

# 采用拦沙坝防护的浅基桥墩局部冲坑三维流场数值模拟

赵海镜<sup>1</sup>, 杜全胜<sup>2</sup>, 张晓松<sup>3</sup>, 程琳<sup>4</sup>, 王鹏涛<sup>5</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 郑州 450003; 3. 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610051; 4. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 成都 610072; 5. 华北水利水电学院, 郑州 450008)

**摘要:**采用数值模拟的方法, 针对典型工程, 对桥墩周围河床局部冲刷的三维流场进行了研究。通过将数值模拟所得流速场和物理模型中用 ADV 流速仪在实体模型中的量测结果进行对比和相互验证, 结果较为吻合, 同时分析了流场分布及不同方向流速对冲坑形成的作用。本文所采用的桥墩局部冲刷流场数值模拟计算方法对于深入研究桥墩局部冲刷及复杂边界流场理论具有一定的参考价值, 所得流速场分布结果为浅基桥梁工程防护设计提供了参考依据。

**关键词:**数值模拟; 三维流场; 物理模型; 局部冲刷; 浅基桥墩; 拦沙坝

**中图分类号:**TV640.3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2009)05-0220-05

## Mathematical Simulation of Three Dimensional Velocity Fields in Local Scour Around Piers Protected by the Sediment Storage Dam

ZHAO Hai-jing<sup>1</sup>, DU Quan-sheng<sup>2</sup>, ZHANG Xiao-song<sup>3</sup>, L HENG Lin<sup>4</sup>, WANG Peng-tao<sup>5</sup>

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China; 2. Yellow River Engineering Consulting CO. Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. Ertan Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China; 4. HydroChina Engineering Corporation, Chengdu 610072, China; 5. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450008, China)

**Abstract:** Aimed at the representative project in the piers, which is protected by the downstream sediment storage dam, this paper has studied three dimensional velocity field in local scour areas around piers via mathematical simulation. The validated results are better contrasting that of the model test surveyed by ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) while the influences of shaping eroded pits caused by the velocities in different directions are analyzed. The mathematical simulation method of velocity field in local scour pit around bridge piers can be referenced to study local scour around bridge piers and complicated boundary flow-field theory in depth. The distribution of velocity field in local scour pit near piers protected by the sediment storage dam, deduced from the paper, will provide references for defensive design of bridge projects with piers in low burial.

**Key words:** mathematical simulation; three dimensional velocity field; physical model; local scour; bridge piers in low burial; the sediment storage dam

交通的发展经常需要跨河修建桥梁, 由于桥梁墩台阻挡水流而产生水流冲击和涡流作用使得桥墩周围河床发生的局部冲淤变形叫做桥墩的局部冲刷。近年来, 由于基建规模扩大, 沙石料需求量猛增; 利益的驱动使河道的挖沙处于无序、难于管理的状态。河道内大量挖取沙石, 造成铁路、公路桥梁附

近的河床发生溯源冲刷, 多数河床的下切速度加剧, 使得桥梁墩台的基础埋置深度不断减小, 原本埋深足够的一些桥梁也变为浅基桥梁, 一些先天不足的浅基桥梁墩台基础则存在更大的安全隐患, 部分桥梁的墩台基础已悬于河床之上。基础埋置深度的减小一方面削弱了桥梁墩台的稳定性, 另一方面造成

\* 收稿日期: 2009-03-02

基金项目: 郑州铁路局 2003 年科技攻关基金资助项目 (02 G16)

作者简介: 赵海镜 (1976 - ), 男, 河南巩义人, 博士生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: zhaohaijing019@163.com

部分桥梁墩台的承载力不足,发生墩顶横向震动幅值超限或晃动,这些都威胁到桥梁建筑物的安全与稳定。为此,交通部门设法采取各种防护措施来保护桥梁。防护工程施工通常受到地理条件、施工技术、工程造价等因素的限制。经过工程实践验证,在桥墩下游适当位置修建拦沙坝是一种较好的防护形式。但是,受到桥墩局部冲刷问题的复杂性和现有研究条件的限制,目前对于拦沙坝的防护效果及其与桥墩冲刷之间的相互影响尚未搞清楚,与之相关的文献也较少,缺乏细致系统的研究。因此,开展该方面的研究对于减轻桥梁墩台附近河床遭受的水力侵蚀,进而指导浅基桥梁墩台防护工程设计具有重要意义。

