

基于通量观测的生态学研究 ——以长白山通量站为例

吴家兵

中国科学院沈阳应用生态研究所

2023. 8. 18

目录

1. 国内通量观测研究现状
2. 长白山通量站碳收支研究
3. 基于通量观测的生态学研究

1. 国内通量研究现状

生态系统碳水通量研究方兴未艾，但趋于同质化



观测对象同质化

观测方法/数据处理方法同质化

论文写作/选题模式同质化

Ecosystem takes up MORE C than we thought...

Ecosystem takes up LESS C than we thought...

Ecosystem is more sensitive to temperature than we thought

We have found more carbon than expected (below ground)

We compared models to our new data - they are all wrong

This model includes a new process - all other models should too

Tropical mountain forests store more carbon than expected

Published 25 August 2021 at The Faculty of Science →

Tropical forests in Africa's mountains store more carbon than previously thought. At the same time, vast amounts of the forests have already been lost. "This draws the attention to the importance of conserving these forests", says Göran Wallin at the University of Gothenburg, co-author of the new study published in Nature.

Scientists studying tropical forests in Africa's mountains were surprised to uncover how much carbon they store, and how fast some of these forests are being cleared.

The international study, reported in Nature, found that intact tropical mountain forests in Africa store around 150 tonnes of carbon per hectare. This means that keeping a hectare of forest standing saves carbon dioxide emissions equivalent to more than 4.5 million kilometers of driving - or 110 laps around the earth - with a new average petrol car*.

Soils could release much more carbon than expected as climate warms

Deeper soil layers more sensitive to warming than previously thought, scientists find

Date: March 9, 2017

Source: DOE/Lawrence Berkeley National Laboratory

Summary: Soils could release much more carbon dioxide than expected into the atmosphere as the climate warms, according to new research. Their findings are based on a field experiment that, for the first time, explored what happens to organic carbon trapped in soil when all soil layers are warmed, which in this case extend to a depth of 100 centimeters.

陆地生态系统碳水通量研究

- ❖ 通量精准计量： EC method is not a gold standard
- ❖ 碳汇形成及影响机制： not very clear
- ❖ 网络化监测： 回答林业“双碳”角色的必要手段
- ❖ 基于通量观测的其它生态学问题：

碳水通量研究

❖ 通量精准计量： EC method is not a gold standard



- ◆ 通量的观测方法已相对成熟，但不代表通量观测结果就是绝对的金标准。通量观测中，还存在着很多的不确定的成分
- ◆ 下垫面异质性或地形倾斜引起的平流效应，对于这部分通量损失，目前还没有理想的修订方法；
- ◆ 针对冬季观测负值，以及晚间通量低估的现象，目前的修订方法也存在较大的不确定性，如何降低类似的不确定性，需要在方法学上做进一步的探索。

陆地生态系统碳水通量研究

- ❖ 通量精准计量： EC method is not a gold standard
- ❖ 碳汇形成与影响机制： 例如： 老龄林能够持续固碳， 但固到了哪里？
- ❖ 通量网络化监测： 科学回答一个国家陆地生态系统碳汇地位的重要手段， 特别是林业碳汇， 同时也是全面认识 陆地生态系统碳汇格局和驱动机制的有效途径
- ❖ 基于通量观测的其它生态学问题：

陆地生态系统碳水通量研究

❖ 碳汇形成与影响机制：

老龄林固碳：地下土壤为主还是地上材积为主？

氮沉降的影响：氮沉降增加对生态系统碳汇是正还是负效应？

气候变化，特别是极端气候事件对生态系统碳汇的影响

人类活动干扰对生态系统碳汇的影响

.....

陆地生态系统碳水通量研究

- ❖ **通量精准计量：** EC method is not a gold standard
- ❖ **通量形成与影响机制：** 例如：老龄林能够持续固碳，但固到了哪里？
- ❖ **通量网络化监测：** 科学回答一个国家陆地生态系统碳汇地位的重要手段，特别是林业碳汇；同时也是全面认识陆地生态系统碳汇格局和驱动机制的有效途径
- ❖ **基于通量观测的其它生态学问题：**

森林碳水通量研究

- ❖ 通量精准计量： EC method is not a gold standard
- ❖ 碳汇形成及影响机制： 老龄林能够持续固碳，但固到哪里？
- ❖ 通量网络化监测： 科学回答一个国家林业碳汇地位的重要手段，同时也是全面认识森林碳汇格局和驱动机制的有效途径
- ❖ 基于通量观测的其它生态学问题： 比如，通量观测数据可为准确界定 森林物候期 提供一种客观的定量化手段

