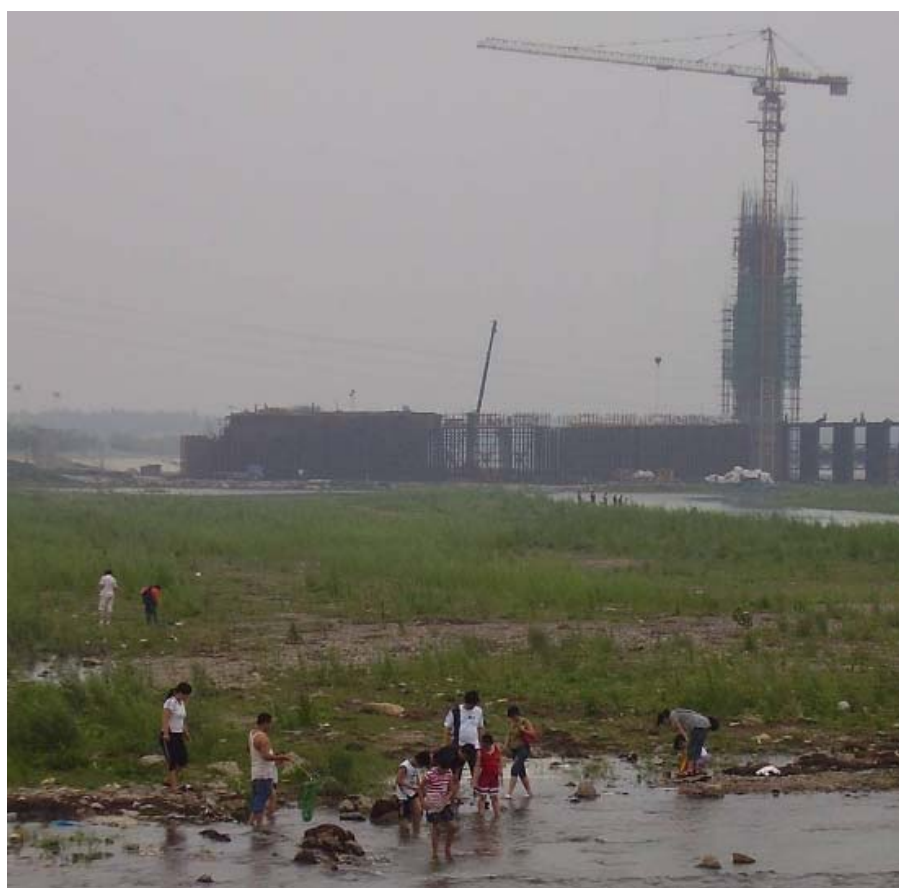


## 中英合作水资源需求管理项目 水资源综合管理方法汇编

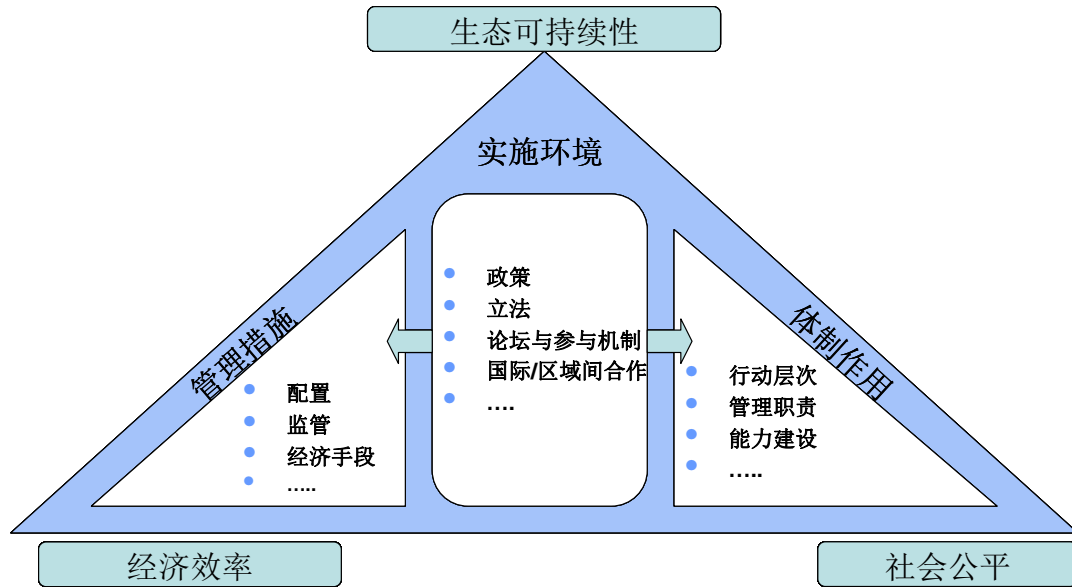
### 实例 1.5: 辽宁省朝阳市水质模型

2010 年 5 月

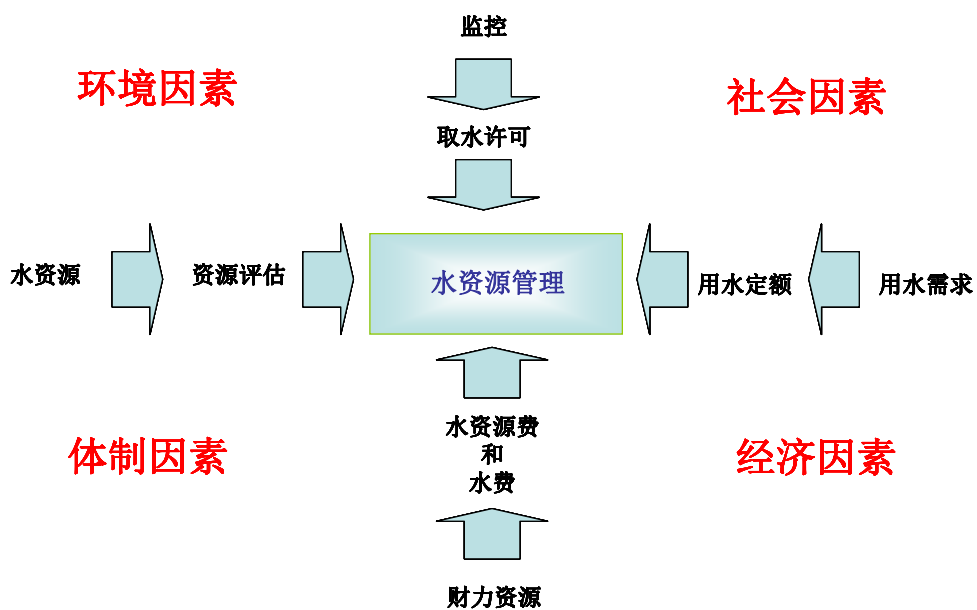


# 水资源综合管理 (IWRM)

(基本原理引自全球水伙伴)



## 水资源综合管理驱动要素



(第二幅图引自水资源需求管理援助项目)

**概述：**本文概述了辽宁省朝阳地区大凌河水质模型的开发情况，模型用于调查大凌河及其支流的水质情况，通过更好的了解污染源，达到长期改善水质的目的。

本文由以下几个部分组成：

- 引言
- 建模目的
- 模型软件的选择
- 数据要求和可获取性
- 数据处理和评估
- 模型开发
- 培训
- 结论汇总

本文是可持续的水资源规划、水量分配和管理主题系列之一。参考书目中有本系列的详细介绍。

在水利部的支持下，根据中英合作水资源需求管理援助项目（WRDMAP）的成果，特编写本方法系列，以辅助省、市、县各级水利（水务）部门的工作，以实现水资源的可持续利用。

## 1 引言

水污染不仅危害人们的健康，也给环境造成危害。通过使用水质模型，更好地了解污染源，以达到长期改善水质的目的。在辽宁省大凌河流域，水质模型的开发和应用已经在水资源综合管理中发挥了作用，本文概述了水质模型开发的情况和相关经验。

