

· 学科进展与展望 ·

罗布泊荒漠化进程中沉积物生物质的指示意义*

安登第 胡鑫

(新疆师范大学生命科学与化学学院, 乌鲁木齐 830054)

[摘要] 罗布泊作为干旱区环境演变的典型代表,干涸后沉积物中的生物质演变记录着由湖泊向荒漠变化的进程。湖泊沉积物作为流域地表物质迁移、大气沉降和湖泊内源物的共同宿体,记录了区域气候变化、生态演变等丰富信息。生物质中的有机物结构在自然因素与微生物共同作用下持续变化,而有机物状态又决定了微生物的组成、分布与活力,以生物质演变表述荒漠化进程将成为干旱区环境研究的一个新领域。本文简单介绍了有机物标志物、微生物活力等在环境演变研究中的重要价值。

[关键词] 沉积物, 生物质, 荒漠化, 罗布泊

罗布泊位于塔里木盆地东部,是包括塔里木河、孔雀河等各大河流的归宿地。湖泊沉积物作为流域地表物质迁移、大气沉降和湖泊内源物的共同宿体,记录了区域气候变化、生态演变、人类活动等丰富信息。湖泊沉积物不仅是环境演变的产物,也是记录环境演化信息的载体,不同时间和空间尺度上的环境变化都会在沉积物中留下烙印。罗布泊的环境变化是整个塔里木盆地和周边地区环境演变的缩影,特别是其干涸后的演变是荒漠化进程的代表,而在这一进程中,生物质的变化是其演变的实质。本文就罗布泊沉积物生物质在其环境演变中的意义做一简要介绍。

1 罗布泊环境演变是荒漠化的典型代表

荒漠化是全球最严重的生态问题之一,影响着环境与生态系统并威胁到人类生存。荒漠占我国国土面积的 27.3%,超过耕地面积总和,且在逐年扩大。

罗布泊是中国西部干旱、脆弱生态环境演变的典型代表。罗布泊作为我国最大的内陆河流——塔里木河的尾间湖泊,面积最大时达 5350 km²,曾孕育了灿烂的楼兰文明。但环境和社会的变迁,特别是近百年来的变迁直至干涸,不仅反映了干旱区湖泊变化的一般规律,而且记录了干旱区环境变化的历

程。罗布泊地区的环境演变,特别是近代以来的变化是干旱地区农耕时代和现代经济发展以来人与自然相处的一个缩影和典型,是观察和了解过去气候变化、预测未来生态环境发展趋势的重要窗口。

罗布泊为荒漠化研究提供了一个理想的“模板”。罗布泊由一个浩瀚大湖变成一个干涸的“大耳朵”是在短期内完成的,曾经的绿洲已成为寸草不生的荒漠,并成为“死亡之海”、“神秘之境”,其快速演变了解荒漠化进程提供了“独特”的材料。自 20 世纪中叶以来,罗布泊成为科学探险和考察的热点区域。在 2005 年的第 254 次香山科学会议上,“罗布泊地区环境变迁和西部干旱区未来发展”吸引了 50 多位从事干旱地区自然地理、人文地理、考古、环境遥感、水资源、矿藏、区域发展、生态、农业研究的专家学者参加,与会者深入讨论了罗布泊地区环境变迁及其折射出的生态环境问题,为干旱湖泊荒漠化研究奠定了基础。

罗布泊演变的研究已取得显著成绩。多年来,学者们利用不同方法、从不同角度对罗布泊环境变迁进行了探索,其中对首个深达百米的 K1 孔岩芯的孢粉记录分析表明该地区古环境与现代环境有巨大差异;根据对罗布泊西湖湖心剖面的分析,认为罗布泊地区始终处于干旱背景下,湖泊往往在短时间内发生大规模扩张或消退,楼兰文明的衰亡是河流

* 国家自然科学基金资助项目和新疆师范大学博士后启动基金资助项目。

本文于 2009 年 12 月 20 日收到。

改道造成环境恶化的结果;利用红柳沙包中植物有机物分析证明了利用植物年层研究小尺度气候变化有重要价值;而对其盐壳地貌形成、遥感影像及成矿机理等的研究解释了罗布泊干涸时间、干涸原因及矿物质积累等过程,并认为应从大流域概念进行罗布泊发育与演变的研究,甚至要延伸到整个塔里木盆地和青藏高原地区。

由于罗布泊从湖泊变为荒漠是在短时间内完成的,从而成为荒漠化研究的“范本”,对其变迁过程的研究为我们了解干旱区生态环境形成以及人与自然的的关系有重要意义,也有助于推动中国西部干旱地区的未来发展和建立可持续发展的和谐环境。