2. 长白山通量站碳收支研究

2.1 长白山通量站简介

2.2 基于通量观测的碳收支研究



2.1 长白山通量站简介



●在长白山自然保护区内，分布着我国东北亚温带典型的原始针阔叶混交林，这个林分类型代表着我国温带森林演替的最顶级群落。

● 30年前，中科院长白山站生态监测站 就在这片原始林中建立了一座62米高的观测塔，开展森林小气候研究。



2.1 长白山通量站简介

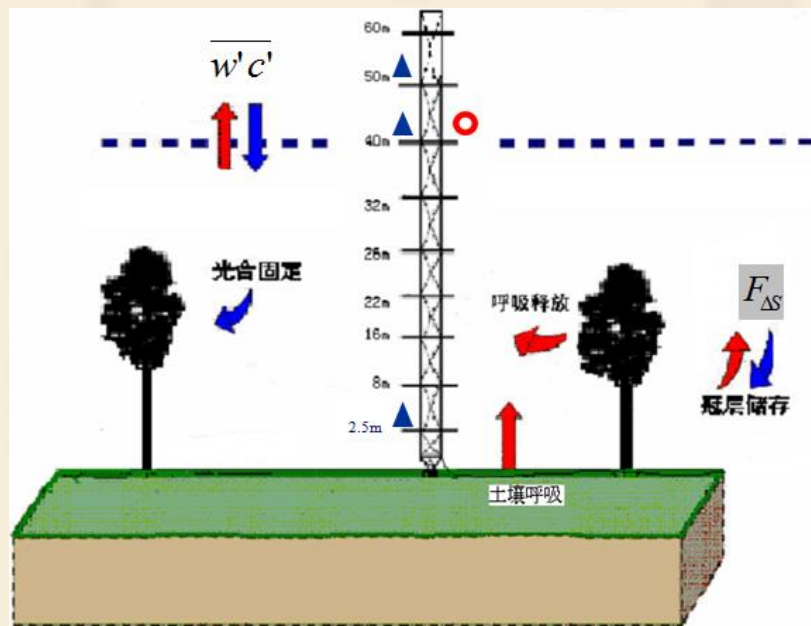


长白山通量站建设中外技术团队

长白山首届碳通量培训

2.1 长白山通量站简介

仪器布设示意图



塔 高： 62m

观测基础： 通量+气象（2002---今）

植 被： 原始针阔叶混交林（>250yr）

特 点： 演替顶级，生物多样性高，响应气候变化敏感

长白山通量站一号塔（主塔）



2.1 长白山通量站简介

❖ 温室气体排放观测系统



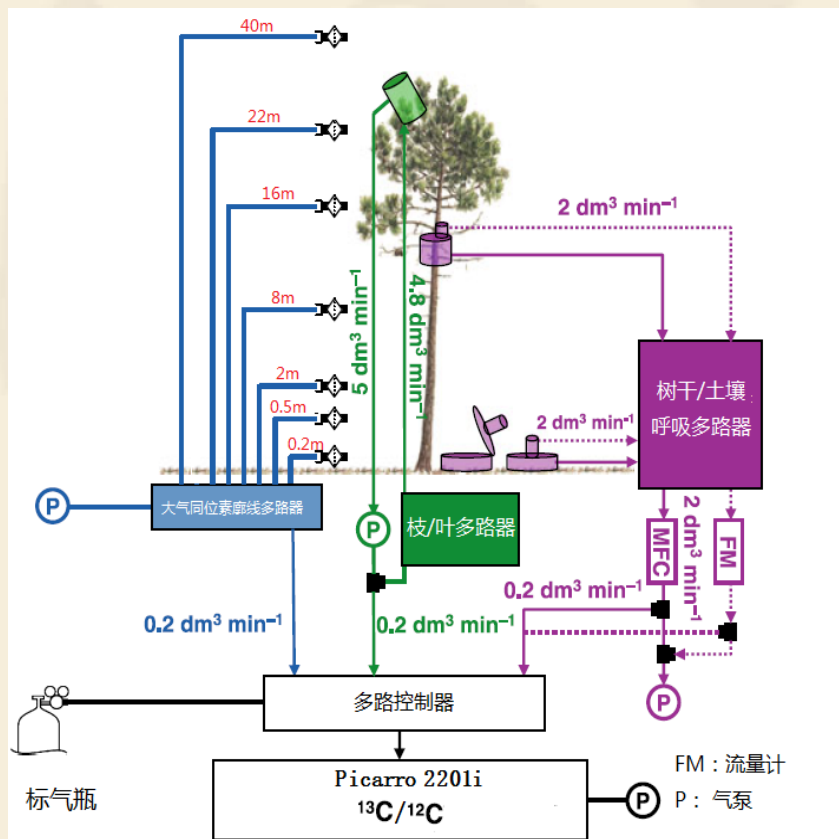
Li8100A土壤碳排放监测系统（1主机+8呼吸室）



Picarro G2509 CO₂/CH₄/N₂O 温室气体分析仪（1主机+8呼吸室）

2.1 长白山通量站简介

❖ 稳定碳同位素系统: Picarro G2201i



稳定碳同位素系统

分析仪



多路器



呼吸气室



2.1 长白山通量站简介

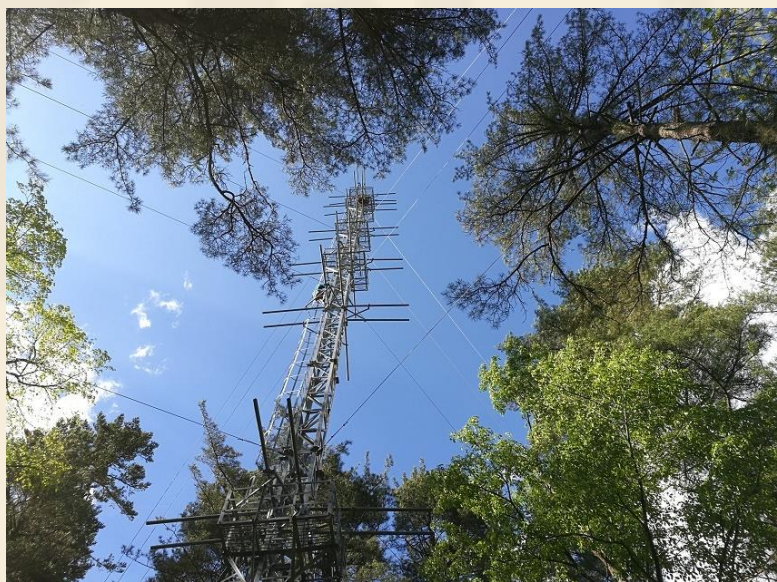
长白山通量站主塔仪器配置信息

观测项目	观测内容	观测设备	位置	数据采集器型号
常规气象系统	风温湿廓线/降雨	温湿探头	2.5/8/22/26/32/50/60 m	Campbell CR1000X
	辐射四分里	四分里辐射表	32 m	
	冠上/下光合有效辐射	光合有效辐射计	1.5 m/32m	
	红外冠层温度	红外探头	40 m	
	气压	气压计	2.5 m	
	土壤温度廓线	Campbell 107/105	0/-5/-20/-50 /100cm	
	土壤热通量	热通量板	-5 cm(共 2 个探头)	
	土壤湿度廓线	Campbell CS616	-5/-20/-50 cm	
	红外地表温度	红外探头	2.5 m	Campbell CR1000
碳水通量系统	CO ₂ /H ₂ O 浓度廓线	AP200 系统 (LI-840A CO ₂ /H ₂ O)	2.5/8/22/26/32/50/60 m	Campbell CR1000+NL116
	树干液流	TDP 探针	1.5m 树干(多个探针)	Campbell CR1000
	CO ₂ /H ₂ O 通量	涡度相关系统 (Licor)	40 m	SmartFlux 3
	土壤 CO ₂ /CH ₄ 通量	LI-8100A CO ₂ /H ₂ O + LI-7810 CH ₄ /CO ₂ /H ₂ O	地表	仪器自带
植被与环境要素	碳同位素廓线	Picarro G2201-i 分析仪	2.5/8/22/26/32/50/60 m	Picarro 主机
	物候	物候相机	26, 40 m	数采箱
	雪深(相机)	雪深相机	1m	无数采
	林冠光谱	Resonon Pika XC2	50m	Pika 主机 (50m)
	树木径向生长	DC2	不同树种 10 余个	Hobo UX120-006M

2.1 长白山通量站简介

2号塔 (副塔1)

长白山西坡站-露水河林场



塔 高： 35m

观测基础： 通量+气象

基础条件： 交流电、网络通讯、道路

植 被： 针阔叶混交林 (红松40~60%)

干扰类型： 轻度干扰 (20%择伐)

特 点： 面积占比<1%，

但代表人类活动的正向扰动

2.1 长白山通量站简介

3号塔 (副塔2)

长白山西坡站-露水河林场



塔 高： 35m

观测基础： 常规气象系统

基础条件： 交流电、道路

植 被： **次生杨桦林** (紫椴、山杨、白桦)

干扰类型： 中度干扰 (60~80%择伐)

特 点： 面积占比 > 50%，保护区外广泛分布

2.1 长白山通量站简介

4号塔 (副塔3)

白河林业局宝马林场



塔 高：20 m

观测基础：通量+常规气象系统

基础条件：交流电、网络通讯、道路

植 被：**次生杂木林** (山杨、蒙古栎、紫椴)

干扰类型：重度干扰 (皆伐)

特 点：面积>20%，保护区外广泛分布

2.1 长白山通量站简介



探索管理措施对低质低效次生林森林碳汇提升的作用

2.1 长白山通量站简介



建设成果:

1. 通量监测平台拓展为4个通量站
2. 积累40余站*年,4.5T的历史资料
3. 支撑了10余项国家自然科学基金、科技部重点研发项目的研究工作
4. 发表SCI论文100余篇,被引3000余次

2.1 长白山通量站简介

长白山通量站建设目标与科学目标

- ❖ 建成 ChinaFLUX重要节点站、卫星数据产品验证站
Modis/TANSAT等缺乏地面CO₂浓度和通量的校验点。
- ❖ 揭示长白山地区森林碳汇能力及其在气候/环境变化背景下的碳汇稳定性
碳汇大小、形成机制及其在未来气候变化情境下碳汇的稳定性等
- ❖ 揭示干扰与人为管理措施对森林碳汇功能的影响
火灾干扰、风灾干扰、病虫害、抚育经营等管理措施
- ❖ 基于通量观测，服务于其它生态学研究
生态水文学、生态气候学、大气环境等等

2.2 基于通量观测的碳收支研究

(1) 生态系统收支评估



科学问题：

- ❖ 长白山原始针阔叶混交林：碳源/汇？
- ❖ 长白山原始针阔叶混交林碳年龄？
mature forest or old-growth forest
- ❖ 碳汇影响机制/变化趋势？

