

银川盆地 35.0ka 以来古植被演化的类脂分子记录

张慧娟¹, 杨桂芳¹, 陈正洪²

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

[摘要]为了更好地了解干旱-半干旱区的植被类型及其演化规律, 利用气相色谱仪对银川盆地冰沟剖面河湖相沉积物中的正构烷烃进行了检测, 结果显示其正构烷烃碳数分布范围为 $C_{15} \sim C_{34}$, 奇碳优势明显, 以 C_{29} 或 C_{31} 为主峰的单峰型为主, 但少量样品也出现双峰型分布模式。通过对冰沟剖面正构烷烃分布特征、碳优势指数 CPI 和 $L/H(\sum C_{21-}/\sum C_{22+})$ 指标的详细分析, 得知其有机质来源以陆生高等植物占主导优势。结合年代数据、有机碳同位素、长链正构烷烃平均链长 ACL 和 $C_{33}/(C_{33}+C_{27})$ 值, 重建出 35.0ka 以来银川盆地植被类型以 C_3 植物为主, 并且 C_3 和 C_4 植物的相对比例变化主导受温度制约, 而木本和草本植被的演化主要受控于水分条件。

[关键词] 正构烷烃 有机碳同位素 有机质来源 古植被演化 银川盆地

[中图分类号] P532 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2019)01-08

Zhang Huijuan, Yang Guifang, Chen Zhenghong. Regional paleovegetation evolution recorded in molecular lipid of fluvial-lacustrine sediments from the Yinchuan basin since 35.0ka[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(1): 0152-0159.

0 引言

地质历史时期干旱-半干旱地区植被类型及其演化规律的研究, 对干旱-半干旱地区生态环境综合建设及生态系统维护等具有现实意义(张永双等, 2017)。目前对黄土高原古植被演化的研究成果较为丰富(谢树成等, 2002; 陈发虎等, 2006; 周斌等, 2016), 但有关黄土高原西北部地区的其它干旱与半干旱区的植被演化状况报道尚少, 尤其是晚更新世晚期以来的植被演化状况仍不明确。因此, 还需要在其它典型区域获得高分率的晚更新世晚期以来的古环境记录, 以深入了解其古植被、古环境变化特征及规律。

银川盆地地处季风与非季风区、干旱与半干旱过渡区, 对环境变化极为敏感, 加之盆地内部发育较为完整的河湖相沉积地层, 是研究干旱-半干旱地区古植被演化的理想地区(杨振京等, 2001)。目前对银川盆地古环境演化的研究主要集中在第四纪

中、晚期以来的沉积环境和古气候演变(刘平贵等, 2000; 杨振京等, 2001; Wang et al., 2015), 对植被的演化涉及较少(童国榜等, 1995; 杨振京等, 2001)。同时, 由于该地区晚更新世地层孢粉含量低, 地层年代数据偏少, 目前, 其植被面貌仍缺乏深入研究(刘德成等, 2009)。近年来, 分子化石记录如正构烷烃类化合物, 因不易遭受微生物的降解, 是研究沉积物有机质来源和古植被演化极具潜力的代用指标, 已被广泛运用在黄土和湖泊等古环境重建中(蒲阳等, 2010; 周斌等, 2016)。为此, 本文选取位于银川盆地一套比较完整的河湖相沉积剖面作为研究载体, 对其正构烷烃分布特征和有机碳同位素进行详细分析, 旨在为银川盆地古植被演化提供一定的科学依据。

1 材料与方法

银川盆地位于季风与非季风区、干旱与半干旱、黄土-沙漠的过渡区, 西依贺兰山, 东临内蒙古鄂尔

[收稿日期] 2018-03-12; **[改回日期]** 2018-10-20; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 北京市自然科学基金委项目(编号: 8162038)、中央高校经费基本科研业务费优秀教师基金项目(编号: 2652017216)和国际合作与交流项目(编号: 2652017285)联合资助。

[第一作者] 张慧娟(1991年-), 女, 在读博士研究生, 第四纪地质学专业。E-mail: HJZhanghuijuan@163.com。

[通讯作者] 杨桂芳(1975年-), 女, 教授, 博士生导师, 长期从事全球变化与地貌演变的教学与科研工作。E-mail: yangguifang@cugb.edu.cn。

多斯高原,东北部为著名的毛乌素沙地。银川盆地属温带大陆性气候,年均气温约 8.0℃,年均降水量约 200mm。区内植被主要是荒漠草原,表现出强烈的旱生特性。冰沟剖面位于银川盆地的东部,具体位置为 38°26′05.62″N,106°34′03.73″E(图 1)。剖面厚度 19.10m,为晚更新世以来的河湖相沉积,岩性主要以浅灰黄色粉砂和粉砂质粘土为主,底部含有细砂和小砾石层,以 5~10cm 间距系统采集样品。

