

基于 BioWin 的污水处理工艺数学模拟与工程应用

胡志荣¹, 周军², 甘一萍², K. Chapman¹, 郝二成², 常江²,
I. Takacs¹, P. Dold¹

(1. EnviroSim Associates Ltd., 加拿大; 2. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100061)

摘要: 借助于计算机技术, 活性污泥工艺数学模型已发展成为一种成熟的工程工具, 并在国外得到了广泛应用, 成为一种标准的工程实践, 而我国在该方面的研究和应用还处于起步阶段。介绍了基于 BioWin 污水处理工艺的数学模拟概念和方法, 包括非常成熟的活性污泥工艺模型以及为整个污水处理厂工艺过程模拟而开发的新模型, 如厌氧消化模型、pH 模型、化学沉淀模型和污泥上清液的处理工艺模型(厌氧氨氧化模型); 同时还介绍了 BioWin 模型在智利某污水厂水费谈判中采取的动态模拟、纽约市环保局管辖污水厂生物脱氮除磷升级改造、F. Wayne Hill 污水处理工艺优化的全厂模型及高碑店污水四系列改造项目中的应用, 说明了该模型在污水处理厂优化设计、运行以及改造中作为一种管理工具具有较高的实用价值和良好的应用前景。

关键词: 污水处理; BioWin 数学模型; 模拟器; 工艺模拟

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2008)04-0019-05

BioWin-based Mathematical Models for Wastewater Treatment Processes and Their Engineering Application

HU Zhi-rong¹, ZHOU Jun², GAN Yi-ping², K. Chapman¹, HAO Er-cheng²,
CHANG Jiang², I. Takacs¹, P. Dold¹

(1. *EnviroSim Associates Ltd., Canada*; 2. *Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100061, China*)

Abstract: With the aid of computer technology, the mathematical models for wastewater treatment processes have been widely and successfully applied abroad. However, their research and application are at an early stage in China. The concepts and methods of BioWin-based mathematical models for wastewater treatment processes, including well-established models for activated sludge process and new models developed for the whole plant, such as anaerobic digestion model, pH model, chemical precipitation model and model for treatment of sludge supernatant (anaerobic ammonia oxidation model) were introduced. The application of BioWin model to the negotiation of water tariffs for a WWTP in Chile, the upgrading reconstruction of biological phosphorus and nitrogen removal process of WWTPs in New York City, the process optimization of F. Wayne Hill WWTP, and the reconstruction of Gaobeidian WWTP was also introduced. All these show that this model, as a management tool, has higher application value and better application prospect in optimal design, operation and reconstruction of WWTP.

Key words: wastewater treatment; BioWin mathematical model; simulator; process simulation

随着城市污水处理厂出水排放标准的日趋严格,传统基于经验的活性污泥工艺设计方法已不能满足工程要求。为更好地进行活性污泥工艺的优化设计和运行,在过去的30年中,活性污泥工艺模型已从简单的去除COD和硝化发展为同时生物脱氮除磷模型^[1-3],从稳态模型发展到动态模型,从单一的生物反应器模型发展到能同时模拟污水和污泥处理的全污水处理厂模型^[4]。这些工艺模型包括了许多描述不同单元工艺的状态变量以及这些变量在多种生物化学反应过程中的化学计量关系和动力学特征。

借助于实施这些数学模型的商用模拟软件(模拟器),数学模拟技术已从一种研究工具发展成为一种成熟的工程工具,并在北美、欧洲、南非和澳大利亚等地得到了广泛应用,成为污水处理中的标准实践。笔者介绍了基于BioWin模型的污水处理工艺数学模拟的概念和方法,并结合工程实例说明了数学模拟在污水处理厂优化设计、运行及改造中作为一种管理工具的实际应用,以推动数学模拟技术在我国污水处理实践中的应用。

1 污水处理工艺数学模拟的概念和方法

污水处理厂的数学模拟包含两个方面:一是数学模型,即不同于小试、中试和生产性试验的物理模型,它是描述各种污水处理工艺中不同组分间相互转换关系的一系列数学关系式或方程,如描述活性污泥工艺中组分之间的生化转换关系的模型,也称为生物模型;二是实施这些数学模型的计算机软件,有时也称之为计算机模拟或仿真。若在同一模拟器中实施不同单元的工艺模型,通常采用转换器法和单一矩阵法来模拟。

