

モンゴル高原東部ブイル湖の湖底堆積物を用いた過去100年間の環境変動解析
Environmental changes over the last 100 years
using a sediment core of Lake Buir in the eastern Mongolian Plateau

板山由依^{1*}・益木悠馬¹・南 雅代²・落合伸也³・丹羽正和⁴・
由水千景⁵・陀安一郎⁵・Davaasuren Davaadorj⁶・勝田長貴¹
Yui Itayama^{1*}, Yuma Masuki¹, Masayo Minami², Shinya Ochiai³, Masakazu Niwa⁴,
Chikage Yoshimizu⁵, Ichiro Tayasu⁵, Davaadorj Davaasuren⁶, Nagayoshi Katsuta¹

¹岐阜大学・²名古屋大学宇宙地球環境研究所・³金沢大学環日本海域環境研究センター・

⁴日本原子力研究開発機構東濃地科学センター・⁵総合地球環境学研究所・⁶モンゴル国立大学

¹ Gifu University, Yanagido, Gifu 501-1112, Japan.

² Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan.

³ Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University, Nomi 923-1224, Japan.

⁴ Japan Atomic Energy Agency, Toki 509-5102, Japan.

⁵ Research Institute for Humanity and Nature, Kyoto 603-8047, Japan.

⁶ School of Art and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar 14201, Mongolia.

*Corresponding author. E-mail: itayama.yui.e0@s.gifu-u.ac.jp

Abstract

This study investigated a short sediment core Buir-2 with total length of 49 cm, retrieved from Lake Buir in the eastern Mongolian Plateau. The sediment core was dated at 1901–2020 CE based on the ¹³⁷Cs–²¹⁰Pb ages. The turbidite bed with the core depth of 22–35 cm was detected from the grain size composition. Since the depositional age was dated at 1955 ± 5 CE, the deposition possibly marks an episode of tectonic activations, such as 1957 CE ($M = 7.8$) Muisik events, northeastern Lake Baikal and 1957 CE ($M = 8.1$) Gobi-Altai earthquake, southern Mongolia. After removing the turbidite bed from the geochemical records of Lake Buir sediment core, we obtained the turbidite-removed temporal records. The $\delta^{13}\text{C}$ of total organic carbon (TOC) and TOC/total nitrogen molar ratio indicates that the organic matters of Buir-2 core are dominated by phytoplankton, the ratio of which has increased since 1901 CE following the decrease in precipitation. Biogenic silica (BioSi) and TOC contents, reflecting the biological production of the lake, have been increased since 1955 CE following the increase in annual mean temperature. Similarly, the carbonate contents show a progressive increasing trend since 1955 CE, probably due to the aridification in this region.

Keywords: sediment; stable isotopic ratio; Asian monsoon

1. はじめに

モンゴル高原東部・ブイル湖 (Fig. 1a) は、中国とモンゴルの国境に位置する淡水湖である (Fig. 1b)。湖の平均水深は約8 m (最水深部は約10 m)、面積は615 km² (琵琶湖の0.9倍) である。主要流入河川は湖の南東のハルハ川であり、流出河川はオルシュン川となり、中国のフルン湖に注いでいる。また、湖周辺の年平均気温は3.5°C (2020年)、年平均降水量は360.1 mm (2020年) であり、ステップ

が広がる (Fig. 1)。また、この地域の気候は、東アジア夏季モンスーン境界に位置し、集水域は半乾燥地帯とモンスーン地帯から成る。本研究では、ブイル湖地域の古環境変動とその変動要因を解明することを目的とし、湖底堆積物の分析を行った。本稿では、過去約100年間のブイル湖堆積物コアの粒度組成、化学組成、安定同位体組成記録を報告する。

