DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2017.04.2016072803
王晓云,于玲红, 王非,等.包头南海子湿地冰封期污染物迁移特征分析[J].环境化学,2017,36(4):867-874.
WANG Xiaoyun, YU Linghong, WANG Fei, et al. Analysis on the characterristics of contaminant migration in period of ice sealed in Baotou Nanhaizi[J].Environmental Chemistry,2017,36(4):867-874.

包头南海子湿地冰封期污染物迁移特征分析*

王晓云[1] 于玲红[1] 王 非[1] 樊爱萍[2] 鲁 海[3] 李卫平[1**]

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 包头, 014010; 2. 包头市生态湿地保护管理中心, 包头, 014010;
3. 包头黄河国家湿地公园管理处, 包头, 014010)

摘 要 为研究寒旱区湿地包头南海子冰封期的污染物迁移特征,于 2015 年 11 月—2016 年 1 月冰封期每月中旬在冰冻的湖面上破冰钻孔采集冰样和冰下水样,对样品的 pH、溶解氧(DO)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO_3-N)、亚硝态氮(NO_2-N)、氨氮(NH_3-N)、溶解性磷(DP)、化学需氧量(COD_{Cr})、叶绿素 a(Chl(a))等指标进行检测,分析各项污染物指标在冰体和水体中的浓度特征及迁移规律,并对 TN、TP、Chl(a)进行 Pearson 相关分析.结果表明,湿地水体在结冰过程中,污染物由冰体向水体迁移,迁移率 Chl(a)>TN>COD_{Cr}>TP;冰封期水体中各形态氮分布差异较大,而磷元素的赋存均以不溶性磷为主;通过分析湿地冰封期 TN、TP、Chl(a)的相关性,得出三者在冰体中的相关性较水体显著;与非冰封期相比,冰封期水体中污染物的含量均高于非冰封期水体中的污染物含量,过长的冰封期使湿地有机污染趋势加重.

关键词 南海子湿地, 冰封期, 污染物迁移, 相关性分析.

Analysis on the characterristics of contaminant migration in period of ice sealed in Baotou Nanhaizi

WANG Xiaoyun[1] *YU Linghong*[1] *WANG Fei*[1] *FAN Aiping*[2] *LU Hai*[3] *LI Weiping*[1**]

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and technology, Baotou, 014010, China;
2. Baotou Ecological Wetland Conservation and Management Center, Baotou, 014010, China;
3. Baotou Yellow River National Wetland Park, Baotou, 014010, China)

Abstract: In order to investigate the contaminant migration of Baotou Nanhaizi wetland in cold and arid regions, samples of ice and the water under the ice were collected on the frozen lake by drilling the hole in the ice at middle of each month from November 2015 to January 2016. The samples were easted for pH, dissolved oxygen (DO), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen(NO_3-N), nitrite nitrogen (NO_2-N), ammonia nitrogen(NH_3-N), dissolved phosphorus (DP), chemical oxygen demand (COD_{Cr}), chlorophylla (Chl(a)), etc., were analyzed. The concentration characteristics and migration pattern of every index in water and ice were analyzed. Pearson correlation analysis was also performed for TN, TP and Chl(a).The results showed that the contaminant in the lake migrated from ice to water while the water was freezing, the migration efficiency was Chl(a)>TN>COD_{Cr}>TP; the distribution of different forms of nitrogen changed

2016 年 7 月 28 日收稿(Received:July 28,2016).
* 内蒙古包头黄河湿地生态系统国家定位观测研究站运行补助(2015-LYPT-DW-037)和国家自然科学基金(41263010)资助.
Supported by State Locating Observation Station of Wetland Ecosystem in the City of Baotou, Inner Mongolia Region(2015-LYPT-DW-037) and the National Natural Science Foundation of China(41263010).
* * **通讯联系人**,Tel:18604720301,E-mail:sjlwp@163.com
Corresponding author,Tel:18604720301,E-mail:sjlwp@163.com

obviously during the frozen period, but the occurrence of phosphorus was mainly the insoluble form. The correlation between TN, TP and Chl(a) in ice was more remarkable than in water, and the contents of the pollutants in the frozen water were higher than that in the non-ice period. The organic contamination of wetland would become more serious if the frozen period is too long.

Keywords: Nanhaizi wetland, period of ice sealed, contaminant transport, correlation analysis.

