

doi:10.3969/j.issn.2095-1035.2023.01.011

基于碳酸盐矿物数据估算色林错 5 000 a BP 以来的沉积无机碳通量

聂小芳^{1,2} 朱立平^{2,3} 韩作振^{1*} 李明慧² 王晓晓²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101;

3. 青藏高原国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要 湖泊沉积物碳通量是当前研究的重点内容, 湖泊沉积物中无机碳主要以碳酸盐矿物的形式存在, 而获取碳酸盐矿物中的无机碳含量的方法主要有 X-射线衍射(XRD)法和酸溶后测定法两种。基于西藏色林错钻孔沉积物的 X-射线衍射数据, 估算了沉积物每一种碳酸盐矿物和总无机碳的沉积碳通量, 并与西藏及其他地区酸溶法的数据进行对比, 发现 XRD 方法计算的沉积无机碳通量与酸溶法具有很好的 consistency。湖泊沉积物中无机碳通量的问题本质上是碳酸盐矿物的成因问题, 5000 a BP 以来, 色林错沉积的无机碳通量主要影响因素是干冷的气候, 文石矿物含量决定了色林错沉积总无机碳通量的高低变化。

关键词 大气 CO₂ 消耗; 水菱镁矿; 沉积无机碳通量

中图分类号: O657.34 TH744.15 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-1035(2023)01-0077-07

Estimation of Carbon Flux Since 5 000 a BP at Selin Co Based on Carbonate Minerals

NIE Xiaofang^{1,2}, ZHU Liping^{2,3}, HAN Zuozhen^{1*}, LI Minghui², WANG Xiaoxiao²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and
Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. National Key Lab of Tibetan Plateau, Beijing 100101, China)

Abstract Carbon fluxes in lake sediments is the focus of current research. Inorganic carbon in lake sediments exists mainly in the form of carbonate minerals. There are two main methods to obtain inorganic carbon in carbonate minerals, X-ray diffractometer and acid dissolution. In this paper, the sedimentary carbon fluxes of each carbonate mineral and total inorganic carbon in the sediment is estimated based on the X-ray diffractometer data of the sediments in the borehole of Selin Co, Tibet, and compared with the data of

收稿日期: 2022-09-15 **修回日期**: 2022-11-05

基金项目: 第二次青藏高原科考项目(2019QZKK0202); 国家自然科学基金资助项目(41831177); 中科院先导专项(XDA20020100, XDA20070101)

作者简介: 聂小芳, 女, 硕士研究生, 主要从事湖泊沉积与环境矿物学研究。E-mail: 2232682908@qq.com

* **通信作者**: 韩作振, 男, 教授, 主要从事油气沉积与成藏方面的研究。E-mail: hanzz@163.com

引用格式: 聂小芳, 朱立平, 韩作振, 等. 基于碳酸盐矿物数据估算色林错 5 000 a BP 以来的沉积无机碳通量[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(1): 77-83.

NIE Xiaofang, ZHU Liping, HAN Zuozhen, et al. Estimation of Carbon Flux Since 5 000 a BP at Selin Co Based on Carbonate Minerals[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(1): 77-83.

acid dissolution method and XRD method in Tibet and other regions, it is found that the inorganic carbon fluxes calculated by the XRD method is well comparable with the acid solution method. The problem of inorganic carbon fluxes in lake sediments is essentially the origin of carbonate minerals. Since 5000a BP, the main influencing factor of inorganic carbon fluxes in the sediment of Selin Co is dry and cold climate, and aragonite mineral content determines the variation of total inorganic carbon fluxes in the sediment of Selin Co.

Keywords atmospheric CO₂ consumption; hydromagnesite; carbon flux

二氧化碳在大气中的积累已成为一个全球性的环境问题。随着人类生活水平的提高,CO₂等温室气体的排放量也逐渐增加,已经威胁到人类的生命系统,减少CO₂的排放是当前要解决的核心问题之一。随着我国“双碳”目标的提出,与碳有关的研究越来越受到重视,比如湖泊沉积物中的碳埋藏的研究。湖泊和河流等内陆水体虽然占地表总面积的很小部分(仅占2%),却是一个不容忽视的碳汇,具有非常丰富的碳储量^[1-3]。因此,湖泊沉积物碳埋藏的研究具有重要意义。

