

陆面过程及其参数化研究

戴永久

北京师范大学

报告内容：

- 一、陆面在天气/气候系统中的重要性
- 二、陆面过程的参数化
- 三、陆面资料同化系统
- 四、人类活动与全球变化相互作用的定量研究方法

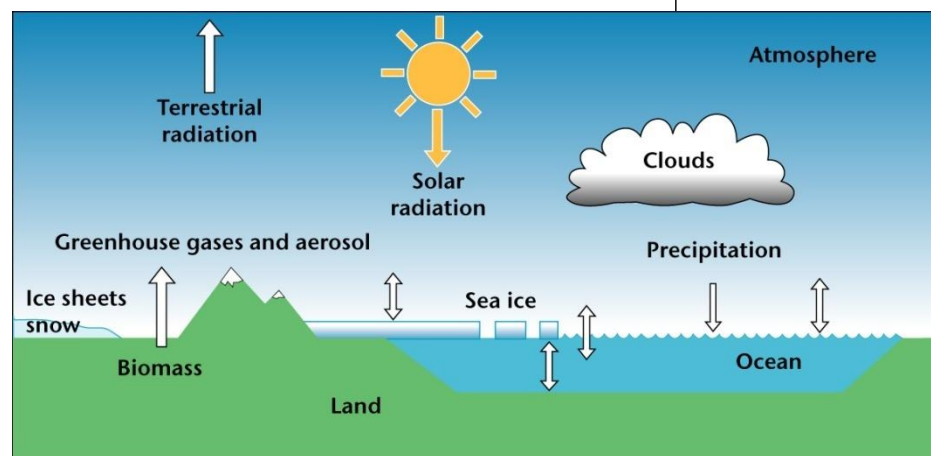
一、陆面在天气/气候系统中的重要性

什么是陆面过程？

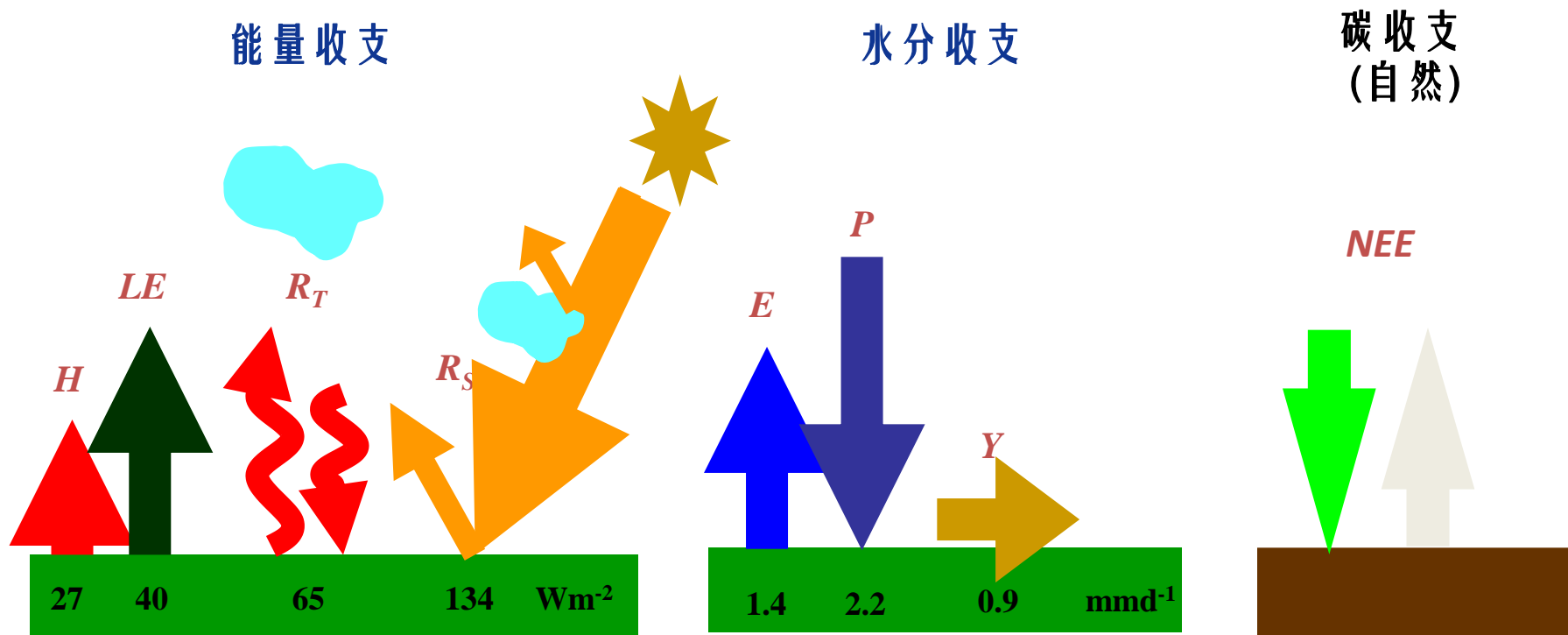
- 天气、气候或环境系统的重要组分：

- 陆面与近地表大气之间的动量、能量、水分、CO₂、挥发性碳（VOC）和其他微量气体；
- 陆面状态（即，土壤湿度、土壤温度、冠层温度、雪水当量）；
- 陆面特征（粗糙度、反照率、比辐射率、土壤质地、土壤养分、植被类型、覆盖比例、等）

