



论文

全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异

陈发虎^{①*}, 黄伟^①, 靳立亚^①, 陈建徽^①, 王劲松^②^① 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;^② 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

* E-mail: fhchen@lzu.edu.cn

收稿日期: 2010-12-10; 接受日期: 2011-08-30

国家重点基础研究发展计划(编号: 2010CB950202)、国家自然科学基金面上项目(批准号: 40971056)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号: 41021091)和兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(批准号: LZUJBKY-2009-82)资助

摘要 依据 Climatic Research Unit(CRU) 1930~2009 年间的最新 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格点的月均降水量序列, 本文分析了中亚干旱区近 80 年来的降水变化特征及其区域差异. 结果发现, 近 80 年来主要受西风环流控制的中亚干旱区年降水整体上表现出增加趋势, 年降水中以冬季降水的增加趋势最明显($0.7 \text{ mm}/10 \text{ a}$). 中亚干旱区近 80 年来的降水变化存在空间差异, 可划分为五个降水变化区域(-哈萨克斯坦西区, -哈萨克斯坦东区, -中亚平原区, -吉尔吉斯斯坦区, -伊朗高原区), 根据年降水分布模式以 45°N 为界划分为两类: 研究区北部的两个区(和 区)四季降水较均匀, 南部的三个区均以春、冬季降水为主(占全年降水的 $60\% \sim 82\%$). 在降水变化趋势上, 除了中亚干旱区西南(区)在近 80 年来有微弱的减少趋势外, 其他四区均表现为增加趋势, 尤以干旱区西部的 区和 区降水增加显著. 近 80 年来降水增加或者减少的趋势主要取决于冬季的变化趋势. 研究还发现, 中亚干旱区降水存在较明显的年际变化, 中亚干旱区及其各分区都具有 $2 \sim 3 \text{ a}$ 的显著周期, 南部三区(, , 区)还存在 $5 \sim 6 \text{ a}$ 的显著周期, 在此基础上都具有 $3 \sim 4$ 个阶段性的变化趋势. 最近一次趋势性变化开始于 20 世纪 70 年代中后期, 研究区降水更多的表现出区域的差异性. 近 80 年来, 中亚干旱区降水对全球变暖的响应复杂, 西风环流变化可能是影响中亚干旱区降水变化的主要因素.

关键词中亚干旱区
年和季节降水
变化趋势
空间差异

全球快速变暖已经是一个不争的事实, 20 世纪的升温率是近千年以来最快的, 近 30 年的升温率也是 20 世纪最高的^[1~3], 在全球变暖的大背景下对水文循环和降水变化的研究尤为重要. 已有的研究发现, 全球变暖导致不同区域的降水和水文循环产生不同的变化^[4]. 马柱国和符淙斌^[5]的研究发现, 近 50 年来

全球变暖下各大洲降水和湿度变化存在较大差异, 欧亚大陆整体上降水在减少, 气候趋于变干. Hulme^[6]分析了全球九大干旱区自 1900~1994 的降水特征后发现, 气温与降水的关系在不同区域差别很大, 总体上讲干旱区降水在减少, 而全球平均降水在增加. 亚洲中部干旱区是全球最大的非地带性干旱区, 中亚

干旱区是亚洲中部干旱区的主体部分, 包括中亚五国、伊朗和阿富汗北部, 西部以里海西部为界, 东部与我国西北干旱区和蒙古高原干旱区相连, 南北大致介于 $35^{\circ}\sim 53^{\circ}\text{N}$ 之间, 其降水具有以冬、春季为主的西风区降水特征, 受西风环流和北大西洋涛动的影响^[7,8], 显著有别于受季风环流控制的以夏季降水为主的中纬度亚洲大陆东部地区. 我们的研究也发现, 在更长时间尺度, 如全新世^[9,10]和近千年^[11], 亚洲中部干旱区和我国东部季风区的湿度(降水)变化存在错位相现象, 据此我们提出了亚洲中部西风环流控制区气候变化的“西风模式”^[12].

就整个亚洲中部干旱区而言, 近百年来气候的变暖幅度大于我国东部季风区和北半球, 甚至是后者变化幅度的两倍多^[13]. 就我国西北干旱区而言, 特别是新疆自 1987 年来气候出现由“暖干”向“暖湿”转型现象^[14], 在年代际尺度上降水和土壤湿度均出现增加趋势^[15-17], 而位于亚洲季风区的华北和西北东部近 50 年来暖干化趋势强烈^[17-19], 树轮记录的 PDSI(帕尔默干旱指数)同样表明, 处于内陆的天山^[20]和季风边缘区的贺兰山^[21]近 50 年来湿度呈反向变化. 利用 CRU 重建序列, Wang 等^[22]分析了从里海到我国东部地区的中纬度地区的干燥指数变化, 发现亚洲中部干旱区的干湿变化存在区域差异, 中亚干旱区具有一致性变化, 被划为一个气候变化区, 近百年来气候变干趋势显著, 但干暖化最显著的区域位于季风边缘区. 前人通过站点资料和模式对亚洲中部干旱区某些区域的温度、降水、土地利用/覆盖变化与区域气候变化、气候预测等方面作了分析^[23]. 然而, 亚洲中部干旱区以其高山-盆地结构而有别于全球其他干旱区, 自然景观以冰雪-森林-草原-绿洲-荒漠(沙漠)为特征, 山地降水相对丰沛, 并以河流径流方式提供了干旱区可利用的主要水资源, 而广大盆地(平原)区降水稀少. 而且中亚干旱区降水的绝对值变化以及由此引起的水资源变化对区域工农业发展更为重要. 因此, 在全球变暖的大背景下, 研究亚洲中部干旱区的降水变化无疑具有更重要的现实意义和科学价值. 作为亚洲中部干旱区主体部分的中亚干旱区近百年来降水是否具有显著的增加趋势和变化阶段, 是否存在空间差异, 其变化的可能机制是什么等问题至今仍缺少系统的研究. 本文利用 CRU 最新网格点月均降水量序列(CRU TS 3.1), 研究了近 80 年(1930~2009)中亚干旱区的年和季节降水的变化特征,

探讨其区域差异和变化的可能机制.

