

藏南沉错沉积物水蚤残体组合对环境变化的响应

朱立平 王君波 Anton Brancelj

(中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; Slovenian National Institute of Biology, Ljubljana 1000, Slovenia; 中国科学院研究生院, 北京 100039. E-mail: zhulp@igsnr.ac.cn)

摘要 利用活塞取样器在藏南沉错获取了连续的沉积岩芯, 选择顶部的 117 cm 岩芯段进行水蚤 (Cladocera) 残体分析. 根据水蚤的种类、数量和生态习性, 从下到上可以将岩芯中水蚤组合划分为 5 个带: CL0 组合 (117~101 cm) 没有发现水蚤; CL1 组合 (101~77 cm, 约公元 1407~1533 年) 出现钻孔中的全部 9 种水蚤, 并达到序列中的最高含量, 反映了在温暖的沉积环境中大量的外来冷水注入和有机质输入, 湖泊宽浅适宜大型水生植物的生长; CL2 组合 (77~29 cm, 约公元 1533~1831 年) 的水蚤数量和种类大大下降, 只有为数不多、环境适应性较强的 *Chydorus sphaericus* 经常存在, 说明了当时的沉积环境非常恶劣; CL3 组合 (29~10 cm, 约公元 1831~1941 年) 的优势水蚤种类与 CL1 组合接近, 但丰度下降, 特别是喜有机碎屑环境的水蚤数量大大降低, 反映了环境有利的条件下, 流域地表的植被发育仍然较差; CL4 组合 (10~0 cm, 约公元 1941 年到现在) 除没有发现浮游型水蚤外, 其他 7 种水蚤均可见到, 稳定的湖泊水温使广温型的水蚤种与窄温型的浅水种相比, 已经失去竞争优势. 该孔水蚤组合反映的环境变化得到其平行孔的介形类组合、环境磁学与相关参数以及硅藻-盐度转换函数研究结果的支持, 反映了青藏高原湖泊沉积中的水蚤组合对沉积环境的敏感性和在环境变化研究中的重要意义.

关键词 湖泊沉积 水蚤 环境变化 藏南地区 沉错

利用湖泊沉积物中的生物指标进行过去环境重建工作日益得到重视. 在这方面, 许多学者利用孢粉、硅藻、介形类等开展了大量的研究工作. 尽管水蚤 (Cladocera) 与硅藻 (Diatom) 一样能够完好地保存在湖泊沉积物中, 用于环境变化研究, 但前者在目前得到研究的程度则远远不如后者^[1]. 利用水蚤进行的环境变化研究在我国基本没有开展. 水蚤是湖泊动物群中经常出现并具有重要意义的一种类型^[2,3]. 这类动物的体长大约在 0.3~3 mm, 普遍生活在淡水或低盐度水体中, 水蚤的出现以及不同种属的富集与湖水深度^[4]、盐度^[5]、营养状况^[6]密切相关. 例如, 一些水蚤喜欢生活在水体的开放表面, 成为浮游动物; 另一些生活在湖水底部, 成为底栖动物. 两种不同类型的水蚤比例变化往往指示了湖水深度的改变^[7]. 在温带的低海拔湖泊中, 大约发现了 5 种浮游型和超过 20 种底栖型的水蚤^[8]. 在高海拔的湖泊中, 其种类和数量大大降低, 已有的研究表明, 就单一湖泊来讲, 只有 1~2 种浮游型和 5 种左右的底栖型水蚤^[9]. 随着湖泊现代沉积过程研究工作的开展, 一些研究者也开始进行了水蚤-环境指标转换函数的研究^[10].

水蚤每次脱羽 (根据种类不同, 一生中大约发生 4~5 次) 或死亡后, 其相应部分的壳质残体就会埋藏

到沉积物中. 这些残体一般具有较好的抗侵蚀分解能力. 沉积物中发现的水蚤残体普遍是其外骨节的壳质部分 (如头部、翅部和后腹) 或具有抗蚀力的虫卵, 这些部分能够表现出水蚤种类的明显特征, 甚至可以用来区分其性别和年龄. 因此, 通过鉴定沉积物中水蚤残体的特征, 可以研究沉积时生活在水体中的水蚤种类和数量, 根据这些水蚤生存的生态条件, 从而重建沉积时的水体环境乃至影响水体的气候环境. 青藏高原与其他高海拔地区一样, 其湖泊中的水蚤种类和数量较少, 有利于进行适应环境的特有种的鉴别和统计. 更重要的是, 由于青藏高原对环境变化非常敏感^[11,12], 其湖泊中水蚤种类和数量必然会对水体的深度和盐度改变产生明显响应, 而这些变化则与气候环境变化密切相关.

