Hf和Ti相对于相邻稀土元素的正异常($(Zr/Nd)_N$=1.2–3.3)。含斜方辉石脉纯橄岩具有低的总REE含量(ΣREE=1.8–2.2 ppm)及左倾的球粒陨石标准化REE模式(网络版附图S4C)。与富单斜辉石橄长岩相比，含斜方辉石脉纯橄岩的LREE分异程度更高($(La/Sm)_N$=0.2)，重稀土元素(HREE)中等分异($(Sm/Yb)_N$=0.3–0.5)，L-HREE分异较大($(La/Yb)_N$=0.07–0.12)，弱负Eu异常(Eu/Eu*=0.7–0.8)。在原始地幔标准化不相容微量元素模式图上(网络版附图S4D)，表现出Zr、Hf和Ti相对于相邻REE正异常($(Zr/Nd)_N$=1.6–1.7)。

洪古勒楞富橄榄石橄长岩、橄榄辉长岩、辉长岩总体表现出LREE相对于HREE亏损，弱正Eu异常。橄长岩LREE相对HREE富集，具有显著正Eu异常的球粒陨石标准化模式。其中，富橄榄石橄长岩球粒陨石标准化模式与橄榄岩的稀土元素模式图相似，不具有Eu异常(图7A)。在原始地幔微量元素图解上，富橄榄石橄长岩、橄长岩总体比大西洋中脊富橄榄石橄长岩和橄长岩显示更

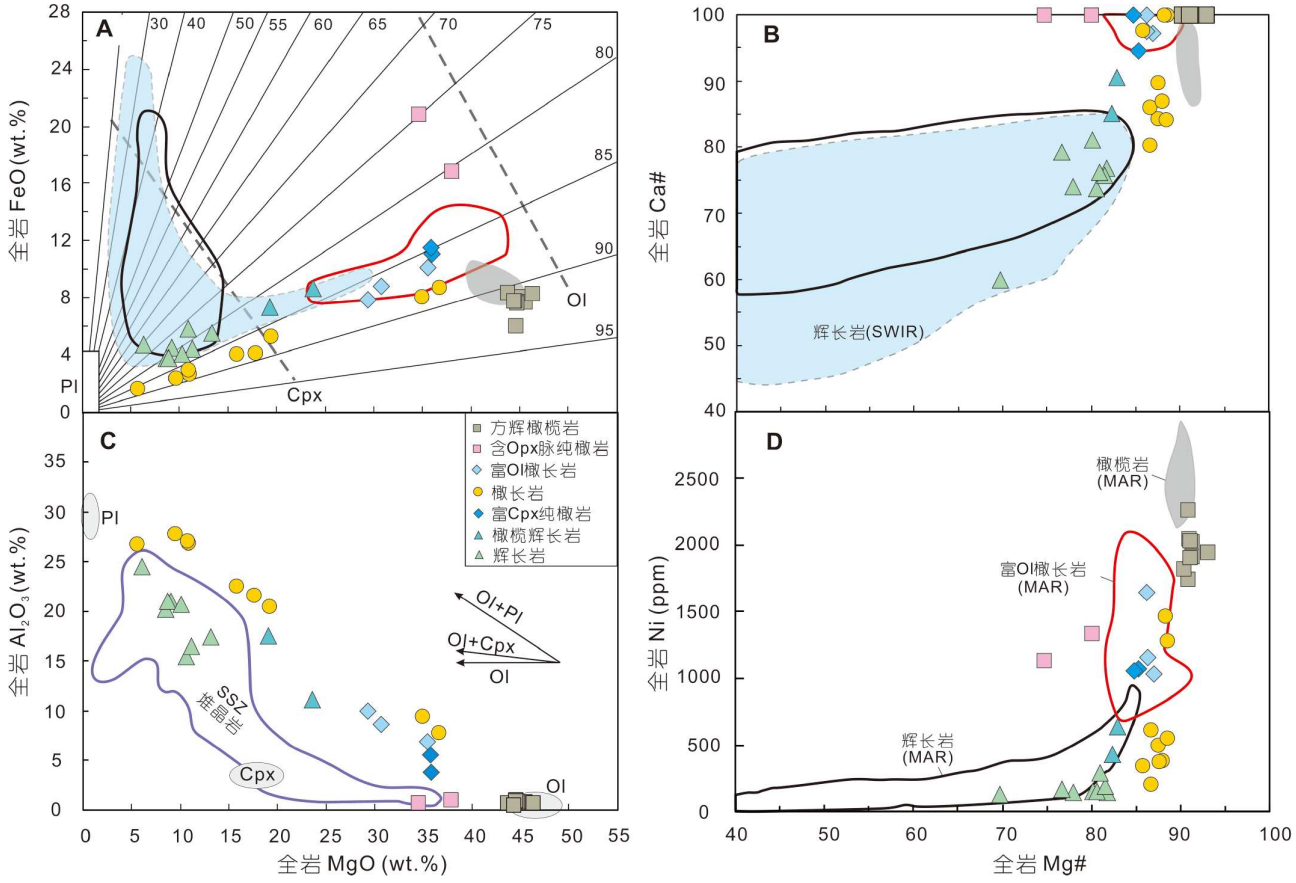



**图 6** 洪古勒楞蛇绿岩全岩主量元素成分图解。(A) 全岩MgO(wt.%)与全岩FeO(wt.%)对比图；(B) 全岩Mg#(Mg/(Mg+$Fe^{2+}$ tot)×100)与全岩Ca#(Ca/(Ca+Na)×100)关系图；(C) 全岩MgO(wt.%)和全岩$Al_2O_3$(wt.%)对比图；(D) 全岩Mg#与全岩Ni(ppm)含量对比图。(A)中的等Mg#线以及橄榄石、单斜辉石和斜长石的FeO-MgO变化范围引自Godard等(2009)。(A、B、D)中灰色区域代表中大西洋脊(MAR)橄榄岩(Kelemen等，2004)；红色曲线包围的区域代表MAR富橄榄石橄长岩(Godard等，2009)；黑色曲线包围的区域代表MAR辉长岩(Godard等，2009；Coogan等，2001)。此外，(A)中的浅蓝色区域表示Godard等(2009)报道的MAR辉长岩；(B)中的浅蓝色区域表示Dick等(2002)报道的西南印度洋(SWIR)辉长岩。(C)中的浅紫色曲线包围的区域代表俯冲带型(SSZ)堆晶岩的成分范围(Zhang等，2022)

低的微量元素组成，橄榄辉长岩、辉长岩和大西洋中脊橄榄辉长岩、辉长岩微量元素组成在相同范围内(图7A–7D)。橄长岩富集大离子亲石元素(LILEs；如Rb、Ba、Pb)，富集Sr和Eu。富单斜辉石橄长岩、橄榄辉长岩及辉长岩均富集Rb、Ba等流体活动性元素，同时普遍具有Sr和Eu正异常，Th、Nb相对于Ba和La亏损，Zr、Hf相对周围稀土元素弱亏损(图7E–7H)。

### 4.2.2 Sr-Nd同位素

橄长岩-橄榄辉长岩-辉长岩的全岩Sr-Nd同位素数据见网络版附表S7。

橄长岩$^{147}Sm/^{144}Nd$比值为0.2345–0.2723，具有1个有效$^{143}Nd/^{144}Nd$(0.513342)，经年龄校正后的$\varepsilon_{Nd}$(506 Ma)为+8.9。橄榄辉长岩$^{147}Sm/^{144}Nd$比值为0.2030，具有1个有效$^{143}Nd/^{144}Nd$(0.513051)，经年龄校正后的$\varepsilon_{Nd}$(506 Ma)为+7.7。辉长岩$^{147}Sm/^{144}Nd$比值为0.1845–0.2802，实测3个有效$^{143}Nd/^{144}Nd$(0.512983–0.513320)，经年龄校正后的$\varepsilon_{Nd}$(506 Ma)为+6.3–+8.5。总体而言，洪古勒楞蛇绿岩的Nd同位素组成与典型洋中脊玄武岩(MORB)的Nd同位素组成重叠，接近亏损地幔(DM)推荐值，Sr同位素比值高于MORB和DM(图8A)。

