

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2013.06.012

乌梁素海沉积物中营养盐分布特征与固碳能力*

刘旭¹ 李畅游^{1**} 贾克力¹ 张生¹ 郑佳伟² 刘海军³

(1. 内蒙古农业大学, 呼和浩特, 010018; 2. 内蒙古水利工程建设质量与安全监督中心站, 呼和浩特, 010020;
3. 内蒙古河套灌区排水事业管理局, 临河, 015012)

摘要 通过2008—2011年连续现场采样和室内实验分析,研究了乌梁素海沉积物营养盐的分布特征以及固碳功能。结果发现,乌梁素海沉积物中氮与有机碳水平分布具有相同规律,总磷水平分布差异较大,揭示了沉积环境和水动力条件对磷在沉积物中的累积具有一定影响,也在一定程度上反映了磷来源的多样性。在垂直方向上,总氮、有机碳、硝态氮规律明显,随深度增加有递减的趋势,而总磷和氨氮垂直分布差异性显著,表明其与环境因素和早期演化和成岩作用有关。乌梁素海沉积物中C:N:P=20.2:4.5:1,小于Redfield比(C:N:P=106:16:1)。沉积物中总氮与有机碳有明显的正相关性,而总磷与有机碳无相关性。乌梁素海沉积物有机碳沉积速率为 $169.55\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,有机碳密度为 $5.70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。30 cm深度沉积物中,碳储量为 $134.39\times 10^4\text{ t}$,存在很大的固碳潜力,这对于调节气候变化和维护湖泊区域生态平衡具有重要潜能。

关键词 营养盐, 固碳能力, 乌梁素海。

湖泊沉积物是湖泊内源负荷重要的源和库,在外源负荷得到有效控制后,由于沉积物中营养物的释放,导致不能有效降低湖泊水体营养物浓度,从而影响上覆水体营养水平^[1-3]。沉积物中营养物对湖泊水体的影响与沉积物间隙水中的营养物浓度和其通过沉积物-水界面向上覆水体的释放密切相关。沉积物中营养元素的赋存、迁移、转化等过程,控制着水生生态系统的初级生产力水平。过去关于陆地生态系统固碳潜力的研究多集中于农田和森林生态系统,然而湿地是世界上最大的碳库之一,碳储量约为770亿吨,占到陆地生态系统的35%,超过农田、温带森林和热带雨林生态系统碳储量的总和,在全球碳循环中发挥着重要作用。并且湿地具有持续的固碳能力,很多湿地生态系统从上一次冰河消融就开始成为碳的储蓄场。

本文在对乌梁素海沉积物营养盐总量与形态进行调查的基础上,重点对氮、磷元素的空间分布与来源进行分析,并且针对湖泊湿地对碳汇作用的研究,分析了乌梁素海沉积物固碳能力,有助于加深对乌梁素海潜在生态危害的认识,为乌梁素海沉积物的农业利用和环境治理提供理论依据。

1 实验方法

1.1 研究区概况

乌梁素海位于中国巴彦淖尔市乌拉特前旗,属于中国八大淡水湖之一,总面积为 300 km^2 ,水域平均水深为1.5 m左右,最大水深可达2.5 m左右。它是内蒙古高原干旱区最典型的浅水草型湖泊,是当地农田退水和工业、生活废水的唯一承泄渠道,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。

1.2 样品采集

从2008—2011年,连续4年进行了野外采样与室内实验。采样点见图1。样品的采集均采用自行研制的柱状沉积物采样器,采样深度为40 cm,将沉积物柱状泥样现场以5 cm分层,分装入铝盒、环刀、聚乙烯塑料袋后封口冷藏保存,带回实验室之后,样品分为新鲜样和风干样分别进行处理,新鲜样放于

2012年12月6日收稿。

* 国家自然科学基金项目(40901262, 50569002, 50669005, 51069007, 51269017, 51269016)资助。

** 通讯联系人, E-mail: nndlichangyou@163.com

4 ℃ 冰箱中保存,进行含水率、容重等物理指标的测定;风干样则是将新鲜样在自然条件下晾干,碾碎后剔除碎屑,过 100 目筛,装袋备用,进行化学指标、颗粒分析的测定。



图 1 乌梁素海采样示意图

Fig. 1 Map of sampling sites for the surface sediments of Ulansuhai Lake

1.3 分析方法

沉积物总氮含量采用 KDN 型定氮仪测定 (GB7173—87). 沉积物氨氮含量的测定方法采用蒸馏法 (GB7173—87). 沉积物硝氮含量的测定方法采用紫外分光光度法^[4]. 沉积物有机质含量的测定综合国标 GB 9834—88 及《湖泊富营养化调查规范》的方法,是用定量的重铬酸钾-硫酸溶液提取有机碳,再乘以系数 1.724,即为土样有机质含量. 沉积物总磷含量的测定参照 GB8937—88,在 U-2001 紫外可见分光光度计上用 660 nm 的波长测定。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中氮、磷空间分布研究

