

大体积混凝土一期通水冷却时机研究

吴 鹏¹, 李 勇 泉¹, 黄 耀 英²

(1. 中国长江三峡集团公司, 湖北 宜昌 443133; 2. 三峡大学 水利与环境资源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:大体积混凝土一期通水冷却的时间选择是一个影响冷却效果的重要因素,采用水管有限元法和水管冷却等效热传导法进行了研究,并对对比分析了环境气温分别为升温过程和降温过程对计算结果的影响。计算结果表明:随着一期开始通水冷却时间的延后,冷却效果更好,停止通水后混凝土的温度更低,但混凝土内部应力趋于不利;当环境气温为升温过程或降温过程时,仍可以得到上述结论;建议大体积混凝土一期通水冷却宜尽早进行。

关键词:水管冷却;一期通水;温度应力;通水时机

中图分类号:TV431 **文献标志码:**A

在大体积混凝土中埋设水管,进行通水冷却是一种有效的温控措施。冷却过程一般分为两期,其中,一期冷却是在混凝土刚浇筑完毕甚至正浇筑时就开始进行,以消减水化热温升。考虑水管冷却时,混凝土空间温度场分析是一个十分复杂的问题,尤其是混凝土浇筑初期水管冷却问题。为了解决这个问题,朱伯芳提出了精细有限元法,用有限元法计算水管冷却的效果^[1-2];刘宁提出了直接用三维有限元计算冷却水管的方法以及有限元子结构法^[3];朱岳明等则对直接用三维有限元计算冷却水管的方法作了改进^[4-5]。郭磊等对混凝土表面保温和水管冷却的温控效果作了比较分析^[6]。为了方便有限元网格剖分和减小计算存储量,朱伯芳等把冷却水管看成热汇^[1,7],在平均意义上考虑水管冷却的效果,得到近似温度场。黄耀英等对水管有限元法和水管等效热传导法两种计算模型的相关性进行了探讨^[8],认为水管冷却等效热传导法与拱坝温度荷载计算中的线性等效温度的思想是一致的,即等效线性温度并非真实的温度,而是虚拟的温度,但其力学作用与真实温度等效。此外,朱伯芳还系统研究了水管管径、管距、管长、水温、流量等因素对冷却效果的影响^[1]。由于一期通水冷却的时间选择是一个影响冷却效果的重要因素,为工程单位所关注,本文对大体积混凝土一期通水冷却时机进行研究。

1 基本原理

1.1 非稳定温度场三维有限元分析

非稳定温度场的有限元控制方程为

$$([H] + \frac{1}{\Delta t_n}[R])\{T_{n+1}\} - \frac{1}{\Delta t_n}[R]\{T_n\} + \{F_{n+1}\} = 0 \quad (1)$$

式中, Δt_n 为计算步长; $[H]$, $[R]$ 为系数矩阵; $[F]$ 为边界温度荷载列阵。

当采用水管冷却等效热传导法进行温度场分析时,此时冷却水管被看成负热源,从平均意义上考虑水管冷却的效果,推导得到的等效热传导方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + (T_0 - T_w) \frac{\partial \phi}{\partial t} + \theta_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (2)$$

式中, T 为混凝土温度; a 为混凝土导温系数; T_0 为混凝土初温; T_w 为水管进口水温。

对式(1)的 $\{F_{n+1}\}$ 做相应的修改,可得到水管冷却等效热传导法的有限元控制方程。当采用水管冷却有限元法进行温度场分析时,此时求解三维非稳定温度场有限元控制方程的难点在于,冷却水管边界 Γ^0 上的水温未知。沿程水温增量采用式(3)计算^[1]

$$\Delta T_w = \frac{-\lambda}{c_w \rho_w q_w} \iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds \quad (3)$$

式中,曲面积分 $\iint_{\Gamma^0} \frac{\partial T}{\partial n} ds$ 可沿冷却水管外缘面混凝土单元边界面逐个单元作高斯数值积分求得。

