

2006—2017年乌梁素海夏季水体营养状态及影响因子*

全 栋, 史小红**, 赵胜男, 张 生, 刘晶晶

(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: 为探明草型湖泊乌梁素海水体营养状态及演变趋势, 明确水体富营养化的关键影响因子, 本文采用 2006—2017 年每年 7 月份湖泊水质监测数据, 利用综合营养指数法评价了湖泊不同区域监测点的水体营养状态, 模拟分析了湖泊水体营养状态的演变过程及趋势特征, 定性分析了湖泊富营养化的关键影响因子. 研究结果表明: 乌梁素海湖区北部、西部和南部监测点处于轻度富营养状态的极限概率分别为 0.588、0.633 和 0.329, 而湖泊的中部和东部监测点处于中营养状态的极限概率分别为 0.810 和 0.536, 说明乌梁素海湖区北部、西部和南部区域夏季水体营养状态将呈现向轻度富营养化演变的趋势, 而湖区中部和东部区域则呈现向中营养化演变的趋势. 水环境因子中水体理化指标对湖泊富营养化起决定性作用, 且盐度指标响应概率高达 55%, 是水体理化指标中第 1 位影响因子, 同时 pH 值与水深指标也是影响乌梁素海水体富营养化程度的重要因子.

关键词: 乌梁素海; 营养状态; 演变特征; 影响因子; Markov 模型

Eutrophication of Lake Ulansuhai in 2006–2017 and its main impact factors

QUAN Dong, SHI Xiaohong**, ZHAO Shengnan, ZHANG Sheng & LIU Jingjing

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

Abstract: In order to ascertain the eutrophication status, evolution trend, and its main impact factors in Lake Ulansuhai, the water quality monitoring data in July between 2006 and 2017 were applied to evaluate the eutrophication status at different monitoring sites by which could represent the typical regions of the lake. The evolution process and trend characteristics of the eutrophication of lake water nutrient status were simulated and analyzed. The key influencing factors of lake eutrophication were qualitatively analyzed. The results showed that the limit probability of slight eutrophication at the northern, western and southern monitoring sites was 0.588, 0.633 and 0.329, respectively, while that in the central and eastern monitoring sites was 0.810 and 0.536, respectively. This indicated that the water eutrophication in the northern, western and southern regions of the lake would present a slight eutrophication evolution trend. Meanwhile the central and eastern regions of the lake present a moderate eutrophication evolution trend. The physical and chemical indexes of water body played a decisive role in the lake eutrophication, among which the response probability of salinity index was as high as 55%, meaning that salinity index was the most important impact factor to the lake eutrophication. pH and water depth also played a quite important role in influencing the lake eutrophication.

Keywords: Lake Ulansuhai; eutrophication; evolution trend; impact factors; Markov model

湖泊是地表水资源的主要载体, 也是维系区域生态系统平衡和调节流域水文气候特征的重要因子. 在湖泊生态环境的演变及人类活动的双重影响下, 湖泊水质环境逐渐恶化, 水体中氮、磷等营养盐严重超出标准阈值, 使水体中藻类及其他水生生物异常繁殖, 从而使水体功能丧失, 造成湖泊水体呈现富营养化状态^[1]. 国内外专家学者对水体富营养化的研究起初基于水体富营养化形成机理, 研究氮、磷等营养元素在水体内迁移转化循环的特征, 进而阐明水体富营养化发生及发展的原理, 明确水体富营养化的主要影响因素^[2-3].

* 国家自然科学基金项目(51669022, 51509133)和国家重点研发计划项目(2017YFE0114800)联合资助. 2018-12-21 收稿; 2019-01-28 收修改稿. 全栋(1992~), 男, 硕士研究生; E-mail: 13644769625@163.com.

** 通信作者; E-mail: imaushixiaohong@163.com.

随着对水体富营养化的认识加深及测量指标的多样化,充分考虑到水生生物及微生物对水体环境变化的影响,通过水生生物模拟实验和藻类培养实验,研究水体富营养化过程中水生微生物的影响机理^[4,6]. 研究技术的进步使得野外监测结合遥感解译和高通量测序等生物技术运用于水体及沉积物中富营养化问题的研究,高效系统地分析水体和沉积物的富营养化规律及微生物与藻类的分布特征及其与水体富营养化的关系^[7-9].

乌梁素海流域内地质地貌条件、水文气候特征和人类活动变化的复杂性和多样性,加之本世纪初工业化进程加剧,导致湖泊水体富营养化问题严重. 近年来政府通过控源减污和实施生态清淤工程,严控入湖污染物的排放量,降低沉积物中氮、磷元素向上覆水体的释放量,使得水体内污染物浓度明显下降^[10];同时黄河水利委员会利用凌汛分水对乌梁素海采取生态补水,2018 年度凌汛期和灌溉期分别向乌梁素海补水 2.14×10^8 和 2.06×10^8 m^3 ,使得乌梁素海水质明显改善. 依据内蒙古农业大学水环境团队多年间实测数据,总排干入湖水量由 2006 年的 3.91×10^8 m^3 升高到 2016 年的 6.88×10^8 m^3 ,总氮和总磷在 2006—2014 年间浓度均值分别为 2.66 和 0.20 mg/L,而近 3 年浓度均值分别下降为 1.42 和 0.08 mg/L,尤其是 2014—2015 年之后乌梁素海水质逐渐改善,水质状况呈良性发展^[11].

