

立冬日在南水北调冬季输水气温稳定转负日预报中的应用

王涛¹, 马俊青², 罗盛³, 赵林明⁴, 王金鹏⁵

- (1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 郑州 450016;
3. 中国寰球工程公司 公用工程室给排水组, 北京 100029; 4. 河北工程大学, 河北 邯郸 056001;
5. 北京市南水北调南干渠管理处, 北京 100195)

摘要: 通过分析中国传统农历节气同水文学之间的密切关系, 论证了其在水文预报中应用的科学依据。以农历二十四节气中立冬日作为时间统计的坐标系基准点, 利用经 Levenberg-Marquart 算法的改进 BP 神经网络, 预报了南水北调黄河以北沿线主要城市气温稳定转负日期。首先比较新乡、安阳、邢台、石家庄、保定和北京 6 个城市 1957 年-2006 年气温稳定转负日相关系数, 结果显示农历坐标系下预报目标的相关系数均比公历坐标系的大。表明当以立冬日作为统计坐标的基准点时, 气温稳定转负日的相关性更强。同时将农历和公历分别作为时间坐标系, 各预报 16 组次, 对预报结果进行对比发现, 农历坐标系下合格组次为 13 组, 而公历坐标系下的合格组次为 11 组。显然, 农历坐标系下预报结果比公历坐标系好, 预报精度较高, 说明农历中二十四节气在冬季气温转负日期中应用的探索是可行的。

关键词: 南水北调; 冰情; 预报; 二十四节气; 立冬; 气温转负日期; 相关系数

中图分类号: TV68; P338 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 1683(2014) 02-0063-04

Application of Beginning of Winter in the Prediction of Date When Transmission Water Temperature Becomes Negative in South to North Water Diversion Project

WANG Tao¹, MA Junqing², LUO Sheng³, ZHAO Linming⁴, WANG Jinpeng⁵

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Henan Water & Power Engineering Consulting Co., Ltd, Zhengzhou 450016, China;

3. Utility Department Water Supply and Sewer Group, China Huanqiu Contracting & Engineering Corp, Beijing 100029, China; 4. Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

5. South Canal Managing Department, Beijing South to North Water Diversion, Beijing 100195, China)

Abstract: The relationship between Chinese traditional twenty four solar terms and hydrology is analyzed and the scientific basis of using solar terms in the hydrological prediction is developed. The Beginning of Winter is selected as the datum point of the statistic date in the prediction. The BP ANNs model improved by Levenberg Marquart algorithm is introduced to predict the dates when temperature becomes negative in the cities of the north of Yellow River. The correlation coefficients of the date when temperature becomes negative in Xinxiang, Anyang, Xingtai, Shijiazhuang city, Baoding, and Beijing from 1957 to 2005 were compared. All of the correlation coefficients in the coordinate system of Chinese lunar calendar are greater than those in the coordinate system of solar calendar, which suggests that the correlation of the date when temperature becomes negative is stronger in the coordinate system of Chinese lunar calendar. In addition, the coordinate system of Chinese lunar calendar and solar calendar were used to predict 16 sets of dates when temperature becomes negative. The results showed that the coordinate system of Chinese lunar calendar predicts 13 sets of acceptable data while the coordinate system of solar calendar predicts 11 sets of ac

收稿日期: 2013-09-05 修回日期: 2014-02-10 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51179209; 51209233); 水利部公益性行业科研专项(201301032)

作者简介: 王涛(1975-), 女, 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事河冰水力学及水文学研究。E-mail: taozy163@163.com

ceptable data. Therefore, the application of the traditional twenty four solar terms in the prediction of date when temperature becomes negative is feasible.

Key words: South to North Water Diversion Project; ice condition; forecast; twenty-four solar terms; beginning of winter; date when temperature becomes negative; correlation coefficient

1 研究背景

开展南水北调工程冰情预报的研究,对保证输水目标实现和确保冰期输水安全意义重大,但是明渠冰情预报一直都是水文预报中的难点:首先,冰情的复杂性和不确定性影响了预报研究的进程;其次,现行冰情预报模型如统计学模型和经验数学模型都有自身的局限性^[1-4];第三,野外观测的难度和危险性使得观测资料的精度受到限制,导致观测内容不完整,水文资料精度不高^[5]。同时,在建南水北调工程沿途水文资料贫乏,仅能利用的预报信息就是各城市的气象资料,因此开展预报工作难度较大。为了进一步提高预报的精确性,有必要转变思路,引入新的预报方法和理念技术,比如考虑把农历二十四节气与神经网络理论相结合进行明渠冰情预报研究。

