

塔克拉玛干沙漠及周边地区大气水汽量的时空变化

杨青, 魏文寿, 李军

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 800002

E-mail: yangq@idm.cn

2007-09-02 收稿, 2008-07-04 接受

科技部社会公益研究专项(2004DIB3J118, 2005DIB6J113)资助

摘要 利用塔里木盆地周边地区 27 个站的 1961~2006 年的降水、水气压资料和沙漠腹地塔中气象站 1999~2006 年的观测数据, 重建了塔中站 1961~1998 年逐月水气压序列, 并利用 1976~2006 年和田、库车、若羌、喀什和民丰(1999~2006 年)等 5 个探空站实测资料对大气含水量与地面水汽压的关系进行了验证和计算, 研究了塔克拉玛干沙漠及周边地区大气含水量时空变化, 得出了新的水汽分布形式. 结果表明: 塔里木盆地内大气含水量的高值区, 主要分布在沙漠北部、西部的边缘的绿洲地带, 大气含水量在 14~15 mm. 而沙漠腹地是水汽的低值中心, 水汽含量仅为 7~8 mm. 大气含水量的年际变化总体呈现增加趋势, 1961~1986 年期间, 沙漠周边与腹地水汽含量的升降趋势均不显著, 1986 年后发生显著意义的突变, 两地水汽增加明显. 这与近 50 年来南疆降水显著增加的趋势是一致的. NCEP/NCAR 再分析资料在塔克拉玛干沙漠地区偏差很大, 与实际情况不符.

关键词

水汽含量
塔克拉玛干沙漠
气候变化

塔克拉玛干沙漠位于中国最大的内陆盆地——塔里木盆地中心, 东西长约 1000 km, 南北宽约 400 km, 面积约 33.76 km²×104 km, 流动沙丘约占整个沙漠的 85%. 地势自西南向东北倾斜, 沙漠四周由绿洲和高山环绕, 中国第一大内陆河塔里木河从中穿过, 与荒漠过渡带一起构成了独特而脆弱的生态环境, 是内陆干旱区对气候变化响应极为敏感的区域. 因此, 研究塔克拉玛干沙漠水汽含量的时空分布特征, 对于揭示沙漠地区气候变化的响应具有重要意义.

总水汽含量又称可降水量, 是研究水分循环和平衡的重要因子, 许多学者对如何计算大气含水量进行了大量的研究^[1~20]. 刘国纬^[1]对国内外的研究成果与进展进行了全面的总结与评价. 目前, 大气含水量的计算一般主要有 4 种方法: (1) 利用探空实测资料直接进行计算, 优点是资料年代较长, 对测点而言, 数据比较客观准确, 故常用来作为其他计算方法的验证. 但是在计算一个区域的大气水汽含量时, 由于探空站太少, 无法细致描述水汽的空间分布状况, 尤其是对像新疆这样地形复杂、测站分布不均的地区来

讲更是如此. (2) 利用地基 GPS 结合遥感资料反演大气水汽含量, 这是近些年来发展并被广泛应用的新技术^[2~12], 它解决了短时区域大气含水量的计算问题, 并应用于北京地区、长江流域、青藏高原、西北地区等区域的大气水汽总量分析. 但是由于 GPS 或遥观测数据年限较短, 不能解决历史水汽含量的演变问题. (3) 通过建立大气水汽含量与地面气象要素(一般是水汽压)的关系进行计算, 这种方法大大增加了站点数量, 充分利用了地面气象资料, 计算简单而且结果较好. 20 世纪 70 年代艾伦^[13]给出了大气含水量与地面水汽压的关系式. 杨景梅等人^[14,15]研究了中国的 20 多个气象站的大气含水量与地面水汽压的关系, 发现地面水汽压力与气柱含水量存在着良好的数值对应关系, 建立了由地面湿度参量计算整层大气可降水量的经验计算模式. 张学文^[16]利用新疆和中国探空气象站和地面月平均水汽压力资料, 也得出了与艾伦相似的可降水量与水汽压力的线性关系式, 只是系数有一点差别. (4) 利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算大气水汽含量, 这也是目前广泛采用

