

西北某水库沉积物污染特征与评价

黄道军¹, 薛睿康², 李 凯², 许 明¹, 李永超¹, 孙闻博¹, 黄廷林²

(1. 陕西西咸新区水务集团有限公司, 陕西 西安 712000; 2. 西安建筑科技大学 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 以西北某小型水库坝前至库尾段 4 个采样点的表层沉积物为研究对象, 测定了表层沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、有效磷(AP)含量, 通过计算碳氮比(C/N)、氮磷比(N/P)分析了沉积物污染主要来源, 并利用有机污染指数法、单因子污染指数法和综合污染指数法对表层沉积物的有机物、氮、磷污染进行了评价。结果表明: 表层沉积物中 TOC、TN、TP、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、AP 含量分别为 11.68 g/kg、0.46 g/kg、0.17 g/kg、32.20 mg/kg、66.90 mg/kg 和 13.08 mg/kg; 沉积物中 C/N、N/P 范围分别为 19.02~40.93 和 2.33~3.36, 表明沉积物主要来自外源输入; 有机污染指数表明 S1、S4 采样点有机物轻度污染, S2、S3 采样点为清洁, S3 采样点有机氮污染评价为清洁, 其余采样点为轻度污染; 单因子污染指数和综合污染指数评价结果表明仅 S4 采样点总氮单因子指数评价和综合污染指数评价为轻度污染, 其余采样点均为清洁。

关键词: 农灌水库; 沉积物; 营养盐; 污染评价

中图分类号: TU451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0103-06

Characteristics and evaluation of pollution in sediments of a reservoir in Northwest China

HUANG Daojun¹, XUE Ruikang², LI Kai², XU Ming¹, LI Yongchao¹, SUN Wenbo¹, HUANG Tinglin²

(1. Shaanxi Xixian New Area Water Group Co., Ltd., Xi'an 712000, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: This study takes the surface sediments from 4 sampling points from the dam to the tail of a small reservoir in the northwest, and analyzes the total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), nitrate nitrogen (NO_3^- -N), ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), and available phosphorus (AP) in the surface sediments. The main sources of sediment pollution were identified by calculating C/N and N/P. The organic pollution index method, single factor pollution index method and comprehensive pollution index method were used to evaluate the organic pollution, nitrogen and phosphorus pollution. Results showed that the contents of TOC, TN, TP, NO_3^- -N, NH_4^+ -N and AP in the surface sediments were 11.68 g/kg, 0.46 g/kg, 0.17 g/kg, 32.20 mg/kg, 66.90 mg/kg and 13.08 mg/kg, respectively; the C/N and N/P ranges of the sediments were 19.02~40.93 and 2.33~3.36, respectively, indicating that the sediments were mainly from external sources. The organic pollution index indicates that the organic pollution of S1 and S4 is evaluated as light pollution, and the sampling points of S2 and S3 are clean. The organic nitrogen pollution of S3 sampling point is evaluated as clean, and the remaining sampling points are lightly polluted. The evaluation results of single factor pollution index and comprehensive pollution index show that only S4 sampling site showed light pollution, and the remaining sampling points are clean.

Key words: agricultural irrigation reservoir; sediments; nutrients; pollution evaluation

沉积物是湖库生态环境的重要组成部分, 也是湖库污染的“源”和“汇”^[1-2]。外源污染汇入水库后因水动力条件的改变, 水中悬浮态污染物如泥沙、动植物残体易沉降至库底并在表层沉积物蓄存; 而溶解态污染物进入水体后一方面直接影响供水水

质, 另一方面会为水生生物提供生长繁殖所需必要营养物质, 待水中动植物死亡后又将成为新的沉积物。同时, 受沉积物氧化还原环境的影响, 沉积物中的有机质无法被彻底矿化分解, 而是分解形成小分子有机物和氮、磷等营养物质, 这些污染物在沉

