

水汽通量经向输送分析

朱丰

中国气象科学研究院，北京，100081

摘要：使用 2011 年 NCEP/NCAR 再分析经向风资料 `vwnd.2011.nc` 和比湿资料 `shum.2011.nc`，计算总的经向输送（TOTAL）、定常经向环流输送（MMC）、定常波输送（SE）以及瞬变部分输送（TE）。利用 NCL 绘制各项的垂直剖面图，分析水汽通量的经向输送。分析发现 MMC 对于水汽的输送作用最为明显，主要体现为 Hadley 环流将水汽向低纬地区输送以及 Ferrel 环流将水汽向高纬地区输送，而 TE 与 SE 都主要将水汽向高纬地区输送，且 TE 的作用比 SE 稍大。

关键词：时空分解，水汽通量，经向输送

1. 引言

水汽的经向输送对于全球的水汽分布影响重大，研究水汽的经向输送，能使我们加深对大气环流以及全球旱涝区分布的理解。

2. 使用资料

本文使用了 2011 年 NCEP/NCAR 再分析资料中的经向风场 *wwnd.2011.nc* 资料，垂直方向取 17 层（1000、900、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10hPa），以及比湿场 *shum.2011.nc* 资料，垂直方向取 8 层（1000、900、850、700、600、500、400、300hPa）。水平分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

3. 水汽经向输送的计算

由时、空二维域上的分解原理，可得

$$\begin{aligned}vq &= \left([\bar{v}] + \bar{v}^* + [v]' + v^{*'}\right) \left([\bar{q}] + \bar{q}^* + [q]' + q^{*'}\right) \\ &= [\bar{v}][\bar{q}] + \bar{v}^*[\bar{q}] + [v]'[\bar{q}] + v^{*'}[\bar{q}] \\ &\quad + [\bar{v}]\bar{q}^* + \bar{v}^*\bar{q}^* + [v]'\bar{q}^* + v^{*'}\bar{q}^* \\ &\quad + [\bar{v}][q]' + \bar{v}^*[q]' + [v]'[q]' + v^{*'}[q]' \\ &\quad + [\bar{v}]q^{*'} + \bar{v}^*q^{*'} + [v]'q^{*'} + v^{*'}q^{*'}\end{aligned}\tag{1}$$

因此有

$$[\overline{vq}] = [\bar{v}][\bar{q}] + [\bar{v}^*\bar{q}^*] + [\overline{v'}[q]'}] + [\overline{v^{*'}q^{*'}}]\tag{2}$$

利用

$$[\overline{v'q'}] = [\overline{v'}][\overline{q'}] + [\overline{v^{*'}q^{*'}}]\tag{3}$$

得

$$[\overline{vq}] = [\overline{v}][\overline{q}] + [\overline{v^*q^*}] + [\overline{v'q'}] \quad (4)$$

4. 水汽经向输送分析

计算总的经向输送 (TOTAL)、定常经向环流输送 (MMC) 以及定常波输送 (SE), 利用关系式 $TOTAL = MMC + SE + TE$, 得到瞬变经向环流与瞬变涡动输送之和 (TE)。各项的垂直剖面如图 1。

