

乌梁素海氮污染及其空间分布格局

孙惠民, 何 江*, 吕昌伟, 高兴东, 樊庆云, 薛红喜

(内蒙古大学生态与环境科学系, 呼和浩特 010021)

摘要: 针对草型富营养化湖泊乌梁素海富营养化日趋严重和湿地面积逐渐萎缩的现实, 本文系统地研究了 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 Org-N 在上覆水与沉积物中的分布规律。结果表明, 上覆水中 TN 含量平均为 1.78mg/L, 且无机氮污染以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主, 占无机氮总量的 69% 以上; 表层沉积物中氮素的水平分布格局均体现出西高东低的经向分异特征并主要以 Org-N 的形式存在; 表层沉积物中 TN 对底栖生物已经具有一定的生态毒性效应并正由最低级向严重级过渡; 氮素在乌梁素海沉积剖面上均表现出随深度增加而含量递减的规律, 表层 0~10cm 的 TN 平均含量达到 1.28g/kg, 分别为 10~22cm 和 22~40cm 的 1.6 和 1.9 倍, 揭示了乌梁素海富营养化进程加速始于 20 世纪 90 年代。

关键词: 氮素; 上覆水; 沉积物; 空间分布格局; 乌梁素海

文章编号: 1000-0585(2006)06-1003-10

1 引言

湖泊沉积物作为湖泊湿地生态系统中氮素的重要源与汇^[1], 对氮素的生物地球化学循环具有重要意义。氮素是湖泊生态系统中极其重要的生态因子, 也是引发江河湖泊等永久性湿地发生富营养化的重要因子之一, 显著影响着湖泊湿地生态系统的生产力, 目前又成为国际全球变化问题研究的核心内容之一^[2~6]。氮素在湖泊水—沉积物系统中以不同形态存在, 表现出不同的地球化学行为, 并在生物地球化学循环中起不同作用。不同形态氮素的空间分布格局则显著影响着湖泊湿地的诸多生态过程^[7], 是研究氮素行为微观过程的重要基础和前提。因此, 本文以草型富营养化湖泊乌梁素海为例, 探讨了 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 Org-N 在上覆水与沉积物中的污染特征和空间分布格局以及乌梁素海的富营养化进程, 填补了该区湖泊沉积物中营养盐分布规律及其地球化学特征研究的空白, 提供了乌梁素海富营养化治理的科学依据, 以期为湖泊湿地对氮素的滤过作用和净化能力及氮素在湖泊湿地中的库存和通量等机理研究奠定基础^[8], 并为揭示湖泊湿地中氮素的沉积过程及其生态效应和环境意义, 诊断湖泊湿地生态系统健康状况和恢复受损湿地功能等提供指导和参考。

2 研究区域与研究方法

2.1 研究区概况

乌梁素海是内蒙古高原干旱区最典型的浅水草型湖泊, 是黄河中上游重要的保水、蓄

收稿日期: 2005-12-22; 修订日期: 2006-03-23

基金项目: 内蒙古自然科学基金资助项目

作者简介: 孙惠民 (1958-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士研究生。主要从事污染生态学研究。

* 通讯作者: E-mail: ndjhe@imu.edu.cn

水和调水基地,也是全球范围内荒漠半荒漠地区极为少见的具有生物多样性和环境保护等多功能的大型草型湖泊,为地球上同一纬度最大的自然湿地。湖区($40^{\circ}47' \sim 41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$)位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,湖面高程 1018.5m,库容量 $2.5 \times 10^8 \sim 3 \times 10^8 m^3$,80%水域水深 0.8m~1.0m,现有水域面积 $333.48 km^2$,为我国第八大淡水湖,是我国第一个湿地示范工程,现已列入内蒙古自治区第十一个五年计划。此外,作为亚洲湿地公约组织名录中的大型湿地生物多样性保护区,乌梁素海为动物,尤其为鸟类提供了良好的栖息地,目前生活着 100 多种鸟类,其中属于国家一级保护的有 5 种,国家二级保护的有 25 种^[9]。乌梁素海大型水生植物共 6 科 6 属 11 种,以芦苇和龙须眼子菜为优势种。乌梁素海的补给水源主要是河套灌区的农田退水,其次是工业废水和生活污水,其中农田退水占三者总水量的 96%,后两者各占 2%^[10],年总入水量约 $7 \times 10^8 \sim 9 \times 10^8 m^3$,每年排入乌梁素海的总氮为 1088.59t,总磷为 65.75t^[11]。河套灌区(2002 年化肥用量已经超过 $52 \times 10^4 t$,化肥利用率仅为 30%)流失的化肥、上游工业废水和城市生活污水随农田退水经西岸自北至南的总排干、八排干、九排干等主要灌渠和排水沟进入乌梁素海(因此西岸受到人类活动的强烈影响),使湖中各种营养盐总和达到 $56 \times 10^4 \sim 110 \times 10^4 t$,目前腐烂水草正以每年 9~13mm 的速度在湖底堆积^[9],使乌梁素海成为世界上沼泽化速度最快的湖泊之一。据 1970~2002 年入湖口水质监测,总氮平均 1.74 mg/L,总磷平均 0.07 mg/L^[12],按国家地表水环境质量标准(GB 3838—2002)分别 V 类水和 IV 类水,乌梁素海水体中氮储备量已达其临界负荷的 14 倍^[13,14],使乌梁素海成为以大型水生植物过量生长为主要表征的草型富营养化湖泊。湖内沉水植物和挺水植物分布甚广,苇塘区面积约 $112.97 km^2$ ^[15]。