收稿日期: 2020-11-24

修改稿日期: 2021-01-12

基金项目: 国家重点研发计划课题基金资助项目(2019YFD1100101); 陕西省重点研发计划重点产业链(群)-社会发展领域基金资助项目(No. 2019ZDLSF06-03)

第一作者: 黄道军(1975—), 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向为水环境保护与水务运营管理。E-mail: huang_xixian@126.com

通讯作者: 黄廷林(1962—), 男, 博士, 教授。主要研究方向为水源水质污染与富营养化控制。E-mail: huangtinglin@xauat.edu.cn

积物-水界面大量积蓄,在特定条件下(如风生浪引起底泥再悬浮时)释放进入水体形成二次污染。这也是在外源污染得到有效控制后湖库等半封闭水体中氮、磷及有机物含量依然增加的重要原因^[3]。因此,探明湖泊水库沉积物中氮磷及有机质含量、形态与分布情况,对控制水体富营养化、保障水质安全和营造良好的水生态环境具有重要意义。

西北某小型水库是一座以灌溉为主的小(I)型水库,水库运行 30 多年来,沉积物淤积厚度已达 10 m 左右。近年来,为满足区域经济发展需求,对水库功能进行了调整,在满足工业用水的同时作为饮用水应急水源。本研究对该水库表层沉积物污染状况进行了分析与评价,以期为该水库后期运行管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样品采集

研究对象水库控制流域面积 6.6 km²,最大水深 10.5 m,最浅处水深 4 m,主沟道长 3.2 km,平均比降 6.25‰。区域为第四纪黄土层所覆盖,厚度 60~100 m,为传统重要农作区,水库右岸为黄土塬沟壑区,黄土冲沟发育,冲刷剧烈,水土流失严重。依据均匀布点和重点关注区域设点原则,沿水库坝前至库尾依次布设 4 个采样点,采样点位置如图 1 所示,其中 S1、S3、S4 采样点分别为坝前、引水塔和库尾。沉积物样品采集使用抓斗式采样器取采样点表层 10 cm 沉积物样品,样品采集后封装至聚乙烯自封袋,运输过程 4℃ 冷藏保存,尽快带回实验室预处理。



图 1 研究区域采样点布置图

Fig. 1 Sampling points distribution of research area

1.2 样品处理与分析测定

采集样品放入冷冻干燥机干燥过夜,随后用研钵研磨并过 100 目筛备用。TOC 测定采用重铬酸钾法, TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 采用凯氏定氮法测定, TP 测定使用碱溶-钼锑抗分光光度法, AP 测定选用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法。

1.3 评价方法

1.3.1 有机污染和有机氮污染指数评价

沉积物中有机物含量丰富,其不仅是氮、磷迁

移转化的媒介,还能与重金属发生复杂的物理化学反应。本研究采用有机氮污染指数(ON)和有机污染指数(OI)能评价沉积物有机污染程度,其计算公式如下^[4-5]:

$$ON = TN \times 0.95 \quad (1)$$

$$OI = ON \times TOC \quad (2)$$

式中, TN 和 TOC 按 1.0 g/kg=0.1%换算为百分比。根据有机氮污染指数和有机污染指数可将沉积物有机污染分为 4 个等级,等级划分标准见表 1^[4-5]。

表 1 有机污染指数及有机氮污染指数等级划分标准

Tab. 1 Classification standard of sediment organic pollution index and organic nitrogen pollution index

等级	有机污染指数		有机氮污染指数	
	OI	污染程度	ON/%	污染程度
I	<0.05	清洁	<0.033	清洁
II	0.05~0.20	轻度污染	0.033~0.066	轻度污染
III	0.20~0.50	中度污染	0.066~0.133	中度污染
IV	≥0.50	重度污染	≥0.133	重度污染

1.3.2 单因子污染指数和综合污染指数评价

单因子污染指数法在环境领域被广泛用于评价大气、水体、土壤及沉积物污染程度^[6-7]。通过分析 TOC、TN、TP 浓度与评价标准值的关系,能够评价沉积物污染程度。鉴于单因子污染指数法只针对单一污染物评价,因此,在单因子污染指数法基础上发展出利用 TN 和 TP 两个指标综合评价污染程度的综合污染指数法^[8]。单因子污染指数与综合污染指数计算公式如(3)~(5)。