中国农历历史悠久,是古人在长期观察天文运行基础上的总结,经历了科学和实践检验。农历核心部分是阴历历月和阳历二十四节气,所以农历属于阴阳历^[6-7]。其中二十四节气根据太阳变化而确定,具有太阳历的性质,但是二十四节气同阳历的对应关系并非固定不变,而是每年根据天文参数变化进行具体推算而得的,其精确性和科学性完全适合作为水文预报中同气候变化相关因素(如冰情、水温、气温)预报的时间坐标。

从二十四节气的命名可以看出,节气的划分充分考虑了季节、气候、物候等自然现象的变化,特别是立冬、冬至、小雪、大雪等节气设置体现冬期气候和气温的变化,农历中的“九九”节气可以直接反映冰情变化。比如立冬节气在每年的 11 月 7 日或 8 日之间变化,民间习惯以立冬为冬季开始;当到达冬至日时,在天球上反映为太阳黄经 225 度之日^[8]。所以本研究以立冬日作为预报时间统计的基点,根据南水北调沿线新乡、安阳、邢台和石家庄 4 个城市 50 年的气象资料,利用 Levenberg Marquart 算法改进的 BP 神经网络^[9-13],预报南水北调黄河以北沿线主要城市气温稳定转负日期,并将预报结果与 11 月 1 日作为时间坐标系基点的预报结果进行对比,分析两种预报方法的差异。

2 研究区气温变化特点

图 1 表示石家庄、安阳、新乡和邢台 4 市气温稳定转负日期变化曲线,其中实线分别表示 4 个城市气温稳定转负日期均值,图中的线性插值曲线分别为气温稳定转负日期均值的线性插值。图 1 可见,气温稳定转负日均值的线性插值呈现上升趋势,说明气温转负日期呈现不断提前的发展趋势;气温稳定转负日期,年际之间变化较大,表现在曲线上为曲线振幅大、频率高,20 世纪 90 年代之后年际间波动更大。

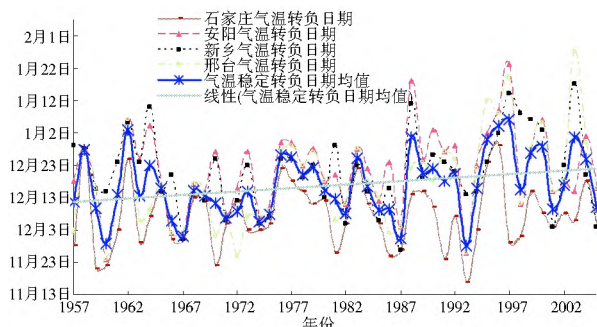


图 1 南水北调气温稳定转负日期变化曲线

Fig. 1 Variation of dates when temperature becomes negative in the South to North Water Diversion Project

3 研究方法

3.1 预报方法

针对气温转负日期及冰情预报的特点,在预报中 BP 神经网络采用 3 层网络,即输入层、隐层、输出层。Levenberg Marquardt 算法用来优化网络计算,隐层传递函数采用双曲函数,输出层采用线性传递函数,为确保网络预报具有一定外延性,学习数据为 1957 年-2002 年 45 年气象数据,预报目标为 2003 年-2006 年 4 年气温稳定转负日期。因气象资料有限,可用的预报因子为前期的气温资料,选择的是小雪节气和大雪节气之间的气温值,即充分考虑到中国传统农历在预报因子时间段选取中的价值。日期的统计分别以二十四节气中的每年立冬日(农历坐标系)和 11 月 1 日(阳历坐标系)作为时间坐标轴基准点,把两种坐标系下预报结果进行比较。

3.2 气温稳定转负日相关系数分析

相关系数能反映相关因子的可靠度,在此把农历坐标系和阳历坐标系下气温稳定转负日期的相关系数进行比较分析,其中相关系数 R^2 表示为:

$$R^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为统计的样本序列,这里 X 为预报目标系列, Y 为预报目标对应的预报因子。计算中 n 为样本序列个数; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为序列样本的均值; R^2 为相关系数,是取值范围在 0~1 之间的数值。当 R^2 越大或者越接近 1,其可靠性最高,反之则可靠性较低。

