

# 感潮河流水环境容量计算——以太湖流域太浦河为例

张红举, 杨利芝

(太湖流域水资源保护局, 上海 200434)

**摘要** :为了探讨感潮河流水环境容量计算方法,以太湖流域重要的感潮河流——太浦河为研究对象,在水量、水质模拟计算的基础上,建立了感潮河流水环境容量计算模型,核算了太浦河的水环境容量,并对核算结果的合理性进行了验证。结果表明,2003 年型( $P = 88\%$ )降雨条件下,太浦河 COD 水环境容量为 14 405 t/a,  $\text{NH}_3\text{-N}$  水环境容量为 1 007 t/a。

**关键词** :感潮河流;水环境容量;污染负荷量;虚拟点源;太浦河

中图分类号 :X143 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2009)06-0012-04

## Calculation of tidal river environmental capacity using Taipu River in Taihu Basin as an example

ZHANG Hong-ju, YANG Li-zhi

(Taihu Basin Water Resource Protection Bureau, Shanghai 200434, China)

**Abstract** : In order to probe the method of water environmental capacity calculation for a tidal river, using the Taipu River, a typical tide-influenced river in Taihu Basin, as an example, a non-constant model for calculating a tidal river's carrying capacity was developed based on calculations of water quantity and water quality. The model was used to calculate the environmental capacity of the Taipu River, and the rationality of the results from the calculations was validated. The results showed that, with a rainfall frequency of  $P = 88\%$  in 2003, the Taipu River's environmental capacities of COD and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  were 14 405 t/a and 1 007 t/a, respectively.

**Key words** : tidal influenced river; environmental capacity; waste load; virtual point source; Taipu River

太湖流域位于长江三角洲,是我国经济最具活力和经济地位最重要的地区之一。流域内河道纵横,湖荡星罗棋布,形成了江南水网。该流域是全国河道密度最大的地区,也是我国著名的水网地区。随着太湖流域经济社会的发展,污水排放量逐年增大,虽然采取了一系列的水污染治理措施,但流域水污染问题仍十分突出。

河网地区感潮河流众多,水流运动规律复杂,给水环境容量计算带来了困难<sup>[1-2]</sup>。因此,有必要研究感潮河流水环境容量的计算方法。为此,笔者以太湖流域重要的感潮河流——太浦河为研究对象,在水量、水质模拟计算的基础上,建立了感潮河流水环境容量计算模型,核算了太浦河的水环境容量,并对

核算结果的合理性进行了验证。

### 1 太浦河水系

太浦河位于太湖流域下游,全长 57.6 km,具有防洪、排涝、供水和航运等综合功能。太浦河源自江苏省吴江市庙港镇的太湖东岸太浦闸,流经浙江省嘉善县后至上海市青浦区。与太浦河相交的湖荡、支流众多,途径蚂蚁漾、桃花漾至平望北与京杭大运河相交,再经汾湖、马斜湖等大小湖荡,至南大港入西泖河接黄浦江,如图 1 所示。太浦河属于黄浦江水系,水位变化受长江口潮汐和太湖下泄径流影响,是一条中等强度的感潮河流。



图1 太浦河水系

## 2 污染源现状

随着工农业生产和经济社会的进一步发展,排入太浦河的污染物逐渐增加。根据污染源资料统计分析,2005年直接排入太浦河的废污水量达2141万m<sup>3</sup>。污染物COD入河量为6431t,其中点源为3122t,占49%,面源为3309t,占51%;NH<sub>3</sub>-N入河量为446t,其中点源为191t,占43%,面源为255t,占57%。

## 3 水质保护目标

太浦河苏浙沪调水保护区水质目标为II~III类,由于东太湖水质优良,太浦河总体水质较好,向下游供水期间水质普遍达到或优于III类水标准,因此,根据水质目标不低于现状原则,引江济太实施条件下太浦河水环境容量计算水质目标由实测水质浓度分析确定。

