

文章编号: 1008-2786-(2018)6-844-13

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000380

天山山脉对流层位温、混合比及抬升指数 时空变化与机制

石 强

(1. 海洋溢油鉴别与损害评估技术国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266033; 2. 国家海洋局北海环境监测中心, 山东 青岛 266033;
3. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266033)

摘 要: 天山山脉对流层大气温湿要素的季节与长期变化, 是研究新疆区域气候与资源环境的基础。根据 1976—2017 年期间天山山脉周围 6 个气象站探空观测资料, 采用时空分析等方法, 研究了天山山脉对流层中标准层月平均假相当位温、混合比以及抬升指数季节与年际时空变化与机制。各层假相当位温季节与年际变化存在 2 种时空模态, 850 hPa 层假相当位温模态季节周期变化以非对称型分量为主, 700、500、400 hPa 层假相当位温模态季节周期变化为准对称型分量。各层假相当位温模态垂直传播过程存在绝热与非绝热形态。各层混合比季节与年际变化存在 2、3 种时空模态, 850、700 hPa 层混合比模态季节周期变化以准对称型分量为主; 500、400 hPa 层混合比模态季节周期变化以非对称型分量为主, 各层混合比模态季节与年际变化的主要影响机制是水汽蒸发-凝结、输送过程, 并且季节周期变化位相从低层传播至高层。抬升指数季节与年际变化存在 2 种时空模态, 天山南坡地区 7—9 月份; 北坡地区 5—6 月份大气层结状况最易于发生强对流天气。天山山脉对流层热湿结构年际变化出现显著线性趋势变化, 目前天山山脉对流层热湿结构和大气不稳定层结易于发生异常旱涝灾害以及冰雪消融。

关键词: 天山山脉; 对流层; 假相当位温; 混合比; 抬升指数; 时空模态

中图分类号: P732

文献标志码: A

天山山脉横贯新疆东西, 塔里木盆地、准噶尔盆地分立天山山脉南北两侧, 盆地南北由昆仑山、阿尔泰山夹持, 由此形成了气候特征有别的南疆与北疆地域。自 20 世纪 60 年代至 21 世纪初, 新疆地区地面年平均最高、最低气温以及年降水量呈现上升趋势, 并且在不同地区发生跃升突变, 其中北疆和天山山区年降水量发生跃升突变, 而南疆年降水量没有发生突变^[1,2], 大气水汽含量和低云量增多是主要原因^[3]。同时新疆地区季节性旱涝灾害也出现趋势性变化, 干旱灾害有扩大趋势, 且新疆东南部比西北部严重, 洪涝灾害有减轻趋势, 而南疆地区的旱涝灾害出现频率较大^[4]。新疆地区对流层中下层大

气在水汽输送和降水量增加的作用下, 自 1980 年代后从暖干转为暖湿, 2005 年后大气环流改变所导致的水汽输送减少导致有变暖干的趋势, 并且北疆对流层中低层增温速率高于南疆^[5]。

天山山脉冰川、积雪是新疆的主要水源地, 也是融雪洪水、雪崩等灾害的发源地^[6-7], 山脉附近对流层作为天山水汽主要水平输送通道, 大气的动力-热力过程对其有重要影响, 对流层低、中层大气环流受山体阻挡形成了绕流、翻山流以及强垂直对流等复杂局地运动, 这些扰动使得山脉附近对流层大气热-湿过程复杂多变^[8]。虽然天山山脉对流层大气温湿要素与地面温湿要素有显著线性相关

收稿日期(Received date): 2018-03-28; 改回日期(Accepted date): 2018-11-26

基金项目(Foundation item): 海洋溢油鉴别与损害评估技术国家海洋局重点实验室项目(2015010)。[Key Laboratory of Marine Spill Oil Identification and Damage Assessment Technology, SOA(2015010)]

作者简介(Biography): 石强(1958-), 男(汉), 山东青岛人, 研究员, 主要研究方向: 海洋与气候变化。[SHI Qiang (1958-), male, professor, research on oceans and climate change] E-mail: shiqiang_soa@126.com

性^[5,9-10],但是,天山山脉对流层大气温度非绝热过程、水汽凝结与输送作用将比地面复杂,对流层中南疆、北疆的温湿要素季节与年际变化中既有局地影响分量,也有相互影响分量。由于对流层中位温、混合比具有绝热守恒和水汽重量特征,两种要素避免了气压随高度变化对温度、水汽的影响作用,比温度、相对湿度要素有更好的物理机制意义。因此,采用地面与探空观测温度、相对湿度资料计算平均值趋势的研究方法难以揭示对流层中温湿要素季节、年际变化的时空关系和物理机制^[5,9-10]。本文收集近40 a来天山山脉周围6个气象站探空观测资料,采用时空分析、调和分析等方法,分析了气压标准层月平均假相当位温、混合比以及抬升指数的季节与年际时空变化与影响机制,增进了对天山山脉对流层大气温湿结构季节与长期变化的认识。

1 资料与方法

1.1 资料来源

每日定时探空资料来自两个时期:1976年1月1日—1981年12月31日(前期);2012年1月1日—2017年12月31日(后期),观测站位为:阿富汗的喀布尔机场站(海拔1791 m)、哈萨克斯坦的江布尔站(海拔642 m)、喀什(海拔1291 m)、库车(海拔1099 m)、伊宁(海拔664 m)、乌鲁木齐(海拔919 m)站(图1)。观测层为:850、700、500、400 hPa,分析要素为经过质量控制处理的假相当位温、混合比、抬升指数月平均值。资料来自探空资料国际交换网。由于喀布尔机场站高度高于850 hPa,该站850 hPa层观测值为缺测。

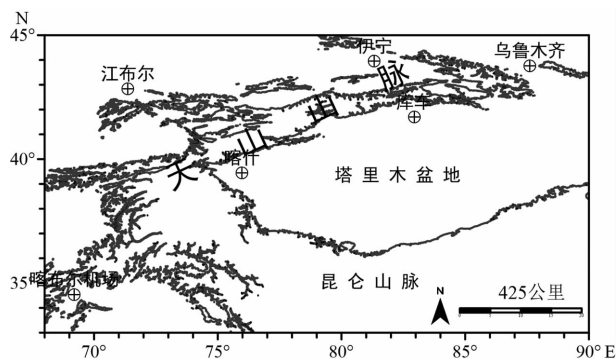


图1 观测站位与天山山脉3100 m等高程线

Fig. 1 Observation stations and 3100 m contour of the Tianshan Mountains

1.2 分析方法

对资料距平值数据矩阵采用旋转经验正交函数(REOF)分析可以解释数据矩阵时空变化的主要影响机制,REOF方法比经验正交函数(EOF)方法能更好地解释数据矩阵的局地时空特征和机制,因此,REOF方法是比EOF方法更优的时空变化机制分析工具。非线性相关系数是表达要素之间非线性过程的度量值,又称广义相关。数据时间序列显著季节周期调和函数可以提取数据中季节周期分量调和常数,并可以根据调和常数将这种周期分量延拓至任意时间阶段,是分析时间序列显著周期分量的有效工具。季节周期分量FR值判别可以区分周期分量在数据变化中的权重大小,上述方法详细介绍见文献[11-13]。

2 结果与分析

2.1 假相当位温、水汽比湿与抬升指数年平均分布

气体假相当位温(简称:位温)是在干、湿绝热和假绝热过程中均具有守恒性的综合物理量,可以用于气团、锋面分析。当气体假相当位温正变率时,气体中有热量输入;相反,气体中热量消耗,气体假相当位温零变率时,气体变化是绝热的^[14]。天山山脉南坡站位温高于北坡,由于地形隧道效应,乌鲁木齐站的位温最低(见表1)。在850~400 hPa之间,乌鲁木齐站对流性稳定度指数^[14](上下层位温差值)最大(7.2℃),周围5个站点平均的年平均对流稳定度指数^[12]较小(6.3℃),并且各层位温分布显著空间相似($r=0.97\sim1.00$)(见表1)。

