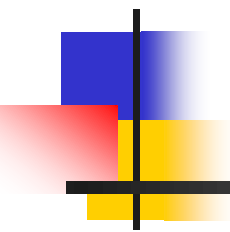


通量数据在陆地生态系统 碳循环过程模型中的应用

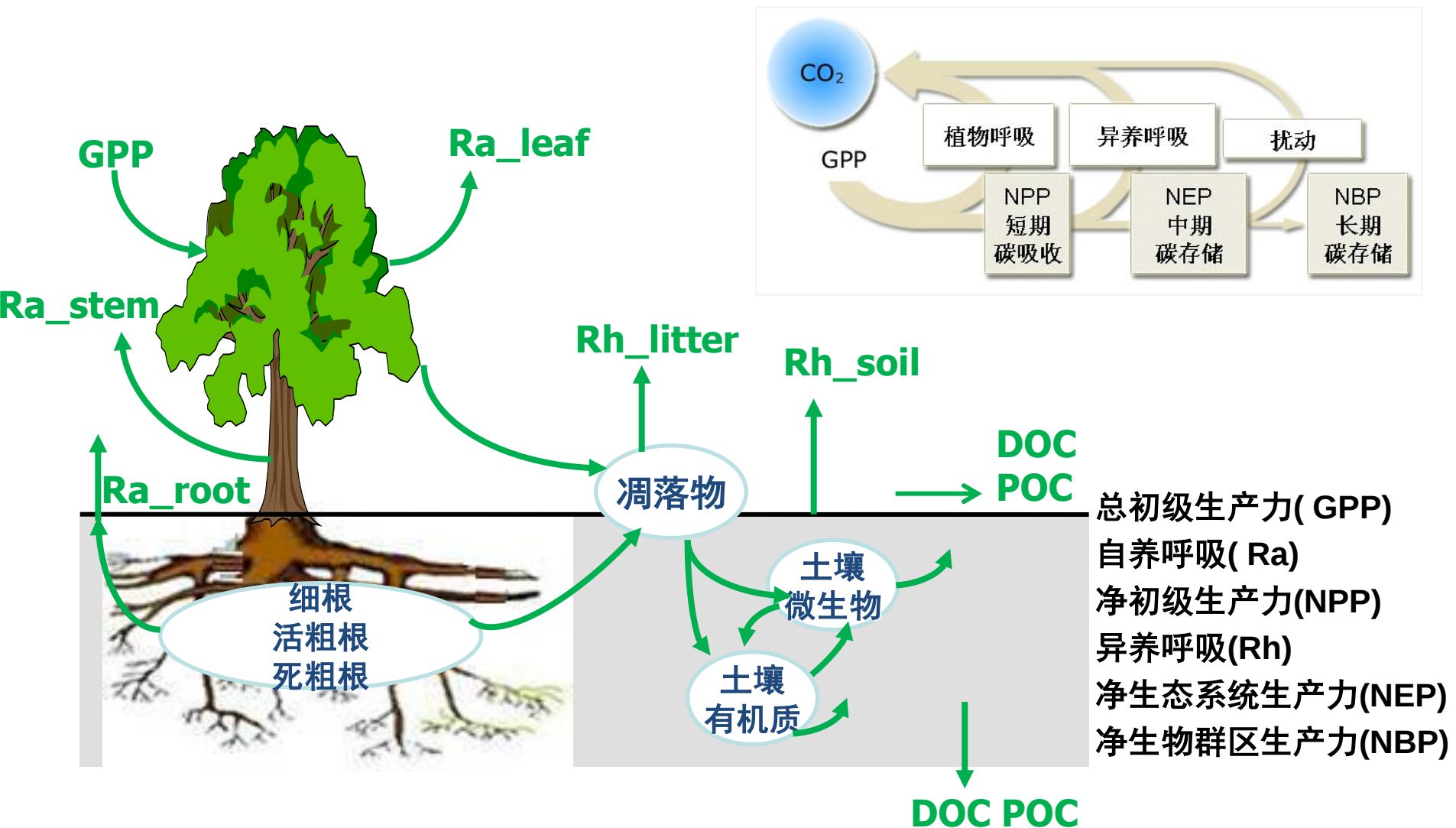


张 黎

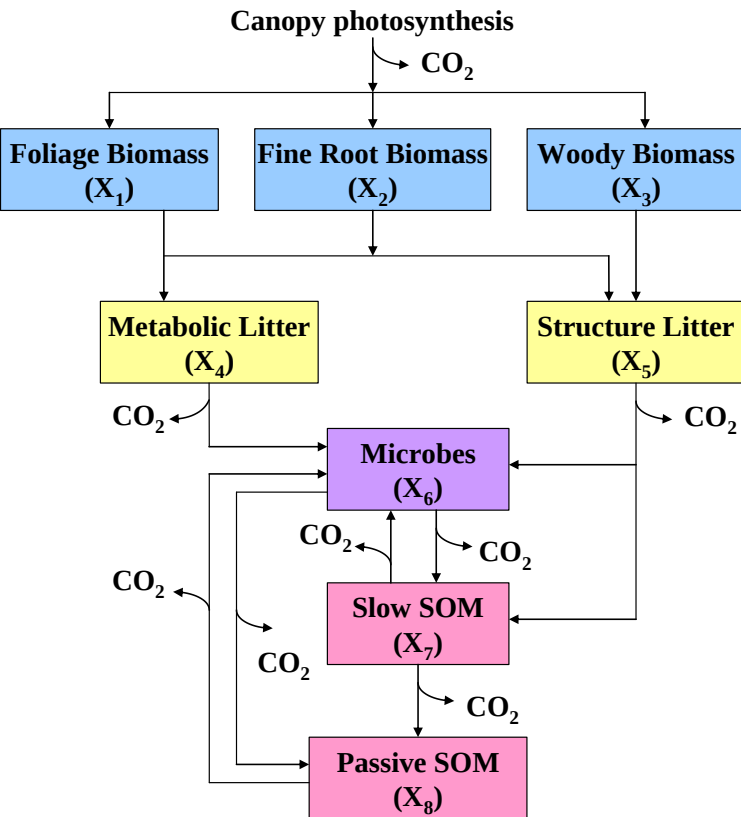
中国科学院地理科学与资源研究所
生态系统网络观测与模拟重点实验室

2015年5月23日
北京

陆地生态系统碳循环



碳库与碳通量



(Luo et al., 2003; Xu et al., 2006)

碳库变化:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, p) + noise$$

x 为状态变量, u 为随时间变化的驱动变量, p 为不随时间变化的模型参数, f 为变化速率, $noise$ 为噪声项。

碳通量:

$$NPP = GPP - R_a$$

$$NEP = NPP - R_h = GPP - R_E$$

碳库与碳通量

CLM vegetation state variables (pools):

C and N pools for each tissue (structural pools):

- Leaf
- Stem (live and dead)
- Coarse root (live and dead)
- Fine root

Each structural pool has two corresponding storage pools:

- Long-term storage (> 1 yr)
- Short-term storage (< 1 yr)

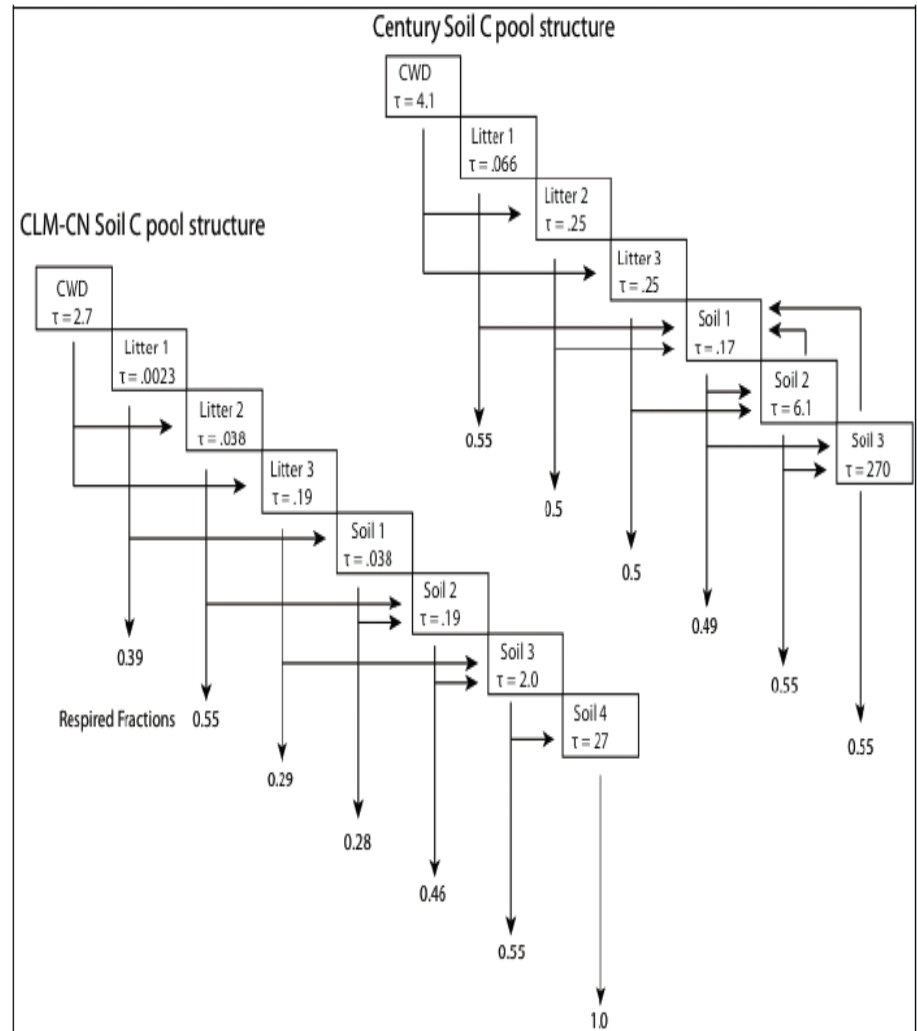
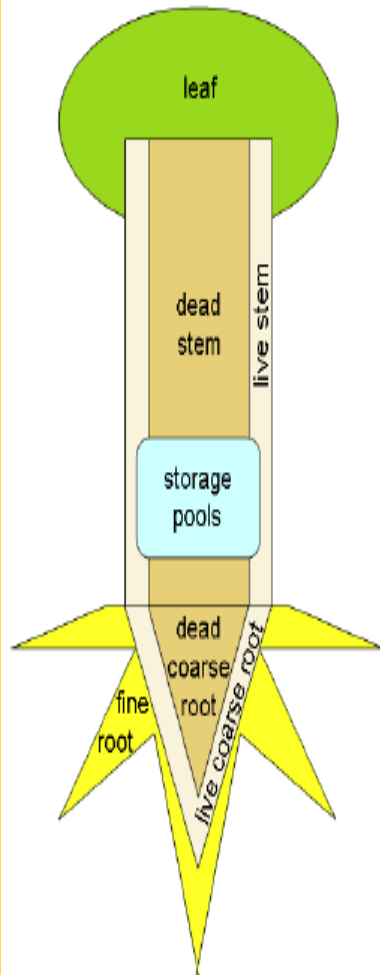
Additional pools:

- Growth respiration storage (C)
- Maintenance respiration reserve (C)
- Retranslocated nitrogen

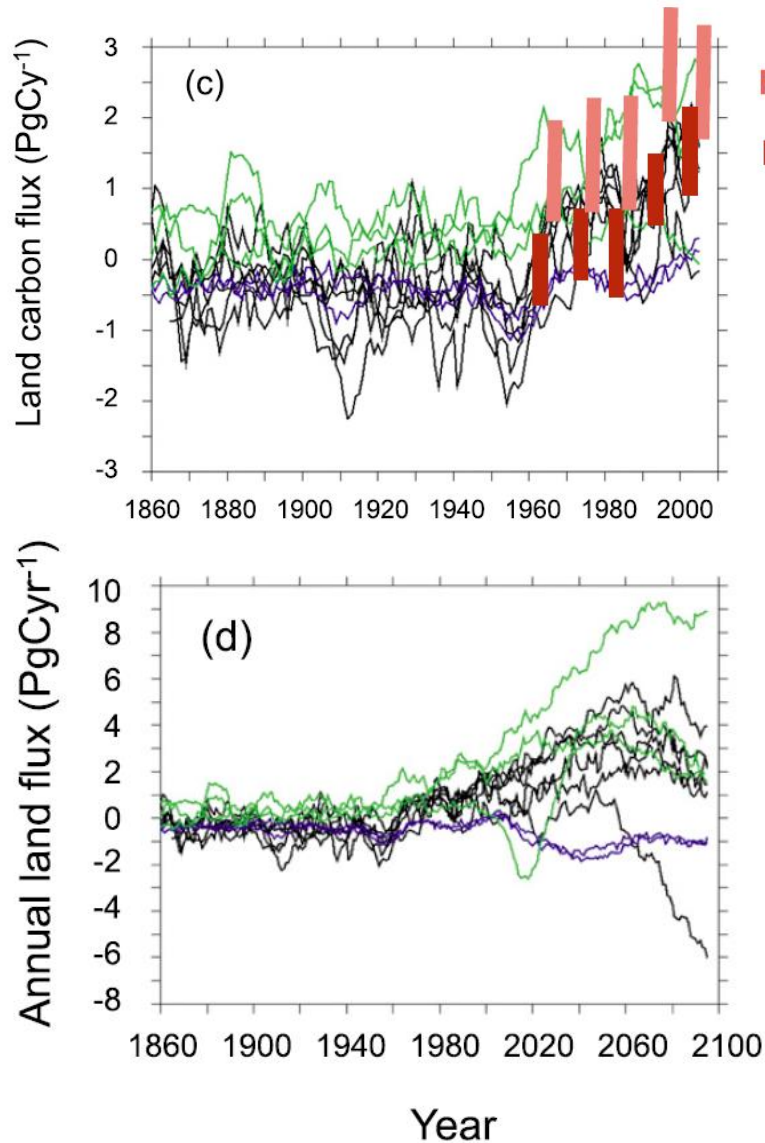
Total number of pools...

Carbon: $6 + 12 + 2 = 20$

Nitrogen: $6 + 12 + 1 = 19$



陆地碳循环模拟仍存在很大不确定性



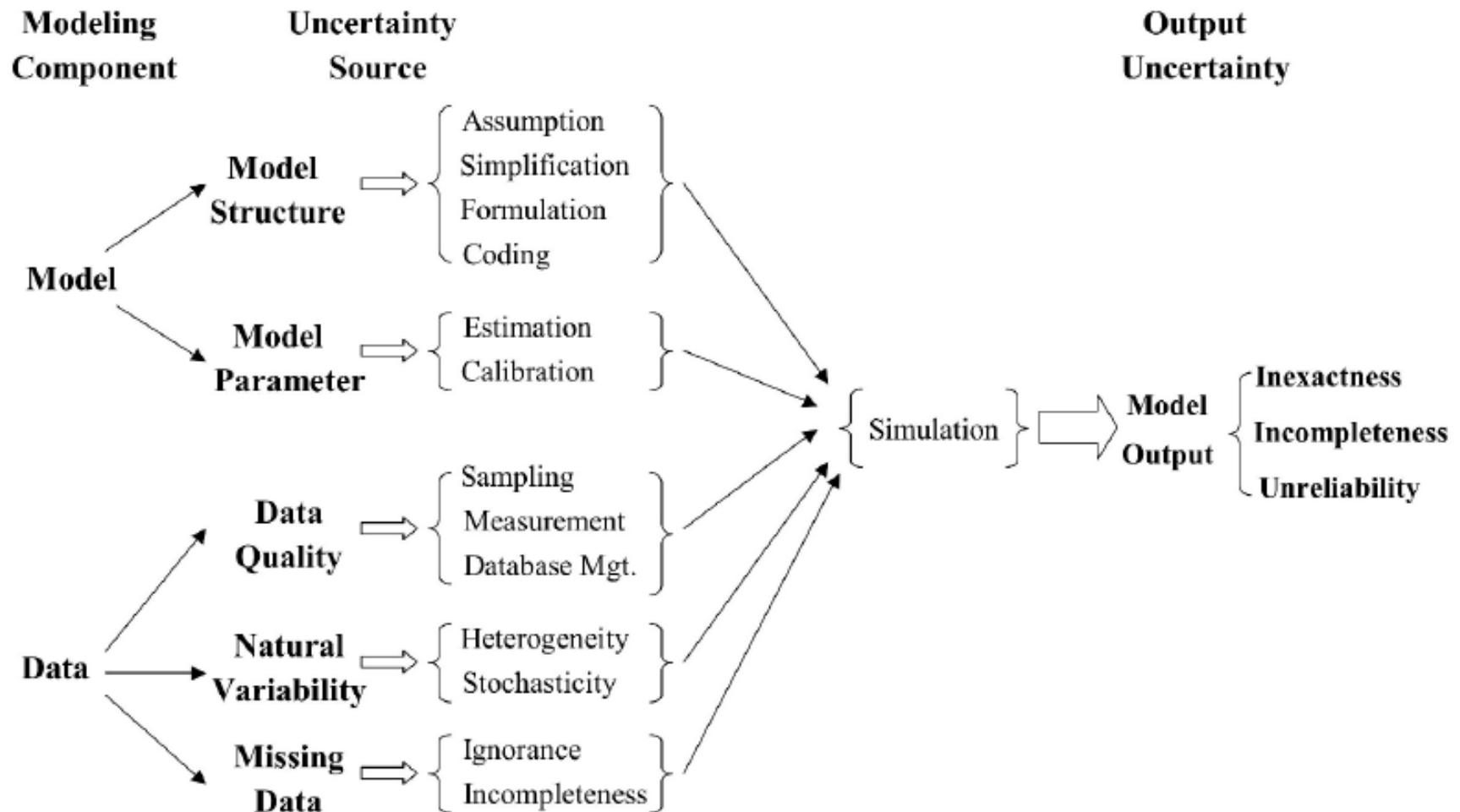
The World Climate Research Programme's phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)

CanESM2
GFDL-ESM2G
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-LR
MIROC-ESM
MPI-ESM-LR
CESM1-BGC
NorESM1-ME
BCC-CSM-1
INM-CM4.0
MRI-ESM1

