

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0012

秦国帅,刘建卫,许士国,等.洪水事件对碧流河水库水质影响[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):110-117,143. QIN G S, LIU J W, XU S G, et al. Impact of flood events on water quality of the Biliuhe reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(1):110-117,143. (in Chinese)

## 洪水事件对碧流河水库水质影响

秦国帅<sup>1</sup>,刘建卫<sup>1</sup>,许士国<sup>1</sup>,谢在刚<sup>2</sup>

(1.大连理工大学 水利工程学院,辽宁 大连 116024;2.碧流河水库有限公司,辽宁 大连 116221)

**摘要:**受全球气候变化的影响,暴雨洪水事件发生频率呈增加趋势,水库作为流域内重要的控制性水利工程,洪水过程中水质安全面临严重威胁。以碧流河水库为例,对建库以来7场典型洪水前后水质状况进行分析,结果表明,洪水过程能够减弱碧流河水库水体的热分层结构,影响溶解氧垂向分布;洪水过程影响较大的水质指标为六价铬、大肠菌群、高锰酸盐指数、氨氮和总磷,洪水过后上升趋势较为明显;空间上来说,洪水对入库口断面的影响大于对坝前断面的影响,碧流河水库地形特征能够减弱洪水异重流对坝前水质的影响;评价结果显示洪水过后碧流河水库水质变差,但整体上能够满足地表水环境质量标准中水源地要求;洪水期间入库污染物主要来自流域非点源污染。分析认为,通过源头治理、入库口拦截、合理调度等措施可以减轻洪水事件对水库水质的影响。

**关键词:**洪水;水库;水质;影响;评价;对策

中图分类号:TV122 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Impact of flood events on water quality of the Biliuhe reservoir

QIN Guoshuai<sup>1</sup>, LIU Jianwei<sup>1</sup>, XU Shiguo<sup>1</sup>, XIE Zaigang<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic Engineering Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Biliuhe Reservoir Co., Ltd., Dalian 116221, China)

**Abstract:** The frequency of extreme floods is increasing due to the impact of global climate change. Reservoirs, as an important water conservancy project, suffered from serious water quality problems during flood events in the river basin. This study took the Biliuhe reservoir as an example and analysed the water quality data before and after seven flood events since the dam was constructed. The results showed that floods could weaken the thermal stratification of the Biliuhe reservoir and influence the vertical distribution of dissolved oxygen. Flood events had great impacts on water quality variables of hexavalent chromium, coliform bacteria, permanganate index, ammonia and total phosphorus, which had increased after the flood event. In terms of spatial distributions, the concentration of pollutants at the entrance section of the reservoir was greater than the front of the dam. The topographic characteristics of the Biliuhe reservoir could weaken the impact of flood density flow on the water quality in front of the dam. The assessment results indicated that the water quality grade of the reservoir become worse after the flood, but it meet the environmental quality standards for surface water. The pollutants entering the reservoir during floods mainly come from the non-point source pollution in the Biliuhe reservoir basin. The countermeasures such as controlling non-point source pollutants, interception at the entrance of the reservoir, reasonable regulation during floods process could alleviate the impact of flood events on the water quality of the Biliuhe reservoir.

**Key words:** flood; reservoir; water quality; impact; assessment; countermeasure

收稿日期:2019-06-06 修回日期:2019-08-26 网络出版时间:2019-09-16

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190912.1732.007.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400903);国家自然科学基金(51679026;51809032;51879031)

作者简介:秦国帅(1991—),男,河南安阳人,博士研究生,主要从事洪水资源利用方面的研究。E-mail:qgs1991@mail.dlut.edu.cn

通信作者:刘建卫(1978—),男,河北深州人,副教授,博士,主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail:jwliu@dlut.edu.cn

受气候变化的影响,全球范围内极端暴雨洪水事件发生频率逐渐增加,造成社会经济和人类生产、生活方面的巨大损失<sup>[1]</sup>。暴雨洪水除了对流域内防洪安全提出严峻挑战外,对地表水环境的影响也不容忽视。暴雨、洪水强烈的冲刷作用使泥沙、营养盐、病原体以及难降解有机物等随径流进入地表水体,造成水体污染物浓度上升,水质恶化,危害人体健康<sup>[2]</sup>。如2016年河北省石家庄市“7·19”大水过后,岗南水库和黄壁庄水库因洪水携带大量的泥沙、污染物进入导致水质恶化,严重影响城市供水<sup>[3]</sup>;2018年8月淮河流域强降雨过程中,上游污水团随洪水下泄,造成洪泽湖水产养殖业的巨大损失和生态环境的严重破坏<sup>[4]</sup>。水库作为流域内重要的水利工程,在洪水的拦蓄和调节过程中起到重要作用,但其“蓄丰补枯”的特性使其成为流域内污染物的“汇”,洪水过程大量污染物滞留在水库当中,严重威胁供水安全。在应对日益增加的防洪风险的同时,研究洪水过程对水库水质的影响机制,保障供水安全,是当前面临的重要课题。

国内外众多学者针对洪水过程对地表水水质影响做了大量监测、分析和研究工作,结果表明,不同流域、水体、洪水频率、前期水文条件等因素下地表水水质对洪水过程的响应相差较大<sup>[5-9]</sup>。对于水库来说,目前研究集中在单一场次洪水水质监测及模拟上,系统性考虑洪水大小以及水库地形对洪水过程水库水质响应的研究还比较少<sup>[10]</sup>。本文以大连市水源地碧流河水库为例,研究建库以来不同场次洪水前后水库水质时空变化规律。除此之外,为定量评估洪水事件对水库水质的整体影响程度,采用可变模糊识别模型对洪水前后水质变化过程进行定量评价,并针对洪水过程污染特征提出系统性的治理措施,对提高水库水质,保障汛期供水安全具有重要意义。