## 1.1 朝阳市大凌河

朝阳市位于中国东北的辽宁省境内，距离北京 390 km。朝阳市区大约有 30 万人口，预期还会增长。

大凌河长度为 434 km，流域面积为 23837 km<sup>2</sup>。流域的大部分地区（20285 km<sup>2</sup>）位于辽宁省境内，其它部分位于内蒙古和河北省。

模型研究区域的具体情况未界定，目前的水质情况可简要概述。

## 1.2 建模概要

通过水质模型可以获得必要的信息，以改善朝阳市水务局和环保局管理的取排水系统。

初期水质模型研究试点区是连接阎王鼻子水库和白石水库的大凌河河段（水库没有包含在模型中），大约长 60 km。随后，通过监测收集了更多的数据，模型被进一步扩展，覆盖了大凌河干流及支流的绝大部分。

这项工作是由朝阳水务局和朝阳环保局的工作人员、辽宁省水文局和国际专家的协助下开展的。

## 2 建模目的

建模的主要目的是为改善取排水系统的管理。也就是水质模型能够辅助取排水许可的制定，通过使用模型，可以测试当取水、排水或水量（如干旱）发生改变时，对河流中水质的影响。反之，可以使用水质模型确定对应具体的河流水质目标所需的取水和排水限额。

## 3 模型软件的选择

本案例考虑了几种不同的模型备选方案，包括专门编写的表格模型（基于 Excel）、来自 DHI 的 Mike Basin 模型、以及来自美国环保署（USEPA）的 Qual2K 模型。

分析了每种模型的成本和易用性，特别是考虑了所选模型在中国的适用性和推广应用。

Qual2K 模型是一个水力水质模型，可以从美国环保署（USEPA）免费下载。模型由用户手册（Chapra 等人，2006）支持。模型开发还在继续，更新定期发布在网站上。这使得该模型尤其适合在中国作为案例研究模型使用。

由于考虑到成本和易用性，该案例决定采用 Qual2K 模型。

## 4 数据要求和可获取性

### 4.1 数据要求

Qual2K 模型需要水质、水力学和气象数据以及校准系数。其它的信息可参照 Qual2K 模型的用户手册（Chapra 等人，2006），以及本系列的指导手册 AN1.5。

如果得不到实测数据，可以估计所需的值，这将造成模型结果精度下降。

#### 所需要的水力和水文数据

- 河流源头流量（ $m^3/s$ ），点源排水/取水流量和面源排水/取水流量；
- 每个河段的尺寸（河段长度、河床宽度、河岸坡度和河床坡度）；
- 每个河段上、下游端的位置；
- 任何量水堰、大坝和瀑布的高度、宽度和形状；
- 在可能情况下，获得水位流量关系曲线参数（如：在测量站）；
- 河段曼宁系数；
- 降雨径流数据；

**所需的水质数据**（在河流源头、点源污染源和面源污染源）：

- 温度（ $^{\circ}C$ ）；
- 硝酸盐  $NO_3$ （N， $\mu g/l$ ）；
- 导电率（ $\mu siemens$ ）；
- 有机磷（P， $\mu g/l$ ）；
- 无机固体（ $mg/l$ ，干重）；
- 无机磷（P， $\mu g/l$ ）；
- 溶解氧（ $O_2$ ， $mg/l$ ）；
- 浮游植物（ $\mu g/l$ ）；
- 慢速 CBOD（ $O_2$ ， $mg/l$ ）；
- 快速 CBOD（ $O_2$ ， $mg/l$ ）；
- 碎石（POM）（ $mg/l$ ，干重）；
- 病原体（ $cfu/100 ml$ ）；
- 有机氮（N， $\mu g/l$ ）；
- 碱度（ $CaCO_3$ ， $mg/l$ ）；
- 氨氮  $NH_4$ （N， $\mu g/l$  of）；
- pH 值；

在模型校准的整个过程中，需要每个点的水质和流量数据。

反应速度和沉降速度的水质参数一般是由用户确定的。Qual2K 中提供了反应速度和沉降速度缺省值，但可能在校准过程中进行调整。

**所需的气候变化数据：**空气温度，风速，露点温度，云层覆盖比例，遮挡比例。（在朝阳可获得的数据）。

### 4.2 朝阳市的数据来源情况

模型需要的数据由环保局和水务局提供，主要来自这两个部门的定期监测，为开展水质模型工作，双方还建立了 GIS 系统并共享数据，（参见关于机构间数据共享的指导手册 AN8.4）。随后，开展了新的监测工作，为扩展模型收集了新的数据。