湖泊沉积物中的碳包含有机碳和无机碳两个部分,有机碳主要来源于湖泊周围的陆生植物以及湖泊水生植物;无机碳是以碳酸盐矿物的形式存在,包括自生的和外源^[4-5]。外源碳酸盐矿物是指由湖盆流域母岩风化产生、由地表径流搬运至湖泊水体的碳酸盐^[6-7]。碳酸盐岩和硅酸盐岩风化过程中均能吸收大气CO₂,但碳酸盐岩风化过程中吸收1个CO₂分子,最后又释放1个CO₂分子,对于大气CO₂的浓度并没有影响,而硅酸盐岩风化过程中净吸收1个大气CO₂分子,对大气CO₂浓度的降低具有重要影响^[8]。因此,硅酸盐岩石的化学风化作用受到更多的关注。无论哪种岩石风化,无机碳都以碳酸盐矿物的形式存在于沉积物中。

西藏的湖泊受人类活动影响小,气候寒冷干旱,湖泊沉积物中无机碳主要是自生的和岩石风化而来,记录了自然条件下的无机碳埋藏过程。因此,西藏湖泊沉积物是进行碳研究的理想场所。

湖泊沉积物无机碳的获取方法,常用的有两种,用X-射线衍射可以得到碳酸盐矿物的含量,再根据矿物化学分子式获取每一种矿物碳的含量。湿法化学的方法,即弱酸与沉积物中碳酸盐矿物化学反应,可以直接测得整个沉积物中无机碳的含量。基于色林错湖芯(SL-1)X射线衍射数据^[9],在其他文献和实测数据基础上,本文用XRD数据和湿法化学数据的碳通量,进行西藏湖泊色林错5000 a BP以来沉积物的碳通量研究,以及XRD数据有效性的评估。

1 研究区概况

色林错(31°34'~31°51'N, 88°33'~89°21'E, 图1)是西藏第一大咸水封闭湖泊,流域内河系发育,冰川融水、湖面降水以及非冰川径流是色林错的补给来源,补给量分别为 2.0×10^8 、 6.0×10^8 和 20.5×10^8 m³,补给比例分别为7.1%、21.1%和71.8%^[10],入湖河流带入大量岩石风化产物。

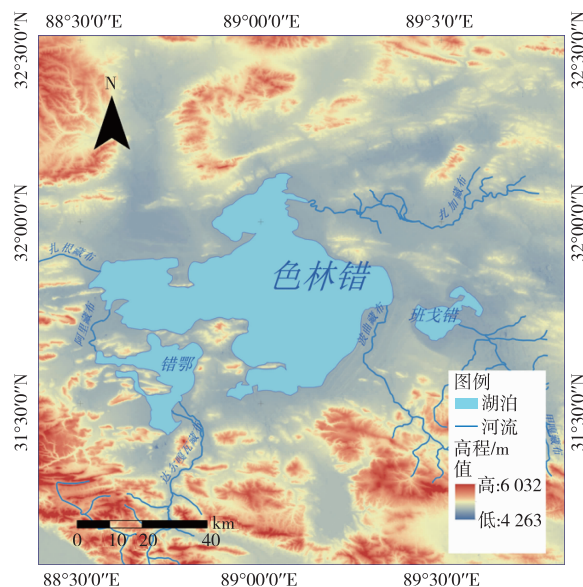


图1 研究区位置图(修改自文献^[14])

Figure 1 Location of the study area. (Modified from literature^[14])

色林错气候寒冷干旱,太阳辐射强,年平均气温为0.8~1.0℃,多年平均降水量为389.4 mm,年大风日数为103~132 d^[10],这种多风少雨的干旱气候,有利于自生碳酸盐矿物的形成。

湖泊沉积物中出现大量碳酸盐矿物,包括方解石、白云石、文石和水菱镁矿等^[9,11],从成因矿物学的角度,方解石和白云石既有自生的也有外力搬运来的,而文石和水菱镁矿则全部为自生矿物^[12-13]。

色林错湖水性质及化学组成如表1所示,湖水富含Na、K、Mg和SO₄²⁻,具有较高的Mg/Ca摩尔比,Mg/Ca>10,pH值在9.2~9.8,色林错盐度为7.8 g/L^[10]。

