

样带尺度生态系统水-碳-氮通量耦合过程的多站点对比研究

于贵瑞

生态系统观测与模拟重点实验室
中国科学院地理科学与资源研究所

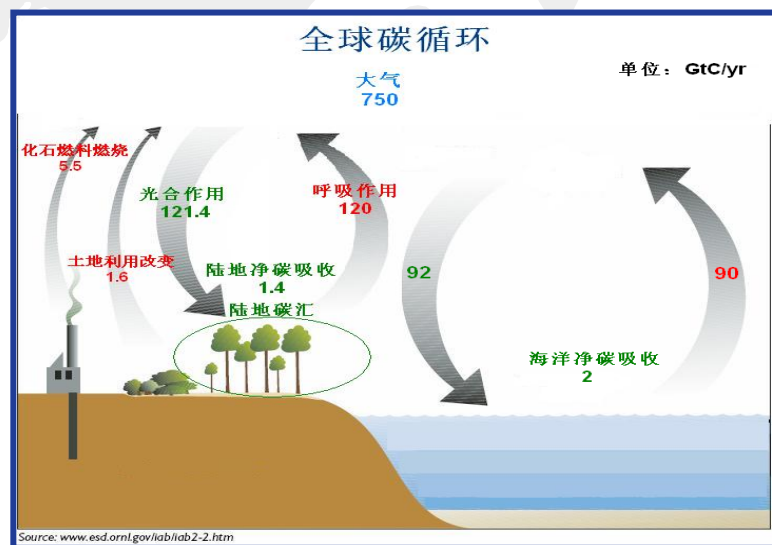
2009.12.21 • 北京

报告提纲

- 
- 一、碳循环过程研究的科学问题
 - 二、生态过程研究的尺度问题
 - 三、基于样带概念的案例研究
 - 四、结论与展望

一、碳循环过程研究的科学问题

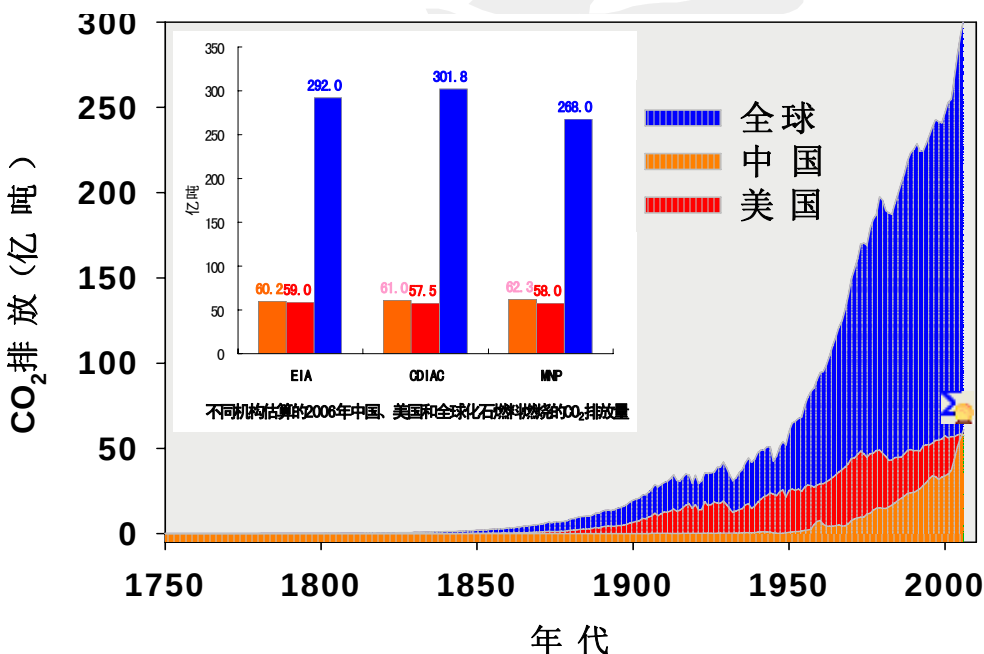
陆地碳循环是减缓和适应气候变化是世界面临的重大科学命题



区域碳收支评估是:

- 陆地增汇/减排的理论基础
- 环境外交和生态建设的科技任务

我国温室气体减排的巨大压力和战略选择



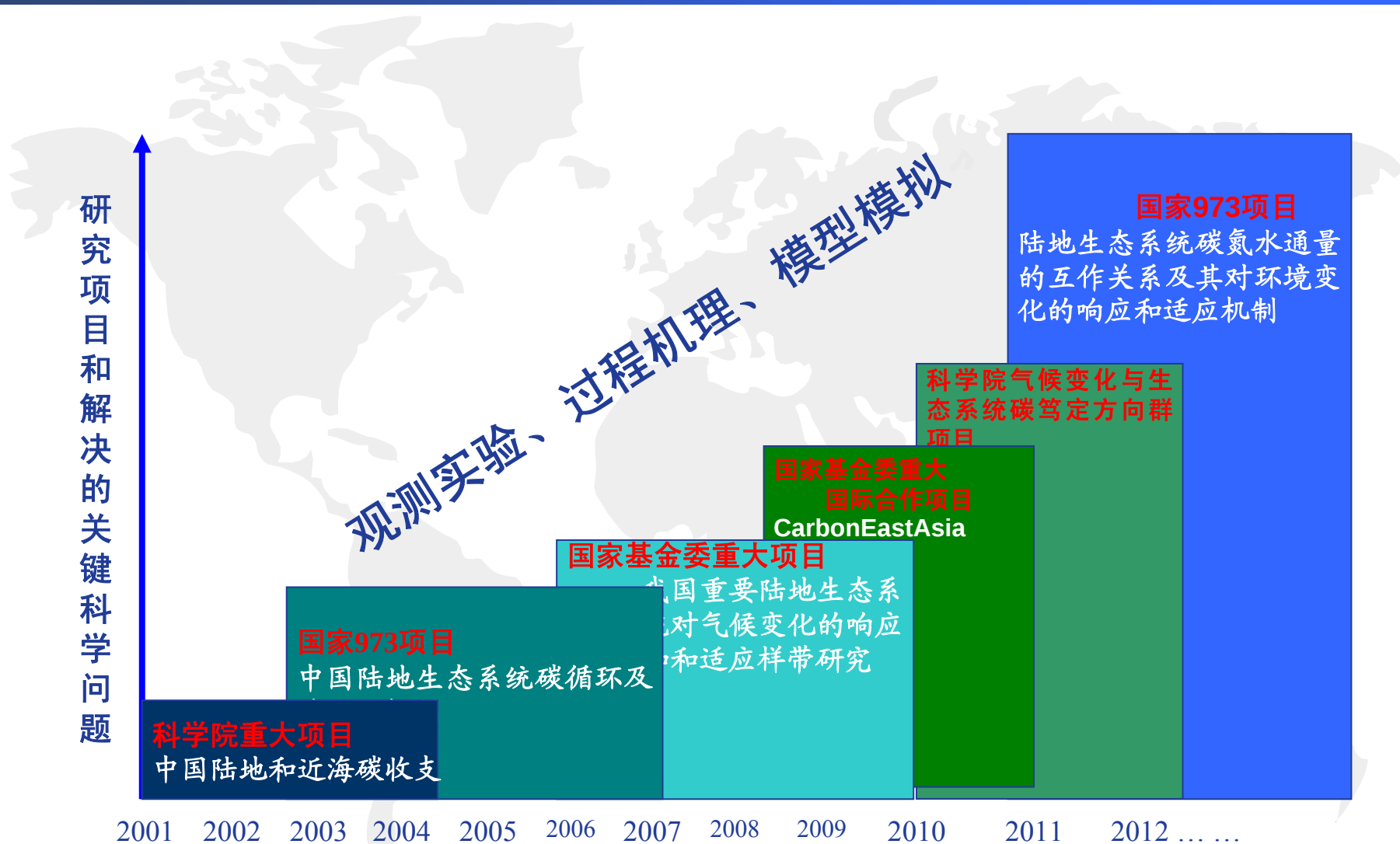
来源：美国能源部橡树岭国家重点实验室

据美国能源部的统计
2006年全球碳排放量约为279
亿吨 CO₂，其中中国已占
21%，美国为20%

2030年全球碳排放量约为
406亿吨 CO₂，其中中国碳
排放将占29%，美国为14%

在适度控制工业减排的基础上，**增加陆地碳汇、减少
陆地碳排放**是我国必然的战略选择

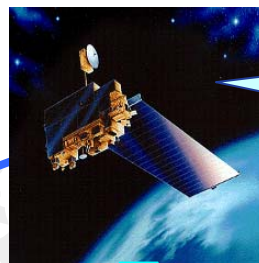
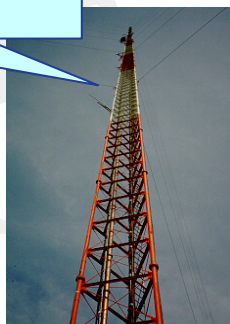
2000以来碳循环领域的重大研究计划



区域碳收支评估的计量方法体系

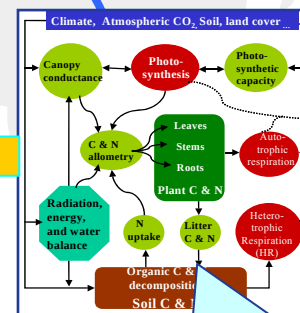
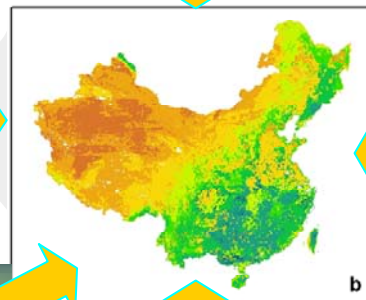
测定大气柱CO₂浓度

- 观测站少、数据不足
- 空间分辨率低
- 估算精度差



大范围格局观测

- 不能全天候测定
- 点评估精度不高



直接、技术简单

- 时间上不连续
- 数据积累耗时长



适于评估和预测

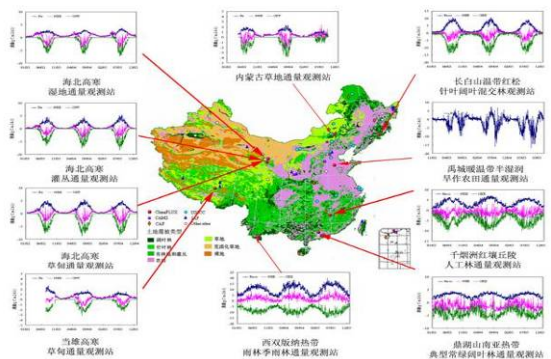
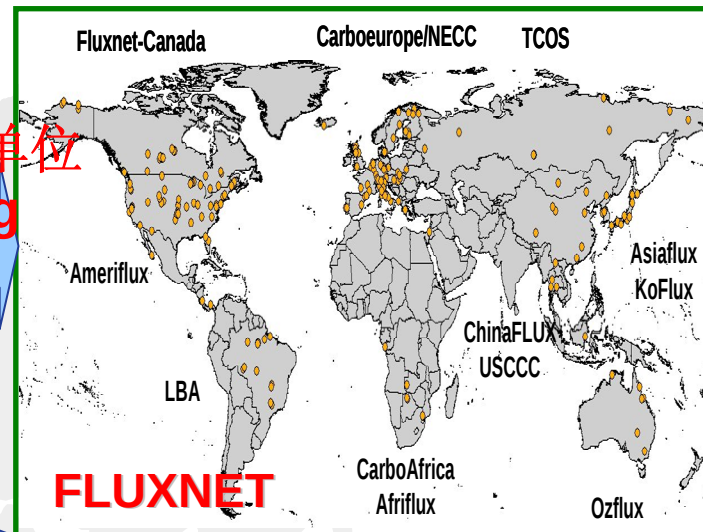
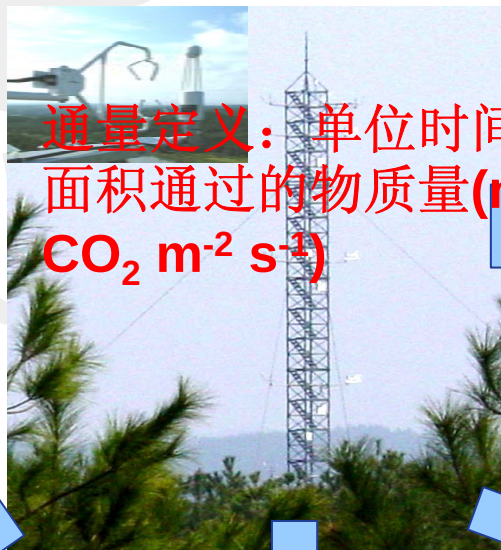
- 参数化验证难
- 尺度转换问题

涡度相关技术的特点与优势

技术优势

- 生态系统的直接测定
- 动态的长期连续观测
- 较大的空间代表性
- 遥感和模型地面信息

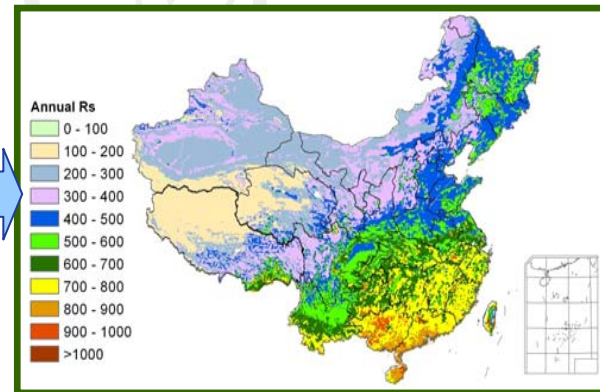
通量定义：单位时间单位
面积通过的质量($\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)



生态系统尺度



样带尺度

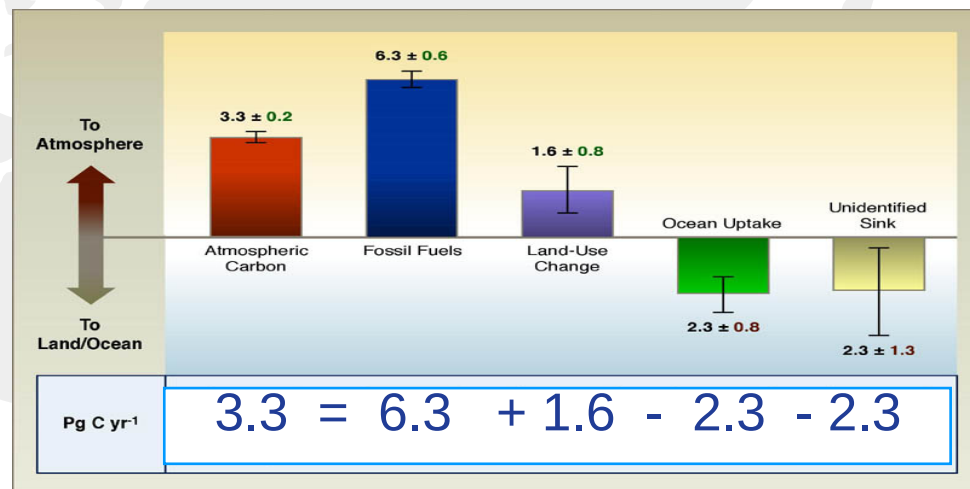


区域/全国尺度

Q1：陆地生态系统碳汇分布评估的不确定性

IPCC第四次评估报告

大气中的碳储量： 33 ± 2 亿吨C年
燃烧和水泥排放量： 63 ± 6 亿吨C/年
土地利用变化排放量： 16 ± 8 亿吨C/年



不确定量占人为排放的
12.7%

减排途径

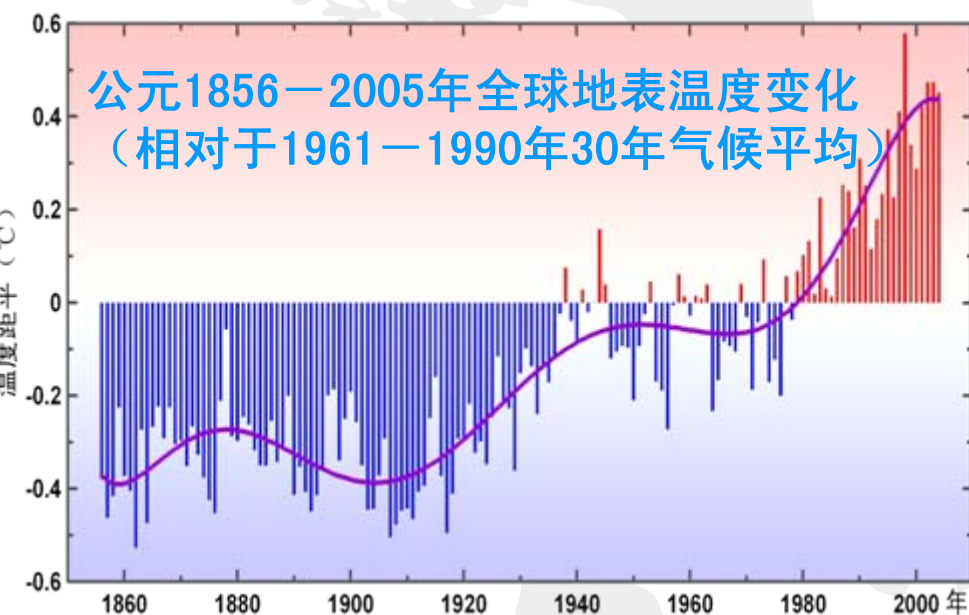
增汇途径

不确定量占人为排放的
20.6%

海洋生态系统净吸收量： 23 ± 8 亿吨C/年
陆地生态系统净吸收量： 23 ± 13 亿吨C/年

全球陆地每年向大气释放1.6(0.5~2.7) GTC，同时固定2.6(0.9~4.3) GTC，两者分别占石燃料燃烧和水泥工业排放CO₂量的22%和36%。

Q2: 温度升高对陆地固碳能力的影响



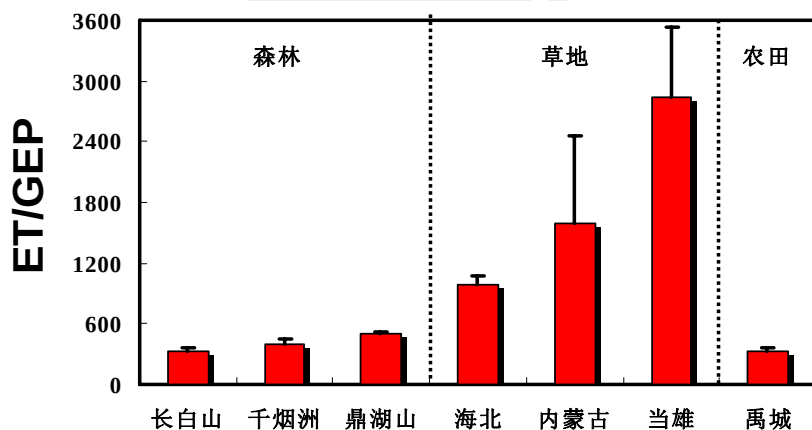
- 1906–2005年全球地表温度上升0.74 (0.56–0.92) °C ;
- 近百年间最暖的10年均出现在1990年以后。

增温对碳汇影响的分歧

- **促进碳排放:** 增温产生水分胁迫, 抑制植物生长, 并加速生态系统呼吸 (Tian et al., 1998, Nature);
- **增加碳吸收:** 增温促进养分矿化, 植物生长加快, 产生碳截存 (Cao & Woodward, 1998, Science) ;
- **无显著变化**(Keyser et al., 2000, GCB), 生态系统过程对增温产生适应 (Luo et al., 2001, Nature; Melillo et al. 2002. Science)。

