

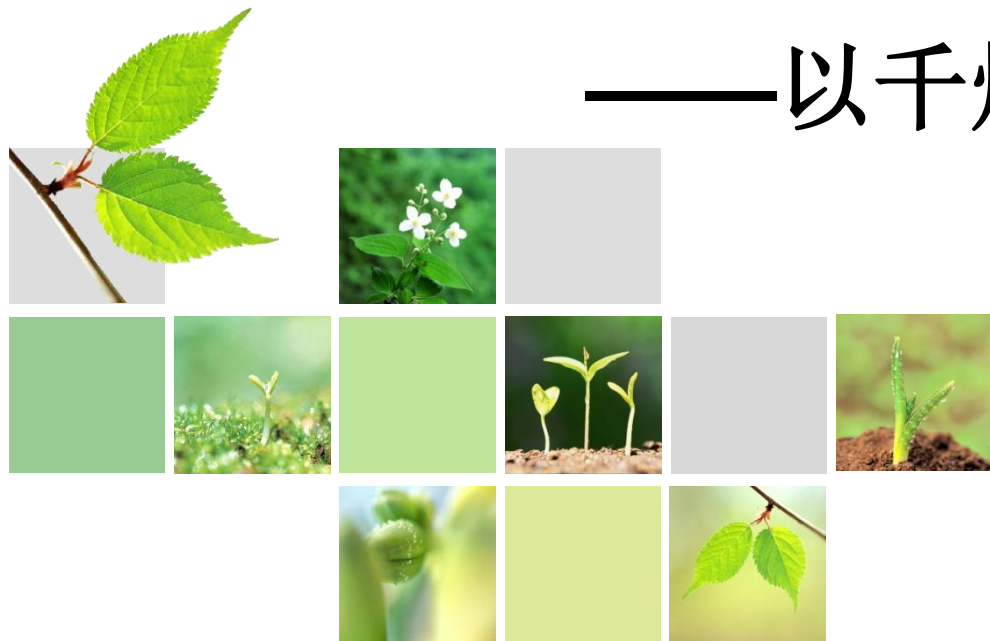


——通量观测、数据分析与研究应用

森林生态系统通量观测研究 ——以千烟洲站为例

温学发

中国科学院地理科学与资源研究所
生态系统观测与模拟重点实验室

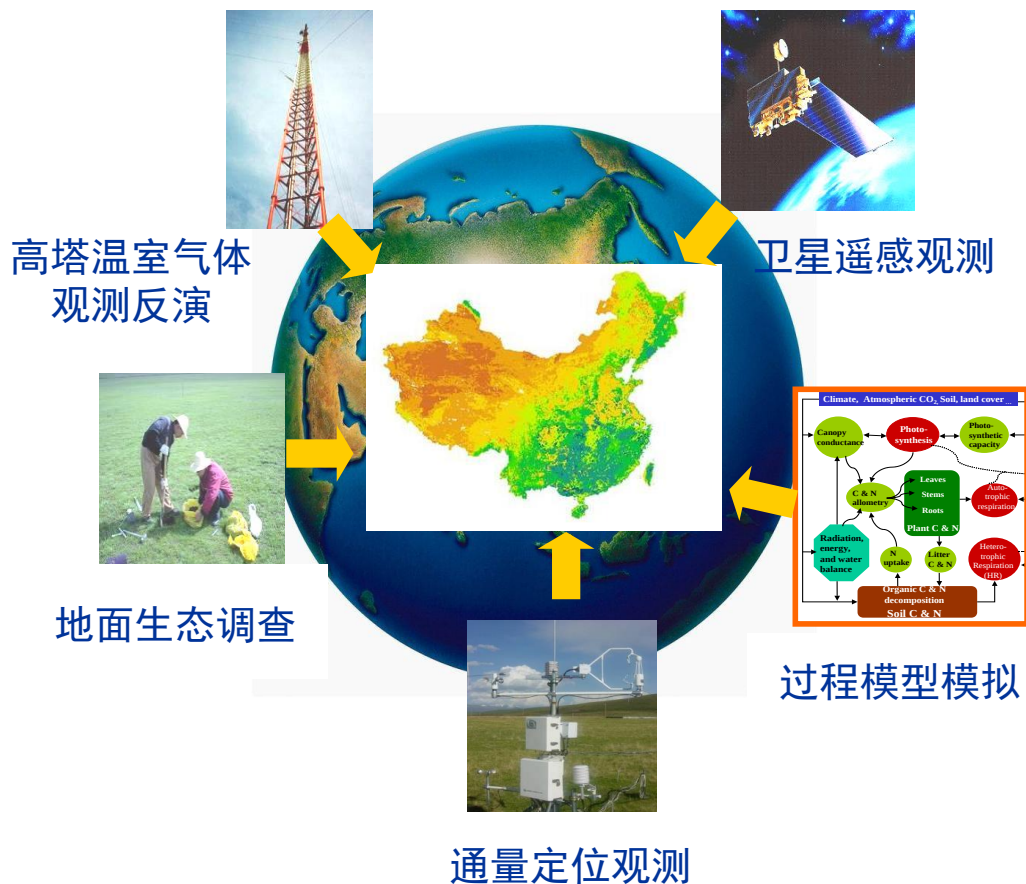
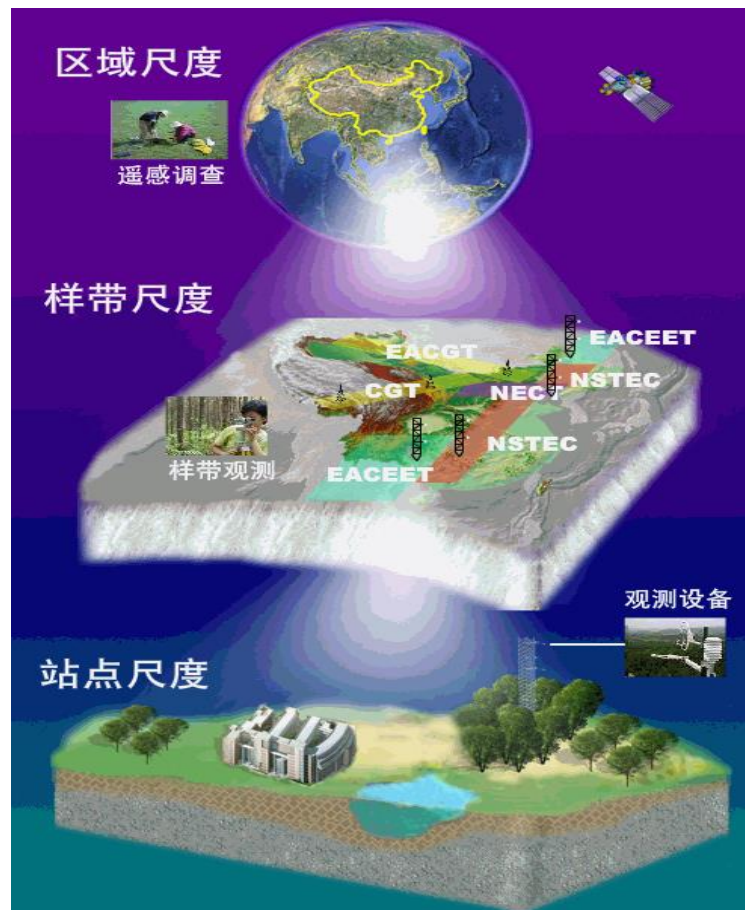


提纲

- 1、站点尺度的通量观测研究
- 2、标准样地的设置与调查
- 3、仪器配置与数据质量评价
- 4、碳水通量研究的应用案例
- 5、扩展研究的应用案例

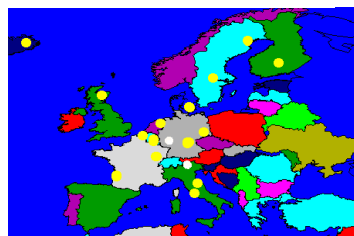
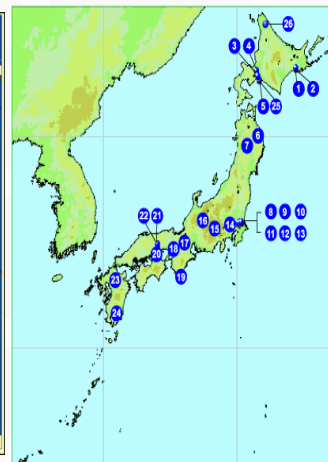
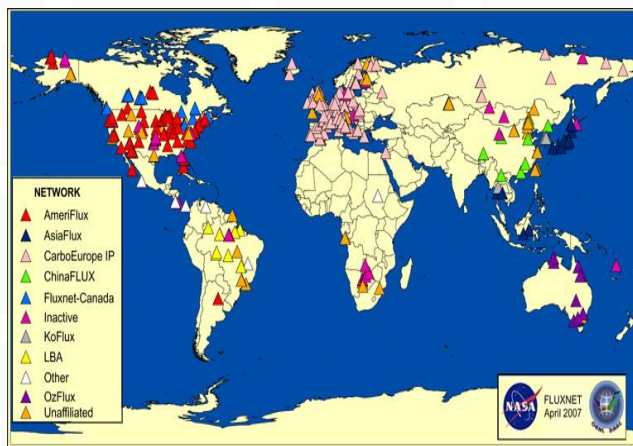
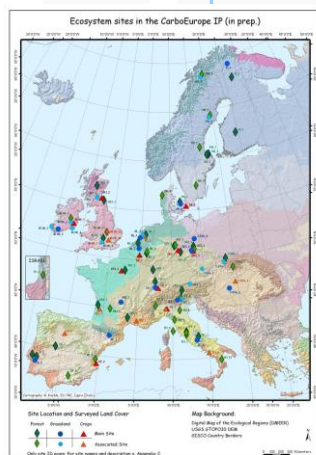
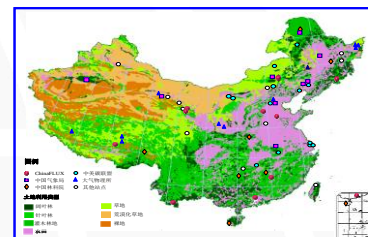
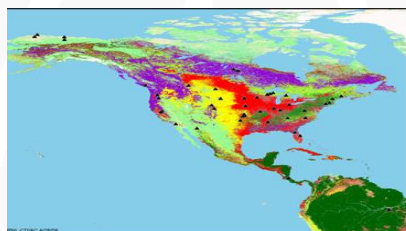
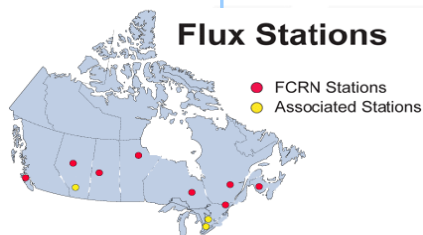


涡度相关技术：生态系统研究技术的革命



- 测定生态系统功能及其变化的重要技术手段；
- 陆地碳收支评估的主要技术途径之一；
- 天地一体化观测体系中核心组成部分。

全球通量观测研究网络(FLUXNET)

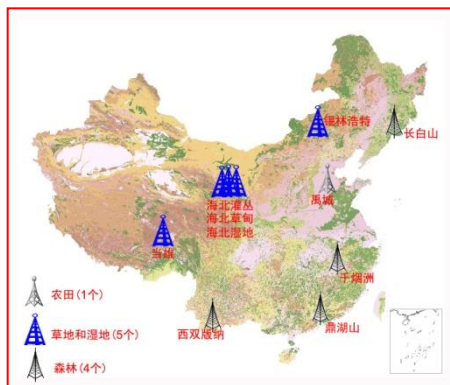


服务于气候变化的精细观测站（全球约700多个）

中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)



