

卢珊,李建科,张宏芳,等.安康及石泉水库入库流量变化特征及汛期预测[J].陕西气象,2019(2):28-33.

文章编号:1006-4354(2019)02-0028-06

安康及石泉水库入库流量变化特征及汛期预测

卢珊,李建科,张宏芳,浩宇,张曦

(陕西省气象服务中心,西安 710014)

摘要:利用安康及石泉水库 2000—2011 年逐日入库流量及对应时段安康及石泉流域观测站逐日降水资料,分析了安康及石泉水库入库流量的变化特征及其与流域面雨量的关系。结果发现,安康及石泉入库流量主要集中在 7 到 10 月,极端入库流量在 7—9 月的出现频率最大;入库流量变化与其流域面雨量关系密切,其中 6—10 月,逐日入库流量与面雨量呈显著正相关;随着面雨量的增长,入库流量呈阶段性增长趋势,安康水库入库流量分别在流域面雨量达到 20 mm 和 40 mm 时显著增加,石泉水库入库流量则分别在流域面雨量达到 15 mm 和 30 mm 时大幅增加;建立了引入降水累积效应的汛期安康及石泉水库入库流量预测模型,经检验表明模型能较好地模拟入库流量的实际变化,对电力部门汛期水量调度有参考价值。

关键词:入库流量;面雨量;预测模型

中图分类号:TV697;P456.3

文献标识码:A

入库流量的大小不仅对水库防洪度汛方案的编制、水库调度图的编制及电站水位的控制有决定性作用,还对以水发电的电站的发电量及经济效益有至关重要的影响,因此是水库调度人员最为关注的的数据之一^[1-3]。近年来,气象及水文方面的专家学者就入库流量的变化特征及其预报预测做了很多的研究工作,从气候变化的角度来看,入库流量的丰寡与汛期气候背景、强降水时空分布及走向存在较大关系,主要表现在对流域降水量、平均最高气温及最低气温的响应显著,且入库流量对降水变化的响应比对气温变化的响应更为明显^[4-8]。河流来水量除受天气变化影响外,还受下垫面因素影响,针对入库流量的预测方法众多^[9-12]。杨延华等^[13]利用 hadlay 气候预测与研究中心的区域气候模式系统 PRECIS,给出了龙羊峡未来 30 年的秋季入库量变化趋势。胡兴林^[14]根据黄河上游唐乃亥水文站以上流域下垫面条件与产汇流特性,将其概化为以降雨量为输入、径流量为输出的单孔出流线性水箱,并用于龙

羊峡水库汛期旬平均入库流量的预报中。张芳珠等^[15]采用超渗产流与蓄满产流相结合的产流模式、纳希瞬时单位线单元汇流模型以及马斯京根多河段连续流量演算的河道汇流模型,研究探讨了故县水库入库流量及水量的预报方法。刘晓阳等^[16]运用雷达和雨量计联合估测了梅山水库集水区的降水分布,并应用降水径流模型,对 1998、1999 年梅山水库入库流量进行了模拟。周少成^[17]利用 6 月份北半球 500 hPa 平均高度的偏差图过滤相似,预报丹江口水库秋季各月平均入库流量。

安康水库及石泉水库分别位于汉江上游的安康市汉滨区及石泉县境内,相距 170 km,不仅在西北和陕西电网中扮演着重要角色,也在防汛抗旱工作中发挥了积极作用。近些年,随着水文气象数据的积累,使得进一步研究及掌握安康及石泉水库入库流量变化的基本规律成为可能。本文利用安康及石泉水库 2000—2011 年逐日平均入库流量及流域观测站降水资料,重点分析入库流

收稿日期:2018-08-09

作者简介:卢珊(1985—),女,陕西石泉人,在读博士研究生,高工,从事专业气象预报服务工作。

基金项目:陕西省气象局青年科研基金(2017Y-9)

量与流域面雨量的关系,同时考虑持续强降水天气中的降水累积效应,对两地汛期入库流量进行预测,以期为水库制定科学的水量调度计划,为创造更好的经济效益和社会效益提供参考。

1 资料与方法

所用入库流量资料为安康及石泉水库 2000—2011 年逐日入库流量监测值,气象资料为安康及石泉流域内宁强、留坝、勉县、南郑、汉中、城固、洋县、西乡、镇巴、佛坪、宁陕、石泉、汉阴、紫阳、安康、岚皋、留坝、太白共计 18 站的逐日降水资料。文中流域面雨量采用算数平均法计算,分析入库流量与降水量的关系时主要采用相关分析及回归分析等统计方法。