的方法. 由于是网格化资料, 在用于计算空间水汽分布时, 可弥补站点不足带来的缺陷, 但另一方面, 较粗的网格仍影响精细化分析, 再分析资料的适用性需要用实测数据进行验证. 蔡英等人^[17]利用 NCEP/NCAR 1958~1997 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点再分析资料分析各季高原上都是低湿区, 由高原边缘向四周可降水量剧增, 南疆盆地是相对的高湿区. 俞亚勋^[18]、王宝鉴等人^[19]分别利用 NCEP/NCAR 1958~2000 年和 1961~2003 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点再分析资料分析了西北地区空中水汽时空分布特征后, 都认为南疆盆地是水汽含量高值中心, 但前者结果表明中心年平均值超过 50 mm, 塔克拉玛干沙漠地区达到 40 mm 以上, 而后者结果表明塔克拉玛干沙漠地区中心年平均值超过 150 mm 以上. 王秀荣等人^[20]利用 NCEP/NCAR 1958~1997 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点再分析资料分析了西北地区夏季水汽含量时空分布后, 认为塔里木盆地水汽含量是从东北向西南方向逐渐变小, 没有高值中心, 大致为 8~14 mm, 东南方向的且末、若羌一带水汽含量很少. 赵芬等人¹⁾也利用 NCEP/NCAR 1948~2005 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点再分析资料对塔里木河流域空中水汽状况进行分析, 认为塔克拉玛干沙漠中心是水汽含量高值区, 水汽含量为 8~14 mm, 多年面平均为 8.8 mm.

可以看出, 目前有关塔克拉玛干沙漠水汽含量的问题还存在着各种看法, 就沙漠中心是高值区还是低值区而言, 不同研究方法、不同的数据得出的结果也不同. 本文依据大气含水量与地面水汽压的关

系式^[16]对塔克拉玛干沙漠大气含水量进行计算, 分析其空间分布和变化趋势.

1 资料与方法

沙漠腹地测站稀少, 主要分布在沙漠周边地区. 本文利用塔克拉玛干沙漠周边地区 27 个站的 1961~2006 年的降水、水气压资料进行分析. 此外, 还利用了塔中气象站 1999~2006 年的观测数据与周边地区进行对比和相关分析, 进行了水汽含量的重建. 塔中气象站地处塔克拉玛干沙漠腹地, 位于 39°N , $83^{\circ}40'\text{E}$, 海拔 1099.3 m, 是目前世界上惟一深入流动沙漠腹地 200 km 以上的气象观测站(图 1).

大气含水量一般是利用探空观测到的对流层各标准等压面上的比湿对大气压力进行积分计算得到的, 而对无探空资料的地区来讲, 这里采用大气含水量 $W(\text{mm})$ 与地面水汽压 $e(\text{hPa})$ 的关系式^[16]: $W=1.74 e$ 进行计算, 并利用 1976~2006 年塔里木盆地周边的和田、库车、若羌、喀什和民丰(1999~2006 年)等 5 个探空站实测资料计算的逐月平均大气含水量对该式的可用性进行了验证. 采用 Mann-kendall 方法对塔克拉玛干沙漠大气含水量进行突变检验.

图 2 给出了实测与计算的逐月平均大气含水量的关系, 由探空站实测资料计算的逐月平均大气含水量和由地面水汽压 $e(\text{hPa})$ 关系式^[16]计算, 求得的逐月平均大气含水量之间的相关系数达 0.9730. 相关是显著的(信度 0.001), 可以用此关系式由地面水汽压来计算平均大气含水量.

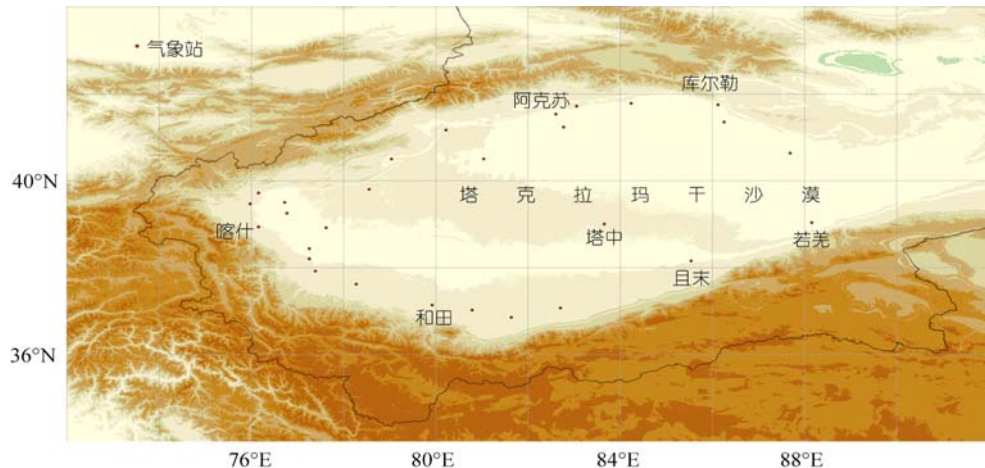


图 1 气象站的位置

1) 赵芬, 吴志勇, 陆桂华. 塔里木河流域空中水汽状况分析. 中国科技论文在线, http://www.paper.edu.cn/paper.php?serial_number=200801-439

