

第四章 大气环流

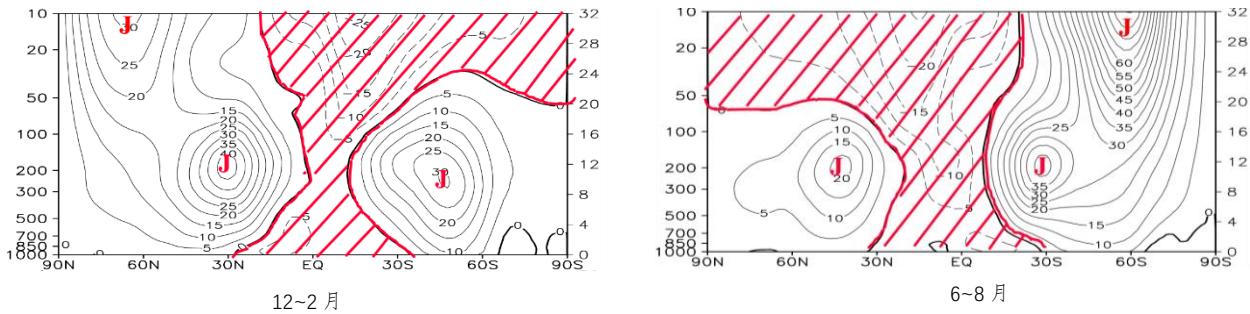
4.1 大气平均流场特征

大气环流 大气具有**全球范围的大尺度大气运行的基本状况**。某一大范围地区（欧亚地区、半球、全球），某一大气层次（对流层、平流层或整个大气圈），在一个长时期（月、季、年、多年）的大气运动的平均状态或某一个时段（一周、梅雨期间）的大气运动变化过程都可以称为大气环流。大气环流是不同尺度的天气系统发生发展和移动的背景条件。

尺度情况 **水平尺度**：数千公里以上 **垂直尺度**：10km 以上 **时间尺度**：数天以上

4.1.1 平均纬向风

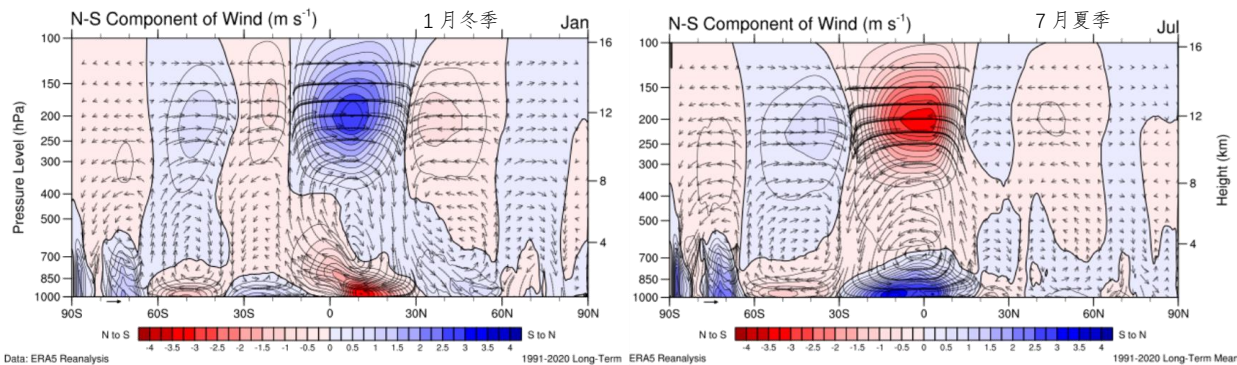
- 冬季 1 月**
- ① **低纬度为东风带**，铅直向上东风带迅速变窄，**东风最大风速中心在平流层**
 - ② 中高纬度对流层中心**冬季西风较强**，最大风速中心在**(200hPa, 30°N)**
 - ③ 北半球极区冬季从对流层到平流层均为西风
- 夏季 7 月**
- ① 低纬小范围为西风，其他部分为东风，最大风速在平流层。
 - ② 中高纬度对流层中心**夏季西风较弱**；北半球最大风速中心在**(200hPa, 40°N)**
 - ③ 北半球平流层为环极地的东风，极区附近为弱东风。



4.1.2 平均经向风

- 冬季 1 月**
- ① **30°N以南低纬度地区(哈得来环流圈)**对流层底层为较强的北风，最大3.5m/s，其上空(200 – 300hPa)同时有明显的南风，最大2.5m/s，中部南北风速较弱(平直西风)，**高底层显著反位相**。
 - ② 30°N~60°N低层平均为南风，高层平均为北风，风速均不足1m/s。**经向交换冬强夏弱**。
- 夏季 7 月**
- ① **近赤道地区(哈得来环流圈)**：底层南风高达 2.5m/s，高空为小于 3m/s 的北风。
 - ② 17~40°N中纬度地区低层为弱北风，高空为弱南风。
 - ③ 高纬度地区可能因为阻塞高压等天气过程而出现较高的南北风。
 - ④ 对流层中层多为 0 线。