蓝线: 考虑了陆地氮循环(CLM-CN)
绿线: 使用已知的土地利用变化排放数据

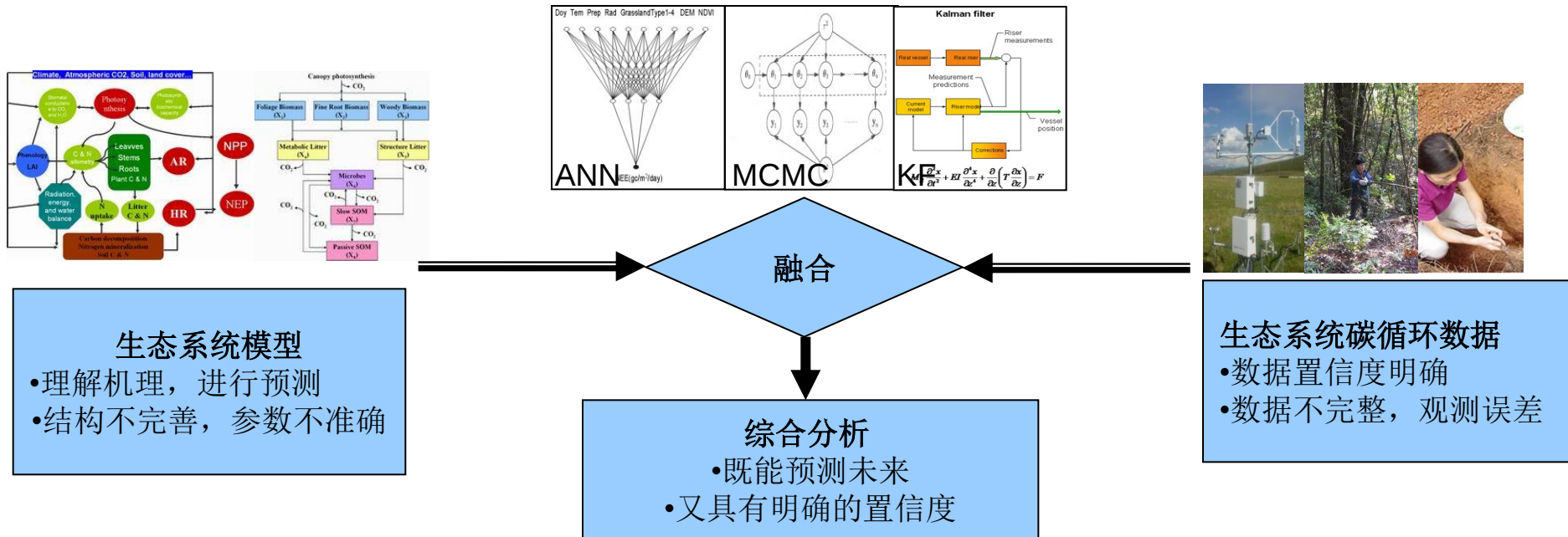
(Friedlingstein et al. 2014)

模拟结果的不确定性来源



(Li and Wu, 2006)

模型—数据融合



模型—数据融合与其他方法的区别

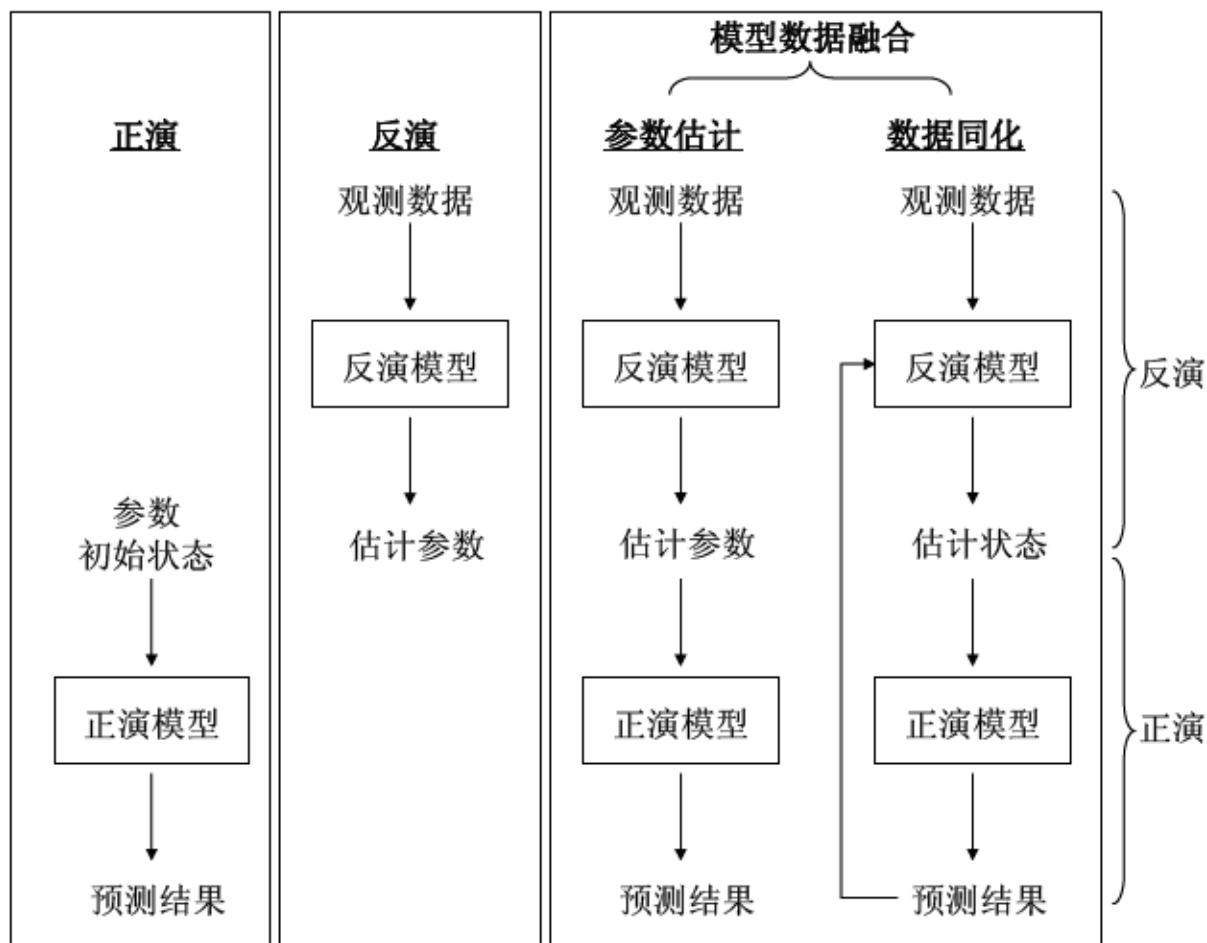


图 1-1 模型数据融合与其他方法的区别示意图

融合方法

目标变量

在优化过程中待
调整的模型属性

模型参数 $\mathbf{P}$

驱动变量 $\mathbf{u}$

状态变量初始值 $\mathbf{x}_0$

状态变量 $\mathbf{x}$

目标函数

定义模型模拟结果和数据的距离

$$J(y) = (z - h(y))^T [\text{Cov}z]^{-1} (z - h(y)) + (y - \hat{y})^T [\text{Cov}\hat{y}]^{-1} (y - \hat{y})$$

搜索方法

非顺序方法

最速下降法
共轭梯度法
拟牛顿法
遗传算法
模拟退火法
贝叶斯估计...

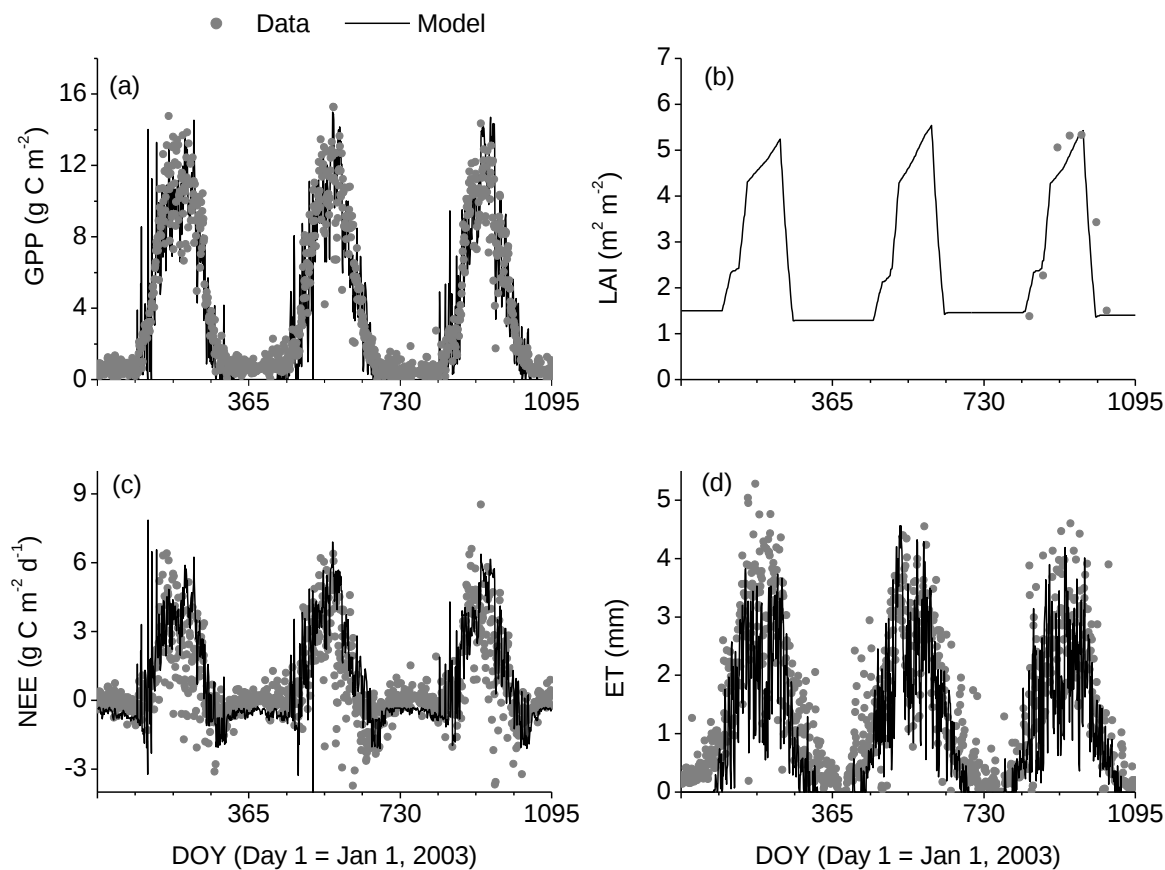
顺序方法

卡尔曼滤波, ...