1.1 模拟模型的建立

在工程实践中应用工艺模拟技术,需有一套模拟软件或一个平台来实施某个特定污水处理厂的所有工艺模型,并联结所有单元工艺(如生物反应器、沉淀池、污泥消化池)。该模型在模拟器设好后,需进行校准和验证以用于各种目的的模拟。为了建立一个污水厂的综合模型,所有的单元工艺[包括水区和泥区以及来自泥区的回流液(上清液)的处理工艺]都需要集中到一个模拟器中考虑。图1列出了建立一个采用典型活性污泥法的污水处理厂模拟模型的要求^[5]。

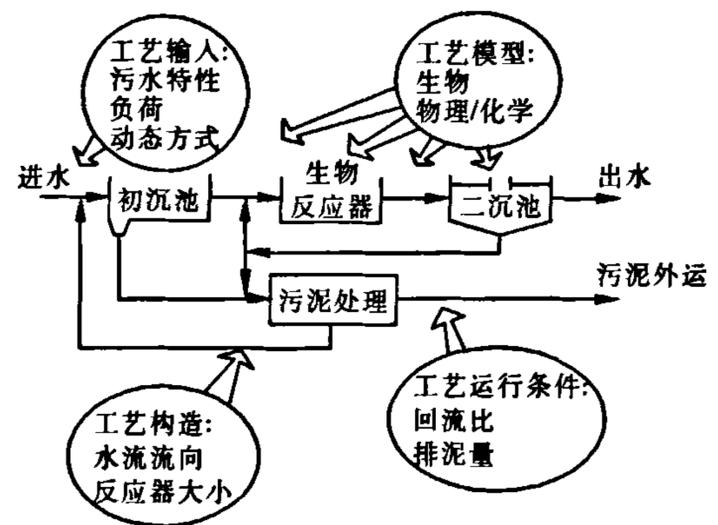


图1 污水处理工艺模拟模型的组成

Fig.1 Composition of wastewater treatment process model

1.2 模拟方法

① 转换器法

在转换器法中,一座污水处理厂的不同单元工艺(如活性污泥反应器、厌氧消化池和旁流处理单元)使用不同的模型(如活性污泥反应器采用ASM1、ASM2、ASM3模型,厌氧消化池采用IWA的厌氧消化一号模型),但描述这些不同模型的状态变量并不相同,因此在模拟由这些不同单元组成的整座污水处理厂时必须解决这些状态变量在不同单元工艺水流中间的转换问题,即一个状态变量如何在活性污泥反应器、厌氧消化池和旁流处理工艺反应器模型中的相互转换。例如,氧化的氮组分在活性污泥模型中一般仅考虑硝酸盐(如ASM1、ASM2/ASM2D);在厌氧消化模型中则不考虑硝酸盐,而在旁流工艺模型中不仅要求考虑硝酸盐还要考虑亚硝酸盐以及相应的反应,即两步硝化模型(在氨氧化菌的作用下氮被转换成亚硝酸盐,在亚硝酸盐氧化菌的作用下亚硝酸盐被氧化成硝酸盐)。转换器法需建立复杂的模型相接界面即转换器^[5-7],要求每一个状态变量的详细元素信息(通常难以做到),并依赖于状态变量的固定组成。目前大多数模拟器都使用这种方法,如GPS-X、WEST。

② 单一矩阵法

在单一矩阵法中,由不同单元组成的整座污水处理厂使用一个单一矩阵的综合模型(包括所有的组分或状态变量及相关反应),无需界面接口。从工程意义上讲,这种方法比转换器法更为实用。因为这种方法可以追踪整座污水处理厂中任何一个模型组分(或状态变量)在不同单元工艺中的变化,因