注意 不能通过尺度分析的方法忽略经向风，否则南北不存在热量和能量交换。



¹ 本节部分图片摘自于 <https://pjbartlein.github.io/UOCWC/globalclimate.html> (University of Oregon)

4.1.3 平均水平环流

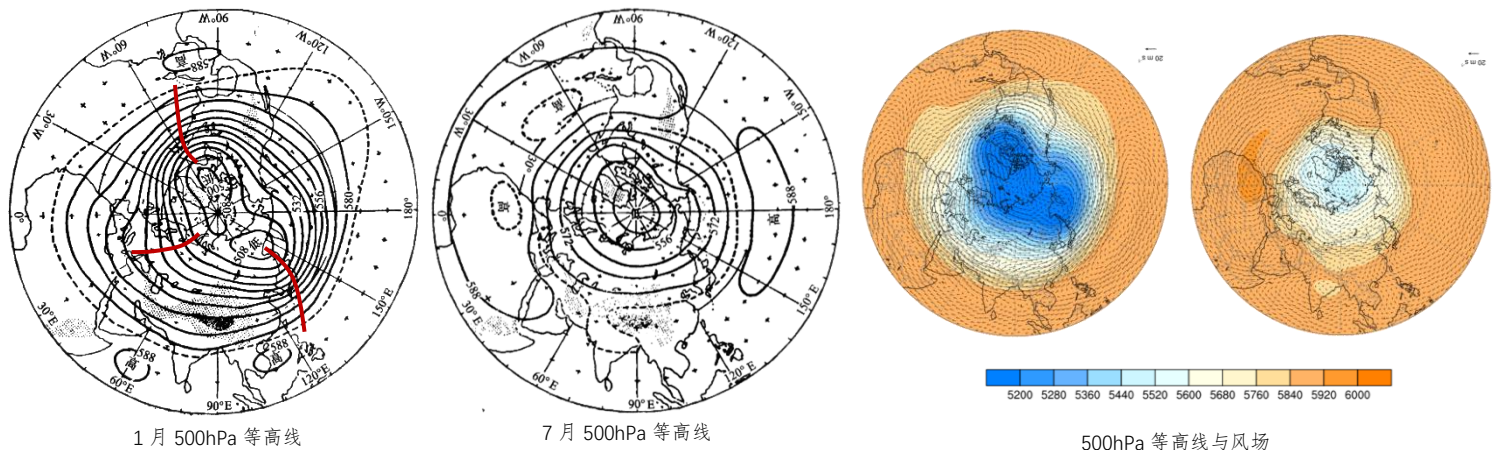
4.1.3.1 对流层中部 500hPa

冬季 1 月

- ① 中高纬度以极地低压为中心的绕纬圈的**较强西风环流**，等高线密集；**极涡分裂为两个中心**。
- ② **中纬度**：**三槽三脊** 中高纬西风带大尺度平均槽脊**位于大陆东岸**（东亚大槽、欧洲东部、北美东部槽）（高原北部脊、西欧沿岸脊、阿拉斯加脊），**脊弱槽强**。
- ③ **低纬情况**：北美和东亚大槽向南延伸到较低纬度；**地中海、孟加拉湾和东太平洋有明显的槽**。
- ④ **副热带高压强度小**，中心都位于海上。

夏季 7 月

- ① 极涡中心合并为一个，中心位于零点，**环绕极涡的西风带明显北移**，等高线变稀疏。
- ② 中高纬度出现**四个弱槽**（北美、东亚槽东移，强度变弱；陆地上的两个冬季的脊变为槽）
- ③ **副热带高压大大加强并北移**，海洋上出现**三个明显闭合中心**（西北太平洋、北大西洋、非洲西部）



