水　利　学　报

2017年3月　　SHUILI　XUEBAO　　第48卷　第3期

文章编号:0559-9350(2017)03-0373-05

寒区结冰湖冰盖下溶解氧垂直分布数值模型

白乙拉[1]，李慧莹[1]，李志军[2]

（1. 渤海大学 数理学院，辽宁 锦州 121000；2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024）

摘要：根据芬兰Valken-Kotinen湖2011年1—4月冰下溶解氧现场观测数据，经对这些数据进行统计分析，绘制出该湖冰下不同时刻溶解氧含量垂直分布图形，通过大量的数据拟合与优化辨识计算，得到了描述该结冰湖冰下溶解氧时空分布规律的一个新的正态分布数值模型。该数值模型中溶解氧含量的变化由深度和冰封持续时间来确定，与文献中的小波分析法和高斯拟合时间序列法的分析结果作比较，该数值模型计算出的冰下溶解氧含量值与实测值吻合效果更好，所绘制出的溶解氧含量曲面和等值线图形更光滑，最后讨论了进一步改进该模型需要考虑的一些因素。该研究结果可推广应用到其它寒区冰封湖泊或水产养殖池塘等水体环境的溶解氧问题研究中。

关键词：溶解氧；冰封湖泊；数据分析；数值模型

中图分类号：P333；O29　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20160594

1　研究背景

水体中溶解氧不仅是各种水生物呼吸代谢的基础，而且溶解氧水平的高低还直接反映了水体的质量，它与养殖生物的生存繁衍和水体的自净作用息息相关。近年来，国内对湖泊、沿海近岸等未冻结水体溶解氧问题作了许多的研究[1-5]，但对冰雪覆盖下湖泊、池塘等水体溶解氧问题的研究文献较少。李润玲等[6]对葫芦岛冰封海水养殖池塘溶解氧含量等环境要素进行了观测研究；柏钦玺等[7]利用时间序列法分析了芬兰Valken-Kotinen湖冰下水温和溶解氧含量之间的相互关系及变化趋势；李明等[8]也对该湖冰下溶解氧含量变化规律进行了小波分析。而国外对于结冰湖泊溶解氧问题已经进行了较深入的研究并取得一些成果，Ellis等[9]经过大量的分析研究，认为结冰湖冰下水体是一个群封闭区域，初始需氧量和耗氧率决定溶解氧含量；Robarts等[10]分析了冬季汉堡湖在冰雪覆盖下溶解氧并未大量减少的原因，给出了该湖冰下溶解氧昼夜变化规律；Brekhovskikh等[11]总结了Mozhaisk水库在冰冻时期的溶解氧变化规律，给出从冰下到湖底不同深度水体中溶解氧含量的变化范围；Golosov等[12]基于俄罗斯西北部和北美5个冰冻的湖泊观测数据，建立了描述冰雪覆盖的湖泊溶解氧垂直分布的一维偏微分方程模型，并给出了一个随水体深度变化的估计冰下溶解氧含量的简单模型，但是该模型未能反映出冰下溶解氧随冰封持续时间的变化情况；Golosov等[13]研究表明影响冰下溶解氧含量的主要因素是气温、冰封持续时间和混合条件。现有文献中尚未见到结冰湖冰下溶解氧含量随水体深度和冰封持续时间的时空变化模型。

本文对芬兰Valken-Kotinen湖2011年1—4月冰下溶解氧含量的现场观测数据进行分析，绘制出冰下溶解氧含量垂直分布剖面图形，并给出一个类似高斯函数的正态分布模型来描述结冰湖冰下溶解氧含量垂直分布时空变化情况。该数值模型能够反映结冰湖冰下溶解氧含量依赖于水体深度和冰封持续时间的时空变化规律，与小波分析的结果作比较，所计算出的冰下溶解氧含量值与实测值吻

收稿日期：2016-06-06；网络出版日期：2016-11-09

网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20161109.1632.002.html

基金项目：国家自然科学基金项目(41376186，11371071)

