

密云水库及其流域营养物集成模拟的模型体系研究

王建平¹, 苏保林^{1*}, 贾海峰¹, 程声通¹, 杨忠山², 武佃卫², 孙峰²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京市水文总站, 北京 100038)

摘要:近年来由于连年干旱, 密云水库面临着严重的水质和水量问题. 为实现密云水库及流域的营养物集成模拟和预测, 研究开发了以流域非点源模型、水体生态动力学模型和河流模型为基础的, 在 GIS、RS 技术支持下的密云水库水环境模拟预测集成模型. 生态动力学模型是由 WASP 模型和 EFDC 模型耦合而成, 流域非点源模型选用 SWAT 模型系统, 该系统同时包括了污染物在河流中的迁移转化模拟. 研究采用马尔科夫链蒙特卡罗法进行参数识别. 结果表明, 实测水质数据基本位于模拟数据分布众数曲线上下, 并基本落入了水质变量模拟分布 80% 置信度的置信区间内, 模拟结果与监测数据匹配较好. 说明流域集成模型体系得到了有效识别并能满足实际应用.

关键词:密云水库; 营养物; 集成模型; 流域

中图分类号: X192; X143 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2006)07-1286-06

Integrated Model of Nutrients for the Miyun Reservoir and Its Watershed

WANG Jian-ping¹, SU Bao-lin¹, JIA Hai-feng¹, CHENG Sheng-tong¹, YANG Zhong-shan², WU Dian-wei², SUN Feng²

(1. Department of Environmental Science & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Hydrographic Station of Beijing, Beijing 100038, China)

Abstract: In recent years, the Miyun Reservoir faces severe problems of water quality and quantity due to continuous drought. In order to simulate and predict the eutrophic status of the Miyun Reservoir and its watershed, an integrated model was developed based on GIS and RS technology, which was composed of non-point source (NPS) simulation model, aquatic ecological-hydrodynamic model, and river water quality model. Ecological-hydrodynamic model was developed through coupling water quality analysis simulation program (WASP) with environmental fluid dynamics Code (EFDC). SWAT was selected as NPS simulation model, which could also perform water quality simulation in the river. Then the integrated model was calibrated using Markov Chain Monte Carlo method and verified using observed data. Results indicated that observed water quality data laid around the mode curves of simulation distribution, and which also dropped into the confidence interval on 80 percent credibility of water quality simulation distribution. In conclusion, the results show that the integrated model can meet the need of application.

Key words: Miyun Reservoir; nutrient; integrated model; watershed

密云水库是北京市城市生活用水的主要地表水源, 目前水质已面临富营养化的威胁, 水库部分区域出现了富营养化的征兆^[1,2]. 由于多年来各级政府十分重视密云水库水源地的保护, 流域内工业点源污染得到了有效控制, 土壤流失造成的非点源污染就成为水库富营养化程度加重的主要因素. 本研究在对流域内各类污染源进行充分调查的基础上, 构建了以流域非点源模型、水体生态动力学模型、河流模型为基础的, 在 GIS、RS 技术支持下的密云水库水环境模拟预测集成模型, 并进行了参数识别和模型验证. 研究实现了密云水库及流域的营养物集成模拟和预测, 为密云水库运行管理、富营养化防治以及流域生态系统保护的研究奠定了基础.

密云水库是北京市的大型水库之一, 也是北京市最重要的地表饮用水源地, 始建于 1958-09, 1960-09 建成. 密云水库位于北京市东北 (如图 1 所示), 距市区 80 多 km, 是潮白河水系上最大的水库, 最大库容 $43.75 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相应水面面积 188 km^2 .

密云水库流域面积约 $15\,505 \text{ km}^2$, 地处北纬 $49^\circ 11' \sim 41^\circ 31'$ 和东经 $115^\circ 25' \sim 117^\circ 33'$ 之间. 流域地貌以山地、丘陵为主, 丘陵区主要分布在潮河流域及水库周边. 土壤类型以淋溶褐土 (28%)、棕壤 (26%)、褐土性土 (18%) 和石灰性褐土 (12%) 等 4 类土壤为主, 约占 84%. 流域内植被覆盖较好, 森林和草地覆盖率达到 76% 以上 (森林 49%, 不同覆盖

1 密云水库及流域

1.1 概况

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2005-07-08

基金项目: 北京市重大科技项目 (H012110010119)

作者简介: 王建平 (1977~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境模拟和水利政策, E-mail: wangjp@tsinghua.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: sbl@tsinghua.edu.cn

度的草地 27%),农用旱地约占 21%.

