

塔里木河流域降水量的非线性时空变化对比研究及预测

张广朋¹, 徐海量², 杜清^{2,3}, 白玉锋¹, 魏茂盛⁴

(1. 新疆农业大学 林学与园艺学院, 新疆 乌鲁木齐 830019; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 阿尔泰山两河源自然保护区管理局, 新疆 阿勒泰 836500)

摘要: 基于塔里木河流域 25 个气象站 1961-2007 的实测降水量数据, 本文利用 Mann-Kendall、R/S 分析以及小波分析和周期性叠加趋势模型对塔里木河流域降水量的非线性时空变化特征进行分析, 并对未来降水量的变化做出预测。结果表明: 1961-2007 年之间塔里木河流域降水量整体呈增加趋势, 位于塔里木河干流北侧气象站增加趋势要明显强于南侧, 其中阿克苏河、迪那河、库车-渭干河和塔里木河干流流域呈极显著增加趋势; 在塔里木河干流及阿克苏河源流区出现了增加率的高值中心, 最大值在阿合奇, 开都-孔雀河的源流区为降水量减少的高值中心, 最大减少率在巴音布鲁克; 塔里木河干流及子流域的 Hurst 指数均大于 0.5, 表明塔里木河流域降水量将保持较鲜明的持续性; 相比较 1998-2007 年, 迪那河流域和库车-渭干河流域降水量在 2015-2020 年的增加值最大。

关键词: 降水量; 时空变化; Mann-Kendall; R/S 分析; 降水量预测; 塔里木河流域

中图分类号: TV125 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)02-0058-06

Comparative Study and prediction of nonlinear temporal and spatial variation of precipitation in Tarim River basin

ZHANG Guangpeng¹, XU Hailiang², DU Qing^{2,3}, BAI Yufeng¹, WEI Maosheng⁴

(1. College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830019, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Management Bureau of Altay Mountains Two River Sources Protected Area, Aletai 836500, China)

Abstract: Based on the precipitation data of 25 weather stations in the Tarim River basin from 1961 to 2007, the paper analyzed the nonlinear temporal and spatial change of precipitation in the basin, and predicted the future change by using Mann-Kendall, R/S analysis and wavelet analysis and periodic superimposed trend model. The result indicated that from 1961 to 2007, precipitation integrally appeared a upward trend in the Tarim River basin. The precipitation in north of Tarim River basin showed a more significant increase trend than that in south of Tarim River basin. The very obvious increase regions of precipitation colludes Akesu River basin, Dina River basin, Kuche-Weigan River basin and the mainstream of Tarim River basin. And there was a high value center of precipitation increase in the origin area of Akusu River basin and the mainstream of Tarim River basin, the maximum precipitation happened in Aheqi. There is a high value center of precipitation decrease in the origin area of Bayinbuluke. The maximum decrease rate of precipitation took place in Bayinbulu. The Hurst indexes in Tarim River Basin and sub basin are all more than 0.5, which showed that precipitation in the future will keep the obvious upward trend in the Tarim River basin. Compared with data from 1998 to 2007, The maximum increase value of average precipitation will be in Dina River basin of Tarim River basin and Kuche-Weigan River basin during 2015 to 2020.

Key words: precipitation; temporal and spatial variation; Mann-Kendall; R/S analysis; forecast of precipitation; Tarim River basin

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471099、41171427、31370551、31400466); 中国科学院“西部之光”人才培养计划(XBBS-2014-13)

作者简介: 张广朋(1990-), 男, 山东定陶人, 在读硕士研究生, 主要从事生态水文研究。

通讯作者: 徐海量(1971-), 男, 江苏宝应人, 博士, 研究员, 主要从事恢复生态学研究。

全球气候逐渐转暖,使得水循环过程加速^[1],造成区域内降水量、降水频率等发生不同程度的变化^[2],更有诸如暴雨、冰雹等极端天气频发^[3-5]。施雅风等^[6]指出,20 世纪 80、90 年代相较于稍前 20 年,中国西北地区出现了许多表征气候由暖干向暖湿转化的信号,诸如降水量增加、河川径流量增加、湖泊水位上升、洪水灾害频繁等,其中新疆塔里木河流域局部地区暖湿化迹象最为明显。有学者对塔河流域近几十年来降水量的变化趋势进行研究^[7-10],但主要集中于塔河流域降水量的整体时间序列的变化,缺少对塔河流域空间内变化特点及未来趋势发展变化的探讨。

