

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111111714

孙园园, 何江, 吕昌伟, 王维, 樊明德, 任丽敏, 麻涛. 达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成. 生态学报, 2013, 33(2): 0610-0618.

Sun Y Y, He J, Lü C W, Wang W, Fan M D, Ren L M, Ma T. Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0610-0618.

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成

孙园园¹, 何江^{1,2,*}, 吕昌伟^{1,2}, 王维^{1,2}, 樊明德^{1,2}, 任丽敏¹, 麻涛¹

(1. 内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古大学环境地质研究所, 呼和浩特 010021)

摘要:以达里诺尔湖沉积物为研究对象, 运用连续浸取法分析测定了沉积物中不同形态的无机碳, 开展了沉积物中无机碳形态的分布特征研究, 初步探讨了沉积物中不同形态生源要素与无机碳的相互关系。研究表明, 表层和柱芯沉积物中无机碳的主导形态均为 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 相; 空间分布上, 湖心区为各形态无机碳的高值区, 东部和北部湖区为低值区; 计算结果表明, 碳酸钙在湖水中可达过饱和, 揭示达里诺尔湖具备形成自生碳酸盐沉淀的条件; 沉积柱芯中氮、磷和生物硅与无机碳的相互关系反映了营养水平升高可促进水体对碳酸钙过饱和条件的形成, 藻类光合作用对水体理化性质的改变是导致碳酸盐沉淀的重要因素之一。

关键词: 无机碳; 形态; 沉积物; 达里诺尔湖

Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake

SUN Yuanyuan¹, HE Jiang^{1,2,*}, LÜ Changwei^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, FAN Mingde^{1,2}, REN Limin¹, MA Tao¹

1 College of Environment and Resources, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

2 Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China

Abstract: Sediments play an important role in carbon cycle as the important sources and sinks of carbon. The role of sediments in the carbon cycle is closely related to the forms and distribution of inorganic carbon in the sediments. The forms of inorganic carbon have different capacity in the carbon cycle and recycle. Forms and changes of inorganic carbon in the sediments were essential for the fluxes and processes of carbon across the water-sediment interface. The study of inorganic carbon forms is the basis and premise for discussing their contribution to carbon cycling. In this work, the sequential extraction method was employed to extract inorganic carbon forms in sediments from Dali Lake. The form distribution characters of inorganic carbon in surface sediments and sediment cores were studied. The correlations between inorganic carbon and physical-chemistry characteristics such as total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and biogenic silicate (BSi) were discussed in sediment cores. The results showed that the dominant form of inorganic carbon was $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form both in surface sediment and sediment cores; The content of $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form in sediments ranges from 6.26 to 17.51 mg/g, with mean content of 14.02 mg/g, accounted for 82.77% of the total inorganic carbon in the sediments. The contents of inorganic carbon forms in surface sediment are rank as: $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form > HCl form > NaCl form > $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ form > NaOH form. In terms of the horizontal characteristics, the central area was the high value area of inorganic carbon form, the east and north area were the low value area in the lake. Water depth and inorganic carbon present a good positive correlation ($R^2 = 0.86, P < 0.01$). The relationship and the horizontal characteristics of inorganic carbon implied that the terrigenous material which were carried by inflowing rivers have dilute effect on sediments. The supersaturation coefficients of Calcium carbonate in different year in Dali Lake are far greater than

基金项目: 国家自然科学基金(40863003); 内蒙古科技厅科技引导创新项目(210058); 内蒙古大学“科技创新团队”基金(12110619)

收稿日期: 2011-11-11; **修订日期:** 2012-01-010

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

1 ($31.59 < IAP/K_{sp} < 166.92$). The calculation results showed that calcium carbonate was supersaturation in the lake and implied that the aquatic environmental conditions were beneficial to authigenic carbonate precipitation in Dali Lake. In sediment cores, the content of $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form ranges from 5.29 to 21.72 mg/g, with mean content of 12.90 mg/g, accounted for 82.21% of the total inorganic carbon in the sediments. The contents of $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form in sediment cores of DLNE-3 and DLNE-5 are obviously higher than DLNE-8 and DLNE-10. The former lied in deep water area are weakly affected by the dilution effect of terrigenous input, which is beneficial to authigenic carbonate precipitation. The latter lied in shallow water area are strongly affected by the dilution effect of terrigenous input, which is not helpful for authigenic carbonate precipitation. The correlations between inorganic carbon and nitrogen, phosphorus, biogenic silicate in the sediments implied that nutrients rising can promote the formation of calcium carbonate supersaturation. In addition, the physical and chemical properties changes in aquatic environment caused by photosynthesis was one of the important factors leading to precipitation of carbonate.

