

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.004

黄河上游河道一维河道水温模型和经验公式法对比

李勋贵, 王晓磊, 苏贤保

(兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:为对比不同方法在黄河上游水温模拟中的适用性,分别用一维河道水温模型和经验公式法(四次多项式、三次多项式和幂函数)对兰州以上的黄河上游干支流共 8 个主要水文站日平均水温和月平均水温进行模拟,并采用平均绝对误差、均方根误差和纳什系数对模拟的精度进行检验。结果表明:四次多项式在黄河干流(除黄河沿站)日平均水温模拟中精度最高,幂函数在支流湟水的日平均水温模拟中精度最高;四次多项式适合黄河干流水文站的月平均水温模拟,幂函数更适合于支流湟水的月平均水温模拟;经验公式法在黄河干流日平均水温模拟中精度高于一维河道水温模型,更适合黄河上游干流段的日平均水温模拟。

关键词:径流水温;一维河道水温模型;经验公式法;黄河上游

中图分类号:TV214; P332.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)04-0024-06

Comparison of one-dimensional river water temperature model and empirical formula method in upper reaches of Yellow River // LI Xungui, WANG Xiaolei, SU Xianbao (College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to compare the applicability of different methods in the simulation of water temperature in the upper reaches of the Yellow River, the daily and monthly average water temperatures of eight main hydrological stations in the upper reaches of the Yellow River above Lanzhou were simulated by using one-dimensional river water temperature model and empirical formula method (quartic polynomial, cubic polynomial and power function). Mean absolute error, root mean square error and Nash coefficient were used to test the accuracy of simulation. The results show that quadratic polynomial has the highest accuracy in the daily average water temperature simulation of the main stream of the Yellow River (except for Huangheyan Station), and power function has the highest accuracy in the daily average water temperature simulation of the Huangshui tributary. Quadric polynomial is suitable for monthly average water temperature simulation of hydrological stations in the main stream of the Yellow River, and power function is more suitable for monthly average water temperature simulation of Huangshui tributary. Empirical formula method is more accurate than one-dimensional river water temperature model in the simulation of daily average water temperature in the main stream of the Yellow River, which is more suitable for the simulation of daily average water temperature in the upper reaches of the Yellow River.

Key words: runoff temperature; one-dimensional river water temperature model; empirical formula method; upper reaches of Yellow River

水温是影响河流生态系统理化性质的重要因素^[1],其变化对河流溶解氧的含量、有机物的降解、水生生物的生存环境^[2]以及水资源的开发利用^[3-4]有重要影响。目前,国内河流水温模拟方法主要有数学模型法和经验公式法两大类^[5-6]。数学模型法物理机制明确,充分考虑河流的河道性质、水动力性质以及河道与各界面的热交换过程^[7-8],但所需数据量大,运算过程较经验公式法复杂,应用受到一定的

限制^[9]。经验公式法依据监测资料建立符合特定条件下的经验表达式^[10],其中应用最为广泛的是 SL278—2002《水利水电工程水文计算规范》中的经验公式^[11],尽管该方法从统计规则得出的经验公式只能粗略估算水温,但其使用简单、快捷,是水温模拟估算的重要方法^[12]。

兰州以上的黄河上游地处高寒集水区,河流水温受冰雪融水、降水和径流变化的多重影响,且水文

基金项目:国家自然科学基金(51679115, 51109103)

作者简介:李勋贵(1978—),副教授,博士,主要从事水文水资源和水文系统研究。E-mail:lixungui@lzu.edu.cn

站点分布稀疏导致实测资料缺乏,在一定程度上限制了该区域水温研究进展。目前对黄河上游河流水温的研究主要集中在水库库区水温时空分布以及水库下泄水量对下游河道水温的影响。如曹永中^[13]运用混合紊流模型方程对龙羊峡水库库区水温和下游河道水温进行模拟,分析了水库水温分层的形成、发展和变化规律;蒋立哲等^[14]根据黄河上游龙羊峡—刘家峡河段多年的实测数据,分析了黄河上游水电站运行产生的河段水温时空分布变化及其影响;宋策等^[15]利用龙羊峡水库蓄水后的1988—2008年运行过程及水温观测资料,分析了水库运行方式与水温结构变化关系,探讨了水库不同运用过程对下游河道水温的影响;周孝德等^[16]基于水库与河道水温观测资料,对比分析了龙羊峡—刘家峡河段梯级水库群各水库对水温累积影响贡献的差异,以及梯级水库水温累积效应的变化特征;唐旺等^[17-19]基于黄河上游河段各水文站的观测资料和龙羊峡、李家峡、刘家峡的实测资料,采用二维、三维水温模型模拟各梯级水库的水温分布,对比了各梯级水库对水温累积的影响、不同类型水库对库区和河道水温的影响以及不同湍流模型在库区水温模拟中的差异;袁博等^[20]基于黄河上游鄂陵湖—循化河段各水文站1958—2008年水温资料,探讨了河流天然水温时空变化特征及其影响因素;王倩等^[21]根据龙羊峡水库监测资料,提出了梯级水库群水温系统原型观测方案,研究了黄河上游梯级水库群联合运行的水温累积影响。