Q3: 降水格局变化对陆地固碳能力的影响

IPCC (2007) 评估报告: 未来全球降水格局将发生 显著改变



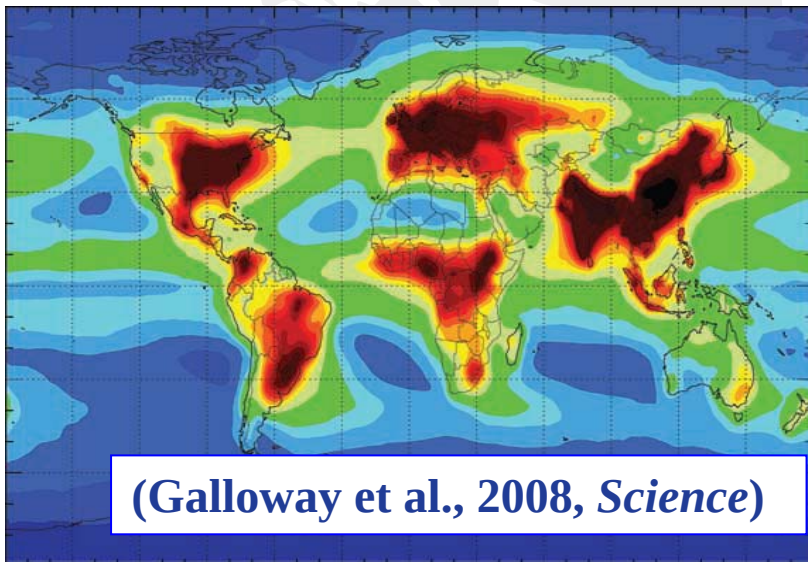
- 中国陆地生态系统固碳耗水具有极大变异性

Yu et al., 2008, *New Phytol.*

干旱对碳汇影响的分歧

- **促进碳排放**: 欧洲干旱使得碳排放量增加5亿吨C (Ciais et al., 2005, *Nature*)
- **增加碳吸收**: 亚马逊河流域干旱促进植物生长 (辐射增加) (Saleska et al., 2007, *Science*)
- 水分对于陆地碳汇有着**复杂的影响机制** (水分阈值, 季节性和与其他因子的交互性) (Heimann et al., 2008, *Nature*)

Q4: 氮沉降对陆地生态系统固碳能力的影响



- 我国已成为继欧洲、北美之后的第三大氮沉降区 ($12.9\text{KgN ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$)

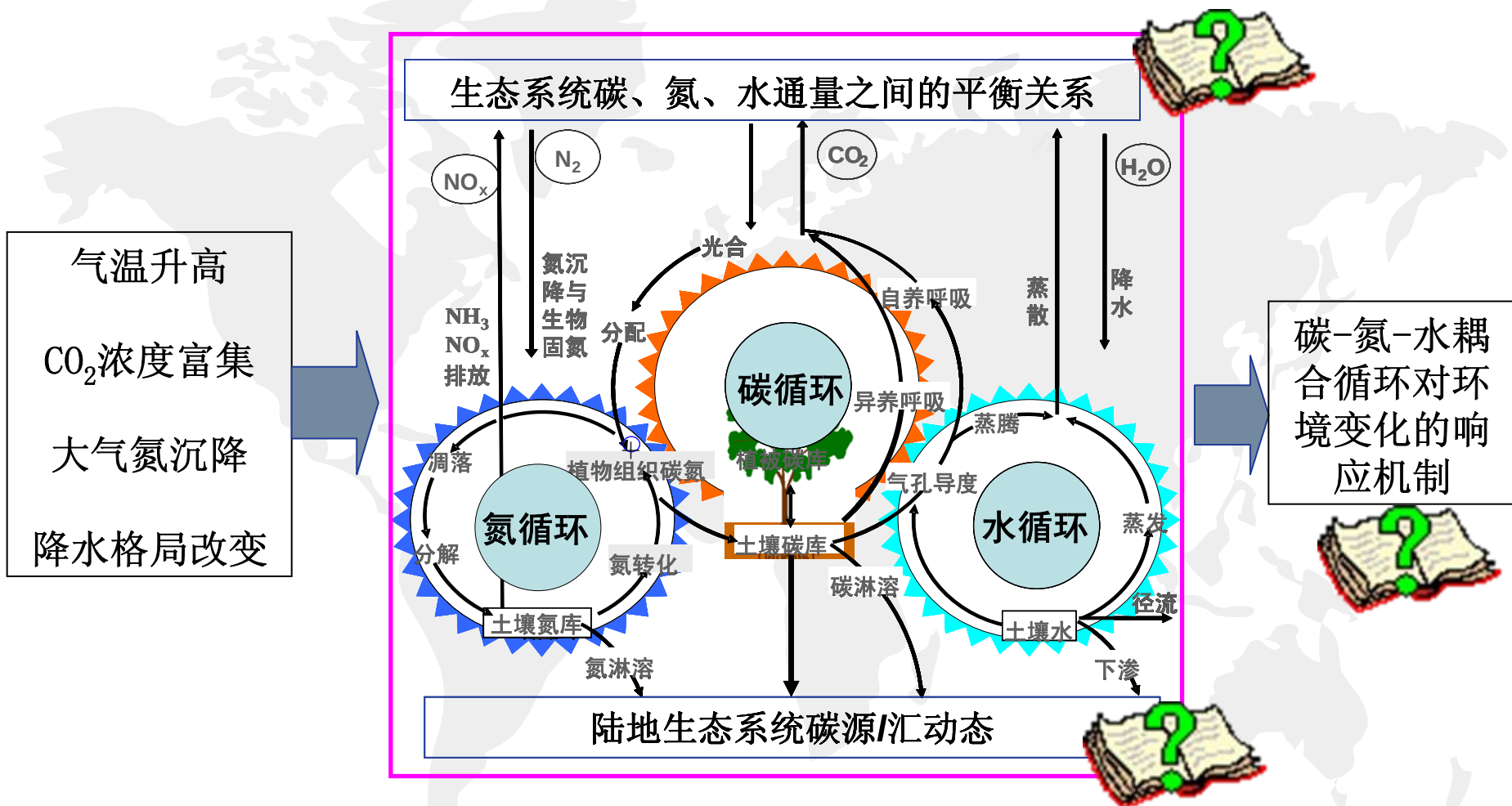
氮沉降对碳汇影响的分歧

增汇: 氮沉降对欧洲森林固碳贡献巨大
(Magnani et al. 2007, *Nature* ;
Veries et al., 2006, *GCB*)

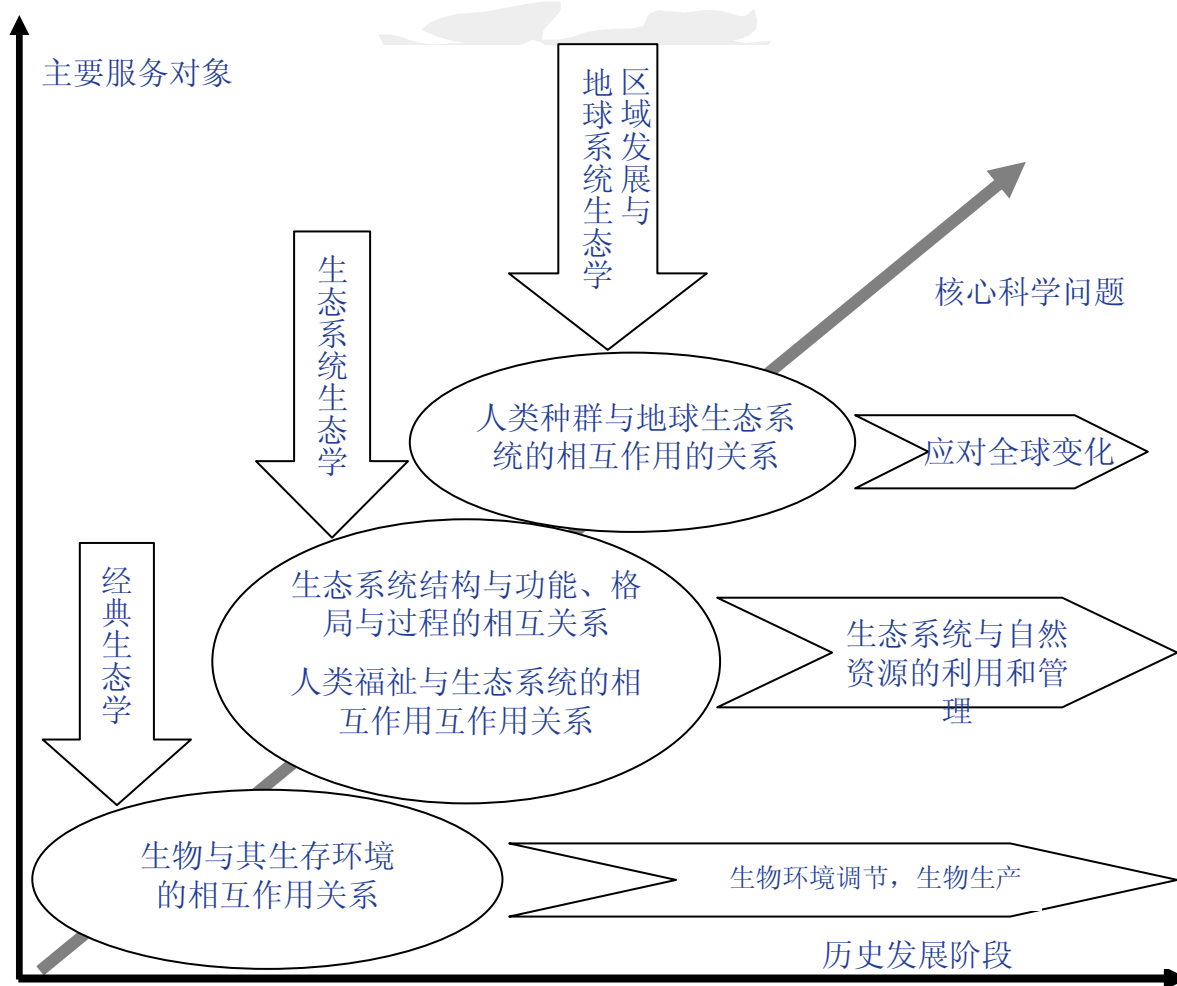
释放: 氮沉降促进南美热带雨林土壤碳
释放 (Cleveland, 2006, *PNAS*;
Bragazza et al., 2006, *PNAS*)

中性: 氮沉降对温带森林的碳截存影响
不大, 取决于土壤的氮饱和状态
(Nadelhoffer et al., 1999, *Nature*;
De Vries et al., 2007, *Nature*;
Höberg et al., 2007; *Nature*)

陆地生态系统碳氮水循环过程对气候变化的响应



二、生态过程研究的尺度问题



生态系统研究尺度
转换的需求

探索未知的欲望
(跨尺度推理)

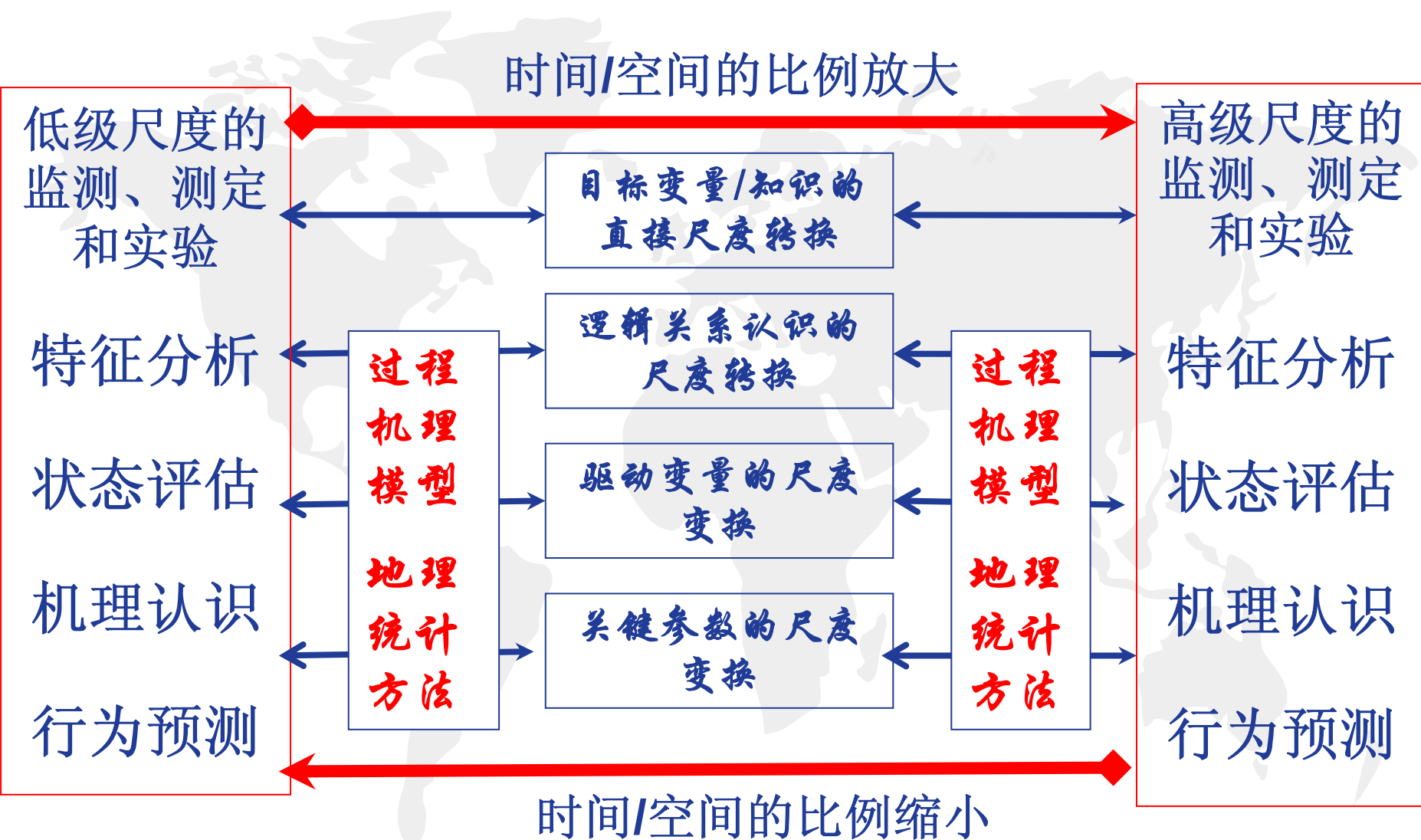
生态建设的需要
(跨尺度管理)

知识普及的欲望
(跨尺度认知)

观测、认知能力与
实际需求的尺度不
匹配

生态学的历史发展阶段及其核心科学问题和主要服务对象

生态学研究尺度转换的主要途径



生态系统研究尺度转换的几种可能情景



逻辑性的推理
知识扩展

盲点下的无奈
知识借鉴

无知者的无畏
知识污染

冒险者的游戏
知识欺骗

尺度转换中的可能误区之一：

❖ 时间尺度（时间尺度的动态积分假设？）

- 不同时间尺度的生态系统关键控制因子可能不同,其环境因子的作用函数的不同。
- 某一时段的总量不等于其在时间尺度上的简单积分

$$G = \int_0^t g(x, t)$$

$$G = \sum_i g_i(x, t) \bullet \Delta t_i$$

时间积分假设

$$G \neq \int_0^t g(x, t)$$

$$G \neq \sum_i g_i(x, t) \bullet \Delta t_i$$

时间积分假设不成立

尺度转换中的可能误区之二：

❖ 空间尺度（空间尺度的面积积分假设？）

- ❖ 生态系统在空间上的异质性和镶嵌结构，
- ❖ 导致某区域尺度的总量不等于简单的面积积分或加权和

$$G = \int_0^s g(x, s)$$

$$G = \sum_i g_i(x_i) \cdot S_i$$

$$G = \sum_i q_i g(X_i) \cdot S_i$$

面积积分假设

$$G \neq \int_0^s g(x, s)$$

$$G \neq \sum_i g_i(x_i) \cdot S_i$$

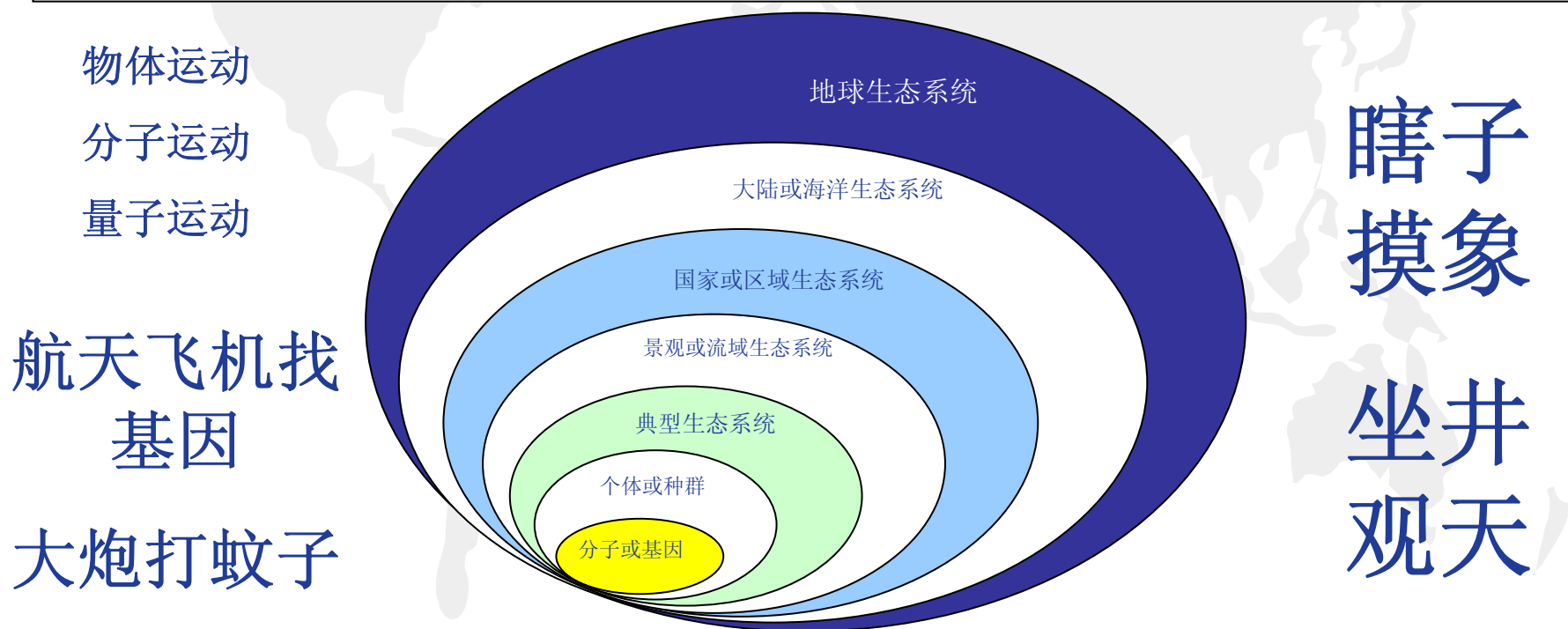
$$G \neq \sum_i q_i g(X_i) \cdot S_i$$

面积积分假设不成立

尺度转换中的可能误区之三：

❖ 系统等级尺度（跨尺度行为的相似性假设？）

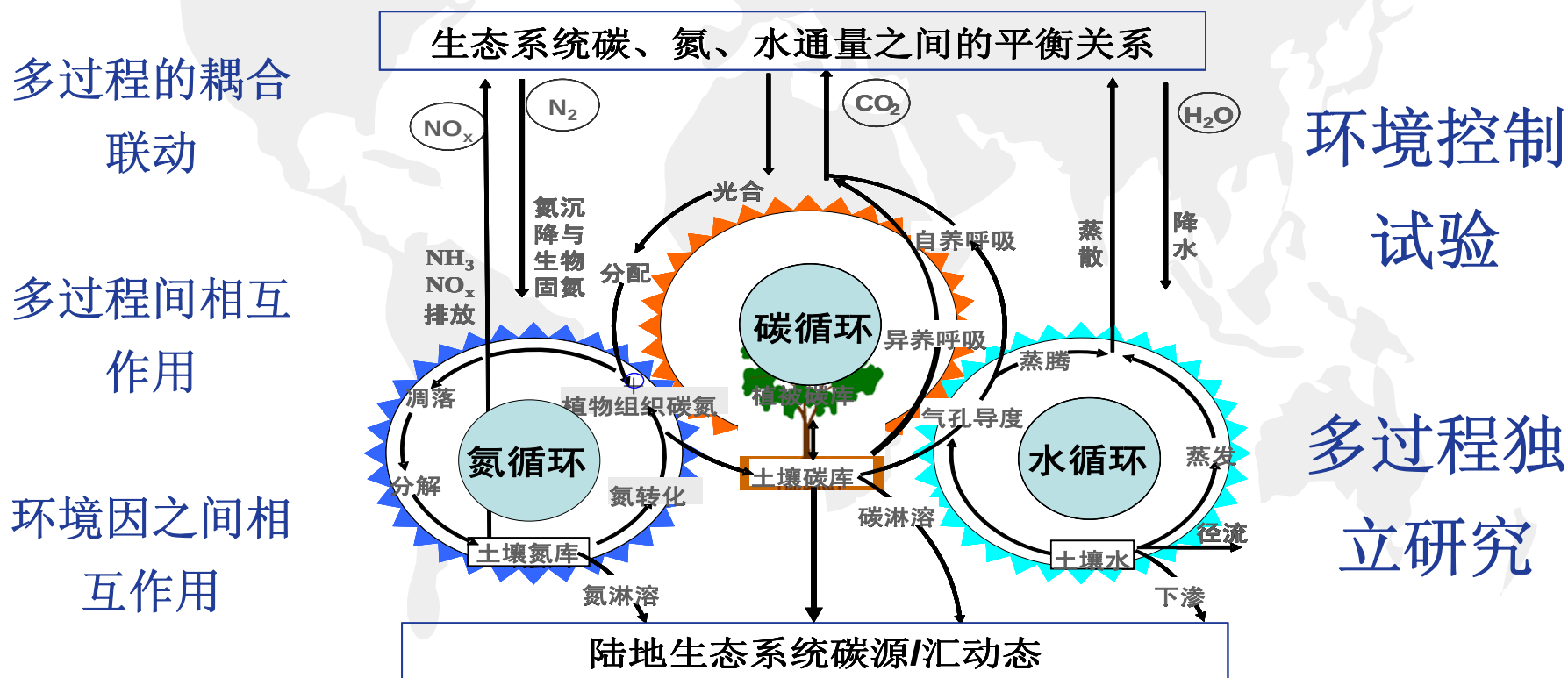
- 生态系统的器官—个体—群落—景观—区域—全球不同等级的行为和控制机制差异很大
- 在某一等级上所获得的研究结果，不能简单地向上和向下等级无条件地推广。