作者简介：白乙拉(1961-)，男，内蒙古人，博士，教授，主要从事应用数学等研究。E-mail：baiyila@bhu.edu.cn

合更好。该模型可为结冰湖冰封期溶解氧问题的数值模拟研究提供参考依据，也可推广应用到其它寒区水产养殖池塘等水体环境中。

2　观测地点和数据

Valken-Kotinen湖位于芬兰南部(61°14′N，25°03′E)，平均深度300 cm，它是一个季节性冰冻的淡水湖泊。在1990—2011年期间，平均结冰日期在11月5日，平均冰封期有5.5月，冰完全融化大约在4月30日[14]。观测时间是从2011年1月13日中午12:00开始到2011年5月17日16点结束。观测时选择了A、B、C三个站位，每隔17 min自动采集冰下溶解氧含量和水温的一组数据，每个站位采集到大约10 500条数据。在该冬季，Valken-Kotinen湖面从2011年11月8日开始冻结，到2011年4月26日完全融化。本文的数据来自湖中央的B站位，此处湖的深度大约600 cm。传感器被配置在冰下7个不同的深度，分别为20、45、70、95、195、295和395 cm，零基准深度是冰水交界面。2011年1月13日—4月25日的溶解氧含量变化曲线见图1。

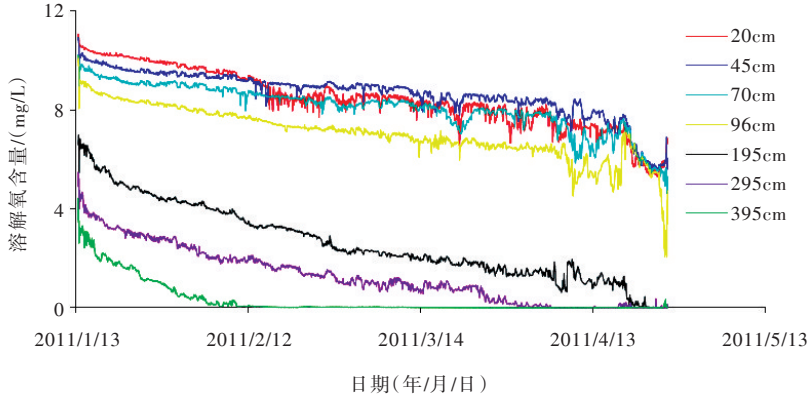


图1　冰下不同深度溶解氧含量变化曲线

3　冰封期水体中溶解氧含量垂直分布时空变化模型

对现场观测数据和图1的分析可知，Valken-Kotinen湖冰下溶解氧含量随着深度和冰封持续时间的增加而减少。1月份溶解氧含量在300 cm之前稳定下降，然而在3月接近冰水交界面处的溶解氧含量比冰下50 cm处的要低，低于100 cm处溶解氧含量下降的比冰水交界处的要快，并在3月下旬后水层300 cm以下开始出现缺氧，图2为1—3月不同时刻冰下溶解氧含量垂直分布剖面图。李润玲等[6]在辽宁葫芦岛观测冰封期海产养殖池塘溶解氧含量时也出现类似的现象。随着冰封持续时间的增长，溶解氧含量逐渐减少，其峰值变得越来越低，峰值的深度离冰底部越来越远，冰下水体中缺氧层离冰底的距离也越来越近(如图2)。