尽管在黄河上游水库库区水温变化及其对下游河道水温的影响研究方面取得了重要进展,但由于实测资料缺乏,该区域河道水温的模拟研究仍鲜有报道。因此,采用有效的方法来模拟和估算河道水温具有重要的科学意义和实用价值。本文基于一维河道水温模型和经验公式法,对兰州以上黄河上游干流段的6个主要水文站、黄河支流湟水的2个水文站进行水温模拟及验证,对比分析这两类方法在该区域不同时间尺度水温模拟中的适用性,可为资料缺乏地区水温模拟研究提供参考。

1 研究区概况

兰州以上的黄河上游地区跨青海、四川和甘肃3省,平均海拔在3000 m以上,流域内高山林立,多年冻土和冰川发育,沟谷纵横,区内主要植被为高寒草原和高寒草甸^[22]。该区域多年平均降水量为426.2 mm,年平均气温在-4.0~9.3℃之间,年均蒸发量为1437.7 mm^[23]。黄河上游干流全长2119 km,集水面积22.26万 km²。直接汇入黄河、

且集水面积超过1000 km²的支流有26条,多年平均径流量327.4亿 m³,多年平均径流深为147.1 mm。黄河上游干流主要水文站有12个,支流湟水干流主要水文站有5个,本文选取干流的兰州站、唐乃亥站、军功站、门堂站、吉迈站和黄河沿站以及湟水干流的西宁站和民和站共8个水文站的资料进行分析。

2 研究方法

2.1 一维河道水温模型

由于黄河干流河道宽且深,故本文选用的一维河道水温模型忽略水体和河床之间的热交换以及水体内部由动能、势能、化学能所转换的热能和人为的增热或减热,其控制方程为一维温度对流-扩散方程:

$$A \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(QT)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(AD_L \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{BS}{\rho c_p} \quad (1)$$

式中: A 为过水断面面积, m²; T 为河流水温,℃; Q 为流量, m³/s; D_L 为纵向弥散系数, m²/s, 参照文献[24]中的经验公式 $D_L = 0.01u^2b^2/(hu^*)$ 计算, 其中 u 为平均流速, b 为水面宽度, h 为水深, u^* 为摩阻流速 ($u^* = (gRi)^{0.5}$, 其中 g 为重力加速度, R 为水力半径, i 为水面比降); ρ 为水的密度, kg/m³; c_p 为水的比定压热容, J/(kg·K); B 为河面宽度, m; S 为单位表面积热交换通量, W/m², 本文采用文献[25]提出的水面热交换的计算方法, 即 $S = H_s + H_1 - H_e - H_c$, 其中 H_s 为净短波辐射量, H_1 为净长波辐射量, H_e 为蒸发热通量, H_c 为传导热通量。

采用有限差分法^[26]对方程进行离散, 整理后得

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{Q}{2\Delta x} + \frac{AD_L}{\Delta x^2} \right) T_{i-1} + \frac{2AD_L}{\Delta x^2} T_i + \\ & \left(\frac{Q}{2\Delta x} - \frac{AD_L}{\Delta x^2} \right) T_{i+1} = \frac{BS}{\rho c_p} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 Δx 为有限差分法中的区间长度, m。离散后的方程采用追赶法在 Matlab 中求解。

2.2 经验公式法

采用四次多项式 ($y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + m$)、三次多项式 ($y = bx^3 + cx^2 + dx + m$) 和幂函数 ($y = ae^{bx}$) 3种经验公式来探究其在日、月平均水温模拟中的适用性。对各水文站2009年各月水温与气温进行相关分析, 水温与气温的相关性远高于水温与太阳辐射和风速的相关性。因此, 基于2009年数据分别建立日、月平均水温 (y) 与气温 (x) 的四次多项式、三次多项式和幂函数关系式如表1和表2所示, 并采用2010—2011年数据进行验证。

