



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401451

引用格式: 马煜萱, 包峻松, 洪坤钰, 等. 春灌期阅海水体的氮磷分布特征及富营养化趋势[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(2): 850-861.

Ma Yuxuan, Bao Junsong, Hong Kunyu, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus and the eutrophication trend of Yuehai Lake during the spring irrigation period[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(2): 850-861.

环境科学、安全科学

## 春灌期阅海水体的氮磷分布特征及富营养化趋势

马煜萱<sup>1,2</sup>, 包峻松<sup>1</sup>, 洪坤钰<sup>3</sup>, 金军<sup>1</sup>, 陈坦<sup>1,2\*</sup>, 刘颖<sup>1</sup>, 杨婷<sup>1</sup>, 张冰<sup>1</sup>

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 中央民族大学北京市食品环境与健康工程技术研究中心, 北京 100081;  
3. 宁夏环境科学研究院(有限责任公司), 银川 750001)

**摘要** 银川市面积最大的湿地——阅海, 春季水质差, 农业面源污染的贡献大。为深入认识春灌期阅海水体中氮磷的分布规律和富营养化情况, 于 2021 年春灌期采集了阅海及其出湖河流共 28 个代表性点位的水体样品, 分析了阅海水体总氮(total nitrogen, TN)、总磷(total phosphorus, TP)和不同形态氮磷的分布特征和规律, 揭示了阅海及其出湖河流的氮磷浓度差异性。结果表明, 春灌期阅海水体 78% 采样点的 TN 浓度劣于地表水 III 类标准, 57% 采样点的 TN 浓度属于重富营养型。春灌期阅海水体各采样点 TP 浓度均劣于地表水 III 类标准, 70% 采样点的 TP 浓度属于重富营养型。阅海中不同形态氮在水体中的来源和转化过程存在差异, 酸碱度(pH)及溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)影响水体氮磷浓度, 溶解氧(dissolved oxygen, DO)对水体氮磷形态的影响不明显。阅海出湖河流与阅海水体的氮磷分布特征不同, 在河湖水体流向(南北方向)上, 河湖水体间氮浓度及非正磷酸盐磷浓度差异不显著。阅海水体中的氮磷污染物随出湖河流汇入黄河, 阅海水体中的氮及非正磷酸盐磷可能会对黄河宁夏段水体产生一定影响, 增加黄河水污染风险, 应加强对阅海水体氮及非正磷酸盐磷的控制。研究结果为持续精准提升黄河流域中上游水质提供参考。

**关键词** 阅海; 春灌期; 氮磷污染; 分布特征; 富营养化趋势

中图分类号 X524; 文献标志码 A

## Distribution Characteristics of Nitrogen and Phosphorus and the Eutrophication Trend of Yuehai Lake during the Spring Irrigation Period

MA Yu-xuan<sup>1,2</sup>, BAO Jun-song<sup>1</sup>, HONG Kun-yu<sup>3</sup>, JIN Jun<sup>1</sup>, CHEN Tan<sup>1,2\*</sup>, LIU Ying<sup>1</sup>,  
YANG Ting<sup>1</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China;  
2. Beijing Engineering Research Center of Food Environment and Health, Minzu University of China, Beijing 100081, China;  
3. Ningxia Environmental Science Research Institute Co., Ltd., Yinchuan 750001, China)

**[Abstract]** Yuehai is the largest wetland in Yinchuan of poor water quality during spring, with a significant contribution from agricultural non-point source pollution. In order to gain a deeper understanding of the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the Yuehai Lake and its eutrophication status, water samples from 28 representative sites in Yuehai Lake and its outflow river were collected during the spring irrigation period of 2021. The distribution characteristics and regularities of TN (total nitrogen) and TP (total phosphorus), as well as different forms of nitrogen and phosphorus in Yuehai Lake were analyzed. The differences in nitrogen and phosphorus concentration between Yuehai Lake and its outflowing river were revealed. The results showed that during the spring irrigation period, the TN concentrations at 78% of the sampling points in Yuehai Lake was lower than the Class III surface water standard, and the TN concentration at 57% of the sampling points belonged to the heavily eutrophic type. During the spring irrigation period, the TP concentration at all sampling points was lower than Class III surface water standard, and the TP concentration at 70% of the sampling points belonged to the heavily eutrophic type. There were differences in the sources and transformation processes of different nitrogen fractions in the water of the Yuehai Lake. pH and TDS (total dissolved solids) affect the concentration of nitrogen and phosphorus in the water, and DO (dissolved oxygen) does not have a significant effect on the nitrogen and phosphorus forms in the

收稿日期: 2024-03-04; 修订日期: 2024-10-24

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(2023QNYL15, 2022QNYL27)

第一作者: 马煜萱(1999—), 女, 汉族, 云南临沧人, 硕士研究生。研究方向: 环境化学。E-mail: myx19992023@163.com。

\* 通信作者: 陈坦(1986—), 男, 汉族, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授。研究方向: 固体废物处理处置与资源化。E-mail: chentan05@tsinghua.org.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

water of the Yuehai Lake. The distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in the outflow river of the Yuehai and the Yuehai water were different, and the differences in nitrogen concentration and non-orthophosphate phosphorus concentration between the Yuehai Lake and its outflow river were not significant in the direction of river and lake water flow (north-south direction). The nitrogen and phosphorus pollutants in the Yuehai converged into the Yellow River along with the rivers out of the Yuehai Lake, and the nitrogen and non-orthophosphate phosphorus in the Yuehai Lake might impact on the water of the Ningxia section of the Yellow River and increase the risk of pollution of the Yellow River, and the control of the nitrogen and non-orthophosphate phosphorus in the Yuehai Lake should be strengthened. This work provides a reference for continuously and accurately improving the water quality in the middle and upper reaches of the Yellow River Basin.

[ **Keywords** ] Yuehai Lake; spring irrigation period; pollution of nitrogen and phosphorus; distribution characteristics; eutrophication trend

水体富营养化是由于氮、磷等营养物质的过量积累而引起水体化学性质的变化<sup>[1]</sup>,已经成为全球普遍关注的环境问题<sup>[2-3]</sup>,主要诱因为过量营养物质的输入<sup>[4,5]</sup>。水体总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)浓度可用于估算富营养化的潜在风险,在已报道的潜在或正处于富营养状态的湖泊、河流和湿地中,如2018年威拉诺夫斯基湖<sup>[6]</sup>、2010—2019年多瑙河-蒂萨河-多瑙河水系<sup>[7]</sup>及2018年太湖梅梁湾五里湖<sup>[8]</sup>,水体TN平均浓度均高于1.0 mg/L,TP平均浓度均高于0.075 mg/L,氮磷含量在自然或人为活动等作用下快速积累,使生产力下的贫营养水体逐渐转向高生产力的富营养水体,致使藻类或水生植物大量生长,破坏了生态系统的平衡,影响人类饮用水质及农田灌溉水质等<sup>[1,9]</sup>。地表水水质受到多种因素的综合影响,其中包括流域土地利用结构、人为因素(如农业活动和生产)、生物活动以及气候条件等<sup>[10]</sup>,不同污染源、不同赋存条件下水体中氮磷形态的分布存在差异<sup>[11-13]</sup>,影响水生生物及地表水环境。水体中的不同形态氮磷具有不同的生物活性,并会对环境产生不同的影响,因此水体富营养化与氮磷形态密切相关<sup>[14]</sup>。如处于富营养化状态的巢湖和太湖水体中,正磷酸盐和单酯磷占TP的比例较高,在一定的环境因素下总颗粒态磷(total particulate phosphorus, TPP)中的正磷酸盐和单酯磷可以转化为总溶解态磷(total dissolved phosphorus, TDP),加速磷在水中的积累,提高藻类暴发的风险<sup>[15]</sup>;2010—2019年多瑙河-蒂萨河-多瑙河水系处于潜在富营养化状态时硝态氮(nitrate,  $\text{NO}_3^-$ -N)占TN比例较高达到51.1%,正磷酸盐占TP比例较高达到60.5%<sup>[7]</sup>。此外有研究表明水体中的 $\text{NO}_3^-$ -N能影响沉积物磷的释放,从而影响湖泊富营养化过程<sup>[16]</sup>。为更好地控制地表水体的富营养化,不仅需要充分考虑氮磷总量,还应考虑不同来源的不同赋存形态氮磷,充分关注各形态氮磷污染物的转化。

