

第九章：边界层过程与陆-气相互作用

Jintai Lin 林金泰

Dept. of Atmospheric & Oceanic Sciences, School of Physics

linjt@pku.edu.cn

<https://www.pku-atmos-acm.org/>

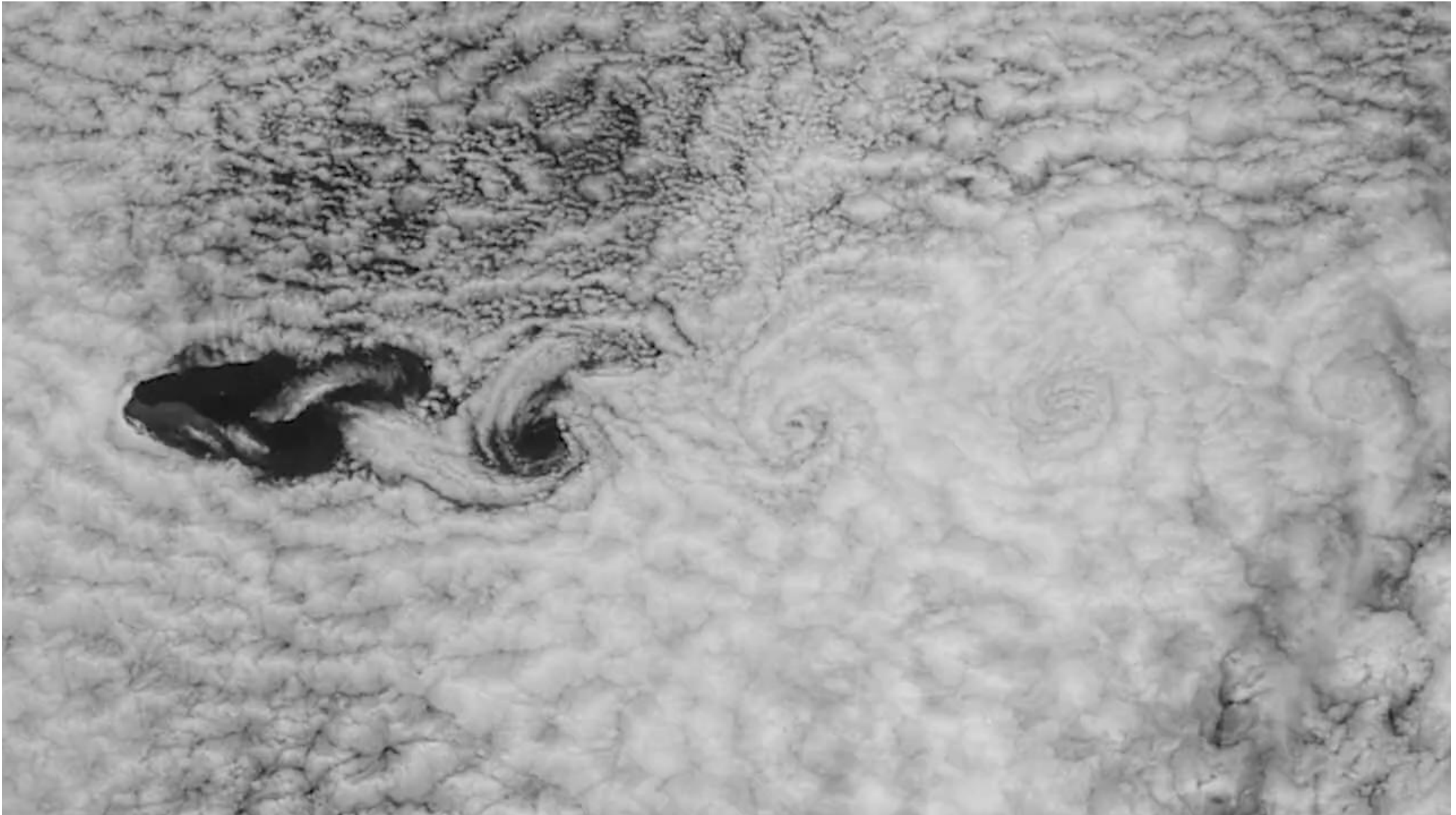
课件改编自俞妍老师课件



本章主要内容

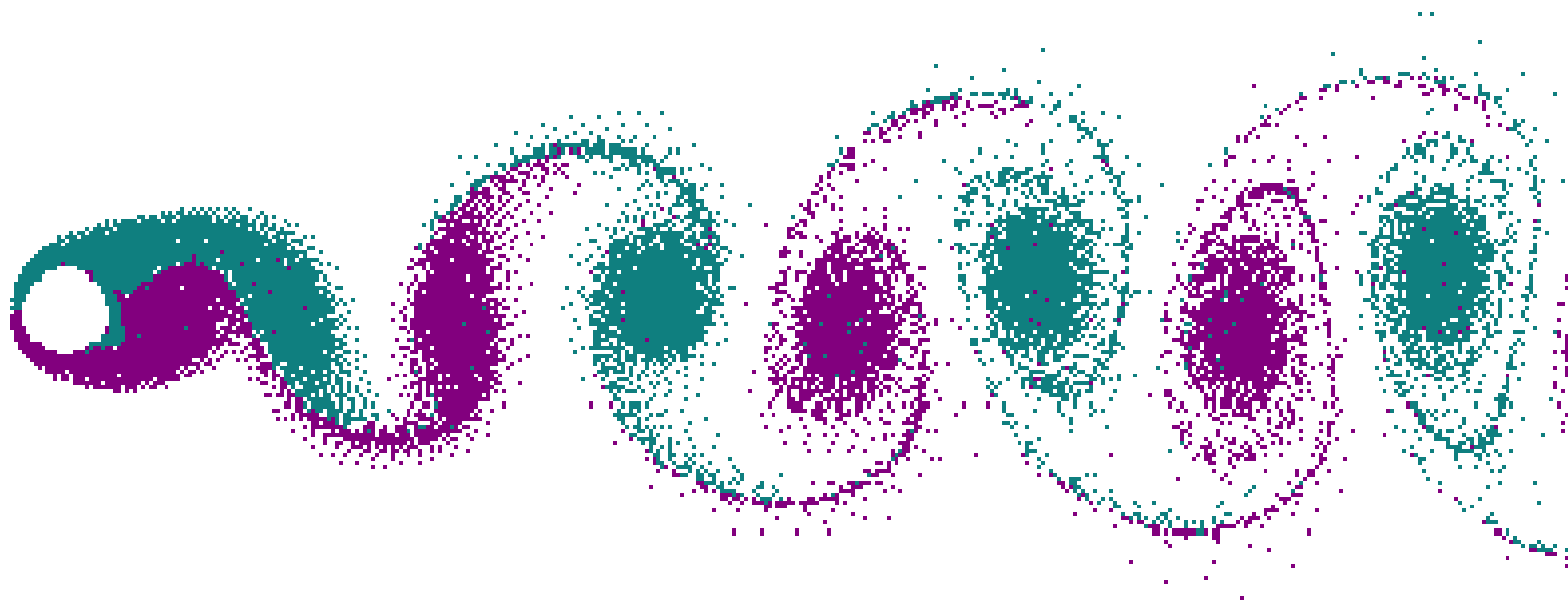
1. 湍流：特征、产生原因、统计描述
2. 大气内湍流最明显的区域：大气边界层
3. 大气边界层湍流通量
4. 陆气相互作用

卡门涡街 Kármán Vortex Street



卡门涡街与湍流

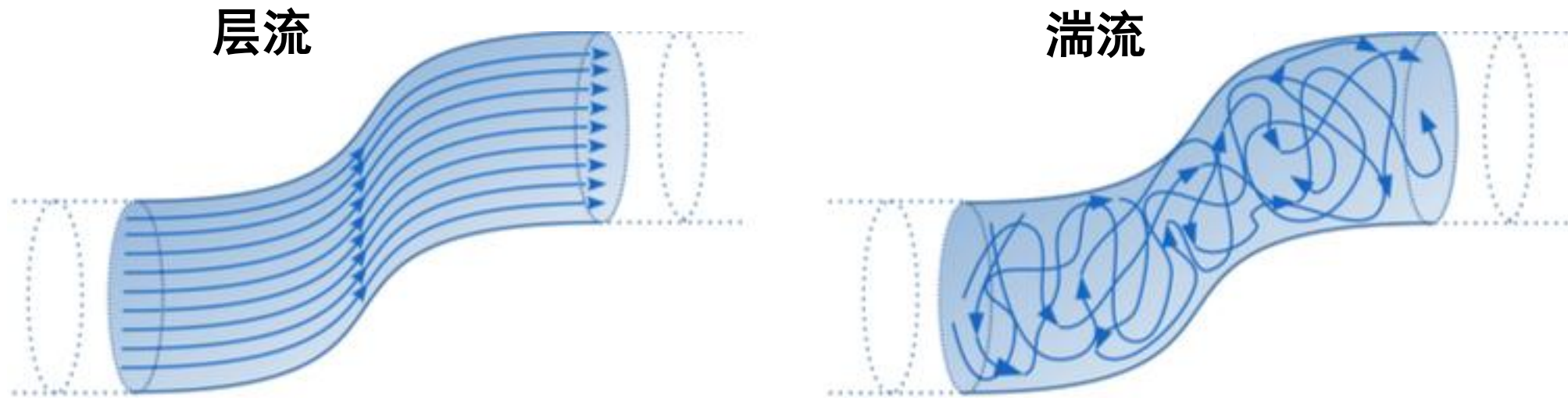
卡门涡街：流体流经阻流体时从阻流体两侧剥离，形成交替的涡旋(eddy)。



具有涡旋的流体运动叫做湍流。

湍流对物质和能量的输送起着重要作用，比分子扩散和热传导有效得多（如搅拌咖啡中的牛奶和糖）。

湍流与层流 Turbulent and Laminar Flow



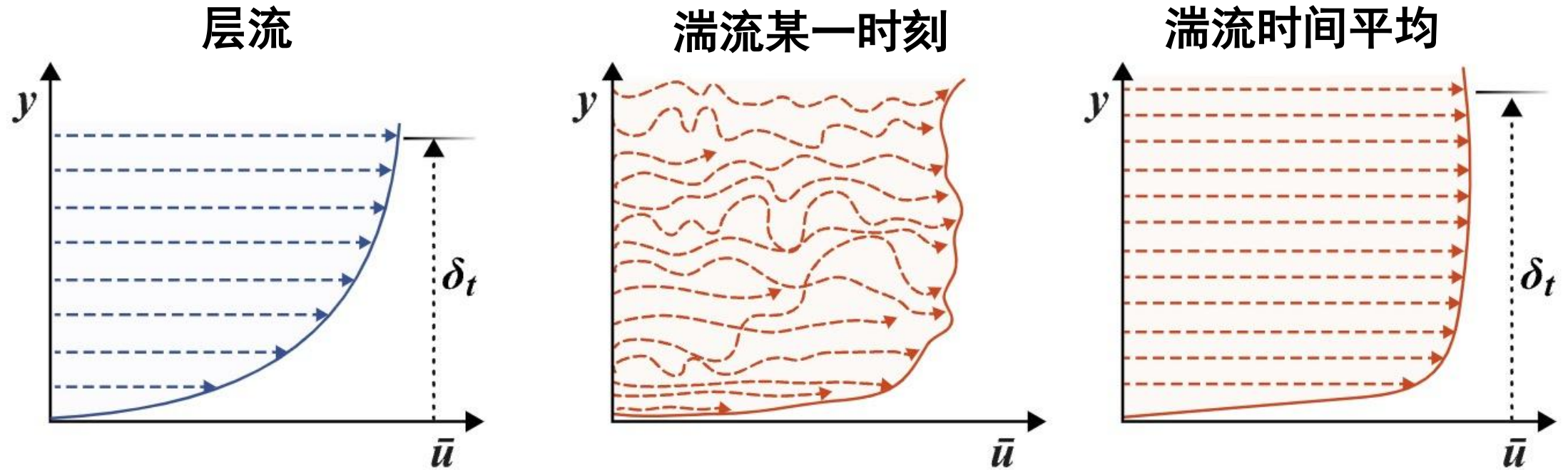
- 层流向湍流的转变取决于流体的粘滞性、运动速度等。
- 雷诺数(Reynolds number): 惯性力与粘性力比值, $R_e = \frac{uL}{\mu}$,
 u, L, μ 分别为流体的运动速率、特征长度、运动粘滞系数
- 层流的雷诺数较小, 湍流的雷诺数较大。

Q: 彩色牙膏挤出来时颜色分布保持不变, 为什么?