2.2 样品采集

于 2004 年 8 月对乌梁素海主体湖区进行了系统的现场监测和样品采集,鉴于北部湖区主要为人工苇田分布区,本次研究未进行样品采集。沉积物柱芯用挪威 Swedaq 公司产 KC mod A ochB 型无扰动采样器采集,同步采集上覆水(500~600ml),沉积物柱芯和水样均采集重复样。沉积物柱芯长度为 30~45cm,现场以 2cm 间隔分层,装入封口聚乙烯塑料袋后冷藏保存,回实验室冷冻保存。采样站位用全球卫星定位系统(GPS)定位,同时结合地形图校正(图 1)。

2.3 分析方法

水样全氮(TN)测定采用 UV-2401PC 紫外分光光度法,铵氮(NH_4^+-N)测定采用纳氏试剂光度法。沉积物全氮(TN)测定采用半微量凯氏定氮法,铵氮(NH_4^+-N)测定采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法,硝态氮($NO_3^- -N$)测定采用酚二磺酸光度法,由于凯氏消煮法测定的全氮中基本上不包含固定态铵以及硝态氮和亚硝态氮^[16],所以有机氮(Org-N)的含量可由全氮与铵态氮的差值来粗略表示。实验数据用 surfur7.0(Kriging Interpolation)及 origin7.0 等软件



图 1 样点分布示意图

Fig. 1 Location of sampling sites in Wuliangsu Lake

进行统计分析。

3 结果与讨论

3.1 乌梁素海上覆水氮污染

湖泊富营养化是由于过量的营养物质输入而导致的藻类等浮游植物大量繁殖，湖泊水质变坏，进而引起湖泊生态系统一系列变化的现象。而氮素作为主要营养元素，其输入输出量大小和含量分布特征将直接决定湖泊的营养状态和植物的初级生产力。乌梁素海年平均气温介于 $5.6\sim 7.4^{\circ}\text{C}$ 之间，全年日照时数为 $2900\sim 3200$ 小时。按阿列金的天然水分类方法，结合上覆水测定结果，该湖水属氯化物类钠组第 II 型水 (Cl_2^{Na})，呈微碱性且 pH 值有逐年增高的趋势， BOD_5 和 $\text{COD}^{[10]}$ 浓度均已超过 V 类水质标准。乌梁素海上覆水中 TN 含量介于 $1.0\sim 3.3$ mg/L 间，平均值为 1.78 mg/L，较 1970~2002 年入湖口水质监测资料 (TN 平均值为 1.74 mg/L) 略有升高。据 2001 年水质监测资料^[17]，乌梁素海上覆水中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 三种无机氮的平均含量分别为 1.28 mg/L、 0.469 mg/L 和 0.0978 mg/L，表明乌梁素海上覆水中无机氮污染以 NH_4^+-N 为主，占无机氮总量的 69% 以上。湖水高浓度的 NH_4^+-N 在进行硝化作用时要消耗大量的溶解氧，研究表明^[18] 乌梁素海上覆水中溶解氧有逐年下降的趋势，这也可能是导致乌梁素海渔业大幅减产的原因之一。根据国家地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 中 TN 和 NH_4^+-N 的标准限值，乌梁素海上覆水水质分别已达 V 类和 IV 类标准。按照《湖泊富营养化调查规范》(第二版) 中的湖泊富营养化评分与分级标准，乌梁素海上覆水中 TN 参数已达富营养化水平，其评分值接近 70 分。

乌梁素海氮污染源主要在西岸，其补给水源主要是西岸总排干 (总排入湖口上游 250m 处 TN 和 NH_4^+-N 浓度分别高达 9.61 mg/L 和 6.42 mg/L)、八排干、九排干等主要灌排渠沟输入的农田退水、工业废水和城市生活污水，三类废水对乌梁素海氮素年总负荷的贡献率分别为 50%、35% 和 15%^[10]，使营养盐在湖中不断积累。而东岸农田较少，相应的湖区水体受农田退水等污染的危害也相对较小。加之湖水的排泄途径以蒸发为主 (年蒸发量为 $3.6\times 10^8\text{m}^3$)，其次是退水 (平均退水量 $2\times 10^8\text{m}^3$)，因此，强烈的蒸发作用所导致的浓缩效应更是加剧了氮素在乌梁素海水体和沉积物的累积。相关研究^[11] 表明，每年乌梁素海中积累的 TN 量为 328.7t，致使沉积物中氮负荷逐渐增加，当点源和非点源氮负荷量减少或完全降低至最低点时，沉积物中的氮将会释放出来，内源污染有可能成为上覆水的主要污染源。

