

1. 气候系统

大气: 大气组分 (温室气体? ...) 来源、分布、效应 **内因**

- 热带海表 $\uparrow 1m^3$
 $w_{H_2O} = 10g/kg$
- 温室效应: 激发态 & 退激发态
吸收主要看分子结构 (稳定的 $N_2, O_2 \rightarrow$ weak GH)

太阳辐射 大气窗口 (可见光, 无线电), 能量收支 **外因**

- 高层大气能量主要来源于潜热 (主要在 ITCZ)
感热在沙漠地区较强。

大气热量分布极不均匀 (几何形状, 太阳直射点的变化, **驱动大气运动** (多尺度) **结果**)

- "赤道-极地" \leftarrow 锋面气旋
- "冬半球-夏半球" Rossby 波
中-高纬热量交换 垂直方向特殊的力热机制 (O_3)
近地面斜压波 (波动就是不稳定性
的积累与缓解)
- \rightarrow 高层大气纬向环流 夏半球东风

- "海陆" 季风、海陆风 (白天海风 夜晚陆风)
- "下垫面" 城市热岛
- "垂直三热板加热"

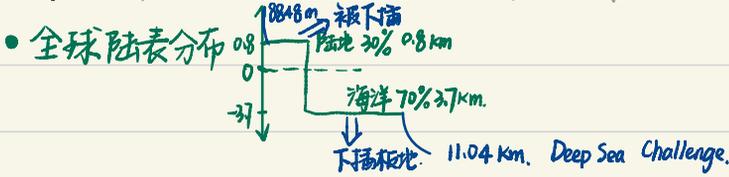


经典的 Ferrel Cell 上升支与观测相反 (西风 observe)
No Cell!

- 对流: ITCZ deep convection.
副热带 Thunderstorm.

海洋 • 海洋物理 ≠ 物理海洋.

基本情况 洋盆几何特征; 洋中脊; 海水组成; 温盐分布; 海洋层结.



• 海陆面积随纬度分布 40%/60% 20%/80%

• 海床岩龄 洋中脊: 新生陆地.

• 海洋的水 相当于直径 1384 km 直径的水珠

$$D = \frac{1}{5} R_{\oplus} = 0.2$$

组分 96.5% H_2O + 3.5% Salt. (80% Na^+ + Cl^-)

$$L = \frac{2.4}{24} \times 2\pi R_{\oplus} = 0.6$$

海表温度 SST 赤道东太平洋 cold tongue 冷舌 ENSO.

(最高温 $30^{\circ}C$) 西 warm pool.

比热大, 潜热

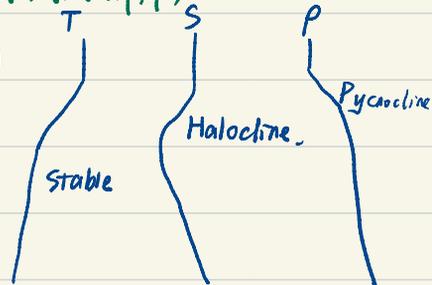
海表盐度 SSS 峰值在副热带 (蒸发大被信风带到 ITCZ) → 海洋沙漠

大西洋盐度高 (来源咸, 水汽到太平洋)

• 密度 mixed layer (风应力搅拌)

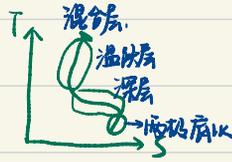
Thermocline (温跃层)

Deep layer

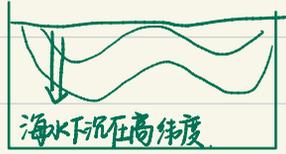


• 廓线的季节变化, 夏: 混合层浅, 温度变化大
冬: 深 小

• T-S Diagram.



• 海洋抽象层结.



• 实际层结



海洋洋流 航海时代新发现

Davis Drifter. (对测量地有污染, 大尺度)

东西边界流

ECC 赤道逆流 弥补赤道水流东部的亏欠

南极绕极流

洋流流速观测: 卫星测高 + 正压反推流速.

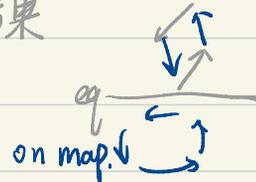
风生环流 Ekman 输送; 大洋环流 Gyre; 地转 ^{Munk Sverdrup Stommel}SSM 理论.

表层环流的主要特征. (垂直积分 90 向右)
(10%)

Gyre: Ekman transport 的结果



Gyre Dome.



EKE TKE

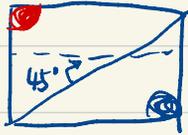
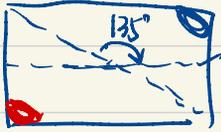
地转不能解释 Eddy.

温盐环流 中深层洋流. 全球深层环流 AMOC IMOC PMOC

印度尼西亚贯穿流, 大西洋深层水体层结.

海洋经向热输送

大气跑得快, 比热小 \rightarrow 中高纬
海洋 慢 大 \rightarrow 中低纬.
两者传热效率 1:1



太平洋同时向南北输送

印度洋向南 大西洋向北

Mountain Glacin.

海冰

冰冻圈成员

山岳冰川、永冻土、陆地冰盖、海冰、冰架
↓
海水结的冰

海冰几何特征

北极海冰 2-4m

南极海冰 1-2m

海冰的形成与消融.

水温 $< -13^{\circ}\text{C}$ \rightarrow 有冰核 \rightarrow 结冰 \rightarrow 碰并形成厚的冰.

雪先融化 \rightarrow 冰开始融化. \rightarrow 海潮风暴加速 (被风拆碎)

海冰对气候的影响:

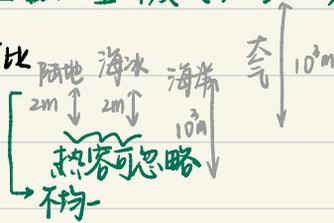
- 影响辐射 (对气候系统) 反照率远高于水 (5%-70%)
- 绝热作用 } 对大气 冰分子导热很慢 绝热板
- 阻挡水汽 } 绝水汽板
- 深水、底水形成 (对海洋) 结冰过程脱盐

北极海冰的长期趋势

- 水平范围减少、老冰比例下降 (新冰夏季化)
- 厚度减小

陆面 Land Surface 地温测量深度 (30-50cm)

