

2006—2015 年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析*

梁丽娥, 李畅游**, 史小红, 赵胜男, 田野, 张立杰

(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: 以内蒙古呼伦湖为研究对象, 2006—2015 年水质数据为基础, 分析呼伦湖的富营养化变化趋势及其影响因素。结果表明, 2006—2015 年呼伦湖各水质指标都有不同程度的变幅, 其中盐度变化范围为 0.75~1.71 ng/L, 均值为 1.32 ng/L, 2010 年达到峰值 1.71 ng/L, 随后呈现逐年递减趋势; pH 的变化范围为 8.78~9.40, 水体偏碱性; 透明度的变化范围为 0.17~0.26 m, 近三年来透明度持续下降; 溶解氧浓度变化范围为 4.05~10.62 mg/L, 均值为 7.12 mg/L。总氮浓度的变化范围为 1.16~3.53 mg/L, 总磷浓度的变化范围为 0.13~0.25 mg/L, 叶绿素 a 浓度的变化范围为 3.31~10.36 mg/m³, N/P 比变化范围为 4.92~15.35, 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。利用综合营养状态指数法对呼伦湖水体富营养化进行评价, 2006—2015 年呼伦湖水体表现出中度—重度—中度—轻度的变化趋势。通过分析呼伦湖富营养化的影响因素, 结果表明, 影响呼伦湖富营养化的可能因素为外源输入和入湖径流量, 同时水深和水温也是呼伦湖发生富营养化的驱动因素, pH、透明度和溶解氧是呼伦湖富营养化影响水质的最主要表现指标。

关键词: 富营养化; 综合营养状态指数法; 影响因素; 呼伦湖

Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006 – 2015

LIANG Li'e, LI Changyou**, SHI Xiaohong, ZHAO Shengnan, TIAN Ye & ZHANG Lijie

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

Abstract: Based on the water quality data of Lake Hulun from 2006 to 2015, the impact factors and the variation of eutrophication in the Lake Hulun are analyzed. The salinity ranges from 0.75 to 1.71 ng/L and the average is 1.32 ng/L, the maximum value is 1.71 ng/L in 2010, and there after followed in a decreasing trend. pH is in the range of 8.78–9.40, indicating an alkaline water; Transparency is in the scope of 0.17–0.26 m, continually decreasing in the recent three years. Dissolved oxygen varies between 4.05–10.62 mg/L, with the mean value of 7.12 mg/L, and the variation of total nitrogen, total phosphorus and chlorophyll-a are 1.16 to 3.53 mg/L, 0.13–0.25 mg/L and 3.31–10.36 mg/m³, respectively. The ratio of N/P is 4.92–15.35. The water quality of Lake Hulun is of type IV to V in accordance with the water standards of the surface water, and the lake is phosphorus-limited lake. The eutrophication of Lake Hulun is evaluated with integrated nutritional status index method, and the results shows that the variation of the eutrophication of Lake Hulun is moderate-severe-moderate-mild during the period of 2006 to 2015. The main impact factors of the eutrophication of Lake Hulun are exogenous inputs and runoff. The water depth and temperature of Lake Hulun are the drivers of eutrophication, while pH, transparency, and dissolved oxygen are the most important factors of eutrophication of Lake Hulun.

Keywords: Eutrophication; integrated nutritional status index method; impact factors; Lake Hulun

近年来,随着社会经济的飞速发展和人口的剧烈增加,以及对水资源的不合理开发利用,江、河、湖、库等的富营养化问题日趋严重^[1-2],尤其东部湖区及云贵高原湖区水体富营养化最为严重^[3,4]。在蒙新高原湖区,由于气候干旱、降水较少、蒸发量大,远远超过湖泊补给量,导致湖水不断浓缩形成咸水湖或者盐湖,甚至干涸^[5],湖泊流域内生态环境恶化,水土流失严重;对于草原型湖泊,以放牧为主,草场退化,导致地表径流携带大量的营养盐入湖^[6];同时,随着工农业发展,人民生活水平的提高,在有限的水资源条件下,工业、

* 国家自然科学基金项目(51339002, 51269017, 51169011)资助。2015-12-14 收稿; 2016-03-02 收修改稿。梁丽娥(1989~), 女, 博士研究生; E-mail: imaulle2008@163.com.

** 通信作者; E-mail: mndlichangyou@.com.

农业和生活用水量增加,排放的污水废水剧增,导致水体富营养化程度也日益突出。

呼伦湖属于内蒙古自治区的第一大湖泊,是我国内陆高纬度半干旱地区的第一大草原型湖泊,也是我国北方重要的生态屏障,对我国北方经济发展和生态环境建设起着举足轻重的作用。呼伦湖流域以放牧为主,属典型的草原型湖泊,近年来,由于气候条件和人类活动的原因,生态环境遭到破坏。颜文博等^[7]对呼伦湖的植被资源和动物资源研究表明,连年的干旱使呼伦湖流域湿地植被不断退化,直接威胁到水禽和鸟类的生存,湖中经济鱼类不断减少。赵慧颖等^[8-9]研究了呼伦湖地区的气候特征,表明气候呈现暖干化趋势,出现气温升高、降水减少,蒸发量增大,导致呼伦湖水域面积萎缩,水位大幅度下降,湖周边沙漠化面积超过 100 km²,生态环境恶化。李畅游等^[10-12]对呼伦湖的水文要素进行分析,建立了呼伦湖的水深-水量反演模型,同时指出 2000 年以来湖泊急速萎缩的主要原因是河流径流量的锐减。气候变化导致呼伦湖流域生态环境恶化,呼伦湖水质也发生着变化。赵慧颖^[13]、岳彩英^[14]、姜忠峰^[15-16]、段超宇^[17]和王丽艳^[18-19]等分别对呼伦湖 1959—2006 年的盐度、2004—2007 年、2009—2010 年、2012 年和 2013 年的水质进行分析评价,指出呼伦湖已经处于富营养状态,2013 年水体达到中度富营养化水平。

