DOI: 10.5846/stxb201306071419

刘沙沙, 贾沁贤, 刘喜方, 郑绵平, 刘雷震.西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构.生态学报,2013,33(18):5785-5793. Liu S S, Jia Q X, Liu X F, Zheng M P, Liu L Z. The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China. Acta Ecologica Sinica,2013,33(18):5785-5793.

西藏达则错盐湖沉积背景与有机沉积结构

刘沙沙1, 贾沁贤1,*, 刘喜方1, 郑绵平1, 刘雷震2

(1.中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京 100037;2.中国地质大学(北京)水资源与环境学院,北京 100083)

摘要:以西藏拟溞(Daphniopsis tibetana Sars)为优势浮游动物物种的低盐度盐湖是西藏湖泊的一个重要类型,以达则错为代表, 分析了其沉积背景及沉积物组成。结果如下:(1)湖泊敞水区无机沉积以内生化学沉积为主,可代表深水盐湖无机沉积物的自 然沉积过程。(2)达则错盐湖浮游植物以蓝藻、硅藻、裸藻、绿藻为主,总生物量11.35 mg/L;浮游动物生物量为4.92 mg/L,其中 西藏拟溞占 82.30%;浮游植物残体受盐梯度影响在盐梯度层之上聚集,而浮游动物残体及粪粒(Fecal pellets)因外表有碳酸盐 附着可穿过盐梯度层沉积湖底,生物残体与浮游动物代谢产物构成了沉积有机物的物质基础。(3)表层沉积物平均含水量为 66.70%,粒径 0.004—0.02 mm 范围内的颗粒物含量最大,占 20.42%,其次为<0.004 mm 的粘土,占 4.53%。(4)表层沉积物总有 机碳(TOC)平均含量为 27.99 mg/g(干重),其中颗粒有机碳(POC)约为 18.11 mg/g,占 TOC 的 64.70%;在 POC 中,西藏拟溞粪 粒贡献最大,约占 POC 的 60.48%,占 TOC 的 39.06%,占沉积物总量的 1.12%,其次为西藏拟溞残体,占 POC 的 38.85%。分析 结果表明盐湖因其独特的水化学和生物学特征具有较强的沉积能力,以化学沉积为主的无机沉积及以西藏拟溞粪粒和残肢碎 屑为主的有机沉积构成了该类型盐湖颗粒物沉降及沉积的主要过程。

关键词:达则错盐湖;沉积物结构;沉积环境;有机沉积;水化学过程;生物过程;西藏

The depositional environment and organic sediment component of Dagze Co, a saline lake in Tibet, China

LIU Shasha¹, JIA Qinxian^{1,*}, LIU Xifang¹, ZHENG Mianping¹, LIU Leizhen²

1 Ministry of Land and Resources Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2 School of Water Resources and Environmental Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: The saline lakes of the Qinghai-Tibet Plateau play an important role in the study of lakes in our country. The lakes, which are characterized by low salinity and are dominated by the zooplankton species *Daphniopsis tibetana* Sars 1903, are an common type in Tibet. The depositional environment and sediment composition in a representative lake, Dagze Co, were analyzed from water and surface sediment samples in sediment traps method. The majority of sediments in shallow lakes are transported by streams and rivers, or are derived from endogenous carbonate sources. Inorganic deposition in more open areas is dominated by endogenous chemical precipitation, concentrated by intense evaporation; similar processes are common in deep saline lakes. In addition to the sedimentation caused by the Bocangzangbu stream, deposition of a large number of carbonates was found in the estuarine region of Dagze Co. This was because of strong mixing between two water bodies of different properties (the fresh water from the stream and the saline water from the lake). Sixty-four species of phytoplankton were recorded in the lake, with a total biomass of 11.35 mg/L. The dominant phytoplankton groups observed included blue-green algae, diatoms, euglenophytes and green algae. Forty-one species of zooplankton were also observed. The lake's zooplankton community had a total biomass of 4.92 mg/L and was dominated (82.30%) by *D.tibetana*. Phytoplankton

基金项目:973项目(2011CB403003);国家自然科学基金项目(40573056);地质调查项目(1212010818056)

收稿日期:2013-06-07; 修订日期:2013-07-03

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jia-qinxian@ sohu.com

debris aggregated above a salt gradient layer. Zooplankton residues and fecal pellets were not impeded from sinking through the salt gradient layer to the bottom of the lake. It is likely that the adhesion of carbonates to these particles aided their descent. As such, biological debris and zooplankton metabolites comprised the material basis of the lake's organic sediments. The average moisture content of the surface sediments was reported to be 66.70%. Size analysis of sediment particles revealed that particles within the 0.004–0.02 mm size range were the most abundant, accounting for 20.42% (wet weight) of the total. The next largest group, accounting for 4.53% (wet weight) of sediment particles, was characterized as clay (0.004 mm).The total organic carbon (TOC) content in the surface sediments was 27.99 mg/g (mean dry weight).Particulate organic carbon (POC) accounted for 64.70% of the TOC. Fecal pellets of D. tibetana were the greatest contributors to POC (60.48%, comprising 39.06% of TOC and 1.12% of sediments). Residues of D. tibetana accounted for 38.85% of POC. D.tibetana was at the highest level of a very simple trophic web in Dagze Co. As a result, the decomposition of benthic organisms in the lake was minimal. In addition, the reducing environment in the deeper waters of the lake promoted the preservation of organic matter. This caused the TOC content to be significantly higher in the surface sediments. These results show that the distinct hydrochemical and biological properties of saline lakes have a strong influence on their sedimentary depositional environments. In Dagze Co, the main processes affecting the precipitation and deposition of particulate matter were influenced by both inorganic (chemical precipitation) and organic (fecal pellets and residues of D. tibetana) mechanisms. This study provides a basis for future analysis of carbon deposition and assessments of carbon source/sink potential in lakes of this type.

