

王昱, 先锋云, 陈吉平, 等. 梯级筑坝对黑河上游水体氮磷营养盐分布的影响[J]. 中国沙漠, 2024, 44(5): 73-83.

## 梯级筑坝对黑河上游水体氮磷营养盐分布的影响

王昱<sup>1ab</sup>, 先锋云<sup>1a</sup>, 陈吉平<sup>2</sup>, 张英<sup>3</sup>, 卫芸<sup>3</sup>, 范逸扬<sup>1a</sup>, 田苗<sup>1a</sup>

(1. 兰州理工大学 a. 能源与动力工程学院, b. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 甘肃省水文站, 甘肃 兰州 730030; 3. 甘肃省环境监测中心, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 梯级筑坝会改变河流水文特征与物质迁移转化特征, 对水环境质量产生影响。探究梯级筑坝下黑河上游水体氮磷营养盐时空分布及富营养化风险问题对黑河流域生态修复及梯级水资源管理具有一定参考意义。对黑河上游16个主要控制断面10项水体理化指标多年数据进行统计分析。结果表明: 黑河上游水体理化性质时空差异显著, 水体整体呈弱碱性, 自净能力较好, 总氮(TN)、总磷(TP)的浓度符合III、II类水质标准。从时间分布来看, 黑河上游水体TN、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)浓度表现为枯水期>丰水期, TP浓度为丰水期>枯水期。从空间分布来看, 单个水库水体营养盐分布具有潜在的累积效应, 但梯级水库作用下整体营养盐的分布呈下降趋势, 说明梯级筑坝使沿程累积作用在逐渐削弱; NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N主要分布在水库中层, TN、TP下层浓度高于上层, 分层现象表明有大量的氮磷蓄积在下层沉积物中。富营养化风险分析表明, 梯级筑坝在一定条件下降低了水体富营养化风险, 丰水期大部分水体断面处于氮限制, 枯水期主要为氮磷共同限制; 结合氮磷比特征的分析, 本研究认为控制外源氮磷输入是黑河梯级水库富营养化防控的有效途径。

**关键词:** 梯级筑坝; 氮磷营养盐; 时空分布; 富营养化评价; 黑河

文章编号: 1000-694X(2024)05-073-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2024.00044

中图分类号: P342

文献标志码: A

### 0 引言

河流作为无机物质运输的重要通道, 其运输的营养物质是维持生态系统运转的关键<sup>[1]</sup>。氮、磷作为构成水体初级生产力的重要营养元素和限制因子, 直接作用于浮游植物的生长过程, 是水体富营养化的重要因子, 也是维持生态系统运转的关键要素<sup>[2]</sup>。河流中营养物质输送与水体的自净能力密切相关, 其水平特征、运移规律及循环过程也受水环境中pH、温度、电导率(EC)、浮游生物等外部条件的影响<sup>[3]</sup>。目前, 梯级筑坝作为满足河流水资源和水能资源开发利用的关键技术手段被广泛采用<sup>[4]</sup>。虽然梯级筑坝在防洪、灌溉、发电、航运等方面发挥着社会效益, 但也造成河流生态系统的改变<sup>[5-6]</sup>, 使河流纵向生态要素呈现迥异于单级水库的

变化特征<sup>[7]</sup>。水库蓄水会改变河流的水动力条件, 使水流减缓, 水中溶解氧急剧降低, 导致水体自净能力减弱, 水环境容量发生改变, 极易造成营养物质的累积, 加速水体富营养化状态的形成<sup>[8]</sup>; 同时高坝大库使水体的垂向对流交换不佳, 易造成水体季节性热分层现象<sup>[9]</sup>, 使得氮、磷营养盐在水体-沉积物界面之间的转化、赋存形态以及水平特征显著改变, 进而作用于无机物质的水环境输送过程<sup>[10-12]</sup>。此外, 梯级开发模式下, 水库空间纵向分布较为密集, 梯级水库对河流的累积影响较单级水库的影响更为复杂<sup>[13]</sup>。以往的研究集中在整个流域, 且很少提及氮、磷的梯级累积及在库内分层状态下氮、磷的分布状态, 因此以黑河上游梯级筑坝段为研究区域, 分析黑河上游筑坝段氮磷营养盐的时空分布特征及富营养化风险, 这对河流水质和水生态系统的

收稿日期: 2024-01-23; 改回日期: 2024-03-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(52169015); 甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0020); 甘肃省2023年水利科研与技术推广项目(23GSLK022)

作者简介: 王昱(1979—), 男, 甘肃永昌人, 博士, 教授, 主要从事生态水文及水力学方面的研究。E-mail: wangyu-mike@163.com

保护具有理论指导作用。

黑河作为中国西北地区第二大内陆河,是涵盖了干旱区绿洲与荒漠的典型区域。流域不同区域气候差异显著,上游祁连山区为高寒半干旱气候区,中游河西绿洲平原为温带干旱亚区,下游阿拉善-额济纳旗荒漠为干旱亚区<sup>[14]</sup>。黑河是河西走廊绿洲赖以生存和社会经济可持续发展的重要水资源基地<sup>[15]</sup>。随着水电资源调配的需求增加,黑河上游祁连山区受人类活动影响较大,建设了大量水电站<sup>[16-17]</sup>,使得河流水动力条件逐渐改变,加之工农业的快速发展及城镇污水排放,导致大量氮磷营养盐在库区积累,易造成水质污染、水体富营养化等生态环境风险问题<sup>[10]</sup>。为此,通过对黑河干流上游水体理化性质的调查,运用多元统计的方法,探讨筑坝蓄水对氮磷分布的影响及黑河流域富营养化的影响,这对于流域生态修复和梯级水资源管理具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黑河是甘肃河西走廊最大的内陆水系,是走廊绿

