

王文儒, 白山. 锋面滑升运动的物理机制[J]. 气象, 2010, 36(9): 42-46.

## 锋面滑升运动的物理机制

王文儒 白 山

辽宁省辽阳市气象局, 辽阳 111000

**提 要:** 锋面滑升运动是形成锋面降水的重要原因, 弄清锋面滑升运动的物理机制对锋面降水的预报是必要的。依据大气动力学原理, 对锋面滑升运动的物理成因进行了研究。已知暖空气沿锋面的滑动与暖空气垂直于锋面的风速( $u_w$ )和锋面移动速度( $c$ )之差有关。当暖空气垂直于锋面的风速小于锋面的移动速度( $u_w < c$ )时, 暖空气向上滑动; 当暖空气垂直于锋面的风速大于锋面的移动速度( $u_w > c$ )时, 暖空气向下滑动。因为锋面的移动速度小于锋后冷空气垂直于锋面的风速( $c < u_c$ ), 所以, 暖空气沿锋面的滑动与锋区中垂直于锋面方向的风速的分布有关, 当锋区中有  $\partial u / \partial x > 0$  时, 暖空气必定向下滑动; 暖空气若向上滑动, 锋区中必为  $\partial u / \partial x < 0$ 。本文依据大气动力学原理给出了锋面坡度公式, 通过演绎该式, 得到了分析锋区中  $\partial u / \partial x$  的公式, 结果表明: (1) 当锋面坡度增大时, 大气沿锋面向上滑动, 反之向下滑动。(2) 锋面强度加强时, 大气沿锋面向上滑动, 反之向下滑动。(3) 暖平流时上滑, 冷平流时下滑。(4) 当锋面上出现气旋式涡度增大时, 大气沿锋面向上滑动, 反之向下滑动。(5) 当垂直于锋面方向的地转风沿锋面由下向上增大时, 大气沿锋面向上滑动, 反之向下滑动。

**关键词:** 锋面, 滑升运动, 滑动成因

### Physical Mechanism of Gliding Motion on the Frontal Surface

WANG Wenru BAI Shan

Liaoyang Meteorological Office of Liaoning Province, Liaoyang 111000

**Abstract:** Air upglide motion on the frontal surface is the important cause for the frontal precipitation. That the mechanism of air upglide motion and downglide motion on the frontal surface is understood is necessary to forecast frontal precipitation. Based on the dynamics of atmosphere, the cause for air upglide motion and downglide motion on the frontal surface was studied. The glide motion of warm air on the frontal surface is related to the difference between the wind speed of warm air in the direction perpendicular to the frontal surface and the moving speed of the frontal surface. Warm air upglide occurs when the wind speed of warm air in the direction perpendicular to the frontal surface is less than the moving speed of frontal surface ( $u_w < c$ ); but warm air downglide occurs when the wind speed of warm air in the direction perpendicular to the frontal surface is more than the moving speed of the frontal surface ( $u_w > c$ ). Because the moving speed of frontal surface is less than the wind speed of cold air in the direction perpendicular to the frontal surface ( $c < u_c$ ), so the glide motion of warm air on the frontal surface is related to the distribution of the wind speed in the direction perpendicular to frontal surface in the frontal zone. Warm air surely downglides when  $\partial u / \partial x > 0$  in the frontal zone; however,  $\partial u / \partial x < 0$  in the frontal zone is the necessary condition of upglide motion of warm air. Based on the dynamics of atmosphere, this article shows the formula of the frontal slope. Deduction of this formula works out the formula for analyzing  $\partial u / \partial x$ . The following conclusions can be drawn. First, air is upglide motion on the frontal surface when the frontal slope increases, on the contrary, downglide. Second, air is upglide motion when frontal intensity increases, on the contrary, downglide. Third, air is upglide motion when it flows from warm to cold; air is downglide motion when it flows from cold to warm. Fourth, air is upglide motion when the cyclonic vorticity develops on the frontal

surface, on the contrary, downglide. Fifth, air is upglide motion when the speed of geostrophic wind in the direction perpendicular to the frontal surface is rising from lower to upper frontal surface, on the contrary, air is downglide motion.