1.2 密云水库的功能和现状

密云水库自 1960-09 建成以来,一直以防洪、发电、农业灌溉、水产养殖和城市供水为主要任务.进入上个世纪 80 年代以后,随着华北地区水资源日趋紧张,密云水库功能发生了重大变化,生活用水比重由 80 年代初的 0.2% 迅速上升到 2002 年的 78%;农业用水比重逐年降低,由 80 年代的 85% 降至

2002 年的 0.8%;环境用水比重稳中有增,而工业用水所占比重在 80 年代到 90 年代中稳中有升,而后由于水资源的持续紧缺,工业用水比例也渐渐压缩.以上变化反映出:密云水库的饮用水源功能在不断增强(如图 2).与此同时,由于官厅水库来水的减少和水质的恶化,密云水库逐渐代替官厅水库成为最主要的地表水源.近年来密云水库年均供水量约 5~6 亿 m³,约占全市年地表供水量的 60%.因此保



图 1 密云水库流域图

Fig.1 Miyun Reservoir watershed

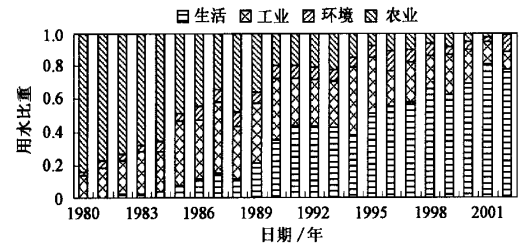


图 2 密云水库用水结构变化曲线图

Fig.2 Water use proportion of the Miyun Reservoir

护好密云水库这盆清水对北京的可持续发展具有极为重要的意义.

目前密云水库面临的首要环境问题是富营养化.研究表明^[1,2],库区水体尽管现阶段处于中营养水平,但向富营养型发展的趋势明显.按照国家地面水环境质量标准(GB3838-2002),密云水库最主要功能是饮用水水源,水体水质应在Ⅱ类以上,对应的总磷(TP)浓度为 0.025 mg/L,总氮(TN)浓度为 0.5 mg/L.目前,密云水库水体总氮超标严重,普遍超标 1 倍以上,个别月份超标 3、4 倍,总磷除个别月

份超标外,年均基本能控制在Ⅱ类水的标准范围内.水体富营养化已引起了相关部门的高度重视.

除潜在水质问题外,来水量减少、库水位不断下降的问题也不容忽视.近年来,华北地区连续多年干旱,密云水库也经历了 1998 年丰水后的连续 5 个枯水年(1999~2003).如图 3,持续干旱使得密云水库补水严重不足,水位不断下降.

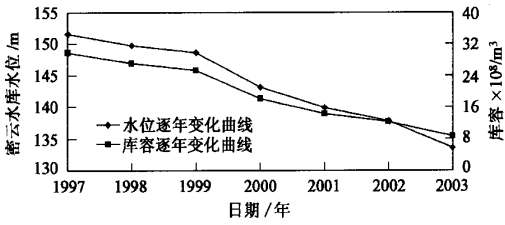


图 3 密云水库水位和库容变化

Fig.3 Water level and volume change in the Miyun Reservoir

2 流域集成模型

为实现密云水库及流域的营养物集成模拟和预测,并为密云水库运行管理、富营养化防治以及流域

生态系统保护提供决策支持,在调查、监测和实验的基础上,开发了以流域非点源模型、水体生态动力学模型、河流模型为基础的,在 GIS、RS 技术支持下的密云水库水环境模拟预测集成模型。

集成模型体系如图 4 所示,生态动力学模型是由 WASP 模型和 EFDC 模型耦合而成,流域非点源模型选用 SWAT 模型系统,该系统同时包括了污染物在河流中的迁移转化模拟。

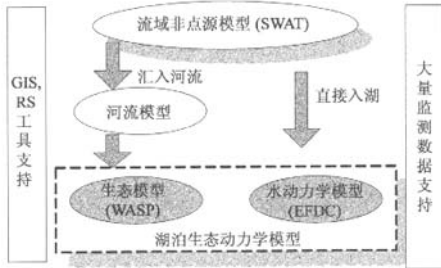


图 4 水环境模拟预测集成模型框架图

Fig. 4 Frame of integrated environmental simulating model

EFDC (The Environmental Fluid Dynamics Code)是由威廉玛丽大学 John Hamrick 开发的一个三维地表水模型,可实现河流、湖泊、水库、湿地系统、河口和海洋等水体的水动力学模拟^[3]。水动力学模拟的水文数据包括:①水库入流流量,主要考虑密云水库的两大河流,白河和潮河。②水库出流流量。③密云水库水位数据。

