

近十几年新疆水汽源地变化特征*

戴新刚^{1,2} 李维京² 马柱国¹

1. 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

2. 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 提出确定新疆水汽源地的原则和步骤, 用 ERA-40 再分析资料计算了新疆至大西洋沿岸对流层 4 个季节典型月份的定常水汽输送场, 结合大气可降水量分析了气候意义上新疆的主要水汽源地及近十几年的变化. 研究表明新疆的水汽主要来自其以西的湖泊或海洋, 1, 4 月的水汽源地是里海和地中海; 7 月是北大西洋和北冰洋; 10 月是黑海和里海. 再分析资料和观测资料分析都发现, 1987 年后随着全球增暖, 7 月和 1 月中高纬度行星尺度大气的水汽含量增加, 地中海所在纬度带减少; 新疆上空的水汽更多地直接来自于较高纬度带, 来自地中海所在纬度带的水汽输送减少了.

关键词 全球增暖 新疆水汽源地 水汽输送 可降水量 ERA-40

20 世纪 70 年代末的全球大气环流年代际突变和 80 年代以来的全球快速增暖构成了近 20 多年气候变化的大背景^[1-3]. 卫星观测发现这一时期北方变绿 (greening), 初级生产率 (NPP) 有增加的趋势^[4]. 这是高纬度增暖明显、降水增加、物候期延长的必然结果. 在此背景下 80 年代后我国新疆维吾尔自治区的降水也呈现增加的趋势^[5]. 新疆地处欧亚大陆腹地, 群山环绕、远离海洋, 属于大陆干旱、半干旱气候区, 除了极少数境外流入的河流 (如伊犁河) 外, 其水资源几乎完全靠降水补充. 张学文曾用新疆的气象、水文和科考等资料研究了新疆的水资源和水分循环问题^[6], 计算出的新疆上空年水汽通过量约为 1×10^{13} t, 年降水总量达 2.4×10^{12} t, 约占通过水汽量的 24%. 新疆上空的水资源会随着气候的波动而变化. 随着全球增暖, 新疆的气温上升^[7]、山地冰川退缩^[8]、河川径流增加^[9]、湖泊面积增大^[10]. 这和近 20 多年华北的严重干旱形成了鲜明的对照^[11, 12]. 一些研究据此推测中国西

北西部的气候可能正从暖干型向暖湿型转变^[13, 14].

新疆降水增加同大气环流年代际变化及全球增暖^[15]的关系需要深入研究. 这里既有动力学上的原因, 如定常波或瞬变波变化, 也有水汽条件的改变, 如水汽输送场和水汽源地的变化等. 本文主要研究近 14a 新疆水汽源地的变化及其同全球年增暖和年代季变化的可能联系.

1 降水变化

中国气候中心给出的 160 个标准气象站中有 12 个属于新疆维吾尔自治区, 依次是库车、喀什、和田、且末、若羌、乌鲁木齐、伊犁、塔城、阿勒泰、乌苏、吐鲁番和哈密等站. 1958—2000 年平均的单站月降水量呈现双峰分布, 降水最多的 3 个月是 5—7 月, 其中 7 月是峰值; 另一个峰值出现在秋季的 10 月. 这同受季风影响的华北降水明显不同. 从 1951—2004 年新疆年降水量演变曲线 (图 1) 可以看出, 存在明显的年代际变化: 50 和 60 年代初降

2005-12-15 收稿, 2006-05-15 收修改稿

* 中国气象局气候变化专项基金 (CCSF2005-2-QH34)、国家重点基础研究发展规划项目 (2006CB400504) 和中国科学院知识创新工程重要方向项目 (编号: KZCX3-SW-229) 联合资助

E-mail: daixg@tea.ac.cn

水偏多, 60年代中直至70年代末偏少, 80年代中期开始明显增加. 夏季和冬季降水量也存在类似的演变规律.

