2015年12月末北极地表爆发性增温事件的卫星遥感监测

黄富祥^{①*}, 任素玲^①, 韩爽爽^{①②}, 孙冷^③, 张艳^①, 惠雯^①

① 国家卫星气象中心, 北京 100081;

② 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

③ 国家气候中心, 北京 100081

* 联系人, E-mail: huangfx@cma.gov.cn

2016-07-21 收稿, 2016-09-03 修回, 2016-09-05 接受, 2016-12-06 网络版发表

国家自然科学基金(41275035)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306042)和国家重点研发计划(2016YFB0502500)资助

摘要 北极地表天气尺度的爆发性增温事件, 往往是由于强烈的大气环流或洋流将低纬度热量输送到北极造成的。2015年12月29日发生的北极地表温度达到0℃以上的爆发性增温事件, 引起全球广泛关注。本文利用AIRS获得的多种遥感资料, 监测弗拉姆海峡上空大气温度、水汽和臭氧的急剧变化。卫星遥感监测表明, 水汽和温度从27日开始出现明显增加, 29日达到峰值, 然后开始回落和振荡, 直到1月2日都维持在12月平均值以上; 与此同时, 大气臭氧则呈现相反的变化, 从27日开始显著减少, 29日达到极小值, 然后开始回升和振荡, 到1月2日才回复到12月平均值附近。水汽变化主要发生在从地表到100 hPa高度, 29日水汽在400 hPa高度最大增幅达到12月平均值的6倍; 温度变化主要发生在从地表到250 hPa高度, 29日地表温度达到0℃以上。臭氧总量的变化速度快、幅度大, 与26日相比, 29日臭氧总量减少102 DU达到12月平均值1/3以上; 臭氧垂直廓线变化主要发生在400~5 hPa高度, 与27日相比, 29日臭氧垂直廓线在此高度层内的减少量占臭氧总量减少量的80%~90%。利用National Centers for Environmental Prediction (NCEP)再分析资料, 结合Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)气团后向轨迹追踪, 分析表明造成此次地表爆发性增温事件的作用机制是, 北大西洋低压风暴将大量低纬度温暖、潮湿的空气快速输送到北极, 导致低层温度和水汽含量的急剧增加, 同时大气从低纬度向高纬度的输送, 配合大气从低层向高层的垂直运动, 导致对流层上部到平流层中上层臭氧分布的急剧变化, 从而造成臭氧总量和垂直廓线的急剧变化。此次典型个例的卫星遥感监测表明, 天气尺度的动力输送造成北极地区热量、水汽和臭氧的快速剧烈变化。

关键词 北极增温放大, AIRS 遥感资料, National Centers for Environmental Prediction (NCEP)分析资料, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)后向轨迹分析

作为对全球气候变化最敏感、升温幅度最大的地区之一, 北极地表温度以远高于全球平均增幅的水平迅速变暖^[1], 该区域气温变化已经成为全球气候变化的一个指示器^[2]。北极气温变暖放大(Arctic amplification)效应, 是指北极地区地表气温变暖的趋势远

高于北半球甚至全球平均增温幅度^[3,4], 这种放大效应得到了多种全球气候模式计算结果的验证^[3~5], 更得到20世纪初和20世纪80年代以来两个阶段北极不同地区大量观测事实的证实^[6,7]。关于北极地表增温放大效应的形成机制, 人们的认识并不完全一

引用格式: 黄富祥, 任素玲, 韩爽爽, 等. 2015年12月末北极地表爆发性增温事件的卫星遥感监测. 科学通报, 2016, 61: 3946~3957

Huang F X, Ren S L, Han S S, et al. Monitoring of Arctic surface sudden warming events in late December 2015 with satellite remote sensing data (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3946~3957, doi: 10.1360/N972016-00460

致^[8~11],但一般认为,在年代际时间尺度上,冰雪覆盖融化加快引起的下垫面反射率变化导致地表接受太阳辐射增加,是造成北极地表温度放大气候效应的主要原因^[6,11];而在年、季乃至更小时间尺度上,北极地表温度时空不同的变化特征则经常与天气过程联系在一起^[4,12].北极地区冬季发生的地表温度快速升高事件,往往是由于强烈的大气环流或温暖洋流将低纬度热量输送到北极造成^[4,13~15].每年冬季,形成于美国东部、墨西哥湾等地的北大西洋暖流,将温暖湿润的空气和洋流携带到大西洋北部高纬度地区,对北极附近地区大气产生增温增湿作用^[16~19].

2015/2016年是全球超强厄尔尼诺影响年,卫星监测表明,2015/2016冬季是有卫星观测记录以来北极最温暖的冬季.多种观测手段监测表明,2015年12月29日在北极点附近地表温度达到0℃以上,引起全球广泛关注.分析表明,此次北极地表爆发性增温事件是由于此前在北大西洋上空形成的一系列低压风暴向北极输送造成的(http://psc.apl.washington.edu/northpole/NPEO2015_midwinter_warming.html).

