

鋒區地帶密度平流對地面 氣壓變化的貢獻*

莊 蔭 模

(南京大學氣象系)

提 要

本文計算了 10 或 13 公里以下密度平流對地面 3 小時氣壓變化的貢獻,得到的結果是:在鋒區地帶密度平流多半可以近似地表示出地面的氣壓變化。

根據密度平流計算出的地面變壓和氣旋、反氣旋的位置看來,密度平流不僅可以表示地面高低壓系統底移動,而且也可以使地面高低壓系統的中心得到發展。

作者也試驗了用密度平流和 3 小時變壓實況來作 24 小時或 12 小時的直線外推預報,得到的結果很失敗。

一. 引 言

對流層低層出現冷平流,地面通常出現加壓;對流層低層出現暖平流,地面通常出現減壓,這是氣象上很早就被發現了的一個經驗事實。

1949 年 Austin^[1] 專門作了各高度冷暖平流和地面氣壓變化之間關係的統計,根據他的統計,對流層低層瞬時冷暖平流和地面 3 小時變壓間的相關係數在冬季可以大到 0.90,在夏季也可達 0.80。

1929 年 Gião^[2] 求得了鋒面過境時不同密度空氣相互取代而引起地面氣壓變化的公式,1945 年在 Haurwitz 的領導下進行了大量利用密度平流來定量預報地面氣壓形勢的工作^[3]。

由於 Gião 只考慮了鋒面下面那一部分冷暖空氣的取代, Haurwitz 作了時間過長的外推,因此,用 Gião 公式來計算地面氣壓變化量的差別會較大,在冷(暖)鋒下減(加)壓的時候符號也剛好與實況相反;而 Haurwitz 的工作不管在定量或者是定性的程度上來看都很失敗。

1949 年統計過溫度平流和地面氣壓變化之間關係的 Austin^[4], 在 1951 年發表的“氣壓變化的機械作用”^[4] 這篇文章裏提出了另一種解釋,他認為冷暖平流和加減壓相

* 1957 年 3 月 27 日收到。

伴隨的現象是由冷暖平流引起的輻合輻散造成的。另外一些氣象學家以及蘇聯 1955 年出版的動力氣象學基礎一書^[5]，提出密度平流對地面氣壓變化的作用可以忽略不計，他們也認為地面氣壓變化可以看成是由輻散過程所造成的。

爲了更好地了解密度平流對地面氣壓變化的貢獻，避免了只計算鋒面下面這部分密度平流的缺點，同時縮短了計算外推的時間，作者計算了 10 或 13 公里以下密度平流造成的 3 小時地面氣壓變化。

二. 計算方法和選例

密度平流造成地面氣壓變化的數學形式應該是

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = -g \int_0^{\infty} \vec{c} \cdot \text{grad } \rho \, dz, \quad (1)$$

這裏 p_0 是地面氣壓， t 是時間， g 是重力加速度， \vec{c} 是水平風速矢量， ρ 是空氣密度， z 是高度。

利用物態方程，設風向沿等壓綫（或等高綫）的切綫方向，這樣(1)式可以寫成

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = g \int_0^{\infty} c \frac{p}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial S} \, dz, \quad (2)$$

這裏 p 、 T 是任意高度的氣壓和虛溫， R 是氣體常數， ∂S 爲等壓綫（或等高綫）上的微綫段。

從(2)式我們可以看出溫度平流的形式表示了密度平流的內容。

(2)式右端分層積分，用中值定理取有限差商，則

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_0}{\partial t} = & g \left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{850} \times (2\text{Km} - 0\text{Km}) + g \left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{700} \times \\ & \times (4\text{Km} - 2\text{Km}) + g \left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{500} \times (7\text{Km} - 4\text{Km}) + \\ & + g \left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{300} \times (10\text{Km} - 7\text{Km}) + g \int_{10\text{Km}}^{\infty} c \frac{p}{RT^2} \frac{\partial T}{\partial S} \, dz, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 $\left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{850}$ ， $\left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{700}$ ， $\left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{500}$ ， $\left(c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S} \right)_{300}$ 分別表示各段氣柱內 $c \frac{p}{RT^2} \frac{\Delta T}{\Delta S}$ 的平均值，爲了利用現有等壓面圖，我們分別用 850、700、500、300 毫巴等壓面上的數值來代替。式中 c 用實測風或地轉近似。

