

基于风云被动微波与地面 观测的雪深动态融合反演

赵亮

中科院大气物理研究所

朱玉祥

中国气象局气象干部培训学院

郑照军

国家卫星气象中心

2017年4月

提 纲

目的意义

单一来源数据的天生缺陷问题

雪深反演中存在的问题

静态反演和ANSA融合算法的缺陷

雪深动态融合反演算法

利用被动微波和测站数据进行雪深动态反演

精度评价

交叉验证、误差分析和准确率分析

相关论文

- 1) 赵亮,朱玉祥,杨弘,胡娅敏,夏明,郭建平. 一种基于卫星遥感与地面测站数据融合技术的雪深动态反演方法. *气象学报*, 2013, 71(4): 769-782, doi: 10.11676/qxxb2013.056.
- 2) 赵亮, 朱玉祥, 程亮, 王成林.遥感—测站相结合的动态雪深反演方法初探. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 685~697.
- 3) Zhao Liang, Zhu Yuxiang, Liu Haiwen, Liu Yanju, Zhongfang Liu, Chen Zhou. A stable snow-atmosphere coupled mode. *Climate Dynamics*, 2016, 47(7): 2085-2104,DOI: 10.1007/s00382-015-2952-z.
- 4) Zhao Liang, Zhu Yuxiang, Xiao Ziniu. A dynamic approach to retrieving snow depth based on the technology of integrating satellite remote sensing and in situ data (Presentation Number: ACG46-P32). 20 to 25 May 2017, Chiba, Japan



一、目的和意义

目的和意义

- 针对单一来源数据的天生缺陷问题：
可见光反演虽准确率高但受云影响；
微波反演虽不受云影响但在高原存在明显高估/分辨率低；
测站观测虽准确但分布稀疏代表性差。
- 将可见光、**被动微波和测站数据**三者有效融合起来，弥补单一方法存在的固有缺陷，有助于进一步提高青藏高原等地形复杂区雪深的反演精度。

A winter landscape featuring a vast, snow-covered field in the foreground. In the middle ground, a dense line of tall, thin evergreen trees stands against a clear blue sky with a few wispy white clouds. The scene is brightly lit, suggesting a sunny day. The text '二、积雪反演中存在的问题' is overlaid in the center of the image.

二、积雪反演中存在的问题

■ 静态被动微波反演方法存在的问题

目前，对雪深反演应用最为广泛的方法是Chang et al.(1987)的算法，他根据辐射传输理论和米氏散射理论，假设雪密度为 0.3g/cm^3 、雪粒径为 0.35 mm 、雪厚 $<1\text{m}$ 的前提下，获得了一个半经验半物理模型的雪深反演公式：

$$SD = 1.59 \times (Tb_{18h} - Tb_{37h}) \quad \text{Chang et al.}(1987)$$

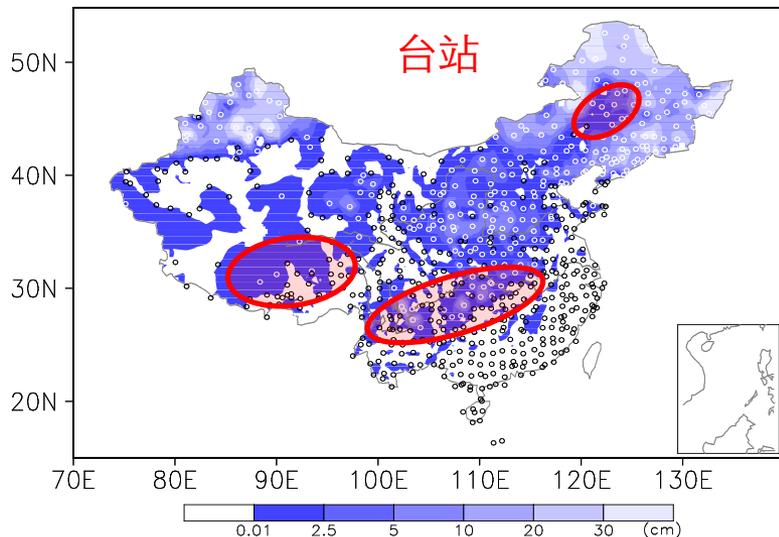
$$SD = 2.0 \times (Tb_{18h} - Tb_{37h}) - 8.0 \quad \text{Chang et al.}(1992)$$

- ✓ 传统的微波遥感反演方法在我国应用效果并不好，在西部往往高估积雪状况，而在东部，不同的方法结果不同。
- ✓ 原因是不满足假设条件。
- ✓ 对雪深这种对环境要素高度敏感的物理参数而言，单一的反演方法可能难有实质性的提高。

■ 静态被动微波反演方法存在的问题

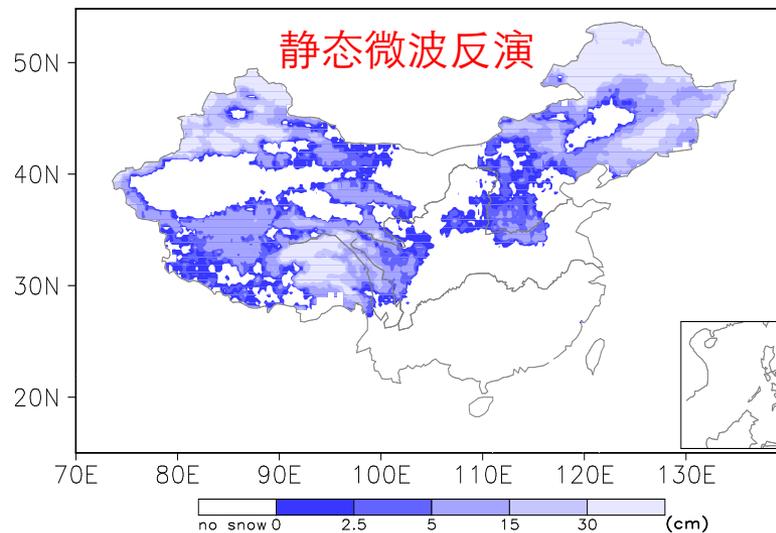
观
测

Observed snow depth JAN 21 2000



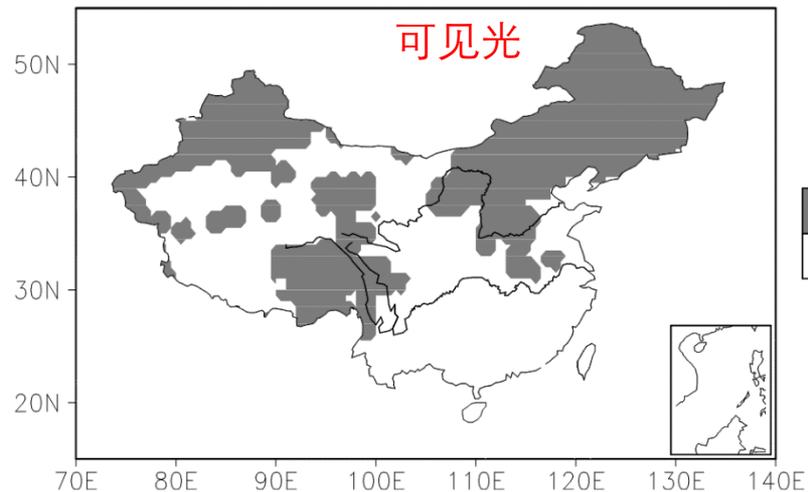
静态反演雪深 (Chang92)

JAN 21 2000



反
演

Weekly snow cover from NSIDC

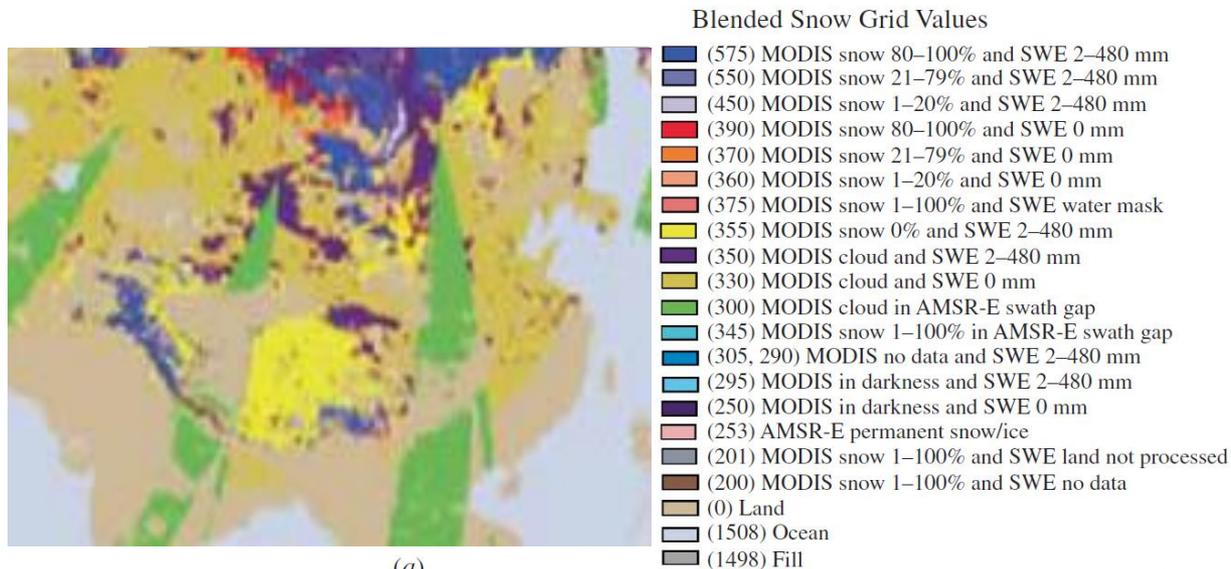


- 传统的微波遥感反演方法在我国应用效果并不好，在西部往往高估积雪状况，而在东部，常常低估雪深。
- ✓ 对雪深这种对环境要素高度敏感的物理参数而言，单一的反演方法可能难有实质性的提高。

