

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.044

大坝下游河床潜流带温度场的影响因素研究

任杰,刘豪杰

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于雷诺平均方程(N-S方程)、 $k-\omega$ 湍流模型,并利用CFD-Fluent及COMSOL Multiphysics软件,构建地下水-地表水耦合模型;通过Morris全局灵敏度分析方法探讨单因素影响及多因素影响下河床潜流带内温度场变化规律。结果表明:河床潜流带的温度场对流速 v 和水深 H 较为灵敏,其余依次为沙坡高度 h 和河床底质渗透系数 k ;河道水位与河床潜流带的温度场变化呈正相关;多因素共同作用对河床潜流带温度场影响明显,且在沙坡下会出现一个半圆的低温区域。通过对大坝下游河床潜流带的温度场进行影响因素敏感性分析,可对水库下游河流生态治理和修复有一定指导意义。

关键词: Morris全局灵敏度分析;潜流带;温度场;地下水-地表水耦合模型

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0244-04

Influence Factors of Temperature Field in Hyporheic Zone on the Downstream Riverbed of the Dam

REN Jie, LIU Haojie

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Based on the Reynolds average equation (N-S equation) and $k-\omega$ turbulence model and CFD-fluent and COMSOL Multiphysics software, this paper constructed the groundwater surface water coupling model. Through Morris global sensitivity analysis, this paper discusses the variation law of temperature field in hyporheic zone affected by single factor and multiple factors. The results show that the temperature field of hyporheic zone is sensitive to flow velocity v and water depth H , and the rest are, in turn, the height h of sand slope and the permeability coefficient k of river bed bottom. The water level of river channel is positively correlated with the temperature field of hyporheic zone. The temperature field of hyporheic zone is affected by many factors, and a semicircular low temperature area will appear under the sand slope. Influence factors sensitivity analysis on that temperature field of hyporheic zone of the dam downstream could provide valuable information for the ecological treatment and restoration of the rivers downstream.

Keywords: Morris global sensitivity analysis; hyporheic zone; temperature field; groundwater surface water coupling model

河流中大坝建成后,坝前后的河流水位及流速发生改变,坝前水位抬升引起水温呈现垂直分层现象,分层水温通常为上层水温高,下层水温低^[1]。水库下泄水温与天然河流水温存在显著差异,对河床潜流带内水热交换有一定影响。水温也是影响河流及其邻近地区(如河岸带、洪泛区和潜流带)的水生生态系统重要的因素之一^[2]。因此,越来越多的研

究学者认识到地表水-地下水相互作用的重要性。陈孝兵等^[3]构建了循环式水槽装置,基于扩散模型,研究了不同河床地形的潜流交换与地表水动力及河床渗透特性之间的关系。刘东升等^[4]以新安江大坝下游为研究对象,对比分析了该水库下游河岸带冬夏季潜流交换特征及温度场分布规律。陈斌等^[5]揭示了渗流仪的不同装置结构对潜流交换的影响。李

英玉等^[6]研究了新安江大坝下游河岸带温度场时空分布特征,并基于一维瞬态解析模型对地下水流速进行了求解。国外专家, Norman 等^[2]构建了循环式水槽装置,研究了3种河床地形、3种水流流量和2种渗透特性情况下河床潜流带热流传输规律。Mamer 等^[7]通过构建一个循环式水槽装置,并利用一维瞬态解析模型对地下水和地表水的相互作用进行了量化,结果表明一维瞬态解析模型方法在精细尺度上能够准确定位和量化潜流交换通量。Sawyer 等^[8]使用了实验室水槽试验和数值模拟两种方法对潜流和热交换进行了量化。上述大都是针对单一因素影响下河床潜流带的规律研究,并未针对多种因素共同影响下河床潜流带的温度场影响规律变化问题进行研究分析。

本文构建一个概化水槽模型,并以水温作为一种示踪剂,基于雷诺平均方程(RANS)和 $k-\omega$ 湍流模型,利用商业有限元软件 CFD-Fluent 和 COMSOL Multiphysics 进行求解,并对模型参数进行 Morris 全局灵敏度分析,研究大坝下游河床潜流带内温度场在水流流速、河道水位、沙坡高度和河床渗透系数等单因素和多因素影响下的变化规律。

1 数学模型

1.1 流体控制方程

Patel 等^[9]和 Yoon 等^[10]通过二维水槽试验与数值模拟对比了相同边界条件下沙波上方流速分布、漩涡大小、阻力系数等特征因素,结果显示 $k-\omega$ 湍流模型对刻画沙波上方紊流结构具有较好的适用性。

