

杨旭, 李畅游, 李文宝, 等. 封闭型内陆湖泊夏季氮素赋存特征——以达里诺尔湖为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(10): 2262–2269.

YANG Xu, LI Chang-you, LI Wen-bao, et al. Characteristics of nitrogen accumulation in closed inland lakes in summer: A case study of Dali-Nor Lake, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(10): 2262–2269.

封闭型内陆湖泊夏季氮素赋存特征 ——以达里诺尔湖为例

杨旭, 李畅游*, 李文宝, 史小红, 赵胜男, 王旭阳

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 氮素是影响湖泊初级生产力的主要因素之一。近年来, 受气候干旱及上游用水量增加等因素的影响, 大多数封闭性内陆湖都面临着湖面萎缩、湖水因营养盐浓度增加而逐渐恶化的问题。本文以内蒙古高原境内封闭型内陆湖泊——达里诺尔湖为例, 于2017年夏季采集湖水、间隙水、沉积物、入湖河流等样品。对湖泊氮素赋存特征、迁移趋势做出分析, 并且对入湖河流携带的氮素对湖泊水质的影响展开讨论。结果表明: 氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)是上覆水中占比例最高的形态氮。总氮(TN)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)含量随水深从浅到深基本保持不变。只有B6、E2、E5样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在水深1.5 m向下处含量有所波动。表层沉积物TN均值2 809.97 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可交换态氮占TN含量6.74%; 河水中占比例最高的形态氮是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 四条入湖河流中, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量最高的是沙里河, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量最高的是亮子河; 每年由入湖河流携带入湖的TN量为120 t。总体来看, 达里诺尔湖氮素赋存特征为: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是上覆水的主导形态氮, TN及各形态氮含量在不同深度水层掺混均匀, 无明显的分层现象。沉积物TN含量较高且氮素迁移能力较强。TN、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 表现为由沉积物到上覆水的释放状态, 而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则以上覆水到沉积物的吸附状态为主。河流的输入对湖水TN含量有稀释作用, 但会增加湖水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的负荷。

关键词: 水资源保护; 封闭性内陆湖; 氮素; 入湖河流

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)10-2262-08 doi:10.11654/jaes.2018-0004

Characteristics of nitrogen accumulation in closed inland lakes in summer: A case study of Dali-Nor Lake, China

YANG Xu, LI Chang-you*, LI Wen-bao, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, WANG Xu-yang

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: Nitrogen is one of the main factors affecting the primary productivity of lakes. The Dali-Nor Lake, which is located in the middle part of the Inner Mongolian plateau, is the study lake of this research. The nitrogen occurrence characteristics and transferring trends were analyzed for samples of lake water, pore water, and sediment and water samples from the lake inlets, collected in the summer of 2017. The impacts of the different nitrogen forms on the water quality of the lake also were studied. The results showed that ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) was the largest component of total nitrogen (TN) in the upper layer of the lake water. TN, nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), and nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$) were mixed uniformly in the lake without distinct stratification, and the TN content remained the same from the top to the bottom of the lake. The TN content in the sediments was higher, and the migration of nitrogen was stronger. TN, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ were in the releasing state from the sediment to the upper water layer, whereas $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was mainly in the adsorption state from the upper water layer to the sediment. The input of the river had a dilution effect on the TN content of the lake water and increased the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ load of the lake water.

Keywords: water resources protection; closed inland lake; nitrogen; rivers into the lake

收稿日期: 2018-01-02 录用日期: 2018-03-21

作者简介: 杨旭(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事湖泊水环境方面研究。E-mail: xuyang9991@126.com

*通信作者: 李畅游 E-mail: nndlichangyou@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51339002, 51669022, 51469025, 51669002, 51509133, 51709162, 513390020); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2016MS0552); 中国博士后科学基金项目(204M562495XB); 自治区级创新团队项目

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51339002, 51669022, 51469025, 51669002, 51509133, 51709162, 513390020); The Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2016MS0552); The China Postdoctoral Science Foundation(204M562495XB); Autonomous Region Innovation Team Project

封闭性内陆湖是指处于河流的尾间或独自形成的独立集水区域。中国的内陆湖主要分布在蒙新、甘肃及西藏等内流地区,如青海湖、达里诺尔湖等。因湖泊所处地理位置远离海洋,气候干燥,其水量平衡主要表现为以径流入湖为主要补给水源,以湖面蒸发为主要水量损耗的特点。与开放性湖泊相比,封闭性内陆湖换水周期为无穷大,湖水无出流,使得由外源输入进湖的污染物常年累积在湖泊中。外加气候干旱、上游用水量增加等因素的影响,许多内陆湖湖面面积逐渐萎缩,湖水营养盐浓度逐年浓缩,水质恶化现象日益加剧。对封闭性内陆湖营养盐展开研究便成为探索其水环境特点,缓解水质恶化的重要入手点,但封闭性内陆湖营养盐究竟有怎样的赋存特点?径流的输入对湖泊内的氮负荷又会有什么样的影响?作者以这两个问题为重点,展开了本次实验研究。

