

文章编号:0559-9350(2009)08-1002-10

中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究

徐利岗^{1,2,3},周宏飞^{3,4},梁 川¹,吴安琪²

(1. 四川大学 水利水电学院,四川 成都 610065; 2. 宁夏水利科学研究所 宁夏 银川 750021;

3. 阜康荒漠生态系统国家野外观测研究站,新疆 阜康 831505;

4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:依据我国北方荒漠区 35 个站点 1951—2005 年月降水资料及 NCEP NCAR 再分析资料,运用降水集度、游程检验、功率谱、Morlet 小波分析、Mann-Kendall 秩次相关及气候趋势系数等方法,分析了北方荒漠地区降水在年内,年际和年代际几种时间尺度的变异规律及其变化趋势,探讨了同期该地区上空大尺度环流异常对当地降水时空分布及变化趋势的影响。结果表明:我国北方荒漠区降水存在 5a、9a 及准 14a 主周期,1988 年以来以 9a 及 14a 周期为主;降水年内分配的差异趋缓,年际波动呈增加趋势。年代尺度下,以多年均值衡量,21 世纪内蒙古高原东部地区降水将减少,平均减幅为 15~40mm a,北疆大部分地区平均增幅为 10~40mm a。各年代,春(秋)季降水占全年百分率变化不大,维持在 14.4%~17.5%(17.3%~21.2%),夏季是主要降水期,占全年降水的 58%~62%,冬季所占比例较小,最高为 5.1%。预计未来:春、夏季降水将增多,冬季降水逐渐减少,年降水有增加趋势;极端干旱区和干旱区的降水有增加趋势的地区概率分别为 83%和 70%,而半干旱地区降水有明显减少趋势的概率为 58%,西部有向暖湿变化、中部地区趋于暖干、而东部地区趋于干旱的可能。

关键词:降水;多时间尺度;Morlet 小波分析;Mann-Kendall 秩统计法;趋势分析;大气环流;中国北方荒漠区

中图分类号:P333

文献标识码:A

水分是荒漠地区最敏感的生态要素,降水的时空变化对我国北方荒漠地区植被格局及生态环境有着深刻的影响,而全球气候变化和人类活动加剧,使该区降水时空分布发生新的变化。通过对冰芯、树轮等气候代用资料的分析,近 500a 来中国北方干旱、半干旱地区存在 5 个气候干旱期,每个干旱期持续 50a 左右^[1];王绍武等^[2]认为近 50a 是 400a 以来中国西部年降水量最丰沛的时期,气候有暖干向暖湿转型的可能^[3-4]。东北科尔沁沙地及其周围地区 2000—2010 年气温将下降,降水将会减少,呈冷干化趋势^[5],而浑善达克沙地地区则呈暖干化趋势^[6]。河套地区西北部和东南部降水分别以 2% 10a 和 3% 10a 的速度减少^[7],河西地区气候趋于暖湿^[8]。新疆极端降水事件在 80 年代以后显著增多^[9]、降水量明显增加^[10],被塔克拉玛干沙漠三面包围的和田绿洲降水的年际变化较大,变幅为 3.4~100.9mm^[11]。可见,针对我国北方不同地区降水时空变化特征的研究较为深入,但对于北方荒漠区降水多时间尺度下的变异性及其变化趋势的定量研究方面还比较薄弱。鉴于此,本文研究北方荒漠区降水在时间方面的变异规律及趋势。

1 研究区概况

中国北方荒漠区属中国综合自然区划中的西北区和内蒙古^[12],行政区划包括新疆、青海、甘肃、内

收稿日期:2008-11-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB421301);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-431);国家自然科学基金重点项目(40730634)

作者简介:徐利岗(1981—),男,宁夏银川人,博士生,主要从事水文学水资源及相关研究。E-mail:xlq9120@163.com

蒙古、宁夏全部,山西、河北、陕西的部分地区,其面积约占全国总面积的 1/3。在研究区范围具体确定上结合了行政区划和我国 400mm 等降水量线走势,包含有极端干旱、干旱、半干旱和半湿润等不同类型的地区,区内还分布有我国四大沙漠(塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠)和四大沙地(毛乌素沙地、浑善达克沙地、科尔沁沙地和呼伦贝尔沙地)。从西部的塔克拉玛干沙漠到东部的科尔沁沙地长达 4 000km 的北方荒漠区,降水量在 500mm 以下,时间及空间上的分布都不均匀;大部分地区的干燥度大于 4.0,其中东疆和南疆塔克拉玛干沙漠地区在 16.0 以上,最高达 60.0^[18]。由于北方荒漠区自然条件恶劣、生态极为脆弱,土地退化和荒漠化问题严重,也是我国和东北亚地区的主要沙尘源地。

2 资料与方法

2.1 研究站点确定与资料来源 在研究区内的国家基准站中,按照区域代表性(新疆南、北部,青藏高原地区,河西走廊,河套平原及内蒙古高原)、降水代表性(极端干旱、干旱、半干旱、半干旱半湿润)和资料序列的长期可比性等原则选站。为选择足够数量的典型站,使采用的降水资料能够代表研究区降水情况并满足后续分析计算的基本要求,采用多步迭代估计方法^[14]对站点最优个数进行估计,从而得出最佳样本数量(选取置信水平为 95% 的 Student t 检验得到置信区间)。选取 8 省(区)35 个站点 1951 年 1 月—2005 年 12 月计 55a 的月降水资料,各站点分布位置见图 1。^①

