

准噶尔盆地渐新世安集海河组类胡萝卜素的发现及古环境意义

马健^{1,2)}, 吴朝东^{1, 2)}, 王熠哲³⁾, 焦悦^{1,2)}, 周家全^{1,2)}, 冷佳宣^{1,2)}, 崔行骞⁴⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京, 100871;

2) 北京大学石油与天然气研究中心, 北京, 100871; 3) 兰州城市学院, 兰州, 730070;

4) 上海交通大学海洋学院, 上海, 200030

内容提要: 作为一类天然色素, 类胡萝卜素在自然界中广泛分布。在沉积记录中, 类胡萝卜素多以结构稳定的衍生物形式赋存。部分具有芳香基的结构的组分与光合硫细菌的活动有关, 因而这些特定生物来源的组分为恢复古水体环境提供了一个重要的依据。通常光合硫细菌多生存在缺氧且富硫的透光层, 地质记录中的芳香基类胡萝卜素往往反映了古水体中发育硫化透光带。类胡萝卜素衍生物的组合差异与硫细菌群落的相关性为古水深、微生物优势群落以及营养元素利用与循环等方面的研究提供了线索和证据。因此, 类胡萝卜素衍生物在油源对比、生命起源、生物灭绝事件以及大洋缺氧事件等诸多地质过程的研究中起到至关重要的指示作用。本文主要通过探讨准噶尔盆地南缘安集海河组有机质中的类胡萝卜素的结构, 分析其成因类型和特定来源, 阐释古环境与古气候演化, 进而恢复与重建渐新世时期准噶尔盆地南缘古湖泊的水体条件与微生物群落。从结果来看, 准噶尔盆地安集海组中发育绿硫细菌来源的绿硫菌烷、异海棉烷等芳香基类胡萝卜素, 可以推测这一时期湖泊水体存在硫化透光带现象; 同时以叶黄素为来源的叶黄烷指示了蓝细菌是古湖泊中生物群落的重要组成部分。古湖泊发育硫化透光带往往与水体分层有关, 而准噶尔盆地渐新世晚期的古气候由湿润转变为干旱似乎对湖泊盐度分层提供有利条件。与此同时, 绿硫细菌中出现较高含量的棕色绿硫细菌菌株反映了安集海河组古湖泊的水深较深, 且分布范围广阔。通过对安集海河组类胡萝卜素研究, 认为渐新世时期准噶尔盆地南缘原始湖泊分布范围向南延伸较广, 与构造研究结果吻合。

关键词: 准噶尔盆地; 安集海河组; 类胡萝卜素; 硫化透光带; 硫细菌

类胡萝卜素 (Carotenoids) 是一类重要的天然色素, 在自然界广泛存在: 几乎所有光合细菌、嗜盐古菌、真核生物以及一些特殊的非光合生物都可以合成类胡萝卜素。类胡萝卜素在生命过程中起到重要的作用, 如在光感生物中作为辅助色素、光保护器以及趋光性和趋光性的光感受器等; 此外, 类胡萝卜素还是一些植物和动物的着色色素 (Liaaen-Jensen, 1979)。目前, 已发现具有不同结构的类胡萝卜素超过 600 种 (Britton, 1995), 但能在沉积记录中保留的种类却较为有限。这是由于在沉积物成岩作用和地质演化过程中, 大多数具有不饱和结构以及具有

官能团的类胡萝卜素都会通过氢化作用、脂环化作用或芳环化作用转化为较为稳定的结构而保存下来。因而, 类胡萝卜素在地质沉积记录中主要以结构稳定的类胡萝卜素衍生物为主。但在一些特殊条件, 非饱和类的类胡萝卜素衍生物也会在沉积记录中保留 (Ding Wenjing et al., 2020)。

从结构上看, 类胡萝卜素是含 40 个碳的类异戊二烯的聚合物, 这类化合物都可以利用非环化的番茄红烯 (见附录, I) 通过环化、取代、重排、和去饱和化等方式进行表征。在沉积记录中, 类胡萝卜素主要以烷基、环烷基和芳香基的长链类异戊二烯烃为

注: 本文为国家科技重大专项 (编号 2017ZX05008-001) 资助的成果。

收稿日期: 2020-03-18; 改回日期: 2020-03-27; 网络发表日期: 2020-05-11; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 马健, 男, 1992 年生, 博士研究生。沉积地球化学专业。Email: majian_geo@pku.edu.cn。通讯作者: 吴朝东, 男, 1965 年生, 教授。Email: cdwu@pku.edu.cn。崔行骞, 男, 1990 年生, 副教授。Email: cuixingqian@sjtu.edu.cn。

引用本文: 马健, 吴朝东, 王熠哲, 焦悦, 周家全, 冷佳宣, 崔行骞. 2020. 准噶尔盆地渐新世安集海河组类胡萝卜素的发现及古环境意义. 地质学报, 94(6): 1853~1868, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020075.

Ma Jian, Wu Chaodong, Wang Yizhe, Jiao Yue, Zhou Jiaquan, Leng Jiaxuan, Cui Xingqian. 2020. Discovery of carotenoids and its paleolake significance in the Oligocene Anjihaihe Formation, southern Junggar Basin, China. Acta Geologica Sinica, 94(6): 1853~1868.

主要结构特征。目前已检出并具有一定地质意义的类胡萝卜素衍生物主要包括:单环类异戊二烯烃类(γ -胡萝卜素)、双环类异戊二烯烃类(β -胡萝卜素)、单芳类异戊二烯烃类(绿硫菌烷和奥克烷)、单芳双环类异戊二烯烃类(β -异海绵烷和 β -海绵紫红烷)和双芳类异戊二烯烃类(异海绵烷、海绵烷和海绵紫红烷)(见附录)。这些胡萝卜素衍生物大多具有2,3,4(χ ,见附录)或2,3,6-三甲基取代结构特征(φ ,见附录),少部分存在3,4,5-三甲基取代结构(见附录,(1))。

地质记录中的类胡萝卜素衍生物来源较广,其中具有芳香基的组分多与光合硫细菌(如绿硫细菌和紫硫细菌)的活动有关。光合硫细菌(sulfur-oxidizing bacteria,以下简称硫细菌)一般发育在贫氧、具有足够光照和富硫化氢的透光带,因此沉积有机质中硫细菌来源的类胡萝卜素衍生物的检出往往指示海洋或湖泊水体中曾经发育硫化氢富集的透光带(简称硫化透光带;Summons et al., 1986; Brocks et al., 2005)。在地质演化过程中,古海洋曾多次广泛发育硫化透光带,并多与重大地质事件有关,如五次生物大绝灭事件(Mass Extinction)(Grice et al., 2005; Hays et al., 2007; Kasprak et al., 2015; Whiteside et al., 2016)和大洋缺氧事件(Oceanic Anoxic Events)(Damsté et al., 1998; French et al., 2014; Haddad et al., 2016; Kuypers et al., 2002)等。其次,类胡萝卜素在探索早期生命演化、元古宙古海洋水体条件研究中也起到重要的作用,如澳大利亚北部约1.6 Ga的元古宙Barney Creek组的有机质中检测出硫细菌来源的类胡萝卜素衍生物是元古宙硫化海洋的重要证据之一(Canfield, 1998; Brocks et al., 2005; Brocks et al., 2008)。另外,类胡萝卜素衍生物在含油气盆地的油源对比和油气分析中也有着广泛的应用(Grice et al., 2005)。

我国学者在类胡萝卜素相关的地质问题研究中已取得一定成果,如利用衍生物作为古环境指标探讨二叠纪末期大洋缺氧与灭绝事件(Grice et al., 2005; Cao Changqun et al., 2009; Zhou Wenfeng et al., 2016)、塔里木盆地古生代古海洋环境演化(Sun Yongge et al., 2003; Zhang Shuichang et al., 2014; Huang Haiping et al., 2016)以及干旱极端环境下的微生物适应性(Wang Jiuyi et al., 2016)等。同时,类胡萝卜素的降解产物——短链芳基类异戊二烯烃化合物常作为油源对比和有机来源

的探究手段,并已在诸多盆地开展研究,包括鄂尔多斯盆地(Li Zhenxi et al., 1988)、塔里木盆地(Sun Yongge et al., 2004; Lu Hong et al., 2004)、松辽盆地(Huo Qiuli et al., 2010)等。但目前国内尚无类胡萝卜素衍生物的生物来源和古环境解释的系统论述。另一方面,目前对于各种类胡萝卜素及其衍生物的习惯命名中文翻译也尚未达成一致(Huo Qiuli et al., 2010; Zhang Chunming et al., 2013),这极大的限制了国内对类胡萝卜素的研究与讨论。

本文基于前人的研究基础并结合国内外的研究现状,拟以准噶尔盆地安集海河组泥岩中保存的类胡萝卜素衍生物的种类和规律为研究对象,在系统阐明这些衍生物生物来源和地质意义的基础上,对渐新世晚期准噶尔盆地古湖泊的水体环境进行探讨与恢复。文中出现的类胡萝卜素及衍生物的中文名称主要依据张水昌(2013)以及张春明等人(2013)建立的习惯命名体系(具体结构与命名见附录),并对某些尚未有中文翻译的类胡萝卜素及其衍生物提供参考性的中文名称(如叶黄烷、古海绵烷等)。

1 研究区概况

准噶尔盆地位于中国西北地区,地处天山山脉和阿尔泰山脉之间。从构造位置上看,准噶尔盆地位于哈萨克斯坦板块、塔里木板块与西伯利亚板块的结合部位。受印度板块与欧亚板块碰撞远程效应的影响(Tapponnier et al., 1979; Jolivet et al., 2010),天山造山带在新生代再次活化,与准噶尔盆地的盆山格局发生了较大的变化。从年代学和热演化记录来看,天山地区的地壳缩短主要集中于20~25Ma,并且缩短的速率在晚新生代有着明显的增加(Fang Shihu et al., 2006; Guo Zhaojie et al., 2016)。受天山快速抬升过程的影响,准噶尔盆地南缘保存了巨厚且较为完整的新生代地层。根据季军良等人的古地磁工作(Ji Junliang et al., 2008, 2010),准噶尔盆地南缘新生代地层年代依次为:紫泥泉子组(?~32.7 Ma)、安集海河组(~32.7~23.3 Ma)、沙湾组(23.3~17.5 Ma)、塔西河组(17.5~13.2 Ma)、独山子组(13.2~6 Ma)以及西域组(6~1.1 Ma)。新生代早期,准噶尔盆地的沉积格局与白垩纪晚期相似(Bian Weihua et al., 2010),盆地南缘的紫泥泉子组以红色河流相-冲积扇相粗粒沉积为主。始新世以来,准噶尔盆地湖平面显著上升,在安集海河组发育以泥岩夹薄层碳酸盐岩为主的厚层湖相沉积。随后受青藏高原远程效

