

《遥感在水循环研究中的作用》

施建成

遥感科学国家重点实验室

2012年12月3日

中科院遥感应用研究所



北京师范大学



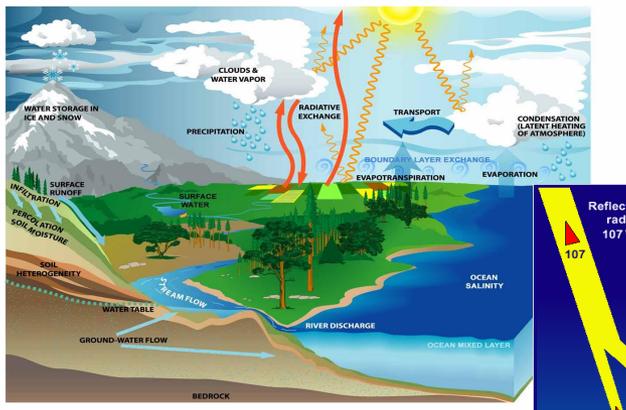
报告提纲

1. 水循环研究的重要性及面临的问题
2. 目前水循环遥感的研究现状及面临的问题
3. 土壤水分和积雪遥感研究实例
4. 总体发展方向

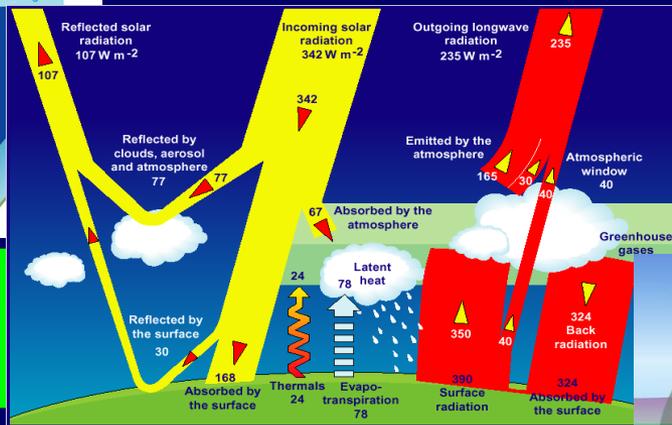
地球系统科学及关键循环系统

三大循环系统及有效观测是关键

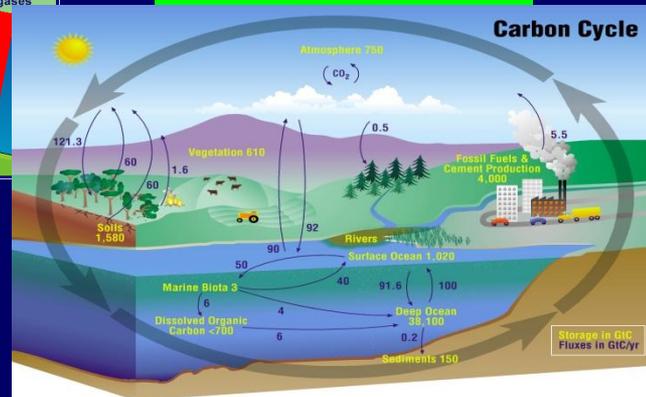
水循环系统



辐射循环及能量平衡系统



生态循环系统



1. 必需打破各学科互不交叉的现状
2. 必需改进并形成系统的观测能力



生物圈

水圈

岩石圈

人类

冰雪圈

研究水循环的重要性

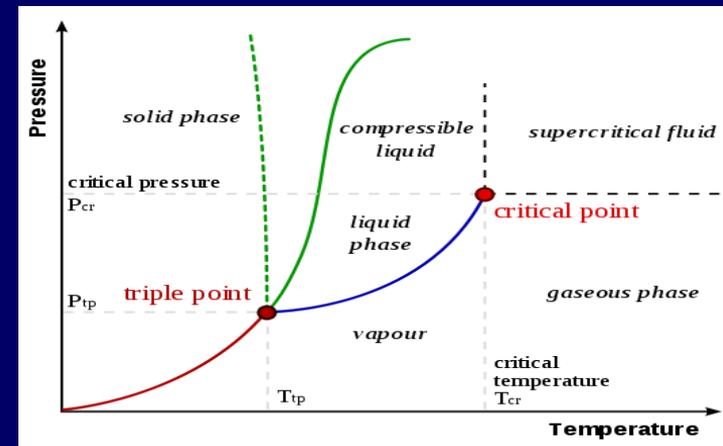
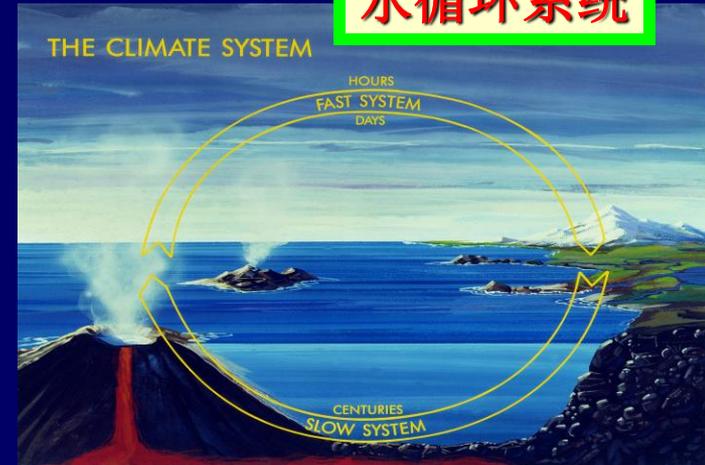
水：是生命之源、生产之要、生态之基

水循环过程：是水文、水资源、气候变化和天气预报等的基础和关键过程。它包括了所有与水有关的过程。是地球系统中的一个最重要的循环系统

气候变化与水循环：热力学（克劳修斯—克拉珀龙）基本原理：饱和水汽压（大气含水能力）和温度的变化关系大约为 6—7% 每增加 1 度

期待结果（全球）：小雨减少，大暴雨增加，蒸散发增加，加快水循环过程的速度。气候变化最终是通过水循环实现

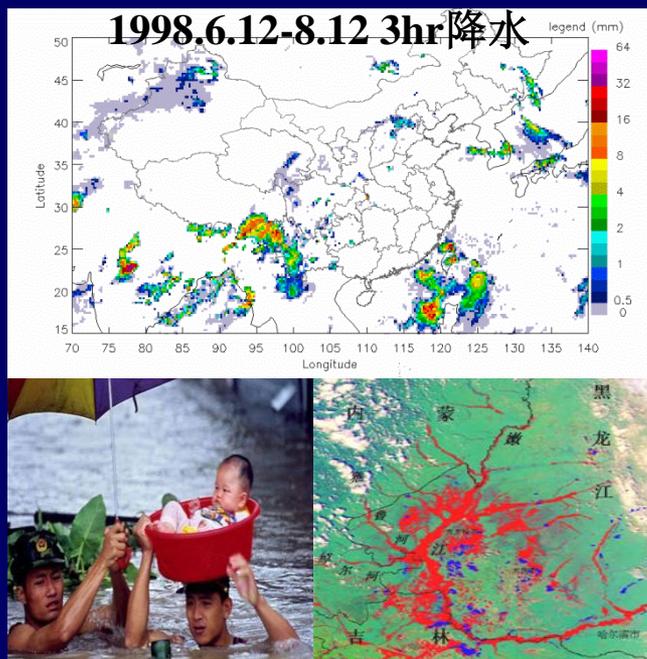
水循环系统



研究水循环的重要性

陆地水循环特征 是研究导致重大水文灾害的科学基础

1998年洪水遥感监测



受灾人口超过**1亿人**，受灾农作物**1000多万公顷**，死亡**1800多人**，倒塌房屋**430多万间**，经济损失**1500多亿元**

2010年西南干旱遥感分析图



受灾人口超过**5000万**，受灾农作物近**500万公顷**，其中**40万公顷**良田颗粒无收，**2000万**同胞面临无水可饮。经济损失超**350亿元**

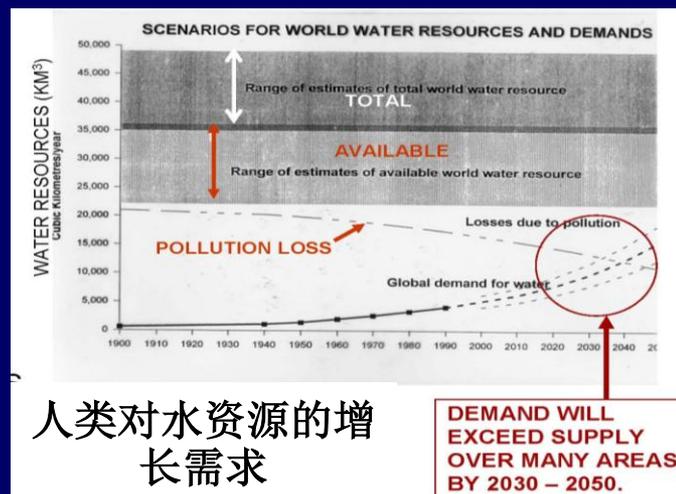
研究水循环的重要性

陆地水循环特征 也关系到水资源、粮食，经济、生态等国家安全

1. 水资源已成为我国三大战略资源之一，人口与水资源问题的巨大压力
2. 粮食安全与水循环特征密不可分

水循环 研究是科学前沿问题《国家中长期科学与技术发展规划纲要（2006-2020年）》，是地球系统科学中的重大基础科学问题

关键科学问题：如何准确认识陆地水循环关键要素、系统过程在各区域的时空分布及变化特征？以及导致极端事件的机制？



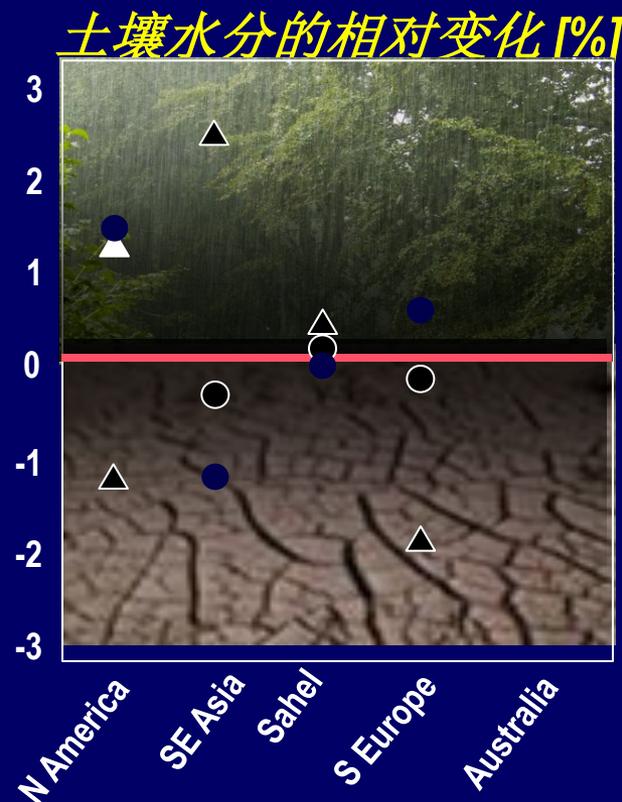
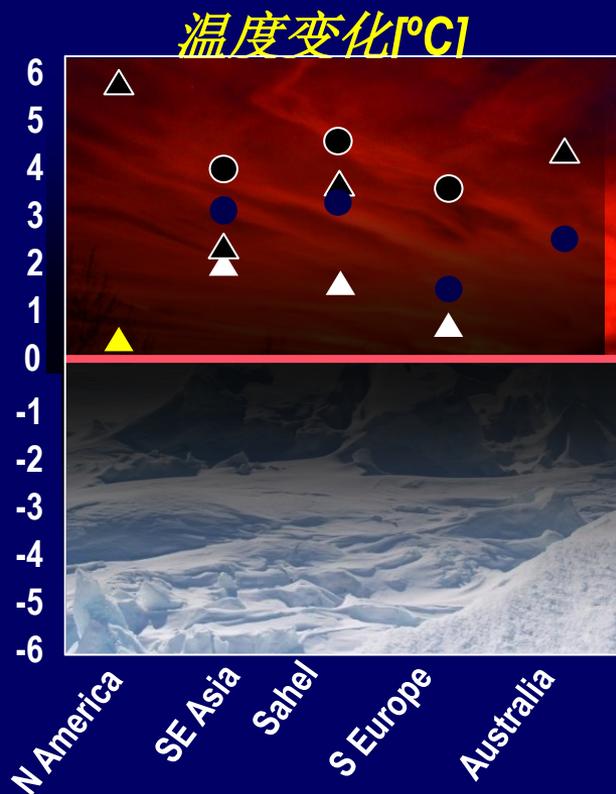
粮食安全



气候变化及水资源影响

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) AR4 气候模式分区预报比较:

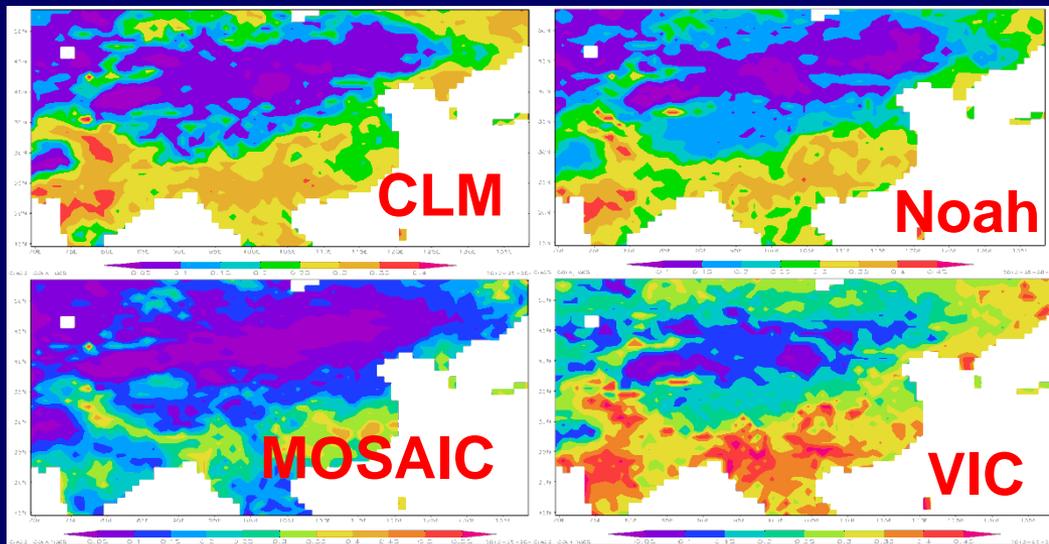
模式均
预报温
度上升
只是幅
度不同



模式预
报的地
表湿度
与今天
相比的
相对变
化有很
大差

Li et al., (2007): Evaluation of IPCC AR4 soil moisture simulations for the second half of the twentieth century, *Journal of Geophysical Research*, 112.

不同陆面模式模拟比较



2010年8月1日15:00 UTC

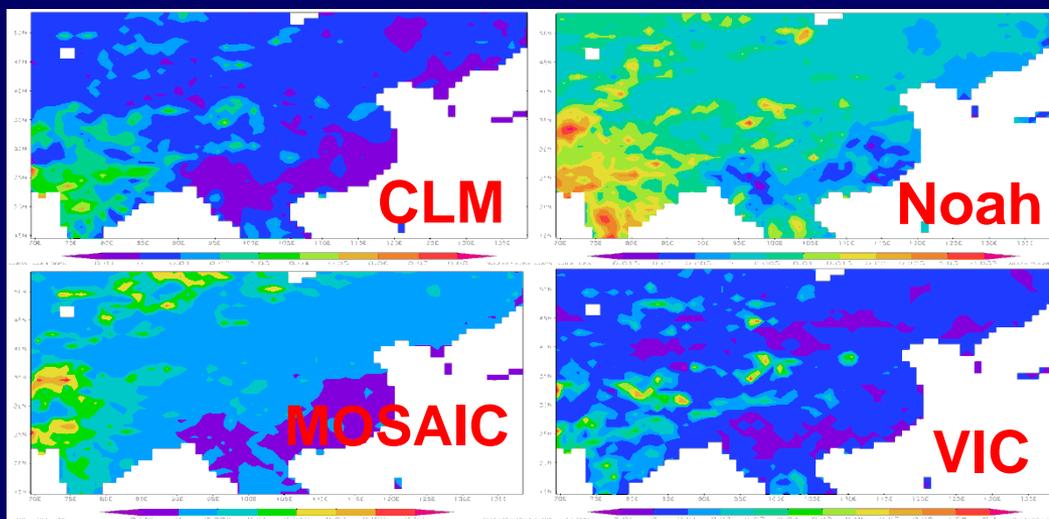
驱动数据: GLDAS

空间分辨率: $1^\circ \times 1^\circ$

← 土壤表层含水量

CLM: 1.75cm; Noah: 10cm;

MOSAIC: 2cm; VIC: 10cm



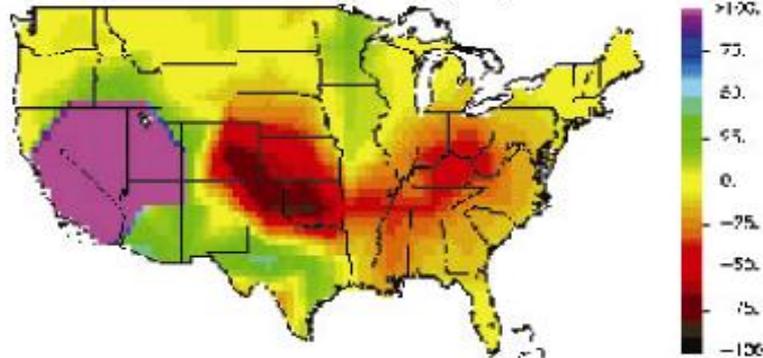
← 蒸发蒸腾总量

单位: g/m²/s

模式预测及卫星观测比较

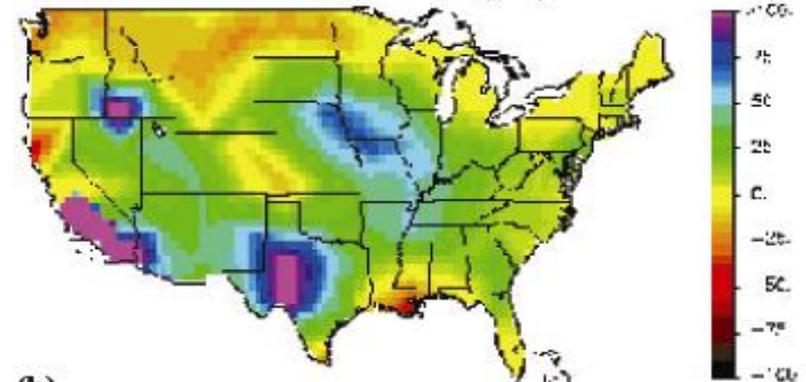
LARGE CLIMATE MODEL DIFFERENCES IN WET PROCESSES (See article beginning on page 1)

CGCM1 Soil Moisture % Trend (JJA)

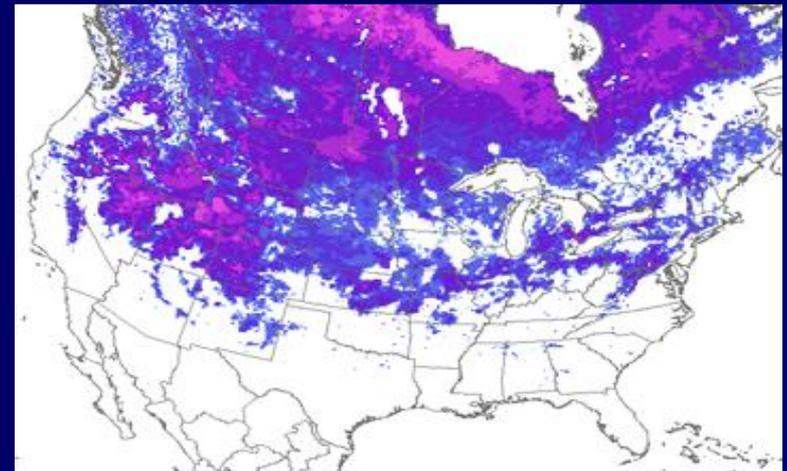
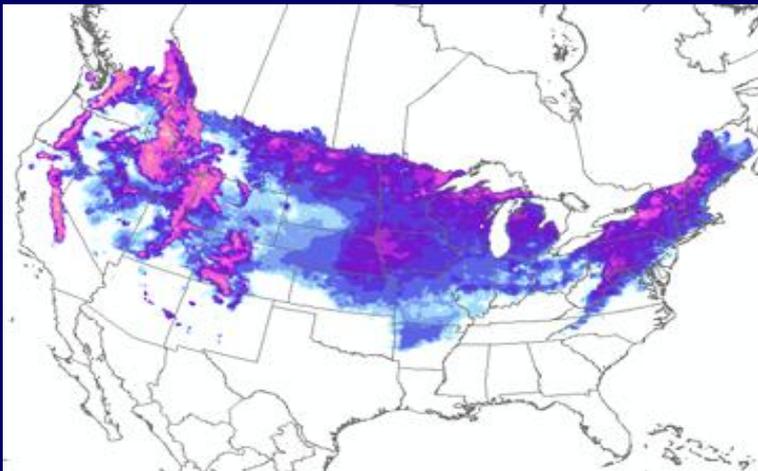


(a)

HadCM2 Soil Moisture % Trend (JJA)

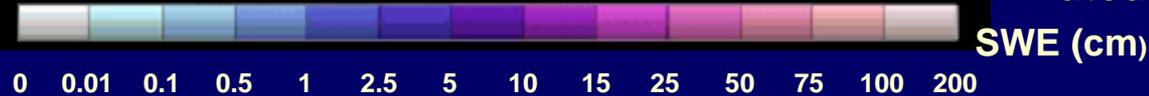


(b)



AMSR 12-km SWE from 12-km Footprints

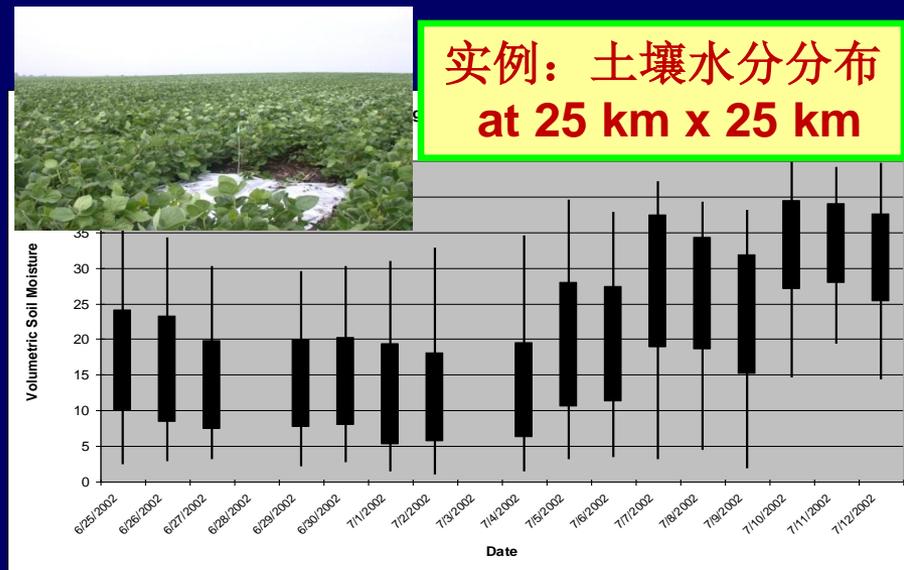
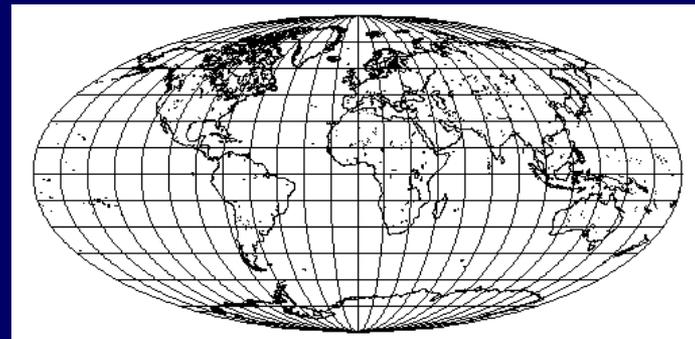
Modeled/Assimilated SWE (NSA)



