第一章

类地密度高 旋转缓慢 大气层对本体薄，类木密度 较低 旋转快 大气层厚

雪线以内H2气态类地，以外类木，太阳系雪线4.5AU

水星 稀薄大气 平均自由程很大 几乎透明 表面温差大

金星 大小密度接近地球 自转很慢 内禀磁场很弱 大量的火山 730K 92倍大气压 百倍地球大气质量 CO2为主 浓密硫酸云层（SO2，火山，硫酸云层，温室效应）

火星 没有发电机 只有剩磁 直径地球一半 质量地球九分之一 倾角自转周期与地球相近 倾角大小适中 干冰极冠 235K 百分之一地球大气质量 大气CO2为主

类木行星 氢和氦 从一个大气压的高度计算半径 遥感观测看到云层顶端（此处略大于p0） 金属氢（近似液体）

木星 强大磁场 p0处110k 零自转倾角

土星 p0处82k

冰巨行星 比氢氦重的气体所占比重很高 表层气态氢为主 下方水氨甲烷组成冰 大气氢氦 有磁场 磁场与自转轴倾斜很大

月球 没有大气 表面温差大 两极永久阴影区可能有冰

第二章

地球大气中只有H2O（实际上同海洋耦合），O3，CO2对地球大气影响显著，化学反应大多是氧

类木行星温度足够低 有大量轻的元素

各个类地行星的标高（H=R\*T/(M\_m\*g)）差距不大

决定季节变更：自转倾角与公转偏心率 => 二者结合，地球北半球夏季在远日点（南半球夏季更热），火星北极冠在北半球夏季存在而南极冠在南半球夏季消失

水星自转58.7天，公转88天（公转一圈自转一圈半，只有半个昼夜变换）=>昼夜交替176天

太阳风与大气最外层作用，电磁辐射是太阳向行星输送能量的主要形式

普朗克黑体辐射定律，维恩位移定律，Stefan-Boltzmann定律

太阳辐射可见光区域辐射最强，99% 位于UV-可见-IR 区域
黑体辐射谱 v.s. 太阳辐射谱：在可见区和IR区（来自较平稳的光球层随时间变化不大）大体一致，EUV区偏高（来自高温的色球和日冕区域，与太阳活动有关），无线电区偏高（产生于自由电子和太阳磁场之间的相互作用，与太阳温度没有直接关系，来自高温的色球和日冕区域，与太阳活动有关），UV区偏低（光球发出的辐射被太阳大气中的原子电离过程 所吸收） 。总辐射量相对稳定

IR辐射=分子振动与旋转，一微米=光离解与激发外层电子，千埃=光离解外层，百埃=光离解内层

传入大气越深，辐射光子越少（大气密度增加吸收更强），O2光离解=1450埃

高空光子多但O2少=>存在光离解极大高度（查普曼图像）（可见光在地面吸收，不存在该图像）
O2+photon->O+O，O+O+M->O2+M（反应速率正比于参与反应的物质的密度积）

光化学平衡假设：假设平衡在每一高度维持（O的密度于100km处最大=>高度继续下降，大气密度降低，光离解速率降低，所以O的密度随高度下降）

70km以下，与观测O的密度基本一致，以上，考虑混合（使各物质向各自的标高分布演化） 与扩散（使得各物质在每一部分的流体有相同的相对浓度）
光离解vs扩散vs混合：混合时间常数，光离解时间常数，扩散时间常数（达到稳定状态所需时间）在120km以下，扩散时间常数较长，主要受光离解和混合影响（越低M浓度越大，光离解和复合过程的时间常数越短，注意区分反应速率和反应时间常数）（如果O的密度非常低，就不存在光离解时间常数这个概念）（臭氧的讨论中会看到类似情况）
低层大气中的光离解vs混合：70km以下光离解起主要作用，以上为混合（混合将氧原子O从高空带到低空 ）。120km处，O与O2浓度基本相等，120km以上，由于扩散（扩散导致轻气体占比随高度升高而增大），O相对O2的浓度继续上升

扩散过程时间常数的量级：120km处一天，整个大气三万年，因此大气一定不是完全由扩散主导
扩散vs混合：低层碰撞频繁，扩散时间常数更大=>低层完全混合。临界高度以上扩散主导