計算是對每隔經緯度 5 度經緯綫組成網絡的交點進行的，對於所取之點用 15 點（世界時）高空等壓面圖計算出公式(3)中前四項的數值，以所得結果相加外推 3 小時即得 15 點到 18 點間密度平流對地面 3 小時氣壓變化貢獻的近似值。

在計算的例子中等高綫的曲率或其輻合輻散很顯著。在這些例子中，除兩個例子外，其餘地面 3 小時變壓一般都大於或等於 3 個毫巴。

爲了使 850 毫巴不致在地底下，我們計算的大部是我國東部和東北部高空鋒帶下面的地區。

三. 計算結果

1. 總的情況

本文總共計算了 12 個例子。在 12 個例子中有 10 個例子 3 小時密度平流造成的加減壓和地面氣壓變化定性的一致，同時在中心強度上相差只一兩個毫巴。另外兩個是計算結果和實況不很一致的例子，一個實況變壓中心只有 +2 毫巴，而密度平流造成的 3 小時變壓達 +6 毫巴，另一個密度平流造成的變壓中心是 +5 毫巴，而實況出現了局部符號相反的 -1 毫巴。

2. 個別例子

下面是一次寒潮侵入我國，前後連續計算了 3 天的三個例子。

圖 1 是寒潮侵入我國後第一天 15 點到 18 點地面 3 小時變壓實況，這裏冷鋒後面河套以上蒙古人民共和國以及我國東北西部的廣大地區都發生了強烈的加壓，變壓形勢略成南北長的橢圓，中心極值爲 3 小時 +7 毫巴；而計算結果（見圖 2），密度平流也在上述區域內造成很强的加壓，中心強度是 +8 毫巴（比實際變壓中心高出一個毫巴）。另外在圖 2 上，密度平流在我國東北造成的很强的減壓，不管在區域上和強度上都和

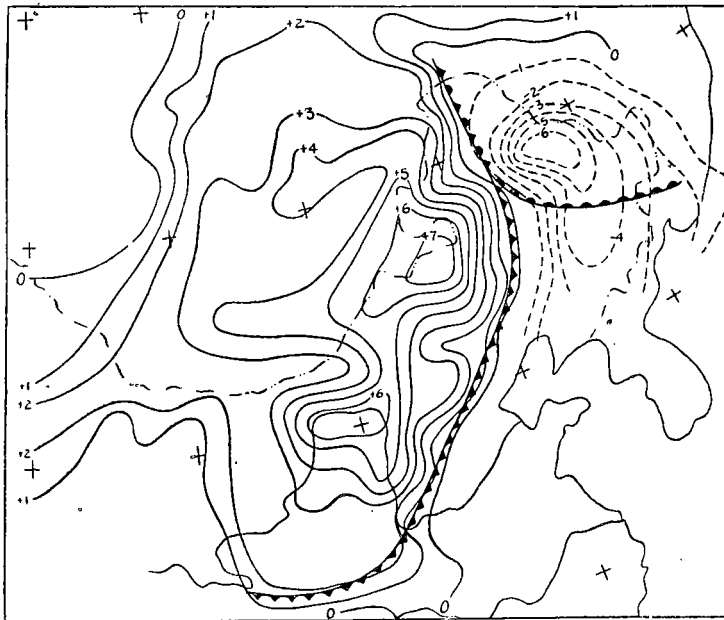


圖 1. 第一天 15—18 時 3 小時變壓實況(單位:毫巴/3 小時)

