

基于 FVCOM 的鹤地水库环流特性模拟研究^{*}

赵庄明, 杨 静, 綦世斌

(环境保护部华南环境科学研究所, 广东广州 510630)

摘 要: 采用 FVCOM 模型, 考虑径流与风的影响, 模拟鹤地水库 2013 年 1 月至 2014 年 3 月的环流。模拟结果与 2014 年 3 月实测流速值符合良好。对比 2013 年纯径流、不同定常主导风以及 2013 年实际径流与风场作用下的环流, 结果显示: ① 不同主导风作用呈现出不同环流结构。在 NNE 风持续作用下, 库区呈现出多个较大的逆时针环流, 西岸流普遍比东岸流强; 而在 S、SSE 风下, 则出现多个逆时针与顺时针环流交替, 且东岸流普遍比西岸流强; ② 在冬半年, 径流弱而风力较大情况下, 风成为水平、垂向环流作用主导因素; 而夏半年, 径流较强劲, 此时风向多与径流流向相反, 水库水平、垂向环流则主要受径流控制; ③ 库区全年平均主要以逆时针环流为主, 并形成较强沿岸流, 西岸流比东岸流更强。

关键词: 风生环流; FVCOM; 径流; 鹤地水库; 河道型水库

中图分类号: TV139.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)06-0144-12

Circulations in the Hedi Reservoir Based on FVCOM

ZHAO Zhuangming, YANG Jing, QI Shibin

(South China Institute of Environmental Sciences, the Ministry of Environmental Protection of PRC, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Considering the influents of both runoff and winds, Circulations in the Hedi reservoir from January 2013 to March 2014 were simulated using FVCOM. Simulated results agree well with the observations during March 2014. Comparisons among the circulations caused by runoff, different dominant winds and both runoff and winds during 2013 showed that: ① The structure of the circulations changed with the dominant winds. Under the NNE wind, several anti-clockwise circulations were observed, and the west coast flow was stronger than the east coast, while under the S or SSE wind, clockwise and anti-clockwise circulations were found at the same time, and the east coastal currents were stronger than the west. ② During the winter half year, when runoff was weak while winds were stronger, the winds controlled the horizontal and vertical circulations; During the summer half year, when runoff was stronger with reverse winds, the runoff controlled the circulations. ③ The main circulations were anti-clockwise for the whole reservoir in the annually average level, and the coastal currents were strong, especially, the west coast currents.

Key words: wind driven circulation; FVCOM; runoff; Hedi Reservoir; river-type reservoir

水库水动力过程直接影响其化学、生物和生态动力系统过程。其水平和垂向的输移和混合过程影响营养盐^[1]、污染物^[2]和动植物^[3-4]的分布。水库动力因素主要包括风应力、入库出库径流、密度

不均造成的重力流以及科里奥利力等, 其中风应力包括风对湖面的摩擦剪应力和风对波浪背面的压力等, 是湖泊、水库中较为重要的动力因素^[5-6]。湖库等较为封闭的水域中, 在风应力作用下常常会形

* 收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 国家环保公益性行业科研专项基金资助项目(201309042)

作者简介: 赵庄明(1986年生), 男; 研究方向: 水环境数值模拟; 通讯作者: 杨静; E-mail: yangjing@scies.org

成水平、垂向上的系统性环流，即风生环流。而水库由于受人工调节等作用，其入库、出库径流引起的环流也需同时考虑。

迄今为止，国内外对湖库环流等方面已进行了深入研究。国内较早就有学者采用二维差分模式模拟了太湖定常风流场^[7]；也有学者采用二维有限元模型对玄武湖风生流进行数值模拟^[8]。这些浅水二维模式应用广泛，却无法反映流场垂向结构。近年来越来越多学者采用三维模式研究实际湖库的水动力特征。如梁瑞驹等^[9]采用基于 Sigma 坐标的三维模型模拟太湖风生流水平和垂向分布；胡维平等^[10]则采用三维模型模拟了典型风场下的湖流，并指出整层平均流场与各层流场之间存在很大差异，在研究诸如藻类、泥沙垂直分布明显的物质输移与分布时，二维模型过于粗略，最好选用垂直方向至少三层数值模型。张发兵^[11]利用三维水动力模式对定常风下典型湖底地形风生流场进行数值模拟，发现在风场等外部条件相同下，湖底地形将决定湖泊风生流场的基本形态和环流流速。Boris 等^[12]则建立了 SPEM 模型模拟了康斯坦茨湖 Marinau 岛周围风生流；Musteyde 等^[13]基于 Stokes 方程建立了一个三维风生湖流数学模型模拟英国 Esthwaite Water 湖计算。在径流方面，孙杨等^[14]采用三维水动力模型模拟了一次暴雨下大伙房水库径流产生的环流过程。近年来，越来越多的研究开始采用 FVCOM、ECOM、Delft 3D 等模式进行湖库环流计算。

鹤地水库作为广东省 5 个大型饮用水源地之一，其遭受来自上游九洲江及周边污染越来越严重，然而目前对鹤地水库水动力研究相对缺乏。现有的文献仅是从水库防洪调度^[15]和流量变化^[16-18]方面进行宏观研究，对于库区的环流变化时空分布特征等研究很少。如何分离各种动力因素对库流特征的影响，是采用实测手段难以解决的课题，因此采用成熟的数值模型模拟以揭示水库水动力物理规律的方法是重要的研究手段。

本文采用三维非结构 FVCOM 模型，同时考虑径流与风的影响，模拟鹤地水库 2013 年 1 月至 2014 年 3 月的环流特征。通过对鹤地水库在纯径流作用下、主导风作用下的环流分析和 2013 年的真实环流模拟，对比库区不同季节下的环流特性和环流的空间分布，揭示和描绘鹤地水库环流的时空分布特征以及主导因素，为将来鹤地水库的营养盐输运过程和生态动力学研究提供基础。

1 研究区域

鹤地水库位于广东、广西跨省河流九洲江的中

游，地处北回归线以南，介于东经 109°54′ - 110°25′，北纬 21°42′ - 22°22′ 之间，研究区域见图 1。水库建于 1958 年，1960 年运行，大坝位于广东省湛江市廉江河唇镇，库区北起文官，南至渠首，横跨广西陆川、博白和广东廉江、化洲四县市，是以防洪、灌溉为主，兼具生活饮用、发电、航运、观光旅游等功能为主的国家级大（I）型水库，是广东省 5 个大型饮用水源地之一，担负着粤西 10 多万 hm^2 耕地的灌溉和几十万人的生活供水^[19]。鹤地水库属于河道型水库，库区最宽可达 4.9 km；水库最大水深 28 m，平均水深 10.1 m，其水文特征如表 1 所示。鹤地水库正常高水位为 39.3 m，洪峰来时超过该水位必须向九洲江下游开闸放水。其多年平均入库径流量为 14.8 亿 m^3 ^[19]，其中上游九洲江入库径流量达 9.28 亿 m^3 。根据建库 40 a 来湛江水文局鹤地水文站的观测统计资料显示，排入下游九洲江年均水量仅为 3.02 亿 m^3 ，而约 10.70 亿 m^3 水量则排入雷州青年运河用于灌溉、供水^[20]。可见鹤地水库对于下游的重要性不言而喻。然而，由于九洲江上游及库区周边大量农业养殖、生活废水的排入，同时鹤地水库流速缓、自净能力差，致使近年来富营养化程度持续加重，已严重威胁到下游城市的生活供水。

表 1 鹤地水库水文特征

Table 1 Hydrological features of Hedi Reserava

项 目	特征值	
水库集雨面积	1 495	
水面面积/ km^2	设计洪水位对应面积	131
	正常高水位对应面积	97
	死水位对应面积	56
珠江基面水位变化/m	设计洪水位	41.91
	正常高水位	39.3
	死水位	34.00
库容/(亿 m^3)	设计洪水位对应库容	11.28
	正常高水位对应库容	7.48
	死水位对应库容	3.4