对O：70km以下光理解主导，70km-150km混合主导，150km以上扩散主导

O+O2+M->O3+M（O3也源自O2光离解）。O3+O->2O2（高空重要），O3+photon->O2+O（任何地方都重要，以此吸收两千埃到三千埃）。

反应速率=>O3密度正比于O2和M的密度，反比于可吸收光子密度反相关。近地面O3很少。低空O很少。O3极值高度为25km。

混合vs光离解：低空中O3几乎不会光化学反应，混合主导（包括大气环流），到临界高度是光离解主导（高空中O和可吸收光子密度高）。对O，光化学时间常数随高度增大=>70-105km混合主导。O3在高空的光化学主导，低空混合主导。（在近地面，大气环流从高纬向低纬运动;在上空，大气环流从低纬向高纬运动）。地面附近O3消失，下层环流不会将O3从高纬带回低纬，在高纬富集。

金星和火星上不存在臭氧层，不吸收两千埃至三千埃。（影响形成温度分层结构）

类木行星标高较小。常见元素与H2结合。按高度变化分为三类（不凝结且混合良好。低层良混合而高层凝结，碳氢化合物低空良混合而高空显著减少）。

地球电离层（50km以上）电子离子来自于光致电离（小于一千埃，大约100km-200km）

金星光致电离：CO2光致电离，参照其查普曼图像。电子密度于140km极大。（火星与之类似）

地球光致电离：速率（N2 O2 O）于150km极大。主要来自O的光致电离。

随高度上升，O密度相对O2与N2密度升高。电离层中混合不重要，高度增加有扩散时间常数减小。足够高时，扩散占主导（该临界高度比光离解临界高度高）。300km以下光致电离主导，以上

扩散主导=>电子密度于280km极大。

基本分析思路 ：行星大气组分决定大气行为；不同波段的辐射有不同的影响。光化学过程与复合过程平衡，得到相应组分的分布的理论值，根据光化学、混合、扩散哪一个占主导，分析偏离原因。

第三章

EUV（不足千埃，透入热层），UV（两千至三千埃，透入平流层），可见光与IR（到地面）。三个温度极大高度：热层（热层温度极大处，来自太阳辐射，光致电离吸收EUV，各个行星高空都有），平流层顶（O3吸收UV），地面。

行星有辐射平衡，吸收能量=pi\*r^2\*太阳辐射通量密度\*(1-反射率)

吸收能量=4pi\*r^2\*sigma\*T\_e^4

金星云层导致反射率高，有效温度接近地球

木星土星大气来自内部加热（其能量与太阳总辐射量接近）（吸收的辐射量存在纬度差异，而辐射量没有纬度差异）（有效温度:基于辐射平衡计算， 热辐射温度:基于行星的辐射总量计算=>木星土星海王星的热辐射温度明显高于有效温度，天王星的差异不大）类地行星的这个差异来自大气对行星发射辐射的吸收

太空中观测者看到的即是有效温度对应高度。

地球大气对可见光透明，水汽对IR强烈吸收

地面和大气不积累能量。向外发射的又会被二者吸收。二者产生的辐射都比从太阳吸收的多。

地球入射100，反射-33，大气辐射给太空-67。地球整体向外的辐射67，等于地球整体吸收的太阳辐射等于大气向外的辐射。

温室效应：大气对短波太阳辐射透明，对较长的行星IR辐射不透明，导致温度增加。

假设：短波太阳辐射被地面不被大气吸收。长波被大气吸收效率无关波长。辐射是逐层传热唯一方式。

选每层光学厚度为1（每层气体等量）=>第n层有T\_n^4=T\_e^4，地面为n+1。高空温度下限（考虑高空一薄层）为T\_e\*2^-0.25。（对平流层，考虑O3，大气对太阳辐射不再透明，(T/T\_e)^4=(mu+epsilon)/(2\*epsilon)）

绝热温度递减率dT/dh = -g/c\_p，气温随高度衰减率delta大于g/c\_p才发生对流（对流与delta互相调制使得12km以下对流区大delta接近g/c\_p。12km以上平流层开始，温度接近常数。）

