

羌塘盆地中侏罗世主力烃源岩的统一：来自原位方解石U-Pb定年的新年代学约束

苗澍青^{1,2}, 王立成^{1*}, 彭恒¹, 李亚林², 岳雅慧¹, 丁林¹

1. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 北京 100101

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

* 通讯作者, E-mail: lichengwang@itpcas.ac.cn

2025-11-06收稿, 2026-01-17修回, 2026-02-10接受, 2026-05-20网络版发表

国家自然科学基金项目(42241201)资助

摘要 羌塘盆地是我国面积最大的中生代海相含油气盆地, 但其主力烃源岩的形成时代长期存在争议。本研究利用原位方解石U-Pb定年技术(LA-ICP-MS), 结合阴极发光成像与地球化学分析, 对盆地侏罗纪主力烃源岩进行了精确的年代学约束。结果表明, 北羌塘坳陷西长梁-胜利河油页岩中的灰岩夹层沉积年龄为164–163 Ma(中侏罗世卡洛夫期), 修正了此前基于Re-Os定年划分的“晚侏罗世-早白垩世”认识; 同时, 南羌塘坳陷安多114道班烃源岩年龄限定为168–165 Ma(中侏罗世晚巴通期-卡洛夫期), 该结果不仅与颗石藻等生物地层学证据高度契合, 亦可与毕洛错油页岩已发表的U-Pb年龄(166–164 Ma)相互印证。综合定年结果、地震反射特征及岩相古地理分析, 本文认为上述三套主力烃源岩均发育于晚巴通期-卡洛夫期, 指示中侏罗世时期北羌塘坳陷广泛发育一套优质烃源岩。这一高精度年代学框架的构建, 有效解决了长期存在的时代争议。研究进一步指出, 这些优质烃源岩形成于温暖、半干旱的古气候背景下, 受区域性蒸发局限影响, 水体盐度升高并诱发强烈分层, 从而显著提升了有机质的保存效率。

关键词 方解石U-Pb定年, 蒸发相烃源岩, 中侏罗世, 羌塘盆地, 青藏高原

1 引言

羌塘盆地位于青藏高原北部, 面积约220000 km², 是我国陆上面积最大的中生代海相含油气盆地, 大规模古油藏带和液态油苗的发现证实盆地经历了油气成藏作用, 显示有巨大的油气资源潜力(王成善等, 2001; 赵政璋等, 2001; 王剑等, 2009a; 吴珍汉等, 2020)。然而该盆地也是我国油气勘探程度最低的地区之一, 长期以来对盆地的主力烃源岩时代和分布范围仍存在较大分歧。早期的烃源岩潜力评价认为毕洛错油页岩是羌塘盆地最主要的烃源层(王成善和张哨楠, 1987); 之后研究者认为存在四套主力烃源岩: 即上三叠统肖查卡组、中侏罗统布曲组、中侏罗统夏里组 and 上侏罗统索瓦组(赵政璋等, 2001; 伍新和等, 2005); 王剑等(2009a)则认为存

在多套烃源岩。后期通过古油藏和液态油苗的油源对比, 提出主力烃源岩为晚侏罗世索瓦组、中侏罗统夏里组、下侏罗统曲色组和上三叠统巴贡组(季长军, 2015; 王剑等, 2020; 吴珍汉等, 2023; 黎东玉等, 2025)。然而, 由于对羌塘盆地主力烃源岩层位认识不一致, 严重制约了对该区域油气成藏规律的认识, 阻碍了生烃凹陷的定位和圈定, 不利于勘探部署工作的推进。

仅就侏罗纪主力烃源岩而言, 主要分布于北羌塘坳陷的胜利河地区, 以及南羌塘坳陷的毕洛错、安多114道班等地区, 以碳质页岩或油页岩为主。其中, 北羌塘坳陷西长梁-胜利河油页岩带是我国迄今发现规模最大的海相油页岩带(王剑等, 2009b), 该油页岩带有机质丰度高、类型好, 是盆地内最具生烃潜力的层系(陈程等, 2024; 刘天夫等, 2024; 杨易卓等, 2025)。前人早期基

中文引用格式: 苗澍青, 王立成, 彭恒, 李亚林, 岳雅慧, 丁林. 2026. 羌塘盆地中侏罗世主力烃源岩的统一: 来自原位方解石U-Pb定年的新年代学约束. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2291–2304, doi: 10.1360/N072025-0686

英文引用格式: Miao S, Wang L, Peng H, Li Y, Yue Y, Ding L. 2026. Unifying the Middle Jurassic major source rock system of the Qiangtang Basin: New chronological constraints from *in situ* calcite U-Pb dating. Science China Earth Sciences, 69(6): 2248–2261, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1875-6>

于Re-Os同位素等时线年龄(101 ± 24 Ma)及孢粉组合特征,将其形成时代限定于晚侏罗世末期-早白垩世(王剑等, 2007)。然而,近期生物化石证据表明,西长梁油页岩沉积时代为早-中侏罗世早期,长蛇山油页岩则形成于中侏罗世巴通期-卡洛夫期(吴珍汉等, 2021)。值得注意的是,南羌塘盆地安多114道班烃源岩同样具有有机质丰度高、类型好等特征,展现出良好的生烃潜力(季长军, 2015)。但目前其时代还存在争议,如依据菊石划分为晚侏罗世(伊海生等, 2005),而依据微体化石颗石藻确定为中侏罗世巴通期-卡洛夫期(Chen等, 2019, 2023)。最近, Wang L等(2024)利用方解石U-Pb定年证实毕洛错油页岩形成于中侏罗世晚巴通期-卡洛夫期,与微体化石证据一致,解决了长期的时代争议。

本研究将原位方解石U-Pb定年技术应用于西长梁-胜利河油页岩以及安多114道班烃源岩地层剖面,揭示二者一致的中侏罗世沉积年龄。结果表明,中侏罗世是羌塘盆地一套广泛分布的高质量烃源岩形成的关键时期。

2 地质背景

羌塘盆地位于全球油气资源最富集的特提斯构造域东段。构造上,盆地北邻金沙江缝合带,南接班公-怒江缝合带(图1)。羌塘盆地经历了长期复杂的构造-沉积演化,其中在晚三叠世-早白垩世发育完整的海相沉积序列,累计厚度逾5000 m(李亚林等, 2008)。前人将羌塘盆地分为北羌塘拗陷和南羌塘拗陷,二者之间被中央隆起带分割(Zhang等, 2024)(图1),该隆起带构成了构造与沉积的双重边界,控制了沉积格局与水动力条件的时空演变。

南北拗陷在中生代独立演化,因此盆地之间的沉积相、地层序列和源-储层系统存在显著差异(王成善等, 2001; 赵政璋等, 2001; 薛伟伟等, 2020)。北羌塘拗陷总体以更厚的海相序列和更广泛的富有机质页岩发育为特征,南羌塘拗陷则表现出更强的构造变形,地层不连续性也更为显著。这种空间异质性对理解盆地含油气系统演化至关重要。

北羌塘拗陷侏罗纪地层分布广泛、层序连续、发育完整,以广泛发育的雁石坪群为代表。该群地层自下而上依次划分为雀莫错组(J_2q)、布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x)、索瓦组(J_3s)及雪山组(J_3x)(西藏地质矿产局, 1997)。岩性组合呈现“三砂夹两灰”的特征:雀莫错组、夏里组和雪山组以砂岩为主,而布曲组、索瓦组则以灰岩为主(王成善等, 2004)。总体为一套浅海碳酸盐岩与碎屑岩沉积,局部夹蒸发岩,反映了中-晚侏罗世期间海侵与海退的交替(Xue等, 2020)。

相较之下,南羌塘拗陷侏罗系出露相对局限,主要分布于帕度错-毕洛错-其香错-安多一带。其层序自下而上为曲色组(J_1q)、色哇组(J_2s)、布曲组(J_2b)、夏里组(J_2x)及索瓦组(J_3s)(Chen等, 2019, 2023; 薛伟伟等, 2020)。与北羌塘拗陷相比,南羌塘侏罗系以典型的浅海相为特征,主要为暗色页岩、钙质泥岩和富含菊石的生物灰岩。这些岩相组合,尤其是在毕洛错和安多114道班地区,指示了一个相对稳定的陆表海环境,具备高有机质生产力和良好的保存条件,有利于优质烃源岩发育(伊海生和夏国清, 2022)。综上所述,在研究区(西长梁-胜利河、毕洛错和安多114道班)广泛发育的中侏罗统层段中,稳定的陆表海环境、高初级生产力与有利的保存条件共同促进了有机质富集,形成了具有高总有机碳(TOC)含量及适宜有机质成熟度的优质烃源岩(表1),为羌塘盆地油气生成奠定了重要基础。

3 研究剖面与样品

3.1 西长梁-胜利河剖面

西长梁油页岩位于北羌塘拗陷玛尔果茶卡东南,近东西向展布于东长梁-西长梁-胜利河地区(图1)。前期探槽揭露显示,该油页岩发育8-12层,累计厚度74-105 m(吴珍汉等, 2021)。研究剖面(GPS: $33^{\circ}43'N$, $87^{\circ}12'E$)岩性组合清晰,主体为黑色含油页岩、微晶灰岩和生物碎屑灰岩,夹少量的泥岩和钙质灰岩(付修根等, 2007)。本次研究在该剖面采集生物碎屑灰岩样品3个(图2和图3)。

