

The Spatial Variation in the Normal/Abnormal Precipitation over the Sina-Mongolia Arid/Semiarid Area and Its Decadal Transformation*

Wanyuan Li^{1,2,3,4}, Shihua Lv², Zhibao Dong³, Shigong Wang¹

¹Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou

²Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou

³Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou

⁴Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou
Email: ywl@lzb.ac.cn

Received: Oct. 10th, 2011; revised: Nov. 3rd, 2011; accepted: Nov. 28th, 2011

Abstract: Based on the monthly precipitation data during 1951 - 2005 for the selected 322 meteorological gauge stations over the Sina-Mongolia arid and semiarid area, the spatial variation in the normal/abnormal precipitation and its decadal transformation for each month have been analyzed in detail utilizing the statistical clustering and the wavelet analysis, disclosing the following facts: 1) Being similar to the monthly precipitation, the spatial distribution of the precipitation is also displaying its argular yearly variation apparently, with the wet area extending continuously and the arid area constricting from spring to summer, till the precipitation reaching the maximum at each station, and then, from autumn to winter, the arid area extending and the wet area constricting continuously, till the precipitation going back to the minimum at each place, so, one whole year is apparently a circulation of the spatial precipitation distribution. 2) The typical spatial distribution patterns of the abnormal monthly precipitation and their appearing years and frequencies during 1951 - 2005 have been found based on the statistical clustering analysis, showing that, the typical spatial distribution patterns and their appearing years and frequencies are all largely different from one month to another month even in the same season. 3) There is apparently a decadal transformation in the spatial variation of the normal/abnormal precipitation over the Sina-Mongolia arid and semiarid area. 4) The major periods existing in the decadal variation of the precipitation for each calendar month and each major area have been found by the wavelet analysis, disclosing the periodicity and the wave in the precipitation variation at some certain place will be different from one month to another even in the same season.

Keywords: Sina-Mongolia Arid/Semiarid Area; Spatial Distribution Pattern of the Abnormal Precipitation; Decadal Variation; Periodicity

中蒙干旱半干旱区降水异常的区域性差异及其年代际演变特征*

李万源^{1,2,3,4}, 吕世华², 董治宝³, 王式功¹

¹半干旱气候变化教育部重点实验室(兰州大学), 兰州

²中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州

³中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州

⁴中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州

Email: ywl@lzb.ac.cn

收稿日期: 2011年10月10日; 修回日期: 2011年11月3日; 录用日期: 2011年11月28日

*资助信息: 受半干旱气候变化教育部重点实验室开放基金(兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金, 项目编号: 223-860011)资助。

摘要: 本文利用 1951~2005 年间中蒙干旱半干旱区 322 个气象测站的月降水量资料, 借助聚类和小波等统计分析方法对该区各月降水异常的区域性差异及其年代际演变进行了较为详细的分析, 主要揭露了以下事实: 1) 同降水量的年变化特征相近, 降水空间分布形势也表现出明显的年变化, 由春季到夏季, 多雨区不断扩展, 少雨区不断退缩, 直到各地降水量均达到最大, 然后由秋季到冬季, 少雨区不断扩展, 多雨区则不断退缩, 直到降水量恢复到全年的最小值, 使得 1 年明显成为降水空间分布变化的一个周期。2) 通过聚类分析给出 1951~2005 年间各月降水典型的典型空间分布型及其出现的年份和频次, 说明不同月份, 即使属同一季节, 其降水典型的典型空间分布型也有很大差异, 不同月份典型空间分布型出现的年份也少有规律可循。3) 中蒙干旱半干旱区降水异常的区域性差异存在着明显的年代际演变。4) 通过小波分析给出一些主要区域逐月降水量年代际变化的主要周期性特征, 结果表明同一区域, 不同月份, 即使属同一季节, 其降水量变化的周期和位相也很不同。

关键词: 中蒙干旱半干旱区; 降水异常空间分布型; 年代际变化; 周期性特征

1. 引言

导致干旱化最直接也是最重要的原因就是降水量的减少, 几乎所有干旱指标均包含降水信息^[1-4]; 降水又是区域乃至全球水循环的重要环节, 与农牧业生产、生态环境改善以及水资源供给等息息相关; 同时降水量是表征和识别气候环境变化的重要参量, 故本文以降水量为研究对象。

我国干旱、半干旱区主要分布于西北和华北西部, 其界限的划分可以年降水量小于 400 mm 为基准, 也可以干燥度(最大潜在蒸发量 P_e 和降水量 P 的比值)、湿润度(P/P_e)、水分盈亏量($P-P_e$)为划分标尺, 其结果大同小异^[1-4]。新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙古和陕西共同构成北半球中纬度最大的干旱半干旱区^[3,4], 这一地区基本位于东亚夏季风边缘区以外^[3,5], 水资源匮乏、植被稀疏、生态脆弱、风蚀和水土流失严重^[3]。我国主要沙漠均位于此^[3,6], 该区也是我国主要的沙尘暴发生区域, 沙尘暴年均频数大于 5 次^[3,7-9]。蒙古国全境基本没有年降水量大于 400 mm 的区域^[10], 境内以草原、荒漠、山区及干旱林区为主, 荒漠化严重、沙尘暴遍布全国且频数不亚于我国^[10-12]。该国与我国干旱半干旱区在地域上联成一体, 更重要的是它们基本属于同一个气候或大气环流系统。例如, 我国大多数沙尘暴最初源于蒙古, 且与蒙古气旋的发生发展密切相关^[9]。对地表湿润指数^[13,14]、Thornthwaite 干湿分类函数^[4]、Palmer 干旱指数^[15]、土壤湿度^[16]等干湿指标的研究结果表明, 近 50 年来我国西北东部和华北地区的干旱化趋势明显, 东北中部和华北北部半干旱区的边界明显东扩, 华北南部特

别是陕西南部半干旱区边界也明显向南扩展; 随着气温升高、降水减少, 蒙古国内的草场也面临着严重的干旱荒漠化威胁^[11-21]。故本文将蒙古国与我国干旱半干旱区视为一体来进行研究, 并将之统称为中蒙干旱半干旱区。