表 1 色林错湖水主要离子组成(数据引自文献^[10])

Table 1 Composition of main ions in lake Selin Co(Data cited from literature ^[10])										/(mg · L ⁻¹)
离子种类	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	TDS	Mg/Ca 摩尔比	pH 值
最小值	3 213.16	328.69	263.81	31.98	1 867.37	3 921.45	2 024.86	10 937.27	13.7	9.2
最大值	3 413.33	398.34	321.18	51.55	2 021.33	4 197.92	2 597.88	11 593.26	10.4	9.8
平均值	3 299.86	356.36	292.39	43.84	1 942.53	4 052.44	2 415.96	11 202.38	11.1	

2 研究方法

色林错沉积物碳埋藏通量由式(1)计算^[15]:

$$A=BD\times DR\times C\times 10\tag{1}$$

式中,A 表示沉积物埋藏通量,g/(m² · a);BD 表示密度,g/cm³;DR 表示沉积物的沉积速率,cm/a;C 表示沉积物中碳浓度,mg/g。

其中,密度数据为 1.23~1.806 g/cm³^[15-17],全球湖泊沉积物的密度基本都在这个范围内。沉积速率数据为 0.052 2 cm/a,即色林错湖芯(SL-1)的平均沉积速率^[18]。

碳浓度则根据碳酸盐矿物的百分含量和矿物化学组成计算的,即 C 占比×矿物的相对百分含量,且 0.1%=1 mg/g,碳酸盐矿物种类及百分含量见表 2^[9],再由公式(1)便可计算每种矿物的沉积碳通量。

3 结果与讨论

3.1 沉积物无机碳通量

色林错沉积物出现了四种碳酸盐矿物:方解石、文石、白云石和水菱镁矿^[9],每种矿物的碳通量均不同,如表 3、图 2 所示。

方解石、文石和白云石为连续出现的矿物,沉积的无机碳通量范围分别为 4.93~11.54、20.42~42.31 和 1.42~5.47 g/(m² · a),水菱镁矿为不连续矿物,仅出现在 2 900~2 420、2 110~1 900 和 1 500~1 300 a BP,其无机碳通量分别为 1.95~2.86、2.43~3.57 和 1.67~2.45 g/(m² · a)。

由公式(1)可知,相同条件下,矿物沉积的无机碳通量高低与该矿物的含量有关,色林错钻孔沉积物中方解石和白云石含量低,对应的无机碳通量也不高,而文石是色林错沉积物中含量最高的碳酸盐矿物,含量为 26.5%~37.4%(表 2^[9]),沉积的无机碳通量也最高(图 2)。

5 000 a BP 以来,色林错沉积物无机碳通量是变化的,总无机碳通量变化范围为 28.54~57.18 g/(m² · a)。

根据文献[9]划分的环境变化阶段,第一阶段(5 090~2 900 a BP)沉积的无机碳通量变化明显,其中 5 090~4 300 a BP 无机碳通量较高,最高达 57.18 g/(m² · a),之后则与第二阶段(2 900~1 135 a BP)相差不大(表 3、图 2)。

表 2 色林错沉积物中碳酸盐矿物的相对百分含量^[9]

Table 2 Relative percentage content of carbonate minerals in Selin Co sediments ^[9]						
	深度/cm	年龄/a BP	碳酸盐矿物的相对百分含量/%			
			水菱镁矿	文石	方解石	白云石
阶段 III	59~0	1 135 至今				
	68~59	1 300~1 135		31.7	10.2	3.7
	78~68	1500~1 300	10.1	29.4	6.4	3.8
阶段 II	88~78	1690~1 500		31.4	8.8	3.4
	99~88	1900~1 690		27.8	8.6	4.5
	110~99	2 110~1 900	14.7	28	7	4.8
	126~110	2 420~2 110		30.3	9	3.6
	151~126	2 900~2 420	11.8	27.7	6.9	4.1
阶段 I	182~151	3 415~2 900		26.5	8.2	4.3
	237~182	4 300~3 415		26.5	10	8.9
	256~237	4 780~4 300		37.4	10.1	5.6
	268~	5 090~4 780		33.4	9.6	8.7