湿地是最富生物多样性生态景观和人类最重要的生存环境之一[1-4].包头黄河湿地位于我国干旱半干旱地区,它在调节气候、涵养水分、碳氮循环以及生物多样性保护等方面均有不可替代的作用[5-6].南海子湿地是包头黄河湿地的重要部分,其特殊的地理位置、气候特征和水文地质条件,使其成为高纬度、寒旱区独特的河流湿地生态系统[7],在生态保护上具有极高的价值[8-11].目前,国内对西北干旱区湿地的研究,主要集中在湿地类型、湿地生态系统形成与演化、湿地生态系统服务功能及价值评估等.而对冰封期湿地水体的水环境特征分析较少.包头南海子湿地冰封时间长,其污染特征也有别于其他湖泊湿地[12].湿地冰封期是一种典型而复杂的封闭式生态系统,冰盖的阻隔使水体水质特征、流速结构等发生改变,从而使污染物的迁移分布特征发生变化.

包头南海子湿地每年 11 月份开始结冻,水面形成冰盖,进入冰封期[13-14],本文通过采集南海子湿地冰封期冰样和水样,对其 pH、溶解氧、总氮、总磷、硝态氮、亚硝态氮、氨氮、溶解性磷、化学需氧量、叶绿素 a 等指标进行检测分析,对湿地冰封期污染物的迁移特征进行研究,不仅可以为水体的污染程度提供参考依据,同时也能为水体治理提供明确的方向.

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 研究区概况

南海子湿地位于包头东河区南侧,是黄河改道南移后形成的水面和滩涂草地,是包头黄河湿地的重要组成部分.南海子是包头市唯一的天然湖泊,水域面积 180 hm^2,在蓄水防洪、调节气候、防止水土流失、保障包头市生态安全等方面发挥着重要作用[15].南海子地表水的主要来源为黄河水,其次为地下水和大气降水.近年来由于黄河水量减少、人口增多、城市污染和工农业的影响,湿地水体质量明显下降,水体呈绿色,可见度底,污染呈现加剧趋势,水生生物多样性降低,湿地面积持续萎缩,导致湿地生态服务功能退化问题日益突出.

1.2 样品的采集

根据南海子湿地的面积、水深、植物的分布特征,结合进出水及湿地功能分区等特点,对南海子湿地布设如图 1 所示的 6 个采样点.并于 2015 年 11 月—2016 年 1 月每月中旬在冰冻的湖面上破冰钻孔采集冰样和冰下水样共 36 个样品.采集冰样时,在破冰的过程中尽量保持冰块完整,收集冰块到 2000 mL 广口取样瓶中,带回实验室在室温条件下使冰完全融化后测定.用深水采样器采集冰面下的水样,收集在 1000 mL 的聚乙烯瓶中,带回实验室立即测定.

1.3 样品的分析方法

1.3.1 现场监测指标

现场使用便携式多参数水质分析仪对冰下水样的水温、溶解氧(DO)、电导率(EC)、盐度、溶解性总固体(TDS)、pH、氧化还原电位(ORP)进行检测.根据《冰封期水体采样与前处理规程(SL466—2009)》的要求,冰体送抵实验室后,置于温度为 20—25 ℃的房间中融冰,冰体在融化过程中始终保持盖紧取样瓶,减少有机物挥发和光降解所造成的损失,冰体完全融化后进行测定.

1.3.2 实验室测定指标及方法

实验室监测水质指标的测定方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》具体分析方法如表 1 所示.

