

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0045

万育生,王栋,黄朝君.丹江口水库来水情势分析与径流预测[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):417-426. WAN Y S, WANG D, HUANG C J. Water inflow regime analysis and runoff prediction of Danjiangkou reservoir[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3):417-426. (in Chinese)

丹江口水库来水情势分析与径流预测

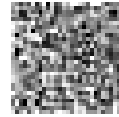
万育生¹,王栋²,黄朝君¹

(1.南水北调中线水源有限责任公司,湖北丹江口442700;2.长江水利委员会水文局,武汉430010)

摘要:基于丹江口水库1956—2016年逐月平均流量资料,采用数理统计手段分析丹江口水库年径流量的周期性和趋势性;从百项气候系统指数集和太阳黑子数中筛选出预测因子,构建月平均流量与预测因子间的多元线性回归模型和随机森林模型,实现丹江口水库月径流预测。结果表明,丹江口水库年径流量呈显著的减小趋势,并伴随有6~8 a、18~21 a两类尺度的周期振荡特性;以2017年逐月平均流量为例,随机森林模型和多元线性回归模型的预报合格率分别为83.3%、75.0%,预报精度均较好,且随机森林模型的预测精度优于多元线性回归模型,可用于丹江口水库月径流预测。

关键词:丹江口水库;径流预测;多元线性回归模型;随机森林模型

中图分类号:TV121 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



在全球气候变暖和人类活动加剧的大背景下,人口的迅速增长以及社会经济的飞速发展导致用水需求不断增加,从而造成水资源短缺现象日益加剧。在我国,北方水资源量明显比南方少,针对北方水资源短缺问题,南水北调工程的兴建改善了北方地区供水条件,也进一步促进了北方的经济社会发展。汉江流域作为南水北调中线工程的水源地,其水文水资源问题历来是工程规划、设计、论证和决策实施的关键技术问题之一^[1]。近些年来,南水北调中线工程水源区汉江流域发生连续枯水年现象,这给南水北调工程水量调度计划的制定带来挑战。鉴于此,亟需开展汉江流域中长期来水量预测研究工作,为南水北调中线工程的年度水量调度计划的制定提供技术支撑。

丹江口水库来水丰枯性直接影响南水北调水量调度计划的制定,其中长期来水量预测一直以来都是汉江流域水文水资源研究的重点问题。目前,中长期预报常用的方法有物理成因分析方法、数理统

计方法、智能算法和基于数值天气预报的综合预报方法^[2-9],相关学者^[10-15]对汉江流域中长期水文预报做了大量探索研究工作。刘勇等^[10]在研究前期气象因子与丹江口水库入库径流过程的相关关系的基础上,从中筛选出稳健性较好的预报因子,构建汉江流域BP神经网络的中长期径流预测模型,结果表明预测精度较高,稳定性较好。冯小冲等^[11]从北太平洋海温、100 hPa、500 hPa高度场及74项环流因子中筛选出与丹江口逐月入库径流相关较高的因子,利用逐步回归法构建丹江口中长期径流预报模型,结果表明径流预报精度较高,平均预报合格率达84.7%。王元超^[12]采用一元线性回归、逐步回归、自回归积分滑动平均模型,用于汉江流域中长期月径流预测研究,结果表明非汛期的模拟精度要优于汛期。张岩等^[13]以国家气候中心百项气候系统指数集及前期降水量为预测因子,建立了汉江流域PCA-PSO-SVR中长期径流预报模型,结果表明模型模拟精度较好,具有精度高且稳定性强的优点。

收稿日期:2020-05-03 修回日期:2020-11-07 网络出版时间:2020-11-16

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201113.1834.002.html>

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0400901)

作者简介:万育生(1961—),男,云南昭通人,教授级高级工程师,主要从事遥感、泥沙、水资源管理及工程管理研究。E-mail:wys@mwr.gov.cn

通信作者:王栋(1986—),男,江苏盐城人,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wangd@cjh.com.cn

祝诗学等^[14]通过降雨-气象遥相关分析从 74 项大气环流因子中筛选出预报因子,建立月降雨量与预报因子间的多元线性回归模型,并构建丹江口以上的 SWAT 模型,以预报的月降雨量作为模型输入,实现丹江口入库月径流量的预报,结果表明降水和径流的模拟精度均较好。酆于杰等^[15]基于 74 项环流指数、北太平洋海温场、500 hPa 高度场中挑选预报因子,构建基于遗传算法的支持向量回归机模型(GA-SVR),结果表明,径流预报精度较高,非汛期的模拟精度要优于汛期。

准确预测丹江口水库年月入库水量,可为南水北调中线工程向北方地区安全供水提供保障。现有研究大多集中于构建前期气候因子与丹江口入库径流间统计模型,或根据数值天气预报产品采用水文模型,实现丹江口入库月径流预测,而未能在丹江口水库来水丰枯性的基础上提出月径流预测成果。本文以丹江口水库以上流域为研究对象,分别从定性和定量两个角度实现丹江口水库来水量预测:首先分析丹江口水库年径流量的趋势性和周期性,从定性角度分析出丹江口水库年来水量丰枯特性;其次

从大气环流、海表温度等外强迫因子中筛选出与丹江口水库径流量密切相关的预测因子,在此基础上,分别构建多元线性回归和随机森林月径流预测模型,从定量角度实现丹江口水库未来 1 年的逐月径流预测。

1 研究区概况

汉江为长江最大的支流,干流全长 1 577 km,流域面积约 15.9 万 km²。流域地势西高东低,由西部的中低山区向东逐渐降至丘陵平原区。丹江口水库位于汉江流域上游,是南水北调中线工程的水源地,具有防洪、供水、发电、灌溉、航运、养殖等综合功能,位于东经 106°12′~111°26′,北纬 31°24′~34°11′。水库以上流域面积约 9.52 万 km²,占汉江流域集水面积的 60%。丹江口水库以上流域地形复杂,多为高山、丘陵区,占流域面积的 97%,流域地势西北高、东南低。流域气候湿润温和,每年 9、10 月,丹江口水库以上流域出现持续阴雨天气,易形成秋汛,给流域防洪及南水北调中线工程的安全运行带来威胁。研究区位置见图 1。

