

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdcqk.2019.0020

黄国兵, 杨金波, 段文刚. 典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 144-149.  
HUANG G B, YANG J B, DUAN W G. Investigation and analysis of ice hazard in operation of typical long distance water transfer project in winter[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 144-149. (in Chinese)

## 典型长距离调水工程冬季冰凌危害调查及分析

黄国兵, 杨金波, 段文刚

(长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010)

**摘要:**以某长距离调水工程为研究对象, 基于原形观测资料分析渠道冬季冰情发展规律和存在的冰凌问题。介绍了渠道和建筑物布置特点、不同冬季气象特点和冬季输水运行方式, 分析了流冰期、封冻期、开河期的冰情现象, 不同年份和空间上的冰情分布特征, 总结了长距离输水渠道冰情生消演变的基本规律。基于典型冬季渠道出现的特殊冰凌灾害, 列举了冰塞、泵站前池水位下降、分水口流量降低、仪器设备读数失真、渠道衬砌冻胀等冰凌影响事件, 分析了气象条件、水力条件和工程布置特点对冰凌危害出现的影响。从调度、工程措施出发, 在不同冰期阶段, 针对不同渠道和建筑物位置, 提出集防、拦、扰、捞、排一体化的冰凌防护措施, 为长距离输水工程冬季冰期安全高效运行提供技术保障。

**关键词:**长距离调水工程; 冰期输水; 冰塞; 防灾减灾

中图分类号: TV875 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Investigation and analysis of ice hazard in operation of typical long distance water transfer project in winter

HUANG Guobing, YANG Jinbo, DUAN Wengang

(Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** This paper takes a long-distance water diversion project as the research object, and analyzes the ice development law and ice hazard of the channel in winter based on prototype observation data. This paper introduces the layout features of the channel and other constructions, the meteorological characteristics in winter, and the water conveyance mode in winter. It analyzes the ice phenomena in the ice drift period, freezing period, and thawing period, and the ice distribution characteristics in different years and areas. It summarizes the basic rules of ice formation and melting in the long-distance water conveyance channel. Based on the special ice hazards in typical channels in winter, this paper lists such events as ice jam, water level decrease at forebay of pumping station, flow rate decrease at diversions, distortion of instrument readings, and canal lining frost heaving. It analyzes the influence of meteorological conditions, water conditions, and projects layout characteristics on the formation of ice hazards. From the perspectives of scheduling and engineering measures, this paper puts forwards a set of protective measures covering prevention, blocking, interference, fishing, and drainage according to different channels and positions of the constructions in different ice periods. It can provide technical support for the safe and efficient operation of long-distance water diversion projects in winter.

**Key words:** long-distance water diversion project; water conveyance in ice period; ice jam; disaster prevention and mitigation

收稿日期: 2018-07-11 修回日期: 2018-12-17 网络出版时间: 2018-12-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20181224.1322.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0405000; 2017YFC0405003; 2016YFC0401800; 2016YFC0401810)

作者简介: 黄国兵(1963—), 男, 湖北天门人, 教授级高级工程师, 主要从事水工水力学方面研究。E-mail: huanggb@crsri.cn

## 1 背景

本文以某长距离跨流域输水工程为研究对象,该工程渠道线路由南向北输水,跨越北纬 $33^{\circ}\sim 40^{\circ}$ ,该工程具有明渠线路长、交叉建筑物多的特点,建筑物包括倒虹吸、隧洞、渡槽、节制闸、分水闸和退水闸等,渠首设计流量 $350\text{ m}^3/\text{s}$ ,渠末设计流量 $50\text{ m}^3/\text{s}$ 。该工程冬季北方渠段出现不同程度的结冰现象,渠道调度面临无冰输水、流冰输水、冰盖输水等运行工况<sup>[1-9]</sup>,尤其在渡槽、倒虹吸进口、隧洞进口、弯道和束窄渠段容易形成冰盖等冰凌灾害<sup>[10-13]</sup>。