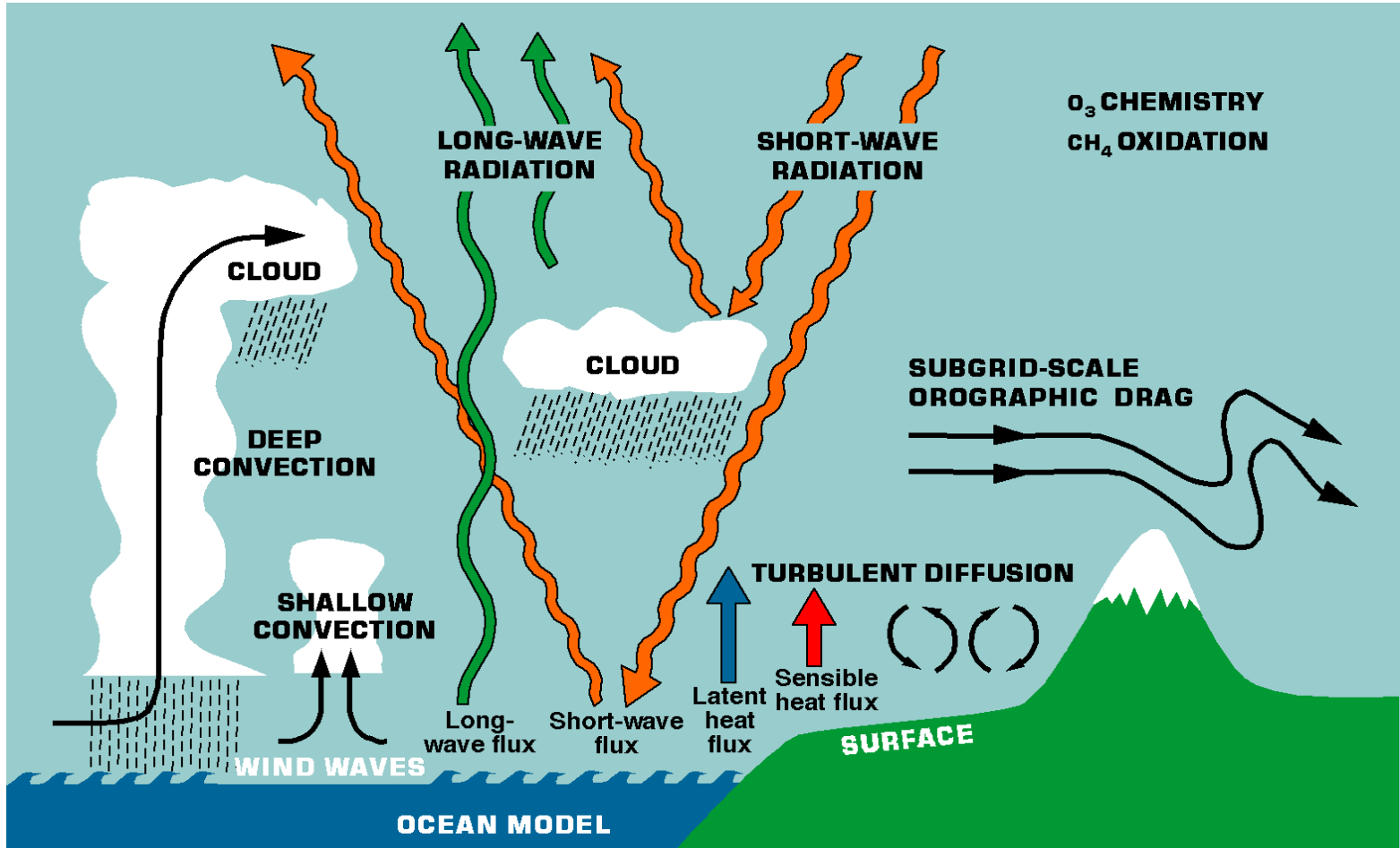
- 天气、气候、水文和环境预报关键因素。



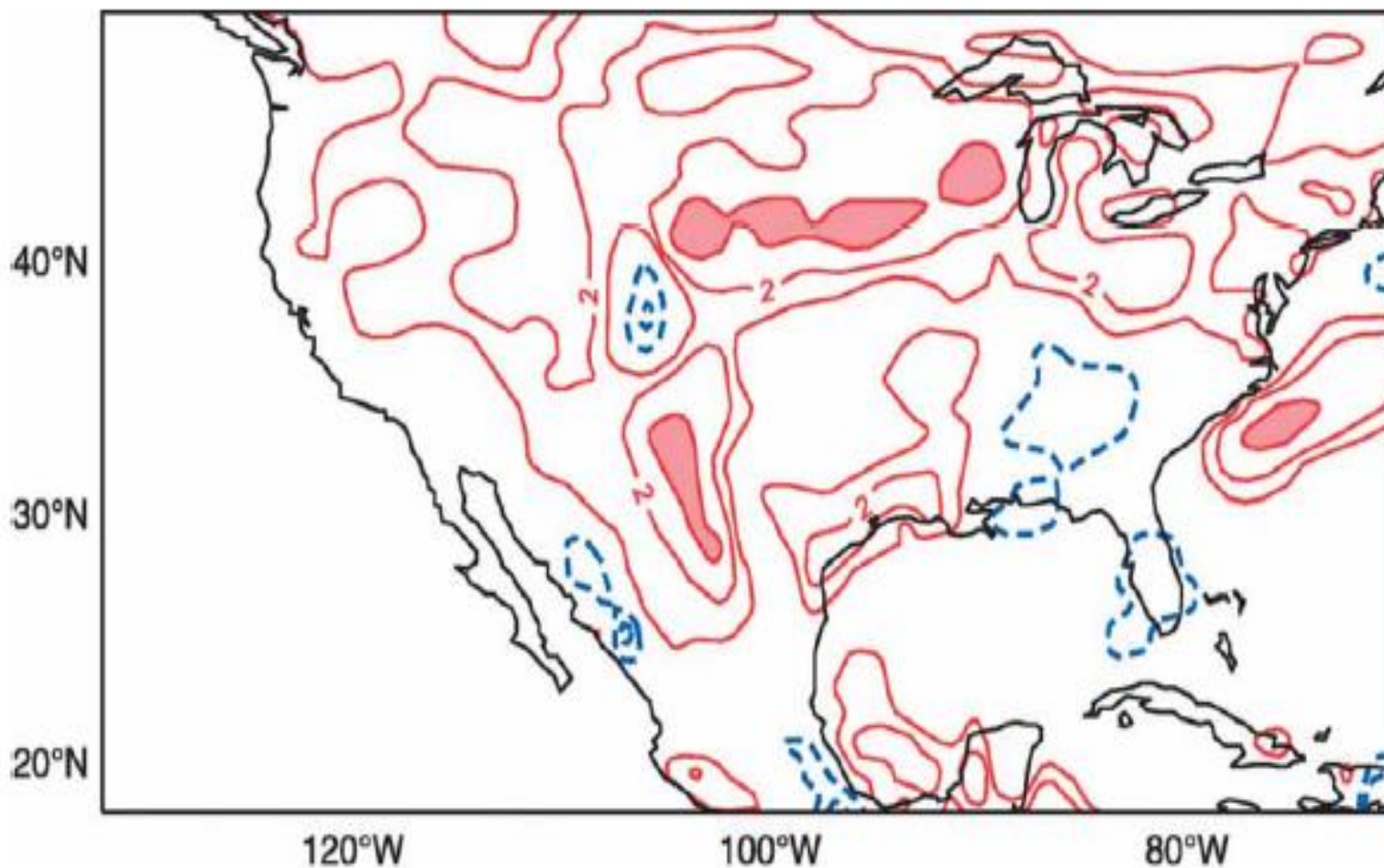
- 大气下边界。
大气运动基本方程的下边界条件。



• 陆面-大气相互作用

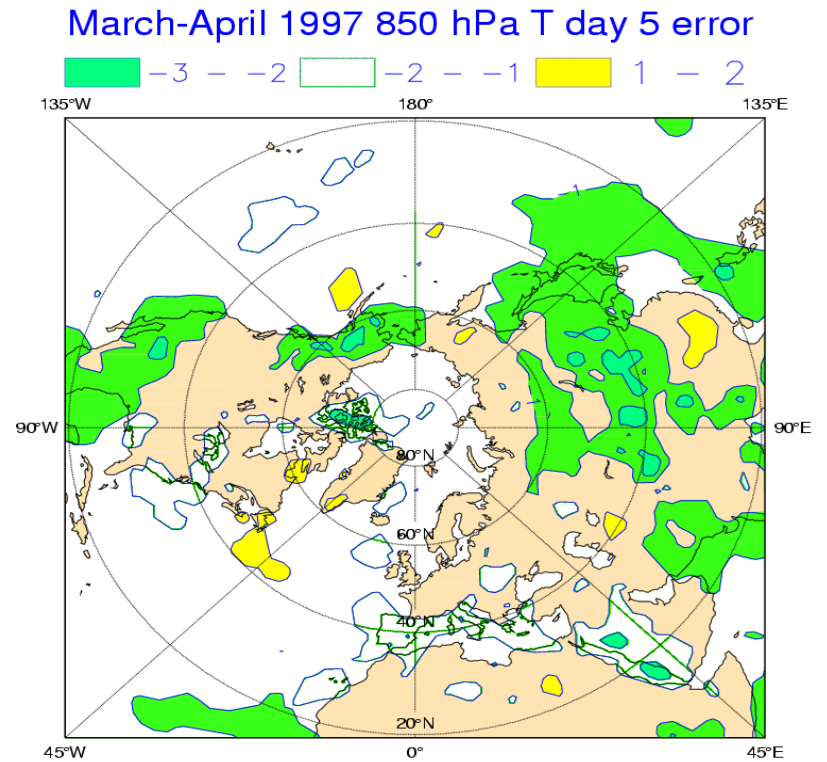
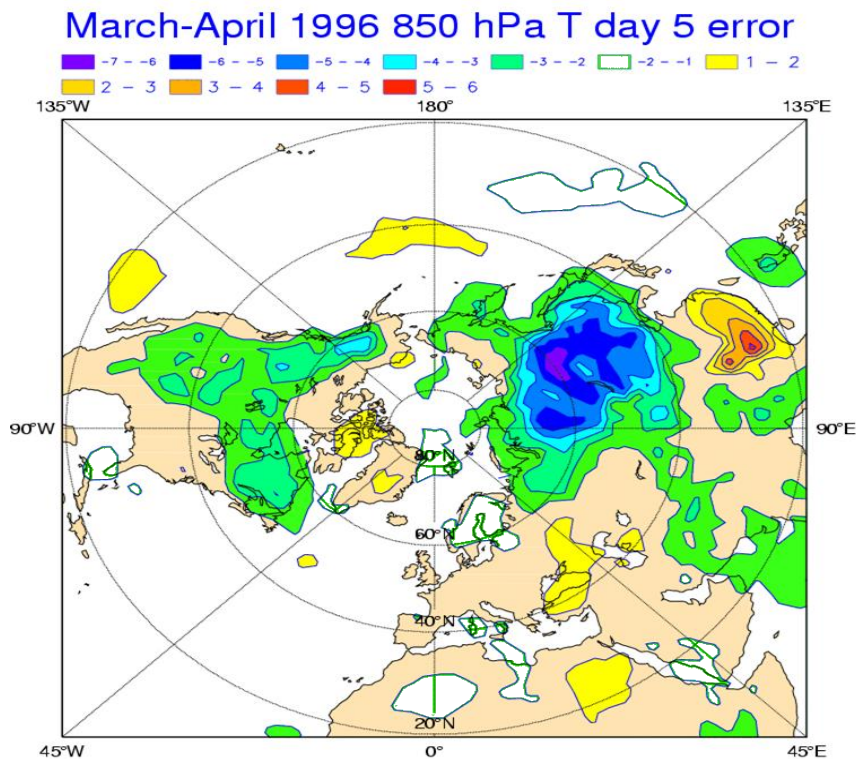


大陆尺度蒸发-降水反馈



初始土壤湿度“湿”和“干”导致30天后的大气降水的差别

返照率对低层大气温度的影响



- A smaller **albedo of snow** in the boreal forests reduces dramatically the **spring** (March-April) error in day 5 temperature at 850 hPa

什么是陆面过程模型？

陆面过程模型：

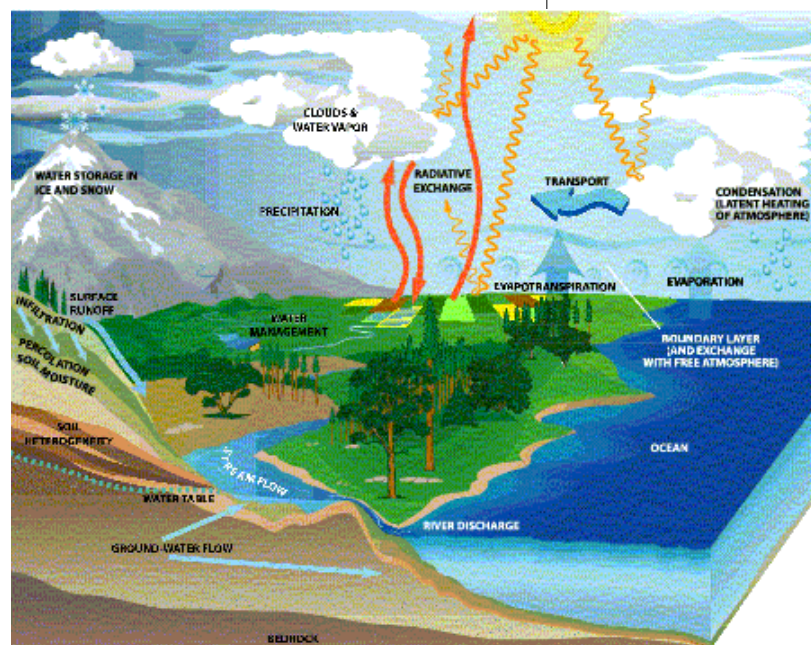
— 大气模型下边界条件

- 大气边界层模拟
- 气候模拟
- 数值天气预报
- 4-D 资料同化

— 水文模型的上边界条件

- 水资源估算
- 作物用水
- 径流模拟

— 大气/水文/生态模型的界面 面



为什么要进行参数化？

- 大尺度模型不能解析小尺度过程，即一些过程的空间尺度小于大尺度模型的模型网格尺度。
- 次网格过程对大尺度过程的影响只能统计表达。
- 次网格过程的表述 —— 参数化。

大气模型的尺度

	水平网格	垂直网格	时间跨度
● 气候模型	500 km	1000 m	100 yrs
● 全球天气预报模型	50 km	500 m	10 days
● 有限区域天气预报模型	10 km	500 m	2 days
● 云分辨率模型	500 m	500 m	1 day
● 大涡模型	50 m	50 m	5 hours

不同模型所需参数化方案的复杂程度不同

雷诺平均方程

位温方程:

$$\underbrace{\frac{\partial \Theta}{\partial t} + u \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v \frac{\partial \Theta}{\partial y} + w \frac{\partial \Theta}{\partial z}}_{\text{平流}} = \underbrace{Q}_{\text{源}} + \underbrace{\lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right)}_{\text{分子扩散}}$$

雷诺分解:

$$U = u + u', \quad V = v + v',$$

$$W = w + w', \quad \Theta = \theta + \theta'.$$

网格平均

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} =$$

$$Q + \frac{\partial}{\partial x} \left(-\overline{u'\theta'} + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\overline{v'\theta'} + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\overline{w'\theta'} + \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

Q : 源项 (即, 吸收/发射辐射或潜热)

$\overline{w'\theta'}$: 次网格 (雷诺应力) 输送项 (即, 湍流、对流)

二、陆面过程的参数化

服务天气预报模型的陆面模型

- 陆-气交换通量：
 - 热
 - 水
 - 辐射
 - 动量
- 生物物理的连贯性
- 网格物理量的可量测
 - 计算的有效性

服务气候模型的陆面模型

- 除包含天气模型的需求外，还需要：
- 生物地球化学，尤其是，影响大气CO₂的过程
- 土地利用及其变化，即农业
- 植被分布的变化

Common Land Model (CoLM)

预报变量与预报方程

T_c	冠层叶面平均温度 (K)
W_{dew}	冠层积水 (mm)
T_j	土壤和雪层温度 (K)
$W_{liq,j}$	土壤和雪层液态水含量 (kg m^{-2})
$W_{ice,j}$	土壤和雪层固态水含量 (kg m^{-2})
Δz_j	雪层厚度 ($j = \text{snl}+1, \dots, -1, 0$)

Prognostic state variables and the equations

Energy Balance

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=i,l,v,d} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k h_k dV = \sum_{k=i,l,v} \int_S U_k h_k \cdot dS + \int_S \lambda \nabla T \cdot dS + \int_{\Delta V} R dV$$

Rate of change
in stored heat

Convection

Conduction

Radiation

where

- ρ_k Intrinsic density of constituent,
- θ_k Partial volume of constituent,
- h_k Specific enthalpy for three water phases and dry soil,
- U_k Mass flux,
- λ Thermal conductivity,
- R Radiation,
- d, i, l, v (for dry soil, ice, liquid and vapor)

Prognostic state variables and the equations

Water Balance

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Delta V} \rho_k \theta_k dV = - \int_S \mathbf{U}_k \cdot d\mathbf{S} + \sum_{k'} \int_{\Delta V} M_{k'k} (1 - \delta_{k'k}) dV + \int_{\Delta V} S_k dV$$

