



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.01.016

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]. 2016, 14(1): 96-101, 24.

ZHU Shi xue, LIANG Zhong min, DAI Chang jun, et al. Study on monthly rainfall and runoff prediction in Danjiangkou Basin[J]. 2016, 14(1): 96-101, 24. (in Chinese)

丹江口水库流域月尺度降雨与径流预报研究

祝诗学¹, 梁忠民¹, 戴昌军², 杨文发³

(1. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210098; 2. 长江水利委员会 水资源局, 武汉 430010;
3. 长江水利委员会 水文局, 武汉 430010)

摘要: 以汉江上游丹江口水库流域为研究区域, 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, 根据大气环流因子对月降雨量进行预报, 并构建研究区域的 SWAT 模型, 以预报的月降雨量作为模型输入, 实现月径流量的预报。以 2012 年逐月降雨及径流为例, 模型对降雨和径流预报的合格率均约为 83%, 预报效果较好。研究表明, 根据降雨量-大气环流因子的统计相关关系预报月降雨, 并结合水文模型进行径流预报, 对研究区域具有一定的适用性。

关键词: 丹江口流域; 降雨预报; 径流预报; 多元线性回归模型; SWAT 模型

中图分类号: TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)01-0096-06

Study on monthly rainfall and runoff prediction in Danjiangkou Basin

ZHU Shi xue¹, LIANG Zhong min¹, DAI Chang jun², YANG Wen fa³

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Bureau of Water Resources, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 3. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to predict monthly rainfall in Danjiangkou basin of the upper Han River, we selected predictors from 74 atmospheric circulation factors by analyzing correlation of rainfall and factors, and multiple linear regression model was established by which the monthly rainfall was predicted. SWAT model of the study area was built to forecast the monthly runoff by using monthly rainfall forecast values as the model input. The monthly rainfall and runoff of 2012 were forecasted with passing rate both were about 83 percent. It shows the method that monthly rainfall prediction based on the statistical correlation of rainfall and atmospheric circulation factors, and runoff prediction combined with hydrological model, is applicable to the studied area.

Key words: Danjiangkou Basin; rainfall prediction; runoff prediction; multiple linear regression model; SWAT model

水文预报根据预见期的长短分为短期水文预报和中长期水文预报, 凡预见期不大于流域汇流时间的称为短期预报, 预见期大于流域最大汇流时间且在 3 d 以上, 1 a 以内的称为中长期水文预报^[1-2]。随着预见期的加长, 中长期水文预报的影响因素增

多, 预报难度及不确定性增大, 需要通过分析影响中长期水文过程各种因素的物理本质以及它们之间的内在联系, 构建预报模型, 提高预报精度^[2-3]。

传统的中长期预报根据河川径流的连续性、周期性、随机性等特点展开研究, 主要有成因分析法和

收稿日期: 2015-01-16 修回日期: 2015-12-28 网络出版时间: 2016-02-27
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160227.1654.018.html>
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2010CB9511)

Fund: National Key Basic Research Program of China(973 Program, 2010CB9511)

作者简介: 祝诗学(1989), 男, 江西上饶人, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: sxzhu0828@163.com

通讯作者: 梁忠民(1962), 男, 辽宁凤城人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: zmliang@hhu.edu.cn

水文统计法^[4]；张丽霞^[5]等根据成因分析法，确定了优化预报因子建立了多元回归预报方程；许士国等^[6]建立了基于物理成因概念的多元线性回归预报模型。随着计算技术与方法的不断发展，如模糊数学、人工神经网络、灰色系统分析、小波分析、混沌理论、多层递阶方法、支持向量机等各种新方法逐渐应用到中长期水文预报中^[7-11]。不同方法各有优缺点，适用性不同，预报效果也存在一定差异。为此，人们发现组合预报方法能有效提高预报精度，增强预报稳定性^[12-13]，其中，使用集合预报的降雨过程驱动水文模型得到相应的径流预报过程的水文集合预报方法，具有气象预报信息以及概率预报的优势，但该方法亦面临不确定性识别、气象-水文耦合等问题^[14]。