阅海位于银川市中心,是银川市面积最大的湿地,在调节气候、涵养水源等方面具有重要作用,近

年以黄河水为主要补水水源<sup>[17]</sup>。阅海周边的农田以黄河水或阅海水灌溉,由于施肥流失等原因,农田灌溉退水携带大量氮磷营养物质汇入阅海,阅海通过典农河、灌溉沟渠等泄入黄河,阅海水质恶化对黄河水质影响较大。2020年位于黄河宁夏段上游的银古公路桥断面监测点水质TP全年平均浓度为0.011 mg/L,低于位于黄河宁夏段下游的平罗黄河大桥断面监测点TP全年平均浓度(0.078 mg/L)<sup>[18]</sup>;同年6月平罗黄河大桥面监测点水质为Ⅲ类水,劣于银古公路桥断面监测点水质(Ⅱ类水)<sup>[19]</sup>,表明春灌末期黄河宁夏段下游水质劣于上游。春灌期是灌区种植业面源污染高发期,春灌期宁夏灌区向黄河流域汇入农田灌溉退水,化肥的不当施用使大量氮磷类污染物随农田灌溉退水排入地表水,使黄河水质恶化。已有研究表明阅海春季水质较差<sup>[20-21]</sup>,农业面源污染是阅海春季水质较差的重要原因<sup>[22]</sup>,但关于阅海水质状况对黄河水质的影响的研究尚待深入,尤其是关于春灌期阅海氮磷形态变化对黄河水质影响的研究。

为持续改善黄河水质,春灌期阅海氮磷形态变化及对黄河水质的影响值得进一步讨论。本文研究于2021年春灌期在银川阅海及其出湖河流采集表层水样品,分析阅海及其出湖河流水体中TN、TP和各形态氮磷的浓度分布特征,评价阅海水体各采样点TN、TP污染情况,解析春灌期阅海水体及其出湖河流水体差异性,为春灌期阅海水质状况对黄河宁夏段水质影响提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域与样品采集

阅海湖位于宁夏回族自治区银川市金凤区西北部,处于中温带半干旱半荒漠气候带,降雨稀少,年均降水量200 mm左右<sup>[23]</sup>,阳光充足,蒸发强烈,大部分地区为耕地和建筑用地(图1),土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。阅海湖由天然湖泊经人工改造而成,湿地总面积

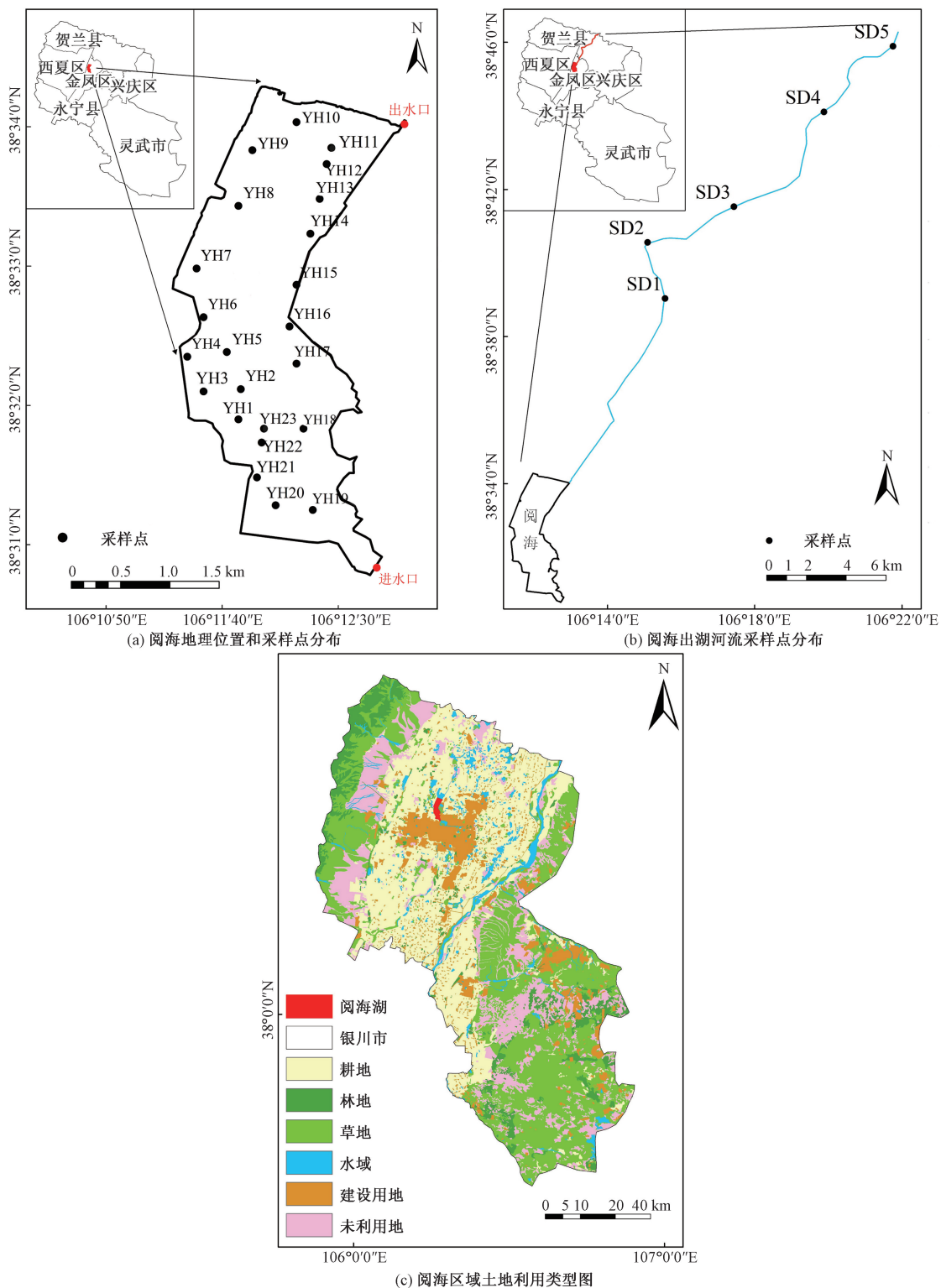


图1 阅海地理位置、采样点分布及区域土地利用类型

Fig. 1 Geographic location, distribution of sampling sites and regional land use types in Yuehai

22.74 km<sup>2</sup>, 湖泊面积 17.91 km<sup>2</sup>, 沼泽面积 0.94 km<sup>2</sup>, 人工湿地面积 3.89 km<sup>2</sup>, 湖泊平均水深 1.8 m<sup>[24-26]</sup>, 对当地生态环境具有重要意义。阅海经典农河穿湖而过, 阅海出湖河流为典农河中段, 典农河下段与黄河相连<sup>[27]</sup>。于 2021 年 4 月底采集

阅海 23 个点位与阅海出湖河流 5 个点位的表层水样品, 采样点分布如图 1 所示。使用聚乙烯瓶采集水面以下 15 ~ 20 cm 水样, 同一个采样点采集 1 L, 采集的水样加入约 0.5 mL 硫酸( $\rho = 1.84 \text{ g/mL}$ )酸化, 调节至 pH < 2 后在 -18 °C 冷冻保存待检。

## 1.2 各形态氮磷的分析方法

水体氮磷的检测方法均根据现行标准展开,其中有机氮(organic nitrogen, ON)的浓度为TN浓度依次减去氨氮(ammonia,  $\text{NH}_4^+$ -N)、 $\text{NO}_3^-$ -N和亚硝态氮(nitrite nitrogen,  $\text{NO}_2^-$ -N)的浓度获得<sup>[11]</sup>。水体TDP、溶解态正磷酸盐磷(dissolved inorganic phosphorus, DIP)和颗粒态正磷酸盐磷(particulate inorganic phosphorus, PIP)方法参考文献[11,13]进行测定,TPP、溶解态非正磷酸盐磷(dissolved non-orthophosphate phosphorus, DOP)和颗粒态非正磷酸盐磷(particulate non-orthophosphate phosphorus, POP)的浓度均以差值获得<sup>[28]</sup>。现场测定水体溶解氧(dissolved oxygen, DO)、酸碱度(pH)和溶解性总固体(total dissolved solids, TDS),水体TN、TP及各形态氮磷均于实验室测定。分析采用可见分光光度计(Spectrumlab 22pc,上海新仪微波化学科技有限公司)、紫外-可见分光光度计(JASCO-750,日本JASCO公司)、便携式多参数测量仪(SX712,上海三信仪表厂)等仪器。

采用国标检测认证有限公司的氨氮标准物质[GBW(E)083304-50]、磷标准物质[(GSB04-1741-2004(a))]、硝酸盐氮标准物质[GBW(E)083215-50]等标准物质,通过空白加标方法评价阅海水质分析的精密度和准确度,回收率均在90.0%~105%范围内,变异系数控制在10.0%以内。