针对中蒙干旱半干旱区特别是我国境内降水量的研究工作主要包括降水的时空变化特征及其天气气候原因分析^[3,20-33], 还有许多针对我国北方某一小区降水的研究成果, 在此不便一一列举^[33-39]。但系统地将中蒙干旱半干旱区作为一个整体, 研究其降水异常时空变化特征的工作还是很少。本文将利用 1951~2005 年该区域 322 个站(图 1)的有效月降水量观测数据, 首先分析该区各月降水典型的典型空间分布型, 然后对其降水异常区域性差异的年代际演变进行详细探讨, 最后详细分析典型区域不同月份降水典型的年际及年代际变化特征。在此特别说明的是, 由于

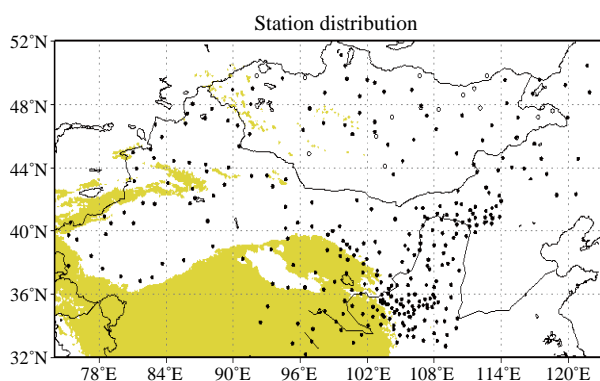


Figure 1. The distribution of the gauge stations over the Chinese-Mongolia Arid and Semi-arid Areas (The shaded area represents the Qinghai-Xizang Plateau)

图 1. 中蒙干旱半干旱区站点分布图(图中阴影部分为青藏高原)

信息量大,且各种异常现象的原因复杂,笔者能力不足以给出详尽、合理的解释,故本文的重点在于揭露事实,很多现象的解释则有赖于以后的深入研究和同行们的共同努力。

2. 资料和方法

本文分析的区域对象为由新疆、内蒙古、甘肃、青海、宁夏、陕西六省和蒙古国全境所构成的中蒙干旱半干旱区,时间跨度为1951~2005年,国内268个站点的月降水量资料由中国气象局甘肃分局整理并提供,蒙古国54个站点的月降水量资料由蒙古国家气象局和NCDC网站提供。所用方法主要包括系统聚类和小波等统计分析方法。

为了充分利用现有资料,尽可能降低缺测资料带来的困惑,本文在计算降水量年际变化序列的平均值、标准差及线性趋势系数时,只要求有效序列长度不低于30,也即要求各个序列中对平均值、标准差及线性趋势系数有贡献的有效数据不少于30个,据经验可知,这一要求基本不会影响统计结果的有效性,所选322个站点都能达到这一要求。只是缺测数据在各月份间的分布并不均匀,1~12月份缺测数据所占的比例分别为19.6%、19.2%、18.9%、18.6%、18.8%、18.4%、18.6%、18.4%、19.6%、19%、19.4%和19.9%。对于各年代的逐月(或月际变化)降水量序列,有效序列长度均不少于96个,同样由于缺测不均匀的原因,对各个年代进行分析时所用的站点和站点数也不相同,1956~1965年、1966~1975年、1976~1985年、1986~1995年以及1996~2005年所用站点数分别为197、298、288、281和242个,5个年代所选站点中缺测数据所占的比例分别为5%、1%、1%、1%和2%。

聚类分析是研究样本或变量指标分类问题的一种多元统计分析方法,目前广泛应用于天气过程分类、环流分型^[33]、降水量气温的分类^[40,41]、天气区域的划分以及相似年的确定等等^[42]。为了明确1951~2005年间各月降水异常的主要空间分布型及降水时间变化区域性差异的年代际演变,本文对标准化后的月降水量场和各年代的月降水量序列分别作了聚类分析,各月和各年代选择站点的标准同上,即有效年际变化序列不短于30,月际变化序列不短于96。分析时所选的统计量为: $f_{jk} = \cos \theta_{jk} + 1 / (1 + D_{jk})$ ($j, k = 1, 2, \dots, n$),其中 $\cos \theta_{jk}$ 为第 j 和第 k 个场或序

列之间的相似或相关系数, D_{jk} 则表示这两个场或序列间的马哈拉诺比斯距离。 $-1 \leq f_{jk} \leq 2$,其值越大说明两个场或序列间越相似或相近,对应的场或站点则越应归为一类。以下是聚类分析的具体步骤:第一步,将各个降水量场或各个站点序列各自视为一类;第二步,最相似或最相近的场或序列并为一类,即如果 $f_{jk} = \max_{i,l} (f_{il})$,则第 j 和第 k 个场或序列最为相似,先将其并成一个新类;第三步,计算新类与其余各类的相似统计量,类与类之间的相似统计量用分属两类的场或序列间最小的相似统计量来代替,然后再根据类间相似统计量的大小进行新的合并;第四步,重复第三步,直到所有场或序列均归为所想达到的类别或类别数。本文将1951~2005年间1~12月份的标准化月降水量场分别分为14类,各月类别内和类别间的平均相似统计量列于表1,各个月份类别内的平均相似系数远大于类别间,而其类别内的马哈拉诺比斯距离则远小于类别间,结果使所选相似统计量在类别内的平均值远大于类别间的平均值,从而充分证实了分类的合理性。由于各年代降水变化区域性特征的空间尺度间可能存在较大的差异,故本文在对各年代月降水量序列进行聚类分析时,统一规定各年代所有站点最终所归类别数须保证类别内和类别间的平均相似统计量之差达到极大,且类别数须接近10。各年代聚类分析结果的相关统计量列于表2,分类结果的合理性同样显而易见。

小波分析是一种信号的时间尺度(频率)分析方法,具有多分辨率分析的特点,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,可以对信号进行多尺度细化分析,得到各个频率随时间的变化及不同频率之间的关系;它还具有数学意义上严格的突变点诊断能力,近年来被广泛应用于气候的多尺度分析研究。小波分析的时频局部化特性可展现降水时间序列的精细结构,不仅可以将隐含在序列中的随时间变化的周期振荡显现出来,还能确定出降水突变点的位置,也可以对时间序列的演变势进行定性的估计,为分析气候多时间尺度变化特征及短期气候预测提供了一种新途径^[43]。本文采用常用的墨西哥小波函数对1951~2005年间1~12月份的标准化降水量序列分别进行了小波变换,小波函数形式为: $\varphi(t) = (1 - 16t^2)e^{-8t^2}$,并对小波方差随周期长度的变化进行了分析,从而确定出各月份降水量年际变化的主要周期。