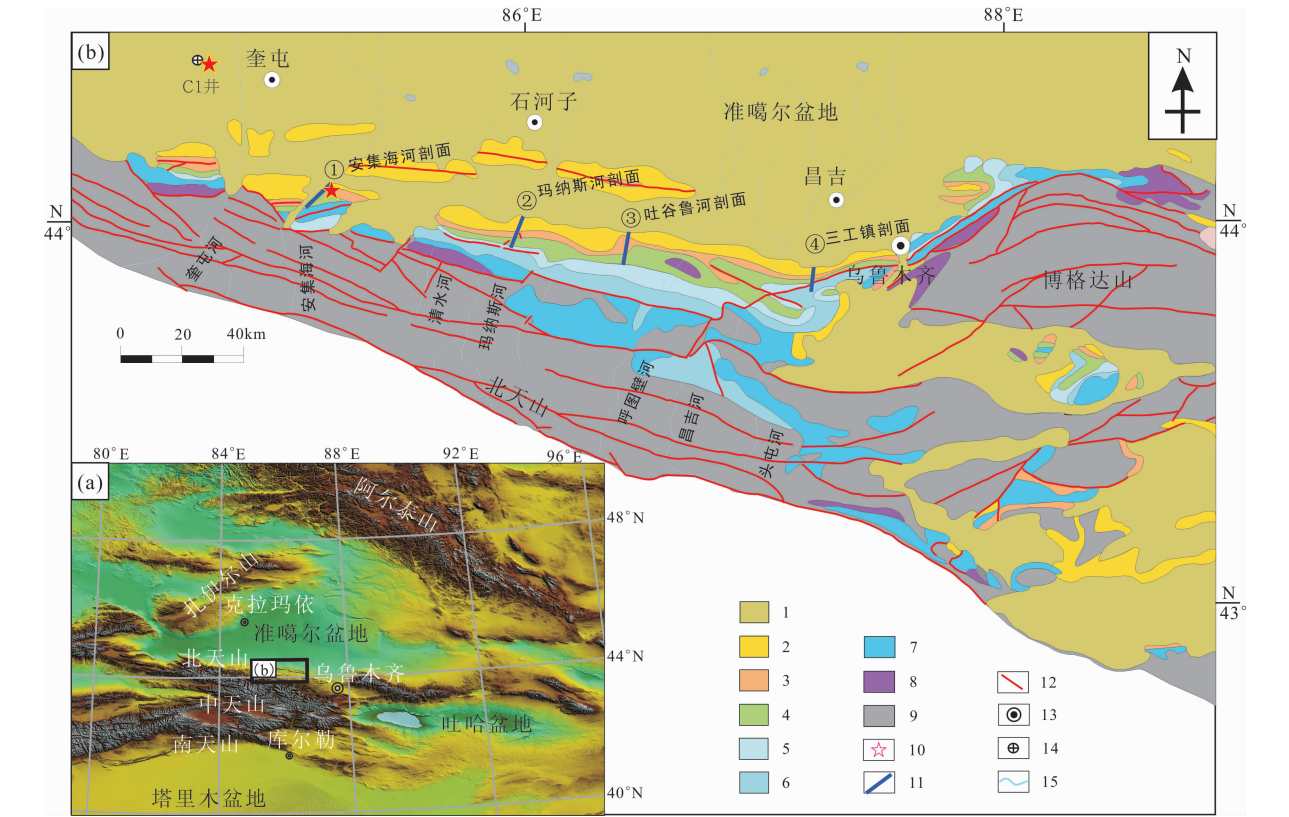


图 1 准噶尔盆地南缘区域地质图及采样位置

Fig. 1 The geological map of the South Junggar Basin with sampling locations
(a)—准噶尔盆地及周缘山系现今地貌;(b)—准噶尔盆地南缘地质图;1—第四系;2—新近系;3—古近系;4—白垩系;5—晚侏罗统;
6—中侏罗统;7—早侏罗统;8—三叠系;9—二叠系;10—采样点;11—剖面位置;12—断层;13—城市;14—井位;15—河流
(a)—Geomorphology of Junggar Basin and surround mountains;(b)—geological map of South Junggar Basin; 1—Quaternary; 2—Neogene;
3—Paleogene; 4—Cretaceous; 5—Late Jurassic; 6—Middle Jurassic; 7—Early Jurassic; 8—Triassic; 9—Permian; 10—sampling location;
11—sections; 12—faults; 13—cities; 14—wells; 15—rivers

应影响,北天山快速隆升(Hendrix et al. , 1994),发育于准噶尔盆地南缘的古湖泊逐渐萎缩、变浅。沙湾组及其后的地层中的沉积记录反映了沉积格局逐渐由湖相转化为山麓-河流相。

目前相关学者对准噶尔盆地安集海河组时期的沉积与古环境已开展了一系列研究。从这一时期碳酸盐岩碳氧同位素结果来看,准噶尔盆地南缘始新世-渐新世时期以温暖湿润的古气候为主,而在渐新世晚期逐渐干旱(Deng Songtao et al. , 2008)。约 5‰碳氧同位素值的漂移变化可能与 25~23 Ma 期间发生的显著蒸发或构造引起的湖泊封闭有关(Charreau et al. , 2012)。类似的环境变化在介形虫研究中也有所记录,如 23.8 Ma 湖泊中优势种属由喜冷水种属(e. g. *Candona* cf. *Neglecta*)向喜温水种属(e. g. *Ilyocyprisbradyi*)发生了转变(Dong Xinxin et al. , 2013),而这种转变似乎可以追溯到天山活化隆升造成的区域气候变化(Li Qian et al. ,

2016)。综上所述,在渐新世晚期准噶尔盆地南缘发生了较为显著的变化。安集海河组正处于这一过渡时期,很好地记录了天山北缘(甚至中亚地区)新生代天山活化隆升和古气候演变的过程。

本次研究主要以渐新世安集海河组泥岩为对象,在沉积学与矿物学研究基础上,进行生物标志化合物提取与分离,并通过类胡萝卜素种类、来源以及分布特征进行讨论,从而对准噶尔盆地渐新世古湖泊水体环境以及微生物群落的生态结构进行恢复。

2 样品采集与测试方法

样品主要采集自准噶尔盆地南缘西部 C1 井和安集海河剖面的安集海河组中上部地层,共采集到 3 个泥岩样品(C1-01、C1-02 和 AJH-01,剖面与采样位置见图 1)。样品经切片与镜下检查,已确认无风化及后期成岩作用的影响。为防止表层可能存在的风化或污染,待测试样品均进行表面切割处理,取

剩余的核心部分,烘干后使用球磨机进行粉碎至 200 目以下,以便后续有机质抽提工作。

我们对安集海河组的灰绿色泥岩和钙质泥岩进行了扫描电镜观察与矿物组成鉴定,主要通过背散射和二次电子的方法对手标本新鲜面进行分析。样品由导电树脂固定在样品盘上。为增加导电性,表面喷涂铬粉。扫描电镜分析仪器采用 FEI Quanta 650 FEG,工作电压为 20kV。该部分测试分析工作在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。

总类脂质抽提主要采用加速有机萃取机(Dionex ASE 350)。萃取剂为二氯甲烷,温度为 100℃,压力为 1700 psi。在每个样品萃取之间设定自动清洗程序进行自净,以防止样品间的交叉污染。在采用纯净的氮气对得到的提取物进行吹干浓缩后,加载至硅胶柱进行组分分离。分别用 4:1 的环己烷:二氯甲烷和 4:1 的二氯甲烷:甲醇洗脱剂进行非极性与极性组分的分离,并将非极性组分上机测试。类胡萝卜素衍生物的测试与分析主要使用气相色谱三重四级杆质谱联用仪(Agilent 7890B GC-Agilent 7010A),选用 DB-5MS 毛细管色谱柱(60m×0.25mm×0.25um)。进样口温度为 320℃,连接杆温度为 300℃;程序升温条件为 60℃保持 2mins,以 8℃/min 升至 220℃后 2℃/min 升至 320℃。三重四级杆质谱电离模式为 EI,检测模式为 MRM。电离能量设置为 70eV。类胡萝卜素的鉴定分析主要采用 Geomark Standard(美国 GeoMark 公司标准混合油样)作为标准参考,数据处理使用安捷伦 Masshunter 分析软件。生物标志化合物抽提、分离与测试分析在美国麻省理工学院 The Summons Lab 完成。

3 类胡萝卜素测试结果

研究中,通过气相色谱三重四级杆质谱联用仪

对样品中分离提纯后的非极性组分进行检测,得到丰富的类胡萝卜素化合物。

3.1 类胡萝卜素种类鉴定

根据类胡萝卜素的分子结构和质谱特征,采用最优的母-子离子对组合对不同组分进行扫描检测。如,异海绵烷、海绵烷和海绵紫红烷为 546→134 离子对;绿硫菌烷和奥克烷为 554→134 离子对; β -异海绵烷和 β -海绵紫红烷为 552→134 离子对; β -胡萝卜烷和 γ -胡萝卜烷分别为 558→123 和 560→125 离子对。在进行类胡萝卜素鉴定时,需要格外注意“串扰”(crosstalk)现象的影响,通常需要通过标准对比进行二次确认。如在离子对 554→134 的扫描图谱中会出现 β -异海绵烷和 β -海绵紫红烷的峰;离子对 560→125 中也会出现 β -胡萝卜烷的峰(见图 2)。此外,本研究还对具有 38 和 39 个碳原子的 C_{38} 和 C_{39} 类胡萝卜素通过 518→120 和 540→120 离子对进行了扫描。

3.2 安集海河组类胡萝卜素分布特征

在准噶尔盆地安集海河组上段检测出了丰富的类胡萝卜素(图 2)。从结果来看, β -胡萝卜烷大量出现,但 γ -胡萝卜烷在安集海河组样品中不发育; β -异海绵烷也占据较大的比例。样品中除了检测到异海绵烷、海绵烷、海绵紫红烷、 β -异海绵烷外,还检测到了相当含量的绿硫菌烷,但奥克烷在安集海河组整体含量都很低(表 1)。此外,在 C1 井中还出现了丰富的叶黄烷,但 C_{39} 胡萝卜烷几乎不发育,因此 C_{39} 胡萝卜烷不作为本研究讨论的重点(以上各种类胡萝卜素的习惯名称和具体探讨见讨论部分)。

4 讨论

准噶尔盆地南缘安集海河组样品中发育多种类胡萝卜素的衍生物。在沉积学与岩石学工作基础上,根据类胡萝卜素的组合关系可以对原始古湖泊的水体性质和微生物群落进行推测。

表 1 安集海河组类胡萝卜素发育种类及相对含量 (%)

Table 1 Types and ratios (%) of carotenoids in Anjihai Formation

	绿硫菌烷	奥克烷	异海绵烷	海绵烷	海绵紫红烷	β -异海绵烷	β -胡萝卜烷	γ -胡萝卜烷	叶黄烷
C1-01	2.97	0.95	10.54	2.22	5.37	18.47	100.00	1.28	130.71
C1-02	12.12	0.88	4.07	1.82	2.77	25.36	100.00	1.12	142.92
AJH-01	0.01	0.00	19.03	2.36	3.09	32.09	100.00	0.48	5.91