通量数据在碳循环过程模型中的应用

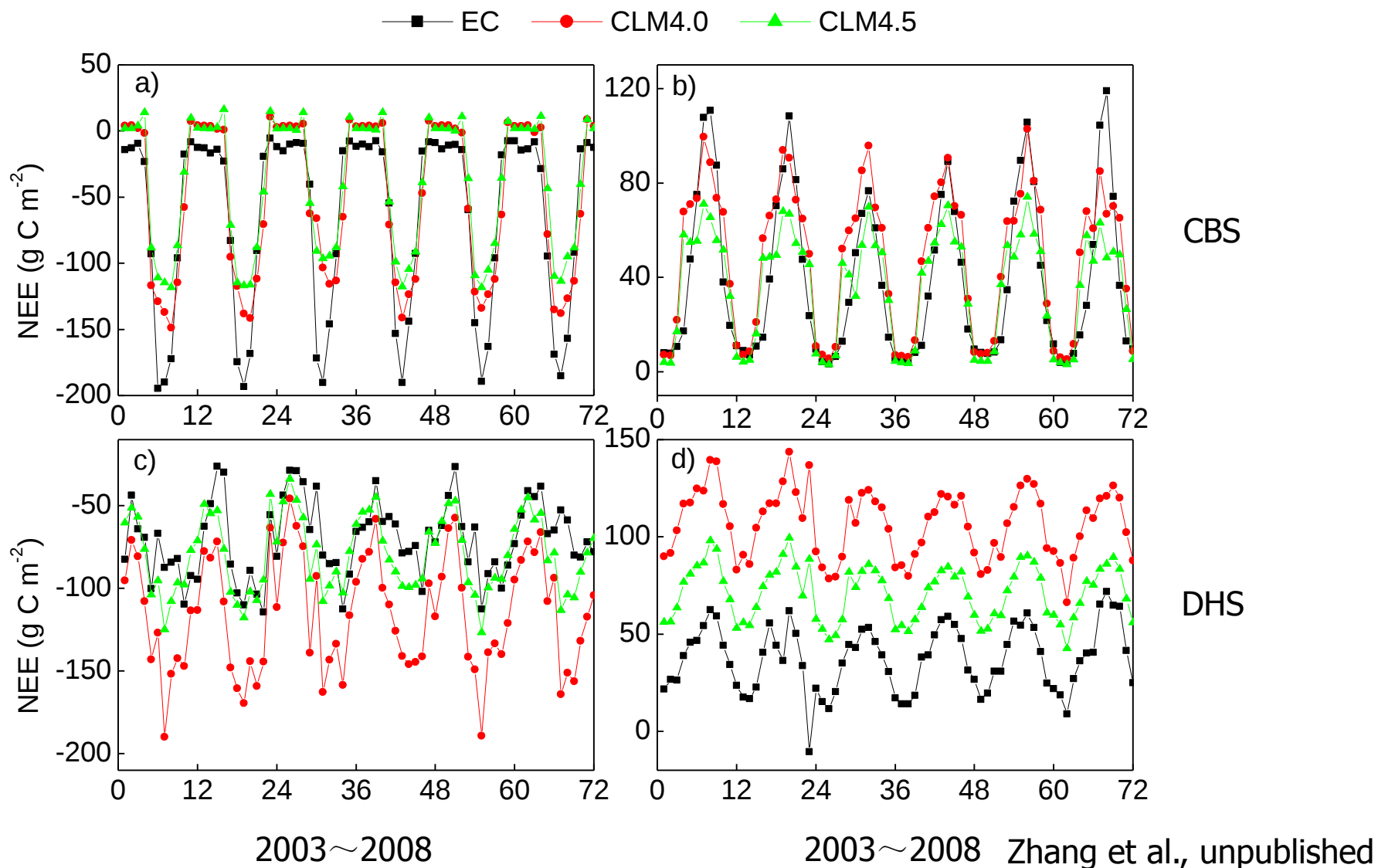
1. 验证碳循环过程模型的模拟结果
2. 反演碳循环过程模型的关键参数
3. 评估碳循环模型的不确定性

CEVSA模型模拟结果的验证



	RMSE	R^2
GPP ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	1.71	0.84
NEP ($\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	1.66	0.44
ET(mm d^{-1})	0.89	0.62
LAI($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$)	0.86	0.77

CLM模型模拟结果的验证

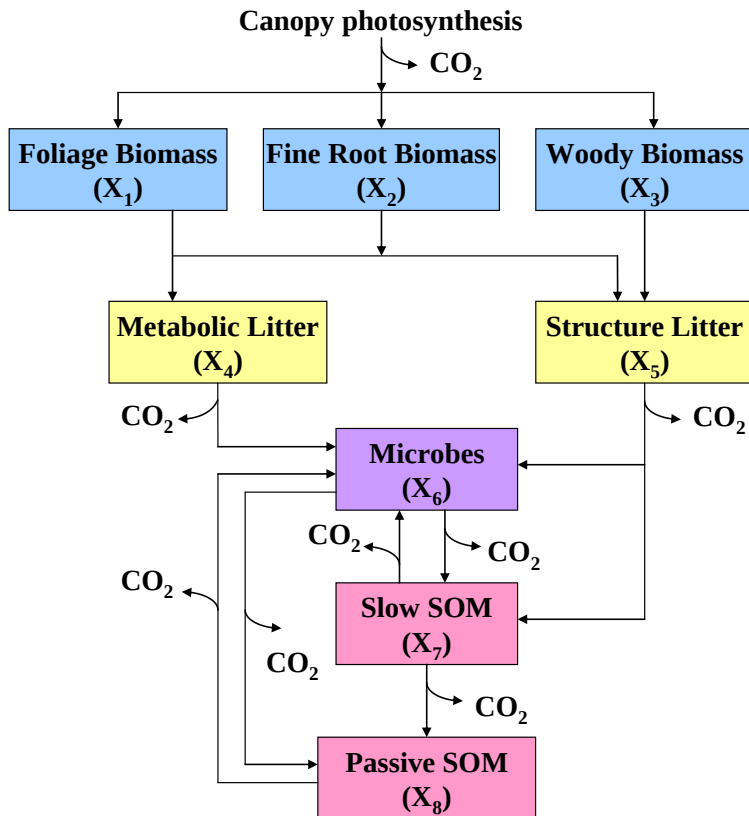


通量数据在碳循环过程模型中的应用

1. 验证碳循环过程模型的模拟结果
2. 反演碳循环过程模型的关键参数
3. 评估碳循环模型的不确定性

2.1 反演碳周转系数

TECO 模型



(Luo et al., 2003; Xu et al., 2006)

$$\frac{dX(t)}{dt} = \xi(t)ACX(t) + BU(t)$$
$$X(0) = X_0$$

驱动变量

$U(t)$ – 进入生态系统的碳

$\xi(t)$ – 环境影响因子

状态变量

$X(t)$ – 碳库大小

X_0 – 初始碳库大小

参数

A – 碳在各个库之间的分配系数

B – 光合产物分配到各个器官的比例

C – 碳转移系数

待估计参数：碳转移系数 C

研究站点

千烟洲 (QYZ) 亚热带人工针叶林



长白山 (CBS) 温带阔叶红松林

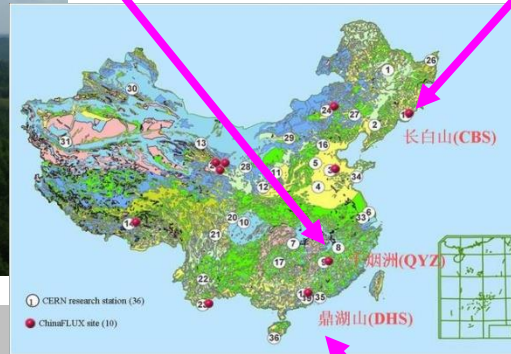


Table 1 Description of site characteristics

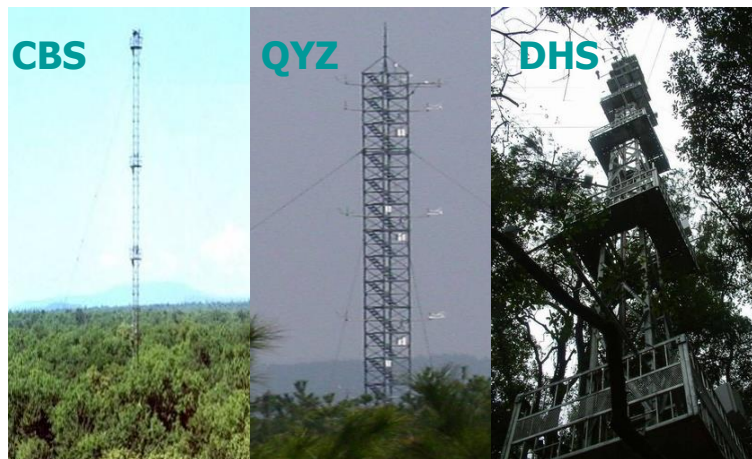
	Unit	Value		
		CBS	QYZ	DHS
Latitude	N	42.45	26.73	23.17
Longitude	E	128.10	115.06	112.53
Elevation	m	736	102	300
Mean annual precipitation ^a	mm	695	1485	1956
Mean annual temperature ^a	°C	3.6	17.9	21.0
Canopy height	m	26	12	20
Age	yr	200	21	100
Soil type	—	Dark brown forest soil	Red soil	Latosolic red soil
pH value of soil	—	5.8	4.8	4.5