1 资料和方法

1.1 资料的选取

本文选取的降水资料来自英国 East Anglia 大学的 Climatic Research Unit(简称 CRU) 1901 年 1 月到 2009 年 12 月的高分辨率全球逐月格点数据集(CRU TS 3.1), 网格距为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$, 此数据集处理方法与 CRU TS 2.1^[24]相同. CRU 数据集有以下优点: 在资料的重建过程中包含了严格的时间均一性检验, 时间尺度更长, 空间分辨率更高. 该数据集被大量运用于气候变化研究中^[5,25-27]. 本文研究区域, 东部以中国国境线为界, 西部以 46.25°E 为界, 南北范围为 $35.25^{\circ}\sim 52.75^{\circ}\text{N}$, 如图 1 中的阴影所示. 基于中亚地区站点稀少, 长序列的站点资料有限的事实, 需要对资料的时间尺度适用性做相应的检验. 具体做法是做出研究区整体平均的单位格点所用站点数的时间序列以及不同时段所用的插值站点(图略), 结果发现 1930 年之前的中亚干旱区观测站点较少, 且研究区西部存在大面积空白区, 可以肯定 1930 年之前的 CRU 资料可信度低. 因此, 为了保证数据的可靠性和适用性, 本文采用 1930~2009 年的降水序列做分析.

1.2 EOF 和 REOF 分析

EOF 是一种气候统计诊断方法, 此方法可以用相对较少的几个空间分布模态描述原变量场, 并且同时涵盖原变量场的信息^[28], 本文采取 North 等^[29]描述的方法进行显著性检验, 检验 EOF 分解出的经验正交函数是否有意义的信号. 然而, EOF 分离出的空间分布结构不能清晰表示不同地理区域的特征, 进行 EOF 展开时所取区域范围不同, 结果也不同, 以及计算 EOF 取样大小不同, 对反映真实分布结构的相似度也会不同^[30], 本文使用旋转经验正交函数(ROF)来克服 EOF 的这些局限性, 更好的反映不同地域的变化^[30], 来开展中亚干旱区降水变化的空间分区研究.

1.3 分段线性拟合

在计算气候要素的变化趋势时, 一般使用线性拟合、多项式拟合等方法. 但是如果气象要素在某个时间尺度上变化比较剧烈时, 以上的方法有可能会将其中某段有意义的趋势变化平均化从而将其忽略,

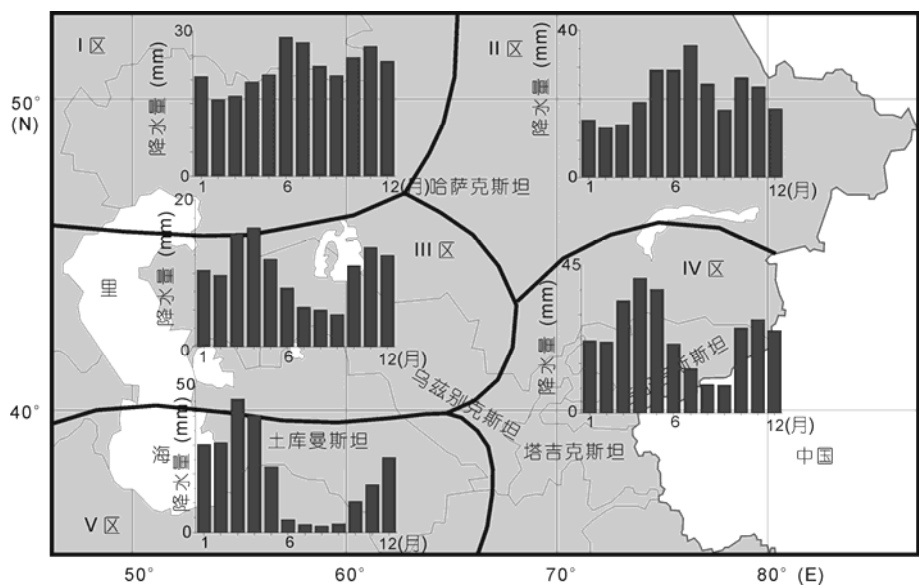


图 1 中亚干旱区范围及其 1930~2009 年降水变化分区 (~ 区)图
柱状图为各分区月均降水(1961~1990 年平均)分布图

最终得出的只是整个时间尺度的平均结果. 由于降水是变化较为剧烈的气候要素, 本文使用一种近年来发展起来的分段线性拟合方法^[31], 从而更大程度的表现降水的真实变化. 分段线性拟合是一种统计方法, 这种方法克服了在未知突变点位置和数目的前提下, 解决非线性的问题. 具体的算法是, 分别假设有 1~12 个突变点, 然后在符合残差平方和最小的前提下分别计算每种情况的突变点位置和拟合线段, 最后比较这 12 种情况, 选取残差平方和最小的一种情况, 从而确定分段的起始位置.

1.4 小波分析和多窗谱分析(MTM)

小波分析被认为是傅里叶分析的突破性进展, 其不仅可以给出气候序列变化的尺度, 还具有可以显示出变化的时间位置的优点^[30]. 多窗谱分析是由 Thomson^[32]提出的一种新颖的谱分析和信号重建技术, 它非常适合于非线性气候系统中短序列高噪声背景下时空依赖信号的诊断分析. 本文采用墨西哥帽小波分析和多窗谱方法分析中亚干旱区近 80 年来的降水变化周期.

2 中亚干旱区降水的时空特征

2.1 中亚干旱区降水的整体变化特征

近 80 年来中亚干旱区作为一个整体, 无论是区

域平均年降水还是平均季节降水都呈现出增加的趋势(表 1), 年降水的增加趋势为 1.2 mm/10 a, 各季节降水中以冬季的线性增加趋势最为显著(0.7 mm/10 a*)(*代表通过 95%的显著性检验, 下同), 其他季节降水的增加趋势依次分别为秋季(0.3 mm/10 a)、夏季(0.2 mm/10 a)、春季(0.1 mm/10 a). 对年和各季节降水进行分段线性拟合发现, 年和各季节降水的特征差异较大, 自 20 世纪 70 年代末夏季降水增幅最快, 但是没有通过显著性检验. 不论是年均降水还是季节降水除了线性趋势外, 存在不同周期的波动, 也存在极端干旱和多雨的年份. 一些极端干旱年份(如 1943~1945, 1974, 1975)在树轮记录中有明显记录^[20,33~35]. 由于降水是变化较为剧烈的气象要素, 研究区地形分布也比较复杂, 因此为了更好地研究中亚的时空特征, 我们采用 REOF 方法将研究区进一步划分.

