

乌梁素海和岱海上覆水中碳的形态分布及其制约机制

吕昌伟, 何江, 梁英, 毛海芳, 刘华琳, 王凤娇

(内蒙古大学环境与资源学院, 呼和浩特 010021)

摘要:以乌梁素海和岱海 2 个不同类型湖泊上覆水中 TIC、DIC、TOC、DOC 的地球化学特征为基础,分析和探讨了 2 个湖泊上覆水的水化学特征和 TIC、DIC、TOC、DOC 的空间分布格局及其制约机制。结果表明,乌梁素海和岱海湖泊的水化学特征均属蒸发-浓缩类型,湖泊水体离子组分特征受控于流域的蒸发-浓缩作用及蒸发盐岩的风化作用;岱海 TIC、DIC、TOC、DOC 的含量范围分别为 $(0.93\sim 1.16)\times 10^4$ 、 $(0.78\sim 0.90)\times 10^4$ 、 $(0.07\sim 0.63)\times 10^4$ 、 $(0.07\sim 0.48)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 乌梁素海 TIC、DIC、TOC、DOC 的含量范围分别为 $(0.18\sim 1.00)\times 10^4$ 、 $(0.03\sim 0.81)\times 10^4$ 、 $(0.10\sim 0.51)\times 10^4$ 、 $(0.04\sim 0.32)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;2 个湖泊上覆水中 TIC 和 DIC 含量的差异性为湖泊富营养化类型、自然地理区划、水文地质背景及水量收支方式等因素综合作用的结果;岱海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 受 N、P、Si 等 3 种营养盐的共同影响,乌梁素海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 主要受 N 的影响。

关键词:碳;形态分布;湖泊;上覆水

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0330-09

Carbon Geochemistry and Controlling Mechanism in the Overlying Water from the Wuliangsuhai and Daihai Lake in the Inner Mongolia Plateau, China

LV Chang-wei, HE Jiang, LIANG Ying, MAO Hai-fang, LIU Hua-lin, WANG Feng-jiao

(Department of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China)

Abstract: In this work, the concentrations, species distributions and controlling mechanism of total inorganic carbon (TIC), dissolved inorganic carbon (DIC), total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) were discussed on the basis of the overlying water hydrochemistry character from the Wuliangsuhai and Daihai Lake. The results indicated that the overlying water hydrochemistry characters from the two lakes were controlled by the evaporation-enrichment process. The concentration ranges of TIC, DIC, TOC and DOC in the Daihai Lake overlying water were $(0.93\sim 1.16)\times 10^4$, $(0.78\sim 0.90)\times 10^4$, $(0.07\sim 0.63)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $(0.07\sim 0.48)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; and $(0.18\sim 1.00)\times 10^4$, $(0.03\sim 0.81)\times 10^4$, $(0.10\sim 0.51)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $(0.04\sim 0.32)\times 10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ in the Wuliangsuhai Lake, respectively. The differences of TIC and DIC reflected the eutrophication type, physical geographical regionalization, hydrogeologic setting and water incoming and outgoings of the two lakes. The concentrations and species distributions of TIC, DIC, TOC and DOC in the Daihai Lake were influenced by the nitrogen, phosphorus and silicon; while they were mainly influenced by the nitrogen in the Wuliangsuhai Lake.

Keywords: carbon; species distributions; lakes; overlying water

碳是最主要的生源要素,亦是生物圈能量循环和物质流动中最为重要的元素,几乎所有的生物地球化学循环过程都与其有关,因而碳循环研究是目前全球变化研究的热点与焦点^[1-3]。湖泊水体的水文地球化学

特征能反映出流域岩石化学风化及土壤侵蚀的强弱和同位素化学组成,并能揭示元素的生物地球化学循环^[4-14]。湖泊上覆水体中碳的存在形态及其含量变化特征受湖泊水文地球化学影响,反映了碳的地球化学行为和生物地球化学循环特征,对湖泊水-沉积物界面的碳通量和碳过程具有重要的影响与制约作用。

内蒙古高原地处蒙新高原湖区,湖泊湿地资源丰富,类型多样。目前有关该区湖泊水环境中碳的形态分布、含量水平及其与湖泊流域水文水化学特征相互影响等方面的研究尚属空白。本研究以岱海和乌梁素

收稿日期:2009-07-23

基金项目:国家自然科学基金项目(40863003);内蒙古自然科学基金项目(2009BS0601);内蒙古大学高层次人才科研启动基金项目(Z20080209)

作者简介:吕昌伟(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为环境地球化学、污染生态学及湿地科学。E-mail:lcw2008@imu.edu.cn

通讯作者:何江 E-mail:ndjhe@imu.edu.cn

海为对象,系统探讨了2个湖泊上覆水体中碳的存在形态及分布特征,同时结合各湖泊流域的水文水化学特征厘定了水环境中各形态碳的来源及其影响因素,以期寻求不同类型湖泊碳循环的关键因子及初步估算中高纬地区湖泊碳源/汇功能提供科学依据,对评价我国内陆水体生态系统碳源/汇的时空分布格局具有重要意义。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

乌梁素海(WLSH, $40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$)系黄河改道后形成的牛轭湖,是内蒙古高原西部干旱区最典型的浅水草型湖泊。湖区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,现有水域面积 333.48 km^2 , 80%水域水深 $0.8 \sim 1.0 \text{ m}$ 。农田退水是该湖最主要的补给水源^[5],受河套灌区农田退水的影响,近10 a来乌梁素海富营养化进程加剧^[6]。湖中现有大型水生植物共6科6属11种,以芦苇、龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种,沉水植物和挺水植物生长繁茂,遍布全湖。乌梁素海已成为以大型水生植物过量生长为表征的重度富营养化草型湖泊,目前腐烂水草正以每年 $9 \sim 13 \text{ mm}$ 的速度在湖底堆积,成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一,正向芦苇沼泽→碱蓬盐化草甸→白刺荒漠方向演化^[7]。