过去的实地台站观测表明,风暴或洋流输送导致的北极地表爆发性增温事件,往往伴随着大气湿度和大气成分的显著变化^[7],然而,对此类事件的卫星遥感综合监测研究相对较少.本文利用AIRS获得的多种遥感资料,监测2015年12月末北极地表爆发性增温事件中大气温度、湿度和臭氧的变化状况,并利用National Centers for Environmental Prediction (NCEP)再分析资料结合Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)后向轨迹分析方法,探讨事件中温度、水汽和臭氧快速剧烈变化的作用机制.

1 使用的数据和方法

本文使用的卫星遥感数据主要来自AIRS臭氧总量和垂直廓线、大气水汽柱含量和垂直廓线、温度廓线等资料,使用的北大西洋冬季风暴风场、温度场、比湿场以及后向轨迹计算数据等,来自NCEP/NCAR再分析资料.

1.1 AIRS卫星遥感资料

卫星遥感数据来自NASA Aqua地球观测卫星AIRS探测器遥感产品.选取与北极点相连的弗拉姆海峡作为监测区域,地理位置75°~90°N, 10°W~10°E

(图S1),这里是北大西洋连接北冰洋的水体,也是北大西洋加热北极的主要通道^[18].

使用的卫星遥感数据包括臭氧总量和垂直廓线、大气水汽柱总量和垂直廓线、大气温度廓线.这些数据均来自AIRS的三级日反演产品.数据分为升轨(ascending)和降轨(descending)两种,过境地方时间分别为1:30 p.m和1:30 a.m. AIRS三级日产品,是在二级产品基础上经过质量控制生成的空间分辨率1°×1°格点数据(<http://airs.jpl.nasa.gov/data/products>).AIRS温度廓线产品在对流层和平流层精度均达到1 K;水汽廓线产品在对流层低层精度达到10%,在对流层上部精度大约50%;柱臭氧总量产品不确定性大约5%,臭氧垂直廓线不确定性大约20%^[20~23](<http://airs.jpl.nasa.gov/data/products>).

臭氧产品为臭氧柱总量和臭氧垂直廓线产品.臭氧柱总量产品量纲为DU,臭氧垂直廓线从地表到大气顶分为24层,数据量纲为ppmv(1 ppmv=1 μL/L).温度廓线层划分方法与臭氧垂直廓线相同,数据量纲可以选择开氏温度或摄氏温度.水汽资料也分为柱总量和垂直廓线两种,量纲均为mg/kg,水汽廓线主要覆盖从地表到上对流层和下平流层,分为12层.

1.2 NCEP/NCAR再分析资料

本文分析风暴输送过程利用的温度、风场和比湿等数据来自NCEP/NCAR再分析数据集,数据空间分辨率2.5°(经度)×2.5°(纬度),温度和风场数据在垂直方向上分为17层(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 10 hPa),比湿数据在垂直方向上分为10层(1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100 hPa),数据分为6小时1次(0:00, 6:00, 12:00, 18:00 UTC)和日平均两种时间分辨率,位涡(potential vorticity, PV)根据此数据集计算求得^[24,25].

1.3 HYSPLIT_4后向轨迹分析

HYSPLIT_4 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模型是由美国NOAA研究开发的处理大气输送、扩散和沉降的综合模式系统,能够处理多种气象输入场、多种物理过程和不同类型排放源^[26].模式采用欧拉和拉格朗日型混合计算模式,其平流和扩散处理采用拉格朗日方法,而浓度计算则采用欧拉方法^[27].

HYSPLIT_4模拟后向轨迹分析的思路:假设空

气块随风飘动, 它的移动轨迹就是其在时间和空间上位置矢量的积分^[14]. 本文轨迹计算数据采用美国国家环境预报中心NCEP和美国国家大气研究中心NCAR的2015年12月全球再分析资料, 每日资料有4个时次0:00, 6:00, 12:00和18:00 UTC, 数据水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 经纬网格, 垂直方向从地面到10 hPa高度共分为17层. 层的划分方法与NCEP/NCAR温度和风场垂直廓线相同.

2 北极地表和大气变化的卫星遥感监测

首先利用NCEP再分析资料考察2015年12月末弗拉姆地区地表和近地层温度与流场的变化; 然后利用AIRS多种遥感数据, 监测该地区大气温度、水汽、臭氧总量及其垂直分布的变化状况.

2.1 北极地表和近地层流场变化监测

利用NCAR/NCEP再分析资料每日0:00, 6:00, 12:00和18:00 UTC 4个时次数据, 分析表明2015年12月末北极地区地表温度发生了一次爆发性增温过程. 图1给出监测区域2015年12月25日~2016年1月2日地表温度变化过程.