### 4.2.3 Re-Os同位素

洪古勒楞5件方辉橄榄岩和3件橄长岩的Re-Os同位素分析结果详见网络版附表S8。

洪古勒楞方辉橄榄岩Os含量介于1.27–4.01 ppb (1 ppb=1 μg $kg^{-1}$)之间，Re含量为0.015–0.130 ppb，Re/Os比值较低(0.007–0.079)，$^{187}Re/^{188}Os$比值为0.034–0.381。方辉橄榄岩的放射性成因$^{187}Os/^{188}Os$在0.1220–0.1256之间，低于原始上地幔的推荐值(0.1296±0.0006)(Meisel等，2001)，与报道的深海橄榄岩的范围重叠(图8B)。方辉橄榄岩的$^{187}Re/^{188}Os$和$^{187}Os/^{188}Os$比值之间并无

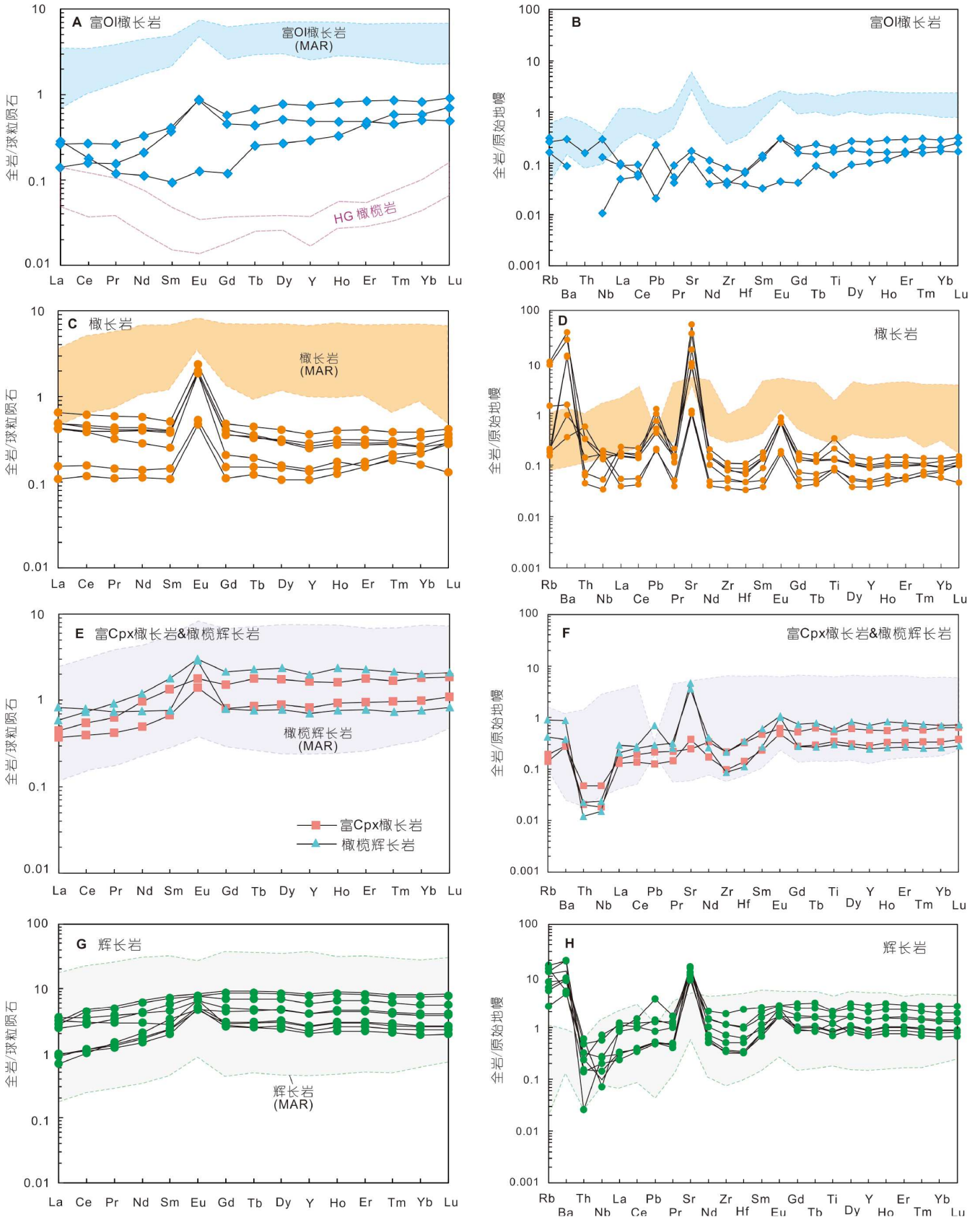



图 7　洪古勒楞堆晶岩全岩微量元素组成。(A、C、E、G) 球粒陨石标准化REE模式图；(B、D、F、H) 原始地幔标准化微量元素蛛网图。MAR富橄榄石橄长岩、橄长岩、橄榄辉长岩、辉长岩全岩成分(Godard等，2009)作为对比，球粒陨石、原始地幔标准化数据引自Sun和McDonough(1989)