## 1 研究区域概况

碧流河水库位于大连、营口交界处的碧流河干流上,控制面积2 085 km<sup>3</sup>,占全流域面积的74.1%。水库按五百年一遇洪水设计,万年一遇洪水校核,最大库容9.34亿 m<sup>3</sup>,设计多年平均供水量4.03亿 m<sup>3</sup>,是一座以城市供水为主,兼有防洪、发电、养鱼、灌溉、旅游等综合利用的大(Ⅱ)型水库。碧流河水库属于典型的河道型水库,主要入库河流为碧流河、蛤蜊河和八家河(图1)。碧流河水库流域地处北温带湿润气候区,流域多年平均气温10.6℃,平均风速12.5 m/s,多年平均降水量740.2 mm,多年平均径流量6.2亿 m<sup>3</sup>,其中汛期径

流量占全年径流量的80%以上。碧流河水库自1984年3月份正式向大连市供水以来,已经累计为大连市供水超过54亿 m<sup>3</sup>。坝址以上流域山多地少,生物资源较为丰富,主要以农林业和畜牧业经济为主。碧流河水库作为大连市主要水源地,水质良好,但总氮超标严重并呈上升趋势。

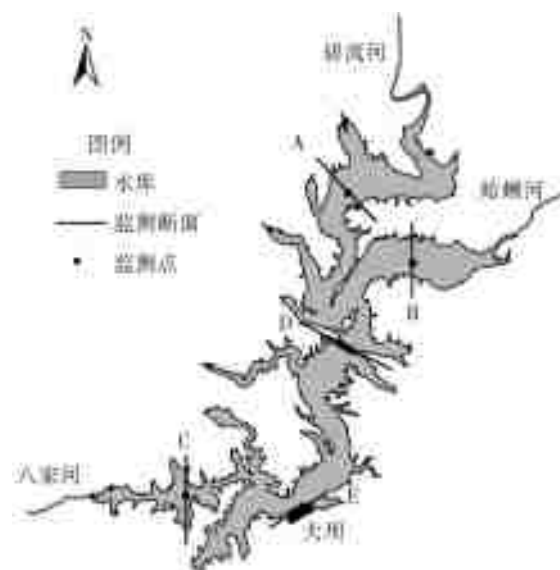


图1 碧流河水库水质监测断面及监测点  
Fig. 1 Water quality monitoring sections and points of the Biliuhe reservoir

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本研究水文数据及水质数据均由碧流河水库管理局提供。碧流河水库管理局从1988年开始定期对水质进行监测,监测断面及点位布置见图1。A、B、C断面分别为主要河流入库口(2009年以前无C断面),D断面为库中心,E断面为坝前,其中入库口水深较浅,只采表层水体以下0.5 m水样,库中心和坝前采表层以下0.5 m和底层以上0.5 m水样,分析水质垂向变化特征。样品采集、分析和化验均按照相关的国家标准进行。本研究共选取水温、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷、六价铬、大肠菌群、氟化物10个指标进行分析。由于建库初期水质监测频率较低(两个月1次)且缺测数据较多,难以反映洪水过程对水库水质的实际影响。在综合考虑洪水代表性以及数据完整性的基础上,共选取1999—2015年7场典型场次洪水过程,分析洪水前后水质的时空变化特征。各场次洪水的洪峰大小、发生时间、采样时间以及库水位波动情况见表1。由表1中可以看出,201208号洪水洪峰流量5 580 m<sup>3</sup>/s,超过20 a一遇,是建库以来最大洪水过程,201508号洪水较小,洪峰流量仅有429 m<sup>3</sup>/s,因

此研究所选的洪水具有一定的代表性,能够较好地 反映不同洪水大小对水库水质的影响。

表 1 场次洪水主要特征  
Tab.1 Main characteristics of selected flood events

洪水编号	发生日期	洪峰流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	采样时间		水位变动	
			洪水期	洪水后	洪水前/m	洪水后/m
199907	7 月 31 日	725	7 月 21 日	8 月 4 日	63.67	64.91
200108	8 月 17 日	1 780	8 月 7 日	8 月 22 日	55.99	61.68
200508	8 月 8 日	923	7 月 5 日	8 月 11 日	65.07	68.62
200607	7 月 30 日	1 224	7 月 11 日	8 月 3 日	65.23	68.08
201208	8 月 3 日	5 580	7 月 3 日	8 月 7 日	68.13	68.31
201307	7 月 2 日	1 380	6 月 4 日	7 月 2 日	65.74	67.40
201508	8 月 4 日	429	7 月 7 日	8 月 4 日	52.88	57.06

## 2.2 分析方法

### 2.2.1 结构稳定性系数

对于水深大于 20 m 的水库来说,在温度较高的夏季,会产生明显的热分层现象,热分层现象阻碍上下层水体之间能量与物质交换,进而影响水库水质。本研究基于库中心及坝前断面垂向水温数据,采用水体结构稳定性系数(RWCS)来评价水体的热分层状态,计算公式<sup>[11]</sup>为

$$RWCS = (D_b - D_s) / (D_4 - D_5) \quad (1)$$

式中: $D_b$  是底层水体的密度; $D_s$  是表层水体的密度; $D_4$  和  $D_5$  分别为在 4 °C 和 5 °C 条件下纯水的密度。对于碧流河水库来说,水体泥沙、悬浮物含量较低,水体密度主要受温度的影响。不同水温对应的水体密度通过 1990 国际温标水密度表可以查得。

### 2.2.2 可变模糊识别模型

本研究选取除温度、pH 外的 8 个水质指标,采用陈守煜教授提出的可变模糊识别模型进行水质综合评价<sup>[12]</sup>。可变模糊模型基于水质变化连续、模糊的特性,通过计算水质样本的相对隶属度分析其所属水质类别,能够科学地评价水质综合状态。可变模糊识别模型的具体步骤<sup>[13]</sup>如下。