第一阶段



第二阶段



第三阶段



新阶段

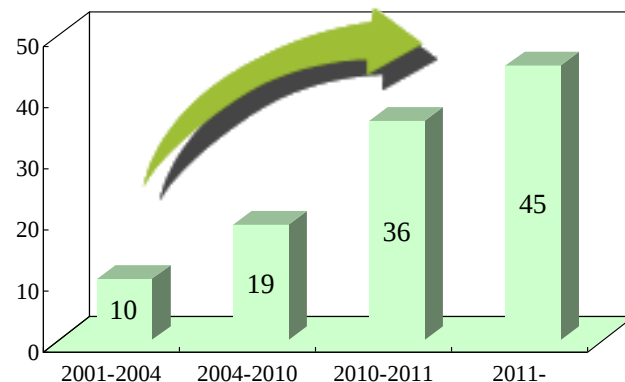


■ NSFC重大项目

■ CERN专项

■ 中国科学院战略性先导科技专项

- 中国科学院知识创新工程重要方向项目
- 国家重点基础研究发展计划项目
- NSFC重大研究项目
- NSFC重大国际合作研究A3前瞻计划项目



- 中国科学院知识创新重大项目
- 国家重点基础研究发展计划项目

站点尺度通量观测研究

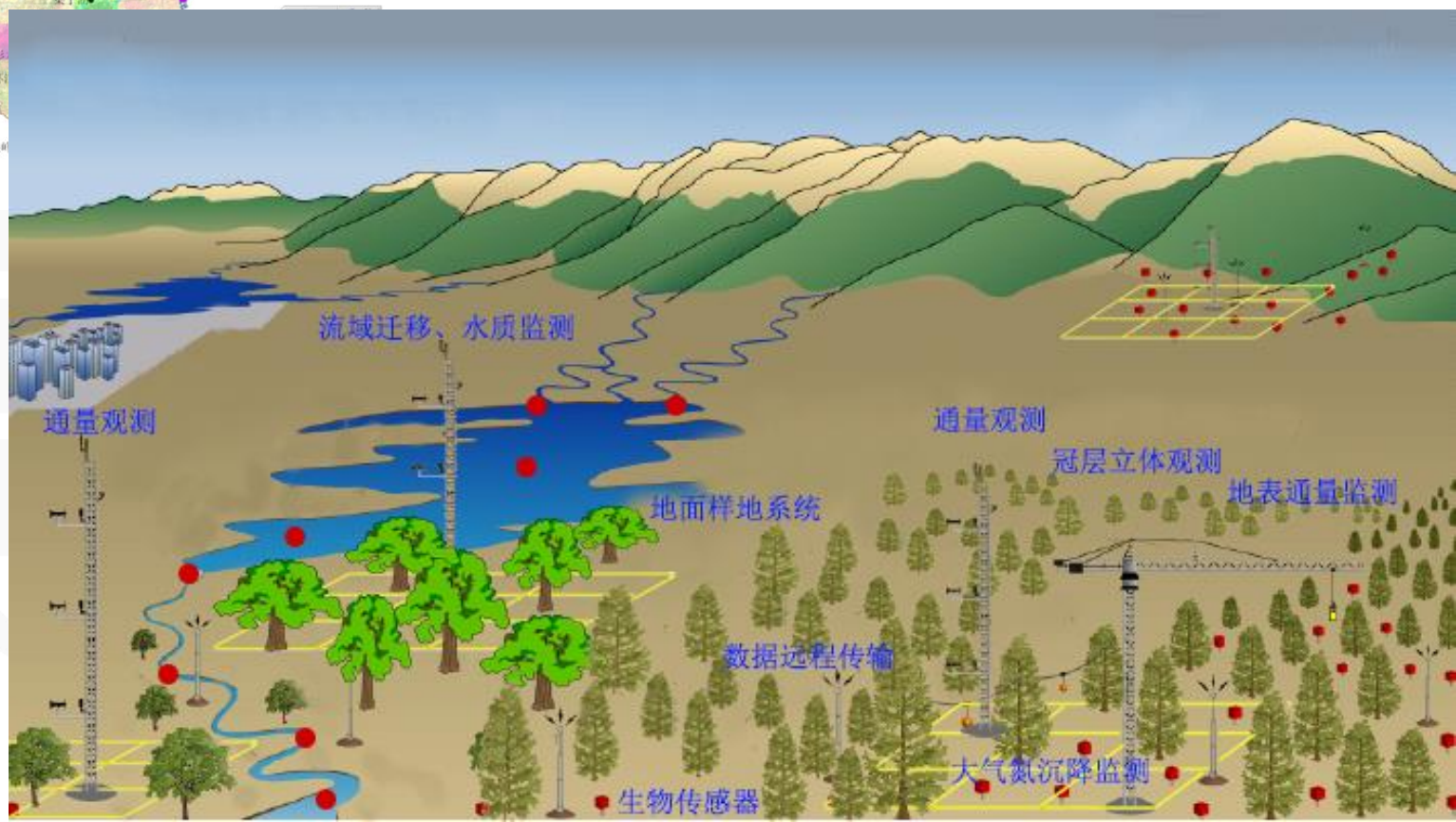
植被分布、气候区划

陆地样带、关键区域



观测站点

- 多塔联合观测系统
- 多目标温室气体通量观测系统
- 群落生态信息自动采集系统
- 流域输送与生态水文监测

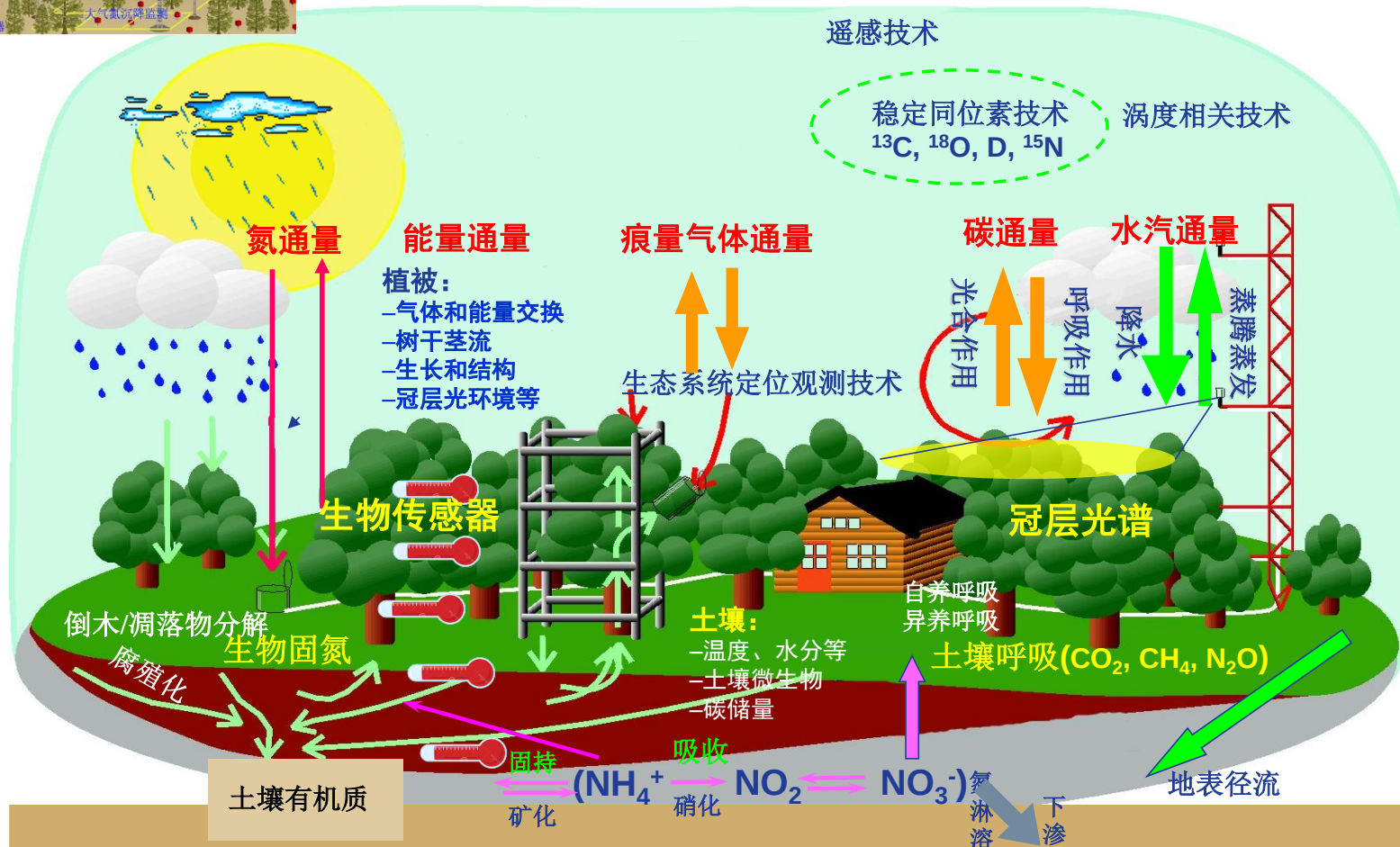


站点尺度通量观测研究

- 三大界面温室气体通量
- 稳定同位素通量
- 冠层光谱、物候等变化生物物理属性
- 叶片-根系-土壤生态信息的自动、连续采集



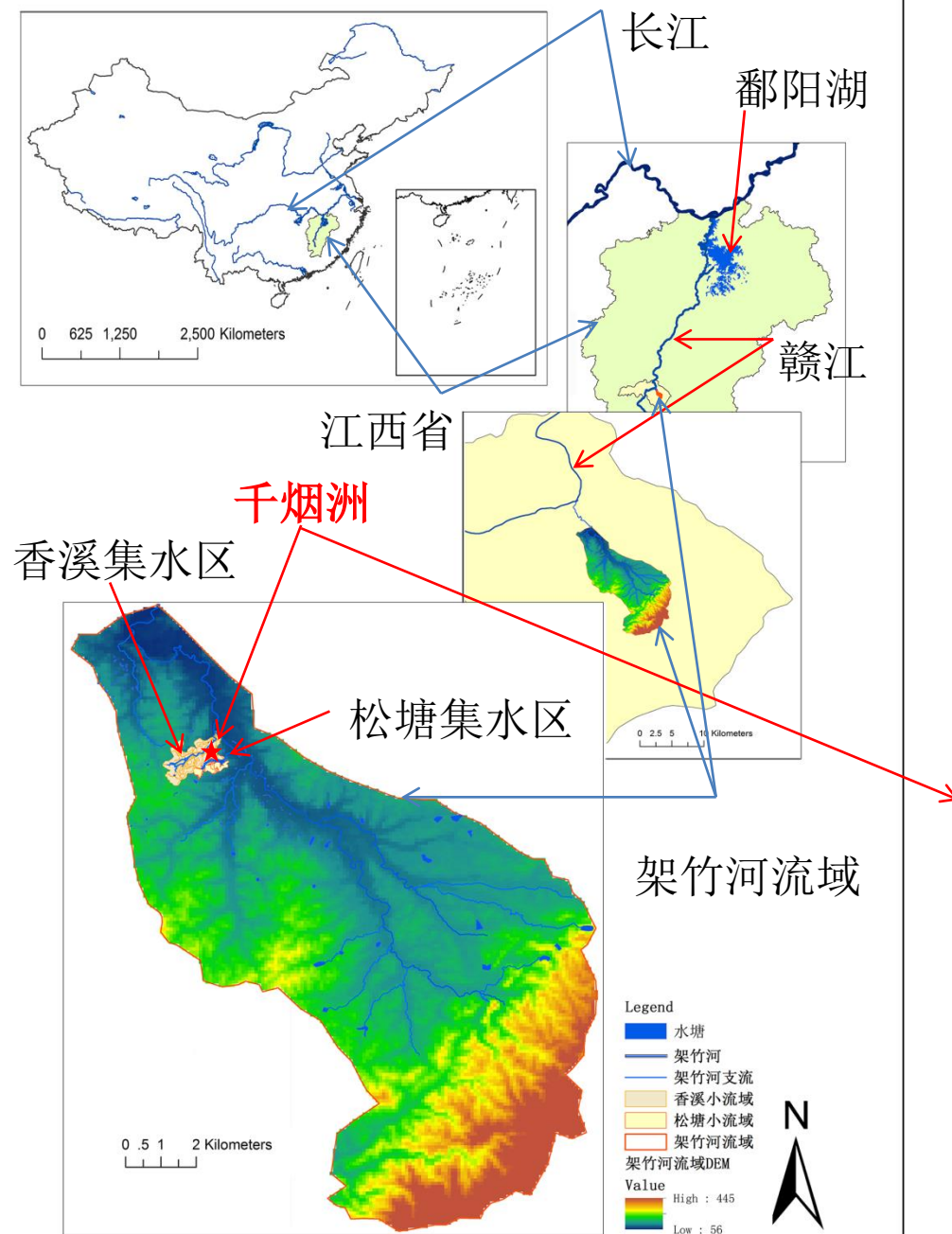
生态系统



千烟洲站 —— 一站四点布局



赣江支流架竹河流域示意图 ——千烟洲通量站



千烟洲站 —— 一站三塔布局

▶ [26.742N, 115.58E], ~100 m, 17.9 °C, 1485 mm

▶ 植被: 马尾松, 湿地松, 杉木, 农田

间伐补阔区

水田

对照区

2008年

图例

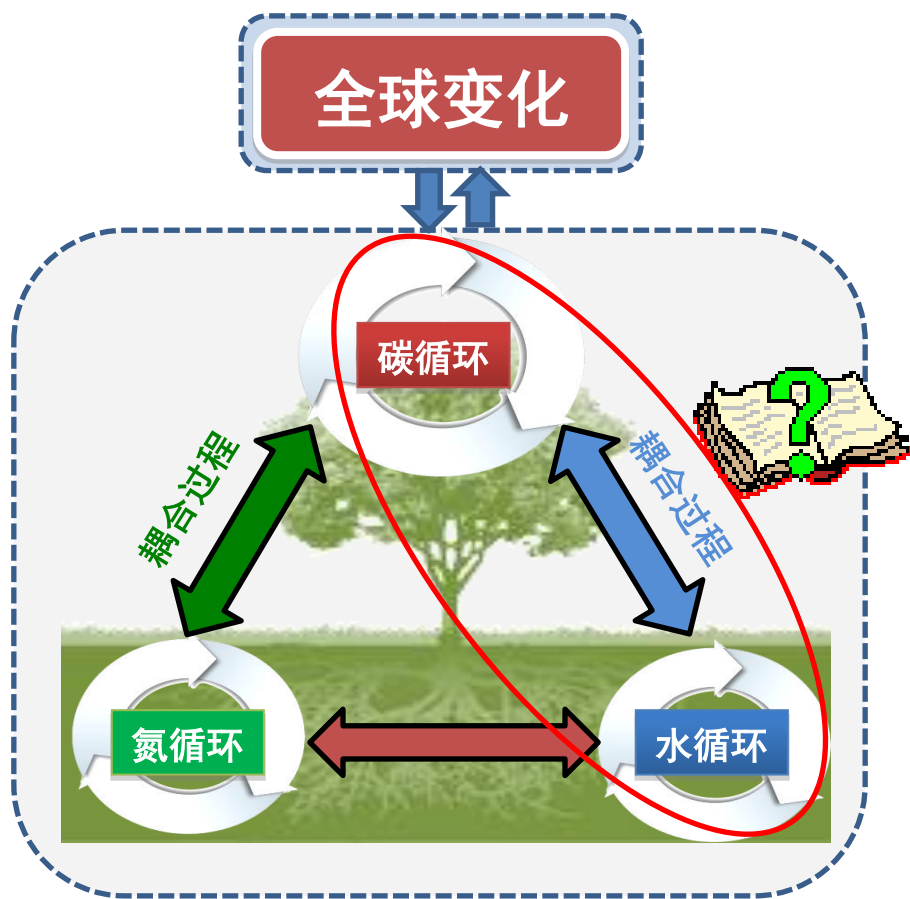


2002年

2012年



生态系统生态学



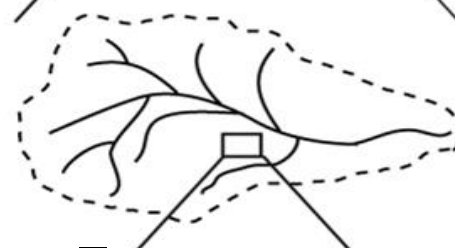
全球生态系统

5,000 km



流域生态系统

10 km

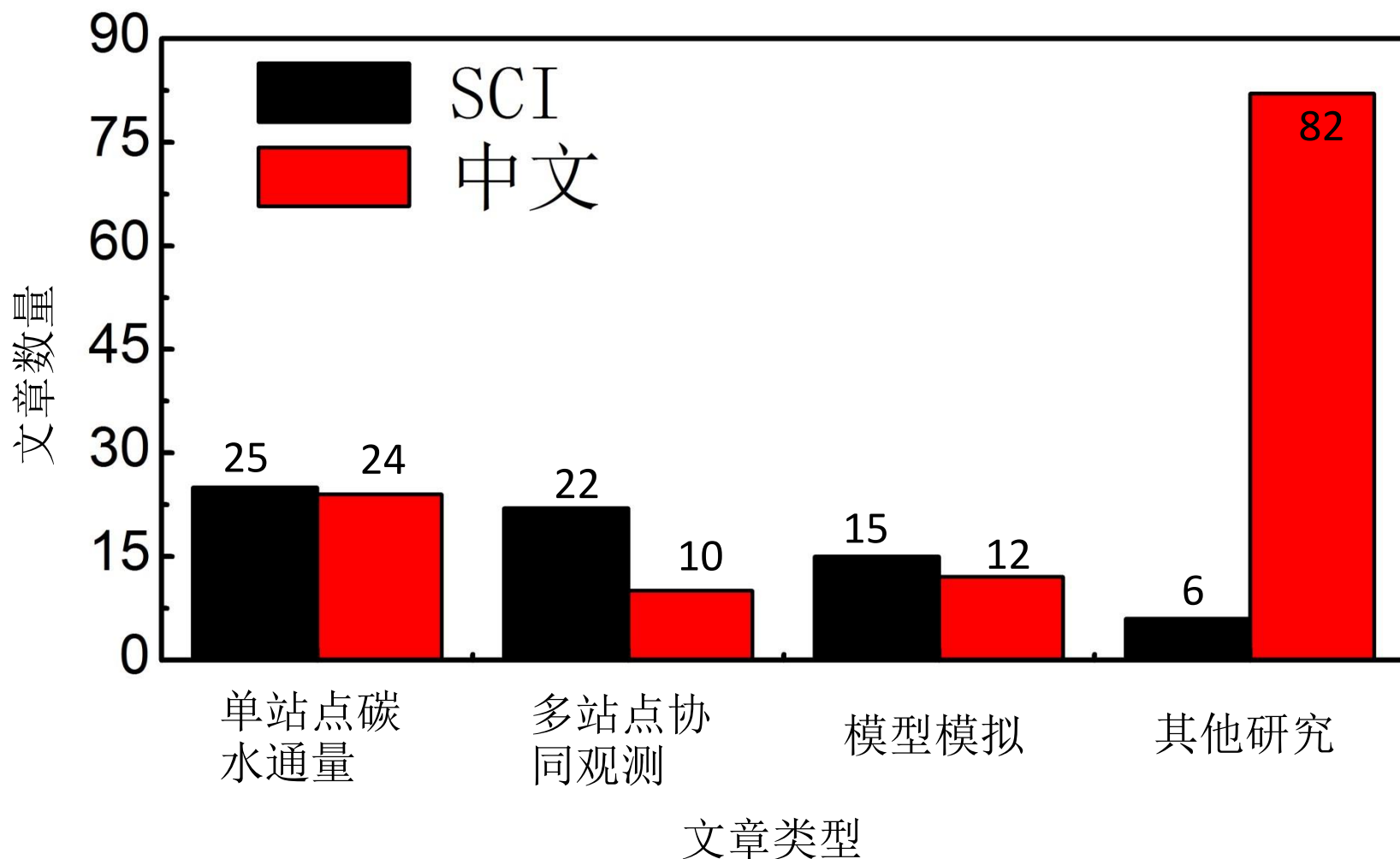


生态系统

1 km



站点尺度通量观测研究



千烟洲地区通量观测及相关研究发文情况统计

提纲

- 1、站点尺度的通量观测研究
- 2、标准样地的设置与调查
- 3、仪器配置与数据质量评价
- 4、碳水通量研究的应用案例
- 5、扩展研究的应用案例



100 m × 100m标准样地



100 m × 100m标准样地



100 m × 100m标准样地



样地采样竹楼



样地采样竹楼



2013/10/03 10:12

样地凋落物收集框