## 2 结果与分析

### 2.1 阅海水体中氮浓度分布特征及污染水平

#### 2.1.1 阅海水体中总氮浓度分布特征及污染水平

阅海水体中总氮分布特征如表1和图2(a)所示。阅海水体TN浓度(以N计,其余氮类指标同)呈北部低南部高的分布规律。对比中国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002),采样点YH5、YH8、YH10、YH12及YH15水样的TN浓度均达到地表Ⅲ类水标准,YH1~YH3、YH6、YH7、YH9、YH11、YH13及YH14属于地表Ⅳ类水,YH4及YH16~YH23均属于地表Ⅴ类水。阅海南部采样点TN浓度处于地表Ⅴ类水水平,北部采样点TN浓度处于地表Ⅲ~Ⅳ类水水平,可能受农田退水等外部污染负荷的影响,导致该区域的TN浓度较高;同时,阅海补给水自南部输入、北部流出,随着水流从南向北运动,经过悬浮有机物沉降、湿地净化过程后,TN浓度逐渐降低,这与乌梁素海TN变化原因相似<sup>[29]</sup>。根据《湖泊富营养化调查规范》<sup>[30]</sup>,水体TN浓度<0.250 mg/L时,该水体为贫营养型;TN浓度在0.250~0.700 mg/L范围内时,该水体为中营养

型;TN浓度在0.700~1.30 mg/L范围内时,该水体为富营养型;TN浓度>1.30 mg/L时,该水体为重富营养型。YH3、YH5、YH6、YH8~YH13及YH15属于富营养型,其余各点均属于重富营养型,总体上阅海水体氮浓度较高。

与其他河湖相比,2021年春灌期阅海TN平均浓度(1.66 mg/L)低于2010—2019年洪泽湖TN平均浓度(1.88 mg/L)<sup>[31]</sup>、2014—2020年太湖TN浓度(1.67~2.82 mg/L)<sup>[32]</sup>及2018—2020年黄河宁夏段TN浓度(1.87~2.8 mg/L)<sup>[33]</sup>,与2013—2018年长湖TN平均浓度(1.61 mg/L)<sup>[34]</sup>大体相当,高于2014—2020年鄱阳湖TN浓度(1.278~2.137 mg/L)<sup>[32]</sup>及2014—2020年洞庭湖TN浓度(1.619~2.416 mg/L)最低水平<sup>[32]</sup>。与阅海往年浓度相比,2021年春灌期阅海TN平均浓度高于2019年5月阅海TN平均浓度(约1.10 mg/L)<sup>[21]</sup>及2019年6月阅海TN平均浓度(1.05 mg/L)<sup>[35]</sup>,高于2010—2020年阅海TN浓度(0.74~2.20 mg/L)最低水平<sup>[36]</sup>。2021年春灌期阅海TN浓度较往年偏高。

表1 阅海水体总氮及形态氮浓度

Table 1 Nitrogen concentrations of various forms in the Yuehai water system

统计参数/ ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TN	ON	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N
最大值	3.200	1.820	1.470	1.040	0.012
最小值	0.813	0.049	0.328	0.087	0.001
平均值	1.661	0.667	0.656	0.332	0.006
标准差	0.772	0.594	0.285	0.292	0.003

#### 2.1.2 阅海水体中各形态氮浓度分布特征及污染水平

阅海水体中各形态氮浓度及分布特征如表1和图2(b)~图2(e)所示。水体中 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N与TN浓度变化趋势相似,可能三者污染来源相同,阅海4种形态氮浓度均值大小顺序为ON> $\text{NH}_4^+$ -N> $\text{NO}_3^-$ -N> $\text{NO}_2^-$ -N,4种形态氮浓度占TN均值大小顺序为ON(40.2%)> $\text{NH}_4^+$ -N(39.5%)> $\text{NO}_3^-$ -N(20.0%)> $\text{NO}_2^-$ -N(0.3%)。ON浓度相对较高,可能因为农业面源污染的外源输入较多以及在微生物作用下动植物的自然降解速度较快等; $\text{NH}_4^+$ -N浓度相对较高,可能是因为宁夏引黄灌区的施肥以施化肥为主,化肥种类主要包括尿素、碳酸氢铵和磷酸铵等<sup>[37]</sup>,尿素等化肥溶于水生成大量的 $\text{NH}_4^+$ -N, $\text{NH}_4^+$ -N随农田退水流入阅海,使阅海 $\text{NH}_4^+$ -N浓度相对较高。

ON、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N与TN浓度分布相似,均为南部高、北部低,含有大量氮元素的农业、工业和城

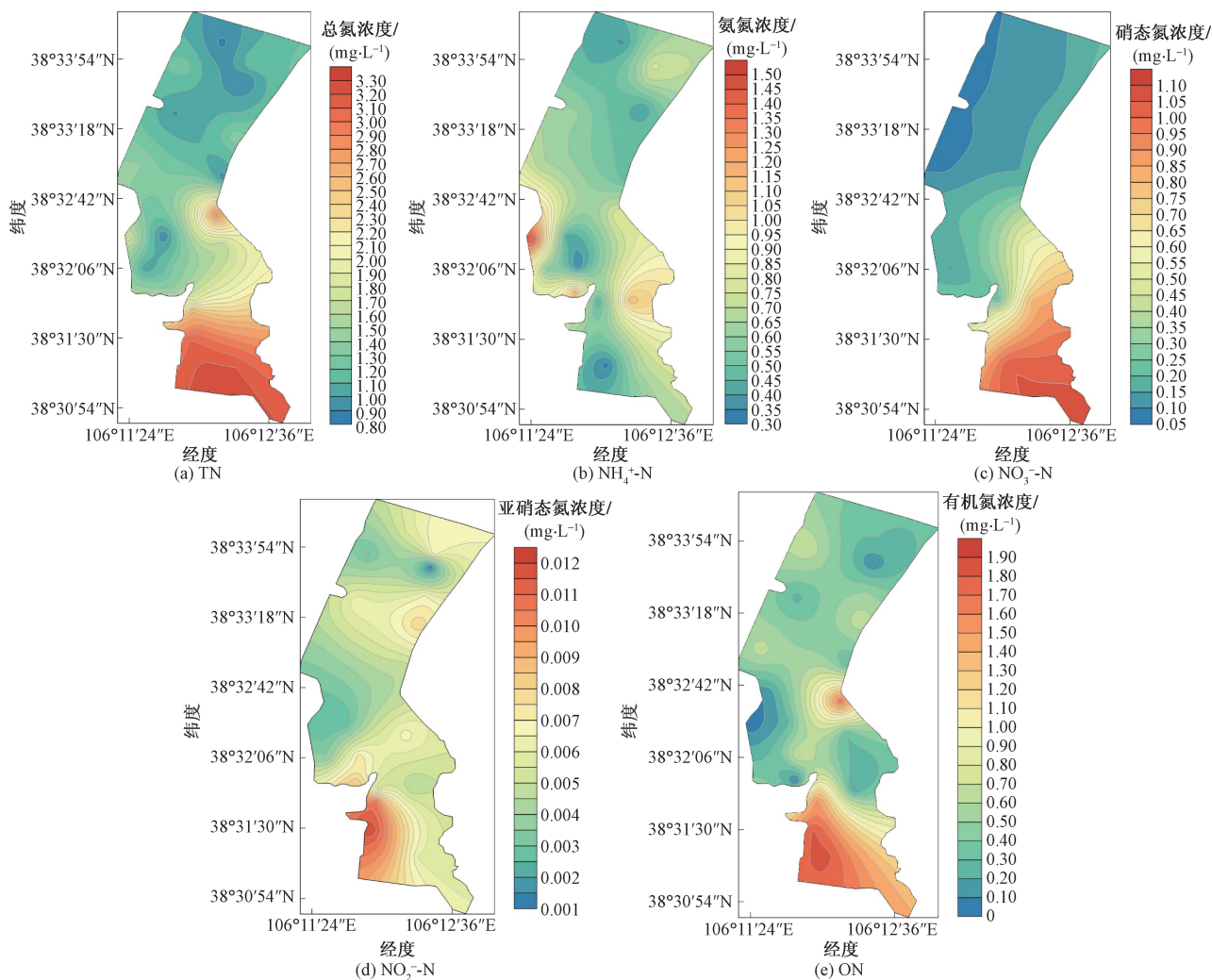


图2 阅海水体总氮及各形态氮的浓度分布

Fig. 2 Concentration distribution of total nitrogen and various forms of nitrogen in Yuehai

市污水等由阅海南部入湖河流输入,在水流自南向北的流动过程中,经过湿地净化作用等过程,导致ON、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N浓度从南到北逐渐下降。 $\text{NH}_4^+$ -N浓度呈东西高、南北低的分布,可能在阅海南部进水口处存在的更多的有机物质和养分促进了细菌的氨氧化作用,将 $\text{NH}_4^+$ -N转化为 $\text{NO}_3^-$ -N,导致 $\text{NH}_4^+$ -N浓度降低;而在阅海东部及西部,可能由于水体中的营养物质较少、生产力较低, $\text{NH}_4^+$ -N的转化速率相对较慢,导致 $\text{NH}_4^+$ -N浓度变化不明显,浓度仍然较高。ON和 $\text{NH}_4^+$ -N等形态氮浓度过高会造成水体富营养化,使水体溶解氧下降,易造成水生生物大量死亡,严重影响水体生态环境<sup>[38-40]</sup>。农田施用化肥可能是 $\text{NH}_4^+$ -N和ON的重要共同来源,施用不当可进入水体,影响阅海水体形态氮浓度与占比。

