



2020-11-13



1. 研究背景及大气反演方法介绍
2. 我国陆地生态系统碳汇的反演估算
3. 基于碳卫星监测的生态系统碳汇反演

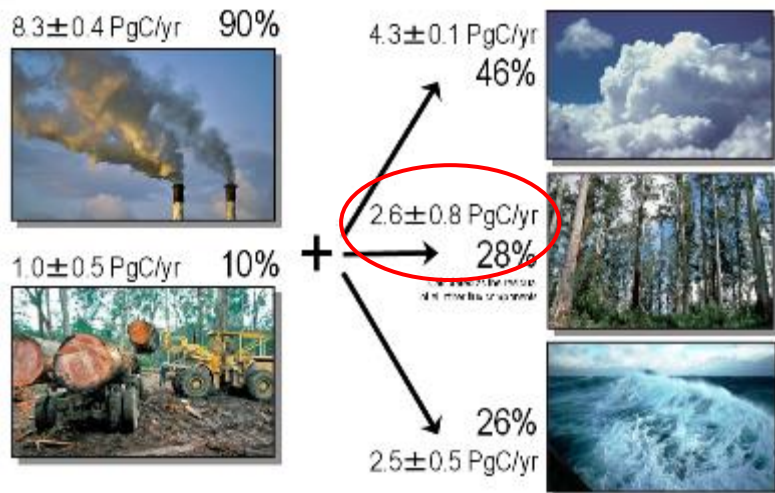
1. 研究背景及大气反演方法介绍
2. 我国陆地生态系统碳汇的反演估算
3. 基于碳卫星监测的生态系统碳汇反演

研究背景

陆地碳汇在缓减大气CO₂浓度增加的过程中起到重要作用，但陆地碳汇的估算不确定性最大

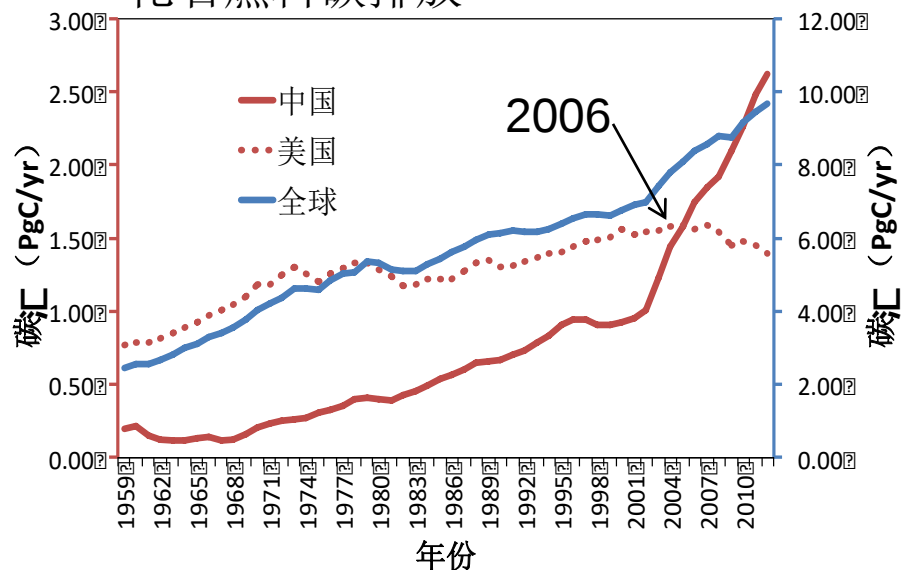
我国面临着巨大的温室气体减排国际压力，需迫切明确我国陆地碳汇及其对全球碳循环的贡献

1PgC=10亿吨碳, 1 PgC ~ 2.0 ppm 大气CO₂



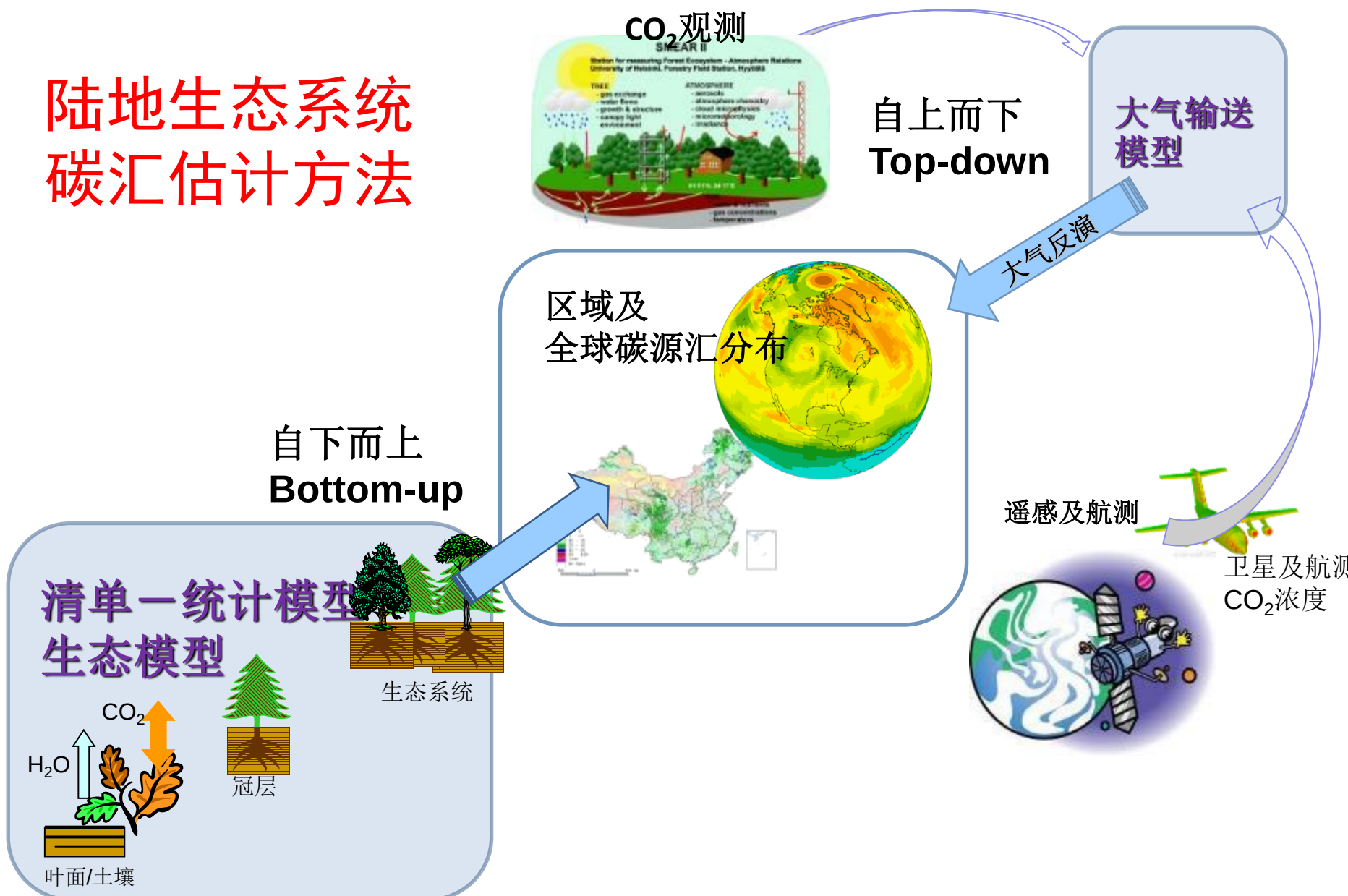
from global carbon budget office

化石燃料碳排放



研究背景

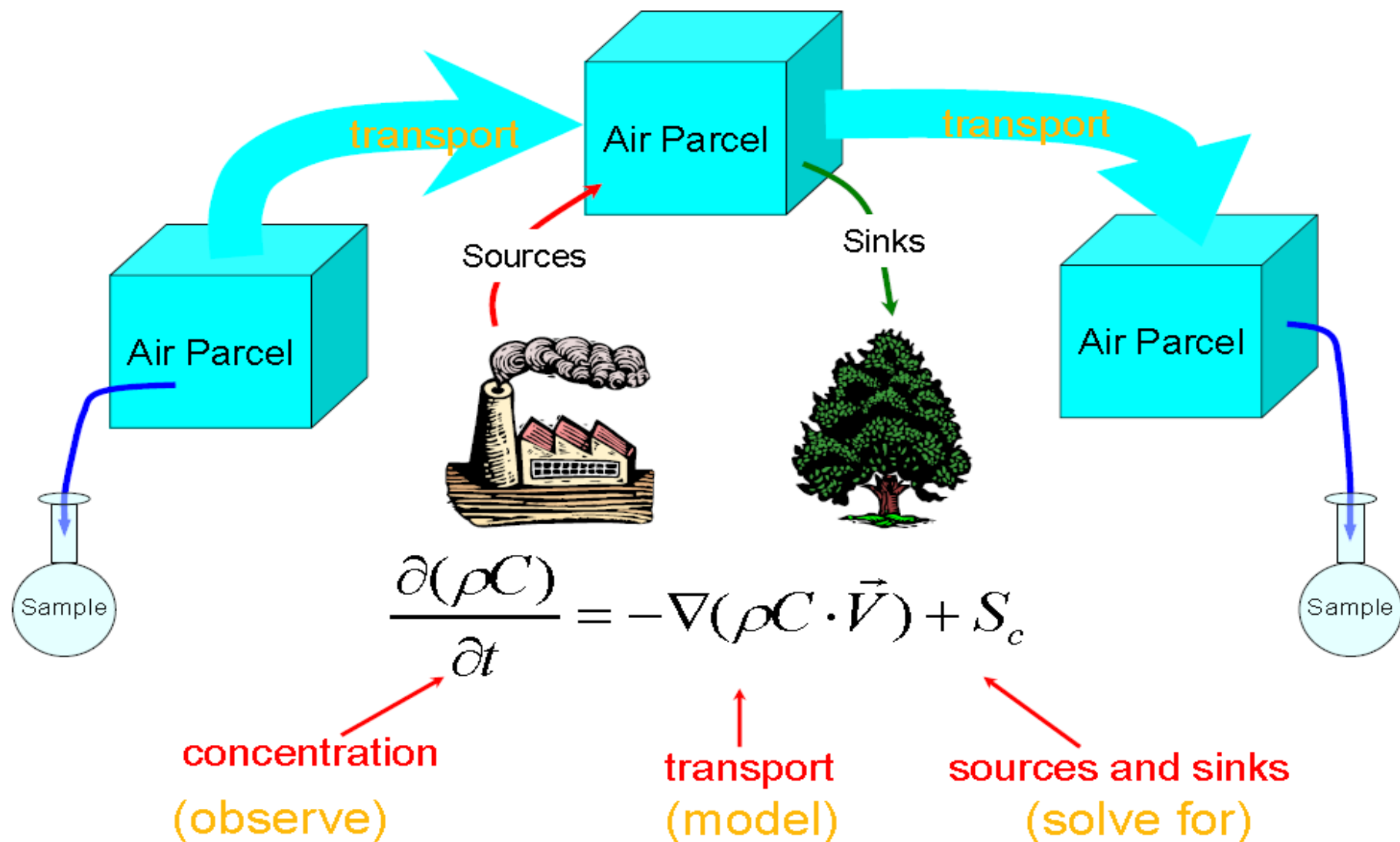
陆地生态系统 碳汇估计方法



大气反演方法介绍



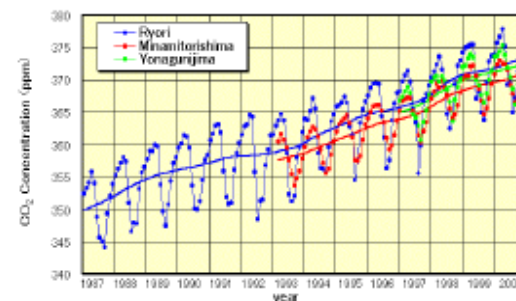
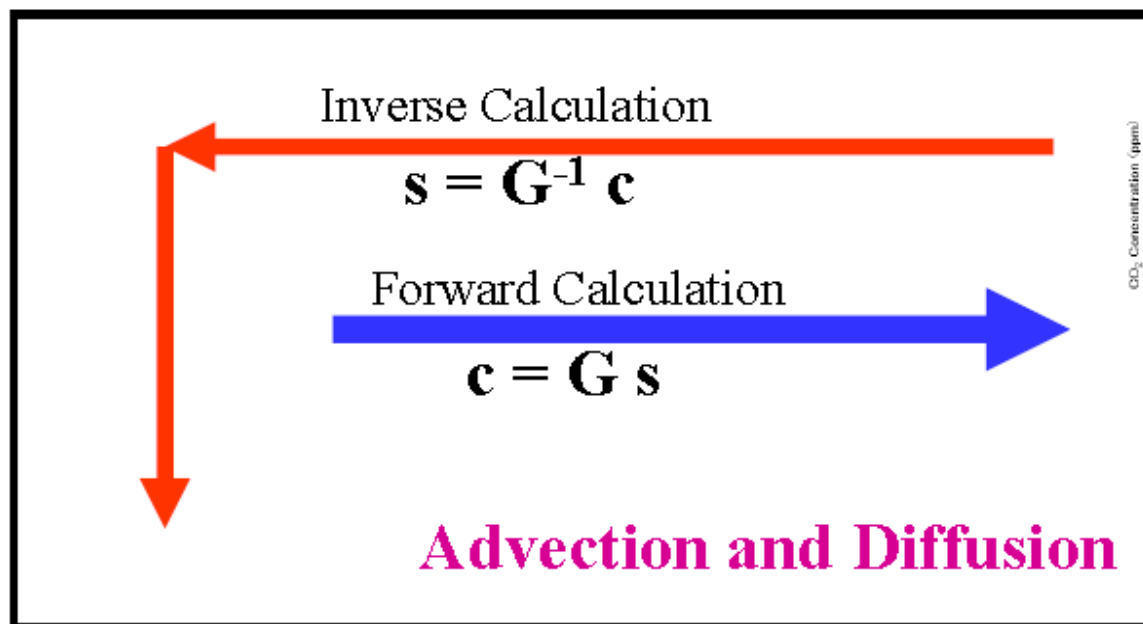
基于质量守恒原理



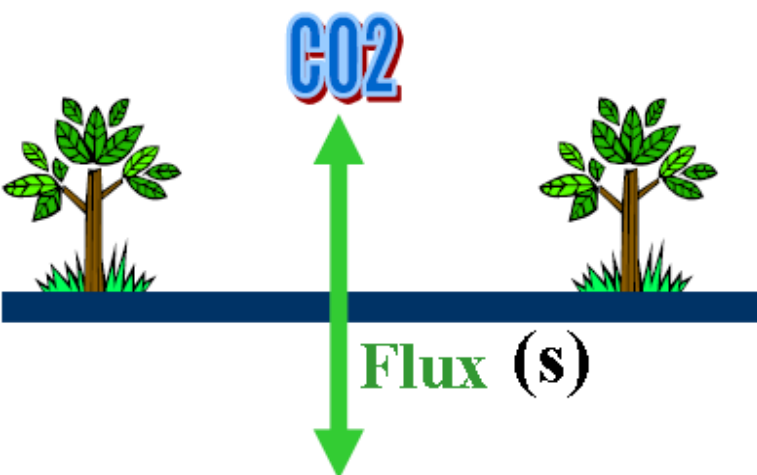
大气反演方法介绍



Atmospheric Model (G)



(c)



c = concentration
 s = surface flux
 G = physical model

- Bayes统计理论

$$\mathbf{c} = \mathbf{G}\mathbf{f} + \mathbf{A}\mathbf{c}_0 + \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\mathbf{M} = (\mathbf{G}, \mathbf{A}), \mathbf{s} = (\mathbf{f}^T, \mathbf{c}_0)^T$$

$$\mathbf{c} = \mathbf{M}\mathbf{s} + \boldsymbol{\varepsilon}$$

建立目标函数

$$\mathbf{J}(\mathbf{s}) = \frac{1}{2} (\mathbf{M}\mathbf{s} - \mathbf{c})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{M}\mathbf{s} - \mathbf{c}) + \frac{1}{2} (\mathbf{s} - \mathbf{s}_p)^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{s} - \mathbf{s}_p)$$

使以上目标函数达到最小值的解，即后验陆地生态碳通量为

大气反演方法介绍

- 大气反演 利用最小二乘法对目标函数直接求解

$$\hat{\mathbf{s}} = (\mathbf{M}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{M} + \mathbf{Q}^{-1})^{-1} (\mathbf{M}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{c} + \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{s}_p)$$

