

2009 年一次华北强桑拿天气过程的动力识别*

杨帅^{1)†} 高守亭¹⁾ 陈斌²⁾

1) (中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029)

2) (中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

(2011 年 11 月 11 日收到; 2011 年 12 月 8 日收到修改稿)

本文数值模拟并诊断分析了 2009 年 7 月华北的一次桑拿天过程, 分析了高温高湿天气的环流特征, 温度、湿度的水平和垂直分布特征, 位涡分布特征等. 分析发现, 此次桑拿天事件高层为反气旋性环流的高压控制, 水平分布图上, 低层相对湿度大. 垂直剖面上, 中低层为下沉气流和暖湿区, 有明显的水汽梯度和垂直温度梯度, 有倾斜的位涡分布. 既然桑拿天发生在夏季普遍高温的大环境之下, 因此靠单纯的温度或湿度来动力识别和诊断桑拿天, 有较大难度. 本文抓住华北地区桑拿天过程高温、高湿、高位涡的特点, 引入一个适合于桑拿天的湿热力位涡参数 (MTPV, 它表示为 $\nabla q \cdot (\nabla \theta \times \nabla Q)$, 这里 q 是湿度, 表示为大气或者云中水汽和所有水凝物的总和, θ 是位温, Q 是位涡), 对桑拿天进行动力诊断分析, 并通过实际个例的计算分析作出简化. 个例分析发现, 此次高温高湿的桑拿天过程伴随 MTPV 的异常. 虽然 2009 年 7 月此次华北地区桑拿天过程有较高的温度, 较大的湿度和倾斜位涡发展, 但是单个变量的范围远大于我们要研究的华北地区桑拿天的爆发范围. 而结合这三个变量引入的 MTPV 及其简化形式, 无论从经向还是纬向剖面图来看, MTPV 的异常大值区相对集中在北京及其周边的华北地区对流层的低层, 并维持. 因而, MTPV 及其简化形式均能对此次高温高湿的桑拿天进行较好的动力识别.

关键词: 桑拿天, 高温高湿, 湿热力位涡参数

PACS: 92.60.Wc, 92.60.Ry, 92.60.Qx

1 引言

在全球变暖的气候背景下, 由于人类活动和城市热岛效应, 高温高湿过程 (国外称热浪, Heat Wave, 中国俗称“桑拿天气”) 已成为世界范围内频繁发生的极端天气事件, 尤以大城市为甚. 世界各国对高温高湿天气的研究很多, 但是至今为止没有统一的定义. 高温高湿通常是指一段不同寻常的让人感到闷热、湿度又大的天气, 一般可以持续几天甚至一周, 使人体耐力超过限度导致发病甚至死亡. 高温高湿天气频繁发生在人口密集的大城市, 与其相关的健康问题引起了越来越多的关注^[1-5]. 据美国国际疾病预防控制中心统计显示: 一般年份时, 美国每年约有近 400 人死于夏季闷热天气. 夏季闷热天气是仅次于冬季冻害的陆地上的自然灾害, 其

危害性相当大. 高温高湿会给人民生活 and 工农业生产带来影响, 尤其是用水、用电的需求量急剧上升, 造成供需矛盾, 严重影响生活和生产. 另外, 高温高湿所带来的污浊的大气条件使得城市地区的污染物不能扩散, 从而加重湿热天气所带来的危险压力, 造成大范围的健康问题. 例如: 1966 年, 美国圣路易斯的与湿热有关的死亡统计表明, 在城市中密集街道和高楼地区死亡率较高, 而这些地区的空气质量在高温高湿期间也很差. 这使得高温高湿对人体健康的影响问题成为许多国际机构, 如世界气象组织 (WMO)、世界卫生组织 (WHO)、联合国环境规划署 (UNEP) 和各国气象、环境和流行病等方面科学家关注的焦点. 近年来, 我国的高温高湿天气也频繁出现, 如 1999 年 8 月, 江南、华南出现持续高温高湿天气. 2006 年 7 月中旬至 8 月, 重庆、川东、鄂西、陕南等地遭受罕见的持续高温热浪袭

* 国家自然科学基金项目 (批准号: 40805001, 41105027) 和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题项目 (批准号: 2009LASW-B02) 资助的课题.

† E-mail: ys_ys@126.com

击,其中重庆最为严重,当地最高气温高达 44.5 °C,重庆、四川两地直接经济损失超过 150 亿元 [6].