1 典型河道桥梁工程的选择和模型设计

选择陇海线上距西安 5 km 的浐河铁路桥作为典型桥梁。桥宽约 140 m,孔数  $n=5$ ,单孔净宽  $b=25$  m,墩厚  $D=2.5$  m,墩长  $L=7.5$  m,桥墩承台顶高程为 391.58 m。铁路桥上游约 100 m 有一座公路桥,距铁路桥下游 75 m,修有拦沙坝,用来防护下游河道冲刷不致向上发展影响桥墩安全。根据研究的工程对象、河道特性和试验任务要求,水力概化模型分为整体试验(变态模型:水平比尺  $L=60$ ,垂直比尺  $H=40$ )和单体系列试验(正态模型  $H=1$ ,几何比尺分别为:25,35,45)。

该文对桥墩附近的三维流场进行数值模拟,绘制三维流场图,进行墩前和坝后局部三维流场的细致描绘,并用美国 Sontek 公司的三维超声波多普勒测速仪(Acoustic Doppler Velocimeter,简称 ADV)对比尺  $H=25$  的单体模型试验桥墩周围附近的三维流速场进行了精细测量,绘制出三维流场图,对流场的特征进行分析,进而对以上两种方式获得的流场进行对比、相互验证和分析。

2 三维流场数值模拟基本理论

三维水流数学模型的建立,是选用了有限差分方法<sup>[1-2]</sup>(FDM)求解三维水流控制方程。应用目前常用的  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[3-5]</sup>补充方程,求解雷诺应力,使不可压湍流基本方程时间平均后在数学上得到封闭方程组。处理自由表面采用 VOF 即体积函数技术,从而对水面进行良好的跟踪,得到较好的水流特征。另外在模型中还采用了笛卡尔坐标系均匀立方体网格。

2.1 控制方程

计算采用粘性不可压缩流体紊流雷诺微分方程

组<sup>[6]</sup>,在笛卡尔坐标系下 3 个方向分别为  $x$ (纵向)、 $y$ (横向)、 $z$ (水深方向), $i, j, k$  分别是  $x, y, z$  坐标轴上的单位矢量,相应的速度分别为  $u, v, w$ 。

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [ \nu_t ( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} ) ] \tag{2}$$

式中:  $u_i, u_j$  —— $i, j$  方向的时均速度分量;  $t$  ——时间;  $\rho$  ——流体密度;  $p$  ——压强;  $\nu_t$  ——紊动粘性系数。

2.2  $k-\epsilon$  方程

式(2)中还存在一个未知的参数  $\epsilon$ ,按照目前常用的  $k-\epsilon$  紊流模型,由下式来确定  $\epsilon$ :

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{3}$$

其中单位水体紊动能  $k$  及紊动动能耗散率的输运方程为

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [ I ( \nu_t ) \frac{\partial k}{\partial x_i} ] + G - \epsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} [ I ( \nu_t ) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} ] + \frac{C_1}{k} G + C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \tag{5}$$

此处  $G$  为紊动能产生项,用下式来表示:

$$G = \nu_t [ 2 ( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} )^2 + ( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} )^2 ] \tag{6}$$

在上述紊流模型方程中,经验系数取值如下:

$$C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, c_\mu = 1.0, \sigma_k = 1.3。$$

2.3 数值求解方法

采用有限体积法对模型方程进行离散,在有限体积法计算中,对每一控制体分别进行水量和动量平衡计算,便得到一组以控制体特征量平均的物理量为未知数的代数方程组,同时沿坐标方向对方程组进行离散,形成的离散方程与有限差分法有些相似。因为跨控制体间界面运输的通量,对相邻控制体来说,大小相等,方向相反,故对整个计算区域,沿所有内部边界的通量相互抵消,对由一个或多个控制体组成的区域,以至整个计算区域,都严格满足物理守恒定律,不存在守恒量的误差。

2.4 VOF 模型

两相流理论中关于自由水面的计算方法,目前主要有欧拉模型中的 MAC(Mark and Cell)法和 VOF 法。MAC 法需要的计算机内存和计算工作量比较大,并且对于非均匀流场会出现虚假的密度很高或很低的标记点,造成模拟的自由液面形状失真。Hirt, C. W. 和 Nichols, B. D. 于 1981 年在研究压力

