

酸沉降影响的湖泊沉积学证据*

朱育新 胡守云 王云飞 尹宇 潘红玺 周万平

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

提要 以阳宗海为例,通过湖泊短柱状沉积物的磁参数、Fe、Al 和化石生物的分析研究以及自然酸性湖泊沉积参数的对比验证,结果显示:低频磁化率(χ_{lf})、非磁滞剩磁(ARM)的数值以及介形类、硅藻的属种与浓度变化灵敏地指示工业大气污染和酸沉降的起点、过程和环境变化趋势;Fe、Al 的显著递减同步于较强酸沉降时段,是工业大气污染危害湖泊环境的标志。上述环境参数可作为识别湖泊酸化趋势的沉积学证据。酸性水体的元素地球化学作用及其对水生生物的影响——生物贫化和耐酸物种的扩张是湖泊沉积物重现酸沉降的历史和过程的理论依据。

关键词 酸沉降,沉积学证据,阳宗海

中图分类号 P736

酸沉降包括酸雨和 SO_2 、 NO_x 的干沉降,是由工业大气污染引发。在 20 世纪 50—70 年代酸沉降曾经给加拿大、中欧和北欧斯堪的纳维亚各国的湖沼资源与环境造成严重破坏。那些地表水被严重酸化的地区,流域土壤退化,森林成片死亡,湖泊中鱼类和大部分水生生物资源死亡消失,水域最终成为失去利用价值和毫无生命潜值的死水团(Cameron *et al.*, 1998; Anderson *et al.*, 1997; Jensen, 1972; White *et al.*, 1999; Wunsam *et al.*, 1995)。因此在 IGBP 的核心计划中,很早就将“具有重要地球化学性质的痕量成分的沉降、酸化及陆地生态系统中水和物质循环影响的研究”列为首选项目之一而受到重视。近 20 余年来我国社会经济获得快速发展,由于煤炭使用量和机动车数量的成倍增加,许多地方的大气污染日趋严重,酸雨在长江以南的红壤分布区不断扩张,预计地表水受酸沉降的危害和对陆地水域生态系统的影响越来越大(丁国安等, 1997; Larssen *et al.*, 2000)。但由于地表水酸化的监测和研究相对于大气污染和酸雨还较薄弱,因此目前对这方面的了解还很少。其次湖沼酸化实质上是外部输入的氢离子引起湖沼系统盐基饱和度减少和湖水 pH 值降低的过程,在相当长的一段时间里,人们也很难从湖水 pH 等显性标志发现湖沼的酸化趋势,故具有较大的隐蔽性,至今尚未见国内有关湖沼受酸沉降危害的报道。本文以云南高原东部阳宗海为例,通过酸沉降的湖泊沉积响应、机理分析以及与腾冲地区自然酸性湖泊的对比研究,揭示阳宗海的湖泊资源与环境已受酸沉降的危害,并从沉积记录中提取具有应用前景的代用指标,为湖沼受酸沉降危害的早期发现、环境影响评价和治理提供科学依

* 国家自然科学基金资助项目,49871075、40172102、49972058 号;中国科学院知识创新工程资助项目,KZCX1-10-01 号。朱育新,男,出生于 1967 年 9 月,副研究员,E-mail: yxzhu@niglas.ac.cn

收稿日期:2001-06-13,收修改稿日期:2002-01-18

据。

1 湖区概况和研究方法

1.1 阳宗海的环境简况

阳宗海位于昆明市东南约 30km 和小江断裂带东支,属典型的断层陷落湖。当湖面高程为 1770.8m 时,面积为 31.7km²,平均水深为 19.5m,最大水深为 30.0m。据 1999 年 5 月调查,湖水 pH 值为 8.18,底层水含 1.77mg/L 的游离 CO₂;矿化度为 327mg/L,SO₄²⁻ 含量高达 58.5mg/L;浮游植物生物量为 1.51mg/L,浮游动物生物量仅为 0.14mg/L;介壳生物腹足类、瓣鳃类罕见,自然鱼类资源贫乏等,均与云南高原其他湖泊有明显差异。阳宗海的湖盆走向与构造线方向一致作 S-N 向展布,东、西两侧被相对高程 400—1000m 的丘陵山地包围,故湖盆较封闭,不利于大气污染物的扩散。据资料,20 世纪 50 年代阳宗海水质优良,水生生物多样,特有物种丰富,生态环境优越(黎尚豪等,1963)。自 60 年代在湖北岸先后建成大型火电厂和水泥、化肥等工厂后,大气污染日趋严重。其中 80 年代大气污染最严重时期,曾多次造成农作物和果树成片死亡的环境事故。但湖区至今没有大气监测,也没有作大气污染的湖泊环境调查和影响评价。