■ 新的ANSA融合算法存在的问题

该算法的基本原理是：对每一个时空像元，以可见光雪产品（如MOD10C1雪盖产品）为第一选择（因为它在晴空时有更少的不确定性，且对湿雪、浅雪有更高的准确率）；以被动微波积雪分类树方法得到的积雪产品（Grody, 1996; Kelly等, 2009）为第二选择。

ANSA snow map 15 April 2007



(a)

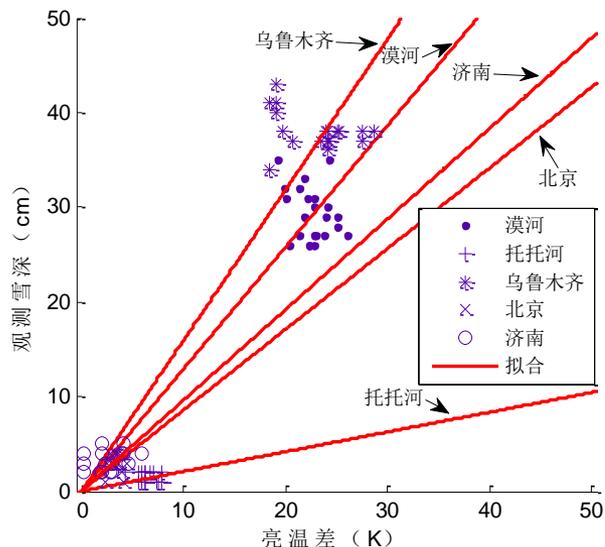
(Foster et al. 2011, IJRS)

The areas in yellow, where AMSR-E appears to map snow but MODIS does not, are primarily located on very high and dry plateaus, such as the Tibet Plateau in western China. This massive plateau, although almost always below freezing during the winter months, is often snow free because the atmosphere is so dry. The AMSR-E product overestimates the snow extent here because the passive microwave algorithm is detecting a very cold surface (low T_b), and therefore this region is misclassified as snow covered. For deeper winter snowpacks (> about 10 cm), the algorithm performs

原因分析——反演参数动态化的必要性和实现方法

表 1 2000年1月15日个别站点观测雪深与SSM/I亮温差的关系

站名	站号	时次 (年月日)	观测雪深 $SD_{station}(cm)$	Tb_{19h} (K)	Tb_{37h} (K)	ΔTb (K)	反演系数A (= $SD_{station}/\Delta Tb$)
漠河	50136	2000.1.15	32	237.4	217.5	19.9	1.61
托托河	56004	2000.1.15	2	231.5	223.7	7.8	0.26
乌鲁木齐	51463	2000.1.15	38	248.2	228.4	19.8	1.92
北京	54511	2000.1.15	3	251.2	248.7	2.5	1.20
济南	54823	2000.1.15	2	254.2	251.2	3	0.67



2000年1月5站SSM/I亮温差（散射通道与非散射通道）
与观测雪深散点图及通过原点的线性拟合

假设亮温与雪深具有如下关系：

$$SD = A \times (Tb_{19h} - Tb_{37h})$$

含水量的影响

积雪中含水量会对雪密度及雪粒径产生影响，导致静态反演系数的明显差异=>反演精度降低。

表2 北京站2000年1月有积雪的18天里，观测雪深与亮温差的关系（注： $\Delta Tb = Tb_{19h} - Tb_{37h}$ ）

日期 (年月日)	观测雪深 $SD_{station}$ (cm)	ΔTb (K)	反演系数A (= $SD_{station}/\Delta Tb$)	日期 (年月日)	观测雪深 $SD_{station}$ (cm)	ΔTb (K)	反演系数A (= $SD_{station}/\Delta Tb$)
2000.1.11	1	2.3	0.4348	2000.1.20	2	4.0	0.5000
2000.1.12	4	3.7	1.0811	2000.1.21	2	4.0	0.5000
2000.1.13	4	3.7	1.0811	2000.1.22	4	4.0	1.0000
2000.1.14	3	3.7	0.8108	2000.1.23	4	2.8	1.4286
2000.1.15	3	2.5	1.2000	2000.1.24	4	3.5	1.1429
2000.1.16	3	2.5	1.2000	2000.1.25	4	3.3	1.2121
2000.1.17	3	3.0	1.0000	2000.1.26	3	3.2	0.9375
2000.1.18	3	3.4	0.8824	2000.1.27	3	3.0	1.0000
2000.1.19	3	4.5	0.6667	2000.1.28	1	4.2	0.2381

可以看出，同一时间不同地点或同一地点不同时间的亮温差与观测雪深间的关系，都是不同的，即这种关系本身就是时空动态变化的。

A winter landscape featuring a snow-covered hill under a clear blue sky. A line of tall, thin evergreen trees stands on the right side of the hill, casting long shadows on the snow. A few smaller trees are scattered on the left side of the hill. The overall scene is bright and serene.

三、雪深动态融合反演算法

■ 基本思想

- 同一时间不同地点或同一地点不同时间的亮温差与观测雪深间的关系，都是不同的，即雪深与亮温差之间存在动态变化的线性关系，那么反演方程应写为

$$D(x, y, t) = A(x, y, t) \times \Delta T_b(x, y, t)$$

- 如何得到动态变化的反演系数 $A(x, y, t)$ ？

微波亮温差 $\Delta T_b(x, y, t)$ 本身是动态变化的，要想得到时空动态变化的反演系数 $A(x, y, t)$ ，可以借助实测雪深，利用时空插值方法，得到与亮温时空网格一致的插值观测雪深 $D_0(x, y, t)$ ，那么，初步的某像元动态反演系数 $A_0(x, y, t)$

$$A_0(x, y, t) = D_0(x, y, t) / \Delta T_b(x, y, t) \quad (1)$$

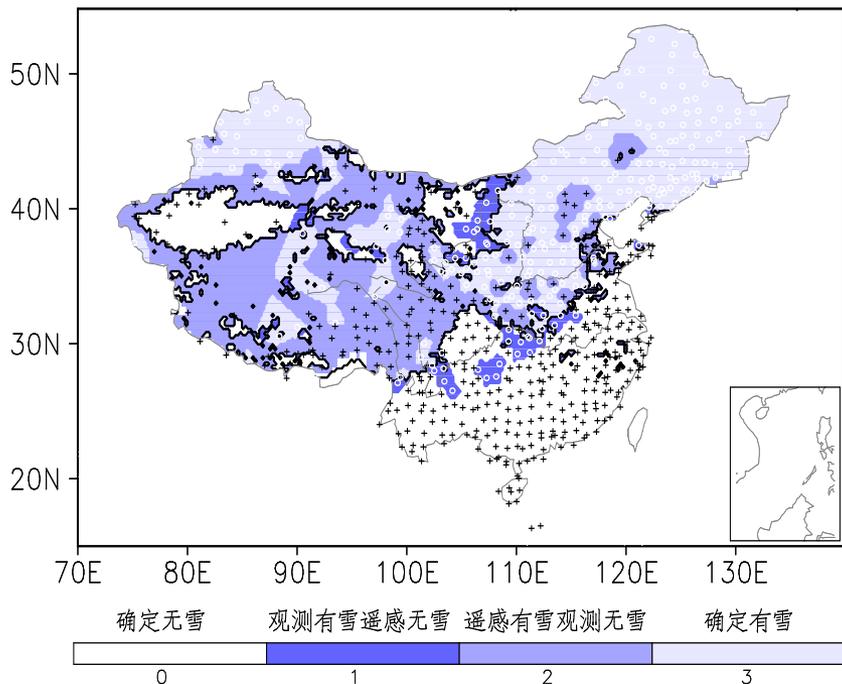
这一反演系数是“实时实地”的，随时空动态变化的，即对每一个地点的每一个时次，都对应独一无二的 $A_0(x, y, t)$ 。