有研究表明水体富营养化程度的提高表现为水体环境由氧化向还原的转变,这种转变最明显的

表现是水体中 $\text{NH}_4^+$ -N相对增加,同时 $\text{NO}_3^-$ -N相对减少,随着 $\text{NH}_4^+$ -N与 $\text{NO}_3^-$ -N比值的升高,水体营养程度将进一步加深<sup>[41-42]</sup>。阅海水体 $\text{NH}_4^+$ -N与 $\text{NO}_3^-$ -N的比值在0.31~7.78,均值为3.34, $\text{NH}_4^+$ -N平均浓度与 $\text{NO}_3^-$ -N平均浓度的比值为1.98。对比其他湖泊 $\text{NH}_4^+$ -N平均浓度与 $\text{NO}_3^-$ -N平均浓度的比值,阅海低于2017年白洋淀 $\text{NH}_4^+$ -N平均浓度(0.36 mg/L)与 $\text{NO}_3^-$ -N(0.12 mg/L)平均浓度的比值(3.00)<sup>[43]</sup>;但高于2019年乌梁素海春季 $\text{NH}_4^+$ -N平均浓度(0.23 mg/L)与 $\text{NO}_3^-$ -N(0.20 mg/L)平均浓度的比值(1.15)<sup>[44]</sup>。阅海水体 $\text{NH}_4^+$ -N平均浓度与 $\text{NO}_3^-$ -N平均浓度的比值较往年同时期其他湖泊高,应持续关注阅海 $\text{NH}_4^+$ -N与 $\text{NO}_3^-$ -N浓度及其变化对阅海富营养化程度的指示作用。

## 2.2 阅海水体中磷浓度分布特征及污染水平

### 2.2.1 阅海水体中总磷浓度分布特征及污染水平

阅海水体中总磷(以P计,其余磷类指标同)分

布特征如表 2 和图 3(a)所示。对比《地表水环境质量标准》(GB3838—2002), 采样点 YH1、YH6、YH7、YH15 水样的 TP 浓度属于地表 V 类水, 其余研究采样点均属于地表 IV 类水。根据《湖泊富营养化调查规范》<sup>[30]</sup>, 水体 TP < 0.020 mg/L 时, 该水体为贫营养型; TP 浓度在 0.020 ~ 0.050 mg/L 范围内时, 该水体为中营养型; TP 浓度在 0.050 ~ 0.090 mg/L 范围内时, 该水体为富营养型; TP 浓度 > 0.090 mg/L 时, 该水体为重富营养型。YH5、YH17 ~ YH23 属于富营养型, 其余各点均为重富营养型。阅海西部 TP 浓度异常点(YH17)的出现, 可能是该位置采样点处于阅海西部, 靠近游船码头, 游船使水体流速加快, 含有一定量磷污染物的底泥在水流动力下受到扰动、释放, 影响 TP 浓度变化。

2021 年春耕期阅海 TP 平均浓度(0.096 mg/L) 低于 2010—2019 年洪泽湖(0.113 mg/L)<sup>[31]</sup> 及 2018—2020 年黄河宁夏段的 TP 浓度(0.13 ~ 0.11 mg/L)<sup>[33]</sup>, 但高于 2014—2020 年鄱阳湖 TP 浓度(0.031 ~ 0.061 mg/L)<sup>[32]</sup>, 高于 2014—2020 年太湖(0.074 ~ 0.151 mg/L) 及 2014—2020 年洞庭湖 TP 浓度(0.073 ~ 0.11 mg/L)<sup>[32]</sup> 的最低水平。与阅海往年浓度相比, 2021 年春耕期阅海 TP 平均浓度低于 2019 年 5 月的平均浓度(0.11 mg/L)<sup>[21]</sup> 及 2019 年 6 月的平均浓度(0.18 mg/L)<sup>[35]</sup>, 但高于 2010—2020 年的平均浓度(0.067 mg/L)<sup>[36]</sup>, 2021 年春耕期阅海 TP 平均浓度较往年同期有所下降, 但总体仍偏高。

TN 和 TP 作为水体富营养化的限制性因子, 其比值变化会影响浮游植物群落的组成<sup>[44-45]</sup>。当水体 TN/TP < 9 时表现为氮限制; 当水体  $9 \leq \text{TN/TP} < 26$  时表现为氮磷共同限制; 当水体  $26 \leq \text{TN/TP}$  时表现为磷限制<sup>[46]</sup>。随着湖泊富营养化程度加深, TN/TP 显著下降, 富营养化湖泊通常有更低的 TN/TP, 低 TN/TP 更有助于藻类生长, 富营养化湖泊往往是氮限制或氮磷共限<sup>[47]</sup>。阅海水体 TN/TP 比值在 7 ~ 46, 均值为 19, TN 平均浓度与 TP 平均浓度比值为 17, 整体上以氮磷共限为主, 8.9% 的采样点属于

表 2 阅海水体总磷及形态磷浓度

Table 2 Phosphorus concentrations of various forms in the Yuehai water system

统计参数/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP	TDP	TPP	DOP	DIP	POP	PIP
最大值	0.189	0.039	0.160	0.022	0.024	0.147	0.060
最小值	0.065	0.007	0.055	0.001	0.006	0.011	0.004
平均值	0.096	0.024	0.072	0.007	0.017	0.047	0.025
标准差	0.023	0.007	0.020	0.005	0.004	0.005	0.013

氮限制, 60.7% 的采样点属于氮磷共限, 30.4% 的采样点属于磷限制, 阅海有潜在富营养化风险。

### 2.2.2 阅海水体中各形态磷浓度分布特征及污染水平

水体中磷包括 DOP、DIP、POP 以及 PIP 4 种形态。阅海水体中各形态磷的分布特征如表 2 和图 3(b) ~ 图 3(g)所示。阅海水体 4 种形态磷浓度均值大小顺序为 POP > PIP > DIP > DOP, POP 浓度显著高于其他形态浓度。4 种形态磷浓度占 TP 均值大小顺序为 POP(45.0%) > PIP(27.9%) > DIP(17.4%) > DOP(7.8%), 正磷酸盐浓度占 TP 均值为 45.3%, 可能有潜在富营养化风险。

POP、TPP 与 TP 浓度变化趋势相似, 高值点出现在阅海西部游船码头位置, 人为影响较大。DOP、DIP 与 TDP 浓度变化趋势相似, 均为阅海北部高于南部。PIP 高值点出现在阅海东部银川花卉博览园附近(YH16), 可能受到花肥使用以及游客活动影响。TPP 浓度高于 TDP, 可能因为处于春灌期, 以黄河水和农田灌溉退水为水源为阅海补水, 径流量较大颗粒物不易沉降, 加之水力搅拌影响, 颗粒物所含磷较多, 因此 TPP 含量较高。在一定的环境因素下 TPP 中的正磷酸盐和单酯磷可以转化为 TDP, TPP 含量过高将会加速磷在水中的积累<sup>[15]</sup>, 提高藻类暴发的风险, 易造成水体富营养化。

## 2.3 阅海出湖河流氮磷分布特征及其与阅海差异性分析

### 2.3.1 阅海出湖河流氮磷分布特征

阅海出湖河流氮磷浓度如图 4 所示, 其中采样点 YH11 位于阅海出水口。从 TN 浓度看, 采样点 SD1 ~ SD5 均为劣 V 类水质, 且 TN 浓度均高于阅海出水口水体 TN 浓度, 根据《湖泊富营养化调查规范》<sup>[30]</sup>, SD1 ~ SD5 均属于重富营养型, TN 浓度较高。从 TP 浓度看, 除 SD3 为 IV 类水外, 其余 SD 采样点均为 III 类水, 根据《湖泊富营养化调查规范》<sup>[32]</sup>, SD1 ~ SD5 均属于重富营养型。

阅海出湖流水体中 TN、ON 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化规律相似, 阅海出水口处至 SD3 位置三者浓度逐渐升高, 至 SD3 位置达到最高值后逐渐下降, 可能与阅海出水口至 SD3 之间有灌溉沟渠(胜利渠)穿过有关, 外源污染物的输入影响 TN、ON 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度。出水口至 SD2 段, 水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化呈相反规律, 可能是硝化作用及生物吸附作用导致, SD2 ~ SD5 段水体 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度逐渐降低, 可能是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在水体自净作用下逐渐降解。