Key Words: inorganic carbon; form distribution; sediments; Dali Lake

碳是最主要的生源要素,它以 CO_2 、 CH_4 、碳酸盐及有机化合物等多种形式在环境中不断循环。碳循环是生物圈健康发展的重要标志,是全球变化研究的热点^[1]。湖泊碳循环是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。湖泊是流域内降水和冲刷物质(面源)、排放物质(点源)和悬浮物质(雨水吸附)的集聚地,是流域产生的溶解碳、颗粒碳及各种营养盐的最终汇集场所^[2]。湖泊生态系统具有生物地球化学过程活跃、生物生产力高、生物泵功能强大等特点^[3]。

沉积物是全球碳的重要源与汇,在碳循环中起重要作用。无机碳在沉积物中占有相当份额,在全球碳循环中扮演重要角色。沉积物在碳循环中的作用与沉积物中无机碳的形态分布密切相关。不同形态无机碳在碳循环中的作用及再循环能力不同,沉积物中无机碳形态及其变化对湖泊水-沉积物界面的碳通量及碳过程起关键控制作用,无机碳形态研究是探讨无机碳在碳循环中作用的基础和前提^[4]。沉积物中无机碳主要以不同形态的碳酸盐矿物存在(如方解石、文石、白铅矿、角铅矿、菱锌矿、菱镁矿、菱锰矿、菱钴矿等)^[5],根据其在不同 pH 介质中的溶解能力将沉积物中的无机碳分为 NaCl 相、 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 相、NaOH 相、 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 相和 HCl 相无机碳,不同形态的无机碳在沉积物中的结合强度不同。近年来,国内外学者取得了沉积物中无机碳总量及其空间分布等一系列研究成果^[6-7],虽然无机碳总量研究对恢复和重建地质历史时期古气候环境演化等是必要的,但不能为沉积物中无机碳的变化过程及其在碳循环中作用的研究提供有价值信息^[8]。

内蒙古高原湖区地处内陆干旱半干旱区,地表径流对湖泊的补给水量少而蒸发量大,湖泊不断向咸水湖或盐湖方向演化^[9]。内蒙古高原湖泊湿地资源丰富,类型多样,在我国湖泊湿地整体研究中占有重要位置。本文以地处半湿润半干旱区的达里诺尔湖(Dali Lake, DLNE)为研究对象,开展了沉积物中无机碳的形态组成研究,综合分析了表层沉积物与沉积柱芯中无机碳的形态分布特征,探讨了沉积物中不同形态生源要素与无机碳的相互关系,以期探讨无机碳形态对湖泊生态系统碳循环的贡献,评价内蒙古高原区湖泊沉积物的碳源汇功能和强度,厘定内蒙古高原湖泊碳的时空分布格局,合理开发与保护利用湖泊湿地资源提供科学依据,为湖泊湿地碳循环研究积累基础资料。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

达里诺尔湖($\text{E}116^{\circ}26' - 116^{\circ}45'$, $\text{N}43^{\circ}13' - 43^{\circ}23'$)位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗西部,南依浑善达克沙地,是内蒙古四大湖泊之一。湖泊面积约 228 km^2 ,湖盆东浅西深(图 1),平均水深 6.8 m,最大水深 13 m,储水量约 $1.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。湖区位处中温带半湿润和半干旱区过渡带,年降水量 350—400 mm,年蒸发量 1287 mm^[10]。达里诺尔湖属堰塞湖,无外流河流,湖泊补给水源主要来自贡格尔河、沙里河、耗来河、亮子河等入湖河流(图 2)及地下水和雨水,湖水的主要损耗方式为蒸发。该湖为碳酸盐型半咸水湖泊,水质类型为碳酸钠

I 型水,盐分以碳酸盐为主,总碱度高达 53.57 mmol/L,pH 值 9.3—9.6。近年来,由于气候干旱和人类活动的影响,水位连年下降,湖泊面积逐年萎缩,水质盐碱度不断增高,富营养化程度日益加剧^[11-13],对达里诺尔国家自然保护区内的珍稀候鸟、渔业生产以及周边区域的可持续发展构成了潜在威胁和风险。

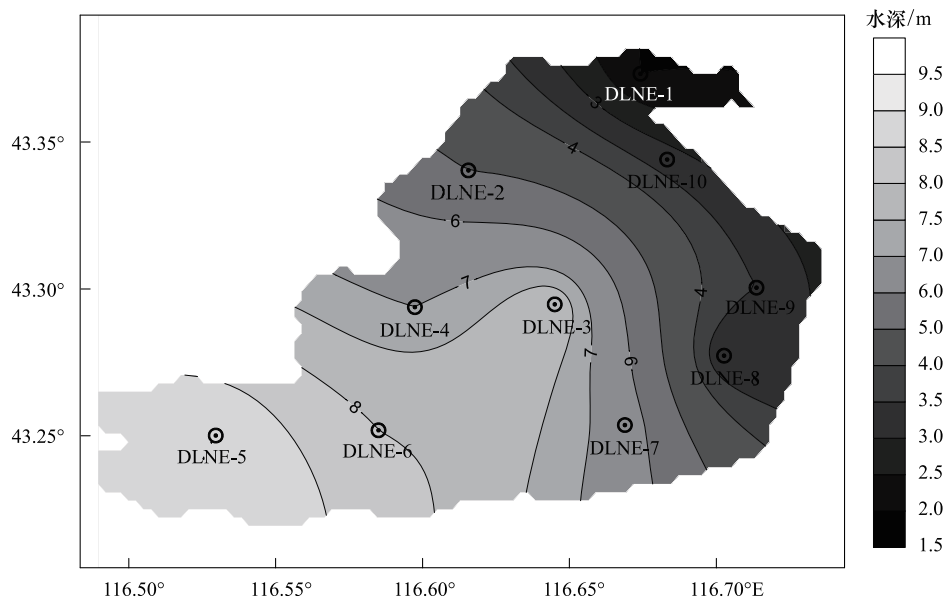


图1 达里诺尔湖水深分布图
Fig.1 The water depth gradient of Dali Lake

1.2 样品采集及分析方法

依据《湖泊生态系统观测方法》,针对达里诺尔湖现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点。于2008年8月对达里诺尔湖进行了系统的现场监测和样品采集(图2)。沉积物柱芯样视湖泊深度分别用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A och B 型无扰动采样器和荷兰 Eijkelpkamp 公司产 SA Beeker 型沉积物原状采样器采集,现场以 2 cm 间隔分层。沉积物样品装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室于-24℃冷冻保存。采样点用 GPS 定位。

