

西安市气象要素变化特征及可利用降雨量预测模型

吴健华^{1,2}, 李培月^{1,2}, 钱会^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 利用西安气象站 1951 年-2008 年的气象资料, 分析了西安市降雨量、蒸发量、可利用降雨量的变化特征, 并建立了基于理论频率曲线修正的加权马尔科夫链年可利用降雨量预测模型。分析结果表明: 西安市可利用降雨量年内变化大, 以 9 月最多, 12 月最少; 四季中以秋季的可利用降雨量最多, 冬季的最少, 分别占全年总量的 44.5% 和 2.1%; 可利用降雨系数也以秋季最高, 冬季最低, 分别为 0.36 和 0.13; 近 58 年来, 西安市平均可利用降雨量以每年 0.99 mm 的线性趋势递减。经过分析, 利用加权马尔科夫预测模型预测的西安市可利用降雨量的相对误差, 与可利用降雨量实际值呈负相关关系; 经过理论频率曲线修正后, 其误差相应的减少。因此经过理论频率曲线修正的加权马尔科夫预测模型, 可以应用于西安市未来年可利用降水资源的预测。

关键词: 马尔科夫链; 频率曲线; 可利用降雨量; 特征分析; 预测模型; 西安市

中图分类号: P426.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)01-0050-05

Variation Characteristics of Meteorological Elements and Prediction Model of Available Precipitation in Xi'an City

WU Jianhua^{1,2}, LI Peiyue^{1,2}, QIAN Hui^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecology in Arid Areas, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: The meteorological data at the Xi'an station from 1951 to 2008 were used to analyze the variation characteristics of precipitation, evaporation, and available precipitation in the area. The prediction model of available precipitation based on the weighted Markov chain amended by the theoretic frequency curve was established and the relationship between the simulated and observed values of available precipitation was also analyzed. The results showed that the available rainfall varies significantly within a year, and it is the highest in September while the least in December. The proportions of available precipitation in the autumn and winter were 44.5% and 2.1%, respectively, and the available rainfall coefficients were 0.36 and 0.13 for the two seasons, respectively. During the past 58 years from 1951 to 2008, the average available rainfall decreased linearly with a rate of 0.99 mm per year. The relative error of available precipitation in Xi'an city determined by the prediction model was inversely related to the actual available precipitation. The relative error decreased using the modification of the theoretic frequency curve. Therefore, the prediction model of available precipitation based on the weighted Markov chain modified by the theoretic frequency curve can be used to predict the future available precipitation in Xi'an city.

Key words: Markov chain; frequency curve; available rainfall; feature analysis; prediction model; Xi'an city

我国是一个干旱缺水的国家, 人均可利用淡水资源少, 而且空间分布极不均衡。近年来, 在气候变化的大背景下, 随着人类活动的不断加剧以及水资源不合理的开发利用, 许多地区水资源已经受到了一定程度的点状和面状污染, 这进

一步加剧了水资源短缺的矛盾。自然降雨是水资源的来源, 可利用降雨量已成为影响经济发展和关系民生的重要因素。可利用降雨资源的变化特征分析以及预测可为水资源合理配置研究提供理论基础。

收稿日期: 2012-09-12 修回日期: 2012-12-21 网络出版时间: 2013-01-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130124.1128.009.html>

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (CHD2011ZY020); 长安大学博士生助研科技项目 (CHD2011ZY022; CHD2011ZY025); 国家自然科学基金项目 (41172212)

作者简介: 吴健华 (1986), 女, 山东聊城人, 博士研究生, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: wjh2005xy@126.com

通讯作者: 钱会 (1963), 男, 陕西泾阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水资源合理开发利用等方面的研究。E-mail: qianhui@chd.edu.cn

目前,关于降雨量分布特征与降雨量预测的研究较多,研究理论方法也多种多样,主要有灰色理论、遗传算法、神经网络法、回归分析法、马尔科夫链等。许多学者也致力于降雨量变化特征及其预测的研究,如李才媛^[1]利用灰色理论研究了湖北省梅雨期分级降雨的预报,Chang 等^[2]利用遗传算法对反距离加权法预测降雨量中的参数优化进行了研究,Valverde Ram rez 等^[3]采用人工神经网络对圣保罗地区的降雨量进行了预测,Chan 等^[4]利用回归分析法对中国南部的夏季季风降雨预测进行了研究。此外,王彩平^[5]、钱会等^[6]、王涛等^[7]、仲远见等^[8]分别利用马尔科夫链对降雨量预测进行了研究。这些研究成果为区域降雨量分布特征研究与预测研究提供了示范,也为区域水资源评价及其合理配置提供了理论基础。但是,这些研究大多侧重于降雨量的时空分布特征及其预测,而关于可利用降雨量的研究则很少。