目前呼伦湖流域的生态环境已经遭到破坏,水质恶化,水体呈现富营养化状态。引起湖泊发生富营养化的驱动力是多种的,有水文气象条件、内外源污染及人类活动等作用。本文旨在对呼伦湖水质进行 2006—2015 年 10 年的变化趋势进行分析,并找出呼伦湖富营养化的影响因素,旨在对寒旱区草原型湖泊的富营养化机理研究和预测提供一定的科学依据,对该类型典型气候和水质敏感区未来水资源的调度和水环境治理提供一定的参考。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

呼伦湖(48°33′~49°20′N, 116°58′~117°48′E)又名达赉湖,是中国第五大湖,水域辽阔,素有“草原明珠”的美誉^[20]。属额尔古纳水系,位于呼伦贝尔草原西部新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗和满洲里市之间。湖

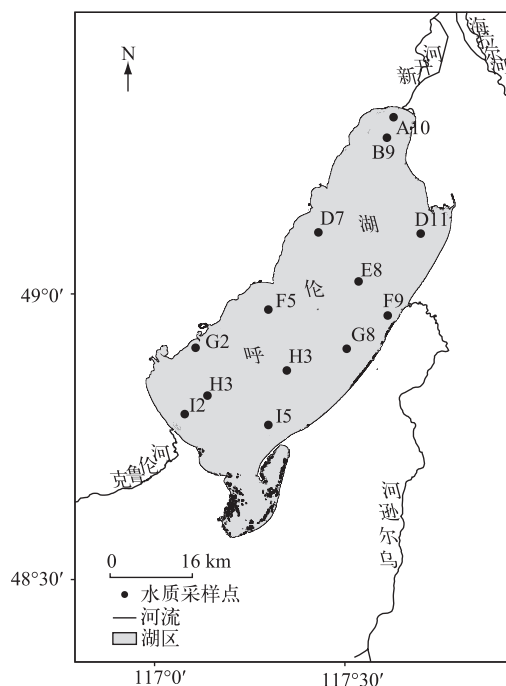


图 1 呼伦湖水水质监测点

Fig.1 Sampling sites in Lake Hulun

面呈不规则斜长方形,长轴为西南至东北方向,湖长 93 km,平均宽度 25 km,周长 447 km,当湖水水位达到历史较高水位 545.33 m 时,蓄水量为 $138 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均水深 5~6 m^[21]。呼伦湖湖水的补给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。呼伦湖地处干旱高纬度地带,属温带大陆性气候,冬季严寒漫长,冰封期长达 6 个月,春季干旱多风,夏季温凉短促,秋季降温急剧。

1.2 采样点的设置及样品的采集

根据对呼伦湖周围环境的勘察,最终选取具有代表性的 13 个采样点作为常年水质监测点(图 1),每次采样采用 GPS 定位,现场用瑞士梅特勒多参数仪测定水温、pH 值、溶解氧(DO)、电导率(EC)和盐度,透明度(SD)用自制塞氏盘测定。叶绿素 a 浓度(Chl. a)采用丙酮萃取分光光度计法测定,总氮(TN)浓度采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定,总磷(TP)浓度采用钼锑抗分光光度法测定^[22]。本文选取 2006—2015 年每年 8 月份的水质实测数据进行分析。

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 Chl.a 作为基准参数进行计算的. 所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, $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; W_j 为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 为第 j 种参数的营养状态指数, m 为评价参数的个数.

各营养状态指数计算公式为:

$$\begin{aligned} TLI(\text{Chl.a}) &= 10(2.5+1.086 \ln \text{Chl.a}) \\ TLI(\text{TP}) &= 10(9.436+1.624 \ln \text{TP}) \\ TLI(\text{TN}) &= 10(5.453+1.694 \ln \text{TN}) \\ TLI(\text{SD}) &= 10(5.118-1.94 \ln \text{SD}) \\ TLI(\text{COD}_{\text{Mn}}) &= 10(0.109+2.66 \ln \text{COD}_{\text{Mn}}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,Chl.a 单位为 mg/m^3 ;SD 单位为 m;其他指标单位均为 mg/L .

Chl.a 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:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_{j=1}^m r_{ij}^2 \quad (3)$$

式中, r_{ij} 为第 j 种参数与 Chl.a 的相关系数. 本文选取的水质参数为 Chl.a、TP、TN 和 SD.