**Key words:** frontal surface, gliding motion, causes of gliding

## 引 言

锋面滑升运动是锋面降水的重要原因, 预报锋面降水时必须分析锋面滑升运动。因此, 有必要弄清是什么原因产生了锋面滑升运动。在教科书中, 有锋面滑升运动形成的垂直速度公式<sup>[2-3]</sup>, 但该式不能揭示产生锋面滑升运动的物理因子, 对锋面滑升运动的成因尚缺少理性的、系统的认识, 其他常见对锋面滑升运动物理过程的描述也显露出表面性、片面性、主观臆想性。因而, 从理论上弄清锋面滑升运动的物理机制是非常必要的。要弄清锋面滑升运动的物理机制, 首先需要求得锋面坡度公式。已知的锋面坡度公式是温度为间断面的锋面坡度公式<sup>[2-3]</sup>, 即马古拉斯公式。该式过分简化, 不能揭示锋面滑升运动的物理机制。本文通过建立模型(图 1)依据大气动力学原理<sup>[1]</sup>, 经过数学演绎, 推导得出温度为连续函数的锋面坡度公式(马古拉斯公式是其特例)。在该式的基础上, 进一步推演出锋面滑升运动与锋面坡度、锋面强度及温度平流间的关系。由大气动力学方程又推导出了锋面滑升运动与风场的关系。应用上述结果, 解释了锋面滑升运动与天气形势的关系。从而解决了如何分析锋面滑升运动的问题, 明确了应该分析什么和怎样去分析。

## 1 锋面坡度公式

如图 1, 假定初始时刻锋面 MN 与地面是垂直的, 在水平气压梯度力的作用下, 锋面 MN 倾斜至 M'N', 达地转平衡, 锋面坡度为

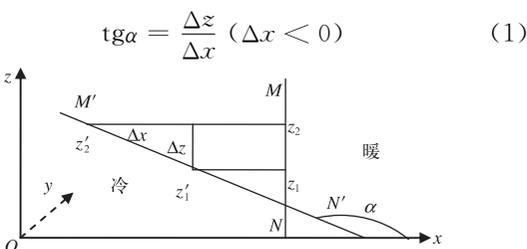


图 1 锋面坡度示意图  
Fig. 1 Sketch map of the frontal slope

令  $c_1, c_2$  分别为  $z_1, z_2$  高度上锋面的水平位移速度, 则

$$\Delta x = \int_0^t (c_2 - c_1) dt \quad (2)$$

气块沿锋面滑升的垂直速度为<sup>[2-3]</sup>

$$w = (u - c) \operatorname{tg} \alpha$$

假定  $z_1, z_2$  高度锋面上的气块沿锋面的滑升速度相等, 则

$$\begin{aligned} u_1 - c_1 &= u_2 - c_2 \\ c_2 - c_1 &= u_2 - u_1 \end{aligned}$$

代入式(2), 则

$$\Delta x = \int_0^t (u_2 - u_1) dt \quad (3)$$

将自由大气的运动方程<sup>[1]</sup>代入式(3), 有

$$\Delta x = \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt - \frac{1}{f} \int_0^t \left( \frac{dv_2}{dt} - \frac{dv_1}{dt} \right) dt \quad (4)$$

由于  $y$  方向与锋面平行, 可认为  $\frac{\partial v}{\partial x} \gg \frac{\partial v}{\partial y}$ , 假定

$$w_1 \frac{\partial v_1}{\partial z} = w_2 \frac{\partial v_2}{\partial z}, \text{ 忽略小项, 则}$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt - \frac{1}{f} \left[ \int_0^t \left( \frac{\partial v_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} \right) dt - \int_0^t \left( \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} \right) dt \right] \quad (5) \end{aligned}$$

由于锋面为物质面<sup>[2-3]</sup>, 即锋面上的气块不离开锋面, 并假定初始时刻风不随高度改变, 则

$$\Delta x = \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt - \frac{1}{f} [v(z'_2) - v(z'_1)]$$

$$\Delta x = \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt - \frac{1}{f} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial z} \Delta z \right)$$

$$\Delta x = \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt - \frac{1}{f} \left( \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{g}{fT} \frac{\partial T}{\partial x} \Delta z \right)$$