<https://daily.zhihu.com/story/9657846>



湍流与层流的比较



- 湍流随时间变化大。
- 湍流边界速度梯度大，摩擦力大。
- 湍流的动量、热量、物质混合效率高。

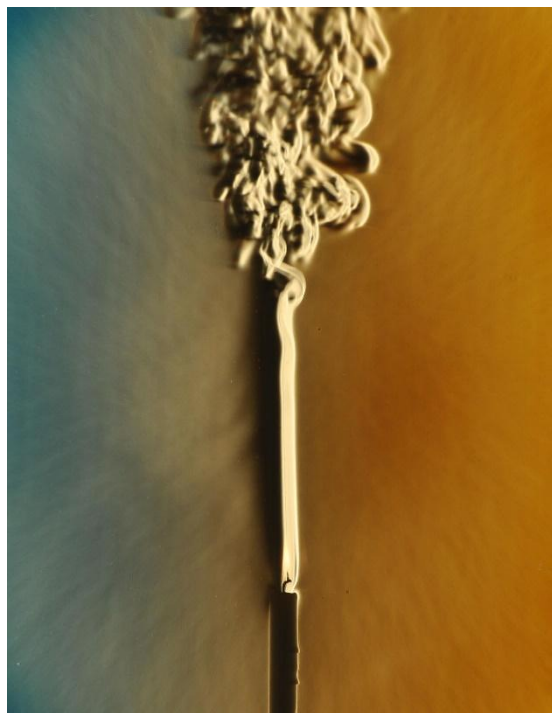
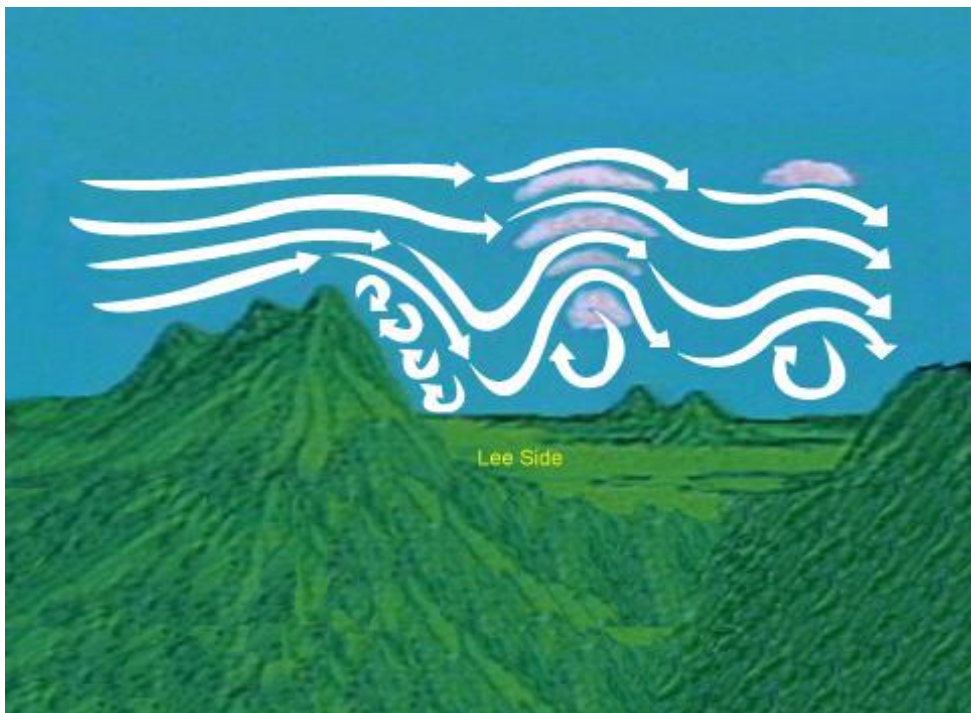
湍流的特征



- 雷诺数高
- 不可预测
- 具有不同尺度的涡旋
- 具有扩散性 (diffusive)
- 具有耗散性 (dissipative?)

Q: 为什么高尔夫球被设计成具有凹凸不平的表面?

大气中湍流形成的机制



The Starry Night (星夜, 梵高)

机械湍流
粗糙表面、障碍物、风切变

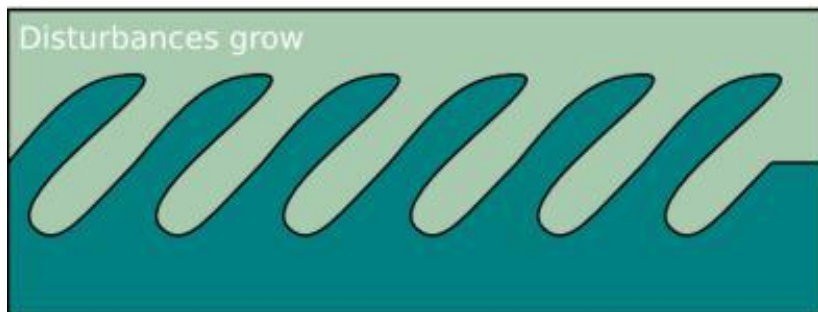
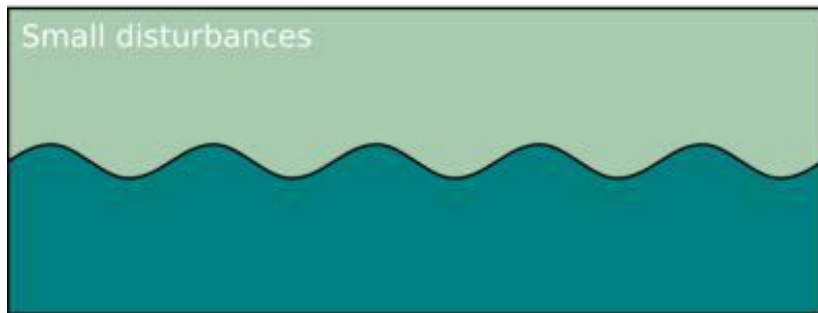
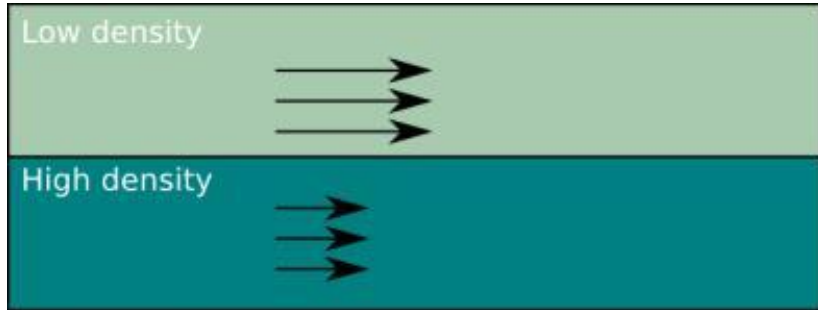
热湍流
不稳定温度层结

大气中湍流
几乎无所不在

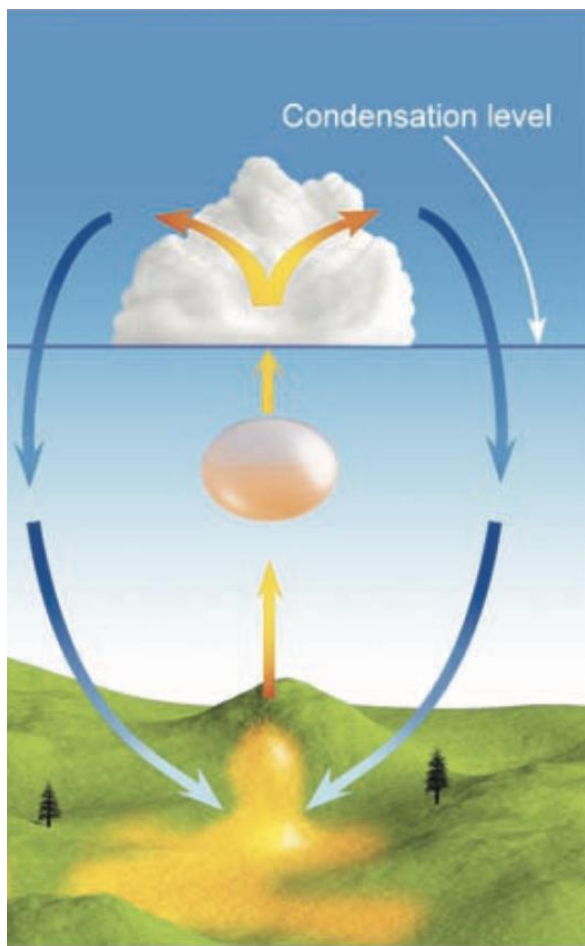
Q: 大气中湍流运动在哪里最为剧烈?

大气中湍流形成的机制：风切变与K-H波

开尔文-亥姆霍兹不稳定性 (Kelvin–Helmholtz instability)：是在有速度切变的连续流体内部或有速度差的两个不同流体的介面之间发生的不稳定现象。



大气中湍流形成的机制：不稳定的温度层结



有不稳定的温度层结时，可以产生积云。

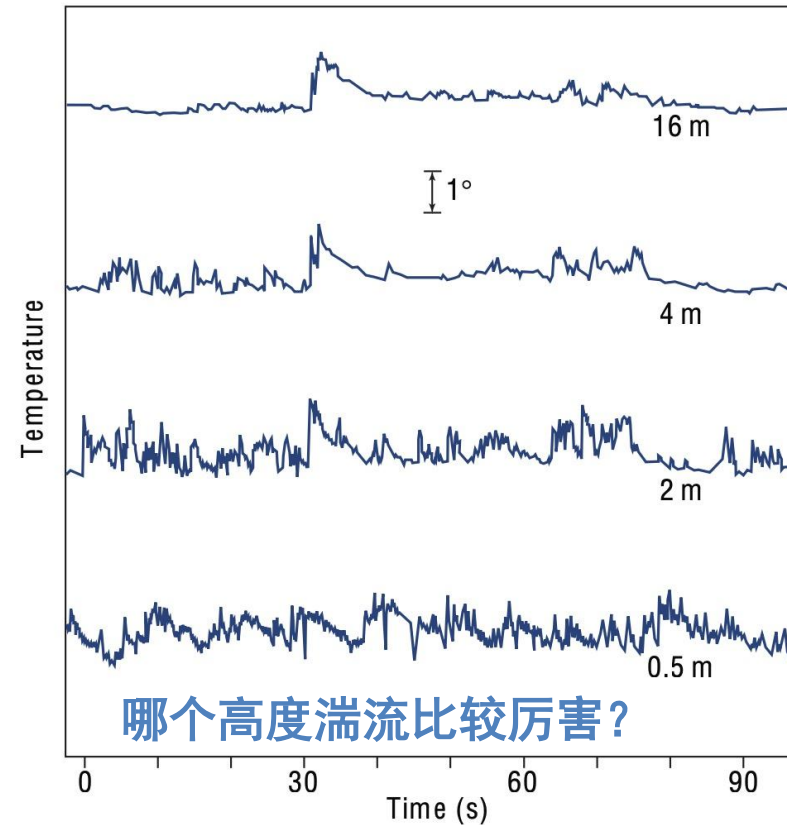
云内为正的浮力，云的边缘为负的浮力，引起垂直风的水平切变。

湍流运动的描述

各种尺度的涡



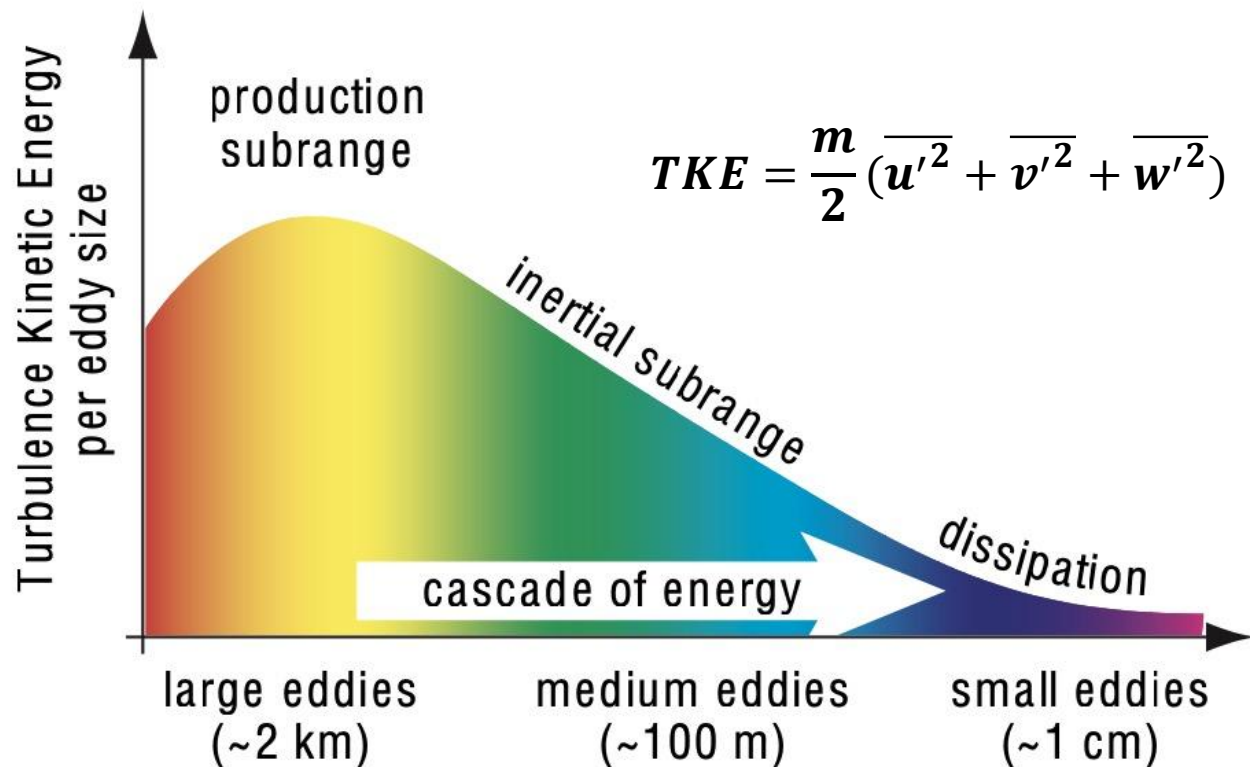
实际测量数据



描述每一个涡的运动往往没有必要，在技术上也不太现实，因此我们常常只（能）关注湍流的统计特征。

湍流动能的耗散

湍流动能谱 (Spectrum of turbulent kinetic energy)



曲线下面的面积为总的湍流动能 (TKE)