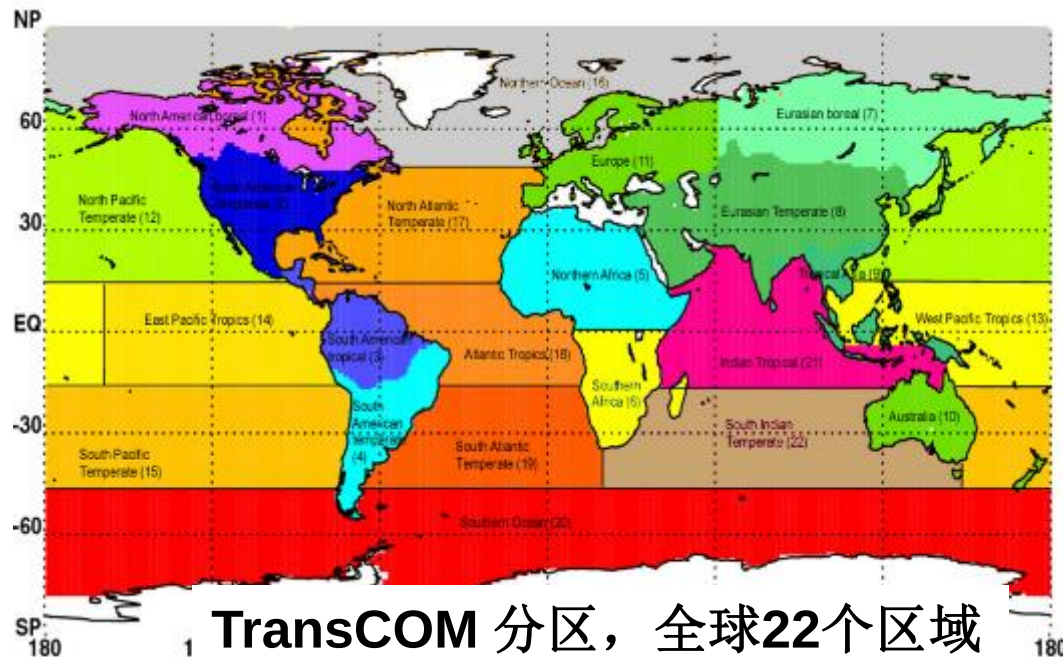
大气
传输矩阵

观测误差协
方差矩阵

先验通量协
方差矩阵

CO₂观测
浓度

先验碳
通量



TransCOM 分区，全球22个区域

优点：

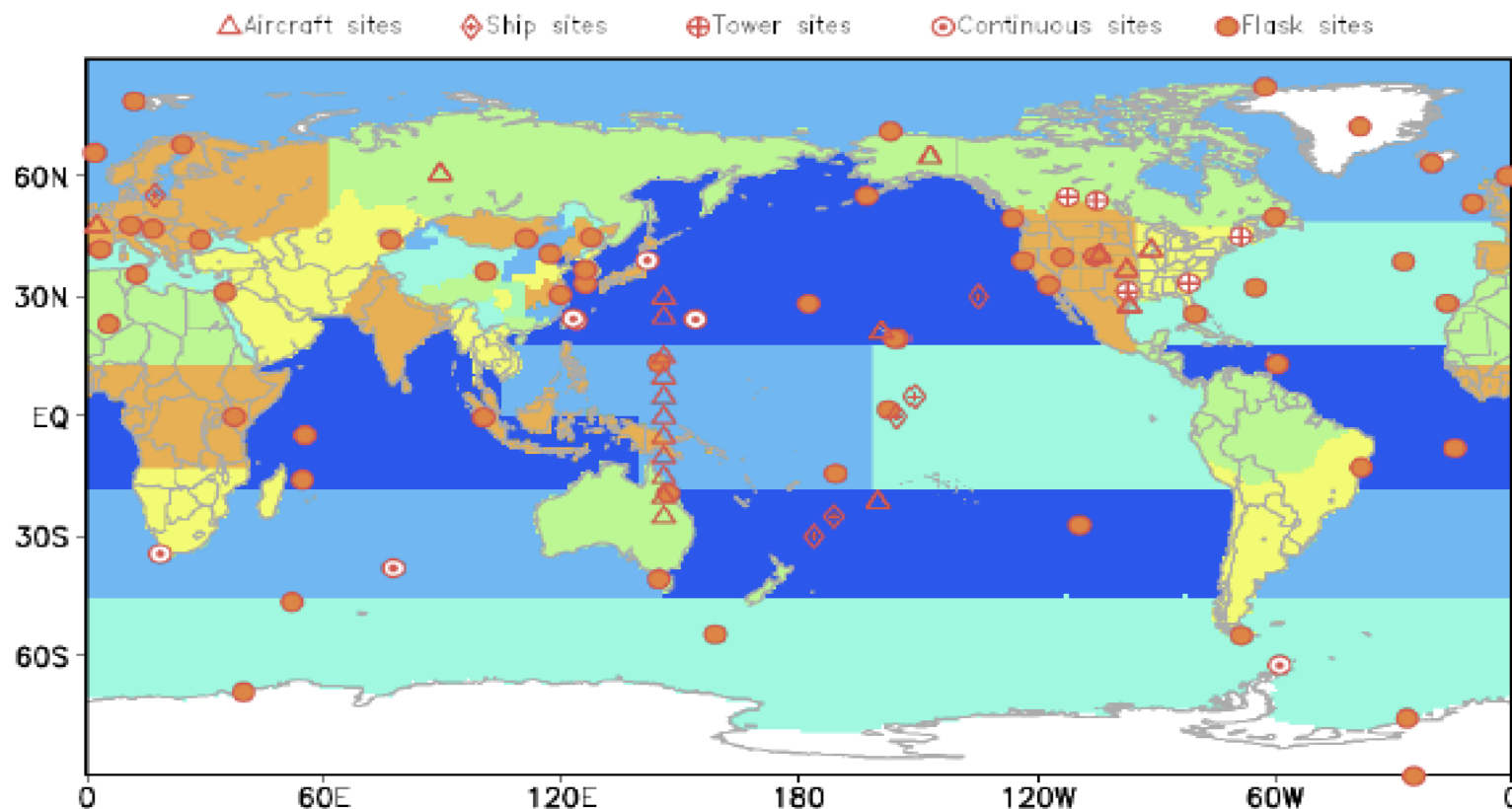
计算便捷，大气传输矩阵计算好以后可以反复使用

缺点：

时间空间分辨率低
能够同化的数据有限

嵌套式大气反演

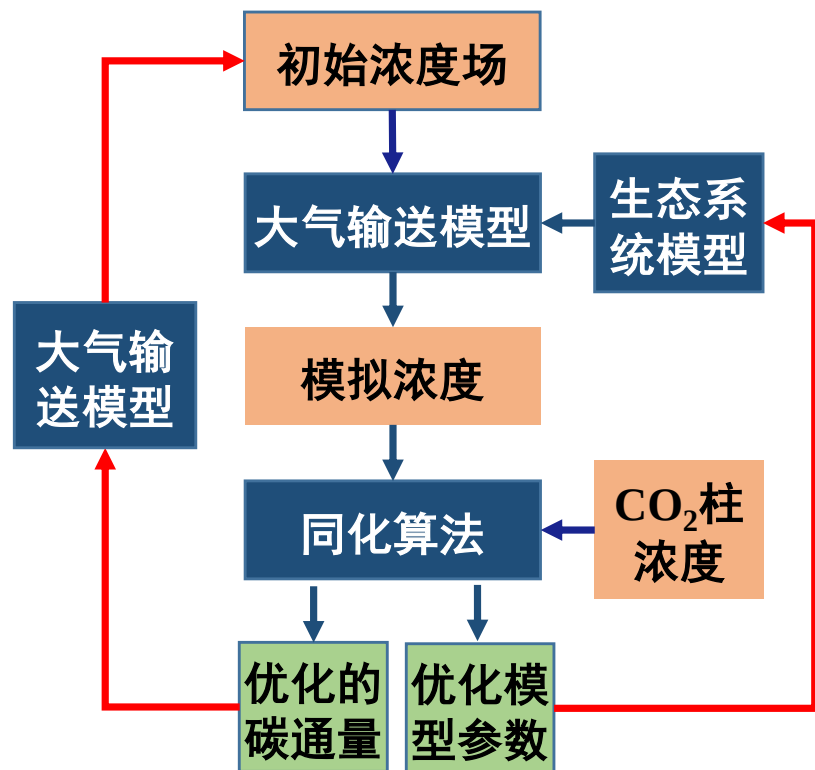
● 以中国区域为中心的嵌套式大气反演系统



基于全球站点和飞机观测数据反演全球43个区其中中国13个区的
月尺度的陆地生态系统碳源汇变化

Jiang et al., 2013

全球碳同化系统GCAS



- 大气输送模型：MOZART-4
- 气象驱动数据：ERA-interim
- 反演算法：EnSRF
- 生态系统模型：BEPS
- 采用两步优化，先反演优化碳通量，然后用优化通量进行正向模拟优化下一窗口初始场，解决了反演的鲁棒性，大幅提高了反演精度
- 可同时同化地面和卫星观测数据，同时优化陆地生态系统和海洋碳通量

碳同化系统

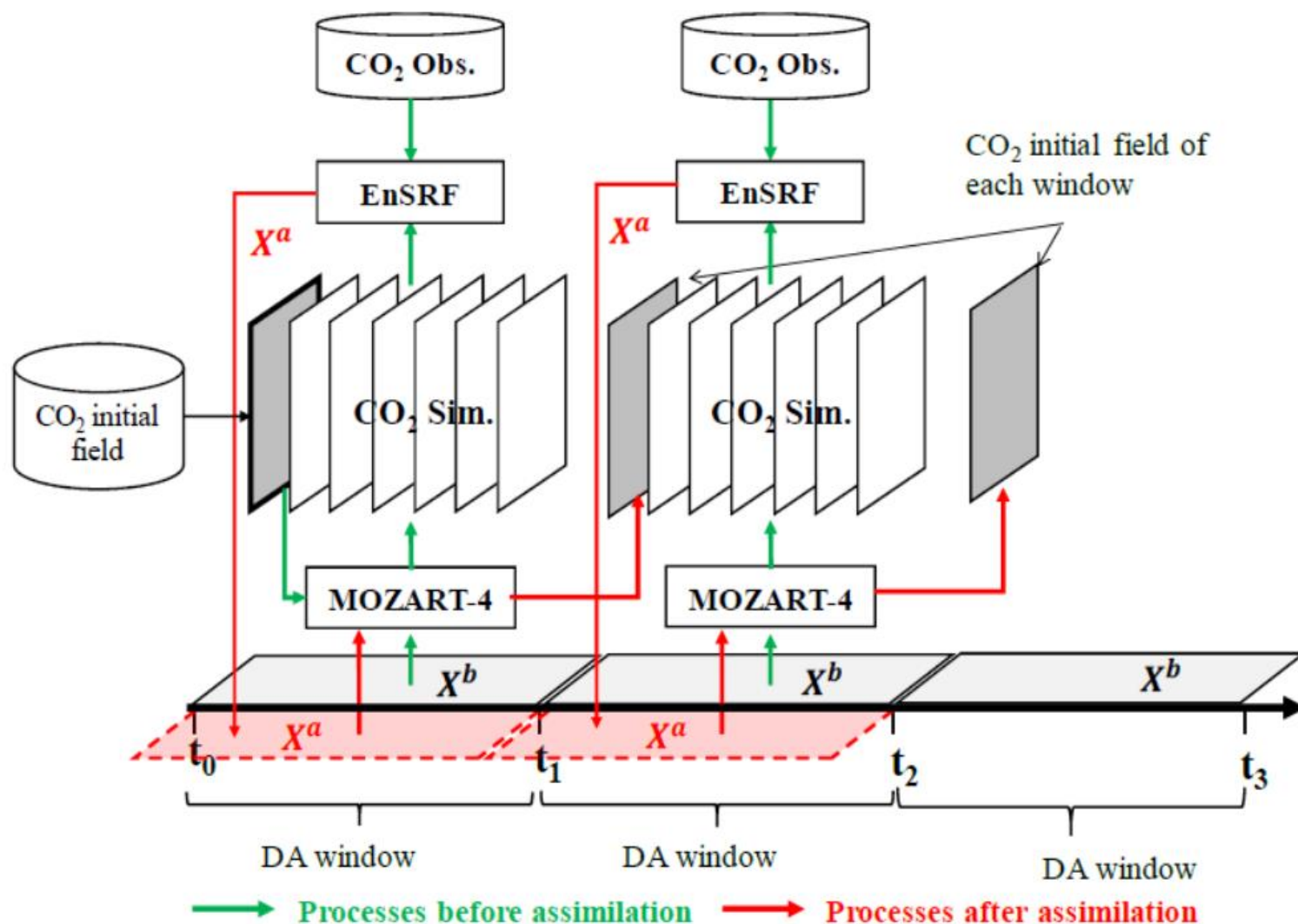


Figure 1. Flow chart of the GCASv2 system

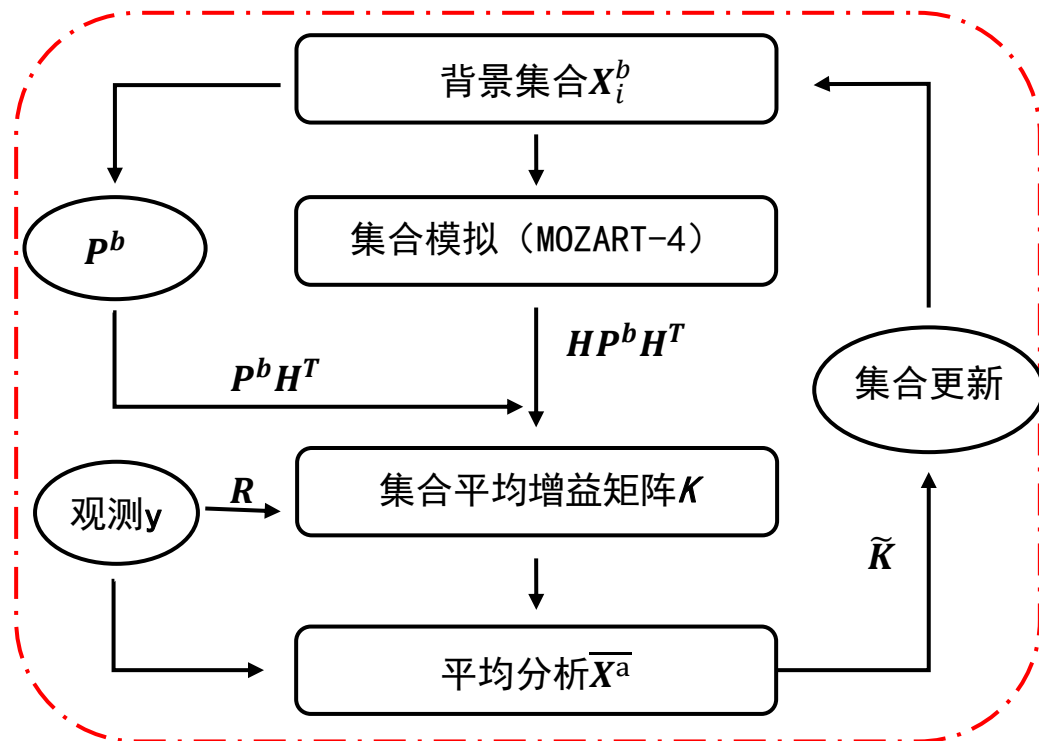
EnSRF算法:

$$\mathbf{X}_i^b = \mathbf{X}_0^b + \delta \mathbf{X}_i$$

$$\bar{\mathbf{X}}^a = \bar{\mathbf{X}}^b + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{X}}^b)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{P}^b \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}^b \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1}$$

$$\mathbf{P}^b = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_i^b - \bar{\mathbf{X}}^b) (\mathbf{X}_i^b - \bar{\mathbf{X}}^b)^T$$

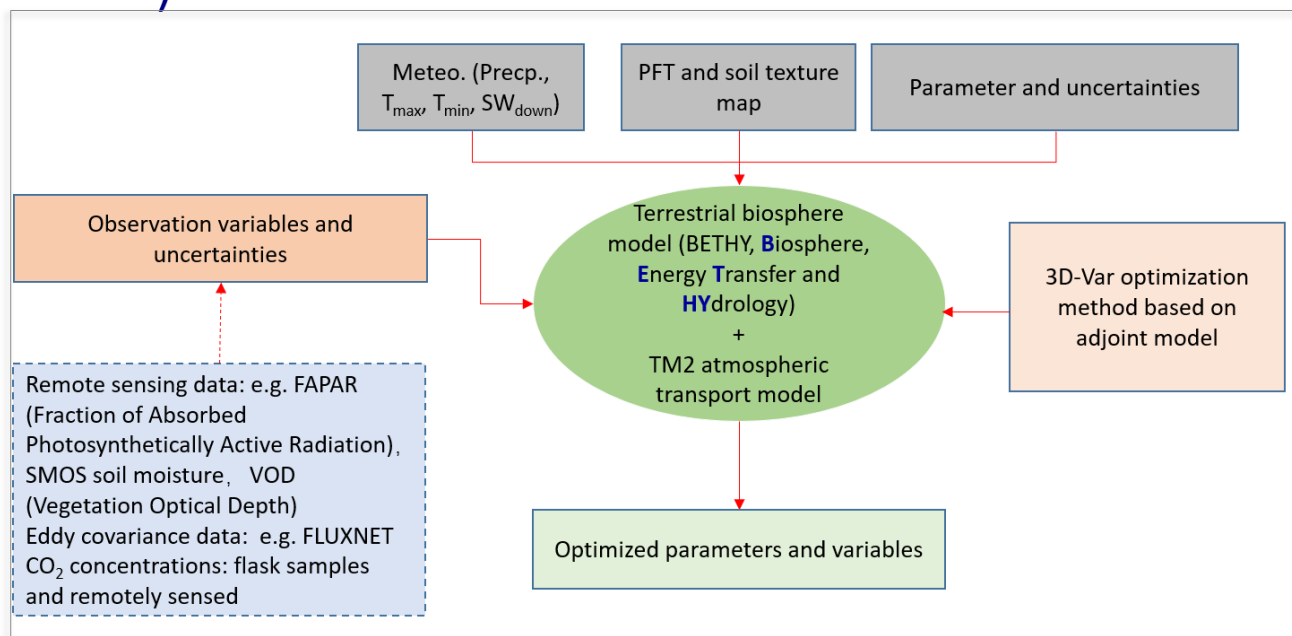


$\mathbf{X}_0^b$: 原始排放; $\delta \mathbf{X}_i$: 背景集合扰动; $\mathbf{X}_i^b$: 背景集合; $\mathbf{P}^b$: 背景误差; $\mathbf{R}$: 观测误差; $\mathbf{H}$: 观测算子; $\mathbf{K}$: 增益矩阵; $\mathbf{y}$: 观测矢量

碳同化系统（引进）

- 基于GEOS-Chem伴随模型的四维变化同化系统
- 碳循环数据同化系统CCDAS（欧洲）
- 基于拉格朗日的区域碳追踪系统CT-Lagrange（美国）

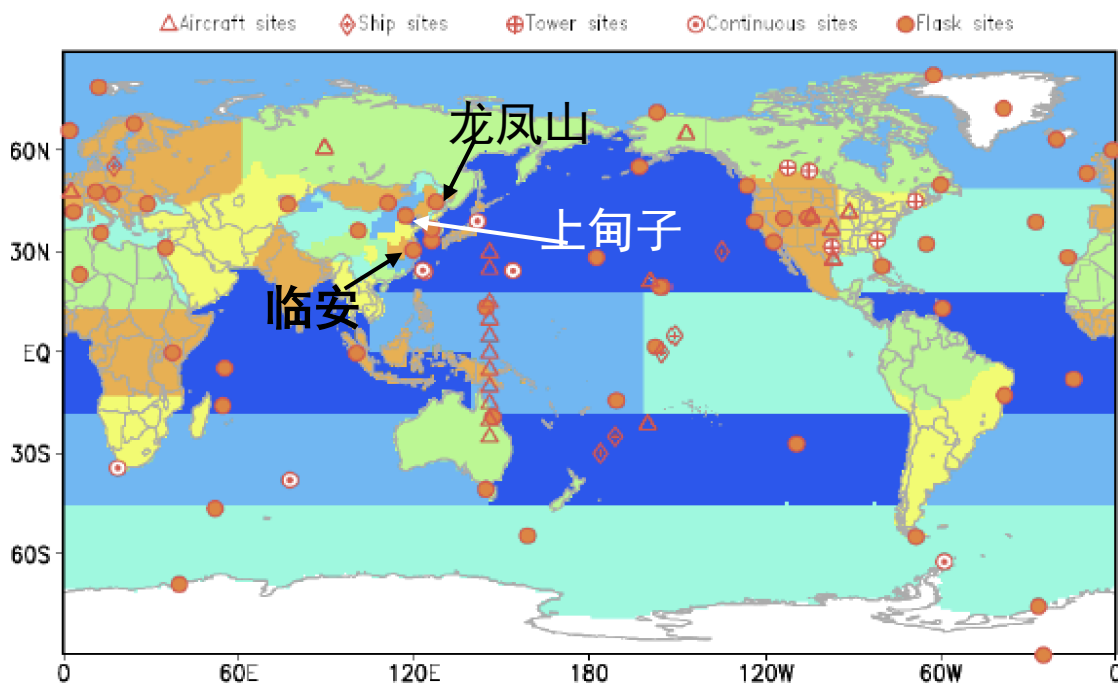
CCDAS (Carbon Cycle Data Assimilation System)



1. 研究背景及大气反演方法介绍
2. 我国陆地生态系统碳汇的反演估算
3. 基于碳卫星监测的生态系统碳汇反演

我国陆地碳汇嵌套式大气反演

Jiang et al., 2013, BG

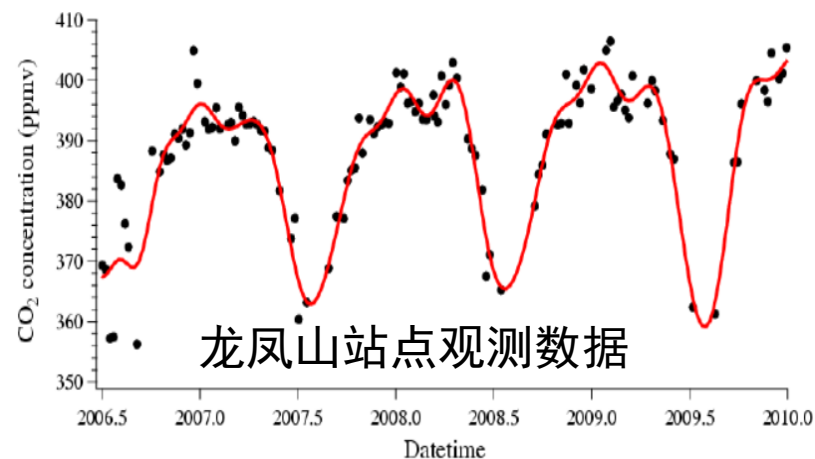


反演分区: 全球43个区, 其中
中国13个区

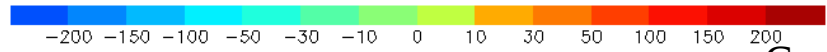
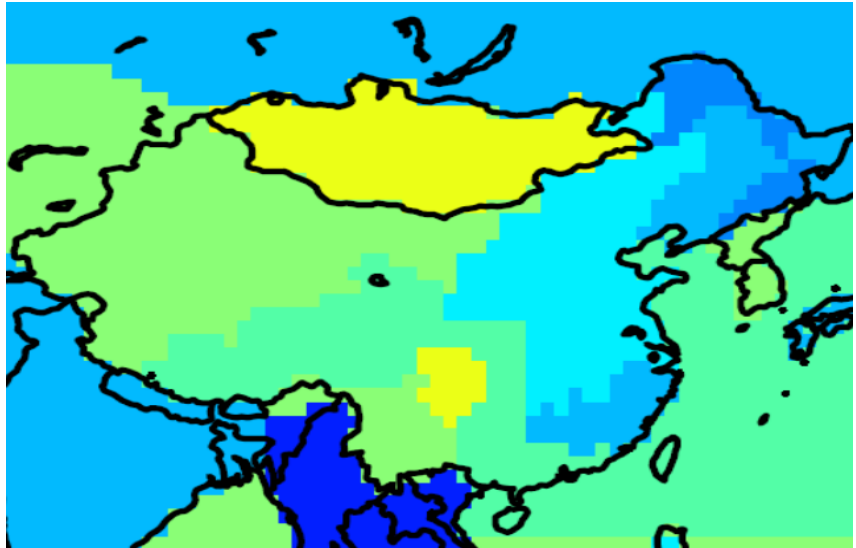
传输模型: TM5, 全球 $3^\circ \times 2^\circ$