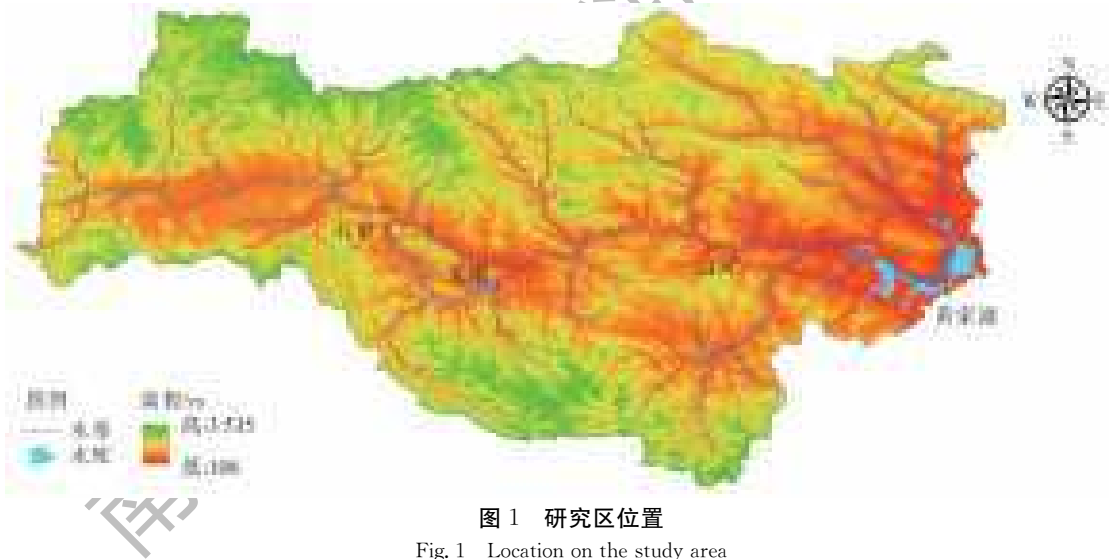


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location on the study area

2 数据和研究方法

2.1 数据来源

收集丹江口水库下游黄家港水文站 1956—2016 年逐月平均流量资料,数据来源于汉江流域水文年鉴,其中流量资料要考虑上游水库的调蓄影响进行还原计算,得出丹江口水库天然逐月平均入库流量系列;1951—2016 年百项气候系统指数集(包括 88 项大气环流指数、26 项海温指数及 16 项其他指数),数据来源于中国气象局国家气候中心;1951—2016 年逐月太阳黑子指数,资料由比利时皇

家天文台 WDC-SILSO 提供。

2.2 研究方法

2.2.1 水文情势分析

分别采用 Mann-Kendall(M-K)方法^[16-18]和小波分析方法^[19-20]分析丹江口水库年径流量的趋势性和周期性。目前,M-K 趋势分析方法因其计算简单,不需要假设样本属于何种分布,由世界气象组织推荐并被广泛使用:在给定的置信水平下,若 M-K 检验的统计量 Z 值为正,表明有上升趋势,反之,则有下降趋势;若统计量 Z 值的绝对值大于置信水平下的阈值,则表明系列趋势性显著。小波分析被称

为分析信号的“显微镜”,具有显示多时间尺度局部特性的优点。小波分析能得到小波变换系数图和小波方差图;小波变换系数图反映不同时间尺度下序列的变化特征,对于径流量,小波变换系数为正时对应于偏丰期,系数为负时对应于偏枯期;根据小波方差图,可分析序列中存在的主周期。

2.2.2 月径流预测模型

中长期径流预测方法较多,结合目前应用情况,主要采用传统统计模型和人工智能算法模型两类方法^[21]:传统统计模型主要基于径流与前期径流或前期水文气候因子间相关联系,构建自回归模型、多元线性回归模型等实现径流预测;人工智能算法模型通过训练样本确定模型结构、参数,对径流与预测因子间的相依关系进行拟合。由于径流与前期径流或前期水文气候因子间的相关联系难以稳健地用于未来径流预测;传统统计模型能够在一定程度上反映未来径流的均值、方差等统计特征,难以准确预测径流过程变化;人工智能算法模型的拟合能力较强,在径流预测中应用较为广泛。

分别选择多元线性回归和随机森林模型,用于丹江口水库月径流预测。多元线性回归为传统统计模型,是研究多个预测因子与预测量的定量线性统计关系。多元线性回归模型^[22]可以简单地写为

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (1)$$

式中: y 表示预测变量; x_1, x_2, \dots, x_n 表示预测因子; a_0, a_1, \dots, a_n 表示多元线性回归方程的回归系数; n 表示预测因子的个数。

针对人工智能模型中的过拟合问题^[21,23], Breiman^[24] 提出了袋装法对其进行改进,通过随机抽样选取多个训练样本子集进行多个子预测模型训练,集成各子模型预测结果,随机误差将互相抵消,由随机误差导致人工智能算法模型的过拟合问题将得到缓解。袋装法中随机抽样选用 Bootstrap 抽样,结果集成采用算术平均法。

Breiman 基于袋装法改进了回归树模型,提出了随机森林模型^[25-27],模型计算流程见图 2。随机森林主要分为训练样本子集和子回归模型两部分:训练样本子集从原始训练集(预测因子系列)中通过 Bootstrap 随机抽样方式获取;子回归模型一般为决策树算法(本次选用 CART 算法),多个子回归模型可得到多个预测结果,然后通过每个子回归模型的预测值取平均值来定量确定最终的预测值。在模型构建阶段,由预测因子与预测量的实测系列构建随机森林模型;在模型预测阶段,只需将最新观测的预测因子数据输入到模型中,即可计算预测量的预

