

# 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积 指标体系中的应用——以太白湖为例

董旭辉<sup>1, 2</sup>, 羊向东<sup>1</sup>, 刘恩峰<sup>1</sup>, 王 荣<sup>1, 2</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 根据太白湖沉积柱中硅藻、孢粉、粒度、磁化率、元素含量等指标记录, 冗余分析结果表明松孢粉的百分含量、沉积物磷浓度、频率磁化率及有机碳含量是能显著解释水环境变化的最小变量组合, 解释的硅藻变率百分比达 51.5%, 仅比所有沉积指标共同解释的信息量少 6.4%。主要根据该 4 指标的古环境意义, 对该湖近 200 年来的营养演化驱动机制进行了探讨。太白湖近代富营养化过程表明: 在温暖湿润的气候背景下, 较高营养背景的湖泊极易在人类活动的驱动下发生富营养化, 因此对湖泊资源必须进行合理的人为开发与利用。

**关键词:** 冗余分析 (RDA); 沉积指标; 硅藻; 富营养化; 太白湖

**文章编号:** 1000-0585(2007)03-0477-08

湖泊沉积物是过去环境变迁信息的档案库, 包含了丰富的湖泊营养演化信息。因此, 以沉积物为研究对象的古湖沼学技术可以弥补湖泊环境长期监测记录缺乏的不足, 能重建湖泊营养演化历史<sup>[1]</sup>。通过各种沉积环境指标 (如孢粉、粒度、磁化率、水生生物化石、元素含量等) 的综合对比, 结合历史文献记录, 将湖泊营养富集和生物种群结构的变化与流域人类活动联系起来, 可以获得湖泊富营养化发生的时间、变率及环境演化特征, 并对富营养化的机理进行解释或推测, 为湖泊富营养化的治理提供理论信息<sup>[2]</sup>。

上述方法已经成为古湖沼学研究的主流方法而被广泛应用<sup>[3]</sup>。但值得注意的是, 这种多指标之间的对比解释只侧重于定性的描述, 对某一指标描述环境变迁的可信度 (显著性) 及解释的能力 (重要性) 等问题很少进行统计学上的定量刻画。随着统计学的发展, 特别是多元统计回归、梯度分析理论如典型对应分析 (CCA, Canonical correspondence analysis)、冗余分析 (RDA, Redundancy analysis) 等方法的成熟, 这方面的研究逐渐成为可能<sup>[4]</sup>。其中 RDA 是一种直接梯度分析方法, 能从统计学的角度来评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系<sup>[5, 6]</sup>。湖泊水环境变迁最终体现在水生生物群落的改变<sup>[7]</sup>, 因此该类研究大多用硅藻 (对水环境响应非常敏感的生物) 来代表水环境的演化, 而用其他沉积指标来进行解释<sup>[8, 9]</sup>。例如 Korsman 等利用 RDA 分析揭示出沉积物钻孔中 Spruce 孢粉的增多与硅藻种群变化之间的强烈关系, 提出陆地植被结构的改变是导致湖泊酸化的主要原因<sup>[8]</sup>; Eastwood 等通过土耳其西南部湖泊沉积柱中火山灰碎片的浓度与陆地孢粉变化关系不大而与沉积硅藻组合变化显著相关得出附近火山爆发对该地区陆地生态系统影响甚小而导致了水生生态系统的营养富集和酸化的结论<sup>[9]</sup>。这些结果均基于统计分

收稿日期: 2006-09-05; 修订日期: 2007-01-30

基金项目: 中科院重大方向性项目 (kzcx2-yw-319) 和国家自然科学基金资助项目 (40572177)

作者简介: 董旭辉 (1978-), 男, 湖北蕲春人, 博士研究生。主要从事硅藻与湖泊环境变迁方面研究。

Email: xhdong@niglas.ac.cn

析得到, 因而更具可信度。

本文选择富营养化问题日益严重的太白湖, 通过常规沉积指标的对比分析, 并在此基础上将硅藻种群数据作为响应变量 (Response variables), 用其他指标来作为解释变量 (Explaining variables), 利用多元统计分析手段 (主要是 RDA), 来提取能显著解释水环境演化的指标, 通过该指标的环境指示意义来阐述影响该湖营养演化的主要驱动机制。

