

1951—2015 年西安市大气降水资源趋势分析及预测

徐盼盼^{1,2}, 林涛^{1,2,3}, 钱会^{1,2}, 杨咪^{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; 3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 西安 710075)

摘要:基于西安市 1951—2015 年逐月降水量和气温资料,依据高桥浩一郎的陆面实际蒸散发经验公式,分析了西安市 65 a 来大气降水资源的变化特征,采用逐步回归周期分析法对西安市未来 10 a 大气降水资源的变化趋势进行了预测。结果表明:西安市年内降水资源分配不均匀,春夏秋冬三季所占比例高达 95% 以上,而冬季所占比例很小;从月尺度、季尺度和年尺度看,西安市降水利用率普遍较低,蒸发率普遍较高;西安市温度变化呈上升态势,降水和可利用降水呈减少态势;在全球气候变暖背景下,除了夏季和冬季可利用降水量对偏冷期气候响应不明显,其他时段可利用降水量对不同时期气候响应显著;未来 10 a 年降水量、年蒸发量和可利用年降水量均以负距平为主,大气降水资源的减少态势可能会持续。

关键词:可利用降水量; 大气降水资源; 西安市; 逐步回归周期分析

中图分类号: P426.62⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0313-06

Trend Analysis and Prediction of Atmospheric Precipitation in Xi'an During 1951—2015

XU Panpan^{1,2}, LIN Tao^{1,2,3}, QIAN Hui^{1,2}, YANG Mi^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3. First Highway Consultants Co., LTD, Xian 710075, China)

Abstract: Based on the monthly precipitation and temperature data of Xi'an City from 1951 to 2015, the characteristics of changes in atmosphere precipitation resource were analyzed by means of Takahashi's evaporation equation. And the trend of the atmosphere precipitation resource for the next ten years was forecasted by using stepwise regression analysis. The results indicated that the distribution of precipitation resource was uneven in Xi'an within the year, and the proportion of spring, summer and autumn was as high as over 95%, while the proportion of winter was very small. On the monthly scale, seasonal scale and annual scale, the utilization rate of precipitation in Xi'an was generally low, and the evaporation rate was generally high. The temperature change in Xi'an was on the rise, and precipitation and utilizable precipitation were decreasing. Under the background of global climatic warming, the response of summer and winter utilizable precipitation was not obvious in the cold climate, while utilizable precipitation of other periods significantly responded to different period climates. The annual precipitation, annual evaporation and utilizable annual precipitation will be dominated by negative anomaly in the next 10 years. Therefore, the downward trend of atmospheric precipitation may persist.

Keywords: utilizable precipitation; atmosphere precipitation resource; Xi'an City; stepwise regressive periodic analysis

收稿日期: 2017-11-01

修回日期: 2017-11-25

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301084); 重点科研平台条件建设项目“微尺度水文生态研究”(310829173306); 创新团队支持项目(学科建设)“旱区一半干旱区干旱预警及水资源配置研究”(310829173701); 高新技术研究培育项目(学科建设)“高新技术研究培育项目(学科建设)“基于水文循环的水资源管理研究”(310829172202)

第一作者: 徐盼盼(1993—), 男, 内蒙古呼和浩特市人, 博士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: xupanpan0212@163.com

通信作者: 钱会(1963—), 男, 陕西西安人, 教授, 博导, 博士, 主要从事水文地质方面的研究。E-mail: qianhui@pub. xaoonline.com

随着全球人口的不断增长和社会经济的高速发展,人们对水的需求量越来越大,水资源匮乏已成为很多国家和地区经济发展的严重障碍^[1]。我国水资源受海陆位置、水汽来源和地形地貌等因素的影响,在区域上分布极不均匀,尤其是约占我国 1/3 面积的西北地区,水资源量仅占全国总量的 4.6%,属于严重缺水^[2]。同时,随着全球气候变暖,海平面上升,极端天气和气候灾害频繁发生^[3],对水资源产生了不可忽视的影响。目前,对区域水资源的研究已成为研究热点^[4-6]。