华北地区比较干旱,不象我国南方部分地区夏季长期处于高温高湿的环境中,使得人体对这种天气缺乏预警性和环境适应性,从而造成更大的危害,严重影响了人们的正常生活,造成了巨大的经济损失.而且,其发生日趋频繁,是一个重要的高影响天气现象.对其进行研究,是我国减少高温高湿天气造成的人员伤亡和经济损失的迫切需要,是国家防灾减灾的一个重要方面.过去对华北地区高温高湿天气的研究以某个地区的高温天气统计及其大气环流分析居多 [7-9].高守亭等 [10] 分析了 2002 年 7 月 30 日—8 月 4 日北京地区典型高温高湿天气的环流、温湿特征和水汽输送特征,指出在异常偏西和偏北的副热带高压控制下,下沉气流抑制了低层水汽的抬升,使得水汽积聚在对流层低层,是导致高温高湿天气的直接原因.2005 年 8 月 15 日,由于受副热带高压控制,并以东南风为主,这样大量的水汽被输送到了北京市上空,再加上大于 30 °C 的高温,因此就形成了北京闷热潮湿的桑拿天气.2006 年 7 月 15 日,由于“碧利斯”(碧利斯台风登陆后已经减弱成为热带风暴)的外围偏东气流影响,大量的海上水汽被输送到华北上空,加剧了北京市的空气湿度(夜间最大相对湿度达到了 90% 以上),造成了北京的高温高湿天气.

虽然以上对高温高湿天气进行了很多的研究,但多半是偏于环流形势的研究,但是就其细致的资料分析和动力诊断并没有涉及很多.可见高温高湿天气的细致资料分析和动力诊断科学上也急需加以解决,以期减少这类高影响天气带来的危害.因此本文在第 2 部分提出一个适用于桑拿天的新的动力因子——湿热力位涡参数,并解释它的物理意义以及守恒性.第三部分利用湿热力位涡参数来动力识别 2009 年 7 月的一次桑拿天气过程.最后给出小结.

2 诊断桑拿天的动力因子——湿热力位涡参数

2.1 湿热力位涡参数的提出

据统计分析北京地区夏季高温闷热天气的季节内分布特征,发现高温天气主要集中在 6 月下旬和 7 月,最高温往往超过 40 °C,而闷热天气(桑拿

天)约 3/4 以上集中在 7 月中旬至 8 月上旬 [9],桑拿天的气温反而不如 6 月份单纯的高温天气发生时气温高.只是由于较高的湿度,使得人们“感知到”比较闷热.可见,虽然桑拿天发生在夏季普遍高温的大环境之下,但靠单纯的温度来诊断桑拿天,有较大难度.由于桑拿天的高湿,水汽效应也是一个必须考虑的因素.从已有的研究中,桑拿天是发生在夏季相对稳定的暖性高压控制的大气环流背景下,因此位涡是桑拿天的一个重要因子.以 2009 年 7 月华北的一次桑拿天过程为例,分析其环流和水汽等分布特征,发现此次桑拿天事件高层为反气旋性环流的高压控制(图 1(a)),水平分布图上,低层相对湿度大(图 1(b)),三角形为北京所在位置.垂直剖面上,中低层为下沉气流和暖湿区(图 2(a), (b)),有水平水汽梯度(图 1(b))和明显的垂直水汽、温度梯度(图 2(a), (b)),且有倾斜的位涡分布(图 2(c)).结合以上几点,这里提出一个适用于桑拿天的新的动力因子——湿热力位涡参数(MTPV),对桑拿天进行动力诊断分析.它的表达式为

$$\begin{aligned} \text{MTPV} &= \nabla q \cdot (\nabla \theta \times \nabla Q) \\ &= \underbrace{\frac{\partial \theta}{\partial x} J_{yz}(Q, q)}_a + \underbrace{\frac{\partial \theta}{\partial y} J_{xz}(q, Q)}_b + \underbrace{\frac{\partial \theta}{\partial z} J_{xy}(Q, q)}_c \end{aligned} \quad (1)$$

这里 q 是湿度, θ 是位温, Q 是位涡,其表达式为 $Q = \frac{\xi_a \cdot \nabla \theta}{\rho}$, ξ_a 为三维绝对涡度矢量, ρ 是密度. (1) 式中, a 项中的

$$J_{yz}(Q, q) = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q}{\partial y} & \frac{\partial Q}{\partial z} \\ \frac{\partial q}{\partial y} & \frac{\partial q}{\partial z} \end{vmatrix} = \frac{\partial Q}{\partial y} \frac{\partial q}{\partial z} - \frac{\partial Q}{\partial z} \frac{\partial q}{\partial y},$$

b 和 c 项中的

$$J_{xz}(q, Q) = \begin{vmatrix} \frac{\partial q}{\partial x} & \frac{\partial q}{\partial z} \\ \frac{\partial Q}{\partial x} & \frac{\partial Q}{\partial z} \end{vmatrix},$$

$$J_{xy}(Q, q) = \begin{vmatrix} \frac{\partial Q}{\partial x} & \frac{\partial Q}{\partial y} \\ \frac{\partial q}{\partial x} & \frac{\partial q}{\partial y} \end{vmatrix}.$$

MTPV 抓住了华北地区桑拿天过程高温、高湿、高位涡的特点(图 1 和图 2).因此可以用来动力识别桑拿天.