一般来说,某区域的可利用降雨量与该地区的降雨、蒸发以及径流等因素有关。从气象的角度考虑,降雨量减去陆面蒸发量在一定程度上反映了该地区的水资源净补给量,即可利用降雨量。目前,根据平均降水量和月平均气温对陆面蒸发量进行估算的计算公式较多,如彭曼公式、桑斯威特公式、哈格里韦斯公式以及高桥浩一郎公式^[9]等。其中,高桥浩一郎公式应用较为广泛,主要适用于我国北方地区的陆面蒸发量的计算。黄晓俊和李永华等^{[10][11]}利用高桥浩一郎公式分别对贵州省贵定县和重庆地区的可利用降水资源进行了分析,彭兆亮等^[12]采用高桥浩一郎公式研究了气候变化对碧流河流域水资源量的影响。本文根据西安市 1951-2008 年的月平均气温(T)和降雨量(P)资料,采用高桥浩一郎的陆面蒸发经验公式,计算出了月平均陆面蒸发量(E),进而求得月平均可利用降雨量($F = P - E$),分析了可利用降雨资源的变化特征,并建立了频率曲线修正的加权马尔科夫链年可利用降雨量预测模型,为可利用降雨量的预测研究提供思路,也为降雨资源的合理利用提供理论基础。

1 可利用降雨资源变化特征

1.1 可利用降雨资源量的计算

区域可利用降雨资源量可以用降雨量与陆面蒸发量之差近似代替。陆面蒸发量可采用高桥浩一郎公式近似估算。高桥浩一郎公式可表述为:

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp(-34.4T/235.0 + T)} \quad (1)$$

式中: E 为月陆面蒸发量; P 为月平均降雨量; T 为月平均气温。根据式(1)计算出陆面蒸发量后,即可根据式(2)计算区域可利用降雨资源量:

$$F = P - E =$$

$$P - \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp(-34.4T/235.0 + T)} \quad (2)$$

式中: F 为月平均可利用降雨量,其它符号意义同前。

1.2 月、季节变化

根据上述公式计算了西安市 1951 年-2008 年月平均可利用降雨量。绘制了近 58 年来月平均降雨量、蒸发量和可利用降雨量柱状图(图 1-图 3)。从图中可以看出:多年月平均降雨量、蒸发量和可利用降雨量的曲线都呈单峰型。从波峰

的缓陡情况可知,降雨量年内的变化幅度最大,蒸发量次之,可利用降雨量变化幅度最小。年内降雨量以 7 月和 9 月最多,12 月最少;蒸发量的峰值出现在 7 月,谷值出现在 12 月;可利用降雨量的峰值则出现在 9 月,谷值出现在 12 月。

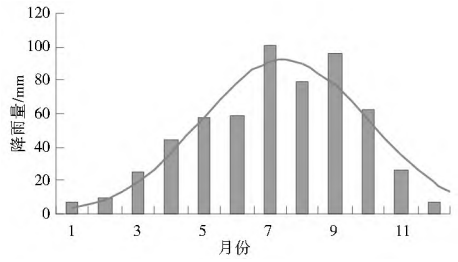


图 1 近 58 年西安市月平均降雨量

Fig. 1 The average monthly rainfall in the recent 58 years in Xi'an city

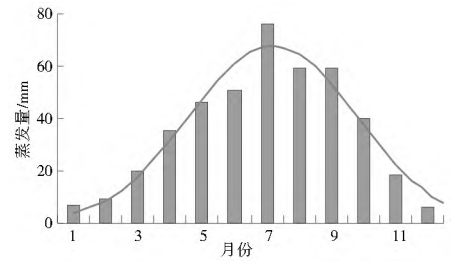


图 2 近 58 年西安市月平均蒸发量

Fig. 2 The average monthly evaporation in the recent 58 years in Xi'an city

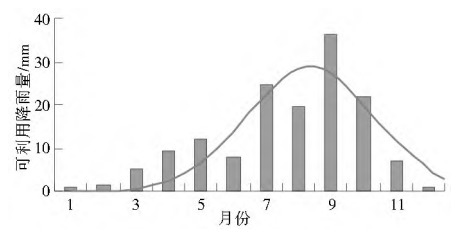


图 3 近 58 年西安市月平均可利用降雨量

Fig. 3 The average monthly available rainfall in the recent 58 years in Xi'an city