2 方法和数据

2.1 物理模型

鹤地水库库区四周为丘陵地，库中岛屿星罗棋布，岸线迂回曲折，形成了众多的库湾和库叉；库尾从石角至文车段为相对较狭窄的河道。研究区域特点是地形复杂，包括宽阔的库区与狭窄的河道段，对于库区，可以采用低分辨率网格，而对于河道段，则必须采用高分辨率网格。

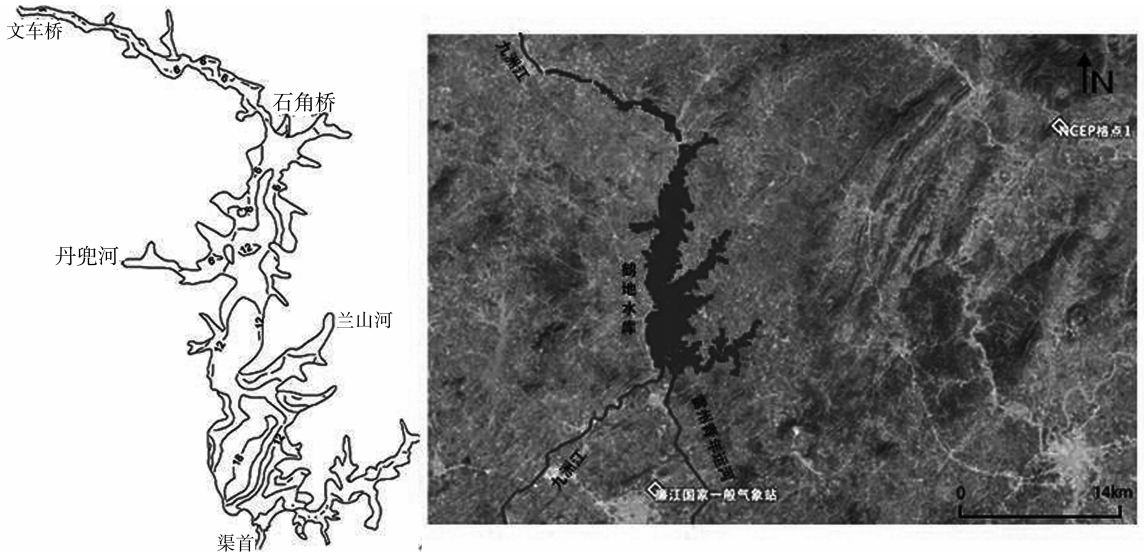


图 1 鹤地水库地形图

Fig. 1 The topography of Hedi Reservoir

本文采用目前应用广泛的三维 FVCOM 模型模拟鹤地水库水动力过程。该模型是由 Chen 等^[23]发展起来的基于无结构网格的有限体积三维原始方程海洋模式。其优点是能够灵活处理空间分辨率及拟合不规则岸线、岛屿；而垂向上采用 σ 坐标系统则能够拟合起伏地形变化。 σ 坐标变换在陡坡地形上容易引起虚假的斜压误差流动，但是这种误差可以通过将水平和垂直网格大小限制在一定分辨率下而达到计算所需精度^[24-27]。FVCOM 在垂向上和水平上分别采用 Mellor 和 Yamada 2.5 阶紊流模型 (MY-2.5)^[28-30] 和 Smagorinsky 紊流模型^[31]。FVCOM 采用内外模分裂技术进行数值求解。目前 FVCOM 已经成功用于胶州湾、渤海、长江口等地方的生态过程研究^[32]。FVCOM 在湖泊水库方面也得到了广泛应用^[5, 33-34]。

为了尽量减小水库回水影响，将模型上游边界定在距离石角桥 14.5 km 的文车桥处。模式计算区域包括鹤地水库文车桥至渠首段，模型的水深资料由鹤地水库库区地形测量图 (图 1 石角 F-49-77- β - α 、东村 F-49-77- β - α 、矛峡村 F-49-77- τ - α 、竹仔山 F-49-77- Γ - δ 、莲塘 F-49-77- Γ - β 、龙潭 F-49-77- Γ - τ) 获得，同时，为了准确了解鹤地水库地形的变化，于 2014 年 3 月对文车桥至鹤地水库的地形进行部分测量，以校核水深资料数据。

模式共划分 6 297 个三角形单元和 3 721 个节点，文车桥至石角桥段采用细网格，最小网格边长 160 m，石角桥以下的库区段采用粗网格，最大网格边长 300 m。垂向均匀划分 10 层网格。库底拖

曳系数取 0.002 5。水平涡粘系数取 $2.0 \text{ m}^2/\text{s}$ ，垂向采用 MY-2.5 紊流模型闭合。最小水深设置为 0.05 m，根据 CFL 条件及模型调试确定时间步长外模取 0.5 s，内模取 10 s。模拟时段从 2013 年 1 月 1 日 0:00-2014 年 3 月 31 日 0:00。由于模型计算量大，所有模拟均提交到高性能并行计算机上进行。

2.2 模型输入数据

2.2.1 水库流量

由于各入库河流的径流量受气候变化影响而导致年度和年内变化差异较大，加之下游水体人工调节等因素，导致库容和水位在年际与年内之间差异明显^[20]。为了了解鹤地水库水量平衡关系，本文收集了 1980-2013 年上游文官站每月来水量与下游青年运河每月输水量 (资料由湛江市雷州青年运河管理局提供)。2013 年及历年月平均鹤地水库上游来水与下游输水量如图 2 所示，由图可见，来水受降雨影响年内各月份分布不均，多集中于 5-9 月，而输水量集中于 3-10 月份；2013 年与历年月平均对比可见，来水高峰差异较大，而输水差异不明显。渠首站同时记录有逐时水位值，该水位资料由广东省水利厅汛情发布系统获得 (<http://www.gdwater.gov.cn:9001/Report/WaterReport.aspx>)。

本次模拟上游入流边界采用月均实测流量值、下游出流边界包括雷州青年运河大坝及排往九洲江的大坝，由于两者相距不远，均采用渠首的实测水位值，初始水位设置为 2013 年 1 月 1 日 1 时相应的水位值。

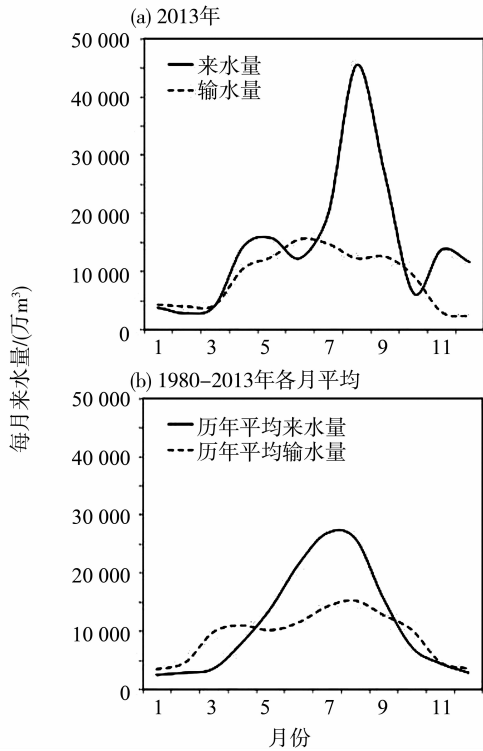


图 2 鹤地水库上游来水及下游（青年运河）输水量
 Fig. 2 The rate of inflow upstream and outflow downstream (the youth river) at Hedi Reservoir

2.2.2 风场 鹤地水库地处北回归线以南低纬地区，紧靠热带海岸，属南亚热带季风气候，夏半年（4-9月）受湿热夏季风影响，盛行偏南风，冬半年（10月-次年3月）受干冷冬季风影响，则多吹偏北风，历年平均风速 2.75 m/s。准确的风场

