

变化水文条件对青草沙水库盐度的影响

缴 健, 窦希萍, 丁 磊, 张新周, 高祥宇

(南京水利科学研究院港口航道泥沙工程交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:建立了大通至外海长江口平面二维水-盐数学模型, 对上游不同径流量及外海不同潮流条件下长江口淡水资源分布情况进行了数值模拟。结果表明, 淡水资源分布情况与径流量关系明显, 当大通站径流量低于 $10\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 长江口南支与北支均发生盐水入侵。随着径流量增大, 淡水资源分布区域逐渐增加。当径流量大于 $20\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 青草沙水库可以保证水库正常取水安全。涨潮时, 大潮期间南支淡水资源分布范围较广, 而小潮时淡水资源分布范围较小, 落潮时相反。对于青草沙水库而言, 潮差越大水体含盐度越低。形成“大潮低盐, 小潮高盐”的现象。

关键词:长江口; 青草沙水库; 盐度; 变化水文条件; 数学模型

中图分类号: X143

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2016)S1-0036-05

《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》(中发[2011] 1 号)及《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》(国发[2012] 3 号)等文件明确指出, 力争通过 5 年到 10 年努力, 城镇供水水源地水质全面达标。长江口是我国最大的河口, 也是上海市水源地取水重心, 已经建成的长江口水源地的水库有陈行水库、青草沙水库和东风西沙水源地^[1](图 1), 其中青草沙水库容量最大, 供水人口超过 1 000 万人。青草沙水库总面积约 66.26 km^2 , 最高蓄水位为 7 m (吴淞基面), 总库容为 5.27 亿 m^3 , 有效库容为 4.38 亿 m^3 ^[2]。但 2014 年 2 月 3—25 日, 长江口水源地遭遇历史上持续时间最长的咸潮入侵, 青草沙水库取水口连续 23 d 出现氯化物超标^[3]。近年来长江流域兴建的一系列的引水工程, 如

三峡工程、南水北调工程等, 使长江口原有水文情况发生一系列变化^[4]。上游径流的变化对青草沙水库取水口盐度有较为显著影响, 外海潮汐的周期性变化也对青草沙水库取水口盐度有着重要作用^[5]。

基于此, 许多学者对不同水文条件下河口盐水入侵问题进行了相关研究。肖成猷等^[6]利用二维盐度模型模拟了长江口北支倒灌, 说明了倒灌水团在南支河段的运动过程。马钢峰等^[7]利用 ECOM 模式建立了一个长江口水动力盐度三维数值模型。李提来等^[8]采用数学模型研究了长江口整治工程对盐水入侵影响。陶建峰等^[9]使用三维数学模型计算了不同径流条件下盐水入侵影响范围, 但并未对青草沙水库的取水安全做出分析。本文采用 Delft 3D 平面二维数学模型模拟的方法分析上游大通站不同径流量、外海不同潮波特征对于长江口淡水资源的分布特性及其规律的影响, 据此分析了变化水文条件对青草沙水库取水口盐度的影响。

1 数学模型建立与验证

采用了 Delft 3D 平面二维数学模型的水流模块, 其中包括盐度的输运以及扩散, 水动力计算的浅水方程基于 Navier-Stokes 方程。在 Delft3D-FLOW 中, 盐度输运采用对流扩散方程进行模拟, 同时考虑了一阶衰退过程。每个一阶衰减过程对应一个以指数形式降低的数值解。



图 1 长江口水源地位置示意图

长江河口模型计算区域包括长江口、杭州湾及邻近海域。北边界位于北纬 34.67°, 南边界最远位于北纬 29.33°, 东边界最远位于东经 124.24°。模型外海开边界采用水位边界条件, 由东中国海模型提供。上游为流量控制条件, 使用大通站 2014 年 1 月 28 日—2 月 29 日逐时实测流量。

模型网格为贴体正交网格, 横向网格 1431 个, 纵向 163 个。外海处网格尺寸较大, 最高达到 2 km×2 km, 对长江口区域进行了局部加密, 最小网格尺寸为 70 m×60 m。坐标为高斯-克吕克坐标。模型范围及网格如图 2 所示。根据柯朗数 (Courant number) 原则, 时间步长取 15 s。长江口区域地形采用长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局提供的 2012 年实测地形资料, 外海采用吕四港至花鸟山 (1:250 000), 舟山群岛及附近 (1:250 000) 海图地形, 以及由 NGDC 美国地球物理中心发布的 ETOPO 地形高程数据。外海边界处盐度设置为海水平均盐度, 上游来水盐度为 0。