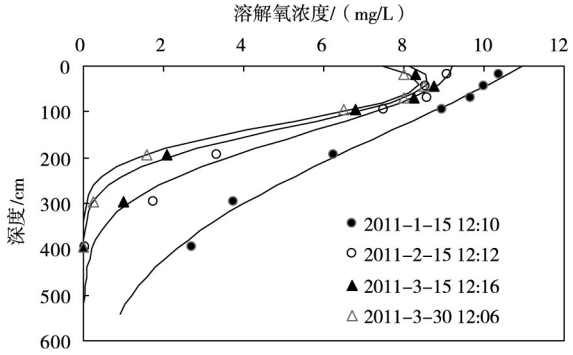


图2　不同时刻溶解氧含量垂直分布情况

经对Valken-Kotinen湖冰下溶解氧垂直分布特征的分析发现，冰封期不同时刻冰下溶解氧实测值的分布特征呈正态分布规律(右半侧部分)，随着冰封持续时间的增长其峰值逐渐变小，冰封期任一时刻冰下溶解氧垂直分布剖面可用一个依赖于水体深度的正态分布函数来表达。因此，选取一个依赖于水体深度和冰封持续时间的正态分布模型来描述冰下溶解氧的时空分布状态：

$$DO(h)=a(t)\exp\left(-\left(h-b(t)\right)^2\Big/2c(t)^2\right) \quad (1)$$

式中：$DO(h)$为在冰下h(cm)处的溶解氧含量值(mg/L)；$a(t)$、$b(t)$、$c(t)$为拟合参数。在这个分布模型中，$a(t)$表示在分布曲线中峰值处的溶解氧含量的最大值，随着冰封持续时间的增加而减小。$b(t)$表示溶解氧在峰值处的深度，它随着冰封持续时间的增加而增大，这意味着这个深度将随着冰封持续时间增加而下移。$c(t)$表示溶解氧含量最大值处的半容量，它随着冰封持续时间的增加而减少。

模型(1)中的3个特征参数$a(t)$、$b(t)$、$c(t)$可根据冰封期水体中不同时刻的溶解氧含量现场观测数据，用数学方法优化辨识和数据拟合得到，从而用模型(1)可模拟出该湖冰封期水体中溶解氧含量垂直分布情况随时间变化的分布剖面。根据现场观测数据、图2及模型(1)可知：(1)该湖冰封的时间比未结冰时间短；(2)冰下溶解氧含量在刚冰封时刻达到最大值，在开化时刻降到最小值；(3)每个冬季冰封期溶解氧的含量是相似的。为了得到更准确的特征参数$a(t)$、$b(t)$、$c(t)$，利用2011年1月14日至4月3日每天正午时刻(t_i)的80条观测数据，根据最小二乘法编程对模型(1)中的3个参数进行优化辨识计算，得到各时刻对应的特征参数值$a(t_i)$、$b(t_i)$、$c(t_i)$(i=1，2，…，80)，对该3组数据用DataFit软件进行数据拟合分析，发现上述3个特征参数依赖于冰封时间t的最优拟合公式具有相同的形式：

$$Y(t)=\alpha+\beta\ln^2(t)+\gamma t^{0.5} \quad (2)$$

式中：$Y(t)$表示特征参数$a(t)$、$b(t)$、$c(t)$，t为当年湖面结冰日期(2010/11/8)开始的天数，α，β，γ为系数参数，该3个系数参数的拟合结果见表1。由于未考虑溶解氧每天的日变化，从而没有利用全部观测数据进行分析。

表1　2011年1月14日—4月3日正午时刻拟合的参数

	α	β	γ
$a(t)$	47.8428	−9.0412	15.3242
$b(t)$	−1873.9032	469.6498	−808.0878
$c(t)$	1665.5196	−345.4060	579.6184

利用特征参数方程(2)和表1中系数值，可以绘制从2011年1月14日至4月3日每天正午时刻的3个特征参数的图形，例如关于参数$a(t)$的图形(如图3)。根据结冰湖水体的物理变化过程及参数$a(t)$的变化趋势可以看出，该曲线具有近似年周期性变化规律，参数$b(t)$、$c(t)$也同样具有类似性质，反映出了结冰湖水体中溶解氧含量的年周期性变化规律。