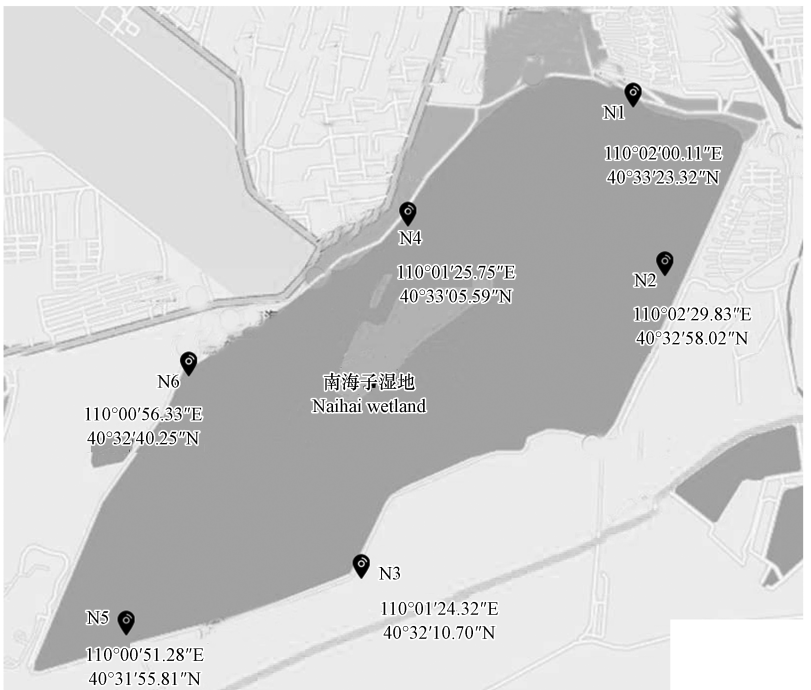

图 1　研究区监测点位示意图

Fig.1　Sampling sites in Nanhaizi wetland

表 1　相关水质指标的测定方法

Table 1　Methds for the determination of water quality indicators

水质指标 Water quality indicators	测定方法 Determination methd	水质指标 Water quality indicators	测定方法 Determination methd
总氮(TN)	碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法	氨氮	纳氏试剂分光光度法
硝态氮	紫外分光光度法	亚硝态氮	N-(1 萘基)-乙二胺光度法
总磷(TP)	过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法	溶解性磷(DP)	过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法
叶绿素 a	丙酮提取法	化学需氧量(COD_{Cr})	重铬酸钾法

2　结果与讨论(Results and discussion)

2.1　南海子湿地冰封期理化指标特征分析

湿地水体的理化指标对湿地生态系统产生至关重要的影响,是生命活动的基础,湿地因其形态、气候、水文背景的不同,理化指标特征差别很大[16].通过对南海子湿地水体和冰体理化指标的测定,将监测期间的数据取平均值进行分析,如图 2 所示.发现南海子中的溶解氧、氧化还原电位、盐度和溶解性总固体在水体中的含量均大于冰体.南海子湿地冰封期水体与冰体 pH 对比图如图 3 所示.

从图 2 和图 3 可以看出,南海子水体中溶解氧、氧化还原电位、盐度和溶解性总固体的含量均大于冰体,说明 TDS、DO、ORP、盐度在结冰过程中由冰体向水体迁移;而冰体的 pH 值高于水体,是由于结冰过程中 H^+由冰体向水体迁移.

2.2　南海子湿地冰封期营养盐的分布特征

营养盐是构成水体初级生产力和食物链最重要的生源要素,也是湖泊湿地富营养化的限制因子[17-18],在湖泊湿地环境质量变化和生命过程演替中占有重要地位[19].

