

渭河流域降水时空变化与干旱特征分析

刘梅¹, 魏加华^{1,2}, 王峰³

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 青海大学水利电力学院, 西宁 810016;
3. 南水北调中线干线工程建设管理局, 北京 100038)

摘要: 以渭河流域 14 个典型气象站降水资料为基础, 应用 Mann Kendall 趋势检验法、频率分析法、差积曲线法以及游程分析法对研究区的降水变化规律及少水概率特征进行了研究。结果显示: 40 多年来渭河流域降水量呈明显减少趋势, 以春、秋两季最为明显, 这增加了区域发生干旱的可能性; 流域降水过程呈丰枯交替的周期性现象, 连丰或连枯较易发生, 且存在干旱与洪涝并发现象; 连枯年的概率比连丰年概率大, 且少水期常持续 2~3 a, 引发的干旱强度较大; 1991 年以后渭河流域干旱事件的频率、强度和烈度均有增加趋势, 未来渭河流域的农业发展与水安全将面临更大的威胁, 必须予以高度关注。

关键词: 降水变化; 游程分析; Mann Kendall 法; 频率分析; SPI 指数

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0193-05

Spatial-temporal variations of precipitation and drought characteristics in Wei River Basin

LIU Mei¹, WEI Jiāhua^{1,2}, WANG Feng³

(1. State Key Laboratory of Hydro Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Qinghai University College of Hydraulic and Electric Engineering, Xining 810016, China;

3. Construction and Administration Bureau of South to North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China)

Abstract: The Wei River Basin is located at a typical frail zone of ecological environment in the east part of northwest China, where frequent drought disasters become the major factor which restricts the sustainable development of regional economy, especially the agricultural economy. Therefore, it is important study the high and low water changes of precipitation and drought characteristics in the basin to understand the cause and development law of drought. Based on the precipitation data from 14 typical weather stations, according to the methods such as Mann Kendall trend test, frequency analysis, differential curve, and runs analysis, variation trends of precipitation and less water probability characteristics were analyzed. The results showed that: (1) precipitation has a significantly decreasing trend, especially in spring and autumn in the recent 40 years, which increases the occurring possibility of regional drought; (2) the precipitation process presents the wet dry alternating phenomenon, continual wet years and dry years occurring and overlapping frequently, which indicates that the drought and flood may coexist in one year; (3) the occurrence probability of continual dry years is higher than that of continual wet years, and less water period can last for 2 to 3 years, which leads to drought with larger intensity; and (4) the frequency and intensity of drought events have an increasing trend in Wei River Basin since 1991. Therefore, it should be paid high attention to the bigger threat of agricultural development and water safety in the future.

Key words: precipitation change; runs analysis; Mann Kendall test; frequency analysis; SPI index

渭河流域地处我国西北地区东部生态环境脆弱带, 是我国西北地区重要的粮食产区和工业发展区。自古以来, 该流域自然灾害多发^[1], 其中旱灾最为频繁, 危害最大, 已成为制约该地区国民经济特别是农业经济和农业持续发展的主要

因素。20 世纪 90 年代以来, 渭河中游西安、宝鸡、咸阳等地经济发展迅速, 目前流域内已拥有五个重点城市、八个工业园区和四个国家级农业灌区(冯家山、宝鸡峡、泾惠渠和交口抽渭灌区), 强大的经济发展势头背后隐藏着对水资源

收稿日期: 2014-09-23 修回日期: 2015-02-17 网络出版时间: 2014-03-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.0926.004.html>

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2013BAB05B03); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室项目(2012-KY-05)

作者简介: 刘梅(1984), 女, 河北石家庄人, 工程师, 博士, 主要从事水文水资源、环境规划与管理研究。E-mail: liumei0325@163.com

的高度依赖与需求。然而,受气候变化和人类活动的影响,渭河及其支流水资源均大幅缩减^[2],区域水资源安全形势极为严峻,亟需对该地区的干旱时空规律展开研究,为科学合理地制定抗旱策略提供支持。