容器流体自由液面时提出的适用于两种或多种互不穿透流体相间界面追踪计算的 VOF 法则克服了上述不足,对于运动界面的数值模拟作出了开创性贡献,是目前研究自由液面问题的理想方法。近年来 VOF 方法模拟自由水面在国内也逐渐得到应用。

VOF 模型中,引入了体积分变量  $a_q$  (第  $q$  相流体的体积分),根据控制网格单元中  $a_q$  值来判断该控制网格中第  $q$  相流体的充盈情况: $a_q = 0$  表示该控制网格内没有第  $q$  相流体; $a_q = 1$  表示该控制网格内完全充满第  $q$  相流体; $0 < a_q < 1$  表示该控制网格内包含第  $q$  相流体与其他流体的相间界面。在每个控制单元格内各相体积分之和为 1。

### 3 模型的建立、计算结果与分析

#### 3.1 单体系列模型布置、制作及试验组次安排

3.1.1 单体系列模型布置与制作 单体系列模型试验全部在玻璃水槽中进行。桥梁墩台采用有机玻璃制作,拦沙坝部分采用木料做出坝面和坝顶,其中坝顶部分做成活动可拆卸的。为满足桥墩及拦沙坝局部冲刷、河床变形相似要求,床沙按河槽模拟,采用天然沙,比尺 = 25,35 和 45 模拟原型中值粒径  $d_{50}$  分别为 7.25 ~ 8 mm、10.15 ~ 11.2 mm、13.05 ~ 14.4 mm,级配基本与原型河槽相似。单体系列模型流量控制以整体模型的试验结果为依据,并适当加以拓展。

#### 3.1.2 单体系列模型试验组次安排

(1) 比尺 = 25 设计方案(曲线型实用堰,坝墩间距 75 m,各流量级、不同拦沙坝高程)条件下的放水试验。

工况 1: 坝顶高程 390.0 m,  $q = 2.76, 5.59, 7.05, 8.40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;

工况 2: 坝顶高程 390.5 m,  $q = 2.76, 5.59, 7.05, 8.40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;

工况 3: 坝顶高程 391.0 m,  $q = 2.76, 5.59, 7.05, 8.40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ;

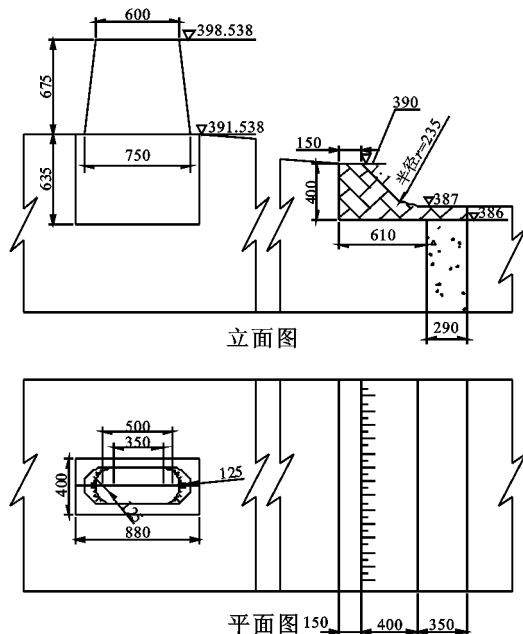
工况 4: 坝顶高程 391.5 m,  $q = 2.76, 5.59, 7.05, 8.40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

(2) 比尺 = 25 修改方案(折线型实用堰,坝墩间距 45 m,各流量级、不同拦沙坝高程)条件下的放水试验,流量拓展至  $q = 10, 11.26, 13.75, 14.1 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

(3) 比尺 = 35、比尺 = 45 的试验(折线型实用堰,坝墩间距 45 m,各流量级、不同拦沙坝高程)条件下的放水试验。由于本文没有对此两种比尺的试验进行数值模拟,故而不予详述。

#### 3.2 模型建立

根据比尺 = 25 单体模型试验的尺寸(见图 1),确定数值模型计算范围(水流方向长 600 cm,平面垂直水流方向宽 60 cm,竖直方向高 56 cm)。地形采用实测物理模型的冲刷地形,所建立的三维模型见图 2。为对三维流场进行精细模拟,所选立方体网格尺寸为:长 2 cm、宽 2 cm、高 2.4 cm,有限控制体数为 207 000 (300 × 30 × 23) 个,平面网格图见图 3。