1 研究地区状况

用于分析的含水蚤沉积物采自沉错. 沉错位于西藏自治区南部的浪卡子县境内, 地理位置为 28°53'~28°59'N, 90°28'~90°35'E. 目前, 沉错最大长度 11 km, 最大宽度 7.8 km, 湖面面积约 37 km², 最大水深约 31 m (图 1). 沉错及其流域处于喜马拉雅山北麓的温带半干旱地带, 为印度季风的雨影区. 受季风影响, 降水的季节性分布明显, 主要集中在 6~9 月份. 湖

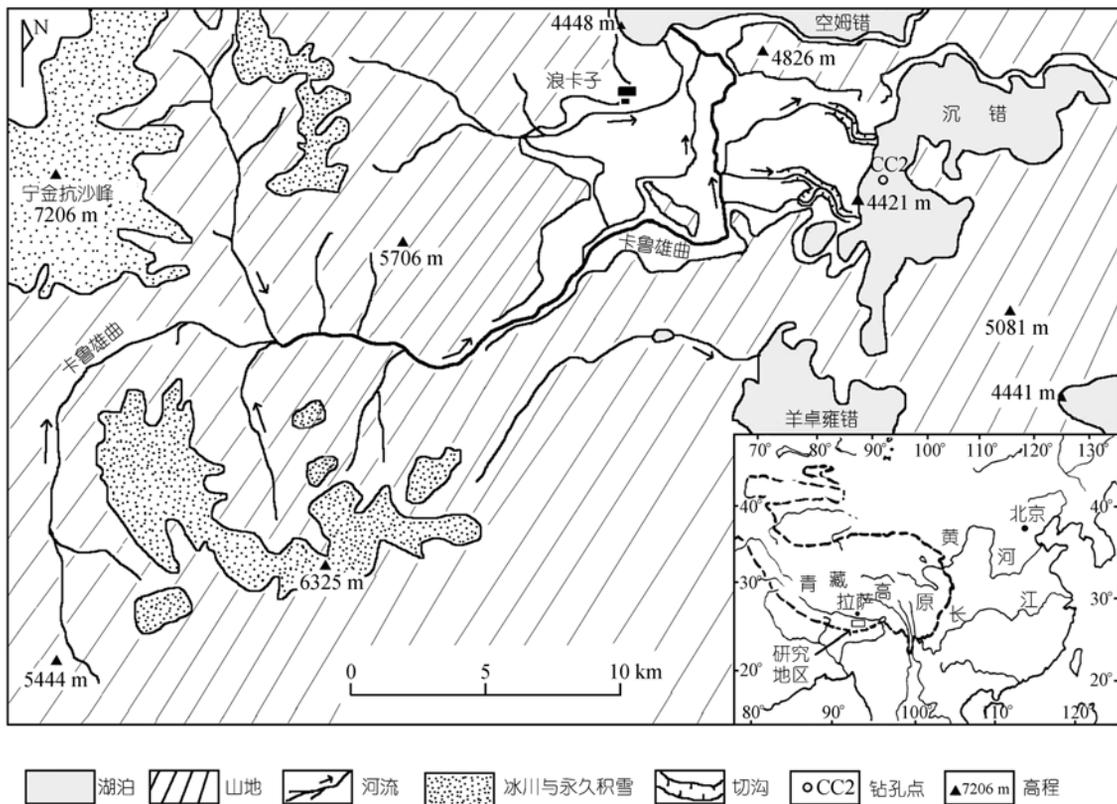


图 1 研究区概况

区年均降水量 372.8 mm, 年均温 2.4 , 湖面蒸发强烈, 年均蒸发量达 2070 mm^[13]. 1974 年、1985 年和 1999 年测得的湖水 pH 值分别为 7.60, 8.75 和 9.10, 相应的矿化度则为 1.02 g·L⁻¹, 1.05 g·L⁻¹ 和 1.20 g·L⁻¹^[14,15], 反映沉错的水体处在萎缩状态, 但仍然属于淡水湖泊. 根据对邻近沉错的羊卓雍错分析^[13], 该湖在研究时段(1974 ~ 1978)维持湖面稳定的水量平衡关系为: 多年平均湖面降水为 230 百万 m³, 陆面补给量为 542 百万 m³, 冰川补给量为 72 百万 m³, 以满足湖面多年平均蒸发 844 百万 m³ 引起的水量消耗, 其中湖面降水、陆面补给量与冰川补给量分别占蒸发消耗量的 27.3%, 64.2% 和 8.5%. 由于羊卓雍错的补给系数为 9.00, 而沉错的补给系数仅为 3.90, 沉错的陆面补给量占蒸发消耗量的比例远远小于羊卓雍错. 如果两个湖泊湖面降水占蒸发消耗量的比例一致, 沉错在陆面补给量比例大大减小的情况下, 其入湖的冰川融水必定成为维持沉错湖面稳定的主要补给来源. 湖泊地貌分析表明, 以枪勇冰川融水为主要补给来源的卡鲁雄曲是目前直接注入沉错的唯一河流.

2 研究材料与方法

进行水蚤分析的样品来自沉错的 CC2 孔, 为该湖 CC1 孔的平行孔, 两孔同时于 1998 年 8 月获取, 其水平距离控制在 1 m 之内, 因此两者可视为同地沉积. 采样位置水深 8 m, 利用活塞取样器在水上平台上获得, 采集的样品以原始状态保存在塑料管中运回实验室. 岩芯柱状样品在室内以 1 cm 间隔进行分样.

已有的研究对沉错 CC1 孔岩芯进行了 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 测试, 结果表明湖芯沉积物的顶部平均沉积速率为 0.16 cm·a⁻¹, 根据沉积物中值粒径与沉积速率间的相关关系(相关系数 0.72)^[16], 推算出该岩芯不同深度处的沉积速率和相应的沉积年代, 每个样品代表的平均年代间距为 6.25±1.75 年, 从而能够根据对不同深度位置的水蚤种类与数量组合分析, 揭示不同时期的环境变化特征.

取岩芯顶部的 117 cm 部分, 每 4 个连续的样品(即每 4 cm)作为一组进行水蚤种属鉴定和数量统计, 共分析了 30 组样品. 在每组样品中称量 1 g 干重物质, 溶解在蒸馏水中后用 40 μm 筛过滤以除去细粒杂质.

