

加拿大阿萨巴斯卡地区泥炭脂类分子记录的古气候信息

何大双^{1,2,3)}, 黄海平^{2,3)}, 侯读杰²⁾, 张鹏辉¹⁾

1) 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊, 065000, 中国; 2) 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京, 100083, 中国; 3) 卡尔加里大学地球科学学院, 阿尔伯塔卡尔加里, T2N 1N4, 加拿大

内容提要: 为了进一步了解泥炭中脂类分子化合物的分布与植被演化和气候变化的响应关系, 对采自加拿大阿尔伯塔省东北部阿萨巴斯卡地区的 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱样品中的脂类分子进行测定。根据正构烷烃、正烷酮、甾类和萜类等分子化合物的地球化学分析, 结合年代学资料, 重建了研究区近千年来的古气候演化过程。现代暖期以来(1990 年以来), 区内大范围的锈色泥炭藓发育, 指示温暖干旱的气候条件; 现代暖期早期(1900 年以来), 陆源高等植物和狭叶泥炭藓共存于干-湿交替的气候环境下; JPH4 泥炭柱记录了小冰期期间寒冷干旱的气候环境, 该时期莎草科等陆生维管植物发育; 上述结论与前人记录的区域植被和气候变化具有较好的可比性。研究区发育的锈色泥炭藓种类特殊, 多形成于干旱环境且具有 C₃₁ 正构烷烃优势分布, ACL、P_{aq}、C₂₃/(C₂₇ + C₃₁) 正构烷烃指标能够有效表征植被输入特征和气候变化。正烷酮主要来源于相应正构烷烃的微生物氧化作用, 正烷酮指标 CPI-ket、ACL-ket 和 (K₂₃ + K₂₅)/(K₂₇ + K₂₉ + K₃₁) 有效地记录了泥炭沉积时期气候的演变过程。甾类、萜类化合物的丰度明显高于直链烷基类化合物, γ-内酯/生育酚、C₂₉ 甾酮/C₂₉ 甾醇、甾醇/甾类化合物等指标能够初步应用于指示区域气候的干湿冷暖变化, 微生物的改造作用可能会影响这些指标的分布。

关键词: 阿萨巴斯卡; 泥炭; 脂类分子; 古植被; 古气候

泥炭是在饱和水或欠饱和水环境下由成炭植物在缺氧条件下不完全降解而导致植物残体堆积而形成, 在堆积过程中其生物源的输入和转化、成炭植物的演变及对气候波动的敏感性在泥炭有机质分子组成上均能得到体现 (Xie Shucheng et al., 2001; Charman et al., 2009; Huang Xianyu et al., 2017)。这些来源于生物有机体的分子具有一定的稳定性, 虽受成岩、成土等地质作用的影响, 但基本保持了原始母源先质的碳骨架结构, 能够较准确地提供古植被演替和古气候变化信息, 是越来越被重视的地质信息载体 (Charman et al., 2009)。

土壤、湿地和海洋沉积物中脂类化合物大多数来源于高等植物的叶蜡, 而叶蜡脂类的组成受控于植物生长的环境条件, 这些化合物携带了大量与环境气候变化相关的信息, 故开展地质体中脂类化合

物的研究对古植被、古温度、古降水等的恢复具有重要的指示意义 (Xue Jiantao, 2018)。由于植物种类、生长周期等因素的影响, 当环境发生长期微小变化时, 与气候变化密切相关的植物中某些脂类分子组成将随之发生变化 (Barker et al., 2016; Huang Xianyu et al., 2016)。Bingham et al. (2010) 研究证实 C₂₃ 正构烷烃是记录总泥炭藓输入量的生物标记物, 提出正构烷烃能够重建过去泥炭沼泽的地下水水位动态, 植物群落的发育主要受到水文条件的影响 (Baker et al., 2016)。俄罗斯北部不同地区浅地表泥炭脂类分子的组成和分布存在差异, 区域气候环境变化是影响脂类分布差异的重要因素 (Serebrennikova et al., 2018)。藻类、古菌、细菌等地质微生物的脂类能够应用于估算古温度和记录干旱等极端古气候事件 (Xie Shucheng et al., 2018),

注: 本文为中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (AS2019Y02) 和中国地质调查局项目 (DD20201164) 联合资助。
收稿日期: 2019-12-25; 改回日期: 2020-02-13; 网络发表日期: 2020-04-27; 责任编辑: 任东; 责任编辑: 黄敏。
作者简介: 何大双, 女, 1989 年生。工程师, 主要从事石油地质和地球化学研究。Email: hedashuang@igge.cn。通讯作者: 黄海平, 男, 1962 年生。教授, 主要从事石油地质和地球化学研究。Email: hhp@cugb.edu.cn。

引用本文: 何大双, 黄海平, 侯读杰, 张鹏辉. 2020. 加拿大阿萨巴斯卡地区泥炭脂类分子记录的古气候信息. 地质学报, 94(12): 3864~3878. doi:10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020060.
He Dashuang, Huang Haiping, Hou Dujie, Zhang Penghui. 2020. Paleo climate information recorded by peat lipid molecules in the Athabasca region, Canada. Acta Geologica Sinica, 94(12): 3864~3878.

利用地质构型的藓类指标,例如 C_{31} 藓烷($\beta\beta/(\alpha\beta+\beta\beta)$),能够定量重建泥炭环境中的 pH (Inglis et al., 2018)。Huang Xianyu et al. (2016) 利用泥炭沉积中叶蜡脂类单体氢同位素组成、异构脂肪醇指数、藓类通量等指标,重建了东亚季风区、北半球北方区末次冰消期以来的古气候变化历史。Yang Guifang et al. (2008) 研究了天目山泥炭类脂物记录的微生物特征及其与植被演替的相关性,划分出早、中、晚 3 个环境演化阶段,与区域前人研究的环境演化与全球气候变化具有较好的可比性。目前国内外学者关于泥炭脂类分子化石对古气候响应的研究多集中在正构烷烃、GDGTs、单体碳、氢、氧同位素等方面,但对于正烷酮、甾类、萜类等作为信息源记录区域古气候、古环境演变的研究则鲜见报道。

雨养型泥炭地植被的发育以大气降水作为主要的水源和营养源(Halsely et al., 1995),对气候环境变化十分敏感,是记录过去气候环境的良好地质档案。本文以加拿大阿尔伯塔省东北部阿萨巴斯卡地区具有代表性的现代雨养型泥炭地为研究对象,开展泥炭沉积脂类分子高分辨率古气候研究,通过剖析脂类化合物的分布特征,提取生物标志物信息恢复阿萨巴斯卡地区所记录的气候演化过程,丰富泥炭脂类分子标志物在气候和生态环境领域中的应用,这对过去全球气候变化研究和人类的可持续发展有着重要的意义。

1 研究区概况

研究区位于加拿大阿尔伯塔省东北部阿萨巴斯卡泥炭沼泽地区。阿尔伯塔省东北部储有丰富的水资源,年降水量较南部多,从省城埃德蒙顿至北而上,属于杨木森林和草原地带,最北部属于森林植被区,泥炭藓类植被大范围发育,部分地区可见莎草和黑云杉针叶树等,区域气候深受大陆性北极气候影响(Wolfe et al., 2005; Edwards et al., 2008)。阿萨巴斯卡泥炭地属于雨养型泥炭,该类型泥炭沼泽生态系统覆盖了阿尔伯塔省北部 50% 以上的高寒地区,大气降水作为植被发育主要的水源和营养源(Halsely et al., 1995)。研究区多年冻土形成于小冰期,呈零星分布且不连续,冻土多以冰丘的形式存在,泥炭藓炭屑保存着小冰期冰川的遗迹特征。小冰期末期(公元 1850 年),永久冻土开始退化,过去 50 年来退化加速。在高寒和(亚)北极地区,由于气候变化而形成的永久冻土可能会改变当地的水文条件和植被发育。冻结膨胀使泥炭地表面发生剧变,

局部地下水位明显下降,旱生植被发育,气候条件变得干燥使得泥炭腐殖化程度增加(Halsely et al., 1995; Vitt et al., 2000; Beilman et al., 2001)。区域气候夏季相对温暖,冬季相对寒冷,气候条件较干燥。年平均气温为 1.0°C , 1~7 月为 -17.4°C , 年平均降水量为 419 mm, 其中 32% 为降雪。过去数十年来,该地区经历了一次重要的气候变暖事件,反映在 1951~1981 年期间年平均气温由 -0.4°C 的上升到 1981~2010 年的 1.0°C (Charman et al., 2009, 2013; Baker et al., 2016)。

加拿大西部北方地区记录了过去千年以来 3 次气候波动事件,包括中世纪暖期(Medium Warm Period)、小冰期(Little Ice Age)和与人类活动有关导致全球变暖的现代暖期(Recent Warming)。小冰期和中世纪暖期的时间界限为公元 1560 年,现代暖期的开始时间约为 1900 年,1990 年以来气温进一步加速升高。前人研究表明(Luckman et al., 2005; Edwards et al., 2008),近千年来加拿大中西部北方地区经历了多期气候变化,气候从中世纪暖期的暖冬和潮夏转变为小冰期期间的凉冬和干夏,期间干燥的北极气团频繁入侵,与现今相比气温大致低了 2°C 。小冰期是北半球众多地区全新世最冷的时期之一(Mann et al., 2009),尽管加拿大西部的水文气候条件持续波动,但从 15 世纪中期到 18 世纪末,干旱和寒冷的气候条件占主导地位(Edwards et al., 2008),尤其是在阿尔伯塔省北部的阿萨巴斯卡三角洲地区(Wolfe et al., 2005)。小冰期之后气温逐渐升高,1900 年以来呈现干燥和温暖的气候环境(Wolfe et al., 2005; Mann et al., 2009)。

2 样品与实验

2.1 取样位置

本文研究对象为 JPH4、Mildred 和 McMurray 3 个泥炭柱,它们的地理位置分别为北纬 $57^{\circ} 06' 44.1''\text{N}$, 西经 $111^{\circ} 25' 24.42''\text{W}$; 北纬 $56^{\circ} 55' 50.4''\text{N}$, 西经 $111^{\circ} 28' 30.3''\text{W}$; 北纬 $56^{\circ} 38' 1.88''\text{N}$, 西经 $111^{\circ} 17' 19.73''\text{W}$ (图 1)。采用荷兰 Wardennar 泥炭取样器对 3 个泥炭柱进行取样,所钻取泥炭柱厚度分别为 67.6cm (JPH4)、48.0cm (Mildred)、54.3cm (McMurray)。泥炭柱从地表至底部每隔 1.0~1.5 cm 进行切割,随后将样品密封并冷藏处理,待测。

2.2 实验方法

泥炭样品风干后进行研磨并过筛子(50 目),除去样品中肉眼可分辨的大的树枝和根茎类,收集混

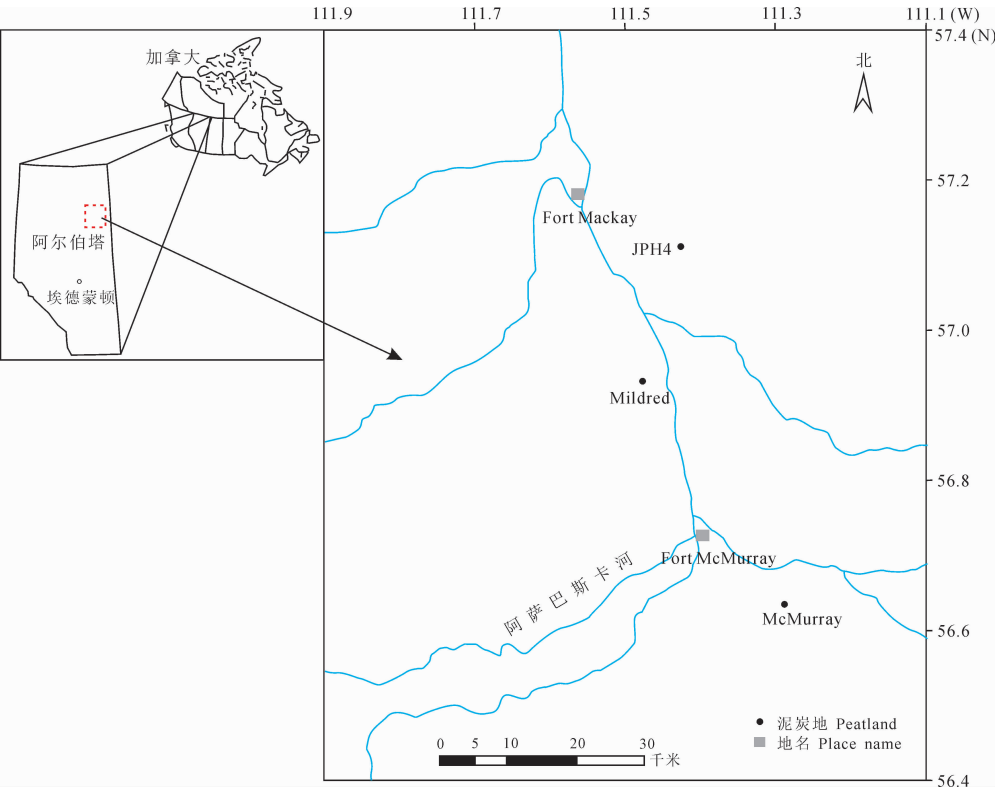


图 1 加拿大阿萨巴斯卡地区泥炭柱取样位置图

Fig. 1 Sampling location of peat sites in the Athabasca region, Canada

和均匀的样品(小于 5g)用于抽提。采用超声抽提方法提取泥炭有机质,抽提溶液为二氯甲烷(DCM)和甲醇(MeOH)的混合溶液(DCM : MeOH=90 : 10,v/v);将抽提得到的溶液置于超声器中萃取 30 分钟之后静置 24 小时,然后用玻璃棉和无水硫酸铜过滤后进行抽提;连续超声抽提 3 次直至抽提物无色。将抽提液蒸馏浓缩,浓缩后的样品移至量筒(10ml)内。在样品中添加内标物,混合均匀,取其 1ml 抽提液移至进样小瓶进行 GC-MS 实验,剩余样品封样保存。