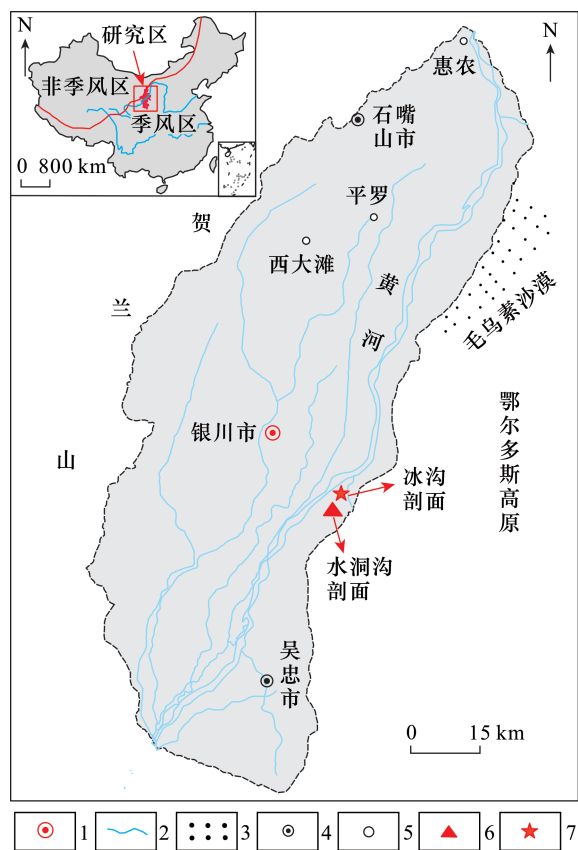


图 1 银川盆地位置及采样位置

Fig. 1 Map showing regional location and sampling sites of the Yinchuan basin

1 - 省会; 2 - 河流; 3 - 沙漠; 4 - 城市; 5 - 乡镇; 6 - 水洞沟剖面; 7 - 冰沟剖面 (本文采样剖面)
1 - provincial capital; 2 - river; 3 - desert; 4 - city; 5 - town; 6 - shuidonggou profile; 7 - Binggou profile

根据岩性变化,以 15~20cm 为间距,选取 112 个有机碳同位素样品在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 MAT-253 型质谱仪上测试,测试结果是相对于 VPDB 标准,误差小于 0.2‰。在此基础上选取 56 个正构烷烃样品(有效数据为 54 个),每个样量 80g 左右。样品干燥后粉碎至 100 目,然后在索氏抽提器中用二氯甲烷反复抽提 72h,在旋转蒸发器上进行减压浓缩至 5~

10ml,并用硅胶色层柱进行组分分离,分别用正己烷、苯或无水甲醇作为冲洗剂,得到饱和烃、芳烃和非烃。有机组分的测试在气相色谱仪(岛津 GC2010)上完成。

在剖面的 4.10m、14.50m、18.85m 处选取年龄样品 3 个,送至河北正定水文所进行 OSL 年龄测试,具体方法依据文献(王成敏和郭盛乔,2005)。

2 结果与分析

2.1 年代结果

剖面 4.10m、14.50m、18.85m 处的年代分别为 17.7ka、34.2ka、34.9ka。计算表明,年代与深度呈现较好的拟合关系($R^2 = 0.93$),经线性内插和外推法推算冰沟剖面约为 35.0ka 以来的沉积。前人对水洞沟遗址的研究表明,水洞沟剖面为典型的河湖相沉积,沉积物以灰黄色粉砂为主,底部存在砾石层,年代约 35.7~4.2ka(刘德成等,2009)。由于冰沟剖面距离水洞沟遗址较近(图 1),且二者岩性十分相似,典型层位对应明显(图 2),故本文典型层位的年龄采用了与水洞沟遗址相对应的典型层位的年龄数据。

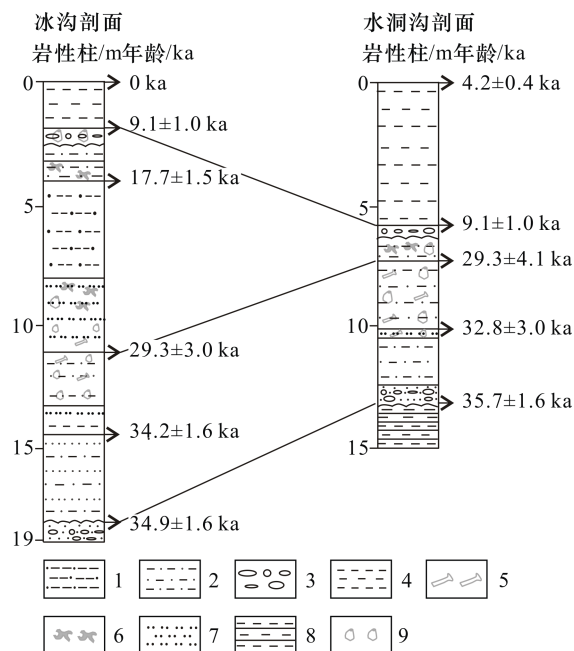


图 2 冰沟剖面与水洞沟剖面(刘德成等,2009)岩性及年代对比

Fig. 2 Lithology and age correlation of the Binggou and Shuidonggou profiles (Liu et al., 2009)

1 - 粉砂质粘土; 2 - 粉砂; 3 - 砾石; 4 - 泥质粉砂; 5 - 动物化石; 6 - 钙质结核; 7 - 细砂; 8 - 泥岩; 9 - 石制品
1 - silty clay; 2 - silt; 3 - gravel; 4 - muddy silt; 5 - animal fossil; 6 - calcareous concretion; 7 - sand; 8 - mudstone; 9 - stone artifact