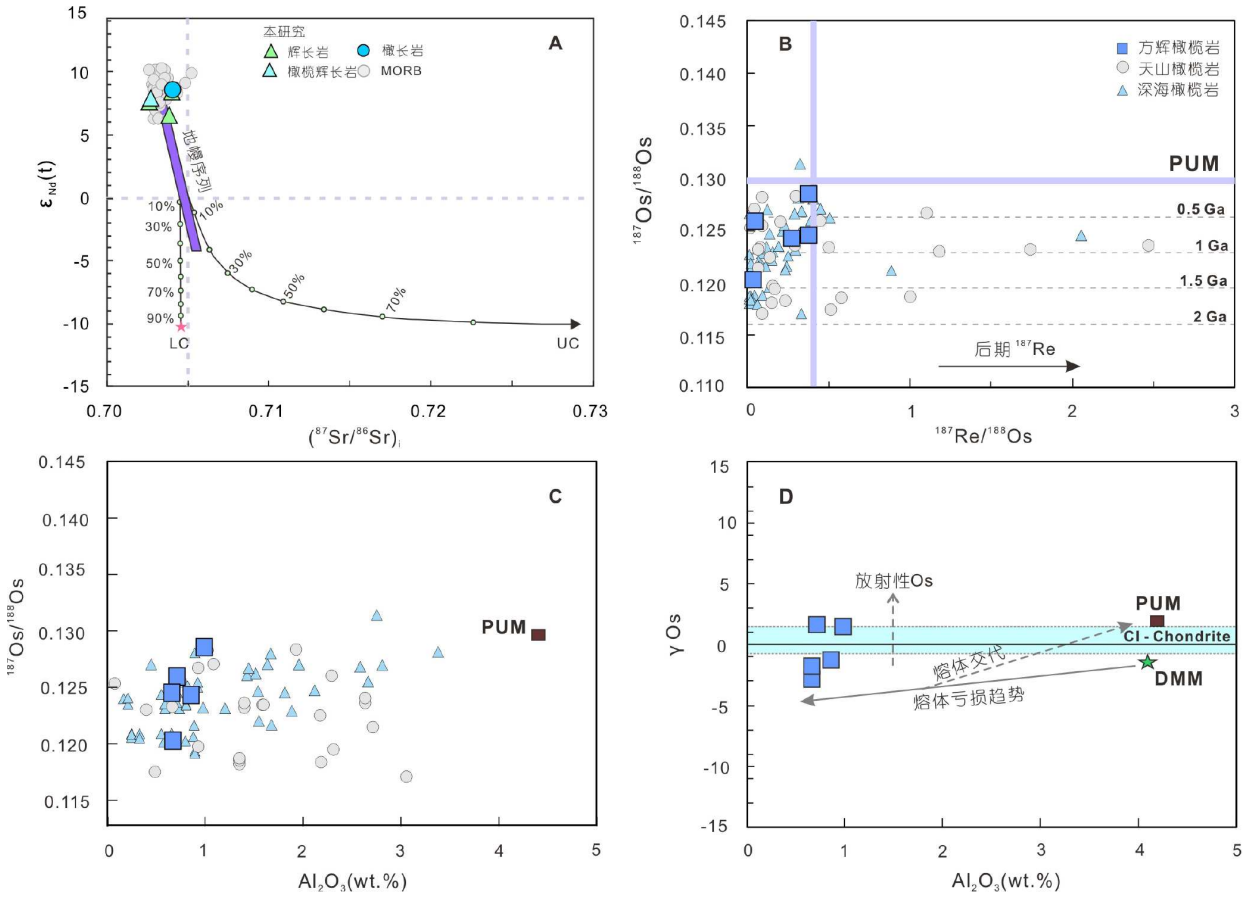



**图 8** 洪古勒楞蛇绿岩Sr-Nd-Os同位素成分。(A) 洪古勒楞橄长岩-辉长岩全岩Sr-Nd同位素组成，洋中脊玄武岩(MORB)Sr-Nd同位素引自https://search.earthchem.org/。LC，下地壳；UC，上地壳；(B) 方辉橄榄岩$^{187}Re/^{188}Os$与$^{187}Os/^{188}Os$图解；(C) $Al_2O_3$与$^{187}Os/^{188}Os$图解；(D) γOs与$Al_2O_3$图解。天山橄榄岩数据引自Gong等(2020)；深海橄榄岩数据引自Harvey等(2006)和Day等(2017)

显著的相关性。值得注意的是，有两个样品呈现出富集特征，其经年龄校正的γOs值分别为1.49和1.64，使用PUM($^{187}Re/^{188}Os$=0.402，$^{187}Os/^{188}Os$=0.1296)(Meisel等，2001)计算的Re亏损年龄($T_{RD}$)均约为0.6 Ga。其余样品的γOs值范围为−2.8–−1.2，与DMM地幔推荐值一致(Shirey和Walker，1998)，对应的$T_{RD}$在0.5–1.3 Ga之间。

橄长岩样品的Os含量介于0.08–0.56 ppb之间，Re含量为0.15–0.61 ppb，具有较高的Re/Os比值(1.1–4.0)，$^{187}Re/^{188}Os$比值范围为5.20–9.41，放射性成因$^{187}Os/^{188}Os$比值分布在0.1194–0.1425之间。由于地壳样品具有高Re/Os比值，$T_{RD}$并不适用于地壳样品，计算橄长岩的$T_{MA}$年龄，得到$T_{MA}$年龄介于0.6–0.42 Ga之间，代表岩石从地幔分离出来的时间。

## 5 讨论

### 5.1 蛇绿岩的形成时代

针对蛇绿岩不同对象的精确定年可揭示其演化的关键阶段。锆石U-Pb定年(辉长岩、辉绿岩-玄武岩等)限定洋壳形成时代；变质矿物(如金红石U-Pb、伊利石Ar-Ar)定年指示构造就位时间；绿泥石等矿物的定年记录热液活动事件；而橄榄岩Re-Os与Lu-Hf同位素则揭示地幔形成或熔体抽取时代(Li等，2011；Liu等，2020；Soret等，2022；Wu等，2023)。这些年龄共同构建了蛇绿岩的演化框架，但其在造山带中经历的复杂俯冲-碰撞过程，常导致年龄解释的多样性。

洪古勒楞蛇绿岩的形成时代存在争议。辉长岩锆石U-Pb定年结果表明蛇绿岩形成于晚寒武世(497 Ma；舍建忠等，2016)，而辉长岩、斜长花岗岩、玄武岩的锆石U-Pb年龄表明蛇绿岩形成于483–452 Ma(Yang等，2022)。本文对两个辉长岩开展了锆石U-Pb同位素定年。辉长岩的锆石呈宽板状、内部结构均一(图5)，为基性岩浆锆石特征，锆石微量元素显示显著正Ce异常和高$(Sm/La)_N$比值，具有较陆壳锆石低的U/Yb比值，在U/Yb-Hf和U/Yb-Y图中落入洋壳锆石的区域(网络版附图S2)。因此，锆石U-Pb年龄代表岩浆结晶的年龄。两个辉长岩的加权平

均年龄分别为506.1±5.8、475.5±5.6 Ma，代表辉长岩的形成时代。其中，后者与Yang等(2022)报道的洪古勒楞辉长岩和斜长花岗岩的年龄重合(483–467 Ma)，506.1±5.8 Ma与洪古勒楞堆晶辉长岩年龄(497.2±4.2 Ma)在误差范围内一致(舍建忠等，2016)。值得注意的是，最老的锆石(512±5 Ma)与相邻的和布克赛尔蛇绿岩辉长岩的形成时代相近(519–502 Ma)(Yang等，2019)。本文报道了辉长岩较老的锆石年龄(最老512±5 Ma)，表明洪古勒楞蛇绿岩的形成时代略早于前人报道的辉长岩，且洪古勒楞蛇绿岩与布克赛尔洋壳同期，将西准噶尔北部准噶尔洋的存在时限限定为早寒武世至早奥陶世(519–467 Ma)。需要指出的是，辉长岩的年龄范围(506–475 Ma)可能代表的是多阶段岩浆侵入的结果。对于慢速-超慢速扩张环境中的大洋核杂岩而言，下洋壳辉长岩的形成常受间歇性岩浆补给、拆离断层活动和深部岩浆房/岩浆透镜体侵入共同控制，因此同一核杂岩系统中可能出现一定时间跨度的辉长岩结晶年龄。例如，Atlantis Massif大洋核杂岩中Hole U1309D辉长岩和长英质脉体的锆石U-Pb年龄显示其下洋壳增生具有间歇性和持续性特征(Grimes等，2008)；菲律宾海Godzilla Megamullion的锆石U-Pb年龄也指示大洋核杂岩可在数十个百万年尺度上持续形成，这与低岩浆供给背景下的阶段性构造扩张有关(Tani等，2011)。因此本次获得的约506 Ma可能代表了洪古勒楞早期辉长质岩浆结晶，而约475 Ma年龄代表了后续岩浆补给或拆离断层活动过程中深部岩浆的侵入。

Re-Os同位素模式年龄同样可以用于约束蛇绿岩的形成时代(Harvey等，2006)。首先，壳层岩石Re-Os同位素$T_{MA}$年龄代表岩石从地幔分离的时间，洪古勒楞橄长岩从地幔分离的时间在0.6–0.42 Ga之间(网络版附表S8)，与辉长岩的形成年代对应。另一方面，洪古勒楞方辉橄榄岩全岩$^{187}Os/^{188}Os$同位素比值低于原始上地幔估计值(图8)，表明橄榄岩长期亏损Re，因此$T_{RD}$能够指示地幔熔体提取事件。假定原始地幔(PUM)为源区，洪古勒楞橄榄岩$T_{RD}$表现出宽泛的变化范围(1.3–0.1 Ga；图8B)。若采用碳质球粒陨石储库(现今$^{187}Os/^{188}Os$=0.1270；Meisel等，2001)，$T_{RD}$的变化范围为0.9–0.1 Ga。综合来看，尽管利用不同储库计算的$T_{RD}$存在一定的误差，部分橄榄岩的$T_{RD}$年龄至少反映了一期早古生代(约505 Ma)熔体提取或熔岩反应事件，与辉长岩锆石U-Pb年代学及橄长岩$T_{MA}$年龄揭示的早古生代熔体活动时间耦合。值得注意的是，部分洪古勒楞橄榄岩记录了古老的$T_{RD}$(1.3 Ga)，类似的古老年龄在现今深海橄榄岩和全球蛇绿岩中常有报道(Becker和Dale，2016)。我们认为洪古勒楞橄榄岩记录的古老成分反映了古亚洲洋对流上地幔物质组成普遍的不均一特征(Gong等，2020)，而相对年轻的模式年龄(约0.5 Ga)可能对应了古亚洲洋的洋脊扩张与岩石圈(即蛇绿岩的)增生事件。