SWE (cm)

模式需求与目前观测系统的局限性

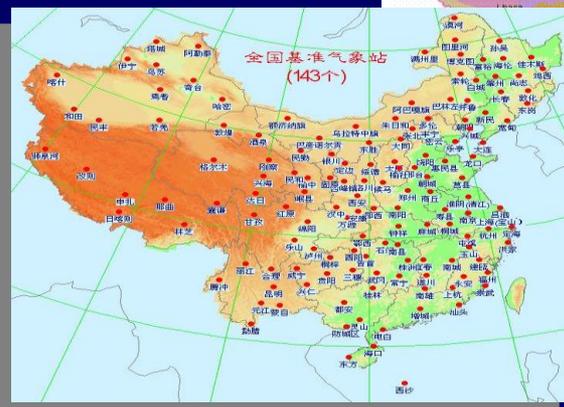
1. 模型中的格点代表不同水循环过程...
2. 代表该尺度上的“平均”状况



能量，水和生态循环过程在很小区域范围内变化很大



1. 地面的观测方法基于点位测量，地表参数的观测点分布稀少
2. 站点观测得到的数据与预测模式的尺度不一致
3. 需要时空分布信息 ← 遥感



尺度效应问题

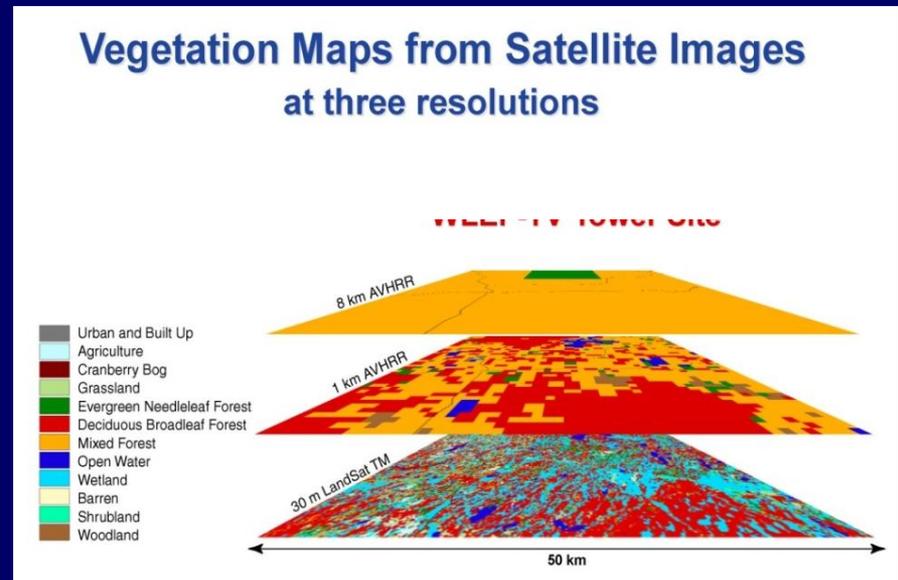
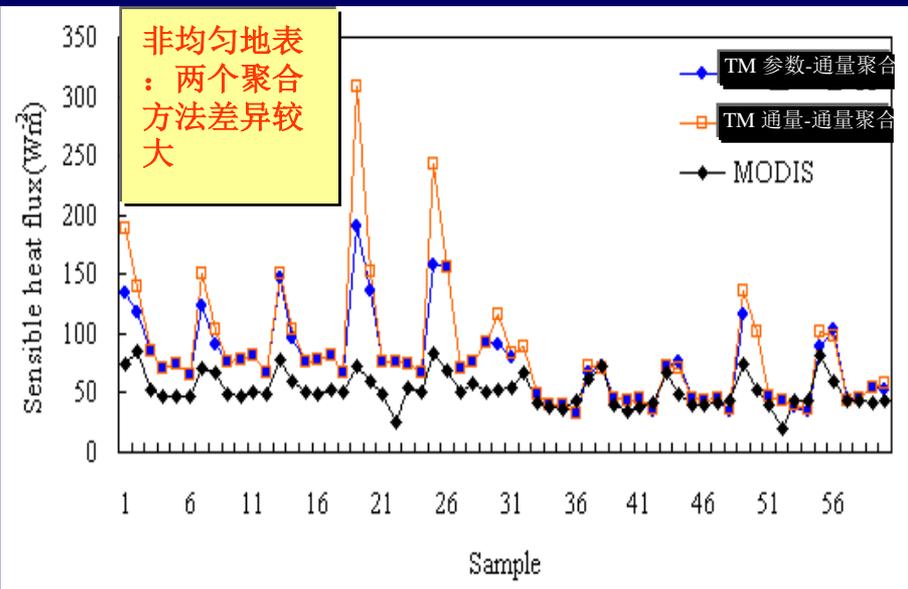
自然界： 能量和水循环过程在很小区域范围内变化很大

科学问题： 水循环过程特征在不同尺度上是如何变化的？

主要问题： 1) 站点观测与区域陆面过程模式的尺度不一致，
2) 大气的驱动与区域陆面过程模式的尺度也不一致；

目前方法： 基于点源的参数化方案有很大不确定性

中高分辨率不同ET计算结果比较

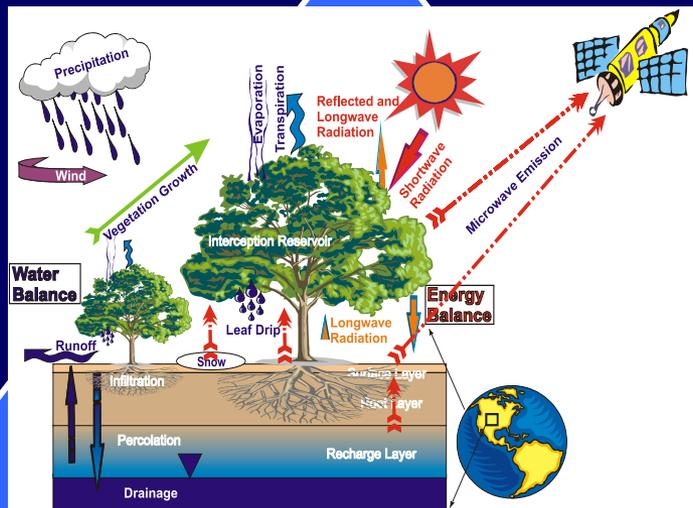


水循环研究的方法

卫星遥感和同化技术在大气和海洋的研究中已有广泛的应用

数据同化

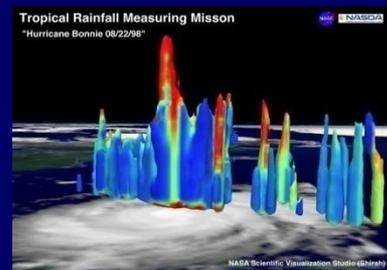
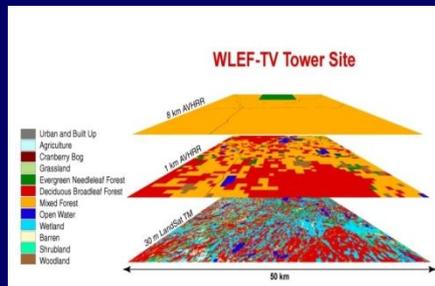
但在地表过程研究中还处于初期阶段



遥感与站点观测

模型

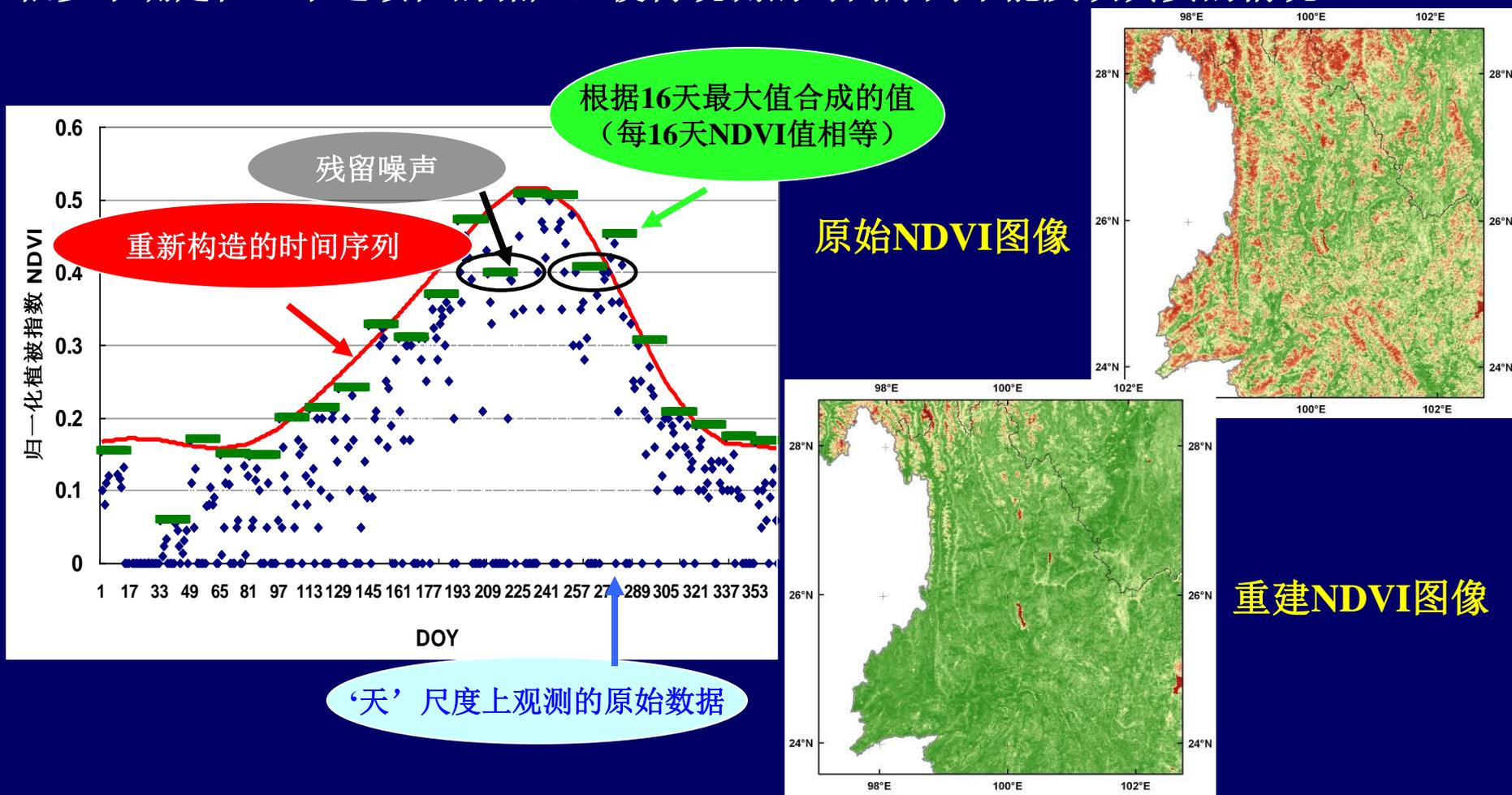
水循环过程（如降雨，水文特性）在很小区域范围内变化很大，造成模型与观测的不一致



遥感研究中主要存在问题

1. 有些卫星遥感数据集的生成，未考虑到模型的需求。

由于受到云污染、大气的不确定性、地表双向反射等影响，数据和产品中会存在很多不确定性、不连续性的噪声，使得观测的时间序列不能反映真实的情况。

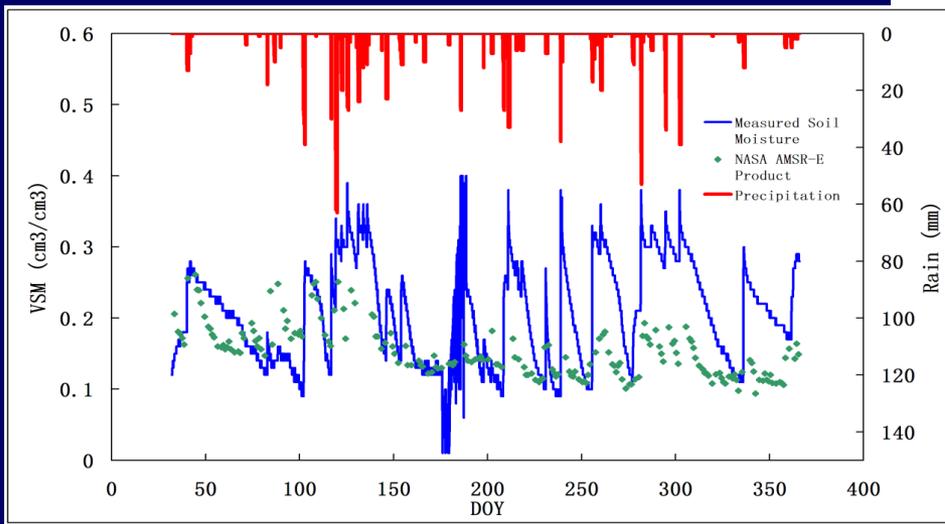
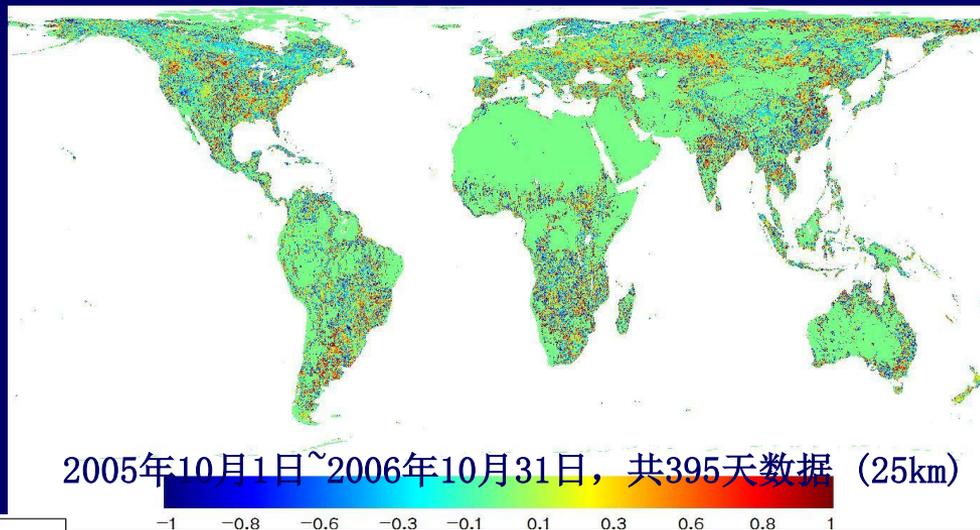


遥感研究中主要存在问题

2. 即使同一传感器不同参数的研究组也很少沟通。

在降雨时，土壤水分是通过差值获得的

NASA降雨与土壤水分产品的相关系数图

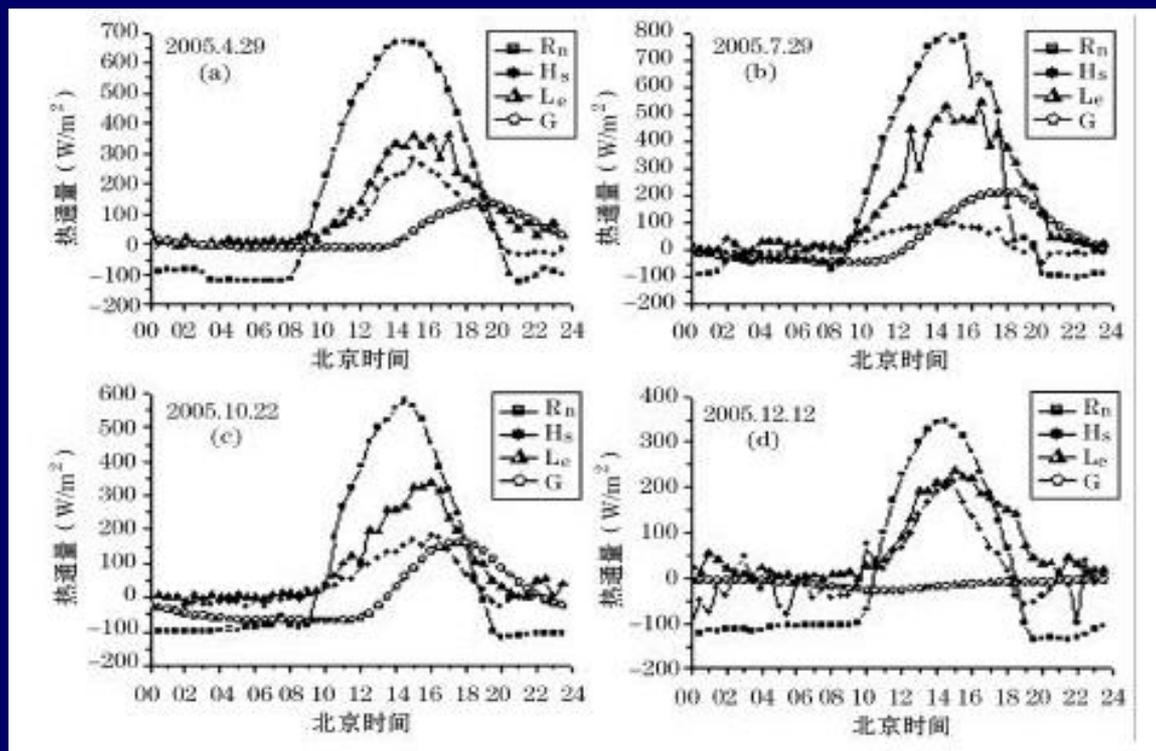


这类数据只能提供概念上的统计分析结果，但很难用于水循环特征分析和定量的水文-大气模型的应用

陆面-大气的过程模型是在水和能量的系统平衡状态下进行！
必须考虑系统平衡

遥感研究中主要存在问题

3. 卫星遥感的观测为瞬时观测，而许多地球物理参数有明显的日变化特征。



R_n : 净辐射通量 (W/m^2)

H_s : 感热通量 (W/m^2)

L_e : 潜热通量 (W/m^2)

G : 土壤热通量 (W/m^2)

4. 许多遥感反演量与模型变量/参数名称相同，但物理意义不一致。

目前的认识水平和主要的不确定性

已有的知识:

- 大气顶辐射通量
- 全球和区域大气和表面温度分布
- 点过程

主要的不确定包括:

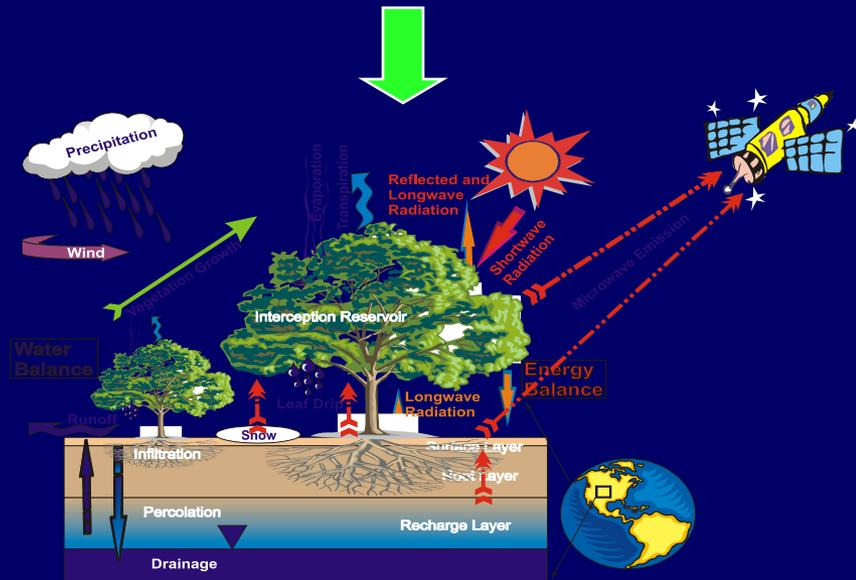
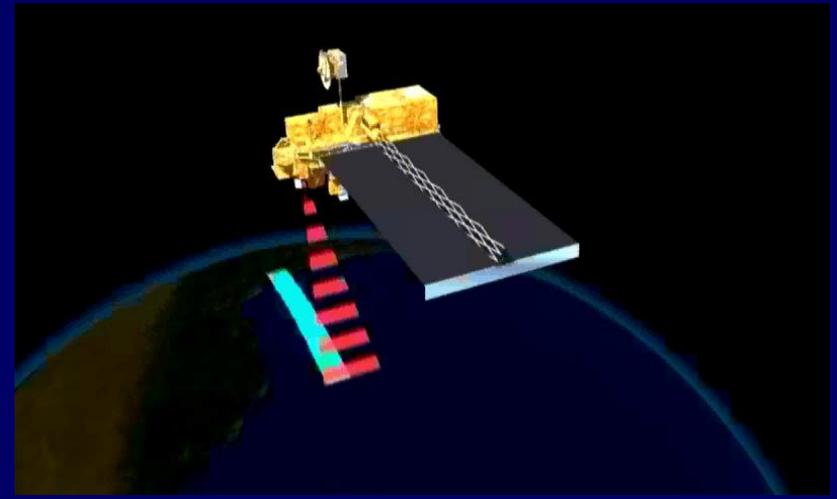
- 全球尺度降水和水汽分布
- 云辐射吸收和散射特性
- 全球土壤湿度、雪覆盖/深度分布
- 表面径流
- 蒸发
- 陆表和大气相互作用
- 能量和水循环过程的集合中存在不确定性