注:数据按照 β -胡萝卜烷为 100%进行参比计算。

4.1 准噶尔盆地南缘安集海河组沉积特征与空间展布

准噶尔盆地南缘安集海河组整体以细粒湖相沉

积为主,颜色以灰色-灰绿色为主,与下部的紫泥泉子组地层和上部沙湾组地层界限明显。从野外剖面发育情况来看,安集海河组在西部安集海河一带最

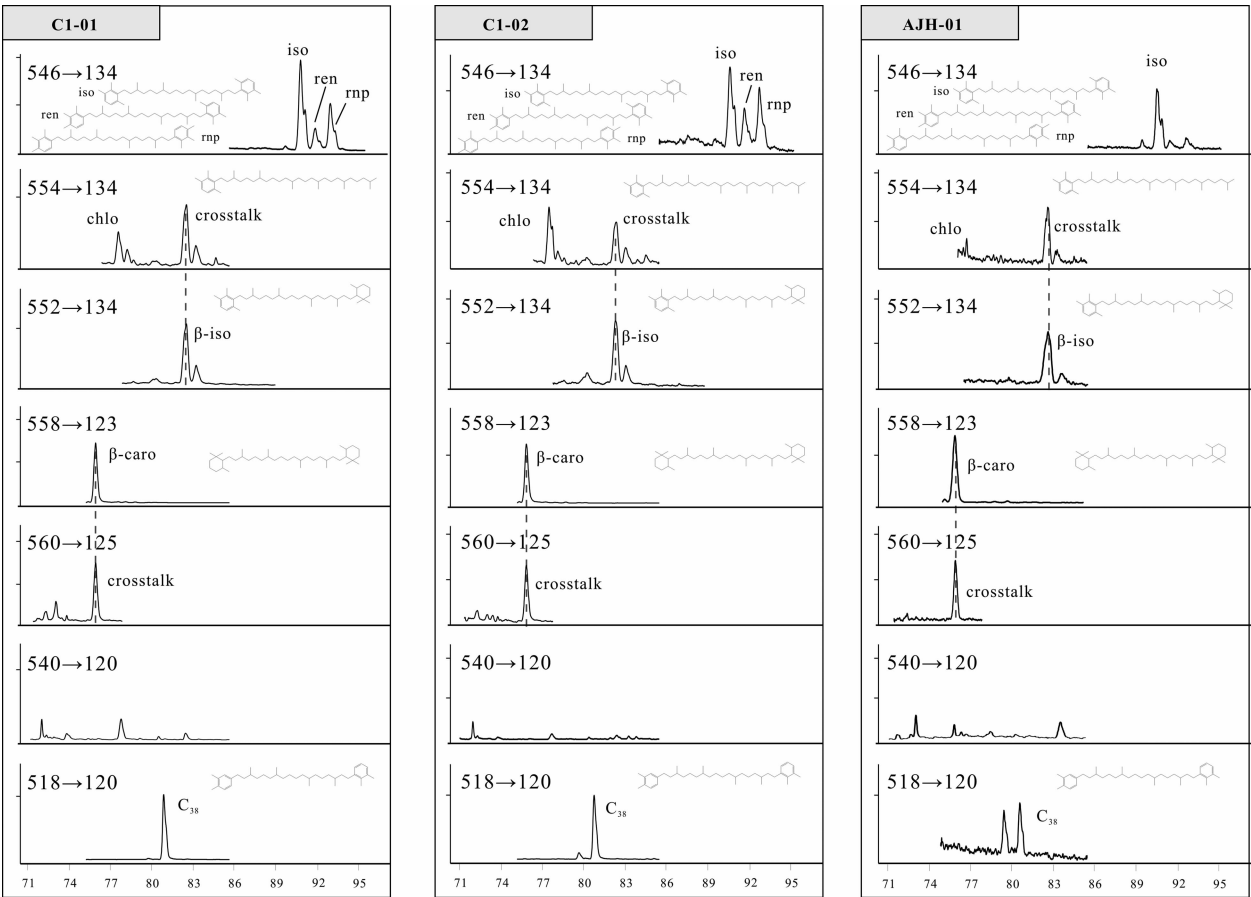


图 2 准噶尔盆地安集海河组类胡萝卜素气相色谱图

Fig. 2 Gas chromatograph of carotenoids in Anjihaihe Formation, Junggar Basin

测试样品分别为 C1-01, C1-02 和 AJH-01, 详见表 1; 其中 iso—异海绵烷; ren—海绵烷; rnp—海绵紫红烷; chlo—绿硫菌烷; β -caro— β -胡萝卜素; C_{38} — C_{38} 类胡萝卜素; Crosstalk: “串扰”现象
Samples are including C1-01, C1-02 and AJH-01. For details, see Table 1. iso—*isorenieratane*; ren—*renieratane*; rnp—*renierapurpurane*; chlo—*chlorobactane*; β -caro— β -carotene; C_{38} — C_{38} carotenoids.

为发育,与下伏紫泥泉子组呈整合接触,岩性以灰绿色-深灰色泥岩夹薄层细砂岩或碳酸盐岩为特征(图 3),并发育大量腹足和介壳类化石;从底部到顶部这种岩性组合呈韵律式发育,上部岩性逐渐过渡为黄绿色-土黄色泥岩夹砂岩,顶部与沙湾组整合接触。位于安集海河剖面北部的西北部的 C1 井中,安集海河组主要以灰绿色泥岩为主,未见碳酸盐岩韵律夹层(图 4)。

从准噶尔盆地南缘自东向西不同剖面中安集海河组地层发育情况对比,显示安集海河组在准噶尔盆地南缘岩性与粒度由西向东逐渐变粗(图 4)。如在玛纳斯河剖面,安集海河组仍为湖相沉积为主,但已发育较厚层的砂岩层;而在三工镇剖面发育的安集海河组明显发育三角洲前缘相沉积,如可见高角度前积层和向上变粗的反韵律特征。同时,野外露头可见大型波痕,反映了湖浪作用较强,顶部灰绿色

砾石质砂岩较为发育。总体来看,准噶尔盆地南缘安集海河组地层东西向发育的差异性主要反映了古湖泊水体由西向东逐渐变浅、分布范围变小的趋势。

由于安集海河剖面安集海河组灰绿色泥岩样品粒度较细,在偏光显微镜下无法识别具体矿物,我们通过扫描电镜进行更高分辨率的观察(图 5)。从结果来看,灰绿色泥岩整体以粘土矿物为主,同时可见碳酸盐岩颗粒均匀地分散于粘土矿物之间。碳酸盐岩颗粒主要为方解石,自形程度较好,晶体粒径较小,直径约 $3\sim5\mu\text{m}$ 。这种较为细小的碳酸盐岩颗粒往往反映了原生或准同生的沉积成因,后期成岩改造作用较弱。此外,我们还发现了大量的草莓状黄铁矿,粒径较小,直径约 $6\mu\text{m}$ 。草莓状黄铁矿往往指示局限水体为缺氧、富硫的还原环境,小颗粒的黄铁矿反映样品并未经过后期成岩作用的强烈改造(Ye Yuntao et al., 2017)。



图 3 准噶尔盆地南缘安集海河剖面安集海河组地层分布特征
Fig. 3 The section of Anjihaihe Formation in outcrops of South Junggar Basin

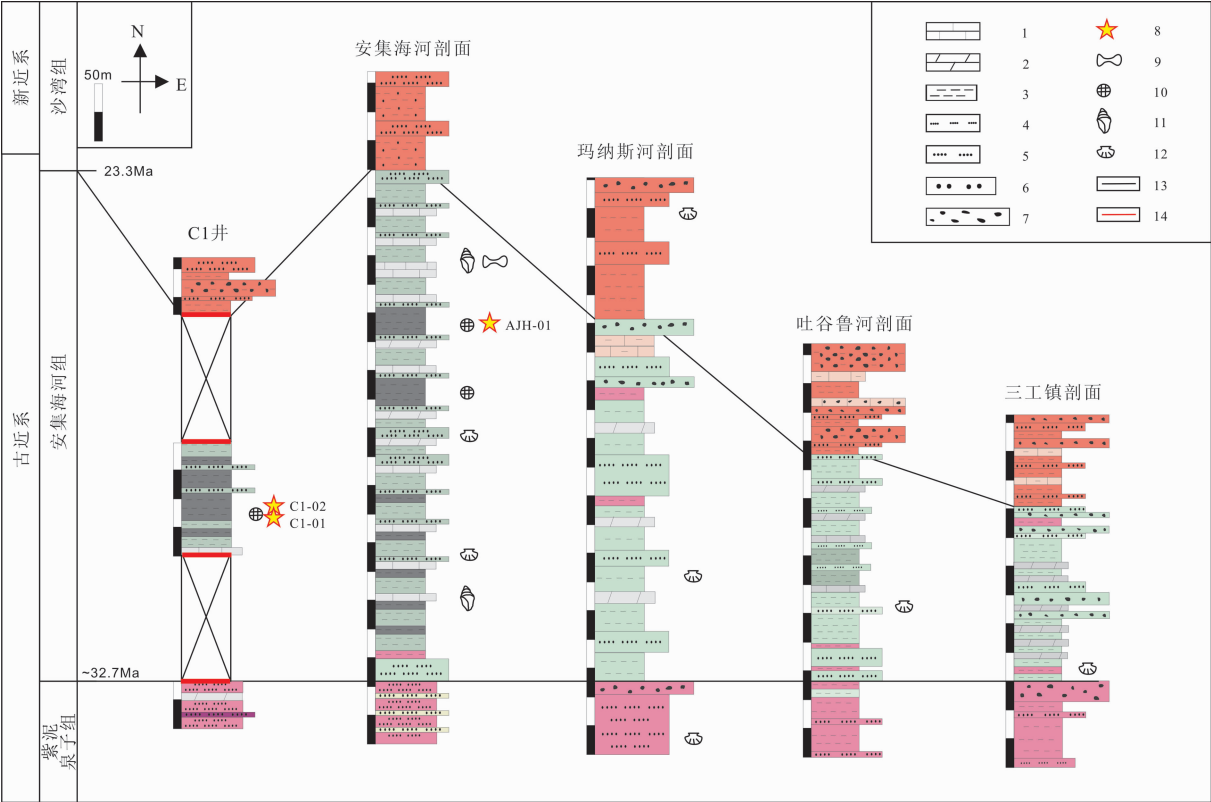


图 4 准噶尔盆地南缘安集海河组东西向地层综合对比

Fig. 4 Strata comparison of Anjihaihe Formation from east to west in the South Junggar Basin

1—灰岩;2—白云岩;3—泥岩;4—细砂岩;5—中砂岩;6—粗砂岩;7—砾岩;8—采样点;9—脊椎动物化石;10—草莓状黄铁矿;
11—腹足化石;12—介壳化石;13—地层边界;14—断层

1—limestone; 2—dolostone; 3—mud; 4—fine sandstone; 5—medium Sandstone; 6—coarse sandstone; 7—gravel stone;
8—sampling locations; 9—vertebrate; 10—framboidal pyrite; 11—pleopods; 12—shells; 13—stratigraphic boundary; 14—faults

结合安集海河组泥岩宏—微观分析结果以及沉积展布特征,我们认为准噶尔盆地南缘安集海河组主要以湖相沉积为主。其中,西部地区安集海河一带水深最大,以半深湖-深湖相沉积为主,原始水体

