

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.06.003

底泥盐分释放影响下的滨海水库 水体盐度变化过程数值模拟

叶清华^{1,2}, 李煜³, 王文¹, 杨云¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. Deltares, 2629 HV Delft, The Netherlands; 3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为研究滨海水库大尺度水体盐度时空动态变化, 改进了水动力与水环境数值模拟专业模型 Delft3D 中盐度输运方程的源汇项, 对所得的数学模型计算值与理论值和实验值进行对比分析, 并验证其合理性。结果表明, 将改进后的 Delft3D 模型应用于拟建滨海水库的盐度变化过程模型, 能定量预测不同工况情形下水库底泥盐分释放造成的盐度变化过程。
关键词: 海岸带水资源; Delft3D 模型; 水体盐度数值模拟; 滨海水库
中图分类号: X52; TV213.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)06-0518-06

Numerical simulation of water salinity change process in coastal reservoir influenced by sediment salt release

YE Qinghua^{1, 2}, LI Yu³, WANG Wen¹, YANG Yun¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Deltares, 2629 HV Delft, The Netherlands;
3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the spatial and temporal dynamic changes of water salinity at a large scale in coastal reservoirs, the source and sink terms in the salinity transport equations of the hydrodynamics and water environment numerical simulation model, i. e., the Delft3D model, were improved, and the improved Delft3D model was validated by comparing the simulation values with theoretical values. The results show that the improved Delft3D model can be applied to the simulation of water salinity change in a proposed coastal reservoir, and quantitatively predict the salinity change processes of the reservoir caused by the sediment salt release under different scenarios.
Key words: coastal water resources; Delft3D model; water salinity numerical simulation; coastal reservoir

沿海地区在世界各国普遍都是经济较为发达的地区,而水资源往往是制约沿海地区经济社会可持续发展的重要瓶颈。沿海地区处于流域汇流区末端,径流总量相对较大,而地貌通常为河口三角洲平原或海积平原,地势低平,地表蓄水条件差,但同时存在海湾、泻湖等海洋环境的可蓄水地貌。由于这样一些特点,在沿海地区修建河道御咸蓄淡工程、滨海平原水库、海岸水库是沿海地区较为常见的水资源开发利用方法^[1]。然而,很多滨海水库蓄水后发生水质咸化,如天津滨海地区北塘水库^[2]和北大港水库^[3-4]。数值模拟已经被国内外一些研究者应用于水库水体盐度变化分析,但在以往的数值模拟中没有充分考虑到底泥盐分释放的动态变化,如毛献忠等^[5]在利用 Delft3D 模型对浙江省漩门二期堵港蓄淡水库模拟时,忽略了底泥盐分释放的影响。目前对于底泥盐分释放的机理已有许多研究,如在室内利用土柱和水槽试验分析不同条件下盐分

释放的时空变化特征^[6-8],但缺乏在水库水体的大尺度盐度变化模拟分析。本文通过对 Delft3D 模型进行模型结构改进,使其增加水质模拟过程中的源汇项,从而在考虑底泥盐分释放情况下进行水库水体的盐度时空变化数值模拟,从而为滨海水库设计与运行管理提供科学依据。

1 滨海水库底泥盐分释放预测模型

1.1 Delft3D 水质数值模拟方法

水体盐分主要来自 2 个方面,一是水库本身,包括原有水体的盐分和水库底盐释放带来的盐分;二是水库外界的外源输入。影响水体咸化过程的因素有很多,主要包括:底盐释放、入库水量与来水盐度、降水与蒸发、风力、温度、浅层地下水与海水入侵、水库工程因素等。笔者主要考虑底盐释放和入库水流流量这 2 个主要的水库盐度影响因素对水库盐度变化的影响。

Delft3D 水动力和物质输运模型由荷兰三角洲研究院(Deltares)开发,适用于海岸、河流、湖泊与河口水沙动力与水环境数值模拟。本文所采用的数值模拟以 δ 坐标下的 Delft3D 模型为基础,通过改进模型中盐度扩散的源汇项,进行底盐释放条件下的水库盐度变化模拟。Delft3D 中的水动力控制方程、定解条件的详细描述等见文献[9]。以下简要介绍与盐度扩散最紧密相关的物质输运模型方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + s \tag{1}$$