在气象条件方面,该工程结冰段位于河北省境内,冬天气干冷,一般11月下旬以后日平均气温开始转负,次年2月转正。近5个冬季观测表明,冬季负积温为 $100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最冷月平均气温为 $-6.0\sim -1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,其中2015—2016年冬季最具有典型性,负积温 $241\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,1月平均气温 $-6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,为形成严重冰情提供气温条件。供水前期(2014年以前),工程下游渠段应急供水,由河北附近水库向某大城市供水,运行线路短,供水流量 $10\sim 20\text{ m}^3/\text{s}$ ,输水流量小;2014年以后工程全线通水,输水渠道增长,流量相应提高,2015—2016年冬季结冰段最大输水流量为 $30\sim 45\text{ m}^3/\text{s}$ ,约为该渠段设计流量的35%以上,平均流速为 $0.25\sim 0.65\text{ m/s}$ ,为冰凌运动提供了动力条件。

文章根据冰情原型观测资料,总结了该工程冬季运行冰情生消演变的基本规律,详细描述了近年来遇到典型冰害,分析了冰害形成条件,提出了冰凌灾害防护措施。

## 2 基本冰情

通过近年来现场观测,各冬季冰情现象见表1,主要包括岸冰、流冰花、表面流冰层、封冻冰盖、冰塞和岸冰脱落等;冬季冰期分为流冰期、封冻期和解冻期等3个阶段,不同时期冰情特征不同;观测期间渠道前4个冬季冰期运行良好<sup>[14-15]</sup>,封冻为平封方式,开河为文开河方式,无冰塞冰坝现象,2015—2016年冬季冰情严重,封冻过程中多个渠池出现冰塞险情,局部断面为立封现象,开河为文开河,有小体积冰块堆积体。

该工程冰情时空分布非常复杂。在时间上,冰期一般每年12月开始,次年3月结束,不同年份冰期时间节点差异较大,其中2015—2016年冬季开始结冰时间最晚,2012—2013年冬季结冰时间最早,开河最晚;空间上,2014—2015冬季气温偏暖,封冻

段渠长约 $86\text{ km}$ ,2015—2016年冬季气候寒冷,全线封冻长约 $360\text{ km}$ 。在冰期,冰盖厚度为 $14\sim 32\text{ cm}$ ,2012—2013年冬季冰盖最厚为 $32\text{ cm}$ ,2015—2016年冬季实测冰厚 $28\text{ cm}$ ,各冬季冰盖厚度由南向北逐渐增厚。对于单个断面冰盖中间较薄,两岸厚,岸冰最大厚度达 $46\text{ cm}$ 。

表1 冬季输水主要冰情现象

冬季	主要冰情	封冻形式	开河形式
2011—2012	流冰期:岸冰、流冰花、表面流冰层等;封冻期:封冻冰盖;开河期:岸冰脱落、冰盖融化	平封	文开河
2012—2013	流冰期:岸冰、流冰花、表面流冰层等;封冻期:封冻冰盖;开河期:岸冰脱落、冰盖融化	平封	文开河
2013—2014	流冰期:岸冰、流冰花、表面流冰层等;封冻期:封冻冰盖;开河期:岸冰脱落、冰盖融化	平封	文开河
2014—2015	流冰期:岸冰、流冰花、表面流冰层等;封冻期:封冻冰盖;开河期:岸冰脱落、冰盖融化	平封	文开河
2015—2016	流冰期:岸冰、流冰花、表面流冰层、冰塞等;封冻期:封冻冰盖;开河期:岸冰脱落、冰盖融化、小体积冰坝;	平封/立封	文开河

通过近年研究,该工程主要冰情具有以下特点。(1)封冻方式多为平封,冰盖形成以上游表面流冰层在下游断面堆积平铺上溯方式为主;开河方式为文开河,冰盖一般就地融化,不会形成大量开河流冰。(2)在调度方式方面,冬季采用浮冰盖输水方式。(3)冬季结冰,严重影响渠道输水能力和调度运行,冬季输水能力明显下降。(4)沿线节制闸、倒虹吸、隧洞等水工建筑物对渠道结冰有一定的影响。