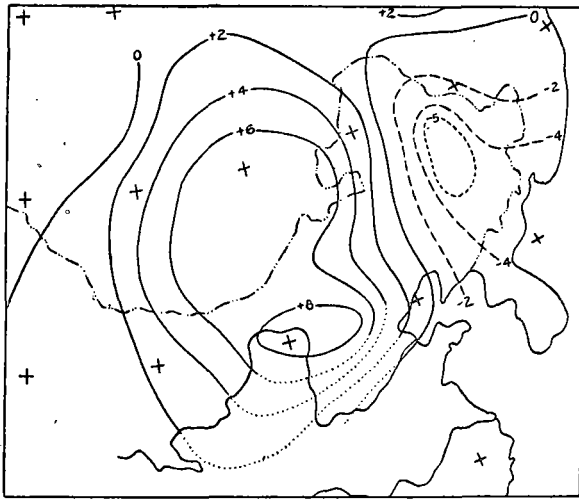


圖 2. 根據第一天 15 時高空圖計算的 10 公里氣柱密度平流的貢獻
(單位: 毫巴/3 小時)

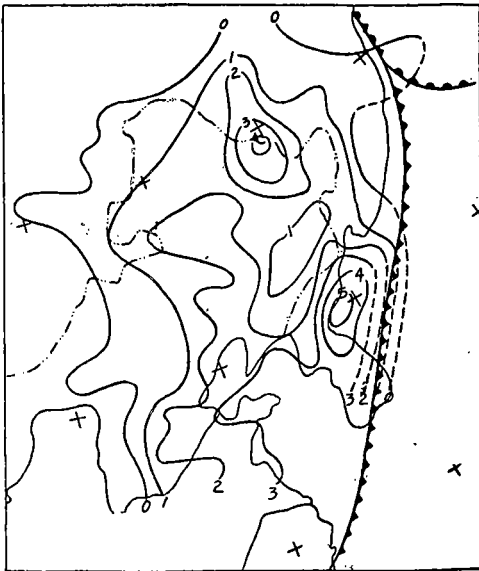


圖 3. 第二天 15—18 時的 3 小時變壓實況
(單位: 毫巴/3 小時)

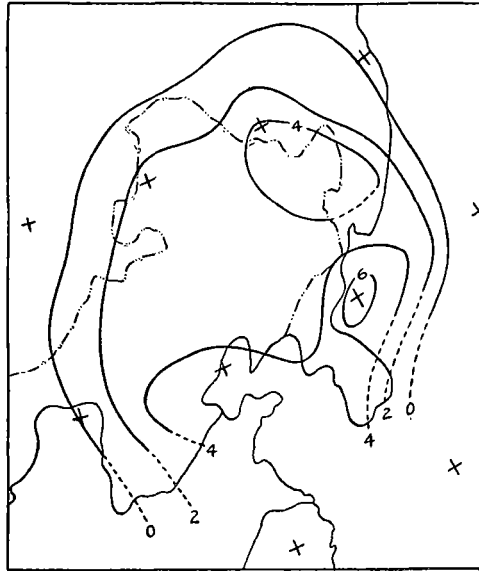


圖 4. 根據第二天 15 時高空圖計算的 10 公里高氣柱的密度平流的貢獻(單位: 毫巴/3 小時)

實況很相近。

寒潮侵入我國後的第二天,加壓區域(圖 3)比第一天已經東移了十個緯度左右,變壓中心強度也比 24 小時以前減弱了兩個毫巴,而計算結果(圖 4)和第一天的計算結果(圖 2)比較也差不多是如此。