表 1 中国湖泊(水库)部分参数与 Chl.a 的相关关系

Tab.1 The correlation between Chl.a and the other parameters of lake(reservoir) in China

参数	Chl.a	TP	TN	SD	COD _{Mn}
r_{ij}	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
r_{ij}^2	1	0.7056	0.6724	0.6889	0.6889

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,其中贫营养: $TLI(\Sigma) < 30$,中营养: $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$,轻度富营养: $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$,中度富营养: $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$,重度富营养: $TLI(\Sigma) > 70$. 在同一营养状态下,指数值越高,其营养程度越重^[23].

1.4 数据分析及处理

数据的分析及处理采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件.

2 结果

2.1 呼伦湖水体理化指标变化趋势

对 2006—2015 年呼伦湖水体理化指标(其中盐度为 2008—2015 年数据)变化进行分析,取每年 8 月份 13 个采样点的均值,结果表明,在年际上,盐度、pH、SD 和 DO 都呈现出不同程度的波动. 盐度变化范围为 0.75~1.71 ng/L ,均值为 1.32 ng/L ,2010 年达到峰值 1.71 ng/L ,随后呈现逐年递减趋势;pH 值的变化范围为 8.78~9.40,水体偏碱性;SD 的变化范围为 0.17~0.26 m,近 3 年来 SD 持续下降;DO 浓度变化范围为 4.05~10.62 mg/L ,均值为 7.12 mg/L (图 2).

2.2 呼伦湖营养盐及 Chl.a 变化趋势

2006—2011 年 TN、TP 浓度总体呈上升趋势,Chl.a 浓度先增加后降低;2012—2015 年 TN、TP 和 Chl.a 浓度均呈现上升趋势(图 3). N/P 比在 2007—2015 年呈现上升趋势. TN 浓度的变化范围为 1.16~3.53 mg/L ,平均值为 2.29 mg/L ,其中 2007 年 TN 浓度最低,为 1.16 mg/L ;TP 浓度的变化范围为 0.13~0.25 mg/L ,平均值为 0.20 mg/L ,根据《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》,呼伦湖水质达到地表水环境质量 IV~V 类水体标准. Chl.a 浓度的变化范围为 3.31~10.36 mg/m^3 ,均值为 7.35 mg/m^3 . N/P 比为 4.92~15.35,均值为 12.03. Redfield 等认为浮游植物进行光合作用时,按 N/P 比为 16 的原子比例进行^[24]. 在淡水环境中,藻类生长期内当 N/P 比 < 7,氮是可能的限制性营养盐;而当 N/P 比 > 7,则磷是可能的限制性营养盐,当 N/P 比接近 7 时,二者均可能是限制性营养盐^[25]. 因此可以认为呼伦湖的限制性营养盐可能为磷.

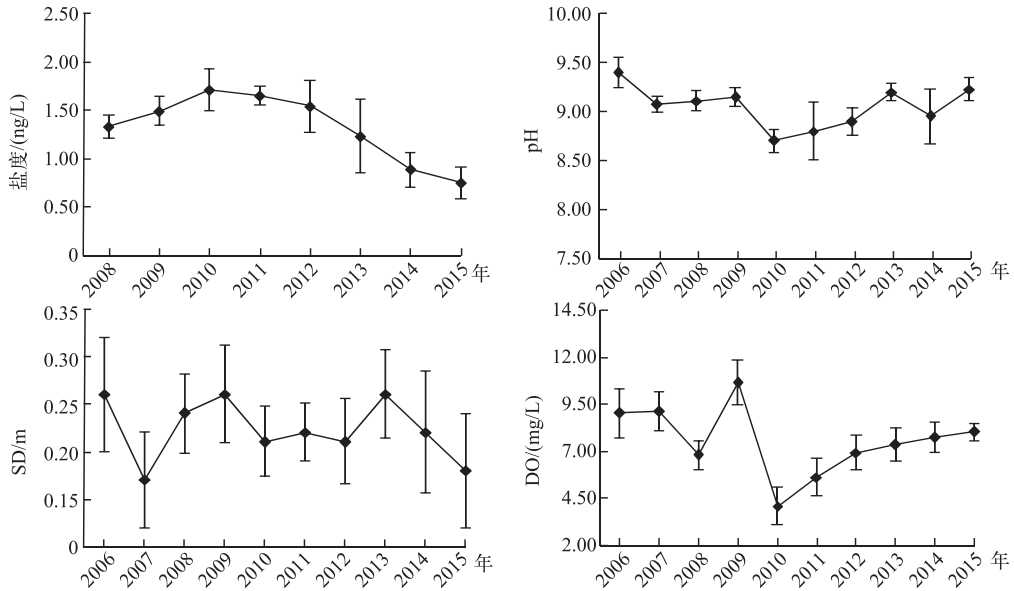


图2 2006—2015年呼伦湖水体理化指标变化

Fig.2 Variations of physical and chemical water quality indexes in Lake Hulun from 2006 to 2015