GC-MS 实验分析采用美国安捷伦色谱-质谱联用仪(Agilent 7890A-GC/5975C-MSD),色谱柱为 HP-5 熔融石英毛细管柱(30m × 0.25mm × 0.25μm),进样口温度为 300℃,柱起始温度 50℃,保持 5min,以 4℃/min 升温至 220℃,以 2℃ /min 升至 320℃,保持 25min;载气为氦气,流速为 1mL/min,扫描方式为全扫描和选择离子扫描。化合物的鉴定依据保留时间、GC-MS 质谱数据库和质谱解析。通过各组分与内标峰的面积比,对目标组分进行定量。直链烷烃的浓度(×10⁻⁶)根据内标角鲨烷计算得到,甾类、萜类极性化合物的浓度根据标样 C₃₀-胆甾烷-d4 计算得到。

2.3 泥炭柱定年

泥炭样品的定年采用²¹⁰Pb 测年方法,由加拿大阿尔伯塔大学 Dr. Duane Froese 和 Lauren Davies 完成。采用美国 ORTEC 公司生产的高纯锗低本底伽马能谱仪井型探测器(Model GWL-250-15, GWL Series HPGe Well Detector)对泥炭样品进行测年,并利用稳定输入通量-稳定沉积物堆积速率(CRS)模式求解年代数据,详细的实验方法见文献 Davies et al. (2018)。图 2 简要总结了研究区 3 个泥炭柱的年龄-深度模型,相关泥炭柱年龄-深度模型的详细内容见 Davies et al. (2018)的研究成果。

3 泥炭地植被输入特征

现代沉积物中泥炭脂类化合物能够有效地指示有机质来源,特别是正构烷烃、正烷醇、脂肪酸等的分布与植被生长密切相关。正构烷烃具有较高的稳定性,是运用最广泛的一类脂类化合物。JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱样品的正构烷烃分布如图 3 所示,正构烷烃分布于 C₁₇-C₃₅ 之间,后峰型为主,部分样品呈现双峰型分布,奇碳优势明显,低碳数分子含量较低,以高分子量正构烷烃占主导,主体体现的是高等植物来源的有机质分布特征,细菌、

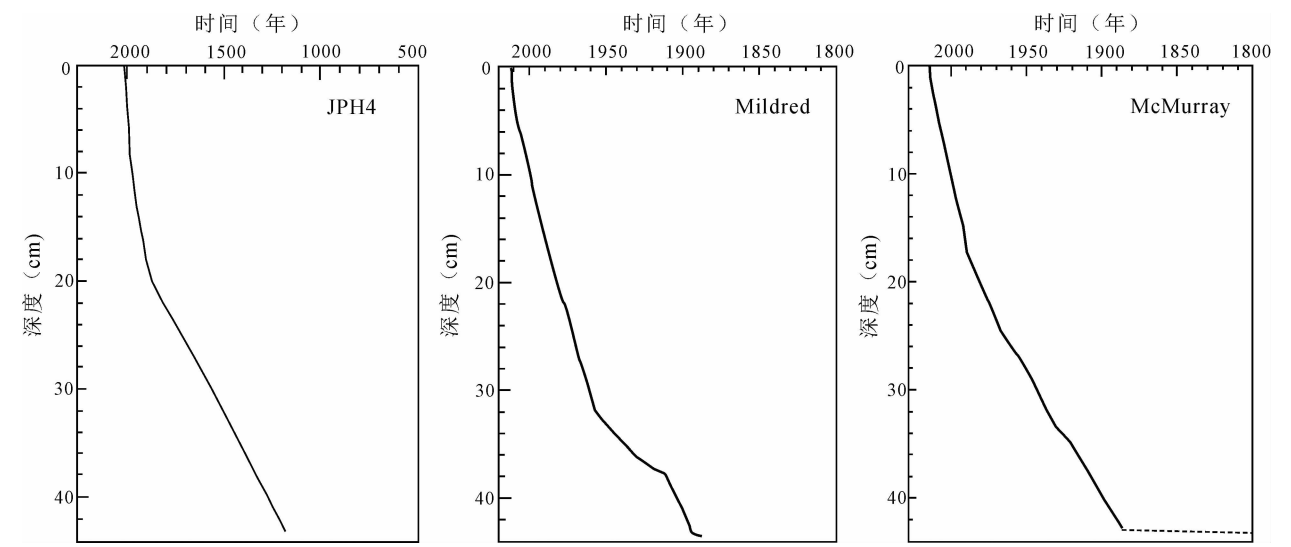


图 2 加拿大阿萨巴斯卡地区泥炭柱年龄-深度模型(资料来源 Davies et al. ,2018)

Fig. 2 Age-depth models of three peat cores in the Athabasca region, Canada (data are referred from Davies et al. , 2018)

藻类等低等生物的贡献不明显。JPH4 泥炭柱自上而下 C_{max} 具有 C_{31} - C_{29} - C_{27} 分布模式,地表处样品主峰正构烷烃 C_{max} 为 C_{23} ,主峰碳的变化说明优势成炭植物的类型不同;正构烷烃总浓度分布范围为 $21.3 \sim 521.4 \times 10^{-6}$,整体随深度降低,—37cm 处达到最大值;碳优势指数 $CPI\{=[\sum C_{23-31}(\text{odd}) + \sum C_{25-33}(\text{odd})]/2 \times \sum C_{24-32}(\text{even})\}$ 值分布为 $4.63 \sim 13.07$,随深度明显呈降低趋势。Mildred 泥炭柱近地表处样品 C_{max} 为 C_{25} , C_{27} 为次主峰,随着深度增加, C_{25} 或 C_{31} 均表现出明显的主峰碳优势,随后 C_{31} 正烷烷烃含量显著增加,至剖面底部 C_{max} 为 C_{27} ;正构烷烃总浓度分布于 $24.02 \times 10^{-6} \sim 321.65 \times 10^{-6}$ 之间,地表处达最大值 321.65×10^{-6} ,且随深度整体呈降低趋势,剖面下部总浓度最低,多小于 100×10^{-6} ;CPI 值介于 $2.04 \sim 14.03$ 之间,随深度明显降低。McMurray 泥炭柱 C_{max} 主要为 C_{31} ,局部出现 C_{25} 、 C_{27} 和 C_{29} 主峰分布;样品总正构烷烃浓度分布较分散,介于 $47.08 \times 10^{-6} \sim 423.14 \times 10^{-6}$,—35.2cm 处出现最大值,正构烷烃的浓度与深度并无明显关系;CPI 介于 $4.56 \sim 11.43$ 之间,随深度逐渐降低,底部样品 CPI 值呈略微增大趋势。三个泥炭剖面的 CPI 分布均具有随深度减小的分布特征,一般微生物活动随着深度的增加而增强,随着深度增加,植物残体发生分解,细菌等微生物活性增大,腐殖化程度增加,从而导致 CPI 随深度降低 (Huang Yongsong et al. ,1996)。

Mildred 泥炭柱有机质来源及古植被演化的研究成果已发表在《沉积学报》第 2018 年 1 期 (He

Dashuang et al. ,2018a),研究表明,根据正构烷烃、正烷酮、脂肪酸等 16 个指标的主成分分析、植物化石剖面^①、物源指标[正构烷烃 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 、 C_{23}/C_{29} 、 P_{aq} 及 ACL]、以及泥炭样品描述,判断 Mildred 泥炭柱沉积有机质主要来源于原地堆积的高等植物和苔藓类,水生植物对泥炭有机质也有一定程度的贡献。Mildred 泥炭柱植被输入具有分段性,剖面上段(地表至 17cm,M1,图 4)成炭植物以锈色泥炭藓为主,中段(17 至 41cm,M2)沉积有机质主要来源于木质树根、杜鹃花科、黑云杉及莎草科等;下段(41cm 至底部,M3)莎草科类富集,少量松柏、杜鹃花科等木本植物发育。样品处理过程中,Mildred 泥炭柱 17cm 至地表的样品多为苔藓植物碎屑,样品干燥后水分损失可达到 93%,17cm 以下的样品主要是木质碎屑、根茎等木本植物,研磨后细颗粒物较多,水分损失可达到 45.1%~88%,进一步证实了 M1 中成炭植物以泥炭藓输入为主,而 M2 和 M3 中物源以木质碎屑、根系或木炭为主。Mildred 泥炭柱植物化石的分布与脂类化合物揭示的物源输入的结论是相吻合的。泥炭脂类分子可作为恢复区域古植被的有效工具,与植物化石资料结合,能够获取更为全面的植被演化信息。

依据脂类分子指标主成分分析、植物化石资料、物源指标、以及实验样品描述,得到 JPH4 和 McMurray 泥炭柱的植被演化特征如下:JPH4 泥炭柱地表至 4cm 处(J1,图 4)以锈色泥炭藓为主要的成炭植物,4cm 至 18cm(J2)有机质主要来源于木质树根、杜鹃花科、以及狭叶泥炭藓,18cm 至 33cm

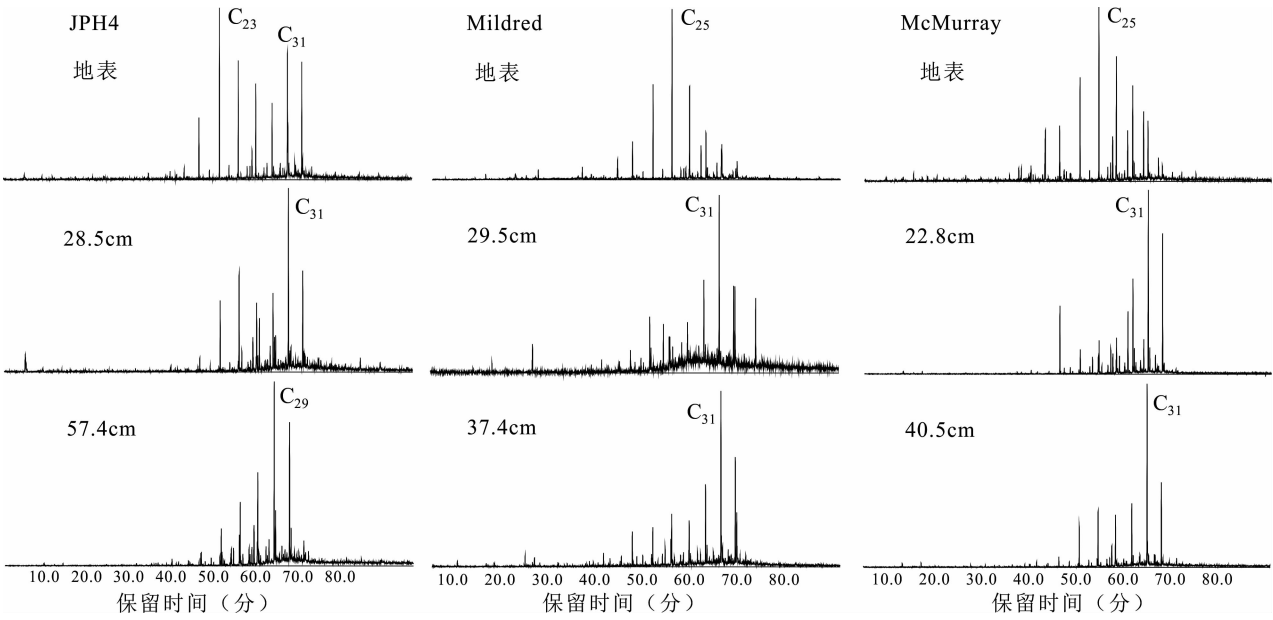


图 3 加拿大阿萨巴斯卡地区 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭地正构烷烃分布
Fig. 3 *n*-Alkane distributions in the JPH4, Mildred and McMurray peat cores in the Athabasca region, Canada