## 3 典型冰凌危害

### 3.1 冰塞

渠道冰塞体剖面结构可分为3层:上层为碎冰块堆积,厚度为 $20\sim 40\text{ cm}$ ;中层为坚硬密实冰盖,厚 $25\text{ cm}$ ;下层为冰屑堆积体,一般厚 $70\sim 150\text{ cm}$ ,局部位达 $250\text{ cm}$ 。冰屑堆积体絮状松散,侵占过水断面,见图1。

观测期间内2015—2016年冬季冰塞最为严重,见图2,蒲阳河倒虹吸以北 $120\text{ km}$ 的渠段,冰塞体总长约 $26.5\text{ km}$ ,单渠池冰塞体长度 $3.2\sim 7.1\text{ km}$ 其中以满城县岗头渠段和坟庄河至北拒马河渠段最严重,冰塞体侵占渠道断面,增加了渠道输水阻力,

降低输水能力,严重抬高了渠池上游水位线。冰塞形成主要原因:(1)输水流量较往年提高,局部渠段水力学条件超过流冰下潜的临界指标。(2)遭遇极端寒冷气候,出现大量流冰。

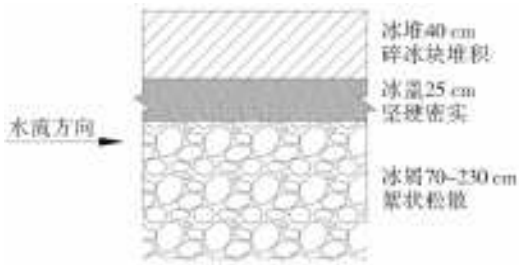


图 1 冰塞剖面  
Fig. 1 Profile of ice jam



图 2 渠道冰塞  
Fig. 2 Ice jam of the channel

### 3.2 泵站前池水位降低

在工程下游渠段布置一个提水泵站,该渠段工程布置复杂,泵站前池上游直接暗渠(长 1 670 m)出口,暗渠上游为倒虹吸(长 685 m),两者之间明渠长约 3.0 km,泵站前池、暗渠进口分别设有拦污栅,同时暗渠进口前布置箱式拦冰索。2015—2016 年度该渠段出现严重冰情,见图 3。



图 3 流冰堵塞拦污栅  
Fig. 3 Trash rack blocked up by ice

(1)上游渠道形成较大体积的冰塞体,增加了渠道阻力,减小了渠道输水能力,导致上游渠池上游水位升高,暗渠进口水位降低,影响供水量。

(2)结冰期和开河期,流冰堵塞拦污栅,前池水

位明显下降,后经采取人工昼夜不停清除拦污栅上的冰块,确保供水流量和泵站安全运行。

主要原因为受多年罕见强降温过程影响,暗渠上游渠道出现大量流冰,流冰在进口下潜形成冰塞体,堆积冰屑侵占大面积过流断面,增加了渠道阻力,渠道输水能力降低。同时进口流冰翻越拦冰索,拦冰索作用局部失效,大量流冰在拦污栅前堆积,堵塞拦污栅空隙,直接导致惠南庄泵站前池水位下降。

### 3.3 分水口流量减小

该工程下游段设有向沿线某一个大城市供水的取水口,设计流量  $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$ ,2015—2016 年冬季取水流量  $Q=13\sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$ ,2016 年 1 月 23 日上午,箱涵段流量骤然降低,通过排查发现取水口闸后出现大体积冰坨,节制闸无法正常操作,影响向正常供水。后经运行管理人员采用热水融冰的方法,恢复正常输水。

事后观测分析,主要由于取水口闸后为急流,形成水花四溅,大量水滴落在闸墩和闸后背水面,遭遇极低温度时,左右闸墩边壁形成贯穿冰坨,冰坨冻结力极强,闸门冻死无法操作,过闸流量减小。

### 3.4 拦冰索断裂

沿线某隧洞上游渠段布置复杂,隧洞进口上游有 14.5 km 的明渠输水段,由上而下布置另一个隧洞(2 207 m)、渡槽(2 199 m),渡槽出口接 900 m 开挖石渠段至该隧洞,隧洞进口布置两道拦冰索。2016 年 1 月 23 日,隧洞进口出现严重冰塞,进口前两道拦冰索先后相继断裂,冰塞体整体下移,强烈撞击隧洞进口导墙,威胁隧洞节制闸安全,见图 4。事后一方面紧急放下检修闸门,保护节制闸;另一方面,在上游渡槽进口上游 1 km 断面临时增设拦冰索,有效拦截上游流冰,控制了隧洞进口前冰塞体积的发展。