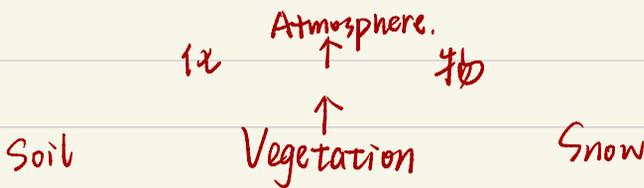
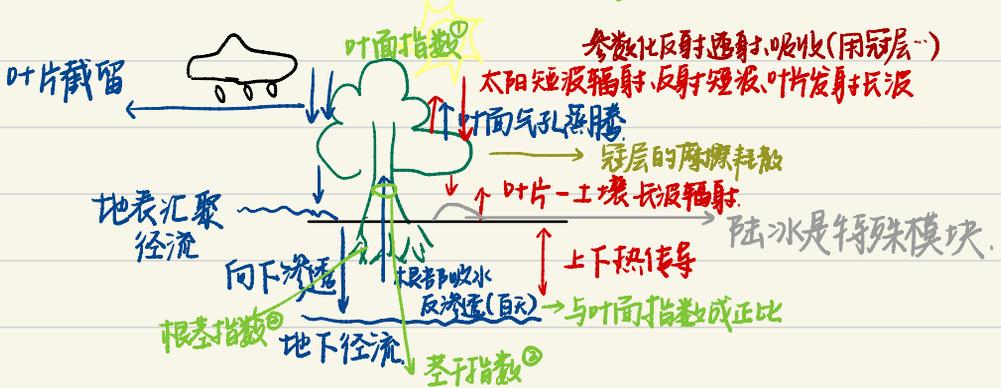
四个分量的对比



人类居住 占陆地总面积 0.3%

基本陆面植被类型 气候分类 Köppen ^{欧洲人} Main climate + Precipitation
植被分类 美国卫星数据 (18类) + Temperature .

陆面过程 核心: 植被 植被的参数化简化.

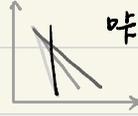


正反馈机制+负反馈约束

反馈

分量之间/之内的反馈 但更关注分量之间的

分量内 e.g. 热对流不稳定



咋, 一天给你对流调整回去

Ice - Albedo Feedback. "极地放大" Arctic \ Polar Amplification ^{气候变暖}

① 冰雪反馈季节尺度主要影响中高纬度

热带基本不受海冰影响

② 南极受冰雪反馈影响小 陆冰季节性变化小

③ 冰雪反馈能无限进行下去吗?

Water Vapor Feedback 水汽反馈

Greenhouse Effect Feedback.

① 不能无限进行 (GT⁺、云)

② CO₂ (来自海洋) 实际: 海洋酸化 大气 CO₂ 反馈.

③ CH₄ (永冻土) 高纬陆地增温.

Cloud Feedback

① 全球变暖与云量关系不明

② 云反馈依赖云型 $\left\{ \begin{array}{l} \text{高云: 温度低于环境} \rightarrow \text{Warming, +} \\ \text{中低云: "高"} \rightarrow \text{Cooling, -} \end{array} \right.$ 不确定性

③ 云反馈依赖云微物理 $\left\{ \begin{array}{l} \text{N: 云滴、多数量: 反射} \rightarrow \text{cooling, -} \\ \text{大 小: 温室} \rightarrow \text{warming, +} \end{array} \right.$

地表植被反馈 ① 植被-反照率:  反照率↓.

(退化正反馈) 主要影响中高纬  和  之间差别大

② 植被-降水

(退化正反馈) 低纬.  蒸发水能力强变化大.

Other Feedback

ENSO  (+)

森林野火  (+)

C-Si cycle (-)

Lapse Rate feedback (-)

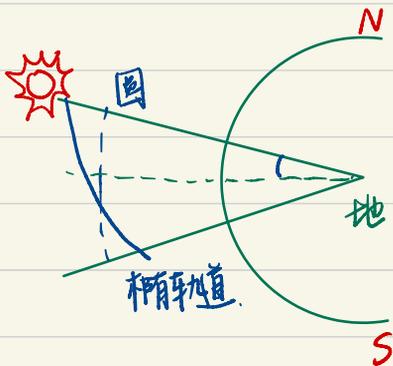
Baroclinic eddy feedback (-).

大气、海洋 → 负反馈 稳定气候

冰雪、陆地 → 正反馈 使气候不稳定

External Forcings) 自然强迫
外强迫

地球轨道 第四纪气候变化 (震荡变冷) 证据。
 10万年轮回 南极冰芯
 2万年 岁差 黄赤交角 (22°-24°) 偏心率 (10万年变圆变椭圆)
 4万年



- ① 南半球季节性更强
- ② 热带区域变大、小

米兰科维奇假说

与南极冰芯观测能对应

太阳活动 太阳黑子 (30°N/S 出现靠近赤道后消失)

SDO 太阳动力观测

太阳黑子 $\frac{\text{短期} \times}{\text{长期} \checkmark}$ 全球温度

(年轮 \rightarrow 年辐射线)

Avercamp 画作

火山活动 热带、喷发至平流层 \rightarrow 全球扩散

平流层: 短期直接加热 + 长期持续吸热
 对流层: 降温

火山烟的轨迹 (高于 1km 离开边界层 湍流区域)

人类活动

温室气体 (CO₂? CO₂? 因-果)

cooling 气候

气溶胶 (工业废气) 陆面变迁

Sahel Amazon
沙漠化, 森林砍伐
城市化, 河湖改造
水坝工程

参与云过程影响气候

- ① 影响反照率
- ② 降水量、云型、生命时间
- ③ 吸收 (e.g. 黑炭)

作业补充: 位温斜压

Barotropic 气压大幅度转换 转换, 热带

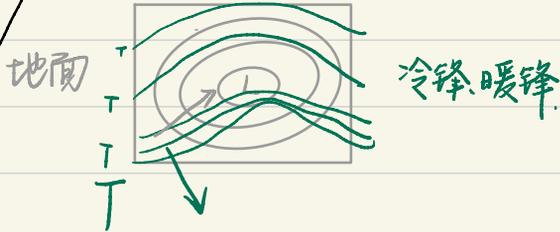
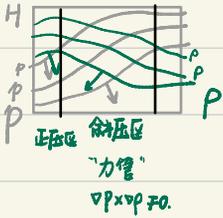
气团垂直运动 900mbar/hr 快

Baroclinic 气压变化小

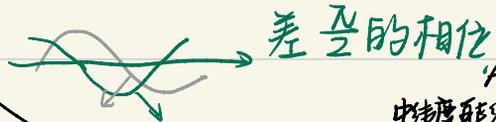
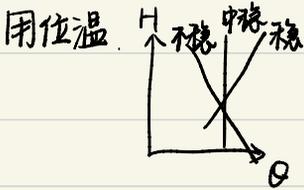
10 mbar/day 慢