水循环研究面临的挑战

考虑的关键科学问题：

1. 如何改进现有水循环系统观测能力？
2. 如何基于循环系统的综合集成，发展基于观测的水循环不同尺度上的模拟研究？

有望获得对能量和水循环过程新的理解以及改进预报能力



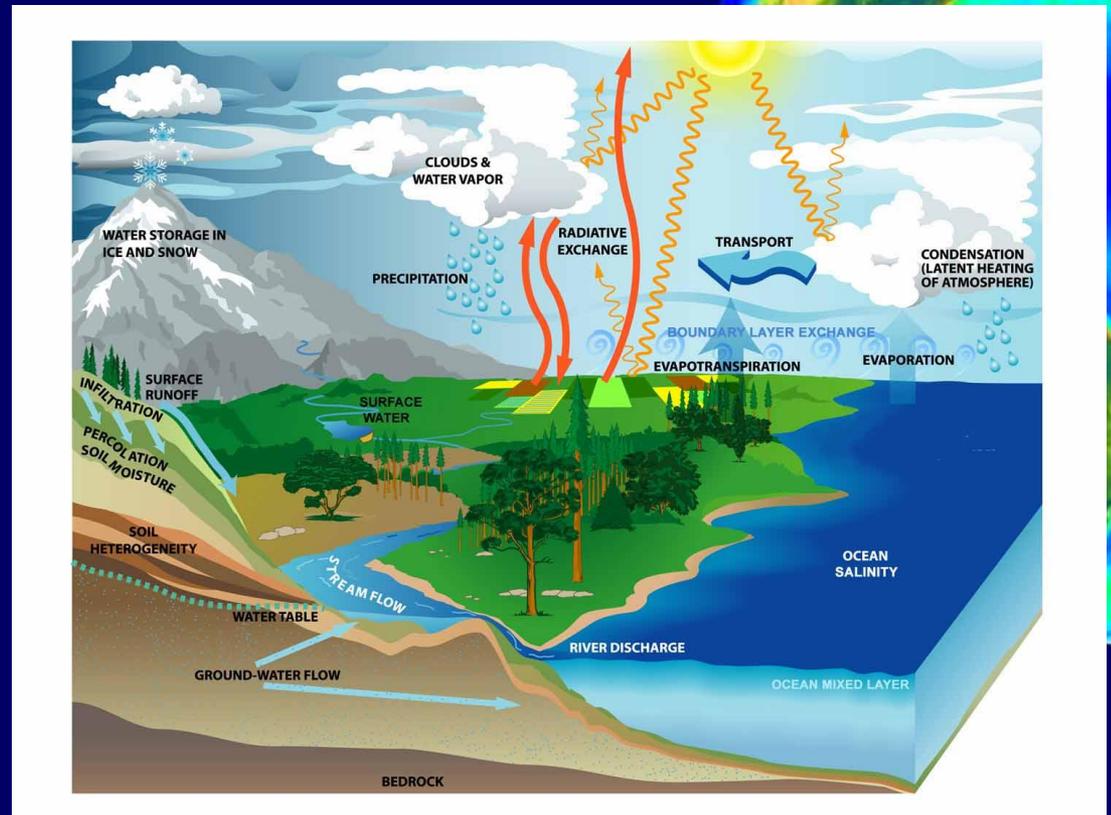
报告提纲

1. 水循环研究的重要性及面临的问题
2. 目前水循环遥感的研究现状及面临的问题
3. 土壤水分和积雪遥感研究实例
4. 总体发展方向

水循环过程中的重要要素

经过大气，河流和海洋的水循环包括如下过程与要素

- ✓ 大气水汽
- ✓ 降雨
- 蒸发
- ✓ 土壤水分
- ✓ 陆地积雪与冰川
- ✓ 地表水体、径流
- ✓ 地下水
- 极地冰雪



可用于陆地水循环重要要素的卫星观测

具备水循环各重要要素在模型尺度上的卫星观测能力，

但精度上还不能满足模型需求

	Water Vapor	Precipitation	Soil Moisture	Snow Cover	SWE	Ground Water
AIRS	×	×				
AMSR-E	×	×	×	×	×	
AMSU-B		×		×	×	
AMI			×			
ASCAT			×			
GRACE						×
FY-1				×		
FY-2	×	×		×		
FY-3	×	×	×	×	×	
HIRS	×					
IASI	×			×		
MADRAS	×	×				
MODIS	×			×		
SAGE-III	×					
SMMR	×			×	×	
SMOS			×			
SSM/I	×	×		×	×	
SSMIS	×	×		×	×	
TRMM-TMI		×	×			
WindSat	×	×	×			

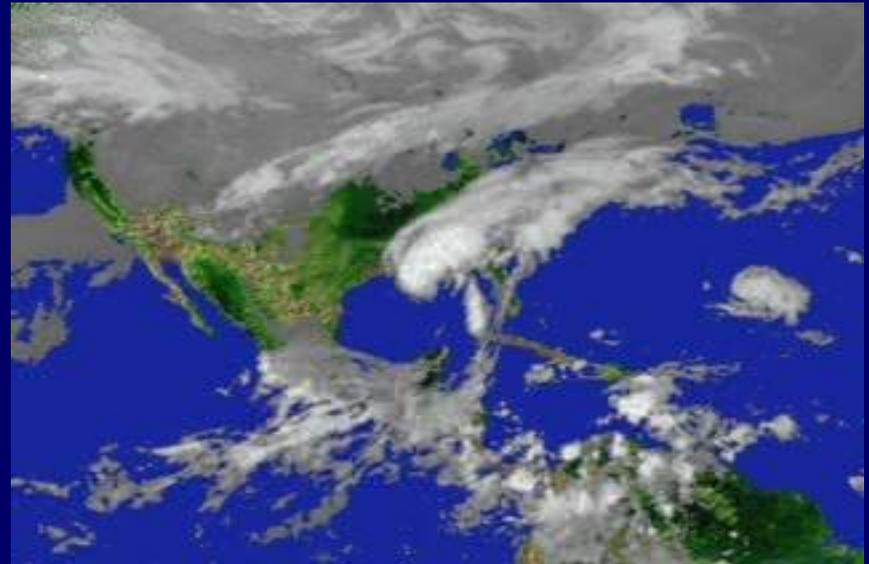
卫星遥感降雨观测

当前能用的传感器

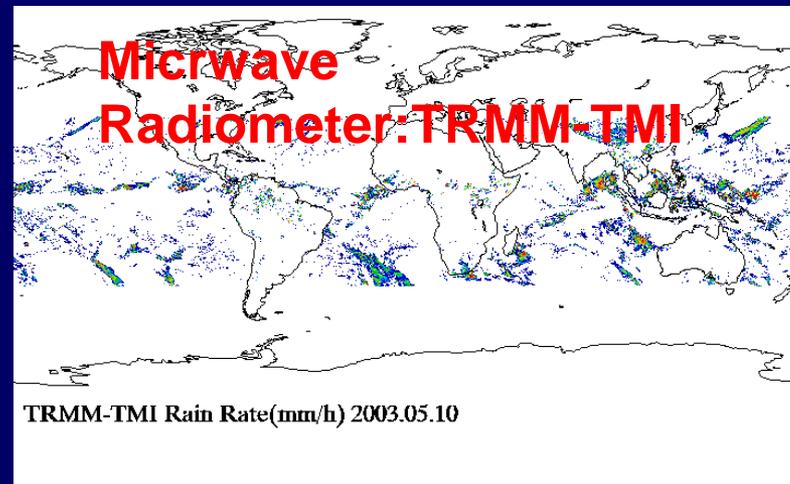
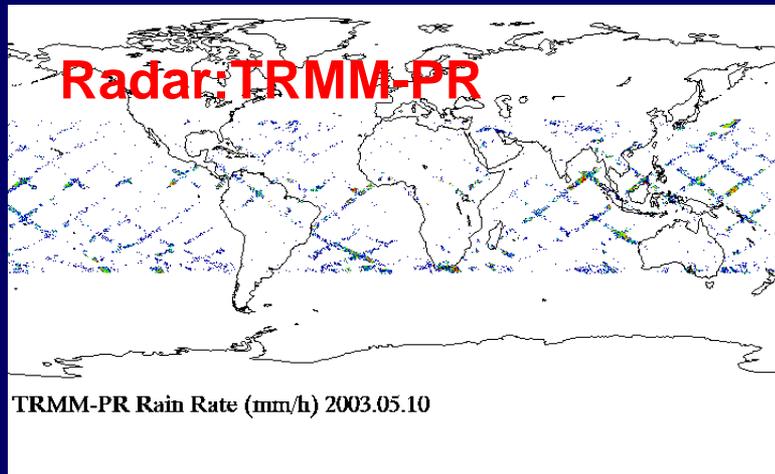
1. 被动微波辐射计: SSM/I, SSM/R, TOPEX/Poseidon, AMSR-E, TMI, and WINSAT
2. 主动微波雷达: PR on TRMM



- TRMM能提供影响降雨的复杂大气过程信息
- 将来已计划的观测系统: GPM (2014)

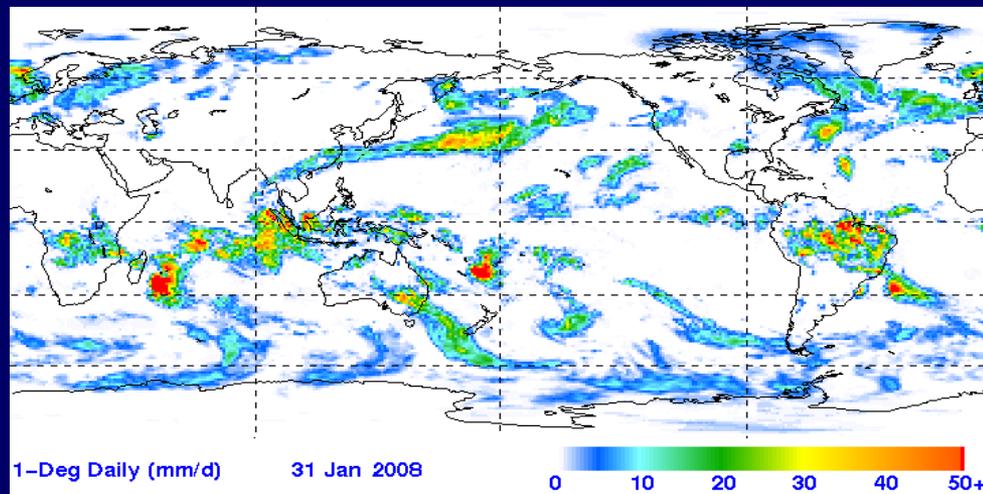


当前卫星降雨产品实例



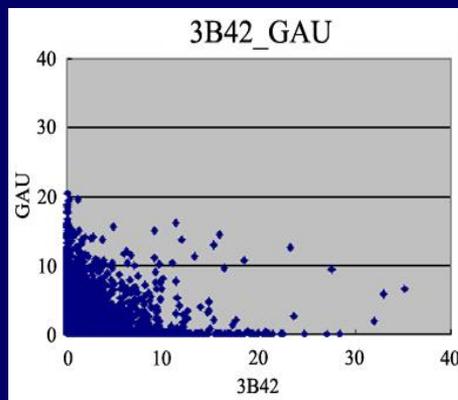
TRMM 3B42: 雷达、被动微波辐射计和近红外静止卫星

产品: 0.25° 3 小时水平分布信息

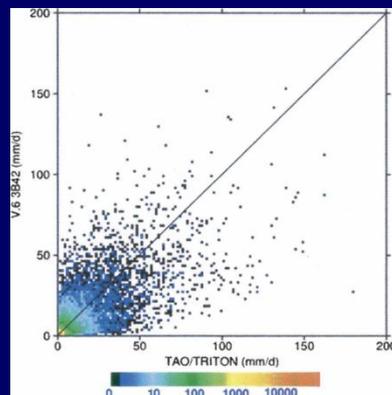


当前卫星降雨产品的主要问题

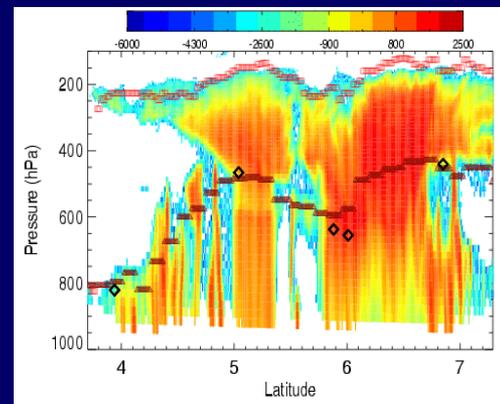
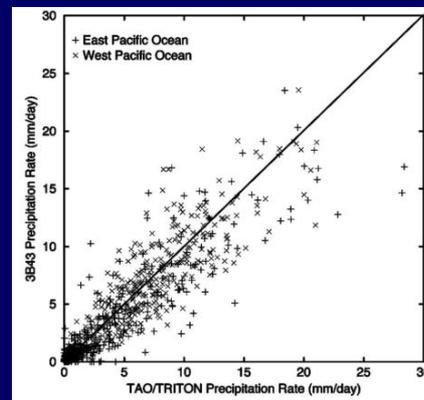
瞬时降雨与地面观测数据散点图



日平均降雨与地面观测数据散点图



月平均数据与地面观测数据散点图



有限精度： 在月平均的尺度上有较好的精度

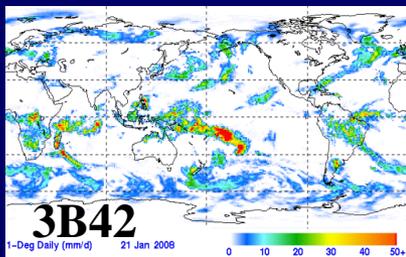
定量反演： 云的结构及类型影响：冰、水云、垂直结构、高度、等

验证： 地面雨量筒与卫星观测量空间分辨率和内容的差异

科学应用需求： 水循环和水文应用要求的是累计降雨量，而卫星观测的是瞬时降雨率

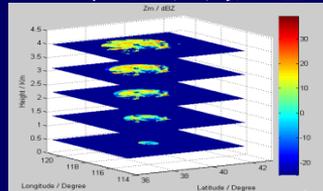
各种降雨观测的有机合成

主被微波级轨卫星



当前国际最先进算法

三维空间信息



有限范围云的垂直和水平分布信息

时间信息



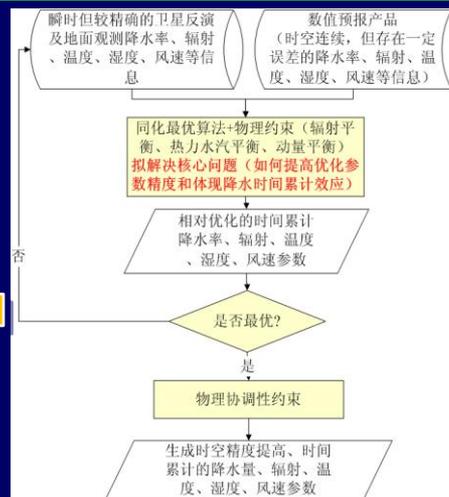
云顶、类型、运移的时空间变化信息

地面雨量筒



点源的真实地表时间累积降雨量标定

空间相关的新同化算法



目标：实现水文模型和水循环研究需要的累积降雨量和提高大气驱动数据的精度

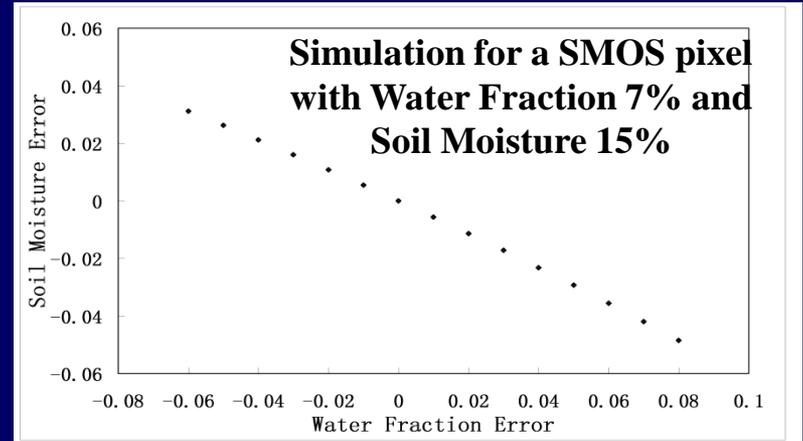
形成高时空分布(30mins/5km)、高精度的综合降水及水汽反演。

动态水体面积信息的重要性

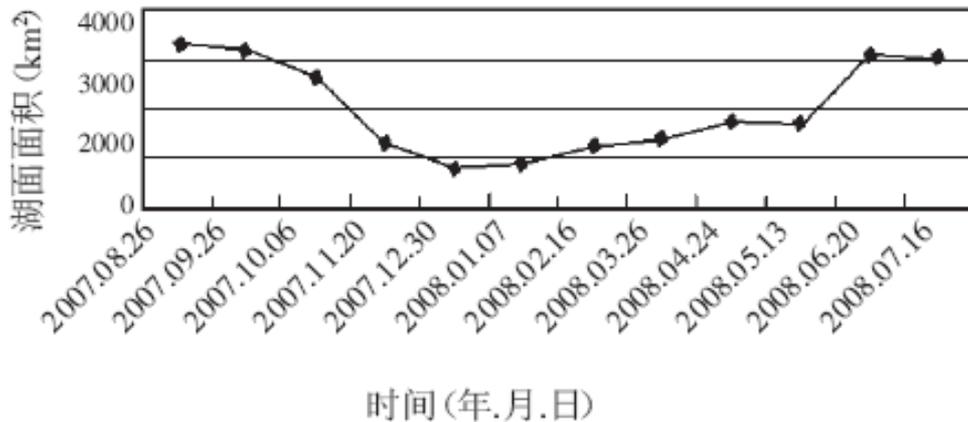
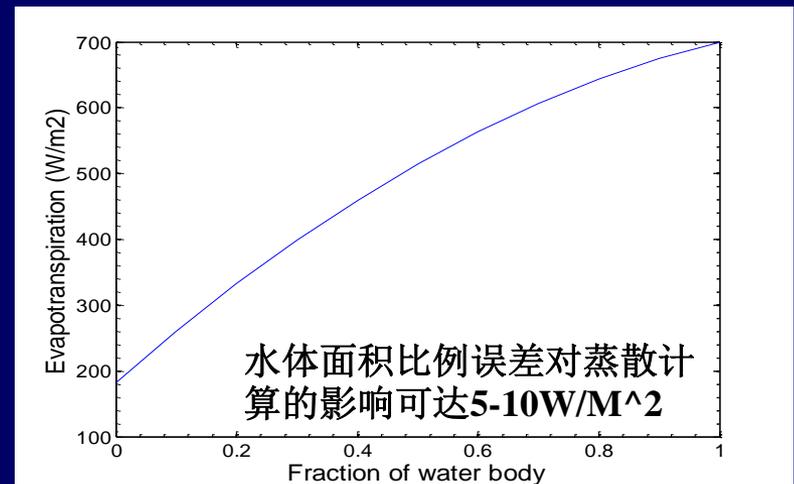
现有水体产品

数据	分辨率	产品
MODIS	500m	每年一次,2001-2007
AVHRR	1000m	共一次,1981-1994
SPOT	1000m	共一次,1998-1999
ECOCLIMAP	1000m	共一次,1992-1993
SRTM	30m	共一次,2000 (56S-60N)
GLDW	1000m	共一次
MODIS_SRTM	250m	共一次

水体面积比例误差对土壤水分反演的影响



水体面积比例对蒸散计算的影响



水体面积遥感中的问题

- **高分辨率卫星数据问题：**

由于云的影响和时间分辨率，很难用于动态水体监测；

- **中分辨率卫星数据问题：**

云的影响及混合像元问题，常用二项分类方法精度较低。

- **当前研究：** 如何利用中分辨率卫星数据及混合像元分解技术提取动态水体面积信息？

径流 / 地表水

空间观测河流流量与地表水位高度

目的:

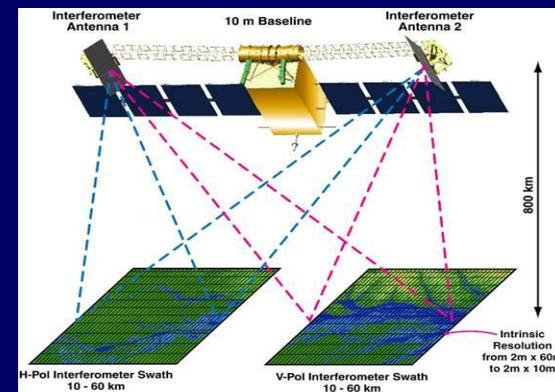
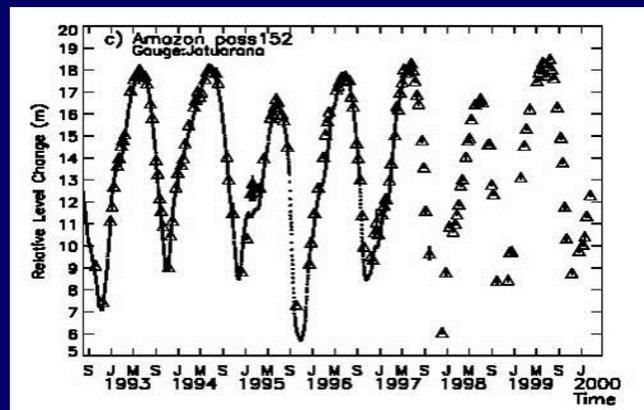
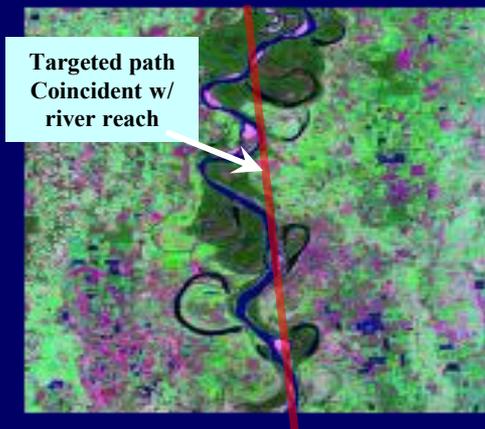
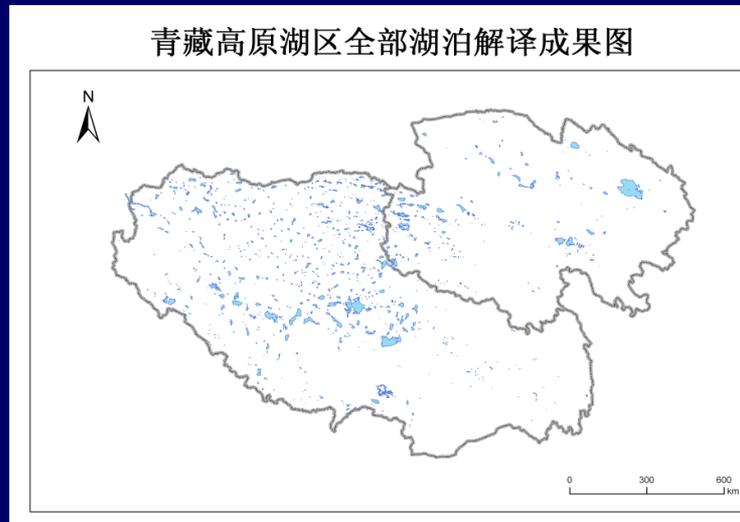
- 水循环中的关键要素
- 水资源管理中的必要因子
- 河流流量与地表水位高度很难获取

传感器技术:

激光高度计
e.g. ICESat (GSFC)

雷达高度计
e.g. Topex/Poseidon over Amazon R.