渭河流域或关中地区的干旱问题已引起许多专家学者的关注,如朱拥军和王秀花分析发现渭河上游年降水量在空间上存在量的差异,水资源对气候变化有很强的敏感性,未来 20 a 渭河流域降水量很可能呈缓慢上升趋势^[3];和宛琳对渭河流域 21 个气象站近 40 a 的降水量时空分布和变化趋势进行了分析,发现降水量呈减少趋势,干旱发生频率有增加趋势,年平均降水量空间分布规律为从西北部向东南部逐渐增加^[4];马明卫等以西安站为例,详细对比了 Z 指数与 SPI 计算结果的一致性和差异性,认为多时间尺度 SPI 能够反映出降水的分散情况,提出降水量区间与干旱指标的对应关系是进行旱涝监测和预报的一种有效手段^[5]。这些研究有助于揭示渭河流域干旱的发生规律和表现特征。本文以渭河流域为研究对象,通过对流域内 14 个典型站点 46 年的逐月降水量变化趋势、丰枯规律的分析,研究该地区少水事件的发生频率及其周期变化,并采用 SPI 指数进一步研究该区域发生干旱的频率、强度和烈度,旨在为渭河流域干旱事件的时空规律与驱动机制的研究奠定基础。

1 研究区概况与资料来源

渭河发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧,是黄河第一大支流,于潼关处流入黄河,全长 818 km,流域面积 13 48 万 km²。流域地形差异较大,表现为西高东低,最大高差 3 000 m 以上。流域属暖温带半湿润气候区,为典型的大陆性季风气候,年均气温 10 ℃ 左右,年均降雨量 550 mm,年蒸发量 1 100 mm 左右,径流量年内分配极不均匀;降雨量和蒸发量年际变化较大,空间差异较大,降雨量从南向西逐步递减,蒸发量由北向南、由东向西递减。

渭河为降雨补给型河流,径流在空间分布上南多北少,山区多,盆地少。从年内看,汛期连续最大 4 个月(7 月-10 月)径流量约占全年径流量的 50%~70%左右,枯水期 3 个月(12 月至次年 2 月)径流量只占年径流的 5%~17%;从年际看,变差系数 C_v 在 0.21~0.29 之间,径流量年际差异较大。

本研究选用渭河流域 14 个典型气象站 1961 年-2006 年共 46 年的逐月降水数据,各站点名称及空间分布见图 1。降水数据来源于中国气象科学数据共享服务网。

2 研究方法

为分析渭河流域降水的丰枯变化规律和干旱特征,本文选取 Mann-Kendall 趋势检验法(以下简称 M-K 法)对降水变化进行趋势性检验,应用频率分析法和差积曲线法获取降水丰枯变化的空间特征^[6],采用游程分析法对连续少水年概率进行统计^[7],最后应用 SPI 指数对气象干旱特征进行研究。

(1) M-K 法。

M-K 法是世界气象组织推荐的一种非参数检验方法,广泛用于时间序列的趋势变化研究^[8,9]。由于水文序列存在自相关问题,很多学者对 M-K 法提出了改进,如白化(PW)^[10]、去趋势白化(TFPW)^[11]等,以此降低自相关性的

影响,避免无效假设。本研究中,由于降水序列近似为平稳序列,故可采用一般 M-K 法。



图 1 渭河流域典型气象站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological station in Wei River Basin

设一平稳序列为 X_t , ($t = 1, 2, \dots, n$, n 为序列长度), 定义统计量 S 为

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

其中 $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 为符号函数。

$$\text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

当 $n \geq 10$ 时,统计量 s 近似服从正态分布,其正态分布的检验统计量 Z 用下式计算:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Z 为正值时表示增加趋势, Z 为负值时表示减少趋势,当 $|Z| \geq 1.96$ 或 2.58 时,表示分别通过了信度 95%、99% 的显著性检验。

(2) 标准化降水指数 SPI。

标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)是由世界气象组织(WMO)建议采用的监测干旱严重程度的一种指标^[12]。首先采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化,然后再经正态标准化即可求得 SPI 值^[13]。对于长期气候状况, SPI 可反映某观测雨量可能出现的几率。干旱严重程度可根据相应 SPI 的负值大小来划分等级, SPI 负值愈大表示干旱愈严重。SPI 的另一个特点是可应用于不同的时间尺度,以分析干旱现象对各类水资源需求的影响,例如, SPI-3 是指 3 个月的雨量状况,一般只影响土壤含水量或农作物收成;而 SPI-24 则指持续两年的雨量状况,这可能导致地下水、河川流量和水塘蓄水量变化等情况。SPI 的优势在于其只需要利用雨量来计算,需求数据量小,且可用来比较不同气候区域的旱涝情况。