乌梁素海表层沉积物中 TN 含量在 0.63—2.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 1.42 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.53(图 2). 湖心区呈现一定范围 TN 含量的高值区, TN 含量在 1.55—2.33 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内变化;湖的西南部呈现一定范围 TN 含量的低值区,其 TN 含量在 0.86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右变化. 氨氮含量在 2.02—37.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 18.65 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.75. 硝氮的含量较低,在 11.72—28.39 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 间变化,平均值为 18.40 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数为 0.37. 湖的西北部和中部硝氮含量出现两个高值区,这是由于该区域属于乌梁素海的深水区,受地表径流影响较小,沉积环境相对稳定,有利于硝态氮的累积与赋存;湖的西南部含量相对较低。

乌梁素海营养盐的外源主要是总排、八排和九排污水中氮磷等营养元素. 沉积物的分布特征主要是受污染源来源和水动力条件的综合影响. 图 3 为乌梁素海流场情况. 通过连续 4 年的数据分析发现,乌梁素海表层沉积中总氮与形态氮的分布特征具有相似性(图 2),北部明显高于南部,在湖心出现高峰值,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、工业废水和生活污水通过总排、八排干渠从湖区西北端入湖,受湖心区芦苇阻碍向东向南分流,使得全氮与各形态氮均在乌梁素海中部西岸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而出现高值区,并沿水流方向表现出递减的趋势,这也在一定程度上体现了湖泊自身的滤过作用。

湖泊表层沉积物中磷的分布特征不仅受环境地球化学背景的影响,还与湖泊外源污染负荷、湖周人类生产活动、上覆水体受污染程度及化学性质、沉积物的性质及化学组成等密切相关^[3]. 乌梁素海表层

沉积物中全磷含量在 $0.22\text{--}1.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.97\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.68 (图 2). 在湖心东部和湖南部呈现两个高值区. 这是由于总排干污水与八排和九排等以农田退水为主的干渠污水混合叠加, 入湖后由于受到芦苇和菖蒲等大型挺水植物的阻碍, 有部分污水向东分流. 向东分流的污水由于直接汇入湖区东北端明水区, 加之南侧挺水植物的围拦和阻碍, 使明水区域处于相对封闭的状态, 水动力条件相对微弱, 从而有利于水体中磷的沉积.