2. 試料と方法

分析試料は、2020年3月にブイル湖で重力式採泥器を用いて掘削した全長49 cmの堆積物コア (Buir-2) である (Fig. 2b)。試料は、1 cm間隔で分取した後、凍結乾燥した。堆積物の年代は、 ^{210}Pb – ^{137}Cs 年代測定 (金沢大学環日本海域環境研究センター) により決定した。生物源シリカ (BioSi) は、50 mgの乾燥試料を用いて、2 mLの10%過酸化水素で有機物を、1 mLの1 mol/L塩酸で炭酸塩をそれぞれ除去した後、10 gの2 mol/L炭酸ナトリウム溶液を用いて抽出した (Mortlock and Froelich, 1989)。そのSi含有量は、誘導結合プラズマ発光分析装置 (ICP–AES、岐阜大学) により求めた。炭酸塩量は、過酸化水素処理後と塩酸処理後のサンプルの質量差として算出した。また、BioSi成分抽出後の残渣 (ケイ酸塩鉱物) は、全含有量から3つの各分画の含有量を差し引いて求め、その粒径はレーザー回折散乱分析 (JAEA東濃) により求めた。全有機炭素 (TOC)、全窒素 (TN)、全硫黄 (TS) 含有量は、遊星型ボールミルで粉碎混合した試料を有機元素分析装置 (vario MICRO CUBE、名古屋大学宇宙地球環境研究所) で定量した。50 mgのTOC乾燥試料は、分析に先立ち、5 mLの1 M塩酸で脱炭酸塩処理した。TOCとTNの安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ と $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$) は、燃焼型元素分析計を接続した安定同位体比質量分析計 (CN–IRMS、総合地球環境学研究所) により求めた。使用した標準試料は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ が $^3\text{VPDB}$ (Vienna Peedee Belemnite) で規格化されたCERKU–02 (L–アラニン、 $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2$; Tayasu et al., 2011) と04 (L–ロイシン、 $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_2$; Tayasu et al., 2011)、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ が大気窒素で規格化されたCERKU–04と05 (L–トレオニン、 $\text{C}_4\text{H}_9\text{NO}_3$; Tayasu et al., 2011) である。

3. 結果と考察

Buir-2コアの岩相 (Fig. 2a) は、明灰色粘土質シルトを主体とし、深度22~35 cmは暗灰色シルト層から成る。鉱物粒径 (Fig. 2b) は、明灰色粘土質シルト層が平均 $8.8 \pm 2.3 \mu\text{m}$ 、深度22~35 cmは平均 $28.1 \pm 9.3 \mu\text{m}$ であり、深度22~35 cmの層準は、他の層準に比べて粗粒であった。この粗粒層は、上方細粒化が見られることから、タービダイト層とみなすことができる (Fig. 2b)。

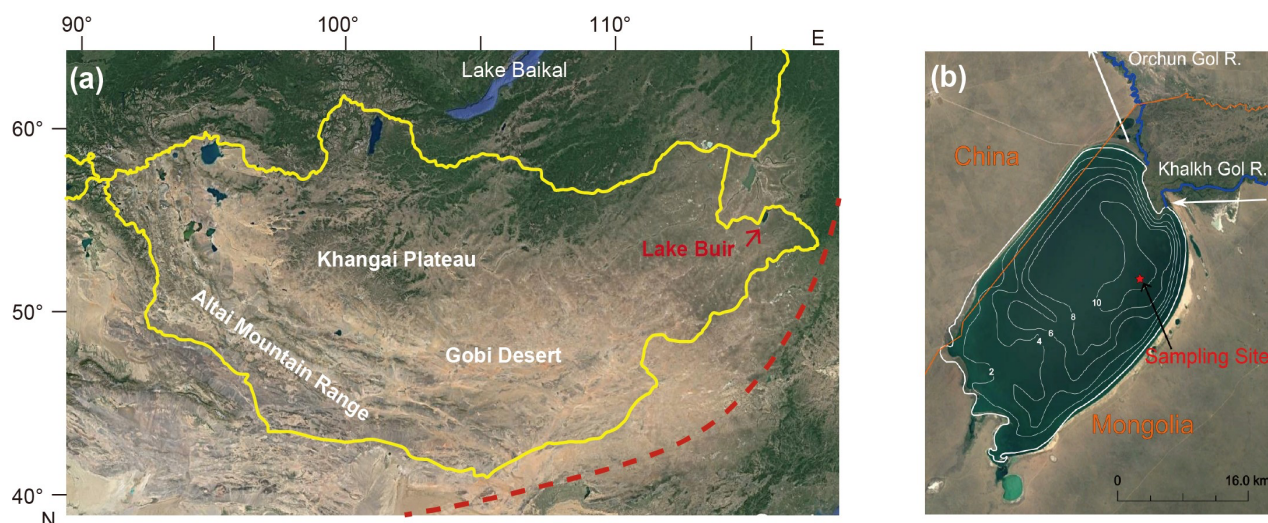


Fig. 1. Maps of (a) the Mongolian Plateau and (b) Lake Buir. A red star in (b) indicate the sampling site of Buir-2 sediment core. A red dotted line in (a) indicates the modern East Asian summer monsoon limit.