① 流体、动力 垂直剖面 $\nabla p \times \nabla \theta$

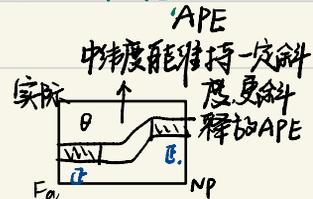
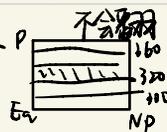
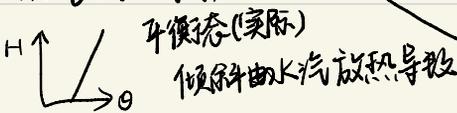
② 天气学 MAP 地面、高空 $\nabla p \times \nabla T$



③ 气候学 垂直剖面 (沿经纬线)



用于热力学的比较



CH2 数值方法. wave equation

2.1 气候模式简介与平流方程.

• EBM Rad-Con Model. Statis-dynamic Model (快)

(看PPT). Earth 有化学.

EMIC, ESM, CSM

(CSM)

climate 无化学

抽象形式: $\frac{dx}{dt} = F(x)$

$$\frac{\partial x}{\partial t} + (\nabla \cdot v)x = F(x)$$

平流项 源汇项

$$= \text{Dyn}(x) + \text{Phy}(x) + \text{Diff}(x)$$

动力过程
显式

次网格
物理过程.

数值耗散
物理

Just for stability.

↑ 导数

一阶双曲线方程

双曲 (1 level) $\frac{dN}{dt} = c \frac{dN}{dx}$ 平流

抛物线: $\frac{dN}{dt} = k \frac{d^2N}{dx^2}$ 小项, 耗散

椭圆: $\frac{d^2N}{dt^2} = k \frac{d^2N}{dx^2}$ (少见)

↑ 热的混合程度.

• 平流方程 Advection $\frac{dN}{dt}$ 源汇项为 0. 熵守恒 (与环境的混合) → 保守方案

$$\frac{\partial N}{\partial t} + C_x \frac{\partial N}{\partial x} + C_y \frac{\partial N}{\partial y} + C_z \frac{\partial N}{\partial z} = 0$$

变量 N 被流场平流 (行波解)



PBL 之上, $v \sim 0.1 - 10 \text{ m/s}$

2.2 时间积分

起点 + 方向 + 步长 \rightarrow 方案给出

• 主流积分方案

(1) 单时间片方案 存储小 计算时间大

当前 $\xrightarrow{\text{迈步方案}}$ 下一步
 t^n 的 X t^{n+1} 的 X



a. Forward Euler scheme. 欧拉前插

$$X_{n+1} = X_n + dt F(X_n) \quad \text{-1阶.}$$

在非线性系统的求解有较大问题

b. Matsuno (松野) scheme. 1阶 or 1.5阶

$$X^{est} = X^n + dt \cdot F(X_n)$$

$$X^{n+1} = X^n + dt \cdot F(X^{est}).$$

c. Heun scheme. 实际问题 2-3阶

$$X^{est} = X^n + dt F(X_n)$$

$$X^{n+1} = X^n + \frac{1}{2} dt [F(X_n) + F(X^{est})] = X^n + \frac{1}{2} dt [F(X_n) + X^n + dt F(X_n)]$$

d. Runge-Kutta. scheme Family. ^{龙格}mid point. 最低2阶 常用4阶.

$$q_1 = dt \cdot F(X^n)$$

$$q_2 = dt F(X^n + q_1) - q_1$$

$$X^{n+1} = X^n + q_1 + \frac{1}{2} q_2$$

(2) 多时间片方案 存储大, 时间小.

使用 t_n 及过去若干时间片的 x 算 t_{n+1} 的 x

Leapfrog Scheme (order=2)

$$X_{n+1} = X_{n-1} + 2dt F(X_n)$$



围绕真值振荡放大
不够稳定

Adam Bashforth Matsuno (ABM) Predictor Corrector Scheme (order=3)

$$X^{est} = X^n + \frac{1}{2} dt \cdot [3F(X_n) - F(X_{n-1})]$$

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{12} dt \cdot [5F(X^{est}) + 8F(X_n) - F(X_{n-1})]$$

A-B Scheme family (order=2, 3, 4)

...

存储向前若干个时间点的趋势

...

...

CH3 简化气候系统

非线性动力系统

1. 定义: 动力系统 Dynamical System

系统状态 \longrightarrow N 个变量 \longrightarrow 规律由 N 个微分方程描述
控制方程组 (Governing equation)

2. 相空间、轨迹和奇点、
 \downarrow N 个状态变量所在维度组成的空间
有正方向与时间一致 (代表动力系统演化)

奇点 - 正则点
(普通 regular 点)

奇点: 方程组的倾向项为 0 系统停止演化。
(排斥子, 吸引子, 鞍点,)

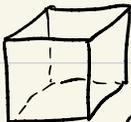
3. Lorentz 混沌吸引子.

距离平衡态较远的初始条件小扰动, 回复到平衡态阶段的
可预报性高

Lorentz 1984 空间尺度越小, 可预报性越短.

ODE

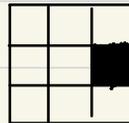
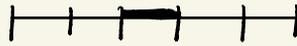
系统总体的概念



(时间积分即可)

$$\frac{dN}{dt} = SMS$$

PDE



时间
空间

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial(NV)}{\partial x_i} + SMS$$

有限差分方法

$$\left(\frac{\partial^n N}{\partial x^n}\right)^m \quad n^{\text{th}} \text{ order} \quad m \text{ 次}$$

一阶精度

二阶精度: $O(\Delta x^2)$

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{N_1 - N_0}{2\Delta x}$$

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} = \frac{N_1 - 2N_0 + N_{-1}}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial N}{\partial x} = \frac{N_0 - N_{-1}}{\Delta x} - \frac{N_1 - N_0}{\Delta x} = \frac{N_1 + N_{-1} - 2N_0}{\Delta x^2}$$

