

青藏高原兹格塘错沉积记录的全新世水位变化事件及其原因初步研究

李世杰^{1,2}, Bernd Wünnemann³, 夏威岚¹, 于守兵^{1,4}, 沈德福^{1,4}, 姜永见^{1,4}

1. 中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室 江苏 南京 210008
2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002
3. Interdisciplinary Centre of Ecosystem Dynamics Central Asia, Free University Berlin, D12249 Berlin, Germany
4. 中国科学院 研究生院, 北京 100039

Li Shijie^{1,2}, Bernd Wünnemann³, Xia Weilan¹, Yu Shoubing^{1,4}, Shen Defu^{1,4}, Jiang Yongjian^{1,4}

1. State Key Laboratory of Lake Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
3. Interdisciplinary Centre of Ecosystem Dynamics Central Asia, Free University Berlin, D12249 Berlin, Germany
4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Li Shijie, Bernd Wünnemann, Xia Weilan et al. A preliminary study of the Holocene lake level changes and their causes derived from the sediment record of Zigetang Lake, Tibetan Plateau. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(6): 162-167

Abstract: The Zigetang Lake is an enclosed lake, located in the hinterland of the North Tibetan Plateau and within the marginal region of southwest monsoon. There is no distribution of glacier in the catchment, and the precipitation controlled by the southwest monsoon is the main water supply for the Zigetang Lake. Therefore, the expansion and contraction of lake water area reflects the changes of southwest monsoon directly. The carbonate concentration of enclosed lake sediments in semi-arid region indicates the changes of the lake level sensitively. The carbonate concentration in the sediment core of Zigetang Lake has generally been in high value but there were several abrupt lowering stages during the Holocene period, which could reveal the evolution stages of the lake level better when associated with the changes of soluble salt (Cl^- and SO_4^{2-}) concentration in the sediment core. The analysis results for a 740 cm-long core drilled in the central Zigetang Lake show that this core has completely covered the whole Holocene period and that the carbonate concentration decreased greatly during 9 3-8 9 cal ka BP, 8 3-7 8 cal ka BP, 5 0-4 7 cal ka BP, 4 0-3 8 cal ka BP, and 3 1-2 7 cal ka BP, respectively, indicating the desalination of the lake and the rise of the lake level. The high value of carbonate and soluble salt (Cl^- and SO_4^{2-}) content around 3 8 cal ka BP indicates the increase of salinity and the decline of the lake level. The content of carbonate and soluble salt decreased gradually since 1 cal ka BP, which indicates the gradual desalination of the lake and the slow rise of the lake level. However, the increase of soluble salt content in the past 100 years indicates the contraction of lake water area and the decline of the lake level, which is in accord with the warming and drying process of the climate. The fluctuations of southwest monsoon

收稿日期: 2009-11-01; 修回日期: 2009-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40471001); 中国科学院重要方向性项目(KZCXZ-YW-338)

作者简介: 李世杰(1954—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 长期从事湖泊沉积与环境变化研究。E-mail: shjli@niglas.ac.cn; lishijie@vip.gyig.ac.cn

during the Holocene can be derived from the five extremely low value events of carbonate concentration in the sediment core from the Zigetang Lake.

Key words: Tibetan Plateau; Zigetang Lake; sediment record; Holocene lake level; southwest monsoon

摘要: 兹格塘错是一个内陆封闭型湖泊, 位于藏北高原腹地, 处于西南季风作用边缘地带。由于流域内无冰川分布, 湖泊补给主要靠大气降水, 因此水体的扩张与收缩能够直接反映西南季风的变化。半干旱气候地区湖泊沉积物碳酸盐含量能够敏感地反映水体的扩张与收缩。兹格塘错沉积物碳酸盐含量高, 与可溶盐(氯离子与硫酸根离子)含量变化结合能更好地揭示水体的演化阶段。分析结果表明, 在 9 3~8 9 cal ka BP、8 3~7 8 cal ka BP、5 0~4 7 cal ka BP、4 0~3 8 cal ka BP 和 3 1~2 7 cal ka BP 碳酸盐含量出现大幅度下降, 指示湖泊淡化、水位升高。但在 3 8 cal ka BP 左右碳酸盐含量和可溶盐(氯离子与硫酸根离子)含量同时出现峰值, 指示出湖泊水体盐度升高、水位出现下降; 近 1 cal ka BP 以来, 碳酸盐与可溶盐含量都呈现逐渐下降趋势, 表明湖泊水体逐渐淡化、水位缓慢上升的过程。但近 100 a 来可溶盐含量上升, 指示出湖泊水体的不断浓缩和水位下降过程, 这和近百年的气候暖干化过程是一致的。兹格塘错沉积岩心碳酸盐含量全新世以来 5 次极低事件, 有力地证明青藏高原西南季风在全新世期间的不稳定性。