根据前人的研究成果和生产经验,本文采用标准化降水指标 SPI 作为气象干旱等级的划分指标^[13](表 1)。

表 1 降水指标的干旱等级划分

Tab. 1 Drought level of SPI index

Z 值	等级	类型
$-0.5 < Z$	V1	不发生干旱
$-1 < Z \leq -0.5$	V2	轻度干旱
$-1.5 < Z \leq -1$	V3	中度干旱
$-2 < Z \leq -1.5$	V4	重度干旱
$Z \leq -2$	V5	极度干旱

3 降水变化趋势分析

将渭河流域 14 个气象站的降水资料进行泰森多边形计算,得到流域的面平均降水量,其多年变化过程见图 2,可以看出渭河流域的降水过程总体上呈现减少趋势,且有明显的周期变化特征。

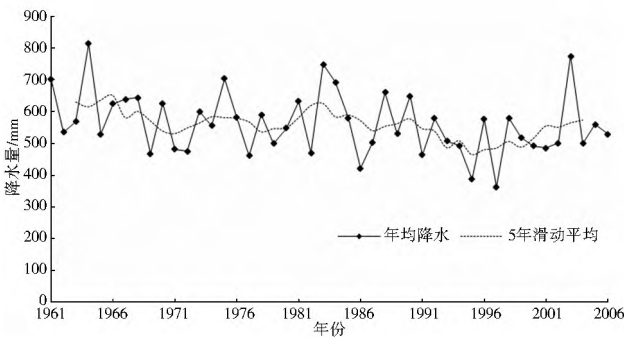


图 2 渭河流域年降水量变化

Fig. 2 Variation of annual average precipitation in Wei River Basin

为了进一步验证上述结论,采用 M-K 法对渭河流域年平均降水量进行趋势检验,结果显示渭河流域年平均降水量的趋势检验指标为 -1.95 ,即存在统计意义上的单调递减趋势,可见 40 多年来渭河流域的降水量呈较为明显减少趋势。将降水量过程进行分时段统计(图 3),发现 60 年代的降水量最多,以后基本上呈现减少趋势,其中 90 年代降幅最大,较 60 年代减少 119 mm,缩减比例近 20%。降水量的减少无疑加大了渭河流域发生干旱事件的频度和烈度。

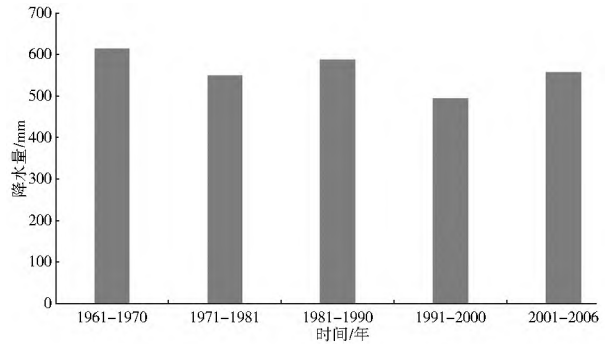


图 3 不同年代的降水统计

Fig. 3 Annual average precipitation in different decades

应用 M-K 法分别对不同月份趋势性进行分析,结果见表 2。不难发现,各月趋势变化并不相同,下降最显著的是 4 月、9 月、11 月,而上升变化不显著。从季节上看,渭河流域夏季(6 月-8 月)和冬季(12 月-2 月)降水量表现出微弱的上升趋势,而春(3 月-5 月)、秋(9 月-11 月)两季有明显的下降趋势。

表 2 降水年内分布的 M-K 法计算结果

Tab. 2 Temporal distribution of M-K trend test on precipitation

时间	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
倾斜度	0.456	0.413	-1.146	-5.618	-1.554	4.247	-2.210	1.036	-9.507	-1.947	-3.537	0.088
Z	1.023	0.587	-1.212	-2.443	-0.417	1.799	-0.587	0.227	-2.007	-0.568	-2.519	0.246