将含有水蚤残体的滤后物质收集到试管中后,向试管注入去离子水,使试管内溶液体积达到10 mL.同时,向试管中加入数滴40%的甲醛溶液防止细菌在其中滋生.

在进行水蚤分析前均匀摇动试管以使溶解物质处于悬浮状态.利用移液管从每个样品中提取5份分别放入玻璃皿中,每份体积为1 mL.利用Olympus立体显微镜对镜下物质放大100倍(个别样品放大1000倍)后进行水蚤种属和计数鉴定,鉴定的部分包括翅部、头囊、后腹等.将各个种类不同部分的残体数量合并后计算每个种的数量,最后将统计单位换算为每克干重样品含有的水蚤残体种类与个数.水蚤种类确定参考《中国动物志(节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类)》的分类原则^[17]和斯洛文尼亚国家生物研究所的样品分类.

3 结果

3.1 水蚤在岩芯中的分布与生态特征

沉错CC2孔岩芯中共发现了9类水蚤,它们的形态和生态特征分别见于表1和图2.其中两类(*Alona* sp.和*Ceriodaphnia* sp.)数量较少而且保存条件较差,因此未能鉴定到种.在这9种水蚤中,*Chydorus sphaericus*(圆形盘肠蚤),*Alona affinis*(近亲尖额蚤)和*Acroperus harpae*(镰形顶冠蚤)出现最多,尽管它们随深度发生数量的改变,但是在每个组合中均占主要的成分.*C. sphaericus*是最常见的水蚤种,它在湖底、小池塘的沿岸和富营养的低地湖泊中均有分布,并且适应的温度范围较广^[19].*A. affinis*和*A. harpae*具有相似的生态渊源关系,它们多生长在具有水生植被(大型植物和纤维状藻类)并富含有机质碎屑的水体环境,能够适应一定的水深^[9].

Ceriodaphnia sp.和*Bosmina longirostris*(长额象

鼻蚤)是浮游生物的代表种.它们通常生活在常年保持数米深的水体中^[8].*Ceriodaphnia* sp.仅在一个样品中有发现,并且为鞍状壳体,其出现存在着很大的偶然性.这类水蚤的残体可以被风或候鸟从长距离以外带来,并不一定为当地的产物.

Graptolebris testudinaria(龟状笔纹蚤)和*Eurycercus lamellatus*(薄片宽尾蚤)一般生活在浅水湖泊或湖滨地带,生活环境中富含有机质碎屑^[8,18].值得注意的是,*E. lamellatus*通常也是适应温暖环境的种.岩芯中的*Alona* sp.的残体数量较少而*Alonella nana*(矮小锐额蚤)则频繁出现.*A. Nana*可以生活在富含有机质的环境中,在相对较浅的湖水和湖滨地带均有分布^[8].

3.2 岩芯中水蚤组合的划分

根据不同样品中水蚤的种类和含量,图3给出了其随钻孔深度(沉积时间)的变化.不同样品中,水蚤的种类出现0~9种的变化,水蚤残体的数量也具有0~600 No.g⁻¹(干重)的波动.钻孔中出现的9种水蚤,除*Bosmina longirostris*和*Ceriodaphnia* sp.为浮游型外,其他的均为底栖滨岸型.在全部30组样品中,浮游型水蚤仅在其中6组出现,因此采集样品的地点大多数时期应该为滨岸环境所控制.

根据水蚤种类与丰度的分布,可以将其自下而上分为CL0, CL1, CL2, CL3和CL4五个组合(图3).CL0组合出现在岩芯最下部的4组样品(117~114, 113~110, 109~106, 105~102 cm),该带中没有发现任何水蚤.目前作者不能断定到底是沉积环境造成的影响还是样品本身鉴定中的问题,由于样品较少,无法进行重复鉴定.CL1组合是出现水蚤种类和数量最多的组合,全部9种水蚤均有出现,最大丰度出现在97 cm深度,接近600 No.g⁻¹.*Chydorus sphaericus*,

表1 沉错湖芯沉积物中的水蚤类型、出现组数与生态特征

种	出现于样品组数	生态特征 ^[8,18]
<i>Acroperus harpae</i> (Baird, 1836)	18	底栖滨岸型, 生活在大型植物中, 喜冷水
<i>Alona affinis</i> (Leydig, 1860)	16	底栖滨岸型, 生活在大型植物中
<i>Alonella nana</i> (Baird, 1843)	4	底栖滨岸型, 喜有机碎屑物环境
<i>Alona</i> sp.	3	
<i>Bosmina longirostris</i> (O.F. Müller, 1776)	6	浮游型, 广温(1~25 °C), 在贫/富营养湖泊中均有出现, 耐2~6 ppm 盐度
<i>Ceriodaphnia</i> sp.	1	浮游型, 喜温水
<i>Chydorus sphaericus</i> (O.F. Müller, 1785)	22	底栖滨岸型, 广温(1~33 °C), 在 pH 3.2~10.6 水中均能生存
<i>Eurycercus lamellatus</i> (O.F. Müller, 1776)	7	底栖滨岸型, 喜有机碎屑物环境, 广温型
<i>Graptolebris testudinaria</i> (Fischer, 1848)	9	底栖滨岸型, 喜有机碎屑物环境