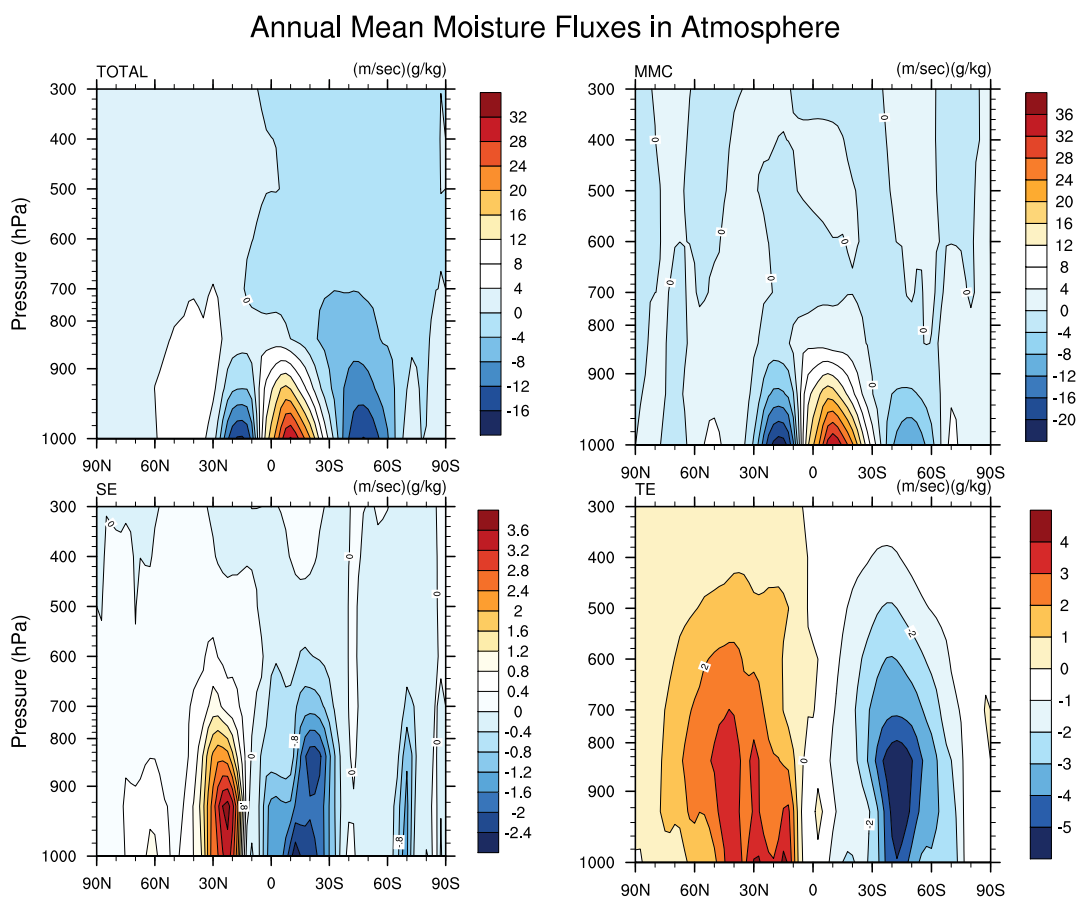


图 1: 水汽通量的经向输送。TOTAL: 总输送; MMC: 定常经向环流输送; SE: 定常波输送; TE: 瞬变部分输送, 包含瞬变经向环流与瞬变涡动输送两部分。

由图 1 可以发现水汽主要集中在 850hPa 以下的低层大气。水汽的定常经向环流输送

(MMC) 量级最大, 接近总的水汽输送 (TOTAL)。它的主要作用范围在低纬地区。北半球低纬地区 ($5^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$) 是个强的负值区; 南半球赤道附近地区 ($30^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$) 存在一个强的正值区, 这些区域正是 Hadley 环流所在区, 因此, MMC 反映了水汽在经向的输送, 主要是 Hadley 环流将水汽向低纬输送, 此外还有中纬度的 Ferrel 环流将水汽向高纬输送。

定常波输送 (SE) 的作用则相对较小。图中南半球赤道附近及低纬地区是负值中心, 而北半球中纬附近地区为正值中心。因此, 在南北半球, SE 都起到了向极地的水汽输送作用。

瞬变部分输送 (TE) 主要在中高纬地区, 作用比 SE 稍大。输送主要来自于向极地移动的暖空气和向低纬移动的冷空气。图中北半球地区为正值区, 南半球地区为负值区, 都表示向极地输送水汽。