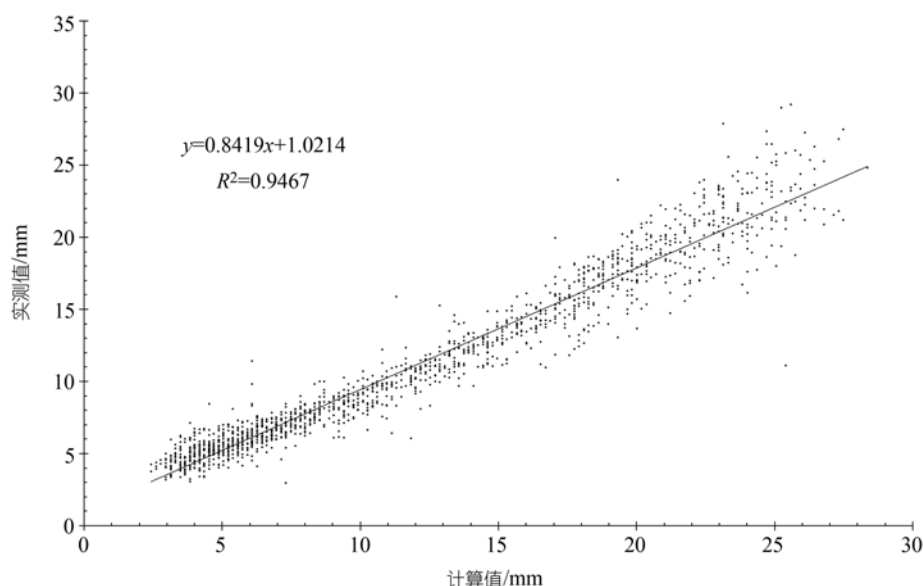


图 2 实测与计算的逐月平均大气含水量的关系

2 结果

2.1 塔中气象站大气含水量的重建

塔中站的数据在一定程度上反映了沙漠腹地的气水汽状况. 塔中站 8 年(1999~2006 年)水汽含量的平均为 8.2 mm. 为了充分利用塔中气象站的资料, 对塔中站与周边气象站 1999~2006 年逐月水汽压距平序列($8 \times 12 = 96$)进行了相关分析, 建立了塔中站与且末、民丰、轮台、尉犁站月水汽压距平的多元回归方程

$$\Delta e_{\text{塔中}} = 0.545 \cdot \Delta e_{\text{且末}} + 0.178 \cdot \Delta e_{\text{民丰}} - 0.026 \cdot \Delta e_{\text{轮台}} + 0.272 \cdot \Delta e_{\text{尉犁}}.$$

塔中与其他站的单相关系数分别为 0.81, 0.69, 0.72 和 0.71, 复相关系数为 0.84. 通过了 0.01 的 F 显著性检验, 表明沙漠与周边地区的水汽变化具有一致性, 在大的背景方面是受同一天气气候系统的影响, 因此, 有理由认为这种相关在过去的 50 年中也是成立的. 利用上式重建了塔中气象站 1961~1998 年逐月水汽压距平, 然后再算出 1961~1998 年大气含水量(图 3). 结果表明, 塔中气象站大气含水量要明显低于周边其他各站, 多年平均为 7.1 mm. 1986 年后有明显增加, 1961~1986 年平均为 6.5 mm, 1987~2006 年平均为 7.9 mm. 这说明水汽增加不仅仅表现在沙漠周边地区, 沙漠腹地也在同样增加.