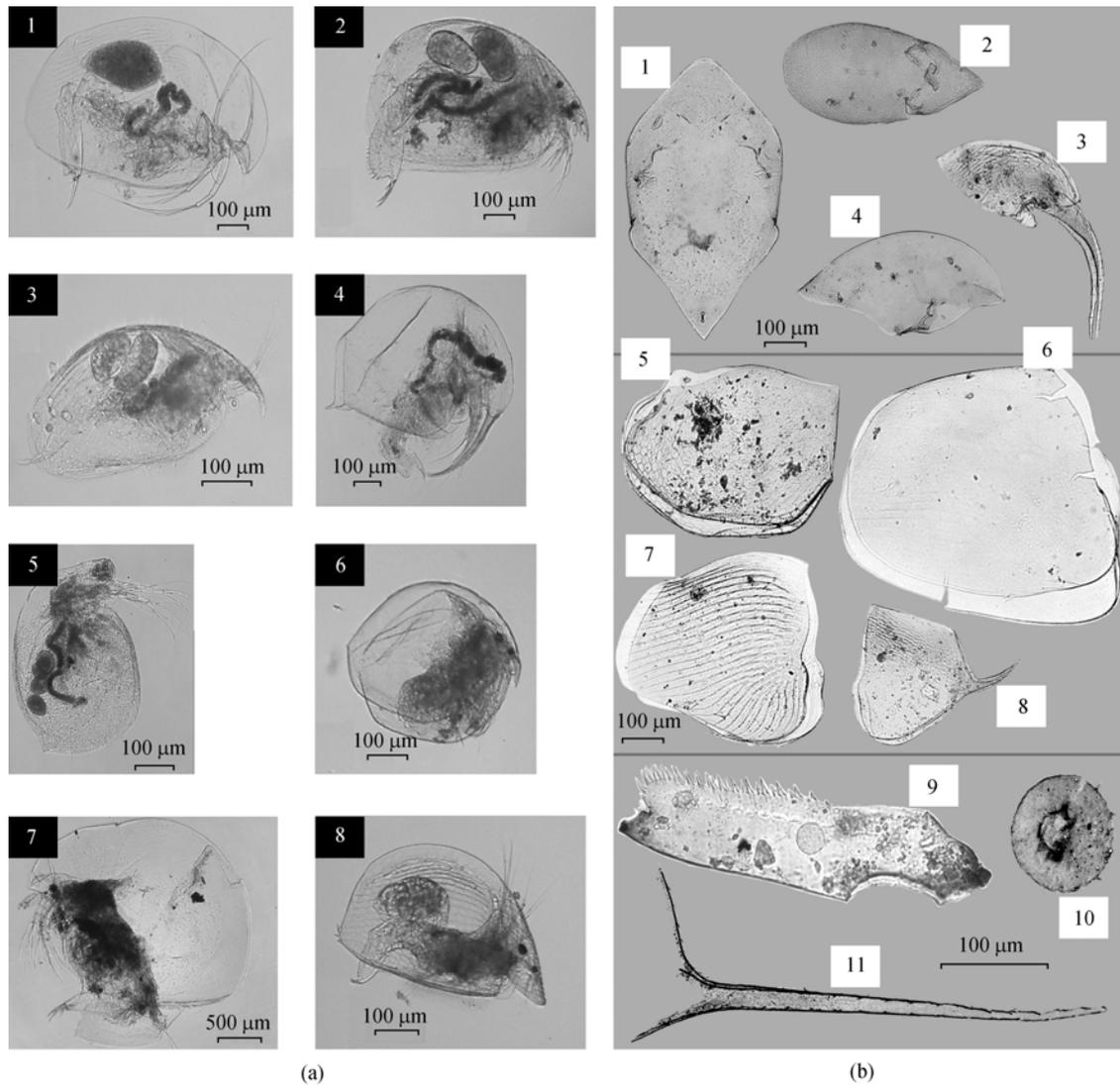


图 2 藏南沉错 CC2 钻孔出现的水蚤种类显微图示

(a) 沉错湖泊与钻孔中水蚤的现生种显微形态图示(1~8 黑底白字编号)1. *Acroperus harpae*; 2. *Alona affinis*; 3. *Alonella nana*; 4. *Bosmina longirostris*; 5. *Ceriodaphnia Reticulata*; 6. *Chydorus sphaericus*; 7. *Eurycerus lamellatus*; 8. *Graptolebris testudinaria*. (b) 沉错钻孔沉积物中保存的水蚤残体各部分形态(1~11 白底黑字编号)头囊-1. *Alona affinis* (Leydig, 1860); 2. *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller, 1785); 3. *Eubosmina longispina* (Leydig, 1860); 4. *Acroperus harpae* (Baird, 1836). 翅部-5. *Chydorus sphaericus* (O. F. Müller, 1785); 6. *Alona affinis* (Leydig, 1860); 7. *Acroperus harpae* (Baird, 1836); 8. *Eubosmina longispina* (Leydig, 1860). 后腹-9. *Acroperus harpae* (Baird, 1836); 10. 原生动动物外壳(卵壳). 尾椎-11. *Daphnia longispina* (O.F. Müller, 1785)

*Acroperus harpae*和*Alona affinis*为该组合的优势种, 丰度普遍超过 100 No.g^{-1} , 它们均为底栖滨岸型. 其中*Acroperus harpae*和*Alona affinis*常常生活在大型植物中间, *Chydorus sphaericus*适应温度变幅较大. 值得注意的是, 该组合中浮游型的*Bosmina longirostris*达到 68 No.g^{-1} , 并出现零星的*Ceriodaphnia* sp. CL2 组合的明显特征是水蚤数量和种类较少. 除广温型的*Chydorus sphaericus*经常出现外, 仅底栖滨岸型的