本文以汉江丹江口水库以上流域为研究对象，面向生产实际需求，采用降雨-大气环流因子遥相关分析筛选预报因子，建立多元线性回归月降雨量预报模型，再利用降雨预报结果驱动分布式水文模型(SWAT模型)，从而实现流域月尺度的降雨与径流预报。

1 流域概况

丹江口水库流域位于汉江流域上游，流域面积为95 217 km²，占汉江流域集水面积的60%，流域地形复杂，多为山区深谷、高山、浅山，地势西北高、东南低，呈一向东开口的马蹄形。流域内水利工程较多，其中丹江口水库是南水北调中线水源工程，具有防洪、供水、发电、灌溉、航运和水产养殖等综合功能。流域水系及水文气象站点见图1。

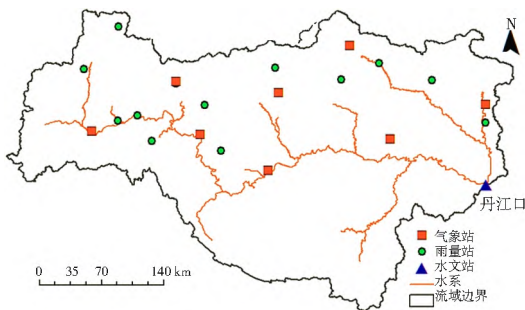


图1 流域水系及水文气象站点

Fig. 1 Stream of basin and hydrometric and weather station

2 月降雨统计预报模型

2.1 降雨-大气环流因子遥相关分析

影响降雨的因素多而复杂，从预报月降雨量的角度，可以通过分析其前期大气环流因子影响的途径，确定关键预报因子并建立统计关系，以实现月降

雨量的预报。

根据国家气候中心提供的74项大气环流因子，选用丹江口水库以上流域1954年-2009年降雨的面平均值以及对应的前三年大气环流因子系列，计算降雨量与各因子间的相关系数，并进行显著性检验，选取通过显著性检验的因子作为预报因子。以1月份为例，选取的预报因子结果见表1。

2.2 模型构建与验证

建立预报对象(月降雨)与筛选出的大气环流因子之间的多元线性回归方程：

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m \quad (1)$$

式中： $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ 为回归系数； $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$ 为预报因子； \hat{y} 为预报对象。

表1 丹江口流域1月份降雨预报因子

Tab. 1 Rainfall predictors of January in Danjiangkou basin

预报因子	环流特征量	提前年数	月份	相关系数
x_1	北美副高脊线(110W-60W)	3	11	0.493
x_2	北美副高北界(110W-60W)	3	11	0.420
x_3	太平洋区极涡面积指数(2区, 150E-120W)	3	1	0.410
x_4	南海副高北界(100E-120E)	3	12	0.409
x_5	编号台风	2	5	0.399
x_6	亚洲经向环流指数(IM, 60E-150E)	2	5	0.396
x_7	南海副高脊线(100E-120E)	2	2	0.393
x_8	冷空气	1	3	0.383
x_9	北美大西洋副高脊线(110W-20W)	3	11	0.373
x_{10}	北半球极涡中心位置(JW)	1	7	0.370

根据1954年-2009年的逐月降雨及对应的大气环流因子资料，逐月联立构建矛盾方程组，采用最小二乘方法估计回归系数。以1月份为例，丹江口以上流域降雨预报模型为

$$\hat{y} = -316.22 + 15.46x_1 - 1.25x_2 + 0.96x_3 + 3.82x_4 - 11.07x_5 + 0.65x_6 + 6.26x_7 - 14.43x_8 - 6.41x_9 - 0.15x_{10} \quad (2)$$

式中： x_i 为表1中对应的降雨预报因子； \hat{y} 为预报对象。

同理，可以建立其他月份的降雨预报模型。对各月的预报模型进行模拟精度统计，根据《水文情报预报规范 SL 250-2000》中对于中长期降雨定量预报的精度规定：以多年变幅的20%作为许可误差。统计上述月降雨预报模型模拟的合格率，结果见表2。可以看出，月降雨预报模型的合格率均在70%以上，平均合格率约为83%，精度较好。

