

# 内蒙古自治区呼伦湖水质变化特征及其影响因素

梁丽娥, 李畅游, 孙标, 王静洁, 韩知明

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:** [目的] 对内蒙古呼伦湖水质变化特征及其影响因素进行分析, 为呼伦湖富营养化机理研究提供理论基础。[方法] 采用 2012—2014 年的水质监测数据, 对水体中 TN, TP 和叶绿素 a(Chla) 浓度的时空分布进行分析, 采用综合营养状态指数法对水质进行富营养化评价, 并对影响水质变化的因素进行探讨。[结果] 在时间上, Chla, TN, TP 浓度均表现为: 7, 8 月 > 9 月 > 1 月; 在空间上, TN 的浓度的范围为 1.70~2.31 mg/L, 均值为 1.94 mg/L。TP 的浓度的范围为 0.15~0.25 mg/L, 均值为 0.19 mg/L。呼伦湖水质已经达到地表水环境质量 IV, V 类水体标准, 是磷限制性湖泊。叶绿素 a 与总氮表现为: 西南、东北两端 > 中部, 总磷浓度除一个水质观测点较高外, 其他各观测点变化不大。呼伦湖水体夏季已经呈现中度富营养化水平, 而冬季和秋季呈轻度富营养化水平。[结论] 呼伦湖已经处于富营养化状态, 丰富的外源输入为非冰封期呼伦湖发生富营养化提供了一定的物质基础。

**关键词:** 时空分布; 综合营养状态指数法; 影响因素; 呼伦湖

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)02-0102-05

**中图分类号:** X820.2

**文献参数:** 梁丽娥, 李畅游, 孙标, 等. 内蒙古自治区呼伦湖水质变化特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 102-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.014; Liang Lie, Li Changyou, Sun Biao, et al. Impact Factors and Characteristics of Water Quality Variation of Hulun Lake in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2): 102-106. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.02.014

## Impact Factors and Characteristics of Water Quality Variation of Hulun Lake in Inner Mongolia Automous Region

LIANG Lie, LI Changyou, SUN Biao, WANG Jingjie, HAN Zhiming

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

**Abstract:** [Objective] The Characteristics of water quality variation and its impact factors were analyzed in Hulun Lake to provide theoretical basis for the eutrophication mechanism of Hulun Lake. [Method] Monitoring data from 2012—2014 were used to analyze the spatio-temporal distribution of chlorophyll a (Chla), TN and TP. Integrated nutritional status index method was use to evaluate the eutrophication of Hulun Lake and the main impact factors were discussed. [Results] Temporal concentrations of Chla, TN, TP ranked as: July, August > September > January, and the spatial concentrations of TN and TP ranges were 1.70~2.31, 0.15~0.25 mg/L, with their averaged values of 1.94 and 0.19 mg/L, respectively. The water quality of Hulun Lake belonged to levels IV to V according to the water standards of surface water, and the lake was phosphorus limited lake. The concentrations of Chla, TN at southeast, northwest corner were greater that at midle part. Except that one sampling point showed a little high concentration of TP, no obvious spatial variation was found for other points. The eutrophication of Hulun Lake was thought moderate in Summer, but light in Autumm and Winter. [Conclusions] The Hulun Lake has been in eutrophication, this is a result of rich exogenous inputs in non-frozen period.

**Keywords:** temporal and spatial distribution; integrated nutritional status index method; impact factors; Hulun Lake

收稿日期: 2016-07-18

修回日期: 2016-07-30

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZC13092)

第一作者: 梁丽娥(1989—), 女(汉族), 陕西省渭南市人, 博士研究生, 研究方向为水污染控制。E-mail: imaulle2008@163.com。

通讯作者: 李畅游(1955—), 男(汉族), 内蒙古自治区呼和浩特市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水污染控制研究。E-mail: nndlichangyou@163.com。