2 沉积物荒漠化实质是生物质的演变

沉积物荒漠化的实质就是生命物质逐步减少直至几乎完全消失的过程。沉积物中的生物质,包括有生命和无生命的有机质含量、分布及结构状态等,都可用来作为荒漠化进程的指标。

沉积物系统是由基质(矿物性物质)、生物质(非矿物质)和环境因子(水、热、气候等)共同形成的自然功能体。在这一系统中,基质提供系统存在的基础,植物与光合菌为第一生产力,为系统输入能量和原始有机质,动物和微生物为系统物质、能量的消耗者和转化者,由原始有机质代谢产生次生有机质,生物质在生物与环境因子的共同作用下推动生物地球化学循环^[1]。在健康的生态系统中,能量流动、物质循环维持着系统的平稳运行,但在生态恶化时,往往由第一生产力减少开始,系统中的能量输入减少而输出增加,有机物沿一条不可逆的方向演化——降解,生物质持续减少。

沉积物中有机物是微生物生命活动的能量和物质来源,有机质的降解、演化与微生物密切相关^[2],不同沉积环境都有与之相适应的生物组合和生态特征,它们随环境演变而不断变化和更替,所以微生物的类别、数量、构造、群落、化石组合面貌和遗体、遗迹等都用来指示沉积物的演化进程。有机质演化之初是好氧微生物的消耗阶段,这一阶段好氧菌消耗和破坏了大部分原始有机质,同时造成了贫氧环境,使次生有机质得以保存,随之厌氧微生物在贫氧环境中继续分解。有机物在微生物作用下结构态发生变化,不同的结构态代表了其降解的不同阶段;同时不同结构态的有机质反过来影响着微生物的活性和群落结构,也决定了微生物的类群与分布状态,它们共同影响、制约着沉积物的理化性质,深刻反映着

湖泊沉积环境、生态系统的变迁^[3]。

有机质是沉积物系统维持稳定的重要物质基础。对于有机物在荒漠化进程中的变化和作用,曹军与陶澍^[4]通过模拟实验发现,沉积物与土壤中天然有机物的释放动力学包括解吸与降解两个过程,且均遵循一级动力学规律,湿润与高温有利于有机物降解。苏永中和赵哈林^[5]对沙化土壤的研究证实,与粘粉粒和部分极细沙结合的稳态有机碳和氮在沙漠化过程中被直接吹蚀,粘粉粒吹蚀1%,有机碳和全氮含量分别下降 $0.169\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0215\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明沙漠化是与有机物密切相关的。

作为荒漠化典型的罗布泊,自干涸那天起沉积物生物质在自然因素与微生物的共同作用下持续发生着变化,部分彻底消失,残留部分以不同的结构状态存在,每种结构态代表了其降解阶段,而其演变过程代表了罗布泊荒漠化的进程。

3 表述荒漠化进程的生物质演变指标

沉积物有机物的积累受古气候进而受流域植物的影响,沉积初期微生物对这些有机物的再加工使其含量大幅度减少,原始有机质被次生产物替代,同时微生物的活力又受环境条件与可利用营养物的共同制约。由于这一再造过程,几乎没有原始有机物能够完整地保留下来,而正是次生产物的结构和形态变化造就了新的生物标志物(biomarker),成为表述干涸后沉积物向荒漠变化进程的指标。

3.1 有机物演变的生物指标

沉积物中有机物的不同结构部分所占比例代表了其降解进程。腐殖质是沉积物中除已知各类有机化合物(非腐殖物质)外的各种淡棕色至暗褐色的天然高分子化合物的总称,主要由腐殖酸、富里酸和胡敏素等组成,土壤中腐殖质的结构变化会影响生物转化及碳循环等^[6],腐殖质在较新的湖泊沉积物中所占比例为60%—70%,而在较为古老的沉积物中这一比例会上升到90%以上,同时证实,湖泊沉积物中的上层总腐殖酸含量较稳定,但随深度增加,腐殖酸增加而富里酸减少。

沉积物中有机物的种类丰富,不同结构态代表了不同的沉积年代或转化进程。Hertkorn等^[7]研究证实,河流沉积物的天然有机物结构成分达数千种,且可由沉积物的组成推断其形成的年代,如Wang & Williams^[8]由某湖泊沉积物的总有机物、总碳和总硫等以及不同结构有机物(烷烃、类固醇等)的比例推断出该湖泊形成时间约在1000年前;