上式两边同除  $\Delta x$ , 整理得

$$\operatorname{tg} \alpha = - \frac{fT}{g} \frac{\partial T}{\partial x} \left[ f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{f}{\Delta x} \int_0^t (u_{g2} - u_{g1}) dt \right] \quad (6)$$

式(6)即为普遍意义的锋面坡度公式,当锋区宽度无限变窄而趋于零时,对式(6)取极限,即得马古拉斯锋面坡度公式。

用实际资料,按式(6)计算出的锋面坡度之值与实际的锋面坡度的大小非常吻合。式中括号内第三项较前两项小得多。

## 2 锋面滑升运动的物理机制

### 2.1 锋面滑升运动与锋面特征的关系

暖空气沿锋面滑升的垂直速度为<sup>[2-3]</sup>

$$w = [u_w - c] \operatorname{tg} \alpha$$

冷锋的移速略小于  $u_c$ <sup>[2]</sup>,则暖空气沿锋面向上滑的必要条件是  $u_c > u_w$ ,即锋区有  $\frac{\partial u}{\partial x} < 0$ ,由于锋面上的气块不离开锋面,故可对锋面坡度取个别变化,对式(6)取全导数,并视  $g$ 、 $T$ 、 $\Delta x$  为常数,略去小项,有

$$\frac{g}{fT} \frac{d}{dt} (\operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) = - \frac{d}{dt} (f + \frac{\partial v}{\partial x}) + f \frac{\partial u_g}{\partial x} \quad (7)$$

将  $x$  方向的运动方程取对  $y$  的偏导数,略去小项,并注意  $\frac{\partial u_g}{\partial x} = - \frac{\partial v_g}{\partial y}$ ,得

$$\frac{\partial u_g}{\partial x} = \frac{1}{f} \frac{d}{dt} (\frac{\partial u}{\partial y}) - \frac{\partial v}{\partial y}$$

将上式代入式(7),得

$$\frac{g}{fT} \frac{d}{dt} (\operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) = - \frac{d}{dt} (f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}) - f \frac{\partial v}{\partial y}$$

将简化的涡度方程<sup>[3]</sup>代入上式,得

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial x} &= \frac{g}{f^2 T} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{d}{dt} (\operatorname{tg} \alpha) + \\ &\frac{g}{f^2 T} \operatorname{tg} \alpha \frac{d}{dt} (\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x} u_g \quad (8) \end{aligned}$$

式(8)即为分析锋面滑升运动的公式。由式(8)得:

(1) 当锋面坡度随时间增大时,暖空气上滑,坡度变化越快,锋区等温线越密集,纬度越低,滑升越强;反之下滑。

(2) 当锋区水平温度梯度随时间增大即锋生时,暖空气上滑,水平温度梯度增大越快,锋面坡度越大,纬度越低,滑升越强;反之下滑。陶诗言等对梅雨锋降水的实例分析得出,“锋生过程使梅雨锋上出现强烈的上升运动;强降水出现时,850 hPa 水平锋生函数也强”<sup>[4]</sup>。这与本文的理论结果吻合。

(3) 暖平流时产生上滑,冷平流时产生下滑,此

项作用远小于前两项。

### 2.2 锋面滑升运动与风场的关系

对  $y$  方向的运动方程取对  $x$  的偏导数(忽略  $f$  的变化),得

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_g}{\partial x} - \frac{1}{f} \frac{d}{dt} (\frac{\partial v}{\partial x}) \quad (9)$$

如图 2,由于  $y$  方向与锋面平行,故有

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (u_{g2} - u_{g1}) - \frac{1}{f} \frac{d}{dt} (\frac{\partial v}{\partial x}) \quad \Delta x < 0 \quad (10)$$