岱海(DH, $40^{\circ}29'27'' \sim 40^{\circ}37'6''N$, $112^{\circ}33'31'' \sim 112^{\circ}46'40''E$)是内蒙古高原中西部干旱半干旱区典型的地堑式深水藻型湖泊,位处温带半干旱区向干旱区的过渡带,是西伯利亚干冷气团南下与热带海洋暖气团北上交锋的敏感地带^[18]。湖区位于内蒙古凉城县境内,现有水域面积约 80.72 km^2 ,最大水深 16.05 m ,平均水深 7.41 m 。湖中有藻类共76属,其中绿藻门28属、硅藻门21属、蓝藻门16属、裸藻门16属^[18];岱海补给水源来自大气降水以及湖周分布的间歇性河流,流域内工业企业数量少、规模小,所排放的工业废水经弓坝河直接入湖,农田面源污染是湖泊的主要污染源。近年来湖泊水位逐年下降、水面不断缩小,湖水咸化程度逐渐增高,环境问题日益突出,成为我国全球变化研究中倍受重视的地区。

1.2 样品采集及分析方法

依据《湖泊生态系统观测方法》,针对各湖泊现有水域面积及湖泊生态系统类型设置采样点。于2007年8月对乌梁素海和岱海进行了系统的现场监测和上覆水样采集(图1)。上覆水样中各指标的分析测试方法如表1所示。

2 结果与讨论

2.1 湖泊水化学特征的影响因素分析

湖泊水体主要组分的受控类型包括“降水控制类

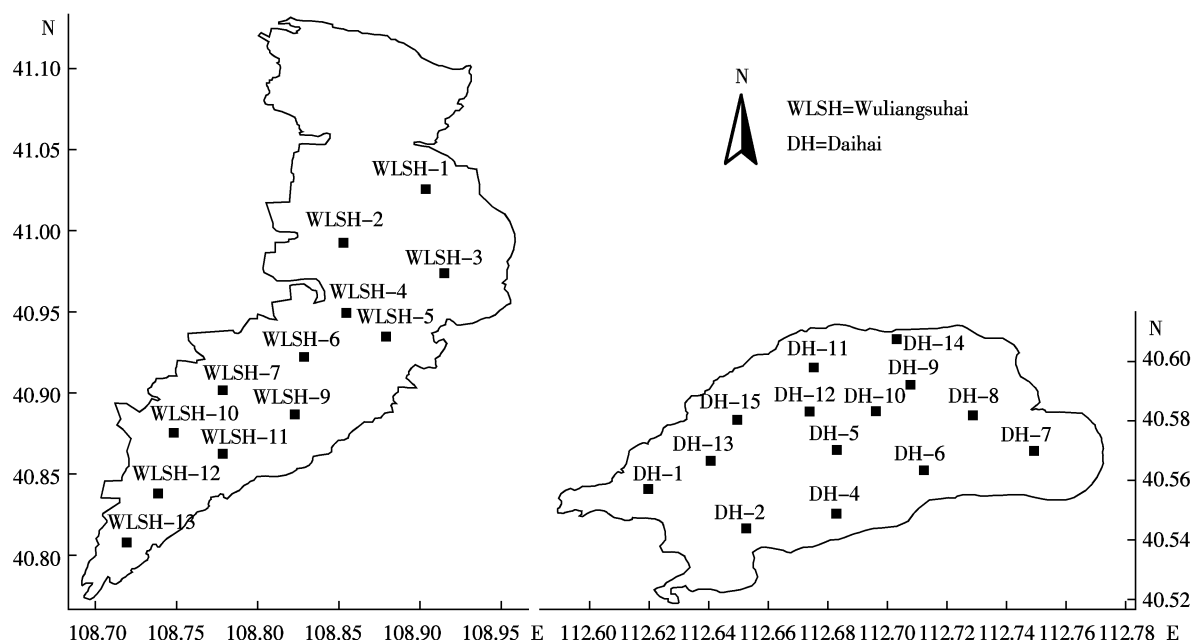


图1 乌梁素海和岱海采样点位图

Figure 1 Location of sampling sites in Wuliangsu Lake and Daihai Lake

表 1 上覆水中各项的分析测试方法
Table 1 Analysis methods for overlying water

项目	分析测试方法	项目	分析测试方法
DIC, TIC, DOC, TOC	TOC 分析仪	可溶性总磷酸盐	钼锑抗分光光度法
总氮	UV-2401PC 紫外分光光度法	硅酸盐	硅钼蓝分光光度法
氨氮	纳氏试剂光度法	K ⁺ 、Na ⁺	原子吸收
硝态氮	酚二磺酸法	Mg ²⁺ 、Ca ²⁺	EDTA 滴定法
亚硝态氮	N-(1-萘基)-乙二胺	SO ₄ ²⁻	铬酸钡光度法
总磷	钼锑抗分光光度法	Cl ⁻	硝酸银滴定法
可溶性正磷酸盐	钼锑抗分光光度法	CO ₃ ²⁻ 、HCO ₃ ⁻	滴定法(以 CaCO ₃ 记)

型”、“岩石风化类型”和“蒸发-浓缩类型”。Gibbs 图(图 2)是定性判断流域盆地基本水文地质特征受控因素的重要手段,能直观反映区域岩石风化、大气降水及蒸发-浓缩作用等对湖泊水化学的影响程度。一般而言,所有地表水的离子组分点几乎全部落在图中的虚线框内^[9],反映湖泊水体主要组分的以下 3 种受控类型:(1)在 Gibbs 图中,离子总量为 10 mg·L⁻¹ 左右,矿化度较低的水体具有较高的 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)比值(接近于 1),代表此种水体离子组分的点分布在图的右下角,此种分布特征揭示该流域水体离子组分为降水控制类型;(2)溶解性固体含量中等(70~300 mg·L⁻¹),而 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)比值较低(低于 0.5),代表此种水体离子组分的点分布于 Gibbs 的中部左侧,揭示该流域水体离子组分受岩石风化影响明显;(3)溶解性固体含量更高,同时具有高的 Na⁺/(Na⁺+Ca²⁺)或 Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)比值(接近于 1),代表此种水体离子组分的点分布在图的右上角,揭示该流域水体离子组分为蒸发-浓缩类型^[4]。

