

不同季节水源水库径流氮磷污染变化特征研究

黄廷林, 邱 实, 李 璇

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 以西安市的饮用水水源地—石砭峪水库为研究对象, 监测库区和上游来水的氮磷指标。研究发现石砭峪水库为典型的峡谷型水库, 具有水深大, 水体分层明显的特点。水库氮磷营养盐季节性变化明显。总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的平均浓度分别达到了 4.26 mg/L 和 0.03 mg/L。上游流域土壤经过冬季的冰冻后, 土中可冲洗出的氮含量大幅升高, 被春季降水大量带入库中导致库区总氮含量大幅升高。上层水体总氮含量最高达 6.44 mg/L。夏季水体分层期间, 底部水体呈厌氧状态, 沉积物中磷开始释放, 水体底部总磷含量持续升高。秋季的持续强降雨的冲刷作用导致库区氮磷含量大幅升高, 底部水体总氮, 总磷浓度分别达到 5.42 mg/L 和 0.10 mg/L。同时, 研究表明石砭峪水库外源污染控制难度大, 内源污染控制是控制水库污染的关键。

关键词: 水库; 营养盐; 季节变化; 内源污染; 外源污染

中图分类号: X832

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)05-0701-06

Studies on seasonal variation and sources of nitrogen and phosphorus in the runoff of Shibianyu reservoir

HUANG Tinglin, QIU Shi, LI Xuan

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Shibianyu reservoir one of drinking is regarded as researched object. The concentrations of nitrogen and phosphorus of upstream river and reservoir were monitored. The results showed that Shibianyu reservoir is a stratified, deep and canyon-reservoir. Nutrients in the reservoir has a significant seasonal variation. The average concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were 4.26 mg/L and 0.03 mg/L, respectively. In spring, the soil of upstream was frozen and a large amount of nitrogen was flushed into the reservoir, which led to increasing inflow and the total nitrogen (TN) of Shibianyu reservoir. The total nitrogen (TN) in the surface may reached 6.44 mg/L. The hypolimnion becomes anaerobic in the stratified period, increasing the release of phosphorus from the bottom sediments. Continuous heavy rains cause upstream landslides, and a large amount of sediment is flushed into the reservoir, which result in an increase of nitrogen and phosphorus concentration in the reservoir. The concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in hypolimnion can reach 5.42 mg/L and 0.10 mg/L. The results also showed that the key of controlling reservoir pollution is to control the endogenous pollution, and for this reason the exogenous pollution is hard to control actually.

Key words: reservoir; nutrition; seasonal variation; endogenous pollution; exogenous pollution

近年来, 我国湖库水体富营养化, 已成为水环境保护中的突出环境问题之一^[1]。水体富营养化导致藻类和其他水生植物过量繁殖, 水体透明度下降, 溶解氧含量降低, 进而引起水生生物大量死亡、水质恶化^[2-5]。生命周期理论认为氮和磷的化合物过量进入水体是造成水体富营养化的根本原因^[6]。从富营养污染控制分析, 可将污染源分为外源和内源^[7]。峡谷型城市水源水库因其角色和本身所处的地理位置的特殊性, 点源以及水体养殖等造成的污染已被控制或禁止, 因此, 氮和磷的来源主要是上游来水^[8]。同时, 峡谷型水源水库一般又具有水深大, 水体分层明显的特点^[9]。因此其沉积物中

氮和磷的释放也成为水库氮和磷的重要来源—内源污染^[10-11]。西安市石砭峪水库随着春季上游来水 (包括雪水和雨水) 逐渐增大, 其总氮浓度持续大幅升高, 总磷浓度则相对下降^[12]。这一点与正常关于水库降雨期间氮磷含量变化的认识不尽相同。因此探究其污染原因对水库水质的污染防治和水库管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

石砭峪水库位于陕西省西安市以南, 地处秦岭北麓泾河上游, 于1975年建成, 1990年投入使用,

收稿日期: 2015-05-05 修改稿日期: 2015-10-10

基金项目: 国家科技支撑计划基金项目 (2012BAC4B02)

作者简介: 黄廷林 (1962-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为水处理理论与技术和水质微污染控制与水资源保护。E-mail: hangtinglin@xauat.edu.cn

