

DOI: 10.5846/stxb201310242567

姚俊强, 杨青, 刘志辉, 李诚志. 中国西北干旱区降水时空分布特征. 生态学报, 2015, 35(17): - .

Yan J Q, Yang Q, Liu Z H, Li C Z. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

中国西北干旱区降水时空分布特征

姚俊强^{1,2}, 杨青³, 刘志辉^{1,2,4,5,*}, 李诚志⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

4 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

5 干旱半干旱区可持续发展国际研究中心, 乌鲁木齐 830046

摘要: 利用中国西北干旱区 122 个气象站点 1961—2011 年月降水量资料, 运用线性趋势、Mann-Kendall 非参数趋势和突变检验法、Morlet 小波分析等方法研究了西北干旱区降水量空间分布及多时间尺度下的变化规律和趋势。结果表明: 近 50 年来西北干旱区降水量呈增加趋势, 95.9% 的站点有增湿特征, 全区增湿趋势为 9.31 mm/10a ($P < 0.01$), 但增湿幅度存在区域差异性, 其中祁连山亚区 (38.67 mm/10a) 增湿最明显; 从季节来看, 冬季增湿具有全区普遍性, 但夏季增湿的区域差异性特征明显。全区及各亚区降水量在 20 世纪 80 年代至 90 年代初有明显的突变特征, 除内蒙西部亚区外均通过了 0.01 的显著性水平检验, 降水量序列存在 4a、8a、12a 和 22a 振荡周期, 其中 22a 尺度振荡周期最强, 其次是 12 a 尺度。全区 32% 的年份降水量属正常范围, 偏干年份为 24%, 异常偏干年份为 12%, 异常偏湿和偏湿年份均为 16%。20 世纪 70 年代之前降水量略低于标准降水均值, 80 年代开始有区域性增湿趋势, 90 年代之后全区增湿均较明显, 正距平年数比例由 70 年代的 10% 上升至 21 世纪初的 80%, 西北干旱区整体处于相对湿润时段, 且增湿趋势明显。

关键词: 降水; 趋势分析; 时空变异; 干湿特征; 小波分析; 西北干旱区

Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China

YAN Junqiang^{1,2}, YANG Qing³, LIU Zhihui^{1,2,4,5,*}, LI Chengzhi⁴

1 College of Resources and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Urumqi 830046, China

3 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

4 Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

5 International Center for Desert Affairs-Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi 830046, China

Abstract: Using monthly precipitation records from 122 meteorological stations in the arid region of Northwest China, the spatial and temporal distribution of precipitation were analyzed for the period 1961—2011. The Mann-Kendall trend test and Morlet wavelet analysis were utilized to detect the spatio-temporal distribution of the mean annual and seasonal precipitation. In the present paper, the Northwest arid area was divided into the northern Xinjiang region, the southern Xinjiang region, Qilian Mountains, Tianshan Mountains, Hexi Corridor region, and the Inner Mongolia Plateau region. The results obtained indicate that the mean annual precipitation (MAP) in the northwest arid region had a significant rising trend ($P < 0.01$), at a rate of 9.31 mm/decade. The mean annual precipitation in the Qilian Mountains area rose the fastest, increasing by 38.

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目 (201301103); 国家科技支撑计划项目 (2012BAC23B01); 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2010CB951001, 2010CB951003); 教育部创新团队项目 (IRT1180)

收稿日期: 2013-10-24; **网络出版日期:** 2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzh@xju.edu.cn

67 mm/decade; the second fastest was on the Tianshan Mountains, increasing by 16.79 mm/decade; the slowest increase was in the Hexi Corridor, southern Xinjiang, and western Inner Mongolia, increasing by 8.49 mm/decade, 5.44 mm/decade, and 5.09 mm/decade, respectively. The Mann-Kendall test showed that the increasing trend of the mean annual precipitation in each area was statistically significant at $P < 0.05$ level, except in western Inner Mongolia. A rising tendency of the mean annual precipitation was observed in 95.9% of the stations in the study region, but the amplitude shows regional differences. The Tianshan Mountains, Qilian Mountains, and northern Xinjiang show a rising tendency in all stations, followed by those in southern Xinjiang and the Hexi Corridor, whereas the lowest increase is in western Inner Mongolia, accounting for 77.78% of the stations. Centers of the highest increase in mean annual precipitation were identified. for example, Yeniugou (52.5 mm/decade) in the Qilian Mountains, Tianchi (22.8 mm/decade) in the middle of the Tianshan Mountains, and Xinyuan (28.3 mm/decade) west of the Tianshan Mountains. There are seasonal differences in the rising trend of the mean annual precipitation. The rate of precipitation increased the fastest in spring, by 3.32 mm/decade, followed by the rate in summer and winter, by 5.44 mm/decade and 5.09 mm/decade, respectively, whereas it is the slowest in fall (only 2.07 mm/decade). The precipitation rate in winter was universal across the studied region, it was 98.36% in all stations. Summer precipitation rate presented regional differences; the precipitation rate was 79.51%. Abrupt changes in mean precipitation in the arid region and sub-region of northwest China are evident. The changes occurred in northern and southern Xinjiang and western Inner Mongolia in the middle of the 1980s, in the Hexi Corridor and the Qilian Mountains changes occurred in the middle of the 1970s, and in the Tianshan Mountains the changes occurred in 1991. The abrupt changes in the mean precipitation in each area were statistically significant at $P < 0.05$ level. The Morlet wavelet analysis showed that the precipitation has an approximate 4-year, 8-year, 12-year, and 22-year cycle in the studied region. According to the level of wet and dry, the rates for normal, abnormally dry, dry, wet, and extremely wet mean precipitation series were 32%, 12%, 24%, 16%, and 16%, respectively. Since the 1980s, precipitation has increased significantly; the rate of positive anomalous years has increased from 10% in the 1970s to 80% nowadays. Today, it is relatively wetter in the arid region of northwest China, with an obvious ongoing increasing trend.