3.2 安多114道班剖面

安多114道班剖面位于南羌塘拗陷安多构造带东缘(GPS: $32^{\circ}26'N$, $91^{\circ}47'E$; 图1)。该剖面露出了区内最完整的中-上侏罗统序列,地层连续,累计厚度600-700 m,整体未见断层或沉积间断,是区域地层对比的关键剖面(伊海生等, 2005; Li等, 2020)。野外观察可将剖面划分为三段:下段以紫红色砂岩、粉砂岩与灰绿色粉砂岩互层为主;中段过渡为生屑灰岩和泥灰岩;上段以灰绿色粉砂岩、钙质细砂岩以及灰黑色微晶灰岩为主,该段是菊石主要产出层位,也是液态油苗显示层位(伊海生等, 2005)。该套沉积受特提斯域海平面上升影响(Xue等, 2020),形成于深水陆棚至陆坡环境(伊海生等, 2005)。本次研究在该剖面共采集灰岩样品10个(图2和图4)。

3.3 地球化学分析

主微量元素分析在北京中科矿研检测技术有限公司完成。测试流程如下:碳酸盐样品研磨至200目后,采用

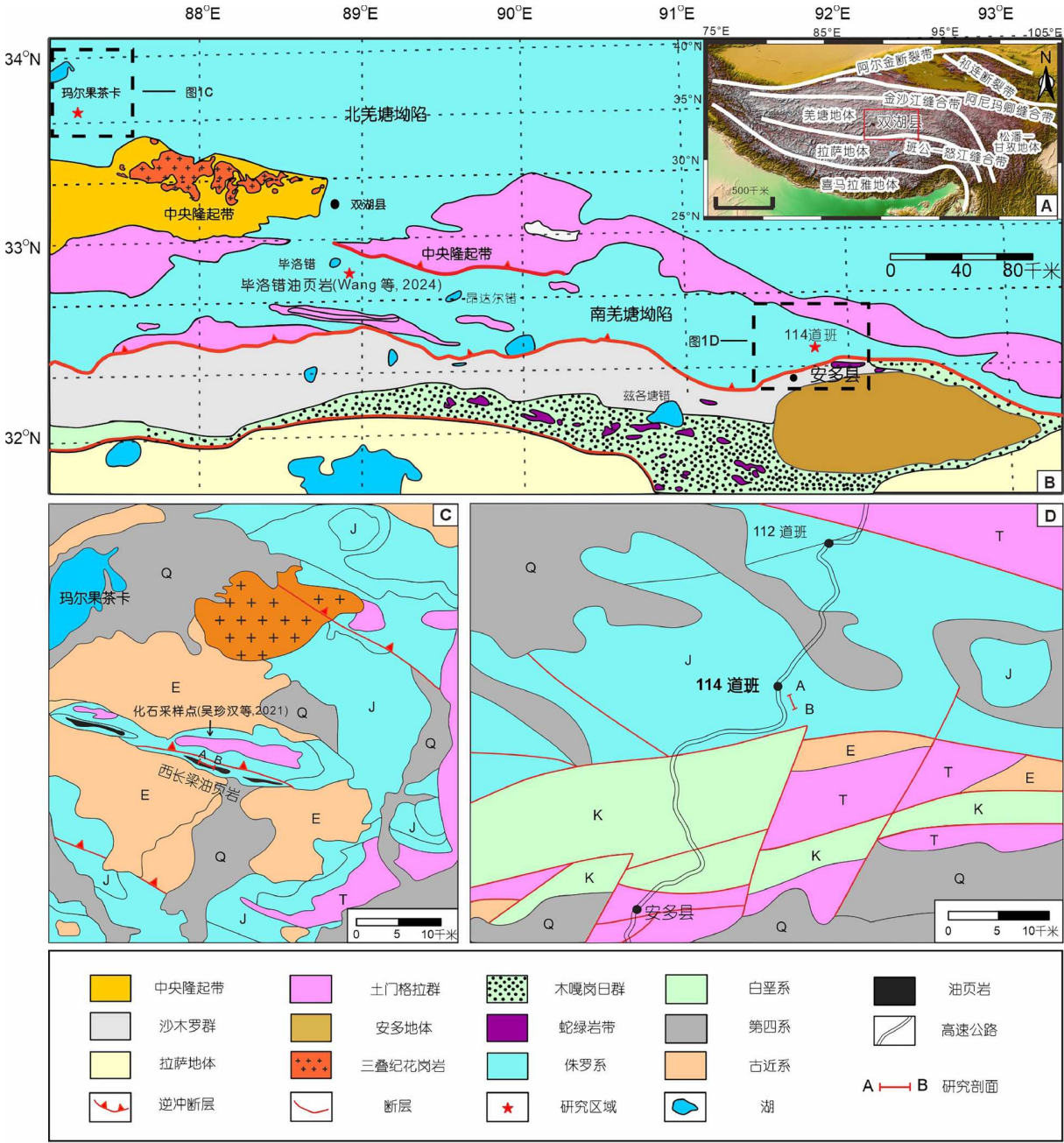


图1 (A) 青藏高原及邻区构造简图, 显示主要地体和缝合带(改自Wang L等, 2024); (B) 羌塘盆地地质简图(改自Wang L等, 2024); (C) 胜利河地区地质简图(改自吴珍汉等, 2021); (D) 安多114道班地区地质简图(改自Li等, 2020)

表1 羌塘盆地主要侏罗系烃源岩地球化学特征(数据引自李闰宇, 2024)

地区	位置	TOC(%)	平均TOC(%)	R_o (%)	平均 R_o (%)
西长梁-胜利河油页岩	北羌塘	0.91–15.39	3.96	0.81–1.09	0.88
毕洛错油页岩	南羌塘	0.65–11.34	3.51	0.79–1.09	0.86
安多114道班烃源岩	南羌塘	0.63–11.4	2.51	0.76–1.05	0.92

飞利浦PW2 404型X射线荧光光谱仪(XRF)测定主量元素, 分析精度优于1%; 微量元素测试采用ELEMENT XR

高分辨率电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行, 分析精度优于2.5%(具体流程参考Ma等, 2015)。



图2 (A、B) 西长梁-胜利河油页岩剖面野外照片(样品SH26和SH27); (C-G) 安多114道班烃源岩剖面野外照片(样品AD01、AD02、AD03、AD04、AD05和AD06), 其中NJ12 *A. helvetica*为NJ12带中标志性化石*Ansulasphaer Helvetica*(Chen等, 2019, 2023)

3.4 方解石U-Pb定年

将新鲜岩石样品破碎成厘米级碎片, 镶嵌于环氧树脂并抛光至 $1\ \mu\text{m}$ 平整度。在进行U-Pb同位素分析之前, 利用透射光及阴极发光(CL)等成像技术鉴别不同期次的碳酸盐矿物, 以评估成岩作用潜在影响。激光剥蚀点选择在均一的成岩域内, 以确保分析对象属同一成岩阶段。剥蚀前用酒精擦拭靶面以减少样品表面Pb污染(张亮亮等, 2022; 鲁雪松等, 2023)。

碳酸盐样品的原位U-Pb测年在中国科学院青藏高原研究所青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室(TPESER)进行。实验室采用ESI NWR HE 193 nm激光剥蚀系统联合Agilent 7900a四极杆型等离子体质谱仪(Q-ICP-MS)进行碳酸盐岩U-Pb定年分析, 参照Zhang和Hou(2021)的流程。激光条件为: 束斑直径 $130\ \mu\text{m}$ 、能量密度 $3\ \text{J}/\text{cm}^2$ 、剥蚀频率10 Hz。每个分析点的分析时间为65 s, 包括激光预热时间15 s、激光剥蚀时间20 s、吹扫