注:图中高程单位为 m,其它单位为 cm。

图 1 沱河铁路桥桥墩及拦沙坝形式及尺寸



图 2 桥墩冲刷模型三维地形图

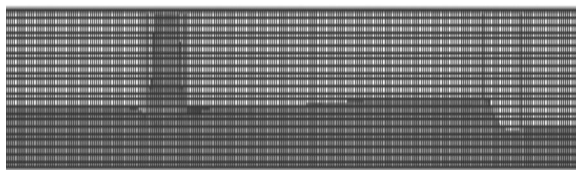


图 3 桥墩冲刷模型平面网格图

#### 3.3 流速空间分布计算结果

流速空间分布计算结果经过可视化后,绘制成流速矢量图。通过单宽流量  $8.4 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,拦沙坝距离桥墩中心线 75 m,坝顶高程 390.0 m 时,单体流速矢量分布图见图 4。

3.4 ADV 流速仪在物理模型中的数据采集与处理 采用 Matlab 程序对采集的数据进行了读取与

处理,并绘制了空间三维矢量场图。

首先对读取的采集数据进行过滤。如前所述,相关值用于监控数据质量,即相关值决定那一部分数据是可用的。理想的相关值应该是在 70 %和 100 %之间,因此需把相关值小于 70 %的流速过滤掉。

最终得到桥墩冲刷坑附近的流场见附图 11 和图 5,图中水流方向如黑色箭头所示。

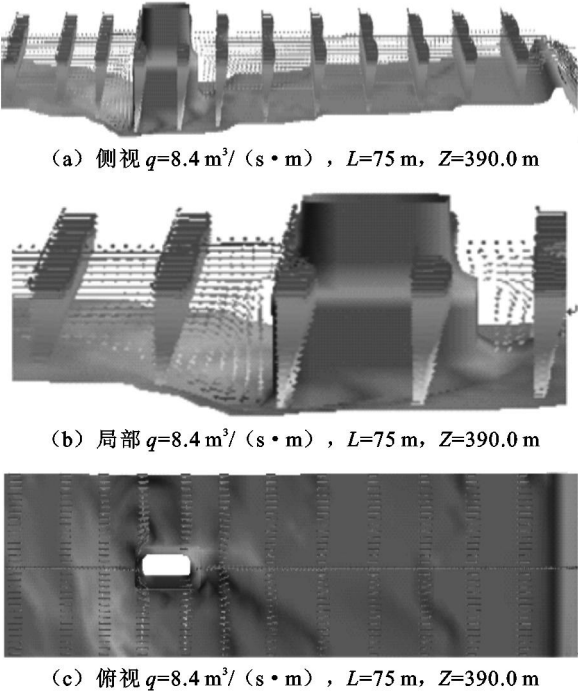


图 4 桥墩冲刷水流数学模型三维流场图

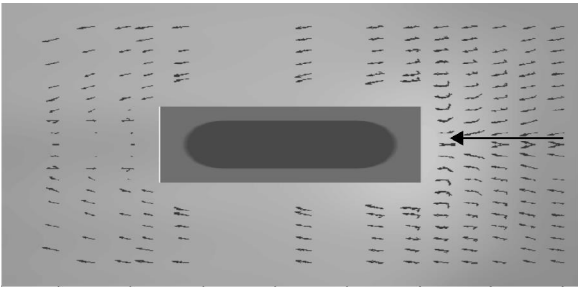


图 5 桥墩冲刷坑附近测量平面流场图

3.5 流场分析

3.5.1 物理模型桥墩周围流场分析 从可视化结果并结合在试验中观察到的现象可以看出:竖立在水流中的桥墩,极大地改变了桥下水流状态。在墩前正面,水流流速显得很杂乱。仔细观察,可以看到流速实际分成了两部分:表面部分向上涌向桥墩,而下层则很明显产生了下切的趋势,下切的流速不断冲击冲坑底部,同时形成了与水流方向反向的横轴漩涡流。靠近墩侧处,水流流速沿墩身绕墩而过,由可视化图中流速箭头长短可知,墩侧流速加大。流速行近墩尾,依然沿墩身绕墩前进,在墩后中部形成立轴漩涡。由于技术手段和测量精度的限制,立轴漩涡在图中不