在平流层，高度增加导致O3增加（mu增加），温度上升，在峰值吸收高度（50km）达到温度极大。

金星对流层50-60km厚，与理论接近，差异或来自云层和雾霾层。几乎没有O，没有臭氧层吸收紫外辐射形成的温度极大。

火星虽然温室效应弱，但重力加速度小，温度衰减慢，所以对流层厚度与地球接近。没有臭氧层吸收紫外辐射形成的温度极大。火星表面温度进而红外辐射（CO2吸收）变化很大。响应迅速。零至八点逆温不对流。八至十六点对流，对流区向上扩展。十六至零点表面温度快速下降，对流减弱。粉尘增大火星的c\_p。

木星（没有表面，以气压表征高度）底部热源导致强对流导致温度变化接近g/c\_p。木星、土星、海王星有很强的内部热源，而天王星的内部热源很弱。

热层，分子密度低（热量转移不能依靠热辐射），没有对流，故通过热传导传热（分子直接碰撞交换平动能）。热层吸收的UV和EUV辐射（峰值高度为200km）与热传导平衡。高处稀薄，热传导少，温度随高度升高。热层高处（250km）没有新的热源，温度趋于定值。中间层相当于热层的冷源。

第五章

木星：浓密且复杂的带状云，金星：厚度极大的云层，火星：数量少且稀薄，地球云：对流层，高中低，卷积层，为液滴与冰晶集合体。

地球大气的水蒸气对太阳辐射透明，对地球IR辐射强吸收。云增加光学厚度和太阳光反射率。地表的水吸收入射的辐射。冰雪增大反射率。

地球的云覆盖一半，有效温度253K。全云则R=0.71，205K。无云R=0.17，267K。

固液进入气态的速率来自分子热运动来自温度，气态进入固液的速率来自分子撞击固液表面来自分压。饱和气压：气态和固液之间动态平衡（与温度正相关）。相对湿度：单位体积空气中，实际水蒸气压与同温下饱和蒸气压之比。（低温下空气含水上限也减少）

水的三相点：6.1mbar，273.16K。水的临界点：220.64bar，647K，在此之上不存在固液。

过饱和：比饱和气压高而气态（如迅速降温且没有液态水或凝结核）。过冷水：低于凝固点而液态（如迅速降温且没有任何冰面、扰动、冰晶）。过冷水与水汽平衡的饱和蒸汽压略大于冰和水汽平衡时的蒸汽压。

考虑湿空气上升，温度降低，逐渐饱和，在凝结高度（云层底部）开始凝结。考虑相变潜热，相当于c\_p增大，等价于绝热温度衰减率减小，温度随高度变化变慢。继续上升，温度温度降低，容水降低，温度随高度变化变快。对流层上部温度很低，温度随高度变化接近绝热温度衰减率。到零摄氏度（凝固高度，2km），变为过冷水，在负四摄氏度（2.5km）凝固。上升停止于云层顶（3km）。水汽凝结需要凝结核（细微固体质点）；水的凝固需要冰晶（随温度降低增多）。

金星云为硫酸液滴（CO2+photon->Co+O,SO2+O->SO3->H2SO4）。主云层（45-65km）上下均有雾霾层。

火星上大气较为稀薄，温度波动很大，CO2的凝华温度在火星 表面较为容易达到。极区CO2凝华。假如极夜足够长，则几乎 全部大气都会在极区凝结 。冬至或夏至时，在火星冬 季半球，大概有约20% 的 大气在极区凝结;而相应 的夏季半球的极冠由于温 度升高几乎消失 。春分与秋分， 是极冠分布最广的时候。高空中 (>50km)，也会有CO2凝华而形成的干冰云。低温区的干冰云降下形成极冠，高温的升华。火星上可见光图像中的云大多由水分子（来自凝华，火星气压很低，根据相图可知不存在液态水云）构成，这些云少而薄，类似卷云。

由气压梯度力可知火星风速很大。小的重力加速度导致很多沙尘暴。除了全球尺度的沙尘暴，火星上还存在小尺度的尘卷风结构。

木星自转快，所以其大气环流是多个环流元的形式，由于科氏力形成地转平衡风，大气运动主要是东西方向为主 。木星的云层顶可分为十余条平行于赤道的带状云，被带状气流分隔。暗的云称为带(belt)，对应环流中的下降气流区，温度较低。亮的云称为区(zone)，对应环流中的上升气流区，温度较高。