表 2 1954 年-2009 年各月降雨预报模型模拟的合格率

Tab. 2 The passing rate of the monthly rainfall forecast model during 1954-2009

月份	多年变幅/mm	许可误差/mm	合格率(%)
1	405	81	94.6
2	425	85	78.6
3	744	149	91.1
4	1096	219	75.0
5	1495	299	78.6
6	2442	488	82.1
7	2855	571	83.9
8	2490	498	71.4
9	2964	593	75.0
10	1955	391	94.6
11	860	172	87.5
12	300	60	78.6

利用 2010 年-2011 年的月降雨数据对模型进行验证。计算各月的实测降雨与模型预报的月降雨之间的误差,与表 2 中的许可误差对比,结果见表 3。经统计,2 年内各月降雨预报合格的有 18 个,不合格的有 6 个,合格率达到 75%,具有一定的预报精度。

表 3 2010 年-2011 年各月降雨量预报误差

Tab. 3 Error of monthly rainfall prediction during 2010-2011

月份	2010 年预报误差/mm	合格/不合格	2011 年预报误差/mm	合格/不合格
1	21	合格	4	合格
2	83	合格	30	合格
3	16	合格	28	合格
4	-256	不合格	207	合格
5	330	不合格	96	合格
6	-333	合格	-934	不合格
7	-620	不合格	-304	合格
8	-146	合格	829	不合格
9	188	合格	-589	合格
10	348	合格	-84	合格
11	-30	合格	-253	不合格
12	-3	合格	14	合格

3 基于 SWAT 的月径流预报模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)是美国农业部(USDA)开发的流域尺度的分布式水文模型,用于模拟预测长期土地管理措施对于多种土壤类型、土地利用和管理条件的大面积复杂流域的径流、泥沙负荷和营养物流失的影响^[15-16]。为减小流

域下垫面和气候因素的时空变异性对于模型径流模拟的影响,SWAT 模型将流域划分为若干子流域,并在子流域内根据土壤和土地利用的类型细分为不同的水文响应单元(HRU),流域细分后再进行产汇流计算可提高模型对于径流模拟的精度,SWAT 模型对于径流的预测能力在国内外已得到广泛的验证^[17-22],特别是对于年、月径流的长期模拟具有较高精度^[23-26],因此 SWAT 模型可用于中长期月径流预报。

3.1 模型构建

SWAT 模型模拟月径流过程所需的基础数据如下。

(1) 水文气象数据。包括流域内安康、城固、丹凤等 20 个雨量站点的 1995 年-2011 年逐日降雨资料,以及对应时间内流域出口的逐日流量资料;流域内安康、佛坪等 8 个气象站 1995 年-2011 年的逐日温度、风速、太阳辐射、相对湿度资料。

(2) 空间及其属性数据。DEM 采用由美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量的 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 90 m 分辨率数字高程数据;土地利用数据采用中国科学院 1:10 万土地资源调查的成果 WESTDC_Land_Cover_Products 1.0 栅格数据,数据年份为 2005 年;土壤数据采用第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,数据格式为 GRID 栅格格式,投影为 WGS1984,土壤分类系统主要为 FAO-90,数据年份为 1995 年;与土地利用和土壤空间数据对应的属性数据,包括土地利用类型、土壤类型、土壤属性、土壤数据库等。

模型构建过程如下。

(1) 输入流域的 DEM 数据,并利用 ArcGIS 空间分析工具,分析流域流向,计算汇流累计量,确定流域出口,定义 28 个子流域(图 2)。

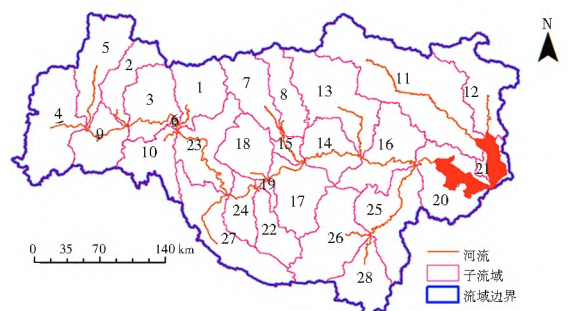


图 2 研究区子流域划分

Fig. 2 sub basins of the study area

(2) 输入土地利用数据、土壤数据,并根据 SWAT 模型中的数据库以及重分类索引表,对土地利用和土壤进行重分类,定义单一坡度,对流域进行水文响应单元(HRU)划分。