对于不可压缩流体,雷诺平均方程为^[11-12]:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \rho \overline{u'_j u'_i}) \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

式中: i, j 为 x, y, z 的空间坐标 ($i, j = 1, 2, 3$); ρ 为流体密度, kg/m^3 ; μ 为流体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; P 为平均压力, Pa ; U_i 为是 x_i 方向上的时间平均; u'_i 为 x_i 方向上的波动速度分量, m/s ; S_{ij} 为应变速率张量; $-\overline{u'_j u'_i}$ 为雷诺应力。

雷诺应力与湍流动能 k 比率耗散系数 ω 有关,

其计算式为:

$$-\overline{u'_j u'_i} = v_t (2S_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4)$$

$$v_t = k/\omega \quad (5)$$

式中:式中 δ_{ij} 为克罗里克符号。

湍流动能 k 方程为:

$$\rho \frac{\partial (U_j k)}{\partial x_j} = \rho \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_f \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

耗散系数 ω 方程为:

$$\rho \frac{\partial (U_j \omega)}{\partial x_j} = \alpha \frac{\rho \omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_f \sigma_\omega) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (7)$$

1.2 多孔介质渗流控制方程

河床饱和多孔介质中渗流连续控制方程为^[13]:

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f v) = 0 \quad (8)$$

式中: ρ_f 为水体密度, kg/m^3 ; v 为渗流速度矢量, m/s 。

1.3 多孔介质温度场控制方程

河床多孔介质中的温度传播采用对流传热方程,其计算式为^[14]:

$$\left[\rho_f c_w \epsilon_p + (1 - \epsilon_p) \rho_s c_s \right] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_f c_w \frac{\partial}{\partial x_i} (T_w q_i) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = Q_T \quad (9)$$

式中: ϵ_p 为多孔介质孔隙率; c_w 为水体导热系数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$; ρ_s 为多孔介质密度, kg/m^3 ; c_s 为多孔介质导热系数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$; T_w 为水温, C ; λ_{ij} 为多孔介质导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$; Q_T 为热(汇)源项。

2 计算模型

参考 Norman 等^[2]的室内水槽物理模型,河床为 5.0 m (长) \times 0.7 m (高),床面有9个沙坡,沙坡有效范围为 $0 \sim 4.5 \text{ m}$ 。单个沙坡 0.5 m (长) \times 0.05 m (高)。地表水水位为 0.1 m 。地表水-地下水数值模型的概念模型如图1所示。以 $2.0 \text{ m} \sim 3.5 \text{ m}$ 之间的区域作为研究对象,研究区域内河床监测点布设 $5 \text{ 行} \times 7 \text{ 列}$,如图2所示。地表水模型采用 CFD-FLUENT 建模并求解,共划分 $1\ 058\ 125$ 个网格单元;地下水模型采用 COMSOL Multiphysics 建模并求解,共划分 $97\ 158$ 个网格单元。

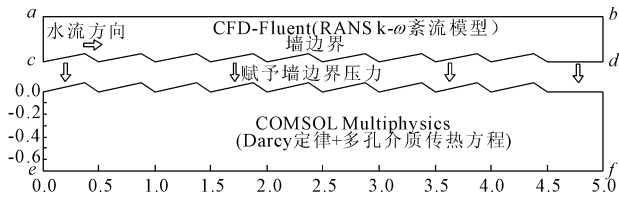


图 1 地表水-地下水数值模型的概念模型(单位:m)

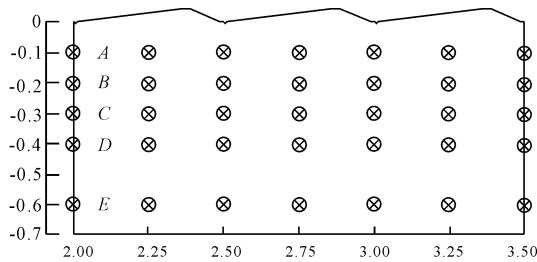


图 2 研究区域范围及温度监测点布置图(单位:m)

2.1 边界条件

水力边界:河流水位 ac 边为定水头边界, bd 边为自由出流, ab 为对称边界, cd 边界为不可移动的墙边界; cd 边界为压力边界, ce 、 ef 、 df 边界均为不透水边界。

温度边界:多孔介质模型中, ce 、 ef 、 df 边界均为绝热边界, cd 边界温度与水体温度相同。

初始条件:初始流速为 0.14 m/s , 水深为 0.1 m 。水流水温为 10°C , 河床底质渗透系数 k 和初始温度分为 0.033 m/s 和 20°C 。

