

青藏高原清水河多年冻土区湖沼环境变迁*

林清 王国尚 程国栋

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室 兰州 730000)

耿安松 张干 傅家谟

(中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室 广州 510640)

提要 1994年10月,利用钻探取样方法获得了位于青藏高原多年冻土区的清水河孔深为8.3m的Q1孔湖沼沉积物样品,对该孔50—640cm样品的有机地球化学分析结果表明,剖面样品中有机质具有相同的成熟度,且具有有机碳、氢指数、可溶有机质和族组成相同的变化特征。样品正烷烃碳数分布在C16—C35之间,主峰碳为C23,高碳数烷烃呈明显的偶奇优势,表明它们来源于植物。OEP值大于2,Pr/Ph均大于1,反映沉积环境处于氧化条件。藿烷和甾烷化合物组成随样品特征不同而异。由于藿烷和甾烷来源的特殊性,因而其组成可以反映湖沼中生物的特征。研究表明,剖面上有机质特征的差别能较好地记录该地湖沼环境的变迁。

关键词 青藏高原 冻结湖沼沉积 有机质地球化学 湖沼环境变迁

学科分类号 P343.3

湖沼沉积中有机质组成特征可以作为一种指示沉积环境变化的记录,其分辨率受到有机质的来源、沉积后期演化、沉积过程中的生物化学作用、沉积物内的迁移和现代生物扰动的影响。然而,位于青藏高原多年冻土区的冻结湖沼沉积处于冻结状态,因而在其沉积过程中具有相对缓慢的生物化学作用、极小有机质的迁移和后期演化等特征,使冻结湖沼沉积物中的有机质保存完好并含有大量的环境信息,成为研究湖沼环境变化的理想对象。本文通过研究青藏高原清水河多年冻土湖沼沉积物的有机地球化学特征,从而了解该地湖沼环境的变化。

1 区域概况及研究方法

清水河地区(35°26' N, 93°35' E)位于青藏高原腹部多年冻土分布区,平均海拔4500m左右,年平均气温为-5℃左右,年平均地温为0—-1.0℃,多年冻土厚度为10—50m不等。流经该区的清水河是楚玛尔河高平原上主要河流之一。河谷两岸发育着大小不一的众多湖塘,最大的湖塘是清水湖,其直径达2km,深10m以上。湖塘和清水河内生

* 国家自然科学基金“青藏高原浅层冻结湖相沉积有机质地球化学和古环境”资助项目,495721117;广州有机地球化学国家重点实验室基金“冻土湖相沉积有机质地球化学”资助项目, OGL-9403号。林清,男,出生于1966年1月,副研究员, Fax: 0086-0971-8885241

收稿日期:1998-04-05,收修改稿日期:1999-04-10

长着大量的沉水草本植物,是湖沼有机质的主要来源。广布于清水河两岸和湖塘周围的冻结湖沼沉积物表面,现处于干旱无植被状态。这些特征表明,冻结湖沼沉积物中有机质来源单一,且没有后期的污染,因而能够真实地记录湖沼环境的变迁。

通过钻孔取样,获得了孔深 8.3m 清水河 1 号孔(以下简称 Q1 孔)湖沼沉积冻土芯。有机碳分析采用有机质热解分析仪分析,通过有机质热解分析结果计算出(HI),即氢指数(HI) = 挥发性烃类含量(S_2)/总有机碳(TOC) × 100。可溶有机质采用二氯甲烷(CH_2Cl_2)—甲醇(CH_3OH)混合溶剂(体积比为 6:4)进行索氏抽提而获得,并通过柱色谱分离得到族组成。烷烃组成及生物标志物组成由 GC-MS 分析确定。