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \quad (3)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

$$FF = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (5)$$

式中: S_i 为单因子污染指数; C_i 为评价因子 i 的实测值, mg/kg; C_s 为评价标准值, mg/kg, TN 评价标准值 C_s 为 550 mg/kg, TP 为 600 mg/kg^[9-10]; FF 为综合污染指数, \bar{F} 为单因子污染指数平均值, F_{\max} 为单因子污染指数最大值。单因子污染指数及综合污染指数分级见表 2^[11]。

表 2 内梅罗综合污染指数($P_{\text{内}}$)及潜在生态危害指数(E_i)、风险指数(RI)等级划分标准

Tab. 2 Classification of single factor index and comprehensive pollution index

等级	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
1	<1.0	<0.5	<1.0	清洁
2	1.0~1.5	0.5~1.0	1.0~1.5	轻度污染

续表 2

等级	S_{TN}	S_{TP}	FF	污染程度
3	1.5~2.0	1.0~1.5	1.5~2.0	中度污染
4	>2.0	>1.5	>2.0	重度污染

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物污染物含量、形态及分布差异

研究对象西北某小型水库南北两岸距离较短, 但

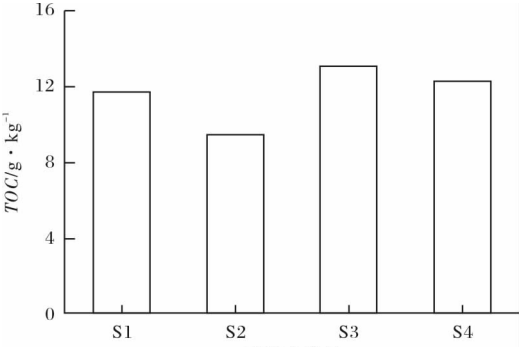
主沟道长达 3 km, 同时水库入流卧管与取水塔距离较远, 库区水体流动性差, 可能导致沉积物中污染物分布差异较大. 表层沉积物中 TOC、TN、TP、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 AP 含量分别为 11.68 g/kg、0.46 g/kg、0.17 g/kg、32.20 mg/kg、66.90 mg/kg 和 13.08 mg/kg. 通过计算变异系数发现 TN 变异系数为 28%, TP 为 31%, NO_3^- -N 为 32%, 说明氮磷营养盐在沉积物中分布并不均匀(表 3).

表 3 西北某小型水库表层沉积物中污染物含量

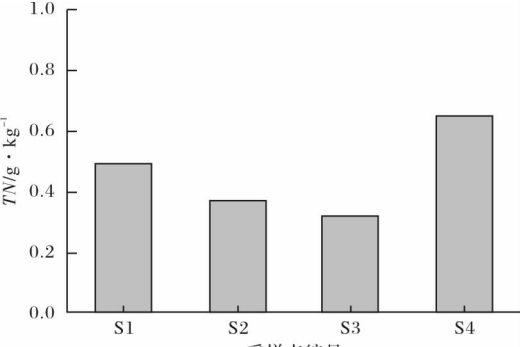
Tab. 3 Distribution of pollutants in surface sediments of a small reservoir in Northwest China

污染物指标	平均值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	最小值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	变异系数/%
TOC	11.68	9.50	13.10	1.34	11.47
TN	0.46	0.32	0.65	0.13	27.79
TP	0.17	0.11	0.24	0.05	31.32
NO_3^- -N	32.2×10^{-3}	20.7×10^{-3}	48.8×10^{-3}	10.2×10^{-3}	31.82
NH_4^+ -N	66.9×10^{-3}	49.9×10^{-3}	89.7×10^{-3}	17.0×10^{-3}	25.45
AP	13.1×10^{-3}	8.9×10^{-3}	14.1×10^{-3}	3.3×10^{-3}	25.02