Time rate
sinks

Mass flow

Phase change

Sources or

of mass change

where

ρ_k Intrinsic density of constituent

θ_k Partial volume of constituent

\mathbf{U}_k Mass flux

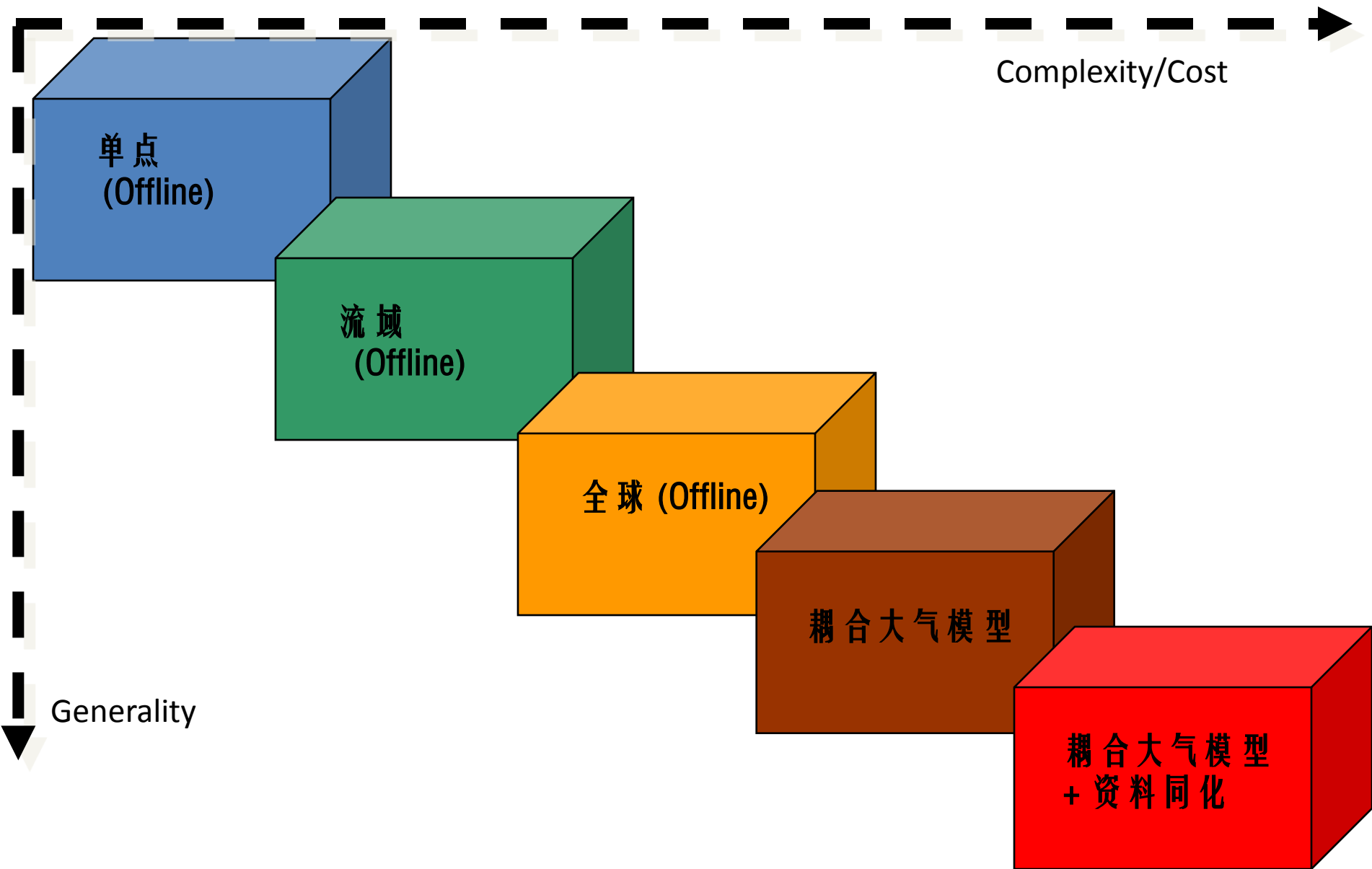
$M_{k'k}$ Phase change from phase k' to phase k

$\delta_{k'k}$ Kronecker delta

S_k Source or sink term

d, i, l, v (for dry soil, ice, liquid and vapor)

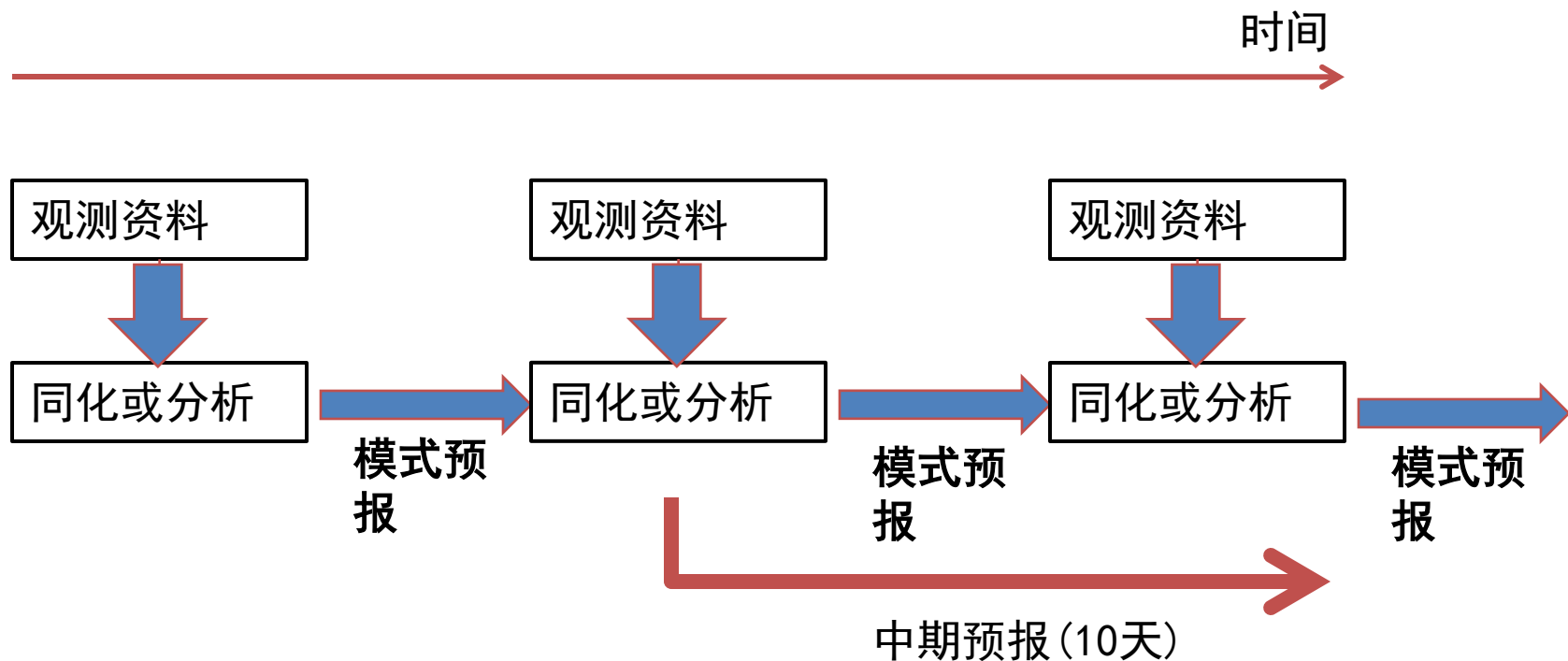
模型验证



三、陆面资料同化系统

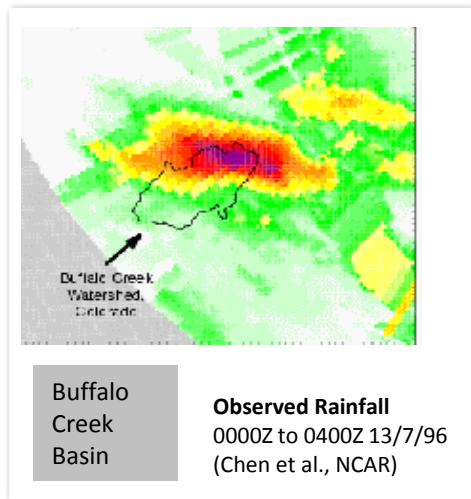
陆面资料同化系统的建立目的是：

为预报模式提供尽可能的准确的 陆地初始场(土壤湿度、地表温度等)、模式参数、气象驱动场(u、T、q、Pr、SW、LW、Ps) 的质量。



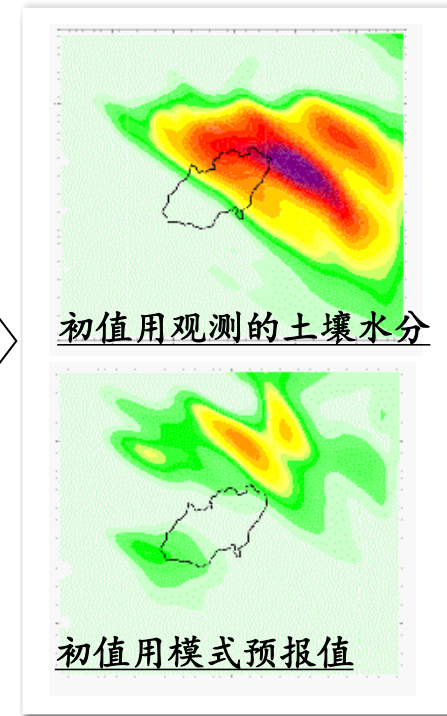
土壤水分对天气预报的影响 (1)

观测降水:

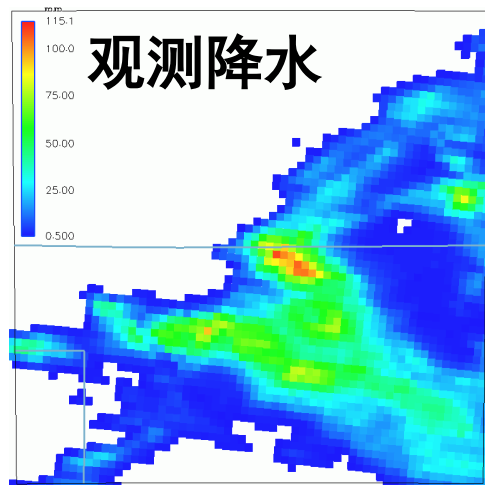


24-小时的模式预报

模式预报的降水:

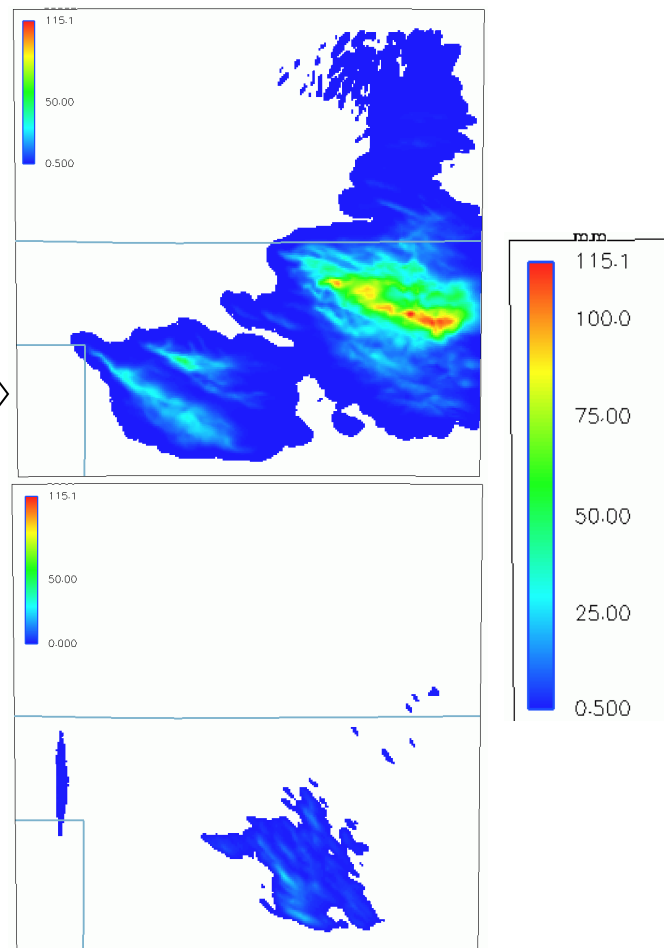


土壤水分对天气预报的影响(2)



12小时模式
预报

初值用同化的土壤水分



用LIS同化的土壤水分作初值能较大程度改进预报结果

初值没有用同化的土壤水分

- 陆面资料同化系统，可改善天气模式陆面状态的初始化精度，可提高天气模式中/短期天气预报质量。

研究内容：

1. 全球土壤/土地覆盖/植被叶面积指数资料集；
2. 融合观测信息的陆面气象驱动场；
3. 卫星和地面观测资料同化方法；
4. 天气模式陆面数据同化系统。

同化算法

$$\mathbf{x}^a = \mathbf{x}^b + \mathbf{B}\mathbf{H}^T \left[\mathbf{H}\mathbf{B}\mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right]^{-1} \left[\mathbf{y} - H(\mathbf{x}^b) \right]$$

观测算子

- 初始值（土壤湿度、表面温度、雪）
- 陆面参数（植被/土壤/返照率/比辐射率/地形）
- 气象驱动
- 陆面模式

扰动气象驱动

陆面模式

扰动初始状态

扰动模式参数

集合

目前可用的（或可获得的）土壤剖面资料

WISE-2土壤剖面的地理分布：

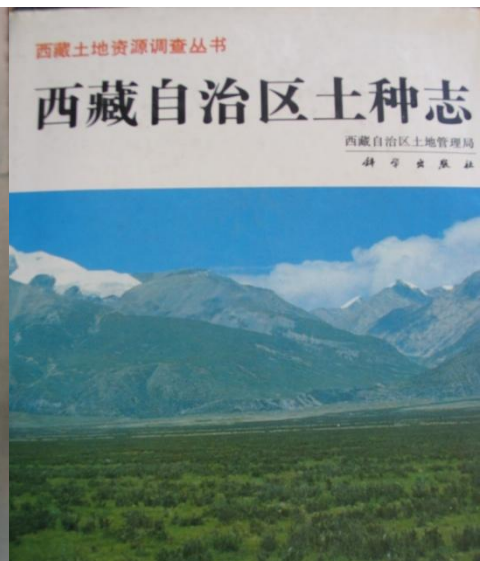
非洲：	3998；
澳大利亚和太平洋岛国：	147；
中国、印度、印度尼西亚和菲律宾：	628 ；
欧洲：	1204；
北美：	326；
南美和加勒比岛国：	2115；
西南和北亚(西北利亚)：	1113；
总剖面数：	9607

目前用于气候模型的中国大陆地区的土壤数据：数小于**60**个剖面 \Leftrightarrow **1:1,000,000** 中国土壤图。

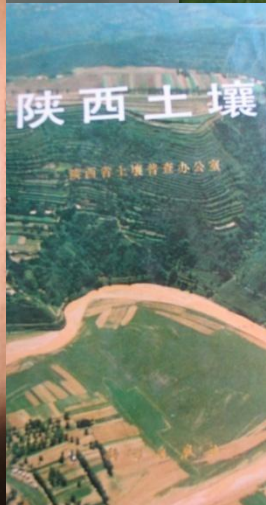
(FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2009. *Harmonized World Soil Database (version 1.1)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.)