塔里木河流域是中国最大的内陆河流域,流域面积 $1.02 \times 10^6 \text{ km}^2$,包括塔里木河干流以及环塔里木盆地以“向心”形式注入塔里木河干流的叶尔羌河、喀什噶尔河、阿克苏河、和田河、库车-渭干河、迪那河、克里雅河、开都-孔雀河以及车尔臣河 9 大水系 144 条河流。塔里木河流域深居欧亚大陆腹地,流域内降水稀少,蒸发强烈,植被稀疏,是典型

的干旱荒漠区和生态脆弱区。塔里木河径流组成中,冰川融水占 48.2%,雨、雪混合补给占 27.4%,河川基流占到 24.4%^[11]。近几十年,人类经济社会活动对水资源的强烈开发利用,造成了河道断流、植被退化、土地荒漠化等严重的生态环境问题^[12-13]。当前,能否保证水资源安全则成为解决流域内生态环境问题、协调经济发展的关键^[14-15]。而降水量的变化势必会对流域内水资源的分布与循环过程产生影响,因此,本文对塔里木河流域降水量的时空变化特征进行分析,并尝试预测塔里木河流域降水量的未来变化,以期对塔里木河流域水安全问题提供科学依据。

1 数据收集及研究方法

1.1 数据收集

收集了塔里木河流域及周边 25 个气象站 1961-2007 年的降水量年实测资料,在每个子流域当中均有气象站分布,数据较全面,且可信度高,能够准确地反应塔里木河流域整体及局部的变化特征。

表 1 塔里木河流域气象站点信息

气象站	经度/ (°E)	纬度/ (°N)	海拔/ m	气象站	经度/ (°E)	纬度/ (°N)	海拔/ m
阿合奇	78.45	40.93	1984.9	轮台	84.25	41.78	976.1
阿克苏	80.23	41.17	1103.8	民丰	82.72	37.07	1409.5
阿拉尔	81.27	40.55	1012.2	皮山	78.28	37.62	1375.4
巴楚	78.57	39.80	1116.5	且末	85.03	38.22	1247.2
拜城	81.90	41.78	1299.2	若羌	88.17	39.03	887.7
巴伦台	86.30	42.73	1739.0	莎车	77.50	38.47	1231.2
巴音布鲁克	84.15	43.03	2458.0	塔什库尔干	75.23	37.77	3090.1
和田	80.08	37.28	1375.0	铁干里克	87.70	40.63	846.0
喀什	75.98	39.47	1289.4	吐尔尕特	75.40	40.52	3504.4
柯坪	79.05	40.50	1161.8	乌恰	94.07	43.35	2027.0
库车	82.97	41.72	1081.9	于田	81.87	36.72	1422.0
库尔勒	86.13	41.75	931.5	昭苏	81.13	43.15	1851.0
兰干	82.44	36.30	1880.0				

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 单调趋势检验 Mann-Kendall 是一种被广泛应用于气象水文数据时间序列趋势分析的非参数统计检验方法,其优点是样本数据不需要遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,检测范围宽、定量化程度高。在进行趋势变化的分析中用统计值 Z_c 来判断,若 $Z_c > 0$,表明序列有上升趋势;若 $Z_c < 0$,则序列有下降趋势。Mann

-Kendall 检验法的基本原理及计算过程在诸多文献之中都有涉及^[16-17],本文不再详述。

1.2.2 R/S 分析方法 R/S 分析方法是由 Hurst 在分析尼罗河水文资料时提出的一种分析方法。其基本步骤如下:对于一个时间序列 $x(t), t = 1, 2, \dots$, 均值序列为:

$$Y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t), \tau = 1, 2, \dots \quad (1)$$

积离差为:

$$F(t, \tau) = \sum_{u=1}^t x(u) - Y(\tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (3)$$