随着社会经济的发展和人口的剧增,生态系统发生了改变,江、河、湖、库等的富营养化问题日趋严重<sup>[1]</sup>。湖泊的富营养化是由于水体中营养物质的过量输入引起水生植物的大量繁殖,从而导致水质恶化等一系列问题。氮、磷是导致湖泊富营养化的重要的营养元素,对水生植物的生长具有重要的影响。氮、磷与藻类生物量之间的关系是研究湖泊富营养化的重要内容之一<sup>[2-3]</sup>。由于叶绿素 a 含量是表征藻类现存量的重要指标之一<sup>[4]</sup>,且藻类生物量与叶绿素 a 浓度之间存在密切关系<sup>[5]</sup>,因此,研究氮、磷营养盐的分布特征及其影响因素对于湖泊的富营养化控制具有重要的意义。呼伦湖属于内蒙古自治区的第一大湖泊,是中国北方的生态屏障,但在近几年来,由于气候变化和人类活动的影响,呼伦湖流域气候呈现暖干化,降水量减少,蒸发量增大,水位逐年下降,水域面积不断减小,湿地萎缩,致使周边生态环境和湖水水质严重恶化,湖水总含盐量和 pH 值逐年升高,渔业资源濒临枯竭和大量珍稀鸟类迁移<sup>[6-8]</sup>,水质呈现中度富营养化水平<sup>[9]</sup>。目前呼伦湖的生态环境已经遭到破坏,水质严重恶化,呈现出富营养化状态,湖泊水质状况以及富营养程度,与当年降雨及入河径流的水量状况关系密切,一般丰水年水质偏好,枯水年偏差。根据呼伦湖历年水文气象资料,2012—2014 年呼伦湖缓慢向丰水年过渡,在年内,1 月(冬季)为枯水期,7—8 月(夏季)为丰水期,9 月(秋季)雨量适中,为平水期,因此本研究采用 2012—2014 年 1,7,8,9 月(其中 2012 年只有 1,7,8 月水质数据)的水质观测数据,分析呼伦湖营养盐及叶绿素 a 时空分布特征,并对水质进行富营养化评价,对影响水质变化的因素进行探讨,旨在为呼伦湖的富营养化机理研究提供一定的理论基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

呼伦湖,又名达赉湖,是中国的第 5 大湖,水域辽阔,素有“草原明珠”的美誉<sup>[10]</sup>。属额尔古纳水系。地理坐标介于 116°58′—117°48′E,48°33′—49°20′N,位于新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和满洲里市之间。湖面呈不规则斜长方形,长轴为西南至东北方向。湖长 93 km,最大宽度为 41 km,平均宽度为 32 km,周长为 447 km。当湖水位在 545.33 m 时,湖水水面为 2 339 km<sup>2</sup>,平均水深为 5.7 m,最大水深 8 m,最大蓄水量为 1.39×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。呼伦湖的补给来源除大气降水和地下水外,主要来自发源于蒙古国东部的克鲁伦

河,以及连接贝尔湖和呼伦湖的乌尔逊河。湖东北部的新开河(达兰鄂罗木河)是一个吞吐性河流,海拉尔河水大时,顺该河流入呼伦湖,呼伦湖水大时又顺此河流向额尔古纳。呼伦湖地处半干旱区高纬度带,属中温带大陆性气候,冬季严寒漫长,春季干旱多风,夏季温凉短促,秋季降温急剧,多年平均气温为 -0.24 ℃,每年 7 月为最高,平均值 20.34 ℃。年均降水量为 228.6 mm,主要集中在 6—9 月,年均蒸发量为 1411mm,约为降水量的 6 倍。受大气环流及地形的影响,全年以西北风为主。