表 1 中亚干旱区不同时期降水的线性趋势(mm/10 a)

	1930~1970s 中期	1970s 末~2009 年	1930~2009 年
年	3.8 ^{a)}	1.3	1.2
春季	2.6 ^{a)}	0.2	0.1
夏季	0.7	2.1	0.2
秋季	0.6	-0.8	0.3
冬季	0.3	-0.4	0.7 ^{a)}

a) 代表通过 95%的显著性检验

2.2 年均降水变化的 REOF 分区

按照 North 等^[29]显著性检验方法, EOF 分解获得的前 10 个主分量(PC)的方差累计达 70.9%, 能够很好代表原变量. 前两个 PC 分别代表南北差异和东西差异, 占总方差的 25.3%和 12.9%(表 2, 图略), 较高估计了南北间的差异和东西间的差异. 取前 10 个 PC 进行旋转, 获得 10 个旋转后的主分量(RPC), 克服了 EOF 方法过高估计前几个主分量的缺陷(见表 2). 前 5 个 RPC 占总方差的 46.5%, 可以较好代表降水区域差异的基本特征, 本文以前 5 个 RPC 来绘制载荷向量场, 取绝对值 0.5 为临界值, 由前 5 个旋转载荷向量得到 5 个年降水变化分区(图 1). 各区具体情况如下:

第 Ⅰ区: 简称哈萨克斯坦西区, 此区域以平原、低地、丘陵为主, 降水相对哈萨克斯坦南部丰富, 年平均降水 261 mm, 四季降水较均匀, 出现两个降水高峰(图 1).

第 Ⅱ区: 简称哈萨克斯坦东区, 包括哈萨克斯坦东北和中部的大部分区域, 此区域的海拔较高, 主要以山地和山间盆地为主, 年平均降水 269 mm, 四季降水也较均匀, 以夏季降水略高 (图 1).

第 Ⅲ区: 简称中亚平原区, 包括里海、哈萨克斯坦西南部、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦等沙漠区, 该区域气候干旱, 年均降水仅 125 mm, 以春、冬季降水占主导(占全年降水 59.8%), 夏季降水很少(图 1).

第 Ⅳ区: 简称吉尔吉斯斯坦区, 位于天山山地和帕米尔高原区, 包括哈察克斯坦东南、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦, 年降水 289 mm, 降水最高值出现在 4 月份, 以春、冬季降水占主导(图 1), 占全年降水的 63.0%.

第 Ⅴ区: 简称伊朗高原区, 包括伊朗北部、土库曼斯坦南部和阿富汗北部, 该区年均降水 232 mm, 以春、冬季降水为主型占全年降水的 81.9%, 而夏季几乎无降水(图 1).

表 2 EOF 和 REOF 分析的主分量(PC 和 RPC)所对应的方差值

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
PC	25.3	12.9	8.7	5.7	4.2	3.7	3.1	2.9	2.3	2.1	70.9
RPC	11.3	10.8	8.3	8.1	8.0	7.3	5.4	4.7	4.1	2.9	70.9
增量	-14.0	-2.1	-0.4	2.4	3.8	3.6	2.3	1.8	1.8	0.8	0

2.3 年降水的周期变化特征

中亚干旱区和 5 个分区年降水量变化的 MTM 分析结果(图 2)显示, 研究区降水存在较明显的年际变化, 中亚干旱区整体及其五个分区均存在 2~3 a 的显著周期, 其中, Ⅰ区通过 90%的显著性检验, 研究区整体及 Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ和 Ⅴ区通过了 95%的显著性检验. 实际上, 各分区主要降水季节的降水表现出非常显著的 2~3 a 基本周期变化. 研究区整体及其南部的 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ区还存在 5~6 a 显著周期(通过了 95%显著性检验). 小波分析结果发现, 5~6 a 周期在研究区整体表现最显著, 基本贯穿整个时间序列, 只在 20 世纪 30 年代的 10 年左右和 80 年代初很短的时间里不明显. Ⅳ, Ⅴ区所具有的 2~3 a 和 Ⅰ区具有的 5~6 年显著周期自 1930 年之后基本连续.

2.4 降水变化的线性趋势及其差异

将各分区格点资料的年和季节降水序列做区域平均, 分别得到每个分区近 80 年来的年降水(图 3)和季节降水序列. 年降水特征除了 Ⅰ区有微弱的减少趋势外, 在中亚干旱区的大部分区域(Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ和 Ⅴ区)均有增加趋势, 线性趋势分别为 3.9 mm/10 a*, 0.7 mm/10 a, 1.9 mm/10 a*和 2.0 mm/10 a, 其中 Ⅱ区和 Ⅳ区均通过了 95%的显著性检验, Ⅱ区降水最多, 增幅也最大, Ⅱ区属于中亚沙漠区, 年降水仅 125 mm, 但相对增幅最大, 降水增加趋势显著. Ⅳ区降水增幅的绝对值也较大, 水资源的增加有利于绿洲农业的发展. 分段拟合发现, 同整个中亚干旱区一样, 这四个年降水增幅区域, 在 20 世纪 60 年代前后均出现降水较多时期, 70 年代前后出现干旱时期. 除了线性增加趋势外, 这四个区中, 最明显特征是降水的周期性变化, 其中 Ⅱ~Ⅳ区存在显著的 2~3 a 周期变化, Ⅰ区以 5~6 a 周期最显著. Ⅴ区有别于上述四个区域, 近 80 年来的降水趋势性变化不明显, 更多的表现出 2~3 a 周期的周期性变化, 同时存在大约 20 世纪 40 年代到 50 年代中的少雨时期和 70 年代的多雨时期, 这与其他四区形成明显对照(图 3). 70 年代末以来, 各个分区的降水主要表现出三种不同的现象: Ⅱ和 Ⅳ区的持续波动上升, Ⅰ和 Ⅲ区先快速上升后缓慢下降, 以及 Ⅴ区的持续波动下降.