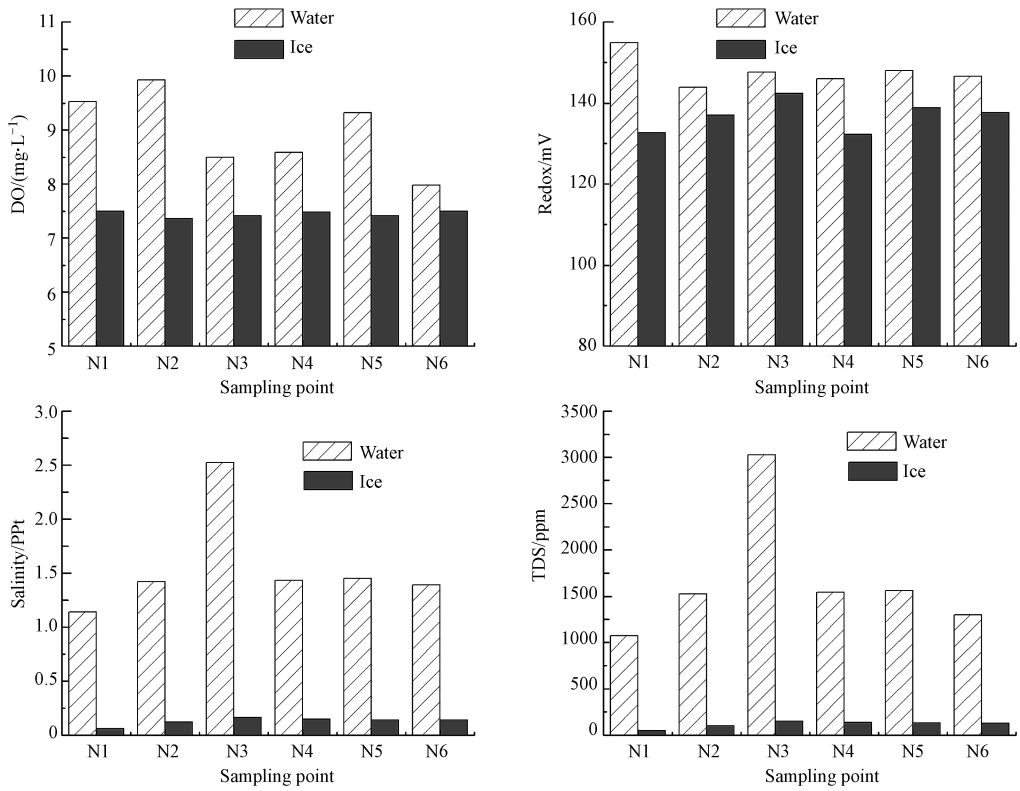

图 2 南海子湿地冰封期物理化学指标分布特征图

Fig.2 Distribution chart of physical and chemical index in Nanhaizi wetland

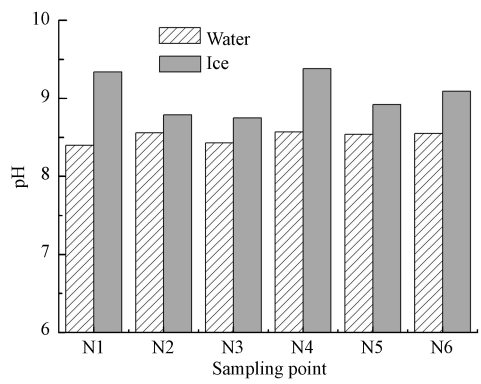

图 3 南海子湿地冰封期 pH 分布特征图

Fig.3 Distribution chart of pH in Nanhaizi wetland

2.2.1 南海子湿地冰封期氮元素的分布特征

通过对比南海子湿地 2015 年 12 月和 2016 年 1 月水体和冰体中的总氮及各形态氮含量如图 4 所示,水体中 TN 的含量在 3.90—6.10 mg·L^{-1},冰体中 TN 含量在 1.89—4.53 mg·L^{-1}.南海子湿地水体 TN 含量超过了《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中 V 类(TN≥2.00 mg·L^{-1})水质标准限值.从图 4 可以看出,南海子湿地水体中的硝态氮占总氮的百分比高于亚硝态氮占总氮的百分比,而冰体中的亚硝态氮含量占总氮的百分比大于硝态氮占总氮百分比.

主要是由于冰封期,虽然冰层下面的水体没有结冰,但是水温很低,浮游植物相对较少,对 NH_4^+ 的利用较低,使得氨氮的含量相对较高,而反硝化作用在<4 ℃时几乎停止,使得硝态氮和亚硝态氮的含量较低.另外冰封期水体中的溶解氧大于冰体,因此水体中的亚硝态氮易转化为硝态氮,而冰体中的亚硝态氮不易转化为硝态氮.

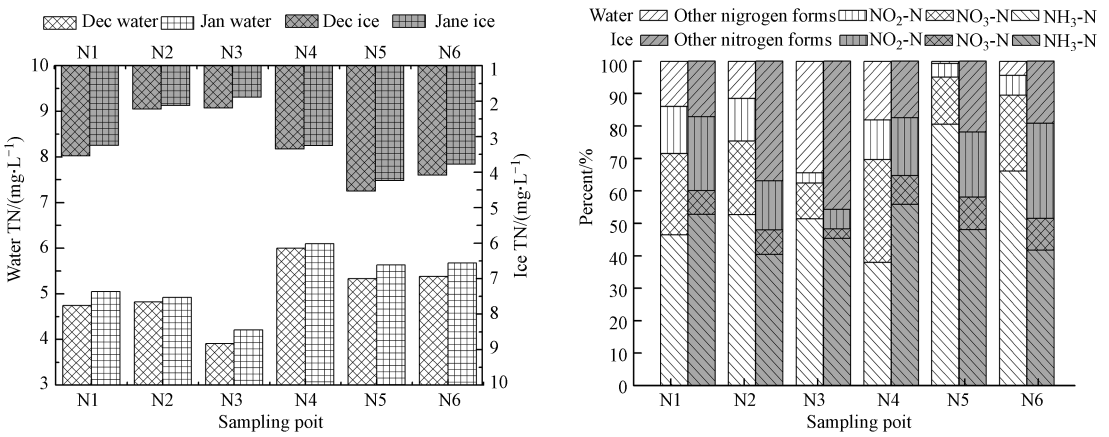

图 4　冰封期南海子湿地总氮及各形态氮在冰水两相中的含量百分比

Fig.4　The comparison of TN and different forms of nitrogen within ice and water in Nanhaizi wetland