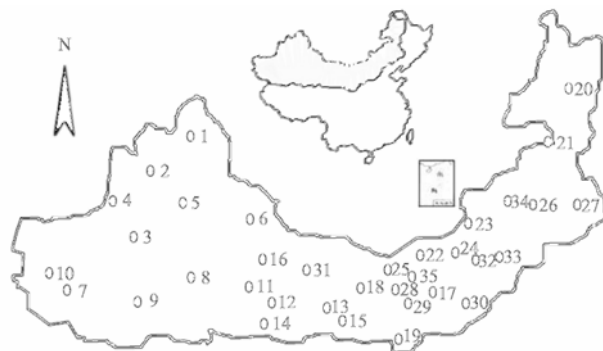


图 1 研究区站点分布示意

站点位置(●):

1. 阿勒泰, 2. 克拉玛依, 3. 伊宁, 4. 乌鲁木齐, 5. 库车, 6. 喀什, 7. 若羌, 8. 莎车, 9. 安德河, 10. 哈密, 11. 冷湖, 12. 大柴旦, 13. 刚察, 14. 格尔木, 15. 西宁, 16. 敦煌, 17. 平凉, 18. 民勤, 19. 酒泉, 20. 银川, 21. 盐池, 22. 榆林, 23. 大同, 24. 太原, 25. 怀来, 26. 图里河, 27. 阿尔山, 28. 朱日和, 29. 乌拉特中旗, 30. 呼和浩特, 31. 吉兰太, 32. 鄂托克旗, 33. 锡林浩特, 34. 通辽, 35. 林西

2.2 研究方法

2.2.1 降水集度及标准化 采用降水集度(Precipitation Concentration Index)表示年内降水的分异性^[15]。

$$PCI = 100 \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{\left[\sum_{i=1}^{12} p_i \right]^2} \quad (1)$$

式中: p_i 是各站每月的降水量,当 $PCI < 10$,降水年内分配均衡,差异不大; $11 \leq PCI \leq 20$,降水呈季节性变化; $PCI > 20$,降水月际变化显著。

依据各站的年降水及 PCI 系列分别计算出降水的变差系数(CVR)及降水集度的变差系数($CVPCI$),以反映降水时间序列上的波动,变异系数值越大,表明序列变化越剧烈,越不稳定。并依据改进后的数据标准化公式计算标准年降水(AR)及标准降水集度($APCI$)来反映降水年际间的变异特征。

^① 资料来源于国家气象数据共享服务网: <http://cdc.gov.cn/index.jsp>。

$$AR_{zi} = (R_{zi} - \overline{R_z}) / \overline{R_z}; APCI_{zi} = (PCI_{zi} - \overline{PCI_z}) / \overline{PCI_z} \quad (2)$$

式中： R_{zi} 是Z站第*i*年的年降水量； $\overline{R_z}$ 是Z站的多年平均降雨量。

2.2.2 小波分析 小波分析是用一族频率不同的振荡函数作为窗口函数 $\varphi(t)$ 对信号 $f(t)$ 进行扫描和平移。时间序列 $f(k\Delta t)$ ($k=1,2,\dots,N$; Δt 为取样时间间隔)的小波变换为式(3)。基本小波函数 $\Psi(t)$ 有墨西哥帽小波(Mexican hat)、Morlet小波和 Wave小波等^[16]。本文采用 Morlet小波^[17]，小波变换系数表示为式(4)。将时间域上关于 a 的所有小波变换系数的平方进行积分即为小波方差，见式(5)。

$$W_f(a, b) = | a |^{-1/2} \Delta t \sum_{k=1}^N f(k\Delta t) \cdot \overline{\varphi} \left(\frac{k\Delta t - b}{a} \right) \quad (3)$$

$$W_f(a, b) = | a |^{-1/2} \sum_{k=1}^N f(k) \cdot e^{i\alpha k} e^{-k^2/2} \quad (4)$$

$$Var(a) = \int_{-\infty}^{\infty} | W_f(a, b) |^2 db \quad (5)$$

式中： a 为尺度因子，反映小波的周期长度； b 为时间因子，反映时间平移； $W_f(a, b)$ 称为小波变换系数，常数 $c=6.2$ 。

3 结果与分析

3.1 降水年内、年际变化 采用降水集度法对北方荒漠区降水系列进行分析并绘出相关特征参数时空变化图(图2)。从图2(a)看出，贺兰山和秦岭以东地区降水分布具有明显自东向西逐渐递减规律，而贺兰山和秦岭以西地区降水的区域地带性规律不明显，但总体上具有自东南向西北逐渐递增的趋势，青海柴达木盆地北部冷湖到新疆东部吐哈盆地的吐鲁番一带形成降水的最低极值区。 CVR 分布(图2(b))反映出各地降水年际间变化程度差异较大。变幅为15%(青海刚察)~78%(新疆安德河)。其中，新疆南部和青海的年际变化最大，大部分地区在40%以上，因此在当地极易发生旱灾或洪灾。内蒙古地区降水年际变化相对平稳，变差系数在28%左右。降水年内分配在时间和空间均呈现出较大的变异性(图2(c))。有63%的地区 PCI 值大于20，变化范围为20.2~42.6。这些地区年内各月的降水分布差异较大。只有新疆北部、宁夏和山西等地年内降水分布相对均匀($PCI < 20$)。这可能是由于北方荒漠区大部分受季风环流影响，降水集中在某几个月而造成。年际间各月降水分配差异较大(图2(d))。 $CVPCI$ 的变幅为12%(青海西宁)~43.5%(新疆喀什)。年际间降水各月分配差异的变化相对降水量的年际变化要缓和得多，这可能是由于一个地区的气候是个长期的过程，业已形成的规律如果发生变化亦要很长的时间才能有所表现。研究区内50%以上的地区变率集中在20%~30%之间；新疆北部地区的