研究时段: 2002-2008

CO₂观测: 130个站点, GLOBALVIEW-
CO₂ 2010 + 3个站, 中国气象局 (2006-2009)
先验通量: 生态系统, BEPS; 海洋, OPA-
PISCES-T; 化石燃料和生物质燃烧,
CDIAC和GFEDv3

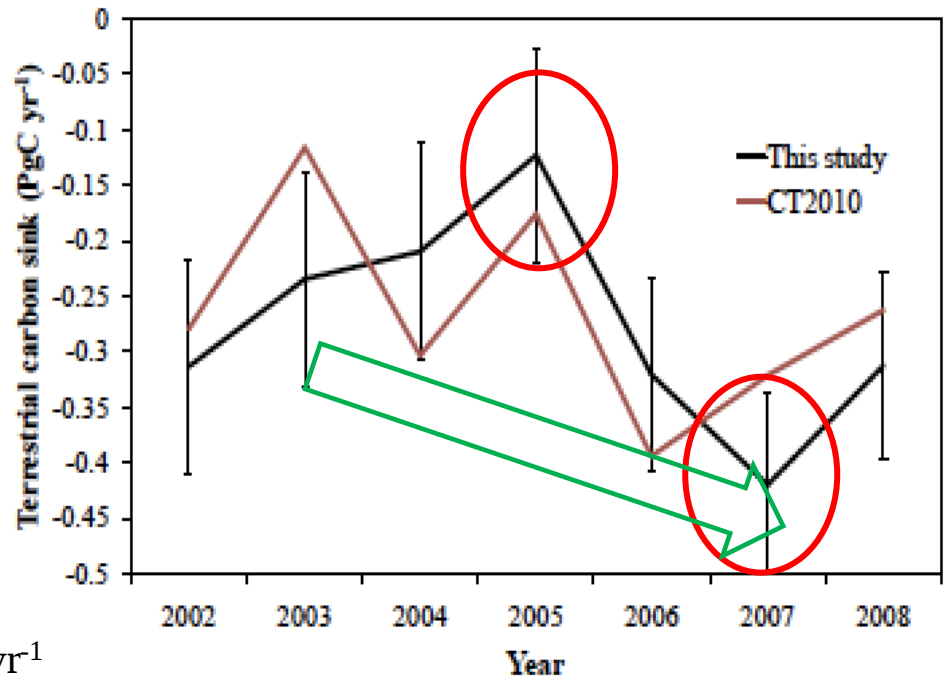


我国陆地碳汇嵌套式大气反演



$\text{gC m}^{-2}\text{yr}^{-1}$

我国2002-2008年陆地生态系统碳源汇空间分布



陆地碳汇年际变化

Region	Global	Land	Ocean	North America	Europe	China
This study	-5.75 ± 0.39	-3.20 ± 0.63	-2.55 ± 0.56	-0.81 ± 0.21	-0.28 ± 0.17	-0.28 ± 0.18
Deng and Chen, 2011 ^a	-5.58	-3.63 ± 0.49	-1.95 ± 0.41	-0.89 ± 0.18	-0.22	-
CarbonTracker 2010	-5.72	-3.85	-1.87	-0.66	-0.31	-0.26
Le Quéré et al., 2009 ^b	-5.3	-3.0 ± 0.9	-2.3 ± 0.4	-	-	-

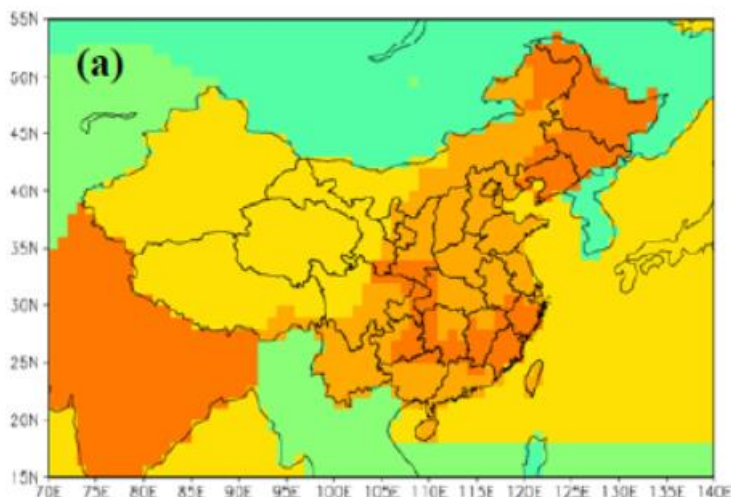
^a Mean from 2002 to 2007; ^b mean from 2000 to 2008.

我国陆地碳汇嵌套式大气反演

碳通量距平

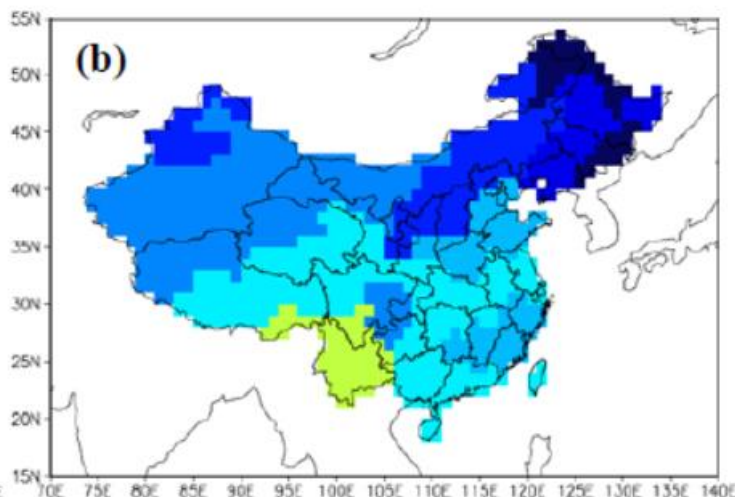
温度距平

2005



碳汇增加

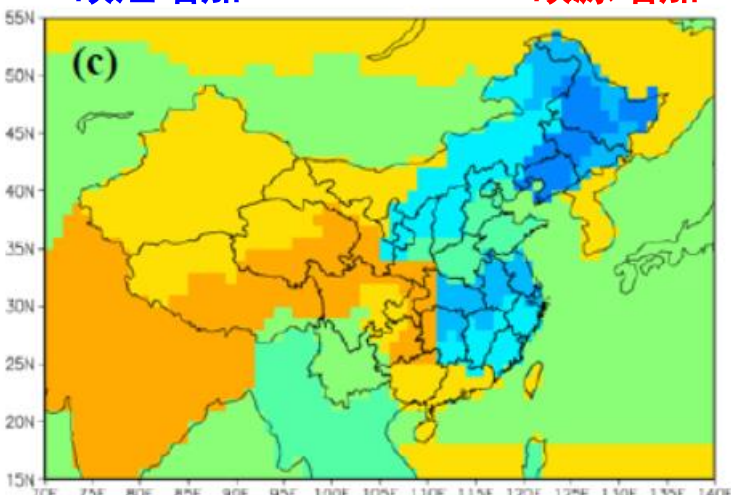
碳源增加



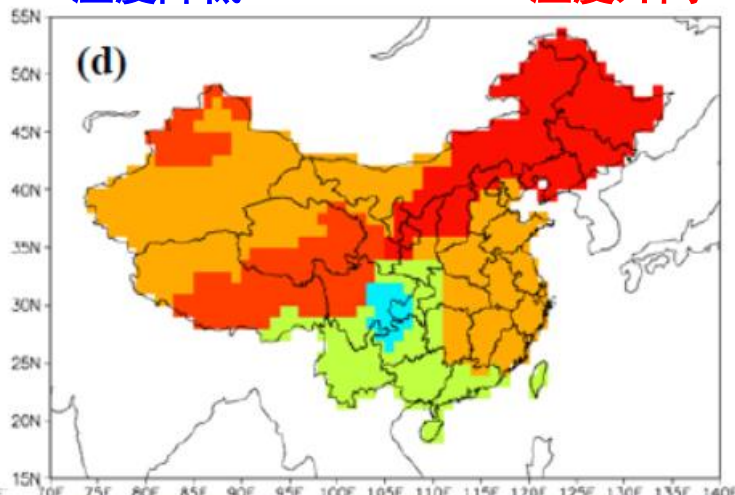
温度降低

温度升高

2007



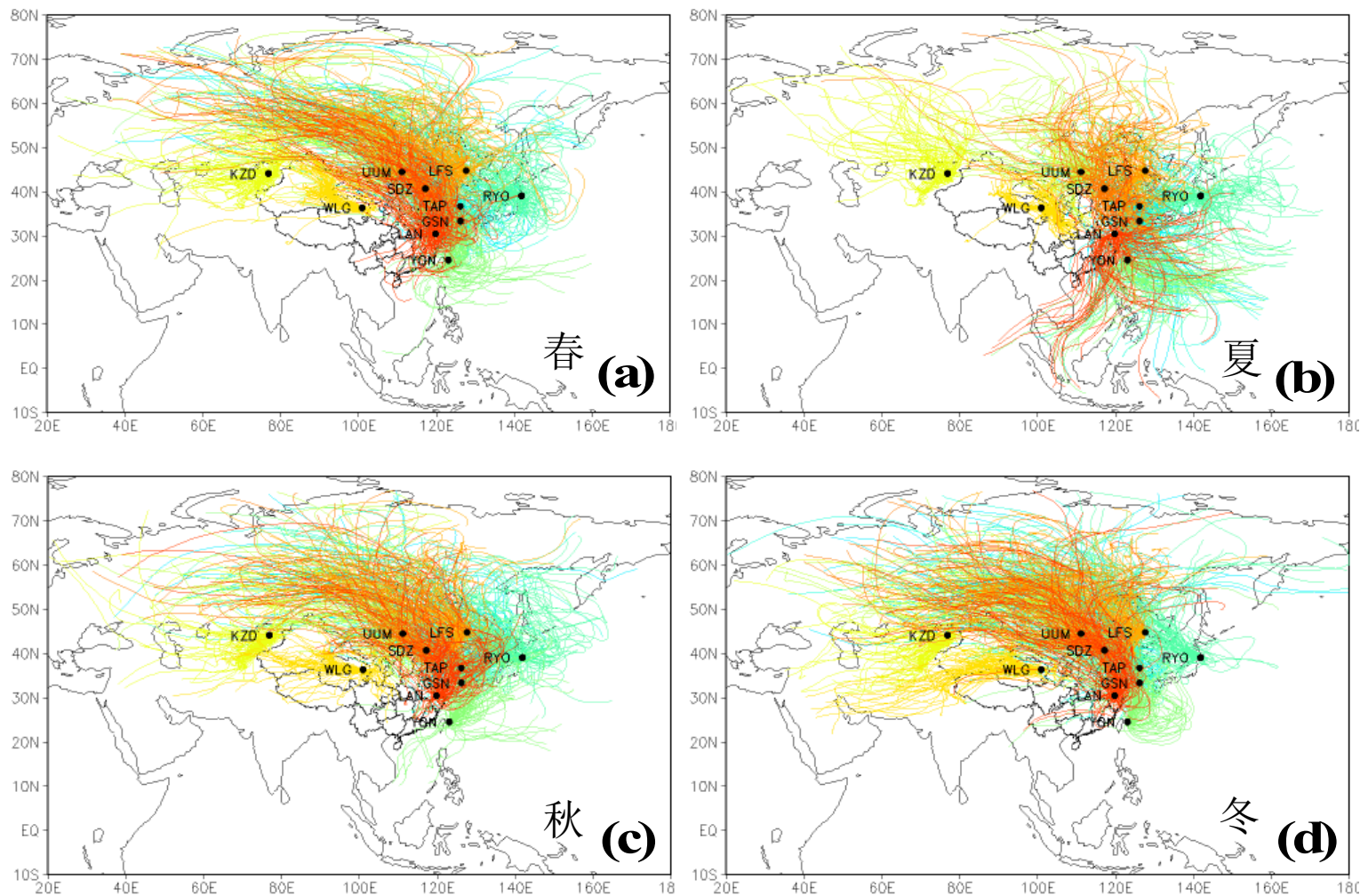
-200 -150 -100 -50 -30 -10 0 10 30 50 100 150 200



-20 -15 -10 -5 -2 0 2 4 6 8 10

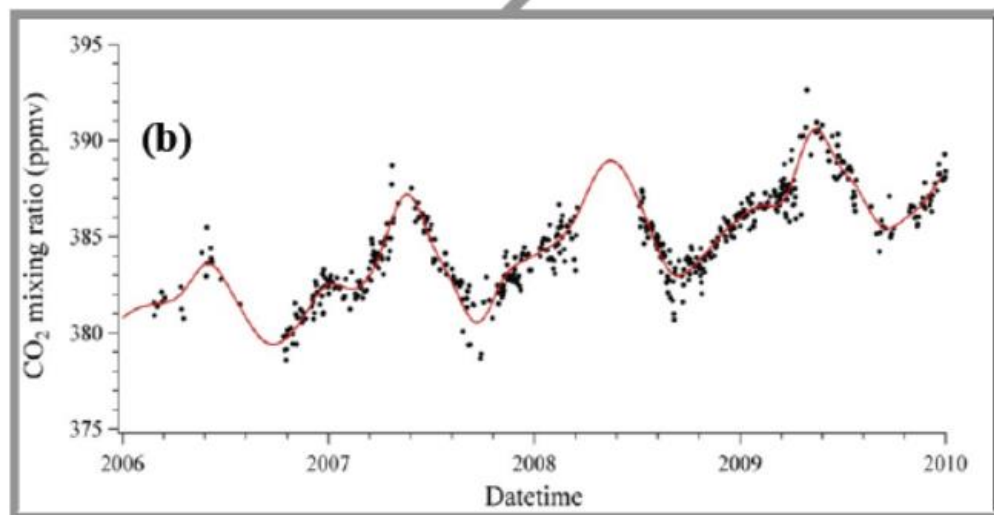
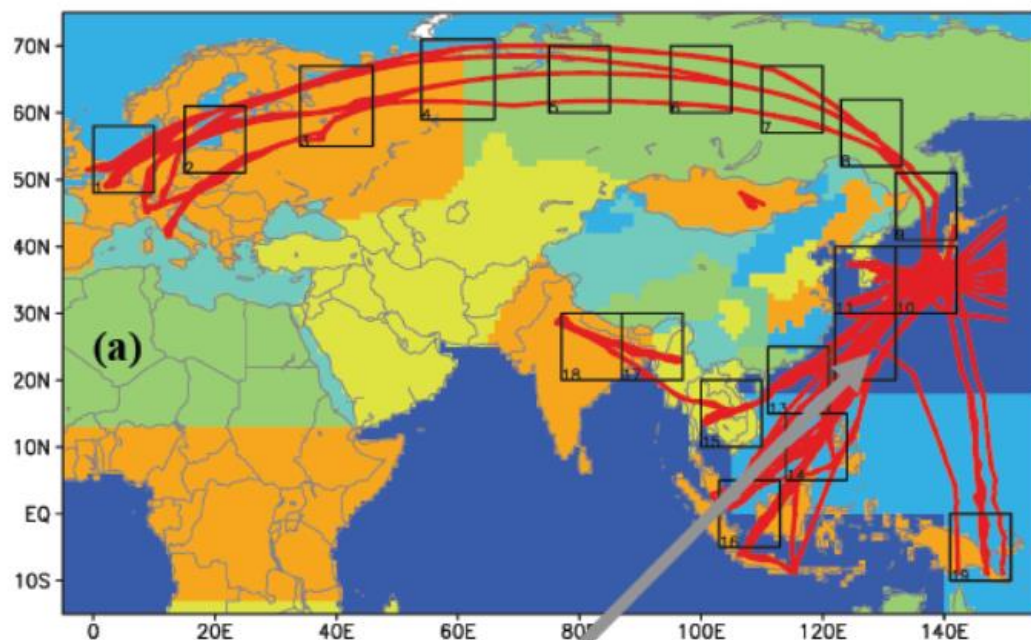
我国陆地碳汇嵌套式大气反演

现有站点无法感应到我国西南以及华南地区的碳通量变化



2006年东亚地区观测站气团的5天后向轨迹

我国陆地碳汇嵌套式大气反演



日本民航飞机观测 (CONTRAIL) 对我国陆地碳汇反演结果的影响

反演分区: 全球43个区, 其中中国13个区

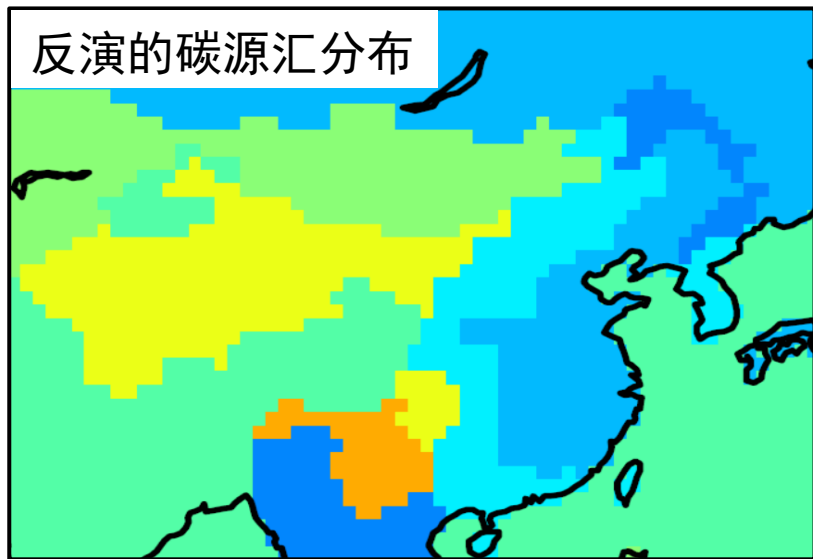
传输模型: TM5, 全球 $3^{\circ} \times 2^{\circ}$

研究时段: 2002-2008

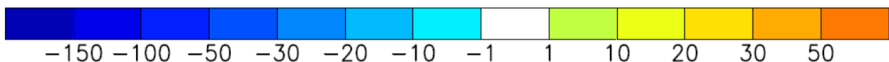
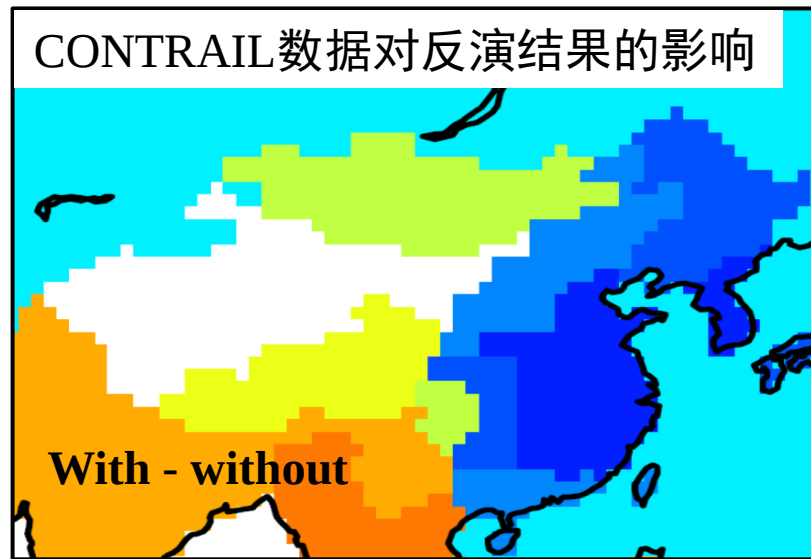
CO₂观测: 130站点,
GLOBALVIEW + CONTRAIL
先验通量: 生态系统, BEPS; 海洋,
OPA-PISCES-T; 化石燃料和生物质
燃烧, CDIAC和GFEDv3

