

内蒙古呼伦湖水体水质时空变化特征

张立杰, 张生*, 孙标, 赵胜男, 梁丽娥

(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: 为明晰呼伦湖水体水质时空变化特征和其富营养化的主要驱动环境因子, 于 2013 至 2015 年每年的 7、9 月采集了湖中心区、沿岸区和主要河流进出口附近的共 13 个具有代表性的采样点的水样, 对湖区水质及其时空分布进行了评价分析, 并分析了影响呼伦湖水质的主要环境因子。结果显示, 水质时空变异性显著, 总氮、总磷、COD 指标处于严重污染状态, 大部分水域为 V 类水, 局部区域为劣 V 类水, 且 9 月湖水水质较 7 月普遍转好。其中, COD 7 月份呈南低北高, 而 9 月呈中心低南北高的分布特点, COD 区域有从南至北转移且范围变小的趋势; 总氮、总磷在空间上分布规律性不强, 从 7 月份至 9 月份, 总氮含量在湖区南部和北部的大部分区域有所减小, 在湖区中部则有增有减且变化幅度较小, 总磷含量在湖区南部普遍下降在北部普遍升高; 叶绿素 a 在 7 月仅东南部的 I5 点附近水域含量较高, 到 9 月该较高含量区域扩大至南部大部水域。依据水环境差异性, 7 月水体聚为四小类, 9 月聚为两大类, 其中影响 7 月水体的主要环境因子是水温、总氮, 溶解氧, 影响 9 月水体质量的环境因子为磷盐、水温、pH。

关键词: 呼伦湖; 水质评价; 时空变化; 影响因子

中图分类号: X143

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)04-0568-08

Spatial and temporal variation of water quality in Hulun Lake

ZHANG Lijie, ZHANG Sheng, SUN Biao, ZHAO Shengnan, LIANG lie

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

Abstract: To better understand the spatial and temporal variation of water quality and the driving factors of eutrophication in Hulun Lake, water samples collected in July and September of 2013 to 2015 from 13 sites that cover the central, coastal, and the hydraulic control areas of the lake. The water quality, its distribution and variation, and factors affecting water quality were analyzed. The results showed that the water quality significantly varied both in space and with time. The concentrations of TN, TP and COD indicated that Hulun Lake was in a state of serious pollution. The water quality in most of the lake area could be classified as Class grade V and some parts as worse than grade V. However, the water quality was getting better from July to September in most of the lake area. Among which, the concentration of COD decreased in the south area in July and then in the center area in September. The concentrations of TN and TP distributed irregularly over the lake in July and September. The concentration of TN reduced significantly in most of the south and north areas, but fluctuated in a small range. The concentration of TP increased in the north and reduced in the south from July to September. However, the concentration of chlorophyll *a* was only high at sampling site I5 in July, but in September it became high in most of the south area. The principal component analysis showed that the water quality could be classified to four small classes in July and two large classes in September. The main factors affecting water quality were water temperature, total nitrogen, and dissolved oxygen in July, and phosphate, salt, water temperature, and pH in September.

Key words: Hulun lake; water quality assessment; spatial and temporal variation; effect factor

由于人类活动等原因的影响, 呼伦湖的水质状况发生了显著变化, 2002—2004 年呼伦湖全湖总氮均值为 $1.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最高测值为 $1.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小测值为 $1.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 总磷均值为 $0.156 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 测值

收稿日期: 2015-12-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51339002, 51269017, 51169011, 51409288) 资助。

作者简介: 张立杰, 硕士研究生。E-mail: 2506201528@qq.com

* 通信作者: 张生, 教授。E-mail: shengzhang@imau.edu.cn

范围 0.09~0.199 mg·L⁻¹, 属于地表水环境质量标准(UB3838-2002)III类水^[1-2]。2008—2009 年总氮均值增长到 3.01~3.316 mg·L⁻¹ 总磷均值增长到 0.435~0.44 mg·L⁻¹; 远远超出地表水环境质量标准(UB3838-2002)V类水标准^[3]。2012 年 TN 其值在 1.468~2.961 mg·L⁻¹ 之间, TP 平均值为 0.12 mg·L⁻¹ 为地表水环境质量的劣 V 类水体标准^[4]。以上研究结果表明呼伦湖水水质正在逐渐变差。因为呼伦湖地处内蒙古呼伦贝尔高原西邻蒙古北毗俄罗斯, 是当地居民主要的饮水来源, 其水质状况不仅关系着当地居民的身体还关系着呼伦湖及其周边乃至华北东北地区的生态安全^[5-6], 所以急需科学系统地评价呼伦湖水水质, 为呼伦湖水体的治理提供科学依据。

呼伦湖又称达赉湖, 地理坐标介于 48.33'—49.20'N, 116.58'—117.48'E 之间。是内蒙古最大的湖泊, 是中国五大淡水湖之一^[7]。其水域面积为 2340 km², 最大水深 5.44 m, 平均水深 4.71 m, 最大储水量 140×10⁸ m³; 湖面呈不规则的斜长型, 湖长 93 km, 最大宽度 41 km, 平均宽度 25 km, 湖周长 447 km; 呼伦湖集水面积为 153700 km²。

