

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.05.017



# 大汶河梯级拦蓄水库富营养化评估

何涛<sup>1</sup>, 夏霆<sup>1</sup>, 陈怀民<sup>2</sup>, 赵计奎<sup>1</sup>, 武钦凯<sup>1</sup>

(1. 南京工业大学 城建学院, 南京 211816; 2. 河海大学 环境科学与工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 基于大汶河沿线 4 个监测点 2007—2014 年水质资料, 分析溶解氧、化学需氧量、氨氮等 9 项指标的年际变化特征, 采用灰色模式识别模型评价大汶河水质状况。通过 9 个梯级水库 2015 年丰、平、枯水期水质现场调查, 分析氮、磷营养盐时空变化特征, 运用加权综合营养状态指数法评价梯级水库营养状态。结果表明: 2007—2014 年间, 受流域内各项减排措施影响, 大汶河有机污染得到有效缓解; 受拦蓄工程影响, 河段内 TP 明显变优, TN 总体变差; 灰色综合指数表明, 水质状况整体有所好转, 且季节波动趋于平稳。因污染程度不同, 梯级水库富营养化状态有明显差异, 部分库区丰水期和枯水期已分别爆发蓝藻和硅藻水华, 不同水期因下泄流量不同等造成流动条件的差异, 对库区水质有较大影响, 水污染程度、工程拦蓄与运行造成的流动条件差异共同对库区内藻类生长与爆发产生重要影响。

**关键词:** 大汶河; 水质变化; 梯级拦蓄工程; 富营养化

**中图分类号:** X524      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2018)05-0133-08

## Eutrophication assessment in cascade reservoirs of Dawen River

He Tao<sup>1</sup>, Xia Ting<sup>1</sup>, Chen huaimin<sup>2</sup>, Zhao Jikui<sup>1</sup>, Wu Qinkai<sup>1</sup>

(1. College of Urban Construction, Nanjing University of Technology, Nanjing 211816, P. R. China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** Based on water quality data of 4 stations in the Dawen River from 2007 to 2014, this paper analyzed the inter-annual variability of 9 indicators such as dissolved oxygen, chemical oxygen demand, ammonia nitrogen etc., and evaluated water quality by a Grey Model. By the site investigation of 9 cascade reservoirs during the rich, average and dry period in 2015, the spatiotemporal variation of nitrogen and phosphorus nutrients were analyzed, nutritional level was assessed by TLI. The results show that during the period of 2007 to 2014, the organic pollution have been effectively alleviated by the emission reduction measures in the basin, the concentrations of TP have been meliorated obviously while the concentrations of TN have been aggravated integrally by the construction of cascade reservoirs. The grey comprehensive index shows that the water quality of the Dawen River is improved and the seasonal fluctuations tend to be stable. The state of eutrophication has apparent difference among cascade reservoirs because the contamination vary in degree. Part of the reservoirs have been experienced cyanobacteria and diatom blooms

**收稿日期:** 2017-11-23

**基金项目:** 泰安市水利局科技项目

**作者简介:** 何涛(1993-), 男, 主要从事水污染控制研究, E-mail: hetao226@njtech.edu.cn.

夏霆(通信作者), 男, 博士, 副教授, E-mail: xiating@njtech.edu.cn.

**Received:** 2017-11-23

**Foundation item:** Science and Technology Project of Taian Water Resource Bureau

**Author brief:** He Tao(1993-), main research interest: water pollution control, E-mail: hetao226@njtech.edu.cn.

Xia Ting (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: xiating@njtech.edu.cn.

during rainy and dry seasons. The different flow conditions induced by different discharge in corresponding season have great influence on water quality of the reservoirs. , the difference of flow condition caused by the water pollution level, damming and impoundment have a significant impact on the growth and bloom of algae in reservoirs.

**Keywords:** Dawen River; water quality variety; cascade reservoir; eutrophication

大汶河是黄河下游、山东省境内的最大支流,也是泰安市唯一的大型河道,是泰安市的母亲河<sup>[1]</sup>,但流域水资源短缺且分布严重不均。近年来,为缓解大汶河流域水资源供需矛盾,充分合理地开发利用大汶河地表径流,在干流和两大支流上规划新建和修复一批拦河枢纽,以保证流域用水需求,减少洪涝与干旱灾害,提高水资源调配能力。但河道拦蓄工程被认为具有阻隔、截留和累积等效应<sup>[2-4]</sup>,对河流生态环境产生一系列的影响:因改变河流自然水文模式,破坏河流自然“连续性”<sup>[5-6]</sup>,河流生态系统因此而向“静水”生态系统转变,强水动力下的河流搬运作用逐渐演变成“湖泊”沉积作用<sup>[7]</sup>,营养物质容易富集,并使得拦蓄水库易出现藻类密度大量增长,甚至水华爆发等现象。