根据太浦河上主要省际边界监测站点汾湖大桥(苏浙沪边界)和东蔡大桥(浙沪边界)水质监测资料统计(表1):汾湖大桥站2002~2005年MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>平均质量浓度为4.80mg/L(COD换算质量浓度为15.80mg/L,其换算系数为3.3),NH<sub>3</sub>-N平均质量浓度为0.60mg/L;东蔡大桥站2002~2005年MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>平均质量浓度为5.32mg/L(COD换算质量浓度为17.56mg/L),NH<sub>3</sub>-N平均质量浓度为0.76mg/L。

汾湖大桥站与东蔡大桥站逐年平均水质浓度均达到了III类水标准,汾湖大桥站水质略好于东蔡大桥,为保证太浦河水质,本次水环境容量计算采用汾湖大桥站2002~2005年平均水质浓度为水质目标,即COD质量浓度为16.0mg/L,NH<sub>3</sub>-N质量浓度为0.6mg/L。

表1 2002~2005年太浦河各监测点MnO<sub>4</sub><sup>-</sup>和NH<sub>3</sub>-N年均质量浓度

监测点	2002年		2003年		2004年		2005年		4年平均	
	$\rho(\text{MnO}_4^-)$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$								
汾湖大桥 (苏浙沪边界)	4.39(III类)	0.53(III类)	4.46(III类)	0.32(II类)	5.20(III类)	0.77(III类)	5.16(III类)	0.78(III类)	4.80(III类)	0.60(III类)
东蔡大桥 (浙沪边界)							5.32(III类)	0.76(III类)		

## 4 核算方法

太浦河属于感潮河道,潮汐为非正规半日潮型,潮流界可达长白荡,潮区界可至太浦闸,河道水流复杂,流向顺逆不定,常规的水量、水质监测资料难以满足水环境容量计算的要求。因此,先建立太浦河一维水量、水质模型并计算河道各断面在设计条件下的水量、水质,然后在此基础上,分段计算河道的水环境容量。

### 4.1 计算模型

#### 4.1.1 河网计算模型

水量模拟根据明渠非恒定渐变流基本方程式(圣维南方程组),以4点隐式差分格式建立河网追赶方程并进行求解。基本方程为

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial t} = q_A + \delta_*$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + u \frac{\partial Q}{\partial x} + (gA - Bu^2) \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{gn^2 |u| Q}{R^{4/3}} = 0$$

式中: $Q$ 为流量; $x$ 、 $t$ 分别为距离和时间; $A$ 为过水面积; $Z$ 为水位; $u$ 为流速; $R$ 为水力半径; $q_A$ 为单位河长的旁侧入流量(与其陆域宽度相对应),入流为正,出流为负; $\delta_*$ 为非守恒修正量; $B$ 为河宽; $g$ 为重力加速度; $n$ 为糙率。

水质模拟建立在求解对流扩散方程的基础上,同时考虑地表水系的水质过程。基本方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial \rho}{\partial x} - u\rho \right) = F(\rho, t)$$

式中: $\rho$ 为某种水质指标的质量浓度; $F[\rho, t]$ 为水质变化过程(生化); $D$ 为扩散系数。

#### 4.1.2 太湖计算模型

太湖水量计算基本方程组为

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial (hU)}{\partial x} + \frac{\partial (hV)}{\partial y} = q$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial x} = S_{fx} + fV$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial Z}{\partial y} = S_{fy} - fU$$

式中: $h$ 为水深, $h = Z - Z_B$ , $Z_B$ 为湖底高程; $U$ 、 $V$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的流速; $q$ 为湖面降雨、蒸发及湖底渗漏等水量源汇项; $f$ 为柯氏加速度, $f = 2\omega \sin \varphi$ , $\omega$ 为地球自转速度, $\varphi$ 为纬度,太湖可取北纬31°10'; $S_{fx}$ 、 $S_{fy}$ 分别为 $x$ 方向和 $y$ 方向的切应力;