洲的支柱、北部沙漠的命脉,也是中国西北干旱区第二大内陆河流域。黑河流域面积 12.83 万 km<sup>2</sup>,是由发源于祁连山脉托勒南山的两条支流(八宝河和野牛沟河),于青海省祁连县境内的黄藏寺处汇合后流入甘肃境内,在莺落峡出山口进入张掖灌区,至金塔县有讨赖河汇入,黑河干流经正义峡流入内蒙古自治区额济纳旗的居延海。黑河流域气候具有明显的东西差异和南北差异,南部祁连山区降水量由东向西递减,雪线高度由东向西逐渐升高,地势高峻,气候严寒湿润,到莺落峡出山口,一直穿行于高山峡谷之中;中部河西走廊位于祁连山地与北山山地之间,地势平坦,光热资源充足,是主要的灌溉农业区;流域下游为阿拉善高原,属于马鬃山-阿拉善台块的戈壁沙漠地带,地势开阔平坦,气候非常干燥,植被稀疏,降水量小,是戈壁沙漠围绕天然绿洲的边境地区。近年来,黑河上游水电梯级开发主要分布在上游干流山区,水能资源蕴藏量为 106 万 kW,可开发量为 52.80 万 kW。根据地形情况,干流从上到下已建并投入运行的有 8 座梯级电站,依次为黄藏寺、宝瓶河、三道湾、二龙山、大孤山、小孤山、龙首二级以及龙首一级(表 1)。

表 1 黑河上游水电开发情况

Table 1 Hydropower development in the upper reaches of the Heihe River

电站名称	装机容量/万 kW	年发电量/(亿 kW·h)	总库容/亿 m <sup>3</sup>	海拔/m	建设时间
黄藏寺电站	4.90	1.43	3.67	2 590.00	在建
宝瓶河电站	12.30	4.10	2.15	2 528.90	2012-07
三道湾电站	11.20	4.00	0.05	2 239.00	2009-05
二龙山电站	5.05	1.74	0.81	—	2007-09
大孤山电站	6.50	2.01	1.41	2 112.90	2009-07
小孤山电站	10.20	3.91	0.01	1 970.50	2006-07
龙首二级电站	15.70	5.28	0.86	1 974.30	2004-08
龙首一级电站	5.20	1.98	0.13	1 716.00	2002-04

### 1.2 样品采集与分析

黑河干流的水能资源集中在上游河段,已建的梯级大坝破坏了河流的连续性,极大地改变了水温和泥沙等水文环境要素,严重影响到流域内的水质安全与河流生态健康。为分析黑河上游梯级筑坝下氮磷营养盐的时空分布特征及水体富营养化状况,根据地形情况及水电开发现状,沿程布设 16 个采样点(图 1),依次命名为 H1~H16,其中

H1、H2、H3、H10、H13 为自然河流段;H4、H6、H8、H11、H14 为水库段,并在水库中分别取上层、中层和下层进行分析;H5、H7、H9、H12、H15、H16 为水库下泄水段。于 2017、2018、2019、2021 年及 2023 年的枯水期(4、12 月)和丰水期(8 月)进行采样调查。现场采用哈希便携水质分析仪进行测定的水体指标有 pH、电导率(EC)、溶解氧(DO)、溶解性固体总量(TDS)和盐度等,并采用 HR8300 型便携

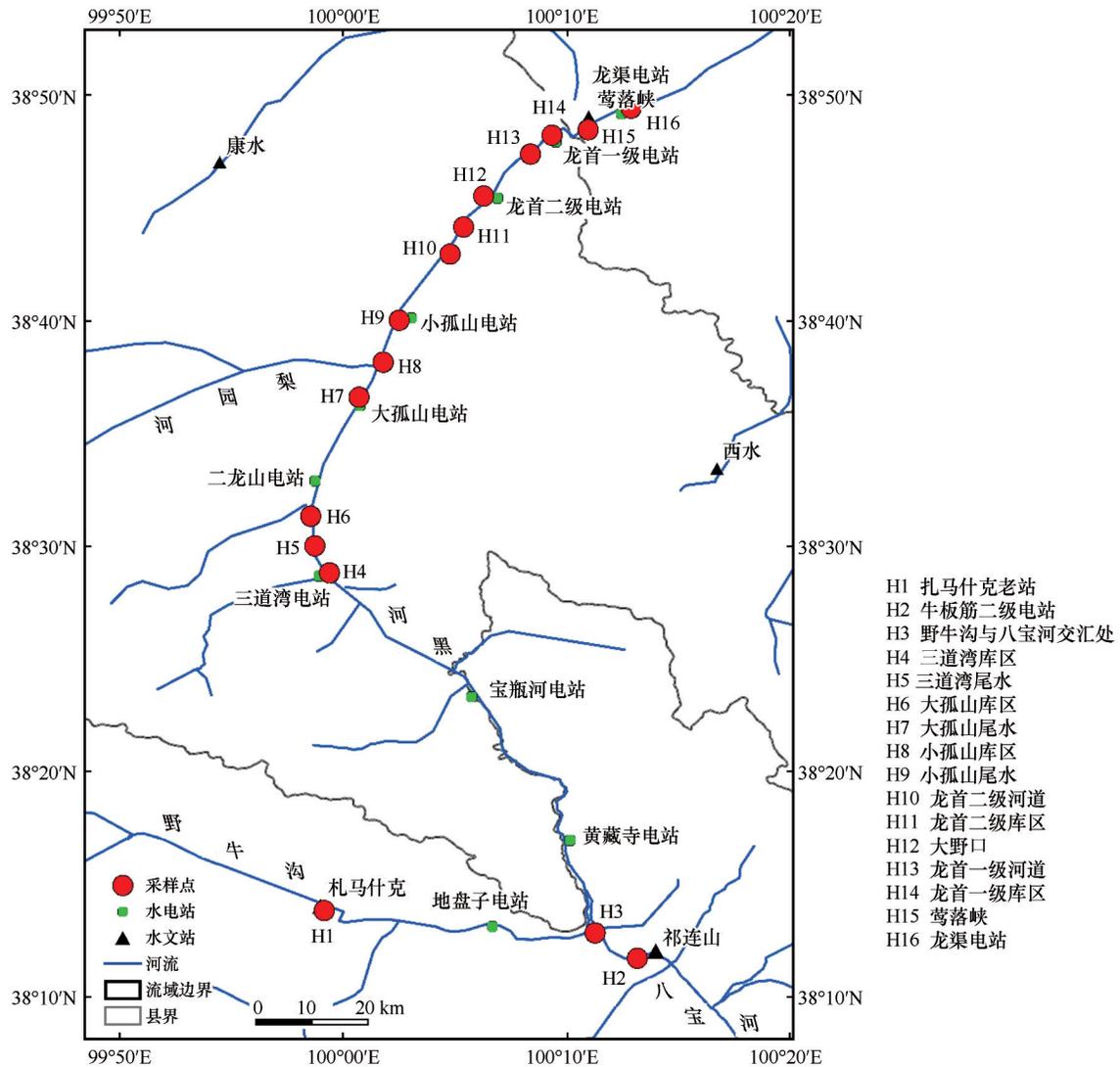


Fig.1 Schematic diagram of sampling point distribution in the research area

式数据记录仪对水温(WT)及水位进行定时采集,同时在库区上、中、下3层分别采集1 000 mL水样,固定后置于4 °C保温箱带回实验室,测定总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度、亚硝酸盐氮(NO<sub>2</sub>-N)浓度、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)浓度、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)及化学需氧量(COD)等指标。水样的预处理和保存严格按