Key Words: Dagze Co salt lake; sediment components; depositional environment; organic sediment; hydrochemical processes; biological processes; Tibet

湖泊作为水生生态系统的重要组成部分,与大气圈、岩石圈和生物圈密切相关,具有连续沉积、沉积速率快等特点,因此湖 泊沉积物是区域环境、气候和事件的重要载体,成为全球环境变化研究的热点问题^[1]。

青藏高原湖泊尤其是盐湖在我国湖泊研究中占重要地位。青藏高原属我国湖泊及盐湖分布最多的地区,据统计,全区面积 大于1km²的湖泊共1612个,湖泊总面积约50900km²,占全国湖泊总面积的53.58%,按照国际广泛公认的盐湖定义(>3g/L)^[2],盐湖面积占81.15%^[3]。

盐湖是地球上具有多种功能的独特生态系统,其独特的水化学和生物学特征使其具有更强的沉积能力^[4]。从生物多样性与生产力角度看,盐湖是一个相对简单的生态系统,盐度的局限性使初级生产者的生物多样性一般较低,是一类物种组成单调、但数量极为丰富的群落类型,它没有像淡水湖泊那样出现明显的春、夏、秋季的季节优势群落剧烈变化,而且由于氮磷的富集具有较高的初级生产力,此外,盐湖作为河流等水系的末端归宿,源源不断的接受着外来物质的输入和补给而几乎不再流失到大气及陆地生态系统^[5],因此具有较强的沉积能力。

盐湖的现代沉积过程是一个重要的生物地球化学过程,这个过程不仅是物质沉积循环的关键过程,而且还能反映湖泊生产 力状况,表达湖泊水域生态系统正在发生的从大气向沉积库的输送效率,是进行湖泊碳收支、诠释湖泊碳汇/碳源特征研究中不 可或缺的内容。但目前国内外针对盐湖沉积物开展工作相对较少,且重点关注过去发生的大时间尺度的沉积历史记录,如魏乐 军等利用沉积物磁化率等恢复重建藏北高原盐湖洞错的古环境信息^[6],孙千里等利用沉积物粒度指标揭示了岱海沉积时的古 环境特征^[7],Reed利用沉积物中保存的硅藻恢复西班牙盐湖的古气候特征^[8],而对于现代沉积过程或者正在发生的沉积过程 研究很少^[9-10],目前对西藏高原盐湖沉积物的沉降过程研究尚属空白。

以西藏拟溞(Daphniopsis tibetana Sars)为优势浮游动物物种的低盐度盐湖是西藏湖泊的一个重要类型,国土资源部盐湖资 源与环境重点实验室近 20 年的西藏野外调查资料统计结果显示,该类型盐湖占到湖泊数量的一半以上,其湖泊理化特征和生 物学特征十分相似。作为该类型湖泊的代表,达则错盐湖地处藏北腹地,人烟稀少,且水深大,其深水区沉积过程基本排除了人 为干扰及风浪扰动影响,因此可代表低矿化度深水盐湖的自然沉积过程,是研究西藏盐湖沉积过程的理想区域。

自 2008 年起,国土资源部盐湖资源与环境重点实验室开始对该湖的水化学及生物动态进行长期监测,进行了沉积物的沉降过程及沉降速率研究。本文将对达则错盐湖表层沉积物结构及其形成的环境背景进行初步探讨,为进一步分析该类型湖泊碳循环特征和碳源碳汇潜力评估提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

达则错盐湖(图1)地处藏北高原腹地,隶属西藏自治区尼玛县境内。地理坐标北纬 31°49'09.29"—31°58'37.57",东经 87°

22′47.93″—81°38′55.58″,东西两岸地势平缓开阔,南北岸则山体陡峭,平均海拔 4461 m,湖水面积 254 km²,平均水深 15.5 m,最 大水深 38 m。达则错年平均气温 0—2.0℃,年蒸发量为 2302 mm,年降水量仅 200 mm,雨季集中在 7—9 月份,湖水主要依赖波 仓藏布补给,雨季有季节性降水流入,湖水全年补给量约 5.56×10⁸ m³。



图 1 西藏达则错盐湖地理位置及采样点布局 Fig.1 The geographical location and layout of sampling sites of Dagze Co in Tibet

1.2 样品采集

2012年9—10月,自湖岸至湖心设置4个采样点(图1):DZC-1、DZC-2、DZC-3、DZC-4,其水深分别为10、26.5、24、38 m(最 深点)。采样项目包括现场理化参数、水化学样、浮游生物样、表层沉积物样。