■ 如何实现遥感和观测数据的融合与优势互补？

□ 空间插值（临近值）

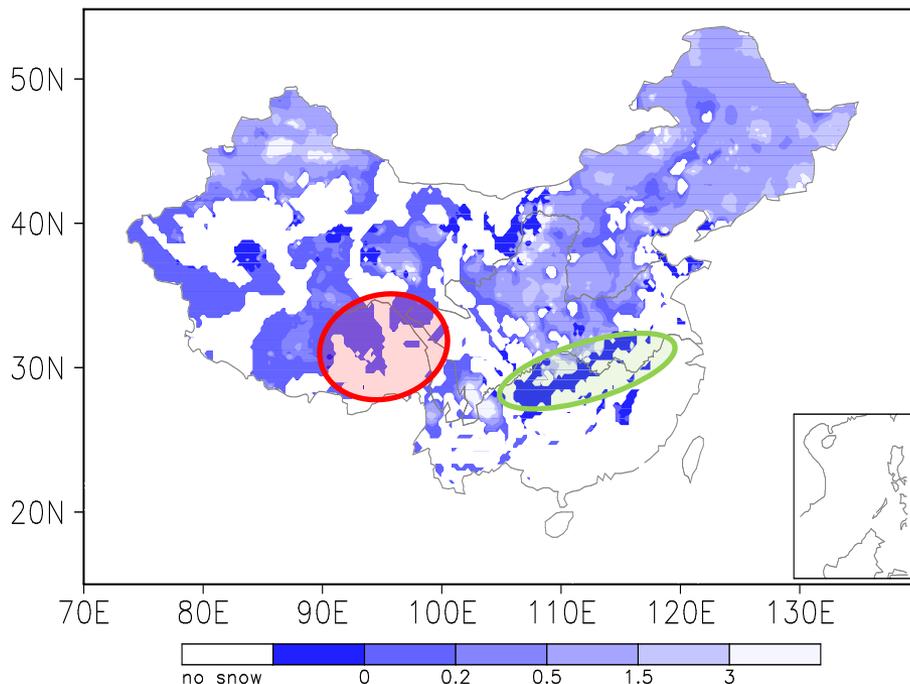
雪盖可信度指数

JAN 21 2000



初步的反演系数

JAN 21 2000



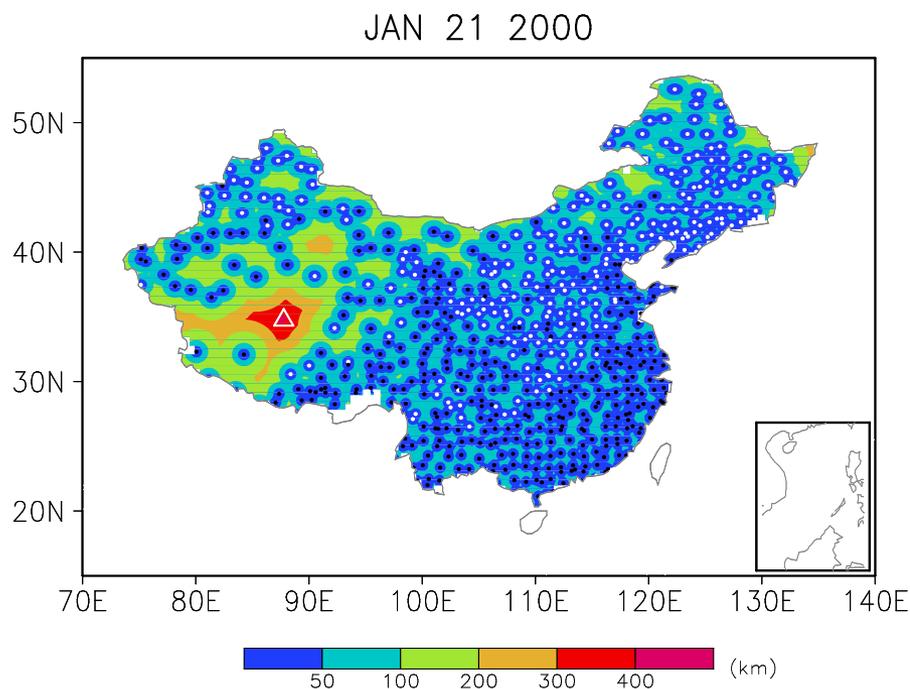
测站观测和插值方法得到当日初步动态反演系数 $A_0(x,y,t)$

- 左图遥感雪盖中东部雪线附近的低估问题则在右图（引入测站雪深后）中得到改善。
- 但是，青藏高原常出现遥感有雪而测站无雪的情况，实际上，根据可见光和微波观测这里存在大面积有雪区，这里应该更加信任卫星遥感数据，因此，这里的初步动态反演系数 $A_0(x,y,t)$ 可能是不真实的。

在西部高原区存在高估问题，因为它是单一遥感（被动微波）反演雪盖，今后需要引入可见光雪盖产品，以减小这种高估问题。

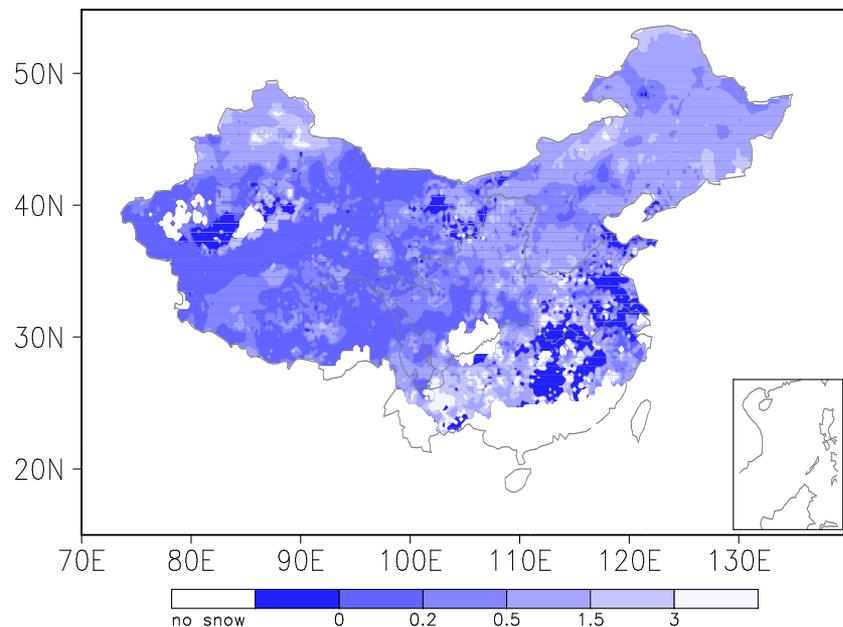
■ 如何实现遥感和观测数据的融合与优势互补？

□ 时间插值（先验值）



中国境内各格点 ($0.225^\circ \times 0.225^\circ$) 到相邻最近测站的距离 (阴影, km) 以及2000年1月21日有雪 (白实圈) 和无雪 (黑实圈) 站点分布 (三角形标注处是格点离最近站点的最大可能距离403.8km)

动态反演系数年均值 2000



2000年所有有雪时次的初步动态反演系数年均值 $A_{0m}(x,y)$

$A_{0m}(x,y)$ 有值的区域要比 $A_0(x,y,t)$ 广得多而且稳定，缺点是不随时间变化。

■ 动态反演算法公式

问题转换为究竟使用实时实地的 $A_0(x, y, t)$ ，还是使用不随时间改变的先验值 $A_{0m}(x, y)$ ？我们认为，需要分别给予它们一个权重系数，使两者之间形成互相制约的关系，从而得到最优方案，获得合理的反演系数。那么，如何确定这样的权重系数 $R(x, y, t)$ ？我们提出“时空距离权重法”来获取 $R(x, y, t)$ 。某格点距离有雪站的空间距离（ r ）越近，越应更多地考虑“实时动态”的初步反演系数 $A_0(x, y, t)$ ，越远越应更多地参考该点的“先验值” $A_{0m}(x, y)$ ，于是可以定义权重系数

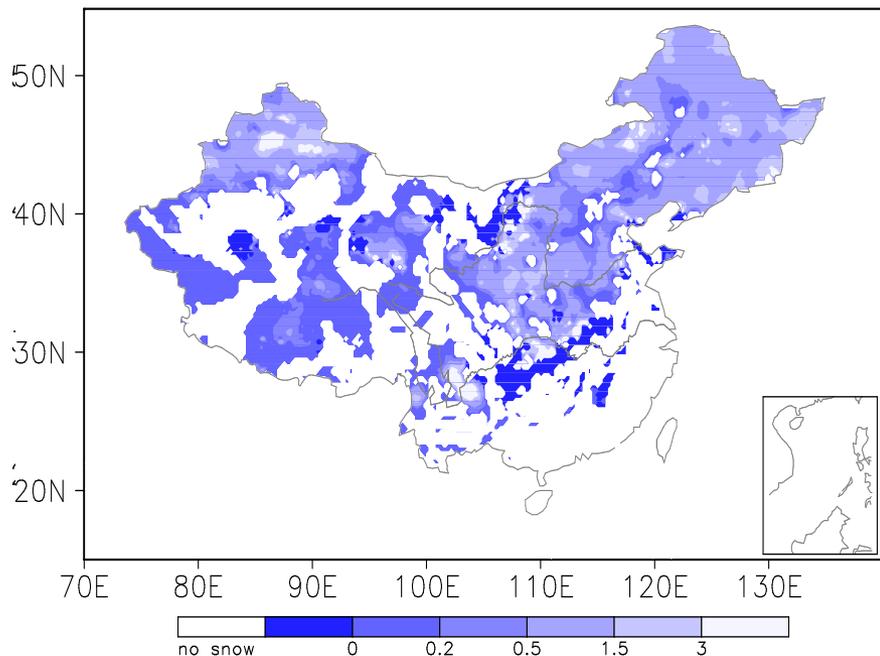
$$R(x, y, t) = r(x, y, t) / r_0 \quad (2)$$

$r(x, y, t)$ 为时空点 (x, y, t) 离最近有雪站的距离， r_0 可取为时空点 (x, y, t) 离站点的最大可能距离，即之前计算的403.8km。所以，这里一定满足 $0 \leq R(x, y, t) \leq 1$ ，“ $1-R$ ”和“ R ”分别代表多大程度上使用实时实地反演值 $A_0(x, y, t)$ 和先验值 $A_{0m}(x, y)$ 。于是，最终的动态反演系数可以表示为

$$A(x, y, t) = (1 - R(x, y, t)) \times A_0(x, y, t) + R(x, y, t) \times A_{0m}(x, y) \quad (3)$$