TMS 土壤数据源

- ~9000 土壤剖面(数字化全国第二次土壤调查)

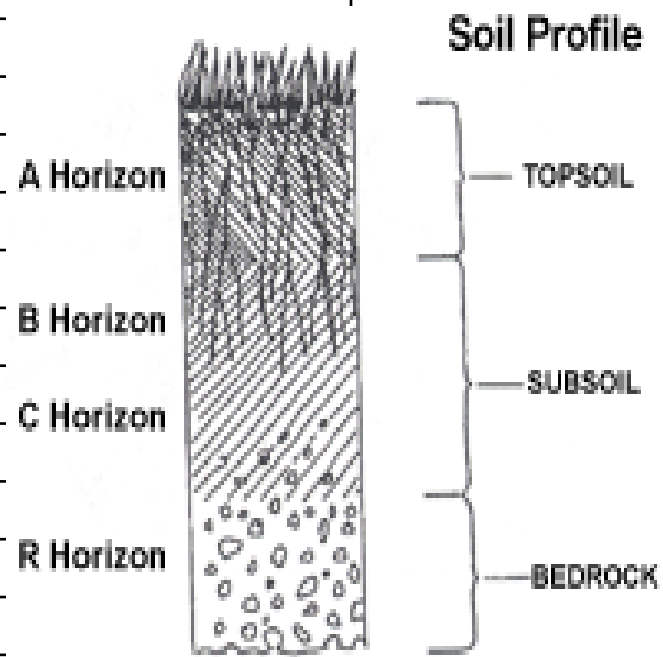


- 1:1 000 000 比例尺的中国土壤类型图。

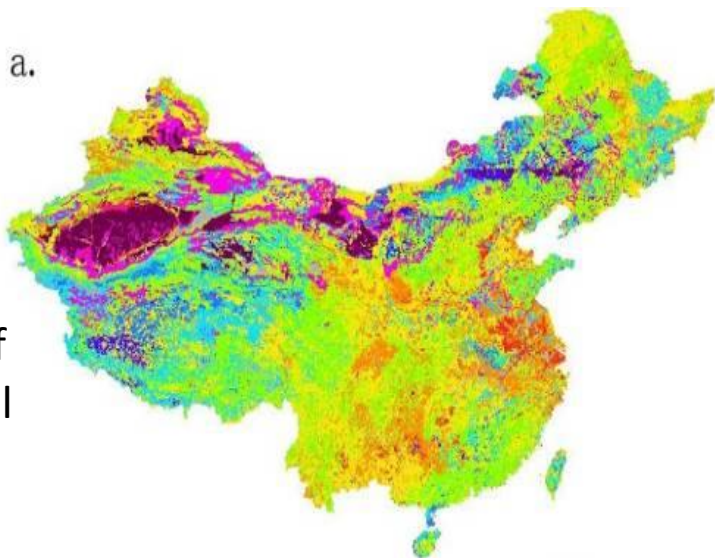


Dai Y, Shangguan W, Liu B, and Coauthors, 2011: **A China dataset of soil properties for land surface modeling.** (to be submitted to Global Biogeochemical Cycles)

1	Horizon Thickness (cm)
2	Soil Texture
3	Bulk Density
4	Particle-Size Fraction % (0.05 - 2.0 mm)
5	Particle-Size Fraction % (0.002 - 0.05mm)
6	Particle-Size Fraction % (< 0.002 mm)
7	Organic Matter Fraction (%)
8	Total N (%)
9	Total P (%)
10	Total K (%)
11	Available P (mg/kg)
12	Available K (mg/kg)
13	pH Value (H ₂ O)
14	Exchangeable H ⁺ (me/100g)
15	Exchangeable Al ³⁺ (me/100g)
16	Exchangeable Ca ²⁺ (me/100g)
17	Exchangeable Mg ²⁺ (me/100g)
18	Exchangeable K ⁺ (me/100g)
19	Exchangeable Na ⁺ (me/100g)
20	Cation Exchange Capacity (CEC) (me/100g)
21	Color
22	Structure
23	Consistence

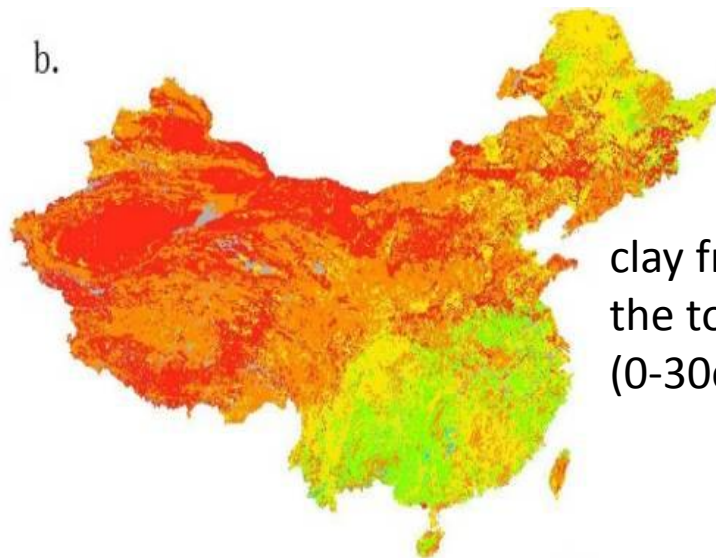


a.



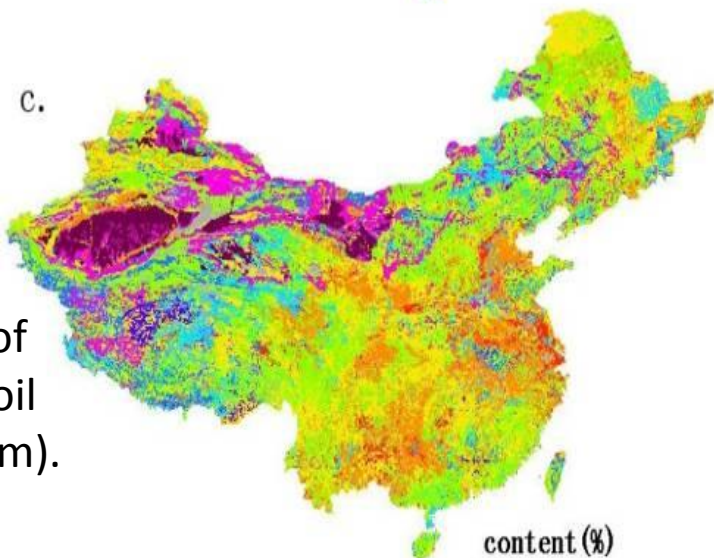
sand fraction of the topsoil (0-30cm)

b.



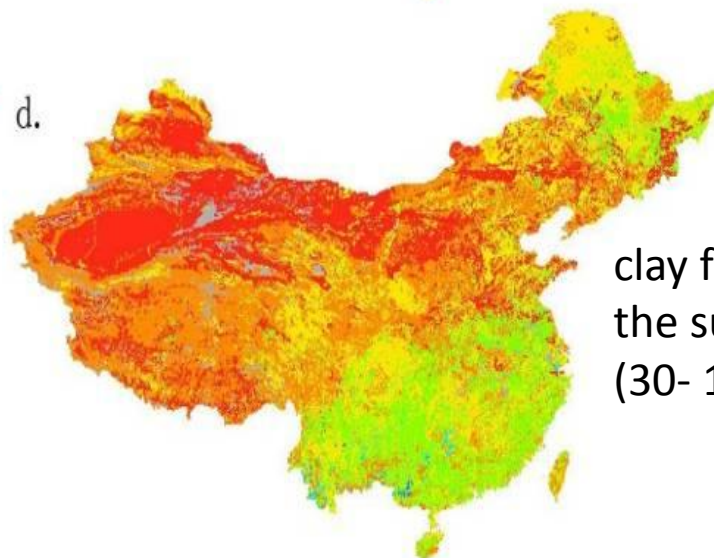
clay fraction of the topsoil (0-30cm)

c.



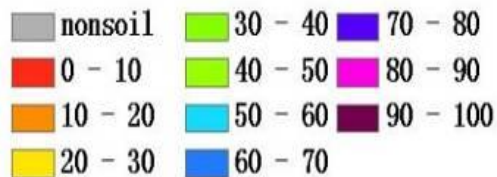
sand fraction of the subsoil (30-100cm).

d.



clay fraction of the subsoil (30- 100cm).

content (%)



Soil Hydraulic Parameters:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h(\theta)}{\partial z} - 1 \right) \right] - S(\theta)$$

Richards equation

$$\psi = \psi_s (\theta / \theta_s)^{-1/\lambda}$$
$$K(\theta) = K_s (\theta / \theta_s)^{(3+2/\lambda)}$$

Functions by Clapp and Hornberger (1978)

K_s = saturated hydraulic conductivity (cm/d)

θ_s = saturated water content (cm³/cm³)

ψ_s = saturated capillary potential (cm)

λ = pore-size distribution index

θ_{33} = Field capacity (cm³/cm³)

θ_{1500} = Permanent wilting point (cm³/cm³)

The parameters were estimated from multiple Pedotransfer Functions (PTFs) as the functions of the percentages of sand, silt and clay, organic matter and bulk density of the profiles.

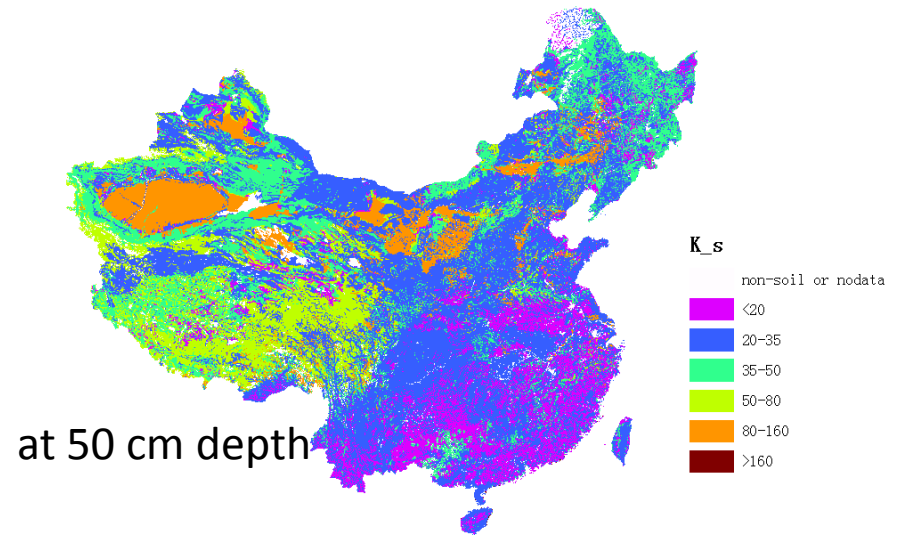
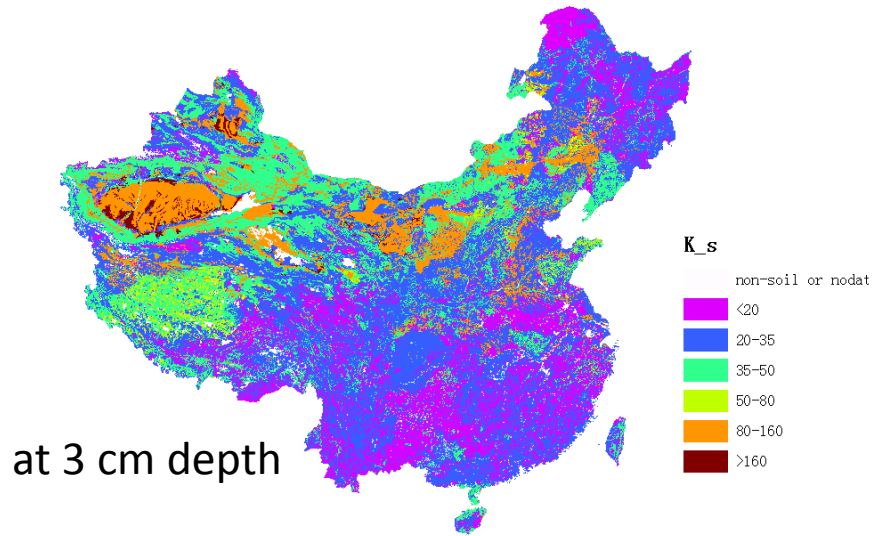
20 PTFs for K_s