由于冷却水的入口温度已知,利用式(3),对每一根冷却水管沿水流方向可以逐段推求沿程水温。设某根冷却水管共分为 m 段,入口水温为 T_{w_0} ,第 i 段内水温增量为 ΔT_{w_i} ,则有

$$T_{w_i} = T_{w_0} + \sum_{j=1}^i \Delta T_{w_j}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

在式(3)中,水管沿程水温的变化与温度梯度 $\frac{\partial T}{\partial n}$ 有关,是一个边界非线性问题,所以温度场无法一次求出,必须采用迭代解法逐步逼近真解。第一次迭代时可先假设整个冷却水管的沿程水温均等于冷却水的入口温度,利用非稳定温度场有限元控制方程先求得温度场的近似解;再利用式(3)和式(4)求得水管内的沿程水温。重复上述过程,直到混凝土温度场和冷却水温都趋于收敛解,迭代结束。

1.2 混凝土徐变应力场有限元分析

混凝土的应变增量可表示为

$$\Delta \varepsilon_n = \Delta \varepsilon_n^e + \Delta \varepsilon_n^T + \Delta \varepsilon_n^0 + \Delta \varepsilon_n^c \quad (5)$$

式中, $\Delta \varepsilon_n^e$ 为弹性应变增量; $\Delta \varepsilon_n^T$ 为温度应变增量; $\Delta \varepsilon_n^0$ 为自生体积变形增量; $\Delta \varepsilon_n^c$ 为徐变应变增量。应力增量与应变增量关系为

$$\{\Delta \sigma_n\} = [\bar{D}_n] (\{\Delta \varepsilon_n\} - \{\eta_n\} - \{\Delta \varepsilon_n^T\} - \{\Delta \varepsilon_n^0\}) \quad (6)$$

式中, $\{\Delta \sigma_n\}$ 为应力增量列阵; $[\bar{D}_n]$ 为修正弹性矩阵; $\{\Delta \varepsilon_n\}$ 为总应变增量; $\{\eta_n\}$ 为徐变影响因子。

由线性徐变理论可得计算徐变应力的有限元控制方程为

$$[K] \{\Delta \delta_n\} = \{\Delta P_n\}^L + \{\Delta P_n\}^c + \{\Delta P_n\}^T + \{\Delta P_n\}^0 \quad (7)$$

式中, $[K]$ 为整体刚度矩阵; $\{\Delta \delta_n\}$ 为节点位移增量; $\{\Delta P_n\}^L$ 为外荷载引起的节点荷载增量; $\{\Delta P_n\}^c$ 为徐变引起的节点荷载增量; $\{\Delta P_n\}^T$ 为温度引起的节点荷载增量; $\{\Delta P_n\}^0$ 为自生体积变形引起的节点荷载增量。由控制方程(7)解出各节点位移增量 $\{\Delta \delta_n\}$ 后,由式(3)可计算出各单元应力增量 $\{\Delta \sigma_n\}$,累加后,即得到各单元应力 $\{\sigma_n\}$ 。

2 算例分析

设一混凝土棱柱体长 $L = 100 \text{ m}$,宽 \times 高 $= 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$,在混凝土棱柱体横截面的正中心方向布置了一根外径 \varnothing 为 32 mm 的冷却水管,混凝土棱柱体顶面散

热,其他面为绝热边界。混凝土的初始温度取 23°C ,环境温度为 $T_a = 17.5 + 10.8 \cos \frac{2\pi}{365}(t - 61)$, t 的单位为 d ,冷却水入口温度为 10°C ,混凝土绝热温升表达式为 $\theta(\tau) = 25.3(1 - e^{-0.315\tau})$,混凝土的导温系数 $a = 0.1 \text{ m}^2/\text{d}$,导热系数 $\lambda = 8.49 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,混凝土的表面放热系数 $\beta = 27.73 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$,水流流量 $q_w = 20.0 \text{ m}^3/\text{d}$,比热 $c_w = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$,密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,网格剖分如图 1 所示。典型节点见图 2。