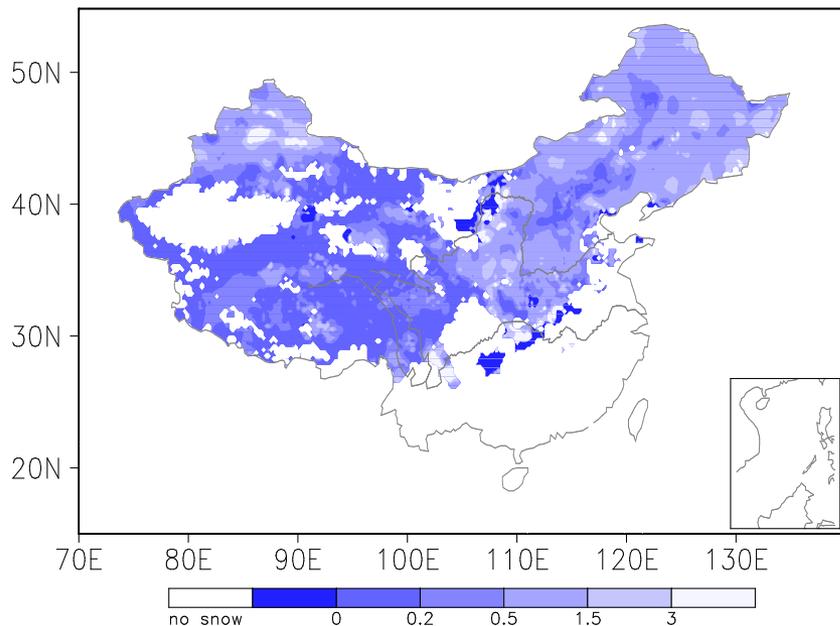
初步的反演系数

JAN 21 2000

2000. 1. 21权重系数 $R(x, y, t)$

动态反演系数

JAN 21 2000

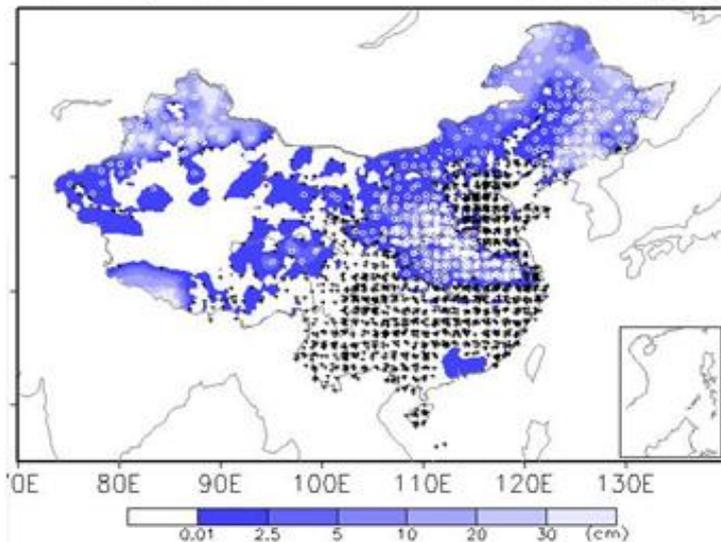
2000. 1. 21最终的动态反演系数 $A(x, y, t)$ 的空间分布
(确定雪盖时还未使用可见光数据)。

西部地区权重系数较大，表明这里以先验值 $A_{0m}(x, y)$ 贡献较大，实时值 $A_0(x, y, t)$ 贡献较小。这样，基本实现了两种数据的融合，并实现了一定的优势互补。

这里，虽然利用“空间距离最近”原则确定了权重系数，实现了两种数据的融合，但实际上，这还不是最优方案，因为“距离”应包括：空间距离和时间距离。更准确的权重系数应进一步考虑“时间距离最近”原则，即先验值应为 $A_{0m}(x, y, t')$ ， t' 是离当前时次最近一段时间的有雪时次。