测值。

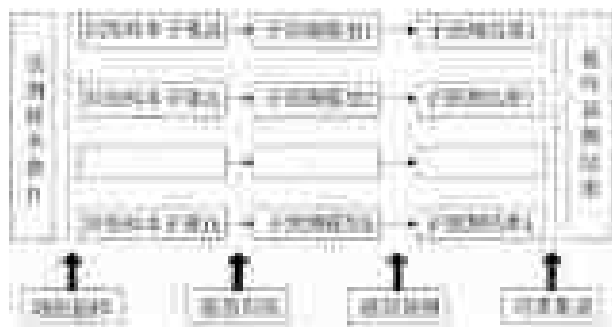


图 2 随机森林模型计算流程框架

Fig. 2 Schematic of the random forest model

2.2.3 模型精度评价准则

为了客观评价预测模型的精度,采用距平符号一致率 P_{Symbol} 、平均绝对百分比误差 δ_{MAPE} 和 Nash 效率系数 E_{NS} 等 3 个指标来检验预测模型的精度。

(1)距平符号一致性能定性判断预测模型的精度,其取值越接近于 1,表明预测精度越高,其计算公式为

$$P_{\text{Symbol}} = m/n \times 100\% \quad (2)$$

式中: n 表示模拟系列的长度; m 表示实测值、模拟值与多年平均值符号一致情况的个数,也即,若实测值与模拟值都大于或小于多年平均值,表明两者符号一致。

(2)平均绝对百分比误差能定量反映预测模型的精度,可通过相对误差绝对值的平均值 δ_{MAPE} 来反映,其值越大,表明模型精度越差,其计算公式为

$$\delta_{\text{MAPE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{Abs} \left(\frac{Q_{p_i} - Q_{s_i}}{Q_{s_i}} \right) \quad (3)$$

式中: n 为模拟系列长度; Q_{s_i} 表示第 i 月实测月平均流量, m^3/s ; Q_{p_i} 表示第 i 月模拟月平均流量, m^3/s ; 若 δ_{MAPE} 值越大,表示模型模拟精度越差,反之,表明模型模拟精度越高。

(3)Nash 效率系数用来衡量模拟流量和实测流量之间吻合程度,其值越接近于 1,表明模拟流量越接近于实测流量,其计算公式为

$$E_{\text{NS}} = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - Q_{p_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{s_i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (4)$$

式中: \bar{Q}_s 为实测月平均流量系列的均值, m^3/s ; 其余符号意义与式(3)一致。

3 径流预测及结果分析

主要对丹江口水库年度来水量进行预测。首先分析丹江口水库年径流量的丰枯发展趋势,在对丹江口水库下一年度年径流量丰枯性分析的基础上,采用多元线性回归模型和随机森林模型定

量预测丹江口水库下一年度逐月平均流量。考虑到气候因子与径流间的相关关系,设定预见期为 1 a,因此从前一年的气候因子集中挑选出与丹江口水库下一年度逐月平均流量密切相关预测因子。研究成果可为南水北调中线一期工程年度可调水量分析和水量调度计划编制提供技术支撑。

3.1 径流情势分析

根据丹江口水库 1956—2016 年天然逐月平均入库流量,统计丹江口水库 1956—2016 年天然年径

流量,分析其趋势性和周期性,为丹江口水库的优化调度配置提供技术参考。

根据收集整理的丹江口水库 1956—2016 年天然年径流量系列,采用 M-K 非参数统计方法对丹江口水库的年径流量进行趋势性检验,见图 3,其中显著性水平 α 取 90%,最终 M-K 检验的统计量 Z 为 -1.67,结果表明,丹江口水库年径流量呈下降趋势,且通过了 90% 置信水平检验,减小趋势显著。丹江口水库年径流量的变化趋势见图 4。