2.2 模型参数

模型所需的水力及热力学特性参数从文献 [2, 14-15] 中进行选取, 模型参数见表 1。

表 1 模型参数

介质类型	渗透系数/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	孔隙率	导热系数/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
水体		999.699	4186		0.68
河床底质	3.3×10^{-2}	1650.000	933	0.4	0.80

2.3 全局灵敏度分析

考虑到所建立的模型参数灵敏度对输出结果的影响, 本文选取 Morris 方法^[15]对河床潜流带温度场的影响因素进行全局灵敏度分析, 具体计算步骤参考文献[15]。本文选取坡高 h , 流速 v , 沉积物渗透系数 k 和水深 H 等 4 个因素, 进行灵敏度分析。数值计算时, 各因素按照 20% 增加进行求解, 模拟时间为 24 h。

3 结果分析

3.1 全局灵敏度分析

根据各因素排列方式得到 10 种因素组合, 并进行数值求解, 结果如表 2 所示。由表 2 可知:

(1) 针对单一因素分析, 流速 v 和水深 H 是影响河床潜流带温度场的主要因素, 但从流速 v 和水深 H 对河床温度场作用的幅度来看, 流速 v 对河床潜流带温度场的影响是负相关的, 而水深 H 对河床温度场的影响是正相关的。

(2) 针对多因素分析, 组别 7、8、10 河床潜流带温度场的影响较大, 均呈现负相关。组别 9 影响最小。

(3) 考虑这 10 组因素组合, 单个因素变化或因素组合变化均会影响河床潜流带的温度场。

3.2 温度场分析

由图 3 可知, 研究区域内的温度场等值线在模拟结束时均会在沙坡下面会出现一个半圆型的低温区域。结合图 4 和图 5 可知, 迎水面压力大于背水

面, 导致地下水从压力大处向压力小处运动, 使沙坡下出现一个半圆的低温区域。由图 3(a)、图 3(b) 可知, 当流速 v 增大时, 研究区域内温度场等值线均有所向下降的趋势。图 3(c) 是流速 v 、水深 H 、河床底质渗透系数 k 和沙坡高度 h 等 4 个因素均发生变化情况下的河床研究区域内的温度场变化情况, 相比额定温度场(见图 3(a))和流速 v 发生变化(见图 3(b))情况而言, 多因素共同变化对河床影响的更为明显, 说明考虑多因素共同影响更能反映河床真实状态下的温度场变化规律。

表 2 全局灵敏度分析因素组合及温度变幅

组别	因素组合	温度变幅 /%	组别	因素组合	温度变幅 /%
1	v	-13.30	6	H, h	2.82
2	H	12.28	7	h, k	-12.36
3	h	-8.42	8	v, H, h	-10.85
4	k	-4.29	9	H, h, k	-1.59
5	v, H	-2.65	10	v, H, h, k	-14.68

4 结论

本文基于雷诺平均方程(N-S 方程)、 $k-\omega$ 湍流模型, 并利用 CFD-Fluent 及 COMSOL Multiphysics 软件, 构建地下水-地表水耦合模型; 通过 Morris 全局灵敏度分析方法探讨单因素影响及多因素影响下河床潜流带内温度场变化规律, 结论如下: 流速 v 、水深 H 、河床底质渗透系数 k 和沙坡高度 h 等。

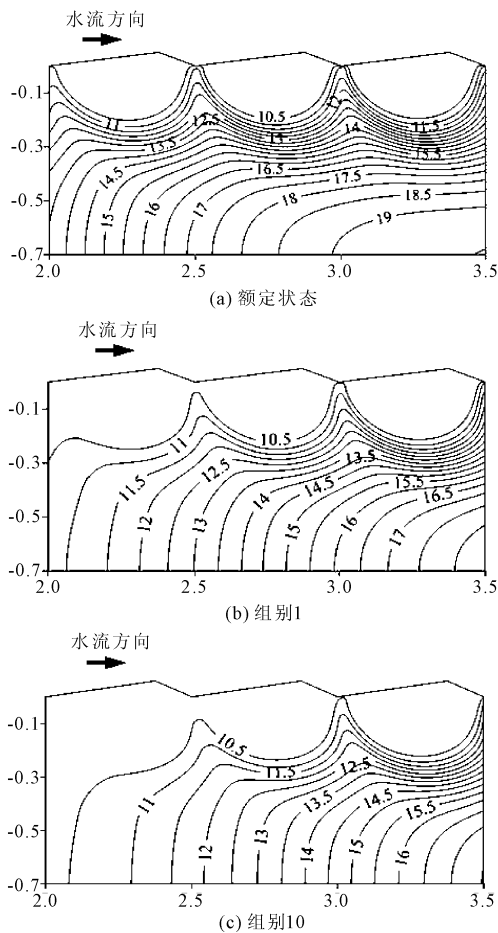


图 3 研究区域 $x = 2.0 \text{ m} \sim 3.5 \text{ m}$ 温度等值线图(单位: $^{\circ}\text{C}$)