2.2 正构烷烃分布特征及有机质来源

一般而言,河湖相沉积物有机质来源主要有两类:一是来自内源的水生植物,包括菌藻类低等植物和水生植物;二是由外源的河流径流携入的陆生高等植物。其中源于菌藻类低等植物的正构烷烃主峰碳多为 C_{17} , 无明显奇偶优势, 碳数分布范围为 $C_{15} \sim C_{20}$; 来源于陆生高等植物的正构烷烃以 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} 为主峰, 奇偶优势显著, 碳数分布范围为 $C_{27} \sim C_{33}$; 源于沉水和漂浮等水生植物的正构烷烃主峰碳为 C_{21} 、 C_{23} 或 C_{25} , 碳数范围为 $C_{21} \sim C_{25}$ (蒲阳等, 2010)。测试结果表明, 冰沟剖面正构烷烃的碳数分布范围为 $C_{15} \sim C_{34}$, 奇偶优势(OEP)(见公式 1)均值为 8.41, 呈现明显的奇碳优势。正构烷烃的分布模式以单峰型为主, 主峰碳数为 C_{29} 或 C_{31} , 但少量样品也呈现双峰型分布模式(图 3)。在河湖相沉积物研究中, 普遍认为低碳数与高碳数链长比值 L/H (见公式 2)可指示低等菌藻类植物与高等植物的相对含量, 较高的 L/H 值指示以低等菌藻类植物的贡献为主, 反之, 以高等植物贡献为主 (Cranwell et al., 1987)。经计算, 整个剖面 L/H 值几乎均小于 1, 均值为 0.59。同时, 冰沟剖面的碳优势指数 (CPI) (见公式 3) 均值为 5.28, 长链正构烷烃平均链长 (ACL) (见公式 4) 值

为 28.99 ~ 30.70, 均值为 29.84, 以上均反映出研究区以陆源高等植物输入为主(图 4)。为了更加准确地分析有机质来源, 将每个样品 GC-MS 图谱中的各碳数正构烷烃峰高之和视为 100%, 并将各碳数正构烷烃峰高相对于总峰高的百分比视为其相对百分含量(%), 计算得出短链($C_{16} \sim C_{20}$)、中链($C_{21} \sim C_{25}$)和长链($C_{27} \sim C_{33}$)正构烷烃相对百分含量均值分别为 9.86%、8.51% 和 81.63%, 进一步说明研究区有机质来源以陆生高等植物为主。并且可以看出, 阶段 I 35.0 ~ 29.3ka (19.10 ~ 11.10m)、阶段 II 29.3 ~ 17.7ka (11.10 ~ 4.10m)、阶段 III 17.7 ~ 9.1ka (4.10 ~ 2.00m) 和阶段 IV 9.1 ~ 0ka (2.00 ~ 0m), 长链($C_{27} \sim C_{33}$)正构烷烃相对含量均在 65.0% 以上, 而短链($C_{16} \sim C_{20}$)和中链($C_{21} \sim C_{25}$)正构烷烃的相对含量较小, 而且变化幅度不大(图 4)。

$$OEP = \frac{C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}{C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34}} \quad (1)$$

$$L/H = \sum C_{21-} / \sum C_{25+} \quad (2)$$

$$CPI = \frac{C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}{2 \times (C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32})} + \frac{C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33}}{2 \times (C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})} \quad (3)$$

$$ACL = \frac{27 \times C_{27} + 28 \times C_{28} + 29 \times C_{29} + 30 \times C_{30} + 31 \times C_{31} + 32 \times C_{32} + 33 \times C_{33}}{C_{27} + C_{28} + C_{29} + C_{30} + C_{31} + C_{32} + C_{33}} \quad (4)$$

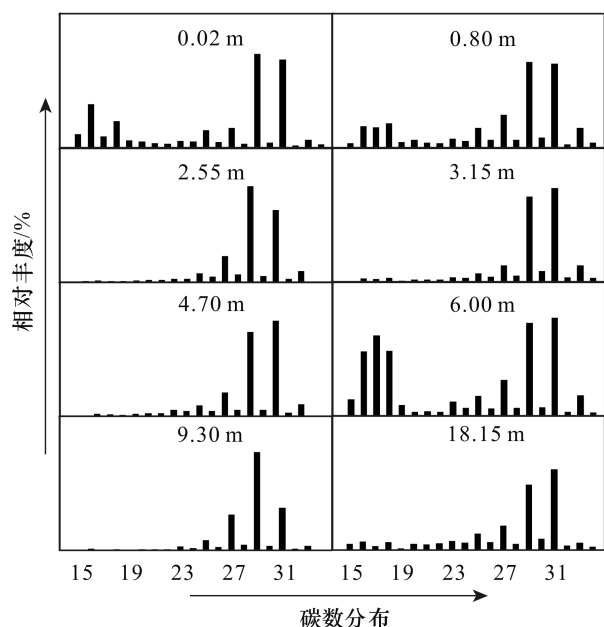


图 3 冰沟剖面沉积物典型样品正构烷烃分布特征

Fig. 3 Distribution patterns of n -alkanes in typical samples from Binggou profile

2.3 有机碳同位素变化特征及其指示意义

陆生高等植物按光合作用, 可分为 C_3 和 C_4 两种最主要的植物类型。 C_3 植物是指生长在低温湿润气候条件下的木本植物和一些草本植物, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值在 -34‰ ~ -22‰ 之间, 平均值为 -27‰ ; C_4 植物主要为一些喜干旱高温的草本植物, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值较高, 一般在 -19‰ ~ -9‰ 之间, 平均值为 -13‰ 。浮游藻类若利用大气 CO_2 作为光合作用的碳源, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值与陆生 C_3 植物的 $\delta^{13}C_{org}$ 值接近, 若利用湖水中的 HCO_3^- 作为碳源, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值显著偏正; 挺水植物一般直接利用大气中的 CO_2 进行光合作用, 通常为 -30‰ ~ -24‰ ; 沉水植物的光合作用和生长受到水体溶解 CO_2 的影响, 其 $\delta^{13}C_{org}$ 值偏正, 变化范围为 -20‰ ~ -12‰ (Meyers and Horie, 1993)。经测试冰沟剖面 $\delta^{13}C_{org}$ 值的范围为 -24.32‰ ~ -21.06‰ , 均值为 -22.96‰ , 在陆生 C_3 植物和菌藻类范围内。前文研究表明银川盆地有机质以陆生高等植物占主导, 并且当 $\delta^{13}C_{org} \leq -24.4\text{‰}$ 时, 生态系统中为纯 C_3

