

基于数据驱动模型的河流水温异变研究

唐雨佳^{1,2}, 黄竞争^{1,2}, 刘 锋^{1,2}, 蔡华阳^{1,2}

(1.中山大学海洋科学学院, 广东 广州 510275; 2.中山大学河口海岸研究所, 广东 广州 510275)

摘 要:河流水温是重要的生态和环境评价因子, 人类活动的干预(如大坝建设)会引起河流水温异常变化, 对河流生态系统造成一定负面影响。有效的水温预测能够为河流的长期演变趋势提供良好指示, 将一种新型的数据驱动水温预测模型——Air2stream 模型, 应用于长江三峡大坝上游寸滩站和下游宜昌站建坝前后的水温预测, 模型的预测效果通过均方根误差和纳什效率系数两种指标衡量, 并与其它经验回归模型进行对比分析。结果表明 Air2stream 模型相比经验回归模型具有精度高、稳定性好的优点, 可用于判断影响河流水温变化的主要因子, 检测河流水温的异变现象和幅度。该模型适用于反演自然演化条件下(即不考虑大型水利工程等强人类活动影响)河流水温的中长期变化, 其中实测值和模拟值之差可作为大型水利工程等强人类活动的影响指标。可为河流生态系统监测及管理提供重要技术支撑。

关键词:水温预测; Air2stream 模型; 水温异变; 经验回归; 三峡大坝

中图分类号: TV122

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2019)01-0050-06

水温是河流水文研究中一项重要因子, 在河流生态系统和物理化学过程中发挥着不可忽视的作用, 成为环境影响评估的重要指标之一。理论上, 河流水温由于受太阳辐射、气象变化、地质与植被状况、水气间的热交换等多种因素影响呈现显著时空复杂性, 给水温的长期演变预测及影响机制分析带来难度。目前, 国内外在水温预测上主要采用两种方法: 基于数值计算的确定性模型^[1-2]和经验统计模型^[3-4]。确定性模型即数值模型, 结合了地形因素和气象因子来模拟水温的时空变化, 根据水体质量守恒、动量守恒及热量平衡建立方程式^[1]。数值模型考虑了河流中能量交换和混合作用, 能够详细地模拟出不同空间位置水温随时间的变化, 并且应用于不同的时空尺度, 但它通常需要大量的观测数据和复杂的地形资料, 在实际应用上相对复杂^[5]。经验模型建立在大量的实测资料基础上, 探究水温变化规律从而建立经验公式, 忽略了复杂的热交换物理过程, 应用简便, 但精度相对较低, 仅适用于特定条件和时段。此外, 近年来, 由于大规模的水利工程建

设, 下游河道生态系统已经发生明显变化, 开发一个适用于反演自然演化条件下(即不考虑大型水利工程等强人类活影响)河流水温的中长期预测模型, 不仅能为流域水动力和热动力研究提供便利, 也为政府监控工程建设长期影响和流域异变提供良性指导。

本文将引用的水温预测模型是由意大利特伦多大学土木工程系教授 Marco Toffolon 团队开发的 Air2stream 模型, Air2stream 模型是一种区别于复杂的数值模型和简单的经验模型的半经验半物理混合模型, 在保证预测精度的同时避免了数值计算的复杂性。在实际运行中, Air2stream 模型假定气温为最主要的驱动因子, 也可引入河流流量, 一般适用于以天为尺度的水温预测。长江流域支流密布, 日均径流量变化大, 水温主要受气温和流量影响^[6], 因此本文将长江三峡大坝上下游河段作为实例进行模型验证分析。该模型的优点在于能够通过对水温的实测值和模拟值(即以实测值和模拟值之差作为大型水利工程等强人类活动的影响指标), 从而研究大型水利工程对河

收稿日期: 2017-11-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402601); 国家自然科学基金项目(51709287); 广东省自然科学基金项目(2017A030310321); 高校基本科研业务费青年教师重点培育项目(17lgzd12)

作者简介: 唐雨佳(1995-), 女, 浙江宁波人, 本科生, 主修海洋科学专业。E-mail: TYooga@outlook.com

通讯作者: 蔡华阳(1986-), 男, 福建晋江人, 副教授, 博士、硕士生导师, 主要从事水资源管理方面的研究。E-mail: caihy7@mail.sysu.edu.cn