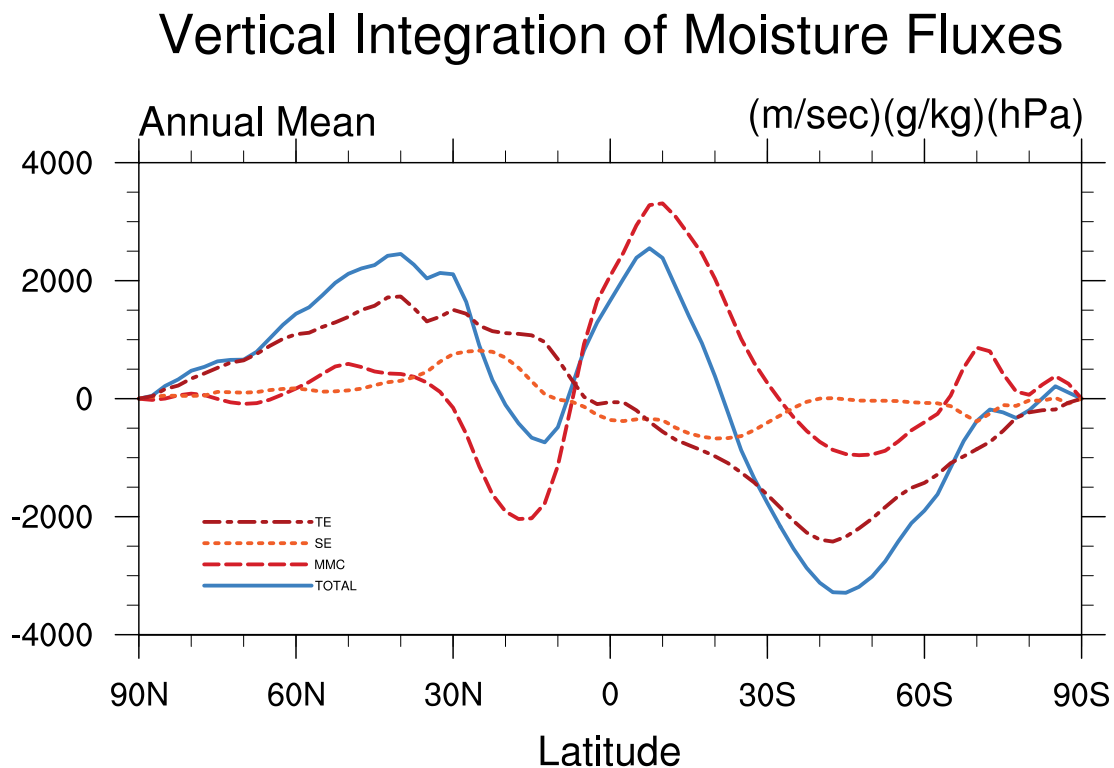


图 2: 水汽通量经向输送的垂直积分。TOTAL: 总输送; MMC: 定常经向环流输送; SE: 定常波输送; TE: 瞬变部分输送, 包含瞬变经向环流与瞬变涡动输送两部分。

图 2 是各纬度水汽通量经向输送的垂直积分。从图中我们可以看到，MMC 对于水汽输送的主要作用是将水汽往低纬地区输送，对应 Hadley 环流，而在 30° 以外的高纬地区对水汽有微弱的向高纬输送的作用，对应 Ferrel 环流。而 TE、SE 作用与 MMC 大致相反，主要使水汽往高纬地区输送，在一定程度上削弱了 MMC 的输送作用。此外，从图中也可以清楚地看出各项的相对大小：MMC 对于水汽的输送作用最明显，TE 次之，SE 输送水汽的作用最小。

5. 结语

本文使用 NCEP/NCAR 再分析资料，计算了总的经向输送 (TOTAL)、定常经向环流输送 (MMC)、定常波输送 (SE) 以及瞬变部分输送 (TE)。利用 NCL 绘制各项的垂直剖面图，分析水汽通量的经向输送。经过分析发现，MMC 对于水汽的输送作用最为明显，体现了 Hadley 环流将水汽向低纬地区的输送以及 Ferrel 环流将水汽向高纬的输送；而 TE 与 SE 都主要将水汽向高纬地区输送，与 MMC 相比，TE、SE 的输送作用都较小，而 TE 的作用比 SE 稍大。