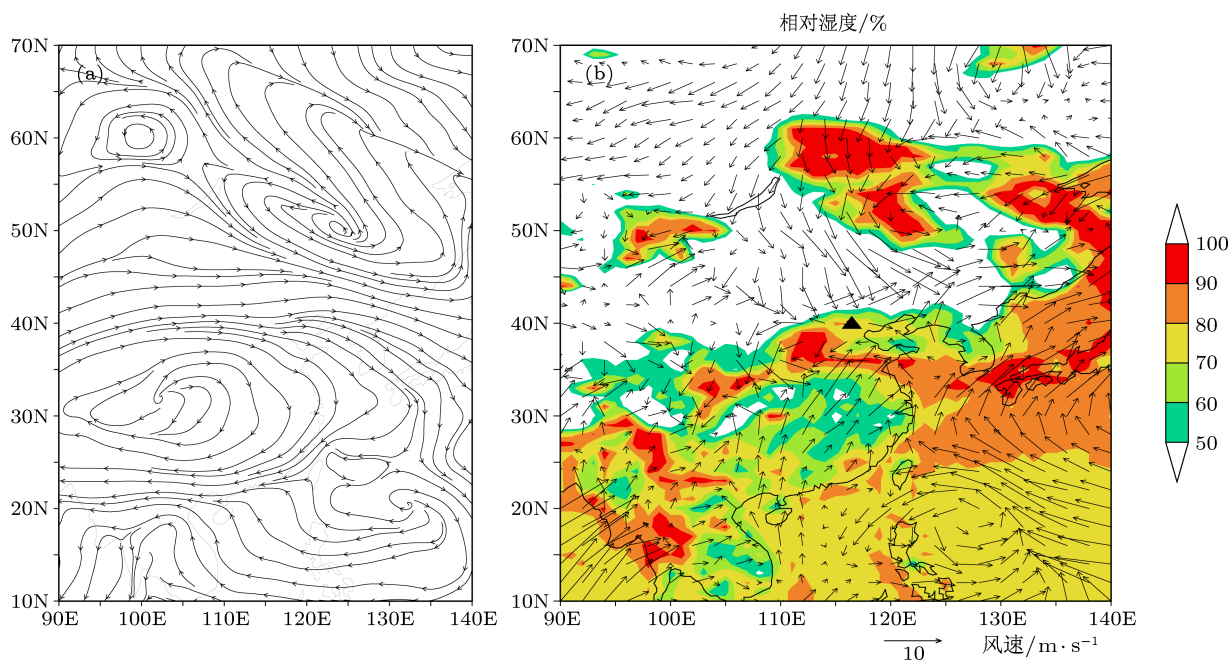


图1 2009年7月8日06时流场、相对湿度等的水平分布 (a) 200 hPa 流场; (b) 1000 hPa 风场 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和相对湿度场 (阴影, %)