2013/09/27 14:26

样地树杆径流系统



样地实验仪器房



2013/09/29 16:29

样地胸径尺



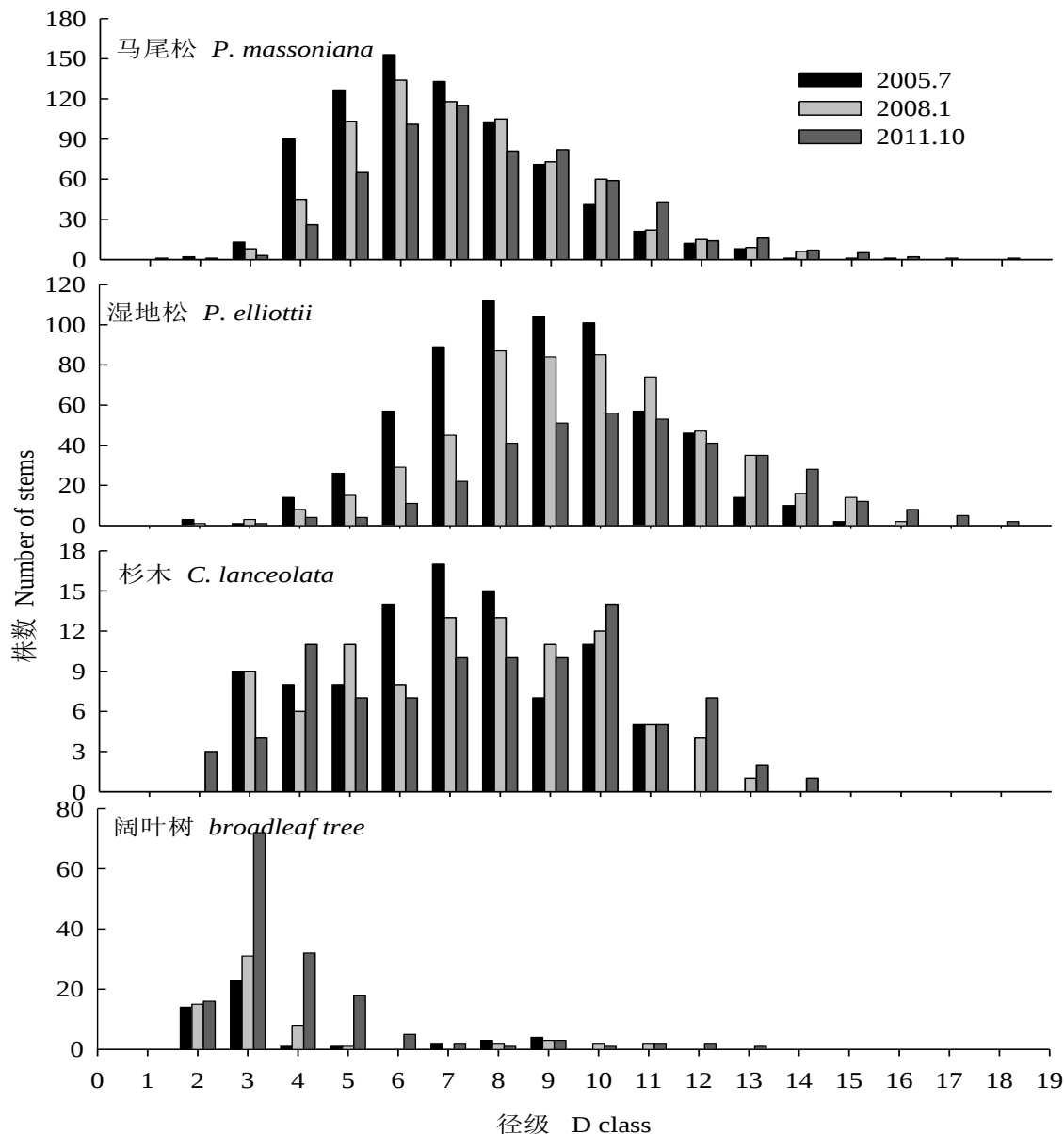
样地调查结果

表 2005 年~2011 年永久样地调查结果

树种	2005 年 7 月			2008 年 1 月			2011 年 10 月		
	株数	胸径 (cm)	树高 (m)	株数	胸径 (cm)	树高 (m)	株数	胸径 (cm)	树高 m)
马尾松	774	12.69	10.54	700	13.64	11.16	622	14.79	——
湿地松	637	16.44	12.65	545	18.23	14.25	374	20.24	——
杉木	94	12.81	10.85	93	13.76	11.80	91	14.32	——
阔叶	49	6.66	7.45	67	6.85	7.88	155	6.92	——
总计	1554			1405			1242		

- ❑ 永久性样方内乔木总株数呈下降趋势(2008年冰雪灾害)
- ❑ 湿地松作为外来物种，受损最为严重，马尾松和与杉木受损情况较小
- ❑ 阔叶树种入侵，其数量呈上升趋势

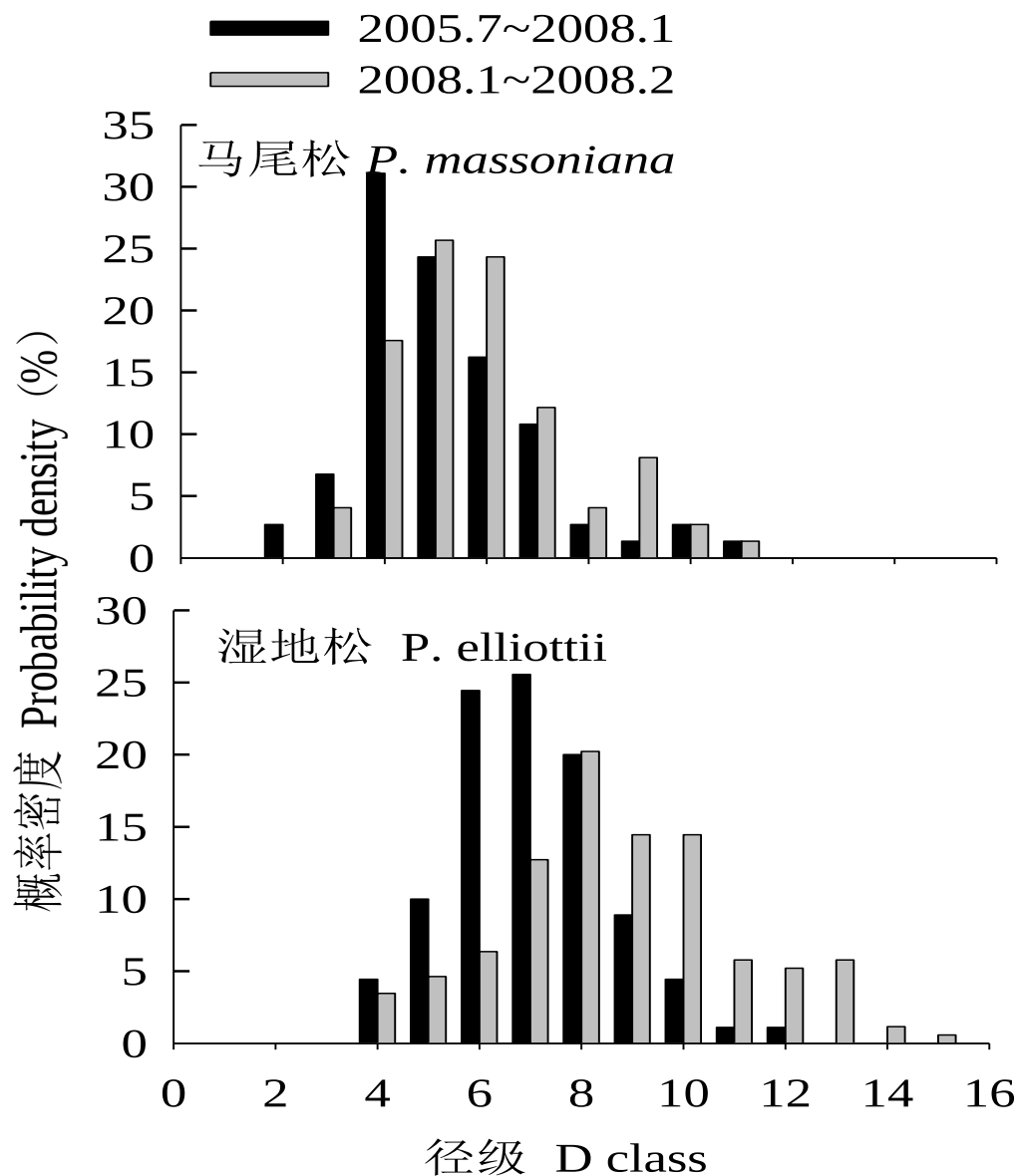
样地调查结果



□ 3个针叶树种径级峰值在冰雪灾害过后向右偏移;

□ 阔叶树种 D 在大径级分布较少, 多集中于 2、3 两个较小径级; 2011 年 10 月, 3、4、5 径级的数量显著增多。

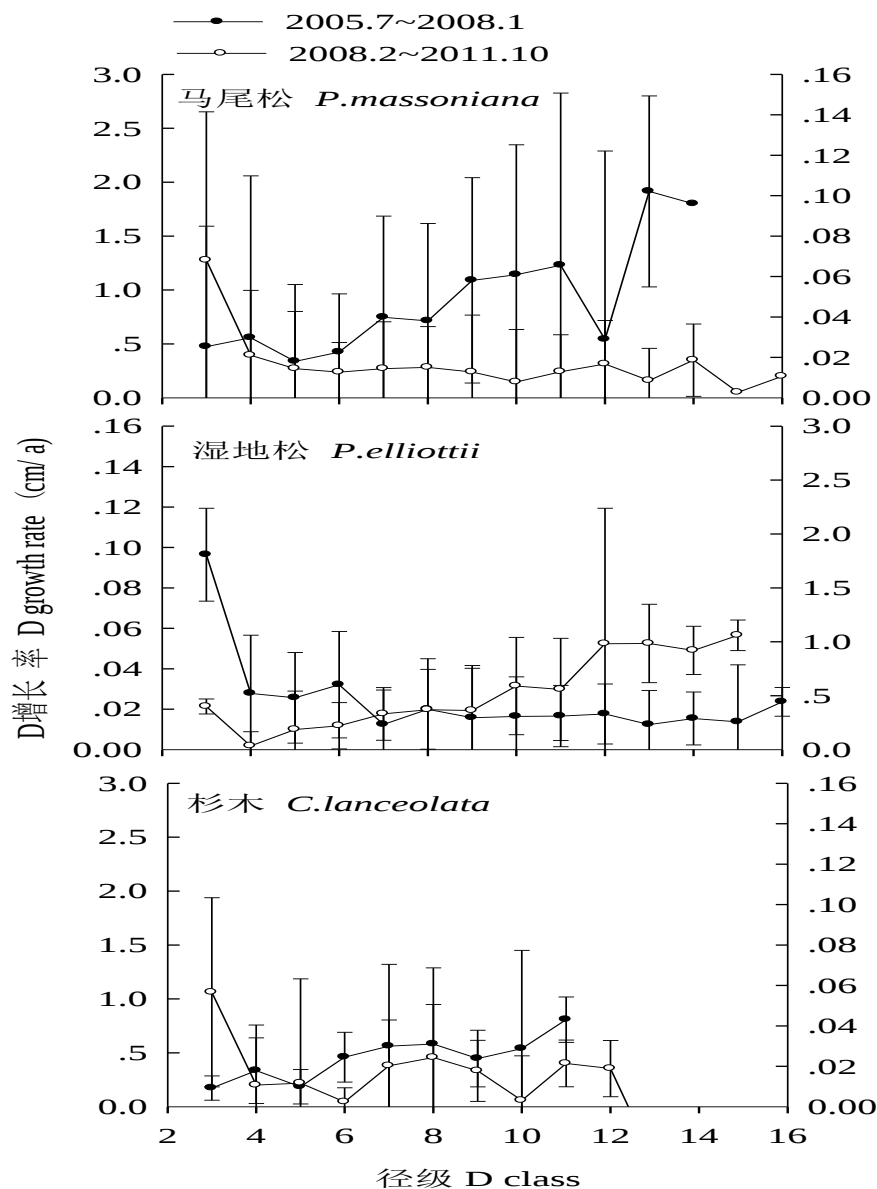
样地调查结果



□ 冰雪灾害之前马尾松、湿地松自然死亡主要是发生在较小的径级范围内；

□ 冰雪灾害引起的树木死亡主要集中在较大径级范围内，较小径级树木的死亡率反而低于自然死亡率。

样地调查结果



❑ 冰雪灾害前（2005 年 7 月~2008 年 1 月），马尾松与杉木 D 增长率随径级的增大而增大，最大值分别为 1.9 和 0.8 cm/a；而湿地松增长率接近于零。

❑ 冰雪灾害后，三个主要树种 D 增长率与 D 的关系则完全相反。马尾松、杉木所有径级 D 增长率则均接近于零；而湿地松 D 则在灾后表现出较大的增长率，最大增长率可达 1.06 cm/a。

样地调查结果

❑ 冰雪灾害对生态系统影响的直接表现是灾害期间碳在生态系统碳库之间的转移

表 3 主要树种生物量(t C)及其所占比例(%)

Table3 The biomass and percentage of main species.