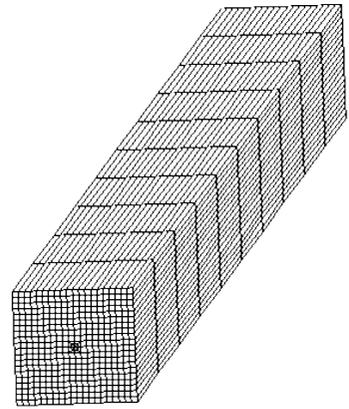


图 1 有限元网格

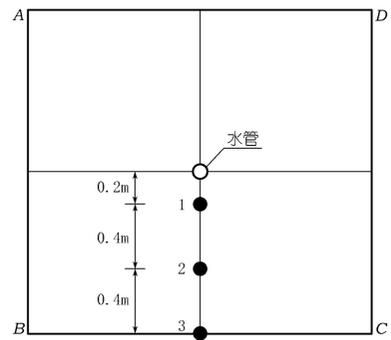


图 2 典型节点示意

2.1 工况设计

为便于对比分析,进行了如下方案的计算。

(1) 方案 1。按上述条件,一期通水开始时间分别为第 0, 0.5, 1, 2 天,连续通水 10 d,分别按水管冷却有限元法和水管冷却等效热传导法进行温度场和徐变应力场仿真计算。

(2) 方案 2。环境温度变化为 $T_a = 17.5 + 10.8 \cos \frac{2\pi}{365}(t + 78)$, t 的单位为 d ,以对比环境气温为升温过程和降温过程的计算结果规律是否一致。