(1) 指标规格化处理。通过对各指标样本进行规格化处理,消除量纲并统一不同指标之间的变化趋势,递增型、递减型指标与指标标准特征值的规格化公式分别为

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, x_{ij} \geq y_{ik} (\text{递增型}), x_{ij} \leq y_{ik} (\text{递减型}) \\ \frac{x_{ij} - y_{ik}}{y_{il} - y_{ik}}, (\text{递增或递减型}) \\ 1, x_{ij} \leq y_{il} (\text{递增型}), x_{ij} \geq y_{il} (\text{递减型}) \end{cases} \quad (2)$$

$$s_{jh} = \begin{cases} 0, y_{jh} = y_{ik} (\text{递增或递减型}) \\ \frac{y_{jh} - y_{ik}}{y_{il} - y_{ik}}, (\text{递增或递减型}) \\ 1, y_{jh} = y_{il} (\text{递增或递减型}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $r_{ij}$  为水质样本  $j$  指标  $i$  的特征值对评价级别的相对隶属度; $s_{jh}$  为级别  $h$  指标  $i$  标准特征值  $y_{jh}$  的规格化数。

(2) 指标权重的确定。通过熵权法确定各指标权重。熵权法基于指标的差异程度越大权重就越大的思想,由指标数据所携带的信息熵来确定其权重,在一定程度上能够消除主观因素带来的影响,具有客观合理性<sup>[14]</sup>。熵权法确定权重的步骤见文献<sup>[14]</sup>。

(3) 综合相对隶属度的计算。将指标权重与规格化的水质指标与标准带入公式(4),计算水质样本  $j$  隶属于水质标准级别  $h$  的综合相对隶属度  $u_{hj}$ 。

$$u_{hj} = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^m [\tau w_{ij} (r_{ij} - s_{jh})]^p}{\sum_{i=1}^m [\tau w_{ij} (r_{ij} - s_{ik})]^p} \right\}^{\frac{\alpha}{p}}} a_j \leq h \leq b_j \\ 0 \quad h < a_j \text{ 或 } h > b_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{hj}$  是综合相对隶属度; $h$  是水质级别( $h=1, 2, \dots, 5$ ); $a_j, b_j$  分别为水质样本级别  $j$  的下限值和上限值; $w_{ij}$  为水质样本  $j$  指标  $i$  的权重,满足  $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ ; $\alpha$  为优化准则参数, $\alpha=1$  为最小一乘方准则, $\alpha=2$  为最小二乘方准则; $p$  为距离参数, $p=1$  表示海明距离, $p=2$  表示欧式距离。通常情况下可以采用 4 种组合计算结果的均值作为可变模糊识别模型的结果。

(4) 级别特征值的计算。利用公式(5)计算水质级别特征值  $H$ 。

$$H = \sum_{h=1}^c u_{hj} h \quad (5)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 洪水事件对水体热分层的影响

选取 2001、2005、2012、2015 年库中心和坝前断

面进行研究。各年份 4—10 月结构稳定性系数计算结果见图 2。由图 2 中可以看出,碧流河水库夏季水体存在明显的热分层现象,坝前水深较大且受扰动较小,结构稳定性系数要大于库中心断面。洪水发生后 RWCS 呈现不同程度的下降趋势,说明洪水过程能够对碧流河水库水体热分层结构产生明显的影响。洪水年份暴雨径流以异重流的形式潜入水库,破坏水体热分层结构,使水体发生混掺,促进上下层水体之间热量、溶解氧、营养盐以及污染物的交

换。当汛前水位较高时,异重流对水体分层结构的影响较小,如 2005、2012 年;当汛前水位较低时,即使洪水较小,异重流对水体分层结构也会产生较大影响,如 2001、2015 年。另外,碧流河水库是蜿蜒狭长的河道型水库,入库口至坝前达 25 km,洪水形成的异重流在向坝前迁移的过程需要一定的时间且逐渐减弱。如 2012 年,洪水发生后库中心水体 RWCS 明显下降,但坝前水体 RWCS 反而呈一定上升趋势,在后期的监测中才出现明显下降。

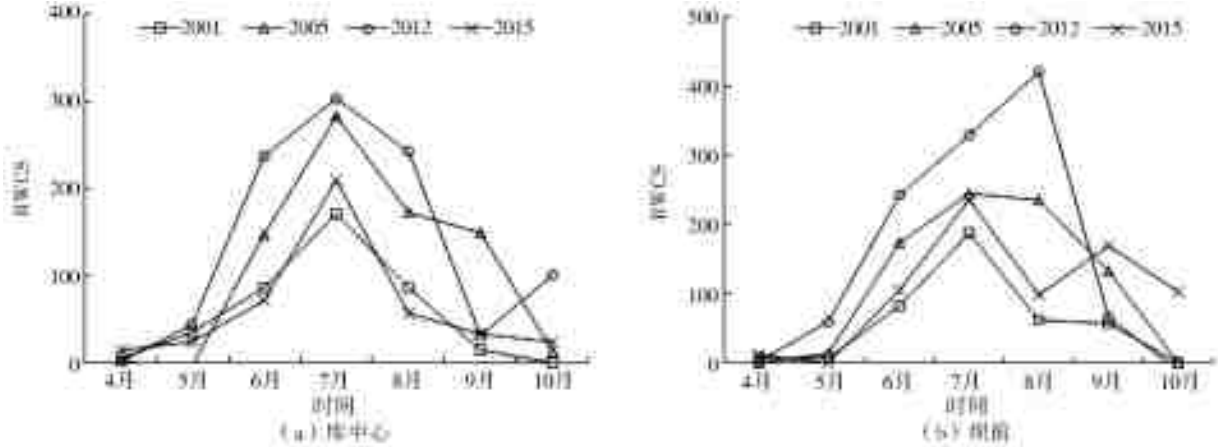


图 2 库中心及坝址断面 RWCS 变化过程

Fig. 2 Change process of RWCS in the center of the reservoir and the dam site

洪水过程对水体热分层结构的影响能够改变水体溶解氧质量浓度的垂向分布,对应典型场次洪水前后水体垂向溶解氧质量浓度分布见表 2。由表 2 中可以看出,洪水前底层水体溶解氧质量浓度明显低于表层水体,说明水体热分层阻碍了底层水体复氧,长时间的水体热分层现象可以使底层水体处于缺氧或厌氧状态。洪水过程能够促进水体混掺,增加底层水体溶解氧质量浓度。如 200108、201508 号洪水发生前后库中心和坝前底层水体溶解氧质量浓