Table 1. The statistical characteristics of the clustering groups for the spatial patterns of the normalized monthly precipitation during 1951-2005 over the Chinese-Mongolia Arid and Semi-arid Areas (CMASA)

表 1. 中蒙干旱半干旱区 1951~2005 年间 1~12 月份标准化月降水量场的分类相关统计量

月份	类别内平均相似系数	类别间平均相似系数	类别内与类别间相似系数之差	类别内平均马氏距离	类别间平均马氏距离	类别内与类别间马氏距离之差	类别内平均相似统计量	类别间平均相似统计量	类别内与类别间相似统计量之差
1 月	0.9576	0.3851	0.5725	11.8835	70.5077	-58.6241	1.7434	0.3789	1.3645
2 月	0.9435	0.3334	0.61	9.1521	60.8186	-51.6665	1.7076	0.3383	1.3693
3 月	0.9451	0.4709	0.4742	15.5693	76.6247	-61.0554	1.7061	0.4685	1.2376
4 月	0.9593	0.553	0.4063	14.616	75.7318	-61.1159	1.7475	0.5522	1.1953
5 月	0.9646	0.5502	0.4145	18.0269	92.7984	-74.7715	1.7722	0.5509	1.2213
6 月	0.9196	0.5043	0.4153	26.5901	90.3516	-63.7616	1.6073	0.5041	1.1032
7 月	0.9461	0.5273	0.4188	18.7342	103.7639	-85.0296	1.7301	0.5209	1.2092
8 月	0.9412	0.4734	0.4679	24.0837	120.109	-96.0253	1.7016	0.4668	1.2348
9 月	0.9681	0.5761	0.3921	18.9933	87.4266	-68.4333	1.7286	0.5769	1.1517
10 月	0.9603	0.6225	0.3377	17.6093	93.6044	-75.9951	1.7639	0.6154	1.1485
11 月	0.9521	0.4981	0.454	16.093	73.2667	-57.1738	1.6953	0.5015	1.1938
12 月	0.953	0.4307	0.5224	10.4781	58.2845	-47.8064	1.7215	0.4304	1.2911

Table 2. The statistical characteristics of the clustering gauge station groups for the month-to-month precipitation change during different decades from 1956 to 2005 over the Chinese-Mongolia Arid and Semi-arid Areas (CMASA)

表 2. 中蒙干旱半干旱区不同年代月际降水量变化的站点序列分类相关统计量

年代	类别数	类别内平均相似系数	类别间平均相似系数	类别内与类别间相似系数之差	类别内平均马氏距离	类别间平均马氏距离	类别内与类别间马氏距离之差	类别内平均相似统计量	类别间平均相似统计量	类别内与类别间相似统计量之差
1956~1965 年	13	0.9949	0.5112	0.4837	0.0026	0.1444	-0.1417	1.9924	1.3849	0.6075
1966~1975 年	8	0.9989	0.4951	0.5038	0.0054	0.5641	-0.5587	1.9945	1.1406	0.8539
1976~1985 年	9	0.9988	0.54	0.4589	0.0028	0.2276	-0.2248	1.9963	1.3589	0.6374
1985~1995 年	10	0.9979	0.5378	0.4601	0.0011	0.1599	-0.1589	1.9969	1.4054	0.5915
1996~2005 年	12	0.9961	0.5163	0.4799	0.0083	0.5145	-0.5062	1.9891	1.1799	0.8092

3. 分析与讨论

3.1. 中蒙干旱半干旱区逐月降水量的空间分布状况及其年变化特征

就年均降水量而言，中蒙干旱半干旱区有 3 个多雨区：北疆大部、蒙古国北半部、青海高原东部及其东侧陕甘宁乃至内蒙古东段的季风边缘区，它们联成一体，中间围绕着降水量不超过 80 mm 的少雨区，该少雨区横跨南疆、河西走廊及内蒙古西端，使整个区域从北到南呈现出“多-少-多”的分布形势(图 2(a))。其实，各月各季的降水量也与年降水量相似，从北到南也均表现出“多-少-多”的分布形势，为了节省篇幅且不失代表性，文中只给出 1 月和 7 月的降水量分布图(图 2(b, c))。

在冬季 12 月份，3 mm 以上降水量主要分布于北疆、蒙古国北部、内蒙古东北部、以及甘南、陕南一带，尤以北疆降水量为最，其余地区降水量均不足 3

mm；1 月份与 12 月份相同，3 mm 以上降水量除分布在北疆、内蒙古东北部和蒙古国北部一些地区以外，还分布在青海省东南部、甘南和陕南地区，其余地区降水量均不足 3 mm，不同的是，3 mm 等雨量线在区域东南隅有向南推进的趋势，而在区域北方则有向北退缩的迹象(图 2(b))；2 月份的基本形势与 1 月份相同，只是降水量在 3 mm 以上的区域明显从陕南向北延展到陕北乃至内蒙古境内。

春季 3 月份的主要降水区域较 2 月份明显扩大，降水量也明显增加，就区域东南部而言，5 mm 以上降水量分布在青海省东部、甘南、宁夏、陕西以及内蒙古中东段的南部和东部地区；在区域西部和北部，整个北疆和蒙古国中西部的一些区域降水量均在 5 mm 以上，其余地区降水量均小于 5 mm；4 月份较 3 月份而言，全区降水强度明显增加，10 mm 等雨量线基本与 3 月份的 5 mm 等雨量线位置相当，降水量大值区仍以北疆、蒙古国北部的一些区域以及青海