氮、磷是湖泊内主要的营养盐。其中氮素不仅是生命体合成蛋白质、核酸以及其他含氮生物大分子的重要元素,更是限制湖泊初级生产力的营养因子^[1-2]。湖水中以溶解性无机氮形式存在的含氮化合物主要为氨氮(NH_4^+-N)、硝酸盐氮(NO_3^--N)和亚硝酸盐氮(NO_2^--N)^[3],无机氮经水生植物吸收转变为有机氮,水生植物在循环排泄或衰老死亡分解后,体内不同形式的有机氮又被释放出来,经过菌类的分解作用再次转化为各种形式的无机氮^[4]。因此,无机氮在氮素循环及收支平衡过程中起到至关重要的作用^[5]。湖泊沉积

物是氮等营养元素的重要贮存库,上覆水体中的氮素通过吸附、络合、絮凝、沉降等作用被沉积物接纳^[5]。沉积物中的氮素也在物理、化学和生物等作用下不断向上覆水体释放,成为水体氮素重要来源之一^[6-7]。目前国内外学者在湖泊氮素迁移循环机制方面已有大量的研究成果^[8-9],但针对典型封闭型内陆湖泊的分析却并不全面。达里诺尔湖(以下简称“达里湖”)是位于蒙新高原湖区典型的寒旱区封闭性内陆湖泊,内蒙古四大湖泊之一。因受干燥气候的影响,湖面面积已从1999年的213.54 km²减少到2010年的188.48 km²。湖水营养盐逐渐浓缩,水质逐年恶化^[10-11]。因此,本文以水生生物活动频繁的夏季为节点,系统地分析了达里湖氮素在上覆水、间隙水、沉积物中的赋存特征。同时对入湖河流的水质展开监测,探讨河流的输入对湖泊内氮负荷的影响。这将对理解氮素在封闭型湖泊赋存特征,以及氮素水污染控制方面提供重要的理论支持。

1 材料与方法

达里湖(43°12'~43°24' N, 116°24'~116°56' E, 图1)位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗西部,海拔1227 m,湖面面积189 km²。湖盆西深东浅,最大深度13 m,平均深度6.44 m。河流补给是达里湖的重要水源之一,每年为达里湖补给水量约0.56亿 m³(近10年平均监测数据)。流入达里湖的河流共有4条,其中贡格尔河、沙里河属于永久性河流,亮子河、耗来河

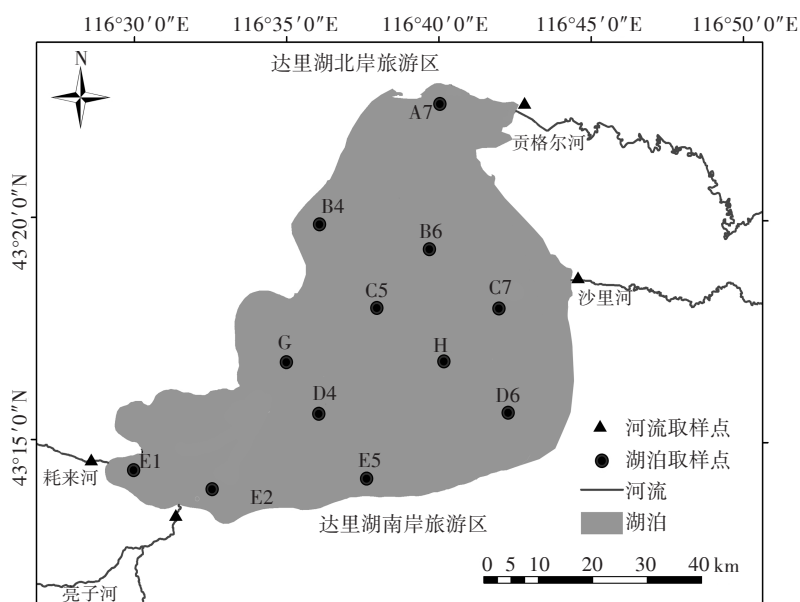


图1 达里湖取样点分布图

Figure 1 Distribution map of sampling points in Dali-Nor Lake

属于间断性河流。四条河流中补给量最大的是发源于大兴安岭尾脉阿拉烧哈山脉的贡格尔河,总长120 km,由北河口入湖;沙里河发源于经棚西侧,流程20 km,先入岗更诺尔湖,再流15 km由南河口入湖;亮子河发源于湖南部的沙丘地带,由西南部入湖;耗来河发源于西部丘陵,由西部穿经多伦诺尔再流入达里湖^[12]。