关键词: 青藏高原; 兹格塘错; 沉积记录; 全新世湖泊水位; 西南季风

中图分类号: P534 632 文献标志码: A 文章编号: 1005-2321(2009)06-0162-06

湖泊沉积以分辨率高、分布范围广、时间跨度大、信息量丰富和连续性好等优点备受重视, 尤其是干旱、半干旱地区的封闭型湖泊沉积, 是环境变迁的忠实记录者^[1]。青藏高原独特的自然环境条件使得高原湖泊对气候变化尤为敏感。

兹格塘错是位于藏北高原中部的封闭型湖泊, 处于西南季风作用边缘地带, 流域内无冰川活动且不受人类活动直接影响, 湖泊沉积记录能够敏感地反映西南季风的强弱变化。

沈永平等曾于 1989 年对兹格塘错和错那进行考察, 指出湖区内发育的 10 道砂砾堤反映了该区气候与环境的波动^[2]。1998—1999 年李世杰等发现兹格塘错存在温跃层和化跃层共存现象, 并证实兹格塘错是半混合型湖泊, 同时在沉积岩心中发现纹层^[3-4]。湖泊纹层沉积是提供高分辨率沉积记录的良好载体, 其形成反映了沉积物陆源输入、沉积环境化学条件和生物活动的时空变异^[5], 受到很多学者重视^[6]。

1 区域概况

兹格塘错(32°00'~32°09'N, 90°44'~90°57'E)位于藏北高原腹地、唐古拉山南坡东巧盆地内, 地处羌塘高寒草原半干旱地带东南边缘, 是一个典型的高原封闭型湖泊(图 1)。流域内人类活动很少, 没有冰川分布, 水量平衡因素简单。

湖面海拔 4 560 m, 最大深度 38 9 m, 湖泊面积

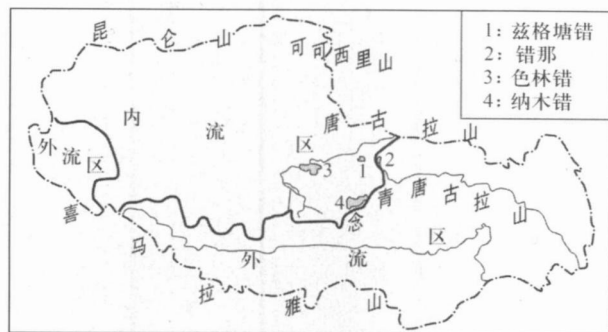


图 1 兹格塘错地理位置

Fig 1 Location of Zigetang Lake

187 km²。流域面积 3 430 km², 湖泊补给系数 17.3。1958—1998 年多年平均气温 -0.4~-3.4 °C, 多年平均降水量为 240~500 mm, 多年平均蒸发量为 791.9~1 111.5 mm。湖水盐度为 41.36 g/L(1998 年与 1999 年平均值), 属于重碳酸盐类钠组第 I 型水。

2 样品采集与定年

2002 年在兹格塘错湖水水深 30 m 处(图 2) 采得 740 cm 长的沉积岩心。50 cm 以上 0.5 cm 间隔分样, 以下 1 cm 间隔分样。沉积物粒级以粘土为主, 整体变化不大。岩心具有明显的色泽变化特征, 微层理发育(图 3)。沉积过程稳定、连续, 很好地记录了湖泊沉积环境的演化过程。