对于研究鹤地水库环流至关重要。本文风场数据采用 NCEP 每隔 6 h 的再分析资料。距离鹤地水库中心最近的 NCEP 格点（约 34 km）和廉江气象站（约 17 km）位置如图 1 所示，为了验证该格点风场数据，将该格点风场与廉江气象站 2011 年的小时平均风场作对比（本文风向以 N 向作为 0° 顺时针增加），部分结果如图 3 所示，NCEP 格点的风速与风向均与监测站实测值吻合良好。证明该 NCEP 格点风场能够代表鹤地水库附近的风场变化。

模型使用风场数据时长为 2013 年 1 月 1 日至 2014 年 3 月 31 日，见图 4。为了得到较为接近现实的初始水动力场，模型在较小风速下预先模拟 1 年时间，得到的流场结果作为初始场代入模型，再按实际风速模拟。

2.3 模型验证

为了验证模型，于 2014 年 3 月 3-6 日对各主要入库河流（九洲江、丹兜河、兰山河）流量进行实测，测量结果见表 2。模型验证时，各入库河流取相应的实测流量值，下游边界取相应的水位实测值。

于 2014 年 3 月 3-7 日通过快艇并采用 River-Surveyor M9 声学多谱勒水流剖面仪（以下简称 M9）对鹤地水库若干点（A1-A9）的流速进行现场实测，对每个测点进行定点监测，等待船停稳后将 M9 固定在船上，并通过连接电脑实时得到水深平均流速数据时间序列。由于水库流速小，为了尽量减少发动机扰动造成的影响，监测期间船只关闭

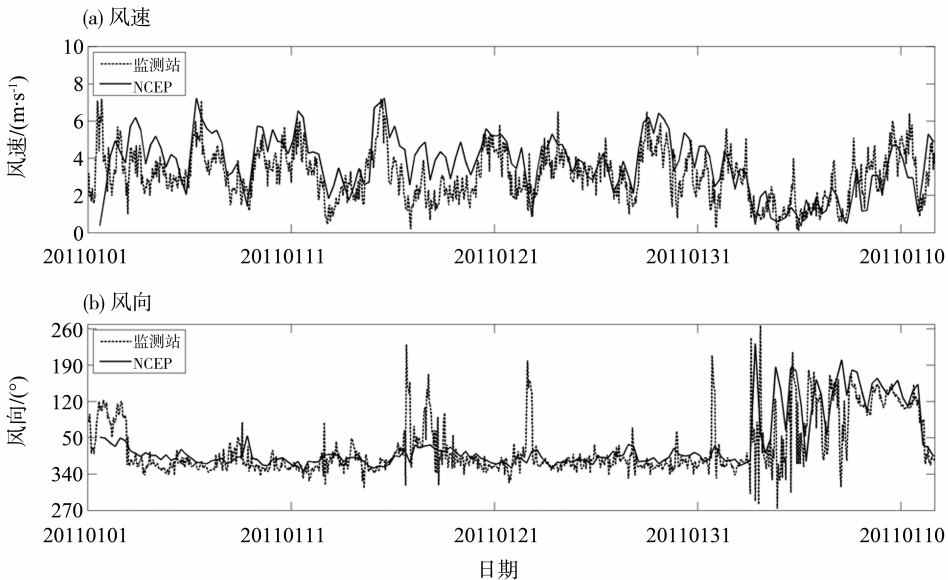


图 3 NCEP 格点与 20110101 - 20110211 廉江气象站风速、风向对比

Fig. 3 Comparison of the winds obtained by NCEP and Lianjiang meteorological station during Jan. 1st to Feb. 11st, 2011

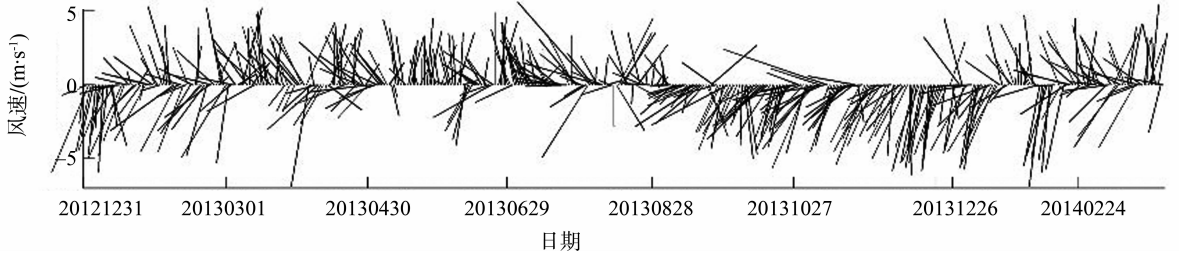


图 4 20130101 – 20140331 期间鹤地水库附近风速变化

Fig. 4 The change of wind velocities near Hedi Reserva from Jan. 1st, 2013 to Mar. 31st, 2014

表 2 主要入库河流实测流量

Table 2 The measured flow rate of main inflow rivers

断面	时间	地点	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)
Q1	20140303	九洲江(文车桥)	13.1
Q2	20140306	丹兜河	0.1
Q3	20140306	兰山河	1.0

发动机, 观测路线依次从渠首至石角桥进行监测, 每天走航一次, 共测 5 次。将各点水深平均流速的时间序列进行平均, 得到各点位的垂向剖面平均流速流向如图 5 (a) 所示。

根据 NCEP 再分析资料显示, 3 月 3 – 7 号水面以上 10 m 风速在 1.3 ~ 3.9 m/s 之间, 主要受 NNE 风作用, 而各个入库河流正处于枯水期, 流量影响不大 (见表 2), 水库处于高水位, 介于 40.23 ~ 40.27 m 之间, 因此风的作用影响显著。如图 5 (b) 所示, 本次模拟结果基本能够反映各

个实测点位的流场趋势。图 6 显示, 总体上除 A9 点的流向有所偏离外, 其它各个测点模拟的流向与实测值符合良好, 但观测发现模拟结果的流速普遍比实测值小, 最大误差为 A1 号点表层, 绝对误差为 0.038 m/s, 相对误差为 76%, 这可能是实测时受瞬时风浪的干扰, 导致流速值偏大, 这在其它的湖泊中也出现相似情况^[5, 35]。但总体上流速基本处于同一数量级水平, 模拟结果与实测值相符良好。

3 结果分析

3.1 径流对环流影响

根据鹤地水库地形特征将其分为河道段 (文车桥至石角桥)、过渡段 (石角桥至兰山河口) 和库区段 (兰山河口至渠首)。为了解入库、出库径流对于库区环流的作用, 首先剔除风的影响, 只考虑入库出库径流, 得到 4 个季度平均水平环流如图 7 所示。由图可见, 各个季度环流较为相似, 主要

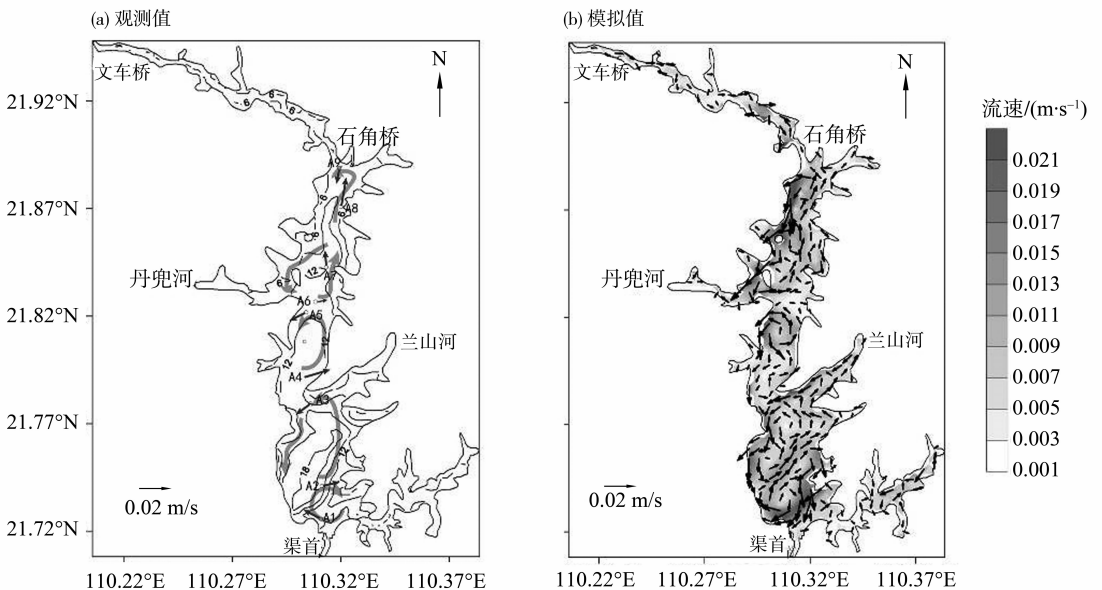


图 5 2014 年 3 月 3 – 7 日鹤地水库水深平均流速观测值与模拟值比较

Fig. 5 Comparison of depth averaged current between observation data and simulations during March 3 – 7, 2014