## 可用的水力和水文数据

- 水文站的河流流量（试验河道仅有一个水文站）；
- 为模型扩展而搜集的流量数据；
- 测站的断面尺寸；
- 为建模特别增加的断面尺寸；
- 大坝的尺寸；
- 测站的流量和水位数据，用于生成一个流量和水位的关系曲线；
- 测站和雨量站的位置；
- 用 GPS 搜集的站点的位置；
- 月平均降雨和径流量；
- 水利局搜集的企业的取水量和环保局搜集的企业排水量；

## 可用的水质数据

水利局和环保局每月都对试验段的水质进行监测，这些数据可用于模型。当模型扩展到整个大凌河流域时，由县级环保局和水利局提供数据，来自企业的点源排放数据由环保局提供。未能搜集到可用的非点源污染数据。已有的水质数据与 Qual2K 模型需要的数据并不一致，评估这些数据的方法下一章节讨论。

## 可用的气候数据

- 年平均风速；
- 年平均空气温度；
- 年日照时数；

## 5 数据处理和评估

Qual2K 需要特定的水质数据和水力参数，已有的数据可能不能完全满足模型的需求，要尽可能直接使用已有的数据，不足的参数可通过评估，评估方法

被描述在本章节。

### 5.1 水质数据

输入模型的水质数据是 2004 年初到 2006 年末的三年平均值。（同时也对数据中间值的应用进行了测试，但是一些极端的数值导致数据偏斜，所以不能得到满意的校准结果）。

Qual2K 要求输入 24 小时中的每小时数据作为日模拟的一部分。但是，没有此类数据，所以采用小时平均值。

试点区的数据并不完全满足 Qual2K 对数据的需要，对于一些参数，可以直接使用测量数据，对于其他一些参数，可以用估计值，或在合适的情况下省略不用。表 2 对每个参数做出了解释。

Qual2K 模型需要使用最终碳源生化需氧量（CBOD<sub>u</sub>），但是该研究可以获得的水质数据是 5 日生化需氧量（BOD<sub>5</sub>）和使用重铬酸钾测出的化学需氧量（COD<sub>cr</sub>）。

为研究 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>cr</sub> 和 CBOD<sub>u</sub> 之间的差异，通过文献查询，以便估计一个恰当的 CBOD 最终值，用于模型输入。

世界卫生组织水质监测手册（Bartram 和 Balance, 1996）第 7.5 节讨论了 COD<sub>cr</sub> 的测量，指出：

“如果污水中只包含有机细菌营养物质，没有有毒物质，COD<sub>cr</sub> 的结果可以估计为最终碳源生化需氧量 BOD 的大约值。”

COD<sub>cr</sub> 值容易获得，因此决定采取此方案。

表 1: 现有数据与 Qual2K 模型所要求数据之间的对比

Qual2K 水质参数	最接近的实测参数	估算/转换的建议
水温	水温	✓
电导率	✗	不包括（对其他参数影响有限）
溶解氧	溶解氧	✓
CBOD <sub>慢</sub> 和 CBOD <sub>快</sub>	BOD 和 COD	见下文的说明
氨	氨	✓
有机氮	总氮（TN）	只能做一次 TN 测量，因此还不适合包含在模型中
硝酸盐		
有机磷（OP）	总磷（TP）	使用 TP 值作为 OP，因为 OP 是 TP 测量值中的主要部分
无机磷（IP）		将 IP 值设为 0
无机固体	✗	不包括（对其他参数影响有限）
浮游植物	✗	
腐质	✗	
病原体	✗	
碱度	✗	使用 200mg/l CaCO <sub>3</sub> 的默认值
pH 值	pH 挥发酚	✓ 模型中以挥发酚取代病原体。