水菱镁矿出现的层位,总无机碳含量没有明显的增加,说明水菱镁矿的出现对总无机碳通量的影响不大(图 2)。而总无机碳通量变化曲线与文石的碳通量变化一致(图 2),说明主要矿物文石沉积的无机碳通量决定了整个沉积物的无机碳通量。

3.2 XRD 法与湿法化学法的对比

色林错与西藏的纳木错、达则错、郭扎错,以及青海的青海湖、新疆的博斯腾湖、内蒙的呼伦湖等,都处于干旱、半干旱地区,无机碳的沉积环境相似,色林错与以上湖泊沉积的无机碳通量具有可比性(表 4、图 2),即 XRD 法得到的矿物数据计算的无机碳通量与酸溶法的计算结果具有一致性,无论是现代湖泊表层沉积物,还是过去几千年的沉积物,XRD 法测定的碳酸盐矿物数据计算的无机碳通量都具有有一致性,说明用 XRD 测定的矿物数据研究无机碳通量是可行的。

表 3 色林错沉积物中碳酸盐矿物的无机碳通量

Table 3 Inorganic carbon flux of carbonate minerals in Selin Co sediments

	深度/cm	年龄/a BP	碳酸盐矿物无机碳通量/(g·m ⁻² ·a ⁻¹)				总无机碳通量
			水菱镁矿	文石	方解石	白云石	
阶段 III	59~0	1 135 至今					
阶段 II	68~59	1 300~1 135		24.42~35.86	7.86~11.54	1.55~2.27	33.83~49.67
	78~68	1 500~1 300	1.67~2.45	22.65~33.26	4.93~7.24	1.59~2.34	30.84~45.29
	88~78	1 690~1 500		24.19~35.52	6.78~9.96	1.42~2.09	32.39~47.57
	99~88	1 900~1 690		21.42~31.45	6.63~9.73	1.88~2.77	29.93~43.95
	110~99	2 110~1 900	2.43~3.57	21.57~31.68	5.39~7.92	2.01~2.95	31.40~46.12
	126~110	2 420~2 110		23.35~34.28	6.93~10.18	1.51~2.21	31.79~46.67
阶段 I	151~126	2 900~2 420	1.95~2.86	21.34~31.34	5.32~7.81	1.72~2.52	30.33~44.53
	182~151	3 415~2 900		20.42~29.98	6.32~9.28	1.80~2.64	28.54~41.90
	237~182	4 300~3 415		20.42~29.98	7.70~11.31	3.73~5.47	31.85~46.76
	256~237	4 780~4 300		28.82~42.31	7.78~11.43	2.34~3.44	38.94~57.18
	268~256	5 090~4 780		25.73~37.78	7.40~10.86	3.64~5.35	36.77~53.99

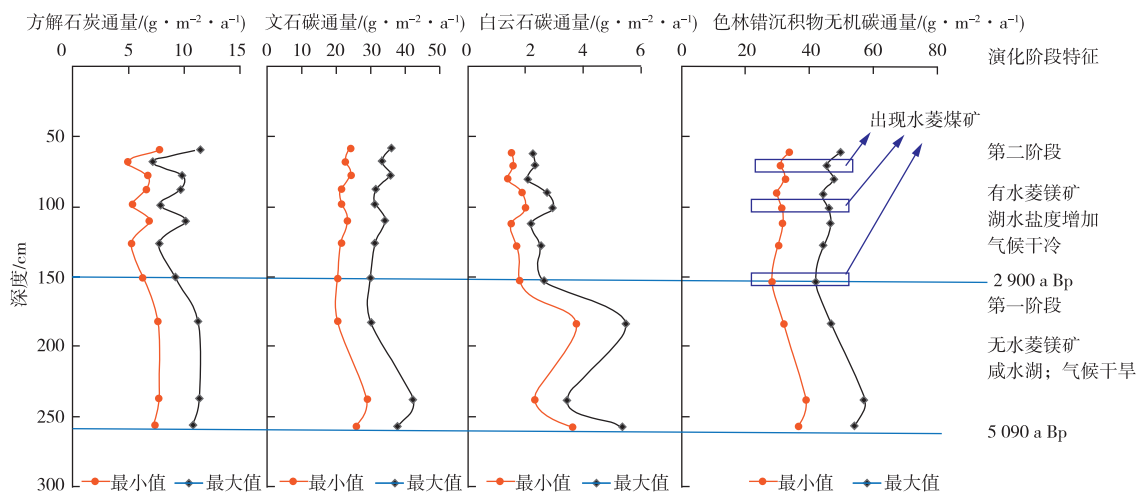


图 2 色林错钻孔(SL-1)沉积物中碳酸盐矿物的碳通量及总无机碳通量

Figure 2 Inorganic carbon flux of carbonate minerals and bulk sample in SL-1 of Selin Co.