一般来说,区域水资源的丰富程度取决于降水、蒸发和径流量的多寡。从气象的角度考虑,降水量与陆面蒸发量分别反映了一个地区水资源的收入与支出情况,两者之差为可利用降水量,是大气降水各分量中(降水量、蒸发量和可利用降水量)可被人实际利用的降水资源,其量的大小基本表征了该区域水资源的多少^[7-8]。近年来,很多学者开始关注可利用降水量的变化^[9-11]。李鹏飞等^[9]将我国干旱半干旱区 50 年来东、西部的降水量和潜在蒸散量联系起来,得出东、西部气候变化存在着显著差异。陈豫英等^[10]分析了 50 a 来宁夏可利用降水的时空变化及其对生态环境的影响,研究表明宁夏大部分地区植被系数值的变化与自然环境和水资源密切相关。程肖侠等^[11]对陕西近 50 a 可利用降水资源的气候变化特征进行分析,并讨论了水资源对气候变化的敏感性。总之,大气降水资源各组分发生的变化与生态环境及生态安全密切相关,它必然会对水资源、农业和生态系统产生深远的影响^[12]。因此,大气降水资源各分量将是一个地区气候干旱研究的重点。

作为东、西部结合枢纽的西安市地处西北内陆腹地关中平原中部,是西北地区的国际化大都市,也是陕西省的政治、经济、文化和科教中心。随着“一带一路”战略目标的推进下,西安在“丝绸之路经济带”建设中迎来了难得的发展机遇。但由于其南部秦岭山脉阻挡了湿润气流,使得降水分布极其不均匀且偏丰的年份较少,加之西安市的用水量逐年增加,使得旱灾频频发生^[13]。在 380—1983 年的 1604 年中,干旱发生 529 次,其中大旱 127 次,基本符合“十年一大旱,三年一小旱”的农谚^[13]。

在气候变暖背景下,西安市大气降水资源的变化态势如何?不同季节与全年变化的趋势是否一致?不同季节和全年对全球气候变化的响应程度是否相同?这些问题都值得探讨。因此,本文基于线性趋势法和距平法系统分析月尺度、季尺度和年尺度大气降

水资源的变化特征,采用逐步回归周期分析法对未来 10 a 大气降水资源的发展趋势进行预测,可以更好地了解西安市降水资源对全球气候变暖的响应程度,对西安市未来水资源规划、开发和利用具有重要的学术价值和实际意义。

1 资料与方法

1.1 资料

本文选用西安市气象站(108°56'E, 34°18'N) 1951—2015 年的逐月平均气温和逐月降水量观测资料,该数据来源于中国气象科学数据共享服务网和陕西省统计年鉴。该站点与西安市气象局整编的长安站 1959—2013 年逐月平均气温和降水达到了 99.9% 的相关水平,表明西安市站的气象资料与邻近的长安站较为一致,代表性高,确定性强,可以准确地反映西安市的气象特征^[13]。

1.2 方法

1.2.1 假设检验法 针对气象站的不同短系列降雨资料,用假设检验法对其进行检验,如果通过检验,说明资料系列可视为同一总体,即总体资料具有一致性^[14]。一般基于 t 分布和 F 分布来确定统计量的接受与舍弃区间,其原理为利用计算得到的统计量与选定的临界值比较,若统计量不属于接受区间,则舍弃;反之则接受^[14]。

F 检验法通过比较两组数据的方差,判断精密度是否存在显著性差异。根据 F 分布表查得临界值,看其两组数据是否有显著差异。F 检验法计算公式为:

$$F = \frac{s_x^2}{s_y^2} = \frac{\frac{m}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i, m, n 分别代表系列样本数据和样本个数,且 F 值服从 $F(n-1; m-1)$ 的分布。

t 检验用 t 分布理论判断两个总体平均数之间是否有显著差异,其统计量 t 值的计算公式为:

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m x_i^2 + \sum_{i=1}^n y_i^2}{m+n-2} \sqrt{\frac{m}{mn}}}} \quad (2)$$

式中: x_i, y_i, m, n 分别代表两系列样本数据和样本个数,且 t 值服从自由度为 $m+n-2$ 的 t 分布。根据 t 分布表查得临界值,如果 $t < t_{表}$,表明两组数据无显著差异。

1.2.2 可利用降水量的计算 可利用降水量为降水量与陆面蒸发量之差,即可被人类所利用的降水资源。在

实际情况下,影响蒸发的最主要物理因子是降水和温度,同时考虑到实际陆面蒸发量受气象条件、土壤性质及地表植被等因素的限制,所以利用蒸发皿观测的陆面蒸发量对实际陆面蒸发量的代表性并不好^[15]。因此,采用高桥浩一郎的经验公式来计算(实际)陆面蒸发量^[16],该方法仅用月平均降水量和气温即可对蒸发进行估算,方法简便,特别是克服了在低温下无法计算和陆面蒸发会大于降水的缺点。在我国华北、西北、西南地区水资源问题的研究结果证明该方法是合理可信的^[1],可利用降水量的计算公式为^[17]:

$$W=P-E$$

（3）

$$E=\frac{3100P}{3100+1.8P^2\text{EXP}\left[-\frac{34.4T}{235+T}\right]}$$

（4）

式中: P 表示月降水量(mm); E 表示月蒸发量(mm); W 表示月可利用降水量(mm); T 为月平均气温($^{\circ}\text{C}$),本文定义可利用降水系数为 $\beta=\frac{W}{P}$,蒸发系数为 $\alpha=\frac{E}{P}$ 。