表 1 给出了降雨量、陆面蒸发量、可利用降雨量、蒸发系数和可利用降雨系数的各季节、全年的量值以及百分比。由表 1 可知,西安市 1951 年-2008 年年平均降雨量、蒸发量和可利用降雨量分别为 573.69 mm、426.63 mm、147.06 mm。全年降雨量主要集中在夏季(6 月-8 月),降水量达 238.15 mm,占全年总降雨量的 41.5%,冬季降雨量最少,仅占全年总降雨量的 4.2%(24.34 mm);西安市全年蒸发量也主要集中在夏季,夏季蒸发量达 186.07 mm,占全年总蒸发量的 43.6%,冬季蒸发量最小,仅占全年总蒸发量的 5.0%;可利用降雨量秋季最多,冬季最少,两个季节的可利用降雨量分别占全年总量的 44.5%和 2.1%。西安市年平均蒸发系数和可利用降雨系数分别为 0.74 和 0.26,四季蒸发系数由小到大为:秋季(0.64) < 夏季(0.78) < 春季(0.79) < 冬季(0.87),而可利用降雨系数则相反,以秋季最大(0.36),冬季最小(0.13)。

1.3 年际变化

西安市降雨量、陆面蒸发量和可利用降雨量的年际变化见图 4-图 6。同时,对这些气象参数进行 3 年滑动平均处

表 1 西安市 1951 年- 2008 年平均降雨量、陆面蒸发量、可利用的降雨量以及蒸发系数、可利用降水系数的各季数值及占全年的比例

Table 1 The average values of rainfall, evaporation, available rainfall, evaporation coefficient, and available rainfall coefficient of Xi'an city from 1951 to 2008 and their proportions of the annual values

时段	降雨		陆面蒸发		可利用降雨		蒸发系数 $\alpha = E/P$	可利用降雨系数 $\beta = (P - E)/P$
	降雨量 P/mm	占全年 比例 (%)	蒸发量 E/mm	占全年 比例 (%)	降雨量 F/mm	占全年 比例 (%)		
春(3月- 5月)	128.00	22.3	101.49	23.8	26.52	18.0	0.79	0.21
夏(6月- 8月)	238.15	41.5	186.07	43.6	52.08	35.4	0.78	0.22
秋(9月- 11月)	138.20	31.9	117.77	27.6	65.42	44.5	0.64	0.36
冬(12月-翌年2月)	24.34	4.2	21.29	5.0	3.05	2.1	0.87	0.13
全年	573.69		426.63		147.06		0.74	0.26

理,同时表示在图 4- 图 6 中。从图 4- 图 6 中三年滑动平均的曲线看,西安市降雨量和蒸发量年际变化较大,呈现明显的波动性,1951 年- 2008 年平均降雨量最大值出现在 1983 年,为 903.2 mm,最小值出现在 1995 年,为 312.2 mm;蒸发量波动幅度比年降雨量的波动幅度小,年平均蒸发量最大出现在 1958 年,为 557.33 mm,最小值为 278.95 mm,出现在 1995 年;可利用降雨量的变化趋势与降雨量和蒸发量类似,其年最大、最小值分别出现在 1983 年和 1995 年。由图 4- 图 6 还可以发现,降雨量、蒸发量和可利用降雨量呈现逐年降低的趋势。其中,降雨量降低趋势最明显,降低速率为 11.582 mm/(10a),可利用降雨量趋势次之,降低速率为 9.866 mm/(10a),而蒸发量降低趋势最小,仅为 1.716 mm/(10a)。图 7 为可利用降雨系数与降雨量的年际变化趋势图,由图 7 可以看出,西安市的可利用降雨系数和降雨量整体上呈正相关,降雨量大的年份,一般可利用降雨量也大。