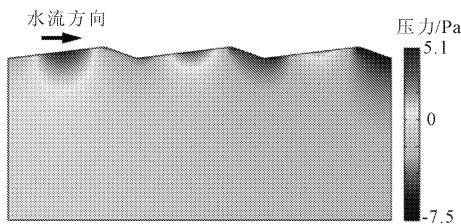


图 4 $x = 2.0 \text{ m} \sim 3.5 \text{ m}$ 压力场分布云图(组别 10)

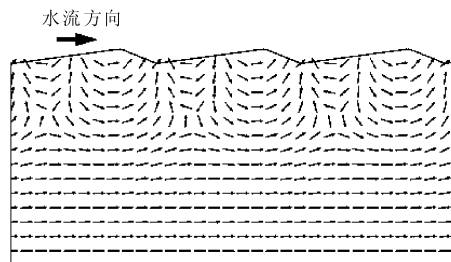


图 5 $x = 2.0 \text{ m} \sim 3.5 \text{ m}$ 速度场分布(组别 10)

(1) 针对单一因素,河床潜流带温度场受水流流速 v 、河道水位 H 的影响最为明显,其次为沙坡高度 h 和河床渗透系数 k ;针对组合因素,坡高 h 和渗透系数 k 组合、流速 v 、水位 H 和坡高 h 组合以及

流速 v 、水位 H 、坡高 h 和渗透系数 k 组合等 3 个组合对河床潜流带温度场影响较大。

(2) 河床潜流带的温度场受河床表面压力分布影响,且在沙坡下会出现一个半圆的低温区域;在多因素共同影响下,河床潜流带温度变化较为明显。

参考文献:

[1] 杜 尧,马 腾,邓娅敏,等.潜流带水文-生物地球化学:原理、方法及其生态意义[J].地球科学,2017,42(5):661-673.

[2] Norman F A, Cardenas M B. Heat transport in hyporheic zones due to bedforms: an experimental study[J]. Water Resources Research, 2014,50(4):3568-3582.

[3] 陈孝兵,赵 坚,李英玉,等.床面形态驱动下潜流交换试验[J].水科学进展,2014,25(6):34-41.

[4] 刘东升,赵 坚,吕 辉.大坝下游河岸带冬夏季水热交换特征对比[J].水科学进展,2017,28(1):124-132.

[5] 陈 斌,吕 辉.渗流仪装置结构对潜流交换的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2018,16(2):232-236.

[6] 李英玉,赵 坚,吕 辉.河岸带潜流层温度示踪流速计算方法[J].水科学进展,2016,27(3):423-429.

[7] Mamer E A, Lowry C S. Locating and quantifying spatially distributed groundwater/surface water interactions using temperature signals with paired fiber-optic cables[J]. Water Resources Research, 2013,49(11):7670-7680.

[8] Sawyer A H, Cardenas M B, Buttle J. Hyporheic temperature dynamics and heat exchange near channel-spanning logs [J]. Water Resources Research, 2012,48,W01529.

[9] Patel V C, Yoon J Y. Application of turbulence models to separated flow over rough surfaces[J]. Journal of Fluids Engineering, 1995,117(2):234-241.

[10] Yoon J Y, Patel V C. Numerical model of turbulent flow over sand dune [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996,122(1):10-18.

[11] Chen X B, Cardenas M B, Chen Li. Three-dimensional versus two - dimensional bed form-induced hyporheic exchange[J]. Water Resources Research, 2014,51(4):2923-2936.

[12] Janssen F, Cardenas M B, Sawyer A H, et al. A comparative experimental and multiphysics computational fluid dynamics study of coupled surface-subsurface flow in bed forms [J]. Water Resources Research, 2012,48(8):W08514.

[13] 仵彦卿.多孔介质渗流与污染物迁移数学模型[M].北京:科学出版社,2011.

[14] 杨 勇,赵 坚,陈孝兵,等.河道低温水对地表水-地下水交错带温度的影响[J].长江科学院院报,2011,29(1):20-24.

[15] 吴志伟,宋汉周.基于全局灵敏度分析的大坝温度场影响因子探讨[J].水利学报,2011,42(6):737-742.