注:倾斜度指序列整体趋势变化率。

从空间分布上看,渭河流域的 14 个气象站点均表现为下降趋势,其中华家岭、华山较显著,其他站点不显著,这与流域面降水量的检验结果相一致。

4 降水丰枯特征分析

应用频率分析方法,以 14 个气象站点的降水数据为基础,对渭河流域各站点降水的丰枯频率进行计算,结果显示(表 4):多年平均降水量为 414 ~ 819 mm,变差系数值为 0.20~0.28,流域少水与多水频率基本相当,分别为 53% 和 47%。结合枯水、偏枯、偏丰、丰水四个等级的划分标准^[9],

可知各等级出现的平均频率为偏枯年(37.4%)、偏丰年(31.8%)、枯水年(15.8%)、丰水年(15%),少水年份出现的概率略高于多水年份。

通过绘制渭河流域部分气象站年际降水过程线(图 4),可发现各气象站存在丰水年和枯水年交替出现的周期性现象,以 12~15 a 周期较为明显。从华家岭和华山两个降水缩减趋势较为明显的站点过程线看,其下降过程主要集中在 1990 年以后。图 5 为部分站点年平均降水量差积曲线,显示差积曲线上升段和下降段持续时间较长,说明站点降水出现连丰或连枯的概率较大。

表 3 降水空间分布的 M-K 法计算结果

Tab. 3 Spatial distribution of M-K trend test on precipitation

站点	华家岭	西吉	华山	武功	环县	西锋镇	长武	吴旗	平凉	洛川	铜川	天水	宝鸡	西安
多年均值/mm	487.95	413.61	818.50	593.48	433.16	554.55	583.75	460.90	507.16	611.97	595.09	517.33	662.03	559.88
倾斜度	-2.850	-1.693	-5.159	-2.255	-1.650	-1.940	-1.714	-1.892	-1.550	-1.808	-1.453	-2.567	-3.254	-1.806
Z	-2.159	-1.562	-2.992	-1.250	-1.515	-1.155	-1.165	-1.174	-1.269	-1.326	-0.992	-1.695	-1.608	-1.399

表 4 渭河流域气象站降水丰枯特征

Tab. 4 Precipitation wet and dry characteristics at the meteorological stations in Wei River Basin

站点	华家岭	西吉	华山	武功	铜川	天水	宝鸡	西安	环县	西锋镇	长武	吴旗	平凉	洛川	平均
资料年数	<i>N</i>	46.00	46.00	46.00	46.00	39.00	43.00	44.00	45.00	46.00	46.00	46.00	46.00	46.00	45.07
干旱年数	<i>n</i>	25.00	25.00	21.00	26.00	20.00	25.00	24.00	26.00	22.00	26.00	22.00	24.00	23.00	23.93
少水频率 (%)		0.54	0.54	0.46	0.57	0.51	0.58	0.55	0.58	0.48	0.57	0.57	0.48	0.52	0.53
丰枯频率 (%)	枯水	0.15	0.11	0.13	0.17	0.13	0.16	0.20	0.16	0.20	0.15	0.15	0.20	0.13	0.17
	少水	0.39	0.43	0.33	0.39	0.38	0.42	0.34	0.42	0.28	0.41	0.41	0.30	0.39	0.33
	小计	0.54	0.54	0.46	0.57	0.51	0.58	0.55	0.58	0.48	0.57	0.57	0.50	0.52	0.50
	偏丰	0.24	0.30	0.41	0.28	0.33	0.23	0.27	0.31	0.41	0.26	0.33	0.37	0.30	0.39
	多水	0.22	0.15	0.13	0.15	0.15	0.19	0.18	0.11	0.11	0.17	0.11	0.13	0.17	0.11
	小计	0.46	0.46	0.54	0.43	0.49	0.42	0.45	0.42	0.52	0.43	0.43	0.50	0.48	0.50