从图1中可见, 该区域地表温度从12月27日18:00开始快速上升, 到29日12:00前后达到峰值 0.76°C , 然后, 温度开始下降、振荡, 一直到1月2日都维持在较高水平. 显然, 这是北极地区一次罕见的地表爆发性增温事件.

图1 研究区域 2015 年 12 月 25 日~2016 年 1 月 2 日地表温度变化过程

Figure 1 Daily variation of surface temperature for the study area during 25 December 2015 to 2 January 2016

分析表明, 此次北极地表温度变化尤其是29日的爆发性增温, 是由于天气尺度北大西洋风暴南风输送造成的. 从2015年12月23日开始, 在美国东北部开始生成低压气旋活动, 形成较强的偏南风, 低压中心逐渐向东北方向移动. 该风暴在26日前后于格陵兰岛南部海域形成低压中心并逐步东移, 12月28日6:00时, 低压系统使冰岛地区南风气流风速加强, 并且向北伸展直达北极, 在弗拉姆海峡形成强劲南风, 使海峡地表温度不断上升, 导致29日前后弗拉姆海峡到北极点地区地表温度达到 0°C 以上(<http://finance.china.com.cn/roll/20160129/3567916.shtml>).

图2是利用NCAR/NCEP日平均再分析资料给出2015年12月25~30日北大西洋北部850 hPa温度和流场分布. 从图2中可见, 在用红色方框标识的弗拉姆地区, 25~26日为强劲北风控制, 导致温度不断下降, 850 hPa气温保持在 -20°C 以下, 27日则南部出现南风, 而北部依然为偏北风, 气温仍然保持低水平. 而从28日开始, 影响该区域的风全部转成西南风, 850 hPa气温开始上升, 到29日转成强盛南风, 850 hPa气温升至最高局部达到 0°C 以上. 然后从30日开始, 风向逐渐转变成西南风, 850 hPa气温高温区域向南退缩, 平均温度下降, 但仍然维持高于28日以前的水平. 这个变化过程与图2地表温度变化过程相一致, 表明在强劲北大西洋风暴影响下, 850 hPa等低层南风输送导致地表和近地层爆发性增温事件发生.

在此过程中, 低层南风输送也导致了近地层水汽随之发生显著变化. 图S2给出日平均850 hPa相对湿度变化与流场的关系. 由图S2可见, 该区域对流层水汽含量变化与风场变化关系密切. 在25~27日区域主要由北风控制时, 水汽含量处于低水平, 当28日风向转成西南风, 区域南部水汽含量显著增加, 在29日随着区域由南风控制水汽含量迅速增加到最大值, 然后从30日开始随着风向变化而降低.

2.2 对流层水汽和温度变化的卫星遥感监测

AIRS水汽和温度遥感每日在地方时1:30a.m和1:30p.m分别获取降轨和升轨两次资料. 图3给出了研究区域水汽柱总量逐日变化情况.

从图3中可见, 该区域水汽柱总量25~27日都处于月均值以下的低值, 从27日中午开始出现一个快速增加过程, 在29日正午前后达到最大值, 是月平均值的3.4倍.

图2 大西洋北部 2015 年 12 月 25~30 日 850 hPa 温度(单位: °C)和流场分布, 红色方框是监测区域所在位置

Figure 2 Distribution of air temperature (unit: °C) and wind steam field at 850 hPa over the north Atlantic during 25~30 December 2015. The red square is the location of the study region

图S3是利用AIRS升轨水汽遥感数据给出研究区域平均水汽廓线逐日变化及其与区域12月平均廓线对比情况. 为了更清楚地显示研究区域大气水汽变化状况, 将各日水汽廓线对区域12月平均廓线作归一化处理. 从图中可见, 12月25~28日区域各层水汽含量均处于月平均或稍低水平, 29日水汽含量发生爆发性增长, 从地表到250 hPa各层水汽都显著增加2倍以上, 尤其是在600~400 hPa各层水汽增加4~5倍. 此后, 虽然有所回落, 但直到1月2日仍维持在平均值以上的较高水平.

与此同时, 大气温度也发生了显著变化. 图S4利用AIRS升轨温度遥感数据给出研究区域平均大气温度廓线变化过程及其与12月平均温度廓线对比情

况. 图中温度廓线对12月平均值进行了归一化处理. 从图中可见, 区域大气温度25~27日维持在12月平均值以下的低温水平, 从28日开始出现显著增温过程, 29日大气温度达到最大值, 然后开始下降, 但直到1月2日都维持在显著高于12月平均值以上. 温度变化主要发生在从地表到300 hPa高度, 与12月平均廓线相比, 29日大气温度从地表到300 hPa各层气温均升高了8~15°C不等, 尤其是地表温度达到0°C以上.