呼伦湖地处高纬度寒冷干旱的内蒙古草原, 每年 4 月下旬开始融化 11 月份下旬封冻, 其非冰封时间为 6 个月, 7 月气温最高, 8 月份就有所回落, 在 9 月下旬时气温显著下降, 所以本研究于 2013、2014、2015 年的 7 月中旬和 9 月下旬采取水样对呼伦湖水水质进行了系统的水体营养现状调查。研究湖泊水质时空变化规律是评价湖泊水质质量、分析污染源和改善湖泊水环境的基础与前提^[8]。呼伦湖由于地处偏远地区, 基础资料缺乏, 以往对呼伦湖水水质研究主要是集中在对单个指标测量报道^[9-10], 或是用综合营养状态指数法评价呼伦湖富营养状况^[4], 这些方法忽略了细节, 其评价结果不能很好的反应湖泊水质情况。本文采用单因子指标法, 结合地表水环境质量标准(UB3838-2002), 在细节上分析呼伦湖水水质近三年的详细变化情况, 并进一步通过主成分分析法评估呼伦湖富营养化的主要驱动因子, 分析其变化规律, 以期对呼伦湖水水质污染的预防控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

水样的采集是在水体的中心区、沿岸区和主要河流进出口附近的共 13 个具有代表性的采样点采取水样, 详情见图 1, 用采水器于距水面 0.5 m 处采取水样, 水样采集后置于聚乙烯瓶中(聚乙烯瓶酸洗

后 70%酒精消毒处理), 运回实验室于 4℃ 冰箱保存。部分水样加硫酸酸化, 于 72 h 内测定总氮(TN)、溶解性总磷(DTP)、溶解性总无机磷(DIP)、总磷(TP)、化学需氧量(COD); 部分水样加 1% MgCO₃, 用 0.45 μm 的滤膜过滤, 用于测定湖水叶绿素 a(*Chl-a*)的含量。所测样品均设置 2 个平行。

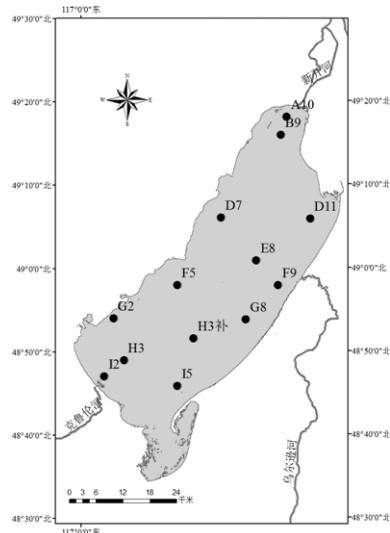


图 1 呼伦湖水体采样点
Figure 1 Sample sites

1.2 测定方法与数据分析

现场用梅特勒-托利公司生产的便携式 pH 计 SG8 记录 pH、温度, 溶解氧测定仪 SG9 测定溶氧量(DO), 电导率仪 SG7 测定总溶解性固体(TDS), 同时用赛氏盘法测定水体透明度(SD), 用测深锤测量各采样点水深(H); *Chl-a* 测定采用丙酮萃取分光光度法^[11], TN 测定采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法^[12], TP、DTP、DIP 测定采用钼酸铵分光光度法^[13], COD 使用重铬酸盐法^[14]。13 个采样点数据借助 Excel 统计软件分析, 主成分分析使用 canoco4.5 与 spss19.0 分析软件完成, 克里金差值法用 Arcgis10.0 完成。

2 结果与分析

2.1 呼伦湖水环境特征分析

呼伦湖水域的各理化参数结果见表 1。结果显示, 呼伦湖水体理化参数在不同的时期显著不同。7 月呼伦湖的水温最大值为 25.73℃ 最小值为 22.30℃ 平均值为 23.69℃ 均明显高于 9 月份; 7 月份透明度在 23.16~38.50 cm 之间波动, 9 月份透明度平均为 26.05 cm, 总体来看 9 月和 7 月水体透明度无明显差异; 水体 pH 均呈弱碱性; 溶解氧在不同时期无明显差异, 均在 8~9 mg·L⁻¹ 之间变动; 7 月和 9 月

总溶解性固体 (TDS) 含量分别在 $419\sim 564\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $298\sim 589\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动, 有研究表明根据 TDS 大小可将水体划分为淡水 (小于 $1000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、稍咸水 ($1000\sim 3000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、中度咸水 ($3000\sim 10000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、极咸水 ($10000\sim 35000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和盐卤水 (大于 $35000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[15-17], 结合湖水数据可知, 目前呼伦湖湖水属于淡水。

2.2 不同时期呼伦湖水水质特征分析

2.2.1 不同时期呼伦湖水体化学需氧量变化特征

COD 是一个表征环境水体有机物污染的特定指标^[18], 2013—2015 年 7 月和 9 月呼伦湖水体 COD 含量变化见图 2。结果显示, 7 月呼伦湖水体 COD 含量平均值为 $36.76\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 9 月 COD 为 $24.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 7 月呼伦湖水体 COD 含量显著高于 9 月水体, 且各采样点间差异显著。对照我国地表水环境

质量标准分析结果可知: 7 月各采样点 COD 含量均达地表水环境质量 IV—V 类标准, 其中位于北部的 A10、B9 采样点超过了地表水环境质量 V 类水标准, 这是由于 A10、B9 点附近的小河口旅游风景区以及当地的扎兰诺尔矿区向呼伦湖排放污水所致, 需加强对该地区的排污管理, 防止该湖区遭受有机污染进而影响全湖区的水质状况; F9、G8 点 COD 含量同样超过地表水 V 类标准, 这是因为其位于乌尔逊入湖口, 乌尔逊上游修建公路以及周边炼油厂通过地下水, 污染了呼伦湖水体, 使得这两点 COD 含量偏高; I5 点 COD 含量最低, 为地表水环境质量 IV 类。9 月 COD 含量从图 2 可以看出普遍小于 7 月, 水环境质量也比 7 月较好, 只有 D11、E8、H3、I2、I5 采样点属地表水 V 类, 其余各点均为 II—IV 类。