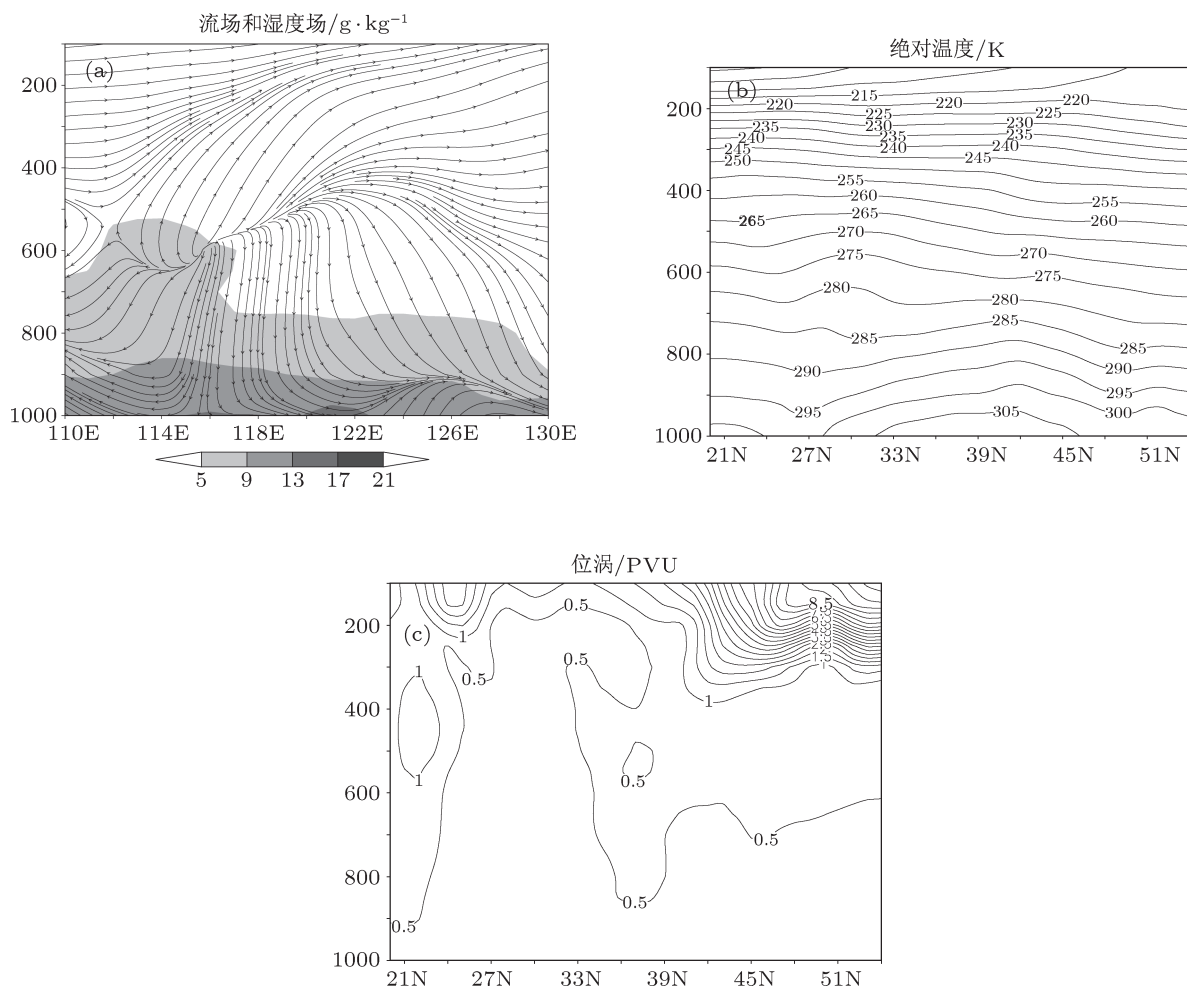


图2 2009年7月8日06时流场、湿度场、绝对温度、位涡的垂直分布 (a) 流场和湿度场 (阴影, 单位 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 沿 39.9°N 的垂直剖面图; (b) 绝对温度 (单位 K); (c) 位涡 (单位 PVU) 沿着 116.5°E 的经向垂直剖面图

2.2 物理意义和守恒性

如图 3 所示, 在笛卡儿坐标系中, 若 y 轴 (x 轴) 表示南北 (东西) 方向, 假定位温由南到北递减, 位涡由东到西递减, 水汽由上到下递增且由南到北递减. 则湿度梯度 ∇q 、位温梯度 $\nabla \theta$ 以及位涡梯度 ∇Q 的方向在 x, y, z 轴构成的笛卡儿坐标系中如图 3 所示. 由公式 (1), MTPV 表示湿度梯度、位温梯度以及位涡梯度的混合积. 它的物理意义明确, 其大小表示由 $\nabla q, \nabla \theta$ 以及 ∇Q 构成的六面体的体积, 方向取决于三者的配置. 要构成 MTPV 的大值, 固然要有大的水汽梯度、位温梯度以及位涡梯度. 在一定 $\nabla q, \nabla \theta$ 以及 ∇Q 值的前提下, 若三个梯度在同一平面上, MTPV 值为 0, 信号最弱; 只有当他们构成底为矩形的正六面体的时候, 体积最大, MTPV 信号最强.

关于其守恒性, 要从 Ertel^[11] 的连续方程的推导得出. 首先, 看连续方程的 Ertel 形式是如何导出的^[12].

连续方程的一般形式为

$$(d\rho/dt) + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial q^1} \\ \frac{\partial}{\partial q^2} \\ \frac{\partial}{\partial q^3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x^j}{\partial q^i} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x^1} \\ \frac{\partial}{\partial x^2} \\ \frac{\partial}{\partial x^3} \end{pmatrix} = \frac{(M_i^j)}{J_x(q^1, q^2, q^3)} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x^1} \\ \frac{\partial}{\partial x^2} \\ \frac{\partial}{\partial x^3} \end{pmatrix}$$

$$= \frac{1}{J_x(q^1, q^2, q^3)} \begin{pmatrix} M_{1.1} & M_{1.2} & M_{1.3} \\ M_{2.1} & M_{2.2} & M_{2.3} \\ M_{3.1} & M_{3.2} & M_{3.3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x^1} \\ \frac{\partial}{\partial x^2} \\ \frac{\partial}{\partial x^3} \end{pmatrix} = \frac{1}{J_x(q^1, q^2, q^3)} \begin{pmatrix} J_x(, q^2, q^3) \\ J_x(q^1, , q^3) \\ J_x(q^1, q^2,) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

这里 $J_x(, q^2, q^3) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x^1} & \frac{\partial}{\partial x^2} & \frac{\partial}{\partial x^3} \\ \frac{\partial q^2}{\partial x^1} & \frac{\partial q^2}{\partial x^2} & \frac{\partial q^2}{\partial x^3} \\ \frac{\partial q^3}{\partial x^1} & \frac{\partial q^3}{\partial x^2} & \frac{\partial q^3}{\partial x^3} \end{pmatrix}$. 应用 (4) 式, 则有

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \dot{q}^1}{\partial q^1} \\ \frac{\partial \dot{q}^2}{\partial q^2} \\ \frac{\partial \dot{q}^3}{\partial q^3} \end{pmatrix} = \frac{1}{J_x(q^1, q^2, q^3)} \begin{pmatrix} J_x(\dot{q}^1, q^2, q^3) \\ J_x(q^1, \dot{q}^2, q^3) \\ J_x(q^1, q^2, \dot{q}^3) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

这里 \mathbf{v} 是速度矢量.