式中: C ——盐度; u 、 v ——流速; D ——扩散系数; s ——底泥盐度的释放速度。

给出的初始条件即全场每个方向流速分量为零,同时给出初始水位和初始盐度。方程的定解条件包含侧面、自由表面和底面开边界条件^[9]。 $u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y}$ 通常被称为对流项, $D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$ 为扩散项, s 为源汇项。

对盐度输运模型方程求解计算采用正交曲线交错网格空间离散,对流项的时间离散采用交替隐式法(ADI),即将一个时间步长剖分成 2 个半步长,前半步长在 x 方向上隐式,在 y 方向上显式;后半步长在 y 方向上隐式,在 x 方向上显式。扩散项由 Crank-Nicholson 法显式离散,类似于有限体积的处理方法,以保证质量守恒。

盐度输运模型数值计算时通常可以应用 Delft3D 点源来提供时间序列格式的源汇项 s ,但这只适用于简单线性释放的情况,而在实际情况中,底盐释放是时间、水体背景浓度等的复杂函数。因此有必要对 Delft3D 中现有的盐度输运方程中源汇项的计算方法进行改进来满足实际工作的需要。

1.2 Delft3D 水质数值模拟方法的改进

从床底释放到水体的盐分总质量可以表达为

$$M = V(C - C_0) \tag{2}$$

式中: V ——体积; C_0 ——初始盐度。

因此底泥盐度释放通量 F 为

$$F = \frac{M}{(t - t_0) A} \tag{3}$$

式中: A ——水体/底泥交界面的面积。

对于泥质粉沙底泥盐分释放通量随时间 t 的衰减过程,高增文等^[6]通过土柱和水槽试验长达 600 h 盐度观测,认为可以表达为如下负幂函数关系:

$$F = a(t - t_0)^b = 3.4777(t - t_0)^{-0.2308} \tag{4}$$

由于盐度输运是一个扩散问题,最简化的扩散方程可表达为 $\frac{\partial C}{\partial t} = -kC$,其解析解的基本形式为负指数: $C = C_0 e^{-kt}$ 。因此本文用负指数函数重新拟合高增文等^[6]的试验数据,得到如下泥质粉沙底泥盐分释放通量表达式:

$$F = a e^{-bt} = 1.6014 e^{-0.002(t-t_0)} \tag{5}$$

经比较,式(4)和式(5)计算得出的释放通量前 600 h 对时间积分基本一致,都符合试验数据,见图 1。从图 1 可见,式(4)对于前 300 h 的盐度观测值拟合误差小于式(5)。但是式(5)计算出的盐度释放通量随

时间减少较快,约 100 d 以后盐度释放通量将保持稳定不变,大约是初始通量值的 2%,这与张鹏等^[10]通过试验得出的结论相符合。而根据式(4),100 d 以后盐度释放通量仍达到初始通量值的 17%,总盐分释放量远大于式(5)计算结果。因此,从盐度变化过程的解析解形式以及盐度长期变化结果来看,式(5)的盐度释放通量更为合理。

把式(5)的盐度释放通量作为源汇项合并到 Delft3D 现有的盐度扩散方程(1)左侧,采用显式积分以求得空间平面盐度分布。为避免数值震荡产生的盐度为负的情况,还采用了平面 Forester 滤波技术^[11]。通过对底泥盐分释放通量加以改进,Delft3D 盐度输运模型就可以进行考虑底盐释放过程的水库盐度变化模拟。

2 模型验证

为验证经改进的 Delft3D 盐度输运模型数值模拟方法正确与否,将进行数值试验来验证底盐释放和水体中的盐度对流这 2 个主要物理过程。尽管所改进的模型能够模拟海湾水库盐度的垂向分层,但是由于海湾水库盐度的垂向分布受多种因素共同影响,难以直接用来验证模型,因此假设水体盐分在垂向上是完全混合的。盐度对流可以采用简化的一维对流方法,通过对比一维矩形河道盐度分布的解析解与数值解来验证盐度对流过程。底盐释放可以通过推算静态水体的浓度来验证,也就是通过对比理论分析和数值计算的结果来验证底盐释放过程。

2.1 考虑底盐释放的对流过程验证

通过简化式(1),得到一维盐度对流扩散方程为

∂C/∂t + u ∂C/∂x = D ∂²C/∂x² + s (6)