干涉技术
SWOT

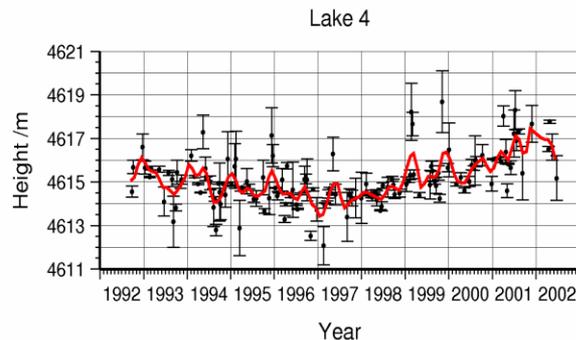
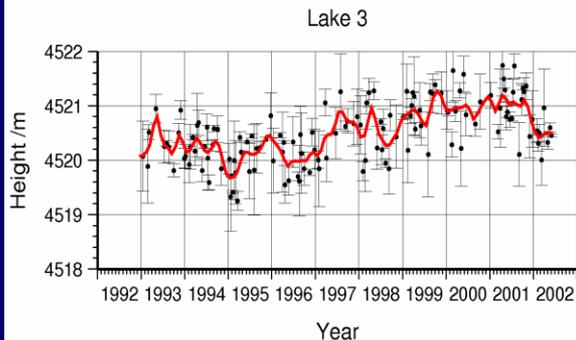
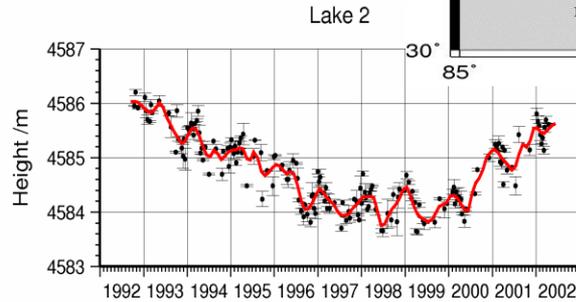
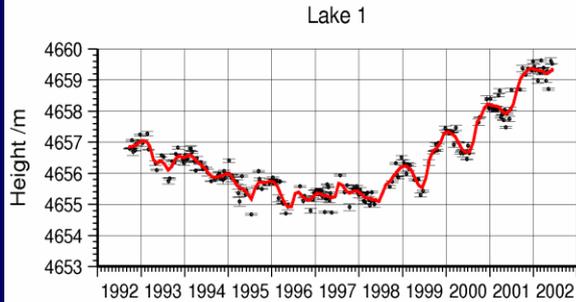
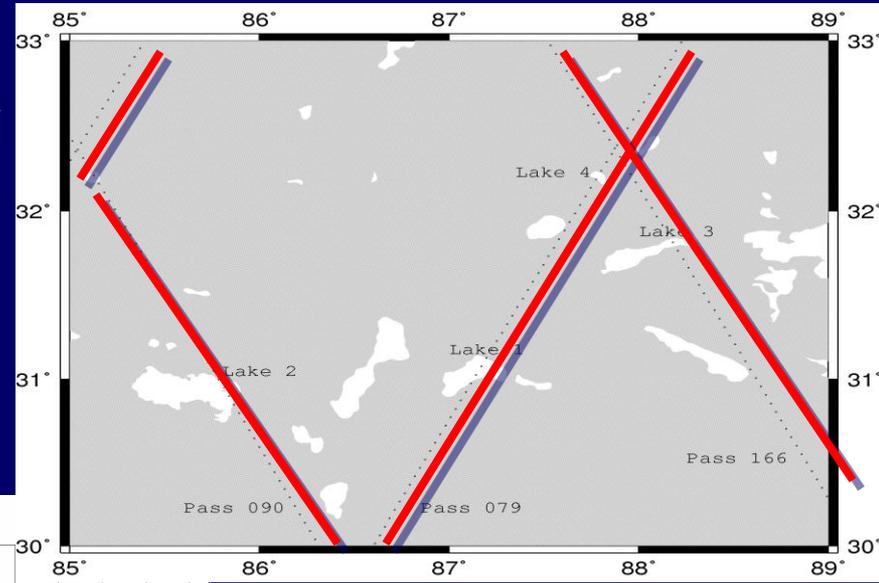


湖泊水位观测实列

1. TOPEX/POSEIDON卫星
Geophysical Data Record (GDR)和
Sensor Data Record (SDR)数据

2. ECMWF水气模型

1992-2002湖泊水和位时间序列



**TOPEX/POSEIDON
卫星轨迹**

重复周期: 10天

周期数: 1-360

**时间: 1992.10-
2002.07**

重力卫星—水储量变化观测

观测原理：地球重力场变化所引起卫星轨道漂移

地球重力场变化是由地球物质变化包括：

大气中水汽、地下水、土壤水分、雪、冰川、地表水和固体岩石的变化

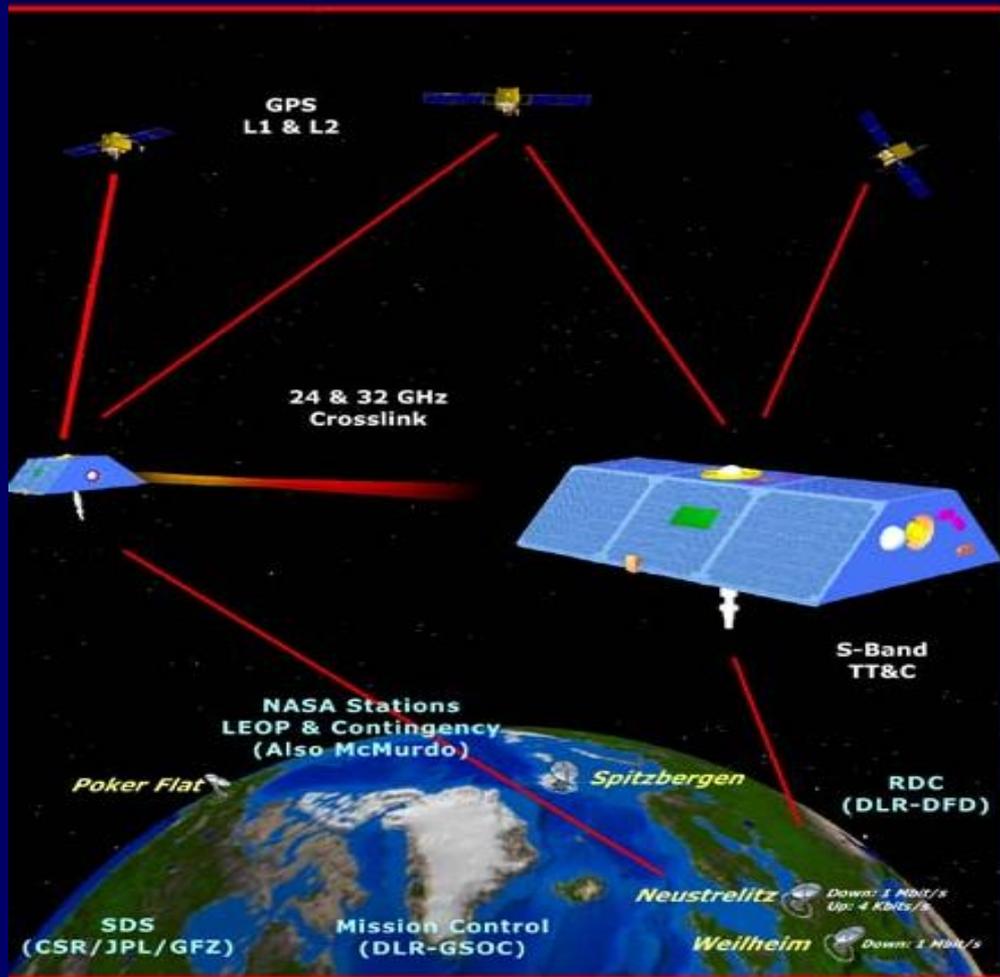
重力卫星能够提供地表及地下水储量变化的信息

已有重力卫星

CHAMP 2000;

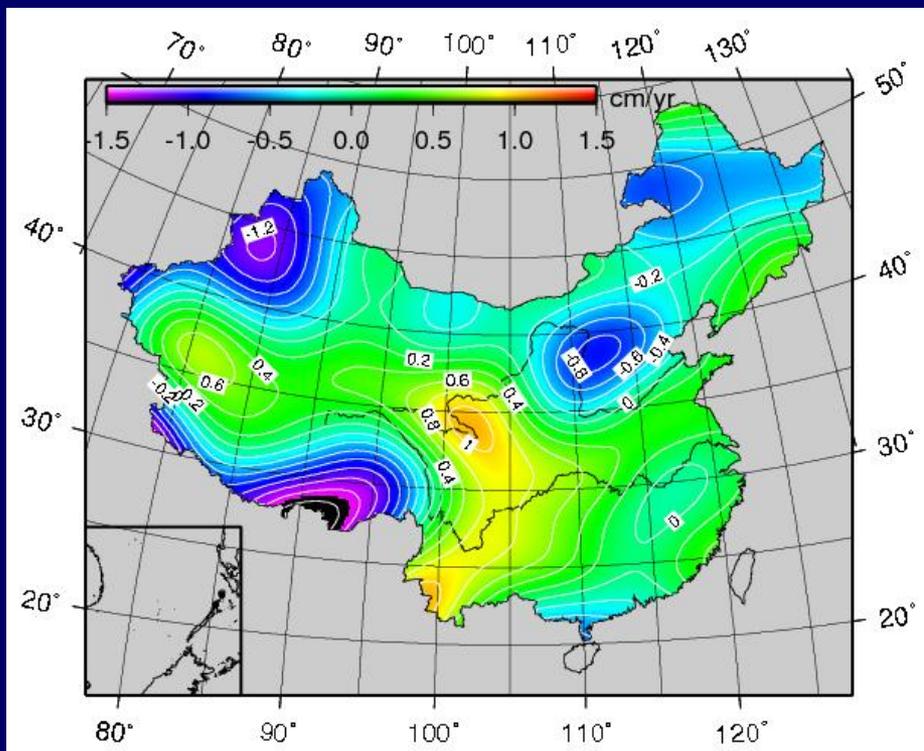
GRACE: (Gravity Recovery And Climate Experiment), 2002

GOCE 2009



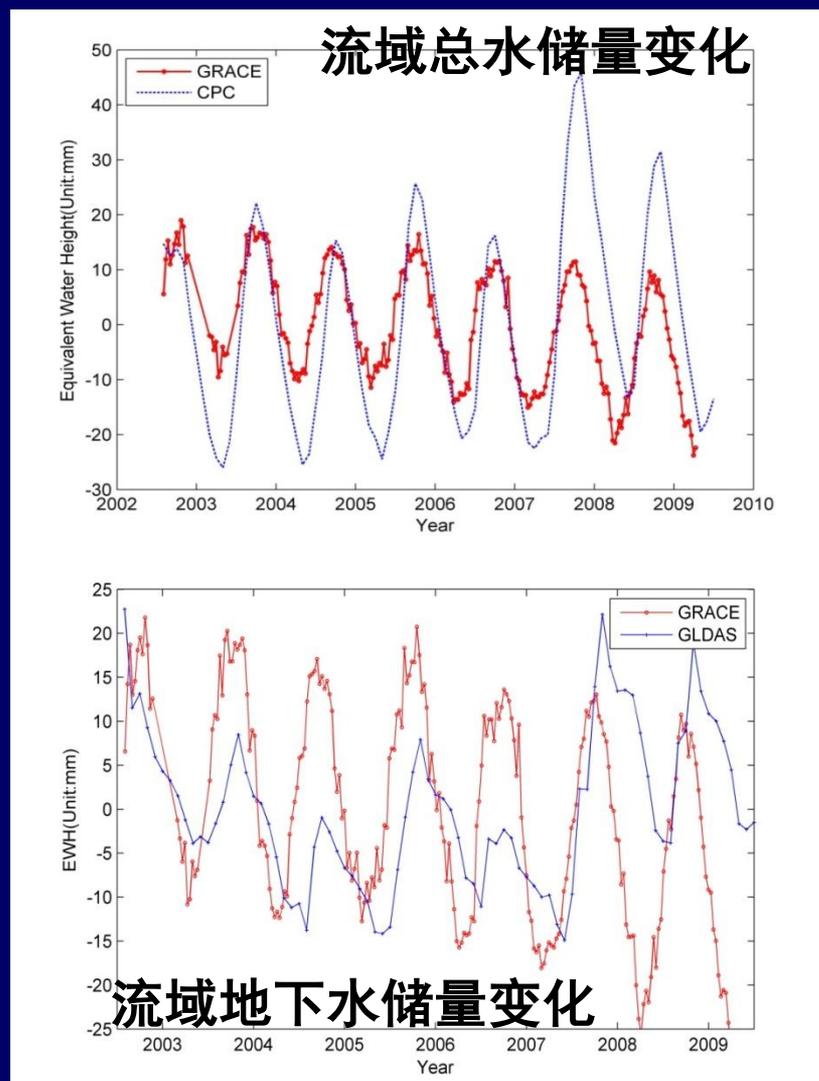
GRACE观在水循环研究中的应用

中国地下水储量变化(2002/08-2008/12), 空间分辨率 300km



从GRACE时变重力场反演的陆地水变化中扣除GLDAS水文模型计算的土壤水和积雪变化，可以估算地下水变化。

黑河流域陆地水和地下水储量变化



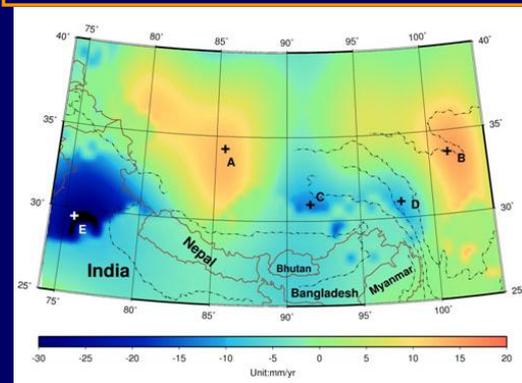
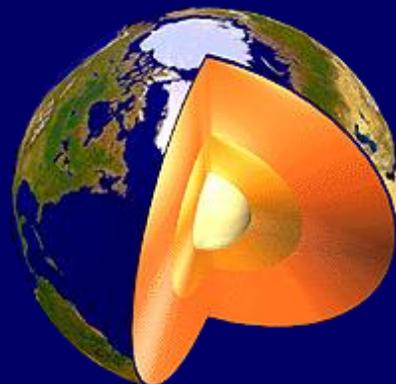
如何进一步改进水储量变化观测精度？

重力卫星能探测到随储水量变化引起的地球重力场变化

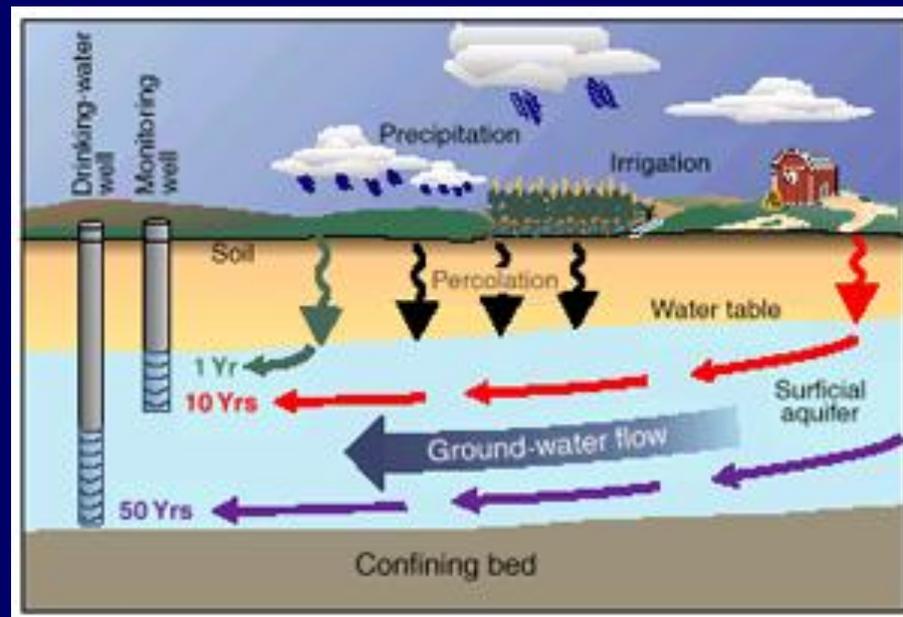
2002年8月至2009年6月
青藏高原地表质量变化

目前应用

1. 忽略固体物质的变化影响；
2. 用大尺度中陆—气再分析数据如GLDAS扣除：
 - 大气水汽影响估算陆地水储量变化；
 - 进一步扣除土壤水分, 雪冰, 地表水的影响估算地下水变化



如何从重力卫星时变重力场的观测中更加有效的区分固体物质、大气物质、陆地水储量的变化影响？

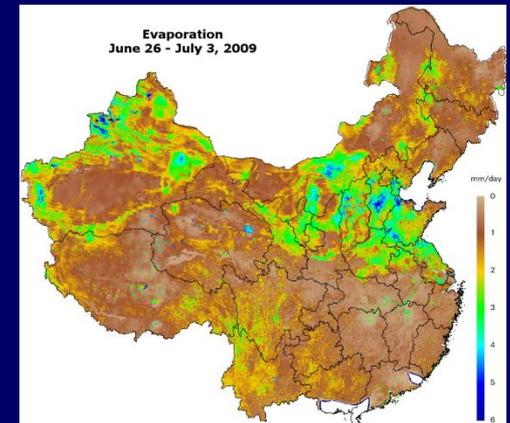
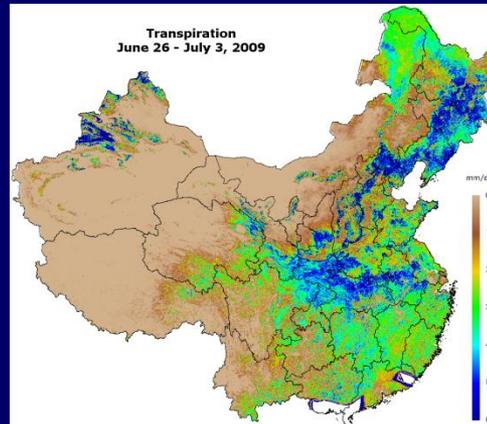
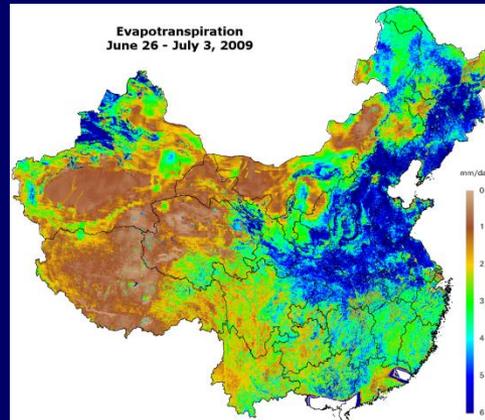


遥感陆面蒸散发量研究现状

基本原理：基于能量平衡方程的物理解析算法 – LE作为能量平衡方程的余项。

地表净辐射通量 (R_n) = 土壤热通量(G_0) + 感热通量(H) + 潜热通量(LE)

2009年6月下旬

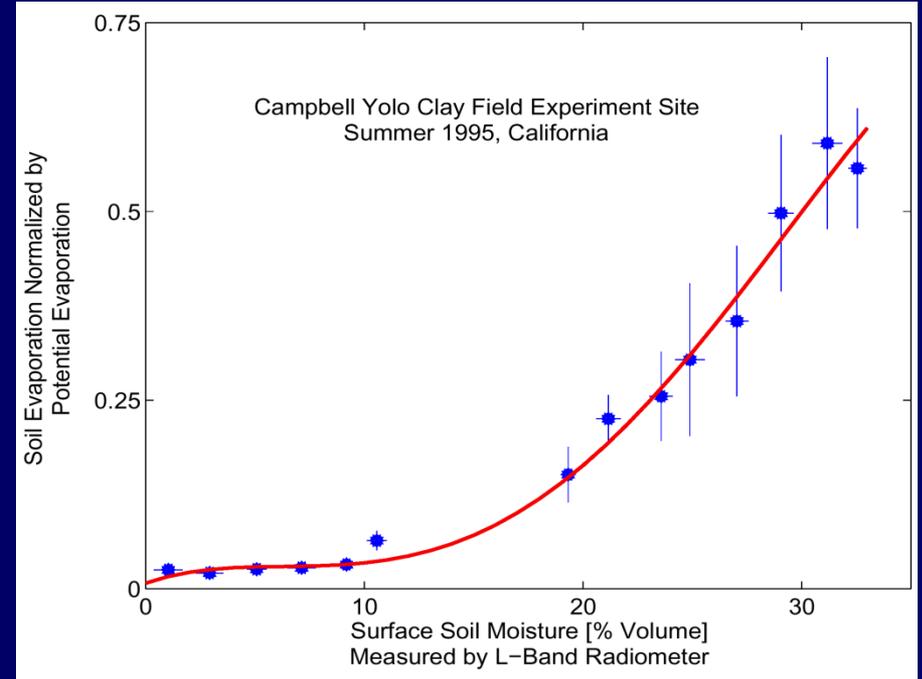


主要问题：

- (1) 净辐射通量和感热通量的估算误差会传递到潜热通量中
- (2) 感热通量对于地表温度较为敏感，由于受到云的影响很难在卫星过境的单一时刻获取较大区域的地表温度图像
- (3) 对湍流通量反演较为敏感的大气风速场、温度场等需要足够的气象观测数据进行空间插值

蒸散发量估算的发展设想

1. 高时空分辨率的大气驱动数据的精度改进
2. 进一步改进辐射平衡及地表驱动变量
(albedo, LST, Fc, 等)
的估算精度
3. 开发光学与微波遥感相结合估算蒸散发新算法-引入土壤水分观测



土壤水分的观测为估算蒸散发提供新的信息

报告提纲

1. 水循环研究的重要性及面临的问题
2. 目前水循环遥感的研研究现状及面临的问题
3. 土壤水分和积雪遥感研究实例
4. 总体发展方向

微波遥感土壤水分

Current passive sensors:

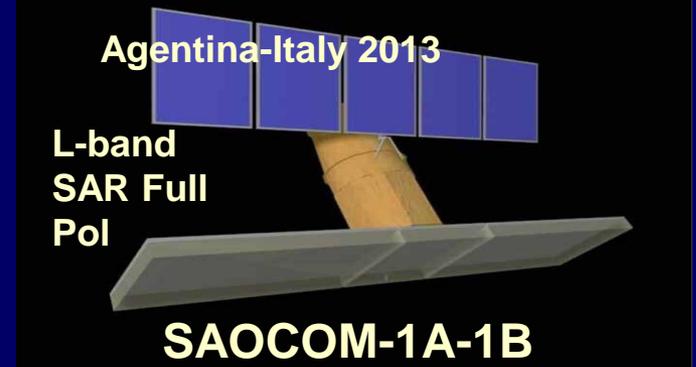
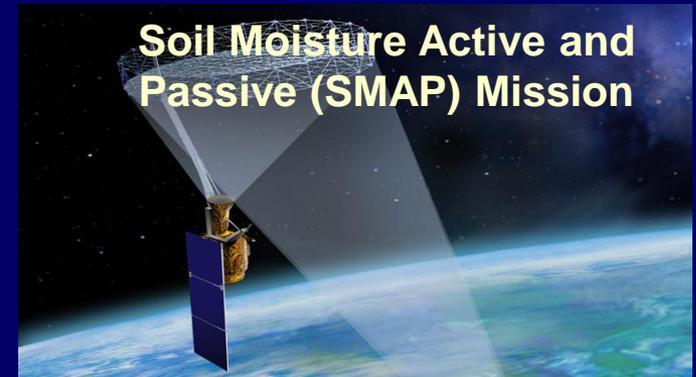
- SSM/I(R) 1978 – current
- TMI since 1998
- AMRS-E 2002-2011
- WindSat since 2003
- FY-3/MWPR since 2008
- SMOS since 2009

Current active sensors:

- ERS-1/2 and ASCAT scatterometers since 1991
- L-band SAR

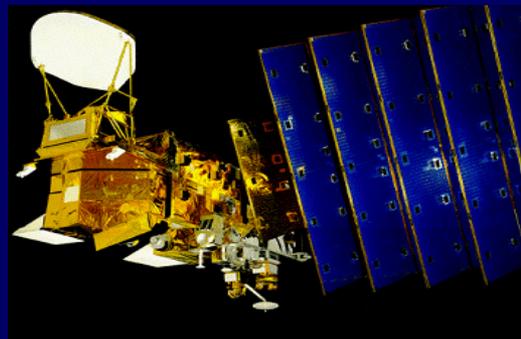


Future Satellites



MWRI/FY-3与AMSR-E/AQUA

1. 观测尺度与天气，气候，及区域陆面模型一致；
2. 具有不受天气和时间影响的观测能力；
3. 对水非常敏感



AMSR-E: Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing System

MWRI: MicroWave Radiometer Imager (2008)

