

大气污染的湖泊响应及其代用标志*

王云飞 胡守云 尹 宇 朱育新 潘红玺

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放研究实验室, 南京 210008)

提 要 通过洱海和阳宗海大气污染的湖泊响应、代用标志提取和原因分析以及地表水酸化理论和自然酸性湖泊的对比研究, 揭示湖水总矿化度和 SO_4^{2-} 的同步异常增大是湖泊早期受酸沉降危害的标志. 保存于沉积记录中的磁化率、非磁滞剩磁和介形类、硅藻的数值和种群、密度等变化, 可灵敏地揭示湖泊受大气污染的起点、过程和环境影响, 可作为酸沉降较重湖区的代用标志.

关键词 云南湖泊 大气污染 湖泊响应 代用标志

分类号 P343.3 X51

由大气污染和酸雨引发的以湖沼为代表的地表水酸化, 曾经给加拿大、中欧和北欧斯堪的纳维亚各国的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、森林成片枯死、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^[1-6]. 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^[7,8]. 但是目前对这方面的了解还很少. 本文拟通过云南高原西部洱海和东部阳宗海的酸沉降湖泊响应、机理分析以及国内外有关地表水酸化的研究成果和腾冲地区自然酸性湖泊的对比研究等, 从众多的环境因素中提取和论证大气污染的环境代用指标, 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据.

1 湖区自然背景和研究方法

1.1 洱海和阳宗海的环境特点

洱海位于云南省大理市北部和点苍山东麓, 当湖面高程 1973.7m 时, 面积 249.8km², 平均水深 10.2m, 最大水深 20.7m, 为云贵高原第二大湖. 受地质构造控制, 湖盆狭长作西北—东南走向. 区内盛行南风 and 西南风, 多年平均风日数 152d, 最大风速可达 40m/s, 故大理市大气污染易向洱海湖面扩散. 尽管大理州人民政府于 20 世纪 80 年代已完成了城市

* 国家自然科学基金项目 (40172102, 49871075), 中国科学院南京地理与湖泊研究所创新经费 (CXNIGLAS-A02-07) 和院重大项目 (KZ951-B1-205) 联合资助. 2002-08-02 收稿; 2002-11-01 收修改稿. 王云飞, 男, 1940 年生, 研究员.

污水截流工程和严禁在湖泊上游兴建污染项目,但湖泊富营养化趋势并未受到遏制,1991年全湖已进入中营养水平,1996年秋季发生了有史以来首次全湖性蓝藻水华暴发^[9]。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1770.8m时,面积31.7km²,平均水深19.5m,最大水深30.0m。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。据调查,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^[10]。自60年代在湖北岸建成大型火电厂以及后来在湖四周陆续兴建了水泥、化肥等工厂后,大气污染日趋严重。

1.2 研究方法

洱海研究以20世纪70年代至1999年六次全湖性水质分析结果为依据,测试采用相同规范的化学分析方法。阳宗海研究于1999年5月使用奥地利湖泊深水采样器在阳宗海北部湖心水深21.7m处,提取芯长34-47cm柱状沉积物样品三根,于现场对YZ1-1柱状样按0.5cm/个制备²¹⁰Pb、¹³⁷Cs测年样品;同时对其余柱状沉积物也以1cm/个作细分,按规范制备磁化率、硅藻、介形类等样品。年代测定运用 α 能谱仪和 γ 能谱仪;环境磁学分析使用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^[11];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 结果与讨论