## 1 研究区域概况及研究方法

太白湖位于湖北省东部, 横跨黄梅、武穴两县市, 流域面积  $960 \text{ km}^2$ <sup>[10]</sup>, 20 世纪初最大水面面积约  $60.1 \text{ km}^2$ , 围垦后现有面积  $26 \text{ km}^2$ 。湖水主要依赖地表径流和降水补给。太白湖流域农业经济发达, 且历史悠久。20 世纪 40 年代以来太白湖渔业养殖开始发展, 并成为黄冈市最大的水产养殖场。然而, 近年来该湖逐渐富营养化 (根据 2001~2002 年水质调查, 年均总磷浓度为  $125.5 \mu\text{g/l}$ ), 夏季水华频繁爆发, 大部分湖区水草灭绝, 湖泊生态系统退化。

2003 年 3 月采用活塞采样器于太白湖湖心位置进行沉积物钻孔的提取, 本研究取钻孔上部 50 cm 的沉积物, 按 0.5 cm 间距分样, 钻孔年代通过<sup>210</sup>Pb 测年获得。分析的指标主要包括硅藻、孢粉、粒度、磁化率、有机碳氮、沉积物中磷及金属元素含量等。硅藻样品采用盐酸和双氧水处理的方法处理并制片<sup>[11]</sup>, 属种鉴定依据 Krammer 等的分类系统<sup>[12]</sup>, 每个样品硅藻壳体统计至少在 300 粒以上, 属种丰度按百分比表示。孢粉样品用传统的实验方法处理, 每个样品统计 300 粒以上并分别计算浓度及百分比, 并用弦距 (Chord distance) 来衡量孢粉组合的整体变化<sup>[13]</sup>。粒度采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪测定。磁化率 ( $\chi_{\text{lf}}$ 、 $\chi_{\text{hf}}$ ) 测量采用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率测量仪。有机碳氮含量采用 CE440 型元素分析仪测定; 沉积物中磷、金属元素含量用电感耦合原子发射光谱仪测定。上述仪器精度控制在重复测量误差小于  $\pm 5\%$ 。

沉积指标的分带利用程序 CONISS<sup>[14]</sup> 来进行; RDA 分析是将沉积柱中含量超过 2% 的硅藻属种 (共 32 个) 作为响应变量组, 解释变量包括孢粉组合弦距、孢粉总浓度、孢粉含量较大的松科 (Pinus) 及禾本科 (Gramineae) 百分含量及浓度指标、粒度、磁化率、总有机碳 (C%)、总有机氮 (N%)、碳氮比 (C/N)、磷 (Sediment-P) 及铁 (Fe, 相关分析表明可以用 Fe 来代表金属元素含量的变化) 含量等 17 个变量。因上述变量中可能存在高度自相关变量, 先对所有变量用 CCA 分析剔除掉膨胀系数大于 20 的变量, 之后用剩余变量来分析影响硅藻种群变化的份额<sup>[5]</sup>; 变量重要性的相对大小在程序结果中得到, 变量的显著性用 999 次的蒙特卡罗检验来考察, 上述统计分析均在程序 CANOCO 4.5 版本中运行<sup>[5]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 沉积环境指标分析

<sup>210</sup>Pb 测年采用 CRS 年代模式计算, 测年结果参见文献 [10], 本文中对特殊层位年代进行了标注 (图 1b)。硅藻组合及水生植物指标反映的水环境的变化 (图 1a) 与孢粉、粒度、磁化率、沉积物磷、总有机碳与有机氮指标等反映的流域环境阶段 (图 1b) 总体一致。各阶段指标变化特征如图所示, 在此不详述。