水样按照水深分表层(0.5 m)、中层(1/2 水深)、底层(沉积物上方 0.5 m)三层采集,采集工具为 2.5 L 有机玻璃采水器。现 场用便携式仪器测定 pH 值、温度、盐度、溶解氧后,取 1 L 水样用碘液进行浮游植物固定,取 10 L 水样进行浮游动物过滤浓缩。 浮游植物样静止沉淀 24h 后浓缩至 60—80 mL,样品加入 5%戊二醛保存。水化学样本与浮游生物样本同步采集,0.5 mL/L 氯 仿临时固定。

表层沉积物样采用自制的沉积物捕捉器(内径 6.9 cm,外径 7.4 cm,长度 1 m 的 PVC 管)采集,将其置于水-沉积物界面,并 借助沉子使捕捉器处于水平状态,DZC-1、DZC-3 每个点位附近设置 7 个相同装置作平行取样,放置 30 d 收取沉积物捕捉器,将 捕捉到的湖泊表层沉积物样品迅速装入密封袋中,并保持低温运输保存。

1.3 分析与测定

(1)水化学样品 常规离子(K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻)中阳离子测定采用等离子光谱 IRIS(JY/T015—1996)进行, 阴离子依据 GB/T8538—2008 进行, 水体 COD 测定采用碱性高锰酸钾法(GB17378.4—1998)进行。

(2)水体生物样品 浮游生物样品直接在显微镜下分类、鉴定进行定性分析;浮游植物在高倍镜下用 0.1 mL 计数框采用视 野法进行镜检计数,浮游动物样品以 0.1、1、5 mL 计数框镜检计数,根据所测体积及各物种的体积生物量换算系数完成浮游生 物定量分析。

(3)表层沉积物样品 ①依据表层沉积物样品的干湿重之差测定间隙水分含量;②取鲜重沉积物样品 10g,直接稀释至 1000 mL 待测;令取鲜重 30g的沉积物样稀释后依次通过孔径为 0.25、0.04、0.02 mm 分样筛,称量并记录滤出物风干重;将每次 过滤的滤出物置于偏光显微镜下(Leica DM2700P)鉴定颗粒物组成并统计百分比;将滤液稀释至 1000 mL 待测。

采用碱性高锰酸钾法(GB17378.4—1998)测定各级滤液及直接稀释的沉积物有机碳含量。测定过程中发现强氧化剂过硫酸钾都难以降解西藏拟溞的几丁质外骨骼,粪粒亦降解不完全。因此,对大颗粒有机物统一采用转化系数方法进行估计。在前人文献中已对不同对象有机物与碳的转换系数进行了研究与引用报道,如枝角类生物干湿重转化系数为 0.16^[11],干重与碳的转化系数为 0.4^[12],粪粒向碳的转化系数为 26.8 μgC/mm^{3[13]};本文中采用显微镜下计算体积并统计分析滤出物组分比例,进一

步采用转换系数转换为含碳量。

以 DZC-1 附近的 7 个沉积物捕捉器中的分析结果平均值代表浅水区结果,以 DZC-3 附近的 7 个沉积物捕捉器的分析结果 平均值作为深水区结果。

1.4 数据处理

本文数据处理均采用 excel 完成,作图采用 CorelDraw X3 及 excel。

2 结果与分析

2.1 湖泊沉积的无机化学背景

湖泊沉积矿物或从集水盆地搬运沉积下来,或以离子形式进入水体并伴随蒸发浓缩沉积下来。因此,沉积物的矿物组成与 补给河流及湖泊水体的离子组成密切相关。

化学分析结果(表1)表明,主要补给河流波仓藏布矿化度 0.62 g/L,阳离子中 Na⁺摩尔浓度最大为 6.00 mmol/L,阴离子中 CO₃²⁻+HCO₃²⁻ 浓度最大为 3.74 mmol/L,其次为 SO₄²⁻、Cl⁻。达则错盐湖平均矿化度为 20.55 g/L,阳离子中 Na⁺摩尔浓度最大,阴 离子中 CO₃²⁻+HCO₃²⁻ 摩尔浓度最大。在入湖河口区,河流携带的大部分颗粒物发生沉积,此外,两种不同矿化度的水体发生强 烈的混合作用重新建立新的平衡状态使大量碳酸盐类矿物沉积,野外可明显看到大量的白色粉末状钙华;湖泊浅水区,雨季河 流携带的泥沙与水体自生矿物发生共沉积;湖泊敞水区,河流携带的泥沙很少到达,主要通过强烈的蒸发浓缩作用析出大量盐 类矿物。可见达则错盐湖浅水区沉积物中无机物既有外源输入,也有因湖泊水体内部发生化学作用产生的化学沉淀,而敞水区 主要为湖泊水体内部发生的化学沉积。