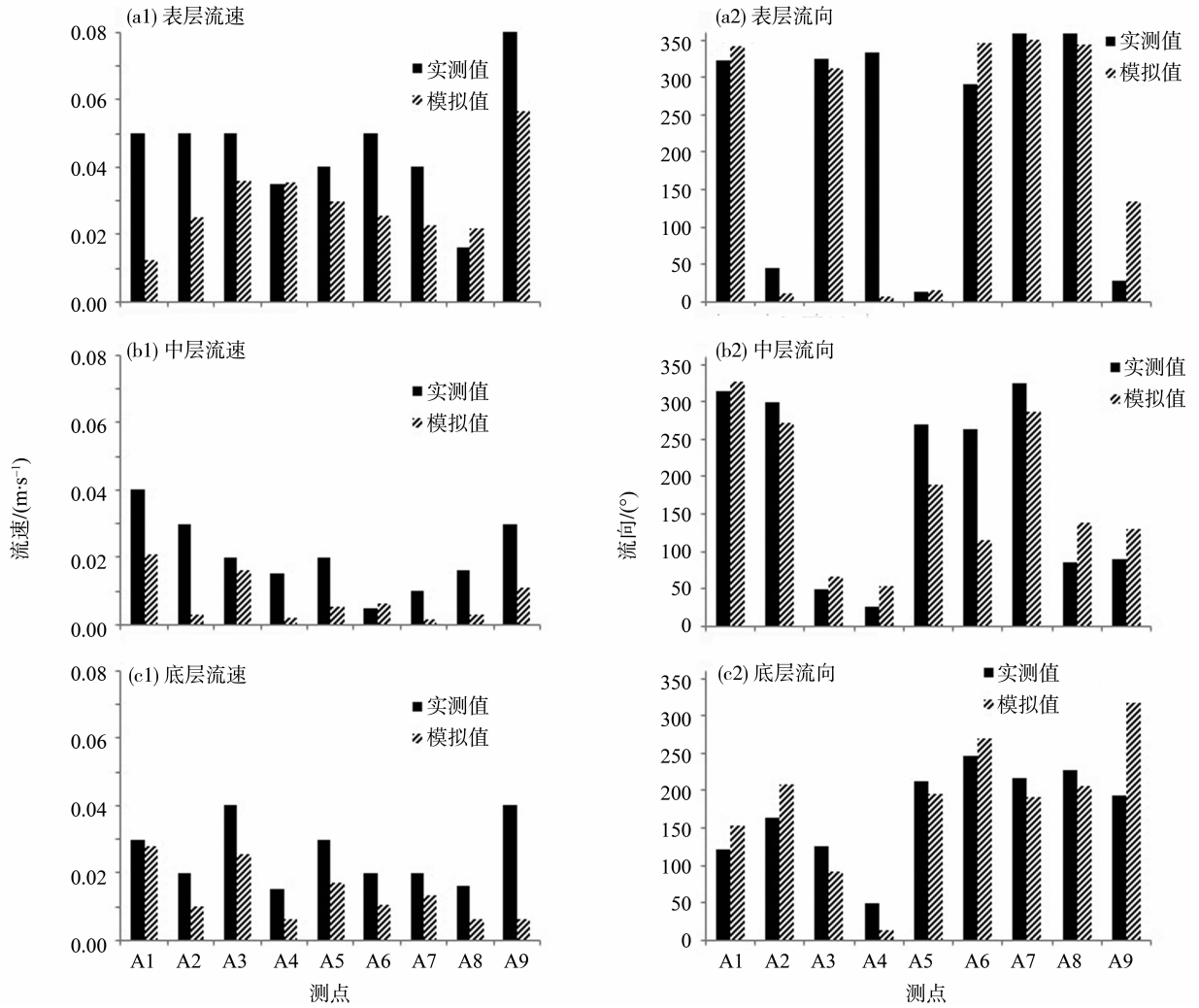


图 6 各个测点各层流速与流向实测值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison between measured data and simulated results of flow velocities and directions at different layers and observation points

以兰山河口至渠首的双环流为主，并且丰水期流速大，双环流增强。其它地方环流较弱，以逆时针环流为主。

为观测枯水期与丰水期垂向环流特征，选择来水差异明显的第一、三季度（每月来水量分别为：3 602.3 万 m³ 和 30 703.0 万 m³），渠首至石角水库轴线（见图 7）的垂向剖面进行对比分析，结果如图 8 所示，枯水期与丰水期均为水库表层由石角向渠首流，而中层、底层流则相反。枯水期这种回流在剖面沿线 17.5 km 后较明显（流速大于 0.01 m/s），而丰水期在 8.0 km 后就已经较大，因此，随着丰水期上游九洲江来水量增大，水库的垂向环流也有所增强。在丰水期可明显看出库区的三大垂向环流区：即石角至丹兜河口、丹兜河口至兰山河口、兰山河口至渠首，这三大垂向环流随着水深增

加、库区变宽而逐渐减弱。

3.2 不同风场对环流影响

根据 NCEP 统计得到鹤地水库近 10 a 的风向玫瑰图如图 9 所示，4 个季度的主导风向依次为 NNE、S、S 和 NNE，对应的平均风速依次为 4.13, 2.82, 2.00 和 3.67 m/s。全年主导风向为 NNE、NE 和 S，对应平均风速分别为 3.6, 2.74 和 2.66 m/s。从图中可见 10 - 12 月份风向较为稳定，几乎都为偏北风，加之径流量对库区环流影响相对较小，因此该段时间是研究风生环流的最佳时期。2013 年 4 个季度的主导风与近 10 a 平均相似，只是秋季由 S 风变为 SSE 风，对应平均风速依次为 4.09, 2.78, 2.39 和 3.45 m/s。

