

胶东半岛冷流降雪与海气湍流感热输送的关系*

于志良

(山东省气象科学研究所, 济南, 250031)

摘 要

为了探讨海气界面感热输送在冷流降雪形成中的作用, 文中给出海气界面感热通量密度公式及感热垂直涡动输送过程, 最后给出西北冷流移经渤海面时海面输送给大气的总热量计算公式。并通过实例计算和分析指出, 海气温差及冷气团在陆上时的稳定性是影响输送热量的多少, 进而能否形成冷流降雪的重要因素; 渤海面向大气输送总热量在 $50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以上或海表水温与冷空气入海前地面气温之差在 11.5 以上, 胶东半岛产生冷流降雪的机率很大。

关键词: 海气温差, 感热输送, 冷流降雪。

1 引 言

海洋与大气相互作用的问题, 早已被众多学者所关注, 但对海洋与大气相互作用进行全面深入的研究, 还是近二三十年来的事, 特别是从提出厄尔尼诺事件以来, 其研究更加广泛。E. B. Kraus^[1]于1970年代初写出了海气相互作用方面的专著。1970年代以来, 国内也已有大量研究, 但多侧重于海温场与长时间尺度气候变化的关系^[2, 3], 更多的研究是月以上时间尺度大气环流或长期天气(温度、旱涝等)与海温场的关系^[4~7]。而海温与短期天气的关系研究甚少。叶笃正等^[3]人认为, 海洋在几乎所有时间尺度的气候变化中都起重要作用。本文就是研究渤海海面的感热输送在冷流降雪天气形成中的作用。

2 冷流降雪

冬季, 当处于高空槽后西北冷平流影响时, 干冷空气移经渤海暖海面时, 受到暖海面的增温增湿作用, 生成系统性低云, 影响胶东半岛产生阵性降雪, 而此时在西北气流影响下的其他地区却为低温晴好天气。胶东半岛的这种地方性降雪常称之为冷流低云降雪。

据烟台资料统计^[8], 11月至次年3月多年平均冷流降雪27.2d, 最多年可达45d, 最多出现在1月份。

冷流低云属于积云性层积云, 云底高度一般在600~1000 m, 云顶高度一般在3000 m以下。

冬季, 从贝加尔湖方向移来的干冷空气, 在陆地上时, 其低层的温度层结很稳定, $\gamma < \gamma_d$ 。移经渤海海面后, 在1500 m以下, 温度层结逐渐接近于 γ_d , 乃至 $\gamma > \gamma_d$, 此时便容易形

* 初稿时间: 1996年3月25日; 修改稿时间: 1996年8月26日。

成冷流低云降雪。

3 海气感热输送

冬半年, 对马暖流西分支把外海暖水输送到黄、渤海海域, 使其表层水温表现为由黄海伸向渤海的一个高温水舌。海水表层温度高于陆地上空气温度。当高空槽后西北气流带动干冷空气移经渤海海面时, 暖海面将大量的热量和水汽输送到干冷空气低层, 使其温度层结变得不稳定, 形成低云降雪。

海面通过湍流交换等作用向大气低层输送感热。

3.1 海气界面感热通量密度

近地面层风速分布的普朗特对数定律为:

$$V = \frac{u^*}{K} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

其中, 摩擦速度

$$u^* = K \frac{V_2 - V_1}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (2)$$

动量湍流系数

$$k = K u^* Z \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)有

$$k = \frac{K^2 (V_2 - V_1) Z}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (4)$$

假定热量湍流系数与动量湍流系数相等, 即

$$k_T = k = \frac{K^2 (V_2 - V_1) Z}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (5)$$

将式(5)代入湍流热通量密度公式, 则得

$$Q_T = - \rho c_p k_T \frac{\partial T}{\partial Z} = - \rho c_p K^2 \frac{V_2 - V_1}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} Z \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (6)$$

但在近地面层

$$Z \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{\partial T}{\partial \ln Z} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (7)$$

式(7)代入式(6), 得

$$Q_T = \rho_{c_p} \kappa^2 \frac{(\bar{V}_2 - \bar{V}_1)(T_1 - T_2)}{(\ln \frac{Z_2}{Z_1})^2} \tag{8}$$