表层样品采用²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 定年, 得到近 50 a

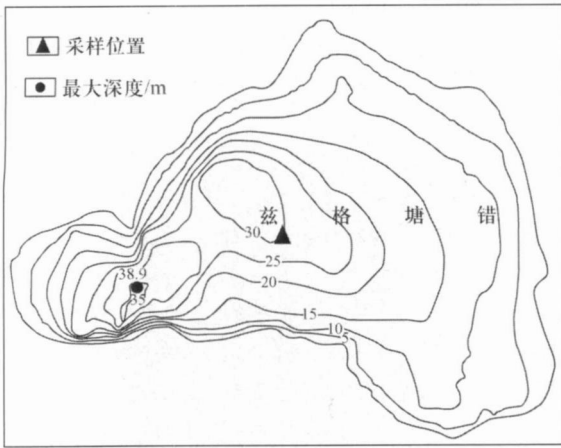


图2 采样点位置及兹格塘错等深线

Fig. 2 Location of sediment core and isobaths of Zigetang Lake

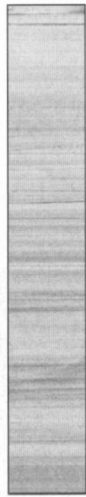


图3 沉积岩心照片

Fig. 3 Image of the sediment core

来平均沉积速率为 0.8 mm/a。其他层位时间确定通过¹⁴C AMS 测年, 并采用 Calib 5.0 程序^[7] 进行日历年代校正(表 1)。根据校正结果计算出各个阶段沉积速率, 内插出深度年代曲线(图 4)。

表 1 ¹⁴C AMS 测年与日历年代校正Table 1 ¹⁴C AMS dating data and calibrated ages

样品深度 / cm	测年代号 (Lab No.)	¹⁴ C 年代 / a BP	校正区间为 2σ 的日历年代 / cal a BP
149 ~ 155	Poz-9737 *	3 505 ± 40	3 395 ± 108
348	beta 190787 [‡]	4 020 ± 50	4 475 ± 54
448 ~ 450	Poz-9735 *	6 430 ± 90	6 926 ± 224
528 ~ 530	Poz-9660 *	7 310 ± 90	7 771 ± 172
740 ~ 741	beta 187652 [‡]	9 490 ± 50	10 725 ± 65

注: * 代表在波兰分析完成, 采用沉积物中生物头壳几丁质¹⁴C 测年; [‡] 代表在美国分析完成, 采用沉积物有机质¹⁴C 测年。

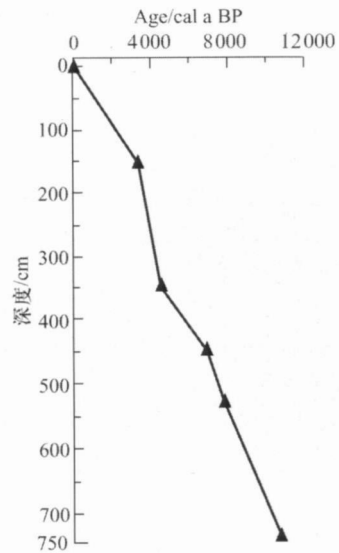


图4 深度-日历年代校正年代曲线

Fig. 4 Depth-calibrated age curve

沉积物上部的年代测定是在两次柱状岩心采集并分别进行²¹⁰Pb、¹³⁷Cs 的测定, 根据¹³⁷Cs 的峰值标志层分布均得出一致的 0.8 mm/a 的平均沉积速率, 这和用两次²¹⁰Pb 测定计算的结果非常吻合, 姚书春等^[15] 专门著文对其进行了论证, 证明其结果的可信度。其岩心的¹⁴C 年代测定, 是分别在美国和波兰不同实验室测定的, 在美国测定的样品是湖泊沉积碳酸盐样品, 而在波兰测定的样品是在沉积物中挑出的生物体, 故对在美国测定的年代进行了湖泊碳库效应的矫正(表一数据已经过碳库效应的校正), 而后再对年代进行了日历年代的矫正。