对近 10 a 风场与 2013 年的统计分析可知，冬半年主导风为 NNE 风，夏半年主导风为 S 风。此

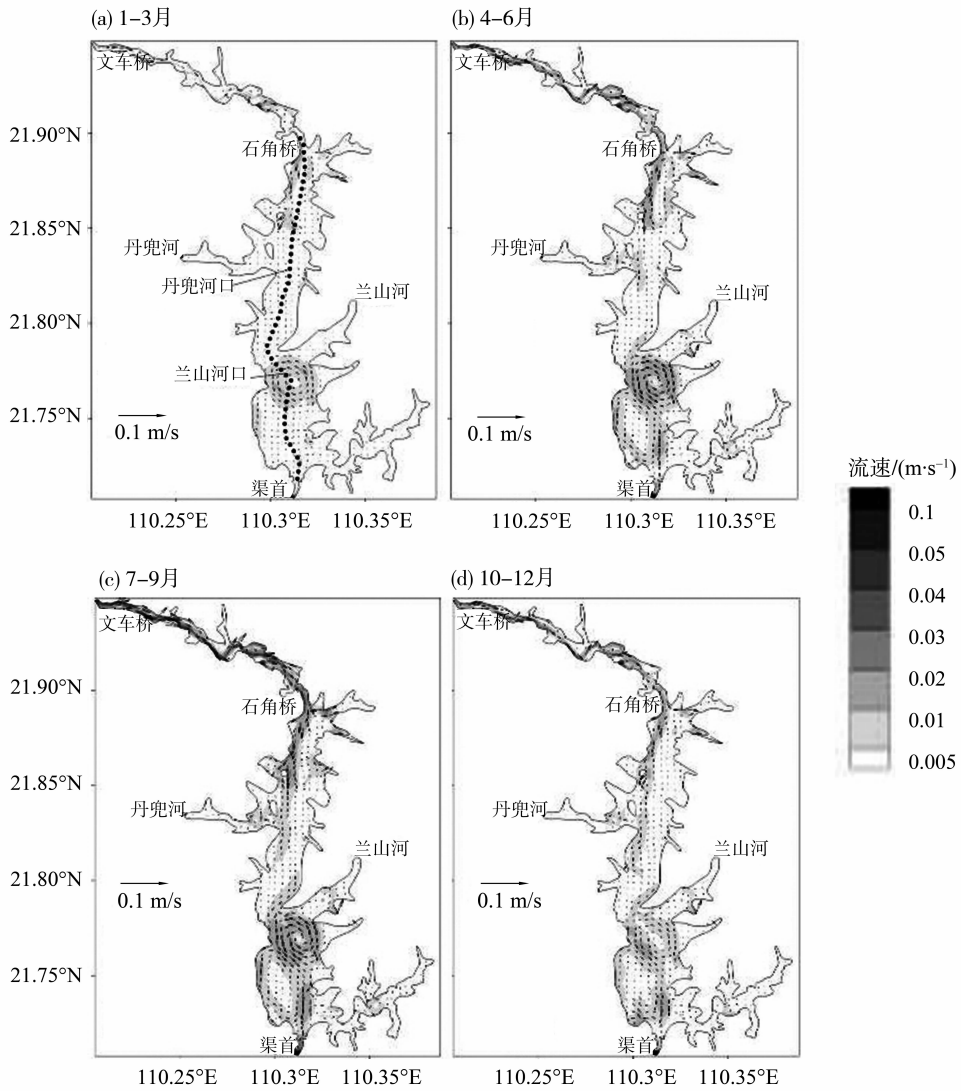


图 7 2013 年纯径流下各季度模拟流场: 实心点为垂向剖面线

Fig. 7 The simulated streamtraces with pure runoff effect in 2013; filled circles are vertical profile

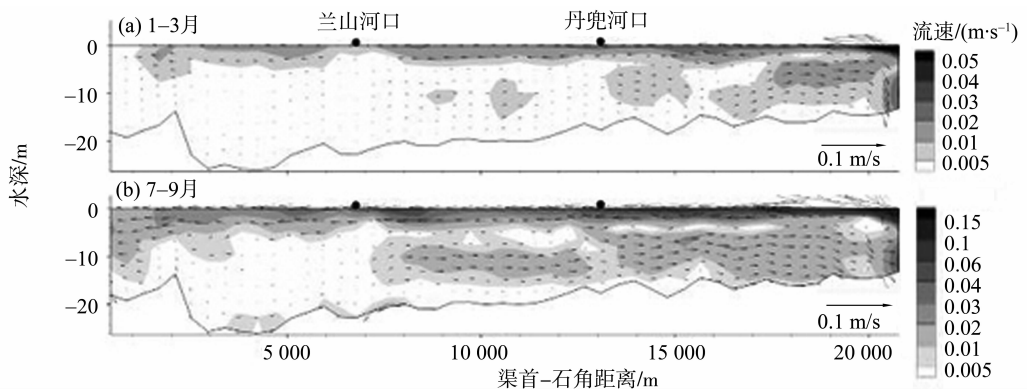


图 8 2013 年纯径流下渠首至石角中轴线垂向剖面流速分布

Fig. 8 The streamtraces of the vertical profile of central axis from Qushou to Shijiao with pure runoff effect in 2013

处剔除径流影响, 模拟这两种主导风作用下的环流, 风速取 2013 年对应的统计值 (4.09 和 2.78 m/s)。另外也模拟 SSE 风下的环流, 风速值根据

2013 年统计结果取 2.39 m/s。

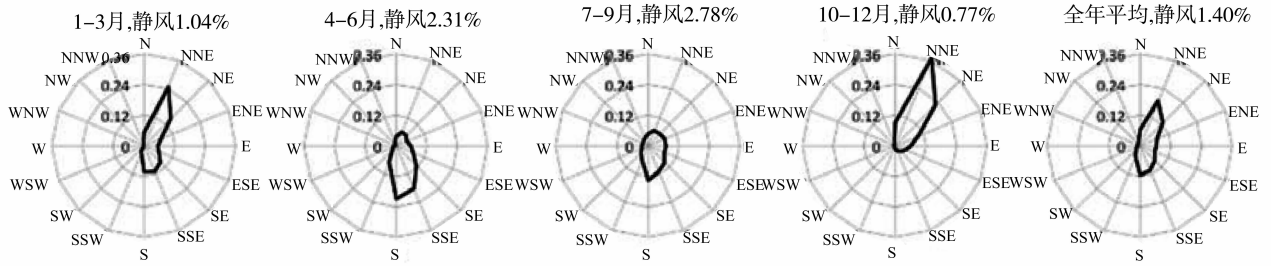
模拟结果显示: ① NNE 风作用下的水平环流结构主要以逆时针环流为主 (如图 10)。主要环流

有石角至丹兜河口的逆时针环流，丹兜至兰山河口的逆时针环流以及库区段的双环流结构，该双环流包含了靠近渠首的一个较小的顺时针环流。西岸流普遍强于东岸流，整个库区最大流速达到 4.6 cm/s 。② S、SSE 风作用下的环流相似，环流结构复杂，顺时针与逆时针环流交替出现，如石角至丹兜河口依次出现顺时针、逆时针、顺时针、逆时针环流。同时也可以发现库区段双环流呈左右排列，且东岸流普遍比西岸流大，S 风下最大流速达到 3.1 cm/s 。值得注意的是，近似椭圆形结构的库区受地形

和风向的影响，均出现双环流结构：在库区较浅的沿岸，流向与风向相同，而在库区中央则形成了与风向相反的补偿流。

垂向剖面流场如图 11 所示，在持续定常风作用下，除较薄的水表层，水面下形成较大规模的与风向相反的回流。这与径流作用下的环流有所不同：径流作用下容易形成强劲的表层流，而回流相对较弱；而定常风作用下表层流则较弱，回流较强，这种现象在库区段最为突出，原因是该段水面较宽，增加了风的受力面。

(a) 近 10 a 平均风向玫瑰图



(b) 近 10 a 近平均风速玫瑰图

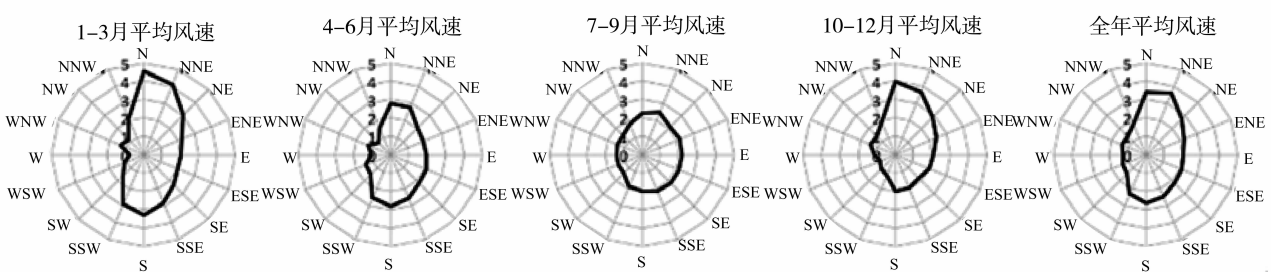


图 9 鹤地水库附近近 10 a 平均风向及风速玫瑰图

Fig. 9 The rose diagrams of 10 years' average wind directions and wind velocities near Hedi Reservoir