无机碳的形态提取按文献^[14]的方法进行,具体步骤见表1。实验在25℃下进行,CO₂含量用容量法测定。实验过程中同时进行空白样和平行样测定,相对标准偏差均<10%。上覆水钙的测定采用原子吸收分光光度法(GB11905-89),碱度的测定采用酸碱指示剂滴定法(HZHSZ0130),pH值的测定采用玻璃电极法

表1 沉积物中无机碳的形态提取

形态 Form	提取方法 The sequential extraction method
氯化钠相(Ⅰ) NaCl form(Ⅰ)	准确称取 1.0000 g 沉积物湿样,盛于 100 mL 聚乙烯螺口离心管中,向管内加入 50 mL 1 mol/L 的 NaCl 溶液,摇匀震荡 2 h 后,离心获取上清液;再向残渣中加入 25 mL 蒸馏水,震荡 10 min 后,离心获取上清液;合并两次上清液,测定 CO ₂
氨水相(Ⅱ) NH ₃ ·H ₂ O form(Ⅱ)	在第Ⅰ步残渣中加入 25 mL 0.1 mol/L 的氨水,余下操作流程同第Ⅰ步
氢氧化钠相(Ⅲ) NaOH form(Ⅲ)	在第Ⅱ步残渣中加入 25 mL 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液,余下操作流程同第Ⅰ步
盐酸羟胺相(Ⅳ) NH ₂ OH·HCl form(Ⅳ)	将第Ⅲ步残渣转移到带有橡胶塞和橡胶管的锥形瓶中,加入 25 mL 0.2 mol/L 盐酸羟胺,产生的 CO ₂ 用高纯 N ₂ (100 mL/min)吹出,用饱和醋酸-醋酸铅吸收所产生的 H ₂ S,用 50 mL 饱和 Ba(OH) ₂ 溶液吸收 CO ₂ ,最后测定所吸收的 CO ₂
盐酸相(Ⅴ) HCl form(Ⅴ)	在第Ⅳ步残渣中加入 25 mL 6mol/L 盐酸,余下操作流程同第Ⅳ步

(GB6920-86),其它营养盐指标为本小组前期研究成果。表层沉积物中各指标的空间分布图均用 Surfer 8.0 完成,相关性分析用 SPSS 16.0 完成,其它数据处理均用 Excel 2003 完成。

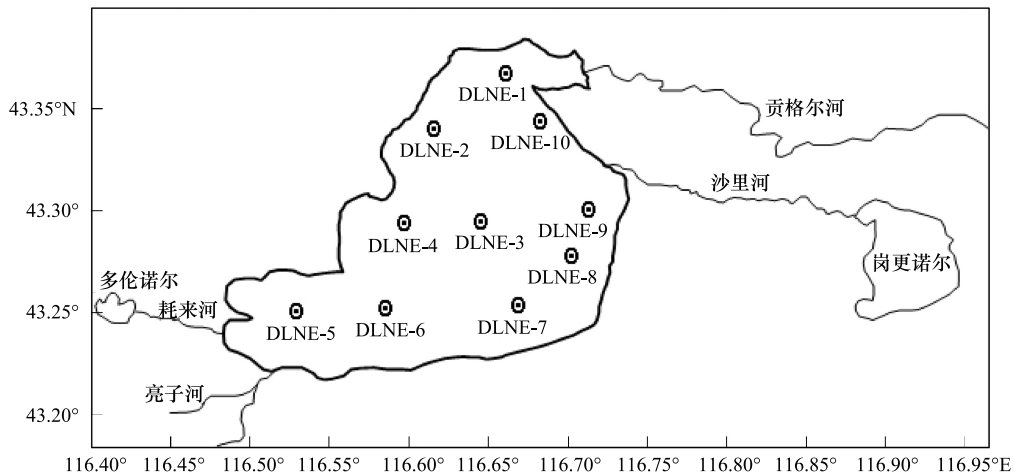


图 2 达里诺尔湖流域水系及采样站位分布图
Fig.2 Locations of sampling points in the Dali Lake

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物(0—10 cm)中无机碳形态的分布特征

表层沉积物中各形态无机碳含量见表 2。
NH₂OH·HCl 相为表层沉积物中无机碳的主导形态,占总量的百分比范围在 72. 20%—90. 69%, 平均 82. 77%, 占绝对优势,其余 4 相无机碳含量均较低,四者之和占总无机碳的百分比不足 20%(图 3)。表层沉积物中各形态无机碳的平均含量序列为 NH₂OH·HCl 相>HCl 相>NaCl 相>NH₃·H₂O 相>NaOH 相,与本小组前期对乌梁素海及岱海的研究结果类似^[4]。与武汉东湖^[15]、辽东湾^[8]及渤海湾北部和西部^[16]相比,达里诺尔湖表层沉积物中无机碳的含量高于前者。武汉东湖、辽东湾及渤海湾北部和西部均属我国湿润半湿润气候区,区内接受来自周边河流的大量物质输入,地表冲刷