2 研究结果

2.1 沉积特征、有机碳含量、氢指数和可溶有机质含量

图 1 为综合剖面图和所获得的一些有机质参数随深度的变化。钻孔 50—90cm 为灰白至灰黄色亚粘土;90—135cm 为灰白至灰黄色亚粘土,含有植物根茎,其中在 110—120cm 处有草炭层;135cm 左右出现冻土(冻土上限);135—170cm 为饱冰灰白至灰黄色亚粘土,160cm 有草炭层;170—220cm 为粉砂;220—320cm 为饱冰富含有机质的灰白色亚粘土,其中在 220—250cm 有粉砂质粘土夹层;320—340cm 为饱冰粉砂质粘土;350—640cm 为饱冰粉砂。沉积剖面中亚粘土沉积代表了温暖和湿润的环境,粉砂沉积代表了干旱的环境。沉积剖面中的年龄由 ^{14}C 分析得出。将实测数据同深度进行线性相关分析, R 平方为 0.93,表明实测年代同剖面深度具有一定的相关性。

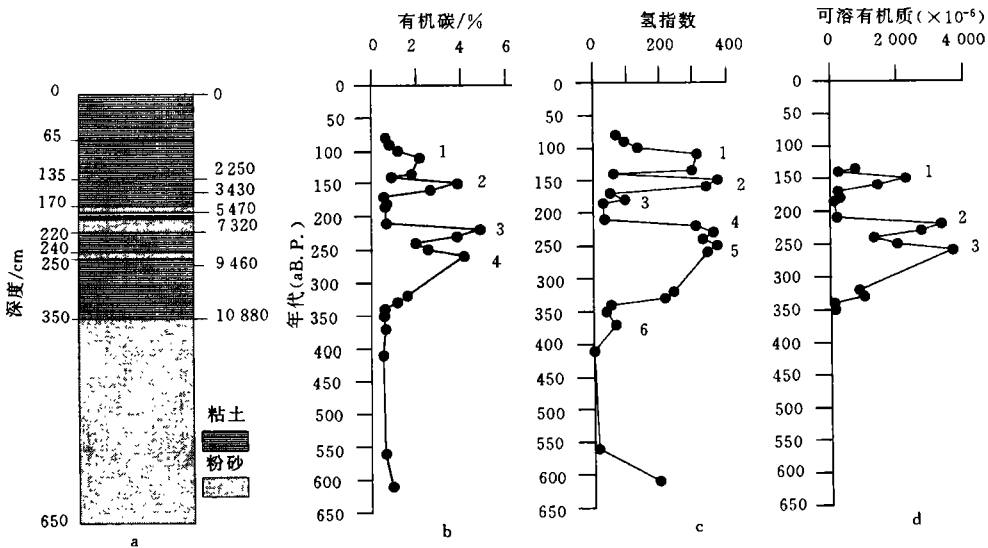


图 1 清水河 Q1 孔剖面 0—650cm 岩性(a)、有机碳含量(b)、氢指数(c)和可溶有机抽提物含量(d)变化特征

Fig. 1 Variations in deposition facies(a), total organic carbon(TOC)(b), hydrogen index(c) and extracted organic matter (EOM)(d) in the core samples of Qingshuihe Q1 borehole from 0 to 650cm

剖面上有机碳含量变化在 0.11%—4.47% 之间。有机碳含量的高低首先取决于环境生物的生产能力,其次取决于沉积环境的保存条件。清水河冻结湖沼沉积物中有机质主

要来源于湖沼中生长的植物,并由于冻土低温的影响,在沉积后的变化较小,因此有机碳含量的高低反映了当时湖区生态环境的生产能力。温湿的气候条件下,生物生长繁盛,产生的有机质相对较多,因而在沉积物中有机碳含量高;冷干气候条件下,生物贫乏,有机碳含量低。

有机碳含量同沉积相有一定的关系。在粘土沉积物中有机碳含量高,而在粉砂沉积物中有机碳含量低。这是由于粘土沉积物形成于温暖和湿润的气候条件的湖沼沉积,有机质输入高且在细颗粒沉积物中保存相对较好,而粉砂沉积物形成于干冷的条件气候下,有机质输入低且在粗颗粒沉积物中保存相对较差的缘故。