其余符号意义同前。

湖泊准三维水质模型通用方程为

$$\frac{\partial(h\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(hU\rho)}{\partial x} + \frac{\partial(hV\rho)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(hE_x \frac{\partial\rho}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hE_y \frac{\partial\rho}{\partial y}\right) + \frac{hS}{86400} + S_w$$

式中： $E_x$ 为 $x$ 方向扩散系数  $m^2/s$ ； $E_y$ 为 $y$ 方向扩散系数  $m^2/s$ ； $S$ 为某种水质指标的生化反应项， $g/(m^3 \cdot d)$ ； $S_w$ 为某种水质指标的外部源汇项  $g/s$ ；其余符号意义同前。

为真实反映湖体水流规律，同时考虑计算工作量，笔者采用准三维方法来计算湖区流场和模拟污染物质。所谓准三维方法，就是在二维流场计算的基础上，根据率定的垂线流速分布曲线，将二维计算所得的垂线平均流速在垂线方向上重新分布<sup>31</sup>。

## 4.2 河道与湖泊概化

### 4.2.1 太浦河概化

太浦河河道底高程在  $-5 \sim -1 m$  之间；太湖至太浦闸段底宽较大，为  $240 m$ ；主河道底宽为  $106 \sim 150 m$ ，边坡为  $2.5 \sim 4.0$ 。

### 4.2.2 太湖概化

由于太浦河与东太湖相连，为获得来水水量与水质浓度变化过程，必须对太湖进行水量、水质计算。太湖准三维水量、水质模型的网格尺度为  $1000 m \times 1000 m$ ，将太湖划分为  $2338$  个单元。

## 4.3 计算方法

太浦河各河段流量受闸门调度、支流汇入以及下游潮水顶托等因素影响，变化较大。为准确反映水环境容量的时间与空间分布，拟先逐时计算各行政区划所辖河道单位时间水环境容量，再求和算得河道全时段水环境容量，计算流程见图2。

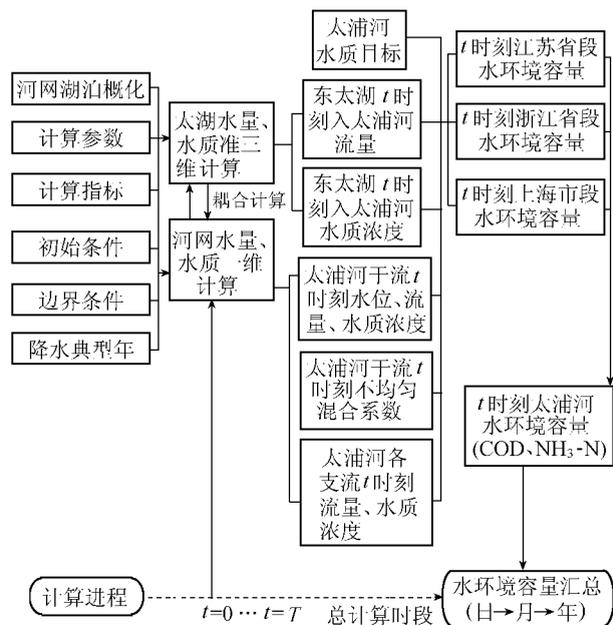


图2 太浦河水环境容量计算流程

某概化河段  $k$  时刻水环境容量计算表达式为

$$m_{t,k} = Q_0(\rho_s - \rho_0) + KV_0\rho_s + \sum_{j=1}^n q_{bj}(\rho_s - \rho_{bj})$$

式中： $m_{t,k}$ 为 $t$ 时刻 $k$ 河段单位时间的水环境容量， $g/s$ ； $Q_0$ 为进口断面的入流流量  $m^3/s$ ； $\rho_s$ 为该水体的水质目标  $mg/L$ ； $\rho_0$ 为进口断面的入流水质浓度， $mg/L$ ； $K$ 为河段污染物降解系数  $s^{-1}$ ； $V_0$ 为该概化河段水体体积  $m^3$ ； $q_{bj}$ 为第 $j$ 条支流入流流量  $m^3/s$ ； $\rho_{bj}$ 为第 $j$ 条支流入流水质浓度  $mg/L$ ； $n$ 为该概化河段的支流总数。