2.3 平流层臭氧变化的卫星遥感监测

图4是用AIRS遥感资料给出2015年12月25日~2016年1月2日研究区域平均臭氧柱总量逐日变化. 从图4中可见, 该区域大气臭氧总量从26日中午开始

图3 研究区域 2015 年 12 月 25 日~2016 年 1 月 2 日水汽柱总量逐日变化. 每日以两个时次数据显示水汽逐日变化过程, 以水平虚线表示区域 2015 年 12 月水汽平均值

Figure 3 Daily variation of the column total water vapor in the study region from 25 December 2015 to 2 January 2016. Two time data are given for every day and the dashed horizontal line is the monthly averaged value for December 2015

图4 研究区域 12 月 25 日~1 月 2 日平均臭氧柱总量逐日变化. 每日以两个时次数据显示臭氧逐日变化过程, 水平虚线是该区域 12 月平均柱臭氧总量

Figure 4 Daily variation of the column total ozone in the study region from 25 December 2015 to 2 January 2016, two time data are given for every day and the dashed horizontal line is the monthly averaged value for December 2015

出现一个连续下降过程, 在 29 日早上达到最小值, 比 12 月平均值低 60 DU, 然后缓慢恢复和振荡, 直到 1 月 2 日才恢复到 12 月平均值附近.

在此变化过程中, 利用 AIRS 臭氧垂直廓线资料对比, 可以看出臭氧变化究竟发生在哪些高度层上. 图 5 给出 AIRS 升轨臭氧垂直廓线逐日变化情况, 图中

图5 研究区域 2015 年 12 月 25 日~2016 年 1 月 2 日平均臭氧廓线与 12 月平均廓线比值的逐日变化

Figure 5 Daily variation of the ration of daily average ozone profile to December 2015 mean profile from 25 December 2015 to 2 January 2016

臭氧廓线对 12 月区域平均廓线进行了归一化处理. 从图中可见, 与臭氧柱总量相对应, 25~27 日区域平均臭氧垂直廓线各层数值均大于 12 月平均值, 从 28 日开始各层臭氧值均显著减少, 29 日臭氧值达到最小, 然后有所恢复, 但直到 1 月 2 日多数层臭氧值都处于月平均值以下. 其中, 臭氧垂直分布含量最显著减少发生在 400~5 hPa 高度层, 与 27 日相比, 29 日臭氧在此高度层内的减少量占臭氧总量减少量的 80%~90%.

3 大气温度、水汽和臭氧急剧变化的作用机制分析

此次监测区域地表爆发性增温及水汽和臭氧的急剧变化, 是北大西洋低压风暴将低纬度气团快速输送到北极造成的. 这里利用气团后向轨迹追踪分析结合 NCEP 风场分析, 研究监测区域低空和高空大气变化的作用机制.

3.1 气团后向轨迹追踪分析

利用 HYSPLIT 后向轨迹追踪, 分析了监测区域近地面层、对流层和平流层不同高度气团的来源地和运动轨迹. 图 6 给出 2015 年 12 月 29 日 14:00 UTC (与 AIRS 升轨观测时间接近) 研究区域内一个地点 (82.00°N, 0.00°) 从近地面层到平流层共 8 个高度层的 3 d 后向轨迹, 这 8 个高度层是 500, 1000, 2000, 5000, 8000, 10000, 15000 和 18000 m. 从图中可见, 2015 年 12 月 29 日监测区域上空不同高度层的空气在许多方

面存在着显著差异. 首先, 来源地差异明显, 从近地面层500 m到对流层中上部的5000 m高度的大气主要来自正南部的北欧、南欧和北大西洋东南部洋面上, 而8000 m以上高度大气主要来自美国和加拿大中部、西部乃至白令海峡以北的北冰洋洋面等, 表明从近地层到对流层中下部大气运动以南风为主, 而从对流层上部到平流层大气运动则以西风或西南风为主; 其次, 气团高度变化差异明显, 从500~2000 m低层空气来源地和输送途中与最后到达监测区的高度差异不大, 而从5000~15000 m大气来源地与输送终点之间的高度存在较大差异, 表明从近地层到对流层下部大气输送以平流为主, 而在从对流层中部到平流层大气输送过程中存在明显的垂直向上运动, 18000 m高度气团在输送过程中高度变化不大.

为了更好地考察监测区域不同高度气团来源, 对29日24个时次的后向轨迹进行聚类分析. 图7给出研究区域8个高度气团来源地和高度的聚类分析结果.

从聚类分析结果, 可以了解不同高度层气团来源地及所在高度的细节. 对于来源地与终点差异比较显著的8个高度, 我们进一步给出了来源地和终点在纬度、高度方面的差异(表1).

纬度差定义为

$$\sigma = l_1 - l_2, \quad (1)$$

式中, σ 为气团来源地和监测点纬度差异, l_1 和 l_2 分别为气团来源地与监测点所在的纬度值.