3.2 乌梁素海表层沉积物中氮素的水平分布格局

TN 和 Org-N 的水平分布格局 (图 2、图 3) 表明，乌梁素海表层沉积物中 TN 与 Org-N 具有较为明显的经向分异特征，即 TN 和 Org-N 含量均随经度增大而减小，形成西高东低的分布格局，其中表层沉积物中 TN 和 Org-N 含量低于 1.2g/kg 等值线的区域约占 60% 以上。西部高值区反映了乌梁素海氮污染源主要来自西岸由总排干、八排、九排等排污沟渠所输入的大量农田退水、上游工业废水和城市生活污水，且高值区的等值线较东部低值区密集且 TN 和有机氮水平分异快，在一定意义上揭示了西岸受到人为扰动的强烈影响。二者的水平分布格局相同与表层沉积物中氮素的主要存在形式为 Org-N 有关，研究表明，乌梁素海沉积物中 Org-N 占 TN 的 95% 以上，所以 TN 含量的多少主要决定于 Org-N，二者水平分异特征和引起分异的因素完全一致^[7]。

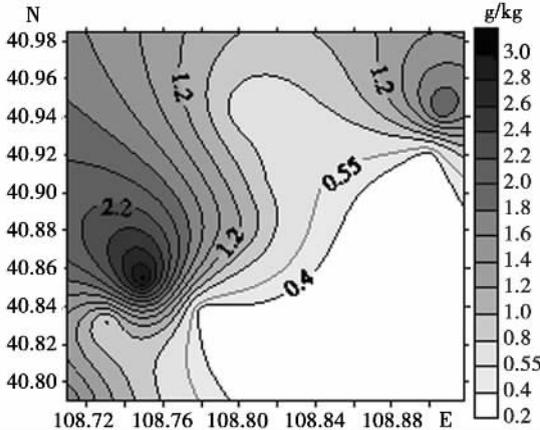


图 2 表层沉积物中 TN 水平分布格局

Fig. 2 Pattern of horizontal distribution of total nitrogen (TN) in surface sediments

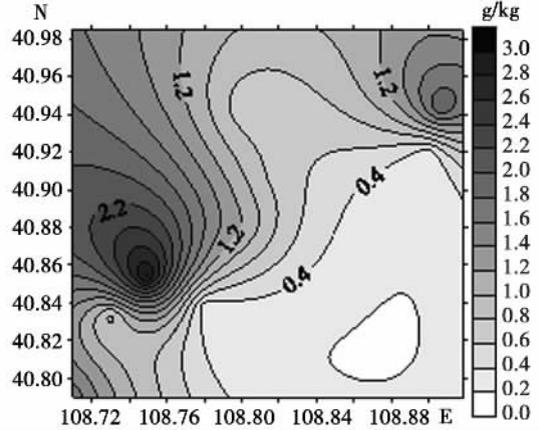


图 3 表层沉积物中 Org-N 水平分布格局

Fig. 3 Pattern of horizontal distribution of organic nitrogen (Org-N) in surface sediments

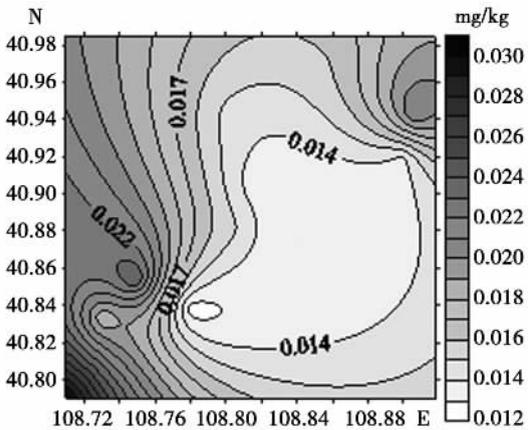


图 4 表层沉积物中 NH₄⁺-N 水平分布格局

Fig. 4 Pattern of horizontal distribution of ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) in surface sediments

NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 在表层沉积物中的水平分布格局同样表现出西高东低的经向分异特征。NH₄⁺-N 在东部形成一个明显低值区, 约 60% 的区域位于 17mg/kg 等值线以内 (图 4), 而表层沉积物 NO₃⁻-N 含量相对较低, 梯度变化明显, 约有 60% 区域位于 10mg/kg (图 5)。这两种有效氮在表层沉积物中的水平分布格局与人为扰动强度具有较好的响应关系。乌梁素海西岸分布有总排干等排污沟渠, 直接将承接的农田退水、工业废水和城市生活污水排入湖中, 其中总排干入湖口上游 250m 处的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 含量分别高达 6.42mg/L 和 3.35mg/L, 因此东西两岸受人类活动影响程度强弱的差异, 是造成表层沉积物中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 西高东低水平分布格局的主要原因。