本文根据《湖泊生态系统观测方法》,针对湖泊现存面积和生态系统特点在湖面上设置了12个具有代表性的采样点,在四条河流入湖口处分别设置采样点(图1)。于2017年7、8、9月分别采集湖水、河水水样;为研究空间角度上的氮素循环特征,于8月在各样点采集湖泊上覆水、间隙水、沉积物样品。考虑B6、C5、C7、D4、E2、E5样点深度大于湖泊平均深度(6.4 m),且分布于湖区中心以及主要河流进水口处,针对这6个样点分层采集水体(采样间隔为1 m·层⁻¹)。以C5样点为例,即分别在0.5、1.5、2.5、3.5、4.5、5.5、6.5、7.5、8.5 m水深处取水。实验共取得74个湖水水样、12个湖泊间隙水水样、12个湖泊沉积物水样和12个河水水样。水样的采集:用有机玻璃取水器采集水体,装入聚乙烯瓶内;沉积物及间隙水的采集:利用彼得森取泥器,采集样点表层5 cm的沉积物。沉积物样品带回实验室后,4000 r·min⁻¹离心15 min得到上清液,用0.45 μm孔径的醋酸纤维滤膜过滤获得沉积物间隙水。剩余沉积物样品则放置于实验室内,以4℃条件进行保存,备用。

水体理化指标采用梅特勒-托利多公司生产的多参数水质监测仪进行现场测定。包括:pH值、溶解氧、氧化还原电位、盐度、电导率等。总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化法测定;NO₂-N采用N-(1-萘基)-C光度法测定;NO₃-N采用紫外分光光度法测定;NH₄⁺-N采用纳氏试剂法测定;沉积物TN采用凯氏定氮法测定(GB 7173—1987);NH₄⁺-N、NO₃-N分别采用

纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)、酚二磺酸分光光度法(GB 7480—1987)进行测定。为保证实验测试的精度,以上实验每组取3个平行样本进行重复测定,所得实验结果相对偏差小于5%,并取三组实验结果均值为实测值。论文图表采用Origin 8.0等绘制完成。

2 结果与分析

2.1 湖水、河水水环境特征

表1为7、8、9月湖水、河水理化指标监测结果,个别指标的含量在河湖之间存在明显差异。其中以盐度指标差异最为明显,河水盐度均值为0.06 mg·L⁻¹,而湖水盐度均值却达到1.79 mg·L⁻¹,是河水的30倍;电导率值在河湖之间同样相差显著,河水电导率均值为0.12 mS·cm⁻¹,而湖水电导率均值却达到3.42 mS·cm⁻¹;河水Eh均值-58.24 mV,水体表现为还原性,湖水Eh均值达到-129.61 mV,还原性更为明显;河湖DO含量相似,7、8、9月份均值分别为6.72、7.00、7.61 mg·L⁻¹,含量呈逐渐升高的趋势。河水pH均值9.50,湖水pH均值9.93,水体均处于碱化状态。

2.2 湖泊不同介质氮素赋存特征

湖泊内形态氮在不同介质(上覆水、间隙水、湖泊沉积物)含量的差异,是影响湖泊内氮循环的主要因素之一。达里湖不同介质氮素含量如表2,表层水TN均值为4.23 mg·L⁻¹,其中NH₄⁺-N均值1.50 mg·L⁻¹,占TN含量35.5%,是表层水的主导形态氮。NO₃-N均值0.29 mg·L⁻¹,仅占TN的6.9%。NO₂-N均值0.03 mg·L⁻¹,含量甚微,不足TN的1%;间隙水TN均值7.40 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N是间隙水中的主导形态氮,均值达到1.37 mg·L⁻¹,NO₃-N、NO₂-N均值分别为0.41、0.24 mg·L⁻¹,含量相对较低;表层沉积物TN均值2809.97 mg·kg⁻¹,NO₃-N是沉积物中的主导形态氮,均值127.74 mg·kg⁻¹。NH₄⁺-N均值为62.33 mg·kg⁻¹,两种无机氮占TN含量6.74%。

表1 7、8、9月湖水、河水理化指标监测结果

Table 1 Monitoring results of physical and chemical indexes of lake and river in July, August, September

检测指标	达里湖			贡格尔河			沙里河			亮子河			耗来河		
	7月	8月	9月	7月	8月	9月	7月	8月	9月	7月	8月	9月	7月	8月	9月
pH	9.9	9.84	10.06	8.52	8.55	8.34	9.23	9.41	9.87	8.1	8.02	8.09	8.07	8.15	8.08
水温/℃	20.7	18.5	17.6	16.39	15.64	16.01	17.35	17.06	16.52	17.28	17.45	17.09	17.45	16.24	16.9
盐度/mg·L ⁻¹	1.85	1.79	1.74	0.05	0.05	0.04	0.09	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.08	0.09	0.07
溶解氧 DO/mg·L ⁻¹	6.85	7.02	7.59	6.52	6.91	7.77	6.71	7.16	7.64	6.78	7.02	7.48	6.77	6.89	7.57
氧化还原电位 Eh/mV	129.36	125.58	133.9	51.58	49.52	45.1	94.9	105.92	119.8	36.6	35.5	35.4	48.72	40.65	35.2
电导率 cond/mS·cm ⁻¹	3.51	3.42	3.34	0.11	0.12	0.1	0.15	0.13	0.13	0.11	0.12	0.11	0.16	0.14	0.13