高度差定义为

$$\Delta = h_1 - h_2, \quad (2)$$

式中, Δ 为气团来源地所在高度与监测点高度差异, h_1 和 h_2 分别为气团来源地与监测点所在高度值.

在表1中纬度差负值表示大气是从低纬度输送到高纬度, 高度差负值表示大气是从低空输送到高空. 从表1可见, 从纬度差异来看, 除了18000 m高度大气来源地与监测区域差异在 10° 以内外, 其他各高度层差异大多在 20° 以上, 表明较低纬度空气被低压系统输送到北极; 从高度差异来看, 从近地面层500 m到对流层低层2000 m, 以及18000 m这4个高度大气来源地与监测区域高度差异不大, 表明这些高度层上大气输送主要是水平运动, 而在从对流层上部到平流层的5000~15000 m高度大气来源地与监测区域高度差异大, 表明这些高度层大气从较低纬度输送到北极的过程中, 伴随着较强的垂直向上运动, 使来源地较低高度的空气被输送到北极较高的高度.

3.2 监测区域垂直风场变化分析

利用NCEP再分析资料, 可以分析监测区域所在经度带的经向风逐日变化. 图8是给出监测区域所在

图6 研究区域2015年12月29日14:00UTC从近地面层到平流层8个高度气团3 d后向轨迹. (a) 500, 1000, 2000, 5000 m; (b) 8000, 10000, 15000, 18000 m

Figure 6 Three days air back-ward trajectory for 8 layers from surface to stratosphere for a point at 14:00 UTC of 29 December 2015 in the study region. (a) 500, 1000, 2000, 5000 m; (b) 8000, 10000, 15000, 18000 m

图 7 研究区域 2015 年 12 月 29 日 8 个高度气团来源地和高度聚类分析

Figure 7 Cluster analysis for the air source and height of 8 layers on 29 December 2015 for one point in the study region

表 1 8 个高度大气来源地与目前位置的纬度和高度差异

Table 1 Differences of latitudes and heights between the air at the source and the present location for 8 layers

高度序号	大气高度(m)	路径序号	比率(%)	纬度差异	高度差异(m)
1	500	1	13	-19.5°	599
		2	29	-19.1°	173
		3	58	-24.4°	-56
2	1000	1	8	-17.8°	509
		2	21	-18.1°	825
		3	58	-28.4°	-567
3	2000	4	13	-37.2°	-641
		1	25	-22.7°	97
		2	54	-45.3°	-870
4	5000	3	21	-38.6°	-1452
		1	8	-38.7°	-4020
		2	92	-51.8°	-3891
5	8000	1	17	-39.6°	-5172
		2	83	-44.2°	-3395
6	10000	1	33	-43.9°	-3910
		2	67	-37.1°	-2743
7	15000	1	62.5	-23.4°	-2629
		2	37.5	-14.5°	-1979
8	18000	1	54	-7.3°	-108
		2	46	-9.6°	-70

的10°W~10°E经度带12月25~30日从赤道到北极日平均经向风场、温度和位涡垂直剖面逐日变化情况。从图8可见,在该经度带内从26日开始在50°~60°N区域形成向北的风场,监测区域位涡等值线从低向高排列界限清晰,其代表的对流层顶高度较低,到28日在40°N以北区域形成从地表到200 hPa一致的北向风场,从地表以上各高度层温度不断升高并向北扩展,29日60°N以北区域形成速度更高的南风,配合以从地表向上的垂直输送,监测区域位涡等值线紧密粘连,对流层顶高度显著抬升,地表温度升高到0℃以上,30日监测区域维持高风速,但是在北极点附近形成高空向下的输送,低层大气温度有所降低,对流层顶高度有所下降。

3.3 大气从低层到平流层变化的作用机制分析

(i) 地表爆发性增温和对流层温度与水汽的急剧增加。多种监测资料表明,12月29日研究区域发生地表爆发性增温事件,地表温度达到0℃以上(图1),同时大气水汽柱总量及300 hPa以下各高度水汽

和温度均发生急剧增加(图3, S3和S4)。造成这种状况的原因是,强烈的低压风暴将大量低纬度空气快速输送到北极,从近地面层500~5000 m高度大气主要来自北欧、南欧和北大西洋东南部等洋面上(图6~8,表1)。斯堪的纳维亚半岛冬季受北大西洋暖流的影响,地表温度远高于同纬度其他地区,输送到北极可以导致地表温度达到0℃以上^[14~16];低层大气来源地温暖、潮湿的大气,导致北极低层大气温度和水汽含量急剧增加。这种近地面层和对流层温度和湿度急剧增加,是低层大气从低纬度输送到高纬度地区的标识物。