考虑恒定来流与恒定底泥释放(∂C/∂t=0),扩散较小(D ∂²C/∂x²≈0),式(6)可简化为

u dC/dx = s (7)

式(7)的边界条件与初始条件可表达为

{ C(x)|_{x=0} = 0, C'(x)|_{x=+∞} = 0 (8)

式(7)的解析解为

C = (s/u)x (9)

由此可知,在恒定来流与恒定底泥释放的情况下,水体盐度 C 与离入口的距离 x 呈线性关系。为验证盐度对流扩散过程,建立矩形断面河道数学模型,长 5 km,宽 500 m,上游进水流量为 200 m³/s,来水为清水,不含盐,下游出口流量与进水平衡,利用改进过的 Delft3D 模型计算所得的 1 个月以后浓度沿程分布与由式(9)计算浓度沿程分布曲线见图 2,可以看出二者基本一致,说明所建立的数值模型中考虑底盐释放的对流过程是合理的。

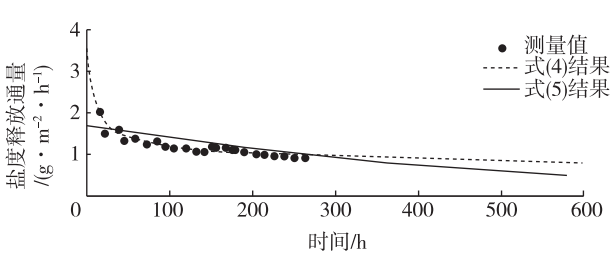


图1 底泥盐分释放通量时间变化曲线
Fig. 1 Temporal variation curves of sediment salt release flux

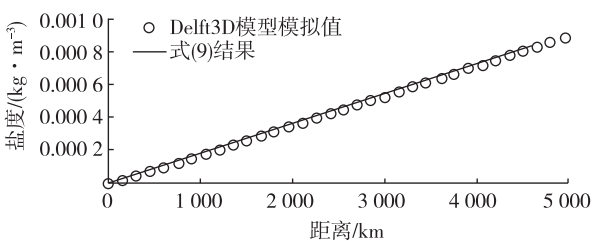


图2 沿一维河道纵截面盐度分布
Fig. 2 Salinity distribution of longitudinal section along 1D river channel

2.2 底盐释放过程验证

为验证模型模拟的底盐释放过程,设计一个面积 9 km×9 km,水深 1 m 的正方形水池,通过对比理想状态下底盐释放总量、数学模型的源项及浓度来分析数值预测模型结果的合理性。

设初始盐度为零。根据式(5),初始时刻底泥盐分释放率为 1.6 g/(m²·h),第 600 小时时刻底泥盐分释放率为 0.48 g/(m²·h)。前 600 h (25 d) 的底泥盐分释放总量为 $8.1 \times 10^7 \times \int_0^{600} (1.6014e^{-0.002t}) dt = 5 \times 10^7 \text{ kg}$,也就是说,600 h 的底盐释放会使整个水池的盐度增加到 $5 \times 10^7 \text{ kg} / (8.1 \times 10^7 \text{ m}^3) \approx 0.617 \text{ kg/m}^3$ 。

由改进的 Delft3D 水质数值模型计算得到的水体第 600 小时的平均盐度为 0.607 kg/m³,盐分总量为 0.607×8.1×10⁷ m³≈4.92×10⁷ kg,与理论计算结果相近,与高增文等^[6]的试验分析结果也相近。

对对流传输、扩散传输与底盐释放这几个过程在水库水体盐化过程中的相对重要性做一个简要对比分析。以上文设计的水池为例,考虑恒定边界条件,水流流速约 5 cm/s。数值预测模型表明,前 600 h 通过水池中心断面的累积盐分总量为:对流传输约 3×10⁷ kg,扩散传输约 1×10⁶ kg,底盐释放量约 5×10⁷ kg。也就是说,对流传输盐分和底盐释放总量大约在一个数量级上,比扩散传输的盐分总量大一个数量级。这个结论与通常河流和滨海水动力下物质传输的特征一致。