为缺氧、富硫的还原环境;而向东古湖泊水体则逐渐变浅、沉积范围变小,以浅湖泊沉积为主。

4.2 沉积记录中类胡萝卜素衍生物的来源

类胡萝卜素及其衍生物在自然界中种类繁多,

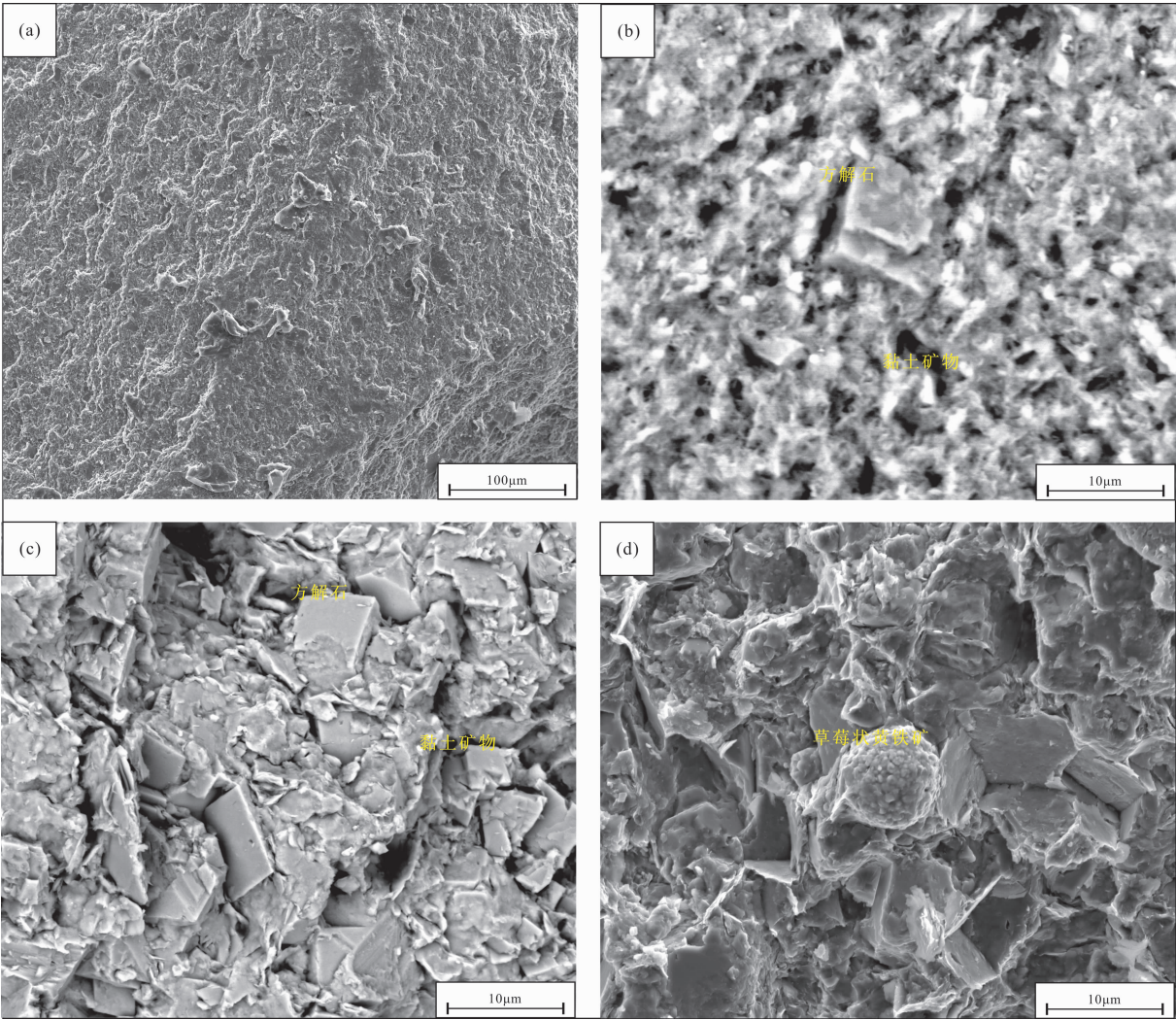


图 5 准噶尔盆地南缘安集海河组泥岩微观结构

Fig. 5 Microscopes of mudstone in Anjihaihe Formation, South Junggar Basin
(a)—安集海河组泥岩样品大范围二次电子照片;(b)—安集海河组泥岩小范围背散射照片;
(c)—安集海河组灰岩样品背散射照片;(d)—安集海河组灰岩样品二次电子照片
(a)—The large-scope secondary-electron picture of mudstone;(b)—the small-scope Electron-Back-Scattered-Diffraction picture of mudstone;
(c)—the Electron-Back-Scattered-Diffraction picture of limestone;(d)—the l secondary-electron picture of limestone

但在地质记录中所发现的种类有限。目前已知的类胡萝卜素衍生物中部分化合物已具有明确的生物来源,如光合硫细菌;其余尚无特定的来源,或目前研究程度较低(表 2)。

4. 2. 1 常见类胡萝卜素衍生物的主要来源

胡萝卜烷在地质记录中广泛出现,一般在所有类胡萝卜素中所占的比例最高。在地质记录中,常见的胡萝卜烷主要以 β -胡萝卜烷(β -carotane)和 γ -胡萝卜烷(γ -carotane)为主,分别以双环、单环烷基的类异戊二烯烃为主要结构特征(见附录, IX, X)。其中, β -胡萝卜烷的先质比较单一,主要为末端具有 β 基团结构的 β -胡萝卜素(见附录, β , IX');而 γ 的

先质可能性较多,如蓝细菌产生的蓝藻叶黄素(Myxoxanthophyll)、绿色非硫细菌(如绿弯菌门 Chloroflexi)或绿色硫细菌产生的具有 β 和 ψ 末端基团的 γ -胡萝卜素(见附录, β , ψ , X')(Palmisano et al., 1988)等都可以产生。整体来看,胡萝卜素的来源十分广泛,目前自然界发现的几乎所有的自养、光养生物都可以合成;此外,在早期成岩作用过程中,胡萝卜烷也常常会从其他化合物转化而来(Koopmans et al., 1996),因而胡萝卜烷不具有特定的来源指向性。对于不同来源的胡萝卜烷还需结合其他证据,如碳同位素、地质特定演化阶段等进行综合判断。如在元古宙缺乏真核藻类的环境中,胡

萝卜烷的存在往往被认为来源于原核生物(Brock et al., 2008)。

相比环烷基结构,芳香基的长链类异戊二烯烃更具明确来源的意义,并多与光合硫细菌活动有关。其中,绿硫菌烷(chlorobactane)由饱和的类异戊二烯长链与末端芳香环构成。异海绵烷(isorenieratane)则由相同的长链和两个芳香环组成,并具有高度对称性结构。值得注意的是,在芳香基类胡萝卜素的结构中,特定的甲基结构极有可能具有来源指向性。如绿硫菌烷和异海绵烷的末端芳香环都具有 2,3,6-三甲基结构(见附录, φ)。这种结构的相似性在一定程度上反映了化合物成因的某种联系。绿硫菌烷和异海绵烷分别是绿硫菌烯和异海绵烯的衍生物。从生物来源上看,绿硫细菌(Green Sulfur Bacteria)中的绿硫细菌科(Chlorobiaceae)可以合成绿硫菌烯和异海绵烯(Grice et al., 1996; Maresca et al., 2008)(见附录, II' 和 IV'),因而在沉积记录中出现的绿硫菌烷和异海绵烷往往反映了绿硫细菌的存在。其中,绿硫菌烯主要来自于绿硫细菌的绿色菌株,而异海绵烯则多由绿硫细菌的棕色菌株产生。从生物种属上看,绿硫细菌属于严格厌氧的光合细菌,其主要通过结构上的三羧酸循环进行二氧化碳的固定,并形成相对富集 ^{13}C 的产物(Koopmans et al., 1996a; 1996b)。相应地,绿硫细菌所产生相关的生物标志化合物也具有较重的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这也是异海绵烷和绿硫菌烷来源于不同种类绿硫细菌的重要判别标志之一。绿硫细菌产生的相关生物标志化合物的单体碳同位素要比来自于浮游植物的偏正约 15‰(Summons et al., 1986; Summons et al., 1987; Sinninghe Damste' et al., 1993b)。如 Grice 等人(1996)测定了蓝藻叶绿体的姥鲛烷和植烷单体碳同位素值分布在-28.7‰~-28.4‰之间,但异海绵烷和绿硫菌烷的碳同位素值可达-16.4‰,呈现出强烈的正漂。实际上从生物来源上看,除绿硫细菌外,放线菌目(Actinomycetales)也可以产生异海绵烯,如 *Mycobacterium* 和 *Streptomyces* 等(Krugel et al., 1999)。但放线菌主要分布在陆表环境中。虽然在特定时期海洋环境中也有所发现(Ward et al., 2006),但是由于水体环境中放线菌体内负责合成异海绵烯的基因通常不表达(Brocks et al., 2004),往往认为放线菌对芳香基类胡萝卜素形成的贡献有限。

奥克烷(okenane)结构与绿硫菌烷较为类似,都

是由饱和的类异戊二烯长链与其末端的芳香环构成。但不同于绿硫菌烷,奥克烷的芳香环具有 2,3,4-三甲基结构。这种结构差异性似乎指示了二者在生物来源上的区别。目前认为奥克酮(okenone)(见附录, III')是奥克烷的唯一先质,主要由紫硫细菌(Purple Sulfur Bacteria)中的着色菌科(Chromatiaceae)合成(Imhoff, 1995; Brocks et al., 2008)。虽然从结构上看,这种 2,3,4-三甲基芳基类异戊二烯烃也可以由环脂类胡萝卜素通过芳化作用形成(Koopmans et al., 1996b),但 Brocks 和 Schaeffer(2008)认为这种涉及到两个甲基的异位重排在非生物转化过程中很难实现,因而奥克烷来源较为固定,具有较强的生物指向性。紫硫细菌的生活环境与方式与绿硫细菌相似。但相较于严格厌氧和光营养的绿硫细菌科而言,能够产生奥克烷的着色菌科生存环境较为多样化。实际上,着色菌科既包含可以生存在表层有氧-无氧界面之下的浮游生物环境的菌种,也包含可以生存在深部光合微生物席以下底栖环境的菌种(Brocks et al., 2004)。在底栖生物席中生存的着色菌科产生的奥克酮往往伴生番茄红烯(Brocks et al., 2004)。表层缺氧且光照的条件最符合自硫细菌代谢要求,因而沉积记录中发育的奥克酮多与这种环境相联系(Van Gemerden et al., 1995)。从紫硫细菌的代谢途径来看,除硫化氢外,他们可利用硫代硫酸盐、亚硫酸盐和其他的简单有机质作为电子的供体,但他们无法同化吸收硫酸盐。因而,在地质条件下保存的奥克烷,目前被普遍认为是硫化透光层和富硫环境的标志(Brocks et al., 2008)。此外,紫硫细菌与绿硫细菌的有机质合成路径存在差异,如紫硫细菌可以进行矿化碳的再利用(Brocks et al., 2004),因而紫硫细菌产生的奥克烷往往以较轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 为特征。Schaeffer 等人(1997)测定奥克烷单体碳同位素值约-45‰,要比来源于绿硫细菌的绿硫菌烷同位素值负偏近~20‰;而对应来自于浮游植物的碳同位素介于二者之间,约为-35‰(Schaeffer et al., 1997)。