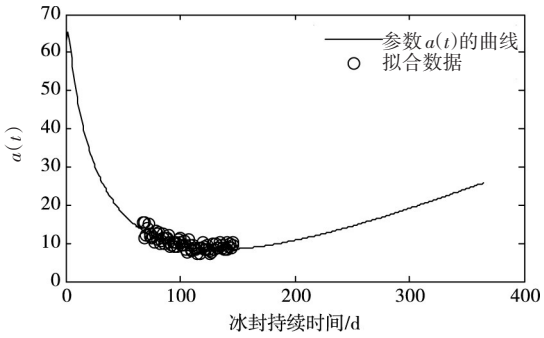


图3　特征参数方程(2)中$a(t)$的曲线

利用模型(1)和特征参数方程(2)，可模拟计算得到结冰湖水体中溶解氧含量时空分布情况。例如，利用它们分析2011年1月14日至4月3日正午时刻该湖冰下溶解氧的分布情况，结果见图5。由于地处寒区的高纬度湖泊，在春季的几个月里，尤其在4月冰雪融化时期，湖水中太阳辐射大量增加，正如Kirillin等[15]人所建议，结冰湖相关问题的数值模式需要对湖泊的周期性物理和化学反应过程完全理解的基础上建立，因此希望本文给出的模型(1)和特征参数方程(2)能被应用到有关问题的数值模拟研究中。图4表明，小波分析法[8]中溶解氧含量减少的很快，24小时滑移平均数法和高斯拟合时间序列法[7]中溶解氧含量出现少量轻微的跳跃点，与上述方法相比较，模型(1)和特征参数方程(2)给出了一个相对更精确、更光滑的结冰湖水体中溶解氧含量时空分布估算模型(见图5)。本文得到的结果是在忽略水体中溶解氧日变化和水温变化的前提下得到的，在今后的研究中，尤其是在冰层融化期应考虑水体中溶解氧的日变化和水温的变化。