在850 hPa与700 hPa;500 hPa与400 hPa层之间混合比空间分布显著相似($r_1=0.85, r_2=0.91$),混合比分布为垂直两层结构,由于地形隧道效应,乌鲁木齐站混合比最低(见表1)。各站年平均水汽含量在850 hPa层占各站总量的48%~52%;700 hPa层占各站总量的31%~34%,喀布尔站为67%;500 hPa层占各站总量的10%~15%,喀布尔站为24%;400 hPa层占各站总量的4%~6%,喀布尔站为8%。因此,天山山脉地形对大气年平均热湿分布有显著影响,山体遮挡地形有利于形成年平均高温、高湿环境,位于山口地形的乌鲁木齐站周围是一个干冷环境,850~700 hPa层之间年平均水汽含量

表 1 年平均假相当位温、混合比和抬升指数

Tab. 1 Annual mean pseudoequivalent potential temperature, mixing ratio and lifted index

项目	标准层	喀什	库车	乌鲁木齐	伊宁	江布尔	喀布尔机场
假相当位温/℃	400 hPa	45.5	43.7	41.6	41.6	42.1	49.7
	500 hPa	40.7	38.8	36.2	36.4	37.3	43.3
	700 hPa	33.0	30.9	27.5	28.1	29.3	36.0
	850 hPa	27.4	25.5	19.9	22.5	23.2	
混合比 /(g · kg ⁻¹)	400 hPa	0.49	0.41	0.36	0.34	0.37	0.43
	500 hPa	1.26	1.01	0.88	0.83	0.88	1.27
	700 hPa	2.64	2.52	2.46	2.50	2.83	3.50
	850 hPa	4.15	3.66	3.65	4.05	4.36	
抬升指数/℃	地面	6.2	7.4	9.9	7.7	7.8	4.6

约占对流层年平均总含量的 80% 左右。

抬升指数是一种对流性不稳定指数。它表示一个气块从观测地面出发,沿干绝热上升至抬升凝结高度后,再沿着湿绝热线上升到 500 hPa 处所具有的温度被该处实际大气温度所减得到的差值^[14]。当指数为负数时,表明气块比其环境温度更暖,因此将会继续上升;指数为正数时,表示大气层结稳定。各站年平均抬升指数南坡站小于北坡站,南坡站年平均发生强对流天气的大气层结条件优于北坡站(表 1)。

2.2 假相当位温季节与年际时空变化

根据模态空间型的载荷向量高值分布分型,850 hPa 层月平均位温模态空间型为南坡型(EOF1)与北坡型(EOF2)(图 2a),位温 EOF1 时间系数季节周期变化为非对称平台型,暖期大于冷期;EOF2 时间系数季节周期变化为对称单峰双谷型,冷暖期时间相同(图 2b),虽然天山山脉对低层大气运动阻挡作用明显,但是,天山山脉对流层下层位温仍然包含着两种相互影响的季节变化分量。按照周期分量权重判别方法^[13],模态时间系数序列中季节周期分量是主要分量($FR_1 = 0.94$, $FR_2 = 0.91$)(图 2c、2d),天山地形对大气环流冷暖气团阻挡以及下垫面热辐射作用是形成 2 种时空模态的主要机制。700 hPa 层位温模态空间型为南坡型(EOF1)与外围南坡型(EOF2)(图 3a),模态时间系数季节周期变化均为准对称单峰谷型(图 3b),模态时间系数序列中季节周期分量与线性趋势、脉动分量有相似权重($FR_1 = 0.80$, $FR_2 = 0.79$)(图 3c、3d),天山、昆仑山地形对冷暖气团阻挡作用以及下垫面热辐射是形成 2 种时空模态的主要机制。

500、400 hPa 层位温模态空间型为天山中部型(EOF1)与天山外围型(EOF2)(图 4a、5a),模态时间系数季节变化均为准对称单峰谷型(图 4b、5b),模态时间系数序列中季节周期分量与线性趋势、脉动分量有相似权重($FR = 0.80 \sim 0.85$)(图 4c、4d、图 5c、5d),天山、昆仑山地形扰动作用形成高空局地大气环流冷暖气团季节变化是形成 2 种时空模态的主要机制。

各层位温 EOF1 时间系数季节周期变化超前 2 月与 EOF2 显著相关($r = 0.79$ 、 0.97 、 0.97 、 0.92)。在 850 hPa 层,受地形阻挡与下垫面热辐射作用存在非对称季节变化位温模态,暖期大于冷期,6、4 个月周期谐波振幅较大(表略),700、500、400 hPa 层位温模态时间系数序列中季节周期变化是准对称的,年周期谐波分量为主(表略)。由于新疆气温年际变化发生了增温跃变^[1-3],各层位温模态年际变化分量可以明显改变位温模态季节周期变化形态。

为检验位温分析的合理性,取 2012 年 1 月 16—21 日新疆出现大范围寒潮过程进行分析。本次寒潮中,24 h 北疆最低气温降幅 $9^\circ\text{C} \sim 12^\circ\text{C}$,天山山区等地局部大雪,北疆风口出现 7 ~ 9 级西北风^[15]。同月,位温距平值最大降温在 700 hPa 层 EOF1(图 3c 箭头所指,下同);次大降温为 400 hPa 层 EOF1(图 5c);第三大降温为 500 hPa 层 EOF1(图 4c);850 hPa 层 EOF1、EOF2 距平值降温较小(图 2c、2d)。本次寒潮在对流层中层降温影响大于低层。2015 年 4 月 27 日天山一带自西向东出现强风沙天气,4 ~ 5 级西北风,阵风 6 ~ 9 级,极大风速 $17 \sim 28 \text{ m/s}$,能见度 $100 \sim 900 \text{ m}$ ^[16]。同月,位温

距平值最大变化在 500 hPa 层 REOF1 降温、REOF2 增温(图 4c、4d);次大变化在 700 hPa 层 REOF1 降温、REOF2 增温(图 3c、3d);最小变化在 850 hPa 层 REOF1 增温、REOF2 降温(图 2c、2d)。对流层中层冷暖气团交汇作用是产生本次强风沙天气的重要层结不稳定条件。

当各层月平均位温模态之间空间型显著相似;时间系数序列显著相关时,两种模态之间可能存在某种物理机制关系^[13]。各层位温 REOF1、REOF2 时间系数季节周期变化垂直对应模态同位相显著相关($r=0.69\sim0.98$),但是,只有 850、700 hPa 层之间位温 REOF1 空间型显著相似($r=0.97$),500、400 hPa 层之间位温 REOF1 和 REOF2 空间型显著相似($r_1=0.95$, $r_2=0.94$)。因此,在位温模态季节变化中,850、700 hPa 层之间位温 REOF1 以及 500、400 hPa 层之间位温 REOF1 和 REOF2 存在绝热垂直传播,而其他层次位温模态的垂直传播中非绝热作用为主。

由于对流层中温度是非保守变量,气压变化和绝热过程都能造成温度值的变化,采用计算垂直平均温度序列趋势研究增、减温的长期趋势并不能真实反映对流层的非绝热过程^[5,9-10]。大气假相当位