代表乌梁素海和岱海湖水离子组分的点均分布于 Gibbs 图的右上角(图 2),表明 2 个湖泊水体离子组分特征强烈地受控于流域的蒸发-浓缩作用,2 个湖泊的水化学特征均表现为蒸发-浓缩类型,这与乌梁素海地处典型的温带大陆性季风气候区、多年平均降雨量仅为 215 mm,而蒸发量高达 2 200 mm,岱海湖区

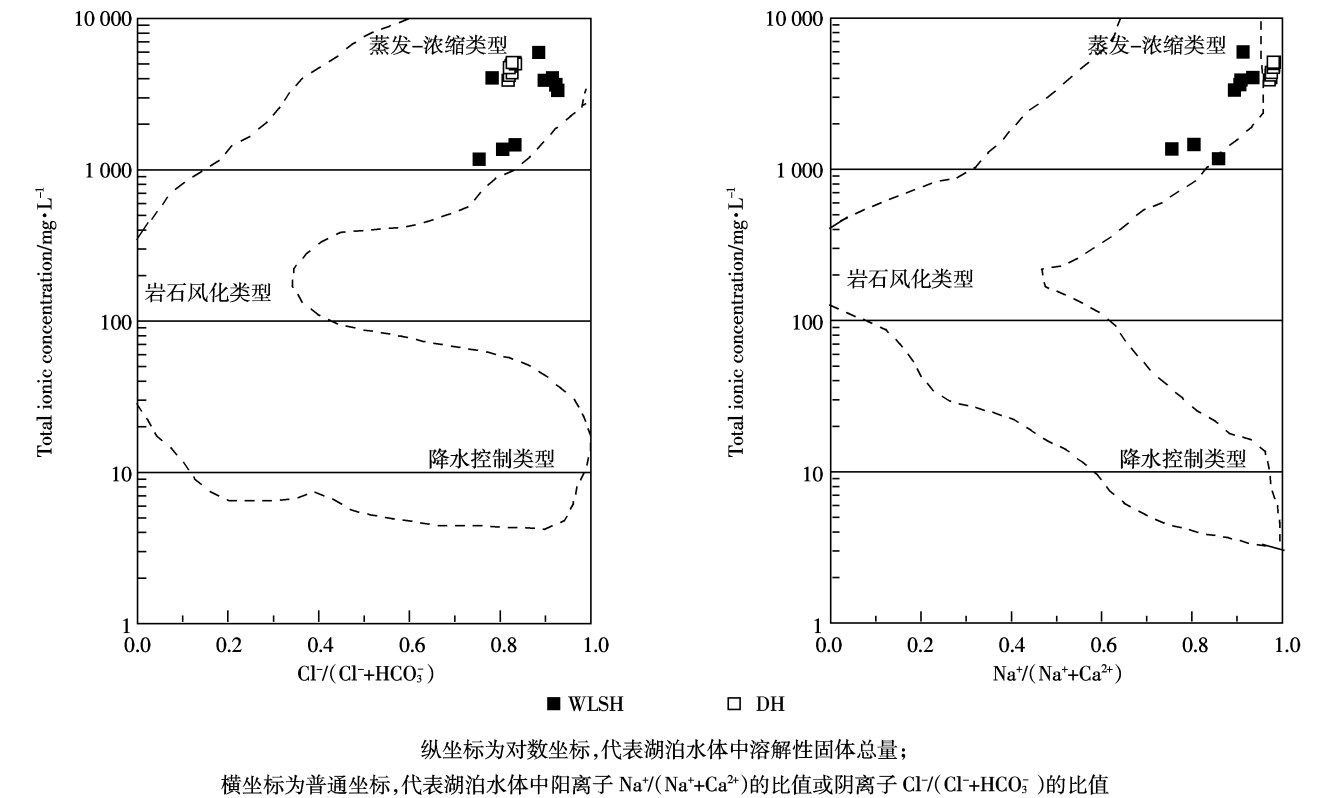


图 2 乌梁素海和岱海湖水的 Gibbs 图
Figure 2 The Gibbs graphs of the Wuliangsu Lake and Daihai Lake

地处我国干旱与半干旱区的过渡带、年均降雨量为 427 mm,蒸发量高达 1 938 mm 的客观事实相一致。

阳离子三角图(图 3)中,蒸发盐矿物风化产物应落在 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 一端,石灰岩风化产物应落在 $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ 线上,白云岩风化产物应落在石灰岩 $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ 线中间 ($\text{Ca}:\text{Mg}=1:1$),硅酸盐矿物风化产物应落在 $\text{Mg}^{2+} - \text{Ca}^{2+}$ 线向 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 线一端;阴离子三角图中,纯碳酸盐的风化物质以 HCO_3^- 为主,几乎不含 Si,因此数据点均落在 HCO_3^- 比例相对较高的一端,蒸发盐矿物的风化产物落在 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比例相对较高的一端,硅酸盐矿物的风化使得水体中同时存在 HCO_3^- 和 Si,数据点通常情况下落在三角图中间。乌梁素海和岱海湖水中, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 含量较高,而 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量则较低;阴离子组成图中,代表 2 个湖泊阴离子组成的点均落在 $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$ 比例相对较高的一端,且 Si 的含量明显偏低,揭示 2 个湖泊的水化学组成均表现出受蒸发盐岩的风化作用控制的特征。

2.2 上覆水体中碳的形态分布

水-气界面 CO_2 和 CH_4 通量日益受到重视, CO_2 和 CH_4 通量受多种因子影响与制约。上覆水中有机碳(OC)在一定条件下可被微生物分解为 CO_2 和 CH_4 ,并最终可能到达水-气界面,进而影响水-气界面的 CO_2 和 CH_4 通量。上覆水中 DIC 主要以 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 CO_2 和 H_2CO_3^* 等形式存在,其含量水平、空间分布格局及控制因子与水-气界面碳通量关系密切。