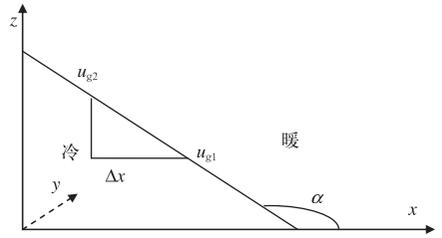


图 2 锋面上地转风分布示意图  
Fig. 2 Sketch map for the distribution of geostrophic wind on frontal surface

式(10)表明:

(1) 垂直锋面方向的地转风沿锋面向上增大时,暖空气沿锋面上滑,反之下滑。

(2) 锋区中气旋式涡度增大时,暖空气沿锋面上滑,反之下滑。由位涡守恒亦可得到锋面滑升与涡度变化的关系,位涡  $pv$  的表达式为<sup>[5-6]</sup>:

$$pv = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$$

在  $z$  坐标下,取  $x$  轴的方向与锋面垂直, $x$  的正方向由冷指向暖,风随高度的变化用热成风代替,则锋区中位涡  $pv$  的表达式可以写成:

$$pv = \left[ \frac{1}{\rho} (\zeta + f) - \frac{g}{\rho f T} \frac{\partial T}{\partial x} \operatorname{tg} \alpha \right] \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

( $\operatorname{tg} \alpha$  为等  $\theta$  面坡度,即锋面坡度)

由位涡守恒<sup>[5-8]</sup>可得,当锋区中气旋性相对涡度增大时,会引起锋面坡度或锋面强度加大,从而形成气块沿锋面向上滑升。

## 3 锋面滑升与天气形势的关系

由上述理论结果,可以推得锋面滑升与天气形势有如下关系。

### 3.1 锋面滑升与地面形势的关系

地面倒槽的偏东风使地面锋面移动较慢,而上

层锋面一般为偏西风,锋面移动较快,从而易使锋面坡度增大,由 2.1 节中的(2)可知,此时易使暖空气上滑。由 2.2 节中(1)的结论也可以得倒槽冷锋有利于产生上滑。同样道理,地面为鞍场时,也易使暖空气上滑。而地面为平浅西风槽冷锋,地面锋面在偏西风作用下移动较快,锋面坡度不易加大,此时暖空气不易上滑。对锋面气旋来说,气旋的北半部相当于倒槽,南半部相当于西风槽,故气旋北半部锋区降水大于南半部锋区降水。

### 3.2 锋面滑升与地形的关系

由于锋面向冷的一侧倾斜,冷锋在移动中,首先是地面锋的移动受到山脉的阻挡,移速减慢,而上层锋面尚未受到阻碍,移速变化不大,从而导致锋面坡度增大,由 2.1 节中的(1)可知,此时暖空气上滑。另外,锋区有相当宽度,由于锋区前部首先受山脉阻挡,易导致锋区强度加强,由 2.1 节中的(2)可知,此时暖空气上滑。由 2.2 节中(1)的结论,也可得地形阻挡有利产生上滑。所以,地形(山脉)的阻挡有利于暖空气上滑。

### 3.3 锋面滑升与低值气压系统的关系

由 2.2 节中的(2)可知,当锋面上出现气旋式涡度增大时,暖空气上滑。所以,当锋面上出现锋面切变或锋面气旋生成和发展时,暖空气上滑。也就是说,锋面滑升运动并不直接取决于锋面切变或锋面气旋本身,而是与它们随时间的变化有关。在一条锋面上,哪一部分有切变或气旋的生成和发展,哪里就产生暖空气上滑,形成或加强降水。高空(500 hPa 以上)槽前一般为辐散,槽越深时,槽前辐散也就越强,所以高空深槽前一般有较强辐散,从而导致下层降压,有利于锋面切变或气旋发展,产生暖空气上滑。因此,配置高空深槽的锋面易产生强降水。

### 3.4 锋面滑升与温度平流的关系

沿锋面冷平流自下向上加强或暖平流自下向上减弱,有利锋面坡度加大,则有利暖空气上滑;反之不利暖空气上滑。锋区冷平流或暖平流向前方减弱时,有利锋面强度加强,则有利暖空气上滑,当冷暖平流相向而行时,最有利于锋面强度加强,则最有利于暖空气上滑;反之,锋区冷平流或暖平流向前方减弱时。不利锋面强度加强,则不利于暖空气上滑。