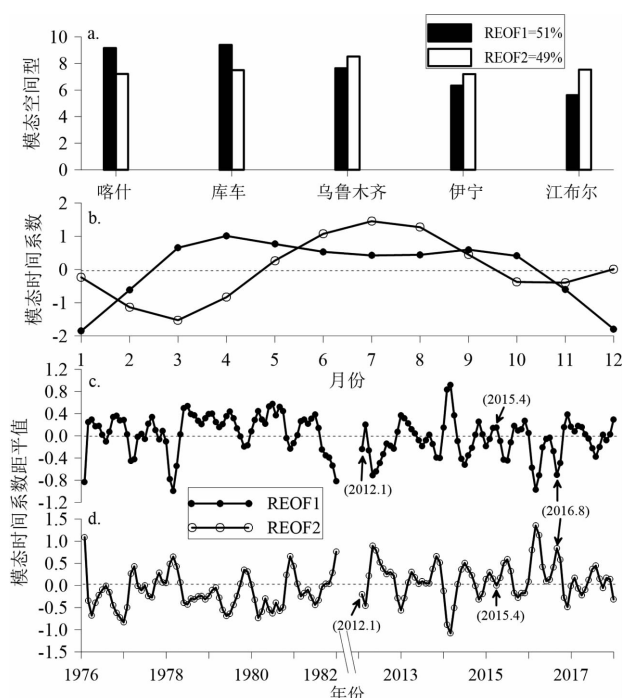


图 2 850 hPa 层假相当位温 REOF 模态

Fig. 2 REOF modes of pseudoequivalent potential temperature in 850 hPa layer

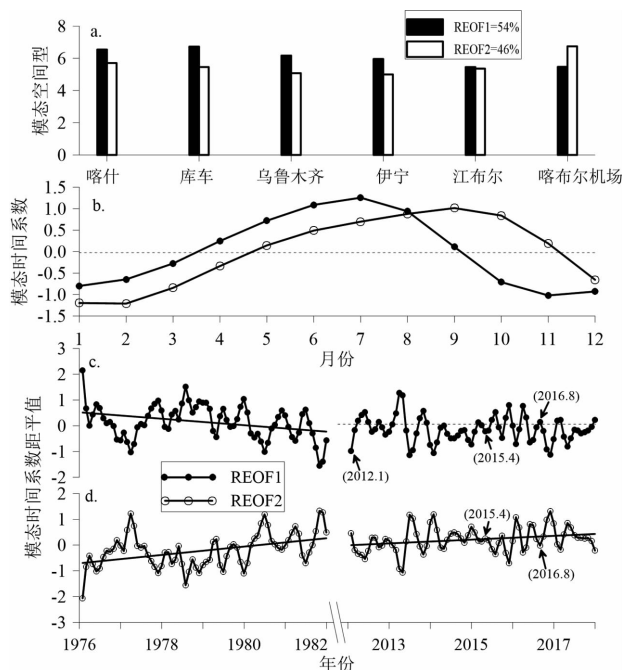


图 3 700 hPa 层假相当位温 REOF 模态

Fig. 3 REOF modes of pseudoequivalent potential temperature in 700 hPa layer

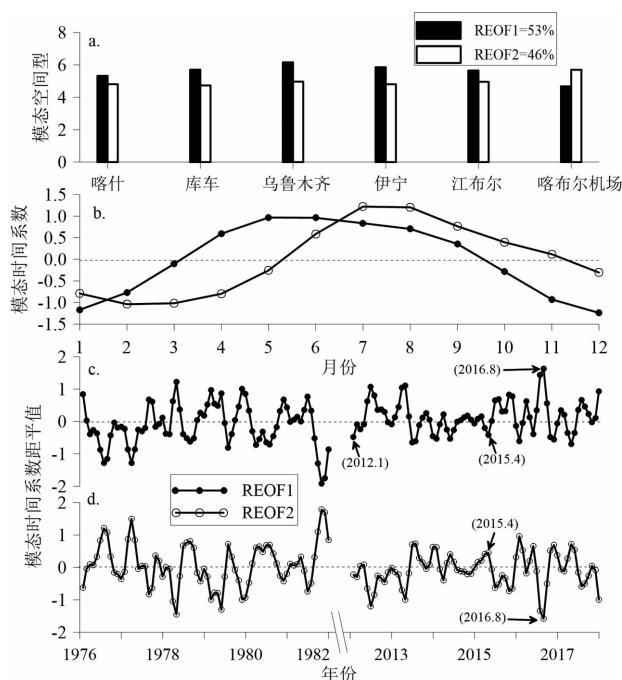


图 4 500 hPa 层假相当位温 REOF 模态

Fig. 4 REOF modes of pseudoequivalent potential temperature in 500 hPa layer

温是保守变量,位温可以真实反映大气热输入、输出过程^[14]。在位温年际变化中,夏季南、北疆各层位温模态时间系数距平值多数出现增温与降温的显著

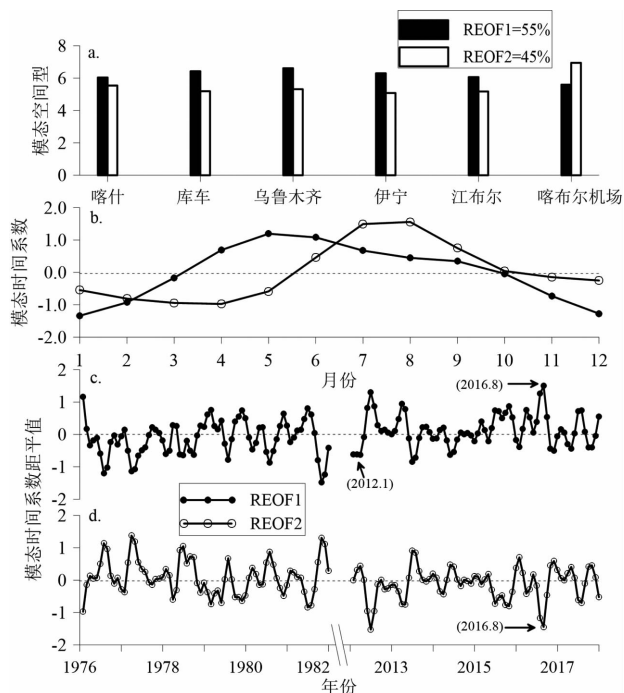


图5 400 hPa 层假相当位温 REOF 模式

Fig. 5 REOF modes of pseudoequivalent potential temperature in 400 hPa layer

线性趋势(图6b),冷暖气团交汇作用增大,强对流天气易于发生。冬季700、500、400 hPa 层北疆位温模态有显著线性热输入增温趋势,850 hPa 层南北疆冷暖反位相变化机会增大(图6d),易于发生暴雪等强对流天气或者干旱,但是冬季极端冷(暖)事件呈现减少趋势^[17]。春、秋季节各层位温模态时间系数距平值多数为准平衡态年际变化(图6a、6c),但是当位温模态时间系数距平值呈现冷暖反位相状态时,易于发生强对流天气,在同位相变化时易于出现干旱灾害。因此,近40 a 来,天山山脉对流层热结构季节变化发生显著改变,春、夏季节冷暖气团交汇作用概率增大,导致异常旱涝灾害性天气增多^[18-21],夏、冬季位温增暖显著线性趋势主要出现在700~400 hPa 层,导致天山冰川、积雪融化呈现长期线性趋势^[6-7]。

2.3 混合比季节与年际时空变化

气温、气压、蒸发、凝结和水汽输送等因素影响空气水汽含量的变化^[14],因此,天山山脉对流层中水汽含量时空变化相对平原、沿海地区复杂多变。天山地区观测资料及遥感资料分析显示:天山山区水汽含量高值区主要分布在天山北麓的河谷平原地带,中天山和东天山是低值区,大气水分随高度呈负

指数规律递减。水汽含量在1961—2009 年期间呈增加趋势,夏、秋季增加明显,突变发生在1986 年,冬季北大西洋震荡指数与水汽有相关关系,冬季北极震荡指数与夏季水汽相关性最显著^[10]。天山山区春季低层云量资源最丰富,冬季低层云中的含水量最丰富^[22]。1979—2014 年期间,天山山区云水含量表现为高山多于平原和盆地,并且云冰水含量值远高于云液水,500~600 hPa 层是云冰水和云液水含量的高值区,夏季是云液水含量最大的季节^[23]。

根据模态空间型的载荷向量高值分布分型,850 hPa 层混合比模态空间型为南坡型(EOF1)、北坡型(EOF2)(图7a),混合比模态时间系数季节周期变化为准对称单峰谷型(图7b), EOF1 时间系数序列中季节周期分量是主要分量; EOF2 时间系数序列中周期分量与非周期分量有相似权重($FR_1 = 0.93, FR_2 = 0.86$)(图7c、7d),混合比模态时间系数序列中的年周期谐波振幅较大(表略)。混合比 EOF1 时间系数季节周期变化滞后2 个月与 EOF2 显著相关($r = 0.94$)。混合比 EOF1 与同层位温 EOF1 空间型显著相似($r = 0.99$); EOF1 时间系数季节周期变化滞后3 个月与位温 EOF1 显著相关($r = 0.63$),混合比 EOF2 与同层位温 EOF2 空间型无显著相似; EOF2 时间系数季节周期变化超前2 个月与位温 EOF2 显著相关($r = 0.96$)。因此,850 hPa 层混合比 EOF1 季节周期变化中蒸发-凝结与水汽输送作用为主要影响机制,融冰、水汽输送是造成混合比 EOF1 季节周期变化位相滞后位温模态的机制,混合比 EOF2 季节周期变化中水汽输送是主要影响机制。