如何协调好河流社会服务与自然生态环境保护之间的关系,一直是河流保护的关键问题,作为南水北调东线工程重要蓄水走廊——东平湖的惟一汇入河流,大汶河水质状况受到社会各界广泛关注。选择泰安市境内大汶河干流、主要支流牟汶河以及河段上新建和修复的 9 座拦河水库为研究对象,基于历史水质监测数据以及现场监测与调研,分析大汶河水质时空变化和梯级水库富营养化状态差异,探讨大汶河水质状况变化的影响因素与拦蓄工程对大汶河梯级水库营养状况的影响,并提出相关建议,以促进大汶河水资源开发利用与生态健康保护。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

大汶河(北纬  $35^{\circ}59'55.6'' \sim 36^{\circ}7'10.1''$ 、东经  $116^{\circ}12'17.6'' \sim 117^{\circ}56'29.4''$ )古称汶水,发源于泰莱山区,汇集泰山山脉以南、蒙山山脉以北诸水,自东向西流经莱芜、新泰、泰安、肥城、宁阳、汶上、东平等县、市,又经东平湖清河门出湖闸入黄河,全长 231 km,总落差 362 m。泰安市境内大汶河流域面积 6 457.2 km<sup>2</sup>,占全流域面积比 72.2%。泰安属水资源短缺地区,水资源年均占有量仅为 311 m<sup>3</sup>,不足全国平均水平的 1/7。大汶河流域降雨量年内分布严重不均,2006—2015 年间,泰安大汶河区平均降雨量为 670.22 mm,汛期(6—9 月)平均降雨量为 494.92 mm,占全年降水量的 73.84%,丰、枯水年交

替出现,且近 10 a 来降水量总体有下降趋势(图 1)。因汛期暴雨集中,而其余时段干旱少雨,大汶河地区洪涝、旱灾交替频发。以 2012 年为例,汛期泰安市因洪涝灾害造成 15.03 万人受灾,受灾面积 8.199 千 hm<sup>2</sup>,绝收面积 2.2 千 hm<sup>2</sup>,而同年又因干旱受灾面积 51 552 hm<sup>2</sup>,绝收面积达 7 519 hm<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。

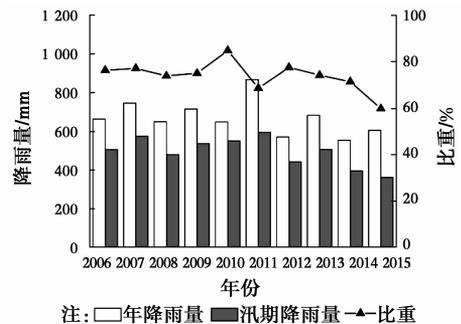


图 1 泰安市年降雨量分布

Fig. 1 Annual rainfall distribution in Taian City

为调洪补枯、应对水资源短缺与洪涝灾害问题,2010—2014 年间,泰安市在大汶河干流和主要支流上新建或修复了一批拦蓄工程。为尽量减少对大汶河生态系统的影响,拦蓄工程多采用橡胶坝等低坝形式。目前,关于梯级拦蓄河流的水质评价多围绕水电开发等形成的深水大库开展<sup>[9]</sup>,尚未见有针对低坝形式开发的调研与评估。为深入分析梯级拦蓄工程对大汶河水质状况的影响,此次评估以唐庄(TZ)、颜张(YZ)、泉林(QL)、颜谢(YX)、汶口 1 号(WK1)、汶口 2 号(WK2)、堽城(GC)、琵琶山(PPS)和戴村(DC)9 个梯级水库为研究对象。

### 1.2 数据来源与分析

收集与分析 2007—2014 年大汶河沿线 4 个水文站(莱芜、北望、大汶口和戴村坝)奇数月份的水质监测数据,水质指标选取:溶解氧(DO)、pH 值、氟化物(F<sup>-</sup>)、化学需氧量(COD)、高锰酸盐指数(I<sub>Mn</sub>)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)。

针对大汶河干流和支流牟汶河上的 9 个梯级水库,分别于 2015 年 1 月(枯水期)、5 月(平水期)和 7 月(丰水期)进行采样分析,样品采集、保存和分析按照文献<sup>[10]</sup>进行。调查指标包括:pH 值、溶解氧、

透明度(SD)、总氮、氨氮、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、高锰酸盐指数、总溶解性氮(TDN)、总磷、总溶解性磷(TDP)、叶绿素(Chl-a)和浮游植物等。

### 1.3 评价方法

水质状况评价参照文献[11]运用的水质评价灰色模式识别模型:1)基于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)建立参考序列及比较序列;2)数据归一化处理;3)关联度、关联离散度、隶属度计算;4)水质灰色识别模式综合指数(GC)计算。