尺度转换中的可能误区之四：

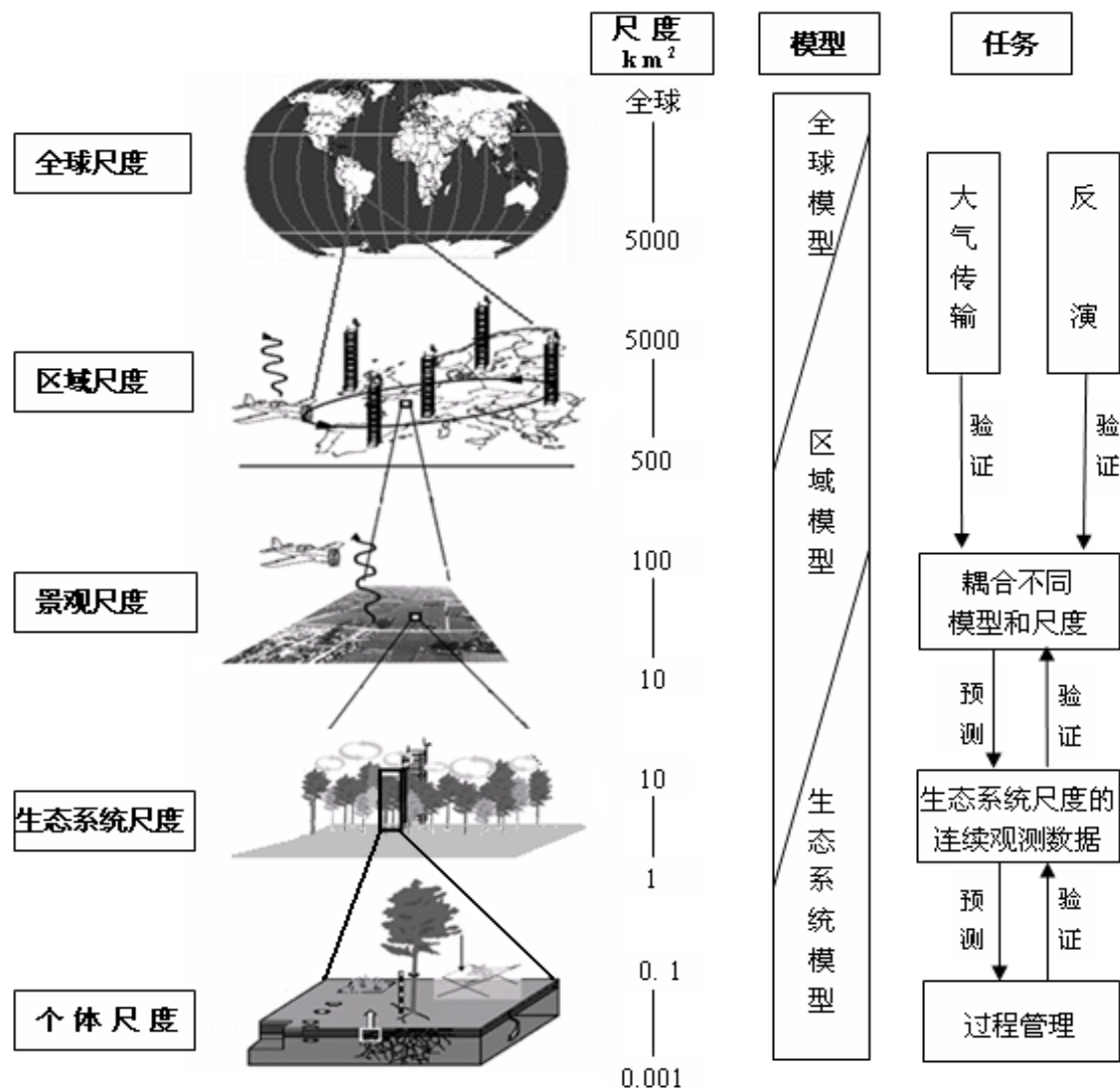
❖ 过程认知尺度（过程的独立性假设？相互作用）

- 生态系统地各种过程具有复杂的耦合关系和相互作用，
- 在特定的环境下（假定其它过程不变）对某各过程的认知，不能简单地推广到多种过程协同变化条件下。



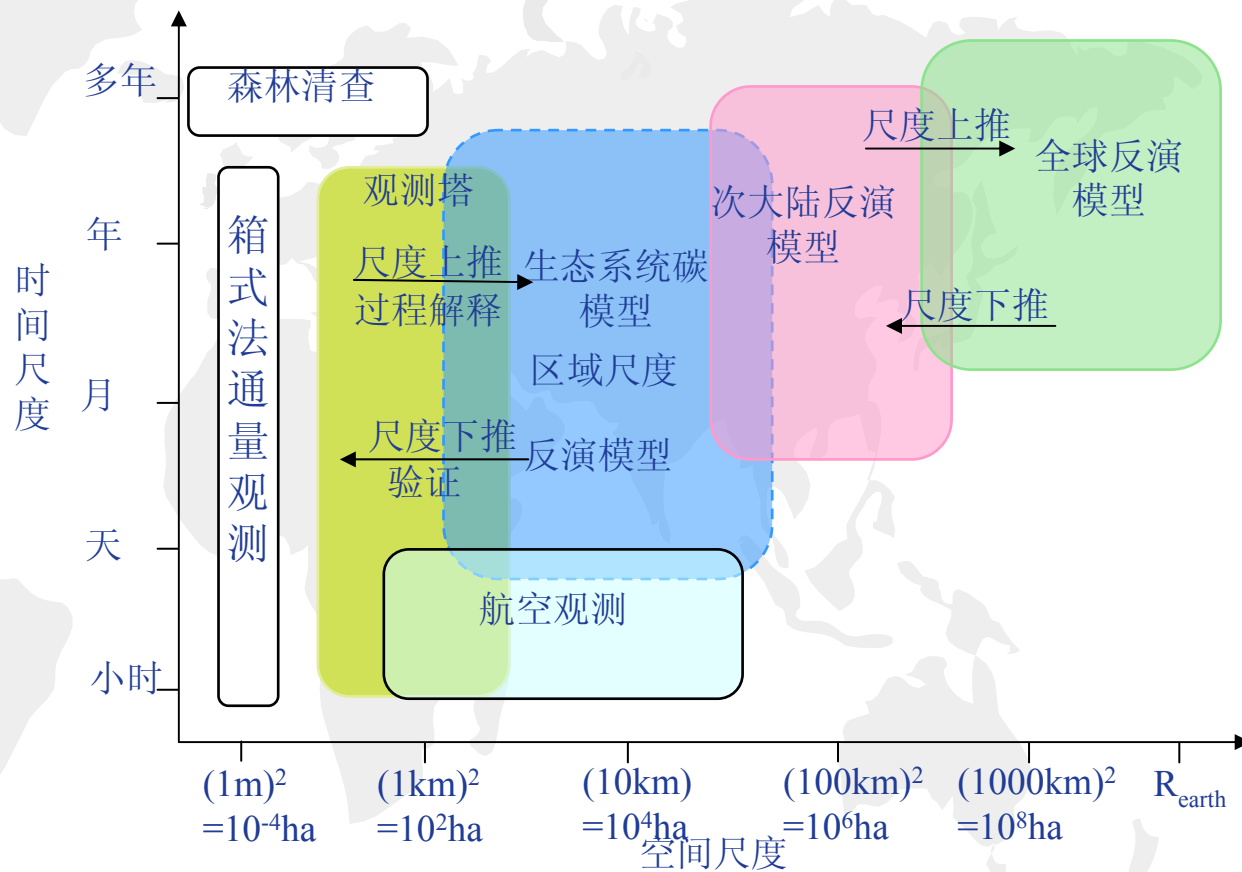
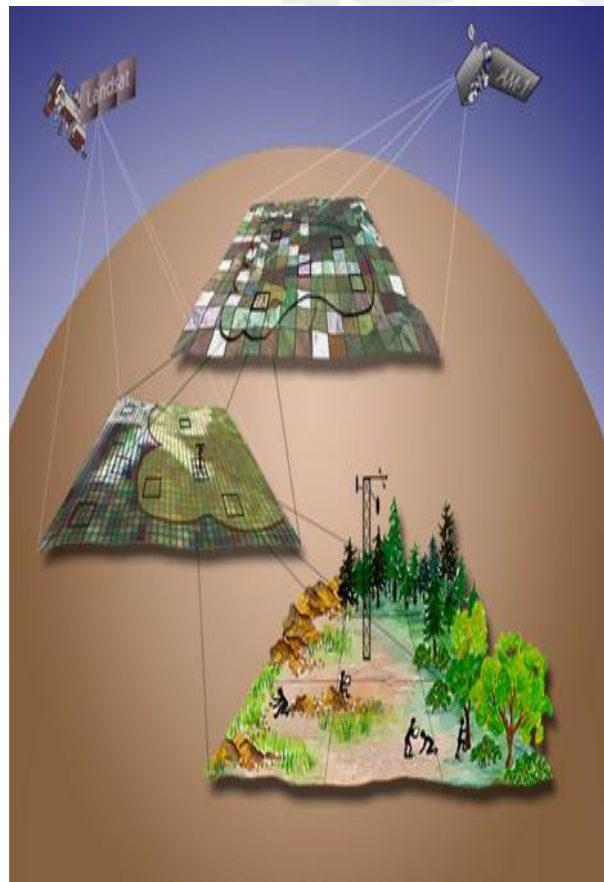
生态系统生态学的研究尺度和方法论体系

多尺度观测
多方法印证
多过程融合
跨尺度认知
跨尺度模拟



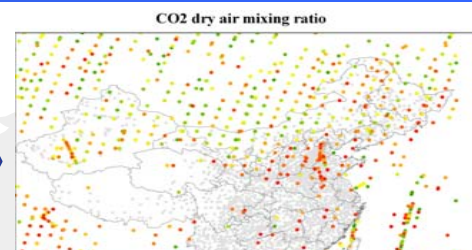
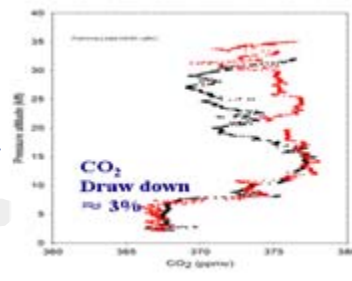
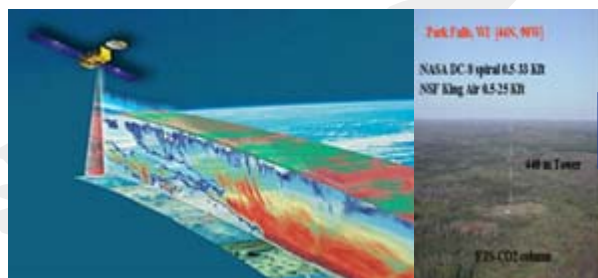
案例1：区域多尺度综合模拟

陆地生态系统碳循环的多尺度模型体系

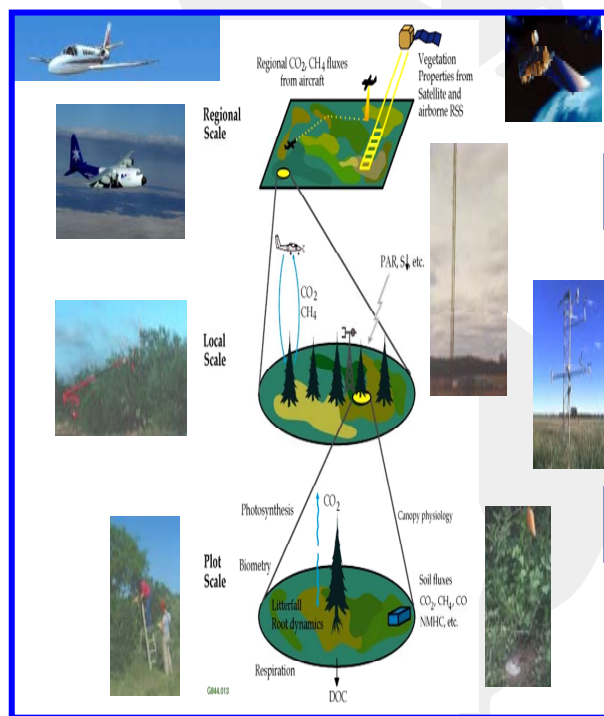


案例2：区域立体化观测

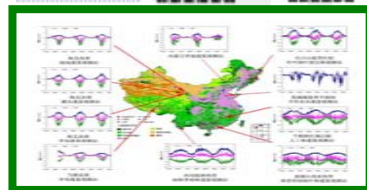
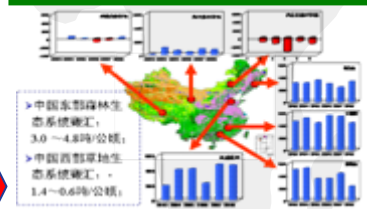
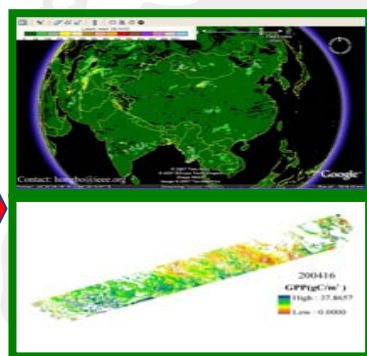
区域碳收支的观测系统、数据资源和定量认证技术系统



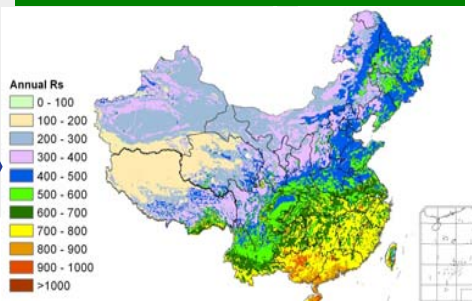
大气碳浓度变化及其排放源认证系统



区域大气和陆地碳收支观测系统



区域碳收支数据资源



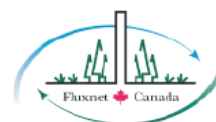
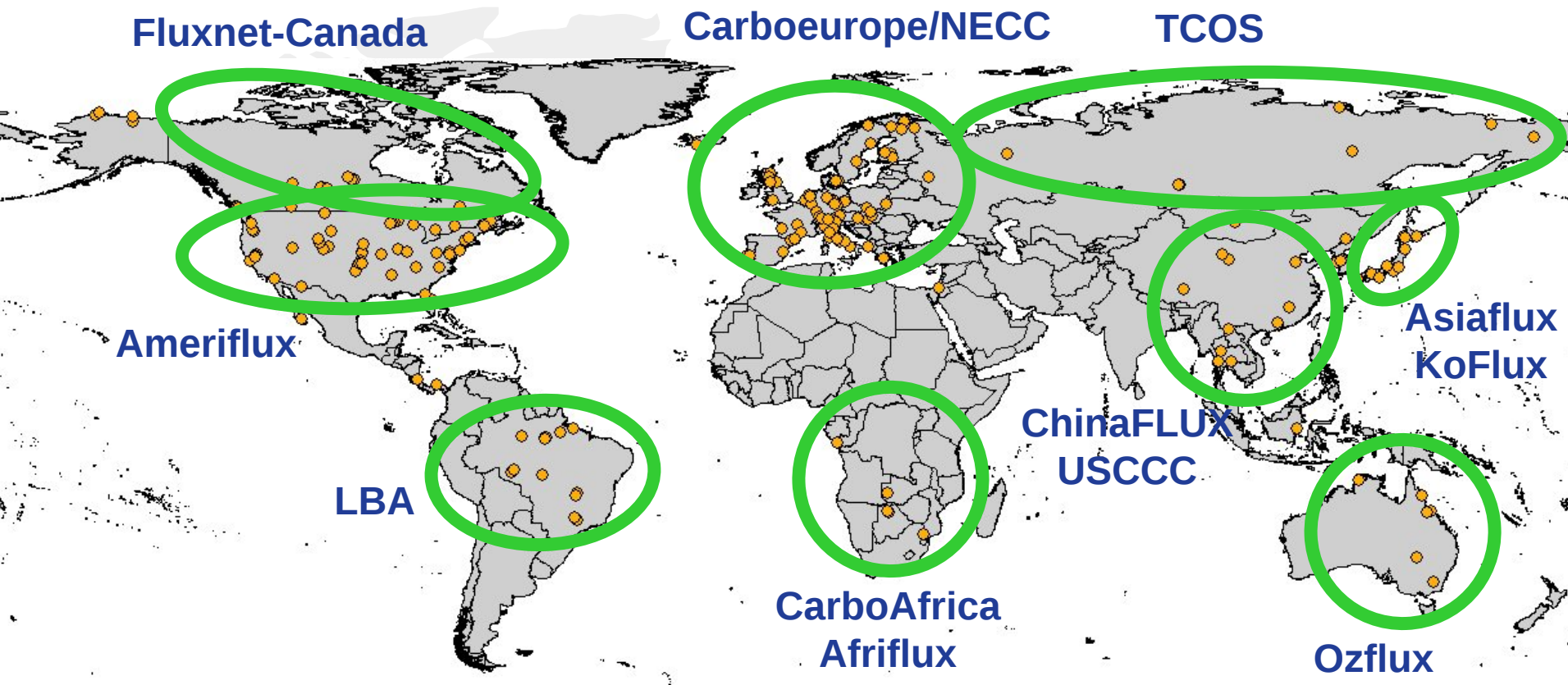
陆地碳源汇时空格局和增汇潜力认证系统



区域/行业/项目的碳源汇强度计量台账系统

案例3: 区域网络观测

国际通量研究网络观测(FLUXNET)