考虑到丹江口水库调节作用对流域出口处月径流量预报的影响,将丹江口水库库区水面部分作为土地利用重分类中的水域(WATER)处理,如图2中蓝色区域所示;流域内其它水利工程信息均反映在土地利用数据内。模型对土地利用进行重分类时,根据相关参数将其分别处理成水库坑塘、湖泊、滩地等。以上处理方式虽然未能考虑水利工程的运行调度规则,但模型计算时会基于土地利用重分类结果中的参数,考虑水利工程对流域产汇流计算的影响。

(3) 加载雨量站数据和气象站数据。依据站点名称索引读取相应雨量和气象数据,完成模型的构建。

3.2 模型参数率定与验证

在径流模拟中,影响产汇流过程的因子众多,对于中长期径流预报中的月径流模拟,主要考虑年、月径流量,以及月径流过程线的拟合情况,率定的参数应与地表水、土壤水、地下水含量以及汇流过程有关。考虑以上因素并结合模型的参数敏感性分析模块,采用 LH-OAT 灵敏度分析法得到参数敏感性排序,利用 SWAT-CUP 中的 SUF2 算法进行参数率定与验证。率定期为 1995 年-2005 年,验证期为 2006 年-2011 年。参数率定范围以及最终的率定结果见表 4。

表 4 SWAT 模型参数率定结果

Tab. 4 Results of parameter calibration of SWAT model

序号	参数代码	参数含义	最佳参数	参数率定范围	敏感性排名	影响对象/过程
1	CN2	SCS 径流曲线系数	88	(35, 98)	1	地表径流
2	SOL_AWC	土壤有效含水量	0.15	(0, 1)	3	土壤水分
3	SOL_K	土壤饱和导水率	674	(0, 2000)	7	土壤水分
4	SOL_BD	土壤容重	2.18	(0.9, 2.5)	12	土壤水分
5	GWQMN	浅层地下水径流系数	4675	(0, 5000)	2	土壤水分
6	ESCO	土壤蒸发补偿系数	0.03	(0, 1)	4	土壤蒸发
7	EPCO	植物蒸腾补偿系数	0.48	(0, 1)	10	植被蒸散发
8	CANMX	最大冠层蓄水量	28	(0, 100)	5	植被蒸散发
9	ALPHA_BF	基流系数	0.075	(0, 1)	8	地下水
10	GW_DELAY	地下水滞后系数	155	(0, 500)	9	地下水过程
11	GW_REVAP	地下水再蒸发系数	0.135	(0.02, 0.2)	6	地下水过程
12	CH_N2	主河道曼宁系数	0.042	(0, 0.3)	11	河道汇流

采用相对误差 (R)、确定性系数 (R^2)、Nash-Sutcliffe 系数 (Ens) 作为模型适用性评价指标,率定期及验证期精度统计见表 5,率定期、验证期的月径流模拟过程与实测过程的对比分别见图 3、图 4。

表 5 模型适用性评价指标计算结果

Tab. 5 Calculated results of evaluation indexes for model performance

时段	R	R^2	Ens
率定期(1995-2005)	8.2%	0.89	0.89
验证期(2006-2011)	13.2%	0.88	0.86

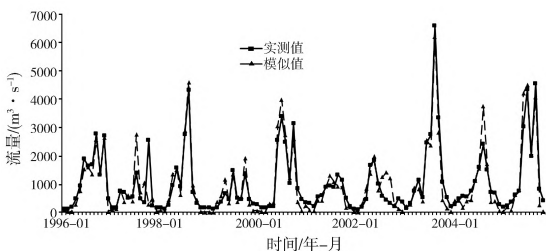


图 3 率定期月径流模拟值与实测值对比

Fig. 3 Comparison of monthly simulated and observed runoff during the calibration period