2.2.2　南海子湿地冰封期磷元素的分布特征

通过对比南海子湿地 2015 年 12 月和 2016 年 1 月水体和冰体中的总磷含量及总磷和溶解性磷的含量对比如图 5 所示,水体中 TP 含量在 0.08—0.25 mg·L^{-1},冰体中 TP 含量在 0.05—0.17 mg·L^{-1}.南海子湿地水体 TP 含量较低.从图 5 中可以看出,12 月份水体中总磷含量均在 0.20 mg·L^{-1}以下,符合《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中 I 类标准,2016 年 1 月,水体中 TP 含量升高达到地表水 II 类标准.通过对比 TP 和 DP 的含量可知,湿地水体和冰体中的 DP 含量很低,因此南海子湿地中的磷的赋存形态以不溶性磷为主.主要是因为水中的溶解性磷易被植物和微生物吸收利用[20],而在水中发生理化反应生成的难溶性磷酸盐不易被降解.

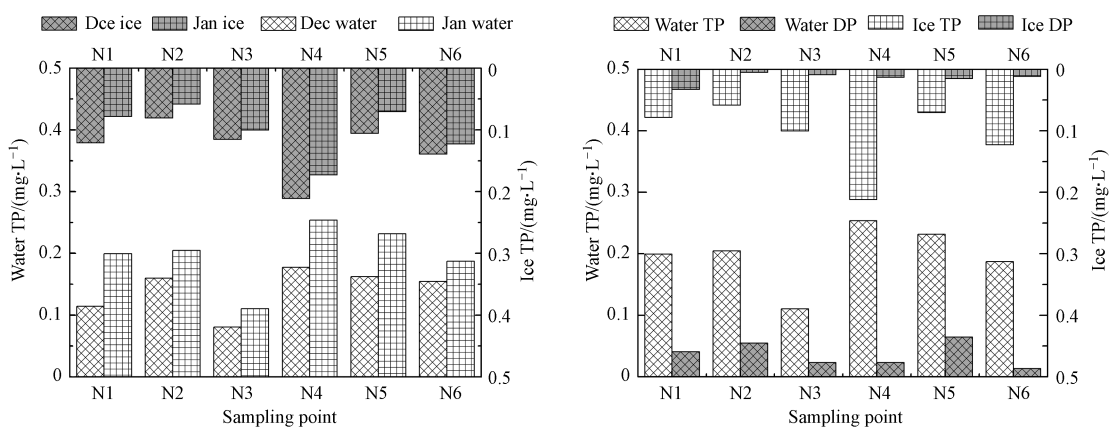

图 5　南海子湿地不同相态水中 TP 和 DP 含量对比图

Fig.5　The comparison of TP and DP within ice and water in Nanhaizi wetland

2.2.3　南海子湿地冰封期营养元素迁移特征分析

为探究南海子湿地冰封期营养元素的迁移特征,将课题组非冰封期 2015 年 4 月至 11 月的总氮、总磷监测结果平均值与冰封期总氮、总磷含量进行对比,如图 6 所示.

综上所述,冰封期水体中 TN、TP 浓度大于非冰封期,12 月至 1 月水体中 TN、TP 的含量升高,冰体中 TN、TP 的含量降低,并且南海子湿地在冰封期水体中总氮浓度是冰体中总氮浓度的 5.45—7.04 倍,水体中总磷浓度是冰体中总磷浓度的 2.08—2.97 倍,这就说明:在结冰过程中,冰体中的 N、P 元素由冰体向水体迁移,并且冰体对 N 的迁移效果要高于 P.在结冰过程中,水体表层温度骤冷,污染物的溶解度降低,使营养盐快速析出,从而增大了形成临界尺寸冰核的可能性,促进冰层的形成,这符合结晶学理论的原理.同时也与张岩等[20]运用固-液相平衡理论和热力学理论对乌梁素海结冰过程中的污染物特性的分析一致.由此可以看出,冰封期南海子湿地由于污染物的迁移,使水体污染呈现加剧趋势.