1.2.3 逐步回归周期模型 在分析大气降水各分量

假设检验法	统计量的计算值	拒绝域	是否通过检验
F 检验法	0.61	$F < F_{0.025}(34, 29) = 0.48$ 或 $F > F_{0.975}(34, 29) = 2.09$	是
t 检验	0.08	$t > t_{0.975}(63) = 2$	是

2.2 可利用降水量的月际分布

由图 1 可知,西安市降水主要集中在 4—10 月,占全年的 86.88%,其中 7—9 月降水量最多,占全年 48.29%,各月均超过 75 mm。蒸发也主要集中在 4—10 月,占全年的 85.91%,其中在 6—9 月蒸发量最多,均超过 50 mm,占全年的 57.47%。降水量和蒸发量的月际分布导致西安市地区可利用降水量以 9 月最大,为 40.03 mm,依次是 7 月和 10 月,分别为 22.70 mm,20.03 mm,其他月份可利用降水量均低于 20 mm。从各月可利用降水系数看,4—11 月(除 6 月)均大于 0.2,其他月份均低于 0.2,可见从月际分布看,降水利用率普遍较低,蒸发率普遍较高。

2.3 可利用降水量的季节分布

从西安市季节可利用降水量距平及累积距平演变趋势图(图 2)可见,1951—2015 年西安市四季可利用降水量有着明显的年际及年代际变化特征。

春季可利用降水量呈 0.17 mm/a 的减少趋势,通过了 95%的置信度检验,最多与最少的年份分别出现在 1987 年和 1955 年,为 106.35 mm 和 0.25 mm,前者高于均值 79.58 mm,后者低于均值 26.52

隐含周期的基础上,依据逐步回归周期分析原理,对未来 10 a 的变化趋势进行了预测。逐步回归周期分析就是将预报对象进行分组,每组按一定的周期进行延长,使其长度与预报对象相同,将各组的平均值作为逐步回归的因子,被筛选出的因子就是预报对象的隐含周期^[18-20],其数学模型为

$$X(t)=\sum_{i=1}^nb_ip_i(t)+\epsilon_t$$

（5）

式中: $X(t)$ 为预报对象; b_i 为回归系数; $p_i(t)$ 为通过检验的周期项因子; ϵ_t 为序列的噪声项。

2 降水特征分析

2.1 降水一致性分析

基于西安市站 1951—2015 年的降水资料系列,将其分为 1951—1980 年共 30 a 和 1981—2015 年共 35 a 的两个短降水系列,利用 F 检验法和 t 检验法对整个降水系列的一致性进行分析,在显著性水平 $\alpha=0.05$ 时,其分析结果见表 1。由表 1 可知,两个短系列降水资料的各项统计值均通过检验,表明西安市站 1951—2015 年的降水资料可以视为整体连续应用,即该序列资料具有一致性。

mm。从年际变化特征看,20 世纪 70 年代中叶前和 2007 年之后可利用降水量偏少,在此期间以 1987 年为界,基本呈现先增后减的趋势。

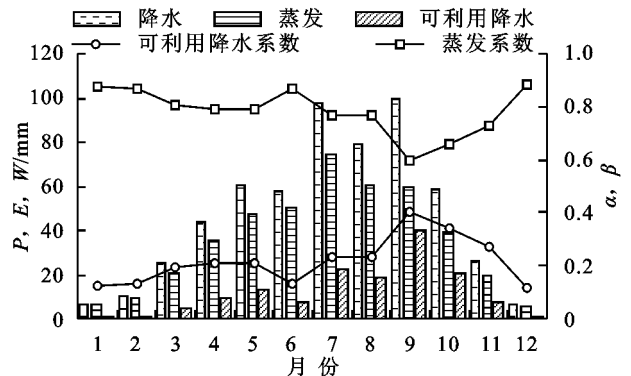


图 1 1951—2015 年西安市多年平均 P, E, W 的逐月分布

夏季可利用降水量呈 0.45 mm/a 的减少趋势,最多与最少的年份分别出现在 1957 年和 1977 年,为 252.88 mm 和 3.48 mm,前者高于均值 204.40 mm,后者低于均值 45.00 mm。从年际变化特征看,20 世纪 60 年代末为界限,整体为先增后减的趋势,在 1975 年之后,呈现出一个波动中减少的趋势。