2 安康及石泉入库流量特征

2.1 入库流量年变化趋势

安康及石泉水库 2000—2011 年平均入库流量分别为 $199.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $97.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,石泉水库由于规模较小,入库流量远远小于安康水库。观察近 12 a 入库流量逐年变化曲线可见,安康及石泉水库的变化趋势基本一致,最大年入库流量出现在 2011 年,安康及石泉水库入库流量分别为 $324.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 及 $183.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,是多年平均的 1.6 倍和 1.9 倍,最小年入库流量出现在 2002 年,安康及石泉水库入库流量分别为 $117.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $56.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,仅为多年平均水平的 1/2 左右(图 1)。另外,从 2000 年到 2011 年,两地的年入库流量呈现出较明显的线性增长趋势,且均通过了 95% 的显著性检验,安康及石泉入库流量的平均增长速度分别达到 $10.0 \times 10^3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 和 $7.1 \times 10^3 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。

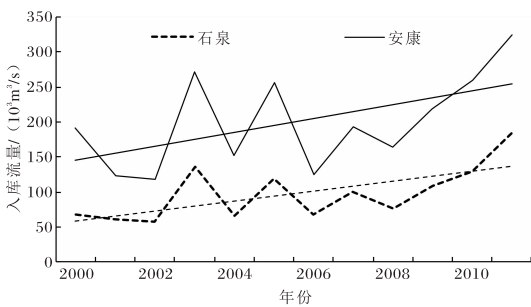


图 1 2000—2011 年安康及石泉水库入库流量逐年变化

2.2 入库流量月变化特征

2000 年至 2011 年,安康及石泉水库多年月平均入库流量分别为 $16.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $8.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,观察安康及石泉入库流量逐月变化曲线(图 2)可见,入库流量在各月的差异明显,冬季为水库枯水期,夏季为盛水期。安康及石泉入库流量最低值均出现在 2 月,仅为多年月平均的 20% 左右,从 3 月开始,两地入库流量逐步增加,6 月基本达到平均水平,随后大幅增长,并在 7 到 9 月间达到最高,11 月开始急剧减少。整体上看,安康及石泉水库各月入库流量的变化趋势基本一致,但不同的是,安康入库流量曲线呈现出明显的双峰结构,入库流量极大值分别出现在 7 月和 9 月,入库流量分别达 $35.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $36.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,石泉入库流量曲线为单峰结构,最大入库流量出现在 9 月,最大值为 $21.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

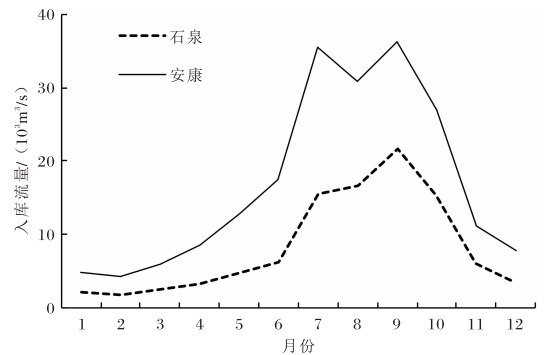


图 2 2000—2011 年安康及石泉水库入库流量逐月变化

据统计,安康及石泉入库流量主要集中在每年的 7 到 10 月,这期间安康及石泉的入库流量分别占到了全年的 70% 和 64%,其中 9 月和 10 月入库流量较大主要与陕西独特的“秋淋”天气有关。

2.3 极端入库流量特征

统计逐日入库流量的分布特征后发现,安康和石泉水库 $\leq 0.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的入库流量分别占到了 71.3% 和 89.3%,随着入库流量的增加,出现频率明显减少。取 2000—2011 年安康及石泉入库流量大于第 5 百分位数的样本作为极端入库流量,通过统计分析发现,安康和石泉水库极端入库流量在 5 月到 11 月均有出现。安康水库极端

入库流量在 $(1.7 \sim 16.8) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 其中 7—9 月的出现频次占到了极端入库流量总数的 73.6%, 每月的累计出现次数均在 50 次以上, 7 月最高达到 56 次, 其他月份的极端入库出现次数明显减少。石泉水库极端入库流量在 $(0.9 \sim 10.8) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 同样集中在 7 到 9 月, 其中 9 月出现次数最多, 达到 71 次, 占极端入库流量总数的 32.9%(图 3)。