鼎湖山 (DHS) 亚热带常绿针阔混交林



观测数据

NEE 数据(2003-2005)



日尺度NEE观测值

由半小时CO₂通量数据累积得到
选择日观测数据的缺失率低于50%

生物计量数据 (2003-2005)



叶生物量: 相对生长法

细根生物量: 相对生长法

木质生物量: 相对生长法

凋落物: 收集筐

土壤有机碳: 由土壤有机质转换得到

土壤呼吸: 静态箱-气相色谱法

MCMC (Markov Chain Monte Carlo)

贝叶斯原理

$$p(c | Z) = \frac{p(Z | c)p(c)}{p(Z)}$$

$\rho(c)$ - prior probability density distributions

$\rho(Z)$ - probability of observed data

$\rho(Z | c)$ - likelihood function for parameter c

似然函数

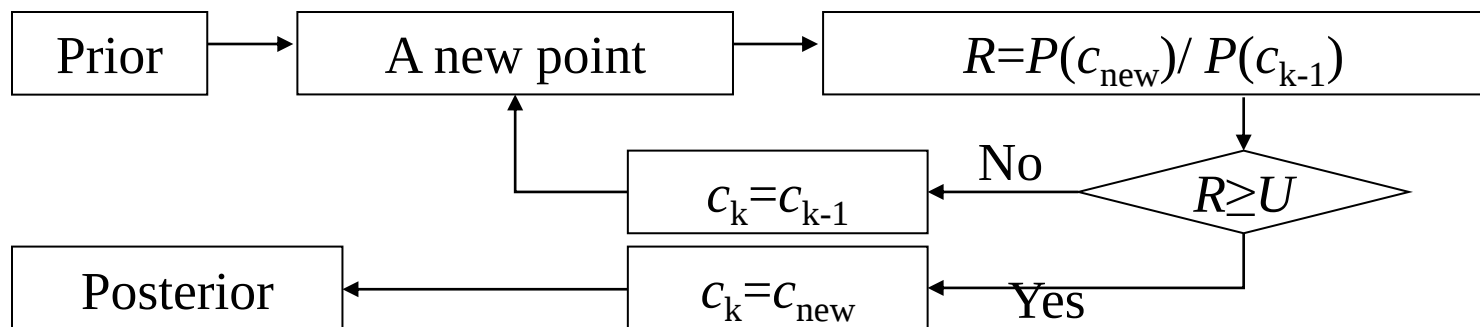
$$P(Z | c) \propto \exp \left\{ - \sum_i \frac{1}{2\sigma_i^2} \sum_{t \in \text{obs}(Z_i)} (Z_i(t) - Y_i(t))^2 \right\}$$

$Y_i(t)$ - the modeled value at time t

$Z_i(t)$ - the observed value at time t

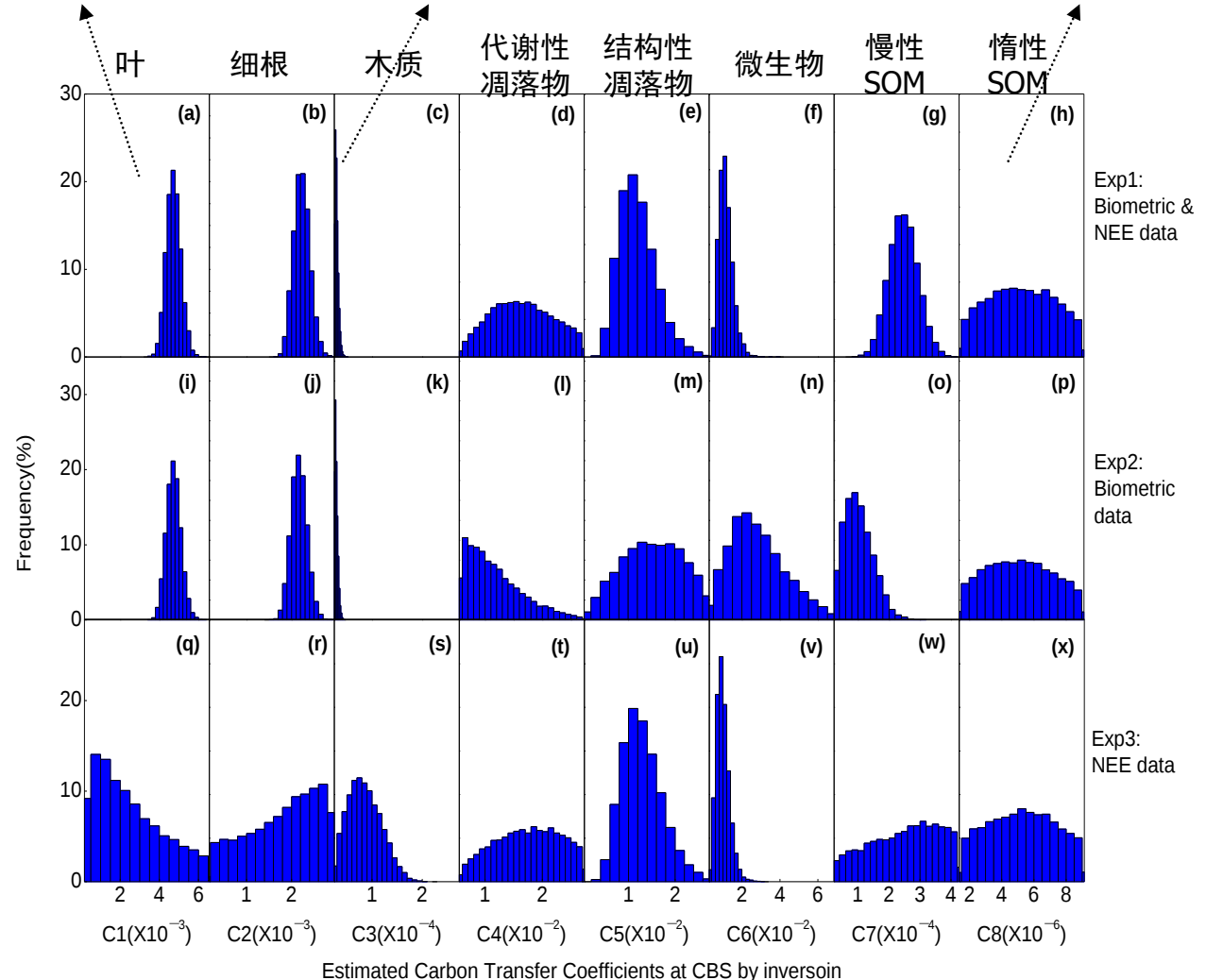
σ_i^2 - the measurement error variance of each data set