除 POP 外, 阅海出湖流水体 TP 及其余形态

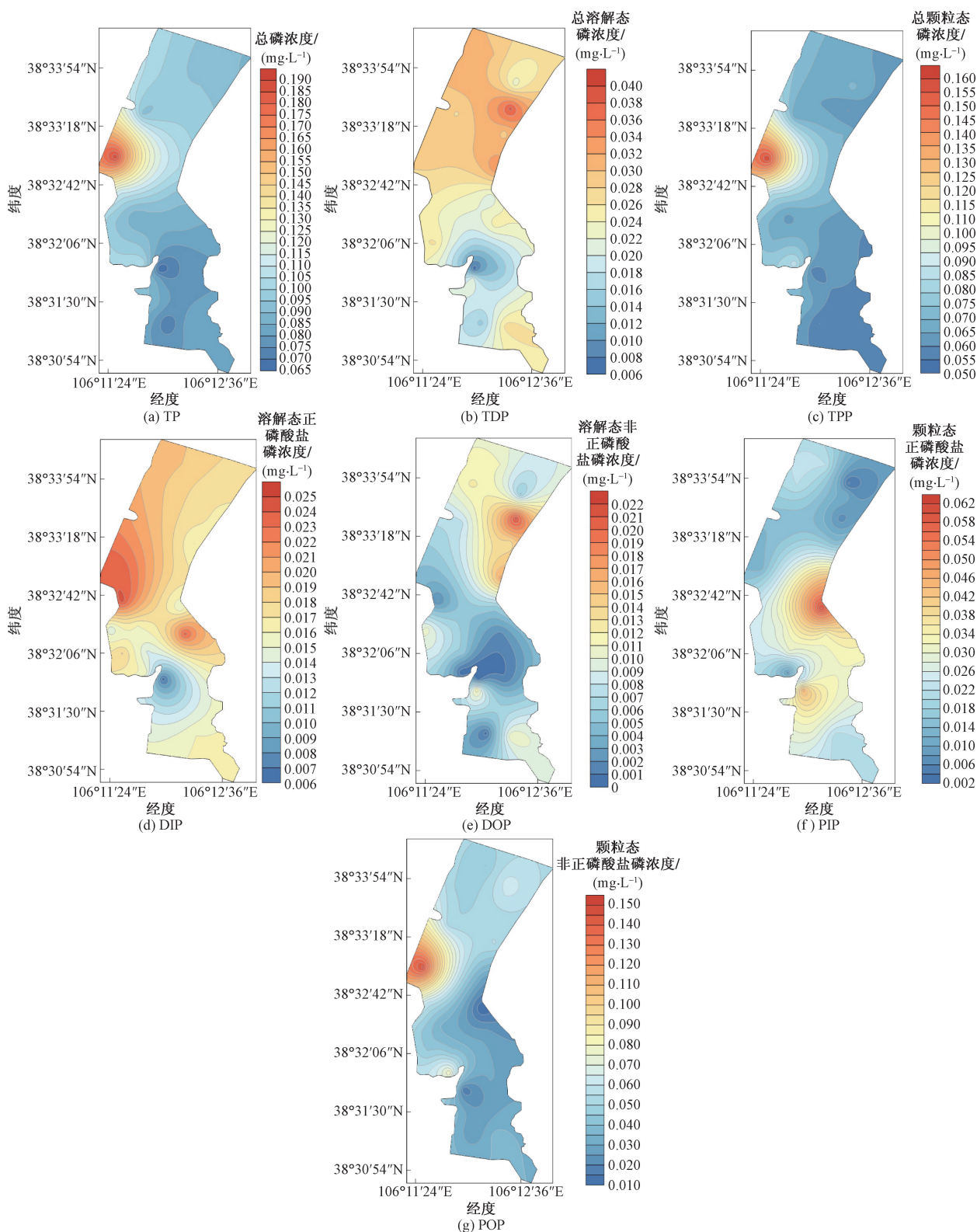


图3 阅海水体总磷及各形态磷的浓度分布

Fig. 3 Concentration distribution of total phosphorus and various forms of phosphorus in Yuehai

磷浓度变化规律均相似,POP 浓度变化规律则与之相反,除外源污染物的输入影响外,POP 浓度降低可能是因为在迁移过程中发生沉降或在生物作用下发生降解。

### 2.3.2 阅海出湖河流与阅海的氮磷分布差异性分析

采用 Shapiro-Wilk 法检验,阅海出湖河流水样中 TN、TP 及各形态氮磷均符合正态分布 ( $p >$

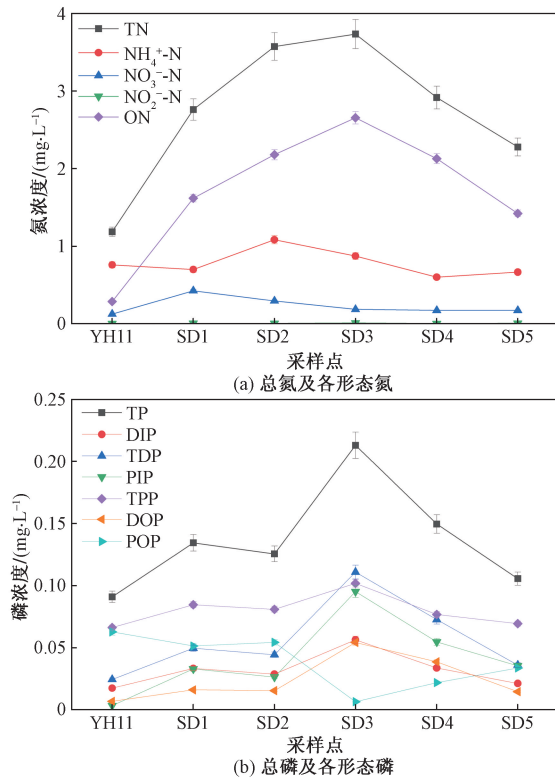


图4 阅海出湖河流水体中氮磷浓度

Fig. 4 Concentrations of nitrogen and phosphorus in the water of the outflow river of the Yuehai Lake

0.05), 阅海水样中 DIP、TDP、PIP、DOP 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度符合正态分布 ( $p > 0.05$ ), TP、TPP、POP、TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 ON 浓度不符合正态分布。采用 Mann-Whitney U 检验对阅海出湖河流与阅海所有采样点氮磷浓度开展差异性检验,发现阅海出湖河流和阅海 TN、TP 浓度有显著差异 ( $p < 0.05$ ),二者可能受到不同污染源影响。POP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度差异不显著 ( $p > 0.05$ ),这些形态的氮磷在阅海出湖河流和阅海水体中的分布相对稳定。从整体上看,阅海出湖河流和阅海水体之间存在着不同的氮磷特征。

从阅海进水口-阅海-阅海出水口-阅海出湖河流的南北方向分析,选取采样点 YH19 (阅海进水口)、YH15 (接近阅海中心点)、YH11、SD1 ~ SD5 作为参考点,利用与上文相同分析方法 (下同) 分析南北方向河湖氮磷浓度差异性,结果表明河湖水体间 TN 及各形态氮浓度差异不显著,TP、DIP、TDP 浓度有显著差异,其余磷形态间差异不显著。在南北方向上,河湖水体间氮浓度及非正磷酸盐磷浓度差异不显著。阅海水体中的氮磷污染物随出湖河流汇入黄河,阅海水体中的氮及非正磷酸盐磷可能会对黄河宁夏段水体产生一定影响,增加黄河水污染风险,应加强对阅海水体氮及非正磷酸盐磷的控制。

阅海区域风向常年以西风、西北风为主,从西北方向分析,选取采样点 YH7、YH8、YH11、SD1 ~ SD5 作为参考点,结果表明河湖水体间 TP、DIP、TPP、POP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 及 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度有显著差异, TDP、PIP、DOP、TN、ON 及 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度无显著差异。西北方向上河湖水体之间部分磷形态浓度呈显著差异,可能与风力扰动下阅海底泥释放磷有关, TN 浓度差异不显著,可能受到内源污染影响较小。控制阅海水体 TP 浓度可能仍需考虑底泥内源污染的影响。

从水深角度分析,选取采样点 YH7 ~ YH10、YH13 及 YH15 为深水区组 (水深超过 120 cm), 采样点 SD1 ~ SD5 为浅水区组 (水深不超过 90 cm) 作为参考点,结果表明河湖水体间 TN 及各形态氮浓度有显著差异, TP 及颗粒态磷浓度差异不显著。深水区域和浅水区域可能会有不同类型和数量的生物群落,这些生物活动可能会对氮的循环和转化起到重要影响,进而影响氮的浓度分布。