在水环境容量计算表达式中， $Q_0(\rho_s - \rho_0)$ 为河段上游来水的稀释能力， $q_{bj}(\rho_s - \rho_{bj})$ 为河段支流来水的稀释能力，这2项在该河道水质目标确定的条件下，与对应入流的水量和入流水质浓度有关，当入流水质浓度超过该河段水质目标时，稀释能力不存在，本河段的水环境容量将被占用。

$KV_0\rho_s$ 反映了河道水体污染物的降解能力，即污染物自净能力，在河道水质目标确定的条件下，与河道蓄水量和污染物的降解系数有关。

如图3所示，采用上述表达式计算的河道水环境容量对应的污染负荷量为：直接排入河道的工业排放、城镇生活排放等点源污染物，随降雨径流汇入河道的面源污染物；当支流流入干流时，水质浓度超过河道水质目标时带入的“控制污染负荷量”。

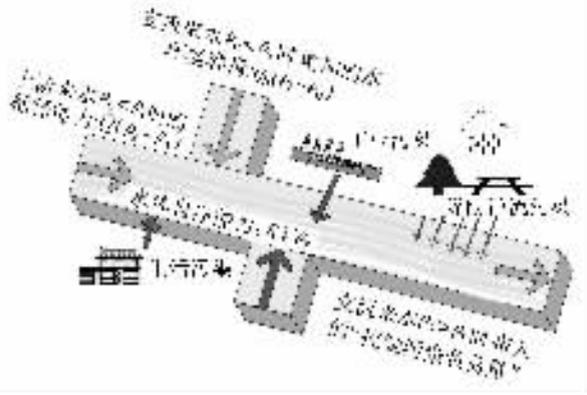


图3 太浦河水环境容量示意图

当支流入流水质浓度低于干流水质目标时，支流汇入的污染物可由支流本身水量稀释，汇入的水体可继续承载污染物，干流的水环境容量可进一步增加。当支流入流水质浓度与干流水质目标一致时，支流汇入的水体没有稀释能力，但不会使干流水体劣于保护目标。若支流入流水质浓度超过干流水质目标时，汇入的水量不能稀释污染物量至水质目标，其超过水质目标部分对应的污染负荷需要干流的水环境容量承载，这部分污染负荷量定义为“控制污染负荷量”。计算公式为

表 2 太浦河水环境容量计算成果

t/a

河 段	水环境容量	
	COD	NH <sub>3</sub> -N
江苏省段	7582	615
浙江省段	2967	191
上海市段	3856	201
太浦河全段	14405	1007

$$L_{i,控} = \begin{cases} \sum_{t=0}^{t=T} (Q_{i,t}\rho_{i,t} - Q_{i,t}\rho_s) \times 0.0864 \times 365 & (\rho_{i,t} > \rho_s) \\ 0 & (\rho_{i,t} \leq \rho_s) \end{cases}$$

式中： $L_{i,控}$ 为第*i*条支流流入太浦河的控制污染负荷量 t/a； $Q_{i,t}$ 为*t*时刻第*i*条支流河道流量，m<sup>3</sup>/s； $\rho_{i,t}$ 为*t*时刻第*i*条支流水质浓度，mg/L； $T$ 为总计算时段，s； $\rho_s$ 为太浦河水质保护目标，mg/L。

获得各河段单位时间的水环境容量后，全时段水环境容量可通过下式计算得到

$$M_t = \sum_{k=1}^L \alpha_k m_{t,k} \quad \Pi = \int_0^T M_t dt$$

式中： $M_t$ 为太浦河*t*时刻单位时间的水环境容量，g/s； $\alpha_k$ 为*k*河段的不均匀混合系数； $L$ 为河段总数； $\Pi$ 为太浦河水环境容量，g/s。