例(1):图 3 的变温分布形势,有利暖空气上滑,产生明显降水<sup>[9]</sup>。例(2):图 4 的形势,锋区前界风向随高度升高而顺转,为暖平流;后部风向随高度升

高而逆转,为冷平流;特别是 850 hPa 强 SE 风( $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )迎合西来冷平流,冷暖平流相汇,有利于锋面强度加强。同时,沿锋面自下向上由暖平流转为冷平流(图 5),有利于锋面坡度增大。故该形势非常有利于暖空气上滑,产生明显降水。

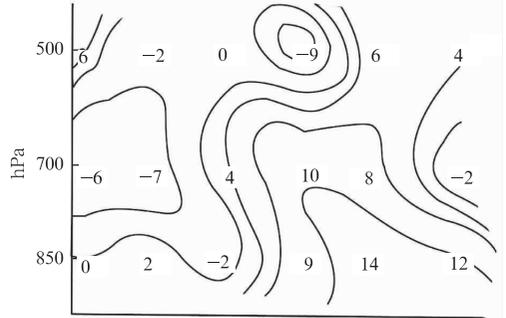


图 3 2008 年 1 月 19 日 08 时  $\Delta\theta_w$  (24 小时) 空间垂直剖面图(线条为等  $\Delta\theta_w$  线 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 3 Vertical cross section of  $\Delta\theta_w$  (24 h) (lines are isopleth of  $\Delta\theta_w$ ) at 0800 BT January 19, 2008

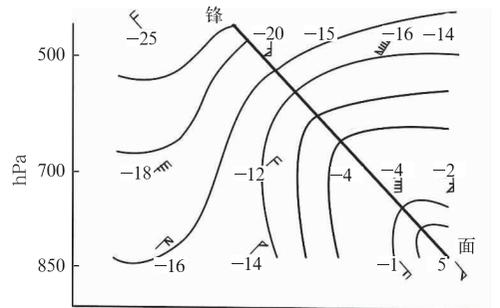


图 4 2007 年 3 月 4 日 08 时锋面垂直剖面图 (数字为温度  $^{\circ}\text{C}$  细线条为等温线,粗线为锋面)

Fig. 4 Vertical cross section of frontal surface (numerals are temperature in  $^{\circ}\text{C}$ , thin lines are isothermal lines, thick line means frontal surface) at 0800 BT March 4, 2007

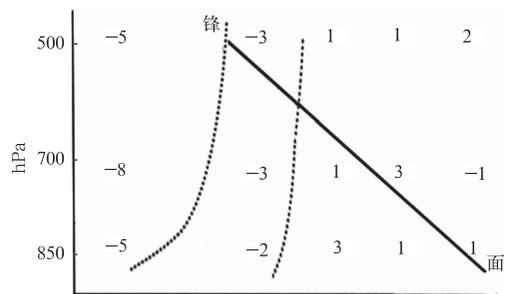


图 5 2007 年 3 月 4 日 08 时  $\Delta T$  (12 小时) 垂直剖面图(虚线为等  $\Delta T_{12}$  线,实线为锋面)

Fig. 5 Vertical cross section of  $\Delta T$  (12 h), (dotted lines are isopleths of  $\Delta T_{12}$ , thick line means frontal surface), at 0800 BT March 4, 2007

## 4 结 论

(1) 暖空气沿锋面是上滑还是下滑不取决于锋面坡度的大小本身,而取决于其坡度随时间的变化,坡度随时间增大时产生上滑;反之产生下滑。滑升强度与锋面强度(锋区水平温度梯度)成正比。