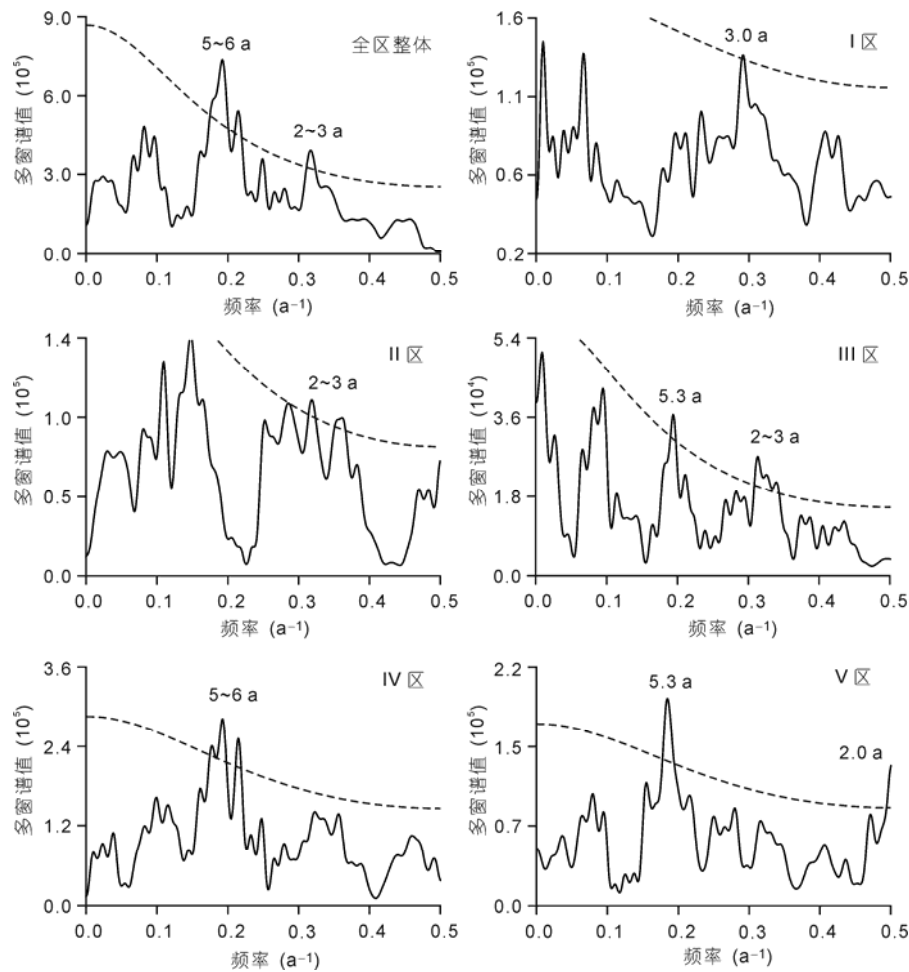


图 2 中亚干旱区整体以及各分区近 80 年降水量的 MTM 分析

虚线表示通过 95% 的显著性检验

在季节降水的变化过程中,研究区北部的两个区(I 区和 II 区)具有一致的变化过程(图 3)。哈萨克斯坦西区(III 区)近 80 年来年降水增加趋势由冬季(图 4)和春季的降水增加趋势所决定,增加幅度分别为 $1.5 \text{ mm}/10 \text{ a}^*$ 和 $0.9 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。分段线性拟合发现, III 区降水存在四个变化阶段,即 20 世纪 30 年代初至 60 年代初期,各季节降水一致表现为增加趋势,以冬季增幅最显著($4.7 \text{ mm}/10 \text{ a}^*$); 60 年代初期至 70 年代末,各季节降水一致表现为减少趋势,以春季减少最显著($-12.5 \text{ mm}/10 \text{ a}^*$); 70 年代末至 90 年代初,各季节降水一致表现为增加趋势,尤其以春季降水增加最快($4.2 \text{ mm}/10 \text{ a}^*$); 90 年代初期以来,各季节降水缓慢减少。在哈萨克斯坦东区(IV 区),近 80 年来年降水的微弱增加(图 3)主要由冬季降水($1.2 \text{ mm}/10 \text{ a}^*$)所贡献

(图 4)。和 V 区的变化特征十分相似,在相同的时间段表现为四个相同特征的变化阶段。

中亚干旱区主体的 III 区和 IV 区各季节降水的变化趋势也基本一致(图 3)。中亚平原区(V 区)近 80 年来降水增加显著,表现为冬季和秋季降水增加显著,但是这个区域的秋季降水较少,其绝对增加贡献很少,降水增加主要是冬季降水增加贡献的。相反,夏季和春季降水更多的表现出阶段性变化,夏季在 20 世纪 40 年代和 70 年代出现十多年的干旱。自 70 年代中期开始,各季节降水出现一致性波动增加。因此,可以说 V 区近 80 年来的年降水在第一个阶段的增加主要由冬季决定,而最近 30 年的增加是各季节共同作用的结果。吉尔吉斯斯坦区(VI 区)的降水近 80 年的也是具有增加趋势,和 V 区非常相似,年降水的增