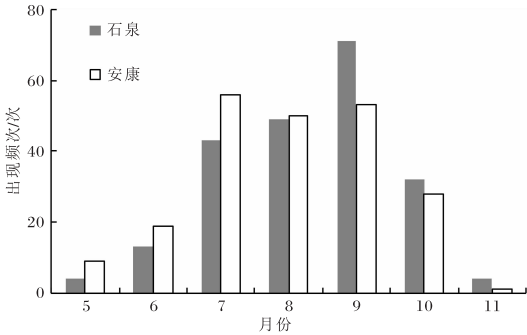


图3 2000—2011年安康及石泉水库
极端入库流量各月出现频次

3 入库流量与面雨量

3.1 各月入库流量与面雨量

安康及石泉虽同为汉江上游, 但流域范围仍有部分差异, 安康流域包括宁强、留坝、勉县、南郑、汉中、城固、洋县、西乡、镇巴、佛坪、宁陕、石泉、汉阴、紫阳、安康、岚皋等 16 个区县, 石泉流域包括宁强、勉县、南郑、汉中、留坝、太白、城固、洋县、西乡、镇巴、佛坪、宁陕、石泉等 13 个区县, 面雨量计算时对上述流域所含区县的逐日降水量进行算术平均。

观察安康及石泉流域逐月面雨量和入库流量(图 4)可见, 安康及石泉流域面雨量逐月变化曲线基本一致, 冬季面雨量最小, 进入春季后逐渐增加, 7 月达到最大, 安康及石泉流域 7 月平均面雨量分别达到了 182.6 mm 和 172.3 mm, 其次是 8 月和 9 月, 平均面雨量均在 160.0 mm 以上, 10 月以后迅速减少, 主要降水时段集中在 5 到 10 月, 期间的累计面雨量占了全年的 85% 以上。此外, 观察发现安康水库逐月入库流量变化与面雨量变化趋势大体一致, 相关系数达到 0.932 3。相比之下, 石泉入库流量的变化趋势要稍晚于面雨

量的变化, 石泉入库流量最大值出现在 9 月, 入库流量与面雨量相关系数为 0.869 0。

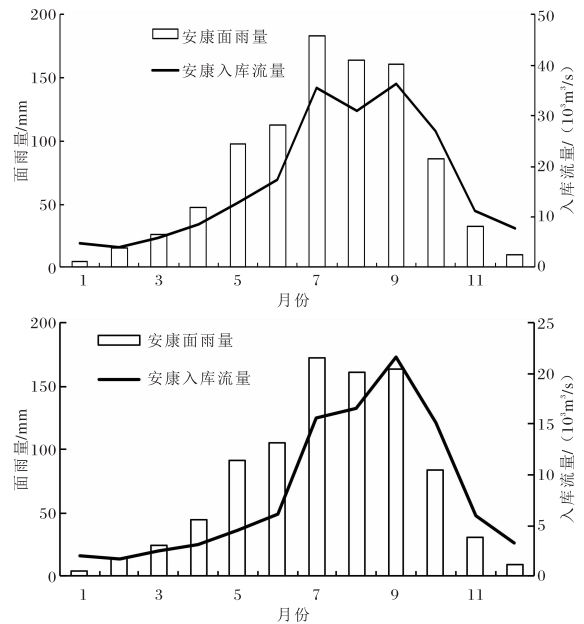


图4 2000—2011年安康及石泉水库
逐月面雨量和入库流量变化

从安康及石泉逐日入库流量与面雨量月平均相关系数表(表 1)可以看出, 除 1 月和 12 月外, 安康及石泉水库逐日入库流量与面雨量均存在很高的正相关, 且绝大多数都通过了 0.001 的显著性检验。对比各月相关系数可见, 从 2 月开始, 安康及石泉逐日入库流量与面雨量的相关系数逐月增加, 6 月至 10 月, 两地的相关系数在 0.468 3 至 0.586 3 之间, 说明在此期间入库流量受降水的影响很大, 其中安康的相关系数在 6 月和 10 月最大, 石泉的相关系数在 7 月和 10 月最大, 11 月两地的相关系数迅速下降至 0.30 以下。