表 1 不同时期呼伦湖水体理化参数

Table 1 The physical and chemical parameters in different periods in Hulun Lake

| 理化指标 Physiochemical index | 最大值 Maximum | | 最小值 Minimum | | 平均值 Average | | 标准差 SD | |
|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|------------|-----------------|
| | 7月 July | 9月 September | 7月 July | 9月 September | 7月 July | 9月 September | 7月 July | 9月 September |
| SD/cm | 38.50 | 28.67 | 23.16 | 24.00 | 27.37 | 26.05 | 4.14 | 1.53 |
| T/°C | 25.73 | 19.13 | 22.30 | 15.43 | 23.69 | 17.31 | 1.06 | 0.88 |
| pH 值 | 8.93 | 9.34 | 8.86 | 9.03 | *** | *** | 0.02 | 0.10 |
| DO/mg·L ⁻¹ | 9.65 | 8.29 | 7.21 | 7.58 | 8.21 | 7.89 | 0.73 | 0.24 |
| TDS(mg·L ⁻¹) | 564.14 | 589.86 | 419.71 | 298.80 | 518.23 | 519.55 | 45.51 | 75.99 |
| H/m | 5.38 | 5.09 | 2.97 | 2.92 | 4.38 | 4.39 | 0.62 | 0.57 |

注: SD 为透明度; DO 为溶解氧; EC 为电导率; H 为水深; 各个采样点取 pH 平均值没有实际意义。

Note: SD, transparency; DO, dissolved oxygen; EC, conductivity; H, depth of each sampling point; the average of pH is of no practical significance.

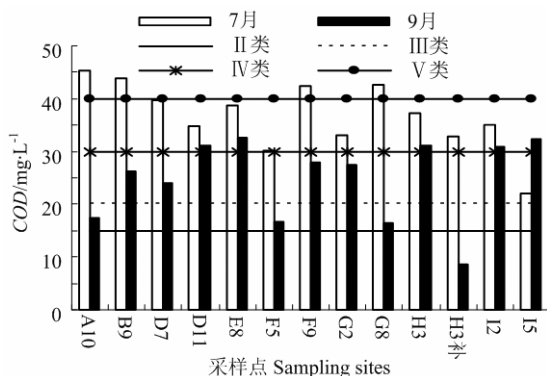


图 2 呼伦湖不同时期 COD 含量

Figure 2 Concentrations of COD in Hlun Lake water from different sampling sites in July and September

近 3 年不同时期呼伦湖水体 COD 含量空间分布情况如图 3、4 所示, 可以看出不同时期 COD 的空间分布特征显著不同。7 月 COD 含量北部显著高于南部, 9 月份湖中心的 F5、G8、H3 补 3 个采集点

COD 含量明显低于南北湖区。

2.2.2 不同时期呼伦湖氮、磷含量变化特征 呼伦湖 7 月和 9 月的氮、磷含量变化见图 5、图 7。结果显示, 7 月呼伦湖水体总氮、总磷、溶解性总磷 (DTP)、溶解性无机磷 (DIP) 含量均高于 9 月。而对于 TN/TP 比值而言, 不同时期差异显著 (见表 2) 以平均值来说, 7 月 TN/TP 小于 9 月。调查表明呼伦湖水体营养特征可能与湖泊的水位变化密切相关, 近年来呼伦湖流域降水丰沛, 湖泊水位持续升高, 呼伦湖氮磷营养盐含量也呈增长趋势。

7 月、9 月呼伦湖水体 TN 三年平均含量分别为 2.02 、 $1.81\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到地表水环境质量 V 类水标准; 总氮是评价水体污染与自净状况的重要指标, 而很多因素会影响水体中总氮含量, 如沉积物^[19]、浮游动植物、水动力条件等, 且呼伦湖各个采样点之间的污染特征也存在差异。对照地表水环境质量标准: 9 月呼伦湖水体氮含量除湖东南部的 I5 属地

表水环境质量劣 V 类标准外, 其他采样点为 IV—V 类标准。7 月呼伦湖大部分采样点处于劣 V 类标准, 除了 E8、F5、F9、G8、I2 为地表水 V 类。可以看出呼伦湖水体总氮含量超标严重, 且 7 月比 9 月严重。需加强对入湖河流氮营养盐的治理与监管, 尤其是旅游季的 7 月。