### 5.2　蛇绿岩成因与演化

(1)橄榄岩成因

洪古勒楞橄榄岩为方辉橄榄岩，斜方辉石含量在22–28 vol%，具有高Mg#(90–93)，低$Al_2O_3$，与大西洋地幔橄榄岩的主量元素组成重叠(图6)，表明洪古勒楞橄榄岩属于典型地幔橄榄岩。岩石学上，橄榄岩中未观察到石榴石分解的显微特征，如Spl-Cpx后成合晶(Gong等，2020)。此外，橄榄岩具有弱分异的MREE/HREE地球化学特征，与石榴石相地幔橄榄岩部分熔融的结果不同(Hellebrand，2002)。尖晶石相亏损MORB地幔(DMM)在不同地幔潜热下多压熔融模拟结果表明，橄榄岩的难熔元素组成与DMM在1400–1200 ℃发生分离熔融的结果一致(网络版附图S3)，说明洪古勒楞方辉橄榄岩形成于尖晶石相稳定域地幔的部分熔融。洪古勒楞方辉橄榄岩中单斜辉石含量小于2 vol%(图4A)，橄榄岩具有高Mg#和低易熔元素含量($Al_2O_3$、CaO和$TiO_2$等)，表明橄榄岩较为亏损，经历了较高程度的熔体提取。全岩HREE模拟表明橄榄岩由尖晶石相DMM经过约18%无水分离熔融形成(网络版附图S4A)。

洪古勒楞方辉橄榄岩经历了广泛的熔体-橄榄岩反应。岩石学上表现为粗粒斜方辉石被细粒港湾状橄榄石和单斜辉石填充(图4C)，这是由于熔体迁移过程中斜方辉石的不完全溶解(Seyler等，2007；Rampone等，2008)。此外，蠕虫状尖晶石表明岩石经历了熔体-橄榄岩反应。在球粒陨石标准化全岩REE模式图上，洪古勒楞橄榄岩相对于DMM减压熔融的橄榄岩更富集LREE，区别于软流圈地幔高程度部分熔融的L-HREE高度分异特征，这是大部分蛇绿岩和深海橄榄岩中熔体-橄榄岩反应典型的REE特征(Zanetti等，2006；Rampone等，2008；Gong等，2022)。研究表明，橄榄岩斜方辉石的比例和颗粒尺寸主要受迁移熔体溶解作用的控制，且斜方辉石的比例与反应熔体的累积通量成反比(Lissenberg等，2024)。对洪古勒楞橄榄岩矿物组分进行计数统计，洪古勒楞方辉橄榄岩的斜方辉石含量普遍在22–28 vol%之间，单斜辉石含量在0.5–2 vol%之间，指示洪古勒楞橄榄岩经历较高的迁移熔体通量。

(2)壳-幔过渡带成因

普遍认为纯橄岩主要有两种成因，分别形成于原始岩浆结晶，即堆晶纯橄岩(Floran等，1978)和熔体通道反

应，即橄榄岩的熔岩反应(Sanfilippo等，2017；Lissenberg等，2024)。洪古勒楞含斜方辉石脉纯橄岩的Mg#远低于原始岩浆结晶的Mg#(图6)，不相容元素含量明显高于堆晶纯橄岩(网络版附图S4)，大洋中很少报道这种类型的斜方辉石脉纯橄岩，目前仅西南印度洋Atlantis Bank中报道了横切二辉橄榄岩的厘米级单斜辉石脉，其矿物成分和化学成分与洪古勒楞斜方辉石脉纯橄岩接近，表明它们具有相同的起源(Zhang等，2024)。这些出现在地幔橄榄岩中的单斜辉石脉形成于Fe-Ti熔体的结晶，其形成模式可能由于在拆离断层下轴部岩浆房高度演化熔体的向上和侧向迁移，洪古勒楞含斜方辉石脉纯橄岩的矿物学成分支持其与Zhang等(2024)所报道的西南印度洋地幔橄榄岩中单斜辉石岩相似的成因模式。

(3)下洋壳成因

洪古勒楞下洋壳岩石组合为富橄榄石橄长岩-橄长岩-橄榄辉长岩-辉长岩(图4B)，与典型的低压贫水玄武质岩浆体系分离结晶的岩石序列一致。全岩Mg#与Ca#(=Ca/(Ca+Na))与大西洋中脊辉长岩具有相同的变化范围(图6B)，全岩$Al_2O_3$和MgO表现出良好的负相关性，符合洋中脊堆晶岩趋势(图6C)。这些特征共同表明洪古勒楞辉长质岩石的矿物结晶顺序为：Ol→Ol+Pl→Ol+Pl+Cpx，与低压贫水体系玄武质岩浆的矿物结晶顺序一致。橄长岩-辉长岩的Nd同位素组成非常亏损，$\varepsilon_{Nd}(t)$和全球洋中脊玄武岩$\varepsilon_{Nd}$重叠，表明辉长质岩石的母岩浆来源于亏损MORB地幔(图8A)。样品的初始Sr同位素比值变化较大，可能受到地壳混染或海水蚀变的影响。辉长岩极其亏损的Nd同位素组成排除了大规模地壳混染的可能，$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$变化范围较宽主要是海水蚀变的结果。另一方面，辉长岩具有十分亏损的锆石Hf同位素组成($\varepsilon_{Hf}(t)$=+14.2–+17.2)，较西准噶尔新生代大陆地壳生长的锆石Hf同位素明显亏损，落在亏损地幔演化线上(图5C)，辉长岩极其亏损的锆石$\varepsilon_{Hf}(t)$值同样指示辉长岩的母岩浆来源于亏损地幔。综上所述，橄长岩-辉长岩的母岩浆源区为亏损MORB地幔。

(4)构造环境

关于洪古勒楞蛇绿岩的构造环境，目前存在不同认识：(ⅰ)形成于准噶尔洋的弧后盆地(舍建忠等，2016)；(ⅱ)代表准噶尔洋初始俯冲阶段的产物(Yang等，2022)；(ⅲ)形成于洋中脊环境(Xie等，2021)。舍建忠等(2016)主要依据玄武岩兼具N-MORB与岛弧拉斑玄武岩地球化学特征提出弧后盆地解释，但其关键玄武岩与497 Ma辉长岩之间缺乏直接年代学对应关系，因此难以判断二者的成因联系。Yang等(2022)依据堆晶岩岩石组合及全岩地球化学特征识别玻安质属性，并将其解释为早奥陶世弧前蛇绿岩。首先，从堆晶岩的全岩化学特征推断母岩浆的性质并不可靠；其次，整个西准地区目前尚无玻安质岩石的报道。相比之下，本文样品覆盖方辉橄榄岩、纯橄岩、橄长岩和辉长岩等壳-幔单元，辉长质岩石具有亏损Nd-Hf同位素组成，橄榄岩为尖晶石相DMM经较高程度无水熔融形成，整体上更接近洋中脊或贫岩浆供给扩张环境。需要承认，现代洋中脊与弧后盆地均可发育大洋核杂岩，且造山带蛇绿岩常经历后期流体和构造改造；因此本文并非完全排除局部俯冲相关影响，而是认为洪古勒楞主体下洋壳-地幔组合更支持慢速扩张洋中脊背景。

### 5.3 慢速扩张脊岩石圈结构组成对比

不同蛇绿岩单元所记录的岩石圈结构存在显著差异。理想的蛇绿岩序列自下而上包括：上地幔橄榄岩、层状超镁铁质-镁铁质堆晶岩、均质辉长岩、席状岩墙群以及喷出岩与海相沉积盖层(Anonymous，1972)。然而，造山带中的蛇绿岩常因后期构造肢解而保存不全。阿曼蛇绿岩是目前世界上保存最为完整的实例之一，其岩石地球化学、同位素及实验岩石学研究揭示，它包含从弧前MORB、玻安岩到拉斑玄武岩的岩石组合，可与伊豆-小笠原-马里亚纳弧前序列对比(Dilek和Furnes，2014)。该蛇绿岩以厚层状辉长岩及发育完好的席状岩墙为特征，此类结构通常被认为形成于快速扩张的洋中脊环境(Akizawa等，2016)。随着综合大洋钻探计划(IODP)与国际大洋发现计划(IODP)的实施，人们对洋壳结构的认识日趋全面。慢速-超慢速扩张系统的岩石圈结构表现出显著的非均质性，表现为上地幔岩石比例增高，且辉长质岩石常以侵入体形式赋存于地幔橄榄岩中(Dilek和Furnes，2014)。例如，地中海地区的阿尔卑斯-亚平宁蛇绿岩就被解释为形成于此类慢速-超慢速扩张环境(Sanfilippo和Tribuzio，2013)。