表2 表层水、间隙水、表层沉积物中形态氮含量
Table 2 The average concentration of nitrogen species in pore water, overlying water and sediments

取样点	表层水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				间隙水/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$				表层沉积物/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	TN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	TN	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
A7	4.3	0.29	0.07	0.53	5.39	0.47	0.03	0.28	269.78	55.62	26.93
B4	4.09	0.31	0.04	1.51	7.55	0.37	0.11	0.86	4 182.23	231.89	42.47
B6	3.88	0.28	0.07	1.65	8.8	0.35	0.31	0.86	3 061.59	83.27	69.13
C5	3.95	0.28	0.02	1.79	6.86	0.45	0.22	1.28	3 195.29	159.61	59.24
C7	4.13	0.3	0.03	1.09	10.1	0.31	0.43	1.25	1 096.68	123.56	50.03
D4	4.5	0.31	0.02	0.53	7.39	0.42	0.16	1.35	3 168.21	240.42	56.31
D6	4.35	0.31	0.01	1.23	8.27	0.37	0.36	0.28	537.13	71.18	34.75
E1	4.55	0.32	0.03	2.9	6.51	0.41	0.21	1.38	4 114.56	148.97	66.14
E2	4.71	0.3	0.02	1.37	7.19	0.44	0.21	0.28	3 754.58	24.29	152.11
E5	4.13	0.3	0.01	3.18	8.03	0.37	0.3	2.64	2 739.15	294.32	81.79
G	4.32	0.29	0.02	0.81	6.05	0.48	0.22	0.69	2 278.61	22.32	44.84
H	4.18	0.29	0.01	1.37	6.6	0.46	0.28	1.52	5 321.8	77.38	64.26
平均值	4.26	0.3	0.03	1.5	7.4	0.41	0.24	1.37	2 809.97	127.74	62.33
标准差	0.25	0.01	0.02	0.83	1.28	0.09	0.11	1.33	1 536.46	89.19	32.21

为研究氮素在湖泊不同水层的分布情况,对B6、C5、C7、D4、E2、E5 6个样点分层采集水样进行测定(图2),从图中可以看出,TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 在湖泊内掺混均匀,含量随水深从浅到深基本保持不变。只有B6、E2、E5样点的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 从水深1.5 m向下处含量有所波动。除E2点 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量相对上覆水较小外,其余各样点氮含量均表现为间隙水大于上覆水。

2.3 湖水、入湖河流氮素赋存情况

夏季降雨频繁,河流入湖量增大,作为湖泊与流域生态系统环境连接的重要纽带和通道,入湖河流水量、水质将直接影响湖泊整体水质情况。研究结果显示(图3),达里湖7、8、9月份湖水TN均值 $4.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,8月份TN达到最高,含量为 $4.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。河流TN均值 $1.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,仅占湖水TN的39%。其中沙里河

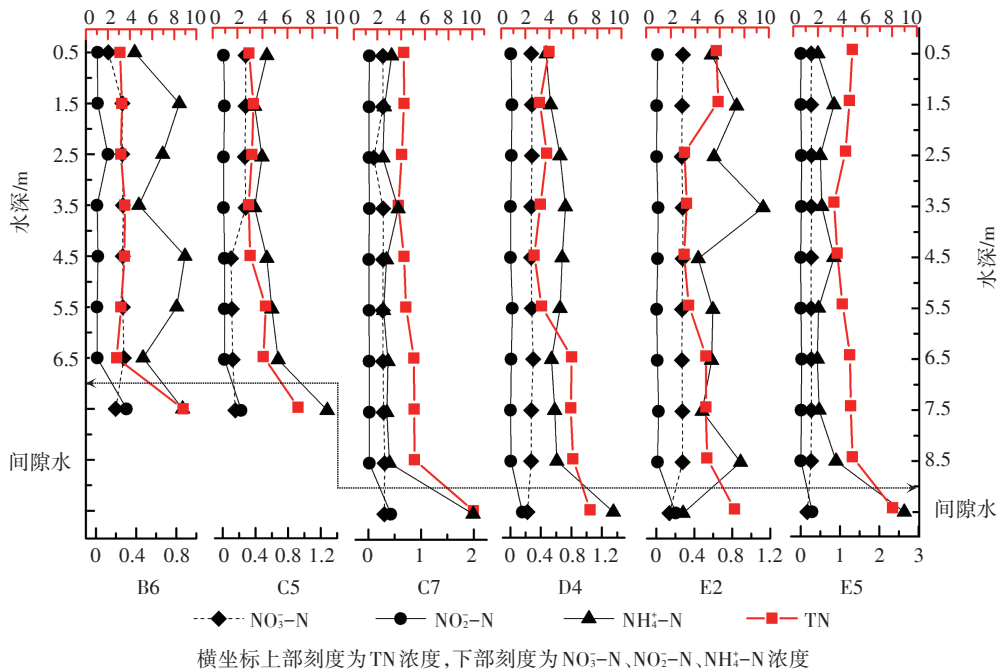


图2 达里湖氮素垂向分布图($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
Figure 2 Vertical distribution of nitrogen in Dali-Nor Lake($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