Acroperus harpae、*Alona affinis*和浮游型的*Bosmina longirostris*在其中的 5 个样品中出现, 而且各类水蚤在每个样品中的数量不超过 30 No.g^{-1} . CL3 组合出现 5 种水蚤, *Chydorus sphaericus*、*Acroperus harpae*和*Alona affinis*仍然为该组合的优势种, 但丰度基本不超过 100 No.g^{-1} . 同时, 喜碎屑环境的*Graptolebris testudinaria*和*Eurycerus lamellatus*丰度分别较CL1 组合下降了约 40%和 75%. CL4 组合中没有浮游型的

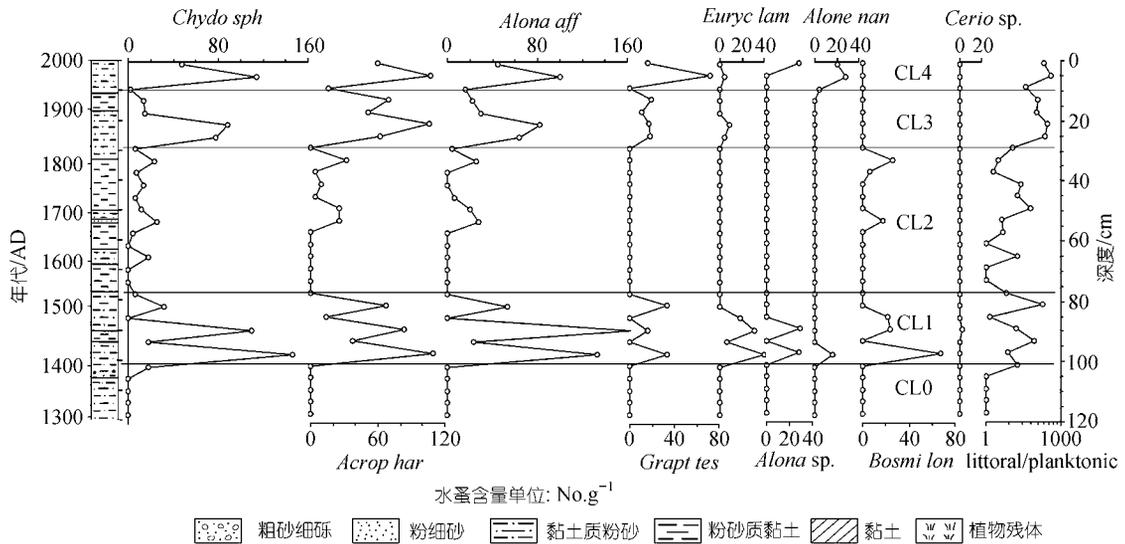


图3 藏南沉错 CC2 湖芯水蚤种类、数量变化与组合划分

*Bosmina longirostris*和*Ceriodaphnia sp.*, 但岩芯中的其他 7 种水蚤均在这个组合中出现. 从绝对数量上看, *Chydorus sphaericus*、*Acroperus harpae*和*Alonella affinis*仍然占主要成分, 但其丰度仍然不超过 100 No.g⁻¹. 然而, 喜碎屑环境的*Graptolebris testudinaria*较CL3组合上升了 2.8 倍, 并且出现了CL3组合中没有的*Alonella nana*(矮小锐额蚤).

4 讨论

4.1 水蚤种类/数量及其组合指示的沉积环境

CL1组合出现在 101~77 cm, 该组合不同种类的水蚤均有发育. 在优势种中, *Chydorus sphaericus*适应的环境条件较广. 但是*Alonella affinis*和*Acroperus harpae*的大量存在, 说明沉积环境具有发育大型水生植被的条件. 同时, 适应浅水湖泊或湖滨地带、喜有机碎屑物环境的*Graptolebris testudinaria*和*Eurycercus lamellatus*也大量发育, 指示着当时湖泊相对宽浅, 有利于水底有机质的输入和驻留. *Acroperus harpae*是一个喜冷水的水蚤种, 它的大量存在指示了湖泊的较低水温条件, 如果这种条件是受整个气候环境控制, 那么则不应该出现其他种类的水蚤大量繁殖. 因此, 湖水的低温条件可能与大量的低温流水注入有关, 而宽浅的湖泊使水底温度更容易受外来流水的影响. 该组合中属于浮游型的*Bosmina longirostris*也在整个岩芯中出现最高值, 说明湖泊仍

有一定的水深或者在水面有相当营养物质存在以满足较多的浮游型水蚤生存^[20].

CL2组合出现在 77~29 cm, 该组合水蚤群落的丰度和种类较CL1组合分别下降了约 74%和 55%. 只有为数不多、环境适应性较强的*Chydorus sphaericus*经常存在, 说明了当时的沉积环境非常恶劣, 不仅使大多数水蚤销声匿迹, 即使广适性的*Chydorus sphaericus*也难以存活. 在这个时期, 适应水生植被条件的*Alonella affinis*和*Acroperus harpae*以及浮游型的*Bosmina longirostris*仅在个别深度(53~49 cm和 33cm)处出现, 可能是恶劣环境中相对好转的个别时段.