Metropolis-Hastings algorithm



碳周转系数的反演结果

Well constrained Edge-hitting Poorly-constrained



- 生物计量数据对3个植物库（叶、细根和木质）的碳转移系数（ c_1 、 c_2 和 c_3 ）和慢性土壤有机质库的碳转移系数（ c_7 ）具有较好的约束作用

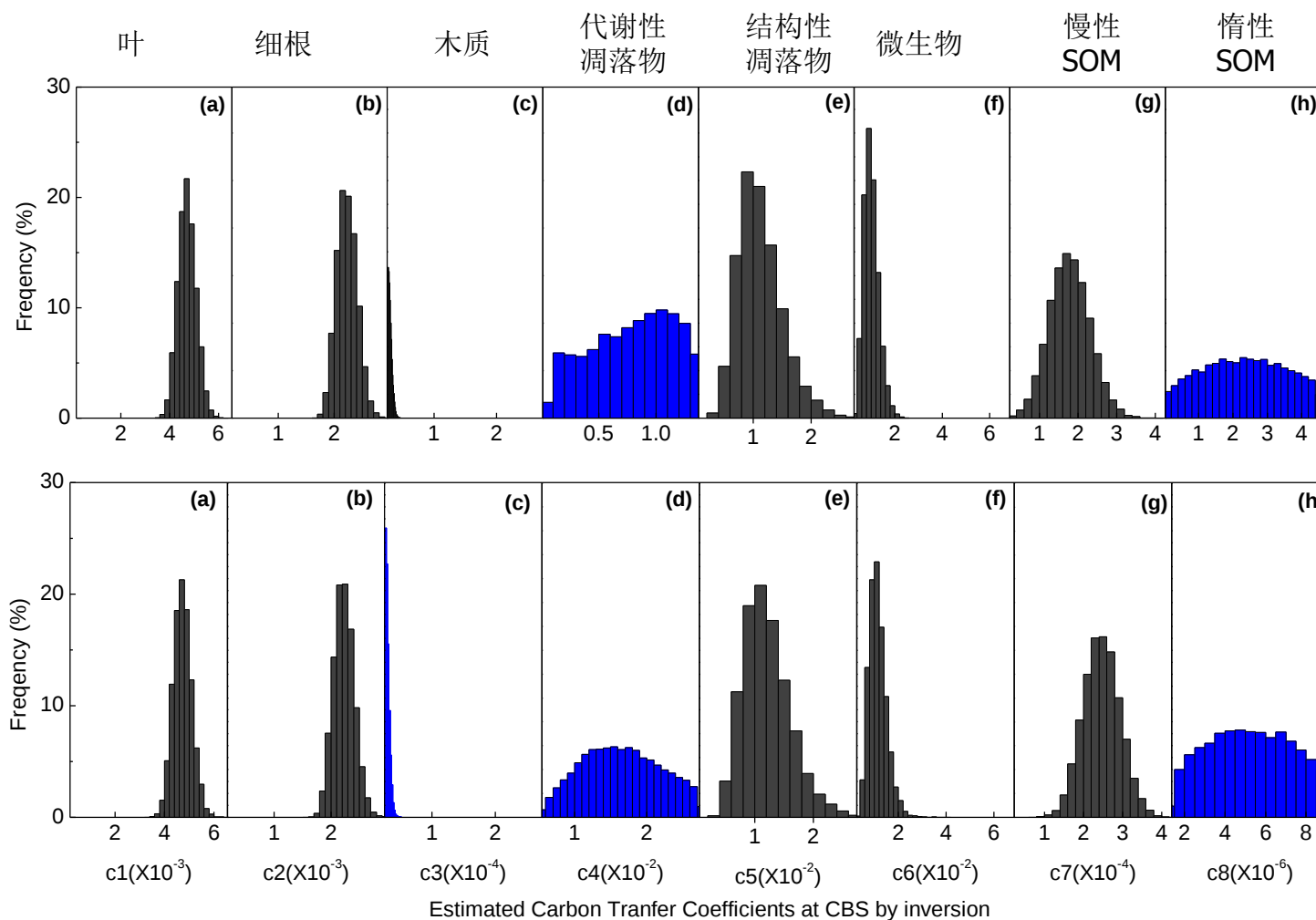
- 涡度相关技术测定的NEE数据有助于增强对代谢性凋落物库、结构性凋落物库和微生物库的碳转移系数（ c_4 、 c_5 和 c_6 ）的约束

参数估计结果

Table Estimated potential carbon residence times in eight pools at CBS, QYZ and DHS sites (unit: years)

Pool	CBS		QYZ		DHS	
	mode	90% confidence interval	mode	90% confidence interval	mode	90% confidence interval
Foliage biomass	1.79	(1.55,2.01)	2.57	(2.05,3.07)	1.08	(0.95,2.07)
Fine root biomass	1.25	(1.08,1.41)	0.95	(0.93,1.06)	2.97	(2.65,3.27)
Woody biomass	101.33	(75.59,108.65)	38.95	(33.59,47.54)	107.67	(64.63,108.21)
Metabolic litter	0.17	(0.11,0.34)	0.46	(0.34,0.49)	0.25	(0.15,0.37)
Structural litter	0.24	(0.14,0.43)	3.8	(2.22,4.73)	4.69	(1.06,4.76)
Microbial biomass	0.28	(0.15,0.43)	0.6	(0.42,0.85)	0.64	(0.50,0.85)
Slow soil organic matter	11.35	(8.46,15.96)	97.05	(57.60,115.61)	108.20	(57.16,116.08)
Passive soil organic matter	508.80	(322.08,1396.04)	767.13	(323.73,1472.26)	897.45	(339.47,1590.09)

参数先验范围和观测误差对参数估计结果的影响

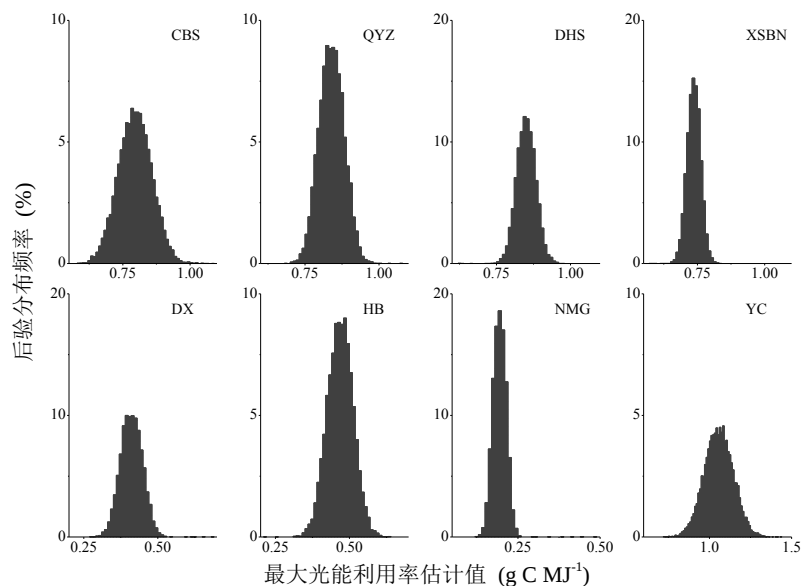


参数 c_4 和 c_8 的最小值缩小5倍，最大值增大5倍。

木质生物量、凋落物、土壤有机碳数据的误差降低50%。

2.2 反演最大光能利用率

- 利用2003~2008年ChinaFLUX 8个野外台站的涡度相关通量观测数据, 采用马尔科夫链-蒙特卡罗方法, 对CASA模型中的最大光能利用率($\epsilon_{\max}$)进行反演。森林、农田和草地生态系统 $\epsilon_{\max}$ 分别为 $0.737 \pm 0.026 \sim 0.850 \pm 0.035$ g C/MJ·PAR, 1.056 ± 0.090 g C/MJ·PAR和 $0.199 \pm 0.068 \sim 0.469 \pm 0.043$ g C /MJ·PAR。
- $\epsilon_{\max}$ 估计的不确定性将导致内蒙、当雄和海北草地生态系统GPP年总量的模拟值产生9.2%~14.2%的误差, 长白山、鼎湖山、千烟洲和西双版纳4个森林生态系统GPP年总量的误差为3.5%~7.8%, 禹城农田生态系统GPP年总量的误差为8.5%。

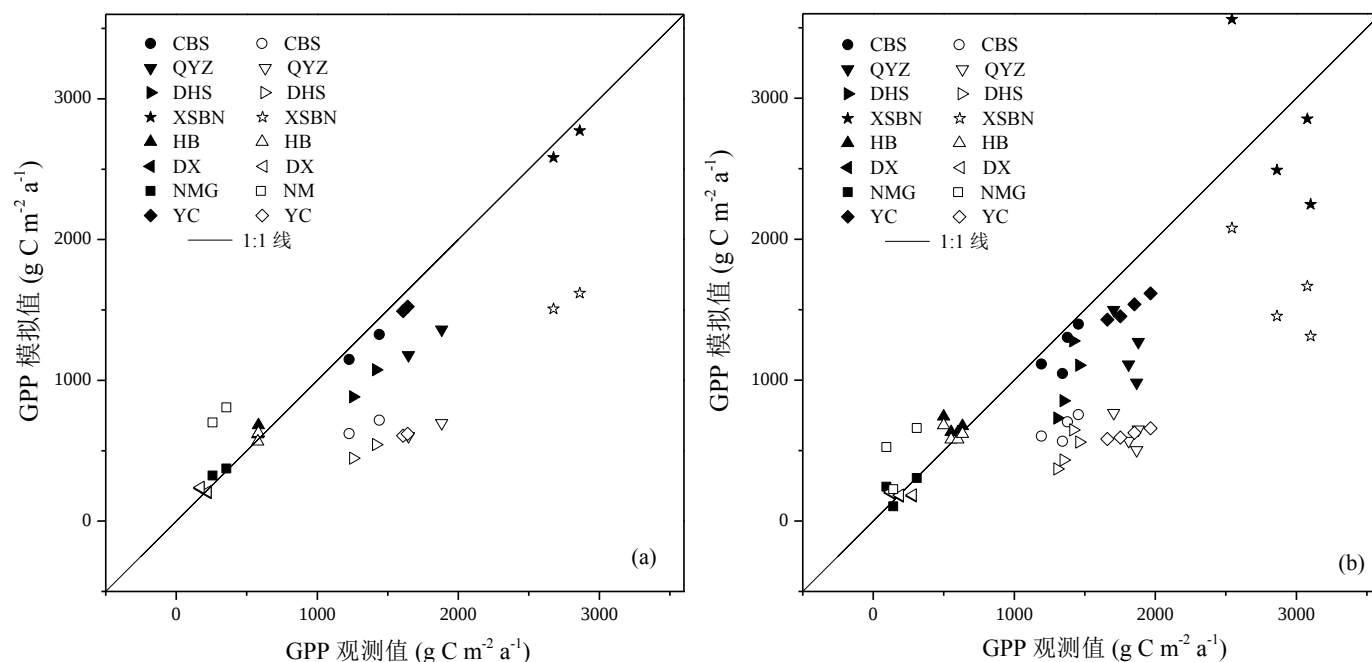


ChinaFLUX的8站点最大光能利用率 ($\epsilon_{\max}$) 的优化结果 (g C / MJ·PAR)