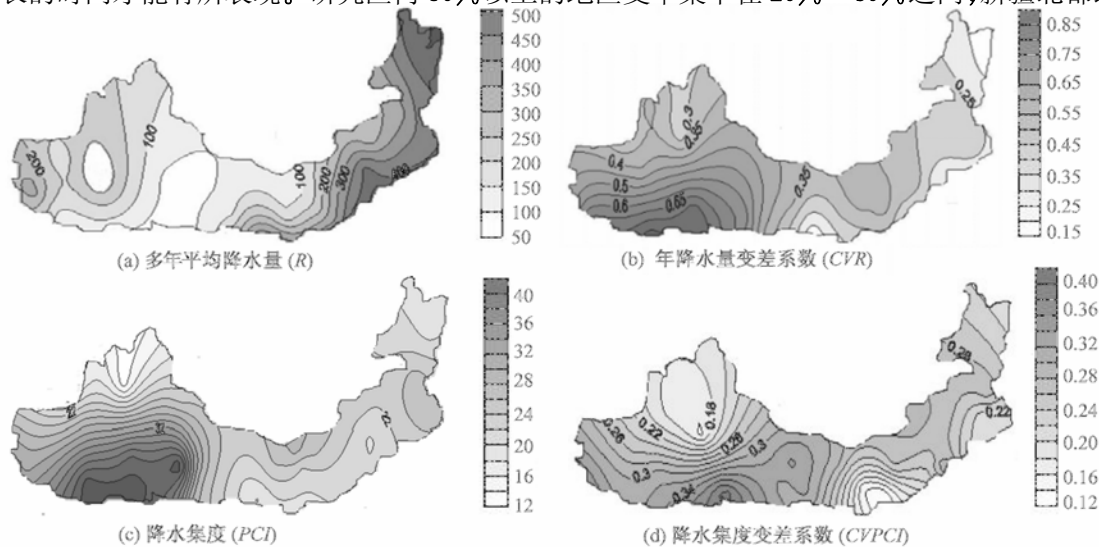


图2 降水特征参数等值线

变化相对稳定($CVPCI < 19\%$)。

采用游程理论分析研究区内各地发生连续丰(枯)水的概率,RS法^[18]计算各站Hurst系数(表1,篇幅所限仅列部分站点)。结果表明:单独丰水年的概率高于单独枯水年;而发生连枯年的概率则高于连丰年。游程概率统计模型参数(ρ)反映了出现连续丰枯状态概率的大小。连枯的模型参数值大于连丰的,则连枯较连丰更频繁的出现。代表站的Hurst系数均大于0.5,介于0.523(乌拉特中旗)—0.842(乌鲁木齐)之间,均值为0.658。表明我国北方荒漠区降水具有持续性特征,现在的降水特性将会影响未来的降水趋势。

表1 游程概率统计分析及Hurst系数

项目站名	丰水年							枯水年							Hurst系数
	ρ	平均	1a	2a	3a	4a	>5a	ρ	平均	1a	2a	3a	4a	>5a	
乌鲁木齐	0.68	3.1	32.0	21.8	14.8	10.1	6.8	0.70	3.4	29.6	20.9	14.7	10.3	7.3	0.84
喀什	0.19	1.2	81.0	15.4	2.9	0.6	0.1	0.47	1.9	53.3	24.9	11.6	5.4	2.5	0.53
民勤	0.32	1.5	68.0	21.8	7.0	2.2	0.7	0.36	1.6	64.3	23.0	8.2	2.9	1.0	0.57
冷湖	0.32	1.5	68.4	21.6	6.8	2.2	0.7	0.57	2.3	43.3	24.6	13.9	7.9	4.5	0.61
银川	0.52	2.1	48.0	25.0	13.0	6.7	3.5	0.57	2.3	43.3	24.6	13.9	7.9	4.5	0.58
榆林	0.44	1.8	56.0	24.6	10.8	4.8	2.1	0.53	2.1	46.7	24.9	13.3	7.1	3.8	0.67
鄂托克旗	0.48	1.9	52.2	25.0	11.9	5.7	2.7	0.55	2.2	44.8	24.7	13.6	7.5	4.2	0.56
呼和浩特	0.36	1.6	64.0	23.0	8.3	3.0	1.1	0.43	1.8	56.7	24.6	10.6	4.6	2.0	0.58
太原	0.33	1.5	66.7	22.2	7.4	2.5	0.8	0.45	1.8	54.8	24.8	11.2	5.1	2.3	0.58
怀来	0.52	2.1	48.3	25.0	12.9	6.7	3.5	0.39	1.6	60.9	23.8	9.3	3.6	1.4	0.70

3.2 降水年代际变化 计算1951—2005年逐年、冬季(12月—次年2月)、春季(3—5月)、夏季(6—8月)和秋季(9—11月)降水距平百分率,分别以10a为步长统计年及各季降水距平累计值见表2,四季降水占年降水百分率年代际变化见图3。从年降水距平百分率变化来看,北方荒漠区20世纪50年代处于丰水期累计降水距平值达62.3%(表2)。60—70年代持续偏枯累计达117.1%,80年代至今降水逐渐偏多,2000—2005年偏丰41.9%,比70年代偏丰96.7%。春季降水占全年降水百分率近50年来均在14.4%~17.5%之间,夏季则维持在58%~62%之间,春、夏季降水量年代际变化不大,且春、夏季降水的年代际变化呈现相同规律(图3)。50年代为丰水期,60—70年代进入枯水期,夏季偏枯89.5%,春季达244.3%;80年代以后一直处于多水期,其中2000—2005年春季降水偏多65.1%,夏季为24.9%。秋季降水规律不同于春夏两季,50年代降水最多,累计距平74.7%,60年代直至90年代持续枯水,枯水距平达203.4%,近5年来降水量有所增加,为21.2%。冬季降水在年代际尺度下丰枯交替,波动较大。50年代降水极为丰富,累计距平值达320.0%,60年代进入偏少期,累计距平为-254.7%,比50年代偏少574.7%,相差极大,90年代降水偏多,但程度较80年代弱,2000—2005年降水偏少,累计距平值42.1%,因此可以预计未来3至5年冬季降水仍会进一步减少。