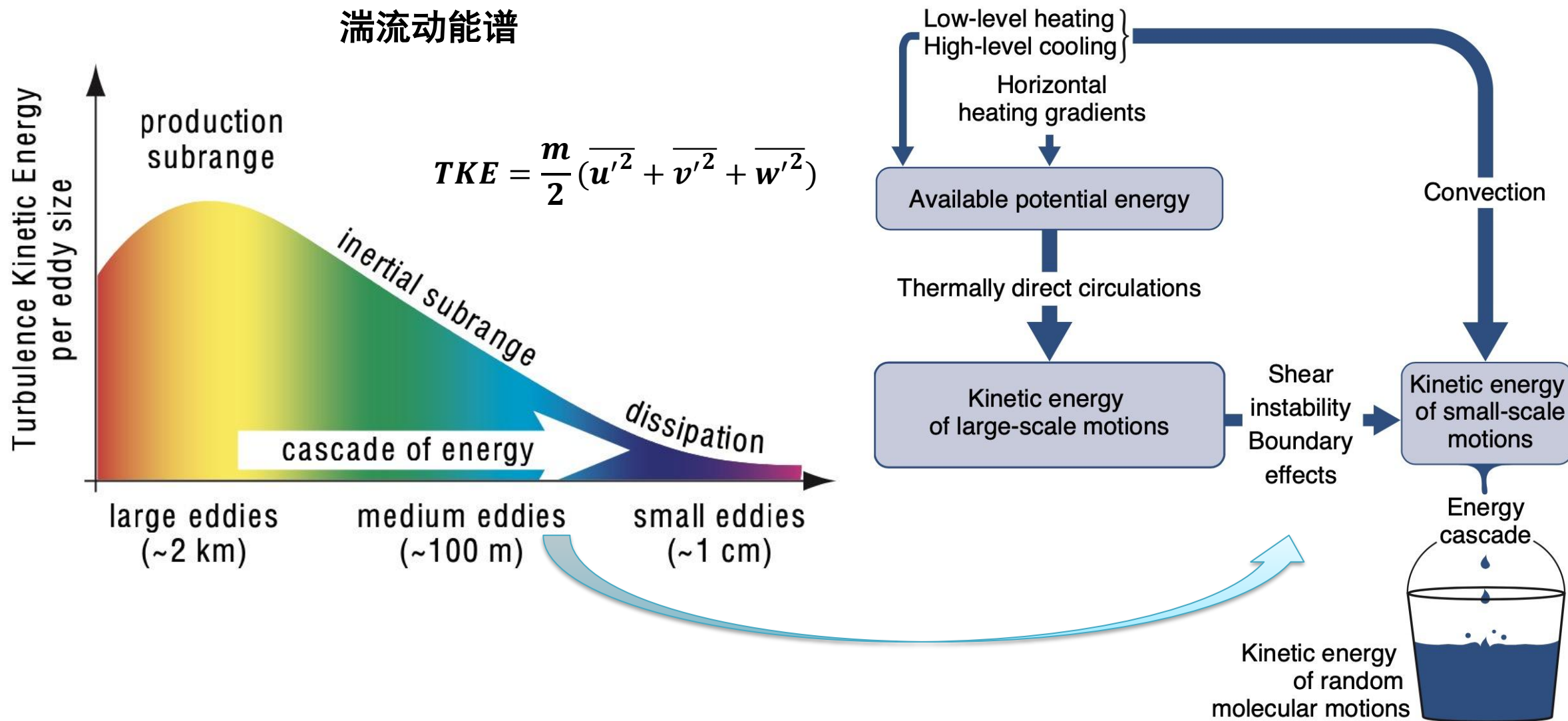
大尺度涡旋对TKE的贡献较大

由于粘滞力（摩擦力）的存在，湍流动能并不守恒。大涡产生后逐步转变成尺度更小的涡，最后到粘滞耗散尺度，动能转化成内能。这就是湍流动能的耗散。

Big whirls have smaller whirls that feed on their velocity, and little whirls have lesser whirls, and so on to viscosity. . . . in the molecular sense.

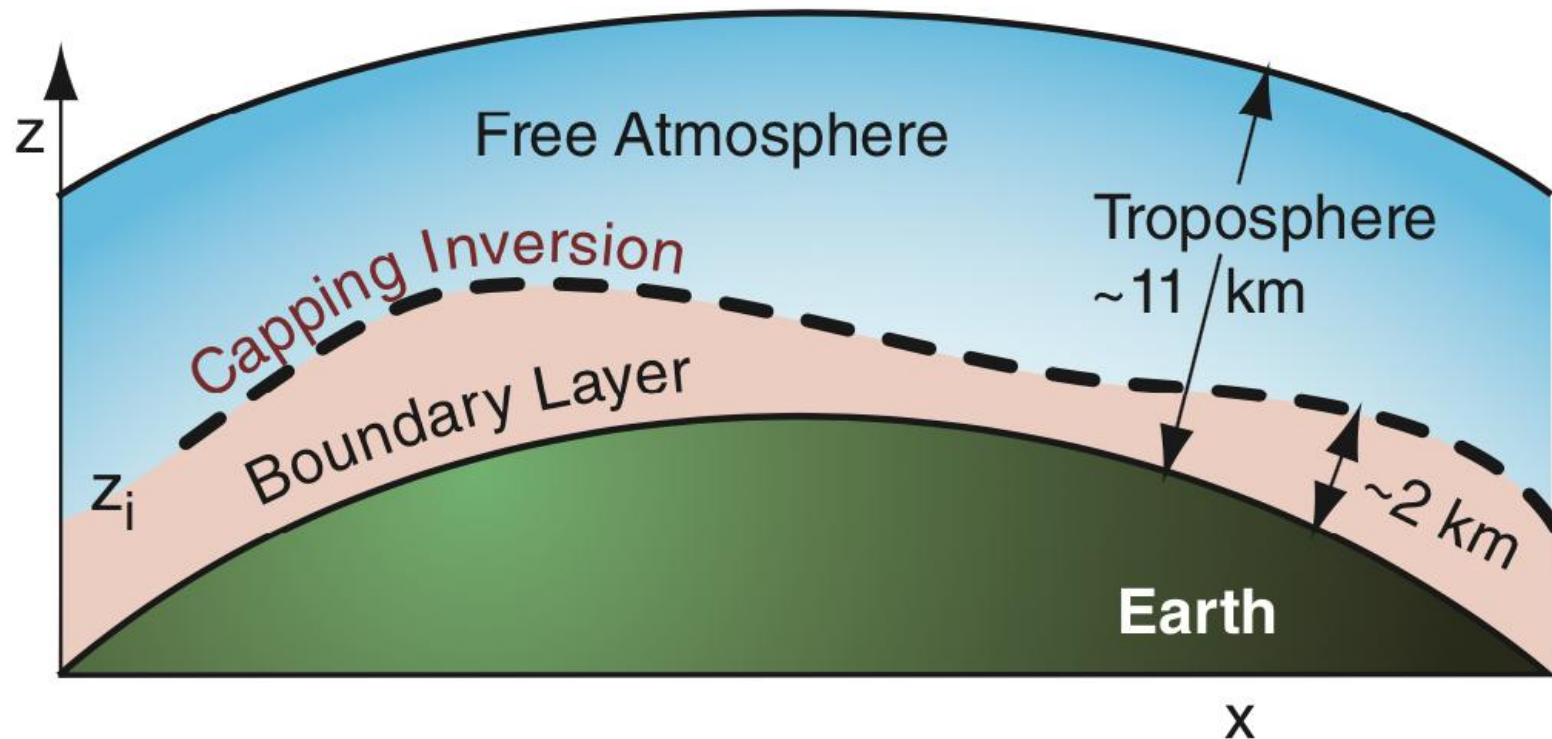
*by Lewis F. Richardson (1881–1953).
English physicist and meteorologist.*

湍流动能耗散与大气动能转化

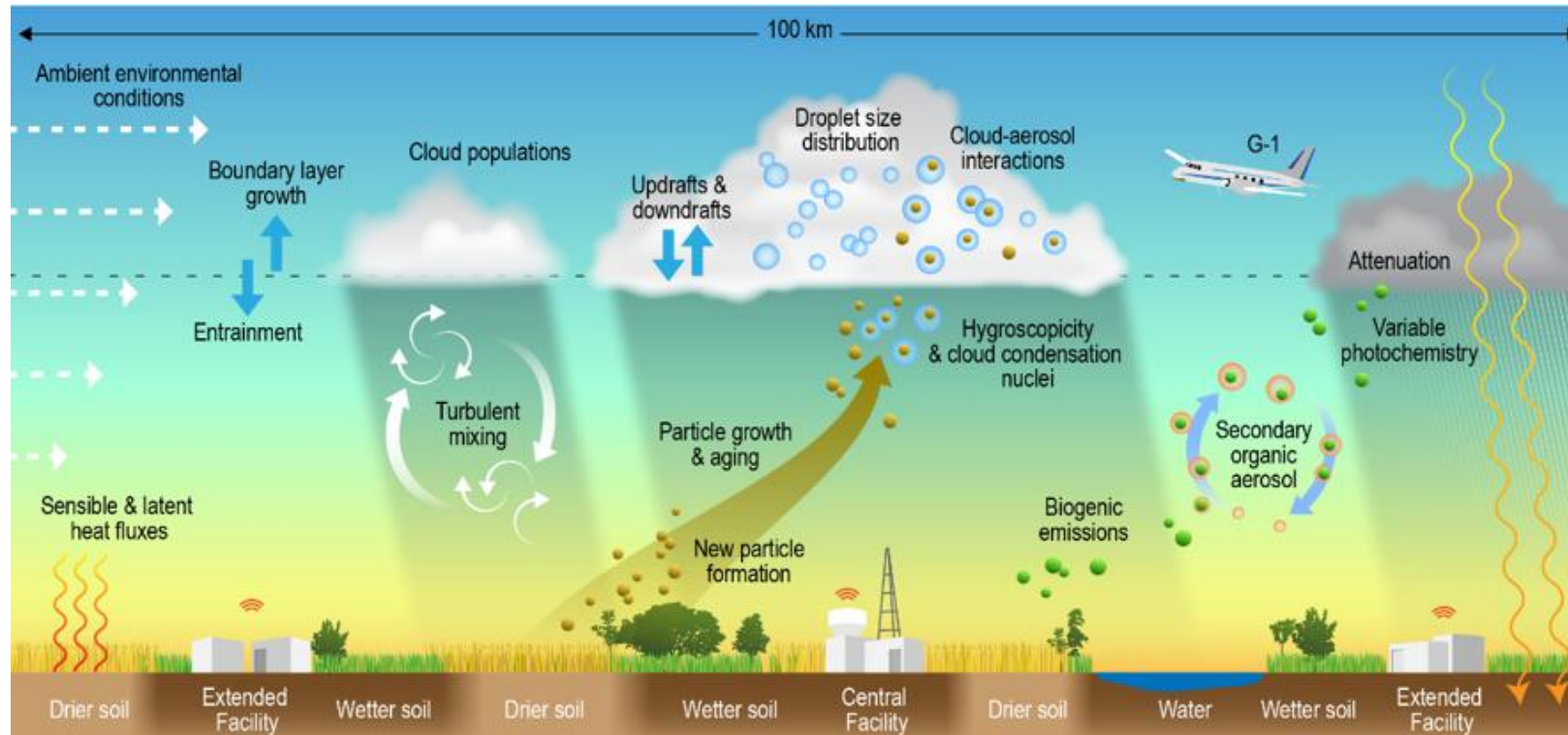


大气边界层

- 大气边界层（Atmospheric boundary layer, ABL）或行星边界层（Planetary boundary layer, PBL）指的是大气和地球表面相接触的这一层，厚度通常在1-2公里之间。边界层以上的大气层通常称为自由大气（free atmosphere）。
- 边界层大气与地球表面的摩擦力较大，运动特征与自由大气有着显著的不同：边界层内表现出较强的湍流特征，摩擦力通常不可忽略。



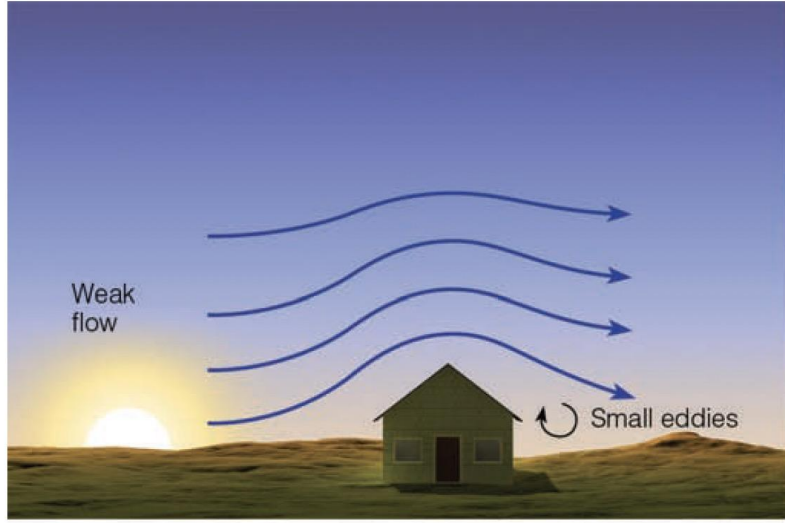
大气边界层的重要性



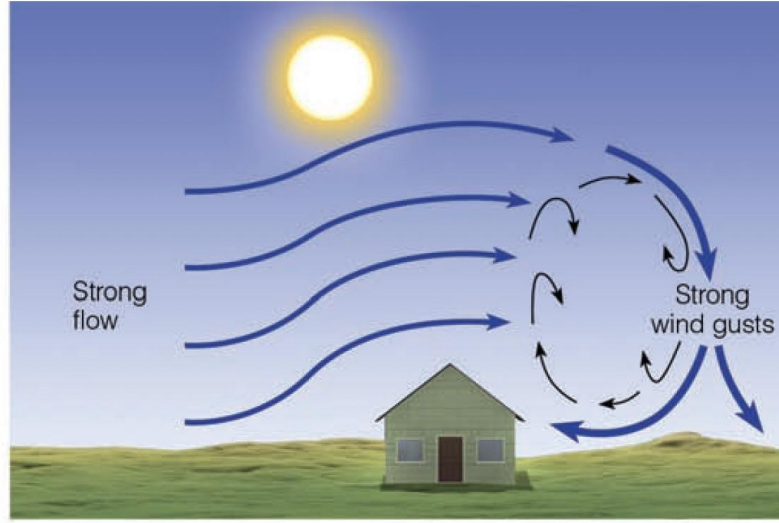
大气边界层虽然是很薄的一层，但它对人类和地球生物圈有着最为直接的影响，与天气、气候、生态环境以及人类活动等密切相关。