AfriFlux

ChinaFLUX

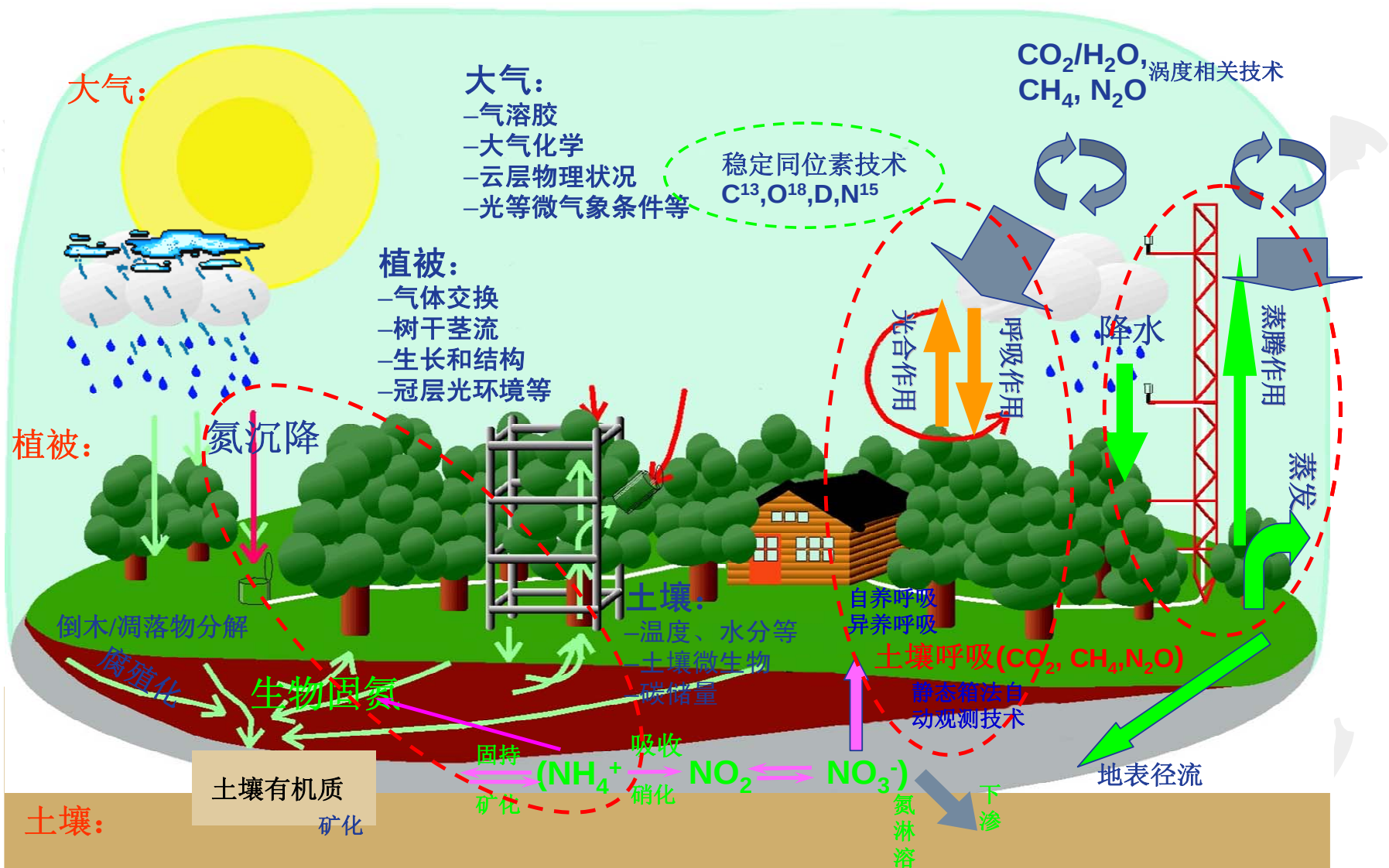
OzFlux
Australian and New Zealand Flux Research and Monitoring

USCCC

NECC
Nordic Centre for Studies of Ecosystem Carbon Exchange
and its Interactions with the Climate System



陆地生态系统尺度的碳氮水和能量通量观测



案例4: 区域联网实验

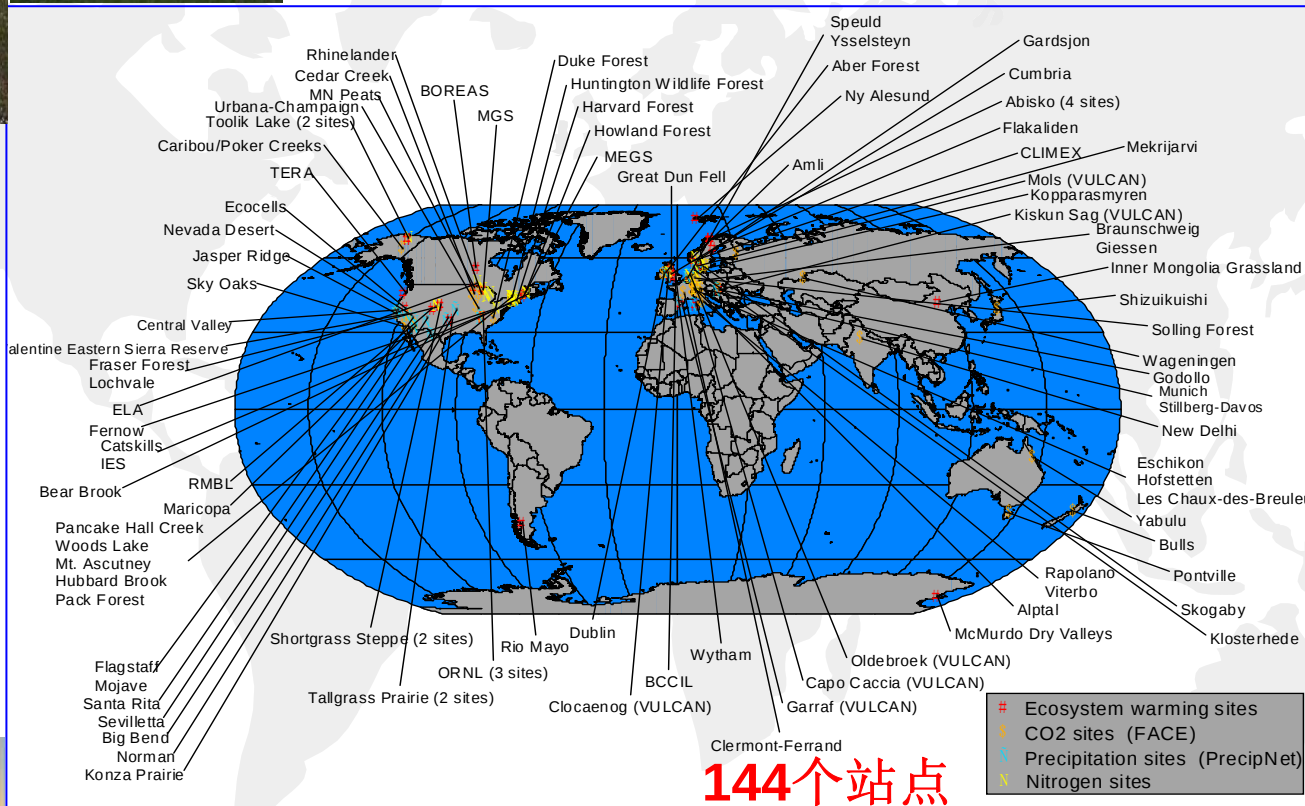
陆地生态系统对气候变化响应的实验研究网络



增温



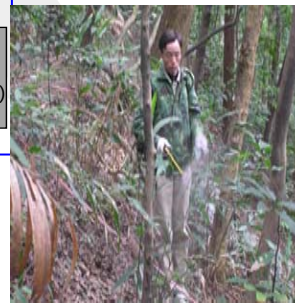
控水



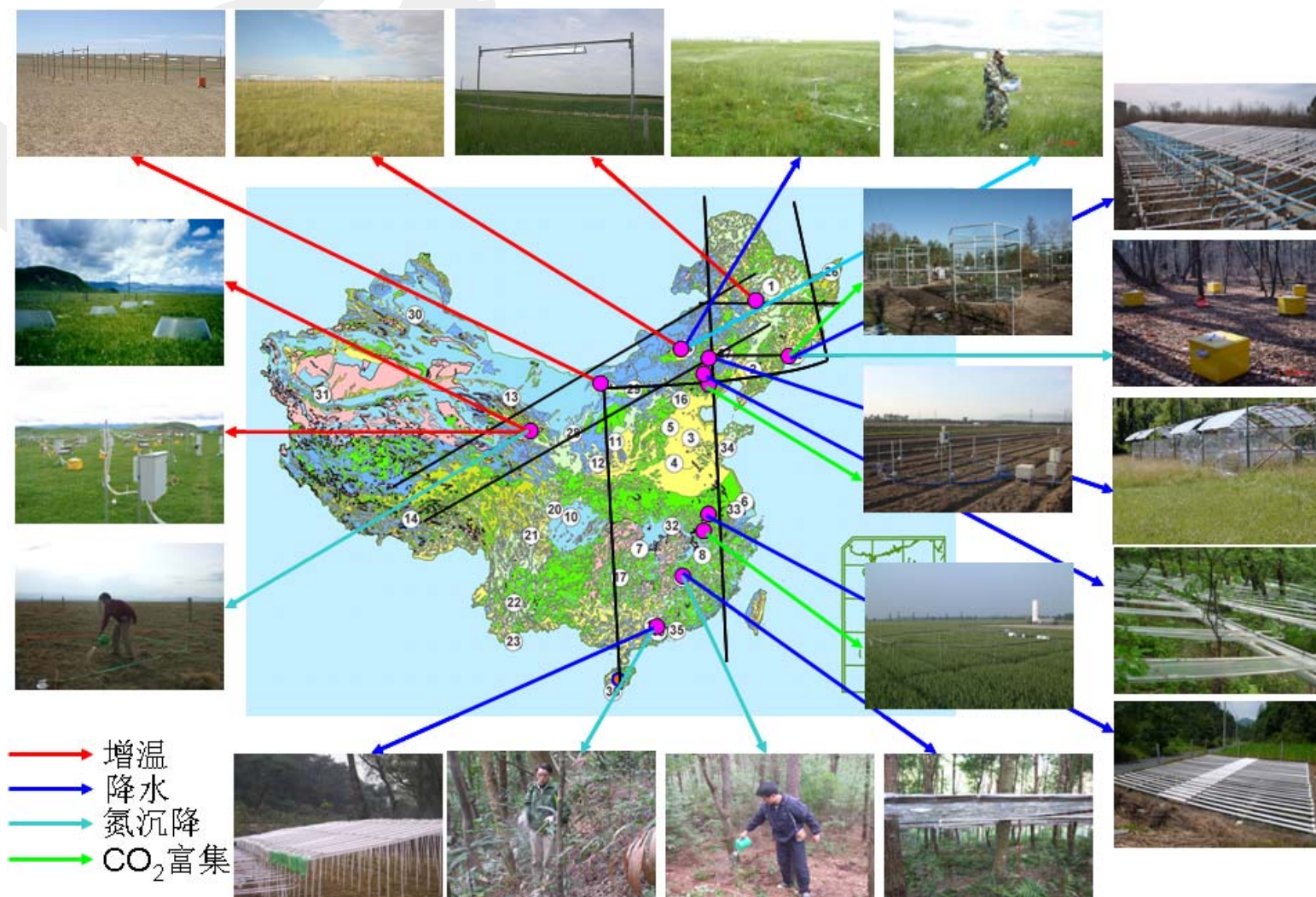
施氮



CO₂富集



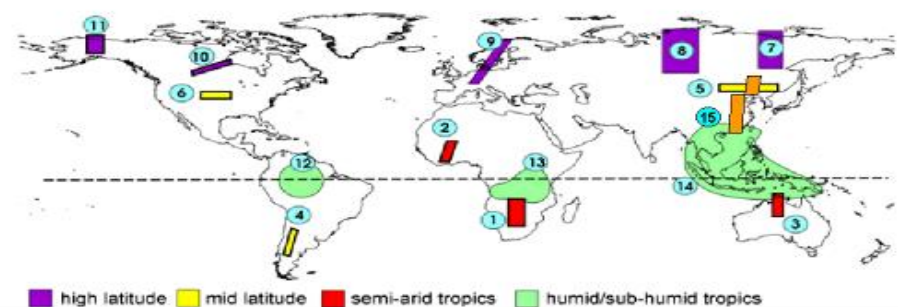
中国主要生态系统对全球变化的响应控制实验



案例4: 陆地样带研究

样带途径在全球变化研究中的作用

GCTE/IGBP Terrestrial Transects



- | | |
|--|--|
| 1 = Kalahari Transect (KALA) | 9 = Europe Transect |
| 2 = Savanna on the Long-Term (SALT) | 10 = Boreal Forest Transect Case Study (BFTCS) |
| 3 = North Australian Tropical Transect (NATT) | 11 = Alaskan Latitudinal Gradient (ALG) |
| 4 = Argentina Transect | 12 = Amazon (LBA) |
| 5 = North East Chinese Transect (NECT) | 13 = Miombo Woodlands Transect |
| 6 = North American Mid-Latitude Transect (NAMER) | 14 = SE Asian Transect |
| 7 = Siberia Far East Transect (SIBB) | 15 = North-South Transect of Eastern China (NSTEC) |
| 8 = Siberia West Transect | |

Vegetation types in the transect

样带植被类型

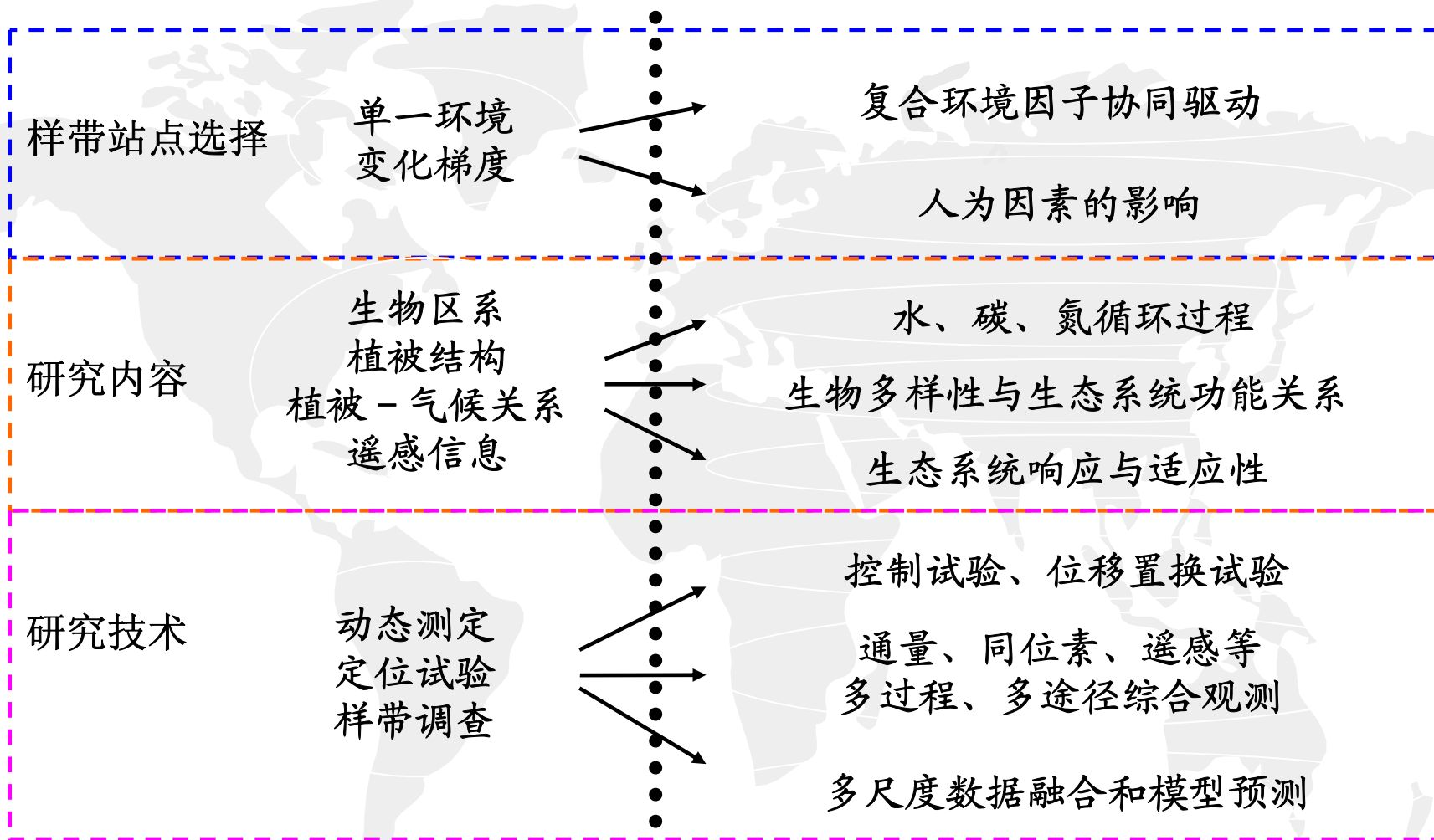
沿水分梯度的东西样带

沿热量梯度的南北样带南段

南北样带北段

- 在空间尺度上分析生态系统结构、过程和功能与驱动因子间的相互关系;
- 是联系站点与区域的桥梁,是不同时空尺度耦合转换的媒介;
- 以空间格局代替时间演替系列、位移互置试验等方法,提高工作效率,缩短对科学问题认识的时间;
- 最大程度地有效整合和利用分布于不同区位各站点的观测研究数据资源。

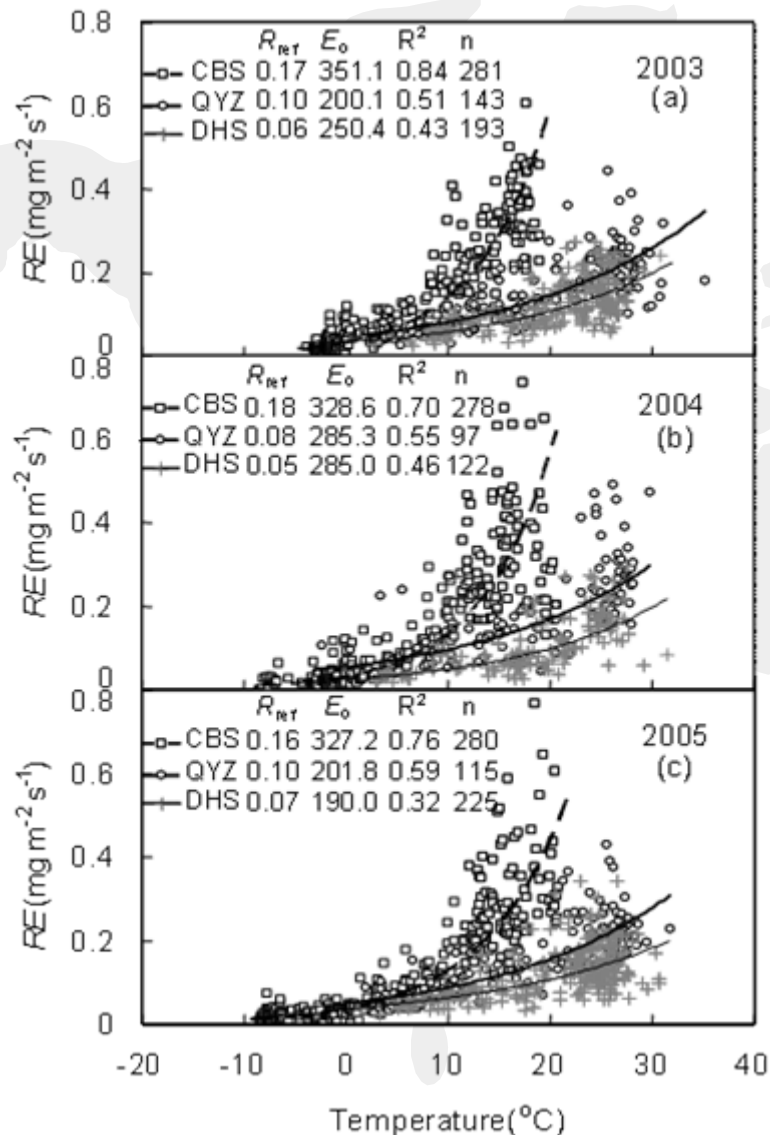
国际样带研究的发展趋势



三、样带尺度的典型案例研究

- 中国东部森林生态系统碳交换的环境控制机制
- 中国东部森林生态系统WUE与气候因子之间的关系
- 中国草地生态系统WUE的植被控制效应
- 中国东部老龄林土壤-大气碳交换的环境控制机制
- 中国典型生态系统土壤呼吸温度敏感性格局特征