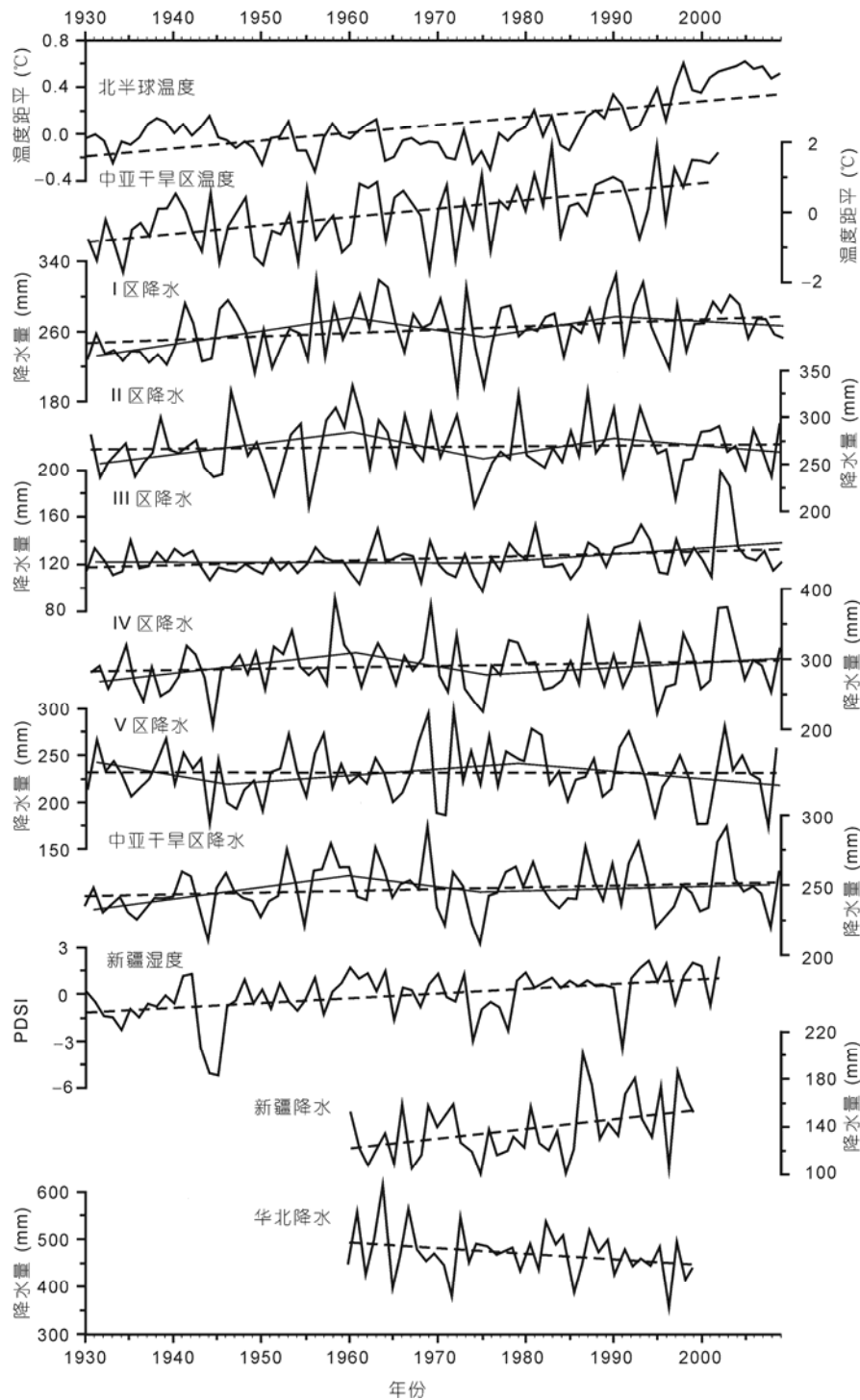


图 3 近 80 年北半球^[36]、中亚干旱区温度变化^[13]以及中亚干旱区和 ~ 分区年降水变化及与我国新疆湿度变化^[20]、新疆降水和华北降水变化^[37]的对比
图中虚线为整体趋势, 细实线为分段拟合趋势

加也主要由冬季降水的增加(1.3 mm/10 a*)所贡献(图 4). 不同处在于, 自 20 世纪 70 年代中期以来的降水增 加也主要是由冬季降水的增加(3.4 mm/10 a*)所决定. 伊朗高原区(区)近 80 年来的年降水特征比较

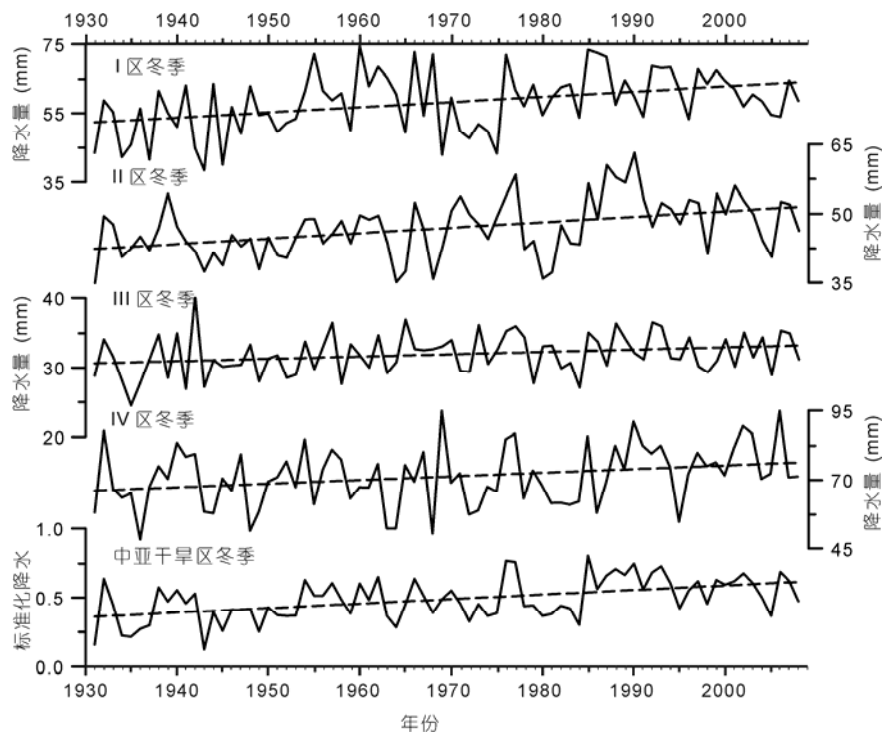


图 4 近 80 年中亚干旱区与各分区降水增加最快季节(冬季)的降水变化(实线)及其线性趋势(虚线)

特殊,几乎和中亚主体的 和 区的降水变化趋势完全相反(图 3),表现为 20 世纪 30 年代初至 40 年代末的下降,40 年代末至 70 年代末的上升,以及 70 年代末至今的波动式下降,主要是由冬、春季降水的减少所贡献的,但无论是年均降水还是各季降水,其线性趋势均没有通过显著性检验.各季节降水的阶段性变化差异较大,30 年代初至 60 年代初春、冬季降水表现出相反的变化趋势,近 30 年以来表现为相同的变化趋势,这可能与西风带的南北摆动有关.夏季降水表现为前 60 年的稀少至近 20 年的快速增加,秋季降水波动较大,最小降水仅 18.0 mm,最大达 54.6 mm.但总的来说,第 区近 80 年来的降水除了微弱的减小外,最基本的特征是中亚干旱区所具有的 2~3 年显著周期性变化,以及近 30~40 年来春、冬季降水量的减小和夏季降水量的快速增加.