表 1 为两种坐标系下气温转负日期线性相关系数。分别计算在两种坐标系下新乡、安阳、邢台、石家庄、保定和北京 6 个城市 1957 年-2006 年气温稳定转负日相关系数。 R_1^2 表示阳历坐标系下气温稳定转负日期相关系数, R_2^2 表示阴历坐标系下气温稳定转负日期的相关系数。对比两种坐标系下黄河以北 6 个城市相关系数结果比

较, R_2^2 均大于 R_1^2 , 说明阴历坐标下气温稳定转负日期的相关性更强, 可靠性更高^[6]。对于冰情这种预报难度较大的问题, 50 年长序列数据通过采用立冬日作为数据基准点这一有效调整, 会给预报结果带来改善。所以, 在通过立冬日作为预报日期的基准点, 预报因子同预报目标的相关性更强, 通过神经网络学习更容易找到预报因子同预报目标的规律。

表 1 气温转负日期线性相关系数

Table 1 Correlation coefficients for the date when temperature becomes negative in the lunar calendar coordinate and solar calendar coordinate

| 气象站 | 新乡 | 安阳 | 邢台 | 石家庄 | 保定 | 北京 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R_1^2 | 0.0267 | 0.0476 | 0.2406 | 0.0174 | 0.2267 | 0.4615 |
| R_2^2 | 0.0296 | 0.0511 | 0.2484 | 0.0203 | 0.2341 | 0.4689 |

4 结果讨论

表 2 为农历坐标系和阳历坐标系下气温稳定转负日期预报结果比较, 表 3 为水文情报预报规范中预报要素的许可误差^[4], 是预报误差是否合格的评定标准。两种坐标系下各预报 16 组次, 在阳历坐标系下 5 组预报不合格, 阴历坐标系下 3 组预报结果不合格。

表 2 农历坐标系和阳历坐标系下气温稳定转负日期预报结果比较

Table 2 Comparison of predicted dates when temperature becomes negative in the lunar calendar coordinate and solar calendar coordinate

| 城市 | 年份 | 实测日期 (月·日) | 预见期 /d | 以立冬日作为计时起点 | | | | 以 11 月 1 日作为计时起点 | | | |
|-------------|------|---------------|-----------|---------------|---------------|----------|------|------------------|----------|------|--|
| | | | | 实测日期 (月·日) | 预报日期 (月·日) | 误差 /d | 是否合格 | 预报日期 (月·日) | 误差 /d | 是否合格 | |
| 新 乡 | 2003 | 1.17 | 34 | 1.17 | 1.17 | 0 | 是 | 1.17 | 0 | 是 | |
| | 2004 | 12.20 | 6 | 12.20 | 12.18 | -2 | 是 | 12.21 | +1 | 是 | |
| | 2005 | 12.4 | 0 | 12.4 | 12.4 | 0 | 是 | 12.6 | +2 | 否 | |
| | 2006 | 12.29 | 15 | 12.29 | 12.25 | -4 | 是 | 1.3 | +5 | 是 | |
| 安 阳 | 2003 | 12.15 | 5 | 12.15 | 12.21 | +6 | 否 | 12.22 | +8 | 否 | |
| | 2004 | 1.1 | 22 | 1.1 | 1.03 | +2 | 是 | 1.02 | +1 | 是 | |
| | 2005 | 12.16 | 6 | 12.16 | 12.16 | 0 | 是 | 12.16 | 0 | 是 | |
| | 2006 | 12.13 | 3 | 12.13 | 12.12 | -1 | 是 | 12.15 | +2 | 是 | |
| 邢 台 | 2003 | 1.27 | 46 | 1.27 | 1.05 | -22 | 否 | 1.07 | -20 | 否 | |
| | 2004 | 12.30 | 28 | 12.30 | 1.1 | +2 | 是 | 12.31 | +1 | 是 | |
| | 2005 | 12.16 | 4 | 12.16 | 12.16 | 0 | 是 | 12.15 | -1 | 是 | |
| | 2006 | 1.09 | 28 | 1.09 | 12.31 | -9 | 否 | 12.27 | -13 | 否 | |
| 石 家 庄 | 2003 | 12.06 | 5 | 12.06 | 12.07 | +1 | 是 | 12.06 | 0 | 是 | |
| | 2004 | 12.18 | 17 | 12.18 | 12.20 | +2 | 是 | 12.19 | +1 | 是 | |
| | 2005 | 12.04 | 3 | 12.04 | 12.04 | 0 | 是 | 12.07 | +3 | 否 | |
| | 2006 | 12.25 | 24 | 12.25 | 12.21 | -4 | 是 | 12.26 | +1 | 是 | |