2.2 大气含水量的空间分布

盆地内大气含水量有两个高值区(图 4), 主要分

布在沙漠的边缘地带, 一个分布在莎车、叶城地区; 另一高值区分布在阿拉尔、库车、沙雅地区; 两中心大气含水量在 14~15 mm, 均位于在塔里木河干流、叶尔羌河流域、阿克苏河支流周围的绿洲地区, 这里有大片农田和水库, 水汽比较充足. 而塔克拉玛干沙漠腹地是水汽的低值中心, 水汽含量仅为 7~8 mm, 由中心向外逐渐增加, 在环塔里木盆地的西部、北部绿洲带达到最高, 然后由于海拔高度的影响又逐渐减小. 这与文献[17~20]认为沙漠腹地整个是一高值区的分析结果完全不一样的. 根据距塔中较近的两个格点(40°N , 82.5°E ; 40°N , 85°E)的 NCEP $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 1999~2006 年可降水量资料与塔中实况的对比表明, NCEP 可降水量各月平均值都要比塔中高出 8 mm 左右, 这说明 NCEP 可降水量资料在塔克拉玛干沙漠地区存在着系统性偏差.

2.3 大气含水量的时间变化

(i) 季节变化. 从塔克拉玛干沙漠及周边地区各月大气含水量的分布规律来讲(表 1), 夏季是大气含水量最高的阶段, 沙漠周边地区平均为 19.22~23.62 mm, 塔中平均为 12.04~15.63 mm; 冬季最小, 分别平均为 4.03~4.86 和 2.59~3.04 mm; 两者的差距也是夏季最大, 冬季最小, 这是因为夏季周边地区绿洲效应明显所致. 为了反映大气含水量的变化, 将前 26 年(1961~1986)与后 20 年(1987~2006)各月大气含水量平均值相比, 结果表明, 后 20 年各月大气含水