植被, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} \geq -14.4\text{‰}$ 时, 生态系统中为纯 C_4 植被 (Ning et al., 2008), 综合表明银川盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值反映了以陆生 C_3 植被为主导的变化过程。

3 讨论

3.1 草本和木本植被演化

研究显示正构烷烃 C_{27} 和 C_{29} 主峰主要与木本植物有关, C_{31} 和 C_{33} 主峰主要来自草本植物。因此, 很多学者认为植物正构烷烃的长链平均碳链长度 ACL 与植被类型有关, 且变化趋势与其单体碳同位素相似, 链长指数增加, 叶蜡烷烃碳同位素正偏, 草本植物增多 (Cranwell et al., 1987; Hughen et al., 2004)。考虑到草本和木本植物都会产生相对丰度较高的 C_{29} 和 C_{31} , 而且挺水植物来源的正构烷烃主峰碳也为 C_{29} 和 C_{31} (饶志国等, 2011; Bush and Mcinerney, 2013), 因而采用 C_{27} 和 C_{33} 则会相对准确地估算草本和木本植物的相对比例。故本文采用 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 指标, 当 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27}) > 0.20$ 表明以草本植被为主, 反之, 以木本植被为主, 该指标的有效性已被前人证实 (刘虎和刘卫国, 2015)。经计算, ACL 值与 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值正相关显著 ($R^2 = 0.70$)。同时, 从表皮蜡质维持植物用水平衡的角度讲, 草本植物必须通过合成更长链的烷烃提高水分利用率来适应高温干旱的环境, 木本植物则相反 (张杰和贾国东, 2009)。因此, 研究区 ACL 可以指示区域的植被组合情况, 即 ACL 值增大, 草本植被优势增强。 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值几乎全部大于 0.20, 均值为 0.35, 表明研究区以草本植被为主。根据古植被演化代用指标的变化, 结合冰沟剖面年龄, 可将研究区古植被演化划分为以下 4 个阶段 (见图 4):

阶段 I: 35.0 ~ 29.3ka (19.10 ~ 11.10m) ACL 值和 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值相对较小, 自下而上波动上升, 反映该时期以木本植被为主导的情况下, 草本植被相对含量逐步增大。

阶段 II: 29.3 ~ 17.7ka (11.10 ~ 4.10m) ACL 值和 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值波动较小, 自下而上稳步上升, 表明该时期草本植被逐步占主导地位。

阶段 III: 17.7 ~ 9.1ka (4.10 ~ 2.00m) ACL 值和 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值显著增大, 表明此时草本植被和木本植被均发生了很大变化, 草本植被占主导地位。

阶段 IV: 9.1 ~ 0ka (2.00 ~ 0m) ACL 均值和 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ 比值与阶段 III 相差不大, 变化较小, 反映出此时植被组合较为稳定, 仍以草本植被占主导。

3.2 C_3 和 C_4 植物的变化

研究表明, 当河湖相沉积物有机质主要来源于陆生植物且植被类型随气候演化而变化成为导致河湖相沉积物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化的主控因素时, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值便可用来反映陆生植被类型, 特别是 C_3 和 C_4 植物的相对比例 (余俊清等, 2001)。为此, 本文选择 C_3 植物 27.5‰、 C_4 植物 12.5‰ 为端元值 (周斌等, 2016), 利用公式 5 (Chen et al., 2010) 计算出研究区 C_4 植物的相对含量为 2.06% ~ 23.82%, 均值 11.16%。值得注意的是 C_3 和 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值可能会因遗传和有机质分馏等因素导致 C_3/C_4 相对丰度估算存在误差, 但是植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在不同气候条件会发生一定程度的变化且分馏幅度较小 (1‰ ~ 2‰) (Connin et al., 2001), 因此冰沟剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值能反映 C_3 和 C_4 植物的相对变化。图 4 显示冰沟剖面以 C_3 植物为主且含有少量 C_4 植物, 与年均温度低于 10°C 的温带地区, 陆生植物以 C_3 植物为主的研究结果一致 (Watanabe et al., 2004)。此外, 冰沟剖面 C_4 植物的相对含量由末次冰期到全新世时期有所增加, 与前人对银川盆地植被的研究一致 (童国榜等, 1995; 杨振京等, 2001), 同时与我国中纬度地区洛川、旬邑、西峰等十多个黄土-古土壤剖面记录的植被演化特点一致, 同时这种植被演化模式在全球其它中纬度地区湖泊、海洋和土壤等载体中也广泛存在 (饶志国等, 2012)。

$$\text{C}_4(\%) = (\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3} + 2.87 - \delta^{13}\text{C}_{\text{org}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3} - \delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}) \times 100\% \quad (5)$$

其中, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 为土壤有机碳同位素组成 (‰), $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_3}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{C}_4}$ 分别是现代 C_3 和 C_4 植物的碳同位素平均值, $\text{C}_4(\%)$ 为 C_4 植物相对百分含量。

3.3 影响古植被演化的驱动机制

3.3.1 C_3 和 C_4 植物变化的驱动机制

大气 CO_2 、温度和降水是影响植被组成和碳同位素分馏的主导因素 (陈发虎等, 2006)。鉴于本文 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值反映了以 C_3 植被为主导的变化过程, 因而只重点讨论 C_3 植物与大气 CO_2 、温度和降水的关系。