2.1 洱海酸沉降的水质响应

近22年来洱海湖水的化学组成发生了明显变化,湖水矿化度逐年增高。1976年全湖湖水平均矿化度仅172.58mg/L,至1999年的调查全湖矿化度的平均值已升至273.4mg/L,增幅达58.4%,其中以1987年后的增长最快。另从矿化度增高的离子贡献分析,以阴离子SO₄²⁻最大,其含量从1.78mg/L增加至39.7mg/L,净增21倍(图1)。据流域环境调查尚未发现新的硫酸盐污染,但近20余年来随着大理市城市的扩大和工业的发展煤炭使用量以每年140%速率递增,大气污染有逐渐增强的趋势。近年来有了大气监测数据,1999年SO₂的年平均含量已达0.028mg/m³,接近和超过昆明市的污染水平,显示洱海湖水化学组成的变化可能源于人类新增燃煤型SO₂大气污染增强和向湖中运移、扩散。据Ruskeeniemi^[12]利用长期积累的湖泊沉积物化学资料对芬兰东部湖泊的分析研究指出:大气污染和酸沉降对湖泊系统的早期影响,往往通过流域内岩石、土壤和沉积物中更多的Ca、Mg、Na、K等阳离子被置换而中和,因此此阶段湖水的pH值虽然未变,但酸沉降已打破原来的湖水物质平衡,表现出湖水中SO₄²⁻和阳离子浓度的明显异常增高。对于汽车尾气排放等燃油氧化型大气污染,湖水水质往往表现为NO₃⁻和阳离子浓度的快速增加。因此在排除水污染后,湖水总矿化度和SO₄²⁻、NO₃⁻的含量急剧增高可以作为大气污染的湖泊影响的敏感指标。由于在大气污染初期的湖水pH未变,人们常常对湖泊生态系统的破坏缺少警觉。研究显示,受其影响水中N、S元素和无机盐等生物营养物质含量的不断增加,常常使水体总营养水平提高,有利于浮游生物的繁殖和有机生物量的增高,加速湖泊的富营养化过程。Leavitt^[13]通过湖泊酸化过程持续19年初级生产力的观察和研究认为湖泊受大气污染的

初期, 色素的含量有明显增加趋势甚至能出现深水水华的现象. 但这种情况仅仅是湖泊受大气污染早期的环境表现, 随着流域可溶性阳离子的不断流失和对酸中和能力的减弱, 湖水 pH 开始下降, 湖泊初级生产力也急剧降低. 近年来洱海湖泊环境面临富营化日趋严重的挑战, 上述分析有理由认为被忽视的大气污染和酸沉降的增强可能是洱海湖水化学组成变化和湖泊富营化继续发展的重要因素之一. 对于我国更多饱受富营养化困扰的湖泊, 在进行治理时有必要认真分析和评价大气污染和酸沉降的湖泊影响.

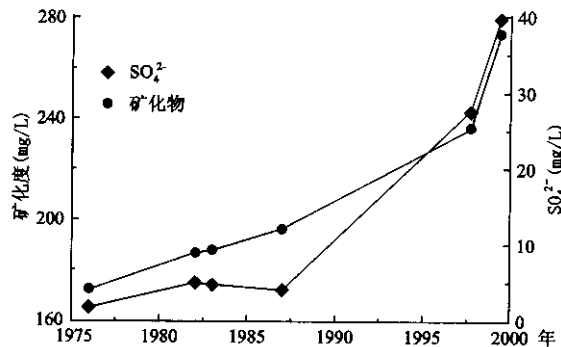


图 1 洱海湖水总矿化度和 SO_4^{2-} 含量的动态变化

Fig.1 Variations of total degree of mineralization and anion SO_4^{2-} of lake water in Erhai Lake

2.2 阳宗海大气污染的沉积响应

对于我国更多缺少实测资料的湖泊, 利用湖泊的沉积响应和沉积记录的酸沉降代用标志提取, 可能是发现和评价湖泊大气污染危害的更为有效的手段. 根据阳宗海 ^{210}Pb 测试结果和 CGS 模式 (Constant rate of supply mode) 计算, 测年底界为 1923 年位于孔深 22cm, 平均沉积速率为 1.25mm/a. 又据 ^{137}Cs 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^[14]. 从而建立了阳宗海较精确的短柱状沉积物年序 (图 2).

2.2.1 大气污染的环境磁学证据

磁化率 (k) 变化曲线显示, 孔深 12cm 以下, 磁化率较高其平均值在 $400 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ 左右, 自下往上变化小, 波型浑圆呈近乎平行于 Y 轴伸展. 反映湖泊环境较稳定和受人为影响小的特点. 12cm 以上曲线变化增大, 平均值降低为 $280 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$. 其中 10cm 和 5cm 附近为 k 低值区, 谷底 k 分别降至 $290 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$ 和 $139 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$; 7-8cm 处为两个低值区间的相对升高段; 4cm 以上 k 逐步增大, 顶部达 $300 \times 10^{-8}\text{m}^3/\text{kg}$. 非磁滞剩磁 (Anhysterisis remanent magnetization, 简称 ARM) 的变化趋势与 k 几乎相同, 表明环境磁学的测试数据可靠 (图 2). 沉积物 k 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 k 降低^[15]. 据调查, 近 40 余年来阳宗海的沉积作用和沉积体系并未发生重大变化, 但曲线变化点位于孔深 12cm 即 1960 年前后以及 k 最低谷位于孔深 5cm 上下, 正好与文字记录的阳宗海大型火电厂投产以及 70 年代至 90 年代初区域大气污染最严重的时段一致. 揭示大气污染和酸沉降的出现和不同时间段的污染差异可能是造成 k 减少和变化加剧的主要原因. Driscoll^[2] 在分析酸化水体的铝毒性时指出: 随着水体 pH 值降低和酸沉降的加剧, 沉积物中 Al, Fe 以及 Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni 等重金属离子也先后被活化而溶出,