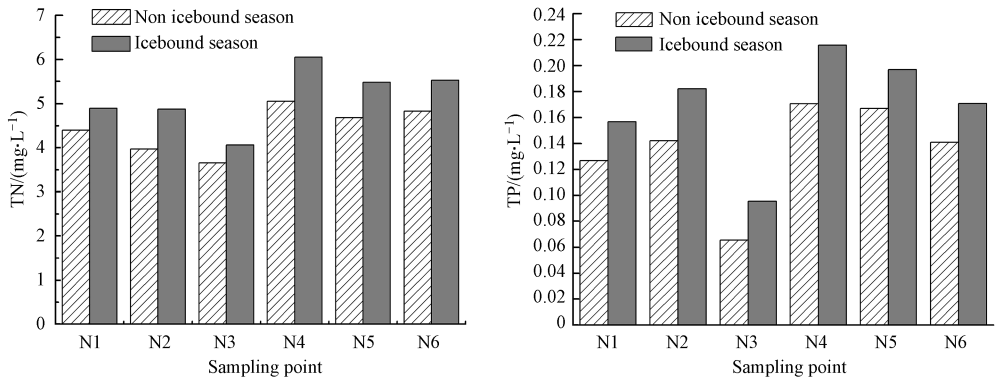

图 6 南海子湿地冰封期与非冰封期营养元素对比图

Fig.6 The comparison of frozen and non frozen period of nutrient in Nanhaizi wetland

2.3 南海子湿地冰封期有机物分布特征

2.3.1 化学需氧量的分布

南海子湿地冰封期化学需氧量在水体和冰体中的含量如图 7 所示.从图 7 中可以看出,各监测点化学需氧在水体和冰体中的变化趋势基本相同,水体中的化学需氧量在 117.64—187.5 mg·L^{-1}之间,冰体中的化学需氧量在 26.73—82.44 mg·L^{-1},水体中化学需氧量是冰体中化学需氧量的 1.67—4.40 倍.

2.3.2 叶绿素 a 的分布

南海子湿地冰封期叶绿素 a 在水体和冰体中的含量如图 8 所示.从图 8 可以看出,Chl(a)在水体和冰体中的变化趋势基本相同,Chl(a)在水体中的含量在 15.46—25.53 mg·m^{-3},冰体中 Chl(a)的含量在 0.95—2.12 mg·m^{-3},水体中 Chl(a)的含量是冰体的 8.80—16.90 倍.

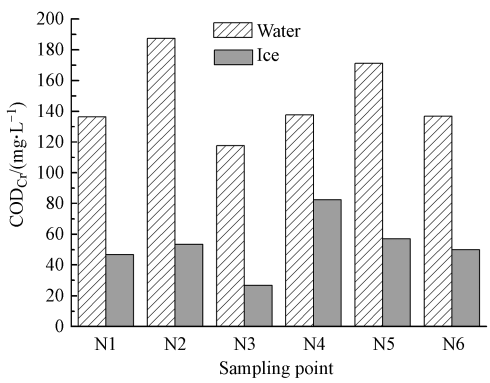

图 7 冰封期南海子湿地化学需氧量在冰水两相中的含量

Fig.7 The comparison of COD$_{Cr}$ within ice and water in Nanhaizi wetland

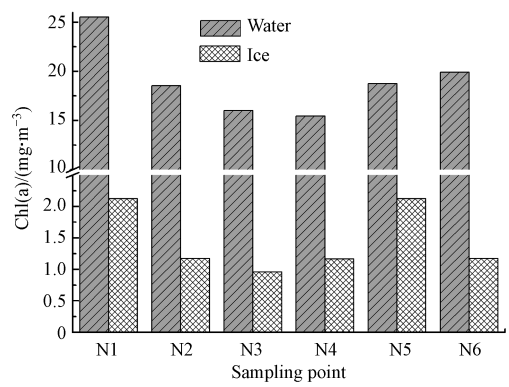

图 8 冰封期南海子湿地 Chl(a)在冰水两相中含量对比

Fig.8 The comparison of Chl(a) within ice and water in Nanhaizi wetland

通过对比冰封期和非冰封期湿地水体中的 COD$_{Cr}$和 Chl(a)的含量可知,冰封期 COD$_{Cr}$的浓度总体大于非冰封期,而 Chl(a)在冰封期与非冰封期的含量相差不大,但是冰封期时温度很低,水体中的藻类生长缓慢 Chl(a)的含量应该减少,说明湿地水体在结冰过程中,对 COD$_{Cr}$和 Chl(a)的迁移作用很强,因此冰体中的 COD$_{Cr}$和 Chl(a)很低.由于水体温度很低,使微生物活性降低,因此对有机污染物的降解速率很低,并且该时期水量较丰水期少很多,加剧了有机污染物的富集,根据地表水环境质量标准(GB3838—2002)可知地表水 V 类标准为 COD$_{Cr}$≤40 mg·L^{-1},而南海子湿地 COD$_{Cr}$超标 2.94—46.70 倍,故冰封期水体中的化学需氧量超标严重.