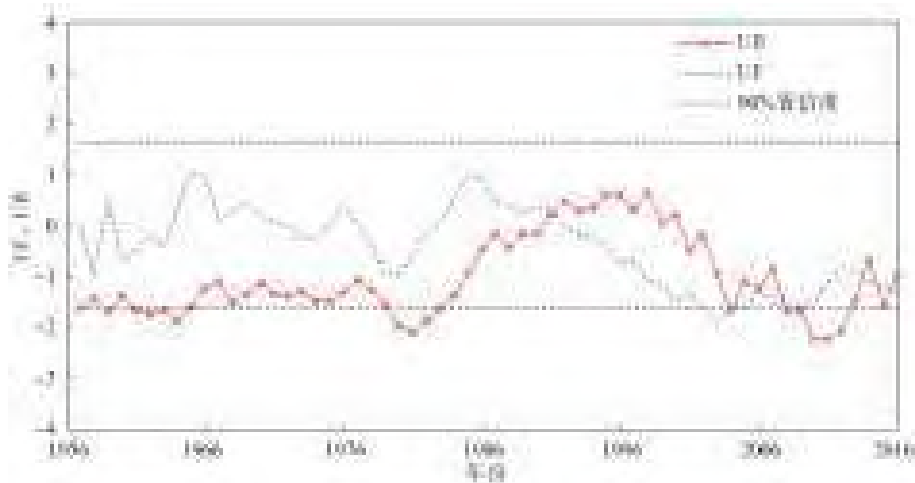


图 3 丹江口水库年径流量趋势检验

Fig. 3 Trend test of annual runoff of Danjiangkou reservoir

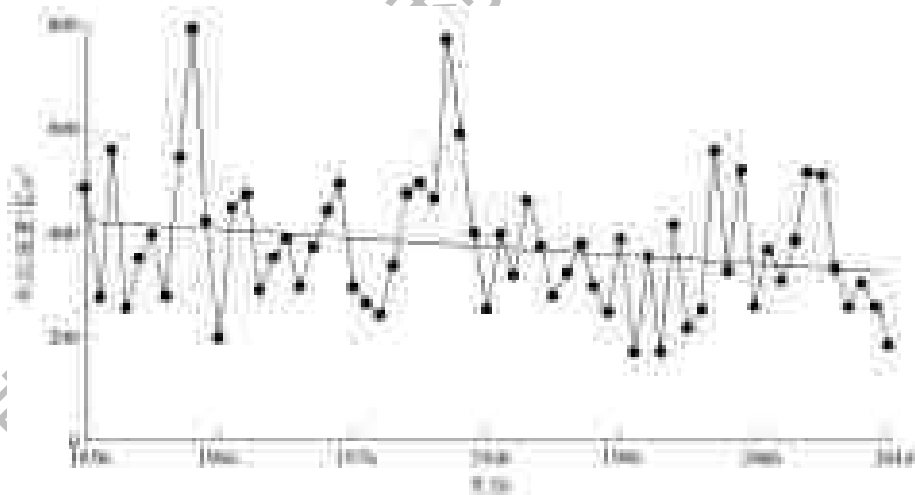


图 4 丹江口水库年径流量变化趋势

Fig. 4 Variation trend of annual runoff of Danjiangkou reservoir

由图 4 和 M-K 趋势检验结果可知,丹江口水库的年径流量呈明显的下降趋势,同时结合近些年汉江流域来水连续偏枯的情况,汉江流域丹江口水库未来一段时间内来水水平偏枯的可能性较大。

根据收集整理的丹江口水库 1956—2016 年天然年径流量系列,采用小波分析方法对丹江口水库的年径流量进行周期性变化特性分析。图 5 给出了丹江口水库年径流量的小波系数和小波方差曲线图。

从图 5 中小波系数实部时频图来看,丹江口水库年径流量具有多时间尺度演变特征,主要表现为 2 种时间尺度的周期振荡和变异特性,存在 6~8 a、19~21 a 两类尺度的周期变化规律。从小波方差曲线图来分析:第一峰值约 20 a,说明 20 a 左右的周期振荡最强,为年径流量周期变化的第一周期,即主周期;第二峰值约 8 a,说明 8 a 左右的周期振荡次强,该类为小周期振荡,历年振荡频率较剧烈,为年径流量周期变化的第二主周期。

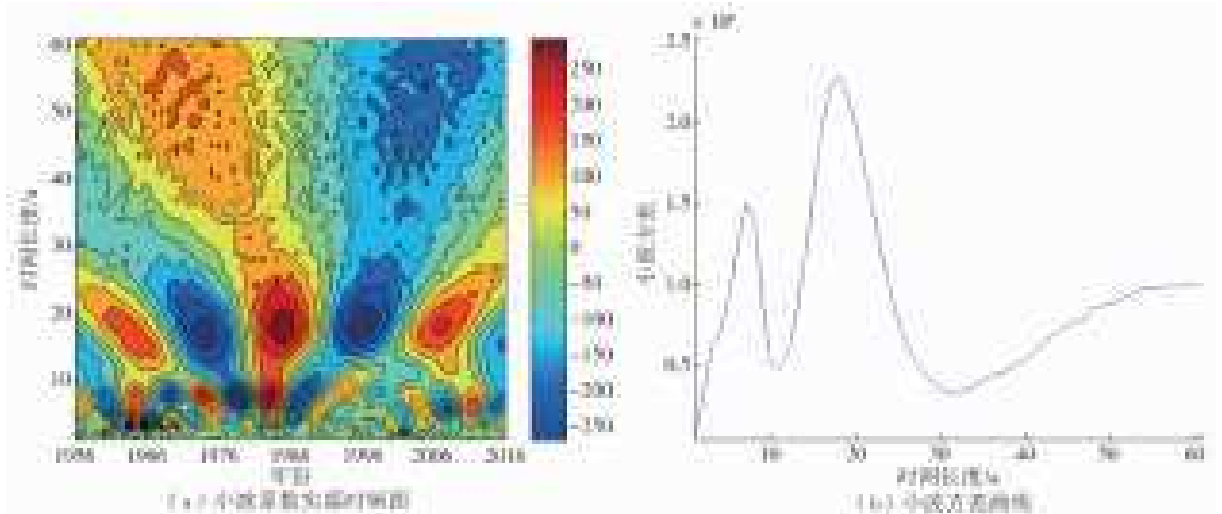


图5 丹江口水库年径流量小波系数实部时频图和小波方差曲线

Fig. 5 Contour maps of the real part of the wavelet coefficients and wavelet variances of annual runoff of Danjiangkou reservoir

由第一主周期径流变化规律可知,在 20 a 左右周期变化时间尺度上,丹江口水库年径流大致呈现出“丰—枯—丰—枯—丰—枯”的变化趋势,见表 1 和图 6。1958—1968 年、1980—1990 年、2003—2012 年为年径流偏丰期,1969—1979 年、1991—

2002 年、2013—2016 年为年径流偏枯期。可以看出,近几年汉江流域丹江口以上来水偏枯。

根据丹江口水库来水情势分析结果来看,目前汉江流域丹江口以上来水处于偏枯期,未来一段时间内来水偏枯的可能性较大。

表 1 不同时段丹江口水库年径流量准周期振荡特征

Tab. 1 Periodic oscillation characteristics of annual runoff of Danjiangkou reservoir in different time intervals

时段	总体情势	均值/亿 m ³	时段	总体情势	均值/亿 m ³
1958—1968 年	偏丰	429.2	2003—2012 年	偏丰	408.5
1969—1979 年	偏枯	342.5	2013—2016 年	偏枯	250.8
1980—1990 年	偏丰	454.0	多年均值		374.0
1991—2002 年	偏枯	290.1			