表2 降水距平百分率10a累计值

项目	50年代	60年代	70年代	80年代	90年代	2000—2005年
年累积距平%	62.3	-15.5	-54.8	-20.1	-13.8	41.9
四季						
春(3—5月)	53.9	36.6	-190.4	36.3	-1.4	65.1
夏(6—8月)	45.9	-21.8	-43.6	-15.5	10.1	24.9
累积距平%						
秋(9—11月)	74.7	3.6	13.6	-59.8	-128.7	96.6
冬(12—2月)	320.0	-254.7	40.2	-93.8	30.5	-42.1

对各站降水系列距平化,以10a为步长累计降水丰枯量并计算不同年代的平均年降水量变化值,绘制60年代、70年代、80年代、90年代及2000—2005年的降水(年平均)年代际变化幅度及趋势(图3)。20世纪60年代(图4(a))年增幅较大的地区(■)多集中在荒漠区东部内蒙古高原地区,中部河套平原及河西走廊地区降水增幅较小或呈小幅负增长,而在新疆北部则有较大幅度的减少(●),南疆及青藏高原北缘地区呈小幅减少。70年代(图4(b)),年增幅较大区域开始向中部移动,内蒙古高原东部地区出现降水高减幅区域,北疆高减幅区域减少,说明降水趋势由东向西出现增大趋势。80年代(图4(c))高增幅区域继续西移,北方荒漠区西部新疆、青海等地降水均有小幅增加,内蒙古高原高减幅地域继续

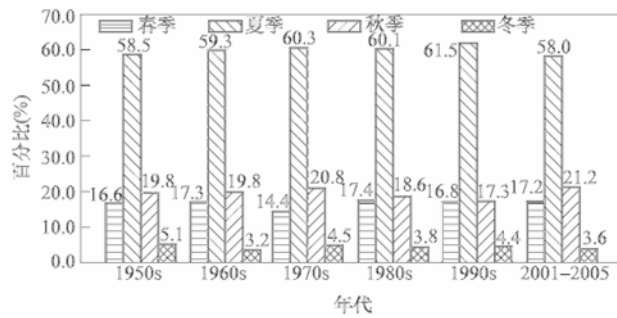


图3 四季降水占年降水百分率年代际变化

扩大。90年代(图4(d))年增(减)幅较大的情况均出现在内蒙古高原中西部,北疆降水继续以大幅增加,南疆部分地区却有小幅减少迹象。2000—2005年降水变化更趋多样化,高减幅全部集中于内蒙古中东部草原、荒漠及沙地区域。河套地区,河西走廊及北疆均有高幅增加趋势,南疆则有更多地区出现小幅减少趋势。

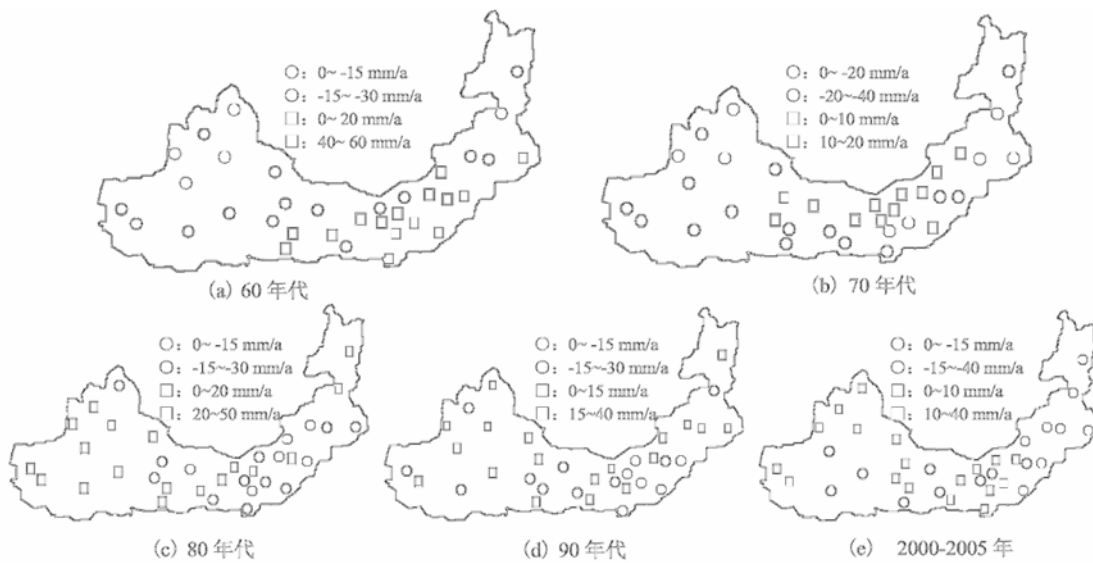


图4 北方荒漠区降水距平年代际变化趋势(年平均)

综上,自50年代以来,我国北方荒漠区降水高增幅地区由内蒙古东部逐渐西移,达到河套平原及河西地区;高减幅地区则有向东移动的趋势。新疆北部降水增加趋势显著,尤其自80年代以来迹象越来越明显。而南疆部分地区降水则又由小幅增加变化至小幅减少,这一迹象值得关注。

3.3 降水周期及奇异性分析 将北方荒漠区55年(1951—2005年)降水系列中心化处理,并用Morlet小波进行变换,分别取不同的 a 和 b 值计算小波变换的模平方和实部,并绘制成图(图5)。