2.2.1 上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 的含量分布

研究表明,岱海 TIC 的含量范围为 $(0.93 \sim 1.16) \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.99 \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;DIC 的含

量范围为 $(0.78 \sim 0.90) \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.86 \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而乌梁素海 TIC 的含量范围为 $(0.18 \sim 1.00) \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.46 \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$;DIC 的含量范围为 $(0.03 \sim 0.81) \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $0.31 \times 10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 2)。岱海的 TIC 和 DIC 的平均含量分别为乌梁素海的 2.15 和 2.77 倍,明显高于乌梁素海,2 个湖泊上覆水中 DIC、TIC、DOC 和 TOC 的分布存在明显差异。

表 2 乌梁素海和岱海上覆水中形态碳含量的统计数据

Table 2 Concentration of DIC, TIC, DOC and TOC of WLSH and DH

项目	TIC		DIC		TOC		DOC	
	WLSH	DH	WLSH	DH	WLSH	DH	WLSH	DH
Min/ $10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.18	0.93	0.03	0.78	0.10	0.07	0.04	0.07
Max/ $10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	1.00	1.16	0.81	0.90	0.51	0.63	0.32	0.48
Mean/ $10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	0.46	0.99	0.31	0.86	0.25	0.24	0.15	0.18
Coefficient of Variation	0.59	0.06	0.78	0.05	0.55	0.76	0.58	0.72

沉水植物的光合作用可强烈吸收和利用上覆水中的 TIC 和 DIC。乌梁素海为大型浅水草型湖泊,湖中分布大面积的以龙须眼子菜和穗花狐尾藻为优势种的沉水植物,平均生物量(鲜重)达到 $12.85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,初级生产力远高于藻型湖泊岱海。初级生产力和富营养化类型的不同是导致 2 个湖泊上覆水中 TIC 和 DIC 差异的主要原因之一^[1]。湖泊是流域内降水和冲刷物质的集聚地,风化作用类型和强度受流域气候控制。从 2 个湖泊自然地理区划看,乌梁素海和岱海分别地处不同的气候带,前者地处干旱区,流域年均降雨量仅为 215 mm,而后者地处半湿润与半干旱区的

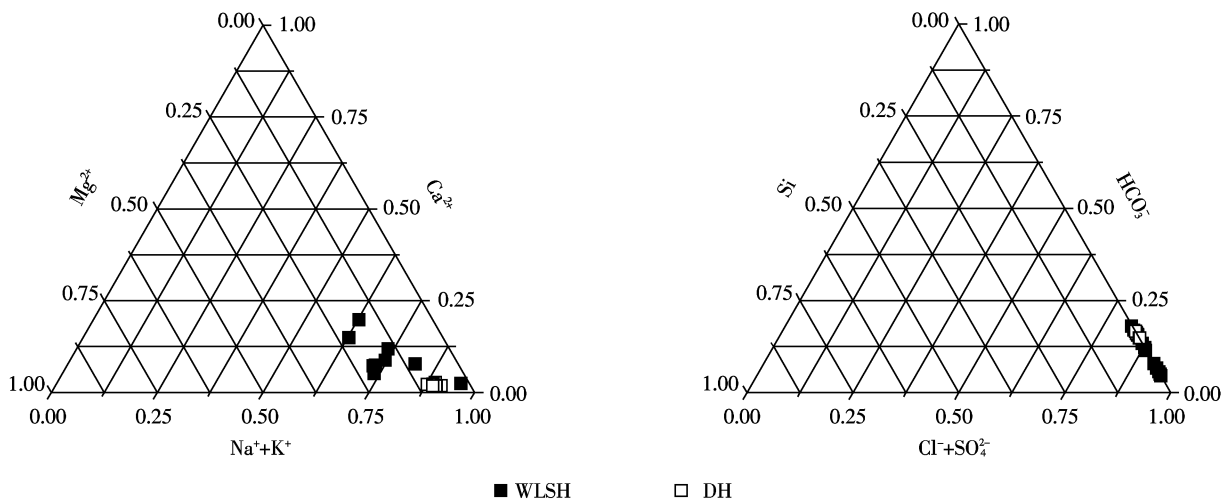


图 3 水化学三角图

Figure 3 Ternary diagrams showing cation and Si and anion compositions for the Wuliangsu Lake and Daihai Lake

过渡带,流域的年均降雨量 427 mm,为乌梁素海的 2 倍,揭示岱海流域的化学风化作用较乌梁素海流域强烈^[20]。风化作用的强度及大气降水量的差异^[20]是导致 2 个湖泊上覆水中 TIC 和 DIC 差异的又一原因。

从 2 个湖泊水量补给与支出方式的差异性来看,乌梁素海经排水渠与黄河直接连通,其主要补给水源为河套灌区的农田退水,主要支出方式为蒸发和排入黄河,换水周期为 160~200 d;而岱海则为典型封闭湖泊,湖水主要来源于地表和地下径流及湖面降水,无直接排泄方式,主要支出方式为蒸发。此外,2 个湖泊上覆水体的离子组成特征虽均为蒸发-浓缩类型,但由于岱海湖水没有直接的排泄方式,导致水体中无机碳含量受蒸发-浓缩作用的影响更强。湖水支出方式的不同是导致 2 个湖泊上覆水中 TIC 和 DIC 差异的原因之一。因此,乌梁素海和岱海上覆水中 TIC 和 DIC 含量的差异性湖泊富营养化类型、自然地理区划、水文地质背景及水量收支方式等因素综合作用的结果。