与阿曼蛇绿岩代表的快速扩张模式不同，洪古勒楞蛇绿岩呈现出慢速扩张体系的典型特征。恢复的蛇绿岩结构剖面显示(图9)，岩石组合上，方辉橄榄岩及蛇纹石化橄榄岩约占30%–40%，壳层岩石以橄长岩-辉长岩系列为主(约占40%–50%)，常与纯橄岩及铬铁矿伴生，但缺失典型的席状岩墙与枕状玄武岩单元；非堆晶的辉长岩、辉绿岩及斜长花岗岩仅占约5%。这些特征与快速扩张的阿曼蛇绿岩厚达4–5 km的连续辉长岩层、席状岩墙及枕状玄武岩(Boudier等，1996)的特征不同。相比之下，洪古勒楞蛇绿岩的结构非均质性明显，表现为辉长岩侵入于上地幔橄榄岩中(图3B)，且辉长质岩石内常见富橄榄石包体，指示熔体-橄榄岩反应过程(未发表数据)。此

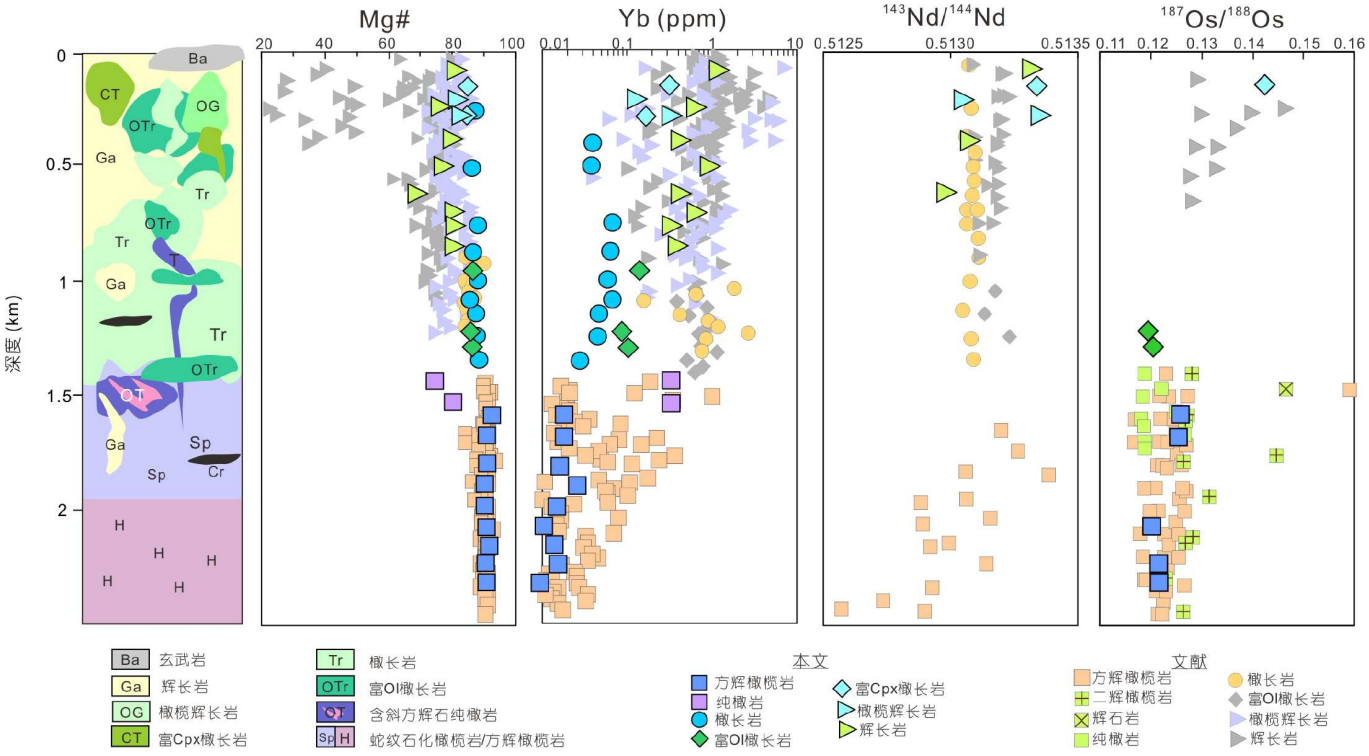



**图 9**　洪古勒楞蛇绿岩结构剖面图及全岩成分、Nd-Os同位素随岩性组成变化图。大西洋Atlantis Massif橄榄岩和辉长岩全岩成分来自Godard等(2009)；大西洋辉长岩Atlantis Massif Nd同位素组成引自Delacour等(2008)；全球深海橄榄岩Os同位素数据来自Harvey等(2006)和Day等(2017)。同位素标准偏差小于图例大小

外，地幔方辉橄榄岩顶部发育含斜方辉石脉纯橄岩，地球化学证据表明其形成于硅饱和熔体的渗透。类似的岩石组合与结构常发现在大西洋中脊，例如IODP钻探获得的橄榄岩岩芯中即见有陡倾的含斜方辉石纯橄岩脉，被解释为地幔上涌、熔融及熔体迁移的产物，这些纯橄岩后期又遭受辉长岩脉侵入与热液蚀变(Lissenberg等，2024)。矿物学统计与成分研究进一步表明，橄榄岩中斜方辉石含量与熔体-岩石反应程度相关。另一方面，大西洋Atlantis Massif作为典型的大洋核杂岩，其辉长质岩石类型极为丰富，涵盖从原始富橄榄石橄长岩到演化程度高的氧化物辉长岩的完整序列(Godard等，2009)，这与洪古勒楞蛇绿岩中观察到的辉长质岩石类型和结构组分特征一致(图3和4)。

不同洋壳单元的地球化学特征存在差异。基于野外剖面关系，我们绘制了洪古勒楞蛇绿岩的成分剖面图(图9)，需说明的是，图中成分数据按采样的相对位置排列，无法代表绝对深度。方辉橄榄岩显示出高Mg#、低Yb等特征，与大西洋地幔橄榄岩相似；辉长质岩石序列从橄长岩到辉长岩，其Mg#和Yb含量呈逐渐降低趋势，揭示了连续的分离结晶过程(图9)。然而，该成分剖面可能平滑了多期岩浆侵入导致的成分跃变，未完全体现类似Atlantis Massif辉长岩中常见的“折线式”成分演化特征(Godard等，2009)。同位素组成上，洪古勒楞橄长岩-辉长岩的Nd同位素组成与Atlantis Massif辉长岩相当；地幔橄榄岩则具有高度亏损的Os同位素组成($^{187}Os/^{188}Os$低至0.1220)，对应的$T_{RD}$模式年龄约为1.3 Ga，与大西洋橄榄岩的亏损端元相似。

综上所述，洪古勒楞蛇绿岩缺失席状岩墙、发育丰富的辉长质侵入序列以及地幔橄榄岩中广泛的熔体-岩石反应现象，可与大西洋中脊的地质实例相类比。另一方面，洪古勒楞蛇绿岩在壳-幔化学成分及Nd-Os同位素演化特征上，与慢速扩张脊Atlantis Massif的壳幔剖面具有高度可比性，进一步支持其形成于慢速扩张背景。

### 5.4　洪古勒楞蛇绿岩可能形成于古大洋核杂岩拼贴

古亚洲洋在演化过程中被微陆块和洋内弧分隔为多个分支洋盆，构成多岛洋的古地理格局(Xiao等，2013)。准噶尔造山带内广泛发育不同时代、成因和规模的蛇绿岩，然而其成因、构造环境及就位机制长期存在争议，制约了对中亚造山带构造演化过程的深入理解。