水库富营养评估参照中国环境监测总站推荐的加权综合营养状态指数法,计算式为

$$TLI(\sum) = \sum W_j \cdot TLI(j)$$

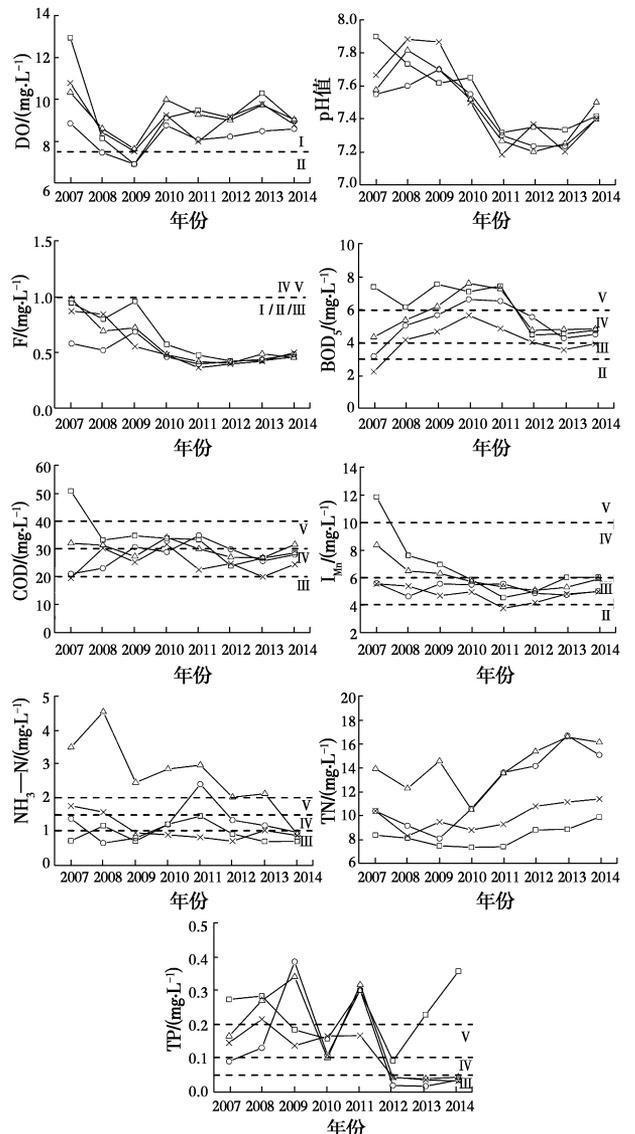
式中:TLI(∑)为综合营养状态指数;W<sub>j</sub>为第j种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)代表第j种参数的营养状态指数。相关权重及富营养化程度分级标准均参照文献[12]的方法确定。

## 2 结果与分析

### 2.1 大汶河水质状况年际变化

大汶河水质因子年际变化如图 2 所示。DO 是衡量河流自净能力及能否维持生态平衡的重要指标。2007—2014 年间,大汶河 DO 平均浓度变化范围为 6.9~14.95 mg/L,平均值为 8.99 mg/L。2010 年后稳定在一个较高水平,超地表水环境质量 I 类标准(GB 3828—2002)。pH 值反映水体酸碱强度与氢离子浓度,决定众多物化生过程。2007—2014 年间,大汶河 pH 值变化范围为 7.18~7.90 mg/L,平均值为 7.50 mg/L,呈弱碱性。2010 年后下降了约 0.5 个单位,整体变化趋势具有明显的趋同性。F 广泛分布于自然水体,是生物体必须的微量元素之一,过量则会抑制植物的光合作用。2007—2014 年间,大汶河 F 平均浓度变化范围为 0.36~0.98 mg/L,平均值为 0.57 mg/L。处于 I 类水质标准,且 2010 年后变化较为平稳,各站点水平相当。

COD、I<sub>Mn</sub>和 BOD<sub>5</sub> 综合反映地表水体受有机污染的程度。2007—2014 年间,大汶河 COD 平均浓度变化范围为 19.45~50.72 mg/L,平均值为 28.87 mg/L。2007—2011 年间整体在 IV~V 类标准波动,2012 年后稳定在 IV 类标准。I<sub>Mn</sub> 平均浓度变化范围为 3.78~11.85 mg/L,平均值为 5.69 mg/L。2007—2011 年间整体上呈现显著下降趋势,尤其莱芜与大汶口站,2012 年后稳定在 IV 类标