是TN含量最高的河流,均值为 $2.91 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次是亮子河 $1.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,贡格尔河 $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,耗来河TN最低,仅有 $0.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据氮素河道入湖通量算法:氮素输入量等于河道平均TN浓度与入湖水量乘积^[13]。达里湖入湖河流对湖水的年河流补给量为0.56亿 m^3 ,计算得出每年由入湖河流携带入湖的TN量为120 t。

NO_3^- -N是湖水氮素主要赋存形态之一,达里湖上覆水 NO_3^- -N均值为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,7、8、9月份浓度无明显差异。河流 NO_3^- -N均值 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是湖水 NO_3^- -N含量的2倍,其中亮子河 NO_3^- -N含量最高,达到 $1.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;贡格尔河 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,是 NO_3^- -N含量最低的河流;沙里河和耗来河 NO_3^- -N含量分别为 $0.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;湖水 NH_4^+ -N均值为 $1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,8月份最高达到 $1.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,9月份下降到 $0.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。河

流 NH_4^+ -N均值 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,仅达到湖 NH_4^+ -N含量的31%。沙里河 NH_4^+ -N含量最高,达到 $0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其次为亮子河 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,贡格尔河和耗来河 NH_4^+ -N均为 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; NO_2^- -N在湖水和河水中的含量均值均为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,含量甚微。

3 讨论

湖泊中氮素的输入方式主要有三种:地表径流、地下水、降雨等补给水源流入时携带输入;人为排放污染物的输入以及湖泊内水生生物的生物固氮作用。由于封闭性内陆湖湖水常年无外泄,外源氮素输入到湖泊后,通过沉降作用在沉积物中大量富集,沉积物中的氮素又通过风浪扰动、生物作用以及间隙水形成的浓度梯度再次释放到湖水中。外加气候干旱等因

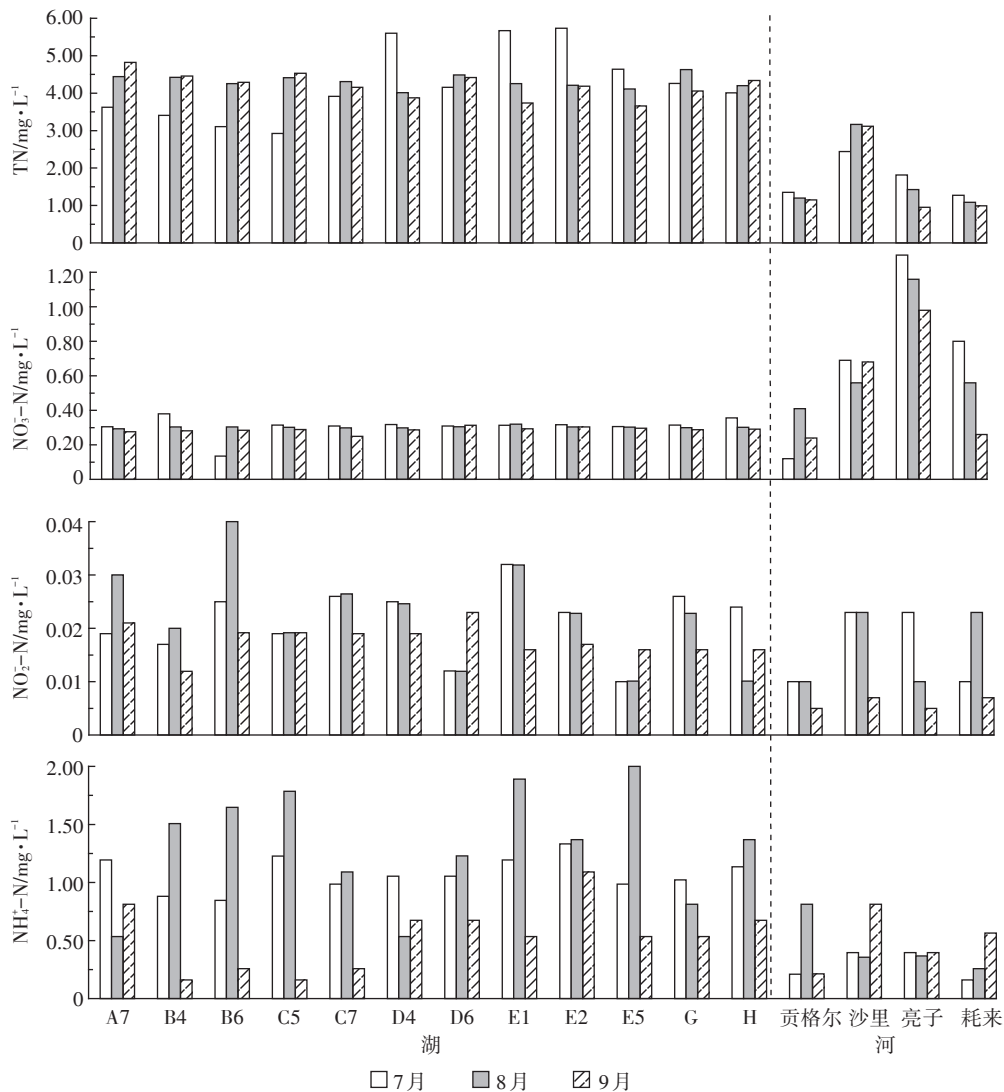


图3 7、8、9月份达里湖及入湖河流氮含量

Figure 3 The amount of nitrogen in the river and Dali-Nor Lake in July, August, September