流下游水温变化的影响^[7]。为了评估 Air2stream 模型的适用性与精确度,本文还将建立经验回归模型与之进行对比。

1 研究方法

1.1 Air2stream 模型

Air2stream 模型的机理是基于物理过程建立一个能量守恒方程,即对于一个流域面积未知的河段,分析河流的主要热量收支,利用外部热传递产生的能量转化为水体热通量的原理建立等式^[8]。这些热收支因子包括河流与大气的净热交换(包括长波辐射和短波辐射),上游支流的影响(一般包括地表和地下水),水体与河床之间的能量交换和水体内部产热等^[9],其中影响最大的是水体与大气间的热交换和水体间的热传递,由此建立一个基本方程:

$$\rho c_p V \frac{dT_w}{dt} = AH + \rho c_p \left(\sum_i Q_i T_{w,i} - Q T_w \right) \quad (1)$$

式中: T_w 为日均水温; t 为以天为单位的时间; ρ 为河流密度; c_p 为在常压下的比热; A 为研究河段的表面积; V 为参与热交换的河段总体积; H 为河流与大气间的净热交换; Q 为河流的流量; Q_i 和 $T_{w,i}$ 为河流在第 i 段对水通量产生影响的流量和水温。方程右侧第一项是一个关于长短波辐射、潜热和显热通量的函数,可以近似地仅用气温 T_a 来衡量;第二项表示某一河段河流流经产生的净热通量,河流与河床摩擦产生的热量忽略不计。

将能量守恒方程右侧的热量交换项用泰勒展开 (Taylor expansion) 进行线性化,可转化为含参数方程:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dT_w}{dt} &= \frac{1}{\delta} \left\{ (a_1 + a_2 T_a - a_3 T_w) + \right. \\ &\quad \left. \theta [a_5 + a_6 \cos(2\pi(t/t_y - a_7))] - a_8 T_w \right\} \\ \delta &= \theta^{a_4} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: t_y 为一年的时间; θ 为无量纲的流量; δ 为无量纲的深度,具体推导过程可参考 Toffolon 和 Piccolroaz 的研究成果^[8]。公式表示的是完整的河流水温预测模型,以气温和流量作为输入参数,在忽略个别参数的情况下,可将模型简化成其他四个版本^[8,9]。本文除了采用完整版本的 8 参数 Air2stream 模型(a2s-8)之外,还采用 5 参数模型(a2s-5):

$$\frac{dT_w}{dt} = a_1 + a_2 T_a - a_3 T_w + a_6 \cos[2\pi(t/t_y - a_7)] \quad (3)$$

与 8 参数模型相比,a2s-5 模型忽略流量变化对水温的影响,仅以气温作为输入参数,即令 $\delta = \theta = 1$,同

时将 8 参数模型中 a_1 和 a_5 简化为 a_5 参数, a_3 和 a_8 简化为 a_3 参数。通过对比 a2s-8 与 a2s-5 的模型结果,可以探讨流量对水温变化的相对重要性。模型中数值方程和的求解采用 Crank Nicolson 方法,迭代次数设为 2000。将已知的一定长度时间序列的历史气温和流量序列输入到模型当中,从而确定各参数的估计值,模拟河流水温的日均变化,进而探讨该河段的热收支情况。

1.2 回归模型

用于对比分析的经验模型采用的是回归分析法,即采用回归分析的方法基于水温预期影响因子(气温和流量)的关系建立预测模型^[10]。本文将采用的模型包括一元、多元线性回归和一元非线性回归(Logistic、Quadratic 和 Cubic 模型),每种模型的拟合方程式列于表 1,单因子的拟合方法选择气温因子,多因子选择气温和流量两个因子。

表1 不同回归模型及其相关参数

Table1 The regression model types and associated parameters

拟合方法-因子数	拟合关系式	参数个数
Linear-1	$T_w = b_1 + b_2 T_a$	2
Linear-2	$T_w = c_1 + c_2 T_a + c_3 Q$	3
Logistic-1 ^[11]	$T_w = f_1 - f_2 / \{1 + e^{[f_3(f_4 - T_w)]}\}$	4
Quadratic-1	$T_w = m_1 + m_2 T_a + m_3 T_a^2$	3
Cubic-1	$T_w = n_1 + n_2 T_a + n_3 T_a^2 + n_4 T_a^3$	4