北方荒漠区降水量距平序列Morlet小波变换实部的时频变化(图5)显示,20世纪50年代中期至80年代初期3~6a尺度较显著,其中心时间尺度为准5a。且正负位相相间交替出现。图6给出了5a尺度的小波变换系数实部变化过程,降水量旱涝变化和突变点可以准确给出。1953—1963年、1988—1996年、2002以后各时段为正位相,降水偏多,且2002年以后降水偏多程度增大;丰枯突变点在1952年、1963年、1988年、1996年和2002年。自1988年以后降水量6~10a时间尺度变化较强,其中心时间尺度为9a。9a尺度的小波变换实部变化过程(图6)旱涝突变点在1964年、1988年、1996年和2001年。经比较,时间尺度为5a和9a时降水量的丰枯特性及突变位置相差不大,而两种时间尺度发生的年代不同,从1951—1988年以5a尺度为主,而在1988年以后则以9a时间尺度为主,那么未来降水丰枯规律是否和5a时间尺度为主的降水变化规律相似需要进一步研究。在整个降水量分析期内,还表现出12~18a时间尺度,尺度中心位于14a左右。振荡中心分别为1957年、1977年和2002年。经分析,大时间尺度较弱,32a尺度不显著。图6绘出14a和32a尺度下降水量的丰枯变化及突变点。根据各Morlet小波变换

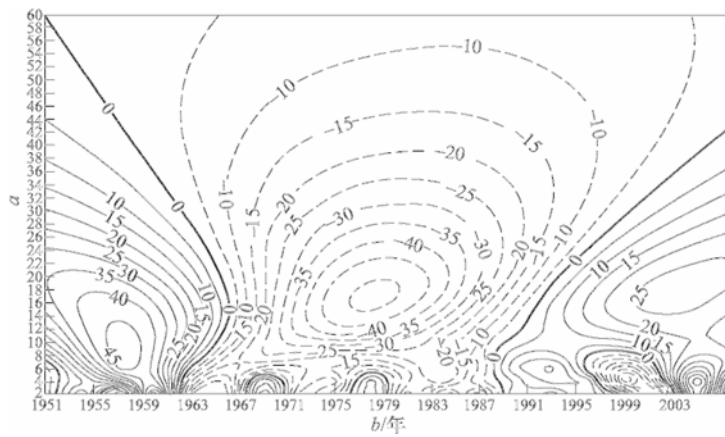


图5 Morlet小波变换实部时频分布

系数实部变化过程分析,5a 和 32a 尺度显示 2002 年以后降水将呈现持续偏多趋势,而 9a 和 14a 尺度下降水 2002 年偏多趋势达到极点,2005 年后降水偏多趋势减缓,降水在不久后有可能进入偏少期。具体增减趋势还需进一步研究。对北方荒漠区降水序列采用持续功率谱计算平均功率谱密度(图 7(a)),存在 4.3a、8.6a 和 14.2a 的主周期,小波方差变化过程(图 7(b))显示该序列存在 5a、准 9a 及准 14a 主周期。两种方法得出的主周期近似,结合 Morlet 小波变换实部时频分布(图 5)可以判定我国北方荒漠区降水存在 5a、准 9a 及 14a 的周期。

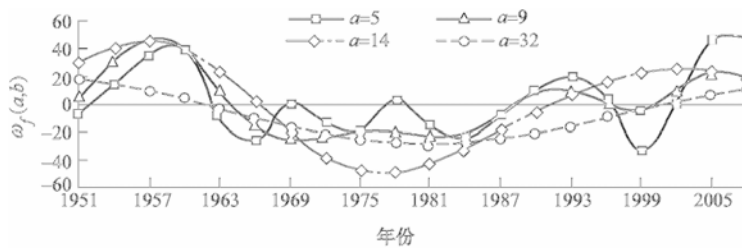


图6 Morlet小波变换系数实部变化过程

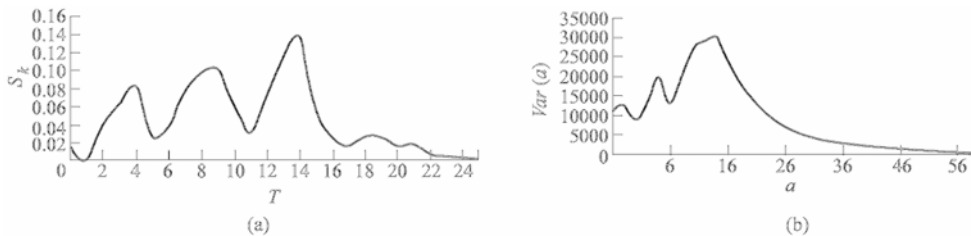


图7 功率谱分析(a),小波方差图(b)

3.4 降水趋势分析 将研究区按照多年平均降水量划分为极端干旱区 ($R < 50\text{mm}$)、干旱区 ($R < 200\text{mm}$)、半干旱区 ($200 < R < 400\text{mm}$)和半湿润区 ($400 < R < 800\text{mm}$)。分别采用 M-K 法^[19-20]和气候趋势系数^[21](r_{M})法分析各参量增减趋势并绘图(图 8)。当 r_{M} 为正(负)时,表示降水有增加(减少)的趋势,并用 t 分布检验其显著水平。分别计算各站趋势系数 r_{M} 的变数 t (表 3),当 $|t| \geq 1.679$ 或 $|t| \geq 2.689$ 时,则认为通过信度为 0.05 或 0.01 的显著性检验,表明该时刻降水的变化不是随机振动而是明显的气候趋势。

采用 M-K 法和气候趋势系数法分别对各站 R 、 AR 、 PCI 及 $APCI$ 进行分析,得出的增减趋势结果基本相同。年降水趋势分布图(图 8(a))显示,极端干旱区和干旱区的降水有增加趋势的地区概率分别为 83%和 70%(表 4),半干旱地区降水则有明显减少的趋势,概率为 58%。具有增加趋势的地区多是以西风环流影响为主的地区,这与新疆大部、甘肃河西祁连山中西部、青海柴达木盆地 1987—2000 年降水及