与南方潮湿气候下的湖泊相比,色林错及其他干旱区的湖泊具有较高的无机碳通量,无论是 XRD 方法还是酸溶法,得到的无机碳通量都远远高于云南滇池的无机碳通量[9.64 g/(m²·a)]^[19],以及黄海[13.26 g/(m²·a)]^[20]和南海沉积物的无机碳通量[11.47 g/(m²·a)]^[20]。从公式(1)可以看出,沉积物碳通量的高低与沉积速率、沉积密度及碳酸盐矿物含量有关,云南等气候潮湿地区,蒸发作用弱,不利于碳酸盐矿物的析出,导致沉积物中无机碳含量也很低。因此,这可能不是方法的问题,而是气候因素造成的碳通量差异。

3.3 沉积物无机碳通量的影响因素

湖泊沉积物中的无机碳,主要以碳酸盐矿物的形式存在,因此,无机碳的问题,实际上是碳酸盐矿物的成因矿物学问题,包括自生的和外源的碳酸盐矿物。

自生碳酸盐矿物是蒸发盐类矿物中最早析出的一类矿物,影响因素复杂多样。以水中 CaCO₃ 的沉淀方程式:Ca²⁺+2HCO₃⁻↔CaCO₃↓+CO₂↑+H₂O 为例,影响 CaCO₃ 形成的因素有气候干旱程度、温度和 pH 值等^[13,26]。气候干旱、温暖的条件下,较强的蒸发作用使得 Ca²⁺、HCO₃⁻ 的浓度增加,有利于反应向右进行;pH 值升高,即碱性条件促进碳酸盐矿物的形成,即沉积的无机碳通量增加。即气候越干旱,析出的碳酸盐越多,沉积的无机碳通量越大。

湖水性质和化学组成的指标可以体现气候干旱程度,如盐度、Mg/Ca 摩尔比等。盐度升高,Mg/Ca 比值也会升高。水体中的 Mg/Ca 是决定矿物析出的重要条件之一,低 Mg/Ca 时析出方解石,高 Mg/Ca 比值析出文石,因为湖水 Mg²⁺ 子浓度增加,会阻碍方解石的析出,而促进文石的析出^[13,27-30],色林错湖

水 Mg^{2+} 含量、 Mg/Ca 摩尔比值较高(表 1),这就能解释为何色林错方解石含量低于文石含量,而文石含量才是色林错沉积无机碳通量的决定因素(图 2、表 3)。

气候因素除了影响湖水离子成分、湖水盐度等,

还会影响地表岩石的化学风化。降雨量和温度影响岩石化学风化和湖水蒸发作用,影响地表岩石的化学风化作用和大气 CO_2 的吸收。温度升高,湖水蒸发作用增强,湖水 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 浓度增大,有利于碳酸钙沉淀的产生,导致无机碳埋藏量增加^[4,24,31]。

表 4 XRD 方法与无机化学方法计算的沉积无机碳通量对比

Table 4 Comparison of carbon flux calculated by XRD method and inorganic chemical method						
湖泊	无机碳通量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	现代水体性质	年代	区域	分析方法	资料来源
	28.54~57.18(方解石:4.93~11.54;					
色林错	文石:20.42~42.31;水菱镁矿:1.67~3.57; 白云石:1.42~5.47)	咸水湖	5 000 a BP 以来	西藏	XRD	本文
纳木错*	37.48~45.36*	微咸水	现代	西藏	酸溶	[21]
达则错	35.61		现代	西藏	酸溶	[22]
郭扎错*	13.58~27.93*(方解石:5.76~30.99; 文石:3.84~16.9;白云石:1.04~5.4)	咸水	4 700 a BP 以来	西藏	XRD	[13]
博斯腾湖	38.7~51.8	淡水	过去 100 年	新疆	酸溶	[23]
呼伦湖	36.15	微咸水	1 850 AD 以来	内蒙	酸溶	[24]
青海湖	48.3	咸水	1 800 AD 以来	青海	酸溶	[25]
滇池	9.64	淡水	现代	云南	酸溶	[19]
黄海	13.26	咸水	现代	黄海	酸溶	[20]
东海	29.2	咸水	现代	东海	酸溶	[20]
南海	11.47	咸水	现代	南海	酸溶	[20]