标准差为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - Y(\tau))^2 \right]^{1/2} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Mandelbrotetal证实了Hurst的研究,并得出了更广泛的指数律,即:

$$R/S = \left(\frac{\tau}{2} \right)^H \quad (5)$$

式中: H 即为赫斯特系数。

对公式(5)两边同时取对数即得到赫斯特经验公式,基于时间序列并利用赫斯特经验公式得到的一簇 H 值进行最小二乘法拟合,得出的直线斜率即为修正后的赫斯特指数($0 < H < 1$)。对于不同的 H ,表示序列有不同的趋势变化:当 $H = 0.5$ 时,表明时间序列是相互独立的、方差有限的随机序列;当 $0 < H < 0.5$ 时,意味着未来的变化状况与过去相反,即反持续性, H 越小,反持续性越强;当 $H > 0.5$ 时,意味着未来的变化状况与过去一致,这个过程具有持续性。

1.2.3 小波分析 小波分析在气候研究当中显现了年与年之间、波长与波长之间的波幅变化形态与特征,通过小波分析可得到所研究对象序列在不同时间尺度上周期结构和异常变化的规律,为短期气候预测提供科学依据,现已广泛应用于气象学、工程学,其基本原理与分析方法可见参考文献^[18-19]。

1.2.4 周期性叠加趋势模型 气象水文数据在有一定的趋势水平和周期性变化特点的基础上,可利用周期性叠加趋势模型来进行未来的变化量,周期性叠加趋势模型已有大量的文献进行了详细的阐述^[20-21],本文不再详述分析过程。

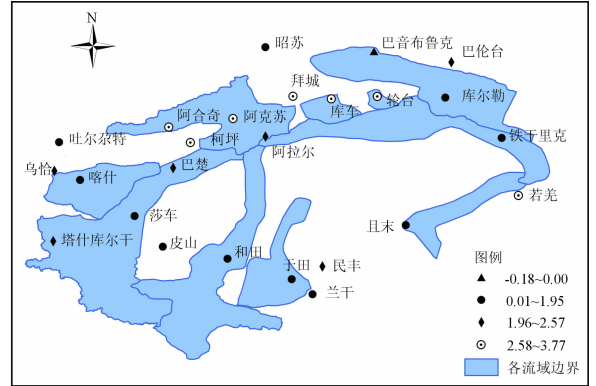
2 结果与分析

2.1 降水变化特征

利用Mann-Kendall趋势检验分别对塔里木河流域25个气象站1961-2007年的年降水量资料进行分析,借助ArcGIS9.3将检验结果如图1。

根据图1,降水量在开都-孔雀河流域的巴音布鲁克的检验统计量小于0,呈轻微下降趋势,除此

之外其他各子流域气象站皆呈增加趋势。位于塔里木河流域北部的阿合奇、柯坪、阿克苏、拜城、库车、轮台以及塔里木河干流下游的若羌的检验统计量均大于2.58($Z_{0.01} = 2.58$),降水量呈极显著增加的趋势。为了更系统地表述塔里木河流域气降水量变化趋势的空间特征,对整理得到的干流及各子流域的数据分别再次进行Mann-Kendall检验(表2)。



注: -1.09 ~ 0.00: 轻微减少; 0.01 ~ 1.95: 微递增;
1.96 ~ 2.57: 显著增加; 2.58 ~ 3.77: 极显著增加

图1 塔里木河流域降水量变化趋势的空间分布

表2 塔里木河干流及子流域降水量的趋势检验

流域	Z_c	β	平均值/mm	H_0	趋势
阿克苏河	2.82	1.441	177.91	R	极显著增加
喀什噶尔河	2.18	1.113	125.57	R	显著增加
叶尔羌河	2.46	0.647	66.27	R	显著增加
和田河	1.06	0.210	37.92	A	微递增
克里雅河	0.77	0.220	71.23	A	微递增
车尔臣河	2.31	0.365	27.40	R	显著增加
开都-孔雀河	1.63	0.568	179.52	A	微递增
迪那河	4.05	1.150	66.01	R	极显著增加
库车-渭干河	3.76	1.245	94.42	R	极显著增加
塔里木河干流	2.59	0.423	55.23	R	极显著增加