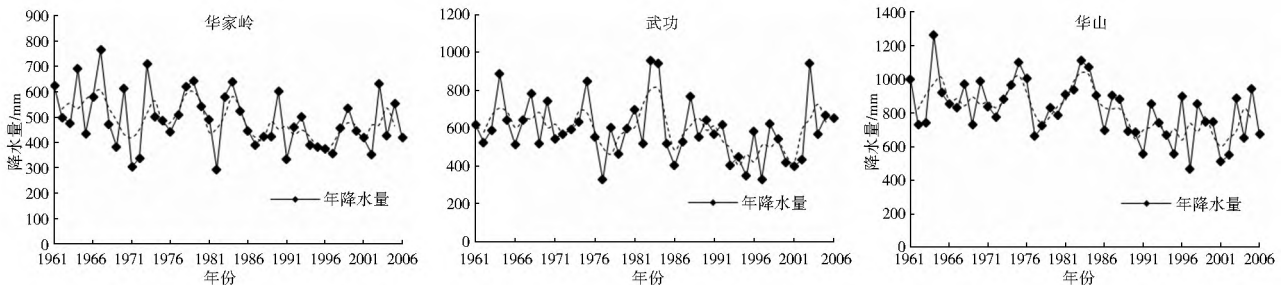


图 4 渭河流域典型站降水量过程线

Fig. 4 Precipitation process at typical stations in Wei River Basin



图 5 渭河流域典型站降水差积曲线

Fig. 5 Differential curve at typical stations in Wei River Basin

应用游程分析方法进一步分析渭河流域各站点的连续多水、少水年概率,结果显示(表 5),渭河流域各站点 1 年多(少)水出现的概率比连续多年多水(少水)的概率大;连续多水期大多持续 1~ 2 a,而连续少水期大多持续 2~ 3 a,持续 4 a 以上的概率较小;少水年分布参数 *P* 值均大于多水年,可见连续少水年的概率相对较大。

5 气象干旱分析

通过对渭河流域逐月面降水量的 *SPI* 指数计算,得到长系列的 *SPI* 指数变化过程见图 6。由统计分析可知,渭河流域历年干旱事件中,有 383 个月不发生干旱,占总时段的 69.38%;77 个月发生轻度干旱,占总时段的 13.95%;54 个月发生中度干旱,占 9.78%;26 个月发生重度干旱,占 4.71%;12 个月发生极度干旱,占 2.18%。平均每年会有 2 个月处于中度干旱以上,可见渭河流域的干旱情势仍是不容乐观的。

从图 6 中不难看出,1990 年以后发生中度以上干旱事件的时长明显增加,尤其是极度干旱,1991 年- 2005 年的 15 a

间共发生 7 次,是 1991 年以前 42 a 中发生的 1.4 倍,表明由于近年来降水量持续缩减,区域发生干旱的频率、强度和烈度都有增加趋势,未来渭河流域的干旱将面临更大的威胁,必须予以高度关注。