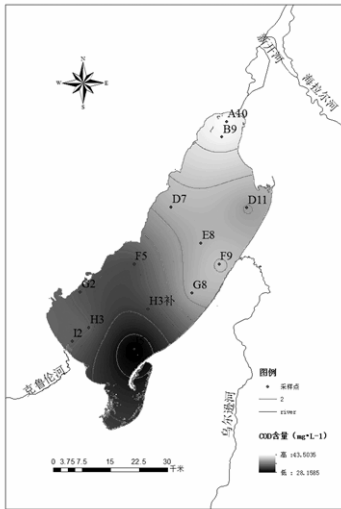


图 3 呼伦湖 7 月 COD 空间分布情况

Figure 3 Spatial distribution of COD in Hulun Lake in July

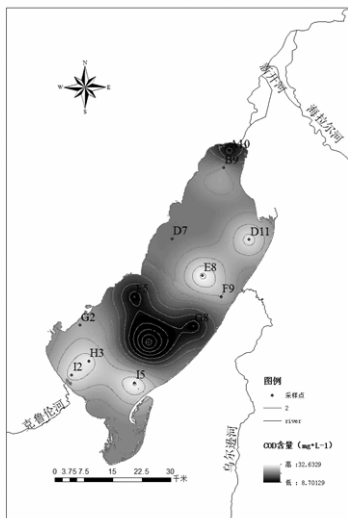


图 4 呼伦湖 9 月 COD 空间分布情况

Figure 4 Spatial distribution of COD in Hulun Lake in September

空间分布图上可以看出, 呼伦湖总氮含量明显偏高的采样点是 D7、I5 点。这一研究结果与段超宇等^[4]的研究结论一致。据调查, I5 点附近有达赉湖渔场乌都鲁分场, 故其附近的养殖业较发达, 鱼虾的养殖将含有大量悬浮物质和营养盐的水排入湖水中, 使湖水含氮量明显偏高^[20]。D7 点含氮量偏高或许是由于附近的伊和诺仁阿木排放生活污水所致。而不同时期有效氮含量变化最大的是 A10、B9

采样点, 这是由于 A10、B9 两点离达赉湖风景区不过 7 km, 而呼伦湖在 7 月中下旬迎来游客高峰, 9 月游客逐渐稀少, 致使两点有效氮含量变化显著。因此应加强对伊和诺仁阿木工农业生产生活中废弃物和废水的排放限制, 及在渔业养殖生产中各项水质指标的检测, 以及对游客生活污水的治理。

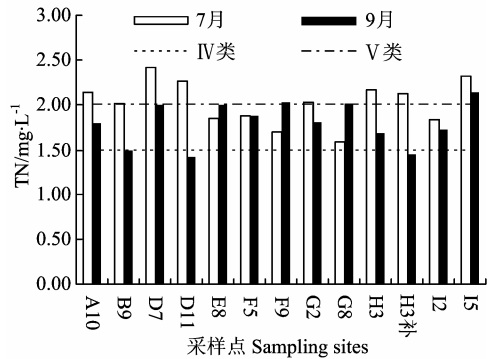


图 5 不同时期呼伦湖水体氮含量

Figure 5 Concentrations of TN in Hulun Lake water from different sampling sites in July and September

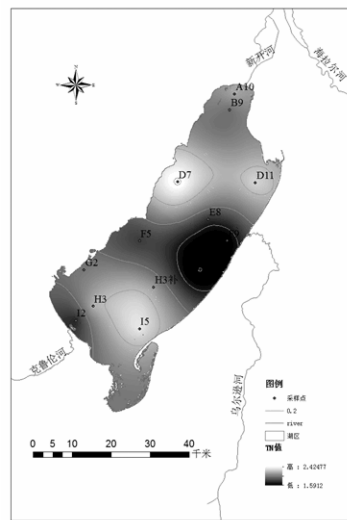


图 6 呼伦湖 7 月 TN 空间分布情况

Figure 6 Spatial distribution of TN in Hulun Lake in September

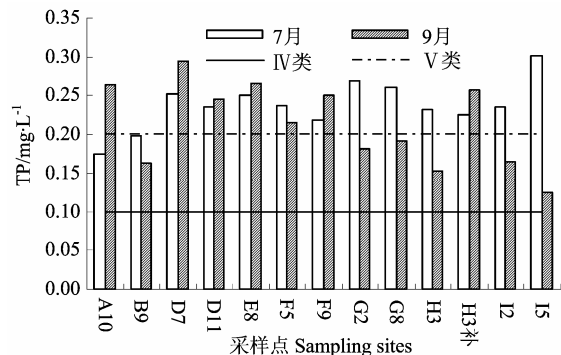


图 7 不同时期呼伦湖水体磷含量

Figure 7 Concentrations of TP in Hulun Lake water from different sampling sites in July and September

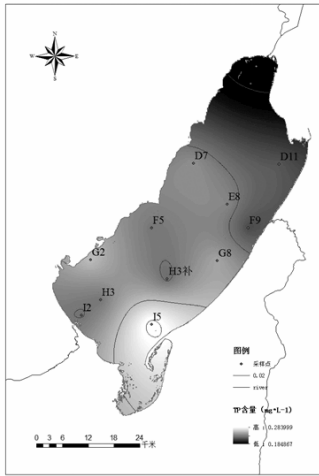


图 8 呼伦湖 7 月 TP 空间分布情况

Figure 8 Spatial distribution of TP in Hulun Lake in September

从表 2 中可以看出, 7 月呼伦湖水体 N/P 波动较小, 各采样点差异显著 ($P=0.011$); 9 月 N/P 波动较大, 各采样点间差异也十分显著 ($P=0.023$)。Downing 认为氮磷比可直接反映湖泊富营养化状况, 低氮磷比意味着较高的营养负荷^[22], 研究结果显示, 各采样点 7 月、9 月的氮磷比显著不同, 说明呼伦湖在不同时期营养状况差异显著。

2.3.3 不同时期呼伦湖水体叶绿素 a 含量变化特征

呼伦湖水体近三年 7、9 月份叶绿素 a (*Chl-a*) 平均含量见图 10; 呼伦湖水体 7 月 *Chl-a* 含量显著高于 9 月水体, 7 月 *Chl-a* 均值为 $8.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 9 月为 $6.21 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。图 10 可以看出 I5 点 *Chl-a* 浓度明显高于其他采样点, 空间分布上 (图 11、12) 7 月东南部 I5 点附近水域含量高于其他水域, 9 月该较高含量区域扩大至南部大部水域。I5 点在不同时期 *Chl-a*