CL3组合出现在 29~10 cm 深度, 该组合优势种的种类与 CL1 组合一致, 但丰度下降约 58%. *Graptolebris testudinaria*和*Eurycercus lamellatus*的丰度分别较 CL1 组合下降了约 40%和 75%, 表明沉积环境中虽然有大型水生植物生长, 但湖水底部有机碎屑含量却较低. 与CL1组合相比, 这可能是由于外界输入的物质中有机质含量不足造成的结果. 尽管这个时段较高含量的喜冷水的*Acroperus harpae*出现意味着有较多的低温水流注入, 但流域的地表植被发育并不能为地表流水提供较多的有机成分来输入湖泊. 浮游型水蚤在这个时段没有出现, 说明湖泊的水深不大.

CL4组合出现在岩芯顶部 10cm, 该组合除没有

发现浮游型水蚤外, 其他 7 种水蚤均可见到. *Chydorus sphaericus*, *Alona affinis* 和 *Acroperus harpae* 在绝对数量上仍然成为优势种, 而且丰度与 CL1 组合基本相当. 适应浅水湖泊、喜有机碎屑环境的 *Graptolebris testudinaria* 较 CL3 组合上升了 2.8 倍, 并且出现 CL3 组合中没有的 *Alonella nana*, 说明湖泊再次向浅水环境发展. 值得注意的是, 在适应浅水湖泊、喜有机碎屑环境的水蚤中, 广温型的 *Eurycercus lamellatus* 并没有出现高值, 亦即其没有表现出较高的竞争优势, 推测可能是由于稳定的湖泊水温使适应该温度的窄温型浅水种与 *Eurycercus lamellatus* 具有一样的生存竞争能力.

4.2 其他代用指标与水蚤组合的环境意义比较

尽管利用水蚤组合进行环境变化研究已经在欧洲^[10]和北美地区^[21]得到广泛开展, 但是在青藏高原地区类似的研究尚不多见. 为验证水蚤组合对环境变化的反映程度, 作者根据上述岩芯中水蚤组合的深度分布和深度-年龄曲线^[16], 将水蚤组合与同一时期的介形类组合^[22]、环境磁学及相关参数^[16]和硅藻-盐度转换关系研究^[15]揭示的环境变化进行了对比(图 4).

深度 120~108 cm(约 1294~1374 AD)的沉积物,

介形类主要为 *Leuconcytherella sinensis* 构成的单一属组合, 并且数量也急剧减少, 反映沉积环境不利于介形类生长. 进一步的分析表明, 这种不利于介形类生长的环境主要是沉积物较细, 可能代表了一种缺氧条件的深水环境. 该段的环境磁学与相关指标也显示, 当时处于偏冷偏湿的气候条件. 一方面深水环境限制了底栖滨岸型水蚤的发育, 另一方面较冷的气候也不利于浮游型水蚤的生长. 同时, 该段的 TN 也处在序列中的最低值(图 4), 不良的营养补给也可能是造成水蚤缺失的另一个重要原因.

进入 101~77 cm 深度(约 1407~1533 AD), 主要表现为水蚤 CL1 组合. 水蚤种属与丰度增多, 并指示了宽浅的湖水状况和较多的低温流水注入. 介形类组合在这个时段以 *Leuconcytherella sinensis*, *Ilyocypris biplicata*, *Leuconcythere mirabilis*, *L. Tropis*, *Limnocythere luculenta*, *Paracypricerus angulata*, *Candona candida*, *C. Gyirongensis*, *Cytherissa lacustris*, *Candona neglecta*, *C. Xizangensis*, *Leuconcythere dorsotuberosa* 为主. 大量浅水介形类种属的出现和数量增加, 同样表明水深相对较浅, 有利于这类介形类的生长和繁殖. 这个时段有超过 50% 的浅锈黄色介形类壳体出现, 指示介形类沉积时处于相对氧化环境, 或其被氧化后易于被搬运到沉积地点, 同样反映了