### 1.2 样品的采集及处理

根据对呼伦湖周围环境的实际勘察,最终选取具有代表性的 13 个取样点作为呼伦湖常年水质观测点(图 1),即 A<sub>10</sub>,B<sub>9</sub>,D<sub>7</sub>,D<sub>11</sub>,E<sub>8</sub>,F<sub>5</sub>,F<sub>9</sub>,G<sub>2</sub>,G<sub>8</sub>,H<sub>3</sub>,H<sub>3补</sub>,I<sub>2</sub>,I<sub>5</sub>。每次取样点位置采用 GPS 定位,现场用瑞士梅特勒多参数仪(SG8,SG9)测定水温、pH 值、溶解氧(DO)、电导率(EC)、盐度;透明度(SD)用自制塞氏盘测定。叶绿素 a(Chla)采用丙酮萃取分光光度计法测定,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,总磷(TP)采用钼锑抗分光光度法测定<sup>[11]</sup>。选取 2012—2014 年的 1,7,8,9 月(其中 2012 年只有 1,7,8 月)的实测数据进行分析。

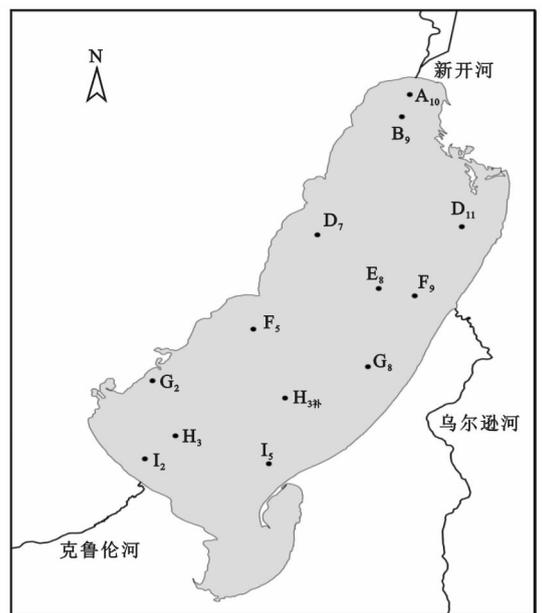


图 1 呼伦湖水水质监测点

### 1.3 富营养化评价方法

采用综合营养状态指数法对呼伦湖水体富营养化进行评价,该方法是以 Chla 作为基准参数计算的。取水质参数的相关权重,通过各水质参数的营养状态指数计算公式,最终加权平均求得水体的综合营养状态指数。计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI_j \quad (1)$$

式中:  $TLI(\Sigma)$ ——综合营养状态指数;  $W_j$ ——第  $j$  种参数的营养状态指数的相关权重;  $TLI_j$ ——第  $j$  种参数的营养状态指数。

各种营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\text{Chla}) = 10(2.5 + 1.086 \ln \text{Chla}) \quad (2)$$

$$TLI(\text{TP}) = 10(9.436 + 1.624 \ln \text{TP}) \quad (3)$$

$$TLI(\text{TN}) = 10(5.453 + 1.694 \ln \text{TN}) \quad (4)$$

$$TLI(\text{SD}) = 10(5.118 - 1.94 \ln \text{SD}) \quad (5)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) = 10(0.109 + 2.66 \ln \text{COD}_{\text{Mn}}) \quad (6)$$

式中:  $\text{Chla}$  单位为  $\text{mg}/\text{m}^3$ ;  $\text{SD}$  单位为  $\text{m}$ ; 其他指标单位为  $\text{mg}/\text{L}$ 。

$\text{Chla}$  作为基准参数, 则第  $j$  种参数归一化的相

关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2} \quad (7)$$

式中:  $r_{ij}$ ——第  $j$  种参数与  $\text{Chla}$  的相关系数;  $m$ ——评价参数的个数。本研究选取的水质参数为  $\text{Chla}$ ,  $\text{TP}$ ,  $\text{TN}$  和  $\text{SD}$ 。

表 1 中国湖泊(水库)部分参数与  $\text{Chla}$  的相关关系

参数	$\text{Chla}$	$\text{TP}$	$\text{TN}$	$\text{SD}$	$\text{COD}_{\text{Mn}}$
$r_{ij}$	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
$r_{ij}^2$	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9	0.688 9

评价结果采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊营养状态进行分级, 分级标准详见表 2。

表 2 富营养化程度评价标准

级别	贫营养	中营养	富营养		
			轻度富营养	中度富营养	重度富营养
$TLI_{\Sigma}$	<30	$30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$	$50 < TLI(\Sigma) \leq 60$	$60 < TLI(\Sigma) \leq 70$	>70