35.0ka 至今的大气 CO_2 浓度的范围为 190 ~ 250 $\mu\text{L/L}$ 且变化幅度不足以达到可以显著影响 C_3 植物生长的阈值 (陈发虎等, 2006; 饶志国等, 2012), 并且几乎所有的研究都表明因大气 CO_2 浓度的上升, C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负 (Feng and Epstein, 1995), 显然末次间冰期和全新世时期, 随着大气 CO_2 含量增高, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值应偏负, 但是冰沟剖面 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$

值在末次间冰期和全新世时期总体偏正,与大气 CO_2 浓度上升导致植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负的理论矛盾,说明大气 CO_2 浓度变化不是控制 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值和植物组成变化的直接因素,与前人研究结果一致(饶志国等,2012)。研究表明,降水量每增加 100mm, C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值将会平均偏负 0.8‰(王国安等,2003; Liu et al., 2005)。但是,研究区在 35.0 ~ 29.3ka 期间,气候较为湿润(杨振京等,2001),然而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 均值偏正,显然与上述认识矛盾。此外,研究区 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化幅度将近为 3.5‰,按照降水量与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的定量关系,其变化幅度要达到约 450mm 才能达到 3.5‰,在年均降水量约 200mm 的银川盆地似乎不太可能,因此降水量不是银川盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的首要驱动因素。顾兆炎等(2003)指出 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值变化与温度呈显著正相关,并且 C_4 植物相对丰度随温度的升高逐步增加。末次冰期至全新世时期,温度升高,银川盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值呈现由负到正的变化, C_4 植物相对丰度也有所增加,与上述认识一致。

以上综合表明,在银川盆地末次冰期至全新世

的气候变化中,影响陆地植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值的温度、降水和大气 CO_2 都发生了变化,其中 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值与温度变化正相关、与降水和大气 CO_2 负相关。在末次冰期,降水和大气 CO_2 的减少都应该使 C_3 植被的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏正;在温暖的全新世,降水和大气 CO_2 的增加都应该使 C_3 植被的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值偏负,但是银川盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值在末次冰期偏负而全新世偏正的现象,只能用温度驱动来解释。此外,本文选取了 CaCO_3 指标进行验证,一般 CaCO_3 含量越高,表明气候越干旱,并且已经在黄土等载体中得到广泛应用(彭红霞等,2003),充分证实其作为干旱指标的可靠性。经过与本剖面 CaCO_3 指标与银川盆地古温度指标 ω 和干旱指标 γ (杨振京等,2001)的对比表明银川盆地 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值和 C_4 植物含量变化与古温度指标 ω 的变化趋势一致,而与干旱指标 γ 和 CaCO_3 指标相关性不大(图 4),进一步证实温度为银川盆地 C_3 和 C_4 植物变化的主要驱动因素,与末次冰期以来全球 C_3 和 C_4 植物变化的驱动机制一致(饶志国等,2012)。

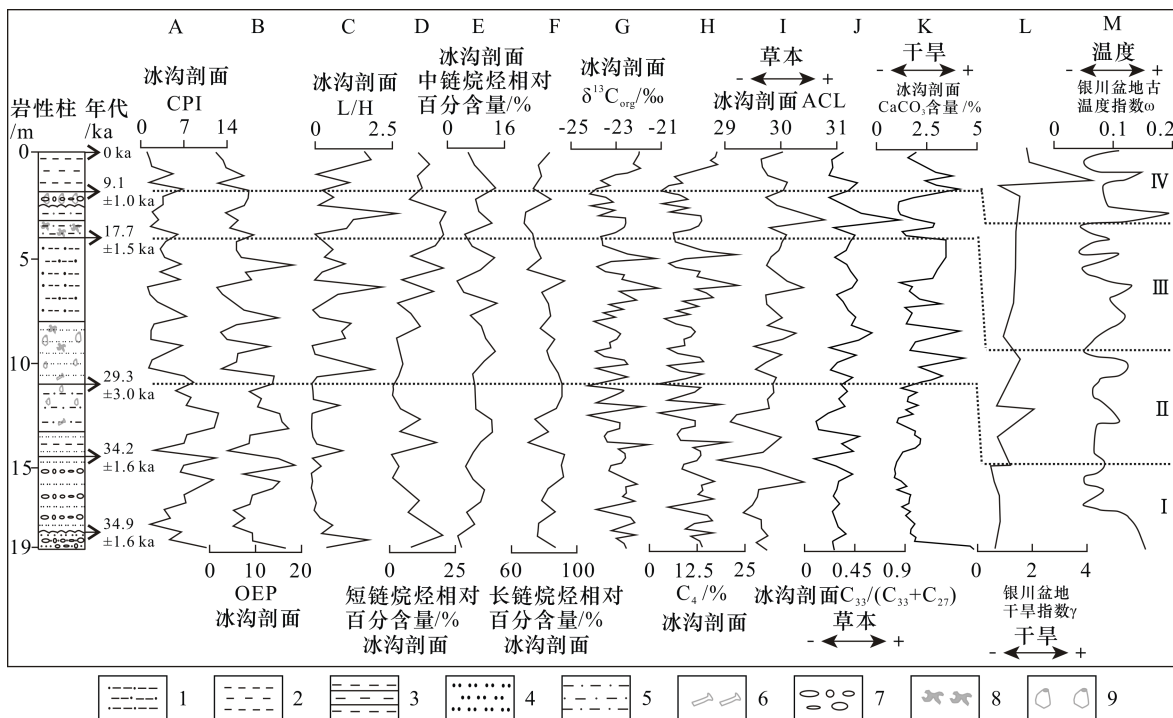


图 4 冰沟剖面正构烷烃各指标 CPI (A)、OEP (B)、L/H (C)、短链正构烷烃相对含量 (D)、中链正构烷烃相对含量 (E)、长链正构烷烃相对含量 (F)、ACL (I) 和 $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ (J) 以及有机碳同位素 (G)、 C_4 植被演化 (H) 和碳酸钙变化 (K) 与银川盆地其它干旱指标 γ (L) 和古温度指标 ω (M) (杨振京等,2001) 的对比