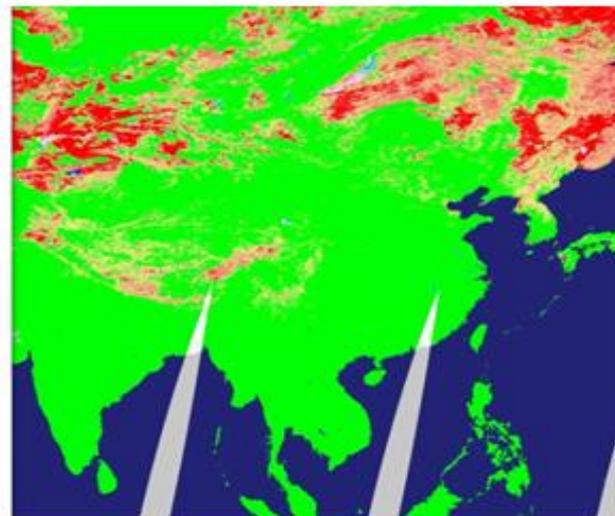
插值后的观测雪深

JAN 28 2015



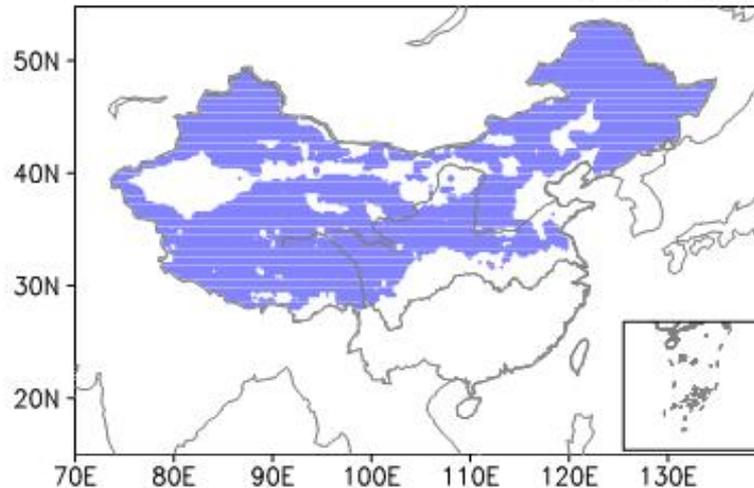
MODIS

JAN 28 2015



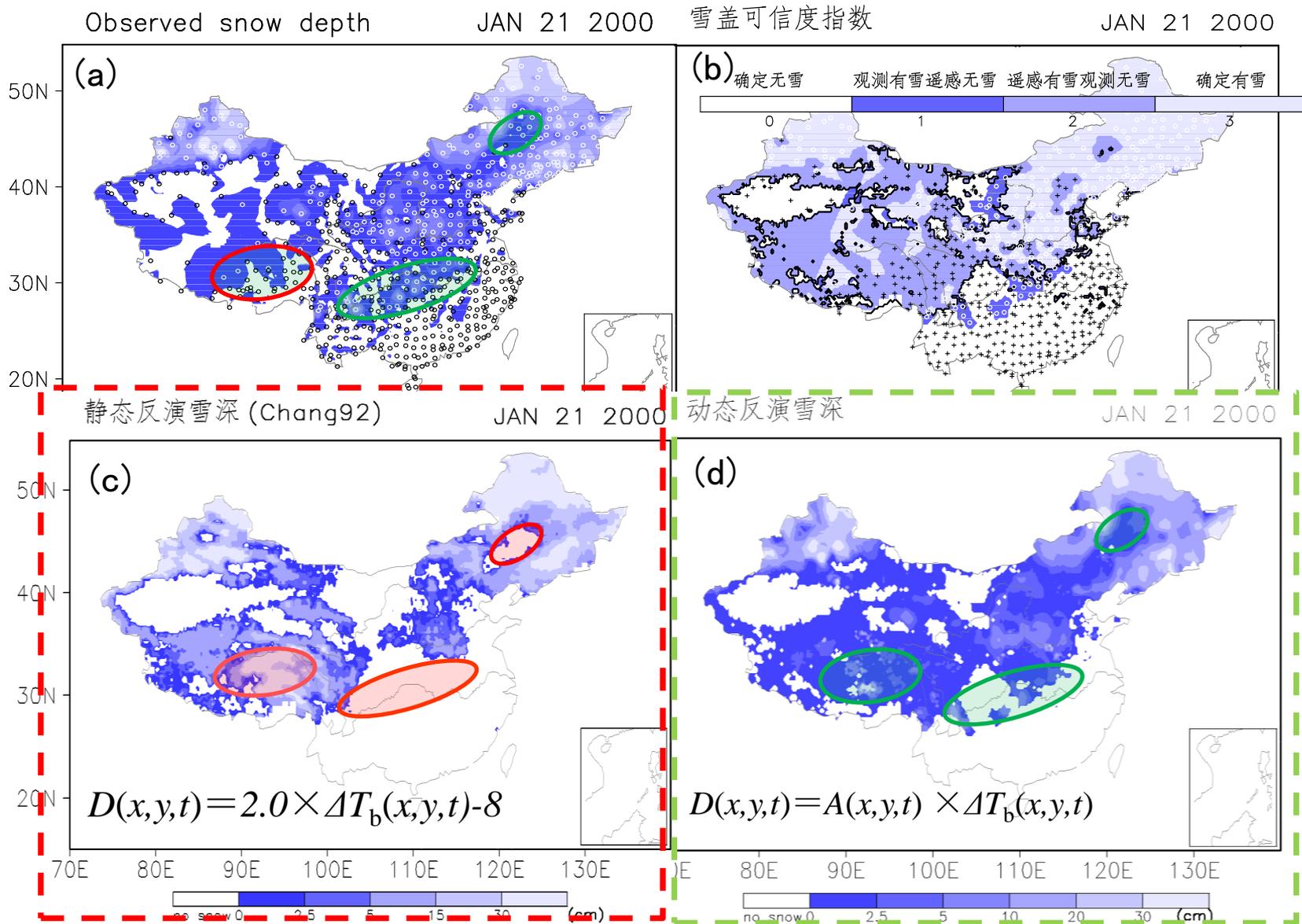
风云3C被动微波MWRI雪盖

JAN 28 2015

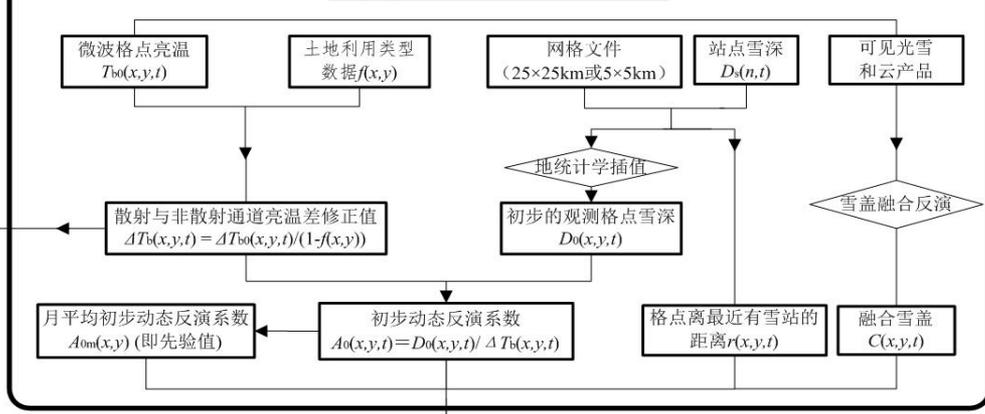


2015年1月28日一次降雪过程台站观测雪深、MODIS雪盖和FY3C被动微波MWRI雪盖

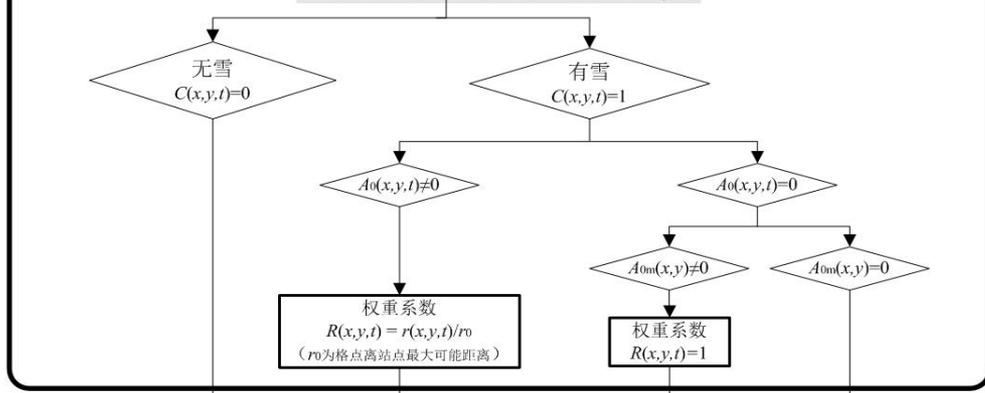
■ 动态反演结果



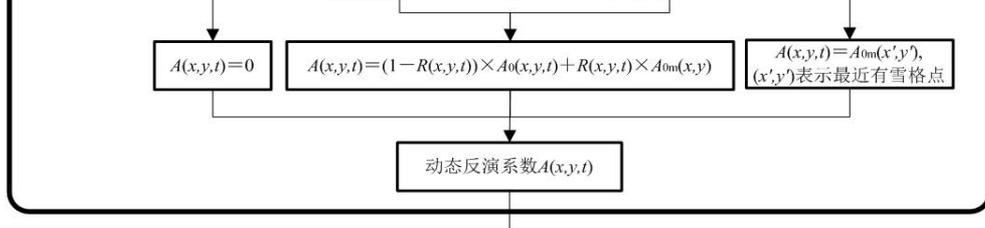
1. 尺度匹配和多源雪盖反演



2. 确定动态反演权重系数 $R(x,y,t)$



3. 计算动态反演系数 $A(x,y,t)$

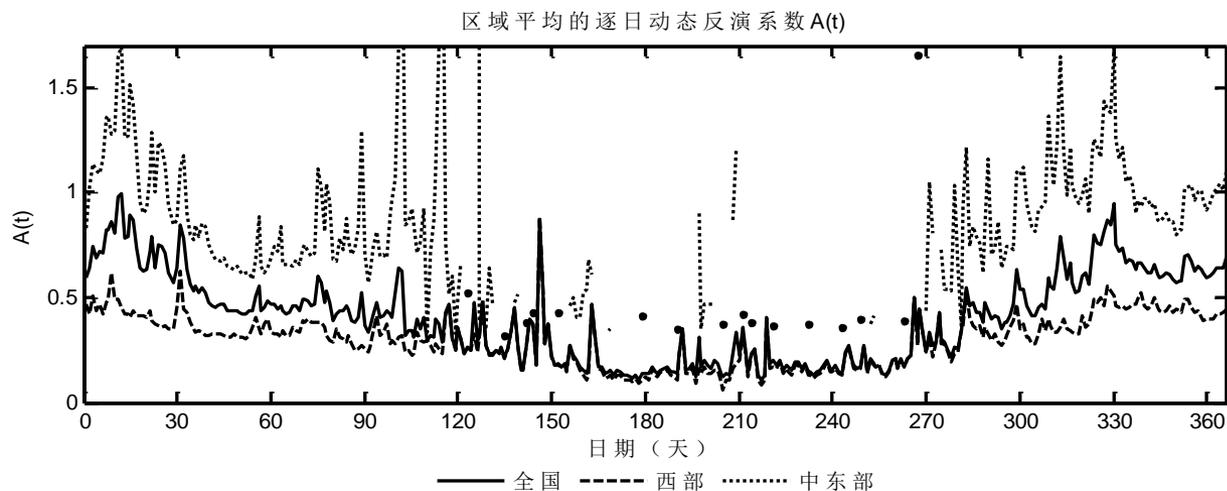


4. 反演雪深 $D(x,y,t)$

动态反演雪深
 $D(x,y,t) = A(x,y,t) \times \Delta T_b(x,y,t)$

遥感-测站相结合的动态雪深反演方法技术路线流程图
 (设定测站数据影响半径 $r_0=403.8\text{km}$)

■ 动态反演系数的检验——区域性和季节性差异



2000年全国和区域平均的逐日动态反演系数（西部和中东部以105° E为界）

- 动态反演方法的关键是动态反演系数的确定，我国地形条件复杂，西部高原地区与中东部地区地形和气候环境差异很大，不同地区的反演系数应该存在较大空间差异，动态反演方法计算的反演系数能够反映出这一点：西部地区反演系数较低，中东部反演系数较高。
- 另一方面，不同的降雪过程和积雪特征的季节差异，也会导致反演系数随时间的变化，动态融合反演方法得到的反演系数随时间和季节的变化十分明显，冬季偏高，夏季偏低，冬夏季可以相差5倍，即使同一季节内，不同的降雪过程前后，反演系数也有较大变化。
- ✓ 因此，用动态反演方法得到的反演系数可以较好地描述这种空间差异和时间演变。

A winter landscape featuring a snow-covered field in the foreground, a line of tall, thin evergreen trees in the middle ground, and a clear blue sky with a few white clouds. The scene is brightly lit, suggesting a sunny day.