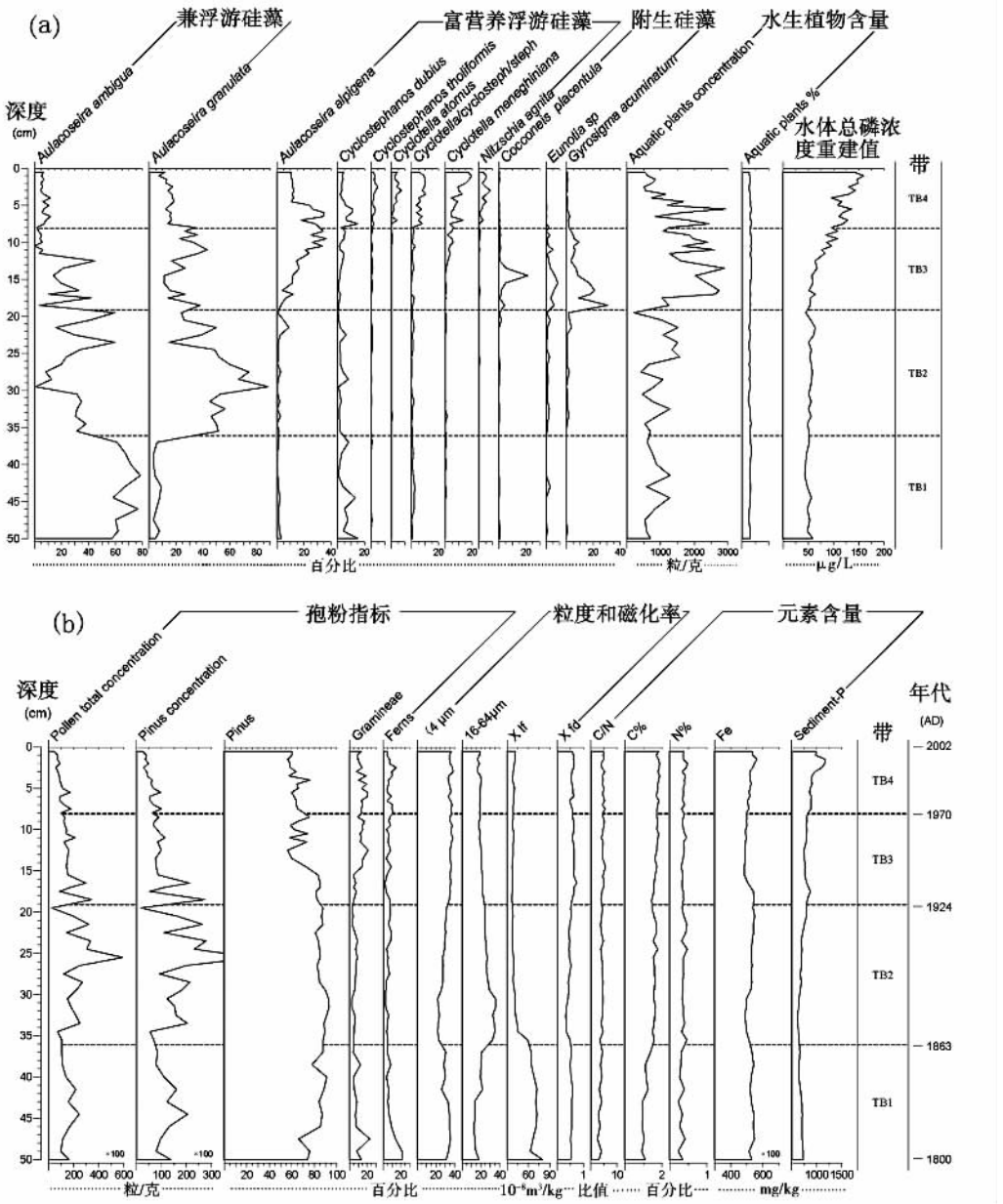


图1 沉积柱中硅藻、水体总磷浓度重建值、孢粉、粒度、磁化率、元素等指标结果  
 Fig.1 Analysis result of diatom abundance, reconstructed TP concentration, pollen, grain size, magnetic susceptibility and selected elements in sediment core