• 截断误差: 用离散形式解释连续形式造成的误差

$f'(x+dx)$ 、 $f'(x-dx)$ Taylor 展开

$$f''(x) = \frac{f'(x+dx) - f'(x-dx)}{2dx} \quad O(\Delta x^2)$$

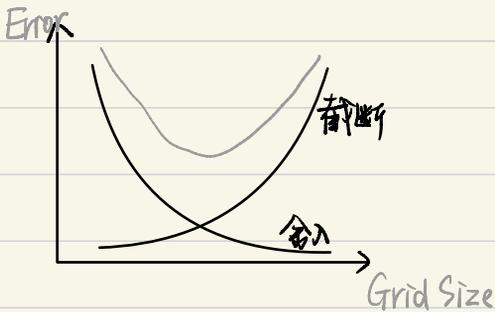
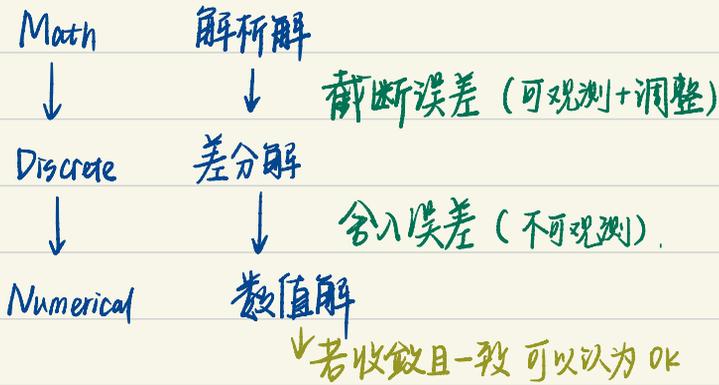
• round-off error 舍入误差

计算机对浮点数的表达, IEEE 754 standard.

32 bit 单精度 32 bit 8+24 $\pm 2^{23} \times 2^{-24}$ (科学计数法)

双精度 64 bit 各有一位标头正负

数值解的误差来源



谱方法:

物理空间 \longleftrightarrow 谱空间

数据点数量应一致 (短波截断来近似, 用更少的数据点来描述系统特征)

波数: 纬度圈 Geopotential Height. 上槽脊的数量.

1-3 行星波 3-10 天气波 10 \uparrow 超短波 再多就是混淆态

• 最大波数 k_{max} 受限于空间分辨率 x 方向离散点, $N=16$ 最多表示 8 (每个波用波峰波谷造成不稳定性)

• Gibbs: 过冲值 (方波的趋近拟合)

9%

e.g. 地形的模式拟合: 陡峭突变 \rightarrow 水汽: 沙漠 \leftrightarrow 绿洲 负水汽 非物理

\rightarrow 云: 云边界处 参数化订正过大处

\downarrow
和 Thermal Phase Curve 的探测限制一致

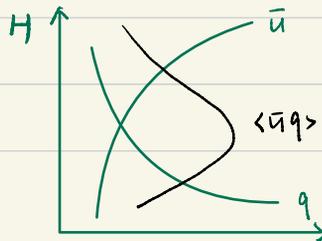
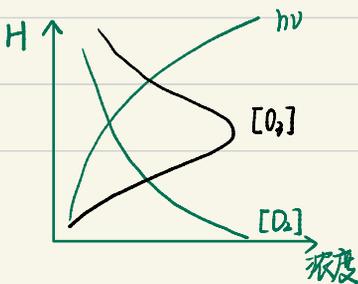
连续傅里叶变换

sin 变换

实型变换 确定系数 $A_k B_k \quad \sum N_k \cos x \rightarrow$ 定义为相似度.

复型变换

FFT



离散傅立叶变换

积分求和

$$[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}] \rightarrow [0, N-1]$$

技术细节PPT

将带来无限的好处

N最好是2的整数幂

应用

• 反变换 & 短波截断

谱方法: Pseudo. 利用谱方向解析地估计空间导数项

谱空间的若干正弦法解析解 \rightarrow 高精度

具体操作: ① $\frac{\partial f}{\partial t} = -\alpha \frac{\partial f}{\partial x}$

$\frac{\partial f}{\partial x}$ 的最优估计

② $C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f_n \cdot e^{-i2\pi kn/N}$ $k \in [-\frac{N}{2}, \frac{N}{2}-1]$

③ 计算导数 $\frac{\partial f}{\partial x} = \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} C_k \cdot (\frac{i2\pi k}{N}) e^{i2\pi kn/N}$ $n \in [1, N]$

④ 计算倾向.

为什么更佳? 每点的倾向使用了所有点的类对层.

Global Estimate

谱方法: 一直在谱空间计算倾向和积分 play everything

k波 $\frac{dC_k}{dt} = -i\alpha C_k$ (把 $\frac{dC_k}{dx}$ 退化 iC_k)

变成ODE 对线性方程非常友好.

非线性情况 $\frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial x}$

$$\sum_k \frac{\partial}{\partial t} (C_k(t) e^{ikx}) = - \sum_k C_k(t) e^{ikx} \cdot \sum_k i k \cdot C_k(t) e^{ikx}$$

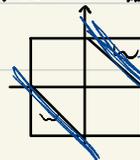
$$\sum_{k_A} \sum_{k_B} i k_B C_{k_A}(t) C_{k_B}(t) e^{i(k_A+k_B)x}$$

计算量 $O(k^2)$

出现了

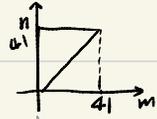
$$\begin{matrix} -k_{\max} & \rightarrow & -2k_{\max} \\ k_{\max} & \rightarrow & 2k_{\max} \end{matrix}$$

截断: 滤去超出 k_{\max} 的波抑制短波增长
否则污染



相互作用出现的

ρ harmonic: 圆洞没有暴力改变点



弦振动 球谐变换 计算量大; 避免极点问题;

弦振动方程 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = C^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$ $C = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$ \rightarrow 张力 \rightarrow 密度

径向波数 $\rightarrow m$
纬向波数 $\rightarrow n-m$

驻波解 $\nabla^2 \psi = 0$ (退化为 Laplace 方程) $Y_n^m(\lambda, \mu) = P_n^m(\mu) e^{-im\lambda}$

在球坐标 $\frac{1}{\cos\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\cos\theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta}) + \frac{1}{\cos^2\theta} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \lambda^2} = 0$ θ : 余纬, 距离北极地轴夹角

对 ψ 分离变量 $\psi(\lambda, \theta) = L(\lambda) P(\theta)$

南北方向 \rightarrow Legendre Eq.