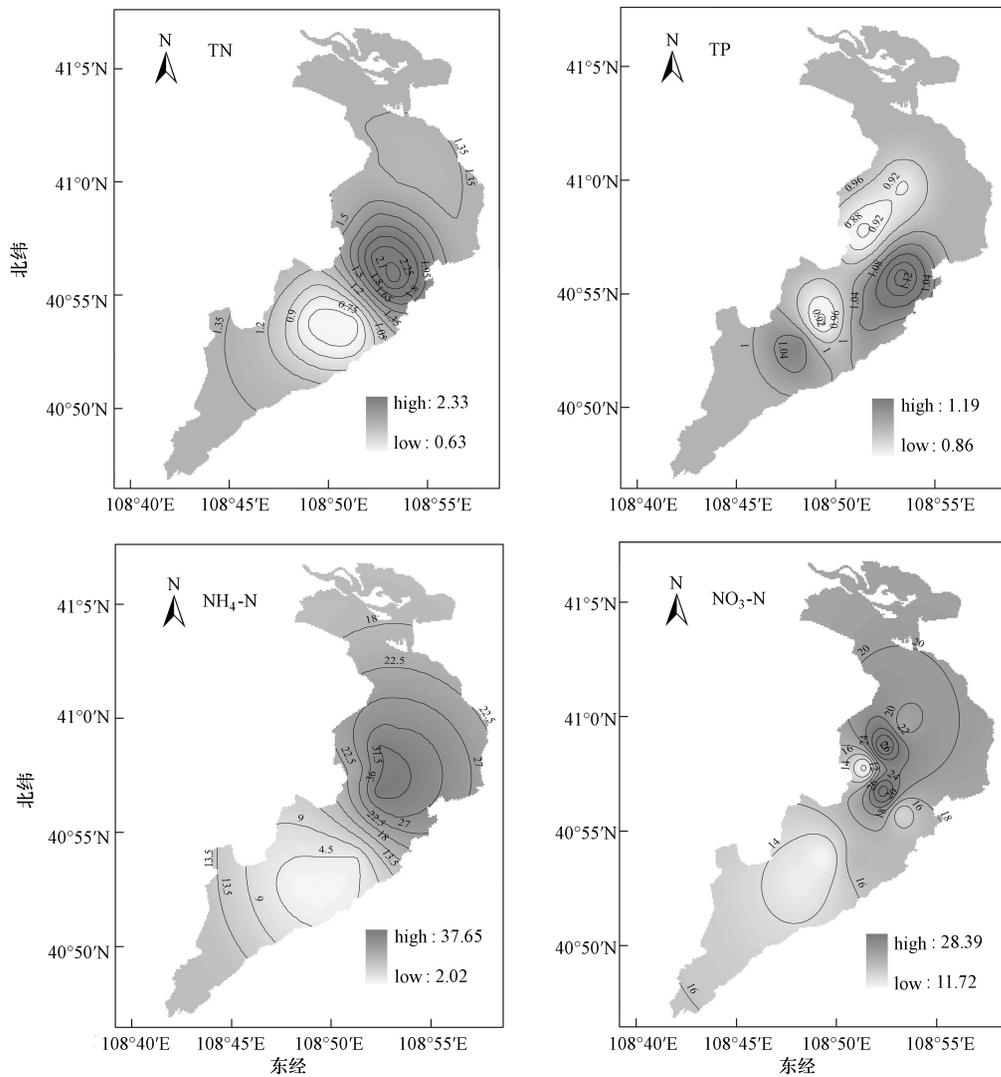


图 2 乌梁素海表层沉积物中总氮、总磷、硝态氮、氨氮空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of TN, TP, ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in the surface sediment of Ulansuhai Lake

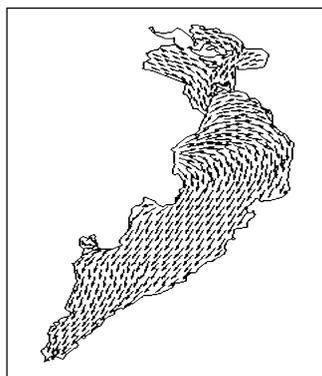


图 3 乌梁素海流场

Fig. 3 Flow field of Ulansuhai Lake

总排干入湖的大部分污水向南分流并与向东分流的污水再次汇合后继续向南流动,由于局部水力条件的变化而在湖区东南部形成另一分布高值区. TP 含量低值区的出现可能与该区域分布着大量水生植物(挺水、沉水植物),其对上覆水体中的 TP 具有吸附净化作用有关.

2.2 沉积物中氮、磷垂直分布研究

TN 和 TP 在沉积剖面的分布特征存在着较大的差异性(图 4),反映氮和磷两种元素本身具有不同的地球化学性质. 在表层 30 cm 的剖面深度内,都表现出明显的递减趋势,说明近年来乌梁素海周边工农业得到较程度的发展,人类活动所排放的含有大量氮磷等营养盐的工业废水、农田退水和生活污水对乌梁素海水体产生巨大的影响,进而导致氮磷等营养盐在表层沉积物中累积富集.

在垂直方向 0—30 cm 深度上,乌梁素海沉积物中 0—10 cm 处 TN 含量高于 10—30 cm 含量,总体上呈现出随着深度的加深, TN 含量有下降的趋势. 乌梁素海目前的沉积速率为 $6\text{--}9\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[5], 按此推算,沉积剖面 10 cm 处对应于上世纪 80—90 年代. 80 年代末期开始人工种植芦苇,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,以及近十年含氮工业废水的排放. 柱状沉积物中铵氮含量的垂直分异较大,剖面中的累积峰值显著,但累积峰值出现的深度和大小不一. 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,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^[6]. 硝态氮的垂直分布变化较小,总体上随深度增加呈递减的趋势,这与湖底的氧化还原环境有关,与表层相比,剖面深度的供氧条件更差,不利于硝化作用的发生.

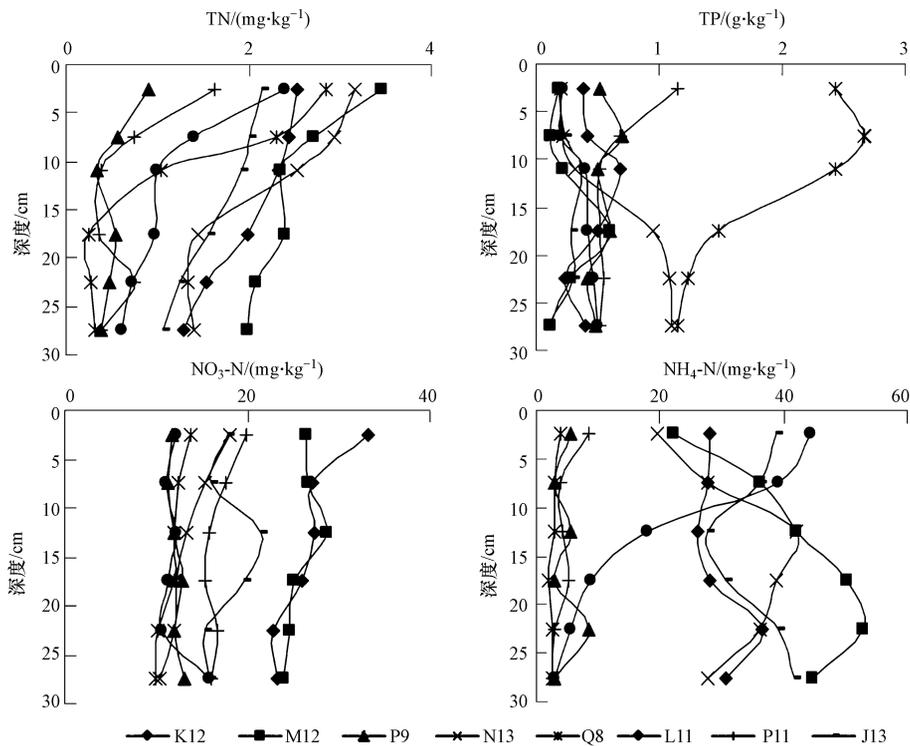


图 4 沉积物中氮、磷的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution profiles of N and P in the sediments of Ulansuhai Lake