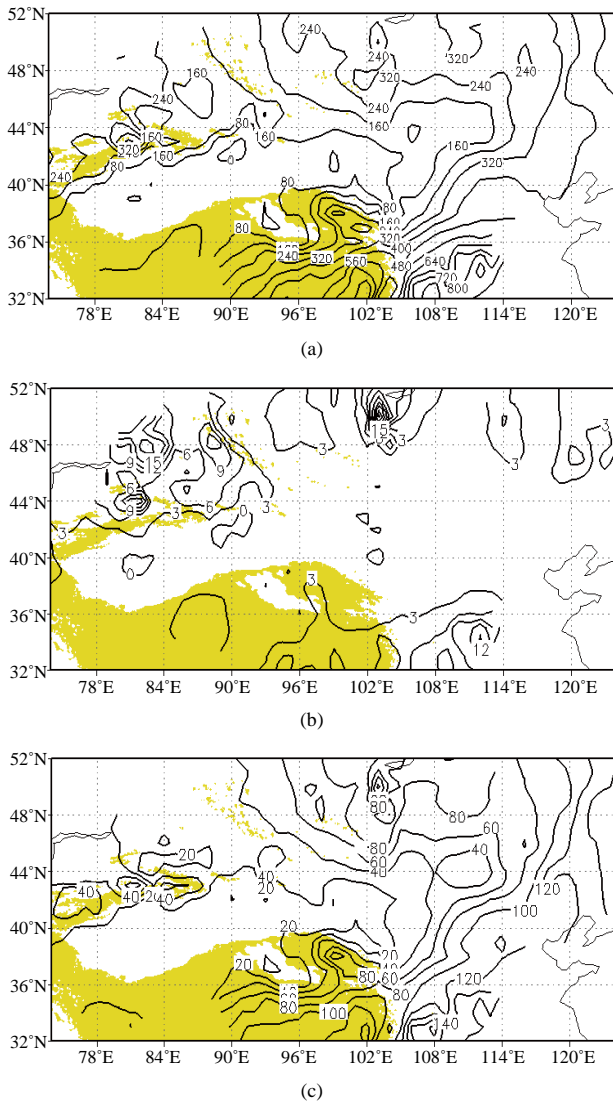


Figure 2. The spatial distributions of the yearly (a), January (b) and July (c) precipitation averaged through 1951~2005 (The shaded area represents the Qinghai-Xizang Plateau.)
图 2. 中蒙干旱半干旱区降水量的多年(1951~2005 年)平均空间分布形势(图中阴影部分为青藏高原): (a) 年降水量; (b) 1 月降水量; (c) 7 月降水量

东部、甘南、宁夏、陕西与内蒙古中东段的南部和东部地区为主;到了 5 月份,区域内所有站点的降水量较 4 月份均明显增加,几乎所有站点的降水量均在 3 mm 以上,等雨量线的分布形势已经与年均降水量甚为接近(说明 5 月份的降水对该区域年降水的贡献较大),整个区域由北到南呈“多-少-多”的分布形势,10 mm 等雨量线包围的中间少雨区是由南疆、青海省西北部、河西走廊、内蒙古西部以及蒙古国南缘连成一体的带状区域。

到了夏季 6 月份,降水量在整个区域较 5 月份均

大幅增加,降水量形势和 5 月份相似,围绕中间少雨区的等雨量线从 10 mm 增加到 20 mm,位置几乎没有改变,50 mm 以上的雨量区主要位于天山一带、蒙古国东北部、以及由青海高原东部、甘南、陕西和内蒙古东段南部和东部区域构成的季风边缘区,整个区域的等雨量线形势同年降水量更为接近;7 月份各地的降水量均比 6 月份增加了许多并达到全年的极大值,20 mm 等雨量线所包围的中间少雨区向西退缩了约 6 个经度,整个区域的降水分布形势与 6 月份非常一致,三个多雨区天山山区、蒙古国中东部、青海高原及其东侧陕甘宁乃至内蒙古东段(即季风边缘区)相当显著,天山山区之外的其他两个多雨区降水量均在 60 mm 以上(图 2(c));8 月份一些地区的降水量较 7 月份有所下降,基本形势与 6、7 月份相当,大部分中间少雨区的降水量已恢复到 10 mm 以下。

秋季 9 月份全区域的降水量较 6~8 月份大幅下降,等雨量线形势及其量级与 5 月份相当,三个多雨区还比较明显;10 月份降水量较 9 月份继续下降,等雨量线形势与 4 月份非常相似,只是区域东南部的 10 mm 等雨量线比 4 月份更加偏北偏西,说明就季风边缘区而言,10 月份降水量比 4 月份更多,然而就北疆而言,10 和 4 月份的降水量相当,甚至后者更多一点;11 月份的等雨量线形势和 3 月份相当,只是 3 月份区域东南部的 5 mm 等雨量线比 11 月份更为偏北偏西,说明 11 月份季风边缘区的降水量要小于 3 月份,然而就北疆整体而言,11 月份降水明显多于 3 月份,而且 11 月份降水的空间分布形势已明显表现出和冬季 2 月份相似的特征。

很明显,同降水量的年变化特征相似,降水空间分布形势也表现出明显的年变化,由春季到夏季,多雨区不断扩展,少雨区不断退缩,直到各地降水量均达到最大,然后由秋季到冬季,少雨区开始扩展,多雨区则开始退缩,直到降水量恢复到全年的最小值,这样使得 1 年正好成为降水量空间变化的 1 个周期。

3.2. 各月降水异常的典型空间分布型

为了把握中蒙干旱半干旱区各月降水异常的典型空间分布型,本文对该区 1951~2005 年间 1~12 月份各月的标准化降水量场分别进行了聚类分析,然后就各月归为同类的场进行了算术合成。若归为某一类别的场数(或年份数)不少于 10,则该类的合成场就被

视为相应月份降水异常的一种典型空间分布型；由于1月份包括场数最多的类别只有9年，故将该类场也视为1月降水异常的典型空间分布型。分析结果表明，不同月份，即使属同一季节，其降水异常的典型空间分布型

也存在极大差异；不同月份降水异常典型空间分布型出现的年份也少有规律可循。表3即列出1951~2005年间各月降水异常典型空间分布型出现的频次和年份及其总体特征，为了节省篇幅，相关图片省略。

Table 3. The typical spatial patterns of the abnormal monthly precipitation for each month over the Chinese-Mongolia Arid and Semi-arid Areas (CMASA)