4.1.3.2 对流层底部（全球平均海平面气压场）

冬季 1 月

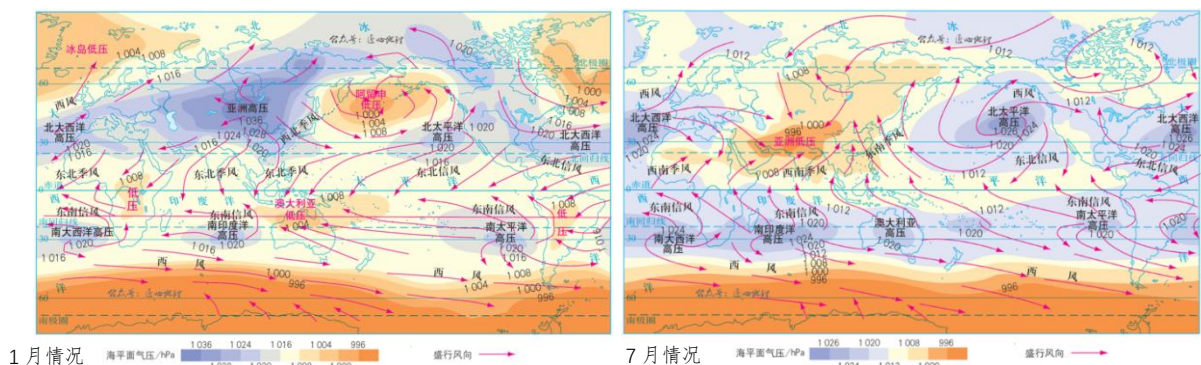
- ① **低压中心**：冰岛低压（北美大槽东，强大）、**阿留申低压**（东亚大槽东，强大）
- ② **高压中心**：格陵兰冷高压（不存在反位相，持续高压）、**亚速尔高压**（北大西洋副热带高压）、亚洲冷高压（反位相）、**夏威夷高压**（太平洋副热带高压）、北美大陆冷高压（反位相）

夏季 7 月

- ① **低压中心**：冰岛低压减弱、**亚洲大陆低压**（反位相）、阿留申低槽、北美低压
- ② **高压中心**：格陵兰高压、**大西洋副热带高压**（亚速尔高压）、**太平洋副热带高压**

活动中心

半永久大气活动中心：**冰岛低压、阿留申低压、太平洋副高、大西洋副高（亚速尔高压）、格陵兰高压**
半体现在冬夏强度、位置存在明显变化。永久体现在冬夏都存在。其变化表征大气环流的显著变化。
季节性大气活动中心：亚洲高压、亚洲热低压、北美冷高压、北美冷低压。
季节性中心出现在陆地上，半永久性出现在除格陵兰以外的海洋上。



4.1.4 大气环流季节转换

4.1.4.1 6 月和 10 月的突变

突变

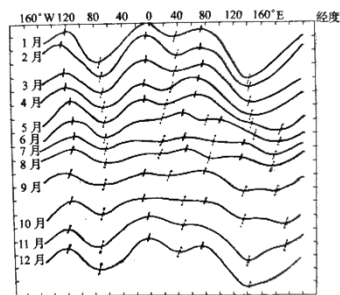
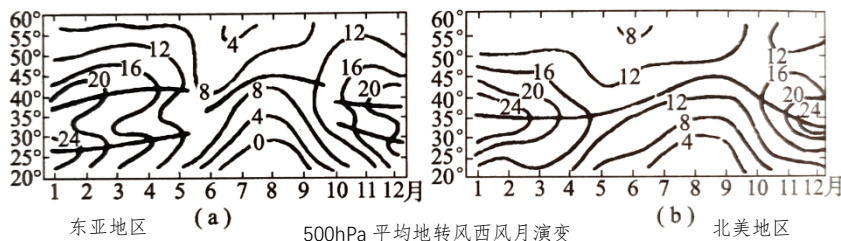
冬季和夏季的槽脊位置基本上是稳定的，它们占全年相当长的时间，而两个过渡季节是短促的，**在短促的时间中完成环流的季节转换常称为突变**，**冬→夏在 6 月，夏→冬在 10 月**
这种突变是半球范围乃至全球范围的现象，以亚洲最为明显（地形显著差异）

强西风带

东亚为双中心结构（西风急流的北跳现象），北美为单中心。

冬季东亚存在着**两支强西风带**，**6月南支强西风带消失**，**北美单支强风带**也明显北移。**10月**东亚又出现两支强西风带，北美西风带也南移回位。东亚为突变型（青藏高原），北美为渐进性。

环流突变在以中东地区和我国青藏高原附近变化最早，北美最迟。



4.2 控制大气环流的基本因子与大气环流基本模型

4.2.1 太阳辐射作用

太阳辐射

其是造成**大气运动能量的唯一来源**。赤道和极地的下垫面接受太阳辐射的差异及其年变化支配着大气环流及其年变化。大气环流的**直接能源来自下垫面的加热、水汽相变的潜热加热和大气对太阳短波辐射的少量吸收**。其最终能源还是来自太阳辐射。