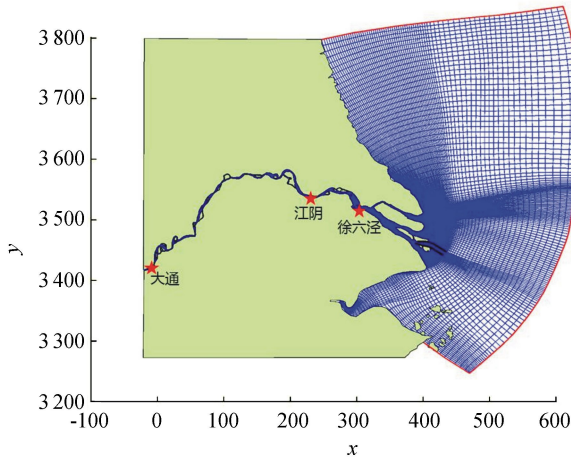


图 2 模型网格

验证资料采用长江水利委员会水文局长江口水文水资源勘测局提供的 2014 年 2 月北支盐水倒灌影响监测技术报告。潮位测站共 19 个, 分别为营船港、七干河、汇丰码头、望虞河、徐六泾、太海汽渡、白茆、崇头、新建河、荡茜、庙港、杨林、南门、浏河口、石洞口、堡镇、吴淞、六激、青龙港。流速、流向与盐度测站位于南北支分汊口附近, 其中一个测站位于北支进口处, 其余 4 个分别位于白茆沙南、北水道。由于潮位、流速、流向和盐度验证图幅较多, 本文不一一列举。验证表明数学模型计算潮位站的高、低潮位与实测资料吻合较好, 各站高低潮时间的相位偏差基本在 0.5 h 以内, 最高最低潮位值偏差基本在 10 cm 以内。各验证流速点的流速过程线形态基本一致, 憩流时间和最大流速出现的时间偏差都基本在 0.5 h 以内, 涨、落潮段平均流速偏差基本在 10%

以内。盐度验证数量级与变化规律一致, 基本可以正确反映长江口盐水入侵情况。水位、流速、流向及盐度比较结果表明模型和原型的相似性良好, 试验数据可信。

2 模型试验方案

长江口径流量的变化对盐水入侵有很大影响, 一般而言, 流量越小, 盐水入侵越严重, 影响范围越大, 危害越大。长江口入海径流量大, 洪枯季节变化明显, 洪季径流量相对较大, 河口段基本为淡水控制, 较严重的盐水入侵一般发生在枯季。根据 1950—2015 年大通径流资料统计, 大通站多年枯季最小径流量平均值为 9900 m³/s, 多年枯季平均流量为 16400 m³/s, 多年枯季最大流量平均值为 25700 m³/s, 多年枯季最小流量为 6100 m³/s, 多年枯季最大流量为 38200 m³/s。2006 年三峡大坝建成后, 对大通枯季各个月日平均流量进行分析。8000~25500 m³/s 可以覆盖枯季各个月的典型频率, 计算上游边界恒定流流量为 8000~25500 m³/s (每间隔 500 m³/s 设置一组方案)、共 36 种方案下长江口水源地水域附近淡水资源受盐水威胁状况, 基本包含了三峡工程建成以后长江口枯季来水量的范围。考虑到极端气候, 增加上游边界恒定流流量 5000 m³/s 方案设置。外海开边界潮位过程为给定典型潮型, 风速为 0, 其他设置与模型验证时相同。模型运行 40 d 后对水源地取水口附近盐度展开分析。分析时间为一个完整的半月周期 (16 d), 从最大潮前 4 d 开始, 再到最小潮后 4 d 结束。

3 结果分析

3.1 不同径流下长江口淡水资源分布

6 组典型径流条件下长江口淡水资源分布情况如图 3、图 4 所示。根据国家标准, 当水体含盐量大于 0.2‰ 时认为发生盐水入侵, 水体含盐量大于 0.45‰ 时水库不能取水。在图 3、图 4 中黑色区域代表水体含盐量大于等于 0.045‰, 即不能取水, 灰色区域代表含盐量大于等于 0.2‰, 小于 0.45‰, 存在盐水入侵但是可以取水, 白色区域代表水体含盐量小于 0.2‰, 没有盐水入侵。从图 3、图 4 中可以看出, 盐水入侵情况与径流量关系明显。总体而言, 外海条件一定的情况下, 随着上游径流量增加, 淡水分布范围越广, 可取水范围越大。当大通站径流量为 8000 m³/s 时, 南北支均发生盐水入侵, 青草沙水库不能取水。当上游径流量增加至 15000 m³/s 时, 小潮期间青草沙水库盐度高于取水标准, 大潮涨憩时青草沙水库盐度低于 0.45‰, 符合取水标准, 但