(J3)以陆源植物输入为主,如杜鹃花科、木质类等, 33cm 至底部(J4)成炭植物包括杜鹃花科、松柏科、莎草科及少量的苔属植物。McMurray 泥炭柱中地表至 17cm 处(Mc1)与 J1 和 M1 类似,即锈色泥炭藓是主要的成炭植物,17cm 至 43cm(Mc2)有机质主要来源于杜鹃花科、落叶松属以及狭叶泥炭藓, 43cm 至底部(Mc3)成炭植物以落叶松属、云杉属及狭叶泥炭藓为主。

4 正构烷烃记录的古气候信息

正构烷烃作为植物叶蜡的重要组成部分,对气候环境变化较为敏感,在沉积、埋藏和迁移过程中较稳定,不易降解,能够长期保存下来,正构烷烃的分布与植被演化和气候环境变化密切相关。正构烷烃指标碳优势指数 CPI、平均链长 ACL(Average Chain Length= $23 \times C_{23} + 25 \times C_{25} + \dots + 33 \times C_{33} / (C_{23} + C_{25} + \dots + C_{33})$)、 $P_{aq} = (C_{23} + C_{25}) / (C_{23} + C_{25} + C_{29} + C_{31})$) 在雪冰、黄土、河湖等全球变化关键载体的成功应用,显示了其对全球及区域气候环境变化具有良好的指示意义(Li Suping et al., 2016; Eglinton et al., 2018; Yang Guifang et al., 2018; Huang Meng et al., 2019)。

基于²¹⁰Pb 测年结果(Davies et al., 2018), JPH4 泥炭柱 18cm 和 Mildred 柱 41cm 对应小冰期晚期,加拿大西部小冰期期间气候特点是干旱寒冷条件下存在多期水文气候波动(Wolfe et al., 2005;

Edwards et al., 2008)。20 世纪早期,泥炭柱中主峰正构烷烃的分布变化明显,表明现代暖期温暖的气候可能导致泥炭地覆盖植被的某些变化,或者微小的种内或种间变化(Bush et al., 2013; Baker et al., 2016)。Mildred 泥炭柱 17cm 大致对应 1990 年,平均气温持续升高,气候条件相对干燥。20 世纪中期,Mildred 沼泽地喜干的泥炭藓群落繁盛,可能是受区域内干燥温暖的气候驱动所致。JPH4 泥炭柱 4cm 和 McMurray 泥炭柱 17cm 均对应 1900 年,JPH4 泥炭柱中 33cm 对应 1560 年即小冰期和中世纪暖期的时间界限,气候事件与前述植被演替能够很好地对应(图 4)。根据¹⁴C 和²¹⁰Pb 年代学结果(Davies et al., 2018; Magnan et al., 2018),JPH4 和 McMurray 柱底部泥炭样品的年龄大致从中世纪暖期开始,故本文主要研究中世纪暖期以来的气候波动历史。

泥炭的积累和保存对降水和温度的变化具有响应性,气候变化直接制约着泥炭地植被生长的生态环境,用来指示生态因子和环境条件的泥炭脂类分子能够作为指示过去气候变化的代用指标(Zheng Yanhong et al., 2007; Bao Kunshan et al., 2012)。Zhou Weijian et al. (2010)指出正构烷烃指标 P_{aq} 、 C_{23}/C_{25} 、 C_{23}/C_{29} 、ACL 等能够有效地记录东北哈尼泥炭序列的气候变化;部分学者应用古水文正构烷烃代用指标 P_{aq} 和 $P_{wax} = (C_{27} + C_{29} + C_{31}) / (C_{23} + C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31})$ 探索泥炭沼泽中泥炭藓和苔

藓植物之间的变化情况,重建过去的地下水位(Ficken et al., 2000; Andersson et al., 2011; Bush et al., 2013)。一般 C_{23}/C_{29} 正构烷烃比值代表湿润栖息地中的泥炭藓类植被相对于干燥环境中陆地维管植物的比例(Nichols et al., 2006; Zhou Weijian et al., 2010); P_{wax} 值越高,说明陆生植物的输入量越大,气候环境越干燥,而较低的 P_{wax} 值则指示潮湿的环境(Zheng Yanhong et al., 2007); C_{23}/C_{31} 正构烷烃比值常用于指示泥炭沼泽潮湿或干旱环境,其表征的气候环境意义与 P_{aq} 类似(Ficken et al., 1998; Nichols et al., 2006)。然而 Nott et al. (2000)指出 C_{23}/C_{31} 比值也能够反映 C_{23} 正构烷烃富集的泥炭藓和 C_{31} 正构烷烃富集的泥炭藓的相对输入程度。Mildred 泥炭柱上部成炭植物以泥炭藓属 *Sphagnum* sect. *Acutifolia* 为主,其中锈色泥炭藓分布广泛,数量最多。由于泥炭藓属 *Sphagnum* sect. *Acutifolia* (包括锈色泥炭藓、尖叶泥炭藓、*S. russowii* 等)一般在喜干的环境下发育,其中锈色泥炭藓中 C_{23} 和 C_{25} 正构烷烃富集,而尖叶泥炭藓中 C_{31} 正构烷烃富集(Bingham et al., 2010),故本研究中利用 P_{aq} 和 C_{23}/C_{29} 指标更能够有效表征泥炭藓物种或维管植物的输入差异。

4.1 P_{aq} 值

JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭地不同时期发育的成炭植物类型不同, P_{aq} 值 0.4 可以作为区分泥炭藓和维管植物的相对贡献的界限值(Ficken et al., 2000; Nichols et al., 2006)。图 4 中, M1 和 Mc1 中 P_{aq} 值以大于 0.4 为主, 少部分样品 P_{aq} 值略小于 0.4, J1 中 P_{aq} 值分布为 0.1~0.6。随着深度增加, 泥炭藓类减少, 陆生植物增加, 使得 M1 和 Mc1 中 P_{aq} 值随深度逐渐降低。J1、M1 和 Mc1 中锈色泥炭藓富集, 其发育环境偏干旱温暖, 而一般较高的 P_{aq} 指示适宜水生植物生长的潮湿环境。由于研究区现今发育的泥炭藓属 *Sphagnum* sect. *Acutifolia* 一般生长在干旱环境下, 使得泥炭柱上部偏高的 P_{aq} 值指示干旱温暖的气候条件。现代暖期早期(1900~1990 年), 泥炭藓和陆源高等植物共存于干湿交替的环境下。陆生维管植物同样在干旱条件下较发育, J2, M2 和 Mc2 中 P_{aq} 值均小于 0.4, 除了 J2 和 Mc2 中间的少数样品, 可能是由于喜湿的狭叶泥炭藓的富集导致 P_{aq} 值大于 0.4。小冰期期间气候寒冷干旱, J3 和 M3 中分别发育 C_{31} 和 C_{27} (正构烷烃, 下同) 优势的维管植物, 使得它们的 P_{aq} 值介于 0.2~0.4 之间, 但 M2 中 P_{aq} 略大于

0.4, 可能是由于底部 C_{27} 优势的莎草科类富集, 也可能与泥炭柱深部的微生物作用有关。相对低的 P_{aq} 值表明, 在寒冷干燥的条件下, 未升高的水位通常与全新世小冰期有关。与 JPH4 和 Mildred 泥炭柱不同, McMurray 泥炭柱中缺少 1200 年至 1890 年沉积的地层(据 ^{210}Pb 和 ^{14}C 测年结果, Davies et al., 2018; Magnan et al., 2018), 对应的深度多年冻土发育。JPH4 泥炭柱底部 J4 中 P_{aq} 值小于 0.4, 且随深度呈略微增大趋势, 而该段富集 C_{29} 优势的陆源植物, 同样指示温暖、潮湿或干湿交替的气候环境, 对应中世纪暖期。此外, 气候变暖条件下微生物活动也会增强(Zhou Weijian et al., 2010), 使得长链正构烷烃优势降低, CPI 值降低, 故 JPH4 泥炭柱深部 P_{aq} 值随深度呈现增大趋势。

Nichols et al. (2006) 利用 C_{23}/C_{29} 指标重建了美国密歇根泥炭地 3000 年以来的水位和湿度变化; Zhou Weijian et al. (2010) 等人指出哈泥泥炭地 ACL 指标与年均降水量正相关, 能够有效重建古气候变化特征。本研究中 P_{aq} 指标能够有效指示不同时期成炭植物的演替和气候干湿变化情况, P_{aq} 与其它正构烷烃指标 C_{23}/C_{29} 、ACL、 P_{wax} 等具有很好的可比性, 说明 C_{23}/C_{29} 、ACL、 P_{wax} 也能用于表征研究区气候的变化。图 5 为 P_{aq} 与 ACL、 C_{23}/C_{29} 的相关关系图, 其中 P_{aq} 与 ACL 的相关系数达到 0.92, P_{aq} 与 C_{23}/C_{29} 的相关系数为 0.75, 较高的正相关性表明 ACL 和 C_{23}/C_{29} 指标对泥炭植物输入和气候演化具有一定的指示意义。

4.2 $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ 比值

C_{23} 、 C_{25} 中链正构烷烃富集的泥炭藓物种一般生长在潮湿环境下, 而陆生维管植物中 C_{31} 正构烷烃较富集。泥炭藓属 *Sphagnum* sect. *Acutifolia* 多形成于干旱环境, 其部分泥炭藓类会出现 C_{31} 正构烷烃优势分布, 如尖叶泥炭藓, 故泥炭藓属 *Sphagnum* sect. *Acutifolia* 的存在会导致 C_{23}/C_{31} 的指示意义存在矛盾。本文提出 $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ 这一指标, 能够区分尖叶泥炭藓和陆源高等植物的相对贡献, 从而指示干湿环境的变化。

图 6 中 J1、M1 和 Mc1 中的多数样品 $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ 值大于 0.2, 指示喜干的锈色泥炭藓富集, 与 P_{aq} 值的结果是吻合的。现代暖期以来区域环境转变为暖干, 阿萨巴斯卡泥炭地的泥炭藓植物在持续温暖和干旱条件下蓬勃发育, 1900 年至 1990 年之间出现了周期性的干-湿交替。J2 和 Mc2 中 $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ 值小于 0.2, 中间区域少数样品点值略高

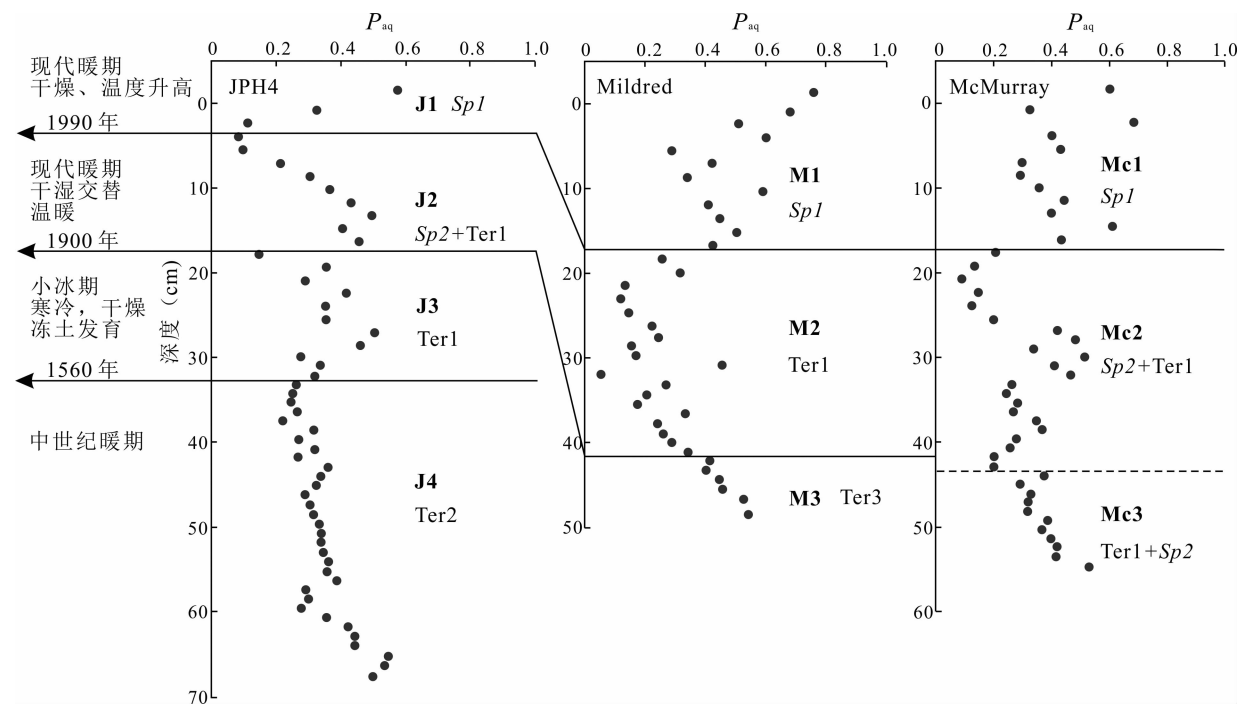


图 4 加拿大阿萨巴斯卡地区 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱正构烷烃 P_{nq} 分布特征与对比