目前还有一些已经发现但来源尚存争论的类胡萝卜素,如海绵烷(renieratane)、海绵紫红烷(renierapurpurane)和古海绵烷(paleorenieratane)(目前 paleorenieratane 尚无中文习惯命名,此处按照词源翻译为“古海绵烷”)。这些化合物的结构与异海绵烷非常相似,都是由两个芳香环和一个饱和类异戊二烯长链构成,主要差异在于两个苯环上的三个甲基位置(见附录, V, VI, XI)。海绵烷和海绵

紫红烷的先质分别为海绵烯和海绵紫红素(见附录, V', VI')。早期研究发现,海绵烯和海绵紫红素可以在海洋海绵体生物中分离出来(Yamaguchi, 1960; Schaeffle' et al., 1977; Liaaen-Jensen et al., 1982)。但实际上海绵体与其他动物相同,并不具备产生类胡萝卜素的基因。这种发现被认为可能与海绵共生的某种微生物产生了海绵烯和海绵紫红素有关,或海绵通过捕食从而检测到类胡萝卜素(Liaaen-Jensen et al., 1982)。海绵烷与海绵紫红烷在甲基取代结构上与奥克烷具有相似性,它们都具有 2,3,4-三甲苯结构。因此海绵烷与海绵紫红烷被认为其来源可能与紫硫细菌有关(Brocks et al., 2008)。此外,由蓝藻细菌(cyanobacteria)产生的一种叶黄素(synechoxanthin)(见附录, VII)也存在这种类似于 2,3,4-三甲苯的结构,有学者认为也可能是海绵烷和海绵紫红烷的潜在来源(Graham et al., 2008)。但 Brocks 和 Schaeffer 等人(2008)认为这种叶黄素的“2,3-二甲基-4 苯甲酸”的结构在长期的地质演化中可能会经脱羧反应转化为 2,3-二甲苯的结构,并非形成三甲基结构,否定了这些类胡萝卜素的蓝藻细菌来源可能性。总体来看,海绵烷和海绵紫红烷的来源尚存在争议。古海绵烷的结构较为特殊,具有 3,4,5-三甲基结构(见附录, (1))。目前这种特殊结构在现存的生物中尚未发现(Hartgers et al., 1993; Requejo et al., 1992),但这种化合物在中生代及以前的岩石或原油中广泛存在(French et al., 2015; Tulipani et al., 2015; Pages et al., 2016; Bhattacharya et al., 2017)。由于古海绵烷呈现较重的碳同位素特征(Koopmans et al., 1996)、以及与异海绵烷在结构上相似,常常认为其来源于已经灭绝的一种绿硫细菌,或目前尚未探测到的绿硫细菌种属(Hartgers et al., 1993)。

具有相似 2,3,6 和 2,3,4 三甲基结构的类胡萝卜素还包括 β -异海绵烷(β -isorenieratane)和 β -海绵紫红烷(β -renierapurpurane)(见附录, VII, VIII)。其中 β -异海绵烷是 β -异海绵烯的衍生物,在结构上 β -异海绵烷与异海绵烷一端相同(2,3,6-三甲基结构);相似地, β -海绵紫红烷具有 2,3,4-三甲基结构,是 β -海绵紫红烯的衍生物。目前对于 β -异海绵烯的来源也尚未定论。Maresca 等人(2008)通过生物合成实验证明 β -异海绵烷是异海绵烷的先质,并主要来自于棕色的绿硫细菌科。但从单体同位素结果来看, β -异海绵烯也可能来自 β -胡萝卜烯。如 Koopmans et al. (1996b)测定 β -异海绵烷与 β -胡萝

卜烷具有相似的碳同位素值,约 -26% ;但对应的异海绵烷碳同位素值约 -15% 。而具有 2,3,4-三甲苯结构的 β -海绵紫红烷被认为可能与紫硫细菌有关(Brocks et al., 2008)。Behrens 等人(2000)通过对 Lake Cadagno 样品的加氢反应检测到了 β -海绵紫红烷的存在,并通过与加氢后的奥克酮进行比对,发现二者单体碳同位素具有相似的结果,因此认为 β -海绵紫红烷来源可能为着色菌属(Schaeffer et al., 1997; Behrens et al., 2000)。虽然目前这些类胡萝卜素的来源尚存争议,但这种较为固定的三甲基结构似乎可以给我们提供生物来源的信息。

目前在地质记录中已有报道的类胡萝卜素中,除了三甲基-芳香基结构外还存在二甲基结构,如 C_{38} 和 C_{39} 类胡萝卜素(见附录, X III, X IV)。这些类胡萝卜素在结构上与硫细菌产生的类胡萝卜素较为相似,因此这些类胡萝卜素似乎也具有来源上的指示意义。其中, C_{39} - C_{38} 以二甲基苯为主要结构,主要包括 2,3-二甲苯和 2,6-二甲苯两种结构(见附录, (2), (3))。这种相似的二甲苯结构在早期的研究中认为在成岩过程中可能与 β -胡萝卜烷的芳环化作用有关(Sinninghe Damsté et al., 1988, 1997; Koopmans et al., 1997)。但张春明等人(Zhang Chunming et al., 2011)通过柴达木盆地始新世湖相地层中保存完整的 C_{39} - C_{38} 类胡萝卜素结构研究,认为这类 C_{39} - C_{38} 二甲苯类胡萝卜素可能是由 C_{40} 三甲基苯基类胡萝卜素在苯环的 3 或 4 或 6 号位通过脱取代基作用形成。这些样品中同时存在的异海绵烷和双 2,3-二甲苯类胡萝卜素印证了其生物来源的可能性,而非后期成岩转化(Zhang Chunming et al., 2011)。如前述,来源于蓝藻细菌合成的叶黄素很有可能通过脱羧基作用而形成这种双 2,3-二甲苯 C_{38} 类胡萝卜素,可见蓝藻细菌极有可能是其来源之一。鉴于目前叶黄素是该 C_{38} 类胡萝卜素衍生物可能性最高的来源,此处暂且将这类 C_{38} 类胡萝卜素衍生物命名为叶黄烷。总体来说, C_{39} - C_{38} 类胡萝卜素研究目前仍处于起步阶段,有待进一步工作。

在沉积物和原油中广泛发育的短链芳基类异戊二烯烃(Aryl isoprenoids)的来源也多与类胡萝卜素相关。这些化合物在油源对比中应用广泛(Kuypers et al., 2002b; Grice et al., 2005a; Marynowski et al., 2007; Jaraula et al., 2013)。目前已发现的短链芳基类异戊二烯烃主要以 2,3,6 结构、2,3,4 结构和 3,4,5 结构三类为主(分别为 2,3,

表 2 地质样品中常见的类胡萝卜素衍生物结构特征及其主要生物来源

类胡萝卜素衍生物	分子式	结构特征	环基取代基结构	衍生物先质	主要生物来源
β-类胡萝卜素 (β-carotane)	C ₄₀ H ₇₈	双环类异戊二烯烃类	1,1,6-三甲基环基	β-类胡萝卜素 (β-carotene)	自养光合生物
γ-类胡萝卜素 (γ-carotane)	C ₄₀ H ₈₀	单环类异戊二烯烃类	1,1,6-三甲基环基	γ-类胡萝卜素 (γ-carotene)	自养光合生物
奥克烷 (okenane)	C ₄₀ H ₇₄	单芳类异戊二烯烃类	2,3,4-三甲基苯基	奥克酮 (okenone)	紫硫细菌
绿硫菌烷 (chlorobactane)	C ₄₀ H ₇₄	单芳类异戊二烯烃类	2,3,6-三甲基苯基	绿硫菌烯 (chlorobactene)	绿硫细菌绿色菌株
异海绵烷 (isorenieratane)	C ₄₀ H ₆₆	双芳类异戊二烯烃类	2,3,6-三甲基苯基	异海绵烯 (isorenieratene)	绿硫细菌棕色菌株、放线菌
海绵烷 (renieratane)	C ₄₀ H ₆₆	双芳类异戊二烯烃类	2,3,6-三甲基苯基 和 2,3,4-三甲基苯基	海绵烯 (renieratene)	硫细菌或蓝细菌?
海绵紫红烷 (renierapurpurane)	C ₄₀ H ₆₆	双芳类异戊二烯烃类	2,3,4-三甲基苯基	海绵紫红素 (renierapurpurin)	紫硫细菌或蓝细菌?
古海绵烷 (paleorenieratane)	C ₄₀ H ₆₆	双芳类异戊二烯烃类	3,4,5-三甲基苯基	—	—
β-异海绵烷 (β-isorenieratane)	C ₄₀ H ₇₂	单芳双环类异戊二烯烃类	2,3,6-三甲基苯基 和 1,1,6-三甲基环基	β-异海绵烯 (β-isorenieratene)	绿硫细菌?
β-海绵紫红烷 (β-renierapurpurane)	C ₄₀ H ₇₂	单芳双环类异戊二烯烃类	2,3,4-三甲基苯基 和 1,1,6-三甲基环基	β-海绵紫红素 (β-renierapurpurin)	紫硫细菌或着色菌属?
叶黄烷	C ₃₈ H ₆₂	双芳类异戊二烯烃类	二甲基苯基	叶黄素? (synechoxanthin)	蓝细菌?
C ₃₉ 类胡萝卜素	C ₃₉ H ₇₂	双芳类异戊二烯烃类	2,3,6/2,3,4-三甲基苯基 和二甲基苯基	—	—

6-三甲基芳基类异戊二烯、2,3,4-三甲基芳基类异戊二烯和 3,4,5-三甲基芳基类异戊二烯),碳数多分布在 C₁₃-C₃₁ 之间,并由于类异戊二烯结构的原因,C₁₇,C₂₃ 和 C₂₈ 分布较少。这种结构与类胡萝卜素结构特征高度一致,因而往往被认为与类胡萝卜素在成岩过程中发生的裂解作用有关(Summons et al, 1986, 1987),也被用作辅助的硫细菌成因相关的化合物进行讨论。但由于来源广泛,本质上这些芳香基化合物并不具有硫细菌来源的指向性。如已有报道证实短链 2,3,6-结构的类异戊二烯烃可以由脂环类胡萝卜素在成岩过程中通过芳环化和裂解作用形成(Koopmans et al. , 1996b)。因此,使用这类化合物进行生物来源的讨论,还需要结合其他指标,如芳香类异戊二烯烃比例指数(Schwark et al, 2004)和碳同位素等手段进行共同验证。

4.2.2 准噶尔盆地安集海河组类胡萝卜素生物来源分析

从本次类胡萝卜素的分析结果来看,异海绵烷和绿硫菌烷在准噶尔盆地安集海河组具有较高的比重(表 1)。这种配置关系反映了准噶尔盆地在渐新世晚期古湖泊中绿硫细菌占优势;同时奥克烷几乎不发育,说明作为其生物来源的紫硫细菌对于安集海河组类胡萝卜素的贡献很小。此外,样品中还发