因此,系统分析乌梁素海近年来水体营养状态的特征及演变过程,明确影响水体富营养化的关键因子,对了解湖泊水体营养状态演变趋势及富营养化治理具有重要意义. 本文采用 2006—2017 年每年 7 月份在乌梁素海的水质监测数据,利用综合营养指数法确定湖泊营养状态,采用 Markov 链分析模型对乌梁素海富营养化过程演变特征进行分析,并建立 Logit 模型和 Probit 模型,定性分析水体富营养化的关键影响因子,旨在揭示乌梁素海水体营养状态演变规律,为乌梁素海水体富营养化治理提供一定理论支撑.

1 材料及方法

1.1 研究区概况

乌梁素海 ($40^{\circ}36' \sim 41^{\circ}03'N$, $108^{\circ}43' \sim 108^{\circ}57'E$) 位于内蒙古自治区巴彦淖尔市乌拉特前旗境内(图 1),北依狼山,南邻黄河,西至后套平原,东滨呼包鄂三角区,是由黄河改道而形成的河迹湖,全球同纬度最大的湖泊,也是同纬度地区罕见的具有重要生态功能的自然湖泊湿地,为中国八大淡水湖泊之一. 乌梁素海湖区呈南北狭长、东西束窄状,面积为 293 km^2 ,蓄水量为 2.5 亿~3.0 亿 m^3 ,水深 1.2~3.4 m(2015 年实测). 湖泊地处荒漠化半荒漠化地区,流域内气候类型为中温带大陆型干旱、半干旱季风气候,区域降水量小、蒸发量大,气温和降水量季节性变化特征显著,多年平均降雨量为 224 mm,蒸发量为 1502 mm,全年无霜期 152 天,湖水每年 11 月初结冰,翌年 3 月末 4 月初开始消融解冻,冰厚约为 0.3~0.6 m,冰封期约 5 个月^[12].

1.2 数据来源及预处理

通过对 2006—2017 年 7 月夏季乌梁素海水体水质指标多年间的连续监测(监测点见图 1),选取与湖泊水体富营养化密切相关的总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度、化学需氧量(COD)、叶绿素 a(Chl.a)浓度和透明度(SD)指标,采用综合营养指数法^[13]评定乌梁素海夏季水体营养状态特征,并以 I12、L11、N13、P9 和 T5 监测点作为代表(监测点特征见表 1),分析乌梁素海夏季水体营养状态的演变过程特征及未来发展趋势. 水体 TN、TP 及 Chl.a 浓度分别采用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法、钼锑抗分光光度法及丙酮萃取分光光度计法分别测定;COD 采用硫酸亚铁铵滴定法测定. SD、泥厚和水深分别采用塞氏盘法、测杆和声呐仪测

表 1 监测点特征

Tab.1 Description of monitoring sites

监测点	位置	多年平均水深/m	监测点特征
I12	41.02°N, 108.87°E	2.39	位于湖区北部,属芦苇生长和弱水循环交替区
L11	40.97°N, 108.85°E	2.18	位于湖区西部,紧临湖区入水口(红圪卜扬水站)
N13	40.93°N, 108.88°E	3.00	位于湖区东部,靠近东湖岸,属入湖水缓冲区
P9	40.90°N, 108.82°E	2.68	位于湖区中部,湖水径流中游及明水区
T5	40.83°N, 108.75°E	3.38	位于湖区南部,湖水径流下游及明水区

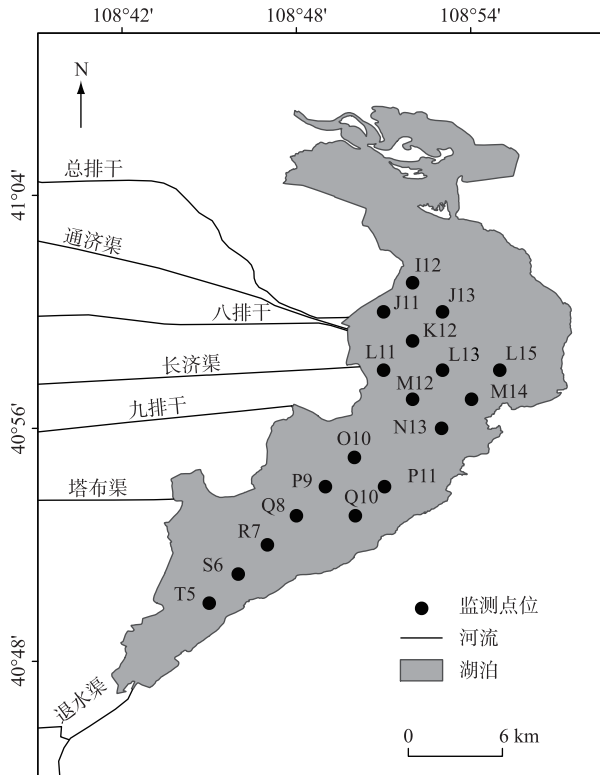


图1 研究区及采样点分布

Fig.1 Location of Lake Ulansuhai and sampling sites

定,其余常规水质指标电导率、盐度、pH 值、水温、氧化还原电位、溶解氧 (DO) 浓度和溶解性总固体 (TDS) 等均采用瑞士梅特勒多参数仪在取样时现场直接测定^[14]。