照《水和废水监测分析方法》<sup>[18]</sup>进行,对TN和TP浓度测定时,由于水样中未含有悬浮物、颗粒物等杂质,无需过滤处理。为减少系统误差,以上样品测定均重复测定3次,数据分析过程中取其平均值。水质指标监测方法如表2所列。水质划分采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。

表 2 水质监测分析方法

Table 2 Water quality monitoring and analysis methods

监测指标	方法	最低检出率/(mg·L <sup>-1</sup> )	参考国标
TN	碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法	0.050	GB 1194—89
TP	钼酸铵分光光度法	0.010	GB 11893—89
NO <sub>2</sub> -N	重氮耦合分光光度法	0.001	GB 7493—87
NH <sub>3</sub> -N	纳氏试剂分光光度法	0.025	GB 7479—87

### 1.3 富营养化风险评价

黑河流域水体富营养化指数(EI)采用适用于中国湖泊、库、河流富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式计算<sup>[19]</sup>,选取TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、DO作为评价指标,并根据富营养状态分级标准评价各采样点处水体的营养状态:

$$EI_j = 10.77 \times (\ln x_j)^{1.1826} \quad (1)$$

$$EI = \sum_{j=1}^n w_j \times EI_j \quad (2)$$

式中:EI<sub>j</sub>为指标j的水体富营养化指数;x<sub>j</sub>为指标j的“规范值”;w<sub>j</sub>为指标j的归一化权重值,本研究将各指标视为等权重。

### 1.4 数据处理与分析

原始数据在Excel中进行标准化处理与计算,利用Pearson相关性分析方法在IBM SPSS Statistics 20中对不同水质指标进行相关性分析,相关图表制作用Origin 2022完成,采用ArcGIS绘制研究区图。

## 2 结果与分析

### 2.1 黑河上游水体基本理化因子参数

黑河上游水体中pH、WT均表现为丰水期>枯水期,其中pH值主要分布在8~9,呈弱碱性;水温沿程起伏变化较小。DO、EC、TDS和盐度为枯水期>丰水期,其中DO、EC、盐度浓度沿程呈不断波动的变化趋势,时空差异显著,DO浓度总体较高,枯水期可达10.56 mg·L<sup>-1</sup>,为II级水质,表明水体拥有良好的自净能力,处于健康状态,同时也说明河流水质未受到有机污染。TDS值越高,表明水体中含有的溶解物越多,TDS在丰水期变化趋势较为稳定,而枯水期沿程呈先减后增的趋势,可能是梯级尾库段(H11~H14)水体中含有大量的溶解物,导致梯级尾库段TDS浓度明显增高(图2)。

### 2.2 黑河上游氮磷时空分布特征

从时间分布来看,水体中TP浓度表现为枯水期<丰水期,而TN、NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N表现为枯水期>丰水期;水体中无机氮以NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N为主,其丰水期和枯水期平均浓度分别为0.193、0.279 mg·L<sup>-1</sup>和0.003、0.006 mg·L<sup>-1</sup>。从空间分布来看,黑河干流水体中NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈现逐渐下降趋

势,TN沿程呈现先减后增的趋势。河流段TN、TP和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈先增后减的趋势,水库段NH<sub>3</sub>-N的浓度沿程逐渐下降,而TN、TP和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈上升趋势,下泄水段TP、NO<sub>2</sub>-N和NH<sub>3</sub>-N沿程呈先减后增的趋势(图3)。

采用2023年4月实验数据对黑河上游5座梯级水库枯水期氮磷营养盐垂向分布特征进行分析,如图4所示。库区水体中NO<sub>2</sub>-N浓度较低,满足I类水质标准,NH<sub>3</sub>-N平均浓度为0.33 mg·L<sup>-1</sup>,为II类水质标准,TN、TP平均浓度分别为0.96、0.07 mg·L<sup>-1</sup>,为III类水质标准。5座梯级水库水体中TN、TP的浓度下层普遍高于上层,其中H4、H6电站上层和下层水体TN、TP的浓度高于中层,H8、H11、H14电站中层水体TN、TP的浓度高于上层和下层,最大值均出现在H4下层,其值分别为1.6、0.093 mg·L<sup>-1</sup>;中层水体中NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N的浓度分别为0.256~0.410、0.0056~0.0113 mg·L<sup>-1</sup>,其中H8、H14水库中NO<sub>2</sub>-N的浓度表现为中层高于上层和下层,H6、H11、H14水库中NH<sub>3</sub>-N的浓度也表现为中层较高。

丰水期,黑河流域上游水体中TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N之间相关性均不显著(P>0.05),可能是由于丰水期存在大量的微生物吸收氮磷等营养物质,难以体现丰水期营养物质之间的相关性;TDS和盐度都与EC呈极显著正相关(P<0.01),一般情况下,EC越高,溶解性总固体浓度越高<sup>[20]</sup>;DO与氮磷呈负相关(表3)。枯水期,TP、NH<sub>3</sub>-N呈显著负相关(P<0.05),WT和TP呈显著正相关,DO与盐度呈显著正相关,与TP、EC呈负相关,盐度、TN间呈显著正相关(表4)。

### 2.3 水体富营养化风险评价

水体氮磷比(TN:TP)反映水体营养物限制性特征,是影响浮游植物生物量以及藻类群落结构的重要因素,也是水体藻类水华暴发的重要指标<sup>[21]</sup>。根据Guildford等<sup>[22]</sup>提出的水中营养物限制性划分标准:TN:TP≤9,藻类生长表现为氮素是限制性营养元素,水体中磷的消耗降低;TN:TP≥22.6,磷元素为限制性营养元素,水体中氮的消耗降低;9<TN:TP<22.6,处于氮磷共同限制阶段,加速藻类对氮素有机合成的生态过程,促进藻类爆发性生长,易造成水体水华暴发<sup>[23-24]</sup>。黑河上游水体丰水期TN:TP值为1.42~16.62,枯水期TN:TP值为2.75~30(图