图 4 隧洞进口拦冰索断裂  
Fig. 4 Ice boom broken at the intake of tunnel

事后分析,主要由于上游长距离明渠内的大量流冰全部堆积在隧洞进口,形成较大体积的冰塞,冰

塞体厚度 1.5 m 以上,有的地方达 2.3 m,水流冲击冰塞体,增加拦冰索荷载,超其容许荷载,最终导致拦冰索断裂,冰塞体整体下移。

### 3.5 流量计读数失真

该工程水力测量仪器一般结合建筑物布置,多数布置在倒虹吸出口,少数布置在建筑物进口。2015—2016 年冬季存在 3 处水力参数观测仪器读数严重失真现象,流量读数最大偏高约 75%。流量计读数偏差过大可能导致调度判断失误,产生严重的次生灾害。通过分析,这些流量计布置在建筑物、节制闸进口,冰塞体侵占仪器安装断面,流量读数失真。

### 3.6 结冰对工程影响

根据近几年观测,结冰对工程结构的影响主要表现在渠道边坡衬砌冻胀和渡槽冬季漏水。一般冬季气温越低,冻胀破坏越严重,见图 5。冬季受低温影响渡槽槽身接缝出现裂缝,导致渡槽漏水,见图 6。



图 5 边坡冻胀  
Fig. 5 Frost heave damage of channel slope



图 6 渡槽渗漏  
Fig. 6 The leakage of aqueduct

## 4 冰凌减灾措施

根据对本工程冰害研究,为保证工程冬季输水安全,提出了集防、拦、捞、抗、排一体化的冰害防护措施。

### (1) 以防为主

重点是防,主要从调度入手:(a)合理确定输水

流量;(b)准确、合理确定渠系进入冰期输水时间;(c)优化冰期输水自动化控制模式;(d)调度方式,结冰期,可抬高闸前控制水位,增加过流面积,控制流速  $v < 0.4 \text{ m/s}$ ,促使冰盖尽快形成;封冻期,严格控制各闸门过闸流量,保持稳定输水,防止水位大起大落,水鼓冰裂;开河期,控制闸门逐段拦蓄、缓慢释放槽蓄量,防止开河槽蓄量叠加积累;(e)建立工程冰情预报预警系统,实时掌握冰情发展动态,为运行调度和防凌减灾提供技术支撑。

### (2) 分段拦截

分段拦截主要是解决大量流冰在下游建筑物前堆积的问题。采用拦冰索分段拦截流冰,控制流冰堆积位置和堆积量,避免造成严重冰害。根据 2015—2016 年冬季对拦冰索拦冰效果的观测,现有拦冰索对较薄的流冰拦截效果较差,应从以下几个方面改善。

(a)分析拦冰索结构、吃水深度等对流冰拦截作用的影响,优化拦冰索体型结构,提供拦冰索拦冰效果。

(b)拦冰索的跨渠布置,现有拦冰索一般为左右岸对称布置,对渠道表面水流分布考虑不周,推荐斜跨式,见图 7。

(c)结合渠道和建筑物布置特点,长距离渠段需增设拦冰索,分割明渠段长度,逐段拦冰,一般推荐间隔距离为 5~10 km,采用双排布置。



图 7 拦冰索双排布置  
Fig. 7 Double row layout of ice boom

### (3) 重点打捞

建筑物、节制闸、取水口等重点位置应布设捞冰、运冰设施,及时打捞流冰,控制流冰堆积量,保证通水安全。捞冰设备包括固定式捞冰机和移动式捞冰铲车。(a)固定式捞冰机应结合建筑物、节制闸布置,可改造现有的捞污机,除污和捞冰两用。(b)移动捞冰设备可采用移动式捞冰铲车,即可打捞建筑物附近堆积冰,又可打捞渠道中的流冰,弥补固定式捞冰设施的缺点。