1.3 研究方法

1.3.1 Markov 链分析 乌梁素海夏季水体营养状态演变过程采用 Markov 分析法,从实测水体综合营养指数的时间序列中抽象出随机过程的概率分布,通过概率分布规律揭示水体营养状态的演变过程,进而阐明水体富营养化产生和发展的机制. Markov 链是一种状态转移分析技术,根据事物的一种状态向另一种状态转化的概率分析未来的状态概率分布^[15]. 设 Markov 链状态为 $X_n (n=0, 1, 2, \dots)$, 其每一时刻的状态概率计算公式为:

$$a_i(n) = P(X_n = i) \tag{1}$$

式中, i 为 Markov 链中一种状态,且 $\sum_{i=1}^k a_i(n) = 1$. 则 Markov 链由状态 i 转移至状态 j 的转移概率 P_{ij} 与状态概率的基本方程为:

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \tag{2}$$

$$a_i(n+1) = \sum_{j=1}^k a_j(n) P_{ij} \tag{3}$$

式中, $P_{ij} \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^k P_{ij} = 1$. 一般地,转移概率存在极限,且极值不依赖于 i , 极限概率计算公式为:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}(n) = \pi_j \tag{4}$$

1.3.2 二元选择模型 乌梁素海富营养状态的水环境影响因子采用二元选择 Logit 和 Probit 模型进行研究,将表征湖泊富营养化程度的指标综合营养指数离散化之后作为因变量,其余各水环境影响因子作为自变量

建立模型,通过模型边际效应分析,计算各水环境影响因子变化时相应因变量的响应概率,进而分析各水环境影响因子对湖泊营养状态的影响程度^[16]. Logit 模型和 Probit 模型是二元离散选择模型,因变量只有两个虚拟数值 0 和 1,代表因变量的两种状态,模型估计采用最大似然法估计,两种模型分布分别为:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1 - P_i}\right) = X_i^* \cdot \beta \tag{5}$$

$$P_i = \int_{-\infty}^{X_i^* \beta} \frac{e^{(-\frac{x^2}{2})}}{\sqrt{2\pi}} dx \tag{6}$$

式中, P_i 为因变量取值为 1 时的概率, X_i^* 为自变量, β 为自变量的回归系数.

2 结果与分析

2.1 乌梁素海夏季水体营养状态演变过程及趋势

根据 2006—2017 年 7 月份对乌梁素海夏季水体水质指标进行连续监测,并采用综合营养指数法确定湖泊水体营养状态,选取监测点中代表乌梁素海湖区东部、西部、南部、北部及中部的典型监测点 N13、L11、T5、I12 和 P9,对乌梁素海营养状态在空间区域上的演变过程进行分析. 2006—2017 年乌梁素海各区域夏季综合营养指数变化过程如图 2 所示. 乌梁素海北部区域 I12 点夏季水体综合营养指数呈现递减的变化趋势,说明水体富营养化状态表现为逐渐减轻的演变趋势,综合营养指数在 2006—2011 年间波动较大,并且在 2006、2009 和 2011 年水体综合营养指数 3 次出现峰值,分别为 73.75、75.06 和 70.38,水体呈现重度富营养化状态,但在 2011 年之后水体水质明显改善,仅呈现轻度富营养化状态. 西部区域 L11 点夏季水体综合营养指数波动较大,12 a 间综合营养指数仅在 2009 年出现峰值,为 72.37,水体呈现重度富营养化状态,在 2009 年之后水体水质明显改善,富营养化状态呈现减轻的演变趋势,至 2016 年水体富营养化状态良好. 东部区域 N13 点夏季水体富营养化状态呈现减轻的演变趋势,12 a 间综合营养指数仅在 2006 年出现峰值,为 74.87,水体呈现重度富营养化,在 2008 年之后水体水质明显改善,呈轻度富营养化,至 2016 年之后水体富营养化状况良好. 中部区域 P9 点夏季水体在 12 a 间综合营养指数波动不大,仅在 2006 年和 2013 年水体综合营养指数出现峰值,分别为 61.04 和 61.21,呈中度富营养化状况,而在 2007—2008 年、2011 年和 2015 年水体呈轻度富营养化状态,其余年份水体营养状态稳定,呈现为中营养状态,富营养化状况良好. 南部区域