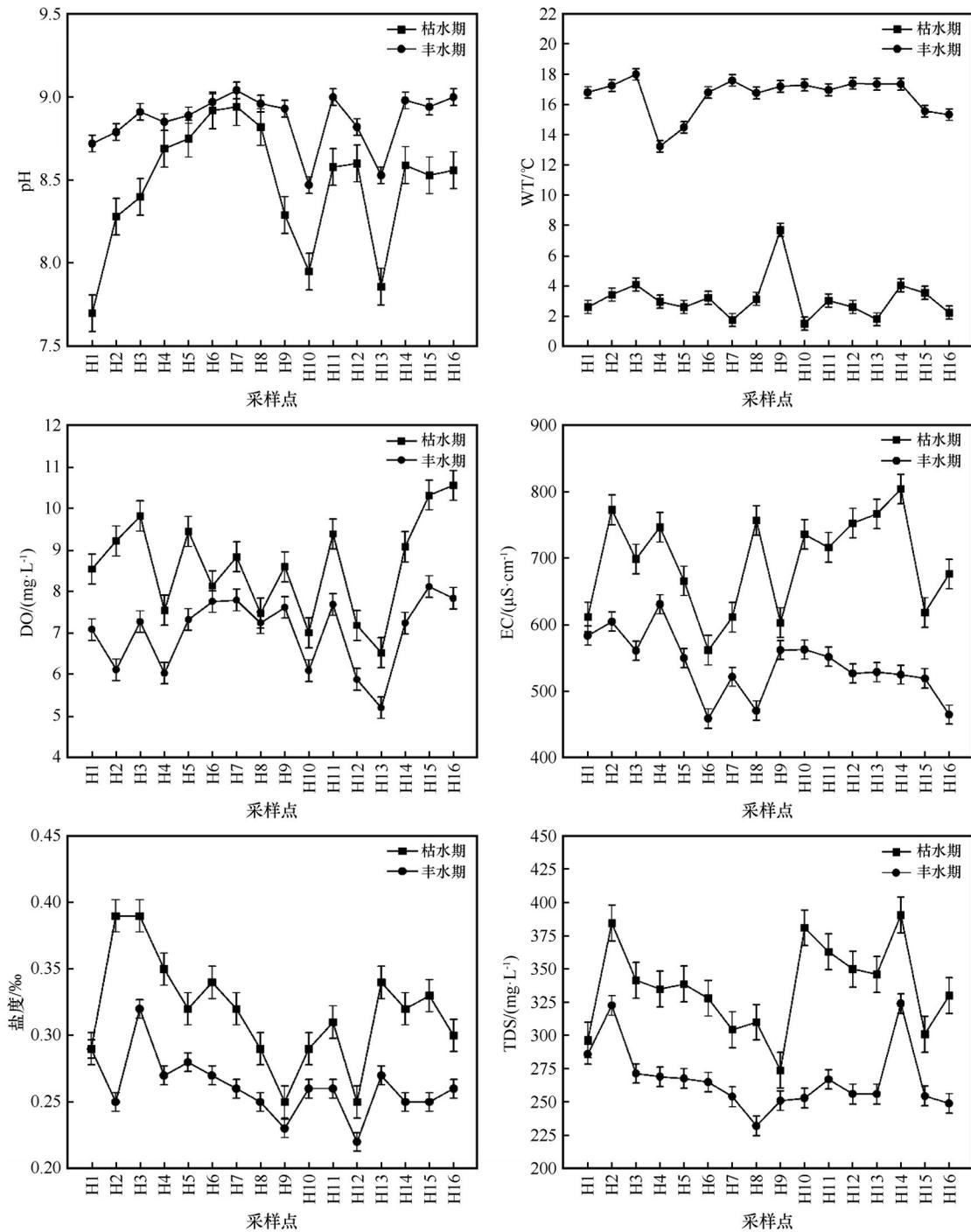


图2 水体理化因子时空分布

Fig.2 Spatiotemporal distribution of physical and chemical factors in water bodies

5A), 丰水期大部分水体断面处于氮限制, 枯水期大多处于氮磷共同限制。

依据对数型幂函数普适指数公式,  $c_0$  选用评价指标的“极贫”营养值<sup>[19]</sup>, 不同评价指标的  $c_0$  如表 5 所列。营养状态分级标准为:  $EI \leq 20$ , 水体为贫营养状态;  $20 < EI \leq 39.42$ , 水体为中营养状态;  $39.42 < EI \leq 61.28$ , 水体为富营养状态;  $61.28 < EI \leq 76.28$ , 水体为

重富营养状态<sup>[25-26]</sup>。在单个河流-水库-下泄水系统中, 入库河流段(H1、H2、H3)  $EI$  指数普遍高于水库段和下泄水段, 首尾水库段丰水期和枯水期  $EI$  指数均低于下泄水段; 整体上黑河上游 H1~H8 区域  $EI$  指数较高, 富营养化风险较大,  $EI$  指数沿程呈逐渐减少趋势, 且丰水期  $EI$  指数高于枯水期  $EI$  指数, 水体富营养化水平存在时空分布差异(图 5B)。