表1 日平均水温经验公式

水文站	四次多项式	三次多项式	幂函数
兰州站	$y = -0.0040x^4 + 0.2573x^3 - 6.0252x^2 + 59.9420x - 197.3516$ ($R^2 = 0.85$)	$y = 0.0192x^3 - 0.9854x^2 + 16.8111x - 80.4802$ ($R^2 = 0.63$)	$y = 6.990e^{0.051x}$ ($R^2 = 0.55$)
唐乃亥站	$y = -0.0031x^4 + 0.1284x^3 - 1.8604x^2 + 11.3300x - 12.4248$ ($R^2 = 0.98$)	$y = 0.0010x^3 + 0.0028x^2 + 0.4516x + 8.1538$ ($R^2 = 0.92$)	$y = 8.813e^{0.052x}$ ($R^2 = 0.94$)
军功站	$y = 0.0001x^4 + 0.0084x^3 - 0.2268x^2 + 2.4013x + 4.9180$ ($R^2 = 0.91$)	$y = 0.0101x^3 - 0.2451x^2 + 2.4811x + 4.8039$ ($R^2 = 0.93$)	$y = 8.327e^{0.069x}$ ($R^2 = 0.92$)
门堂站	$y = -0.0040x^4 + 0.0975x^3 - 0.7612x^2 + 2.8950x + 1.6157$ ($R^2 = 0.92$)	$y = -0.0218x^3 + 0.4763x^2 - 2.1776x + 8.1701$ ($R^2 = 0.91$)	$y = 6.637e^{0.054x}$ ($R^2 = 0.86$)
吉迈站	$y = -0.0035x^4 + 0.1408x^3 - 1.9474x^2 + 11.4310x - 15.6612$ ($R^2 = 0.88$)	$y = 0.0255x^3 - 0.6608x^2 + 5.8170x - 7.6274$ ($R^2 = 0.86$)	$y = 5.946e^{0.067x}$ ($R^2 = 0.82$)
黄河沿站	$y = 0.0169x^4 - 0.4647x^3 + 4.2473x^2 - 11.3429x + 13.8283$ ($R^2 = 0.92$)	$y = -0.0066x^3 + 0.0555x^2 + 1.3220x - 0.8802$ ($R^2 = 0.77$)	$y = 7.338e^{0.041x}$ ($R^2 = 0.64$)
西宁站	$y = -0.0003x^4 + 0.0221x^3 - 0.5676x^2 + 6.3071x - 13.1469$ ($R^2 = 0.98$)	$y = -0.0041x^3 + 0.1766x^2 - 1.7919x + 14.8990$ ($R^2 = 0.84$)	$y = 7.717e^{0.041x}$ ($R^2 = 0.96$)
民和站	$y = -0.0006x^4 + 0.0333x^3 - 0.6036x^2 + 5.1252x - 7.0964$ ($R^2 = 0.99$)	$y = -0.0073x^3 + 0.4121x^2 - 6.8428x + 46.7644$ ($R^2 = 0.81$)	$y = 6.723e^{0.048x}$ ($R^2 = 0.92$)

表2 月平均水温经验公式

水文站	四次多项式	幂函数
兰州站	$y = -0.0001x^4 + 0.0033x^3 + 0.0077x^2 + 0.2243x + 5.9736$ ($R^2 = 0.72$)	$y = 7.041e^{0.044x}$ ($R^2 = 0.78$)
唐乃亥站	$y = 0.0002x^4 - 0.0020x^3 - 0.0118x^2 + 0.8409x + 5.4414$ ($R^2 = 0.97$)	$y = 6.813e^{0.055x}$ ($R^2 = 0.92$)
西宁站	$y = 0.0001x^4 - 0.0013x^3 - 0.0177x^2 + 0.5531x + 3.2076$ ($R^2 = 0.97$)	$y = 6.769e^{0.044x}$ ($R^2 = 0.95$)
民和站	$y = -0.0001x^4 + 0.0008x^3 + 0.0208x^2 + 0.4857x + 1.9876$ ($R^2 = 0.99$)	$y = 6.577e^{0.049x}$ ($R^2 = 0.91$)

2.3 研究数据

采用的数据有黄河干流和支流湟水 8 个水文站的逐日平均水温和气温等数据。水文数据来自水文年鉴^[27-29], 气象数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>)。根据资料的收集情况, 一维河道水温模型日平均水温参数率定采用兰州站 2009 年 5 月 28 日至 9 月 20 日的水文和气象数据(表 3 和表 4), 并以同时段的乌金峡站和安宁渡

站数据进行检验; 经验公式法日平均水温模拟采用 8 个水文站 2009—2011 年 1 月 25 日、2 月 19 日、3 月 16 日、4 月 10 日、5 月 5 日、5 月 30 日、6 月 24 日、7 月 19 日、8 月 13 日、9 月 7 日、10 月 2 日、10 月 27 日、11 月 21 日和 12 月 16 日的水温和气象数据。经验公式法月平均水温模拟采用兰州站、唐乃亥站、西宁站和民和站逐月平均水温和气象数据。