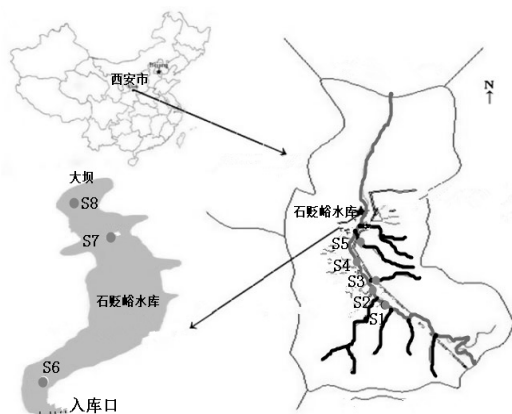


图1 石砭峪水库地理位置及取样点布置示意图
Fig. 1 Location of Shibianyu Reservoir and the sampling sites

集防洪,发电,供水等多种功能,是典型的峡谷型水库,流域面积 132 km^2 ,上游流域为多山区域,分布着少量工业企业和村庄.上游沿岸居住来自多个村庄的居民大约 1 500 人.多年平均径流量 0.95 亿 m^3 ,年平均降雨量和蒸发量分别为 898 mm 和 948.5 mm.该水库是西安黑河引水系统的辅助水源,日供水能力 40 万 t.水库总库容 2 810 万 m^3 ,库区最大水深约为 60 m.

1.2 监测断面与检测方法

本研究的现场监测时间为 2014 年 1 月至 2014 年 12 月.上游监测点分布如图 1 所示(S1, S2, S3, S4, S5),水库监测点为入库点(S6),主库区点(S7)和坝前点(S8),S7 为水库最大水深处.本研究中水库库区水质采用 S7 水质数据.上游采样取水面 0.2~0.5 m 以下的水样.库区取样,取水水下 0.2~0.5 m 处水体作为表层水样,垂向采用直立式采样器沿水深每隔 5~10 m 取样一次.采样频率约为每周一次.样品采集后立即装入 500 mL 聚乙烯瓶中运回实验室,放入 4°C 冰箱中保存,所有指标检测在 2 天内完成.水温、水深、溶解氧(DO)指标直接通过 HACH Hydrolab DS-5 型多功能水质分析仪现场进行测定.

同时,为研究水库春季氮磷含量变化的原因,探究春季上游积雪融化和降雨经过土壤后氮磷含量的变化,实验室进行了模拟降水淋洗土壤过程.由于石砭峪水库上游地区冬季和初春山区仍有积雪存在,因此实验设计为冰冻组和非冰冻组.实验装置如图 2 所示.土样为石砭峪水库上游典型地区地表土样,取土深度为 0~50 cm,取完后立即封存待用.水样为 2014 年冬上游流域降雪(使用其

融化之后的水样)和春季降雨水.实验过程:将冰冻组实验装置(图 2)置于 -10°C 的冰箱中,缓慢加入 4 L 上述水样后冰冻 12 h,然后将实验装置放入 4°C 冰箱中,每 2 d 取一次水样 200 mL,用 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后立即测量各分析指标;非冰冻组实验装置置于室温下,其余过程和冰冻组相同.

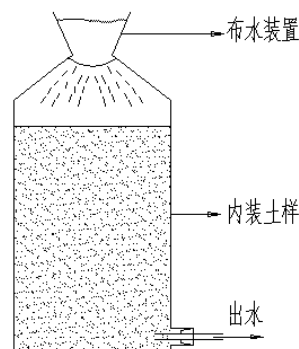


图2 模拟渗流装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the reactor

分析指标包括总氮(TN),总磷(TP),溶解性总氮(DTN),溶解性总磷(DTP),氨氮(NH_4^+-N),硝氮(NO_3^--N).用测定 TN、TP 可认为是总溶解态氮和磷(DTN、DTP),总颗粒态氮 $\text{TPN} = \text{TN} - \text{DTN}$,总颗粒态磷 $\text{TPP} = \text{TP} - \text{DTP}$.TN,TP, NH_4^+-N , NO_3^--N 均按照《水和废水监测分析方法》(第四版)^[13]测定.水库水文数据(水位,降雨量,入流量)是来自石砭峪水库水文监测站.