## 2.2 统计分析结果

对17个沉积指标变量进行多次CCA分析筛选,结果表明,Pinus百分含量(Pinus)、细颗粒含量( $<4 \mu\text{m}$ )、频率磁化率( $\chi_{fd}$ )、总有机碳(C%)、沉积物铁、沉积物磷含量(Sediment-P)共6个变量的组合能保证所有变量的膨胀系数均小于20,将此变量组进行初步的RDA分析。各个变量的重要性及显著水平如表1。结果表明,Sediment-P、C%、Pinus这三个变量重要性均超过0.27,且均通过 $p < 0.005$ 的检验。细颗粒指标重要但不

表 1 各个变量的重要性及显著水平

Tab. 1 Importance and significance level of each variable

	Sediment-P	C%	Pinus	<4 $\mu\text{m}$	$\chi_{\text{fd}}$	Fe
重要性	0.32	0.29	0.27	0.16	0.11	0.07
显著水平(P 检验)	0.002	0.002	0.002	0.174	0.002	0.002

显著, Fe 显著但重要性稍差, 因此对此两变量予以删除。最终只保留 Sediment-P、C%、Pinus 和  $\chi_{\text{fd}}$  四个变量的 RDA 分析结果如图 2 所示。所有沉积样品有规律的分布在平面图中, 大的变化转折点大致以 1863 年(沉积深度为 36cm)为界: TB1 带样品主要沿着 C 的负方向排列; 而其余所有样品主要沿 Pinus 的负

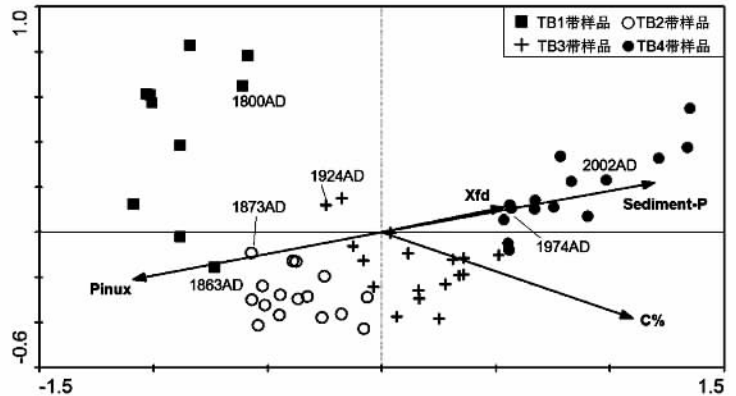


图 2 RDA 分析结果

Fig. 2 Result of redundancy analysis

方向沉积物磷及  $\chi_{\text{fd}}$  的增加方向排列。四个变量前两个轴上共解释了 51.5% 的硅藻属种变率, 约 88.0% 的属种-环境关系。

### 3 讨论

RDA 分析结果提取了能最大程度上代表所有指标解释能力的最小变量组合 (Pinus、C%、Sediment-P、 $\chi_{\text{fd}}$ )。对所有变量进行 RDA 分析的结果表明所有变量能解释 57.9% 的硅藻变率, 而该最小变量组合能解释 51.5% 的硅藻变率, 因此用这四个变量来进行湖泊水环境变迁的解释, 指标可以得到大大的简化, 且损失的信息量很小 (仅 6.4%)。目前有多种多元统计分析手段被应用于生态学领域, 特别是用于生物种群分布与多个环境因子间关系的研究, 例如主成分分析、相关分析、因子分析、回归分析等等, 各种方法在解决特定问题时各具优势<sup>[15, 16]</sup>。RDA 分析最大优势在于能独立保持各个变量对环境 (生物群落变化) 的贡献率, 它是一种直接梯度分析方法, 不是单纯对变量组进行分析, 也不是将几个变量综合成一个虚拟的复变量, 这样, 在不同的变量组合下仍可进行单个变量的统计学特征描述, 进而决定变量的取舍<sup>[5]</sup>。