1.3 模型效果评估

为了便于对比 Air2stream 模型和回归模型的运行效果,本文使用了均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE,修正为 NSE^* ^[9],平均水温 $\bar{T}_w$ 定义为每一天的水温的年际平均值)两个模型评估指标:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_{w,i} - \hat{T}_{w,i})^2} \quad (4)$$

$$NSE^* = 1 - \frac{RMSE^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{w,i} - \bar{T}_w)^2} \quad (5)$$

均方根误差越小或纳什效率系数越接近 1,表明模型的预测效果越好;均方根误差越大或纳什效率系数小于 0,表明模型预测误差较大。

2 实例分析

2.1 研究区域与数据来源

为分析三峡大坝水库调节对下游水温的影响,本文以长江三峡大坝上游寸滩河段(未受大坝影响)和下游宜昌河段(见图1)为研究实例探究 Air2stream 的模型效果。长江三峡与下游的葛洲坝水电站构成梯级电站。三峡大坝对下游的径流调节为年内可分4个运行期,即枯水期(12月~次年2月中旬)、汛前消落期(第一阶段2月下旬~5月;第二阶段即泄水期,5月~6月上旬)、洪水期(6月中旬~9月中旬)和汛末蓄水期(9月下旬~11月中旬),分别对应冬、春、夏和秋四个季节^[12]。前期研究为探讨葛洲坝对长江下游(特别是宜昌站)水温的影响,将三峡大坝运行前的水温时间序列分成葛洲坝运行前(1975~1980)和运行后(1981~1987)两个阶段,采用葛洲坝运行前数据进行 Air2stream 模型的率定,葛洲坝运行后数据进行验证,结果表明葛洲坝运行前后的模型的水温均方根误差基本相同,表明葛洲坝不是影响长江下游水温变化的主要因子^[7]。



图1 长江流域水系示意图

Fig.1 The drainage map of the Yangtze River

宜昌和寸滩站水文资料来自水文年鉴,包括日均水温和日均流量数据;日均气温数据来自中国气象数据网公开的《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》,需要说明的是,寸滩并未设置地面交换站,因此以靠近寸滩地区的沙坪坝站的气象数据代表寸滩站的气象状况。

2.2 模型运行效果

利用建坝前宜昌和寸滩的水文资料进行研究,将1975~1982年数据用于参数率定,1983~1987年数据用于水温预测和验证,得到 Air2stream 模型和回归模型的评估指标见表2。根据各模型的均方根误差 RMSE 的值,Air2stream 模型的预测效果优于回归模型,预测效果最好的是 a2s-8 模型;而回归模型各版本表现最好的 Logistic 模型误差接近 2℃,远大于 Air2stream 模型。从模拟寸滩和宜昌水温时的 NSE* 值集合箱线图来看(见图2),根据数据的离散程度,air2stream 模型在预测水温上的总体表现比回归模型更稳定。

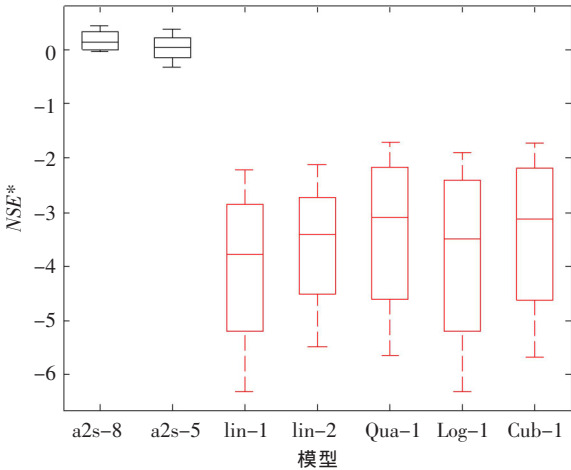


图2 Air2stream 模型和回归模型的 NSE* 分布箱线图

Fig.2 The NSE* box plots for Air2stream and regression models

表2 建坝前水温预测模型的率定与验证效果

Table2 The calibration and validation results of water temperature prediction models before the dam construction