物中 Al, Fe 以及 Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni 等重金属离子也先后被活化而溶出, 使单位沉积物中上述金属元素的含量降低. 又据腾冲青海——我国已知的唯一自然酸性湖泊的沉积学研究^[16], 由于酸性水体长期对沉积物中重金属离子的溶解和流失, 表层沉积物的磁化率极低, 10cm 以上沉积物的 k 平均值仅为 $19 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$, 较一般湖泊磁参数低一个数量级. 因此可以认为阳宗海上部沉积物 k 和 ARM 的突然降低和变化增大是湖泊沉积物中铁磁性矿物颗粒对大气污染和酸沉降的沉积响应, 可以作为识别和评价湖泊受酸沉降危害的良好指标. 过去的研究较为重视森林砍伐、土地利用、铁器使用等人类活动影响 k 增大的报道^[15], 阳宗海的实例表明, k 的异常下降也是人类活动湖泊影响的另一种形式.

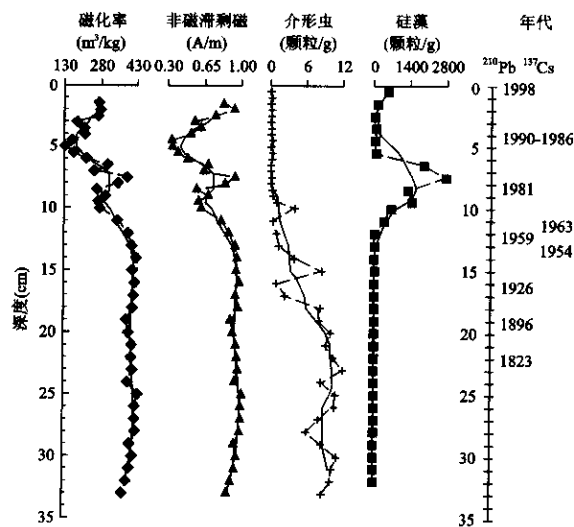


图 2 阳宗海沉积记录的年序以及环境磁学参数、介形类和硅藻的垂向分布

Fig.2 The chronology of sedimentation records of Yongzonghai Lake and variations of magnetic susceptibility, Ostracoda and diatom along Core YZH1-1

2.2.2 介形类生物的酸沉降响应 生物贫化是湖泊遭酸化后的普遍规律. Haines 等许多研究者都指出, 随着水体酸化的日趋严重, 在高浓度 H^+ 离子、活性铝离子和丰富的 CO_2 释放等共同毒害下, 湖泊中大部分动植物都先后死亡、消失, 仅有少数耐酸、耐污的生物种群能保存下来^[1,2,17]. 介形类是云贵高原湖泊中普遍生存的低等甲壳类动物, 在青藏高原玛尔盖茶卡盐湖湖水总矿化度达 323g/L 的极端恶劣环境下仍然有介形类生存, 表明介形类生物具有很强的生存能力. 由于其死亡后的钙质壳体能保存于沉积物中, 因此可为湖泊环境的变化其原因分析提供最直接的证据. 阳宗海的介形类分布, 在孔深 18cm 以下很丰富, 其平均密度为每克沉积物 5 个. 优势种群为湖花介科 (Limnocythidae) 和玻璃介属 (Canduna Baird), 另含有球星介属 (Cyclocypris) 种群. 孔深 17-10cm 介形类的密度变化增大, 平均数量减少为 3 个/g, 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. 孔深 10cm 以上的沉积物中介形类近乎消失, 平均密度小于 1 个/5g, 仅鉴定出一种广生型湖花介. 反映 20 世纪 60 年代以后湖泊环境变化较大, 介形类的生存条件受到限制和破坏. 由于介形类生物壳体的形成对碳酸钙有大量需求, 但随着湖沼酸化和碱度