注: R: 拒绝原假设; A: 接受原假设; β : 倾斜度。

从表2中可以看出,塔里木河干流及子流域降水量整体以增加趋势为主,其中阿克苏河、迪那河、库车-渭干河和塔里木河干流流域呈极显著增加趋势,喀什噶尔河、叶尔羌河、车尔臣河呈显著增加的趋势,而和田河、克里雅河和开都-孔雀河呈微递增的趋势。表2中 β 反映降水量的变化速度,1961-2007年塔里木河干流降水量的变化率为0.423 mm/a,而在子流域当中,阿克苏河流域降水量的变化率为1.441 mm/a,是塔里木河干流及子流域当中变化率的最大值,而和田河降水量的变化率最小,仅

为 0.21 mm/a。进一步利用 ArcGIS9.3 中空间分析模块,对降水量的变化率进行空间插值,使降水量变化率更直观地表现出来(图 2)。

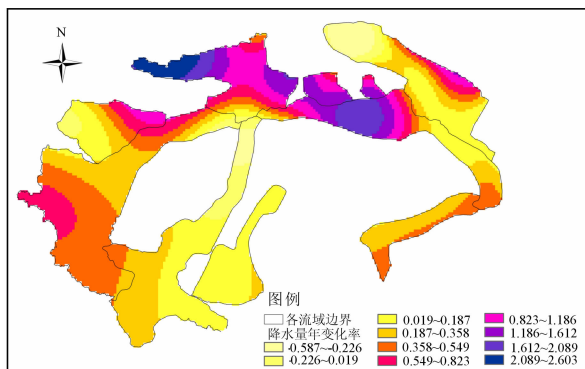


图 2 塔里木河流域降水量年变化率分析

在图 2 中,塔里木河流域降水量的增加率在塔里木河干流中游及阿克苏河源流区出现高值中心,最大值在阿合奇,达到 2.07 mm/a;开都-孔雀河的源流区为降水量减少的高值中心,最大减少率在巴音布鲁克为 -0.07 mm/a;和田河的中下游、克里雅河流域和塔里木河干流下游,降水量的增加率较小,

最小值在和田和铁干里克,其变化率皆为 0.09 mm/a。在开都-孔雀河的源流区,降水量的变化率介于 -0.587 ~ 0.019 mm/a 之间,下游介于 0.019 ~ 0.187 mm/a 之间,年增加率的高值区出现中下游的北部沿线。迪那河流域、渭干河流域降水量的年增加率在 0.549 ~ 1.612 mm/a 之间。阿克苏河流域西部和东部降水量增加率最大,北部和南部最小,中部介于 0.823 ~ 1.186 mm/a 之间。喀什噶尔河流域降水量年变化率从西部从东部逐渐增加,在喀什最小,为 0.019 mm/a。叶儿羌河流域源流和下游降水量年增加率大于中部;如中部莎车年增加率仅为 0.7 mm/a,而源流的塔什库尔干和下游的巴楚为 0.5 和 0.7 mm/a。车尔臣河年降水量变化率在 0.019 ~ 0.549 mm/a 之间。

2.2 未来降水变化预测

对于管理者而言,了解降水量在未来一定时期内的变化特征能够为资源调配、生态规划等工作提供参考性依据。为此,利用塔里木河各子流域及周边气象站的降水量数据,借助 R/S 分析方法,对降水量的未来变化趋势预测(表 3)。

表 3 塔里木河流域降水量的 R/S 分析

流域	阿克苏河	喀什噶尔河	叶尔羌河	和田河	克里雅河	车尔臣河	开都-孔雀河	迪娜河	库车-渭干河	塔里木河干流
Hurst	0.763	0.602	0.714	0.758	0.853	0.646	0.819	0.997	0.998	0.862

塔里木河干流及各个子流域的 Hurst 指数均大于 0.5,表明其将延续原有的变化趋势。结合 Mann-Kendall 检验结果,阿克苏河流域、迪那河流域、库车-渭干河流域和塔里木河干流流域降水量将保持极显著的增长趋势,特别地,迪娜河与库车-渭干河变化趋势的持续性最为强烈。而喀什噶尔河流域、叶儿羌河流域、车尔臣河流域降水量的检验统计量分别为 2.18、2.46 和 2.31,介于 1.96 ($Z_{0.05} = 1.96$) 和 2.58,表明降水量在 0.05 检验水平下呈显著的增加趋势;同时,3 流域的 Hurst 指数分别为 0.602、0.714 和 0.646,因此降水量这种显著增加趋势仍将持续。