综上所述,改进的 Delft3D 盐度运输模型能正确模拟底盐释放和水体中的盐度对流这 2 个主要物理过程。

3 滨海滩涂水库水体盐度变化模拟计算实例

根据对江苏沿海区域供需水现状及预测分析,大丰垦区未来缺水问题较为突出。因此,拟在大丰市外延的王港河道与竹港河道之间布局一个滩涂水库,称为王港水库。库区依现有海堤及水产养殖区围堤建设,大致呈南北向延伸,总面积约 10.3 km²,建成后正常水位时的水深约 3 m。水库来水有 2 个入口,北侧入口从王港河取水,南侧入口从竹港河取水。水库出水口位于库区东侧中部,用于泄水和向用户供水。利用改进后的 Delft3D 模型,对该水库的水体盐度变化过程进行模拟。

3.1 模型基本参数设置

根据拟建王港水库设计方案构建了计算网格,如图 3 所示,网格大小约 50 m×50 m。假定水库的来水盐度为 0.3 kg/m³,底盐释放率采用式(5)计算,库内水体初始流速为零,出入口水位差为零。在水库蓄水初期,假定水深为 1.5 m,考虑到海水的影响,水体盐度为 30 kg/m³。在水库运行后期的维护阶段,假定水深为 3 m,水体基本淡化,水体盐度为 2 kg/m³。

3.2 水库盐度变化模拟结果

3.2.1 计算工况设计

为了对比分析不同入流与出流情形下水库的淡化过程,设计 8 种工况,如表 1 所示。

表 1 水库计算工况				
Table 1 Scenarios of reservoir operation				
时期	工况	流量/(m ³ ·s ⁻¹)		
		王港河入水口	竹港河入水口	出水口
蓄水初期	A1	5	5	10
	A2	7	3	10
	A3	3	3	6
	A4	4	2	6
维护期	B1	5	5	10
	B2	7	3	10
	B3	3	3	6
	B4	4	2	6

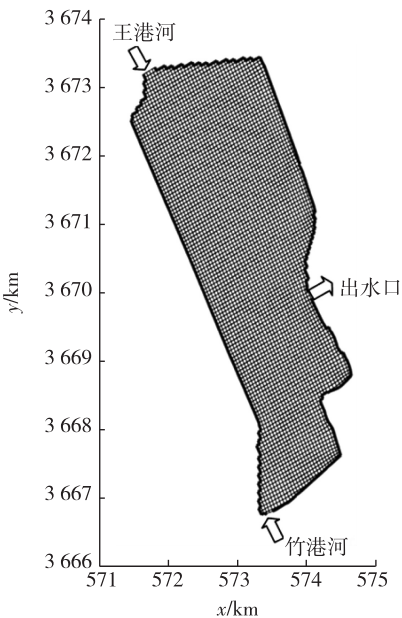


图 3 拟建水库计算网格和出水、入水点
Fig. 3 Computational grids, inflow positions, and outflow position of proposed reservoir

3.2.2 盐度模拟计算结果

王港水库在不同工况下平均盐度变化过程线见图4。计算结果表明:

a. 在水库蓄水初期阶段,在75 d内,不同工况都可以使盐度由初始的 30 kg/m^3 降到 1 kg/m^3 以下,其中最快的是 A2,大约35 d盐度即可低于 1 kg/m^3 ,在60 d后将达到约 0.5 kg/m^3 ;最慢的是 A3,大约70 d盐度低于 1 kg/m^3 ,在3个月后将达到约 0.7 kg/m^3 。

b. 在水库运行维护阶段,在45 d内,不同工况都可以使盐度由初始的 2 kg/m^3 降到 1 kg/m^3 以下,其中最快的仍是 B2,大约25 d盐度即可低于 1 kg/m^3 ;最慢的是 B3,大约35 d盐度低于 1 kg/m^3 。