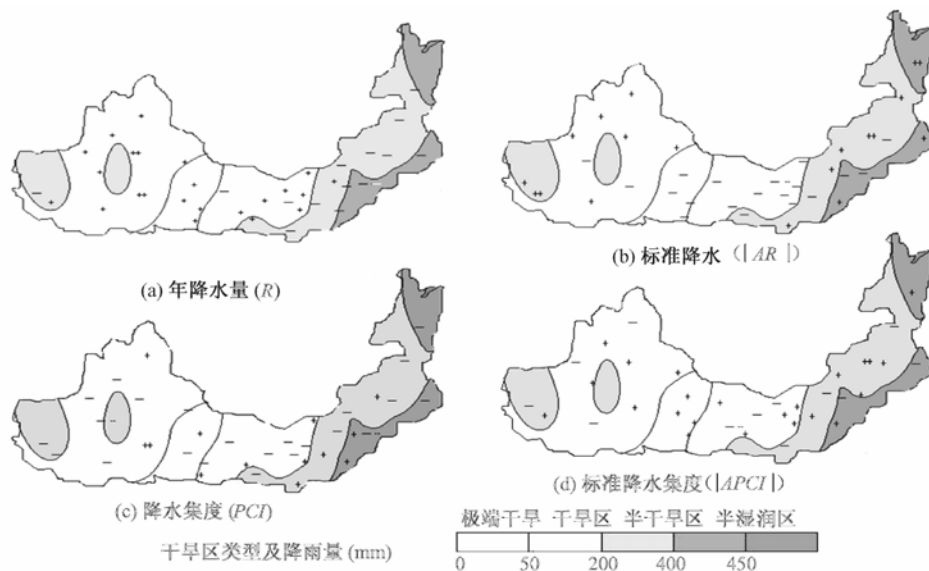


图8 降水特征参数趋势(增加趋势:+;降低趋势:-)

河川径流增加^[4]的事实相吻合。标准年降水绝对值的趋势(图8(b))体现了当地未来降水与多年平均降水的差异及丰枯趋势,当年降水偏多或偏少时则出现增加趋势。研究区西部和东部降水波动较大,呈增加趋势的概率为53%(表4),有更趋离散而背离均值的趋势;中部地区呈减少趋势概率为67%,其降水趋于稳定,波动有变缓的趋势。结合降水的分布趋势推断,处于干旱地区的新疆、青海及甘肃等地区降水将会增加,而处于半干旱地区的内蒙古等地降水将会减少。我国北方荒漠区降水年内分配的差异将变缓,尤其是干旱地区呈减少趋势概率达到90%(表4),说明其降水年内各月的分配会相对趋于均匀。极端干旱地区仍将维持已经形成的年内降水分配规律(图8(c))。由于气候环境的不断变化,已经形成的降水分配规律在新的气候影响下必将发生变化。因此,研究区内各代表站APCI值有63%的站点呈增加趋势,其中极端干旱区的变化最为普遍,达到83%(表4)。具体的趋势分布见图8(d)。

表3 Mann-Kendall法及气候趋势系数法特征参数

站名	PCI				R				AR				APCI			
	M-K法		趋势系数法		M-K法		趋势系数法		M-K法		趋势系数法		M-K法		趋势系数法	
	m值	趋势	变数	趋势	m值	趋势	变数	趋势	m值	趋势	变数	趋势	m值	趋势	变数	趋势
伊宁	-0.994	-	-1.920	-*	1.357	+	1.690	+	0.347	+	0.456	+	-0.770	-	-1.780	-*
乌鲁木齐	-0.016	-	0.011	+	2.431	+	2.341	+	1.026	+	1.226	+	0.253	+	0.001	+
喀什	-0.934	-	-1.140	-	-0.154	-	-0.300	-	0.106	+	0.713	+	-0.190	-	-0.910	-
西宁	-1.247	-	-1.030	-	1.326	+	1.680	+	-1.410	-	-1.041	-	0.189	+	0.659	+
民勤	-1.365	-	-1.690	-*	0.061	+	0.316	+	-1.040	-	-0.975	-	-0.920	-	-1.220	-
酒泉	-1.503	-	-0.680	-	-0.138	-	-0.350	-	-1.710	-	-1.925	-*	1.038	+	0.864	+
银川	-0.545	-	-0.420	-	-1.009	-	-1.260	-	-0.650	-	-0.825	-	0.719	+	0.190	+
榆林	1.111	+	1.550	+	-1.517	-	-1.140	-	-0.270	-	-0.833	-	0.486	+	1.177	+
太原	0.399	+	0.530	+	-1.241	-	-1.410	-	0.022	+	-0.54	-	1.009	+	1.118	+
怀来	-2.888	-*	-2.510	-*	-3.235	-*	-3.230	-**	-1.720	-	-1.705	-*	0.410	+	0.0730	+
图里河	-1.190	-	-1.20	-	-0.931	-	0.933	+	2.896	+	3.077	+	0.052	+	0.181	+
锡林浩特	0.660	+	1.135	+	-0.537	-	-0.120	-	2.547	+	1.767	+	1.963	+	1.071	+
通辽	-0.530	-	-0.600	-	-1.837	-	-2.090	-*	0.646	+	0.238	+	-1.840	-	-1.490	-

注:趋势栏中“*”及“**”项分别为通过置信水平95%及99%的t分布显著性检验。

3.5 降水的大气环流特征变化分析 大气环流决定着全球性和区域性的天气、气候类型及其时空变

化^[22]。我国北方荒漠区近 50 多年来降水的时空变化与这一时期的大气环流异常特征有着密切的关系。大量的研究证明,20 世纪 70 年代大气环流发生了显著的变化^[23-24]。由 Morlet 小波变换实部时频分布(图 5)可以看出在 70 年代末期(约 1977 年)研究区的降水发生显著突变。形成降水的水汽大多来源于海洋,而水汽的输送则很大程度上取决于风。因此,为了探究我国北方荒漠区降水突变原因及其未来趋势的物理机制,分别绘出 500hpa 1961—1977 和 1961—2005 时段及 1978—2005 和 1961—2005 时段的水平风距平合成图(图 9)。