注: * 纳木错、郭扎错的无机碳通量是作者利用文献^[21]、文献^[13]的数据计算所得。

湖泊内部,水体生物的壳,如介形虫的壳体、螺壳等生物壳的成分就是碳酸钙,也会影响沉积物的无机碳通量。水体生物新陈代谢也会改变水体中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子、湖水 pH 值等因素,诱导碳酸盐矿物的析出^[32]。以细菌为例,细菌表面为负电荷,会吸收 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子,使得细菌成为碳酸盐沉淀的“核”^[33]。除了细菌的生物矿化作用外,藻类的光合作用会大量消耗湖水中的二氧化碳,也可以影响湖水 CO_3^{2-} 或 HCO_3^- 浓度,进而影响方解石的析出^[29]。不过,由于青藏高原地区气候寒冷,湖水中生物数量少,生物壳对沉积物碳酸盐含量的贡献不大^[13],对沉积无机碳通量的影响也不大,但生物诱导析出的碳酸盐矿物量并不容易估计。

人类活动也是湖泊碳通量的影响因素之一,但是青藏高原地区,人类稀少,如色林错湖区人口密度小,那曲市人口密度仅 1 人/ km^2 ,与同为咸水湖的青海湖相近(3 人/ km^2),远低于云南滇池的人口密度 1 284 人/ km^2 ^[34],且湖区产业较少,故人类活动对色林错湖沉积的无机碳埋藏造成的影响较弱。因此,干旱气候是影响色林错无机碳埋藏的主要条件。

4 结论

湖泊沉积物中,无机碳主要以碳酸盐矿物的形式存在,沉积的无机碳通量可以用 X-射线衍射方法

获取,也可以用酸溶法获取,两种方法计算的无机碳通量具有可比性。XRD 方法的优势是可以获得每一种矿物的无机碳通量。

5 000 a BP 以来色林错碳酸盐矿物中的总无机碳通量范围为 28.54 ~57.18 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。水菱镁矿不连续出现,其碳通量范围为 1.67~3.57 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。方解石、文石和白云石为连续出现的矿物,碳通量范围分别为 4.93~11.54、20.42~42.31 和 1.42~5.47 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。文石为主要碳酸盐矿物,决定了沉积物总无机碳通量的变化。

湖泊沉积物中无机碳埋藏问题实际上就是碳酸盐矿物的成因问题。青藏高原人类活动少,色林错湖沉积的无机碳埋藏与人类活动影响之间的关系不大,更多受自然环境的影响,即干旱寒冷的气候是影响碳酸盐矿物无机碳通量的主要因素。

参考文献

[1] 张风菊,薛滨,姚书春. 中全新世以来呼伦湖沉积物碳埋藏及其影响因素分析[J]. 湖泊科学,2018,30(1): 234-244.
ZHANG Fengju, XUE Bin, YAO Shuchun. Organic carbon burial and its driving mechanism in the sediment of lake Hulun, northeastern Inner Mongolia, since the mid-Holocene[J]. Journal of Lake Sciences,