度均有不同程度的上升,其中 201508 号洪水过后坝前底层水体溶解氧质量浓度由 1.23 mg/L 上升为 7.60 mg/L。而 200508 号洪水对水体分层结构影响较小,洪水过后库中心和坝前底层水体溶解氧质量浓度均有不同的下降趋势;201208 号洪水过后库中心分层结构有所减弱,底层溶解氧质量浓度由 6.10 mg/L 上升为 8.70 mg/L,而坝前分层结构并未受到影响,底层水体溶解氧质量浓度由 7.80 mg/L 下降为 4.40 mg/L。

表 2 洪水事件对碧流河水库水体溶解氧质量浓度分布的影响

Tab. 2 Impact of flood events on the distribution of dissolved oxygen in the Biliuhe reservoir 单位:mg/L

洪水事件	库中心(表)		库中心(底)		坝前(表)		坝前(底)	
	洪水前	洪水后	洪水前	洪水后	洪水前	洪水后	洪水前	洪水后
200108	6.88	6.72	4.44	6.36	7.32	7.48	1.44	3.44
200508	8.20	6.60	6.20	3.20	8.10	6.20	7.40	4.90
201208	9.10	6.80	6.10	8.70	8.90	10.30	7.80	4.40
201508	8.86	7.51	2.12	6.10	9.51	7.64	1.23	7.60

### 3.2 洪水事件对水库水质影响

#### 3.2.1 洪水水质影响时间差异性分析

场次洪水过后碧流河水库各水质参数变化情况见图 3。从图 3 中可以看出,洪水能够降低碧流河水库水体 pH 值,可能与洪水过程影响藻类的繁殖,进而影响光合作用消耗水体中 CO<sub>2</sub> 有关;另外,洪水过

程中会携带大量有机污染物进入水库,污染物在分解过程中会产生一定的酸性物质,也会造成水体 pH 值的下降。水体溶解氧除 201208、201307 号洪水外,总体呈下降趋势。水体中溶解氧质量浓度与水温、藻类光合作用、水体分层等因素密切相关。由 3.1 节分析可得,洪水引起的异重流能够增加底层水体溶解氧

质量浓度,但洪水过程输入的污染物在分解过程也会消耗大量的溶解氧,从而造成溶解氧浓度的下降。

洪水过后高锰酸盐指数均有不同程度的上升,说明洪水过程能够携带大量的有机污染物进入水库,增加水体污染程度。氨氮质量浓度在 199907、200108、201508 号洪水过后分别上升了 2.6 倍、9.2 倍和 1.7 倍,上升趋势十分明显,而其他场次洪水变化不大。总氮情况较为特殊,碧流水库总氮浓度超标严重,201208 号洪水发生前后更是超过了 4 mg/L,但洪水前后水体总氮质量浓度变化不大,部分场次洪水过后甚至有一定的下降趋势(200508、201208、201307)。

总磷质量浓度在 201307 号洪水过后存在明显的上升趋势,由 0.02 mg/L 上升为 0.10 mg/L,其他年份有轻微的上升或变化不大。六价铬在碧流水库水体中质量浓度较低,2012 年、2013 年为未检出状态,但其他年份洪水过后均有不同程度的上升。大肠菌群指标近几年下降较为明显,说明水体受畜禽粪便及人类生活污水污染的程度逐渐减少,但洪水过后上升趋势明显。水体中氟化物主要来自含氟工业废水的排放,碧流水库氟化物质量浓度较低,说明水体受工业污染影响较小,除 201208 号洪水过后氟化物质量浓度有明显上升趋势外,其他场次洪水变化不大。