Fig. 4 The variations of CPI (A), OEP (B), L/H (C), short chain (D), middle chain (E), long chain (F), $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ (G), C_4 plants (H), ACL (I), $\text{C}_{33}/(\text{C}_{33} + \text{C}_{27})$ (J), and CaCO_3 (K) of Binggou profile, in comparison with the change of drought index γ (L) and palaeotemperature ω (M) from the Yinchuan basin (Yang et al., 2001)

1 - 粉砂质粘土; 2 - 泥质粉砂; 3 - 泥岩; 4 - 细砂; 5 - 粉砂; 6 - 动物化石; 7 - 砾石; 8 - 钙质结核; 9 - 石制品
1 - silty clay; 2 - muddy silt; 3 - mudstone; 4 - sand; 5 - silt; 6 - animal fossil; 7 - gravel; 8 - calcareous concretion; 9 - stone artifact

3.3.2 草本和木本植被演化的驱动机制

前文研究表明银川盆地 35.0ka 以来以草本植被为主。相邻区域黄土高原正构烷烃分子化石记录也显示在末次冰期以来未出现森林景观,以草本植被为主(谢树成等,2002;周斌等,2016),与本文研究一致。银川盆地草本和木本植物的演变主导受气候制约已被证实(童国榜等,1995;刘平贵等,2000),但究竟是温度还是降水需进一步探索。为此,与银川盆地古温度指标 ω 和干旱指标 γ (杨振京等,2001)做了详细对比,结果发现冰沟剖面 ACL 值和 $C_{33}/(C_{33} + C_{27})$ 比值与本区域干旱指标 γ 较为一致(自下而上随着气候逐步变干,草本植被逐步增加,木本植被逐步减少),但是与古温度指标 ω 并不是简单的线性对应关系。同时冰沟剖面 $CaCO_3$ 指标也表现出自下而上的增加趋势,同草本植物演化趋势一致,有力地说明了随着水分的减少,草本植物逐步代替木本植物。饶志国等(2012)认为温度是影响 C_3 和 C_4 植物变化的首要因素,温度条件满足之后,水分条件则成为其内部演化的主要控制因素。前文已指出银川盆地 C_3 和 C_4 植物的变化受控于温度,因此在温度满足银川盆地 C_3 和 C_4 植物生长需求后,其内部木本与草本植物的演化应受水分条件驱动,并且根据草本和木本植物本身的特点,为适应银川盆地越来越干旱的生态环境,木本植物会逐渐让位于草本植物(张杰和贾国东,2009)。因此,可以粗略推知研究区木本和草本植物的演化受控于水分条件。

4 结论

本研究通过对银川盆地正构烷烃参数及有机碳同位素的详细讨论,结合年代数据和 $CaCO_3$ 等指标,揭示了其 35.0ka 以来植被的演化特征及驱动因素:

(1) 银川盆地河湖沉积物中正构烷烃的分布以 C_{29} 或 C_{31} 为主峰的单峰型为主,奇碳优势明显,存在少量低碳数和高碳数并存的双峰型分布类型。银川盆地河湖相沉积物的有机质来源以陆生高等植物为主。

(2) 35.0ka 以来,有机碳同位素揭示银川盆地陆地植物为 C_3 和 C_4 植物混生,以 C_3 植物为主;正构烷烃参数揭示银川盆地植被以草本植被为主。银川盆地 C_3 和 C_4 植物的变化主导受温度驱动,而草本和木本植被的演化受控于水分条件。

[References]

Bush R T, Meinerney F A. 2013. Leaf wax n - alkane distributions in

and across modern plants; implications for paleoecology and chemotaxonomy [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 117 (117): 161 - 179.

Chen Fahu, Rao Zhiguo, Zhang Jiawu, Jin Ming, Ma Jianying. 2006. $\delta^{13}C_{org}$ variations and its significance of western Loess Plateau since the last glacial [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (11): 1310 - 1317 (in Chinese).

Chen P N, Wang G A, Han J M, Liu X J, Liu M. 2010. $\delta^{13}C$ difference between plants and soil organic matter along the eastern slope of Mount Gongga [J]. *Chinese Science Bulletin*, 55 (1): 55 - 62.

Connin S L, Feng X, Virginia R A. 2001. Isotopic discrimination during long - term decomposition in an arid land ecosystem [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 33 (1): 41 - 51.

Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. 1987. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 11 (6): 513 - 527.

Feng X H, Epstein S. 1995. Carbon isotopes of trees from arid environments and implications for reconstructing atmospheric CO_2 concentration [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (59): 2599 - 2608.

Gu Zhaoyan, Liu Qiang, Xu Bing, Han Jiamao, Yang Shiling, Ding Zhongli, Liu Dongsheng. 2003. The relative abundance of C_3/C_4 plants of the Loess plateau controlled by climate change during the last glacial [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (13): 1458 - 1464 (in Chinese).

Hughen K, Eglinton T I, Li X, Makou T. 2004. Abrupt tropical vegetation response to rapid climate changes [J]. *Science*, 304 (5679): 1955 - 1959.