这里研究的是海气界面的感热输送, 令 $Z_1 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ m}$, $Z_2 = 1.5 \text{ m}$, $\rho = 1.2928 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, $c_p = 1.0061 \text{ J/g} \cdot \text{K}$, 卡曼常数 $\kappa = 0.4$, 并设 $\bar{V}_1 = 0$, 将以上数字代入式(8)则得

$$Q_T = 1.73 \times 10^{-2} \bar{V}_2 (T_1 - T_2) (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) \tag{9}$$

设海面水温为 $T_s(\text{K})$, 海面上空空气温度和风速分别为 $T_k(\text{K})$ 和 $V_k(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 则式(9)可改写为

$$Q_T = 1.73 \times 10^{-2} V_k (\bar{T}_s - T_k) (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}) \tag{10}$$

3.2 感热的垂直涡动输送

暖海面向冷气团底层输送的热量, 主要靠垂直涡动上传, 使冷气团底层逐渐增温, 而较高层温度少变, 即使底层温度垂直递减率逐渐加大, 当层结曲线与状态曲线相交时, 便认为可形成冷流低云(见图1)。

图1中, 层结曲线与状态曲线相交处, 气块温度与环境温度相等, 即 $T_k - \gamma_d Z = T_k - \gamma_2 dZ$, 有 $\gamma_2 = \gamma_d$ 。

所以, 冷流低云的形成过程就是 $\gamma > \gamma_d$ 的过程, 此过程是靠海面输送一定的热量来实现的。

为使问题研究简化, 在 P_k 到 P (垂直涡动可达高度) 之间取一空气柱, 截面为 1 cm^2 , 以 V_k 速度移经海面。假设: (1) 垂直涡动输送为干绝热过程; (2) 冷气团在陆地时底层温度层结极稳定; (3) 除海气界面有热量输送外, 与周围无热量、质量交换; (4) 气柱的质量为 M 。

把气柱按质量从 P_k 到 P 分成 k 等份, 每份质量为 $\Delta m = M/k$, 从 P_k 向上到 P 依次为 $\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_{k-1}, \Delta m_k$ 。由于气柱从海面获得感热, 致使垂直涡动发展, 上下质量进行交换。令 $(T_{k1} - T_1)/dZ = \gamma_d$, 使 $(T_{k0} - T_0)/dZ = (T_{k1} - T_1)/dZ$ 的过程就是 $\gamma > \gamma_d$ 过程, 见图2。

取 $\frac{1}{2} \Delta m_1$, 由 P_k 干绝热上升至 P , 其状态由 $(P_k, T_{k0}) \rightarrow (P, T_2)$, 与 $\frac{1}{2} \Delta m_k$ 等压水平混合; P 上另外的 $\frac{1}{2} \Delta m_k$ 由 P 干绝热下降至 P_k , 其状态由 $(P, T_0) \rightarrow (P_k, T_{k2})$, 与 P_k 面上剩下的 $\frac{1}{2} \Delta m_1$ 等压水平混合; Δm_2 与 Δm_{k-1} , Δm_3 与 $\Delta m_{k-2}, \dots$, 均进行水平混合, 直至整

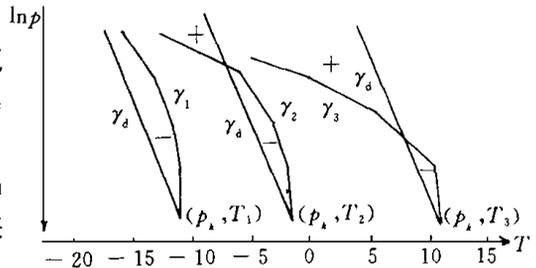


图1 入海前 (P_k, T_1) 及移经海面之后层结曲线的变化 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)$

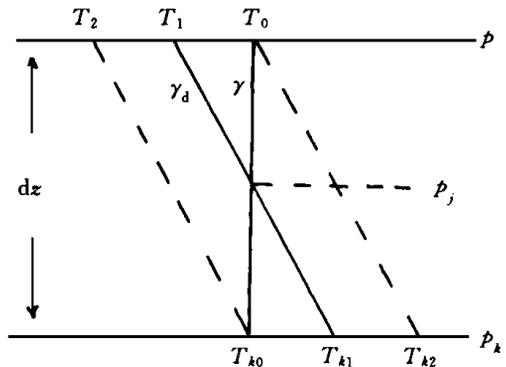


图2 感热垂直涡动输送

个气柱全部垂直交换混合完毕, 这时:

P_k 处温度由 T_{k0} T_{k1} ,

$$T_{k1} = \frac{\frac{1}{2}\Delta m_1 T_{k0} + \frac{1}{2}\Delta m_k T_{k2}}{\frac{1}{2}\Delta m_k + \frac{1}{2}\Delta m_1} = \frac{1}{2}(T_{k0} + T_{k2}) \quad (11)$$

P 处温度由 T_0 T_1 ,

$$T_1 = \frac{\frac{1}{2}\Delta m_k T_0 + \frac{1}{2}\Delta m_1 T_2}{\frac{1}{2}\Delta m_k + \frac{1}{2}\Delta m_1} = \frac{1}{2}(T_0 + T_2) \quad (12)$$

整个气柱涡动混合完毕后, 气柱低层的温度层结便由 $(T_{k0} - T_0)/dZ$ 变为 $(T_{k1} - T_1)/dZ$, 即 $\gamma < \gamma_d$ 。

3.3 海面上空气温度的变化

T_{k0} 为气柱移入海面前在陆上时的空气温度。气柱入海后海气温差 $(T_s - T_k)$ 随时在变化。如取海域平均表层水温 T_s , 变化很小, 变化的主要是 T_k , 引起 T_k 变化主要有两种机制。

3.3.1 感热输送引起的 T_k 变化

由热力学第一定律

$$dQ = M(c_p dT_k - A R T_k \frac{dp}{p})$$

当气柱沿等压线移动时, $dp = 0$, 则有

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{1}{M c_p} \frac{dQ}{dt}$$

由式(10)有

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{1}{M c_p} (1.73 \times 10^{-2} V_k (\bar{T}_s - T_k)) \quad (\text{K}/\text{min}) \quad (13)$$

将 $c_p = 1.0061 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ 代入, 写成差分形式, 并令 $\Delta t = \pi$ (min), $L = 6.0 \times 10^{-2} V_k \pi$ (km), 有

$$\Delta T_k^{(1)} = \frac{2.87 \times 10^{-1} L}{M + 2.87 \times 10^{-1} L} (T_s - T_{k0}) \quad (14)$$

3.3.2 垂直涡动引起的 T_k 变化

当气柱底层温度直减率由 γ 变为 γ_d 时, P_k 处空气温度由 T_{k0} 变为 T_{k1} , 由式(11)和图2知

$$\Delta T_k^{(2)} = \frac{1}{2} (T_{k2} - T_{k0}) \quad (15)$$

式(14)中,当取 $P_k = 1030 \text{ hPa}$, $P = 900 \text{ hPa}$ 时,气柱质量 $M = 0.75 \times 1.36 \times (P_k - P) = 129 \text{ g}$ 。由式(14)和(15)可得到海面上气柱近海面空气温度由感热输送和垂直涡动引起的变化为

$$\Delta T_k = \Delta T_k^{(1)} + \Delta T_k^{(2)} = \frac{0.287L}{129 + 0.287L}(T_s - T_{k0}) + \frac{1}{2}(T_{k2} - T_{k0}) \quad (16)$$

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_k \quad (17)$$

3.4 输送总热量的计算

P 为感热垂直涡动输送的上限高度,根据观测事实,可取 $P = 900 \text{ hPa}$ 。

$$T_0 = T_{k0} - \frac{T_{k0} - T_{850}}{P_k - 850}(P_k - 900) \quad (18)$$

T_{k2} 为 P 等压面上气块干绝热下降至 P_k 面时的温度

$$T_{k2} = T_0 \left(\frac{P_k}{900} \right)^{0.288} \quad (19)$$

取锦州站实测地面 P_k , T_{k0} 值和 850 hPa T_{850} 值。海表水温取渤海海域平均表层水温。由式(18)、(19)、(16)及(17)即可算出气柱在海面上移经 L 距离时的 T_{k2} 及 T_k 值。

此处,又假设气柱从锦州附近沿海沿直线移到烟台(基本符合实际)。从海面共获取的总热量可实施分段计算,从锦州附近到烟台约 390 km ,分3段(图略)。每段路长 $L_1 = L_2 = L_3 = 130 \text{ km}$ 。