此可估计这些组分在不同工艺之间的转换,如活性生物量(普通异养菌、氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌)。单一矩阵模型法仅在 BioWin 模拟器中使用,该模型包括活性污泥反应、厌氧消化、旁流工艺、pH 模型/气体转移及化学沉淀反应等^[5,8],现已广泛用于模拟生物污水处理厂的工艺。图 2 是整个污水处理厂的模拟工艺流程,该工艺包括:a. 剩余污泥经脱水后与初沉污泥混合进入厌氧消化池;b. 厌氧消化池的上清液一部分进入 SHARON 处理单元,另一部分直接进入厌氧氨氧化反应器(ANNAMOX);c. 上清液处理出水返回主流工艺。

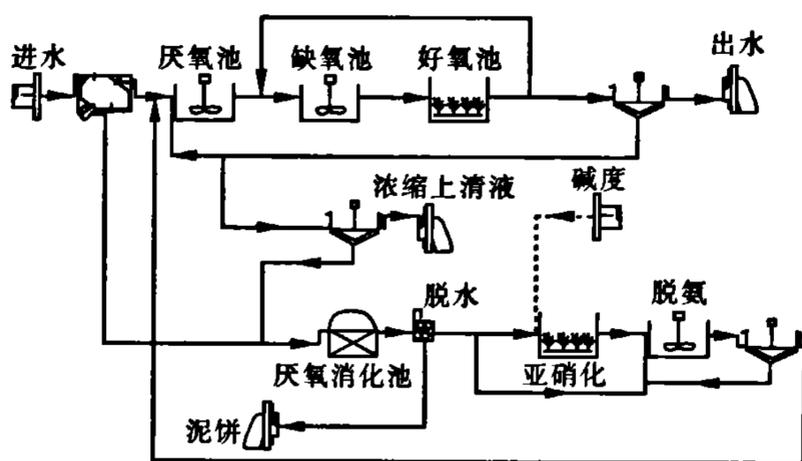


图 2 全污水处理厂的模拟工艺流程

Fig. 2 Flow chart of simulation process for whole WWTP

2 模型的校准和验证

BioWin 模型中的默认参数是基于世界上数百座生产性城市污水处理厂的观测数据,反映了典型城市污水水质的特征。这些默认参数非常有利于污水处理厂性能趋势的预测,但对于某座特定的污水处理厂,考虑到污水水质的变化,需对模型进行某种程度的校准,以使模拟结果更加准确。

通过校准验证可使模型结构真实、可靠地预测和优化污水处理厂的运行性能,校准所需数据可采用污水厂的历史数据,也可采用专门用于校准的补充数据和难以从正常运行厂获得而通过直接测量获得的数据(如 20℃ 时的最大硝化速率)。污水处理厂模型校准的方法和指南可参考文献[9]和[10]。

3 应用实例

污水处理工艺模拟作为有用的工具已在污水处理的许多方面得到了广泛应用,如在工艺设计方面,可实现不同工艺的评估和比较;在工艺运行方面则可实现工艺诊断和优化,以评价污水处理厂流量、负荷和运行工况变化对工艺的影响。

① 实例 I:南美智利某污水厂运行水费谈判

中采用的工艺动态模拟

Nolasco^[11]描述了一个用 BioWin 模型和模拟器实施污水处理动态模拟的应用实例。在该实例中,动态的工艺模型用于智利圣地亚哥最大污水处理厂运行合同的水费谈判中,通过模拟污水处理厂的运行以估计运行费用、污泥产量和能耗要求(氧需求)。

在水费谈判中,运营合同商基于传统的设计指南和稳态模型,建议 2005 年—2010 年合同期间水费在 2004 年的基础上增加 23%,而政府部门基于动态模拟结果的数据要求水费在此合同期内减少约 15%。与传统设计和稳态模型相比,基于动态模拟所估计的污水处理投资和运行费用更加可靠,最后负责决定水费的委员会决定支持政府机构,在考虑其他不可预测因素的情况下,在 2005 年—2010 年合同期内水费仅增加 3%。

② 实例 II:纽约市环保局管辖污水厂的生物脱氮除磷升级改造项目

Mahoney 等^[12]报道了基于 BioWin 的模拟模型在纽约市环保局所管辖污水厂生物脱氮除磷升级项目中的应用实例。纽约市环保局有 4 座污水处理厂,所有的处理出水均排放到东河上游,最终到达长岛海峡,总的二级处理能力 $>318 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