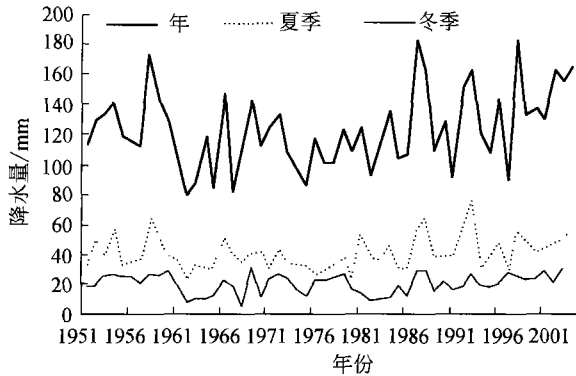


图1 1951—2004年新疆年、夏季和冬季降水演变

Yamamoto 突变检验^[16]表明, 当平均时间尺度取 14—18a 时, 夏季 7 月和冬季 1 月的突变点几乎都位于 1987 年; 当平均的时间尺度增加到 20a 和 21a 时, 突变点在 1979 或 1980 年左右. 不过这些突变点均未通过 0.05 信度的显著性检验. 1987—2000 年相对于 1973—1986 年的降水距平百分率显示(见表 1), 夏季 7 月和冬季 1 月降水增加最明显, 分别达 74% 和 49%.

表 1 1987—2000 年相对于 1973—1986 年的降水距平百分率

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水距平/%	49	-3	22	10	28	4	74	56	-8	25	19	46

2 水汽源地问题

水汽源地本身是一个难以准确定义的概念, 因为存在直接水汽源地和间接水汽源地问题. 任何向大气有净水汽输送的下垫面都可以视为大气的水汽源地. 在通常意义下, 新疆的水汽源地主要指上游距离较近的海洋和大的湖泊, 它们的水汽可以通过大气环流输送到新疆境内.

水汽输送可以分解为平均经圈环流输送、定常波输送和瞬变波输送 3 个部分. 对中高纬度而言, 第 1 部分并不重要; 一般瞬变涡动水汽输送比定常波水汽输送小得多^[17], 大小还同速度扰动与比湿扰

动的相关性有关, 其输送方向基本垂直于风暴路径, 通常指向北方¹⁾. 其次, 每一次瞬变天气系统的水汽源地都可以不一样. 因此不宜用瞬变涡动水汽输送确定水汽源地. 第 2 部分定常涡动水汽输送的模式同大气比湿和平均风速成比例, 输送方向即是气候平均气流的方向, 以此可以比较清楚地定义气候意义下的水汽源地.

此外, 某一水面能否成为大气水汽源地还取决于其上空大气的热力状态和动力结构, 即要有利于蒸发的水汽输送到大气中. 因而气候平均水汽源地上空应该是可降水量的极大值区域. 可降水量定义为单位截面整层大气柱中所含水汽全部凝结成雨的深度(mm). 本文使用质量单位, 如千克(kg)或克(g).

确定新疆水汽源地具体可以分为如下 5 个步骤:

- (1) 计算出气候平均意义下对流层(地面至 300 hPa)定常水汽输送场;
- (2) 绘出该矢量场的水汽输送流线图;
- (3) 选出穿过新疆境内的流线并沿这些流线寻找上游较大(资料可分辨)的湖面或海洋;
- (4) 剔除那些水面上空大气可降水量不是极大值的水系;
- (5) 选出最近和次近的湖泊或海洋, 将其定义为新疆的水汽源地.

3 新疆的水汽源地

气候平均的新疆水汽源地可以用上节叙述的方法从定常水汽输送场和大气可降水量场上加以识别. 首先用欧洲数值预报中心(ECMWF) 2.5° × 2.5° 分辨率再分析资料 ERA-40^[18] 计算出 1, 4, 7, 10 月份的对流层(地面至 300 hPa)定常水汽输送场, 计算方法同 Simmonds 等^[17]; 然后将 1980—2000 年气候平均的水汽输送场和大气可降水量场绘制在同一张图上(见图 2)进行分析.