秋季可利用降水量呈 0.17 mm/a 的减少趋势,

最多与最少的年份分别出现在 1987 年和 1998 年,为 266.76 mm 和 6.03 mm,前者高于均值 199.51 mm,后者低于均值 60.95 mm。从年际变化特征看,20 世纪 90 年代中叶为界,整体为先增后减的趋势,转为一个相对缺乏期,特别在 2000 年之后进一步加剧,可利用降水量为负值的年份一共 12 a。

冬季可利用降水量呈 0.03 mm/a 的减少趋势,通过了 90%的置信度检验,最多与最少的年份分别出现在 1989 年和 1992 年,为 28.94 mm 和 0.02 mm,前者高于均值 26.00 mm,后者低于均值 2.92 mm。从年际变化特征看,呈现了 4 个丰枯周期的交替变化,其中 1950—1957 年、1972—1977 年、1988—1992 年、2002—2007 年为偏丰期,1958—1971 年、1978—1987 年、1993—2001 年、2008—2015 年为偏枯期。

从西安市年内季节降水资源的分布特征看(表 2),春夏秋三季的降水量、蒸发量和可利用降水量分布具有一致性,占全年的比例分别高达 95.84%,

95.11%和 97.98%,而冬季所占比例很小,可见年内季节大气降水的各组分分布及其不均匀,不利于水资源的合理利用。四季的蒸发系数远大于可利用降水系数,表明西安市可利用的降水资源很少,原因在于四季的温度呈明显的上升趋势,均通过了 99%的置信度检验,降水均呈减少的趋势;可利用降水与温度呈负相关(表 3),与降水呈正相关,且相关系数达 0.90~0.98(表 3)。总之,近 65 a 西安市四季可利用降水量均减少,对西安市社会、经济可持续发展将产生负面影响。

表 2 1951—2015 年西安各季平均降水资源分布

时段	降水量 <i>P</i> /mm	蒸发量 <i>E</i> /mm	可利用降水量 <i>W</i> /mm	α	β
春	129.42	102.65	26.77	0.793	0.207
夏	233.94	185.46	48.48	0.793	0.207
秋	185.28	118.03	67.25	0.637	0.363
冬	23.80	20.86	2.94	0.877	0.123

表 3 1951—2015 年西安市各季降水、温度和可利用降水的 M-K 检验值及其相关系数

时段	降水 <i>Z</i> 值	温度 <i>Z</i> 值	可利用降水 <i>Z</i> 值	可利用降水与温度的 相关系数	可利用降水与降水的 相关系数
春	-1.91**	5.77***	-1.69**	-0.33	0.93
夏	-0.11	3.09***	-0.75	-0.39	0.91
秋	-1.01	5.88***	-1.12	-0.20	0.98
冬	-1.42*	5.78***	-1.61*	-0.21	0.90

注: *、**和 *** 分别表示通过了信度 90%、95%和 99%的显著性检验。

2.4 年可利用降水量的变化特征

1951—2015 年西安市可利用降水量距平及累积距平演变趋势见图 3。西安市平均年可利用降水量以 1983 年最多,为 395.23 mm,比多年均值多 249.80 mm; 1995 年最少,为 33.61 mm,比多年平均少 111.83 mm。从年代际变化特征来看,20 世纪 90 年代中叶为界,之前可利用降水偏多,波动中上升,之后可利用降水偏少,呈明显的减少趋势。

年降水量、年蒸发量和年可利用降水量的均值分别为 572.44 mm,427.00 mm 和 145.44 mm,可利用降水系数为 0.25。年可利用降水量呈减少趋势,平均每年减少约 0.82 mm,通过了置信度为 95%的检验(表 4),主要因为年均降水和年均温度分别呈减少和增加的趋势,分别通过了置信度为 90%和 99%的显著性检验,且可利用降水与温度和降水的相关系数为-0.25,0.93,再加之蒸发量的 M-K 检验值 *Z* 为 0.22,呈增加的趋势,因此,可利用的降水资源减少明显。

3 全球气候变暖对西安市可利用降水量的影响

在全球变暖的大气候背景下,各地区气候表现出

了一定的差异性与一致性。西安位于西北内陆地区的关中平原腹地,属于暖温带半干旱、半湿润大陆性季风气候,具有明显的区域气候特征,其可利用降水量也具有自身的特点。

由图 4 可知,西安市年均气温总体呈上升趋势,其线性变化的斜率为 0.04℃/a,大于全球年均气温线性变化的斜率 0.01℃/a^[1]。从年际变化看,1951—1993 年西安市气候属于偏冷期,1993—2015 年属于偏暖期,在 1997 年之后气温上升尤为明显。

