

基于径流系数的流域产流模型建立及检验

胡彩虹¹,李世豪¹,张文华²,陈曦²,王金星³,吕林英¹

(1.郑州大学水利与环境学院,河南 郑州 450001;

2.中国科学研究院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011;3.水利部水文局,北京 100053)

摘要:降雨径流关系因其原理简单实用在实际洪水预报中应用广泛,但一直以来是经验推算。在阐述降雨径流关系的基础上,构建了基于径流系数的流域产流模型,并确定了径流系数的计算公式。将该模型应用在伊河流域的东湾站、沙颍河流域的官寨站以及灌河鲢鱼山站等控制流域的径流预报中,结果表明,模型在3个流域的预报合格率均达到了乙级以上作业预报要求。该模型简单实用,计算步骤可行,并易于程序化,可进一步推广应用。

关键词:降雨径流关系;产流;应用检验

中图分类号:P338+.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0008-06

水文预报是水文科学的重要组成部分。水文预报就是根据已知的信息(测验或分析的信息)对未来一定时期内水文要素的状态做出定量或定性的预测^[1]。在实际工作中,特别是防洪减灾中,洪水预报是调度决策的重要依据,关系着人民生命财产的安全和经济社会的稳定发展^[2-4]。当前,在水文作业预报中,所采用的水文预报模型主要有中国自行研制的新安江模型、双超产流模型、河北雨洪模型、姜湾径流模型、双衰减曲线模型等,从国外引进的模型主要有水箱、Sacramento、NAM模型和SMAR等模型,以及改进的国外模型,如连续API模型、SCLS模型等^[2-6]。长期的应用实践表明,湿润地区的模型应用精度较高,干旱地区精度较差。传统的API模型和新安江模型能够适用于中国大部分地区,特别是湿润和半湿润地区,在实时作业预报中一般都能够取得令人满意的精度和预报效果。以蓄满产流概念为机理的降雨径流关系($P\sim R$)图由于计算方法简单、统一、客观^[7-8],同时,关系图是根据次降雨与次径流的资料作出来的,反映了产流的变化过程^[5],在产流预报实践中,应用和研究甚广^[9-14]。降雨-径流经验相关方法是研究降雨-径流问题的一种常规经验方法,它是在成因分析与统计相结合的基础上,用每次降雨

的流域平均雨量和相应产生的径流量,以及影响它们的主要因素建立起来的一种定量相关图,经验方法是水文生产单位最常用、最易解决实际问题的方法^[15-16]。本研究是在降雨径流关系成因分析和统计学方法相结合的基础上,挖掘大量的实测降雨径流数据内涵信息,提出了基于径流系数的流域产流模型,并选择黄河和淮河流域3个子流域进行应用检验,采用相对误差和绝对误差进行评定,期望能得到进一步的推广应用。

1 基于径流系数的产流模型建立

1.1 降雨径流关系

在一般情况下,流域非饱和带的厚度和蒸散发量在各处是不等的,因此,各处的缺水量也不相等。下垫面条件的复杂性致使流域产流不均匀,在一次降雨过程中,就会出现一些地区先产流,另一些地方后产流甚至不产流。因此,决定产流量的因素除了降雨量之外是非饱和带缺水量在流域面上的分布情况,这种分布可以用流域蓄水容量分配曲线来表示(见图1)。从图1(a)可以看出, $P\sim P_c\sim R$ 关系即表示为径流深是关于降雨量和土壤含水量的函数,即随着降雨量 P 的增大,产流面积 A/A_c 增大,所产生的径流深也随之增大;而

收稿日期:2015-07-08

基金项目:国家重点研发计划水资源高效利用重点专项(2016YFC0402402);中国气象局/河南省农业气象保障与应用重点开放实验室开放研究基金项目(AMF201304)