勒让德多项式

令 $\mu = \cos\theta$ $\frac{d}{d\mu} [(1-\mu^2) \frac{dP}{d\mu}] + n(n+1)P = 0$

$P_n(\mu) = \sum_{r=0}^n (-1)^r \dots$ 显式

$= \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n}{d\mu^n} (\mu^2 - 1)^n$ 隐式 Rodrigues

递推关系 $P_0(\mu) = 1$ $P_1(\mu) = \mu$

$(n+1)P_{n+1}(\mu) = (2n+1)\mu P_n(\mu) - nP_{n-1}(\mu)$

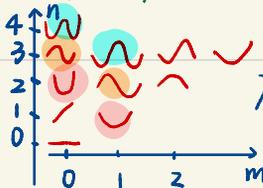
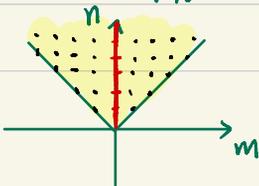
多项式的几何图景 弦的“振动”起振次数

$n=0$ ——— 不振

$n=1$ / 起振一次

连带 (associated) 勒让德多项式

$P_n^m(\mu) = \frac{(1-\mu^2)^{\frac{|m|}{2}}}{2^n n!} \cdot \frac{d^{n+|m|}}{d\mu^{n+|m|}} (\mu^2 - 1)^n$ $m \in [-M, M]$ $n \geq |m|$



$m=1$ 由 $m=0$ 左侧分折一下得到

$m=i+1$ 由 $m=i$ 右侧分折一下得到

多项式的递归建立. 结合平面理解

$n=1$ $m=1$ Tidally locked planet?

$n=2$ $m=-1$ Earth like planet?

球谐变换的截断: 按 n 截  三角截断 T_{42}, T_{85} ^{eg:} T_{41} : 至少82个点 \rightarrow 128个点 ^{2的幂}
 菱形截断 R_{21} ^{计算量细节} 同阶 $R > T$

高斯积分法 root 附近的近线性 (导数 $\rightarrow \infty$?) .

CH3 大气模式

五力平衡: Coriolis Force $\Omega \sim 7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ $f \sim 10^{-4}$

科氏力的影响 $\Delta mv = f v \Delta t$
 $\frac{1000}{1000} \frac{10}{0.03h}$

垂直方向动量方程: 静力近似 Hydrostatic 水稳 (龙卷强对流 (丢了对流只适用薄大气))



预报方程 (含时) Prognostic 每时间片先算诊断再算预报
 诊断方程 (不含时) $\frac{d}{dt} = 0$ 得到 Diagnostic. 的 tendency.

热力学方程. 单位质量 $C_{v,m} dT = \frac{dQ}{m} + \alpha dp$
 $C_{p,m} dT = \frac{dQ}{m}$ 更常用

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{p,m}} \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C_{p,m} p} \frac{dp}{dt}$$

T: 气候模式 (天气尺度算T)
 位温: 非绝热加热 绝热压缩
 绝热压缩算起来太头疼, 揉进一个守恒量.

湿位温/相当位温: θ_w 考虑水相变

Q: 相变 (b) + 长短期加热 (2) + 感热 (1) 实际: 参数化完成

讨论化学判罚考虑辐合散

标准平流方程认为流场不能辐合散

连续性方程

平流

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -v \frac{\partial N}{\partial x}$$

连续性

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -v \frac{\partial N}{\partial x}$$

$$-N \frac{\partial v}{\partial x} (= \frac{\partial v N}{\partial x})$$

流场性质
辐合散

对大气大差不差

上下游效应
N性质

可压: $\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial p u}{\partial x} - \dots$ $\frac{\partial p}{\partial t}$ 预报

(大尺度)不可压: $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$ 诊断(模式)

Primitive Equations 原始方程组

b: 干模式

b+1: 湿模式 (除水汽还可以加入任意平流物)

动力核心 IC 至少4 (预报方程各1)

闭合? 耗散项 Q项

水平网格分辨率 CFL (目前平均: 80-100km 格点) 评估报告 AR6

• Δt 最大值 $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c}$ \rightarrow 重力外波波速 (300m/s)

因此, 将格点分辨率提高一倍 $x \rightarrow 2$ $y \rightarrow 2$ $t \rightarrow 2$ 计算 $\rightarrow 8$.

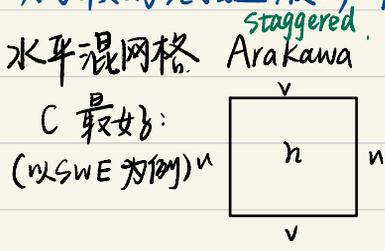
• 水平分辨率的理性要求

大气模式 大尺度: ① 准纬向 ② 准地转 ③ 准不可压/无辐散

④ 准静力/准水平 (排除深对流)

- 大尺度运动中, 地球的旋转作用不可或缺 为大气带来涡旋特性.
地转使高低压中心恢复时间 $1h \rightarrow 1week$ (滞弹性)
- 大尺度运动波长达到 Rossby Deformation Radius
- 大尺度运动频率向地转参数适应.
- 风场\动力场向气压场适应.

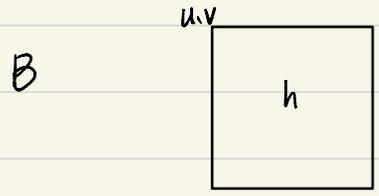
为了较好地描述波动 格距最好取波长的 $\frac{1}{8}$.



"如何在格点上放置变量" (中小尺度)

(散度 梯度) $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 计算有效

科氏力项效果不佳.



科氏力无偏 (更适合大尺度)

散度具有误差 (平均的运算)

垂直方向的分辨率 $\sim 1km$ 相比水平非常小

气候 $1km/300m/s \sim 3s$ 过短 用静力平衡近似

天气 $1km \times 1km \times 1km \quad \Delta t \leq 3s$ 求解非静力平衡.

垂直混网格 Lorenz ? 但广泛使用

CP \checkmark by Arakawa 1997

等压面 p_gF 的计算 等高面 .. 有山!

常见垂直坐标:

1. 地形距随类 σ pressure | σ height.

$$\sigma = \frac{p - p_{top}}{p_s - p_{top}}$$

PGF 计算不够准确 (垂直气压差被水平气压差包括)

2. 阶梯山脉 Eta. 复杂地形需要

四川盆地降水的 overestimate.

把山切成块极高分辨率

中小尺度

3. 位温守恒 (isentropic)

4. 混合坐标: $\frac{pres}{\sigma - pres}$ 简化 σ pres 的运算.

σ p 平流层不受地形影响.



物理过程参数化.

1970s WCRP ①
的推动

- AGCM
- NWP: 边条很重要 (中小尺度)
- LES/CRM: 云解析 (m~km 分辨率)
大涡模型

② 物理过程复杂化.

- 降水
- 辐射
- 表面过程.