1.2 研究方法

1999 年 5 月使用奥地利产湖泊深水采样器在阳宗海北部湖心水深 21.7m 处,提取芯长 44—47cm 深灰色泥质柱状样品 4 根,于现场按 0.5cm/个制备 ²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 测年样品;同时也以 1cm/个按规范制备化学元素、磁化率、硅藻和介形类等样品。年代测定运用 α 能谱仪和 γ 能谱仪;元素分析采用硝酸-氢氟酸-高氯酸溶解,美国产 Jarrel-Ash 1100 多道电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定元素含量;环境磁学分析在美国加州大学戴维斯分校古地磁实验室完成,使用 Bartington 磁力仪和 Long-Core 超导磁力仪测试;硅藻分析采用原样 2g,用双氧水加稀盐酸浸泡法提取制成固定片,主要用 Leitz 生物显微镜进行鉴定(Battarbee,1986);介形类分析取样 5g,在 600 μ m 的网筛中冲洗,凉干后在实体显微镜下挑出并结合生物显微镜、电子显微镜进行种类鉴定和纹饰、生态分析。

2 结果分析

根据阳宗海 ²¹⁰Pb 测试结果和 CGS 模式(Constant rate of supply moder)计算,测年底界 1823 年位于井深 22cm,平均沉积速率计算为 1.25mm/a;又据 ¹³⁷Cs 比度的垂向分布,获得 1954 年、1963 年和 1986 年切尔诺贝利核事故等时标深度分别为 13cm、11.5cm 和 4cm(项亮,1996),从而建立了阳宗海短柱状沉积物较精确的年代序列(图 1)。

2.1 沉积物磁化率和非磁滞剩磁的垂向变化

磁化率(10^{-8} m³/kg)变化曲线显示(图 1),井深 12cm 以下段,低频磁化率(χ_f)较高,其平均值在 400(10^{-8} m³/kg)左右,全段变化小,波型呈浑圆近乎平行 Y 轴伸展,反映湖泊环境较稳定和人为影响较小的特点。12cm 处 χ_f 值急剧减小,10cm 以上曲线变幅增大, χ_f 平均值降为 280(10^{-8} m³/kg),其中 8.5cm 和 5cm 处 χ_f 降至 263(10^{-8} m³/kg)和 131(10^{-8} m³/kg);4cm 以上 χ_f 有增大趋势,顶部达 300(10^{-8} m³/kg)。非磁滞剩磁(Anhysterisis remanent magnetization 简称 ARM)的变化与磁化率几乎相同,表明环境磁学的测试数据可靠。沉积物低频磁化率的高低取决于包括极细小粘滞性铁磁颗粒在内的磁性矿物种类和含量,物源的变化和沉积后铁磁性矿物的流失往往导致 χ_f 降低(吴瑞金,1993;张卫国等,

2000)。据记载¹⁾,近 40 余年来阳宗海的沉积物物源并未发生重大变化,但曲线变化点位于井深 12cm 及 χ_{lf} 最低值位于井深 5cm 左右,正好与记载的 1960 年后阳宗海火电厂投产及 80 年代区域大气污染最严重的时段一致,揭示酸沉降的出现和不同时期的污染差异可能造成沉积物中极小粘滞性铁磁颗粒的流失和 χ_{lf} 变化加剧。