### (4) 局部扰冰

在建筑物、节制闸、取水口等重点位置应布设扰冰设施,防治关键位置结冰。主要扰冰设施包括:压力气泡、电阻式加热等,扰冰设施的设置和布置应结合该部位具体冰情。

### (5) 应急排冰

在端情况下,大范围冰塞体堆积在建筑物进口,影响输水能力,为防止堵塞建筑物等次生灾害,应采取应急排冰措施。京石段排冰闸数量有限,布置有待优化。一方面可对退水闸进行改造,具有应急排冰功能;另一方面完善排冰设施具有拦、导、排作用,首先能有效拦截渠道流冰,其次导冰设备将流冰疏导至排冰闸一边,最后通过排冰闸排出渠道,见图 8。

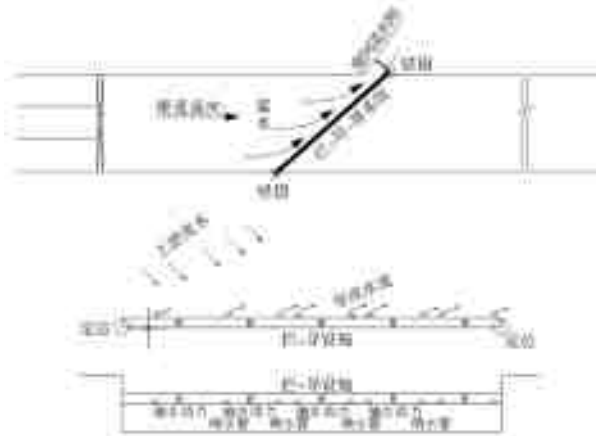


图 8 排冰设施工作原理

Fig. 8 Working principle of ice drainage facilities

## 5 结 论

通过分析,该工程冬季结冰时间从 12 月至次年 2 月,京石段为主要结冰范围,不同气候条件下冰情时间、空间规律不同。小流量时,水流小于流冰下潜条件,渠道封冻方式为平封,开河方式为文开河,无冰塞、冰坝等冰凌灾害;流量提高,遭遇寒冷气候,渠段内水流大于流冰下潜临界条件时,可能出现大量流冰下潜形成冰塞,尤其是在节制闸、倒虹吸、隧洞、暗渠和前池等部位,严重影响渠道输水能力。从调度和工程措施方面,突出重点,兼顾全面,提出了防、拦、捞、扰、排一体的冰害防护措施,为长距离输水工程冬季安全、高效运行提供技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] WASANTHA LAL A. M., SHEN H T. Mathematical model for river ice processes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991, 117(7): 851-967.
- [2] 魏良琰, 黄继忠. 冰盖流阻力与综合 Manning 糙率[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(4): 1-8. (WIN L Y, HUANG J Z. Ice cap flow resistance and comprehensive Manning roughness[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2002, 35(4): 1-8. (in Chinese))
- [3] 严增才, 吴新玲. 南水北调中线工程冰期输水原型观测与冰情分析[J]. 河北水利, 2008(4): 28-29. (YAN Z L, WU X L. The prototype observation and ice situation analysis of the ice age in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project in the ice period[J]. Hebei Water Resources, 2008(4): 28-29. (in Chinese))
- [4] 董耀华, 杨国录. 大清河系观测河段及南水北调中线方案冰情计算分析[J]. 长江科学院院报, 1999(6): 13-17; (DONG Y H, YANG G L. The calculation and analysis of Daqinghe River system observation river and South-to-North Water Diversion Scheme of ice[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999(6): 13-17. (in Chinese))
- [5] 黄国兵, 聂艳华, 段文刚. 南水北调中线工程主要水力学问题研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 34-42. (HUANG G B, NIE Y H, DUAN W G. Study on the main hydraulic problems of the middle route Project of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 34-42. (in Chinese))
- [6] 刘孟凯, 王长德, 冯晓波. 长距离控制渠系结冰期的水力响应分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 20-27. (LIU M K, WANG C D, FENG X B. Analysis of hydraulic response of long distance control canal system during freezing period[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 20-27. (in Chinese))
- [7] 付辉, 杨开林, 郭新蕾, 等. 基于虚拟流动法的输水明渠冰情数值模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 7-12. (FU H, YANG K L, GUO X L, et al. Numerical simulation of ice flow in water conveyance open channel based on virtual flow method[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 7-12. (in Chinese))
- [8] 范北林, 张细兵, 蔺秋生. 南水北调中线工程冰期输水冰情及措施研究[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 66-69. (FAN B L, ZHANG X B, LIN Q S. Study on water transport ice and measures in the middle route of South-to-North Water Diversion Project during the ice period [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 66-69. (in Chinese))
- [9] 武汉大学, 长江科学院. 南水北调中线工程总干渠冰期输水计算分析[R]. 武汉: 武汉大学, 2005 (Wuhan University, Changjiang River Scientific Research Institute. Calculation and analysis of the water conveyance of the main canal in the middle route of the South-to-North Water Diversion Project [R]. Wuhan: 2005. (in Chinese))