Fig. 4 Comparison of P_{nq} n -alkane proxy in the JPH4, Mildred and McMurray peat cores in the Athabasca region, Canada
注: McMurray 中灰色虚线代表 1200 年至 1890 年间缺失地层, 定年资料参考 Davies et al., (2018)。J1、J2、J3 及 J4 代表 JPH4 泥炭柱分成 4 段, 即 J1 为地表至 4cm, J2 为 4cm 至 18cm, J3 为 18cm 至 33cm, J4 为 33cm 至底部; 同理, M1、M2 和 M3 代表 Mildred 分成 3 段, M1 为地表至 17cm, M2 为 17cm 至 41cm, M3 为 41cm 至底部; Mc1、Mc2 和 Mc3 代表 McMurray 分成 3 段, Mc1 为地表至 17cm, Mc2 为 17cm 至 43cm, Mc3 为 43cm 至底部。Sp1 代表锈色泥炭藓, Sp2 代表狭叶泥炭藓, Ter1、Ter2 和 Ter3 分别代表以 C_{31} 、 C_{29} 和 C_{27} 为优势正构烷烃的陆源高等植物

Note: The dotted line in the McMurray profile refers to the strata lost from year 1200 to 1890. Age date was referred from Davies et al. (2018). J1, J2, J3 and J4 refer to four divided intervals of JPH4 core (J1: from the living layer to 4cm, J2: from 4cm to 18cm, J3: from 18cm to 33cm, J4: from 33cm to the bottom). M1, M2 and M3 refer to three divided intervals of Mildred core (M1: from the living layer to 17cm, M2: from 17cm to 41cm, M3: from 41cm to the bottom). Mc1, Mc2 and Mc3 refer to three divided intervals of McMurray core (Mc1: from the living layer to 17cm, Mc2: from 17cm to 43cm; Mc3: from 43cm to the bottom). Sp1: *S. fuscum* in *Sphagnum* sect. *Acutifolia* family; Sp2: *Sphagnum* of *S. cuspidata* species. Ter1, Ter2 and Ter3 refer to vascular plants dominated by C_{31} , C_{29} and C_{27} n -alkanes, respectively

于 0.2, 指示喜湿的狭叶泥炭藓与喜干的陆生植物共存。加拿大西部的水文气候条件持续波动, 自小冰期以来以干旱和凉爽的气候占主导, 小冰期是全新世最冷的时期之一。J3 中 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 值以小于 0.2 为主, 随深度逐渐降低, 表明泥炭地的陆地植物适应相对偏干燥和凉爽的气候。JPH4 泥炭柱中深度 33cm 对应 1560 年, 即中世纪暖期, $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 值随深度呈略微增加趋势, 多数样品的 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 值小于 0.2。由于 C_{29} 正构烷烃优势的陆生植物富集导致 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 值相对较低, 也可能是由于气候温暖条件下微生物作用增强, 与中世纪暖期温暖的冬季和潮湿的夏季气候相呼应。Mildred 泥炭柱底部经历较长的埋藏时间, 微生物作用时间长, CPI 值偏低且随深度明显呈降低趋势,

M3 中 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 值随深度逐渐增加, 可能与底部较强的微生物降解作用有关。Mildred 泥炭柱 M3 中 C_{27} 正构烷烃优势的陆生植物在干旱条件下发育, 现代暖期之前的小冰期即代表寒冷干旱的气候环境。McMurray 泥炭柱中, 随着小冰期期间永久冻土的形成, 气候变得寒冷干燥, 小冰期及中世纪暖期期间(1200~1890 年)的沉积地层缺失(Davies et al., 2018; Magnan et al., 2018)。McMurray 泥炭柱底部经历较长时间的微生物作用, 使得 Mc3 中 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 比值随深度增加, 剖面底部 CPI 值较低且随深度降低也证实了这一点。

5 正烷酮分布及其古气候意义

Mildred、JPH4 和 McMurray 泥炭柱正烷酮(正

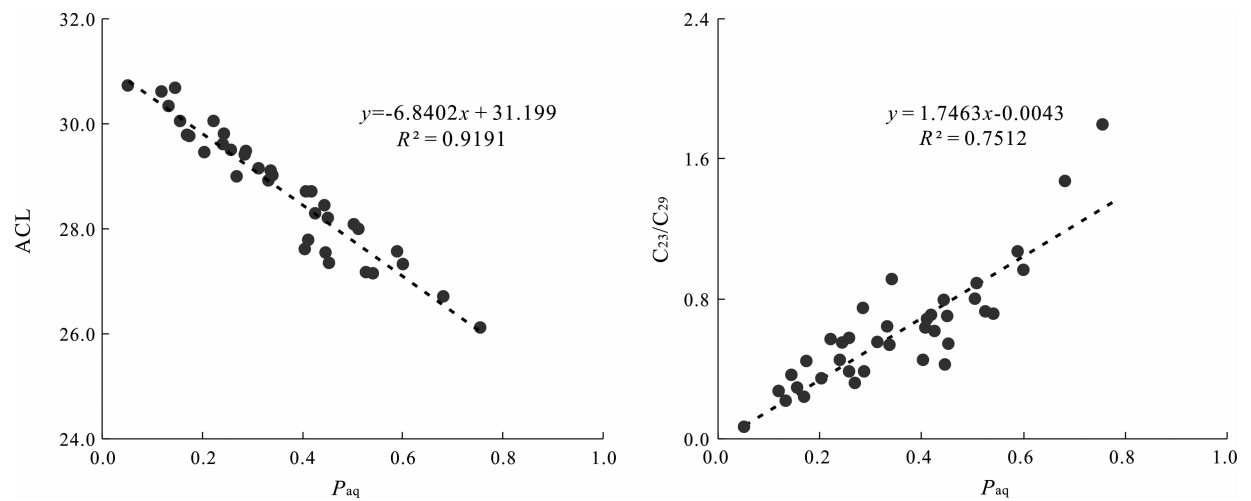


图 5 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭柱正构烷烃 P_{aq} 与 ACL、 C_{23}/C_{29} 的相关关系图

Fig. 5 Correlation between P_{aq} and ACL, C_{23}/C_{29} in the Mildred peat core in the Athabasca region, Canada

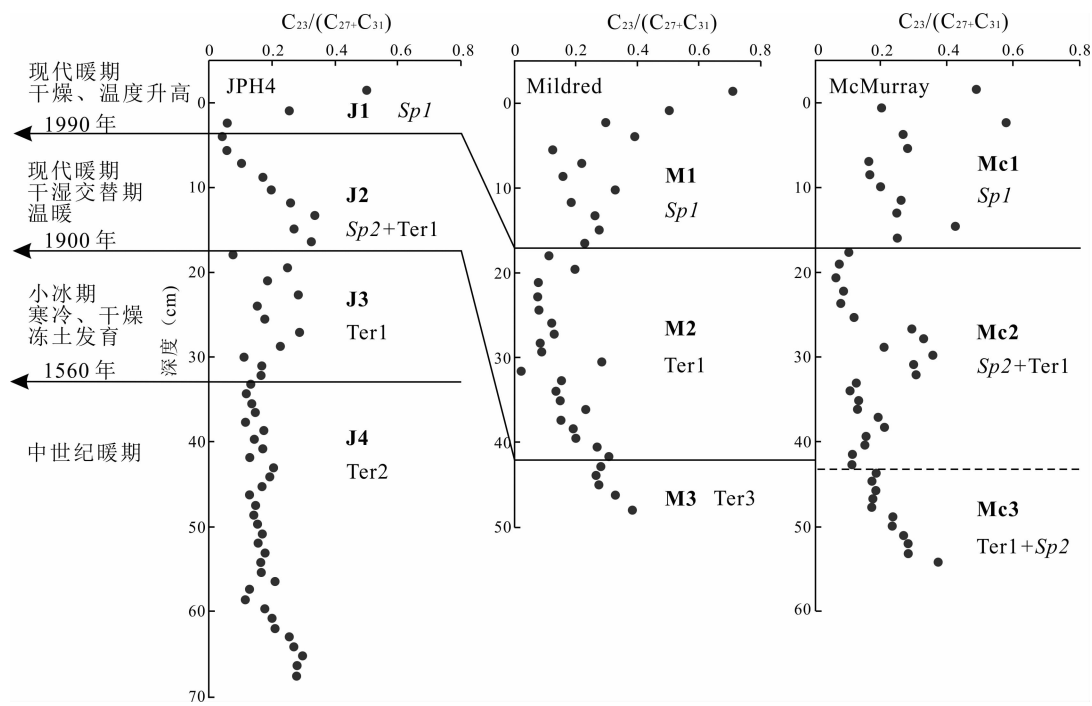


图 6 加拿大阿萨巴斯卡地区 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱正构烷烃 $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ 分布特征与对比,注解详见图 4

Fig. 6 Comparison of $C_{23}/(C_{27}+C_{31})$ n -alkane proxy in the JPH4, Mildred and McMurray peat cores in the Athabasca region, Canada. The annotations are interpreted in Fig. 4

烷基-2-酮, K_n) 的分布具有相似性(图 7), 正烷酮分布在 $K_{21} \sim K_{33}$ 之间, 后峰型为主, 具明显的奇碳优势, 主峰正烷酮(K_{max})以 K_{27} 和 K_{29} 为主, 正烷酮与正构烷烃分布具有相似性。JPH4 泥炭柱顶部样品的 K_{max} 为 K_{29} , 7cm 以下 K_{max} 均为 K_{27} ; 正烷酮总浓度小于正构烷烃, 为 $15.56 \times 10^{-6} \sim 331.40 \times 10^{-6}$, 随深度无明显变化趋势; CPI-ket 值分布于 3.9~11.2 之间, 随深度逐渐降低。Mildred 泥炭柱中正烷酮 K_{max} 为 K_{27} , 部分样品表现为 K_{25} 和 K_{29} 优势; 正

烷酮的总浓度($5.03 \times 10^{-6} \sim 59.52 \times 10^{-6}$)明显低于正构烷烃($24.02 \times 10^{-6} \sim 321.65 \times 10^{-6}$); CPI-ket 值介于 1.88~7.01 之间, 随深度明显降低。McMurray 泥炭柱 K_{max} 以 K_{27} 为主, 仅 2 个样品为 K_{29} 优势; 正烷酮浓度分布于 $34.27 \times 10^{-6} \sim 280.53 \times 10^{-6}$ 之间, 随深度无明显变化趋势; CPI-ket 与正构烷烃 CPI 分布类似。正烷酮分布特征表明, 正烷酮的来源可能与成炭植物生物源有关, 也可能与正构烷烃存在一定的关联性。