辐射平衡

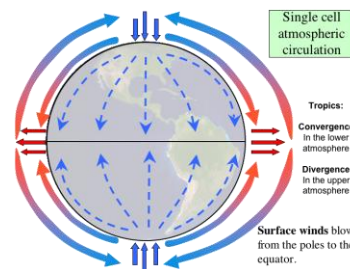
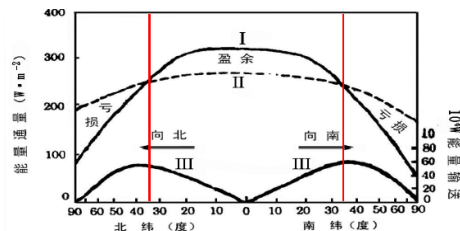
赤道地区净获得，**40°左右**为分界线，极地地区为净失去。

单圈环流

直接热力环流圈，高层产生指向极地的气压梯度，形成单圈环流。

特点

赤道附近上升，极地下沉运动，北半球为高层为南风，低层为北风。其由于大气加热不均匀造成，实际上是不存在的。



4.2.2 地球自转与三圈环流

4.2.2.1 三圈环流

形成

在地表性质均匀，地球自转产生的地转偏向力之作用下，形成了理想的**经向三圈环流**和近地层的**三风四带环流**。

风带

东北信风带、盛行西风带、极地东风带

气压带

赤道低压带、副热带高压带、副极地低压带、极地高压带

组成

哈得莱环流+费雷尔环流+极地环流

哈得莱环流

从赤道低压地区上升，升至对流层顶，向极地方向直到南北纬30度左右，在高压区下沉。部分空气返回地面后于地面向赤道返回，形成信风，完成低纬度环流。

动能产生【直接热力环流圈，强度最强】

费雷尔环流

也称为中纬度环流，是一个次要的环流，依靠其余两个环流而出现，有时并不明显。**动能消耗【间接热力环流圈】**

其低层为西风带，高层理论上为东风，然而由于环流很弱，高层仍为带状的西风气流，多扰动。

极地环流

也是一个热力环流圈，**强度最弱【直接热力环流圈】**。

信风

东北东南信风带：北半球哈得莱环流中低层向南的气流，在科氏力作用下向右偏转形成的稳定风系。

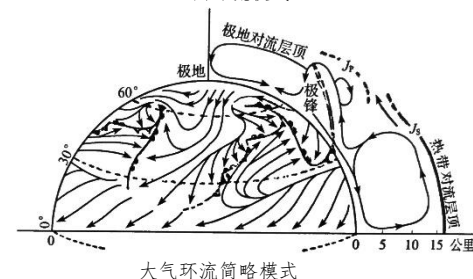
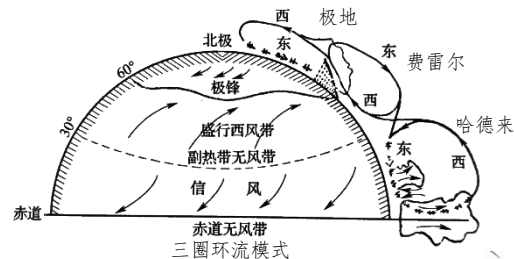
赤道辐合带

赤道附近东北信风和东南信风汇合的地带，简称 ITCZ

4.2.2.2 锋区

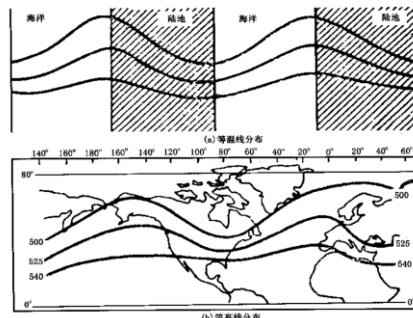
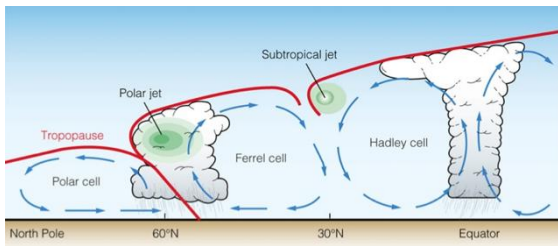
副热带锋区

哈德来环流圈中高层向北运动的暖湿气流，与**极地环流圈**中上升辐散向南的气流辐合，形成锋区。在**对流层上层**明显，**30°左右**的高空有锋区存在，也称为**南支锋区**。有**副热带急流**与之对应。

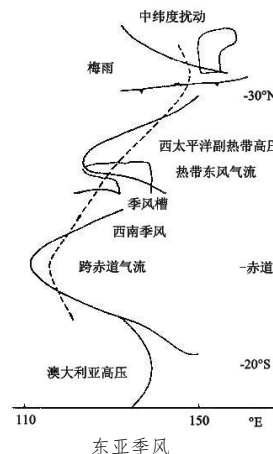


极锋锋区 极地环流圈中低层向南的东北风，与哈得莱环流中下沉辐散向北运动的西南风辐合，形成锋区。在对流层低层明显，有**极锋急流**与之对应，也称为**北支锋区**。