Q1 孔样品中有机质热解分析结果表明,有机质的最大热解温度均在 410°C 左右,说明剖面中有机质的演化程度极为相近。

剖面中氢指数变化在 0—369 之间。氢指数受有机质来源、演化程度和氧化还原条件控制。在相同演化程度下,水较深时,沉积物相对缺乏氧,因而氢指数高;水较浅时,氢指数就低。

Q1 孔剖面中可溶有机质含量在 109×10^{-6} — $3\ 631 \times 10^{-6}$ 之间。可溶有机质含量取决于有机质丰度、来源和演化程度。在相同演化程度下,有机抽提物含量受类型、丰度和氧化还原条件所控制。同植物来源的有机质相比,微生物及浮游生物来源的有机质含有较多的可溶有机质;由于氧化作用可以较快导致沉积物中有机物聚合为腐殖质,因而在氧化条件下可溶有机质含量低。有机碳含量和有机抽提物含量在剖面中的峰值出现位置相同(图 1b 中峰 1、2、3、4 和图 1d 中峰 1、2、3),说明湖沼环境生产能力高,气候较为温暖、湿润。氢指数出现 6 次峰值(图 1c 中峰 1—6),大的变化同有机碳含量变化基本一致(峰 1、2、4 和 5),但小的峰值有一些差别(峰 3、6)。由于氢指数不仅同有机碳含量有关,而且同有机质类型以及氧化还原条件有关,这就产生有机碳含量不高而氢指数相对较高的结果。水位较深,沉水植物相对减少而浮游生物增多,氧含量降低,能产生并保存较多分子量低的有机化合物,因而氢指数增高,这种现象同湖沼演化过程相一致。

2.2 可溶有机质族组成

图 2 为可溶有机质含量随深度的变化特征。样品的烷烃含量为 2×10^{-6} — $28 \times$

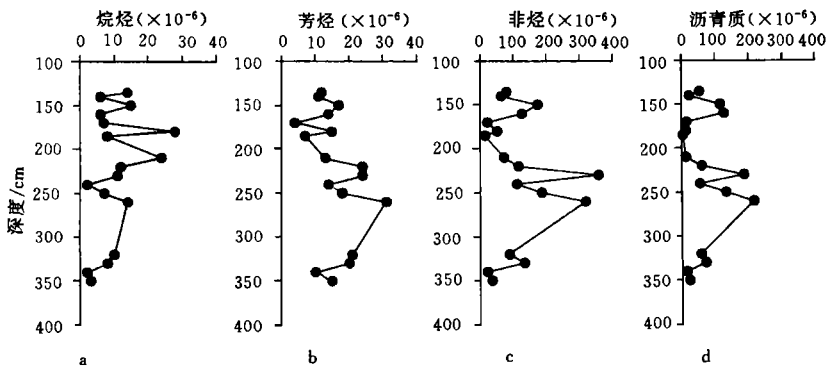


图 2 清水河 Q1 孔剖面 100—400cm 烷烃(a)、芳烃(b)、非烃(c)和沥青质(d)变化特征

Fig.2 Variations in aliphatic(a), aromatic(b), polar(c) and asphaltic(d) fractions in the core samples of Qingshuihe Q1 borehole from 100 to 400cm

10^{-6} , 芳烃含量为 $4 \times 10^{-6} - 31 \times 10^{-6}$, 非烃为 $16 \times 10^{-6} - 356 \times 10^{-6}$, 沥青质为 $5 \times 10^{-6} - 214 \times 10^{-6}$ 。烷烃和芳烃含量均较低, 而非烃和沥青质含量高。这是由于冻结湖沼沉积物中化学反应速度慢、有机质成熟度(演化程度)低、烃类中的极性组分含量高而造成的。

族组成随深度有基本相同的变化趋势, 均在 140—180cm、220—240cm 和 240—320cm 之间出现峰值。非烃和沥青质的含量变化最大, 具有明显的环境指示意义。一般来说, 烃类含量高的地段, 有机质的输入高而且保存条件好, 代表温暖的湖沼环境。同来源于植物的有机质相比, 来源浮游生物和细菌的有机质中含有高的烷烃组分, 因而水位相对深一些。