700 hPa 层混合比模态空间型为南坡型(EOF1)、北坡型(EOF2)与外围型(EOF3)(图8a), EOF1、EOF2 时间系数季节周期变化为准对称、非对称单峰谷型, EOF3 时间系数为准对称双峰双谷型(图8b),模态时间系数序列中季节周期分量与非周期分量有相似权重($FR = 0.74 \sim 0.81$)(图8c、8d),模态时间系数序列中年、半年周期谐波振幅较大(表略)。混合比 EOF1 时间系数季节周期变化滞后2 个月与 EOF2 显著相关($r = 0.96$)、与 EOF3 显著同步非线性相关($nr = 0.72$),该层天山南坡型混合比模态与天山外围型混合比模态季节变化存在非线性影响, EOF3 时间系数季节周期变化超前2 个月与 EOF2 显著相关($r = 0.63$),该层混

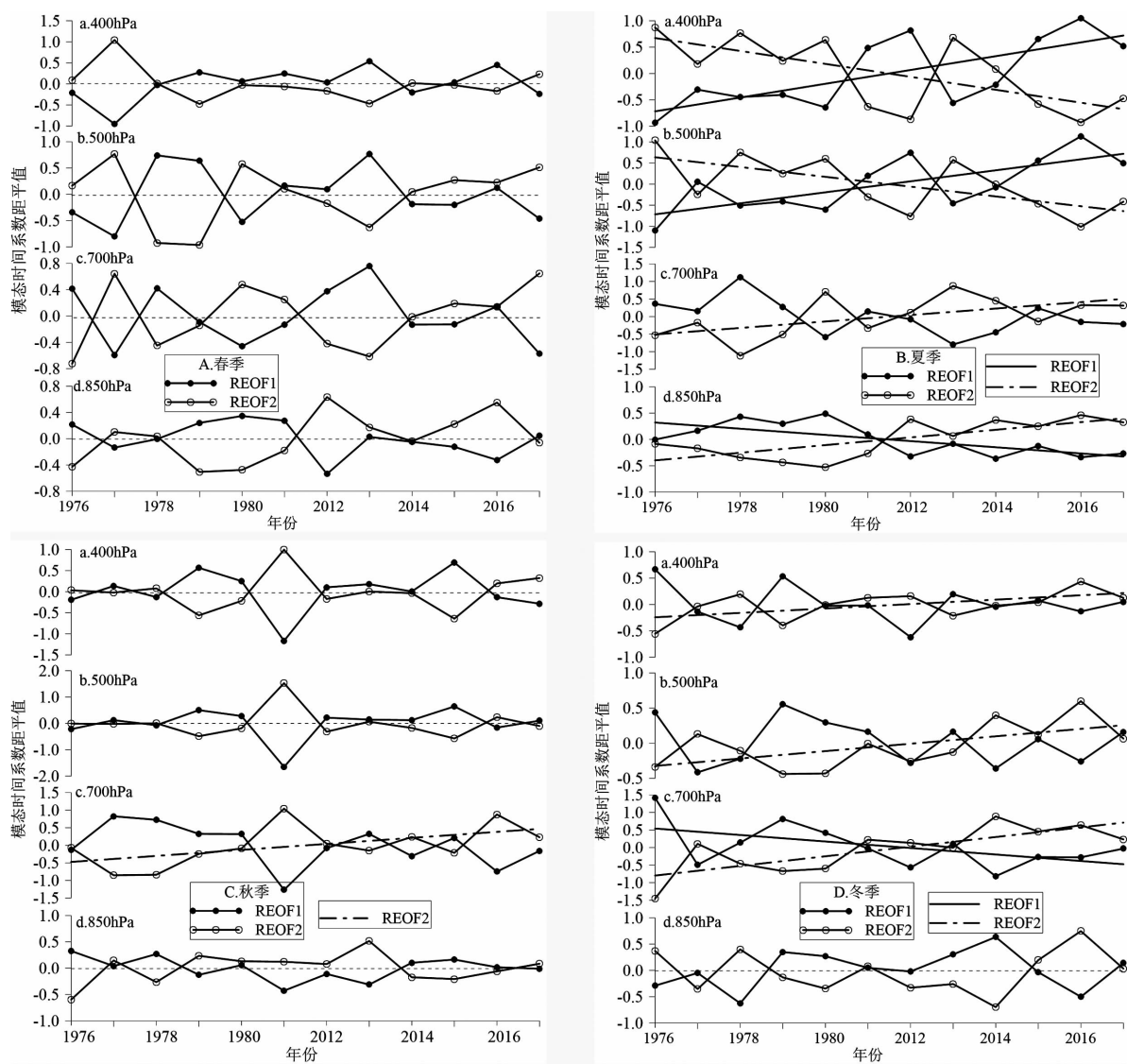


图6 假相当位温模态时间系数距平值平均季节变化趋势

Fig. 6 Mean seasonal variation trend of temporal coefficient anomalies of pseudo-equivalent potential temperature modes

合比模态季节变化有较强的局地特征。混合比 REOF1 与同层位温 REOF1 空间型显著相似 ($r=0.98$); REOF1 时间系数季节周期变化滞后 1 个月与位温 REOF1 显著相关 ($r=0.86$), 混合比 REOF3 与同层位温 REOF2 空间型显著相似 ($r=0.94$); REOF3 时间系数季节周期变化超前 2 个月与位温 REOF2 显著相关 ($r=0.82$), REOF2 与同层位温模态空间型无显著相似, 时间系数无显著相关性。因此, 700 hPa 层混合比 REOF1、REOF3 季节周期变化中水汽蒸发-凝结以及输送作用为主要影响机制, 混合比 REOF2 季节周期变化水汽输送是主要影响机制。

500 hPa 层混合比模态空间型为南坡型

(REOF1)、外围南部型 (REOF2) 与天山中部型 (REOF3) (图 9a)。REOF1 时间系数季节周期变化为非准对称单峰双谷型; REOF2 为准对称双峰单谷型; REOF3 为准对称单峰双谷型 (图 9b), 模态时间系数序列中季节周期分量与非周期分量有相似权重 ($FR=0.53 \sim 0.83$) (图 9c、9d)。REOF1 时间系数序列中的年、半年周期谐波振幅较大, REOF2、REOF3 时间系数序列中的年周期和 6 个月周期谐波振幅较大 (表略)。混合比 REOF1 时间系数季节周期变化滞后 2 个月与 REOF2 显著相关 ($r=0.69$); 滞后 1 个月与 REOF3 显著相关 ($r=0.90$), REOF2 时间系数季节周期变化超前 1 个月与 REOF3 显著相关 ($r=0.83$), 南坡外围混合

