

渭河流域降雨结构时空演变特征

蔡新玲¹, 蔡依暉², 叶殿秀³, 乔秋文⁴, 路岑之², 赵晓萌¹, 李茜¹

(1. 陕西省气候中心, 西安 710014; 2. 西安市周至县水务局, 陕西 周至 710400;

3. 国家气候中心, 北京 100081; 4. 国家电网西北电力调控分中心, 西安 710004)

摘要:为研究气候变化背景下渭河流域降水结构的时空变化,利用渭河流域71个气象站1981—2012年汛期(5—9月)逐时降水资料,选取降水发生率和降水贡献率两个指标,结合线性倾向率和非参数Mann-Kendall检验法探讨了流域降水结构的变化趋势及不同降水历时和不同降水等级的空间变化特征。结果表明:(1)渭河流域各历时降水发生率随历时增加呈指数形式快速递减,降水贡献率随历时增长先快速增大,后波动减小。流域上游短历时降水发生率和贡献率较高,而流域中下游长历时降水发生率和贡献率较高。(2)渭河流域1~6 h的短历时和48 h以上长历时降水发生率和贡献率均表现为减小趋势,7~24 h历时降水发生率和贡献率为增加趋势,这种变化趋势在流域的中下游更加显著。(3)渭河流域降水发生率随降水等级的增加呈指数下降,小雨发生率最高,而暴雨的发生率最低。比较而言,流域上游小雨和中雨的发生率和贡献率较高,而流域中下游大雨和暴雨发生率和贡献率较高,特别是在渭河干流,暴雨贡献率在25%以上。(4)渭河流域小雨级别的降水事件发生率和贡献率均表现为显著的下降趋势,而暴雨级别降水发生率和贡献率表现为增加趋势,这种变化趋势将可能使流域防洪形势趋于严峻。

关键词:渭河流域; 降水历时; 降水等级

中图分类号: P426.62+3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0370-06

Spatiotemporal Variability Characteristics of Precipitation Pattern in Weihe River Basin

CAI Xinling¹, CAI Yixuan², YE Dianxiu², QIAO Qiuwen⁴, LU Cenzhi², ZHAO Xiaomeng¹, LI Qian¹

(1. Shaanxi Provincial Climate Center, Xi'an 710014, China; 2. Zhouzhi county

Water Authority, Xi'an 710400, China; 3. National Climate Center, Beijing 100081, China;

4. Northwest Electric Power Dispatching and Control Sub-center of State Grid, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the temporal and spatial variation of precipitation pattern in Weihe River Basin under the background of climate change, the change trend of precipitation pattern and the spatial variation characteristics of different precipitation durations and different precipitation grades were discussed by using the incidence rate, contribution rate of precipitation and the method of linear tendency rate and non-parametric Mann-Kendall test. The data included hourly precipitation covering 1981—2012 in 71 meteorological stations in the Weihe River basin. The results show that: (1) the precipitation occurrence rate decreases rapidly with the increase of precipitation time; the contribution rate of precipitation increases rapidly with the increase of precipitation time, and then decreases in Weihe River Basin; the short duration precipitation has a high occurrence rate and the contribution rate in the upper reaches of the river basin, and the duration precipitation occurrence rate and contribution rate are higher in the middle and lower reaches of the river basin; (2) the long duration precipitation rate and contribution rate show the decreasing trend from 1 to 6 h of short duration and more than 48 hours in Weihe River Basin, and the increasing trend in 7 to 24 h, This trend is more significant in the middle and lower reaches of the basin; (3) the precipitation rate decreases exponentially with the increase of precipitation grades, the occurrence rate of sprinkle is the highest, and the rainstorm is the lowest in Weihe River Basin; the occurrence rate and contribution rate of sprinkle and moderate rain are higher in upstream, and heavy rain and rainstorm are higher in the middle and lower basin, especially in the mainstream of Weihe River, the rainstorm contribution rate is more than 25%; (4) the occurrence rate and

收稿日期: 2016-06-12

修回日期: 2016-09-28

资助项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目“基于相似理论的渭河致洪秋雨短期气候预测方法研究”(2012JM5012); “陕西省环境气象影响评估及霾预测研究”(2014JM2-4038); 陕西省社发攻关项目“陕西气象干旱事件监测预警及评估技术研究”(2016SF-419)

第一作者: 蔡新玲(1969—), 女, 陕西周至人, 高级工程师, 主要从事气候变化研究工作。E-mail: caixinling@126.com

contribution rate of sprinkle show a significant downward trend and the rainstorm performs an increasing trend in Weihe River Basin, this trend will likely make the watershed flood control situation tends severe.