注: 在同一营养状态下, 指数值越高, 其营养程度越重。

## 2 结果与讨论

### 2.1 营养盐变化特征分析

2.1.1 水体中营养盐浓度随时间的变化 对呼伦湖水体中  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度随时间变化特征进行分析, 取各月份的浓度均值(图 2)。结果表明,  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度总体表现为 7, 8 月较高, 9 月次之, 1 月最低, 其原因主要为: 湖周围以放牧为主, 牛羊产生的大量的粪便, 7, 8 月降雨较频繁, 这些粪便会随地表径流入湖; 同时呼伦湖属于浅水湖泊, 7, 8 月湖泊水体的水动力条件活跃, 水体温度较高, 在水动力条件下有利于湖底底泥营养物质的释放, 综上因素导致 7, 8 月  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  的含量较高。1 月气候较寒冷, 且湖面处于冰封状态, 内源释放和外源汇入都比较薄弱, 水体在自净能力作用下, 营养物质浓度降低。

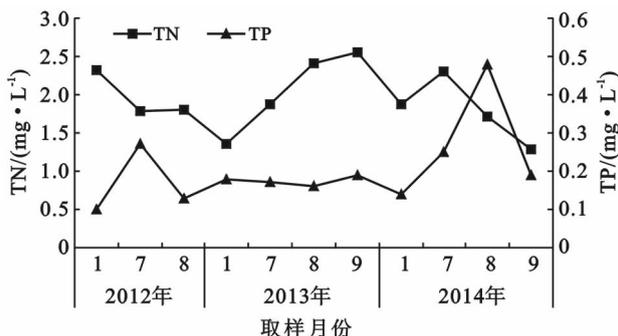


图 2 呼伦湖水体  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度随时间变化

2.1.2 水体中  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度的空间变化 各取样点的  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度在时间上取平均值, 得到  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度的空间分布(图 3)。从图 3 可以看出,  $\text{TN}$  的浓度的范围为 1.70~2.31  $\text{mg}/\text{L}$ , 均值为 1.94  $\text{mg}/\text{L}$ 。  $\text{TP}$  的浓度的范围为 0.15~0.25  $\text{mg}/\text{L}$ , 均值为 0.19  $\text{mg}/\text{L}$ 。根据《地表水环境质量标准(GB3838-2002)》呼伦湖水质已经达到地表水环境质量 IV, V 类水体标准。  $\text{TN}$  浓度的空间分布规律为: 总体上, 湖的西南、东北两端  $\text{TN}$  值较高, 而湖的中部  $\text{TN}$  浓度相对较低, 其中  $A_{10}$ ,  $D_7$ ,  $F_9$ ,  $G_2$  各采样点的  $\text{TN}$  浓度要比其他点高, 而这些点位于湖周边或入湖河口处, 即湖周边及入湖河口处  $\text{TN}$  浓度要高于湖心区。  $\text{TP}$  浓度的空间分布特征基本一致, 没有表现出显著差异性。只有在  $E_8$  点的浓度最高, 其值为 0.25  $\text{mg}/\text{L}$ , 达到了地表水环境质量 V 类水体标准。