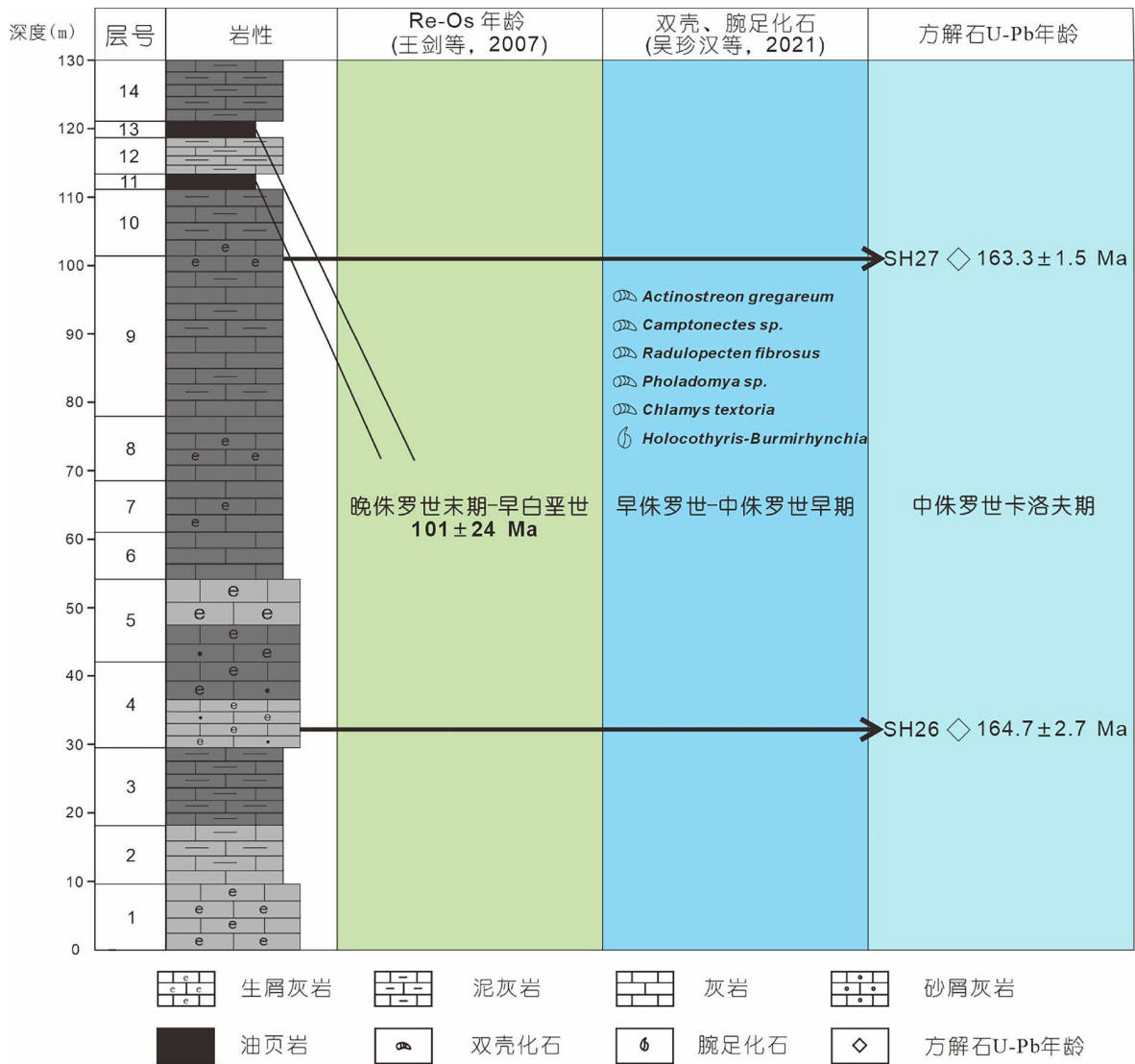


图3 西长梁-胜利河油页岩剖面地层柱状图(据付修根等, 2007修改); 年龄标定基于已发表的Re-Os同位素数据(王剑等, 2007)及双壳类、腕足类化石记录(吴珍汉等, 2021), 图中标注了本次研究获得可靠年龄的样品位置

时间30 s。NIST SRM 614和ARM-3作为标样。WC-1 (254±6.5 Ma; Roberts等, 2017)作为主要标样来校准U/Pb比值, TARIM(208.5±0.6 Ma; Zhang等, 2023)作为次要标样来确保数据的准确性。使用NIST SRM 614校正仪器漂移并计算²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb与²³⁸U/²⁰⁶Pb比值; 使用WC-1校正NIST SRM 614与方解石之间的基体效应导致的质量分馏(吴石头等, 2022), WC-1的定值误差未传递至未知样品的最终年龄。采用网格法筛选高U、低普通Pb的剥蚀点。在仪器调谐模式下, 监控²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb和U信号强度及²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb、²³⁸U/²⁰⁶Pb比值。筛选标准为U信号强度高、²³⁸U/²⁰⁶Pb比值>2、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb比值<0.8(鲁雪松等, 2023)。每分析10个样品点后, 对NIST SRM 614、ARM-3、WC-1和TARIM各进行两次测量, 以进行

质量控制。采用Zhang等(2023)的两步法校正仪器漂移、同位素分馏及普通Pb校正。WC-1的U-Pb数据通过Isoplot插件生成的上交点固定为0.85的Tera-Wasserburg图, 下交点年龄记为未校正年龄。鉴于碳酸盐岩基体效应, 将WC-1未校正年龄与其推荐年龄的比值作为偏移因子(1.05), 乘以未知样品的²³⁸U/²⁰⁶Pb比值进行校正(鲁雪松等, 2023)。原始数据使用Iolite 4软件处理, 并以无固定上交点回归绘制Tera-Wasserburg谐和图, 同时给出拟合的初始Pb比值及对应年龄。数据导出至Excel软件后, 使用Isoplot插件绘制等时线并剔除明显离群值以确定年龄。误差报告为2σ, 最终不确定度仅包含分析误差(即内部精度), 未包含标样WC-1的定值误差(~2.5%)。

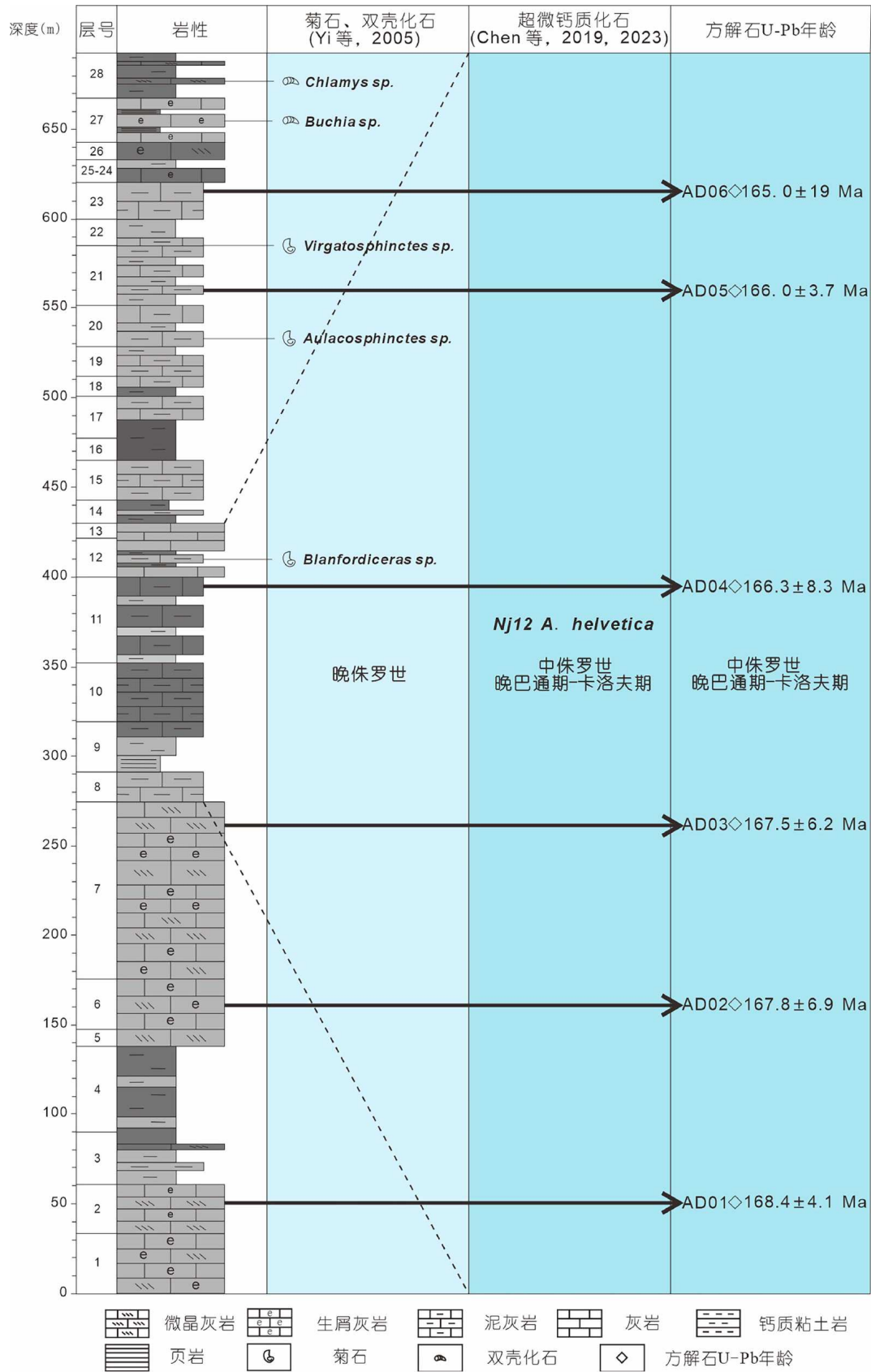


图4 安多114道班剖面地层柱状图(据Li等, 2020修改); 年龄标定基于已发表的钙质超微化石(Chen等, 2019, 2023)及双壳类、菊石化石数据(伊海生等, 2005)。图中标注了本次研究获得可靠年龄的样品位置

4 结果

4.1 岩石学

安多114道班剖面样品AD01–AD05均为微晶灰岩, AD06为砂屑灰岩(图5A)。在CL下, 微晶灰岩中的方解石呈微弱暗棕红色光(图5B)。样品AD01中含有少量孔洞充填及脉状方解石, 发光较强, 呈红色。砂屑灰岩AD06的发光性与微晶灰岩相似, 呈弱棕红色光(图5B)。