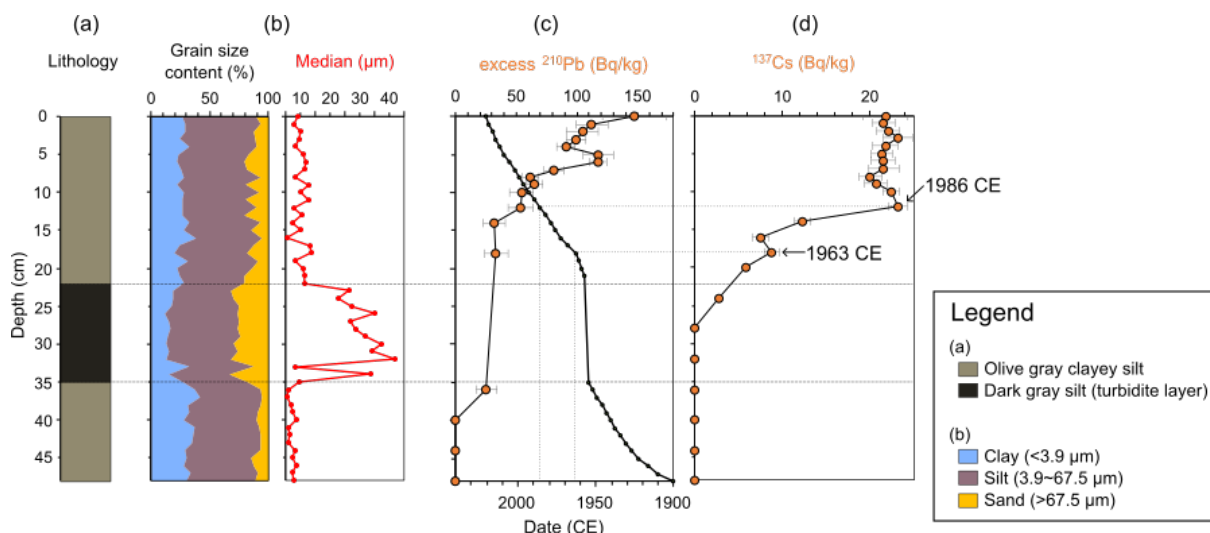


Fig. 2. Sediment and ages for the Buir-2 core: (a) lithology, (b) grain size and median size, (c) excess ^{210}Pb activity, and (d) ^{137}Cs activity.

Buir-2コアの $\text{excess } ^{210}\text{Pb}$ (Fig. 2c) は、深度0–14 cm、18 cm、36 cmで検出されたが、深度16 cm、20–32 cm、40 cm以深では、 $\text{unsupported } ^{210}\text{Pb}$ と $\text{supported } ^{210}\text{Pb}$ に有意な差が認められず、不検出であった。一方 ^{137}Cs は、Fig. 2dに示すように深度24 cmから検出され始め、深度12 cmで最大濃度 (23.2 ± 1.1 Bq/kg) となった。また、深度18 cmでも、濃度ピーク (8.8 ± 0.8 Bq/kg) が見られた。

以上の結果から、Buir-2コアの年代軸は、深度22–35 cmのタービダイト層を取り除き、CRSモデル (Appleby, 2001) による $\text{excess } ^{210}\text{Pb}$ 年代をもとに構築した。ここで、本研究は、 ^{137}Cs 濃度が最大であった深度12 cmを1986年、深度18 cmのピークを1963年と仮定した。1986年はチェルノブイリ原発事故、1963年は世界的に大気核実験による放射性降下物のピークである。本研究では、CRSモデルを用いたPb年代計算は、R言語のソフトウェアseracを用いた (Bruel and Sabatier, 2020)。その結果、Buir-2コアの堆積年代は西暦1901–2020年、平均堆積速度は 0.48 ± 0.91 cm/yrとなった。