3 碳酸盐与可溶盐含量分析结果

采用化学中和滴定方法计算样品碳酸盐含量。样品置于 80 °C 烘箱烘干, 磨碎; 称重 0.12 ~ 0.20 g, 加入双氧水除去硫铁矿, 加入 0.1 mol/L HCl 溶液 20 mL; 高速离心机 4 000 rpm 离心, 取上层清液, 以 0.1 mol/L 进行中和滴定。根据消耗的 NaOH 溶液计算出上层清液中 HCl 的量, 从而得到与碳酸盐反应的 HCl 的物质的量, 最后计算出碳酸盐物质的量及其质量分数(以碳酸钙计)。

可溶盐含量采用中国科学院南京土壤研究所离子色谱仪(DIONEX LC 20、DIONEX ED 40 和 DIONEX GP 50)分析得到。可溶盐成分以硫酸根和氯离子为主, 其他阴离子含量很低。依据实验结果

作出碳酸盐与可溶盐含量变化曲线(图5)。

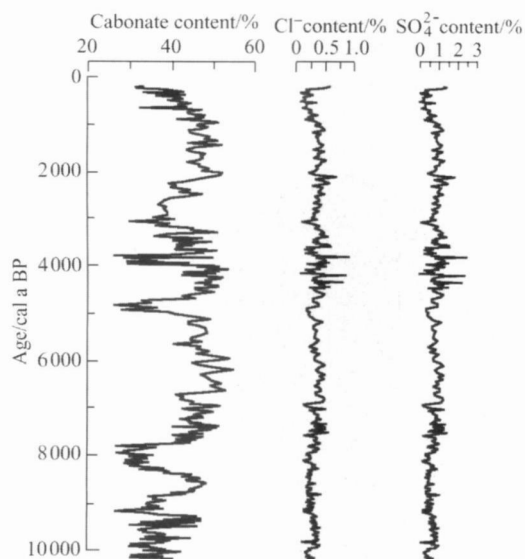


图5 沉积岩心碳酸盐与可溶盐含量变化曲线
Fig 5 The carbonate and soluble salt content variations in the sediment core

碳酸盐质量分数总体平均值为42%，最高为55%，最低为26%，波动幅度高达29%。可溶盐含量总体很低，氯离子质量分数为0.92%~0.08%，硫酸根质量分数为2.46%~0.02%，两者变化趋势几乎完全一致。碳酸盐含量很明显共出现5次极低时期，分别是9.3~8.9 cal ka BP、8.3~7.8 cal ka BP、5.0~4.7 cal ka BP、4.0~3.8 cal ka BP和3.1~2.7 cal ka BP，碳酸盐质量分数急剧下降，平均值分别降至34%、32%、32%、34%和30%。

4 碳酸盐与可溶盐含量所指示的水位变化事件

碳酸盐矿物是湖泊沉积物的常见组成部分，沉积作用机制比较复杂，然而大量的原生湖泊碳酸盐是无机的化学沉淀物^[8]。湖泊沉积物中随着气候变干可依次沉淀出碳酸盐、硫酸盐和氯化物。在湿润气候区多为外流湖，水体交换迅速，不利于碳酸盐沉积^[9]，而长期干旱地区，封闭湖泊逐渐演化成盐湖，碳酸盐沉积为其他盐类沉积所代替，沉积剖面中出现的碳酸盐沉积往往代表古气候相对偏湿的波动，例如柴达木盆地中碳酸盐矿物反映古气候中相对偏湿的气候波动^[10]。在半干旱气候条件下的封闭型湖泊，沉积物碳酸盐含量可有效地反映湖泊水位变化和流域环境的干湿变化，通常作为天然的雨量计

应用于许多湖泊研究中^[11-13]。

通常，在内陆湖泊盐类沉淀的碳酸盐阶段，含量增加反映了湖面下降和水质浓缩的过程。但是在碳酸盐整体含量很高的情况下，必须明确湖泊演化阶段才能对碳酸盐含量的指示意义做出正确的解释。兹格塘错沉积岩心碳酸盐总体质量分数平均值为42%，最高质量分数为55%，最低质量分数为26%，波动幅度高达29%。碳酸盐含量之高和波动幅度之大是鲜见的。这说明碳酸盐含量对湖泊水体扩张变化很敏感，从而能够有效地指示湖泊流域气候环境变化，但是必须结合可溶盐含量才能对碳酸盐指示意义作出合理解释。