事实上, 许多沉积指标间因受控于同种驱动因素而呈现出高度的相关性<sup>[3]</sup>, 这是 RDA 进行变量筛选的理论基础。例如, 孢粉是反映流域古植被、古气候环境的指标, 其主要种属的百分含量, 如本研究沉积柱中松与禾本科、蕨类的百分含量, 呈一定的负相关关系, 因此, 可用松属含量的变化来概述整个孢粉组合的主要变化。类似的, 磁化率的各指标、粒度的各指标等亦呈强相关关系, 可以予以简化。当然, 最终的 4 个指标间也存在联系。松孢粉含量的减少主要指示了流域森林的砍伐, 与之对应的禾本、蕨类孢粉的增多指示了农业耕种活动的加强<sup>[17]</sup>; 沉积物磷大体指示了流域磷的流失量, 在人类活动地区

可以反映流域耕作土壤的流失情况或化肥使用的情况<sup>[18]</sup>。而磁化率的高低常用来作为判断流域耕作强度的代用指标, 频率磁化率可以指示流域土地侵蚀强度<sup>[19]</sup>。上述3个指标在人类活动地区的短时间尺度上的研究都能较好地指示人类活动的强弱, 但在活动方式上能予以一定的区分。而 TOC 含量代表了古生物量的变化(本文中 C/N 比值小于 10, 说明有机质主要来源为湖内<sup>[20]</sup>), 主要受气候、湖泊水化学性质、温度、降水等影响<sup>[21]</sup>。因此上述4个指标的古环境意义又各有侧重, 故本文将主要根据这4个指标来阐述该湖过去200年来水环境变迁的特征及驱动机制, 可分为如下几个阶段:

1800~1863年期间气候背景为小冰期气候, 气候寒冷, 降水丰沛<sup>[22, 23]</sup>。根据对历史记载的研究<sup>[24]</sup>, 乾隆六十年(1795年)~道光五年(1825年), 人口增长率达0.64%, 中国出现“盛世经济”, 但1830年左右气候突变及随后帝国主义入侵导致盛世结束。从 Pinus 指标来看, 该段开始含量较低, 表明人类砍伐活动加剧, 与史料记载的人口增多相吻合。与此同时由于森林砍伐短期内难以恢复, 加之充足的降水导致水土流失, 侵蚀强度加剧, 故磁化率指标在该段持续高值。显然该时期入湖的营养盐较丰富, 而重建水体总磷浓度却较低。这可能与冰期雨量充沛, 入湖营养盐被充足的降水所稀释而未导致营养水平升高。此外, 有机碳的含量持续偏低, 也指示了该时期气候寒冷, 流域植被的不发育。

1863~1924年期间, 湖水总磷继续维持中营养水平。松孢粉含量维持高值, 表明该时期流域森林植被发育, 与历史记载的同时期内人口快速减少相对应。频率磁化率, 尤其是低频磁化率相对于 TB1 带急剧下降, 反映了人类耕作强度的降低。C% 指标较 TB1 带有较大的升高指示了湖泊生产力的提高, 相应地, 水生植物孢粉含量相应上升。硅藻组合上指示高水位的 *Aulacoseira ambigua*<sup>[25]</sup> 含量开始急剧降低至顶部有所升高, 与 *Aulacoseira granulata* 含量呈互补趋势。有研究表明, *Aulacoseira granulata* 已显示出在浑浊的水体中有较强的竞争能力<sup>[26]</sup>。湖水水位降低, 沉积物更易受湖泊风浪的作用, 沉积物磷逐渐释放, 相应地沉积物磷浓度开始也处于剖面最低值段。总之, 该时期湖泊环境主要特征为流域人类活动弱, 湖泊相对萎缩, 湖泊营养水平较低。