房吉敦等^[9]对滇池沉积物中可溶性有机质组成的定量测定表明,正构烷烃组分较稳定反映出其有机质以菌藻类来源为主,以高碳数脂肪醇为主要组分的脂肪醇反映了有机质中陆源输入的部分,脂肪酸组分揭示出可溶有机质中以浮游植物贡献为主。

沉积物中有机物含量及各元素的不同比例显示了其不同的结构状态。总有机物(TOM)是在550℃下可氧化物质的总量^[10],表示样品的基本有机质组成;总有机碳(TOC)是样品中的有机态碳含量,以区别于无机态碳;可溶性有机碳(DOC)是可溶于水并能通过0.45 μm滤膜的有机碳;碳氮比(C/N)用以描述有机物中含氮物质的量,通常含氮量会随降解程度的增加而下降;氢指数(HI)是有机物中氢与碳的比例,氧指数(OI)则是氧与碳的比例。荒漠化进程中沉积物有机物逐步降解,含碳物会被微生物分解而以CO₂和CH₄释放到空气中,使TOC减少。有机物降解过程中首先是容易被利用的部分分解,DOC易被吸附到沉积物颗粒表面,为微生物作用提供了可接触性从而易被降解。有机物降解进程中C/N会相应变化,随沉积物深度的增加,C/N值下降。但对含氮物丰富的沉积物,沉积初期C/N会因蛋白质的迅速降解而升高^[11]。有机物氧化过程中氢的比例会降低而氧则会增加。同时,TOC也与C/N、HI、OI密切相关,随TOC的减少,C/N值和HI值会相应减少而OI值会增加^[12],这些指标的变化显示着有机物在不同沉积条件下的降解过程,因而可用来指示环境的演化进程。

3.2 微生物活力指标

微生物是地球物质、能量循环的主要动力。沉积物中的有机物降解主要是由微生物推动的^[13],而微生物活力又受有机物组成、环境因素等的影响^[14]。微生物活力包括微生物的组成、分布、数量及代谢活性(酶活力)等。

沉积物中有机物含量是决定异养生物活力的最主要因素。随沉积物深度增加,有机质含量降低,微生物数量也随之减少、类群发生变化,同时功能基因和微生物多样性却随之增加。研究表明,南极大陆架沉积物1.5—2.5 cm表层微生物种类达1128个操作分类单元(OTU),但到20—21 cm处减少到442个OTU;我国青海湖沉积物的微生物数量由水-固界面处的 4×10^9 降低到40 cm深处的 6×10^7 ,微生物类群由上层的变形菌门逐步变化为深层的硬壁菌门。同时研究显示,晚期全新世沉积物中的微生物多样性远远多于早期,而中期的多样性居中。对

Hovsgol湖沉积物的微生物分布研究显示,古菌在39—42 cm处的全新世与更新世界面处变化最大,并随深度增加,硝化螺旋菌门和部分β-变形菌纲数量减少而α-、β-和γ-变形菌纲数量增加;对海底沉积物分析显示,342 m深处的微生物主要种类是杆菌属、希瓦氏菌属、假交替单胞菌属、盐单胞菌属、假单胞菌属、副球菌属、红球菌属、细杆菌属等,其胞外酶则包括蛋白酶、淀粉酶、酯酶、甲壳酶、磷酸酯酶和脱氧核糖核酸酶等。苏玉环^[15]对采自北极太平洋扇区沉积物样品的16SrDNA V3区序列PCR-DGGE(变性梯度凝胶电泳)系统发育分析表明,9个样品微生物归属于7个细菌类群,且其中5个浅海样品和2个深海样品可分辨电泳条带数目较多,而其余2个深海样品可分辨电泳条带的数目较少,说明随沉积物深度增加,可分辨微生物种类减少。

微生物活力也受有机物结构状态的影响。研究发现,河流沉积物中微生物酶活性与生物可降解水溶性有机质(BDOC)浓度密切相关。Edlund等^[2]报道,波罗的海沉积物中的微生物数量与沉积物的有机碳呈强正相关,其次与有机氮相关;Boer等^[14]研究也表明微生物的多样性、碳产率及胞外酶活性与深度强烈相关。对武汉月湖沉积物微生物在磷释放中的作用室内模拟实验表明,微生物与沉积物碱性磷酸酶存在一定的相关性^[16],沉积物微生物在好氧环境下有助于磷的积聚,而厌氧环境下随厌氧微生物对铁结合态磷的利用,磷又从沉积物中转化为溶解态被释放出来^[17]。对采自墨西哥湾的海洋沉积物用约2000种功能酶基因探针检测显示,深层的功能基因种类远高于表层,从0.75 cm处的1.7%增加到25 cm处的18.9%,说明随有机物降解,微生物总数减少但多样性和功能基因都增加。