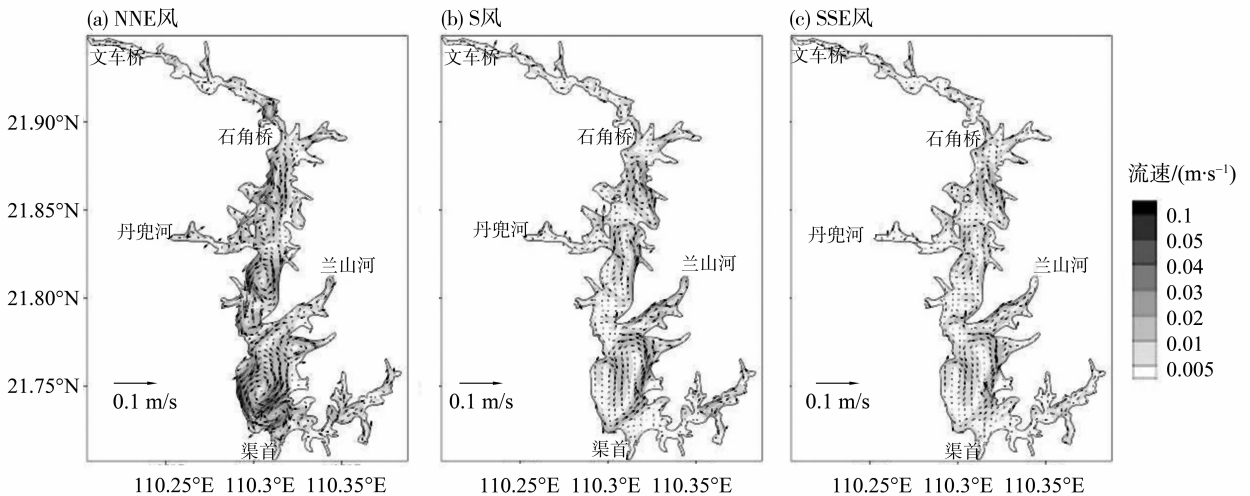


图 10 不同风场下的环流

Fig. 10 Circulations with different winds

3.3 2013 年环流

3.3.1 环流季节特性 图 12 显示 2013 年各季度平均水平环流。夏半年 (4-9 月) 由于径流为自北往南, 而两个季度的平均风向为 ESE 和 SE 风, 因此这两种作用力存在一定程度的相互抵消。从平均结果上看, 鹤地水库主要为逆时针环流, 且西岸流普遍强于东岸流。与纯径流作用相比, 一方面是库区段的逆时针水平环流强度被削弱, 但另一方面由于风的存在, 较强的环流结构明显增加 (如 4-6 月份), 但是随着径流作用与风作用差距变大, 环流结构分布逐渐趋向于纯径流下的环流, 如 7-9 月份, 其环流结构几乎与纯径流一致。而冬半年的 1-3 月份径流作用不强, 风场多变, 风速不大, 因此平均环流较弱, 但是与纯径流相比, 整个水库的环流明显得到增强; 对于 10-12 月份, 此时的径流虽没有夏半年强, 然而却呈现出多个流速较大的环流, 这是由于此时平均风向为 NNE, 风向稳定且与径流方向大概相同, 平均风速大, 达到了 3.36 m/s, 因此这一阶段的风生环流是全年最为强劲的时候, 风生环流的涡旋结构明显增加, 且逆时针环流强, 顺时针环流弱。

如图 13 所示为纯径流与加上风场作用 B1 点 (位置见图 12) 各层的流速时间序列对比, 从图中可见风场增强了各层特别是表层的流速紊动, 特别是在 10-12 月份, 由于持续强偏北风作用, B1 点流速整体比纯径流下强。从垂向剖面看 (见图 14), 1-3 月份垂向环流比纯径流作用时增强, 在

弱径流作用下, 风对于垂向环流至关重要; 而夏半年垂向环流与纯径流作用相比差异不明显, 这是由于在强径流作用下, 较小的风对于垂向环流作用并不明显。

总体上, 在冬半年, 径流弱而风力较大情况下, 风成为水平、垂向环流作用的主导因素, 特别是在风速较大、风向稳定且与流向相同情况下环流更为明显; 而夏半年, 径流较强劲, 此时风向多与径流流向相反, 水库水平、垂向环流则主要受径流控制, 只在库区段出现较强水平环流。

3.3.2 环流空间分布 鹤地水库 2013 年全年平均水平环流如图 15 所示。以下主要分析鹤地水库过渡段和库区段的环流结构。过渡段主要环流是石角至丹兜河口形成的逆时针环流。最大水深平均沿岸流出现在石角以下约 2.3 km 西岸处, 达到 2.4 cm/s。总体来说, 较浅的沿岸流比库中央深水区的流速要大, 且西岸流普遍比东岸流流速大。由于环流作用, 东岸往往容易富集营养盐, 并提供有利于藻类生长的缓流环境。黎红秋等^[3]的观测结果显示浮游植物细胞密度在高朗 (东岸) 一带接近甚至超过营养盐最高的石角, 这证明了过渡段的东岸可能出现富营养化几率会更高。另外, 在丹兜河与兰山河口段也出现逆时针环流和一个较弱的顺时针环流, 流速相对偏缓, 这导致悬浮物易于在此沉积, 张华骏等^[1]对于沉积物营养盐的观测证明了该观点。

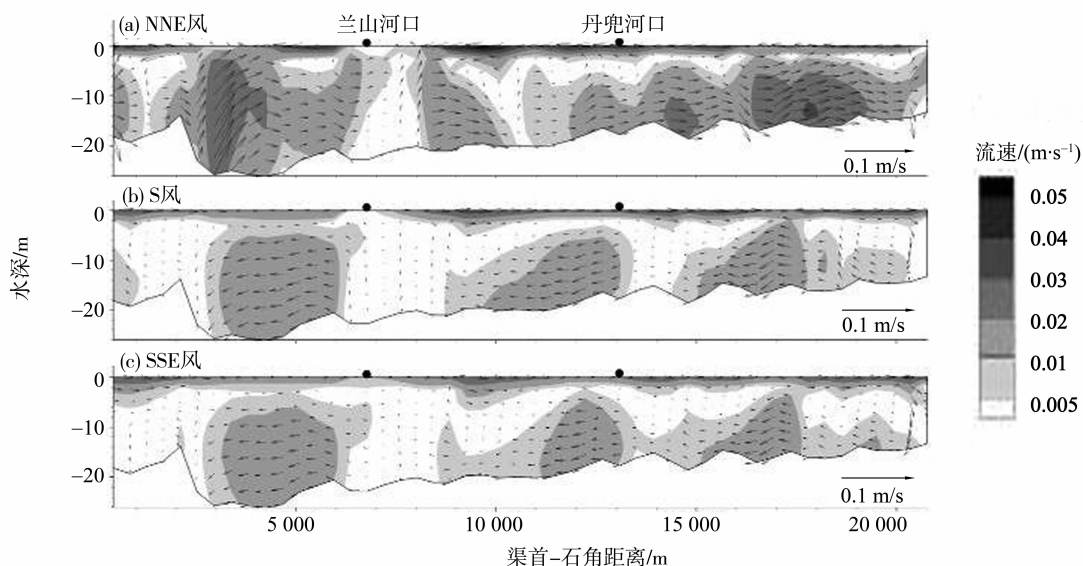


图 11 不同风场下渠首至石角中轴线垂向剖面流速分布

Fig. 11 The streamtraces of the vertical profile of central axis from Qushou to Shijiao under different winds