表3 兰州站水文资料

时间	断面面积/m ²	流量/(m ³ ·s ⁻¹)	河面宽/m	水面温度/°C	水深/m	平均流速/(m·s ⁻¹)	水面比降/(m·km ⁻¹)
5月28日	676	1630	208	12.0	3.25	2.41	0.000798
6月19日	640	1460	208	15.0	3.08	2.28	0.000798
6月20日	700	1660	209	14.0	3.35	2.37	0.000798
6月21日	721	1740	209	14.8	3.45	2.41	0.000798
7月18日	529	1050	206	18.4	2.57	1.98	0.000865
7月31日	380	556	194	17.8	1.96	1.46	0.000672
8月19日	401	618	194	17.2	2.07	1.54	0.000690
9月8日	613	1370	207	16.2	2.96	2.23	0.000838
9月15日	727	1770	209	16.2	3.48	2.43	0.000898
9月20日	665	1580	208	15.4	3.20	2.38	0.000922

表4 兰州站气象资料

时间	太阳辐射/(W·m ⁻²)	气温/°C	云量	风速/(m·s ⁻¹)	露点温度/°C
5月28日	900.05	13.7	1.0	2.8	-1.2
6月19日	800.87	15.3	1.0	2.4	6.0
6月20日	734.59	17.3	1.0	1.3	-0.6
6月21日	177.31	17.3	1.0	1.8	1.6
7月18日	1388.09	22.8	0.0	3.0	3.2
7月31日	994.06	20.7	0.7	1.9	7.0
8月19日	49.52	12.9	1.0	2.3	-0.2
9月8日	542.93	13.6	1.0	1.4	-3.0
9月15日	299.47	13.3	0.9	1.2	-1.2
9月20日	688.24	8.9	0.8	1.4	-9.2

3 结果与分析

采用平均绝对误差 (MAE)、均方根误差 (RMSE)、纳什系数 (Nash coefficient, NC) 对模拟结果进行检验。MAE 和 RMSE 值越小,说明模拟的结果越好;NC 值越接近 0 或 1,表明模拟结果越可信,若该值远小于 1 则表明模型不合理,而在 0 左右则说明模拟结果接近于实测结果的平均值。

3.1 一维河道水温模型结果

采用兰州站数据率定一维河道水温模型,并用同期的乌金峡站和安宁渡站数据对模型的模拟精度进行检验,结果如图 1 和表 5 所示。

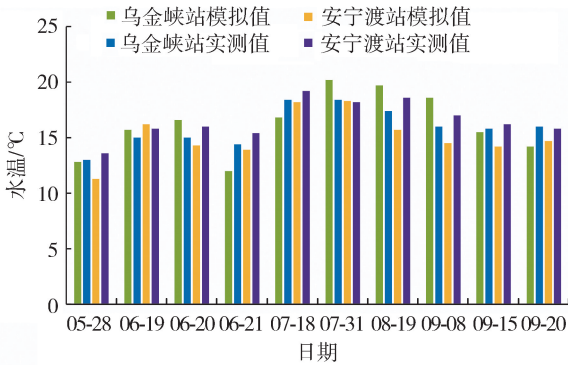


图 1 乌金峡站和安宁渡站水温模拟结果

表 5 乌金峡站和安宁渡站模拟精度

站名	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	不同模拟水温绝对误差的天数 占总天数的比例/%		
				$\varepsilon \leq 1.0^\circ\text{C}$	$\varepsilon \leq 1.5^\circ\text{C}$	$\varepsilon \leq 2.0^\circ\text{C}$
				乌金峡	1.53	0.86
安宁渡	1.55	0.91	-0.22	20	50	70

从图 1 可以看出,乌金峡站和安宁渡站的模拟值与实测值较接近,两站的模拟值与实测值的相关系数分别达到 0.706 和 0.765,均通过 0.05 显著性检验,说明模型的模拟精度较高。表 5 结果表明,乌金峡站与安宁渡站模拟值比较接近实测值的平均值,一维水温模型模拟精度较高。乌金峡水文站的 MAE、RMSE 均略小于安宁渡站,NC 值略大于安宁渡站,乌金峡站的模拟效果略优于安宁渡站;乌金峡站和安宁渡站模拟的水温绝对误差 $\varepsilon \leq 1.0^\circ\text{C}$ 时的天数占总天数的比例较小,说明以 1.0°C 为控制点时乌金峡站的模拟精度略高于安宁渡站。但由于两个站模拟的水温绝对误差 $\varepsilon \leq 1.0^\circ\text{C}$ 的占比较小, $\varepsilon \leq 2.0^\circ\text{C}$ 时才达到 70%,表明该方法的细致化模拟精度较低。

3.2 经验公式法结果

3.2.1 日平均水温模拟精度

分别采用 8 个水文站 2010 年、2011 年的气温和水温数据验证表 1 和表 2 中的经验公式,结果如表 6 和表 7 所示。

黄河干流 6 个水文站中,黄河沿站的四次多项式和三次多项式的 MAE 和 RMSE 值最大(表 6)。其他站点的 MAE 和 RMSE 值远小于黄河沿站,且四次多项式的值优于三次多项式的值。军功站 2010 年的幂函数有较大的 MAE 和 RMSE 值,其他各站的 3 项指标值均较优。湟水干流的 2 个水文站中,幂函数的 MAE 和 RMSE 值在 3 种方法中基本上是最小的,NC 值接近 0 或 1,精度最高;四次多项式的 MAE 和 RMSE 值大都大于幂函数的相应值,小于