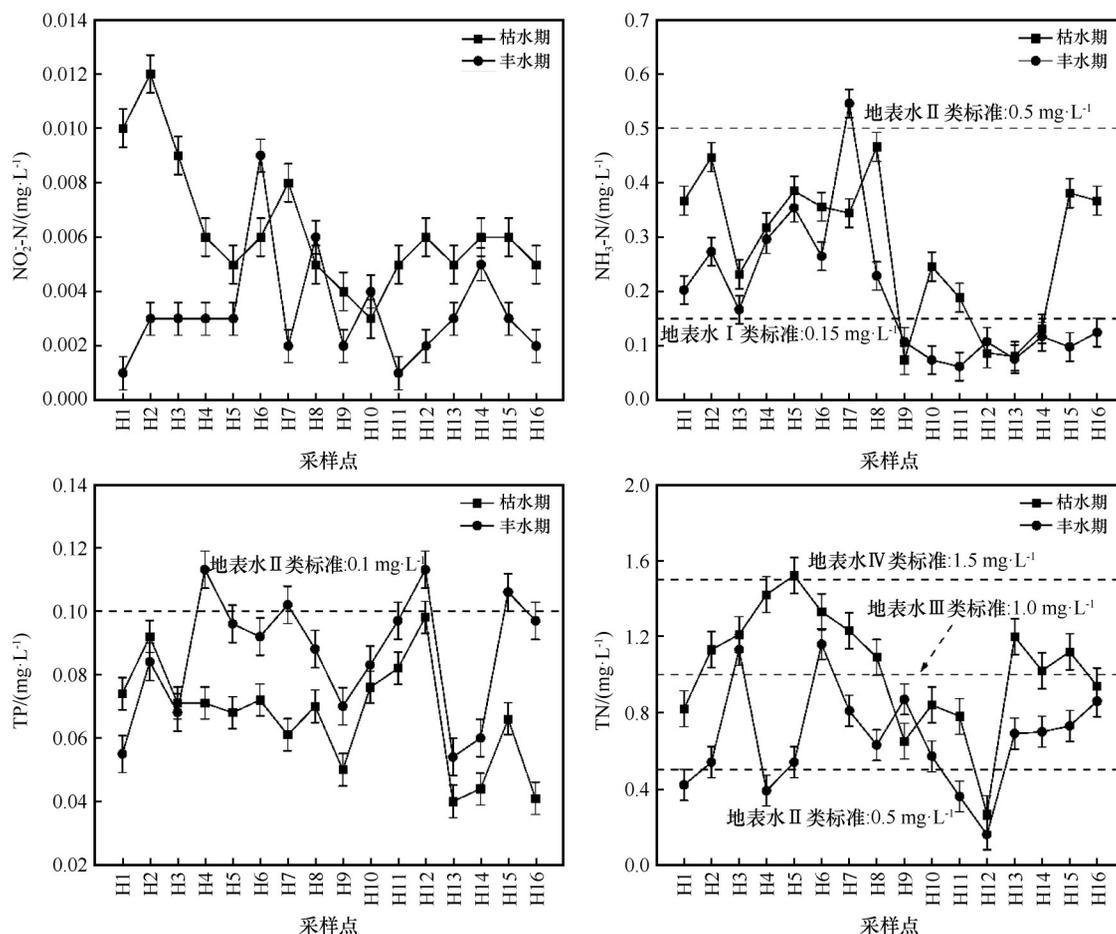


图3 水体氮磷浓度时空分布

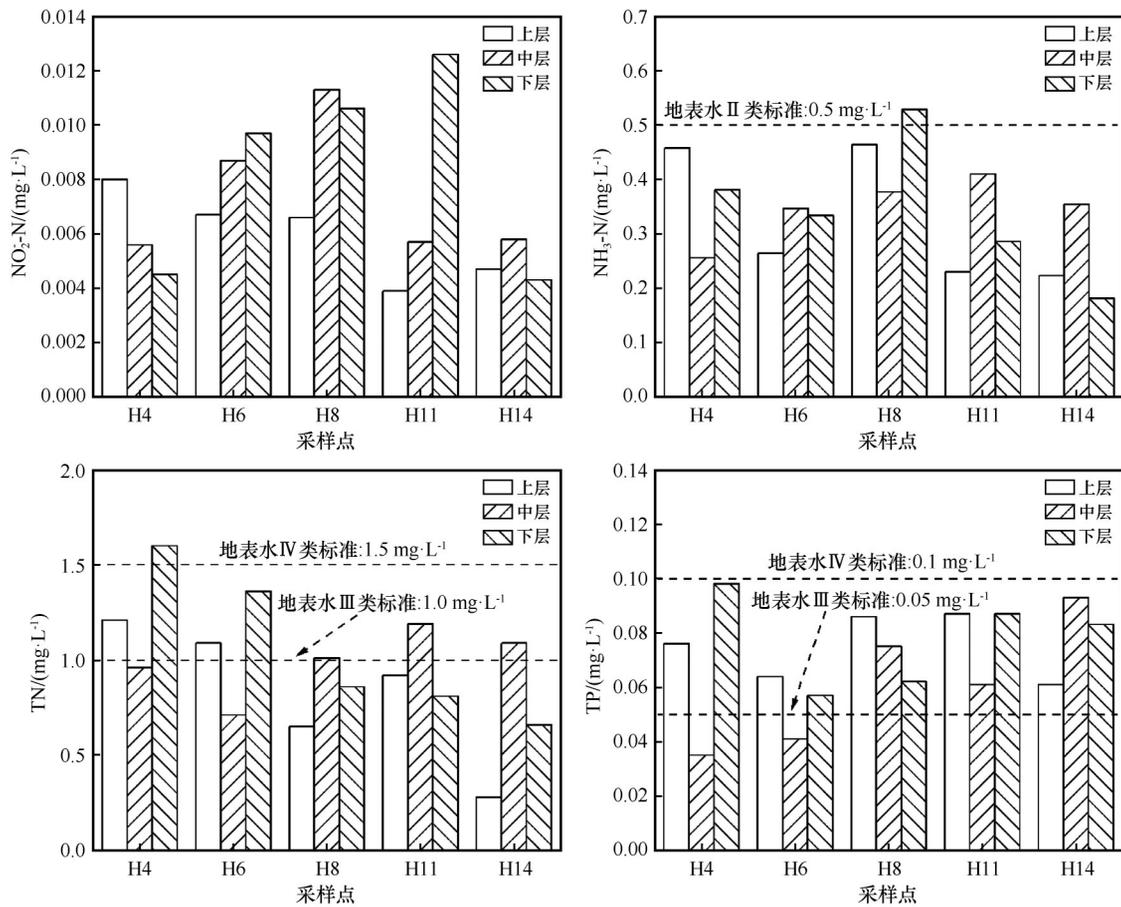
Fig.3 Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus concentrations in water bodies

### 3 讨论

#### 3.1 梯级筑坝下黑河流域氮磷分布特征

梯级水库建设对河流氮磷分配格局的影响存在多种复杂调控路径,包括营养物质多级物理拦截与滞留,固定与再悬浮,吸附-解吸与矿化作用等<sup>[21]</sup>。本研究中,从时间分布来看,TP浓度表现为丰水期>枯水期,TN、NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度与之相反,主要是由于枯水期冬季水库水量补给和换水频率减弱,水力停留时间增长,造成有机物和营养盐大量滞留;加之枯水期水体温度较低,降低污染物分解速度,从而使磷的浓度表现为枯水期高于丰水期<sup>[27-28]</sup>。丰水期处于氮限制,水体中对磷的消耗降低;同时由相关性分析可知枯水期水温与水体TP呈显著正相关,表明不同季节水体氮磷浓度变化主要受降水、温度、水力条件等的影响而存在不同的差异。从空间分布看,黑河干流水体NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈现逐渐下降趋势,TN和TP浓度沿程变