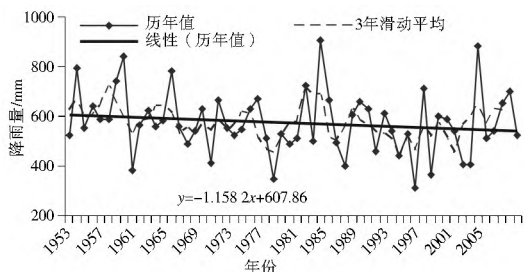


图 4 降雨量逐年变化

Fig. 4 Variation of annual rainfall in Xi'an city

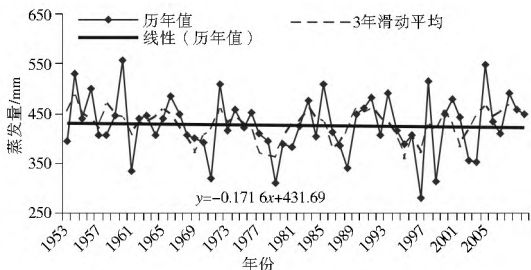


图 5 蒸发量逐年变化

Fig. 5 Variation of annual evaporation in Xi'an city

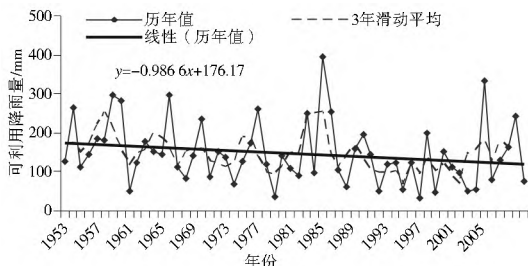


图 6 可利用降雨量逐年变化

Fig. 6 Variation of annual available rainfall in Xi'an city

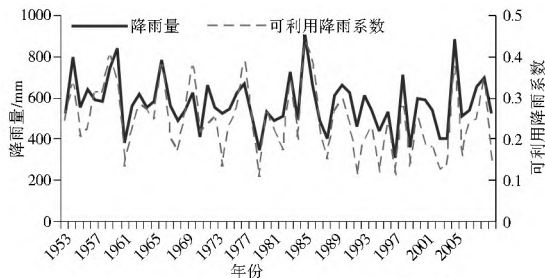


图 7 可利用降雨系数逐年变化

Fig. 7 Variation of annual available rainfall coefficient in Xi'an city
雨量的预测模型。已有许多学者对马尔科夫预测模型进行了研究,具体理论在这里不再赘述。在采用马尔科夫链进行时间序列预测时常常出现预测误差较大的情况。本文采用理论频率曲线法对模型预测结果进行进一步的修正,以提高模型预报精度。采用理论频率曲线修正的加权马尔科夫可利用降雨量预测模型的结构见图 8。采用理论频率曲线修正加权马尔科夫模型最关键的一步是确定修正误差。

2 可利用降雨量预测模型

2.1 模型的建立

由于可利用降雨量和降雨量有很大的关系,存在很大的随机性,所以本文运用马尔科夫过程的原理建立了可利用降

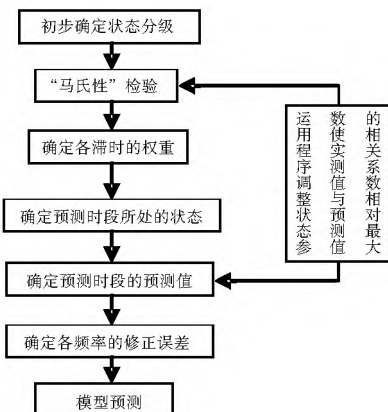


图 8 预测模型流程

Fig. 8 Flow chart of prediction model

首先根据已知序列,进行可利用降雨量预测,得到预测序列。对可利用降雨量的已知序列和预测序列分别进行降序排列,利用经验频率公式 $p = \frac{m}{n+1} \times 100\%$ 计算年可利用降雨量的分布频率,其中 m 为排列中的序号, n 为分析的总项数。选用 P-ó 型分布线型,采用离差平方和最小的准则对参数进行优化,分别绘制可利用降雨量实际值和预测值的理论频率分布曲线。从图中实际值和预测值的理论频率曲线上分别读取不同保证率下的可利用降雨量,并计算其相应的相对误差,作为加权马尔科夫链可利用降雨量预测模型预测结果的修正误差。