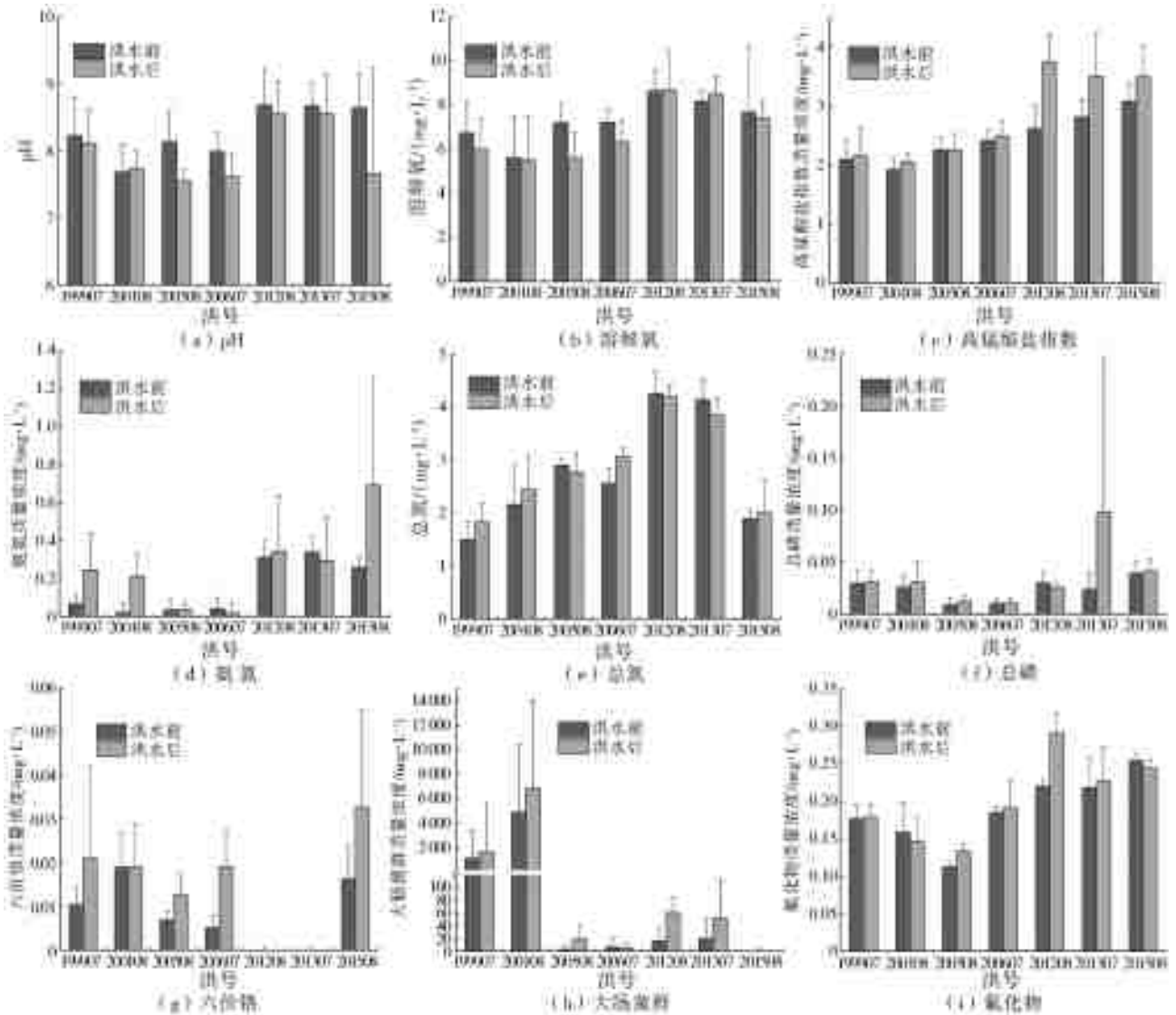


图 3 碧流水库洪水前后水质变化趋势

Fig. 3 Variations of water quality before and after floods in the Biliuhe reservoir

对碧流水库来说,洪水影响最大的指标为六价铬和大肠菌群,大多数场次洪水发生后上升趋势明显,其次为高锰酸盐指数、氨氮和总磷,部分场次洪水后浓度上升趋势明显,其他指标受洪水影响较小且不同场次洪水前后变化趋势有较大不同。由于不同污染源来源不同,各水质指标对同一场次洪水

的影响也不相同。另外,洪水大小与水质变化趋势没有必然的联系,例如 2012 年洪水是建库以来最大的洪水过程,但是除了高锰酸盐指数、大肠菌群和氟化物有较为明显的上升趋势外,其他指标变化不大,总氮、总磷甚至还有轻微的下趋势。而 2015 年流域偏旱,洪峰流量只有 429 m<sup>3</sup>/s,但是氨氮、六价铬

水质上升趋势十分明显。

各场次洪水前后水质评价结果见图 4。由图 4 可以看出,典型场次洪水前后水库水质评价结果位于 II 类和 III 类,与实际情况比较接近<sup>[15]</sup>。说明可变模糊识别模型评价结果能够较为准确的反映碧

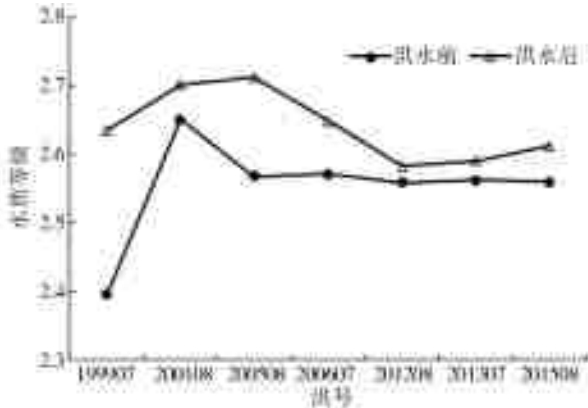


图 4 碧流河水库洪水前后综合水质评价结果  
Fig. 4 Assessment of water quality before and after floods in the Biliuhe reservoir

流河水库水质状况而不受个别超标水质参数(总氮)的影响。碧流河水库洪水过后水质呈下降趋势,但能够满足集中式生活饮用水地表水源地水质的需求。除此之外,不同场次洪水对水库水质影响相差较大,如 199907 号洪水前水质评价结果为 2.39,洪水后评价结果为 2.64,水质明显变差,与洪水发生前流域相对干旱,当发生旱涝急转事件时,暴雨径流冲刷导致大量蓄积在流域内的污染物进入水体有关;201208 号洪水发生前水质评价结果为 2.56,洪水后水质评价结果为 2.58,由于洪水发生前流域内已发生数次较小洪水过程,水体中污染物浓度已达较高水平,因此洪水过后水质变化不大。

### 3.2.2 洪水水质影响空间差异性分析

碧流河水库的地形特征决定了洪水前后水质空间分布的差异性。将水库水体从空间上分为入库口、库中心以及坝前区域,分析不同区域洪水前后水质的变化过程。洪水前后水质整体变化趋势见图 5。