15 PTFs for ψ_s , λ , θ_s , θ_{33} , θ_{1500} , respectively

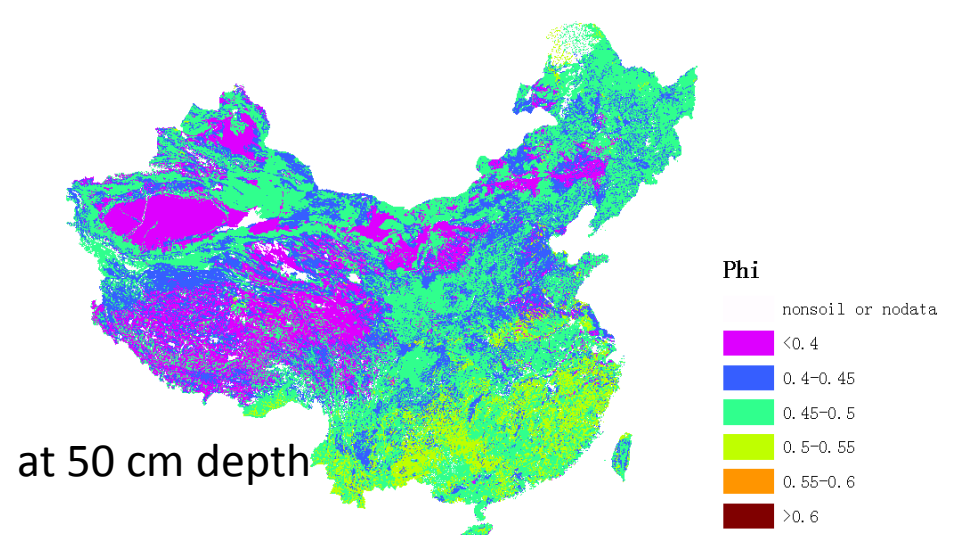
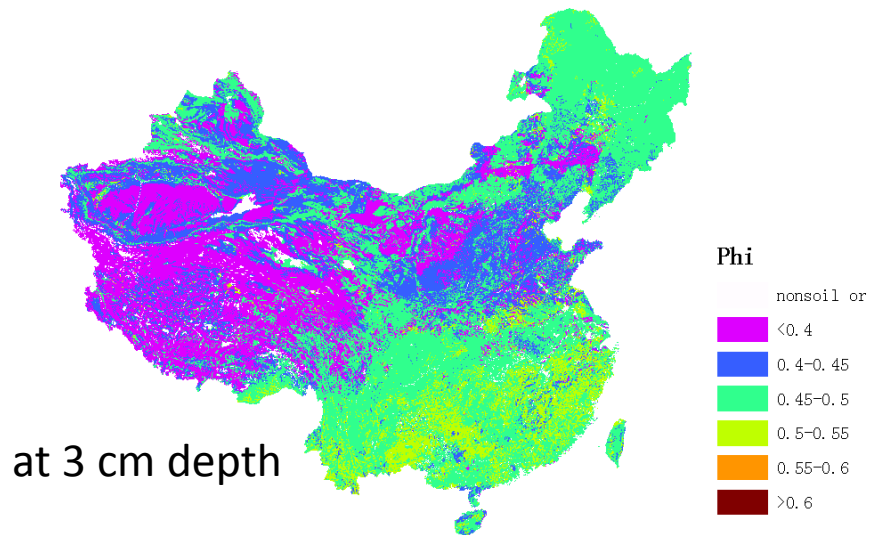
Output: Median, Individual PTF value

Dai Y, Shangguan W, Liu B, Duan Q and Coauthors, 2011: **Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling.** (to be submitted to Journal of Hydrometeorology)

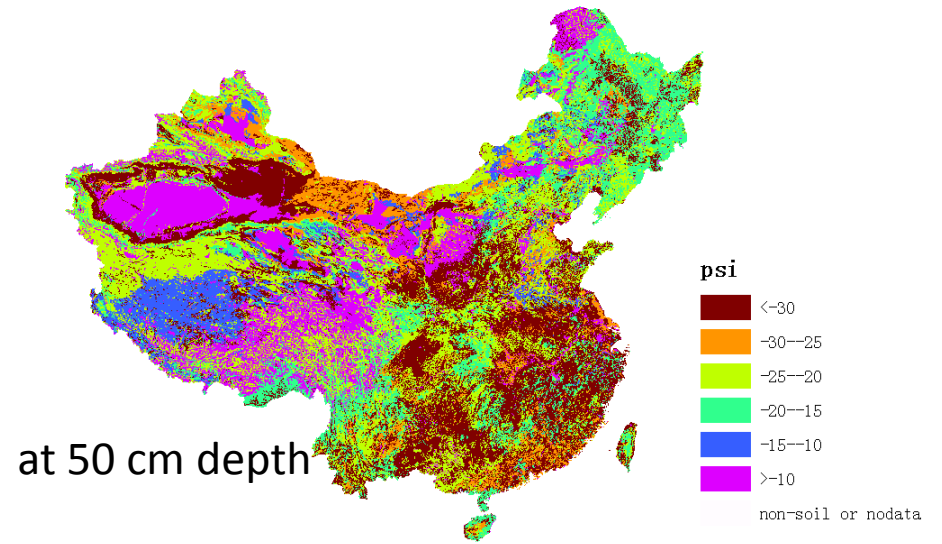
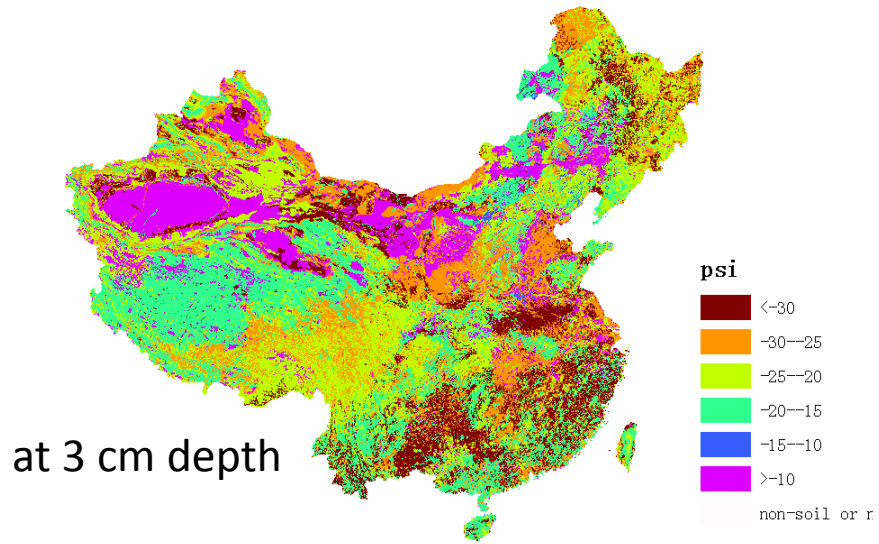
Saturated Hydraulic Conductivity (cm/d)



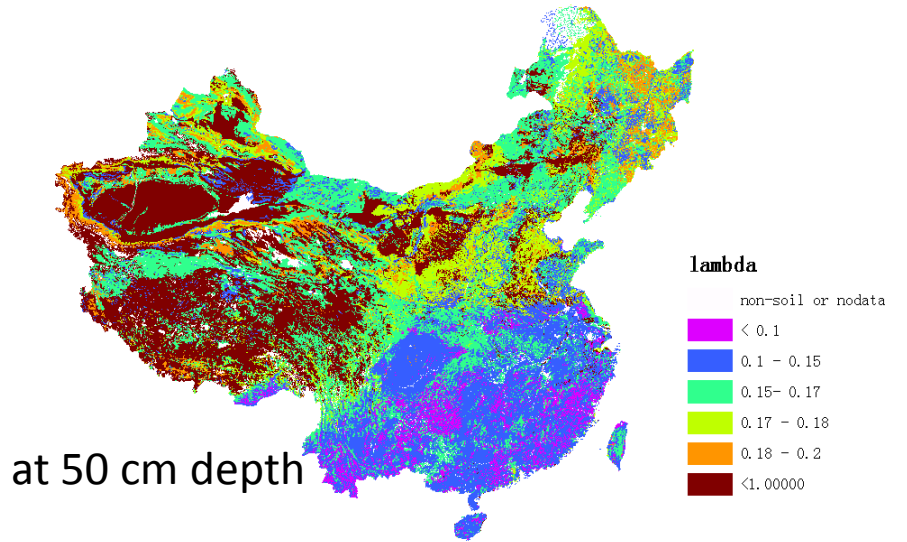
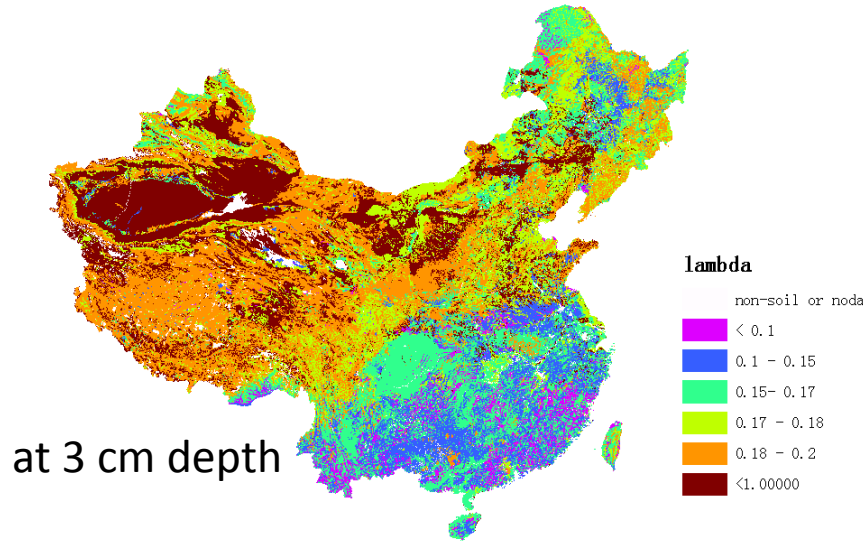
Saturated Water Content (cm³/cm³)



Saturated Capillary Potential (cm)