	模型版本	寸滩 ($RMSE/^\circ C(NSE^*)$)		宜昌 ($RMSE/^\circ C(NSE^*)$)		平均值 ($RMSE/^\circ C(NSE^*)$)
		率定期	验证期	率定期	验证期	
Air2stream	a2s-8	0.73 (0.45)	0.71 (0.23)	0.86(0.03)	0.73(−0.04)	0.76(0.17)
	a2s-5	0.77 (0.38)	0.78(0.06)	0.87(0.03)	0.88(−0.32)	0.83(0.04)
回归模型	Linear-1	1.76(−2.21)	1.71(−3.48)	1.98(−4.09)	2.02(−6.31)	1.87(−4.02)
	Linear-2	1.74(−2.13)	1.67(−3.29)	1.87(−3.54)	1.91(−5.48)	1.80(−1.84)
	Logistic-1	1.61(−1.70)	1.54(−2.62)	1.88(−3.57)	1.93(−5.65)	1.74(−3.39)
	Quadratic-1	1.67(−1.90)	1.60(−2.92)	1.98(−4.09)	2.02(−6.31)	1.82(−3.81)
	Cubic-1	1.62(−1.73)	1.54(−2.65)	1.88(−3.59)	1.93(−5.66)	1.76(−3.42)

根据模型精度和稳定性,分别选取 Air2stream 模型和表现最好的 Logistic 模型探讨拟合效果。以寸滩 1983~1987 年水温多年月平均值为例(见图 3),对比预测效果最好的 a2s-8 模型和 Logistic 模型的预测水温与实测水温可见,Air2stream 模型预测水温与实测水温重合度更高,而回归模型一般适用于平均水温的预测,与实测水温值相差较大。

3 结果与讨论

3.1 判断影响水温的主要因子

Air2stream 模型基于能量守恒定律,可为河流水温变化的内在影响机制分析提供指导。a2s-5 相对 a2s-8 模型而言忽略了流量的影响,通过比较两模型的误差可以大致判断气温和流量对河流水温的影响权重。对于寸滩河段,进行水温预测时 a2s-5 模型的 *RMSE* 值相对 a2s-8 增加了 0.07℃;而对于宜昌河段,a2s-5 的 *RMSE* 值相比 a2s-8 模型提升了 0.15℃,表明径流变化对宜昌河段水温的影响比寸滩河段更显著。值得一提的是,在忽略流量变化的条件下,a2s-5 模型预测精度也相当可观,表明在一定条件下,仅靠气温数据也可获得相对可信的预测结果。

3.2 检测水温异变现象

利用三峡建坝前(1975~1987 年)的数据拟合得到适用于自然状态下水温预测的理论模型,分别预测宜昌和寸滩建坝后(2003~2012 年)水温。对比寸滩和宜昌水温预测的 *RMSE* 和 *NSE** 值(见表3),Air2stream 模型在预测寸滩水温时仍能保持较低的平均误差(0.85℃),展现了该模型进行跨时段预测的强大性能;而在预测宜昌水温时,模型出现显著的性能恶化现象,实际预测产生的误差达到 2.5℃以上,*NSE** 小于-4,预测阶段误差增大了 1~2℃。对比