前人研究报道的古大洋核杂岩具有以下特征：(1)缺失连续席状岩墙和枕状熔岩、并以橄榄岩和辉长质侵入

体为主体(Manatschal等，2011；Miranda和Dilek，2010)；(2)存在辉长岩侵入蛇纹石化橄榄岩、纯橄岩脉和熔体-橄榄岩反应等贫岩浆供给扩张背景下常见的岩石组合(Liu等，2014)；(3)保存伸展剪切、S-C组构、拉伸线理、显微正断层等拆离断层相关运动学证据(敖松坚等，2017)；(4)壳-幔岩石具有亏损MORB地幔来源和慢速扩张洋脊可比的地球化学与同位素特征(Liu等，2024)；(5)存在以糜棱岩或滑石-透闪石-绿泥石片岩为主的大型低角度拆离断层带(刘飞等，2018)。洪古勒楞蛇绿岩在前四方面均显示较强支持，但大型低角度拆离断层及连续糜棱岩带尚未被直接识别。

具体而言，洪古勒楞蛇绿岩主体由下洋壳与地幔岩石组成，缺失典型席状岩墙和连续枕状玄武岩；富橄榄石橄长岩及橄长岩全岩稀土与微量元素含量整体低于大西洋Atlantis Massif的对应岩石(图7A–7D)，可能与母岩浆相对亏损或单斜辉石比例较低有关。橄长岩-辉长岩中单斜辉石平衡熔体的稀土成分(未发表数据)，其显著高于伊豆-小笠原-马里亚纳弧的玻安岩，因而不支持将玻安质熔体作为主要源区。年代学结果及前人资料共同表明，洪古勒楞辉长岩形成于中晚寒武世至早奥陶世(506–475 Ma)，可能记录多阶段辉长质岩浆侵入。野外和显微构造上，洪古勒楞蛇绿岩未见大型低角度拆离断层及糜棱岩带，但存在若干与拆离断层活动相关的间接证据：(1)北侧辉长岩发育典型S-C组构、变晶结构和波状消光等特征(图4H)，类似于韧性剪切带相关伸展组构；(2)橄榄岩强烈蛇纹石化，橄榄岩、辉长岩矿物定向排列并具有拉伸线理(图4G)；(3)韧性变形辉长岩中角闪石发育显微正断层(图4I)，可能代表同期的微小断层切穿糜棱岩面理，表明其为拆离断层张性环境(敖松坚等，2017)。上述证据支持洪古勒楞蛇绿岩可能经历拆离断层相关伸展和热液改造，未来需通过系统构造填图、断层岩识别和变质温压约束进一步验证。

洪古勒楞蛇绿岩的就位机制尚不明确。一般认为，造山带内的蛇绿岩可通过碰撞仰冲、增生底垫、俯冲剥离和角流等方式发生就位(马冲等，2011；敖松坚等，2022)。鉴于洪古勒楞蛇绿岩具有潜在的大洋核杂岩特征，其可能通过以下几类过程就位：(1)俯冲剥离，即转换断层或洋中脊附近的构造高地在俯冲过程中被剥离并保存于增生楔中；(2)增生底垫，古大洋核杂岩的正地形从俯冲板块顶部被刮削并底垫于上覆增生楔；(3)弧-弧碰撞或碰撞仰冲，通过博什切库尔-成吉思弧和塔尔巴哈台-萨吾尔弧碰撞的仰冲就位。

尽管MOR型蛇绿岩在造山带中保存较少，但近年来的研究表明，慢速-超慢速扩张脊环境形成的大洋核杂岩因具有较高的正地形，可能在俯冲过程中优先被保存在造山带中(Liu等，2014；Zhang等，2019)。区域上，早中寒武世古准噶尔洋向北俯冲形成博什切库尔-成吉思弧，形成以查干陶勒盖为代表的蛇绿岩，早中寒武世至早奥陶世，斋桑洋持续扩张，经历洋内俯冲形成和布克赛尔洋和塔尔巴哈台-萨吾尔弧，洪古勒楞-和布克赛尔-库吉拜为代表的蛇绿岩在此期间形成，早志留世前洪古勒楞-和布克赛尔-库吉拜蛇绿岩可能就位于博什切库尔-成吉思弧和塔尔巴哈台-萨吾尔弧的碰撞(Yang等，2019；Song等，2021；Zhang等，2025)。相邻的和布克赛尔蛇绿岩的钉和岩体(441–435 Ma)指示和布克赛尔洋在早志留世之前就已关闭(杨亚琦等，2018)，即洪古勒楞蛇绿岩在此之前完成就位。

洪古勒楞蛇绿岩在岩石圈结构、岩石组合、地球化学和Nd-Hf-Os同位素特征上与慢速扩张岩石圈具有较强可对比性，特别是与Atlantis Massif大洋核杂岩十分接近，其作为中亚造山带中一个可能的古大洋核杂岩代表，其构造高差形成的正地形在后期俯冲-碰撞过程中更易于拼贴保存。这一就位机制对理解中亚造山带的地体拼贴具有重要意义。

## 6 结论

本文对洪古勒楞蛇绿岩开展了野外剖面、岩石学、年代学和Sr-Nd-Hf-Os同位素地球化学研究，建立了壳-幔结构成分剖面，取得了以下认识。

(1)洪古勒楞蛇绿岩主要由方辉橄榄岩、纯橄岩、橄长岩、辉长岩、少量的辉绿岩和块状玄武岩组成，缺失席状岩墙和枕状熔岩。辉长岩锆石U-Pb年代学研究表明蛇绿岩形成于中寒武世至早奥陶世(506–475 Ma)，可能分别记录早期洋壳增生和后续辉长质岩浆补给/侵入事件；橄榄岩Re-Os同位素显示早古生代熔体提取/熔体-岩石反应事件，同时局部较老$T_{RD}$年龄可能反映古老亏损大洋地幔组分。

(2)岩石学、全岩地球化学、锆石Hf同位素及Sr-Nd-Os同位素研究表明，洪古勒楞辉长质岩石是源于DMM的玄武质岩浆在低压贫水条件下分离结晶的产物；而该地区的方辉橄榄岩则是由尖晶石相DMM经约18%的无水部分熔融形成，并遭受了熔-岩反应改造，其地球化学特征与洋中脊橄榄岩类似。

(3)与慢速扩张脊岩石圈结构与成分系统对比提出洪古勒楞蛇绿岩形成于慢速扩张环境，可能为拼贴到中亚造山带内的古大洋核杂岩。

**致谢** 张治国、周海龙、何鹏宇在新疆野外工作中提供帮

助，责任编委和审稿人在评审过程中提出宝贵意见，在此一并致谢。

**补充材料**　补充材料为作者提供的原始数据，作者对其学术质量和内容负责，详见网络版(http://earthcn.scichina.com)。

## 参考文献


敖松坚, 肖文交, 杨磊, 等. 2017. 造山带中古洋壳核杂岩的识别与地质意义. 中国科学: 地球科学, 47: 1–22

敖松坚, 肖文交, 韩春明, 等. 2022. 中亚造山带南缘蛇绿岩研究现状与展望. 地球科学, 47: 3107–3126

白文吉, 周美付. 1991. 新疆洪古勒楞蛇绿岩套中堆积杂岩的地球化学特征及成因. 中国地质科学院院报, 24: 63–78

白文吉, Robinson P. 1995. 西准噶尔不同时代蛇绿岩及其构造演化. 岩石学报, 11: 62–72

都厚远, 陈家富. 2017. 西准噶尔和布克赛尔古洋盆的厘定——来自和布克赛尔蛇绿混杂岩的锆石U-Pb年代学及地球化学证据. 地质学报, 91: 2638–2650