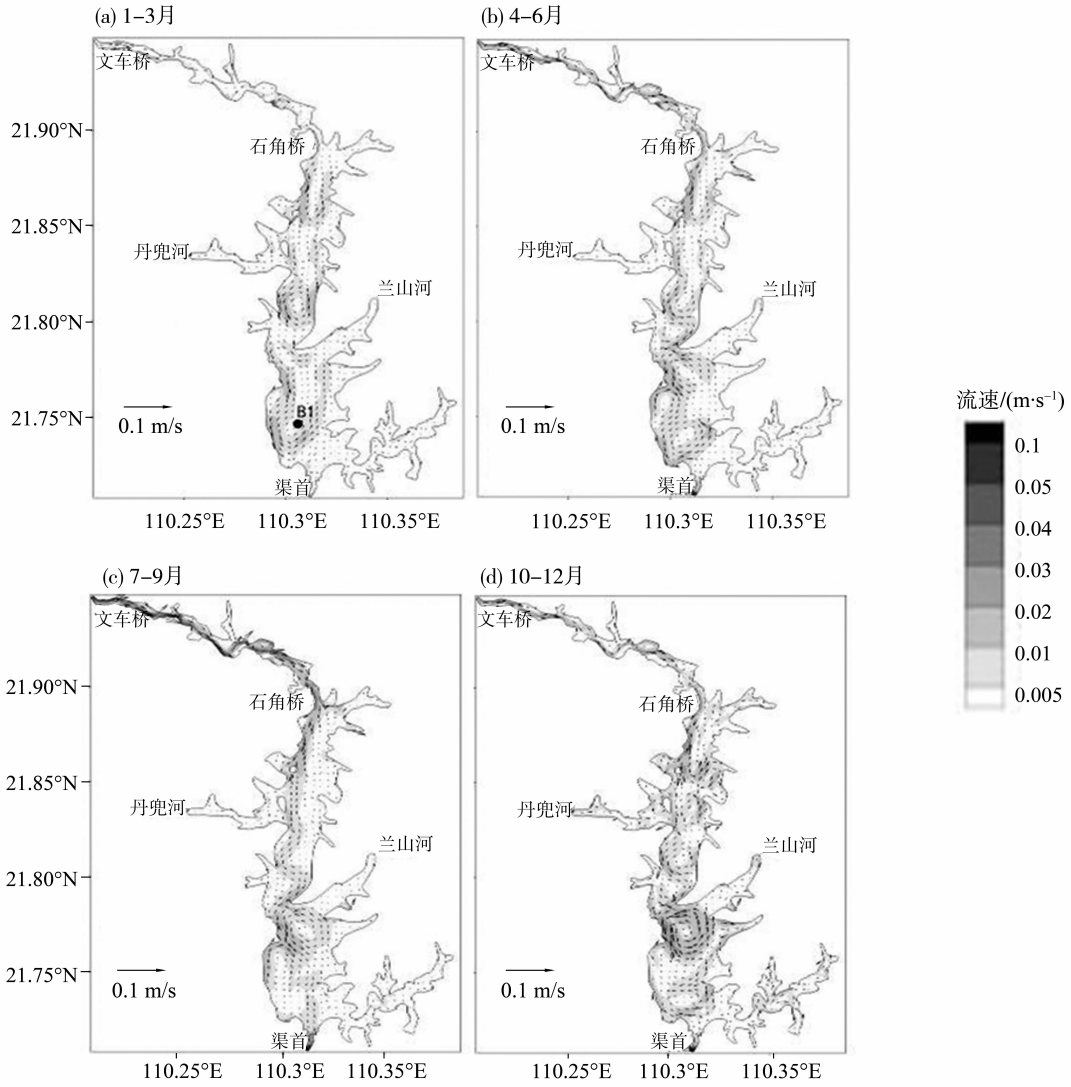


图 12 2013 年各季度模拟流场图

Fig. 12 The streamtraces in all quarters of 2013

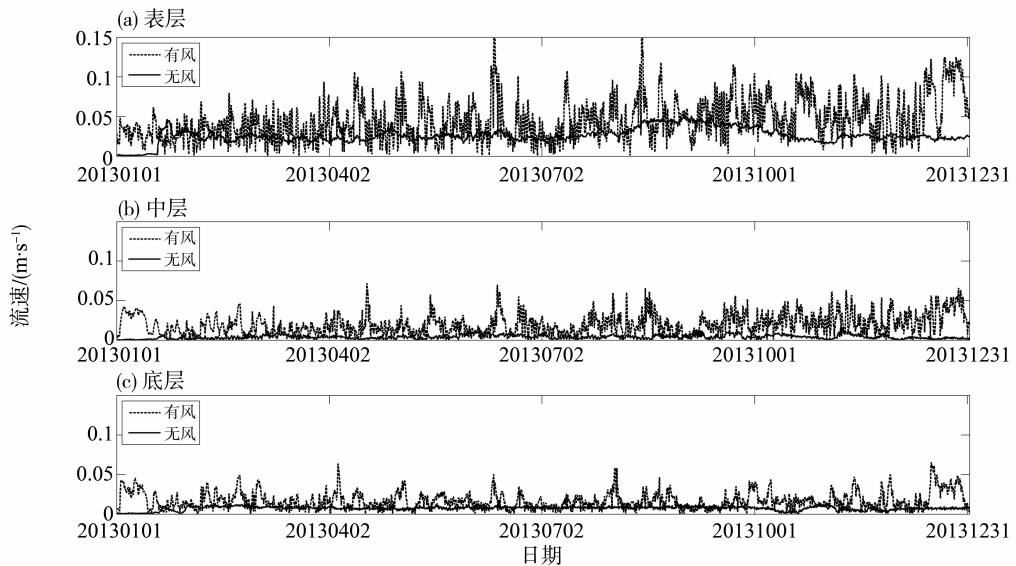


图 13 B1 点有风与无风情况下表、中、底层流速序列

Fig. 13 The time serials of velocities at surface, center and bottom layers of point B1 with and without winds

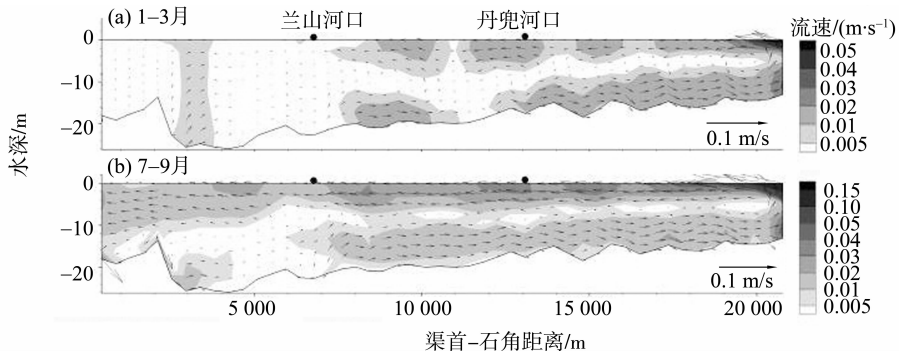


图 14 渠首至石角中轴线垂向剖面流速分布

Fig. 14 The streamtraces of the vertical profile of central axis from Qushou to Shijiao