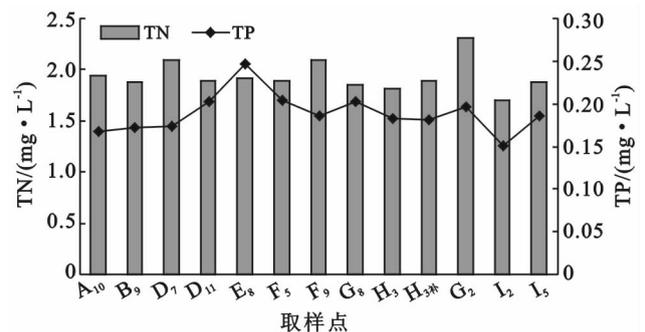


图 3 呼伦湖各采样点  $\text{TN}$ ,  $\text{TP}$  浓度空间变化

## 2.2 叶绿素 a 的时空分布

2.2.1 呼伦湖水体中 Chla 的时间变化 湖水体中 Chla 随时间变化规律(图 4)为,在年际上,除 2014 年 7 月外,叶绿素 a 的浓度变化比较平稳;在年内,与 TN,TP 浓度变化规律一致,即 7,8 月 Chla 浓度较高,9 月次之,1 月的 Chla 浓度最低,最高值出现在 2014 年 7 月,均值为 39.52 mg/m<sup>3</sup>;最低值出现在 2012 年 1 月,均值为 1.93 mg/m<sup>3</sup>。Chla 用来表征藻类的生物量,7,8 月,湖水的温度升高,光照充足,藻类可以从水体中汲取大量营养物质,利于藻类大量繁殖;而冬季比寒冷,水温降低,藻类处于休眠期,故 Chla 在 7,8 月出现较高值,1 月出现最低值。

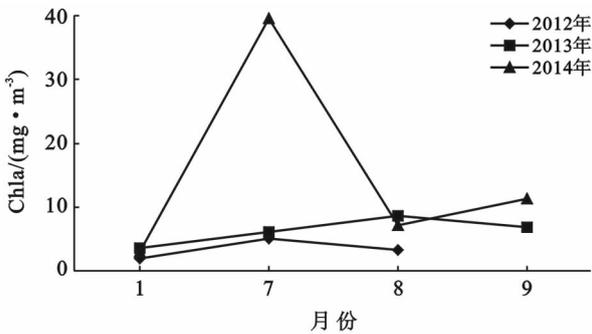


图 4 呼伦湖 Chla 浓度随时间变化

2.2.2 呼伦湖水体中 Chla 的空间变化 对各采样点 Chla 浓度取平均值,得到 Chla 浓度的空间分布(图 5)。从图 5 可以看出,Chla 浓度的范围为 4.66~16.39 mg/m<sup>3</sup>,均值为 8.37 mg/m<sup>3</sup>。其空间变化规律为,湖的南北两端 Chla 值较高,而湖的中部 Chla 浓度相对较低,与总氮的分布规律一致,图 6 中的直线为均值分界线。分析其原因为:湖的西南和东北两端的营养盐浓度较高,有利于藻类的生长繁殖,故 Chla 含量较高;而湖的中部由于水体的自净能力使得营养盐浓度降低,而营养盐是藻类生长的必备营养物质,藻类生物量降低,故叶绿素的含量相对减少。

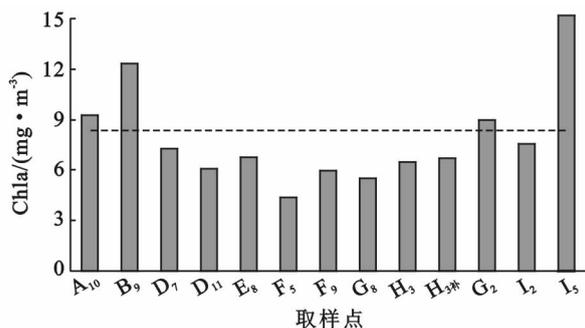


图 5 呼伦湖各采样点 Chla 浓度及其均值

## 2.3 呼伦湖富营养化评价

利用综合营养状态指数法对呼伦湖 2012—2014 年的富营养化状态进行评价,结果如图 6 所示。呼伦湖冬季(1 月)水质较好,综合营养状态指数为:49.1~52.24,基本处在中营养—轻度富营养化状态。夏季(7,8 月)水质较差,综合营养状态指数为:55.98~66.97,处在轻度—中度富营养化水平。而秋季水质有所好转,综合营养状态指数为:56.42~56.89,都处在轻度富营养化水平。因此可以看出呼伦湖水质年际变化为:冬季优于秋季,秋季优于夏季。