化较为平稳,原因可能是受水库建设的影响,水体沿程累积趋势逐渐被削弱,这与众多学者关于梯级筑坝下养分的“拦截-衰减”预期一致<sup>[29]</sup>。水库段TN、TP和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈上升趋势,下泄水段沿程呈先减后增趋势,前期研究发现黑河水体中TP浓度沿梯级水库呈增加趋势,将这一现象归因于上游外源性磷输入在梯级水库中的连续积累作用<sup>[30]</sup>,这与Chen等<sup>[31]</sup>发现湄公河上游梯级水库水体中TN和TP浓度并未下降,甚至有所增加结论相一致。现阶段黑河干流水体NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈现逐渐下降趋势,可能是多级大坝的拦截效应<sup>[29]</sup>,在一定程度上起到净化水体的作用,致使由河流段到下泄水段水质有好转的趋势;与此同时,随着周围环境的变化,下层水体的缺氧甚至厌氧状态为沉积物氮磷的释放提供了有利条件,导致出现在沉积物中过量的氮磷营养盐再次释放,下层水体无机磷或重金属元素等物质输入通量提高,造成二次污染<sup>[32-33]</sup>,因此,持续监测水库水质的再生污染尤为重要。



注：根据TP进行水质划分时采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)湖、库栏标准值

图4 黑河上游5座梯级水库枯水期氮磷营养盐垂向分布

Fig.4 Vertical distribution of nitrogen and phosphorus nutrients during dry season in five cascade reservoirs in the upper reaches of the Heihe River

表3 丰水期水体理化指标相关关系

Table 3 Correlation between physical and chemical indicators of water during high water season

丰水期	pH	WT	DO	EC	SAL	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
pH	1.000								
WT	0.030	1.000							
DO	0.278	-0.183	1.000						
EC	0.033	-0.177	-0.562*	1.000					
SAL	0.438	-0.092	-0.088	0.597*	1.000				
TN	-0.133	0.234	-0.264	-0.055	0.039	1.000			
TP	-0.059	-0.540*	-0.339	-0.174	0.027	0.099	1.000		
NH <sub>3</sub> -N	0.098	-0.183	-0.010	0.077	0.248	-0.304	0.333	1.000	
NO <sub>2</sub> -N	0.072	0.152	-0.149	0.058	-0.031	0.080	0.294	0.086	1.000

注：\*表示显著性水平  $P < 0.05$ , \*\*表示显著性水平  $P < 0.01$ 。

从5座梯级水库水体中氮磷垂向分布来看,5座梯级水库水体中TN、TP的浓度均呈现出下层普遍高于上层,且最大值均出现在H4水库下层;大部分

水库水体中NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N的浓度呈现出中、下层均高于上层,这可能是由于下层水体为厌氧环境,促使沉积物中氮、磷释放<sup>[34]</sup>,但由于太阳辐射和

表4 枯水期水体理化指标相关关系

Table 4 Correlation between physical and chemical indicators of water bodies during dry season

枯水期	pH	WT	DO	EC	SAL	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>2</sub> -N
pH	1.000								
WT	0.210	1.000							
DO	0.196	-0.075	1.000						
EC	0.201	0.013	-0.259	1.000					
SAL	0.264	-0.110	0.540*	-0.167	1.000				
TN	0.493	-0.383	0.344	0.044	0.638**	1.000			
TP	-0.237	0.635**	-0.212	-0.105	-0.107	-0.291	1.000		
NH <sub>3</sub> -N	0.475	-0.301	0.368	0.521*	0.086	0.388	0.523*	1.000	
NO <sub>2</sub> -N	-0.378	-0.004	0.312	-0.134	0.562*	0.255	0.272	0.188	1.000

\*表示显著性水平  $P < 0.05$ , \*\*表示显著性水平  $P < 0.01$ 。

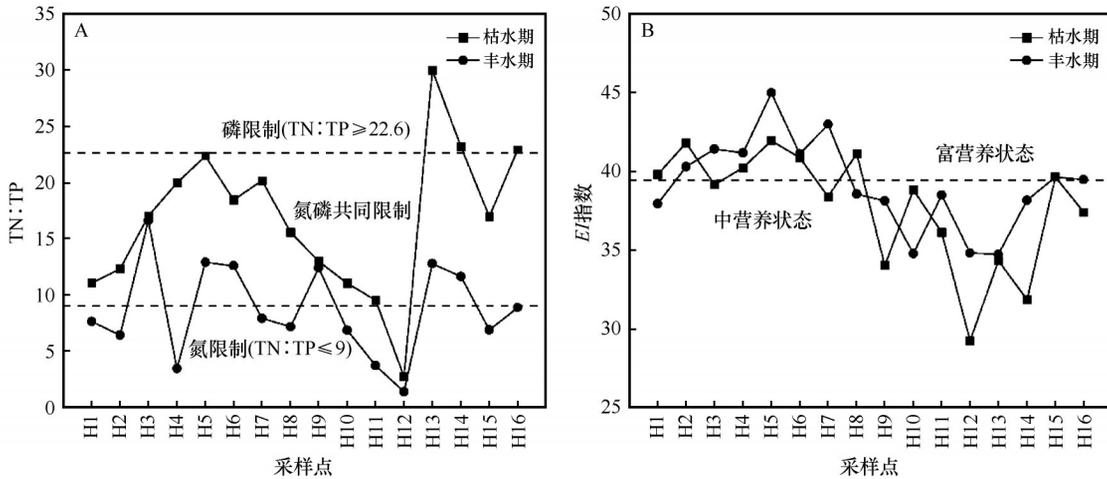


图5 黑河水体 TN:TP 和水体富营养化指数

Fig.5 TN:TP and eutrophication index of Heihe River water body

表5 湖、库富营养化指标“参照值” $c_0$

Table 5 "Reference values"  $c_0$  of lake and reservoir eutrophication indicators

状态	TP/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	TN/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	COD <sub>Mn</sub> /( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	DO/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NH <sub>3</sub> -N/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	NO <sub>2</sub> -N/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
极贫( $c_0$ )	1.0	0.02	0.12	40	0.01	0.01