注: —○— 莱芜 —□— 北望 —△— 大汶口 —×— 戴村坝

图 2 2007—2014 年大汶河水质因子年际变化

Fig. 2 Interannual variations of water quality factors from 2007 to 2014

准。BOD<sub>5</sub> 代表水体可生物降解有机物含量,2007—2014 年间平均浓度变化范围为 2.27~7.69 mg/L,平均值为 5.69 mg/L。2007—2011 年间,上游莱芜站稳定在 V 类标准,其余 3 站呈现显著上升趋势。2012 年后除下游戴村站处于 III 类标准外,整体上均稳定在 IV 类标准。

TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 是表征水体富营养化状态的重要指标。2007—2014 年间,大汶河 TN 平均浓度变化范围为 7.335~16.68 mg/L,平均值为 11.49 mg/L。超地表水环境质量标准中 V 类标准的限值,达劣 V 类。莱芜与戴村站变化较为平稳且浓度相对较低,北望、大汶口 2010 年后处于较高水平且存在较为明显的上升,2014 年出现稳定趋势。NH<sub>3</sub>-N

平均浓度变化范围为 0.65~4.54 mg/L,平均值为 1.48 mg/L。除大汶口站超 V 类标准限值外,整体在 IV~V 类标准波动。TP 平均浓度变化范围为 0.02~0.39 mg/L,平均值为 0.16 mg/L。除个别年度超 V 类标准外,总体上在 III~IV 类标准波动。2012 年后下游 3 站点均稳定在较低水平(0.03 mg/L)。

根据大汶河 2007—2014 年 48 个奇数月 DO、pH、F<sup>-</sup>、COD、I<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、TN、TP 和 NH<sub>3</sub>-N 9 项指标监测数据,利用灰色模式识别模型对大汶河水质状况进行综合分析评价。通过主成份分析(KMO 检验值=0.675)确定各参评指标权重,权向量 W=0.039、0.040、0.085、0.090、0.134、0.082、0.147、0.160、0.223。计算水质灰色识别模式综合指数,结果如图 3 所示,基于 GC 值,2007—2014 年间大汶河水质转好趋势明显,且 2012 年后季节性波动变小,介于 2~3 之间。整体上大汶河水质变化趋势与上游来水(莱芜站)具有明显趋同性,上、中游(莱芜、北望、大汶口站)水平相当,下游(戴村坝站)相对较低。

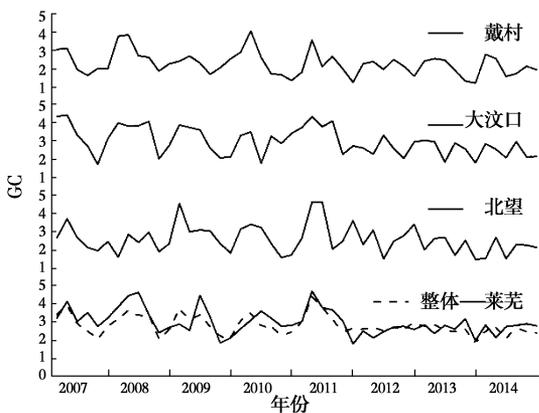


图 3 2007—2014 年大汶河水质年际变化  
Fig. 3 Interannual variations of water quality from 2007 to 2014

### 2.2 梯级水库营养状况时空变化

沿河筑坝蓄水形成梯级水库群,改变原有自然水文、水动力模式,河流自净能力下降,营养物质易于在库区富集,富营养化问题严峻。调查期梯级水库氮、磷营养盐时空变化如图 4 所示。大汶河梯级水库 TN、NH<sub>3</sub>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度沿程变化趋势基本一致,总体呈波浪式变化且沿程降低,在泉林、堽城处到达波峰,其中,泉林处达最大值,分别为 16.37、2.98 和 8.24 mg/L。泉林库区主要受重污染支流泮汶河汇入影响,后者承纳市区工业废水及

40 多万城镇居民生活污水,水质超地表水 V 类标准(GB 3838—2002)。季节变化方面,TN 浓度枯水期最高,丰水期最低,表明库区 TN 污染可能主要来自沿途城镇和生活污水排放等点源污染,丰水期稀释作用加强;NH<sub>3</sub>-N 浓度除受泮汶河影响较大的泉林库区外,均为丰水期最高,说明 NH<sub>3</sub>-N 污染主要来源于沿河区域面源污染,同时,可能经有机氮微生物在夏季有氧条件下分解形成;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度枯水期最高,丰、平水期基本一致,主要由于枯水期 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 污染主要来自外源化肥输入,丰、平水期则以生活污水和内部生物作用为主。TP 浓度整体在泉林库区达最大值,约 0.59 mg/L。丰水期相对较高,自颜谢下泄后 TP 明显偏低,均低于 0.01 mg/L,表明梯级拦蓄对 TP 的拦截与沉积作用明显。对比上、下游梯级水库营养盐变化,并无明显的累积性效应;而泉林等水库营养盐的峰值性凸显变差,应主要受污染汇入的影响,如泉林水库水质应与污染严重的泮汶河支流汇入密切相关。