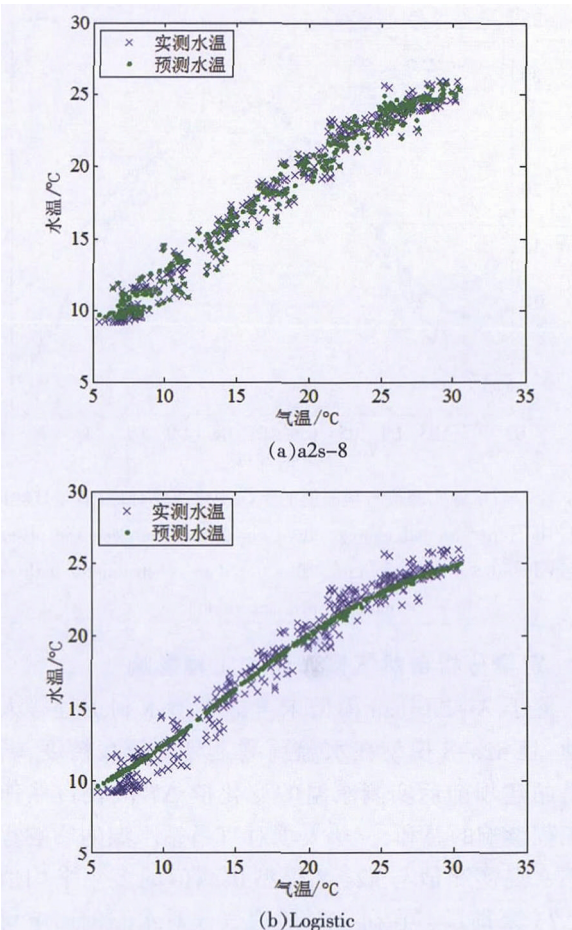


图3 a2s-8(a)和 Logistic(b)模型效果对比图
Fig.3 The comparison between predicted and observed water temperature using a2s-8(a) and logistic(b) models

模型在寸滩水温预测上的稳定表现可知,这个误差主要来源并不是模型性能缺陷所致,而是 2003 年开始运行的三峡大坝使其下游的宜昌河段水温发生异变。根据宜昌实测水温和预测水温多年月均值年内变化曲线(见图 4),三峡大坝建成后该站水温变化发生滞后。

表3 建坝后水温预测模型的率定与验证效果

Table3 The calibration and validation results for water temperature predicting models after the dam construction						
模型版本		寸滩(<i>RMSE</i> /℃(<i>NSE*</i>))		宜昌(<i>RMSE</i> /℃(<i>NSE*</i>))		平均值
		率定期	验证期	率定期	验证期	(<i>RMSE</i> /℃(<i>NSE*</i>))
Air2stream	a2s-8	0.74 (0.43)	0.93(0.19)	0.82(0.11)	2.61(−4.4)	1.27(−0.92)
	a2s-5	0.77 (0.39)	0.96(0.12)	0.83(0.08)	2.84(−5.66)	1.35(−1.27)
回归模型	Linar-1	1.85(−2.14)	1.96(−2.58)	2.00(−4.29)	3.33(−8.18)	2.28(−3.76)
	Linar-2	1.79(−2.05)	1.90(−2.39)	1.89(−3.71)	3.15(−7.18)	2.18(−2.81)
	Logistic-1	1.59(−1.61)	1.78(−2.00)	1.90(−3.77)	3.30(−8.00)	2.14(−3.04)
	Quadratic-1	1.65(−1.81)	1.83(−2.18)	2.00(−4.29)	3.33(−8.16)	2.20(−4.11)
	Cubic-1	1.59(−1.64)	1.80(−2.07)	1.90(−3.79)	3.30(−8.01)	2.15(−3.88)

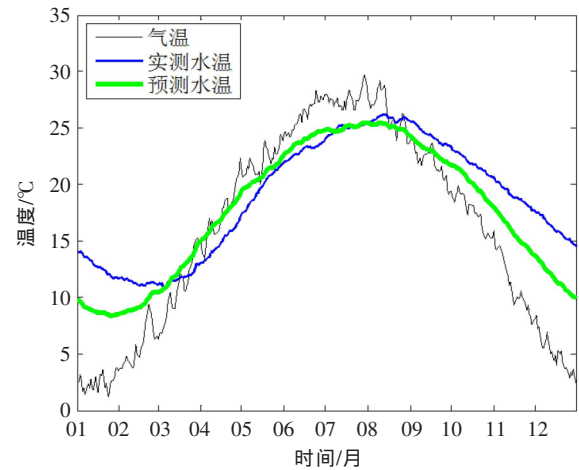


图4 建坝后水温实测值与预测值的年内变化曲线对比(多年月均值)
Fig.4 The inner-annual change curve comparison between the observed and predicted water temperature after the dam construction(multi-year monthly average value)