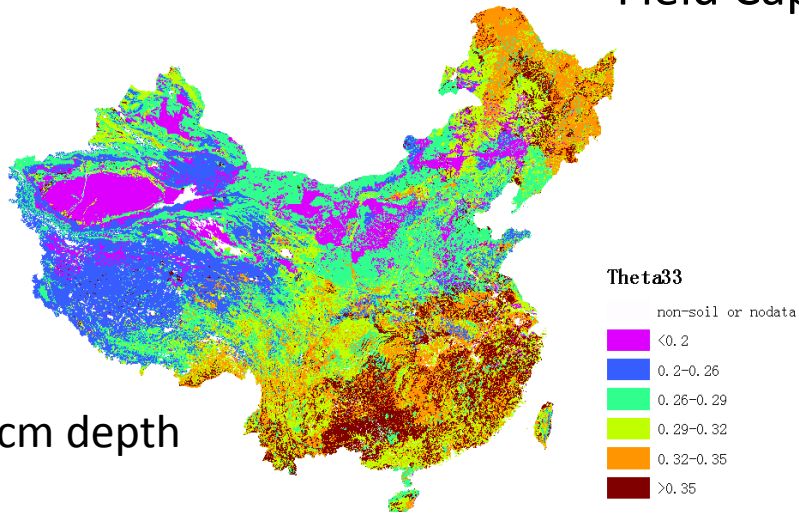


Pore-Size Distribution Index

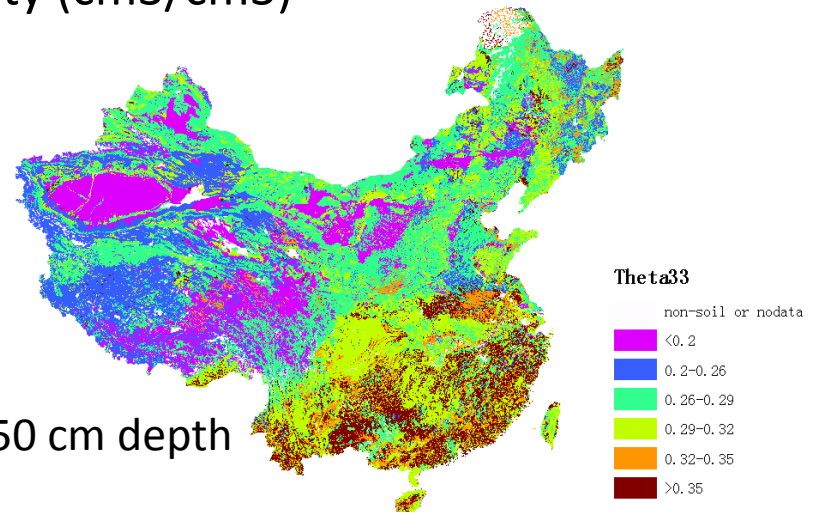


Field Capacity (cm³/cm³)

at 3 cm depth

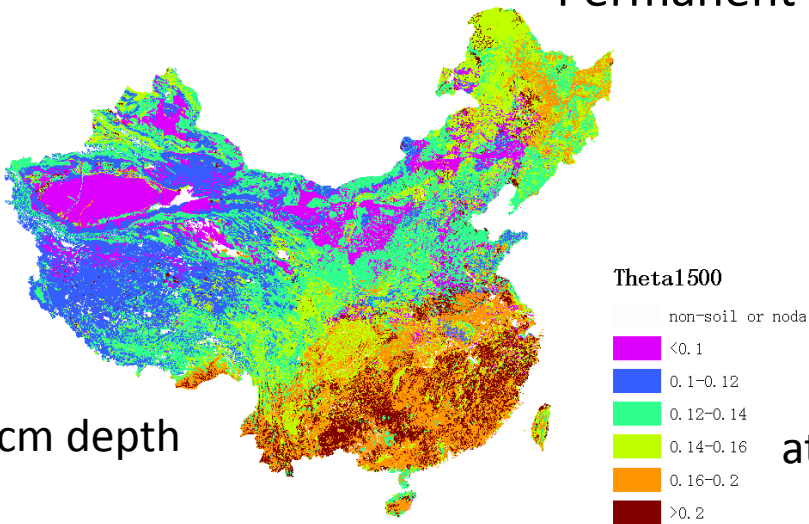


at 50 cm depth

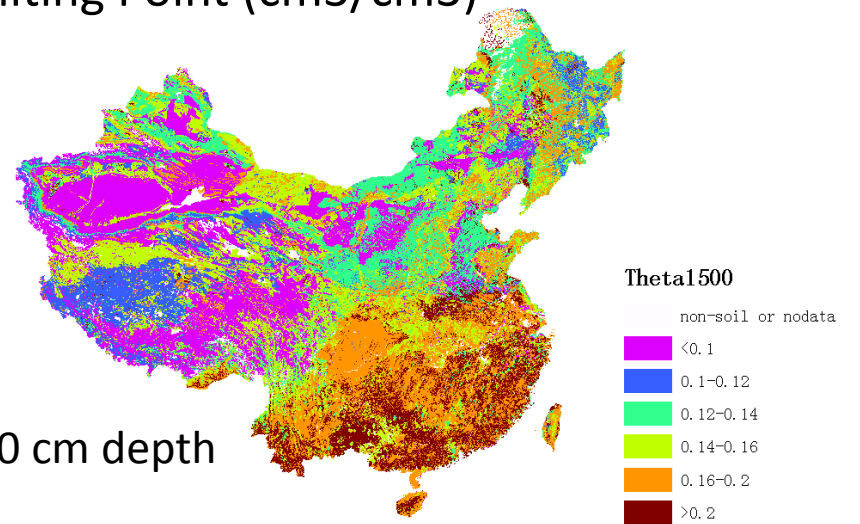


Permanent Wilting Point (cm³/cm³)

at 3 cm depth



at 50 cm depth



全球土壤资料集

- Harmonized World Soil Database (全球、1km x 1km)
- 中国土壤资料集
- 土壤质地
- 土壤营养元素(生物地球化学)
- 土壤土体厚度

全球土地覆盖资料集

- 欧洲GlobalCover(全球、1km x 1km)
- 中国植被资料(1:1,000,000)
- 863项目全球土地覆盖/利用数据。

LAI资料背景介绍(1)

• 全球四大主要LAI产品

产品	空间分辨率	时间分辨率	时间跨度	主要算法	参考
CYCLOPES (V3.1) (SPOT/VEG)	1/112°	10天	1999~ 2003	一维辐射传输模型(SAIL)	Baret et al. [2007]
ECOCLIMAP (2006) (NOAA/AVHRR)	1km	1个月	-	经验算法 (以DNVI变化为基础)	Masson et al. [2003]
GLOBCARBON (V1) (SPOT/VEG, ENVISAT/AATSR)	1km	10天	1998~ 2006	植被指数与LAI关系	Deng et al. [2006]
MODIS (C5) (TERRA/MODIS,MISR)	1km	8天	2000.2~ 今	主算法: 三维辐射传输模型 备用算法: NDVI与LAI经验关系	Knyazikhin et al. [1998] Yang et al. [2006]

• MODIS LAI产品优点

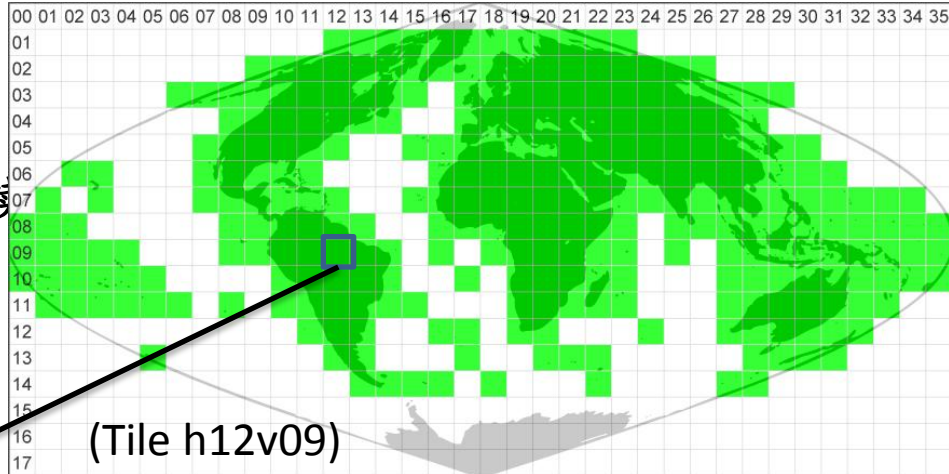
- 时间序列较长
- 地面验证工作多
- 产品算法多次更新(目前为C5版本, 2006年)
- 产品发布快, 方便获取

由于以上原因, 我们选取**MODIS LAI**资料作为我们产品改进对象。

LAI资料背景介绍(2)

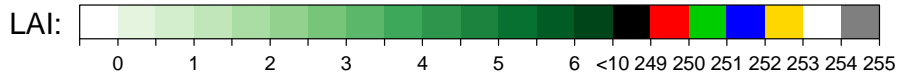
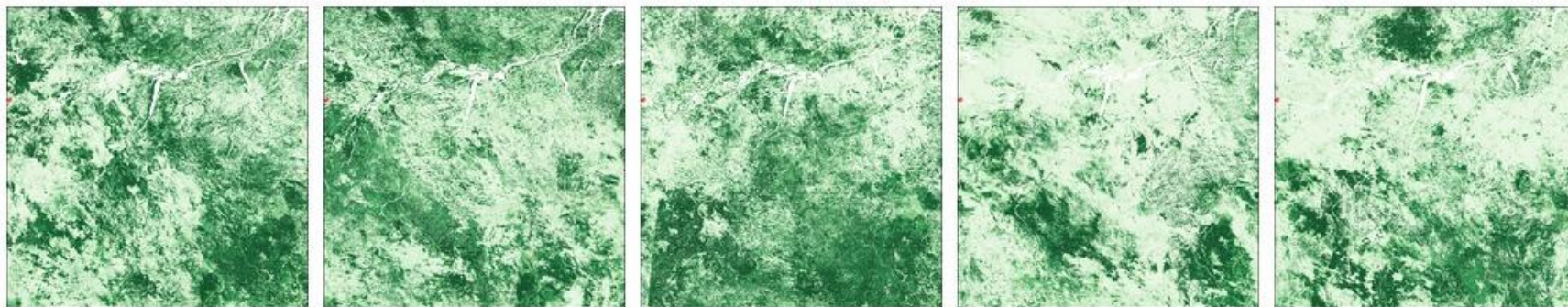
- MODIS LAI 产品不足——时空不连续

- 云的出现
- 雪的覆盖
- 传感器观测角度及自身故障
- 算法本身的不确定性

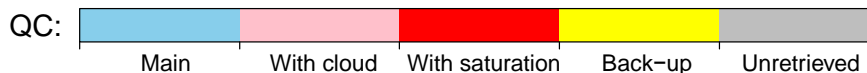
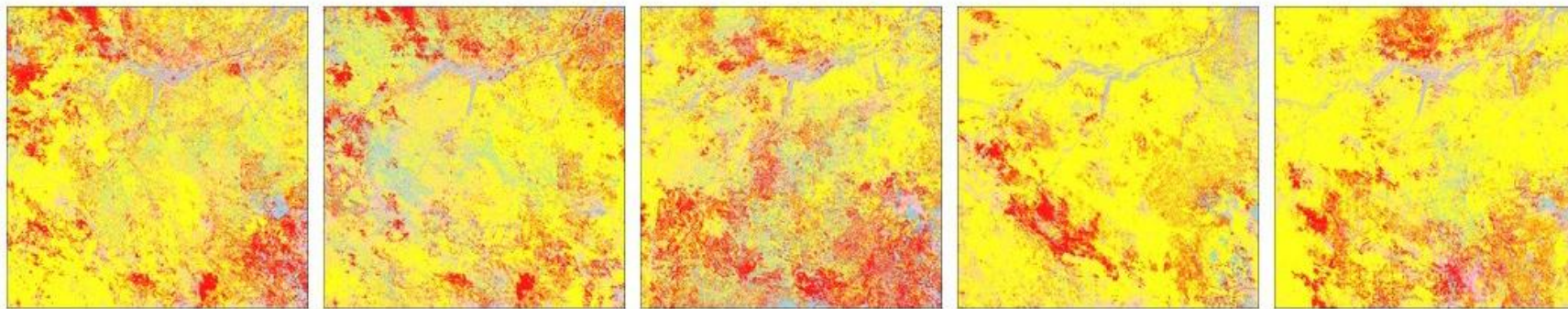


year 2008, day 361 year 2009, day 001 year 2009, day 009 year 2009, day 017 year 2009, day 025

MODIS



QC



方法

• 第一步

- 利用改进的时空滤波 (TSF) 方法 (mTSF) 对 MODIS LAI 进行处理。
 - 计算背景值
 - 填充观测值
 - Cressman 分析 (一种简单的一维同化方法)
- Cressman 分析 (Cressman, 1959)

$$x_a(r_i) = x_b(r_i) + \frac{\sum_{j=1}^n w(r_i, r_j) [x_o(r_j) - x_b(r_j)]}{\sum_{j=1}^n w(r_i, r_j)}$$