WASP (Water Quality Analysis Simulation Program Modeling System)^[4]是由美国国家环保局开发的用于地表水水质模拟的模型,它提供了一个灵活的动态模拟系统。WASP 可以模拟 8 个指标,分别为:氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、溶解性磷酸盐(OPO_4)、叶绿素 a (Chl-a)、碳生化需氧量(CBOD)、溶解氧(DO)、有机氮(ON)和有机磷(OP)。WASP 模型的输入数据主要包括:①水动力学文件(流量、水位等),由水动力学模型 EFDC 生成;②污染负荷量和入库方式。由非点源模型 SWAT 模拟提供。

SWAT(Soil Water and Assessment Tool)^[5]模型由美国得克萨斯农业与工程大学学院站分校的水资源研究所开发。它是一个以日为步长的连续空间分布的流域模型,可以模拟大流域的径流、泥沙、营养物和杀虫剂的运移。SWAT 模型结构清楚,水文模拟采用 SCS 模型,土壤侵蚀模型采用 MUSLE 模型,是非点源模型中应用广泛而且已经具备相当应

用经验的子模型。同时,目前版本的 SWAT 模型(AVSWAT2001)已集成到 ArcView GIS 环境中,具有良好的用户应用界面和较强的空间数据管理、分析和表达的能力,在众多的非点源模型应用中具有较强的优势。限于篇幅,更详细的内容可参见文献[3~5]。

3 时空概化

时间概化要从实际问题的性质出发,考虑模型状态变量和输入条件的时间变化属性,一般来说,概化时间步长要小于重要变量的变化周期。同时,时间概化还需考虑实际数据的详尽程度。考虑到上述概化原则和水文、水质数据的可获得性,确定本次模拟工作以水文、水质的月变化为基础展开。主要依据是:①密云水库水质监测是每月中旬进行一次;②可获得的水文数据也是每月一个数据;③月周期水质模拟能够较好地反映水库水质的宏观变化规律,可满足水质管理要求。

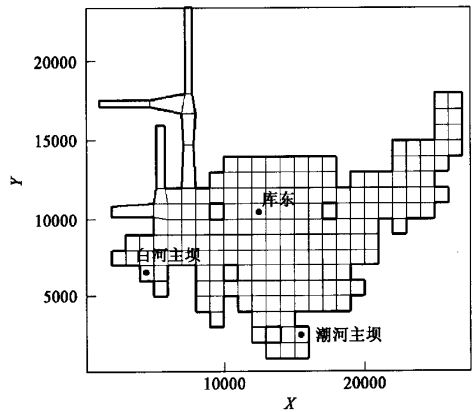


图 5 密云水库概化单元格

Fig. 5 Segmentation of the Miyun Reservoir

空间概化首先需要根据模型要求确定网格形状,EFDC 可以处理矩形网格和曲线正交网格。研究中采用矩形网格,以方便利用空间数据处理工具进行概化。网格形状确定后,就可确定网格大小和数目、垂向分层数。

研究对比了不同网格的精度、计算时间和效率,最终确定单元格大小为 $1\,000\text{m} \times 1\,000\text{m}$ 的正方形网格,局部地区(白河河道)概化为长方形网格,共包括 148 个单元格。密云水库空间概化结果及部分水质监测站点如图 5 所示。考虑温度分层效应,垂直方向分为 2 层,各占水深比例的 50%。密云水库的水

动力学、水质模拟均将建立在该空间概化结果的基础之上。

4 参数率定与模型验证

水环境模拟预测集成模型中非点源模型的参数率定和模型验证见文献[6],本文将着重介绍生态动力学模型部分的参数率定和验证.根据数据收集情况,研究确定 2000 年数据用于生态动力学模型的参数率定,2001 年数据用于模型验证.水文数据、气象数据、水质和负荷数据均为月数据.

4.1 水动力学模型

水动力学模拟由 EFDC 程序执行,运行结果提供了水质模拟(WASP)必需的水动力学条件.首先按 EFDC 模型格式要求设定数据输入文件,输入条件设定完毕后即可开始模拟.水动力学模拟结果如图 6 所示,模拟水位和观测水位匹配较好,平均误

差 0.09%,绝对误差约 0.13m;最大误差 0.37%,约 0.55m.