站点代码	站点名称	基于 MCMC 的后验估计结果		
		平均值	标准差	90%置信区间
CBS	长白山	0.796	0.062	[0.694, 0.898]
QYZ	千烟洲	0.841	0.049	[0.772, 0.909]
DHS	鼎湖山	0.850	0.035	[0.798, 0.904]
XSBN	西双版纳	0.737	0.026	[0.695, 0.778]
NMG	内蒙	0.199	0.068	[0.162, 0.227]
HB	海北灌丛	0.469	0.043	[0.398, 0.539]
DX	当雄	0.413	0.059	[0.351, 0.472]
YC	禹城	1.056	0.090	[0.912, 1.201]

(张强等, 第四纪研究, 2014)

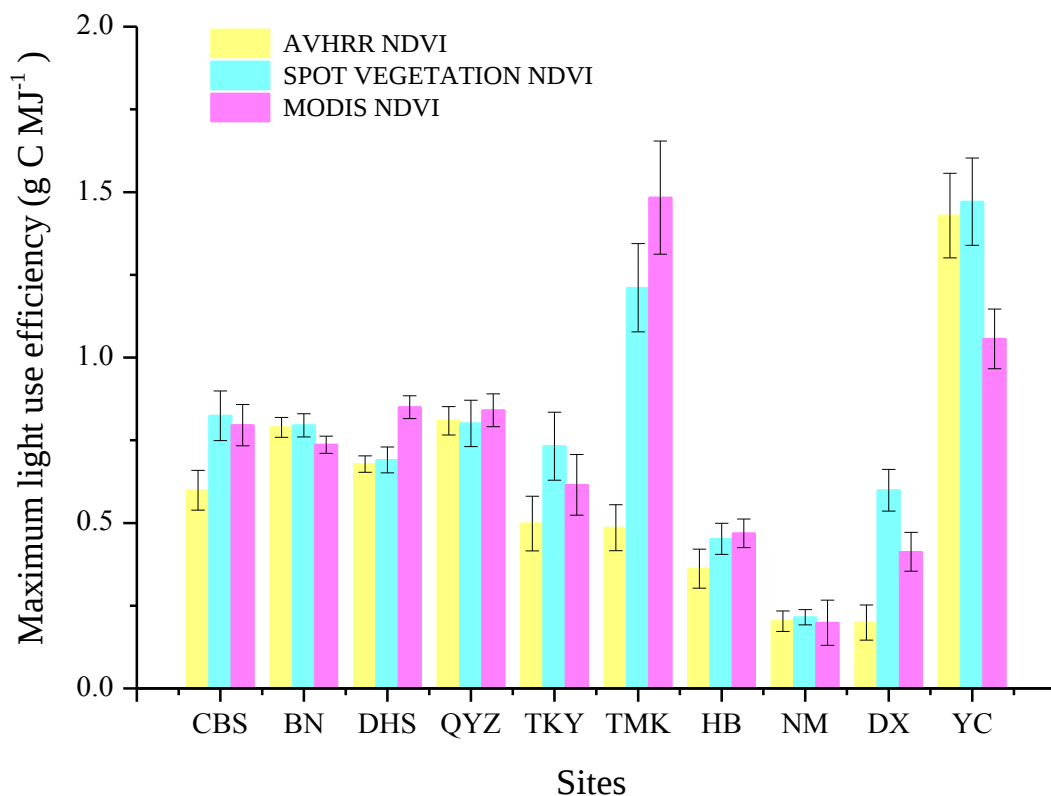
GPP模拟值与观测值的比较



(a)反演年份GPP模拟结果;(b)非反演年份GPP模拟结果。图中空心图例代表采用默认参数GPP模拟值，实心图例代表采用反演后的参数模拟GPP值

三种遥感NDVI数据源对 $\epsilon_{\max}$ 反演结果的影响

基于马尔可夫链-蒙特卡洛方法，利用10个通量站的GPP观测数据对最大光能利用率参数进行概率估计，分析了3种遥感NDVI数据对反演结果的影响。基于3种遥感数据估计的最大光能利用率后验平均值的变异范围在2.6%~49.6%，10个站点的平均变异为18.6%。



Zhang et al., Ecosphere, in review

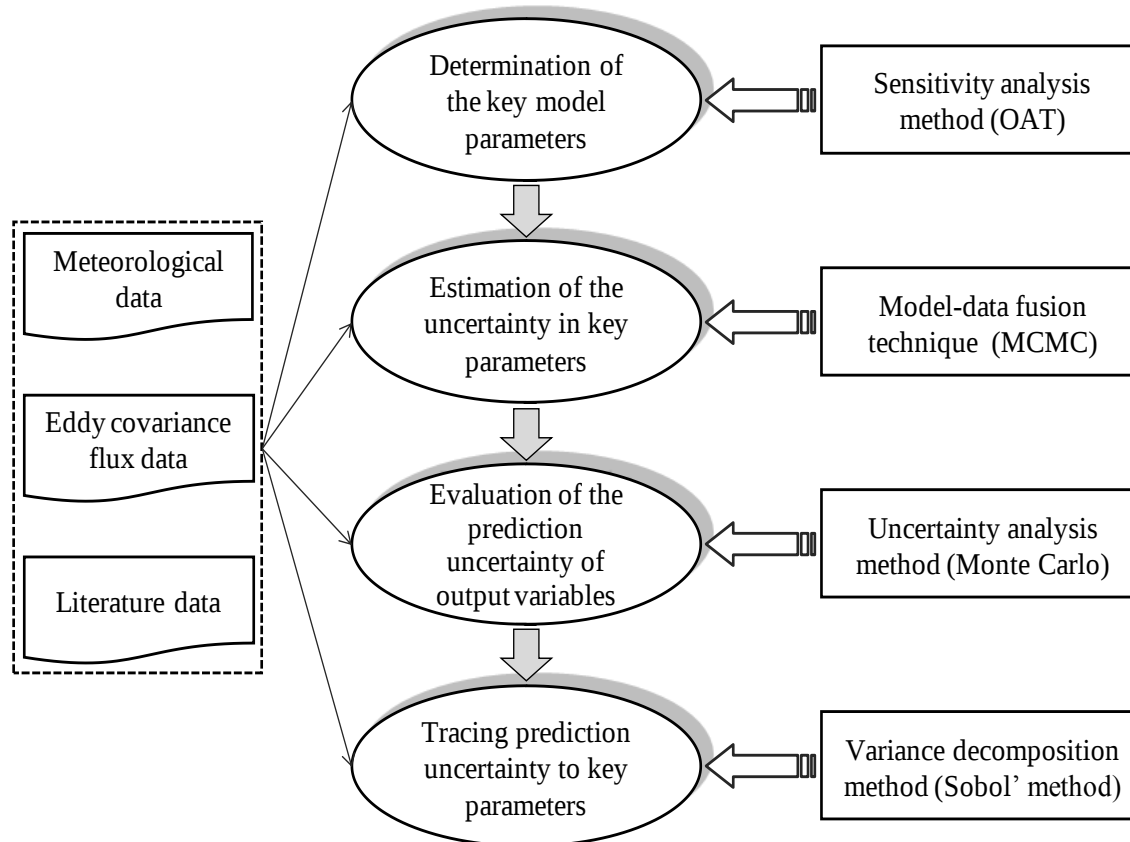
站点	变异系数(%)
CBS	16.6
BN	2.6
DHS	12.9
QYZ	4.1
TKY	16.4
TMK	49.1
HB	13.4
NM	4.0
DX	49.6
YC	17.3

通量数据在碳循环过程模型中的应用

1. 验证碳循环过程模型的模拟结果
2. 反演碳循环过程模型的关键参数
3. 评估碳循环模型的不确定性

模型模拟不确定性分析框架

集成OAT（one-at-a-time）参数敏感性分析方法、MCMC(Markov Chain Monte Carlo)参数优化方法、MC(Monte Carlo)不确定性量化方法以及方差分解方法，初步构建了生态模型不确定性分析框架。