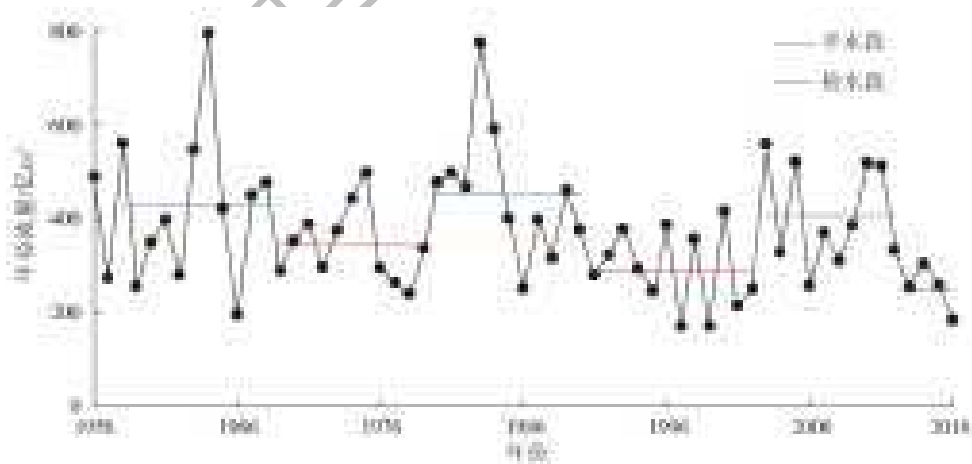


图 6 不同年份丹江口水库年径流量丰枯变化趋势

Fig. 6 Wet and dry periods changing tendency of annual runoff of Danjiangkou reservoir in different years

3.2 月径流预测

3.2.1 预测因子筛选

在构建多元线性回归模型时,需确定影响丹江口水库各月平均流量的预测因子。以百项气候系统指数集和太阳黑子数为初选预测因子,选用丹江口水库以上流域 1956—2006 年逐月平均流量作为预

报变量,计算月平均流量系列与前一年相应的气候因子序列间的相关系数,根据相关系数显著性检验表剔除不显著相关的预测因子。由于中长期径流预测的物理成因复杂,预测变量与预测因子间的内在联系仍处于探索阶段,挑选 10 个通过显著性检验的因子作为最终预测因子。

以丹江口水库枯期中 1 月、汛期中 7 月的月平均流量为例,筛选的预报因子见表 2。

表 2 丹江口水库月平均流量预测因子

Tab. 2 Monthly runoff predictive factors of Danjiangkou reservoir

1 月预测因子	1 月预测因子说明	7 月预测因子	7 月预测因子说明
$x_{1,1}$	前一年 7 月亚洲纬向环流指数	$x_{7,1}$	前一年 4 月欧亚经向环流指数
$x_{1,2}$	前一年 7 月西太平洋副高脊线位置指数	$x_{7,2}$	前一年 1 月亚洲区极涡强度指数
$x_{1,3}$	前一年 3 北半球极涡中心强度指数	$x_{7,3}$	前一年 1 东亚槽强度指数
$x_{1,4}$	前一年 9 月欧亚纬向环流指数	$x_{7,4}$	前一年 6 月 850 hPa 西太平洋信风指数
$x_{1,5}$	前一年 4 月东亚槽位置指数	$x_{7,5}$	前一年 3 月西太平洋遥相关型指数
$x_{1,6}$	前一年 11 月青藏高原-2 指数	$x_{7,6}$	前一年 5 月西太平洋副高脊线位置指数
$x_{1,7}$	前一年 8 月 NINO 3.4 区海表温度距平指数	$x_{7,7}$	前一年 7 月 NINO 3 区海表温度距平指数
$x_{1,8}$	前一年 6 月印度洋暖池面积指数	$x_{7,8}$	前一年 10 月西太平洋暖池面积指数
$x_{1,9}$	前一年 12 月南方涛动指数	$x_{7,9}$	前一年 8 月北半球极涡中心纬向位置指数
$x_{1,10}$	前一年 10 月太阳黑子数	$x_{7,10}$	前一年 9 月北大西洋-欧洲环流 E 型指数

3.2.2 模型构建与验证

根据挑选的预测因子,以 1955—2005 年预测因子逐月数据和 1956—2006 年逐月平均流量为模型的输入,构建丹江口水库 1—12 月各月径流预测的多元线性回归模型,对模型参数进行率定,并以 2006—2015 年预测因子逐月数据和 2007—2016 年逐月平均流量进行模型验证。以丹江口入库枯期中 1 月、汛期中 7 月的月平均流量为例,根据筛选的因子(表 2),最终率定的模型如下。图 7 给出多元线性回归模型的实测和模拟月平均流量过程。

$$y_1 = -9.948 4x_{1,1} + 4.716 3x_{1,2} - 5.732 2x_{1,3} +$$

$$3.224 7x_{1,4} - 0.336 7x_{1,5} - 10.655 3x_{1,6} + 0.032 4x_{1,7} + 0.352 7x_{1,8} + 6.102 6x_{1,9} - 7.504 5x_{1,10} + 2 006.293 8 \quad (5)$$

式中: y_1 表示 1 月丹江口入库平均流量; $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,10}$, 分别表示 1 月相应的预测因子。

$$y_7 = -133.148x_{7,1} - 0.173 8x_{7,2} - 0.992 8x_{7,3} - 187.048x_{7,4} - 223.383x_{7,5} - 107.216x_{7,6} - 0.887 8x_{7,7} - 0.124 9x_{7,8} + 216.262 3x_{7,9} - 156.547x_{7,10} + 38 526.3 \quad (6)$$