1924~1970年营养缓慢上升期。该时期松含量的急剧减少, 沉积物磷、 $\chi_{td}$  的增加, 说明了人类活动表现在毁林和农业耕作的扩大。人类活动开始加强, 势必引起入湖营养物质的增多, 相应地 C% 指标缓慢升高, 但水体磷增加相对缓慢(52~72  $\mu\text{g/l}$ )。这可以从硅藻组合的变化上得到解释。此段硅藻主要为附生属种, 表明该时期水生植被比较发育<sup>[27]</sup>, 这与水生植物浓度指标开始达到剖面最高值相一致。并且, 随着 12cm 以上水生植被的逐渐减少, 营养递增幅度加大。事实上, 水草的生长具有对营养、光的竞争优势, 有效地减少了营养富集的沉积物中磷的再释放; 此外, 水草的发育使得水体抗风浪能力增强, 可以抑制磷的再悬浮作用, 沉积物磷不参与再循环<sup>[28]</sup>, 因此水体总磷浓度升高幅度不大。

从1970年开始为湖泊的显著富营养化时期。Pinus 含量继续保持低值且有降低趋势, 植被仍未得到恢复, 细颗粒含量增多, 表明人类砍伐森林, 农业耕作活动继续加强。此外70年代以来该地区开始大量使用 N、P、K 化肥<sup>[19]</sup>, 化肥的使用增加了农田磷的流失, 入湖磷负荷明显增加, 因此沉积物磷含量持续升高。而且, 资料记载了在这个时期湖泊的养鱼规模急剧扩大, 并从自然放养发展到种苗放养并投放饵料(包括部分化肥)<sup>[29]</sup>, 加速了水体总磷的聚集速率和湖泊水生植被丢失, 最终造成水生生态系统功能的退化。同时80年代末期以来在该湖西面的武山湖周围, 相继建立了数个小型化工厂(以制药和造纸业为主), 污水的排放导致水环境进一步恶化<sup>[29]</sup>。

上述营养演化阶段特征及主要驱动因素在 RDA 分析的结果中有直观的体现 (图 2)。RDA 分析能通过拟合各个样品中硅藻组合与环境因子间的响应关系, 将其显示在二维空间排序图上<sup>[6]</sup>。本研究中各样品带界限清晰, 表明了不同驱动因素下的环境响应差异性。图 2 中, 从 TB1 到 TB2 带, 样品主要沿着 TOC 升高的方向排列, 且均分布在 *Pinus* 的高值端 (正方向上) 与沉积物磷、 $\chi_{fd}$  的低值端 (负方向上), 表明在人类活动相对较弱的环境背景下, 营养水平主要气候因素的影响, 如温度和降水, 和 TOC 的变化具一致性。降水量和温度 (影响蒸发量) 控制着湖泊的水量平衡状况, 直接影响湖泊水体的收缩和扩张, 进而影响湖泊水体离子浓度<sup>[30]</sup>。同时水体总磷重建结果显示 TB1、TB2 带营养状态变化不大, 这说明在自然条件如气候波动变化的情况下, 湖泊由中营养状态向中富营养状态的演化过程极其缓慢, 湖泊富营养化可能性小。就太白湖而言, 这种自然因素控制下的营养水平 (总磷浓度  $50 \mu\text{g/l}$ ) 基本上代表了强烈人类活动前的湖泊营养特征<sup>[10]</sup>, 其营养背景值较高。此外图 2 中除 TB1 带外所有的样点均沿着 *Pinus* 减少、沉积物磷及  $\chi_{fd}$  增加的方向排列, 表明了该湖富营养化主要是由于人类活动不断加强所造成的, 而且从营养开始富集到富营养化的发生仅仅经过数十年时间, 这说明尽管人类活动的方式有所不同, 但在长江中下游湿润温暖的气候条件及较高营养背景值下, 任何不当的或过度的人类活动都极易触发湖泊富营养化乃至湖泊生态系统功能的退化。因此在该湖的富营养化治理上, 必须控制流域内不当的人类活动, 需对湖泊资源进行合理的开发与利用。

## 4 结论

(1) 冗余分析能有效地对多个沉积指标进行统计检验, 并确定对湖泊环境变化具最大解释能力的最小变量组。对太白湖沉积柱的所有指标进行冗余分析发现共包含松花粉的百分含量、沉积物磷浓度、频率磁化率及有机碳含量等 4 个变量的最小沉积指标的组合能显著解释水环境变化, 与全部变量组合解释的信息量相比, 仅损失了 6.1% 的信息。