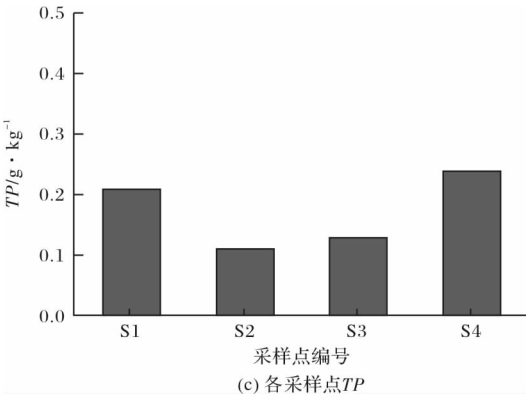
沉积物中 NH_4^+ -N 来源主要为有机物的氨化作用, 因此, 本研究中计算了 S1 至 S4 采样点 NH_4^+ -N 占 TN 比例. 结果显示这一比例在 4 个采样点为 13%~16%, 并没有因有机质含量的不同出现显著差异, 说明该水库不同位置沉积物氨化水平相近. 沉积物中 NO_3^- -N 是 NH_4^+ 在硝化作用下转化而来, 然而沉积物处于厌氧环境, 硝化作用弱^[12], 导致 NO_3^- -N 所占比例仅为 5%~10%. 也正因此, 在沉积物的还原条件下 NH_4^+ -N 比 NO_3^- -N 的释放速率高, 当 NH_4^+ 释放至上覆水体后又被氧化为 NO_3^- -N^[13-14].



(a) 各采样点 TOC



(b) 各采样点 TN



(c) 各采样点 TP

图 2 西北某小型水库沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)、总磷(TP)空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the sediments of a small reservoir in Northwest China

从图 2 可以看出, 研究区域内表层沉积物中 TOC 含量接近, 但氮、磷含量空间分布差异明显, 且变化趋势相近. 从坝前至引水塔 TN 与 TP 不断下降, 又于库尾处急剧升高, 反映出该小型水库沉积物受制于库区地形和运行管理方式, 在库区内迁移较慢. 此外, 氮磷营养盐的分布规律相似能够从侧面说明此水库沉积物污染来源较为单一.

2.2 沉积物中营养物质比值

沉积物 C/N 与 N/P 是反映其污染来源的重要指标, 研究表明, 若 $C/N < 10$ 则有机质多为内源污染, $C/N \approx 10$ 时有机质内源与外源平衡, 而 $C/N > 10$ 则有机质来自外源^[15]. 这是因为高等植物、维管束陆生植物和陆生禾本科或莎草科植物的 C/N 比大于 10, 其中高等植物为 14~23, 维管束陆生植物通常大于 20, 陆生禾本科与莎草科则可高

达 45~50^[10,16]。由图 3 可知,西北某小型水库 S1-S4 采样点表层沉积物 C/N 分别为 23.93、25.71、40.93 和 19.02,空间分布差异较大,且呈现出强烈的外源输入迹象。浮游植物在生长和衰亡过程会按一定比例吸收和释放氮、磷,这一比值约为 16:1,若接近此值,表明沉积物主要为内源输入的污染^[17]。在对 4 个采样点做 N/P 分析可以发现该水库 N/P 在 2.33~3.36 波动,远小于 16:1,说明外源有大量磷输入水库,这可能是由于该水库位于传统农灌地区,生活农业等污水排入所致。