有机质族组成芳烃、非烃和沥青质中含有大量的色素, 从颜色来看, 这些色素可能为叶绿素, 它们的存在说明有机质主要来源于植物。

2.3 生物标志物组成

2.3.1 烷烃

烷烃的组成和特征可以反映有机质的来源。尽管烷烃在多种有机体中均存在, 但不同来源的有机质有不同的烷烃组成。如浮游植物以短链的正烷烃(C15 和 C17)为主, 具有一定的偶碳优势; 高等植物来源的正烷烃以长链的正烷烃(C27 和 C29)为主, 具有明显的偶碳优势。此外由于植烷和姥鲛烷的来源均是叶绿素上的植醇, 植醇在还原条件下加氢得到植烷, 而在氧化条件下脱羧形成姥鲛烷, 因而烷烃中的植烷和姥鲛烷的比值可以指示环境的氧化还原程度。表 1 是通过 GC-MS 分析得到的烷烃组成特征。

表1 烷烃的组成特征、OEP¹⁾ 和姥鲛烷/植烷

Tab.1 Composition of normal alkanes, OEP and the ratio of Pr/Ph

样号	深度 (cm)	岩性	烷烃分布范围和特征	主峰碳	OEP	Pr/Ph
Lin1-1	135	亚粘土	C17—C33, 单峰	C23	6.88	1.06
Lin1-3	150	亚粘土	C17—C33, 单峰	C23	7.83	1.04
Lin1-4	160	亚粘土	C16—C33, 单峰	C23	5.63	1.78
Lin1-5	170	粉砂	C16—C33, 单峰	C27	2.44	2.65
Lin1-6	180	亚粘土	C16—C33, 单峰	C23	5.53	1.57

1) $OEP = [(C_i + 6C_{i+2} + C_{i+4}) / (4C_{i+1} + 4C_{i+3})]^{(-1)^{i+1}}$, i 为碳数。

正烷烃的分布特征表明正烷烃主要来源于湖沼沉积中的植物, 具有明显的环境指示意义。L1-1、L1-3、L1-4、L1-6形成于水相对较深的温暖的湖沼环境, 样品中的植物叶片较宽, 植物为沉水植物; L1-5样品是形成于较干旱寒冷、水较浅环境的湖沼, 由于干旱气候条件, 植物为了保持水分, 因而叶片变窄。

正烷烃中 C23 主峰植物软木脂中 C24 的 ω -羟基酸氧化脱羧形成; C27 来自于 C28 脂肪酸氧化脱羧形成 (Eglinton, 1968)。

正烷烃 OEP 均大于 2, 呈明显的奇偶优势。在成熟度相同的情况下, 由于氧化作用, 导致烷烃的氧化分解, 使得烷烃的奇偶优势减弱, 因而 OEP 值的大小是指示沉积物中氧化还原条件的一个标志。同样姥鲛烷 (Pr) 和植烷 (Ph) 的比值被用来指示沉积环境的氧化还原条件, 当比值大于 1 时表示沉积环境是氧化环境, 而当其比值小于 1 时, 沉积环境是还原环境。从表 1 中可以得出, 样品的 Pr / Ph 均大于 1, 说明沉积环境是氧化条件, 同湖沼沉积处