3.1 中国东部森林生态系统碳交换的环境控制机制

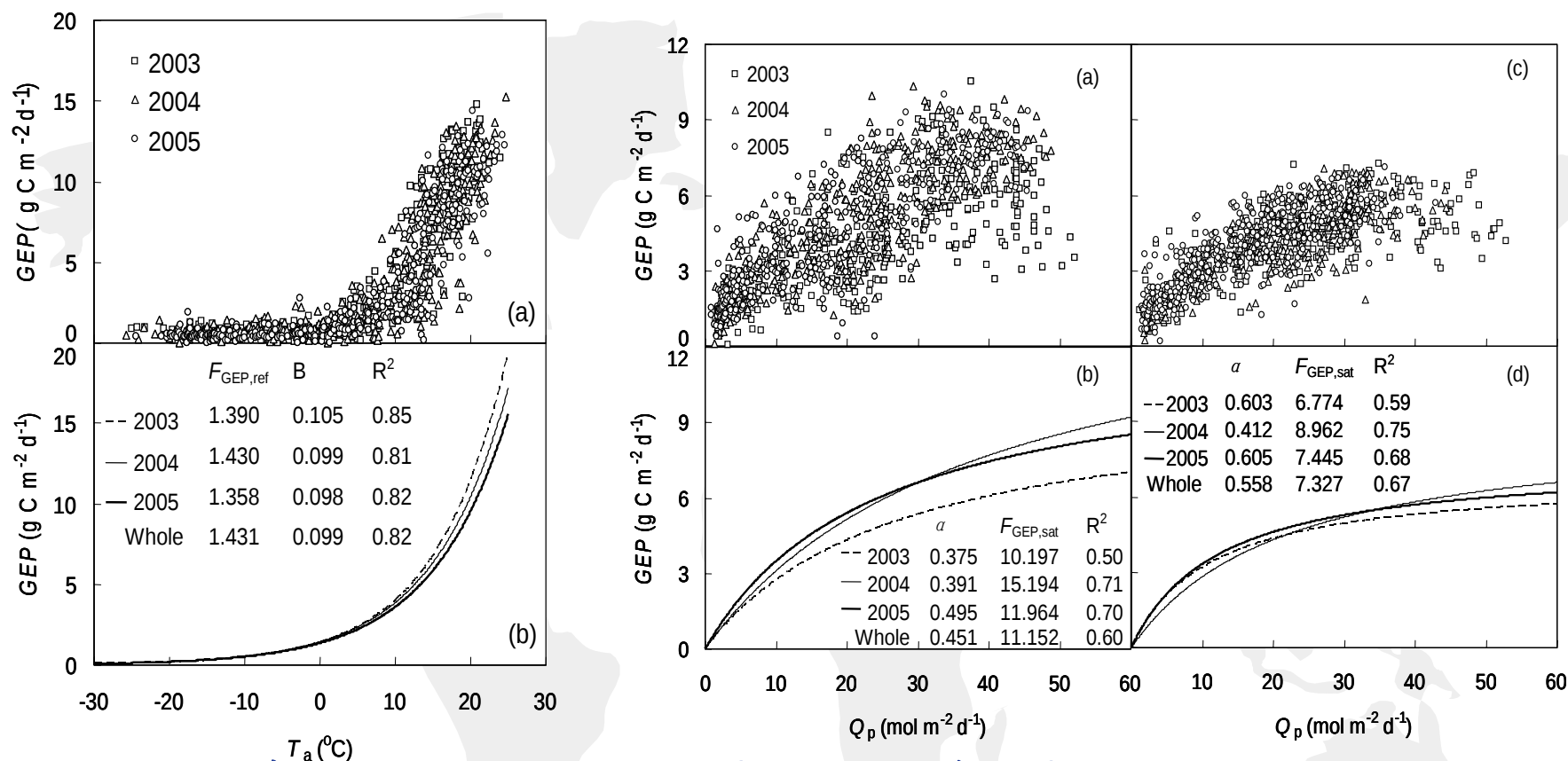


从北往南，森林生态系统呼吸的温度敏感性逐渐降低，温带森林温度敏感性大于亚热带森林；

表明在未来气候变暖条件下，温带森林生态系统呼吸的响应更显著，有可能通过呼吸作用释放出更多的CO₂到大气中。

(Yu et al., 2008; Global Change Biology)

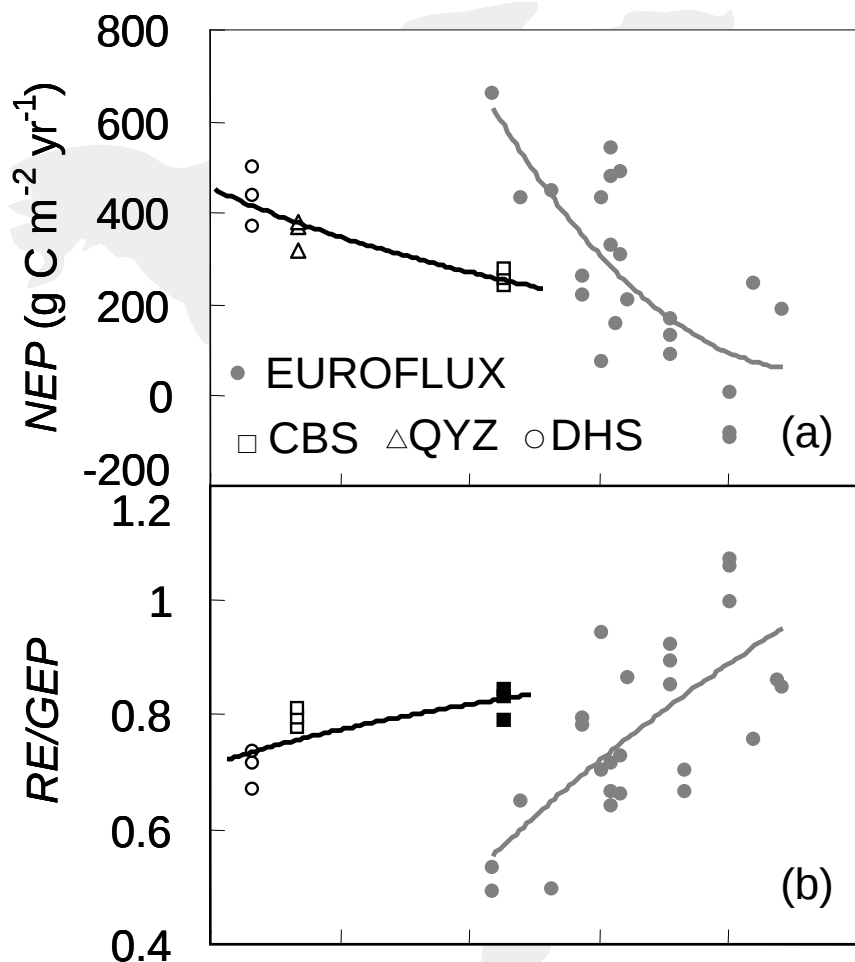
中国东部森林生态系统碳交换的环境控制机制



长白山温带混交林生态系统日尺度GEP主要受温度的影响，而千烟洲亚热带人工针叶林和鼎湖山亚热带常绿阔叶林生态系统日尺度GEP主要受到了光强的制约。温度主要决定CBS森林碳交换的年际间变异，而QYZ人工林生态系统碳交换的年际变异主要受水分有效性的控制。

(Yu et al., 2008; Global Change Biology)

中国东部森林生态系统碳交换的环境控制机制



虽然两个大陆上森林生态系统NEP均表现出随着纬度升高而降低的趋势，但是在变化的速率上存在明显的差异。

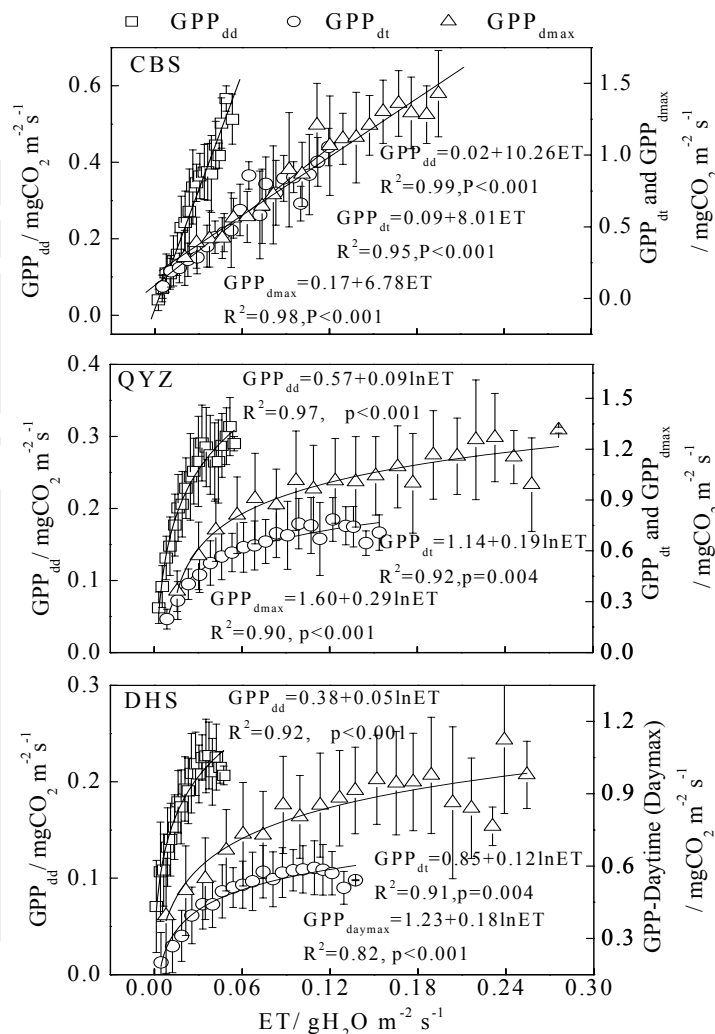
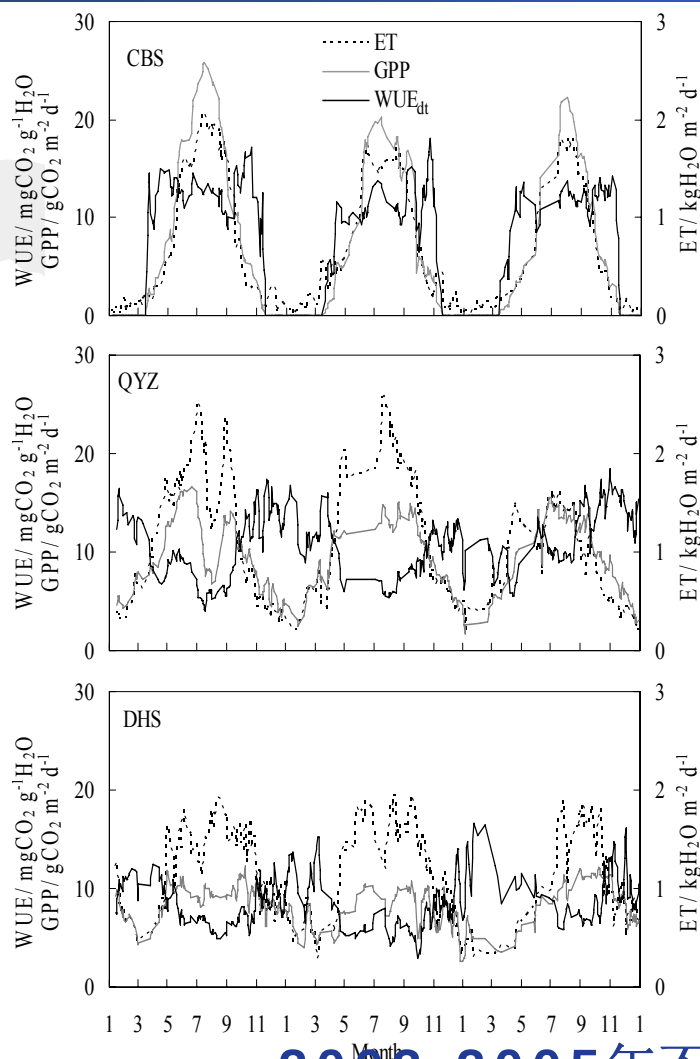
原因：

- (1) 森林类型；
- (2) 森林立地年龄；
- (3) 气候带。

生态系统碳通量的空间格局:纬度变化趋势、欧亚大陆间的比较

(Yu et al., 2008; Global Change Biology)

3.2 中国东部森林生态系统WUE与气候因子之间的关系



2003-2005年不同尺度上GPP和ET的关系

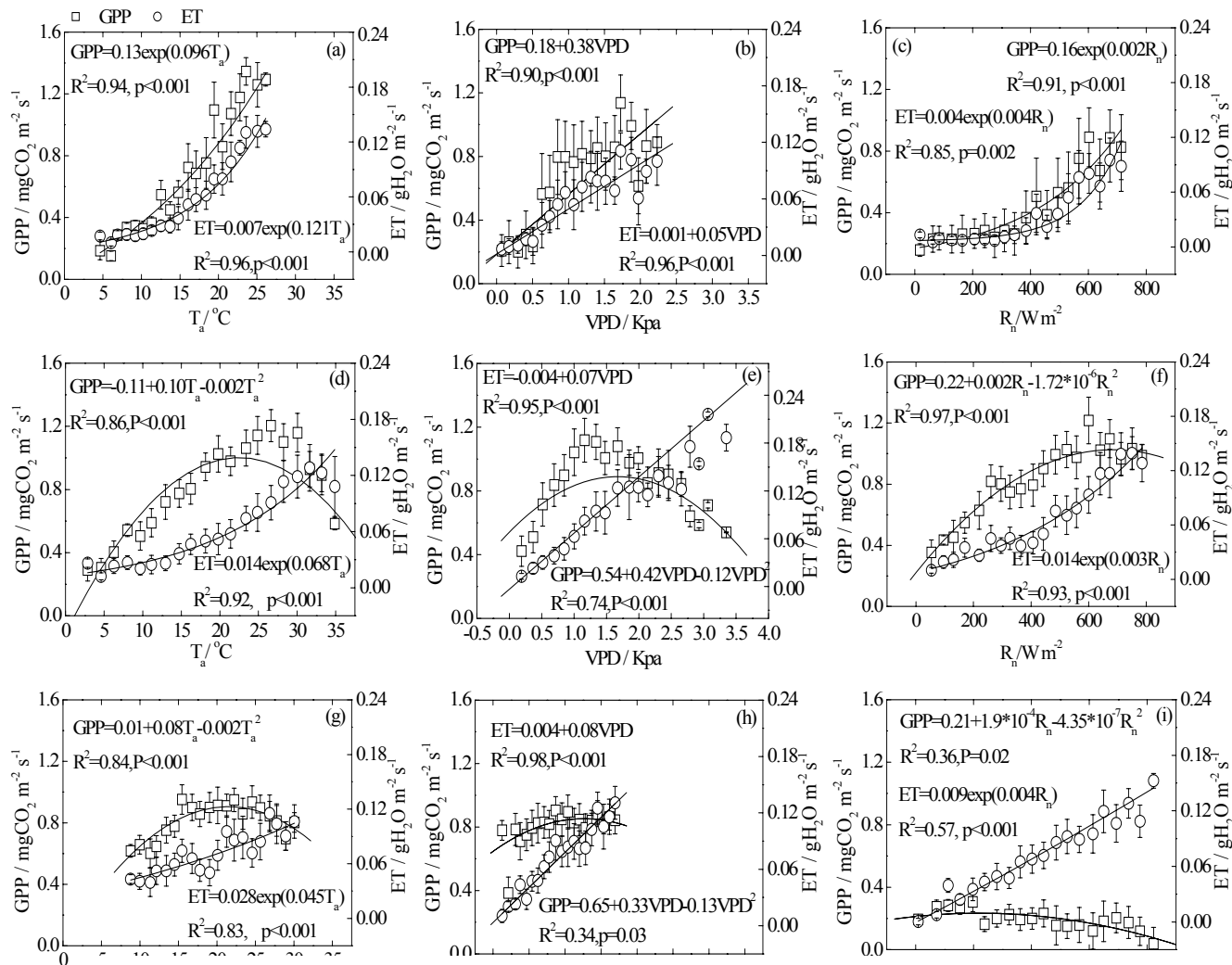
(Yu et al., 2008; New Phytologist)

中国东部森林生态系统WUE与气候因子之间的关系

季节性的环境变化对GPP和ET的驱动作用的差异是导致WUE的保守性和变异性的主要原因；

温带森林环境变化对GPP和ET的驱动作用同步特征，WUE表现为保守性；

亚热带生态系统环境变化对GPP和ET的驱动作用不同步，导致WUE的季节变异。

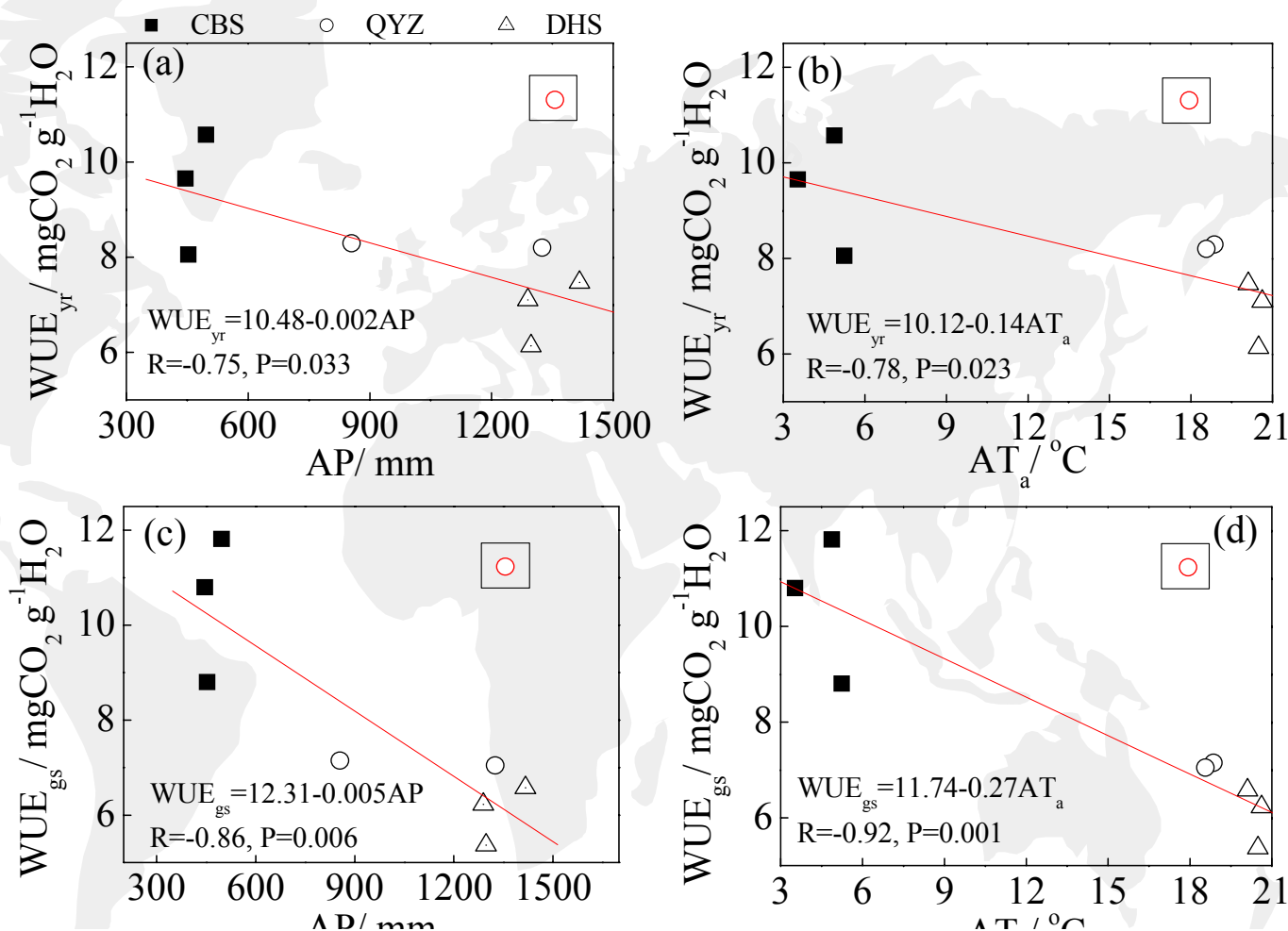


2003-2005年GPP、ET和气候变量(Ta, VPD, Rn)的关系

(Yu et al., 2008; New Phytologist)