时间		马尾松	湿地松	杉木	阔叶	混交林
Time		<i>P.massoniana</i>	<i>P.ellottii</i>	<i>C.lanceolata</i>	Broadleaf species	Mixed forest
2005 年 7 月	生物量 Biomass	21.76	28.46	1.92	0.72	52.86
Jul-05	比例 Percentage	41.16	53.84	3.63	1.36	
2008 年 1 月	生物量 Biomass	23.31	30.34	2.46	0.99	57.10
Jan-08	比例 Percentage	40.83	53.13	4.30	1.74	
2008 年 2 月	生物量 Biomass	21.73	21.57	2.37	0.99	46.66
Feb-08	比例 Percentage	46.58	46.24	5.07	2.12	
2011 年 10 月	生物量 Biomass	24.06	26.03	2.77	1.51	54.38
Oct-11	比例 Percentage	44.25	47.87	5.10	2.77	

❑ 在灾后经过将近 4 年的恢复固碳能力逐渐增强，但其固碳能力仍未恢复到灾前水平

表 4 生态系统的 NPP、GEP 及 CUE

Table 4 The NPP、GEP and CUE of the ecosystem

时间 time	NPP(g C /m ² /a)	GEP(g C /m ² /a)	CUE
2005.7~2008.1	736.23	1802.05	0.41
2008.2~2011.10	683.08	1780.8	0.38

提纲

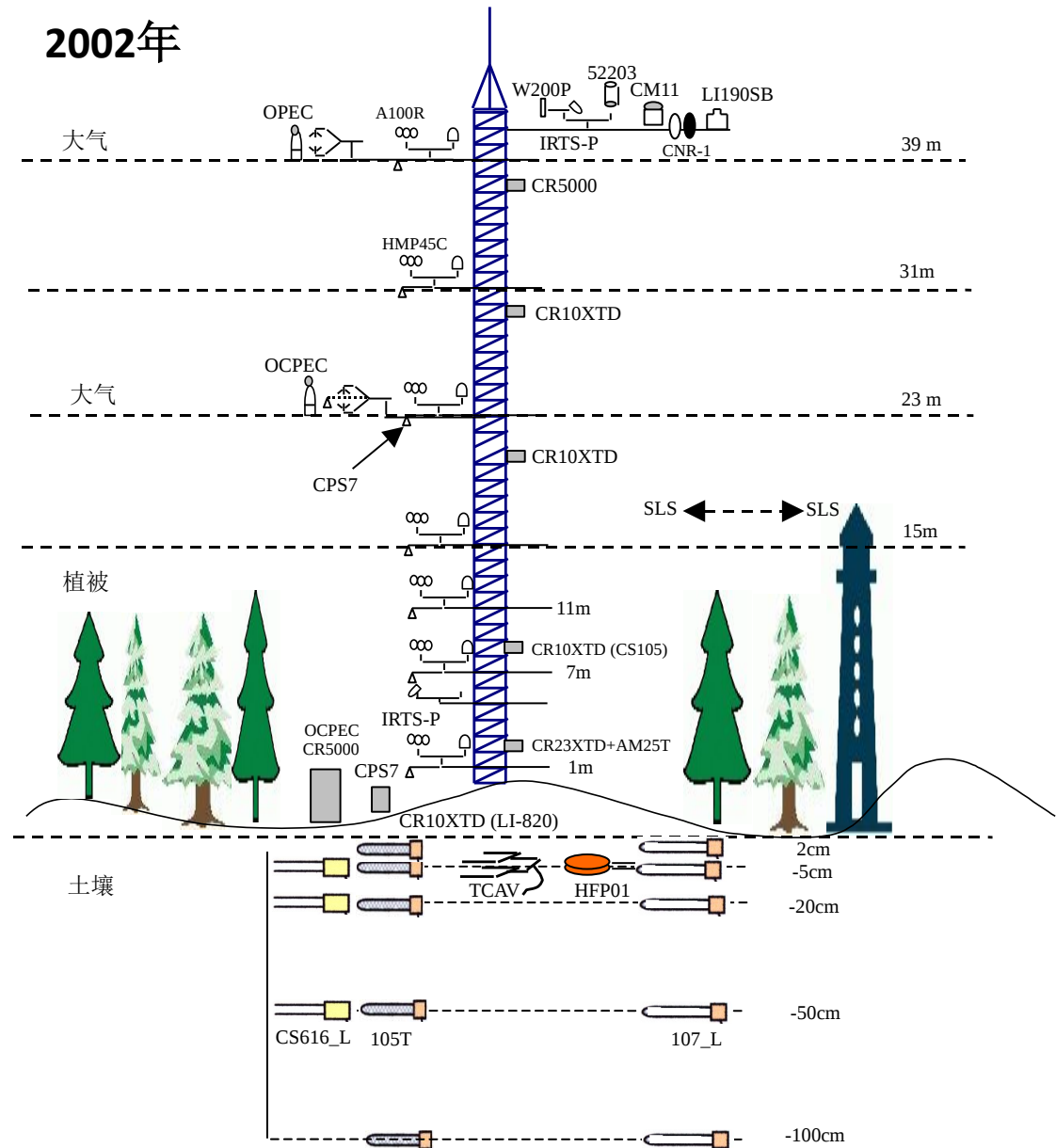
- 1、站点尺度的通量观测研究
- 2、标准样地的设置与调查
- 3、仪器配置与数据质量评价
- 4、碳水通量研究的应用案例
- 5、扩展研究的应用案例



碳水通量与常规气象仪器配置



2002年

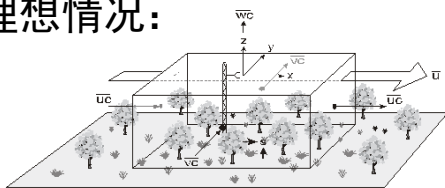


涡度相关技术的基本理论与千烟洲通量观测的试验设计

基础理论

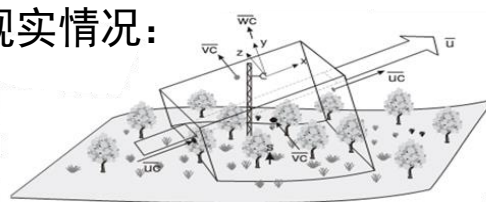
$$(a) \quad NEE = \overline{w'c'}(h_r) + \int_0^{h_r} \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial t} dz + \int_0^{h_r} \left(\bar{u}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial x} + \bar{v}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial y} \right) dz + \int_0^{h_r} \bar{w}(z) \frac{\partial \bar{c}(z)}{\partial z} dz$$

理想情况：



地形平坦、开阔，下垫面均质

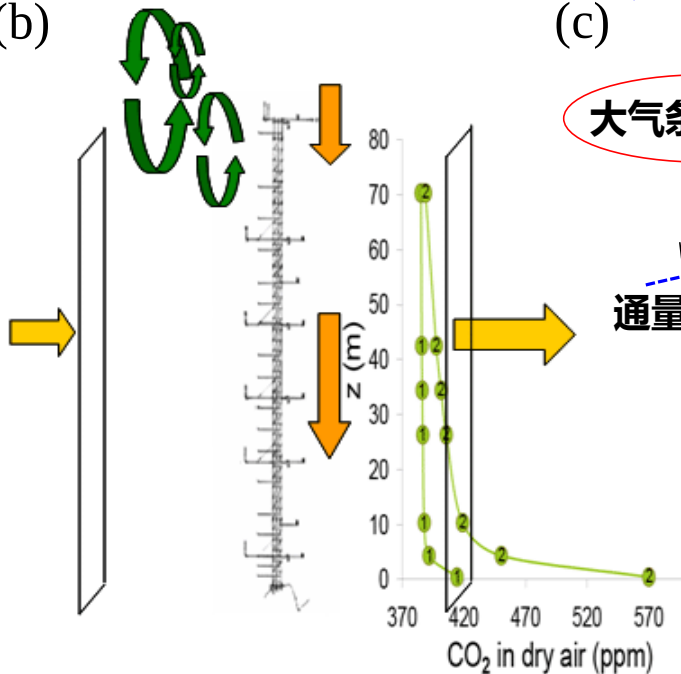
现实情况：



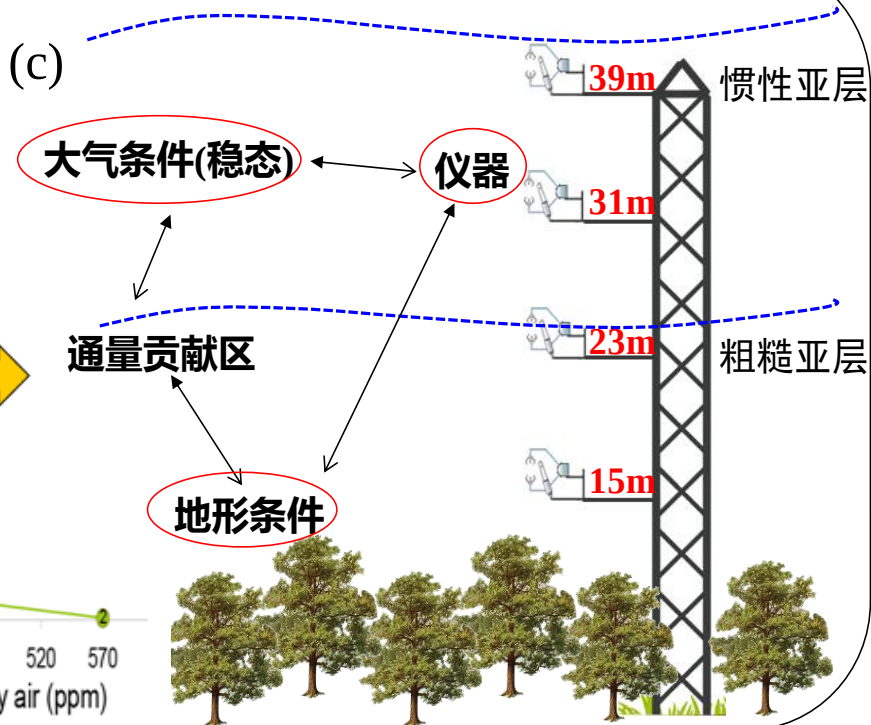
地形复杂，下垫面异质

现实情况：

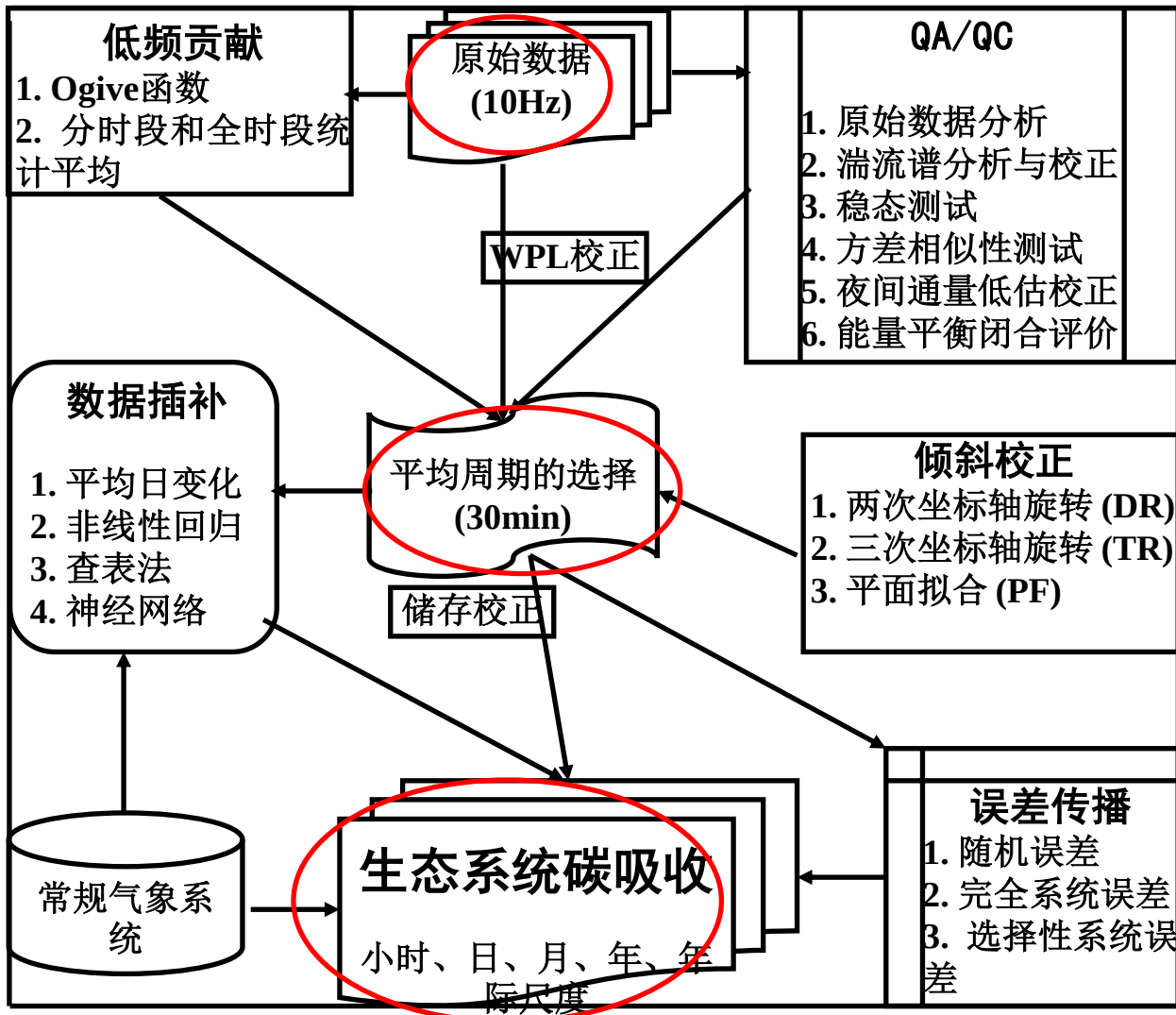
(b)



(c)