上述分析发现,中亚干旱区降水在 ~ 区有明显增加趋势,且均以冬季增加最显著,而 区(伊朗高原区)降水与 ~ 区不同,这一区域也不是传统的中亚干旱区.因此,我们将 ~ 区的冬季降水变化进行合成,形成一个降水快速增加季节的降水变化趋势图,代表整个中亚干旱区降水快速增加季节

的降水变化趋势(图 4),突出研究区主要降水变化季节的降水演变.具体做法为:首先将 ~ 区的冬季降水序列进行标准化处理,后将标准化后的四条曲线进行平均.从图 4 可以看出,中亚干旱区近 80 年来冬季降水增加非常显著(通过 95% 的显著性检验),说明虽然研究区的降水特征空间差异较大(图 5),但对年降水变化做出最大贡献季节(冬季)的降水表现出一致性显著增加.

3 讨论

已有的研究发现,我国新疆地区自 20 世纪 80 年代以来气候向暖湿型转变^[14],内陆终年湖泊面积普遍扩大,许多干涸的沙漠化湖床重新形成湖泊^[38,39],内陆干旱区降水增加、湿度增大^[18,19],天山树轮重建的 PDSI 指数指示出近百年来的土壤湿度在增加^[20],这些结果是我国西北干旱区降水增加的反映.我国新疆地区西邻中亚干旱区主体(~ 区),无疑其降水增加气候变湿润应当是中亚干旱区降水增加的缩影罢了,应当是从亚洲中部干旱区大区域出现的降水变化来理解这些变化.近 80 年来中亚干旱区西

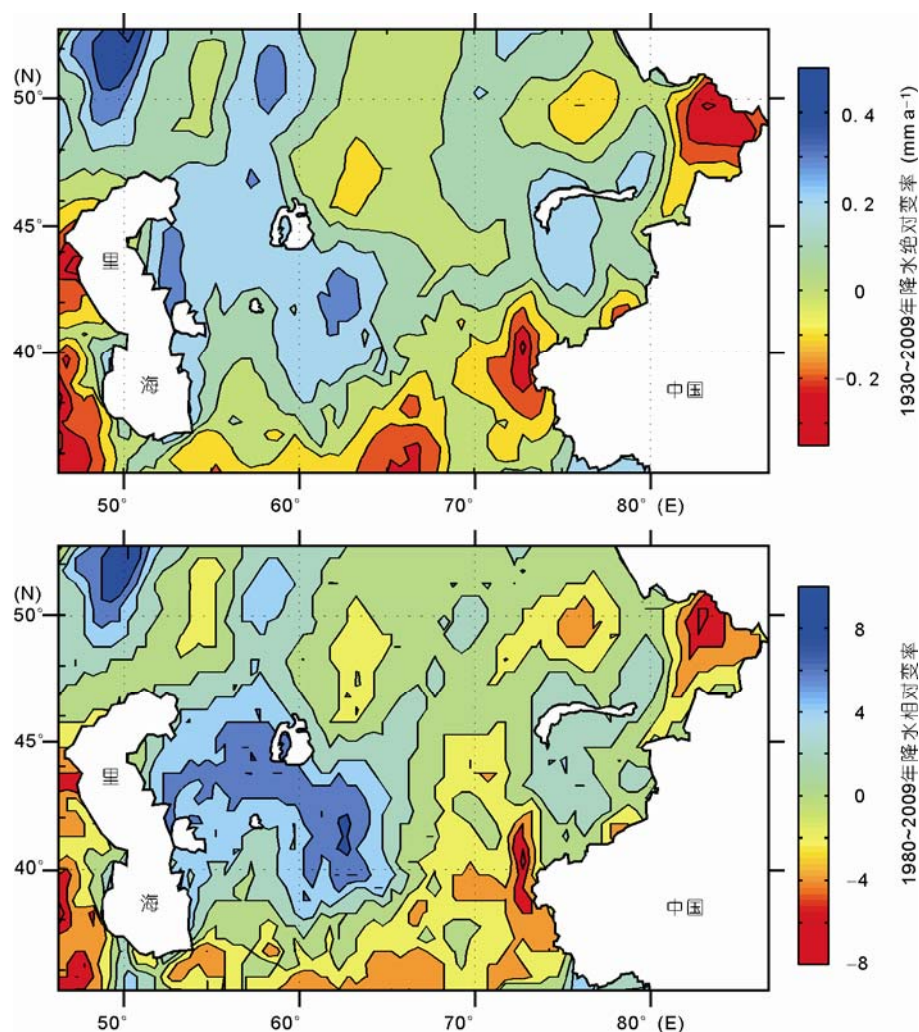


图5 1930~2009年中亚干旱区降水变化的绝对变率(a)和1980~2009年相对1930~2009年的降水变率(b)

图中数值扩大100倍

南的区降水有微弱下降,以近30年来下降趋势更显著(图5)。然而,总体来讲,近80年来包括我国在内的亚洲中部干旱区降水总体上是增加的。对比亚洲季风变化可以发现,近百年来亚洲季风总体在衰退^[40~42],西北东部季风边缘区湿度在减小^[21]。我国实测资料也表明,近50年来我国西北西部在变湿润,而我国华北地区整体变干^[19],季风边缘区的降水显著减少^[18,37](图3)。近80年来中纬度亚洲干旱区和季风区的这种差异变化,说明在短尺度上,也存在类似全新世的中纬度亚洲气候变化的“西风模式”^[12]。

在全球变暖背景下,中亚干旱区近百年来气温显著升高,增幅高达 1.6°C ^[13](图3),远高于北半球的变暖幅度^[36](图3)。降水对全球变暖的响应是复杂的,