由于受沉积环境、早期成岩作用和人类活动等多种因素的共同作用,湖区不同点的 TP 垂直变化存在较大差异. 其中, J13、N13 点位于入水口湖心处附近,其垂直变化波动较大,但总体有随着深度加深 TP 含量上升的趋势,与沉积环境不稳定有关; Q8、P11 点均出现随着深度的加深,其含量减小,这与近年来河套灌区化肥用量的逐年加大,以及近年来大量生活污水和工业废水排入乌梁素海相吻合,这反映了人类活动对乌梁素海沉积物中磷的积累具有一定的影响; P9、M12、K12、L11 点浅层则出现随着深度的

加深其含量有增大的趋势,但在其深层变化却较为稳定,而对于各点深层出现高值点,与底层沉积物的吸附能力和湖盆早期演化和成岩作用有关。

2.3 营养盐来源分析

乌梁素海各点 TOC/TN 和 TN/TP 比率见图 5。TOC/TN 在 9—36 之间变化,平均值为 20.2;TN/TP 在 0.4—18.4 之间变化,平均值为 4.5。总体上,沉积物表层 0—10 cm 的 TOC/TN 和 TN/TP 大于 10—30 cm。在垂直方向上,TN/TP 变化规律性明显,在 0—10 cm 深度,随着深度增加逐渐减少,在 10—30 cm 比率相对稳定,变异系数为 0.61;TOC/TN 变化相对复杂,在 0—10 cm 深度,除了 L11 点,其他各点 TOC/TN 比值随着深度递增;而在 10—30 cm 深度范围内,各点变化规律性不明显,变异系数为 0.07。

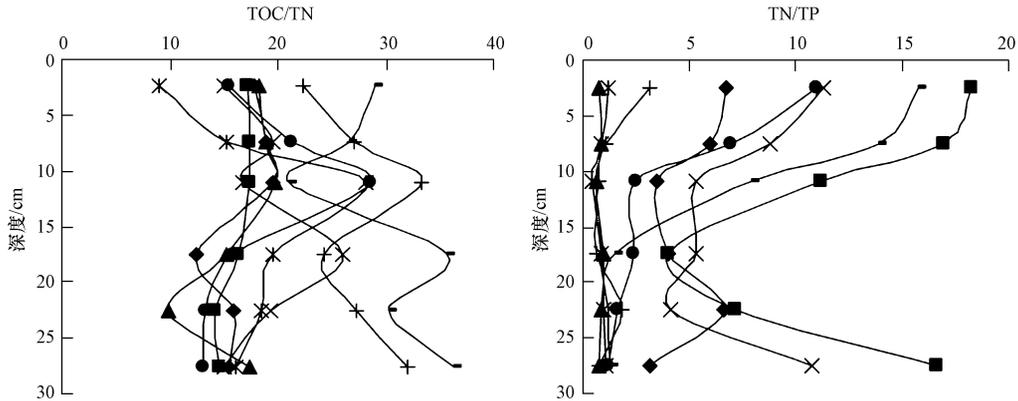


图 5 乌梁素海表层沉积物中 TOC/TN、TN/TP 垂直分布

Fig. 5 Vertical profiles of TOC/TN, TN/TP in the surface sediments of Ulansuhai Lake

沉积物的 TOC/TN 值可有效地指示有机质的来源。根据沉积物有机质及其 C 和 N 的组成差别,可以区分内源和外源有机质的比例。一般认为,TOC/TN > 10 时,沉积物有机质以外源为主;TOC/TN < 10 时,以内源有机质为主,TOC/TN ≈ 10 时,外源与内源有机质基本达到平衡状态^[7]。乌梁素海表层沉积物 TOC/TN 比值,反映有机质来源是湖泊水生生物和陆源输入,其中外源输入略占主导。在湖心芦苇密集区,有机质来源于芦苇等大型挺水植物和渠干附近陆源有机质的输入。而 Q8 点位于西南湖心区,有机质受人类活动及外源输入影响很小,但该区域湖底大量分布着以龙须眼子菜为优势种的沉水植物,且由于 TOC 含量高而 TN 含量低所致,使这一区域 TOC/TN 比值出现高值。造成垂向变化差异较大的原因与这些点位于非湖心区的湖滨带有关,TOC/TN 值相对较大与湖滨受雨季地表径流所携带富含有机质的陆源植物残体等有关,而变幅较大则揭示了因乌梁素海湖区干湿年份交替而导致入湖陆源有机质的数量差异。