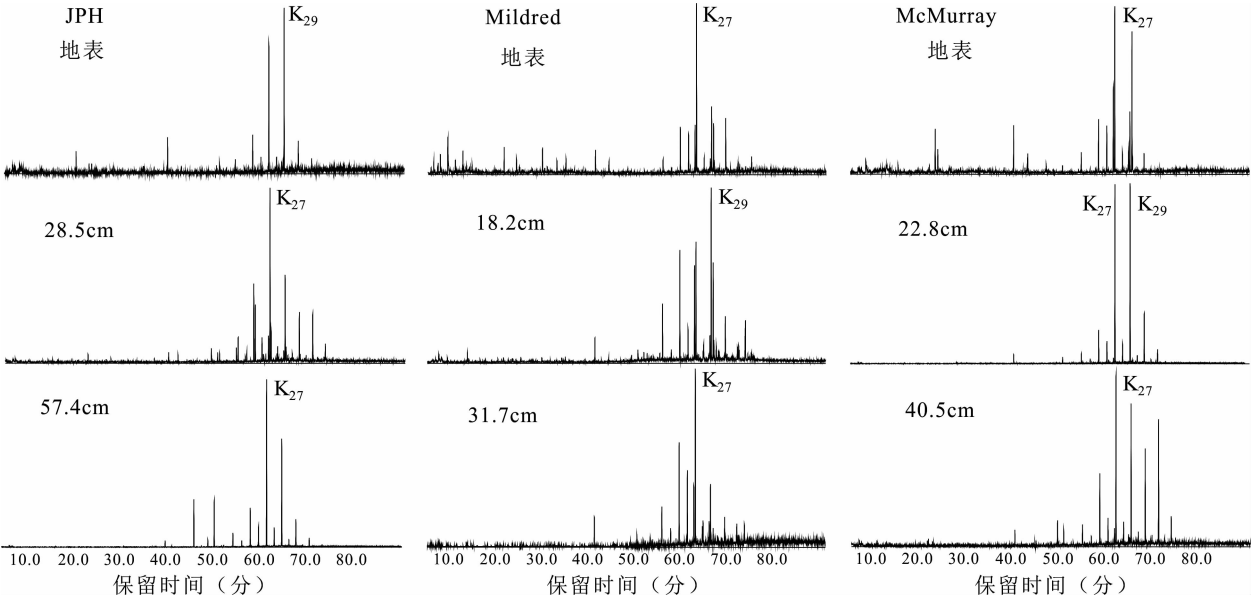


图 7 加拿大阿萨巴斯卡地区 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭地正烷酮分布

Fig. 7 *n*-Alkan-2-one distributions in the JPH4, Mildred and McMurray peat cores in the Athabasca region, Canada

根据 JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱中正构烷烃分子标志物推断的古气候信息与当地所记载的水文和古气候环境资料是吻合的(Halsey et al. , 1995; Luckman et al. ,2005;Edwards et al. ,2008; Mann et al. ,2009),故利用脂类分子标记物对阿萨巴斯卡泥炭地古气候变化的重建是可行的,特别是中世纪暖期以来的气候变化。除了正构烷烃,本文还利用正烷酮指标探讨研究区古气候演化特征。Nichols et al. (2007)研究指出高丰度的正烷酮可用于指示泥炭藓植物栖息的潮湿栖息地;Zheng Yanhong et al. (2011)研究表明哈尼泥炭沼泽中正烷酮碳优势指数与冷杉/莎草科花粉比值趋势一致,能够记录全新世以来的季风和降水量,并指出($K_{23} + K_{25}$)/HMW-ket,ACL-ket 正烷酮指标能够记录过去的气候变化,被认为是潜在的古气候指标。

He Dashuang et al. (2018a)研究表明 Mildred 泥炭地正构烷烃的微生物氧化作用是相应正烷酮形成的主要途径,来源于植物直接输入的正烷酮主要体现在泥炭柱上部,即泥炭藓十分富集的区域;脂肪酸的微生物 β -氧化和脱羧基作用可能对正烷酮的形成也有一定的影响,但其贡献并不是主要的。本文应用 CPI-ket、ACL-ket 和 ($K_{23} + K_{25}$)/HMW-ket 等正烷酮指标研究生物源输入特征及对应的气候环境。

Mildred 泥炭柱 M1 中泥炭藓植物对形成正烷酮的贡献较大,正构烷烃和正烷酮的 CPI 值分布相

似,均随深度呈降低趋势。由图 8 可知,随着时间的推移,逐渐增大的 CPI-ket 值指示气候变干,干旱条件下微生物活性降低,CPI 值增大,这与逐渐变暖干的现代暖期气候是吻合的。正烷酮 ACL-ket 与正构烷烃 P_{aq} (图 4) 呈现相反的分布特征,而 M1 中 ACL-ket 和 P_{aq} 分布相似。ACL-ket 值分布于 26.6 ~27.6 之间,且随深度降低,M1 中正烷酮主要来源于泥炭藓类植物,与微生物作用关系不大,正构烷烃和正烷酮的 ACL 呈现相反的分布趋势也支持这一结论,故 M1 中降低的 ACL-ket 与干旱温暖的气候环境相关。M2 和 M3 中 ACL-ket 与 ACL 分布相似,进一步论证了正烷酮与正构烷烃存在成因联系,由此可以推断正烷酮是从正构烷烃衍生而来的,能够记录当前泥炭序列中的古环境变化(Ortiz et al. , 2011;Zheng Yanhong et al. ,2011)。M2 中 ACL-ket 呈现高值且随深度逐渐降低,对应适宜陆生植物生长的温暖、偏干旱气候。M3 中 ACL-ket 值偏低,且随深度降低,与 M3 中随深度降低的 ACL 和增大的 P_{aq} 一样,均指示寒冷干旱的气候环境,这是由于微生物作用增强导致,也可能是莎草科类植被增加,使得深部泥炭中正构烷烃以 C_{27} 甚至更短链化合物占主导。图 8 中 ACL-ket 和 ($K_{23} + K_{25}$)/($K_{27} + K_{29} + K_{31}$) 呈现较好的负相关性,M1 中 ($K_{23} + K_{25}$)/($K_{27} + K_{29} + K_{31}$) 值随深度由 0.2 增至 0.7,与 P_{aq} 的分布明显相反,指示适宜生长于温暖干燥环境的锈色泥炭藓富集。M2 中 ($K_{23} + K_{25}$)/

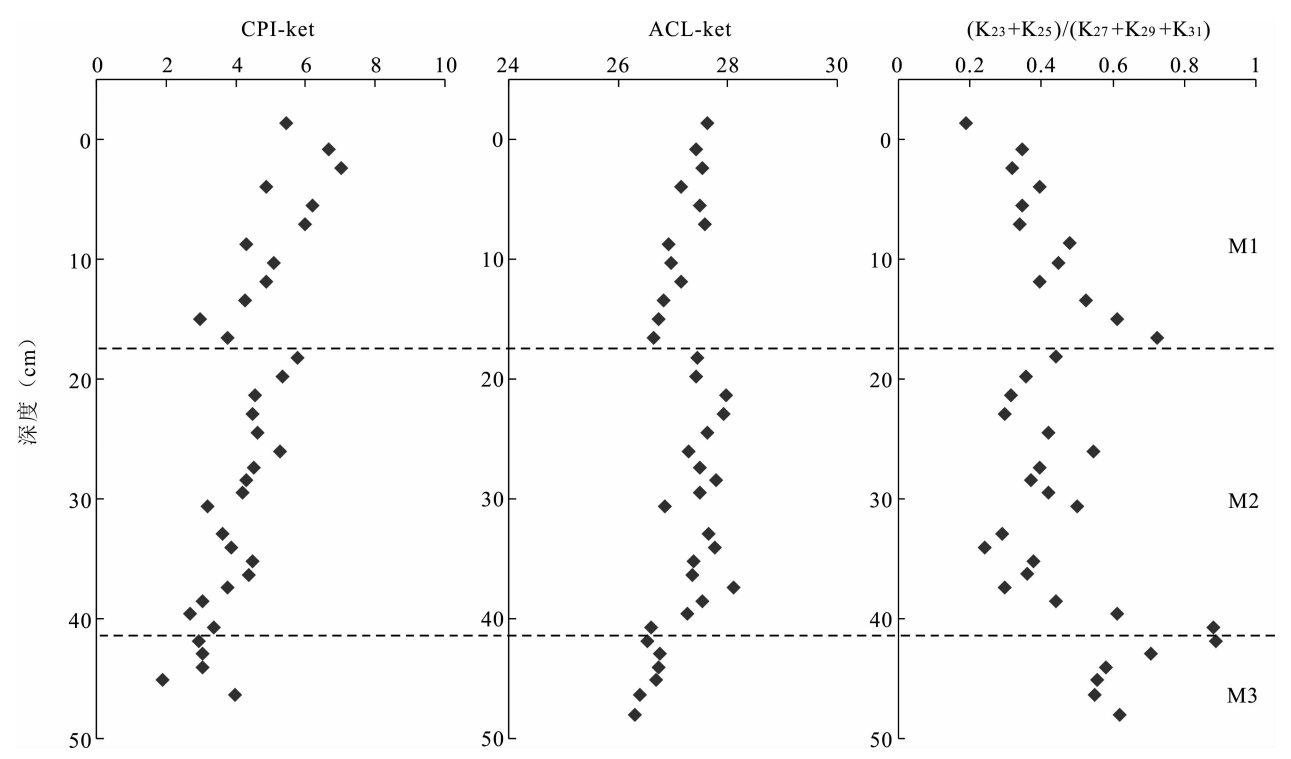


图 8 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭柱正烷酮指标 CPI-ket、ACL-ket 和 $(K_{23} + K_{25}) / (K_{27} + K_{29} + K_{31})$ 分布特征

Fig. 8 Distributions of *n*-alkan-2-one proxies of CPI-ket, ACL-ket and $(K_{23} + K_{25}) / (K_{27} + K_{29} + K_{31})$ in Mildred peat core in the Athabasca region, Canada

$(K_{27} + K_{29} + K_{31})$ 值随深度降低,指示适宜陆生植物生长的温暖、偏干旱气候。剖面下段 $(K_{23} + K_{25}) / (K_{27} + K_{29} + K_{31})$ 值随深度先增大后减小,最大值达到 0.8,指示寒冷、干湿交替的气候条件。由上述分析可知,正烷酮可以作为重建过去气候变化的指标,进一步证实了能够基于脂类生物标志物研究近千百年来的古气候演变历史。

6 其他脂类分子记录的古气候信息

泥炭脂类分子中正烷醇、脂肪酸、甾类、萜类等也能够应用于研究泥炭地古植被演化和气候变化。泥炭中烷醇类含量相对较低,总浓度随深度发生变化,但与植被并没有表现出明显的相关关系。Baker et al. (2016)提出泥炭序列中部分正烷醇发生了成岩作用,有机质指纹特征部分被次生微生物标志物叠加。沉积物中正烷醇化合物成因复杂,不仅与母体物源性质有关,而且还受生物化学和地球化学作用的影响(Duan Yi, 2002; Zheng Yanhong et al. , 2007)。由于本次实验缺少衍生化操作,泥炭中仅检测到短链脂肪酸($<C_{22}$),基本检测不到 C_{22} 以上的中-长链脂肪酸,通过脂肪酸的分布判断其物源以浮游植物或细菌为主,与正构烷烃物源解析的结论存

在矛盾。大多数甾类、萜类化合物广泛存在于不同种类的植物中,一些甾萜类分子在沉积过程中经历了微生物改造作用和成岩转化作用,但目前关于甾类、萜类化合物的成因、转化及其古气候环境意义的研究鲜有报道。作者系统研究了 Mildred 泥炭柱中极性甾类、萜类化合物的分布特征(He Dashuang et al. , 2018b),发现倍半萜、五环三萜酮、五环三萜醇和五环三萜烯等化合物在顶部富集,它们的来源可能与泥炭藓和高等植物均存在联系。大多数甾类化合物来源不具体,根据其分布特征及其与成炭植物输入进行对比,发现丰度较高的 C_{28} 、 C_{29} 和 C_{30} 甾类主要来源于高等植物,中部富集的 γ -谷甾醇、菜油甾醇和豆甾烷-3,5,22-三烯等也属于陆源高等植物来源;上述结论与根据正构烷烃推断的成炭植物来源是吻合的。本文根据甾类、萜类化合物的分布,结合前述直链烷基化合物的分析结果,初步探讨甾类、萜类分子对古气候的指示意义。

研究区泥炭样品总离子流图中(图 9,以 Mildred 泥炭柱为例),甾类、萜类化合物丰度较高,明显高于直链无环类化合物,典型甾类、萜类化合物的质谱图及分子构型如图 10 所示。 γ -谷甾醇、 α -生育酚等化合物浓度最高,为 $1.24 \times 10^{-6} \sim 142.95 \times$