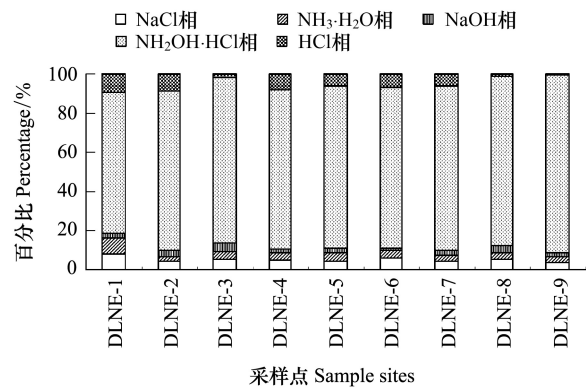


图 3 达里诺尔湖表层沉积物中无机碳的形态分布特征
Fig. 3 Speciation distribution of inorganic carbon in surface sediments

作用均强于位于内陆的达里诺尔湖,陆源物质的输入稀释了沉积物中的无机碳而导致无机碳含量较低。此外,达里诺尔湖位于半湿润和半干旱区过渡带,水体蒸发浓缩作用强烈,从而导致湖水对碳酸钙过饱和度增加及较多的湖泊自生碳酸盐沉淀。

表 2 达里诺尔湖表层沉积物中不同形态无机碳的含量 (n=9)

Table 2 Speciation concentration of inorganic carbon in surface sediments						
mg/g	氯化钠相 NaCl form	氨水相 NH ₃ ·H ₂ O form	氢氧化钠相 NaOH form	盐酸羟胺相 NH ₂ OH·HCl form	盐酸相 HCl form	总无机碳 Total inorganic carbon
最小值 Min	0.51	0.37	0.21	6.26	0.11	8.67
最大值 Max	1.18	0.86	0.92	17.51	1.73	20.76
平均值 Average	0.86	0.61	0.47	14.02	0.92	16.88

贡格尔河、沙里河是湖泊第一和第二大供给河流,分别从湖区东北部和东部入湖,但无机碳的空间分布却

呈现东低西高的趋势(图4)。大量碎屑沉积物的注入对碳酸盐沉淀具有较强的稀释作用,从而不利于湖泊自生碳酸盐沉淀^[17]。统计分析结果表明,水深与无机碳具有良好的正相关性($R^2 = 0.86, P < 0.01$),即随水深增大,离湖岸距离越远,陆源碎屑物质逐渐减少,碳酸盐含量逐渐增大。这与湖盆西深东浅(图1)及无机碳空间分布的客观事实相一致,揭示入湖河流携带的陆源物质对沉积物无机碳具有稀释作用。