2.2 模型的检验

对西安气象站 1951 年-2008 年可利用降雨量序列进行

统计,得到序列的平均值 E_X 为 147.06,标准差 S 为 80.27,按照均值-标准差分级法,将序列分为 5 个状态,状态分级见表 2,各年份可利用降雨量状态见表 3。

表 2 年可利用降雨量状态分级

Table 2 Classification of annual available rainfall

状态	分级标准	可利用降雨量区间/mm
1	$X \leq E_X - 0.60S$	$X \leq 98.90$
2	$E_X - 0.60S < X \leq E_X - 0.25S$	$98.90 < X \leq 126.99$
3	$E_X - 0.25S < X \leq E_X + 0.25S$	$126.99 < X \leq 167.13$
4	$E_X + 0.25S < X \leq E_X + 0.60S$	$167.13 < X \leq 195.23$
5	$X > E_X + 0.60S$	$X > 195.23$

表 3 西安市 1951 年-2008 年可利用降雨量序列及其分级

Table 3 Available rainfalls from 1951 to 2008 and their classifications in Xi'an city

年份	可利用降雨量/mm	状态	年份	可利用降雨量/mm	状态	年份	可利用降雨量/mm	状态	年份	可利用降雨量/mm	状态
1951	128.13	3	1966	82.3	1	1981	251.48	5	1996	198.91	5
1952	266.17	5	1967	142.17	3	1982	96.03	1	1997	47.49	1
1953	112.87	2	1968	237.07	5	1983	395.24	5	1998	151.47	3
1954	143.77	3	1969	88.29	1	1984	253.4	5	1999	110.81	2
1955	185.7	4	1970	153.57	3	1985	106.86	2	2000	97.04	1
1956	180.18	4	1971	139.01	3	1986	61.51	1	2001	50.56	1
1957	298.85	5	1972	69.21	1	1987	161.09	3	2002	54.18	1
1958	281.67	5	1973	127.13	3	1988	196.35	5	2003	334.82	5
1959	51.6	1	1974	174.2	4	1989	143.76	3	2004	80.31	1
1960	123.14	2	1975	261.72	5	1990	51.05	1	2005	131.45	3
1961	175.8	4	1976	118.38	2	1991	121.35	2	2006	162.14	3
1962	150.74	3	1977	37.38	1	1992	123.62	2	2007	241.37	5
1963	145.64	3	1978	141.11	3	1993	52.57	1	2008	75.48	1
1964	297.65	5	1979	107.68	2	1994	124.45	2			
1965	111.33	2	1980	88.81	1	1995	33.61	1			

经检验,该年可利用降雨量序列符合“马氏性”,可以用马尔科夫模型进行预测。采用 1951 年-1955 年的数据对 1956 年的可利用降雨量进行预测,采用 1952 年-1956 年的数据对 1957 年的可利用降雨量进行预测,以此类推,得到了 1956 年-2008 年的年可利用降雨量的预测序列,并计算了其预测相对误差。绘制可利用降雨量的实际值和相对误差的关系曲线,见图 9。从图 9 中可以看出,可利用降雨的实际值与预测相对误差呈负相关关系,因此采用理论频率曲线法对其进行修正。

降雨量的分布频率,并利用其计算结果,选用 P-ó 型分布线型,采用离差平方和最小的准则对参数进行优化,分别绘制可利用降雨量实际值和预测值的理论频率分布曲线,见图 10。从图 10 中实际值和预测值的理论频率曲线上分别读取不同保证率下的可利用降雨量,并计算其相应的相对误差,作为模型的修正误差,见表 4。

$$p = \frac{m}{n+1} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m 为排列中的序号; n 为降雨量序列的项数; p 为年降雨量频率。