Liu Decheng, Wang Xulong, Gao Xing, Xia Zhengkai, Pei Shuwen, Chen Fuyou. 2009. Progress on the stratigraphy and geochronology of the Shuidonggou site, Ningxia, North China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3880 - 3886 (in Chinese with English abstract).

Liu Hu, Liu Weiguo. 2015. Relationship of plant leaf wax n - alkanes molecular distribution characteristics and vegetation types [J]. *Journal of Earth Environment*, 6 (3): 168 - 179 (in Chinese with English abstract).

Liu Pinggui, Fan Shuxian, Li Xueju. 2000. Characteristics of the Quaternary geochemistry elements and sedimentary environment in the Yinchuan Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 6 (4): 43 - 50 (in Chinese).

Liu W G, Feng X H, Ning Y F, An Z S. 2005. $\delta^{13}C$ variation of C_3 and C_4 plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China [J]. *Global Change Biology*, 11 (7): 1094 - 1100.

Meyers P A, Horie S. 1993. An organic carbon isotopic record of glacial - post glacial change in atmospheric Pco_2 in the sediments of lake Biwa, Japan [J]. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 105 (3 - 4): 171 - 178.

Ning Y F, Liu W G, An Z S. 2008. A 130ka reconstruction of precipitation on the Chinese loess plateau from organic carbon isotopes [J]. *Paleogeography Paleoclimatology Paleoecology*, 270 (1): 59 - 63.

Peng Hongxia, Li Changan, Yang Guifang, Yu Huagui, Huang Changsheng. 2003. Content of carbonate of loess and significance of palaeo - climate: Taking Hongzuisi section in Lanzhou as an example [J]. *Geological Science and Technology Information*, 23 (1): 3 - 55 (in Chinese).

- Chinese with English abstract).
- Pu Yang, Zhang Hucai, Lei Guoliang, Chang Fengqing, Yang Mingsheng, Zhang Wenxiang, Lei Yanbin, Yang Lunqing, Pang Youzhi. 2010. The late MIS3 climate changes of Qaidam basin in the northeast of Qinghai - Tibet inferred from its plateau lake sediments, n - alkanes record[J]. Science China Earth Sciences, 36(5): 624 - 631 (in Chinese with English abstract).
- Rao Zhiguo, Chen Fahu, Zhang Xiao, Xu Yuanbin, Xue Qian, Zhang Pingyu. 2012. Spatial and temporal variations of C_3/C_4 relative abundance in global terrestrial ecosystem since the last glacial and its possible driving mechanisms[J]. Chin Science Bulletin, 57(18): 1633 - 1645 (in Chinese).
- Rao Zhiguo, Wu Ji, Zhu Zhaoyu, Jia Guodong, Andrew H. 2011. Is the maximum carbon number of long - chain n - alkanes an indicator of grassland or forest? Evidence from surface soils and modern plants[J]. Chinese Science Bulletin, 56(10): 774 - 780 (in Chinese).
- Tong Guobang, Shi Ying, Fan Shuxian, Zhang Junpai, Song Xianghua, Liu Zhenxi, Qiao Guangdong, Zhang Jixiang. 1995. Environment features of Yinchuan basin in Late Quaternary[J]. Earth Science, 20(4): 421 - 426 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chengmin, Guo Shengqiao. 2005. Age dating of lacustrine deposits in the Ningjinpo area, Shijiazhuang, North China Plain[J]. Geological Bulletin of China, 24(7): 655 - 659 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guoan, Han Jiamao, Liu Dongsheng. 2003. A study on the isotopic composition of C_3 herbaceous plants in the loess region of northern China[J]. Science in China(series D), 33(6): 550 - 556 (in Chinese with English abstract).
- Wang J P, Shen M M, Hu J M, Wei M J, Zhao X H, Liu S C, Li X L, Li X L. 2015. Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of the PL02 borehole in the Yinchuan basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 258 - 265.
- Watanabe T, Naraoka H, Nishimura M, Kawai T. 2004. Biological and environmental changes in Lake Baikal during the Late Quaternary inferred from carbon, nitrogen and sulfur isotopes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 222(1): 285 - 299.
- Xie Shucheng, Wang Zhiyuan, Wang Hongmei, Chen Fahu, An Chengbang. 2002. The grassland vegetation landscape of Loess Plateau referred from molecular fossils since the last interglacial period[J]. Science in China(series D), 32(1): 28 - 35 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhenjing, Liu Zhiming, Zhang Junpai, Tong Guobang, Yang Xiaolan. 2001. Sporopollen records and paleoclimate study of Yinchuan Basin since Mid - Pleistocene[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 21(3): 43 - 49 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z R, Shi P J, Fang X Q. 2008. Paleovegetation reconstruction using $\delta^{13}C$ of soil organic matter[J]. Biogeosciences, 5(2): 1325 - 1337.
- Yu Junqing, Wang Xiaoyan, Li Jun, An Zhisheng. 2001. Paleoenvironmental interpretations on organic carbon isotopic records from lake sediments: A critique[J]. Journal of Lake Sciences, 13(1): 72 - 78 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie, Jia Guodong. 2009. Application of plant - derived n - alkanes and their compound specific hydrogen isotopic composition in paleo-environment research[J]. Advance in Earth Science, 24(8): 874 - 881 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongshuang, Sun Lu, Yin Xiulan, Meng Hui. 2017. Progress and prospect of research on environmental geology of China: A review[J]. Geology in China, 44(5): 901 - 912 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Bin, Waili Gu, Peterse F, Bird M I. 2016. Organic carbon isotope and molecular fossil records of vegetation evolution in central Loess Plateau since 450kyr[J]. Science China Earth Sciences, 46(4): 509 - 518 (in Chinese with English abstract).