- ✓ 污染物的大部分在边界层中
- ✓ 边界层云对地气系统有冷却效应
- ✓ 陆地与大气的物质、能量交换发生在边界层

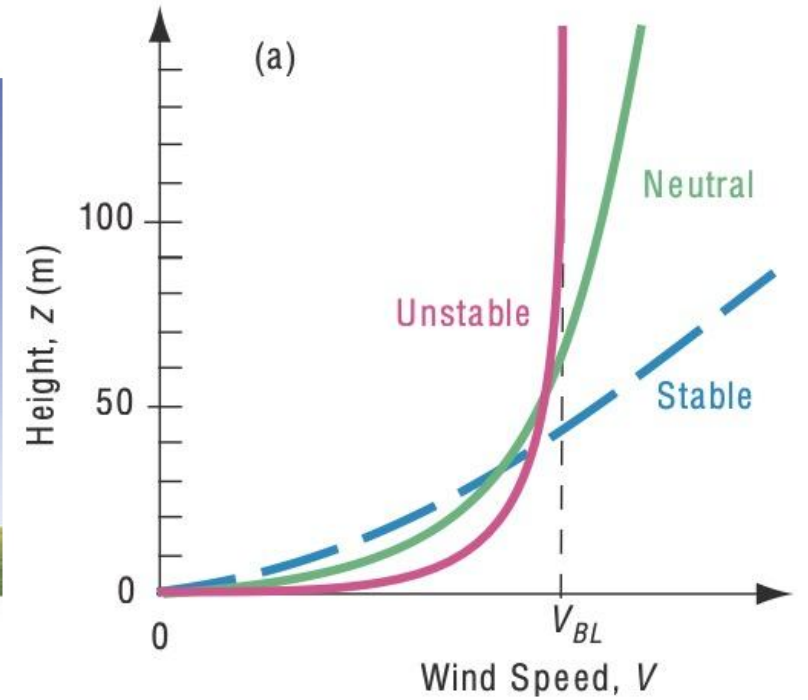
大气边界层内：机械湍流与热湍流常常发生联动



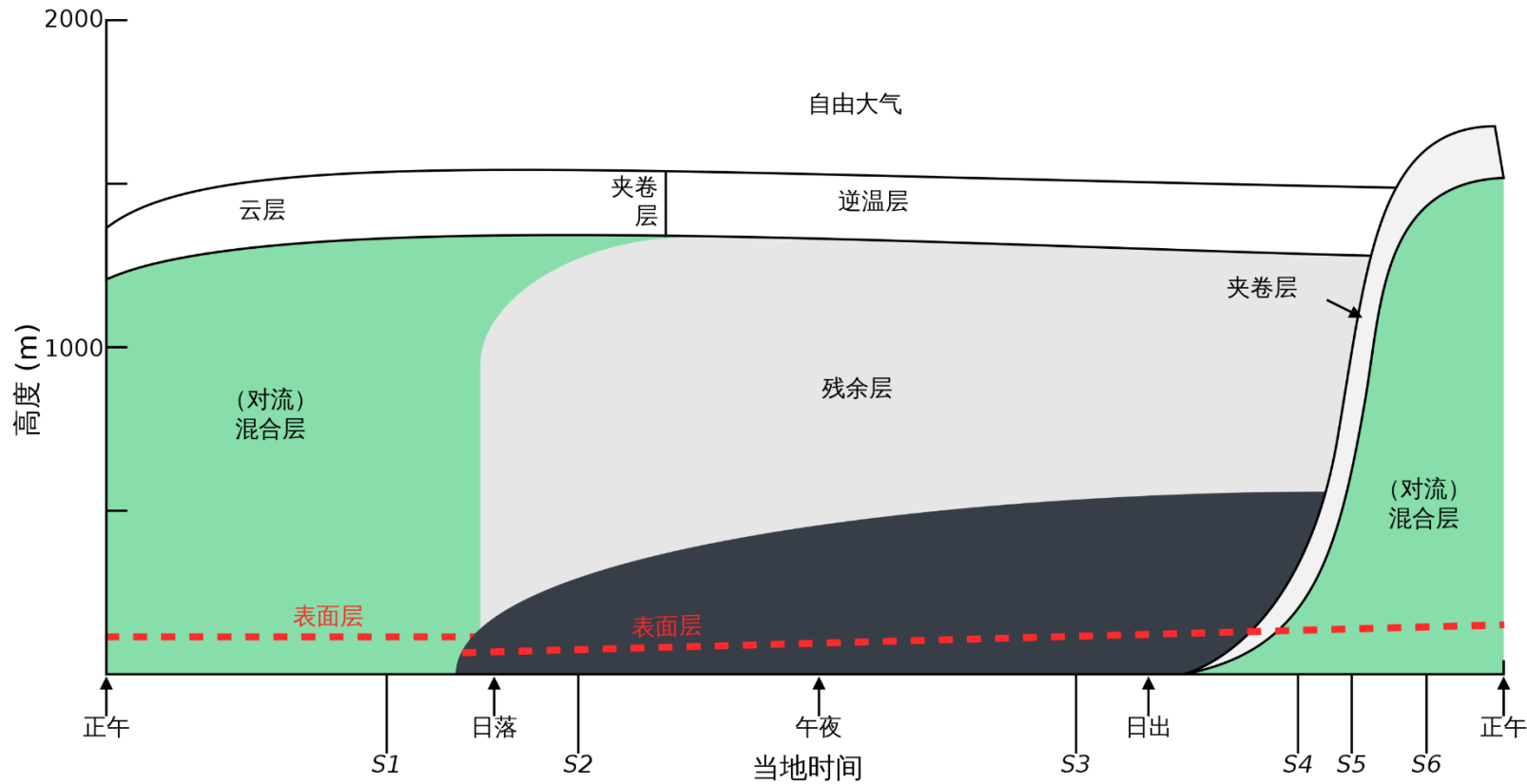
(a) Stable air



(b) Unstable air



大气边界层的日内变化



白天:

出现不稳定边界层, 又称混合层 (mixed layer), 或对流边界层(CBL)。因下垫面被太阳加热, 易形成对流。

- ✓ 湍流运动较强。
- ✓ 混合层不断地将上面的空气混合进来, 混合层升高。
- ✓ 有时在夹卷层上方也有一个逆温层, 可以阻止边界层内污染物垂直扩散。

夜间:

一般为稳定边界层(stable layer)。

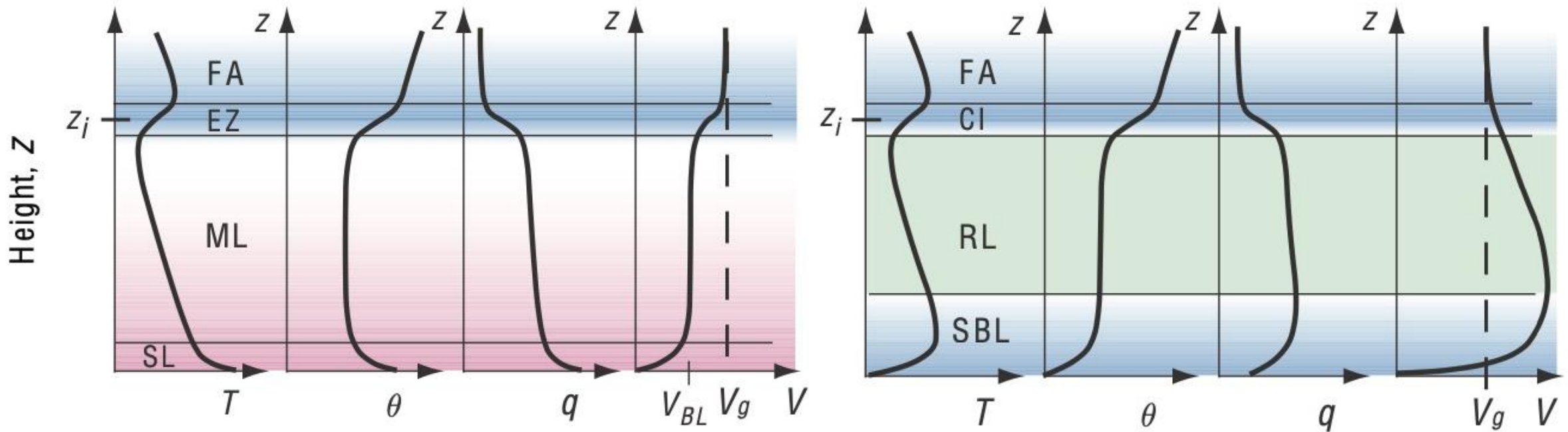
- ✓ 稳定边界层湍流运动较弱。
- ✓ 之上仍保留白天混合层的特征, 称为残余层(RL)。
- ✓ 边界层上方通常存在逆温层。

大气近地面温度、湿度、风速廓线的日内变化

白天

Q: 白天和夜间的温度、湿度、
风速廓线有哪些区别?

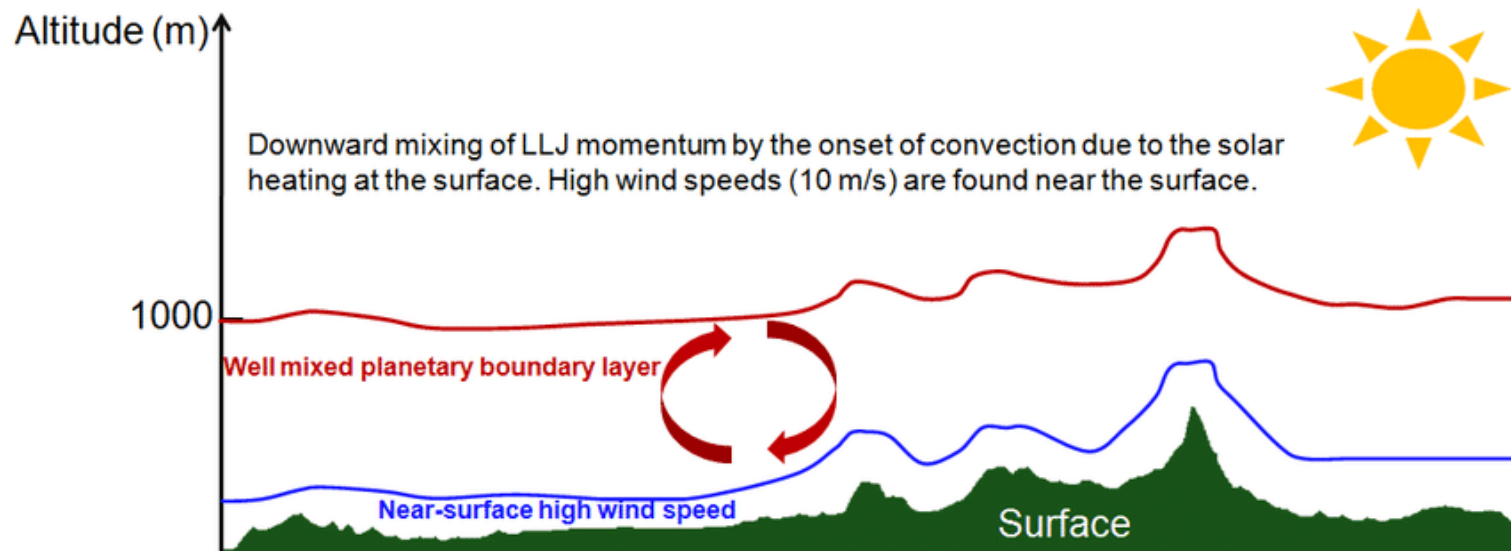
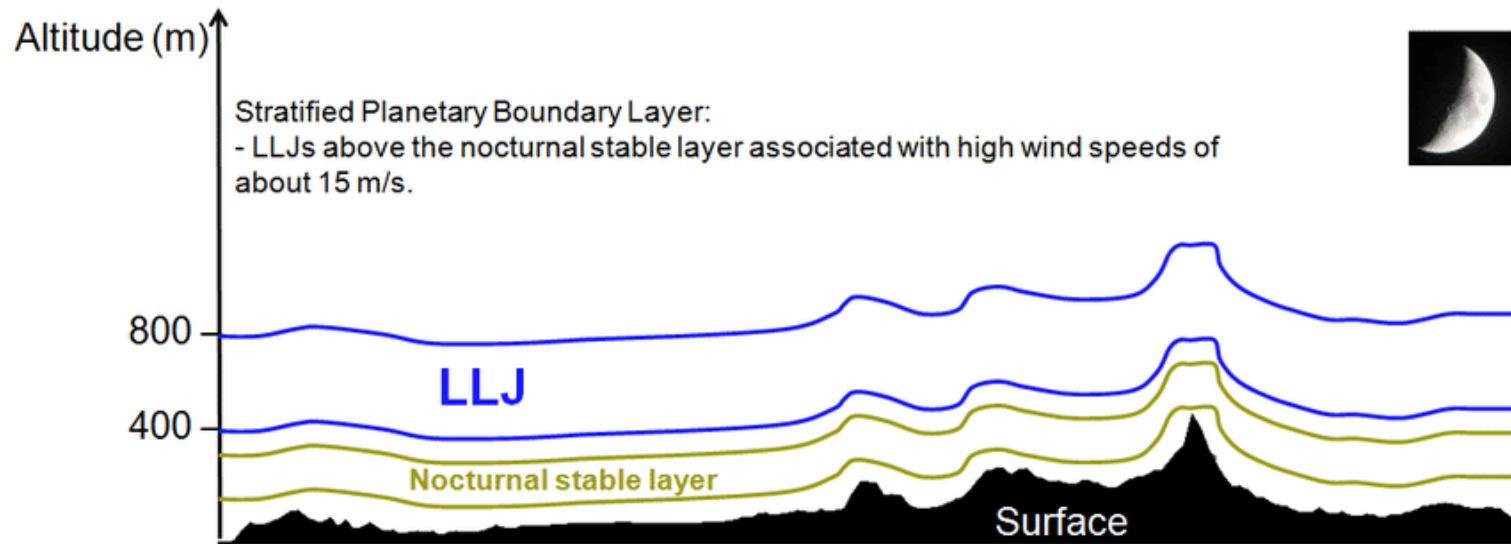
夜间