总体上, 乌梁素海表层沉积中不同形态氮素的分布特征具有相似性, 均表现出西高东低的分布规律, 体现了人为扰动程度与沉积物质量之间良好的响应关系。河套灌区农田退水、上游工业废水和生活污水通过总排干渠从湖区西北端入湖, 受芦苇区阻碍向东向南分流, 向南分流的污水与八排、九排等干渠污水混合叠加, 使得各形态氮均在乌梁素海西部湖区出现高值分布区, 而向东分流的污水则进入相对较为封闭的湖区, 水动力条件渐趋稳定, 有利于氮素在该区表层沉积物中累积, 即出现在图 2、3、4 东北部的高值区, 并在水流方向上表现出递减的趋势, 这也在一定意义上体现了湖泊自身的滤过作用。

表层沉积物与底栖生物关系密切, 其沉积物质量对底栖生物生境有重要影响, 若污染物超过某一水平将对底栖生物产生毒性效应。根据加拿大安大略省环境和能源部 (1992) 按生态毒性效应制定的沉积物质量评价指南^[19], 沉积物中能引起最低级别生态毒性效应

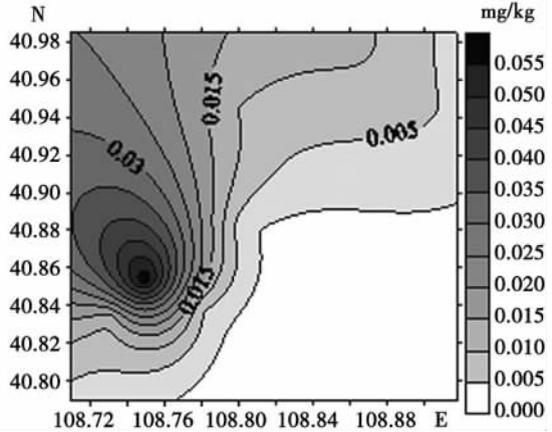


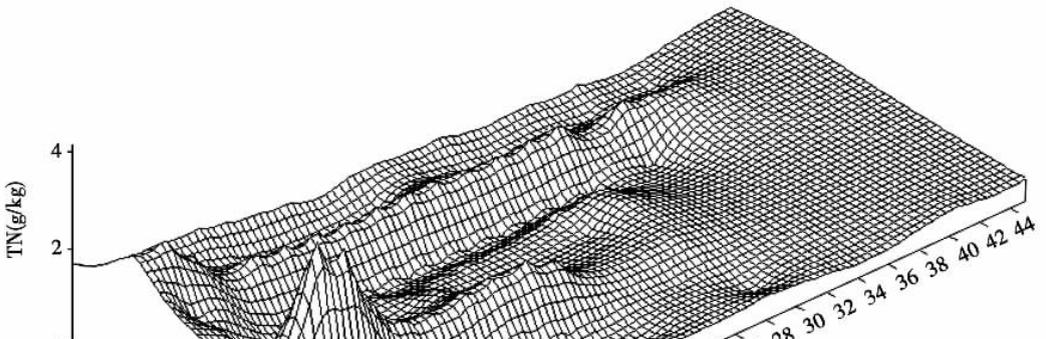
图5 表层沉积物中 NO_3^- -N 水平分布格局

Fig. 5 Pattern of horizontal distribution of nitrate nitrogen (NO_3^- -N) in surface sediments

的浓度为 0.55g/kg ，具有严重级别生态毒性效应的 TN 浓度为 4.8g/kg 。乌梁素海表层沉积物 TN 含量介于 $0.26\sim 3.1\text{g/kg}$ 之间，除 WLSH-5 和 WLSH-8 点 TN 含量低于 0.55g/kg 外，其他采样点均高于 0.55g/kg ，表明乌梁素海表层沉积物中 TN 对底栖生物已经具有一定的生态毒性效应并正由最低级向严重级过渡，将使底栖生物群落遭受明显损害。TN 水平分布格局图上（图 2），TN 含量高于 0.55g/kg 最低级别生态毒性效应等值线的区域已占乌梁素海湖区的 70% 左右，因此，要使其继续发挥大型湿地生物多样性保护功能，继续为鸟类等生物提供良好的栖息地，乌梁素海氮污染治理刻不容缓。

3.3 乌梁素海沉积物中氮素的垂直分布特征

3.3.1 TN 垂直分布格局 乌梁素海沉积物中 TN 空间垂直分异较大，沉积剖面中的累积峰明显（图 6），与 $10\sim 40\text{cm}$ 的剖面深度相比，TN 在表层 $0\sim 10\text{cm}$ 的相对富集系数介于 $1.1\sim 5.7$ 间，表层 $0\sim 10\text{cm}$ 的 TN 平均含量达到 1.21g/kg ；而 $10\sim 22\text{cm}$ 的 TN 平均含量为 0.74g/kg ； $22\sim 40\text{cm}$ 的 TN 平均含量仅为 0.63g/kg 。TN 在 $0\sim 10\text{cm}$ 的表层沉积物中富集，而在 $10\sim 40\text{cm}$ 的范围内变化不大，其原因是氮素的垂直分布特征主要受控于沉积物中有机质的分布（本研究中二者相关系数大于 0.93 ），乌梁素海目前沉积速率为 $9\sim 13\text{mm}^{[11]}$ ，强大的生物填平作用导致大量植物残体在湖底沉积，致使表层沉积物中有机质含量丰富，TN 含量也相应最高；而剖面下层土壤有机质含量相对较低，所以其 TN 含量也相应降低。这与袁可能^[20]和何池全^[21]的研究结果相一致。