在第三天的高空圖上我國東部和東北部已經是一片暖平流,根據 15 點高空圖進行計算的結果,在我國東部和東北部密度平流造成一片減壓(見圖 6),減壓中心靠近中蒙

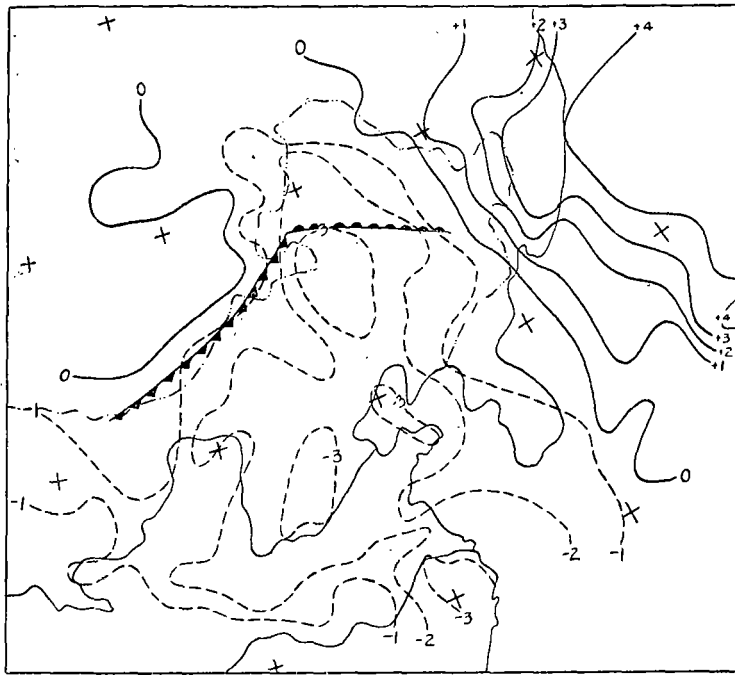


圖 5. 第三天 15—18 時地面 3 小時變壓實況(單位:毫巴/3 小時)

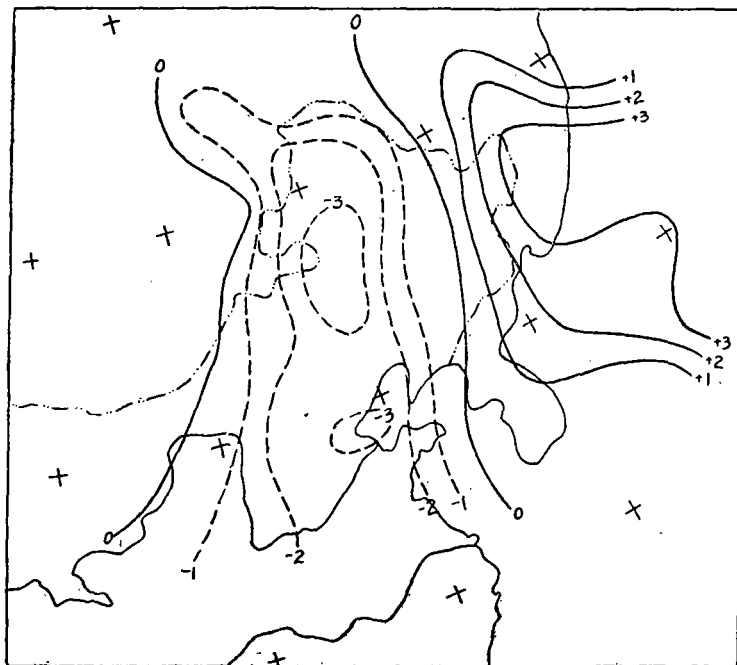


圖 6. 根據第三天 15 時高空圖計算的 10 公里氣柱密度平流的貢獻
(單位:毫巴/3 小時)

邊境在我國境內，中心強度為 -3 毫巴左右，而圖 5 中實際發生的地面氣壓變化恰是如此。

3. 冷鋒後面的減壓和氣旋暖區氣旋中心的地面氣壓變化

在計算的例子中有兩個是冷鋒後出現減壓的例子，這兩個例子和其它八個例子一樣，10 公里以下密度平流造成的地面氣壓變化和實際變壓也定性的相似、定量的相近（其中一個例子是北京大學物理系氣象專業王紹武同志計算的）。這裏，雖然在 700 毫巴甚至 500 毫巴以下冷鋒後面是冷平流，但高層是更強的暖平流，故地面仍減壓。

同樣，在我們計算的六個氣旋和錮囚氣旋的例子中，暖區暖平流造成的減壓和氣旋暖區的實況減壓總是近乎一致（如圖 1 和圖 2，圖 5 和圖 6 都是這樣），並且我們也計算到兩個氣旋中心上空暖平流造成的減壓和地面氣旋中心減壓很相近的例子（如圖 5 和圖 6）。