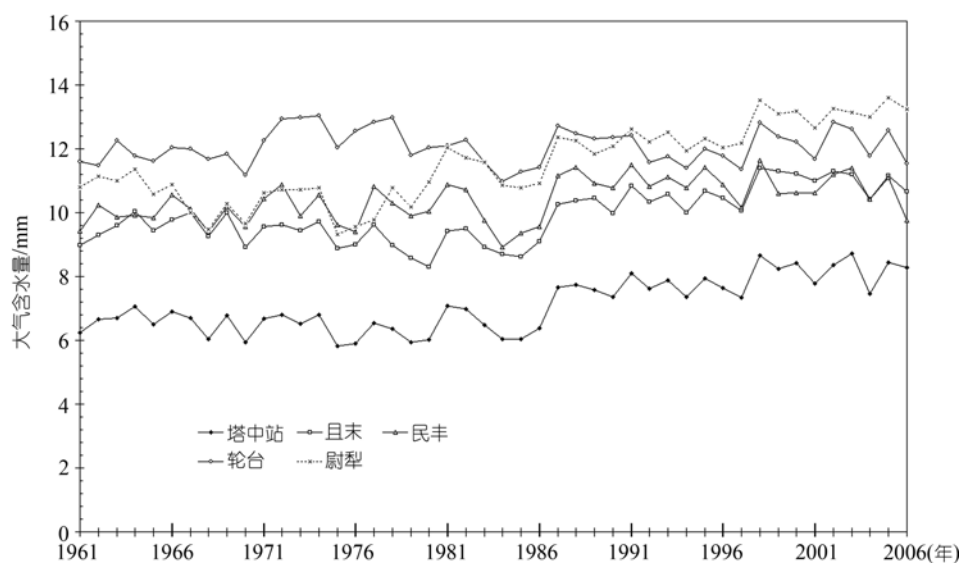


图 3 重建的塔中大气含水量的变化及与附近站的对比

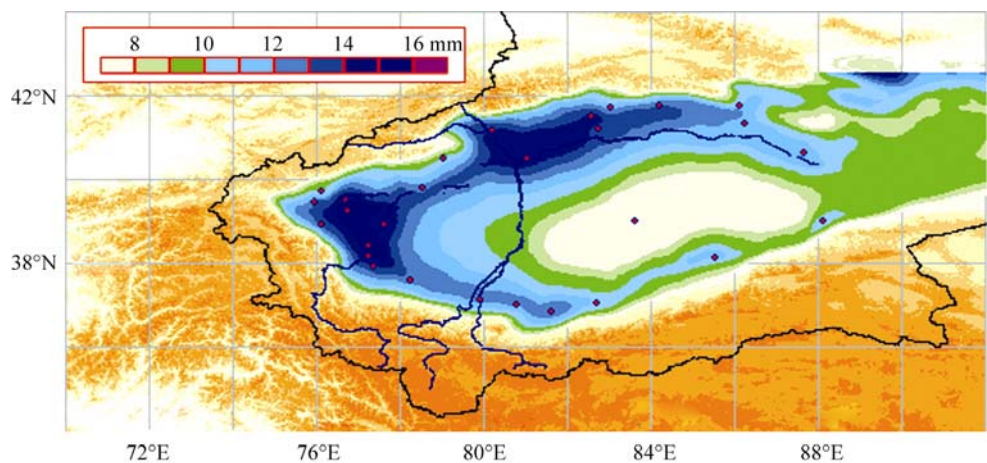


图 4 塔克拉玛干沙漠大气含水量的空间分布

表 1 塔中及周边地区大气含水量各月平均值及差值(单位: mm)

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年均
1971~2000	周边站	4.03	4.85	8.86	9.55	14.10	19.22	23.62	23.69	18.23	11.50	7.03	4.86	12.46
	塔中站	2.59	2.93	3.62	5.14	8.34	12.04	15.63	12.56	8.83	5.75	4.29	3.04	7.06
T1: 1961~1986	周边站	3.74	4.69	6.86	9.33	13.63	18.03	22.16	22.49	17.12	10.90	6.85	4.49	11.69
	塔中站	2.32	2.71	3.45	4.70	7.86	11.01	14.42	11.40	7.74	5.10	4.06	2.69	6.45
T2: 1987~2006	周边站	4.28	5.29	7.07	9.82	14.73	20.17	25.00	24.81	19.22	12.22	7.38	5.13	12.93
	塔中站	2.84	3.36	3.99	5.75	9.29	13.21	17.32	14.45	10.24	6.65	4.70	3.35	7.93
T2-T1 差值	周边站	0.54	0.60	0.21	0.49	1.10	2.14	2.84	2.32	2.10	1.32	0.53	0.64	1.24
	塔中站	0.53	0.65	0.54	1.05	1.43	2.20	2.90	3.06	2.50	1.55	0.63	0.66	1.47

量均有不同程度的增加, 增加最显著的是夏季, 沙漠周边地区平均增加了 2.14~2.84 mm, 塔中平均增加了 2.20~3.06 mm, 增加幅度高于周边地区; 冬季增幅

相对较少, 沙漠周边地区平均为 0.54~0.64 mm, 塔中平均增加了 0.53~0.66 mm; 就各月而言, 沙漠周边地区增幅最小的是 3 月, 为 0.21 mm, 增幅最大的是 7

月, 为 2.84 mm; 塔中增幅最小的是 1 月, 为 0.53 mm, 增幅最大的是 8 月, 为 3.06 mm. 从变化趋势来讲, 沙漠周边地区冬季(12~2 月)倾向率仅为 0.22 mm/10a, 而夏季达到了 0.84 mm/10a; 塔中冬季(12~2 月)倾向率仅为 0.21 mm/10a, 夏季达到了 0.71 mm/10a. 这说明, 塔克拉玛干沙漠及周边地区大气含水量的增加主要表现在夏季.

(ii) 年代际变化. 为了反映塔克拉玛干沙漠大气含水量的年代际变化, 分别对沙漠周边 27 站和沙漠腹地塔中站的大气含水量平均值和标准差进行 10 年滑动计算(图 5). 可以看出, 大气含水量平均值的变化明显表现出两个阶段, 1961~1986 年期间, 水汽趋势变化表现平缓, 周边地区倾向率为 0.10 mm/10a, 塔中倾向率为 -0.14 mm/10a, 升降均不显著; 1987~2006 年, 两者均表现为明显的上升趋势, 变化幅度迅速增加, 周边地区与塔中倾向率分别为 0.23 mm 和 0.39 mm.

大气含水量标准差的变化反映了气候变化的另一个方面, 沙漠周边与沙漠腹地塔中的标准差变化趋势十分一致, 但塔中的标准差要略大于周边地区. 在 1961~1986 年期间, 标准差的变化表现非常稳定, 没有明显的上升或下降趋势, 周边与塔中标准差平均分别为 0.34 和 0.38, 最大也只有 0.38 和 0.44. 在 1987~1995 年期间, 标准差突然增加, 变化剧烈, 在 1984~1993 年中分别达到了最大 0.64 和 0.74 的峰值,

这说明大气含水量的离散程度加大, 极端事件增多, 之后标准差又迅速下降. 在 1987 年后, 标准差又变的比较稳定, 恢复到前期水平, 略有增加, 平均为 0.35 和 0.38, 最大也只有 0.41 和 0.44. 标准差的这种变化与突变现象的发生有着较好的对应关系.