2.2 温度场计算结果及分析

按水管有限元法计算的温度结果如图 3~6 所示,

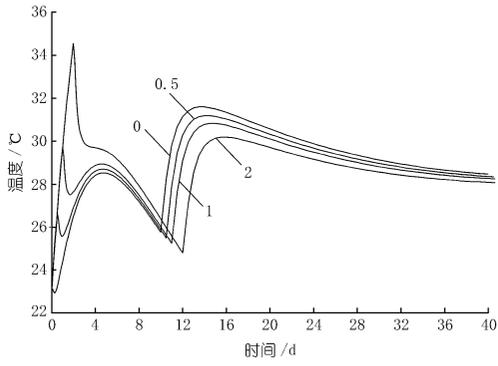


图3 水管有限元法在点1温度过程线比较

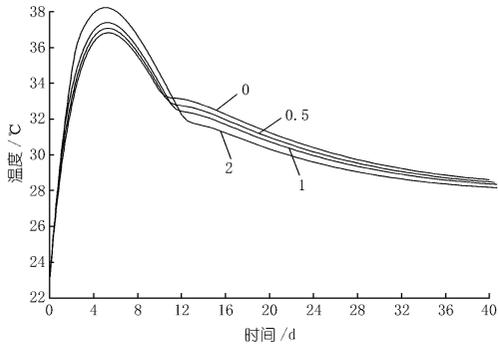


图4 水管有限元法在点2温度过程线比较

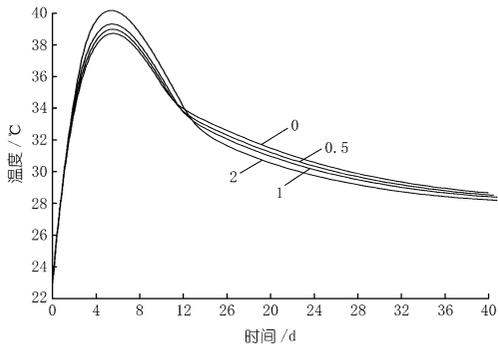


图5 水管有限元法在点3温度过程线比较

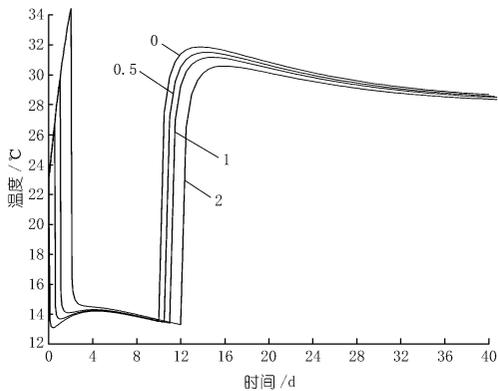


图6 水管有限元法在出口截面管壁温度过程线比较

图中标注0,0.5,1,2 分别表示开始通水时间为第0, 0.5,1,2 天。按水管冷却等效热传导法计算的温

果如图7~9所示。采用方案2按水管有限元法计算的温

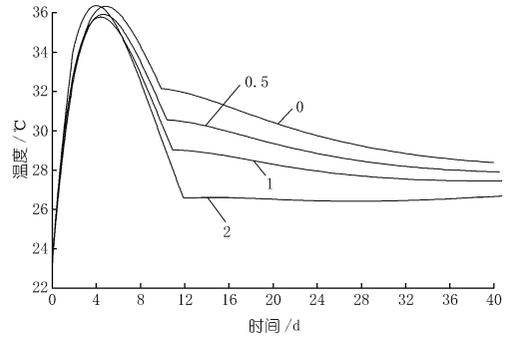


图7 水管等效法在点1温度过程线比较

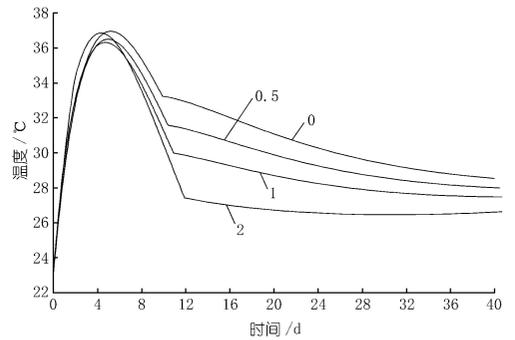


图8 水管等效法在点2温度过程线比较

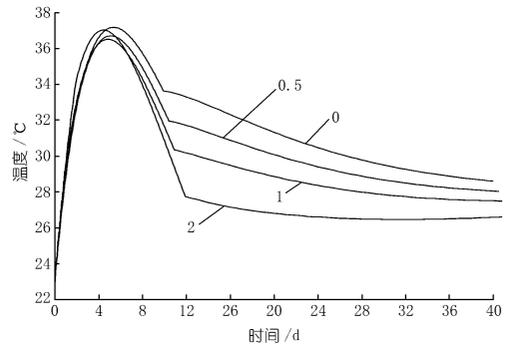


图9 水管等效法在点3温度过程线比较

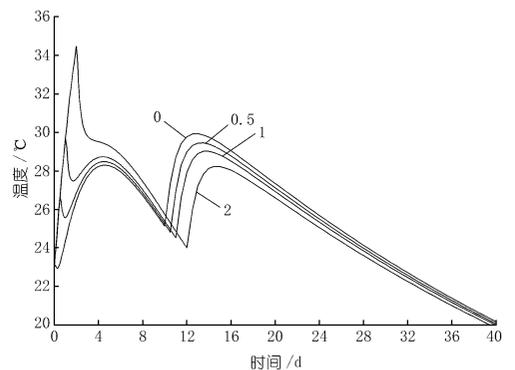


图10 方案2水管有限元法在点1温度过程线比较

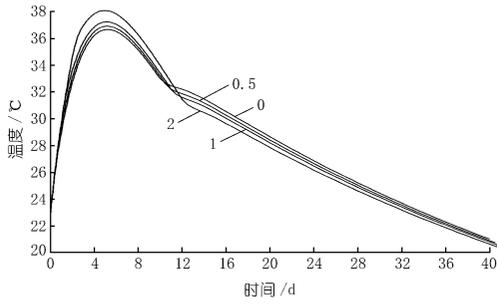


图 11 方案 2 水管有限元法在点 2 温度过程线比较

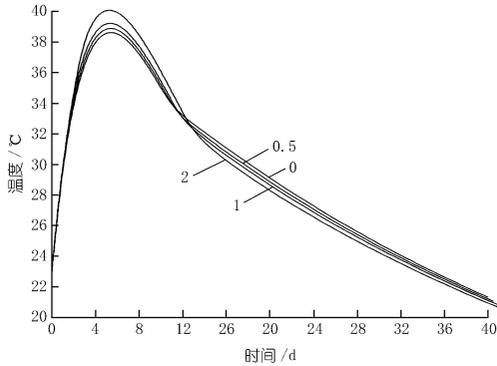


图 12 方案 2 水管有限元法在点 3 温度过程线比较

(1) 采用水管有限元法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,在通水期间,最高温度升高,在停止通水后,温度反而低。如在点 2,第 0 天开始通水,在通水期间最高温度为 36.835℃,停止通水后,即在第 15 天时,温度为 32.540℃。而在第 1 天开始通水,在通水期间,最高温度为 37.406℃,停止通水后,即在第 15 天时,温度为 31.948℃。究其原因为一期通水冷却时间延后,混凝土内部平均温度高,冷却水带走的热量多。