马冲, 赵桂萍, 肖文交, 等. 2011. 蛇绿岩就位机制及时限. 地质科学, 46: 865–874

刘飞, 连东洋, 牛晓露, 等. 2018. 雅鲁藏布江缝合带西段东波MORB型均质辉长岩的大洋核杂岩成因. 地球科学, 43: 952–974

孟磊, 申萍, 沈远超, 等. 2010. 新疆谢米斯台中段火山岩岩石地球化学特征、锆石U-Pb年龄及其地质意义. 岩石学报, 26: 3047–3056

舍建忠, 邓洪涛, 刘阁, 等. 2016. 新疆西准洪古勒楞蛇绿岩地球化学特征及构造环境. 新疆地质, 34: 40–45

杨亚琦, 赵磊, 徐芹芹, 等. 2018. 新疆西准噶尔北部和布克赛尔蛇绿混杂岩的厘定及其洋盆闭合时代限定. 地质学报, 92: 298–312

杨震, 木合塔尔扎日, 马比阿伟, 等. 2016. 洪古勒楞蛇绿岩层序研究进展. 西部探矿工程, 28: 121–122

张元元, 郭召杰. 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究. 岩石学报, 26: 421–430

朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. 岩石学报, 12: 2833–2842

Akizawa N, Ozawa K, Tamura A, et al. 2016. Three-dimensional evolution of melting, heat and melt transfer in ascending mantle beneath a fast-spreading ridge segment constrained by trace elements in clinopyroxene from concordant dunites and host harzburgites of the Oman ophiolite. J Petrol, 57: 777–814

Anonymous. 1972. Penrose field conference on ophiolites. Geotimes, 17: 14–15

Ao S J, Xiao W J, Khalatbari Jafari M, et al. 2016. U-Pb zircon ages, field geology and geochemistry of the Kermanshah ophiolite (Iran): From continental rifting at 79 Ma to oceanic core complex at ca. 36 Ma in the southern Neo-Tethys. Gondwana Res, 31: 305–318

Balestro G, Festa A, Dilek Y, et al. 2015. Pre-Alpine extensional tectonics of a peridotitelocalized oceanic core complex in the Late Jurassic, high-pressure Monviso ophiolite (Western Alps). Episodes, 38: 266–282

Becker H, Dale C W. 2016. Re-Pt-Os isotopic and highly siderophile element behavior in oceanic and continental mantle tectonites. Rev Mineral Geochem, 81: 369–440

Boschi C, Frueh-Green G L, Escartin J. 2006. Occurrence and significance of serpentinite-hosted, talc- and amphibole-rich fault rocks in modern oceanic settings and ophiolite complexes: An overview. Ofioliti, 31: 129–140, doi: 10.4454/ofioliti.v31i2.335

Boudier F, Nicolas A, Ildefonse B. 1996. Magma chambers in the Oman ophiolite: Fed from the top and the bottom. Earth Planet Sci Lett, 144: 239–250

Cannat M. 1993. Emplacement of mantle rocks in the seafloor at mid-ocean ridges. J Geophys Res, 98: 4163–4172

Cannat M. 1996. How thick is the magmatic crust at slow spreading oceanic ridges? J Geophys Res, 101: 2847–2857

Cannat M, Sauter D, Mendel V, et al. 2006. Modes of seafloor generation at a melt-poor ultraslow-spreading ridge. Geology, 34: 605–608

Chen J F, Han B F, Ji J Q, et al. 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China. Lithos, 115: 137–152

Chen J F, Han B F, Zhang L, et al. 2015. Middle Paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the West Junggar (NW China): Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemisitai-Saier Mountains. J Asian Earth Sci, 113: 90–109

Choulet F, Faure M, Cluzel D, et al. 2012. Architecture and evolution of accretionary orogens in the Altaids collage: The early Paleozoic West Junggar (NW China). Am J Sci, 312: 1098–1145

Coogan L A, Wilson R N, Gillis K M, et al. 2001. Near-solidus evolution of oceanic gabbros: Insights from amphibole geochemistry. Geochim Cosmochim Acta, 65: 4339–4357

Day J M D, Walker R J, Warren J M. 2017. $^{186}Os$-$^{187}Os$ and highly siderophile element abundance systematics of the mantle revealed by abyssal peridotites and Os-rich alloys. Geochim Cosmochim Acta, 200: 232–254

Delacour A, Früh-Green G L, Frank M, et al. 2008. Sr- and Nd-isotope geochemistry of the Atlantis Massif (30°N, MAR): Implications for fluid fluxes and lithospheric heterogeneity. Chem Geol, 254: 19–35

Dick H J B, Ozawa K, Meyer P S, et al. 2002. Primary silicate mineral chemistry of a 1.5-km section of very slow spreading lower ocean crust: ODP Hole 735B, Southwest Indian Ridge. In: Natland J H, Dick H J B, Miller D J, et al., eds. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Result. Proc Ocean Drill Program: Sci Results. 176

Dilek Y, Furnes H. 2014. Ophiolites and their origins. Elements, 10: 93–100

Floran R J, Prinz M, Hlava P F, et al. 1978. The Chassigny meteorite: A cumulate dunite with hydrous amphibole-bearing melt inclusions. Geochim Cosmochim Acta, 42: 1213–1229

Godard M, Awaji S, Hansen H, et al. 2009. Geochemistry of a long *in-situ* section of intrusive slow-spread oceanic lithosphere: Results from IODP Site U1309 (Atlantis Massif, 30°N Mid-Atlantic-Ridge). Earth Planet Sci Lett, 279: 110–122

Gong X H, Xu J F, Liu X J, et al. 2020. Widespread Os-isotopically ultradepleted mantle domains in the Paleo-Asian oceanic upper mantle: Evidence from the Paleozoic Tianshan ophiolites (NW China). Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 109: 1421–1438

Gong X H, Tian L, Dong Y. 2022. Contrasting melt percolation and melt-rock reactions in the Parece Vela back-arc oceanic lithosphere, Philippine Sea: A mineralogical perspective. Lithos, 422-423: 106727

Grimes C B, John B E, Cheadle M J, et al. 2008. Protracted construction of gabbroic crust at a slow spreading ridge: Constraints from $^{206}Pb/^{238}U$ zircon ages from Atlantis Massif and IODP Hole U1309D (30°N, MAR). Geochem Geophys Geosyst, 9: Q08012

Han Y, Zhao G. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean. Earth-Sci Rev, 186: 129–152

Harvey J, Gannoun A, Burton K W, et al. 2006. Ancient melt extraction from the oceanic upper mantle revealed by Re-Os isotopes in abyssal peridotites from the Mid-Atlantic ridge. Earth Planet Sci Lett, 244: 606–621

Hellebrand E. 2002. Garnet-field melting and late-stage refertilization in 'residual' abyssal peridotites from the Central Indian Ridge. J Petrol, 43:

2305–2338
Kelemen P B, Kikawa E, Miller J, et al. 2004. Proceedings of the Ocean Drilling Program Volume 209 Scientific Results: Drilling Mantle Peridotite Along the Mid-Atlantic Ridge from 14° to 16°N: Sites 1268–1275. Ocean Drilling Program
Li Q, Lin W, Su W, et al. 2011. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China. Lithos, 122: 76–86
Lissenberg C J, McCaig A M, Lang S Q, et al. 2024. A long section of serpentinized depleted mantle peridotite. Science, 385: 623–629
Liu C Z, Zhang C, Yang L Y, et al. 2014. Formation of gabbronorites in the Purang ophiolite (SW Xizang) through melting of hydrothermally altered mantle along a detachment fault. Lithos, 205: 127–141
Liu J, Pearson D G, Shu Q, et al. 2020. Dating post-Archean lithospheric mantle: Insights from Re-Os and Lu-Hf isotopic systematics of the Cameroon Volcanic Line peridotites. Geochim Cosmochim Acta, 278: 177–198
Liu T, Liu C Z, Wu F Y, et al. 2024. Detachment fault-hosted subduction re-initiation of the (Ultra)slow-spreading western Neo-Tethys in the Jurassic. Geochem Geophys Geosyst, 25: e2023GC011173
Manatschal G, Sauter D, Karpoff A M, et al. 2011. The Chenaillet Ophiolite in the French/Italian Alps: An ancient analogue for an oceanic core complex? Lithos, 124: 169–184
Meisel T, Walker R J, Irving A J, et al. 2001. Osmium isotopic compositions of mantle xenoliths: A global perspective. Geochim Cosmochim Acta, 65: 1311–1323
Miranda E A, Dilek Y. 2010. Oceanic core complex development in modern and ancient oceanic lithosphere: Gabbro-localized versus peridotite-localized detachment models. J Geol, 118: 95–109
Nuriel P, Katzir Y, Abelson M, et al. 2009. Fault-related oceanic serpentinization in the Troodos ophiolite, Cyprus: Implications for a fossil oceanic core complex. Earth Planet Sci Lett, 282: 34–46
Rampone E, Piccardo G B, Hofmann A W. 2008. Multi-stage melt-rock interaction in the Mt. Maggiore (Corsica, France) ophiolitic peridotites: Microstructural and geochemical evidence. Contrib Miner Petrol, 156: 453–475
Ren R, Han B F, Xu Z, et al. 2014. When did the subduction first initiate in the southern Paleo-Asian Ocean: New constraints from a Cambrian intra-oceanic arc system in West Junggar, NW China. Earth Planet Sci Lett, 388: 222–236
Sanfilippo A, Tribuzio R. 2013. Building of the deepest crust at a fossil slow-spreading centre (Pineto gabbroic sequence, Alpine Jurassic ophiolites). Contrib Miner Petrol, 165: 705–721
Sanfilippo A, Tribuzio R, Ottolini L, et al. 2017. Water, lithium and trace element compositions of olivine from Lanzo South replacive mantle dunites (Western Alps): New constraints into melt migration processes at cold thermal regimes. Geochim Cosmochim Acta, 214: 51–72
Seyler M, Lorand J P, Dick H J B, et al. 2007. Pervasive melt percolation reactions in ultra-depleted refractory harzburgites at the Mid-Atlantic Ridge, 15° 20′N: ODP Hole 1274A. Contrib Miner Petrol, 153: 303–319
Shen P, Shen Y, Li X H, et al. 2012. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A geochemical and geochronological approach. Lithos, 140-141: 103–118
Shirey S B, Walker R J. 1998. The Re-Os isotope system in cosmochemistry and high-temperature geochemistry. Annu Rev Earth Planet Sci, 26: 423–500
Smith D K, Cann J R, Escartín J. 2006. Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13°N on the Mid-Atlantic Ridge. Nature, 442: 440–443
Smith D K, Escartín J, Schouten H, et al. 2008. Fault rotation and core complex formation: Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°–15°N). Geochem Geophys Geosyst, 9: Q03003
Soret M, Bonnet G, Agard P, et al. 2022. Timescales of subduction initiation and evolution of subduction thermal regimes. Earth Planet Sci Lett, 584: 117521
Song F, Chen J F, Han B F, et al. 2021. Silurian alkaline magmatism in the Saur area, northern West Junggar: Evidence for the Middle Palaeozoic amalgamation of the Kazakhstan Block at the south-west of the Central Asian Orogenic Belt. Geol J, 56: 1202–1235
Sun S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. Geol Soc Spec Publ, 42: 313–345
Tani K, Dunkley D J, Ohara Y. 2011. Termination of backarc spreading: Zircon dating of a giant oceanic core complex. Geology, 39: 47–50
Wu Y, Bai X J, Shi H S, et al. 2023. Dating of authigenic minerals in sedimentary rocks: A review. Earth-Sci Rev, 241: 104443
Xiao W, Windley B F, Allen M B, et al. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. Gondwana Res, 23: 1316–1341
Xiao W, Windley B F, Sun S, et al. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: Oroclines, sutures, and terminal accretion. Annu Rev Earth Planet Sci, 43: 477–507
Xie H, Wang Y, Guo B, et al. 2021. Mineralogy and geochemistry of cumulates from the Hongguleleng ophiolitic mélange, western Junggar, Xinjiang: Implications for the origin and tectonic setting. Ore Geol Rev, 132: 104000
Xu Z, Han B F, Ren R, et al. 2012. Ultramafic-mafic mélange, island arc and post-collisional intrusions in the Mayile Mountain, West Junggar, China: Implications for Paleozoic intra-oceanic subduction-accretion process. Lithos, 132-133: 141–161
Xu Z, Han B F, Ren R, et al. 2013. Palaeozoic multiphase magmatism at Barleik Mountain, southern West Junggar, Northwest China: Implications for tectonic evolution of the West Junggar. Int Geol Rev, 55: 633–656
Yang G, Li Y, Santosh M, et al. 2013. Geochronology and geochemistry of basalts from the Karamay ophiolitic melange in West Junggar (NW China): Implications for Devonian-Carboniferous intra-oceanic accretionary tectonics of the southern Altaids. Geol Soc Am Bull, 125: 401–419
Yang Y, Zhao L, Zheng R, et al. 2019. Evolution of the early Paleozoic Hongguleleng-Balkybey Ocean: Evidence from the Hebukesaier ophiolitic mélange in the northern West Junggar, NW China. Lithos, 324-325: 519–536
Yang Y, Zhao L, Zheng R, et al. 2020. An Early Ordovician fossil seamount of the Hongguleleng-Balkybey Ocean in the northern West Junggar terrane (NW China) and its implications for the ocean evolution. J Asian Earth Sci, 194: 104066
Yang Y, Zhao L, Zhang J, et al. 2022. An Ordovician ophiolitic complex in West Junggar, NW China: Implications for subduction initiation and oceanic arc evolution of the Paleo-Asian Ocean. Gondwana Res, 111: 122–141
Yin J, Chen W, Xiao W, et al. 2017. Late Silurian-early Devonian adakitic granodiorite, A-type and I-type granites in NW Junggar, NW China: Partial melting of mafic lower crust and implications for slab roll-back. Gondwana Res, 43: 55–73
Yin J, Chen W, Xiao W, et al. 2018. Petrogenesis and tectonic implications of early Devonian mafic dike-granite association in the northern West Junggar, NW China. Int Geol Rev, 60: 87–100
Yin J, Xiao W, Wang T, et al. 2024. Maturation from oceanic arcs to continental crust: Insights from Paleozoic magmatism in West Junggar, NW China. Earth-Sci Rev, 253: 104795
Zanetti A, D'Antonio M, Spadea P, et al. 2006. Petrogenesis of mantle

peridotites from the Izu-Bonin-Mariana (IBM) forearc. Ofioliti, 31: 189–206, doi: 10.4454/ofioliti.v31i2.340

Zhang C, Liu C Z, Xu Y, et al. 2019. Subduction re-initiation at dying ridge of Neo-Tethys: Insights from mafic and metamafic rocks in Lhaze ophiolitic mélange, Yarlung-Tsangbo Suture Zone. Earth Planet Sci Lett, 523: 115707

Zhang W Q, Liu C Z, Liu T, et al. 2022. Multi-stage melt impregnation and magma-seawater interaction in a slow-spreading oceanic lithosphere: Constraints from cumulates in the Lagkorco ophiolite (central Xizang). Contrib Miner Petrol, 177: 109

Zhang W Q, Liu C Z, Dick H J B, et al. 2024. Oceanic mantle beneath ultraslow spreading ridges metasomatized by variably evolved melts. Contrib Miner Petrol, 179: 15

Zhang Y, Chen J, Liu Y, et al. 2025. How long did the Paleo-Asian Ocean take from initial subduction to slab rollback?: Revelation of early Paleozoic magmatism in the eastern Boshchekul-Chingiz arc Geol Soc Am Bull, 137: 769–789

Zhao L, He G. 2014. Geochronology and geochemistry of the Cambrian (~518 Ma) Chagantaolegai ophiolite in northern West Junggar (NW China): Constraints on spatiotemporal characteristics of the Chingiz-Tarbagatai megazone. Int Geol Rev, 56: 1181–1196

Zheng R, Zhao L, Yang Y. 2019. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of a new ophiolitic mélange in the northern West Junggar, NW China. Gondwana Res, 74: 237–250

（责任编委：周建波）