陆地上的边界层垂直温度廓线有着明显的日变化。

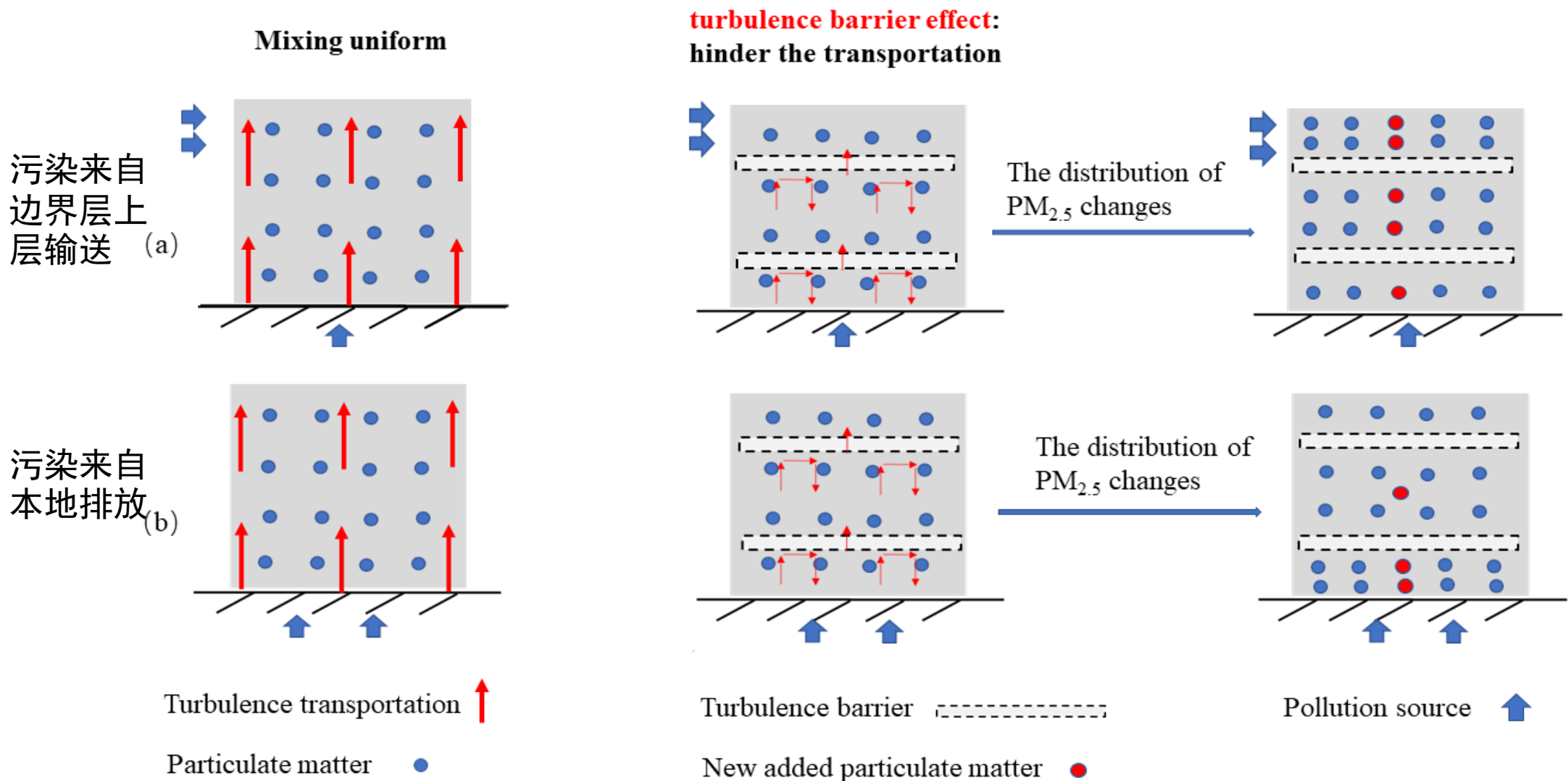
- 晴朗的白天，由于太阳辐射，地表温度升高，边界层大气温度随高度递减。如果温度递减率大于干绝热递减率，大气层结不稳定，产生对流运动。
- 晴朗的夜晚，地表通过红外线辐射降温，降温比边界层大气降温快，边界层大气温度随高度递增(逆温)，大气层结稳定。

夜间低空急流 Nocturnal Low-level Jet



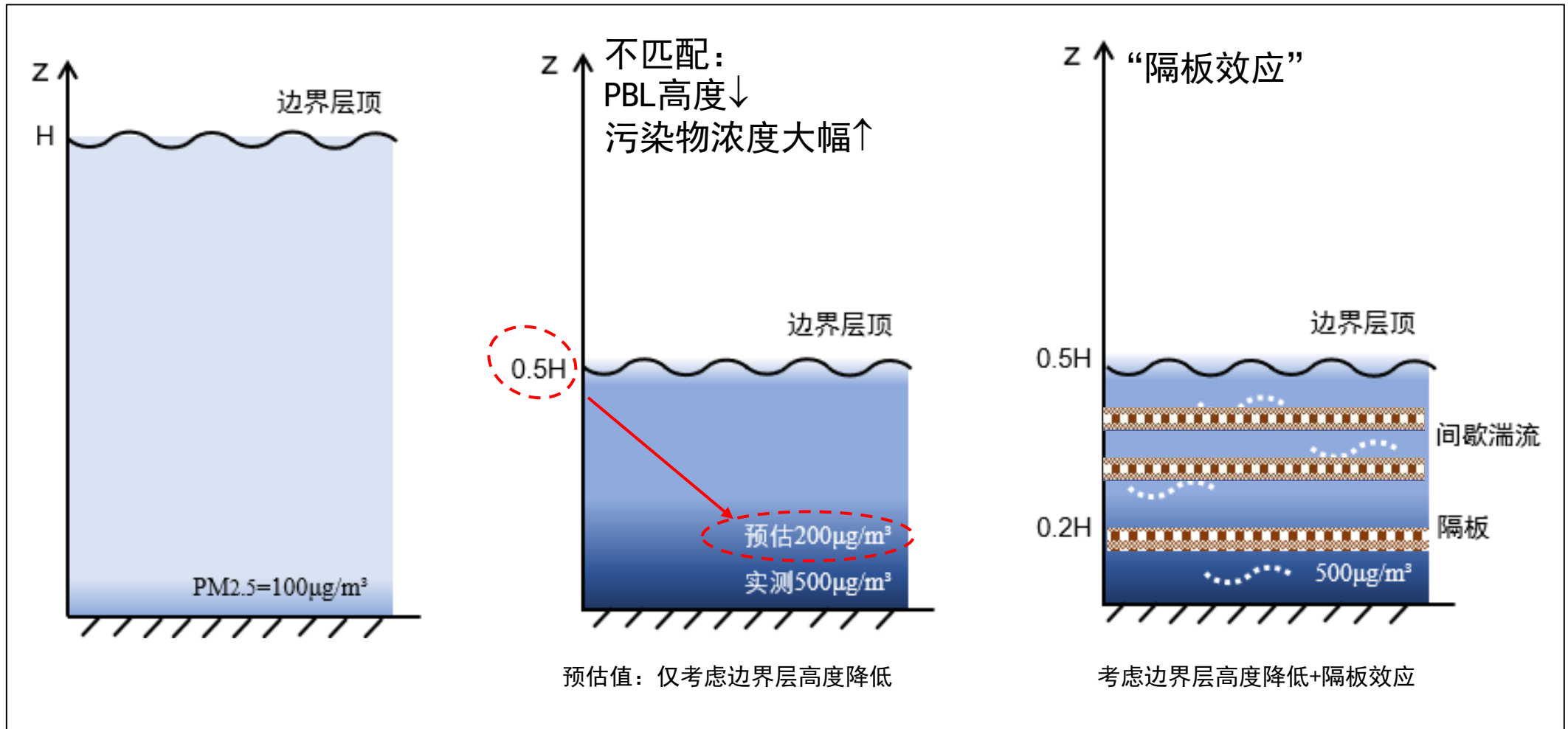
- 地面上方500-1000米，夜间由于对流弱，与地面摩擦力解耦，出现 15 m s^{-1} 以上的急流。
- 由于惯性震荡，会出现风速超过地转风的现象。
- 另外，山坡上受热不均，也会导致类似“热成风”的风速加成。
- 日出后，随着混合层向上生长，动量向下混合，近地面出现大风。

弱湍流情形下的“湍流隔板效应”



张宏升

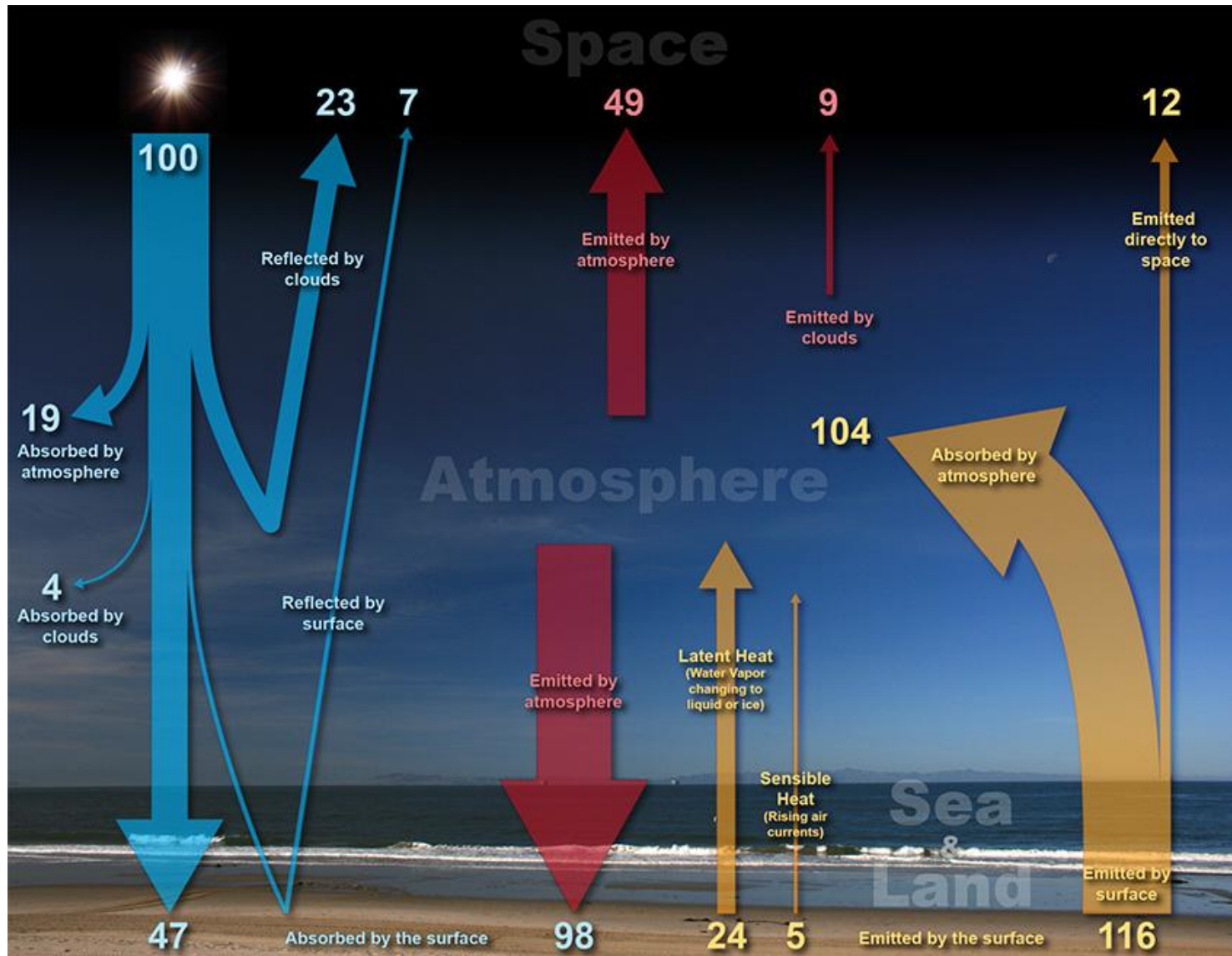
弱湍流情形下的“湍流隔板效应”