TN/TP 的比值,从某种程度上反映了湖泊的富营养状态。沉积物中 N、P 含量及比值通常为水中 N、P 的聚积、沉积及沉积物溶出、释放两种动态过程的综合反映^[8]。乌梁素海表层沉积物 TN/TP,在西南湖区及排干入口下游比值较低,这是由于该区域受水动力条件以及芦苇、水草的降解作用,使得 N、P 含量均较低;而大量污水在湖区中部、西北部汇入,在湖的中心以北属于扩散带,污水中的营养盐成分决定了此区域相对较高的 TN/TP 比率。芦苇区比值较高。总体上,沉积物中 C:N:P = 20.2:4.5:1,远远小于 Redfield 比(C:N:P = 106:16:1),表明乌梁素海沉积物中的磷主要是陆源的。TN/TP 在表层沉积物中相对较高也体现了富含氮素的河套灌区农田退水和乌梁素海上游工业废水的入湖量有逐年增加的趋势,并且存在氮在湖底沉积物中的累积速度要明显高于磷的规律。

2.4 乌梁素海沉积物固碳功能

湖泊碳循环是陆地生态系统碳循环的重要组成部分。湖泊沉积物是全球碳的重要源与汇,在全球碳循环中扮演重要角色。据初步研究,全球湖泊对大气的贡献达每年 0.14×10^{15} g 的碳,这个量相当于由陆地江河向海洋输入有机碳和无机碳总和的一半^[9]。

国际上对全球陆地生态系统土壤有机碳库进行了较为深入和系统的研究,并取得了一些基本明确的结果。统计估算一般是以一定数量代表性土壤剖面的有机碳含量及容重为基础,结合土壤分类数据库

进行有机碳密度和储量的估算。

沉积物有机碳密度及储量分析参照土壤有机碳含量分析方法,采用如下公式计算有机碳密度和储量:

$$\text{SOCD}_i = \frac{(1 - \delta\%) \rho_i C_i T_i}{100} \quad (1)$$

式中, SOCD_i 为某一土壤类型第 i 层土壤有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); $\delta\%$ 为 >2 mm 砾石的体积分数; ρ_i 为某一土壤类型第 i 层土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C_i 为某一土壤类型第 i 层有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); T_i 为第 i 取样土层厚度 (cm)。

如果土体由层组成,则土体总 SOCD 为各层累加和。

$$\text{SOCD} = \sum_i^n \text{SOCD}_i \quad (2)$$

$$\text{SOC} = S \times \text{SOCD} \quad (3)$$

其中, SOC 为沉积物有机碳储量 (kg); S 为湖区面积 (m^2)。

根据其沉积速率和沉积物中有机碳的含量,计算单位面积的固碳速率 (CSR):

$$\text{CSR} = \rho \times C \times R \quad (4)$$

其中, ρ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); C 为有机碳含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); R 为沉积速率 ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

2.4.1 表层沉积物有机碳密度空间分布

土壤有机碳含量和组成表明土壤有机质的水平,而且能够说明营养元素的可利用状态,同时还影响着土壤的物理特性,是反映土壤质量或土壤健康的一个重要指标,直接影响着土壤肥力和生物的生长。乌梁素海沉积物中有机碳含量垂直分布见图 6。表层沉积物中有机碳含量在 $2.32\text{--}36.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 17.39,总体上呈现随深度增加有机碳含量递减的趋势。0—10 cm 深度内,有机碳含量为 21.63 ± 2.34 ; 10—30 cm 深度,有机碳含量为 $13.15 \pm 1.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。这是由于沉积物中有机碳含量与底质中微生物的理化环境(如温度、pH、Eh)、水文状况(如上浮水体水位)、沉积物性质(如粒度、矿化度)等有关。对乌梁素海 0—30 cm 各水平的沉积物的容重进行了测定,0—5 cm 与 5—10 cm 沉积物的容重基本相同, $\rho_i = 1.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 10—15 cm 沉积物的容重为 $\rho_i = 1.21 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 15—30 cm 沉积物的容重为 $\rho_i = 1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,取 $\delta = 0.3\%$, $S = 300 \text{ km}^2$,乌梁素海有机碳密度空间分布见图 7。

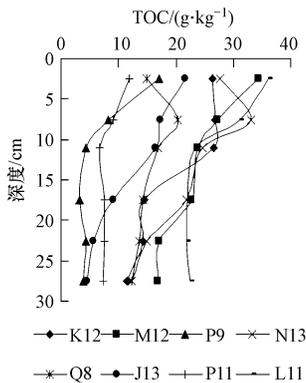


图 6 沉积物中有机碳垂直分布

Fig. 6 Vertical distribution of TOC in the sediments of Ulansuhai Lake

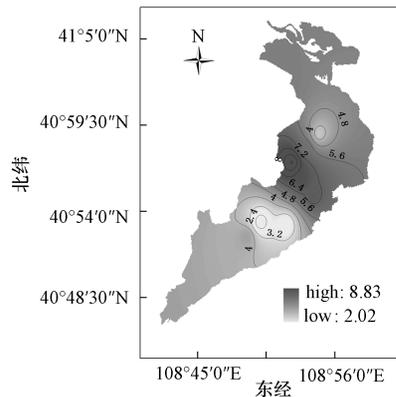


图 7 乌梁素海表层沉积物中 SOCD 空间分布 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

Fig. 7 Spatial distribution of SOCD in the surface sediment of Ulansuhai Lake ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)