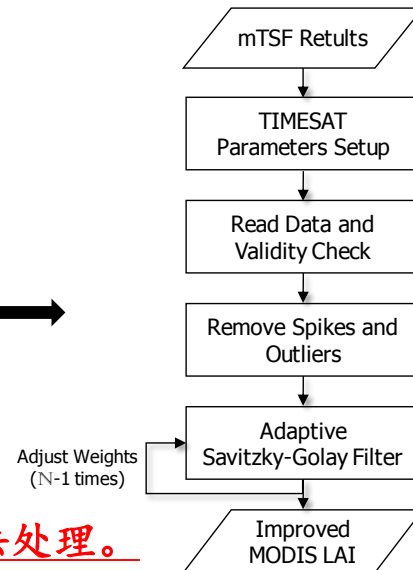
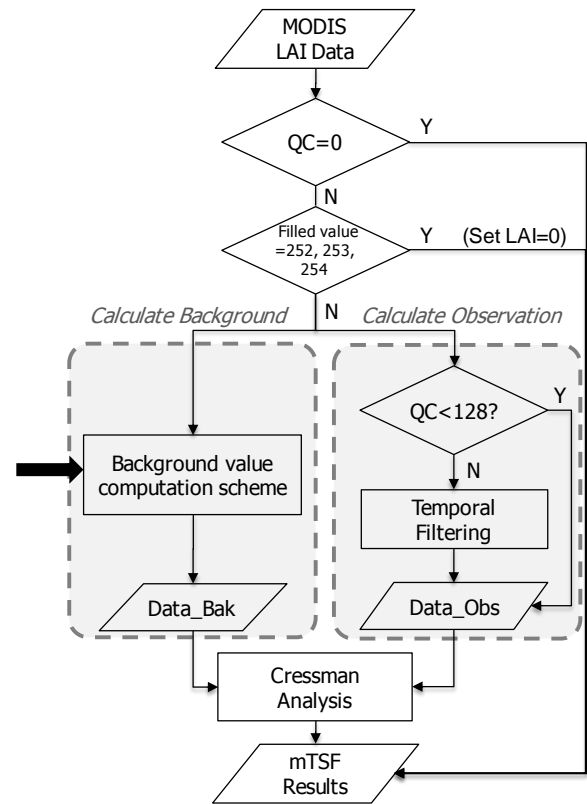
$$w(r_i, r_j) = \max\left(0, \frac{R^2 - d_{i,j}^2}{R^2 + d_{i,j}^2}\right)$$

• 第二步

- 利用 TIMESAT Savitzky-Golay (SG) 滤波对 mTSF 的结果进行平滑处理
- SG 滤波 (Savitzky and Golay, 1964)

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N}$$

➤ 对 10 年的 MODIS LAI (MOD15A2) 全球数据进行以上方法处理。



陆面模式气象驱动场 (t, p, h)

$$\hat{t}_i = f_i(x, y) + \alpha_i z + \beta_i \hat{t}_{i-1}$$

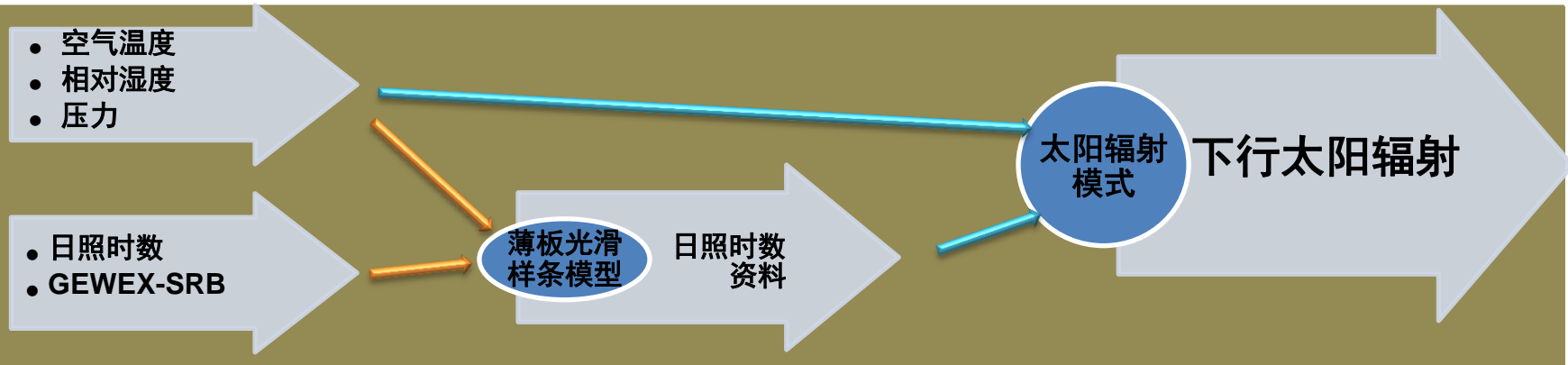
$$\hat{p}_i = f_i(x, y) + \alpha_i \exp(b_i z) + \beta_i \hat{p}_{i-1}$$

$$\ln\left(\frac{\hat{h}_i}{1 - \hat{h}_i}\right) = f_i(x, y) + \beta_i \ln\left(\frac{\hat{h}_{i-1}}{1 - \hat{h}_{i-1}}\right)$$

预报误差(CV-RMSE)

	3 hourly without β_i	3 hourly with β_i	Estimate daily mean with β_i
t	2.0°C	1.5°C	0.7°C
p	4.0hPa	2.0hPa	1.8hPa
h	11.7%	5.3%	1.5%

陆面模式气象驱动场 (sw)



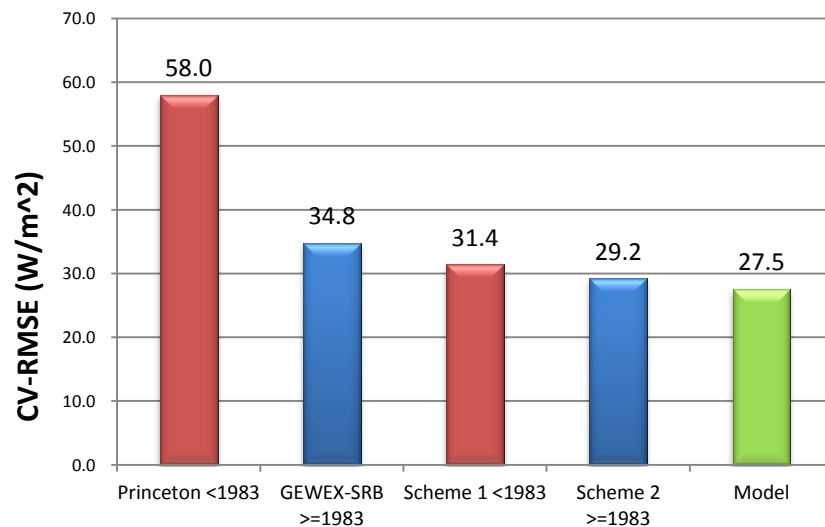
$$\hat{o}_d = f_d(x, y) + \alpha_d F_1(\hat{t}) + \beta_d F_2(\hat{h}) + \gamma_d F_3(GEWEX)$$

Scheme 2

$$F_1(\hat{t}) = \hat{t}_{max,d} - \hat{t}_{min,d}$$

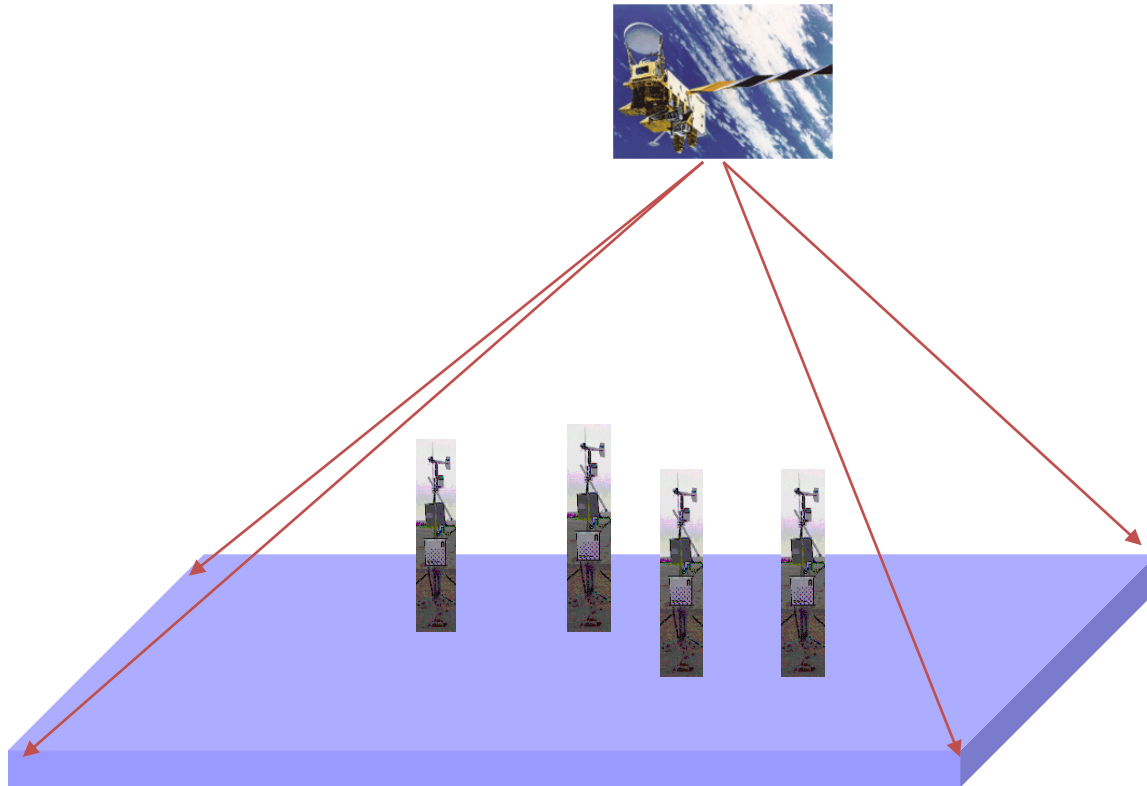
$$F_2(\hat{h}) = \frac{1 - \exp\{-2.34(1 - \hat{h}_d)\}}{1 - \exp\{-2.34\}}$$

$$F_3(GEWEX) = \frac{Total_d}{ClearSky_d}$$

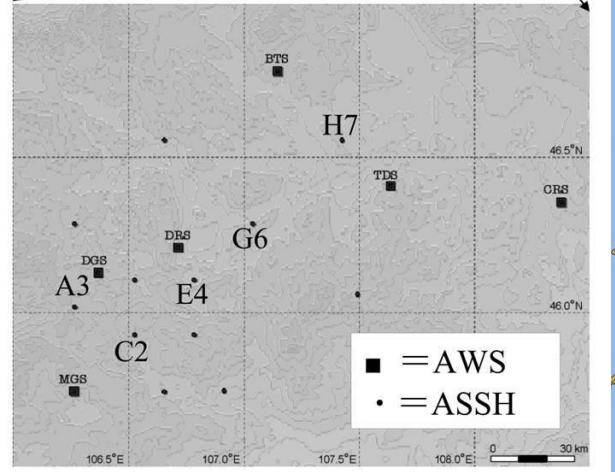
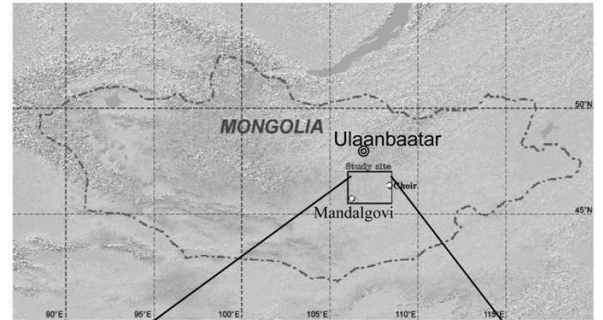
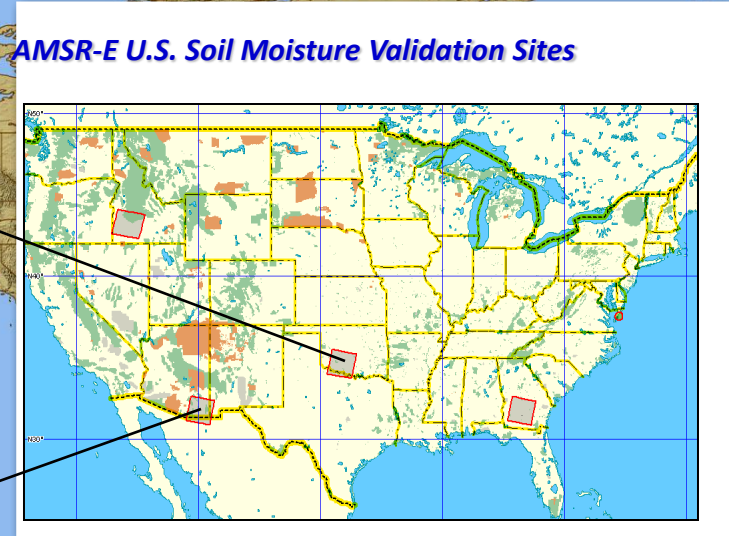
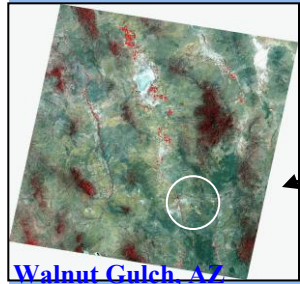
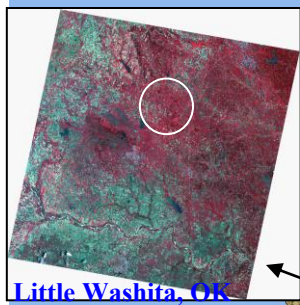