作者简介:胡彩虹(1968-),女,山西平遥人,博士,教授,主要从事水文学及水资源方面的教学和科研工作。E-mail: hucaihong@zzu.edu.cn

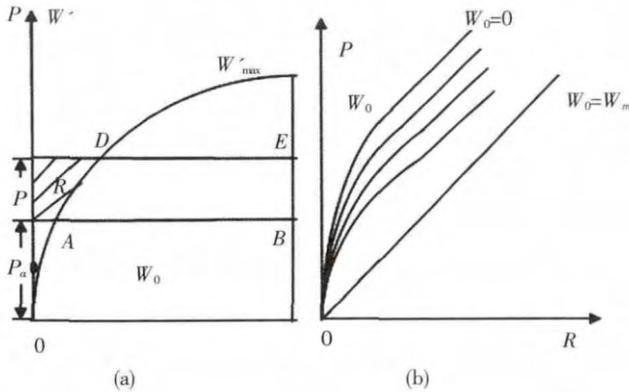


图1 一般情况下的降雨径流关系
Fig.1 The relation of rainfall and runoff

当 $A/AC=dR/dP=1$, 即 dR/dP 随着降雨量 P 的增大而增大, 最终增至 dR/dP 等于 1, 而在图 1(b) 中, $W_0=0$ 时的 $P\sim R$ 关系曲线的斜率为 dR/dP 的倒数, 当降雨量 P 增大, 斜率 dP/dR 随之减小, 则 dR/dP 随之增大; 当 $dP/dR=1$ 时, $dR=dP$, $P\sim R$ 的关系为一条 45° 直线, 也即 $W_0=0$ 的 $P\sim R$ 关系的斜率随着降雨量的增大而减小, 最终减至 1。 $W_0=0$ 的直线方程显然为 $P-R=W_m$, 即 $P\sim R$ 线在纵轴的截距为 W_m 。 在一般情况下, 流域起始蓄水量在零与流域蓄水容量之间, 即 $W_m>W_0>0$ 。 图 1(a) 中的阴影部分面积即为本次降雨所产生的径流量, ABED 所包围的面积为本次降雨的损失量。 不同的降雨量 P 值有不同的径流量 R 值, 即得到以流域起始蓄水量 W_0 为参数的 $P\sim R$ 关系曲线, 不同的 W_0 值对应一条不同的 $P\sim R$ 关系线。 从图 1 中可以看出径流深 R 即为降雨量和前期土壤含水量的函数, 且其为指数型关系曲线, 因此, 可表达为:

$$R = P e^{-\beta \frac{(W_m - W_0)}{P}} \quad (1)$$

式中: R 为径流深(mm); P 为降雨量(mm); W_m 为流域土壤蓄水容量(mm); W_0 为起始土壤含水量(mm); β 为参数。

(1)式即可表达为:

$$\alpha = \frac{R}{P} = e^{-\beta \frac{(W_m - W_0)}{P}} \quad (2)$$

该式即为径流系数 α , 为某一时段内的平均降雨量与所产生的径流深 R 的比值。(1)式表述了径流深是降雨量和径流系数的函数, 而径流系数是有关土壤缺水量和降雨量的函数。 因此, 只要知道 P 、 W_m 、 W_0 和

β 值即可推求由该场洪水的径流系数 α 和径流深 R 。

1.2 参数推求

(1)前期影响雨量 P_a 与流域蓄水容量 W_m 的推求

前期影响雨量 P_a 用经验公式计算, 即:

$$P_{at} = K P_{t-1} + K^2 P_{t-2} + K^3 P_{t-3} + \dots + K^n (P_{at-n} + P_{t-n}) \quad (3)$$

式中: P_{at} 为第 t 日上午 8 时的前期影响雨量(mm); n 为影响本次径流的前期降雨天数; K 为折算系数, 一般根据蒸发量确定。

若第 i 天的降雨产生了径流, 则该天的前期影响雨量 P_a 即为前天的前期影响雨量加上本次降雨量 P 减去本次降雨量产生径流量 R 之后的值。 若倒推一个月, 且 $K < 1$, 若 $K = 0.9$, 则 $K^{30} = 0.042$, 因此, 对于向前一个月推求, 若一个月前有一场大洪水, 使土壤含水量蓄满, 则 $P_{at-1} = W_m$, 否则 $P_{at-1} = 0$ 。