生态系统CO₂和水热通量数据的质量控制与评价体系

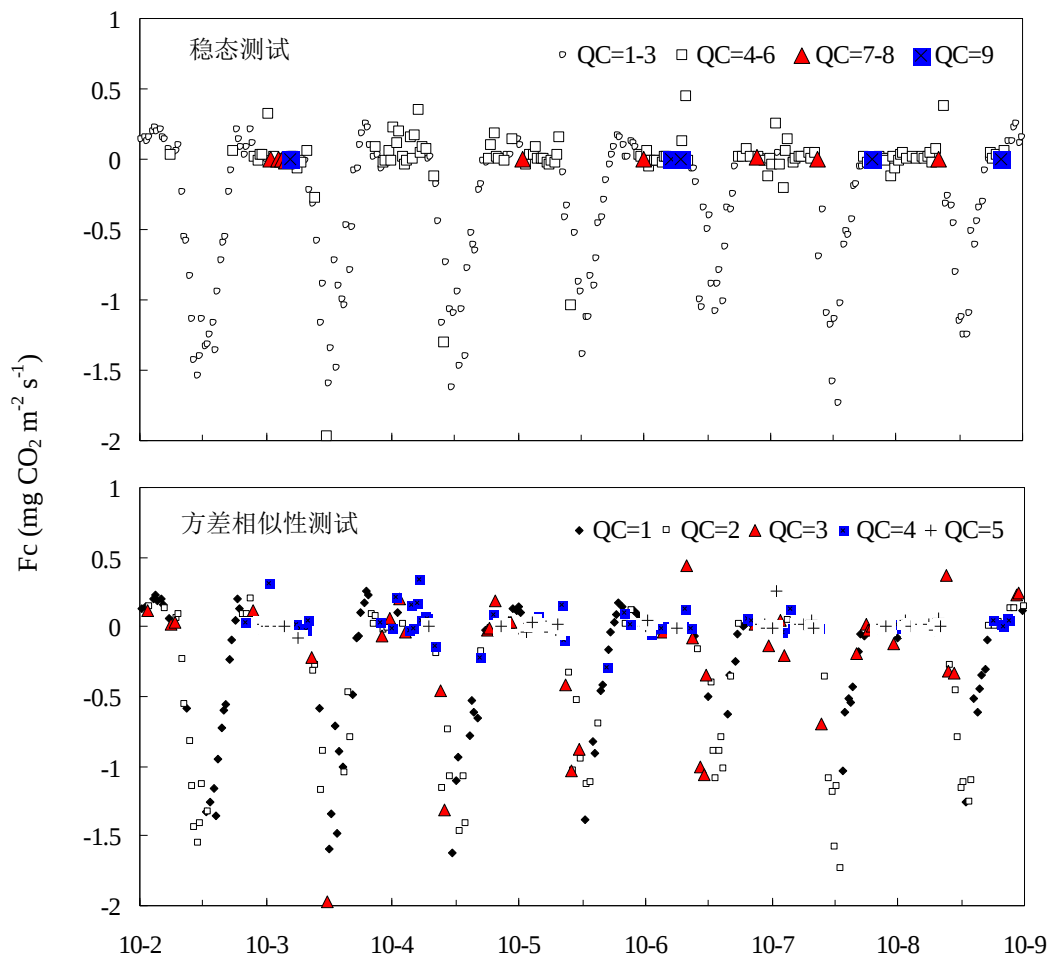


□ 解决系列技术难点

- 观测点选择
- 适宜高度的确定
- 采样频率/平均周期
- 坐标轴选择和变换
- 高频信号损失校正
- 低频大气传输影响
- 夜间通量低估

□ 保证了数据的可靠性

大气稳态测试和方差相似性测试

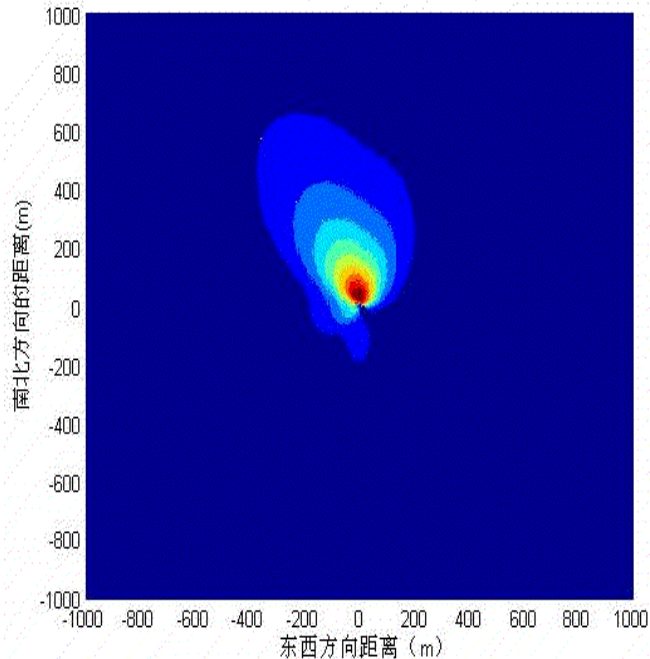


涡度相关技术要求
大气处于稳态条件，
稳态测试和方差相
似性测试是评价大
气湍流运动的有效
手段。

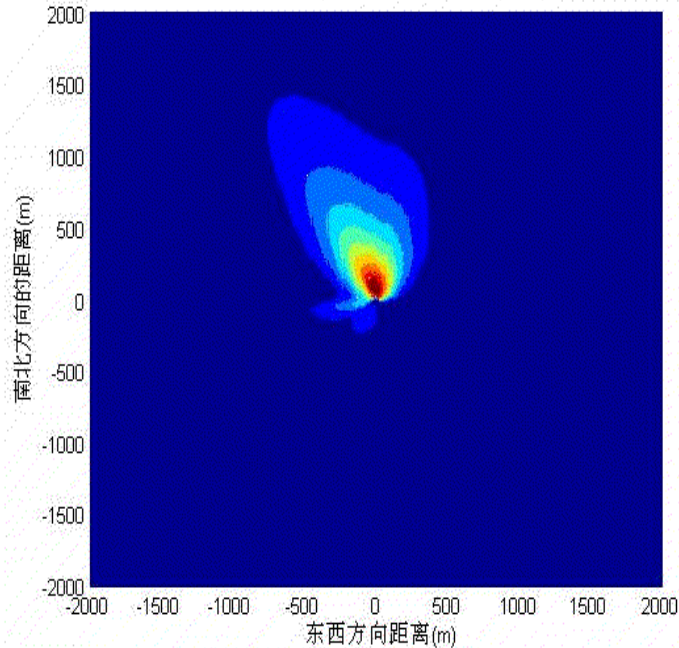
不同数据质量级别的 CO_2 湍流通量的日变化过程（稳态测试和方差相似性测试）

通量贡献区

1月份通量贡献区-FSAM模型-23m



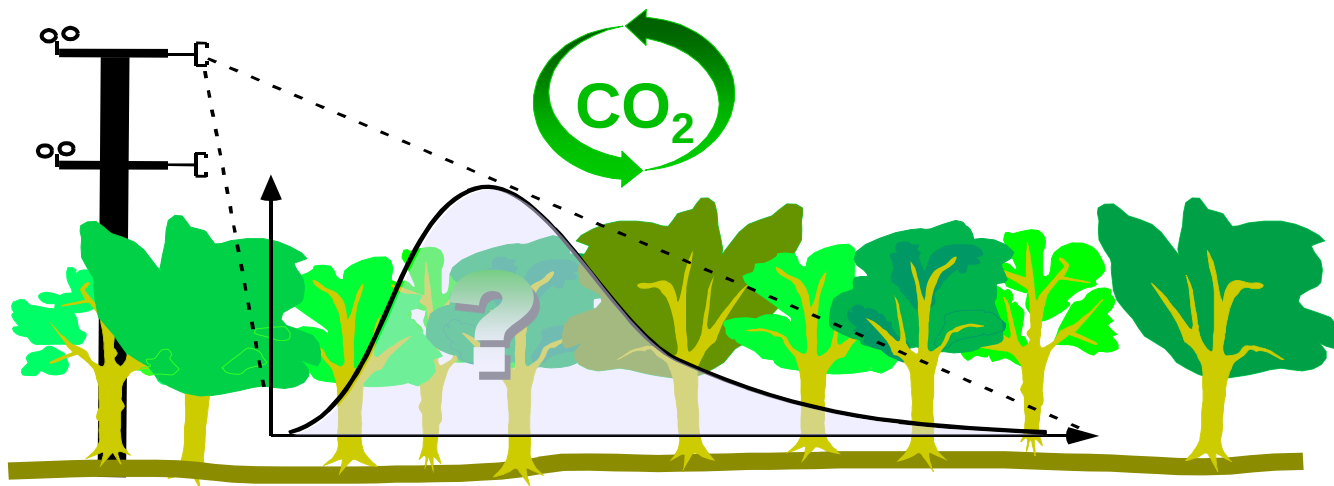
1月份通量贡献区-FSAM模型-39m



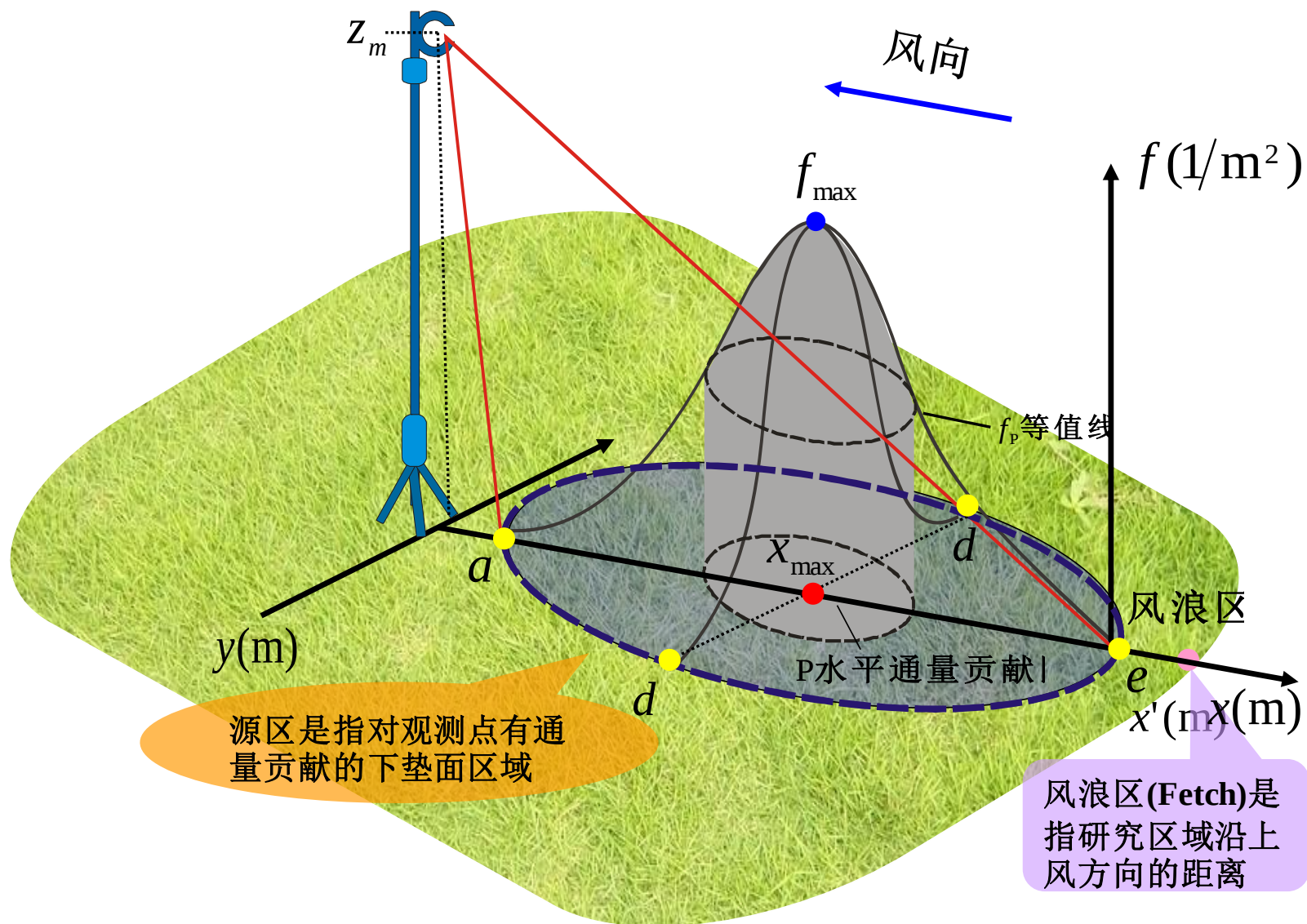
1) 指导仪器安装位置
和高度，使得观测点
有最佳的空间代表性。

2) 在时间尺度上累加
通量贡献区得到通量
贡献气候区，了解观
测代表区域年季间的
变化规律

3) 与GIS技术结合，
确保通量数据来自感
兴趣研究区域，通量
数据是有意义的。



通量贡献区的基本概念



提纲

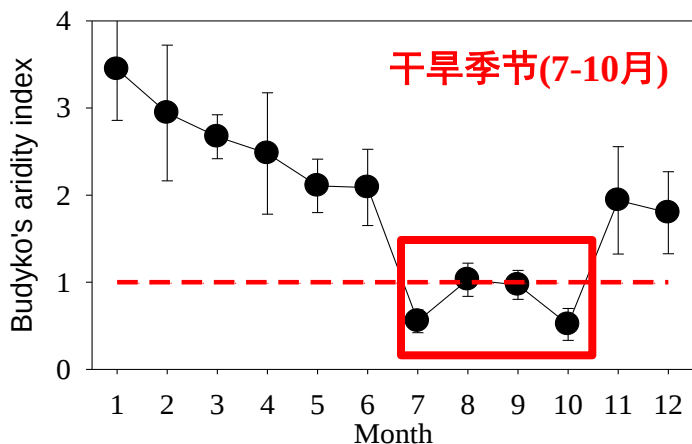
- 1、站点尺度的通量观测研究
- 2、标准样地的设置与调查
- 3、仪器配置与数据质量评价
- 4、碳水通量研究的应用案例
- 5、扩展研究的应用案例



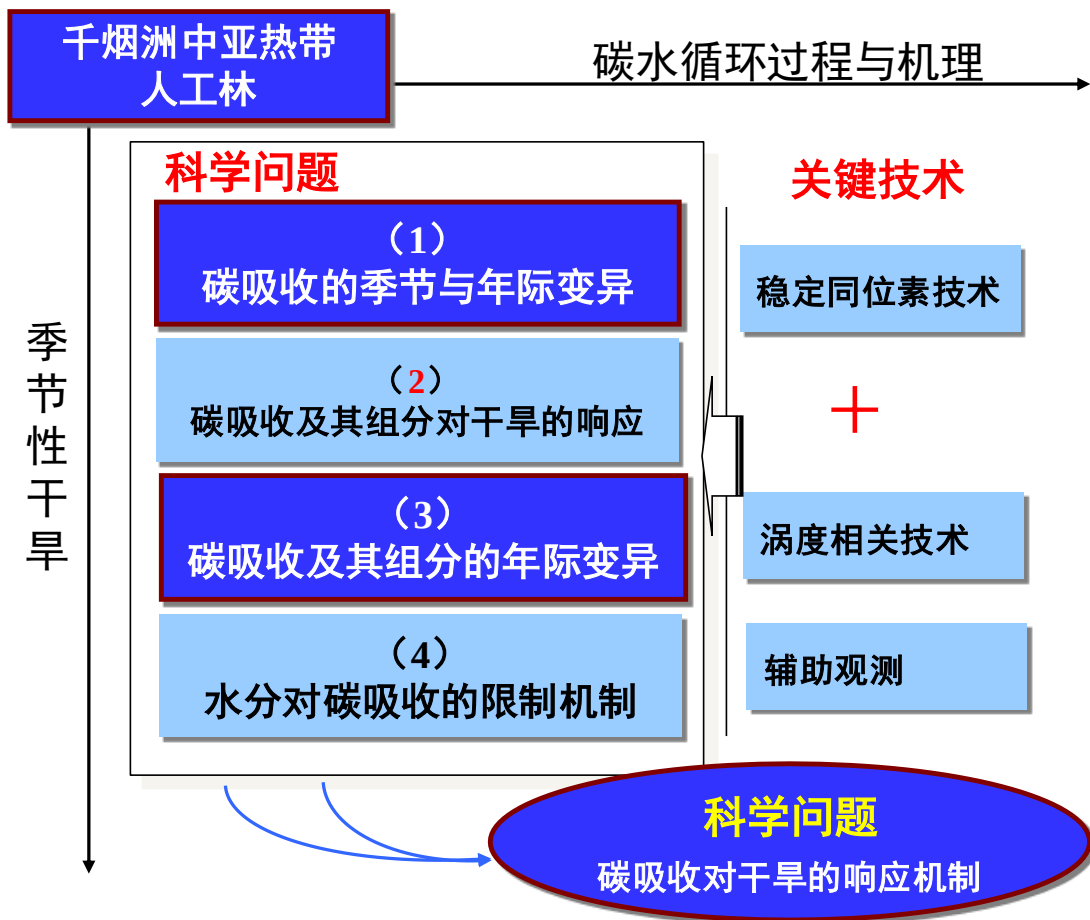
生态系统碳收支过程及其对干旱的响应机理

❑ IPCC (2007) 指出:降水季节分配格局改变会导致湿润地区“季节性干旱”频发!