有研究表明,氮是造成长岛海峡富营养化的主要因素,因此为了解决海峡的水质问题,纽约市环保局拟实施一个阶段性削减氮排放量的计划,以确保 15 年中氮排放量减少 50%。为了达到这个长期减少氮排放量的目标,现有污水处理厂将分阶段进行升级改造,为此成立了一个专家组以帮助开发污水厂生物脱氮除磷升级改造的设计指南并提供项目管理经验。专家组的任务之一就是给纽约市环保局提供生物脱氮除磷升级改造建设期和建成后污水厂出水氮含量的预测,任务目标是通过使用 BioWin 模拟模型确定改造对 4 座污水厂脱氮能力的影响并估计出水总氮的最高浓度;更重要的是证实东河上游 4 座污水厂的生物脱氮除磷升级改造是否能实现长岛海峡长期的最大日负荷(TMDL)达标。

BioWin 工艺模拟工具可用来预测每座污水厂的流量和负荷在施工前、施工期间和施工后期对污水厂运行性能的影响,如施工期间反应器不能使用时、升级后处理能力的变化及增加额外碳源等的影响。专家组使用 BioWin 模拟出水氮的结果创建了一个称为“Bulge.”的管理工具,它用图形方式表示

了升级改造建设过程中对出水氮的预测。将污水厂每月的出水水质与“Bulge.”的预测结果进行对比,发现在2003年—2006年中,“Bulge.”预测的出水氮含量比实际运行结果仅高了2%。如此小的偏差使“Bulge.”被纽约市环保局接纳,并认为它能进行污水厂的升级改造,且满足每个中间的限制性条件。

该例介绍了BioWin工艺模拟工具是关键的规划和运行工具,基于BioWin模拟的“Bulge.”工具用来分析建设速度、批式调整和运行范围变化的影响,也可用来估计项目潜在变化的效能,并能容易地知道任何变化对管理的影响。

③ 实例Ⅲ:污水处理工艺优化的全厂模型

2005年Latimer等^[13]描述了建立一个全污水处理厂模拟模型作为改造F. Wayne Hill水资源中心

污水处理工艺优化工具的项目。

在该例中建立模拟模型包括4项任务:a.测定详细、具体的污水水质特性;b.进行小试以校正金属盐的投量;c.用历史数据和补充的取样数据(包括生物反应器结构)校准和验证模型;d.建立最终的执行模型。使用BioWin工艺模拟软件,在水资源中心对以下运行情况评价的基础上,开发了该中心污水厂的模拟模型(全污水处理厂模型的结构见图3)。这些运行情况包括:采用或不采用初沉池、不同的运行工况和生物反应池的季节优化、金属盐的投加点和量的影响/优化、污泥的处置和回流影响、DO优化、暴雨流模拟和部分单元关闭的评价。这个应用显示了如何建立一个全厂模型,以降低运行和维护成本、生产高质量的出水。