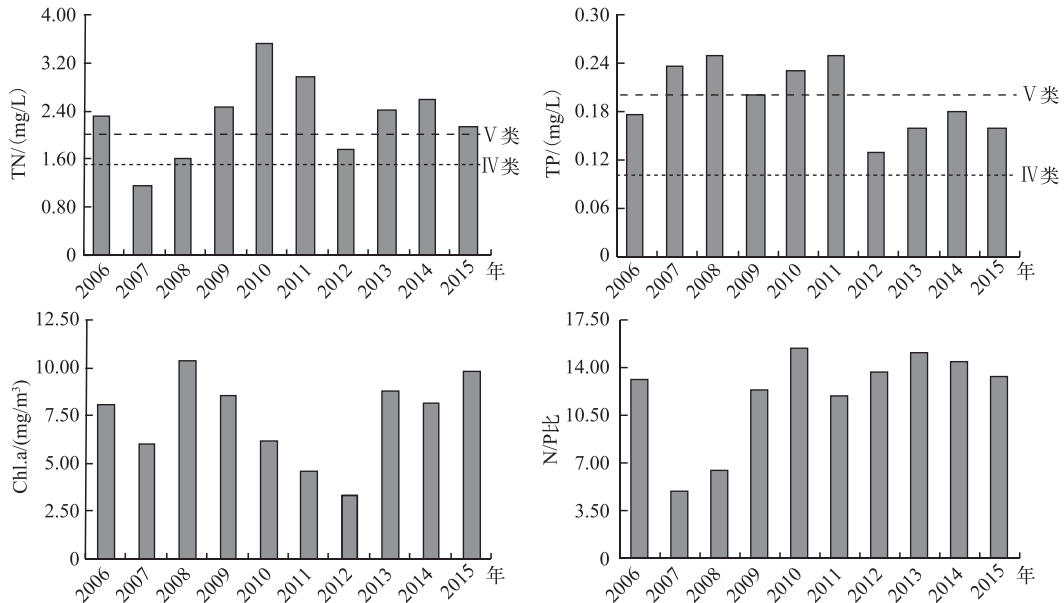


图3 2006—2015年呼伦湖营养盐及 Chl.a 浓度变化

Fig.3 Variations of nutrients and Chl.a concentrations in Lake Hulun from 2006 to 2015

2.3 呼伦湖富营养化变化趋势

利用综合营养状态指数法对呼伦湖 2006—2015 年的富营养化趋势进行分析评价,结果表明,呼伦湖水体总体表现为富营养化状态,2006—2015 年水体经历了中度—重度—中度—轻度富营养化变化过程(图 4)。其中 2008 年和 2009 年水质污染最为严重, TLI 分别为 71.12 和 70.12, 根据 TLI 分级表,呼伦湖水体为重度富营养化。2010—2015 年较 2008 年和 2009 年水质好转, TLI 为 57.78~65.74, 除 2012 年和 2015 年水质为轻

度富营养化,其余年份均为中度富营养化。

3 讨论

湖泊富营养化是各种环境因素综合作用的结果,其中氮、磷是主导因子,水文条件和水环境因子也是导致富营养化发生的关键因素。

3.1 呼伦湖水体富营养化的影响因素

3.1.1 外源输入 呼伦湖周围以放牧为主,有 2 条补给河流——克鲁伦河和乌尔逊河,沿途畜牧业较为发达,在降雨较频繁的夏季,水土流失较严重,氮磷等营养盐也会随之流失,这些营养盐有部分随地表径流进入湖泊和河流。赵伟等^[26]对呼伦湖流域草场利用方式水土及氮磷流失特征研究表明,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,可见随水土流失的营养盐浓度较大。呼伦湖常年以西北风为主导风向,每年入湖尘量可达 6440×10^4 kg,降水入湖量可达 6.28×10^8 m³/a;冰封期每年干草入湖 158.0×10^4 kg,含氮量 2.1×10^4 kg,含磷量 0.89×10^4 kg;非冰封期则有 176.8×10^4 kg 干草入湖,折算为入湖氮为 2.3×10^4 kg,入湖磷为 0.97×10^4 kg^[27]。可见大气补给和地表径流会引起大量的营养物质入湖。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^[28];湖东北端是小河口渔场,也是呼伦湖的旅游景观,每年夏季有大批的游客来此地旅游观光,人类活动比较频繁,对湖水的影响较大。同时,呼伦湖的渔业资源丰富,使渔业得到一定发展,但是存在私自捕捞现象,渔民在捕鱼过程中随意丢弃废旧电池及汽油排放,也会对呼伦湖水质产生一定的影响。上述因素导致呼伦湖的营养物质来源丰富,也为呼伦湖富营养化奠定了物质基础。取各入湖河口和小河口旅游景区附近的样品,分析营养盐浓度,结果表明乌尔逊河入湖口(F9)、克鲁伦河入湖口(I2)和小河口(A10)TN 浓度的变化范围为 1.80~3.02 mg/L,TP 浓度的变化范围为 0.10~0.54 mg/L,其中 2012 年和 2015 年 TN 和 TP 浓度均较低,这与 2012 年和 2015 年水体呈现轻度富营养化相一致(图 5)。而 2006—2015 年期间呼伦湖全湖 TN 浓度的变化范围为 1.16~3.53 mg/L,TP 浓度变化范围为 0.13~0.25 mg/L,可见,外源输入对呼伦湖营养盐的贡献较大。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)^[29],呼伦湖属于高营养水体,具备发生富营养化的营养盐条件。