表 6 日平均水温模拟误差

水文站	2010 年									2011 年								
	四次多项式			三次多项式			幂函数			四次多项式			三次多项式			幂函数		
	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值	MAE 值/ °C	RMSE 值/ °C	NC 值
兰州站	0.76	0.55	0.24	1.61	0.45	-12.79	1.01	0.68	0.19	0.07	1.19	-0.06	0.09	1.51	-0.73	0.09	1.57	-0.86
唐乃亥站	1.07	0.44	0.19	0.88	0.56	-4.83	1.06	0.85	-0.12	0.04	0.61	0.45	0.07	0.98	-0.42	0.10	1.51	-2.32
军功站	1.04	0.96	0.07	1.06	0.99	-0.41	1.36	1.11	-0.09	0.06	0.95	0.77	0.06	0.99	0.75	0.08	1.18	0.65
门堂站	1.29	0.89	-0.30	1.25	0.98	-0.37	0.97	0.62	0.30	0.07	0.82	0.65	0.07	0.83	0.64	0.05	0.70	0.74
吉迈站	0.87	0.57	0.32	0.81	0.63	-0.51	0.80	0.65	-2.40	0.06	0.76	0.61	0.07	0.85	0.50	0.11	1.21	0.01
黄河沿站	4.70	3.05	0.09	3.87	2.38	-10.76	0.86	0.69	0.03	0.24	2.14	-0.52	0.44	3.51	-3.10	0.24	1.98	-0.30
西宁站	0.90	0.65	0.29	1.30	1.20	-0.45	0.60	0.45	0.29	0.04	0.74	-1.16	0.03	0.50	0.01	0.03	0.50	-0.02
民和站	2.10	0.83	-0.12	1.90	1.24	-4.63	0.90	0.88	0.19	0.07	1.29	0.67	0.07	1.39	0.61	0.06	1.03	0.79

表 7 日平均水温模拟精度

水文站	经验公式	2010 年不同模拟水温绝对误差天数 占总天数的比例/%		2011 年不同模拟水温绝对误差天数 占总天数的比例/%	
		$\varepsilon \leq 0.5^\circ\text{C}$	$\varepsilon \leq 1.5^\circ\text{C}$	$\varepsilon \leq 0.5^\circ\text{C}$	$\varepsilon \leq 1.5^\circ\text{C}$
		兰州站	四次多项式	35	90
唐乃亥站	四次多项式	10	80	40	100
军功站	四次多项式	40	80	20	100
门堂站	四次多项式	25	65	20	100
吉迈站	四次多项式	35	80	30	90
黄河沿站	四次多项式	10	25	0	50
西宁站	幂函数	55	90	60	100
民和站	幂函数	40	90	30	80

三次多项式的相应值,NC 值最接近于 0 或 1。综上,四次多项式在黄河干流(除黄河沿站外)的日平均水温模拟中精度最高,幂函数在黄河支流湟水的日平均水温模拟中精度最高。表 7 的统计结果也表明,对于黄河干流除黄河沿站外,四次多项式在 $\varepsilon \leq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的比例高于 65%,最高可达 100%,整体模拟精度较高;对于支流湟水,幂函数在 $\varepsilon \leq 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的比例高于 80%,整体模拟精度比四次多项式高。表明四次多项式更适合于黄河干流日平均水温模拟,幂函数更适合支流湟水日平均水温模拟。

3.2.2 月平均水温模拟精度

为进一步分析四次多项式和幂函数在月平均水温模拟中的精度,用其模拟黄河干流兰州站和唐乃亥站以及支流湟水的西宁站和民和站的月平均水温,结果如表 8 所示。四次多项式在黄河干流的 MAE 和 RMSE 值均小于支流湟水的相应值,NC 值更接近 1;而幂函数在支流湟水有较小的 MAE 和 RMSE 值,NC 值更接近 1。这表明四次多项式法适合黄河上游干流水文站的月平均水温模拟,幂函数适用于支流湟水的月平均水温模拟。