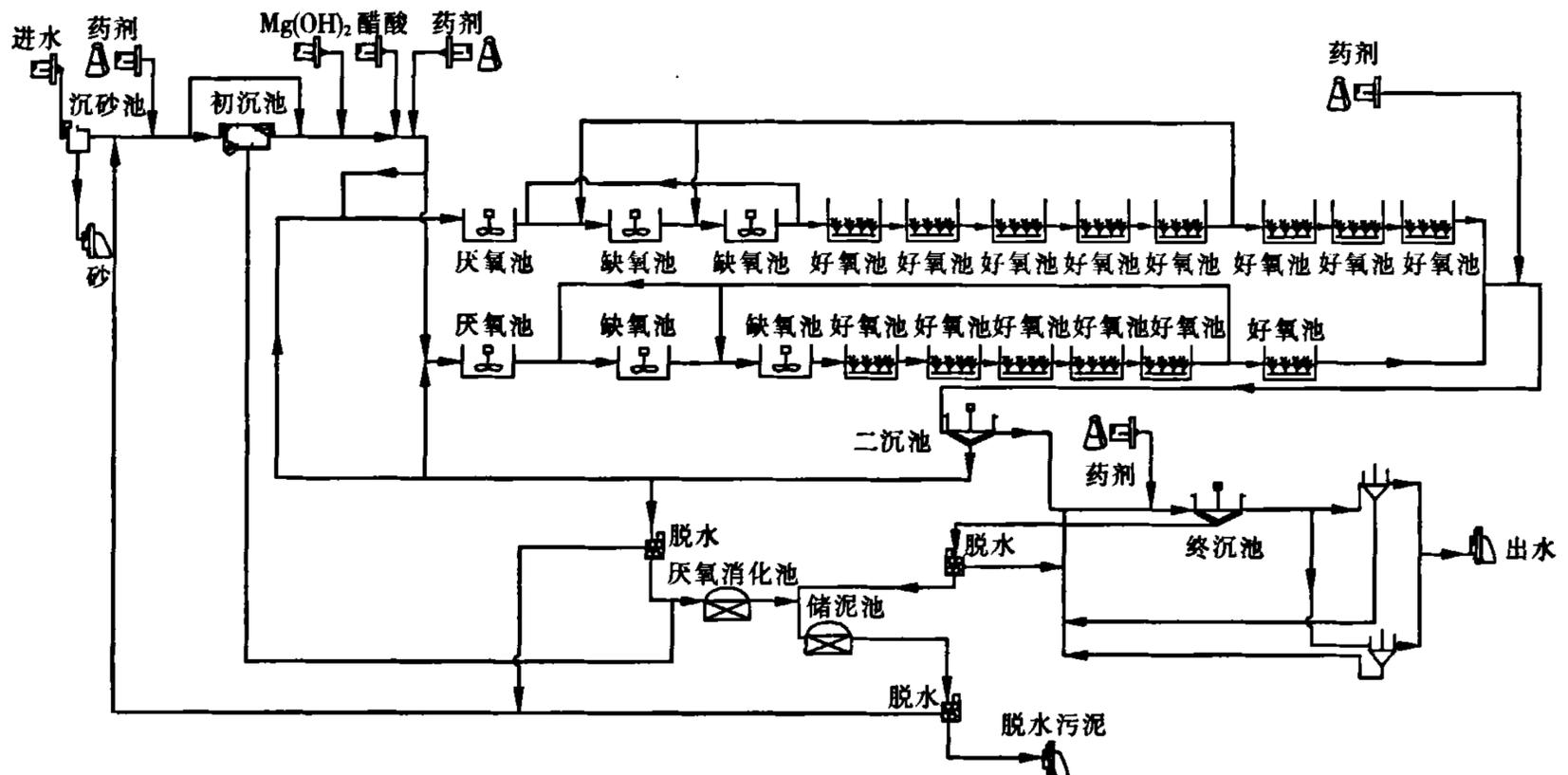


图3 F. Wayne Hill全污水处理厂模拟模型的结构

Fig. 3 Model configuration of whole F. Wayne Hill WWTP

④ 实例Ⅳ:高碑店污水处理厂四系列的改造

2005年北京排水集团甘一萍等采用数学模拟技术建立了高碑店污水处理厂四系列的工艺模型,对当时的运行情况进行了模拟分析,在此基础上提出了改善脱氮效果的改造方案。针对脱氮效率不高的问题,研究组对延长缺氧时间并保证好氧段的硝化效果进行了详细的模拟分析,最终确定了改造方案的核心内容。改造后系统运行稳定时的脱氮效率明显提高,与预期效果基本一致,证明了数学模拟技术的可靠性和实用性。

该例主要说明了采用数学模拟技术可对现有工

艺进行分析和诊断,找出运行中存在问题的关键原因,并针对易于改善和改造的条件进行模拟分析,最终确定工艺优化和改造方案。

4 结语

自国际水协的活性污泥数学模型出版以来,数学模型已得到了广泛研究和应用,但这仅仅是污水处理的一部分,对于整座污水处理厂来说,数学模型还应包括污泥处理等单元。由于IWA的活性污泥数学模型给出的参数值并不是模型的一部分,故要求对该模型进行广泛的校正。BioWin模型使用技术先进的单一矩阵的整体模型,能全面模拟整座污