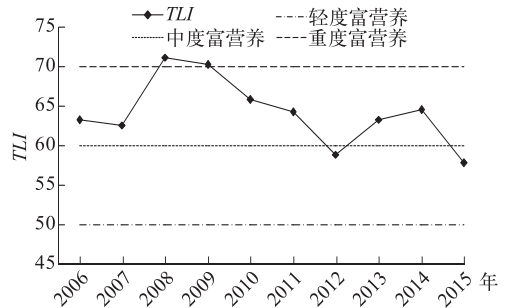


图 4 呼伦湖 2006—2015 年综合营养状态指数(TLI)变化
Fig.4 Variations of TLI in Lake Hulun from 2006 to 2015

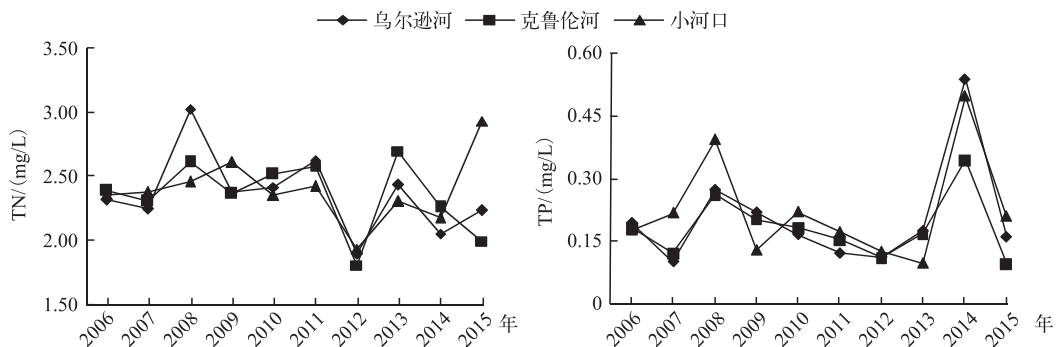


图 5 2006—2015 年各入湖河口营养盐浓度变化

Fig.5 Variations of nutrients concentrations in estuary from 2006 to 2015

3.1.2 水文条件 与呼伦湖连通的河流有 3 条,即克鲁伦河、乌尔逊河和新开河,近年来由于新开河发生断流,不再补给呼伦湖,故本文仅讨论克鲁伦河和乌尔逊河对呼伦湖的影响。克鲁伦河及乌尔逊河的径流量

2006—2009年呈下降趋势,2010—2014年径流量逐年上升,乌尔逊河径流量的变化趋势更为显著.水深的变化趋势与河流径流量趋势相似,也是先减小后增加,2006—2011年呼伦湖水深逐年递减,由2006年的3.65 m降至2011年的2.30 m,2012年起,呼伦湖水深逐年增加,由2012年的2.36 m增加到2015年的5.11 m(图6).根据黄健对呼伦湖流域水文序列的随机分析,呼伦湖流域从2000年进入枯水期,预计在2012年左右缓慢进入丰水期^[30],从水深变化趋势来看,与黄健的研究结果一致.2006—2009年,入湖径流量持续下降,水深减小,导致湖泊水位下降较为严重,湖泊出现自然浓缩,加速了富营养化进程;2010年至今,径流量增加,湖泊水量补给充沛,湖泊水位持续上涨,水深增加,湖面面积增大,水体污染物得到稀释,水质好转,富营养化程度降低.故2010—2015年水质较2008—2009年好转,呈现出重度富营养化向中轻度富营养化转变的趋势.与此同时,径流量的增加,也会携带大量的污染物入湖,增加湖泊环境容量,TN、TP浓度2012—2015年呈现上升趋势,但相比于2006年,TN、TP浓度有所减少,2015年TN浓度减少7.79%,TP浓度下降了11.11%,水质呈现好转的趋势.因此,呼伦湖入湖径流量及水深是影响湖泊发生富营养化的主要因素.