岱海 TOC 的含量范围为 $(0.07\sim0.63)\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.24\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;DOC 的含量范围为 $(0.07\sim0.48)\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.18\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。乌梁素海 TOC 的含量范围为 $(0.10\sim0.51)\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.25\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;DOC 的含量范围为 $(0.04\sim0.32)\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,平均值为 $0.15\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2)。两者上覆水中 TOC 平均含量相当,前者上覆水中 DOC 平均含量高于后者。岱海湖中藻类等浮游生物远较乌梁素海丰富,尤其夏季高温有利于微生物活动及藻类的分解和生产,浮游生物排泄物和分泌物中相当部分直接形成了上覆水中的 DOC^[21-22]。

TOC 和 DOC 是衡量湖泊富营养化的指标之一。Wetzel R G^[22]提出判断湖泊富营养化的 TOC 和 DOC 标准值分别为 12.00 和 10.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。乌梁素海上覆水中 TOC 和 DOC 的平均含量分别达到了 $0.25\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 $0.15\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),岱海上覆水中 TOC 和 DOC 的平均含量也分别达到了 $0.24\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (28.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 $0.18\times10^4\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (21.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),这从一个侧面进一步印证了 2 个湖泊均已达富营养化水平。

2.2.2 上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 的空间分布

乌梁素海西岸为上覆水中 DIC、TIC、DOC 和 TOC 的高值区,东岸则为低值区,其 DIC、TIC、DOC 和 TOC 的空间分布格局相似(图 4),反映无机碳和有机碳的同源性,揭示碳主要源于西岸入湖补给水。西

岸自北向南依次分布着主排干、八排干和九排干等 3 条主要补给干渠,含有机碳和无机碳的河套灌区农田退水、上游生活污水和工业废水通过上述干渠入湖,恰与上覆水中 DIC、TIC、DOC 和 TOC 的空间分布格局相吻合。湖区西部和北部分布有大面积的芦苇,受大型挺水植物的阻碍,湖区西岸入湖的农田退水、上游工业废水和生活污水未与东岸湖区水体充分混合;湖区东岸以雨季形成的地表径流为主要补给水源,受降水(年均降雨量仅为 215 mm)和地形地势条件的影响,地表径流量小,流程短,水流急,携带的有机碳和无机碳含量受限。

岱海上覆水中无机碳(DIC 和 TIC)与有机碳(DOC 和 TOC)的空间分布格局不尽一致(图 5)。就无机碳而言,尽管不同湖区的空间分布存在一定差异,但总体上未表现出明显的空间分异,反映不同方向入湖的补给水中无机碳的均一性。湖区南部为有机碳的高值区,北部为低值区,表现出明显的空间分异,可能反映了由南部入湖的弓坝河和步量河水体中有机碳的含量水平较高。弓坝河为岱海盆地最大的入湖河流,且凉城县的生活污水及工业废水经弓坝河入湖;步量河也是较大的季节性河流,亦从南部湖区入湖,受各类入湖水体的影响,导致岱海南部湖区成为有机碳高值区。

2.3 上覆水中碳形态分布的制约机制

N、P、Si 等营养盐对湖泊水中的碳形态分布有重要影响。硅是硅藻类浮游植物细胞壁的主要组成成分; NO_3^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 可直接被进行光合作用的藻类细胞所利用,以形成细胞原生质。光合作用过程就是植物吸收太阳光能,以水、 CO_2 和 N、P 等营养盐为原料,把无机碳转化为植物体内有机碳的过程。由于水生生物对水体中 C、N、P、Si 等营养元素的吸收和释放按比例进行,湖泊上覆水中 TIC、DIC、TOC、DOC 与 DIN 、 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 和 SiO_3^{2-} 的浓度变化存在相关关系。

乌梁素海上覆水中 TIC 与 DIC、TOC 与 DOC 均呈极显著相关,相关系数分别达 0.986 和 0.846;TIC 与 TOC 和 DOC 也表现出较好的相关性,相关系数分别达到 0.582 和 0.522(表 3)。TN 与 TIC 和 DIC 呈显著相关,相关关系分别为 0.598 和 0.594; NO_3^--N 与 DIC、TIC、DOC、TOC 呈极显著或显著相关,相关系数分别达 0.780、0.772、0.672 和 0.625。 SiO_3^{2-} 与 TOC 呈显著负相关,相关系数为 -0.618。TP、DTP、DRP 与 TIC、DIC、TOC、DOC 无显著相关性。