含量均较高于其他采样点, 调查显示这是由于附近的达赉湖渔场乌都鲁分场向呼伦湖释放过多营养物质导致的。

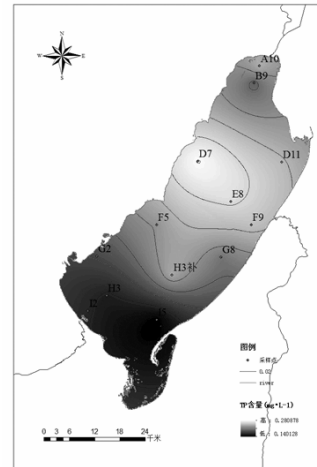


图 9 呼伦湖 9 月 TP 空间分布情况

Figure 9 Spatial distribution of TP in Hulun Lake in September

Chl-a 浓度反应了浮游植物的生物量^[23], 结果表明, 9 月呼伦湖湖水中藻类等浮游植物的生物量比 7 月有所降低。许畅^[24]认为影响湖泊或水库中 *Chl-a* 含量、藻类生长的主要因素是水动力条件、光照、温度、营养盐等。Karl^[25]认为当环境中的氮磷比偏离 Redfield 值 (16) 时, 浮游动植物的生长就会主要受营养盐的限制。图 10 结合 N/P 值与各营养盐的相关性分析可知, 呼伦湖 *Chl-a* 含量变化可能主要受氮营养盐影响(N/P 与 TN 的相关性 $r=0.77$, $P<0.01$)。但由于影响呼伦湖 *Chl-a* 含量的因素极其复杂, 仍需进一步研究。

表 2 不同时期呼伦湖水体 DTP, DIP 及 TN/TP 含量

Table 2 Concentrations of DTP, DIP, TN/TP in Hulun Lake in July and September

| 采样点 Sampling site | 7 月 DIP DIP in July | 9 月 DIP DIP in Semptember | 7 月 DTP DTP in July | 9 月 DTP DTP in Semptember | 7 月 TN/TP TN/TP in July | 9 月 TN/TP TN/TP in Semptember |
|----------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
| A10 | 0.10 | 0.18 | 0.15 | 0.20 | 14.26 | 6.82 |
| B9 | 0.11 | 0.06 | 0.12 | 0.08 | 10.13 | 9.10 |
| D7 | 0.16 | 0.09 | 0.19 | 0.10 | 8.98 | 7.33 |
| D11 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.12 | 10.33 | 5.81 |
| E8 | 0.13 | 0.08 | 0.15 | 0.07 | 7.43 | 8.51 |
| F5 | 0.11 | 0.05 | 0.12 | 0.07 | 7.96 | 8.75 |
| F9 | 0.13 | 0.13 | 0.19 | 0.14 | 7.77 | 9.27 |
| G2 | 0.08 | 0.07 | 0.13 | 0.11 | 8.74 | 10.03 |
| G8 | 0.16 | 0.10 | 0.16 | 0.13 | 6.11 | 10.47 |
| H3 | 0.14 | 0.06 | 0.16 | 0.08 | 9.38 | 11.02 |
| H3 补 | 0.11 | 0.13 | 0.11 | 0.13 | 9.45 | 5.61 |
| I2 | 0.10 | 0.04 | 0.13 | 0.11 | 7.82 | 10.50 |
| I5 | 0.10 | 0.08 | 0.11 | 0.11 | 7.69 | 14.82 |

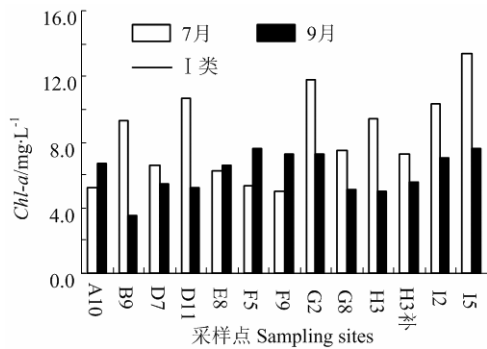


图 10 呼伦湖不同时期 *Chl-a* 含量

Figure 10 Concentrations of *Chl-a* in Hulun Lake water from different sampling sites in July and September