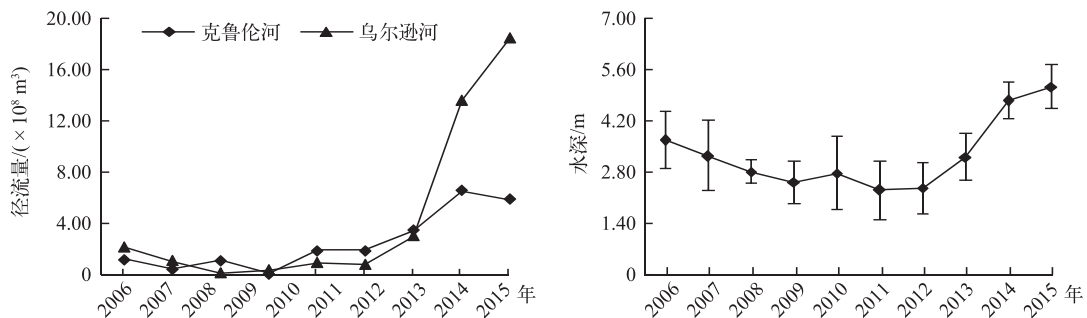


图6 呼伦湖2006—2015年径流量、水深变化

Fig.6 Variations of runoff and depth in Lake Hulun from 2006 to 2015

3.2 呼伦湖富营养化与水环境因子的相关关系

为探讨呼伦湖富营养化与各水环境因子的相关关系,对综合富营养化指数 *TLI* 与各水环境因子做相关性分析.结果表明,*TLI* 与 pH、DO、SD、盐度、TN 和 N/P 比呈显著相关,其中与 pH、DO 和 SD 均呈显著正相关,相关系数分别为 0.491、0.539 和 0.438,与盐度、TN 和 N/P 比均呈显著负相关,相关系数分别为 -0.429、-0.576 和 -0.527(表 2).水体 pH 的变化与藻类的光合作用有关^[31],呼伦湖 pH 的变化范围为 8.78~9.40,水体偏碱性,碱性环境有利于藻类的光合作用,使大气中的 CO_2 更容易被捕捉^[32].藻类光合作用强烈,消耗大量的 CO_2 ,pH 水平显著提高,pH 是 Chl.a 变化的被动因子^[33],故 *TLI* 与 pH 呈正相关关系.水体中藻类的大量繁殖,会产生有机物质,但是呼伦湖周围以放牧为主,受工业污染影响较小,有机物含量低;同时,藻类进行光合作用产生大量的氧气分子,使水体中 DO 增加,因此 DO 也是 Chl.a 变化的被动因子^[34],*TLI* 与 DO 呈正相关关系.盐度可以反映水体中可溶盐含量,呼伦湖盐度与 *TLI* 呈负相关关系,说明可溶盐的增加可以抑制藻类的生长. pH、SD 和 DO 等则是湖泊水体发生富营养化的结果而非原因,而水深、水温是湖泊发生富营养化的原因^[35].因此,水深和水温是呼伦湖发生富营养化的驱动力,而 pH、SD 和 DO 是呼伦湖水体发生富营养化影响水质的最主要表现指标.氮、磷是藻类生长所必需的营养物质,也是湖泊发生富营养化的主导因子,*TLI* 与 TN、N/P 比均呈显著负相关,与 TP 呈正相关关系,说明磷可能是呼伦湖的限制性因子.

4 结论

通过对 2006—2015 年呼伦湖水水质指标进行分析,结果表明,pH 的变化范围为 8.70~9.40,水质偏碱性;TN 浓度的变化范围为 1.16~3.53 mg/L,TP 浓度的变化范围为 0.13~0.25 mg/L,根据《地表水环境质量标准(GB 3838—2002)》,呼伦湖水水质已经达到地表水环境质量 IV~V 类水体标准. N/P 比的变化范围为 4.92~15.35,均值为 12.03,呼伦湖为磷限制性湖泊.

表 2 呼伦湖 *TLI* 与各水环境因子的相关关系Tab.2 The spearman rank correlation of water quality factors and *TLI* in Lake Hulun

	水深	SD	pH	DO	盐度	水温	TN	TP	N/P 比	<i>TLI</i>
水深	1.000									
SD	-0.142	1.000								
pH	0.600	0.426	1.000							
DO	0.455	0.123	0.661 *	1.000						
盐度	-0.857 **	-0.036	-0.833 *	-0.714 *	1.000					
水温	-0.167	-0.061	0.190	0.643	-0.214	1.000				
TN	-0.261	0.265	-0.406	-0.382	0.452	-0.238	1.000			
TP	-0.299	-0.034	-0.390	-0.244	0.422	-0.578	0.122	1.000		
N/P 比	0.115	0.080	-0.152	-0.345	0.048	-0.143	0.552	-0.591	1.000	
<i>TLI</i>	0.115	0.438	0.491	0.539	-0.429	0.167	-0.576	0.177	-0.527	1.000

* 表示 $P < 0.05$, 差异显著; ** 表示 $P < 0.01$, 差异极显著。

运用综合营养状态指数法对 2006—2015 年呼伦湖水体进行富营养化评价,结果表明,呼伦湖水体呈现出中度—重度—中度—轻度富营养化水平。通过对呼伦湖富营养化的影响因素进行分析,结果表明,影响呼伦湖富营养化的可能因素为外源输入和入湖径流量,同时水深和水温也是呼伦湖发生富营养化的驱动因素。pH、SD 和 DO 是呼伦湖水体富营养化影响水质的最主要表现指标,而非影响因素。

呼伦湖水体已经呈现富营养化状态,水体污染的预防和治理工作迫在眉睫,应采取积极的措施。通过本文的分析与讨论,主要应该控制外源输入和大量补给湖泊水量,同时对补给水水质进行控制。因此应做如下努力:(1)保护呼伦湖流域草地,严禁草地超载,过度放牧,转变草地利用方式,以轮牧方式替代传统放牧方式,合理利用牲畜粪便,减少水土流失,防止地表径流带入大量营养盐,加重湖泊富营养化进程。(2)加强对入湖河流水质的监测,控制点源污染,确保充足的补给水量和优质的补给水源,从而减轻湖水污染程度。