为了研究全球气候变暖对西安市可利用降水量的影响,选取 1961—1976 年为全球偏冷期及 1997—2006 年为全球偏暖期^[1],分别计算了两个时期西安市全年及四季可利用降水量的平均值。由表 5 可知,在偏冷期,春、秋季和全年可利用降水量相对于多年平均偏多,而夏季和冬季可利用降水量相对于多年平均偏少;在偏暖期,四季和全年可利用降水量相对于多年平均偏少,可见,除了夏季和冬季可利用降水量对偏冷期气候响应不明显,其他时段对不同时期气候响应显著。总的来说,全球气候的不断变暖,西安市可利用降水量减少。

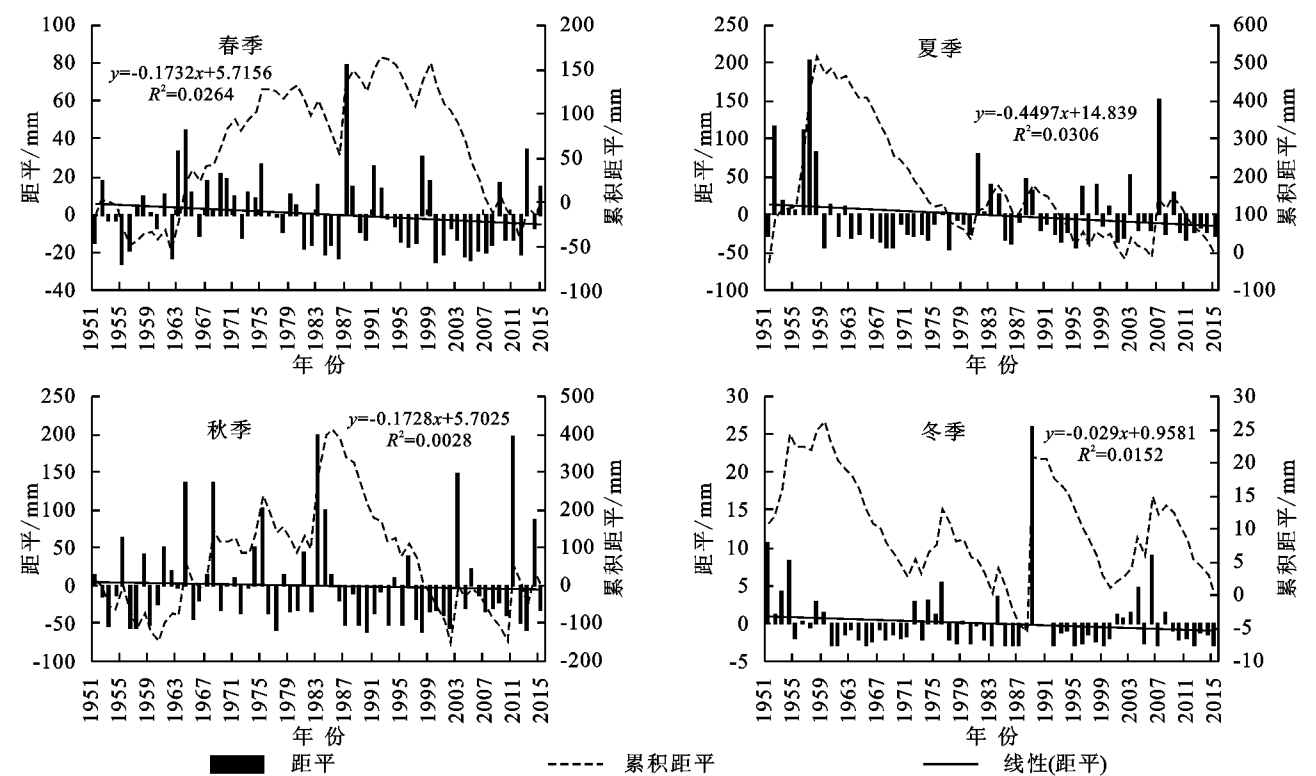


图 2 1951—2015 年西安市季节可利用降水量距平及累积距平

表 4 1951—2015 年西安市年均降水、温度和可利用降水的 M-K 检验值及其相关系数

时段	降水 Z 值	温度 Z 值	可利用降水 Z 值	可利用降水 与温度的相关系数	可利用降水 与降水的相关系数
年	-1.41*	6.53***	-1.99**	-0.25	0.93