用 Mann-kendall 方法对塔克拉玛干沙漠周边地区及塔中大气含水量进行突变检验(图 6). 在 1961~1986 年期间, 沙漠周边地区的 UF 曲线基本都在 0 线上部, 表明这段时期大气含水量以上升趋势为主; 而塔中的 UF 曲线在 1975 后以 0 线下部为主, 表明大气含水量呈现下降趋势. 1986 年以后, 两者的 UF 曲线都呈稳定直线上升; 周边地区和塔中的 UB 与 UF 曲线分别相交于 1986 年和 1991 年, 之后 UF 曲线迅速上升, UB 曲线则迅速下降, 均稳定的超过置信线 ± 2 的范围, 这表明在 1986~1991 年, 沙漠周边与沙漠腹地发生了显著意义的大气含水量上升的突变现象. 突变发生前后 10 年间, 标准差突然显著增加, 达到最大, 这正反映了非线性系统在突变时变率增加的特征.

2.4 大气含水量与降水量的关系

塔克拉玛干沙漠周边地区年降水量与年平均大气含水量存在明显相关, 相关系数达到 0.6, 通过信度为 0.01 的 t 显著性检验. 降水量变化趋势率为 5.6 mm/10a. 检测表明, 年降水量与大气含水量一样,

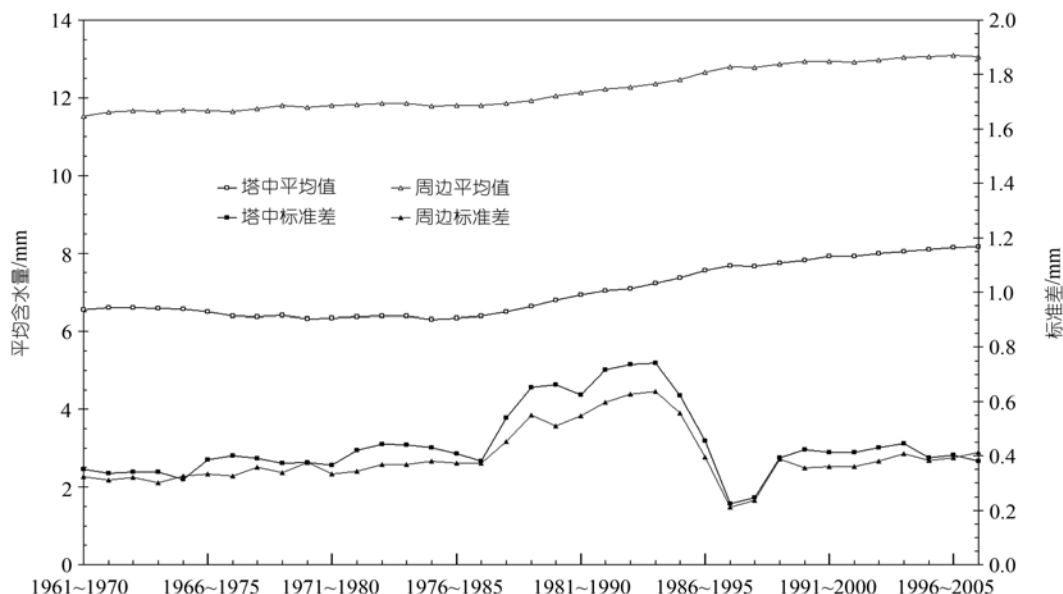


图 5 塔克拉玛干沙漠大气含水量的 10 年滑动平均值与标准差的年代际变化

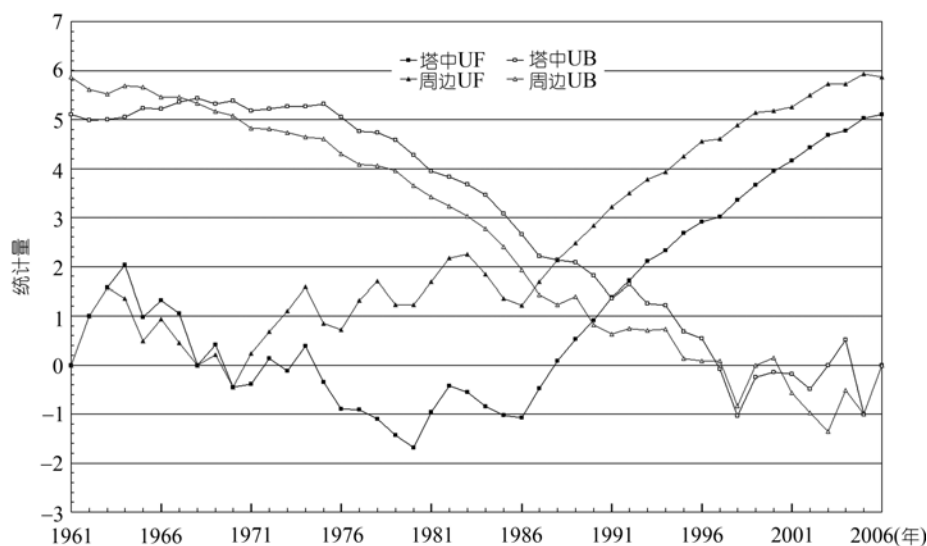


图6 塔克拉玛干沙漠地区大气含水量的突变检验