5 参考文献

- [1] Hu Chunhua. The water environmental characteristic and its evolutional trends of Poyang Lake [Dissertation]. Nanchang: Nanchang University, 2010(in Chinese with English abstract). [胡春华. 鄱阳湖水环境特征及演化趋势研究[学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2010.]
- [2] Richerson PJ, Suchanek TH, Why SJ. The causes and control of algal blooms in clear lake; clean lakes diagnostic/feasibility study for clear lake, California. Final Report. Division of Environmental Studies, University of California, Davis, California, USA, 1994.
- [3] Zhang Chengcheng, Shen Aichun, Zhang Xiaoqing *et al.* Application of support vector machine to evaluate the eutrophication status of Taihu Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(23): 7563-7569(in Chinese with English abstract). DOI: 10.5846/stxb201302270314. [张成成, 沈爱春, 张晓晴等. 应用支持向量机评价太湖富营养化状态. 生态学报, 2013, **33**(23): 7563-7569.]
- [4] Yu Yang, Zhang Min, Qian Shanqin *et al.* Current status and development of water quality of lakes in Yunnan-Guizhou Plateau. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 820-828(in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2010.0603. [于洋, 张民, 钱善勤. 云贵高原湖泊水质现状及演变. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 820-828.]
- [5] Li Shijie. Lacustrine changes of China. *Forest & Humankind*, 2007, **27**(7): 6-25(in Chinese). [李世杰. 中国湖泊的变迁. 森林与人类, 2007, **27**(7): 6-25.]
- [6] Han Peijiang, Li Weiping, Yu Linghong *et al.* Effect of different grazing system on nitrogen and phosphorus losses along the rainfall runoff. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(1): 8-12(in Chinese with English abstract). [韩佩江, 李卫平, 于玲红等. 不同放牧强度对流域降雨径流中氮磷流失的影响. 水土保持研究, 2016, **23**(1): 8-12.]
- [7] Yan Wenbo, Zhang Honghai, Zhang Chengde. Protection for habitat security of biological resources in wetland of Dalaihu Natural Reserve. *Territory & Natural Resources Study*, 2006, (2): 47-48(in Chinese with English abstract). [颜文博, 张

- 洪海, 张承德. 达赉湖自然保护区湿地生物生境保护. 国土与自然资源研究, 2006, (2): 47-48.]
- [8] Zhao Huiying, Wu Liji, Hao Wenbo *et al.* Influences of climate change to ecological and environmental evolvement in the Lake Hulun wetland and its surrounding areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(3): 1064-1071 (in Chinese with English abstract). [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. 生态学报, 2008, **28**(3): 1064-1071.]
- [9] Zhang Na, Wu Liji, Liu Songtao. The characteristics of climate change and its influence on water area of Lake Hulun. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, **29**(7): 192-197 (in Chinese with English abstract). [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. 干旱区资源与环境, 2015, **29**(7): 192-197.]
- [10] Li Changyou, Sun Biao, Gao Zhanyi *et al.* Retrieval model of water depth in Lake Hulun using multi-spectral remote sensing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, **42**(12): 1423-1431 (in Chinese with English abstract). [李畅游, 孙标, 高占义等. 呼伦湖多波段遥感水深反演模型研究. 水利学报, 2011, **42**(12): 1423-1431.]
- [11] Sun Biao, Li Changyou, Yang Zhiyan *et al.* An analysis on depth extraction and 3D model of Lake Hulun. *Yellow River*, 2011, **33**(2): 34-36 (in Chinese). [孙标, 李畅游, 杨志岩等. 呼伦湖水深反演及湖盆三维模型分析. 人民黄河, 2011, **33**(2): 34-36.]
- [12] Wang Zhijie, Li Changyou, Zhang Sheng *et al.* Hydrological changes in Lake Hulun based on water balance model. *J Lake Sci*, 2012, **24**(5): 667-674 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0504. [王志杰, 李畅游, 张生等. 基于水平衡的呼伦湖湖泊水量变化. 湖泊科学, 2012, **24**(5): 667-674.]
- [13] Zhao Huiying, Li Chengcai, Zhao Henghe *et al.* The climate change and its effect on the water environment in the Lake Hulun wetland. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(5): 795-801 (in Chinese with English abstract). [赵慧颖, 李成才, 赵恒和等. 呼伦湖湿地气候变化及其对水环境的影响. 冰川冻土, 2007, **29**(5): 795-801.]
- [14] Yue Caiying, Zhao Weidong, Li Mingna *et al.* The situation of Da Lai Lake water quality and influencing factors analysis. *Inner Mongolian Environmental Sciences*, 2008, **2**(2): 7-9 (in Chinese with English abstract). [岳彩英, 赵卫东, 李明娜等. 达赉湖水水质状况及影响因素分析. 内蒙古环境科学, 2008, **2**(2): 7-9.]
- [15] Jiang Zhongfeng, Li Changyou, Zhang Sheng *et al.* Phytoplankton and nutrition evaluation in Lake Hulun. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(4): 726-732 (in Chinese with English abstract). [姜忠峰, 李畅游, 张生等. 呼伦湖浮游植物调查与营养状况评价. 农业环境科学, 2011, **30**(4): 726-732.]
- [16] Jiang Zhongfeng, Li Changyou, Zhang Sheng *et al.* Zooplankton in Lake Hulun and the eutrophication evaluation. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, **28**(1): 158-162 (in Chinese with English abstract). [姜忠峰, 李畅游, 张生等. 呼伦湖浮游动物调查与水体富营养化评价. 干旱区资源与环境, 2014, **28**(1): 158-162.]
- [17] Duan Chaoyu, Zhang Sheng, Sun Biao *et al.* Assessment of Lake Hulun water quality in summer and winter. *Water Saving Irrigation*, 2014, (4): 64-69 (in Chinese with English abstract). [段超宇, 张生, 孙标等. 呼伦湖夏季与冬季水质现状评价研究. 节水灌溉, 2014, (4): 64-69.]
- [18] Wang Liyan, Shi Xiaohong, Sun Biao *et al.* Determination of COD concentration of water in Lake Hulun based on MODIS data. *Environmental Engineering*, 2014, (12): 103-108 (in Chinese with English abstract). [王丽艳, 史小红, 孙标等. 基于 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体 COD 浓度的研究. 环境工程, 2014, (12): 103-108.]
- [19] Wang Liyan, Li Changyou, Sun Biao *et al.* Determination total phosphorus concentration and evaluation eutrophication of Lake Hulun with MODIS data. *Chinese Journal of Environment Engineering*, 2014, **8**(12): 5527-5534 (in Chinese with English abstract). [王丽艳, 李畅游, 孙标等. 基于 MODIS 数据遥感反演呼伦湖水体总磷浓度及富营养化状态评价. 环境工程学报, 2014, **8**(12): 5527-5534.]
- [20] Compilation Committee of Lake Hulun Zhi (Zhi Continued). Lake Hulun Zhi (Zhi Continued). Hohht: Inner Mongolia Cultural Press, 1998: 5-20 (in Chinese). [《呼伦湖志(续志一)》编纂委员会. 呼伦湖志(续志一). 呼和浩特: 内蒙古文化出版社, 1998: 5-20.]
- [21] Xu Zhanjiang, Jiang Fengyuan, Zhao Haowen *et al.* Lake Hulun Zhi. Changchun: Jilin Literature and History Press, 1989: 660-665 (in Chinese). [徐占江, 姜风元, 赵好文等. 呼伦湖志. 长春: 吉林文史出版社, 1989: 660-665.]
- [22] State Environment Protection Administration ed. Water and wastewater monitoring and analysis method (The Fourth Edition). Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 223-671 (in Chinese). [国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 223-671.]
- [23] Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environ-*