分别将 L_1 、 $(L_1 + L_2)$ 、 $(L_1 + L_2 + L_3)$ 代入式(16),可计算出各分点处 ΔT_k 值:

$$\begin{cases} \Delta T_{k(1)} = 0.22(T_s - T_{k0}) + \frac{1}{2}(T_{k2} - T_{k0}) \\ \Delta T_{k(2)} = 0.37(T_s - T_{k0}) + \frac{1}{2}(T_{k2} - T_{k0}) \\ \Delta T_{k(3)} = 0.46(T_s - T_{k0}) + \frac{1}{2}(T_{k2} - T_{k0}) \end{cases} \quad (20)$$

由式(17)算出各分点处 T_k 值:

$$\begin{cases} T_{k(1)} = T_{k0} + \Delta T_{k(1)} \\ T_{k(2)} = T_{k0} + \Delta T_{k(2)} \\ T_{k(3)} = T_{k0} + \Delta T_{k(3)} \end{cases} \quad (21)$$

L_1, L_2, L_3 各段距离内的 T_k 平均值为

$$\begin{cases} T_{k(1)} = \frac{1}{2}(T_{k0} + T_{k(1)}) \\ T_{k(2)} = \frac{1}{2}(T_{k(1)} + T_{k(2)}) \\ T_{k(3)} = \frac{1}{2}(T_{k(2)} + T_{k(3)}) \end{cases} \quad (22)$$

由式(10), 各段距离内获得的热量为

$$Q_i = 2.25(T_s - T_{k(i)}) (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (23)$$

全程获得总热量:

$$Q = \sum_{i=1}^3 Q_i (\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (24)$$

4 实例计算及统计分析

4.1 计算样本的确定

当前一日20时(北京时)或当日08时天气图上, 自华北经渤海到黄海北部, 从地面到700 hPa 高空为一致的西北气流, 确定为一次冷流过程(此过程多处于东北低压或深槽后部)。其中, 能取得同期海温、气温及降雪资料的冷流过程选为一个样本。1992年1至2月、11月到1993年3月和1993年11月至12月共获取样本51例。

计算资料: ①锦州地面气压、气温和850 hPa 等压面温度, 取自天气图(业务应用时可取自常规气象报); ②降雪量资料取自山东省气象台, 取降雪站中最大量, 0.0 mm 不计为降雪日; ③考虑到海表面水温变化缓慢, 业务应用时资料又能及时获取, 故采用上一旬平均海表水温资料。

4.2 计算结果和统计分析

51个个例中, 胶东半岛产生冷流降雪26例, 故冷流过程产生降雪的概率为 $26/51=51\%$ 。26例降雪中, 小雪(0.1~2.4 mm) 17例, 中雪(2.5~4.9 mm) 5例, 大雪和暴雪(5.0 mm) 4例。

计算渤海海面向大气底层输送感热总量 Q 值平均为 $55.5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 最大值为 $110.3 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, 最小值为 $11.1 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

4.2.1 有无降雪的判别

计算的感热输送总热量 $Q > 50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时有降雪, 产生降雪的机率为 $26/32=81.3\%$, 包括了样本中所有26个降雪个例。故对有无降雪判别的总准确率为 $45/51=88.2\%$ 。

4.2.2 降雪量级的判别

降雪量与感热输送量 Q 的相关系数 $r = 0.785$, 达 $\alpha = 0.01$ 显著水平。

当 $Q > 50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 确定有冷流降雪时, 用下式确定降雪量级:

$$R = -7.097 + 0.135Q \quad (25)$$

(1) 当 $R \geq 5.0$ 时报大雪($\geq 5.0 \text{ mm}$), 拟合率 $3/4 = 0.75$ 。错报一例, 实况出现小雪。

(2) 当 $3 \leq R < 5$ 时报中雪, 拟合率 $3/5 = 0.60$ 。错报两例中, 一例为大雪, 一例为小雪。

(3) 当 $R < 3$ 时报小雪, 拟合率 $15/23 = 0.65$ 。错报8例中, 两例为中雪, 6例为无雪。

量级预报总的拟合率为 $21/32 = 65.6\%$ (此评定, 对各级雪量不做上下延伸)。如允许一级误差(报小雪而无雪不算对), 则拟合率为 $25/32 = 78.1\%$ 。