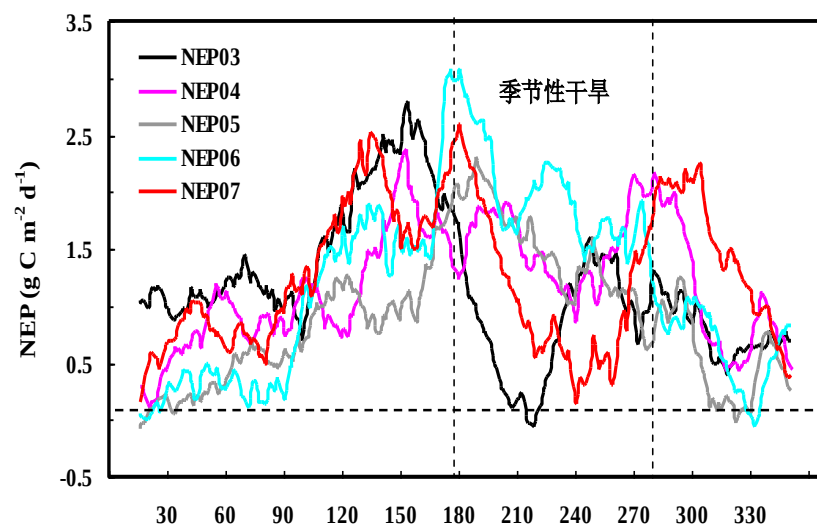
❑ 中亚热带(千烟洲)夏季高温和降水季节分配不均导致的季节性干旱频发



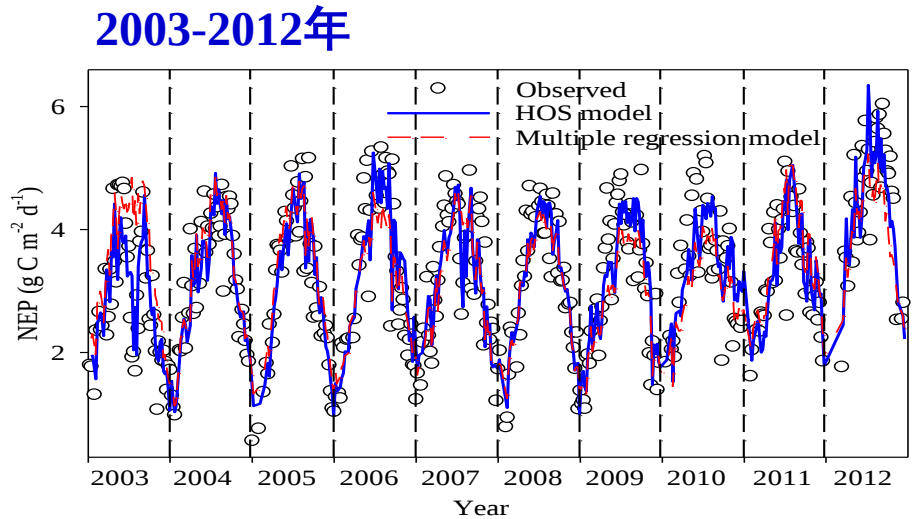
中亚热带千烟洲地区干旱指数的季节变异
(Budyko's 干旱指数: 降水量/潜在蒸散)



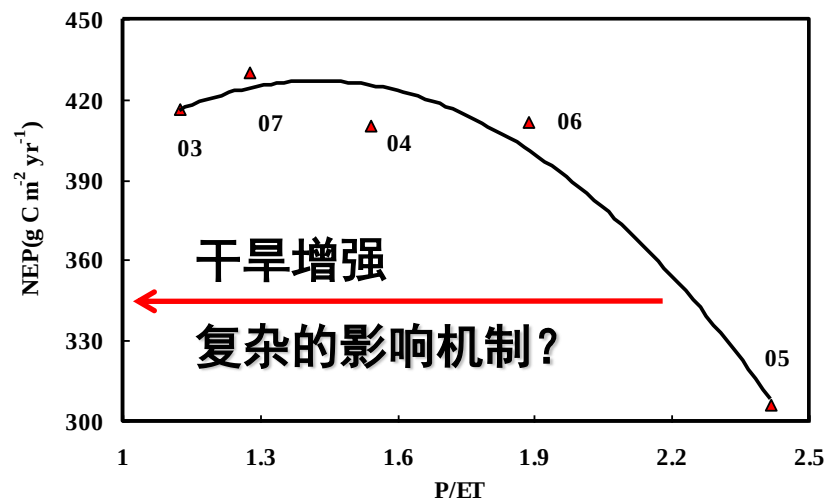
(1) 评价了季节性干旱对碳吸收的季节和年际变异的影响



千烟洲人工林碳吸收(NEP)的季节变异



千烟洲人工林碳吸收(NEP)的年际变异



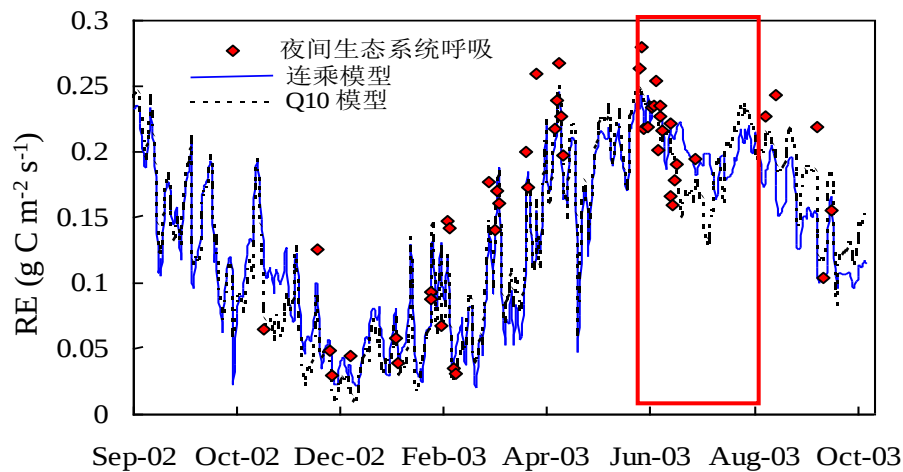
千烟洲人工林年碳吸收(NEP)与水分平衡的关系

- 干旱造成夏季碳吸收能力明显下降，甚至成为碳源
- 年碳吸收能力随着干旱的增强先增强后降低
- 碳汇，NEP: $408.6 \pm 67.3 \text{ g C m}^{-2} \text{yr}^{-1}$

(2) 阐明了碳吸收及其组分对季节性干旱响应的差异性

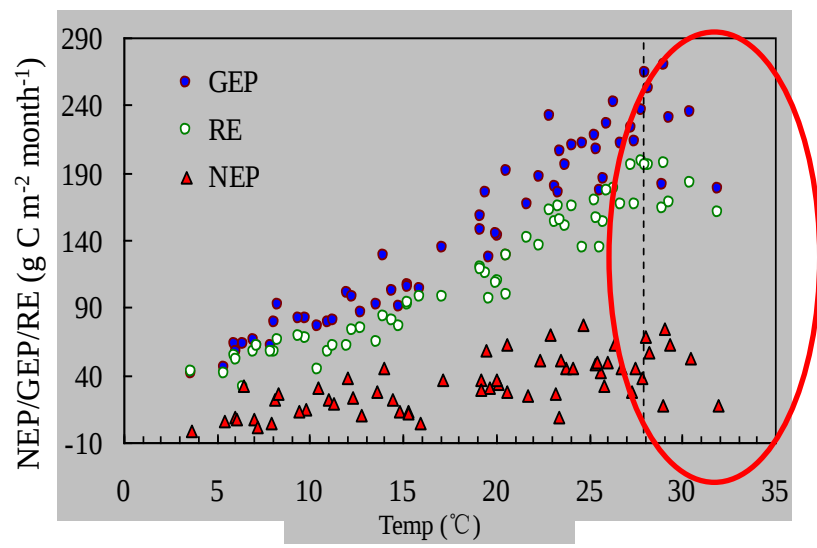
- 现有的呼吸(RE)模型假设 Q_{10} 与土壤水分无关，无法准确描述干旱对RE的影响
- 建立了考虑水分对 Q_{10} 影响的 Q_{10} 模型，其对干旱的响应能力比传统模型更敏感

$$F_{RE} = F_{RE, Re f} e^{(\ln(Q_{10})/10)(T - T_{Re f})}$$
$$Q_{10} = a \cdot S_w^2 + b \cdot S_w + c$$



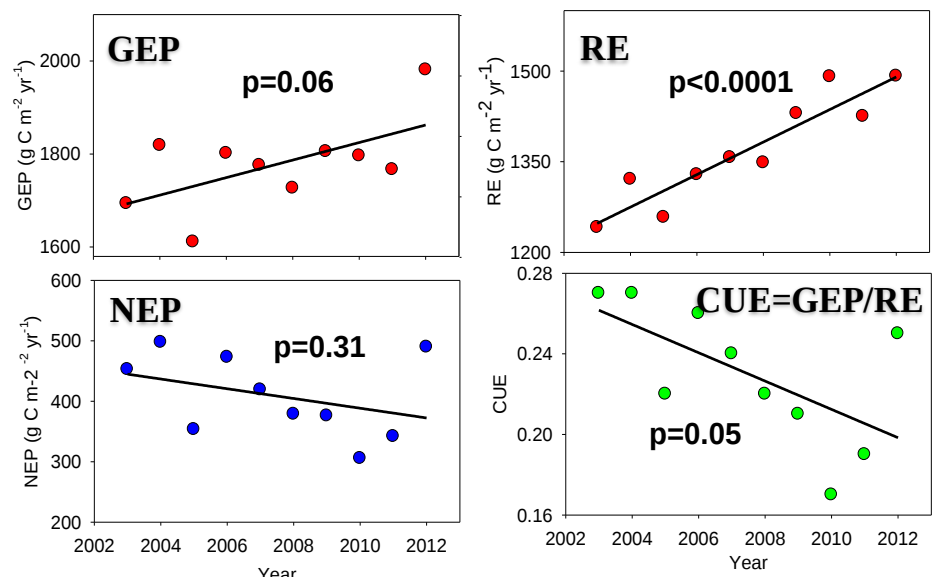
千烟洲人工林生态系统RE季节变化特征模型比较

- 碳吸收NEP及其组分GEP和RE都会受到高温(干旱)胁迫的影响，但是响应的方式与程度不同



千烟洲人工林NEP、GEP和RE对温度的响应

(3) 揭示了碳吸收及其组分的年际变异趋势及其控制机理



千烟洲人工林NEP、RE和GEP的年际变异趋势

表1 环境因素和功能变化对千烟洲人工林NEP的影响

	环境因素 季节变异	环境因素 年际变异	功能 变化	误差
NEP	60.4%	10.6%	11.3%	17.7%
NEP_dry	44.7%	7.5%	16.3%	31.5%
NEP_wet	72.5%	8.4%	3.8%	15.3%

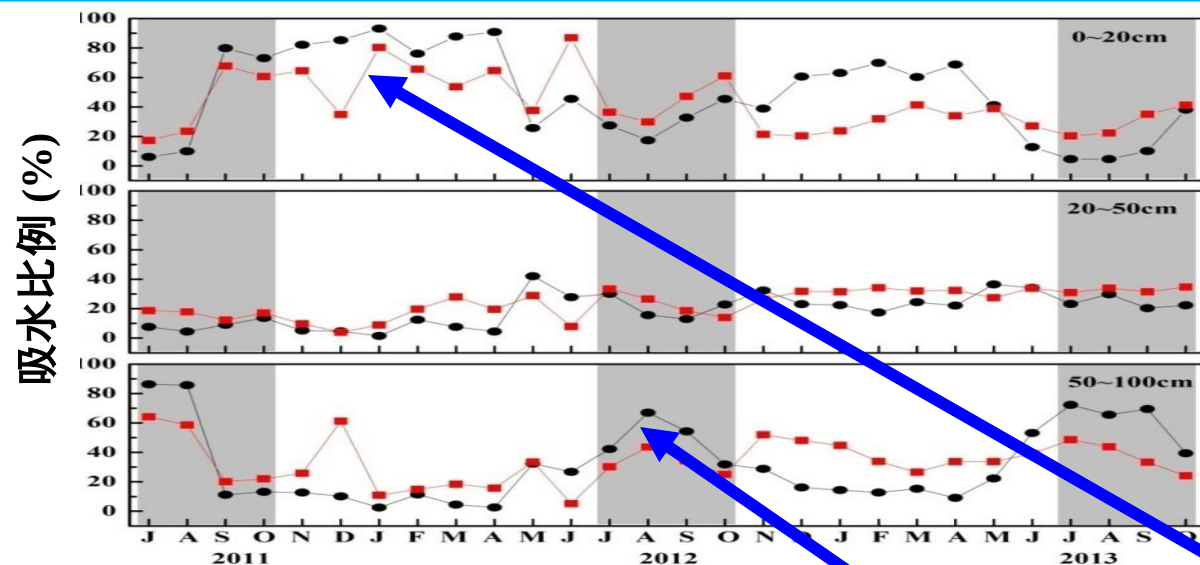
□ 年光合(GEP)和呼吸(RE)呈增加趋势，受干旱季节(7-10月)浅层土壤水控制

□ 年CUE呈降低趋势，受年浅层土壤水控制

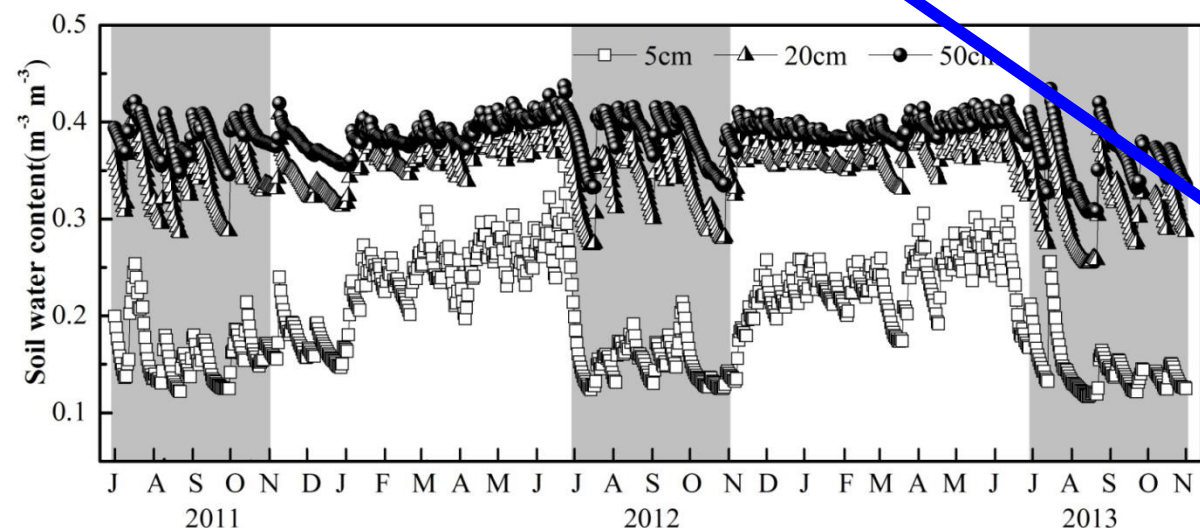
□ 2003-2012年，干旱(2003, 2007, 2010)和湿润年环境因素的季节变异控制着NEP年际变异

□ 干旱年, 生物功能变化对NEP年际变异的解释量大于湿润年的解释量，但量级较小

(4) 揭示了土壤水分是限制碳吸收的主要因素



千烟洲人工林对土壤水的利用比例



千烟洲人工林土壤水含水量季节变化特征

➤ 三种主要树种(马尾松、湿地松和杉木)具有相似的水分来源, 存在明显的水分竞争关系

➤ 非干旱时期(11-6月)主要利用浅层0-20cm土壤水

➤ 干旱时期(7-10月)主要利用深层50-100cm土壤水

提纲

- 1、站点尺度的通量观测研究
- 2、标准样地的设置与调查
- 3、仪器配置与数据质量评价
- 4、碳水通量研究的应用案例
- 5、扩展研究的应用案例

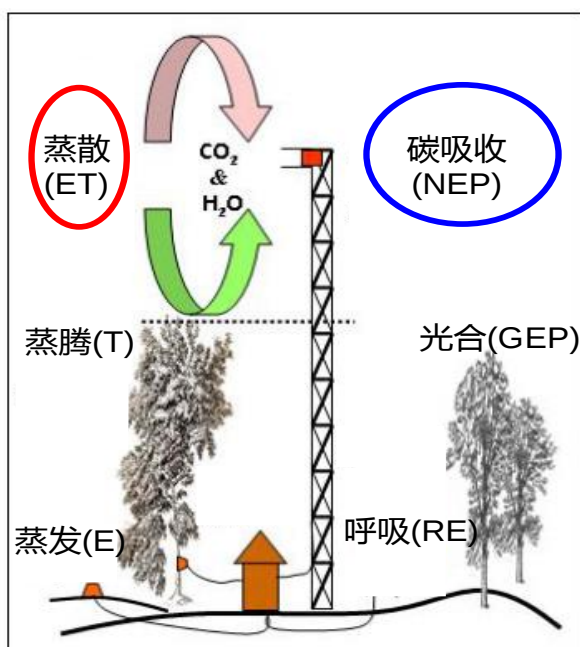


涡度相关和稳定同位素技术的协同观测

瓶颈问题:

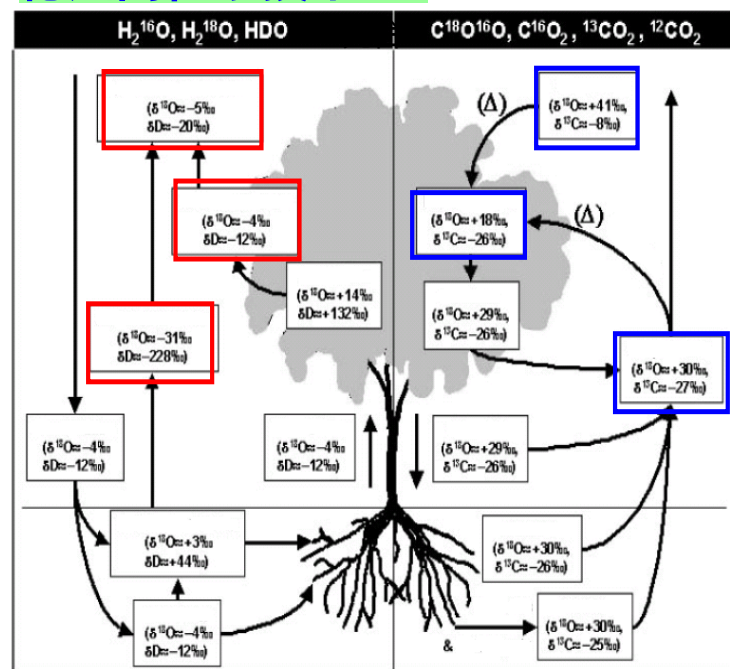
- 传统方法: 大气水汽冷阱/ CO_2 气瓶采样与质谱仪 (IRMS) 技术, 时间分辨率低且耗时费力
- 稳定同位素红外光谱 (IRIS) 仪器: 浓度依赖性和仪器时间漂移问题尚未解决

涡度相关技术



生态系统主要碳水过程

稳定同位素技术



土壤-植被-大气系统水碳同位素分馏过程

□ 生态系统尺度光合、呼吸、蒸腾、蒸发的直接测定成为可能!