四、精度评价法

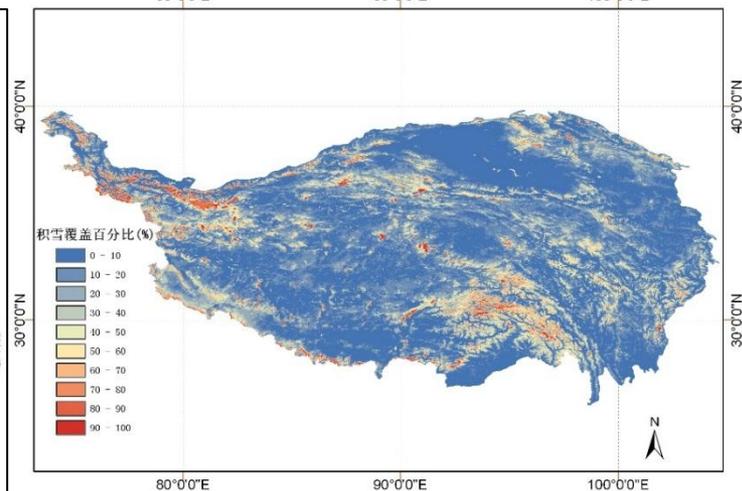
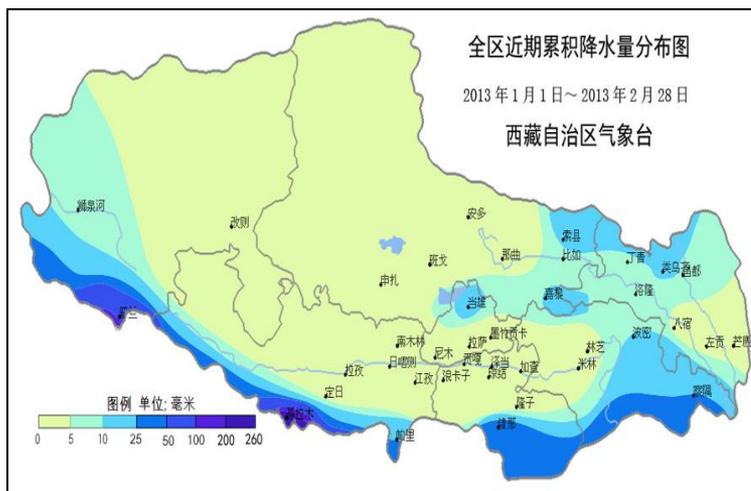
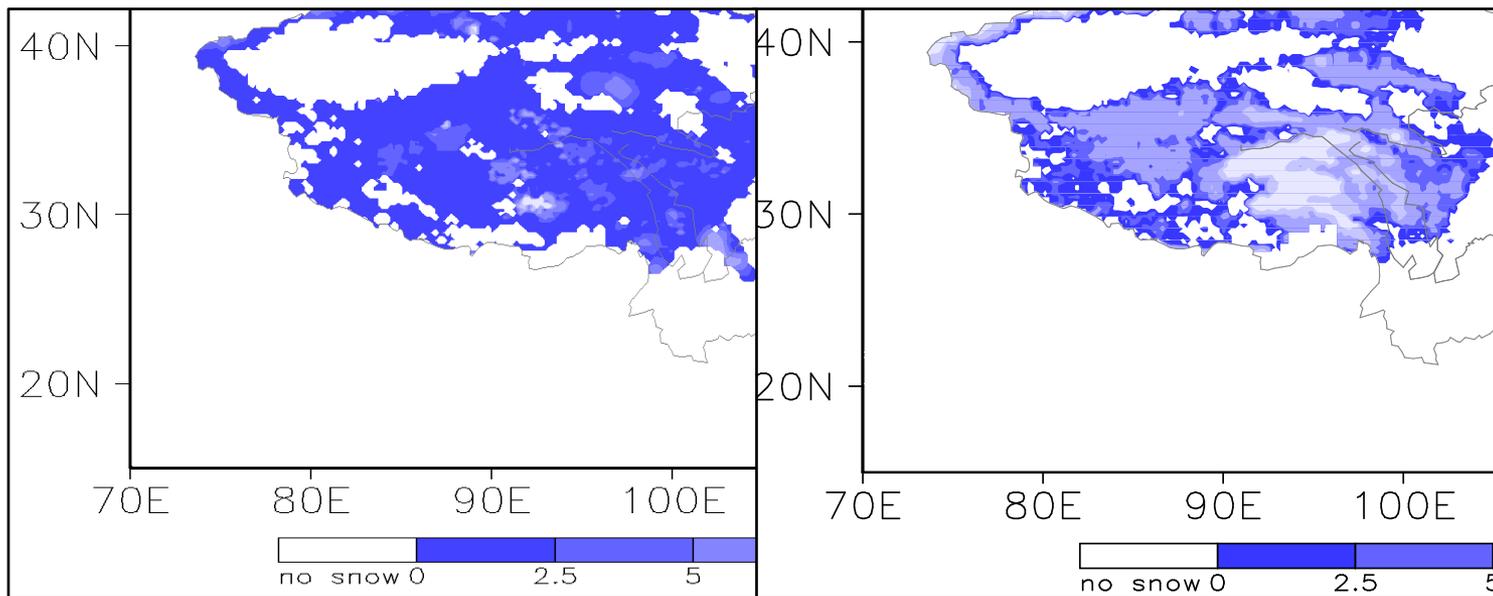
■ 实况图



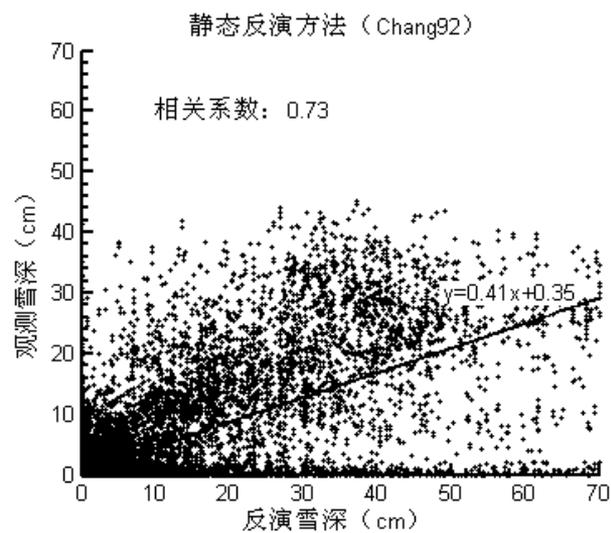
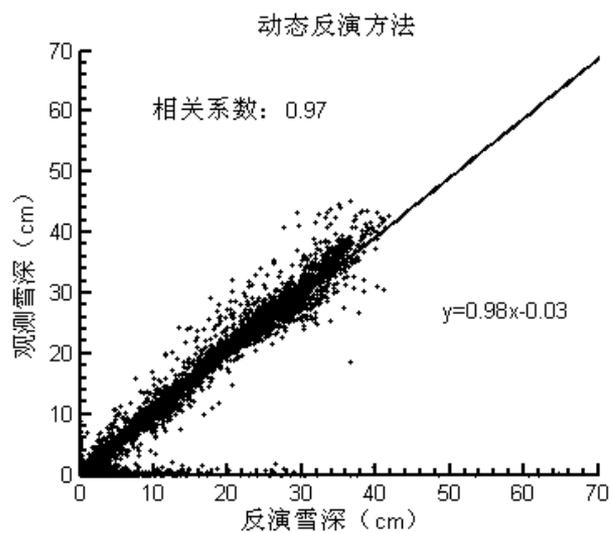
索县



■ 实况图



■ 误差分析

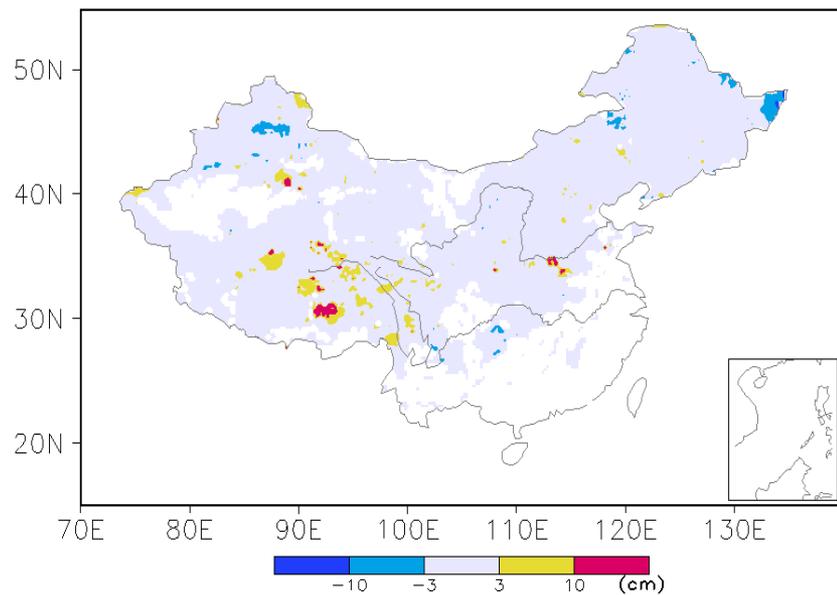


2000年1月21日反演雪深与观测雪深散点图 (将站点观测雪深插值到格点)

■ 误差分析

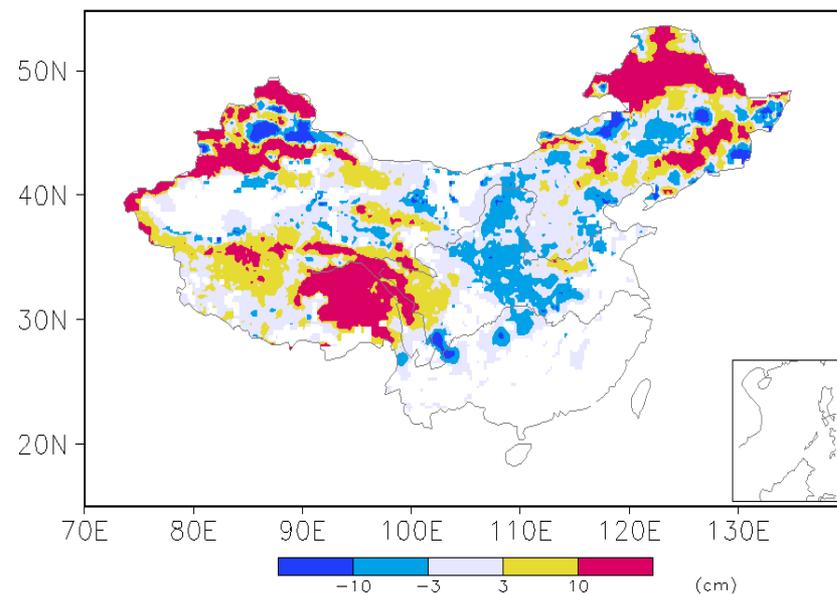
(a) 误差 (动态反演)