Frequency (GHz)	Polarization	Sensitivity (K)	Mean Spatial Resolution(Km)	Swath (Km)
10.65	V, H	0.3	51x85	1400
18.7	V, H	0.3	30x50	1400
23.8	V, H	0.3	27x45	1400
36.5	V, H	0.2	18x30	1400
89	V, H	0.4	9x15	1400

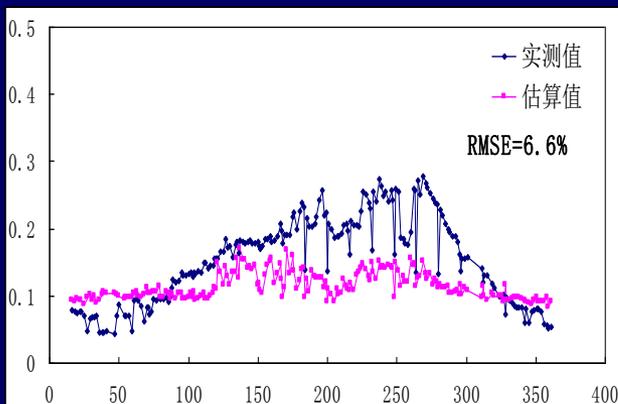
- 5频率，双极化，10通道
- 入射角 53°
- 太阳同步轨道
- 当地时间10:30 过境(降轨)

Frequency (GHz)	Polarization	Sensitivity (K)	Mean Spatial Resolution (km)	Swath (km)
6.925	V, H	0.3	56	1445
10.65	V, H	0.6	38	1445
18.7	V, H	0.6	21	1445
23.8	V, H	0.6	24	1445
36.5	V, H	0.6	12	1445
89.0	V, H	1.1	5.4	1445

- 6频率，双极化，12通道
- 入射角55°
- 太阳同步轨道
- 当地时间1:30 过境(降轨)

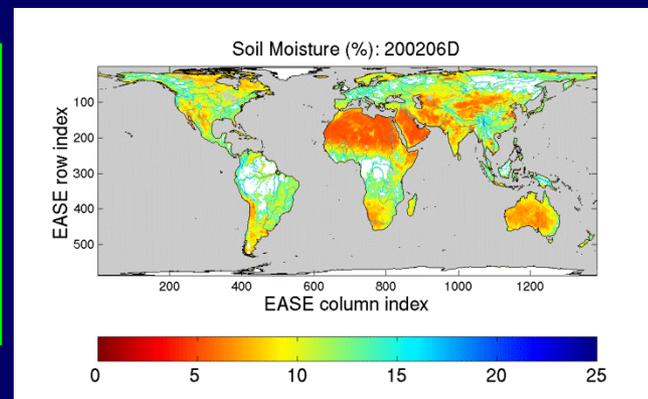
目前微波辐射计估算土壤水分的方法与问题

四种算法: Enjoku (NASA-产品), Jackson (USDA), Koike (JAXA—产品), and Palascia (Italy)



共同特征

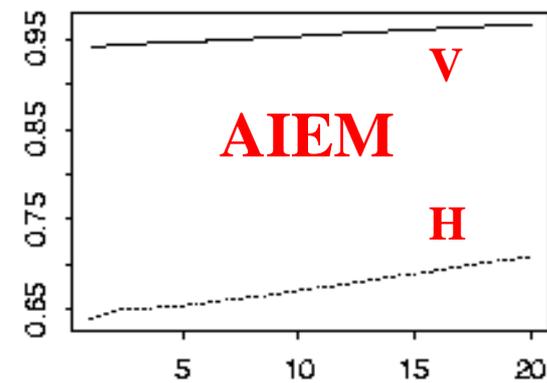
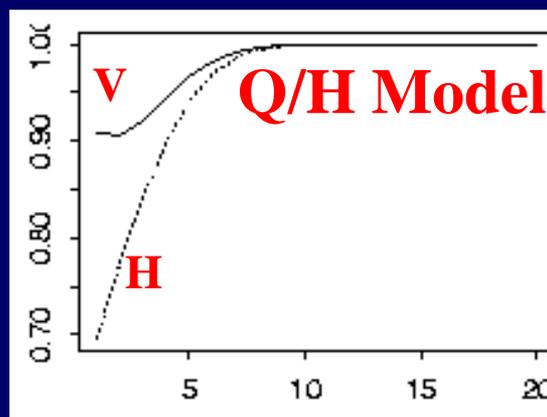
- 土壤地表辐射的Q/H模型
- 假设均匀植被
- 借助地表覆盖数据



Q/H存在问题:

1) 地表粗糙度参数: Q/H模型中所用的 \neq 地表可观测的物理参数

2) Q/H模型中所描述的地表粗糙度对发射率影响与极化无关 — 与理论模型不一致



Frequency in GHz

Comparing Qp and AIEM Models

Newly developed Qp model

Qp is surface roughness parameter

$$t_p = 1 - r_p$$

Fresnel's reflectivity and transmittivity

$$R_p^e = (1 - Q_p) \cdot r_p + Q_p \cdot r_q$$

$$E_p^s = (1 - Q_p) \cdot t_p + Q_p \cdot t_q$$

RMSE between Qp and AIEM

Frequency in GHz	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5
V Polarization	0.0016	0.0012	0.0011	0.0011	0.0012
H Polarization	0.0023	0.0022	0.0017	0.0019	0.0016

AMSR-E和FY-3的裸土微波发射率参数化模型—Qp模型及定量反演算法

基于物理模型（AIEM）并通过实验数据验证,发展了简单、快速、准确的参数化模型

$$R_p^e = (1 - Q_p) \cdot r_p + Q_p \cdot r_q$$

$$E_p^s = (1 - Q_p) \cdot t_p + Q_p \cdot t_q$$

新发展的Qp模型

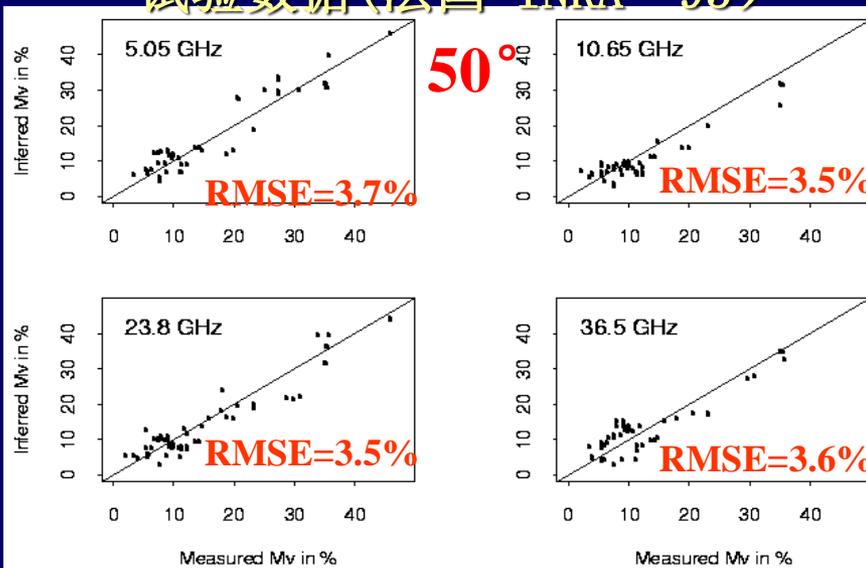
Qp : 表面粗糙度参数

定量算法的发展:

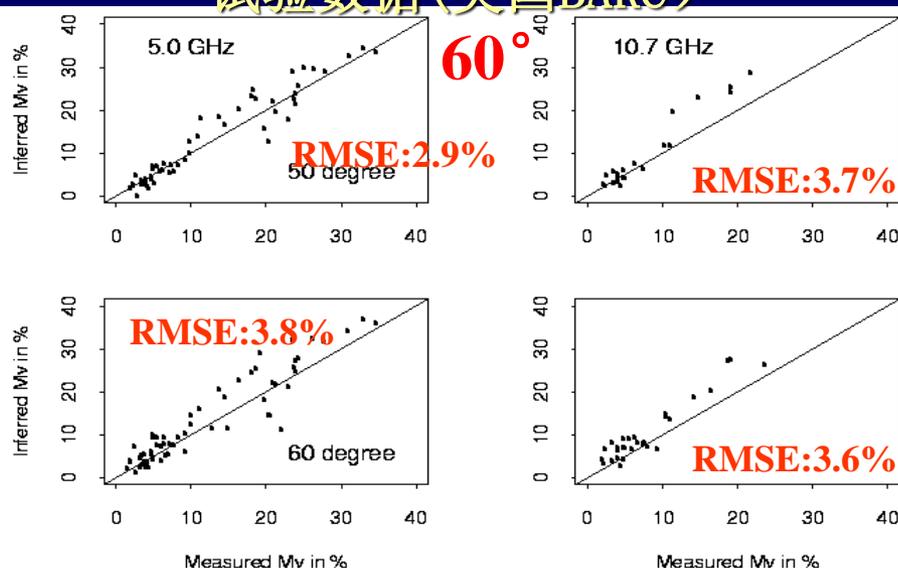
$$Qh(f) = a(f) + b(f) \cdot Qv$$

$$a \cdot E_v^s + E_h^s = b \cdot t_v + c \cdot t_h$$

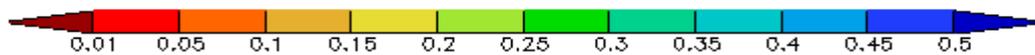
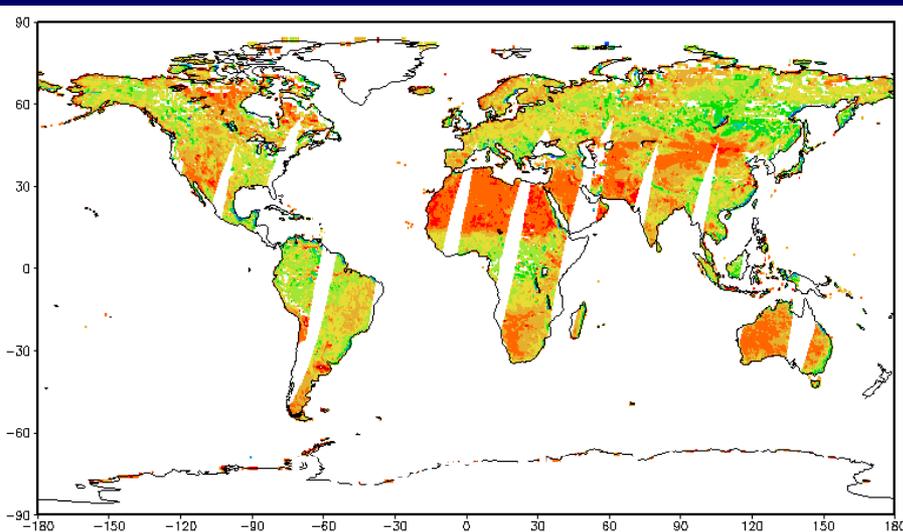
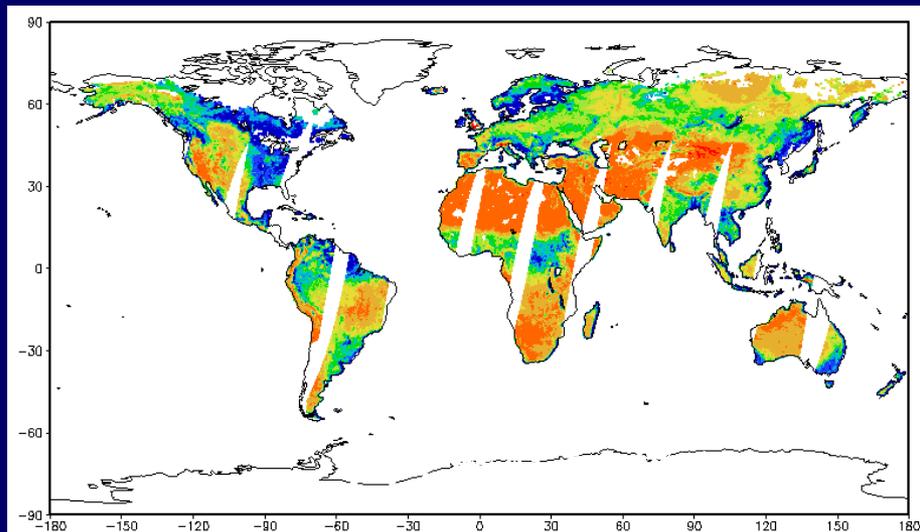
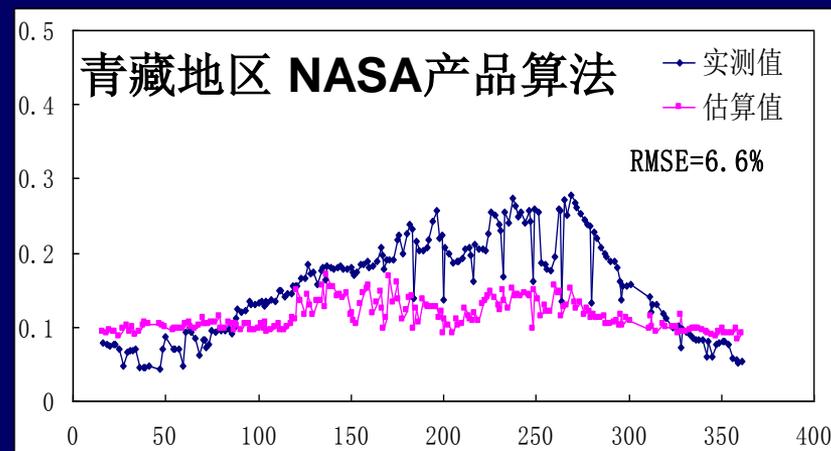
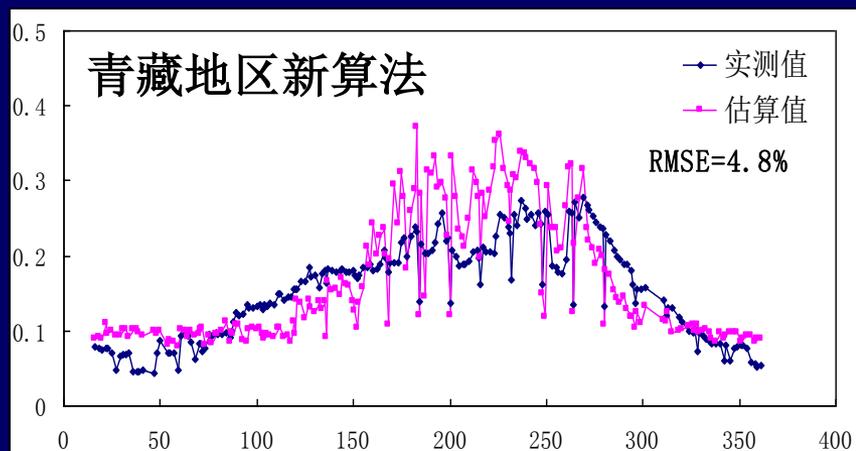
试验数据(法国 INRA' 93)



试验数据(美国BARC)



研究结果的应用: FY-3的全球土壤水分产品



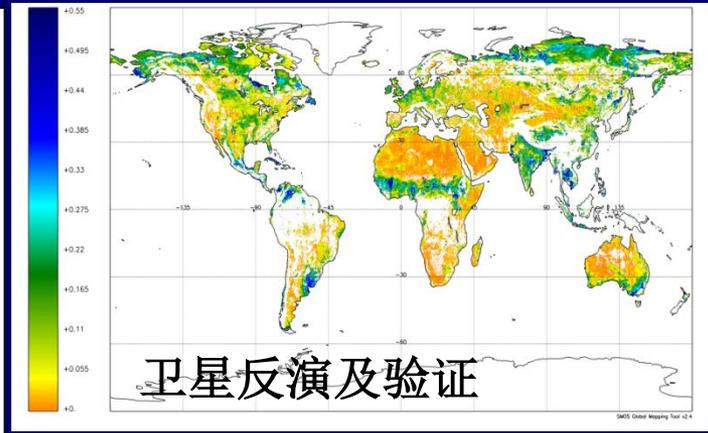
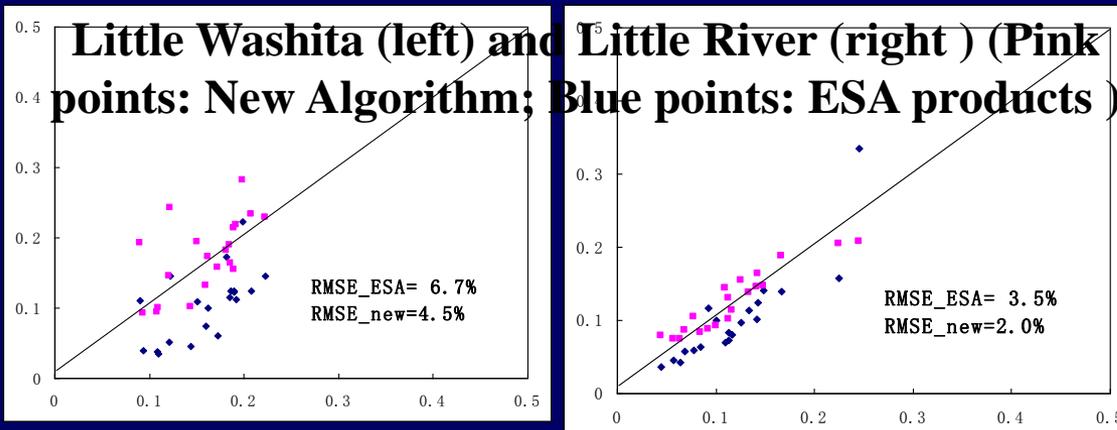
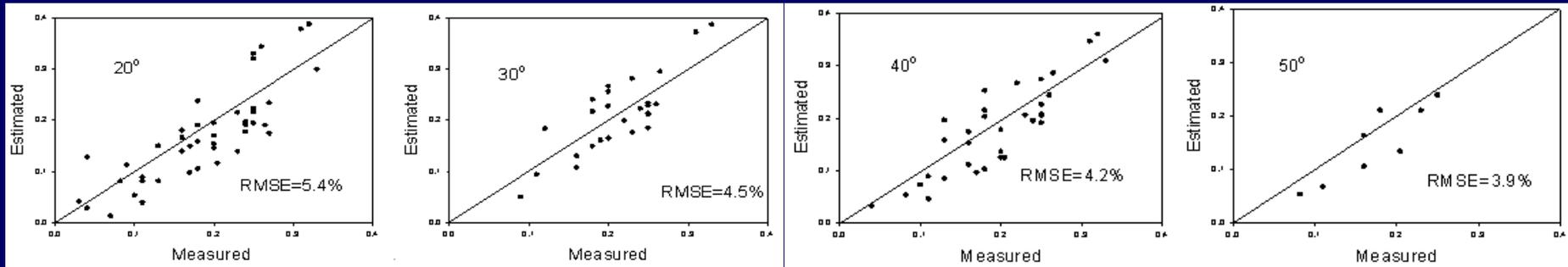
Volumetric Soil Moisture[cm³/cm³]

SMOS – 土壤水分和海洋盐度卫星

SMOS 卫星: 欧空局 (ESA), 2009年11月2日, 首个 L波段(1.4 GHz) 星载辐射计, 采用 2-D 干涉测量技术, 入射角度 $0 \sim 55^\circ$, 视场中心空间分辨率 35 km, 重访周期 3天。



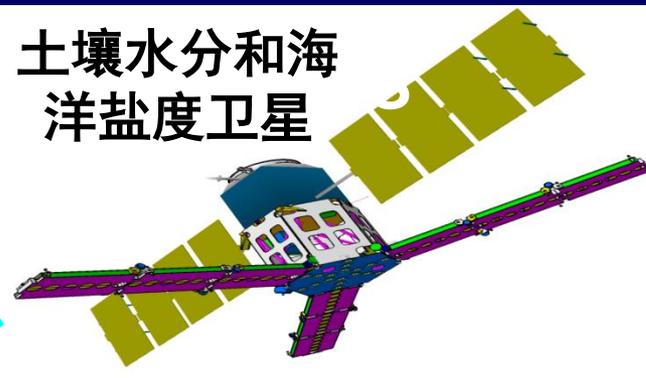
发展了针对**SMOS**的参数化模型并用与定量反演
PORTOS -93 地表土壤水分算法的地表验证



土壤水分长时间数据集生成

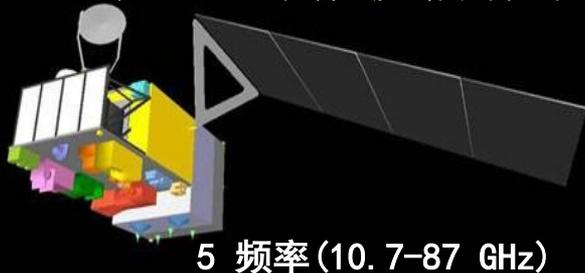
怎样利用**SMOS**卫星
观测校正已有卫星的
反演算法？

土壤水分和海
洋盐度卫星



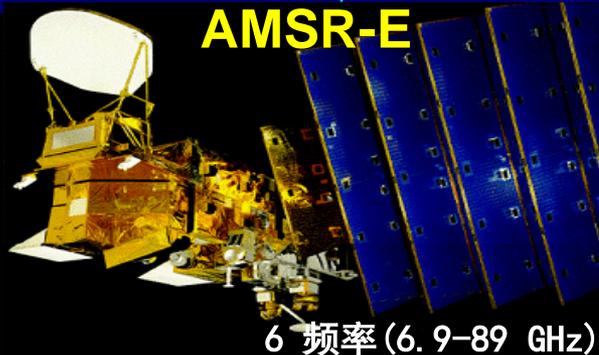
目标：形成长时间
序列为气候变化研究
提供高精度的数据
集

风云3号微波辐射计

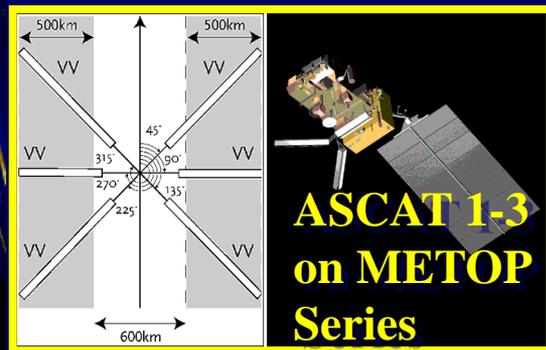


5 频率 (10.7-87 GHz)

AMSR-E



6 频率 (6.9-89 GHz)