表 3. 中蒙干旱半干旱区 1~12 月降水量异常的典型空间分布型

月份	类别	代表年份	频次	降水异常分布型特征
1	1	1951、1954、1956、1957、1967、1973、1974、1982、1996	9	新疆东端和南缘及青海高原的部分地区，以及 102°E 以东、44°N 以南的国内广大地区的降水异常偏多，蒙古、新疆大部、内蒙古西端和河西走廊地区的降水异常偏少。
2	1	1952、1964、1965、1970、1972、1982、1989、1990、1994、2001、2005	11	降水偏多区主要包括新疆南缘、青海高原及其东侧陕甘宁及内蒙西南部，偏少区包括新疆大部、蒙古国几乎全境以及内蒙古中东部区域。
3	1	1952、1954、1961、1967、1974、1982、1988、1989、1993、1994、1998	11	降水偏多区主要包括南疆大部、青海高原及其东侧陕甘宁境内，和北侧河西走廊、内蒙古西端及蒙古国西南部、还有蒙古国东北部和内蒙古东北端的小片地区，其余地区为降水偏少区。
4	1	1951、1952、1954、1957、1961、1963、1964、1965、1967、1970、1972、1973、1977、1982、1983、1984、1985、1990、1997、1998、2001、2003	22	全区以降水偏多为主，偏少区主要包括南疆南部和柴达木盆地北缘、北疆大部及蒙古国西北端及其东北部。
5	1	1951、1952、1959、1967、1972、1973、1975、1986、1987、1988、1993、2002、2003、2005	14	整个区域以降水偏多为主，偏少区主要包括区域东南缘内蒙古和陕西境内的个别地区。
	2	1957、1958、1963、1964、1970、1974、1983、1984、1985、1991、1998	11	降水偏多区主要包括 96°E 以东、44°N 以南的区域东南部，还有新疆中部柴达木盆地南侧、以及蒙古国西北部的一小块地区；其余地区为降水偏少区。
6	1	1964、1965、1968、1972、1974、1976、1985、1992、1999、2003、2004	11	降水偏多区主要包括新疆西部、青海大部以及高原东侧和北侧两条狭长地带，其余为降水偏少区。
7	1	1953、1955、1957、1965、1970、1975、1980、1984、1987、2005	10	全区以降水偏少为主，降水偏多区主要位于南疆大部、北疆东部、青海省大部以及甘南和陕南一带。
8	1	1952、1954、1956、1958、1960、1976、1980、1981、1982、1989、2000、2002、2003	13	降水偏多区主要包括新疆大部、蒙古国西部、青海省西部、南部和东部、以及青海高原东侧甘南和陕南地区，其余地区为降水偏少区。
	2	1959、1961、1964、1968、1970、1973、1985、1988、1990、1992、1995、2004	12	降水偏多区主要包括北疆、蒙古国几乎全境、内蒙古中东部、以及青海高原东侧陕甘宁地区，其余地区以降水偏少为主。
9	1	1955、1963、1964、1968、1969、1970、1974、1975、1979、1981、1984、1985、1992、1996、2003、2004、2005	17	降水偏多区主要包括北疆东部、蒙古国几乎全境、青海省中东部及其东侧陕甘宁地区，其余地区为降水偏少区。
10	1	1958、1960、1961、1962、1965、1966、1973、1975、1978、1990、1992、2000	12	降水偏多区主要包括青海及河西走廊、内蒙古西部和南部、以及陕西、宁夏和甘南地区，再加上北疆中部、蒙古国西部和北部的个别区域，其余地区为降水偏少区。
	2	1954、1963、1970、1971、1974、1980、1983、1988、1999、2004、2005	11	降水偏多区主要包括新疆东部、青海南部、甘肃南端和陕西南端、以及蒙古国中南部的小片区域，其余地区以降水偏少为主。
11	1	1952、1954、1957、1958、1964、1968、1969、1972、1982、1983、1996、1999、2003	13	降水偏多区主要包括新疆西部、南疆东部、蒙古国北部和东部、内蒙古东段以及陕西省大部，其余地区以降水偏少为主。
12	1	1956、1957、1970、1971、1972、1978、1986、1987、1990、1992、1996、1997、2000	13	降水偏多区主要包括北疆、蒙古国几乎全境、青海省大部及东北侧一条狭长地带，其余地区均为负值。

3.3. 中蒙干旱半干旱区降水异常区域性差异的年代际更替

分析表明, 中蒙干旱半干旱区 1956~1965 年、1966~1975 年及 1976~1985 年三个年代的年均降水量分布形势非常相似, 青海高原及其东侧陕甘宁乃至内蒙古东段的降水量最大, 其次是天山山区和蒙古国东北部地区, 降水量由北到南呈“多-少-多”的分布形势, 与气候态的年均降水量分布形势相当; 整个区域三个年代的降水量值并无太大改变, 10 mm 等雨量线包括的少雨区范围几乎未变。然而, 到了 1986~1995 年和 1996~2005 年两个年代, 尽管降水量还保持着由北到南“多-少-多”的分布形势, 但新疆境内(特别是西部地区包括天山山脉)及青海高原上的降水比前 3 个年代有明显增加, 其余大部分地区(包括青海高原东侧陕甘宁境内)的降水量则有所减少。看来, 经过 5 个年代的变迁, 中蒙干旱半干旱区降水异常的空间分布虽有稳定的一面, 也有明显变化的一面, 这就意味着该区降水异常的区域性差异可能存在着比较明显的年代际演变。有鉴于此, 本文分别对以上 5 个年代降水量的月际变化序列进行了聚类分析, 分析结果由图 3(a)~(e)给出, 图中的数字代表相应年代相应站点序列所归的类别号。同一年代属于相同类别的站点其降水量的月际变化特征相近。