云层顶固态氨云，云层顶下对流层上固态硫氢化铵云，对流层中部水冰云；

云滴对应饱和蒸汽压：凸面，气与液固接触面更大，蒸发更快，需要更大的水汽分压力，即需要更高的饱和蒸汽压；云滴越小，曲率半径越小，分界面弯曲程度越大，饱和气压越大；小云滴的形成的重要原因是有凝结核，然后才能聚集成大云滴；估算质量时以球形估计单个云滴的质量，初始形成的云滴半径约7微米

卷云：高空、纤维状结构、冰晶组成；积云：云底水平，垂直发展，垂直风速大于1m/s；层云：横向尺度很大（可达1000km），细小水水珠，几乎完全没有结构，垂直速度10cm/s量级

不同尺寸云滴的成因和演化：凝结核决定初始大小；不同云滴之间的偶然碰撞合并；不同尺寸云滴饱和气压差异，无论如何气压会使得小云滴消失，大云滴产生。

云滴下落直到粘滞力+浮力=重力$6πμrv\_{s}+\frac{4}{3}πr^{3}ρ\_{a}g=\frac{4}{3}πr^{3}ρ\_{s}g$；沉降使得云滴接触概率变大。云滴在云层停留时间：与云层厚度正相关；与云层中上升气流的速度反相关。考虑不同云层。云层下方为不饱和空气，云滴离开云层会蒸发减小，足够大的云滴才能落到地面降水。大云滴（$r>2500μm$）会分裂。

冰晶（等价于大云滴）和过冷水（等价于小云滴）的发展与上类似。冰晶成长时间较长形成雪；此时若大气温度低且存在较强上升气流使得冰晶成长时间更长且与云滴接触，形成冰雹。

第六章

类地行星早期大气中的氢和氦被吹走。可能通过火山或行星内部重新形成了各自的行星大气。类木行星捕获了太阳吹拂过来的气体组分与太阳接近，可能保留了原始太阳星云。

水循环。碳循环。大气（CO2），海洋（碳酸离子），沉积物（碳酸盐）。海洋有碳酸平衡。CO2溶解速率正比于分压，离开海洋的速率不受影响。大气CO2增加导致大部分被海洋（含碳酸远多于大气）吸收。化石燃料燃烧打破大气CO2平衡。CO2从大气到生物圈（光合作用)速率略大于和从生物圈到大气(呼吸，腐烂)，因为生物有机体的残骸还 会发生沉积过程。光合作用和呼吸及腐烂是最主 要的过程。 海洋中的碳酸离子沉积， 形成水成(沉积)岩，碳从海 洋中转化至沉积物中。水成岩被推升至海面上方，风化和海洋剥蚀，碳酸盐会再度溶解。 地球内部:地壳和地幔。地球内部也有碳元素的分布，主要来自于地球的地幔和地壳。 尽管海洋作为蓄水池，大气中CO2含量还是比工业化前增加了近 50%。还导致海洋 的pH值降低。即使CO2对地球大气光学厚度 贡献有限，当CO2含量增加时， 还是会引起升温 。升温饱和水汽压升高，从而可能导致地 大气中有更多的水汽，明显增加大气的光学厚度。

沉积物经过抬升暴露于大气，再加上化石燃料的燃烧，产生CO2，消耗大气的氧气。水分子光离解产生的氢原子离开地球，增加大气的氧元素（可忽略）。 氧气非常难以溶解于水，所以历史上大气中的氧气含量可能变化很大。富含氧气的环境主要来自藻类。

金星无海洋，大气与岩石交换碳。CO2产生方解石和石英（与CO2分压有关）和岩石释放CO2（无关）平衡。而地球上很多组分不平衡，因为1.地球有光合作用（否则氧均进入岩石与有机碳结合。金星的CO2不转换为O2）2.金星温度高反应快。