Keywords: Weihe River Basin; precipitation duration; precipitation grades

全球变暖和人类活动引起区域乃至全球范围内水循环发生变异,从而导致区域洪涝、高温、干旱等水文气象极端事件的频发,给人类社会经济的快速发展和生态文明建设造成了重要影响^[1-2]。大气降水作为水循环过程的主要驱动因素,深入了解其结构变化特征有助于探索区域水循环的变异规律^[3-4]。国内外学者已经开展了大量的研究工作以探讨全球或区域降水演变特征,获得了若干新的认识。研究发现,近半个世纪中国平均年降水量变化趋势不明显,但降水强度在增强^[5]。中国区域极端降水研究表明,长江中下游地区极端强降水量、降水强度与日数呈显著增加趋势。西北大部地区极端降水事件频率显著增加,东北东部及华北大部在减少^[6]。Yu et al^[7]基于小时降水资料分析了中国大陆地区夏季降水变化特征,发现降水发生了结构性调整^[8]。

渭河是黄河的最大支流,是陕西关中地区的生命河。在气候变暖背景下,该流域的降水结构也发生了较大的变化,区域经济社会已表现出高度的敏感^[9]。以往的研究由于资料时空精度所限,对日、月、年等尺度的降水变化研究较多^[10-12],但是,许多水文过程、土壤侵蚀和防洪排涝工程等都需要更短时间尺度上的降水资料来刻画^[13-17]。因此利用小时尺度降水资料对渭河流域不同历时和不同等级降水的演变规律进行研究,有助于了解区域水循环变异特征,同时对评价流域气候特征和改进降雨预报预测性能以及流域防汛安全与水资源管理等方面都有重要作用。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

渭河是黄河最大的支流,发源于甘肃省渭源县鸟鼠山,自西向东流经甘肃、宁夏、陕西三省(区)的84个县,在陕西省潼关县注入黄河。流域位于 $104^{\circ}00'—110^{\circ}20'E$ 和 $33^{\circ}50'—37^{\circ}18'N$,总面积13.48万 km^2 。流域地形西高东低,北部为黄土高原,南部为秦岭山区。由北洛河、泾河2大支流和渭河干流组成^[9]。渭河流域地处我国西北地区东部干旱和湿润区的过渡地带,属大陆性季风气候。多年平均降水量572 mm,总体分布南多北少。降水量年际变率大,年内时空分配不均。洪涝和干旱灾害频繁,且程度重,危害大,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。因此,研究渭河流域降水结构的时空变化,对流域水资源可持续开发、生态

环境保护以及渭河流域防洪抗旱减灾,具有重要的现实意义和社会经济效益。

1.2 研究资料

渭河流域按水文分区为北洛河流域、泾河流域和渭河干流区间3大分区,各分区内气象站空间分布为北洛河11个,泾河21个,渭河干流40个,见图1。所用资料由中国气象局国家气象信息中心提供的1981—2012年汛期(5—9月)逐时降水量资料。并经过了初步的质量控制。为了确保资料不受异常值的影响,这里进一步利用人工观测的日降水量对小时降水量进行了校对。