西长梁-胜利河剖面样品SH26和SH27为生物碎屑灰岩(图5C)。CL下, 鲕粒包壳发微弱暗棕红色光, 而核部发较强红色光。在进行U-Pb分析时, 优先选择弱发光区域进行激光剥蚀, 以代表受后期改造较少的原生碳酸盐岩。

4.2 地球化学特征

西长梁样品(SH26和SH27)的CaO含量为48.06%–48.72%, MgO为0.77%–0.78%, MgO/CaO为0.02。MnO为0.04%–0.05%, Sr含量低于300 $\mu\text{g/g}$, Mn/Sr比值大于1。安多样品(AD01–AD06)的CaO为39.64%–53.00%, MgO为0.92%–2.90%, MgO/CaO为0.02–0.07。MnO为0.01%–0.04%, Sr含量普遍高于350 $\mu\text{g/g}$, Mn/Sr均小于0.4(表2)。这些特征表明, 大多数碳酸盐岩样品保留了近原始组成, 成岩作用较弱。

4.3 原位方解石U-Pb定年

U-Pb同位素分析获得了良好的Tera-Wasserburg等时线(图6, 表3和网络版附表S1)。西长梁两个样品(SH26、SH27)获得了可靠年龄, 分别为 164.7 ± 2.7 和 163.3 ± 1.5 Ma, 属中侏罗世卡洛夫期。安多114道班剖面六个样品(AD01–AD06)获得了有地质意义的年龄, AD01为 168.4 ± 4.1 Ma, AD02为 167.8 ± 6.9 Ma, AD03为 167.5 ± 6.2 Ma, AD04为 166.3 ± 8.3 Ma, AD05为 166.0 ± 3.7 Ma, AD06为 165 ± 19 Ma, 均属于中侏罗世晚巴通期-卡洛夫期。

5 讨论

5.1 成岩作用评估

成岩作用可能会显著影响碳酸盐岩的U-Pb同位素体系。因此, 在将U-Pb年龄解释为沉积年龄前, 必须充分评估其影响。CL是研究碳酸盐岩物质来源、成岩作用以及演化历史的重要技术手段, 其有效性源于碳酸盐矿物的发光特性受控于Mn、Fe等特定元素, Mn是方解石阴极发光的活化剂, Fe是方解石阴极发光的猝灭剂(黄思

静, 1992)。由于海水中Sr、Mg、Fe富集而Mn贫乏, 原始碳酸盐沉积物通常因贫Mn而不发光; 然而, 经历成岩作用后, 随着Fe含量降低或Mn含量增加, 其阴极发光强度显著增强(郑荣才等, 2010)。Mg/Ca和Mn/Sr元素比值也被广泛用作成岩作用指标。在成岩作用的不同阶段, Mg和Mn的富集机制存在显著差异: Mg在早期成岩中与海水相互作用富集(Fantle等, 2020), Mn在晚期成岩中因矿物溶解再结晶而富集(Denison等, 1994)。相比之下, Sr含量在整个成岩过程中持续降低(Marshall, 1992)。

安多114道班样品具有较低的Mg/Ca与Mn/Sr比值及微弱的CL发光, 表明其受后期成岩作用影响弱, 保存了近初始沉积状态。相比之下, 西长梁-胜利河剖面样品显示较高的Mn/Sr比值和较强的CL发光, 指示经历了更显著的后期成岩改造, 尽管如此, 通过谨慎选择其相对弱发光区域进行激光剥蚀, 确保了所获U-Pb年龄主要指示原始沉积年龄, 而非成岩作用重置年龄。

5.2 主力烃源岩时代

5.2.1 西长梁-胜利河油页岩

自北羌塘坳陷胜利河油页岩带发现以来, 其沉积时代一直存在较大争议。王剑等(2007)基于Re-Os等时线年龄(101 ± 24 Ma)及孢粉组合, 提出其为晚侏罗世-早白垩世沉积(图3)。然而, 该解释存在两点主要问题: (1)样品间 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比值及Re、Os含量差异显著, 不满足Re-Os定年的基本前提; (2)孢粉化石稀少且分异度低, 生物地层学约束弱(王剑等, 2007)。之后, 吴珍汉等(2021)在西长梁剖面以北约4 km处发现丰富的双壳类及腕足类化石(图1和图3), 其中*Holocothyris-Burmihynchia*腕足组合及*Chlamys textoria*和*Radulopecten fibrosus*等双壳类指示中侏罗世早巴通期-早卡洛夫期。本研究获得的原位方解石U-Pb年龄(164–163 Ma)提供了高精度年代学约束, 明确否定了早白垩世的观点, 将其沉积时代限定于巴通期-卡洛夫期。尽管较高的Mn/Sr比值及CL特征指示其经历后期成岩改造, 但通过避开发光强烈的鲕粒核部等区域, 确保了U-Pb体系受成岩作用影响最小。综合而言, U-Pb年代学和古生物学证据均表明西长梁-胜利河油页岩沉积于中侏罗世巴通期-卡洛夫期。

5.2.2 安多114道班烃源岩

安多114道班烃源岩以高有机质丰度和好干酪根类型为特征, 是南羌塘坳陷最具潜力的烃源岩(季长军, 2015), 其时代厘定至关重要。早期伊海生等(2005)基于

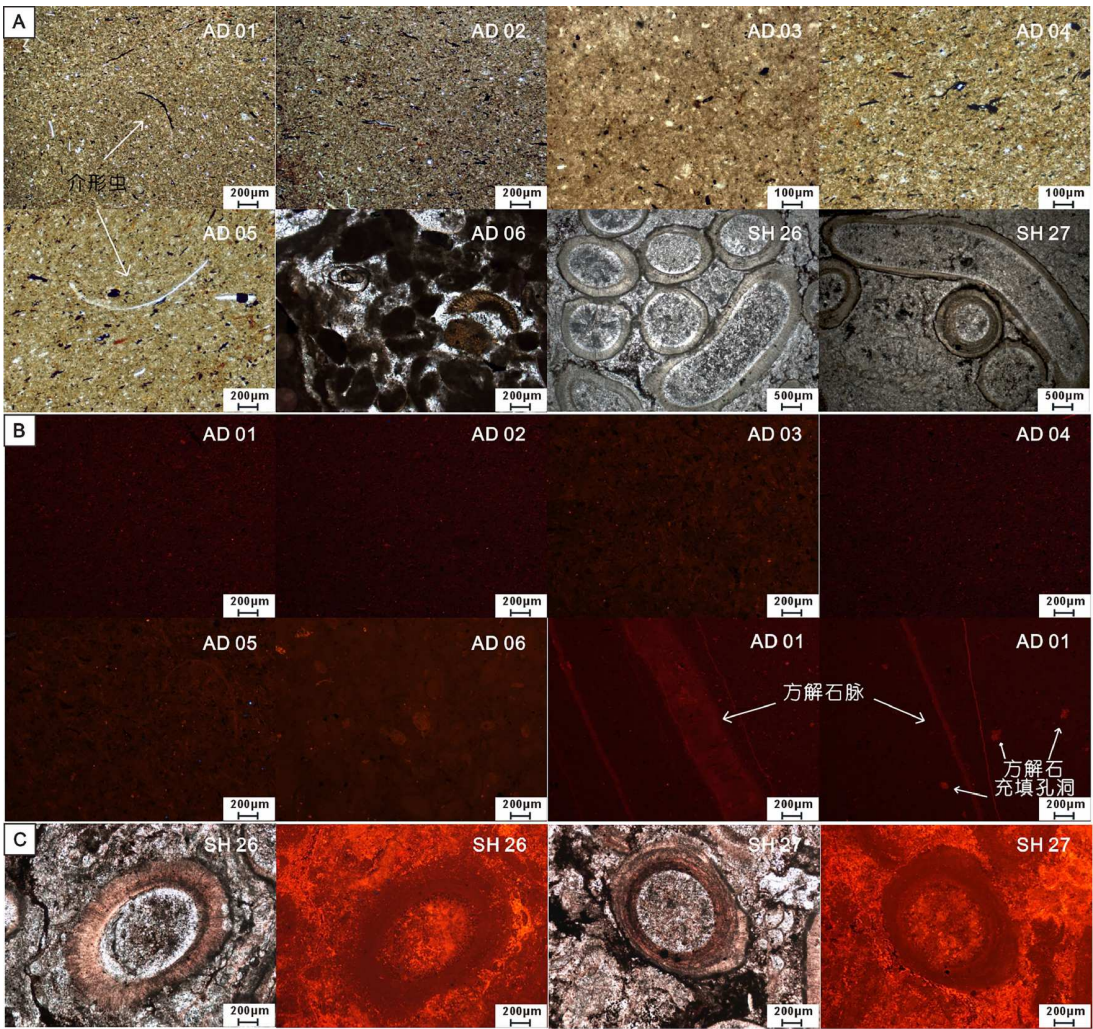


图5 (A) 碳酸盐岩样品代表性显微照片(AD01–AD05, 微晶灰岩; AD06, 砂屑灰岩; SH26、SH27, 生物碎屑灰岩); (B) 安多114道班剖面样品CL图像; (C) 西长梁-胜利河剖面样品显微照片与CL图像对比