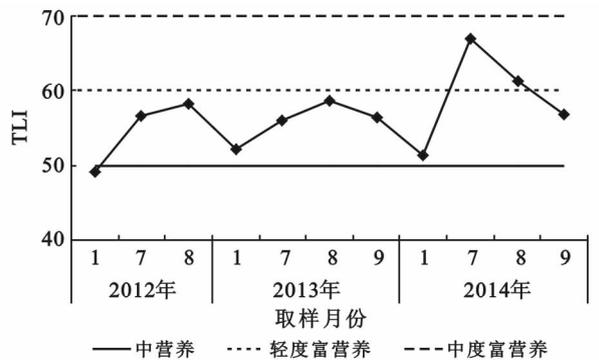


图 6 2012—2014 年呼伦湖综合营养状态指数(TLI)变化

## 2.4 呼伦湖水质影响因素分析

内蒙古呼伦湖流域以放牧为主,主要补给河流为克鲁伦河和乌尔逊河,沿岸分布着大量的牧户,畜牧业较为发达。在降雨强度较大的夏季,牛羊粪便会随着地表径流进入河流及湖泊水体,其中传统放牧草场总氮、总磷的流失量分别为 1.75,0.63 mg/L;草库伦草场总氮、总磷的流失量分别为 1.6,0.68 mg/L;不放牧草场总氮、总磷的流失量分别为 0.54,0.25 mg/L<sup>[12]</sup>。可见,由于地表径流进入湖泊的营养盐含量不容忽视。湖的西南端是克鲁伦河入口,河上游有熟皮厂和硝矿,排放的主要污染物有氨氮、农药、氟化物、砷、汞、酚等<sup>[8]</sup>。湖东北端是小河口渔场,人类活动比较频繁,对湖水的影响较大。呼伦湖常年以西北风为主导风向,大气沉降和干草入湖会导致湖泊营养物质增加,已有文献<sup>[13]</sup>表明每年入湖尘量可达 6.44×10<sup>7</sup> kg,降水入湖量可达 6.28×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a;冰封期每年干草入湖 1.58×10<sup>6</sup> kg,含氮量 2.1×10<sup>5</sup> kg,含磷量 8 900 kg;非冰封期则有 1.77×10<sup>6</sup> kg 干草入湖,折算为入湖氮为 2.3×10<sup>4</sup> kg,磷 9 700 kg。这些因素导致非冰封期呼伦湖营养盐来源丰富,为呼伦湖富营养化的产生奠定了一定的物质基础。同时取各入湖河口和小河口旅游景区附近的采样点,分析营养盐的含量,如图 7 所示。乌尔逊河入湖口(F<sub>9</sub>)、克鲁伦河入湖口(I<sub>2</sub>)和小河口(A<sub>10</sub>)TN 的变化范围为 0.58~

2.69 mg/L, TP 的变化范围为 0.07~0.54 mg/L, 其中 1 和 9 月 TN 和 TP 的含量均较低, 这与富营养化评价结果 1 和 9 月水体呈现中营养、轻度富营养化相一致。

依据国际公认湖库发生富营养化 TN 浓度水平 (0.20 mg/L) 和 TP 浓度水平 (0.02 mg/L)<sup>[14]</sup>, 呼伦

湖属于高营养水体, 具备发生富营养化的营养盐条件。对于冰封期(冬季)而言, 呼伦湖表面覆盖一层厚 1 m 以上的冰, 物质交换减弱, 水体中生物活动减慢, 水体与沉积物的间的相互作用减小, 沉积物释放作用减弱, 水体在自净作用下, 营养盐浓度降低, 湖泊发生富营养化的可能减小。