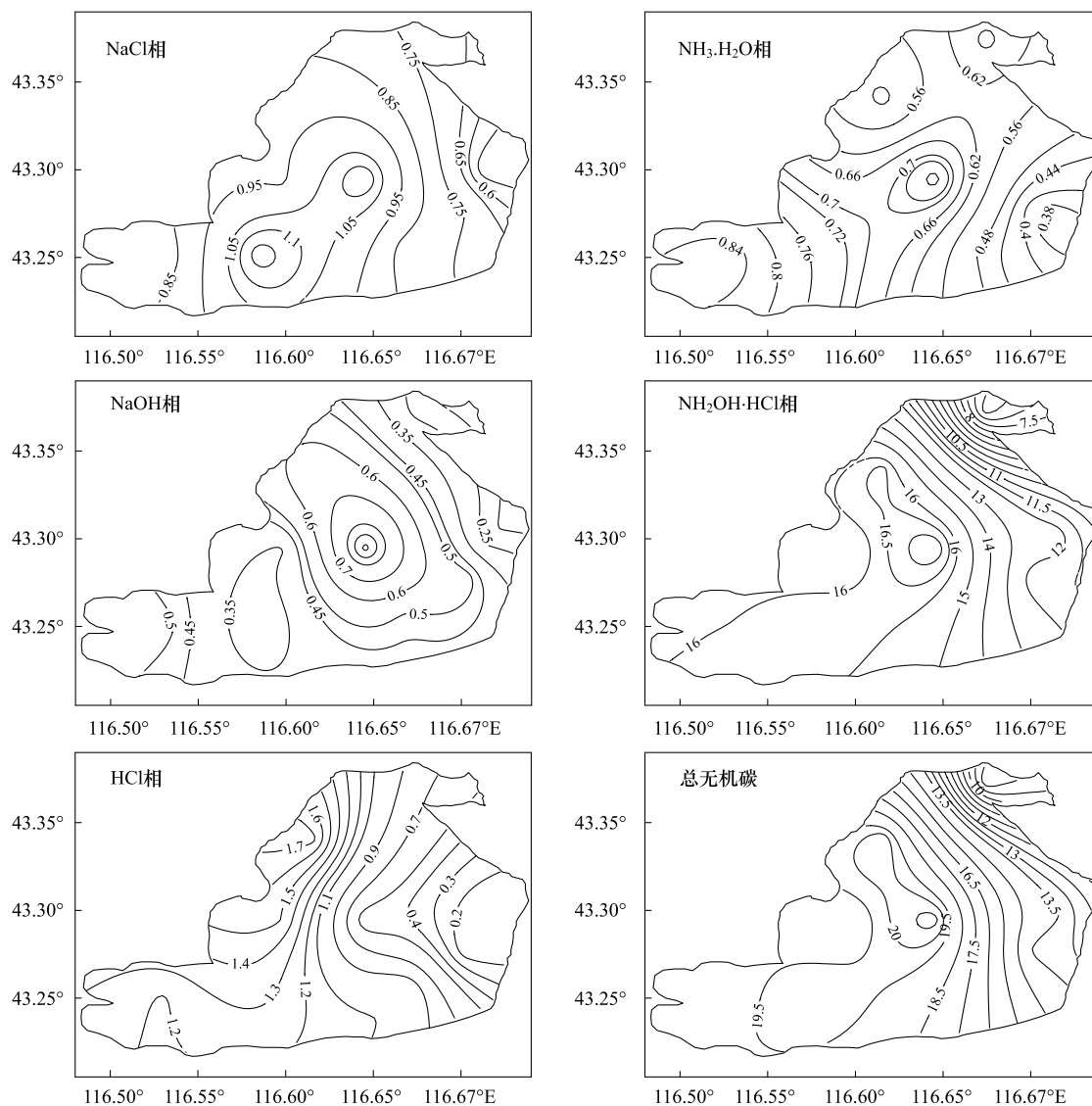


图4 达里诺尔湖表层沉积物中各形态无机碳的空间分布/(mg/g)

Fig. 4 Pattern of horizontal distribution of inorganic carbon speciation in surface sediments from DLNE Lake

碳酸钙过饱和是天然水体中碳酸盐沉淀的必要条件,常用离子活度积(Ionic Activity Product, IAP)与平衡常数 K_{sp} 的关系作为判断湖水碳酸钙饱和性的依据,以饱和系数 IAP/K_{sp} 表示^[6]。

$$IAP = (Ca^{2+})(CO_3^{2-}) = \{r_{Ca^{2+}} \times [Ca^{2+}] \times r_{HCO_3^-} \times K_2 \times Alk\} / (H^+)$$

式中, (Ca^{2+}) 和 (CO_3^{2-}) 分别是 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 的离子活度; $r_{Ca^{2+}}$ 和 $r_{HCO_3^-}$ 分别是 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的活度系数; $[Ca^{2+}]$ 为湖水 Ca^{2+} 的浓度; K_2 是 H_2CO_3 的二级离解常数; Alk 是湖水总碱度; (H^+) 为 H^+ 的活度 ($pH = -\lg(H^+)$)。若 $IAP/K_{sp} > 1$, 则湖水碳酸钙达过饱和。

计算结果(表3)表明,达里诺尔湖水碳酸钙饱和系数远大于1 ($31.59 < IAP/K_{sp} < 166.92$),揭示该湖泊具备了自生碳酸盐沉淀的必要条件。

2.2 柱状沉积物中无机碳形态的分布特征

DLNE-3、DLNE-5、DLNE-8 和 DLNE-10 沉积柱芯中各形态无机碳含量见表 4。4 个沉积柱芯中, $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相无机碳均为无机碳的主导形态, 占无机碳总量的 80% 以上。各沉积柱芯中, NaCl 相含量接近且变化不大; $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 相含量在 0—8 cm 内随深度递增, 8—26 cm 内波动较大, 26 cm 以下趋于稳定; NaOH 相含量在 0—8 cm 内随深度递增, 8—26 cm 内波动不大, DLNE-8 沉积柱芯在 26—34 cm 随深度递减, 34 cm 以下呈微弱递增趋势; HCl 相含量在 0—24 cm 内波动较大, 24 cm 以下较为稳定; $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相与总无机碳的变化趋势相一致, 在所有沉积柱芯中含量波动不大(图 5), 这可能与 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相为 4 个沉积柱芯中无机碳的主导形态, 是无机碳的主要组成部分有关。

表 3 达里诺尔湖不同年份湖水中碳酸钙的饱和系数

Table 3 The supersaturation coefficients of Calcium carbonate of different year in the water of Dali Lake

年份 Year	pH	Ca^{2+}	总碱度 Alk	离子活度积 IAP	平衡常数 K_{sp}	饱和系数 (IAP/K_{sp}) The supersaturation coefficient
1975—1976 ^[11]	9.43	0.14	44.5	1.51×10^{-7}	$10^{-8.32}$	31.59
1994 ^[12]	9.60	0.15	44.9	2.32×10^{-7}	$10^{-8.32}$	48.48
2005—2008 ^[13]	9.42	0.27	51.89	3.31×10^{-7}	$10^{-8.32}$	69.20
2011	9.5	0.57	49.61	7.99×10^{-7}	$10^{-8.32}$	166.92

Ca^{2+} 和 Alk 的单位为 mmol/L, 2011 年为本研究实测数据

表 4 达里诺尔湖沉积柱芯中不同形态无机碳的含量 ($n=62$)