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(1) 生态系统收支评估

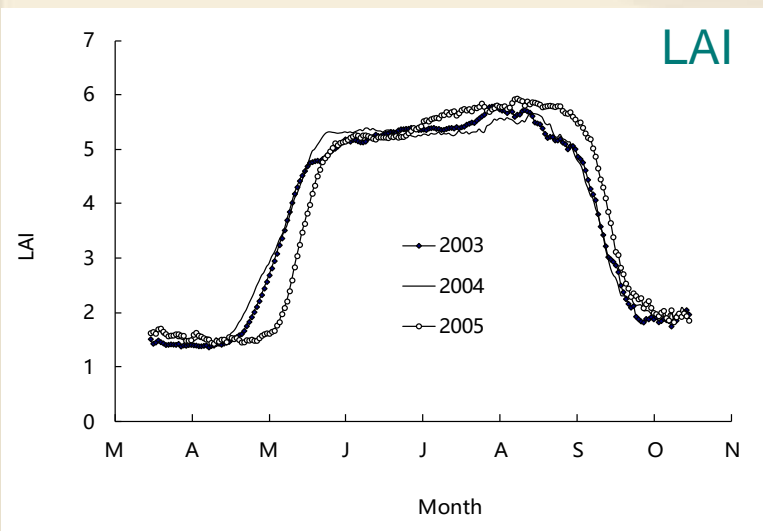
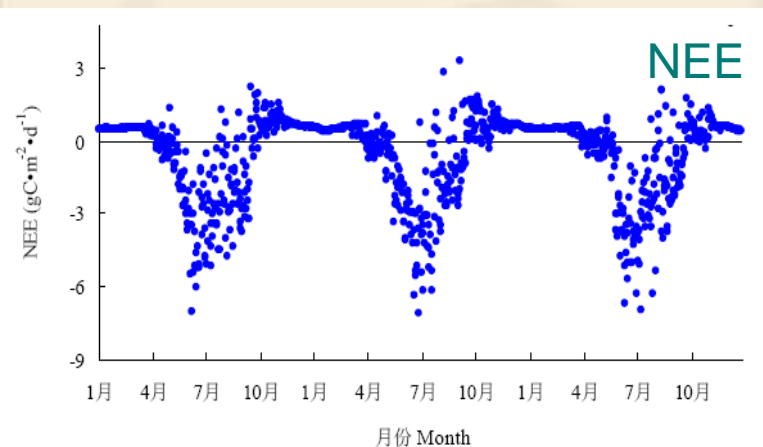


研究方法:

- ❖ 通量观测
- ❖ EC数据插补与修订
- ❖ 辅助森林清查+土壤调查/监测

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(1) 生态系统碳收支——碳汇计量



主要结论:

- ❖ 长白山原始针阔叶混交林作为一个林龄超过250年的原始森林，仍表现为一个稳定，中度的碳汇： $171\text{-}295 \text{ gC}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$
- ❖ 温度和降水是森林碳汇的主要控制因子
- ❖ 长白山原始林：mature forest, not old-growth forest

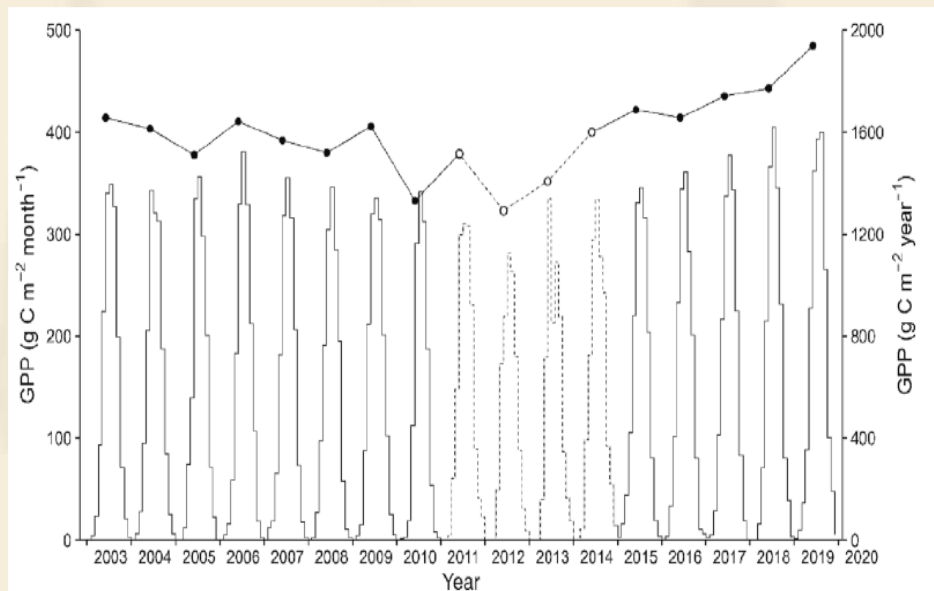
Guan et al. 2006. Agriculture and Forest Meteorology

Wu et al. 2006. Science in China Series

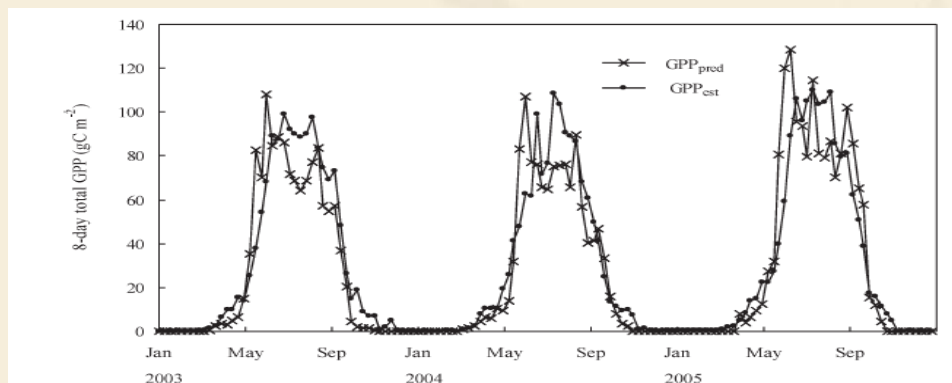
Zhang et al. 2006. Science in China Series

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(1) 生态系统碳汇——生产力



基于通量数据分析，得出长白山原始针阔混交林GPP变化在1312到1838gC·m⁻²a⁻¹，总的趋势就是本世纪初相对稳定，2012年以来，GPP呈现了快速增加模式



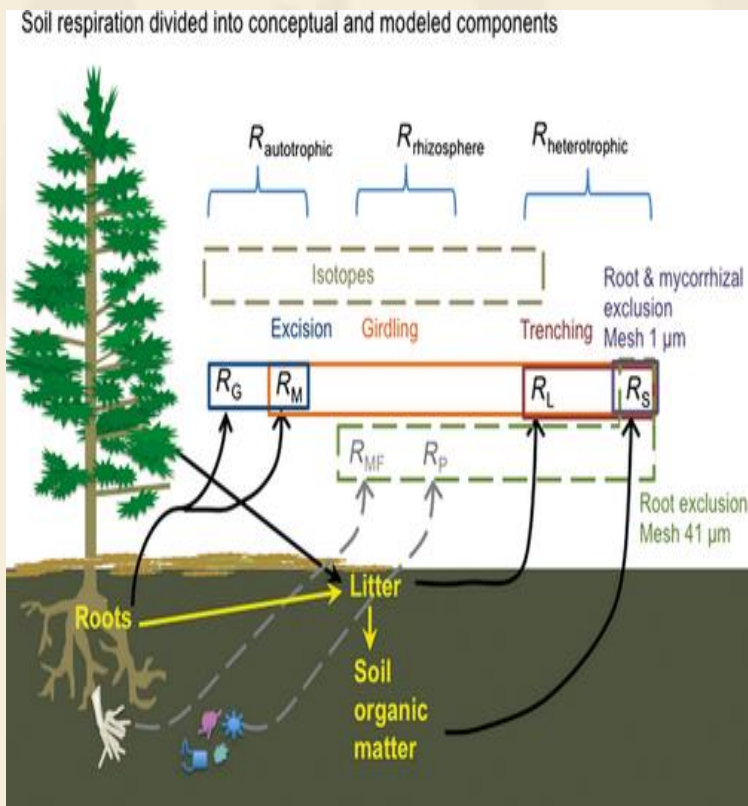
Wu et al. 2009. *Int. J. Remote. Sens.*
Diao et al. 2023. *Ecological Indicators*