我国陆地碳汇嵌套式大气反演

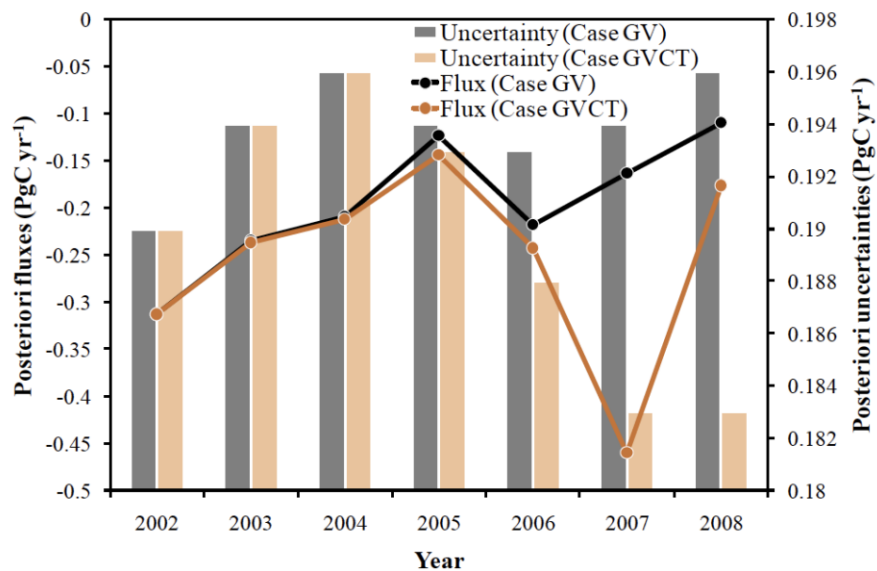
反演的碳源汇分布



CONTRAIL数据对反演结果的影响



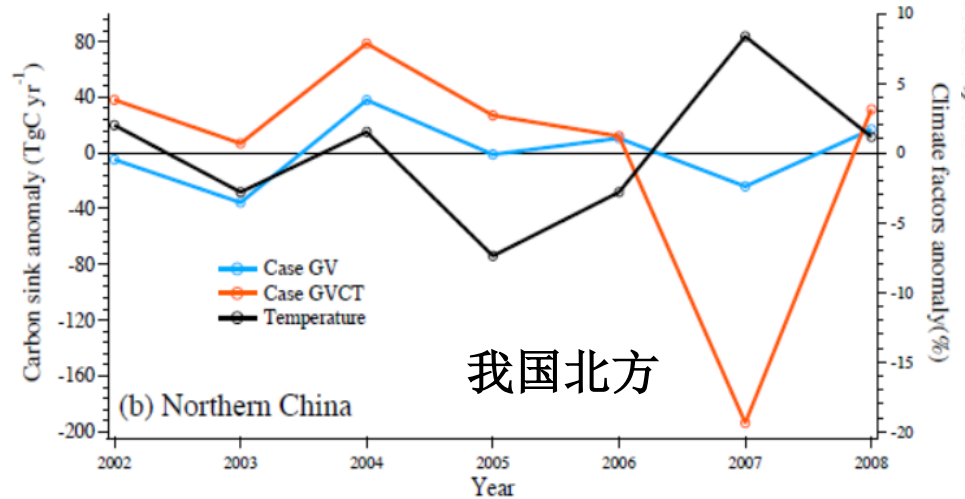
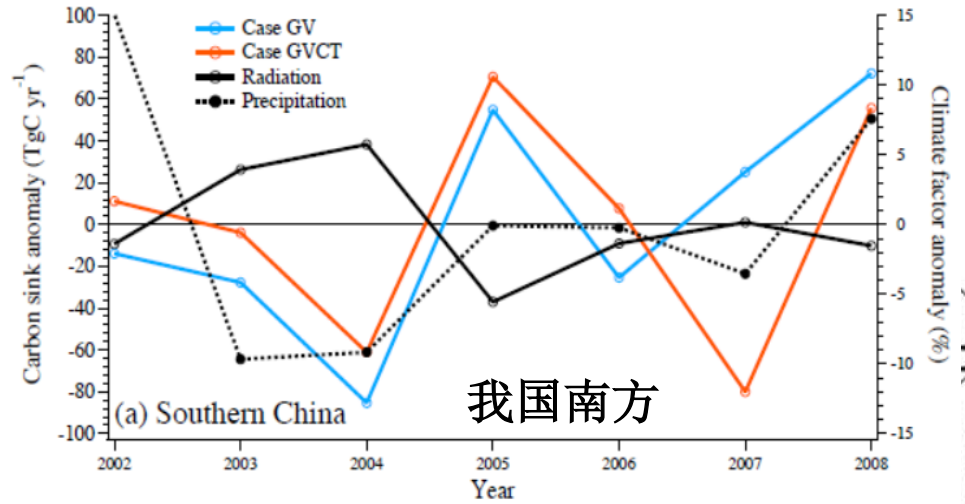
$\text{gC m}^{-2}\text{yr}^{-1}$



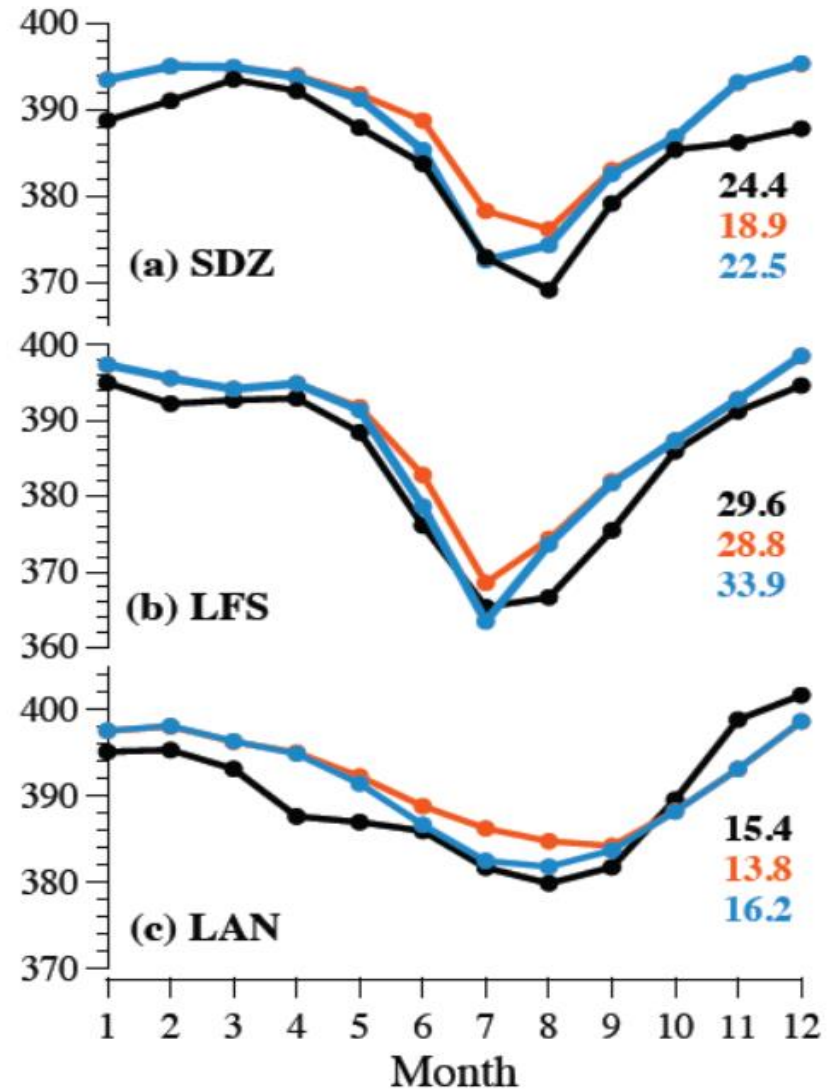
- 增加CONTRAIL数据反演的碳汇年际变化跟增加中国3个站的结果基本一致
- 观测数据增加，反演的我国陆地生态系统碳汇明显增加

2. 中国大陆地碳汇嵌套式大气反演

与环境因子演变的相关性更好



与独立验证观测值更接近



● 反演方法

- 以中国区域为中心的嵌套式大气反演系统 (BI)
- 全球碳追踪系统CarbonTracker-China CAS (CTC)

● 实验设置

BI

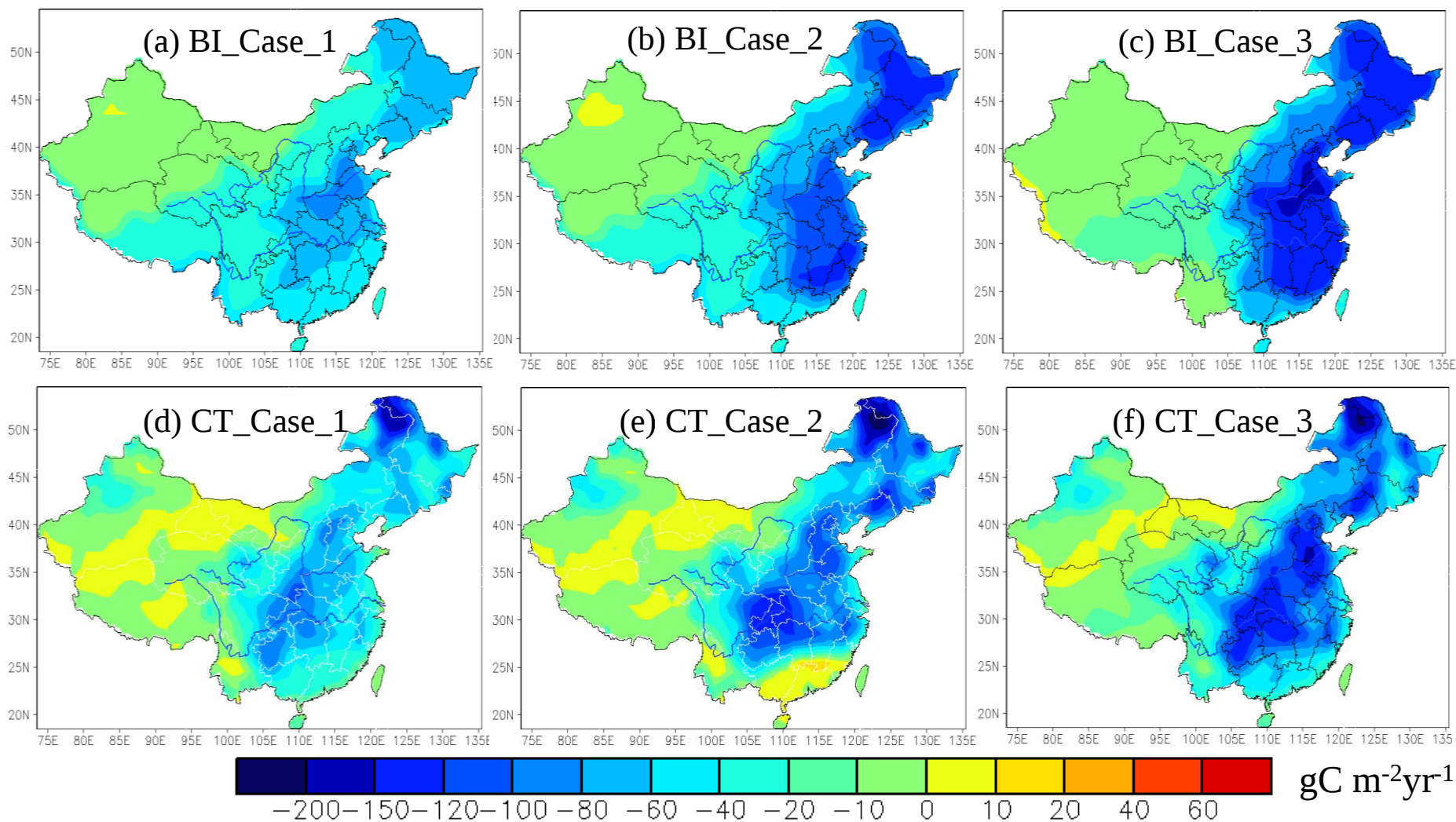
CTC

Case_1	GLOBALVIEW中130个站点	Obspack, WDCGG中的99个站点
Case_2	增加我国3个区域站的数据	
Case_3	进一步增加CONTRAIL CO ₂ 数据	
先验碳通量	化石燃料排放、生物质燃烧排放、生态系统通量、海洋通量	

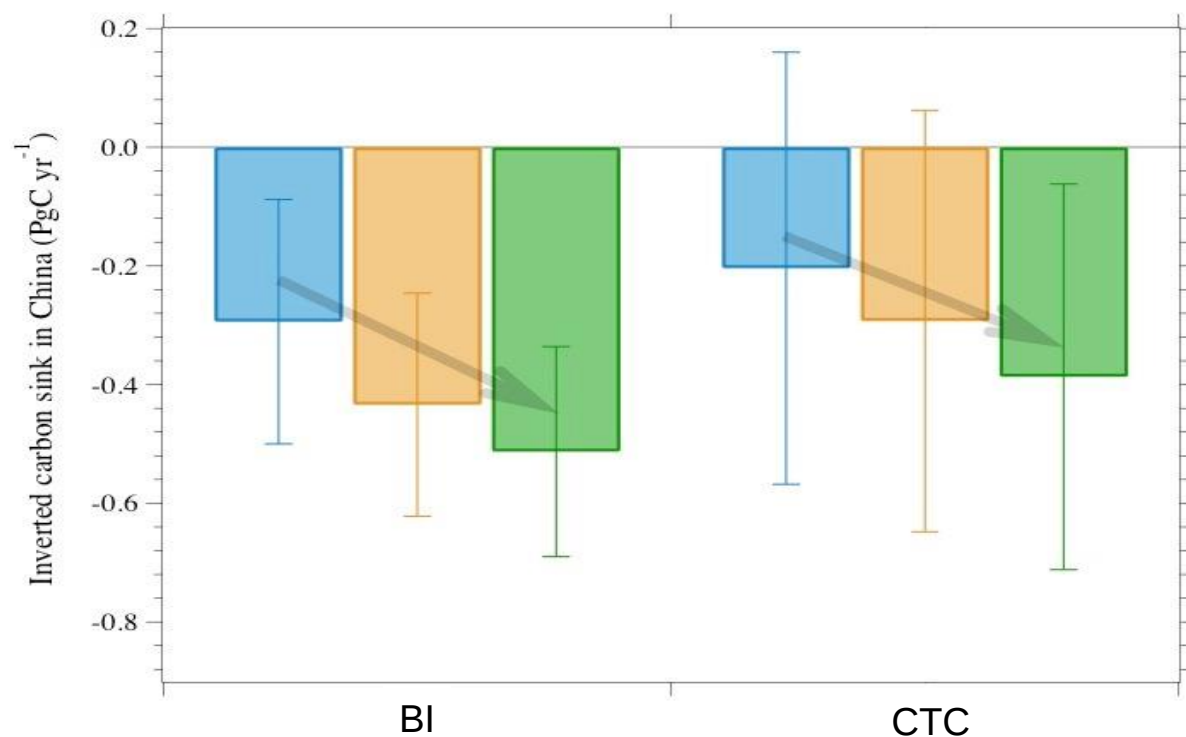
我国陆地碳汇闭合估算



我国陆地生态系统碳汇空间分布 (2006-2009)



反演的2006-2009年平均的我国陆地生态系统碳汇



单位: PgC yr^{-1}

Case 1: 0.25 ± 0.28

Case 2: 0.36 ± 0.27

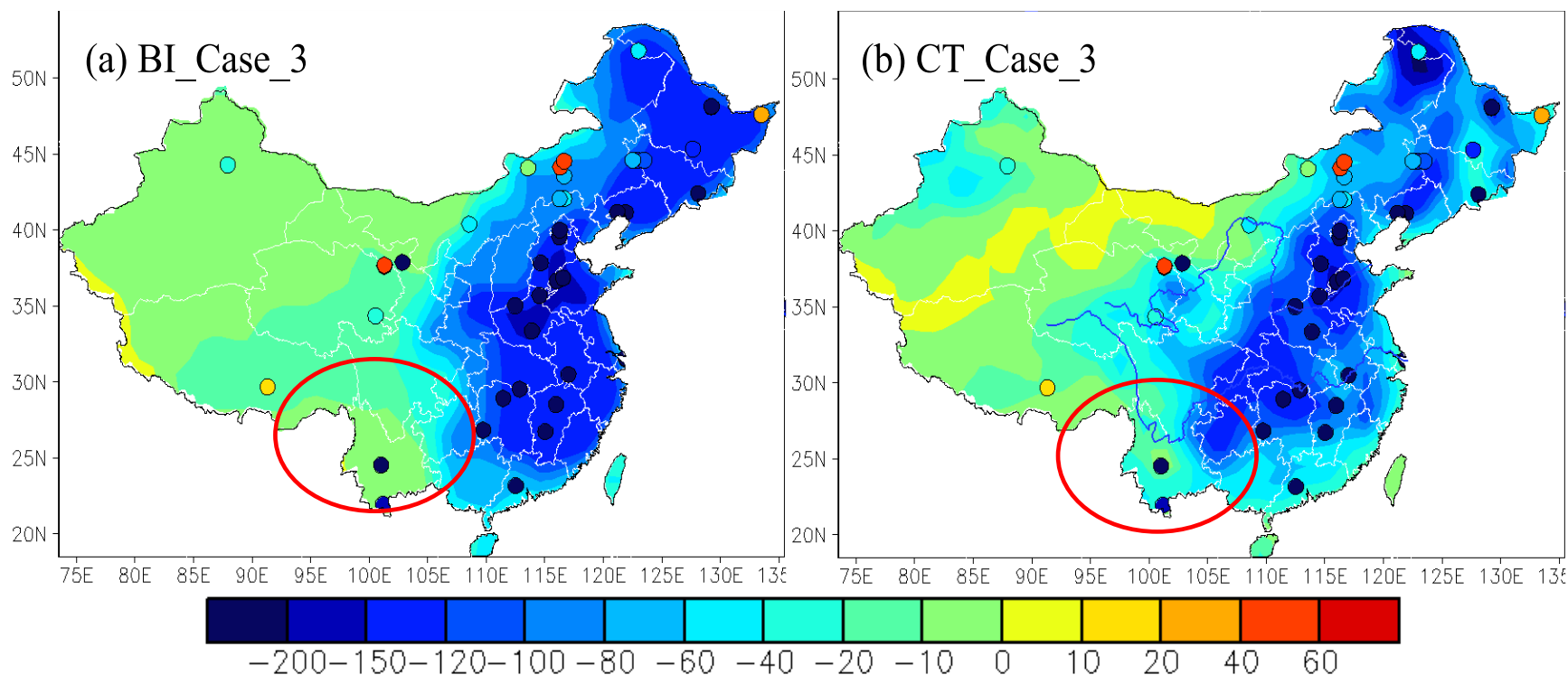
Case 3: 0.45 ± 0.25

更多观测，更强碳汇！

我国陆地碳汇闭合估算



- 反演的陆地生态系统碳源汇空间分布格局与ChinaFlux观测的空间分布格局基本一致



反演的陆地碳汇与ChinaFlux通量观测结果对比



我国陆地碳汇闭合估算

自下而上估算：植被碳累积速率

	方法	面积 (1.0e6 ha)	碳累积速率 (PgC yr ⁻¹)	时段	Ref.
林分	清单	149	0.174	1999-2008	本研究
	清单	156	0.115	1999-2008	Pan et al., 2011
	清单	149	0.104	1999-2008	Guo et al., 2013
林分平均		151	0.131±0.036		
经济林	清单	21	0	1999-2008	本研究
	清单	21	0	1999-2008	Guo et al., 2013
经济林平均		21	0		
竹林	清单	5.1	0.013	1999-2008	本研究
	清单	5.1	0.005	1999-2008	Guo et al., 2013
竹林平均		5.1	0.009±0.004		
林地	清单	5.4	-0.002	1999-2008	本研究
灌木	清单	49.5	0.019	1999-2008	本研究
行道树			-0.001	1999-2008	本研究
草地	模型		0.014	1979-2008	本研究
	清单	331	0.007±0.0025	1980s,1990s	Piao et al., 2009
草地平均			0.01±0.003		
小计			0.175±0.042		