③ 使用领域

④ 使用方法 (多初条/参数/模式) Ensemble simulation
 ↑
 降水概率

• 为什么要参数化?

- ① 显式计算代价昂贵 radiation (line-by-line) ; turbulence (谱) 看需要细分到什么尺度
- ② 次网格尺度信息不全 cumulus convection (100m - 10km) .
- ③ 不完全了解 云微物理 ; Turbulence

e.g.: 与下垫面有关的过程

降水

物理过程 — 辐射

谱线的加宽 { 多普勒

↓ 压力 (对流层) 分子运动导致的碰撞

峰宽随加宽下降

长短波适合分而治之 (低温 star 高温 planet?)

大气对辐射的消光: 吸收和散射 (主要是 Rayleigh Scattering)

参数: k 参数: $w_0(0\sim1)$ $g(-1,1)$ $P(\theta)$

光学厚度

$$RTeq: I = I_0 e^{-\tau} + \int_0^s B_\lambda(T) e^{-\tau} d\tau.$$

参数化方案: (1) 无散射 (2) 只考虑 Column (3) 水汽形成长波窗区

(4) GHGs 污染长波窗区

双流模型 (二流近似) 处理透射

k 由实验室测得

ρ/T 比值

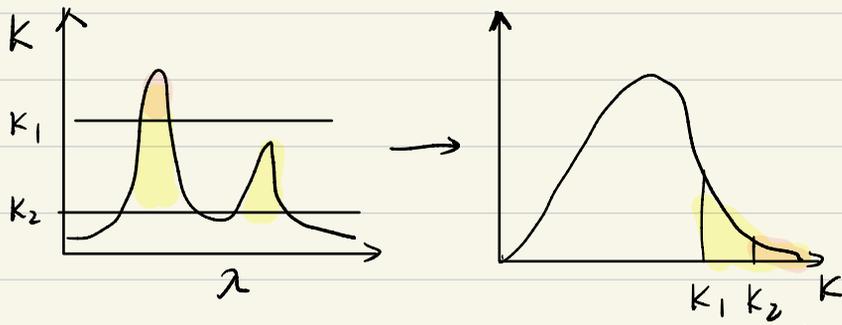
实际计算需要考虑压力加宽效应. \rightarrow 修正 k / 双参数经验 / line by line.

处理频谱积分

• 窄带

• 宽带: 用比吸收率 LW 看成若干或一整个

• Correlated- k : 将频域上的吸收率转换为整个频域的 CDF 累积分布函数
简化了某频段总吸收的计算

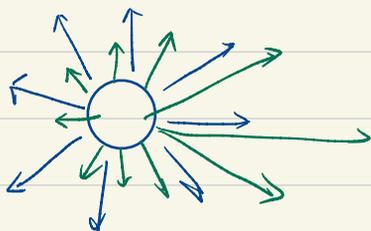


长波辐射中云的处理 $CWP = \int_{z_1}^{z_2} q dz$ $a = 0.13 / 0.158$
 $\epsilon_{cloud} = 1 - e^{-a \cdot CWP}$
 算2遍 ① clearsky ② 云修正

短波方案 $Avg = 1364 W/m^2$
 大气层顶 天顶角、直射角。
 (时间、地点、 $\sin\theta \sin\lambda$)

散射、 O_3 吸收、 H_2O 吸收近红外

① 散射的处理: Eddington 近似



将散射的影响进行分解。

overestimate. 尤其稀薄大气

$$I_v(\theta) = I_v p(\theta)$$

② 修正 Eddington Approach. (NCAR)

用 δ 函数进行修正. $p(\theta) = 2f \cdot \delta(1 - \cos\theta) + (1-f)(1 + 3g^{-1} \cos\theta)$

短波辐射方案中云的处理

...: CWP

辐射加热率的计算 $Q_{rad} = Q_{sw} + Q_{lw}$

$$= \frac{g}{c_p} \frac{F^+ - F^-}{dp}$$

辐射的CPU使用最大

WRF中模块可以自选

• 降水过程

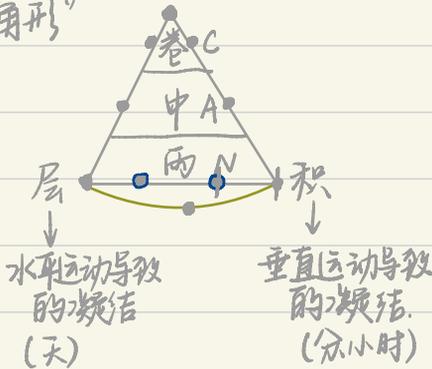
热带: 对流云 ITCZ

锋面气旋

中高纬=(海洋) storm track

降水 对应 凝结潜热

云“三角形”



次网格尺度

山区易形成对流云/平原热泡对流.

暖锋前有一大块云

冷锋上有一条带云.

陆面强对流伴随杂质

→ 闪电. 云内闪、云间闪 云地闪

大尺度凝结降水 (水云) (暖) (南北温度梯度)

积云对流降水及参数化. (冰云) (冷) (垂直...) (高反照率)

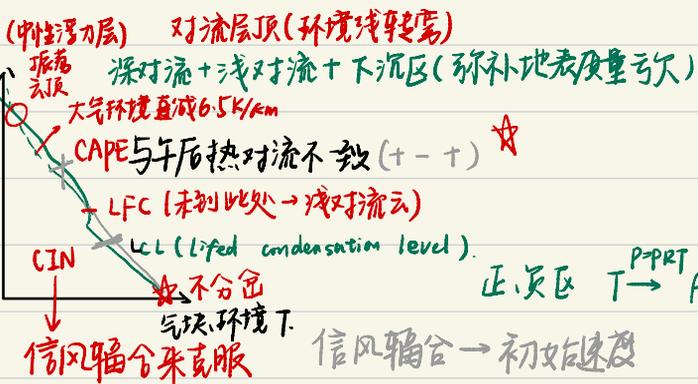
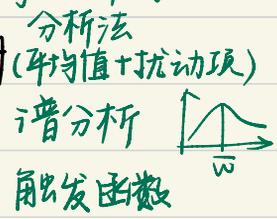
大尺度凝结降水方案 - 格点平均

- 简单方案: 过饱和凝结
- 替代方案: 凝结放热, $T \uparrow$, $q_s \uparrow$ 未饱和
 - 非常快 ($\sim \text{km} - \text{s} \sim \text{min}$)
 - 过饱和 1% 量级的极限

积云对流参数化方案

W : double u.