推演类地行星大气形成：假设反射率同火星（无云），有效温度即为初始温度。水汽与CO2从固体释放，大气因此吸收表面红外辐射，升温。光学厚度N与水汽分压正相关（假设足够的水）。以此，水与CO2逐渐在大气中聚集，水汽分压逐渐增大，温度随之变化。

行星大气的另一个演化就是大气分子的逃逸。

外逸层是大气层最外层。外逸层密度低，平均自由程大，近似认为粒子直接进入太空而不发生碰撞。约500km。

进入太空需要超过第二宇宙速度(2GM/R)^0.5=(2gR)^0.5。类地行星第二宇宙速度差异不大。最可几速度(2kT/m)^0.5。温度不同，元素种类不同，最可几速度不同 。氢原子可以离开月球（400K，2.3km/s）。如果某一组分能够长时间停留，可以认为含量基本保持不变。 速度大于最可几速度的粒子占一半，大于四倍最可几速度占不足百万分之一。氧分子在地球永久存在，但氢原子逃逸。金星大气外逸层中的氢原子在行星寿命的尺度上逃逸。加上氢氧根与岩石作用，金星水分很低。地球的总水量几乎不变。类木行星重力加速度大，外逸层对应的逃逸速度很高。温度很低，因此大气各组分的最可几速度都很低。逃逸很少。水星和月球的逃逸与之相反。

除了逃逸，太阳风的剥蚀作用（尤其对行星磁场较弱者）也使大气流失。火星大气可能在火星磁场之后消失。

第四章

低空的空气受热膨胀上升到高空，高空大气遇冷收缩下降到低空为对流，对应纵向运动；质量守恒会导致大气出现横向运动；二者耦合形成对流层中的环流行星大气的环流：行星尺度的对流运动与相应的横向的大气运动耦合，形成较为稳定且长期存在的环流。大气环流的本质：能量和物质传输的形式；行星表面和行星大气；低纬度和高纬度地区；地球上的海洋和陆地；行星的向阳侧与背阴侧。地球大气环流的成因：地表冷热源的不均匀分布。具体表现为地球表面是热源，地球大气是热汇；低纬地区是热源，高纬地区是热汇；海洋和陆地为季节性的热源和热汇。风是行星大气中横向运动的具体表现形式，与气候有密切的关系，对于社会、经济等有重要影响。平均风：相当长一段时间内大气的横向平均运动，即大气环流横向部分的具体形式；平均既包括速度，也包括方向；反映着行星大气的长期演化特征，而非短期扰动。行星大气宏观上较为稳定，因此表面测得的平均风也较为稳定。行星尺度的平均风场：测量行星表面各个位置相当长时间范围内的平均风，并在此基础上，在行星整体尺度分析平均风的分布，从而得出行星尺度的平均风场；是行星大气环流的直接表现形式之一；忽略了短时标、小范围的气象系统、风暴等扰动结构的影响地球纬向风远大于经向风，但经向风不能忽略。地球平均纬向环流：全球平均风场的东西分量；（1）低纬度区，又称为信风、贸易风，在低空中，纬向风始终为东风；在高空中，低纬为东风，中低纬为西风；冬季到夏季，东风带向北移动，范围扩展，强度增大；低纬赤道区域降水较多。（2）中纬度区，从低空到高空始终为强劲的西风；冬季范围大，强度强；在200-300mba高空有西风急流（高速流），冬季强于夏季；（3）高纬度区，靠近地面的低空在为较弱的东风，高空为西风。（4）随季节南北向移动，夏季北移，冬季南移；这种移动不完全对称，有近日点和远日点的影响，陆地海洋分布的影响等。地球平均经向环流：Hadley环流最强；Ferrel环流最弱；极区环流次强季风环流：季风是两种不同性质的气流交替，并且这种交替具有明显的季节性；两种来自不同源地的气团差异明显，产生的天气气候现象具有明显的季节性局部扰动过程：大气中较为快速剧烈的局部区域内的运动（气象、风锋）气象等扰动结构对大气环流的影响：行星大气风场中存在大量的瞬时扰动结构.一方面，由于这些瞬时扰动结构的影响，会使得局地实时风场显著偏离大气环流；另一方面，这些大量产生的局部瞬时扰动结构，能够改变行星整体规模的大气流动的特征，如大气环流的速度、方向，等等都可能与受到大量瞬时气象过程的调制。低空风场存在大量扰动过程，使得低层大气的实时风场与低层大气环流存在明显偏离；高空风场反之。流体具有黏性，产生的耗散会使得流体趋于稳定，及运动归零。因此一定存在外部驱动力，使得大气连续运动空气压力是大气环流最直接的驱动力。大小是大气中一定高度的空气压力，与该高度处单位面积上方所有气体的向下的重力相平衡。在满足静力学平衡近似的理想气体中，向各个方向的压力相等。从而在同一平面大气压力不相等的情况下会产生压力梯度力驱动大气环流（高压向低压）。驱动大气的加速度与局地大气质量成反比，进而与局地大气压强成反比（例如：平均压力是1000mbar的大气，被驱动的运动的加速度比平均压力为500mbar的大气约小一半）由于行星自转、行星表面对太阳辐射吸收特性的差异、比热容的差异等等，行星表面的温度分布是不均匀的。简单的热力环流模型的局限性：只有温度随高度衰减的速率高于绝热温度递减率时才会发生对流；某一高度大气压力与该高度处上方所有气体的向下的重力相平衡，因此要判断不同位置间的压力关系。行星表面温度分布差异引起的大气环流——热环流（气压梯度力为驱动力）：地表压强相当，温度对气压梯度力影响不大；低温处标高小，上方压强随高度衰减快，高温处反之；因此高低温上空相对压强会逐渐增大，即相对压力差