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(2) 土壤碳排放

科学问题：

- ❖ 土壤碳排放强度？
- ❖ 土壤碳排放的组分构成是？
- ❖ 土壤碳排放的驱动机制是？



成熟林的另外一个特点就是，它具有较高的呼吸代谢速率，针对土壤碳排放的研究也证实了这一点。

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(2) 土壤碳排放——计量



研究方法:

❖ EC 方法

❖ 箱式法:

Li6400+呼吸叶室

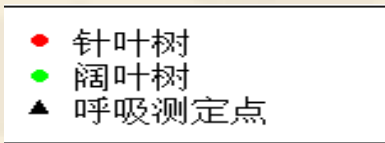
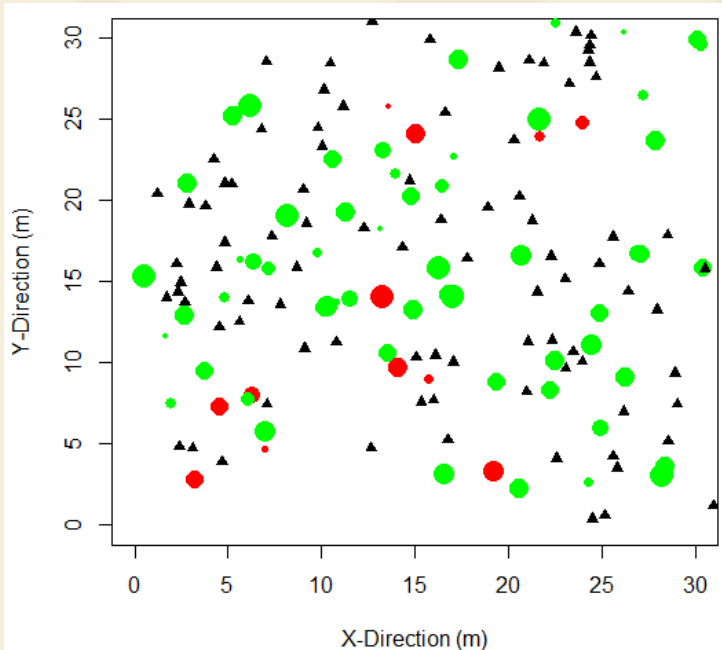
Li8100+ 多路器+呼吸箱



2.2基于通量观测的碳收支研究

(2) 土壤碳排放—空间异质性

研究方法：



样地调查

乔木相对坐标、胸径、树种

呼吸测定

PVC管 (90个)
春,夏,秋季测定,同步测温湿度

样方大小: 30m × 30m

细根生物量

10月底: PVC的位置
土钻: D=20 cm, h=10 cm

土壤理化性质

10月底采集土样 (土钻)
指标: C, N

由于研究对象为混交林, 林下土壤存在较高的异质性, 所以我们建立了一块 30*30米的样地, 布设了90个测点, 这样做, 一方面, 为了更科学的评估森林的土壤碳排放, 另外一方面, 也想看下森林的土壤呼吸异质性到底有多大, 为观样地内 样点数的设置提供依据。

2. 2基于通量观测的碳收支研究

(2) 土壤碳排放——计量

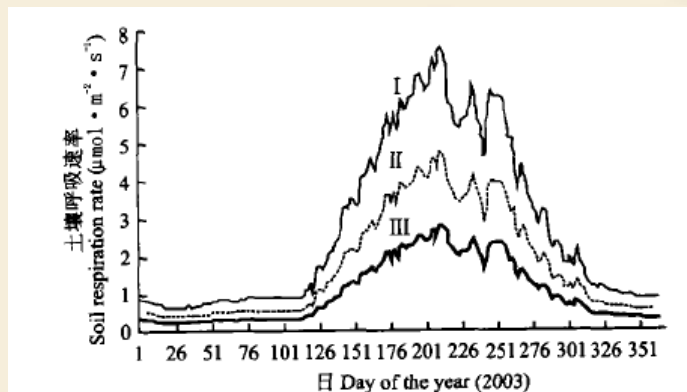
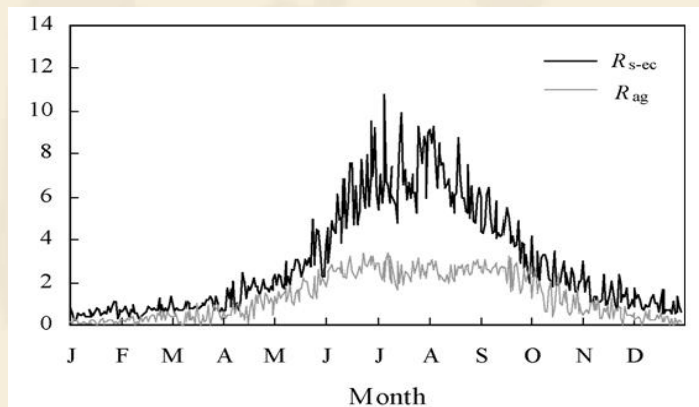
主要结论：

❖ 土壤呼吸：

$1017.0 \text{ gC}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{yr})^{-1}$ Wu et al. 2006. For. Ecol. Manage

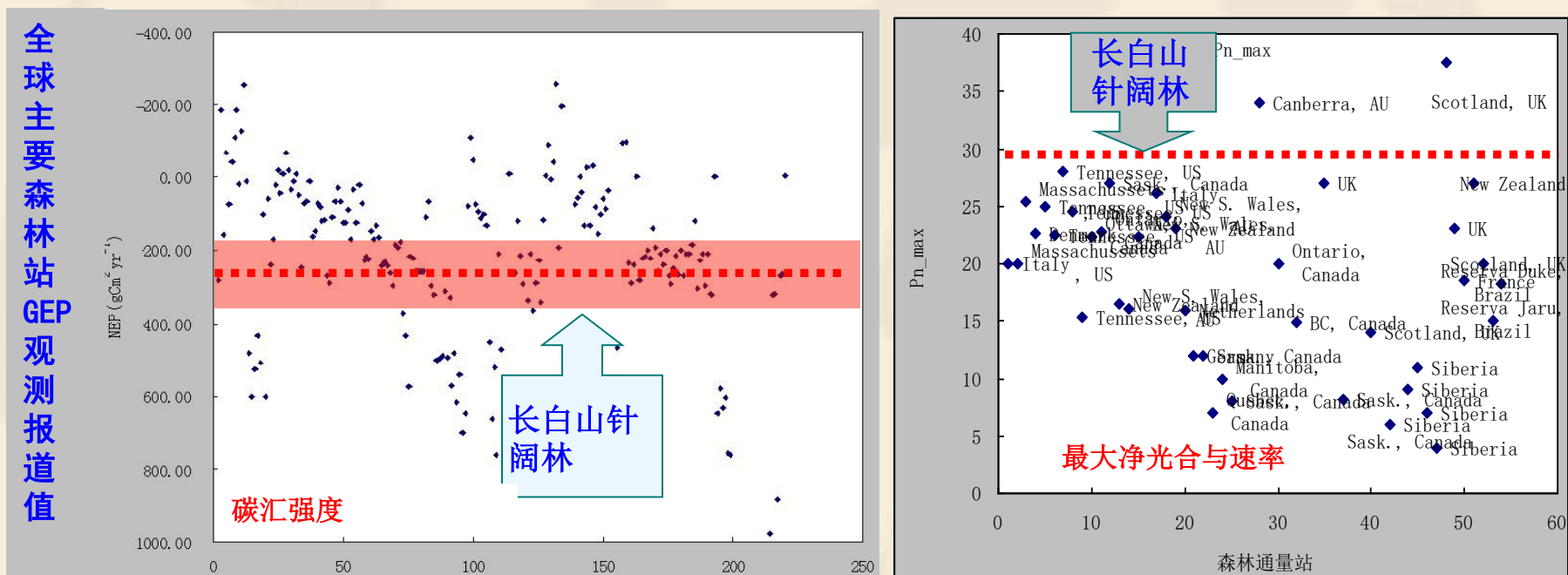
$1009.7 \text{ gC}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{yr})^{-1}$ 王淼. 2006. 应用生态学报