Key Words: Precipitation; trend analysis; spatio-temporal change; Wet and dry character; wavelet analysis; arid region; Northwest China

气候变化问题被列为全球十大环境问题之首,成为国际社会关注的焦点之一,是各国政府和学术界的重要议题^[1]。气候变化不仅影响自然系统和人类生存环境,也将影响世界经济发展和进步^[2]。气候变化对于干旱区的影响尤为突出。中国西北干旱区是亚洲中部干旱区的重要组成部分之一,是全球同纬度最干旱地区,该区域地形复杂,山-盆相间,沙漠与绿洲共存,水资源分布极不均匀,是生态环境严重脆弱地区,也是全球气候变化的最敏感地区^[3]。水是干旱区农业和社会经济发展的瓶颈,山区降水是干旱区水资源的主要来源,而平原降水对生态和环境保护有重要的意义。因此,全球变化和人类活动共同驱动下干旱区降水量的时空分布及其变化研究也受到众多学者的关注。21 世纪初,施雅风院士提出了中国西北气候由暖干向暖湿转型的推测,认为西北干旱区在 20 世纪 80 年代中期开始有变湿趋势,其中新疆西部地区变湿更加明显^[4];李栋梁^[5]、沈永平^[6]等分别从水资源、径流和冰雪等方面对变湿趋势做了证实。陈亚宁等^[7,8]利用 76 个代表站降水数据研究了西北干旱区的年降水量和极端降水事件的时空分布特征,认为降水量在 1987 年发生了突变,山区的降水增加趋势大于平原和荒漠区域。任朝霞和杨达源^[9]、赵传成等^[10]也分别研究了西北干旱区降水的时空分布。可见,目前对中国西北地区降水变化特征的研究成果较多,但这些研究所用站点资料有限,且以整体分析为主,缺乏时空变异性分析,对于西北干旱区降水多时间尺度及空间维度的变化规律及其变化趋势的定量研究方面还相对薄弱。研究干旱区降水在时间及空间方面的变化规律及趋势对进一步认识干旱区气候变化规律,提高应对气候变化能力有重要意义,同时也对干旱区退化生态系统植被的保护与恢复,区域社会

经济与生态环境协调发展具有重要的指导意义。

1 研究区概况

中国西北干旱区是亚洲中部干旱区的重要组成部分,包括新疆维吾尔自治区全境、甘肃河西走廊、青海祁连山地区、内蒙古阿拉善高原及黄河宁夏段以西的宁夏回族自治区部分。大致为年平均降水量小于 200 mm 的极端干旱区和干旱区,地理位置东以贺兰山为界,南至昆仑山—阿尔金山—祁连山脉,北侧和西侧直抵国界,区域范围大致介于 73°E—107°E 和 35°N—50°N 之间(图 1)。该区主要有天山、昆仑山、阿尔金山、阿尔泰山及祁连山等高大山脉,包围着塔里木盆地、准噶尔盆地等内陆盆地和河西走廊,分布着中国四大沙漠和大片戈壁,总面积为 235.2 km²,占全国国土面积的 24.5%。西北干旱区深居大陆腹地,属典型的大陆性气候,自然条件恶劣,降水稀少,生态系统极为脆弱^[3]。