2 结果与分析

2.1 库区氮磷季节性变化特征

库区(S7)的氮磷含量如图 3 所示,石砭峪水库氮磷季节性变化明显,其中总氮的年平均值(4.26 mg/L)超出Ⅲ类水(1 mg/L)3 倍多;TP 的年平均浓度为 0.031 mg/L,从全年来看,库区水体总磷浓度大部分时间满足Ⅲ类水要求(0.05 mg/L).从 3 月份至 5 月初,库区总氮含量大幅上升.5 月后有所下降,但是仍然保持在 3.34 mg/L 以上,并在 9 月份有较大幅度的升高,最大浓度达到 5.45 mg/L.10 月份之后,总氮持续下降;而总磷浓度在春季之后随即降低,6 月中旬达到最低值 0.011 mg/L,从 6 月末水体总磷整体持续升高,9 月上旬底部达到最高(0.121 mg/L).和总氮变化规律相似,9 月份后,总磷值也持续下降.从全年来看,库区总氮含量在春季和秋季大幅升高,总磷在秋季会大量汇入水库.

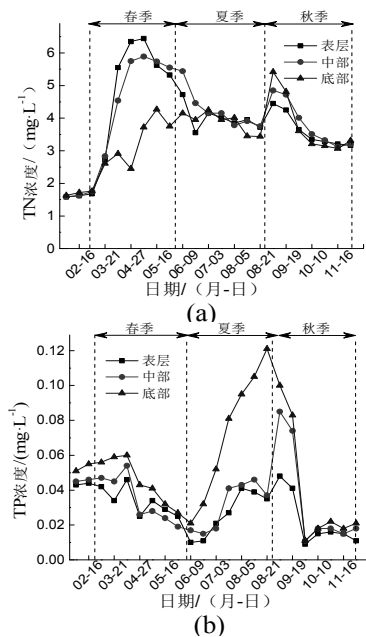


图 3 2014年石砭峪水库TN、TP含量动态变化
Fig. 3 Distribution of nutrients in the reservoir

2. 2 春季径流氮磷污染特征

水库氮含量的升高主要来自两个方面：外源污染和内源污染。内源污染是指水体在自然循环过程中由于水库内部的污染物迁移所产生的污染，石砭峪水库是典型的峡谷型水库，其内源污染主要来自于水库底部水体在厌氧条件下，水库沉积物中污染物的释放^[8]。自 3 月份以来水体垂向都维持在好氧状态，溶解氧(DO)浓度一直维持 4 mg/L 以上(图 4)，沉积物中氮释放量低。因此内源污染并不是库区 TN 上升的主要原因。

表 1 给出了上游来水氮磷含量的变化特征，从表 1(a)可以看出，3 月底到 5 月初，上游区域 S1-S5 来水氮含量大幅升高为 7~8 mg/L (表 1)，加之此时入库流量迅速增大为 4.5m³/s (图 5)。总氮最大

输入负荷达到 0.37t/d。上游来水总磷含量为 0.01~0.03 mg/L (表 1b) 相对于冬季库区水体较低，春季库区水体的总磷含量表现出下降趋势。可见，石砭峪水库氮污染主要来自于上游来水，以外源污染为主，这部分外源污染具有污染负荷大，持续时间长的特点，是导致库区中上部水体的总氮含量升高的主要原因。

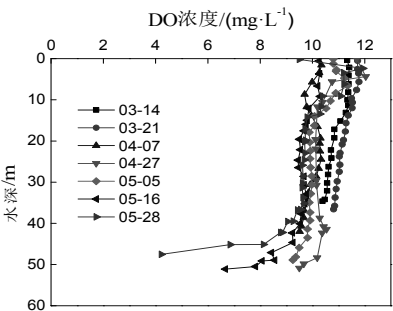


图 4 DO浓度垂向分布
Fig. 4 DO concentration vertical distribution characteristics

进一步研究发现这段时间，上游来水以强度较小的降雨和积雪融化水为主。来水主要以渗流的形式经过土壤汇流形成径流进入水库的。通过模拟渗流实验发现：首先雨水和雪水的氮磷指标相似，总氮浓度分别为 3.2 和 3.0 mg/L，总磷分别为 0.017 和 0.015 mg/L。总氮中氨氮为主要成分，浓度分别为 2.2 和 2.1 mg/L。其次，对比表 2a 和表 2b：冰冻组淋洗出水总氮浓度是非冰冻组的 3 倍，这表明土壤经过交替冻融后，土中的氮更容易被带出。而淋洗出总磷本身含量较少，上游来水总磷浓度较库区低，导致水库总磷浓度呈现下降趋势。另外，这段时间上游来水主要进入水库水体的中上部，导致中上层的 TN 含量大幅升高 (图 3)，而下层水体氮含量变化相对较小。