✗ = 无资料; ✓ = 直接输入模型的数据

## 5.2 水力学数据

阎王鼻子水库大坝和橡胶坝在模型中表示成堰的形式，模型需要堰的如下数据：高，宽，以及基于堰的形状和水质的系数 **a** 和 **b**。两个系数可参考用户手册（Chapra 等，2006）表 2 进行估算。

尽管大坝的高度和总宽度可以由原有的设计或经测量获得，然而，模型使用的是水流通过的实际部分的高度和宽度，这些数据是随水流和操作条件的不同而变化，需要仔细地考虑。

朝阳水文站有足够数据能用于生成水位流量曲线，用于 Qual2K 模型。通过“最佳拟合”生成一个符合模型要求的格式的曲线。

Qual2K 模型需要简化的横断面，包括河底宽度和边坡的坡度，这个信息可从测量的断面中估计，对于不同的流态需要估算不同的断面——例如，在低流量情况下与高流量相比，水流仅通过断面的一小部分，因此，必须用一个在低流量情况下的断面。

Qual2K 模型需要每个河段的曼宁系数 **n**，曼宁系数 **n** 的估算基于当地经验，照片和实地考察，也可以参考用户手册（Chapra 等，2006）的表格进行估算。

## 5.3 水文数据

研究区域的汇水区被分为若干子汇水区，每个子汇水区代表降雨径流进入每个河段的区域，按照每个子汇水区的

降水产流数据，计算流到大凌河的地表径流。

利用 GIS 和数字高程模型 (DEM) 生成子汇水区。用 DEM 找出高点以分离子汇水区，从而区分每个子汇水区的边缘，然后，用 GIS 软件计算各子汇水区的面积。

使用大凌河流域的年均降雨产流值简单的与各子汇水区面积相乘，转换成  $m^3/s$ ，就得出各河段的面源径流。沿着河段的全长进入河道的各汇水区的径流按面源（在“面源”工作表中）输入模型中。

土地利用的相应数据不足，因此，根据当地的情况评估了一个典型的值作为面源污染负荷值。

## 5.4 气象数据

表 2 为 Qual2K 模型所需的气象数据，以及该数据是否直接可用，或者该数据如何估算。

尽管 Qual2K 模型允许将不同的气象数据输入每个河段模型，但是汇水区应当划分的足够小，以便在这样的小型汇水区内不会产生巨大的局部变化。

模型允许在 24 小时内输入每小时的不同数据作为全日模拟数据的一部分。然而，由于无法获得每小时不同的水质数据值，因此，本研究为所有参数输入了每小时相同的水质数据，得出典型的日均水质数据。

表 2: 气象数据来源和估计

Qual2K 模型所要求的气象数据	数据来源
气温 (°C)	现有数据 (环保局)
风速 (m/s)	现有数据 (环保局)
露点温度 (°C)	利用在线计算器估算： <a href="http://www.srh.noaa.gov/elp/wxcalc/rh.shtml">http://www.srh.noaa.gov/elp/wxcalc/rh.shtml</a> 计算器需要输入温度值，相对湿度和气压——在当地经验值的基础上估算相对湿度和气压值
云量 (%)	按年平均日照时数估计 (环保局)，假设平均日照时间为每天 12 小时： $\% \text{ 云量} = \text{每年日照时数} / (365 \times 12)$
阴影 (%)	据当地经验估计为 10%

## 6 模型开发

### 6.1 第 1 阶段

第 1 阶段的目标（2007 年 9 月）是在试点区建立一个简单的水质模型。该模型使用非常简化的数据集，反映年平均水质状况。

#### 数据来源与使用

第 1 阶段所使用的水质和流量数据是根据 2004 年初至 2006 年底三年历史数据计算出的平均值。

从水务局和环保局收集到的数据也包括在模型里。

只有朝阳监测站可以提供适当的流量数据。

汇水区的年平均降雨径流值是 79 毫米/年，这个数值被用于估算分散入流值。

只有一个测量的断面值可用，其余的断面是在现场考察时估计的。

#### 模型校准

模型的模拟结果与在朝阳市所观测到的上游数据十分吻合，然而，对朝阳市中央排水系统的下游和十家河的入河口处的高污染水平，模型却并没能准确地模拟。

#### 获得的经验

模型结果与观测结果之间的差异，一部分是由于平均值的使用造成的。使用中间值可能比使用平均值更为恰当，因为中间值受极端数据的影响较小。

使用年平均数据可能在某一出现极端降雨量的地区并不合适。Qual2K 模型使用的简化断面，在低流量和高流量两种情况下是有显著差异的。因此，在第 2 阶段决定根据流量将数据分成两种不同的流态。