是特别清晰,但若在水流中加入高锰酸钾试剂,可很清楚地看到立轴漩涡。流速场的这些变化和特点对桥墩局部冲刷坑的形成产生了重要的影响。

3.5.2 流场对比分析 将附图 11ADV 实测三维流速场与图 4 计算三维流速场进行对比,在流动现象上,首先,均有明显的下切流速(见局部图 4b),即墩前马蹄涡的形成;其次,水流在墩前向桥墩两侧分流(见俯视图 4c);再次,在墩后形成低速区及尾部立轴漩涡(见俯视图 4c)。以上三个方面的流动现象基本证实计算结果符合桥墩局部冲刷及绕流流场的特征。另外,从侧视图 4a 中也可以看到流速的垂向分布,符合对数流速分布及近水面部分的修正;局部图 4b 中还可以看到墩前水流压力梯度的急剧变化。

为了反映计算流速分量与实测流速分量的定量对比,将坝顶高程 390.5 m,拦沙坝距桥墩中心线 45 m,单宽流量  $q=5.59\text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$  时墩前 4 cm 处 y 向中轴线上( $y=0$ )的 ADV 实测物理模型垂线流速分布与数值计算垂线流速分布进行了对比,见表 1 及图 6。

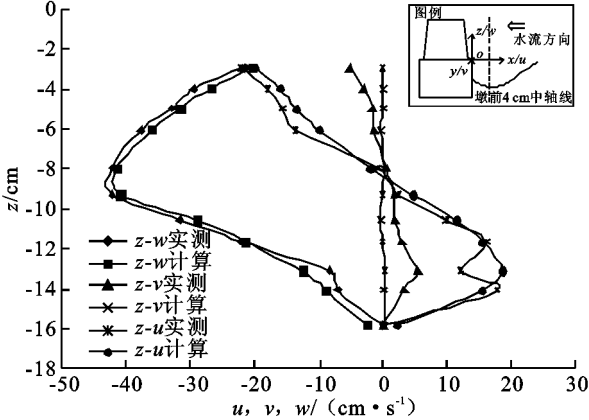


图 6 墩前中轴线垂向流速分量实测计算对比图

从表 1 中可以看到,测量值与计算值的差别基本在 10 %或 5 cm/s 以内,ADV 测量值与数值模拟结果能够相互验证。另外可以从图 6 中看到:由于测量存在人为因素,在流速垂线分布上,计算值更加偏于光滑。在垂向,流速方向指向冲坑底,逐渐增大,当在承台以下某个深度时,流速增大至最大,同时又开始减小,靠近底部最小。在纵向,以垂向流速最大的位置为分界,在分界点以上的流速方向与水流方向一致,越靠近水面流速值越大;而在分界点以下的流速方向则与水流方向相反,流速在分界点以下某一位置达到最大,随着与底部距离的靠近,流速相应减小。垂向流速与纵向流速的共同作用形成了桥墩局部冲坑特有的水流现象,即横轴漩涡,同时引发了坑底的阵发性脉动。对于横向流速,整个流速的方向大小波动较小,对桥墩局部冲刷坑的形成不起主导作用。

表 1 墩前中轴线垂向流速分量实测计算对比表

坐标值/cm			实测流速分量/(cm·s <sup>-1</sup> )			计算流速分量/(cm·s <sup>-1</sup> )		
x	y	z	u	v	w	u	v	w
4.0	0.0	- 15.9	0.17	- 0.01	0.01	2.00	0.30	- 2.44
4.0	0.0	- 14.1	17.81	3.16	- 7.03	15.40	0.20	- 8.78
4.0	0.0	- 13.1	12.15	5.34	- 8.34	18.70	0.30	- 12.71
4.0	0.0	- 11.6	16.14	2.87	- 22.19	15.50	- 0.20	- 21.53
4.0	0.0	- 10.6	9.81	1.79	- 31.61	11.40	- 0.30	- 29.04
4.0	0.0	- 9.3	2.28	1.67	- 42.28	4.60	- 0.10	- 40.90
4.0	0.0	- 7.9	- 0.84	0.53	- 42.30	- 1.90	0.20	- 41.58
4.0	0.0	- 6.1	- 13.68	- 1.33	- 37.78	- 10.10	- 0.30	- 36.11
4.0	0.0	- 5.0	- 15.72	- 1.64	- 32.81	- 13.70	0.00	- 31.57
4.0	0.0	- 4.0	- 18.05	- 2.98	- 29.57	- 16.00	0.00	- 26.86
4.0	0.0	- 2.9	- 22.37	- 5.19	- 21.35	- 20.20	- 0.20	- 20.30