3.3.2 Org-N 垂直分布格局 由于乌梁素海沉积物中 95% 以上的 TN 以有机氮形态存在, 因此有机氮与 TN 的垂直分布格局相一致, 也主要集中在表层 0~10cm, 剖面中的累积峰非常显著 (图 7)。矿化分解与腐殖化程度是决定表层沉积物有机氮含量变化的主要因素, 若矿化分解程度高于腐殖化程度, 有机氮含量将因分解而减少, 反之则增加^[22]。由于乌梁素海水体富营养化程度在逐年加剧, 湖中芦苇和水草大面积蔓延, 湖底沉积的植物残体逐年增加, 腐殖质不断增加, 而湖底又为缺氧的还原环境, 制约了有机氮的矿化分解, 因此, 腐殖质的不断增加和矿化程度的相对降低是有机氮在表层富集的原因。

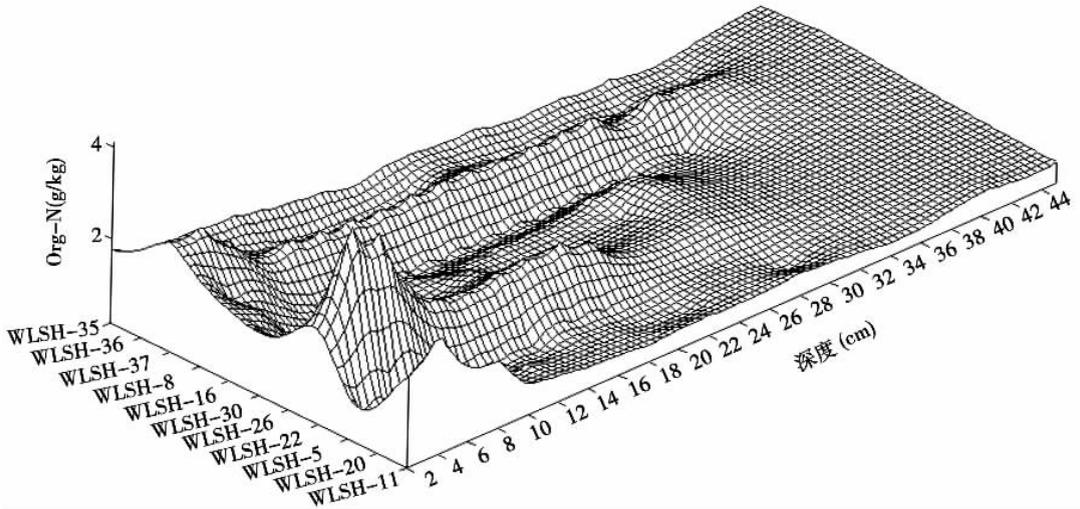


图 7 Org-N 垂向分布

Fig. 7 Pattern of vertical distribution of Org-N in sediment cores of Wuliangsu Lake

3.3.3 NH_4^+ -N 垂直分布格局 柱状沉积物中铵态氮含量的垂直分异较大, 剖面中的累积峰亦十分显著, 但累积峰出现的深度和大小不一。11 个柱状沉积物均在 0~10cm 表层出现

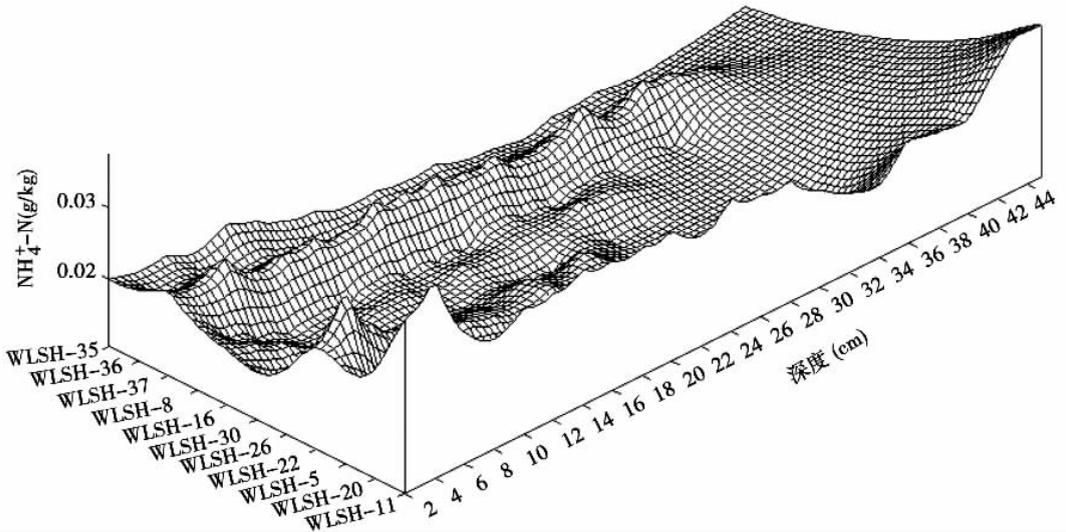


图 8 NH_4^+ -N 垂向分布

Fig. 8 Pattern of vertical distribution of NH_4^+ -N in sediment cores of Wuliangsu Lake