和田河流域、克里雅河流域和开都-孔雀河流域降水的检验统计量皆大于 0 而小于 1.96,另其 Hurst 指数皆大于 0.5,表明三流域降水量在未来仍将保持不显著增加趋势。

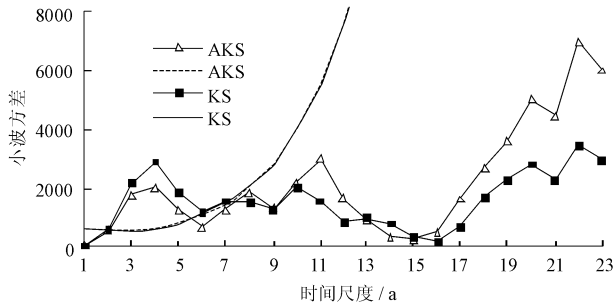
R/S 分析虽然可以对气候因子未来的变化趋势进行预测,但不能给出较准确的量的变化。因此,本

文对各子流域气象站 1961-2007 年的降水量数据进行累加,通过小波分析甄别出不同气象站降水量的显著周期;并根据显著周期,借助周期性叠加趋势模型,对降水量未来的变化量进行预测(图 3 和表 4)。在图 3 中,AKS-阿克苏河流域,KS-喀什噶尔河流域,YRQ-叶儿羌河流域,HT-和田河流域,KLY-克里雅河流域,CRC-车尔臣河流域,KD-开都-孔雀河流域,NN-迪那河流域,KC-库车-渭干河流域,TH-塔里木河干流流域。

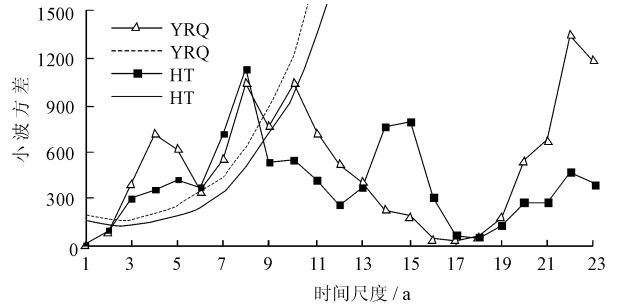
塔里木河流域降水量的显著周期在 3、4 和 8 a。各流域降水量的主周期与流域内主周期空间分布有所不同,这是由于子流域内各气象站降水量在各自主周期处周期波动相关叠加和抵消的结果。经计算,拟合方程的拟合误差在 13.2% ~ 24.4% 之间,可保持原始序列信息量的 75% 以上,预测结果较为可信。根据预测结果,相比较 1998-2007 年,迪那河流域和库车-渭干河流域降水量在 2015-2020 年的增加值最大,分别为 29.46 和 23.52 mm,而后

依次是塔里木河干流、和田河流域、阿克苏河流域、叶儿羌河流域、车尔臣河流域和克里雅河流域。开都-孔雀河流域和喀什噶尔河流域降水量皆呈现减少,其值分别为9.78和11.92 mm。总体上,在2015-2020年,塔里木河流域降水量的增加值将为6.44 mm。

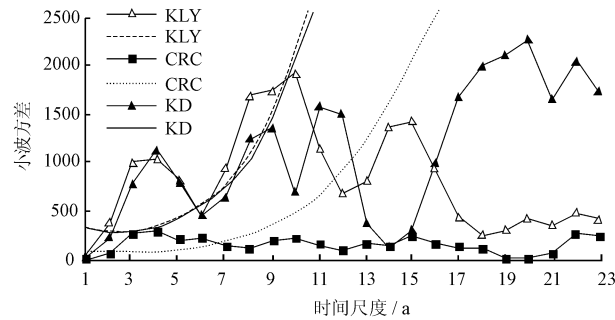
少,其值分别为9.78和11.92 mm。总体上,在2015-2020年,塔里木河流域降水量的增加值将为6.44 mm。