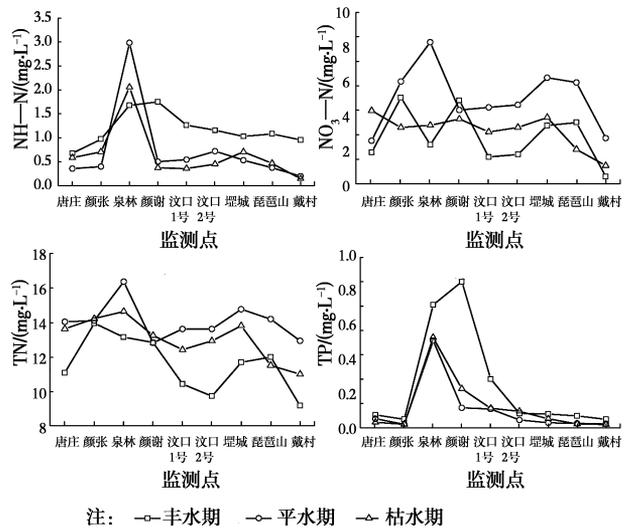


图 4 调查期大汶河营养盐沿程变化  
Fig. 4 Change along the river of nutrients in survey period

选取 TP、TN、COD<sub>Mn</sub>、SD 和 Chl-a 5 项水质因子,运用加权综合营养状态指数法评价大汶河梯级库区营养状态。调查期大汶河各梯级库区综合营养指数 TLI(Σ)沿程变化范围见图 5,丰、平、枯水期 TLI(Σ)值均在泉林出现最大峰值(分别为 61.54、63.51 和 68.76),处于中度富营养状态,自泉林往下游,各水库富营养状况总体有逐级减缓趋势,且不同水期具有较为明显的趋同性,丰、平水期戴村水库已为贫营养状态。从富营养化评价结果来看,主要因污染程度不同,梯级水库富营养化状态差异明显,泉林水库污染严重,富营养程度严重。

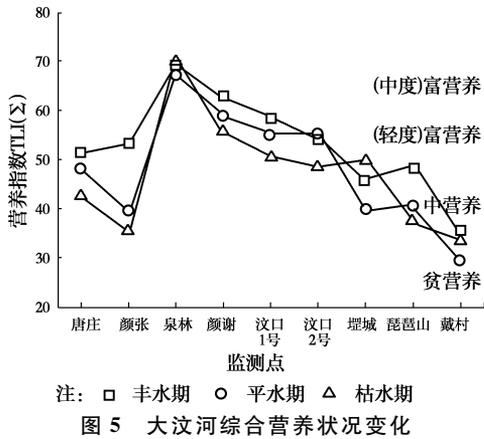


图 5 大汶河综合营养状况变化

Fig. 5 The changes of Comprehensive nutritional status

### 3 讨论

#### 3.1 大汶河水质状况变化的影响因素

基于 2007—2014 年水质指标主成分分析,主要水质污染指标依次为  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 和  $I_{\text{Mn}}$  (权重  $>0.1$ )。马吉让等<sup>[13]</sup>调查大汶河水系 30 个人河排污口,污染物年入河总量为 31 957 万 t/a,泰安区域占比达 77.1%,主要污染物 COD 为 19 660 t/a,  $\text{NH}_3\text{-N}$  为 3 155 t/a, TP 为 326 t/a,  $\text{BOD}_5$  为 2 481 t/a, TN 为 4 390 t/a,大汶河水体污染物主要是营养盐和有机物,与本文分析结果基本一致。近年来,沿河地区大力推进各项减排措施,尤其莱钢减排贡献突出,上游来水水质明显改善,大汶河整体水质状况有所好转。随着城市化与农业集约化进程加快,沿河生活与农业污染源成为大汶河水体污染的重要来源,2014 年生活污水排放量高达 18 966.59 万 t,且存在逐年上升趋势,农业化肥施用量 65.70 万 t(氮肥 26.17 万 t,磷肥 9.99 万 t)。因此,大汶河水环境治理首要解决沿河污染汇入问题。

调查期  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 浓度整体呈下降趋势,主要由于近年来泰安市不断加强对污染排放的监管,整治城区污水管线,提高污水处理能力,截至 2014 年全市建成污水处理厂 12 座,大大削减了入河污染,使得河道内  $\text{NH}_3\text{-N}$  满足地表水 III 类标准, COD 满足 IV 类标准。  $\text{BOD}_5$  浓度 2010 年后明显下降,应该是周边污染排放得到有效控制,同时,也可能与梯级水库建设后河段内新增大面积湿地,水质净化能力提高。受梯级拦蓄工程影响,河段 TP 浓度 2012 年后显著下降,参照其他地区拦蓄工程的影响分析<sup>[14]</sup>,这应与梯级拦蓄水库对 TP 的拦截与沉积作用有关。与此同时, DO 浓度趋于稳定化,由于 DO 受径流影响较大,这应与拦蓄工程调节影响使得河道径流较为稳定有关。