式中: y_7 表示 7 月丹江口入库平均流量; $x_{7,1}, x_{7,2}, \dots, x_{7,10}$ 分别表示 7 月相应的预测因子。

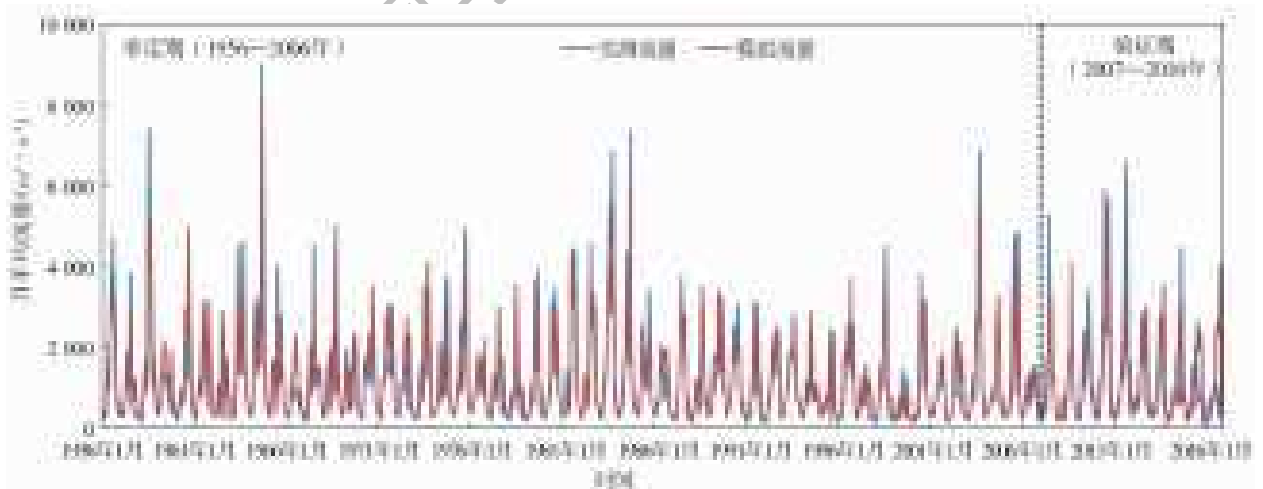


图 7 丹江口水库实测和模拟月平均流量过程对比(多元线性回归模型)

Fig. 7 Comparison between measured and simulated monthly average discharge of Danjiangkou reservoir (multiple linear regression model)

以 1956—2006 年、2007—2016 年分别作为模型的率定和验证期,以逐月平均流量和相应的预测因子系列作为模型的输入,构建丹江口水库 1—12 月各月径流预测的随机森林模型。图 8 给出随机森林模型的实测和模拟月平均流量过程。

基于率定期 1956—2006 年和验证期 2007—2016 年模拟及相应实测的逐月平均流量系列,采用距平符号一致率 P_{Symbol} 、平均绝对百分比误差 δ_{MAPE} 和 Nash 效率系数 E_{NS} 等 3 个指标对两个模型的模拟精度进行评定,结果见表 3。

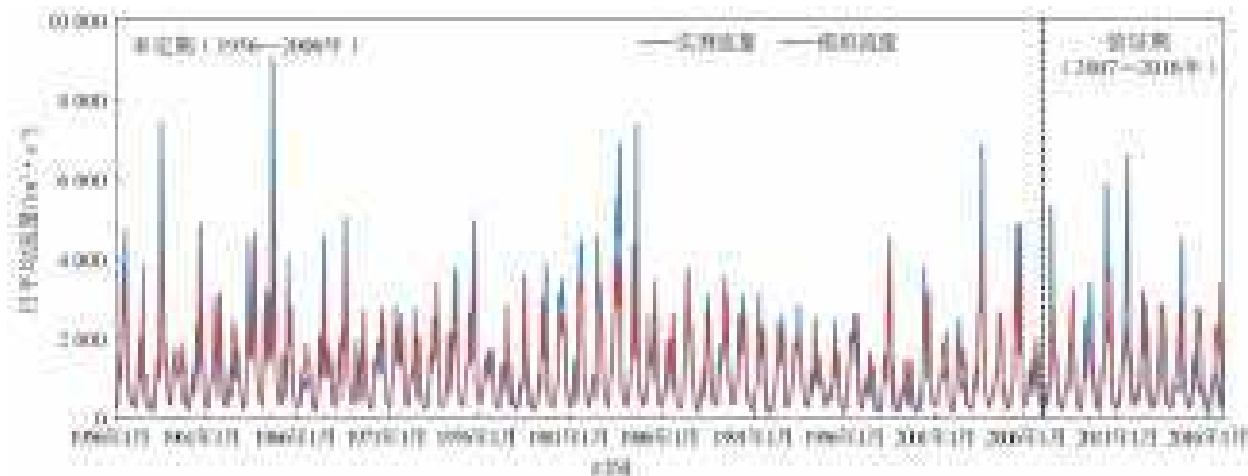


图8 丹江口水库实测和模拟月平均流量过程对比(随机森林模型)

Fig. 8 Comparison between measured and simulated monthly average discharge of Danjiangkou reservoir (random forest model)

表3 丹江口水库月平均流量预测模型率定和验证模拟性能
Tab. 3 The simulation performance of calibration and validation for the monthly runoff prediction models of Danjiangkou reservoir

项目	采用模型	评价指标		
		$P_{Symbol}/\%$	$\delta MAPE/\%$	E_{NS}
率定期	多元线性回归模型	78	25.6	0.78
1956—2006年	随机森林模型	88	20.3	0.82
验证期	多元线性回归模型	73	30.8	0.69
2007—2016年	随机森林模型	78	26.9	0.70

由表3可知:率定期内各模型月平均流量过程模拟的距平符号一致率均在75%以上,平均绝对相对误差在30%以内,Nash效率系数均大于0.75,模拟精度较好;相比于率定期,验证期的模拟精度要略差。由图4和图5可知,不论在率定期还是验证期内,两种模型

丰水年份的模拟值偏小,枯水年份的模拟效果较好。

对比多元线性回归模型与随机森林模型的模拟精度可知,随机森林模型的模拟性能要略优于多元线性回归模型。整体而言,从中长期来水量预测角度来分析,两个统计模型均能较好地模拟汉江上来水量,具备一定的预测能力。

3.2.3 月径流预测

根据前述建立的两种丹江口水库逐月径流量预测模型,对2017年丹江口水库逐月平均流量进行预报,并与实测结果进行比较分析,计算各月误差,结果见表4。中长期径流预报许可误差规定为多年变幅的10%,计算许可误差并分析两种模型的预测结果是否合格,结果见表4。