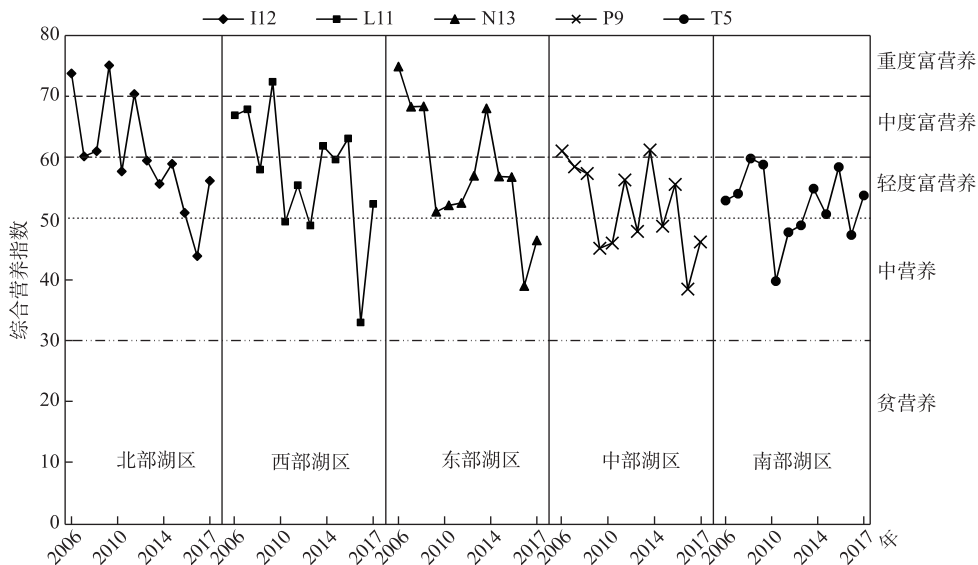


图 2 2006—2017 年乌梁素海不同湖区夏季富营养状态的变化过程

Fig.2 Changes of eutrophication status in summer in different lake areas of Lake Ulansuhai from 2006 to 2017

T5 点与中部区域 P9 点的水体综合营养指数变化过程相似,2006—2009 年、2013—2015 年和 2017 年水体营养状态变化稳定,呈轻度富营养化状态,而在 2010—2012 年与 2016 年水体呈中营养状态,富营养化状态良好. 乌梁素海湖区整体富营养化状态呈现出由湖区西北向东南减轻的变化趋势,主要由于乌梁素海湖区北部属于芦苇生长区域,水深较浅,流速缓慢导致污染物易于沉积积累,而湖区西部主要承纳河套灌区农田退水和生活污水,入湖水体中携带大量有机污染物,因而造成湖区北部和西部富营养化状态较为严重.

根据综合营养指数法对湖泊水体营养状态的划分,结合乌梁素海实际计算所得综合营养指数值,统计乌梁素海在 2006—2017 年间各年份夏季水体营养状态,并计算 4 种营养状态间的转移概率,构造相应的转移概率矩阵,并采用 Markov 链分析求解 4 种营养状态的极限概率,对未来乌梁素海水体富营养状态演变趋势进行分析,极限概率结果如图 3 所示. 由图 3 可知,监测点 I12、T5 和 L11 处于轻度富营养状态的极限概率最大,分别为 0.588、0.633 和 0.329,说明在未来水体营养状态主要向轻度富营养状态演变;监测点 N13 和 P9 处于中营养状态的极限概率最大,分别为 0.810 和 0.536,说明在未来水体营养状态主要向中营养状态演变;监测点 P9 处于重度富营养及监测点 T5 处于中度富营养和重度富营养的极限概率为 0,说明 P9 点水体在未来不会呈现重度富营养化,T5 点水体在未来也不会呈现中度富营养化和重度富营养化. 从湖区分析可知,乌梁素海湖区北部、西部和南部区域在未来极有可能呈现轻度富营养化状态,而中部和东部区域水体则呈现中营养状态,总体而言乌梁素海夏季水体的营养状态在未来呈现为向良好的营养状态方向演变的趋势.

2.2 乌梁素海富营养化影响因子分析

湖泊水体富营养化程度的主要限制因子为氮、磷等营养盐及有机物浓度,但同时也受水体理化特征、无机物特征和湖泊环境及水动力特征影响,水体的富营养化程度既决定水体水质指标的变化情况,同时也受水环境因子的影响^[17-18]. 选取乌梁素海 2015—2017 年 7 月份各监测点实测 TN 浓度、TP 浓度、COD、Chl.a 浓度和 SD 指标,采用综合营养指数法确定湖泊水体富营养化程度并将水体富营养化程度作为因变量,并以电导率、盐度、pH 值、水温、氧化还原电位、DO 浓度、水深、泥厚和 TDS 浓度 9 种水环境因子作为自变量,研究乌梁素海水体富营养化程度与水环境因子之间的响应关系.