表 1(a) 上游来水总氮含量的动态变化/(mg·L⁻¹)
Tab. 1 (a) Dynamic characteristics of TN in the sampling points of upstream/(mg·L⁻¹)

日期/(月-日)	03-14	03-21	04-07	04-27	05-05	05-28	06-09
S1	4.21	6.28	6.42	5.63	4.31	4.15	3.05
S2	3.25	4.67	5.61	5.13	4.95	4.34	3.23
S3	1.25	2.51	5.74	4.71	4.21	4.01	4.21
S4	2.12	3.26	6.31	5.52	5.53	4.04	4.01
S5	4.22	6.21	8.13	7.84	7.51	5.24	4.71

表 1(b) 上游来水总磷含量的动态变化/(mg·L⁻¹)
Tab. 1 (b) Dynamic characteristics of TP in the sampling points of upstream/(mg·L⁻¹)

日期/(月-日)	03-14	03-21	04-07	04-27	05-05	05-28	06-09
S1	0.007	0.001	0.007	0.010	0.010	0.007	0.015
S2	0.010	0.004	0.007	0.014	0.014	0.005	0.016
S3	0.020	0.018	0.010	0.007	0.017	0.010	0.020
S4	0.027	0.012	0.022	0.014	0.014	0.020	0.021
S5	0.027	0.025	0.027	0.017	0.014	0.023	0.023

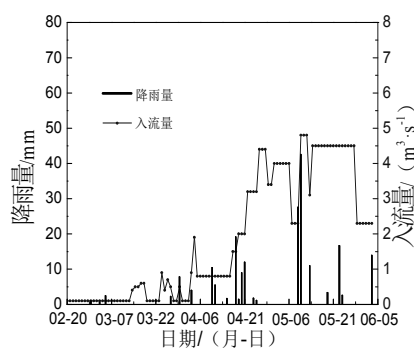


图 5 入流量和降雨量变化
Fig. 5 Variation of inflow and rainfall
进一步研究发现：无论是冰冻和非冰冻条件

下，还是自然状态下，降水总氮中均以氨氮为主，硝氮含量较少，而在模拟降水经过土壤渗流的试验中，以冰冻组为例（表 3），淋出水中的硝氮较原水高出数倍，起始硝氮浓度达到了 11.37 mg/L，随后浓度逐渐降低（3.72 mg/L），但仍高于进水浓度（0.89 mg/L）；而氨氮含量则表现为持续降低，且起始浓度即比原水降低 44%，淋洗过程表现的是一个原水氨氮被迅速去除，而土中硝氮被大量冲洗出的过程。这主要是由于氨氮较硝氮非常容易被土壤吸附造成的^[14]。同时对比表 2（a）和表 3 发现淋洗出水中氮以硝氮为主，氨氮所占比例逐渐减小，淋洗出水的这种特征和水库水质特征基本一致。

表 2(a) 总氮和总磷含量的动态变化
Tab.2(a) Dynamic characteristics of TN and TP

冰冻组淋洗 天数/d	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
总氮/mg·L ⁻¹	15.92	12.35	10.54	9.78	7.35	5.74	5.15	5.04	4.85	4.75	4.73
总磷/mg·L ⁻¹	0.095	0.084	0.041	0.033	0.019	0.015	0.009	0.005	0.004	0.004	0.004

表 2(b) 总氮和总磷含量的动态变化
Tab. 2(b) Dynamic characteristics of TN and TP

非冰冻组淋洗 天数/d	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
总氮/mg·L ⁻¹	5.61	4.43	3.02	2.56	2.03	1.85	1.50	1.32	1.12	0.98	0.82
总磷/mg·L ⁻¹	0.081	0.052	0.28	0.021	0.014	0.08	0.004	0.002	0.001	0.001	0.001