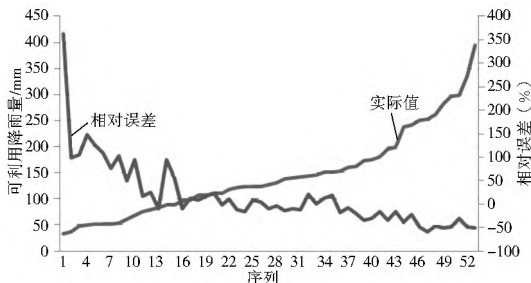


图 9 可利用降雨量的实际值与其相对误差的关系曲线

Fig. 9 Relationship curve of actual available rainfall and its relative error

分别对 1956 年-2008 年的年可利用降雨量的实际值和预测值由大到小进行排序,利用经验频率公式(式 3)^[13],计算

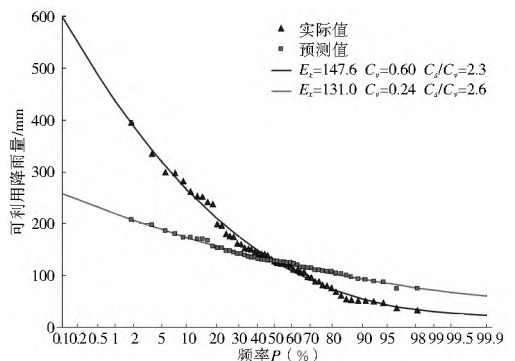


图 10 水文频率分析图

Fig. 10 Hydrological frequency curve

表 4 不同保证率下可利用降雨量实际值与预测值统计

Table 4 Statistical results of the actual and predicted available rainfalls under different assurance rates

保证率 (%)	实际值 /mm	预测值 /mm	修正误差 (%)	保证率 (%)	实际值 /mm	预测值 /mm	修正误差 (%)
1	437.34	219.14	-49.89	60	108.66	120.03	10.46
2	387.37	206.40	-46.72	70	90.95	112.24	23.41
3	357.66	198.61	-44.47	80	73.54	103.71	41.02
4	336.30	192.90	-42.64	90	54.73	92.89	69.72
5	319.57	188.34	-41.06	95	43.27	84.81	96.02
10	266.33	173.32	-34.92	96	40.53	82.6	103.78
20	210.39	156.39	-25.67	97	37.5	79.96	113.2
30	175.61	145.03	-17.42	98	34.01	76.59	125.2
40	149.42	135.86	-9.08	99	29.6	71.61	141.93
50	127.75	127.73	-0.01				

将 2004 年-2008 年的可利用降雨量的预测值、实际值及修正前后的预测误差列于表 5。由表 5 可以看出, 2004 年-2008 年修正前的预测误差分别为 24.42%、-2.63%、-20.38%、-22.68% 和 17.42%, 修正后的误差分别为 6.49%、-2.62%、-19.11%、1.31% 和 -10.16%, 修正后预测精度均有很大提高, 所以经过理论频率曲线修正的加权马尔科夫预测模型可以用于西安市可利用降雨量的预测。

表 5 2005 年-2008 年可利用降雨量预测结果

Table 5 The predicted results of available rainfall from 2005 to 2008

年份	实际值 /mm	预测值 /mm	预测误差 (%)	频率 (%)	修正误差 (%)	修正后预测值 /mm	修正后误差 (%)
2004	80.31	99.93	24.42	64.93	16.85	85.52	6.49
2005	131.45	128.00	-2.63	50	-0.01	128.01	-2.62
2006	162.14	129.10	-20.38	48.28	-1.57	131.16	-19.11
2007	241.37	186.64	-22.68	22.41	-23.67	244.53	1.31
2008	75.48	88.63	17.42	74.14	30.7	67.81	-10.16

3 结论

(1) 统计分析表明, 西安市近 58 年来平均年降雨量为 573.69 mm, 平均年可利用降雨资源量为 147.06 mm, 全年平均可利用降雨系数为 0.26。一年中 7 月和 9 月可利用的降雨资源为最多, 12 月的可利用降雨量最小。西安可利用降雨量季节变化明显, 以秋季和夏季为最多, 冬季最少, 分别占年总量的 44.5%、35.4% 和 3.05%。可利用降雨量的年际变化较明显, 近 58 年来整体以每年 0.99 mm 的趋势递减。可利用降雨系数和降雨量整体上呈正相关。

(2) 采用理论频率曲线法对传统加权马尔科夫预测模型的预测结果进行修正, 大大提高了模型的预测精度, 使预测更加准确合理。修正后的模型可以用于西安市未来可利用降雨量的预测, 并且该修正方法可以借鉴到其它研究领域。

(3) 由于缺少西安市 2009 年-2012 年气象数据, 本文没有对 2013 年及以后的可利用降雨量进行预测。但是, 该预测模型的建立与修正将有助于降雨资源预测与管理等方面的研究。