$935.4 \pm 53.3 \text{ gC}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{yr})^{-1}$ Wang Xu et al., 2010. Canada. J. For. Res



基本确定，长白山针阔叶混交林 每年土壤碳排放的量级基本上在 $1000\text{gC}/\text{m}^2$ 左右。

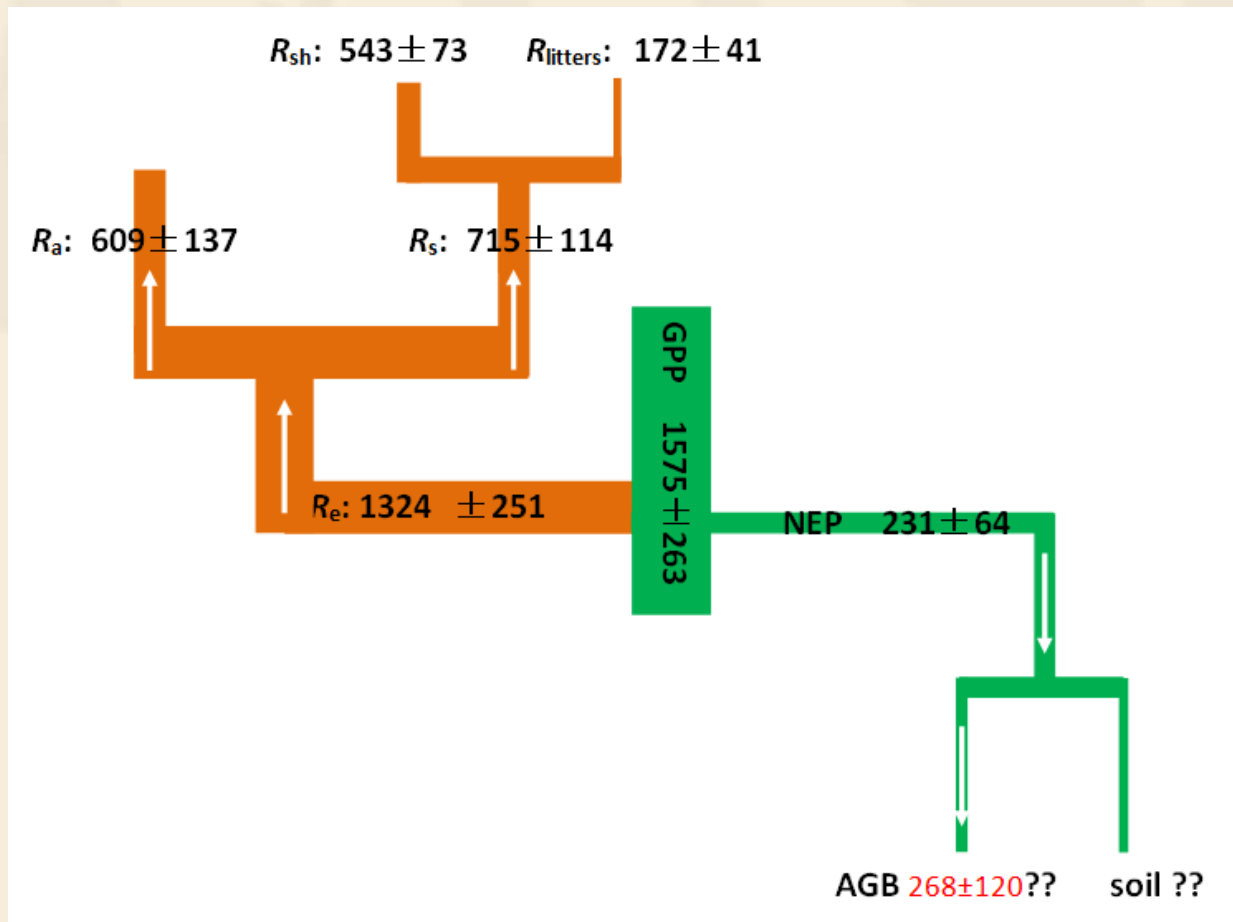
2.2 基于通量观测的碳收支研究



整体上虽然长白山针阔叶混交林具有较高的GPP，但森林的呼吸代谢活动也很活跃，这使得该森林群落维持着一个相对稳定、中等强度的碳汇服务功能

2. 2基于通量观测的碳收支研究

长白山原始针阔林碳汇分配路径 ($\text{gC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

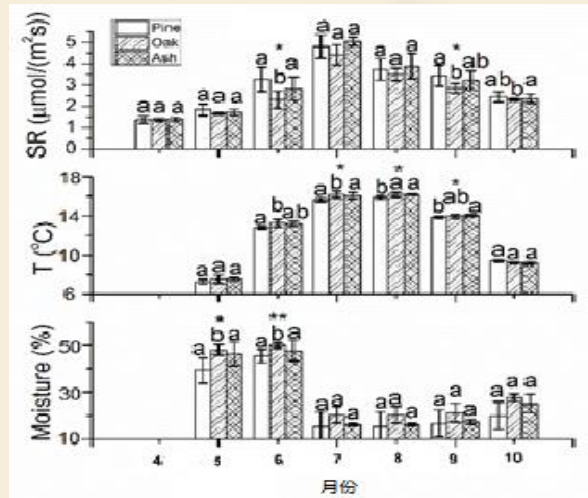
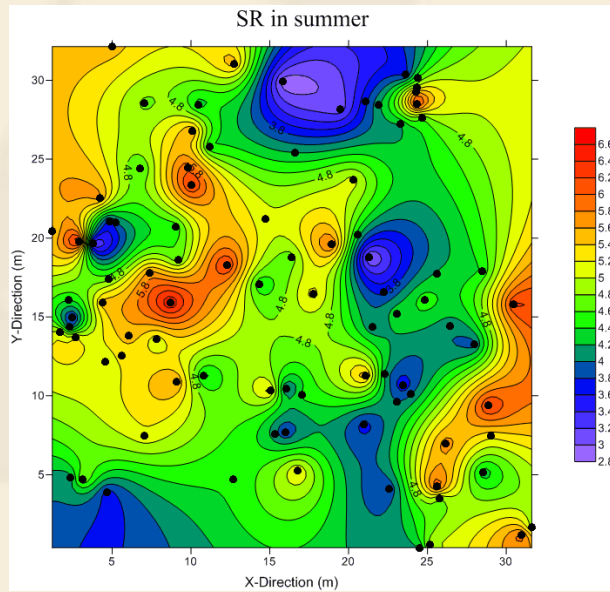


2. 2基于通量观测的碳收支研究

(2) 土壤碳排放—空间异质性

主要结论：

- ❖ 长白山阔叶红松林土壤呼吸速率在空间上存在很明显空间异质性，其变异系数达到了18.3% - 34.2%；
- ❖ 土壤呼吸空间异质性远高于土壤温湿度空间变异性
- ❖ 树种的空间变化是异质性产生的最主要原因：红松 > 水曲柳 > 蒙古栎，树种的呼吸代谢差异和冠下特定小生境决定了空间异质性的格局；
- ❖ 需要至少6个随机测点，才能保证由于空间异质性产生的不确定性低于5%；