- 大尺度环境如何控制小尺度对流? 底层辐合 Reynold 平均
- 对流的调整过程? 绝热气块的条件性抬升 (平均值 + 扰动项)
- 调整的效果? 暖干



火箭 燃料 \rightarrow 水汽 (二级)

正压区 $T \rightarrow P \rightarrow$ 上升 or 下沉

信风辐合 \rightarrow 初始速度

气块干 CIN 增大

ITCZ 内气块 均 CIN 小 CAPE 大

绝热抬升的理解 湍流混合(弱) 冷干下沉流(使环境线变冷
不能忽略 → 导致谱分布(大哥+小弟), CIN ↓ CAPE ↑)

积云对流. 参数化方案 } Deep: 由 CAPE 决定而忽略 CIN (潮热不下雨)
大尺度 control. 中小尺度气群 } Low: 认真考量 CIN, CAPE 可以存很久
CISK 2nd 湿对流.
CISK 1st 干对流

其它: PBL 动量耗散 → 热能通常忽略,
可以放在陆面过程计算

陆面+海面 cloud cover 参数化 差强人意

云微物理 冰雹(水和冰的多层结构) The aeronaut.

重力波 drag: 高空破碎 波流转换

海洋环流模式

与大气“镜像”。

1. 家族谱 box ocean、swamp ocean (水汽)、slab ocean、Mixed layer.

Dynamic 3D model.

自由海表: split-时间积分器.

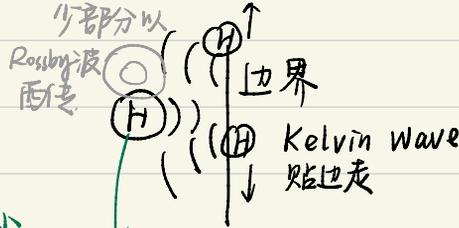
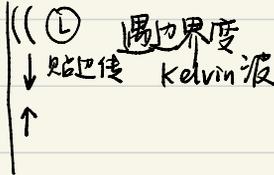
时空谱 Mesoscale Eddy 100 km weeks

2. 海洋的基本运动

风生、温盐、引力 (open ocean 可忽略).

波的理解

Kelvin 更快 (热带波系和 ENSO 循环).



Rossby wave 速度取决于 β 的大小

赤道附近更快

是峰/谷决定上番羽强度
因此拉尼娜... 是循环.
enso cycle.

3. 浅水方程

- 些视频

4. 动力框架

辐射过程

{ 刚盖 快波被约束 使积分步长更长
自由面 能解析重力波之类的快波

5. 海气相互作用和物理过程

动量、热量、水汽、温室气体、大气的汇库

(1) 辐射

0 ~ 100m

垂直混合+光
夏半球高纬

{ SW: 近黑体 (取决于海色-叶绿素) 表层10m吸收绝大部分, 剩下的吸收向下
指数递减
LW: 海表

(2) 混合

混合层海洋的湍流混合 热带“层化结构”(上热下冷)

潮汐、风应力、边界摩擦引起的湍流和耗散 → 混合层

~ 100m 日夜

~ 1000m 夏冬

混合过程参数化: ^(大气: 3 min)

- 垂直: B-V Freq, 浮力平衡
- 侧边界: 滤波 (Shapiro) 混合长理论
- 显式对流, Bulk 越短混合越强

把本需要区分的东西混在一起计算.

Mellor Yamada: 两层模式 (机械、热力湍流) "冒泡排序"

垂直混合的参数: 物理量在 y 方向的二阶导 \rightarrow 二次项耗散

K-profile parameterization: 也是两层

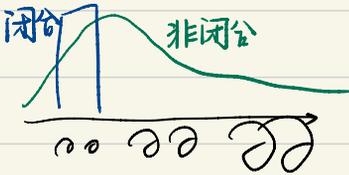
$$K = h w G + C$$

$$K = k_s + k_d + k_w$$

混合效率高, 短期更准.

复杂度 ① 局地闭合 \ 非 ...

涡度尺度固定为 \downarrow 考虑跨格点大涡
相邻格点的差距.



② 是否考虑逆梯度项: 对于海洋而言非常大

③ 盐度源汇

海冰模式

海水向冰层的凝结.

- 季节循环

基本框架 / 热力学

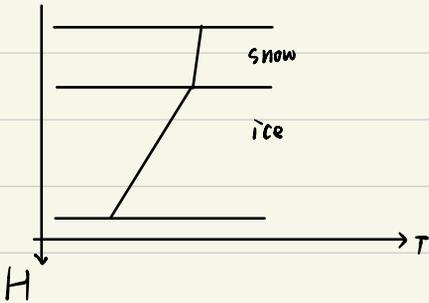
考虑格点内厚度分布 → Two level

考虑动力学 → 完整海冰

(1) 冰厚度是积温的函数 $\theta(t) = \int_0^t (T_{ocn} - T_{air}) dt$. [$^{\circ}C \cdot day$]

(2) 垂向热传导.

- 热力学海冰: 经验法. 盐水泡订正 (新老冰内) ^{5-10ppt 2-4ppt}



- 海冰厚度的格点内分布: 能结冰时优先让一定区域内海冰先进行堆积

在海冰的边缘需要这样的计算.

达到“安全厚度”.

- 动力学海冰:

风应力、流应力

surface tilt coriolis force.

内应力.

↓
free drift.
大尺度, 如!

海洋表面、位势面
之间差距
海面倾斜

(晶格形变).
陆地边缘有.
弹性 塑性
高度非线性

空穴流体: 海水中溶解气体分子 → 空气团聚现象 → 气泡.

陆面模式:

PBL: 1km 日循环

物理过程 → 快 LSP 只有物理

生物过程 → 慢 LSM 包括植物

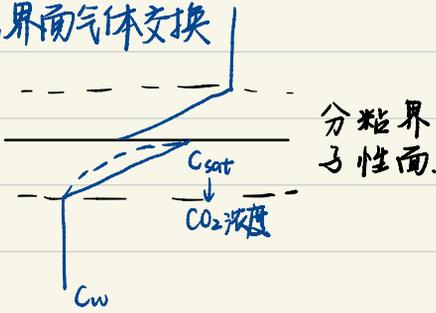
Ch 7 海洋生物地球化学

基本概念 CO_2 、DMS、 N_2O



SMS: source minus sink.

海气界面气体交换



活塞模型:

$$Flux = K_w(C_w - \alpha p_a)$$

往海洋内泵入 CO_2

海洋混合层 $\tau_{mix} \sim 20$ days

北大西洋: 大气通风区, CO_2 多
(深混区)

ENSO区: CO_2 少
(涌升区)

海洋酸化, 工业革命以来大部分 CO_2 灌入海洋. ^{本身有盐使其呈碱性.} pH soon < 8.