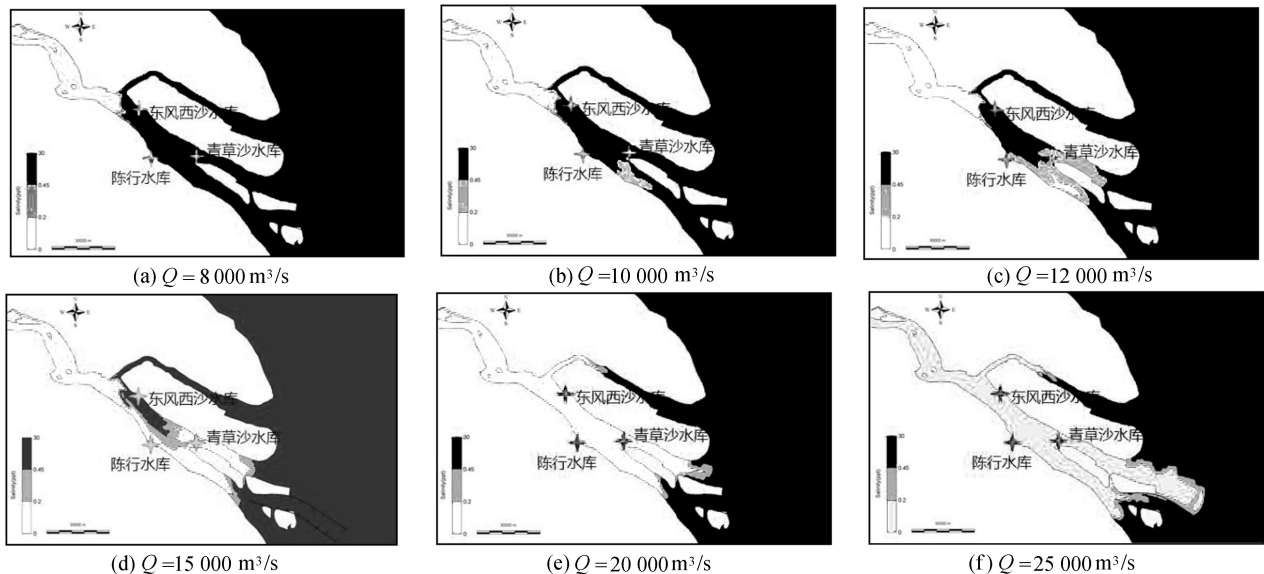


图3 不同径流条件下长江口淡水资源分布情况(大潮涨憩)