#### 3.2 梯级拦蓄对大汶河富营养化影响

梯级拦蓄影响大汶河氮磷营养盐的迁移、转化等生物地球化学行为,个别库区富营养化问题严峻,但整体上并无明显的累积效应。经采样分析(见图 6),大汶河梯级水库群调查期 TDN/TN 值高达 73%,表明库区 N 污染以溶解态为主,而溶解态 N 较颗粒态受梯级水库主要的沉积作用影响微弱,因此, TN 浓度在库区内迅速累积,进而导致全河性的严重超标。拦蓄工程因加速 TP 的拦截与沉积而对库区与下泄水体 TP 浓度具有明显的改善作用。同时,张恩仁等<sup>[3]</sup>认为发育出的水库生态系统可将上游输入的 13%~42% 的溶解态无机磷固定于浮游生物。大汶河全年 TDP/TP 值仅为 28%,表明大汶河 P 污染主要以颗粒态为主,而修建梯级水库产生阻隔效应,水体流动性减小,加速悬浮态 P 在库区沉积,降低水体中 TP 浓度。丰水期 TP 浓度明显高于平、枯水期,主要由于丰水期库水交换量大,TP 的拦截与沉积作用相对较弱。基于 P 在库区的积蓄,大汶河拦蓄水库尤其是上游水库应注意防范底泥内源 P 释放对上覆水质的影响。

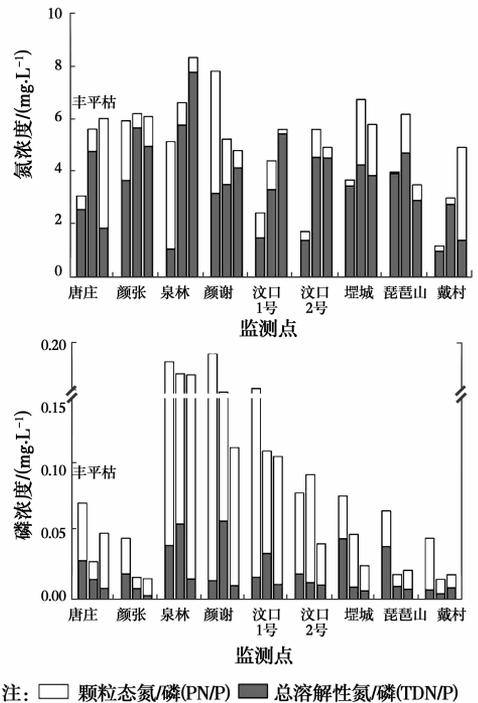


图 6 溶解态营养盐分布情况

Fig. 6 The distribution of dissolved nutrients

因大汶河旱涝不均,拦蓄工程建设之前,非汛期河道内长期断流,大段河道枯竭,河流生态健康受损严重。拦蓄工程的建设尽管使得局部水流受阻,但低坝的建设形式使得河道内形成多个首尾相连的浅水水库,对沿河水资源利用、河道内水生生物栖息地

修复与河道健康维护作用巨大。根据水库运行水量统计(见图 7),2014 年研究区 9 个梯级水库蓄水量达 6 680 万 m<sup>3</sup>,改变原有枯水期断流现象。并使得河道内新增河滩型湿地 2 885.4 ha,颜张坝下至泉林库区段约 30 km 河段内已形成著名的徂徕山汶河自然湿地景观。现有关于自然湿地缓冲带对氮磷去除的研究表明<sup>[15-16]</sup>,湿地对氮、磷的削减作用显著,生长季节的湿地缓冲带对面源 TN、TP 去除率高达 74.1%和 84.6%。同时,湿地对河道内 N、P 营养盐有良好的吸收、利用和转化作用,能有效促进硝化和反硝化,改善水体富营养状态。

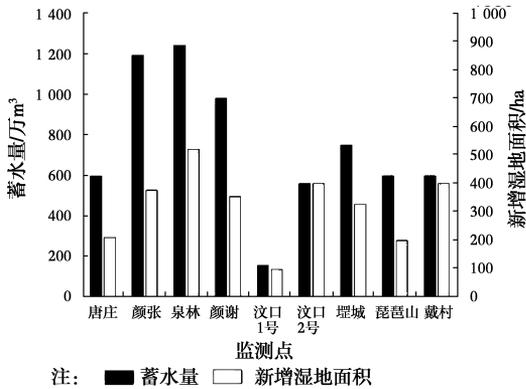


图 7 梯级水库蓄水量与诱发湿地面积分布情况

Fig. 7 The distribution of pondage and wetland area

在外来污染源未得到有效控制条件下,拦蓄工程阻隔使得水体交换受阻,水库 N、P 营养盐蓄积,致使藻类快速生长与爆发。同步的浮游植物取样调研发现,泉林库区夏季丰水期已爆发严重的蓝藻(微囊藻)水华,冬季枯水期泉林和堽城库区出现了硅藻水华(小环藻)。