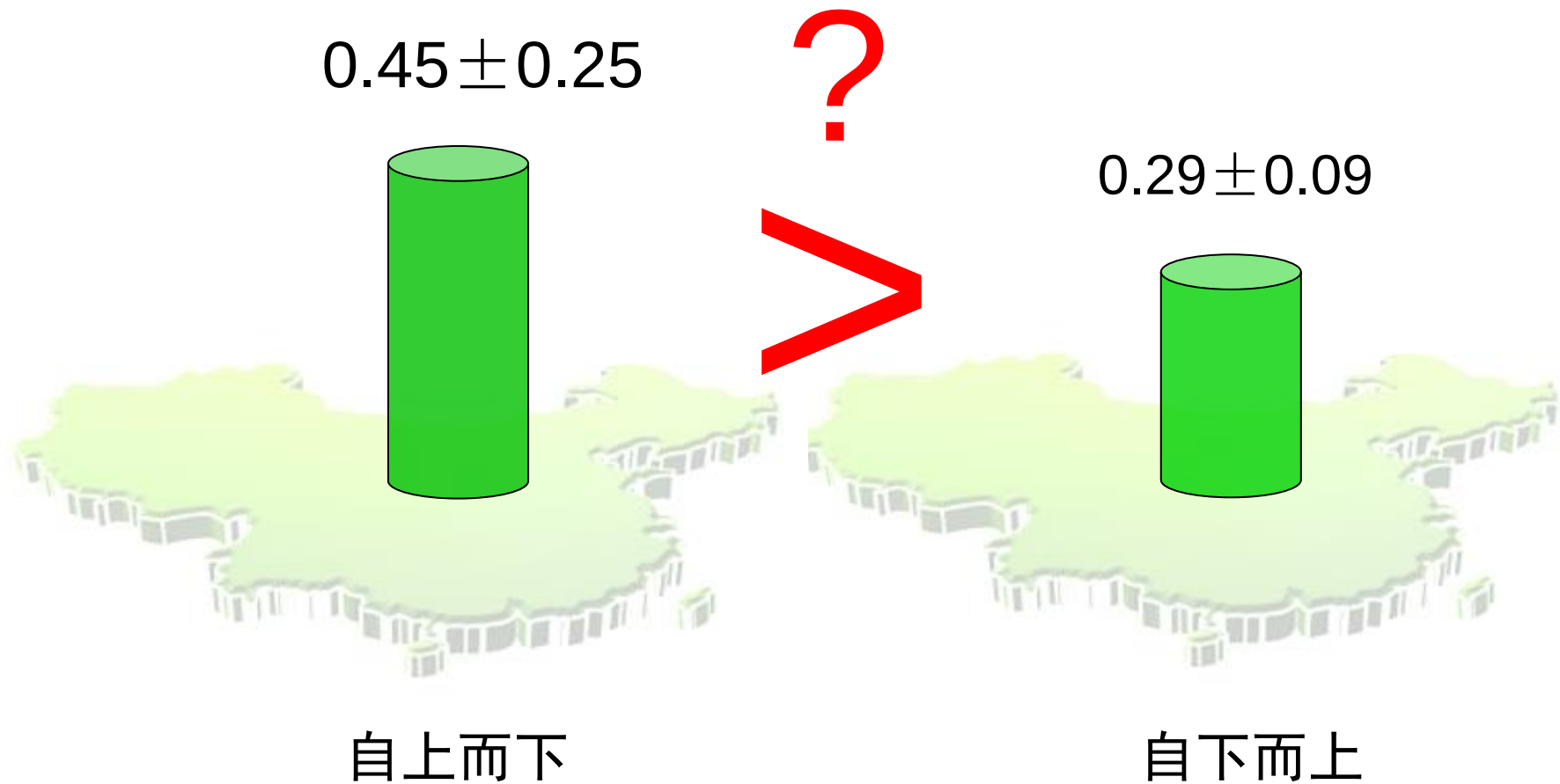
我国陆地碳汇闭合估算

自下而上估算：土壤碳累积速率

	方法	面积 (1.0e6 ha)	碳累积速率 (PgC yr ⁻¹)	时段	Ref.
森林	INTEC模型	155	0.068±0.034	1999-2008	本研究
	清单	156	0.060±0.025	1999-2008	Pan et al., 2011
森林平均		155	0.064±0.030		
灌木	统计模型	215	0.039±0.009	1980s,1990s	Piao et al., 2009
	过程模型	141	0.012±0.005	1981-2000	Tian et al., 2011
灌木平均			0.0255±0.013		
农田	模型		0.0167	1981-2008	本研究
	集成	130	0.021±0.0043	1980s,1990s	Huang et al., 2010
农田平均			0.0188±0.003		
草地	模型		0.012	1979-2008	本研究
	集成	331	0.005±0.0016	1980s,1990s	， Huang et al., 2010
草地平均			0.008±0.003		
小计			0.117±0.049		

植被+土壤=0.29±0.09 PgC yr⁻¹

我国陆地碳汇闭合估算



PgC yr⁻¹

我国陆地碳汇闭合估算

化石燃料排放

生物质燃烧排放

陆地碳汇_{自上而下} = 反演的碳汇 - 输送到全球大气中的化石燃料RCC - 沉降到地表的化石燃料RCC - 输送到全球的自然源RCC + 国际贸易净碳进口

陆地碳汇_{自下而上} = 植被土壤碳储量变化 + 木材产品碳储量变化 + 沉降到河底湖底 + 输送到海洋

NEP = 陆地碳汇 + 生物质燃烧碳排放 + 河流湖泊碳排放 + 自然源RCC排放 - 自然源RCC沉降

RCC: 非CO₂含碳气体, 包括VOC, CO和CH₄

自下而上估计

流失到河流湖泊中

植被的VOC排放

我国陆地碳汇闭合估算

化学转换对陆地碳源汇估计的影响

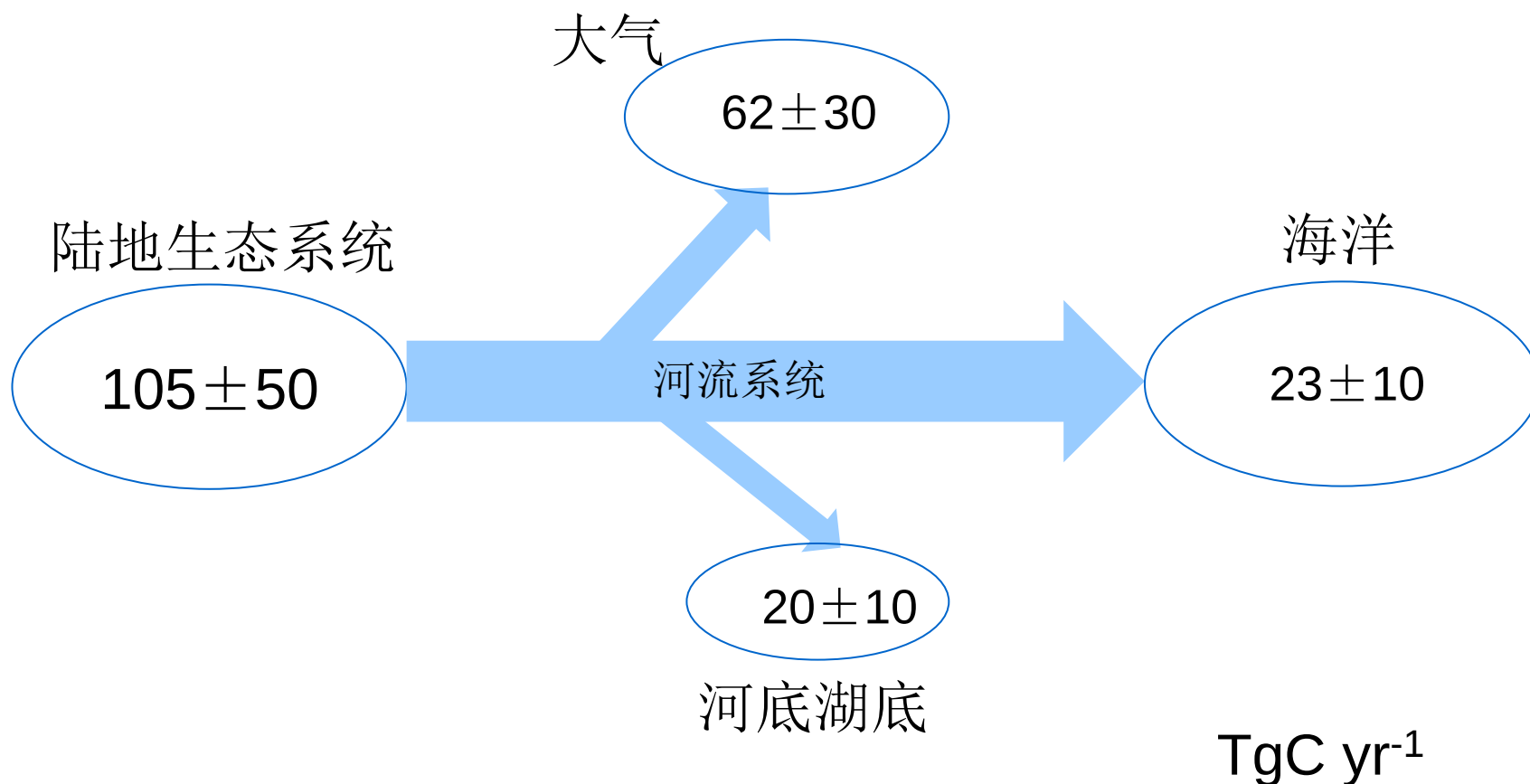
- RCC来自：化石燃料碳排放和自然界；
- RCC到CO₂的化学转换需要经过较长的时间，只有部分（**14%**）在边界层内转化，很大一部分（**74%**）输送到全球其他地方，然后再转换；
- 反演系统只能识别到在我国边界层内转换的部分。

	化石燃料	生物质燃烧	自然源排放	总计
CO	72.4 ± 5.0	1.0	0.0	73.4 ± 3.6
NMVOCs	18.7 ± 1.3	0.1	21.0 ± 10.5	39.8 ± 11.4
CH ₄	11.2 ± 0.8	0.7	27.0 ± 13.5	39.0 ± 14.1
总计	102.3 ± 7.1	1.9	48.0 ± 24.0	152.1 ± 31.1
在边界层内转换为 CO ₂	14.3 ± 1.0	0.3	6.7 ± 3.4	21.3 ± 4.4
沉降到地表	12.0 ± 0.8	0.2	5.6 ± 2.8	17.8 ± 3.6
输送到全球	76.0 ± 5.3	1.4	35.7 ± 17.8	113.0 ± 23.1