3.2 逐日入库流量与面雨量

观察表 2 可见, 安康及石泉入库流量前 10 的均值分别达到了 $12.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $7.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$, 在 6 至 10 月都有发生。此外观察与入库流量对应的面雨量可见, 安康及石泉排名前 10 入库流量对应的当日面雨量均值分别为 33.4 mm 和 44.5 mm, 而与其对应的前日面雨量均值为 45.4 mm 和 46.1 mm, 高于当日面雨量, 说明入库流量不仅与当日的降水有关, 同时还与前日日的降水紧密相关, 由于降水的累积和汇合作用, 因

此一次过程中的入库流量极值往往滞后于降水量极值。例如 2011 年 9 月 19 日,安康和石泉流域的面雨量仅为 1.9 mm 和 0.8 mm,但由于前日的

面雨量分别高达 63.8 mm 和 65.4 mm,因此安康及石泉水库的入库流量达到了 $14.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $7.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 安康及石泉水库逐日入库流量与面雨量月平均相关系数表

月份	安康	石泉	月份	安康	石泉
1	0.020 1	-0.013 5	7	0.505 4**	0.573 7**
2	0.197 9**	0.241 2**	8	0.468 3**	0.515 8**
3	0.212 1**	0.132 6*	9	0.485 0**	0.525 5**
4	0.250 4**	0.050 9	10	0.582 6**	0.571 3**
5	0.429 4**	0.179 8**	11	0.290 9**	0.298 3**
6	0.586 3**	0.548 2**	12	0.097 1	0.091 9

注:*,** 分别代表该值通过了 0.01 及 0.001 的显著性检验。

表 2 安康及石泉水库入库流量排名前 10 与对应面雨量

安康				石泉			
时间	入库流量/ (m^3/s)	当日面雨 量/mm	前日面雨 量/mm	时间	入库流量/ (m^3/s)	当日面雨 量/mm	前日面雨 量/mm
2005-10-02	16 786.0	43.7	62.2	2011-09-18	10 788.0	65.4	57.0
2010-07-18	14 828.9	42.5	62.2	2005-10-02	8 816.0	37.7	67.2
2011-09-19	14 380.3	1.9	63.8	2005-10-01	8 438.0	67.2	24.3
2011-09-18	12 483.3	63.8	52.1	2002-06-09	7 551.0	78.2	17.6
2005-10-01	11 445.0	62.2	20.1	2011-09-19	6 972.7	0.8	65.4
2003-09-01	10 959.0	33.9	42.4	2011-07-06	6 961.4	67.4	51.2
2003-09-07	10 591.0	19.9	48.6	2010-07-24	6 698.1	32.8	39.1
2010-07-19	10 286.2	2.8	42.5	2003-07-16	6 234.0	24.6	45.2
2011-09-13	10 271.4	56.4	16.1	2007-07-05	6 213.0	66.5	32.1
2005-10-03	10 184.0	6.4	43.7	2003-08-30	5 573.0	37.7	61.4
平均值	12 221.5	33.4	45.4	平均值	7 424.5	44.5	46.1

为进一步了解降水对水库入库流量的影响,选取流域面雨量 $\geq 10 \text{ mm}$ 且入库流量 $\geq 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 的样本,得到安康及石泉水库流域面雨量与入库流量的 5 d 滑动平均曲线(图 5),观察发现,随着流域面雨量的增加,安康及石泉水库的入库流量均呈增加趋势,同时也存在明显的阶段特征。当流域面雨量在 20 mm 以内时,安康水库入库流量变化幅度不大,基本为 $(1.5 \sim 1.8) \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,当面雨量在 20~40 mm 时,入库流量总体明显增加,平均入库流量

达到 $2.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,面雨量超过 40 mm 时,入库流量进一步增加,其平均入库流量增至 $5.3 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。石泉水库入库流量存在类似的变化趋势,但由于石泉水库的库容较小,因此入库流量对面雨量的响应更为迅速,当面雨量在 15 mm 以内时,石泉水库的平均入库流量为 $1.0 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,当面雨量在 15~30 mm 时,平均入库流量增长至 $1.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,面雨量 $\geq 30 \text{ mm}$ 时,石泉水库的平均入库流量显著增加至 $3.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