Table 4 Speciation concentration of inorganic carbon in sediment cores form Dali Lake

	mg/g	氯化钠相 NaCl form	氨水相 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ form	氢氧化钠相 NaOH form	盐酸羟胺相 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ form	盐酸相 HCl form	总无机碳 Total inorganic carbon
DLNE-3	最小值 Min	0.90	0.35	0.59	16.92	0.21	20.49
	最大值 Max	1.70	1.25	0.94	21.72	1.38	25.49
	平均值 Average	1.19	0.79	0.74	18.95	0.83	22.51
DLNE-5	最小值 Min	0.84	0.69	0.44	14.29	0.07	17.48
	最大值 Max	1.10	1.41	1.22	20.42	2.08	23.97
	平均值 Average	1.00	1.04	0.76	17.25	0.58	20.63
DLNE-8	最小值 Min	0.59	0.32	0.13	5.29	0.06	7.16
	最大值 Max	0.99	1.00	0.67	12.16	1.41	14.09
	平均值 Average	0.80	0.58	0.43	9.30	0.46	11.58
DLNE-10	最小值 Min	0.75	0.22	0.32	7.21	0.07	9.04
	最大值 Max	0.99	0.91	0.77	10.45	1.29	13.63
	平均值 Average	0.88	0.58	0.51	9.09	0.40	11.47

DLNE-3 和 DLNE-5 柱芯中 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相无机碳含量明显高于 DLNE-8 和 DLNE-10, 这可能与前 2 个柱芯位处深水区(图 1), 受陆源输入稀释作用影响较弱从而有利于碳酸盐的沉淀, 以及后 2 个柱芯位处浅水区(图 1), 受陆源输入稀释作用影响较强从而不利于碳酸盐的沉淀有关。

总体上, 4 个沉积柱芯中以 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 相、 NaOH 相和 HCl 相的垂向波动变化较大, 造成这种变化的原因除与 4 个沉积柱芯所处湖区水深不同有关外, 可能还与湖泊演化过程中流域气候、环境条件及湖泊初级生产力的变化所引致的湖泊水体理化参数的改变有关, 还有待进一步深入研究。

2.3 无机碳与生源要素相互关系分析

研究表明, 沉积物中有机碳与各形态无机碳均不存在显著相关关系, 表明有机质的降解与矿化对无机碳的影响较小。沉积物中 TN、Org-N、TP、活性磷、有机磷和生物硅等营养盐与各无机碳形态均呈正相关关系(表 5), 揭示营养盐含量的增加可促使无机碳各形态含量增加。除大量碎屑沉积物的注入对碳酸盐沉淀有重大影响外, 碳酸盐的发育与藻类的大量繁殖密切相关^[17]。营养盐含量的增加, 可促使藻类等浮游植物的繁