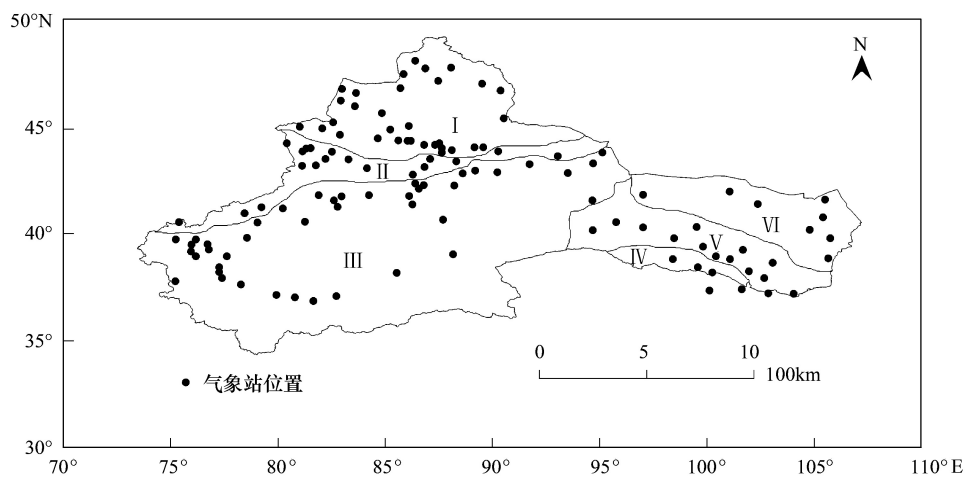


图 1 研究区气象站点及分区示意图

Fig.1 Distribution of observational stations in the study region

I: 北疆亚区; II: 天山亚区; III: 南疆亚区; IV: 祁连山亚区; V: 河西走廊亚区; VI: 内蒙古西部亚区

2 资料与方法

西北干旱区地形复杂多样,在高山和荒漠腹地人迹罕至。相比东部地区,长期的气象监测资料不足,且空间分布不均匀。为了尽可能的反映西北干旱区的降水变化,根据前人的研究成果和区域差异,把西北干旱区分为 6 个亚区,即新疆北部(北疆)、新疆南部(南疆)、天山、祁连山、甘肃河西走廊和内蒙古西部地区。按照区域代表性和长期观测资料的可比性,选取北疆 32 站、南疆 43 站、天山 19 站、祁连山 5 站、河西走廊 14 站、内蒙西部 9 站共计 122 个站点 1961 年 1 月至 2011 年 2 月共计 50 年月降水量数据,并整理出季节降水量和年降水量序列,季节是按照气象季节划分,标准气候均值用世界气象组织(WMO)推荐的 1971—2000 年的平均值。资料来自国家气象信息中心和新疆气象信息中心,数据序列经过了严格的质量控制,完整性和准确性良好。

降水的空间插值分析采用梯度距离平方反比法(Gradient Plus Inverse Distance Squared, GIDS)方法。GIDS 方法是在反距离加权插值的基础上,考虑了气象要素随经纬度和海拔高程的梯度变化,该方法在降水空间插值中得到了很好的运用^[11]。本研究所用的其他方法包括线性趋势、Mann—Kendall 非参数趋势检验和 Mann—Kendall 突变检验^[12-14]、Morlet 小波分析等^[15-16],具体原理和计算过程见相关文献。

3 结果与分析

3.1 降水量变化趋势分析

采用 Mann-Kendall 非参数检验法(M-K 法)对西北干旱区各亚区域和各站点年降水量序列进行趋势分

析。研究发现,近 50 年来,西北干旱区降水量总体呈增加趋势,增湿趋势为 $9.31 \text{ mm}/10\text{a}$ ($P<0.01$),但各区域存在差异性,形成了祁连山区、天山山区中段和西部等高幅增湿中心,其中祁连山区以野牛沟 ($52.5 \text{ mm}/10\text{a}$) 为中心,天山中部以天池 ($22.8 \text{ mm}/10\text{a}$) 为中心,天山西部以新源 ($28.3 \text{ mm}/10\text{a}$) 为中心;而在塔里木盆地周边和河西走廊形成低幅增湿区域(图 2a)。具体来看,增湿趋势在祁连山脉 > 天山山脉 > 北疆 > 河西走廊 > 南疆 > 内蒙西部,其中祁连山亚区 ($38.67 \text{ mm}/10\text{a}$) 增湿最明显,通过了 0.01 的显著性检验,其他区域通过了 0.05 的显著性检验,而内蒙西部增湿趋势较弱 ($5.09 \text{ mm}/10\text{a}$),没有通过显著性检验(图 2b)。

从各站点来看,全区绝大部分站点均呈现增湿趋势,占总站点的 95.9%,其中 90% 以上的站点通过了 0.05 的显著性检验;仅有 5 个站点降水量有微弱的减少趋势,但没通过显著性检验,这些站点主要位于荒漠腹地的极端干旱地区,如巴丹吉林沙漠腹地的拐子湖地区和塔克拉玛干沙漠东部的铁干里克地区,而号称“百里风区”的十三间房地区降水量减少趋势最大,为 $-1.97 \text{ mm}/10\text{a}$ 。在各亚区中,天山、祁连山和北疆亚区所有站点均有增湿趋势,其次是南疆和河西走廊亚区,而内蒙古西部亚区增湿比例为 77.78%,明显低于其他区域(表 1),这种区域变化在空间上表现为自西向东减弱的特征。

从季节变化来看,增湿趋势在春季 > 夏季 > 冬季 > 秋季,除夏季增湿趋势通过了 0.05 显著性水平检验之外,其余季节均通过了 0.01 的显著性检验,表明春季增湿趋势最明显,夏季较弱,但降水的年净增加量夏季最大,这是由于夏季降水量占全年降水量的比重最大。各季节增湿站点的比例在冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季,冬季降水量仅有 2 个站点呈下降趋势,站点增湿率为 98.36%,而夏季降水量呈下降趋势的站点有 25 个,增湿率为 79.51%,可以看出冬季增湿具有全区普遍性,但夏季增湿的区域差异性特征明显。在各亚区,北疆和天山山区的冬季增湿趋势最为明显,变化趋势分别为 $4.53 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $3.79 \text{ mm}/10\text{a}$,通过了 0.01 的显著性检验;祁连山秋季增湿趋势最显著,变化趋势为 9.73,通过了 0.01 的显著性检验。而内蒙古西部夏季降水量呈微弱的减少趋势,9 个站点中有 6 个表现为变干特征(表 1)。