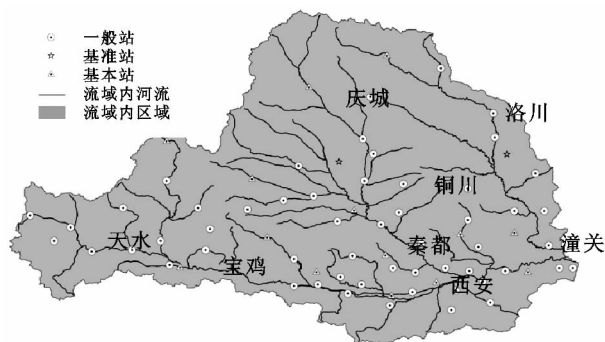


图1 渭河流域气象站点分布

2.3 研究方法

本文主要从降水历时、降水等级以及降水日变化3个方面分析渭河流域降水结构的时空演变规律。本文判断降水是否发生的临界值为0.1 mm,即逐时累积降水量大于或等于0.1 mm的时次定义为有降水时次,否则视为无降水。降水事件的分隔是以某一降水时次之后5 h没有降水作为判定标准^[18]。一次降水事件的持续时间是指降水出现时次与降水结束时次之间的小时总数,此段时间内的降水量之和定义为一次降水过程的降水量。将一次降水过程的等级分成5类:小雨(0.1~10 mm),中雨(10~25 mm),大雨(25~50 mm),暴雨(50 mm以上)。定义降水发生率为各种降水指标在某一分类情况下发生的次数占总次数的比值,而降水贡献率则表示某一分类情况下的降水量占总降水量的比值。对于气象要素的时间序列趋势显著性检验,采用世界气象组织推荐的非参数Mann-Kendall检验方法。

2 结果与分析

2.1 渭河流域降水历时变化特征

2.1.1 不同历时降水发生率和贡献率特征 图2给

出了渭河流域及其各分区不同降水历时降水事件的发生率及其对总降水量的贡献率。由图 2A 可以看出,渭河流域各历时降水发生率随降水历时增加大致呈指数形式递减。1 h 历时降水事件发生率最高,之后快速递减,至 6 h 以后减小幅度变缓;各历时降水贡献率与发生率变化不一致,随着降水历时的增长,降水贡献率先增加后波动减小,2 h 历时降水贡献率快速增至最大,之后波动减小;从等间隔降水历时分段统计(表 1)来看,1~6 h 历时降水发生率最高,为

58.3%,但对应降水贡献率仅为 19.5%。7~12 h 历时降水发生率为 20.0%,降水贡献率最高,为 21.0%。13~18 h 历时降水发生率为 10.2%,降水贡献率 18.0%。19~24 h 历时降水发生率为 4.8%,降水贡献率 11.6%。25~48 h 历时降水发生率虽较小,为 5.8%,但降水贡献率相对较高,达 20.2%。48 h 以上历时降水发生率很低,不足 1%,但降水贡献率也能达 8.3%。这表明渭河流域 24 h 以上的长历时降水事件少,但也可能造成较大的累积降水量。