(ii) 臭氧柱总量和平流层臭氧的急剧减少。卫星臭氧总量和垂直廓线遥感监测表明,12月29日研究区域大气臭氧柱总量降低到极小值,显著低于12月平均值,尤其是在400~5 hPa高度层臭氧减少量占臭氧总量减少量的80%~90%(图4和5)。造成研究区域臭氧急剧减少,是由于高层激流将低纬度大气输送到北极造成的。监测表明,8000~15000 m高度大气主要来自美国和加拿大中部、北部等陆地区域,在输送

图 8 10°W~10°E 经度带 12 月 25~30 日从赤道到北极点平均经向风场、温度场和位涡垂直剖面, 阴影表示温度(单位: °C), 箭头表示经向风向和风速, 紫色等值线为位涡, 自下而上分别为 1, 1.5, 2, 2.5, 3 PVU (1 PVU=10⁻⁶ m² K s⁻¹ kg⁻¹), 红色虚线方框内为监测区域

Figure 8 Vertical profiles of the meridional mean wind stream field, temperature (°C) and potential vorticity field average from the equator to the north pole for 10°W~10°E during 25~30 December 2015. The shadow is for temperature, and the arrow is for wind direction and speed, the purple contour lines are for potential vorticity of 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 PVU (1 PVU=10⁻⁶ m² K s⁻¹ kg⁻¹) from the lower to the higher lines, the monitored region is remarked by red dash line

过程中对流层上部到平流层存在明显的大气垂直向上运动(图6和7)。一方面, 这些平流层大气来源地比研究区域纬度位置上低20°~40°, 大气臭氧的浓度比北极大气低很多, 这是导致研究区域臭氧急剧减少的重要原因; 另一方面, 输送过程大气的垂直向上输送, 大气来源地高度比研究区域低2000~4000 m(图6和7, 表1), 对流层中上部到平流层下部的低臭氧浓度空气被输送到平流层中上部, 导致研究区域对流层顶高度迅速抬升(图8), 进一步加剧臭氧总量和400~5 hPa高度层臭氧的减少。臭氧总量和平流层臭氧的急剧减少, 是平流层大气从低纬度输送到高纬度地区的标识物。

(iii) 对流层和平流层大气变化的相关性。监测分析表明, 研究区域近地面层、对流层和平流层大气来源地存在差异, 输送过程中低层以平流为主, 而5000 m以上高度则存在着明显的垂直向上运动(图6~8)。这些都表明12月29日北极地区对流层和平流层大气变化存在显著差异, 但是, 也应该看到从近地面层到平流层上部大气, 都是从纬度较低的地区被低压风暴输送到北极。因此, 研究区域大气臭氧和水汽柱总量的逐日变化存在着紧密相关性(图S5)。从图中可见, 研究区域臭氧和水汽柱总量逐日变化数据序列存在着很好的负相关性, 相关系数-0.7。表明研

究区域从对流层到平流层大气, 尽管来源地存在差异, 但都是从较低纬度地区被输送到北极, 这一共同特征, 导致12月29日北极地表爆发性增温、对流层温度和水汽急剧增加, 与臭氧总量和平流层臭氧急剧减少几乎同步进行。

4 结论

本文利用AIRS多种遥感资料, 结合NCEP再分析资料, 监测了2015年12月29日北极地表爆发性增温事件及伴随的大气温度、水汽和臭氧的急剧变化过程, 利用HYSPLIT后向轨迹分析结合NCEP再分析风场资料, 考察此次事件过程中不同高度大气变化的作用机制, 得到如下主要结论。

(1) 2015年12月29日, 北极地区发生地表爆发性增温事件导致地表温度达到 0°C 以上, 是由于强烈的北极低压风暴将低纬度大气输送到北极上空造成的。卫星遥感数据和NCEP再分析资料监测表明, 在此事件过程中伴随着地表增温, 还发生了对流层大气温度和湿度的急剧增加, 以及臭氧柱总量和平流层臭氧的急剧减少。

(2) 卫星遥感数据监测表明, 研究区域水汽和温度从27日出现一个快速上升过程, 均在29日达到极大值。大气温度变化主要在从地表到300 hPa高度, 与12月平均廓线相比, 29日从地表到300 hPa各高度层气温升高 $8\sim 15^{\circ}\text{C}$ 不等, 尤其是地表温度达到 0°C 以上; 29日水汽总量增加量比12月平均值大2~3倍, 水汽含量变化主要在从地表到250 hPa高度, 29日各高度层水汽含量均增加2倍以上, 尤其是在600~400 hPa各层水汽增加4~5倍。

(3) 与此同时, 大气臭氧则呈现一个相反的变化过程。大气臭氧从27日开始出现一个明显的连续下

降过程, 于29日达到极小值, 比12月平均值低60 DU。与26日相比, 29日臭氧减少量占该地区12月臭氧总量平均值1/3以上。臭氧垂直分布变化最显著减少发生在400~5 hPa高度, 与27日相比, 29日臭氧在此高度层的减少量占臭氧总量减少量的80%~90%。