根据冰封期冰体与水体中污染物含量的对比可知 Chl(a)、TN、COD$_{Cr}$、TP 在水体中的含量是冰体中含量的 8.8—16.9 倍、5.54—7.14 倍、1.67—4.40 倍、2.08—2.97 倍,故迁移效果 Chl(a)>TN>COD$_{Cr}$>TP.

2.4　营养盐与叶绿素 a 的相关性分析

分别对冰封期水体和冰体中 TN、TP、Chl(a)采用 SPSS21.0 进行 Pearson 相关性分析,结果如表 2、表 3 所示.由此可知,南海子冰封期水体中 TN—TP 表现出显著相关性,冰体中 TN—TP—Chl(a)三者均表现出显著相关性.

表 2　南海子湿地冰封期水体指标相关性分析

Table 2　The correlection analysis of water index in Nanhaizi wetland

水体 Water	TN	TP	Chl(a)
TN	1	0.86**	0.16
TP		1	0.43
Chl(a)			1

注:**为极显著相关,*为显著相关.Note:** was the extremely significant correlation, * was the significant correlation.

表 3　南海子湿地冰封期冰体指标相关性分析

Table 3　The correlection analysis of ice index in Nanhaizi wetland

冰体 ice	TN	TP	Chl(a)
TN	1	0.94**	0.85**
TP		1	0.81**
Chl(a)			1

注:**为极显著相关,*为显著相关.Note:** was the extremely significant correlation, * was the significant correlation.

有上述相关性分析可知,南海子湿地在冰封期冰体中的 TN、TP、Chl(a)的相关性比水体中 TN、TP、Chl(a)的相关性显著.

3　结论(Conclusion)

(1)通过对比分析南海子湿地冰封期污染物在冰体和水体之间的浓度,可知冰封期各项污染物在水体中的含量均大于冰体,冰封期水体中污染物的含量大于非冰封期水体中的污染物含量,因此在结冰过程中污染物由冰体向冰下水体迁移,根据冰封期冰体与水体中污染物含量的对比可知 Chl(a)、TN、COD_{Cr}、TP 在水体中的含量是冰体中含量的 8.8—16.9 倍、5.54—7.14 倍、1.67—4.40 倍、2.08—2.97 倍,故迁移效果 Chl(a)>TN>COD_{Cr}>TP.

(2)南海子湿地冰封期水体与冰体中各形态氮的百分比差异较大,水体中硝态氮的百分比大于亚硝态氮的百分比,冰体中亚硝态氮的百分比大于硝态氮的百分比;湿地水体与冰体中的磷均以不溶性磷的形式存在.

(3)通过对比南海子湿地冰封期与非冰封期水体中污染物的含量,可知冰封期水体中的污染与含量高于非冰封期.由于温度很低,不易于有机污染物的降解,冰层的覆盖使有机污染物失去了挥发和光解的途径,而且冰封期水量少使有机物浓度相对升高.因此过长的冰封期导致南海子湿地有机污染加重.

(4)通过对南海子湿地在冰封期污染物进行相关性分析,得出冰体中 TN、TP、Chl(a)的相关性比水体中 TN、TP、Chl(a)的相关性显著.

参考文献(References)

[1]　缑倩倩,屈建军,王国华,等.中国干旱半干旱地区湿地研究进展[J].干旱区研究,2015,32(2):213-220.
GOU Q Q,QU J J,WANG G H,et al. Progress of wetland researches in arid and semi-arid regions in China[J].Arid Zone Research, 2015, 32(2): 213-220(in Chinese).

[2]　李静,孙虎,邢东兴,等.西北干旱半干旱区湿地特征与保护[J]. 中国沙漠,2003,23(6): 67-71.
LI J, SUN H, XING D X, et al. Characteristics of wetland and its conservation in arid and semi-arid areas in Northwest of China[J]. Journal of Desert Research, 2003,23(6): 67-71(in Chinese).

[3]　宋爽.冻融过程中乌梁素海湖泊水质变化特征研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学, 2015.
SONG S.The study on Wulansuhai Lake water quality variation characteristics in freezing and thawing process[D]. Hohhot:Inner Mongolia

Agricultural University, 2015(in Chinese).