表 3 水文情报预报规范中预报要素的许可误差

Table 3 Allowed errors for the forecast factors in the hydrological prediction

| 预见期/d | < 2 | 3~ 5 | 6~ 10 | 11~ 13 | 14~ 15 | > 15 |
|--------|-----|------|-------|--------|--------|------|
| 许可误差/d | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 |

5 结语

对在建的南水北调工程开展冰情预报, 可以利用的预报数据和信息有限, 预报难度较大, 在预报中得到较高精度的预报结果难度更大。为了尽可能得到较好的预报结果, 本文

(1) 2005 年新乡和石家庄在阳历坐标系下预报结果不合格, 而在阴历坐标系下合格。观察表 2, 这两组次预见期分别是 0 d 和 3 d, 预见期小, 阳历坐标系下却不能预报成果。由前面分析可知, 阴历坐标系下预报目标相关系数大, 能够修复阳历坐标系下预报结果, 所以这两组次在阴历坐标系下预报是合格的。

(2) 2003 年安阳、邢台和 2006 年邢台三组次在两种坐标系下预报均不合格。三组次预见期分别为 5 d、46 d 和 28 d。观察图 1, 在正常年份, 安阳气温稳定转负日期要比邢台晚, 而 2003 年安阳和邢台气温稳定转负日期正好相反, 前者气温稳定转负日期明显提前, 后者气温稳定转负日期为几个城市中最迟, 而其预见期高达 46 d。对于气温变化反常, 而预见期超长的工况, 目前科学预报手段很难做出精确预报。同样, 2006 年的邢台站, 预见期高达 28 d, 也属于长期预报, 要达到较高精度难度很大。

总体来看, 气温稳定转负日期在阳历坐标系下, 合格率达到 0.69, 在农历坐标系下合格率达到 0.81, 农历坐标系下预报结果好于阳历坐标系下的预报结果, 这一结论同相关性分析中农历坐标系下相关系数均大于阳历坐标系下相关系数结论一致。

另辟蹊径, 把中国传统二十四节气的立冬日作为时间基准点应用到冰情预报中, 开展南水北调中线工程冬季输水冰情预报。首先比较两种坐标系下新乡、安阳、邢台、石家庄、保定和北京 6 个城市 1957 年- 2006 年气温稳定转负日相关系数, 结果显示农历坐标系下预报目标的相关系数均大于阳历坐标系下预报目标的相关系数; 然后采用 Levenberg Marquart 算法改进的 BP 神经网络模型预报南水北调中线黄河以北 4 个城市的气温稳定转负日期。比较两种坐标系下预报结果发现: 以立冬日作为日期统计的基准点, 可以提高预报的合格率。研究表明, 中国传统二十四节气不仅能够用来指导农

事活动,而且在冰情预报中应用时还可提高预报目标的相关系数和预报的精度。

参考文献(References):