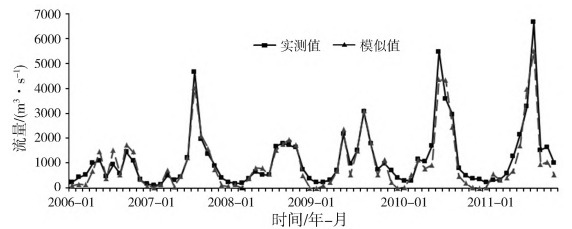


图 4 验证期月径流模拟值与实测值对比

Fig. 4 Comparison of monthly simulated and observed runoff during the validation period

由表 5 及图 3、图 4 的结果可知,SWAT 模型在率定期及验证期均达到了较高精度, R 值在 20% 以内, R^2 系数和 Ens 系数均在 0.85 以上,表明 SWAT 模型可以用于研究区域的月径流模拟预报研究。

4 月降雨及径流预报及结果分析

4.1 月降雨量预报

根据前述建立的月雨量预报模型,对 2012 年丹江口以上流域的逐月降雨量进行预报,比较预报结

表 6 2012 年月降雨量与径流量预报误差

Tab. 6 Error of monthly rainfall and runoff prediction in 2012

月份	月降雨量误差		月径流量误差		月径流量许可误差	
	/mm	/合格 /不合格	$/(m^3 \cdot s^{-1})$	$/(m^3 \cdot s^{-1})$	/合格 /不合格	
1	29	合格	-149	81	不合格	
2	275	不合格	-112	85	不合格	
3	-47	合格	-169	179	合格	
4	128	合格	70	219	合格	
5	-81	合格	-254	299	合格	
6	384	合格	297	488	合格	
7	250	合格	408	571	合格	
8	-130	合格	-46	498	合格	
9	658	不合格	-493	593	合格	
10	-18	合格	30	391	合格	
11	-123	合格	253	272	合格	
12	-36	合格	34	60	合格	

果与实测结果并计算误差,结果见表 6。对比表 2 中的许可误差可知,除 2 月、9 月之外,其他月份的预报均在许可误差内,合格率达 83%,预报效果较好。

4.2 月径流量预报

以预报的 2012 年逐月降雨结果作为 SWAT 模型的输入,进行产汇流计算,得到流域出口的流量过程,进行月径流试预报。由于 SWAT 模型需要输入的降雨为日数据,而预报的降雨是逐月数据,因此需将逐月数据解集成逐日数据。

采用相似性原理进行处理:构建预报的逐月降雨量向量与历史实测各年逐月降雨量向量之间的欧氏距离度量函数:

$$\|D_i\| = \|X - Y\|_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{12} (x_j - y_{i,j})^2} \quad (3)$$

式中: $X = (x_1, x_2, \dots, x_{12})$ 为预报的 2012 年逐月降雨量向量; $Y = (y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,12})$ 为历史实测各年逐月降雨量向量; $\|D_i\|$ 为 2012 年预报值与第 i 年观测值向量的欧氏距离, $i = 1 \sim n$, n 为实测降雨年数。

根据最小距离原则,即 $\min \|D_i\|$,选择与预报月降雨量最相似的实测年份,结果为 1978 年。计算预报的逐月降雨量与 1978 年相应月份降雨量的比值,按照该比值对 1978 年各雨量站的逐日降雨量进行缩放,从而获得 2012 年 SWAT 模型所需的各雨量站逐日降雨量预报值。同时,移用 1978 年的气象数据作为 2012 年的 SWAT 模型输入数据,以计算逐日蒸发量。

将上述数据输入率定后的 SWAT 模型,得到 2012 年的月径流预报值,对比实测值计算各月误差,结果亦列于表 6,与实测月径流的对比见图 5。

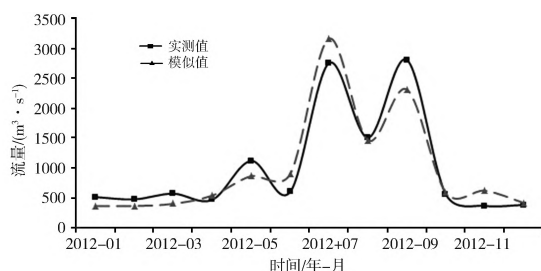


图 5 2012 年月径流预报值与实测值对比

Fig. 5 Comparison of monthly predicted and observed runoff in 2012

中长期径流预报许可误差规定为多年变幅的 10%,计算许可误差与预报误差,结果列于表 6。对比发现,除 1 月、2 月流量较小的月份外,其他月份均在许可误差内,合格率达到 83%,模型整体效果良好。