(2) 太白湖开始发生显著富营养化的时间为 1970 年左右, 并于 1989 年进一步恶化。沉积物指标分析结果与历史记载的气候、人类活动信息具有较好的一致性。沉积记录表明: 1924 年前的低营养水平主要受寒冷、多降水的自然气候因素所控制; 1924 年后的营养水平由低至高、1970 年后的富营养化则主要受人类活动如毁林、湖泊围垦及近代以来的农业规模扩大、养殖业的发展、工业生活废水的排放的影响。

(3) 人类活动加强是太白湖近代富营养化发生的主要原因, 为避免水环境继续恶化, 必须控制流域内不当的人类活动, 需对湖泊资源进行合理的开发与利用。

## 参考文献:

- [1] Battarbee R W. The importance of palaeolimnology to lake restoration. *Hydrobiologia*, 1999, 395:149~159.
- [2] Bradshaw E G, Rasmussen P, Odgaard B V. Mid- to late-Holocene land-use change and lake development at Dal-lund Sø, Denmark: Synthesis of multiproxy data, linking land and lake. *Holocene*, 2005, 15:1152~1162.
- [3] Mackay A W, Battarbee R W, Birks H B, *et al.* Global Change in the Holocene. London: Arnold, 2003.
- [4] Birks H B. Numerical tools in palaeolimnology: Progress, potentialities and problems. *J. Paleolimnol.*, 1998, 20: 307~332.
- [5] ter Braak C J F, Smilauer P. CANOCO Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows (version 4.5). New York: Centre for Biometry Wageningen, 2002.

- [6] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, 1992, 73: 1045~1055.
- [7] Hall R, Smol J P. Diatom as indicators of lake eutrophication. In: Eugene F. (eds.). *The Diatom: Application for the Environmental and Earth Science*. London: Cambridge University Press. 1999. 128~168.
- [8] Korsman T, Renberg I, Anderson N J. A palaeolimnological test of the influence of Norway spruce (*Picea abies*) immigration on lake-water acidity. *Holocene*, 1994, 4: 132~140.
- [9] Eastwood W J, Tibby J, Roberts N, Birks H B, *et al.* The environmental impact of the Minoan eruption of Santorini (Thera): Statistical analysis of palaeoecological data from Gölhisar, southwest Turkey. *Holocene*, 2002, 12: 431~444.
- [10] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰. 太白湖 400 多年来沉积硅藻记录及湖水总磷的定量重建. *湖泊科学*, 2006, 18(6): 680~688.
- [11] Battarbee R W. Diatom analysis. In: Berglund B E (eds.). *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. Chichester: Wiley, 1986. 527~570.
- [12] Krammer K, Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae (1-4Teil). In: Ettl H, *et al.* (eds.). *Süßwasserflora von Mitteleuropa*. Stuttgart and Jena: Gustav Fischer Verlag, 1986~1991.
- [13] Overpeck J T, Webb T I, Prentice I C. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra: Dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quat. Res.*, 1985, 23: 87~108.
- [14] Grimm E C. CONISS: A Fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences*, 1987, 13: 13~35.
- [15] 杨存建, 刘纪远, 黄河, 等. 热带森林植被生物量与遥感地学数据之间的相关性分析. *地理研究*, 2005, 24(3): 473~479.
- [16] 罗明, 张镜铨, 何书金, 等. 基于因子分析的中国西部土地利用程度分区. *地理研究*, 2001, 20(6): 731~738.
- [17] 羊向东, 沈吉, Richard T J. 云南洱海盆地早期人类活动的花粉证据. *科学通报*, 2005, 3(50): 238~245.
- [18] Anderson N J. Reconstructing historical phosphorus concentrations in rural lakes using diatom models. In: Tunney H *et al.* (eds.). *Phosphorus Loss from Soil to Water*. Oxford: CAB International, 1997.
- [19] 羊向东, 王苏民, 沈吉, 等. 近 0.3ka 来龙感湖流域人类活动的湖泊环境响应. *中国科学(D辑)*, 2001, 31(12): 1031~1038.
- [20] Dean W E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments. *J. Paleolimnol.*, 1999, 21(4): 375~393.
- [21] 汪品先, 等. *古湖泊学译文集*. 北京: 海洋出版社, 1991.
- [22] 张丕远 主编. *中国历史气候变化*. 济南: 山东科学技术出版社, 1996.
- [23] 叶愈源, 赵文兰. 近 500 年长江中游气候变化的初步研究. *成都气象学院学报*, 1994, 29(2): 51~57.
- [24] 王铮, 黎华群, 孔祥德, 等. 气候变暖对中国农业影响的历史借鉴. *自然科学进展*, 2005, 15(6): 706~713.
- [25] Leira Manel. Diatom responses to Holocene environmental changes in a small lake in northwest Spain. *Quaternary International*, 2005, 140-141: 90~102.
- [26] Bradbury J P. *Diatom Stratigraphy and Human Settlement in Minnesota*. Geological Society of America; Special Paper 1975.
- [27] Karst T L, Smol J P. Paleolimnological evidence of limnetic nutrient concentration equilibrium in a shallow, macrophyte-dominated lake. *Aquat. Sci.*, 2000, 62: 20~38.
- [28] Scheffer M, Hosper S H, Meijer M L, *et al.* Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends Ecol. Evol.*, 1993, 8: 275~279.
- [29] 简永兴, 王建波, 何国庆, 等. 湖北省海口湖、太白湖与武山湖水生植被多样性的比较研究. *生态学报*, 2001, 21(11): 1815~1824.
- [30] Shari E F, Roland I Hall. Effects of drought-induced acidification on diatom communities in acid-sensitive Ontario lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 2003, 48(4): 1662~1673.