Figure 3に、Buir-2堆積物の化学組成と安定同位体比の鉛直深度分布を示す。深度22–35 cmのタービダイト層では、炭酸塩、BioSi、TOC、TN含有量の低下と $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ の上昇が認められた。4成分の急激な低下は、タービダイト層による希釈効果によると考えられる。Buir-2のタービダイト層の原因として、地震活動による可能性が考えられる。タービダイトの最上層 (深度22 cm) の年代は、西暦 1957 ± 5 年であった。バイカル湖北東部では、1957年6月27日のMuisk地震 ($M = 7.8$) が発生した (Doser, 1991)。同年12月4日には、ゴビ-アルタイ山脈で $M = 8.1$ が発生した (Kurtza et al., 2018)。よって、2つの地震のいずれか、または両方の影響により、ブイル湖で地すべりが発生した可能性が考えられる。

Figure 4は、西暦1901–2020年のBuir-2堆積物の粒度組成、化学組成と安定同位体組成の記録を示す。また、Fig. 5は、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ とC/N比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ と $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ の関係を示す。炭酸塩、BioSi、TOC、TN含有量 (Fig. 4a–d) は、西暦1901–1955年にかけて低下し、その後は現在にかけて増加した。このうち、BioSiとTOC含有量変動の同調 ($R = 0.73$) は、堆積物中の有機物が、堆積期間を通じて、湖内の植物プランクトンに起因することを示唆するものである。この解釈は、Fig. 5に示すように、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ とC/N比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ と $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ の関係からも支持される (O' Leary, 1988; Meyers, 1999; Pu et al., 2023)。さらに、西暦1955年から現在にかけてのBioSiとTOC含有量の増加は、ERA5データ (Hersbach et al., 2020) で示される1950年代からの気温の上昇傾向と同調する (Fig. 4h)。これは、温暖化に伴う湖内の生物生産の増加を意味する。また、炭酸塩含有量の西暦1955年以降の増加は、温暖化と夏季モンスーン降水量の低下 (乾燥化) (Fig. 4i) に伴う湖水の蒸発作用の強化により、湖水の塩濃度の上昇で生じたと考えられる。一方

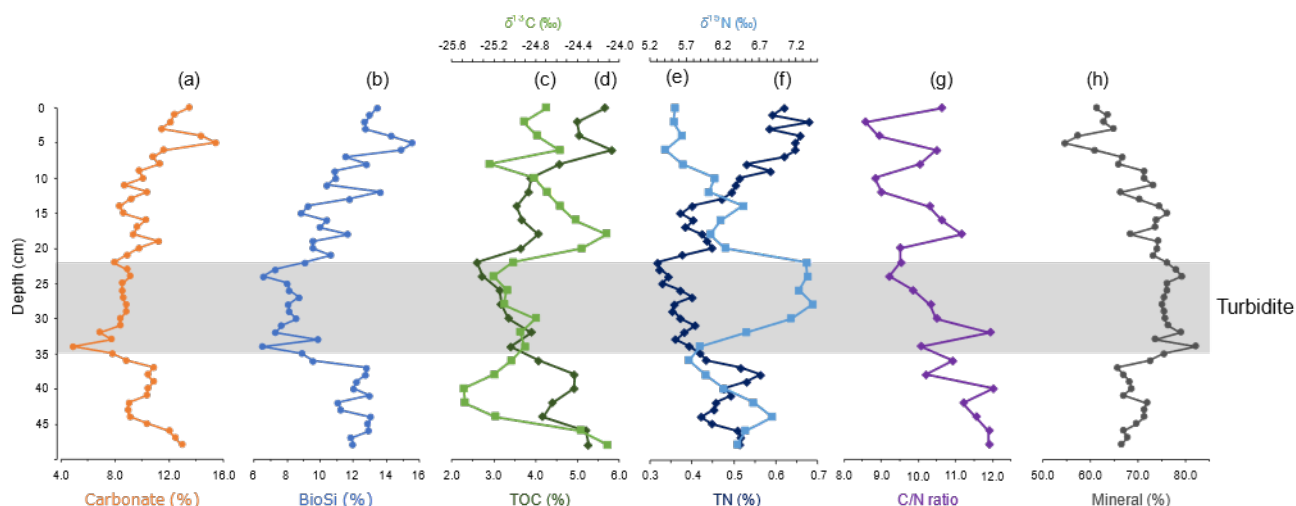


Fig. 3. Vertical depth profiles of Buir-2 sediments: (a) carbonate content; (b) BioSi content; (c) $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$; (d) TOC content; (e) $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$; (f) TN content; (g) C/N molar ratio; and (h) mineral content.