4.3 预报结果不确定性分析

预报结果的整体效果较好,但预报中仍存在一定误差,主要原因有:(1)降雨预报的误差来源于预报因子的精度及选取的合理性;(2)径流预报不合格的 1 月、2 月绝对误差比汛期的误差小,但预报仍难以满足精度要求,一方面是由于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,另一方面 SWAT 模型对于枯季小流量的模拟精度不足;(3)实测径流 4 月、5 月份存在融雪径流,而模型对融雪过程模拟效果欠佳,有必要改进模型融雪模块对季节性融雪径流的模拟。

5 结论

(1)通过计算月降雨量与 74 项大气环流因子的相关系数,选取通过显著性检验的因子作为降雨预

报因子,建立月降雨与大气环流因子的多元线性回归模型,实现月降雨量的统计预报。在丹江口流域2012年的逐月月降雨量预报结果中,预报值满足精度评定要求的合格率约为83%,表明建立的月雨量预报模型对研究流域具有较好的适用性。

(2)建立了丹江口水库流域的SWAT模型,率定与验证结果表明,对于月径流的模拟具有较高精度。对2012年预报的月降雨,采用相似性分析技术解集成逐日降雨量,作为模型输入得到逐月径流量预报,结果表明,满足精度要求的合格率约为83%,预报效果较好。

参考文献(References):