4 结 语

采用数值模拟的方法,针对典型工程,对桥墩周围河床局部冲刷的三维流场进行了研究。通过将数值模拟所得流速场和物理模型中用 ADV 流速仪在实体模型中的量测结果进行对比和相互验证,所得两种流速场结果较为吻合。流场分析成果主要包括以下几方面:

(1)墩前水流具有明显的下切流速,流速方向指向冲坑底,逐渐增大,当在承台以下某个深度时,流速增大至最大,接着又开始减小,靠近底部最小,下切流速引起墩前形成马蹄形漩涡;(2)对于纵向流速,以垂向流速最大的位置为分界,在分界点以上的流速方向与水流方向一致,越靠近水面流速值越大,而在分界点以下的流速方向则与水流方向相反,流速在分界点以下某一位置达到最大,随着与底部距离的靠近,流速相应减小;(3)垂向流速与纵向流速的共同作用形成了桥墩局部冲坑特有的水流现象,即横轴漩涡,同时引发了坑底的阵发性脉动;(4)对于横向流速,整个流速的方向大小波动较小,对桥墩

局部冲刷坑的形成不起主导作用。

本文所采用的桥墩局部冲刷流场数值模拟计算方法对于深入研究桥墩局部冲刷及复杂边界流场理论具有一定的参考价值,所得流速场分布结果为浅基桥梁工程防护设计提供了参考依据。鉴于 ADV 测速仪测架的灵活性和局限性,对桥墩局部冲刷发展过程中流场脉动强度、雷诺应力及近底流场研究有待于进一步开展。

参考文献:

[1] 汪德耀. 计算水力学[M]. 南京:河海大学出版社, 1989.

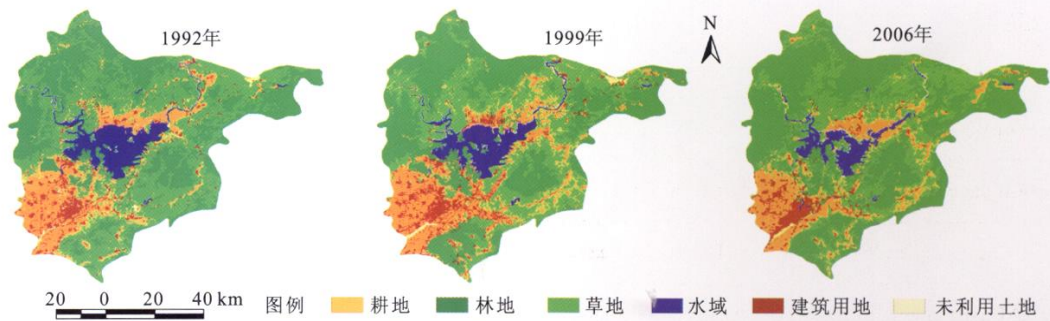
[2] 曹祖德,王运洪. 水动力学泥沙数值模拟[M]. 天津:天津大学出版社,1994.

[3] 夏勇,彭玮,石江涛.  $k-\omega$  紊流数学模型应用于河道冲刷模拟初探[J]. 水电站设计,2002,18(1):36-39.

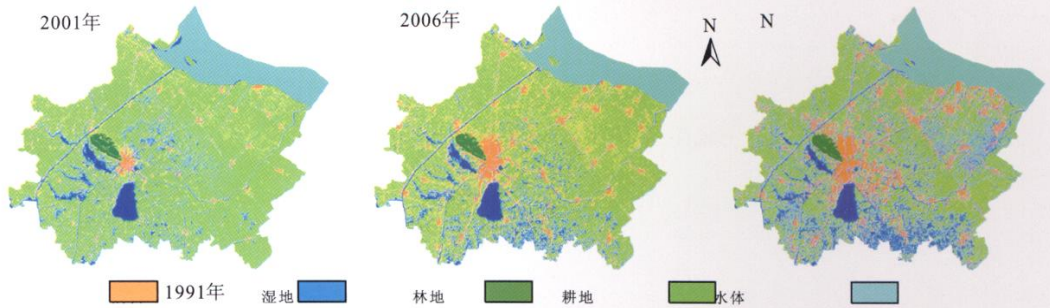
[4] 杨丽萍,党彦,郭维东,等. 液流运动形态的数值模拟[J]. 中国科技信息,2006(3):62-62.