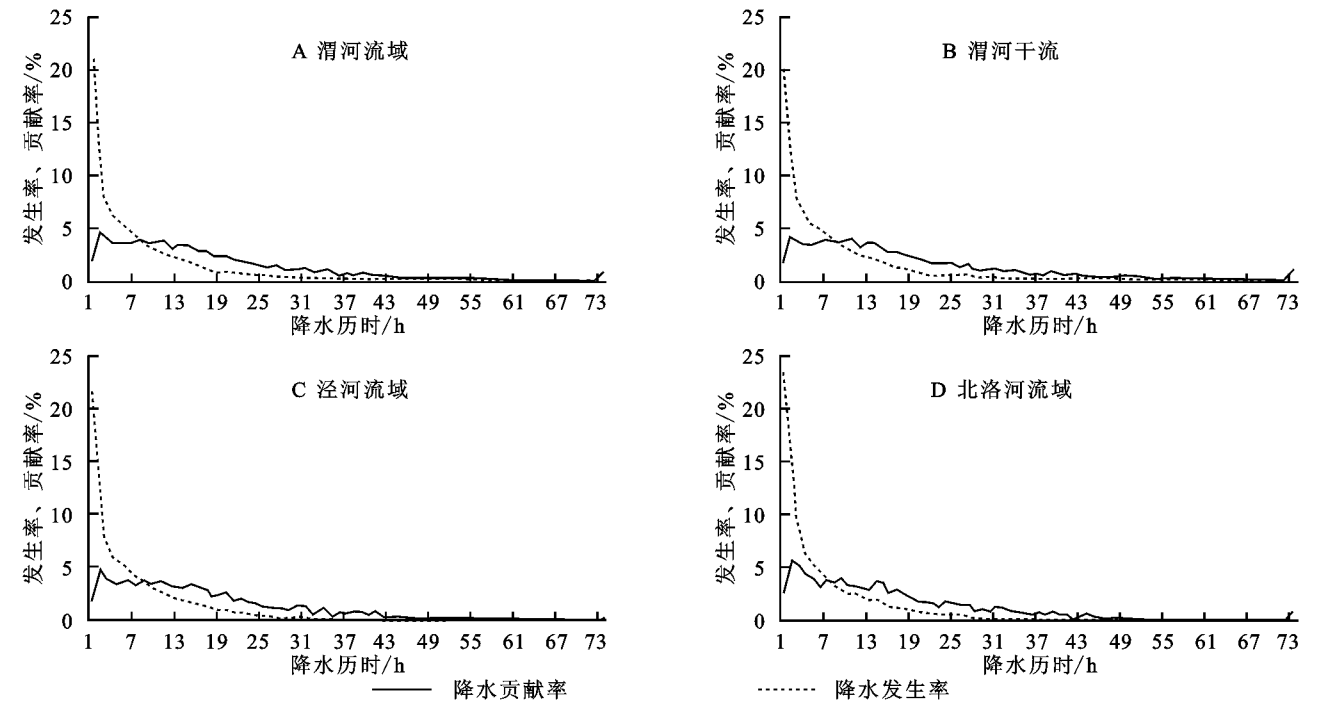


图 2 渭河流域不同历时降水发生率与贡献率

考虑到流域气象要素的演变存在空间尺度效应,为深入理解渭河流域降水结构的变化规律,按泾河流域、北洛河流域和渭河干流区间等 3 个分区分析降水结构的空问规律。通过对 3 个分区降水发生率的分析(图 2B,C,D)可以看出各个分区的降水发生率随降水历时的变化与渭河流域基本一致,均呈指数趋势递减。从各分区各时段降水发生率来看,其数值较接

近,但 1~6 h 历时北洛河支流降水发生率高于泾河和渭河干流,6 h 以上历时渭河干流降水发生率略高于泾河和北洛河;从降水贡献率来看,3 个分区降水贡献率随历时的增加也呈先增加后波动减小的变化趋势,贡献率均在 2 h 历时达最高。1~6 h 历时北洛河流域降水贡献率高于泾河和渭河干流,48 h 以上历时渭河干流降水贡献率略高于泾河和北洛河。

表 1 渭河流域不同时长降水发生率与贡献率

历时		1~6 h	7~12 h	13~18 h	19~24 h	25~48 h	48 h 以上
渭河流域	发生率	58.4	20	10.2	4.8	5.8	0.9
	贡献率	19.5	21.0	18.0	11.6	21.6	8.3
渭河干流	发生率	57.2	20.6	10.5	4.8	6.0	1
	贡献率	18.6	21.4	17.9	11.4	22.1	8.8
泾河流域	发生率	58.9	19.6	10	4.8	5.7	1
	贡献率	19.7	20.6	18.0	12.4	21.4	7.9
北洛河流域	发生率	61.5	18.3	9.5	4.5	5.3	0.8
	贡献率	22.7	20.2	18.2	11.2	20.2	7.4

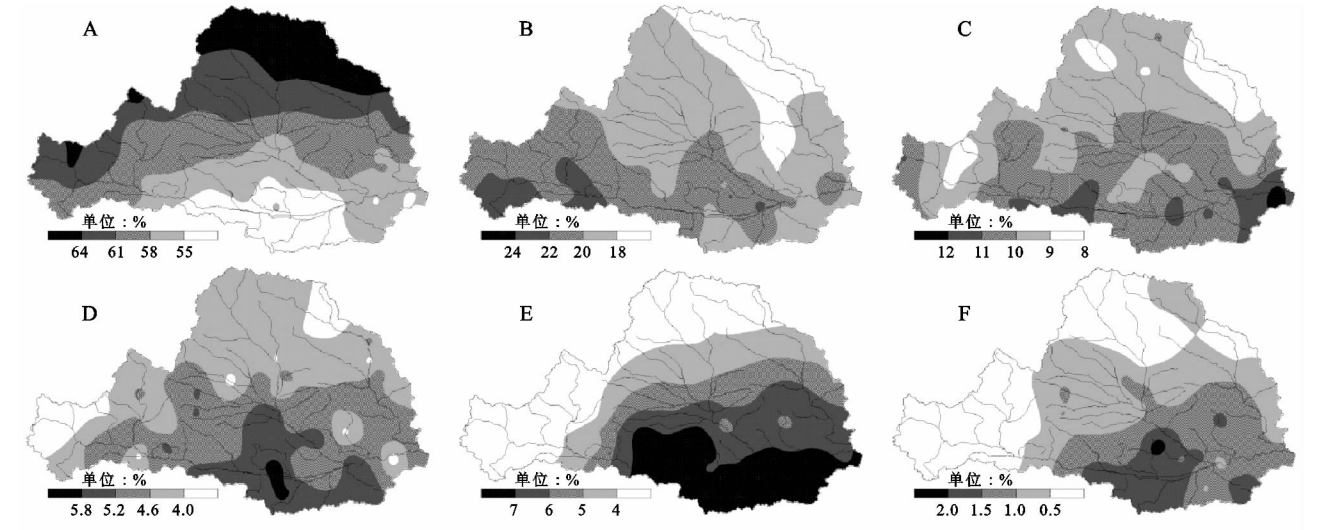
图 3 是渭河流域不同历时降水发生率的空问分布。渭河流域 1~6 h 历时降水发生率(图 3A)为 50%~66%,从上游到下游降水发生率在减小。7~