[附中文参考文献]

- 陈发虎, 饶志国, 张家武, 金明, 马剑英. 2006. 陇西黄土高原末次冰期有机碳同位素变化及其意义[J]. 科学通报, 51(11): 1310 - 1317.
- 顾兆炎, 刘强, 许冰, 韩家懋, 杨石岭, 丁仲礼, 刘东生. 2003. 气候变化对黄土高原末次盛冰期以来的 C_3/C_4 植物相对丰度的控制[J]. 科学通报, 48(13): 1458 - 1464.
- 刘德成, 王旭龙, 高星, 夏正楷, 裴树文, 陈福友. 2009. 水洞沟遗址地层划分与年代测定新进展[J]. 科学通报, 54(19): 2879 - 2885.
- 刘虎, 刘卫国. 2015. 植物叶蜡正构烷烃分子分布特征与植被类型的关系[J]. 地球环境学报, 6(3): 168 - 179.
- 刘平贵, 范淑贤, 李雪菊. 2000. 银川盆地第四纪地球化学元素特征及沉积环境[J]. 地质力学学报, 6(4): 43 - 50.
- 彭红霞, 李长安, 杨桂芳, 余华贵, 黄长生. 2003. 黄土中碳酸盐含量变化及其古气候记录 - 以兰州红咀寺剖面为例[J]. 地质科技情报, 23(1): 3 - 55.
- 蒲阳, 张虎才, 雷国良, 常凤琴, 杨明生, 张文翔, 类延斌, 杨伦庆, 庞有智. 2010. 青藏高原东北部柴达木盆地古湖泊沉积物正构烷烃记录 MIS3 晚期气候变化[J]. 中国科学: 地球科学, 36(5): 624 - 631.
- 饶志国, 陈发虎, 张晓, 许元斌, 薛骞, 张平宇. 2012. 末次冰期以来全球陆地植被中 C_3/C_4 植物相对丰度时空变化基本特征及其可能的驱动机制[J]. 科学通报, 57(18): 1633 - 1645.
- 饶志国, 吴翼, 朱照宇, 贾国东, Andrew H. 2011. 长链正构烷烃主峰碳数作为判别草本和木本植物指标的讨论: 来自表土和现代植物的证据[J]. 科学通报, 56(10): 774 - 780.
- 童国榜, 石英, 范淑贤, 张俊牌, 宋祥华, 刘振西, 乔光东, 张纪祥. 1995. 银川盆地晚第四纪环境特征[J]. 地球科学, 20(4): 421 - 426.
- 王成敏, 郭盛乔. 2005. 华北平原石家庄东南部宁晋泊地区湖相地层的年龄测定[J]. 地质通报, 24(7): 655 - 659.
- 王国安, 韩家懋, 刘东生. 2003. 中国北方黄土区 C_3 草本植物同位素组成研究[J]. 中国科学(D辑), 33(6): 550 - 556.
- 谢树成, 王志远, 王红梅, 陈发虎, 安成邦. 2002. 末次间冰期以来黄土高原的草原植被景观: 来自分子化石的证据[J]. 中国科学(D辑), 32(1): 28 - 35.
- 杨振京, 刘志明, 张俊牌, 童国榜, 阳小兰. 2001. 银川盆地中更新世以来的孢粉记录及古气候研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(3): 43 - 49.
- 余俊清, 王小燕, 李军, 安芷生. 2001. 湖泊沉积有机碳同位素与

环境变化的研究进展[J]. 湖泊科学,13(1):72-78.
张杰,贾国东. 2009. 植物正构烷烃及其单体氢同位素在古环境研究中的应用[J]. 地球科学进展,24(8):874-881.
张永双,孙璐,殷秀兰,孟晖. 2017. 中国环境地质研究主要进

展与展望[J]. 中国地质,44(5):901-912.
周斌,古再丽努尔·外力, Peterse F, Bird M I. 2016. 黄土高原中部 450ka 以来植被演化的有机碳同位素与分子化石记录[J]. 中国科学:地球科学,46(4):509-518.

Regional Paleovegetation Evolution Recorded in Molecular Lipid of Fluvial-lacustrine Sediments the Yinchuan Basin Since 35.0ka

ZHANG Huijuan¹, YANG Guifang¹, CHEN Zhenghong²

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083; 2. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract: By the aid of GC method, n -alkanes have been identified fluvial-lacustrine sediments from the Binggou profile of the Yinchuan basin, Ningxia, to characterize the palaeovegetation types and evolutions in arid and semi-arid regions. The results show that the n -alkanes with carbon numbers ranging from C_{15} to C_{34} exhibit different distribution patterns. Most samples show a single peak with high carbons (C_{29} or C_{31} in particular) and have an odd-over-even carbon number predominance, while others have double peaks (the first peak is lower homologue and the second peak is high carbon). The distributions of n -alkanes, CPI and L/H values show that the organic matter in the Binggou profile primarily comes from terrestrial. According to OSL sequence, organic carbon isotope, ACL, and $C_{33}/(C_{33} + C_{27})$, the relative contents of C_4 plants and the evolution of herbs and woody plants have been reconstructed in the study area since 35.0ka. As a result, C_3 plants in the Yinchuan basin have great dominance and the changes of C_3 and C_4 plants are constrained by temperature, while the evolution of woody and herbaceous vegetation is mainly controlled by moisture.

Key words: n -alkane, organic carbon isotope, organic source, paleovegetation, Yinchuan basin