水体 Chl-a 含量是表征藻类现存量的重要指标<sup>[17]</sup>,相关分析表明,调查期水库 Chl-a 浓度(见图 8)与综合营养指数 TLI(Σ)显著相关(相关系数 0.695\*\*)。进一步分析不同期 Chl-a 含量与各水质因子的相关关系(表 1)表明:丰水期 Chl-a 浓度与各

水质因子无明显相关性,应是夏季藻类生长受光照、温度和 水体滞留状态等因素影响较大,且营养盐本底值较高,营养盐对藻类生长难以形成限制因素。平、枯水期 Chl-a 与 TP 和 NH<sub>3</sub>-N 浓度有着极显著的相关关系,应是梯级水库对 P 的拦截与沉积作用明显,水体中 P 含量较低,成为主要限制因素。Redfield 等<sup>[18]</sup>认为浮游植物光合作用中吸收适宜的 N/P 比为 16,当 N/P>7 时浮游植物生长受磷限制。因平、枯水期河道及水库内 TN 高,库内 TP 偏低,水库富营养化及藻类生长均受 P 影响大。并且,尽管库区 TN 浓度高,但 NH<sub>3</sub>-N/TN 值总体为 0.12,NH<sub>3</sub>-N 作为藻类吸收利用的重要氮源,也成为影响藻类生长的重要因素。枯水期 Chl-a 浓度与 WT 有着显著的相关关系,主要由于枯水期大汶河浮游植物优势门类为硅藻,对光强和温度的要求相比其他藻类低,能适应低温条件,在营养盐适宜和缓流条件下以累积生物量的方式快速对水温作出响应<sup>[19]</sup>。从不同水期 Chl-a 分布及其与水质因子的关系来看,大汶河梯级水库富营养化及藻类爆发除主要受 N、P 营养盐影响外,亦受光照、水温、水流状态等其他理化因素影响较为明显。

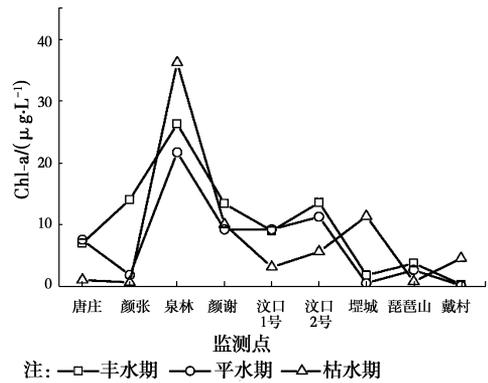


图 8 调查期大汶河 Chl-a 沿程变化  
Fig. 8 Change along the river of Chl-a in survey period

表 1 不同水期 Chl-a 浓度与水质因子的相关关系

Table 1 The spearman rank correlation in water quality factors and Chl-a

水期	pH	DO	WT	SD	I <sub>Mn</sub>	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	N/P
丰水期	0.661	-0.038	0.105	-0.261	0.441	0.700*	0.520	0.661*	-0.086
平水期	0.593	0.524	0.371	-0.551	0.590	0.789**	0.615	0.827**	-0.507
枯水期	0.506	0.592	0.841**	0.102	0.621	0.948**	0.435	0.937**	-0.454

注: \* 表示 P<0.05; \*\* 表示 P<0.01(双尾检验)。

## 4 结论

1)2007—2014 年间,大汶河水体主要污染物为营养盐和有机物,受沿河地区各项减排措施影响,

NH<sub>3</sub>-N 和 COD 浓度整体呈下降趋势,一定程度上缓解了水体有机污染;受梯级拦蓄工程影响,TN 浓度逐年提高尤其城市化程度较高区域,TP 浓度 2012 年后稳定在较低水平。水质灰色识别模式综

合指数表明,大汶河水体环境正向良性方向发展,水质状况得到明显改善,且2012年后季节波动趋于平稳。

2)对9个梯级水库不同水期水质调查表明,除部分库区因污染严重外,梯级水库水质总体呈现由上游至下游逐步变优的趋势;不同水期因下泄流量不同等造成流动条件的差异,对库区水质有较大影响;因污染程度不同,梯级水库富营养化状态有明显差异;水污染程度、工程拦蓄对库区内藻类生长与爆发共同产生影响,部分库区丰水期和枯水期已分别爆发蓝藻和硅藻水华。