差异 ① 纬度不同 ② 高度不同 ③ 极锋地面经常有锋或锋面，副热带锋地面常常无锋。



平均槽脊的形成



4.2.3 地球表面的不均匀性

4.2.3.1 海陆分布对大气环流的影响

总述 海陆分布可以导致**海陆风**、**季风**、**形成平均槽脊**等影响。

海陆风 在海岸附近因海陆热力性质差异而产生的中尺度热力环流。

季风 **大气环流季节变化的一种最典型的表现**。季风是一种与年循环相联系的现象。

冬夏盛行风向相反，夏季：地面低层从凉的海洋吹向热的大陆；冬季：从冷大陆吹向暖的海洋
夏季风潮湿，冬季风干燥。（最大大陆、最大高原、南半球经度配合好）

亚洲季风 分为**印度季风区**、**东亚季风区**、**西太平洋季风区**

进一步分为**南亚季风**（印度季风）、**东亚季风**（东亚副热带季风、南海季风（西北太平洋季风））

季风区 大兴安岭-阴山-贺兰山-巴颜喀拉山脉-冈底斯山脉

4.2.3.2 形成平均槽脊

理论 **冬季**：有一气块自西向东运动，经过**暖洋面膨胀**，到**大陆西海岸附近变成脊**，到**陆地受冷收缩**，到**大陆东岸变成槽**（冬季热力+动力因素叠加：形成东亚大槽、北美大槽）

注意 观测事实并不完全一致，说明海陆分布的热力差异**不是**影响大气环流的唯一因素。

还和大地形的动力作用有关（夏季：热力因素意图变脊，动力仍为槽，导致槽脊反转或减弱）

4.2.3.3 地形情况

总述 地形作用有**动力作用**、**热力作用**等。

动力作用 大地形使得气流**分支**，**绕流**，**爬坡**等，并使其速度发生变化。

- ① 青藏高原使得 500hPa 以下西风环流明显分支，绕流，汇合，绕流作用形成**北脊南槽**（印缅槽）。
- ② 爬坡影响到西风槽本身强度（下坡有利于槽的加深）和移动速度。
- ③ **南支西风**在形成孟加拉湾低槽，槽前偏西南风又**受到地形摩擦作用**而减弱，具有**气旋式切变**。冬春季节西南地区（四川西部）处于印缅槽前，以致**低涡活动特别多（西南涡）**大部分西南涡是局地的，但少部分能够沿切变线移出，所经之处有明显降水，因此**西南涡对预报相当重要**。
- ④ **下坡气流**气旋性涡度增加，有利于**东亚大槽形成**。

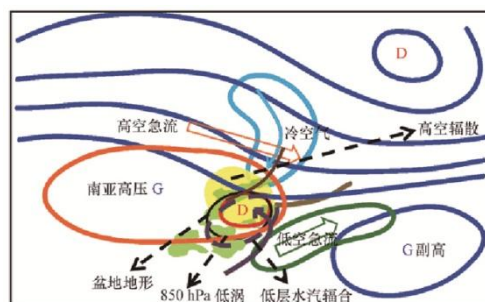
热力作用 ① 青藏高原相对于四周的自由大气，**夏季受热快，起着强大热源**的作用。冬季高原积雪对大气环流也有影响。高原**夏季是个热低压**，**冬季是个冷高压**。

② **夏季西风急流北跳**，与高原的热力作用有关：

冬季：急流位置偏南，位于高原南缘附近。南边洋面暖，高原冷，北边虽然更冷，但温度梯度相对小。

夏季：南缘温度梯度减小，西风小，**西风急流消失**，甚至温度梯度反向，出现东风气流（热带东风急流）
北部温度梯度增大，西风大，西风急流北跳（东亚地区特有的季节转换现象）。

③ 南亚高压的形成。



西南涡的形成

4.2.3.4 西南涡

含义 the Southwest Vortex, 指形成于四川西部地区, 700 或 850 百帕上具有气旋性环流的闭合小低压, 直径在 300-400km 左右。一般来说, 西南涡是浅薄系统, 特殊个例也可发展到对流层高层。

生命史 多形成于 4~9 月份, 生命史一般低于 48h, 但向东发展后可超过七天。降水具有明显的中小尺度特征, 就造成的暴雨强度、频数和范围而言, 西南涡仅次于台风。

西南涡形成

- ① 地形作用: 背风坡的减压作用、绕流与侧向摩擦作用。
- ② 500hPa 上有高原槽东移, 槽前正涡度平流造成低层减压, 形成低涡。
- ③ 700hPa 上有能使高原东南侧的西南气流加强, 并在四川盆地形成明显的辐合气流的环流形势
- ④ 江淮切变线的西端也容易形成西南涡。青藏高原东北侧绕流形成兰州小高压