表4 丹江口水库2017年各月平均流量预测误差
Tab. 4 Error of monthly runoff prediction of Danjiangkou reservoir in 2017

月份	月平均流量误差/($m^3 \cdot s^{-1}$)		月平均流量许可误差/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	预测结果	
	多元回归模型	随机森林模型		多元回归模型	随机森林模型
1	-82	97	28.9	不合格	不合格
2	20	18	27.2	合格	合格
3	77	-34	47.6	不合格	合格
4	43	59	94.4	合格	合格
5	-54	-60	127.0	合格	合格
6	-80	-20	135.0	合格	合格
7	-70	-40	245.0	合格	合格
8	120	150	198.0	合格	合格
9	90	60	236.0	合格	合格
10	-120	110	160.0	合格	合格
11	-67	48	75.2	合格	合格
12	70	-61	42.4	不合格	不合格

经对比,两种模型在汛期的模拟精度要优于非汛期,模型整体预测效果良好,且随机森林的预测精度要优于多元线性回归模型,预测合格率分别为

83.3%、75.0%。相对而言,随机森林模型更宜用于丹江口水库月径流预测中。

3.3 讨论

本文分别从定性和定量两个角度实现丹江口水库来水量预测:在定性层面,分别选用 Mann-Kendall(M-K)方法和小波分析方法分析丹江口水库年径流量的趋势性和周期性,根据趋势性和周期性分析成果,初步掌握丹江口水库目前及未来一段时间内来水丰枯特性,为月径流预测研究奠定基础;在定性分析的基础上,分别选用多元线性回归模型和随机森林模型预测丹江口水库月平均流量,定量给出丹江口水库下一年度逐月平均流量。相比于既往研究,本次从定性和定量相结合的角度,综合实现丹江口水库来水量预测研究工作。

M-K 趋势检验结果及趋势变化图表明,丹江口水库年径流量呈显著的减小趋势;小波系数和小波方差曲线图表明,丹江口水库年径流量存在约 20 a、8 a 左右的周期变化特性,以 20 a 左右的周期振荡最强,年径流大致呈现出“丰—枯—丰—枯—丰—枯”的变化趋势。由此可知,丹江口水库以上来水处于偏枯期,未来一段时间内来水偏枯的可能性较大。从大气环流、海温指数等气候因子中筛选出与丹江口水库月平均流量密切相关的因子,构建丹江口水库逐月径流的多元线性回归模型和随机森林模型,两类模型的模拟精度较好,均可用于丹江口水库中长期来水量预测研究中,相比而言,随机森林模型的模拟性能要略优于多元线性回归模型。依据定性和定量两个层面的预测成果,两者相辅,以进一步保障预测成果的准确性,可用于水库来水量预测,为水库的优化调度及水量调度计划编制提供技术支撑。

另外,本次定量预测结果的整体精度较好,但枯期径流预测仍存在一定误差。虽然枯期径流预报的绝对误差比汛期的误差小,但预报精度仍难以满足实际要求,主要由于预报许可误差取决于年际间径流的变化幅度,而枯季径流量小、年际间的变化也小。

4 结语

丹江口水库年径流量趋势性和周期性检验结果表明,年径流呈显著减少趋势,存在 6~8 a、18~21 a 两类尺度的周期振荡特性。目前汉江流域处于枯水段,近些年来水偏枯的可能性较大。

构建适用于丹江口水库来水量预测的多元线性回归和随机森林模型,从模型的率定和验证结果来看,模拟精度较好,可用于丹江口水库月径流预测。以 2017 年为例,随机森林和多元线性回归模型的预报合格率分别为 83.3%、75.0%,表明建立的月径流预测模型可用于丹江口水库来水预测,特别是随

机森林模型。

参考文献(References):

- [1] 陈华,郭生练,郭海晋,等. 汉江流域 1951—2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 340-345. (CHEN H, GUO S L, GUO H J, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(3): 340-345. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2006.03.014.
- [2] 王文,马骏. 若干水文预报方法综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 56-60. (WANG W, MA J. Review on some methods for hydrological forecasting [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(1): 56-60. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2005.01.018.
- [3] 张俊. 中长期水文预报及调度技术研究与应用[D]. 大连:大连理工大学, 2009. (ZHANG J. Mid-and-long term hydrological forecasting and operation techniques research and application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)).
- [4] SHAHAB A, DONALD H B, MOHAMMAD K. Long-lead probabilistic forecasting of stream flow using ocean-atmospheric and hydrological predictors [J]. Water Resources Research, 2006, 42: 1-11. DOI: 10.1029/2004wr003853.
- [5] GLENN A T, ASHOK K S, THOMAS C P, et al. Long lead-time forecasting of US stream flow using partial least squares regression [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(5): 442-451. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2007)12:5(442).
- [6] CHENG C T, XIE J X, CHAU K W, et al. A new indirect multi-step-ahead prediction model for a long-term hydrologic prediction [J]. Journal of Hydrology, 2008, 361: 118-130. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.040.
- [7] FELIPE P S, NELSON O N. Forecasting of monthly stream flows based on artificial neural networks [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009, 14(12): 1390-1395. DOI: 10.1061/(asce)1084-0699(2009)14:12(1390).
- [8] WANG W C, CHAU K W, CHENG C T, et al. A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series [J]. Journal of Hydrology, 2009, 374: 294-306. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.019.
- [9] 林剑艺,程春田. 支持向量机在中长期径流预报中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 681-686. (LIN J Y, CHENG C T. Application of support vector machine