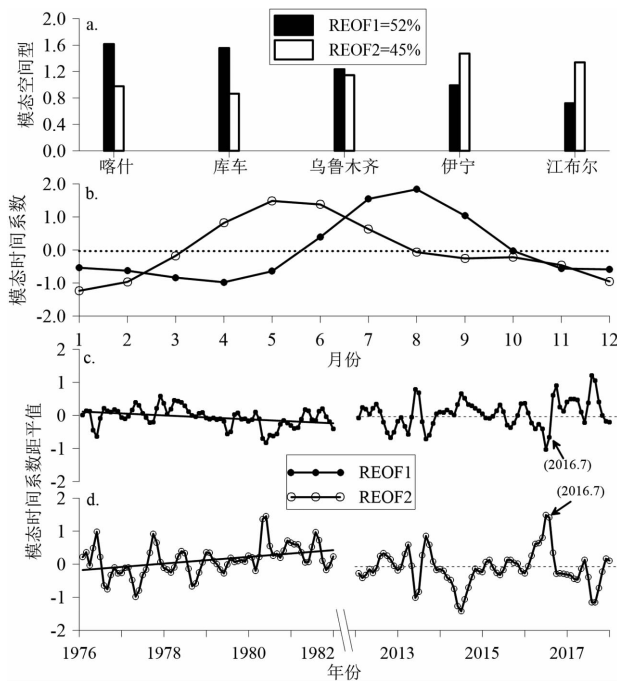


图7 850 hPa 层混合比 REOF 模式

Fig. 7 REOF modes of mixing ratio in 850 hPa layer

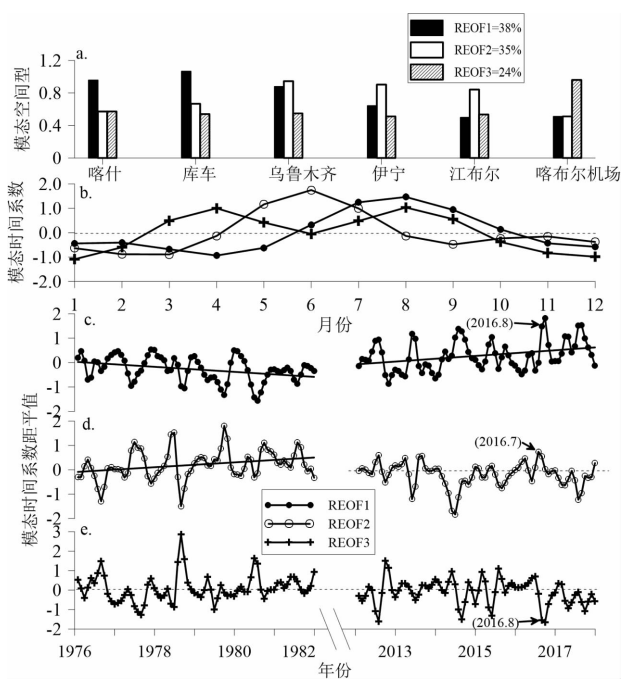


图8 700 hPa 层混合比 REOF 模式

Fig. 8 REOF modes of mixing ratio in 700 hPa layer

比模式季节周期变化位相超前其他模式。混合比模式与同层位温模式空间型与时间系数无显著相似、相关性,因此,500 hPa 层水汽输送是该层混合比模式季节周期变化的主要影响机制,水汽蒸发-凝结作用是次要影响机制。

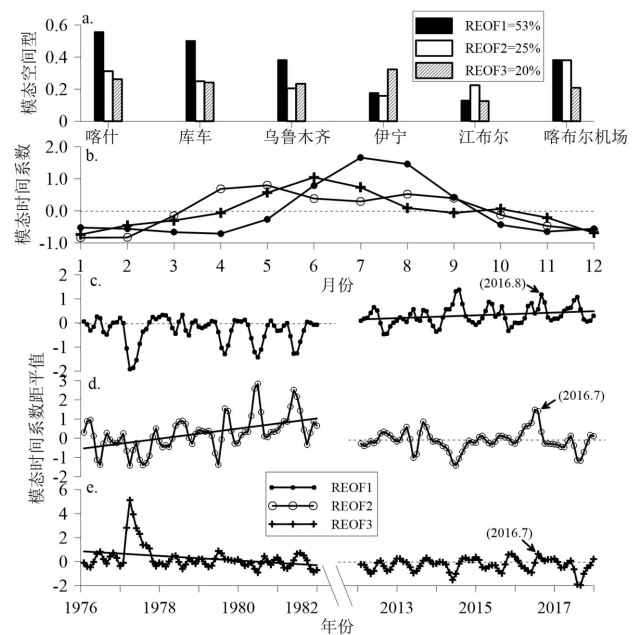


图9 500 hPa 层混合比 REOF 模式

Fig. 9 REOF modes of mixing ratio in 500 hPa layer

400 hPa 层混合比模式空间型为南坡型 (REOF1)、北坡型 (REOF2) 与外围型 (REOF3) (图 10a)。REOF1 时间系数季节周期变化为非对称单峰谷型; REOF2 为准对称单峰双谷型; REOF3 为非对称双峰单谷型 (图 10b)。REOF1、REOF3 时间系数序列中周期分量与非周期分量有相似权重 ($FR = 0.89, 0.61$); REOF2 时间系数序列中周期分量不是主要分量 ($FR = 0.37$) (图 10c, d)。混合比 REOF1、REOF3 时间系数序列的年、半年周期谐波振幅较大; REOF2 的年、半年周期谐波振幅较大 (表略)。混合比 REOF1 时间系数季节周期变化滞后 2 个月与 REOF2 显著相关 ($r = 0.89$); 超前 2 个月与 REOF3 显著相关 ($r = 0.58$), REOF2 时间系数季节周期变化超前 1 个月与 REOF3 显著相关 ($r = 0.63$), 天山地形效应造成的大气环流形态对该层混合比模式的季节周期变化位相有较大影响。混合比 REOF2 与同层位温 REOF2 空间型显著相似 ($r = 0.98$); REOF2 时间系数季节周期变化超前 2 个月与位温 REOF2 显著相关 ($r = 0.91$), 混合比 REOF1、REOF3 与同层位温模式空间型与时间系数无显著相似、相关性。因此, 400 hPa 层混合比 REOF2 季节周期变化中水汽蒸发-凝结以及输送作用为主要影响机制, 混合比 REOF1、REOF3 季节周期变化水汽输送是主要影响机制, 水汽蒸发-凝

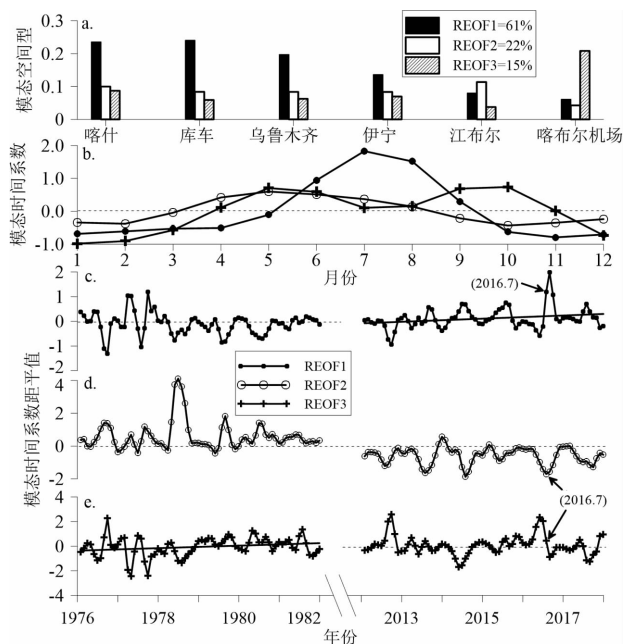


图10 400 hPa层混合比 REOF 模态

Fig. 10 REOF modes of mixing ratio in 400 hPa layer

结作用为次要影响机制。

对于混合比模态季节垂直传播形态,850 hPa 层混合比 REOF1 与 700 hPa 层混合比 REOF1 空间型显著相似($r=0.96$);时间系数季节周期变化显著相关($r=0.99$),REOF2 与 700 hPa 层混合比 REOF2 空间型显著相似($r=0.96$);时间系数季节周期变化超前 1 个月显著相关($r=0.92$)。700 hPa 层混合比 REOF1 与 500 hPa 层混合比 REOF1 空间型显著相似($r=0.78$);时间系数季节周期变化显著相关($r=0.92$),700 hPa 层混合比 REOF3 与 500 hPa 层混合比 REOF2 空间型显著相似($r=0.83$);时间系数季节周期变化显著相关($r=0.99$),500 hPa 层混合比 REOF2 与 400 hPa 层混合比 REOF2 空间型显著相似($r=0.81$);时间系数季节周期变化显著相关($r=0.83$)。因此,在模态季节垂直变化中,850 hPa 层 REOF2 与 700 hPa 层 REOF2 之间水汽垂直传播作用为主,其他各层混合比模态之间的水汽水平传播作用大于垂直传播。

对于混合比模态长期变化,在春季,850 hPa 层混合比模态时间系数各季节平均距平值年际变化均为准平衡态,在 2 个模态反位相变化时,易于发生旱涝灾害(图 11a、b、c、d)。700、500 hPa 层混合比 REOF1 时间系数春季平均距平值均为显著线性增湿;700、400 hPa 层混合比 REOF2 和 500 hPa 层混