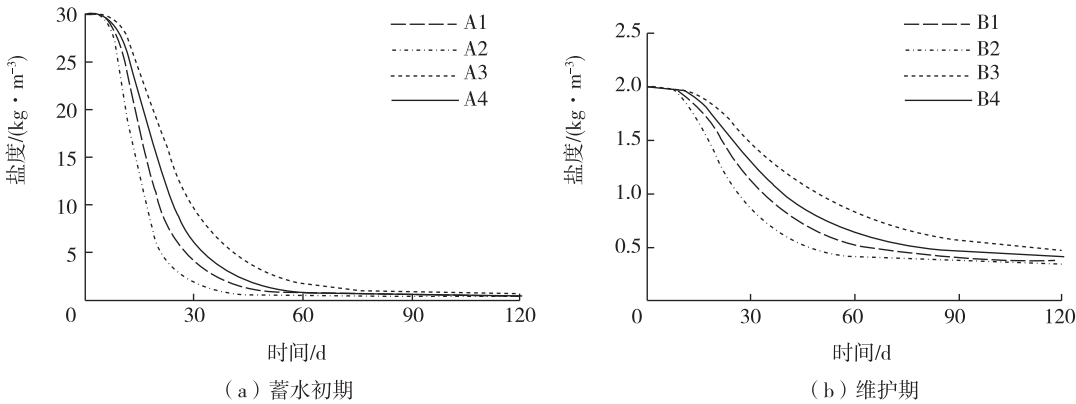


图4 王港水库不同工况下的出口处盐度变化过程线

Fig. 4 Variation curves of salinity change at outflow position under different scenarios in initial impoundment and maintenance periods of Wanggang Reservoir

根据 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》^[12],在非盐碱地区,灌溉用水的全盐量标准盐度小于或等于 1 kg/m^3 即可。因此,根据王港水库水体淡化过程的数值模拟结果,采用不同的运行方案,水库盐度均可以在不同时长之后满足 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》要求。

本研究中,假设保持水位不变,水库进出流量平衡。如果这个保持水位与平均海平面相当,水库渗透(通过地下漏水)量将较小。由于常压情况下,地下水流速约 1 m/a ,以大约12 h为周期的潮汐水位变化不会对地下水流速影响太大^[13]。对于潮汐水位变化及波浪等对地下水位及盐度传输的影响,尚需进一步研究^[14-15]。

4 结 论

通过改进水动力与水环境数值模型 Delft3D 中盐度输运方程的源汇项,实现了滨海水库底泥盐分释放与对流扩散过程的模拟。在经过对所得的数学模型计算值与理论值对比验证,证明其合理性之后,将改进后的 Delft3D 应用于拟建滨海水库的盐度变化预测,定量分析了水库底泥盐分释放条件下的盐度变化过程。

通过苏北滨海水库案例应用发现:(a)水库的淡化过程与水停留时间有关,水库水体的盐度与水库的进出口流量成负相关关系,水库的进出口流量越大,计算平衡后水库的盐度越小,所需的时间也越小;(b)水库淡化平衡后的盐度主要取决于水库的进出口流量以及底泥的盐度释放率,与水库的初始盐度无关。

限于实测资料的匮乏,有待收集库区盐度的垂向分布数据对所改进的模型做进一步验证。

参考文献:

[1] 王文,张鹭,杨云. 沿海地区常规水资源开发利用方法与策略[J]. 水利经济, 2014, 32(4): 35-38. (WANG Wen, ZHANG Lu, YANG Yun. Methods and strategies for development of conventional water resources in coastal regions[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2014, 32(4): 35-38. (in Chinese))

[2] 姜翠玲,裴海峰. 天津市北塘水库水质咸化原因和防治对策[J]. 湖泊科学, 2007, 19(4): 428-433. (JIANG Cuiling, PEI Haifeng. Reasons of water salinization and its prevention measures in Beitang Reservoir, Tianjin City[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(4): 428-433. (in Chinese))

[3] 赵文玉,刘国庆,刘景兰,等. 北大港水库水质咸化数学模型[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(2): 236-239. (ZHAO Wenyu, LIU Guoqing, LIU Jinglan, et al. Water salinization mathematical model in Beidagang Reservoir[J]. Journal of Guilin University

of Technology, 2007,27(2): 236-239. (in Chinese))

[4] 张宇龙,王启山,贺兰畹,等. 北大港水库调蓄“引江水”水质变化[J]. 城市环境与城市生态, 2005,18(2): 24-26. (ZHANG Yulong, WANG Qishan, HE Lanwan, et al. Water quality of south-to-north transfer water in Bei-Da-Gang Reservoir [J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2005, 18(2): 24-26. (in Chinese))