表 4 各特征量增减趋势概率

项目	站数 个	R		AR		PCI		APCI	
		增加	减少	增加	减少	增加	减少	增加	减少
总区域	35	60(21)	40(14)	46(16)	54(19)	34(12)	66(23)	63(22)	37(13)
极端干旱区	6	83(5)	17(1)	33(2)	67(4)	50(3)	50(3)	83(5)	17(1)
干旱区	10	70(7)	30(3)	40(4)	60(6)	10(1)	90(9)	60(6)	40(4)
半干旱区	19	42(8)	58(11)	53(10)	47(9)	42(8)	58(11)	58(11)	42(8)

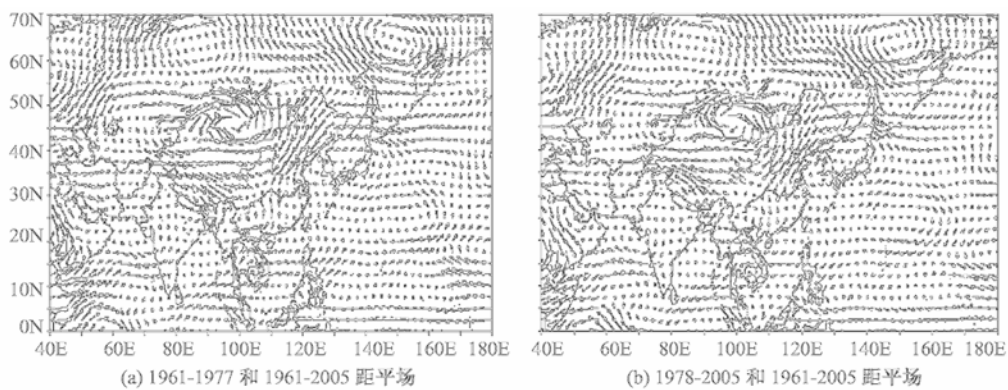


图 9 500hpa 水平风距平合成

由于西风急流北移和副热带高压的北进,中国北方处在平直西风气流控制下。从图 9(a)可以看出,20 世纪 70 年代末以前,东亚西南季风强度偏强、北进明显,北方荒漠区中东部没有高山阻挡,来自孟加拉湾、南海及西太平洋的大量水汽被输送到河套及内蒙古地区,使得当地降水偏多;而由于高山阻拦以及来自蒙古气旋底部的西风与西太平洋副热带高压北侧的西风气流汇合而成的西风急流的冲击使得东亚季风已成强弩之末,输送到河西及新疆地区的水汽量极少,降水随之偏少,在新疆北部新西伯利亚形成的高压中心,致使 100°E 以东地区南风偏强、降水偏多,而 100°E 以西地区降水偏少。80 年代以来(图 9(b))水平风场发生较大变化,贝加尔湖南下的气流以及从东西伯利亚而来东北风明显增强,东亚夏季风强度偏弱并急速南退,对内蒙古地区的影响随之减弱,当地降水持续偏少,降雨带则停留在长江中下游地区。而在西北地区中西部(河西、新疆地区)南风逐渐增强,有利于源自印度洋及西太平洋的南方水汽向北输送;同时,北冰洋的冷空气经由贝加尔湖南下的水汽一部分偏转成纬向东风,从而形成纬向环流沿河西走廊侵入新疆,另外紧临新疆东缘的西风环流相对有所增强,二者产生明显的辐合,在高山的抬升下也为新疆地区带来部分降水。因此,在多重环流影响下新疆地区及河西地区西部降水增加(图 4)并有进一步增加的趋势(图 8(a))。有文献报道,近 44 年来西北地区西部(93°E 以西)降水呈增加趋势,东部(93°E 以东)则呈减少趋势^[25],变化幅度西北部大于东南部^[26]。近 10 年来,西大西洋遥相关型(WA)继续为负趋势、太平洋北美遥相关型(FNA)为正趋势,亚洲(亚欧)地区经向环流继续减弱、纬向环流加强的趋势仍将维持^[27]。在此背景下,我国北方荒漠区降水的时空分布又将如何变化仍需进一步研究。

4 结论

(1)我国北方荒漠区降水在不同时间尺度下具有不同特征。63%的地区降水年内分配不均匀,新疆北部、宁夏、山西等地相对均匀;年内分配的差异将逐渐变缓,干旱地区降水年内分配的差异呈下降趋势概率达90%;50%以上的地区降水年际变率在20%~30%之间,新疆北部相对稳定,变率小于19%。极端干旱区和干旱区的降水增加趋势的概率分别为83%和70%,半干旱地区降水明显减少趋势的概率为58%。

(2)近50多年各地降水系列Hurst系数均大于0.5,可认为我国北方荒漠区降水序列具有持续性特征;存在5a、9a及准14a主周期。经比较,时间尺度为5a和9a时降水量的丰枯特性及突变位置相差不大,规律相似,而两种时间尺度发生的年代不同,1951—1988的38年间5a尺度较为显著,而在1988年以后9a尺度为主,那么未来降水丰枯规律是否和5a时间尺度为主的降水变化规律相似需要进一步研究。

(3)自20世纪50年代以来,我国北方荒漠区降水高增幅地区由内蒙古东部逐渐西移,达到河套平原及河西地区;高减幅地区则有向东移动的趋势。新疆北部降水增加趋势显著,尤其自80年代以来迹象越来越明显。而南疆部分地区降水则又由小幅增加变化至小幅减少,这一迹象值得关注。