(2) 采用水管等效热传导法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,停止通水后,温度更低。如在点 1,第 0 天开始通水,停止通水后,温度为 31.426℃;而在第 1 天开始通水,停止通水后,温度为 28.81℃。

(3) 采用方案 2 进行温度场仿真分析,即环境温度由升温变为降温时,仍然满足上述规律。

2.3 徐变应力场计算结果及分析

按节 2.2 的温度场仿真计算结果进行徐变应力场分析。图 13、14 为按水管有限元法计算的徐变应力结果。图 15、16 为按水管冷却等效热传导法计算的徐变应力结果。

分析图 13~16 可得如下结论。

(1) 虽然采用水管有限元法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,在停止通水后,温度反而低,即冷却效果好,但应力趋于不利。如点 1,在第 2

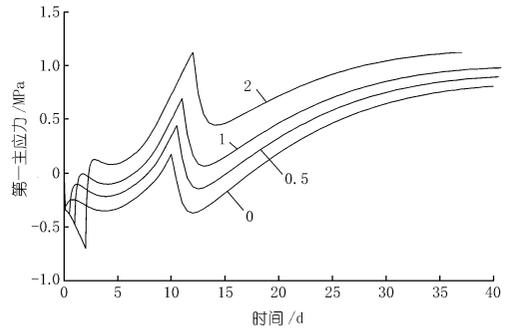


图 13 水管有限元法在点 1 主应力过程线比较

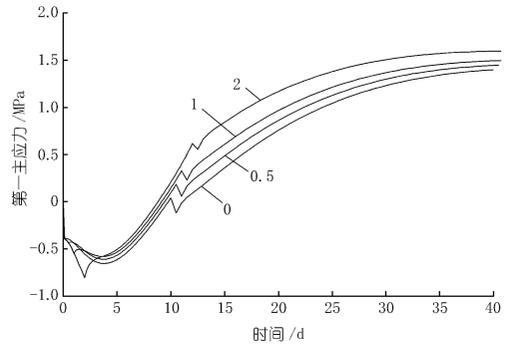


图 14 水管有限元法在点 2 主应力过程线比较

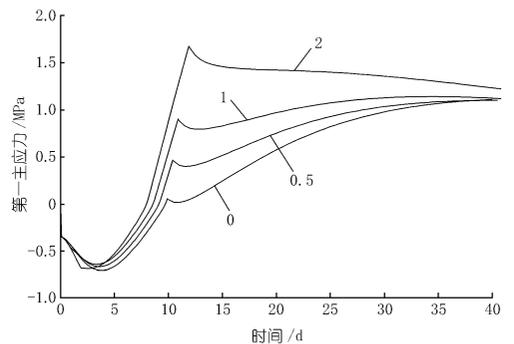


图 15 水管等效法在点 1 主应力过程线比较

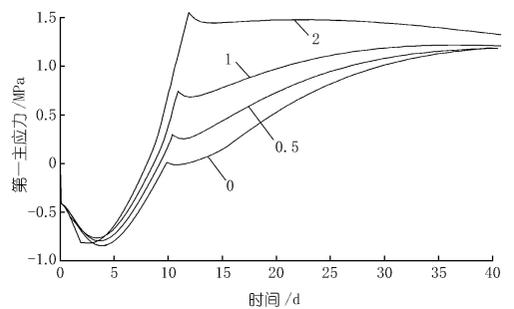


图 16 水管等效法在点 2 主应力过程线比较

天通水,通水前,水泥水化热温升,混凝土压应力逐渐增加;通水期间,压应力减小并转化为拉应力,最大拉应力为 1.127 MPa;停止通水后,温度回升,拉应力减小,然后随着混凝土内部温度向外散热而降温,拉应力