中国东部森林生态系统WUE与气候因子之间的关系

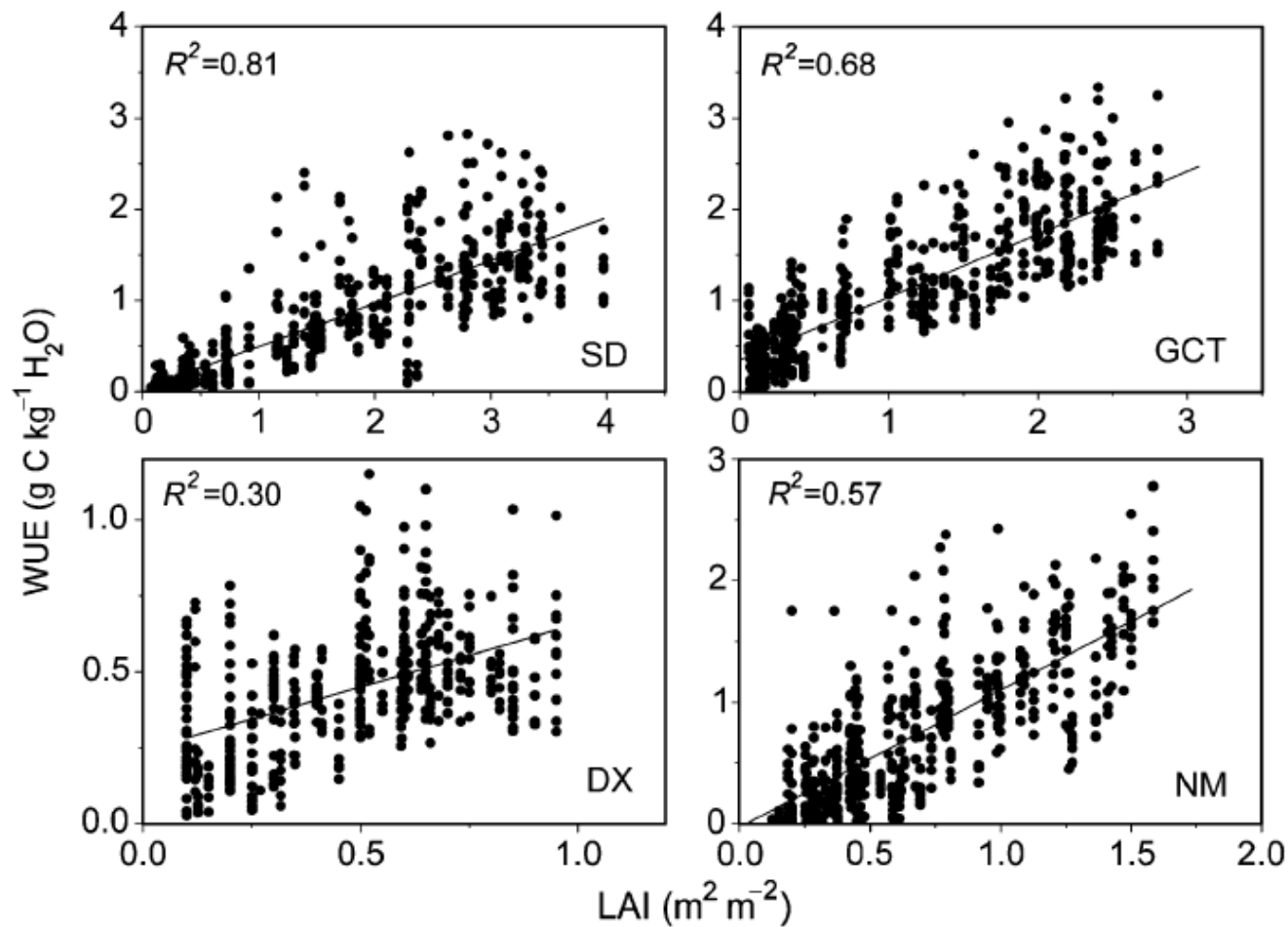
3年的观测
资料表明年
降水量(AP)
和年平均温
度(AT_a) 是
决定生态系
统 WUE_{gs} 和
 WUE_{yr} 格局变
化关键因子



WUE_{gs} 和 WUE_{yr} 随年降水量(AP)和年平均温度(AT_a)的变化

(Yu et al., 2008; New Phytologist)

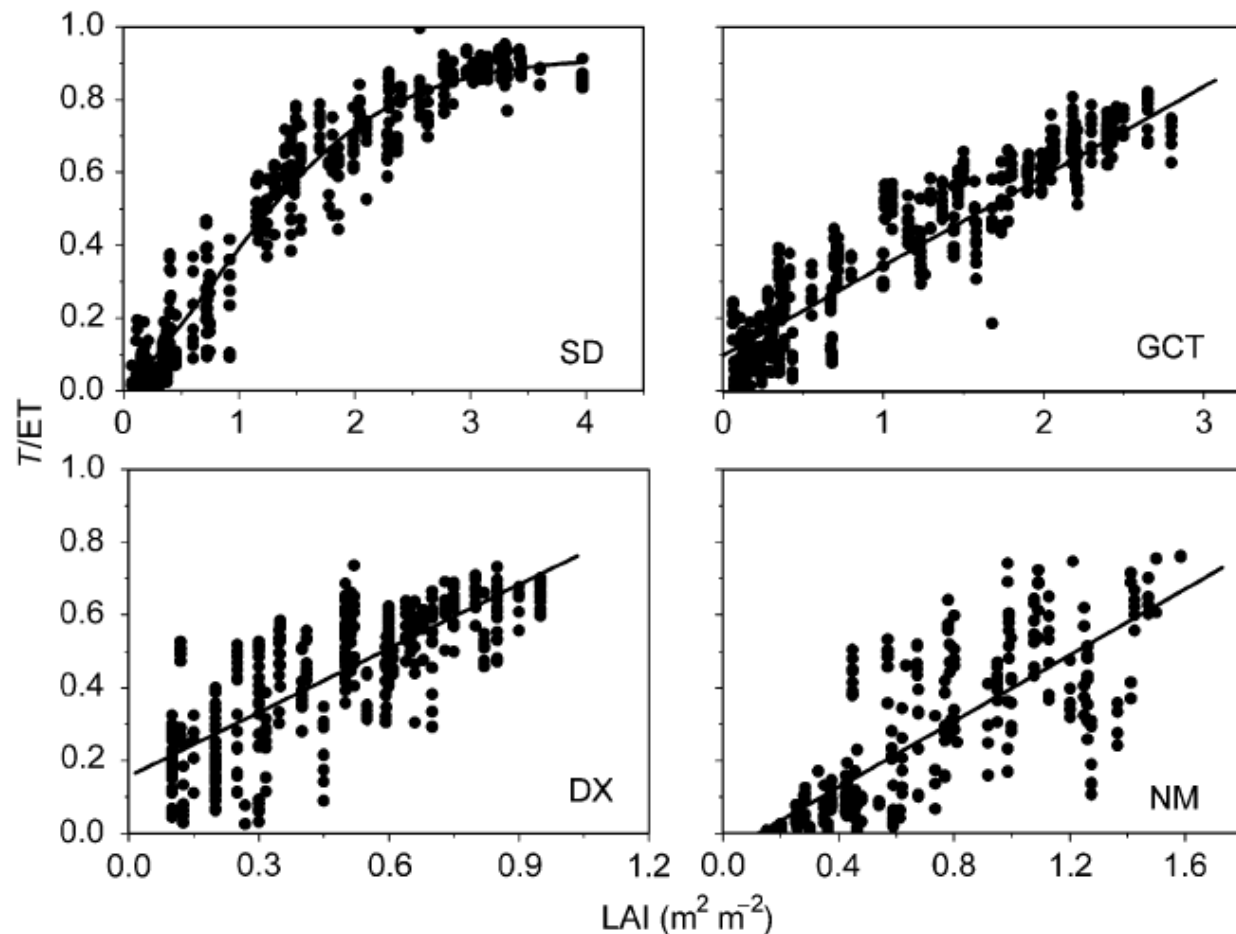
3.3 中国草地生态系统WUE的植被控制效应



四种草地生态系统LAI对WUE具有明显的正效应，DX
站点相关性最弱

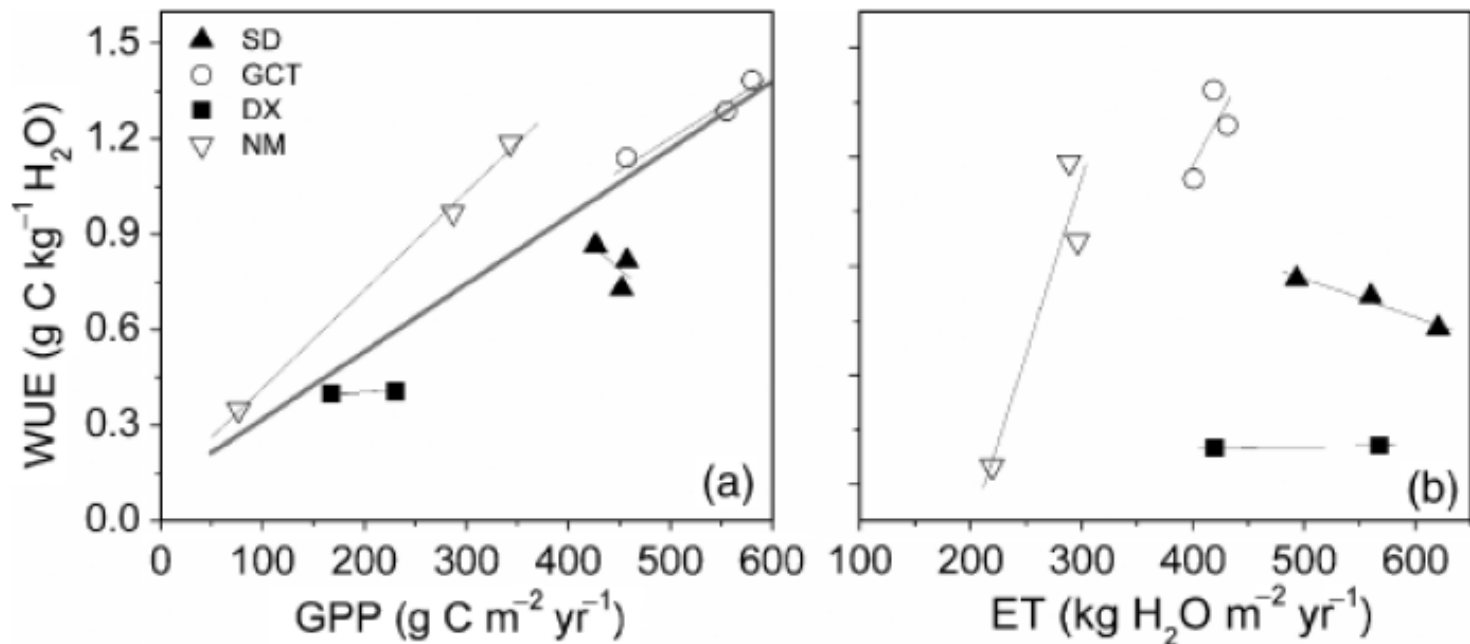
(Hu et al., 2008; Global Change Biology)

中国草地生态系统WUE的植被控制效应



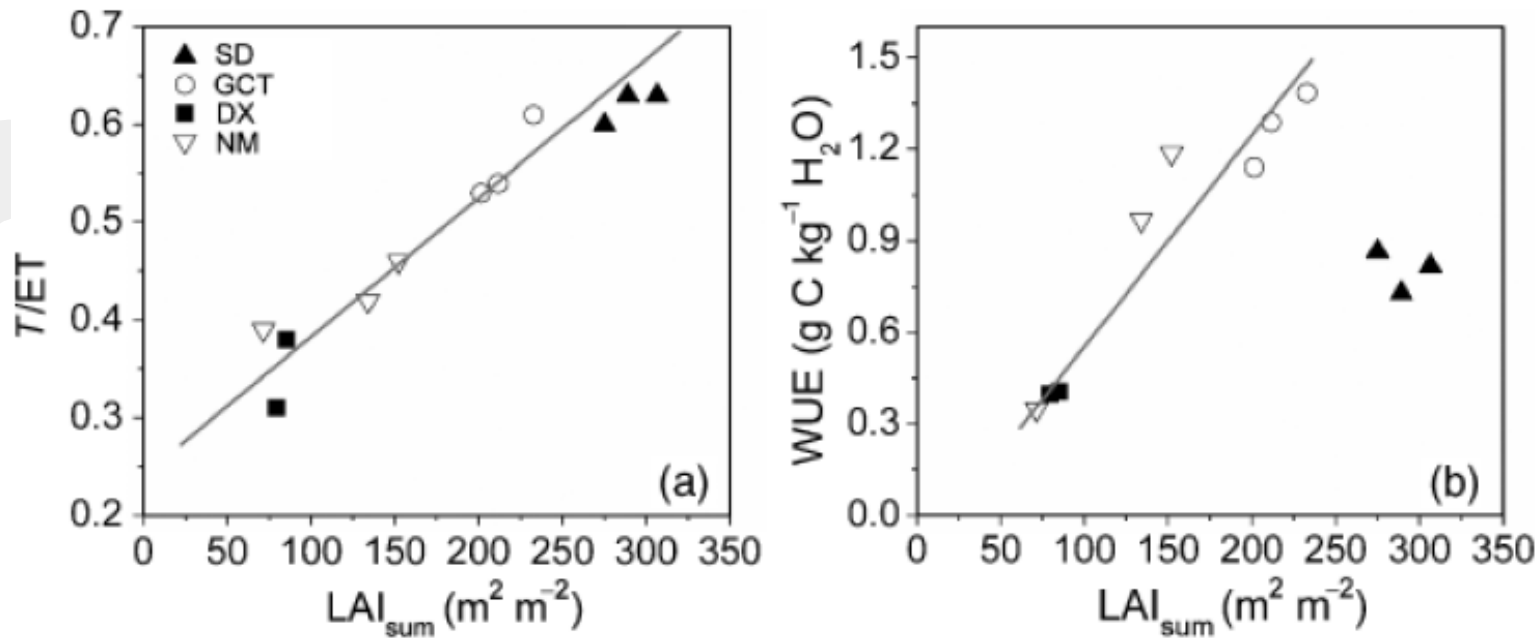
在生长季内，LAI的增加能显著提高 T/ET ，但LAI与 GPP/T 均无显著相关关系。在SD站点， T/ET 随LAI的增加而升高趋势逐渐减缓，当LAI达到约 $3 m^2 m^{-2}$ 时， T/ET 不再增加。

中国草地生态系统WUE的植被控制效应



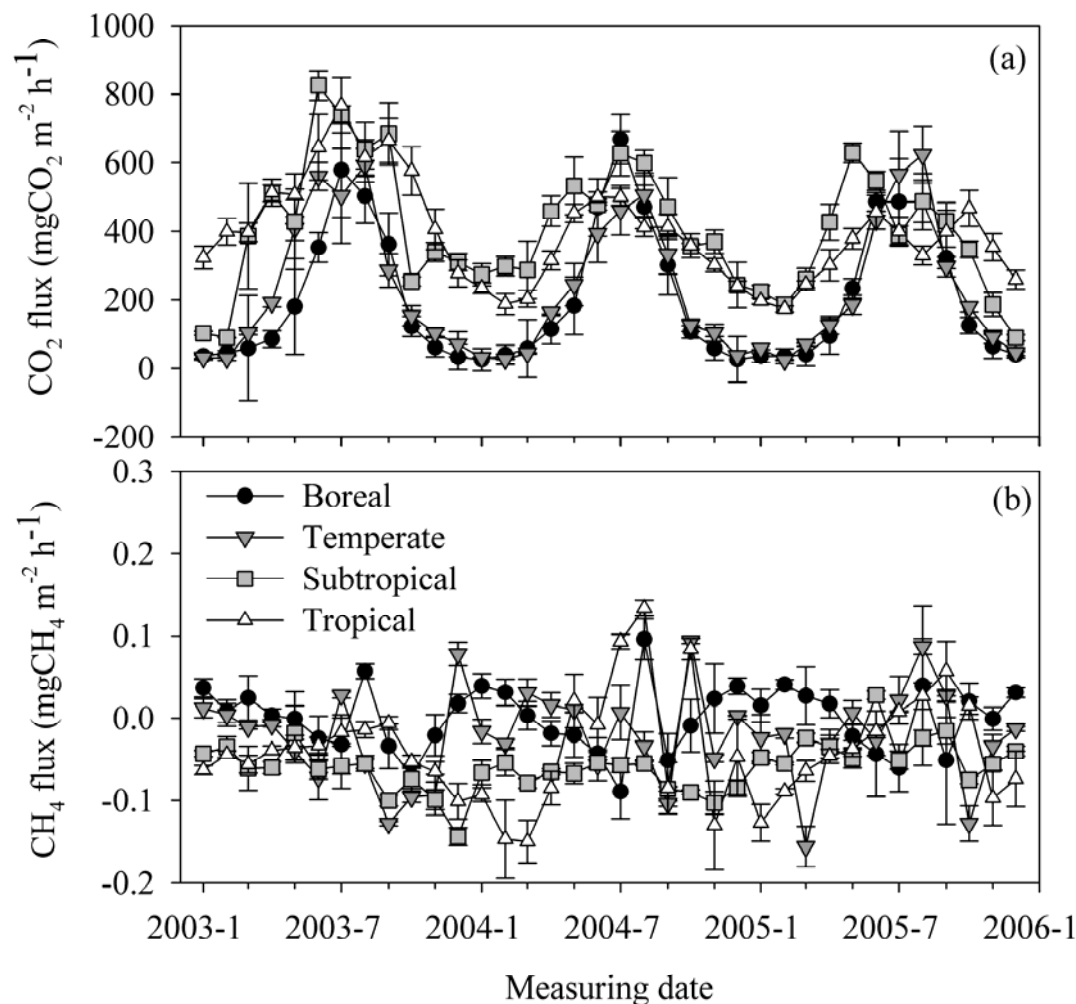
不同生态系统WUE对GPP响应的敏感性存在一定差异，其中NM和GCT最为敏感，生产力的增加能显著地提高生态系统WUE，而DX的WUE表现得较为保守，GPP的年际变化对WUE的影响程度弱于其它生态系统。

中国草地生态系统WUE的植被控制效应



LAI_a通过影响生态系统的水分平衡对WUE的年际变化以及生态系统间的差异也起着重要的作用。对单个生态系统而言，LAI_a高的年份其T/ET也较高；在生态系统之间，LAI_a高的生态系统的T/ET和WUE一般也较高（左图）。除了SD外，LAI较高的GCT具有较高的WUE，而LAI低的DX的WUE也最低（右图）。

3.4 中国东部老龄林土壤-大气碳交换的环境控制机制

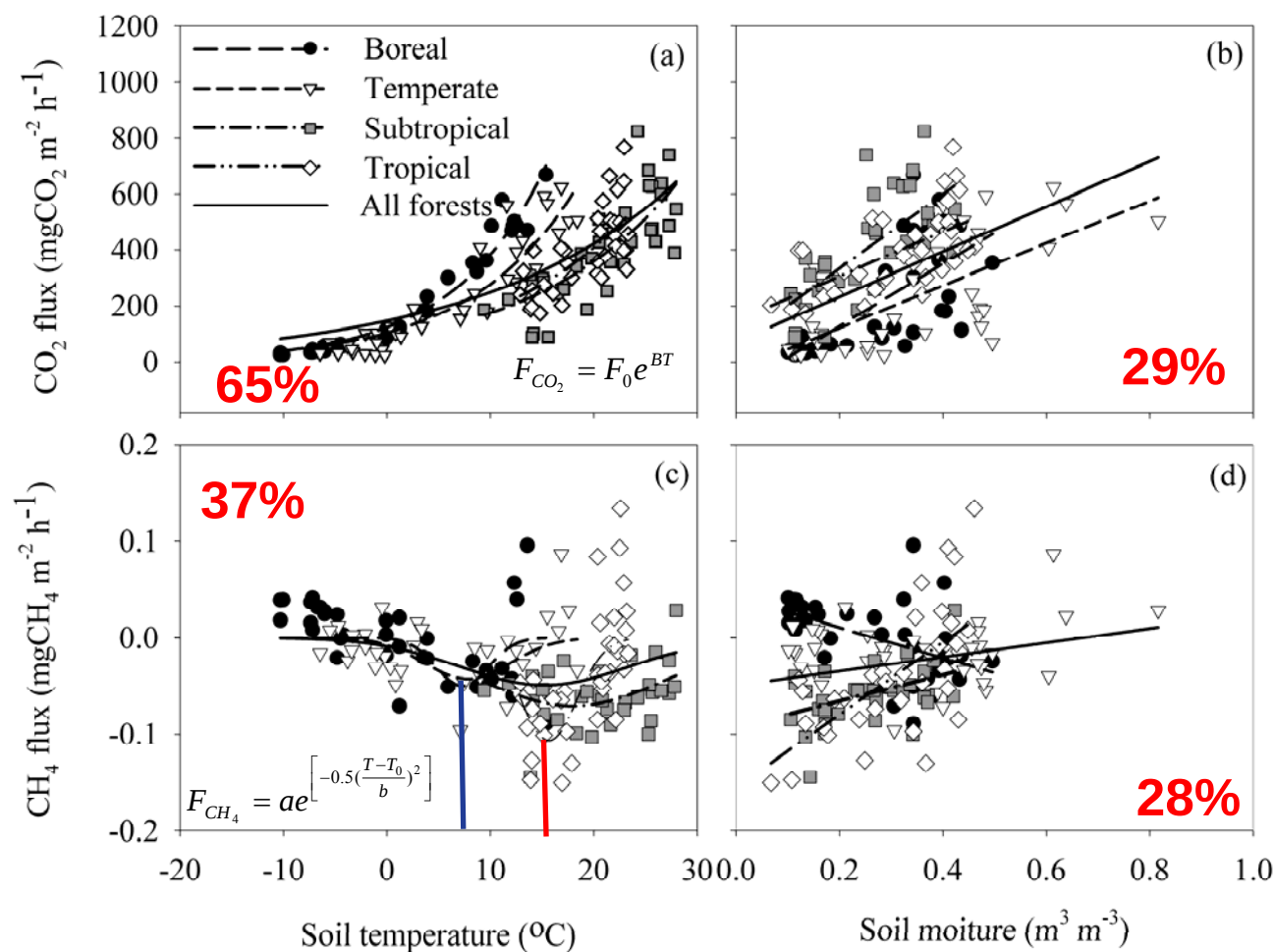


□ 森林土壤 CO₂ 通量变化范围为18.09~20.08 Mg CO₂ ha⁻¹ yr⁻¹, 生态系统类型间土壤CO₂排放的差异主要是由非生长季差异引起的。

□ 东部森林土壤表现为大气CH₄ 的汇 (-0.04 ~ -5.15 kg CH₄ ha⁻¹ yr⁻¹。北方森林最低, 亚热带森林最高。

(Fang et al., 2009; Biogeosciences)