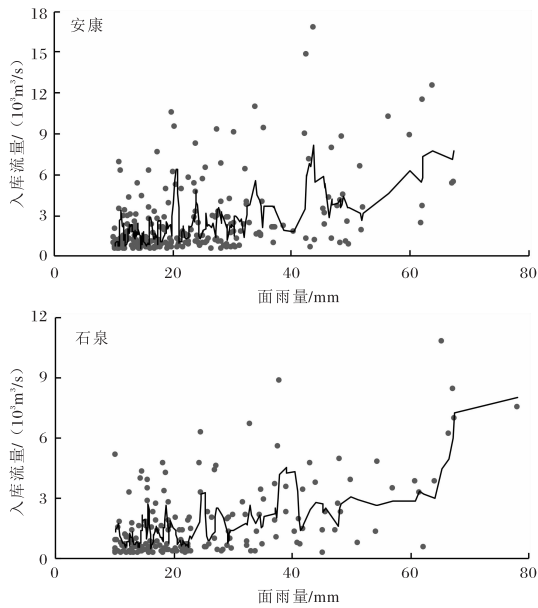


图5 安康及石泉水库逐日入库流量
与面雨量的5 d滑动平均曲线

4 入库流量预测模型建立及检验

4.1 引入降水累积效应的预测模型

实际情况表明,在连续性的强降水天气条件下,入库流量常常表现出降水累积效应,也就是说,经过数天明显的降水过后,即使降水停歇,较降雨过程之初,入库流量也会出现大幅的增长。例如,在2003年8月29日—9月1日,安康流域经历了一次强降水天气过程,连续4 d的流量面雨量均在30~50 mm,降雨过程之初入库流量仅为 $0.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,9月2日降水虽已结束,但入库流量却仍高达 $5.4 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

因此在考虑降水累积效应对入库流量的影响时,引入降水累积效应参数 $B = n(P_A - P_{A0})$,其中 P_A 为流域当日面雨量, P_{A0} 为降水累积临界值, n 为连续超过临界值的累计日数,根据前面的研究,在流域面雨量分别达到20 mm和15 mm时,对应安康及石泉水库入库流量的明显增加,因此确定安康及石泉流域降水累积临界值 P_{A0} 分别为20 mm和15 mm。

分别将安康及石泉的流域当日面雨量(P_A)和降水累积效应参数(B)同逐日入库流量做相关分析可见(表3),安康及石泉入库流量与当日面雨量及降水累积效应参数均呈正相关,相关系数在0.51~0.63,达到了0.001的显著性水平。由

于安康和石泉水库的入库流量分别集中在6—10月和7—10月,因此利用安康水库2000—2010年6—10月逐日入库流量及面雨量样本1 683个,石泉水库2000—2010年7—10月逐日入库流量及面雨量样本1 353个,建立了安康及石泉水库入库流量多元线性回归预测模型,模型的复相关系数分别为0.749 4和0.743 4,均达到了0.001的显著性水平。

$$\text{安康: } F_{AK} = 494.991 9 + 64.450 5 P_A + 112.378 4 B$$

$$\text{石泉: } F_{SQ} = 270.000 4 + 35.584 1 P_A + 45.130 74 B$$

表3 安康及石泉水库入库流量与气象要素的相关系数

要素	P_A		B	
	安康	石泉	安康	石泉
相关系数	0.523 6	0.518 4	0.627 3	0.628 9

4.2 预测模型检验

利用2011年安康及石泉水库入库流量及流域降水资料,分别对安康及石泉入库流量预测模型进行检验,由图6可见,预测模型能够较好的模拟入库流量波峰及波谷的起伏变化。对预测效果进行分析检验后,得到安康水库2011年6—10月逐日入库流量的相对误差平均为30%,石泉水库7—10月逐日入库流量的相对误差绝对值平均为32%,误差主要归因于对强降水过程中入库流量波峰极值的预测偏小,以及对入库流量波峰降幅的预测过大。需要注意的是,入库流量的预测准确性受到下垫面众多因素的影响,且各种影响因素的复杂性导致水文现象的不确定性难以被认知和描述,本方案在某些情形下仍存在着较大的预测误差,所以预测人员在实际运用中需要综合考虑其他的影响和以往的经验,使得预测结果更为合理。

5 结论

(1)2000年至2011年,安康及石泉水库年均入库流量分别为 $199.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $97.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,近年来均呈现出比较明显的线性增长趋势,且入库流量主要集中在7至10月,其中9—