计算得到乌梁素海 2015—2017 年 7 月份各监测点综合营养指数均值为 49.94,并将此值作为标准,对综合营养指数进行离散,其中监测点综合营养指数大于均值表示水体富营养化程度呈严重趋势,取值为“1”,综合营养指数小于均值则表示水体富营养化程度呈减轻趋势,取值为“0”;其余水环境因子变量均作为连续变量,取 2015—2017 年 7 月各监测点实测值. 通过 Logit 模型和 Probit 模型分析影响湖泊水体富营养化程度的主要水环境因子,建模结果分别为:

$$\ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) = X_i^* \cdot \beta \quad (7)$$

式中, $X_i^* \cdot \beta = -37.155 + 0.469 \text{ DO} - 2.089 \text{ H} + 0.037 \text{ h} + 0.014 \text{ ORP} - 4.627 \text{ pH} + 26.742 \text{ S} + 2.744 \text{ T} + 0.024 \text{ TDS} - 11.28 \text{ EC}$.

$$P_i = \int_{-\infty}^{X_i^* \cdot \beta} \frac{e^{-(x-\frac{x}{\beta})}}{\sqrt{2\pi}} dx \quad (8)$$

式中, $X_i^* \cdot \beta = -22.282 + 0.265 \text{ DO} - 1.052 \text{ H} + 0.018 \text{ h} + 0.009 \text{ ORP} - 2.435 \text{ pH} + 14.067 \text{ S} + 1.547 \text{ T} + 0.01 \text{ TDS} - 5.855 \text{ EC}$, P_i 表示湖泊水体呈现富营养化程度较重状态时的概率. 对 Logit 模型和 Probit 模型进行检验,其中 Logit

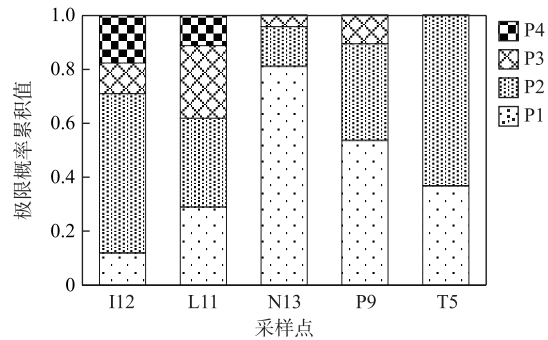


图 3 乌梁素海不同湖区夏季富营养状态极限概率 (P1、P2、P3 和 P4 分别表示处于中营养、轻度富营养、中度富营养和重度富营养)

Fig.3 Limit probability of eutrophication in summer in different lake areas of Lake Ulansuhai

模型和 Probit 模型的拟合优度分别为 0.6412 和 0.6429, 拟合结果较好, LR-statistic 检验值分别为 47.953 和 48.085, 表明模型总体显著. 两模型没有本质区别, 通常情况下可以换用, 但由于采用分布函数不同, 为使分析结果更加准确, 出于相互佐证的目的同时采用两个模型进行回归分析, 从建模结果可以看出两个模型总体效果相差不大, 仅表现为变量系数大小不同, 建模效果比较理想.

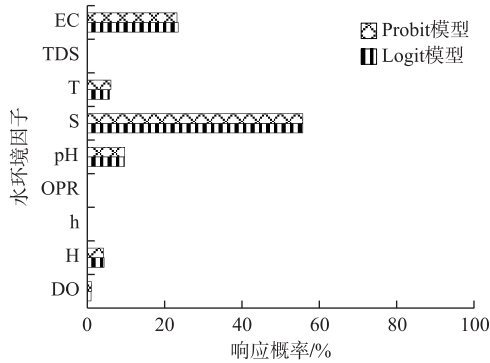


图 4 响应概率

Fig.4 Response probability of impact factors

对 Logit 模型和 Probit 模型进行边际效应分析, 根据建模方程对影响因素分别求偏导数, 计算相应自变量变化时因变量的响应概率. 由图 4 可知, Logit 模型和 Probit 模型在同一水环境因子求解的响应概率大小略有不同, 但综合整体情形来看两种模型求解的各影响因子概率的大小顺序表现一致, 为 $S > EC > pH > T > H > DO > h > TDS \geq OPR$. 由响应概率大小可知, 盐度指标的响应概率分别为 55.71% 和 55.70%, 对乌梁素海夏季水体富营养化程度影响最大; 电导率指标响应概率分别为 23.50% 和 23.18%, 对乌梁素海夏季水体富营养化程度影响次之, 表明水体理化指标对水体富营养化程度起决定性的影响; pH 值指标的响应概率分别为 9.59% 和 9.64%, 对乌梁素海夏季水体富营养化程度的影响排在

第 3 位, 说明水体的无机物特征对富营养化具有重要影响; 水温和水深对乌梁素海夏季水体富营养化程度的影响分别排在第 4、5 位, 说明湖泊环境及水动力条件也对水体富营养化具有重要影响, 而其余水环境指标的响应概率之和低于 2%, 对乌梁素海夏季水体富营养化产生的影响较弱.