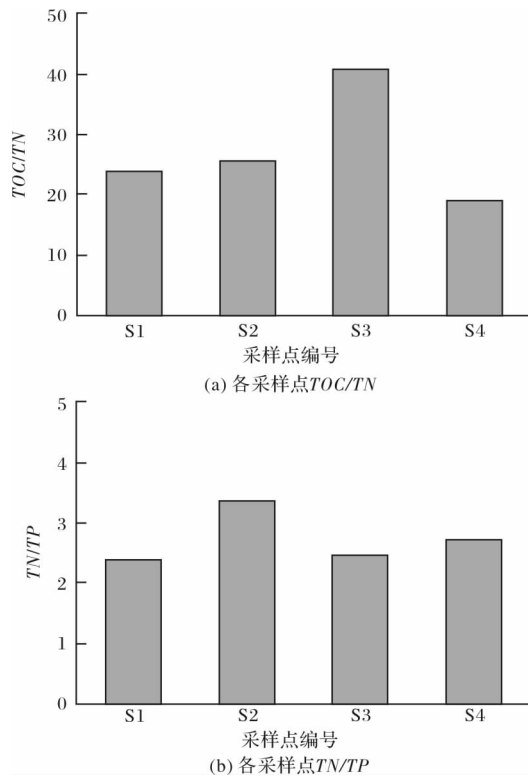


图 3 西北某小型水库表层沉积物中 TOC/TN、TN/TP
Fig. 3 TOC/TN and TN/TP in surface sediments of a small reservoir in Northwest China

2.3 沉积物污染评价

2.3.1 有机污染评价

有机污染指数法能定量评价湖库沉积物所受有机污染水平,因此,对 4 个采样点进行了有机污染和有机氮污染指数评价,评价结果如表 4 所示。由表 4 可知,西北某小型水库沉积物有机污染指数为 0.035~0.080,均值为 0.054,属于轻度污染。其中 S2 和 S3 采样点有机污染指数均小于 0.05,评价结果为清洁。有机氮污染指数评价结果与有机污染指数评价结果略有不同,因为有机污染指数同时考虑有机碳和有机氮含量,而有机氮污染指数仅评价有机氮含量。从表中可以看出,有机氮污染指数

范围为 0.030~0.062,平均值 0.044,亦属于轻度污染,但 S2 采样点有机氮污染指数评价为轻度污染,这说明 S2 采样点表层沉积物有机氮含量较高。

表 4 西北某小型水库表层沉积物有机污染指数和有机氮污染指数评价结果

Tab. 4 Evaluation of organic pollution index and organic nitrogen pollution index in surface sediments of a small reservoir in Northwest China

采样点	有机污染指数(OI)		有机氮污染指数(ON)	
	污染指数	污染程度	污染指数	污染程度
S1	0.057	轻度污染	0.047	轻度污染
S2	0.035	清洁	0.035	轻度污染
S3	0.042	清洁	0.030	清洁
S4	0.080	轻度污染	0.062	轻度污染

2.3.2 单因子污染指数和综合污染指数评价

有机污染评价虽能判断沉积物中有机污染程度,但并未考虑到沉积物中 TP 的影响。磷作为微生物生长繁殖的必要营养物质,在水体富营养化发展进程中起着至关重要的作用,因为部分浮游植物具有固氮功能,此时磷就成为藻类生长的限制因素。本研究采用单因子污染指数与综合污染指数进一步对沉积物污染做出评价,结果如表 5 所示。

表 5 西北某小型水库表层沉积物单因子污染指数及综合污染指数评价

Tab. 5 Evaluation of single factor pollution index and comprehensive pollution index of surface sediments of a small reservoir in Northwest China

采样点	S _{TN}		S _{TP}		FF	
	污染指数	污染程度	污染指数	污染程度	污染指数	污染程度
S1	0.891	清洁	0.350	清洁	0.884	清洁
S2	0.673	清洁	0.183	清洁	0.640	清洁
S3	0.582	清洁	0.217	清洁	0.573	清洁
S4	1.182	轻度污染	0.4	清洁	1.151	轻度污染

单因子污染指数能较准确反应研究区域 N、P 营养物的污染情况。我国目前并未制定湖库沉积物 TN、TP 的污染评价标准,故选用加拿大安大略省所定标准。由表 5 可知,研究对象表层沉积物氮、磷单因子污染指数低,仅 S4 点总氮为轻度污染,其余各采样点均为清洁。结合氮、磷两种元素做综合污染指数评价后也仅 S4 点位轻度污染,其余采样点表层沉积物为清洁。