12 h 历时发生率(图 3B)为 16%~25%,干流上中游的降水发生率高于下游及北洛河支流。

13~18 h 历时降水发生率(图 3C)为 8%~

13%,中下游的发生率高于上游。19~24 h 历时降水发生率(图 3D)为 3%~6%,同样,中下游的发生率高于上游。25~48 h 历时降水发生率(图 3E)为

2%~10%,高发生率位于流域中下游。48 h 以上历时降水发生率(图 3F)很低,仅 0%~3%,主要在流域中下游。



注: A. 持续 1~6 h; B. 持续 7~12 h; C. 持续 13~18 h; D. 持续 19~24 h; E. 持续 25~48 h; F. 持续 48 h 以上,下同。

图 3 渭河流域不同历时降水发生率的空间分布

从不同历时降水贡献率的空间分布来看,1~6 h 历时降水贡献率(图 4A)从流域的上游(包括泾河和北洛河上游)向下游呈减小趋势,流域上游的贡献率较高,一般在 25%~30%,渭河干流中、下游和泾、洛支流的下流贡献率相对较低,在 13%~20%。7~12 h 历时贡献率(图 4B)在 16%~31%,高值区位于干流上游,贡献率在 25%~31%,流域中下游贡献率在 16%~20%。13~18 h 历时贡献率(图 4C)在 14%~23%,19~24 h 历时贡献率(图 4D)在 7%~16%,这两段历时的降水贡献率的空间差异相对较小,高贡献率零散地分布于流域中游。25~48 h 历时降水贡献率(图 4E)高值区位于流域中下游,在 25%~30%,

而流域上游贡献率较小,在 9%~15%,流域贡献率的空间差异最大。48 h 以上历时降水贡献率(图 4F)空间差异较大,高值区位于流域中下游,在 10%~15%,上游大部分站点的贡献率不足 5%。

以上分析可见,渭河流域各历时降水发生率随历时增加呈指数形式快速递减,各历时降水贡献率随历时增长先快速增大,后波动减小;流域 1~6 h 的短历时降水发生率高,但 7~12 h 历时降水贡献率最大。24 h 以上的长历时降水事件少,但降水贡献率较高。各历时降水发生率和贡献率在空间上的差异较大,流域上游(包括泾河和北洛河上游)短历时降水发生率和贡献率高于中下游,而流域中下游长历时降水贡献率高于上游地区。