累积峰，而 WLSH-11 和 WLSH-37 点随剖面深度增加出现两个峰值带(图 8)，即此两点铵态氮含量在整个沉积剖面中均明显高于其他点。由于表层沉积物质地黏重，带正电的铵态氮易被带负电的沉积颗粒物胶体吸附而不易发生淋失，导致表层含量高于以下各层，沉积剖面中铵态氮含量的波动性变化还与植物根系分布和沉积物质地密切相关^[23]；铵态氮累积峰的形成与微生物活动、有机氮矿化和植物吸收等因素及其综合作用有关^[24]。

3.3.4 NO_3^- -N 垂直分布格局 硝态氮的垂直分异最为显著，均在表层 0~10cm 出现累积峰，在 WLSH-22 达到最高值，而在 10~40cm 剖面深度内的垂直分布几乎无变化(图 9)。硝态氮在表层出现累积峰与湖底的氧化还原环境有关，与 0~10cm 的表层相比，10~40cm 剖面深度的供氧条件更差，不利于硝化作用的发生。

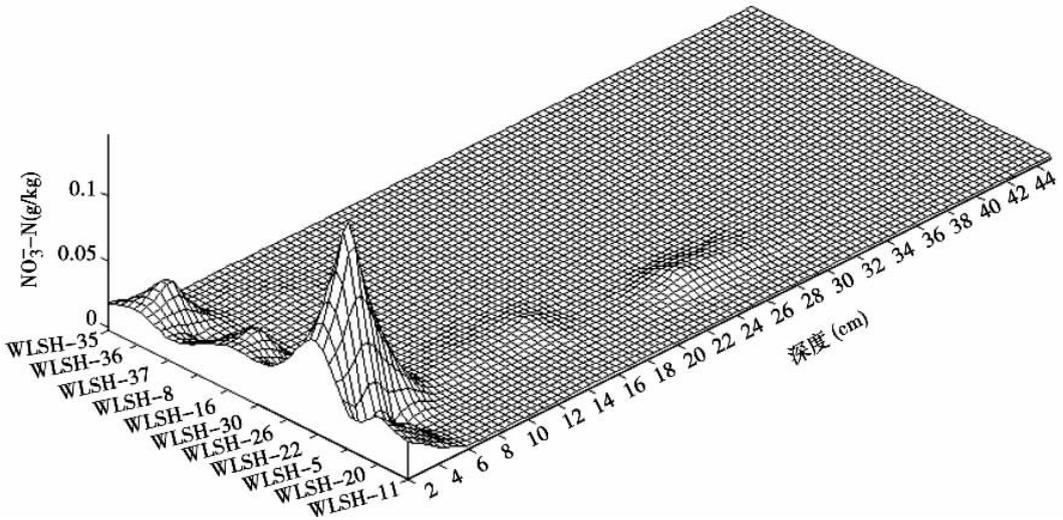


图 9 NO_3^- -N 垂向分布

Fig. 9 Pattern of vertical distribution of NO_3^- -N in sediment cores of Wuliangsu Lake

3.4 乌梁素海富营养化进程

沉积物作为湖泊生态系统中氮素的载体，能够反映氮素在湖泊生态系统的自然沉积过程^[25,26]。从生物地球化学角度来看，水体营养水平的升高可导致初级生产力的上升，它应该能在沉积物中留下相应的沉积记录^[27]，反映出湖泊富营养化进程。

TN 在乌梁素海沉积剖面中可明显划分为三个不同阶段(图 10)，即：0~10cm、10~22cm 和 22~45cm。乌梁素海目前的沉积速率为 9~13mm/a，按此推算，沉积剖面上 10cm 和 22cm 处分别对应于上世纪 90 年代和 80 年代。由于上世纪 80 年代以前我国国民经济发展水平不高，工农业生产落后，人类活动对乌梁素海影响较小，因此，22~45cm 剖面深度 TN 含量较低，平均为 0.63g/kg；进入 80 年代，随着改革开放政策的实施，农业投入加大并得到较大幅度的发展，并且 80 年代末期(1988 年)开始人工种植芦苇，相应沉积剖面中 TN 含量达到 0.74g/kg，农业面源污染加之水草和芦苇残体在湖底的逐渐腐烂并沉积可能是导致该时期富营养化进程加快的原因；90 年代以来，乌梁素海周边地区工农业得到更快的发展，人为扰动对湖泊生态系统的影响更大，尤其是化肥在河套灌区的大量使用(2002 年的化肥用量是 1978 年的 7 倍，且增幅主要在近十年)和含氮工业废水的排放，二者对 TN 负荷的贡献率分别为 50% 和 35%^[10]。已有研究表明，1996~2002