由于微生物是沉积物中最活跃的生物因子,微生物活力在一定程度上集中了生物质的全部表现,以微生物的组成、分布及酶活性等指示沉积物荒漠化进程具有一定的代表意义,其组成与分布可表示生物质存在状态与分布,而其酶活力可代表可利用有机物的丰度,同时结合有机物的化学组成,就可阐明生物质变化的过程,成为荒漠化进程的指示指标。

4 罗布泊沉积物生物质演变的特点

罗布泊作为流域的集水和集盐中心,沉积物累积了大量矿物质,干涸后呈现强碱和高盐环境,其沉积物中的生物质,包括有机物结构态和微生物类群、分布等,在干涸后的演变必然区别于海洋和有水湖

泊等的沉积物,主要特点为:

4.1 生物质变化呈现单向性

有水湖泊、海洋和河流沉积物由于随水流进入的有机物和微生物、浮游生物等的合成作用^[18]而使有机物持续输入,与微生物的分解作用共同使有机物组成和微生物群落结构处在一定范围内的动态平衡之中。但罗布泊干涸后,外源有机物输入和表面微生物合成均终止,其有机物的演变就只向着“分解”的单方向进行,微生物组成及活力也随之相应变化,一些微生物类群会彻底消失,存活的微生物由于可利用基质的减少和性质的变化而致代谢功能随之改变,这也许可以解释随沉积物深度增加,微生物的功能基因多样性也增加^[19]。

4.2 与环境的界面交流基本停止

农田土壤由于耕作而使上下层剧烈交流,其中的有机物组成和微生物群落也随之变化;有水湖泊、海洋沉积物由于水体扰动等因素使沉积物表面与水体的物质进行交流,沉积物中的有机物和微生物也处于较为稳定的动态平衡之中。罗布泊沉积物则因为缺乏翻动和水体的扰动,也无周边植物的影响,自干涸的那天起即处于非常稳定的状态,其与环境的交流仅限于气体层面。

4.3 沉积物系统对外呈现开放模式

通常意义上的沉积物,包括海洋、湖泊及河流沉积物等,都是在有上覆水覆盖的情况下,自身内部形成了一个相对封闭的系统,其与环境的物质、能量交流都须通过上覆水进行,而罗布泊沉积物由于失去了水体的覆盖,沉积物也就失去了隔绝保护,系统处于对外开放模式,特别是有水覆盖沉积物的厌氧环境不复存在,其有机物结构演变与微生物类群、分布等会显著区别于其他环境的沉积物。

5 问题与展望

湖泊沉积物是一个非常复杂的生态系统,有机物与微生物间存在复杂但密切的关系,且这一关系随沉积物历史和环境而持续变化,由此使得由生物质演变表述荒漠化进程显得更为复杂。目前对罗布泊环境的研究主要集中在对其气候、地理、干涸时间、环状盐壳成因及成分、沉积物中常量、微量元素的分析和有机质的来源等,而对其荒漠化过程的重要内容,即生物质的演变研究仍是一个空白。探讨荒漠化进程中的生物质演变过程与机制,对认识干涸湖泊环境演变有重要价值,必将成为干旱湖泊沉积物荒漠化研究的一个新领域。

通过如下工作,将会对采用生物质演变表述荒漠化过程有重要的参考价值:

(1) 将沉积物的生物质作为研究重点。荒漠化的实质是生物质的演变,为此有生命和无生命的生物质就成为重要研究对象。采用热重差热分析、有机物提取、分离,结合荧光光谱法、红外光谱法检测、ICP-MS等方法研究沉积物有机物的组成与结构,以沉积物的总DNA为模板进行PCR-DGGE分析微生物的类群与分布,以细胞膜磷脂测定等分析微生物活力等,研究不同时空有机组分变化与微生物活性、群落结构变化的相互关系,作为描述荒漠化进程的指标,是研究生物质演变与环境关系的意义所在。

(2) 采用合理的生物标志物。沉积物中有机物有数千种,而微生物群落结构、活力等指标也多种多样,但并非任何一种有机物成分或微生物群落指标都可表述荒漠化的进程。采用即具有环境指示意义、便于检测,又对生物间相互作用有重要价值的生物标志物,是利用生物质研究荒漠化进程成功的关键。