素的影响,湖泊储水量逐渐减少,导致湖水中的氮素含量逐渐浓缩。达里湖湖区年平均降水量 396.1 mm,年蒸发量 1 287.3 mm,蒸发趋势明显,湖水 TN 含量已浓缩致 $4.26 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,超过国家地表 V 类水标准的 2 倍之多。并且湖水 TN、 NH_4^+-N 含量均在 8 月份达到最高值,这主要由人为影响所致。根据达里诺尔国家自然保护区的统计结果显示,每年 8 月份南北岸景区旅游人数达到全年最高。两岸游船和频繁的人类活动使得过量营养盐输入到湖水中,导致湖水 TN 含量增加。氮素的增加会直接影响到湖水中浮游藻类的赋存情况:在大多数湖泊中,浮游藻类生物量与水体营养盐浓度变化趋势一致,随着水体中氮浓度升高,无论体系中是否有沉水植物存在,都会导致浮游藻类和附着藻类增加^[13]。根据前人研究结果显示,8 月份是达里湖浮游植物生物量与丰度最高的月份,尤其是作为富营养化湖泊浮游植物优势种的蓝藻,其比例增加了 54.35%^[14]。湖水中大量的藻类一方面通过分泌具有生物毒性的物质,对水体造成污染^[15],另一方面也会加剧湖泊出现藻类水华的风险。因此,应对此现象予以重视,避免达里湖 8 月份出现蓝藻水华的风险。频繁的人类活动使得过量的营养盐输入到湖泊中,导致湖泊内浮游植物量升高。而生物量的增加会促进生物固氮作用的发生,大气中的分子态氮通过生物作用转化为湖泊所需的氮化物,被动植物吸收利用后代谢分解生成 NH_3 ,而后转变为 NH_4^+-N ,这便是 NH_4^+-N 同样在 8 月份含量升高的主要原因。湖水中丰富的 NH_4^+-N 一部分作为湖泊初级生产力直接利用的氮源,另一部分在溶解氧充足的条件下发生硝化反应生成 NO_3^--N ,最终以有机态形式进入沉积物被保存起来。

根据氮素在不同深度水层赋存情况研究结果显示,TN、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 在湖泊不同深度掺混均匀,含量随水深从浅到深基本保持不变。只有 B6、E2、E5 样点的 NH_4^+-N 在水深 1.5 m 向下处含量有所波动。这是由于达里湖水温在水深 1.5 m 处存在温度突变^[16],垂向上的温度变化会影响湖泊内硝化细菌的垂向分布^[17], NH_4^+-N 作为硝化反应的原料,其浓度同样会受到影响。

间隙水作为沉积物氮素释放的重要平台,其氮素含量直接影响着上覆水氮浓度和沉积物-水界面氮交换过程^[18]。尤其在夏季,沉积物温度升高,生物活性增强,促使冬季滞留在沉积物中的氮大量释放^[19]。本次研究结果显示 12 个样点间隙水 TN、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 含量在上覆水、间隙水、沉积物中有明显的浓度差,说

明达里湖存在氮素内源释放的可能性。其中 NO_2^--N 在间隙水和上覆水含量差异最为明显。这是由于 NO_2^--N 主要来自于硝化反应时 NH_4^+-N 氧化成 NO_3^--N 的中间产物,沉积物表面有大量硝化细菌,是湖泊中硝化反应发生最主要和最强烈的地方^[20],使大量的 NO_2^--N 进入到间隙水中。但因 NO_2^--N 本身不稳定且易转化成其他形态氮,在向上覆水释放的过程中会发生氮形态的转化,导致上覆水 NO_2^--N 明显低于间隙水;相反的,达里湖间隙水 NH_4^+-N 质量浓度略低于上覆水,因此, NH_4^+-N 在水-沉积物界面以吸附状态为主。