表 1 西北干旱区及各亚区降水量变化趋势

Table 1 Trend of precipitation in the arid region of northwest China

参数 Parameter	亚区 Subregion	趋势变化率 (mm/10a) Tendency rate	趋势 Tendency	比例(增湿 站点/比例) Ratio	参数 Parameter	亚区 Subregion	趋势变化率 (mm/10a) Tendency rate	趋势 Tendency	比例(增湿 站点/比例) Ratio
春季降水量 Spring precipitation	北疆	3.09	▲	30(93.75%)	夏季降水量 Summer precipitation	北疆	3.15	▲	29(90.63%)
	南疆	0.98	▲	37(86.05%)		南疆	2.40	▲	36(83.72%)
	天山	4.06	▲	17(89.47%)		天山	5.77	▲	19(100%)
	祁连山	3.43	▲*	5(100%)		祁连山	3.89	▲	4(80%)
	河西走廊	1.52	▲*	14(100%)		河西走廊	0.28	▲	6(42.86%)
	内蒙西部	3.24	▲	7(77.78%)		内蒙西部	-1.03	△	3(33.34%)
	西北干旱区	3.32	▲**	110(90.16%)		西北干旱区	2.66	▲*	97(79.51%)
秋季降水量 Autumn precipitation	北疆	1.81	▲	25(78.13%)	冬季降水量 Winter precipitation	北疆	4.53	▲**	32(100%)
	南疆	1.50	▲	37(86.05%)		南疆	0.63	▲	41(95.35%)
	天山	3.20	▲	15(78.95%)		天山	3.79	▲**	19(100%)
	祁连山	9.73	▲**	5(100%)		祁连山	0.56	▲*	5(100%)
	河西走廊	2.74	▲*	14(100%)		河西走廊	0.92	▲*	14(100%)
	内蒙西部	2.43	▲*	9(100%)		内蒙西部	0.53	▲*	9(100%)
	西北干旱区	2.07	▲**	105(86.01%)		西北干旱区	2.34	▲**	120(98.36%)
年降水量 Precipitation	北疆	12.26	▲*	32(100%)	年降水量 Precipitation	天山	16.79	▲*	19(100%)
	南疆	5.44	▲*	41(95.36%)		祁连山	38.67	▲**	5(100%)
	河西走廊	8.49	▲*	13(92.86%)		内蒙西部	5.09	▲*	7(77.78%)
	西北干旱区	9.31	▲**	111(95.9%)					

▲表示增加趋势,△表示减少趋势; * 通过 $P<0.05$ 显著性水平检验, ** 通过 $P<0.01$ 显著性水平检验

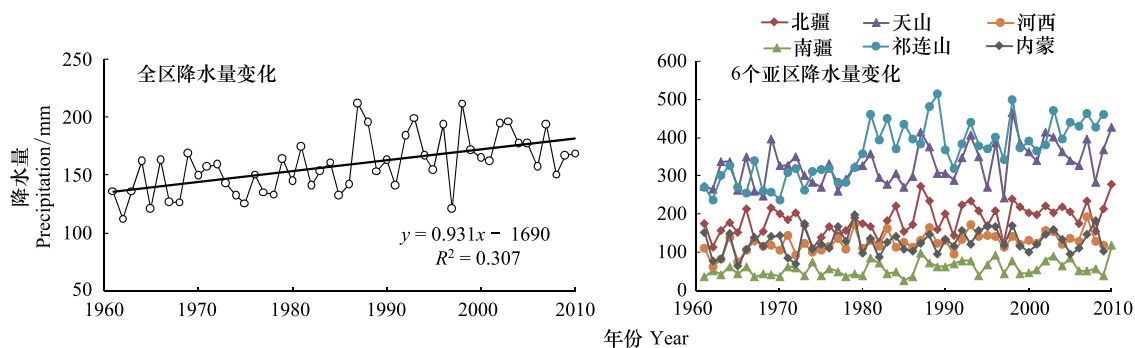


图2 西北干旱区及各区域降水量变化

Fig.2 Change of precipitation in the arid region of northwest China

3.2 降水量年际变化

3.2.1 多年平均降水量空间分布特征

根据西北干旱区 122 站月降水量资料,结合 DEM 数据(采用的 DEM 数据为 GTOPO30(global digital elevation model),其水平空间分辨率为 30 ~ 近似 1 km×1 km 的网格),采用 GIDS 方法进行降水量空间插值。降水量在空间分布上表现为从东南向西北、自山区向两侧平原减少的趋势,这主要是由于干旱区东南部及祁连山地区受西南暖湿气流和东亚季风的影响,气候潮湿,降水量大;天山山区则是西风环流的通道,可以带来大西洋的湿润气流,加上高大山脉的影响,在迎风坡有丰富的降水量,而被高山环抱的盆地内湿润气流无法进入,下垫面以荒漠为主,降水量较小,强烈的蒸发使得区域更加干旱^[3]。

3.2.2 近 50 年来降水干湿特征分析

根据划分干、湿年的方法,将西北干旱区降水量划分为异常偏湿、偏湿、正常、偏干和异常偏干等 5 个等级。干湿年的划分标准为^[17]:

异常偏湿:	$R_i > (R + 1.17\sigma)$
偏湿:	$(R + 0.33\sigma) < R_i \leq (R + 1.17\sigma)$
正常:	$(R - 0.33\sigma) < R_i \leq (R + 0.33\sigma)$
偏干:	$(R - 1.17\sigma) < R_i \leq (R - 0.33\sigma)$
异常偏干:	$R_i < (R - 1.17\sigma)$

其中, R 代表多年平均降水量; R_i 代表逐年降水量; σ 代表标准差。采用干湿年划分标准,计算西北干旱区及各亚区降水量干湿的划分标准区间及各等级降水所占的比例。