从图 2(a)中可以看到, 春季 4 月份新疆上空大气的可降水量小, 西面的欧洲大陆南部相对较高; 地中海、黑海和里海周围都是可降水量的极大值区域, 是春季大气的水汽源地. 新疆上空的定常水汽

1) 赵瑞霞. 中国长江、黄河流域水分收支与水分循环. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 北京, 2005

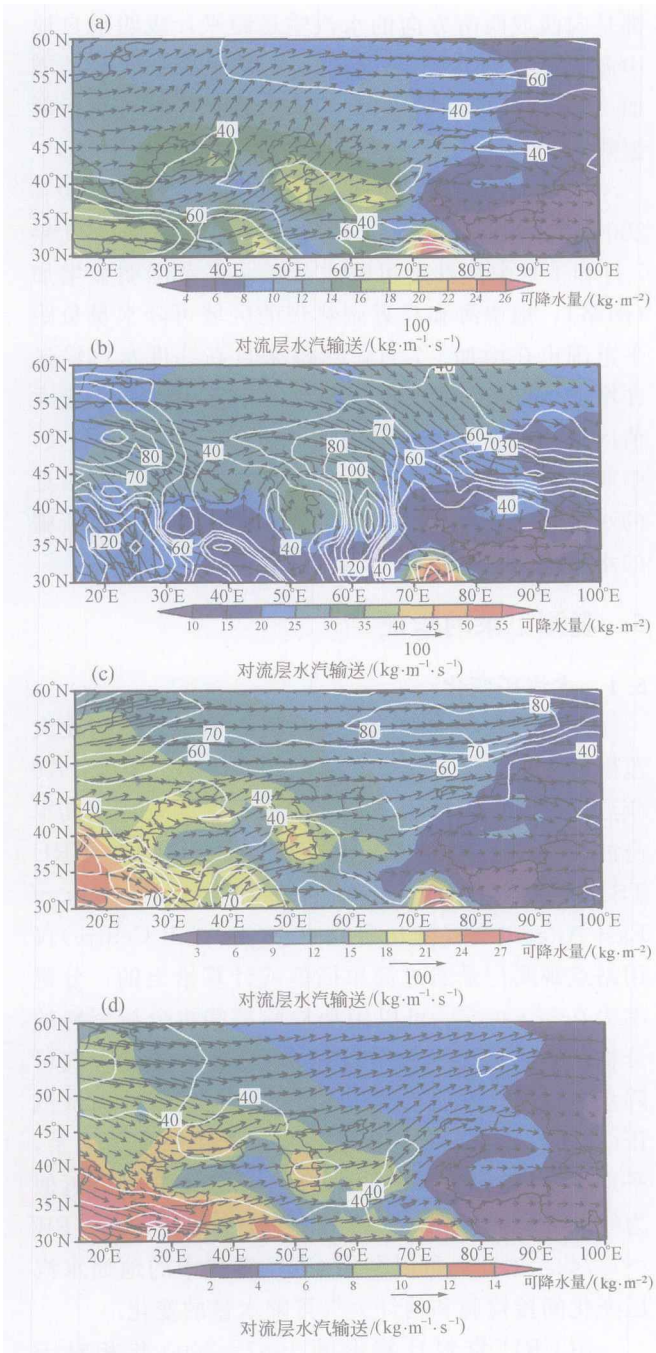


图2 ERA-40计算的1980—2000年月平均地面至300 hPa定常水汽输送场和大气可降水量场
图中白色曲线是水汽输送矢量模的等值线
(a) 4月; (b) 7月; (c) 10月; (d) 1月

输送场主要是自西向东的, 根据流线跟踪法不难发现里海和地中海都在通过新疆和巴尔喀什湖周围的水汽输送带路径上, 因此是新疆春季的水汽源地。

夏季7月, 副热带高压北上控制了地中海及其

周边地区, 副高中的下沉气流不仅干燥, 而且抑制了地中海水汽向大气的传输, 在可降水量场上表现为地中海及其东侧是相对小的带状区域(图2(b)). 相反, 在大陆中高纬度可降水量相对较大, 里、黑海上空仍是极大值区域, 含水汽量丰富. 但从定常水汽输送场上看, 欧洲中南部大部分地区的水汽输送几乎都有偏南分量; 在新疆西侧的中亚地区还存在一条由北向南的水汽输送极大带, 中心输送值达到 $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上. 这条向南水汽输送带阻挡了其西面地中海、黑海和里海水汽向新疆境内的输送, 使得它们不能成为7月新疆的水汽源地. 7月是新疆降水最多的季节, 不仅其上空的大气可降水量达到最大, 而且水汽输送也最强, 极大值超过 $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 用水汽输送流线跟踪法可以发现7月由西侧进入新疆的水汽主要来自欧洲大陆高纬度, 进一步跟踪可以发现来自大西洋和北冰洋. 它们就是新疆7月的水汽源地。