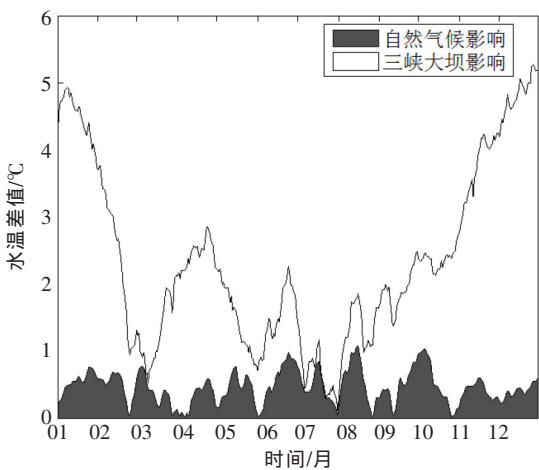


图5 自然气候与三峡大坝对宜昌站水温的影响幅度(绝对值)
Fig.5 A comparison between the effects of natural climate and the Three Gorges Dam on the water temperature at the Yichang station (absolute value)

3.3 定量分析自然气候作用和工程影响

鉴于 Air2atream 模型未考虑大型水利工程等人类活动,且 a2s-8 模型在水温预测上具有较高精度,若以宜昌站建坝前后实测水温的变化值 ΔT 代表自然作用和工程影响的总和,三峡大坝对宜昌站水温的影响程度可用水温实测值与 a2s-8 模型预测值的多年平均值差值 $\Delta T1$ 来衡量,在研究时段内气候对水温的影响可由 ΔT 和 $\Delta T1$ 的差值 $\Delta T2$ 表示,以月平均值表示的计算结果见表4。从三峡大坝建成至2012年,对宜昌站水温的影响表现为春、夏季使其平均降低1.28℃和0.11℃,秋、冬季使其平均升高2.18℃和3.46℃。结合气温变化趋势,可认为升温期和降温期的水温变化分别滞后0.70℃和2.82℃。气候变化对宜昌站水温影响较小,引起水温异变在0.5℃左右。图5直观地表示了这两个因子的影响幅度,对比可知三峡工程对下游河流水温影响十分明显。

4 总结与展望

本文主要针对 Air2stream 模型和经验回归模型探讨了以天为尺度的水温预测模型的运行效果,并

将模型应用于三峡大坝上游寸滩河段和下游宜昌河段的水温预测,讨论 Air2stream 模型的实用性及其在水温异变研究上的应用价值。水温模型的预测效果与河流的水文特性、研究时段和研究尺度等多种因素相关,考虑到自然气候变化和人类活动的影响,研究时段的变化可能使得原本适用的模型变得不那么适用。

相较传统的经验模型,Air2stream 模型的预测精度高,性能更加稳定,能为自然演变条件下(即不考虑大型水利工程等强人类活动影响)河流水温的中长期预测提供有效参考。为了提高模型的预测精度,最好选取邻近时间序列的历史数据进行参数率定。在实际应用中,利用 Air2stream 模型可有效判断河流水温主要影响因子的权重,检测河流水温是否发生了异常变化,计算水温异变的幅度和自然气候作用或人类活动对河流水温变化的影响程度,为工程建设与监控提供一定指导。

参考文献:

[1] 江春波,周琦,刘健.河道与水库水温模拟及预测模型概述[J].环境影响评价,2016,38(3):53-56. (JIANG Chunbo, ZHOU Qi, LIU Jian. Numerical models of water temperature prediction for reser-

表4 自然气候及三峡大坝对宜昌站水温的影响

Table4 The impacts of climate change and Three Gorges Dam on the thermal dynamics at the Yichang station

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
总影响 $\Delta T/^\circ\text{C}$	3.43	1.53	-1.00	-2.40	-1.53	-0.39	0.39	0.14	1.60	2.34	2.87	4.02
三峡大坝影响 $\Delta T1/^\circ\text{C}$	3.96	2.01	-0.61	-2.14	-1.09	-0.92	-0.09	0.68	1.42	1.84	3.28	4.41
自然气候影响 $\Delta T2/^\circ\text{C}$	-0.53	-0.48	-0.39	-0.26	-0.44	0.54	0.48	-0.54	0.18	0.50	-0.41	-0.39