JAN 21 2000



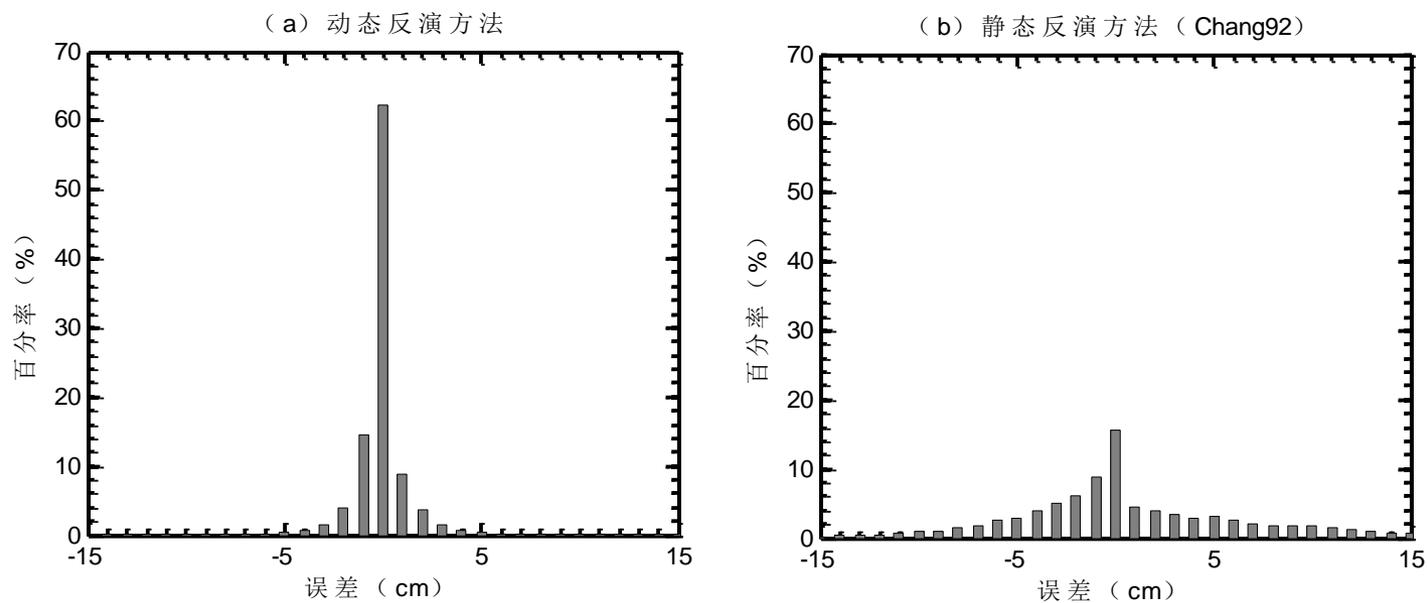
(b) 误差 (Chang92)

JAN 21 2000



2000年1月21日误差的空间分布 (单位: cm)

■ 误差分析



2000年1月21日格点场误差百分率分布 (误差间隔: 1cm)

■ 准确率分析

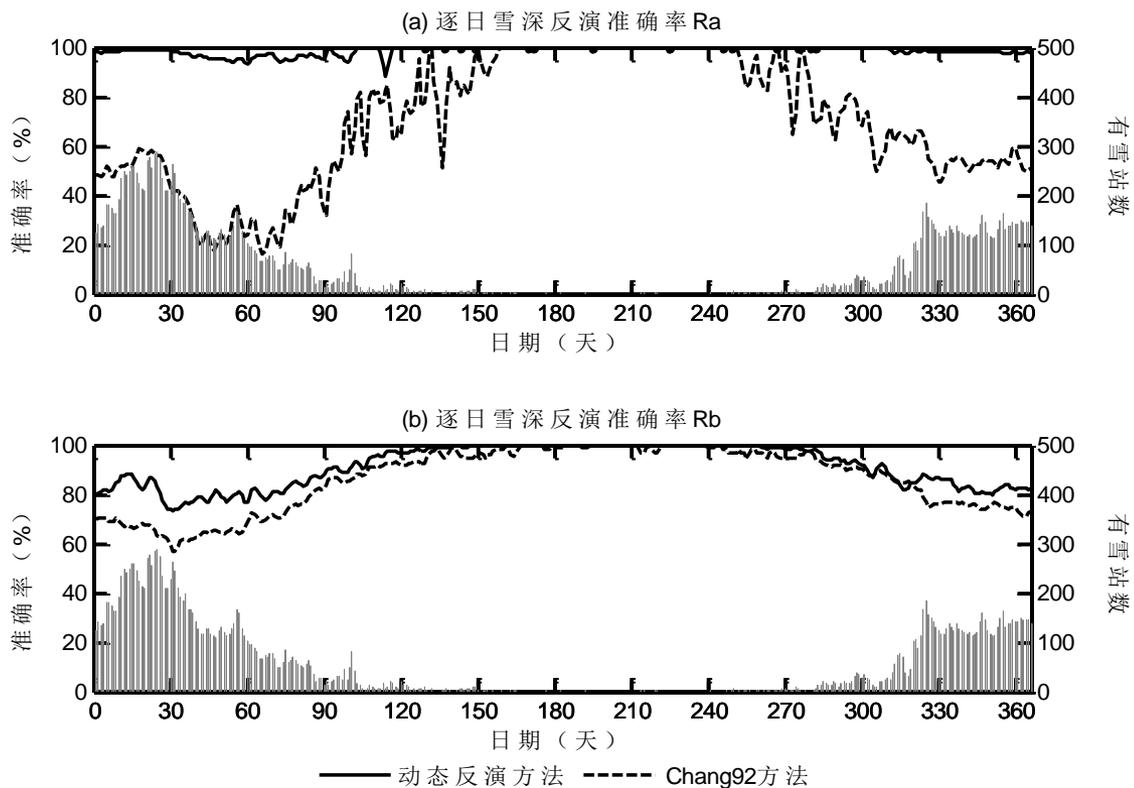
$$R_a = \frac{\text{有雪合理站数}}{\text{总有雪站数}} \times 100\%$$

$$R_b = \frac{\text{总合理站数}}{\text{总站数}} \times 100\%$$

动态反演方法与Chang92方法准确率比较 (单位：%)

日期	有(无)雪 站数	反演准确率 类型	-3cm< 误差 <3cm		-5cm < 误差 <5cm		-10cm< 误差 <10cm	
			动态反演	Chang92	动态反演	Chang92	动态反演	Chang92
2000.1.21	268(411)	R_a	96.6	41.1	98.5	57.8	98.8	84.0
		R_b	85.6	60.5	86.4	67.0	86.5	77.2