秋季10月地中海上空又变成大气可降水量的极大值区域(图2(c)), 但其上空的水汽输送方向指向东南, 因而不是新疆的水汽源地. 里海和黑海依然是可降水量的极大值区域, 而且大气水汽含量高于春季. 新疆及其西侧的可降水量超过了春季. 用水汽流线跟踪法可以知道黑海和里海是10月新疆的水汽源地。

冬季1月地中海上空是可降水量的极大值区域(图2(d)). 显然, 这就是地中海气候, 冬季温暖潮湿. 众所周知, 平均而言冬季地中海为一低压区, 在每日天气图上可以看到气旋很活跃, 非常有利于水面蒸发的水汽向大气输送. 此外, 黑海和里海也是可降水量的极大值区. 从地中海上空, 经欧洲南部到里海、中亚南部、再到西伯利亚, 是一条清晰的水汽输送极大通道, 地中海和里海正处在这条水汽输送带上. 因此新疆1月的水汽源地是里海和地中海。

此外, 为比较起见, 我们还用美国环境预报中心(NCEP)提供的第二套再分析资料 NCEP-II^[19], 就新疆的水汽源地问题做了同样的计算分析, 结果不变。

4 水汽源地的年代际变化

根据前面的计算, 新疆季节降水演变在1986/1987年发生了一个时间尺度约14a的年代际突变。

考虑到影响降水变化的因子很多,本文只选取降水变化最显著的夏季7月和冬季1月,分析水汽源地的年代际变化.用1987—2000年气候平均定常水汽输送场减去前14a的,得到其年代际变化(见图3).注意到水汽输送变化比其本身量级小,分析其变化必须结合气候平均输送场(图2)进行.

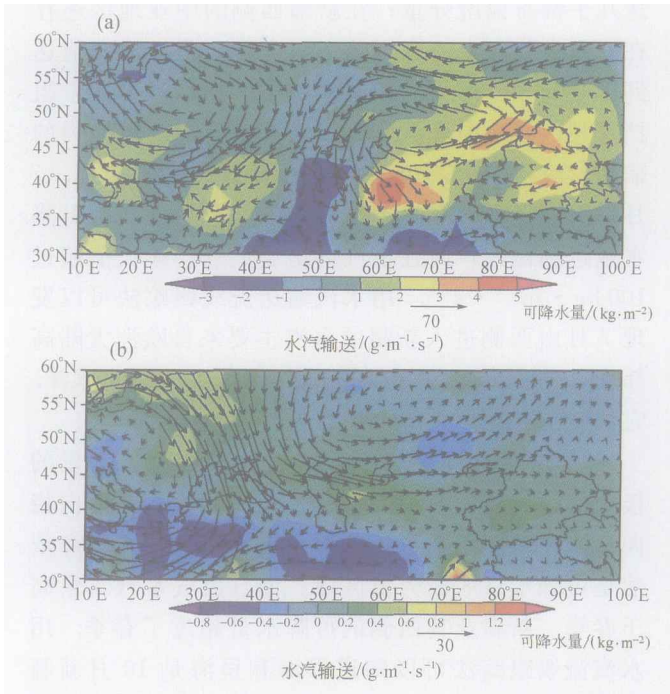


图3 ERA-40再分析资料计算的1987—2000年相对于1973—1986年对流层地面至300 hPa定常水汽输送和大气可降水量距平场
(a) 7月; (b) 1月

夏季7月,可降水量增加的几个极大值区域几乎都位于新疆和其西侧的中亚地区,中亚上空出现一条向新疆的水汽输送距平带(图3(a)),导致进入新疆北部和南部的的水汽输送都增加了;从我国西北东部进入塔里木盆地的水汽输送也明显增加了.这些变化有利于7月新疆的局地对流性降水和大尺度降水.从更大范围来看,参考图2(b),可以知道来自西西伯利亚水汽输送减少,来自欧洲北部的水汽输送增加.