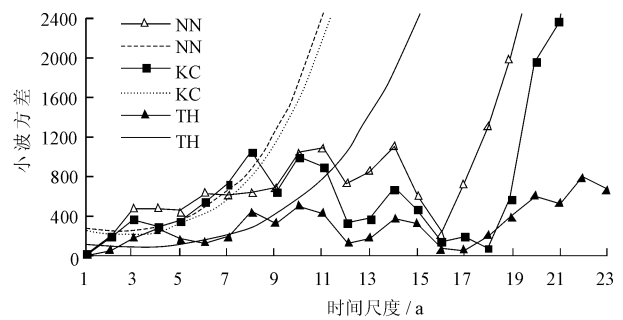
(a) 阿克苏河、喀什河流域



(b) 叶儿羌河、和田河流域



(c) 克里雅河、车尔臣河、开都孔雀河流域



(d) 迪那河、库车渭干河、塔里木河流域

图3 塔里木河流域降水量周期分析

表4 塔里木河流域降水量预测

流域	周期/a	拟合方程	拟合误差/%	降水量平均值/mm	
				1998-2007	2015-2020
阿克苏河	4	$X(\tau) = 204.95281003 + 1.22777061\tau + d$	19.7	218.25	222.63
喀什噶尔河	4	$X(\tau) = 135.81096319 + 0.56958136\tau + d$	21.1	156.56	144.64
叶儿羌河	8	$X(\tau) = 76.37161402 + 0.48496351\tau + d$	17.6	79.38	82.84
和田河	8	$X(\tau) = 42.97750032 + 0.39300482\tau + d$	18.2	45.42	54.54
克里雅河	4	$X(\tau) = 76.61081335 + 0.08114169\tau + d$	24.4	77.25	77.65
车尔臣河	4	$X(\tau) = 34.56962605 + 0.35934871\tau + d$	19.0	37.57	38.37
开都-孔雀河	4	$X(\tau) = 185.85089006 + 0.25710826\tau + d$	16.9	201.40	191.62
迪那河	4	$X(\tau) = 97.86473661 + 0.219481949\tau + d$	13.2	78.95	108.41
库车-渭干河	3	$X(\tau) = 115.42556439 + 1.45180636\tau + d$	16.0	114.69	138.21
塔里木河干流	8	$X(\tau) = 66.08325154 + 0.52779322\tau + d$	19.6	59.12	74.12

结合M-K检验及R/S分析结果,开都-孔雀河与喀什噶尔河的降水量未来应出现增加,但这与周期性叠加趋势模型的预测结果并不相符。由于降水量数据的时间序列较短,而塔里木河流域的降水量变化是否存在较长周期无法获知,这可能是造成开都-孔雀河与喀什噶尔河降水量未来短期变化预测出现减少的原因。降水量在短期内的变化并不能对塔里木河流域气候产生本质性的改变,但对局部

地区的小气候仍会产生重要影响^[21]。同时,降水量的增加也证明了水循环过程的加速,流域内自然条件也会出现相应变化,这对植被、经济作物等的生长会产生一定影响^[22-23]。至于降水量的变化对流域水资源变化、农业生产等产生的具体影响则需做进一步研究,而水资源管理者则应把降水量的变化及其产生的影响作为在进行资源规划管理过程当中重要的依据。

3 结 语

(1)1961-2007年之间,塔里木河流域降水量整体呈增加趋势,25个气象站之中只有巴音布鲁克气象站出现轻微减少,特别地,位于塔里木河流域北部的阿合奇、柯坪、阿克苏、拜城、库车、轮台以及塔里木河干流下游的若羌呈现出极显著增加的趋势。而对塔里木河干流及子流域的降水量数据检验结果显示,阿克苏河、迪那河、库车-渭干河和塔里木河干流流域呈极显著增加趋势。