- voirs and river channels [J]. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(3):53–56. (in Chinese))
- [2] 任华堂, 夏建新, 陶亚. 阿海水库水温数值预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7):814–820. (REN Huatang, XIA Jianxin, TAO Ya. On temperature numerical prediction in Ahai reservoir [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(7):814–820. (in Chinese))
- [3] GRBIĆ R, KURTAGIĆ D, LIŠKOVIĆ D. Stream water temperature prediction based on Gaussian process regression [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(18):7407–7414.
- [4] KAMARIANAKIS Y, VELASCO AYUSO S, CRISTÓBAL RODRÍGUEZ E, et al. Water temperature forecasting for Spanish rivers by means of nonlinear mixed models [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2016(5):226–243.
- [5] 孙大明, 田慧峰, 张欢, 等. 长江上游水温监测及水温和气温关系研究[J]. 建筑节能, 2010, 38(12):74–77. (SUN Daming, TIAN Huifeng, ZHANG Huan, et al. Monitoring of water temperature and changing relationship between the water temperature and air temperature in the upper Yangtze river [J]. Building Energy Conservation, 2010, 38(12):74–77. (in Chinese))
- [6] 保文秀, 陆颖, 国怀亮. 河流水温预测方法研究进展[A]. 中国环境科学学会学术年会论文集 (2014)[C]. 中国环境科学学会, 2014:2143–2147. (BAO Wenxiu, LU Ying, GUO Huailiang. Research development of river water temperature forecasting methods[A]. Proceedings of Annual Meeting of Chinese Society for Environmental Sciences[C]. Chinese Society for Environmental Sciences, 2014:2143–2147. (in Chinese))
- [7] CAI H., PICCOLROAZ S., HUANG J., LIU Z., LIU F., TOFFOLON M. Quantifying the impact of the Three Gorges Dam on the thermal dynamics of the Yangtze River [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(5): 054016.
- [8] TOFFOLON M, PICCOLROAZ S. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge [J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(11):114011.
- [9] PICCOLROAZ S, CALAMITA E, MAJONE B, et al. Prediction of river water temperature: a comparison between a new family of hybrid models and statistical approaches[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(21):3901–3917.
- [10] 王国丽, 陈晓飞, 刘刊, 等. 回归分析在水科学中的应用综述[J]. 中国农村水利水电, 2004(11):40–44. (WANG Guoli, CHEN Xiaofei, LIU Kan, et al. Summary on application of regression analysis in water science [J]. Water Conservancy and Hydropower in Rural China, 2004(11):40–44. (in Chinese))
- [11] OMID MOHSENI, HEINZ G. STEFAN, TROY R. ERICKSON, et al. A nonlinear regression model for weekly stream temperatures[J]. Water Resources Research, 1998, 34(10):2685–2692.
- [12] 谢涛, 纪道斌, 刘德富, 等. 三峡水库库首水温监测及初步分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(9):1201–1206. (XIE Tao, JI Daobin, LIU Defu, et al. Water temperature monitoring of the head of the Three Gorges reservoir and preliminary analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2013, 22(9):1201–1206. (in Chinese))

Investigation of River Water Temperature Variation Based on Data-Driven Model

TANG Yujia^{1,2}, HUANG Jingzheng^{1,2}, LIU Feng^{1,2}, CAI Huayang^{1,2}

(1. School of Marine Science of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Estuarine and Coastal Research Institute of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: River water temperature has been regarded as an important ecological and environmental assessment factor. Intervention of human activities (such as dam construction) often causes abnormal changes in river water temperature and significant effects on river ecosystem. The effective water temperature prediction can provide a good indication for the long-term evolution trend of the river thermal dynamics. In this paper, the Air2stream model, which is a newly data-driven water temperature prediction model, has been used in the Yangtze River to explore its temperature variation before and after the operation of Three Gorges Dam. The performance of the model is assessed by the root mean square error (RMSE) and the Nash efficiency coefficient (NSE), with a comparison with other empirical regression models. The results show that the Air2stream model has the advantages of higher accuracy and better stability in the medium and long-term water temperature prediction for the river water temperature that would have occurred in absence of the large-scale engineering works or other intensive human interventions. In addition, the difference between observed and simulated values of river water temperature can be used as a useful indicator for assessing the impacts of human interventions. The case study applied to the Yangtze River shows that Air2stream can be used to determine the extent of variation of water temperature and main controlled factors, as well as quantitatively analyzes the contributions of both human interventions and climate change to water temperature mutation. Therefore, it can provide an important technical support for monitoring and management of river ecosystem.

Key words: water temperature prediction; Air2stream model; water temperature variation; empirical regression model; Three Gorges dam