冬季1月,从北欧到里海,再到新疆是一条水汽输送距平带,同时也是一条可降水量增加带(图3(b)),其输送方向同气候平均水汽输送场(图2(d))比较接近,加强了欧洲东北部和向新疆的水汽输送.地中海以及里海南部大气可降水量减少且

都是向西或西南方向的水汽输送距平,表明来自地中海的水汽输送减少,来自中高纬度水汽输送增加.显然,可降水量和水汽输送距平场都有利于新疆降水.

当平均的时间尺度进一步延长时,例如1980—2000年平均减去1959—1978年平均,发现近20年7月和1月中高纬度可降水量正距平范围明显增加(图略),地中海和靠近副热带的区域可降水量负距平范围也在增加.7月,新疆来自高纬度水汽输送在增加;1月可降水量距平场上中亚出现一个极大值区域,水汽输送距平场相对于图3(b)变化不大,中亚和新疆的水汽多来自于欧洲北部;地中海附近的水汽输送距平仍然是向西或向西南方向,向新疆的水汽输送减少.

5 观测记录的验证

5.1 水汽压变化

再分析资料ERA-40揭示的近14a中高纬度大范围可降水量增加需要观测记录的印实.因为1979年后再分析资料使用了更多的卫星遥感资料,其本身的非一致性可能造成虚假的年代际变化. CRU TS2.0资料是英国东安格利亚大学(University of East Anglia)气候变化研究中心(Tyndall Centre)仅用站点观测记录通过简单插值或计算给出的,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,可以用来检验某些再分析资料的分析结果.然而,在CRU格点资料中没有大气可降水量,但有地面水汽压.已有研究发现地面水汽压(e)和可降水量(PW)之间存在很强的相关关系,平均相关系数达0.93^[20,21];回归分析发现两者近似为线性关系.张学文^[21]给出了一个近似关系式: $PW = 1.74e$.据此,可以利用CRU资料中的地面水汽压变化间接检验和估计大气可降水量的变化.

用CRU资料计算出的1987—2000年相对于1973—1986年的地面水汽压的差值(或距平)场(图4(a), (b)),基本证实了用再分析资料分析的可降水量变化结果(图3).例如近14a,夏季7月新疆附近的几个正距平中心(图4(a)),高纬度大范围的水气压正距平,及中亚南部、西北欧、里海附近的负距平等.只是在地中海东侧两者的符号不一致.冬季1月的水汽压年代际距平几乎都为正(图4(b)),西北欧、里、咸海、中亚和新疆上空的水气压正距