从表中可以看出,西北干旱区 32% 的年份降水属正常范围,异常偏湿和偏湿年份均为 16%;偏干年份为 24%,异常偏干年份为 12%。天山和祁连山亚区异常偏湿所占比例在各亚区中最高,为 16%,其次是内蒙古西部亚区 14%,北疆、南疆和河西走廊亚区最小,为 12%。偏湿年份地区较多,北疆亚区比例最高位 34%,其次是内蒙西部亚区的 24%。各亚区降水正常年份比例在 14%(北疆亚区)至 30%(河西走廊亚区)。各亚区偏干年份所占比例均较高,南疆亚区最高 44%,其次是天山 30%,而祁连山最小 24%。祁连山亚区异常偏干比例最大 16%,其余亚区均在 10%—12% 之间,南疆亚区最小 2%。可以看出,西北干旱区依然以偏干为主,但异常偏干年份的比例小于异常偏湿年份。这与西北干旱区降水事件的特点有关,在全球气候变化背景下,干旱区的极端降水事件频发,降水的强度增加,若干次大的降水事件形成了全年的大部分降水。

3.3 降水量的年代际变化

年代际尺度是气候变化研究的最基本的尺度之一。按照年代为时间尺度统计中国西北干旱区自 1961—2010 年以来的年降水量序列,分别计算全区和各亚区 20 世纪 60 年代至 21 世纪初十年各时段平均降水量、距平值以及正距平年数的比例(表 3),分析西北干旱区年降水量的年代际变化特征。

表 2 西北干旱区年降水量干湿分析
Table 2 An analysis of wet or arid of precipitation in the northwest arid area

降水量级别 Precipitation level	参数 Parameter	分区 Areas						
		西北干旱区 Northwest arid area of China	北疆 Northern of Xinjiang	南疆 Southern of Xinjiang	天山 Tianshan Mountain	祁连山 Qilian Mountain	河西走廊 Hexi Corridor	内蒙古西部 Western of Inner Mongolia
异常偏湿 Extremely wetter	标准/mm	$R_i > 187$	$R_i > 231.4$	$R_i > 81$	$R_i > 392.1$	$R_i > 450.1$	$R_i > 154.8$	$R_i > 163.1$
	年数/a	8	6	6	8	8	6	7
	比例/%	16%	12%	12%	16%	16%	12%	14%
偏湿 Wetter	标准/mm	$166.7 < R_i \leq 187$	$199.2 < R_i \leq 231.4$	$64.6 < R_i \leq 81$	$348 < R_i \leq 392.1$	$388.6 < R_i \leq 450.1$	$134.3 < R_i \leq 154.8$	$137.4 < R_i \leq 163.1$
	年数/a	8	17	10	11	10	10	12
	比例/%	16%	34%	20%	22%	20%	20%	24%
正常 Normal	标准/mm	$150.7 < R_i \leq 166.7$	$173.8 < R_i \leq 199.2$	$51.6 < R_i \leq 64.6$	$313.3 < R_i \leq 348$	$340.3 < R_i \leq 388.6$	$118.1 < R_i \leq 134.3$	$117.3 < R_i \leq 137.4$
	年数/a	16	7	11	10	12	15	11
	比例/%	32%	14%	22%	20%	24%	30%	22%
偏干 Drier	标准/mm	$130.3 < R_i \leq 150.7$	$141.6 < R_i \leq 173.8$	$35.1 < R_i \leq 51.6$	$269.1 < R_i \leq 313.3$	$278.7 < R_i \leq 340.3$	$97.6 < R_i \leq 118.1$	$91.6 < R_i \leq 117.3$
	年数/a	12	14	22	15	12	14	14
	比例/%	24%	28%	44%	30%	24%	28%	28%
异常偏干 Extremely drier	标准/mm	$R_i < 130.3$	$R_i < 141.6$	$R_i < 35.1$	$R_i < 269.1$	$R_i < 278.7$	$R_i < 97.6$	$R_i < 91.6$
	年数/a	6	6	1	6	8	5	6
	比例/%	12%	12%	2%	12%	16%	10%	12%

在中国西北干旱区,20 世纪 70 年代之前低于标准降水均值,70 年代之后开始进入湿润时段,到 90 年代正距平值达 11.4 mm,21 世纪初正距平 15.1 mm。正距平年数比例由 70 年代的 10% 上升至 21 世纪初的 80%。北疆亚区、南疆亚区、祁连山亚区和河西走廊亚区降水变化特征相似,天山亚区和内蒙西部亚区降水变化规律相似。从年代来看,60 年代至 70 年代,全区时段降水量均低于标准降水均值,距平为负值(−99.2—−2.6),正距平年数比例在 0% 至 50% 之间,但祁连山亚区所有年份均为负距平,距平值为−99.2 mm 和−66.2 mm。80 年代,北疆亚区、南疆亚区、祁连山亚区和河西走廊亚区降水均值不断增加,距平值在 2.3—50.7 mm 之间,正距平年数比例在 30%—80%,其中祁连山的降水变化幅度最大;而天山亚区和内蒙西部亚区仍处于负距平时段,但降水趋势不断缓和。90 年代至 21 世纪初,各亚区时段降水均值均高于标准降水均值,其中天山亚区和祁连山亚区等山区增湿更加明显,正距平年数比例达到 90%,而南疆和内蒙西部等干旱地区增湿较弱,正距平年数比例在 50%—60% 之间。总体来看,20 世纪 70 年代之前以负距平为主,80 年代开始有区域性增湿趋势,90 年代之后全区增湿均较明显,西北干旱区整体处于相对湿润时段,且趋势明显。

表 3 西北干旱区及各亚区降水年代际变化特征
Table 3 The variation character of precipitation anomaly for decade