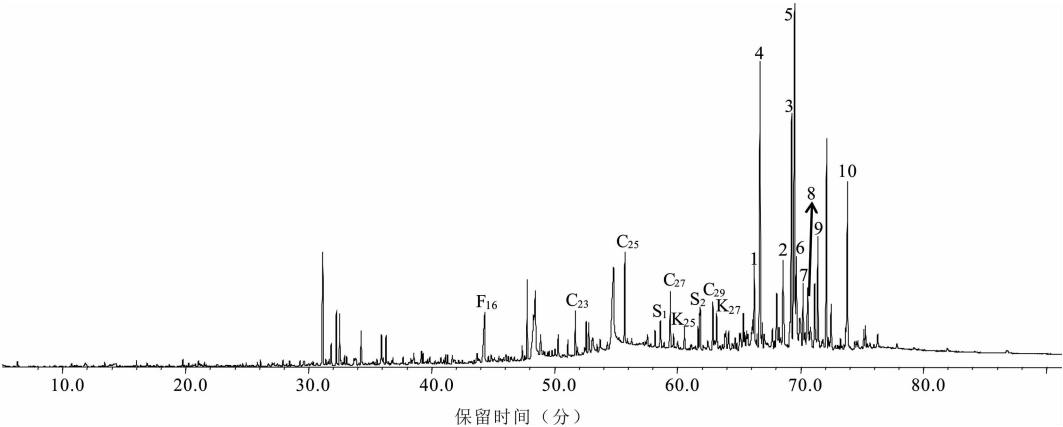


图 9 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭样品(0.82cm)总离子流图(TIC)甾萜类化合物鉴别
Fig. 9 Diagram of total ion chromatogram and the identification of polar compounds in the Mildred bog
(Sample: 0.82cm) in the Athabasca region, Canada

S1—标样角鲨烷;S2—标样胆甾烷-d4;F16—C₁₆-脂肪酸;C₂₃—C₂₃-正构烷烃;K₂₅—C₂₅-正烷酮;编号 1—菜油甾醇;2—豆甾醇;3—D-弗瑞德齐墩果-14-烯-3-酮;4—α-生育酚;5—γ-谷甾醇;6—弗瑞德-3-酮;7—齐墩果烯-12-烯-3-酮;8—α-香树脂醇;9—羊毛甾醇乙酸酯;10—胆甾醇-[7,8-a]-环丁烷,3-甲基-6-氧代-2'-甲基
S1—squalane;S2—cholestane-d4;F16—C₁₆-fatty acid;C₂₃—C₂₃-n-alkane;number 1—Campesterol;2—Stigmasterol;3—D-Friedoolean-14-en-3-one;4—α-Tocopherol;5—γ-Sitosterol;6—Friedelan- 3-one;7—Olean-12-en-3-one;8—β-Amyrin;9—Lanosta-8, 24-dien-3-ol, acetate, (3β)-;10—Cholestano[7,8-a]cyclobutane, 3-methoxy-6-oxo-2'-methylene

10^{-6} 和 $0.92 \times 10^{-6} \sim 234.76 \times 10^{-6}$, 其分布均随深度增加而减小。五环三萜类的浓度大多分布在 $0 \sim 20 \times 10^{-6}$, 其中 β-香树脂醇浓度最低, 最大值仅为 2.2×10^{-6} , 菜油甾醇和豆甾醇浓度分别为 $0 \sim 49.08 \times 10^{-6}$ 和 $0.34 \times 10^{-6} \sim 22.05 \times 10^{-6}$, 羊毛甾醇的浓度最低。甾烯中豆甾-3,5,22-三烯和豆甾-3,5-二烯浓度分别为 $0.52 \times 10^{-6} \sim 22.25 \times 10^{-6}$ 和 $0.50 \times 10^{-6} \sim 8.17 \times 10^{-6}$, 甾酮中豆甾-4-烯-3-酮的浓度为 $0.46 \times 10^{-6} \sim 14.6 \times 10^{-6}$ 。五环三萜类以 C₃₀ 五环三萜醇、C₃₀ 五环三萜酮和奥利烯醇(C₃₀)等含量较高, 主要来源于陆源高等植物(Duan Yi, 2001;Huang Xianyu et al., 2008)。本研究中检测到的大多是植物源的萜类化合物, 没有检测到微生物细菌来源的藿类化合物, 与实验中缺乏衍生化步骤有关。Rontani et al. (2006)在泥炭沉积中检测到了生育酚和 γ-内酯化合物, 认为 γ-内酯是生育酚自氧化作用的产物。Mildred 泥炭柱中 γ-内酯和生育酚的分布模式十分相似, γ-内酯的浓度($0 \sim 8.41 \times 10^{-6}$)明显低于生育酚, 且随深度逐渐降低。γ-内酯/生育酚比值为 $0.02 \sim 0.17$ (图 11), 该值随深度增加而增大, 剖面顶部值最小, 底部出现最大值, 表明随着深度增加, 生育酚自氧化作用增强, 使得 γ-内酯/生育酚比值增大。一般在潮湿环境下, 微生物作用增强, γ-内酯含量增加, 导致 γ-内酯/生育酚比值增大;现代暖期以来, Mildred 泥炭柱中 γ-内酯/

生育酚比值先减小后增加, 可能与气候由潮湿向干旱转变有关;小冰期期间气候干旱, 使得 M3 中 γ-内酯/生育酚比值呈降低趋势。

Mildred 泥炭柱样品中甾类化合物以 C₂₈、C₂₉ 和 C₃₀ 甾醇为主, 基本没有检测到 C₂₇ 甾醇。沉积物中原始生物输入的差异是造成甾醇类分布不同的主要原因(Ying Guangguo et al., 2002), 一般 C₂₇ 甾醇可能起源于细菌, 而 C₂₈ 和 C₂₉ 甾醇来自高等植物, 甾醇的分布代表了以陆源高等植物为主的植被输入特征(Duan Yi, 2001;López-Días et al., 2010)。甾酮的成因是不确定的, 已有研究认为甾酮是由甾醇经微生物氧化作用而形成, 一些甾酮也可以直接来源于植物体(Serebrennikova et al., 2015)。泥炭样品中检测到了丰富的甾酮, 以 C₂₉ 甾酮为主, 同样反映出陆源高等植物的输入特征, 这表明甾酮和甾醇均可以作为指示沉积环境的生物标记物(Duan Yi, 2002)。

Mildred 泥炭柱样品中甾醇的丰度明显高于甾酮, C₂₉ 甾酮/C₂₉ 甾醇比值分布于 $0.08 \sim 0.64$ 之间, 随深度先减小后增大, 与甾醇/甾类化合物含量比值呈相反的趋势(图 11)。泥炭样品中甾酮/甾醇、甾醇/甾类化合物比值与植被输入具有较好的对应关系, M1 中 C₂₉ 甾酮/C₂₉ 甾醇比值随深度呈略微降低趋势, C₂₉ 甾酮含量整体随深度降低, M1 中该值最大, 说明 C₂₉ 甾酮与泥炭藓的输入有关, 而 M1 中以

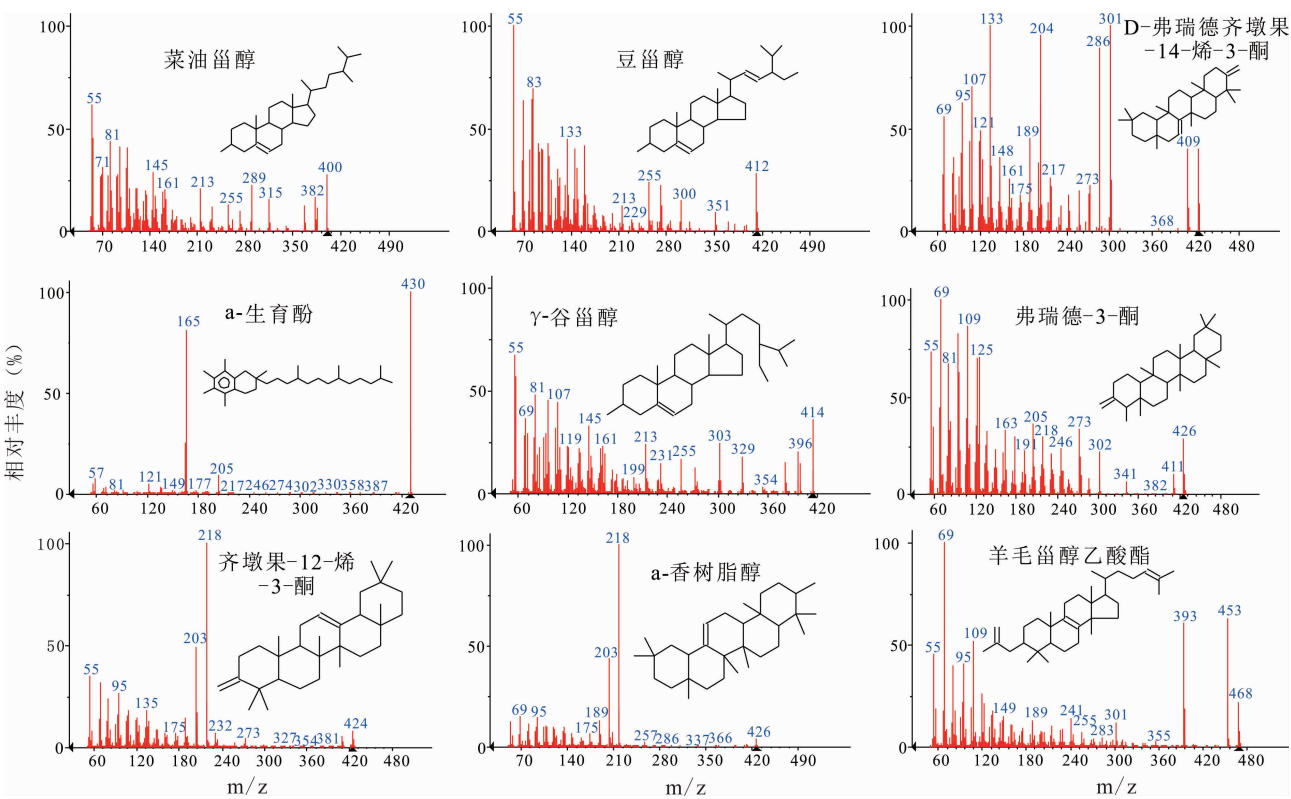


图 10 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭柱典型甾萜类化合物质谱图及分子构型

Fig. 10 Mass spectra of representative terpenoids and steroids and their molecular configurations in the Mildred bog in the Athabasca region, Canada

喜干的锈色泥炭藓发育, C_{29} 甾酮/ C_{29} 甾醇随深度逐渐降低, 与气候由干旱向潮湿转变有关。M2 和 M3 中甾酮的形成可能与甾醇的微生物氧化作用有关, C_{29} 甾酮/ C_{29} 甾醇随深度逐渐增大, 剖面底部达最大值; M2 中气候相对温暖潮湿, 微生物作用增强, 使得 C_{29} 甾酮/ C_{29} 甾醇比值逐渐增大; M3 中由于经历埋藏时间较长, 微生物作用使得 C_{29} 甾酮/ C_{29} 甾醇比值继续增大。甾醇的分布与甾酮不同, 以 γ -谷甾醇和豆甾醇为例, 其含量随深度呈先增大后减小的分布特征, M2 中含量达到最大, 底部呈现最低值, 说明在相对潮湿的气候环境下甾醇含量有所增加。甾醇/甾类化合物含量比值随深度逐渐降低, M2 至 M3 中下降幅度明显增大, 可能与微生物作用有关, 相对潮湿温暖的气候环境导致微生物作用增强, 甾醇向甾酮等转化, 使得甾醇/甾类化合物比值降低。目前关于泥炭脂类中甾类、萜类化合物及其代用指标与气候变化响应关系的研究较为缺乏, 有待在后续工作中进一步深入研究。

7 结论

(1) JPH4、Mildred 和 McMurray 泥炭柱中脂类

化合物的分布与植被发育类型和气候变化密切相关。由于区内发育的锈色泥炭藓种类特殊, 多形成于干旱环境且呈 C_{31} 正构烷烃优势分布, 一些常用的正构烷烃指标在本区应用存在矛盾, 如 C_{23}/C_{31} 、 C_{27}/C_{31} 、 C_{23}/C_{25} , 而 ACL 、 P_{aq} 、 P_{wax} 等指标更能够有效判断植被输入特征和气候变化; 有效地揭示了 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 这一新指标对泥炭有机质物源输入和气候环境的指示意义。

(2) 现代暖期以来 (1990 年以来), 正构烷烃指标 P_{aq} 和 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 呈现较高值, 指示适宜锈色泥炭藓发育的温暖干旱的气候条件; 现代暖期早期 (1900 年以来), 陆源高等植物和狭叶泥炭藓共存于干-湿交替的环境下, P_{aq} 和 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 均表现为低值。JPH4 泥炭柱记录了小冰期期间寒冷干旱的气候环境, 莎草科等陆生维管植物发育。