| | Table 1 | Ion concentrations and COD_{Mn} of Dagze Co and main recharge river | | | | | | |
|------------------------------|---------|---|--------|--------|-----------------|----------------------|--------|--------------|
| | | 湖泊浅水区 Shallow area | | | 湖泊敞水区 Open area | | | _ |
| 项目 | 河水 | 表层 | 中层 | 底层 | 表层 | 中层 | 底层 | 湖泊平均 |
| Items | River | Surface | Middle | Bottom | Surface | urface Middle Bottom | | Lake average |
| | | layer | layer | layer | layer | layer | layer | |
| $K^{+}/(mmol/L)$ | 0.15 | 16.56 | 16.62 | 16.38 | 16.26 | 16.15 | 16.67 | 16.44 |
| Na ⁺ /(mmol/L) | 6.00 | 313.26 | 309.04 | 312.35 | 310.22 | 307.35 | 315.04 | 311.21 |
| $Ca^{2+}/(mmol/L)$ | 0.87 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.26 | 0.13 | 0.10 | 0.15 |
| $Mg^{2+}/(mmol/L)$ | 1.01 | 5.71 | 5.75 | 5.96 | 5.79 | 5.71 | 5.79 | 5.78 |
| Cl ⁻ /(mmol/L) | 0.37 | 37.61 | 36.87 | 38.11 | 37.13 | 36.62 | 38.34 | 37.45 |
| $SO_4^{2-}/(\text{ mmol/L})$ | 2.90 | 55.06 | 55.28 | 56.88 | 55.78 | 55.09 | 55.75 | 55.64 |
| $CO_3^{2-}/(mmol/L)$ | 0.44 | 72.45 | 85.12 | 74.30 | 83.70 | 75.02 | 76.25 | 77.81 |
| $HCO_3^-/(mmol/L)$ | 3.30 | 49.90 | 26.25 | 46.82 | 28.38 | 48.23 | 49.30 | 41.48 |
| $COD_{Mn}/(mg/L)$ | 1.88 | 5.20 | 5.08 | 5.32 | 5.08 | 4.76 | 6.36 | 5.30 |
| 矿化度 Salinity/(g/L) | 0.62 | 20.48 | 20.42 | 20.67 | 20.48 | 20.40 | 20.83 | 20.55 |

表 1 达则错盐湖及主要补给河流的离子浓度、化学耗氧量

2.2 湖泊沉积的浮游生物与有机质背景

有机沉积包括河流携带的有机碎屑沉积、湖泊中动物尸体、排泄物及植物残体沉积,因此该湖的生物背景及河水有机质含量与沉积物有机质含量密切相关。

经鉴定,达则错盐湖共有浮游植物 64 种,其中蓝藻门 17 种,硅藻门 17 种,裸藻门 15 种,绿藻门 14 种,隐藻门 1 种。浮游植物密度为 377.30×10⁵个/L,生物量 11.78 mg/L。达则错盐湖浮游植物具有一定的空间分布规律(图 2):与敞水区相比,浅水区浮游植物生物量偏小;垂向上真光层及盐梯度层之上浮游植物生物量较高,敞水区盐梯度层之下基本没有浮游植物生存。

浮游动物共 41 种,其中原生动物 38 种,轮虫 2 种,枝角类 1 种。浮游动物生物量为 4.92 mg/L,其中原生动物生物量 0.69 mg/L,轮虫生物量 0.18 mg/L,西藏拟溞生物量为 4.05 mg/L,占浮游动物生物量的 82.30%。西藏拟溞的空间分布规律与浮游植物的分布基本一致(图 3):敞水区西藏拟溞密度较浅水区大;垂向上在真光层及盐梯度层之上出现峰值。与浮游植物分布规律不同的是西藏拟溞能够进入盐梯度层之下而在沉积物上方水层生活。

另一方面,从反应有机质含量的指标化学耗氧量(COD)数据(表1)来看,河水 COD 为1.88 g/L,湖水 COD 为5.08—6.36 mg/L,平均5.30 mg/L。与浅水区相比,湖泊深水区有机质含量偏高,且垂向波动明显;与表、中层相比,底层含量明显偏高,表明水体有机质含量与浮游生物的分布特征基本吻合。

2.3 表层沉积物成分构成及来源判断

2.3.1 沉积物物理特征

粒径组成及含水量是沉积物的重要物理特性,与颗粒物的运移和沉积等过程密切相关[14],同时也是描述沉积环境的重要





参数^[15]。沉积物粒度与沉积环境息息相关,特定的沉积环境往往具有特定的沉积物粒度参数特征^[16]。达则错盐湖颗粒物粒 径范围较广,从粒径>0.25 mm的大颗粒物到小于0.004 mm的粘土均有分布(表2)。其中,粒径为0.004—0.02 mm的细粉砂平 均含量最大,占总颗粒物的67.44%,占沉积物总量的20.42%。粒径为0.04—0.25 mm与<0.004 mm的颗粒物含量相当,分