年代 Decades	参数 Parameter	分区 Areas						
		西北干旱区	北疆	南疆	天山	祁连山	河西走廊	内蒙西部
1961—2010	多年平均值/mm	158.7	186.5	58.1	330.6	364.4	126.2	127.4
1971—2000	标准气候均值/mm	159.5	184.0	58.6	326.7	375.2	129.1	128.8
1961—1970	距平值/mm	−19.2	−14.3	−13.0	−20.4	−99.2	−23.9	−11.2
	正距平年数比率%	30	30	20	40	0	20	50
1971—1980	距平值/mm	−14.9	−19.5	−8.3	−19.3	−66.2	−7.8	−2.6
	正距平年数比率%	10	30	30	30	0	30	40
1981—1990	距平值/mm	3.3	5.7	2.3	−5.2	50.7	2.6	−8.2
	正距平年数比率%	50	40	60	30	80	50	40
1991—2000	距平值/mm	11.4	13.8	5.7	24.4	15.5	5.1	10.7
	正距平年数比率%	70	70	60	70	60	70	50
2001—2010	距平值/mm	15.1	26.8	10.5	40.1	51.6	10.9	4.7
	正距平年数比率%	80	80	50	90	90	60	60

3.4 降水量的突变和周期特征

将西北干旱区及各亚区近 50 年(1961—2010 年)降水量序列进行标准化处理,采用 M-K 法和 Morlet 小波变换分别进行年降水量的突变和周期特征分析,绘制全区和各亚区降水量序列 Morlet 小波变换系数实部时频变化图(图 3),并绘制西北干旱区小波变换系数实部变化过程(图 4)。突变结果表明,西北干旱区各亚区降水量在 20 世纪 80 年代至 90 年代初有明显的突变特征,其中新疆北部、南部和内蒙西部亚区在 80 年代中期有突变,突变时间与气温变化基本同步^[18];祁连山和河西走廊亚区突变较早,发生在 70 年代中后期;而天山山区在 1991 年,以上突变时间均通过了相应的显著性水平检验。Morlet 小波变换系数实部时频变化图可以看出,西北干旱区年降水量序列在整个研究时段内均存在 4a、8a、12a 和 22a 振荡周期,结合小波方差检验得出 22a 尺度振荡周期最强,其次是 12a 尺度(图 3)。从小波变换实部变化过程看出 22a 的主周期分别在 1968 年、1976 年、1981 年、1990 年、1997 年和 2004 年发生突变,共经历了 3 个干湿变化的周期(图 4)。在各亚区,4a、8a 和 22a 尺度周期是全区域性的,12a 周期在天山和祁连山表现明显,而在除北疆和祁连山之外的其他子区还存在 28a 的振荡周期。