热量传输不平衡导致水体出现“分层”现象<sup>[35-37]</sup>,阻隔了下层高浓度的氮素向上层水体扩散,并随着水体温度的降低,下层蓄积的氮磷在上下层对流过程中被带到中层水体<sup>[38]</sup>,对水库水体溶解氧、营养盐和水生生物的分布产生重大影响<sup>[39-40]</sup>。另外,水库蓄水后原有河流水力条件与物质传输之间的平衡状态遭到破坏,导致上游污染物被拦截于库区,造成有机物和营养盐的蓄积污染<sup>[41]</sup>,沿程形成系列氮磷“蓄积库”和“反应器”,促使氮磷释放和下泄转移,进而导致下泄水段水体氮磷浓度提高,增加下一级水库富营养化的风险<sup>[42]</sup>。

### 3.2 梯级筑坝下黑河流域水体富营养化风险变化

水体富营养化是梯级筑坝河流面临的重要生态威胁<sup>[43]</sup>。黑河入库河流段 EI 指数普遍高于水库段和下泄水段,首尾两座水库丰水期和枯水期 EI 指数下泄水段高于水库段,但整体 EI 指数沿程呈逐渐减少趋势,表明梯级筑坝作用下沿程累积有逐渐削弱的趋势,特别是 EI 指数的空间特征与氮磷浓度分布相似,呈自第一梯级向库尾逐级减少的趋势,表明梯级筑坝在一定条件下降低了水体富营养化风险。此外枯水期黑河上游水体中 TN:TP 值为 2.75~

30,丰水期为1.42~16.62,丰水期大部分水体断面处于氮限制,有可能为调节TN:TP而发生生物固氮作用,以消纳水体中相对较多的磷;枯水期大部分水体断面处于氮磷共同限制,为浮游植物生长的最佳范围,加速浮游植物对氮素有机合成,促进藻类爆发性生长;而黑河上游之所以未发生富营养化,极有可能是黑河上游属于高寒半干旱区,温度较低,日照强,冬季降水量较少,不利于藻类生长<sup>[44]</sup>。但梯级筑坝导致水文情势变化以及光热分层,为水体藻类生长提供了良好的条件,水流速度的减缓改变了水动力条件,容易形成营养物质的滞留,甚至导致水体富营养化<sup>[45-46]</sup>,因此控制外源磷输入对黑河流域富营养化防控具有重要意义。

## 4 结论

黑河上游pH和WT表现为枯水期>丰水期,水体总体呈弱碱性,枯水期和丰水期WT和DO均呈负相关关系,温度越低,DO溶解度就越高,TDS沿程大致呈先减后增趋势,表现出显著的时空差异,盐度在丰水期和枯水期均表现为沿程逐渐下降的趋势,TDS浓度、盐度和EC之间呈显著正相关关系。

从时间分布来看,TN、NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度表现为枯水期>丰水期,TP浓度则是丰水期>枯水期。从空间分布来看,黑河干流水体中NH<sub>3</sub>-N和NO<sub>2</sub>-N浓度沿程呈现逐渐下降趋势,TN和TP浓度沿程变化较为平稳,部分水库下泄段氮磷营养盐浓度高于水库段,说明单个水库建设对黑河流域营养盐分布具有潜在的累积效应,但梯级水库作用下整体营养盐的分布呈下降趋势,表明梯级筑坝使沿程累积逐渐削弱;同时,梯级水库水体分层现象表明有大量的氮磷蓄积在下层,在某种因素的诱发下可能造成流域生态安全隐患,因此,持续监测水库水质的再生污染尤为重要。

黑河入库河段EI指数普遍高于水库段和下泄水段,整体上EI指数沿程呈逐渐减少趋势,梯级筑坝在一定条件下降低了水体富营养化风险。黑河上游枯水期TN:TP值为2.75~30,丰水期TN:TP值为1.42~16.62,丰水期水体处于氮限制,枯水期大部分水体处于氮磷共同限制。

## 参考文献:

[1] 孔德星.黑河水体-沉积物营养盐时空分布特征及其影响因

素研究[D].兰州:兰州理工大学,2021.

- [2] 刘小真,杨子依,曹炳伟,等.赣江主要河流丰水期-枯水期氮磷营养盐分布特征[J].中国环境监测,2023,39(2):21-32.
- [3] 周晓霞.桐梓河小流域氮磷分布特征及输出通量估算[D].贵阳:贵州大学,2021.
- [4] 李晨辉,闫兴成,丁珏,等.澜沧江梯级筑坝下水体氮磷分布特征及其形成机制[J].湖泊科学,2023,35(4):1320-1332.
- [5] 杨梦斐.梯级水电工程的环境生态累积效应及生命周期评价研究[D].武汉:武汉大学,2018.
- [6] 李哲,陈永柏,李翀,等.河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展[J].地球科学进展,2018,33(7):675-686.
- [7] 纪道斌,龙良红,徐慧,等.梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J].水利水电科技进展,2017,37(3):7-14.
- [8] 麻泽龙,程根伟.河流梯级开发对生态环境影响的研究进展[J].水科学进展,2006(5):748-753.
- [9] 易仲强,刘德富,杨正健,等.三峡水库香溪河库湾水温结构及其对春季水华的影响[J].水生态学杂志,2009,30(5):6-11.
- [10] 王昱,孔德星,冯起,等.筑坝蓄水对夏季黑河氮磷营养盐空间分布特征的影响[J].生态与农村环境学报,2021,37(8):1001-1010.
- [11] 段斐.亚高山针叶林-溪流-河流集合生态系统的氮磷硫迁移过程[D].雅安:四川农业大学,2017.
- [12] Falkowski P, Scholes R J, Boyle E, et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system[J]. Science, 2000, 290:291-296.
- [13] 李提来,陈黎明,王向明.梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J].水利水电科技进展,2013,33(3):23-28.
- [14] 王昱,朱家乐,冯起,等.黑河上中游流域梯级库区夏季重金属汇源解析[J].中国环境科学,2023,43(4):1895-1905.
- [15] 展洋,汪双,陈吉平,等.基于大型底栖动物完整性指数的黑河中上游水生生态系统健康评价[J].中国沙漠,2023,43(2):271-280.
- [16] 徐佳妮,刘东鑫,黄赛宇,等.青山湖流域景观格局对河流氮磷营养盐影响的时空尺度效应[J/OL].环境科学:1-18 [2024-02-28].
- [17] 韩子言,蒙古军,邹易,等.1982-2017年黑河流域植被指数动态及其对气候变化与生态建设工程的响应[J].中国沙漠,2023,43(3):96-106.
- [18] 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].北京:中国环境科学出版社,2002:1-9.
- [19] 李祚泳,汪嘉杨,郭淳.富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式[J].环境科学学报,2010,30(3):664-672.
- [20] 杨福霞,简慧敏,田琳,等.大辽河口COD与DO的分布特征及其影响因素[J].环境科学,2014,35(10):3748-3754.
- [21] 阙子亿,王晓锋,袁兴中,等.梯级筑坝下小型山区河流水体碳氮磷的时空特征及富营养化风险[J].湖泊科学,2022,34(6):1949-1967.
- [22] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. American Society of Limnology and Oceanogra-