4. 各層密度平流對地面變壓的貢獻

按我們計算所分的層次看來，地面—2 公里、2 公里—4 公里、4 公里—7 公里、7 公里—10 公里各層密度平流造成氣柱的重量改變，其概量一般都是 10^{-1} — 10^0 毫巴/3 小時，但是在大多數情況下，低層密度平流比上層的來得大，而且低層很大的密度平流出現的區域比較大，至於高層雖然有時候也出現很大的密度平流，但出現的區域通常比低層要來得小。

我們統計三百多個點得到各層 1 公里高氣柱內密度平流的平均貢獻是

地面—2 公里	2 公里—4 公里	4 公里—7 公里	7 公里—10 公里
0.37	0.26	0.14	0.15

（單位：毫巴/3 小時·公里）

這裏從地面—2 公里間密度平流最大，2 公里—4 公里次之，而 4 公里—7 公里，7 公里—10 公里間的密度平流平均只有地面到 2 公里間密度平流的一半弱。因此，在不少例子中 10 公里氣柱內總的密度平流的符號常常可以由 850 毫巴附近的密度平流或者 700 毫巴密度平流的符號基本上決定。

在我們的例子中也有少數 10 公里以下總的密度平流的符號決定於高層（500 毫巴和 300 毫巴）的密度平流的。以上事實和我們多年來的經驗，即對流層低層的冷暖平流和地面氣壓變化有密切的關係，但又不是絕對相關的事實是一致的。

關於 10 公里以上的密度平流，由於缺少蘇聯部分的記錄因而未能全部計算，但作者仍就可能的記錄取 200 毫巴上的密度平流局部的計算了 10—13 公里氣柱內的密度平流。

雖然 200 毫巴上的等溫綫是稀疏的，但由於風速大，等溫綫和風向的交角也可能很大，因而 200 毫巴仍然是可能出現溫度平流極值的地方，只是這裏的氣壓已很低，因而

在同樣的溫度平流條件下，200 毫巴上的密度平流只有 850 毫巴上密度平流的三分之一左右。

根據很少記錄計算的結果，密度平流造成的 3 小時變壓，其概量一般仍為 10^{-1} — 10^0 毫巴，將它加到前面的結果上去，不少例子能夠更符合實況，但也有一些例子產生了數值上的較大偏差或符號上受到了局部的破壞；但是對那兩個計算結果和實況不很一致的例子，情況仍然無大變化。

由於記錄稀少和高空觀測中儀器的很大積累誤差，因此這種對於 200 毫巴的計算，顯然只能有參考的價值。

四. 討 論

1. 關於密度平流對地面變壓的作用的問題

根據作者^[7]估計：在中高緯常見天氣系統的情況下，取

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = \int_0^{\infty} \frac{\partial \rho}{\partial t} g \, dz$$

發生的誤差不會比 10^{-2} — 10^{-1} 毫巴/3 小時的概量更大，因此，在我們的問題中用

$$\frac{\partial p_0}{\partial t} = -g \int_0^{\infty} \vec{c} \operatorname{grad} \rho \, dz - g \int_0^{\infty} \rho \operatorname{div} \vec{c} \, dz \quad (4)$$

來討論地面氣壓變化是完全可以令人放心的。

根據(4)式地面氣壓變化不僅決定於密度平流項，它應該決定於密度平流和輻散項的代數和。

我們都曉得(4)式中的輻散項是大量的小量差，用它計算地面氣壓變化得到的絕對值常常可以和實況相差十倍以上，顯然直接用它來計算並討論地面氣壓變化是沒有意義的，這裏密度平流項沒有輻散項存在的這種缺點。

要討論密度平流的作用，理論上需將計算一直進行到大氣層頂，但這是不可能的，因此我們只能像氣象理論和實際工作中常採用的觀點，假想密度平流的作用主要是發生在 10 或 13 公里以下的氣層內，這樣，根據上面十個密度平流和實際變壓定性一致、定量相近的結果看來，似乎是密度平流對地面氣壓變化起了主要的作用，而輻散項只起了次要的作用，而從兩個不很一致的例子看來，好像這時輻散項也起了很大的作用或者是起了主要的作用。但由於我們的例子大部分不是故意為計算密度平流而選擇的，因而我們可以說至少鋒區地帶的地面氣壓變化密度平流的作用不僅不能忽略，而且看來它還在起着很重要的作用*。