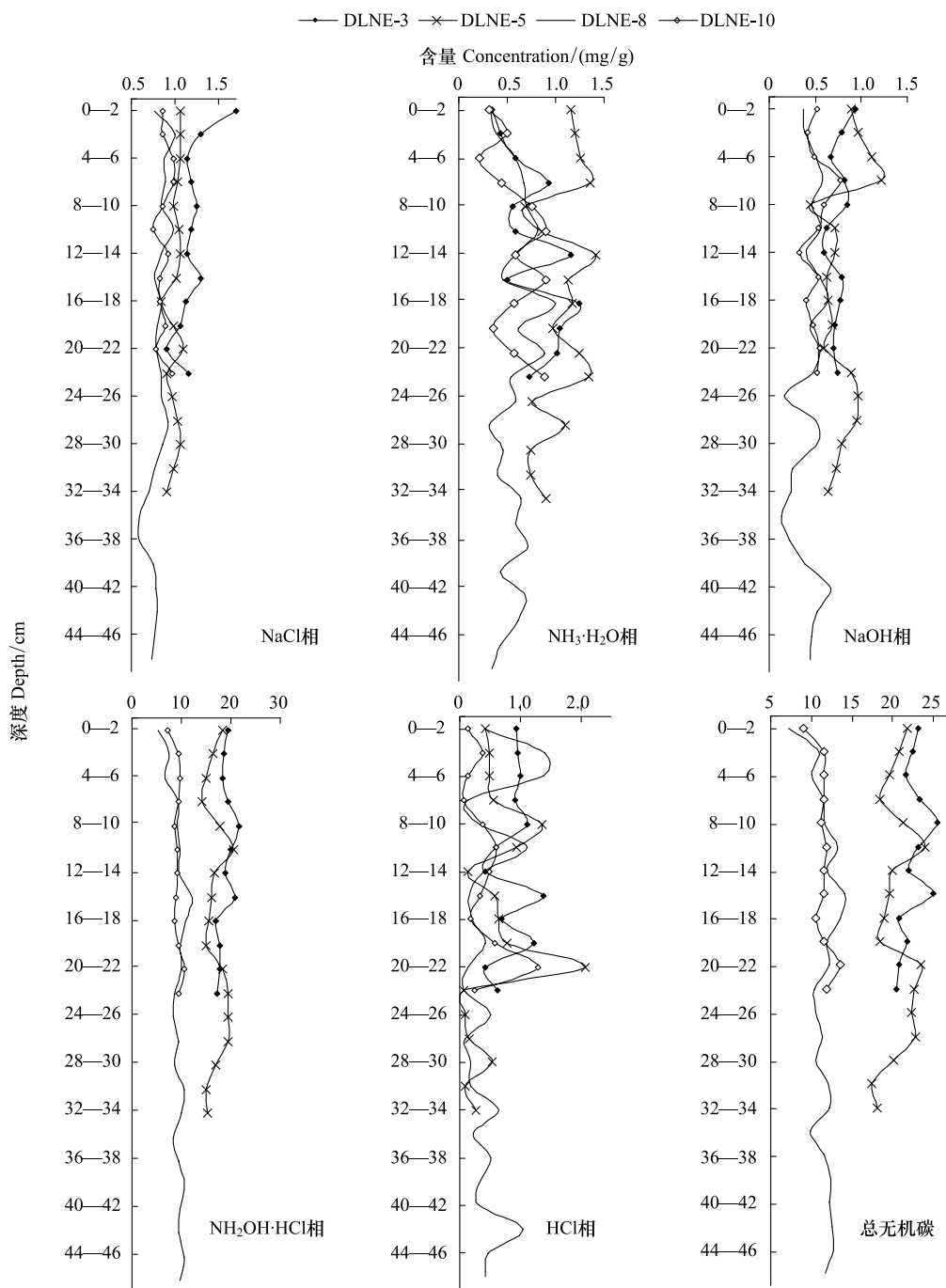


图5 达里诺尔湖沉积柱芯无机碳垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of inorganic carbon speciation in sediment cores

育,藻类增殖大量吸收 CO_2 及部分藻类对水体中有机酸的吸收和重碳酸盐的利用等均可导致水体 pH 值升高从而有利于碳酸盐沉淀^[18-19]。达里诺尔湖硅藻资源极为丰富^[20],水质具有高碱度和高 pH 值特点,藻类的光合作用对水体理化性质的改变可能是导致碳酸钙过饱和进而导致碳酸盐沉淀的重要因素之一。

此外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与各形态无机碳也均呈正相关, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 除与 NaCl 相呈正相关外,与其它形态无机碳均呈负相关且相关性不大。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可通过氨化作用和硝化作用影响碳酸盐的溶解沉淀^[21]。氨化作用占优时,因消耗氢离子导致 pH 值升高从而有利于碳酸盐沉淀;硝化作用占优时,生成氢离子导致 pH 值降低促进无机碳的溶解。无机磷与无机碳各形态均呈负相关,可能与微生物代谢过程可导致有机质矿化降解及 Ca-

P 的溶解有关^[22]。

表 5 沉积柱芯中各形态无机碳与生源要素间的相关性 ($n=62$)

Table 5 Correlations between inorganic carbon speciation and trophic element in sediment cores

	总有机碳 TOC	总氮 TN	硝态氮 $\text{NO}_3^- \text{-N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$	有机氮 Org-N	总磷 TP	活性磷 Reactive P	无机磷 Inorg-P	有机磷 Org-P	生源硅 BSi
氯化钠相 NaCl form	0.03	0.75 **	0.01	0.61 **	0.74 **	0.46 **	0.22	-0.48 **	0.65 **	0.47 **
氨水相 $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ form	0.16	0.41 **	-0.13	0.29 *	0.41 **	0.24	0.21	-0.15	0.50 **	0.47 **
氢氧化钠相 NaOH form	-0.01	0.54 **	-0.02	0.43 **	0.53 **	0.51 **	0.25	-0.38 **	0.56 **	0.54 **
盐酸羟胺相 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ form	0.09	0.80 **	-0.11	0.63 **	0.79 **	0.46 **	0.46 **	-0.38 **	0.77 **	0.58 **
盐酸相 HCl form	0.09	0.36 **	-0.07	0.25	0.36 **	0.12	0.20	-0.13	0.29 *	0.21 *
总无机碳 Total inorganic carbon	0.10	0.81 **	-0.11	0.63 **	0.80 **	0.47 **	0.44 **	-0.38 **	0.78 **	0.60 **

* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关; ** 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关

3 结论

达里诺尔湖表层沉积物中各形态无机碳含量平均值排序为: $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 相 > HCl 相 > NaCl 相 > $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 相 > NaOH 相。 $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ 相无机碳为表层沉积物和沉积柱芯中无机碳的主导形态, 约占无机碳总量的 80%。空间分布上, 湖心区为各形态无机碳的高值区, 东部和北部湖区为低值区。近 30 余年来, 达里诺尔湖水碳酸钙饱和系数均远大于 1 ($31.59 < \text{IAP}/K_{\text{sp}} < 166.92$), 揭示达里诺尔湖具备形成自生碳酸盐沉淀的条件。

沉积柱芯中氮、磷和生物硅与无机碳的相互关系反映了营养水平升高可促进水体对碳酸钙过饱和条件的形成, 藻类的光合作用对水体理化性质的改变可能是导致碳酸盐沉淀的重要因素之一。

References:

- [1] Reay D S. Climate change for the masses. *Nature*, 2008, 452(7183): 31-31.
- [2] Yan G A, Liu Y D. Aquatic ecosystems: carbon cycle and as atmosphere CO_2 sink. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(5): 827-833.
- [3] Yu G R. Global Change, Carbon Cycle and Storage in Terrestrial Ecosystem. Beijing: Meteorology Press, 2003: 1-6, 109-119.
- [4] Lü C W. Geochemistry Character of Carbon (Nitrogen, Phosphorus, Silicon) in Lakes in West Inner Mongolia Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2008.
- [5] Helmke J P, Banch H A. Glacial-interglacial relationship between carbonate components and sediment reflectance in the North Atlantic. *Geo-Marine Letter*, 2001, 21(1): 16-22.
- [6] Chen J A, Wan G J, Wang F S, Huang G R, Zhang F, Zhang D D, Schmidt R. Environmental records of carbon in modern sediments of Lake. *Science in China (Series. D)*, 2002, 32(1): 73-80.
- [7] Wan G J, Bai Z G, Wang H R, Huang R G. The geochemical records of C-N-S-P in recent sediments of Lake Erhai. *Geochimica*, 2000, 29(2): 189-197.
- [8] Niu L F, Li X G, Song J M, Yuan H M, Li N, Dai J C. Forms of inorganic carbon in Liaodong Bay core sediments. *Marine Sciences*, 2006, 30(11): 17-22.
- [9] Zeng H A, Wu J L. Lake status of water quality and the changes in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(6): 882-887.
- [10] Xiao J L, Si B, Zhai D Y, Shigeru Itoh, Zaur Lomtadidze. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40(1): 519-528.
- [11] He Z H, Xie Z H, Lei Y Z. Study on the hydrochemistry and hydrobiology of Dali lake. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1981, 7(3): 341-357.
- [12] He Z H, Jiang H, Bi F S. Restudies on the hydrochemistry and hydrobiology of Dali lake. *Journal of Dalian Fisheries College*, 1996, 11(2): 2-13.
- [13] Ding Z J. Dalinuoer Lake environmental problems and prevention measures. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 2009, 25(4): 57-58.
- [14] Li X G, Li N, Song J M. Determination for the different combined-form inorganic carbon in marine sediments. *Chinese Journal of Analytical*

- Chemistry, 2004, 32(4): 425-429.
- [15] Yang H, Yi C L, Xie P, Xing Y P, Ni L Y. Vertical distribution of carbon, nitrogen and phosphorus of sediments at Stations I and II in Lake Donghu, Wuhan. *Geochimica*, 2004, 33(5): 507-514.
- [16] Wang Y Z, Gao X L, Yang Y W. Fractionation of inorganic carbon in the surface sediments of northern and western Bohai Bay. *Marine Sciences*, 2011, 35(2): 52-57.
- [17] Xia Q S, Tian J C, Ni X F. Lacustrine carbonate rocks in China: an overview. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(1): 106-112.
- [18] Xu H, Liu Z P, Yuan L, Yang L Z. Effect of pH on growth of several freshwater algae. *Environmental Science and Technology*, 2009, 32(1): 27-30.
- [19] Liu C G, Jin X C, Sun L, Zhong Y, Dai S G, Zhuang Y Y. Effects of pH on growth and species changes of algae in freshwater. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 294-298.
- [20] Li Z M, An M, Li Y P. Investigation on the phytoplankton of Dali Lake. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2007, (S1): 210, 212.
- [21] Wang X L. A Study of Transportation Behaviors of Inorganic Carbon in Huanghe Estuary [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [22] Zhang B L. The Characteristics of Phosphorus Behavior at Sediment-Water Interface and Environmental Risk Assessment from Shallow Lakes [D]. Shanghai: East China Normal University, 2004.

参考文献:

- [2] 严国安, 刘永定. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO₂ 的汇. *生态学报*, 2001, 21(5): 827-833.
- [3] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积. 北京: 气象出版社, 2003: 1-6, 109-119.
- [4] 吕昌伟. 内蒙古高原湖泊碳(氮、磷、硅)的地球化学特征 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [6] 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 黄荣贵, 张峰, Zhang D D, Schmidt R. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(1): 73-80.
- [7] 万国江, 白占国, 王浩然, 黄荣贵. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录. *地球化学*, 2000, 29(2): 189-197.
- [8] 牛丽凤, 李学刚, 宋金明, 袁华茂, 李宁, 戴纪翠. 辽东湾柱状沉积物中无机碳的形态. *海洋科学*, 2006, 30(11): 17-22.
- [9] 曾海鳌, 吴敬禄. 蒙新高原湖泊水质状况及变化特征. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 882-887.
- [11] 何志辉, 谢祚浑, 雷衍之. 达里湖水化学和水生生物学研究. *水生生物学集刊*, 1981, 7(3): 341-357.
- [12] 何志辉, 姜宏, 毕凤山. 达里湖水化学和水生生物学再调研. *大连水产学院学报*, 1996, 11(2): 2-13.
- [13] 丁子军. 达里诺尔湖水环境问题及防治措施. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2009, 25(4): 57-58.
- [14] 李学刚, 李宁, 宋金明. 海洋沉积物中不同结合态无机碳的测定. *分析化学*, 2004, 32(4): 425-429.
- [15] 杨洪, 易朝路, 谢平, 邢阳平, 倪乐意. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究. *地球化学*, 2004, 33(5): 507-514.
- [16] 王允周, 高学鲁, 杨玉玮. 渤海湾北部和西部海域表层沉积物中无机碳形态研究. *海洋科学*, 2011, 35(2): 52-57.
- [17] 夏青松, 田景春, 倪新锋. 湖相碳酸盐岩研究现状及意义. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(1): 105-112.
- [18] 许海, 刘兆普, 袁兰, 杨林章. pH 对几种淡水藻类生长的影响. *环境科学与技术*, 2009, 32(1): 27-30.
- [19] 刘春光, 金相灿, 孙凌, 钟远, 戴树桂, 庄源益. pH 值对淡水藻类生长和种类变化的影响. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 294-298.
- [20] 李志明, 安明, 李岩平. 达里湖浮游植物调查. *内蒙古农业科技*, 2007, (S1): 210, 212.
- [21] 王晓亮. 黄河口无机碳输送行为研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [22] 张斌亮. 浅水湖泊沉积物-水界面磷的行为特征与环境风险评价 [D]. 上海: 华东师范大学, 2004.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元