河流碳循环

基于最近10年科学家在我国主要河流湖泊中的观测数据



我国陆地碳汇闭合估算

国际贸易中净碳进口和木材产品碳储量变化

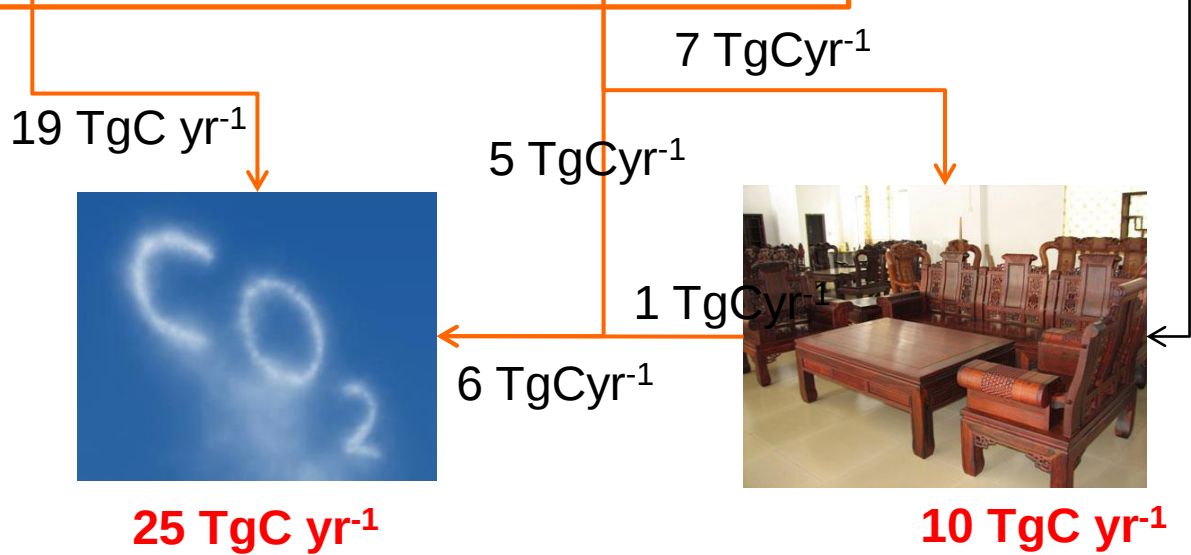


联合国粮食及
农业组织

进口

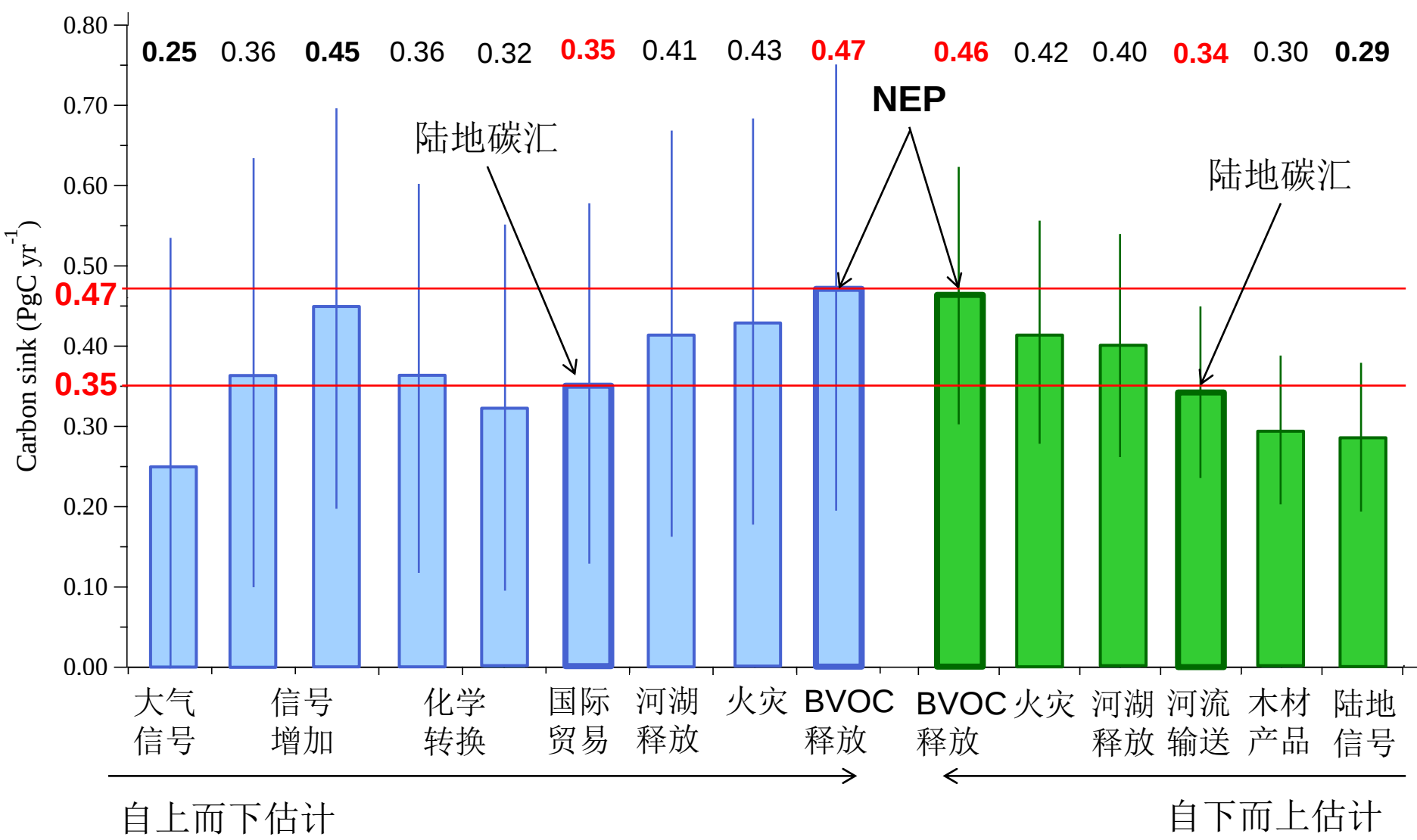


砍伐

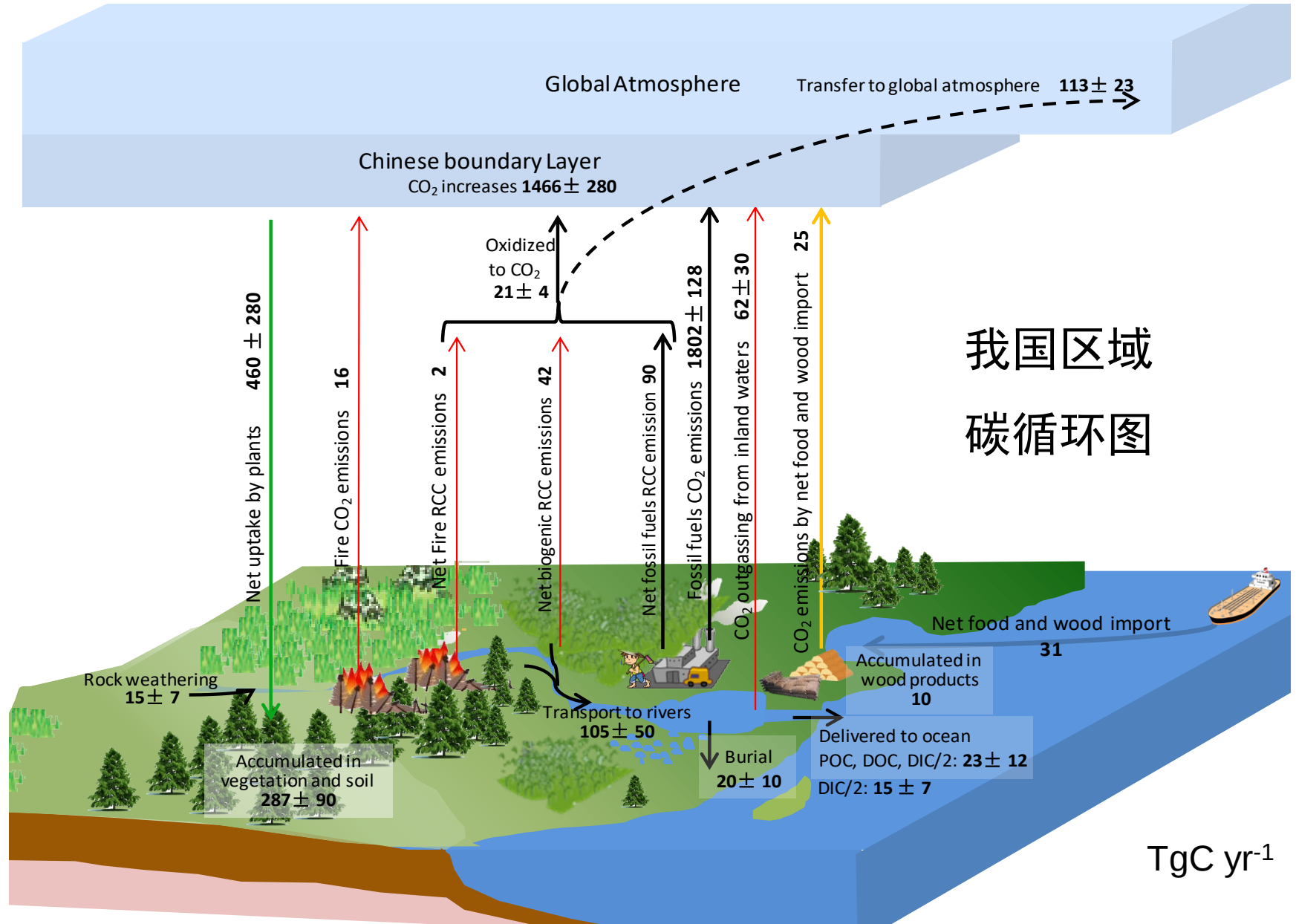


我国陆地碳汇闭合估算

自上而下和自下而上估算的闭合



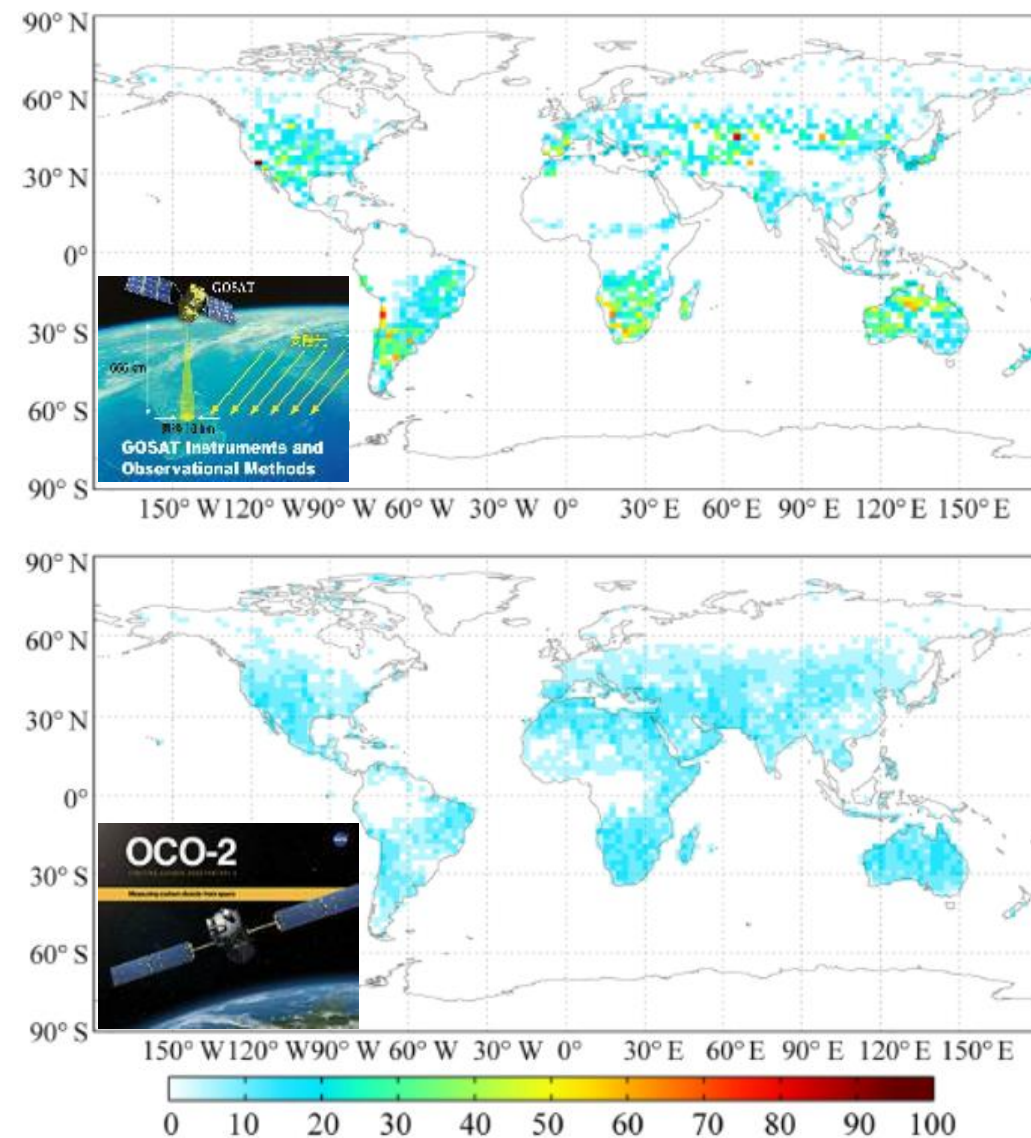
我国陆地碳汇闭合估算



- 大气CO₂浓度观测数据缺乏会导致我国陆地碳汇的自上而下估计偏低；
- 我们实现了我国陆地碳汇自上而下和自下而上估计的闭合，陆地碳汇为 $0.34 \pm 0.11 \text{ PgC yr}^{-1}$ ，生态系统净碳吸收NEP为 $0.46 \pm 0.16 \text{ PgC yr}^{-1}$ ；
- 2000年代，我国的陆地碳汇显著增强，约是八九十年代的2倍；
- 河流碳循环、化学转换、国际木材粮食贸易等在陆地碳汇估计中具有重要影响。

1. 研究背景及大气反演方法介绍
2. 我国陆地生态系统碳汇的反演估算
3. 基于碳卫星监测的生态系统碳汇反演

1. 不同碳卫星产品的陆地碳汇反演差异



两颗卫星产品在不同地区数据量差异

GOSAT: 2009, footprint直径 10.5 km, 12:49 local time, 3d cycle

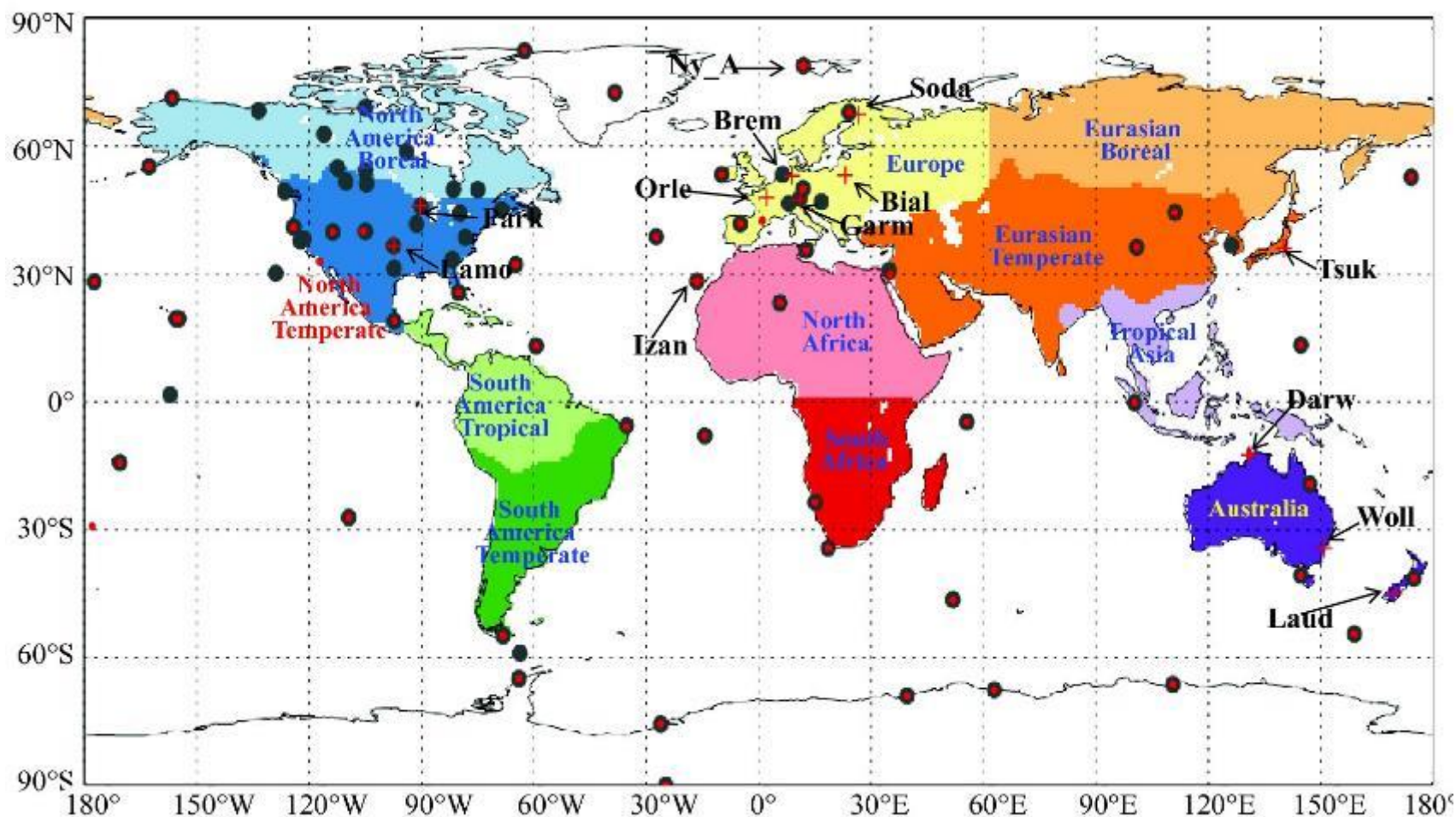
OCO-2: 2014, 1.3km x 2.3 km, 13:30 local time, 16 d repeat

方法: GEOS-Chem+4DVAR

数据: GOSAT, OCO-2 XCO2 from ACOS v7.3 Level 2 Lite products, 仅陆地上的观测

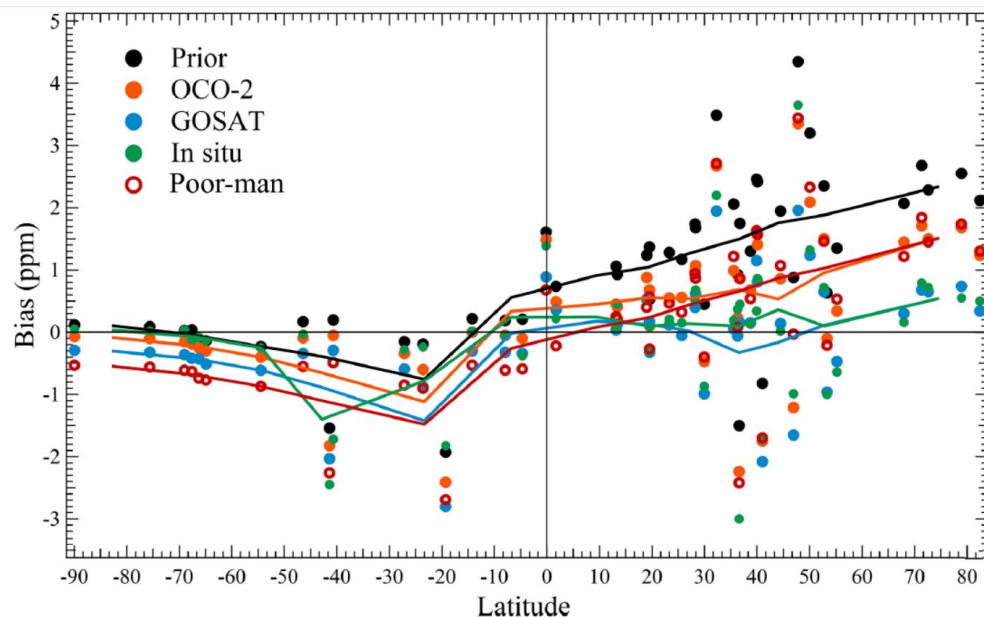
时间: 1 October 2014 to 31 December 2015

地面观测站点分布



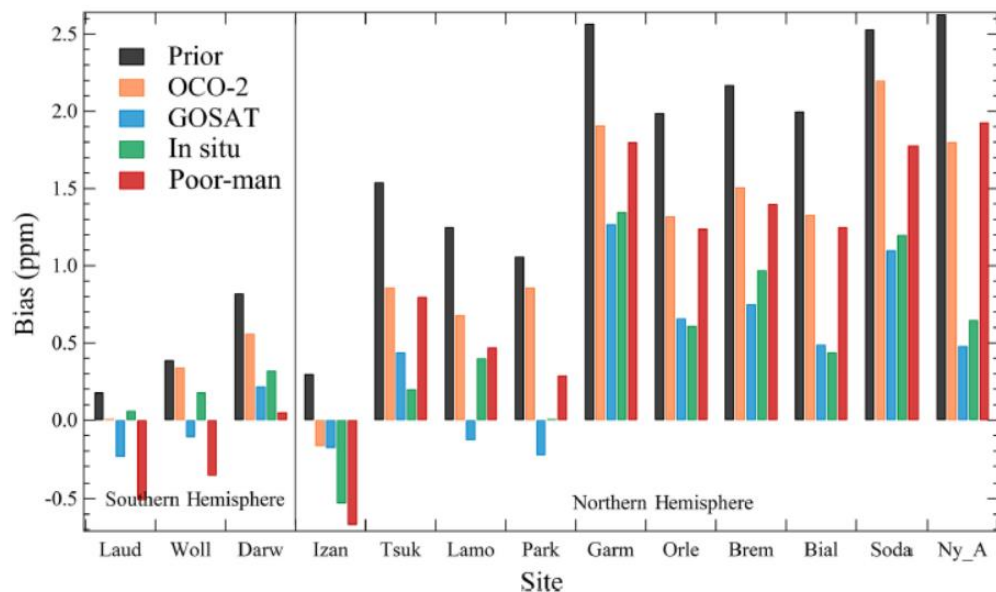
52个Flask站点，13个TCCON站点

反演通量的验证结果



地面采样站点验证 (52 sites)

- 北半球：GOSAT偏差与地面站点反演结果接近，明显小于OCO-2结果
- 南半球：反演以后误差都反演有一定增加



与TCCON站点对比 (13 sites)

- GOSAT偏差与地面站点反演结果接近，明显小于OCO-2结果

反演通量的验证结果

Table 1. Statistics of the model–data mismatch errors at the 52 surface flask sites and the 13 TCCON sites (ppm).

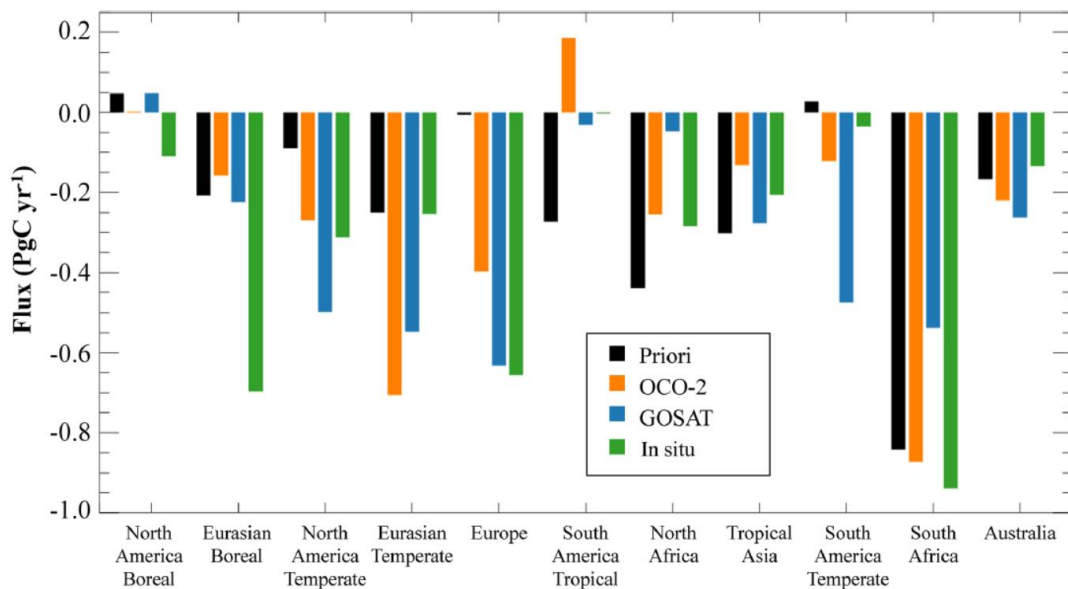
	Flask		TCCON	
	Bias	SD	Bias	SD
Prior	0.93	2.30	1.16	1.30
OCO-2	0.33	2.15	0.80	1.08
GOSAT	−0.19	2.05	0.22	1.04
In situ	−0.03	2.04	0.38	1.04
Poor-man	0.14	2.28	0.49	1.25

反演结果对比

全球碳收支结果对比

	Prior	OCO-2	GOSAT	In situ	Poor-man
Fossil fuel and industry	9.84	9.84	9.84	9.84	9.84
Biomass burning emissions	2.20	2.20	2.20	2.20	2.20
Land sink	-2.50	-2.94	-3.48	-3.63	-3.35
Ocean sink	-2.41	-2.44	-2.45	-2.41	-2.41
Global net flux	7.13	6.66	6.11	6.00	6.28

不同区域陆地生态系统碳汇反演结果对比



- 大部分区域，GOSAT反演的碳汇大于OCO-2结果，特别是在温带和热带区域
- 在寒带地区，两者接近

反演结果对比

- 在同一个区域，观测数据量越多，引起的碳通量的变化越大
- 与先验通量模拟的柱浓度相比，GOSAT的偏差明显大于OCO-2

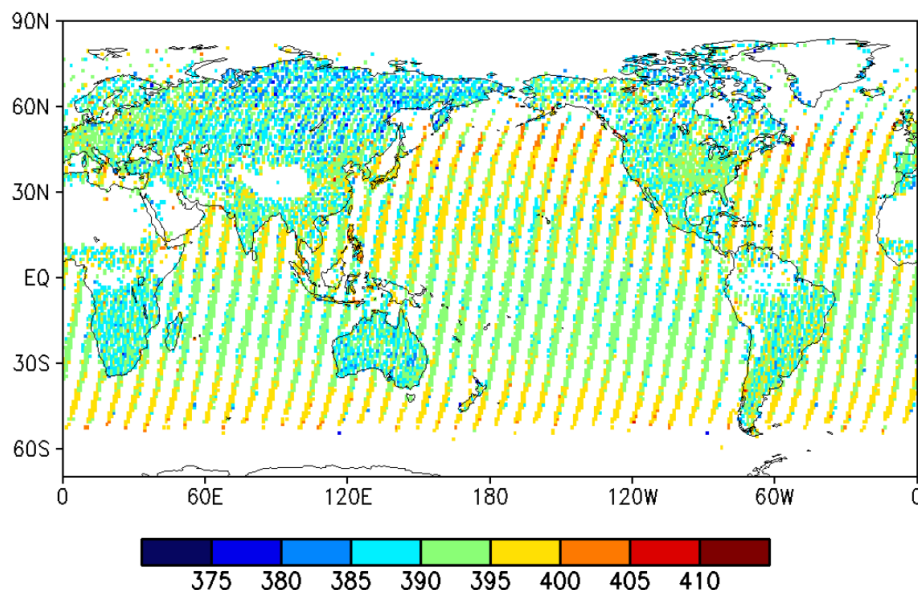
Region	Flux change (PgC yr^{-1})*		XCO ₂ data amount		Deviations (ppm)**	
	OCO-2	GOSAT	OCO-2	GOSAT	OCO-2	GOSAT
North American boreal	-0.05	0	1143	639	0.6	1.41
North American temperate	-0.18	-0.41	2390	3163	0.52	0.93
South American tropical	0.46	0.24	800	421	-0.89	0.43
South American temperate	-0.15	-0.5	1711	3500	0.02	0.54
North Africa	0.19	0.39	3208	674	0.12	-0.19
South Africa	-0.03	0.3	2057	3060	0.17	0.33
Eurasian boreal	0.05	-0.02	1714	1339	0.47	1.5
Eurasian temperate	-0.46	-0.3	5323	4782	0.46	0.82
Tropical Asia	0.17	0.03	726	550	-0.43	0.34
Australia	-0.05	-0.1	2011	3110	0.18	0.67
Europe	-0.39	-0.63	1604	2106	0.28	1.35
Global land	-0.44	-0.98	22687	23344	0.22	0.79
Northern boreal land	0.005	-0.02	2857	1978	0.52	1.47
Northern temperate land	-1.03	-1.33	9317	10051	0.45	0.96
Tropical land	0.82	0.66	4734	1645	-0.08	0.13
Southern temperate land	-0.234	-0.3	5779	9670	0.11	0.6

* Differences between posterior and prior flux. ** Deviations between the modeled XCO₂ with prior flux and satellite-retrieved XCO₂.