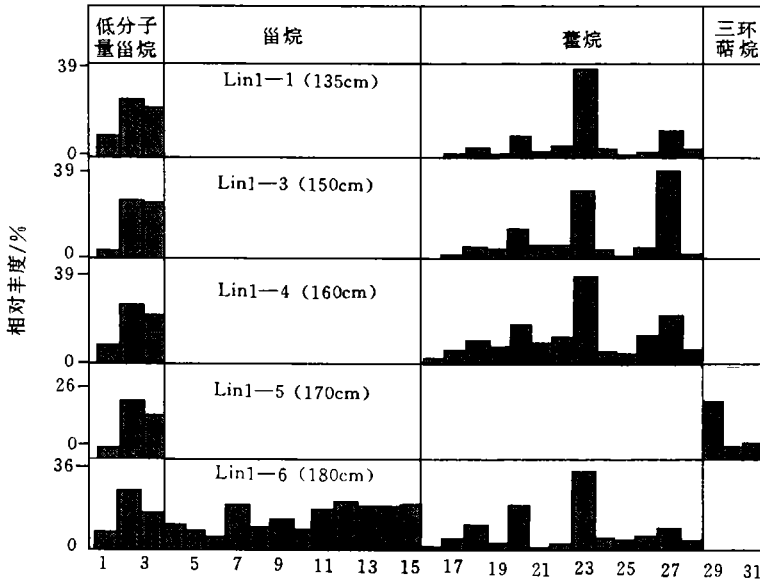


图3 生物标志物分布

Fig.3 Distribution of biomarks

1. 雄甾萜烷; 2. 孕甾萜烷; 3. 4-甲基甾萜烷; 4. $14\alpha, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20S); 5. $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20R); 6. $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20S); 7. $14\alpha, 17\alpha$ -胆甾萜烷 (20R); 8. 24-甲基- $14\alpha, 17\alpha$ -胆甾萜烷 (20S); 9. 24-甲基- $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20R); 10. 24-甲基- $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20S); 11. 24-甲基- $14\alpha, 17\alpha$ -胆甾萜烷 (20R); 12. 24-乙基- 14α -胆甾萜烷 (20S); 13. 24-乙基- $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20R); 14. 24-乙基- $14\beta, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20S); 15. 24-乙基- $14\alpha, 17\beta$ -胆甾萜烷 (20R); 16. 18α (H)-22, 29, 30-三降藿烷 (Ts); 17. 17α (H)-22, 29, 30-三降藿烷 (Tm); 18. 17β (H)-22, 29, 30-三降藿烷; 19. 17α (H), 21β (H)-30-降藿烷; 20. 藿烷 17(21)-烯; 21. 17α (H), 21β (H)-藿烷; 22. 新藿烷 13(18)-烯; 23. 藿烯; 24. 藿烯; 25. 17α (H), 21β (H)-升藿烷; 26. 伽玛蜡烷; 27. 17β (H), 21β (H)-藿烷; 28. 17β (H), 21β (H)-升藿烷; 29. C27 萜烷; 30. C28 萜烷; 31. C29 萜烷

于较高氧逸度沉积环境相一致。由于沉积物的氧化还原条件同水深有一定的关系,因而 OEP 和 Pr / Ph 可用以指示相对的水深变化。

2.3.2 藿烷和甾萜烷系列化合物 图3显示了样品中所检出的生物标志物分布特征。样品中藿烷碳数从 C27—C30, 含有较丰富的藿烯和生物藿烷, 这类化合物在青海湖沉积物中也大量出现(范璞等, 1994), 表明沉积物中有机质成熟度低。Lin1-1, Lin1-3, Lin1-4中藿烷分布基本相同; Lin1-5中没有藿烷, 只有三环萜类化合物; Lin1-6中二者均有出现。藿烷主要来自微生物, 因而具有指示沉积环境的作用。样品 Lin1-5中缺少这类化合物, 主要原因是湖沼水位浅, 气候寒冷, 因而微生物较少。

样品中普遍检出分布极为相似的低分子量的雄甾萜烷、孕甾萜烷和4-甲基甾萜烷化合物, 说明它们具有相同的来源。它们可能均来自湖中生长的生物。仅在样品 Lin1-6中检出系列高分子量的甾萜烷类化合物。

3 结论

清水河冻结湖沼沉积物中有机质的地球化学特征取决于有机质的输入和沉积环境特

点,而这两者湖沼环境的变化有着紧密的联系。在沉积物剖面中,有机质来源于单一的植物且具有相同成熟度,有机碳含量、氢指数、可溶有机质含量和族组成均具有相同的变化趋势,同当时生态环境的生产能力和沉积环境条件关系极为密切,是记录气候和环境变化的理想对象。