平极值区均与图3(b)对应;虽然水汽压负距平极值区同可降水量负距平极值大致对应,但可降水量负

距平区范围比水汽压大,如50°E—100°E高纬度、地中海所在纬度带等。

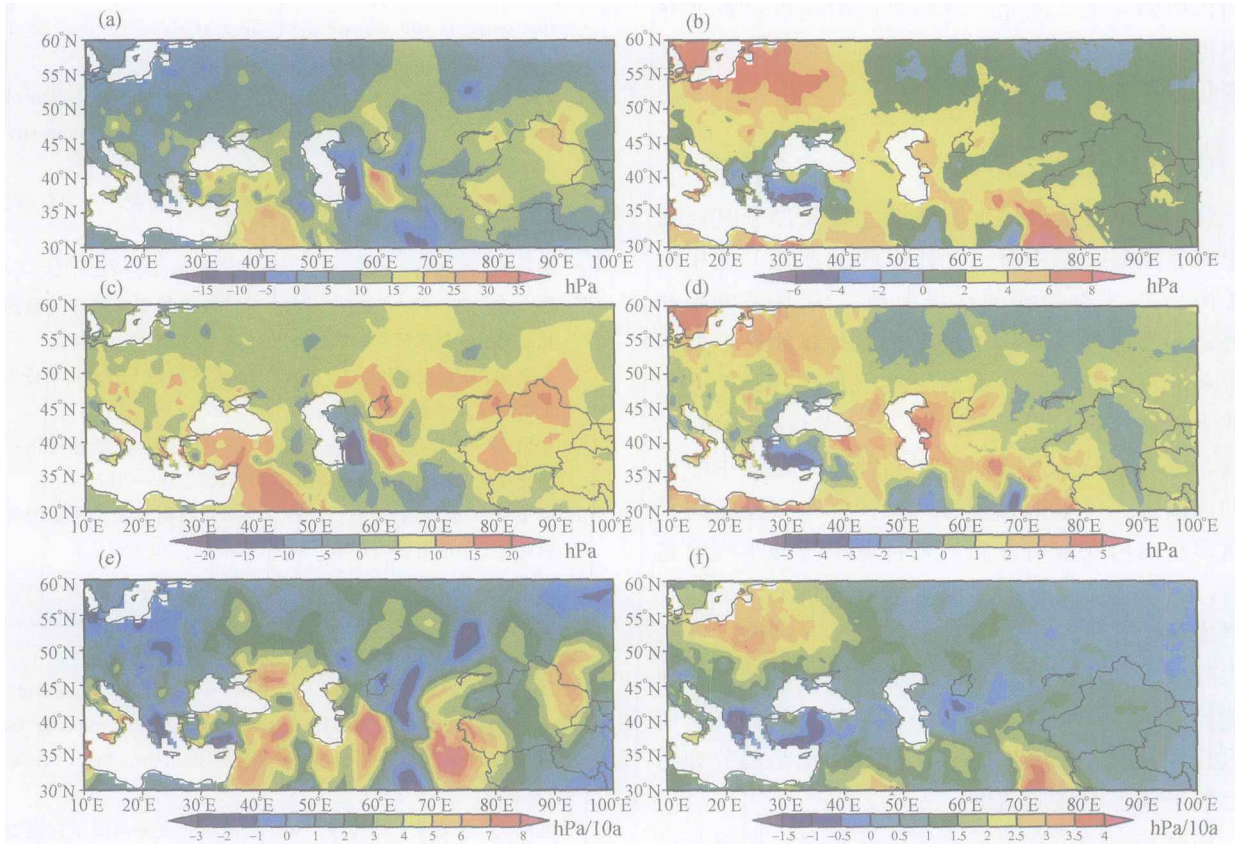


图4 CRU TS2.0资料计算的1987—2000年相对于1973—1986年地面水汽压年代际变化及1958—2000年趋势 (a), (b): 7月和1月年代际变化; (c), (d): 去趋势后的年代际变化; (e), (f): 7月和1月水汽压趋势

5.2 趋势和年代际变化

大范围地面水汽压的增加可能与全球增暖有关。水汽压是温度的指数函数,对全球增暖的响应比温度要敏感得多。在计算图4(a), (b)时包含了水汽压的趋势部分。为了考察趋势变化(trend)和单纯年代际变化对近14a地面水汽压增加的贡献,先去趋势变化,再计算年代际变化或差异,计算结果再同图4(a), (b)进行比较。

7月去除趋势后水汽压年代际变化同图4(a)比较类似,几乎整个绘图区域都是正距平(图4(e));新疆附近、威海附近及地中海东侧几个大的正距平中心和里海的负距平中心都同图4(a)对应。7月趋势的分布(图4(e))也同图4(a)类似,大多数正趋势区都同图4(c)中正距平区域对应,新疆周围也都是正趋势。比较图4(a), (c), (e)不难发现,图4(c)

在中纬度更相似于图4(a);图4(e)在高纬度和地中海所在纬度带更相似于图4(a)。可见,7月大范围水汽压增加主要是年代际变化的贡献;新疆和乌拉尔山附近大的水汽压正距平都是年代际变化和增湿趋势叠加增强的结果。

1月,去除趋势的年代际变化(图4(d))在中纬度同图4(b)很相似,例如在西北欧,里、威海附近和中亚南部两者都是大的正距平区域;但在45°E—90°E的高纬度和新疆境内不一致,出现了负距平;在1月趋势图(图4(f))中,高纬度几乎都是增湿趋势;在中纬度地中海、里海和威海一带出现负趋势,新疆也是正趋势。因此,图4(a)中新疆及高纬度大范围的增湿主要是增湿趋势的作用,这同高纬度快速增暖是一致的;中纬度大的正距平带主要是年代际变化的贡献。

总之,近14a 1月和7月对新疆有利的地面水汽压或可降水量场的形成是年代际变化和增湿趋势共同作用的结果。因此,新疆水汽源地重要性北移的原因主要是高纬度快速增暖增湿和大气环流年代际变化造成的。