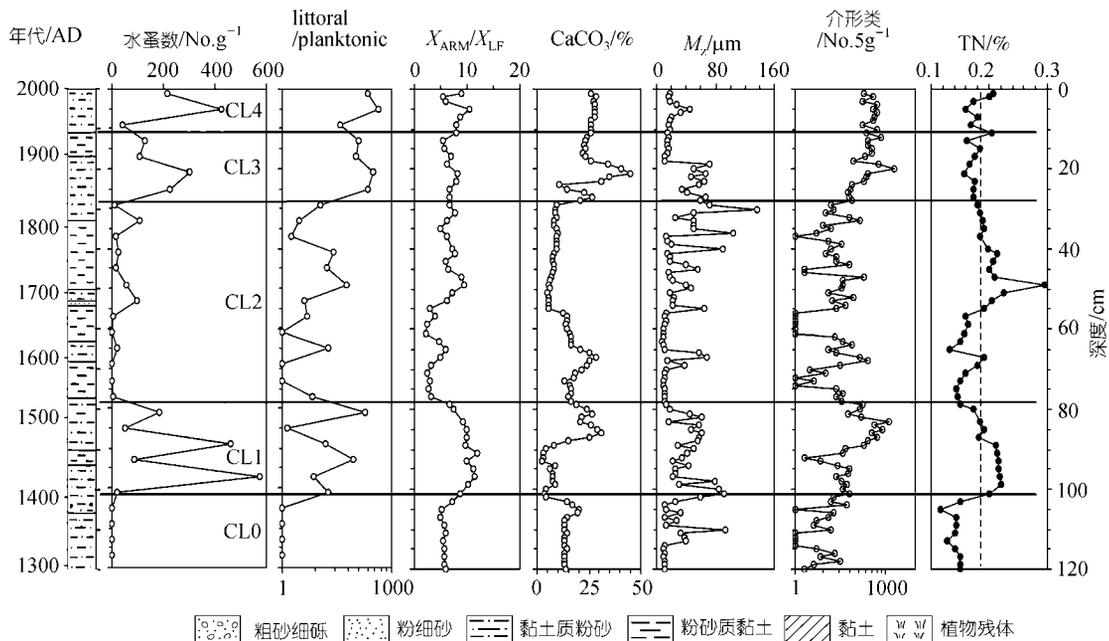


图 4 藏南沉错 CC2 湖芯水蚤组合与 CC1 孔介形类组合、环境磁学及相关参数反映的环境变化比较

浅水环境或流水强烈影响的特征。环境磁学与其他指标的综合研究表明这个时期主要表现为暖湿特征,后期向冷干变化(图4)。由于冰川融水是沉错的主要补给来源之一,因此当时的温暖条件是造成大量低温流水注入湖泊的重要原因。

77~29 cm 深度(约1533~1831 AD),主要表现为水蚤 CL2 组合,水蚤群落的数量和质量急剧下降,只有最耐严酷环境的个别种以极低的含量出现,并且其中一些种仅能维持很短时间,反映了不利于水蚤生存的寒冷、干旱(盐度增加)的环境条件。这一时段的特征得到介形类的两个组合、环境磁学以及硅藻研究的支持。介形类的一个组合出现在73~46 cm(约1561~1731 AD),表现为以 *Leucocytherella sinensis* 为主,有少量 *Ilyocypris biplicata* 和 *Leucothere tropis* 的组合,该组合没有深水种。同时,介形类的丰度在该时段内出现了整个序列中的最低值甚至零值。这不仅反映了湖水变浅的沉积条件,连适应性极强的 *Leucocytherella sinensis* 也不能生存的事实也指示了极其恶劣的沉积环境。环境磁学和相关指标在73~55 cm 深度(约1561~1676 AD)表现出该序列中最强的冷干特征。对 CC1 孔的硅藻研究表明,45 cm 深度以下硅藻出现突然减少或缺失,可能不仅是作者认为的保存条件的原因,也不能排除环境极端恶化的影响。介形类的另一个组合出现在46~34 cm(约1731~1803 AD),仅由单一的 *Leucocytherella sinensis* 构成,并且其残留的钙质壳体大多受到溶蚀,可能反映水体原有钙盐浓度发生了降低的现象。说明在沉积环境依然严酷的同时,湖泊水量有所增加。这个深度的环境磁学和相关指标显示为环境有所转暖,湖区湿润程度增加。硅藻组合的盐度转换函数研究表明,当时湖泊为微咸水状态,仍然未能摆脱前期寒冷干旱环境造成的影响,同时温度上升也可能引起蒸发加强超过冰川融水的增加。这个时段出现了一些喜水生植物并适应冷水的水蚤 *Acroperus harpae*, 估计可能与沉积环境适合一些水生植物生长有关。

29~10 cm 深度(约1831~1941 AD),主要表现为水蚤 CL3 组合,水蚤群落的种类与数量均出现大幅度回升。这个时段有较多的低温水流注入,但并没有为湖泊带来较多的有机成分,湖泊仍然处在相对浅水状态。同一时期,介形类组合表现为种类和数量丰富,但壳体颜色复杂,有大量氧化环境中或流水带来的锈黄色壳体。除个别层位具有深水种外,基本为浅

水种所控制。环境磁学和相关指标显示,湖区在维持温暖的同时干旱程度显著增加,可能是造成流域地表植被发育不良,入湖流水不能带来较多有机成分的一个原因。硅藻研究指示,湖泊盐度比上一时期(CL2 组合时段)有所下降,表明外部流水对湖泊的补给具有重要的影响。

10~0 cm 深度(约1941~1998 AD),主要表现为水蚤 CL4 组合,湖泊继续向浅水环境发展,而湖泊水温则保持在相对稳定状态。这个时段的介形类组合在数量上除继续保持较高的丰度外,在种类上基本不见深水种出现。环境磁学和相关指标显示该时期湖区的温暖程度得以继续维持,但干旱程度有所下降。硅藻组合则表现出湖泊盐度明显升高达到其研究时段(约1723~1998 AD)中的最高值。各种指标显示,出现这种现象的原因主要是由于持续的温暖使得湖面蒸发加强,冰川融水补给不能对其进行有效抵偿,导致湖面下降。湖区内干旱程度的减弱则可能是由于降水的略微增加引起的。邻近湖区的浪卡子气象站观测记录表明,在1961~1996年间的降水出现2次由突然降低转向逐渐增加。气候由短暂的较为干旱向持续的较为湿润转化能够造成入湖的碳酸盐类相对减少。但是,就湖面变化来讲,降水的略微增加远远不能补偿温度上升引起的强烈蒸发效应。