式(3)中折算系数 K 是蒸发的一个折算过程, 表达为:

$$K = 1 - \frac{E_m}{W_m} \quad (4)$$

式中: E_m 为流域蒸散发能力 (mm); W_m 流域最大蓄水容量(mm)。

W_m 可由多场洪水逐次逼近^[16]计算推求, 计算中选取能使流域土壤含水量达到饱和且产生较大洪水过程的降雨洪水场次, 其推求过程为:

令 $W_{m0} = I_m$, 其中损失量 $I_m = P - R$, P 为此次洪水的降雨总量, R 为由此次降雨所产生的径流总量, W_m 的计算过程为:

$$K_j = 1 - \frac{k_e \times E_0}{W_{m,j}} \quad (5)$$

$$W_{0,j} = \sum_0^n P_i \times K_j^i \quad (6)$$

$$W_{m,j} = W_{m,j-1} + W_{0,j-1} \quad (7)$$

式中: k_e 为流域蒸散发能力 E_m 与水面蒸发 E_0 的比值, 即 $k_e = E_0 / E_m$, 在一个流域是一个固定值; P_i 为此次洪水前 i 天的有效降雨量; i 为次幂; j 为迭代次数; W_{m0} 为第一次迭代假设的初值。

经过多次迭代, W_m 趋于一个稳定值, 则该值即为流域最大蓄水容量。

(2)参数 β 的推求

径流深的计算关键是确定参数 β , 对式(2)取对数得:

$$\beta = \frac{P(\ln P - \ln R)}{W_m - W_0} \quad (8)$$

即可根据历史洪水推求出相应的 β 值。

(3) 径流深推求步骤

径流深推求步骤: ①首先依据流域洪水过程确定退水曲线表达式, 根据退水曲线确定分割出场次洪水过程; ②采用逐次逼近法(式(5)~(7))确定流域最大蓄水容量 W_m ; ③采用式(4)确定折算系数 K , 并依据式(3)计算每场洪水的前期影响雨量 $P_n(W_0)$; ④根据实测时段降雨量、蒸发量及所推求的前期影响雨量和流域蓄水容量根据式(1)推求径流深 $R(\text{mm})$ 。

2 应用检验

2.1 流域基本概况

为了检验模型的实际应用情况, 选择黄河流域支流伊河流域的东湾水文站和淮河流域沙颍河主要支流澧河上游官寨水文站以及灌河鲇鱼山水文站控制流域作为典型实例进行应用, 流域的有关水文特征及其资料情况见表1。

表1 流域特征及水文情况
Table1 The watershed characteristics and hydrological condition

水文站名称	控制面积/km ²	所属水系	气候特征	资料情况
东湾	2 543	黄河	半干旱半湿润地区, 流域内降水量随季节变化大, 冬春季寒冷少雨, 夏季炎热多雨, 多年平均降水量约 700mm, 降水量占全年的 55.7%。	1975~1998 年 50 场洪水
官寨	1 169	淮河	半湿润地区, 多年平均降雨量为 885mm, 年际变化较大, 降雨年内分配不均。	1974~2006 年的 53 场洪水
鲇鱼山	924	淮河	夏季炎热多雨, 冬季寒冷干燥。区内雨量充沛, 多年平均降雨量为 1 200mm, 降雨主要集中在汛期的 6~9 月, 占全年降雨量的 60% 以上。	1975~1999 年 20 场洪水

2.2 径流预报方案评定

采用预报合格率和许可误差进行评定, 径流深预报许可误差中, 径流深预报以实测值的 20% 作为许可误差, 当该值大于 20mm 时, 取 20mm; 当小于 3mm 时, 取 3mm^[17]。合格率即为预报合格次数与预报总次数的比值:

$$Q_R = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (9)$$

式中: Q_R 为合格率; n 为预报合格次数; m 为预报总次数。

2.3 产流模型建立及检验

根据各站点洪水的退水过程, 确定各流域水文站的退水公式, 选定东湾站 50 场洪水、官寨站 53 场和鲇鱼山站 20 场洪水作为验证所建立产流模型的基础资料。

(1) W_m 的确定

采用逐次逼近法式(7)~(9)计算确定 W_m , 东湾站逐次逼近法计算 W_m 的过程见表2(其它流域略), 分别计算得到东湾、栾川和官寨站蓄水容量值分别为 $W_m=86\text{mm}$ (东湾)、 $W_m=99.8\text{mm}$ (官寨)和 $W_m=112\text{mm}$ (鲇鱼山)。根据流域内蒸散发量值 E_m 与流域蓄水容量值 W_m 求得 K 值, 分别求得东湾、官寨及鲇鱼山控制站 K_e 值分别为 0.93、0.97 和 0.96。