年上覆水中 TN 的含量净增 1.06mg/L ^[18], 表层 $0\sim 10\text{cm}$ 沉积物中 TN 平均含量达到 1.21g/kg , 同时密集水草区和芦苇区的蔓延使生物填平作用加速, 这些因素的综合作用可能是导致 TN 垂向分布侧视图 (图 10) 中 $0\sim 10\text{cm}$ 表层沉积物 TN 明显高于其他年代的原因。

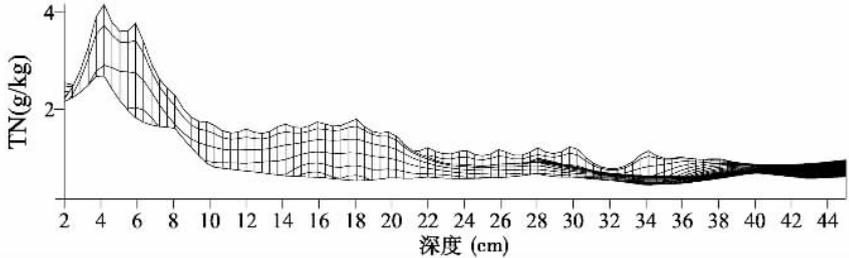


图 10 TN 垂向分布侧视图

Fig. 10 Pattern of vertical distribution of TN in sediment cores of Wuliangshuai Lake

由上可知, TN 在沉积剖面的分布特征基本体现了乌梁素海富营养化进程, 表明 90 年代是乌梁素海富营养化进程加速的起始年代。作为草型富营养化湖泊, 也能从芦苇产量的角度来揭示其富营养化进程。1975 年乌梁素海芦苇产量仅 $2.3\times 10^4\text{t}$, 到 1996 年上升到 $6.6\times 10^4\text{t}$, 至 2002 年已高达 $12\times 10^4\text{t}$, 大量芦苇和水草等植物残骸在湖底腐烂沉积, 按 10mm/a 的生物填平作用, 在约 30 年左右时间内, 乌梁素海将变成芦苇沼泽地或盐碱滩^[18]。因此, 作为我国第一个湿地示范工程并列入内蒙古自治区第十一个五年计划, 减少总排干、八排干和九排干等主要排污沟渠的排污量 (外源控制) 和控制芦苇区和密集水草区的蔓延并及时收割芦苇和水草 (内源控制) 就成为减缓乌梁素海沼泽化进程并继续发挥其湖泊湿地巨大生态功能的首要任务。

4 结论

据国家地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) 中 TN 和 NH_4^+-N 的标准极限值, 乌梁素海上覆水水质分别已达 V 类和 IV 类标准; 上覆水中 TN 含量平均为 1.78mg/L , 且无机氮污染以 NH_4^+-N 为主, 占无机氮总量的 69% 以上。

表层沉积物中氮素的水平分布格局体现出西高东低的趋势, 而且主要以 Org-N 的形式存在; 表层沉积物中 TN 含量高于 0.55g/kg 最低级别生态毒性效应等值线的区域已占乌梁素海湖区的 70% 左右, TN 对底栖生物已经具有一定的生态毒性效应并正由最低级向严重级过渡。

氮素在乌梁素海沉积剖面上均表现出随深度增加而含量递减的规律, 表层 $0\sim 10\text{cm}$ 的 TN 平均含量达到 1.21g/kg , 分别为 $10\sim 22\text{cm}$ 和 $22\sim 40\text{cm}$ 的 1.6 和 1.9 倍, 揭示了乌梁素海富营养化进程加速始于 90 年代。

乌梁素海氮污染具有内源和外源两重性。外源污染主要是由西岸总排干、八排干和九排干等主要排污沟渠排入的农田退水和工业废水; 在一定条件下, 内源污染有可能成为上覆水的主要污染源。除受外源输入和内源释放影响外, 湖区强烈的蒸发也是氮素在乌梁素海水体和现代沉积物中快速累积的重要因素之一。

参考文献:

- [1] Mitsch W J, Gosselin J G. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 2000. 89~125.
- [2] Franzen L G Can. The earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect. International Peat Society Proceedings of International Peat Congress. Uppsala, 1992. 1~18.
- [3] Keeney D R. Prediction of soil nitrogen availability in forest ecosystems: a literature review. For Sci., 1980, 26: 159~171.
- [4] Schlesinger W H. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. California: Academic Press, 1991.
- [5] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater marine, and terrestrial ecosystems. Environmental Pollution, 1999, 100: 179~196.
- [6] 傅国斌, 李克让. 全球变暖与湿地生态系统的研究进展. 地理研究, 2001, 20(1): 120~128.
- [7] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤氮素的空间分布格局. 地理研究, 2004, 23(5): 614~622.
- [8] 白军红, 王庆改, 余国营. 吉林省向海沼泽湿地土壤中氮素分布特征及生产效应研究. 土壤通报, 2002, 33(2): 113~116.
- [9] 邢莲莲, 杨贵生. 内蒙古乌梁素海鸟类志. 呼和浩特: 内蒙古大学出版社, 1996. 22~23.
- [10] 内蒙古湖泊恢复治理项目——乌梁素海综合整治研究. 中国—瑞典—挪威合作项目.
- [11] 尚士友, 杜健民, 李旭英, 等. 乌梁素海富营养化及其防治研究. 内蒙古农业大学学报, 2003, 24(4): 7~12.
- [12] 金相灿, 刘鸿亮, 屠清瑛, 等. 中国湖泊富营养化. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 509~512.
- [13] 尚士友, 杜健民, 李旭英, 等. 草型富营养化湖泊生态恢复工程技术的研究—内蒙古乌梁素海生态恢复工程试验研究. 生态学杂志, 2003, 22(6): 57~62.
- [14] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 等. 中国主要湖泊营养氮沉降临界负荷的研究. 环境污染与防治, 2002, 24(1): 54~58.
- [15] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 等. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析. 植物生态学报, 2004, 28(2): 246~251.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 107~147.
- [17] 张奋清, 王丽敏, 吴利斌, 等. 乌梁素海氮循环转化过程的初探. 内蒙古农业大学学报, 2004, 25(2): 31~34.
- [18] 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺, 等. 乌梁素海湿地环境的演变. 地理学报, 2004, 59(6): 948~955.
- [19] Mudroch A, Azcue D J M. Manual of Aquatic Sediment Sampling. Boca Raton: Lewis Publications, 1995.
- [20] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学. 北京: 科学出版社, 1983.
- [21] 何池全. 三江平原毛果苔草湿地生态过程研究. 中国科学院长春地理研究所博士学位论文. 2000.
- [22] Chen R, Robert R T. A simulation model of organic matter and nutrient accumulation in mangrove wetland soils. Bio-geochemistry, 1999, 44: 93~118.
- [23] 白军红, 邓伟, 欧阳华, 等. 吉林向海沼泽湿地土壤氮素的剖面分布. 湖泊科学, 2004, 16(4): 377~380.
- [24] Bai J, Deng W, Zhu Y, et al. Spatial variability of nitrogen in soil from land/inland water ecotones. Comum. Soil Sci. Plant Anal., 2004, 35(5-6): 735~750.
- [25] 何池全, 赵魁义, 余国营, 等. 湿地生态过程研究进展. 地球科学进展, 2000, 15(2): 165~171.
- [26] 白光润, 王升忠, 冷雪天, 等. 草本泥炭形成的生物环境机制. 地理科学, 1999, 53(3): 246~254.
- [27] 贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录. 第四纪研究, 2002, 22(2): 158~165.

Nitrogen pollution and spatial distribution pattern of Wuliangsu Hai Lake

SUN Hui-min, HE Jiang, LÜ Chang-wei,
GAO Xing-dong, FAN Qing-yun, XUE Hong-xi

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

Abstract: Wuliangsu Hai Lake is one of the representative inland freshwater lakes in grassland area in China. Recently, the lake is shrinking and eutrophication has become serious. This paper interpreted the spatial distribution patterns of total nitrogen (TN), ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) and organic nitrogen (Org-N) in surface water and sediment cores systematically. The results revealed that the average content of TN was 1.78mg/L and the main inorganic nitrogen pollutant was $\text{NH}_4^+\text{-N}$ which accounted for more than 69% of the inorganic nitrogen in surface water; spatial distribution pattern of nitrogen in surface sediment indicated that the nitrogen content in the west of the lake was higher than in the east and the main species of nitrogen was Org-N which was more than 95% of TN. Furthermore based on the Sediment Quality Estimation Guide which was enacted in terms of ecological toxic effects by Department of Environment and Energy of Ontario Province, Canada, 1992, the content of TN in surface sediment has certain ecological toxic effects which are more serious; the content of nitrogen decreased with depth and the eutrophication process existed in three periods which revealed that the acceleration of the eutrophication process dated back to the 1990s. The content, speciation distribution and spatial distribution pattern of TN in Wuliangsu Hai Lake's surface water and sediment cores indicated that its pollution was characterized by exogenous and endogenous pollution. The exogenous pollution was mainly the drainage water from farmland and industrial wastewater, which accounted for 50% and 35% of the TN load respectively, pouring into the lake through the main drainage canals, the eighth and the ninth drainage canal. And under certain conditions, the endogenous load could release nitrogen into surface water and make it the main pollution source. Besides the exogenous and the endogenous pollution, the intense evaporation, which accelerated the eutrophication process of Wuliangsu Hai Lake, was also a key factor which caused nitrogen accumulation in the surface and modern sediments.

Key words: nitrogen; surface water; sediment; spatial distribution pattern; Wuliangsu Hai Lake