(3) 正烷酮主要来源于相应正构烷烃的微生物氧化作用, 与正构烷烃指标 P_{aq} 、 P_{wax} 和 $C_{23}/(C_{27} + C_{31})$ 对比表明, 利用正烷酮指标 $CPI-ket$ 、 $ACL-ket$ 和 $(K_{23} + K_{25})/(K_{27} + K_{29} + K_{31})$ 指示区内气候变化是可行的。

(4) 甾类、萜类化合物能够初步用于表征泥炭沉

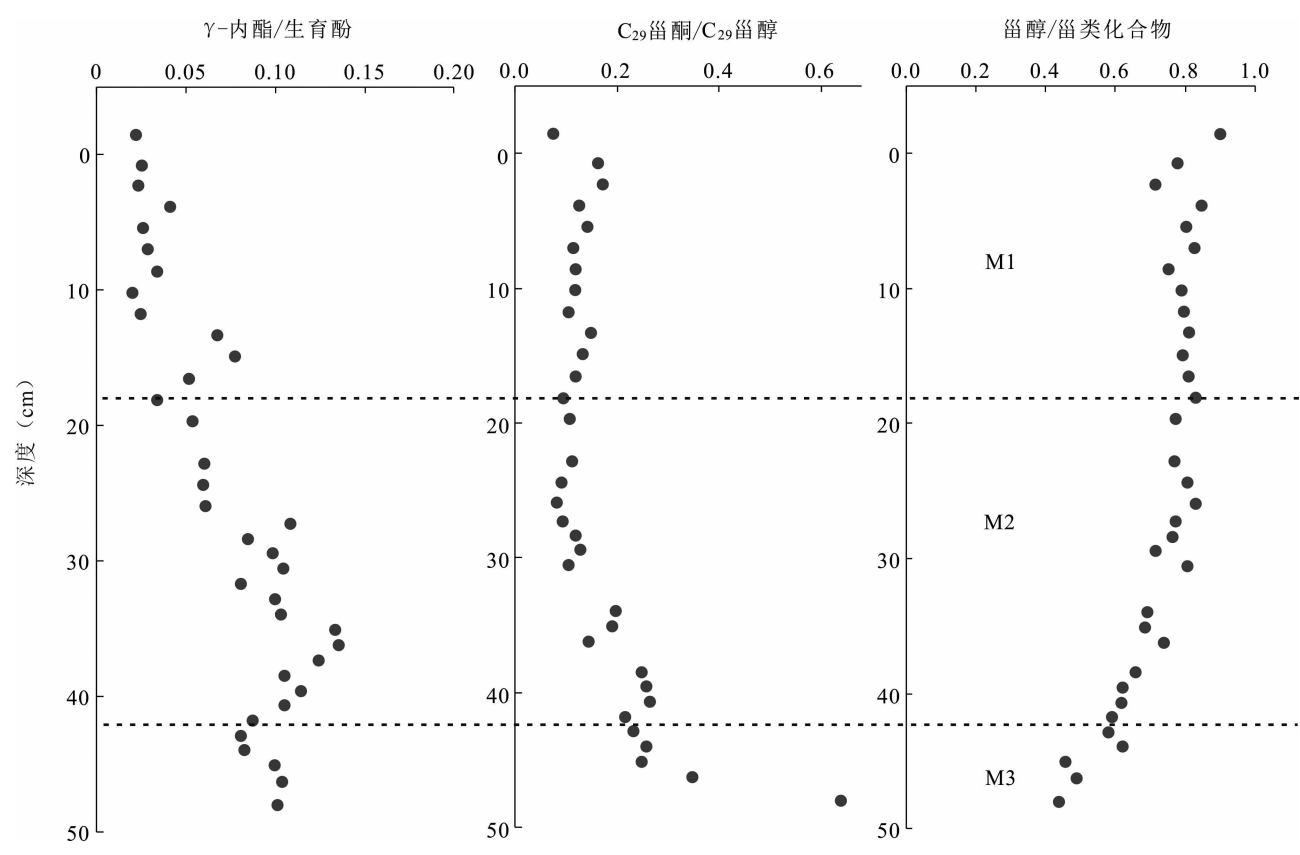


图 11 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭柱甾、萜类指标分布特征

Fig. 11 Distributions of steroid and terpenoid proxies in Mildred peat core in the Athabasca region, Canada

积时期的气候演化过程,其中 γ -内酯/生育酚、 C_{29} 甾酮/ C_{29} 甾醇、甾醇/甾类化合物等指标用于指示区域气候的干湿冷暖变化,微生物作用可能是影响这些指标的重要因素。关于甾类、萜类分子对古气候指示意义的研究有待进一步深入。

注 释

① University of Alberta, Department of Renewable Resource. 2016. Peatland vegetation and geochemical records from northern Alberta show a shift in the importance of forcing factors since the onset of the Little Ice Age.

References

Andersson R A, Kuhry P, Meyers P, Yngve Z. 2011. Impacts of paleohydrological changes on *n*-alkane biomarker compositions of a Holocene peat sequence in the eastern European Russian Arctic. *Organic Geochemistry*, 42(9):1065~1075.
Baker A, Routh J, Roychoudhury A N. 2016. Biomarker records of palaeoenvironmental variations in subtropical Southern Africa since the late Pleistocene: Evidences from a coastal peatland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 451: 1~12.
Bao Kunshan, WangGuoping, Zhao Hongmei, Xing Wei, Lv Xianguo. 2012. Peat deposits and their evidence of climatic changes: A review. *Journal of Stratigraphy*, 36(1): 97~108 (in Chinese with English abstract).
Beilman D W, Vitt D H, Halsey L A. 2001. Localized permafrost peatlands in western Canada: definition, distributions, and degradation. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 33(1):

70~77.
Bingham E M, McClymont E L, Valiranta M, Mauquoy D, Evershed R P. 2010. Conservative composition of *n*-alkane biomarkers in *Sphagnum* species; implications for palaeoclimate reconstruction in ombrotrophic peat bogs. *Organic Geochemistry*, 41(2): 214~220.
Bush R T, Mcinerney F A. 2013. Leaf wax *n*-alkane distributions in and across modern plants; Implications for paleoecology and chemotaxonomy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 117:161~179.
Charman D J, Barber K E, Blaauw M, Langdon P G, Mauquoy D, Daley T J. 2009. Climate drivers for peatland palaeoclimate records. *Quaternary Science Reviews*, 28:1811~1819.
Charman D J, Beilman D W, Blaauw M, Booth R K, Brewer S, Chambers F M. 2013. Climate-related changes in peatland carbon accumulation during the last millennium. *Biogeosciences* 9, 929~944.
Davies L J, Appleby P, Jensen B J L, Magnan G, Boudreau G, Noernberg T, Shannon B, Shotyk W, Bellen V S, Zaccane C, Forese G D. 2018. High-resolution age modelling of peat bogs from northern Alberta, Canada, using pre-and post-bomb, ^{14}C , ^{210}Pb and historical cryptotephra. *Quaternary Geochronology*, 47, 138~162.
Duan Yi. 2001. Pentacyclic triterpenoid ketones in peat from Gannan Marsh, China. *Chinese Science Bulletin*, 46(17): 1433~1435.
Duan Yi. 2002. Compositional features of lipid compounds in sediments from Gannan Marsh, China. *Geochimica*, 2002, 31 (6): 525~531 (in Chinese with English abstract).
Edwards T W, Birks S J, Luckman B H, MacDonald G M. 2008. Climatic and hydrologic variability during the past millennium in the eastern Rocky Mountains and northern Great Plains of western Canada. *Quaternary Research*, 70(2): 188~197.
Eglinton T I, Eglinton G. 2008. Molecular proxies for

- paleoclimatology. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(1-2): 0~16.
- Ficken K J, Barber K E, Eglinton G. 1998. Lipid biomarker, $\delta^{13}\text{C}$ and plant macrofossil stratigraphy of a Scottish montane peat bog over the last two millennia. *Organic Geochemistry*, 28(3-4): 217~237.
- Ficken K J, Li B, Swain D L, Eglinton G. 2000. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes. *Organic Geochemistry*, 31(7-8): 745~749.
- Halsey L A, Vitt D H, Zoltai S C. 1995. Disequilibrium response of permafrost in boreal continental western Canada to climate change. *Climatic Change*, 30(1): 57~73.
- He Dashuang, HouDujie, Huang Haiping. 2018a. Geochemistry of *n*-alkanes and *n*-alkan-2-ones in Mildred peat bog from the Athabasca Region, Canada. *Acta Sedimentologica Sinica* 36, 89~98(in Chinese with English abstract).
- He Dashuang, Huang Haiping, Hou Dujie. 2018b. Composition of lipid compounds in the peat deposit in Mildred bog from the Athabasca region, Canada. *Geoscience*, 32(05): 938~952(in Chinese with English abstract).
- Huang Meng, Li Mingchen, Fan Yanyu, Zhang Xiaofei, Li Jijun, Xu Qinnian. 2019. Late cenozoic climate and sedimentary environment evolution of the northwestern coast of the Bohai Bay revealed by borehole QHJ01. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 899~914(in Chinese with English abstract).
- HuangXianyu, Xie Shucheng, Zhang Chuanlun L, Jiao Dan, Huang Junhua, Yu Jianxin, Jin Fang, Gu Yansheng. 2008. Distribution of aliphatic des-A-triterpenoids in the Dajiuhu peat deposit, southern China. *Organic Geochemistry*, 39(12): 1765~1771.
- Huang Xianyu, Xie Shucheng. 2016. An overview of the molecular paleoclimate in peat deposits. *Quaternary Sciences*, 36(3): 666~673(in Chinese with English abstract).
- Huang Xianyu, Zhang Zhiqi, Wang Hongmei, Chen Xu, Zhu Zongmin, Gu Yansheng, Qin Yangmin, Liu Jinling, Wang Yinchun. 2017. Overview on Critical Zone Observatory at Dajiuhu Peatland, Shennongjia. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 42(06): 1026~1038(in Chinese with English abstract).
- Huang Yongsong, Bol Roland, Harkness Douglas D. 1996. Postglacial variations in distributions, ^{13}C and ^{14}C contents of aliphatic hydrocarbons and bulk organic matter in three types of British acid upland soils. *Organic Geochemistry*, 24(3): 273~287.
- Inglis G N, Naafs B D A, Zheng Y, Rizzuti A M. 2018. Distributions of geohopanooids in peat: Implications for the use of hopanoid-based proxies in natural archives. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 224(1): 249~261.
- Li Suping, Li jinfeng, Wu Zhenjie, Yao Jianxin. 2016. Climatic and Environmental Changes of the Lugu Lake Area During the Late Holocene. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1998~2012(in Chinese with English abstract).
- López-Días V, Borrego Á G, Blanco C G, Arboleya M, López-Sáez J A, López-Merino L. 2010. Biomarkers in a peat deposit in Northern Spain (Huelga de Bayas, Asturias) as proxy for climate variation. *Journal of Chromatography A*, 1217(21): 3538~3546.
- Luckman B H, Wilson R J S. 2005. Summer temperatures in the Canadian Rockies during the last millennium; a revised record. *Climate Dynamics*, 24(2-3): 131~144.
- Magnan G, van Bellen S, Davies L, Froese D, Garneau M, Mullan-Boudreau G, Zaccane C, Shotyk W. 2018. Impact of the Little Ice Age cooling and 20th century climate change on peatland vegetation dynamics in central and northern Alberta using a multi-proxy approach and high-resolution peat chronologies. *Quaternary Science Reviews*, 185: 230~243.
- Mann M E, Zhang Z, Rutherford S, Bradley R S, Hughes M K, Shindell D, Ammann C, Faluvegi G, Ni F B. 2009. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326, 1256~1260.
- Nichols J E, Booth R K, Jackson S T, Pendall E G, Huang Y. 2006. Paleohydrologic reconstruction based on *n*-alkane distributions in ombrotrophic peat. *Organic Geochemistry*, 31, 1505~1513.
- Nichols J E, Huang Y. 2007. $\text{C}_{23}\text{-C}_{31}$ *n*-alkan-2-ones are biomarkers for the genus *Sphagnum* in freshwater peatlands. *Organic Geochemistry*, 38(11): 1972~1976.
- Nott C J, Xie S, Avsejs L A, Maddy D, Chambers F M, Evershed R P. 2000. *n*-Alkane distributions in ombrotrophic mires as indicators of vegetation change related to climatic variation. *Organic Geochemistry*, 31(2-3): 231~235.
- Ortiz J E, Diaz-Bautista A, Aldasoro J J, Torres T, Gallego J L R, Moreno L, Estébanez B. 2011. *n*-Alkan-2-ones in peat-forming plants from the Roñanzas ombrotrophic bog (Asturias, northern Spain). *Organic Geochemistry*, 42(6): 586~592.
- Otto A, Simoneit B R T. 2001. Chemosystematics and diagenesis of terpenoids in fossil conifer species and sediment from the Eocene Zeitz formation, Saxony, Germany. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(20): 3505~3527.
- Rontani J F, Marty J C, Miquel J C, Volkman J K. 2006. Free radical oxidation (autoxidation) of alkenones and other microalgal lipids in seawater. *Organic Geochemistry*, 37(3): 354~368.
- Serebrennikova O V, Strelnikova E B, Duchko M A, Preis Y I. 2018. Influence of north climatic conditions on the peat lipids composition. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 138(1): 012016.
- Serebrennikova O V, Strelnikova E B, Preis Y I, Duchko M A. 2015. Influence of peat formation conditions on the transformation of peat deposit organic matter. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 27(1): 012036.
- Vitt D H, Halsey L A, Bauer I E, Campbell C. 2000. Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 37(5): 683~693.
- Wolfe BB, Karst-Riddoch T L, Vardy S R, Falcone M D, Hall R I, Edwards T W. 2005. Impacts of climate and river flooding on the hydro-ecology of a floodplain basin, Peace-Athabasca Delta, Canada since AD 1700. *Quaternary Research*, 64, 147~162.
- Xie Shucheng, Evershed R P. 2001. Information of climate change and biological succession recorded in peat molecular fossils. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 863~866(in Chinese).
- Xie Shucheng, Yin Hongfu, Liu Deng, Qiu Xuan. 2018. On Development from Paleontology to Geobiology: Overview of Innovation and Expansion of Application Fields. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 43(11): 3823~3836(in Chinese with English abstract).
- Xue Jiantao. 2018. The distribution of sedimentary lipids in wetland and their paleo-environment implications: Take *n*-alkanes and microbial hopanoids as an example. China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Yang Guifang, Chen Zhenghong, Zhang Huijuan, Jia Qing. 2018. Paleoclimatic Variations in Ningjinpo Area since Late Pleistocene as Indicated by *n*-Alkanes. Editorial Committee of Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 43(11): 4001~4007(in Chinese with English abstract).
- Yang Guifang, Xie Shucheng, Huang Junhua, Chen Zhongyuan. 2008. Microbial characteristics and vegetation changes as recorded in lipid biomarker of Tianmushan peat bog. *Earth science frontiers*, 15(4): 170~177(in Chinese with English abstract).
- Ying Guangguo, Kookana Rai S, Ru Yingjun. 2002. Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. *Environment international*, 28(6): 545~551.
- Zheng Yanhong, Zhou Weijian, Meyers P A, Xie Shucheng. 2007. Lipid biomarkers in the Zoigê-Hongyuan peat deposit: indicators of Holocene climate changes in West China. *Organic Geochemistry*, 38(11): 1927~1940.