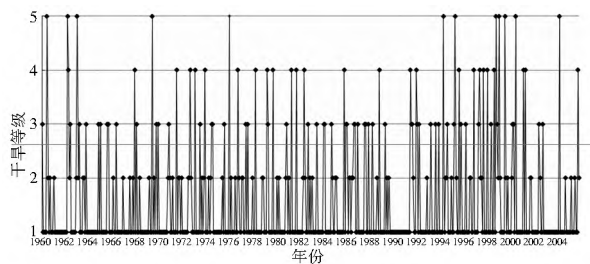


图 6 渭河流域气象干旱 *SPI* 等级变化

Fig. 6 Inter-annual distribution of drought level in Wei River Basin

6 结论

(1) 46 年来,渭河全流域降水量呈减少趋势,20 世纪 90 年代降幅最大,较 60 年代缩减近 20%,且一年中以 4 月、9

月和 11 月的减少趋势最为显著,春、秋两季减少较明显,而 空间上以华家岭、华山两站的减少最为显著。

表 5 渭河流域连续多水年和少水年游程分析

Tab. 5 Runs analysis on the continual dry and wet years in Wei River Basin

站点	华家岭	西吉	华山	武功	铜川	天水	宝鸡	西安	环县	西锋镇	长武	吴旗	平凉	洛川	平均	
频次统计	1年	7	7	7	8	5	8	5	7	5	12	10	7	8	10	7.57
	2年	3	1	2	6	3	2	4	3	0	1	3	1	1	3	2.36
	3年	1	2	0	0	0	2	1	2	5	2	0	2	4	1	1.57
	4年	0	0	1	0	2	0	1	0	1	0	1	2	0	1	0.64
	≥5年	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.29
游程	1年	5	4	7	7	3	6	6	5	5	6	9	5	7	8	5.93
	2年	4	4	2	2	3	3	1	3	2	5	1	3	3	3	2.79
	3年	1	2	2	2	2	0	1	2	3	2	2	4	2	3	2.00
	4年	1	0	1	1	0	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0.71
	≥5年	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0.64
游程概率	1年	0.57	0.52	0.48	0.70	0.53	0.67	0.55	0.63	0.46	0.75	0.70	0.52	0.59	0.65	0.59
	2年	0.24	0.25	0.25	0.21	0.25	0.22	0.25	0.23	0.25	0.19	0.21	0.25	0.24	0.23	0.23
	3年	0.10	0.12	0.13	0.06	0.12	0.07	0.11	0.09	0.13	0.05	0.06	0.12	0.10	0.08	0.10
	4年	0.04	0.06	0.07	0.02	0.06	0.02	0.05	0.03	0.07	0.01	0.02	0.06	0.04	0.03	0.04
	≥5年	0.02	0.01	0.07	0.01	0.03	0.01	0.02	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02
ρ	0.43	0.48	0.52	0.30	0.47	0.33	0.45	0.37	0.54	0.25	0.30	0.48	0.41	0.35	0.41	
平均连续年数	1.75	1.91	2.08	1.43	1.90	1.50	1.82	1.58	2.18	1.33	1.43	1.92	1.69	1.53	1.72	
游程	1年	0.48	0.44	0.57	0.50	0.45	0.44	0.46	0.46	0.50	0.54	0.54	0.52	0.54	0.61	0.50
	2年	0.25	0.25	0.24	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24	0.25
	3年	0.13	0.14	0.10	0.13	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.11	0.11	0.12	0.11	0.09	0.12
	4年	0.07	0.08	0.04	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06
	≥5年	0.04	0.01	0.02	0.03	0.04	0.00	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.03
ρ	0.52	0.56	0.43	0.50	0.55	0.56	0.54	0.54	0.50	0.46	0.46	0.48	0.46	0.39	0.50	
平均连续年数	2.08	2.27	1.75	2.00	2.22	2.27	2.18	2.17	2.00	1.86	1.86	1.92	1.85	1.64	2.01	

(2) 渭河流域少水年发生的频率为 53%, 枯水年频率多在 12% 以上, 说明该地区容易发生气象干旱。流域降水表现出丰水年和枯水年交替出现的周期性现象, 连丰或连枯较易发生, 且连少年的概率比连多年的概率大。流域少水期大多持续 2~ 3 a, 且干旱强度较大。

(3) 渭河流域干旱事件频发, 平均每年会有 2 个月处于中度干旱以上, 且 1991 年以后干旱的频率、强度和烈度都有增加趋势, 渭河流域的干旱情势不容乐观。

参考文献(References):

[1] 杜继稳. 陕西省干旱监测预警评估与风险管理[M]. 气象出版社, 2008. (DU Jiwen. Drought monitoring forecasting assessment and hazard management in Shaanxi Province[M]. China Meteorological Press, 2008. (in Chinese))

[2] 粟晓玲, 康绍忠, 魏晓妹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(2): 153-159. (SU Xiaoling, KANG Shaoyong, WEI Xiaomei, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 35(2): 153-159. (in Chinese))

[3] 朱拥军, 王秀花. 渭河上游干旱特征与降水对天水市水资源的影响[J]. 干旱气象, 2003, 21(4): 50-54. (ZHU Yongjun, WANG Xihua. The drought character in upper area of Wei

River and precipitation influence on water resource in Tianshui [J]. Arid Meteorology, 2003, 21(4): 50-54. (in Chinese))

[4] 和婉琳. 渭河流域干旱情势分析及其预测[D]. 北京: 北京师范大学, 2006. (HE Wanlin. Drought analysis and prediction in the Wei River Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2006. (in Chinese))

[5] 马明卫, 宋松柏. 渭河流域干旱指标空间分布研究[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 681-691. (MA Mingwei, SONG Songbai. Study on spatial distribution of drought indices in the Wei River basin[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(4): 681-691. (in Chinese))

[6] Gonzalez J, Valdes J B. The mean frequency of recurrence of intertime multi-dimensional events for drought analysis[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2004, 4: 17-28.