(4)20世纪70年代末大气环流发生显著突变,我国北方荒漠区降水的丰枯情势在这一时期也随之发生巨大变化。70年代以前,东亚夏季风较强为河套及内蒙古地区带来丰富降水,新疆地区受西风气流控制降水相对偏少;80年代以来,东西伯利亚的东北风增强,东亚夏季风强度偏弱并急速南退,内蒙古地区降水持续偏少;西北地区中西部(河西、新疆地区)南风逐渐增强,北冰洋的冷空气形成纬向环流沿河西走廊侵入新疆,有所增强的西风环流也为新疆带来部分降水,在多重环流影响下新疆地区及河西地区西部降水逐渐增加。

参 考 文 献:

- [1] 王涛,杨保, BRAEUNING A,等. 近0.5ka中国北方干旱半干旱地区降水变化分析[J]. 科学通报,2004,49(9): 883—887.
- [2] 王绍武,董文杰. 中国西部年降水量的气候变化[J]. 自然资源学报,2002,17(4):15—422.
- [3] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6): 1031—1040.
- [4] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京:气象出版社,2003.
- [5] 张永民,王云霞,席桂萍. 科尔沁沙地及其周围地区降水与气温变化的多时间尺度分析[J]. 内蒙古农业大学学报,2006,27(2):30—33.
- [6] 刘树林,王涛. 浑善达克沙地地区的气候变化特征[J]. 中国沙漠,2005,25(4):557—562.
- [7] 钟海玲,李栋梁,陈晓光. 近40年来河套及其邻近地区降水变化趋势分析[J]. 高原气象,2006,25(5):900—905.
- [8] 刘洪兰,李栋梁,郭江勇. 河西走廊春末夏初降水的空间异常分布及年代际变化[J]. 冰川冻土,2004,26(1): 55—60.
- [9] 杨莲梅. 新疆极端降水的气候变化[J]. 地理学报,2003,58(4):577—583.
- [10] 姜逢清,朱诚,胡汝骥. 1960—1997年新疆北部降水序列的趋势探测[J]. 地理科学,2002,22(6):669—672.
- [11] 沈冰,黄领梅,阮本清,等. 和田绿洲水循环要素变化特征[J]. 水利学报,2003(5):78—83.
- [12] 任美镔. 中国自然地理纲要(修订第三版)[M]. 北京:商务印书馆,1999.
- [13] 吴正. 中国的沙漠[M]. 香港:商务印书馆,1995.
- [14] Skopp J, Kachman S D, Hergert G W. Comparison of procedures for estimating sample numbers[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis(USA),1995,26:2559—2568.
- [15] Deluis M, Raventos J, Gonza J C, et al. Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia(East Spain)[J]. International Journal of Climatology,2000,20:1451—1469.

- [16] 桑燕芳,王栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. 水利学报,2008,39(3):295—306.
- [17] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [18] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of monofractal long-term statistical dependence[J]. *Water Resources Research*, 1969, 5(4): 969—981.
- [19] Mann H B. Nonparametric tests against trend[M]. *Econometrica*, 1945.
- [20] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259: 254—271.
- [21] 李帅,陈莉,任王玉. 1951—2004年中国冬季降水变化研究[J]. 热带气象学报,2008,24(1):94—98.
- [22] 叶笃正,曾庆存,郭裕福. 当代气象研究[M]. 北京:气象出版社,1991.
- [23] Hare S R, Mantua N J. Empirical evidence for North Pacific regime shifts in 1977 and 1989[J]. *Progress in Oceanography*, 2000, 47: 103—145.
- [24] 朱益民,杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系[J]. 气象学报,2003,61(6):641—654.
- [25] 靳立亚,符娇兰,陈发虎. 近44年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 567—572.
- [26] 苏布达,王国杰,姜彤. 西北地区45年来降水异常的时空变化及其尺度特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 176—182.
- [27] 林振敏,施能. 北半球冬季大气环流遥相关型特征与我国区域气候[J]. 气象科技, 2004, 32(5): 333—342.

Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China

XU Li-gang^{1,2,3}, ZHOU Hong-fei^{3,4}, LIANG Chuan¹, WU An-qi²

(1. *Sichuan University, Chengdu 610065, China;*

2. *The Scientific Research Institute of Water Conservancy of Ningxia, Yinchuan 750021, China;*

3. *National Fukang Desert Ecosystem Observation and Experiment Station, Fukang 831505, China;*

4. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Urumqi 830011, China)*

Abstract: The precipitation concentration index, moving average course, power spectral analysis, Morlet wavelet analysis and Mann-Kendall rank statistic method are applied to analyze the multi-time scale variability of precipitation according to the data obtained from 35 sites in the desert region of North China in the period from 1951 to 2005. Moreover, the relationship between spatial and temporal variability of precipitation and large-scale atmospheric circulation are analyzed by using NCEP/NCAR re-analysis data. The results indicate that three main cycles of precipitation variation with periods of 5, 9 and 14 years exist and the latter two periods tend to evidently since 1988. The annual distribution of precipitation tends to mild but the fluctuation of annual precipitation exhibits a tendency of increasing. In decadal scale, the precipitation in the east area of Inner Mongolia will decrease in 21st century with reduction amplitude 15—40mm/a, but in the most area of the Northern Xinjiang the precipitation will increase by 10—40mm/a. In this time scale, the annual precipitation distribution will not change significantly, the portion of precipitation in summer is 58%—62% and the highest portion in winter is only about 5.1%. It may predict that in the future the precipitation will increase in summer and spring, and will decrease in winter. The annual precipitation in extreme arid area and arid area tends to increase with probability 83% and 70% respectively, but in the semi arid area it tends to decrease with probability 58%. The west part of the whole region tends to wetter and warmer, but the east part tends to more drier.

Key words: precipitation; multi-time scale; Morlet wavelet analysis; Mann-Kendall rank statistic; spatial and temporal variability; atmospheric circulation; desert region in northern China

(责任编辑:王成丽)