合理解释了边界层高度与污染物浓度不匹配的观测事实

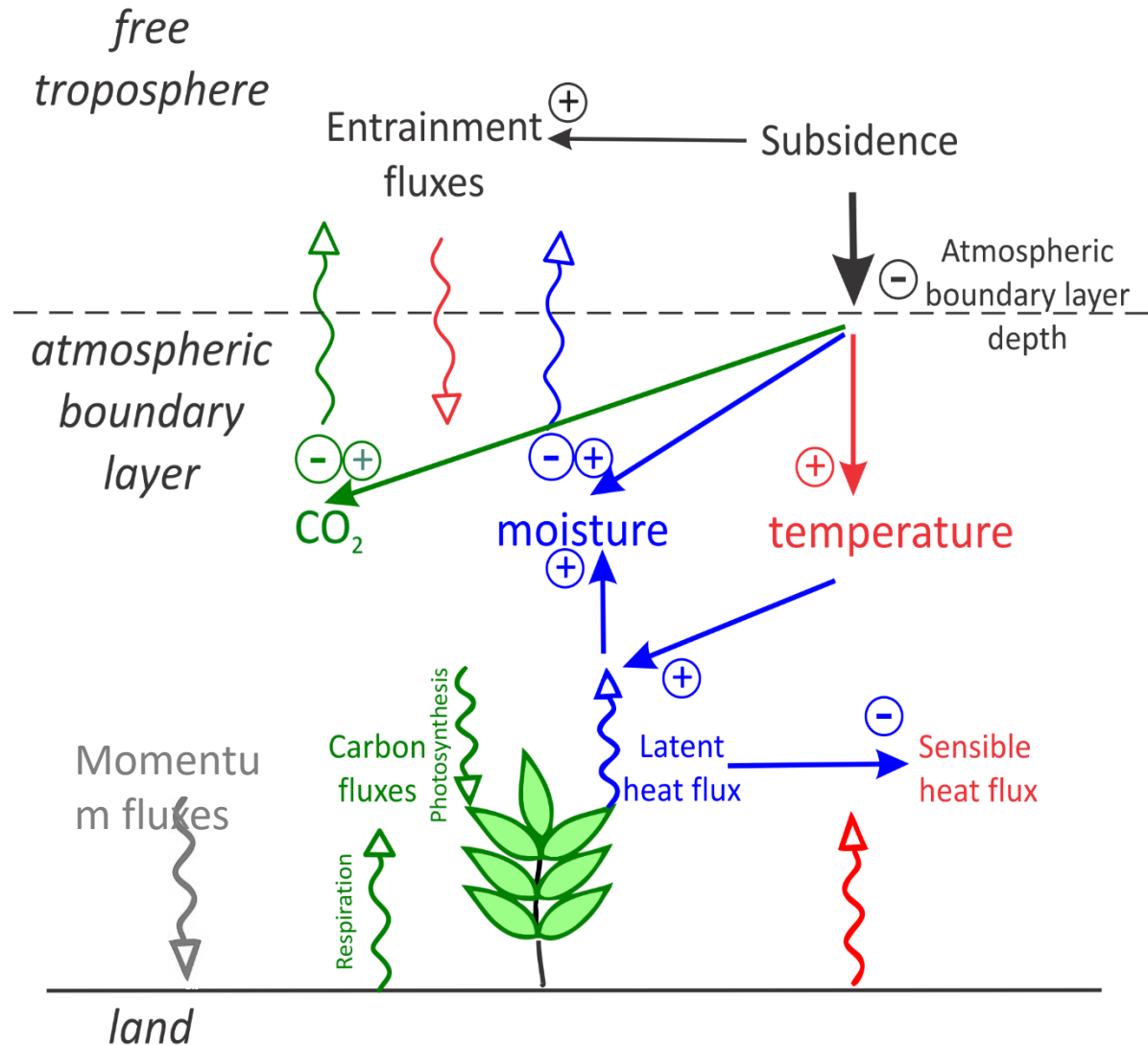
张宏升

回顾：辐射-对流平衡与湍流通量



- 整个大气的基本能量来源是太阳辐射。而太阳辐射的47%被地表吸收，然后部分通过边界层大气的运动输送到上层大气；
- 上述能量交换大多是通过湍流实现的。

湍流通量与地-气物质交换



- 地表和大气的水汽交换，也是通过边界层输送上去的；
- 除了能量和水汽，地表和大气之间也有各种气体和颗粒物的交换；
- 上述地-气物质交换大多是通过湍流实现的。

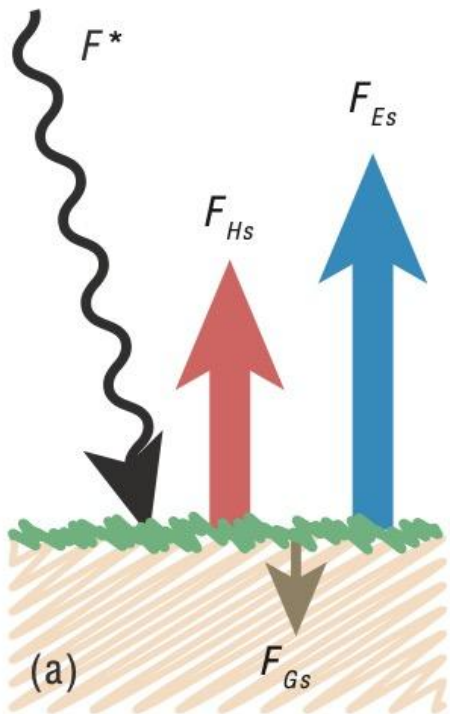
地表的湍流水热通量与能量平衡

地表的净辐射通量与热通量平衡, $F^* = F_{Hs} + F_{Es} + F_{Gs}$

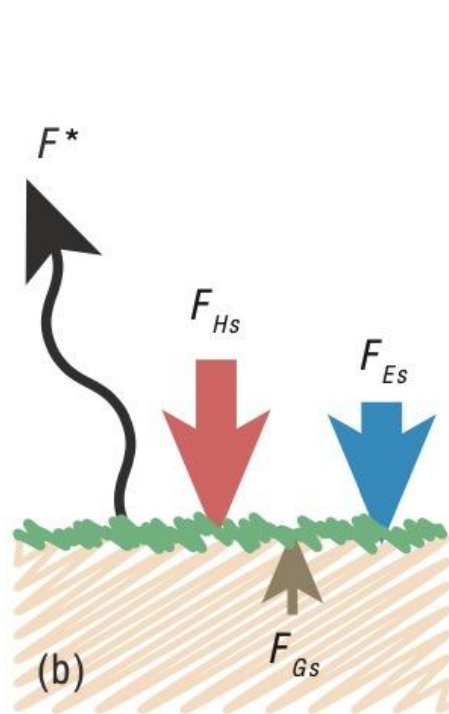
✓ 净辐射通量 $F^* = F_S \downarrow - F_S \uparrow + F_L \downarrow - F_L \uparrow$

✓ F_{Hs} 代表感热湍流通量, F_{Es} 代表潜热湍流通量, F_{Gs} 代表陆地表层与次表层的热传导

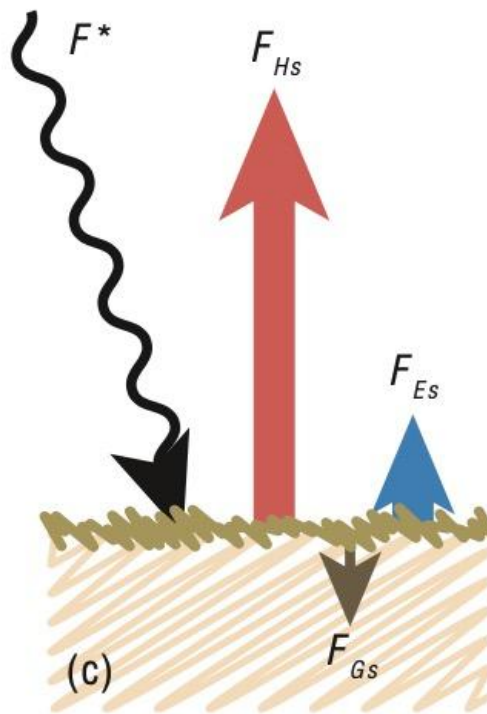
白天, 森林腹地



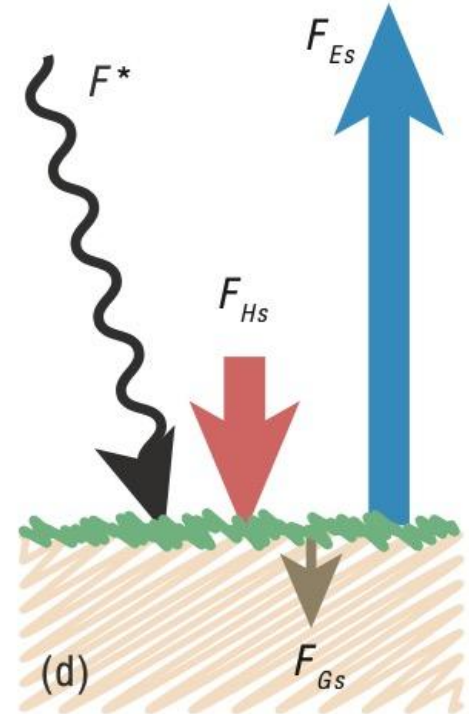
夜晚, 森林腹地



白天, 沙漠

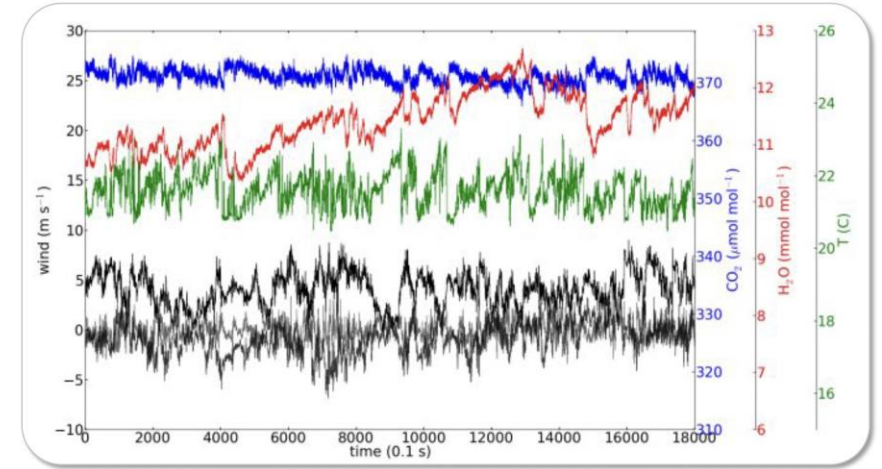
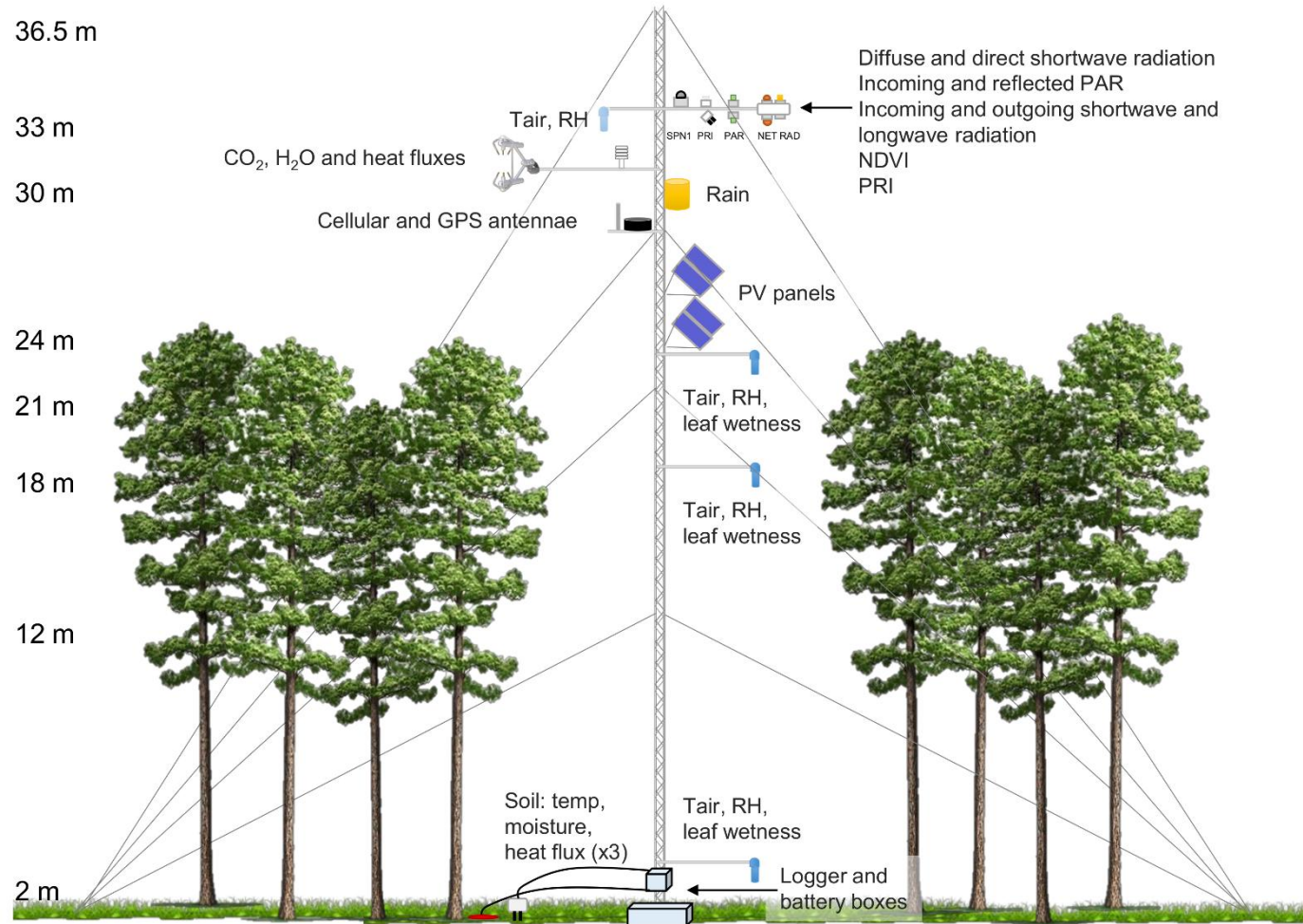