| Table 2 Particle size, salt and moisture content in surface sediments | | | | | | | | | |
|---|---------|-------------|-------------|--------------|----------|-----------------------------|----------------------|--|--|
| 名称 | | 粒径组成 | 间隙水 | 盐分 | | | | | |
| | >0.25mm | 0.04—0.25mm | 0.02—0.04mm | 0.004—0.02mm | <0.004mm | Interstitial water /(g/40g) | Salinity /(g/40g) | | |
| 浅水区 Shallow area | 0.25 | 1.49 | 0.22 | 9.57 | 2.12 | 25.10 | 1.26 | | |
| 深水区 Open area | 0.19 | 1.96 | 0.16 | 6.77 | 1.50 | 28.26 | 1.17 | | |
| 平均值 Average | 0.22 | 1.73 | 0.19 | 8.17 | 1.81 | 26.68 | 1.21 | | |
| % | 0.55 | 4.32 | 0.46 | 20.42 | 4.53 | 66.70 | 3.03 | | |

| 表 2 | 表层沉积物中粒径组成及盐分、水分含量 |
|-----|--------------------|
| | |

33 卷

别占沉积物总量的 4.32%、4.53%。粒径>0.25 mm 及 0.02—0.04 mm 的颗粒物所占比重较小,分别为 0.55%、0.46%。沉积物间 隙水及盐分平均含量分别为 66.70%、3.03%。与深水区相比,浅水区颗粒物含量高而间隙水含量稍低。 2.3.2 沉积物有机组分来源判断

沉积物镜检照片(图4)显示,粒径 R>0.25 mm 的颗粒物主要为西藏拟溞的几丁质外骨骼,并发现有大量卵鞘及边缘生有刚 毛的胸肢(图4a)。粒径 0.25 mm>R>0.075 mm 的沉积物绝大部分是西藏拟溞粪粒(Fecal pellets)及碳酸盐类矿物,且粪粒大部 分保持原有的圆柱状而未被攻击散落。偏光镜观察表明,粪粒表面往往有方解石、文石等碳酸盐类矿物附着(图4b)。0.075 mm>R>0.04 mm 的沉积物同样以碳酸盐类矿物及西藏拟溞粪粒为主,其中拟溞粪粒占 49.02%,且开始分解呈现明显的散落状 态(图4c)。0.04 mm>R>0.02 mm 的沉积物主要由粗粉砂组成,含少量松散结构的细菌有机碎屑团(图4d),仅占沉积物的 5.10%,这类碎屑团主要由细菌包围的小型粪粒及极少量的有机碎屑组成,未发现可辨识的浮游植物残体。



图 3 达则错盐湖西藏拟溞空间分布特征 Fig.3 Spatial distribution of *D.sistibetana* in Dagze Co





Fig.4 Micrographs of sediments in different particle sizes

a: 西藏拟溞外骨骼 Exoskeleton of *D.sistibetana*, b 和 c: 西藏拟溞类 粒及碳酸盐类矿物 Fecal pellets of *D.sistibetana* and carbonates, d: 松 散结构的细菌有机碎屑团 Loosely structured group of bacteria organic detritus

2.3.3 沉积物有机碳含量及构成

达则错盐湖表层沉积物总有机碳(TOC)、颗粒有机碳(POC)含量及其构成结果(表3)显示,TOC 平均含量 27.99 mg/g,占 沉积物总重量的 2.80%,其中 POC 约为 18.11 mg/g,占沉积物总量的 1.81%,占 TOC 的 64.70%。在 POC 中,西藏拟溞粪粒 (Fecal pellets)对其贡献最大,约占 POC 的 60.48%,占 TOC 的 39.06%,占沉积物总量的 1.12%;其次为西藏拟溞残体,对 POC 的 贡献率约为 38.85%;松散结构的细菌颗粒有机碎屑团对 POC 贡献最小,仅占 POC 的 0.67%。与浅水区相比,敞水区 TOC、POC 尤其是西藏拟溞粪粒碳含量明显偏高。

| Table 3 Organic carbon composition and proportion in unit dry weight sediment | | | | | | | | |
|---|--------------|-----------|---------|--|--|--|--|--|
| | 站位 | 亚坎 | | | | | | |
| 名称 Items | 浅水区 | 敞水区 | Average | | | | | |
| | Shallow area | Open area | | | | | | |
| 总有机碳 Total Organic Carbon, TOC/mg | 23.23 | 32.75 | 27.99 | | | | | |
| 总颗粒有机碳 Particulate Organic Carbon, POC/mg | 14.26 | 21.97 | 18.11 | | | | | |
| 西藏拟溞残体碳 D.sistibetana Residues Carbon, RC/mg | 6.58 | 6.93 | 6.75 | | | | | |
| 西藏拟溞粪粒碳 D.sistibetana Fecal Pellets Carbon, FPC/mg | 7.56 | 14.93 | 11.24 | | | | | |
| 有机碎屑碳 Organic Detritus Carbon, ODC/mg | 0.12 | 0.11 | 0.12 | | | | | |
| 总有机碳/沉积物(干)TOC/Sediments(dry weight)/% | 2.32 | 3.28 | 2.80 | | | | | |
| 总颗粒有机碳/沉积物(干)POC/ Sediments(dry weight)/% | 1.43 | 2.20 | 1.81 | | | | | |
| 西藏拟溞残体碳/总颗粒有机碳 RC/POC/% | 46.16 | 31.53 | 38.85 | | | | | |
| 西藏拟溞粪粒碳/总颗粒有机碳 FPC/POC/% | 53.01 | 67.96 | 60.48 | | | | | |
| 有机碎屑碳/总颗粒有机碳 ODC/POC/% | 0.83 | 0.51 | 0.67 | | | | | |

| 表 3 单位重量(干)沉积物中有机碳组成 | 及比例 |
|----------------------|-----|
|----------------------|-----|