4 结论与讨论

4.1 结论

(1) 近 50 年来西北干旱区降水量呈增加趋势,95.9% 的站点有增湿特征,全区增湿趋势为 9.31 mm/10a

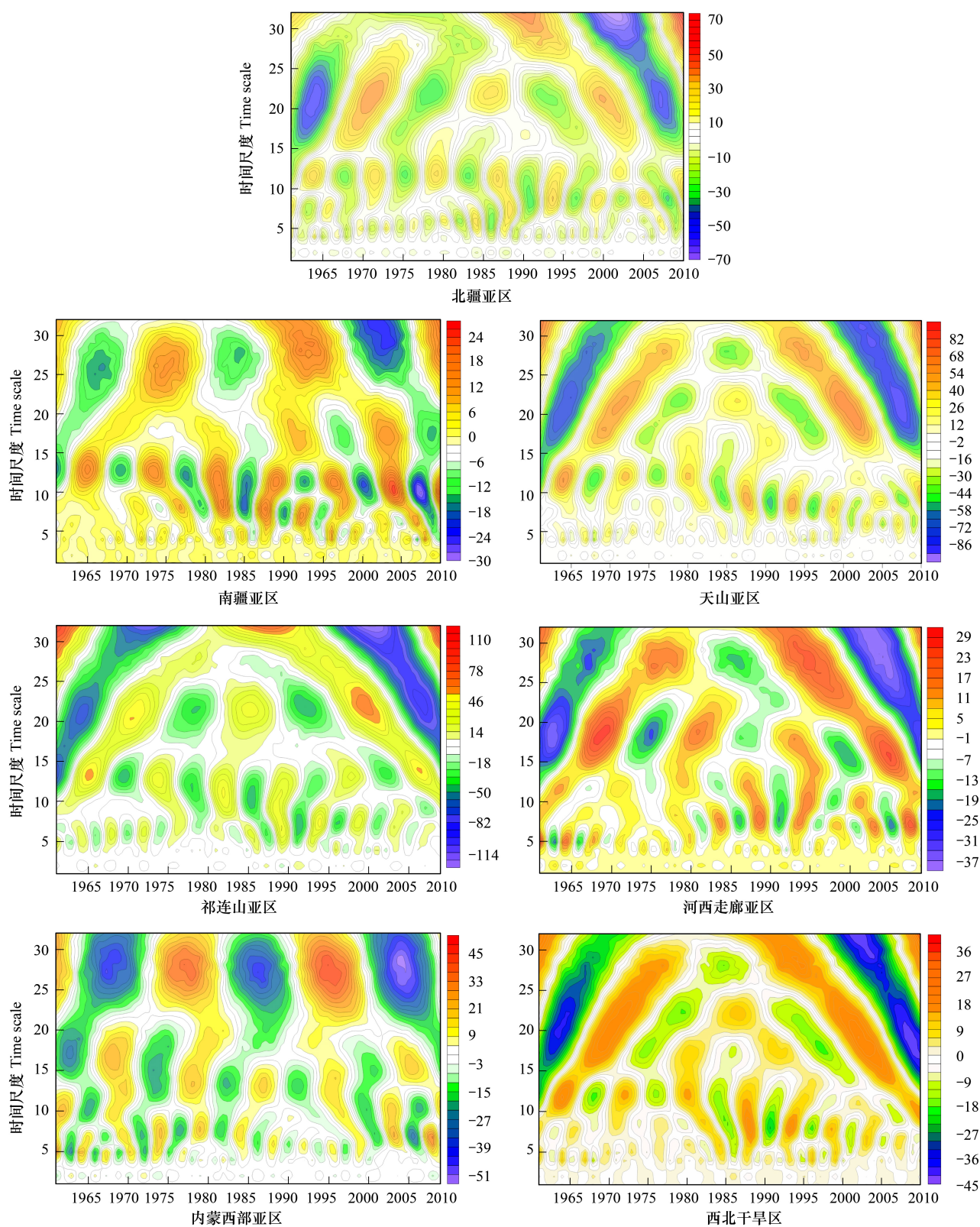


图3 西北干旱区 Morlet 小波变换实部时频分布

Fig.3 Real plural of Morlet wavelet analysis in the arid region of northwest China

($P < 0.01$), 但增湿幅度存在区域差异性, 其中祁连山亚区 (38.67 mm/10a) 增湿最明显; 从季节来看, 冬季增湿具有全区普遍性, 但夏季增湿的区域差异性特征明显。

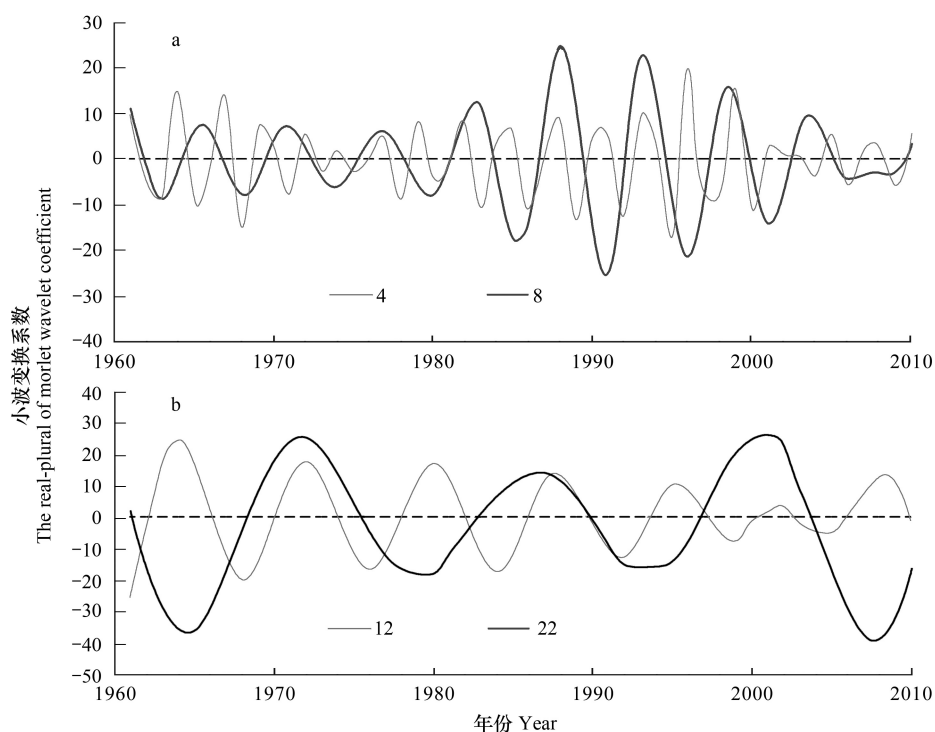


图4 西北干旱区 Morlet 小波变换系数实部变化过程

Fig.4 The real plural of morlet wavelet coefficient process line in the arid region of northwest China

表4 西北干旱区及各亚区降水突变特征

Table 4 Abrupt change of precipitation the arid region of northwest China

参数 Parameter	分区 Areas						
	西北干旱区	北疆	南疆	天山	祁连山	河西走廊	内蒙西部
突变年份 Abrupt change year	1981	1986	1986	1991	1979	1976	1985
显著性水平 Significance level	***	***	**	***	***	***	*

* 通过 $P < 0.05$ 显著性水平检验, ** 通过 $P < 0.01$ 显著性水平检验, *** 通过 $P < 0.001$ 显著性水平检验

(2) 西北干旱区 32% 的年份降水属正常范围, 偏干年份为 24%, 异常偏干年份为 12%, 异常偏湿和偏湿年份均为 16%。20 世纪 70 年代之前降水量略低于标准降水均值, 80 年代开始有区域性增湿趋势, 90 年代之后全区增湿均较明显, 正距平年数比例由 70 年代的 10% 上升至 21 世纪初的 80%, 西北干旱区整体处于相对湿润时段, 且增湿趋势明显。

(3) 西北干旱区及各亚区降水量在 20 世纪 80 年代至 90 年代初有明显的突变特征, 降水量序列存在 4a、8a、12a 和 22a 振荡周期, 其中 22a 尺度振荡周期最强, 其次是 12a 尺度。