白天, 沙漠中的绿洲



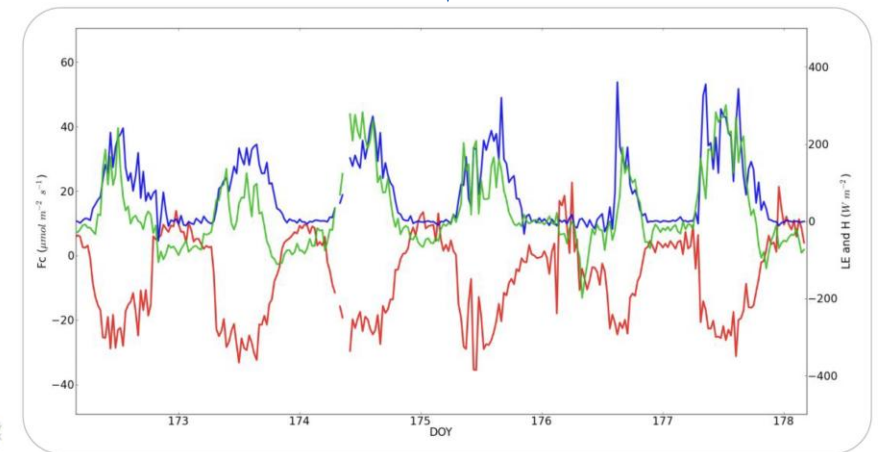
湍流通量的测量：涡旋协方差法 Eddy Covariance

通量塔 (Flux tower)

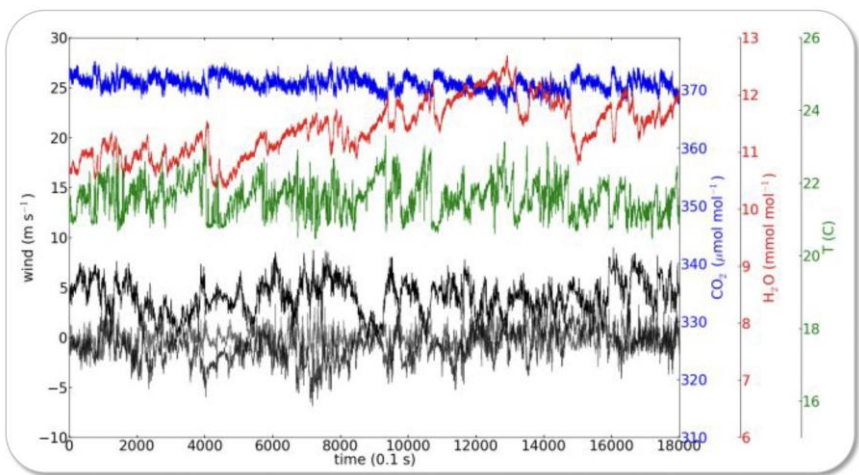


$$F = \rho_{air} \overline{w' s'}$$

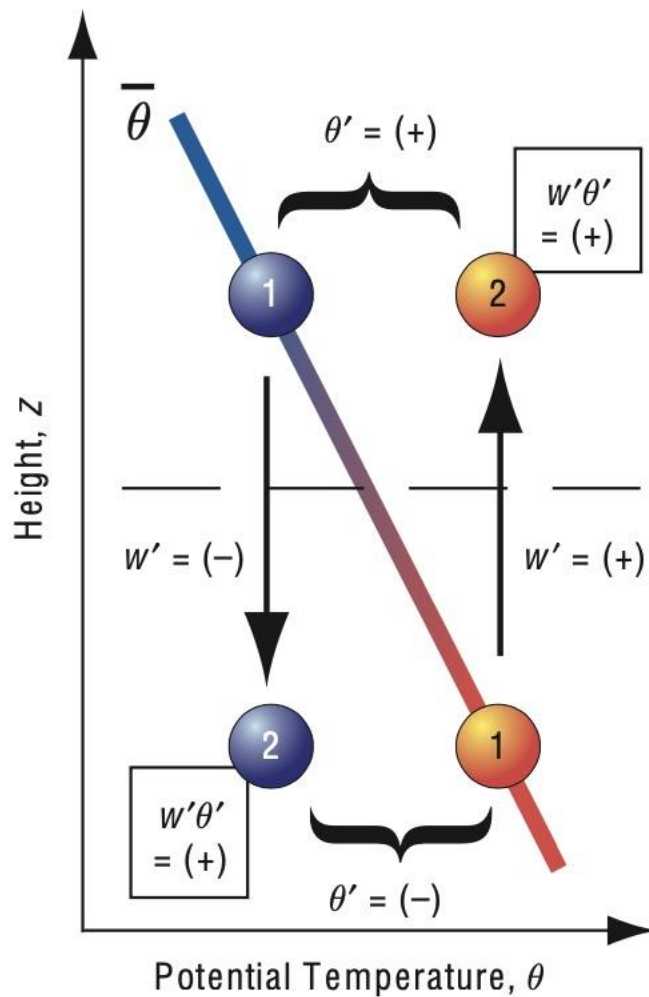
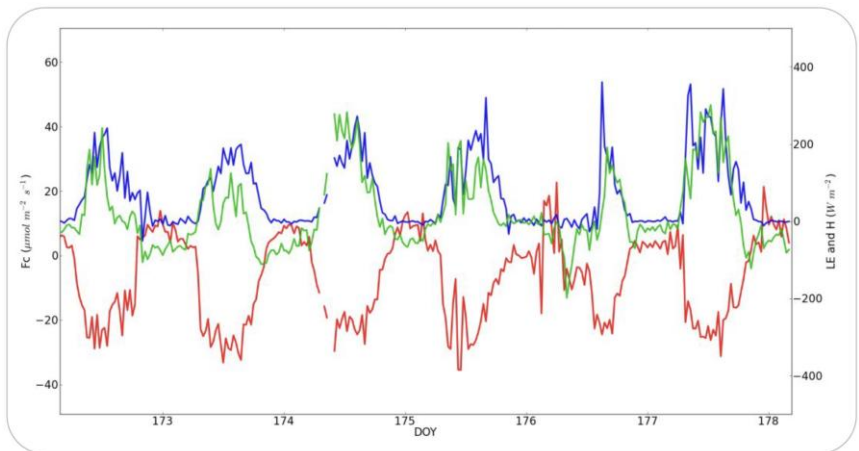
w' : 垂直速度的扰动
 s' : 浓度、温度、动量等



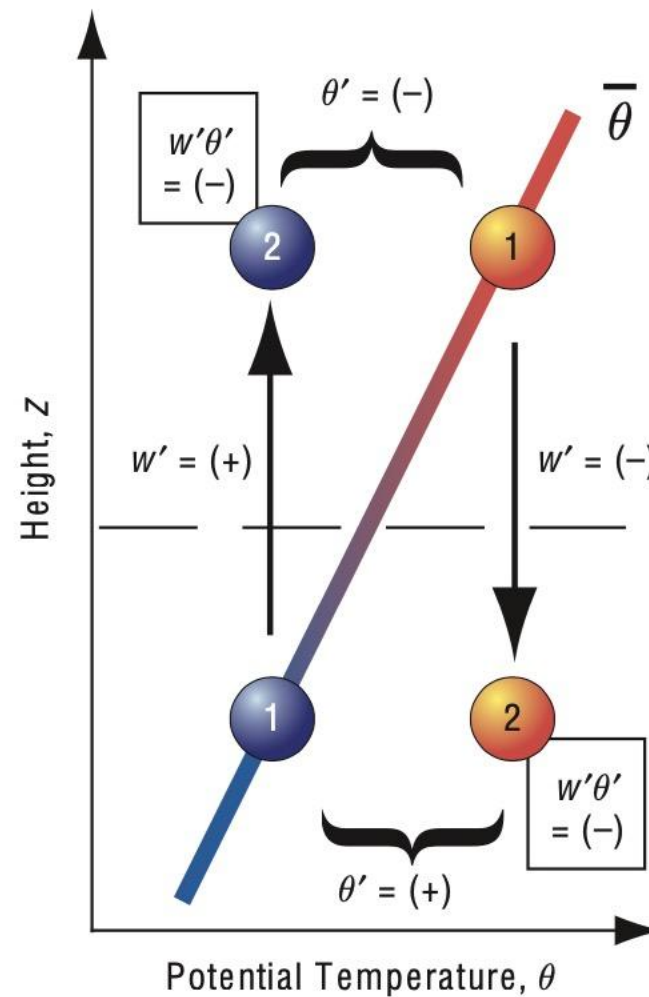
湍流热通量的近似估计法



$$F_H = \overline{w'\theta'} \approx -K \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z}$$



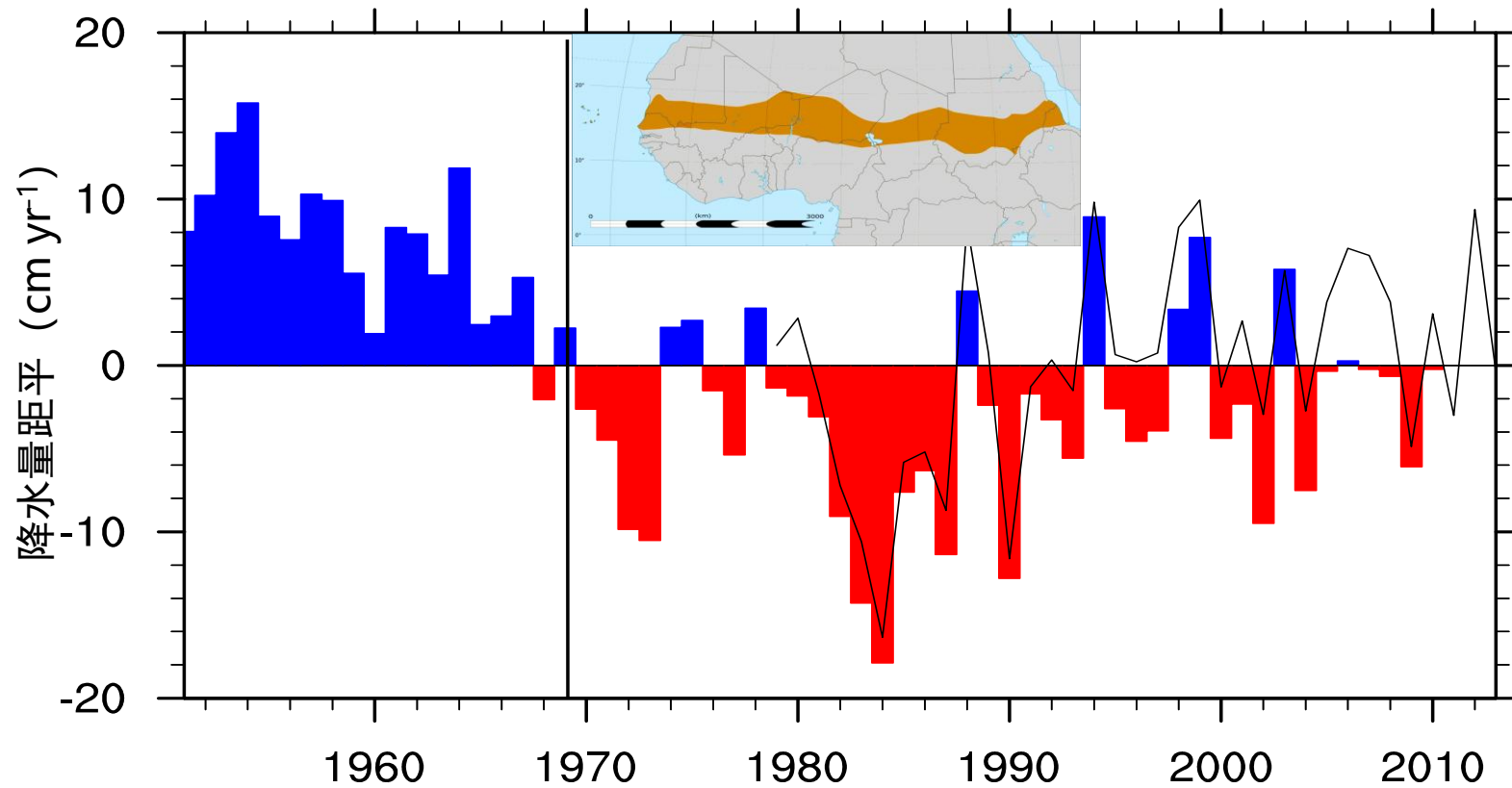
(a) Statically unstable: $\partial \bar{\theta} / \partial z < 0$.



(b) Statically stable: $\partial \bar{\theta} / \partial z > 0$.