- [1] 王燕生. 工程水文学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991. (WANG Yan sheng. Engineering Hydrology [M]. Beijing: Water Power Press, 1991. (in Chinese))
- [2] 陈守煜. 中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报, 1997(8): 16-22. (CHEN Shou yu. Theoretical pattern of comprehensive analysis and method for mid and long term hydrology forecasts [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(8): 16-22. (in Chinese))
- [3] 王富强, 霍风霖. 中长期水文预报方法研究综述[J]. 人民黄河, 2010(3): 25-28. (WANG Fu qiang, HUO Feng lin. Review on study of mid and long term hydrological forecasting technique [J]. Yellow River, 2010(3): 25-28. (in Chinese))
- [4] 杨旭, 栾继虹, 冯国章. 中长期水文预报研究评述与展望[J]. 西北农业大学学报, 2000(6): 203-207. (YANG Xu, RUAN Jihong, FENG Guozhang. Discussion and prospect on mid to long term hydrological forecasting [J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 2000(6): 203-207. (in Chinese))
- [5] 张丽霞, 梁新平. 基于单相关系数法的中长期水文预报研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008(3): 49-51. (ZHAN Lixia, LIANG Xin ping. Study on mid to long term hydrological forecasting based on single correlation coefficient [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008(3): 49-51. (in Chinese))
- [6] 许士国, 王富强, 李红霞, 等. 洮儿河镇西站径流长期预报研究[J]. 水文, 2007(5): 86-89. (XU Shir guo, WANG Fu qiang, LI Hong xia. Study on long term runoff forecast at the Zhenxi Station on the Ta'er River [J]. Journal of China Hydrology, 2007(5): 86-89. (in Chinese))
- [7] 白子岩. 模糊模式识别法在中长期预报中的应用[J]. 水利水电技术, 1999(2): 50-51. (BAI Zi yan. Application of fuzzy pattern recognition model on mid to long term forecasting [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999(2): 50-51. (in Chinese))
- [8] 蔡煜东, 姚林声. 径流长期预报的人工神经网络方法[J]. 水科学进展, 1995(1): 61-65. (CAI Yudong, YAO Lisheng. Long Range runoff forecast by Artificial Neural Network [J]. Advances In Water Science, 1995(1): 61-65. (in Chinese))
- [9] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展, 2002(4): 515-520. (WANG Wen sheng, DING Jing, XIANG Honglian. Application and prospect of wavelet analysis in hydrology [J]. Advances In Water Science, 2002(4): 515-520. (in Chinese))
- [10] 赵隼. 灰色系统在瑞丽江长期水文预报中的应用[J]. 云南水力发电, 2007(6): 5-7, 16. (ZHAO Cui. Application of gray systems in the long term hydrological forecasting in Ruili River [J]. Yunnan Water Power, 2007(6): 5-7, 16. (in Chinese))
- [11] 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(6): 681-686. (LIN Jianyi, CHENG Chun tian. Application of support vector machine method to long term runoff forecast [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006(6): 681-686. (in Chinese))
- [12] 徐冬梅, 赵晓慎. 中长期水文预报方法研究综述[J]. 水利科技与经济, 2010(1): 1-7. (XU Dong mei, ZHAO Xiaosheng. Review on study of mid and long term hydrological forecasting technique [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010(1): 1-7. (in Chinese))
- [13] 冉笃奎, 李敏, 武晟, 等. 丹江口水库中长期径流量的多模型预报结果分析及综合研究[J]. 水利学报, 2010(9): 1069-1073. (RAN Dukuai, LI Ming, WU Sheng, et al. Research on multi model forecasts in mid long term runoff in Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010(9): 1069-1073. (in Chinese))
- [14] 徐静, 叶爱中, 毛玉娜, 等. 水文集合预报研究与应用综述[J]. 南水北调与水利科技, 2014(1): 82-87. (XU Jing, YE Aizhong, MAO Yunan, et al. Review of research and application of hydrological ensemble forecast [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(1): 82-87. (in Chinese))
- [15] 郝芳华, 程红光, 杨胜天. 非点源污染模型——理论方法与应用[M]. 北京: 中国科学环境出版社, 2006. (HAO Fanghua, CHENG Hongguang, YANG Sheng tian. Non point source pollution model [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006. (in Chinese))
- [16] 李燕, 梁忠民, 赵卫民, 等. 基于SWAT模型的农业干旱评价方法与应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014(1): 7-11. (LI Yan, LIANG Zhongming, ZHAO Weiming, et al. Evaluation method and its application of agricultural drought based on SWAT model [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014(1): 7-11. (in Chinese))
- [17] R Jayakrishnan, R Srinivasan, C Santhi, et al. Advances in the application of the SWAT model for water resources management [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 749-762.
- [18] J G Arnold, R Srinivasan, R S Mutiah, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development [J]. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [19] Chanasyk D S, Mapfumo E, Willms W. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59: 137-153.
- [20] F Bouraoui, S Benabdallah, A Jrad, et al. Application of the SWAT model on the Medjerda River Basin (Tunisia) [J]. Physics and Chemistry of Earth, 2005, 30: 497-507.
- [21] 庞靖鹏, 徐宗学, 刘昌明. SWAT模型研究应用进展[J]. 水土保持研究, 2007, 03: 31-35. (PANG Jing peng, XU Zong xue, LIU Chang ming. SWAT model application: State of the Art Review [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 03: 31-35. (in Chinese))
- [22] 孙瑞, 张雪芹. 基于SWAT模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010(3): 28-32, 47. (SUN Rui, ZHANG Xue qing. Progress in application of watershed runoff simulation based on SWAT [J]. Journal of China Hydrology, 2010(3): 28-32, 47. (in Chinese))

(上转第24页)