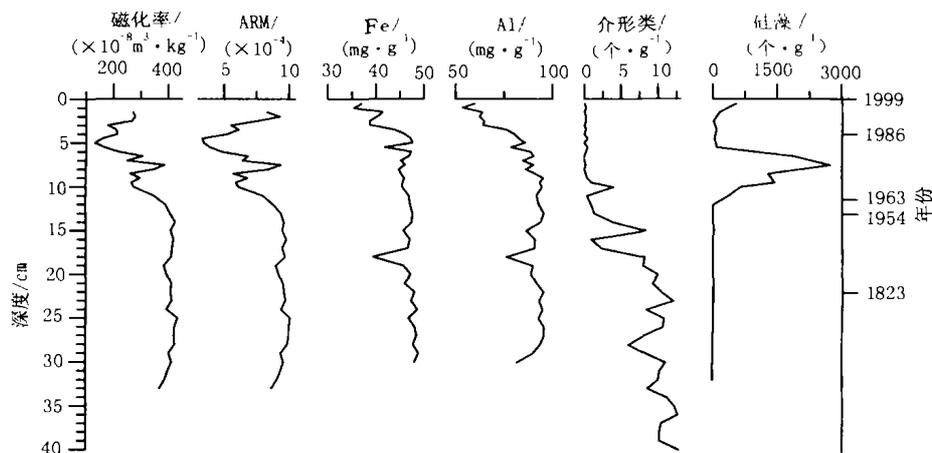


图 1 阳宗海短柱状沉积物的环境磁学、Fe、Al 元素和介形类、硅藻的垂向分布

Fig.1 Vertical distribution of environmental magnetic parameter, content of Fe and Al, ostracod and diatom in sediment of Yangzonghai Lake

位于云南省西南部腾冲县的青海是我国目前已知的惟一自然酸性湖泊,由于火山活动区酸性地下水补给,青海西南部湖水 pH 值变化于 5.8—6.6,总矿化度仅为 16.2mg/L (王苏民等,1998)。尽管自然酸性湖泊和工业大气污染引起的湖泊酸化在成因上不同,但本质上均为高浓度 H^+ 水对湖泊系统包括湖泊水体和湖泊流域地表土壤长期的物理、化学和生物作用结果,可为酸沉降的湖泊影响提供证据。据分析,青海表层 10cm 的 χ_{lf} 平均值仅为 $19(10^{-8} m^3/kg)$,较一般湖泊磁参数低一个数量级。酸性地下水对沉积物中铁磁颗粒的长期溶解和流失应是青海 χ_{lf} 极低的主要原因。由此可以认为阳宗海上部沉积物 χ_{lf} 和 ARM 的变化是对酸沉降的沉积响应,可作为识别湖泊受酸沉降危害的证据。过去的研究(吴瑞金,1993)较重视森林砍伐、土地利用、铁器使用等人类活动影响 χ_{lf} 增大的报道,阳宗海的实例表明 χ_{lf} 的异常下降也是人类活动对湖泊影响的另一种形式。

2.2 铁、铝元素的迁移

短柱状沉积物的 Fe、Al 垂向分布表明,井深 10cm 以上存在明显地元素迁移和流失现象。除个别点外,Fe、Al 在井深 30—10cm 间含量较高,平均值分别为 45.6mg/g 和 94.8mg/g,此外各点间的变幅也相对较小;10cm 以上 Fe、Al 含量呈递减趋势,其中 5cm 以上含量急剧减少,最低值仅为下部平均含量的 77.6% 和 56.4% (图 1)。此外沉积物中其他重金属元素如 Co、Ni、Sr、Ba、Cu 等也有相似的变化趋势。根据地表水酸化理论,工业大气污染的初期阶段,酸沉降的影响首先通过地表岩石、土壤和沉积物中更多的碱金属、

1) 宜良县水利水电局水利志编写组,1987. 宜良县阳宗海湖泊志(第二稿)

碱土金属和重金属阳离子的被置换而削减,此时湖水 pH 表面上维持不变,实际上阳离子的流失在不断进行,其中 Fe、Al 的迁移被认为是酸沉降已危害湖泊生态环境重要标志(Larsen *et al.*, 2000; Haines, 1981)。Forstner 等(1988)和 Angino 等(1974)认为,水体偏酸时,Fe 在沉积物-水界面的还原作用增强,结果使 Fe 易被还原为 Fe^{2+} 溶解于水而迁移。自然酸性湖泊沉积物较低的 Fe、Al 含量也证实上述理论。据分析,腾冲青海表层沉积物 Fe、Al 的平均含量分别为 18.8mg/g 和 90.0mg/g,仅为盆地四周土壤、岩石平均含量的 61.8% 和 70.6%。Fe 的流失也合理解释了阳宗海柱状沉积物磁化率下降的原因,但对比两条曲线不难发现,磁化率对酸沉降似乎更灵敏,这可能与酸沉降更易激活极细小粘滞性铁磁颗粒的溶解有关,而 Fe、Al 等元素的明显流失可能对应较强的酸沉降时期。Driscoll 等(1980)还认为:随着酸沉降的加剧,沉积物中 Al 元素被更多地溶出,形成 $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ 和 $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ 等羟基形式化合物对水生生物具有很强的毒杀性。因此化石生物的变化也能为酸沉降影响提供新证据。