4.2 水质模型

在 WASP 模型系统中水质模块 EUTRO5 的水质参数有 42 个之多,通过灵敏度分析提取了灵敏度较高的参数,结果如表 1 所示.

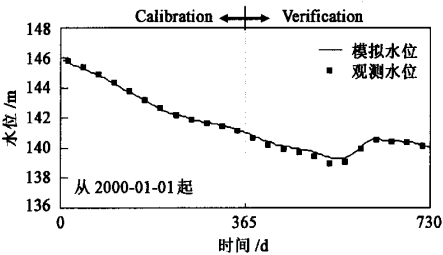


图 6 水动力学模型(EFDC)参数识别和验证图
Fig.6 Calibration and Verification of EFDC

表 1 待识别水质模型参数
Table 1 Parameters needed to be calibrated in water quality model

参数名称	物理意义	参数范围	方差
SOD	20℃ 条件下的底泥耗氧量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$	0~3	0.3
K12C	20℃ 条件下的硝化速率/ d^{-1}	0.01~0.5	0.05
K20C	20℃ 条件下的反硝化速率/ d^{-1}	0.0~0.05	0.005
KNO3	反硝化氧限制半饱和系数/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.1~1.0	0.1
K1C	20℃ 条件下浮游植物的饱和和生长率/ d^{-1}	2~5	0.3
CCHL	浮游植物碳与叶绿素的比(mg/mg), 缺省值为 30	20~40	2
K1RC	20℃ 条件下浮游植物的内源呼吸速率/ d^{-1}	0.02~0.2	0.02
NCRB	浮游植物内的氮碳比(mg/mg), 缺省值为 0.25	0.2~0.4	0.02
PCRB	浮游植物内的磷碳比(mg/mg), 缺省值为 0.025	0.01~0.03	0.002
KDC	20℃ 条件下的 CBOD 降解速率/ d^{-1}	0.0~0.02	0.002
K2	20℃ 条件下水体的大气复氧速率/ d^{-1}	0.1~0.2	0.01
K71C	20℃ 条件下溶解有机氮的矿化速率/ d^{-1}	0.0~0.03	0.003
K83C	20℃ 条件下溶解有机磷的矿化速率/ d^{-1}	0.0~0.03	0.003

参数识别方法为马尔科夫链蒙特卡罗法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC).MCMC 法用于模型参数不确定性分析的研究是近年来才发展起来的一种方法^[7],用于待估参数的贝叶斯分布采样,以估计参数的后验分布.由于这种方法的应用,使得随机模拟在很多领域的计算中,显示出巨大的优越性,相比 Monte Carlo 法,MCMC 法可大大降低计算量.有关 MCMC 的概述和实现途径可参见相关文献^[8].

MCMC 算法控制参数选择如下:迭代 10 000 次,平行运行 5 次,初始化阶段为 5 000 次.参数初始协方差矩阵 C_0 见表 1 最后一列,即对角线为各参数方差,其余为 0 的矩阵,表 1 中参数方差取参数搜索范围的 1/10.初始迭代次数 $i_0=1\,000.5$ 次平行

试验后,参数采样结果统计如表 2 所示.

对表 2 的参数后验分布进行随机采样,代入 WASP 模型进行水质模拟,逐月输出各监测站点各水质状态变量模拟值.采样 5 000 次,分别统计各水质变量逐月的采样分布.以白河主坝站点为例,各水质状态变量模拟分布和监测数据的对比如图 7 所示,其中水质变量的模拟分布用众数和 80% 置信区间来表示.结果如下:

(1)溶解氧(DO) 可以看到,DO 的模拟不确定性在水库结冰季节明显增大.主要原因是在结冰季节大气复氧明显减少,底泥耗氧的大小对水体中溶解氧浓度的影响就更加显著.