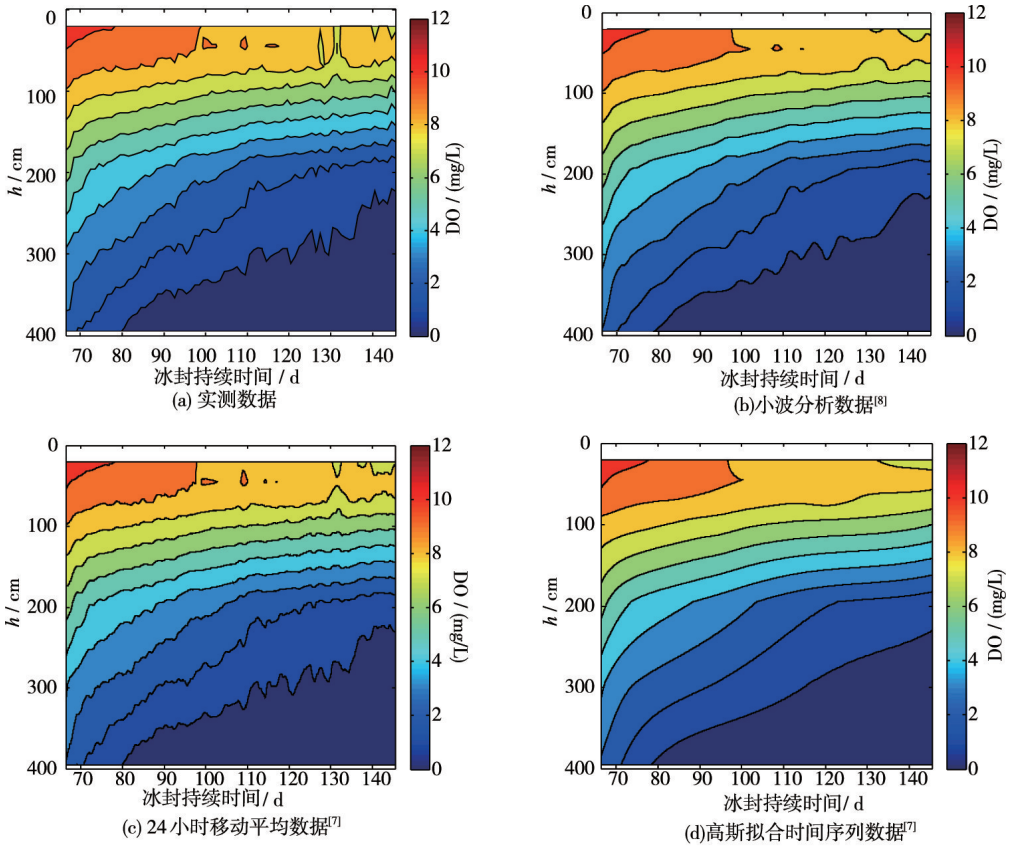


图4　溶解氧含量实测和计算值的等值线

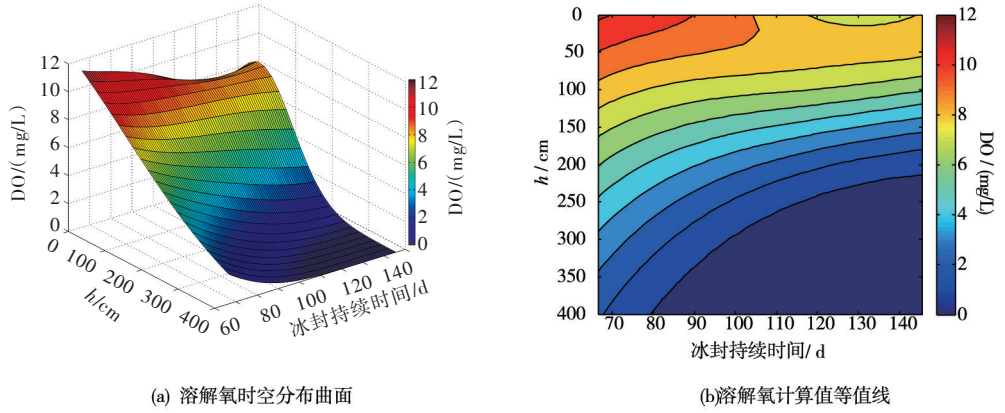


图5　根据模型式(1)和式(2)计算出的溶解氧含量曲面和模拟计算值等值线

4　结论

对芬兰Valken-Kotinen湖2011年1月—4月冰下溶解氧现场观测数据，经过大量的数据分析、数据拟合与优化辨识计算，得到了描述该结冰湖冰下溶解氧时空分布规律的一个新的正态分布数值模型。与小波分析法比较，由该数值模型计算得到的冰下溶解氧含量与实测值的吻合效果更好，模拟结果更光滑。然而本文所给出的模型与实际问题仍然存在一些差异，应需要进一步考虑其它一些因素。这些因素包括：(1)在雪冰融化期溶解氧含量的日变化；(2)冰下溶解氧含量数值模拟过程应是基于水温和溶解氧含量日变化的正确估算来完成；(3)本文方法应在若干个冰封湖水体中溶解氧观测数据的基础上进行准确分析；(4)所给出的溶解氧含量时空变化估算模型可以应用到中国其它冰封湖水体中。例如中国内蒙古的乌梁素海和辽宁葫芦岛的海产养殖池塘，有相应的溶解氧含量观测数据；(5)建议将冰的厚度h与湖泊冰封时间t之间建立关联，从而使冰下溶解氧含量估算模型只依赖于冰层厚度h。