中国东部老龄林土壤-大气碳交换的环境控制机制

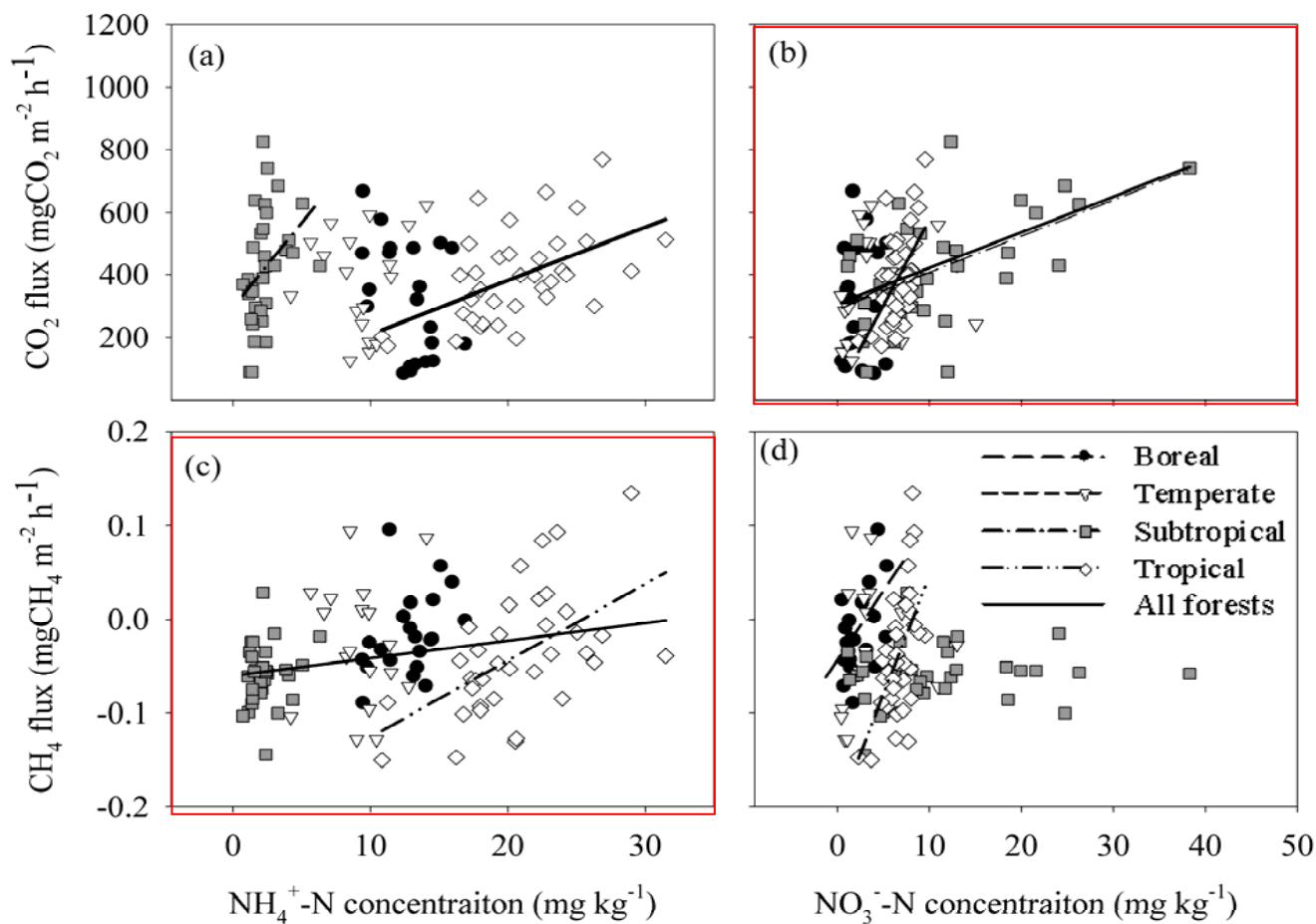


(Fang et al., 2009; Biogeosciences)

森林土壤CO₂排放主要受温度驱动，其次为水分。

森林土壤CH₄通量主要受水分控制，其对温度的响应取决于土壤临界温度，北方森林和温带森林7-8°C，热带和亚热带森林为15-18°C，平均15°C。

中国东部老龄林土壤-大气碳交换的环境控制机制

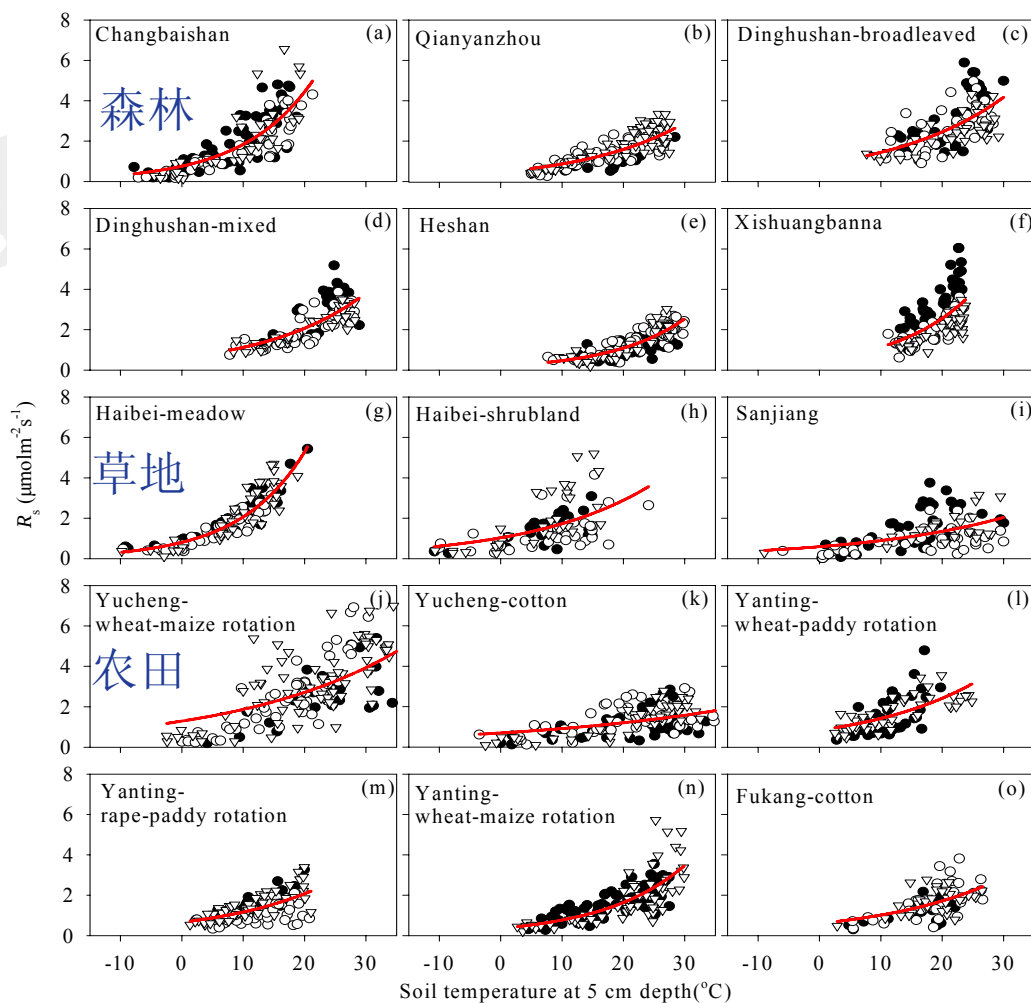


(Fang et al., 2009; Biogeosciences)

■ 不考虑森林类型，土壤 NO_3^- -N累积与土壤 CO_2 排放通量一致，表明土壤硝化与有机碳分解两者密切耦合在一起。

■ 土壤 CH_4 通量与 NH_4^+ -N含量正相关，表明 NH_4^+ -N消耗有利于土壤 CH_4 氧化吸收，该结果能很好解释鼎湖山亚热带森林 CH_4 吸收最高现象。

3.5 中国典型生态系统土壤呼吸温度敏感性格局特征



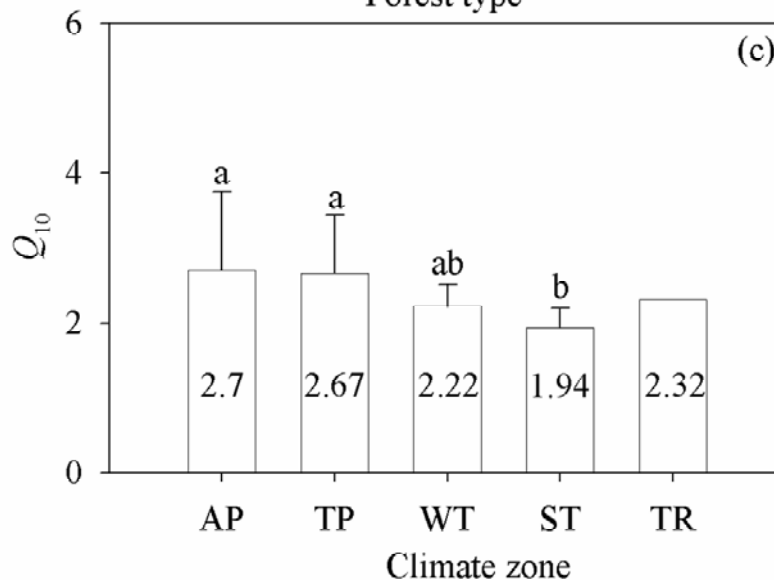
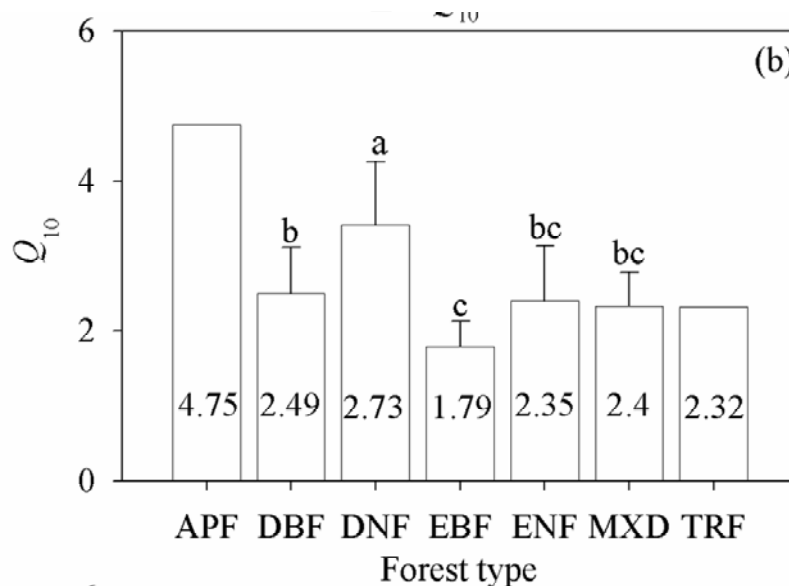
5cm 土壤温度能很好解释ChinaFLUX典型生态系统土壤呼吸, R^2 变化范围为 0.37 ~ 0.83。

自然生态系统 (森林、草地) 中土壤呼吸与温度的关系较农田生态系统更为密切;

农田管理 (如翻耕), 改变了土壤的空隙度或湿度, 这会影响土壤呼吸, 从而影响温度对土壤呼吸的控制。

(Zheng et al.2009, Soil Biology and Biochemistry)

中国典型生态系统土壤呼吸温度敏感性格局特征

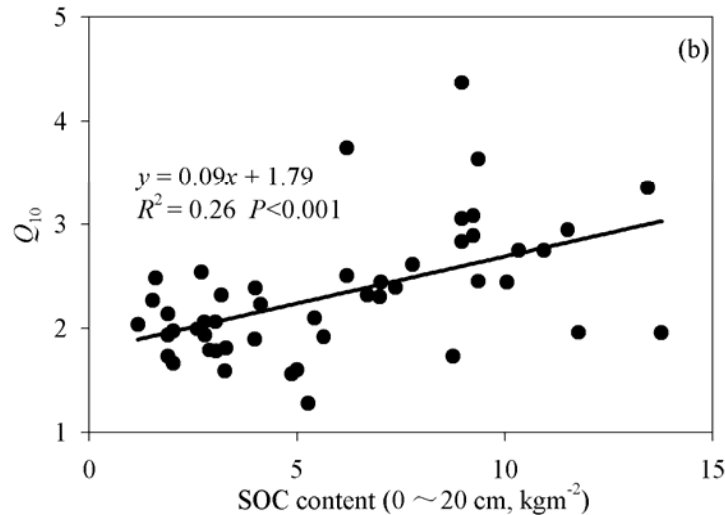
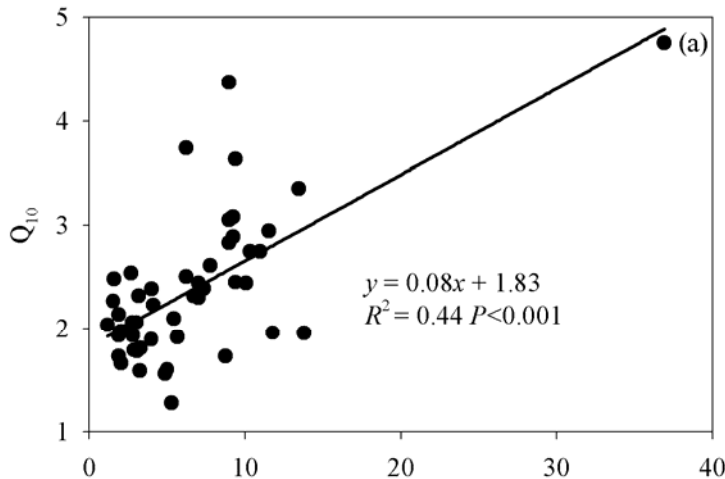


不同森林类型: Q_{10} 变化范围为1.79~4.75, 常绿阔叶林 (EBF) 土壤最低, 青藏高原高山森林 (APF) 土壤最高。

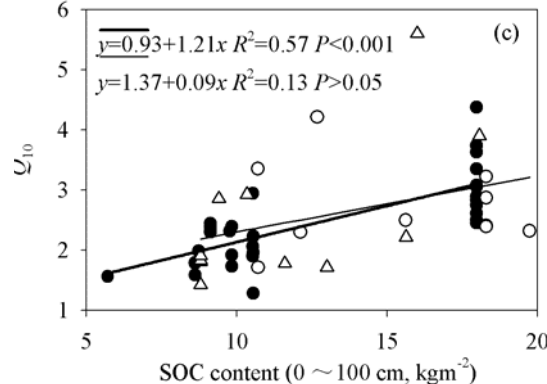
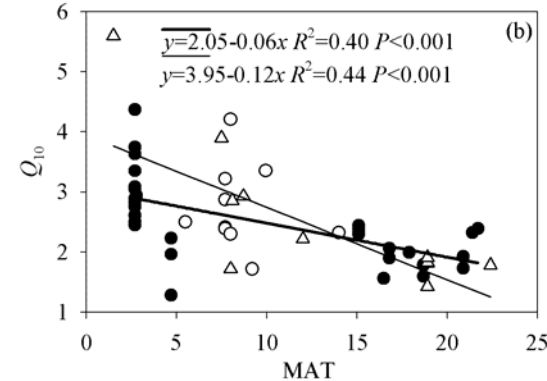
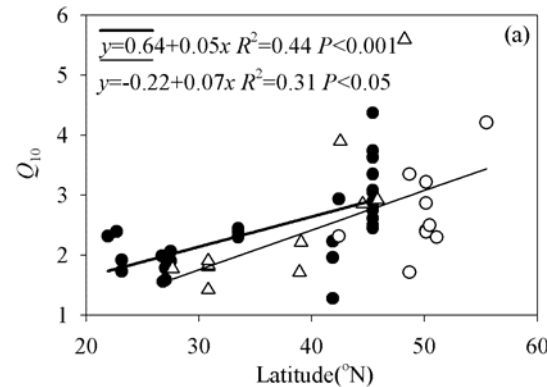
不同气候区: Q_{10} 变化范围为1.94~2.7, 亚热带气候区 (ST) 最低, 高山气候区 (AP) 最高。

(Zheng et al., 2009,
Soil Biology & Biochemistry)

中国典型生态系统土壤呼吸温度敏感性格局特征



(Zheng et al., 2009, Soil Biology & Biochemistry)



□ Q_{10} 除了与测定的气温呈负相关外，还与SOC含量、纬度呈显著的正相关。

□ Q_{10} 的空间变化主要由温度、SOC和森林类型决定。低温和高SOC含量的森林倾向于具有更高的温度敏感性。

土壤呼吸的地学统计模型(GSMSR)建立

TP模型

$$R_{s,monthly} = F \cdot e^{QT} \cdot P / (P + K)$$

$$R_{s,monthly} = (R_{SOC=0} + M \cdot SOC) e^{QT} (P + P_0) / (P + K)$$

$$R_{s,monthly} = (R_{SOC=0} + M \cdot SOC) e^{\ln \alpha e^{\beta \cdot T} \cdot T / 10} (P + P_0) / (K + P)$$

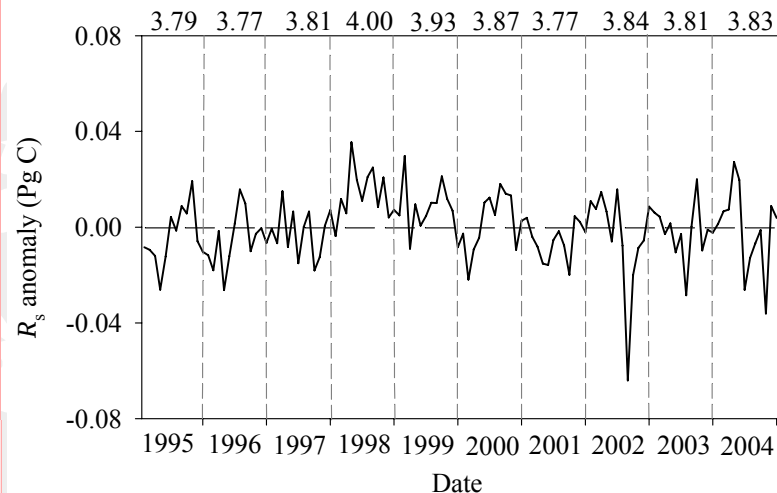
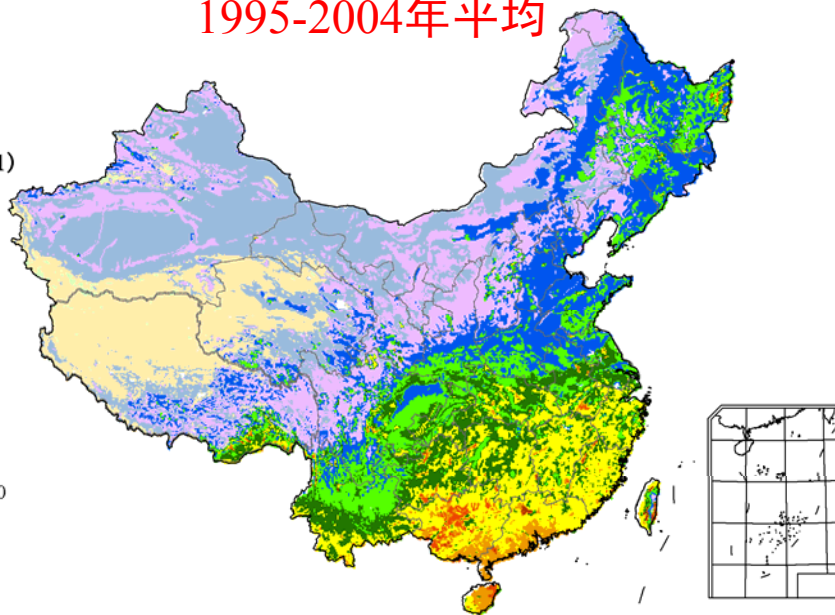
GSMSR模型