例如,北半球温度变化中,20世纪20~40年代出现的小暖期在欧亚大陆内陆的中亚干旱区温度系列中并没有表现出来^[13],同样降水变化也对这一小暖期事件没有响应,可能与这一小暖期事件不是全球性事件^[43~45]有关。然而,北半球温度和中亚干旱区温度自70年代以来均加速升温,中亚干旱区主体的~区这一时期降水增幅加快,波动的幅度也在加大(图3),很好的响应了全球温度的快速升温。但在研究区的南部(图5),反而出现变干的趋势。说明在全球变暖下,中亚干旱区的不同区域降水的变化是有差异的,与已有的研究^[4,6]一致,说明区域降水对变暖的响应并不一致,具有复杂性。在研究区北部(和区)降水先增加再减少可能与高纬的西伯利亚高压和

北极涛动等有关; 研究区主体(和 区)降水的持续上升和南部的整体降水减少(图 5)可能反映了在全球变暖下副热带高压带和西风带均向北迁移, 导致不同区域受大气环流影响的方式发生了变化, 研究区南部因副热带高压向北迁移对这一区域产生持续影响, 导致研究区南部伊朗高原降水减少, 已有的研究也发现, 随全球变暖伊朗北部降水在减少^[46].

除了环流变化导致的中亚干旱区降水的变化外, 由于研究区主体以冬、春季降水为主, 降水增加的趋势也主要由冬季降水决定, 我们认为西伯利亚高压的位置和强弱变化对其内部的局地降水变化也将会起到一定作用. 此外, 苏明峰和王会军^[15]发现, 中国西北自 20 世纪 80 年代中期的变湿, 与 ENSO 朝更暖的状态变化有紧密联系. 而中亚干旱区降水的增加是否与 ENSO 变化有关值得深入的探讨; 同时, 对于处在中亚干旱区上风向的北大西洋及里海和处于其内部的咸海等几大湖泊, 它们的湖泊大小变化和蒸发强弱变化也是此区域降水变化的重要影响因素; 中亚干旱区地形和植被覆盖较为复杂, 其内部的水循环和气溶胶的作用也是不可忽略的因素. 研究表明, 中亚干旱区在早全新世的干旱气候与冬、春季节中纬度西风环流的减弱北移及其上风向北大西洋及里海等内陆湖泊水汽蒸发减弱有密切关系^[47]. 显然, 进入中纬度大气中的水汽多少和西风环流强弱变化可能是影响中亚干旱区降水变化的最主要因素, 但具体如何响应全球变暖, 导致研究区, 特别是中亚干旱区主体的降水增加, 以及全球变暖情形下, 中亚干旱区降水出现的区域差异及其变化机制, 需要通过开展降水变化的数值模拟作进一步深入分析.

近 80 年来中亚干旱区降水除了趋势性变化外, 还存在显著的年际变化周期, 尤其以 5~6 a 和 2~3 a 周期变化最显著, 均通过了 95% 的显著性检验(图 2). 其中, ~ 区都存在 2~3 a 的振荡周期, 是研究区降水变化的基本周期, 在此基础上, ~ 区还具有 5~6 a 的显著周期. 研究区降水存在的 2~3 a 准周期

是大气环流和气候年际尺度变化的一种非常显著而重要的信号, 对流层的许多气象要素都具有此周期^[48~52], 同时 2~3 a 周期也是西风环流摆动周期^[53], 这一周期在亚洲季风边缘区降水中也有记录^[54], 可能代表了中纬度亚洲环流变化的基本周期, 值得今后深入研究.

4 结论

中亚干旱区作为一个整体, 近 80 年来年降水和各季节降水都表现出微弱增加趋势, 以冬季的降水增加幅度最大. 近 80 年来中亚干旱区降水的变化趋势与我国东部季风区显著不同, 在短尺度上也存在气候变化的“西风模式”.

中亚干旱区降水变化的区域差异较大, 可分为五个分区. 其中, 哈萨克斯坦西区(区)和哈萨克斯坦东区(区)各季节降水分配比较均匀; 中亚平原区(区)、吉尔吉斯斯坦区(区)和伊朗高原区(区)降水主要以春、冬季降水为主. 近 80 年来, 各区降水的变化趋势除 区有微弱的下降趋势外, 其他四区均存在增加趋势.

近 80 年来中亚干旱区降水存在显著的年际变化周期, ~ 区都存在 2~3 a 的振荡周期, 是研究区降水变化的基本周期. 研究区南部的 , 和 区还具有 5~6 a 周期.

分段拟合显示, 各区均出现 20 世纪 60 年代前后的降水较多时期和 70 年代前后的干旱时期, 但在 80 年代前后出现三种不同的变化趋势: 和 区降水出现持续波动上升, 体现了与中纬度西风环流的密切联系; 和 区出现先快速上升再缓慢下降, 可能与高纬的西伯利亚高压和北极涛动等因素有关; 区出现持续波动下降, 可能是由于西风急流的纬向摆动和副高带北移有关, 以上也说明了降水对全球变暖的响应比较复杂, 变化机制需要深入研究.

致谢 A. R. Tomé 教授提供分段拟合分析方法, 方克艳博士对周期分析、吕雁斌博士对图的修改提出了宝贵意见. 论文完成过程中得到王会军研究员、马柱国研究员等的有益交流讨论; 三位审稿人对论文提出了建设性建议, 冯松博士对论文修改提供了帮助, 在此一并致谢.