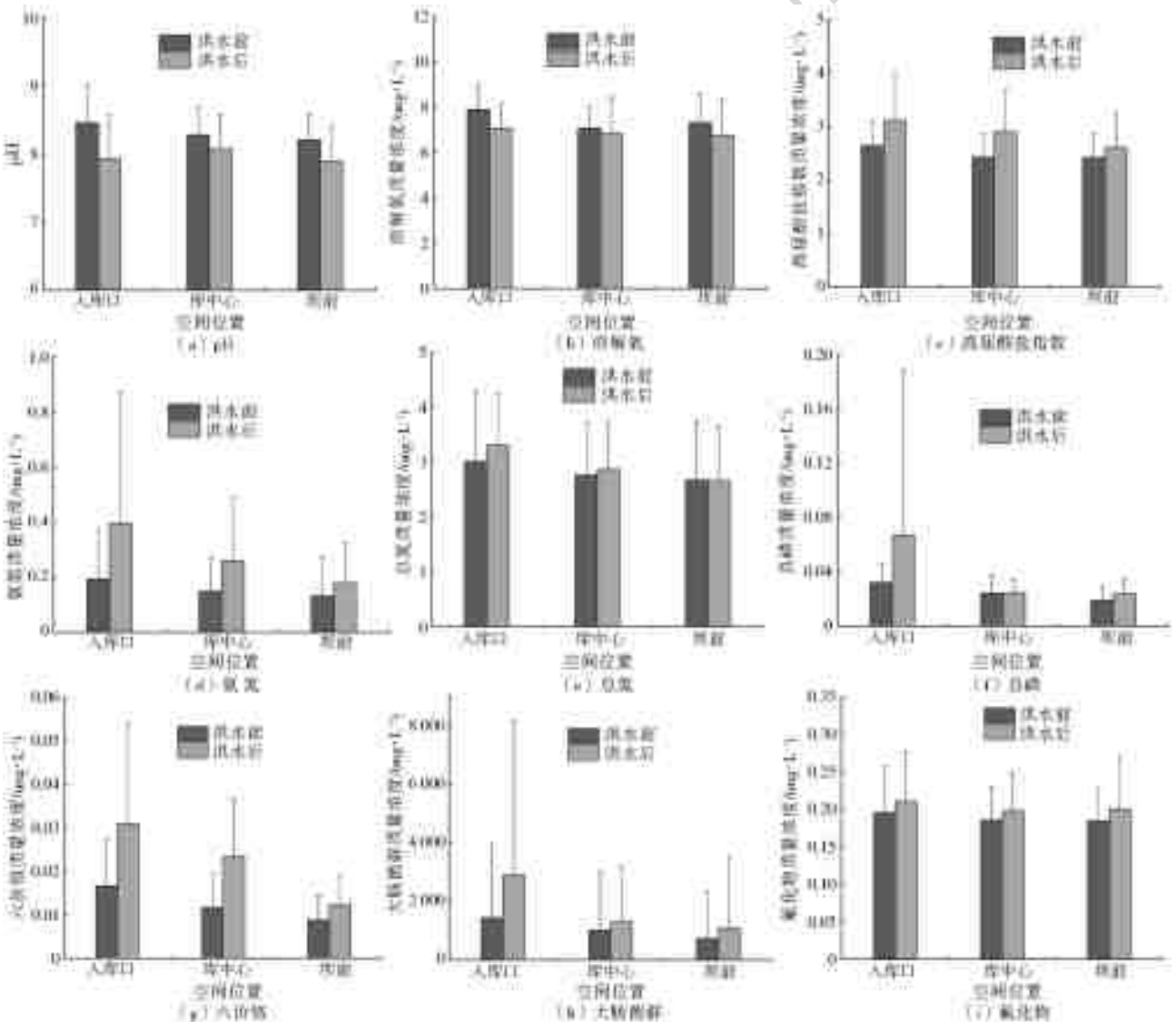


图 5 洪水前后水质空间变化趋势  
Fig. 5 Spatial variations of water quality before and after floods

由图 5 中可以看出,洪水前后入库口 pH、溶解氧均高于库中心和坝前区域,与入口水体较浅,受入库河流影响较大有关。洪水前高锰酸盐指数、氮磷、六价铬、大肠菌群等指标整体呈现出入库口 > 库中心 > 坝前的趋势,说明入库口水体直接受到流域污染物输入的影响,库中心和坝前区域因地形原因受入库污染物影响较小。

洪水发生以后,入库口水质波动较大,pH、溶解氧呈下降趋势,而其他污染物指标均呈现出明显的上升趋势,尤其是总磷、六价铬和大肠菌群,分别上升了 2.1、1.9 和 2.0 倍。相对入库口来说,库中心、坝前水质指标所受影响逐渐降低,说明碧流河水库的地形特征使得径流携带的污染物容易发生沉降,使得洪水过程对坝前水质的影响要小于对入库口和库中心的影响,对于总磷、六价铬、大肠菌群等与入库泥沙、悬浮物关系密切的指标来说更加明显。

洪水前后不同区域水质评价结果见表 3。可以看出,除 200108、200508 号洪水外,洪水前后坝前断面水质均优于入库口断面,与上述水质参数分析结果比较一致。200108 号洪水比较特殊,坝前和库中心水质较入库口要差,主要是坝前和库中心断面稳定分层结构导致溶解氧质量浓度较低的原因。大部分情况下洪水过后水质呈变差趋势,但 201508 号洪水前后坝前水质等级却由 2.52 下降为 2.46,呈轻微变好趋势。该情况与洪水过后坝前水体溶解氧质量浓度上升有关,除此之外洪水过程对总氮和高锰酸盐指数也有一定的稀释作用。以上分析表明,洪水事件对水库水质的影响机制十分复杂,需要结合流域背景、水文、水质等实际情况进行分析。

表 3 不同区域洪水前后水质评价结果  
Tab. 3 Assessment of water quality before and after floods in different regions

场次洪水	入库口		库中心		坝前	
	洪水前	洪水后	洪水前	洪水后	洪水前	洪水后
199907	2.41	2.64	2.57	2.68	2.20	2.59
200108	2.56	2.66	2.67	2.67	2.72	2.77
200508	2.60	2.64	2.57	2.75	2.53	2.74
200607	2.61	2.67	2.58	2.66	2.53	2.62
201208	2.58	2.58	2.55	2.58	2.55	2.58
201307	2.58	2.65	2.56	2.57	2.55	2.55
201508	2.59	2.73	2.57	2.64	2.52	2.46