(4) 利用HYSPLIT气团后向轨迹追踪结合NCEP经向风场再分析资料, 揭示研究区域低层和高层大气的来源有所不同。从近地面层500~5000 m高度对流层大气主要来自北欧、南欧和北大西洋东南部等洋面上, 这些地区温暖、潮湿的低层空气被快速输送到北极, 导致北极地表爆发性增温、对流层大气温度和湿度的急剧增加。

(5) 而8000~15000 m高度平流层大气, 则主要来自美国和加拿大中部、北部等陆地区域, 在输送过程中还伴随着大气的垂直向上输送, 纬度位置低 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 、高度低2000~4000 m的臭氧浓度低得多的空气取代北极原来的大气, 同时, 经向风场作用导致的研究区域对流层顶高度迅速抬升, 这些因素共同导致研究区域臭氧总量和平流层臭氧急剧减少。

(6) 水汽和臭氧总量的日变化数据序列相关性分析还表明, 尽管低层和高层大气来源地存在差异, 但是低层和高层大气都是从较低纬度地区被输送到北极, 这导致此次北极地表爆发性增温事件过程中水汽急剧增加和臭氧急剧减少的变化过程有着很好的一致性, 几乎同步进行。

(7) 卫星遥感监测表明, 超强低压风暴可以在很短的时间里将大量低纬度、低空大气快速输送到北极, 导致北极地表爆发性增温、对流层温度和水汽急剧增加、平流层臭氧急剧减少。这种大气热量、水汽和大气成分的快速剧烈变化, 可能对北极气候变化产生的影响, 更值得人们关注和深入研究。

致谢 对国家卫星气象中心许健民院士、国家气候中心李维京研究员在本文数据分析过程中的讨论和指导, 表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate change 2013: The physical science basis. In: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535
- 2 WMO/UNEP. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No.55. Geneva: United Nations Environment Programme/World Meteorological Organization, 2014
- 3 Serreze M C, Barry R G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. Glob Planet Change, 2011, 77: 85~96

- 4 Johannessen O M, Kuzmina S I, Bobylev L P, et al. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization. *Tellus A*, 2016, 68: 28234, doi: 10.3402/tellusa.v68.28234
- 5 Pithan F, Mauritsen T. Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nat Geosci*, 2014, 7: 181–184
- 6 Semenov V A, Latif M. The early twentieth century warming and winter Arctic sea ice. *Cryosphere*, 2012, 6: 1231–1237
- 7 Maturilli M, Kayser M. Arctic warming, moisture increase and circulation changes observed in the Ny-Alesund homogenized radiosonde record. *Theor Appl Climatol*, 2016, doi: 10.1007/s00704-016-1864-0
- 8 Serreze M C, Barrett A P, Stroeve J C, et al. The emergence of surface-based Arctic amplification. *Cryosphere*, 2009, 3: 11–19
- 9 Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 2010, 464: 1334–1337
- 10 Hwang T, Frierson D M W, Kay J E. Coupling between Arctic feedbacks and changes in poleward energy transport. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L17704, doi: 10.1029/2011GL048546
- 11 Wang X, Key J R. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR Polar Pathfinder Data Set, Part II: Recent trends. *J Clim*, 2005, 18: 2575–2593
- 12 Overland J E, Hanna E, Hanssen-Bauer I, et al. Surface Air Temperature. In: Arctic Report Card: Update for 2015. http://www.arctic.noaa.gov/reportcard/air_temperature.html
- 13 Bengtsson L, Semenov V, Johannessen O M. The early twentieth-century warming in the Arctic: A possible mechanism. *J Clim*, 2004, 17: 4045–4057
- 14 Chylek P, Folland C K, Lesins G, et al. Arctic air temperature change amplification and the Atlantic multidecadal oscillation. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L14801, doi: 10.1029/2009GL038777
- 15 Kuzmina S, Johannessen O M, Bengtsson L, et al. High northern latitude surface air temperature: Comparison of existing data and creation of a new gridded data set 1900–2000. *Tellus A*, 2008, 60: 289–304
- 16 Seager R, Battisti D S, Yin J, et al. Is the gulf stream responsible for Europe's mild winters? *Q J R Meteorol Soc*, 2002, 128: 2563–2586
- 17 Kaspi Y, Schneider T. Winter cold of eastern continental boundaries induced by warm ocean waters. *Nature*, 2011, 471: 621–624
- 18 Spielhagen R F, Werner K, Sorensen S A, et al. Enhanced modern heat transfer to the Arctic by warm Atlantic water. *Science*, 2011, 331: 450–453
- 19 Ding Q, Wallace J M, Battisti D S, et al. Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland. *Nature*, 2014, 509: 209–212
- 20 Divakarla M G, Barnett C D, Goldberg M D, et al. Validation of atmospheric infrared sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecast. *J Geophys Res*, 2006, 111: D09S15, doi: 10.1029/2005JD006116
- 21 Goldberg M D, Qu Y, McMillin L M, et al. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, 41: 379–389
- 22 Arai K. Method for water vapor profile retrievals by means of minimizing difference between estimated and actual brightness temperatures derived from AIRS data and radiative transfer model. *Int J Adv Comput Sci Appl*, 2012, 3: 145–148
- 23 Monahan K P, Pan L L, McDonald A J, et al. Validation of AIRS v4 ozone profiles in the UTLS using ozonesondes from Lauder, NZ and Boulder, USA. *J Geophys Res*, 2007, 112: D17304, doi: 10.1029/2006JD008181
- 24 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteorol Soc*, 1996, 77: 437–471
- 25 Song J X. Circulation pattern and weather features of strong extratropical cyclone activity in the North Atlantic (in Chinese). *Mar Forecasts*, 1986, 3: 60–65 [宋家喜. 北大西洋强温带气旋活动的环流形势及其天气特征. *海洋预报*, 1986, 3: 60–65]
- 26 Draxler R, Stunder B, Rolph G, et al. HYSPLIT_4 User's Guide. 2014, <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>
- 27 Draxler R, Hess G D. Description of the HYSPLIT_4 modeling system. Maryland: Air Resources Laboratory Silver Spring, 1997