表2 西长梁-胜利河和安多114道班剖面碳酸盐岩样品元素地球化学

剖面名称	样品号	岩性	MnO(%)	Sr(μg/g)	Mn/Sr	MgO(%)	CaO(%)	Mg/Ca
西长梁-胜利河	SH26	生物碎屑灰岩	0.04	261	1.13	0.77	48.06	0.02
	SH27	生物碎屑灰岩	0.05	278	1.27	0.78	48.72	0.02
安多114道班	AD01	微晶灰岩	0.03	453	0.38	1.07	48.87	0.02
	AD02	微晶灰岩	0.04	794	0.28	1.60	39.91	0.04
	AD03	微晶灰岩	0.04	678	0.36	2.90	39.64	0.07
	AD04	微晶灰岩	0.02	370	0.26	0.99	49.09	0.02
	AD05	微晶灰岩	0.03	469	0.30	1.58	47.47	0.03
	AD06	砂屑灰岩	0.01	272	0.26	0.92	53.00	0.02

剖面顶部菊石和双壳类化石，将其归为晚侏罗世提塘期。然而，菊石保存较差，导致定年结果不确定性大。随后，阴家润(2005)将该化石组合修订为中侏罗世巴通期-卡洛夫期。近期，Chen等(2019, 2023)依据钙质超微化石组

合(含NJ12带标志性化石*Ansulasphaer helvetica*)剖面中部限定为晚巴通期-卡洛夫期，但上部层段因缺乏诊断性化石，时代仍存争议(图4)。本研究获得的原位方解石U-Pb年龄(168–165 Ma)在误差范围内与Chen等(2019, 2023)

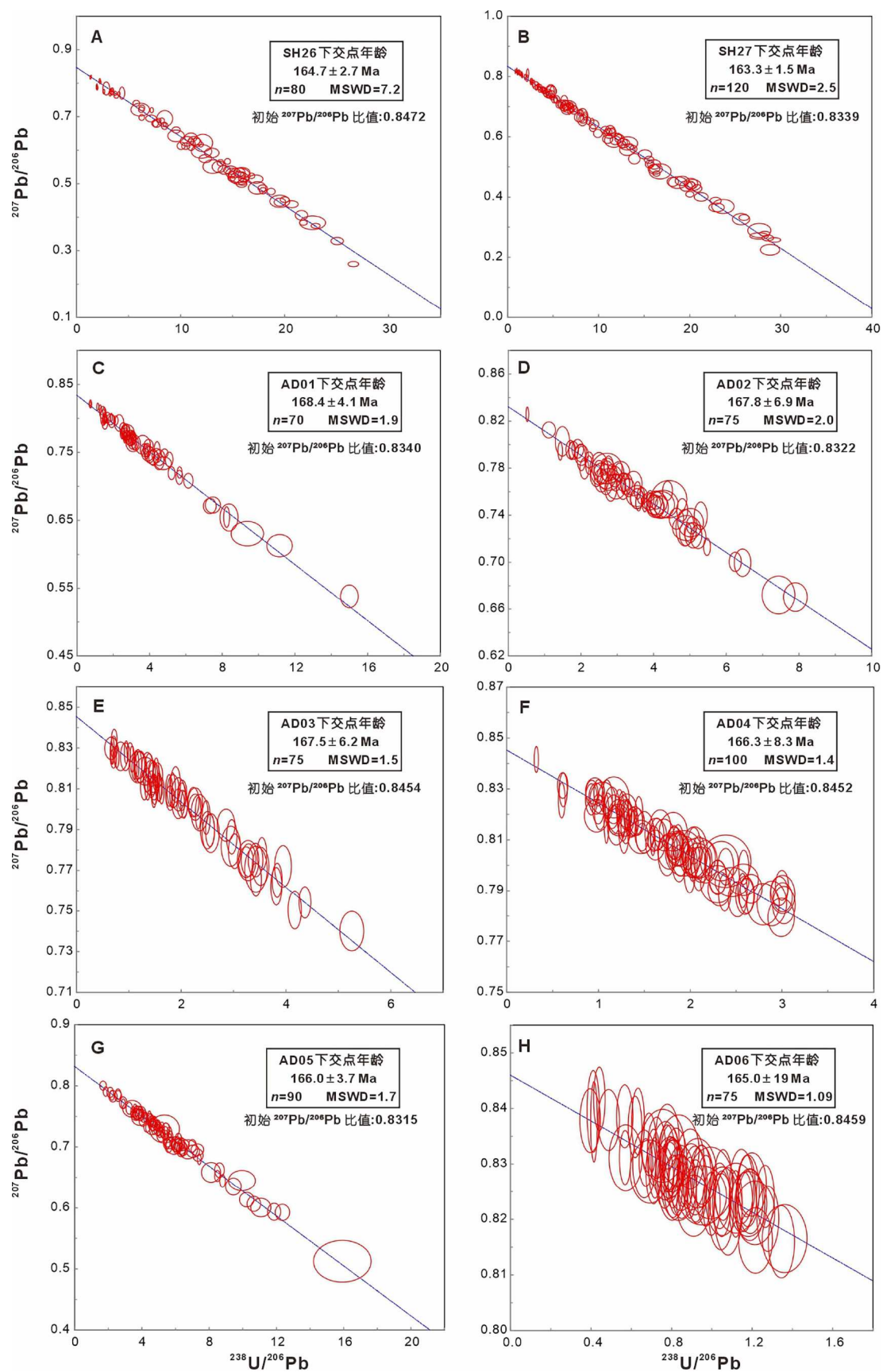


图6 西长梁-胜利河与安多114道班剖面碳酸盐岩 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ Tera-Wasserburg图解及U-Pb年龄

表3 研究样品方解石U-Pb年龄汇总

样品号	岩性	点数	U浓度(μg/g)	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	同位素年龄(Ma)	MSWD
SH26	生物碎屑灰岩	80	0.18–6.5	1.36–26.9	0.26–0.82	164.7±2.7	7.2
SH27	生物碎屑灰岩	120	0.25–5.09	1.02–28.75	0.23–0.82	163.3±1.5	2.5
AD01	微晶灰岩	70	0.76–3.02	1.25–2.02	0.54–0.82	168.4±4.1	1.9
AD02	微晶灰岩	75	0.63–3.21	1.65–2.05	0.67–0.83	167.8±6.9	2.0
AD03	微晶灰岩	75	0.96–3.06	1.85–2.07	0.74–0.83	167.5±6.2	1.5
AD04	微晶灰岩	100	0.80–2.02	0.32–2.98	0.77–0.84	166.3±8.3	1.4
AD05	微晶灰岩	90	0.87–1.66	1.22–2.00	0.51–0.80	166.0±3.7	1.7
AD06	砂屑灰岩	75	1.14–1.31	2.03–2.12	0.81–0.84	165±19	1.09

基于钙质超微化石推断的巴通期-卡洛夫期年龄一致，提供了独立的年代学约束。综上，现有证据表明安多114道班烃源岩形成于中侏罗世巴通期-卡洛夫期。

5.2.3 中侏罗世盆地尺度优质烃源岩

前人研究表明，羌塘盆地发育三套侏罗系主力烃源岩，即下侏罗统曲色组(土阿辛期毕洛错油页岩)、中侏罗统夏里组(西长梁-胜利河油页岩)和上侏罗统索瓦组(安多油页岩)(吴珍汉等，2021；伊海生和夏国清，2022；Wang J等，2024)。地球化学数据显示这些烃源岩具有较高的TOC含量和有利成油的成熟度(表1)，共同支撑了整个盆地的生烃潜力(李闰宇，2024)。然而，由于露头零星且缺乏精确的年代学约束，其时代归属长期存在分歧。这不仅影响了对盆地尺度优质烃源岩是否存在的判断，也制约了生烃凹陷的圈定。

本研究首次获得了西长梁-胜利河剖面夏里组和安多114道班索瓦组烃源岩的精确沉积年龄，均为中侏罗世巴通期-卡洛夫期。同样，曾被视为东特提斯土阿辛期大洋缺氧事件(OAE)沉积响应的毕洛错油页岩(伊海生等，2003；Fu等，2016a；付修根等，2021)，近期也根据菊石与钙质超微化石组合(Chen等，2019，2023；Yin，2022)及新的方解石U-Pb年龄(Wang L等，2024)被重新厘定为晚巴通期-卡洛夫期。

因此，西长梁-胜利河(北羌塘)、毕洛错(南羌塘)及安多114道班(南羌塘)三套主力侏罗系烃源岩均同期沉积于中侏罗世巴通期-卡洛夫期(图7)，对应于夏里组沉积期(Fang等，2016；Song等，2016)。尽管沉积环境可能存在差异，但他们的同期发育厘定了一次关键的盆地规模生烃事件。

重要的是，地震反射剖面与钻井资料揭示，这套中侏罗世烃源岩在北羌塘坳陷呈连续席状展布，厚度稳定(110–150 m)，可横向追踪超过100 km(吴珍汉等，2019)，证实其为区域规模的优质烃源岩，而并非局部孤

立沉积。这一广泛分布与北羌塘坳陷中侏罗世以潮坪-泻湖为主的古地理格局相符(图8)。相比之下，南羌塘坳陷同期烃源岩(即毕洛错、安多114道班)的分布似乎更为局限，可能受控于不同的古地理与构造格架。