3 讨论

通过二元选择模型对乌梁素海水体富营养化程度与水环境因子之间的响应关系分析可知, 盐度、电导率、pH 值、水温和水深 5 个水质指标的响应概率总和大于 98%, 对乌梁素海夏季水体富营养化程度起着决定性的影响. 基于水质指标特征和典型代表性, 选取盐度反映湖泊水体理化特征, pH 值反映湖泊水体无机物特征, 水深反映湖泊环境及水动力特征, 具体讨论各水环境指标与水体富营养化之间的关系.

3.1 盐度与富营养化的关系

盐度反映湖泊水体中离子数量与活动程度, 乌梁素海土地盐碱化较重, 农田灌溉退水、工业废水和生活污水排入乌梁素海, 区域干旱、半干旱气候特征导致蒸发量大、降水量小, 使得湖泊水体盐度值偏高, 而藻类在适宜盐度范围内较高盐度水平下易于生长繁殖, 因而极易造成水体富营养化^[19]. 在富营养化湖泊中, 高盐度水体对湖泊水生植物盐胁迫作用较强, 对水生植物的生长发育及营养物质的吸收转化都产生了限制作用, 水生植物对氮、磷营养元素的吸收受到抑制, 进而影响植物的光合作用、呼吸作用与叶绿素的合成, 导致湖泊水体环境恶化, 加深了水体富营养化程度^[20]. 同时, 盐度也是水生微生物生存的重要影响因子, 水生微生物的生存均需要适宜范围的盐度值, 在较低盐度条件下, 微生物会加快新陈代谢作用来克服增大的渗透压, 以维持细胞质内水平衡, 而在高盐度值水体中会抑制微生物活性, 减弱微生物的反硝化作用过程中对水体中氮元素的消耗, 导致水体富营养化程度加重^[21]. 因此, 通过维持水体的盐度在适宜范围内可以改善湖泊水质状况, 使湖泊水质处于良好的发展状态.

3.2 pH 值与富营养化的关系

pH 值主要是表征水体中无机物特征的重要指标, 它通过影响水体的酸碱反应、氮和磷等营养元素的释放及水生生物的光合作用来影响水体富营养化状态. 乌梁素海水体夏季 pH 值为 7.50~8.63, 冬季 pH 值为 7.73~8.90, 水体呈弱碱性, 碱性环境下有利于促进藻类的生长和繁殖, 消耗水体内溶解氧, 极易造成湖泊富营养化^[22-23]. 乌梁素海表层底泥 pH 值变化范围为 7.35~7.77, 而底层底泥 pH 值最大达到 8.18, 呈弱碱性, 碱性环境有利于沉积物中氮、磷元素向上覆水体中释放, 增加水体中氮、磷元素浓度, 进而促进水体富营养化^[24]. 此外, 乌梁素海作为河套灌区农田退水的承泄区, 含有氮、磷元素的农田退水排入湖泊, 营养元素不

仅直接造成水体富营养化,还间接提升了水体 pH 值,而 pH 值与电导率和溶解氧浓度呈显著正相关,与 TP 浓度呈负相关,pH 值的变化引起水体其他理化指标的变化,对湖泊水体富营养化产生一定影响^[25]。湖泊氮、磷元素的外源输入引起水体 pH 值升高,从而促进氮、磷元素的内源释放,因此,可以通过调节水体 pH 值处于弱碱近中性来维持水体营养状态处于良好水平。

3.3 水深与富营养化的关系

湖泊环境及水动力特征主要表现在水深、泥厚和水流流速等方面,湖泊中湖岸、湖心及湖湾等不同区域水动力条件存在一定差异,而水深是水动力条件的直接反应,也是湖泊蓄水量变化的直观表现^[26]。湖泊水深的变动,会引起湖内水体的扰动,在水体内产生一定流速梯度,对水体内氮、磷营养盐的浓度、悬浮物浓度及藻类微生物的分布产生重要影响,会导致水体中的 TN、TP、氨氮和溶解性活性磷浓度的变化,同时会造成沉积物中 Fe、Mn 的结合态磷快速释放至水体,增加水体有效磷浓度,促进水体富营养化^[27-28]。水深的变化又直接反映湖泊蓄水量的变化,乌梁素海在 2005—2014 年各排干累计排入湖中水量为 $5.72 \times 10^9 \text{ m}^3$,2010 年入湖水量是 2005 年的 1.7 倍,至 2014 年入湖水量提升至 2005 年的 2.37 倍,入湖水量显著升高,新增加水量对水体中污染物浓度既起到稀释的作用,同时又使原有湖泊水体置换排出,降低了水体中污染物浓度,可以有效改善水体水质状况^[29]。2006—2017 年 7 月乌梁素海水深呈增加的变化趋势,而相应综合营养指数均值呈现递减的变化趋势(图 5),说明水深增大、蓄水量增加对乌梁素海水体营养状态