附：NCL 计算及绘图脚本

```
1 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
2 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
3 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"
4
5 begin
6 ;=====
7 ; Read Data
8 A = addfile("./vwnd.2011.nc","r")
9 B = addfile("./shum.2011.nc","r")
```

```

10 ;=====
11 ; Calculate
12 vo = short2flt(A->vwnd)
13 q = short2flt(B->shum)*1000
14 lat = B->lat
15 lev_p = B->level
16 v = vo(:,0:7,,:,:) ; Cut v
17
18 TAve_V = dim_avg_n(v,0)
19 TAno_V = v
20 do z = 0,7,1
21     do y = 0,72,1
22         do x = 0,143,1
23             do t = 0,364,1
24                 TAno_V(t,z,y,x) = v(t,z,y,x) - TAve_V(z,y,x)
25             end do
26         end do
27     end do
28 end do
29
30 ZAve_V = dim_avg_n(v,3)
31 ZAno_V = v
32 do t = 0,364,1
33     do z = 0,7,1
34         do y = 0,72,1
35             do x = 0,143,1
36                 ZAno_V(t,z,y,x) = v(t,z,y,x) - ZAve_V(t,z,y)

```

```

37             end do
38         end do
39     end do
40 end do
41
42 TAve_Q = dim_avg_n(q,0)
43 TAno_Q = q
44 do z = 0,7,1
45     do y = 0,72,1
46         do x = 0,143,1
47             do t = 0,364,1
48                 TAno_Q(t,z,y,x) = q(t,z,y,x) - TAve_Q(z,y,x)
49             end do
50         end do
51     end do
52 end do
53
54 ZAve_Q = dim_avg_n(q,3)
55 ZAno_Q = q
56 do t = 0,364,1
57     do z = 0,7,1
58         do y = 0,72,1
59             do x = 0,143,1
60                 ZAno_Q(t,z,y,x) = q(t,z,y,x) - ZAve_Q(t,z,y)
61             end do
62         end do
63     end do

```

```

64 end do
65
66 TAve_ZAve_V = dim_avg_n(TAve_V,2)
67 TAve_ZAve_Q = dim_avg_n(TAve_Q,2)
68 ZAno_TAve_V = dim_avg_n(ZAno_V,0)
69 ZAno_TAve_Q = dim_avg_n(ZAno_Q,0)
70
71 vq=v
72 do t = 0,364,1
73     do z = 0,7,1
74         do y = 0,72,1
75             do x = 0,143,1
76                 vq(t,z,y,x) = v(t,z,y,x) * q(t,z,y,x)
77             end do
78         end do
79     end do
80 end do
81
82 TOTAL=dim_avg_n(dim_avg_n(vq,0),2)
83 TOTAL!0 = "lev"
84 TOTAL!1 = "lat"
85 TOTAL&lev = lev_p
86 TOTAL&lat = lat
87
88 MMC=TOTAL
89 do z = 0,7,1
90     do y = 0,72,1

```



```

91             MMC(z,y) = TAve_ZAve_V(z,y) * TAve_ZAve_Q(z,y)
92     end do
93 end do
94
95 ZTvq=ZAno_TAve_V
96 do z = 0,7,1
97     do y = 0,72,1
98         do x = 0,143,1
99             ZTvq(z,y,x) = ZAno_TAve_V(z,y,x) * ZAno_TAve_Q(z,y,x)
100        end do
101    end do
102 end do
103 SE=dim_avg_n(ZTvq,2)
104 SE!0 = "lev"
105 SE!1 = "lat"
106 SE&lev = lev_p
107 SE&lat = lat
108
109 TE=TOTAL-MMC-SE
110 TE!0 = "lev"
111 TE!1 = "lat"
112 TE&lev = lev_p
113 TE&lat = lat
114 system("/bin/rm -f ./Output/TOTAL.nc")
115 C = addfile("./Output/TOTAL.nc","c")
116 C->TOTAL = TOTAL
117 system("/bin/rm -f ./Output/MMC.nc")

```

```

118 D = addfile("./Output/MMC.nc","c")
119 D->MMC = MMC
120 system("/bin/rm -f ./Output/SE.nc")
121 E = addfile("./Output/SE.nc","c")
122 E->SE = SE
123 system("/bin/rm -f ./Output/TE.nc")
124 F = addfile("./Output/TE.nc","c")
125 F->TE = TE
126 end

////////////////////////////////////

1 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_code.ncl"
2 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/gsn_csm.ncl"
3 load "$NCARG_ROOT/lib/ncarg/nclscripts/csm/contributed.ncl"
4
5 begin
6 ;=====
7 A = addfile("./TOTAL.nc","r")
8 B = addfile("./MMC.nc","r")
9 C = addfile("./SE.nc","r")
10 D = addfile("./TE.nc","r")
11 TOTAL = A->TOTAL
12 MMC = B->MMC
13 SE = C->SE
14 TE = D->TE
15 linlog = 1
16 p = (/1000.,925.,850.,700.,600.,500.,400.,300./)
17 nlvl = dimsizes(p)