油源对比研究证实了这些烃源岩的生烃有效性。生物标志物参数将毕洛错-昂达尔错古油藏原油与毕洛错油页岩相关联(季长军，2015；Ji等，2018)，而胜利河地区原油则与胜利河油页岩具有亲缘性(吴珍汉等，2023)。综合地球化学证据与新的年代学数据，本研究认为在北羌塘坳陷广泛发育了一套以高有机质丰度和有利成熟度为特征的中侏罗世优质烃源岩，构成了盆地主要的生烃灶。南羌塘同期发育的优质烃源岩进一步表明，巴通期-卡洛夫期是羌塘盆地侏罗系含油气系统形成的主要时期。

5.3 中侏罗世优质蒸发相烃源岩的富集机制

优质海相烃源岩的形成受地质、气候和环境等多种因素协同控制，其发育关键在于高初级生产力与强有机质保存能力在特定古地理、古气候和古环境演化框架下的耦合(张水昌，2025)。此类烃源岩的生成需要稳定的构造背景、有利的生物生产力条件以及高效的有机质埋藏环境，三者缺一不可(张水昌等，2005；李天义等，2008)。

首先，古地理格局为有机质聚集提供了稳定的沉积载体与富集空间。海平面波动在塑造古地理格局中起关键作用。海侵扩大了海域范围，增加可容纳空间，有利于烃源岩形成(张水昌等，2005)。羌塘盆地布曲组沉积期发生大规模海侵(Xue等，2020)，至夏里组沉积期，总体海退，潮坪-泻湖蒸发岩、页岩、泥岩、碳酸盐岩及陆棚内页岩等有利烃源岩发育的相带广泛分布(图8)(梁狄刚等，2000；丁文龙等，2011)。

其次，古气候直接决定了有机质生产力。普遍认为温暖、半潮湿的条件有利于藻类繁盛与有机质积累(Zeng等，2025)。然而，在半干旱气候下，蒸发加剧导致海水

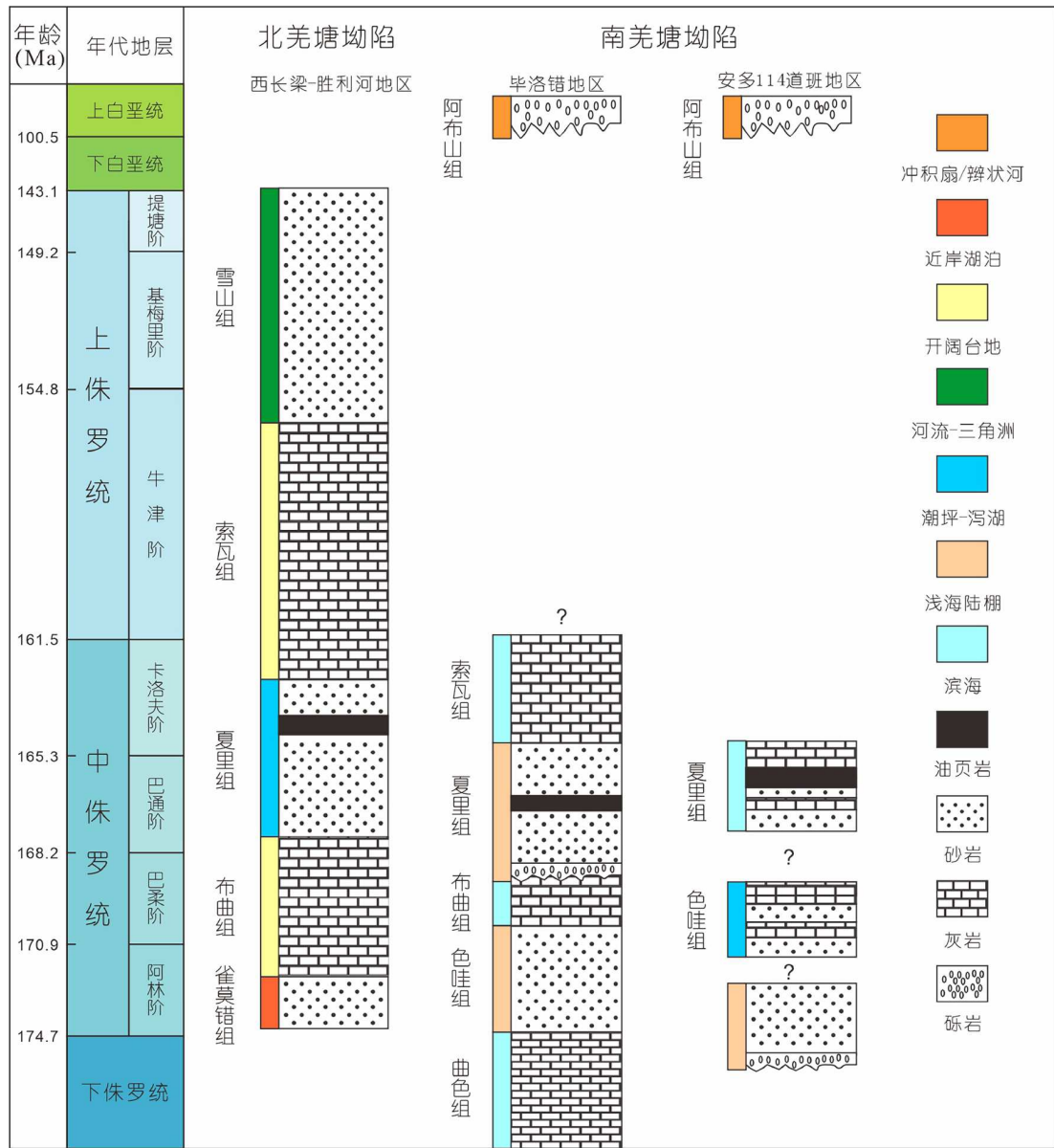


图7 羌塘盆地中侏罗统夏里组烃源岩地层对比与盆地尺度分布，据Xue等(2020)和胡修棉等(2025)修改

盐度升高。有机质含量通常随盐度升高而增加，直至达到临界阈值，超过此值不耐盐生物迅速灭绝，可造成有机质输入短暂激增(Barbe等, 1990; Hu等, 2018)。高盐环境并非“生命禁区”，嗜盐细菌、杜氏藻、硅藻等仍可存活并维持较高初级生产力(Warren, 2016; Xu等, 2024; 范晓杰等, 2025)。羌塘盆地夏里组沉积期，海平面下降与气候向温暖半干旱转变同步(曾永耀等, 2014)。增强的蒸发作用显著提高了海水盐度，这得到了中盐度双壳类(陈兰等, 2005)及地球化学指标证据的支持(陈程等, 2024)。盐度升高促使浓卤水向受限的陆棚内或潮坪内汇聚，形成密度分层水体(图9)，有利于嗜盐微生物繁殖，并在中-高盐度下维持较高的初级生产力(图9)。持

续的蒸发与海平面下降进而导致硬石膏、石盐沉淀(Duan等, 2024)，在夏里组烃源岩之上形成蒸发岩盖层(Zhang等, 2015; Fang等, 2016)。类似机制也见于西特提斯域世界级烃源岩-哈尼法组沉积期，其中盐度条件与水体分层促进了有机质的生成、保存与富集(Warren, 2016)。

最后，有机质的保存受多种沉积和沉积后因素影响，这些因素可能破坏或稀释有机质(陈践发等, 2006)。有效的保存通常需要缺氧、还原的底层水环境，以抑制氧化作用与底栖生物扰动(Demaison和Moore, 1980; 张水昌等, 2005; 陈践发等, 2006)。在羌塘盆地，海退与气候干旱化导致的盐度升高，增强了水体盐度分层，形成持久的盐跃层(Fang等, 2016)。盐跃层阻碍了富氧表层