补充材料

图 S1 监测区域地理位置

图 S2 大西洋北部 2015 年 12 月 25–30 日 850 hPa 水汽和流场分布图

图 S3 研究区域 2015 年 12 月 25 日~2016 年 1 月 2 日平均水汽廓线逐日变化

图 S4 研究区域 2015 年 12 月 25 日~2016 年 1 月 2 日平均温度廓线逐日变化

图 S5 研究区域 2015 年 12 月 25 日~1 月 2 日臭氧和水汽的逐日变化

图 S6 卫星监测 2015 年是北极最温暖的冬季

本文以上补充材料见网络版 csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Monitoring of Arctic surface sudden warming events in late December 2015 with satellite remote sensing data

HUANG FuXiang¹, REN SuLing¹, HAN ShuangShuang^{1,2}, SUN Leng³, ZHANG Yan¹ & HUI Wen¹

¹ National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China;

² School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

³ National Climate Center, Beijing 100081, China

The explosively sudden warming of synoptic scale at the Arctic surface is often caused by meridional transport of lower latitude warm air or the ocean warm currents into the Arctic. The explosively sudden warming event that the Arctic surface temperature reached above 0°C on 29th December 2015 caused global concern. In the present paper, a variety of remote sensing data obtained by the AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) flying on board NASA's Aqua satellite were applied to monitor the abrupt changes in the atmospheric temperature, water vapor and ozone over the Fram Strait. AIRS measurements showed that the water vapor and temperature increased significantly beginning on December 27th, reached a peak on the 29th, then began to fall and oscillate, remaining above the December average value until January 2nd. At the same time, the atmospheric ozone showed the opposite change, having significantly reduced beginning on the 27th, and reached the minimum value on the 29th, after which it began to rebound and oscillate, then returned to near the December average value until January 2nd. The water vapor mainly changed from the surface to the 100 hPa height. On December 29th, the maximum increase of water vapor reached six times that of the December average at the 400 hPa height, the temperature changes mainly occurring from the surface to the 250 hPa height. The surface temperature reached to above 0°C on the 29th. The total amount of ozone changes became faster and greater. Compared to December 26th, the total amount of ozone reduced by 102 DU, thus reaching more than 1/3 of the December average. The ozone vertical profile mainly changed at the 400–5 hPa height. Compared to the 27th, the reduction of the ozone vertical profile accounted for 80%–90% of the total amount at this height on December 29th. Using NCEP reanalysis data, further combined with HYSPLIT air mass backward trajectory tracking, the analysis showed that the functionary mechanism which caused the surface explosively sudden warming was that the North Atlantic low-pressure storms rapidly transported large amounts of warm and moist air at low latitudes to the Arctic, which led to a dramatic increase in the low layer temperature and water vapor content. Additionally, the atmosphere was transported from low latitudes to higher latitudes, thereby harmonizing with the vertical motion of the atmosphere from the low level to the upper level. This led to the dramatic changes in ozone distribution from the upper troposphere to the stratosphere, in turn resulting in dramatic changes in the total ozone and vertical profiles. A typical example of satellite remote sensing monitoring showed that it was the power transmission of the synoptic scale which caused the rapid and dramatic changes of heat, water vapor and ozone in the Arctic.

Arctic amplification, AIRS remote sensing data, National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data, Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) back-ward trajectory analysis

doi: 10.1360/N972016-00460