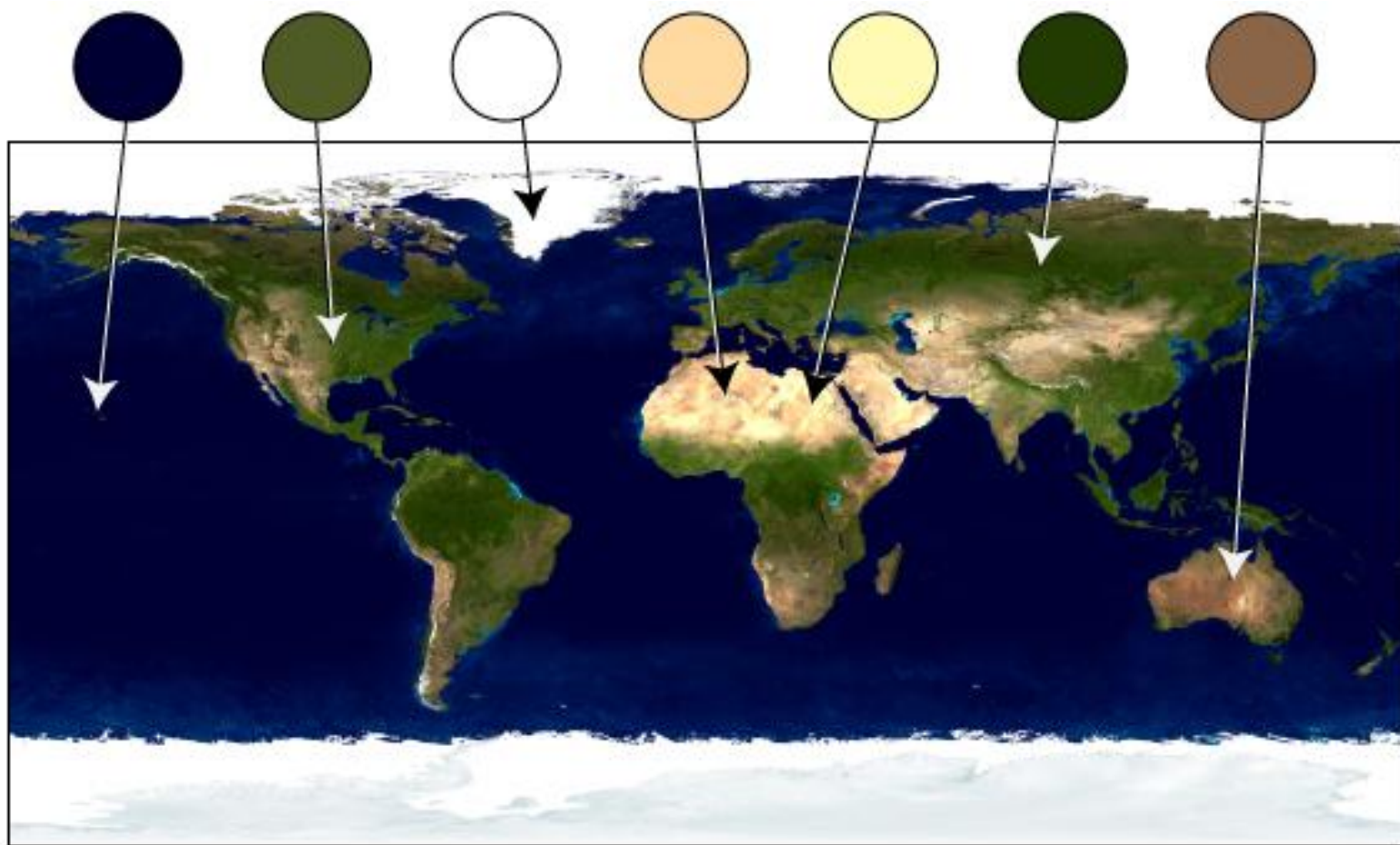
陆气相互作用的研究背景：北非长期干旱

Charney经典假说：陆地对气候的反馈作用加剧北非干旱



现代动力气象学之父
Jule Gregory Charney

Charney提出的陆气反馈机制：地表反射率

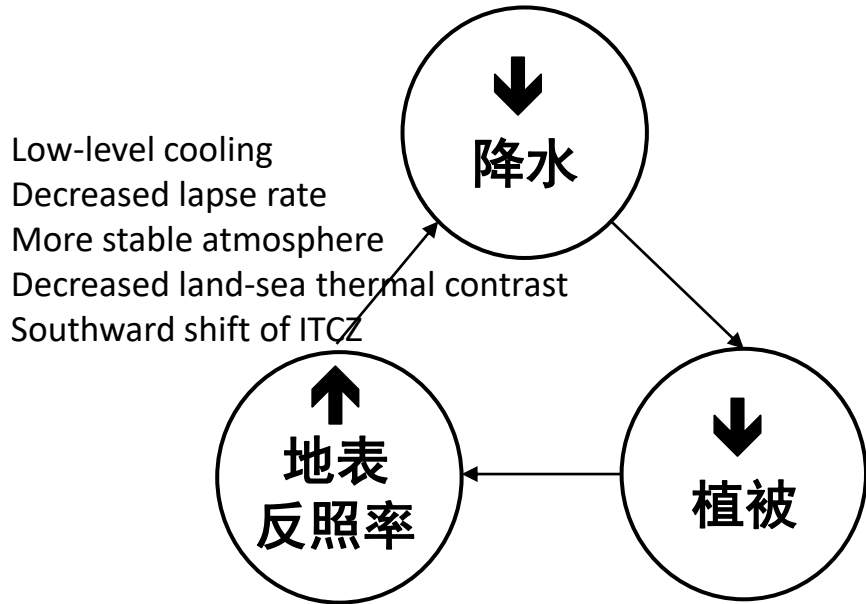


地表类型	反射率
水面	0.06-0.08
阔叶林	0.13-0.15
沼泽	0.10-0.18
水稻田	0.12-0.18
灌木	0.16-0.18
田野	0.15-0.20
草原	0.20-0.25
沙漠	0.25-0.35
海冰	0.50-0.70
新鲜雪被	>0.80

Charney在气候模式里面将撒哈拉沙漠的地表反射率从0.35改成0.14，引起北非地表加热，静力稳定度减小，海陆温差加大，ITCZ北移，夏季降水增加40%。

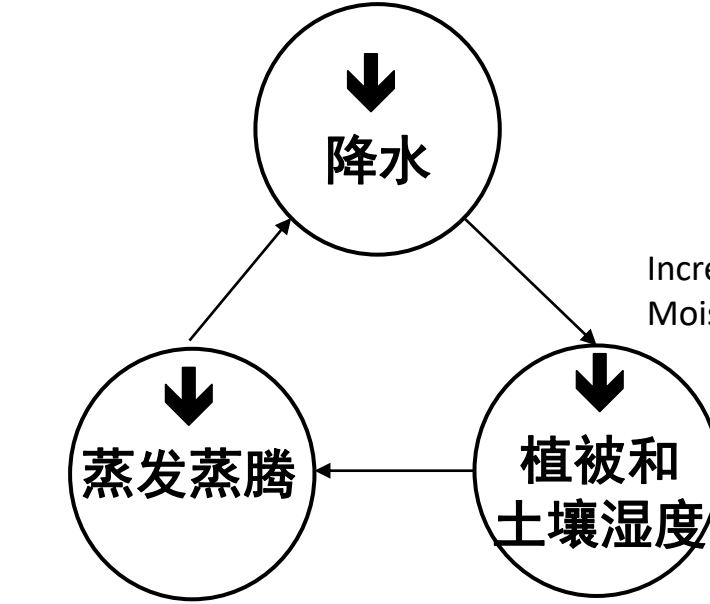
陆气相互作用的机制

反照率（能量）机制



Charney 1975

水循环机制

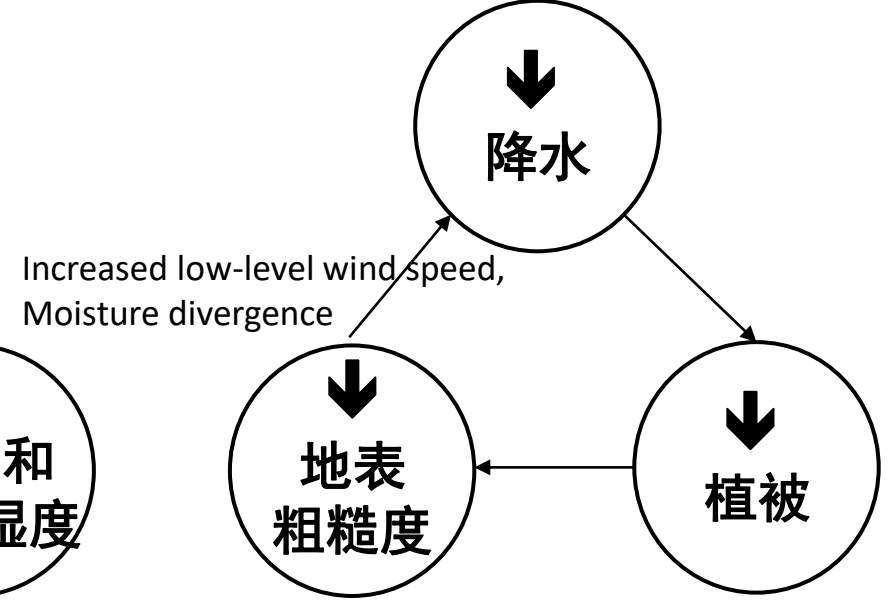


Inhibited moisture recycling

Zeng et al. 1999

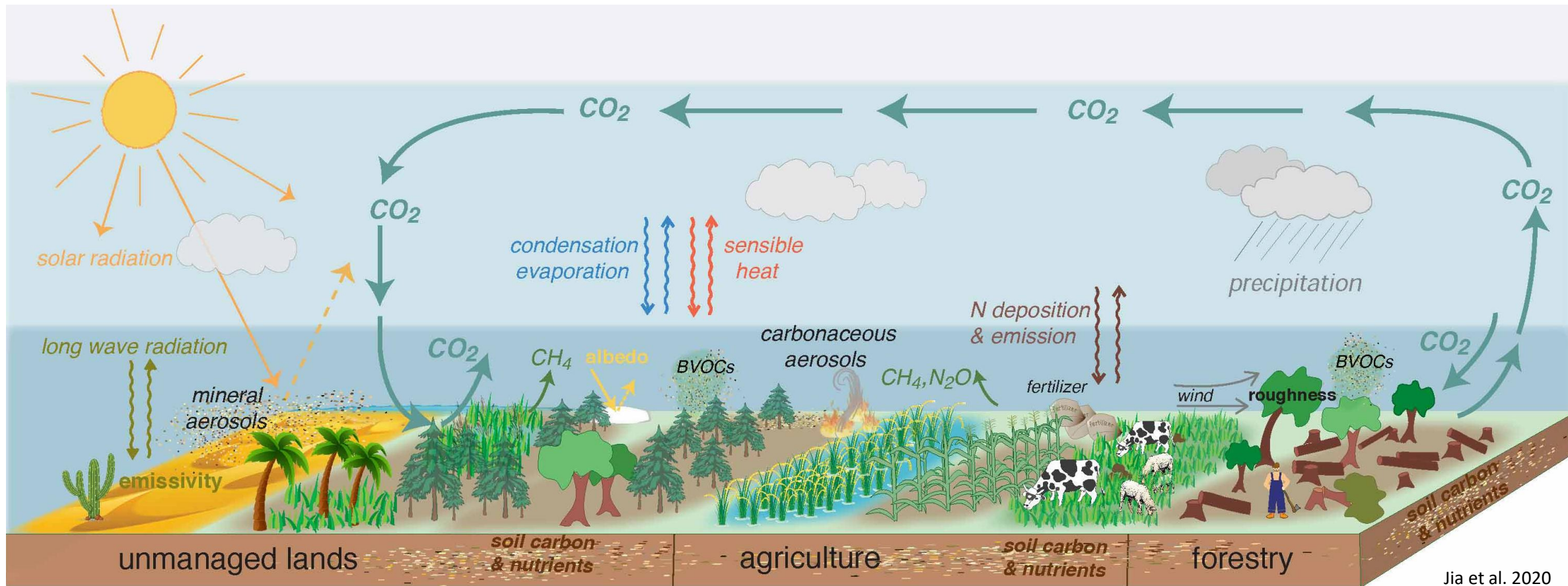
Yu et al. 2017

动量机制

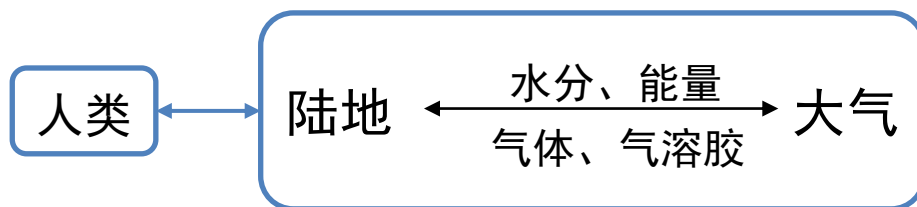


Sud and Smith. 1985

陆气相互作用的机制



Jia et al. 2020



本章作业 ddl = 2026年6月16日 13:00

1. 单位质量空气的总动能 $E_T = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ 。利用雷诺分解，证明一定时间和/或空间范围内的平均总动能 $\overline{E_T}$ 是平均气流动能 \bar{E} 和湍流动能 \bar{e} 之和，即 $\overline{E_T} = \bar{E} + \bar{e}$ ，其中 $\overline{E_T} = \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2)$ ， $\bar{E} = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2 + \bar{w}^2)$ ， $\bar{e} = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$
2. 边界层高度的比较及原因：
 - (1) 日食中 versus 日食前
 - (2) 午后，沙漠 versus 临近的绿洲
 - (3) 午后，沿海陆地 versus 临近的海上
3. 从物质交换角度，陆气相互作用如何影响大气污染和气候？