2.3 介形类的垂向变化

介形类在井深 18cm 以下较丰富,平均 5g 沉积物中约有 50 个。优势种群为湖花介科(Family Limnocythidae)和玻璃介属(*Genus Canduna* Baird),另含有球星介属(*Genus Cyclocypris*)种群。17—10cm 介形类的密度变化增大,平均数量减少为每 5g 沉积物 14 个,主要种群为广生型的湖花介科,而适宜清洁水体的玻璃介属未发现。井深 10cm 以上介形类在沉积物中近乎消失,平均密度小于每 5g 一个,仅鉴定有湖花介一种(图 1)。生物贫化是地表水酸化的普遍规律, Haines(1981)等许多研究者都指出,随着水体酸化的日趋严重,湖泊生物在高浓度 H^+ 、活性铝离子和丰富 CO_2 释放等共同毒害下,大部分动植物都先后死亡、消失,仅留下少数耐酸、耐污的生物种群。介形类因其壳体的形成对碳酸钙有大量需求,故随着湖沼酸化和水体碱度下降往往较早地在湖泊中消失,因而,介形类是酸沉降较为敏感的物种之一(李辛夫, 1989; Cameton *et al.*, 1998; Driscoll *et al.*, 1980)。另据青海表层沉积物的系统取样和分析,介形类在大部分取样点缺失,少数样点虽然检测有介形类包括鉴定有介形类活体,但种类仅为白花介一种(*Leucocythere* sp.),密度为每 5g 沉积物 0—4 个。从自然酸性湖泊的沉积学对比也证实酸性水介质不利于介形类的生长和繁育,大气污染和酸沉降应是阳宗海上部沉积介形类消失的原因。

2.4 硅藻沉积记录及其变化

阳宗海柱状沉积物的硅藻分布,根据 2g 沉积物中的硅藻数,可划分为上下两段。井深 12.5cm 以下段硅藻密度较低,每 2g 沉积物为 1—65 个,但组合较丰富,含广缘小环藻(*Cyclotella bodanica*)、颗粒直链藻(*Melosira granulata*)、喙头舟形藻(*Navicula rhynchocephala*)、扁圆异壳藻(*Cocconeis placentula*)等种类,反映 20 世纪 60 年代以前湖水营养水平较低。上段自井深 12cm 处硅藻密度急剧增大,从每 2g 沉积物 43 个增加到每 2g 沉积物 764 个;8cm 处达全分析段密度最高值为每 2g 沉积物 5476,至顶部数量又稍减少,但密度也在每 2g 100 粒以上(图 1)。上段硅藻组合以广缘小环藻和扭曲小环藻(*Cyclotella stelligera*)占绝对优势,其含量占总数的 95% 以上。12cm 处硅藻剖面的突变,反映 1960 年以后湖泊环境更有利于硅藻群落的繁衍。据藻类生物实验室酸化控制研究,蓝藻和大部分绿藻对地表水酸化的适应性很差,当湖沼受酸沉降的影响后其数量和生物量往往迅速减少,而部分