- phy, 2000, 45(6): 1213-1223.
- [23] 赵建国. 永定河怀来段氮磷时空分布及迁移规律研究[D]. 保定: 河北大学, 2018.
- [24] 陈昊, 陈艺晏, 金英淑. 丹江口库区典型支流氮、磷空间分布特征与富营养化评估[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 62-70.
- [25] 单保庆, 营宇翔, 唐文忠, 等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 352-358.
- [26] 朱广伟, 邹伟, 国超旋, 等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005-2018年)及其对未来磷控制目标管理的启示[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 21-35.
- [27] 周涛, 程天雨, 虞宁晓, 等. 乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应[J]. 生态学杂志, 2018, 37(3): 707-713.
- [28] 程根伟, 麻泽龙, 范继辉. 西南江河梯级水电开发对河流水环境的影响及对策[J]. 中国科学院院刊, 2004(6): 433-437.
- [29] 黎慧卉, 刘丛强, 汪福顺, 等. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(4): 368-372.
- [30] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响[J]. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1539-1551.
- [31] Chen Q W, Shi W Q, Huisman J, et al. Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream[J]. National Science Review, 2020, 7(9): 1449-1457.
- [32] 王兴菊, 于文晴, 赵华青, 等. 大冶水库夏秋季热分层对沉积物氮磷释放的影响[J/OL]. 环境科学与技术: 1-11 [2023-12-25].
- [33] 叶胜兰, 舒晓晓. 富营养化景观水体中氮素的迁移转化研究进展[J]. 农业与技术, 2022, 42(1): 90-93.
- [34] 王书航, 王雯雯, 姜霞, 等. 蠡湖水体氮、磷时空变化及差异性分析[J]. 中国环境科学, 2014, 34(5): 1268-1276.
- [35] Ward J V, Stanford J A. The serial discontinuity concept of lotic ecosystems[M]//Fontaine T D, Bartell S M. Dynamics of Lotic Ecosystems. Ann Arbor, USA: Ann Arbor Science, 1983: 29-42.
- [36] Naiman R J, Turner M G. A future perspective on North American's freshwater ecosystems[J]. Ecological Applications, 2000, 10: 958-970.
- [37] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展[J]. 水科学进展, 2005(1): 134-140.
- [38] 马卫星. 黑河水库水质变化规律及扬水曝气应用效果研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [39] 张运林, 陈伟民, 杨顶田, 等. 天目湖热力学状况的监测与分析[J]. 水科学进展, 2004(1): 61-67.
- [40] 林佳, 苏玉萍, 钟厚璋, 等. 一座富营养化水库: 福建山仔水库夏季热分层期间浮游植物垂向分布[J]. 湖泊科学, 2010, 22(2): 244-250.
- [41] 王昱, 卢世国, 冯起, 等. 黑河上中游水质时空分异特征及污染源解析[J]. 中国环境科学, 2019, 39(10): 4194-4204.
- [42] 钟华平, 刘恒, 耿雷华. 澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应[J]. 水利学报, 2007, 38(增刊1): 577-581.
- [43] 鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养化特征[J]. 生态学报, 2017, 37(14): 4663-4670.
- [44] 王锦旗, 宋玉芝, 薛艳. 气候变化诱导水体富营养化研究进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 145-155.
- [45] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J]. 环境科学, 2023, 44(3): 1452-1464.
- [46] 王璨, 李一平, 李聂贵, 等. 南方水库热分层消亡时期水体混合特征及其驱动机制[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1613-1622.

## Impact of cascade damming on nitrogen and phosphorus nutrient distribution in the Heihe River Basin

Wang Yu<sup>1ab</sup>, Xian Fengyun<sup>1a</sup>, Chen Jiping<sup>2</sup>, Zhang Ying<sup>3</sup>, Wei Yun<sup>3</sup>, Fan Yiyang<sup>1a</sup>, Tian Miao<sup>1a</sup>

(1. a.School of Energy and Power Engineering / b.Gansu Province Key Laboratory of Biomass and Solar Energy Complementary Energy Supply System, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.Hydrological Station of Gansu Province, Lanzhou 730030, China; 3. Water Environment Monitoring Center of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Cascade dams alter the hydrological characteristics along with material transport and transformation patterns of rivers, thereby influencing water environment quality. Therefore, exploring the spatio-temporal distribution impact of nitrogen (N) and phosphorus (P) nutrients in the upper reaches of Heihe River under cascade dams and analyzing eutrophication risks is of certain reference significance for ecological restoration and cascade water resources management in Heihe River Basin. This study conducted statistical analysis on multi-year data of 10 water physicochemical indicators at 16 major monitoring sections in the upper reaches of Heihe River. The results demonstrate that there were significant spatio-temporal differences in the physicochemical properties of the water in the upper reaches of Heihe River. The overall water quality is weakly alkaline with good self-purification capacity, and the concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) comply with Class III and Class II water quality standards. For temporal distribution, the concentrations of TN, ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), and nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) in the upper reaches of Heihe River are higher during the dry season than the flood season, while TP concentration is higher during the flood season than the dry season. In terms of spatial distribution, the distribution of nutrient salts in individual reservoirs exhibits potential cumulative effects, but under the action of cascade reservoirs, the overall distribution of nutrient salts shows a decreasing trend, indicating that the cumulative effect along the river is gradually weakening. Furthermore,  $\text{NH}_3\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N}$  are primarily distributed in the middle layer of the reservoir, while TN and TP have higher concentrations in the lower layer than the upper layer, indicating a stratification phenomenon with a large amount of N and P accumulating in the lower layer sediment. This study highlights the necessity for the implementation of management strategies aimed at mitigating eutrophication risks.

**Key words:** cascade damming; nitrogen and phosphorus nutrients; spatio-temporal distribution; eutrophication assessment; Heihe River