で、鉍物の含有量と粒径は現在にかけて減少傾向を示し (Fig. 4f, g)、降水量の変動パターン (Fig. 4i) と同調した。これは、黄海の堆積物研究 (Zhou et al., 2012) で示される粒径と夏季モンスーン降水量の正相関関係と整合するものである。したがって、鉍物含有量と粒径の減少傾向は、夏季モンスーン降水量の低下に伴う乾燥化による流域からの碎屑物流入量の減少に起因すると推察される。

4. 結論

本研究では、モンゴル高原東部・ブイル湖の西暦1901–2020年を記録する湖底堆積物 (全長49 cm) を用いて、粒度組成、化学組成、安定同位体組成を分析した。深度22–35 cmのタービダイト層は、西暦1957年にバイカル湖北東部とモンゴル・アルタイ山脈で発生した大規模地震によって形成されたと考えられる。堆積物の有機物は植物プランクトンから構成され、BioSiとTOC含有量で示される西暦1955年以降の生産量は、気温上昇に伴い増加してきた。同様に、堆積物の炭酸塩で示される西暦1955年以降の湖水の塩濃度の上昇は、温暖化と共に、夏季モンスーン降水量の減少によるものであることから、湖水の蒸発作用の強化に起因する。

謝辞

本研究は、JSPS科研費 (19KK0264, 23KK0192, 23H04840) と名古屋大学宇宙地球環境研究所共同利用 (2023-09-006) の助成を受けて実施したものである。