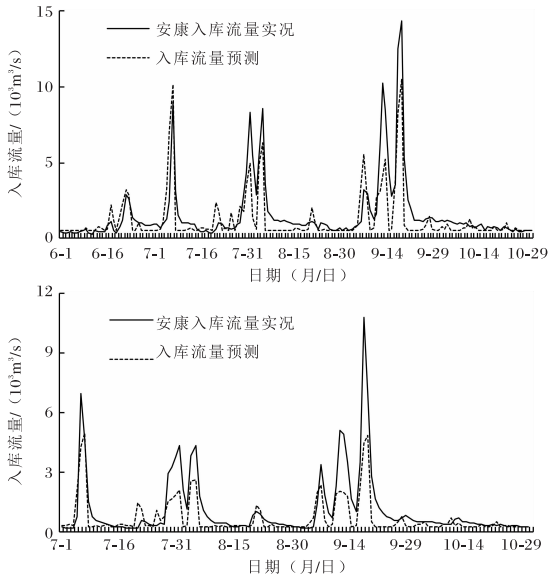


图6 2011年汛期安康及石泉水库逐日
入库流量预测值与实况对比

10月入库流量与华西秋雨关系密切。

(2)安康及石泉水库极端入库流量集中在7到9月,其中安康水库7月极端入库流量出现频率最高,石泉水库9月出现最多,两地极端入库流量最早出现在5月,最晚出现在11月。

(3)安康及石泉水库逐月入库流量变化与面雨量变化趋势基本一致,6—10月,两地逐日入库流量与面雨量呈显著正相关,反映出在此期间降水对入库流量的影响很大。

(4)两地入库流量在流域面雨量增加时呈现出明显的阶段性增长特征,其中安康水库入库流量分别在流域面雨量达到20 mm和40 mm时显著增加,石泉水库入库流量则分别在流域面雨量达到15 mm和30 mm时大幅增加。

(5)将引入降水累积效应的线性回归模型应用于2011年安康及石泉水库汛期入库流量预测后,经检验表明,两地预测误差分别达30%和32%,能够较好的模拟入库流量的起伏变化,对科学的水量调度有参考价值。

参考文献:

[1] 李强,唐锋,陈卓,等. Elman神经网络在水电站入库流量短期预测中的应用[J]. 华电技术,2015,37(7):1-3.

- [2] 张艳玲,邵高曦. 汉江子午河流域洪水预警指标及阈值计算方法[J]. 陕西气象,2017(6):1-5.
- [3] 董立凡,雷向杰,王倩. HBV模型在汉江流域的适用性研究[J]. 陕西气象,2016(4):23-26.
- [4] 刘彩红,杨延华,王振宇. 黄河上游夏季流量对气候变化的响应及未来趋势预估[J]. 地理科学进展,2012,31(7):846-852.
- [5] 徐元顺. 近75年丹江口水库入库流量时间变化特征与气候成因[J]. 湖北气象,2005(4):21-23.
- [6] 卢珊,贺皓,高红燕. 2011年汉江流域秋汛气象水文特征分析[J]. 陕西气象,2013(1):16-19.
- [7] 刘星才,徐宗学,占车生,等. 密云水库入库流量变异性及其影响因素[J]. 水土保持通报,2011,31(1):40-45.
- [8] 刘丽娜,顾万龙,胡彩虹. 中小流域入库径流影响因素的敏感性分析[J]. 气象与环境科学,2009,32(2):7-10.
- [9] 郭华,陈勇,马耀光. 组合灰色预测模型在入库流量预测中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(3):96-100.
- [10] 许银山,李玉荣,闵要武. 三峡水库水文气象预报不确定性及误差分布分析[J]. 人民长江,2015,46(21):27-32.
- [11] 唐海华,陈森林,赵云发. 三峡水库入库流量计算方法研究[J]. 中国农村水利水电,2008(4):26-28.
- [12] 张孟春. 龙羊峡、刘家峡水库日平均入库流量的预报[J]. 水文,1996(4):37-39.
- [13] 杨延华,刘彩红. SRESB2情景下未来30年黄河上游龙羊峡库区秋季入库流量变化趋势分析[J]. 青海环境,2011,21(2):76-80.
- [14] 胡兴林,崔涛,王小玲,等. 黄河上游唐乃亥站月、旬平均流量预报模型研究[J]. 水文,2000,20(3):24-26.
- [15] 张芳珠,马卫东,李作安,等. 降雨径流模型在故县水库入库预报中的应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):137-140.
- [16] 刘晓阳,毛节泰,李纪人,等. 雷达联合雨量计估测降水模拟水库入库流量[J]. 水利学报,2002(4):51-55.
- [17] 周少成. 用偏差过滤相似作秋季入库流量预报[J]. 湖北气象,1993(Z1):13-14.