3 结论与讨论

18 期

(1)湖泊的水化学性质是沉积物形成的背景条件,直接影响着沉积物的物质成分及组成特征。水化学背景对湖泊表层沉 积物的影响主要表现在两个方面:①离子组成影响沉积物中无机物的成分与比例:②通过影响水生生物影响沉积物的成分及积 累过程。

达则错盐湖的水化学背景表明,河流携带的有机碎屑及无机物主要在近岸带的浅水区沉积,深水区以碳酸盐为主的内生化 学沉积为主,因此该湖无机沉积物主要为碳酸盐类矿物。

已有研究表明,浮游生物的分布特征与其存在的盐梯度密切相关[17]。在本湖,深水区存在较为明显的盐梯度层,并使大量 的浮游植物及细菌在该层上方聚集,成为浮游动物的饵料场所。由于浮游植物生命周期较短,其体表未能形成碳酸盐附着,不 能打破盐梯度层到达湖底,因此镜下沉积物中未发现可以辨识的浮游植物残体;而浮游动物生命周期长,其排泄物及残体表面 可附着大量的碳酸盐微粒,促进了这些物质穿过盐梯度层屏障继续向下沉积。在偏光显微镜下可明显辨识沉积物中浮游动物 残体、粪粒及表面的碳酸盐微粒。

深水区的盐梯度层之下,以单一的硫细菌层为主,悬浮颗粒极少,水色紫色到粉红色透明,且有强烈的硫化氢气味,说明该 层之下为典型的还原环境,有利于有机质的保存;而浅水区沉积的有机质处于有氧环境且不断受到湖泊风浪摩擦扰动,分解较 快,因此表层沉积物 POC 以西藏拟溞粪粒及残体为主且深水区高于浅水区。

(2)西藏拟溞作为达则错盐湖的优势动物种群,在有机沉积形成中发挥着重要作用。西藏拟溞是一种喜低温耐高盐的枝 角类生物,主要在高海拔、高寒、贫营养型盐水水体中生活。多年来地质调查结果表明,西藏低盐度盐湖中,西藏拟溞在生物群 落结构中占重要地位。除我国少数学者外[18-22],国内外对西藏拟溞的报道并不多[23-25]。目前该物种在生态系统碳循环中的关 键作用尚无研究报道。

本文结果表明,西藏拟溞的滤食作用在生源要素碳的生物地球化学循环中发挥着重要作用,西藏拟溞产生的大量粪粒占达 则错盐湖表层沉积物 POC 的 60.48%,是沉降颗粒有机物的主要形式。西藏拟溞粪粒相对于其它有机颗粒大而密实、且呈圆柱 型,外表附着大量的碳酸盐,因此沉降速度快,沉降过程中能有效抵御微生物的分解,从而得以穿过盐梯度层到达湖泊底部供底 牺生物利用或沉积湖底。有研究报道,浮游生物的摄食活动对颗粒性碳沉积有重要贡献^[26-27],本文研究结果也证实了该结论, 并进一步说明了在西藏低盐度盐湖中,西藏拟溞对碳沉积循环发挥着重要作用,是垂直碳通量的重要组成部分。

(3) TOC 是描述沉积物总有机质含量的重要指标,主要受内源(水生生物)与外源(陆生植被)有机质输入的影响。当 TOC 以内生作用为主时,其大小能够有效反应湖泊生产力状况,而以外源为主时,则反映了陆生植被的生产力及风力或河流的输入 能力。文献表明,大型深水湖泊的沉积有机碳主要由湖泊生态系统中的浮游生物群落形成(外源输入仅占沉积有机碳的5%以 内)[28],而不像那些小型湖泊周源输入人类活动产物及大型植物残体输入占相当比重(外源输入比例大于10%)[29]。在现代 湖泊的外源 POC 输入中,人类活动影响越来越显著,在欧洲的伊比利亚半岛占到了 72%^[29]。在藏北高原,许多末端湖泊都是 大型深水湖泊,湖岸周边分布有极为稀疏的草本植被,离开湖岸则基本为裸地,与低海拔地区相比,人类活动的影响十分有限, 因此藏北大型深水盐湖沉积基本上是自然过程中的内生沉积。