TMI/TRMM 等 1998-今

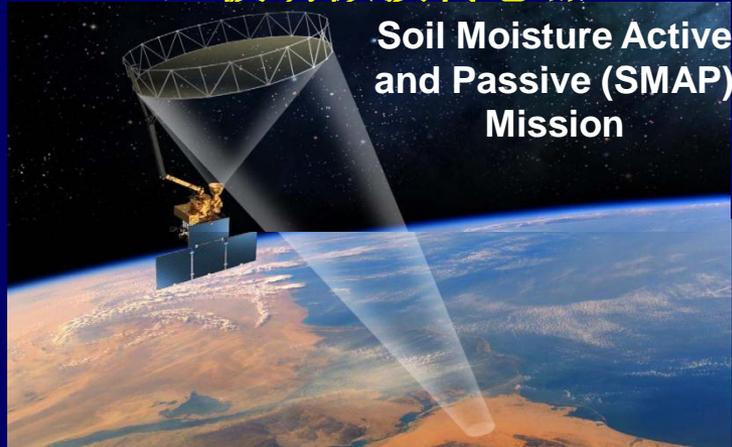
ERS + SACT 1991-今

SSM/I(R): 1978 - 至今

主被动微波联合反演

多传感器高分辨率土壤水分数据生成

主被动微波传感器



Soil Moisture Active and Passive (SMAP) Mission

Radar: L-band (1.26 GHz) : 1-3 km
Radiometer: L-band (1.4 GHz) 40 km

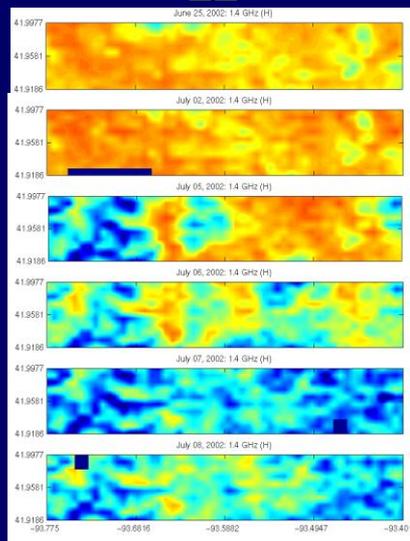
可能性—1

25/06

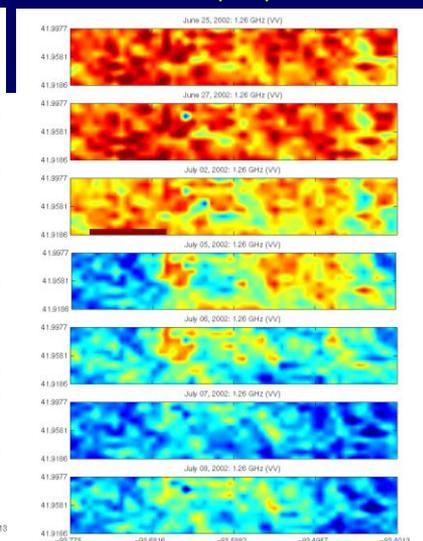
PALS Experiment

8/07

H

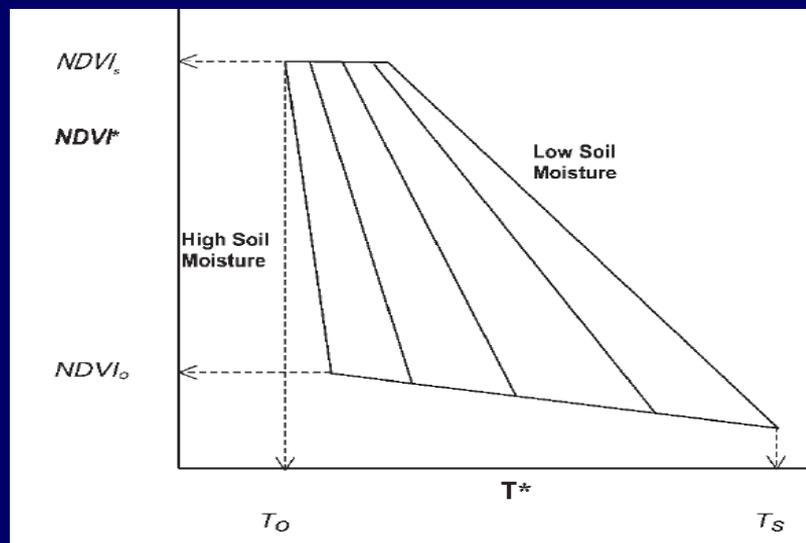


VV



可能性—2 被动微波+光学传感器

- 1) At course resolution to find relationship through time series analysis : $SM=f(NDVI, T_s)$
- 2) At high resolution: $SM=f(NDVI, T_s)$
- 3) Renormalize SM



遥感观测积雪特性参数

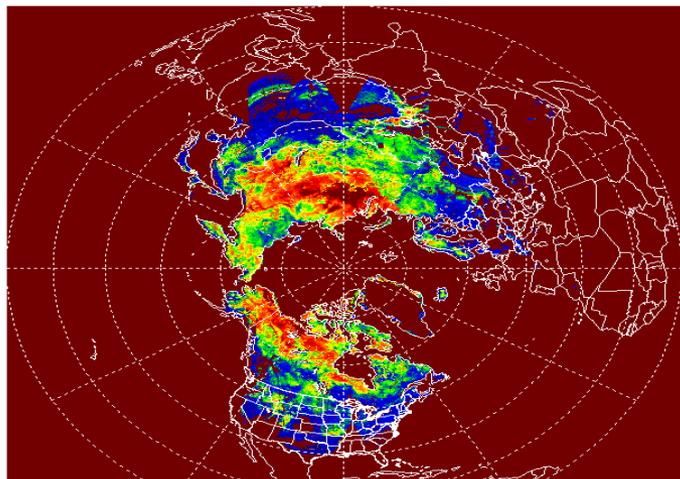
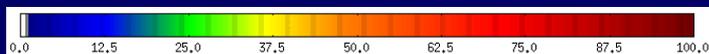
- 光学传感器

- 辐射平衡 (albedo)
- 雪盖面积

- 微波遥感

- 积雪湿度
- 雪水当量
- 雪盖面积
- **CoreH2O mission**

能量与物质平衡计算



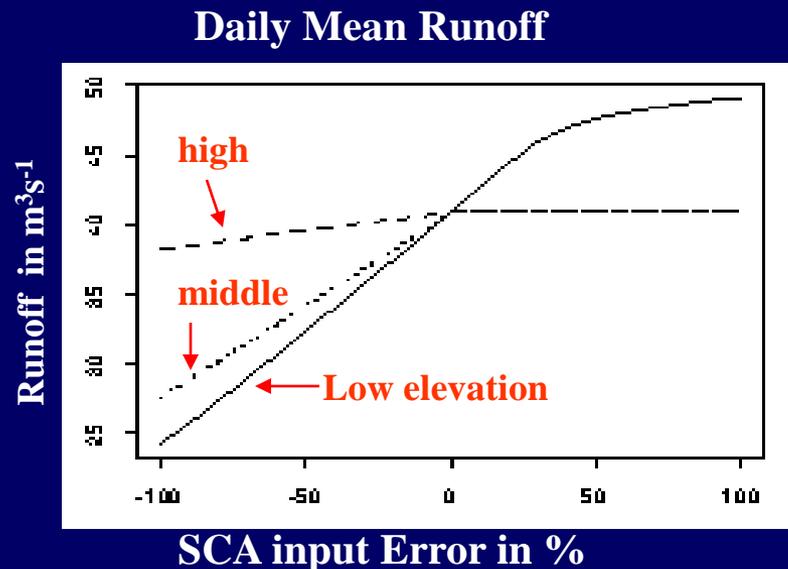
Snow Depth (cm) Jan 02, 2001



积雪覆盖精度在水文应用中的影响

积雪覆盖精度的敏感性分析：对融雪水预报的影响

- 3 个海拔高度区
- 三月15号引入积雪覆盖误差
- 预报三月30号融雪径流
- 主要问题: 50% -> 雪或非雪



MODIS SCA

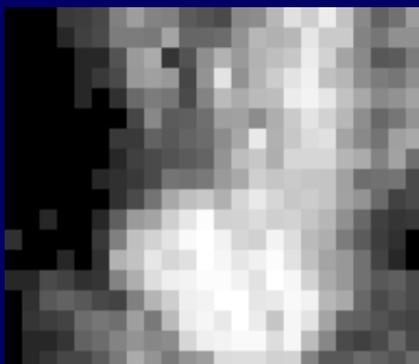
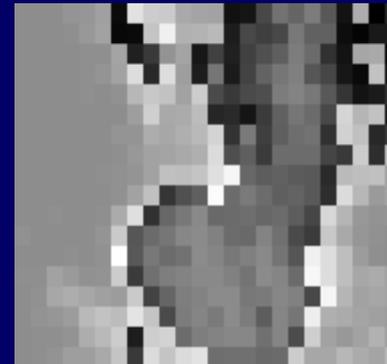


Photo SCA



Difference

光学积雪面积算法中的问题

当前NASA / MODIS积雪面积产品问题

1. 二值化雪分类: $>50\%$ 积雪
2. 基于NDSI统计回归混合像元积雪

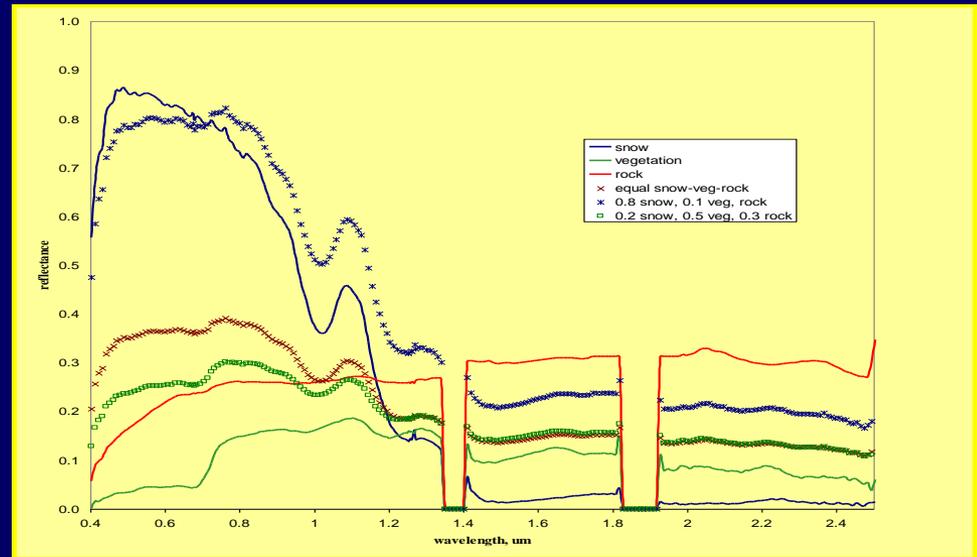
线性混合分解的关键问题

1. 如何选取端元?

- 监督 - 每类地物选单一端元
- 非监督 - 多端元(曲体)
- 非监督 - 模型模拟 + 光谱库

2. 现有端元选取方法局限:

- 不能自动化获取多个同类且具有空间信息的端元
- 难以大数据量、大面积的快速计算

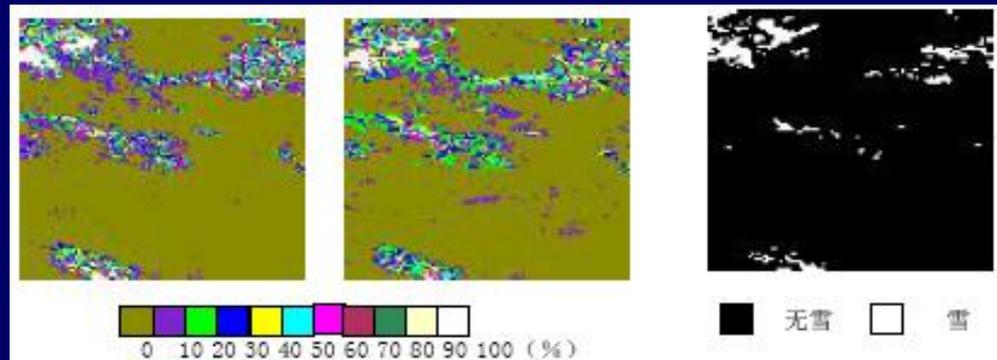


典型地物光谱 (包括落叶林、叶林、岩石、干草) 与中等颗粒大小的雪两两之间进行了线性混合

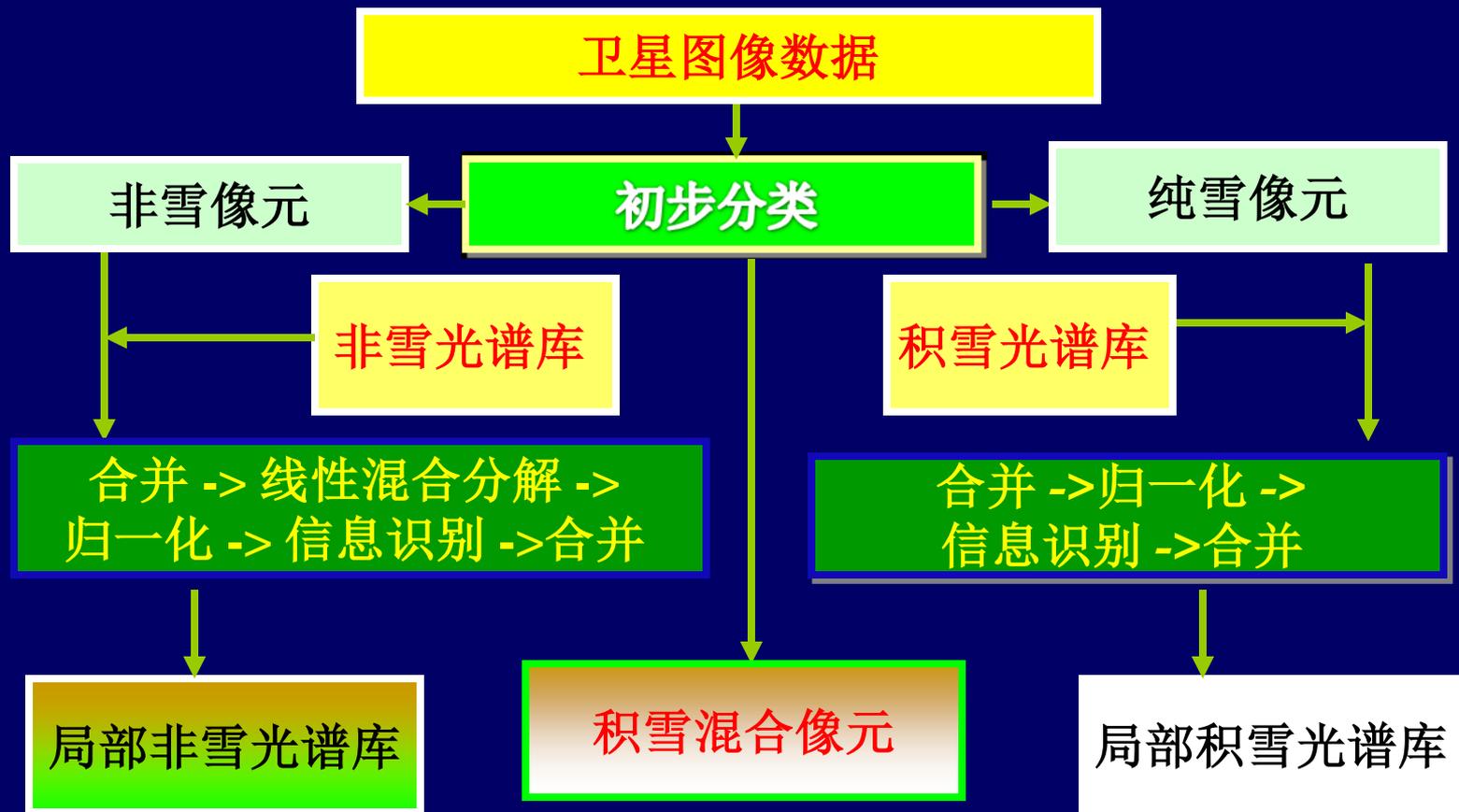
ASTER

混合象元分解

MODIS 1



端元选用技术-建立区域图像光谱库



非雪端元的选取

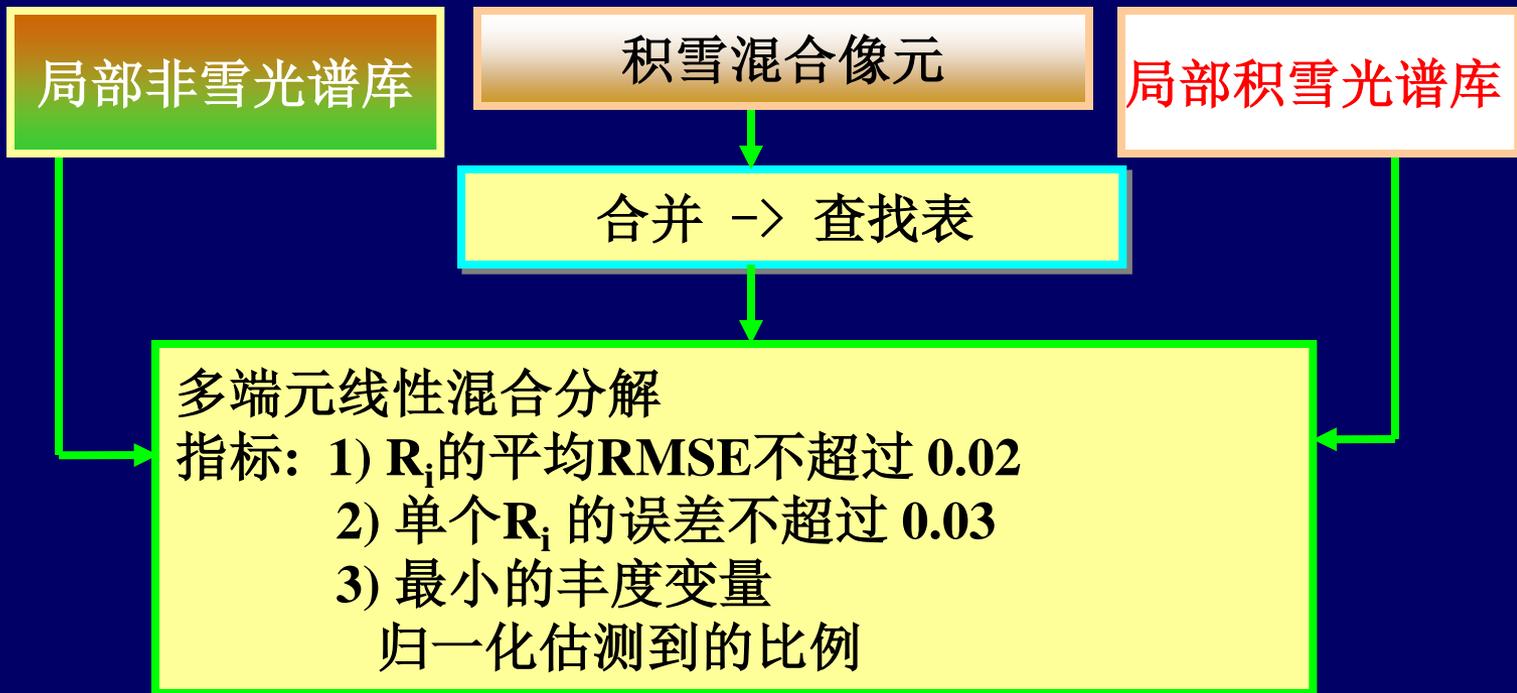
雪端元的选取

端元选取规则

- $NDVI > 0.5$, $NDSI < -0.4$, 如植被;
- $0.25 < NDVI < 0.3$, $NDSI < -0.5$, 如树叶, 低矮植被;
- $0 < NDVI < 0.15$, $NDSI < -0.4$, 如土壤、岩石。

- $NDVI < -0.035$,
- $NDSI > 0.75$, 通道 2 > 0.7

多端元的线性混合分解



基本原理

$$R_i(\theta) = \sum_{j=1}^N f_j \cdot R_e^j(\theta), \quad \sum_{j=1}^N f_j = 1$$

遥感应用

$$\min(RMSE) = R_i(\theta) - \sum_{j=1}^N f_j \cdot R_e^j(\theta)$$

亚像元+纯像元的雪填图

MODIS混合像元分解算法结果

影像	时间	地理环境
影像1	2001,9,30	冰川、雪盖与裸土分布广， 山势高大， 青藏高原西部
影像2	2001,9,30	
影像3	2001,10,8	
影像4	2000,10,7	青藏高原内部，地势较平坦，冰川河 湖众多， 牧草繁茂
影像5	2000,9,30	
影像6	2000,9,30	
影像7	2001,6,13	
影像8	2001,1,20	冰川、雪盖与裸土分布广，喜马拉雅 山脉北坡
影像9	2001,4,12	青藏高原东部， 河流、森林与雪山相间
影像10	2001,4,12	
影像11	2001,4,12	
影像12	2001,4,12	

验证方法

15米ASTER影像

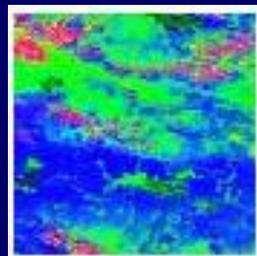


MODIS影像



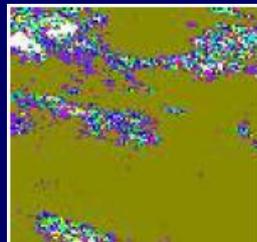
几何配准

↓ 分类



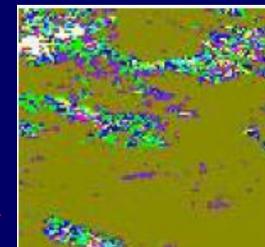
15米
雪盖
分布
图

↓ 重采样



雪面积百分比图

↓ 线性混
合分解



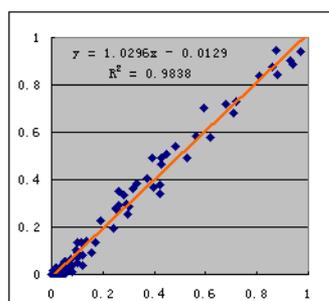
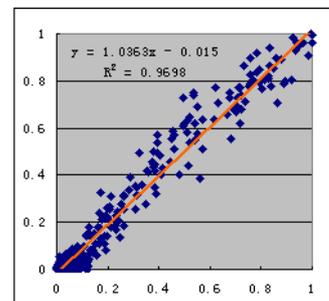
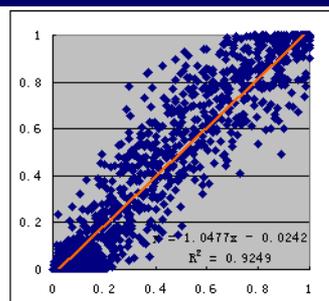
验证

线性混合分解结果

MODIS亚像元雪填图与ASTER雪盖结果比较

以12幅ASTER雪盖信息作为“真实值”，按不同尺度；1km×1km、2km×2km、5km×5km，进行比较；发现分解结果可靠，且尺度越大误差越小

图像编号	网格大小	NDSI-FSA			混合像元分解方法		
		R	R ²	Rmse	R	R ²	Rmse
图像4	1KM×1KM	0.778	0.605	0.159	0.935	0.874	0.090
	2KM×2KM	0.834	0.696	0.129	0.960	0.923	0.065
	5KM×5KM	0.889	0.790	0.095	0.978	0.956	0.044
图像5	1KM×1KM	0.849	0.722	0.204	0.939	0.863	0.143
	2KM×2KM	0.925	0.857	0.126	0.973	0.948	0.076
	5KM×5KM	0.957	0.916	0.076	0.990	0.980	0.037
图像6	1KM×1KM	0.783	0.612	0.169	0.918	0.842	0.108
	2KM×2KM	0.838	0.702	0.133	0.959	0.919	0.069
	5KM×5KM	0.879	0.756	0.099	0.978	0.956	0.042
图像7	1KM×1KM	0.815	0.664	0.099	0.941	0.886	0.058
	2KM×2KM	0.853	0.727	0.081	0.975	0.950	0.034
	5KM×5KM	0.901	0.812	0.058	0.989	0.979	0.019