(2)叶绿素(Chl-a) 从模拟分布图可以发现,叶绿素模拟的不确定性很大,主要包括 2 方面的原

表 2 参数后验分布统计
Table 2 Statistics of parameter posterior distributions

参数	样本数	平均值	众数	标准差	斜度	最小值	最大值	百分点						
								5	10	25	50	75	90	95
K12C	25 000	0.218 0	0.020 0	0.144 3	0.283 7	0.010 0	0.499 7	0.023 8	0.037 6	0.085 4	0.201 9	0.341 5	0.430 3	0.464 3
K20C	25 000	0.021 7	0.010 0	0.013 7	0.354 7	0.000 0	0.050 0	0.002 9	0.004 7	0.010 1	0.019 7	0.032 6	0.042 6	0.046 0
KNO3	25 000	0.541 8	0.325 0	0.257 3	0.067 6	0.100 1	0.999 7	0.146 7	0.191 7	0.319 7	0.534 4	0.762 5	0.907 7	0.955 1
K1C	25 000	3.725 1	4.625 0	0.830 6	-0.288 6	2.000 3	5.000 0	2.265 5	2.510 3	3.053 3	3.819 0	4.450 1	4.788 6	4.890 8
CCHL	25 000	31.431 4	38.500 0	5.645 1	-0.295 5	20.000 3	39.999 7	21.603 3	23.168 4	26.813 0	32.085 7	36.392 1	38.531 3	39.298 4
K1RC	25 000	0.092 1	0.065 0	0.046 2	0.436 8	0.020 0	0.200 0	0.027 9	0.034 7	0.054 1	0.085 2	0.126 1	0.161 0	0.177 1
NCRB	25 000	0.313 6	0.385 0	0.057 9	-0.290 1	0.200 2	0.400 0	0.214 5	0.226 8	0.265 9	0.320 6	0.365 6	0.386 6	0.393 5
PCRB	25 000	0.018 5	0.011 0	0.005 7	0.304 5	0.010 0	0.030 0	0.010 7	0.011 3	0.013 5	0.017 9	0.023 1	0.027 0	0.028 4
KDC	25 000	0.006 8	0.000 7	0.005 6	0.729 4	0.000 0	0.020 0	0.000 4	0.000 8	0.002 1	0.005 1	0.010 9	0.016 0	0.017 8
K2	25 000	0.157 3	0.195 0	0.028 7	-0.302 6	0.100 0	0.200 0	0.107 2	0.115 2	0.133 6	0.160 9	0.182 9	0.193 6	0.197 0
K71C	25 000	0.010 2	0.001 0	0.008 5	0.691 1	0.000 0	0.030 0	0.000 5	0.001 0	0.002 9	0.007 8	0.016 4	0.023 8	0.026 8
K83C	25 000	0.019 1	0.027 5	0.007 8	-0.511 7	0.000 0	0.030 0	0.004 6	0.007 5	0.013 3	0.020 4	0.025 8	0.028 3	0.029 2
SOD	25 000	1.077 1	0.500 0	0.749 0	0.651 9	0.000 2	2.996 4	0.109 3	0.204 0	0.463 0	0.931 8	1.567 9	2.221 4	2.573 0

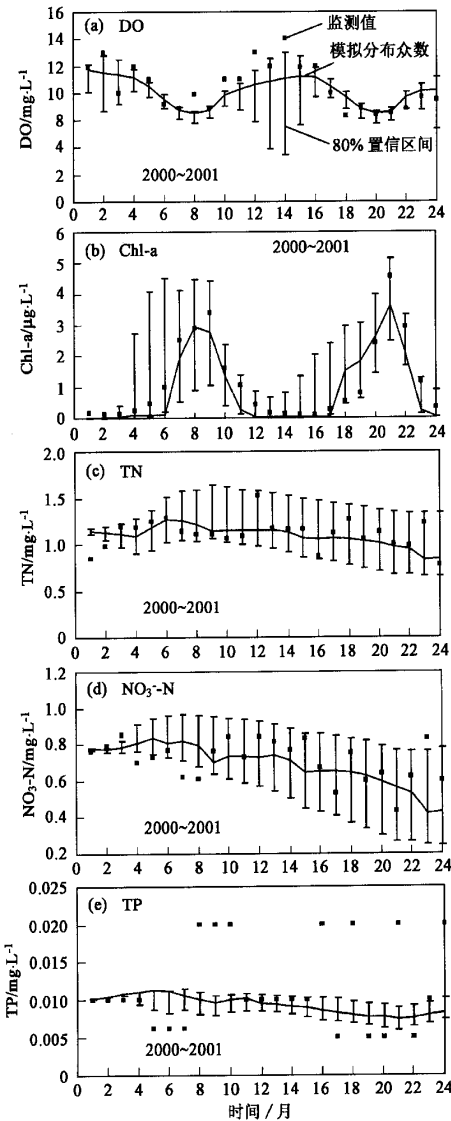


图 7 白河主坝站点观测变量与模拟状态变量分布对比
Fig. 7 Comparisons between observed and simulated values at the point of Baihe dam

因:①叶绿素生长与大气复氧、营养物质循环过程紧密相关,导致叶绿素模拟更加困难;②叶绿素浓度监测不确定性较大.叶绿素浓度与气温、光照条件和生态条件密切相关,采样时间、位置和深度等都会给监测带来很大的随机性.