当硫酸根和氯离子含量与碳酸盐含量都很低时，说明湖泊处于矿化度较低阶段，湖泊水位较高。而碳酸盐含量很低，但硫酸根和氯离子含量很高时，则说明湖泊演化过程的碳酸盐沉积阶段已结束，进入盐湖沉积阶段，表明气候向干旱化发展。因此，沉积物中硫酸根和氯离子含量与碳酸盐含量的对比变化能够揭示湖泊水位变迁。

9.3~8.9 cal ka BP、8.3~7.8 cal ka BP、5.0~4.7 cal ka BP、4.0~3.8 cal ka BP和3.1~2.7 cal ka BP左右碳酸盐含量与可溶盐含量都很低，表明湖泊水体矿化度较低，处于较高的水位状态。而4.0~3.8 cal ka BP期间碳酸盐含量与可溶盐含量总体较低，但在3.8 cal ka BP同时出现峰值，指示整体水位出现的短暂下降。近1 cal ka BP以来，碳酸盐与可溶盐含量逐渐下降，这与小冰期期间的总体冷湿气候相对应。但近100 a来可溶盐含量开始回升，反映气候变暖的过程。

青藏高原封闭湖泊流域存在的古湖泊砂砾堤，是湖泊水位稳定的地貌特征。兹格塘错西南部湖滨发育13道砂砾堤，东南部湖滨发育8道砂砾堤。其中东南部的第5道砂砾堤底部砂砾层热释光测年为 (8.3 ± 0.8) ka BP，证实了8.3~7.8 ka BP的高水位。据贾玉连等现场考察，当时湖面高出现代8 m，面积比现代大56 km²^[14]。

兹格塘错是处于西南季风作用边缘地带的高原封闭型湖泊，流域内无冰川活动，并且不受人类活动直接影响，因此湖泊水位变化敏感地反映了西南季风的强弱。碳酸盐含量极低时期对应着湖泊水体的扩张，指示着西南季风的增强。这有力地证明了全新世西南季风的不稳定性。

5 结论

(1) 兹格塘错碳酸盐含量很高, 总体平均质量分数为 42%; 波动幅度很大, 最高质量分数为 55%, 最低质量分数为 26%, 波动幅度高达 29%。

(2) 9.3~8.9 cal ka BP、8.3~7.8 cal ka BP、5.0~4.7 cal ka BP、4.0~3.8 cal ka BP 和 3.1~2.7 cal ka BP 碳酸盐含量与可溶盐含量都很低, 表明湖泊水体矿化度较低, 处于较高的水位状态。但在 3.8 cal ka BP 出现峰值, 指示湖泊水位出现明显下降; 近 1 cal ka BP 以来, 碳酸盐与可溶盐含量逐渐下降, 反映湖泊水体逐渐淡化、水位不断上升的过程, 这与小冰期冷湿气候特征相符, 但近 100 a 来可溶盐含量开始回升, 与 20 世纪气候变暖过程相一致。

(3) 兹格塘错处于西南季风作用边缘地带, 湖泊水位的上升指示西南季风作用的强盛, 碳酸盐含量出现的 5 次极低值的突然变化, 有力地证明全新世西南季风的不稳定性。

References:

- [1] Wang S M, Li J R. Lacustrine sediments—An indicator of historical climatic variation—The case of Qinghai Lake and Daihai Lake[J]. Chinese Science Bulletin, 1991, 36(16): 1364-1368(in Chinese).
- [2] Shen Y P, Xu D M. Fluctuations of lakes and their environments since last glaciation in Amdo area, Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(2): 173-180(in Chinese).
- [3] Li S J, Li W C, Xia W L, et al. The scientific expedition on the modern lake evolution in the Qinghai-Tibet Plateau: A preliminary report[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(4): 95-96(in Chinese).
- [4] Li W C, Li S J, Yin Y, et al. Meromixis in Zigetangco, central Tibetan Plateau—Discovery and significance[J]. Science in China: Series D, 2001, 44(Suppl 1): 338-342(in Chinese).
- [5] Li W C, Li S J, Pu P M. Review on the high-resolution varved lake sediments as a proxy of paleoenvironment[J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(2): 172-176(in Chinese).
- [6] Liu J Q, Liu D S, Chu G Q, et al. Maar lake and varve chronology[J]. Quaternary Sciences, 1996(4): 353-358(in Chi-

nese).