图 4：模型的试验点和检测地点



## 6.2 第2阶段

在第2阶段（2007年12月），建模小组对水质模型进行了如下改进：

- 将大凌河新的断面数据输入模型；
- 数据分为“低流量”“中流量”和“高流量”三种，针对每一种情况分别建立模型；
- 模型采用了数据中间值而不是在第1阶段所采用的平均值；
- 加入了雨水径流的季节性数据。

此外，对模型进行了延伸，将一条在朝阳市下游汇入大凌河的污染严重的支流：十家河包括到模型中。如果向十家河排污的企业有相关数据存在，将作为“点排污源”，包括到模型中。

将单个企业的排污包括到模型中，则允许使用该模型制定有效的排污许可。能够根据企业排污的变化，运用模型对未来的水质状况进行预测。

### 模型校准

根据朝阳监测站的流量数据对水力模型进行校准（发现阎王鼻子水库上游流量的有限数据与模型不匹配，因此决定放弃不用）。

通过调整模型中的反应速率，实现对水质参数的校准。

各流态的模拟结果显示，观测的各个水质参数的中值与模拟结果基本吻合，仅在朝阳市下游的严重污染排放口出现差异。

应当注意到，单个企业的数据是2003年的数据，而模型中的其它水质数据是2004至2006年的数据。由于所取数据的时期不同，可能也会因此产生一些差异。

### 情景测试

可能会利用 Qual2K 水质模型来模拟一种新的情景，例如：使用在某一种特定情况(即：年平均数据)下已校准的模型，改变一些输入数据（如排水水质），然后，将新模拟的结果与已校准模型的结果相对比。

在这一阶段，模型对一种假定的情形进行了测试，即测试单个企业向十家河排污的污染负荷降低的情形。结果显示，某一个特殊企业排污的减少对十家河的水质提高有显著的影响，而其它企业则没有这种影响。这是因为稀释作用和排污量大小不同而造成的。

## 6.3 第3阶段——模型的延伸

建模工作的第3阶段于2009年5月进行，并在随后开始了广泛的数据收集和监测计划。

第3阶段额外工作的目的是将水质模型延伸至在大凌河流域中受大型点污染源或面污染源污染的其它区域，如工业区和农业区。

### 模型校准

第3阶段的模型校准着重以下三个方面：

- 雨水径流估算；
- 地下水渗透；
- 未知污染源；

雨水径流量的估算使用了子汇水区季节性平均径流量，模型的结果显示是显然高估了径流量值，随后按比例降低估算值（在所有地点采用相同的系数）直至达到一个合理的水平。

在模型校准过程中，也显示出在河流干流的一些河段沿线存在大量水流失的现象。水的流失是由于地下水渗透造成的，再加上抽取地下水用于灌溉，加剧了水的流失。Qual2K 模型中包括了对地下水渗漏的估算，作为一种分散式的取水方式，使估算值与河流实测流量相吻合。图5是模型校准的大致结果。