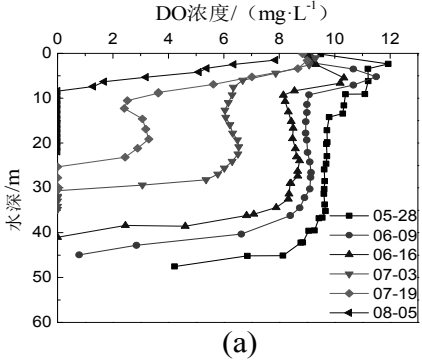
表 3 氨氮和硝氮含量的动态变化
Tab. 3 Dynamic characteristics of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N

冰冻组淋洗 天数/d	原水	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
氨氮/mg·L ⁻¹	2.20	1.23	0.65	0.54	0.47	0.48	0.44	0.38	0.36	0.31	0.27	0.22
硝氮/mg·L ⁻¹	0.89	11.37	11.29	9.25	8.54	6.54	4.21	4.11	3.98	3.77	3.74	3.72

2.3 夏季径流氮磷污染特征

春季到来之后，由于气温的升高，库区表层温度从 20℃ 上升至 28℃（图 6），水库水体逐渐形成分层（图 6）。分层结构的水体阻止了上层 DO 向深水层的扩散，深水层的 DO 不断被消耗（图 6），底部 DO 浓度逐渐降低^[15-17]。水库在 6 月中旬底部开始出现厌氧层，随着底部 DO 的不断消耗，厌氧层不断加厚（最大厚度 13.5 m）。由于厌氧层的出现，水库底部沉积中的磷开始逐渐释放（图 7），并逐渐向上层水体扩散。如图 8 和图 3 所示，底层水体的总磷含量迅速升高，8 月下旬达到最高值 0.121mg/L。而中上部总磷含量变化幅度较小。同时，水库水位迅速下降（图 8），水深从 45 m 骤降至 22 m（库区底部海拔 672 m）。因此沉积物的释放

作用是这段时间库区底部水体总磷升高的主要原因。另外由于沉积物中氮的释放以氨氮为主，而石砭峪水库水体的总氮主要来源于硝氮（表 4），因此沉积物中氨氮的释放对总氮的影响很小，总氮含量变化不明显。



(a)

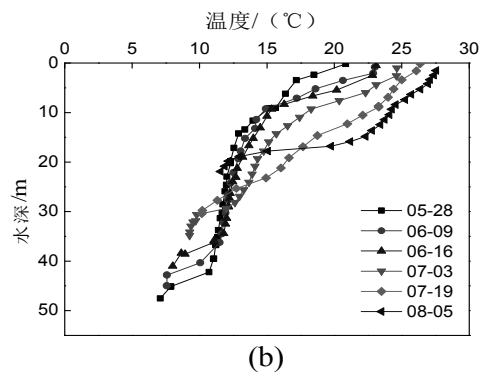


图 6 分层形成期水体DO(a)和水温(b)垂向分布
Fig.6 vertical distribution characteristics of DO (a) concentration and water temperature(b)

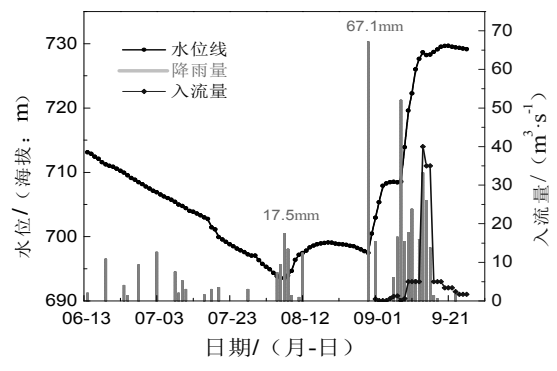


图 8 夏秋季水库水位和降雨量变化以及9月份入库流量
Fig.8 Variation of water level, rainfall and inflow in September