[5] 毛献忠,朱小敖,陈甫源,等. 沿海堵港蓄淡水库加快水体淡化措施的研究[J]. 水科学进展, 2005,16(6): 773-776.(MAO Xianzhong, ZHU Xiaobao, CHEN Fuyuan, et al. Study on accelerating water desalination in polder reservoir for storage of fresh water along the coast[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(6): 773-776. (in Chinese))

[6] 高增文,郑西来,吴俊文. 海湾水库蓄水初期底质与淡水盐分交换的试验研究[J]. 水科学进展, 2006,17(2): 170-175. (GAO Zengwen, ZHENG Xilai, WU Junwen. Experimental studies on salt exchange between freshwater and sediments in a polder reservoir[J]. Advances in Water Science, 2006,17(2): 170-175. (in Chinese))

[7] 张效龙,朱鸣鹤,郑西来. 环境因素影响下海湾蓄淡水库底泥盐分释放试验研究[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 135-142. (ZHANG Xiaolong, ZHU Minghe, ZHENG Xilai. Test investigation for salt release from sediments in a polder reservoir under effects of environmental factors[J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(2): 135-142. (in Chinese))

[8] RIMMER A. The mechanism of Lake Kinneret salinization as a linear reservoir[J]. Journal of Hydrology, 2003, 281(3):177-190.

[9] LESSER G R, ROELVINK J A, VAN K, et al. Development and validation of a three dimensional morphological model[J]. Coastal Engineering, 2004, 51: 883-915.

[10] 张鹏,姜翠玲,朱立琴,等. 沿海拟建水库底泥盐分释放规律研究[J]. 人民黄河, 2014,35(9): 74-78.(ZHANG Peng, JIANG Cuiling, ZHU Liqin, et al. Study on the salt release law from the bottom sediment of a proposed reservoir in the coastal area[J]. Yellow River, 2014, 35(9): 74-78. (in Chinese))

[11] FORESTER C K. Higher order monotonic convective difference schemes[J]. Journal of Computational Physics, 1979,23: 1-22.

[12] GB5084—2005 农田灌溉水质标准 [S].

[13] HEISS J W, MICHAEL H A. Saltwater-freshwater mixing dynamics in a sandy beach aquifer over tidal, spring-neap, and seasonal cycles[J]. Water Resource Research, 2014, 50: 1-20.

[14] ROBINSON C, GIBBES B, LI L. Driving mechanisms for groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary[J]. Geophysical Research Letter, 2006,33: 1-4.

[15] ULLMAN W J, CHANG B, MILLER D C, et al. Groundwater mixing, nutrient diagenesis, and discharges across a sandy beachface, Cape Henlopen, Delaware (USA) [J]. Estuarine Coastal Shelf Science, 2003,57:539-552.

· 简讯 ·

大型专业辞书《水利大辞典》出版发行

一部系统介绍当代水利科学技术的大型专业辞书《水利大辞典》,在纪念水利高等教育百年、河海大学百年校庆的前夕正式发行了。该书是在上海辞书出版社 1994 年出版的《水利词典》基础上,由河海大学组织学校相关学科教师百余人精心编纂修订而成的,由姜弘道教授、唐洪武教授担任执行主编。这是一部进入 21 世纪以来,我国总结水利科技发展、普及水利科技知识、传承水利科技文化的又一标志性力作。

《水利大辞典》内容全面、选词科学、取材精当、格式规范、资料新而丰富。全书共收编词目 4 700 余条,计 142 万字。内容涉及 8 类 31 个分支学科,包括:水利(综合),水利史;水文学,水资源,地质;工程力学,水力学,河流动力学,土力学,岩石力学,工程结构,土工材料;防洪抗旱,农业水利,城市水利,给水排水工程,水力发电,水电设备,水工建筑物,水利工程施工;海洋水文学与海岸动力学,港口,航道,河口,海岸;环境水利,生态水利;水利经济,水利管理;水利科技,水利信息化,水文化等。

《水利大辞典》的出版是一项充分体现河海大学专业特色的文化工程。有近 60 位河海大学各学科的学术带头人、学术骨干参加了《水利大辞典》的编撰和修订工作;有 80 位专家,包括特聘的校外专家,参加了《水利大辞典》的三轮审稿。他们严谨治学、字斟句酌、反复推敲、认真审订,为保证和提升《水利大辞典》的编纂质量发挥了关键性的作用。

(本刊编辑部供稿)