乌梁素海有机碳密度在 $2.32\text{--}8.83 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,平均值为 $5.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。湖心处密度较高,湖区北部高于南部。主要是由于排干退水中含有大量的有机污染物影响,在湖心南部到出口处附近水域,长有大面积的水草和芦苇,水生植物和微生物的新陈代谢又造成该区域有机碳含量的相对增加。乌梁素海有机碳来源分为陆源和内源,而内源主要是由大面积的芦苇所影响。据梅雪英等^[10]对长江口典型芦苇带湿地植被的碳分布的研究,芦苇植被生物量碳储量为 $2.66\text{--}5.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,平均 $4.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,且地下部分的生物现存量大于地上部分,地下/地上生物量比率为 $2.33\text{--}3.64$,平均 2.96 ,碳储量是地上部分的

近 3 倍;并且其芦苇湿地具有很强的固碳能力,达 $1.11\text{--}2.41 \text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$,是全国陆地植被平均固碳能力的 2.3—4.9 倍,达全球植被平均固碳能力的 2.7—5.9 倍。

2.4.2 沉积物中氮、磷与有机碳相关性分析

对各点不同剖面的总氮、总磷与有机质含量进行相关性分析(图 8),总氮与有机碳存在明显正相关性,反应了乌梁素海沉积物中有机碳与总氮具有同源性。随着近年来河套灌区农田施肥量的增加,以及粗犷的灌溉模式,使大量的氮素随着退水排放到乌梁素海,进而乌梁素海营养化加剧,而氮素的增加促进了有机碳的固定。从 1977 年到 2010 年河套灌区农田灌水与排水来看(图 9),平均每年有 $5\times 10^9 \text{ m}^3$ 水从黄河引入灌区,其中 $3\times 10^9 \text{ m}^3$ 水排到乌梁素海。而这些农田退水中,富含氮磷等营养元素。氮素的增加促进了湖泊沉积物的生产力,促进湖区中水生植物的生长,进而促进了生物碳积累的过程。同时,也说明了沉积物中的氮主要以有机氮的形式存在。有机碳与总磷无明显相关性,这说明磷在沉积物中存在的形式比较复杂,除了以有机磷的形态存在之外,同时还存在无机磷,甚至大部分区域主要以无机磷(磷酸钙)形式存在于沉积物中。

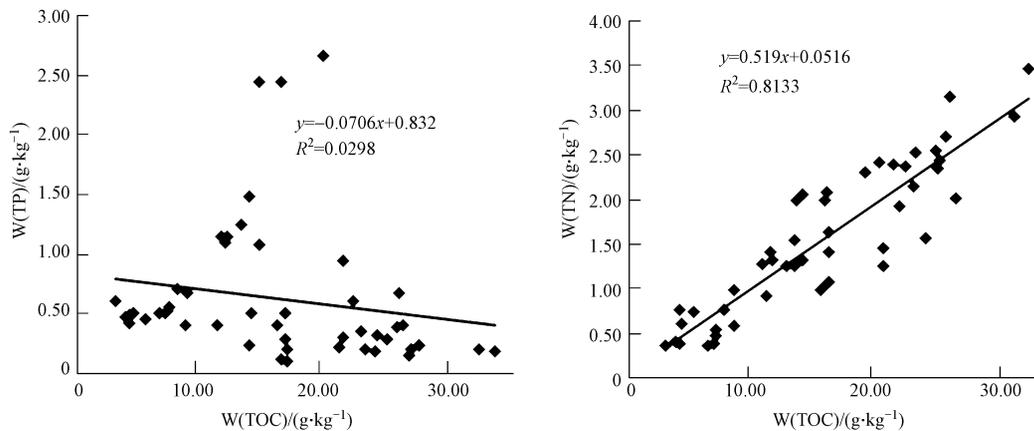


图 8 有机质与 TN、TP 的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of organic matter with TN and TP

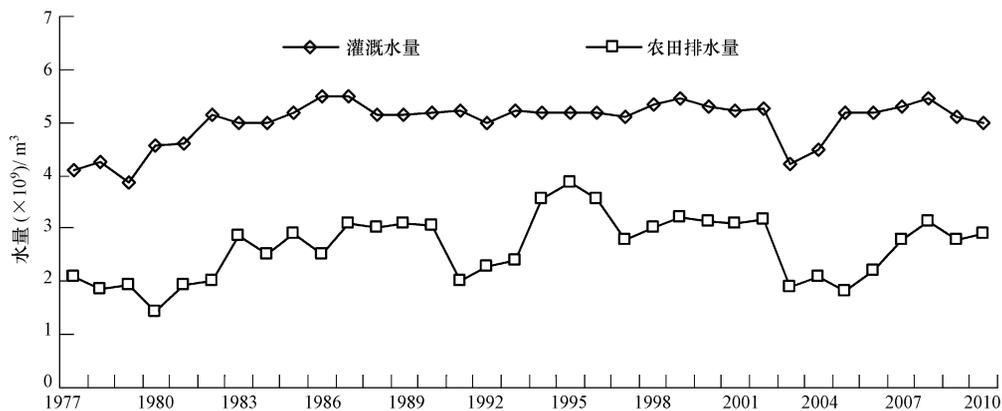


图 9 从 1977—2010 年灌溉用水与排水量

Fig. 9 The volume of irrigation water use in Hetao and discharge water into Ulansuhai Lake from 1977 to 2010