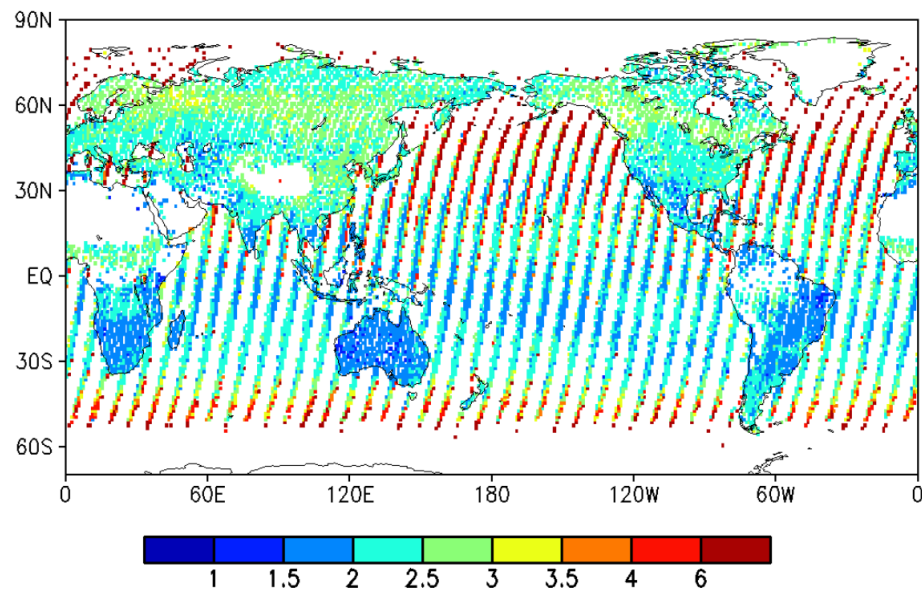
2. 基于GOSAT反演的2010-2015年陆地碳汇

Jiang et al., 2020, ACPD

- 反演系统：全球碳同化系统GCASv2
- 同化数据：GOSAT ACOS v7.3
- 反演时间：20090501-20151231，同化窗口：一周
- 生态系统：BEPS：海洋， $p\text{CO}_2$ -Clim prior

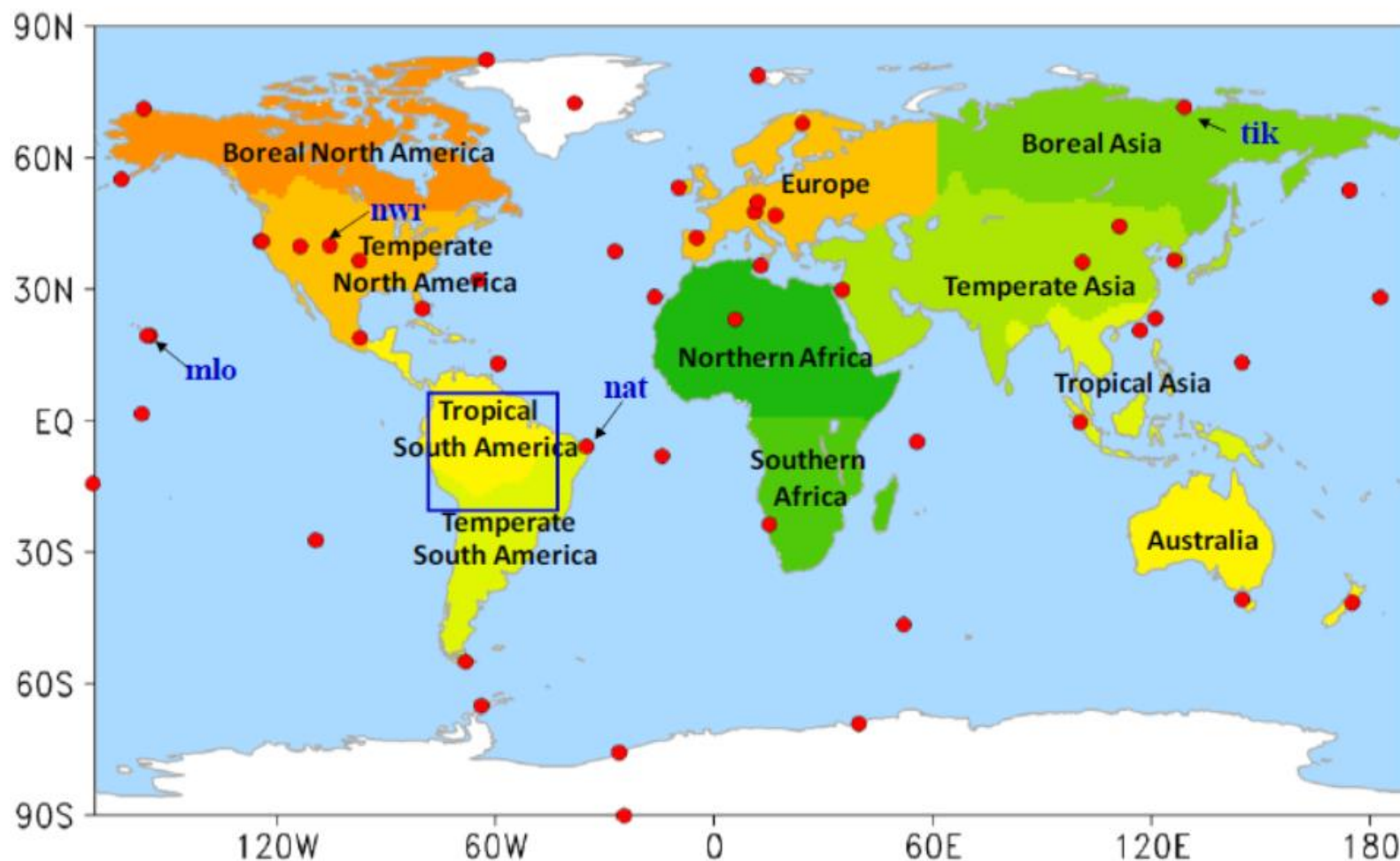


平均浓度



平均不确定性

基于GOSAT反演的2010-2015年陆地碳汇



地面独立验证站点：52 flask sites

反演结果验证

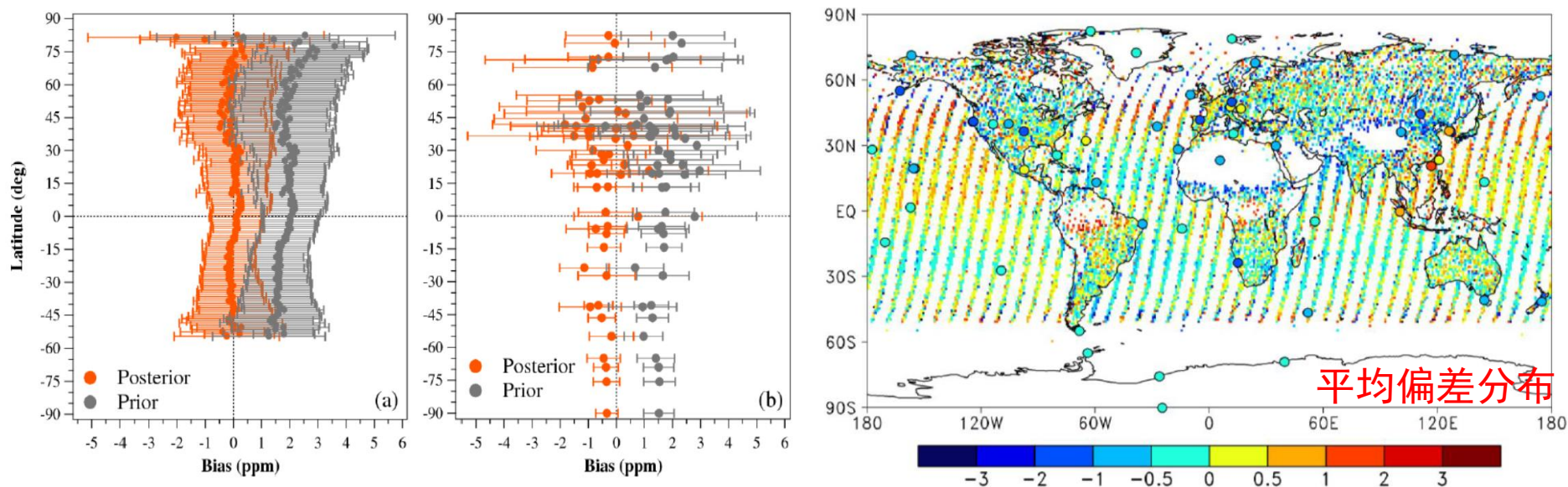
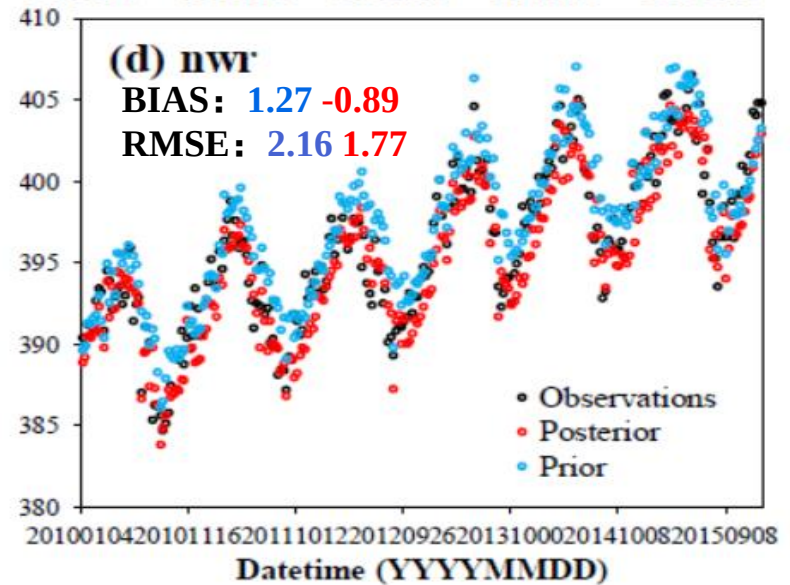
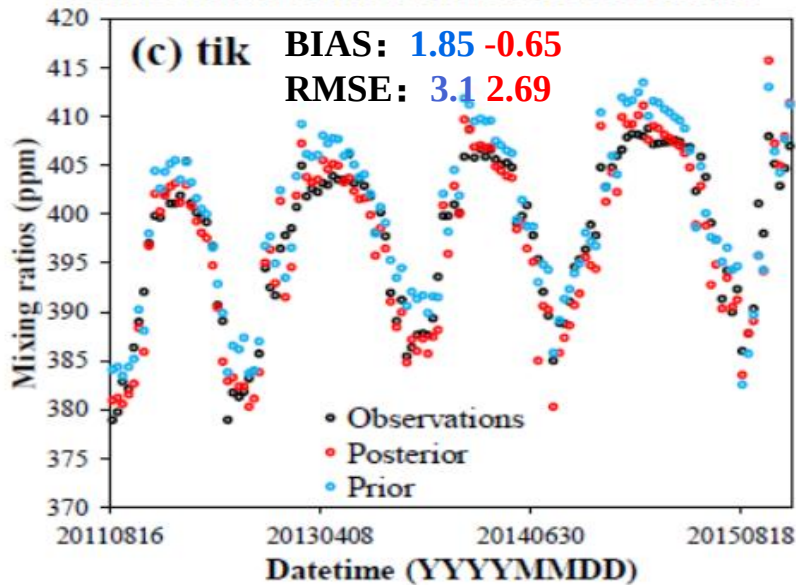
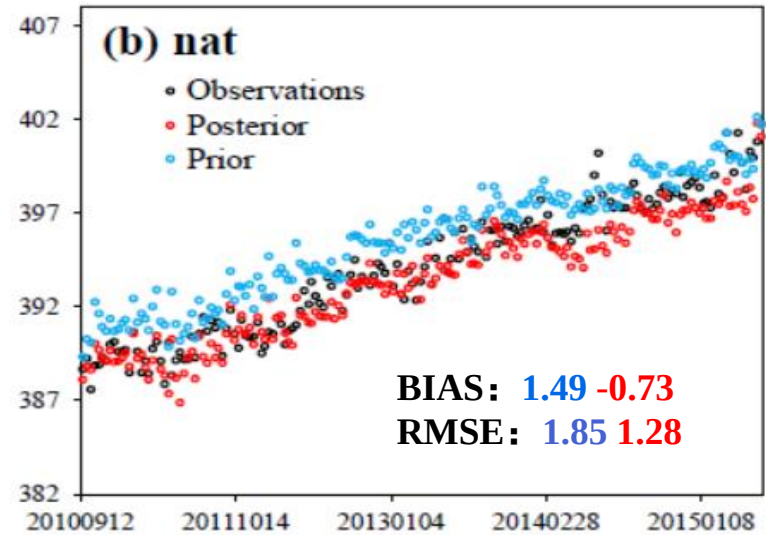
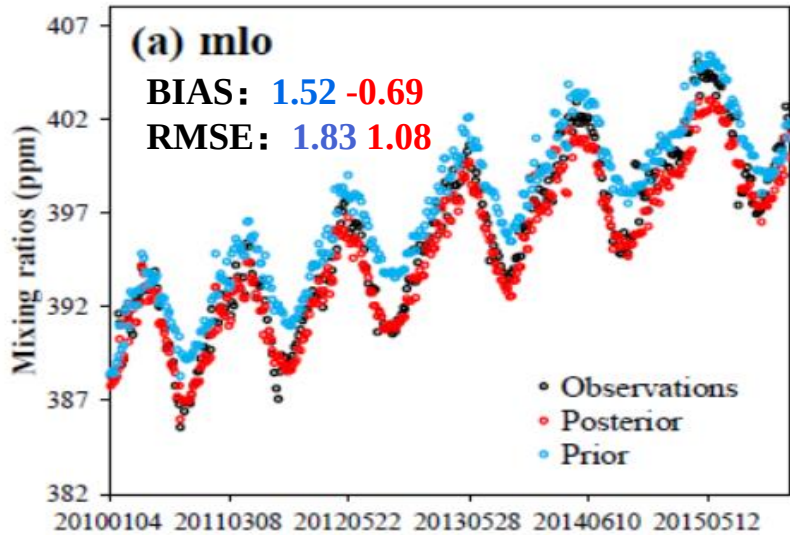


Table1. Statistics of the simulated surface CO₂ and XCO₂ concentrations against the surface flask observations and GOSAT retrievals, respectively

	BIAS (ppm)*		RMSE (ppm)		CORR	
	Prior	Posterior	Prior	Posterior	Prior	Posterior
XCO ₂	1.8±1.3	-0.0±1.1	2.2	1.1	0.95	0.96
Surface CO ₂	1.6±1.8	-0.5±1.8	2.4	1.9	0.96	0.96

*mean ± standard deviation

反演结果验证



CO₂年增长率变化对比

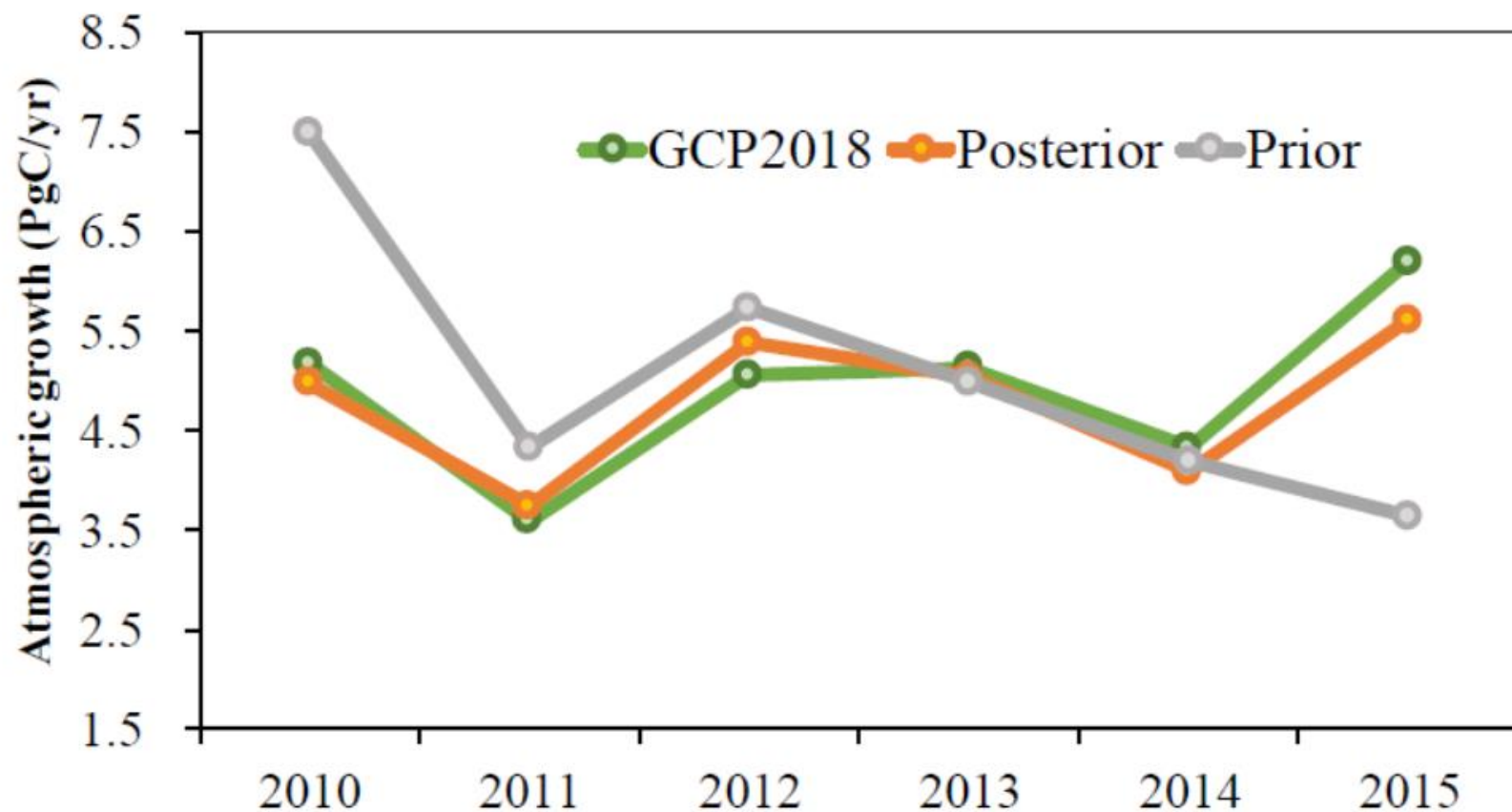


Figure 8. Interannual variations of the atmospheric CO₂ growth rates

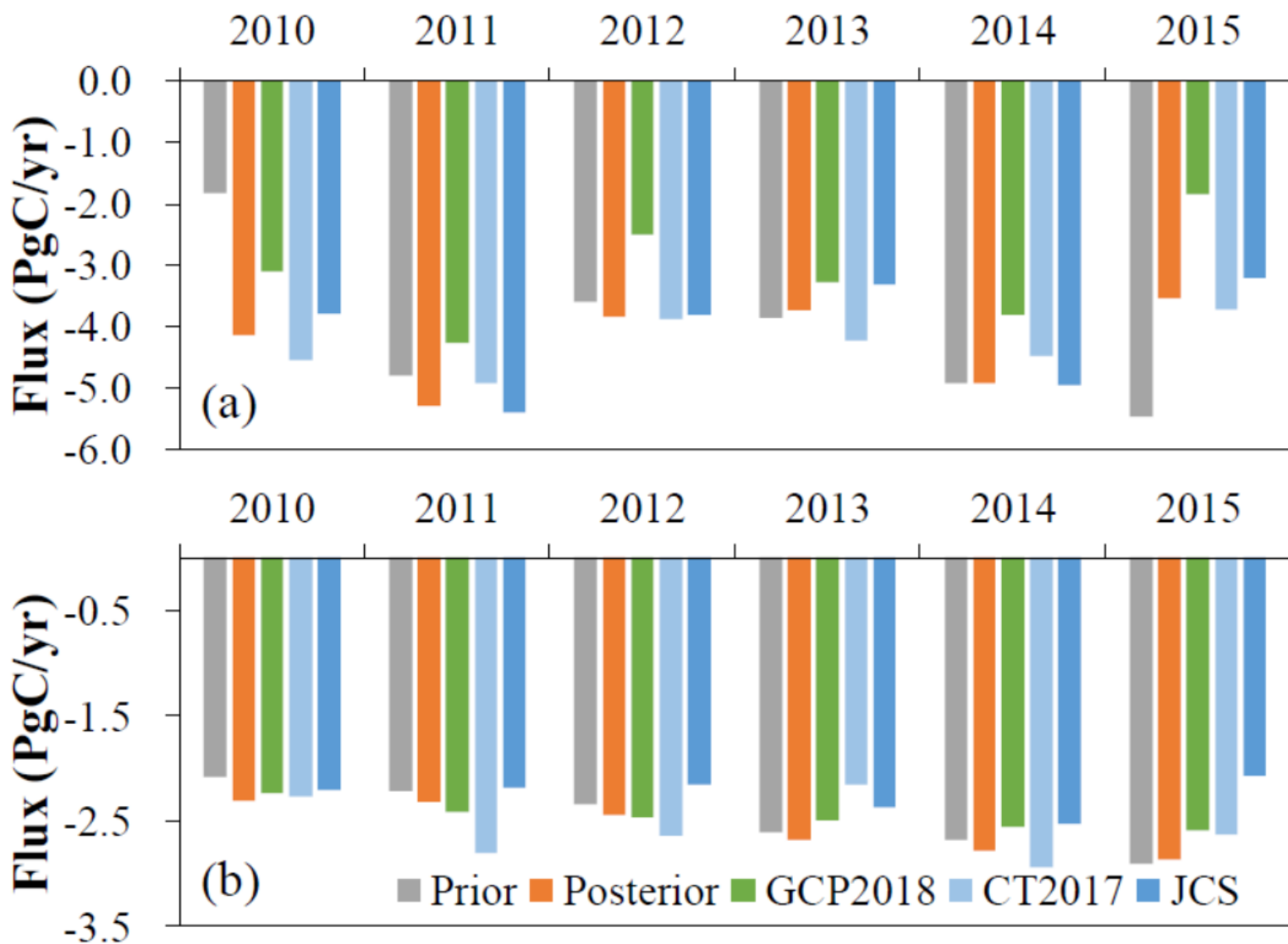
全球平均碳收支

Table 2. Mean global carbon budgets during 2010 ~2015 estimated in this study as well as those from the prior fluxes, GCP2018, CT2017 and JCS (PgC yr⁻¹)