亚像元雪填图研究进展亮点

1. 自动化获取,并有效避免目前选取多端元的方法的问题,为全球大面积的计算积雪面积提供了新的技术
2. 亚像元雪填图可以有效的解决目前MODIS产品的系统误差问题
3. 验证的结果表明我们的精度比MODIS的高,并且是随机误差

静止卫星FY-2E的应用

许多地方的季节性积雪具有高空间和高时间变化的特征



积雪在10天内的变化

目前MODIS的积雪面积产品是8天合成，不能满足水循环和水文应用研究

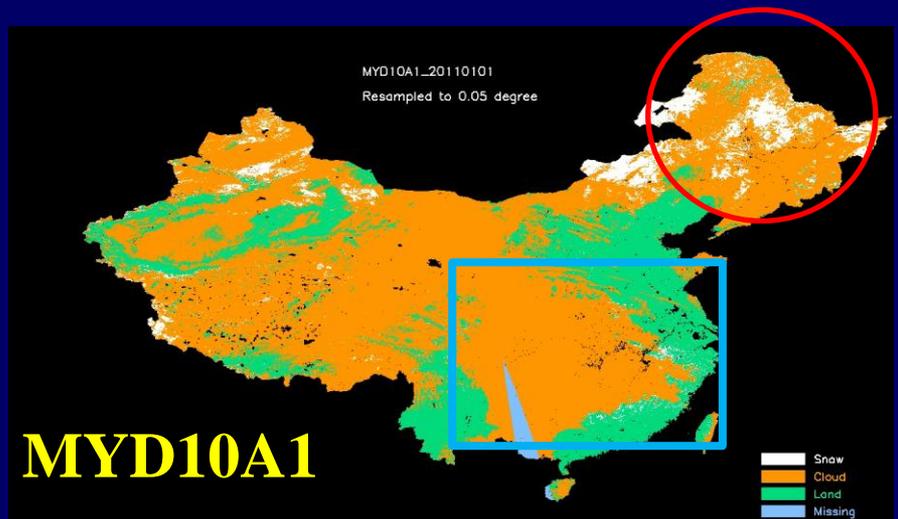
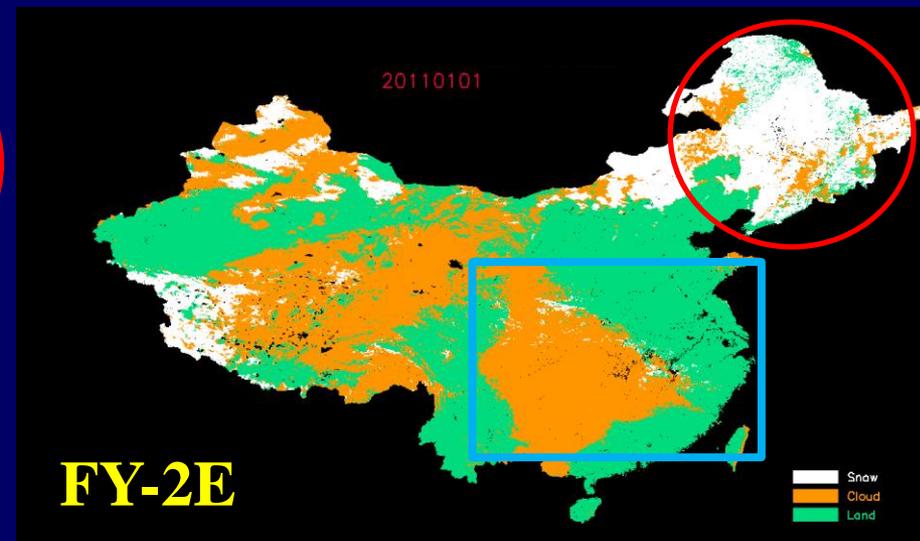
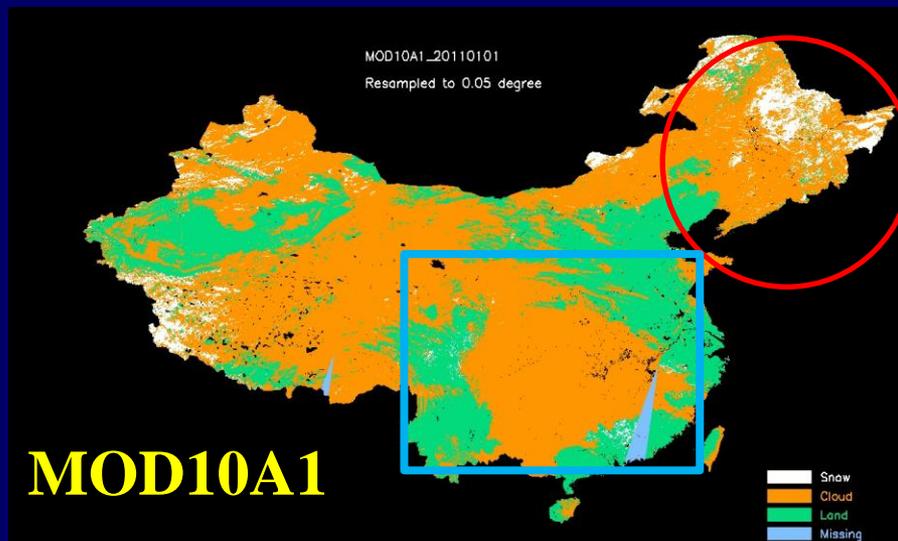
FY-2E VISSR(Visible and Infrared Spin Scan-Radiometer)



Band	Wavelength range (μm)	Spatial resolution (km)
VIS	0.55 - 0.90	1.25
IR1	10.3 - 11.3	5
IR2	11.5 - 12.5	5
IR3	6.5 - 7.0	5
IR4	3.5 - 4.0	5



FY-2E Imager 与 MODIS 积雪识别



1. MODIS的8天合成积雪面积产品仅能识别30%（一颗星）到40%左右的积雪（双星）
2. 利用静止卫星的观测（90%左右的积雪）可以大力提高积雪识别的时间分辨率

目前被动微波雪水当量估算的方法与问题

• 目前算法

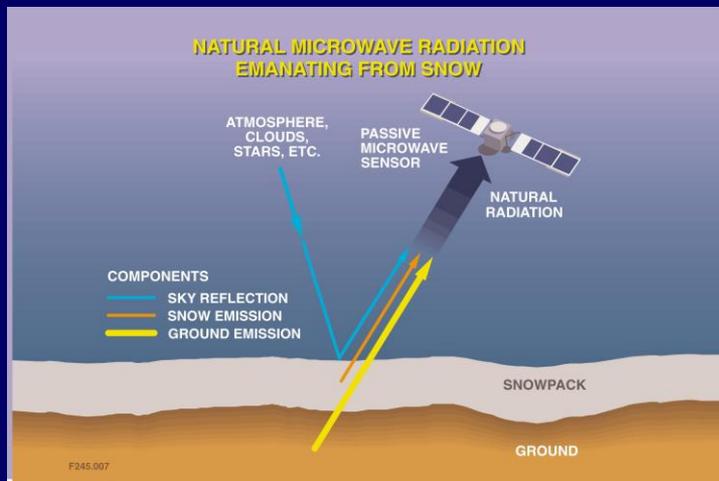
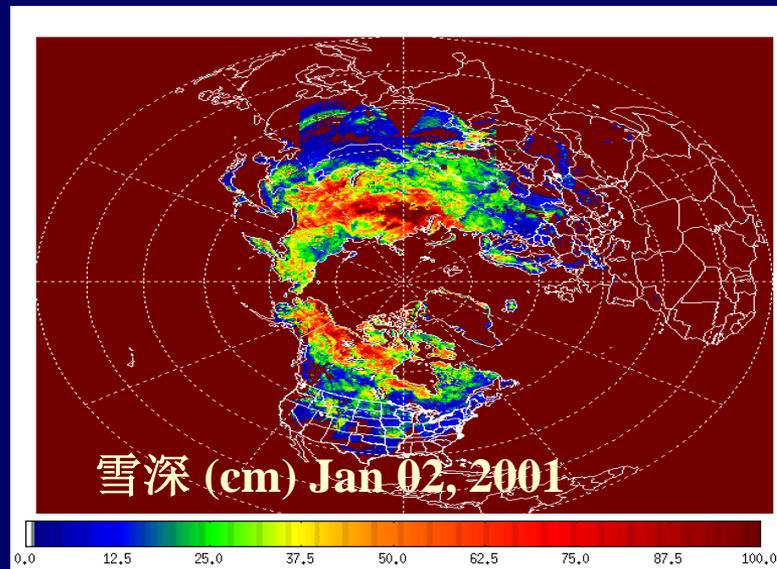
$$SD(SWE) = a + b \cdot (T_{Bp}(18) - T_{Bp}(37))$$

存在的问题

水平不均一性（混合像元）

垂直不均一性

雪的自身特征



中国区域雪水当量半经验算法改进

NASA
AMSR-E算法

$$SWE = \frac{a(T_{b18h} - T_{b36h})}{1 - f}$$
$$SD = \frac{SWE}{\rho * 10}$$

不同的地表类型参数a不同； f是森林覆盖度

半经验新算法—利用地面观测及引入积雪覆盖面积

$$SD = \text{value1} * SD(\text{FOREST}) + \text{value2} * SD(\text{SHRU}) + \text{value3} * SD(\text{GARSS}) + \text{value4} * SD(\text{BARREN}) \quad (SD \geq 3\text{cm})$$

$$Sd(\text{forest}) = 1.381 + 1.107 * sc * (t18h - t36h) + 2.807 * (t89v - t89h)$$

$$Sd(\text{shrub}) = 6.599 - 0.074 * sc * (t18v - t18h)$$

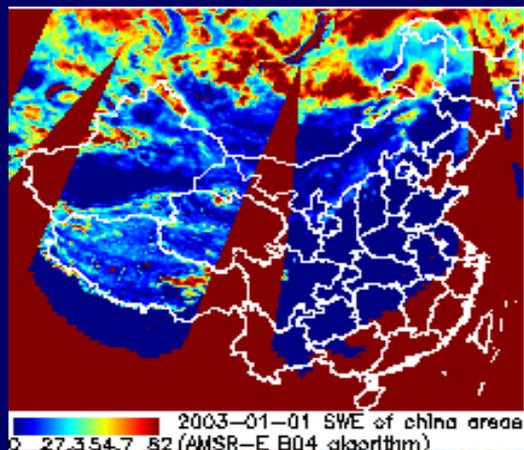
$$Sd(\text{grass}) = 6.495 + 0.531 * sc * (t18h - t36h) + 0.116 * (t89v - t89h)$$

$$Sd(\text{baren}) = 2.990 + 0.417 * sc * (t18v - t36v) + 0.364 * (t89v - t89h)$$

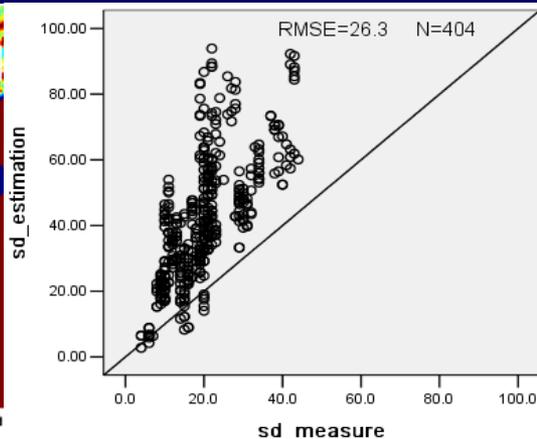
value1, value2, value3, value4分别为FOREST, SHRUB, GRASS, BARREN地物类型在象元内的百分比。

雪水当量结果验证及算法比较

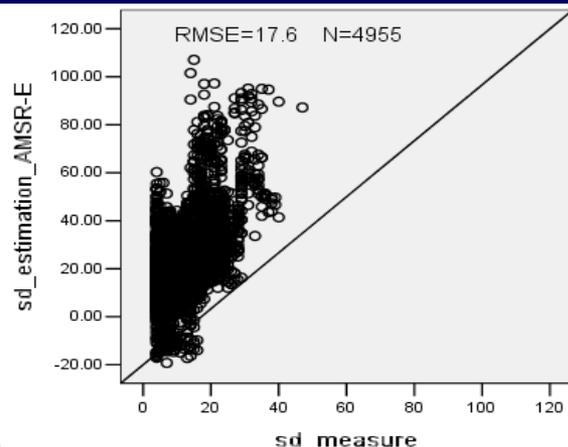
AMSR-E
B04产
品算法
结果图
(无混
合象元
分解)



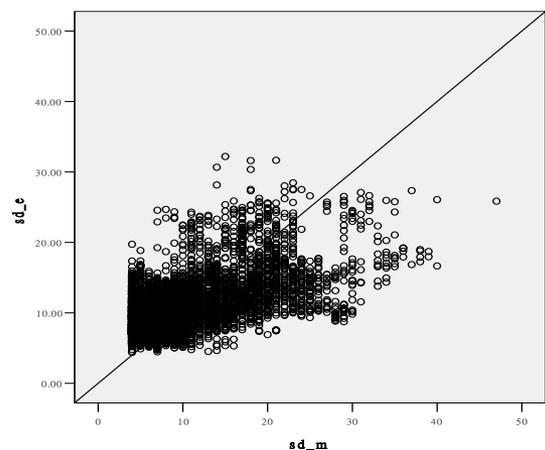
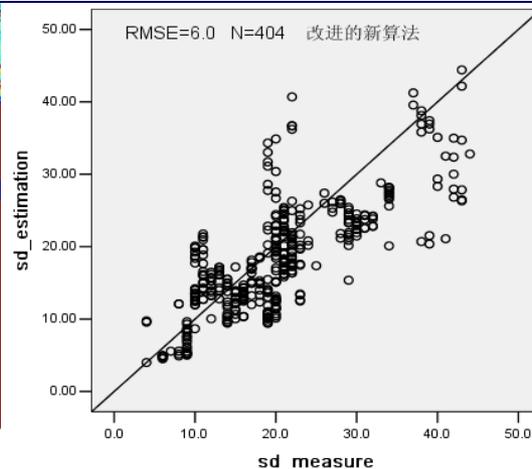
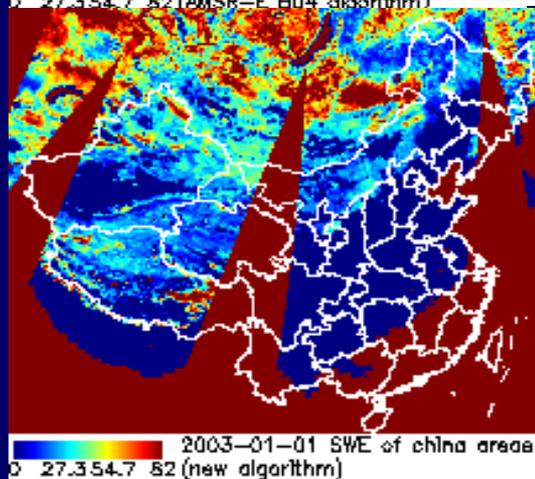
新疆地区



中国区域



新算
法结
果图
(考
虑混
合象
元分
解)



雪水当量半经验算法的研究进展亮点

算法的改进：引入积雪面积后大大提高了反演精度

利用理论模型发展积雪辐射参数化模型

各传感器下积雪辐射参数化模型误差

卫星	入射角 (°)	频率 GHz	RMSE (V-pol)	RMSE (V-pol)
SSMR	50.3	10.7	0.0129	0.016
		18	0.0112	0.015
		37	0.0117	0.016
SSM/I	53.1	19.35	0.0091	0.011
		37.0	0.0111	0.014
TRMM (TMI)	52.8	10.65	0.0080	0.0095
		19.35	0.0093	0.0112
		37	0.0112	0.014
AMSR-E	55	10.65	0.0042	0.005
		18.7	0.0072	0.009
		36.5	0.0108	0.013
FY3 MWRI	53	10.65	0.0076	0.009
		18.7	0.0072	0.011
		36.5	0.011	0.014

参数化模型形式:

$$E_p^t = E_{mp}^v + E_{mp}^{sv} + E_{mp}^s \approx E_p^v \cdot Cf_p^v + E_p^s \cdot Cf_p^{svs}$$

纠正因子

$$Cf_p^{svs} = L_p \cdot \exp(a + b \cdot \log(L_p) + c \cdot \omega + d \cdot \omega \cdot \log(L_p) + e \cdot (\omega \cdot \log(L_p))^2)$$

$$Cf_p^v = (a + b \cdot \log(L_p) + c \cdot \omega + d \cdot \omega^2 \cdot \log(L_p) + e \cdot \omega^3 \cdot \log(L_p))$$

其中，系数a,b,c,d,e,均与频率有关

发展了高效、简单、准确的参数化微波辐射模型，并根据实测数据得以验证。可用于

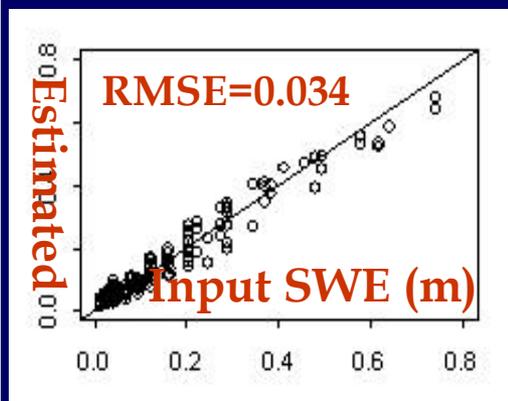
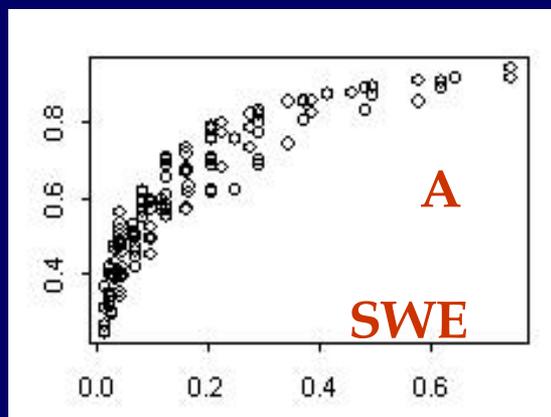
- 1) 遥感的定量反演
- 2) 数据同化中的观测算子

利用模拟数据发展雪水当量反演算法

发展了提取积雪信号（去除土壤辐射影响）的新技术

$$A = E_p^t(f_1) - B \cdot E_p^t(f_1)$$

$$B = \frac{E_v^t(f_1) - E_h^t(f_1)}{E_v^t(f_2) - E_h^t(f_2)}$$

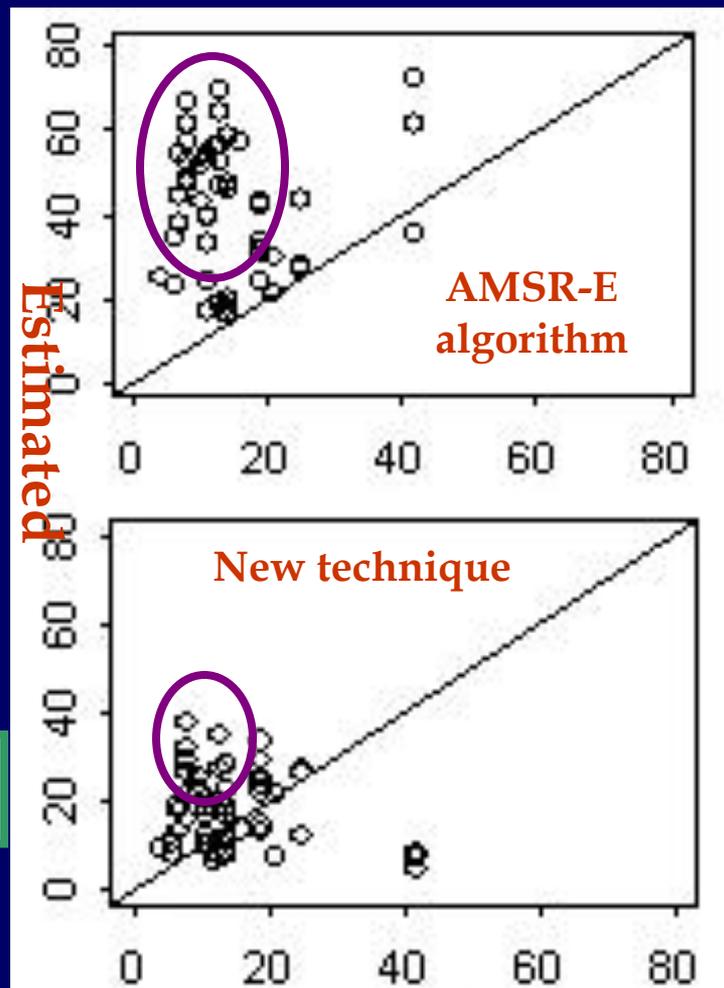


根据A，B与SWE之间的关系，可估算出SWE

$$swe \approx \exp(a + b \cdot A + c \cdot A^2 + d \cdot \log(-\log(B)))$$

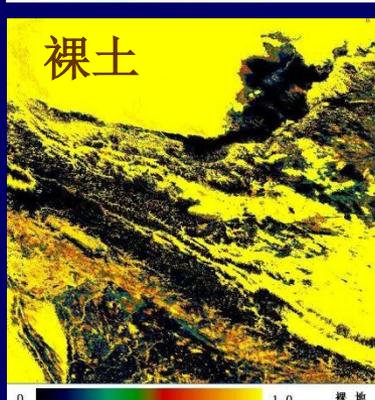
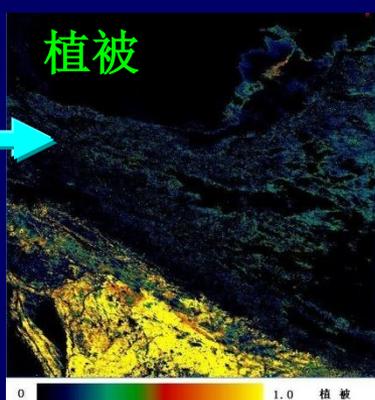
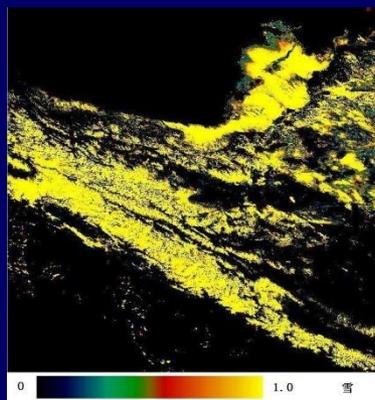
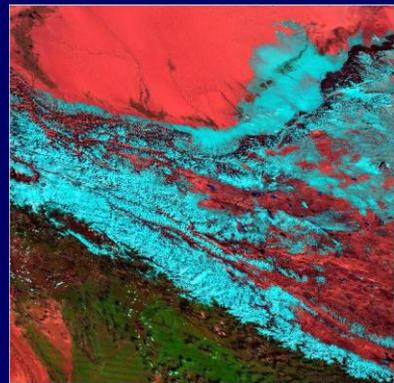
其中，a, b, c, d 回归系数。

雪水当量算法比较
(CLPX2003, PSR, North Park)