水处理厂的所有工艺单元,且 BioWin 模型参数值来自于最新的研究出版物和实际污水处理厂校正得到的最佳缺省值。这种广泛和综合的解决方案使得模型校正要求大大减少,也因此使得 BioWin 模拟软件在北美和澳大利亚等地得到了广泛的应用并成为污水处理中的标准工程工具。

参考文献:

- [1] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2D[J]. *Water Sci Technol*, 1999, 39(1): 165 - 182.
- [2] Barker P S, Dold P L. General model for biological nutrient removal activated sludge systems: model presentation[J]. *Water Environ Res*, 1997, 69(5): 969 - 984.
- [3] Hu Z, Wentzel M C, Ekama G A. A general model for biological nutrient removal activated sludge systems: model development [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2007, 98(6): 1242 - 1258.
- [4] Dold P L, Fairlamb P M, Jones R, *et al.* Sidestream modelling incorporated into whole plant simulation [A]. Closing the Nitrogen Cycle from Urban Landfill Leachate by Biological Nutrient Removal over Nitrate and Thermal Treatment [C]. Spain: Clonic project, 2007.
- [5] Wilson A W, Dold P L. Using a process simulator for design, analysis, de-bottlenecking and operation of wastewater treatment plants [A]. Presented at the 50th Annual Conference of the Western Canada Water & Wastewater Association [C]. Canada: Water & Wastewater Association, 1998.
- [6] Vanrolleghem P A, Rosen C, Zaher U, *et al.* Continuity-based interfacing of models for wastewater systems described by petersen matrices [J]. *Water Sci Technol*, 2005, 52(1 - 2): 493 - 500.
- [7] Volcke E I P, van Loosdrecht M C M, Vanrolleghem P A. Continuity-based model interfacing for plant-wide simulation: a general approach [J]. *Water Res*, 2006, 40(15): 2817 - 2828.
- [8] Takács I, Bye C M, Chapman K, *et al.* A biofilm model for engineering design [J]. *Water Sci Technol*, 2007, 55(8 - 9): 329 - 336.
- [9] Dold P L, Jones R M, Takacs I, *et al.* Practical guidance for WWTP model calibration and associated data gathering requirements [A]. Proceedings of the Water Environment Federation 76th Annual Technical Exhibition & Conference [C]. California: Water Environment Federation, 2003.
- [10] Melcer H, Dold P L, Jones R M, *et al.* Methods for Wastewater Characterization in Activated Sludge Modeling [M]. Alexandria, VA: Water Environment Research Foundation, 2004.
- [11] Nolasco D A. Software applications in large wastewater treatment plants in Latin America [A]. Proceedings of the Water Environment Federation 78th Annual Technical Exhibition & Conference [C]. Washington: Water Environment Federation, 2005.
- [12] Mahoney K, Mazzocco J, Mueller J G, *et al.* The development of the New York City BNR program [A]. Nutrient Removal 2007, the State of the Art [C]. Baltimore, Maryland: Water Environment Federation, IWA, EPA, 2007.
- [13] Latimer R, Pitt P, Richards T, *et al.* Development and implementation of a whole plant simulator of the F. Wayne Hill waster resources center for process optimization [A]. Proceedings of the Water Environment Federation 78th Annual Technical Exhibition & Conference [C]. Washington: Water Environment Federation, 2005.

电话: +1 905 90 1122

传真: +1 905 689 2200

E-mail: hu@envirosim. com

收稿日期: 2007 - 08 - 31

· 信息 ·

无锡市梅园水厂变换“角色”净化太湖水

2007年12月5日,在无锡市太湖新城接山水利工程附近的工地上,一根口径为1.4 m的输水管道正在施工。该输水管穿过渤公桥洞后抵达接山大坝的底部,直至五里湖湖边。待2008年3月长江供水工程竣工后,梅园水厂的出水将通过这根新管回排到五里湖中,这标志着无锡市“最老”的水厂将不再向用户供给自来水,其功能将改为加工净化太湖水。这一治水新举措在江苏省内还是首次推出,在国内也较罕见。

(无锡市自来水总公司 华一)