经过从笛卡儿坐标到广义坐标的转换, 并用比容 α 代替密度 ρ , 方程 (2) 可以被写成如下形式^[12]

$$\frac{d}{dt} [\alpha J_x(q^1, q^2, q^3)] = \alpha J_x(q^1, q^2, q^3) \frac{\partial \dot{q}^n}{\partial q^n}, \quad (3)$$

这里 $J_x(q^1, q^2, q^3) = \text{Det}(\partial q^j / \partial x^i)$, 若 M_i^j 是矩阵 $(\partial q^j / \partial x^i)$ 的伴随矩阵, 则有

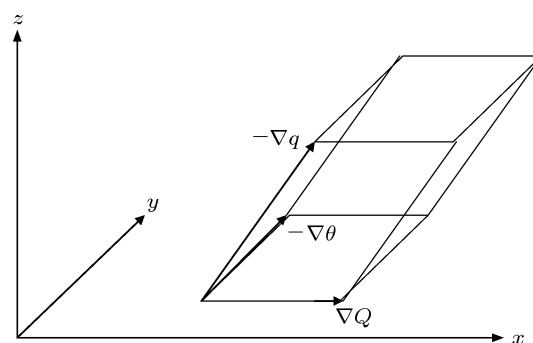


图 3 湿度梯度 ∇q 、位温梯度 $\nabla \theta$ 、位涡梯度 ∇Q 配置的示意图. x 轴, y 轴分别表示东西和南北方向

将 (5) 式代入 (3) 式, 则有

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [\alpha J_x(q^1, q^2, q^3)] \\ &= \alpha [J_x(\dot{q}^1, q^2, q^3) + J_x(q^1, \dot{q}^2, q^3) \\ & \quad + J_x(q^1, q^2, \dot{q}^3)]. \end{aligned} \quad (6)$$

这里所有的空间导数都是关于笛卡儿坐标系的. 方程 (6) 就是连续方程的 Ertel 形式^[11]. 这里 $\dot{q}^i = \frac{dq^i}{dt}$.

当 ψ^i 取为任意的守恒量 (不变量) 时, 将 ψ^i 代入连续性方程 (6), 这时连续方程的这种形式发挥其最大优势. 因为当 ψ^i ($i = 1, 2, 3$) 是任意的守恒的场函数时, 即 $d\psi^i/dt = \dot{\psi}^i = 0$ 时, 方程 (6) 的左边等于

$$\frac{d}{dt} [\alpha J_x(\psi^1, \psi^2, \psi^3)] = \frac{d}{dt} (\alpha \nabla \psi^1 \cdot \nabla \psi^2 \times \nabla \psi^3),$$

方程 (6) 的右边等于零. 则有

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} [\alpha J_x(\psi^1, \psi^2, \psi^3)] \\ &= \frac{d}{dt} (\alpha \nabla \psi^1 \cdot \nabla \psi^2 \times \nabla \psi^3) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

在本文的研究中, 桑拿天过程中无降水发生, 无水凝物掉落出气块, 因此某一气块的湿度 q 可以认为是近似不变的. 而且位温 θ 和位涡 Q 在绝热无摩擦大气中也是守恒量, 所以 $MTPV = \nabla q \cdot (\nabla \theta \times \nabla Q)$ 在桑拿天过程中是个近似守恒量, 因此可以用来动力识别和追踪桑拿天.

3 湿热力位涡参数在桑拿天中的应用

我们利用 WRF 模式对 2009 年 7 月 7 日 00 时—10 日 00 时华北的一次桑拿天过程进行了数值模拟. 模式选取 $1^\circ \times 1^\circ$ 分辨率的 NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) 资料 (间隔 6 h), 并将初始时刻的常规地面、探空资料通过 WRF-3DVAR 模块引入模式来改善初始场. 模拟采用水平分辨率分别为 27 km 和 9 km 的双重嵌套方案, 具体的参数化方案的选取等见文献 [13]. 模拟的初始时刻为 2009 年 7 月 7 日 00 时, 共积分 72 h, 模式输出资料间隔为 1 h. 对比图 4 左列 (实况) 与右列 (模拟), 模式模拟的流场尤其是高层的高压中心及其外围环流 (图 4(a), (b))、湿度场 (图 4(c), (d))、

温度场 (图 4(e), (f)) 等与实况均较符合. 下面利用模式输出资料, 来计算湿热力位涡参数.

从图 1 和图 2 的分析, 虽然 2009 年 7 月此次华北地区桑拿天过程有较高的温度, 较大的湿度和倾斜位涡发展, 但是单个变量的范围远大于我们要研究的华北地区桑拿天的爆发范围. 而结合这三个变量引入的湿热力位涡参数 MTPV, 从经过北京地区的纬向 (取 39.9°E , 图 5(a), (b)) 和经向 (取 116.5°E , 图 5(c)) 的剖面图, MTPV 的异常大值区相对集中在北京及其周边地区对流层的低层, 并维持. 分析 (1) 式中的 a, b, c 项 (图 5(d)—(f)), 发现 c 项占主导 (图 5(d)), 其量级最大与 MTPV 一致, 涵盖的范围、分布形态与 MTPV 也非常一致. 因此我们可以用 c 项来近似代替 MTPV, 从而作出简化, 来动力识别桑拿天.