随高度增大，从而显著加速高空中的大气，使得大气从高温上空向低温上空运动，形成高层大气环流；高层环流增大低温位置上空大气总量，进而增大表面气压，而高温位置反之，从而形成逆向的低层环流。最后在低温位置形成下降气流，高温位置反之，从而形成完整环流。据此也知高空平均风速显著快于地空平均风速，与测量结果吻合。热环流与对流：不同位置的温度差引起了大气的水平环流，而物质守恒导致了高温位置的上升气流和低温位置的下降气流；因此，大气环流会从高温地表向上方大气中传输热量，从而实现了对流过程；注意：考察的是整个环流区的绝热温度递减率；行星大气中能够发生环流需要满足的条件，与大气中能够发生对流时所需要满足的条件是相互吻合的。季风环流的成因：陆地和海洋比热容的差别所引起的季节变化的热环流；北半球夏季：陆地温度高，海洋温度低，低层大气环流由海洋向陆地；北半球冬季：陆地温度低，海洋温度高，低层大气环流由陆地向海洋行星大气中的大尺度热环流：Hadley环流；行星不同地区因吸收的太阳辐射量不同，所以温度不同（赤道到南北纬30°范围的环流圈，其他纬度受更多因素影响）行星一昼夜变化周期引起的温度变化：总热输入量

为行星半径，&#119878;为太阳辐射通量密度，&#119860;为反射率

为一个昼夜变化周期的时间；引起温度变化

其中

为行星表面单位面积上方大气质量，

为单位质量的定压比热容；则昼夜温度变化相对值

其中

为行星的有效温度地球的计算结果表明昼夜温差很小；木星则更小；火星由于极低气压导致昼夜温差很大；金星虽然自传周期117天，但气压92bar，昼夜温差也很小。温度分布的影响因素：（1）行星表面不同纬度太阳辐射输入的差异——日与夜的相对长度、行星表面单位表面积所接收到的太阳辐射通量——归结于行星自转轴倾角的差异。根据统计，夏季极区边缘的入射辐射比热带区多，向冬季半球极区逐渐减少，注意：在冬至时南极的入射辐射量比夏至时北极的入射辐射量更多。（2）行星表面不同位置反射率的差异——雪与冰，以及云层都具有较高的反射率、以大角度入射的太阳辐射更容易被大气散射、不同位置的行星表面特征和大气特征带来的反射率差异。分析实例：地球夏季极区理论上入射辐射总量最多，但冰雪覆盖率、入射角的因素极大影响吸收；中高纬地区云层更多反射率高；热带吸收最多。冬季半球温差大，大气压力差大，热环流强科里奥利力