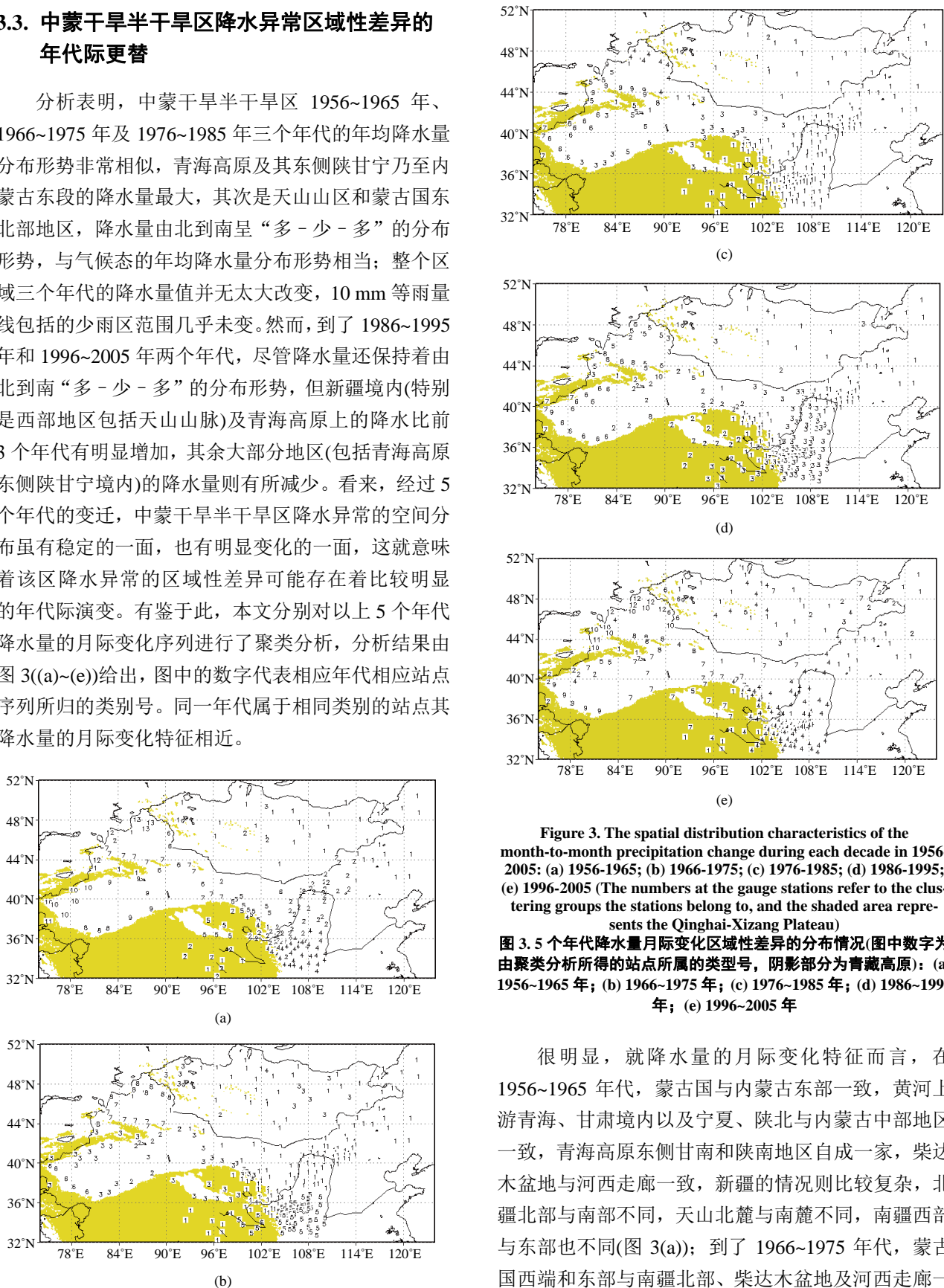


Figure 3. The spatial distribution characteristics of the month-to-month precipitation change during each decade in 1956-2005: (a) 1956-1965; (b) 1966-1975; (c) 1976-1985; (d) 1986-1995; (e) 1996-2005 (The numbers at the gauge stations refer to the clustering groups belong to, and the shaded area represents the Qinghai-Xizang Plateau)

图 3. 5 个年代降水量月际变化区域性差异的分布情况(图中数字为由聚类分析所得的站点所属的类型号, 阴影部分为青藏高原); (a) 1956~1965 年; (b) 1966~1975 年; (c) 1976~1985 年; (d) 1986~1995 年; (e) 1996~2005 年

很明显, 就降水量的月际变化特征而言, 在 1956~1965 年代, 蒙古国与内蒙古东部一致, 黄河上游青海、甘肃境内以及宁夏、陕北与内蒙古中部地区一致, 青海高原东侧甘南和陕南地区自成一家, 柴达木盆地与河西走廊一致, 新疆的情况则比较复杂, 北疆北部与南部不同, 天山北麓与南麓不同, 南疆西部与东部也不同(图 3(a)); 到了 1966~1975 年代, 蒙古国西端和东部与南疆北部、柴达木盆地及河西走廊一

致, 该国其余地区主要与内蒙古、陕北、宁夏、甘肃境内黄河上游地区以及青海省的东北部和西南部一致, 青海省东南部黄河源区与青海高原东侧甘南和陕南地区一致, 新疆地区仍比较复杂, 北疆北部与南部不一致, 南疆北部、西南部及东部也不一致(图 3(b)); 1976~1985 年代, 蒙古国与内蒙古大部、甘肃、宁夏、陕西以及青海大部的降水变化步调一致, 内蒙古和甘肃两省区西端则与柴达木盆地西部及南疆南缘的一些地区步调一致, 此外, 北疆北部和南部、南疆西部和东部均不一致(图 3(c)); 1986~1995 年代, 降水变化的区域性特征与前几个年代又有所不同, 蒙古国大部与内蒙古中东部、甘肃中部以及青海省东北部一致; 蒙古国西部和东端的一些站点则与内蒙古西部、陕西、宁夏、甘南及青海省东南隅一致; 青海省大部连及甘肃省西部与南疆中东部地区一致; 新疆境内, 北疆北部不同于南部, 天山北侧不同于南侧, 南疆西部不同于其中东部(图 3(d)); 到了 1996~2005 年代, 降水变化的区域性差异变得更为复杂, 一块小区域可能包含数种不同的变化特征, 如蒙古国 108°E 以东地区以及北疆分别包含着 5 种以上的变化特征, 且各种变化对应的站点也并不集中(图 3(e)), 总体而言, 蒙古国除东部、南部、中部以及西南边境的一些站点外, 约一半左右的区域与内蒙古东段以及青海省东北缘和南缘的一些站点具有一致的变化特征, 蒙古国中部的一些区域则与甘肃省东南部、宁夏、陕西省延及内