参考文献 (References):

- [1] 李才媛. 湖北省梅雨期分级降水预报试验 [J]. 气象, 1996, 22 (1): 49-52. (LI Cai yuan. The Experiment of Classification Rainfall forecast in Hubei During Mèr yu Period [J]. Meteorological Monthly, 1996, 22(1): 49-52. (in Chinese))
- [2] Chang Chia Ling, Lo Shang Lien and Yu Shaw L. The Parameter Optimization in the Inverse Distance Method by Genetic Algorithm for Estimating Precipitation [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 117: 145-155.
- [3] Maria Cleof Valverde Ramirez, Haroldo Fraga de Campos Velho, Nelson Jesus Ferreira. Artificial Neural Network Technique for Rainfall Forecasting Applied to the São Paulo Region [J]. Journal of Hydrology, 2005, 301: 146-162.
- [4] Chan Johnny C. L., Shi Jiu En. Prediction of the Summer Monsoon Rainfall over South China [J]. International Journal of Climatology, 1999, 19: 1255-1265.
- [5] 王彩平. 滑动平均马尔科夫模型在高速公路沿线降雨中的应用 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007. (WANG Cai ping. Application of Moving Average Markov Model in Rainfall Forecasting Along Highway [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007. (in Chinese))
- [6] 钱会, 李培月, 王涛. 基于滑动平均加权马尔科夫链的宁夏石嘴山市年降雨量预测 [J]. 华北水利水电学院学报, 2010, 31 (1): 6-9. (QIAN Hui, LI Pei yue, WANG Tao. Precipitation Prediction on Shizuishan City in Ningxia Province Based on Moving Average and Weighted Markov Chain [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(1): 6-9. (in Chinese))
- [7] 王涛, 钱会, 李培月. 加权马尔科夫链在银川地区降雨量预测中的应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 78-81. (WANG Tao, QIAN Hui, LI Pei yue. Prediction of Precipitation Based on the Weighted Markov Chain in Yinchuan Area [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(2): 78-81. (in Chinese))
- [8] 仲远见, 李靖, 王龙. 改进马尔科夫链降雨量预测模型的应用 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2009, 23 (4): 402-405. (ZHONG Yuan jian, LI Jing, WANG Long. Precipitation Predicting Model Based on Improved Markov Chain [J]. Journal of University of Jinan (Science & Technology), 2009, 23 (4): 402-405. (in Chinese))
- [9] 李永华, 毛文书, 高阳华, 等. 重庆区域旱涝指标及其变化特征分析 [J]. 气象科学, 2006, 26(6): 638-644. (LI Yong hua, MAO Wen shu, GAO Yang hua, et al. Regional Flood and Drought Indices in Chongqing and Their Variation Features Analysis [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2006, 26(6): 638-644. (in Chinese))
- [10] 黄晓俊, 夏恒, 杨明, 等. 近 40a 贵定县可利用降水资源特征及变化 [J]. 贵州气象, 2010, 34(4): 18-20. (HUANG Xiaojun, XIA Heng, YANG Ming, et al. Characteristics of Available Precipitation and Its Variation in Guiding County during the Past 40 Years [J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2010, 34 (4): 18-20. (in Chinese))

(下转第 74 页)

和校核洪水工况下该重力坝右岸 7 号岸坡坝段的抗滑稳定安全系数, 计算结果见表 1。由表可知: 坝体在不同工况下抗滑稳定安全系数均满足规范^[9]要求。采用该方法计算重力坝陡倾岸坡坝段的抗滑稳定安全系数是可行的, 与现行规范匹配性好, 计算结果可靠。