Zheng Yanhong, Zhou Weijian, Meyers P A. 2011. Proxy value of *n*-alkan-2-ones in the Hongyuan peat sequence to reconstruct Holocene climate changes on the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Chemical Geology*, 288(3-4): 97~104.

Zhou Weijian, Zheng Yanhong, Meyers Philip A, Timothy Jullf A J, Xie Shucheng. 2010. Postglacial climatechange record in biomarker lipid compositions of the Hani peat sequence, northeastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(1-2): 37~46.

参 考 文 献

鲍锟山, 王国平, 赵红梅, 邢伟, 吕宪国. 2012. 泥炭沉积与气候变化的泥炭记录. *地层学杂志*, 36(1): 97~108.

段毅. 2002. 甘南沼泽沉积脂类生物标志化合物的组成特征. *地球化学*, 31(6): 525~531.

何大双, 侯读杰, 黄海平. 2018a. 加拿大阿萨巴斯卡地区泥炭正构烷烃与正烷酮地球化学特征. *沉积学报*, 36(05): 1049~1058.

何大双, 黄海平, 侯读杰, 张鹏辉. 2018b. 加拿大阿萨巴斯卡地区 Mildred 泥炭柱脂类化合物的组成特征. *现代地质*, 32(05): 938~952.

黄猛, 李明辰, 樊航宇, 张晓飞, 李继军, 胥勤勉. 2019. 渤海湾西北岸 QHJ01 孔记录的晚新生代气候与沉积环境演化. *地质学报*, 93(4): 899~914.

黄咸雨, 谢树成. 2016. 泥炭沉积分子古气候研究进展. *第四纪研究*, 36(3): 666~673.

黄咸雨, 张志麒, 王红梅, 陈旭, 朱宗敏, 顾延生, 秦养民, 刘金铃, 汪迎春. 2017. 神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展. *地球科学*, 42(06): 1026~1038.

李素萍, 李金锋, 武振杰, 姚建新. 2016. 泸沽湖地区晚全新世气候和环境演变. *地质学报*, 90(8): 1998~2012.

谢树成, Evershed R P. 2001. 泥炭分子化石记录气候变迁和生物演替的信息. *科学通报*, 46(10): 863~866.

谢树成, 殷鸿福, 刘邓, 邱轩. 2018. 再谈古生物学向地球生物学的发展: 服务领域的拓展与创新. *地球科学*, 43(11): 3823~3836.

薛建涛. 2018. 湿地沉积脂类分布特征及古环境意义-以植物正构烷烃和微生物藿类为例. *中国地质大学*.

杨桂芳, 陈正洪, 张慧娟, 贾晴. 2018. 宁晋泊晚更新世以来气候变化的正构烷烃分子记录. *地球科学*, 43(11): 4001~4007.

杨桂芳, 谢树成, 黄俊华, 陈中原. 2008. 天目山泥炭类脂物记录的微生物特征和植被演替. *地学前缘*, 15(4): 170~177.

Paleo climate information recorded by peat lipid molecules in the Athabasca region, Canada

HE Dashuang^{1,2,3)}, HUANG Haiping^{* 2,3)}, HOU Dujie²⁾, ZHANG Penghui¹⁾

1) Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang, Hebei, 065000, China;

2) School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing, 100083, China;

3) Department of Geoscience, University of Calgary, Alberta, T2N 1N4, Canada;

* Corresponding author : hhp@cugb.edu.cn

Abstract

Lipid molecules of JPH4, Mildred and McMurray peat core samples from the Athabasca region of northern Alberta, were systematically analyzed in order to improve the understanding of the relationship between peat lipid distribution and its response to the vegetation evolution and climate change. In accordance with the analysis results of *n*-alkanes, *n*-alkan-2-ones, steroids, terpenoids and other molecular compounds, combined with chronological data, the paleoclimatic evolution in the study area in the past millennium has been reconstructed. In the modern Recent Warming (since 1990 cal AD), *Sphagnum fuscum* developed widely in the Athabasca region under warm and dry climate. In the early Recent Warming, terrestrial plants and *S. cuspidata* species coexisted in the peatland with periods of dry-humid oscillations observed from 1900 to 1990 cal AD. As Little Ice Age period can be dated in the JPH4 core, the climate became cold and dry after 1560 cal AD when *C*₂₇-dominated vascular plants accumulated in the JPH4 core. These conclusions are consistent with the information documented in local hydrological and paleoclimate data. *Sphagnum fuscum*, which favors dry conditions and has *C*₃₁ *n*-alkane dominant distribution, is a special plant type of *Sphagnum* sect. *Acutifolia*. ACL, *P*_{aq}, *C*₂₃/(*C*₂₇ + *C*₃₁) *n*-alkane proxies are optimally selected to interpret paleoclimate alternations recorded by different types of peat-forming plants. In the representative Mildred peat core, microbial oxidation of related *n*-alkanes is the primary source of *n*-alkan-2-one. CPI-ket, ACL-ket and (*K*₂₃ + *K*₂₅)/(*K*₂₇ + *K*₂₉ + *K*₃₁) *n*-alkan-2-one are useful proxies to record paleoclimate variations during peat deposition. The abundance of steroids and terpenoids is significantly higher than that of linear-chain acyclic compounds, proxies of γ -lactone/tocopherols; *C*₂₉ sterone/*C*₂₉ sterol, sterol/steroids are preliminarily applied to indicate regional dry-wet and cold-warm changes in the study area, and microbial alternation may be a factor affecting these proxies.

Key words: Athabasca; peat; lipid molecular; paleovegetation; paleoclimate

《地质学报》(中文版)“地学新知”、“地学科普”公开征集 稿件简则

《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

为提高刊物与学科前沿研究领域的交互,让读者更多了解和普及地学新知,增加作者投稿热情与读者阅读兴趣,《地质学报》(中文版)拟增设“地学新知”和“地学科普”两个栏目,现向国内外各地学研究机构专家学者们公开征集相应稿件。稿件具体要求如下。

一、“地学新知”和“地学科普”栏目征稿范围:

“地学新知”栏目征稿范围为地质学研究领域的新知识、新发现、新成果、新理论、新问题等,文章要侧重“新”字,围绕学科前沿领域研究展开撰写,并向国内外地质学界推荐展示;

“地学科普”栏目征稿范围为地质学各细分研究领域的最新成果,特别注意稿件科普对象并非普通大众,而是要求作者从自身所处分支学科出发,向地质学其他分支学科的研究人员“科普”自己细分领域的研究成果,以期达到交流学习的目的。

二、《地质学报》编辑部与作者约定如下:

1. 作者应保证稿件不一稿两投,并对所投稿件拥有无可争议的著作权。

2. “地学新知”和“地学科普”两个栏目的稿件均需通过网上办公系统进行网上投稿,且投稿时一定要在备注中注明所投栏目,《地质学报》(中文版)投稿网址为 <http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>。请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word 文件中(07 版以下为宜,请作者自留原始文件,以备修改,详细投稿办法见网站说明)。投稿成功与否以编辑部网站收稿回执为准。

3. 不得将投向本编辑部的稿件同时投至其他刊物,否则视为一稿两投。

4. 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内,不应将稿件另投他刊。

5. 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文 Word 文档、清绘好的 CorelDRAW 图件等。

6. 稿件文责自负,若做实质性修改,须征得作者同意。

三、对投稿内容格式的要求:

每篇文章应包含下列要素:文章题目(不多于 25 个汉字)、作者、作者单位、作者简介、正文、图表(可有可

无)、致谢(可有可无)等。重要内容说明如下:

1. **正文:**排版后一般不超过 4 页(依纯文字计,大约相当于不超过 5000 字,若有图表等,则字数应更少些)。作者自行按行文逻辑划分章节。

2. **图件:**不是必须,但若有图件,请严格按照下列要求进行绘制。

① 凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开出版的最新地理底图上。

② 图件请用 CorelDraw X4 版本格式最好(且不是导入的)。若为其他软件编成的图件,需提供 600 dpi 的 TIF 格式的文件。彩色照片(包括图版)需提供 600 dpi 以上的 JPG 格式文件。

③ 图件大小:排半栏时:图宽不超过 80mm,最高 245mm;排通栏时:图宽不超过 168mm,最高 245mm;整版卧排:图宽不超过 235mm,最高 170mm(以上高度均含图名和说明)。中文字体请用宋体,英文和数字请用 Time New Roman,字号为 6~8p 大小,均不加粗。

④ 图件不同区域可用通用地质花纹(或符号)区分,除照片外,一般不用灰度图。若必须用灰度图表示不同区域时,灰阶应尽量少,阶差应尽量地大。

⑤ 图件若为彩色照片者,可选择集中制成图件。须注意,照片按我刊要求出版时必须彩印。

⑥ 图号、表号应按顺序编写,并在正文中也应按相应顺序全部出现。

3. **参考文献:**可不列参考文献,若必须列参考文献,请严格按照下列要求进行编排,且一定保证正文中引用的文献与参考文献列表中的文献保持一一对应。

本刊采用著者年制,正文中用圆括号列出第一作者和年代,同一作者同时列出多篇文献时,次序按年代先后。

所有文献均放在“参考文献”标题之下,按中文、英文、日文、西文、俄文、其他文排列。文献均按“第一作者姓名字母音序+年代”先后排列。各条参考文献的具体格式请参考我刊相应要求编写。

4. **注释:**非必须。引用非公开出版物时在文后单列注释一栏,格式与参考文献相同。参考文献及注释详细格式可见《地质学报》修改注意事项。

5. **作者简介:**主要介绍作者的学术经历,包括资助项目、姓名、性别、学历、职称、研究方向、Email 等,具体格式可参考我刊已发表的最新文章。