3. 基于长白山通量观测的生态学研究

3. 1. 森林CO₂浓度环境研究

3. 2 森林物候研究

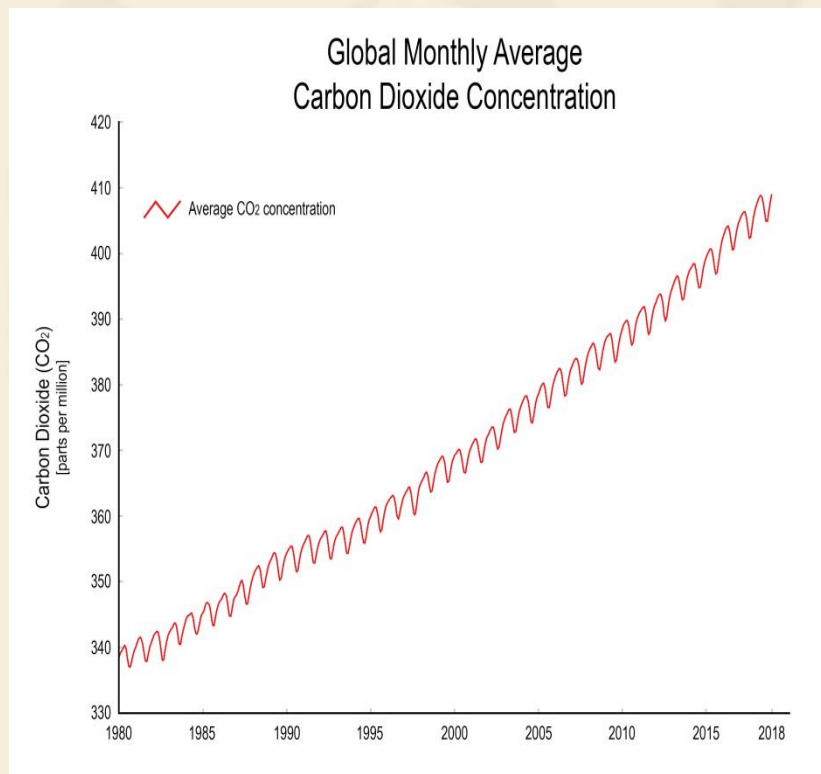
3. 3 森林水文学研究

3. 4 森林能量平衡研究

3. 5



3. 1. 森林CO2浓度环境研究

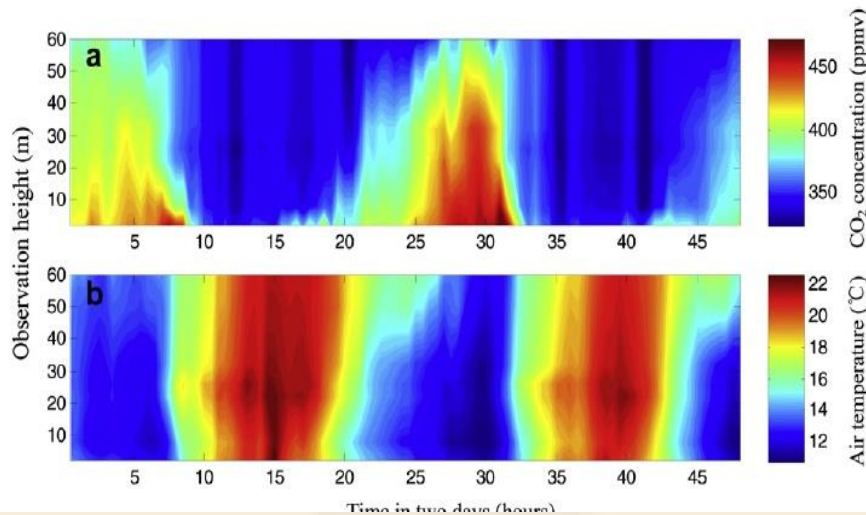
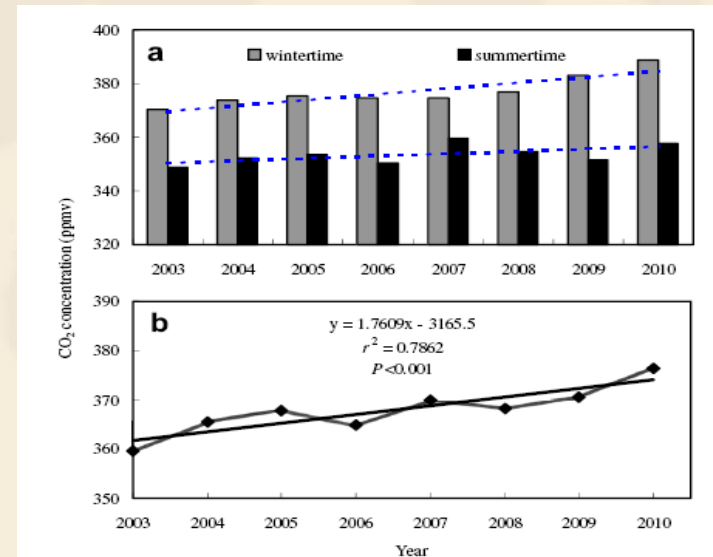
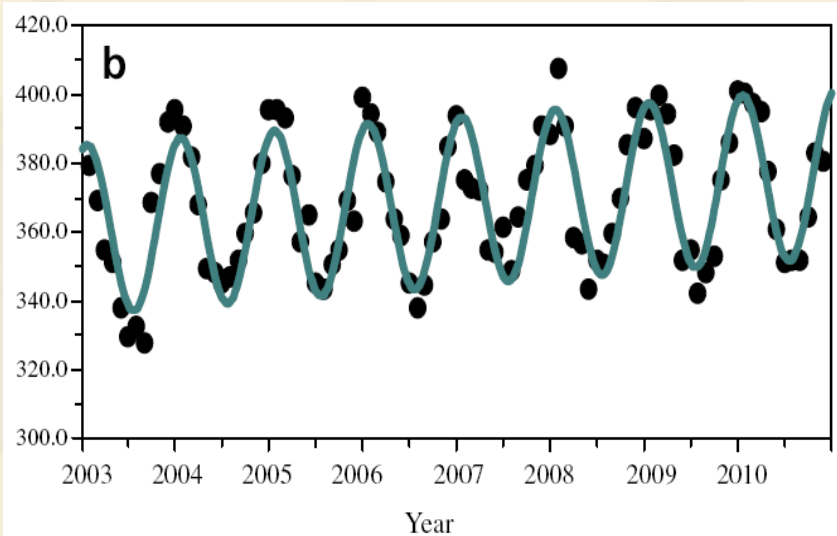


科学问题：

1. 森林冠上冠下是什么样地CO₂浓度环境？

2. 林内CO₂浓度长期升高趋势与全球CO₂浓度的平均增幅是否一致？

2. 森林CO2浓度环境研究



主要结论:

- CO₂ 浓度持续升高: 1.7ppmv/yr
- 晚间和冬季的CO₂增幅高于白天和夏季
- 夜间林内CO₂存在富集现象

---Wu et al. 2012. *Atmos. Environ.*

3. 1. 森林CO2浓度环境研究

科学问题：
全球森林也是如此？

研究方法：
104 个通量站355站年资料分析

主要结论：

- 每年平均增加2.04 ppm
- 季节振幅增加 0.60 ppm

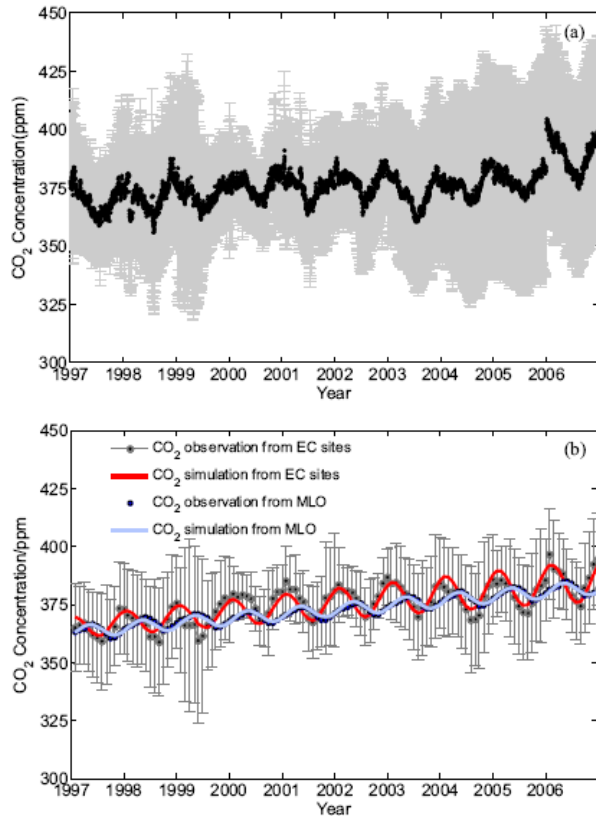
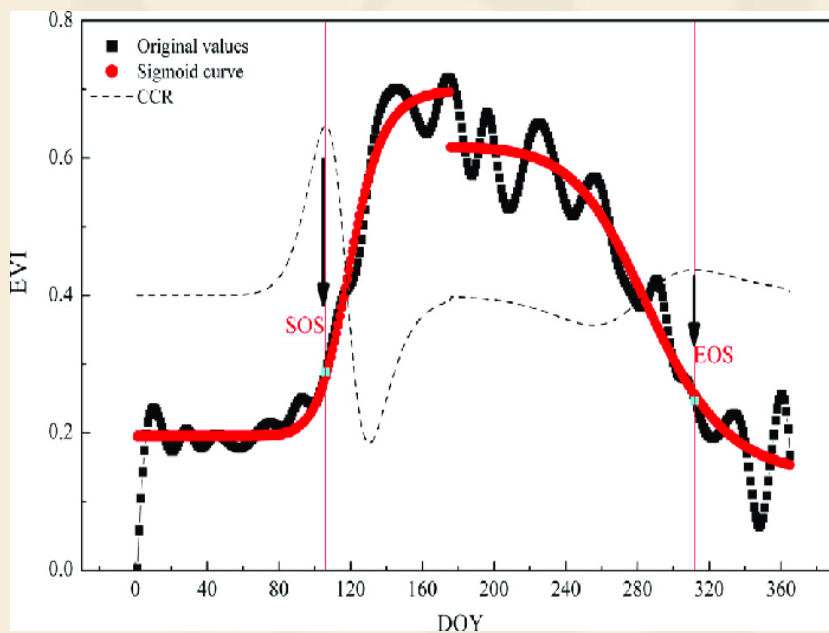


Fig. 2. Evolutions of the daily (a) and monthly (b) CO₂ means over the entire valid FLUXNET sites and Mauna Loa (MLO) from 1997 to 2006. The black circles depicted the observed CO₂ daily means (in upper panel) and monthly means (in the lower panel) from FLUXNET. The blue circles depicted the monthly observed CO₂ (in the lower panel) from MLO. The red and blue lines in lower panel denote the simulated monthly CO₂ values for EC sites and MLO, respectively, using Eq. (1). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