从清水河冻结湖沼沉积的有机地球化学特征来看,该地区在 $10\ 880 \pm 200\text{aB.P.}$ 之前,还未形成湖沼沉积。此时在沉积物中,有机碳含量低,表明该地区处于气候寒冷条件下。在此之后,广泛发育湖沼沉积物,气候也出现了冷暖交替的变化,相应的气候温度高期峰值出现的年龄为 $9\ 460 \pm 170$ 、 $7\ 320 \pm 140$ 、 $3\ 430 \pm 100$ 和大约 $1\ 500\text{aB.P.}$;而相应的气候温度低值出现的年龄为 $2\ 250 \pm 90$ 、 $5\ 470 \pm 120$ 和大约 $8\ 000\text{aB.P.}$ 。湖沼沉积物中有机碳含量、氢指数、可溶有机质含量在温暖期相应较高,而在寒冷期相应较低。从氢指数的特点说,湖沼水位较深时其值也相应高,气候相对湿润,因此,在 $10\ 880 \pm 200\text{aB.P.}$ 之后的两个温暖期表现为较长暖湿气候特点,湖沼环境得到较好的发展。

·从对 Q1 孔剖面 135—180cm 沉积物的生物标志物特征看,其间的气候变化为:180cm,气候温暖;170cm,气候干旱寒冷;160—135cm 之间,气候变化不大。相应的水深为:剖面深度 150cm 时 > 剖面深度 135cm 时 \approx 剖面深度 180cm 时 > 剖面深度 160cm 时 > 剖面深度 170cm 时。

以上结果表明,利用多年冻土湖沼沉积有机质可得到较好的湖沼环境变化历史信息,并由有机分子组成特征还可以分辨湖沼水位的变化。

参 考 文 献

- 范璞等, 1994. 青海湖近代沉积物生物地球化学. 北京: 科学出版社, 168—224
- Eglinton G, 1968. Gas chromatographic-mass spectrometric studies of long chain hydroxy acids II. The hydroxy acids and fatty acids of a 5 000-year-old lacustrine sediment. *Tetrahedron*, 24: 5 929—5 941

QINGSHUIHE LIMNETIC ENVIRONMENTAL CHANGE IN THE PERMAFROST REGION OF QINGHAI-XIZANG PLATEAU

LIN Qing, WANG Guo-shang, CHENG Guo-dong

*(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology,
The Chinese Academy of Science, Lanzhou, 730000)*

GENG An-song, ZHANG Gan, FU Jia-mo

*(State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, The Chinese
Academy of Science, Guangzhou, 510640)*

Abstract Organic geochemistry in frozen limnetic sediments can be used to reconstruct the paleoenvironment because of good preservation of organic matter under low temperature. In this work, an 830cm long core sample of the frozen limnetic sediments was collected from Qingshuihe, a typical permafrost region in Qinghai-Xizang plateau, and the organic matter in the core samples from 50—640cm has been studied. The organic matter, which has the same maturity, was mainly derived from the single species of high plant. The content of total organic carbon (TOC), hydrogen index (HI), extracted organic matter (EOM) and the composition of groups have the same variations in this profile, suggesting that at least four warmer climatic periods have occurred in this region. In sediments from 135 to 180cm, the different distributions of normal alkanes, which range from C16—C35 with the maximum of C23 and the remarkable odd-even predominance (OEP), and the different compositions of steranes and hopanes may imply the changes of water depth and environmental moisture and temperature. At the same time, the OEP and Pristane / Phytane (Pr / Ph), which are greater 2 and 1, respectively, indicate that the sedimentary environment was rich in oxygen and had a shallow water depth.

Key words Qinghai-Xizang plateau Frozen limnetic sediments permafrost region Organic geochemistry Limnetic environmental change

Subject classification number P343.3