# Application of redundancy analysis in predigesting sedimentary proxies for paleolimnological research: A case study of Taibai Lake

DONG Xu-hui<sup>1,2</sup>, YANG Xiang-dong<sup>1</sup>, LIU En-feng<sup>1</sup>, WANG Rong<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;

2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Taibai Lake, a shallow lake with a surface area of 26.1 km<sup>2</sup>, is a presently algae-dominant lake and experiences obvious eutrophication. A multi-proxy analysis including diatoms, pollen, grain size, magnetic susceptibility and selected elements were applied to a 50 cm long sediment core extracted from Taibai Lake. Series of multivariables analysis such as canonical correspondence analysis (CCA), redundancy analysis (RDA) based on those proxies revealed that the minimum variables combination including *Pinus* percentage, sediment phosphorus, frequency-dependent susceptibility and total organic carbon percentage could explain significantly most of the variation of diatom community, which could reflect the changes of lake's nutrient status. The four proxies explained 51.5% of the diatom variance, only 6.4% less than those explained by all the sedimentary proxies, which is 57.9%.

Based on the four indices mentioned above and the reconstructed historical total phosphorus concentration, four developmental phases were distinguished as follows. (1) 1800-1863AD: the earlier deforestation led to much intensive erosion, which resulted in much nutrient input. While the lake kept lower nutrient status as nutrient concentration was diluted by the sufficient precipitation. (2) 1863-1924AD: the lake was still in a mesotrophic status for the weakened human impacts. (3) 1924-1970AD: human activities became stronger and nutrient input increased. However with the flourish of aquatic plant, parts of nutrient were absorbed and consequently the nutrient concentration increased slowly. (4) Since 1970 the lake has gradually become much obvious eutrophic with the development of much stronger human activities including reclamation, fish-stocking and modern agriculture, as well as the discharge of waste water from local factories and dwellers. The four phases were also illustrated clearly by the RDA bi-axis plot, which indicated different driving mechanism for lake environmental change in different periods.

The sediment records in Taibai Lake showed that human activities played an important role in the recent eutrophication process. It also concluded that lakes with higher nutrient background is much apt to become eutrophicated enforced by human activities, consequently rational management or exploitation will be necessary to protect Taibai Lake from further water quality deterioration.

**Key words:** redundancy analysis (RDA); sedimentary proxy; diatom; eutrophication; Taibai Lake