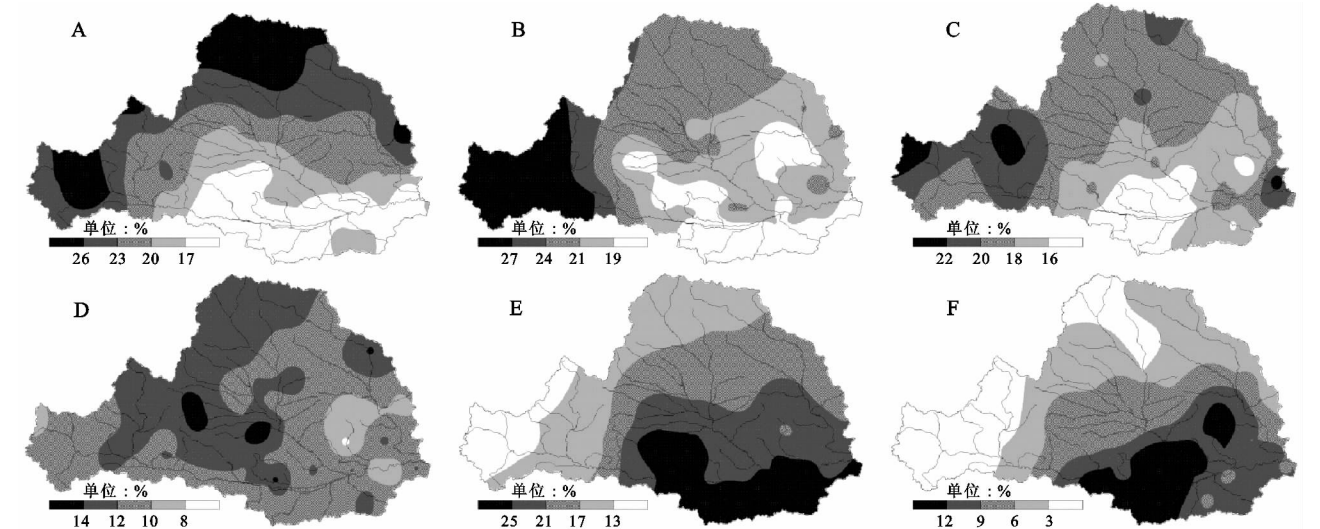


图 4 渭河流域不同历时降水量贡献率空间分布

2.1.2 不同历时降水发生率和贡献率变化趋势 为分析不同历时降水发生率和贡献率的演变趋势,采用线

性趋势方法对不同历时的降水发生率和贡献率进行趋势统计分析。图 5 是渭河流域区域平均分段历时降水

发生率和贡献率的长期变化趋势。可以看出,1~6 h 历时降水发生率和贡献率均为减小趋势,发生率的减小通过了 0.05 显著性水平检验。7~12 h 历时降水发生率增加,但贡献率在减小。13~18 h 和 19~24 h 历时降水发生率和贡献率均为增加趋势,13~18 h 历时发生率的增加通过了 0.05 显著性水平检验,19~24 h 历时降水贡献率的增加通过了 0.1 显著性水平检验。31~48 h 历时发生率和贡献率均为增加趋势,均未通过显著性检验。60 h 以上历时降水发生率和贡献率均为减小趋势,均未通过显著性检验。

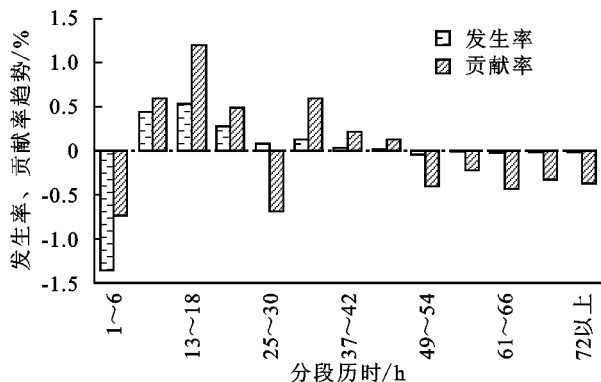


图5 渭河流域不同历时降水发生率和贡献率的长期变化趋势

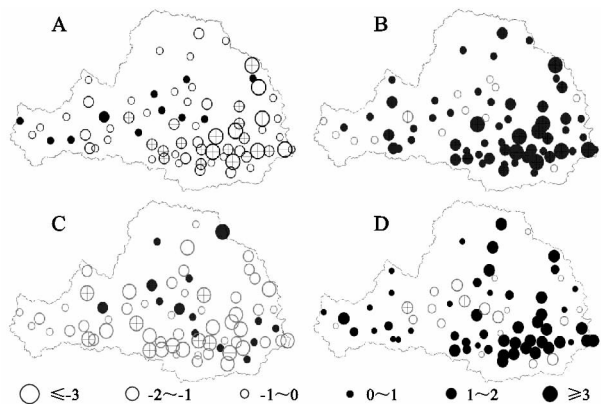
为了解流域降水变化趋势的空间差异,结合流域主要降水历时和分段历时降水变化趋势,图6给出了流域1~6 h 短历时和7~24 h 长历时降水发生率和贡献率的变化趋势空间分布。可以看出,1~6 h 的短历时降水发生率(图6A)的长期趋势绝大多数站点为减少趋势,其中在流域的中下游减少趋势显著,仅上中游少数站点表现为不明显的增加趋势。7~24 h 历时降水发生率(图6B)大多数站点为增加趋势,其中流域中下游增加趋势显著,仅上中游少数站点表现为减少趋势;从降水贡献率的长期趋势来看,流域各站点表现为非均一性变化,1~6 h 的短历时降水贡献率(图6C)大多数站点为减少趋势,部分站点通过了 0.1 显著性水平检验,但也有少数站点为增加趋势。7~24 h 历时降水贡献率(图6D)大多数站点为增加趋势,其中干流下游站点增加趋势显著,仅少数站点为减少趋势,主要分布在泾河支流。