蒙古中部地区一致, 南疆东部、青海省西北部、甘肃省西北部以及内蒙古西部连成一片, 自成一家, 新疆境内, 北疆北部与南部不同, 天山各段也各不相同, 南疆西北部与蒙古东边境连及内蒙古境内的一些地区变化一致, 其西南部则自成一种变化特征(图 3(e))。

正如前面所指出的, 不同年代按同一标准进行聚类分析时, 所分的类别数并不相同(表 2), 说明不同年代降水月际变化的区域性差异在空间尺度上具有明显的不同。总之, 中蒙干旱半干旱区降水月际变化的区域性特征存在着明显的年代际演变。

3.4. 不同区域逐月降水异常的年代际变化特征

为了澄清中蒙干旱半干旱区各区域逐月降水在 1951~2005 年间的年代际变化特征, 以 1996~2005 年降水月际变化的聚类分析结果为基准, 分别对归为同一类别站点的合成标准化降水序列进行小波分析, 即可得到相应区域降水异常的年代际变化特征。为了突出重点, 本文只关注站点数排在前 4 位的类别及相应区域, 其类别号分别为 1、2、4 和 7, 见图 3(e)。表 4 即列出中蒙干旱半干旱区降水异常的 4 类代表性年代际变化特征及其相应的区域, 其中区域标志就是指图 3(e)中所标的站点类别号。很明显, 同一区域, 不同月份, 即使属同一季节, 其降水量年代际变化的主要周期和位相也有很大不同。不同区域的时代际变化特征间也有很大差异。

Table 4. The periodic characteristics of each month's precipitation during 1951-2005 for some important sub-regions in the Chinese-Mongolia Arid and Semi-arid Areas

表 4. 中蒙干旱半干旱区各典型区域 1-12 月份降水量在 1951~2005 年间的周期性变化特征

区域标志及范围	月份	主要周期(年)	降水偏少期(年)
1. 内蒙古东段、青海省东北缘和南缘、以及遍布蒙古国、约占该国一半左右的一些地区	12	2、10、23	1958~1975、1978~1984、1993~2000
	1	13	1953 前、1961~1969、1975~1985、1990~1997、2004 后
	2	2、18	1952 前、1962~1972、1977~1985、1994~2002
	3	13	1952 前、1960~1976、1981~1987、1994~2003
	4	2、8	1955~1962、1967~1975、1984~1997
	5	2、23	1955~1963、1970~1985、1990~1999
	6	2、12	1954 前、1960~1970、1977~1983、1995 后
	7	21	1956 前、1965~1973、1979~1989、1998 后
	8	2、3、4、23	1957 前、1971~1980、1986~1990、1998 后
	9	2、14	1962~1969、1977~1982、1990~2001
	10	2、15	1956~1968、1977~1985、1988~1994、2003 后
	11	2、3、4	1957~1965、1971~1977、1984~1990、1995~2001

续表

2. 南疆西北部与蒙古国东边境联及内蒙古境内的一些地区	12	2、9	1960~1973、1980~1986、1995~2000
	1	11	1955 前、1962~1970、1977~1986、1992~1999
	2	2、20	1959~1970、1978~1987、1995~2002
	3	2、3、11	1960~1969、1975~1984、1994~2002
	4	2、3、4、5、12	1957 前、1967~1977、1984~1988、1995~2001
	5	2、5、23	1970~1988
	6	23	1957~1973、1979~1987、1999 后
	7	2、3、15	1956 前、1964~1969、1976~1986、1994 后
	8	2、3	1966~1979、1987~1994、2001 后
	9	11	1957 前、1963~1968、1975~1988、1993~2000
	10	23	1957~1965、1976~1985、1999 后
4. 甘肃省东南部、宁夏、陕西省、联及内蒙古中部，以及蒙古国中部的一些地区	11	2、3、4、5、6、7、23	1958~1967、1972~1979、1990~1998、2003 后
	12	2、23	1957~1972、1979~1984、1993~2001
	1	12	1953 前、1960~1968、1975~1989、2003 后
	2	2、15	1954~1970、1977~1986、1995~2003
	3	2、9、23	1965 前、1971~1987、1996 后
	4	2、5	1963 前、1974~1985、1991~1996、2002 后
	5	2、3、18	1954~1962、1970~1982、1991~2000
	6	2、3、9、23	1954 前、1961~1982、1994 后
	7	14	1959 前、1967~1975、1983~1991、1999 后
	8	2、3、12	1954 前、1962~1968、1972~1976、1984~1990、1995~2003
	9	23	1953~1961、1986~2000
7. 南疆东部、青海省西北部、甘肃省西北部、以及内蒙古西部的一些地区	10	2、3、4、5、13	1959 前、1966~1972、1978~1986、1994~2000
	11	2、3	1953~1959、1979~1988、1995 后
	12	2、3、7	1961~1971、1976~1985、1995~1999
	1	13	1954 前、1962~1975、1981~1989、2002 后
	2	23	1955~1966、1974~1987、1996~2002
	3	23	1957 前、1976~1988、1996~2004
	4	2、7	1960~1970 及 1990~1999
	5	20	1961 前、1970~1982、1991~2001
	6	2、3、6	1958~1970、1977~1984、1991~1998、2003 后
	7	2、3、16	1964 前、1981~1989、1998 后
	8	8	1956~1977、1984~1991、2000 后
	9	2、7	1954~1960、1965~1975、1988~1992
	10	14	1955~1964、1979~1985、1990~1995、2003 后
	11	2、14	1955~1962、1968~1975、1982~1988、1993~2000

4. 结论

本文通过详细分析 1951~2005 年间中蒙干旱半干旱区降水异常的区域性差异及其年代际演变特征，主要得出以下结论：

1) 同降水量的年变化特征相近，降水空间分布形势也表现出明显的年变化，由春季到夏季，多雨区不断扩展，少雨区不断退缩，直到各地降水量均达到最大，然后由秋季到冬季，少雨区不断扩展，多雨区则不断退缩，直到降水量恢复到全年的最小值，使得 1 年明显成为降水空间分布变化的一个周期。