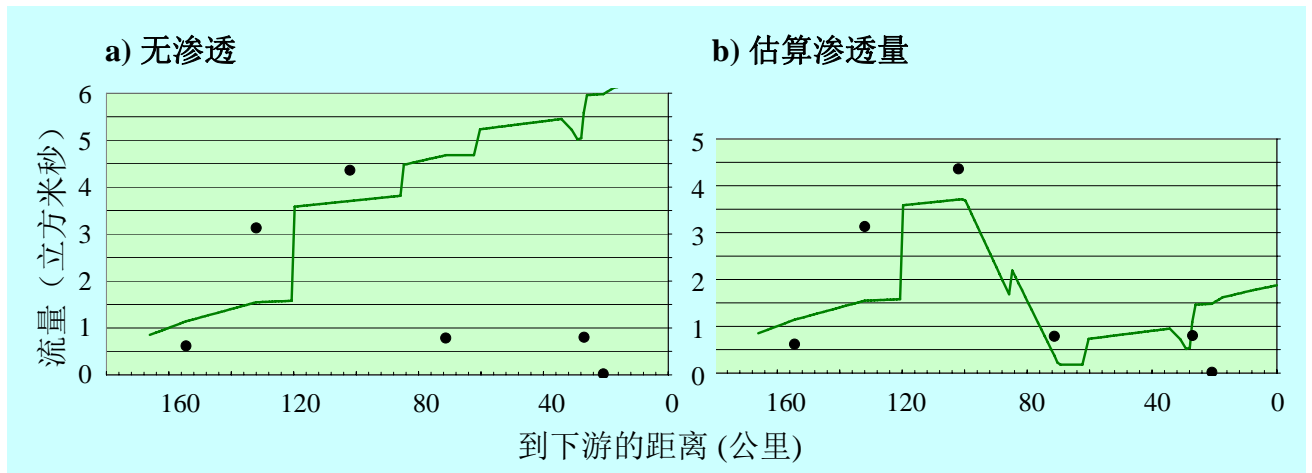
在某些地点，实测数据与模型结果之间存在显著的差异，推测是由于存在未知的取水和排水活动，这些地点是以“虚拟”点源的形式包括在模型中。

### 模型结论

模型大体上给出了无法获取的数据信息，如无资料的污染排放或地下水渗透等。

此模型的主要成功之处是确定了未知资料的大概规模和范围（如无资料污染排放等），环保局和水务局从而能够发现应重点加强监测并获取相关数据的区域。

图 5: 渗透量对模型预测流量的影响



## 7 培训

在本项目开展之前，朝阳市水务局和环保局的人员没有水质建模方面的经验。当地人员具有水资源和水环境管理方面的各类的知识，他们接受过相关学科的大学教育，如环境科学和水资源，但是缺少水化学、水文学和水力学方面的具体知识。

对市级地方人员的培训侧重于水质建模，并且在必要的时候，对其它课题进行解释。地方人员在项目实施期间接受了培训并参与了建模，因此他们对建模的步骤有着全面的了解。

对省级人员（来自沈阳水文局）的培训内容包括对 **Qual2K** 水质模型的介绍，并对数据处理进行阐释。这些人员有过建模的经验，且更加熟悉技术背景。

在无法获得实测数据的情况下，如何对相关数值进行估算，是参与项目的每一个人都应接受的培训内容。

虽然举办研讨会是对模型进行初步了解和讨论的一种很好的方法，但是对于学习如何使用模型的人来说，最佳途径是通过实践练习获取经验，亲手操作模型是熟悉模型的最有效的途径。

图 6：在辽宁省朝阳市举办的水质模型研讨会



## 8 结论汇总

### 8.1 适合于市级的水质模型

可以使用稳态的水质模型，例如 Qual2K 模型，来预测河流系统水质对条件变化的长期反应，例如，排入河流水系的水质变化等。

通过预测河流系统的水质变化，水质模型有助于制定取水和排水许可。

### 8.2 数据

相关数据可以从水务局和环保局获取，对这些数据集进行整合能够提高模型的准确性。

在朝阳市，现有数据可以在水务局和环保局之间共享（见 AN8.4）。这种合作方式对获取充足的数据进行水质建模起到了重要的作用。

模型范围向大凌河流域其它支流的延伸需要额外的数据监测工作，在缺乏数据的区域进行监测，获取相关数据。由于没有阎王鼻子水库的断面数据，这使的模型无法正确的校核水库下游的水质。因此，模型只能用于有足够数据的区域。