注:*,**和***分别表示通过了信度 90%,95%和 99%的显著性检验。

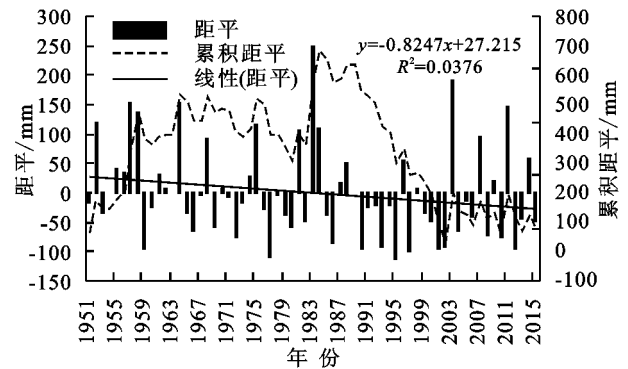


图 3 1951—2015 年西安市年可利用降水量距平及累积距平

表 5 全球气候偏冷、偏暖时期西安各季及全年可利用降水量的差异

时段	偏冷期(1961—1976 年)		偏暖期(1997—2006 年)	
	可利用降水量 均值/mm	可利用降水量 距平/mm	可利用降水量 均值/mm	可利用降水量 距平/mm
春	37.42	10.64	16.24	-10.53
夏	25.97	-22.51	41.08	-7.40
秋	88.95	21.70	56.63	-10.62
冬	2.30	-0.64	-2.83	-0.11
年	154.64	9.19	116.78	-28.66

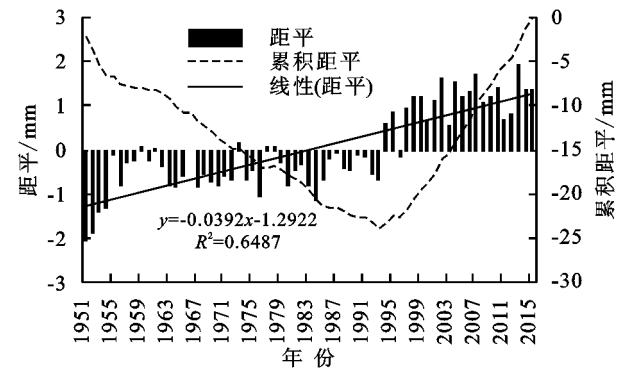


图 4 1951—2015 年西安市年均气温距平及累积距平

4 未来 10 a 大气降水资源的变化趋势预测

4.1 预报要素拟合分析

基于逐步回归周期分析法,建立了年降水量和年蒸发量的预报方程,在此基础上对 1951—2015 年西安市年降水量和年蒸发量进行了拟合,见图 5。在中长期水文预报值相对误差小于 20%的要求下^[21],各要素拟合预报合格率均为 100%,表明模型精度满足要求,完全可以用于预报,此外,对于可利用年降水量的预测,直接采用年降水量和年蒸发量的差值即可。

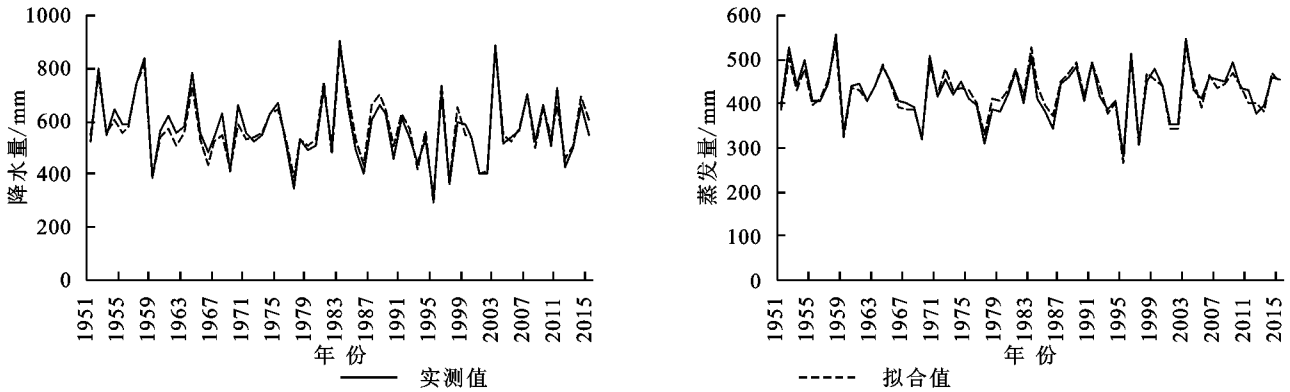


图 5 1951—2015 年西安市年降水量和蒸发量实测与拟合

4.2 各气候要素的预报

表 6 显示,在未来 10 a,西安市年降水量、年蒸发量和可利用年降水量负距平分别有 6 a,7 a 和 6 a,且变化斜率分别为 -4.37 mm/a 、 -1.38 mm/a 和 -2.99 mm/a ,可见,降水量、蒸发量和可利用降水量均呈减少态势。