- method to long-term runoff forecast [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(6): 681-686. (in Chinese) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2006. 06. 007.
- [10] 刘勇,王银堂,陈元芳,等. 丹江口水库秋汛期长期径流预报[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 771-778. (LIU Y, WANG Y T, CHEN Y F, et al. Long-term runoff forecasting for autumn flooding seasons in Danjiangkou reservoir based on analyzing the physical causes [J]. Advances In Water Science, 2010, 21(6): 771-778. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2010. 06. 010.
- [11] 冯小冲,王银堂,刘勇,等. 基于物理统计方法的丹江口水库月入库径流预报[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(3): 242-247. (FENG X C, WANG Y T, LIU Y, et al. Monthly runoff forecast for Danjiangkou reservoir based on physical statistical methods [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(3): 242-247. (in Chinese) DOI: 10. 3876/j. issn. 1000-1980. 2011. 03. 002.
- [12] 王元超. 丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2015. (WANG Y C. Medium and long term runoff forecasting and joint simulation of water quality and quantity for Danjiangkou reservoir[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research(IWHR), 2015. (in Chinese))
- [13] 张岩,杨明祥,雷晓辉,等. 基于 PCA-PSO-SVR 的丹江口水库年径流预报研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 35-40. (ZHANG Y, YANG M X, LEI X H, et al. Research on annual runoff forecast of Danjiangkou reservoir based on PCA-PSO-SVR [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 35-40. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdkj. 2018. 0122.
- [14] 祝诗学,梁忠民,戴昌军,等. 丹江口水库流域月尺度降雨与径流预报研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(1): 96-101, 24. (ZHU S X, LIANG Z M, DAI C J, et al. Study on monthly rainfall and runoff prediction in Danjiangkou basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 96-101, 24. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdkj. 2016. 01. 016.
- [15] 酆于杰,梁忠民,唐甜甜. 基于支持向量回归机的长期径流预报及不确定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 45-50. (LI Y J, LIANG Z M, TANG T T. Long-term runoff forecasting based on SVR model and its uncertainty analysis [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 45-50. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdkj. 2018. 0067.
- [16] HIRSCH, ROBERT M, SLACK, et al. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982, 18(1): 107-121. DOI: 10. 1029/WR018i001p00107.
- [17] ZHANG X P, ZHANG L, ZHAO J, et al. Responses of streamflow to changes in climate and land use/cover in the Loess Plateau, China [J]. Water Resources Research, 2008, 44(7): W00A07. DOI: 10. 1029/2007WR006711.
- [18] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9): 1807-1829. DOI: 10. 1002/hyp. 1095.
- [19] 王红瑞,刘昌明. 水文过程周期分析方法及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (WANG H R, LIU C M. Theory and applications of hydrological processes and periodic analysis [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010 (in Chinese))
- [20] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG W S, DING J, LI Y Q. Hydrology wavelet analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [21] BREIMAN L. Statistical modeling: The two cultures [J]. Statistical Science, 2010, 16(3): 199-215. DOI: 10. 2307/2676681.
- [22] 黄振平. 水文统计学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2003. (HUANG Z P. Hydrologic statistics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2003. (in Chinese))
- [23] TIWARI M K, CHATTERJEE C. Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs) [J]. Journal of Hydrology, 2010, 382(1/4): 20-33. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2009. 12. 013.
- [24] BREIMAN L. Bagging predictors [J]. Machine Learning, 1996, 24(2): 123-140. DOI: 10. 1023/A: 1018054314350.
- [25] BREIMAN L. Random forests [J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32. DOI: 10. 1023/A: 1010933404324.
- [26] PETERS J, et al. Random forests as a tool for ecohydrological distribution modeling [J]. Ecological Modelling, 2007, 207(2/4): 304-318. DOI: 10. 1016/j. ecolmodel. 2007. 05. 011.
- [27] 赵钢铁,杨大文,蔡喜明,等. 基于随机森林模型的长江上游枯水期径流预报研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(3): 18-24. (ZHAO T T G, YANG D W, CAI X M, et al. Predict seasonal low flows in the upper Yangtze River using random forests model [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(3): 18-24. (in Chinese))

Water inflow regime analysis and runoff prediction of Danjiangkou reservoir

WAN Yusheng¹, WANG Dong², HUANG Chaojun¹

(Water Sources Company of South-to-North Water Transfers, Danjiangkou 442700, China;
Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The water inflow of Hanjiang River basin (HRB) continues to decline in recent years. The imbalance between supply and demand of water resources becomes more acute. Hence, it is necessary to study the middle and long-term water inflow prediction of HRB. If the annual and monthly runoff of the Danjiangkou reservoir can be predicted accurately, it would may ensure water supply safety of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project for the northern region. Meanwhile, it can also provide technical support for making an annual water regulation plan of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project.

The basin above the Danjiangkou reservoir was selected as a research object. Water inflow of the Danjiangkou reservoir was predicted from qualitative and quantitative perspectives, respectively. The trend and periodicity characteristics of annual runoff were analyzed based on the monthly runoff data from 1956 to 2016. Characteristics of the annual water inflow were analyzed from qualitative perspectives in the Danjiangkou reservoir. The predictive factors which closely related to the runoff were selected based on hundred-term climate system indices set and sunspot number. The multiple linear regression model and random forest model were constructed for the monthly runoff prediction. The monthly runoff was also predicted from quantitative perspective.

The results showed that the annual runoff exhibited a significant decreasing trend, with periodic oscillation characteristics of 6-8 years and 18-21 years. The monthly runoff of 2017 was predicted with a passing rate of 83.3% and 75.0% for the random forest model and multiple linear regression model, respectively. The high prediction accuracies indicated that they can be applied for the monthly runoff prediction in the Danjiangkou reservoir. By contrast, the random forest model was better.

Presently, the runoff of the Danjiangkou reservoir is low. It is also predicted that water inflow less than normal runoff is expected in the near future. The multiple linear regression model and random forest model were constructed. Both simulation precisions were good based on calibration and validation results. They can be applied for the runoff prediction of the Danjiangkou reservoir. By contrast, the simulation performance of the random forest model is slightly better. Besides, the prediction precision of runoff in dry seasons is poor. The main reason is that prediction permissible error depends on the variation range of annual runoff.

Key words: Danjiangkou reservoir; runoff prediction; multiple linear regression model; random forest model