发展了大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 比值和通量的原位连续观测技术

瓶颈问题：

- 传统方法：大气水汽冷阱/质谱仪技术，时间分辨率低且耗时费力
- 稳定同位素红外光谱技术：非线性响应和仪器漂移问题限制应用

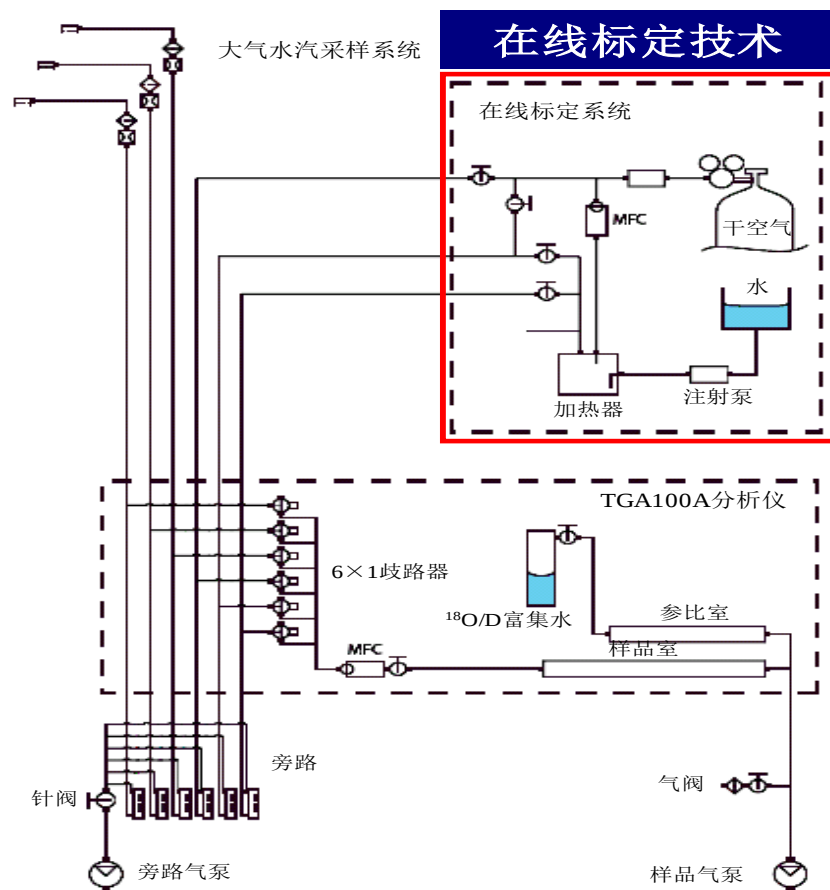


图2 原位连续观测系统的系统构成

系统特色：

- ✓ 研发了在线标定系统和方法
- ✓ 建立了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 比值的标定方法
- ✓ 建立了 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 通量的评价方法

系统(比值)精度：

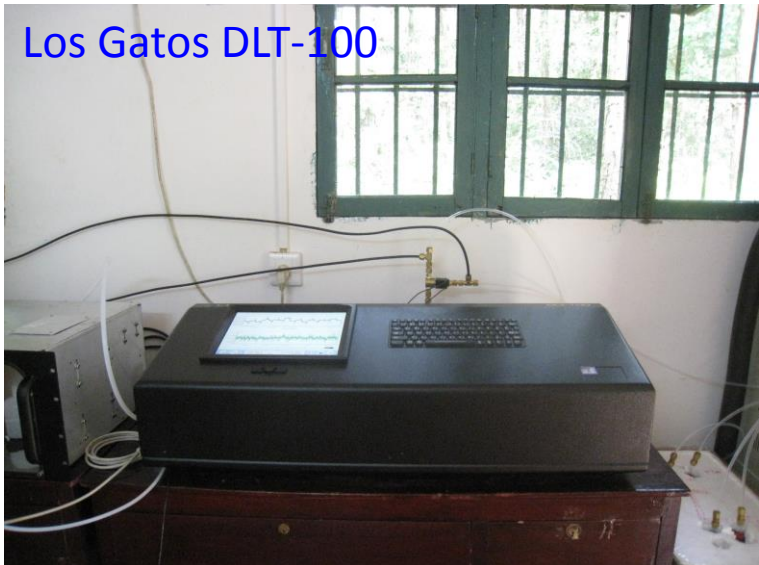
- ✓ $\delta^{18}\text{O}$ 精度优于0.3‰
- ✓ δD 精度优于1‰

授权专利(第一发明人2项)

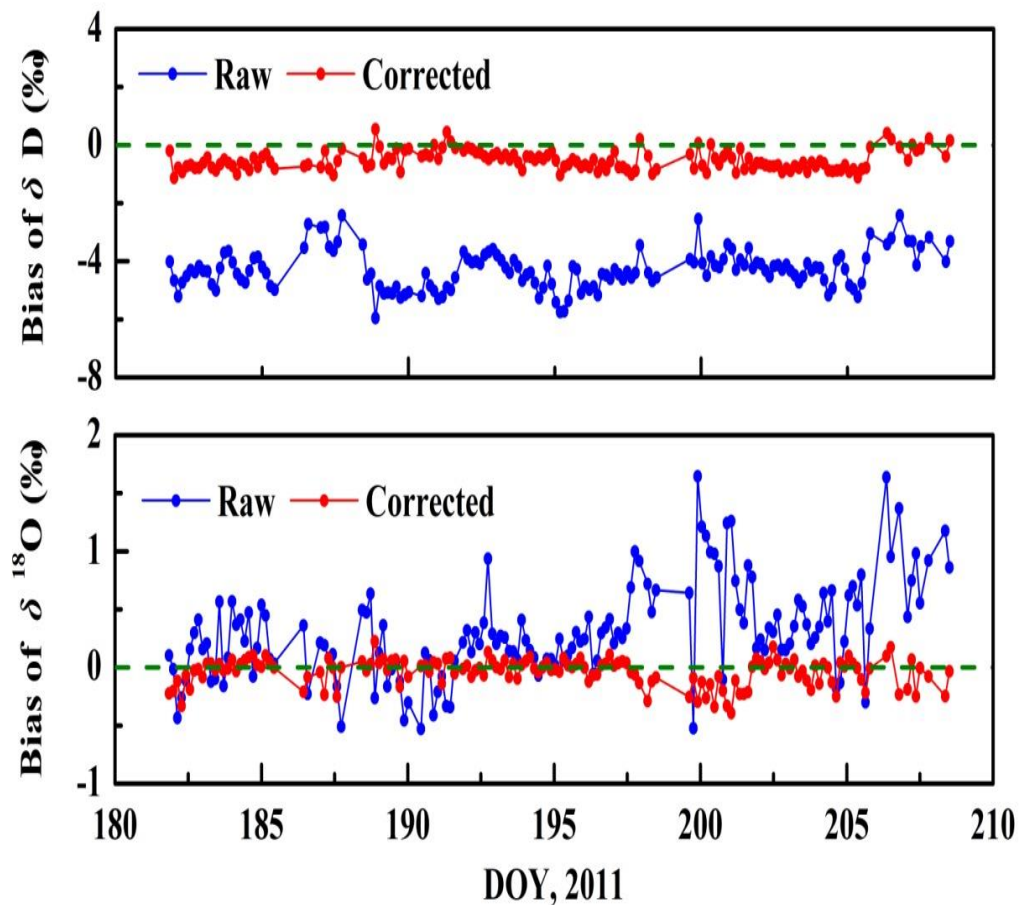
- ✓ 国家发明专利3项(水)

水汽 $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ 原位连续观测

Los Gatos DLT-100



干烟洲大气水汽 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD (5标气+大气)



标气S4/S3/S2校正结果

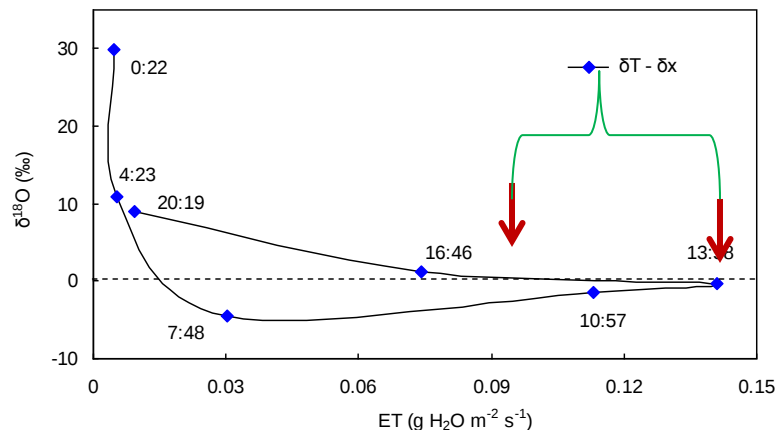
校正	δD 差值	$\delta^{18}\text{O}$ 差值
S4	$-0.4 \pm 0.4\text{‰}$	$-0.04 \pm 0.11\text{‰}$
S3	$0.3 \pm 0.4\text{‰}$	$0.06 \pm 0.20\text{‰}$
S2	$-0.1 \pm 0.5\text{‰}$	$0.21 \pm 0.15\text{‰}$

质控标气(S4)标定后的测量值和真实值的差值

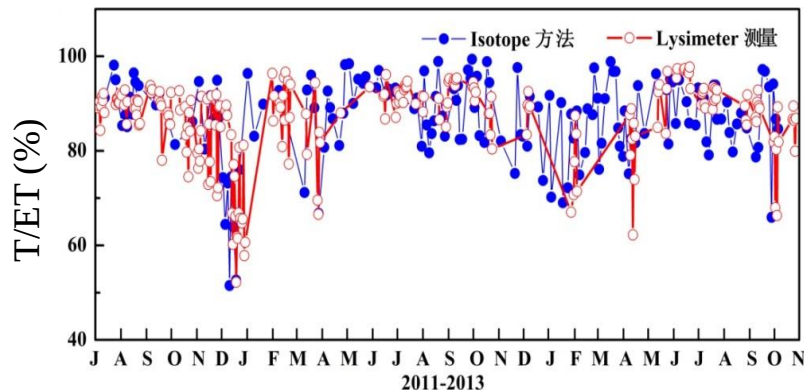
发展了蒸散组分拆分的方法，量化了蒸散组分的季节变异

科学问题：

- 确定蒸散 $\delta^{18}\text{O}(\delta\text{ET})$ 、土壤蒸发 $\delta^{18}\text{O}(\delta\text{E})$ 和植物蒸腾 $\delta^{18}\text{O}(\delta\text{T})$
- 正午稳态假设 $\delta\text{T}=\delta\text{x}$ 是否成立？



稳态假设($\delta\text{T}=\delta\text{x}$)与ET的相互关系



千烟洲人工林同位素方法和Lysimeter测量得到的T/ET的季节变化

□ 稳态假设($\delta\text{T}=\delta\text{x}$)——正午时刻：

- 验证了稳态(13:00-15:00)假设的成立
- T/ET比例为 $87.3 \pm 8.6\%$ ，与Lysimeter方法一致性较好，差异不显著($p=0.286$)

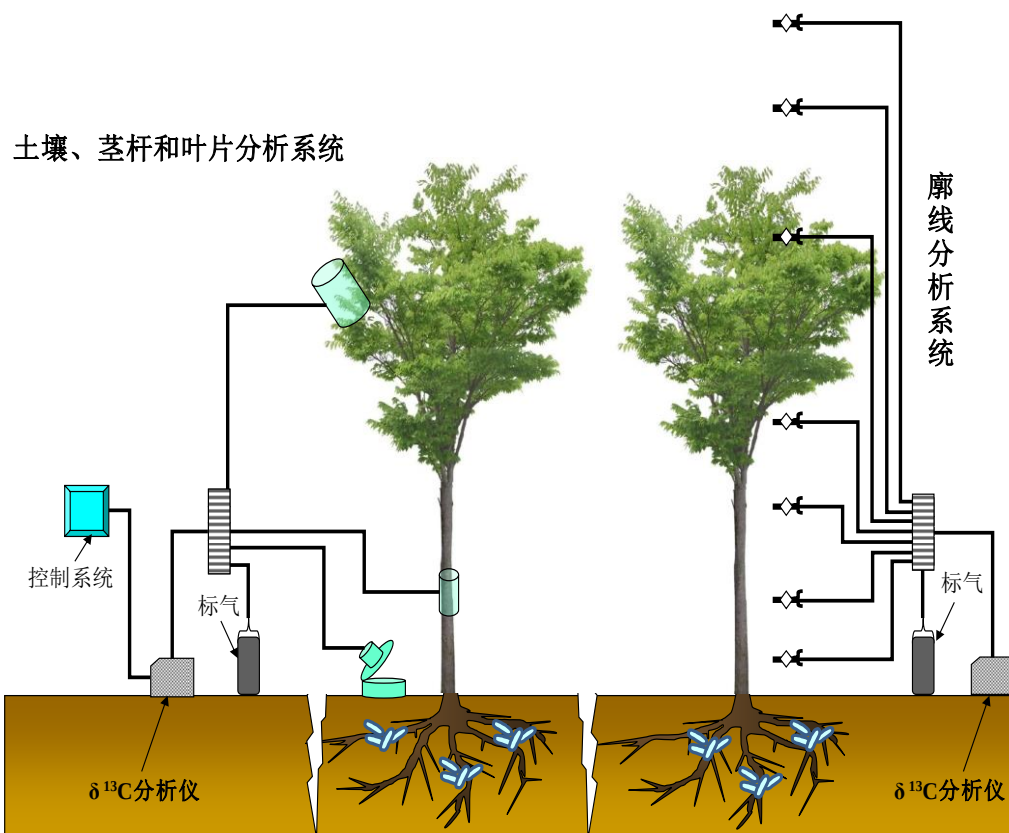
□ 冠层模型模拟 δT ——日变化动态：

- 构建了冠层叶水 H_2^{18}O 富集模型
- 首次在动力分馏系数的参数化过程加入湍流扩散项

完善了大气 $\text{CO}_2\delta^{13}\text{C}$ 比值和通量的原位连续观测技术

瓶颈问题：

- 传统方法：大气 CO_2 气瓶采样/质谱仪技术，时间分辨率低且耗时费力
- 稳定同位素红外光谱技术：非线性响应和仪器漂移问题限制应用



系统特色：

- ✓ 确定标定气体涵盖 CO_2 浓度范围比涵盖 δ 范围更为重要的校正策略
- ✓ 校正前差异可达 $9.44 \pm 1.65 \text{ ‰}$ ，校正后差异仅 $-0.02 \pm 0.18 \text{ ‰}$