### 3.3 对策分析

前期调查及研究表明,碧流河水库坝址以上流域经济发展主要以农业为主,水库入库污染物主要

来自非点源污染(98.2%~99.7%),且主要集中在汛期<sup>[16]</sup>。结合洪水前后水库水质演变特征可以得到,洪水过程主要入库污染物来源为暴雨径流引起的非点源污染,包括化肥施用、畜禽粪便以及农村生活垃圾污水等。对于重金属来说还有可能来自上游废弃尾矿库的土壤淋溶作用<sup>[17]</sup>。针对洪水期间入库污染物特征,首先需要从源头进行治理:通过推广测土施肥,发展精细化耕作方式,减少氮、磷等营养物质的流失<sup>[18]</sup>;针对畜禽粪便污染,应完善畜禽养殖业的配套设施,避免畜禽粪便随意排放;针对农村生活污水,应建立垃圾集中处理点和小型污水处理厂,清理河道内垃圾、秸秆等污染物,防止洪水发生时随径流进入水库;除此之外对上游尾矿库要加大清理和防渗工作。其次,在水库入库口设置拦漂网、前置库,可以直接对洪水期垃圾、漂浮物进行拦截;在水库沿岸设置生态隔离缓冲带、滨库湿地,可以对水库沿岸居民区污染物起到一定的缓冲作用,有效拦截、降解暴雨洪水中的污染物<sup>[19]</sup>。最后,通过对洪水过程异重流进行监测,采用蓄清排浑的调度方式排出洪水前期高浊度和高污染物浓度的入库水流,可以减小暴雨径流对水质带来的影响,以保障供水水质安全<sup>[20]</sup>;针对洪水期异重流的潜入位置,也可以采用分层取水的方案减少洪水过程对水库供水的影响<sup>[21]</sup>。通过以上源头治理、入库口拦截和库区调度措施,可以最大程度上减少洪水过程对碧流河水库水质的影响。

## 4 结论

(1)洪水事件能够减弱碧流河水库夏季水体稳定的热分层结构,影响溶解氧的垂向分布。(2)对于碧流河水库来说,洪水影响最大的指标为六价铬和大肠菌群,大多数场次洪水发生后上升趋势明显,其次为高锰酸盐指数、氨氮和总磷,部分场次洪水后浓度上升趋势明显,其他指标受洪水影响较小且不同场次洪水前后变化趋势有所不同。(3)空间上来说,洪水过程对入库口的影响更为明显,对库中区及坝前影响相对较小,碧流河水库地形特征能够减弱洪水过程对坝前水质的影响。(4)可变模糊识别模型评价结果显示洪水过后碧流河水库水质变差,但整体上能够满足地表水环境质量标准中水源地要求。(5)洪水过程对水库水质的影响主要来自于流域农业非点源污染的输入,通过源头治理、入库口拦截、库区调度等多维治理方案与调度措施可以减少洪水过程对水库水质的影响。

## 参考文献(References):

- [1] DOTTORI F, SZEWCZYK W, CISCAR J C, et al. Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 781-786. DOI: 10.1038/s41558-018-0257-z.
- [2] 郝秀平, 夏军, 王蕊. 气候变化对地表水环境的影响研究与展望[J]. *水文*, 2010(1): 67-72. (HAO X P, XIA J, WANG R. Influence of climate change on surface water environment[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, (01): 67-72. (in Chinese))
- [3] 石宝红. 岗南、黄壁庄水库“7·19”洪水调度分析[J]. *河北水利*, 2017(1): 20-21. (SHI B H. Flood dispatch analysis of Gangnan and Huangbizhuang reservoir in July 19, 2016[J]. *Hebei Water Resources*, 2017(1): 20-21. (in Chinese))
- [4] 陈栋栋. 洪泽湖螃蟹死亡之谜 是暴雨泄洪所致, 还是上游安徽省境内排放污水[J]. *中国经济周刊*, 2018(38): 40-43. (CHENG D D. The mystery of Hongze Lake crab death: is caused by rainstorm flood discharge or sewage discharge upstream in Anhui Province[J]. *China Economic Weekly*, 2018(38): 40-43. (in Chinese))
- [5] FOVET O, HUMBERT G, DUPAS R, et al. Seasonal variability of stream water quality response to storm events captured using high-frequency and multi-parameter data[J]. *Journal of Hydrology*, 2018(559): 282-293. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.02.040.
- [6] HUANG T L, LI X, RIJNAARTS H, et al. Effects of storm runoff on the thermal regime and water quality of a deep, stratified reservoir in a temperate monsoon zone, in northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014(485): 820-827. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.01.008.
- [7] MCMILLAN K, WILSON F, TAGUE L, et al. Before the storm: antecedent conditions as regulators of hydrologic and biogeochemical response to extreme climate events[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 141(3): 487-501. DOI: 10.1007/s10533-018-0482-6.
- [8] BABOROWSKI M, VON TUMPLING W, FRIESE K. Behaviour of suspended particulate matter (SPM) and selected trace metals during the 2002 summer flood in the River Elbe (Germany) at Magdeburg Monitoring station[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(2): 135-150. DOI: 10.5194/hess-8-135-2004.
- [9] 李延, 毕见霖, 王立硕, 等. 暴雨径流对非常规水源补给城市河流水质冲击研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 443-448. (LI Y, BI J L, WANG L S, et al. Effect of storm runoff on the water quality of urban rivers with unconventional water sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 443-448. (in Chinese))
- [10] 刘日锋, 李扬, 马卫星, 等. 暴雨径流潜流演变特征及对水源水库水质的影响[J]. *供水技术*, 2017, 11(4): 6-11, 16. (LIU R F, LI Y, MA W X, et al. Characteristics of rainstorm flow undercurrent evolution and its influence on water quality of source water reservoir[J]. *Water Technology*, 2017, 11(4): 6-11, 16. (in Chinese))
- [11] 李璇. 分层型富营养化水源水库水质演变机制与水质污染控制[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015. (LI X. Study on the evolution mechanism of water quality and its pollution control in a stratified and eutrophic reservoir[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese))
- [12] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009: 40-45. (CHEN S Y. Theory and model of variable fuzzy sets and its application[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2009: 40-45. (in Chinese))
- [13] 汪天祥, 许士国, 胡素端. 综合权重的可变模糊识别模型在水质动态评价中的应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(6): 1075-1079. (WANG T X, XU S G, HU S D. Application of variable fuzzy pattern recognition model with synthetic weight in the assessment of water quality dynamics [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(6): 1075-1079. (in Chinese))
- [14] 冯峰, 许士国, 杜丽杰. 基于熵权的洪水资源利用风险效益模糊评价[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(3): 280-285. (FENG F, XU S G, DU L J. Fuzzy evaluation model of risk and benefit of flood resources utilization based on entropy weight [J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 2010, 31(3): 280-285. (in Chinese))
- [15] 胡素端, 许士国, 汪天祥, 谢在刚. 基于可变模糊识别模型及GIS相耦合的水库水质综合评价[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(11): 21-24, 163. (HU S D, XU S G, WANG T X, et al. Comprehensive assessment of reservoir water quality based on variable fuzzy pattern recognition model and GIS[J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(11): 21-24, 163. (in Chinese))
- [16] QIN G S, LIU J W, WANG T X, et al. An integrated methodology to analyze the total nitrogen accumulation in a drinking water reservoir based on the SWAT model driven by CMADS: A case study of the Biliuhe reservoir in Northeast China[J]. *Water* 2018(10): 1535. DOI: 10.3390/w10111535.