■ 准确率分析

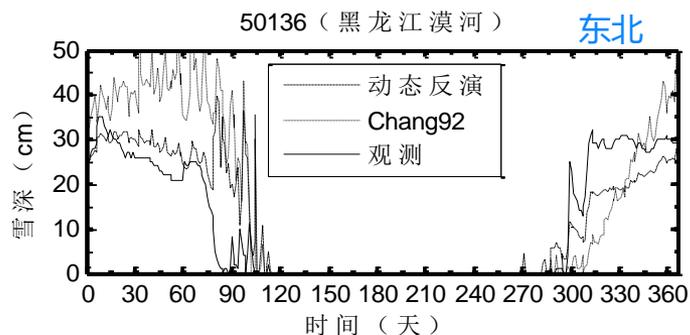


(a) 2000年动态反演方法和 (b) Chang92方法的反演准确率 (曲线 , 误差阈值 : 5cm) 与有雪站数 (直方图) 逐日演变

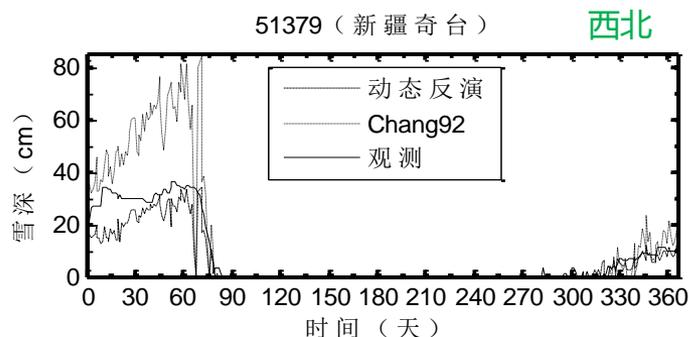
交叉验证

交叉验证技术是一种客观的检验方法，将测站样本分为反演和校验两部分，用反演样本计算出校验样本的推测值，将其与实测的校验样本值比较。

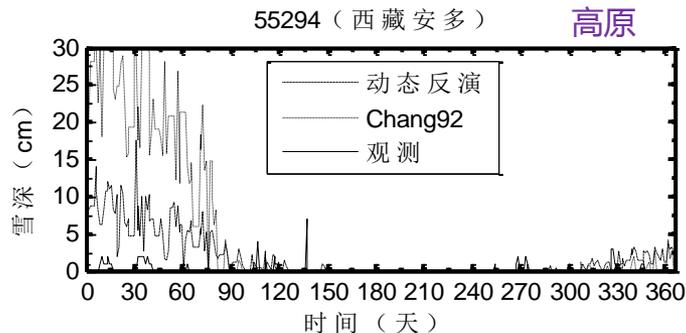
均方根反演误差：12.7和7.6cm



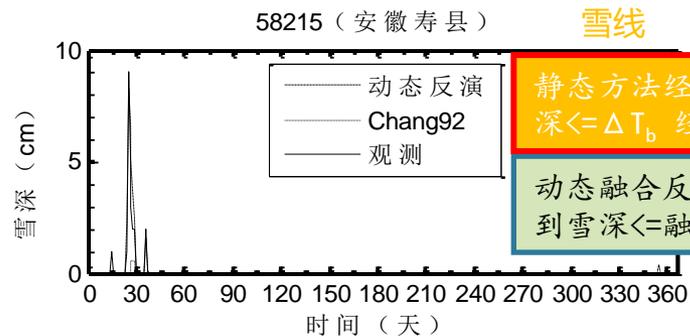
均方根反演误差：12.5和5.1cm



均方根反演误差：10.8和3.4cm



均方根反演误差：0.58和0.19cm

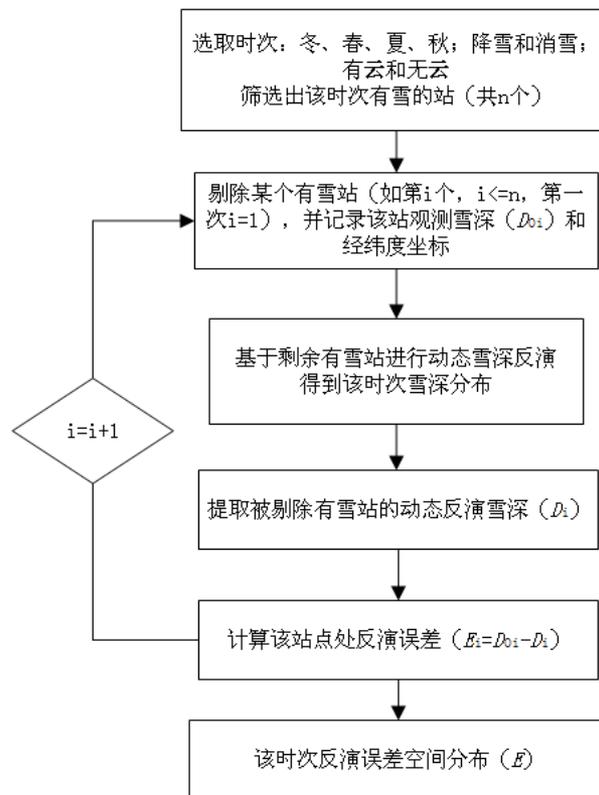


静态方法经常无法得到雪深 $\leq \Delta T_b$ ，经常是负的

动态融合反演方法可以得到雪深 \leq 融合了测站数据

4 站逐日的动态反演 (剔除 4 站后重新反演) 雪深、Chang92 静态反演雪深和观测雪深 (2000 年 1 月 1 日-12 月 31 日)

■ 交叉验证



交叉验证流程图

总 结

- 1、用统计关系的时空动态化方案克服理论上亮温与不同类型积雪之间物理关系的复杂性。
- 2、针对高原地形和气候特点，发挥不同来源资料的优势，提出融合测站和卫星遥感资料的时空动态变化的雪深反演方法，并且用该方法建立较高分辨率的高原格点积雪资料。

以往的方法大多只用单一来源的数据，本研究所提出的反演算法与以往方法不同之处在于：

- 其一，将测站**实时**观测数据融合进算法中；
- 其二，反演系数随时空**动态**变化，也不像前期工作中过分依赖插值方法，而是根据当时次各测站数据与邻近区域遥感数据的实时和历史回归关系，自动调整遥感和测站数据的权重，实现遥感与观测数据的优势互补；
- 其三，在确定有雪像元时，利用遥感和测站数据联合建立**雪盖可信度指数**，共同确定雪盖分布；然后在此基础上采用时空距离权重法设定反演系数动态参数化方案，反演雪深。

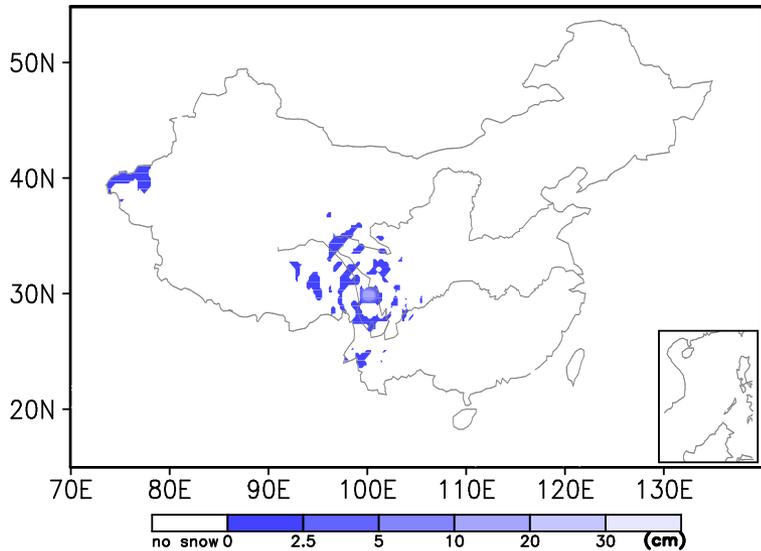


Thank You !

观测雪深

MAY 03 2000

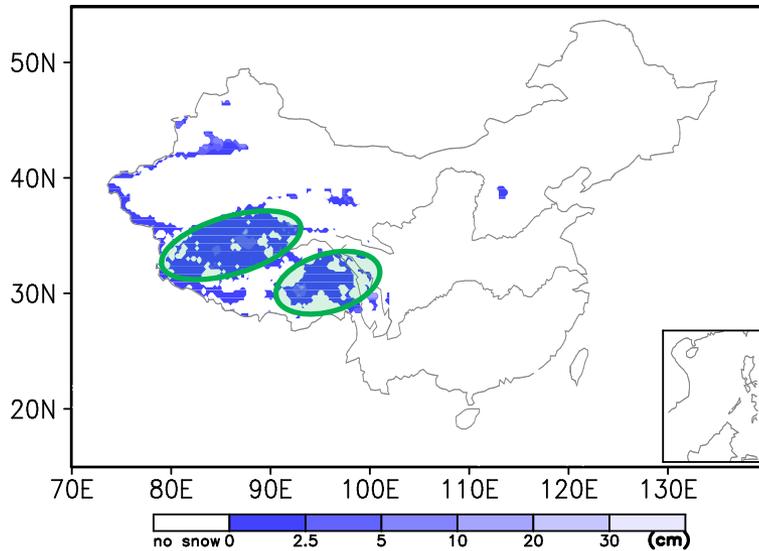
测站



动态反演雪深

MAY 03 2000

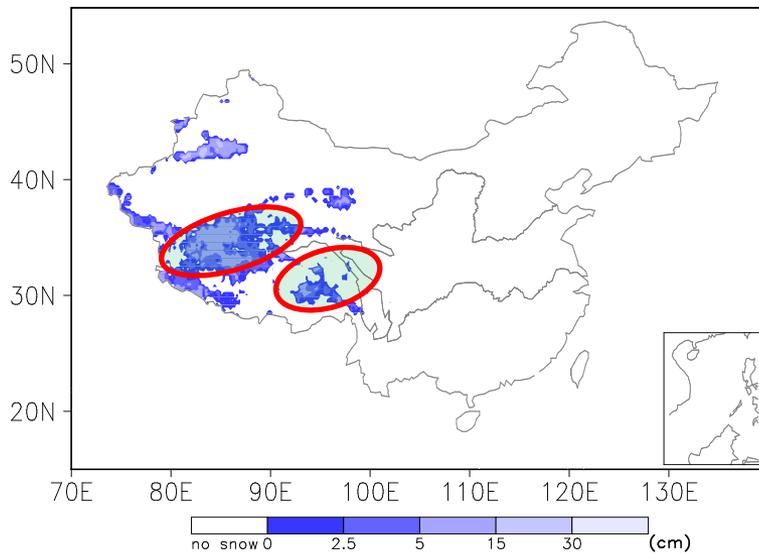
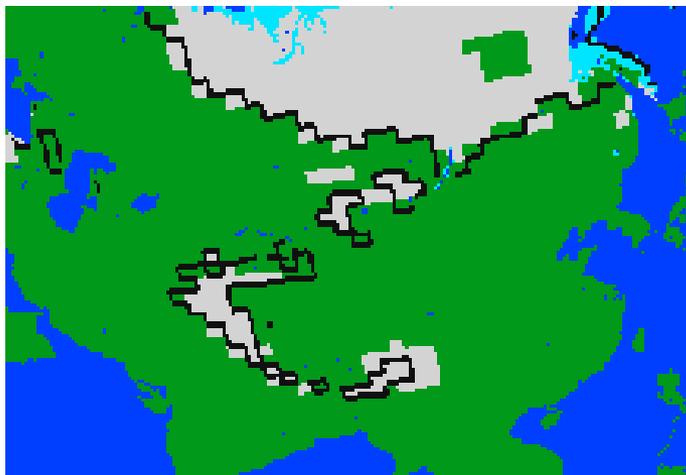
动态反演



静态反演雪深 (Chang92)

MAY 03 2000

可见光周雪盖



静态反演