从 MTPV 的定义可见, MTPV 与大气温度和相对湿度有关, 在分析时段内, 水汽输送和辐合集中在北京及周边的华北地区, 增大了该地区的相对湿度, 加上副热带高压中的下沉增温, 低层空气高温高湿, 及高层高位涡值的下传, 因此出现了 MTPV 的异常.

当然, 本文只分析了 2009 年的一次华北强桑拿天过程, 并尝试性的将提出的湿热力位涡参数用于此次过程的分析. 下一步要用更多的个例来检验其效果. MTPV 包含了大气动力、热力及水汽的综合作用, 相对于常用的温度、湿度等物理量来说, 它能在一定程度上反映风场、温度场和水汽场的相互作用, 从而体现出大气变化的综合结果. 而且, 其守恒性更有利于桑拿天的动力识别和追踪. 通过推导 MTPV 及其简化形式 c 项的倾向方程, 来计算 MTPV 的倾向, 依据 MTPV 倾向的强弱, 就可以预测未来短期华北地区高温高湿的桑拿天的发生及强弱趋势. 这也是我们下一步要做的工作.

4 结论

本文数值模拟并诊断分析了 2009 年 7 月 7 日 00 时—10 日 00 时华北地区的一次高温高湿的强桑拿天过程, 分析了其环流特征, 温度、湿度的水平和垂直分布特征, 位涡分布特征等. 分析发现, 虽然桑拿天发生在高温的大环境之下, 但靠单纯的温度或湿度来识别桑拿天, 范围偏大, 有较大难度. 因此引入一个适合于桑拿天的湿热力位涡参数——MTPV, 通过计算对桑拿天进行诊断, 发现高