[4] 孙广友.中国湿地科学的进展与展望[J]. 地球科学进展,2000,15(6):666-672.
GUN G Y. Deveiopment and prospect of wetland science in China[J].Advances In Earth Science, 15(6):666-672(in Chinese).

[5] KEITH J O. Insecticide contaminations in wetland habitats and their effects on fish- eating birds[J]. Journal of Applied Ecology, 1966, 3: 71-85.

[6] 王效科,欧阳志云,苗鸿.中国西北干旱地区湿地生态系统的形成、演变和保护对策[J].国土与自然资源研究,2003,(4):52-54.
WANG X K, OUYANG Z Y, MIAO H.Formation, evolution and protection of wetland ecosystems in arid region, northwestern China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2003,(4):52-54(in Chinese).

[7] 吕超.乌梁素海冰封期富营养化特征研究[D].包头:内蒙古科技大学,2013.
LU C.Research on icebound eutrophication's feature of Wuliangsuhai Lake[D].Baotou:Inner Mongolia University of Science & Technology, 2013(in Chinese).

[8] 胡素端.水库水质动态监测与评价研究[D].大连:大连理工大学,2015.
HU S D.Research on dynamic monitoring and assessment of water quality in reservoir[D].Dalian, Liaoning Province Dalian University of Technology,2015(in Chinese).

[9] 王志刚.北方河流冰封期水质特征及模拟方法研究[D].北京:清华大学,2013.
WANG Z G. Water quality characteristics and simulation methods of northern rivers during ice-covered periods[D]. Beijing: Tsinghua University,2013(in Chinese).

[10] 杨阳,张亦.我国湿地研究现状与进展[J].环境工程,2014,32(7):43-48,78.
YANG Y,ZHANG,Y. Progress and development of wetland in China[J].Environment Engineering, 2014,32(7):43-48,78(in Chinese).

[11] 胡启武,吴琴,刘影,等.湿地碳循环研究综述[J].生态环境学报,2009,18(6):2381-2386.
HU Q H,WU Q,LIU Y, et al. A review of carbon cycle in wetlands[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(6):2381-2386(in Chinese).

[12] 刘晓旭,李畅游,李文宝,等.冰封期达里诺尔湖同位素与营养盐分布特征及关系的定量分析[J].湖泊科学,2015,27(6): 1159-1167.
LIU X X,LI C Y,LI W B, et al. The distribution and relationship of isotope and nutrient during freeze-up period in the Lake Dalinuoer: A quantitative approach[J].Journal of Lake Sciences,2015,27(6):1159-1167(in Chinese).

[13] 智颖飙.包头南海子湿地水体环境季节性变化与生态功能货币化评价[J].干旱区资源与环境,2014,28(2):124-128.
ZHI Y B. An assessment for water environment and ecosystem functions-A case study for Nanhaizi Wetland of Baotou City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014,28(2):124-128(in Chinese).

[14] 李晶,马云,周浩,等. 扎龙湿地冰封期水环境特征初步研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(9): 128-130, 135.
LI J,MA Y,ZHOU H,et al. Reliminary studies on the characteristics of water environment of ice sealed[J].Environmental Science and Management, 2009, 34(9): 128-130, 135(in Chinese).

[15] 刘建龙.包头黄河湿地水质评价与需水量研究[D].包头:内蒙古科技大学,2015.
LIU J L.Water quality assessment and water demand analysis of the Yellow River wetland in Baotou[D]. Hohhot:Inner Mongolia University of Science & Technology,2015(in Chinese).

[16] 赵林林.太湖水体理化指标在夏季短时间尺度上的分层及其控制因素[J].湖泊科学, 2011, 23(4):649-656.
ZHAO L L. Stratification and its driving factors of water physicochemical variables in large, shallowLake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2011, 23(4):649-656(in Chinese).

[17] QIN B Q, GAO G, ZHU G W, et al. Lake eutrophication and its ecosystem response[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(9): 961-970.

[18] SMITH V H, SCHINDLER D W. Eutrophication science: Where do we go from here? [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2009, 24(4): 201-207.

[19] 吴丰昌,金相灿,张润宇,等.论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性[J].湖泊科学,2010, 22(1): 3-9.
WU F C, JIN X C,ZHANG R Y,et al.Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 3-9(in Chinese).

[20] 张岩.乌梁素海结冰过程中污染物迁移机理及其应用研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
ZHANG Y. Migration mechanism of pollutants and its application in Ulansuhai Lake in freezing process[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012(in Chinese).