由于达里湖湖水无外泄,输入到湖泊中的氮素日益累积在湖底沉积物中,使得表层沉积物 TN 均值已达到 $2\ 809.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据加拿大安大略省环境和能源部按生态毒性效应指定的沉积物质量评价指南评估^[7],达里湖沉积物 TN 已高出 $550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的最低级别生态毒性效应标准值,对底栖生物及生态环境构成了威胁。根据其他学者研究结果可知,封闭性内陆湖岱海沉积物 TN 含量为 $1640 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21],我国最大的内陆高原咸水湖青海湖沉积物 TN 含量为 $1740 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[20]。相比之下,达里湖沉积物 TN 已处于偏高水平。沉积物可交换态氮(NO_2^--N 、 NO_3^--N 和 NH_4^+-N)是水-沉积物界面发生迁移转化最主要最活跃的形态氮,但因 NO_2^--N 不稳定且易转化为其他形态氮,所以本文以 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 之和来计算可交换态氮值。达里湖表层沉积物可交换态氮占 TN 含量 6.74%。同样在蒙新高原湖区的岱海和呼伦湖沉积物可交换态氮占 TN 的百分比分别为 1.0% 和 4.3%^[22]。对比可知,达里湖沉积物可交换态氮占 TN 比份相对较高,沉积物氮素迁移能力较强。

本次研究结果显示,四条入湖河流 TN 均值只占湖水 TN 含量的 39%,而 NO_3^--N 含量却是湖水的 2 倍。从三个方面对该现象进行解释:首先,由于内陆湖泊补给水量较小,水力停留时间长,蒸发作用明显,使得湖水逐渐浓缩,相比之下河流水体始终处于流动更换的状态,这是导致湖水与河水 TN 含量相差较大的原因之一;其次,径流中的氮素主要与区域环境及土地利用类型有着密切的关系,达里湖周围主要以自然形成的流域景观为主,无大型工农业基地。湖泊北岸与东岸分别与锡林郭勒草原和贡格尔草原相邻,畜牧业是该地区的主要经济支撑。在放牧过程中,家畜通过采食、践踏和排泄粪便等影响草地土壤状况和营养状态。有关研究表明,随着放牧强度的增加,表层土壤有机质和 TN 含量会明显减少,TN 矿化率升高,导致

土壤中 NO_3^- -N逐渐累积^[23]。在自然土壤系统发生的浸溶作用下,使得进入径流的氮形态与该区域土地的氮素赋存特征趋于一致性。所以 NO_3^- -N便成为入湖河流的主导形态氮;最后,因夏季湖泊内生物量丰富, NO_3^- -N作为最易被生物获取的氮形态,被湖泊内的生物大量消耗,使得湖水 NO_3^- -N含量较低。

总体来看,作为封闭性内陆湖泊的达里湖,其氮素赋存特征为:上覆水TN含量高, NH_4^+ -N是上覆水的主导形态氮,TN及各形态氮含量在不同深度水层掺混均匀,无明显的分层现象。沉积物TN含量较高且氮素迁移能力较强。 TN 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N表现为由沉积物到上覆水的释放状态,而 NH_4^+ -N则以上覆水到沉积物的吸附状态为主。河流的输入对湖水TN含量有稀释作用,但会增加湖水 NO_3^- -N的负荷。

4 结论

(1) NH_4^+ -N是湖水中占比例最高的形态氮。 TN 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N在湖泊内掺混均匀,含量随水深从浅到深基本保持不变。只有B6、E2、E5样点的 NH_4^+ -N在水深1.5 m向下处含量有所波动;达里湖间隙水TN含量高于底层水,该情况会导致TN发生由高浓度向低浓度进行的分子扩散现象,外加沉积物中TN累积丰富,因此TN表现的內源释放状态明显; NO_3^- -N和 NO_2^- -N同样表现为释放状态,而 NH_4^+ -N则以上覆水到沉积物的吸附状态为主。表层沉积物中可交换态氮占TN比例6.74%,沉积物氮素迁移能力较强。

(2)河水中占比例最高的形态氮是 NO_3^- -N,四条入湖河流中,TN、 NH_4^+ -N含量最高的是沙里河, NO_3^- -N含量最高的是亮子河;河流TN均值占湖水TN含量的39%, NO_3^- -N却是湖水的2倍。河流的输入对湖水TN含量有稀释作用,但会增加湖水 NO_3^- -N的负荷。

(3)作为封闭性内陆湖泊的达里湖,其氮素赋存特征为:上覆水TN含量高, NH_4^+ -N是上覆水的主导形态氮,TN及各形态氮含量在不同深度水层掺混均匀,无明显的分层现象。沉积物TN含量较高且氮素迁移能力较强。 TN 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N表现为由沉积物到上覆水的释放状态,而 NH_4^+ -N则以上覆水到沉积物的吸附状态为主。

参考文献:

[1] Babu K N, Ouseph P, Padmalal D. Interstitial water-sediment geochemistry of N, P and Fe and its response to overlying waters of tropical estuaries: A case from the southwest coast of India[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 633-640.

[2] Berelson W M, Heggie D, Longmore A, et al. Benthic nutrient recycling in port Phillip Bay, Australia[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 1998, 46(6): 917-934.

[3] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, et al. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus, and carbon chemistry in a northern Hardwood ecosystem[J]. *Biogeochemistry*, 2001, 56(2): 215-238.

[4] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions[J]. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.