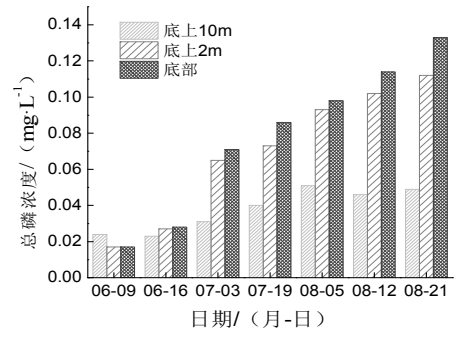


图 7 下层水体TP含量变化趋势
Fig.7 Variation of phosphorus concentration in hypolimnion

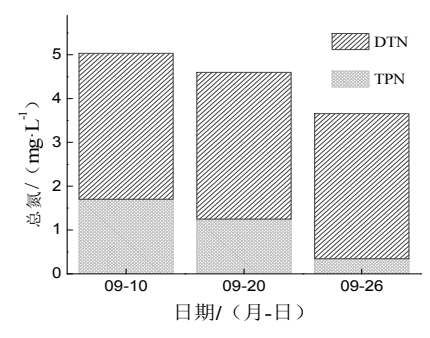


图 9 2014年9月暴雨径流期间库区TN含量变化
Fig.9 Variation of nitrogen concentration during the period of heavy rainfalls in September 2014

表 4 深水区水体氨氮, 硝氮与总氮浓度变化特征
Tab. 4 Dynamic characteristics of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and TN concentration in hypolimnion

日期/ (月-日)	06-09	06-16	07-03	07-19	08-05	08-12	08-21
氨氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	0.11	0.13	0.18	0.28	0.72	0.84	0.81
硝氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	3.89	3.71	4.03	3.27	3.06	2.51	2.59
总氮浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	4.15	3.95	4.25	3.95	4.01	3.45	3.44

2. 4 秋季径流氮磷污染特征

2014年石砭峪水库降雨量主要集中在9月份(图8)。其降雨量达到了311.5 mm, 而且以持续大降雨为主, 上游径流的最大入库流量达到 $40\text{ m}^3/\text{s}$ 由于强降雨冲刷地表形成的高浊度地表径流大量汇入水库。由于高浊度的地表径流水体密度大, 汇入水库后, 迅速潜入了水库中下部, 导致9月份水库中下部的氮磷含量迅速升高(图3), 而上层水体的氮磷含量变化较小。9月10日为洪峰到达日期, 氮磷含量达到最高。

从图9和图10可以看出, 库区水体中颗粒态总氮占34%, 颗粒态总磷占67%。持续降雨过后库区水体中颗粒物逐渐下沉, 水体中颗粒态的氮磷含量随之减少, TN和TP浓度也随之下降。

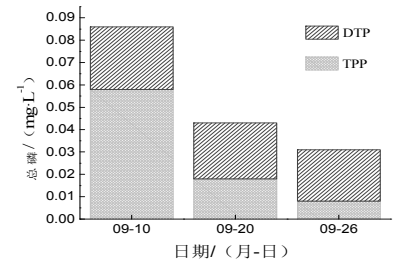


图10 暴雨径流期间库区TP含量变化
Fig. 10 Variation of phosphorus concentration during the period of heavy rainfalls in September

3 结论

(1) 石砭峪水库春季上游流域土壤经过冰冻后, 其中可淋洗出的氮含量大幅升高, 经过春季降雨和积雪水的淋洗, 被大量带入库中, 降水中的氮氮大部分被土壤吸附, 而土中硝氮被大量冲洗出,

最终导致库区总氮含量大幅升高。

(2) 石砭峪水库春季上游流域土壤经过冰冻后,其中可淋洗出的氮含量大幅升高,经过春季降石砭峪水库夏季由于分层结构的形成水体底部出现厌氧区,导致水库底部沉积物污染物释放,加之降雨的作用,夏季总磷浓度在分层期间持续上升。

(3) 石砭峪水库秋季(9月份)由于持续的强降雨,上游及水库周边区地表的污染物被雨水大量冲刷至库中,导致秋季库区水体氮磷营养盐含量都大幅上升,分别达到了5.42 mg/L和0.10 mg/L。