下降 Ca 离子的浓度越来越小, 因此影响介形类的正常生长, 使其种类和数量越来越少直到最后消失. 表明记录于沉积物中的介形类组成和密度的变化能灵敏地揭示大气污染和酸沉降对湖沼生态环境的影响和危害. 自然酸性湖泊腾冲青海的研究证实了酸沉降对湖泊介形类沉积记录的影响. 由于火山活动区有酸性地下水补给, 青海西南部湖水 pH 值变化于 5.8-6.6, 总矿化度 16.24mg/L. 经表层沉积物的取样分析, 介形类在部分样点缺失, 部分样点虽然观察有介形类包括鉴定有介形类活体存在, 但种类仅湖花介一种(*Leucocythere* sp.), 密度不超过 1 个/g.

2.2.3 酸沉降的硅藻沉积记录变化 在湖泊生物区系中, 浮游藻类属低等植物和重要的初级生产力制造者. 由于它们共存于同一湖泊系统中以及对阳光、养分的剧烈竞争, 故其组成、数量及其变化灵敏地揭示湖泊环境及其变化. 硅藻是浮游藻类中一个重要门类, 因其细胞外有一特殊的硅质壳体并在死亡后能保存在沉积物中, 因此硅藻生物的分析研究在湖泊环境的重建中具有更重要的意义. 阳宗海柱状沉积物的硅藻分布, 根据密度(每克沉积物中的硅藻数)的大小, 可将柱状沉积物划分为上下两段. 孔深 12.5cm 以下为下段, 该段硅藻密度较低 1-33 个/g, 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 年代以前湖泊受人为影响较小, 湖水营养水平较低的特点. 上段自孔深 12cm 处硅藻密度急剧增大, 从 22 个/g 增加到 382 个/g, 8cm 处达全分析段密度最高值 2738 个/g. 至顶部密度又稍减少, 但每克样品的硅藻数也在 50 粒以上(图 2). 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, 其含量一般占硅藻总量的 95%以上. 硅藻剖面上述变化特征表明, 孔深 12cm 处湖泊环境发生的明显变化, 可能表现为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^[6, 19]. Fiudlay^[20]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(*Coscinodiscaeae*)、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 318 个/g, 其优势种属为颗粒直链藻科的酸性变种 *M. granwata*. 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的广缘小环藻和扭曲小环藻的变化再次证实, 20 世纪 60 年代阳宗海湖泊环境的变化源于工业大气污染和酸沉降的危害. 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, 使耐酸的硅藻获得更多的养分、阳光和空间而急剧发展并成为湖泊中的浮游生物优势种群.

3 结论

(1) 在排除陆源污染因素后, 湖水矿化度和 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等阴离子的同步异常增大往往预示湖泊已受大气污染和酸沉降的影响, 是湖泊酸化的早期信号. 尽管湖水 pH 值尚无明显改变, 也应引起重视. 其危害的主要表现之一是打破原来的水生态平衡, 加速湖泊的富

营养化进程。

(2) 湖泊沉积物是揭示酸沉降影响的最好自然记录, 环境磁学和介形类、硅藻对大气污染最具敏感性, 是最有应用前景的代用指标。磁化率(k)和非磁滞剩磁(ARM)常指示铁磁颗粒的流失趋势, 因此可能反映较强的酸沉降危害。生物贫化和耐酸物种的出现是酸化水体的普遍现象, 由于介形类和硅藻壳体能保存在不同时期的沉积物中, 因此种群和密度的变化可直接提供酸沉降的证据和过程。阳宗海大气污染的代用指标综合分析显示: 1960年后阳宗海受大气污染和酸沉降的危害逐渐增强; 1973-1990年间为危害最严重的时段; 1990年以后酸沉降的水平减少可能得益于环保立法、排污控制和污染治理等措施。

(3) 洱海和阳宗海的研究个例证实, 大气污染和酸沉降已造成湖泊环境的损坏。对于我国酸雨分布区的更多湖泊, 预计也会有不同程度的影响, 因此在进行资源利用、环境保护和湖区治理等规划时, 有必要认真评价大气污染和酸沉降的湖泊影响, 避免重蹈某些发达资本主义国家因大气污染而导致地表水酸化的覆辙。