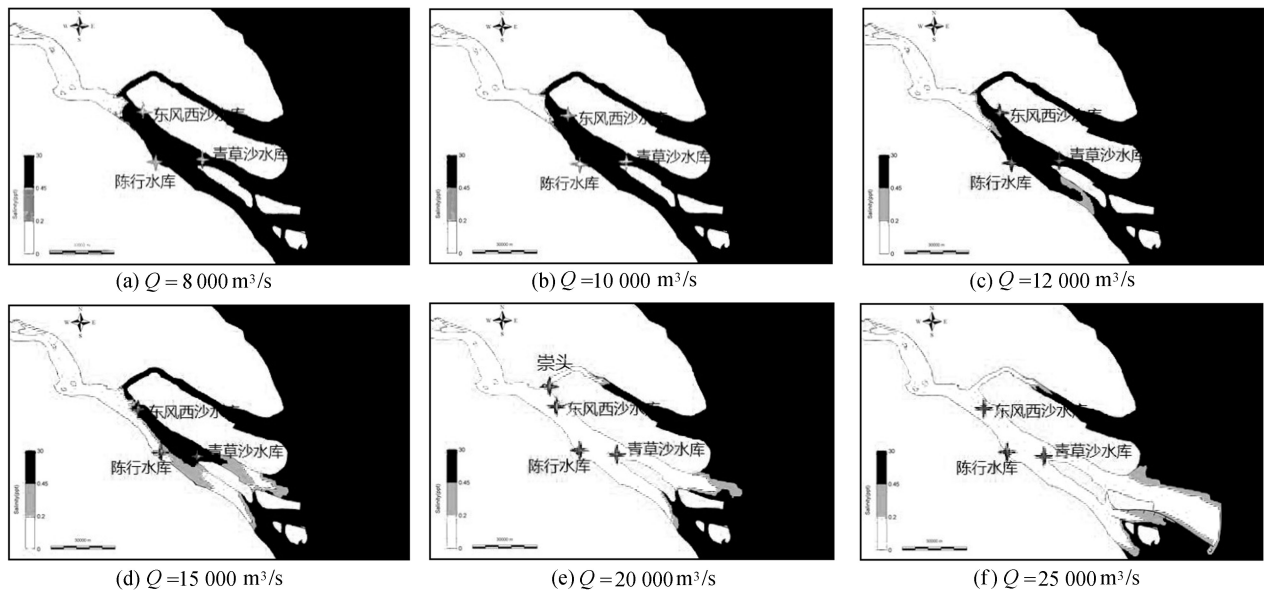


图4 不同径流条件下长江口淡水资源分布情况(小潮涨憩)

是青草沙水库上下游由于南支的正面入侵和北支倒灌的影响,盐度大于 $0.45‰$,均不符合取水标准。当径流量为 $20000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,南支仅有南港附近有少量盐水,青草沙水库附近区域含盐量均小于 $0.02‰$,不存在盐水入侵情况,可以保证水库正常取水。北支盐水仅上溯至青龙港下游,不会产生北支盐水倒灌威胁南支取水安全现象。随上游径流量进一步增加至 $25000\text{ m}^3/\text{s}$,南支全线均不存在盐水入侵。经分析有三点原因:①由于上游径流为淡水,所以当上游径流量增加时下泄淡水增多,降低了从下游向上游入侵的盐水浓度。②由于上游径流量增加,南北支分流比发生变化,北支分流比增加,上游部分淡水流向北支,减小了北支盐水的倒灌。③当上游径流量增加使得长江口落潮流流速增加而涨潮流流速减小,因此盐水上溯距离减小,减轻了盐水入

侵,保证了青草沙水库取水安全。

3.2 不同径流下青草沙水库取水口盐度分析

由于青草沙水库为近年新建水库,相关研究较少,所以本次重点研究青草沙水库取水口附近盐度特征。为探究青草沙水库取水口处水体盐度与径流的关系,比较不同径流下青草沙水库取水口附近测点的盐度曲线,结果如图5所示。不考虑模型自适应阶段,当上游径流为 $5000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,青草沙取水口含盐量明显高于其他情况且呈现先增高后降低的趋势,在2月12日达到峰值($1.8‰$)。当上游径流在 $8000\text{ m}^3/\text{s}$ 至 $15000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,取水口含盐量减小,呈现先增加后减小再增加的趋势,在2月7号达到峰值。当上游径流量达到 $20000\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $25000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,含盐量波动减小,均保持在 $0.2‰$ 以下。据此可以得出结论,随着上游径流量的增加,青草沙水库附

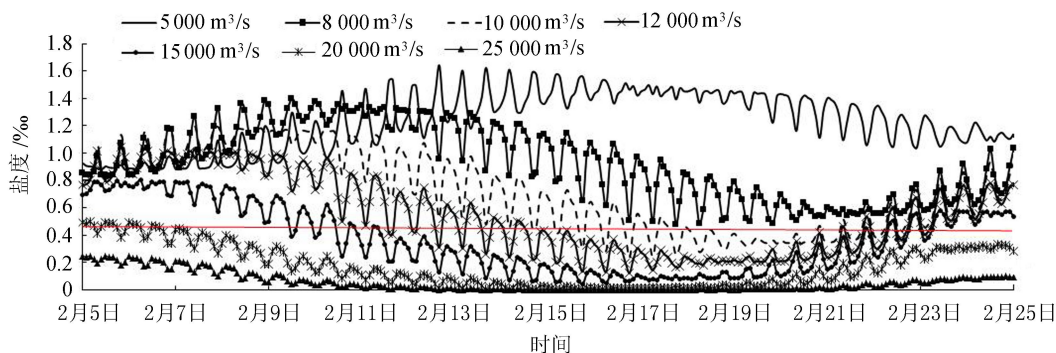


图5 不同径流下青草沙水库取水口盐度

近水体盐度整体呈现减小趋势。根据 GB3838—2002《地表水环境质量标准》,当水体中含盐量达到 0.45‰时,达到饮用水取水标准上限,在图 5 中用直线标出。由图 5 可以看出,当上游径流为 5000 m³/s 与 8000 m³/s 时,整个月份基本都不符合饮用水取水标准。随着上游径流量增加,水中含盐量达标时间随之增加,径流为 10000 m³/s 与 12000 m³/s 时,不考虑模型前期自适应阶段,水体含盐量约有一半时间符合饮用水取水标准,当径流超过 15000 m³/s,水体含盐量大部分时间符合饮用水取水标准。