长白山阔叶红松林碳通量不确定性分析

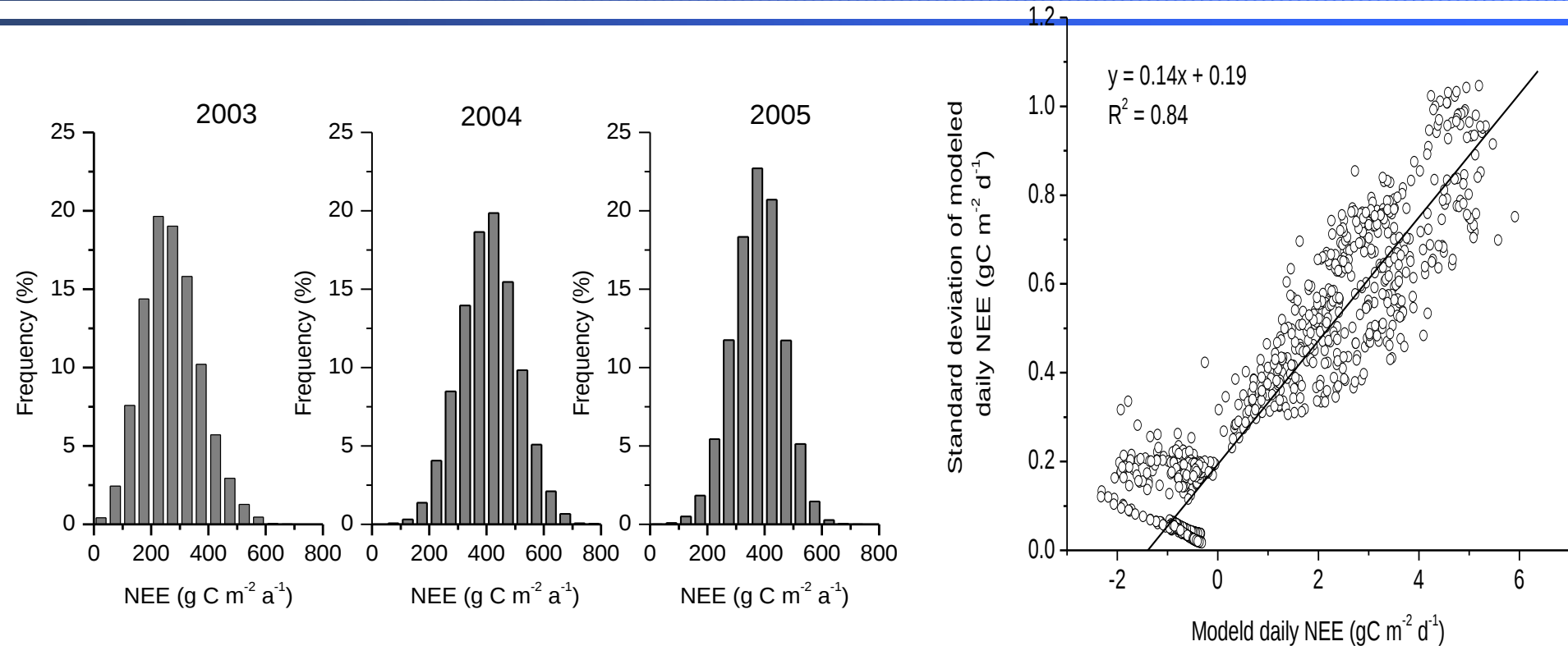
- One-at-a-time sensitivity method——确定16个敏感性参数
- Monte Carlo analysis ——确定参数的贡献
 - 16000 simulations for 16 sensitive parameters
 - A standardized multiple regression technique (Hamby 1994)

表： 敏感性参数对模拟NEE、GPP和RE年总量不确定性的贡献（%）

参数	定义	NEE	GPP	RE
W_c	田间持水量	75.35	90.55	25.69
K_m	维持呼吸系数	7.45	0.03	35.21
L_{max}	最大叶面积指数	4.36	0.04	22.03
k_w	土壤容重	2.96	3.39	0.8
R_d	日照下暗呼吸	2.08	2.42	0.61
C_{psom}	初始惰性土壤有机质碳	1.49	1.85	0.58
C_{mrl}	初始代谢性根凋落物碳	0.97	0.05	2.19
f	生长呼吸系数	0.95	0	3.79
N_s	植物残体氮含量	0.81	0.02	4.48
C_{ssl}	初始地表结构性凋落物碳	0.79	0.57	0
C_{sm}	初始地表微生物碳	0.69	0.04	1.42
W_s	土壤饱和含水量	0.58	0	2.07
C_{ssom}	初始慢性土壤有机碳	0.53	0.63	0.19
C_{srl}	初始结构性根凋落物碳	0.48	0.1	0.44
S	气孔导度模型参数	0.3	0.3	0.03
W_{opt}	有机碳分解适宜土壤含水量	0.2	0.01	0.46

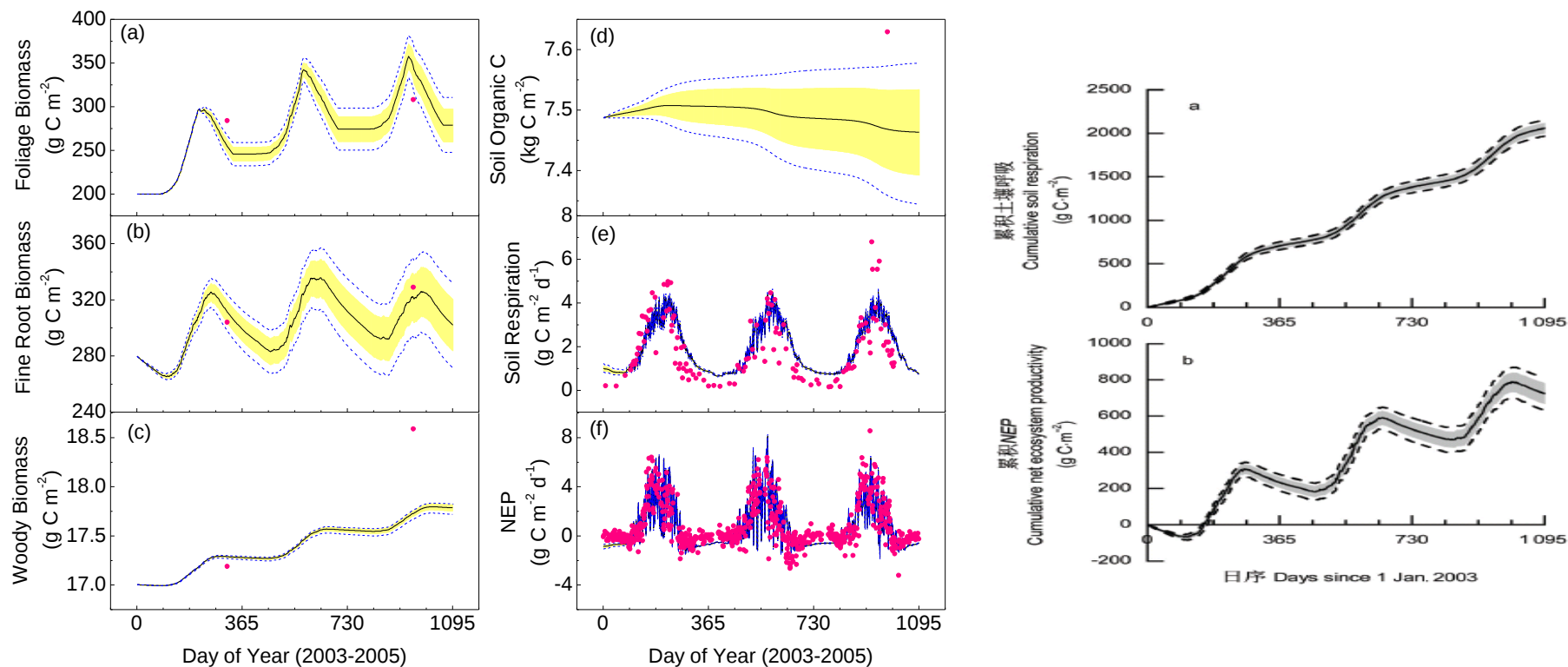
其中由5个参数引起的NEE年总量不确定性约占总误差的92%

NEE模拟结果的不确定性



- 模拟的2003-2005年GPP和RE的不确定性为5-8%，NEE年总量的不确定性为23-37%。
- 日尺度NEE模拟值的不确定性随NEE量级的增加而增大，在生长季期间达到最大。

长白山阔叶红松林碳通量和碳储量不确定性分析



- 植物和土壤碳库模拟值的不确定性随时间增加呈递增趋势
- 碳通量累积值的不确定性同样表现出随着时间增加而递增的趋势

结论

- 连续测定数据涡度相关通量数据为陆地生态系统碳循环过程模型的验证提供了长期、有效数据。在验证过程中，应进一步考虑通量数据本身存在的随机观测误差、插补过程导致的误差以及能量不闭合等问题。
- 通量数据是优化陆地生态系统碳循环过程模型的关键参数和变量的重要数据来源。由于通量大小相对于植被和土壤碳库来说是一个相对小的量，因此在开展模型参数反演和模型数据融合研究时，最好综合通量和碳库的观测信息。
- 今后可考虑采用顺序参数估计方法或数据同化方法，根据不断获取的通量数据动态优化模型参数或状态变量，以降低误差的传播，更准确地预测未来气候条件下生态系统的碳循环过程。

主要参考文献

- Zhang L, Luo YQ, Yu GR, Zhang LM: Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of eastern China: Applications of probabilistic inversion. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 2010, 115., G01010, doi:10.1029/2009JG001004.
- Zhang L, Yu GR, Gu FX, He HL, Zhang LM, Han SJ: Uncertainty analysis of modeled carbon fluxes for a broad-leaved Korean pine mixed forest using a process-based ecosystem model. *J Forest Res-Jpn* 2012, 17:268-82.
- Ren XL, He HL, Moore DJP, Zhang L, Liu M, Li F, Yu GR, Wang HM: Uncertainty analysis of modeled carbon and water fluxes in a subtropical coniferous plantation. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences* 2013, 118:1674-88.
- 张黎,于贵瑞,何洪林,张雷明. 基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟. *植物生态学报*,2009,06:1044-1055.
- 张强,张黎,何洪林,韩士杰,李英年,欧阳竹,石培礼,王辉民,郝彦宾,张一平,闫俊华. 基于涡度相关通量数据的植被最大光能利用率反演研究. *第四纪研究*, 2014, 34(4): 743-751.

谢谢!

li.zhang@igsnrr.ac.cn