致谢 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; 周万平研究员测试了硅藻参数, 谨致谢意。

参 考 文 献

- 1 Cameron E M, Prevost C L, Curdy M M, et al. Recent (1930s) natural acidification and fish-kill that was an important food source for an Inuit community in northern Quebec, Canada. *J Geochemical Exploration*, 1998, 64(1-3):197-213
- 2 Driscoll C T, Baker J P, Briscognt J J, et al. Effects of aluminum speciation on fish in dilute acidified waters. *Nature*, 1980, 284:164-170
- 3 Anderson N J, Blomqvist P, Renberg I. An experimental and palaeoecological study algal responses to lake acidification and liming in their central Swedish lakes. *Eur J Phycol*, 1997, 32:35-48
- 4 Jensen K. Low pH levels wipe out salmon and trout population in southernmost Norway. *Amhio*, 1972, 1: 223-225
- 5 White C C, Smart R, Sutter M, et al. A novel index of susceptibility of rivers and their catchments to acidification in regions subject to a maritime influence. *Applied Geochemistry*, 1999, 14(8):1093-1099
- 6 Wunsam S, Schmidt R, Klee R. *Cyclotella-taxa* (Bacillariophyceae) in lakes of the Alpine region and their relationship to environmental variables. *Aquatic Sciences*, 1995, 57(4):362-386
- 7 丁国安, 徐晓斌, 房玉梅. 中国酸雨现状及其发展趋势. *科学通报*, 1997, 42(2): 169-173
- 8 Larssen T, Carmichael G R. Acid rain and acidification in China: the importance of base cation deposition. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1):89-102
- 9 王云飞, 潘红玺, 吴庆龙等. 人类活动对洱海的影响及对策分析. *湖泊科学*, 1999, 11(2): 123-128
- 10 黎尚豪, 俞敏娟, 李光正等. 云南高原湖泊调查. *海洋与湖沼*, 1963, 5(2): 87-113
- 11 Battarbee R W. Diatom analysis. In: Berglund B E ed. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. Chichester: Wiley, 1986: 527-570
- 12 Ruskeeniemi K L, Uutela A, Tenbala M, et al. Environmental impact of metalliferous bleas at Talvivaara in Finland, with indication of lake acidification 9000 years ago. *J Geochemical exploration*, 1998, 64(1-3):395-407
- 13 Leavitt P R, Findlay D L, Hall R I. Algal responses to dissolved organic loss and pH decline during whole-lake

- acidification:evidence from paleolimnology. *Limnol Oceanogr*,1999,44:757-773
- 14 项亮, 王苏民, 薛滨. 切尔诺贝利核事故泄漏 ^{137}Cs 在苏皖地区湖泊沉积物中的蓄积及时标意义. *海洋与湖沼*, 1996, 27(2): 132-137
- 15 吴瑞金. 湖泊沉积物的磁化率、频率磁化率及其气候意义. *湖泊科学*, 1993, 5(2): 128-135
- 16 王苏民, 奚鸿身. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社, 1998:389-390
- 17 Haines T A. Acid precipitation and its consequences for aquatic ecosystems: a review. *Trans Amer Fish Soc*, 1981, 110:669-707
- 18 杨留法. 试论介形虫生存的主要条件. *中国科学, B辑*, 1986, (11): 1219-1224
- 19 Psenner R, Schmidt R. Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature*, 1992, 356(30): 35-40
- 20 Findlay D L, Shearer J A. Relationships between sedimentary diatom assemblages and lake-water pH values in the Experimental Lakes Area. *J Paleolimnol*, 1992, 7: 145-156

The Lacustrine Responses Towards Atmospheric Pollution and Related Proxies

WANG Yunfei, HU Shouyun, YIN Yu, ZHU Yuxin & PAN Hongxi

*(Key Laboratory of Lake Sedimentation and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)*

Abstract

The detailed studies were carried out on the lacustrine sediments from both the Lake Erhai and the Lake Yangzonghai, concerning the lacustrine responses towards the atmospheric pollution. Based on magnetic and biological proxies, as well as comparing acidification theory of surface water with naturally-acidified lakes, it is being revealed that anomaly synchronic increase on both the total degree of mineralization and anion SO_4^{2-} are indicators of lake affected by acid deposition. Low frequency magnetic susceptibility (k), anhysteretic remanent magnetization (ARM), and the changes of the concentration and species of ostracoda and diatom preserved within the lacustrine sediment could be used as indicating proxies, because of their sensitivity towards atmospheric pollution on the lake, including pollution history, its process and its effect on the environment.

Keywords: Yunnan lakes; atmospheric pollution; lake responses; proxies