- [1] 王涛. 基于神经-模糊理论的冰情预报研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012. (WANG Tao. Using Neuro Fuzzy to Forecast Ice Condition[D]. Beijing: China Institution of Water Resource and Hydropower Research, 2012. (in Chinese))
- [2] 刘连希, 吴吉才. 关于十三陵抽水蓄能电站上库冬季运行结冰问题的探讨[J]. 水利水电技术, 2001, 32(3): 33-35. (LIU Lianxi, WU Jicai. Ice Condition of Winter Operation in Upper Reservoir of Mingtombs Pumped Storage Power Station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2001, 32(3): 33-35. (in Chinese))
- [3] 李若宏. 黄河流域实用水文预报方案[R]. 郑州: 水利部黄河水利委员会水文局, 1989. (LI Ruohong. Hydrological Forecast Method of Yellow River Basin[R]. Zhengzhou: Hydrology Bureau of Yellow River Conservancy Commission, 1989. (in Chinese))
- [4] 可素娟, 王敏, 饶素秋, 等. 黄河冰凌研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2000. (KE Sujuan, WANG Min, RAO Suqiu, et al. Study of Yellow River[M]. Zhengzhou: Water Resources Press of Yellow River, 2000. (in Chinese))
- [5] 蔡琳. 中国江河冰凌[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008. (CAI Lin. China River Ice[M]. Zhengzhou: Water Resources Press of Yellow River, 2008. (in Chinese))
- [6] 马光华, 王华勇. 中国民间历书[M]. 北京: 农业出版社, 1993. (MA Guanghua, WANG Huayong. Chinese Folk Almanac[M]. Beijing: Agricultural Press, 1993. (in Chinese))
- [7] 徐振韬. 中国古代天文学字典[K]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009. (XU Zhen tao. Astronomy Dictionary of Ancient Chinese[K]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009. (in Chinese))
- [8] 中国科学院紫金山天文台. 2012年中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (Purple Mountain Observatory of China Academy of Science. 2012 Chinese Astronomical Year Book[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [9] 王涛, 杨开林. 神经网络理论在南水北调冰期输水中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1403-1408. (WANG Tao, YANG Kaolin. Forecast on Winter Water Diversion Using Artificial Neural Networks in South to North Water Diversion Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1403-1408. (in Chinese))
- [10] WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Yongxin, Application of Artificial Neural Networks to Forecasting Ice Conditions of the Yellow River in the Inner Mongolia Reach[J]. Journal of Hydrologic Engineering, ASCE, 2008, 13(9): 811-816.
- [11] WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Yongxin. River Ice Conditions Forecast by Artificial Neural Networks. 16th IAHR-APD 2008 and ISHS-IAHR, October, Nanjing, China, 2008: 1919-1923.
- [12] WANG Tao, YANG Kaolin, FU Hui. Ice Forecast by Artificial Neural Networks in South to North Water Diversion Middle Route Project. 20th IAHR-APD Congress, 2010.
- [13] 王涛, 杨开林, 郭新蕾, 等. 自适应神经模糊推理系统在冰情预报中的应用[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 112-117. (WANG Tao, YANG Kaolin, GUO Xinlei, et al. Ice Condition Forecast based on Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System for Inner Mongolia Reach of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 112-117. (in Chinese))
- [14] GB/T 22482-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T 22482-2008, Hydrographic Forecast Standard[S]. (in Chinese))
- [3] 王国庆, 谢兴华, 速宝玉. 岩体水力劈裂试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(4): 480-484. (WANG Guoqing, XIE Xinghua, SU Baoyu. Experimental Study on the Hydraulic Fracturing of Rock mass[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2006, 23(4): 480-484. (in Chinese))
- [4] 盛金昌, 赵坚, 速宝玉. 高水头作用下水工压力隧洞的水力劈裂分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1226-1230. (SHENG Jinchang, ZHAO Jian, SU Baoyu. Hydraulic Fracture Analysis of Hydraulic Pressure Tunnel Under the Action of High Head[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(7): 1226-1230. (in Chinese))
- [5] 黄润秋, 王贤能, 陈龙生. 深埋隧道涌水过程的水力劈裂作用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 573-576. (HUANG Runqiu, WANG Xianeng, CHEN Longsheng. Hydraulic Fracture Analysis of Deep Buried Tunnel Gushing Process[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 573-576. (in Chinese))
- [6] 陈益峰, 周创兵, 郑宏. 含复杂渗控结构渗流问题数值模拟的SVA方法[J]. 水力发电学报, 2009, 28(2): 89-95. (CHEN Yifeng, ZHOU Chuangbing, ZHENG Hong. The Complex Seepage Control Structure with SVA Numerical Simulation Method of Seepage Problems[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2009, 28(2): 89-95. (in Chinese))
- [7] 蒋中明, 傅胜, 李尚高, 等. 高压引水隧洞陡倾角断层岩体高压水试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 27(11): 2318-2323. (JIANG Zhongming, FU Sheng, LI Shang-gao, et al. Experimental Study of High Pressure Water Pressure Tunnel of High angle Fault Rock[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 27(11): 2318-2323. (in Chinese))

(上接第62页)