参考文献

- 1 IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 4–6
- 2 Mann M E. Climate over the past two millennia. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2007, 35: 111–136
- 3 Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, et al. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 13252–13257
- 4 Dai A G, Trenberth K E, Karl T R. Global variations in droughts and wet spells: 1900–1995. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 3367–3370
- 5 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37: 222–233
- 6 Hulme M. Recent climatic change in the world's drylands. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 61–64
- 7 Rogers J C, Van L H. The seesaw in winter temperatures between Greenland and northern Europe. Part II: Some oceanic and atmospheric effects in middle and high latitudes. *Mon Weather Rev*, 1979, 107: 509–519
- 8 Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. *Int J Climatol*, 2001, 21: 535–556
- 9 Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 351–364
- 10 Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Vegetation response to Holocene climate change in monsoon-influenced region of China. *Earth-Sci Rev*, 2009, 97: 242–256
- 11 Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. *Quat Sci Rev*, 2010, 29: 1055–1068
- 12 陈发虎, 陈建徽, 黄伟. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的“西风模式”讨论. *地学前缘*, 2009, 16: 23–32
- 13 Chen F H, Wang J S, Jin L Y, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years. *Front Earth Sci China*, 2009, 3: 42–50
- 14 Shi Y F, Shen Y P, Kang E, et al. Recent and future climate change in northwest China. *Clim Chang*, 2007, 80: 379–393
- 15 苏明峰, 王会军. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 951–958
- 16 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估. *大气科学*, 2009, 33: 90–98
- 17 Feng S, Nadarajah S, Hu Q. Modeling annual extreme precipitation in China using generalized extreme value distribution. *J Meteorol Soc Japan*, 2007, 85: 599–613
- 18 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. *地理科学*, 2005, 25: 567–572
- 19 马柱国, 符淙斌. 1951–2004 年中国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51: 2429–2439
- 20 Li J B, Gou X H, Cook E R, et al. Tree-ring based drought reconstruction for the central Tien Shan area in northwest China. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L07715, doi: 10.1029/2006GL025803
- 21 Li J B, Chen F H, Cook E R, et al. Drought reconstruction for north central China from tree rings: The value of the Palmer drought severity index. *Int J Climatol*, 2007, 27: 903–909
- 22 Wang J S, Chen F H, Jin L Y, et al. Characteristics of the dry/wet trend over arid central Asia over the past 100 years. *Clim Res*, 2010, 41: 51–59
- 23 Lioubimtseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia. *J Arid Environ*, 2005, 62: 285–308
- 24 Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int J Climatol*, 2005, 25: 693–712
- 25 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30: 894–904
- 26 Neukom R, Prieto M R, Moyano R, et al. An extended network of documentary data from south America and its potential for quantitative precipitation reconstructions back to the 16th century. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L12703, doi: 10.1029/2009GL038351
- 27 Xu H M, Taylor R G, Kingston D G, et al. Hydrological modeling of river Xiangxi using SWAT2005: A comparison of model parameterizations using station and gridded meteorological observations. *Quat Int*, 2010, 226: 54–59
- 28 Lorenz E N. Empirical orthogonal function and statistical weather prediction. Scientific Report No. 1 Statist Forecasting Project. Department of Meteorology, Massachusetts Institute of Technology, 1956
- 29 North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function. *Mon Weather Rev*, 1982, 110: 699–706
- 30 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007
- 31 Tomé A R, Miranda P M A. Piecewise linear fitting and trend changing points of climate parameters. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L02207,

doi: 10.1029/2003GL019100

- 32 Thomson D J. Spectrum estimation and harmonic analysis. *Proc IEEE*, 1982, 70: 1055–1096
- 33 Li J B, Cook E R, Chen F H, et al. An extreme drought event in the central Tien Shan area in the year 1945. *J Arid Environ*, 2010, 74: 1225–1231
- 34 Yuan Y J, Jin L Y, Shao X M, et al. Variations of the spring precipitation day numbers reconstructed from tree rings in the Urumqi River drainage, Tianshan Mts. over the last 370 years. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 1507–1510
- 35 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235 a 气候变化及降水趋势预测. *中国沙漠*, 2008, 28: 803–808
- 36 Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J Geophys Res*, 2006, 111: D12106, doi: 10.1029/2005JD006548
- 37 Qian W H, Qin A. Precipitation division and climate shift in China from 1960 to 2000. *Theor Appl Climatol*, 2008, 93: 1–17
- 38 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响. *干旱区地理*, 2002, 25: 194–200
- 39 郭妮, 张杰, 梁芸. 西北地区近年来内陆湖泊变化反映的气候问题. *冰川冻土*, 2003, 25: 124–127
- 40 Li J P, Zeng Q C. A new monsoon index and the geographical distribution of the global monsoons. *Adv Atmos Sci*, 2003, 20: 299–302
- 41 Wang B, Ding Q H. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L06711, doi: 10.1029/2005GL025347
- 42 Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. Inter-decadal variation of the summer precipitation in east China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences. *Int J Climatol*, 2008, 28: 1139–1161
- 43 曾昭美, 严中伟, 叶笃正. 20 世纪两次全球增暖事件的比较. *气候与环境研究*, 2003, 8: 319–330
- 44 李丽娟, 王斌, 周天军. 外强迫因子对 20 世纪全球变暖的综合影响. *科学通报*, 2007, 52: 1820–1825
- 45 王劲松, 陈发虎, 靳立亚, 等. 亚洲中部干旱区在 20 世纪两次暖期的表现. *冰川冻土*, 2008, 30: 224–233
- 46 Raziei T, Bordi I, Pereira L S. A precipitation-based regionalization for western Iran and regional drought variability. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2008, 12: 1309–1321
- 47 Jin L Y, Chen F H, Morrill C, et al. Causes of early Holocene desertification in arid central Asia. *Clim Dyn*, 2011, doi: 10.1007/s00382-011-1086-1
- 48 Trenberth K E, Shin W T K. Quasi-Biennial fluctuations in sea level pressure over the Northern Hemisphere. *Mon Weather Rev*, 1984, 112: 761–777
- 49 Rasmusson E M, Wang X, Ropelewski C F. The biennial component of ENSO variability. *J Mar Syst*, 1990, 1: 71–96
- 50 李崇银, 龙振夏. 西太平洋副高活动与平流层 QBO 关系的研究. *大气科学*, 1997, 21: 670–678
- 51 Sathiyamoorthy V, Mohanakumar K. Characteristics of tropospheric biennial oscillation and its possible association with the stratospheric QBO. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 669–672
- 52 丁裕国, 余锦华, 施能. 近百年全球平均气温年际变率中的 QBO 长期变化特征. *大气科学*, 2001, 25: 89–102
- 53 王绍武. 北半球 500 毫巴月平均环流特征及演变规律的研究西风指数. *气象学报*, 1963, 33: 361–374
- 54 王澄海, 崔洋. 西北地区近 50 年降水周期的稳定性分析. *地球科学进展*, 2006, 21: 576–584