根据沉积物污染物含量与评价结果,该水库虽淤积严重,但有机质、氮、磷污染程度较轻,能够

作为饮用水应急水源。但在水库运行管理中,应在有效控制外源输入污染的同时,尽量避免沉积物的内源释放。

3 结论

(1)西北某水库4个采样点表层沉积物中总有机碳、总氮、总磷、硝态氮、铵态氮、有效磷含量分别为11.68 g/kg、0.46 g/kg、0.17 g/kg、32.20 mg/kg、66.90 mg/kg和13.08 mg/kg;

(2)沉积物中C/N为19.02~40.93, N/P为2.33~3.36,表明沉积物污染主要来自外源输入,内源所致较少;

(3)有机污染评价、单因子污染评价及综合污染评价表明沉积物氮、磷、有机质污染较轻,仅部分采样点为轻度污染,潜在生态风险较低,因此该水库能够作为饮用水应急水源。

参考文献 References

- [1] 王金瑾,鲍建国,李立青. 东湖沉积物重金属来源与人类活动相关性分析[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(4): 84-90.
WANG Jinji, BAO Jianguo, LI Liqing. Sources of heavy metal pollutions in sediments of lake DongHu and their relationship with anthropogenic activities[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 33(4): 84-90.
- [2] 黄道军,薛睿康,李凯,等. 浅层滞缓流水体富营养化成因与防控策略[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(4): 514-519.
HUANG Daojun, XUE Ruikang, LI Kai, et al. Eutrophication and algae bloom in shallow stagnant water bodies: causes and control strategies [J]. Journal of Xian Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020, 52(4): 514-519.
- [3] 季斌,杭小帅,梁斌,等. 湖泊沉积物重金属污染研究进展[J]. 污染防治技术, 2013, 26(5): 33-39.
JI Bin, HANG Xiaoshuai, LIANG Bin, et al. Advances in heavy metals contamination of lake sediment [J]. Pollution Control Technology, 2013, 26(5): 33-39.
- [4] 向爱农,苏甜,刘方平,等. 抚河故支河道沉积物污染物分布特征及污染评价[J]. 中国农村水利水电, 2020(10):117-120.
XIANG Ainong, SU Tian, LIU Fangping, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of sediment pollutants in the old branch of Fuhe river[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(10):117-120.
- [5] 万玲,项颂,牛勇,等. 牛谷河表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J/OL]. 环境工程, [2021-1-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.x.20200615.0958.004.html>.
WAN Ling, XIANG Song, NIU Yong, et al. Distribution characteristics and pollution assessment of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of Niugu river[J/OL]. Environmental Engineering, [2021-1-14]. <http://kns.cnki.net/kons/detail/11.2097.x.20200615.0958.004.html>.
- [6] 罗良荣,梁朝玉. 右江百色城河段水质现状及变化趋势分析[J]. 云南环境科学, 2006, 25(S): 97-99.
LUO Liangrong, LIANG Zhaoyu. Analysis of water quality status and change trend of baise city reach of Youjiang River [J]. Yunnan Environmental Science, 2006, 25(S): 97-99.
- [7] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 101-104.
LIU Zhemin. Soil heavy metal pollution and its prevention and control in Baoji[J]. Journal of Arid Land Research and Environment, 2005, 19(2): 101-104.
- [8] YANG Yang, LIU Qigen, HU Zhongjun, et al. Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34(12): 3057-3064.
- [9] 王亚平,黄廷林,周子振,等. 金盆水库表层沉积物中营养盐分布特征与污染评价[J]. 环境化学, 2017, 36(3): 659-665.
WANG Yaping, HUANG Tinglin, ZHOU Zizhen, et al. Distribution and pollution evaluation of nutrients in surface sediments of Jinpen reservoir[J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(3): 659-665.
- [10] 黄廷林,刘飞,史建超. 水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2016, 37(1): 166-172.
HUANG Tinglin, LIU Fei, SHI Jianchao. Distribution characteristics and pollution status evaluation of sediments nutrients in a drinking water reservoir[J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 166-172.
- [11] 刘晶,赵建国,姜甜甜,等. 永定河怀来段沉积物营养元素分布特征及评价[J]. 河北环境工程学院学报, 2020, 30(3):76-81.
LIU Jing, ZHAO Jianguo, JIANG Tiantian, et al. Distribution characteristics and evaluation of nutrient elements in sediments of Huailai section of Yongding river[J]. Journal of Hebei University of Environmental Engineering, 2020, 30(3):76-81.
- [12] FENN M E, ALLEN E B, WEISS S B, et al. Nitro-