育相当含量的海绵烷和海绵紫红烷。鉴于紫硫细菌并不发育,我们可以否定海绵烷和海绵紫红烷来自于紫硫细菌的假设。有趣的是,我们同时检测到了大量的叶黄烷。虽然目前尚未存在叶黄烷来源研究,但结合叶黄烷的二甲基芳香基结构,以及该层位紫硫细菌的缺失,我们认为叶黄烷最有可能的先质是叶黄素(synechoxanthin),并主要由蓝藻细菌合成。同时在安集海河组样品中大量发育的 β-异海绵烷的来源较为复杂,可能来自于异海绵烯或 β-胡萝卜素烯,也或许二者都存在一定的贡献。具体来源还需要进一步的单体同位素数据进行确认。综上所述,我们认为在安集海河组渐新世晚期水体曾存在透光带硫化现象,且光合微生物中以绿硫细菌和蓝藻细菌占优势。

4.3 硫细菌相关的类胡萝卜素古环境意义

地质记录中的胡萝卜素的来源与古环境研究主要依据“将今论古”原则。现今能够产生这些类胡萝卜素衍生物的硫细菌多存在于缺氧、富硫且具有光照的水体中。具体来讲,不同种类的硫细菌生存条件和环境要求各异,因而在沉积记录中特定的类胡萝卜素组合关系可以很好地反映不同的古水体环境和生物种群优势。如绿色绿硫细菌和浮游紫硫细菌对光强要求较高,主要活动在浅层缺氧水体

(Montesinos et al., 1983)。因而在沉积记录中,绿硫菌烷和奥克烷大量共存往往反映了浅层光线通透性较好的缺氧富硫水体。相反,当光合微生物在浅层水体爆发,并使水体富营养化时(如藻华),会造成光强度随水深快速衰减。同时期藻类来源的有机质在水体沉降中逐步降解并消耗下层水体中的全部溶解氧。在这种环境中,绿硫细菌中的棕色种属往往大量发育,并在与绿硫细菌的绿色种属的竞争中具有绝对优势,从而在沉积记录中由棕色绿硫细菌产生的异海绵烷远比绿色绿硫细菌产生的绿硫菌烷量大。此外,在局限封闭缺氧水体中,紫硫细菌与绿硫细菌的竞争中占绝对优势,因而地层记录中大量奥克烷发育(Overmann et al., 1991)。如澳大利亚北部古元古宙的 Barney Creek 组记录的类胡萝卜素以富奥克烷、贫异海绵烷为特征,被解释为化学跃变层较浅、以着色菌科为优势的缺氧水体环境(Brocks et al., 2008)。

由于不同硫细菌对光照强度要求的差异,不同类型的菌株在水柱中也存在着纵向上的梯度分布,这种分布特征可以一定程度上还原古水体的演化。纵向上看,随着水深加深和光强度的降低,紫色的着色菌科和绿色的绿硫细菌科逐渐占劣势,而棕色的绿硫细菌科比例逐渐提升。Brocks et al. (2008)对 33 个分层湖泊水体中绿硫细菌和紫硫细菌的生存水深统计显示,能够产生绿硫菌烯的绿色绿硫细菌科主要发育的水深约 2~16 m,其中 75% 主要发育在 6 m 以上;能够生产奥克酮的着色菌科的勃发水深约 1.5~24 m,其中 75% 主要发育在 12 m 以上;而产生异海绵烯的棕色绿硫细菌科发育的水深最多可达 80 m,其中 75% 主要发育在 17 m 以上。这种分布的差异揭示了棕色的绿硫细菌其所需光线强度条件最弱,也符合目前在地质记录中所发现的异海绵烷多分布于深海相沉积或水体较深的湖泊中这一现象。由此可见,类胡萝卜素的种类与组合关系往往反映了特定的古水体条件。来自于棕色绿硫细菌的异海绵烯主要出现于化变层较深的大型盆地以及峡湾环境(Burke et al., 1988; Smittenberg et al., 2004; Wakeham et al., 2007)。当纵向地质记录上异海绵烷出现并逐渐占优势,很可能表明化变层逐渐加深和(或)表层氧化带发生了藻华现象。相反,在地质记录中奥克烷与绿硫菌烷共存现象,往往出现在浅海或半封闭湖泊中,反映了湖泊逐渐演化为缺氧水体较浅的沉积环境。而奥克烷逐渐占优势的情况,多见于半对流或封闭湖泊演化后期,化学跃变

层很浅情况(Fulton et al., 2018; Meyer et al., 2011; Overmann et al., 1993)。此外需要注意的是,大量奥克烷出现也可能反映了一种特殊的环境:当水体相对较浅、且并未产生永久分层时,其来源很大程度上与微生物席有关(French et al., 2014)。

从类胡萝卜素组合的分析研究结果来看,C1 井和剖面的样品都表现出了一定含量的绿硫菌烯和异海绵烷的特征,而奥克烷缺乏。这种组合说明古湖泊中绿硫细菌的绿色菌株和棕色菌株共存,并占据光合细菌中的主导优势。往往反映了古湖泊水体较深,且两种菌株在水深上已形成分带。缺乏紫硫细菌的现象也印证了这一点,说明安集海河组时期湖泊水体较深,湖泊面积分布广阔。

4.4 准噶尔盆地渐新世时期古湖泊环境恢复

目前相关学者已对准噶尔盆地安集海组古环境与古气候开展了一定的研究,但有关硫化透光带和光合硫细菌目前尚未报道。从地层记录来看,准噶尔盆地西部安集海河组属于半深湖-深湖相沉积(图 4)。鉴于渐新世早期准噶尔盆地南缘构造稳定,且以温暖湿润的古气候为主要特征(Deng Songtao et al., 2008; Dong Xinxin et al., 2013),这种古环境似乎为深水古湖泊的发育提供了有利条件。而在渐新世中晚期,准噶尔盆地南缘古气候由湿润逐渐转为干旱,证据主要来自于古生物种类的演变和碳氧同位素等地球化学指标变化(Deng Songtao et al., 2008; Charreau et al., 2012; Dong Xinxin et al., 2013; Li Qian et al., 2016; Wang Yizhe et al., 2019)。从我们在安集海河组中上部地层中发现的绿硫菌烷和异海绵烷来看,这一时期古湖泊水体透光层已产生了硫化现象。这种透光带硫化的现象往往与水体分层、物质循环不畅有关。从前人对准噶尔盆地古气候研究来看,蒸发很有可能是导致湖泊盐度升高、产生水体分层的重要原因之一。

研究区位于准噶尔盆地南缘,紧邻北天山山前构造带。现今分布于准噶尔盆地南缘的安集海河组主要以湖相为主,边缘相沉积缺乏(如图 4)。这种靠近山前却缺失粗沉积相带的发育模式符合前陆盆地的特征(Kang Linshu et al., 1995)。但从类胡萝卜素中异海绵烷相比绿硫菌烷占优势来看(平均 11.21 vs 5.03,表 1),安集海河组时期的古湖泊水深与发育范围应具有相当规模。同时来自于碎屑锆石年代学的研究表明,安集海河组仍接受来自中天山的物源输入(Buslov, 2008; Xiang Dunfeng et al., 2019),证明渐新世时期北天山尚未完全对中天山与

准噶尔盆地产生屏障。据此我们推测,安集海河组时期发育的古湖泊向南延伸的范围很有可能比现今观察到的地层分布范围更广。来自类胡萝卜素的证据揭示了安集海河组时期发育的古湖泊原始水深与范围超过目前的认识。

5 结论

(1) 沉积记录来看,安集海河组在准噶尔盆地西部地区安集海河一带最为发育,以半深湖-深湖相为主,向东(如玛纳斯河一带)水体逐渐变浅。整体来看,安集海河组时期发育的古湖泊具有缺氧和富硫的特征。

(2) 准噶尔盆地安集海组检测到了丰富的类胡萝卜素衍生物,包括绿硫菌烷、异海绵烷、海绵烷和海绵紫红烷等,同时叶黄烷也较为发育。综合判断认为,这些类胡萝卜素主要来源于绿硫细菌和蓝藻细菌,期间紫硫细菌不发育。

(3) 通过沉积学与类胡萝卜素组合的证据来看,渐新世晚期,准噶尔盆地西部地区古湖泊水体较深,同时发育硫化透光带。这一时期古气候由湿润向蒸发环境的转变很有可能是引发这种现象的重要原因之一。另外,微生物中绿硫细菌种占优势证明渐新世时期在准噶尔盆地南缘发育的古湖泊向南延伸范围很广,与构造演化观点相一致。

致谢:本研究中的样品采集工作得到了王家林、周天琪、周彦希、冯庚、李严等人的帮助;野外安全由李宏伟和祁郁明两位师傅提供保障。同时,本研究还受到了公派留学基金委的资助。在此一并衷心感谢!