土壤呼吸时空分布特征：空间与年际变异

1995-2004年平均

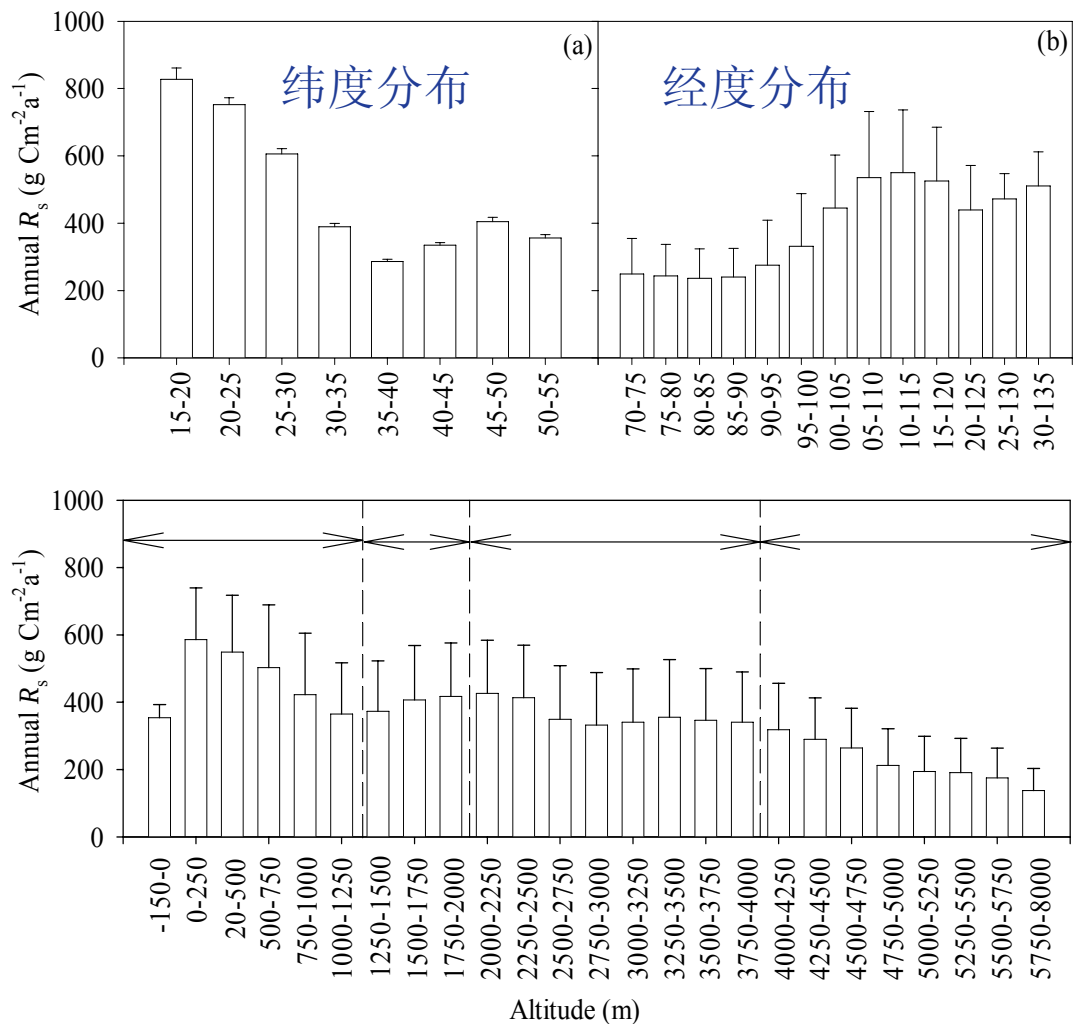
Annual R_s
(g C m⁻² yr⁻¹)

0 - 100
100 - 200
200 - 300
300 - 400
400 - 500
500 - 600
600 - 700
700 - 800
800 - 900
900 - 1000
>1000



- 受气温、降水量和土壤有机碳密度空间分布的控制，中国区域土壤呼吸年总量呈现从西北向东南逐渐递增的趋势。
- 1995~2004年中国区域土壤呼吸的年总量的平均值为3.84 Pg C (3.77-4.00)。
- 土壤呼吸月距平的波动范围为-0.064~0.035 Pg C

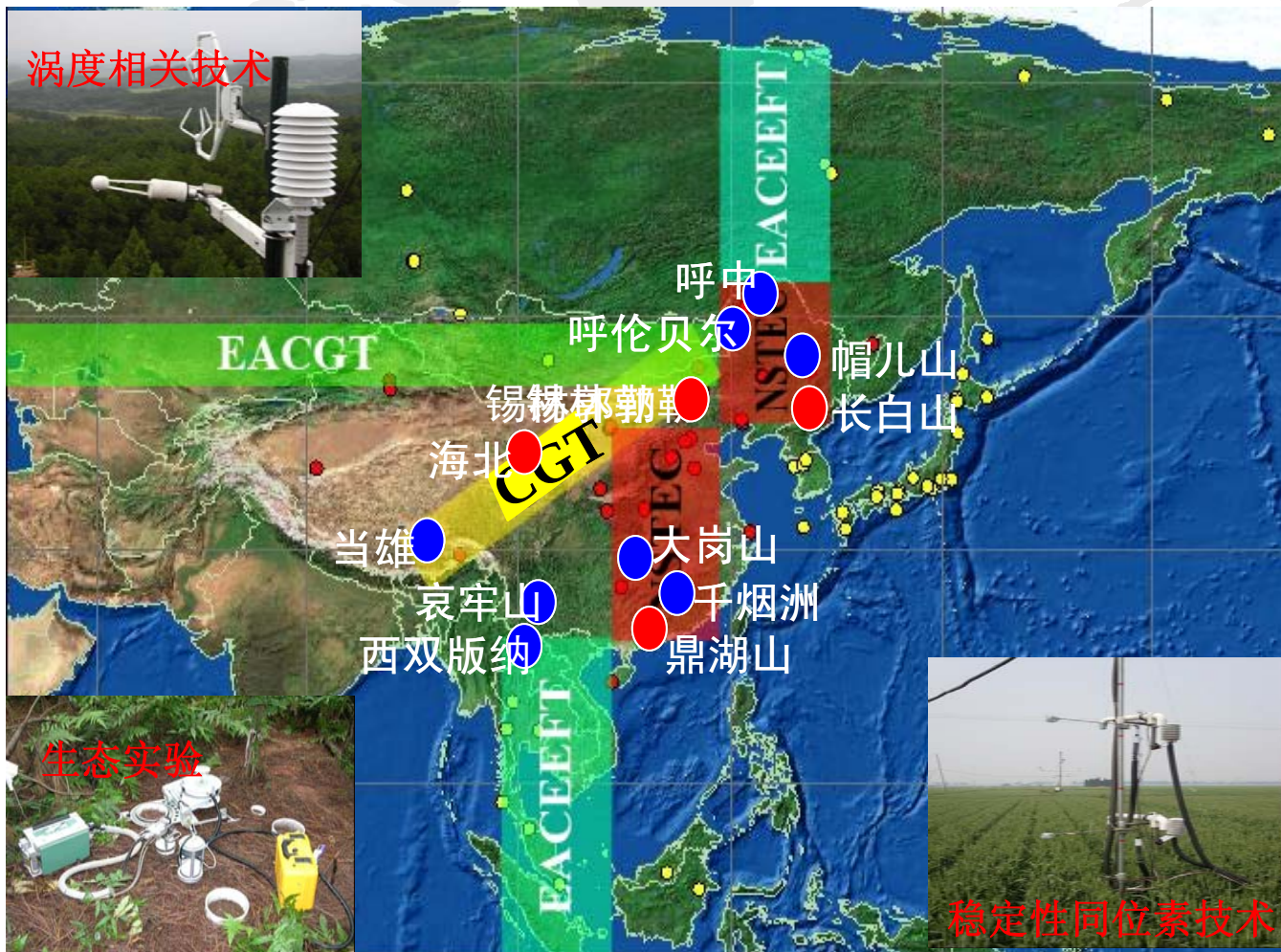
土壤呼吸的地理格局分布特征



- 随着纬度的升高土壤呼吸年总量先下降后上升
- 随着经度的增加土壤呼吸年总量呈明显增加趋势
- 不同海拔梯度下，土壤呼吸的的层级规律明显

四、结论与展望

样带尺度的通量观测

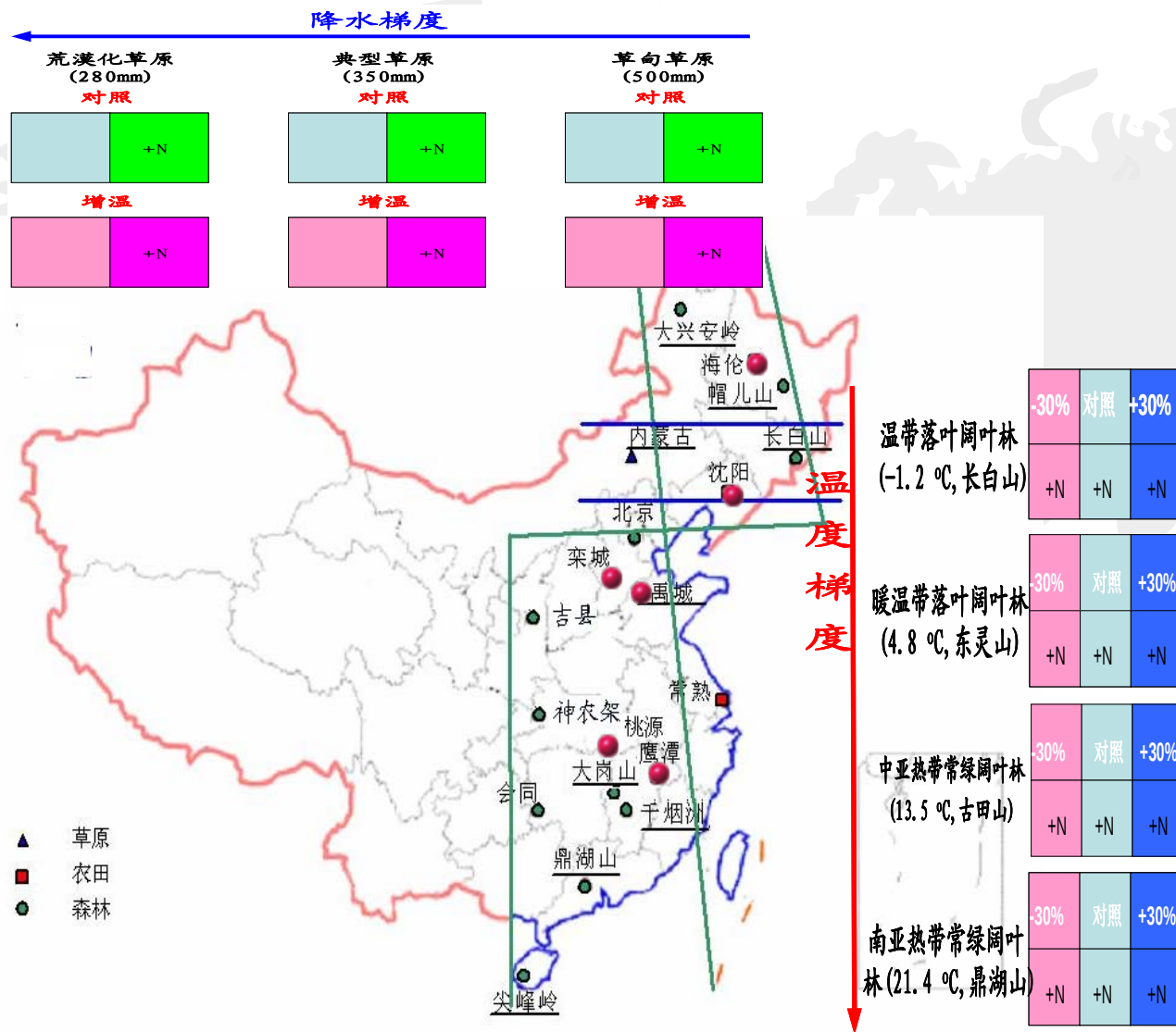


□ 多层次：超级站、重点站、普通站；

□ 多指标：碳、氮、水通量的联网综合观测

□ 多方法：涡度相关、同位素、生理生态实验、遥感。

样带尺度的原位控制试验

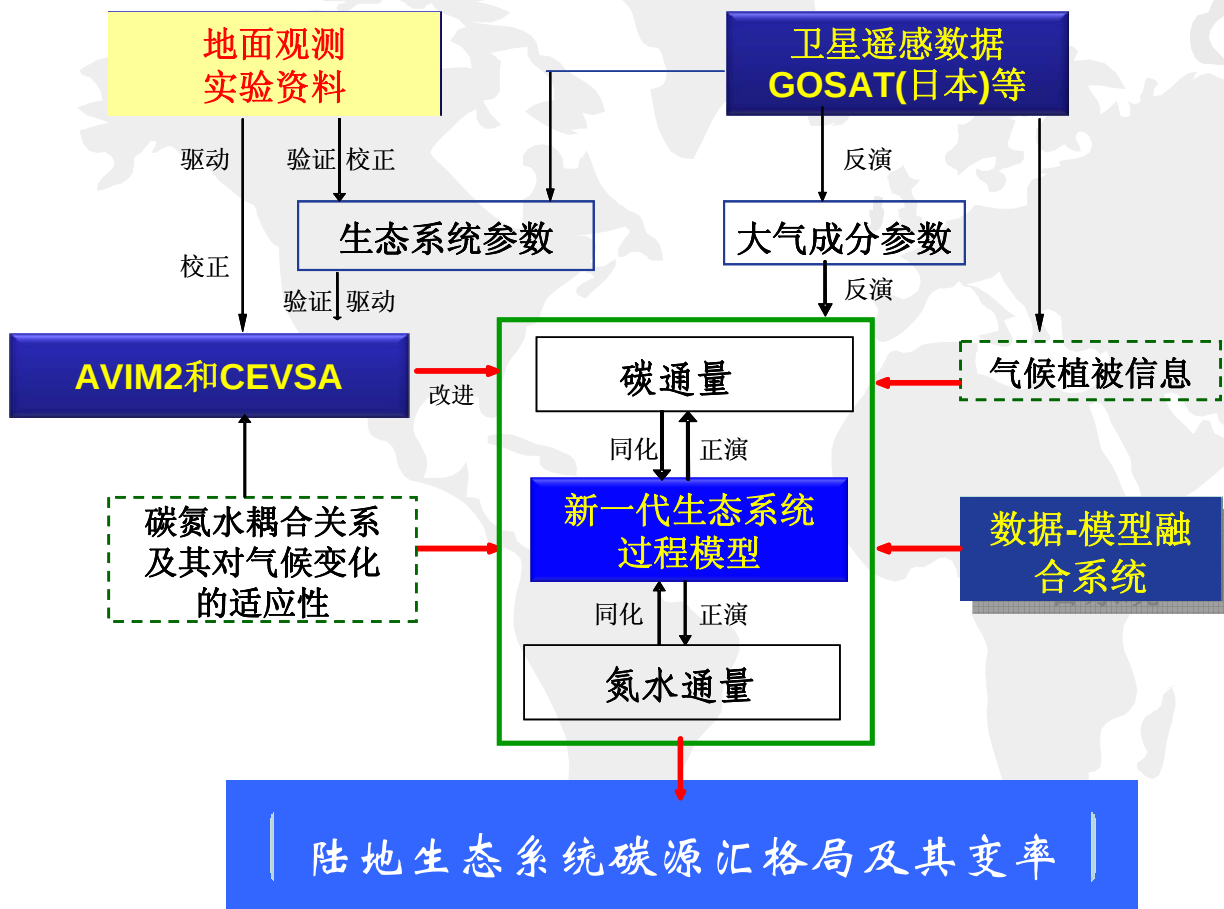


□ 多因子：增温、控水、氮沉降、CO₂富集、放牧；

□ 自上而下设计：统一研究内容，指标体系、观测技术和观测频率；

□ 自然梯度与控制因子相结合；控制实验与生物地球化学模型相结合。

陆地生态系统耦合模型的构建



通过模型-数据融合技术，充分利用多尺度观测数据来提高对陆地生态系统碳循环时空格局及其变率的认识和定量表达；

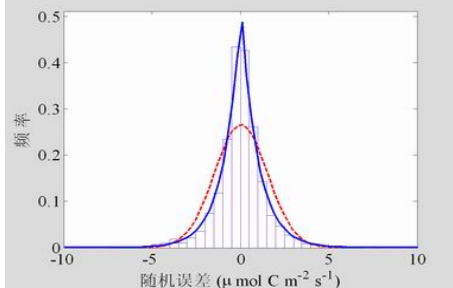
完善模型结构、机理过程，参比大量站点数据进行的调试和验证，真正实现多要素相互作用和反馈关系定量描述，建立新一代陆地生态系统过程模型。

ChinaFLUX 的数据-模型融合系统

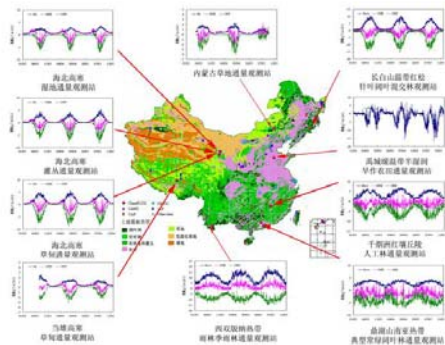


生态系统碳循环数据

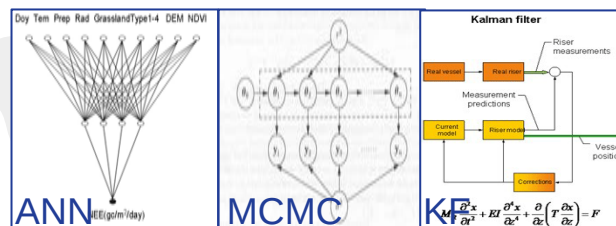
- 数据置信度明确
- 数据不完整，观测误差



NEE不确定性分析



站点尺度GPP/RE/NEP动态系列



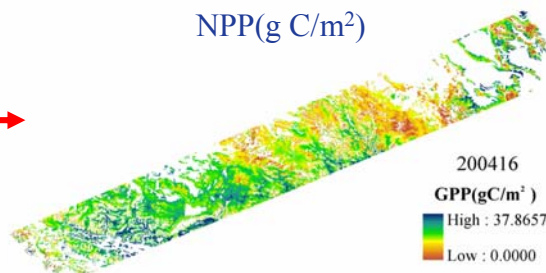
融合

综合分析

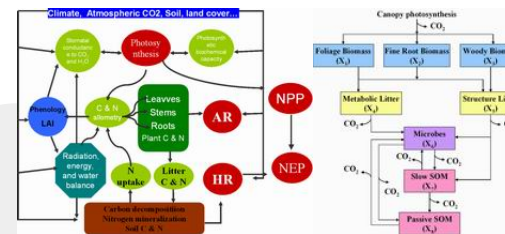
- 置信度明确，预测未来

区域/全国尺度

NPP(g C/m²)

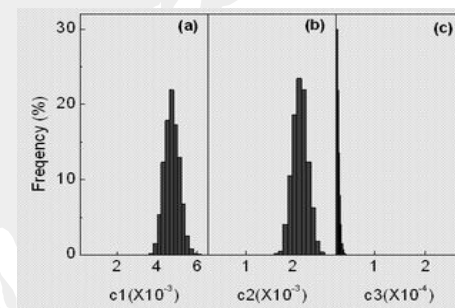


样带尺度GPP空间分布

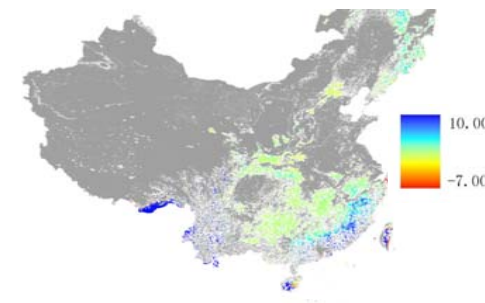


生态系统模型

- 理解机理，进行预测
- 结构不完善，参数不准确



2007C 参数估计(碳滞留时间)



全国尺度森林NPP空间分布

谢谢!