3)梯级拦蓄工程因蓄积水资源、恢复河滩湿地,改善了河道内长期断流现象,并促进河道生物栖息条件好转。但为减缓水库富营养化趋势及防控藻类水华爆发,应严控污染源汇入,并优化重点库区和时段的出、入库流量,改善水库流动与营养盐蓄积条件。

#### 参考文献:

- [1] 赵志鹏,刘慧,周震. 泰安市生态河道建设措施[J]. 山东水利,2010(9):51-52.  
ZHAO Z P, LIU H, ZHOU Z. Measures of ecological river construction in Taian [J]. Shandong Water Resources, 2010(9):51-52. (in Chinese)
- [2] WARD J V, STANFORD J A. Ecological connectivity in alluvial river ecosystems and its disruption by flow regulation [J]. Regulated Rivers Research and Management, 1995, 11(1):105-119.
- [3] 张恩仁,张经. 三峡水库对长江N、P营养盐截留效应的模型分析[J]. 湖泊科学,2003, 15(1):41-48.  
ZHANG E R, ZHANG J. Analysis of the three-gorge reservoir impact on the retention of N and P in the Yangtze River [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(1):41-48. (in Chinese)
- [4] 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(Sup1):582-586.  
ZHONG H P, LIU H, GENG L H. Cumulative effects of Lancang River basin cascade hydropower development on ecology and environment [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007(Sup1):582-586. (in Chinese)
- [5] TUNDISI J G, STRASKRABA M. Theoretical reservoir ecology and its applications [J]. Optical Remote Sensing of Air Pollution, 1999: 95-122. (in Chinese)
- [6] 申恒伦,蔡庆华,邵美玲,等. 三峡水库香溪河流域梯级水库浮游植物群落结构特征[J]. 湖泊科学,2012, 24(2):197-205.  
SHEN H L, CAI Q H, SHAO M L, et al. Community structure characteristics of phytoplankton along a cascade of reservoirs in Xiangxi River basin, Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2012, 24(2):197-205. (in Chinese)
- [7] HART D D, POFF N L. A special section on dam removal and river restoration [J]. Bioscience, 2002, 52(8):653-655.
- [8] 泰安市大汶河志编纂委员会. 大汶河志[M]. 北京:方志出版社,2016:93-99.  
Compilation Committee of Taian Dawen River Records. Dawen River records [M]. Beijing: Fangzhi Press, 2016:93-99. (in Chinese)
- [9] 邱光胜,胡圣,叶丹,等. 三峡库区支流富营养化及水华现状研究[J]. 长江流域资源与环境,2011, 20(3):311-316.  
QIU G S, HU S, YE D, et al. Investigation on the present situation of eutrophication and water bloom in the branches of three gorges reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(3):311-316. (in Chinese)
- [10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002:649-653.  
The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:649-653. (in Chinese)
- [11] 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[J]. 湖泊科学,2016(6):1226-1234.  
TIAN W D, JIA K L, SHI X H, et al. Water quality variation in Lake Wuliangsubai, 2005-2014 [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, 28(6):1226-1234. (in Chinese)
- [12] 金相灿,刘树坤,章宗涉,等. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社,1995:150-197.  
JIN X C, LIU S K, ZHANG Z S, et al. China lake environment [M]. Beijing: Ocean Press, 1995:150-197. (in Chinese)
- [13] 马吉让. 大汶河流域排污口设置现状调查评价与对策建议 [C]//全国河湖治理与水生生态文明发展论坛,2015.  
MA J R. The investigation and evaluation of the status quo of sewage outlet in Dawen River basin and its countermeasures [C]//National rivers and Lakes regulation and Water Ecological Civilization Development Forum, 2015. (in Chinese)
- [14] 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.
- LI H H, LIU C Q, WANG F S, et al. Change characteristics of phosphorus in cascade reservoirs on Maotiao River system in summer [J]. Resources and Environment in The Yangtze Basin, 2009, 18(4): 368-372. (in Chinese)
- [15] 王磊, 章光新. 湿地缓冲带对氮磷营养元素的去除研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25: 649-652.
- WANG L, ZHANG G X. Removal of nitrogen and phosphorus in riparian buffer zone of wetland [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25: 649-652. (in Chinese)
- [16] PETERJOHN W T, CORRELL D L. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of a riparian forest [J]. Ecology, 1984, 65(5): 1466-1475.
- [17] 国家环境保护局科技标准司. 中国湖泊富营养化及其防治研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- Department of Science, Technology and Standards. Study on lake eutrophication and its countermeasure in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001. (in Chinese)
- [18] REDFIELD A C, KETCHUM B H. The influence of organisms on the composition of sea-water [J]. Sea, 1963, 40(6): 640-644.
- [19] 邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 1-10.
- DENG J M, QIN B Q. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems [J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 1-10. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)