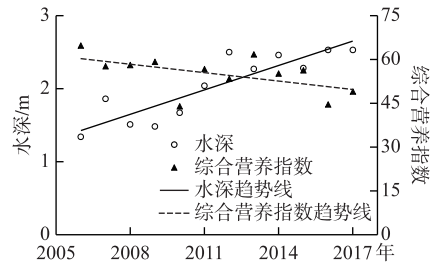


图 5 水深与综合营养指数的关系

Fig.5 Relationship between the water depth and comprehensive nutrition index

有着明显的改善作用。水深变动既能扰动水体促进内源中活性磷的释放,又能通过增加水深提高湖泊蓄水量来降低污染物浓度,因此,可以通过调节水深促进污染物释放,通过增加水量促进污染物置换排除,以维持湖泊水体水质处于良好状态。

4 结论

1)通过 Markov 模型对乌梁素海夏季水体营养状态的演变趋势分析可知:乌梁素海湖区北部、西部和南部区域处于轻度富营养状态的极限概率最大,分别为 0.588、0.633 和 0.329,说明北部、西部和南部区域在未来极有可能呈现轻度富营养化的演变趋势;而湖泊的中部和东部区域处于中营养状态的极限概率最大,分别为 0.810 和 0.536,说明中部和东部区域在未来极有可能呈现中营养化的演变趋势。

2)通过 Logit 和 Probit 模型对乌梁素海夏季水体富营养化影响因子定性分析可知:乌梁素海水环境因子中水体理化指标对富营养化程度响应概率之和大于 83%,对湖泊水体富营养化起决定性作用,并且盐度指标响应概率大于 55%,是水体理化指标中第 1 位影响因子;同时 pH 值与水深也是影响乌梁素海水体富营养化程度的重要因子。

3)通过对乌梁素海夏季水体富营养化程度的水环境影响因子分析表明可以通过对湖泊水体盐度及酸碱性调控,并采取生态补水增加水量的措施来实现湖泊水体营养状态的良性发展。

5 参考文献

- [1] Schindler DW. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2012, **279**: 4322-4333.
- [2] Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions and potential solutions. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [3] Wang X, Lv XG, Zhang XL *et al.* Eutrophication aspects and effective factors analysis in Songhua Lake. *Wetland Science*, 2004, **2**(4): 273-278. [王霞, 吕宪国, 张学林等. 松花湖富营养化现状及其影响因素分析. *湿地科学*, 2004, **2**(4): 273-278.]
- [4] Ozawa K, Fujioka H, Muranaka M *et al.* Spatial distribution and temporal variation of *Microcystis* species composition and

- microcystin concentration in Lake Biwa. *Environmental Toxicology*, 2005, **20**(3): 270-276.
- [5] Zheng JF, Li FK, Sun LP. Identification of eutrophication-controlling factors in mesohaline waters of coastal region: A case study on Qingjing Lake of Tianjin City. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 785-791. [郑剑锋, 李付宽, 孙力平. 滨海地区混盐水体富营养化主因子识别与分析——以天津市清静湖为例. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 785-791.]
- [6] Zhang H, Lin C, Lei P *et al.* Evaluation of river eutrophication of the Haihe River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2336-2344. [张洪, 林超, 雷沛等. 海河流域河流富营养化程度总体评估. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2336-2344.]
- [7] Andersen T, Carstensen J, Hernandez-Garcia E *et al.* Ecological thresholds and regime shifts: Approaches to identification. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, **24**(1): 49-57.
- [8] Wu L, Qin HY, Zhu MY *et al.* Distribution characteristics and controlling factors of nitrifying microorganisms in freshwater and sediment of eutrophic zones in Lake Taihu in autumn. *J Lake Sci*, 2017, **29**(6): 1312-1323. DOI: 10.18307/2017.0603. [吴玲, 秦红益, 朱梦圆等. 太湖富营养化湖区秋季水体和沉积物中硝化微生物分布特征及控制因素. 湖泊科学, 2017, **29**(6): 1312-1323.]
- [9] Zhang M, Kong FX. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984—2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798. DOI: 10.18307/2015.0505. [张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984-2013年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]
- [10] He LS, Xi BD eds. Research on integrated treatment and management planning of Lake Ulansuhai. Beijing: China Environmental Science Press, 2013. [何连生, 席北斗. 乌梁素海综合治理规划研究. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.]
- [11] Lv J, Li CY, Zhao SN *et al.* Evaluation of nutritional status in Wu Liangsuhai in frozen and non-frozen seasons. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(1): 109-114. [吕杰, 李畅游, 赵胜男等. 乌梁素海冰封期与非冰封期营养状态分布特征. 干旱区资源与环境, 2018, **32**(1): 109-114.]
- [12] Li CY, Shi XH, Zhao SN eds. Study on ice environmental characteristics and material migration of Ulansuhai Lake. Beijing: Science Press, 2016; 90. [李畅游, 史小红, 赵胜男. 乌梁素海湖冰环境特征及物质迁移规律研究. 北京: 科学出版社, 2016; 90.]
- [13] Liang LE, Li CY, Shi XH *et al.* Analysis on the eutrophication trends and affecting factors in Lake Hulun, 2006-2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1265-1273. DOI: 10.18307/2016.0612. [梁丽娥, 李畅游, 史小红等. 2006—2015年内蒙古呼伦湖富营养化趋势及分析. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1265-1273.]
- [14] Editorial board of "Water and wastewater monitoring and analysis method", Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater: fourth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [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: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [15] Sun P, Zhang Q, Tu XJ *et al.* Changing properties of meteor-hydrological droughts of the Lake Poyang Basin using the Markov model. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1177-1186. DOI: 10.18307/2015.0624. [孙鹏, 张强, 涂新军等. 基于马尔科夫链模型的鄱阳湖流域水文气象干旱研究. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1177-1186.]
- [16] Liu K, Li YE, Wu Q *et al.* Driving force analysis of land use change in the developed area based on Probit regression model: A case study of Nanjing City, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(7): 2131-2138. [刘康, 李月娥, 吴群等. 基于 Probit 回归模型的经济发达地区土地利用变化驱动力分析——以南京市为例. 应用生态学报, 2015, **26**(7): 2131-2138.]
- [17] Tsugeki NK, Agusa T, Ueda S *et al.* Eutrophication of mountain lakes in Japan due to increasing deposition of anthropogenically produced dust. *Ecological Research*, 2012, **27**(6): 1041-1052.
- [18] 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.
- [19] Barron S, Weber C, Marion R *et al.* Effects of varying salinity on phytoplankton growth in a low - salinity coastal pond under two nutrient conditions. *Biol Bull*, 2002, **203**: 260-261.
- [20] Zhang YL, Xi BD, Xu QJ. Research on the possibility of using salinity as eutrophication criteria indicator of saline lakes.

- Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, **1**(3): 260-263.[张亚丽, 席北斗, 许秋瑾. 盐度作为咸水湖富营养化基准指标的可能性初探. 环境工程技术学报, 2011, **1**(3): 260-263.]
- [21] Guo ZX, Wang Q, Yu ZL. Effects of salinity on the activity of non-acclimated biomass. *China Environmental Science*, 2017, **37**(1): 181-187.[郭姿璇, 王群, 余宗莲. 盐度对未驯化微生物活性的影响. 中国环境科学, 2017, **37**(1): 181-187.]
- [22] Zhao MX, Han BP. Analysis of factors affecting cyanobacteria bloom in a tropical reservoir (Tangxi Reservoir, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(7): 1554-1567.[赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析. 生态学报, 2005, **25**(7): 1554-1567.]
- [23] Li WP, Xu J, Yu LH *et al.* Distribution characteristics of nutrients and phytoplankton in Wuliangsuhai Lake during the icebound season. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(6): 1007-1013.[李卫平, 徐静, 于玲红等. 乌梁素海冰封期营养盐及浮游植物的分布特征. 生态环境学报, 2014, **23**(6): 1007-1013.]
- [24] Fu XJ, Jia KL, Shi XH *et al.* The humus composition and distribution of Lake Wuliangsuhai sediment. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 489-496. DOI: 10.18307/2013.0405. [付绪金, 贾克力, 史小红等. 乌梁素海沉积物腐殖质的组成及分布特征. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 489-496.]
- [25] Liang XZ, Li CY, Li X *et al.* The relativity of pH and other indicators in eutrophication body of Wuliangsuhai Lake. *China Rural Water and Hydropower*, 2009, (12): 1-6.[梁喜珍, 李畅游, 李兴等. 乌梁素海富营养化水体 pH 值与其他指标的相关性初探. 中国农村水利水电, 2009, (12): 1-6.]
- [26] Ren Z, Yang SY, Wang XZ *et al.* Spatial and temporal variation of water quality of Erhai Basin. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2011, **27**(4): 14-20.[任泽, 杨顺益, 汪兴中等. 洱海流域水质时空变化特征. 生态与农村环境学报, 2011, **27**(4): 14-20.]
- [27] Ding YQ, Zhu GW, Qin BQ *et al.* Experimental study on the effect of wave disturbances on the phosphorus dynamics in shallow lakes. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(2): 273-278.[丁燕青, 朱广伟, 秦伯强等. 波浪扰动对太湖底泥磷释放影响模拟. 水科学进展, 2011, **22**(2): 273-278.]
- [28] Gao YX, Sun XJ, Zhang ZP *et al.* Simulated study on concentration change of different form phosphorus in shallow lakes caused by wind-wave disturbance. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(5): 668-673.[高永霞, 孙小静, 张战平等. 风浪扰动引起湖泊磷形态变化的模拟试验研究. 水科学进展, 2007, **18**(5): 668-673.]
- [29] Tian WD, Jia KL, Shi XH *et al.* Water quality variation in Lake Wuliangsuhai, 2005-2014. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1226-1234. DOI: 10.18307/2016.0608. [田伟东, 贾克力, 史小红等. 2005—2014 年乌梁素海湖泊水质变化特征. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1226-1234.]