也在 1986 年发生了突变,但是年降水量的变差系数为 0.39, 要比大气含水量的 0.06 大的多,说明沙漠地区降水量的变率很大,但大气含水量相对稳定. 水汽含量的突变为沙漠出现极端降水事件创造了有利的条件,降水出现极大或极小值机会的也在增加,在 1986 年后表现尤其明显(图 7). 1987 年降水量达到了最高值 113.3 mm; 而 1994 年则创造了最低值 23.5 mm. 这也说明,水汽含量不是影响降水量变化的唯一条件.

塔中站的降水反映了沙漠腹地降水量的变化,其量要明显低于沙漠周边地区,8 年平均降水量为 29.0 mm. 相关分析表明,塔中站年降水量(1999~2006 年)与且末站相关最高,相关系数为 0.82. 塔中站本身逐月的降水量与水汽含量的相关系数为 0.53($n=104$, 信度 0.01).

3 讨论

塔克拉玛干沙漠是气候变化的敏感地区,引起

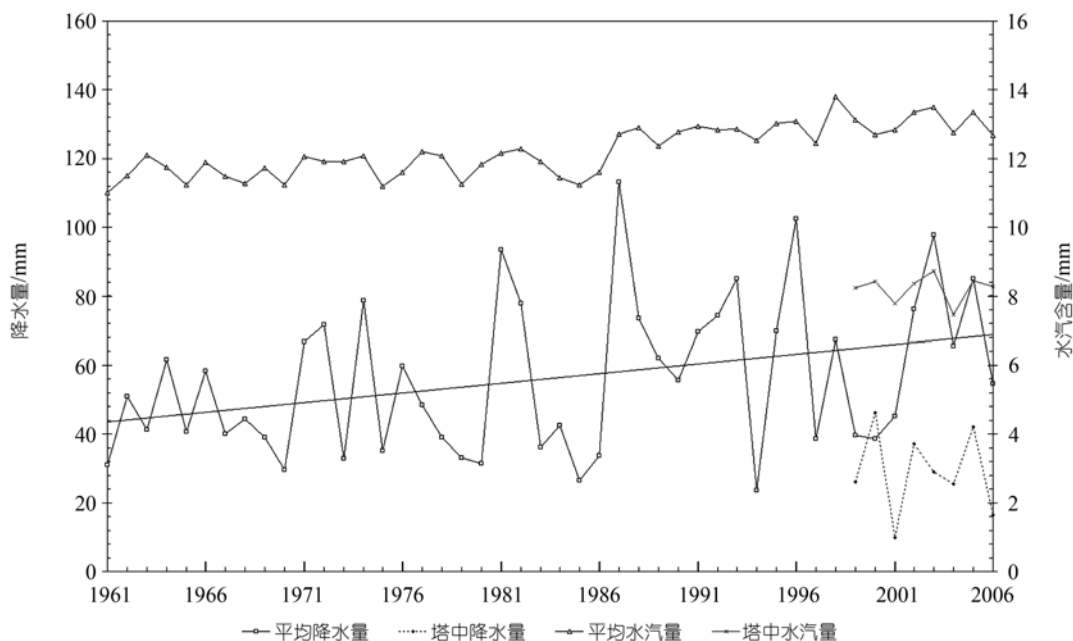


图7 塔克拉玛干沙漠大气含水量与降水量的变化

了许多学者的关注. 在一些涉及到塔里木盆地水汽问题的研究中, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料计算出的结果都认为塔克拉玛干沙漠是大气含水量的相对高值区^[17-22], 只是高值区的数值、形状和范围略有差异, 并认为 1986 年以前水汽含量是明显减少的^[18, 20]. 但本文利用塔里木盆地周边气象资料和塔中站资料的分析表明, 沙漠腹地是水汽含量的低值区而不是高值区, 水汽含量仅为 7~8 mm, NCEP/NCAR 再分析资料在塔克拉