表 8 月平均水温模拟误差

水文站	2010 年					
	四次多项式			幂函数		
	MAE 值/ $^{\circ}\text{C}$	RMSE 值/ $^{\circ}\text{C}$	NC 值	MAE 值/ $^{\circ}\text{C}$	RMSE 值/ $^{\circ}\text{C}$	NC 值
兰州站	0.68	0.29	0.99	1.33	0.71	0.96
唐乃亥站	0.33	0.26	0.93	1.00	0.27	0.57
西宁站	4.77	1.08	-10.53	0.71	0.37	0.70
民和站	6.10	3.88	-15.96	0.58	0.24	0.69
水文站	2011 年					
	四次多项式			幂函数		
	MAE 值/ $^{\circ}\text{C}$	RMSE 值/ $^{\circ}\text{C}$	NC 值	MAE 值/ $^{\circ}\text{C}$	RMSE 值/ $^{\circ}\text{C}$	NC 值
兰州站	0.08	1.26	0.76	0.15	2.52	0.04
唐乃亥站	0.05	0.75	0.72	0.08	1.22	0.26
西宁站	0.37	4.90	-9.42	0.04	0.54	0.88
民和站	0.33	5.74	-9.73	0.05	0.77	0.81

3.3 一维河道水温模型与经验公式法比较

对比表 5 和表 6 结果,可以发现一维河道水温模型的 MAE 和 RMSE 值大都大于四次多项式和幂函数的值,说明在黄河上游日平均水温模拟中,经验公式法的模拟精度更高,且所需数据量少,计算原理简单,具有较强的适用性。造成一维河道水温模型模拟精度下降的主要原因在于用兰州站的数据率定模型参数,而用同时段的乌金峡站和安宁渡站的数据进行验证,3 个站点间的河道性质、水动力性质、气象数据的差异可能会导致模型验证结果的差异,模拟的精度可能会下降;另外模型的日数据仅采用 2009 年 5 月 28 日至 9 月 20 日的数据,数据的代表

性可能不足。

4 结 论

a. 四次多项式在黄河干流(除黄河沿站)日平均水温模拟中精度最高,幂函数次之,三次多项式最差。幂函数在支流湟水的日平均水温模拟中精度最高,四次多项式次之,三次多项式最差。

b. 四次多项式适合黄河上游干流水文站的月平均水温模拟,幂函数在支流湟水月平均水温模拟中优于四次多项式,更适合支流湟水月平均水温模拟。

c. 经验公式法在黄河干流日平均水温模拟中优于一维河道水温模型,更适合黄河上游的日平均水温模拟。资料和模型验证的限制可能是一维河道水温模型模拟结果欠佳的主要原因。

参考文献:

- [1] PRATS J, VAL R, ARMENGOL J, et al. Temporal variability in the thermal regime of the lower Ebro River (Spain) and alteration due to anthropogenic factors[J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1/2): 105-118.
- [2] 陈永柏, 廖文根, 彭期冬, 等. 四大家鱼产卵水文水动力特性研究综述[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 130-133. (CHEN Yongbai, LIAO Wengen, PENG Qidong, et al. A summary of hydrology and hydrodynamics conditions of Four Chinese Carps' Spawning [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 130-133. (in Chinese))
- [3] 詹晓群, 胡建军. 伦潭水库水温预测分析及冷害对策[J]. 江西水利科技, 2004, 30(增刊 1): 92-95. (ZHAN Xiaqun, HU Jianjun. The prediction analysis of the water temperature of Luntan Reservoir and the countermeasure of cold disaster [J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2004, 30(Sup1): 92-95. (in Chinese))
- [4] 陈飞. 水电与中国可持续发展[J]. 中国三峡, 2013(9): 7-11. (CHEN Fei. Hydropower and China's sustainable development [J]. China Three Gorges, 2013(9): 7-11. (in Chinese))
- [5] 王冠, 韩龙喜, 常文婷. 基于立面二维水动力-水温耦合模型的水库水温分布[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 59-63. (WANG Guan, HAN Longxi, CHANG Wenting. Modeling water temperature distribution in reservoirs with 2D laterally averaged flow-temperature coupled model[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(2): 59-63. (in Chinese))
- [6] 刘军英, 贾更华, 韩龙喜, 等. 水库下游河道水温沿程分布的解析解及与其他方法的比较[J]. 水资源保护, 2012, 28(4): 28-32. (LIU Junying, JIA Genghua, HAN Longxi, et al. Analytical solution of water temperature distribution in river downstream of reservoir and comparison with another method [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(4): 28-32. (in Chinese))
- [7] 郝红升, 李克锋, 梁瑞峰, 等. 支流影响下的水库水温预