[5] James R T, Gardner W S, McCarthy M J, et al. Nitrogen dynamics in Lake Okeechobee: Forms, functions, and changes[J]. *Hydrobiologia*, 2011, 669(1): 199-212.

[6] Lange G J D. Distribution of exchangeable, fixed, organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal Plain, Eastern North Atlantic[J]. *Marine Geology*, 1992, 109(Suppl 1/2): 95-114.

[7] Persaud D, Jaagumagi R, Hayton A. Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario: Report[M]. Water Resources Branch, Ontario Ministry of the Environment, 1993(2): 494-495.

[8] Rose J, Vora N M, Caron D A. Effect of temperature and prey type on nutrient regeneration by an Antarctic bacterivorous protist[J]. *Microbial Ecology*, 2008, 56(1): 101-111.

[9] Shan L N, He Y F, Chen J, et al. Nitrogen surface runoff losses from a Chinese cabbage field under different nitrogen treatments in the Taihu Lake Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 255-263.

[10] 赵胜男, 史小红, 崔英, 等. 内蒙古达里诺尔湖湖泊水体与入湖河水水化学特征及控制因素[J]. *环境化学*, 2016, 35(9): 1865-1875.

ZHAO Sheng-nan, SHI Xiao-hong, CUI Ying, et al. Hydrochemical properties and controlling factors of the Dali Lake and its inflow river water in Inner Mongolia[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, 35(9): 1865-1875.

[11] 董生旺. 达里诺尔湖碳、氮、磷环境地球化学研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.

DONG Sheng-wang. Environmental geochemical characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in Dalinor Lake[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2009.

[12] 甄志磊, 李畅游, 李文宝, 等. 内蒙古达里诺尔湖流域地表水和地下水环境同位素特征及补给关系[J]. *湖泊科学*, 2014, 26(6): 916-922.

ZHEN Zhi-lei, LI Chang-you, LI Wen-bao, et al. Characteristics of environmental isotopes of surface water and groundwater and their recharge relationships in Lake Dali Basin[J]. *Journal of Lake Science*, 2014, 26(6): 916-922.

[13] 宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(2): 125-130.

SONG Yu-zhi, QIN Bo-qiang, GAO Guang. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19

- (2):125-130.
- [14] 徐琼,贾克力,李文宝,等. 达里诺尔湖夏季浮游植物群落结构及分布特征[J]. 水生生态学杂志, 2016, 37(6):14-22.
- XU Qiong, JIA Ke-li, LI Wen-bao, et al. Characteristics of the summer phytoplankton community structure in Dalinor Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, 37(6):14-22.
- [15] 曾巾,杨柳燕,肖琳,等. 湖泊氮素生物地球化学循环及微生物的作用[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4):382-389.
- ZENG Jin, YANG Liu-yan, XIAO Lin, et al. Biogeochemical cycling of nitrogen in lakes and the role of microorganisms in conversion of nitrogen compounds[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2007, 19(4):382-389.
- [16] 刘志娇. 达里诺尔湖水动力条件试验及氢氧稳定同位素研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
- LIU Zhi-jiao. Tests of hydrodynamics and hydrogen and oxygen stable isotopes in Lake Dalinor[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015.
- [17] 李辉,潘学军,史丽琼,等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展[J]. 环境化学, 2011, 30(1):281-292.
- LI Hui, PAN Xue-jun, SHI Li-qiong, et al. Research progress on the analytical methods and characteristic of endogeneous nitrogen and phosphorus pollution in Lakes[J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(1):281-292.
- [18] 金赞芳,龚嘉临,施伊丽,等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1423-1430.
- JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, et al. Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface[J]. *Environment Science*, 2017, 38(4):1423-1430.
- [19] 王一茹,王圣瑞,焦立新,等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, 38(6):2336-2344.
- WANG Yi-ru, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, et al. Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6):2336-2344.
- [20] 陈学民,朱阳春,伏小勇,等. 青海湖表层沉积物营养元素分布特征及相关性分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2):395-401.
- CHEN Xue-min, ZHU Yang-chun, FU Xiao-yong, et al. Investigation of eutrophic elements distribution and their correlation in Qinghai Lake surface sediments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2):395-401.
- [21] 吕昌伟,何江,高兴东,等. 岱海表层沉积物中氮素的水平分布及环境意义[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):307-310.
- LU Chang-wei, HE Jiang, GAO Xing-dong, et al. Spatial distribution of nitrogen in surface sediments of Daihai Lake and its environmental significance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):307-310.
- [22] 侯兆洁. 内蒙古高原典型湖泊氮的地球化学特征[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2013.
- HOU Zhao-jie. The study on the geochemical cristics of nitrogen in four typical lakes of Inner Mongolia Plateau, China[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2013.
- [23] 闫钟清,齐玉春,董云社,等. 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制[J]. 草业学报, 2014, 23(6):279-292.
- YAN Zhong-qing, QI Yu-chun, DONG Yun-she, et al. Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities[J]. *Acta Prataculurae Sinica*, 2014, 23(6):279-292.