4.2 讨论

近 50 年来西北干旱区呈整体增湿的趋势, 而且得到了各方面的证实。21 世纪初施雅风院士提出了中国西北气候由暖干向暖湿转型的观点^[4], 任朝霞和杨达源等^[9, 19-20]系统的研究了西北干旱区降水变化趋势 (1951—2000 年) 及其对农业、荒漠化等的影响, 认为降水变化有增加的趋势 (3.2 mm/10a), 其中北疆降水增加最多。Li 和 Wang 等^[7, 8]也研究了西北干旱区降水的变化特征 (1960—2010 年), 认为年降水量增加趋势为 7.05 mm/10a, 其中山区增湿最显著, 为 10.15 mm/10a, 而荒漠地区增湿不明显, 这与本研究的结论相近。和以上类似研究相比, 本研究有两个优势: 其一是使用了研究区内 122 个站点的观测资料, 与以上研究的 21 和 51 个站点相比, 有更加充足的数据支持, 且资料的年限更接近; 其二是根据区域差异和海拔等因素对西北干旱区划分为 6 个亚区, 分析不同尺度的时间变化和干湿特征, 揭示了空间异质性, 得出增湿趋势在祁连山脉 > 天山山脉 > 北疆 > 河西走廊 > 南疆 > 内蒙西部; 异常偏湿年份所占比例在天山和祁连山 > 内蒙古西部 > 北疆、

新疆和河西走廊,而异常偏干比例祁连山最大,南疆最小;降水量突变时间在祁连山和河西走廊较早,新疆北部、南部和内蒙西部发生在 80 年代中期,而天山山区在 90 年代初期等结论。因此,本研究的结论更加可信,对认识西北干旱区降水的时空变异性增添了新的证据。

西北干旱区降水的时空格局的演变受诸多因素的影响。地理位置和地形是形成空间分布格局的主要因素,祁连山和天山等的高大山脉迎风坡有丰富的降水,而周边盆地和走廊降水稀少。在时间演变上,西北干旱区及各亚区降水量均存在较强的 12a 和 22a 尺度振荡周期,而 12a 和 22a 尺度与 Qian 等^[21]研究得出的千年全球平均气候变化周期(准 11—13 年和准 20—22 年)一致,这些周期振荡与太阳活动有关,如准 11 年的太阳黑子活动周期和 22 年的黑子磁性倒转周期。因此,降水的时间演变可能与太阳黑子活动有关。

西北干旱区降水增湿化趋势,对冰川、沙尘暴和湖泊等西部特殊的生态环境要素造成影响^[3]。降水量的增加,尤其是山区降水量的显著增加,对冰川和常年积雪的积累、高山草原和灌溉农业等有有利的影响,同时也能够缓解荒漠绿洲过渡带的退化和荒漠化的防治。随着气候系统变暖,降水增加的趋势是否会持续发展,干旱区水文循环、生态系统和地表过程将如何响应,相对较少的绝对降水量对当地农林牧业发展,尤其是荒漠生态环境的保护和修复将产生怎样的影响,这些都是进一步研究的重点课题。

参考文献(References):

- [1] 国家气候变化对策协调小组办公室,中国 21 世纪议程管理中心. 全球气候变化——人类面临的挑战. 北京: 商务印书馆, 2004: 247-249.
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 宫鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈亮, 高学杰, 戴晓苏. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [3] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 胡文峰, 刘志辉, 赵玲. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1283-1291.
- [4] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226.
- [5] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 张存杰, 冯建英, 杨青, 袁玉江, 董安祥. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135-142.
- [6] 沈永平, 王德顺. 塔里木盆地冰川及水资源变化研究新进展. 冰川冻土, 2002, 24(6): 819-825.
- [7] Li B F, Chen Y N, Shi X, Chen Z S, Li W H. Temperature and precipitation changes in different environments in the arid region of northwest China. Theoretical and Applied Climatology, 2013, 112(3/4): 589-596.
- [8] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960—2010. Hydrological Processes, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [9] 任朝霞, 杨达源. 西北干旱区近 50 年气候变化特征与趋势. 地球科学与环境学报, 2007, 29(1): 99-102.
- [10] 赵传成, 王雁, 丁永建, 叶柏生, 姚淑霞. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化. 高原气象, 2011, 30(2): 385-390.
- [11] Nalder I A, Wein R W. Spatial interpolation of climatic normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(4): 211-225.
- [12] Mann H B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [13] Kendall M G. Rank Correlation Methods. London: Griffin, 1975.
- [14] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [15] 王文圣, 赵太想, 丁晶. 基于连续小波变换的水文序列变化特征研究. 四川大学学报: 工程科学版, 2004, 36(4): 6-9.
- [16] 薛小杰, 蒋晓辉, 黄强, 王煜. 小波分析在水文序列趋势分析中的应用. 应用科学学报, 2002, 20(4): 426-428.
- [17] 王秀荣, 徐祥德, 姚文清. 西北地区干湿夏季的前期环流和水汽差异. 应用气象学报, 2002, 13(5): 550-559.
- [18] 黄蕊, 徐利岗, 刘俊民. 中国西北干旱区气温时空变化特征. 生态学报, 2013, 33(13): 4078-4089.
- [19] 任朝霞, 杨达源. 近 50 年西北干旱区气候变化对农业的影响. 干旱区资源与环境, 2007, 21(8): 48-53.
- [20] 任朝霞, 杨达源. 近 50 年西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 91-95.
- [21] Qian W H, Lu B. Periodic oscillations in millennial global-mean temperature and their causes. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(35): 4052-4057.