(3) 突出多学科交叉。荒漠化本身是涉及多学科的一个领域,对沉积物生物质的研究涉及到天然产物化学、生物化学、化学生态学、微生物学及分子生物学等多学科,需要阐明的不仅仅是沉积物的有机物结构和微生物分布问题,更重要的是它们相互间的关系所代表的环境演化意义,需要更多的生物学、化学和生态学研究参与。

参 考 文 献

- [1] Falkowski P G, Fenchel T, Delong E F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*, 2008, 320(5879): 1034—1039.
- [2] Edlund A, Hardeman F, Jansson J K et al. Active bacterial community structure along vertical redox gradients in Baltic Sea sediment. *Environ Microbiol*, 2008, 10(8): 2051—2063.
- [3] Froelich P N, Klinkhammer G P, Bender M L et al. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochim Cosmochim Acta*, 1979, 43(7): 1075—1090.
- [4] 曹军, 陶澍. 土壤与沉积物中天然有机物释放过程的动力学研究. *环境科学学报*, 1999, 3: 75—80.
- [5] 苏永中, 赵哈林. 农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究. *中国农业科学*, 2003, 36(8): 928—934.
- [6] Myneni S C B, Brown J T, Martines G A et al. Imaging of humic substance macromolecular structures in water and soils. *Science*, 1999, 286(5443): 1335.

- [7] Hertkorn N, Frommberger M, Witt M et al. Natural organic matter and the event horizon of mass spectrometry. *Anal Chem*, 2008, 80(23): 8908—8919.
- [8] Wang R L, Williams W D. Biogeochemical changes in the sediments of Lake Cantara South, a saline lake in South Australia. *Hydrobiologia*, 2001, 457: 17—24.
- [9] 房吉敦, 吴丰昌, 熊永强等. 滇池湖泊沉积物中游离类脂物的有机地球化学特征. *地球化学(GEOCHIMICA)*, 2009, 38(1): 96—104.
- [10] Fischer H, Wanner SC, Pusch M. 2002. Bacterial abundance and production in river sediments as related to the biochemical composition of particulate organic matter (POM). *Biogeochemistry* 61: 37—55.
- [11] Sarazin G, Michard G, Gharib I A et al. Sedimentation rate and early diagenesis of particulate organic nitrogen and carbon in Aydat Lake (Puy de Dôme, France). *Chem Geol*, 1992, 98: 307—316.
- [12] Bertrand P, Lallier-Vergès E. Past sedimentary organic matter accumulation and degradation controlled by productivity. *Nature*, 1993, 364: 786—788.
- [13] Bardgett RD, Freeman C, Ostle N J. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks. *The ISME Journal*, 2008, 1—10.
- [14] Boer S I, Hedtkamp S I C, van Beusekom J E E et al. Time—and sediment depth-related variations in bacterial diversity and community structure in subtidal sands. *The ISME Journal*, 2009, 1—12.
- [15] 苏玉环. 北极太平洋扇区表层沉积物中微生物群落的分子生物学分析. 中国海洋大学硕士学位论文, 2006.
- [16] 夏卓英, 周易勇, 宋春雷等. 微生物在湖泊沉积物磷释放中的作用初探. *环境污染与防治*, 2007, 网络版第8期.
- [17] 孙晓杭. 太湖沉积物磷的形态与微生物作用初探. 中国科学院生态环境研究中心硕士学位论文, 2005.
- [18] Ruhl H A, Ellena J A, Smith K L Jr. Connections between climate, food limitation, and carbon cycling in abyssal sediment communities. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105(44): 17006—17011.
- [19] Wu L, Kellogg L, Devol A H et al. Microarray-based characterization of microbial community functional structure and heterogeneity in marine. *Appl Environ Microbiol*, 2008, 74(14): 4516—4529.

THE INDICATE VALUES OF THE SEDIMENT BIOMASS ON DESERTIFICATION OF LOP NUR

An Dengdi Hu Xin

(College of Life Science and Chemistry, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054)

Abstract Lop Nur, as a specific model of the environmental evolution of the dried area, the changes of its sediments biomass after dried up typically represented the environment proceeding to desert. As an accumulation of surface soil migration, air particles settling and endogenous materials sedimentation, biomass in lake sediment constitutes a minor but important fraction and recorded plentiful information of the environmental evolution and climate changes. During the course, the organic contents decreased and the microbe communities, abundance and activities fluctuated. The successions of the biomass typically represented the desertification of the dried up sediments and would be a new area for the investigation of environment. In this paper, we reviewed the indicate values of the biomarkers and the microbial activities on environment process in brief.

Key words sediment, biomass, desertification, Lop Nur