- [10] 吴剑疆. 河道中冰情形成演变机理分析及冰塞和水内冰数值模拟研究[D]. 北京:清华大学,2002. (WU J J. Analysis of the formation and evolution mechanism of ice in the river and numerical simulation of ice plug and water internal ice[D]. Beijing:Tsinghua University,2002. (in Chinese))
- [11] 杨开林,刘之平,李桂芬,等. 河道冰塞的模拟[J]. 水利水电技术,2002(10):40-47. (YANG K L, LIU Z P, LI G F, et al. Simulation of river ice jam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002(10):40-47. (in Chinese))
- [12] 王军. 冰塞形成机理与冰盖下速度场和冰粒两相流模拟分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2007. 6. (WANG J. Formation mechanism of ice plug and simulation analysis of velocity field under ice cover and two phase flow of ice particles[D]. Hefei: Hefei Polytechnic University,2007. 6. (in Chinese))
- [13] 李志军,韩明,秦建敏,等. 冰厚变化的现场监测现状和研究进展[J]. 水科学进展,2005,16(5):753-757 (LI Z J, HAN M, QIN, J M, et al. Current situation and research progress of ice thickness variation in field monitoring[J]. Progress in Water Science,2005,16(5):753-757. (in Chinese))
- [14] 段文刚,黄国兵,杨金波,等. 长距离调水明渠冬季输水冰情分析与安全调度研究[J]. 南水北调与水利科技,2016.14(6):96-104(DUAN W G, HUANG G B, YANG J B, et al. Analysis and safety scheduling of water transport in long distance water diversion open channel[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2016,14(6):96-104. (in Chinese))
- [15] 温世亿,杨金波. 南水北调中线2014—2015年度冬季冰情原型观测[J]. 人民长江,2015,(22):99-102 (WEN S Y, YANG J B. A prototype observation of the winter ice situation in the middle line of the south to North Water Transfer Project in the year 2014-2015[J]. Journal of Yangtze River, 2015(22):99-102. (in Chinese))
- .....
- (上接第129页)
- [50] 庄军莲,王一兵,赖俊翔,等. 北海近岸海域化学需氧量分布特征及其影响因素研究[J]. 广西科学院学报,2014(3):165-169. (ZHANG J L, WANG Y B, LAI J X, et al. Distribution characteristics and the influencing factors of COD in the coastal waters of Beihai [J]., 2014(3):165-169. (in Chinese)) DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20140721.001.
- [51] MEYBECK M. Global occurrence of major elements in Rivers[J]. Treatise on Geochemistry,2003,5(1):207-223. DOI:10.1016/B0-08-043751-6/05164-1.
- [52] 奚磊,侯明明,张胜伟. 水环境中磷的农业非点源污染研究[J]. 安徽农学通报,2007,13(10):42-44,105. (XI L, HOU M M, ZHANG S W. Study on phosphorus of agricultural non-point sources pollution in water environment[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007,13(10):42-44,105. (in Chinese)) DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2007.10.018.
- [53] 程素珍,许尚杰,刁汇文. 水库网箱养鱼对水质的影响及防治对策[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(1):30-31,147. (CHENG S Z, XU S J, DIAO H W. Influence of fish culturing with cages in reservoir on water quality and countermeasures to it[J]. journal of Water Resources and Architectural Engineering,2010,8(1):30-31,147. (in Chinese))