	Prior	Posterior	GCP2018	CT2017	JCS
Fossil fuel and industry (FOSSIL)	9.58	9.58	9.49	9.62	9.31
Biomass burning (FIRE)	2.02	2.02	1.52*	2.03	2.02
Terrestrial ecosystem (BIO)	-4.07	-4.24	-3.13	-4.29	-4.07
Ocean (OCN)	-2.47	-2.56	-2.46	-2.57	-2.25
Budget imbalance	-	-	-0.52	-	-
Net biosphere exchange***	-2.05	-2.22	-2.12	-2.27	-2.05
Global net carbon flux (AGR)	5.06	4.80	4.91**	4.79	5.01

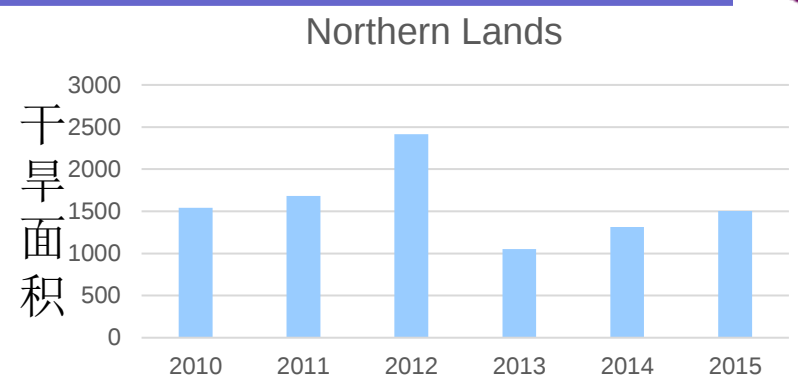
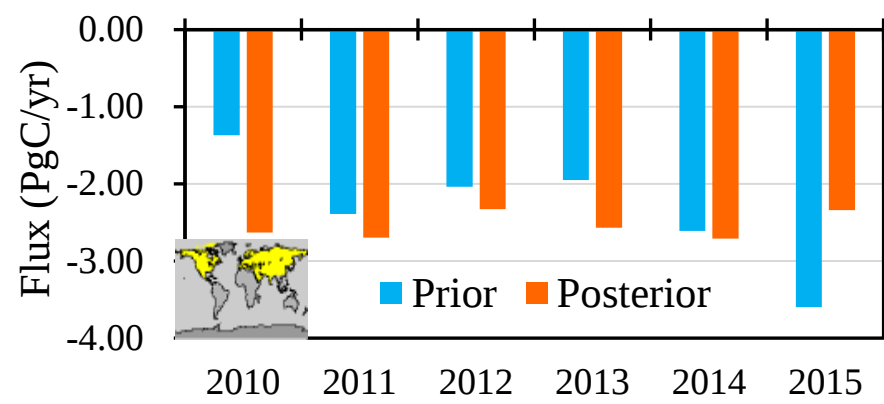
* land-use change emissions, **atmospheric growth in GCP2018, *** for GCP2018, it is the sum of BIO, FIRE and budget imbalance, and for the others, it is the sum of BIO flux and FIRE emission.

陆地和海洋碳汇年际变化

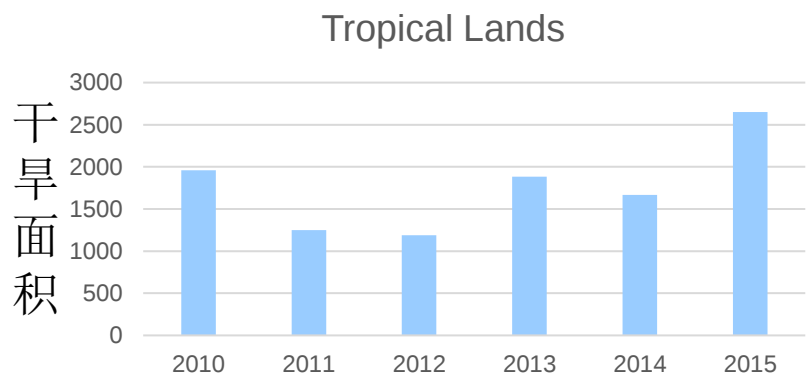
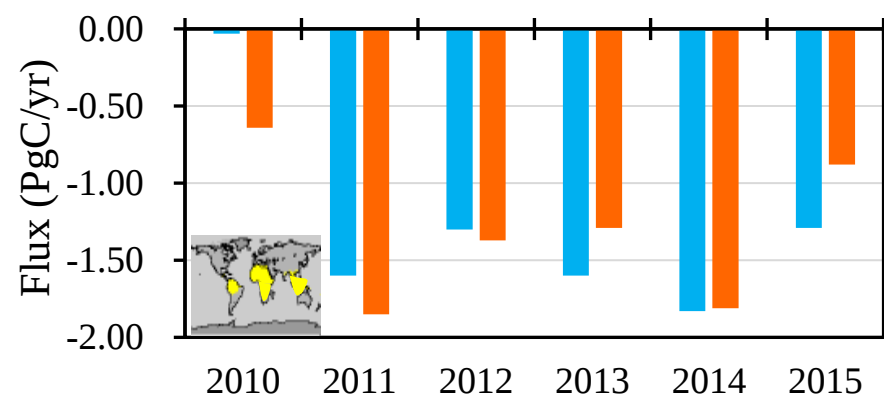


不同纬度带陆地碳汇及其与干旱变化的关系

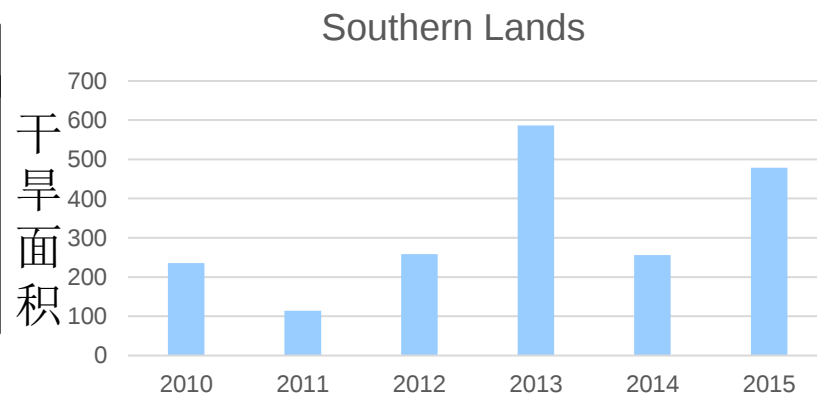
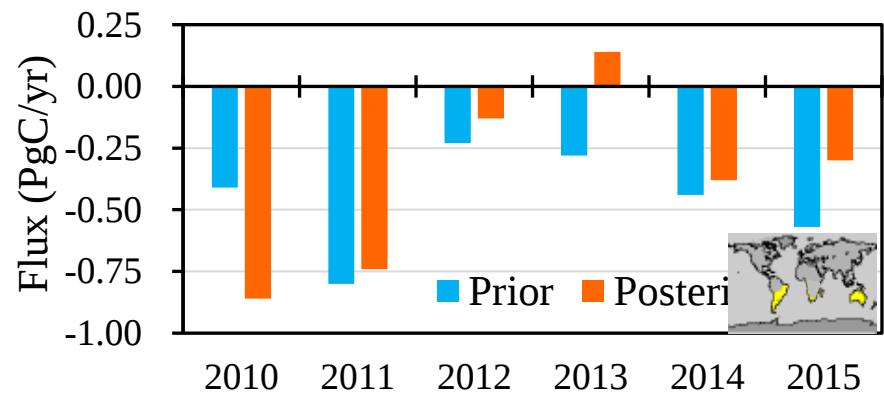
北半球陆地



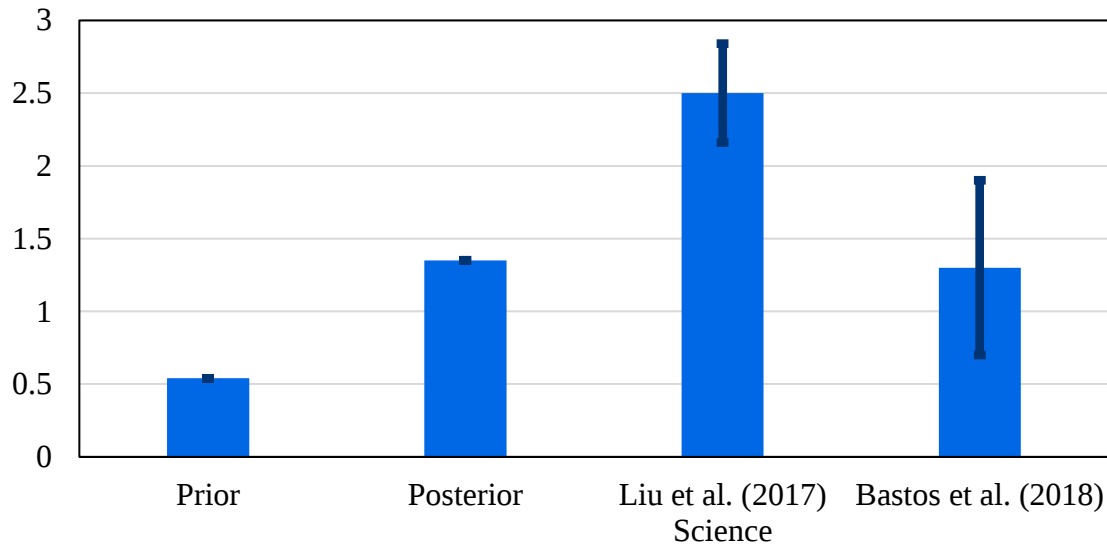
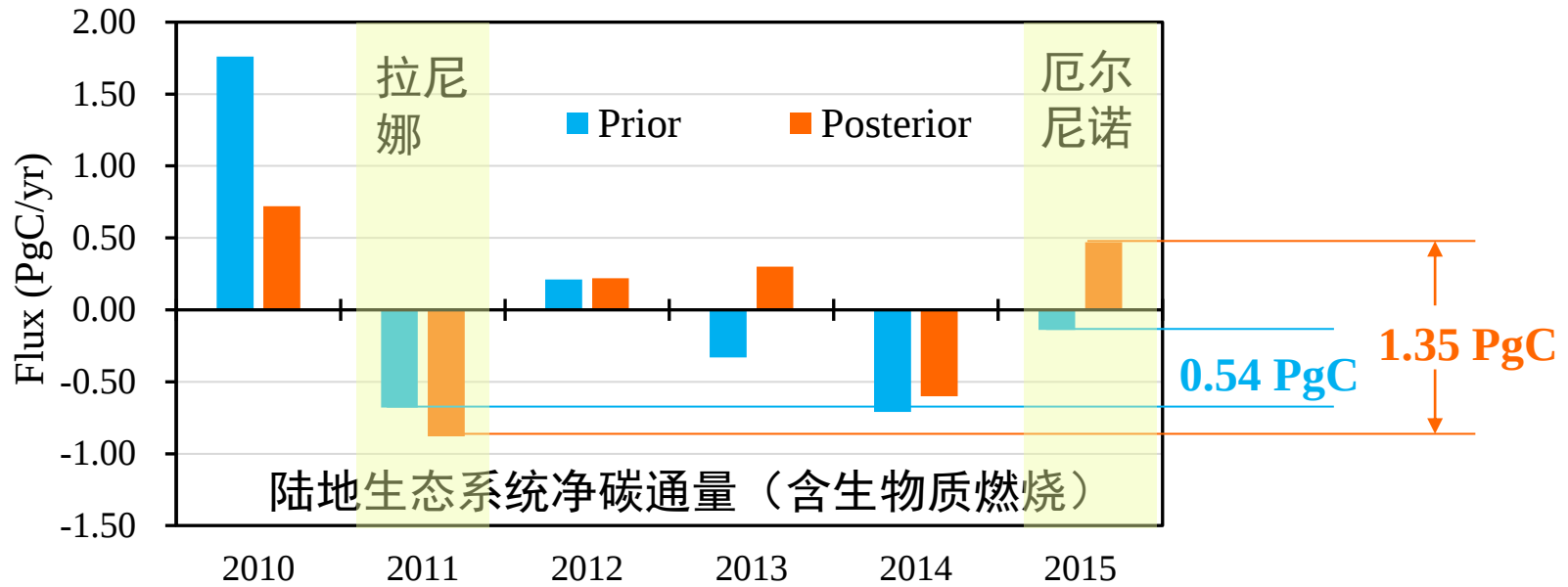
赤道陆地



南半球陆地

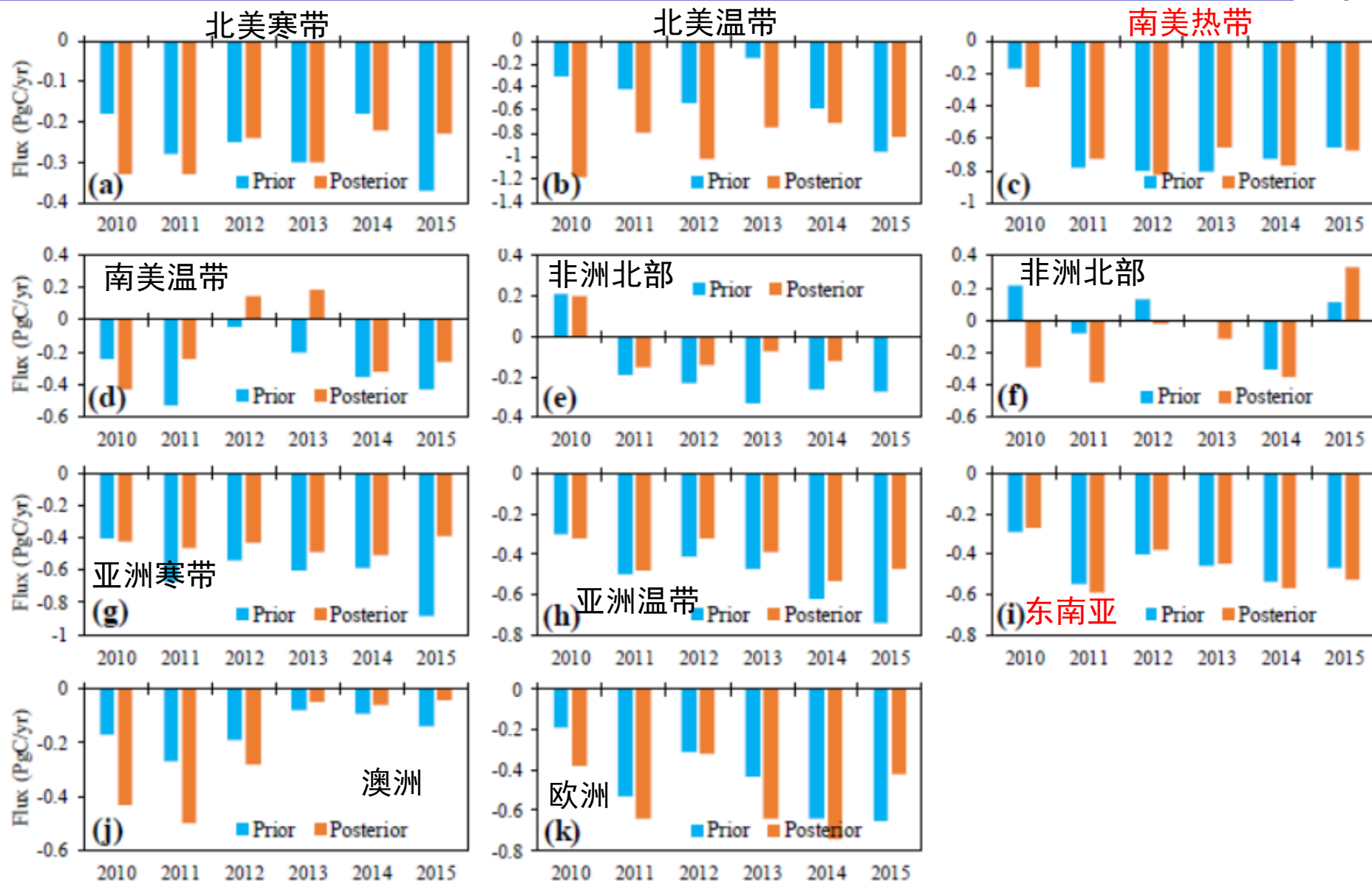


泛赤道地区 (-30S~30N)



2015年相比2011年热带地区碳释放的增加量

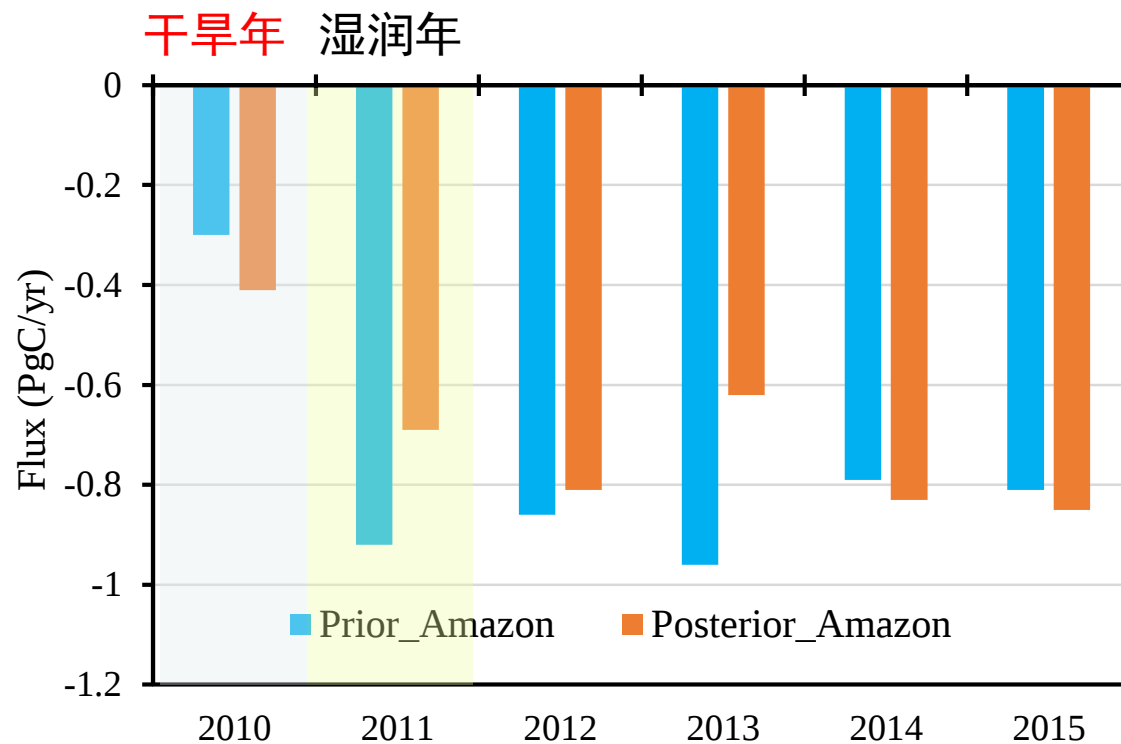
不同地区碳汇年际变化



不同地区碳汇年际变化

Table 4. Correlation coefficients of severe drought areas (SDAs) and regional mean LAI with the BIO sinks in each region

Regions	SDA		LAI	
	Prior	Posterior	Prior	Posterior
Boreal North America	-0.29	0.36	-0.4	0.62
Temperate North America	-0.54	-0.27	0.31	0.73
Tropical South America	-0.1	-0.2	0.64	0.49
Temperate South America	-0.41	-0.74	0.72	0.24
Northern Africa	0.51	0.2	0.81	0.89
Southern Africa	-0.53	0.41	0.35	0.9
Boreal Asia	-0.17	-0.35	0.49	0.1
Temperate Asia	0.33	0.33	0.55	0.38
Tropical Asia	-0.03	0.16	0.69	0.71
Australia	-0.85	-0.73	0.88	0.83
Europe	-0.33	-0.85	0.85	0.58



2010年相比2011年碳汇的减少量 PgC/yr

Gatti et al. (2014)	0.22
van der Laan-Luijkx et al. (2015)	0.08 to 0.26
Doughty et al. (2015)	0.23–0.53
Prior	0.62
Posterior	0.28

- 基于GOSAT的 XCO_2 产品可以反演得到与地面观测反演的相接近的效果
- 基于GOSAT的 XCO_2 反演的陆地生态系统碳汇年际变化更够较好的揭示极端气候事件的影响



谢谢!

Email: jiangf@nju.edu.cn

Tel: 13913839705