```

```

18 psfc = 1013.
19 pbot = 1100.
20 ptop = 300.
21 STOTAL = new(73,float)
22 SMMC = new(73,float)
23 SSE = new(73,float)
24 STE = new(73,float)
25 do i = 0,72,1
26     STOTAL(i) = vibeta(p,TOTAL(:,i),linlog,psfc,pbot,ptop)
27     SMMC(i) = vibeta(p,MMC(:,i),linlog,psfc,pbot,ptop)
28     SSE(i) = vibeta(p,SE(:,i),linlog,psfc,pbot,ptop)
29     STE(i) = vibeta(p,TE(:,i),linlog,psfc,pbot,ptop)
30 end do
31 data = new((/4,dimSizes(TOTAL&lat)/),float)
32 data(0,:) = STOTAL(:)
33 data(1,:) = SMMC(:)
34 data(2,:) = SSE(:)
35 data(3,:) = STE(:)
36 ;=====
37 ; Plot
38 wks = gsn_open_wks("pdf","Total")
39 gsn_define_colormap(wks,"BlueWhiteOrangeRed")
40
41 vres = True
42 vres@tiMainString = "Vertical Integration of Moisture Fluxes"
43 vres@gsnLeftString = "Annual Mean"
44 vres@gsnRightString = "(m/sec)(g/kg)(hPa)"

```

```

45 vres@tiXAxisString = "Latitude"
46 vres@gsnMaximize = True
47 vres@vpWidthF = 1.
48 vres@vpHeightF = 0.5
49 vres@xyLineThicknesses = (/5.,5.,5.,5./)
50 vres@xyLineColors      = (/ "steelblue", "red", "khaki4", "sienna" /)
51 vres@xyExplicitLegendLabels = (/ "TOTAL", "MMC", "SE", "TE" /)
52 vres@pmLegendDisplayMode = "Always" ; Display a legend.
53 vres@pmLegendWidthF      = 0.2      ; Make it smaller
54 vres@pmLegendHeightF     = 0.1      ; Make it smaller
55 vres@pmLegendOrthogonalPosF = -0.55 ; Move into to plot
56 vres@pmLegendParallelPosF = 0.15   ; Move to right
57 vres@trXReverse = True
58 vres@lgPerimOn      = False        ; No legend perimeter.
59 vres@lgLabelFontHeightF = 0.01
60 plot_ov = gsn_csm_xy(wks, TOTAL&lat, data, vres)
61
62 res = True
63 res@cnLineLabelsOn = True
64 res@cnFillOn = True
65 res@lbOrientation = "Vertical"
66 res@lbLabelBarOn = True
67 res@gsnSpreadColors = True
68 res@lbLabelAutoStride = True
69 res@gsnRightString = "(m/sec)(g/kg)"
70 res@trYReverse = True
71 res@trXReverse = True

```

```
72 res@gsnMaximize = True
73
74 plots = new(4,graphic)
75 res@gsnLeftString = "TOTAL"
76 res@tiYAxisString = "Pressure (hPa)"
77 plots(0) = gsn_csm_contour(wks,TOTAL,res)
78 res@gsnLeftString = "MMC"
79 res@tiYAxisString = ""
80 plots(1) = gsn_csm_contour(wks,MMC,res)
81 res@gsnLeftString = "SE"
82 res@tiYAxisString = "Pressure (hPa)"
83 plots(2) = gsn_csm_contour(wks,SE,res)
84 res@gsnLeftString = "TE"
85 res@tiYAxisString = ""
86 plots(3) = gsn_csm_contour(wks,TE,res)
87
88 pres = True
89 pres@gsnMaximize = True
90 pres@tiYAxisString = "Pressure (hPa)"
91 pres@txString = "Moisture Fluxes in Atmosphere of 2011"
92 gsn_panel(wks,plots,(/2,2/),pres)
93 end
```