5 结论

藏南沉错 CC2 孔湖芯 750 余年沉积物中的水蚤种属和数量可以划分为 CL0, CL1, CL2, CL3 和 CL4 五个组合,每个组合集中出现于不同的深度范围内,分别具有水蚤缺失、水蚤种类和数量最多、水蚤数量和种类较少、水蚤数量和种类回升和适应浅水环境水蚤种类与数量增加的特点。与不同的水蚤组合和沉积年代相对应,沉积环境特征相继表现为:(1)约公元1407~1533年,湖泊有大量低温流水注入,有相当的有机质输入与驻留,湖泊宽浅满足水生植物生长;(2)约公元1533~1831年,表现为不利于生物生存的寒冷干旱环境;(3)约公元1831~1941年,湖泊处于有较多的低温水流注入,较少的有机成分输入的浅水环境;(4)约公元1941~1998年,温度保持相对稳定,并向浅水湖泊发展。结合湖泊水体主要补给过程进行分析,这些沉积环境分别形成于暖湿、冷干、暖偏湿、偏暖干的气候环境条件下。利用沉错沉积物中的水蚤组合所揭示的湖区过去环境变化得到钻孔中

的介形类组合、环境磁学及相关参数和硅藻-盐度转换关系研究等证据的支持,说明青藏高原湖泊中的水蚤组合能够敏感地反映湖泊沉积环境以及对其制约的气候环境变化,是过去环境变化研究中一个不可忽视的重要生物指标。

致谢 本研究得到中国科学院知识创新工程项目(批准号:KZCX3-SW-321, KZCX3-SW-339)、中国科学院地理科学与资源研究所创新项目(批准号: CXIOG-E01-05-02)和科技部中国-斯洛文尼亚双边科技合作项目资助。

参 考 文 献

- 1 Stoermer E F, Smol J P. The diatoms: applications for the environmental and earth sciences. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 469
- 2 Löffler H. The paleolimnology of Lake Bled (Blejsko jezero). Verhandlungen International Verein für Limnologie, 1984, 22: 1409~1413
- 3 Frey D G. Cladocera Analysis. In: Berglund B E. ed. Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Chichester: Wiley, 1986. 667~692
- 4 Mueller W P. The distribution of cladoceran remains in surficial sediments from three northern Indiana lakes. Investigation of Indiana Lakes Streams, 1964, 6: 1~64
- 5 Amsinck S L, Jeppesen E, Ryves D. Cladoceran stratigraphy in two shallow brackish lakes with special reference to change in salinity, macrophyte abundance and fish predation. Journal of Paleolimnology, 2003, 29(4): 495~507[DOI]
- 6 Brodersen K P, Whiteside M C, Lindegaard C. Reconstruction of trophic state in Danish lakes using subfossil chydorid (Cladocera) assemblages. Canadian Journal of Fishery and Aquatic Science, 1998, 55: 1093~1103[DOI]
- 7 Alhonen P. On the significance of the planktonic/littoral ratio in the cladoceran stratigraphy of lake sediments. Social Science of Finnish Commission for Biology, 1970, 35: 1~9
- 8 Margaritora F G. Fauna d'Italia: Cladocera. Calderoni, Bologna, 1985. 397
- 9 Brancelj A, Šiško M, Kosi G. Distribution of algae and crustacea (Copepoda & Cladocera) in mountain lakes in Slovenia with different trophic levels. Periodicum Biologorum, 1997, 99: 87~96
- 10 Lotter A F, Birks H J B, Hofmann W, et al. Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. I. Climate. Journal of Paleolimnology, 1997, 18(4): 395~420[DOI]
- 11 李吉均, 文世宣, 张青松, 等. 青藏高原隆起的时代、幅度和形式的探讨. 中国科学, 1979, (6): 608~616
- 12 汤懋苍, 李存强. 关于“青藏高原是气候变化启动区”的分析事实. 见: 中国青藏高原研究会编. 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文集. 北京: 科学出版社, 1992. 42~48
- 13 关志华, 陈传友, 区裕雄, 等. 西藏河流与湖泊. 北京: 科学出版社, 1984. 159~168
- 14 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998. 438
- 15 羊向东, 王苏民, Kamenik C, 等. 藏南沉钻钻孔硅藻组合与湖水古盐度定量恢复. 中国科学, D 辑, 2003, 33 (2): 165~169
- 16 Zhu L P, Zhang P Z, Xia W L, et al. 1400-year cold/warm fluctuations reflected by environmental magnetism of a lake sediment core from the Chen Co, southern Tibet, China. Journal of Paleolimnology, 2003, 29(4): 391~401[DOI]
- 17 蒋燮治, 堵南山. 中国动物志(节肢动物门·甲壳纲·淡水枝角类). 北京: 科学出版社, 1979. 165~254
- 18 Alonso M. Fauna Iberica: Crustacea, Branchiopoda. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid, 1996. 486
- 19 Brancelj A. Chydorus 'mutilus' Kreis, 1921-a postephipial form of *Chydorus sphaericus* (O F Mueller, 1785). Hydrobiologia, 1996, 323: 45~59
- 20 Sarmaja-Korjonen K, Alhonen P. Cladoceran and diatom evidence of lake-level fluctuations from a Finish lake and the effect of aquatic-moss layers on microfossil assemblages. Journal of Paleolimnology, 1999, 22: 277~290[DOI]
- 21 Bredesen E L, Bos D G, Laird K R, et al. A cladoceran-based paleolimnological assessment of the impact of forest harvesting on four lakes from the central interior of British Columbia, Canada. Journal of Paleolimnology, 2002, 28: 389~402[DOI]
- 22 李元芳, 朱立平, 李炳元. 藏南沉钻地区近 1400 年来的介形类与环境变化. 地理学报, 2002, 57(4): 413~421

(2005-01-20 收稿, 2005-03-23 收修改稿)