6 结论和讨论

综上所述,新疆的水汽源地主要是位于其西面的里海、黑海、地中海、大西洋和北冰洋。地中海和里海是1,4月新疆的水汽源地;10月是黑海和里海;北大西洋和北冰洋是夏季7月新疆的主要水汽源地。近14a,冬季和夏季典型月1月和7月份欧亚大陆高纬度行星尺度大气可降水量都增加了,导致新疆更多的水汽来源于较高纬度。而地中海所在的纬度带大气水汽含量有所减少,水汽输送距平矢量多指向西或偏南方向,来自地中海的水汽输送减少。基于观测资料的地面水汽压分析不仅证实了可降水量的分析结果,而且发现近14a高纬度大尺度大气水汽含量的增加主要是增湿趋势造成的,即可能同全球增暖、特别是高纬度快速增暖有关。而水汽压距平场上的极大极小值区域往往是趋势和年代际距平同号增强的结果。

中高纬度增湿有着重要的气候意义。即便是气候风场不变,来自较高纬度的水汽输送也会增加。因此随着全球增暖,北方的水汽源地会变得更加重要。与此同时,欧洲南部上空大气的水汽含量在减少,来自地中海和较低纬度的水汽输送减少,地中海作为新疆水汽源地的重要性在降低。从中高纬度向新疆输送水汽更直接、效率更高。高纬度的增湿还有利于来自高纬度的天气扰动增湿、增强,并携带更多的水汽进入新疆增加降水。因此,即使大气环流结构不变,全球增暖也可能使远离海洋的新疆获得更多的水汽和降水。

显然,仅用定常水汽输送场和水汽源地的变化解释近14a新疆降水增加的气候事件是不够的,瞬变涡动水汽输送在新疆气候转变中可能亦十分重要,需要进一步加以研究。

参 考 文 献

- 符淙斌,王强. 南亚夏季风气候的突变现象及其与全球迅速增暖的同步性. 中国科学, B辑, 1991; 666—672
- Mann M E, Amman C, Bradley R S, et al. On past temperatures and anomalous late-20th century warmth. EOS, 2003, 84(27); 256
- Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate over the past six centuries. Nature, 1998, 392; 779—787
- Lucht W, Prentice I C, Myneni R B, et al. Climate control of the high-latitude vegetation greening trend and Pinatubo effect. Science, 2002, 296; 1687—1689
- 王娇,任宜勇. 新疆降水与环流场演变研究. 干旱区研究, 2005, 22(3); 326—331
- 张学文. 新疆的水源问题. 自然杂志, 1988, 10(8); 597—600
- 薛燕,韩萍,冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势. 干旱区研究, 2003, 20(2); 127—130
- 焦克勤,王纯足,韩添丁. 天山乌鲁木齐河源1号冰川新近出现大的物质负平衡. 冰川冻土, 2000, 22(1); 62—64
- 张国威,吴素芬,王志杰. 西北气候转型信号在新疆河川径流变化中的反映. 冰川冻土, 2003, 25(2); 183—187
- 胡汝骥,马红,潘自立,等. 近期新疆湖泊变化所示的气候趋势. 干旱区资源与环境, 2002, 16(1); 20—27
- Dai X G, Wang P, Zhang P, et al. Rainfall in North China and its possible mechanism analysis. Progress in Natural Sciences, 2004, 14(7); 598—604
- Dai X G, Wang P, Chou J F. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(24); 2730—2734
- 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2); 152—164
- 章名立,曾昭美,季劲均. 全球增暖过程中亚洲东部区域气候的特点. 地理学报, 1996, 51(5); 518—526
- Johannessen O M, Bengtsson L, Miles M W, et al. Arctic climate change: Observed and modeled temperature and sea-ice variability. Tellus, 2004, 56(A); 328—341
- 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999, 66—68
- Simmonds I, Bi D, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer. J Climate, 1999, 12(5); 1353—1367
- Bromwich D H, Fogt R L. 2004; Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR reanalyses in the high and midlatitudes of the southern hemisphere, 1958—2001. J Climate, 2004, 17(23); 4603—4619
- Kanamitsu, Masao, Wesley Ebisuzaki, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). Bull Amer Meteor Soc, 2002, 83(11); 1631—1643
- 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
- 张学文. 可降水量与地面水汽压力的关系. 气象, 2004, 30(2); 9—11