此项目初始数据的局限性在于，是否能够获取单个企业排污的水质水量监测资料。没有这些数据，就无法预测排污和取水许可战略的影响。

### 8.3 水质模型的使用

水质模型能够通过限制排放和取水，为排污和取水许可战略制定一个预期的河流水质目标。

对水质模型最有效的使用方法是共享模型，即对环保局和水务局的排污和取水数据进行共享，为水务局和环保局制定共同的水质目标，联合进行建模，这样能够制定恰当的河流取水和排污许可标准。

本研究所采用的此类水质模型能够预测水质变化对案例区的长期影响。

但值得注意的是，有一些方面是此类模型不能做的：

- 预测河流系统中污染物的扩散；
- 给出达到预期水质目标的时间表；
- 根据预期的水质，反算出所需水质许可标准。

图 7：受污染的大凌河段



## 文件参考表

### 词汇:

边界	模型的界线，对于 1 维模型，需要上游和下游的边界。需要相关数据建立边界条件。
校准	校准是对估算的模型参数（如反应率）进行调整的过程，以使模型的计算结果符合实测数据。
断面	河床和河堤的剖面，垂直于流量方向。
水头	河道上游的末端。模型水头可能位于河流的中间，在这种情况下，它是模型的上游边界。
结点	许多模型使用“结点”，即进行水力和/或水质计算的地点。一些模型是以单元为基础的，并且计算值是在单元的中央。
数字化	数字化模型使用没有精确答案的公式。使用数字化方法（典型的是计算性的）来设计公式。
流量关系曲线	在特定地点流量和水深之间的关系。通常是测站，水库
河段	河流的长度，通常是两个结点之间的长度。
稳态	在一定时间内条件不发生变化，处于一种平衡的状态。

### 书目:

Bartram, J. and Ballance, R. (1996) , *水质建模* , 英国伦敦  
[http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/resourcesquality/wqmonitor/en/index.html](http://www.who.int/water_sanitation_health/resourcesquality/wqmonitor/en/index.html)

Chapra, S.C. (1997), *地表水水质建模*, McGraw-Hill

Chapra, S.C., Pelletier, G.J. and Tao, H. (2006), *QUAL2K 模型使用手册和文件*, 土建与环境工程系, Tufts 大学, 马萨诸塞州 Medford, 免费下载网址:  
<http://www.epa.gov/athens/wwqtsc/html/qual2k.html>

谢永明编著, 《环境水质模型概论》, 北京: 中国科学技术出版社, 1996

郝芳华著, 《流域水质模型与模拟》, 北京师范大学出版社, 2008

**水利部水资源综合管理文件汇编相关材料：**

指导手册 1.7：水质模型监测计划的设计

专题报告 1.5：将水质模型用于水资源保护

指导手册 1.5：水资源综合管理中 QUAL2K 水质模型的使用

专题报告 8.4：为改善水质管理而开展的部门间合作

指导手册 8.4：使用部门间协议促进水质管理合作

**如需有关水资源综合管理的更多信息 – 推荐网站：**

中华人民共和国水利部：[www.mwr.gov.cn](http://www.mwr.gov.cn)

全球水伙伴：[www.gwpforum.org](http://www.gwpforum.org)

WRDMAP 项目网站：[www.wrdmap.com](http://www.wrdmap.com)



## 中英合作水资源需求管理项目

水资源综合管理方法汇编  
根据 DFID 出资的水资源需求管理援助项目  
(2005-2010)  
中央案例研究报告编写计划

1.  
水资源需求评价

报告由以下部分构成:

专题报告

指导手册

操作指南

实例

培训材料

本方法汇编系列的中英文材料可查询以下项目网站

WRDMAP 项目网站: [www.wrdmap.com](http://www.wrdmap.com)

咨询服务由英国莫特麦克唐纳公司牵头, 其他成员单位包括: DHI (丹麦水力与环境研究所)、HTSPE (UK)、中国水利水电科学研究院 (IWHR)、北京中水新华国际工程咨询有限公司 (IECCO)、国际农村发展中心 (CIAD)、清华大学, 中国农业科学院——农业环境与可持续发展研究所、中国科学院水资源研究中心、甘肃省水文水资源勘测局、辽宁省水文水资源勘测局。