4.2.3.4 南亚高压的形成

南亚高压 南亚高压因为暖(非绝热加热)形成高压, 是一个热力性高压。而副高是因为高压才暖(下沉增温)形成: 500hPa 上有辐散, 感热, 中底层加热; 潜热中高层加热, 具有趋热性。(东西振荡)与副高常常相向而行。长江中下游出现上下游叠加时, 利于降水; 相背而行时, 较为干旱。

情景案例 5 月中下旬攀登珠穆朗玛峰的原因:
急流六月突变, 3-4 月很冷, 西风急流在南缘, 正好在急流控制区, 风很大, 不利于攀登。
5 月中下旬南缘离开急流区, 风变小了。随后印度季风在 6 月中旬建立, 降水剧烈。

4.3 极地环流

4.3.1 北极环流

4.3.1.1 冬季情况 (1 月)

500hPa 极地是一个槽区, 极地涡旋断裂为两个闭合中心。

断裂原因:

- ① 极地涡旋收到行星波的扰动, 导致涡旋结构分裂。
- ② 热力: 北极地区表面冷源分布不均, 低压中心倾向于在冷源下游形成。

比较情况 在新地岛 500hPa 上有槽的地方, 在 700hPa 上是一个闭合的小低压。
位于格陵兰与加拿大之间及亚洲东北部的低中心, 700hPa 上的位置比 500hPa 的偏向东南。

原因:

- ① 地形情况: 低层收到格陵兰高原阻挡, 冷空气绕流, 导致低压中心南移。
- ② 温度场配置: 加拿大-格陵兰为冷源, 东北侧海洋温度更高, 有东南热成风。

地面情况

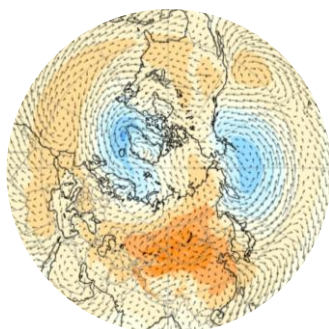
- ① 基本是一个高压带, 存在极地环流。
- ② 冰岛低压很强大, 向大西洋的极圈伸展出一个槽, 占据极地面积的一半。

4.3.1.2 夏季情况 (7 月)

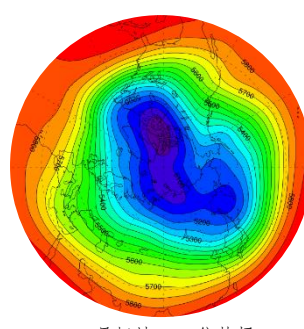
500hPa 极地涡旋中心均在极点附近, 较 1 月气压系统明显减弱, 低压中心轴线几乎垂直。

地面情况

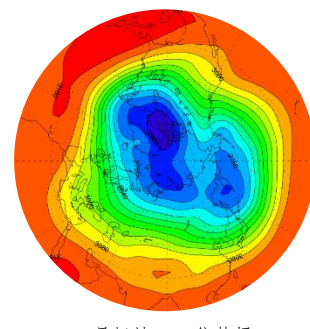
- ① 仍未高压, 但强度较 1 月明显减弱。
- ② 加拿大地区有一个闭合低压中心, 其他系统不明显。