对比我国学者对淡水湖及咸水湖表层沉积物 TOC 含量的报道(表4),达则错表层沉积物 TOC 含量平均值为 2.80%,超过 了纳木错 TOC 含量的 2 倍,低于南四湖及尕海果芒滩。南四湖处于人类活动中心区,大量排污水是高 TOC 主因,而尕海的果芒 滩主要因为其丰富的水生植被,其碎屑含碳量远高于浮游生物碎屑含碳量。纳木错表层沉积物 TOC 含量较低,主要因为该湖 中存在大型动物——鱼类^[30],且底栖生物量大,食物网结构复杂,有机物沉积过程中及到达湖底后多次被生物利用和矿化,导 致含量降低。而达则错营养级简单,西藏拟溞为该湖最高营养级,基本无底栖生物分解作用,且深水区的还原环境非常有利于 有机物的保存,因此其表层沉积物 TOC 含量较纳木错明显偏高。

| Table 4 The comparison of TOC in Nansi lake, Gahai and Nam Co sediments with Dagze Co | | | | | | | | |
|---|---------------------|---------------|-------------------|--|--|--|--|--|
| | 湖泊名称 Name | 总有机碳百分比 TOC/% | 参考文献 References | | | | | |
| 南四湖 Nansi Lake | 独山湖 Dushan lake | 9.2 | [31] | | | | | |
| | 南阳湖 Nanyang lake | 5.21 | | | | | | |
| | 昭阳湖 Zhaoyang lake | 2.26 | | | | | | |
| 尕海 Gahai | 果芒滩 Guomangtan lake | 4.68 | [9] | | | | | |
| 纳木错 Nam Co | 中部 Central region | 1.07 | [32] | | | | | |
| 达则错 Dagze Co | 浅水区 Shallow area | 2.32 | 见本文 See the paper | | | | | |
| | 敞水区 Open area | 3.28 | | | | | | |

| 表 4 | 南四 | 湖、尕海及 | 纳木 | 错三湖 | 沉积物总 | 有机碳与 | 可达则 | 亅错的 | 比较 | |
|-----|----|-------|-----|-----|------|------|-----|-----|----|--|
| | | | ••• | | ~ | | ~ | | | |

致谢:本次藏北野外采样工作得到了国土资源部盐湖资源与环境重点实验室当雄错野外试验站卜令存、叶玉刚、马万云、张光全 及张海华等同志的大力协助,特此致谢。

References:

- [1] Liu E D, Yang Y.Research progress and methods of lake carbon cycle.Northern Environmental, 2012, 24(2): 201-204.
- [2] Williams W D.1.Inland salt lakes: An introduction.Hydrobiologia, 1981, 81-82(1): 1-14.
- [3] Zheng M P, Xiang J, Wei X J, Zheng Y.Saline Lakes on the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. Beijing: Scientific and Technical Publishing House, 1989: 9-10.
- [4] Hammer U T.5. Primary production in saline lakes. Hydrobiologia, 1981, 81-82(1): 47-57.
- [5] Vitt D H, Halsey L A, Bauer I E, Campbell C.Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene. Canadian Journal of Earth Science, 2000, 37(5): 683-693.
- [6] Wei L J, Zheng M P, Cai K Q, Ge W S.Early-middle Holocene palaeoclimate record from saline lake sediments in Tontso, Tibet.Earth Science Frontiers, 2002, 9(1): 129-135.
- [7] Sun Q L, Zhou J, Xiao J L.Grain-size characteristics of lake Daihai sediments and its paleaoenvironment significance. Marine Geology & Quaternary Geology, 2001, 21(1): 93-95.
- [8] Reed J M.Diatom preservation in the recent sediment record of Spanish saline lakes: implications for palaeoclimate study. Journal of Paleolimnology, 1998, 19(2): 129-137.
- [9] Zhang N, Li H J, Yuan L W, Li W.Characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus in surface sediments of typical littorals of three lake regions on Qinghai-Tibet Plateau.Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition, 2010, 38(3): 70-75.
- [10] William M L.Rates of sediment deposition in a hypersaline lake in the northern Great Plains, western Canada. International Journal of Salt Lake Research, 1993, 2(1): 47-58.
- [11] Vinogradov M E, Shushkina E A.Function of Epipelagial Plankton Communities. Moscow: Nauka, 1987: 240.
- [12] Mauchline J.The Biology of Calanoid Copepods: The Biology of Calanoid Copepods.San Diego: Academic Press, 1998: 710.
- [13] Urrere M, Knauer G A.Zooplankton fecal pellet fluxes and vertical transport of particulate organic material in the pelagic environment. Journal of Plankton Research, 1981, (3): 369-387.
- [14] Walling D E, Moorehead P W.The particle size characteristics of fluvial suspended sediment: An overview. Hydrobiologia, 1989, 176-177(1): 125-149.
- [15] Chen S L, Yang S L, Wu R M.Temporal changes in tidal flat sediment grain size along the north bank of the Hangzhou Bay and their implication of sedimentation dynamics. Advances in Marine Science, 2004, 22(3): 299-305.
- [16] Friedman G M.Address of the retiring President of the International Association of Sedimentologists: Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. Sedimentology, 1979, 26(1): 3-22.
- [17] Svensen C, Viličić D, Wassmann P, Arashkevich E, Ratkova T. Plankton distribution and vertical flux of biogenic matter during high summer stratification in the Krka estuary (Eastern Adriatic). Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(3/4); 381-390.
- [18] Zhao W, Wang Q H, Zheng M P, Zhao Y Y, Wang H L.A preliminary study on the biology of *Daphniopsis tebitana* Sars. Journal of Dalian Fisheries University, 2002, 17(3): 209-214.
- [19] Zhao W, Zheng M P, Xu X Z, Liu X F, Guo G L, He Z H. Biological and ecological features of saline lakes in northern Tibet, China. Hydrobiologia, 2005, 541(1): 189-203.
- [20] Zhao W, Wang Q H. The morphological redescription of *Daphniopsis tibetana* Sars (Crustacea: Cladocera: Daphnidae). Journal of Dalian Fisheries University, 2005, 20(3): 165-173.
- [21] Zhao W, Huo Y Z, Gao J.Analysis and appraisement of nutrient compositions for *Daphniopsis tibetana* Sars. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(3): 446-451.
- [22] Zhao W, Wang Q H, Zhang L, Bao J.The effects of temperature, salinity and food on the feeding intensity of *Daphniopsis tibetana*. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(11): 3065-3072.
- [23] Jiang X Z, Du N S.Fuuna Sinica: Crustacea (Freshwater Cladocera).Beijing: Science Press, 1979: 6-24, 122-124.
- [24] Jiang X Z.Tibet Aquatic Invertebrates.Beijing: Science Press, 1983: 443-492.
- [25] Manca M, Cammarano P, Spagnuolo T. Notes on Cladocera and Copepoda from high altitude lakes in the Mount Everest Region (Nepal). Hydrobiologia, 1994, 287(3): 225-231.
- [26] Wang R, Fan C L Copepods feeding activities and its contribution to downwards vertical flux of carbon in the east China Sea. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(6): 579-586.
- [27] Longhurst A R.Role of the marine biosphere in the global carbon cycle.Limnology and Oceanography, 1991, 36(8): 1507-1526.
- [28] Fukushima T, Aizaki M, Muraoka K.Characteristics of settling matter and its role in nutrient cycles in a deep oligotrophic lake. Hydrobiologia,