解决混合像元雪当量反演思路

光学观测



下雪前微波观测

下雪后微波观测

非雪地物微波
频谱观测特性

混合像元分解

提取纯雪
辐射信号

纯雪雪当量反演

雪水当量理论算法
的研究进展亮点

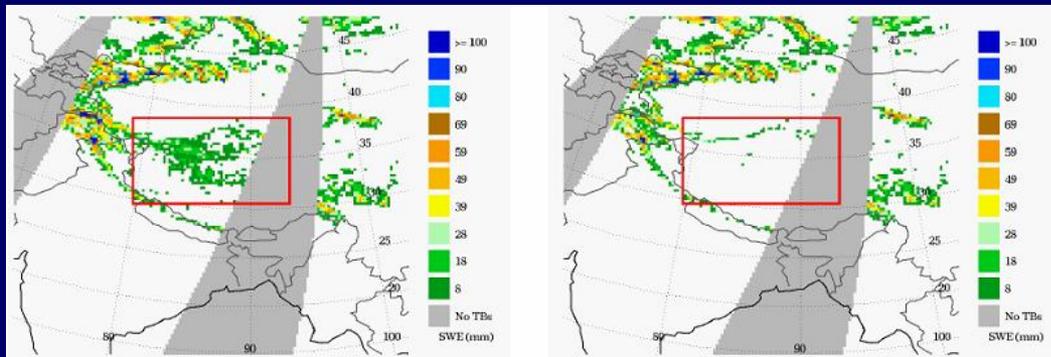
1. 发展了高效、简单、准确的参数化微波辐射模型
2. 发展了提取微波积雪信号的新技术及雪水当量反演算法
3. 验证的结果表明我们的精度比NASA的高
4. 如何提取混合象元中的纯雪信号是提高现有雪当量精度的关键和难点

进一步提高雪当量观测精度的思路

发现和必须改进的问题:

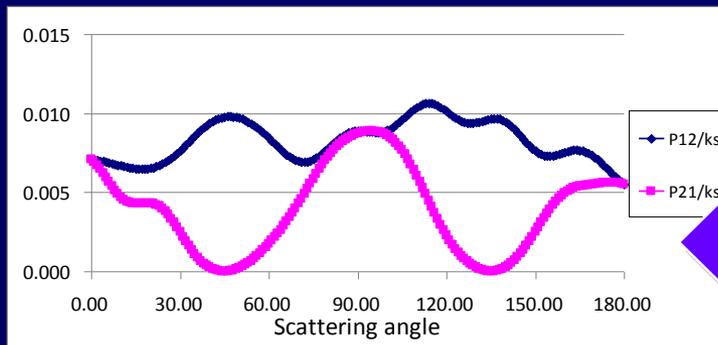
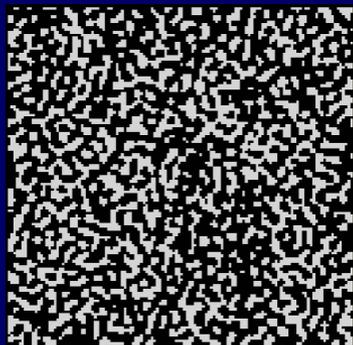
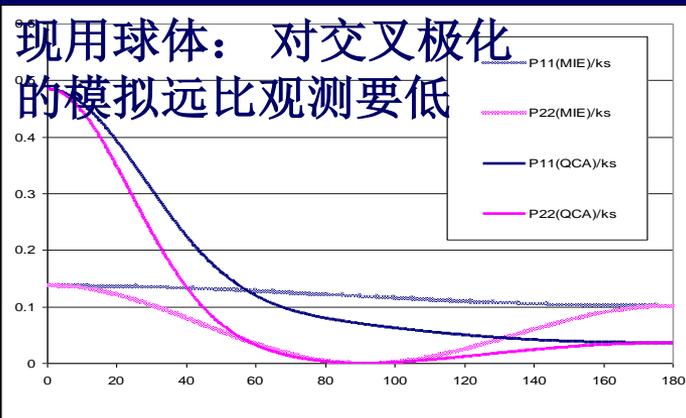
1) 大气对雪当量反演的影响

2) 对积雪模型的机理上，必须考虑结构和交叉极化的影响



Result of atmospheric correction, November 29, 2003. SWE derived from uncorrected AMSR-E (left) and corrected AMSR-E (right).

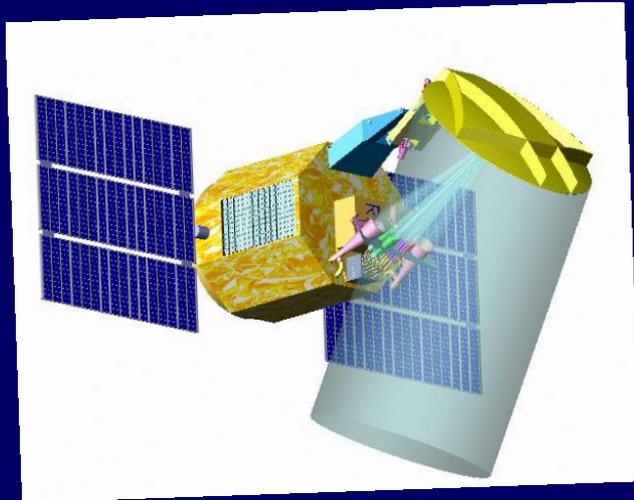
现用球体：对交叉极化的模拟远比观测要低



半连续模型+DDA(Discrete Dipole Approximation):有望解决这一问题

陆地固体水卫星观测的需求

Snow



1.95 m pushbroom reflector
with offset feeds

Glacier

Current Capabilities:

1. Glacier and its covered area can be detected and mapped with optical sensors
2. Radar Interferometric technique can detect glacial surface movement

Science needs: Total volume of glaciers

ESA CoReH2O: Cold Regions High-Resolution Hydrologic Observatory

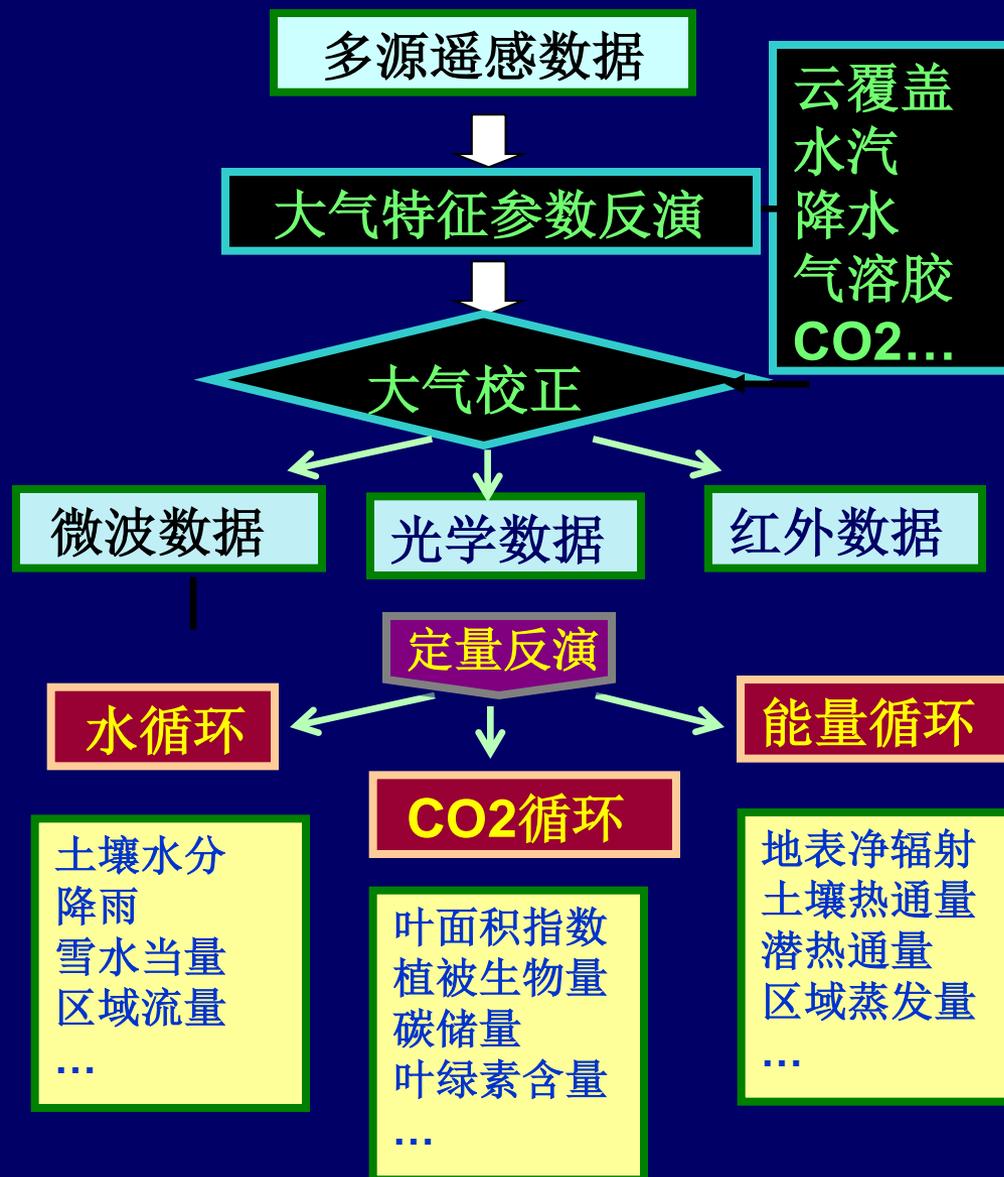
- **ESA Earth Explorer Program, Core Missions**

- Proposed August 2005
- Selections February, 2006
- Final selection, March 2013

报告提纲

1. 水循环研究的重要性及面临的问题
2. 目前水循环遥感的研究现状及面临的问题
3. 土壤水分和积雪遥感研究实例
4. 总体发展方向

遥感关键参数的系统集成



研究思路：必需打破，

1. 单一传感器及单一参数的研究方式
2. 反演各参数中相互独立的研究方式，形成综合反演系统

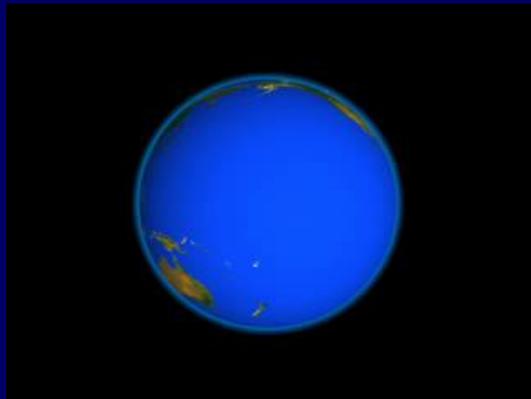
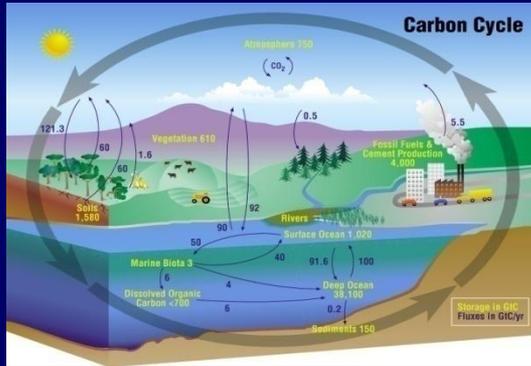
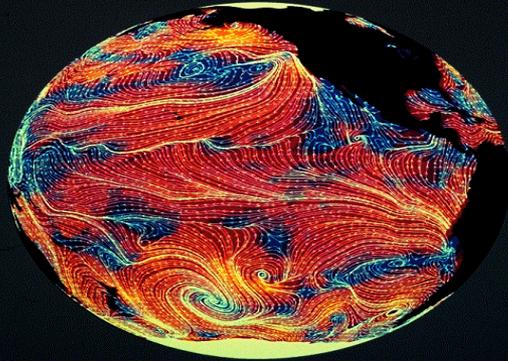
技术路线：

1. 科学应用驱动，针对碳、水、能量循环的过程模型，发展具有物理和生态意义地球科学参数（模型需求）
2. 发展综合多传感器和多平台数据的综合反演技术，解决目前单一传感器参数及单一参数反演结果相互不一致的缺陷（针对单一参数）
3. 有效的利用各研究人员专长，避免重复计算

目标：

生成具有比目前国际反演技术更高精度的多种参数产品（至少在我国区域内）。为我国气候变化、水、碳循环研究提供一套更精确的时空分布的数据

遥感在地球系统模式中的应用



GCM或再分析数据 (NCEP/NCAR和ERA-40) 1-2.5°



动力和物理降尺度

区域气候模式 + MicroMet (10-25km)



1) 初始场

陆面过程及全球植被模拟系统 (GVMS)
(各种动态的陆面水文及生态过程模式)

水文及生态的重要参数

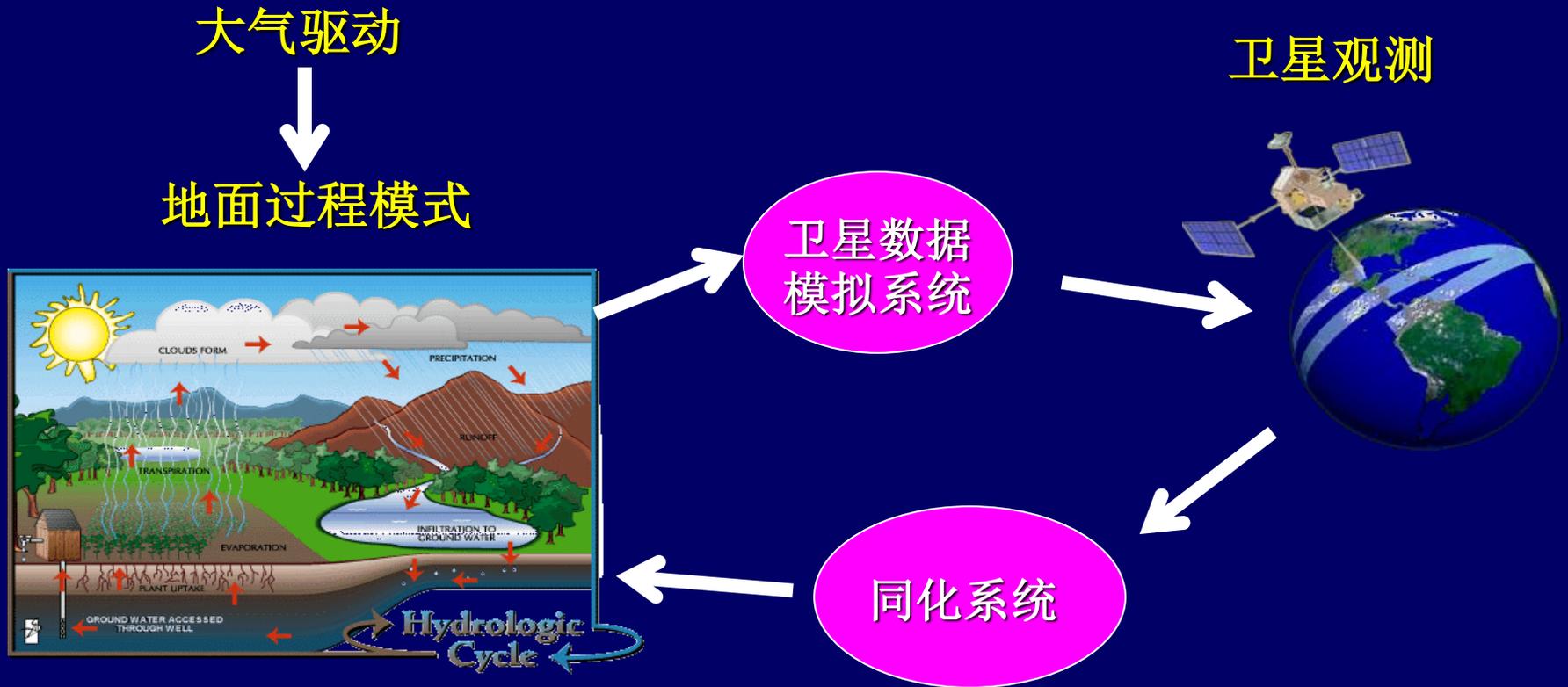


2)
同化系统



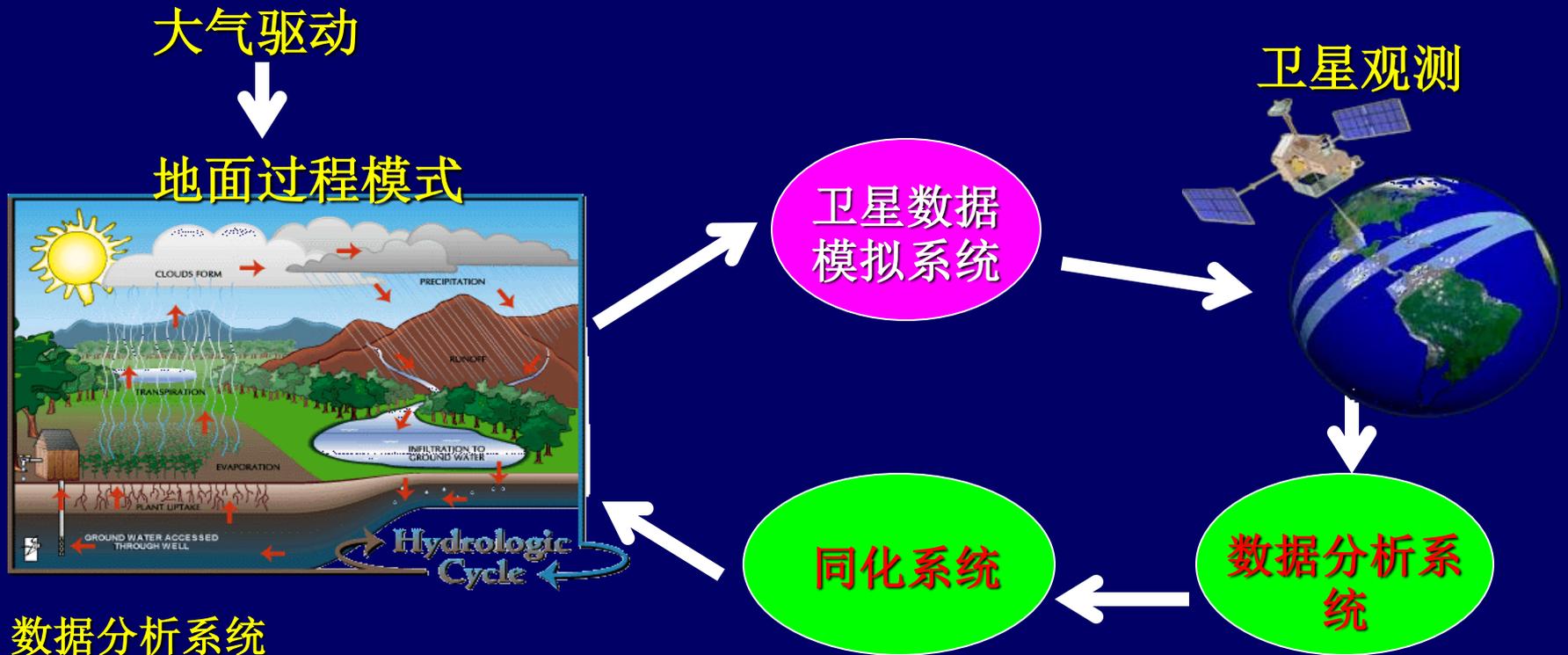
其通量组分 (蒸散发), 及生态系统净交换 (NEE), 即净初级生产力 (NPP) 及异养呼吸 (HR)

目前用于站点或卫星观测的同化系统



1. 地表过程的数据同化-- 提高了给定产品的精度;
2. 同化时 - 不平衡;
3. 对模型的预报能力并没有改进;

发展基于卫星观测的同化校正系统



数据分析系统

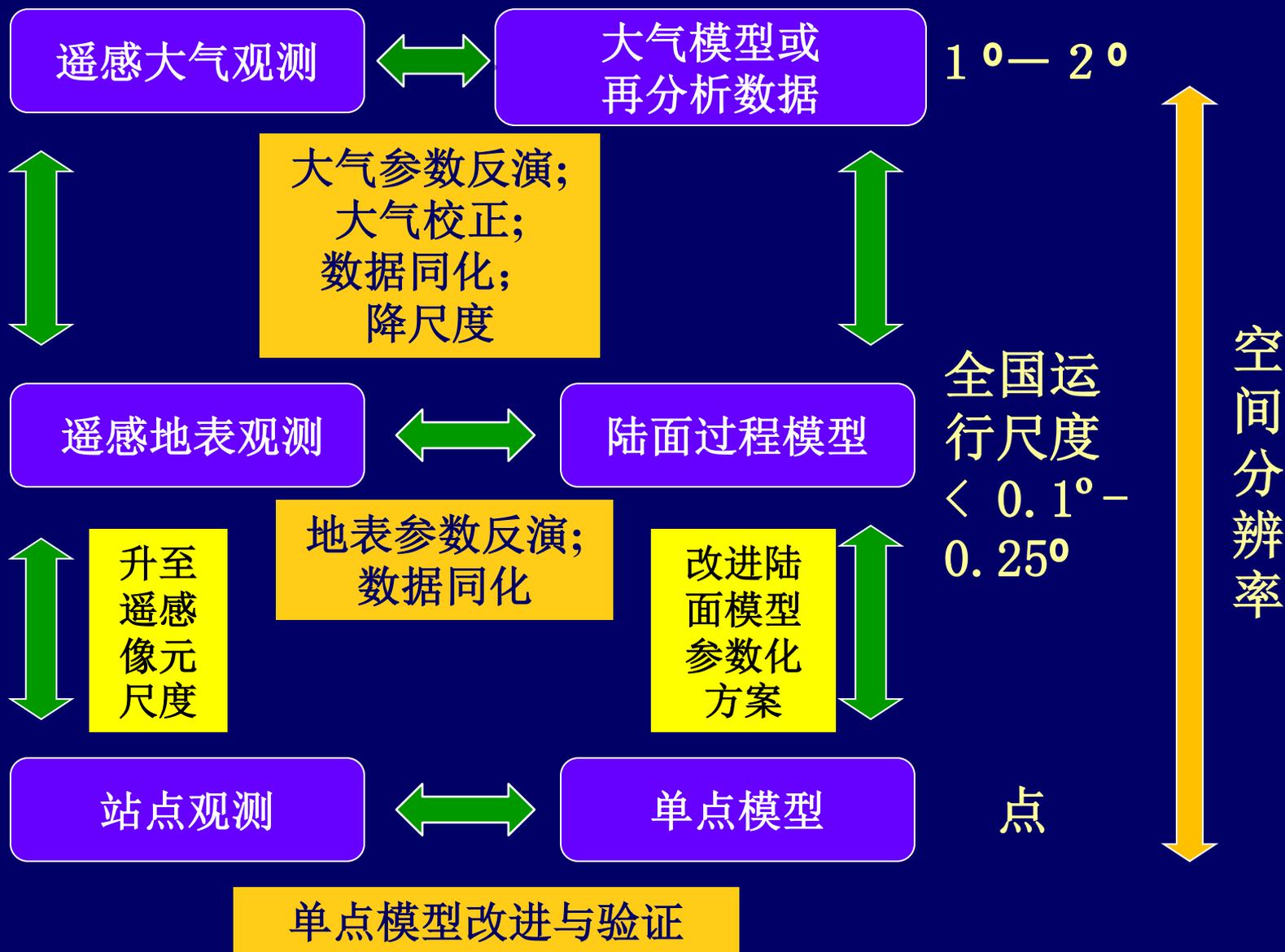
1. 发展以大气和陆面模式中的可靠输出参数为基础的新的遥感技术方法；
2. 发展利用卫星测量的新的遥感技术以判别大气和陆面模式输出参数的误差及精度。

同化系统

基于超级参数化的模型校正。

总体思路-遥感与模式的有机结合

模型与观测在不同尺度的有机结合



谢谢!