- 2018,30(1):234-244.
- [2] 金章东. 青海湖的无机碳收支[J]. 第四纪研究, 2010, 30(6):1162-1168.
JIN Zhangdong. The inorganic carbon budget of lake Qinghai [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30 (6): 1162-1168.
- [3] 桂智凡. 近百年来中国东部地区湖泊沉积物碳埋藏研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
GUI Zhifan. The carbon burial of lake sediments in Eastern China over the past 100 years [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [4] 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 等. 2002. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2002(1):73-80.
CHEN Jing'an, WAN Guojiang, WANG Fushun, et al. A study of the carbon environmental record of modern sediments in lakes [J]. Science in China (Series D), 2002(1):73-80.
- [5] LIU W G, LI X Z, WANG Z, et al. Carbon isotope and environmental changes in lakes in arid Northwest China[J]. Science China(Earth Sciences), 2019, 62(8): 1193-1206.
- [6] 孙园园. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态分布及对比研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2012.
SUN Yuanyuan. Forms distribution of inorganic carbon in sediments from Dalinuoer lake and compared with the other three lakes of inner Mongolia Plateau, China[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2012.
- [7] 宋文杰, 张瑾, 郭晶晶. 呼伦湖沉积物中有机碳无机碳分布特征研究[J]. 北方环境, 2018, 30(6):97-100, 102.
SONG Wenjie, ZHANG Jin, GUO Jingjing. Characteristics of organic carbon and inorganic carbon distribution in the sediment of Hulunhu lake[J]. Northern Environmental, 2018, 30(6):97-100, 102.
- [8] 梅西, 刘锐. 大气中 CO₂ 含量的控制因素及其对气候的影响[J]. 海洋地质动态, 2008(9):1-7.
MEI Xi, LIU Rui. Controlling factors of atmospheric CO₂ content and its influence on climate [J]. Marine Geology Frontiers, 2008(9):1-7.
- [9] 林勇杰, 郑绵平, 王海雷. 青藏高原中部色林错矿物组合特征对晚全新世气候的响应[J]. 科技导报, 2014, 32(35):35-40.
LIN Yongjie, ZHENG Mianping, WANG Hailei. Late Holocene climatical and environmental evolutions inferred from mineralogical records in Selin Co, central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Science & Technology Review, 2014, 32(35):35-40.
- [10] 朱立平. 西藏色林错地区环境变化综合科学考察报告[M]. 北京:科学出版社, 2021.
ZHU Liping. Comprehensive scientific investigation report on environmental changes in Selinco area, Tibet [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [11] 顾兆炎, 刘嘉麒, 袁宝印, 等. 12 000 a 来青藏高原季风变化——色林错沉积物地球化学的证据[J]. 科学通报, 1993(1):61-64.
GU Zhaoyan, LIU Jiaqi, YUAN Baoyin, et al. Monsoon changes over the Tibetan Plateau over the past 12 000 years—Evidence from sediment geochemistry of Selin Co [J]. Chinese Science Bulletin, 1993(1):61-64.
- [12] 曲一华, 钱自强, 韩蔚田. 盐矿物鉴定手册[M]. 北京:地质出版社, 1979:99-137.
QU Yihua, QIAN Ziqiang, HAN Weitian. Handbook of salt minerals [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979:135-137.
- [13] LI M H, ZHU L P, WANG J B, et al. Holocene lake evolution and glacial fluctuations indicated by carbonate minerals and their isotopic compositions in the sediments of a glacial melt recharge lake on the northwestern Tibetan Plateau[J]. Frontiers in Earth Science, 2021. 656281. doi:10.3389/feart.2021.656281
- [14] 德吉央宗, 尼玛吉, 强巴欧珠, 等. 近 40 年西藏色林错流域湖泊面积变化及影响因素分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(2):35-41, 96.
DEJI Yangzong, NIMA Ji, QIANGBA Ouzhu, et al. Lake area variation of Selin Co in 1975-2016 and its influential factors [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018, 38(2):35-41, 96.
- [15] 雷雁翔, 何磊, 王玉敏, 等. 渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2021, 41(6):194-205.
LEI Yanxiang, HE Lei, WANG Yumin, et al. Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2021, 41(6):194-205.
- [16] HAMILTON E L. Variations of density and porosity with depth in deep-sea sediments [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1976, 46(2):280-300.
- [17] 赵广明, 叶思源, 丁喜桂, 等. 黄河三角洲全新世以来沉积环境的划分及各环境中碳埋藏速率的评价[J]. 地球科学, 2014, 39(4):451-461.
ZHAO Guangming, YE Siyuan, DING Xigui, et al. Sedimentary environmental partitioning of holocenestrata and assessment of carbon burial rate of various paleo-environments in the Yellow River Delta [J]. Earth Science, 2014, 39(4):451-461.
- [18] 王海雷, 郑绵平. 青藏高原中部色林错 SL-1 孔粒度参