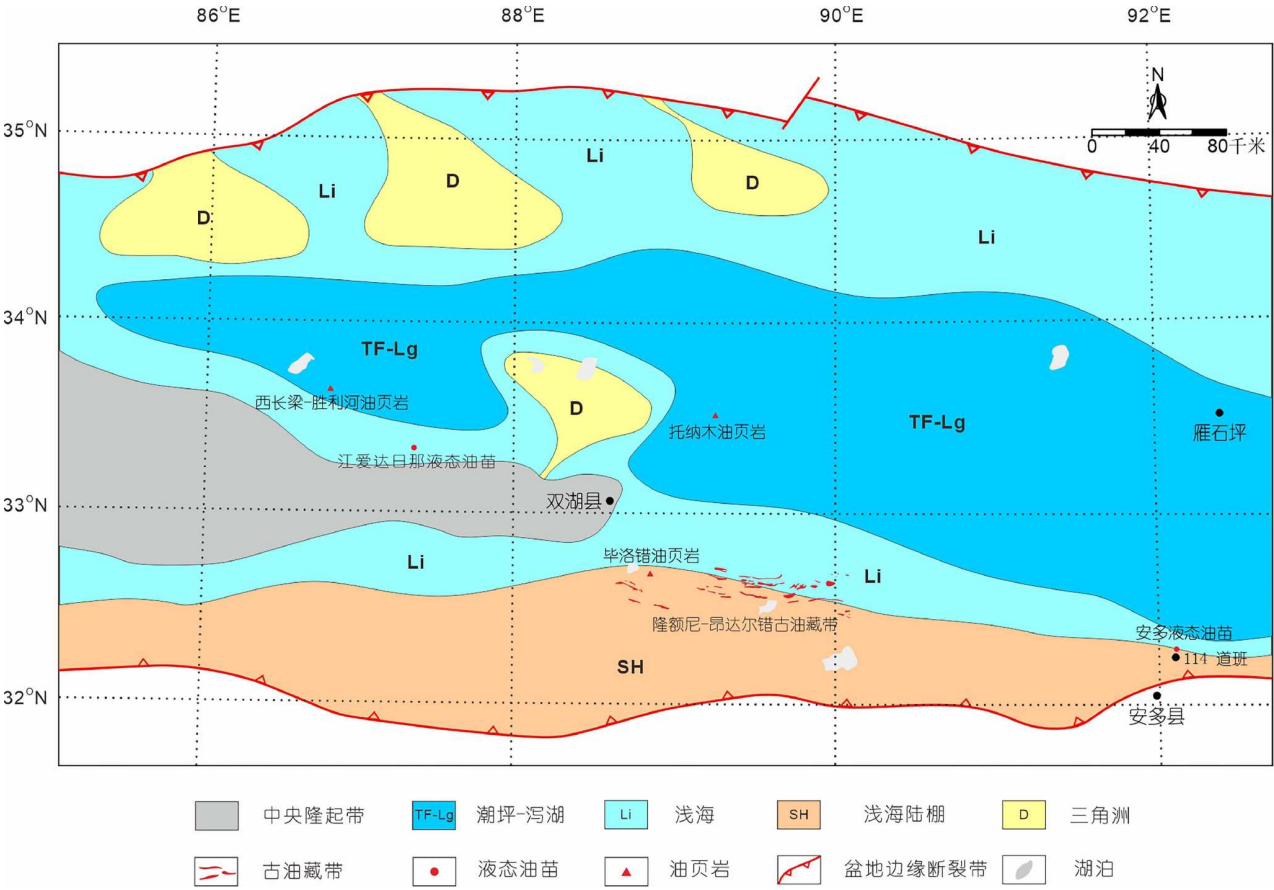


图8 羌塘盆地夏里组沉积期古地理图, 据Fu等(2016b)修改

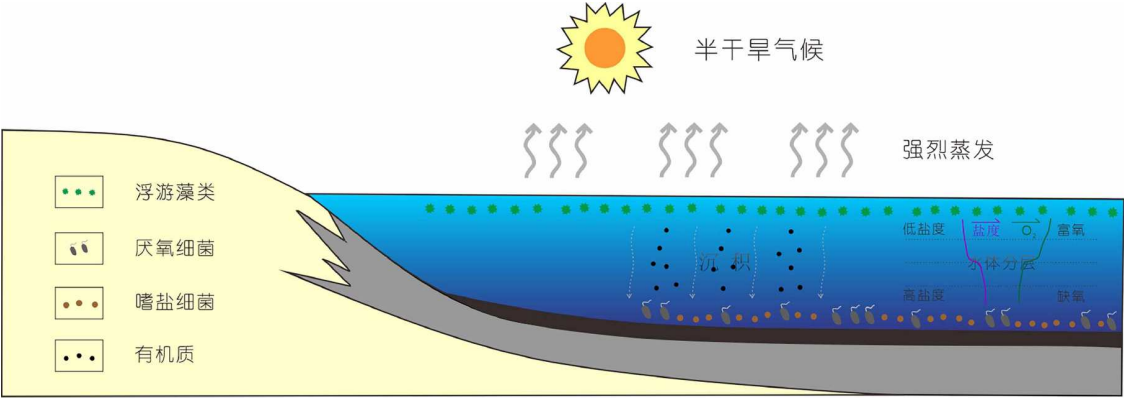


图9 羌塘盆地中侏罗世蒸发岩烃源岩富集模式图, 据Guo等(2018)和Liang等(2024)修改, 阴影黑色部分示意烃源岩沉积

水与底层水的交换, 造就了强还原的底层环境。这种环境抑制了底栖生物活动, 显著缓解了有机质的氧化分解, 从而保障了有机质的高效保存与埋藏。

6 结论

(1)首次获得了羌塘盆地侏罗系烃源岩的精确U-Pb年龄。北羌塘坳陷西长梁-胜利河油页岩中灰岩夹层年龄为

164–163 Ma(中侏罗世卡洛夫期); 南羌塘坳陷安多114道班剖面烃源岩年龄为168–165 Ma(中侏罗世晚巴通期-卡洛夫期)。

(2)证实北羌塘坳陷广泛发育一套中侏罗世巴通期-卡洛夫期优质烃源岩。南羌塘坳陷优质烃源岩的同步发育进一步表明, 巴通期-卡洛夫期代表了整个羌塘盆地侏罗系含油气系统形成的主要时期。

(3)在晚巴通期-卡洛夫期温暖半干旱气候背景下,羌塘盆地湖坪及陆棚环境内蒸发作用加剧,海水盐度升高,引发水体盐度分层。这种盐度驱动的分层可能促进了嗜盐细菌、藻类等微生物的繁衍,从而提升了初级生产力。同时,持久的底层水缺氧环境抑制了有机质降解,促进了其高效埋藏。生产力提高与保存条件增强的耦合效应,最终导致了盆地内优质蒸发相烃源岩的发育。