## 5 计算参数选择

### 5.1 降水典型年

计算河流域水环境容量，一般采用 90% 保证率最枯月平均流量或近 10 年最枯月平均流量作为设计流量。本计算采用自 2002 年引江济太实施以来太浦河调度发生变化的条件下最接近 90% 降水保证率的 2003 年（ $P = 88\%$ ）作为典型年进行计算。

### 5.2 太浦闸入流水质浓度

太浦闸入流水量来源于东太湖，其水质浓度过程由太湖水质模型计算生成，COD 平均质量浓度为 13.55 mg/L，NH<sub>3</sub>-N 平均质量浓度为 0.20 mg/L。

### 5.3 污染物降解系数

太浦河污染物降解系数由水质模型根据 1998~2000 年 3 a 实测水质数据率定。根据模型率定结果，太浦河 COD 的降解系数为 0.05~0.08/d，NH<sub>3</sub>-N 的降解系数为 0.04/d。

### 5.4 不均匀混合系数

太浦河为宽浅型河流，排污口的污水自岸边进入太浦河后，在近岸带附近水域形成污染带，河流中泓部分水体的降解能力没有被全部利用，在计算河流水环境容量时，应考虑污水入流后混合状况，即河流不均匀混合系数。根据推荐的不均匀混合系数取值范围<sup>[4]</sup>，太湖—太浦闸段不均匀混合系数取值为 0.4，太浦闸—西泖河段取值为 0.5。

## 6 计算成果

根据前述方法确定的计算原则、计算参数，通过模型计算得到的太浦河 COD 水环境容量为 14 405 t/a，NH<sub>3</sub>-N 水环境容量为 1 007 t/a，如表 2 所示。

## 7 成果合理性验证

为进一步验证计算得到的太浦河水功能区水环境容量的合理性，将计算得到的水功能区水环境容量作为污染负荷量施加到概化河网中，通过模型计算判断水功能区的达标情况。

将太浦河实际污染负荷量清零，再将水功能区水环境容量按照河长平均分配至各概化河段，并把各概化河段的水环境容量作为虚拟点源施加在河段中部（图 4）。虚拟点源负荷总量 COD 为 14 405 t/a，NH<sub>3</sub>-N 为 1 007 t/a，与水环境容量数值一致。



图 4 太浦河概化河道施加的虚拟点源分布

在虚拟点源污染负荷条件下，通过计算，太浦河水环境容量复核控制断面汾湖大桥、练塘大桥处的 COD 与 NH<sub>3</sub>-N 年平均质量浓度均达到水质目标要求，成果满足计算精度要求，如表 3 所示。

表 3 水环境容量复核计算得出的控制点年均质量浓度

控制点	控制点年均质量浓度		控制点	控制点年均质量浓度	
	$\rho$ (COD)	$\rho$ (NH <sub>3</sub> -N)		$\rho$ (COD)	$\rho$ (NH <sub>3</sub> -N)
太浦闸下	13.95	0.15	汾湖大桥	15.83	0.55
平望大桥	15.00	0.56	练塘大桥	15.63	0.51

## 8 结 语

以湖泊—河网水量、水质非恒定计算为基础，探讨了感潮河水环境容量计算方法，计算了太湖流域重要的感潮河流——太浦河的水环境容量，得出的太浦河 COD 水环境容量为 14 405 t/a，NH<sub>3</sub>-N 水环境容量为 1 007 t/a。

影响人工调控河道水域水环境容量计算结果的因素有很多，但主要影响因素有 3 个：①计算方法的选择。感潮河道水流运动复杂，给水环境容量计算带来了困难，笔者采用的分时段零维公式计算方法，物理意义明确，操作性强。②旁侧（下转第 20 页）

资源分区中,黑龙港平原及马颊河平原变化趋势明显,超出了临界值,其他区域变化趋势不明显,可以认为区域年降水量的变化趋势与区域的平均海拔高度有关。

#### 参考文献:

[1] 丁晶, 邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988.  
[2] 覃爱基, 陈雪英, 郑艳霞. 宜昌径流时间序列的统计分析[J]. 水文, 1993, 13(5): 15-21.  
[3] YUE S, PILON P, CAVADIAS G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259: 254-

271.