2) 通过聚类分析给出 1951~2005 年间各月降水异常的典型空间分布型及其出现的年份和频次。说明

不同月份，即使属同一季节，其降水异常的典型空间分布型也有很大差异，不同月份典型空间分布型出现的年份也少有规律可循。

3) 中蒙干旱半干旱区降水异常的区域性差异存在着明显的年代际演变。

4) 通过小波分析给出一些主要区域逐月降水量年代际变化的主要周期性特征。同一区域，不同月份，即使属同一季节，其降水量变化的主要周期和位相也有很大不同。

参考文献 (References)

[1] 卢琦, 杨有林. 全球沙尘暴警录[M]. 北京: 中国环境科学

- 出版社, 2001: 1-27.
- [2] 施能, 陈绿文, 封国林. 1920~2000 年全球 6~8 月陆地旱涝气候变化[J]. 气象学报, 2003, 61(2): 237-345.
- [3] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰等. 中国气候与环境演变(上): 气候与环境的演变及预测[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 63-99, 319-349, 398-439.
- [4] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [5] 汤绪, 钱维宏, 梁萍. 东亚夏季风边缘带的气候特征[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 375-381.
- [6] X. Yang, K. Zhang, B. Jia, et al. Desertification assessment in China: An overview. *Journal of Arid Environment*, 2005, 63(2): 517-531.
- [7] S. A. Goudie. *Great warm deserts of the world: Landscapes and evolution*. New York: Oxford University Press Inc., 2002: 315.
- [8] S. G. Wang, J. Y. Wang, Z. J. Zhou, et al. Regional characteristics of three kinds of dust storm events in China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 509-520.
- [9] X. M. Wang, Z. B. Dong, J. W. Zhang, et al. Modern dust storms in China: An overview. *Journal of Arid Environment*, 2004, 58(4): 559-574.
- [10] N. Endo, T. Kadota, J. Matsumoto, et al. Notes and correspondence: Climatology and trends in summer precipitation characteristics in Mongolia for the period 1960-98. *Journal of the meteorological society of Japan*, 2006, 84(3): 543-551.
- [11] P. Batima, L. Natsagdorj, P. Gombluudev, et al. Observed climate change in Mongolia. *AIACC Working Paper No. 12*, 2005.
- [12] L. Natsagdorj, D. Jugder and Y. S. Chung. Analysis of dust storms observed in Mongolia during 1937-1999. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(9): 1401-1411.
- [13] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 737-745.
- [14] 马柱国, 黄刚, 甘文强等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征[J]. 大气科学, 2005, 29(5): 671-680.
- [15] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系[J]. 大气科学, 2006, 30(2): 277-283.
- [16] 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 83-90.
- [17] J. X. Xu. Sand-dust storms in and around the Ordos Plateau of China as influenced by land use change and desertification. *Catena*, 2006, 65(3): 279-284.
- [18] 丁一汇. ISACS 技术总结报告[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 75-78.
- [19] 刘艳, 舒红, 李杨等. 天山巴音布鲁克草原植被变化及其与气候因子的关系[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 173-176.
- [20] 唐红玉, 肖风劲, 张强等. 三江源区植被变化及其对气候变化的响应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 177-180.
- [21] J. Keyantash, J. A. Dracup. 干旱的量化: 干旱指数的评价[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 85-93.
- [22] M. Gemmer, S. Becker and T. Jiang. Observed monthly precipitation trends in China 1951-2002. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, 77(1-2): 39-45.
- [23] 刘波, 马柱国, 丁裕国. 中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 840-848.
- [24] 曹玲, 窦永祥. 黑河流域降水的时空特征及预报方法[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 35-38.
- [25] 王遂疆, 李栋梁, 王谦谦. 青藏高原东北侧夏季降水的气候特征分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(2): 13-18.
- [26] 时兴合, 李生辰, 李栋梁. 青海南部冬季积雪和雪灾变化的特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 36-40.
- [27] 唐红玉, 杨小丹, 王希娟等. 三江源地区近 50 年降水变化分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 47-54.
- [28] 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的初步研究[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 900-905.
- [29] 徐宗学, 和宛琳. 近 40 年黄河源区气候要素分布特征及变化趋势分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 901-905.
- [30] 丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 气候变化国家评估报告(1): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [31] A. J. Bai, P. M. Zhai and X. D. Liu. Climatology and trends of wet spells in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2007, 88(3-4): 139-148.
- [32] 孙燕, 王谦谦, 钱永甫等. 华北地区夏季降水与全球海温异常的关系[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1127-1138.
- [33] 蔡英. 青藏高原及周围地区水汽气候学与东亚夏季风、水汽输送等对西北区东部和华北夏季降水的影响[D]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2004.
- [34] 赵珊珊, 张强, 陈峪等. 渭河、汉水流域秋季降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 181-183.
- [35] 郝立生. 哈尔滨、石家庄、武汉和广州的气候变化对比[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 193-196.
- [36] 郝立生, 毕宝贵. 1951-2005 年燕山南麓夏季降水变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 31-35.
- [37] 陈科艺, 王谦谦, 毛文书等. 江淮北区 6~7 月降水异常与北太平洋海温的 SVD 分析[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 539-544.
- [38] 汤懋苍, 柳苗, 朱德琴等. 我国东部的准经向降水带及其成因分析[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 964-968.
- [39] D. Y. Gong, P. J. Shi and J. A. Wang. Daily precipitation changes in the semi-arid region over northern China. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 771-784.
- [40] 秦爱民, 钱维宏. 近 41 年中国不同季节降水气候分区及趋势[J]. 高原气象, 2006, 25(3): 495-502.
- [41] 秦爱民, 钱维宏, 蔡亲波. 1960-2000 年中国不同季节的气温分区及趋势[J]. 气象科学, 2005, 25(4): 338-345.
- [42] 施能. 气象统计预报中的多元分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 1992: 338-349.
- [43] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(12): 1176-1183.