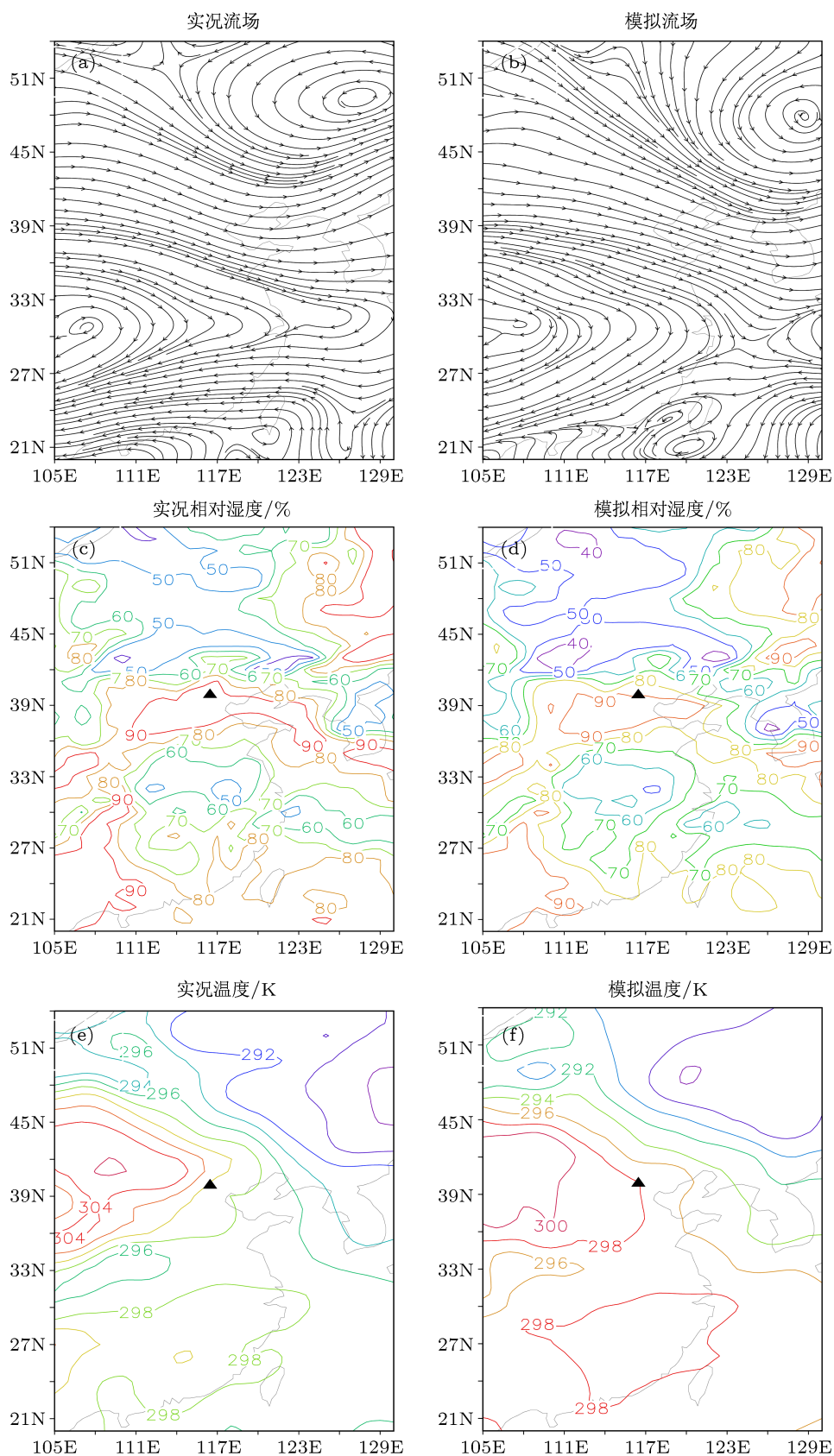


图4 2009年7月10日00时实况与模拟的对比 (a) 实况200 hPa 流场; (b) 模拟200hPa 流场; (c) 实况900 hPa 相对湿度 (%); (d) 模拟900hPa 相对湿度 (%); (e) 实况900 hPa 温度 (K) (f) 模拟900 hPa 温度 (K)

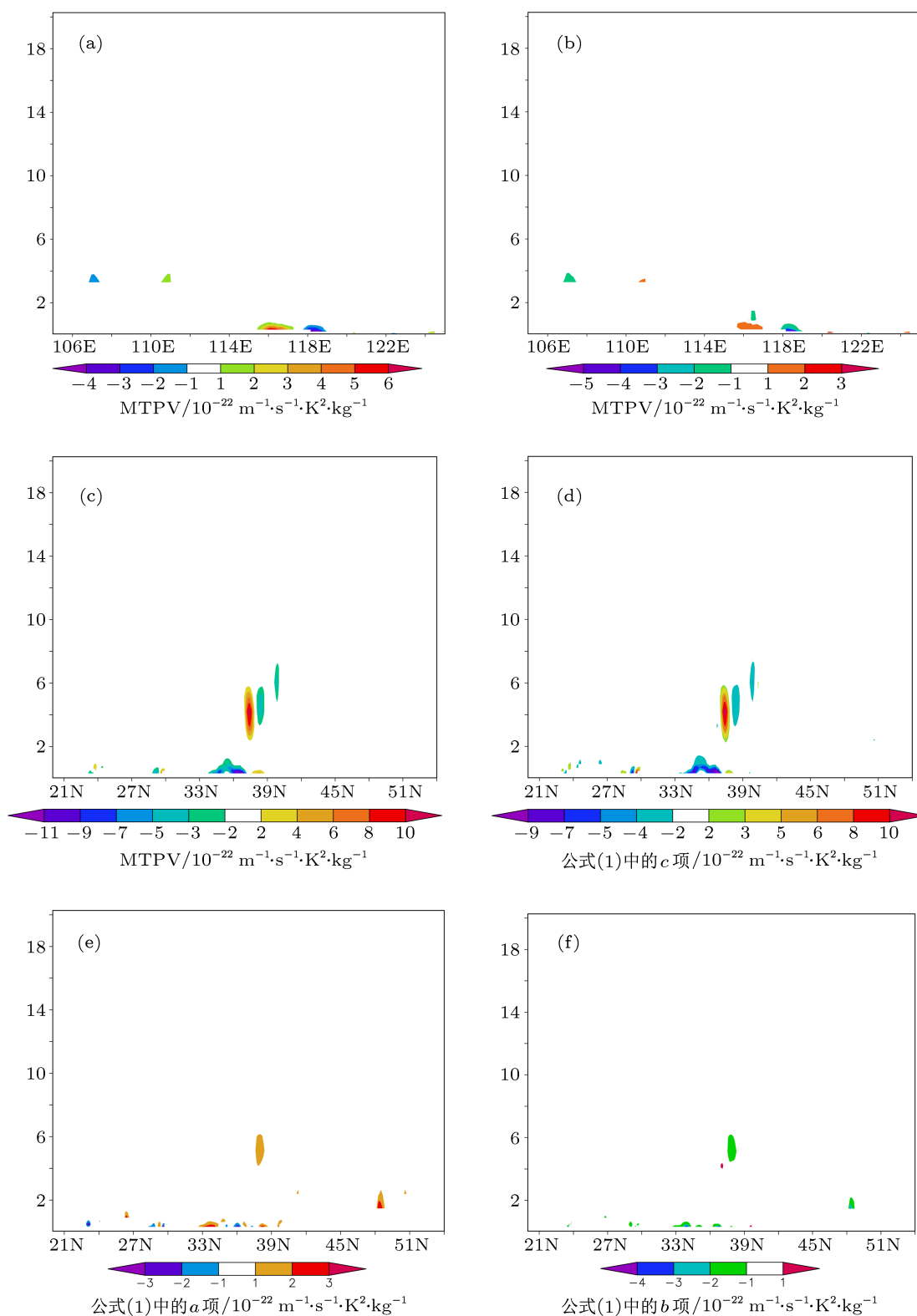


图5 MTPV及公式(1)中各项 ($10^{-22} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ K}^2 \text{ kg}^{-1}$) 的垂直剖面图 (a) 2009年7月8日06时MTPV; (b) 9日06时MTPV沿着39.9°N的纬向剖面图; (c) 2009年7月8日06时MTPV; (d) 公式(1)中的c项; (e) 公式(1)中的a项; (f) 公式(1)中的b项沿着116.5°E的经向剖面图

温高湿的桑拿天伴随MTPV的异常. 通过展开MTPV的表达式, 发现(1)式中的c项是主导项, 从而对MTPV作出近似和简化. 分析发现, MTPV

及其简化形式均能对此次高温高湿的桑拿天进行较好的动力识别.