[5] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

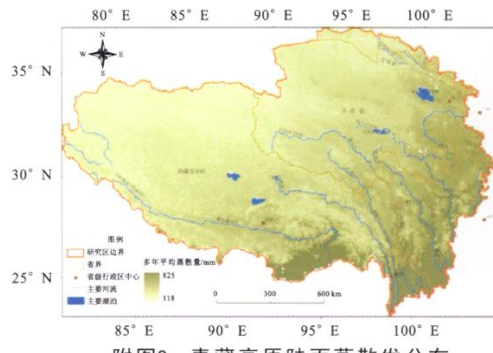
[6] 吴望一. 流体力学[M]. 北京:北京大学出版社,1992.



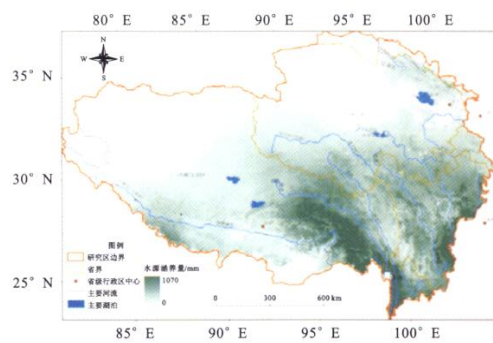
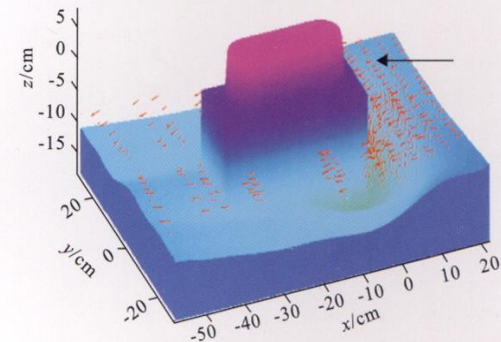
附图6 密云县3个时期的景观类型图



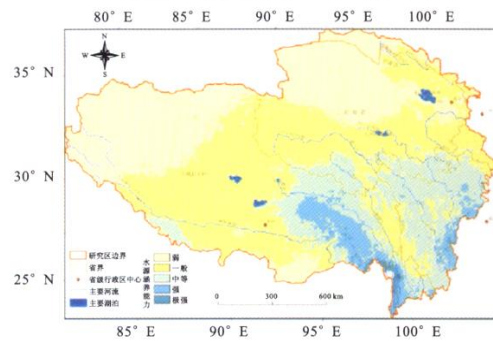
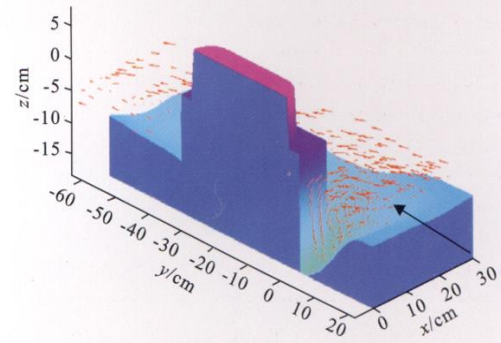
附图7 1991年、2001年和2006年土地利用分类图



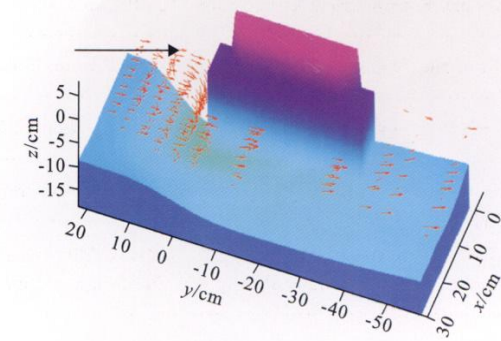
附图8 青藏高原陆面蒸发分布



附图9 青藏高原水源涵养分布



附图10 青藏高原水源涵养能力分区



附图11 桥墩冲刷坑附近测量三维流场图