玛干沙漠地区偏差很大, 得出的沙漠是大气含水量高值中心的结论与实际情况明显不符. 另外, 塔克拉玛干沙漠地区大气含水量的年际变化明显表现出两个阶段, 1961~1986 年期间, 沙漠周边与腹地水汽含量的升降趋势均不显著, 1986 年后发生显著意义的突变, 两地水汽增加明显. 1986~1991 年后发生显著意义的突变, 周边地区和塔中水汽含量显著增加, 这与近 50 年来南疆降水显著增加的趋势是一致的^[23].

参考文献

- 1 刘国纬. 水文循环的大气过程. 北京: 科学出版社, 1997
- 2 李国平, 黄丁发. GPS 遥感区域大气水汽总量研究回顾与展望. 气象科技, 2004, 32(4): 201—205
- 3 何平, 徐宝祥, 周秀骥, 等. 地基 GPS 反演大气水汽总量的初步试验. 应用气象学报, 2002, 13(2): 179—183
- 4 李成才, 毛节泰, 李建国, 等. 全球定位系统遥感水汽总量. 科学通报, 1999, 44(3): 333—336
- 5 毛辉, 毛节泰, 毕研盟, 等. 遥感 GPS 倾斜路径信号构筑水汽时空分布图. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(12): 1177—1185
- 6 梁宏, 刘晶淼, 章建成, 等. 青藏高原大气总水汽量的反演研究. 高原气象, 2006, 25(6): 1055—1063
- 7 李万彪, 刘盈辉, 朱元竞, 等. GMS-5 红外资料反演大气可降水量. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(5): 631—638
- 8 杜瑞林, 乔学军, 王琪, 等. 用地基 GPS 资料分析大气可降水汽总量. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(3): 121—124
- 9 曹云昌, 方宗义, 夏青. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. 应用气象学报, 2005, 16(1): 54—59
- 10 梁丰, 李成才, 王迎春, 等. 应用区域地基全球定位系统观测分析北京地区大气总水汽量. 大气科学, 2003, 27(2): 236—244
- 11 陈添宇, 李照荣, 陈乾, 等. 用 GMS5 卫星反演水汽场分析中国西北地区大气水汽分布的气候特征. 大气科学, 2005, 29(6): 864—871
- 12 梁宏, 刘晶淼, 李世奎. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析. 自然资源学报, 2006, 21(4): 526—534
- 13 艾伦. 物理量和天体物理量. 上海: 上海人民出版社, 1976
- 14 杨景梅, 邱金桓. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式. 大气科学, 1996, 20(5): 620—626
- 15 杨景梅, 邱金桓. 用地面湿度参数计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究. 大气科学, 2002, 26(1): 9—22
- 16 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系. 气象, 2004, 30(2): 9—11
- 17 蔡英, 钱正安, 吴统文, 等. 青藏高原及周围地区大气可降水量的分布、变化与各地多变的降水气候. 高原气象, 2004, 23(1): 1—10
- 18 俞亚勋, 王劲松, 李青燕, 等. 西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析. 冰川冻土, 2003, 25(2): 149—156
- 19 王宝鉴, 黄玉霞, 陶建红, 等. 西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化. 冰川冻土, 2006, 28(1): 15—21
- 20 王秀荣, 徐祥德, 苗秋菊. 西北地区夏季降水与大气水汽含量状况区域性特征. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 35—42
- 21 张学文. 新疆水汽压力的铅直分布规律. 新疆气象, 2002, 25(4): 1—2
- 22 王得翰. 杭州上空温度湿度分布的气候学特征. 杭州大学学报, 1985, (7): 386—393
- 23 杨青, 魏文寿. 新疆现代气候变化特征及趋势分析. 见: 气候变化与生态环境研讨会论文集. 北京: 气象出版社, 2004. 202—209