3.3 外海潮汐变化对青草沙水库取水口盐度影响

潮汐是咸水入侵的动力,潮汐大,盐水入侵大,盐水上溯远。盐度的变化一般有涨落潮日变化、大小潮半月变化、年内季节变化、年际变化等。通常,盐度枯水年高于洪水年、枯季高于洪季、大潮高于小潮。在涨落潮过程中,盐度的变化与潮位变化一致,涨潮盐度升高,落潮盐度降低,最高和最低盐度通常出现在涨憩和落憩时刻前后。因此,通常在枯季大

潮期盐水入侵强烈,盐水往往倒灌进入南支,影响上海市及江苏省的水源地水质。

本次研究的重点为青草沙水库,两个典型径流量 10000 m³/s 与 25000 m³/s 下的取水口处水位盐度过程线如图 6。径流量为 25000 m³/s 时测点水位整体略高于径流量为 10000 m³/s 的情况,是由于上游下泄流量增大抬高了水位,但两种情况潮差基本保持一致。与水位变化趋势相似,测点盐度变化呈现日变化与半月变化趋势。盐度日变化过程线与潮位过程线完全相似,与潮位在一天有两高两低相对应,盐度在一天中也出现两高两低且具有明显的日不等现象。

长江口在半月中有一次大潮和一次小潮(月潮不等),日平均盐度在半月中也有一次高值和一次低值。上游径流量较小(10000 m³/s)时,平均盐度过程线在两个潮周期内与水位关系明显,盐度最大值(2.5‰)出现在小潮期间,盐度最小值出现在大潮期间。盐度过程线日不等现象明显,随水位的变