合比 REOF3 时间系数春季平均距平值显著线性降湿,即南疆对流层显著线性增湿为主;北疆、天山中部有显著线性降湿分量(图 11a)。在夏季,700 ~ 400 hPa 层混合比 REOF1 时间系数夏季平均距平值均为显著线性增湿;500 hPa 层混合比 REOF3 和 400 hPa 层混合比 REOF2 时间系数夏季平均距平值均为显著线性降湿,即南疆对流层增湿为主(图 11b)。在秋季,700 hPa 层混合比 REOF1 时间系数秋季平均距平值为显著线性增湿;400 hPa 层混合比 REOF2 时间系数秋季平均距平值为显著线性降湿(图 11c)。在冬季,700 hPa 层混合比 REOF1 时间系数冬季平均距平值为显著线性增湿,500、400 hPa 层混合比模态时间系数冬季平均距平值均为准平衡态变化,即秋、冬季节增湿主要发生在南疆对流层 700 hPa 层(图 11d)。因此,由于气候变暖,天山山脉大气环流形态与水汽源地的变化^[24]等,天山山脉对流层中下层(700 ~ 400 hPa)春、夏季节平均水汽含量出现空间差异的显著线性增湿、降湿趋势变化;秋、冬季节显著线性增湿、降湿趋势变化较小,对流层垂直热、湿结构的改变形成了春、夏季节异常旱涝灾害易发^[25,26]以及天山冰川、积雪长期线性趋势消融^[6,7]的气候背景条件。

为检验混合比分析的合理性,取 2016 年 7 月 28—8 月 2 日新疆西部出现的一次罕见大暴雨过程进行分析,该过程最强降水中心降水量 123.2 mm,伊犁地区 10 个站日降水量破历史 10 站平均日降水量最高纪录,伊犁河谷地区 4 个站日降水量破历史极值^[27]。2016 年 7、8 月 850 hPa 层混合比 REOF2 距平值出现较大正值,混合比 REOF1 距平值在 7 月为负值、8 月出现较大正值,对流层下层北疆是水汽聚集地,暴雨后蒸发作用使得南疆水汽增多(图 7c、7d)。700 hPa 层混合比 REOF1 距平值 7 月近似零值、8 月出现较大正值,REOF2 距平值 7、8 月出现较大正值,REOF3 距平值 7、8 月出现较大负值(图 8c、8d、8e),暴雨前后对流层中下层北疆是水汽主要聚集地,雨后蒸发作用使得南疆水汽增多,天山南部的外围地区不是水汽的来源地。500 hPa 层混合比 REOF1、REOF2、REOF3 距平值 7、8 月均为正值(图 9c、d、e),暴雨前后天山对流层中层周围水汽含量充沛。400 Pa 层混合比 REOF1 距平值 7、8 月出现较大正值,REOF2 距平值在 7、8 月为负值,REOF3 在 7、8 月为正、负值(图 10c、10d、10e)。对流层水

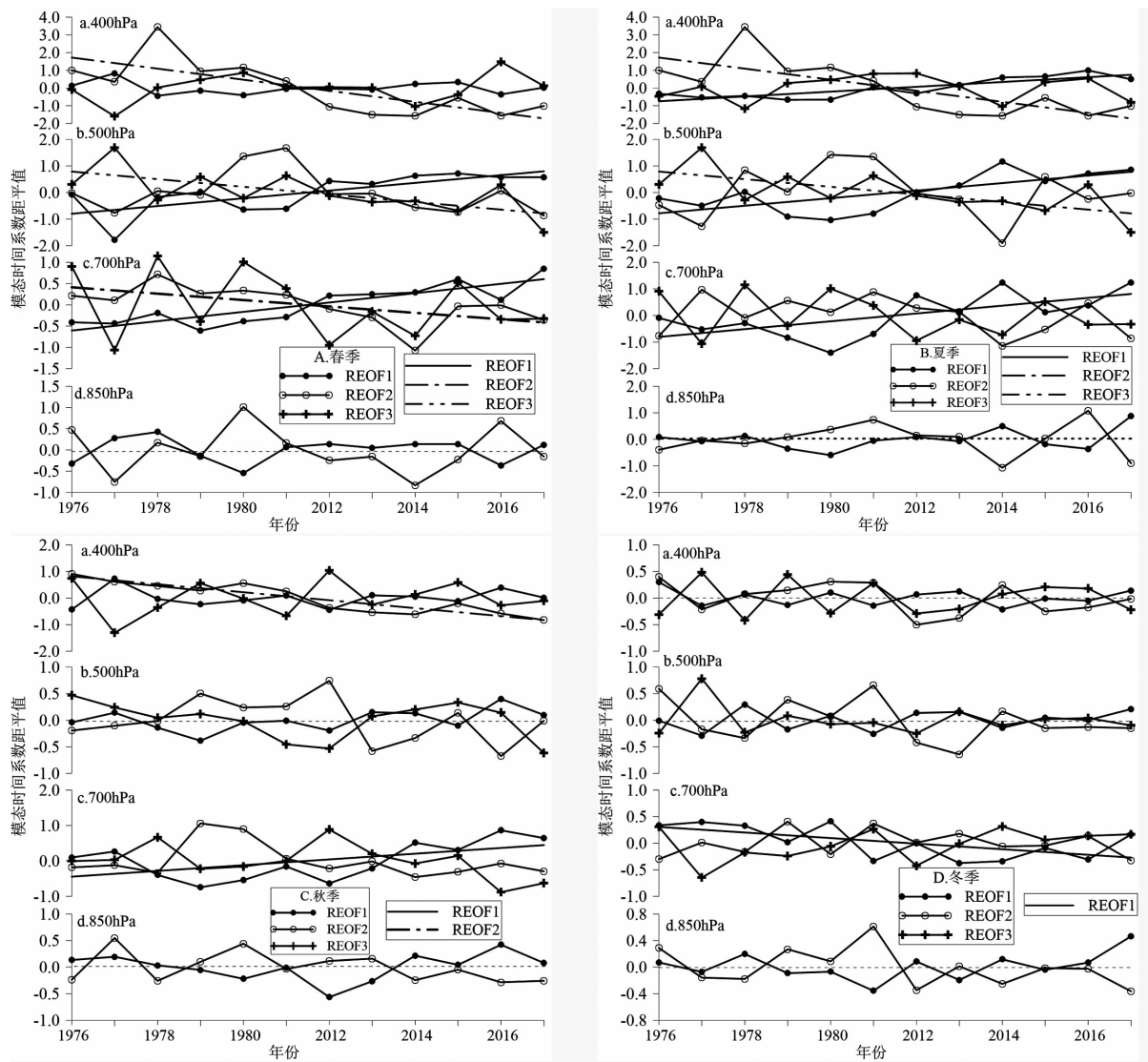


图 11 混合比模态时间系数距平值平均季节变化趋势

Fig. 11 Mean seasonal variation trend of temporal coefficient anomalies of mixing ratio modes

汽垂直分布说明暴雨主要水汽来源并非来自西南方向而是西北方向,雨前水汽输送作用较强,对流层混合比变化特征与该次暴雨过程水汽来源分析结果是一致的^[26]。2016 年 7、8 月 850 hPa 层位温 REOF1、REOF2 距平值负、正值(图 2c、2d);7、8 月 700 hPa 层位温 REOF1 距平值负、正值;REOF2 为正、负值(图 3c、3d),500、400 hPa 层 7、8 月位温 REOF1 距平值均为正值;ROEF2 均为负值(图 4c、4d;图 5c、5d)。暴雨前对流层下层北疆为冷湿环境、南疆为干暖环境,暴雨后水汽凝结释放潜热使得北、南疆大气热状态出现相反变化,对流层中下层暴雨前后天山地区均为暖结构,天山外围为冷结构。天山山脉对流层有利于垂直对流发展的热湿结构,

是这次罕见暴雨发生的重要天气条件。

2.4 抬升指数季节与年际时空变化

抬升指数模态空间型为天山中部型(REOF1)与北坡型(REOF2)(图 12a),天山、昆仑山脉对形成强对流层结有显著的局地影响作用。REOF1 时间系数季节周期变化为非对称单峰谷型,REOF2 时间系数季节周期变化为准对称单峰双谷型(图 12b),模态时间系数序列中季节周期分量与非周期分量有相似权重($FR = 0.89、0.69$)(图 12c、12d),抬升指数 REOF1 时间系数序列中的年周期谐波振幅较大;REOF2 的半年与年周期谐波振幅均较大(表略)。天山中南部地区在 7—9 月份;北部地区在 5—6 月份是易于出现不稳定大气层结。抬升指数 REOF1