硅藻和甲藻具有较强的耐酸性,常常成为酸化水体的优势种群(李辛夫,1989;Wunsam *et al*,1995;Psenner *et al*,1992)。Fiudlay(1992)在硅藻种群与湖水化学转换函数的定量化关系研究中,进行了硅藻种属耐酸性划分,认为硅藻门中筛盘藻科(Coscinodiscaceae)、脆杆藻科(Fragilariaceae)、平板藻科(Tabellariaceae)等许多属种具有较强的耐酸性。又据腾冲青海的现代湖泊浮游藻类分析,硅藻是湖中浮游藻类的主要类型,其生物数量达 304×10^4 个/L,硅藻门和甲藻门的生物量之和为 7.2mg/L,占总生物量的 54.3%。因此沉积物中化石硅藻密度较高,表层沉积物的平均数量为每 2g 636 个,其优势种属为颗粒直链藻科的酸性变种 *M. g. var. angustissima* 和扭曲小环藻。由此表明阳宗海上段硅藻的高密度和优势种隶属筛盘藻科广缘小环藻和扭曲小环藻的变化与 20 世纪 60 年代后湖区受工业大气污染有关。在酸性水介质的影响下,原来适合于蓝、绿藻生长繁衍的条件受限制,使耐酸的硅藻种群获得更多的养分、阳光和空间而急剧发展并成为湖泊中浮游生物的优势种群。

2.5 文字记录检验

1960 年以后先后在阳宗海四周建成火力发电厂、铝厂、化肥厂等企业,湖区大气、水质污染日趋严重¹⁾。云南省环境保护局 1980 年资料:电厂每年排放有害气体约为 641 万 m^3 ;每年废气中污染排放总量为 37204t,其中 CO_2 为 11235t。电厂排放的大量煤灰烟尘不仅影响人畜健康,而且危害作物生长。电厂每年向阳宗海排放的废水中,镉为 0.0145t,砷化物为 0.0189t,酚化物为 0.806t,造成水体严重污染。同时,天然渔业年产量由 60 年代稳定的 30t 左右下降到 1978 年的 20t 左右。

3 结论

3.1 酸沉降的湖泊影响,实质上是湖泊系统受外部持续地氢离子输入,降低了湖水和水土界面的 pH 值,使原来在碱性水介质中相对稳定的碱金属、碱土金属和重金属阳离子更多更快地被溶解和流失。与此同时,适宜碱性水介质的绝大部分水生生物在高浓度的氢离子、活性铝离子和丰富的 CO_2 溢出等共同毒害下先后死亡消失,少数耐酸生物成为湖中的优势种群。由于湖泊沉积物较好地保存了上述信息,因此重现的酸沉降影响的沉积学证据,是以地表水酸化理论为依据,具有较高的可靠性。

3.2 低频磁化率(χ_f)和非磁滞剩磁(ARM)的递减常指示沉积物中极细小粘滞性铁磁颗粒的流失趋势;介形类和硅藻的种群、密度变化,反映了酸化水体生物贫化和耐酸物种扩张这两种有代表性的化石生物演变趋势,是最灵敏指示湖泊已受酸沉降影响的证据,也是最具应用前景的环境辨别指标。Fe、Al 含量的明显减少常与酸沉降较强的时段一致,可作为湖泊环境明显受损害的标志。

3.3 根据多参数的沉积环境分析,重建阳宗海酸沉降简史如下:1960 年后伴随火电厂的运行,湖泊开始受酸沉降的危害,后逐渐增强;1973—1990 年间为湖区大气污染最严重的时期,表现为沉积物中 Fe、Al 含量明显减少, χ_f 和 ARM 异常降低,介形类及其贝壳生物近于消失和硅藻极大浓度;1990 年以后酸沉降的水平降低可能得益于环保措施的加强。阳宗海研究的个例证实,工业大气污染已危害我国部分湖泊的资源与环境。对于我

1)宜良县水利水电局水利志编写组,1987. 宜良县阳宗海湖泊志(第二稿)

国酸雨分布区的更多湖泊,预计也会有不同程度的影响,因此在进行湖泊资源利用、环境保护和湖区治理等规划时,有必要运用湖泊沉积学证据进行工业大气污染和酸沉降的湖泊影响评价,以避免和减轻工业化进程可能诱发的湖沼酸化问题。