通过对流域不同历时降水发生率与贡献率的变化分析得出,1~6 h 的短历时和48 h 以上的长历时降水发生率和贡献率均表现为减少趋势,7~24 h 历时降水发生率和贡献率表现为增加趋势。这种变化趋势在流域的中下游表现得更加显著,而在流域的上游趋势变化不明显。这可能与流域上游降水少,变率大有关。

2.2 渭河流域降水等级变化特征

2.2.1 不同等级降水发生率和贡献率特征 根据降

水等级划分标准,统计渭河流域不同等级降水的发生率和贡献率。由图7可知,随着降水等级的增加,渭河流域降水发生率呈指数下降趋势,其中小雨发生率占绝对优势,各区域均值均大于70% (72.8%~73.6%),而暴雨的发生率最低,仅占2%~3%。相对降水发生率而言,降水贡献率的变化较小。各区域中雨和大雨的贡献率相对较大,在27.6%~32.1%,暴雨和小雨的贡献率在15.1%~20.3%。由此可知,渭河流域汛期降水以弱降水事件为主,但汛期降水量的贡献则取决于几次强降水事件。



注:A表示1~6 h 发生率;B表示7~24 h 发生率;C表示1~6 h 贡献率;D表示7~24 h 贡献率;“+”表示通过0.1显著性水平检验。

图6 渭河流域不同历时降水发生率和贡献率变化趋势空间分布

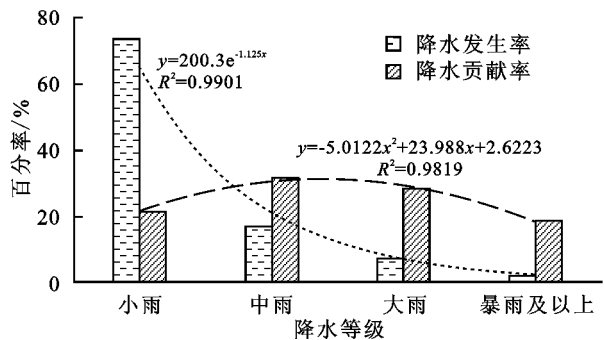


图7 渭河流域不同等级的降水发生率和贡献率

从渭河流域不同等级降水发生率和贡献率的空间分布来看(图略),流域西北部的上游地区小雨发生率相对较高,而渭河干流的上游中雨发生率较大,对于大雨及以上等级降水发生率而言,流域东南部中下游的平原地区发生率较高,而西北部的上游山区较低。从降水贡献率角度分析,渭河干流的西部上游地区小雨和中雨的贡献率较高,而大雨及以上的降水事件贡献率的高值区位于流域的中下游,特别是在渭河干流的东南部,暴雨贡献率在25%以上。

2.2.2 不同等级降水发生率和贡献率变化趋势 对流域不同等级降水发生率和贡献率变化趋势进行分析。平均而言,渭河流域小雨级别的降水事件发生率

和贡献率均表现为显著的下降趋势,而暴雨及以上级别降水事件发生率均表现为增加趋势,中雨和大雨级别的降水发生率在增加,但贡献率在减小,均未通过显著性检验。从各分区不同等级降水的 M-K 检验结果(表 2)可知,只有北洛河小雨发生率变化通过了

90%水平的显著性检验。而其他等级的降水发生率和贡献率变化均未通过显著性检验。各区域不同等级降水事件的发生率和贡献率变化趋势基本一致,各区域小雨发生率均减小,中雨及以上级别降水发生率均增加。各区域暴雨级别降水贡献率增大。