岱海上覆水中 TOC 与 DOC 呈极显著相关,相关

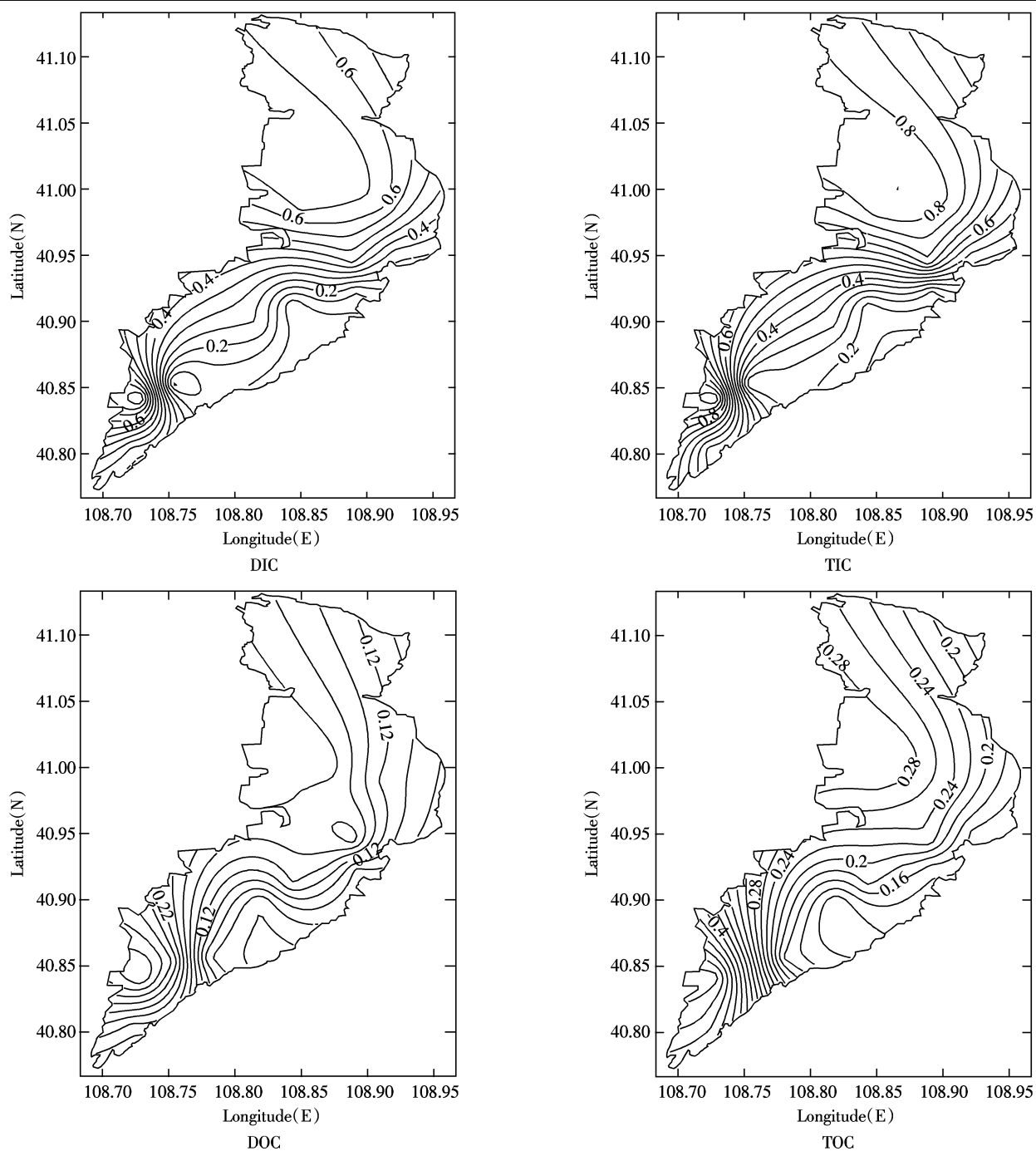


图4 乌梁素海上覆水中不同形态碳的空间分布($10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

Figure 4 Patter of horizontal distribution of DIC, TIC, DOC and TOC in WLSH overlying water($10^4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

系数达 0.975(表 4),其他形态碳间的相关性不明显。 NH_4^+-N 与 TIC、TOC、DOC 均呈显著相关,相关关系分别为 0.591、0.552 和 0.458; SiO_3^{2-} 与 TIC 呈极显著相关,相关系数达 0.715;DTP 与 DIC、DRP 与 TOC 和 DOC 呈显著相关,相关系数分别为 0.466、0.526 和 0.586。

上述研究表明, NH_4^+-N 和 SiO_3^{2-} 与 2 个湖泊上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 间的相关性存在明显差异。

NH_4^+-N 和 SiO_3^{2-} 与岱海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 间均呈显著正相关,而与乌梁素海均呈负相关;虽然 NO_3^--N 与 2 个湖泊上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 间均呈正相关,但这种相关性在乌梁素海湖泊中表现更为明显。DRP 与 TOC 和 DOC、DTP 与 DIC 在岱海上覆水中均呈显著正相关。岱海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 受 N、P、Si 等 3 种营养盐的共同影响,乌梁