逐渐增大,在第 20 天时,拉应力为 0.717 MPa。而在第 0 天通水,通水期间仅有很小的拉应力,为 0.175 MPa;停止通水后,在第 20 天时,拉应力为 0.186 MPa。究其原因为一期通水冷却时间延后,混凝土在通水期间降温大,从而产生较大的拉应力。

(2) 采用水管等效热传导法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,在停止通水后,温度反而低,即冷却效果好,但应力同样趋于不利。如点 1,在第 2 天通水,通水期间,最大拉应力为 1.675 MPa;停止通水后,在第 20 天时,拉应力为 1.423 MPa。而在第 0 天通水,通水期间仅有很小的拉应力,为 0.058 MPa;停止通水后,在第 20 天时,拉应力为 0.576 MPa。

3 结 语

(1) 采用水管有限元法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,在通水期间,最高温度升高,在停止通水后,温度反而低。采用水管等效热传导法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,停止通水后,温度更低。

(2) 虽然采用水管有限元法和水管等效热传导法进行分析时,随着一期通水冷却开始时间的延后,在停

止通水后,温度反而低,但应力结果趋于不利。

(3) 对比分析了环境气温为升温过程和降温过程,结果表明上述结论仍然成立。

(4) 综上所述,建议大体积混凝土一期通水冷却开始时间宜尽早。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京:中国电力出版社,1999:652-668.
- [2] 朱伯芳,蔡建波. 混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J]. 水利学报,1985,(4):27-36.
- [3] 刘宁,刘光廷. 水管冷却效果的有限元子结构模拟技术[J]. 水利学报,1997,(12):43-49.
- [4] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报,2003,20(2):19-21.
- [5] 贺金仁. 高碾压混凝土重力坝的温度防裂研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [6] 郭磊,韩永林,黄养连,等. 混凝土表面保温和水管冷却的温控效果研究[J]. 人民长江,2011,42(11):27-31.
- [7] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报,1991,(12):43-49.
- [8] 黄耀英,周宜红. 两种不同水管冷却热传导计算模型相关性探讨[J]. 长江科学院院报,2009,26(6):56-59.

(编辑:郑毅)

Study on first stage cooling opportunity of massive concrete

WU Peng¹, LI Yongquan¹, HUANG Yaoying²

(1. China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The determination of opportunity for first stage cooling of massive concrete is an important issue influencing the cooling effect, and this issue is investigated by pipe FEM and cooling pipe equivalent heat conduction model. We compare the different results induced by raising environmental temperature and lowering environmental temperature. If the time of first stage cooling is postponed, cooling effect is better, when cooling stops, the massive concrete's temperature is lower, but the massive concrete's stress is disadvantage. The above results would be the same whether the environmental temperature is in a rising period or lowering period. The suggestion on first stage cooling of massive concrete as early as possible is recommended.

Key words: pipe cooling; first stage cooling; temperature stress; opportunity of water cooling

· 简 讯 ·

水保局开展丹江口库周主要支流水质监测

2012年3月28~31日,水保局丹江口局结合本年度工作任务,会同长江流域水环境监测中心成立工作组,共同开展丹江口库周主要支流水质监测断面现场查勘、样品采集和水质分析工作。

目前,丹江口水库处于枯水期,水位较低,加上此次水质监测断面现场查勘与采样工作点多面广、战线长、环境复杂,工作

人员克服诸多困难,精心组织,周密安排,紧密配合,制定了合理的工作计划和采样线路。

经过4d的努力,工作组先后完成了浪河、剑河、官山河、泗河、神定河、颍河、堵河、东河、汉江、天河、曲远河、淘沟河、滔河、丹江、淇河、老灌河等16条丹江口库周主要支流水质监测断面现场查勘、样品采集和水质分析工作。(长江)