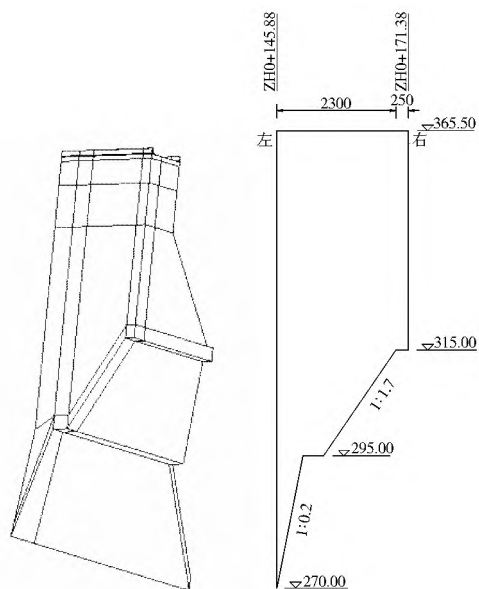


图 5 某重力坝右岸 7 号坝段建基面形状及坝体三维实体模型
Fig. 5 3D solid model and base shape of No. 7 dam in the right bank of a gravity dam

表 1 抗滑稳定安全系数

Table 1 The antisliding stability safety factor

计算工况	安全系数	允许值
正常蓄水位工况	3.238	3.0
校核洪水水位工况	2.513	2.3

6 结论

(1) 针对重力坝岸坡坝段建基面是陡倾阶梯状的实际情况, 提出视重力坝岸坡坝段坝体由若干刚性滑动块体组成的重力坝三维抗滑稳定条块法。该法与现行规范匹配性好, 计算相对简便, 结果可靠。

(2) 提出运用有限元分析软件 ANSYS 的前处理模块进

行荷载计算的方法, 能有效减少复杂坝体坝基情况下重力坝荷载计算的工作量, 且计算精度高, 速度快, 适应性强。

(3) 对于重力坝深层双滑面、多滑面以及坝基面沿顺河向成折线状的抗滑稳定问题, 本文方法亦适用。

参考文献(References):

[1] 左东启, 王世夏, 林益才. 水工建筑物[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995. (ZUO Dong qi, WANG Shi xia, LIN Yi cai. Hydraulic Structure[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1995. (in Chinese))

[2] 李东辉, 于跃, 陈宗荣, 等. 折线台阶状基础面重力坝的抗滑稳定性分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1), 5F53. (LI Dong hui, YU Yue, CHEN Zong rong, et al. Antisliding Stability Analysis of Gravity Dam with Polyline Stepped Foundation[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1), 5F53. (in Chinese))

[3] 王大胜. 复杂层状地基重力坝仿真分析理论和抗滑稳定研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (WANG Da sheng. Simulation Calculation and Antisliding Stability of Gravity dam With Complex Layered Foundation[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))

[4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理方法程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003. (CHEN Zu yu. Stability Analysis of Soil Slope Theory, Methods and Programs[M]. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese))

[5] 袁林娟. 重力坝坝基深层抗滑稳定及控制标准研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2003. (YUAN Lin juan. Stability Analysis Against Deep Sliding and Its Control Standards of Gravity Dam[D]. Wuhan: Wuhan University, 2003. (in Chinese))

[6] 朱婷. 基于三维刚体极限平衡法的岩质边坡参数敏感性分析和工程应用[D]. 宜昌: 三峡大学, 2010. (ZHU Ting. Sensitivity Analysis of Rock Slope Parameters and Its Engineering Applications By 3-D Limit Equilibrium Method[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2010. (in Chinese))

[7] A. W. Bishop. The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes[J]. Geotechnique, 1955, 5(1): 7-17.

[8] 彭国伦. Fortran 95 程序设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010. (PENG Guo lun. Program Design of Fortran 95[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010. (in Chinese))

[9] SL 319-2005, 混凝土重力坝设计规范[S]. (SL 319-2005, Design of Concrete Gravity Dams[S]. (in Chinese))

(上接第 54 页)

[11] 李永华, 高阳华, 廖良兵. 重庆地区年可利用降水资源的变化分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(3): 422-428. (LI Yong hua, GAO Yang hua, LIAO Liang bing. Analysis of Annual Utilizable Precipitation Changes in Chongqing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(3): 422-428. (in Chinese))

[12] 彭兆亮, 何斌, 王国利, 等. 碧流河流域气候变化对水资源量的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 76-79. (PENG Zhao liang, HE Bing, WANG Guo li, et al. A Study on

Characteristics of Climate Change and its Influence on Water Resources in Resent 30 Years in Biliuhe River Basin [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 76-79. (in Chinese))

[13] 魏永霞, 王丽学. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (WEI Yong xia, WANG Li xue. Hydrology Engineering[M]. Beijing: China Water Conservancy and Electricity Press, 2005. (in Chinese))