References

- Anke B, Philippe S, Stefano B, Pierre A. 2000. Mono and bicyclic squalene derivatives as potential proxies for anaerobic photosynthesis in lacustrine sulfur-rich sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (19): 3327~3336.
- Bhattacharya S, Dutta S, Summons R E. 2017. A distinctive biomarker assemblage in an Infracambrian oil and source rock from western India: Molecular signatures of eukaryotic sterols and prokaryotic carotenoids. *Precambrian Research*, 290:101~112.
- Bian Weihua, Hornung J, Liu zhenhua, Wang Pujun, Hinderer M. 2010. Sedimentary and palaeoenvironmental evolution of the Junggar Basin, Xinjiang, Northwest China. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 90 (3): 175~186.
- Britton G, Liaen-Jensen S, Pfander H. 1995. Carotenoids today and challenges for the future. *Carotenoids: Isolation and Analysis*, 1: 60~64.
- Brocks J J, Schaeffer P. 2008. Okenane, a biomarker for purple sulfur bacteria (Chromatiaceae), and other new carotenoid derivatives from the 1640 Ma Barney Creek Formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72: 1396~1414.
- Brocks J J, Summons R E. 2004. *Sedimentary Hydrocarbons, Biomarkers for Early Life. Treatise on Geochemistry (Second Edition)*, 10: 61~103.
- Brocks J J, Pearson A. 2005. Building the biomarker tree of life. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 59: 233~258.
- Burke C M, Burton H R. 1988. Photosynthetic bacteria in meromictic lakes and stratified fjords of the Vestfold Hills, Antarctica. *Hydrobiologia*, 165: 13~23.
- Buslov M M. 2008. Cenozoic tectonics of Central Asia: Basement control. *Himalayan Journal of Sciences*, 2(4): 104~105.
- Canfield D E. 1998. A new model for Proterozoic ocean chemistry. *Nature*, 396: 450~453.
- Cao Changqun, Love G D, Hays L E, Wang Wei, Shen Shuzhong, Summons R E. 2009. Biogeochemical evidence for euxinic oceans and ecological disturbance presaging the end-Permian mass extinction event. *Earth and Planetary Science Letters*, 281: 188~201.
- Charreau J, Kent-Corson M L, Barrier L, Augier R, Ritts B D, Chen Yan, France-Lannord C, Guilmette C. 2012. A high-resolution stable isotopic record from the Junggar Basin (NW China): Implications for the paleotopographic evolution of the Tianshan Mountains. *Earth and Planetary Science Letters*, 341~344: 158~169.
- Deng Songtao, Wu Chaodong, Gu Xiao, Guo Zhaojie. Sedimentary records and paleoenvironmental significance of stable isotopic evidences from the late Cenozoic, northern Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 689~698 (in Chinese with English abstract).
- Ding Wenjing, Hou Dujie, Jiang Lian, Jiang Yuhuan, Wu Piao. 2020. High abundance of carotenes in the brackish-saline lacustrine sediments: A possible cyanobacteria source? *International Journal of Coal Geology*, 219, 33~37.
- Dong Xinxin, Ding Zhongli, Yang Shiling, Luo Pan, Wang Xu, Ji Junliang. 2013. Synchronous drying and cooling in central Asia during late Oligocene. *Chinese Science Bulletin*, 58(25): 3119~3124 (in Chinese with English abstract).
- Fang Shihu, Guo Zhaojie, Jia Chengzao, Zhang Zhicheng, Wang Xulong, Wang Meina. 2006. Meso-Cenozoic heavy minerals' assemblages in the southern Junggar Basin and its implications for basin-orogen pattern. *Chinese Journal of Geology*, 41(4): 648~662 (in Chinese with English abstract).
- French K L, Rocher D, Zumberge J E, Summons R E. 2015. Assessing the distribution of sedimentary C40 carotenoids through time. *Geobiology*, 13: 139~151.
- French K L, Sepúlveda J, Trabuco-Alexandre J, Gröcke D R, Summons R E. 2014. Organic geochemistry of the early Toarcian oceanic anoxic event in Hawsker Bottoms, Yorkshire, England. *Earth and Planetary Science Letters*, 390: 116~127.
- Graham J E, Bryant D A. 2007. Carotenoid biosynthesis in *Synechococcus* sp. PCC 7002: elucidation of the pathway to myxoxanthophyll and aromatic xanthophylls. 9th Cyanobacterial Molecular Biology Workshop, Lake Lawn Resort, Delavan, WI, 63.
- Grice K, Schaeffer P, Schwark L, Maxwell J R. 1996. Molecular indicators of palaeoenvironmental conditions in an immature Permian shale (Kupferschiefer, Lower Rhine Basin, north-west Germany) from free and S-bound lipids. *Organic Geochemistry*, 25(3-4): 131~147.
- Grice K, Summons R E, Grosjean E, Twitchett R J, Dunning W, Wang S X, Bottcher M E. 2005. Depositional conditions of the northern onshore Perth Basin (Basal Triassic). *The APPEA Journal*, 45(1): 262~274.
- Gruce K, Cao Changqun, Love G D, Böttcher M E, Twitchett R J, Grosjean E, Summons R E, Turgeon S C, Dunning W, Jin Yugan. 2005. Photic zone euxinia during the Permian-Triassic superanoxic event. *Science*, 307(5710): 706~709.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Wu Chaodong, Fang Shihu, Zhang Rui. 2006. The Mesozoic and Cenozoic Exhumation History of Tianshan and Comparative Studies to the Junggar and Altai

- Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 1~15 (in Chinese with English abstract).
- Haddad E E, Tuete M L, Martinez A M, Williford K, Boyer D L, Droser M L, Love G D. 2016. Lipid biomarker stratigraphic records through the Late Devonian Frasnian/Famennian boundary: Comparison of high- and low-latitude epicontinental marine settings. *Organic Geochemistry*, 98: 38~53.
- Hays L E, Beatty T, Henderson C M, Love G D, Summons R E. 2007. Evidence for photic zone euxinia through the end-Permian mass extinction in the Panthalassic Ocean (Peace River Basin, Western Canada). *Palaeoworld*, 16: 39~50.
- Hendrix M S, Dumitru T A, Graham S A. 1994. Late Oligocene-early Miocene unroofing in the Chinese Tian Shan: An early effect of the India-Asia collision. *Geology*, 22(6): 487~490.
- Huang Haiping, Zhang Shuichang, Su Jin. 2016. Palaeozoic oil-source correlation in the Tarim Basin, NW China: A review. *Organic Geochemistry*, 94: 32~46.
- Huo Qiuli, Li Zhenguang, Zeng Huasen, Fu Li. 2010. Aryl Isoprenoids Found in Late Cretaceous Qnl Source Rocks in Songliao Basin and Its Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(4): 815~820 (in Chinese with English abstract).
- Imhoff J F. 1995. Taxonomy and Physiology of Phototrophic Purple Bacteria and Green Sulfur Bacteria. *Anoxygenic Photosynthetic Bacteria*. 2:1~15.
- Jaraula C M B, Grice K, Twitchett R J, Böttcher M E, LeMetayer P, Dastidar A G, Opazo L F. 2013. Elevated pCO₂ leading to Late Triassic extinction, persistent photic zone euxinia, and rising sea levels. *Geology*, 41(9): 955~958.
- Ji Junliang, Luo Pan, White P, Jiang Hanchao, Gao Ling, Ding Zhongli. 2008. Episodic uplift of the Tianshan Mountains since the late Oligocene constrained by magnetostratigraphy of the Jingou River section, in the southern margin of the Junggar Basin, China. *Journal of Geophysical Research*, 113(5): 100~102.
- Ji Junliang, Zhu Min, Wang Xu, Luo Pan, Dong Xinxin. 2010. Ages of the Cenozoic strata on the southern margin of Junggar Basin, northwestern China. *Journal of Stratigraphy*, 34(1): 43~50 (in Chinese with English abstract).
- Jin Xiong, Fischer W M, Inoue K, Nakahara M, Bauer C E. 2000. Molecular evidence for the early evolution of photosynthesis. *Science*, 289(5485): 1724~1730.
- Jolivet M, Dominguez S, Charreau J, Chen Yan, Li Yongang, Wang Qingchen. 2011. Mesozoic and Cenozoic tectonic history of the central Chinese TianShan: Reactivated tectonic structures and active deformation. *Tectonics*, 29: 1~30.
- Kang Linshu, Zhai Guangming. 1995. Foreland basins and hydrocarbon accumulation in China. *Acta Petrolei Sinica*, 16(4): 1~8 (in Chinese without English abstract).
- Kasprak A H, Sepúlveda J, Price-Waldman R, Williford K H, Schoepfer S D, Haggart J W, Ward P D, Summons R E, Whiteside J H. 2015. Episodic photic zone euxinia in the northeastern Panthalassic Ocean during the end-Triassic extinction. *Geology*, 43(4): 307~310.
- Koopmans M P, Koster J, Van Kaam-Peters H M E, Kenig F, Schouten S, Hartgers W A, De Leeuw J W, Sinninghe Damste J S. 1996. Diagenetic and catagenic products of isorenieratene: Molecular indicators for photic zone anoxia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(22): 4467~4496.
- Koopmans M P, Schouten S, Kohnen M E L, Sinninghe Damste J S. 1996. Restricted utility of aryl isoprenoids as indicators for photic zone anoxia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(23): 4873~4876.
- Krugel H, Krubasik P, Weber K, Saluz H P, Sandmann G. 1999. Functional analysis of genes from *Streptomyces griseus* involved in the synthesis of isorenieratene, a carotenoid with aromatic end groups, revealed a novel type of carotenoid desaturase. *Biochemica et Biophysica Acta*, 1439: 57~64.
- Kuypers M M M, Blokker P, Hopmans E C, Kinkel H, Pancost R D, Schouten S, Sinninghe Damsté J S. 2002b. Archaeal remains dominate marine organic matter from the early Albian oceanic anoxic event 1b. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 185: 211~234.
- Kuypers M M M, Pancost R D, Nijenhuis I A, Sinninghe Damsté J S. 2002a. Enhanced productivity led to increased organic carbon burial in the euxinic North Atlantic basin during the late Cenomanian oceanic anoxic event. *Paleoceanography*, 17(4): 1~13.
- Li Chuanxin, Guo Zhaojie, Dupont-Nivet G. 2011. Late Cenozoic tectonic deformation across the northern foreland of the Chinese Tian Shan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 0~1073.
- Li Qian, Tian Xiaoru, Hu Hanwen, Guo Zhaojie. 2016. Paleo-environment Significance of Oxygen and Carbon Isotopic Records in Lacustrine Limestone from Anjihaihe Formation, Northern Tianshan. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 38(3): 398~409 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenxi, Fan Pu, Li Jinggui, Zen Fangang. 1998. An Application of Aryl Isoprenoids in Indicating Sedimentary Environments. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(2): 9~13 (in Chinese with English abstract).
- Liaaen-Jensen S, Renstrøm B, Ramdahl T, Hallenstvet M, Bergquist P. 1982. Carotenoids of marine sponges. *Biochemical Systematics & Ecology*, 10(2): 167~174.
- Liaaen-Jensen S. 1979. Marine carotenoids. In *Marine Natural Products, Chemical and Biological Perspectives* (ed. P. Scheuer). Academic Press, 2:1~73.
- Lu Hong, Sun Yongge, Peng Pingan. 2004. Occurrences and Implications of Aryl Isoprenoids Detected in the Crude Oils from Lunnan Oilfield, Tarim Basin, NW China. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 283~289 (in Chinese with English abstract).
- Maresca J A, Graham J E, Bryant D A. 2008. The biochemical basis for structural diversity in the carotenoids of chlorophototrophic bacteria. *Photosynthesis Research*, 97: 121~140.
- Maresca J A, Romberger S P, Bryant D A. 2008. Isorenieratene Biosynthesis in Green Sulfur Bacteria Requires the Cooperative Actions of Two Carotenoid Cyclases. *Journal of Bacteriology*, 190: 6384~6391.
- Marynowski L, Filipiak P. 2007. Water column euxinia and wildfire evidence during deposition of the Upper Famennian Hangenberg event horizon from the Holy Cross Mountains (central Poland). *Geological Magazine*, 144: 569~595.
- Meyer K M, Macalady J L, Fulton J M, Kump L R, Schaperdorth I, Freeman K H. 2011. Carotenoid biomarkers as an imperfect reflection of the anoxygenic phototrophic community in meromictic Fayetteville Green Lake. *Geobiology*, 9(4): 321~329.
- Montesinos E, Guerrero R, Abella C, Esteve I. 1983. Ecology and physiology of the competition for light between *Chlorobium limicola* and *Chlorobium phaeobacteroides* in natural habitats. *Appl Environ Microbiol*, 46(5): 1007~1016.
- Overmann J, Beatty J T, Hall K J, Pfennig N, Northcote T G. 1991. Characterization of a dense, purple sulfur bacterial layer in a meromictic salt lake. *Limnology and Oceanography*, 36(5): 846~859.
- Overmann J, Pfennig N. 1992. Continuous chemotrophic growth and respiration of Chromatiaceae species at low oxygen concentrations. *Archives of Microbiology*, 158: 59~67.
- Pagès A, Schmid S, Edwards D, Barnes S, He N, Grice K. 2016. A molecular and isotopic study of palaeoenvironmental conditions through the middle Cambrian in the Georgina Basin, central Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 447: 21~32.
- Schaeffer P, Adam P, Werung P, Bernasconi S, Albrecht P. 1997. Molecular and isotopic investigation of free and S-bound lipids from an actual meromictic lake (Lake Cadagno, Switzerland). In: *Proceedings of the 18th International Meeting on Organic Geochemistry*, September 22, Maastricht, The Netherlands,