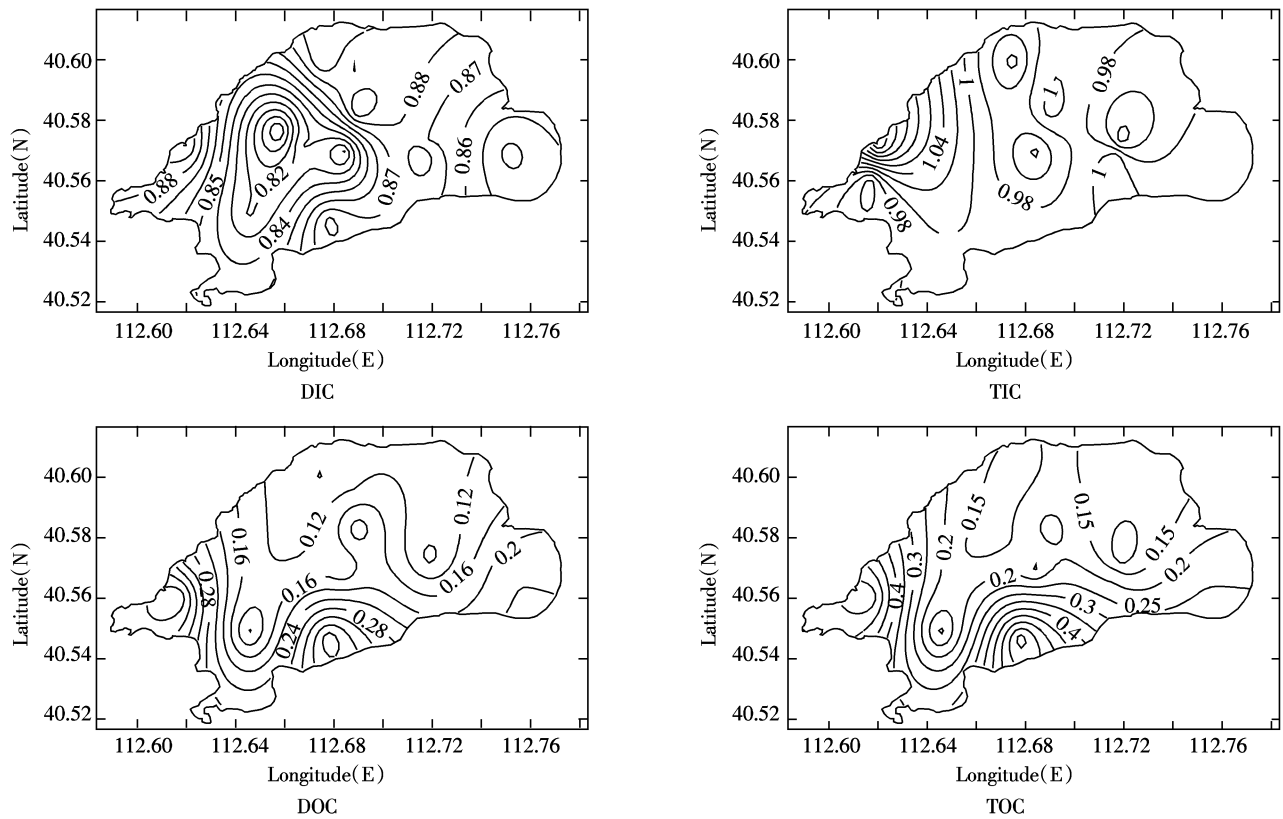


图 5 岱海上覆水中不同形态碳的空间分布($10^4 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

Figure 5 Patter of horizontal distribution of DIC,TIC,DOC and TOC in DH overlying water($10^4 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)

素海则主要受 N 的影响。

NO_3^--N 和 NH_4^+-N 分别为岱海和乌梁素海上覆水中无机氮的主导形态, 乌梁素海上覆水中 DTP 和 DRP 及 SiO_3^{2-} 的平均含量分别为岱海的 2 倍和 3 倍以上(表 5)。根据 Libeg 最小限制因子定律, 结合 2 个湖泊富营养化类型, 笔者认为, NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DTP、DRP、 SiO_3^{2-} 与 DIC、TIC、DOC、TOC 在 2 个湖泊中的相关性差异, 揭示了岱海上覆水中与碳的生物地球化学循环有关的生命活动受 NH_4^+-N 、DTP、DRP 和 SiO_3^{2-} 的含量水平限制。岱海上覆水中 NH_4^+-N 、DTP、DRP 和

表 3 乌梁素海上覆水中碳与营养盐的相关系数

Table 3 Correlation of carbon speciation in WLSH overlying water

	TIC	DIC	TOC	DOC	TN	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	TP	DTP	DRP	SiO_3^{2-}
TIC	1											
DIC	0.986(**)	1										
TOC	0.582(*)	0.501	1									
DOC	0.522(*)	0.429	0.846(**)	1								
TN	0.598(*)	0.594(*)	-0.136	0.000	1							
NH_4^+-N	-0.009 2	-0.063	-0.420	-0.268	0.287	1						
NO_3^--N	0.078 0(**)	0.772(**)	0.672(*)	0.625(*)	0.188	-0.378	1					
NO_2^--N	0.399	0.342	0.235	0.002	0.261	-0.001	-0.030	1				
TP	0.468	0.396	0.049	0.175	0.626(*)	0.276	-0.067	0.698(**)	1			
DTP	0.322	0.272	-0.183	-0.056	0.687(**)	0.227	-0.231	0.551(*)	0.927(**)	1		
DRP	-0.080	-0.049	-0.178	0.039	0.078	0.866(**)	-0.126	-0.277	-0.024	-0.155	1	
SiO_3^{2-}	-0.160	-0.115	-0.618(*)	-0.455	0.443	0.464	-0.639(*)	0.212	0.435	0.571(*)	0.209	1

** Correlation is significant at the 0.01 level(1-tailed). * Correlation is significant at the 0.05 level(1-tailed). The same below.

表 4 岱海上覆水中碳与营养盐的相关系数

Table 4 Correlation of carbon speciation in DH overlying water

	TIC	DIC	TOC	DOC	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TP	DTP	DRP	SiO ₃ ²⁻
TIC	1											
DIC	0.218	1										
TOC	0.281	0.362	1									
DOC	0.214	0.305	0.975(**)	1								
TN	0.251	-0.252	-0.054	-0.106	1							
NH ₄ ⁺ -N	0.591(*)	0.361	0.552(*)	0.458(*)	0.171	1						
NO ₃ ⁻ -N	-0.403	0.203	0.314	0.400	-0.451	0.041	1					
NO ₂ ⁻ -N	0.840(**)	0.150	0.284	0.215	0.068	0.696(**)	-0.408	1				
TP	-0.328	0.336	-0.146	-0.208	-0.569(*)	-0.034	0.110	-0.119	1			
DTP	0.018	0.466(*)	-0.177	-0.174	-0.081	0.306	0.135	0.077	0.121	1		
DRP	0.342	0.209	0.526(*)	0.586(*)	-0.114	0.591(*)	0.517(*)	0.380	-0.199	0.223	1	
SiO ₃ ²⁻	0.715(**)	0.069	0.255	0.152	0.083	0.474(*)	-0.262	0.696(**)	-0.247	0.033	0.049	1

SiO₃²⁻平均含量均明显低于乌梁素海,无法满足大量藻类生长对 NH₄⁺-N、DTP、DRP 和 SiO₃²⁻等形态营养盐的需要,从而限制了湖泊的富营养化和初级生产力。随水体中营养盐含量的升高,藻类对 NH₄⁺-N、DTP、DRP 和 SiO₃²⁻等的生长需求得以补充,与碳的生物地球化学循环有关的光合与呼吸作用等生命活动得以加强,湖泊初级生产力随之提高,进而导致了 DIC、TIC、DOC、TOC 含量的升高,体现了富营养化过程对湖泊碳循环的影响。

表 5 乌梁素海和岱海上覆水中主要营养盐的平均含量(mg·L⁻¹)
Table 5 Average concentration of N,P,Si in overlying water of WLSH and DH(mg·L⁻¹)

	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	DTP	DRP	SiO ₃ ²⁻
DH	0.026	0.110	0.033	0.011	1.019
WLSH	0.254	0.109	0.065	0.028	3.014

NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 与乌梁素海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 间分别呈负相关和正相关,揭示浅水草型湖泊水环境中 N 的硝化和反硝化过程是影响 TIC、DIC、TOC、DOC 的重要机制。P 和 Si 与乌梁素海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 的相关性较弱,这与乌梁素海上覆水中 P 和 Si 的含量较高,湖泊生态系统中与碳的生物地球化学循环有关的生命活动不受这 2 种营养盐的含量限制有关。

3 结论

研究表明,乌梁素海和岱海湖泊的水化学特征均属蒸发-浓缩类型,湖泊水体离子组分特征受控于流

域的蒸发-浓缩作用及蒸发盐岩的风化作用。

DIC、TIC、DOC 和 TOC 的空间分布格局较好地反映了乌梁素海和岱海上覆水中无机碳和有机碳的来源;2 个湖泊上覆水中 TIC 和 DIC 含量的差异性 是湖泊富营养化类型、自然地理区划、水文地质背景及水量收支方式等因素综合作用的结果;据湖泊富营养化的 TOC 和 DOC 标准限值判断,2 个湖泊水体均已达富营养化水平。

岱海上覆水中 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、DTP、DRP、SiO₃²⁻与 TIC、DIC、TOC、DOC 的正相关关系,表明 DIC、TIC、DOC、TOC 受 N、P、Si 等 3 种营养盐的共同影响,揭示湖泊水体富营养化对湖泊生态系统碳循环具有拉动或促进作用;乌梁素海上覆水中 DIC、TIC、DOC、TOC 主要受 N 的影响,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 与 DIC、TIC、DOC、TOC 间的相关性揭示浅水草型湖泊水环境中 N 的硝化和反硝化过程是影响 TIC、DIC、TOC、DOC 的重要机制。

参考文献:

[1] 陈泮勤, 黄 耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
CHEN Pan-qin, HUANG Yao, YU Gui-rui. Carbon cycle of earth system[M]. Beijing: Science Press, 2004.

[2] 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚. 碳循环与岩溶地质环境[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YUAN Dao-xian, LIU Zai-hua, JIANG Zhong-cheng. Carbon cycle and karst geological environment[M]. Beijing: Science Press, 2003.

[3] 陈宜瑜. 中国全球变化的研究方向[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 319-323.
CHEN Yi-yu. Research direction of global change in China[J]. Advance

- in *Earth Sciences*, 1999, 14(4):319-323.
- [4] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the Amazon 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1983, 88(C14):9671-9688.
- [5] Stallard R F, Edmond J M. Geochemistry of the amazon 3. weathering chemistry and limits to dissolved inputs[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C8):8293-8302.
- [6] Sarin M M, Krishnaswami S, Dilli K, et al. Major ion chemistry of the Ganga-Brahmaputra river system: Weathering processes and fluxes to the Bay of Bengal[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53:997-1009.
- [7] Elderfield H, Upstill-Goddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(4):971-991.
- [8] Palmer M R, Edmond J M. Controls over the strontium isotope composition of river water[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1992, 56(5):2099-2111.
- [9] Zhang J, Takahashi K, Wushiki H, et al. Water geochemistry of the rivers around the Taklimakan Desert (NW China): Crustal weathering and evaporation processes in arid land[J]. *Chemical Geology*, 1995, 119(1-4):225-237.
- [10] Huh Y, Tsoi M Y, Zaitsev A, et al. The fluvial geochemistry of the rivers of Eastern Siberia: I. Tributaries of the Lena River draining the sedimentary platform of the Siberian Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(10):1657-1676.
- [11] Gaillardet J, Dupre B, Allegre C J, et al. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin [J]. *Chemical Geology*, 1997, 142(3-4):141-173.
- [12] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers[J]. *Chemical Geology*, 1999, 159(1-4):3-30.
- [13] Viers J, Dupré B, Braun J J, et al. Major and trace element abundances, and strontium isotopes in the Nyong basin rivers (Cameroon): Constraints on chemical weathering processes and elements transport mechanisms in humid tropical environments[J]. *Chemical Geology*, 2000, 169(1-2):211-241.
- [14] Qin J, Huh Y, Edmond J M, et al. Chemical and physical weathering in the Min Jiang, a headwater tributary of the Yangtze River[J]. *Chemical Geology*, 2006, 227(1-2):53-69.
- [15] 内蒙古湖泊恢复治理项目——乌梁素海综合整治研究 [R]. 中国-瑞典-挪威合作项目. Restoration of Lake Wuliangsu Hai: Management and Control Plans[R]. China-Sweden-Norway Corporation Program.
- [16] 孙惠民, 何江, 吕昌伟, 等. 乌梁素海氮污染及其空间分布格局[J]. 地理研究, 2006, 25(6):1003-1012. SUN Hui-min, HE Jiang, LV Chang-wei, et al. Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Hai Lake[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(6):1003-1012.
- [17] 孙惠民, 何江, 高兴东, 等. 乌梁素海沉积物中全磷的分布特征[J]. 沉积学报, 2006, 24(4):579-584. SUN Hui-min, HE Jiang, GAO Xing-dong et al. Distribution of total phosphorus in sediments of Wuliangsu Hai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4):579-584.
- [18] 王苏民, 吴瑞金, 余源盛. 岱海-湖泊环境与气候变化 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990. WANG Su-min, WU Rui-jin, YU Yuan-sheng, et al. Climate change and environment of Lake Daihai [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1990.
- [19] 徐志方. 西江流域环境河水地球化学研究 [D]. 中国科学院地质与地球物理研究所, 2002. XU Zhi-fang. Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Xijiang River, China [D]. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2002.
- [20] Lü C, He J, Sun H, et al. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions[J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(6):1279-1289.
- [21] Ford T E, Ford S A, Lock M A, et al. Dissolved organic carbon concentrations and fluxes along the Moisie River, Quebec[J]. *Freshwater biology Oxford*, 1990, 24(1):35-42.
- [22] Wetzel R G. Limnology: Lake and river ecosystems[M]. Elsevier: New York, 2001:1006.