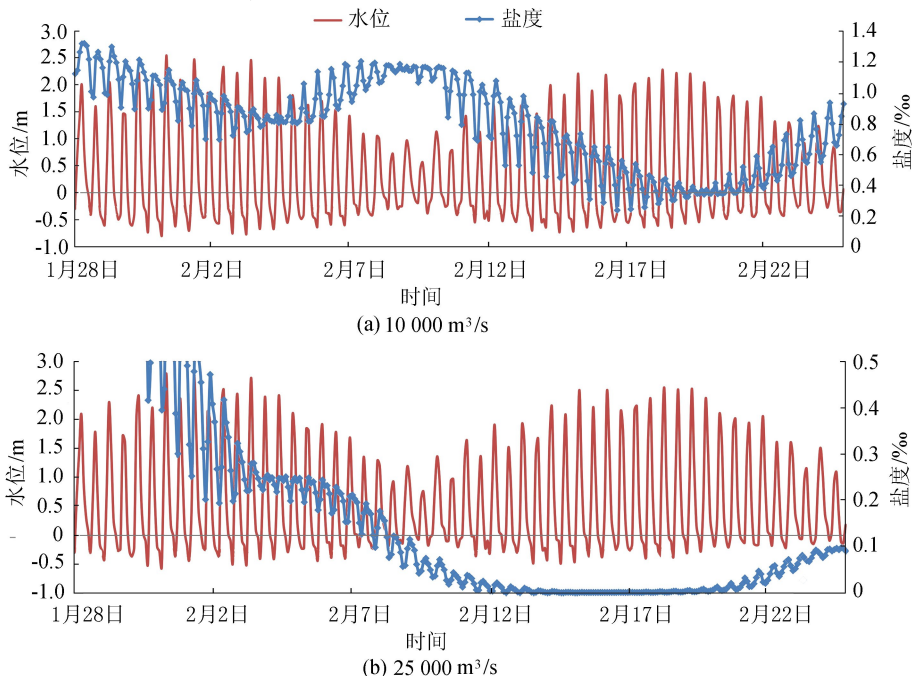


图6 青草沙取水口水位盐度过程线

化而变化,每天呈现出两涨两落现象。当径流量增加至 25 000 m³/s 时,不考虑模型自适应阶段,在小潮期间盐度略有所上升,大潮期间盐度几乎为 0。

青草沙水库取水口盐度与潮差关系如图 7 所示。青草沙水库取水口处潮差变化范围在 1.4 ~ 3.0 m 之间,分别对应小潮与大潮的潮差。对于相同的潮差条件下,径流越大,水体含盐度越高。在同一径流条件下,青草沙水库取水口盐度与潮差关系明显,径流量 5 000 m³/s 条件下,潮差越大水体含盐度越大。其他径流条件下,潮差越大水体含盐度越低。青草沙水库区域盐水主要来自北支的倒灌,而北支盐水倒灌至青草沙水库附近时需要经历一段时间。当青草沙水库附近潮差较小时,由北支倒灌而来的盐水受潮差较大的大潮影响,潮差增加代表潮汐动力增加,导致北支盐水倒灌现象加剧,所以一般情况下青草沙水库潮差较小时盐度较高。而当青草沙水库附近潮差较大时,倒灌的盐水受小潮动力支配,潮动力较弱,因此由北支倒灌进南支的盐水较少,一般情况下青草沙水库潮差较大时盐度较低,形成“大潮低盐,小潮高盐”的现象。而对于径流量 5 000 m³/s 情况下,由于上游径流作用较弱,除北支倒灌的盐水,南支盐水的正面入侵对于青草沙水库水体含盐度影响很大,而来自南支的盐水上溯速度较快,大潮差的情况下盐水直接由南支正面入侵,导致含盐度升高,因此,在径流量为 5 000 m³/s 情况下,潮差与水体盐度成正相关。

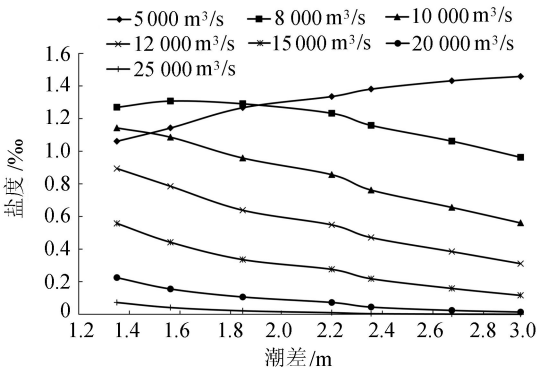


图 7 青草沙取水口盐度与潮差关系

4 结 论

基于 Delft 3D 软件建立了长江河口平面二维水流和盐度数学模型,模型较好地模拟了长江河口的流场特征,反映了盐水入侵的运移特性及青草沙水库取水口盐度特征。径流和潮流的相互消长导致了盐水入侵强度和入侵距离的多变性。上游径流量对盐水入侵有明显的制约作用。随着上游径流量的增加,盐水入侵范围显著改变,青草沙水库取水盐度达

标时间增加。在不同潮流作用下,长江口淡水资源分布呈现不同特征。涨潮时,大潮期间南支淡水资源分布范围较广,而小潮时淡水资源分布范围较小,落潮时相反。对于青草沙水库而言,在径流大于等于 8 000 m³/s 时,潮差越大水体含盐度越低,形成“大潮低盐,小潮高盐”的现象。

参考文献:

[1] 顾玉亮,吴守培,乐勤. 北支盐水入侵对长江口水源地影响研究[J]. 人民长江, 2003, 34(4):1-3.
[2] 李茂学,刘小梅,付新永,等. 青草沙水库取水泵闸规模论证[J]. 给水排水,2009(2):50-54.
[3] 朱建荣,顾玉亮,吴辉. 长江河口青草沙水库最长连续不宜取水天数[J]. 海洋与湖沼,2013,44(5):1138-1145.
[4] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源地盐水入侵规律及其应对措施[J]. 水资源保护, 2014,30(3):19-24.
[5] 茅志昌,沈焕庭,肖成猷. 长江口北支盐水倒灌南支对青草沙水源地的影响[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1):58-66.
[6] 肖成猷,朱建荣. 长江口北支盐水倒灌的数值模型研究[J]. 海洋学报, 2000, 22(5):124-132.
[7] 马钢峰,刘曙光,戚定满. 长江口盐水入侵数值模型研究[J]. 水动力学研究与进展:A 辑, 2006, 21(1):53-61.
[8] 李提来,李谊纯,高祥宇,等. 长江口整治工程对盐水入侵影响研究[J]. 海洋工程, 2005, 23(3):31-38.
[9] 陶建峰,齐华萍,曹利利,等. 长江入海径流变化对长江口盐水入侵影响分析[J]. 中国科技论文,2014,9(11):1233-1236.

(收稿日期:2016-12-20 编辑:徐 娟)