致谢 野外采样工作得到了云南省阳宗海管理处杨雪梅、高茂林等同志的大力协助,谨致谢忱。

参 考 文 献

- 丁国安, 晓斌, 房玉梅, 1997. 中国酸雨现状及其发展趋势. 科学通报, 42(2): 169—173
- 王苏民, 窦鸿身, 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 389—390
- 李辛夫, 1989. 酸沉降对水生态系统的影响. 见: 中国环境科学学会编. 酸雨文集. 北京: 中国环境科学出版社, 435—444
- 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M, 2000. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法. 海洋与湖沼, 31(6): 616—623
- 吴瑞金, 1993. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其气候意义. 湖泊科学, 5(2): 128—135
- 项 亮, 王苏民, 薛 滨, 1996. 切尔诺贝利核事故泄漏¹³⁷Cs 在苏皖地区湖泊沉积物中的蓄积及时标意义. 海洋与湖沼, 27(2): 132—137
- 黎尚豪, 俞敏娟, 李光正等, 1963. 云南高原湖泊调查. 海洋与湖沼, 5(2): 87—113
- Anderson N J, Blomqvist P, Renberg I, 1997. An experimental and palaeoecological study algal responses to lake acidification and liming in the central Swedish lakes. Eur J Phycol, 32: 35—48
- Angino E E, Magmuson L M, Waugh T C, 1974. Mineralogy of suspended sediment and concentration of Fe Mn Ni Zn Cu and Pb in water and Fe Mn and Pb in suspended load of selected Kansas stream. Water Res, 10: 1187—1191
- Battarbee R W, 1986. Diatom analysis. In: Berglund B E ed. Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology. Wiley, Chichester, 527—570
- Cameron E M, Prevost C L, Curdy M M *et al*, 1998. Recent (1930s) natural acidification and fish-kill that was an important food source for an Inuit community in northern Quebec, Canada. J Geochemical Exploration, 64(1—3): 197—213
- Driscoll C T, Baker J P, Briscognt J J *et al*, 1980. Effects of aluminum speciation on fish in dilute acidified waters. Nature, 284: 164—170
- Findlay D L, Shearer J A, 1992. Relationships between sedimentary diatom assemblages and lake-water pH values in the Experimental Lakes Area. J Paleolimnol, 7: 145—156
- Forstner U, Wittman G T W, 1988. Metal Pollution in the Aquatic Environment. West Germany: Springer, 170—172
- Haines T A, 1981. Acid precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review. Trans Amer Fish Soc, 110: 669—707
- Jensen K, 1972. Low pH levels wipe out salmon and trout population in southwest Norway. Ambio, 1: 223—225
- Larsen T, Carmichael G R, 2000. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition. Environmental Pollution, 110(1): 89—102
- Psenner R, Schmidt R, 1992. Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. Nature, 356(30): 35—40
- White C C, Smart R, Sutter M *et al*, 1999. A novel index of susceptibility of rivers and their catchments to acidification in regions subject to a maritime influence. Applied Geochemistry, 14(8): 1093—1099
- Wunsam S, Schmidt R, Klee R, 1995. Cyclotella-taxa (Bacillariophyceae) in lakes of the Alpine region and their relationship to environmental variables. Aquatic Sciences, 57(4): 362—386

SEDIMENTOLOGICAL EVIDENCE OF LAKE ACID PRECIPITATION

ZHU Yu-Xin, HU Shou-Yun, WANG Yun-Fei, YIN Yu, PAN Hong-Xi, ZHOU Wan-Ping

(*Nanjing Institute of Geography and Limnology, The Chinese Academy of Sciences, Nanjing, 210008*)

Abstract We analyzed magnetic parameter, content of Fe and Al, ostracod and diatom in sediment of Yangzonghai Lake (Kunming), and compared and verified with nature acid lake (Qinhai Lake, Tengchong Count) simultaneously. The result shows that changes in magnetic susceptibility (χ_f) and Anhysterisis Remanent Magenitization (ARM), species and concentration of ostracod and diatom sensitively indicate the start, process and environment evolution trend of industrial atmosphere pollution and acid precipitation. It is the mark of harming lake environment by industrial atmosphere pollution; the obvious decrease in the contents of Fe and Al synchronizes with strong acid precipitation periods. The environmental parameters mentioned above provide sedimentological evidence for the trend of lake acidification. The element geochemistry processes in the acid water column and their influence on the aquatic creature, decrease in creature and expansion of acid resistant species form a theoretical basis to re-construct the history of acid precipitation in lake sediments.

Key words Acid precipitation, Sedimentary processes, Yangzonghai Lake