* 動力氣象基礎一書以對簡化了的連續方程積分的辦法得到 $\frac{\partial p_0}{\partial t} = -g \int_0^{\infty} \rho \operatorname{div} \vec{c} \, dz$ ，問題在於這裏對簡化的方程積分是不允許的。

2. 關於地面氣壓系統移動和發展的問題

如 Austin, Palmén 等的理論, 很多人認為地面氣壓系統的移動發展是由輻合輻散過程產生的, 而按我們計算的結果和討論, 密度平流應該也能够造成地面氣壓系統的移動和發展, 並且從氣旋反氣旋前後冷暖平流的分佈看來, 密度平流可能還對這種地面氣壓系統的移動起了主要的作用; 如圖 2、圖 4、圖 6 密度平流的分佈和移動與地面高壓和氣旋的進出是很一致的。

因為在地面系統中心上空也可以有冷暖平流, 因而密度平流也就可以造成地面氣壓系統中心的變化發展, 如圖 5 這個新進來的發展着的氣旋, 上空就是一片暖平流。

在很多情況下, 鋒區地帶地面氣壓變化, 可以近似地由 10 或 13 公里以下氣柱的密度平流來表示, 但是像 Haurwitz 一樣, 我們用密度平流甚至是 3 小時變壓實況作 24 小時或 12 小時直綫外推結果也是很失敗的。

由以上的討論, 我們認為密度平流可以用來解釋一些瞬時地面氣壓變化的現象; 同時, 通過密度平流的研究可以了解密度平流和輻散項的相對重要性, 從而對氣壓變化的機械作用可以有更好的了解; 但是用來作 24 小時甚至是 12 小時直綫外推的定量預報, 是難以勝任的。

關於在何種情況下 10 或 13 公里以下的密度平流不能近似地表示出地面的氣壓變化, 這是本文沒有討論過需要作進一步研究的問題。

參 考 文 獻

- [1] Austin, James M., Temperature advection and pressure change. *J. Meteor.*, **6**, 358—360, 1949.
- [2] Gião, A., *Mém. off. Nat. France*, No. 20, **104**, 1929.
- [3] Haurwitz, B., and Collaborators, Advection of air and the forecasting of pressure change. *J. Meteor.* **2**, 83—93, 1945.
- [4] Austin, James M., Mechanism of pressure change. *Compendium of Meteor.*, Boston, Amer. Meteor. Soc. 630—638, 1951.
- [5] Palmén, E., The Aerology of Extratropical Disturbances. *Compendium of Meteor.*, Boston, Amer. Meteor. Soc. 599—620, 1951.
- [6] Гандин, Л. С., Лайхтман, Д. Л., Матвеев, Л. Т., Юдин, М. И., Основы динамической метеорологии. Гидрометеоиздат. Л. 1955, Стр. 257.
- [7] 莊啓模: 對用靜力方程計算地面氣壓及地面氣壓變化可能造成的誤差的估計, 北京大學學報, 自然科學 1957 年第一期 97—105.

ВКЛАД АДВЕКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА В ИЗМЕНЕНИЯ НАЗЕМНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗОНАХ ФРОНТА

Чжуан Инь-мо

(Метеорологический факультет Нанкинского университета)

Резюме

В настоящей работе расчислено влияние адвекции плотности воздуха ниже уровня 10 или 13 км на изменения наземного давления за 3 часа. Полученные результаты показывают, что указанная выше адвекция плотности воздуха в зонах фронтов в большинстве случаев позволяет приблизительно представлять изменения наземного давления.

Из взаимных положений изменений наземного давления, вычисленных по адвекции плотности воздуха, и наземных синоптических образований — циклонов, антициклонов и т. д. следует, что адвекция плотности воздуха приводит не только к перемещениям наземных барических образований, высоких и низких, но и к развитию их центров.

Автром ещё соответственно производились опыты линейной экстраполяции за 24 и 12 часов при помощи адвекции плотности воздуха и фактических изменений давления за 3 часа. Однако полученные результаты были неудачны.