## 2.4 阅海水体氮磷与基础理化指标的相关性分析

### 2.4.1 阅海水体基础理化指标含量分析

水环境中的 DO 浓度与生物多样性、温室气体排放与水环境质量有关,是衡量水体自净能力、水环境质量的重要指标。TDS 反映了水中溶解的有机和无机物质的浓度<sup>[47]</sup>。阅海水体中 pH、DO 与 TDS 浓度分布特征如图 5 所示。

阅海水体 pH 在 8.04 ~ 8.35 范围内,均值为 8.25, 低于 2013—2020 年泸沽湖的 pH 平均值 (8.40)<sup>[48]</sup>, 高于 2019 年秋季与 2021 年夏季内蒙古 12 个典型湖泊 pH (7.84 ~ 10.43) 的最低水平<sup>[49]</sup>, 阅海水体及与其相比较湖泊水体均呈碱性; DO 在 3.8 ~ 7.7 mg/L 范围内,均值为 5.6 mg/L, 低于 2022 年全国湖泊 DO 平均浓度 (10.04 mg/L)<sup>[50]</sup>, 低于 2019—2021 年仙女湖 DO 浓度 (8.9 ~ 9.8 mg/L)<sup>[51]</sup>, 低于 2013—2020 年泸沽湖 DO 平均浓度 (7.46 mg/L)<sup>[48]</sup>, 2021 年春灌期阅海 DO 浓度较低; TDS 在 2.26 ~ 3.36 g/L 范围内,均值为 3.03 g/L, 高于 2019 年秋季与 2021 年夏季内蒙古巴丹东湖 TDS 浓度 (1.48 ~ 1.92 g/L)<sup>[49]</sup>, 高于 2018 年乌梁素海冰下水体 TDS 浓度 (2.23 ~ 3.30 g/L)<sup>[44]</sup>, 春灌期阅海 TDS 浓度较高。

阅海水体 pH 与 DO 均满足中国《地表水环境质量标准》(GB3838—2002) III 类水要求。DO 浓度较低,可能是由于含有大量有机物质,如残留的农药、化肥等的农田灌溉退水,在灌溉过程中流入阅海,这些有机物在水中分解或促进水生生物生长消耗氧气,致使 DO 浓度较低。水体中 TDS 与生物类指标密切相关<sup>[52]</sup>, TDS 浓度较高会抑制水体中氮磷的生物利用

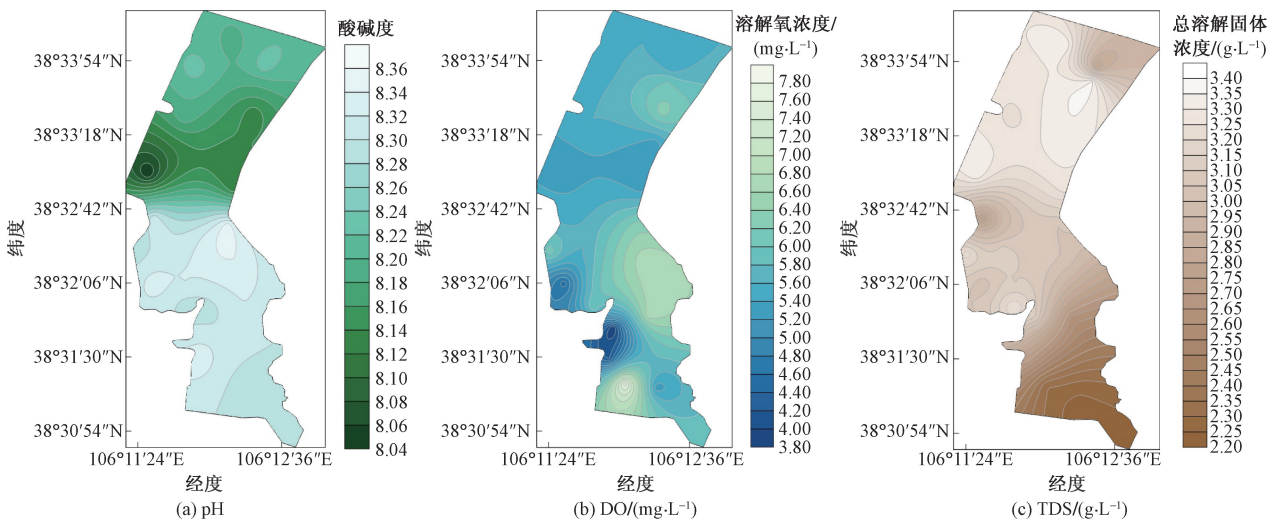


图5 阅海水体基础理化性质分布

Fig. 5 Distribution of basic physical and chemical properties in Yuehai Lake water

率,从而使水体中氮磷浓度升高,还可通过吸附、沉积、释放等机制影响水体中氮磷的环境行为。TDS 浓度较高,表明阅海水生环境中生物体的生活条件可能较差,灌溉退水可能影响了阅海水质。

#### 2.4.2 基础理化指标的相关性分析

2.3.2 节已述及阅海水样中部分参数不符合正态分布,相关性分析采用 Spearman 参数,结果如表 3 所示。

阅海水体 TP 和 DIP、POP 显著正相关,表明 TP 受 DIP 和 POP 影响较为明显。磷的各赋存形态之间,DIP 和 POP 显著正相关,PIP 和 POP 显著负相关,表明 DIP、PIP 均与 POP 有一定的转化关系,且较活跃。TN 和 ON、TN 和  $\text{NO}_3^-$ -N、TN 和  $\text{NO}_2^-$ -N 等指标间显著正相关,表明 TN 受 ON、 $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 影响较为明显, $\text{NH}_4^+$ -N 与除 ON 外其他氮形态间的

相关关系不显著,但  $\text{NH}_4^+$ -N 占比较高,表明不同氮形态在水体中的来源和转化过程存在差异。

氮的各赋存形态之间, $\text{NH}_4^+$ -N 和 ON 显著负相关, $\text{NO}_2^-$ -N 和 ON 显著正相关, $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 成显著正相关,表明水体不同氮形态之间相互转化复杂且相互转化的过程可能受到多种因素的影响, $\text{NH}_4^+$ -N 与 ON 可能有共同来源:以化肥为主的农业面源污染,但因微生物作用下的硝化与矿化等作用强度不同、温度光照等因素影响, $\text{NH}_4^+$ -N 和 ON 显著负相关。氮磷之间,TN 和 TP、DIP 和 ON、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 ON、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 POP,均呈显著负相关关系,表明这几者之间变化趋势相反,TN、TP 变化趋势不一致,阅海水体氮磷的来源或迁移转化规律可能不同。pH 与 TN 显著正相关,与 TP 显著负相关,表明 pH 影响水体氮磷的积累,这与陈黎黎对 2013 年春季、

表3 阅海水体氮磷及基础理化性质的相关性分析结果

Table 3 Correlation analysis results of nitrogen, phosphorus and basic physicochemical properties in Yuehai Lake

参数	pH	TDS	DO	TP	DIP	TDP	PIP	TPP	DOP	POP	TN	$\text{NH}_4^+$ -N	$\text{NO}_3^-$ -N	$\text{NO}_2^-$ -N	ON
pH	1														
TDS	-0.699**	1													
DO	0.187	0.047	1												
TP	-0.495*	0.639**	-0.080	1											
DIP	-0.361	0.346	0.030	0.608**	1										
TDP	-0.640**	0.518*	-0.185	0.658**	0.720**	1									
PIP	0.650**	-0.454*	-0.002	-0.392	-0.421*	-0.370	1								
TPP	-0.090	0.446*	-0.027	0.765**	0.284	0.131	-0.135	1							
DOP	-0.476*	0.337	-0.346	0.310	0.178	0.759**	-0.142	-0.091	1						
POP	-0.533**	0.464*	-0.081	0.657**	0.525*	0.367	-0.866**	0.521*	0.052	1					
TN	0.497*	-0.649**	0.040	-0.483*	-0.575**	-0.552**	0.410	-0.266	-0.394	-0.439*	1				
$\text{NH}_4^+$ -N	0.216	-0.167	0.156	0.186	0.116	-0.164	-0.087	0.423*	-0.323	0.275	0.218	1			
$\text{NO}_3^-$ -N	0.680**	-0.740**	0.195	-0.687**	-0.674**	-0.665**	0.613**	-0.453*	-0.399	-0.674**	0.779**	0.042	1		
$\text{NO}_2^-$ -N	0.171	-0.300	-0.096	-0.316	-0.360	-0.250	0.099	-0.370	-0.058	-0.204	0.456*	-0.243	0.447*	1	
ON	0.208	-0.327	-0.289	-0.418*	-0.344	-0.119	0.357	-0.425*	0.091	-0.503*	0.544**	-0.539**	0.372	0.515**	1