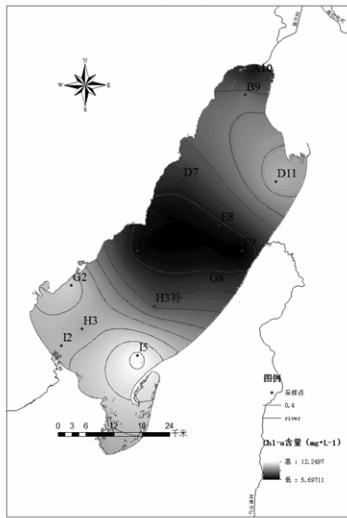


图 11 呼伦湖 *Chl-a* 7月空间分布情况

Figure 11 Spatial distribution of *Chl-a* in Hulun Lake in July

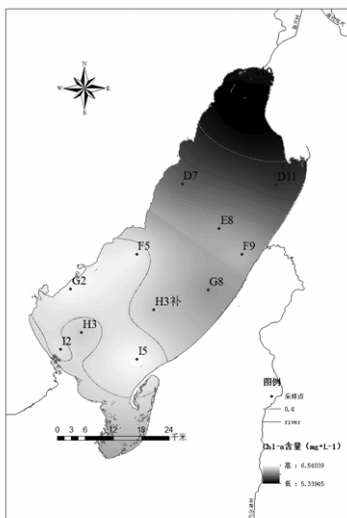
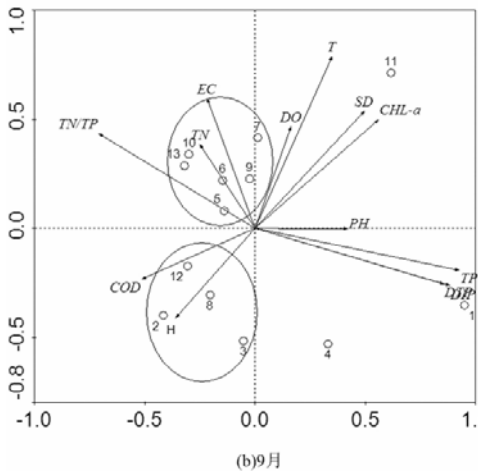
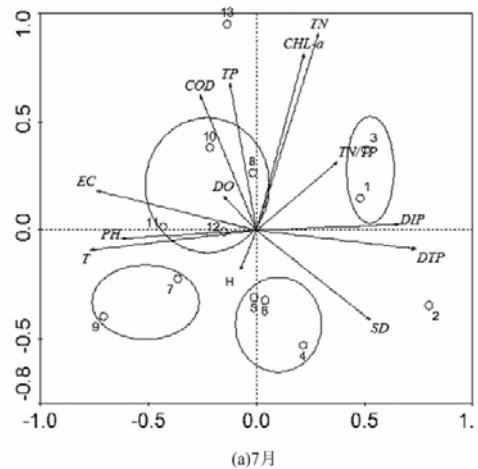


图 12 呼伦湖 *Chl-a* 9月空间分布情况

Figure 12 Spatial distribution of *Chl-a* in Hulun Lake in September

其广泛应用于自然科学和社会科学的研究中^[26-28]。本文通过 spss19.0, canoco4.5 分析呼伦湖近三年的水质理化参数。结果显示: 依据各项环境参数的差异性, 7月呼伦湖 13 个采样点聚为 4 类(图 13a), 其中 G2、I2、H3、H3补环境差异较小聚为一类; A10、D7 聚为一类; D11、E8、F5 采样点聚为一类; F9、G8 聚为一类。而 9 月水体聚为两类分别为西岸的 B9、D7、G2、I2 为一类, 乌尔逊河入湖口 E8、F5、F9、G8、I5 为另一类 (图 13b)。13 个采样点在两个时期依据水环境参数的差异性聚类数量显著不同, 这是由于 7 月水温较高, 水体内生物繁衍生长吸收各个区域营养盐, 此时生物群落对水环境影响较大。而水温较低的 9 月浮游动植物衰亡, 此时湖泊水环境主要受来水水质及其所在地理位置(如水动力条件)的影响。所以呼伦湖水环境时空差异不仅受水温影响还与地理位置有关, 这为呼伦湖的分区治理提供依据。



1—A10; 2—B9; 3—D7; 4—D11—E8; 6—F5; 7—F9; 8—G2; 9—G8; 10—H3; 11—H3 补; 12—I2; 13—I5

图 13 不同时期呼伦湖水体理化因子主成分分析

Figure 13 Physiochemical parameters by Principal components analysis in July and September

2.4 呼伦湖湖流域不同时期理化因子主成分分析
主成分分析是一种重要的多元统计分析方法,

表3 呼伦湖水体理化因子主成分分析

Table 3 Physicochemical parameters by principal components analysis

(a) 解释总方差 Total Variance Explained

| 成份 Component | 初始特征值 Variance of initial eigen value | | | | | | 提取平方和载入 Variance of extraction sums of squared loadings | | | | | |
|-----------------|--|------|---------------|--------------|-------------------|------|--|------|---------------|-------|-------------------|------|
| | 合计 Total | | 方差/% Variance | | 累积/% Accumulative | | 合计 Total | | 方差/% Variance | | 累积/% Accumulative | |
| | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 |
| 1 | 3.18 | 4.26 | 24.47 | 32.75 | 24.47 | 32.8 | 3.18 | 4.26 | 24.47 | 32.75 | 24.47 | 32.8 |
| 2 | 2.72 | 2.45 | 20.93 | 18.84 | 45.4 | 51.6 | 2.72 | 2.45 | 20.93 | 18.84 | 45.4 | 51.6 |
| 3 | 2.35 | 2.03 | 18.09 | 15.61 | 63.49 | 67.2 | 2.35 | 2.03 | 18.09 | 15.61 | 63.49 | 67.2 |
| 4 | 2 | 1.43 | 15.41 | 10.98 | 78.9 | 78.2 | 2 | 1.43 | 15.41 | 10.98 | 78.9 | 78.2 |
| 5 | 0.9 | 1.26 | 6.93 | 9.7 | 85.83 | 87.9 | 0.9 | 1.26 | 6.93 | 9.7 | 85.83 | 87.9 |
| 6 | 0.71 | 0.69 | 5.49 | 5.28 | 91.32 | 93.2 | | | | | | |
| 7 | 0.52 | 0.53 | 3.97 | 4.05 | 95.29 | 97.2 | | | | | | |
| 8 | 0.45 | 0.23 | 3.44 | 1.76 | 98.73 | 99 | | | | | | |
| 9 | 0.13 | 0.08 | 0.98 | 0.64 | 99.72 | 99.6 | | | | | | |
| 10 | 0.03 | 0.04 | 0.22 | 0.32 | 99.93 | 99.9 | | | | | | |
| 11 | 0.01 | 0.01 | 0.07 | 0.05 | 100 | 100 | | | | | | |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 100 | 100 | | | | | | |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | | | | | | |

(b) 主成分矩阵 Component Matrix

| | 成份 Component | | | | | | | | | |
|-------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|
| | F1 | | F2 | | F3 | | F4 | | F5 | |
| | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 | 7月 | 9月 |
| TN | 0.29 | -0.25 | 0.91 | 0.39 | -0.08 | 0.65 | -0.14 | -0.28 | 0.09 | 0.41 |
| TP | -0.12 | 0.93 | 0.68 | -0.19 | -0.21 | 0.15 | 0.61 | -0.09 | 0 | 0.24 |
| DIP | 0.66 | 0.88 | 0.03 | -0.26 | 0.43 | -0.02 | 0.48 | -0.01 | 0.31 | 0.15 |
| DTP | 0.74 | 0.86 | -0.09 | -0.26 | 0.34 | -0.03 | 0.48 | -0.14 | 0.27 | 0.36 |
| TN/TP | 0.38 | -0.71 | 0.31 | 0.43 | 0.09 | 0.39 | -0.76 | -0.34 | 0.06 | 0.08 |
| SD | 0.52 | 0.5 | -0.41 | 0.54 | -0.25 | -0.01 | -0.24 | 0.46 | 0.1 | -0.34 |
| T | -0.77 | 0.35 | -0.09 | 0.79 | 0.45 | -0.18 | 0.06 | -0.14 | -0.23 | -0.3 |
| pH | -0.63 | 0.42 | -0.03 | 0 | -0.61 | 0.76 | 0.06 | 0.42 | 0.42 | -0.03 |
| DO | -0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.46 | 0.91 | -0.66 | 0.16 | 0.13 | -0.28 | 0.48 |
| EC | -0.74 | -0.22 | 0.19 | 0.59 | 0.31 | -0.09 | 0.08 | 0.39 | 0.46 | 0.6 |
| H | -0.08 | -0.36 | -0.18 | -0.41 | -0.48 | 0.37 | 0.65 | 0.29 | -0.19 | 0.23 |
| COD | -0.26 | -0.51 | 0.62 | -0.23 | 0.25 | -0.09 | -0.2 | 0.73 | 0.24 | 0 |
| CHL-a | 0.22 | 0.56 | 0.82 | 0.5 | -0.38 | 0.48 | 0.11 | 0.14 | -0.33 | -0.16 |

PCA 显示前 5 个主成分共解释了呼伦湖 7 月环境变量的 85.8% 和 9 月环境变量的 87.9% (表 3)。7 月, 影响呼伦湖水质的第一主成分 F1 反应的是水温 (-0.77)、DTP(0.74)、DIP(0.66)、电导率 (-0.74)、pH (-0.63)、透明度 (0.52) 等理化指标, 可以看出第一主成分 F1 与溶解性磷成较强正相关, 所以以溶解性磷含量解释第一主成分, 随着水温升高, 水中的溶解性磷减少, 如果是普通水中温度的升高溶解在水中的磷盐含量会增加, 而现在成相反趋势, 这是由于水体中浮游动物随着水温的升高迅速繁殖, 吸收了溶解在水中的磷, 导致了溶解性磷的减少。溶解性磷的减少导致了湖水中 pH、电导率的增加, 这或许是由于其他盐类如氮盐随着温度升高溶解量变大而导致的, 这还需进一步验证; 第二主成分 F2

反应的是总氮(0.91)、叶绿素 a (0.82)、总磷 (0.68)、COD (0.62), 叶绿素 a 的含量反应了浮游植物的生物量, 第二主成分 F2 说明呼伦湖水体中浮游植物的生长极可能受水体中总氮含量限制, 所以控制入湖氮元素可以有效控制水华的发生, 还可以看出叶绿素 a 的含量跟总磷、COD 成正相关, 从前文 Chl-a、TP、COD (由于 COD 是污染指标而非营养元素, 所以需以背景值为参考, 即受外界影响较小的 9 月) 的空间分布图也可以印证这一点; 第三主成分 F3 反应了 pH(-0.61)、溶解氧 (0.91) 这说明溶解氧的增加会导致水体 pH 的降低, 这对渔场的养殖具有提示意义, 通过向水体中输氧来降低水体 pH; 第四主成分 F4 反应的是氮磷比 (-0.76)、水深 (0.65), 表明呼伦湖水位会影响水体营养负荷; 第五主成分 F5 相关

为 pH(0.42)、EC(0.46), 相关性较差。9 月, PCA 显示第一主成分 F1 反应的是水体中磷, 总磷 (0.93)、DIP(0.88)、DTP(0.86); 第二主成分 F2 反应的是水温 (0.76); 第三主成分 F3 反应的是 pH(0.76)、总氮 (0.65)、溶解氧 (-0.66), 由第三主成分可知呼伦湖 pH 主要受氮营养盐影响; 第四第五主成分见表 3b。