- Forschungszentrum Jülich, Germany, 57~58.
- Schaeffle J, Ludwig B, Albrecht P, Ourisson G. 1977. Hydrocarbures aromatiques d'origine géologique. II. Nouveaux carotano? des aromatiques fossiles. *Tetrahedron Letters*, 18: 3673~3676.
- Schwark L, Frimmel A. 2004. Chemostratigraphy of the Posidonia Black Shale, SW Germany: II. Assessment of extent and persistence of photic-zone anoxia using aryl isoprenoid distributions. *Chemical Geology*, 206(4): 231~248.
- Sinninghe Damsté J S, Kster J. 1998. A euxinic southern North Atlantic Ocean during the Cenomanian/Turonian oceanic anoxic event. *Earth and Planetary Science Letters*, 158: 165~173.
- Smittenberg R H, Pancost R D, Hopmans E C, Paetzel M, Sinninghe Damsté J S. 2004. A 400-year record of environmental change in an euxinic fjord as revealed by the sedimentary biomarker record. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 202(4): 0~351.
- Summons R E, Powell T G. 1986. Chlorobiaceae in Paleozoic seas revealed by biological markers, isotopes and geology. *Nature*, 319(6056): 763~765.
- Summons R E. 1987. Branched alkanes from ancient and modern sediments: isomer discrimination by GC/MS with multiple reaction monitoring. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(4): 1~289.
- Sun Yongge, Xiao Zhongyao, Xu Shiping, Lu Hong, Chai Pingxia. 2004. Aryl-Isoprenoids in Crude Oil and Its Implication in Geological Exploration. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(02): 215~218(in Chinese with English abstract).
- Sun Yongge, Xu Shiping, Lu Hong, Cuai Pingxia. 2003. Source facies of the Paleozoic petroleum systems in the Tabei uplift, Tarim Basin, NW China: implications from aryl isoprenoids in crude oils. *Organic Geochemistry*, 34(4): 629~634.
- Tulipani S, Grice K, Greenwood P F, Schwark L, Böttcher M E, Summons R E, Foster C B. 2015. Molecular proxies as indicators of freshwater incursion~driven salinity stratification. *Chemical Geology*, 2015, 409: 61~68.
- Van Gernerden H, Mas J. 1995. Ecology of phototrophic sulfur bacteria. In *Anoxygenic Photosynthetic Bacteria* (ed. R. E. Blankenship et al.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2: 49~85.
- Wang Jiuyi, Lowenstein T K, Fang X. 2016. Microbial Habitability and Pleistocene Aridification of the Asian Interior. *Astrobiology*, 16(6): 379~388.
- Wang Yizhe, Wu Chaodong, Fang Yanan, Ma Jian, Shen Bing, Huang Fang, Zhou Tianqi, Wang Jialin, Zhang Wei. 2019. Origin and palaeoenvironmental indications of Eocene to Oligocene primary lacustrine dolomite, Northern Tianshan Mountains, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, in press.
- Wang Yizhe, Wu Chaodong, Ma Jian, Fang Yanan, Xu Zhuo, Zhou Yanxi. 2019. Strata color rhythm of the Cretaceous-Neogene and evolution of palaeoenvironment and palaeoclimate in Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(3): 451~468(in Chinese with English abstract).
- Wenke T L, Vogt J C. 1981. Temporal changes in a pink feedlot lagoon. *Applied and Environmental Microbiology*, 41(2): 381~385.
- Whiteside J H, Grice K. 2016. Biomarker records associated with mass extinction events. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 44: 581~612.
- Xiang Dunfeng, Zhang Zhiyong, Xiao Wenjiao, Zhu Wenbin, Zheng Dewen, Li Guangwei, Zheng Bihai, Song Dongfang, Han Chunming, Pang Jianzhang. 2019. Episodic Meso-Cenozoic denudation of Chinese Tianshan: evidence from detrital apatite fission track and zircon U-Pb data, southern Junggar Basin margin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 175: 199~212.
- Yamaguchi M. 1960. Total synthesis of renieratene and renierapurpurin. *The Chemical Society of Japan*, 33(11), 1560~1562.
- Ye Yuntao, Wu Chaodong, Zhai Lina, An Zhengze. 2017. Pyrite morphology and episodic euxinia of the Ediacaran Doushantuo Formation in South China. *Science China Earth Science*, 60: 201~113.
- Zhang Chunming, Yang Lu. 2013. Nomenclature of aryl isoprenoid hydrocarbons. *Geochimica*, 42(4): 379~384(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunming, Zhang Yuqing, Cai Chunfang. 2011. Aromatic isoprenoids from the 25-65 Ma saline lacustrine formations in the western Qaidam Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 42: 851~855.
- Zhang Shuichang, Huang Haiping, Su Jin, Liu Mei, Zhang Haifeng. 2014. Geochemistry of alkylbenzenes in the Paleozoic oils from the Tarim Basin, NW China. *Organic Geochemistry*, 77: 126~139.
- Zhang Shuichang, Li Zhenxi. 2013. *Trans. Peter K E, Walters C C, Moldowan J M. 2004. The Biomarker Guide. Second Edition. Biomarkers and Isotopes in Petroleum Systems and Earth History. Cambridge University Press, 120~122.*
- Zhou Wenfeng, Thomas J, Algeo, Ruan Xiaoyan, Luo Genming, Chen Zhongqiang, Xie Shucheng. 2016. Expansion of photic-zone euxinia during the Permian-Triassic biotic crisis and its causes: Microbial biomarker records. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 474: 140~151.

参 考 文 献

- 邓松涛, 吴朝东, 顾潇, 郭召杰. 2008. 晚新生代以来天山北缘沉积记录及其稳定同位素变化的环境意义. *岩石学报*, 24(04): 689~698.
- 董欣欣, 丁仲礼, 杨石岭, 王旭, 罗攀, 季军良. 2013. 晚渐新世中亚降温与干旱化. *科学通报*, 58(17): 3119~3124.
- 方世虎, 郭召杰, 贾承造, 张志诚, 王绪龙, 王美娜. 2006. 准噶尔盆地南缘中—新生界沉积物重矿物分析与盆山格局演化. *地质科学*, 41(4): 648~662.
- 郭召杰, 张志诚, 吴朝东, 方世虎, 张锐. 2006. 中、新生代天山隆升过程及其与准噶尔、阿尔泰山比较研究. *地质学报*, 80(1): 1~15.
- 霍秋立, 李振广, 曾花森, 付丽. 2010. 松辽盆地北部晚白垩系青一段源岩中芳基类异戊二烯烃的检出及意义. *沉积学报*, 28(04): 815~820.
- 季军良, 朱敏, 王旭, 罗攀, 董欣欣. 2010. 准噶尔盆地南缘新生代地层层时代研究. *地层学杂志*, 34(01): 43~50.
- 康竹林, 翟光明. 1995. 中国的前陆盆地与油气聚集. *石油学报*, 16(4): 1~8.
- 李骞, 田孝茹, 胡瀚文, 郭召杰. 2016. 天山北缘安集海河组湖相灰岩氧碳同位素变化的古环境意义. *地球科学与环境学报*, 38(03): 398~409.
- 李振西, 范璞, 李景贵, 曾凡刚. 1998. 芳基类异戊二烯生标在指相上的应用. *沉积学报*, 16(02): 9~13.
- 卢鸿, 孙永革, 彭平安. 2004. 轮南油田原油中三甲苯基类异戊二烯化合物的检出及其意义. *高校地质学报*, 10(02): 283~289.
- 张水昌, 李振西. 2013. 译. 皮得斯, 沃尔特斯, 莫尔万多. 2004 生物标志化合物指南(第二版下册) 生物标志化合物和同位素在石油勘探与地史研究中的应用. 北京: 石油工业出版社, 120~122.
- 孙永革, 肖中尧, 徐世平, 卢鸿, 柴平霞. 2004. 塔里木盆地原油中芳基类异戊二烯烃的检出及其地质意义. *新疆石油地质*, 25(02): 215~218.
- 王熠哲, 吴朝东, 马健, 房亚男, 许酌, 周彦希. 2019. 准噶尔盆地白垩纪—新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化. *古地理学报*, 21(03): 451~468.
- 张春明, 杨禄. 2013. 芳基类异戊二烯烃类化合物的命名. *地球化学*, 42(04): 379~384.

Discovery of carotenoids and its paleolake significance in the Oligocene
Anjihaihe Formation, southern Junggar Basin, China

MA Jian^{1,2)}, WU Chaodong^{* 1,2)}, WANG Yizhe³⁾, JIAO Yue^{1,2)},
ZHOU Jiaquan^{1,2)}, LENG Jiaxuan^{1,2)}, CUI Xingqian^{* 4)}

1) Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education,
School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871;

2) Institute of Oil & Gas, Peking University, Beijing, 100871;

3) Lanzhou City University, Lanzhou, 730070;

4) School of Oceanography, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200030

* Corresponding author: cdwu@pku.edu.cn; cuixingqian@sjtu.edu.cn

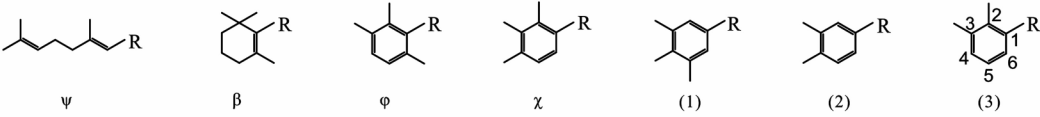
Abstract

Carotenoids are a major group of pigments widely distributed in nature and are commonly preserved as derivatives in sedimentary records after diagenesis and catagenesis. Among them, the aromatic compounds are mostly associated with photosynthetic sulfur bacteria and have been used in paleoenvironment reconstruction. For example, the detection of aromatic carotenoids in sedimentary rocks has been interpreted as photic zone euxinia (PZE) during deposition, and further inferences can be drawn regarding paleo-water depth, microbial communities, nutrient availability, etc. Aromatic carotenoid-based PZE have been widely used in oil-source rock correlation, exploring life evolution, understanding drivers of mass extinctions and as triggers of oceanic anoxic events. In this study, we assess the pattern of carotenoids in the Oligocene Anjihaihe Formation of the southern Junggar Basin to provide paleoenvironmental and paleoecological interpretations. Our results show predominance of chlorobactene and isorenieratane from green sulfur bacteria indicative of PZE during deposition. The dominance of green sulfur bacteria over purple sulfur bacteria in carotenoid input suggests a deep and large paleolake during deposition, in which the occurrence of PZE was likely related to the evaporative water conditions during the paleoclimatic shift from wet to dry conditions during late Oligocene. Additionally, we report a new diaromatic carotenoid with 38 carbon atoms that was potentially synthesized by cyanobacteria. Consistent with tectonic viewpoints, the post-Oligocene uplift of the north Tian Shan suggests a possibly larger paleolake during the Oligocene deposition than the current range of Anjihaihe Formation in the south of Junggar Basin.

Key words: Junggar Basin; Anjihaihe Formation; carotenoids; photic zone euxinia; sulfur bacteria

附录

一、常见末端基团



二、常见地质类胡萝卜素