[4] 吴师, 高嵩嵘. 安徽省地表水水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2006, 22(5): 74-76.  
[5] 李俊峰, 盛东, 程晓如, 等. 玛纳斯河流域水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 10-13.  
[6] 刘攀, 郭生练, 肖义, 等. 水文时间序列趋势和跳跃分析的再抽样方法研究[J]. 水文, 2007, 27(2): 49-53.  
[7] 刘春臻, 刘志雨, 谢正辉, 等. 近 50 年海河流域径流的变化趋势研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4): 385-393.  
[8] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230-234.

(收稿日期 2008-10-15 编辑 陈吉平)

(上接第 11 页)

[3] 尚银生, 吴有志, 宋尚孝. 水库水源保护区划分方法初探[J]. 山西水利科技, 1999(1): 44-46.  
[4] 王晓燕, 王晓峰, 汪清平, 等. 北京密云水库小流域非点源污染负荷估算[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 227-231.  
[5] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss[J]. Transactions of American Geophysical Union, 1988, 39(3): 285-291.  
[6] 张力. 为畜禽排污现状十分惊人, 正成为中国新的污染大户破题“养殖业与种植业要”破镜重圆[J]. 中国动物保健, 2007(9): 59-61.  
[7] 吴淑杭, 姜震芳, 俞清英. 禽畜粪便污染现状与发展趋势[J]. 上海农业科技, 2002(1): 9-10.  
[8] 苏杨. 我国集约化畜禽养殖场污染问题研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(2): 15-18.

[9] 贾玉霞. 规模化畜禽养殖环境影响及主要防治问题[J]. 环境保护科学, 2002, 28(6): 42-47.  
[10] 赵虹, 韩永升. 沈阳市畜禽养殖环境污染分析及防治对策[J]. 环境保护科学, 2007, 33(4): 118-120.  
[11] 刘凌岩, 王红军. 大伙房水库上游禽畜业污染现状及其防治对策[J]. 环境保护科学, 2002, 28(3): 21-22.  
[12] 李学灵, 刘新媛, 马岳雄, 等. 珠江流域片水资源保护规划报告[R]. 广州: 水利部珠江水利委员会, 2001: 65.  
[13] 洪晓瑜, 逢勇, 黎曼. 近似解模型在太湖藻类浓度场求解中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 41-44.  
[14] 韩菲, 陈永灿, 刘昭伟. 湖泊及水库富营养化模型研究综述[J]. 水科学进展, 2003, 14(6): 785-791.  
[15] 张征, 沈珍瑶, 邵景力, 等. 环境评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 198.

(收稿日期 2008-11-05 编辑 徐娟)

(上接第 15 页)入流的处理。与其他河网地区河道相比,太浦河旁侧入流量很大,超过了东太湖来水水量,如何处理旁侧入流对干流水环境容量计算结果的影响是较关键的问题。笔者提出的“控制污染负荷量”的概念为解决这个问题提供了新的思路。③河道不均匀混合系数的确定。由于采用分段零维公式计算,不可避免地会带来由于污染物不均匀混合造成的误差,因此,必须对结果进行修正。

#### 参考文献:

[1] 翟淑华, 张红举. 人工调控河道水环境容量计算研究

[C]//黄真理. 中国环境水力学, 2006. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 46-52.

[2] 张红举. 感潮河流水环境容量计算方法探讨[C]//房玲娣. 水资源管理创新理论与实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 495-501.  
[3] 程文辉, 王船海, 朱琰. 太湖流域模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 2006: 117-176.  
[4] 孙卫红, 姚国金, 逢勇. 基于不均匀系数的水环境容量计算方法探讨[J]. 水资源保护, 2001, 17(2): 25-26.

(收稿日期 2008-12-30 编辑 陈吉平)