- [1] Kalkstein L S 1993 *Lancet* **342** 1379
- [2] Gaffen D J, Ross R J 1998 *Nature* **396** 529
- [3] McGeehin M A, Mirabelli M 2001 *Environ Health Perspect* **109** 185
- [4] Karl T R, Trenberth K E 2003 *Science* **302** 1719
- [5] Meehl G A, Tebaldi C 2004 *Science* **305** 994
- [6] Li W, Zhu Y F 2007 *Meteorological Monthly*. **33** 108 (in Chinese) [李威, 朱艳峰 2007 气象 **33** 108]
- [7] Xie Z, Cao H X 1996 *Acta. Meteor. Sinica* **54** 501 (in Chinese) [谢庄, 曹鸿兴 1996 气象学报 **54** 501]
- [8] Zheng S H, Wang S R, Wang Y M 2000 *Acta. Geographica. Sinica* (Supplement) 55 119 (in Chinese) [郑水红, 王守荣, 王有民 2000 地理学报 **55**(增刊) 119]
- [9] Wang Y C, Ge G Q, Tao Z Y 2003 *Meteorological Monthly* **29** 23 (in Chinese) [王迎春, 葛国庆, 陶祖钰 2003 气象 **29** 23]
- [10] Gao S T, Zhou Y S, Lei T, Sun J H 2005 *Sci. China* (Series D) **35** 107 (in Chinese) [高守亭, 周玉淑, 雷霆, 孙建华 2005 中国科学 D 辑 **35** 107]
- [11] Ertel H 1960 *Gerlands Beitr. Geophys.* **69** 357
- [12] Zdunkowski W, Bott A 2003 *Dynamics of the Atmosphere: A Course in Theoretical Meteorology* (1st Ed.) (United Kingdom: Cambridge University Press), pp268–270
- [13] Wang D H, Yang S, Zhong S X, Han Y 2009 *Chinese J. Atmos. Sci.* **33** 1238 (in Chinese) [王东海, 杨帅, 钟水新, 韩瑛 2009 大气科学 **33** 1238]

Dynamical identification of a heavy “sauna” weather event in northern China in 2009*

Yang Shuai^{1)†} Gao Shou-Ting¹⁾ Chen Bin²⁾

1) (Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

2) (State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

(Received 11 November 2011; revised manuscript received 8 December 2011)

Abstract

A “sauna” weather event in northern China in July 2009 is numerically simulated and diagnostically analyzed. The atmospheric circulation characteristics, the horizontal and vertical distributions of temperatures and moistures, and the distribution of potential vorticities are studied. It is found that anticyclone dominates the upper troposphere during the “sauna” weather event. In the horizontal chart, the relative humidity in the lower troposphere is large. From the vertical sections, descending airflow dominates the moist and warm sectors at the middle and lower levels. There are clear humidity gradient, evident vertical gradient of temperature, and slanting distribution of potential vorticity. The “sauna” weather event occurs in the generally high-temperature environment of summertime, so it is difficult to dynamically identify and diagnose the “sauna” weather depending on some single factor, e.g., temperature or moisture. According to the high-temperature, large-moisture, and strong-potential vorticity characteristics during the “sauna” weather in northern China, a moist thermal potential vorticity parameter MTPV, may be expressed as $\nabla q \cdot (\nabla \theta \times \nabla Q)$, where q is the sum of water vapor and all hydrometeors including cloud water, rain water, cloud ice, snow and graupel; θ is potential temperature; Q is potential vorticity which is appropriate for “sauna” weather, is introduced. Then it is used to dynamically diagnose “sauna” weather event. And it is simplified by calculation analysis in case study. It is found that the MTPV anomaly is accompanied by the “sauna” weather process. Although high temperature, large moisture and strong slanting potential vorticity development present in the “sauna” weather process in northern China in July 2009, their coverages for these single variables are larger than our target region of this “sauna” weather event. While for the MTPV and its simplified form combining these variables, their anomalies maintain in the lower troposphere around Beijing and its peripheral areas in northern China, viewing from either zonal or meridional section. Therefore, both MTPV and its simplified form can better dynamically identify this high-temperature and high-humidity “sauna” weather event.

Keywords: “sauna” weather, high temperature and high moisture, moist thermal potential vorticity parameter

PACS: 92.60.Wc, 92.60.Ry, 92.60.Qx

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40805001, 41105027), and the Opening Foundation of the State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China (Grant No. 2009LASW-B02).

† E-mail: ys_ys@126.com