- 测模型[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(5): 7-9. (HAO Hongsheng, LI Kefeng, LIANG Ruifeng, et al. Water temperature prediction model for reservoirs under influence of branches [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(5): 7-9. (in Chinese))
- [8] 叶闽, 陈惠敏. 一维垂向水温分布模型在隔河岩水库中的应用与检验[J]. 水资源保护, 2001, 17(2): 19-22. (YE Min, CHEN Huimin. Application of one-dimension model of vertical temperature distribution to Geheyan Reservoir[J]. Water Resources Protection, 2001, 17(2): 19-22. (in Chinese))
- [9] 李褪来, 陈黎明, 王向明. 梯级水电站对库区和河道水温的影响预测[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(3): 23-28. (LI Tilai, CHEN Liming, WANG Xiangming. Influence forecast of the cascade power stations on water temperature of reservoirs and rivers [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(3): 23-28. (in Chinese))
- [10] 许丹, 陆宝宏, 程昕野, 等. 应用 Logistic 曲线预测水库垂向水温[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 235-240. (XU Dan, LU Baohong, CHENG Xinye, et al. Application of logistic curve to forecast vertical distribution of water temperature in reservoirs [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(3): 235-240. (in Chinese))
- [11] 李冰冻, 李嘉, 李克锋, 等. 二滩水库坝前及下泄水体水温分布现场观测与分析[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(4): 21-23. (LI Bingdong, LI Jia, LI Kefeng, et al. Field observation and analysis of water temperature distribution in front of dam and in outflow in Ertan Reservoir [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009, 29(4): 21-23. (in Chinese))
- [12] 杨梦斐, 李兰, 李亚农, 等. 规范推荐的水库水温经验预测方法比选研究[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 55-58. (YANG Mengfei, LI Lan, LI Yanong, et al. Comparison study of recommended empirical prediction methods for reservoir water temperature in specification [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 55-58. (in Chinese))
- [13] 曹永中. 龙羊峡水库水温模拟及其对下游河道水温影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [14] 蒋立哲, 牛天祥, 马俊杰, 等. 黄河上游调节性水库对河段水温的影响及其环境效应分析[J]. 西北水电, 2010, 118(3): 14-18. (JIANG Lizhe, NIU Tianxiang, MA Junjie, et al. Influence of upper Yellow River regulating reservoirs on water temperature and environmental effect analysis [J]. Northwest Hydropower, 2010, 118(3): 14-18. (in Chinese))
- [15] 宋策, 周孝德, 辛向文. 龙羊峡水库水温结构演变及其对下游河道水温影响[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 421-428. (SONG Ce, ZHOU Xiaode, XIN Xiangwen. Water temperature dynamics of Longyangxia Reservoir and its influence on downstream water temperature [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 421-428. (in Chinese))
- [16] 周孝德, 宋策, 唐旺. 黄河上游龙羊峡—刘家峡河段梯级水库群水温累积影响研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(1): 1-7. (ZHOU Xiaode, SONG Ce, TANG Wang. Cumulative effects of cascade reservoirs on water temperature from Longyang Gorge to Liujia Gorge in the Yellow River upstream [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(1): 1-7. (in Chinese))
- [17] 唐旺, 周孝德, 宋策, 等. 龙头水库方案变化对下游梯级开发的水温累积影响[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 392-397. (TANG Wang, ZHOU Xiaode, SONG Ce, et al. Cumulative effects of cascade reservoirs on water temperature for the uppermost reservoir program adjustments [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(4): 392-397. (in Chinese))
- [18] 唐旺, 周孝德, 袁博. 不同类型水库对库区及河道水温的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 184-188. (TANG Wang, ZHOU Xiaode, YUAN Bo. Influence of difference types of reservoirs on water temperature in reservoir and its downstream river [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 184-188. (in Chinese))
- [19] 唐旺, 周孝德, 宋策. 不同湍流模型对库区水温分布模拟的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 229-234. (TANG Wang, ZHOU Xiaode, SONG Ce. Influence of different turbulence models on simulation of reservoir water temperature distribution [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(10): 229-234. (in Chinese))
- [20] 袁博, 周孝德, 宋策, 等. 黄河上游高寒区河流水温变化特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(12): 59-65. (YUAN Bo, ZHOU Xiaode, SONG Ce, et al. Analysis of water temperature changes and influencing factors in the alpine zone of Yellow River upstream [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(12): 59-65. (in Chinese))
- [21] 王倩, 牛乐, 牛天祥, 等. 黄河上游梯级水库群水温原型观测方案[J]. 环境影响评价, 2016, 38(3): 9-12. (WANG Qian, NIU Le, NIU Tianxiang, et al. The prototype observation scheme for water temperature of cascaded reservoirs on upper Yellow River [J]. Environmental Impact Assessment, 2016, 38(3): 9-12. (in Chinese))
- [22] 仇杰. 黄河上游测区水文站水位级划分研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [23] 蒋元春, 李栋梁. 近 50 年黄河上游径流量与气候变化特征研究[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(2): 51-57. (JIANG Yuanchun, LI Dongliang. Variations of Tangnaihai runoff and precipitation and temperature in the upper reach of the Yellow River [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(2): 51-57. (in Chinese))

送,导致盐度突然增大。

参考文献:

- [1] 孔兰,陈晓宏. 珠江口咸潮影响因素分析 [J]. 水资源保护, 2015, 31 (6): 94-97. (KONG Lan, CHEN Xiaohong. Analysis on the influence factors of saltwater in Pearl River Estuary [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(6):94-97. (in Chinese))
- [2] 陈祖军. 后三峡工程时代长江口水源区地盐入侵规律及其应对措施 [J]. 水资源保护, 2014, 30 (3): 19-24. (CHEN Zujun. Saltwater intrusion into water source zone in Yangtze Estuary in post-Three Gorges engineering era and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2014, 30(3):19-24. (in Chinese))
- [3] 陈妮,唐建华,蓝霄峰,等. 北支咸潮倒灌对东风西沙水库取水水质的影响 [J]. 水资源保护, 2013, 29(1): 37-40. (CHEN Wei, TANG Jianhua, LAN Xiaofeng, et al. Impact of salinity intrusion of north branch on water quality of intake water areas of Dongfengxisha Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1):37-40. (in Chinese))
- [4] LI Ming, ZHONG Liejun, BOICOURT W C, et al. Hurricane-induced storm surges, currents and destratification in a semi-enclosed bay [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(2):356-360.
- [5] GONG Wenping, MAA P Y, HONG Bo, et al. Salt transport during a dry season in the Modaomen Estuary, Pearl River Delta, China [J]. Ocean & Coastal Management, 2014, 100:139-150.
- [6] 刘吉,苏波,何贞俊,等. “黑格比”风暴潮对磨刀门水道沿岸取水的影响 [J]. 人民珠江, 2012(增刊 1): 25-27. (LIU Ji, SU Bo, HE Zhenjun, et al. Influence of the storm surge “Hagupit” on coastal water intaking in the Modaomen Waterway [J]. Pearl River, 2012(Sup1): 25-27. (in Chinese))
- [7] BURCHARD H, HETLAND R D, SCHULZ E, et al. Drivers of residual estuarine circulation in tidally energetic estuaries; straight and irrotational channels with parabolic cross section [J]. Journal of Physical Oceanography, 2011, 41(3):548-570.
- [8] ZHANG Y J, YE F, STANEV E V, et al. Seamless cross-scale modelling with SCHISM [J]. Ocean Modelling, 2016, 102:64-81.
- [9] 叶荣辉,钱燕,孔俊,等. 珠江三角洲大系统风暴潮数学模型建立与验证 [J]. 人民长江, 2013, 44(21): 76-80. (YE Ronghui, QIAN Yan, KONG Jun, et al. Mathematical model establishment and verification for large scale storm surge in Pear River Delta [J]. Yangtze River, 2013, 44(21):76-80. (in Chinese))
- [10] BECHERER J. Estuarine circulation in well-mixed tidal inlets [D]. Rostock; University of Rostock, 2013.
- [11] GEYER W R, MACCREADY P. The estuarine circulation [J]. Encyclopedia of Ocean Sciences, 2014, 46(1): 299-305.
- [12] SIMPSON J H, BROWN J, MATTHEWS J, et al. Tidal straining, density currents, and stirring in the control of estuarine stratification [J]. Estuaries and Coasts, 1990, 13(2): 125-132.
- [13] STACEY M T, RALSTON D K. The scaling and structure of the estuarine bottom boundary layer [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 2005, 35(1): 477-478.
- [14] VERSPECHT F, RIPPRTH T P, HOWARTH M J, et al. Processes impacting on stratification in a region of freshwater influence: application to Liverpool Bay [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 114(C11): 507-514.
- [15] BURCHARD H. Combined effects of wind, tide, and horizontal density gradients on stratification in estuaries and coastal seas [J]. Journal of Physical Oceanography, 2009, 39(9): 2117-2136.
- [16] LERCZAK J A, GEYER W R, CHANT R J. Mechanisms driving the time-dependent salt flux in a partially stratified estuary [J]. Journal of Physical Oceanography, 2006, 36(12): 2296-2311.
- [17] 胡溪,毛猷忠. 珠江口磨刀门水道咸潮入侵规律研究 [J]. 水利学报, 2012, 43(5): 529-536. (HU Xi, MAO Xianzhong. Study on saltwater intrusion in Modaomen of the Pearl River [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(5):529-536. (in Chinese))

(收稿日期:2018-09-09 编辑:熊水斌)

(上接第 29 页)

- [24] 孙东迁. 托什干河上游梯级水库水温预测研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2008.
- [25] 余常昭, MARKOVSKY M, 李玉梁. 水环境中污染物扩散输移原理与水质模型 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 1989.
- [26] 任玉新,陈海昕. 计算流体力学基础 [M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2006.
- [27] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2009 年第 4 卷第 1 册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2010.
- [28] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2010 年第 4 卷第 1 册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2011.
- [29] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴:2011 年第 4 卷第 1 册 黄河上游区上段(黑山峡以上) [Z]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2012.

(收稿日期:2018-09-15 编辑:熊水斌)