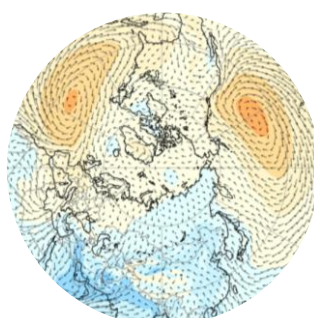
1 月地面气压及风场



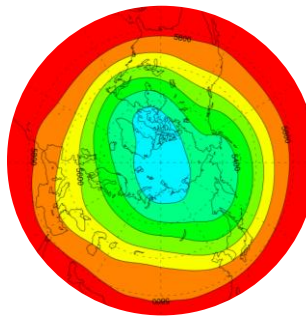
1 月极地 500 位势场



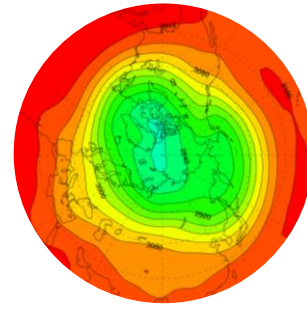
1 月极地 700 位势场



7 月地面气压及风场



7 月极地 500 位势场



7 月极地 700 位势场

4.3.2 极地环流的异常

- 基本情况** 极涡中心有两个，一个在东亚，一个在北美。当两个极涡**分别向中高纬活跃时，会带来冷空气。**冬季北极对流层中部一般是一个**极地涡旋**或是**极涡的槽区**，但有时也可能出现反气旋，但不持久。
- 异常情况** 若极地持久地**为暖性的反气旋或暖脊所控制**，就会使得**极地冷性涡旋偏离极地向南移动**，导致锋区位置比平均情况**偏南，寒潮活动多而强烈。**
- 案例分析** 北极点平均 -30°C ，冬夏温差可达 30°C 。2015年12月29日，北极点气温为 -35.4°C ，可第二天上午温度就达到零上，因为**大西洋风暴**（爆发性温带气旋）将中纬度**暖洋面气流**裹挟到北极区域，使该地大幅升温。极区极涡受到暖气流影响分裂迅速，东边极涡被迫向南，半个月后(1月中旬)有强烈寒潮。

4.4 热带环流

- 热带** 热带一般指南北半球**副热带高压脊线**之间的区域，约为 $\sim 20^{\circ}$ ，约占地球表面积的一半。热带的环流与中高纬度的环流有密切关系。

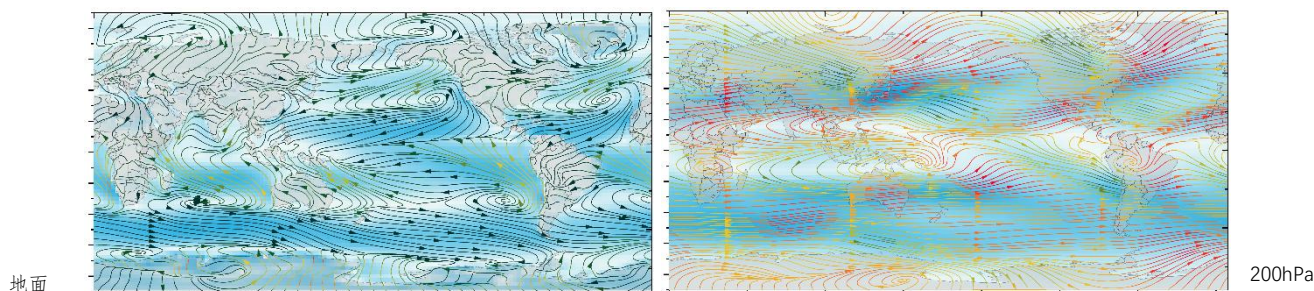
4.4.1 平均环流特征

4.4.1.1 地面流场

- 冬季** 北半球**两个巨大的反气旋**(南半球三个)，**两支偏东气流**(信风)，**赤道辐合带**：大西洋、西非、太平洋东部平均位于 $5\sim 10^{\circ}\text{N}$ ，在印度洋和太平洋位于 10°S ，随季节有南北位移。亚洲地区为**东北季风**。
- 夏季** 东北信风加强北移到 20°N 附近，副热带反气旋显著增强，**赤道辐合带北抬**。亚洲为西南季风。
- 季风辐合带**

4.4.1.2 对流层上部(200hPa)平均流场

- 冬季** 对流层高层出现**强西风**，**副热带有西风急流**，上有三个弱槽(孟加拉湾、太平洋东部、非洲西海岸)。**三个急流中心**：地中海急流中心、日本急流中心、美国-东南急流中心，速度可以达到 100m/s 。
- 夏季** 对流层高层三个**反气旋中心**位于北美、波斯湾、青藏高原，和地面强大的低压对应。高原上空范围庞大的反气旋(**南亚高压**)。热带太平洋和大西洋为低槽，从西太平洋到非洲有强大的**热带东风急流**。夏季高层主要是**南亚高压、北美高压和洋中槽**。
- 冬夏比较** 对流层高层在夏季，波斯湾和青藏高原上的反气旋对应的气压场是一个在全球范围内最强大的高压：**南亚高压**(其北侧为西风急流，南侧为东风急流)；同时北美高压则相对较弱。太平洋大西洋洋中槽。
- 信风辐合带** 气压场称为**信风槽**，是**两支信风汇合的辐合带**，常出现在大西洋和太平洋的热带地区。
- 季风辐合带** 其反应为低槽，也称为**季风槽**，**信风与季风汇合的辐合带**，主要出现在**亚非季风表现最明显的区域**，其平均位置随季节摆动很大，属于一种**无风带**。低纬度地区，洋面和海温等满足台风生成条件，且辐合利于上升运动，是**台风生成的摇篮**。
- 赤道辐合带** **ITCZ**，南北半球两个**副热带高压之间气压最低、气流汇合的地带**，分为信风带(洋面多见，东北信风和东南信风的汇合)和无风带(大陆多见，如非洲大陆，是季风辐合带)。