- gen critical loads and management alternatives for N-impacted ecosystems in California[J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91(12): 2404-2423.
- [13] 文帅龙, 吴涛, 杨洁, 等. 冬季大黑汀水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及交换通量[J]. 中国环境科学, 2019, 39(3): 1217-1225.
- WEN Shuailong, WU Tao, YANG Jie, et al. Distribution characteristics and exchange flux of nitrogen and phosphorus at the sediment-water interface of Daheiting reservoir in winter [J]. China Environmental Science, 2019, 39(3): 1217-1225.
- [14] 姜星宇, 姚晓龙, 徐会显, 等. 长江中下游典型湿地沉积物-水界面硝酸盐异养还原过程[J]. 湖泊科学, 2016, 28(6): 1283-1292.
- JIANG Xingyu, YAO Xiaolong, XU Huixian, et al. Dissimilatory nitrate reduction processes between the sediment-water interface in three typical wetlands of middle and lower reaches of Yangtze river[J]. Journal of Lake Science, 2016, 28(6): 1283-1292.
- [15] ZHANG Zhibin, LV Yufeng, ZHANG Wen, et al. Phosphorus, organic matter and nitrogen distribution characteristics of the surface sediments in Nansi lake, China[J]. Environmental earth sciences, 2015, 73(9): 5669-5675.
- [16] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 213-220.
- QIU Zukai, HU Xiaozhen, YAO Cheng, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China[J]. Environmental Science, 2016, 37(4): 213-220.
- [17] 李云鹏, 李致春, 余宝宝, 等. 宿州市沱河沉积物氮磷和有机碳分布及评价[J]. 环境监测管理与技术, 2017, 29(5): 25-28.
- LI Yunpeng, LI Zhichun, YU Baobao, et al. Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic carbon in sediment of Tuohe River from Suzhou City[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring. 2017. 29(5): 25-28.

(编辑 沈波)

(上接第14页)

- [12] 郭猛, 刘洪, 白文静. 混凝土桥梁结构的等耐久性设计[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(1): 117-121.
- GUO Meng, LIU Hong, BAI Wenjing. Equal durability design of bridge structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(1): 117-121.
- [13] 白文静, 屈文俊. 风压加速混凝土碳化计算模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2003, 31(11): 1280-1284.
- BAI Wenjing, QU Wenjun. Calculating model of concrete carbonization accelerated by wind pressure[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(11): 1280-1284.
- [14] 埃米尔·希缪, 罗伯特·H·斯坎伦. 风对结构的作用-风工程导论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1992.
- Simiu Emil, Scanlan Robert H. Wind effect on structures: an introduction to wind engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1992.
- [15] 何艳丽. 空间结构风工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2012.
- HE Yanli. Space structure wind engineering [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2012.
- [16] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- CHEN Zhengqing. Bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 1988.
- [17] 汪彦斌. 弯曲荷载作用下的混凝土箱梁碳化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.
- WANG Yanbin. Research on carbonization of concrete box girder under bending load[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [18] 陈涛. 混凝土箱梁的碳化性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- CHEN Tao. Research on carbonization performance for concrete box girder[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [19] 中国建筑科学研究院. 钢筋混凝土结构设计及构造[M]. 北京: 中国建筑科学研究院, 1985.
- China Academy of Building Research. Reinforced concrete structure design and construction [M]. Beijing: China Academy of Building Research

(编辑 沈波)