- 数指示的 5.33 ka BP 以来的水位变化[J]. 科技导报, 2014, 32(35):29-34.
- WANG Hailei, ZHENG Mianping. Lake level changes indicated by grain-size of core SL-1 sediments since 5.33 ka BP in Selin Co, Central Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Science & Technology Review, 2014, 32 (35): 29-34.
- [19] HUANG C, ZHANG L, LI Y, et al. Carbon and nitrogen burial in a plateau lake during eutrophication and phytoplankton blooms [J]. Science of the Total Environment, 2017, 616-617:296.
- [20] 焦念志, 梁彦韬, 张永雨, 等. 中国海及邻近区域碳库与通量综合分析[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(11): 1393-1421.
- JIAO Nianzhi, LIANG Yantao, ZHANG Yongyu, et al. Carbon pools and fluxes in the China seas and adjacent oceans[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48 (11): 1393-1421.
- [21] KAI J L, WANG J B, JU J T, et al. Spatio-temporal variations of hydrochemistry and modern sedimentation processes in the Nam Co basin, Tibetan Plateau: Implications for carbonate precipitation[J]. Journal of Great Lakes Research, 2020, 46(4):961-975.
- [22] 刘沙沙. 西藏达则错盐湖碳固定及碳沉积特征[D]. 中北京:国地质科学院, 2014.
- LIU Shasha. Carbon fixation and sinking fluxes in DagzeCo, a deep-water saline lake in North-Tibet, China [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2014.
- [23] YU Z T, WANG X J, ZHAO C Y, et al. Carbon burial in the Bosten lake over the past century: impacts of climate change and human activity [J]. Chemical Geology, 2015, 419:132-141.
- [24] 张风菊, 薛滨, 姚书春. 1850 年以来呼伦湖沉积物无机碳埋藏时空变化[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6):1770-1782.
- ZHANG Fengju, XUE Bin, YAO Shuchun. Spatiotemporal pattern of inorganic carbon sequestration in lake Hulun since 1850[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1770-1782.
- [25] LAN J, HAI X, LIU B, et al. A large carbon pool in lake sediments over the arid/semiarid region, NW China [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2015, 34(3):289-298. DOI:10.1007/s11631-015-0047-5
- [26] 王晓晓. 西藏郭扎错钻孔沉积物中碳酸盐成因矿物学及环境事件研究[D]. 北京:中国科学院青藏高原研究所, 2021.
- WANG Xiaoxiao. Mineralogy and environmental events of carbonate genesis in the sediments of Gozha Coborehole, Tibet [D]. Beijing: Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [27] MÜLLER G, IRION G, FORSTNER U. Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment[J]. Naturwissen, 1972, 59:158-164.
- [28] HARVIE C E, WEARE J H. The prediction of mineral solubilities in FB BHN Xs; the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O system from zero to high concentrations at 25 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1980, 44: 981-998.
- [29] 王国志, 汪品先, 刘传联. 湖相碳酸盐的环境信息[M]. 北京:海洋出版社, 1993.
- WANG Guozhi, WANG Pinxian, LIU Chuanlian. Environmental information of lake phase carbonates [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [30] LI M H, KANG S C, ZHU L P, et al. On the Unusual Holocene carbonate sediment and environmental change in Nam Co(Lake), central Tibet[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 6(4):346-353.
- [31] 蓝江湖. 我国西北干旱一半干旱区湖泊碳埋藏研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
- LAN Jianghu. Carbon burials in Lake Sediments over the arid-semiarid region, Northwestern China [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [32] LI M H, KANG S C, ZHU L P, et al. Mineralogy and geochemistry of the holocene lacustrine sediments in Nam Co, Tibet [J]. Quaternary International, 2008, 187:105-116.
- [33] LYTLE D A, JOHNSON C H, RICE E W. A systematic comparison of the electrokinetic properties of environmentally important microorganisms in water [J]. Colloids & Surfaces B, 2002, 24(2):91-101.
- [34] 陈阿江, 王昭, 周伟. 气候变化背景下湖平面上升的生计影响与社区响应——以色林错周边村庄为例[J]. 云南社会科学, 2019(2):106-112, 188-189.
- CHEN Ajiang, WANG Zhao, ZHOU Wei. Livelihood impact and community response to lake level rise in the context of climate change—Based on a village investigation around Selin Co [J]. Social Sciences in Yunnan, 2019(2):106-112, 188-189.