- [7] Stuiver M, Reimer P J. Extended ¹⁴C database and revised CALIB radiocarbon calibration program[J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215-230.
- [8] Lerman A. Lakes Chemistry Geology Physics[M]. Translated by Wang S M, et al. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 306(in Chinese).
- [9] Wang Y F. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic-environmental evolution—A case study of Qinghai lake and daihai lake[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(1): 31-36(in Chinese).
- [10] Chen K Z, Bowler J M. Preliminary study on sedimentary characteristics and evolution of palaeoclimate of Qarhan salt lake in Qaidam Basin[J]. Science in China: Series B, 1985(5): 463-473(in Chinese).
- [11] Li S J, Qu R K, Zhu Z Y, et al. A carbonate content record of late Quaternary climate and environment changes from lacustrine core TS95 in Tianshuihai Lake Basin, Northwestern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(2): 58-65(in Chinese).
- [12] Cao J T, Xu A X, Wang S M, et al. Carbonate content record of climate and environment changes from lacustrine core in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1999(4): 21-26(in Chinese).
- [13] Zhang E L, Shen J, Wang S M, et al. Climate and environment change during the past 900 years in Qinghai Lake[J]. Journal of Lake Sciences, 2002, 14(1): 32-38(in Chinese).
- [14] Jia Y L, Wang S M, Wu Y H, et al. Preliminary study of lake evolution and precipitation of Zigetangco and Coe Basins, Central Qinghai-Xizang Plateau, since 24 ka BP[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2003, 34(3): 283-294(in Chinese).
- [15] Yao S C, Li S J, Zhang H C. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating of sediments from Zigetang Lake, Tibetan Plateau[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008(2): 1-4.

参考文献:

- [1] 王苏民, 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段——以青海湖、岱海为例[J]. 科学通报, 1991, 36(1): 54-56.
- [2] 沈永平, 徐道明. 西藏安多的湖泊变化与环境[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 173-180.
- [3] 李世杰, 李万春, 夏威夷, 等. 青藏高原现代湖泊变化与考察初步报告[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 95-96.
- [4] 李万春, 李世杰, 尹宇, 等. 青藏高原腹地半混合型湖泊的发现及其意义[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 44(增刊1): 338-342.

- [5] 李万春, 李世杰, 濮培民. 高分辨率古环境指示器——湖泊纹泥研究综述[J]. 地球科学进展, 1999, 14(2): 172-176.
- [6] 刘嘉麒, 刘东生, 储国强, 等. 玛珥湖与纹泥年代学[J]. 第四纪研究, 1996(4): 353-358.
- [8] 莱尔曼 A. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民, 等译. 北京: 地质出版社, 1989: 306.
- [9] 王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(1): 31-36.
- [10] 陈克造, Bowler J M. 柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究[J]. 中国科学: B 辑, 1985(5): 463-473.
- [11] 李世杰, 区荣康, 朱照宇, 等. 24 万年来西昆仑山甜水海湖岩心碳酸盐含量变化与气候环境演化[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 58-65.
- [12] 曹建廷, 徐爱霞, 王苏民, 等. 内蒙岱海湖岩心碳酸盐含量变化与气候环境演化[J]. 海洋湖沼通报, 1999(4): 21-26.
- [13] 张恩楼, 沈吉, 王苏民, 等. 青海湖近 900 年来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学, 2002, 14(1): 32-38.
- [14] 贾玉连, 王苏民, 吴艳宏, 等. 24 ka BP 以来青藏高原中部湖泊演化及古降水量研究——以兹格塘错与错鄂为例[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 283-294.

《地学前缘》再获 “百种中国杰出学术期刊”称号

据中国科学技术信息研究所 2009 年 11 月 27 日发布的中国科技论文统计结果,《地学前缘》再获“百种中国杰出学术期刊”称号。