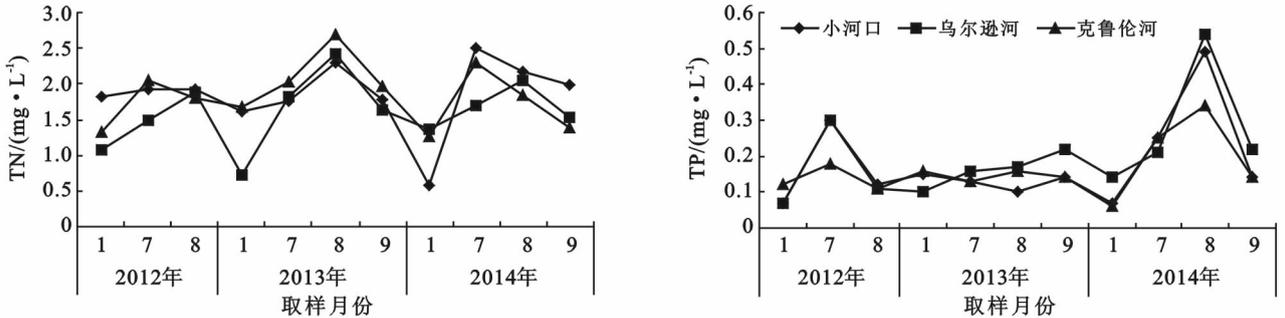


图7 呼伦湖入湖河口营养盐变化

### 3 结论

(1) 通过对呼伦湖 Chla 浓度的时空分布研究表明, 在时间上表现为: 夏季>秋季>冬季; 在空间上表现为: 西南、东北两端>中部。

(2) 通过对呼伦湖 TN, TP 浓度的时空分布研究表明, TN 的浓度的范围为 1.70~2.31 mg/L, 均值为 1.94 mg/L。TP 的浓度的范围为 0.15~0.25 mg/L, 均值为 0.19 mg/L, 已经达到地表水环境质量 IV, V 类水体标准。在空间上, TN 的分布为西南、东北两端>中部。TP 浓度的空间分布特征基本一致, 没有表现出显著差异性。

(3) 利用综合营养状态指数法对呼伦湖水体进行富营养化评价得出, 呼伦湖水体夏季水质呈现轻—中度富营养化状态, 秋季和冬季呈现轻度富营养化水平。

(4) 非冰封期, 呼伦湖营养盐外源输入丰富, 为呼伦湖富营养化的产生奠定了一定的物质基础; 冰封期由于冰盖作用, 切断外源输入, 水质相对较好。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Richerson P J, Suchanek T H, Why S J. The causes and control of algal blooms in clear lake: Clean lakes diagnostic/feasibility study for clear lake, California[R]. USA California: Final Report, Division of Environmental Studies, University of California, Davis, 1994.

[2] 杨清心. 太湖水华成因及控制途径初探[J]. 湖泊科学, 1996, 8(1): 67-74.

[3] 秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社; 2004.

[4] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations [J]. Limnology and Oceanography, 1967, 12(2): 343-346.

[5] Lamon E C, Kenneth H R, Karl E H. Using generalized additive models for prediction of chlorophyll a, in Lake Okeechobee, Florida[J]. Lakes & Reservoirs Research & Management, 1996, 2(1/2): 37-46.

[6] 赵慧颖, 乌力吉, 郝文波, 等. 气候变化对呼伦湖湿地及周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1064-1071.

[7] 颜文博, 张洪梅, 张承德. 达赉湖自然保护区湿地生物环境保护[J]. 国土与自然资源研究, 2006(2): 47-48.

[8] 张娜, 乌力吉, 刘松涛. 呼伦湖地区气候变化特征及其对湖泊面积的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 192-197.

[9] 梁丽娥, 李畅涛, 史小红, 等. 2006—2015 年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1265-1273.

[10] 《呼伦湖志(续志一)》编纂委员会. 呼伦湖志: 续志一[M]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古文化出版社, 1998: 5-20.

[11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 223-671.

[12] 赵伟, 杨培玲, 李海山, 等. 呼伦湖流域 3 种利用方式草场水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 220-225.

[13] 王荔弘. 呼伦湖水环境及水质状况浅析[J]. 呼伦贝尔学院学报, 2006, 14(6): 5-7.

[14] 郭秒, 王政昆, 彭昌亚, 等. 阳宗海和滇池中紫色非硫细菌数量和种群结构的比较[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1337-1340.