1989, 176-177(1): 279-295.

- [29] Evans G, Prego R, Marshall J E.Organic matter in ria sediments: Relevance of terrestial sources and temporal variations in rates of accumulation. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 94(3): 246-254.
- [30] Ren M L, Wu Y F.Notes on fishes from Nam Co (lake) of Northern Xizang (Tibet) China. Acta Zoologica Sinica, 1982, 28(1): 80-86.
- [31] Yang L Y, Wang X J, Liu S F. Characteristics of Nutrients distribution in surface sediments of Nansihu lake. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, (2): 40-44.
- [32] Wang Y, Zhu L P, Wang J B, Ju J T, Lin X.The spatial distribution and sedimentary processes of organic matter in surface sediments of Nam Co, Central Tibetan Plateau.Chinese Science Bulletin, 2012, 57(36): 3090-3099.

参考文献:

- [1] 刘二东,杨耀.湖泊碳循环研究进展及研究方法.北方环境,2012,24(2):201-204.
- [3] 郑绵平,向军,魏新俊,郑元.青藏高原盐湖.北京:科学技术出版社,1989:9-10.
- [6] 魏乐军,郑绵平,蔡克勤,葛文胜.西藏洞错全新世早中期盐湖沉积的古气候记录.地学前缘, 2002, 9(1): 129-135.
- [7] 孙千里,周杰,肖举乐.岱海沉积物粒度特征及其古环境意义.海洋地质与第四纪地质,2001,21(1):93-95.
- [9] 张娜,李红敬,远凌威,李伟.青藏高原典型湖泊湖岸带表层沉积物碳、氮、磷分析.陕西师范大学学报:自然科学版,2010,38(3): 70-75.
- [15] 陈沈良,杨世伦,吴瑞明.杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义.海洋科学进展,2004,22(3):299-305.
- [18] 赵文,王巧晗,郑绵平,赵元艺,王海雷.西藏拟溞生物学的初步研究.大连水产学院学报,2002,17(3):209-214.
- [20] 赵文, 王巧晗.西藏拟溞形态构造的再描述.大连水产学院学报, 2005, 20(3): 165-173.
- [21] 赵文, 霍元子, 高敬.西藏拟溞营养成分的分析与评价.中国水产科学, 2006, 13(3): 446-451.
- [22] 赵文,王巧晗,张琳,包杰.温度、盐度和食物条件对西藏拟溞摄食强度的影响.生态学报,2010,30(11):3065-3072.
- [23] 蒋燮治, 堵南山.中国动物志(节肢动物门甲壳纲淡水枝角类).北京:科学出版社, 1979: 6-24, 122-124.
- [24] 蒋燮治.西藏水生无脊椎动物.北京:科学出版社, 1983: 443-492.
- [26] 王荣, 范春雷.东海浮游桡足类的摄食活动及其对垂直碳通量的贡献.海洋与湖沼, 1997, 28(6): 579-586.
- [30] 任慕莲, 武云飞.西藏纳木错的鱼类.动物学报, 1982, 28(1): 80-86.
- [31] 杨丽原, 王晓军, 刘思峰. 南四湖表层沉积物营养元素分布特征. 海洋湖沼通报, 2007, (2): 40-44.
- [32] 汪勇,朱立平,王君波,鞠建廷,林晓.青藏高原中部纳木错湖泊表层沉积物有机质空间分布及其揭示的沉积过程.科学通报,2012,57 (32):3090-3099.