以上分析表明, 影响 7 月呼伦湖主要环境因子为水温、总氮、溶解氧, 9 月的主要影响因素是磷盐、水温、pH。这就为呼伦湖的分时段保护提供依据, 比如在温度逐渐升高的 6 至 8 月间需要加强入湖河流氮营养盐的控制, 防止发生水华或者绿藻疯涨; 而在温度逐渐下降的 9 至 11 月间可以处理磷含量偏高的区域如 D7 采样点附近的水域, 为下年鱼类的生长提供有利环境。

3 结论

呼伦湖水体各项水质指标存在显著的时间差异性, 7 月 COD、总磷、总氮、叶绿素 a 含量均高于 9 月, 而 TN/TP 小于 9 月。通过单因子指标法评价呼伦湖水质显示, 7 月水体总体比 9 月水体水质要差, 且大部分水域已属地表水 V 类水, 局部区域甚至为劣 V 类, 需要加强对该区域的污水排放管理和对游客的环保宣传与环保管制。呼伦湖水体理化参数也存在显著的空间差异, 其中 COD 在 7 月份呈南低北高, 9 月呈中心低南北高的分布特点; 总氮、总磷在空间上分布规律性不强, 从 7 月份至 9 月份, 总氮含量在湖区南部和北部的大部分区域有所减小, 在湖区中部则有增有减且变化幅度较小, 总磷含量在湖区南部普遍下降在北部普遍升高; 叶绿素 a 在 7 月仅东南部的 I5 点附近水域含量较高, 到 9 月该较高含量区域扩大至南部大部水域。

PCA 结果显示, 按照水环境差异大小, 7 月水体聚为四类, 9 月水体聚为两类, 这为呼伦湖分区域治理提供了依据; 同时 7、9 月提取的五个主成分可充分解释呼伦湖的环境变量, 其中 7 月影响呼伦湖的主要环境因子为水温、总氮、溶解氧。9 月影响呼伦湖的主要环境因子为磷盐、水温、pH。这为呼伦湖的分时段治理提供了科学依据。

通过对呼伦湖氮磷等诸多营养盐的测定可以看出, 呼伦湖水质状况日益严重, 为保护呼伦湖水质, 需要加快流域污染源控制, 尽量减少流域污染物排放对水质以及生态环境的影响。

参考文献:

[1] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会。

水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

- [2] 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): 5-6.
- [3] 王俊, 冯伟业, 张利, 等. 呼伦湖水质和生物资源量监测及评价[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(5): 64-68.
- [4] 段超宇, 张生, 孙标, 等. 呼伦湖夏季与冬季水质现状评价研究[J]. 节水灌溉, 2014(4): 66-67.
- [5] 都达古拉, 何江, 吕昌伟, 等. 呼伦湖水-沉积物系统中重金属的含量特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 118-123.
- [6] 樊才睿, 李畅游, 贾克力, 等. 不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4716-4724.
- [7] 吴用, 史小红, 赵胜男, 等. 内蒙古高原 3 大典型湖泊水化学特征及其控制因素分析[J]. 生态环境学报, 2015(7): 1202-1208.
- [8] 王天阳, 王国祥. 昆承湖水水质参数空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4): 1384-1390.
- [9] 王俊, 冯伟业, 张利, 等. 呼伦湖水质和生物资源量监测及评价[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(5): 64-68.
- [10] 冯伟业. 呼伦湖渔业水域四季水质的变化情况[J]. 当代畜禽养殖业, 2013(6): 29-33.
- [11] SL88-1994 叶绿素的测定(分光光度法)[S].
- [12] GB11893-89 水质总磷的测定钼酸铵分光光度法[S].
- [13] GB11894-89 水质总氮的测定碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S].
- [14] GB11914-89 水质化学需氧量的测定重铬酸盐法[S].
- [15] DAVID R M. Handbook of hydrology [M]. New York: McGraw-Hill, 1992.
- [16] 孙瑞, 张雪芹, 吴艳红. 藏南羊卓雍错流域水化学主离子特征及其控制因素[J]. 湖泊科学, 2012, 24(4): 600-608.
- [17] 黄锡荃. 水文学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 150-151.
- [18] 宋祖华, 凌娟, 母应锋, 等. COD 与 TOC 测定方法的比较[J]. 环境监测管理与技术, 2014, 23(6): 53-54.
- [19] 张台凡, 宋进喜, 杨小刚, 等. 渭河陕西段沉积物中总磷、总氮时空分布特征及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5): 1394-1399.
- [20] 沈建. 养殖水体中氨氮的危害及管理措施[J]. 科学养鱼, 2014, 38(1): 91.
- [21] MEYBECK M. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers [J]. American Journal of Science, 1982, 282(40): 401-450.
- [22] DOWNING J A, MCCAULCY E. The nitrogen: Phosphorus relationship in lakes[J]. Limnol-Oceanogr, 1992, 37: 936-945.
- [23] LAU S S S, LANE S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study[J]. The Science of the total Environment, 2002, 288: 167-181.
- [24] 许畅. 湖库藻类浓度预测技术研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [25] KARL D, LETELIER R, TUPAS L, et al. The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean[J]. Nature, 1997, 388: 533-538.
- [26] 龚然, 徐力刚, 徐进, 等. 主成分分析法在城市小型湖泊水质评价中的应用[J]. 环境科学与技术, 2014(S2).
- [27] 吴美琼, 陈秀贵. 基于主成分分析法的钦州市耕地面积变化及其驱动力分析[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 56-58.
- [28] 徐光宇, 柴国平, 徐明德, 等. 主成分分析法在汾河太原城区段水质评价中的应用[J]. 环境工程, 2014, 32(6): 122-124.