4.2.3 1996年使用情况

1996年1,2月份共取冷流过程个例10例,其中有两例 $Q < 50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,实况无降雪;其他8例, R 均小于3,故预报有小雪,与实况完全相符,无空报。

5 结论与讨论

(1) 胶东半岛的冷流降雪与渤海海面向大气底层的感热输送 Q 值关系密切,当 $Q > 50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,产生冷流降雪的机率达81.3%,是预报冷流降雪的有效指标。

(2) 从式(10)可以看出,在单位时间内,海面向大气输送热量的多少,与海气温差及海面风速成正比。这说明要形成冷流降雪,需要有一定强度的冷空气侵入,即要有一定强的西北气流和冷气团有相当低的温度(T_{k0})。观测事实也证明了这一点,不是每一次冷流过程均会产生降雪。经计算并统计分析认为,海表水温与冷空气入海前的锦州地面气温之差($T_s - T_{k0}$) > 11.5 时,半岛产生冷流降雪的机率为 $26/35 = 74.3\%$,这表明,只有达到一定强的海气温差,才能输送足够的热量而产生降雪。

(3) 从图1和图2可以看出,冷气团在陆地上空时层结越稳定,即 $(T_{k0} - T_0)/dZ$ 越小, $(T_{k2} - T_{k0})$ 就越大,需要输送较多的热量才能使近海面低层温度层结变得不稳定。就是说,冷气团在陆地上空时低层温度层结越不稳定,移经海面后越易形成冷流降雪。统计发现,当反映冷气团入海前低层稳定度的锦州地面气温与850 hPa温度之差($T_{k0} - T_{850}$) > 5 时,产生冷流降雪的机率较大。

(4) 当然,海气界面的感热输送不是形成冷流低云降雪的唯一条件。海面向大气输送大量水汽及凝结潜热作用也是形成冷流降雪的重要条件。另外,胶东半岛的地形对冷流降雪的形成也起一定作用,半岛北部沿海的丘陵山地的抬升作用,是不稳定能量释放而形成低云的触发条件。

参考文献

- 1 柯劳斯. 大气和海洋的相互作用. 北京: 科学出版社, 1979. 142 ~ 200
- 2 杨芳林, 袁重光. 夏季赤道东太平洋海温异常对全球及东亚短期气候变化影响的数值试验. 大气科学, 1995, 19(5): 535 ~ 544
- 3 叶笃正, 曾庆存, 郭裕福. 当代气候研究. 北京: 气象出版社, 1991. 211 ~ 215
- 4 李崇银. 赤道东太平洋增暖对全球大气30 ~ 60天振荡的激发. 科学通报, 1991, 36(15): 894 ~ 998
- 5 王彰贵. 北半球冬季大气环流与热带太平洋海表温度二年振荡相互作用的若干事实. 气象学报, 1990, 48(4): 424 ~ 431
- 6 李崇银. 中国东部地区的暖冬与厄尔诺. 科学通报, 1989, 34(4): 205 ~ 208
- 7 刘永强, 丁一汇. ENSO事件对我国季节降水和温度的影响. 大气科学, 1995, 19(2): 200 ~ 208
- 8 李洪业, 徐旭然. 冷流低云降雪成因的分析. 气象, 1995, 21(12): 21 ~ 24

THE RELATION BETWEEN COLD FLOW SNOWFALL AND SEA-AIR SENSIBLE HEAT TRANSPORTATION IN JIAODONG PENINSULA

Yu Zhiliang

(*Shandong Research Institute of Meteorological Science, Jinan, 250031*)

Abstract

In order to know the role of sea-air sensible heat transportation in cold flow snow-fall, in this paper, the sensible heat flux density formula is given, and vertical turbulent transportation process is described. Lastly the formula for total sea-air transportation heat in the condition of northwest cold flow over Bohai sea is provided. The calculation and analysis show that sea-air temperature difference and stability of cold air mass over the land are the important factors for the amount of the transportation heat and cold flow snowfall. When the transportation heat from Bohai sea to air is more than $50 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$, or sea-air temperature difference is greater than 11.5° , the cold flow snowfall is then possibly emerged in Jiaodong peninsula.

Key words: Sea-air temperature difference, Sensible heat transportation, Cold flow snowfall.