季节周期变化滞后 2 个月与 REOF2 显著相关 ($r=0.60$)。抬升指数模态时间系数序列中存在年代际周期变化分量,在前、后期,抬升指数模态时间系数距平值呈现相反的显著线性趋势(图 12c、12d)。

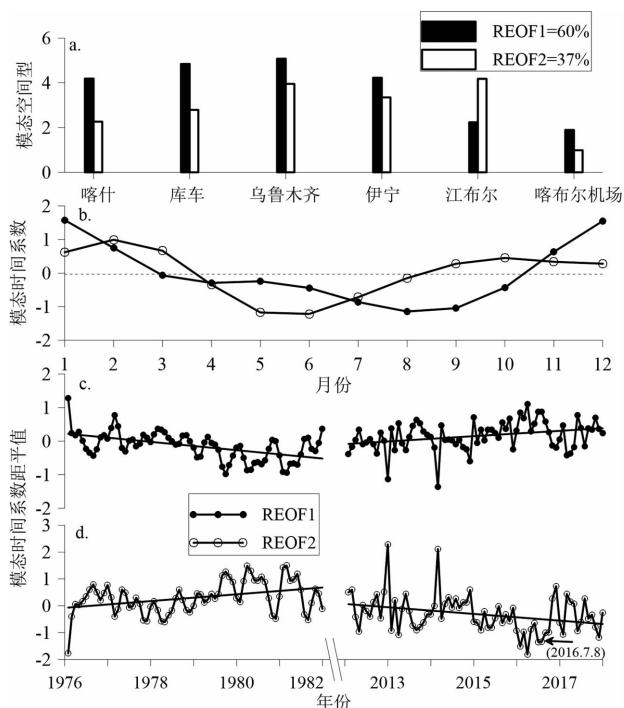


图 12 抬升指数 REOF 模态

Fig. 12 REOF modes of lifted index

对于抬升指数模态时间系数平均季节距平值长期变化,抬升指数 REOF1 时间系数夏季平均距平值为显著线性稳定性增强趋势;REOF2 为显著线性稳定性减弱趋势,其他季节各模态距平值为准平衡态年际变化(图略),因此,夏季北疆地区大气稳定性趋势性降低,易发生强对流天气;天山中部地区大气稳定性趋势性升高,易发生干旱天气。1961—2010 年新疆雷暴时空分析表明:全疆大部分地区年、月雷暴日数呈现减少趋势,北疆减少趋势大于南疆,仅天山山区及其两侧以及南疆西部的个别地方呈弱的增加趋势^[28]。前期的抬升指数模态时间系数距平值显著线性趋势与观测资料分析基本一致。2016 年 7—8 月新疆伊犁地区罕见大暴雨^[27]就是在抬升指数 REOF2 时间系数距平值出现较大负值月份发生(图 12d),为天山山脉北疆大气层结不稳定状态的天气特例。

3 结论

(1)天山山脉地形效应使得对流层年平均假相当位温分布呈现显著局地特征,天山周围山体遮挡地区对流层年平均热湿不稳定性高于山体峡谷地区。天山山脉周围对流层各层大气年平均位温为垂直单层结构;年平均混合比为垂直双层结构。850、700 hPa 层之间大气年平均水汽含量约占对流层年平均总含量的 80% 左右。南坡站年平均抬升指数小于北坡站,南坡站年平均易于出现强对流天气。

(2)各层月平均假相当位温季节与年际变化存在 2 种时空模态:850 hPa 层南坡型假相当位温模态时间系数季节周期变化为暖期大于冷期的非对称型分量为主,700、500、400 hPa 层之间假相当位温模态时间系数季节周期变化为准对称型,大气环流冷暖气团受到天山地形阻挡、扰动与下垫面热辐射是形成 2 种时空模态的主要机制。各层假相当位温 2 种时空模态时间系数季节周期变化存在 2 个月位相差,各层假相当位温模态季节周期变化位相垂直传播时存在绝热与非绝热过程。

(3)各层月平均相对混合比季节与年际变化存在 2、3 种时空模态,850、700 hPa 层以及 500、400 hPa 层混合比模态时间系数季节周期变化分别以准对称型、非对称型变化为主,各层混合比模态时间系数之间季节周期变化之间存在 1、2 个月的位相差。850、700 hPa 层混合比模态季节周期变化的主要影响机制是水汽蒸发—凝结、输送作用;500、400 hPa 层之间混合比模态季节周期变化的主要影响机制是水汽输送作用。混合比模态垂直传播中存在水汽垂直传播为主以及水汽水平、垂直传播为主两种形态。天山山脉对流层中下层月平均假相当位温、混合比水平分布以及季节与年际变化受局地大气环流控制。

(4)各站月平均抬升指数季节与年际变化存在 2 种时空模态,天山北坡地区春、夏季节与南坡地区夏、秋季节大气层结不稳定,易发生强对流天气。

(5)在 1976—2017 年期间,大气环流冷暖气团在天山山脉对流层中、低层季节热湿结构发生显著线性趋势变化,夏季冷暖热结构线性趋势变化幅度最大;春、夏季干湿水汽结构线性趋势变化幅度最大;夏季北疆地区大气稳定性线性降低趋势变化幅

度最大,天山山脉对流层形成异常旱涝灾害易发以及冰川、积雪长期线性趋势消融的热湿气候条件。近40 a来,天山山脉对流层温湿结构长期趋势变化的原因来自大气环流与局地天山气候之间的复杂相互作用,需要做进一步的深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 李珍,姜逢清. 1961—2004年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土, 2007, **29**(3): 351—359 [LI Zhen, JIANG Fengqing. A study of abrupt climate change in Xinjiang region during 1961—2004 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, **29**(3): 351—359]
- [2] 阿帕尔·肉孜,叶尔克江·霍依哈孜,高培,等. 新疆近50a气候的变化特征[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版, 2014, **6**(4): 356—362 [Ruzil Apar, Hoyhazi Erkejan, GAO Pei, et al. Climatic change characteristics of Xinjiang during recent 50 years [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, **6**(4): 356—362]
- [3] 刘波,冯锦明,马柱国,等. 1960—2005年新疆气候变化的基本特征[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(4): 414—426 [LIU Bo, FENG Jingming, MA Zhuguo, et al. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005 [J]. Climatic and Environmental Research, 2009, **14**(4): 414—426]
- [4] 吴友均,师庆东,常顺利. 1961—2008年新疆地区旱涝时空分布特征[J]. 高原气象, 2011, **30**(2): 391—396 [WU Youjun, SHI Qingdong, CHANG Shunli. Characteristics of temporal and spatial distributions of the drought and flood in Xinjiang region from 1961 to 2008 [J]. Plateau Meteorology, 2011, **30**(2): 391—396]
- [5] 张元,巩远发,蒋贤玲. 新疆地区对流层中下层及地面温湿变化特征[J]. 成都信息工程学院学报, 2011, **26**(6): 608—616 [ZHANG Yuan, GONG Yuanfa, JIANG Xianling. Characteristics of the upper and ground temperature and humidity variations over Xinjiang region [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2011, **26**(6): 391—426]
- [6] 沈永平,苏宏超,王国亚,等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I):水文效应[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(3): 513—527 [SHEN Yongping, SU Hongchao, WANG Guoya. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): hydrological effect [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(3): 513—527]
- [7] 董志文,秦大河,任贾文,等. 近50年来天山乌鲁木齐河源1号冰川平衡线高度对气候变化的响应[J]. 科学通报, 2013, **58**(9): 825—832 [DONG Zhiwen, QIN Dahe, REN Jiawen, et al. Variations in the equilibrium line altitude of Urumqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, over the past 50 years [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(9): 825—832]
- [8] CHOW F K, DE WEKKER S F J, SNYDER B J. Mountain weather research and forecasting [M]. Dordrecht Heidelberg: Springer, 2013: 1—716.
- [9] 柏玲,陈忠升,王祖静,等. 1980—2013年新疆高空大气温度变化特征[J]. 地理科学, 2016, **36**(3): 458—465 [BAI Ling, CHEN Zhongsheng, WANG Zujing, et al. Upper-air temperature change of Xinjiang during 1980—2013 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, **36**(3): 458—465]
- [10] 姚俊强. 天山山区水汽含量时空分布及强降水过程的水汽演变特征[D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2012: 1—67 [YAO Junqiang. Temporal-spatial distribution of the water vapor content and evolution character of water vapor during heavy rain in Tianshan Mountains [D]. Urumchi: Xinjiang Normal University, 2012: 1—67]
- [11] 吴洪宝,吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 33—44 [WU Hongbao, WU Lei. Methods for diagnosing and forecasting climate variability [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 33—44]
- [12] 斯皮格尔. M R, J. 希勒, R A. 斯里泥瓦桑(孙山泽 戴中维译). 概率与统计(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 213—214 [SPIEGEL M R, SCHILLER J, SRINIVASAN R A. Schaum's outline of theory and problems of probability and statistics, Second Edition. [M]. New York American: McGraw-Hill Companies, Inc. 2000: 213—214]
- [13] 石强. 黄海溶解氧含量场季节循环时空模态与机制[J]. 应用海洋学学报, 2016, **35**(1): 1—14 [SHI Qiang. Mechanism and spatial-temporal mode on the seasonal cycle of dissolved oxygen content fields in the Yellow Sea [J]. Journal of Applied Oceanography, 2016, **35**(1): 1—14]
- [14] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 32—38, 82, 3—14 [LIU Jianwen, GUO Hu, LI Dongyao, et al. Basis for calculating the physical quantity of weather analysis and forecasting [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005: 32—38, 82, 3—14]
- [15] 李海燕,杨霞,张超. 新疆一次超极地寒潮天气分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, **6**(5): 12—19 [LI Haiyan, YANG Xia, ZHANG Chao. Analysis of a super polar path cold wave in Xinjiang [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2012, **6**(5): 12—19]
- [16] 闵月,李娜,汤浩. 2015年春季北疆沿天山一带一次强沙尘暴过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, **11**(5): 30—37 [MIN Yue, LI Na, TANG Hao. Analysis of a strong sandstorm along Tianshan Mountains of northern Xinjiang in spring 2015 [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, **11**(5): 30—37]
- [17] 陈颖,李维京,史红政,等. 不同气候背景下新疆冬季极端冷(暖)事件的变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, **10**(4): 17—24 [CHEN Ying, LI Weijing, SHI Hongzheng, et al. Variations of extreme cold (warm) events in winter in Xinjiang under different climate background [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, **10**(4): 17—24]
- [18] 袁玉江,何清,穆桂金. 天山山区近40a夏季降水变化及与南北疆的比较[J]. 冰川冻土, 2003, **25**(3): 331—335 [YUAN Yujang, HE Qing, MU Guijin. Summer precipitation change for