(2) 暖空气沿锋面是上滑还是下滑不取决于锋面强度的大小本身,而取决于其强度随时间的变化,强度随时间增大时产生上滑;反之产生下滑。滑升强度与锋面坡度成正比。

(3) 暖平流产生上滑;冷平流产生下滑。但由量级分析知,温度平流本身的作用是比较小的,滑升主要取决于温度平流的空间分布(见本文 3.4 节)。

(4) 锋区中气旋性相对涡度增大时,产生上滑,反之下滑。

(5) 垂直锋面的地转风沿锋面向上增大时,产生上滑,反之下滑。如图 4,沿锋面自下向上由偏东风转为偏西风,有利于产生上滑运动。

**致谢:**衷心感谢张谭教授悉心指导和石定朴先生热情帮助。

## 参考文献

- [1] 杨大升等. 动力气象学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1961: 244-252.
- [2] 北京大学地球物理系气象教研室. 天气分析和预报[M]. 北京: 科学出版社, 1976: 104-113.
- [3] 中国人民解放军空军司令部. 天气学教程[M]. 北京: 中国人民解放军空军司令部出版发行, 1975: 134-135.
- [4] 陶诗言, 卫捷, 张小玲. 2007 年梅雨锋降水的大尺度特征分析[J]. 气象, 2008, 34(4): 13-15.
- [5] 靖春悦, 寿绍文, 贺哲, 等. 台风海棠造成河南暴雨过程的位涡分析[J]. 气象, 2007, 33(4): 60.
- [6] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
- [7] 黄亿, 寿绍文, 傅灵艳. 对一次台风暴雨的位涡与湿位涡诊断分析[J]. 气象, 2009, 35(1): 65-73.
- [8] 朱晶, 寿绍文, 何玉科. 辽东半岛大暴雨的雷达回波及数值模拟分析[J]. 气象, 2007, 33(6): 48-49.
- [9] 周宁芳. 全国大部气温明显偏低 南方低温雨雪冰冻肆虐[J]. 气象, 2008, 34(4): 130-131.

## 征稿简则

1 《气象》主要刊登气象科学研究领域的综合评述及研究论文;天气、气候诊断分析与预报技术;气象业务技术及业务现代化建设经验;气象灾害的规律及防灾减灾决策;公共气象服务和专业气象服务技术方法;气象科技信息动态等。

### 2 来稿注意事项

- 2.1 来稿务必论点明确,数据可靠,文字精炼。文章的书写顺序为:中文题目(不超过 20 个汉字)、作者姓名、单位名称、邮政编码、中文提要(200~300 字)、关键词(3~8 个);英文题目、作者姓名、单位名称、邮政编码、英文提要及英文关键词;引言;正文;结论和讨论;致谢;参考文献。文章首页页脚处附作者信息,即姓名、从事专业工作和研究方向、Email 等。
- 2.2 正文标题用阿拉伯数字连续编号,不同层次数字间用圆点间隔,如“1”,“1.2”,“2.1.3”等。标题左顶格,在数字编号后空一格再写标题,末尾不加标点符号。
- 2.3 基金资助的研究项目,请注明省部级以上基金名称和项目编号。
- 2.4 文稿的单位制采用《中华人民共和国法定计量单位》。图、表中量和单位间用“/”隔开,表示物理量的符号用斜体表示,并注意文种、大小写、正斜体、上下角码等。
- 2.5 科技术语和名词应使用全国自然科学名词审定委员会公布的名词。
- 2.6 文稿只附必要的图表。图、表要求准确,清晰,美观。在文中相应的位置插入图、表。图、表附相应的中英文图题、表题。附表请使用三线表。
- 2.7 参考文献按在文内出现顺序连续编码。在期刊上发表的文献书写格式为:[序号] 作者姓名(列出前 3 位). 题名[J]. 期刊名,年,卷(期):页码。在专著、教科书上发表的文献书写次序为:[序号] 作者姓名. 译者姓名. 文题名. 书名[M]. 出版地:出版社,出版年:页码。

3 请勿一稿两投。本刊一般不退稿,若 6 个月内未见刊用通知,可自行处理。

4 本刊收取发表费,并付稿酬,所付稿酬包含纸质版、数字版稿酬和刊物内容网络服务报酬等。凡不同意将其稿件纳入此两种版本进行交流者,请书面说明。

5 通讯地址:北京市中关村南大街 46 号《气象》编辑部 邮政编码:100081

网上投稿地址: <http://219.234.83.5>

电话:(010)68407936 58993789 68407336 Email:qixiang@cams.cma.gov.cn