- mental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49 (in Chinese with English abstract). [王翠明, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]
- [24] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, **46**: 205-222.
- [25] Bulgakov NG, Levich A. The nitrogen: phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure: nutrient ratios. *Archiv fur Hydrobiologie*, 1999, **146**(1): 3-22.
- [26] Zhao Wei, Yang Peiling, Li Haishan *et al.* Characteristics of soil erosion, nitrogen and phosphorous losses under three grassland use patterns in Lake Hulun watershed. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, **27**(9): 220-225 (in Chinese with English abstract). [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. 农业工程学报, 2011, **27**(9): 220-225.]
- [27] Wang Lihong. An analysis of water environment and water quality of Lake Hulun. *Journal of Hulunbeier College*, 2006, **14**(6): 5-7 (in Chinese). [王荔弘. 呼伦湖水环境及水质状况浅析. 呼伦贝尔学院学报, 2006, **14**(6): 5-7.]
- [28] Han Xianghong, Yang Chi. An analysis of the self-purification function of Lake Hulun and its effect on regional environmental conservation. *Journal of Natural Resources*, 2002, **17**(6): 684-690 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.11849/zrzyxb.2002.06.005. [韩向红, 杨特. 呼伦湖自净功能及其在区域环境保护中的作用分析. 自然资源学报, 2002, **17**(6): 684-690.]
- [29] Guo Miao, Wang Zhengkun, Peng Changya *et al.* The abundance and structure comparison of purple nonsulfur bacteria between Yangzonghai Lake and Dianchi Lake. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(6): 1337-1340 (in Chinese with English abstract). [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. 生态学报, 2005, **25**(6): 1337-1340.]
- [30] Huang Jian. Stochastic Analysis of Hydrological Time Series base on wavelet theory in Hulun Basin [Dissertation]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011 (in Chinese with English abstract). [黄健. 基于小波理论的呼伦湖流域水文序列随机分析 [学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.]
- [31] Gallian N, Salmasso N, Morabito G *et al.* Phytoplankton configuration in six deep lakes in the peri-Alpine region: are the key drivers related to eutrophication and climate? *Aquatic Ecology*, 2013, **47**(2): 177-193. DOI: 10.1007/s10452-013-9433-4.
- [32] Imhoff JF, Sahl HG, Soliman GSH *et al.* The Wadi Natrun: chemical composition and microbial mass development in alkaline brines of Eutrophic Desert Lakes. *Geomicrobiology Journal*, 1979, **1**(3): 219-234.
- [33] Ruan Xiaohong, Shi Xiaodan, Zhao Zhenhua *et al.* Correlation between chlorophyll-a concentration and environmental factors in shallow lakes in plain river network areas of Suzhou. *J Lake Sci*, 2008, **20**(5): 556-562 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2008.0502. [阮晓红, 石晓丹, 赵振华等. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素 a 与环境因子的相关关系. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 556-562.]
- [34] Zhou Beibei, Wang Guoxiang, Xu Yao *et al.* Spatial distribution of chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Qinhuai River, Nanjing. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 267-272 (in Chinese with English abstract). DOI: 10.18307/2012.0215. [周贝贝, 王国祥, 徐瑶等. 南京秦淮河叶绿素 a 空间分布及其与环境因子的关系. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 267-272.]
- [35] Wang XL, Lu YL, He GZ *et al.* Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: a 5-year study. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(8): 920-927.