表2 东湾站 W_m 计算过程表

Table2 The calculation of W_m for the Dongwan station

洪号	P/mm	R/mm	I_n/mm	W_m/mm
800630	74.85	50.17	24.67	93.81
880808	68.91	33.98	34.93	83.46
880813	47.25	29.12	18.14	86.32
880819	18.57	14.41	4.16	84.23
890710	83.70	24.55	59.14	85.29
900720	55.25	17.07	38.18	82.30
940702	51.71	20.58	31.12	87.33
950724	48.30	12.31	35.99	90.89
960802	129.75	113.74	16.01	86.30
960810	25.60	14.04	11.56	81.41
960917	68.79	54.95	13.85	82.22

(2) β 值的确定

依据历史降雨径流洪水数据采用(8)式计算 β 值, 计算结果点绘在图2, 可见 β 值主要在 1~2 之间, 且随着降雨量的增加, β 值趋于 1~1.5 之间, β 值变动较小, β 值平均值为 1.5142, 偏差为 0.0552, 因此, 在进行径流深计算时 β 值采用定值, 即 $\beta=1.5142$, 其径流系数计算表达式即为:

$$\alpha = e^{-\frac{1.5142(W_m - W_0)}{P}} \quad (10)$$

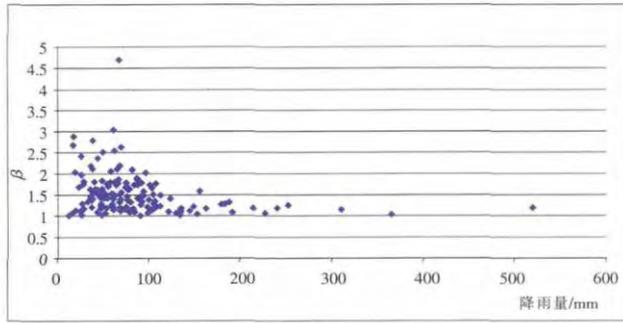


图2 研究区域的β分布图
Fig.2 The distribution of β in research regions

可见,随着降雨量和初始土壤含水量的不同,径流系数也在变化,径流深也随着降雨量和初始土壤含水量的变化而变化,反映了径流深是降雨量和土壤缺水量的函数。

(3)径流预报检验

东湾站部分场次径流深计算结果见表3,可见,50场洪水产流计算合格率为80%,径流深相对误差>20%的有14场,其中有4场径流深误差小于3mm,36场洪水径流深相对误差控制在20%以内,绝对误差绝对值大于10mm的洪水场次有3场,分别是750804、790618和820729,场次洪水实测降雨量和径流深分别是310mm、232.53mm;69.41mm、6.4mm

和214mm、151.34mm。3个流域的径流深预测结果统计见表4,图3为3个区域径流预测值和实测值对比图,可以看出,东湾站50场、官寨站53场洪水和鲇鱼山站20场洪水点据基本在45°线两侧,实测径流深与预测径流深的相关系数分别为0.994、0.995和0.982。东湾站预测径流深合格的洪水共40场,合格率为80%;官寨站合格的洪水有45场,合格率为84.91%;鲇鱼山站合格的洪水有17场,合格率为80.79%;误差范围分别在-15.68~10.81mm、-18.61~18.88mm和-38.1~73.89mm之间(见图4),在东湾站和官寨站相对误差均在±19mm范围内,只有鲇鱼山站有两场洪水径流深预报误差超过±20mm,分别是890805和860715,误差分别为38.10mm和-73.89mm,其中860715场次洪水降水量为510.61mm,实测径流深为355.56mm,前期影响雨量 $P_a=53.63mm$,土壤缺水量58.37mm,计算径流深为429.45mm,其绝对误差为20.8%。