(2)塔里木河流域降水量增加率的高值中心出现在塔里木河干流中游及阿克苏河源流区,最大值在阿合奇,达到2.07 mm/a;而在开都-孔雀河的源流区为降水量减少的高值中心,最大减少率在巴音布鲁克为-0.07 mm/a。相对于其他区域,和田河的中下游、克里雅河流域和塔里木河干流下游,降水量的增加率较小,最小值在和田和铁干里克,其变化率皆为0.09 mm/a。而剩余区域的变化率均介于0.187~0.823 mm/a之间。

(3)塔里木河干流极子流域降水量将保持原有的变化趋势,其中迪那河与库车-渭干河的持续性最为强劲。塔里木河干流及各子流域的降水量预测拟合方程误差在13.2%~24.4%之间,预测结果较为可信。根据预测结果,相比1998-2007年,在2015-2020年,塔里木河流域降水量整体将增加6.44 mm,迪那河流域和库车-渭干河流域降水量在2015-2020年的增加值最大,分别为29.46和23.52 mm,开都-孔雀河流域和喀什噶尔河流域降水量皆呈现减少,其值分别为9.78和11.92 mm。

参考文献:

[1] Xu Chongyu. Modeling the effects of climate change on water resources in central Sweden[J]. Water Resources Management, 2000, 14(3):177-189.

[2] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[3] 陈洪滨,范学花. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾[J]. 气候与环境研究,2007,12(1):100-112.

[4] 曹玲,李岩瑛,刘明春,等. 1958-2006年河西走廊极端

天气气候事件变化特征[J]. 干旱区研究,2009,26(5):649-655.

[5] 潮轮. 极寒、火热、雾霾:极端天气全球轮番登场[J]. 生态经济,2013(3):8-13.

[6] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152-164.

[7] 陈亚宁,徐长春,郝兴明,等. 新疆塔里木河流域近50a气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2008,30(6):921-929.

[8] 徐长春,陈亚宁,李卫红,等. 塔里木河流域近50年气候变化及其水文过程响应[J]. 科学通报,2006,51(Z1):21-30.

[9] 陶辉,白云岗,毛炜峰. 塔里木河流域气候变化及未来趋势预估[J]. 冰川冻土,2011,33(4):738-743.

[10] 吴永萍,王澄海,沈永平. 1960-2009年塔里木河流域降水时空演化特征及原因分析[J]. 冰川冻土,2011,33(6):1268-1273.

[11] 宋郁东,樊自立,雷志栋,等. 中国塔里木河水资源与生态问题研究[M]. 乌鲁木齐:新疆人民出版社,2000.

[12] 叶茂,徐海量,宋郁东,等. 塔里木河流域水资源利用面临的主要问题[J]. 干旱区研究,2006,23(3):388-392.

[13] 段建军,王彦国,王晓风,等. 1957-2006年塔里木河流域气候变化和人类活动对水资源和生态环境的影响[J]. 冰川冻土,2009,31(5):781-791.

[14] 陈亚宁,崔旺诚,李卫红,等. 塔里木河的水资源利用与生态保护[J]. 地理学报,2003,58(2):215-222.

[15] 邓铭江. 塔里木河流域气候与径流变化及生态修复[J]. 冰川冻土,2006,28(5):694-702.

[16] 胡刚,宋慧. 基于Mann-Kendall的济南市气温变化趋势及突变分析[J]. 济南大学学报:(自然科学版),2012,26(1):96-101.

[17] 张勃,康淑媛,刘艳艳,等. 甘肃张掖市冬季气温变化的时空特征[J]. 地理研究,2010,29(1):137-144.

[18] 王文圣,丁晶,向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望[J]. 水科学进展,2002,13(4):515-520.

[19] 李远平,杨太保. 柴达木盆地近50年来年气温、降水的小波分析[J]. 干旱区地理,2007,30(5):708-713.

[20] 徐海量,叶茂,宋郁东. 塔里木河流域水资源变化的周期性分析及预测[J]. 干旱区研究,2005,22(4):454-457.

[21] 陈亚宁,郝兴明,徐长春. 新疆塔里木河流域径流变化趋势分析[J]. 自然科学进展,2007,17(2):205-210.

[22] 刘燕强. 大气相对湿度变化趋势对农作物的影响研究[J]. 中国农业信息,2013(7):190.

[23] 王润元. 中国西北主要农作物对气候变化的响应[D]. 兰州:兰州大学,2010.