[7] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales[A]. Paper Presented at 8th Conference on Applied Climatology[C]. American Meteorological Society, Anaheim, CA, 1993.

[8] Mann H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrical, 1945, 13: 245-259.

[9] Burn D H, Hag Elnur, M A. Detection of Hydrologic Trends and Variability[J]. Journal of Hydrology, 2002, 255(1): 107-122.

[10] Hamed K H. Enhancing the Effectiveness of Prewhitening in Trend Analysis of Hydrologic Data[J]. Journal of Hydrology, 2009, 368(1): 143-155.

(下转第 210 页)

(5) 丹江口水库天然入库径流量 20 世纪 90 年代初至 2002 年的持续下降只是其丰枯周期性变化过程中的枯水期。

参考文献(References):

- [1] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 丹江口水利枢纽大坝加高工程可行性研究报告[R]. 2003. (Changjiang Water Resources Commission Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research. Feasibility study report of Danjiangkou hydroelectric project[R]. 2003. (in Chinese))
- [2] 郭海晋, 金蓉玲. 丹江口水库上游水资源现状及变化趋势分析[J]. 自然资源, 1997(1): 28-33. (GUO Haijin, JIN Rongling. Analysis of present state of water resources and its changing tendency for the upstream of Danjiangkou reservoir[J]. Natural Resources, 1997(1): 28-33. (in Chinese))
- [3] 李桃英, 殷峻暹, 张丽丽, 等. 汉江上游径流演变趋势及影响因素分析[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 19-22. (LI Taoying, YIN Junxian, ZHANG Lili, et al. Analysis on runoff evolution trend of upper Hanjiang River and its influential factors[J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 19-22. (in Chinese))
- [4] 张洪刚, 王辉, 徐德龙, 等. 汉江上游降水与径流变化趋势研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 27-30. (ZHANG Honggang, WANG Hui, XU Delong, et al. Changing tendency of water resources for upper Hanjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5): 27-30. (in Chinese))
- [5] 李明新, 吕孙云, 徐德龙. 汉江上游水资源量变化趋势分析[J]. 人民长江, 2008, 39(17): 49-52. (LI Mingxin, LYU Sunyun, XU Delong. Trend of water resources for Hanjiang upstream[J]. Yangtze River, 2008, 39(17): 49-52. (in Chinese))
- [6] 陈华, 郭生练, 郭海晋, 等. 汉江流域 1951-2003 年降水气温时空变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(13): 340-345. (CHEN Hua, GUO Shenglian, GUO Haijin, et al. Temporal and spatial trend in the precipitation and temperature from 1951 to 2003 in the Hanjiang Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(13): 340-345. (in Chinese))
- [7] CHEN Hua, GUO Shenglian, XU Chongyu, et al. Historical temporal trends of hydroclimatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin[J]. Journal of hydrology, 2007, 344: 171-184.
- [8] 张利平, 胡志芳, 秦琳琳, 等. 2050 年前南水北调中线工程水源区地表径流的变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(6): 383-386. (ZHANG Liping, HU Zhifang, QIN Linyin, et al. Surface runoff changes in the water source area for the Middle Route Project of South to North Water Transfer before 2050[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(6): 383-386. (in Chinese))
- [9] 赵红莉, 陈宁, 蒋云钟, 等. 汉江上游水资源时空演变及成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 90-93, 185. (ZHAO Hongli, CHEN Ning, JIANG Yunzhong, et al. Temporal spatial evolution of water resources in the upstream of the Hanjiang River basin and the cause analysis[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 90-93, 185. (in Chinese))

(上接第 197 页)

- [11] Yue S, Pilon P, Phinney B, et al. The Influence of Autocorrelation on the Ability to Detect Trend in Hydrological Series[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9): 1807-1829.
- [12] Michaelides S, Pashiardis S. Monitoring Drought in Cyprus During the 2007-2008 Hydro Meteorological Year by Using the Standardized Precipitation Index (SPI)[J]. European Water, 2008, 23(24): 123-131.
- [13] 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 224-226. (TAN Xue zhi, SU Xiao ling, SHAO Dong guo. Analysis of spatial and temporal characteristics to meteorological drought in Guanzhong Region of Shanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 224-226. (in Chinese))