- cialist rural areas in Northwest China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010, (2): 35-37. (in Chinese)
- [19] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 2012. (QIAN Hui, MA Zhi yuan, LI Pei yue. Hydrogeochemistry[M]. the second edition. Beijing: Geological Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [20] Bundschuh J, Sracek O. Hydrogeochemistry principles for geochemical modeling. In: Geochemical Modeling of Groundwater, Vadose and Geothermal Systems, edited by J. Bundschuh and M. Zilberbrand. CRC Press, 2012.
- [21] 陈宗宇, 齐继祥, 张兆吉, 等. 北方典型盆地同位素水文地质学方法应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (CHEN Zongyu, QI Ji xiang, ZHANG Zhaoji, et al. Application of Isotope Hydrogeology in Typical Northern Basins of China[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [22] 夏雨波, 谢海澜, 王冰, 等. 地下水循环演化模式及研究方法综述[J]. 地质调查研究, 2012, 35(4): 299-303. (XIA Yubo, XIE hailan, WANG Bing, et al. Review on regional groundwater cycle and evolution [J]. Geological Survey and Research, 2012, 35(4): 299-303. (in Chinese))
- [23] 周训, 金晓媚, 梁四海, 等. 地下水科学专论[M]. 北京: 地质出版社, 2010. (ZHOU Xun, JIN Xiaomei, LIANG Sihai, et al. [M]. Groundwater Science Monograph[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010. (in Chinese))
- [24] 李培月. 非稳定流抽水试验确定越流承压含水层水文地质参数方法对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2011. (LI Pei yue. Comparative study on the methods for determining hydrogeological parameters in leaky confined aquifers by transient flow pumping test [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese))
- [25] 贾艳红, 赵传燕, 牛博. RS 与 GIS 技术在地下水研究中的应用[J]. 地下水, 2011, 33(1): 1-3. (JIA Yan hong, ZHAO Chuanyan, NIU Bo. Application of RS and GIS technology in the study of groundwater[J]. Ground water, 2011, 33(1): 1-3. (in Chinese))
- [26] 吴健华, 李培月, 钱会. 基于 Holt 指数平滑模型的地下水水质预测[J]. 工程勘察, 2013(10): 38-41, 38. (WU Jianhua, LI Pei yue, QIAN Hui. Groundwater quality prediction based on Holt exponential smoothing model[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013(10): 38-41, 38. (in Chinese))
- [27] Furlong B V, Riley M S, Herbert A W, et al. Using regional groundwater flow models for prediction of regional wellwater quality distributions[J]. Journal of Hydrology, 2011, 398: 1-16.
- [28] 张春志. MODFLOW 在地下水水源地水质预测中的应用[J]. 地下水, 2007, 29(1): 61-64. (ZHANG Chunzhi. Application of MODFLOW in groundwater quality prediction of water source site[J]. Ground water, 2007, 29(1): 61-64. (in Chinese))
- [29] Mugunthan P, McDonough M K, Dzombak D A. Geochemical approach to estimate the quality of water entering abandoned underground coalmines[J]. Environmental Geology, 2004, 45: 769-780.
- [30] 袁志梅, 徐慧珍, 叶晓宾. 中长期地下水水质预报的准确性探讨—以西安市为例[J]. 水文地质工程地质, 1996(5): 8-10. (YUAN Zhimei, XU Hui zhen, YE Xiaobin. Discussion on the accuracy of mid long term groundwater quality prediction: case study of Xi'an [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1996(5): 8-10. (in Chinese))
- [31] 姜纪沂. 地下水环境健康理论与评价体系的研究及应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2007. (JIANG Ji yi. Study and application of theory and evaluation architecture of groundwater environment health [D]. Jilin: Jilin University, 2007. (in Chinese))

(下接第 101 页)

- [23] 陈理想, 梁忠民, 朱金峰. SWAT 模型在黄鸭河流域径流模拟中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2011(10): 8-11. (CHEN Li xiang, LIANG Zhong ming, ZHU Jing feng. Application of SWAT model to runoff simulation in Huangyahe Basin[J]. Water Resource and Power, 2011(10): 8-11. (in Chinese))
- [24] 林凯荣, 魏新平, 黄淑娟, 等. SWAT 模型在东江流域的应用研究[J]. 水文, 2013(4): 32-36. (LIN Kai rong, WEI Xin ping, HUANG Shu xian. Application of SWAT model in Dongjiang River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2013(4): 32-36. (in Chinese))
- [25] 夏智宏, 周月华, 许红梅. 基于 SWAT 模型的汉江流域径流模拟[J]. 气象, 2009(9): 59-67, 132. (XIA Zhi hong, ZHOU Yue hua, XU Hong mei. Runoff simulation in hanjiang river basin based on SWAT model [J]. Meteorological Monthly, 2009(9): 59-67, 132. (in Chinese))
- [26] 李磊, 董晓华, 喻丹, 等. 基于 SWAT 模型的清江流域径流模拟研究[J]. 人民长江, 2013(22): 25-29, 42. (LI Lei, DONG Xiaohua, YU Dan, et al. Study on runoff simulations on Qingjiang River Basin by SWAT model [J]. Yangtze River, 2013(22): 25-29, 42. (in Chinese))