参考文献 References

- [1] 袁志宇,赵斐然.水体富营养化及生物学控制[J].中国农村水利水电,2008(3):57-59.
YUAN Zhiyu, ZHAO Feiran. Study on water eutrophication and Biological control[J]. China rural water and hydropower, 2008(3):57-59.
- [2] 杨华东,袁伟华,欧阳雪君,等.武汉市汤逊湖水体富营养化现状及其对策分析[J].水资源与水工程学报,2009,20(4):34-42.
YANG Huadong, YUAN Weihua, OUYANH Xuejun, et al. Current situation and countermeasures on the eutrophication of the Tangxun Lakes in Wuhan City[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009,20(4):34-42.
- [3] 赵德锋.北京市河湖富营养化成因分析及治理技术的研究[D].北京:北京工业大学,2005.
ZHAO Defeng. The improvement technology and genetic analysis of eutrophication research of fluviolacustrine in Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
- [4] 赵永宏,邓祥征,战金艳,等.我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J].环境科学与技术,2010,33(3):92-98.
ZHAO Yonghong, DENG Xiangzheng, ZHAN Jinyan, et al. Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China[J]. Environmental Science and Technology, 2010,33(3):92-98.
- [5] 何淑英,徐亚同,胡宗泰,等.湖泊富营养化的产生机理及治理技术研究进展[J].上海化工,2008,33(2):1-5.
HE Shuying, XU Yatang, HU Zongtai et al. Review on mechanism of eutrophication of water bodies and its treatment techniques[J]. Shanghai Chemical Industry, 2008,33(2):1-5.
- [6] 付春平,钟成华,邓春光.水体富营养化成因分析[J].重庆建筑大学学报,2005,27(1):128-131.
FU Chunping, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang. Analysis on cause of the eutrophication of water body[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2005,27(1):128-131.
- [7] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,12(3):193-202.
QIN Boqiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangze River[J]. Journal Of Lake Sciences, 2002,12(3):193-202.
- [8] 黄廷林,秦昌海,李璇.峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析[J].环境科学,2013,34(9):3423-3429.
HUANG Tinglin, QIN Changhai, LI Xuan. Studies on seasonal variation and sources of nitrogen and phosphorus in a canyon reservoir used as water source[J]. Environmental Science, 2013,34(9):3423-3429.
- [9] 王雨春,朱俊,马梅,等.西南峡谷型水库的季节性分层与水质突发性恶化[J].湖泊科学,2005,17(1):54-60.
Thermal stratification and paroxysmal deterioration of water quality in a canyon-reservoir, southwestern China[J]. Journal Of Lake Sciences, 2005,17(1):54-60.
- [10] Hu W F, Lo W, Chua H, et al. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong [J]. Environment International, 2001,26(2001):369-375.
- [11] 刘臣伟,汪德耀.湖泊富营养化内源污染的机理和控制技术研究[J].农业环境科学学报,2006,25(1):814-818.
LIU Chenwei, WANG Deguan. Principle and control of eutrophication for lakes polluted by Internal origin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006,25(1):814-818.
- [12] HUANG T L, Li X, Ma W X, et al. Dynamic characteristics of nutrients and causal analysis in eutrophic reservoir: a case study of Shibianyu reservoir[J]. Desalination and Water Treatment, 2014(52):1624-1635.
- [13] 魏复盛,朱文启.水和废水监测分析方法[M] 4th ed.北京:中国环境科学出版社,2002.
WEI Fusheng, ZHU Wenqi. The Water and Wastewater monitoring and analysis methods[M] 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [14] 孙大志,李绪谦,潘晓峰.氨氮在土壤中的吸附/解吸动力学行为的研究[J].环境科学与技术,2007,30(8):17-20.
SUN Dazhi, LI Xuqian, PAN Xiaofeng. Ammonia absorption/desorption behavior in soil[J]. Environmental Science and Technology, 2007,30(8):17-20.
- [15] WU Q H, ZHANG R D, HUANG S, et al. Effects of bacteria on nitrogen and Phosphorus release from river Sediment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007,20(4):404-412.
- [16] 孙亚敏,董曼玲,汪家权.内源污染对湖泊富营养化的作用及对策[J].合肥工业报,2000,23(2):210-213.
SUN Yamin, DONG Manling, WANG Jiaquan. Effects of internal Pollution sources on the eutrophic lakes and Countermeasures[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2000,23(2):210-213.
- [17] 黄廷林,章武首,柴蓓蓓.大水深水库内源污染特征及控制技术[J].环境污染与防治,2010,32(3):1-4.
HUANG Tinglin, ZHANG Wushou, CHAI Beibei. Study on the characteristic & control of endogenous pollution in source water reservoir with great depth[J]. Environmental pollution and control, 2010, 32(3):1-4.

(编辑 沈波)