注:\*表示置信度  $p < 0.05$ ; \*\*表示在置信度  $p < 0.01$ 。

2014年夏季—2015年冬季珠江三角洲地区较为典型的富营养化湖库的研究结果<sup>[53]</sup>相似;DO与各形态氮磷及pH均无相关关系,表明DO对水体氮磷的影响不明显,DO受pH影响不明显,这与郝宇超等<sup>[54]</sup>对2018年蒙新高原南海湖的研究结果相似。TDS和TP显著正相关、TDS和TN显著负相关,表明TDS还可能通过影响水体中氮磷的吸附、沉积、释放等过程,对TN及TP浓度产生影响,如通过影响浮游植物与营养盐的响应关系<sup>[55]</sup>,使湖泊中浮游植物的生长受限,减少了其对TN和TP的吸收。

### 3 结论

(1)春灌期阅海水体TN、ON、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N及 $\text{NO}_2^-$ -N的平均浓度分别为1.661、0.667、0.656、0.332、0.006 mg/L,阅海78%采样点的TN浓度处于地表水IV~V类水平,57%采样点的TN浓度属于重富营养型,阅海水体氮浓度较高。

(2)春灌期阅海水体中TP、POP、PIP、DIP及DOP的平均浓度分别为0.096、0.047、0.025、0.017、0.007 mg/L,磷浓度较高。各采样点TP浓度均属于IV~V类水,70%采样点的TP浓度属于重富营养型。

(3)阅海及其出湖河流的氮磷浓度差异性方面,阅海出湖河流与阅海水体之间具有不同的氮磷分布特征,其中在河湖水体流向(南北方向)上,河湖水体间氮浓度及非正磷酸盐磷浓度差异不显著。阅海水体中的氮磷污染物随出湖河流汇入黄河,阅海水体中的氮及非正磷酸盐磷可能会对黄河宁夏段水体产生一定影响,增加黄河水污染风险,应加强对阅海水体氮及非正磷酸盐磷的控制。

(4)阅海中不同形态氮在水体中的来源和转化过程存在差异,pH及TDS影响水体氮磷浓度,DO对水体氮磷形态的影响不明显。

### 参 考 文 献

- [1] 张文庆,肖薇,曹畅,等. 通过定点监测相对绿度指数获得水体藻类生长动态的方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7609-7616.  
Zhang Wenqing, Xiao Wei, Cao Chang, et al. A method for monitoring algae status in water bodies based on green chromatic coordinate[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7609-7616.
- [2] Wang D, Gan X, Wang Z, et al. research status on remediation of eutrophic water by submerged macrophytes: a review[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 671-684.
- [3] Zhao X, Zhao X, Chen C, et al. Ecological floating bed for decontamination of eutrophic water bodies: using alum sludge ceramicsite [J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114845.
- [4] Kakade A, Salama E S, Han H, et al. World eutrophic pollution of lake and river: biotreatment potential and future perspectives[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 23. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101604.
- [5] Li Y, Shang J, Zhang C, et al. The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: a review[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.144582.
- [6] Wojtkowska M, Bojanowski D. Assessing trophic state of surface waters of Służewiecki Stream (Warsaw) [J]. Applied Water Science, 2021, 11(7). DOI: 10.1007/S13201-021-01446-W.
- [7] Savic R, Stajic M, Blagojević B, et al. Nitrogen and phosphorus concentrations and their ratios as indicators of water quality and eutrophication of the Hydro-System Danube-Tisza-Danube [J]. Agriculture, 2022, 12(7). DOI: 10.3390/AGRICULTURE12070935.
- [8] Wang J, Fu Z, Qiao H, et al. Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 1392-1402.
- [9] 张雅文, 秦亮, 陈路路, 等. 利用基质辅助激光解吸电离质谱成像技术研究斑马鱼响应富营养化污染水质内源性脂质分子变化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5658-5667.  
Zhang Yawen, Qin Liang, Chen Lulu, et al. MALDI-MSI analysis of endogenous lipid changes in zebrafish exposures to water eutrophication[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5658-5667.
- [10] Janicka E, Kanclerz J, Wiatrowska K, et al. Variability of nitrogen and phosphorus content and their forms in waters of a river-lake system [J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 409.
- [11] 姚珊, 张璇凌, 蔡雨欣, 等. 分光光度法对白洋淀各形态氮磷分布特征及源解析的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(4): 1306-1312.  
Yao Shan, Zhang Xuanling, Cai Yuxin, et al. Study on distribution characteristics of different nitrogen and phosphorus fractions by spectrophotometry in Baiyangdian Lake and source analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2022, 42(4): 1306-1312.
- [12] 张萌, 张银峰, 杨鸿锋, 等. 澜沧江漫湾大坝对水体氮磷迁移及形态的影响[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(30): 13578-13589.  
Zhang Meng, Zhang Yinfeng, Yang Hongfeng, et al. Influence of Manwan Dam on transportation and speciation of nitrogen and phosphorus in water of Lancang River[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(30): 13578-13589.
- [13] 拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 等. 包头南海湿地磷形态及污染源定量识别[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4275-4286.  
Bai Yahong, Qian Chengge, Yuan Sijing, et al. Phosphorus fractions and quantitative identification of pollution sources in Nanhai Wetland, Baotou [J]. Environmental Science, 2021, 42(9): 4275-4286.
- [14] Wei Z, Yu Y, Yi Y. Analysis of future nitrogen and phosphorus loading in watershed and the risk of lake blooms under the influence of complex factors: implications for management[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345. DOI: 10.1016/J.JENVMAN. 2023.118662.
- [15] Feng W, Yang F, Zhang C, et al. Composition characterization and biotransformation of dissolved, particulate and algae organic phosphorus in eutrophic lakes [J]. Environmental Pollution,