综合以上3个流域的产流计算结果,产流计算满足乙级以上预报要求,且3个流域分别属于我国湿润和半湿润过渡区的黄河和淮河流域,年降雨量在700~1200mm之间,说明该产流模型适应能力强,且不需要进行参数率定,计算过程简单,因此,该产流计算模型可以推广到其它流域。

表3 东湾站产流计算结果统计表
Table3 The calculation results of the runoff at the Dongwan station

序号	洪号	P/mm	R(实测)/mm	P_a /mm	α	R(预测)/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	合格与否(√合格,×不合格)
1	750707	49.31	5.24	39	0.24	11.64	6.40	122.30	×
2	750804	310	232.53	15.51	0.71	219.66	-12.87	-5.53	√
3	750919	99.6	49.75	36.95	0.47	47.25	-2.51	-5.04	√
4	750926	98.25	85.65	70.93	0.79	77.89	-7.76	-9.06	√
5	751010	18.04	3.51	53.97	0.07	1.23	-2.29	-65.09	√
6	760820	16.32	1.12	40.97	0.02	0.25	-0.87	-77.69	√
7	760831	35.16	15.53	64.65	0.40	14.02	-1.51	-9.70	√
8	770716	27.38	7.18	66.21	0.33	9.17	1.99	27.73	√
.....
46	980803	47.06	32.861	77.558	0.76	35.87	3.01	9.15	√
47	980806	31.85	17.292	81.754	0.82	26.02	8.73	50.49	×
48	980809	24	18.897	79.427	0.66	15.86	-3.04	-16.09	√
49	980812	69.73	49.863	75.219	0.79	55.18	5.32	10.67	√
50	980825	46.91	21.825	60.449	0.44	20.56	-1.26	-5.78	√

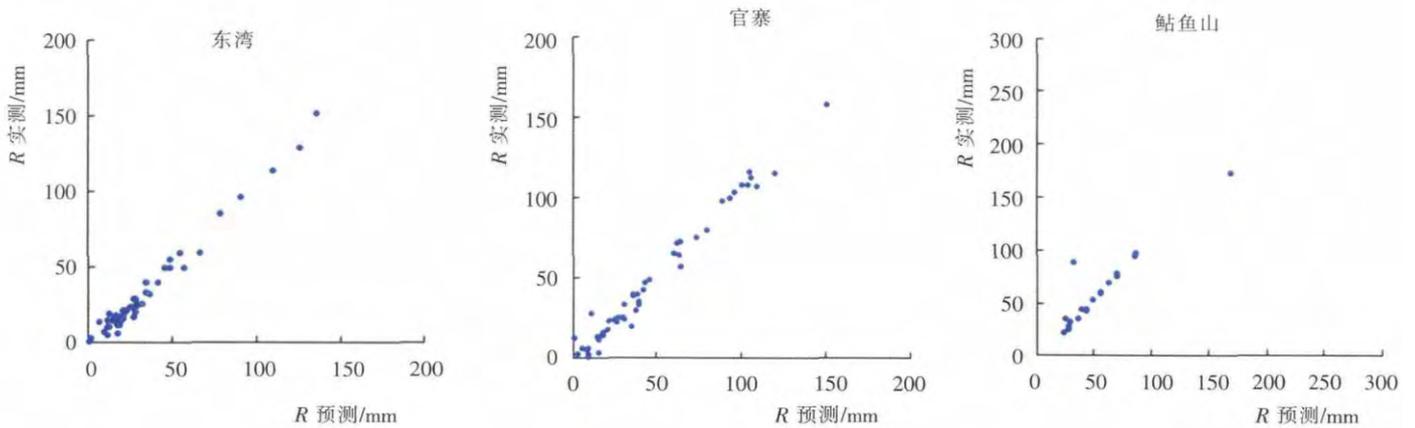


图3 3个站实测和计算径流深对比图
Fig.3 The comparison between observed and simulated runoff at the stations Dongwan, Nianyushan and Guanzhai