- recent 40 years in the Tianshan Mountains and compared with southern and northern Xinjiang regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 331–335]
- [19] 吴纯渊, 袁玉江. 天山山区近 40 年冬季降水变化特征与南、北疆的比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, **19**(2): 87–90 [WU Chunyuan, YUAN Yujang. Comparison of features of winter precipitation change among Tianshan Mountainous area, southern and northern Xinjiang in recent 40 years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, **19**(2): 87–90]
- [20] 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, **67**(3): 312–320 [LI Jianfeng, ZHANG Qiang, BAI Yungang, et al. Spatio-temporal probability behaviors of the maximum consecutive wet days in Xinjiang, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(3): 312–320]
- [21] 姜逢清, 胡汝骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化[J]. *中国沙漠*, 2004, **24**(1): 35–40 [JIANG Fengqing, HU Ruji. Climate change and flood & drought disasters in Xinjiang during recent 50 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2004, **24**(1): 35–40]
- [22] 彭宽军, 陈勇航, 王文彩, 等. 新疆山区低层云水资源时空分布特征[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(5): 653–659 [PENG Kuanjun, CHEN Yonghang, WANG Wencai, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of lower layer cloud water resources in Xinjiang mountain regions[J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(5): 653–659]
- [23] 石晓兰, 杨青, 姚俊强, 等. 基于 ERA-Interim 资料的中国天山山区云水含量空间分布特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2016, **10**(2): 50–56 [SHI Xiaolan, YANG Qing, YAO Junqiang, et al. The spatial distribution of water vapor and cloud water content over Tianshan Mountains, China based on ERA-Interim dataset [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2016, **10**(2): 50–56]
- [24] 戴新刚, 李维京, 马柱国. 近十几年新疆水汽源地变化特征[J]. *自然科学进展*, 2006, **16**(12): 1651–1656 [DAI Xingang, LI Weijing, MA Zhuguo. The characteristics of variation of Xinjiang water vapor sources in recent years [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, **16**(12): 1651–1656]
- [25] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010 年新疆极端降水过程时空特征[J]. *地理研究*, 2014, **33**(10): 1881–1891 [CI Hui, ZHANG Qiang, ZHANG Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961–2010 [J]. *Geographical Research*, 2014, **33**(10): 1881–1891]
- [26] 赵玲, 杨青, 安沙舟. 天山山区 1961—2010 年面雨量分布及变化特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2013, **7**(2): 20–24 [ZHAO Ling, YANG Qing, AN Shazhou. Distribution and change characteristics of areal precipitation in Tianshan Mountains during 1961–2010 [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2013, **7**(2): 20–24]
- [27] 曾勇, 杨莲梅, 张迎新. 新疆西部一次大暴雨过程水汽输送轨迹模拟[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2017, **11**(3): 47–54 [ZENG Yong, YANG Lianmei, ZHANG Yingxin. Simulation of water vapor transport trajectories of a heavy rain in western Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2017, **11**(3): 47–54]
- [28] 霍广勇, 江远安, 史红政, 等. 1961—2010 年新疆雷暴时空分布及其变化特征[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(5): 1156–1164 [HOU Guangyong, JIANG Yuanan, SHI Hongzheng, et al. Temporal-spatial distribution and variation characteristics of the thunderstorm in Xinjiang during 1961–2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1156–1164]

Mechanism and Spatio-temporal Variations on Potential Temperature, Mixing Ratio and Lifted Index in Troposphere over the Tianshan Mountains, China

SHI Qiang

(1. Key Laboratory of Marine Spill Oil Identification and Damage Assessment Technology, SOA, Qingdao 266033, China;

2. North China Sea Environmental Monitoring Center, SOA, Qingdao 266033, China;

3. Shandong Province Key Laboratory of Marine Ecological Environment and Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266033, China)

Abstract: The seasonal and long-term variations of tropospheric atmospheric temperature and humidity in the Tianshan Mountains are the basis for the study of regional climate, resources and environment in Xinjiang, China. Sounding data from six meteorological stations around the Tianshan Mountains were collected from 1976 to 2017. The seasonal and inter-annual spatio-temporal variations of the mean monthly pseudo-equivalent potential

temperature, mixing ratio and lifted index of the standard layer in the troposphere were studied through spatio-temporal analysis and so on. The results indicated that there existed two spatio-temporal modes of the seasonal and inter-annual variations of the pseudoequivalent potential temperature in each layer. The seasonal variation of the pseudoequivalent potential temperature mode in the 850 hPa layer was dominated by the asymmetric component, and in the 700, 500 and 400 hPa layers by quasi-symmetric component. There were adiabatic and non-adiabatic forms in the vertical propagation of pseudoequivalent potential temperature modes in each layer. There were 2 and 3 spatio-temporal modes in the seasonal and inter-annual variations of mixing ratio in each layer. The seasonal variation of the mixing ratio mode in the 850, 700 hPa layers were dominated by quasi-symmetric components, and in the 500, 400 hPa layers by asymmetric components. The main mechanism affecting the seasonal and inter-annual variations of mixing ratio in each layer were evaporation, condensation and transportation process of water vapor, and the seasonal cycle changes from lower level to higher level. There were 2 kinds of spatio-temporal modes in the seasonal and inter-annual changes of the lifted index. The strong convective weather most likely occurred under the atmospheric stratification status between July and September along the southern slope of the Tianshan Mountains and between May to June along the north slope of the Tianshan Mountains. The inter-annual changes of thermal and wet structure within troposphere in the Tianshan Mountains had a significant linear trend. At present, the thermal and wet structure of troposphere and the unstable stratification of the atmosphere in the Tianshan Mountains are prone to result in abnormal droughts and floods, ice melting and snow.

Key words: the Tianshan Mountains; troposphere; pseudoequivalent potential temperature; mixing ratio; lifted index; spatio-temporal mode