致谢：此项研究得到芬兰赫尔辛基大学Lauri Arvola教授、Matti Leppäranta教授的支持，在此表示感谢！

参 考 文 献：

[1] 黄平．河流随机微分动态溶解氧模型的应用[J]．水利学报，1993(7)：38-43．

[2] 唐诗，孙涛，沈小梅，等．水体浊度变化影响下的河口溶解氧系统动力学模型及应用[J]．水利学报，2013，44(11)：1286-1293．

[3] 刘海英，曲克明，马绍赛．养殖水体中溶解氧的变化及收支平衡研究概况[J]．海洋水产研究，2005，26(2)：79-84．

[4] 彭斌，黄金田，王资生．沿海滩涂养殖水体中溶解氧的变化及其影响因素[J]．水生态学杂志，2008，1(5)：97-99．

[5] 石强，杨朋金，卜志国．渤海冬季溶解氧与表观耗氧量年际时空变化[J]．海洋湖沼通报，2014(2)：161-168．

[6] LI R L，LU P，DING J，et al．Observations of ice and water under ice in aquaculture zone in the Liaodong Gulf of the Bohai Sea，China[C]//Proceedings of the 22nd IAHR International Symposium on Ice．Singapore，2014：916-923，doi：10.3850/978-981-09-0750-1-1216．

[7] BAI Q X，LI R L，LI Z J，et al．Time-series analyses of water temperature and dissolved oxygen concentration in Lake Valkea-Kotinen (Finland) during ice season[J]．Ecologic Informatics，doi：10.1016/j.ecoinf.2015.06.009.

[8] 李明，李润玲，柏钦玺，等．芬兰淡水湖冰下溶解氧浓度变化规律的离散小波分析[J]．数学的实践与认识，2015，45(7)：149-155．

[9] ELLIS C R，STEFAN H G．Oxygen demand in ice covered lakes as it pertains to winter aeration[J]．Jawra Journal of the American Water Resources Association，1989，25(6)：1169-1176．

[10] ROBARTS R，WAISER M，ARTS M，et al．Seasonal and diel changes of dissolved oxygen in a hypertrophic prairie lake[J]．Lakes & Reservoirs：Research & Management，2005，10(3)：167-177．

[11] BREKHOVSKIKH V，GASHKINA N，KREMENETSKAYA E，et al．Oxygen regime of the Mozhaisk Reservoir during under ice period[J]．Rus．Meteorol．Hydrol．，2003，1：103-109．

[12] GOLOSOV S，MAHER O，Schipunova E，et al．Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes[J]．Oecologia，2007，151(2)：331-340．

[13] GOLOSOV S，TERZHEVIK A，ZVEREV I，et al．Climate change impact on thermal and oxygen regime of shallow lakes[J]．Tellus，2012，64(1)：145-153．

[14] JYLHA K，PIRINEN M，LAAPAS K，et al．Climate variability and trends in the Valkea-Kotinen region，southern Finland：comparisons between the past，current and projected climates[J]．Boreal Environment Research，2014，19 (suppl. A)：4-30．

[15] KIRILLIN G，LEPPARANTA M，TERZHEVIK A，et al．Physics of seasonally ice-covered lakes：a review[J]．Aquatic Sciences，2012，74(4)：659-682．

Numerical model for vertical distribution of dissolved oxygen in cold and icy lake ice

BAI Yila[1]，LI Huiying[1]，LI Zhijun[2]

(1. *Department of Mathematics*，*Bohai University*，*Jinzhou* 121000，*China*；

2. *State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering*，*Dalian University of Technology*，*Dalian* 116024，*China*)

Abstract：According to the observation data of dissolved oxygen (DO) during January to April of 2011 under ice of Valken-Kotinen Lake in Finnish，the vertical distribution patterns of DO are examined by analyzing these data. A new normal distribution model that can describe the spatial and temporal distribution of the DO is also given. The DO concentration in the numerical model is determined by the depth and the frozen duration of the lake. Compared with the results obtained by using wavelet analysis and Gaussian fitting time series methods，the DO concentration under ice attained by the proposed model is more agreed with the experimental data. The drawn surface and contour line of DO concentration are smoother. Finally，some considerations are discussed to improve the proposed model in future. This study can be applied to describe the dissolved oxygen of other cold regions such as icy lake，mariculture ponds，and so on.

Keywords：dissolved oxygen；icy lake；data analysis；numerical model

（责任编辑：韩 昆）