表4 东湾站、鲇鱼山和官寨站预测结果统计表
Table4 The runoff statistics at the stations of Dongwan, Nianyushan and Guanzhai

控制站	绝对误差值范围/mm	相对误差值范围/%	合格率/%
东湾	-15.68~10.81	-77.69~122.30	80.00
官寨	-18.61~18.88	-31.94~15.87	84.91
鲇鱼山	-38.10~73.89	-64.97~20.75	85.00

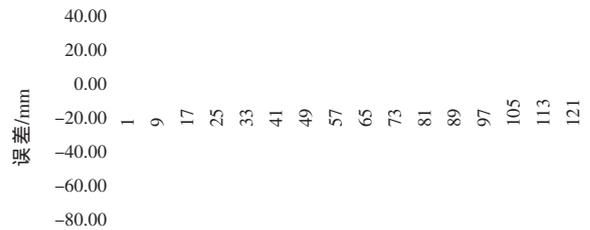


图4 3个控制站径流预报误差分布图
Fig.4 The distribution of the runoff forecasting error for the 3 stations

3 结语

根据降雨径流关系进行产流推求由于其简洁实用广泛应用在生产实际之中, 本文在分析降雨径流形成关系基础上, 针对降雨径流关系进行分析, 提出了一套公式化的降雨径流关系产流模型及其径流深推求步骤, 并选取了伊河的东湾站、沙颖河流域的官寨站以及灌河的鲇鱼山站控制的3个流域进行了分析检验, 得到如下结论:

(1) 基于径流系数构建的产流模型及其推求步骤, 模型简单, 步骤简便, 且便于程序化, 模型中参数 β 的确定值可行。

(2) 将所提出的基于径流系数的产流计算模型应用在伊河东湾站(50场)、沙颖河官寨站(53场)以及灌河鲇鱼山站(20场)洪水的产流计算中, 应用结果表明, 3个水文控制站的径流深预报合格率达到80%以上, 3个流域达到了径流深预报的乙级以上要求, 说明建模思路合理, 模型具有较大的适用性。

基于径流系数的产流计算模型是在总结降雨径流关系的基础上建立起来的, 模型在3个区域得到了较

高精度的应用检验, 模型可进一步推广应用。

参考文献:

- [1] 中国大百科全书编辑委员会. 中国大百科全书: 大气科学、海洋科学、水文科学卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1987. (Editorial Committee of Chinese Encyclopedia. Chinese Encyclopedia: Atmospheric Science, Oceanography Science, Hydrologic Science[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1987. (in Chinese))
- [2] 张建云. 中国水文预报技术发展的回顾与思考 [J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 435-443. (ZHANG Jianyun. Review and reflection on China's hydrological forecasting techniques [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 435-443. (in Chinese))
- [3] 刘志雨. 我国洪水预报技术研究进展与展望 [J]. 中国防汛抗旱, 2009, 5: 13-16. (LIU Zhiyu. Flood forecasting technology research progress and prospect in our country [J]. China Flood & Drought Management, 2009, 5: 13-16. (in Chinese))
- [4] 李琪. 全国水文预报技术竞赛流域水文模型分析 [J]. 水科学进展, 1998, (2): 187-195. (LI Qi. Analysis and discussion related to the hydrological watershed model used in the first hydrological forecasting technology competition of China [J]. Advances in Water Science, 1998, (2): 187-195. (in Chinese))
- [5] 芮孝芳. 流域水文模型精度验证及进一步发展模型的建议 [J]. 水文, 1999, (S1): 20-28. (RUI Xiaofang. The accuracy test of hydrological watershed model and some suggestions for further development [J]. Hydrology, 1999, (S1): 20-28. (in Chinese))