评估数据同化土壤水分的基本思路

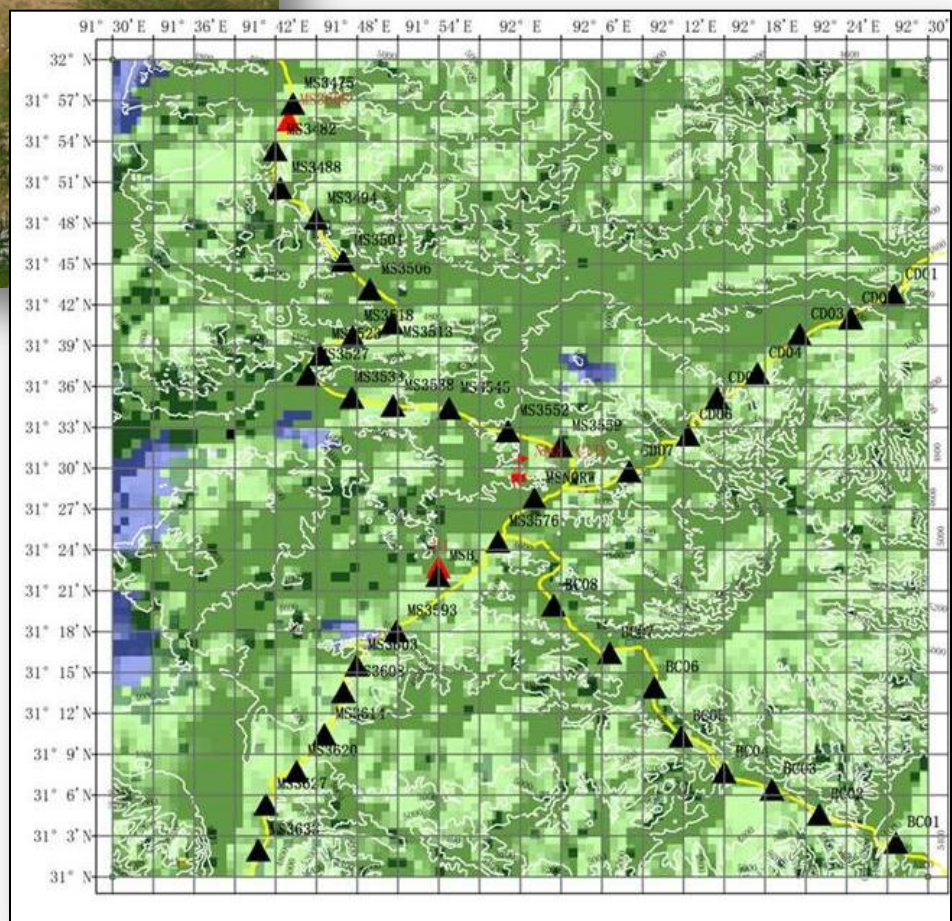
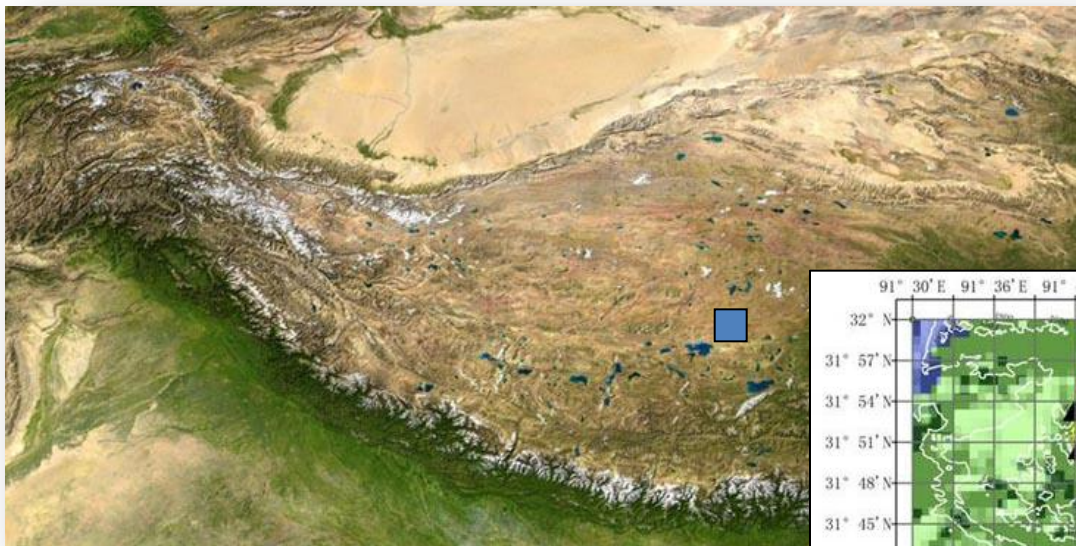
- 土壤水分的空间变异性很大，在一个像元内必须布置大量的观测点才有可能获取对应卫星影像像元尺度的土壤水分真值



收集土壤水分集中观测网

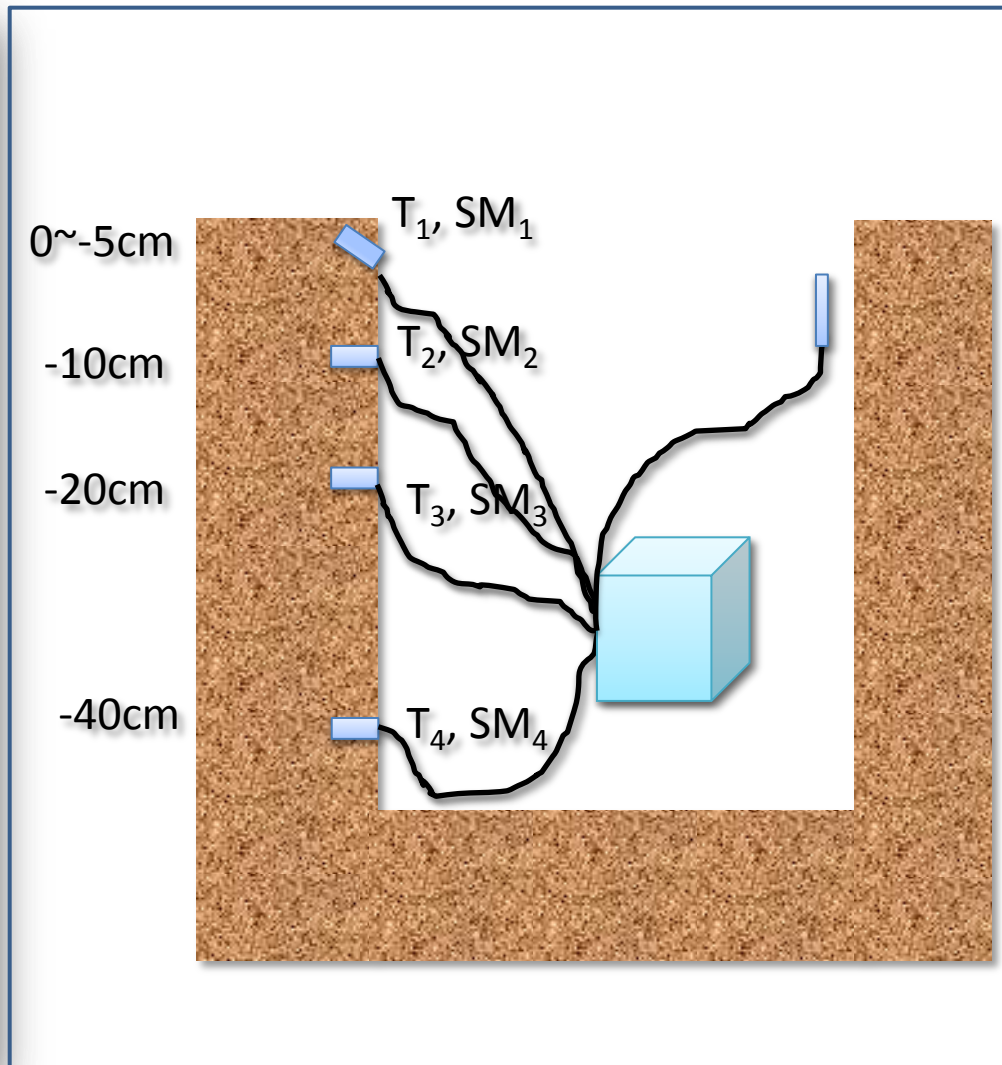


建立青藏高原土壤水分网

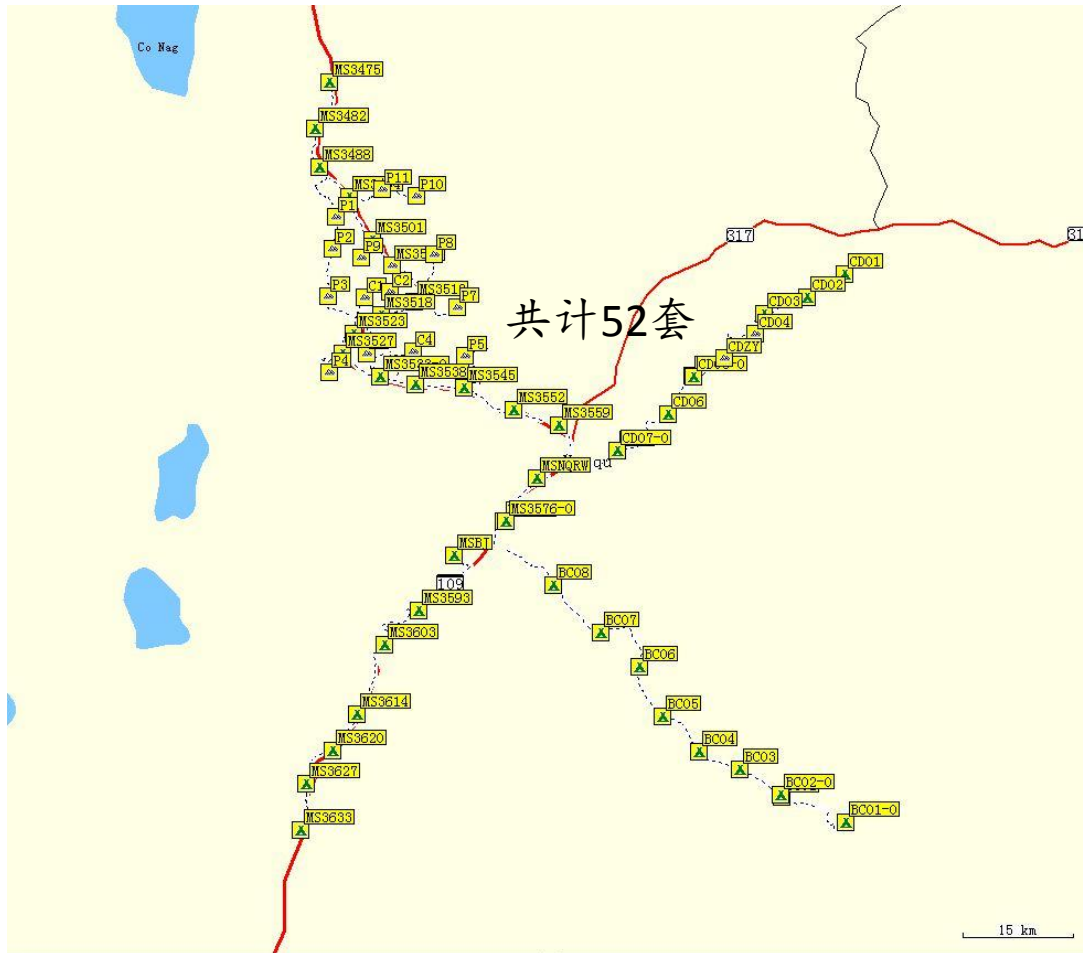


2010年设置39套

每一个观测站设置四层温湿度观测



2011年获取31个观测站的一年完整数据，另外八套受损。另外新安装21套，目前共计52个观测站正常工作。



本项目实行期间（2012-2013），预计购置30套仪器，用于观测网的更新