海洋溶解 CO_2 是大气 20 倍.

- 物理: $\mu \uparrow$ 溶解 \uparrow
- 化学: $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$
- 生物: 海洋生物吸收 CO_2 并固定代谢.

海洋生物的基本分类

SA:V surface area: Volume.

N-P-Z 模式 \rightarrow 中层细菌分解
OML

海洋C循环 生物钙化过程 (吃进去、不消化、形成外骨骼) 生物学沉降
双泵C沉降 C-Si盐循环

海洋排放DMS $(\text{CH}_3)_2\text{S}$
来源于藻类(安慰剂) 挥发性好 作为CCN影响云的形成

CH8 化学传输模式

1 传输+化学反应 $\frac{dy_i}{dt} = \frac{S_i}{P_a}$

- 0D | Box 化学烟箱
- 1D | Column
- 2D | Meridional Circulation
- 3D ↓ 现代大气化学传输 (off-line、On-line) ^{耦合}

2 化学反应体系: 排放+光化学+分子化学反应

5-20 反应 10-100 化学物种

沉降、湿沉降

CH9 陆地冰盖的模拟

山岳冰川: (5km 以上) 的雪

冰盖的量 \rightarrow 冰的体积质量 input + output (昂然北, 冰架崩解)

Greenland: 陆地地壳受冰雪挤压而变形

(“推入海中”)

Greenland 质量平衡线在海平面
50% 50% 南极 以下

大冰期 \rightarrow 有永久冰盖

气候效应: 1. 对海洋: Sea Level; MOC (影响深水)

2. 对大气: Albedo

3. 对气候系统

看探讨的时间尺度

太快自噪音 \rightarrow 近似常量
大气运动 \leftrightarrow 冰盖
大慢常量

CH10 耦合器

regridding : 温度守恒 动量守恒
调度格点

期末复习

气候系统的四个组成部分: 大气、海洋、陆地、冰雪

多角度回答气候模式是什么

描述气候系统的数学模型, 根据一定的热力学动力学定律, 在给定边界条件下数值计算的结果

海洋环流的两个组成部分: 风生环流、温盐环流.

北极海冰厚度 3-4m 南极: 1-2m 两极海冰占地表面积 2%-7%

海冰影响气候的四个过程: 通过反照率影响辐射(对气候系统)

通过减弱海气之间的热量输送而起绝热作用(对大气)

... 水汽 ... 阻挡水汽(对大气)

海冰的脱盐有利于大洋深水底水的形成(对海洋)

气候系统的正负反馈

正反馈: 冰雪反馈(反照率)、水汽反馈(温室效应)、地表植被(反照率的退化正反馈、降水的进化正反馈)

[冰雪、陆地]

负反馈: 碳-硅酸盐循环、中低云、斜压涡度反馈

[大气、海洋]

大气热机、海洋热机的原理、异同:

大气

海洋

辐射的变化与不均 → 密度 → 大气的运动

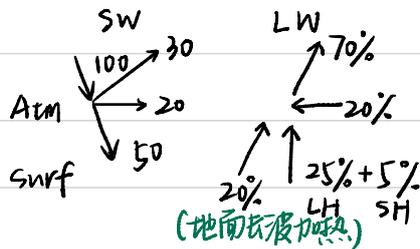
温盐环流、风生环流(风、密度驱动)

均通过能量输送的方式使系统能量平衡

温度的差异

密度的差异

地球大气能量收支



最大海表盐度 副热带

温度 赤道西太平洋暖池.

最高温不超过 30度

PGF与科氏力的计算与比较

平流项为何非线性作用明显. 波的长短串级

数值计算的误差及来源

截断误差: 用离散形式解释连续形式导致 (省略了微分的高阶项) 解析 \rightarrow 离散

舍入误差: 计算机表达浮点数精度损失累积导致 离散 \rightarrow 数值

水平混网格: Arakawa

• 适用高分辨率的模拟? Arakawa C. $\begin{matrix} \downarrow \\ \square \\ \downarrow \end{matrix}$ h 辐合\散及气压梯度力能被准确 短波点优

中小尺度的运动: 辐合\散很重要; 气压梯度 $>$ 科氏力

• 适用大尺度的模拟, 均衡的格点? Arakawa B. $\begin{matrix} \leftarrow \\ \square \\ \rightarrow \end{matrix}$ h 长波点优

差分、谱方法的优缺点和简介

差分

格点空间计算导数, 微商换成差商

高效但精度不高

优点 守恒性好

谱方法

格点空间转化到谱空间求解

精度更高 (取决于截断波数)

无守恒性

Gibbs过冲 对不连续点表示差 (地形、水汽)

昂贵的计算成本 (一直在格谱变换)

相速度变慢

优点

相速度与解析解一致

大尺度特征用少数波即可表达精确

每点的倾向使用了所有点的数据

准谱方法 在谱空间计算导数返回格点空间计算倾向

T42 格点 $42 \rightarrow$ 至少84点来描述波 $\rightarrow 128 \times 64$

静力平衡假设薄层近似, z方向预报方程变成诊断方程

$1^\circ \times 1^\circ$ 的格点中赤道能够描述的最短波长是? $360^\circ \cdot \frac{1}{2} = 180$ $\lambda_{\min} = \frac{6370 \times 2\pi}{180} = 222 \text{ km}$

短于该波长的波模式会出现非线性不稳定: 波速的快速增加、混淆表达

向短波串级

向长波反串级

海洋的参量化过程 辐射过程；海面和侧界面的混合过程。

海洋C循环过程 生物钙化过程沉入海底(无机, CaCO_3) 光合作用(复杂有机物)。

海洋的初级生产 海表的光合作用。

耦合器的作用

- 通量计算. 单位. 转换
- 格点插值转化.
- 时间同步(平均)
- 并行计算资源管理与调度

波文比的定义 $\frac{Q_{sh}}{Q_{lh}}$. 干旱陆地区域大.

大气化学模式包含化学反应体系和平流.

陆冰的质量平衡线: 融化区与积累区的平衡.

参量化模型.

计算辐射的模型 双流模型.

陆面模式 电阻模型.

积云对流中的名词概念

降水及其物理过程:

大尺度凝结

积云对流

锋面气旋(稳定的层结抬升)

积云对流(气块绝热抬升)

中纬度

热带及副热带

多发晚间持续数天

多发午后持续数小时

不用参量化. 显式计算

复杂. 半经验.

由k分布判断压强 看k空间: 展宽大压强小