2.4.3 乌梁素海沉积物固碳能力

乌梁素海有机碳沉积速率为 $169.55 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。30 cm 深度沉积物中,碳储量为 $134.39 \times 10^4 \text{ t}$ 。在 30 cm 深度上以 5 cm 分层,按照乌梁素海沉积物沉积速率 $6\text{--}9 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 计算,每层相应的沉积年数与累计储碳量如表 1 所示。随着深度的增加,碳储量呈递减趋势。在 0—5 cm、5—10 cm、10—15 cm 深度的碳储量,与 25—30 cm 深度的碳储量相比,分别增加了 83.49%、70.22% 和 51.03%。在过去的 28 年左右,沉积物固碳量为 $100.89 \times 10^4 \text{ t}$,占总储碳量的 75%。这主要是由于上世纪 80 年代末开始,河套地区大量农药使用与工业的发展,污水中携带了大量营养盐与有机污染物,引起了沉积物碳在该时期的富集。

从 1978 年到 1997 年,河套灌区农田的化肥用量从 7×10^4 t 上升到 43.8×10^4 t,到了 2002 年就已经超过 52×10^4 t,化肥利用率仅为 30%^[11]. 同时,人工芦苇的增加,也促进了碳的积累. 根据 TM 卫星影像解译,乌梁素海的野生芦苇分布面积从 1987 年的 94.88 km^2 ,增加到 1996 年的 112.97 km^2 ,直到 2001 年的 115.89 km^2 ^[12].

表 1 乌梁素海沉积物固碳能力统计

Table 1 Statistics of carbon sequestration capacity in Ulansuhai Lake sediment

深度/cm	SOC(10^4)/t	增加率/%	沉积年数/a	累计储量(10^4)/t
0—5	29.45	83.49	6—8	29.45
5—10	27.32	70.22	11—17	56.77
10—15	24.24	51.03	17—25	81.01
15—20	19.88	23.86	22—33	100.89
20—25	17.45	8.72	28—42	118.34
25—30	16.05		33—50	134.39

2.4.4 乌梁素海沉积物碳储量现状水平

目前,我国湿地土壤有机碳储量的研究主要集中在东北的三江平原沼泽湿地、青藏高原东部的若尔盖高原湿地、长江中下游的湖泊湿地和东部沿海的河口湿地,而对我国西北内陆湿地土壤含碳量和碳储量的研究较少,对有机碳库中不同组分的研究甚少. 乌梁素海沉积物中有机碳储量与全国湿地碳储量相比,并不是很高. 三江平原 3 类典型湿地(腐殖质沼泽、沼泽化草甸和泥炭沼泽)沉积物剖面有机碳分布具有明显的淀积层和储碳层,剖面上部是储碳层,有机碳含量高($60—295 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),剖面下部是淀积层,有机碳含量较低($<30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);若尔盖高寒湿地有机碳密度介于 $21.5—105 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;洞庭湖 3 类典型湿地(湖草洲滩地、垦殖水田、芦苇洲滩地)表层土壤有机碳含量为 $19.63—50.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;闽江河口鱖鱼滩湿地远近潮沟 3 种优势植物(蕉草、咸草、芦苇)群落下的土壤有机碳储量分别为 $5303.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $9706.9 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 、 $10045.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ^[13-17]. 乌梁素海沉积物中有机碳含量平均值为 $17.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于淀积层,表明乌梁素海有很大的潜在固碳能力. 总之,准确估算乌梁素海沉积物中土壤有机碳储量,揭示有机碳空间分布规律是整个湿地碳循环研究的重要组成部分,对正确把握沉积物中碳储量对整个湖泊体系碳循环的作用,具有非常重要的意义. 湖泊湿地土壤以其有机碳含量高和强烈的还原环境为主要特征,具有物质“源、汇”功能、“养分库”功能和“净化器”功能,这些性质和功能对于维护湖泊区域生态平衡具有极为重要的作用.

3 结论

(1) 乌梁素海沉积物中,氮以有机氮为主要形式,各形态氮水平分布具有相同规律,湖区中心和湖区北部高于南部,这与乌梁素海流场条件以及水生植物有关. 总磷水平分布差异较大,揭示了沉积环境和水动力条件的变化对磷在沉积物中的累积具有一定影响,也在一定程度上反映了磷来源的多样性.

(2) 在垂直方向上,总氮、硝态氮规律明显,随深度增加有递减的趋势,近年来大量的农业、生产退水对氮的沉积具有明显的影响. 而总磷和氨氮垂直分布差异性显著,表明其不仅与人为活动有关,还与环境因素和早期演化和成岩作用有关.