- [6] 文康,乐嘉祥. 提高水文预报技术水平,建立有中国特色的水文预报系统[J]. 水文, 1999, (S1):10-16. (WEN Kang, YUE Jiaxiang. Improving hydrological forecasting techniques, developing the hydrological forecasting systems with Chinese characteristics [J]. Hydrology, 1999, (S1):10-16. (in Chinese))
- [7] 赵人俊,庄一铭,刘新仁,等. 中国湿润地区降雨径流计算方法的探讨[J]. 广西水利电力科技, 1975,(S1):20-33. (ZHAO Renjun, ZHUANG Yiming, LIU Xinren, et al. The method discussed of rainfall and runoff calculation in humid regions [J]. Guangxi Water Conservancy Power Technology, 1975,(S1):20-33. (in Chinese))
- [8] 喻杉,纪昌明,赵璧奎,等.降雨径流相关模型在丹江口水库洪水预报中的应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2011,9:145-148. (YU Shan, JI Changming, ZHAO Bikui et al. Research on rainfall-runoff correlation model in application of short-term flood forecast for the Danjiangkou reservoir [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011,9:145-148. (in Chinese))
- [9] 郭清雅. 无量纲产汇流法在洪水预报中的应用 [J]. 水文, 1996,(5): 27-29. (GUO Qingya. The application of dimensionless runoff method in flood forecast[J]. Hydrology, 1996,(5):27-29. (in Chinese))
- [10] 胡春歧. 对现行 Pa 两层计算法的改进 [J]. 水文,1996,(2):10-12. (HU Chunqi. The improvement of Pa calculation [J]. Hydrology, 1996,(2):10-12. (in Chinese))
- [11] 张恭肃,王成明.对 API 模型的改进[J].水文,1996,4:20-25. (ZHANG Gongsu, WANG Chengming. The improvement of API model[J]. Hydrology, 1996,4:20-25. (in Chinese))
- [12] 李亚娇,李怀恩,李家科. 一种利用蓄满产流模型绘制降雨径流相关图的方法[J]. 西北水力发电, 2003,19(2):5-7. (LI Yajiao, LI Huai'en, LI Jiake. A method for drawing P~Pa~R correlation diagram using the storage model[J]. Journal of Northwest Hydroelectric Power, 2003,19 (2):5-7. (in Chinese))
- [13] 周洋洋,李致家,姚成,等. 基于 SCE-UA 算法的 API 模型应用研究[J]. 水力发电, 2014,40(4):13-16. (ZHOU Yangyang, LI Zhijia, YAO Cheng, et al. Study on the application of API model based on SCE-UA algorithm[J]. Water Power, 2014,40(4):13-16. (in Chinese))
- [14] 刘国富,周涛,楼其禄. 连续 API 水文模型的研究及应用[J]. 大坝与安全, 2008,2:4-8. (LIU Guofu, ZHOU Tao, LOU Qilu. Research and application of continuous API hydrological model [J]. Dam & Safety, 2008,2:4-8. (in Chinese))
- [15] 李致家,于莎莎,李巧玲,等. 降雨-径流关系的区域规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012,40(6):597-604. (LI Zhijia, YU Shasha, LI Qiaoling, et al. Regional pattern of rainfall-runoff relationship[J]. Journal of Hohai University, 2012,40(6):597-604. (in Chinese))
- [16] 张文华,郭生练. 流域降雨径流理论与方法[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2008:66-75. (ZHANG Wenhua, GUO Shenglian. Theories and Methods of Watershed Rainfall-runoff Process [M]. Wuhan: Hubei Science & Technology Press, 2008:66-75. (in Chinese))
- [17] GB/T22482-2008, 水文情报预报规范[S]. (GB/T22482-2008, Standard for Hydrological Information and Hydrological Forecasting [S]. (in Chinese))

Establishing and Testing Runoff Model Based on Runoff Coefficient

HU Caihong¹, LI Shihao¹, ZHANG Wenhua², CHEN Xi², WANG Jinxing³, LV Linying¹

(1. College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

3. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China)

Abstract: Based on the analysis of relation between rainfall and runoff, this study built a watershed runoff yield model based on runoff coefficient and determined the calculation formula of runoff coefficient. The model was applied in forecasting the runoff at the Dongwan station in the Yihe River Basin, Guanzhai station in the Shayinghe River Basin and Nianyushan station in the Guanhe River Basin. The results show that the forecasts in the 3 basins have met the eligibility requirements.

Key words: rainfall-runoff relationship; runoff yield; application test