- 2020, 265. DOI: 10.1016/j. envpol. 2020. 114838.
- [16] Ma S N, Wang H J, Wang H Z, et al. Effects of nitrate on phosphorus release from lake sediments [J]. *Water Research*, 2021, 194. DOI: 10.1016/J. WATRES. 2021. 116894.
- [17] 王宇, 田巍, 太鸿泽. 宁夏阅海湖生态需水量计算与保障对策研究[J]. *水资源开发与管理*, 2022, 8(2): 16-19.  
Wang Yu, Tian Wei, Tai Hongze. Study on ecological water demand calculation and guarantee countermeasures of Yuehai Lake in Ningxia [J]. *Water Resources Development and Management*, 2022, 8(2): 16-19.
- [18] 宁夏回族自治区生态环境厅. 2020年宁夏生态环境状况公报 [EB/OL]. (2021-05-31) [2024-02-08]. [https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202105/t20210531\\_3633768.html](https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202105/t20210531_3633768.html). Department of Ecology and Environment of Ningxia Hui Autonomous Region. Ningxia ecological environment status bulletin in 2020 [EB/OL]. (2021-05-31) [2024-02-08]. [https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202105/t20210531\\_3633768.html](https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/hjzkgb/202105/t20210531_3633768.html).
- [19] 宁夏回族自治区生态环境厅. 2020年6月宁夏回族自治区地表水环境质量状况月报 [EB/OL]. (2020-09-08) [2024-02-08]. [https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/shjzl/shjzk/202009/t20200908\\_3706100.html](https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/shjzl/shjzk/202009/t20200908_3706100.html). Department of Ecology and Environment of Ningxia Hui Autonomous Region. Monthly report on surface water environment quality in Ningxia Hui Autonomous Region in June 2020 [EB/OL]. (2020-09-08) [2024-02-08]. [https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/shjzl/shjzk/202009/t20200908\\_3706100.html](https://sthjt.nx.gov.cn/hjzl/shjzl/shjzk/202009/t20200908_3706100.html).
- [20] 李世龙, 雷兴碧, 邱小琮, 等. 银川阅海湖水生生态系统健康评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(3): 168-173, 200.  
Li Shilong, Lei Xingbi, Qiu Xiaocong, et al. Health assessment of aquatic ecosystem of Yuehai Lake in Yinchuan [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(3): 168-173, 200.
- [21] 杨蕾, 璩向宁, 马正虎, 等. 宁夏阅海湿地水质评价及其空间差异性研究[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(3): 640-649.  
Yang Lei, Qu Xiangning, Ma Zhenghu, et al. Water quality evaluation and spatial difference of Yuehai wetland in Ningxia [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(3): 640-649.
- [22] 周夏飞, 曹国志, 於方, 等. 黄河流域水污染风险分区[J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2448-2458.  
Zhou Xiafei, Cao Guozhi, Yu Fang, et al. Risk zoning of water pollution in the Yellow River Basin [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2448-2458.
- [23] 马正虎, 璩向宁, 何志润, 等. 宁夏阅海湖底泥重金属空间分布特征及来源解析[J]. *水生态学杂志*, 2022, 43(2): 116-124.  
Ma Zhenghu, Qu Xiangning, He Zhirun, et al. Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in the sediments of Yuehai Lake, Ningxia [J]. *Journal of Hydroecology*, 2022, 43(2): 116-124.
- [24] 高小龙, 王幼奇, 白一茹, 等. 阅海城市湿地典型植被群落土壤活性有机碳组分分布特征[J]. *草地学报*, 2022, 30(6): 1441-1449.  
Gao Xiaolong, Wang Youqi, Bai Yiru, et al. Distribution characteristics of soil labile organic carbon fractions in typical vegetations communities of the Yuehai urban wetland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1441-1449.
- [25] 陈琪, 路建强. 阅海湖浮游动物群落特征及其与水环境因子的关系[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(10): 70-73, 30.  
Chen Qi, Lu Jianqiang. Relationship between zooplankton community characteristics and environmental factors in Yuehai Lake [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(10): 70-73, 30.
- [26] 田媛. 宁夏阅海冰封期污染物迁移变化特征分析[D]. 银川: 宁夏大学, 2023.  
Tian Yuan. Characteristics of contaminant migration changes during frozen period in Ningxia Yuehai [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2023.
- [27] 田林锋, 姜文娟, 罗桂林, 等. 宁夏典农河磷污染特征探究[J]. *环境化学*, 2023, 42(9): 3125-3135.  
Tian Linfeng, Jiang Wenjuan, Luo Guilin, et al. Study on phosphorus pollution characteristics of Diannong River in Ningxia [J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(9): 3125-3135.
- [28] 李维燕, 王仕琴, 古丛珂, 等. 府河至白洋淀沿线水体-沉积物中磷形态的分布特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2023, 43(8): 179-188.  
Li Weiyang, Wang Shiqin, Gu Congke, et al. Distribution characteristics and influencing factors of phosphorus forms in water-sediment from Fu River to Baiyangdian Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2023, 43(8): 179-188.
- [29] 刘莹慧, 卢俊平, 赵胜男, 等. 基于长时间序列乌梁素海水环境变化趋势及生态补水等关键驱动因子分析(2011—2020年)[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 1-11.  
Liu Yinghui, Lu Junping, Zhao Shengnan, et al. Based on the long time series of lake Wuliangsu hai water environment change trend and ecological water replenishment and other key driving factors analysis (2011—2020) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 1-11.
- [30] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. 2版. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.  
Jin Xiangcan, Tu Qingying. Specification for investigation of lake eutrophication [M]. 2nd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [31] 崔嘉宇, 郭蓉, 宋兴伟, 等. 洪泽湖出入河流及湖体氮、磷浓度时空变化(2010—2019年)[J]. *湖泊科学*, 2021, 33(6): 1727-1741.  
Cui Jiayu, Guo Rong, Song Xingwei, et al. Spatio-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus in lake and inflow/ outflow rivers of Lake Hongze, 2010—2019 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, 33(6): 1727-1741.
- [32] Shang W, Jin S, He Y, et al. Spatial-temporal variations of total Nitrogen and phosphorus in Poyang, Dongting and Taihu Lakes from landsat-8 data [J]. *Water*, 2021, 13(12). DOI: 10.3390/W13121704.
- [33] Jin Y, Wang X, Dong Y P. Variation of water quality in Ningxia section of the Yellow River in recent 5 years [J]. *Journal of Chemistry*, 2022, 2022. DOI: 10.1155/2022/7704513.
- [34] Li X, Zhu T, He Y, et al. Assessment of eutrophication and nitrogen and phosphorus carrying capacity before and after removing pen culture (2013—2018) in Lake Changhu, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(4): 5674-5686.
- [35] Lü S, Li C, Gao F. Hydrodynamic features and water ecology improvement of Yuehai Lake based on ecological water diversion [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(4): 2909-2918.

- [36] 杨蕾. 宁夏阅海湿地水质变化特征及综合评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.  
Yang Lei. Water quality evolution characteristics and comprehensive evaluation of Yuehai wetland in Ningxia [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [37] 颯聚欣. 宁夏引黄灌区农田退水污染防治景观格局优化策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.  
Kuang Juxin. Study on the optimization strategy of landscape pattern of farmland drainage pollution prevention in Ningxia irrigation area [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [38] Ni Z, Wang S, Wu Y, et al. Response of phosphorus fractionation in lake sediments to anthropogenic activities in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134242.
- [39] 白冬锐, 张涛, 陈坦, 等. 苏州古城区域河道碳氮磷类污染物的分布特征[J]. *环境科学*, 2021, 42(3): 1403-1415.  
Bai Dongrui, Zhang Tao, Chen Tan, et al. Distribution characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus bearing pollutants in ancient town river of Suzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(3): 1403-1415.
- [40] 白冬锐. 苏州市中心区河道底泥的常规污染物分布特征研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2021.  
Bai Dongrui. Study on the distribution characteristics of conventional pollutants in the sediment of rivers in the central district of Suzhou [D]. Beijing: Minzu University, 2021.
- [41] Stumm W, Morgan J J. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [42] Liu X, Wu Y, Sun R, et al.  $\text{NH}_4^+$ -N/ $\text{NO}_3^-$ -N ratio controlling nitrogen transformation accompanied with  $\text{NO}_2^-$ -N accumulation in the oxic-anoxic transition zone [J]. *Environmental Research*, 2020, 189. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109962.
- [43] Zhu Y, Jin X, Tang W Z, et al. Comprehensive analysis of nitrogen distributions and ammonia nitrogen release fluxes in the sediments of Baiyangdian Lake, China [J]. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 2019, 76: 319-328.
- [44] 王希欢. 乌梁素海流域氮污染来源的时空特征解析研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2022.  
Wang Xihuan. Study on spatial and temporal characteristics of nitrogen pollution sources in Wuliangsu Hai Watershed [D]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Sciences, 2022.
- [45] Qin B, Zhou J, Elser J J, et al. Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(6): 3191-3198.
- [46] Zhang T, Lei Q, Liang X, et al. Optimization of the N footprint model and analysis of nitrogen pollution in irrigation areas: a case study of Ningxia Hui Autonomous Region, China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 340: 118002.
- [47] Zhou J, Han X, Brookes J D, et al. High probability of nitrogen and phosphorus co-limitation occurring in Eutrophic Lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 292. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.118276.
- [48] 杨春艳, 施择, 焦聪颖, 等. 2013—2020年泸沽湖溶解氧随时间变化规律及主要影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(4): 139-145.  
Yang Chunyan, Shi Ze, Jiao Congying, et al. Analysis of temporal variation of dissolved oxygen and its main influencing factors in the Lugu Lake from 2013 to 2020 [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(4): 139-145.
- [49] 王欣远, 潘保柱, 王立新, 等. 内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价[J]. *环境科学*, 2023, 44(12): 6744-6753.  
Wang Xinyuan, Pan Baozhu, Wang Lixin, et al. Water environmental characteristics and water quality assessment of typical lakes in Inner Mongolia [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(12): 6744-6753.
- [50] 付蕊, 刘沙沙, 索诚宇, 等. 2008—2022年我国湖泊有机质相关指标时空演变特征[J]. *中国环境科学*, 2024, 44(3): 1426-1435.  
Fu Rui, Liu Shasha, Suo Chengyu, et al. Spatiotemporal variations of organic matter related indicators in the inland lakes in China from 2008 to 2022 [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(3): 1426-1435.
- [51] 夏威, 张萌, 周懋, 等. 大型深水湖库溶解氧时空变化及驱动因素: 以江西仙女湖为例[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(3): 874-885.  
Xia Wei, Zhang Meng, Zhou Min, et al. Spatio-temporal dynamics of dissolved oxygen and its influencing factors in Lake Xiannv Jiangxi, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(3): 874-885.
- [52] Essa D I, Elshobary M E, Attiah A M, et al. Assessing phytoplankton populations and their relation to water parameters as early alerts and biological indicators of the aquatic pollution [J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111721.
- [53] 陈藜藜. 珠三角典型富营养化状态湖库的氮形态研究[D]. 广州: 暨南大学, 2015.  
Chen Lili. Research on nitrogen forms in typical eutrophication lakes and reservoirs in the Pearl River Delta region [D]. Guangzhou: Jinan University, 2015.
- [54] 郝宇超, 张元, 杨文焕, 等. 寒旱区湖泊氮素类营养盐分布及与环境因子相关性分析[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(3): 87-94.  
Hao Yuchao, Zhang Yuan, Yang Wenhuan, et al. Characteristics of lake pollution and distribution of nitrogen nutrients in cold-arid area [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(3): 87-94.
- [55] 王世欢, 张生, 武蓉, 等. 寒旱区湖泊浮游植物特征及其对营养状态的指示作用[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(1): 311-320.  
Wang Shihuang, Zhang Sheng, Wu Rong, et al. Characteristics of phytoplankton in cold and arid areas and their indicator of trophic status [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(1): 311-320.