(3)总氮(TN) 从图中可以看出,总氮的总体变化趋势模拟较好,同时总氮模拟与溶解氧、叶绿素模拟不同,并不是周期变化,因而不确定性会随模拟时间的增长而累积.在这种情况下,若采用试错法识别参数,参数选择不好,可能会导致模拟变化趋势与实际情况完全相反.硝氮(NO_3^- -N)的结论与总氮相同.

(4)总磷(TP) 从白河主坝站点的总磷模拟分布图可以看出,总磷的总体变化趋势模拟较好,同时不确定性较小.

参数率定和模型验证结果表明,实测水质数据基本位于模拟数据分布众数曲线上下,并基本落入了水质变量模拟分布 80%置信度的置信区间内,模拟结果与监测数据匹配较好.说明模型参数得到了有效识别.同时研究表明,MCMC 法可有效对参数后验分布进行采样.

5 结论

为实现密云水库及流域的营养物集成模拟和预测,并为密云水库运行管理、富营养化防治以及流域生态系统保护提供决策支持,研究开发了以流域非点源模型、水体生态动力学模型、河流模型为基础的密云水库水环境模拟预测集成模型.参数率定和模型验证结果表明,实测水质数据基本位于模拟数据分布众数曲线上下,并基本落入了水质变量模拟分布 80%置信度的置信区间内,模拟结果与监测数据匹配较好.说明流域集成模型体系得到了有效识别并能满足实际应用.

参考文献:

- [1] 杜桂森, 孟繁艳, 李学东, 等. 密云水库水质现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 110~112.
- [2] 杜桂森, 王建厅, 武佃卫, 等. 密云水库的浮游植物群落结构与密度[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 501~504.
- [3] Hamrick J M. A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects[R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report 317, 1992.
- [4] Ambrose R B, Wool T A, Martin J L, *et al.* WASP5. x, A Hydrodynamic and Water Quality Model Theory, User's Manual, and Programmer's Guide[M]. Draft: Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, 1993.
- [5] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, *et al.* Soil and water assessment tolls theoretical documentation (Version 2000)[R]. Texas: Grassland, soil and water research laboratory, Agricultural research service, 2001.
- [6] 苏保林, 王建平, 贾海峰, 等. 密云水库流域非点源模型系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 355~359.
- [7] 龚光鲁, 钱敏平. 应用随机过程教程及其在算法与智能计算中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [8] 王建平, 程声通, 贾海峰. 基于 MCMC 法的水质模型参数不确定性研究[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 24~30.

第 20 届国际科技数据委员会(CODATA)国际学术会议通知

第 20 届 CODATA 国际学术会议将于 2006-10-23~2006-10-25 在北京国际会议中心召开,会议的主题是“信息社会的科学数据与知识”。我们诚挚地邀请您出席此次大会。

国际科学数据委员会(CODATA)是国际科学联合会(ICSU)组建的跨学科的科学委员会,其宗旨是提高重要科技数据的质量、管理水平和共享程度。2006 年适逢 CODATA 成立 40 周年,预计届时全球 600 余名专家学者将齐聚北京,使此次会议成为 CODATA 历史上一次里程碑式的盛会。第 20 届 CODATA 国际学术会议涉及的部分前沿问题包括:数据归档、存贮、处理、传输、应用和共享服务的技术和规范,与数据领域相关的信息技术,科学数据在科学研究和创新中的应用以及科学数据在自然科学(包括:天文学和气象学、能源和环境、物理学和化学、地球科学、材料学、灾害减轻和预防、天然气水合物、神经信息学、生物信息学、生物多样性、医药卫生等)和社会科学中的应用服务。(详情请见会议网站:<http://www.codata.cn/2006/index.html>)

本次大会将为全球数据领域的专家提供一个共享和交流的平台。让我们相约在金秋北京!

国际科技数据委员会(CODATA)中国全国委员会

2006 年 5 月 10 日