表 2 各分区不同等级降水发生率和贡献率变化趋势检验结果

M-K 值	降水发生率				降水贡献率			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
北洛河	-1.703	1.638	0.470	1.054	-0.989	-0.211	-0.146	1.151
泾河	-1.216	0.503	1.184	0.503	-1.443	-0.568	0.211	0.568
渭河干流	-0.016	0.373	0.081	0.438	-0.568	-0.535	-0.405	1.443

3 结论与讨论

(1) 渭河流域各历时降水发生率随历时增加呈指数形式快速递减,各历时降水贡献率随历时增长先快速增大,后波动减小。流域 1~6 h 的短历时降水发生率高,7~12 h 历时降水贡献率最大,24 h 以上的长历时降水事件少,但降水贡献率较高。各历时降水发生率和贡献率在空间上的差异较大,流域上游(包括泾河和北洛河上游)短历时降水发生率和贡献率高于中下游,而流域中下游长历时降水贡献率高于上游地区。

(2) 渭河流域 1~6 h 的短历时和 48 h 以上的长历时降水发生率和贡献率均表现为减少趋势,7~24 h 历时降水发生率和贡献率表现为增加趋势,这种变化趋势在流域的中下游表现得更加显著,而在流域的上游趋势变化不明显。这可能与流域上游降水少,变率大有关。

(3) 随着降水等级的增加,渭河流域降水发生率呈指数下降趋势,小雨发生率最高,而暴雨的发生率最低。相对降水发生率而言,降水贡献率的变化较小。各流域中雨和大雨的贡献率相对较大,暴雨和小雨的贡献率相对较小。渭河流域汛期降水以弱降水事件为主,但汛期降水量的贡献则取决于几次强降水事件。

(4) 流域西北部的上游地区小雨和中雨发生率较高,贡献率也较高,而在流域东南部中下游的平原地区大雨及以上等级降水发生率较高,贡献率也较高,特别是在渭河干流的东南部,暴雨贡献率在 25%以上。

(5) 渭河流域小雨级别的降水事件发生率和贡献率均表现为显著的下降趋势,而暴雨及以上级别降水事件发生率和贡献率均表现为增加趋势。这可能导致流域汛期防洪形势趋于严峻。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2001:The science of climate change[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2001:155-163.
[2] IPCC. Climate Change 2014:Impact, Adaptation and Vulnerability [M/OL]. Cambridge:Cambridge University Press, in

press, 2014. <http://www.ipcc-wg2.gov/>.
[3] 刘国纬. 水文循环的大气过程[M]. 北京:科学出版社, 1997:245.
[4] 夏军,刘春蓁,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展,2011,26(1):1-12.
[5] 任国玉,封国林,严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究,2010,15(4):337-353.
[6] 正果,张明军,王圣杰,等. 1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报,2014,69(5):640-649.
[7] Yu Rucong, Zhou Tianjun, Xiong Anyuan, et al. Diurnal variations of summer precipitation over contiguous China[J]. Geophys. Res. Lett.,2007,34:L01704.
[8] 宋晓猛,张建云,刘九夫,等. 北京地区降水结构时空演变特征[J]. 水利学报,2015,46(5):525-535.
[9] 宋进喜,李怀恩. 渭河生态环境需水量研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
[10] 冶运涛,梁犁丽,龚家国. 长江上游流域降水结构时空演变特性[J]. 水科学进展,2014,25(2):164-171.
[11] 刘闻,曹明明,刘琪,等. 1951—2012 年渭河流域降水频次变化特征分析[J]. 干旱区地理,2015,38(1):18-24.
[12] 刘梅,魏加华,王峰. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):193-210.
[13] 王治亮,李新亚,杨爱琴. 陕西黄土高原 15 时段降水特征分析[J]. 水土保持研究,2013,20(5):176-179.
[14] 路培,吴发启. 陕西省近 30 年降水变化特征分析[J]. 水土保持研究,2013,20(4):64-68.
[15] 张涵丹,卫伟,薛蕙. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究,2015,22(6):183-189.
[16] Kandel D D, Western A W, Grayson R B, et al. Process parameterization and temporal scaling in surface runoff and erosion modeling [J]. Hydrol. Process., 2004, 18: 1423-1446.
[17] 殷水清,高歌,李维京,等. 1961—2004 年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J]. 中国科学,2012,42(2):256-266.
[18] 宇如聪,原韦华,李建. 降水过程的不对称性[J]. 科学通报,2013,58(15):1385-1392.