表 6 未来 10 a 西安市年降水量、年蒸发量及
可利用年降水量及其距平值

年份	年降水量		年蒸发量		可利用年降水量	
	预测值/	距平值/	预测值/	距平值/	预测值/	距平值/
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
2016	591.42	18.98	459.98	32.98	131.44	-14.00
2017	506.43	-66.01	419.31	-7.69	87.12	-58.32
2018	615.18	42.74	420.18	-6.82	195.01	49.57
2019	554.80	-17.64	399.68	-27.32	155.12	9.68
2020	583.79	11.35	456.22	29.22	127.57	-17.87
2021	550.35	-22.09	390.69	-36.31	159.66	14.22
2022	611.71	39.27	426.19	-0.81	185.52	40.08
2023	509.68	-62.76	417.50	-9.50	92.18	-53.26
2024	518.58	-53.86	438.29	11.29	80.29	-65.15
2025	545.26	-27.18	419.96	-7.04	125.30	-20.14

5 结论

(1) 西安市大气降水资源年内分布不均匀,春夏秋冬三季的降水量、蒸发量和可利用降水量占全年的比例分别为 95.84%,95.11%和 97.98%,冬季所占比例很小。可利用降水量除 7 月、9 月、10 月,其他月份均低于 20 mm,降水利用率普遍偏低,蒸发率普遍偏高。此外,四季可利用降水量均减少,气温上升显著,导致年可利用降水量明显减少。

(2) 西安市对全球气候变化的响应程度既有一致性,也有差异性。一致性表现为在偏冷期,春、秋季和全年可利用降水量相对于多年平均偏多,在偏暖期,四季和全年可利用降水量相对于多年平均偏少;差异性表现为在偏冷期,夏季和冬季可利用降水量相对于多年平均偏少。

(3) 基于逐步回归周期原理,西安市未来 10 a 年降水量、年蒸发量和可利用年降水量均以负距平为主,且变化斜率分别为 -4.37 mm/a 、 -1.38 mm/a 和 -2.99 mm/a ,即大气降水资源的减少态势可能会

持续。因此,在未来 10 a 中,应考虑可利用降水量将减少的预测结果,为水资源保护与合理利用提供科学依据,以保证西安市水资源的可持续发展。

参考文献:

[1] 陶云,何华,何群,等. 1961—2006 年云南可利用降水量演变特征[J]. 气候变化研究进展,2010,6(1):8-14.

[2] 陈豫英,冯建民,陈楠. 西北地区东部可利用降水的时空变化特征[J]. 干旱区地理,2012,35(1):56-66.

[3] 秦大河,STOCKER T. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展,2014,10(1):1-6.

[4] 郑金凤,孙虎. 陕西榆林地区降水特征分析[J]. 江西农业学报,2015,27(4):94-98.

[5] 周文婧,夏自强,黄峰,等. 巴尔喀什湖流域降水量及其年内分配的变化特征[J]. 水电能源科学,2013,31(6):10-13.

[6] 徐盼盼,王海科,钱会. 宝鸡地区降水特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(2):86-91.

[7] 刘承晓,张蕾. 江淮流域春季可利用降水量变化特征[J]. 干旱气象,2016,34(6):976-981.

[8] 张小峰,王欣,任余龙. 1959—2008 年汉中盆地可利用降水量演变特征[J]. 陕西农业科学,2011,57(3):83-87.

[9] 李鹏飞,孙小明,赵昕奕. 近 50 年中国干旱半干旱地区降水量与潜在蒸散量分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(7):57-63.

[10] 陈豫英,程楠,王式功,等. 50 a 来宁夏可利用降水的时空变化及其对生态环境的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(4):748-754.

[11] 程肖侠,方建刚,孙娴,等. 陕西省可利用降水资源的气候变化特征及敏感性分析[J]. 水土保持研究,2009,16(5):46-50.

[12] 高蓓,栗珂,李艳丽. 陕西近 40 年气候变化特征的分析[J]. 成都信息工程学报,2006,21(2):290-295.