致谢 感谢中国科学院青藏高原研究所贾晴晴在实验室分析与数据处理中的帮助,以及三位匿名审稿人提出的宝贵意见。

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

- 陈程, 吴珍汉, 赵为永, 等. 2024. 北羌塘胜利河地区布曲组优质烃源岩形成环境与有机质富集机制. *地质学报*, 98: 530–543
- 陈践发, 张水昌, 孙省利, 等. 2006. 海相碳酸盐岩优质烃源岩发育的主要影响因素. *地质学报*, 80: 467–472
- 陈兰, 伊海生, 胡瑞忠, 等. 2005. 羌塘盆地侏罗纪双壳类化石组合及古环境. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 32: 466–473
- 丁文龙, 李超, 苏爱国, 等. 2011. 西藏羌塘盆地中生界海相烃源岩综合地球化学剖面研究及有利生烃区预测. *岩石学报*, 27: 878–896
- 范晓杰, 滕晓华, 王春连, 等. 2025. 早始新世江汉盆地新沟嘴组下段沉积环境与有机质富集机理. *地球科学*, 50: 1953–1967
- 付修根, 王剑, 汪正江, 等. 2007. 藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义. *地球化学*, 36: 486–496
- 付修根, 王剑, 文华国, 等. 2021. 东特提斯开阔海环境中托尔期大洋缺氧事件的记录: 对全球气候变化和区域环境扰动的启示. *中国科学: 地球科学*, 51: 2184–2196
- 黄思静. 1992. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其Fe、Mn含量的关系. *矿物岩石*, 12: 74–79
- 季长军. 2015. 南羌塘拗陷油藏带生物标志化合物特征及油源对比研究. 博士学位论文. 成都: 成都理工大学. 1–149
- 黎东玉, 唐友军, 孙鹏, 等. 2025. 北羌塘拗陷夏里组油砂地球化学特征及油源探讨. *地球学报*, 46: 671–682
- 李闰宇. 2024. 羌塘盆地油气显示特征及油源分析研究. 硕士学位论文. 荆州: 长江大学. 1–74
- 李天义, 何生, 杨智. 2008. 海相优质烃源岩形成环境及其控制因素分析. *地质科技情报*, 27: 63–70
- 李亚林, 王成善, 李永铁. 2008. 西藏羌塘盆地侏罗系膏盐岩与油气成藏. *石油学报*, 29: 173–178
- 梁狄刚, 张水昌, 张宝民, 等. 2000. 从塔里木盆地看中国海相生油问题. *地学前缘*, 7: 534–547
- 刘天夫, 季长军. 2024. 羌塘盆地胜利河地区布曲组油气地球化学特征与油源对比. *地球学报*, 45: 365–374
- 鲁雪松, 桂丽黎, 陈玮岩, 等. 2023. 激光原位碳酸盐岩U-Pb定年实验方法改进与石油地质应用. *中国科学: 地球科学*, 53: 2953–2968
- 王成善, 张哨楠. 1987. 藏北双湖地区三叠纪油页岩的发现. *中国地质*, (08): 29–31
- 王成善, 伊海生, 李勇, 等. 2001. 西藏羌塘盆地地质演化与油气远景评. 北京: 地质出版社. 249
- 王成善, 伊海生, 刘池洋, 等. 2004. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义. *石油与天然气地质*, 25: 139–143
- 王剑, 付修根, 杜安道, 等. 2007. 羌塘盆地胜利河海相油页岩地球化学特征及Re-Os定年. *海相油气地质*, 12: 21–26
- 王剑, 丁俊, 王成善, 等. 2009a. 青藏高原油气资源战略选区调查与评价. 北京: 地质出版社. 645
- 王剑, 付修根, 李忠雄, 等. 2009b. 藏北羌塘盆地胜利河-长蛇山油页岩带的发现及其意义. *地质通报*, 28: 691–695
- 王剑, 付修根, 沈利军, 等. 2020. 论羌塘盆地油气勘探前景. *地质论评*, 66: 1091–1113
- 伍新和, 王成善, 伊海生, 等. 2005. 西藏羌塘盆地烃源岩古油藏带及其油气勘探远景. *石油学报*, 26: 13–17
- 吴石头, 杨岳衡, M W ROBERTS Nick, 等. 2022. 高灵敏度-单接收杯LA-SF-ICP-MS原位方解石U-Pb定年. *中国科学: 地球科学*, 52: 1375–1390
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 等. 2019. 羌塘盆地半岛湖-东湖地区主力烃源岩及油气资源潜力. *地质学报*, 93: 1738–1753
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 等. 2020. 羌塘盆地中部侏罗系埋藏史和生烃史. *地质学报*, 94: 2823–2833
- 吴珍汉, 赵珍, 季长军, 等. 2021. 北羌塘凹陷沃若山及邻区海相烃源岩形成时代. *地质学报*, 95: 352–361
- 吴珍汉, 季长军, 赵珍, 等. 2023. 北羌塘坳陷南部胜利河油浸白云岩. *地球学报*, 44: 411–418
- 西藏地质矿产局. 1997. 西藏自治区岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社
- 薛伟伟, 马安林, 胡修棉. 2020. 羌塘盆地侏罗系-白垩系岩石地层格架厘定. *地质论评*, 66: 1114–1129
- 杨易卓, 黄志龙, 冯伟平, 等. 2025. 北羌塘盆地不同地区中-下侏罗统油页岩地球化学特征对比及意义. *地球学报*, 46: 602–614
- 伊海生, 夏国清. 2022. 羌塘盆地优质烃源岩和白云岩储油层的层位与分布. *沉积与特提斯地质*, 42: 455–464
- 伊海生, 林金辉, 赵兵, 等. 2003. 藏北羌塘地区地层新资料. *地质论评*, 49: 59–65
- 伊海生, 王成善, 林金辉, 等. 2005. 藏北安多地区侏罗纪菊石动物群及其古地理意义. *地质通报*, 24: 41–47
- 阴家润. 2005. 西藏北部安多地区中侏罗统(巴通阶-卡洛夫阶)菊石. *古生物学报*, 44: 1–16
- 曾永耀, 潘佳秋, 马丽芳, 等. 2014. 羌塘盆地中-晚侏罗世夏里期气候演化特征及其成盐意义. *矿床地质*, 33: 993–1002
- 张亮亮, 朱弟成, 谢锦程, 等. 2022. 碳酸盐矿物激光原位U-Pb定年: 进展与展望. *矿物岩石地球化学通报*, 41: 1120–1134
- 张水昌. 2025. 碱湖烃源岩生烃理论的突破与思考. *中国科学: 地球科学*, 55: 2098–2100
- 张水昌, 张宝民, 边立曾, 等. 2005. 中国海相烃源岩发育控制因素. *地学前缘*, 12: 39–48
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等. 2001. 青藏高原羌塘盆地石油地质. 北京: 科学出版社. 398
- 郑荣才, 赵灿, 刘合年, 等. 2010. 阿姆河盆地卡洛夫-牛津阶碳酸盐岩阴极发光性及其研究意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 37: 377–385
- Barbe A, Grimalt J O, Pueyo J J, et al. 1990. Characterization of model evaporitic environments through the study of lipid components. *Org Geochem*, 16: 815–828
- Chen L, Mattioli E, Da X, et al. 2019. Calcareous nannofossils from the Jurassic black shales in the Qiangtang Basin, Northern Xizang (China): New records of stratigraphic ages and palaeoceanography. *Newsl Stratigr*, 52: 55–72
- Chen L, Mattioli E, Da X, et al. 2023. Integrated carbon-isotope and calcareous nannofossil stratigraphy in the Middle Jurassic of Qinghai-Xizang (China). *Newsl Stratigr*, 56: 405–421
- Demaison G J, Moore G T. 1980. Anoxic environments and oil source bed genesis. *Org Geochem*, 2: 9–31
- Denison R E, Koepnick R B, Fletcher A, et al. 1994. Criteria for the

- retention of original seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in ancient shelf limestones. *Chem Geol*, 112: 131–143
- Duan L, Wang P, Liu C, et al. 2024. Deposition of a saline giant in the Jurassic Qiangtang Basin. *Sci Bull*, 69: 2997–3000
- Fang X, Song C, Yan M, et al. 2016. Mesozoic litho- and magnetostratigraphic evidence from the central Tibetan Plateau for megamonsoon evolution and potential evaporites. *Gondwana Res*, 37: 110–129
- Fantle M S, Barnes B D, Lau K V. 2020. The role of diagenesis in shaping the geochemistry of the marine carbonate record. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 48: 549–583
- Fu X, Wang J, Feng X, et al. 2016a. Early Jurassic carbon-isotope excursion in the Qiangtang Basin (Xizang), the eastern Tethys: Implications for the Toarcian Oceanic anoxic event. *Chem Geol*, 442: 62–72
- Fu X, Wang J, Tan F, et al. 2016b. New insights about petroleum geology and exploration of Qiangtang Basin, northern Xizang, China: A model for low-degree exploration. *Mar Pet Geol*, 77: 323–340
- Guo P, Liu C, Gibert L, et al. 2018. How to find high-quality petroleum source rocks in saline lacustrine basins: A case study from the Cenozoic Qaidam Basin, NW China. *Mar Pet Geol*, 111: 603–623
- Hu T, Pang X, Jiang S, et al. 2018. Impact of paleosalinity, dilution, redox, and paleoproductivity on organic matter enrichment in a saline lacustrine rift basin: A case study of Paleogene organic-rich shale in Dongpu Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Energy Fuels*, 32: 5045–5061
- Hu X M, Ma A L, Wang J G, et al. 2025. The odyssey from marine to continental transition in the Tibetan Plateau: A duet of tectonic and sealevel change. *Acta Sedimentol Sin*, 43: 1569–1591
- Ji C, Xia G, Wu Z, et al. 2018. Study of crude oil-source rocks correlation in the paleo-oil reservoirs of the Southern Qiangtang Depression, China. *Oil Shale*, 35: 195–213
- Li G, Yi H, Xia G, et al. 2020. A late Jurassic carbon-isotope record from the Qiangtang Basin (Xizang), eastern Tethys, and its palaeoceanographic implications. *Glob Planet Change*, 195: 103349
- Liang C, Yang B, Cao Y, et al. 2024. Salinization mechanism of lakes and controls on organic matter enrichment: From present to deep-time records. *Earth-Sci Rev*, 251: 104720
- Ma P F, Wang L C, Wang C S, et al. 2015. Organic-matter accumulation of the lacustrine Lunpola oil shale, central Tibetan Plateau: Controlled by the paleoclimate, provenance, and drainage system. *Int J Coal Geol*, 147–148: 58–70
- Marshall J D. 1992. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geol Mag*, 129: 143–160
- Roberts N M W, Rasbury E T, Parrish R R, et al. 2017. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochim Geophys Geosyst*, 18: 2807–2814
- Song C, Zeng Y, Yan M, et al. 2016. Magnetostratigraphy of the middle-upper Jurassic sedimentary sequences at Yanshiping, Qiangtang Basin, China. *Geophys J Int*, 206: 1847–1863
- Wang J, Fu X, Wei H, et al. 2024. An overview of the Qiangtang Basin: Geology, hydrocarbon resources and the role of the Tethyan evolution. *J Asian Earth Sci*, 266: 106128
- Wang L, Garzanti E, Peng H, et al. 2024. Discovery of the Callovian Oceanic Anoxic Event in the Qiangtang Basin, eastern Tethys: Insights from *in situ* calcite U-Pb dating. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 656: 112572
- Warren J K. 2016. *Evaporites*. Cham: Springer. 833–958
- Xu S, Wang Y, Bai N, et al. 2024. Organic matter enrichment mechanism in saline lacustrine basins: A review. *Geol J*, 59: 155–168
- Xue W, Hu X, Ma A, et al. 2020. Eustatic and tectonic control on the evolution of the Jurassic North Qiangtang Basin, northern Xizang, China: Impact on the petroleum system. *Mar Pet Geol*, 120: 104558
- Yin J. 2022. A revision and new data on the Jurassic ammonites from the Biluoco area, southern Qiangtang block (North Xizang). *Newsl Stratigr*, 55: 1–19
- Zeng S, Wang J, Fu X, et al. 2025. Organic matter accumulation in Barremian marine black shales of the Qiangtang Basin, China. *Int J Coal Geol*, 311: 104887
- Zhang L L, Zhu D C, Xie J C, et al. 2023. TARIM calcite: A potential reference material for laser ICPMS *in situ* calcite U-Pb dating. *J Anal At Spectrom*, 38: 2302–2312
- Zhang M, Hou X. 2021. Rapid analysis of ^{129}I in natural water samples using accelerator mass spectrometry. *At Spectrosc*, 42: 335–348
- Zhang S, Song C H, Liu C, et al. 2015. Mechanisms of the sedimentary cycles and climatic evolution in middle Jurassic Xiali Formation in Yanshiping area, Qiangtang Basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 51: 319–326
- Zhang Q, Fu X, Wang J, et al. 2024. Orbitally-paced climate change during the Carnian Pluvial Episode. *Earth Planet Sci Lett*, 626: 118546

(责任编辑: 万博)