(下转第 143 页)



- (ZHANG J. Prediction of middle-long term natural gas load of Xi'an City based on gray-neural network theory[D]. Xi'an; Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese))
- [11] 周立建,穆志韬,邢玮,等. 基于灰色神经网络的有机涂层寿命预测研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(5): 62-65, 81. (ZHOU L J, MU Z T, XING W, et al. Study of service life prediction of organic coatings based on grey neural network[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5): 62-65, 81. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-9242.2011.05.014.
- [12] 于婧,陈东景,王海宾. 基于灰色系统理论的海洋主导新兴产业选择研究——以山东半岛蓝色经济区为例[J]. 经济地理, 2013, 33(6): 109-113. (YU J, CHEN D J, WANG H B. Study on the leading industries of marine emerging industries based on grey system theory: A case of blue economic zone of Shandong Peninsula[J]. Economic Geography, 2013, 33(6): 109-113. (in Chinese)) DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2013.06.031.
- [13] 孙涛. 灰色系统预测理论在建筑工程造价中的应用[D]. 西安:西北工业大学, 2006. (SUN T. Application of grey system prediction theory in construction project cost[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese))
- [14] 冯惠娟,杨海娟. 基于压力-状态-响应模型的榆林市可持续发展评价及预测[J]. 水土保持通报, 2013, 33(4): 64-69. (FENG H J, YANG H J. Sustainable
- development of Yulin City and its evaluation and forecast by pressure-state-response model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(4): 64-69. (in Chinese)) DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2013.04.022.
- [15] 冯志,李兆平,李祎. 多变量灰色系统预测模型在深基坑围护结构变形预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(S2): 4319-4324. (FENG Z, LI Z P, LI Y. Application of a multi-point grey model to deformation predict in of supporting structure for deep pit[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007(S2): 4319-4324. (in Chinese))
- [16] 丁万涛,李术才,王书刚. 龙潭隧道围岩收敛变形灰色系统预测模型[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 118-121. (DING W T, LI S C, WANG S G. Prediction of grey system model on convergence of surrounding rock deformation of Longtan tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(S1): 118-121. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2006.s1.015.
- [17] 夏元友. 滑坡灰色系统预测模型及其应用[J]. 自然灾害学报, 1995(1): 74-78. (XIA Y Y. Grey system prediction model of landslide and its application[J]. Journal of Natural Disasters, 1995(1): 74-78. (in Chinese)) DOI:10.13577/j.jnd.1995.0112.
- [18] 张涛,杨娇敏. 我国区域天然气消费量的趋势预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 135-140. (ZHANG T, YUAN J M. Trend prediction of natural gas consumption in different regions of China[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 135-140. (in Chinese))

.....

(上接第 117 页)

- [17] ZHU L, LIU J W, XU S G, et al. Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of northeast China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 142: 454-463. DOI:10.1016/j.ecoenv.2017.04.039.
- [18] 段圣辉,赵钰,单保庆,等. 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3697-3705. (DUAN S H, ZHAO Y, SHAN B Q, et al. Research of the stormwater runoff and pollution characteristics in rural area of Yuhang District, Hangzhou[J]. Environmental Science, 2015, 36(10): 3697-3705. (in Chinese))
- [19] 苏广宇. 碧流水库滨库带水质保障技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016. (SU G Y. The study on the
- technology of protection measures of Bliuhe reservoir's water quality on the riparian zone[D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [20] LI Y, HUANG T L, MA W X. Correlation analysis of rainstorm runoff and density current in a canyon-shaped source water reservoir: implications for reservoir optimal operation[J]. Water, 2018, 10(4): 447-460. DOI:10.3390/w10040447.
- [21] 曾康,黄廷林,马卫星,等. 暴雨径流对分层水库水质的影响[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9): 4979-4986. (ZENG K, HUANG T L, MA W X, et al. Impact of storm runoff on water quality of one stratified reservoir[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(9): 4979-4986. (in Chinese))