系统(比值)精度：

- ✓ $\delta^{13}\text{C}$ 精度优于 0.3 ‰

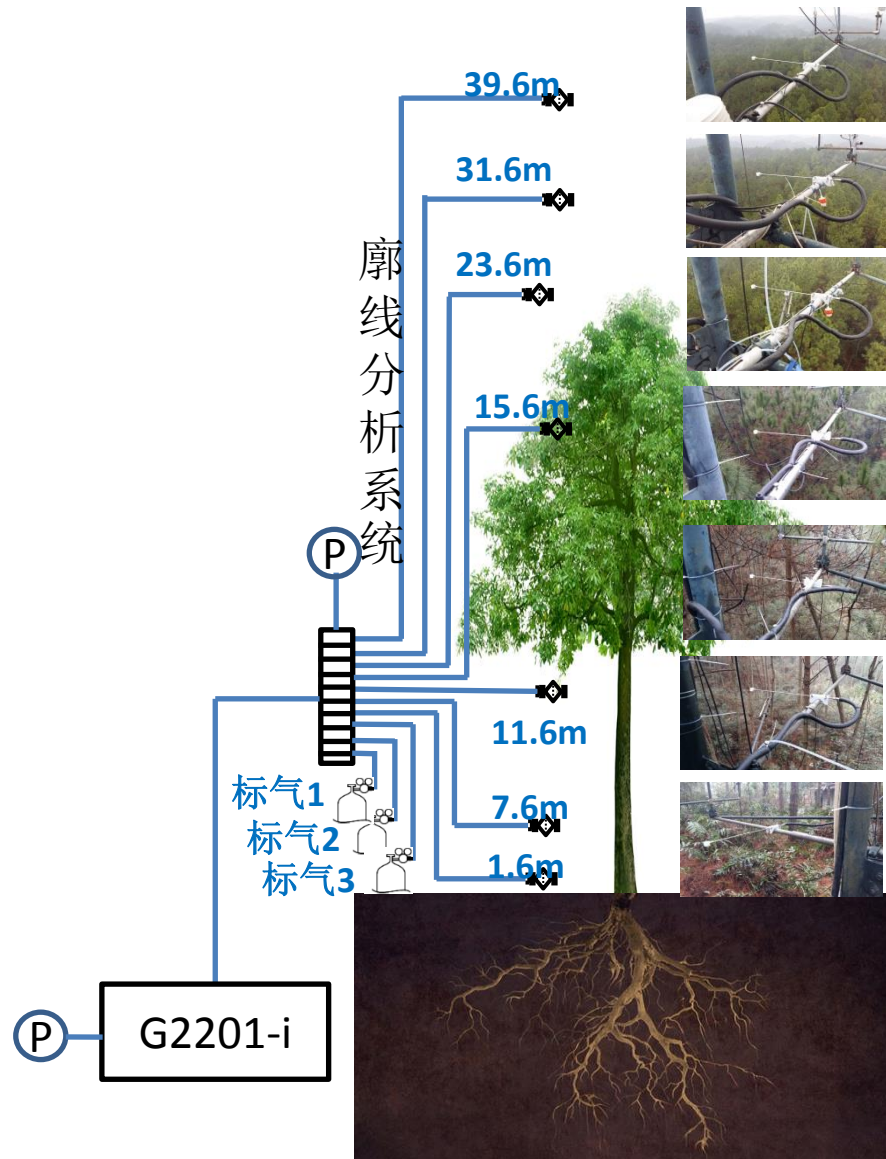
授权专利

- ✓ 国家发明专利3项(碳)

大气 $\text{CO}_2\delta^{13}\text{C}$ 廓线分析系统以及自动箱式系统的示意图

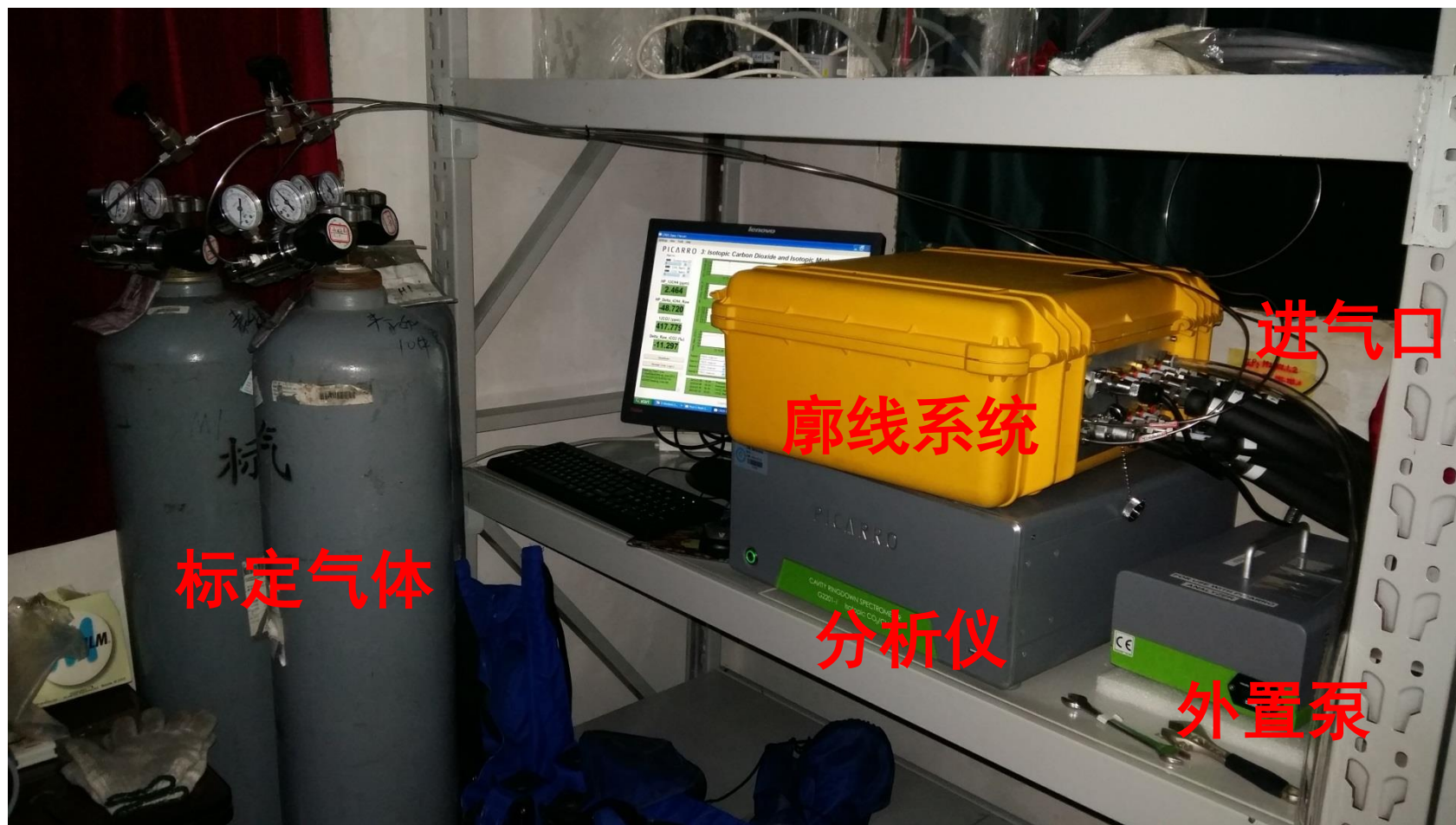
大气CO₂ δ¹³C原位连续观测

千烟洲站



千烟洲站七层廓线系统

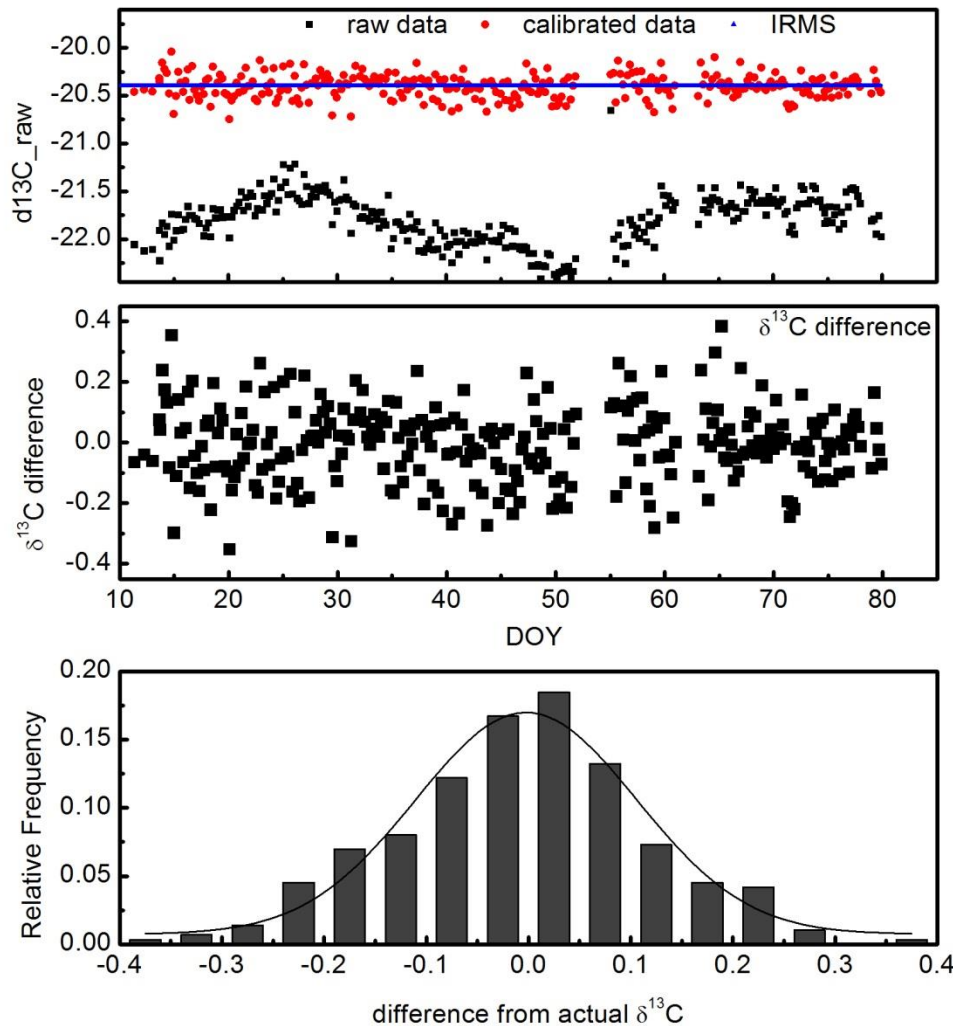
CO₂ δ¹³C 仪器配置



千烟洲站δ¹³C同位素分析仪（Picarro G2201-i）和标定系统

大气CO₂ δ¹³C观测（3标气+大气）

□ 测量循环：每个标气测定5min，大气持续测量294min。



δ¹³C标定后的测量值和真实值

□ 平均差异为 $-0.007 \pm 0.124\%$

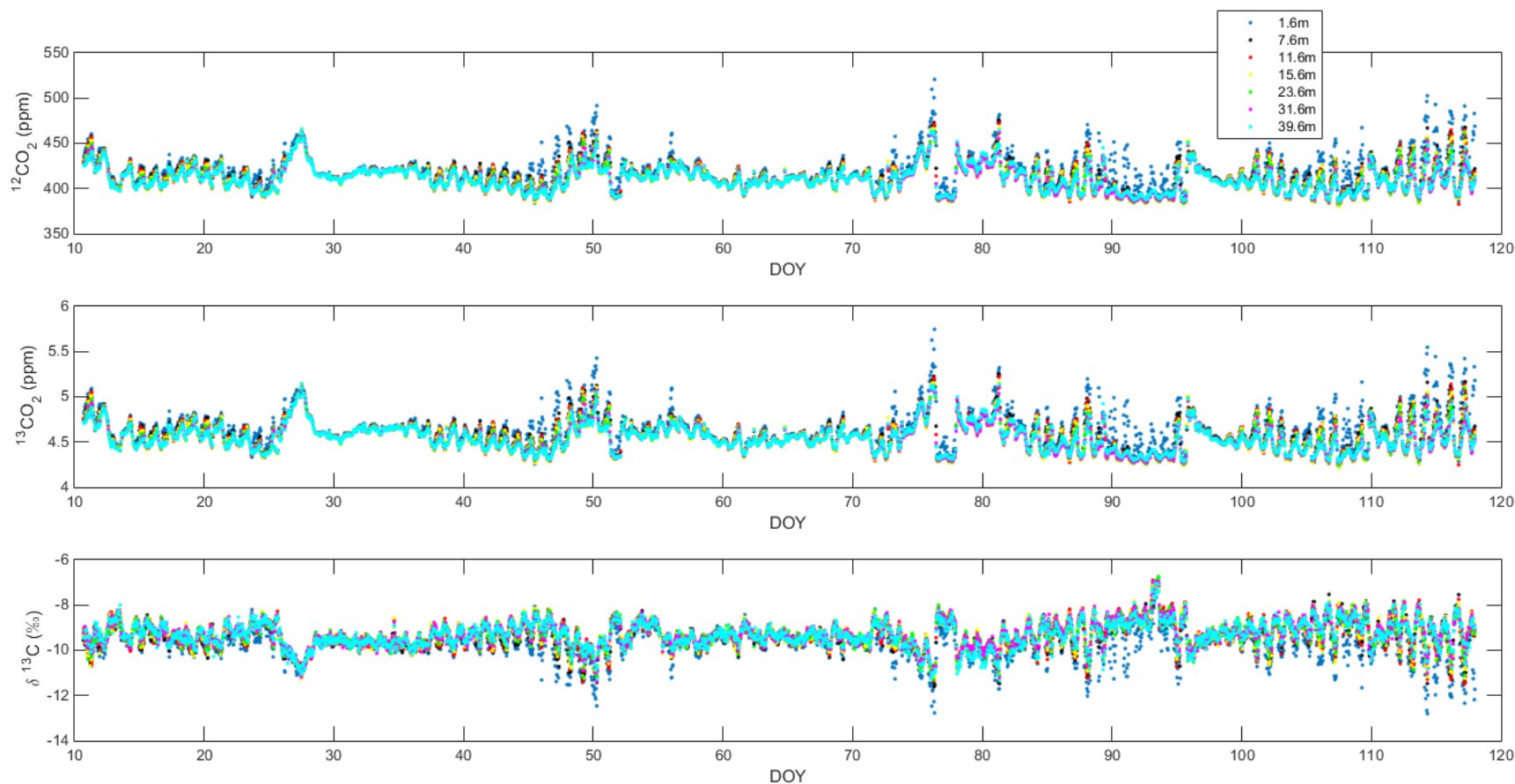
□ 变化范围： -0.352% 到 0.354%

□ 测量值和真实值的差异符合

高斯分布

干烟洲质控标气时间序列与频率分布

大气CO₂ δ¹³C廓线时间序列



□ 观测时间为：2015年1月11日~至今

□ CO₂的变化范围在380.07 ~ 528.45 ppm，平均值为412.45 ± 15.18ppm。

□ δ¹³C的变化范围在-6.74 ~ -12.81‰，平均值为 -9.38 ± 0.62‰。

□ 质控标气平均值为-20.382 ± 0.122‰，与真值的差异为0.002 ± 0.122‰。

敬请各位批评指正

谢谢!



仪器安装与维护



涡度相关技术



稳定同位素技术



碳-水-氮耦合循环