4.4.2 平均经向垂直环流

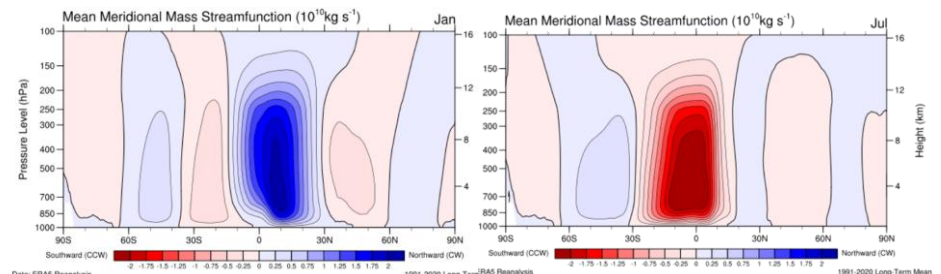
质量流函数 冬季上升支位于5°S附近，夏季在10°N附近，春秋上升支范围基本一致。

4.4.2.1 纬向对称的经圈环流（信风区）

描述 即赤道地区辐合上升，副高地区下沉，副高上方有西风急流的较为**对称的哈得莱环流**。

4.4.2.2 纬向非对称的经圈环流

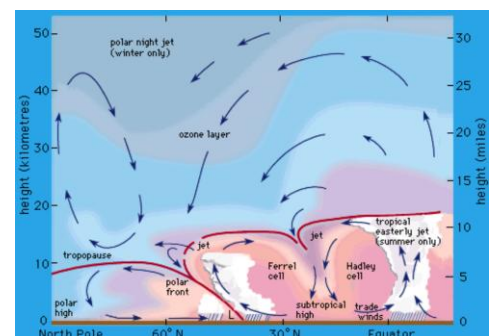
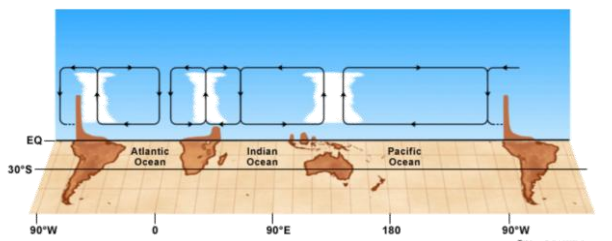
描述 即**上升支移位**，北半球夏季，近赤道地区的对流在**亚洲季风区**可发生最大20°的经向位移，导致**亚洲季风经圈环流**。



4.4.3 平均纬向垂直环流

主要结构 印度尼西亚和西太平洋暖洋面上的上升运动，及其东西两侧的下沉运动。

沃克环流 太平洋-印度尼西亚的环流称为**沃克环流**；印度洋-印度尼西亚的环流称为**反沃克环流**。



4.5 西风带大型扰动

参见下学期《天气学原理2》课程

4.6 急流

4.6.1 概述

急流的发现 二战期间，飞行员往返于英国和美国，发现从美国到英国更快，并报告了45m/s的风速。

含义 一股强而窄的气流带，主要集中在**对流层的上部或平流层中(200hPa)**，其轴是准水平的，为东西走向。沿轴 **最大风速≥ 30m/s**。具有**强大的水平风速切变和垂直风速切变**。

水平切变：5m/s/100km (每百公里 5m/s)，**垂直切变**：5~10m/s/1km。

尺度情况 **水平长度**达上万公里，**水平宽度**几百公里，**厚度**几公里。

低空急流 **600hPa** 以下出现的强而窄的气流，与暴雨、**飕线**、**龙卷**、**雷暴**等剧烈天气有密切关系。

4.6.2 急流的基本特点

4.6.2.1 涡度分布

模型假设 假设急流平直，忽略曲率涡度，且急流轴上风速最大，两侧风速逐渐变小。

急流左侧 $\frac{\partial V}{\partial n} < 0$ ，具有**气旋性切变，正涡度**。该涡度量级与 $f \sim 10^{-4} s^{-1}$ 相当，需要格外注意。

急流右侧 $\frac{\partial V}{\partial n} > 0$ ，具有反气旋性切变，负涡度。

4.6.2.2 平直西风的急流轴两侧

在急流轴左侧有偏差风辐合、右侧有偏差风辐散

故急流轴线上 $|\vec{D}|$ 大，轴线外 $|\vec{D}|$ 小，导致出口左侧偏差风辐散。

4.6.3 急流的种类和特点

热带东风流 夏季北移，在**100~150hPa**达到急流标准，夏季最强，位于10~15°N附近 **【夏强冬弱】**

作用 输送水汽，其左侧发生强降水。