[13] 祁巍雯,钱会,高盼盼. 可利用降雨量 Z 指数法的西安市气象干旱特征[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):93-98.

[14] 王琼. 降雨资料一致性检验实例计算分析[J]. 黑龙江水利科技,2015,43(11):51-52.

- [9] Jackson R D, Idso S B, Reginato R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. *Water Resources Research*, 1981,17(4):1133-1138.
- [10] Idso S B, Schmugge T J, Jackson R D, et al. The utility of surface temperature measurements for the remote sensing of surface soil water status[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975,80(21):3044-3049.
- [11] 张仁华. 定量热红外遥感模型及地面试验基础[M]. 北京:科学出版社,2009,233-243.
- [12] Wang K, Wang P, Li Z, et al. A simple method to estimate actual evapotranspiration from a combination of net radiation, vegetation index, and temperature[J]. *J Geophys Res*, 2007,112:D15107.
- [13] Liu S, Xu Z, Song L, et al. Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016,230:97-113.
- [14] Xu Z, Liu S, Li X, et al. Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hi-WATER-USOEXE[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013,118(23):140-157.
- [15] Liu S M, Xu Z W, Wang W Z, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2011,15(4):1291-1306.

(上接第 318 页)

- [15] 郭渠,程炳岩,孙卫国,等. 长江上游地区可利用降水量的气候特征[J]. *湖泊科学*,2011,23(1):112-121.
- [16] Takahashi Hiroichiro. The calculation method of monthly average temperature, precipitation and evaporation[J]. *Synoptic(Japan)*,1979,26(12):759-763.
- [17] 高桥浩一郎. 根据月平均气温、月降水量推算蒸散量[J]. *气象科技*,1979,26(12):48-50.
- [18] 吴立君,葛朝霞,曹琨,等. 西北地区可利用年降水量趋势分析及预测[J]. *人民黄河*,2011,33(12):51-55.
- [19] 葛朝霞,曹丽青,薛梅,等. 近 50 a 来南疆气候变化对可利用降水量的影响[J]. *河海大学学报:自然科学版*,2010,38(1):6-9.
- [20] 旦木仁加甫. 中长期水文预报与 SPSS 应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,2011.
- [21] 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):15-21.

(上接第 324 页)

- [9] 韩振宇,周天军. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性[J]. *大气科学*,2012,36(2):361-373.
- [10] 刘少华,严登华,王浩,等. 中国大陆流域分区 TRMM 降水质量评价[J]. *水科学进展*,2016,27(5):639-651.
- [11] 田苗,李卫国. 基于 TRMM 遥感数据的旱涝时空特征分析[J]. *农业机械学报*,2015,46(5):252-257.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[J]. *Proceedings of the 8 th Conference on Applied Climatology*. Boston, Ma; American Meteorological Society, 1993,17(22):179-183.
- [13] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. *农业工程学*,2010,26(7):50-59.
- [14] 王丹云,吕世华,韩博,等. 近 30 年黄土高原春季降水特征与春旱变化的关系[J]. *高原气象*,2017,36(2):395-406.
- [15] Hurst H E. Long term storage capacity of reservoirs[J]. *Trans American Society of Civil Engineers*, 1951,116(12):776-808.
- [16] 刘琳,徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测[J]. *自然资源学报*,2014,29(10):1792-1801.
- [17] 孙东永,黄强,王义民. 基于 V/S 分析的河川径流长记忆性研究[J]. *水力发电学报*,2011,30(6):178-182.
- [18] 邬长福,涂志刚,万佳威,等. 基于 R/S 分析与 V/S 分析的滑坡变形趋势判断及稳定性研究[J]. *水电能源科学*,2015,33(1):111-114.

(上接第 329 页)

- [27] Trenberth K E, Hoar T J. The 1990—1995 El Nino-Southern Oscillation Event; Longest on Record [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996,23(1):57-60.
- [28] Kiladis G N, Van Loon H. The Southern Oscillation. Part VII: Meteorological Anomalies over the Indian and Pacific Sectors Associated with the Extremes of the Oscillation[J]. *Monthly Weather Review*, 1988,116(1):120-136.
- [29] 胡姝,孙立尹,李英. 热带气旋结构和强度变化研究进展[J]. *气象与环境学报*,2014,30(4):91-98.
- [30] 王坚红,曾喻,彭模,等. 中国南部沿海暴雨东风波特征及 SST 影响机制研究[J]. *大气科学学报*,2017,40(3):333-345.
- [31] 湛芸,施能. 厄尔尼诺/南方涛动与我国秋季气候异常[J]. *热带气象学报*,2003,19(2):137-146.