(3) 乌梁素海表层沉积物中 C:N:P = 20.2:4.5:1,小于 Redfield 比(C:N:P = 106:16:1),表明沉积物的有机质主要以外源为主,磷的来源来自陆源. 沉积物中总氮与有机碳有明显的正相关性,表明二者具有同源性,氮的沉积促进了有机碳的固定. 而总磷与有机碳无相关性,说明沉积物中的磷主要是以无机磷形态存在.

(4) 乌梁素海有机碳沉积速率为 $169.55 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 30 cm 深度沉积物中,碳储量为 $134.39 \times 10^4 \text{ t}$. 在过去的 30 年左右,沉积物固碳量为 $100.89 \times 10^4 \text{ t}$,占总储碳量的 75%,主要受近 30 年来大量富含有机污染物的污水纳入以及湖区芦苇面积增加的影响. 乌梁素海沉积物中有机碳 P 含量与全国其它湿地

相比,含量相对较少、存在很大的固碳潜力,这对于调节气候变化和维护湖泊区域生态平衡具有重要潜能。

参 考 文 献

- [1] Norton S A, Coolidge K, Amirbahman A, et al. Speciation of Al, Fe, and P in recent sediment from three lakes in Maine, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 404: 276-283
- [2] 王敬富,陈敬安,曾艳,等. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(5): 599-603
- [3] 张志斌,魏垒垒,高宝玉,等. 南四湖沉积物营养盐释放特性 [J]. *环境化学*, 2012, 31(2): 221-225
- [4] 宋歌,孙波,教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 288-293
- [5] 朱广伟,陈英旭. 沉积物中有机质的环境行为研究进展[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(3): 272-279
- [6] Bai J, Deng W, Zhu Y, et al. Spatial variability of nitrogen in soil from land/inland water ecotones. *Comum* [J]. *Soil Sci PlantAnal*, 2004, 35(5/6): 735-750
- [7] Krishnamurthy R V, Bhallacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India [J]. *Nat*, 1986, 323(11): 150-152
- [8] 张文菊,吴金水,童成立,等. 三江平原湿地沉积有机碳密度和储量变异分析[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(4): 537-544
- [9] Yang Liyuan, Wang Xiaojun, Liu Enfeng. Characteristics of nutrient distribution in surface sediments of NanSiHu Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007, (2): 40-44
- [10] 梅雪英,张修峰. 长江口湿地海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 的储碳、固碳功能研究——以崇明东滩为例[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 360-363
- [11] 冯素珍,李畅游. 内蒙古乌梁素海污染源调查研究[J]. *中国农村水利水电*. 2010(4): 125-128
- [12] 段晓男,王效科,郭玉华,等. 乌梁素海芦苇资源演变及影响因素分析[J]. *干旱区资源与环境*. 2006(3): 175-180
- [13] 石福臣,李瑞利,王绍强,等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特征 [J]. *应用生态学报*, 2007, 28(7): 1425-1431
- [14] 高俊琴,欧阳华,张锋,等. 若尔盖高寒湿地表层土壤有机碳空间分布特征[J]. *生态球环境*, 2007, 16(6): 1723-1727
- [15] 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(10): 1572-1575
- [16] 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 洞庭湖湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 49-53
- [17] 贾瑞霞. 闽江河口湿地沉积物碳、氮、磷含量及储量特征[D]. 福州: 福建师范大学硕士论文, 2009

Nutrients distribution and carbon stock assessment in Ulansuhai Lake sediments

LIU Xu¹ LI Changyou^{1*} JIA Kili¹ ZHANG Sheng¹ ZHENG Jiawei² LIU Haijun³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, 010018, China;

2. Inner Mongolia Water Conservancy Project Construction Quality and Safety Supervision Center Station, Huhhot, 010020, China;

3. Drainage Administration Bureau of Hetao Irrigation Area of IMAR, Linhe, 015012, China)

ABSTRACT

Based on the on-site sampling and laboratory experiments from 2008 to 2011, this paper studied the characteristics of the nutrients distribution in the Ulansuhai Lake sediment, as well as carbon sequestration. The results showed that the horizontal distribution of nitrogen and organic carbon has same regularity. The horizontal distribution of the total phosphorus varied largely, which reveals the impacts of the sedimentary environment and hydrodynamic conditions to the accumulation of the phosphorus in the sediments, and the diversity phosphorus source. Total nitrogen, organic carbon and nitrate-nitrogen decreased with increasing depth of sediment in the vertical direction. The vertical distribution of total phosphorus and ammonia nitrogen varied significantly, which is related to the environmental factors and the early development of the sediment. C:N:P ratios of surface sediments is 20.2:4.5:1, lower than Redfield ratios. Organic carbon and nitrogen have obvious positive correlation. Organic carbon deposition rate in the sediment of Ulansuhai Lake is $169.55 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Organic carbon density is $5.70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, and carbon stored in 30 cm depth of the sediments is $134.39 \times 10^4 \text{ t}$, which has a great potential for carbon sequestration and climate regulation as well as ecological balance of lake region.

Keywords: nutrient salt, carbon sequestration capacity, Ulansuhai Lake.