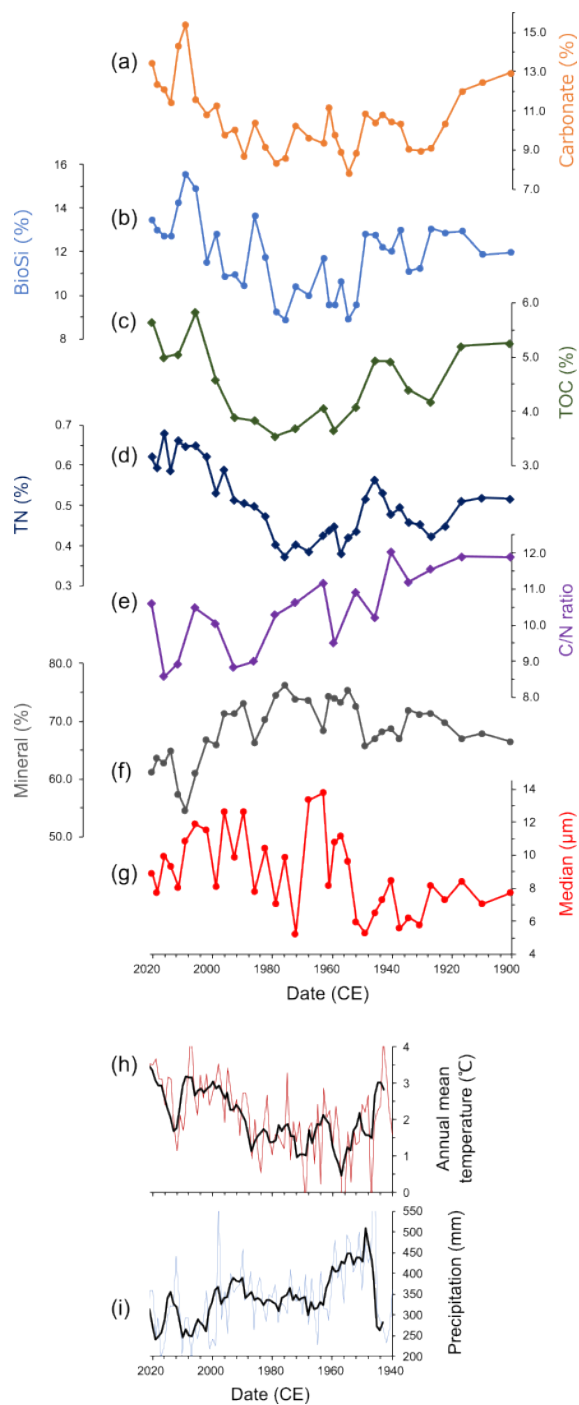


Fig. 4. Comparison of Buir-2 sediment proxy-records with meteorological instrument data. Records represent (a) carbonate content; (b) BioSi content; (c) TOC content; (d) TN content; (e) C/N molar ratio; (f) mineral content; (g) median grain size; (h) annual mean air temperature; and (i) annual mean precipitation. Black lines in (h)–(i) show the 4-year running mean. Climatological data in (h)–(i) are those of Lake Buir area (46°–47° N and 116°–117° E) derived from ERA 5 reanalysis.

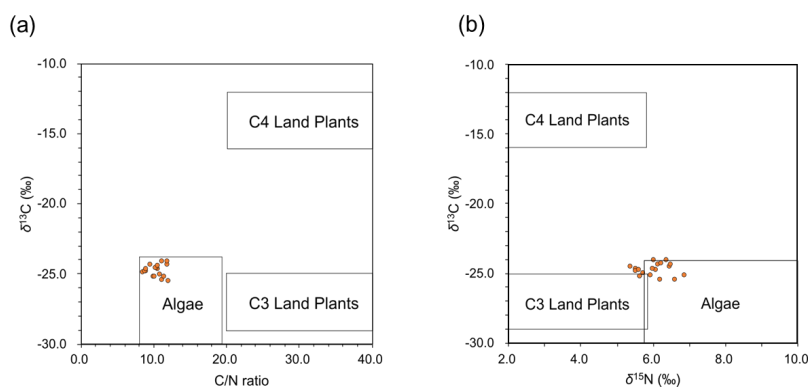


Fig. 5. Relationships between (a) $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ and C/N molar ratio and (b) $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ and $\delta^{15}\text{N}_{\text{TN}}$ for the Buir-2 sediment core excluding the turbidite layer (Fig. 3).

引用文献

- Appleby, P.G. (2001) Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last WM, Smol JP (eds) Tracking environmental change using lake sediments: basin analysis, coring, and chronological techniques, vol 1. Kluwer Academic, Dordrecht, pp 171–203.
- Bruel, R., Sabatier, P. (2020) serac: an R package for Short-lived radionuclide chronology of recent sediment cores. *J. Environ. Radioact.* **225**, 106449.
- Doser, D.I. (1991) Faulting within the eastern Baikal rift as characterized by earthquake studies. *Tectonophysics* **196**, 109–139.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **146**, 1999–2049.
- Kurtz, R., Klingerb, Y., Ferrya, M., Ritz, J.F. (2018) Horizontal surface-slip distribution through several seismic cycles: The Eastern Bogd fault, Gobi-Altai, Mongolia. *Tectonophysics* **734–735**, 167–182.
- Meyers, P.A., Lallier-Vergès, E. (1999) Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *J. Paleolimnol.* **21**, 345–372.
- Mortlock, R.A, Froelich, P.N. (1989) A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Res.* **36**, 1415–1426.
- O’Leary, M.H. (1988) Carbon isotopes in photosynthesis. *BioScience* **38(5)**, 328–336.
- Pu, Y., Meyers, P.A., Werne, J.P., Zhang, H. (2023) The paleolacustrine significance of sedimentary nitrogen isotopes: A comparative study of late Holocene records in two lakes on the eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Sci. Total Environ.* **893**, 164641.
- Tayasu, I., Hirasawa, R., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., Yamada, K. (2011) New organic reference materials for carbon- and nitrogen-stable isotope ratio measurements provided by Center for Ecological Research, Kyoto University, and Institute of Biogeosciences, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology. *Limnol.* **12(3)**, 261–266.
- Zhou, X., Sun, L., Huang, W., Cheng, W., Jia, N. (2012) Precipitation in the Yellow River drainage basin and East Asian monsoon strength on a decadal time scale. *Quat. Res.* **78**, 486–491.