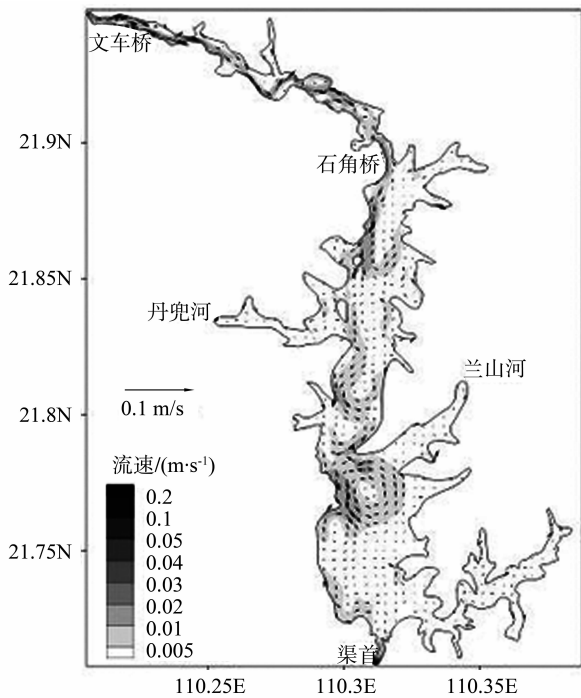


图 15 2013 年水深平均流速模拟结果

Fig. 15 The simulation of depth averaged current in 2013

库区段的水域比较广阔, 受径流、风和地形三重作用, 形成近兰山河口的较强的逆时针环流和较弱的顺时针环流。其中西岸也出现较强沿岸流。库区上游来水在兰山河口和兰山河汇合, 主要受径流推动, 形成了大小两个环流, 此处地形对于双环流的形成起到了关键作用。

4 结论

采用 FVCOM 模型, 同时考虑径流与风的影响, 模拟鹤地水库 2013 年 1 月至 2014 年 3 月的环流, 并通过 2014 年 3 月的实测流速值与模拟结果进行比较, 证明模拟结果与实测值符合良好。通过

对鹤地水库 2013 年纯径流作用下、不同主导风场作用下和 2013 年实际环流结构分析显示:

1) 不同主导风作用下呈现出不同环流结构。在主导风 NNE 风持续作用下, 鹤地水库呈现出多个较大的逆时针环流, 西岸流普遍比东岸流强; 而在 S、SSE 风作用下, 则出现多个逆时针与顺时针环流交替, 且东岸流普遍比西岸流强;

2) 在冬半年, 径流弱而风力较大情况下, 风成为水平、垂向环流作用的主导因素; 而夏半年, 径流较强劲, 此时风向多与径流流向相反, 水库水平、垂向环流则主要受径流控制;

3) 整个库区全年平均主要以逆时针环流为主, 并形成较强的沿岸流, 西岸流比东岸流更强。

通过描绘鹤地水库风生环流的时空分布特征并分析主要动力因素, 为将来鹤地水库的富营养化和生态动力学深入研究提供基础。但是由于水库环流除了受到主导因素风、径流、地形的影响外, 还受到诸如温度变化等因素影响, 这些因素在某些情况下是不可忽略的, 有时甚至成为主导因素。由于夏季鹤地水库出现温度分层, 这种非正压作用也会影响到鹤地水库的环流特性, 此外, 风浪作用也会影响到水库表层的混合和扩散, 从而影响其热力结构和动力。鹤地水库的这些因素的影响比例是多少目前仍未有量化的结果, 在将来研究工作中需考虑完善。

致谢: 本文研究工作得到了环境保护部华南环境科学研究所高性能计算平台的大力支持, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 张华俊, 陈修康, 韩博平, 等. 鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 [J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1167-1175.
- [2] 逢勇, 吴亚蒂, 龙江. 九洲江粤桂交界处水质达标研究 [J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2002, 41(4):

- 101-105.
- [3] 黎红秋. 鹤地水库浮游植物时空分布特征研究 [J]. 广东水利水电, 2006, (5): 15-16.
- [4] 邹红菊, 胡韧, 韩博平. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态 [J]. 热带亚热带植物学报, 2010, 18(2): 196-202.
- [5] BAI X, WANG J, SCHWAB D J, et al. Modeling 1993-2008 climatology of seasonal general circulation and thermal structure in the Great Lakes using FVCOM [J]. Ocean Modelling, 2013(65): 40-63.
- [6] 黄漪平. 太湖水环境及其污染控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [7] 王谦谦. 太湖风成流的数值模拟 [J]. 河海大学学报, 1987, 15(2): 11-18.
- [8] 龚春生, 姚琪, 赵棣华. 玄武湖风生流数值模拟研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 72-75.
- [9] 梁瑞驹, 仲金华. 太湖风生流的三维数值模拟 [J]. 湖泊科学, 1994, 12(4): 324-328.
- [10] 胡维平, 濮培民, 秦伯强. 太湖水动力学三维数值试验研究-2. 典型风场风生流的数值计算 [J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 26-34.
- [11] 张发兵, 胡维平, 秦伯强. 湖底地形对风生流场影响的数值研究 [J]. 水利学报, 2004, 35(12): 34-38.
- [12] BORIS V C, WANG Y, IRINA P C. Wind-driven current simulations around the Island Mainau (Lake Constance) [J]. Ecological Modeling, 2001, 138(1): 55-73.
- [13] MUSTEYDE B, ROGER A. Three-dimensional numerical modeling of wind-driven circulation in a homogeneous lake [J]. Advance in Water Resource, 2004, 27(12): 1167-1178.
- [14] 孙杨, 韩龙喜. 大伙房水库暴雨情况下三维水动力数值模拟 [J]. 江西农业学报, 2015, 27(2): 116-120.
- [15] 曹基富, 吴瑞钦. 防洪补偿调度在鹤地水库中的应用 [J]. 广东水利水电, 2004(6): 44-45.
- [16] 曹基富. 九洲江中下游“06·8”洪水分析 [J]. 人民珠江, 2013, 34(3): 50-52.
- [17] 陈红宏, 陈苑, 肖仕鼎, 等. 九洲江流域上游“06·7”暴雨洪水分析 [J]. 广东水利水电, 2007(6): 45-46.
- [18] 谢天. 九洲江流域“2013·08”暴雨洪水特性分析 [J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(11): 6-8.
- [19] 陈雄, 彭钧才. 鹤地水库向湛江市城区供水问题的分析 [J]. 广东水利水电, 2000, (5): 15-18.
- [20] 黎红秋. 鹤地水库富营养化综合评价与分布特征研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [21] 李剑兵. 鹤地水库区域降雨特点及集雨供水能力分析 [J]. 广东气象, 1995, (4): 13-15.
- [22] 蔡杰. 湛江地区大型饮用水供水水库污染状况研究与管理 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [23] CHEN C, BEARDSLEY R C, COWLES G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system [J]. Oceanography, 2006, 19(1): 78-89.
- [24] CHEN C, BEARDSLEY R C. Numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks, part I: Symmetric banks [J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25(9): 2090-2110.
- [25] CHEN C, BEARDSLEY R C, LIMEBURNER R. A numerical study of stratified tidal rectification over finite-amplitude banks, part II: Georges Bank [J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25(9): 2111-2128.
- [26] CHEN C, BEARDSLEY R C, LIMEBURNER R. Variability of currents in late spring in the northern Great South Channel [J]. Continental Shelf Research, 1995, 15(4): 451-473.
- [27] CHEN C, BEARDSLEY R C, LIMEBURNER R. Variability of water properties in late spring in the northern Great South Channel [J]. Continental Shelf Research, 1995, 15(4): 415-431.
- [28] MELLOR G L. One-dimensional, ocean surface layer modeling, a problem and a solution [J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(3): 790-809.
- [29] MELLOR G L, BLUMBERG A. Wave breaking and ocean surface thermal response [J]. Journal of Physical Oceanography, 2004, 34(3): 693-698.
- [30] MELLOR G L, YAMADA T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1982, 20(4): 851-875.
- [31] SMAGORINSKY J. General circulation experiments with the primitive equations [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99-164.
- [32] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [33] LUO L, WANG J, SCHWAB D J, et al. Simulating the 1998 spring bloom in Lake Michigan using a coupled physical-biological model [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117(C10): 2156-2202.
- [34] 欧阳潇然, 赵巧华, 魏璇珠. 基于 FVCOM 的太湖梅梁湾夏季水温、溶解氧模拟及其影响机制初探 [J]. 湖泊科学, 2013, 25(4): 478-488.
- [35] 许旭峰, 刘青泉. 太湖风生流特征的数值模拟研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2009, 24(4): 512-518.