是地球自转角速度）与气压梯度力平衡引起地转平衡风：副热带高压带（纬度30°）和副极地低压带（纬度60°）的形成，出发点是高空大气因温度差异引起的气压梯度力的移动。若地球没有自转，温差引起的热环流将扩展至极区。注意：中纬度Ferrel环流区，高空理论上应为东风，与实测不一致；Ferrel环流与极区环流交界区本应为东风，与实测不一致！原因还在讨论中。惯性离心力和梯度风：大气沿圆形闭合气压场的等压线运动，形成旋转的风场，即梯度风；此时可以忽略地球自转的离心力而只考虑气旋中大气的圆周运动；向心力由科里奥利力和气压梯度力提供，从而得出南北半球中心高低压（按低层大气运动方向划分）气压环形梯度风场的方向。摩擦力：近地表运动的空气和地面之间的阻力；与运动方向相反，与空气运动速度和摩擦系数成正比，随高度上升减弱；风向低压侧偏转，与等压线形成一定夹角；减弱近地风速，从而减弱近地大气所受科里奥利力，从而依据合力判断南北半球高低压（依照低层大气运动方向）气旋方向；中心低压为气旋行星波：是一种扰动过程，是低空的气旋和反气旋耦合在一起之后在高空形成的大尺度空间波动现象。转速越快，温度越高，越不稳定金星的大气环流：（1）特点：大气非常浓密；自转轴倾角小，表面温度分布季节变化小；自转速度很慢，大气运动基本不受科氏力影响，也就基本没有东西风场；昼夜周期长，但大气总量大，综合效果不会导致很大的昼夜温差；（2）高层大气热环流：昼夜周期长，向阳背阴两侧的温差导致高层（100km以上）大气沿经度（跨越极区）运动形成热环流。（3）中低层大气环流（80km以下）:纬向很快的超自旋，即行星大气层旋转速度超过行星自转速度的现象（金星最明显），方向与自转同向，越高越快，在95km高度左右超自旋消失；超自选系数用赤道处大气旋转线速度除以行星表面线速度；南北经向风速很低，1m/s级；周期约4.2天，导致快速的纬向热量交换和传输，进而使得此层大气的向阳背阴测温差很小；温度分布差异主要来自吸收太阳辐射总量的差异，赤道和极区之间由温差导致的气压梯度力形成热环流。（4）大气浓厚，太阳辐射在云层顶就被吸收，使得表面温度分布比较均匀。由于金星浓厚的大气，只能用厘米无线电波探测金星表面，而金星云层顶下方的大气运动无法通过遥感观测进行测量；另一方面，观测所看到的云层的变化是由云层下方金星大气的环流运动引起的，因此云层顶下方的大气运动同样很重要——金星中低层大气中的风场需要依靠探测器局地测量金星表面风速非常低的原因——表面温差小——太阳辐射在云层顶就被吸收，使得表面吸收的太阳辐射很少，同时驱动的环流导致热量输运，进一步降低表面温差火星的大气环流：（1）特点：自转轴倾角和自转速度和地球类似——表面温度分布季节变化大；大气运动明显受科氏力影响；大气比较稀薄，温度分布和风场有明显昼夜差异。（2）没有冰雪云层的反射，太阳辐射入射约等于吸收，因此夏季半球极区温度最高，向冬季半球极区逐渐递减，气压梯度力驱动相应热环流；夏季半球温差小，大气慢，科氏力驱动的风场小，冬季半球反之；Hadley环流跨赤道，截止于冬季半球高纬，更高纬度形成Ferrel环流，随季节变化；冬季半球大温差会驱动表面气旋和反气旋的形成木星的环流：温度分布受不同纬度吸收太阳辐射总量、内部热源南北分布差异等因素的共同影响，导致温差驱动热环流；快速自旋导致很强的科氏力，使得热环流非常不稳定；以东西纬向为主；主要观测特征包括：亮区、暗带、漩涡、不同尺度的波浪和湍流型结构。土卫六：周期16天，相对土星潮汐锁定；超自旋，类似金星，高层大气温差来自不同纬度太阳辐射吸收的差异，驱动热环流；高层大气在科氏力作用下形成很强纬向风场；自转轴倾角26.7度