---Liu et al. 2015. *Atmos. Environ.*

3.2. 森林的物候变化

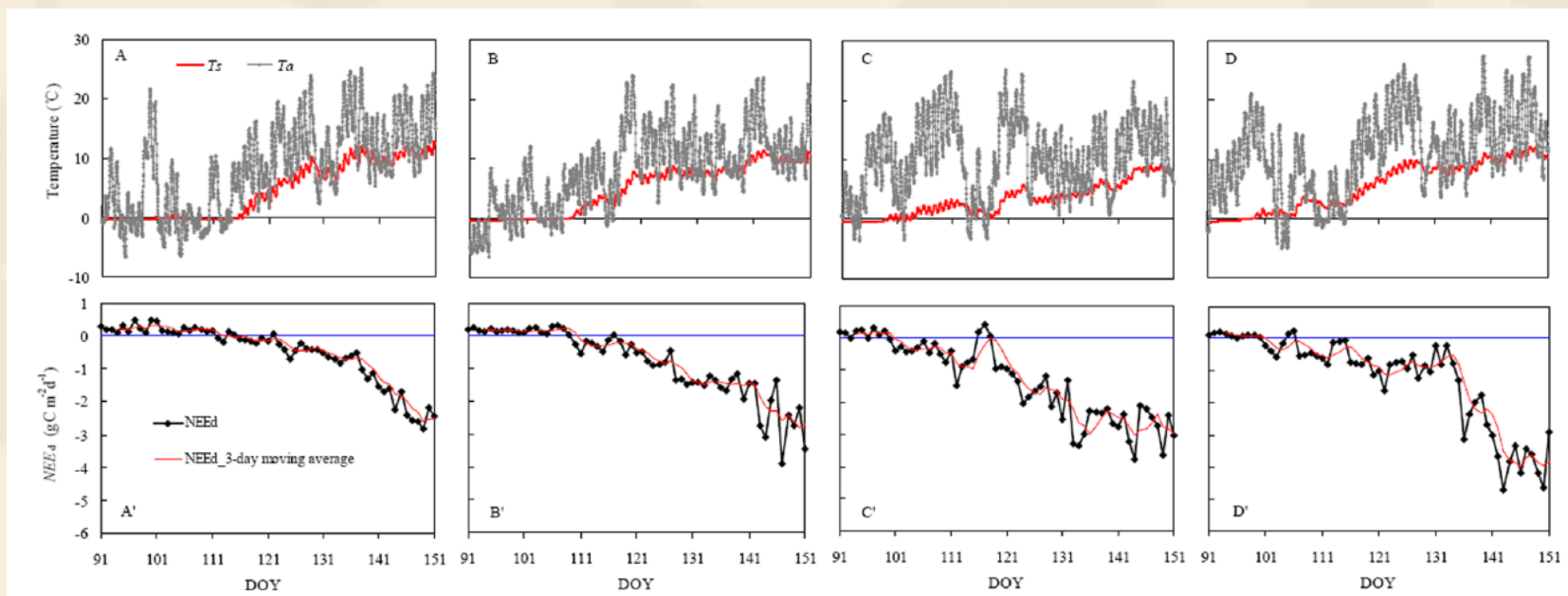


科学问题：

1. 通量数据能否很好的指示森林物候变化？
2. 基于通量提取的物候变化趋势如何？
3. 影响长白山森林物候变化的主要动因是什么？

基于实测的NEE来提取了长白山森林早春物候信息

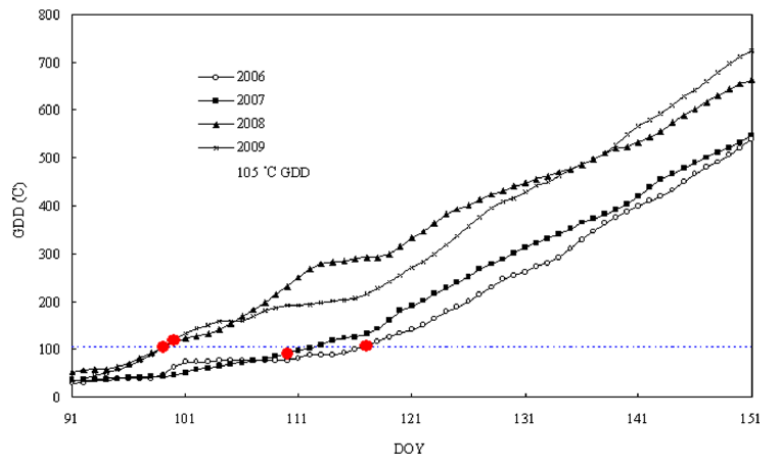
长白山森林物候变化



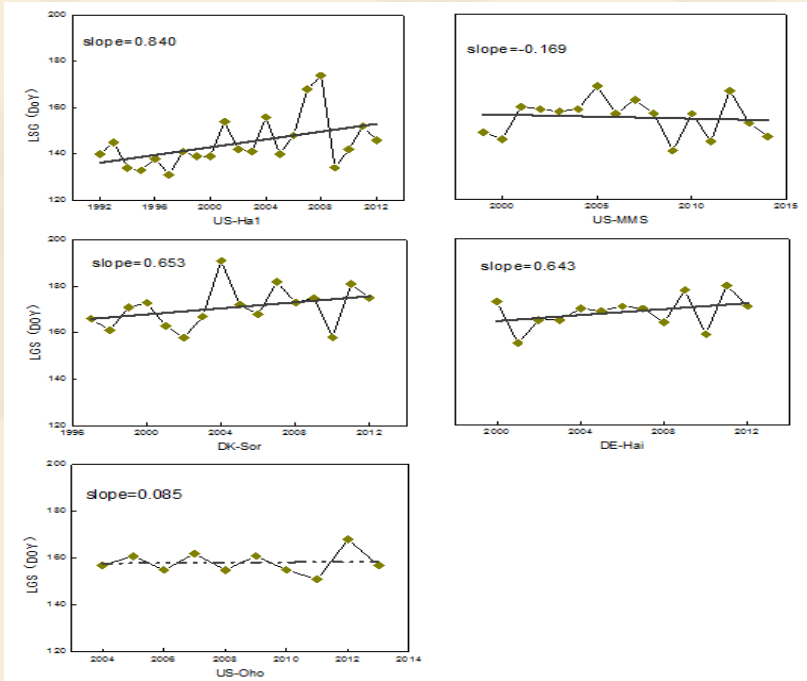
SOS: 3-d running mean $NEE_d < 0$

- ◆ 长白山地区树种早春物候逐年提前
- ◆ 物候期开始时间与土壤融冻期高度关联

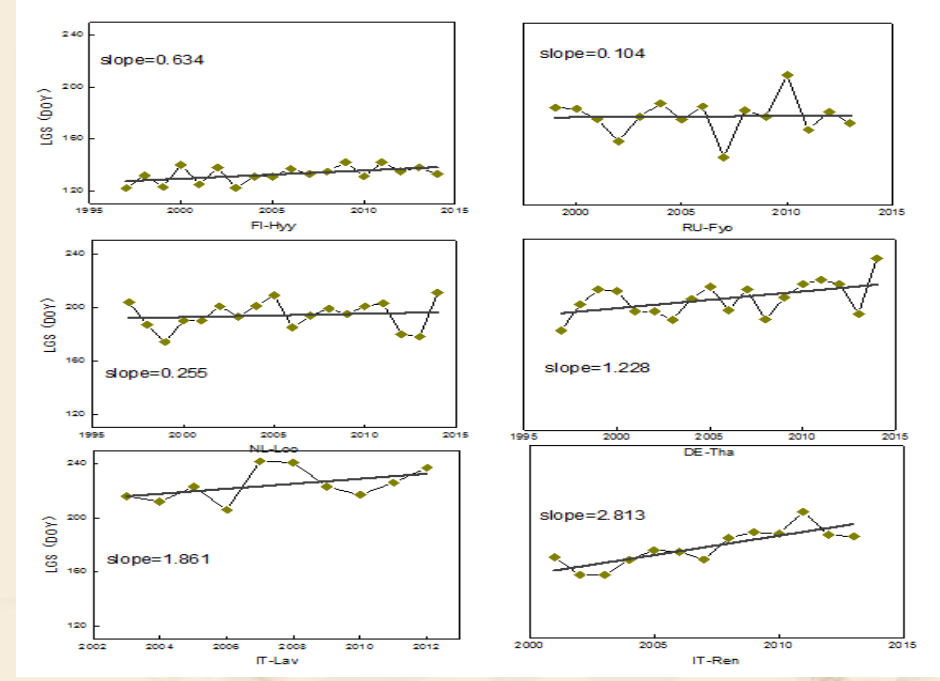
Wu et al. 2011



北半球温带森林物候变化



落叶阔叶林

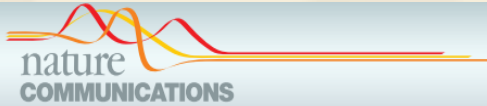


常绿针叶林

利用全球通量网数据，收集了1998年-2012年间所有观测时长超10年的温带森林站点数据，发现：多数站点物候存在显著变化，主要表现为春季物候提前、秋季延迟。春季物候提前的站点中常绿针叶林较多，秋季物候延迟的站点中落叶阔叶林较多；

常绿针叶林的生长季长度 增加幅度要明显高于落叶阔叶林，说明气候变暖对前者的影响更显著。

北半球温带森林物候变化



ARTICLE

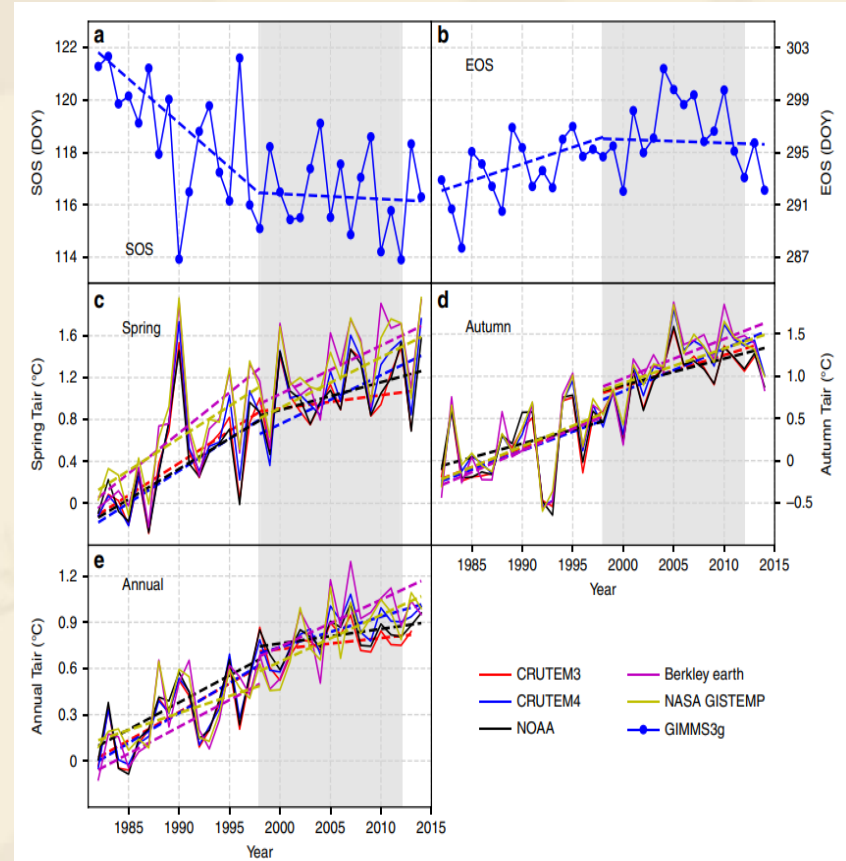
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-10235-8>

OPEN

No trends in spring and autumn phenology during the global warming hiatus

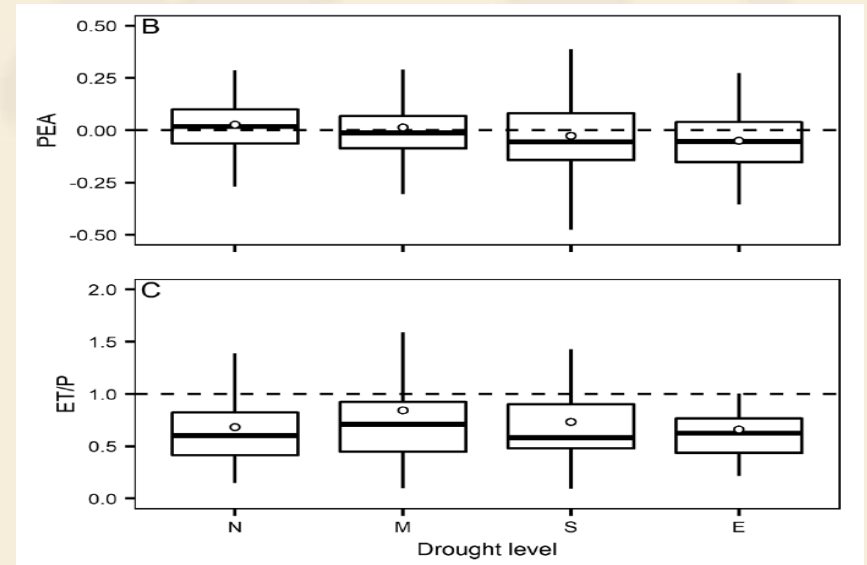
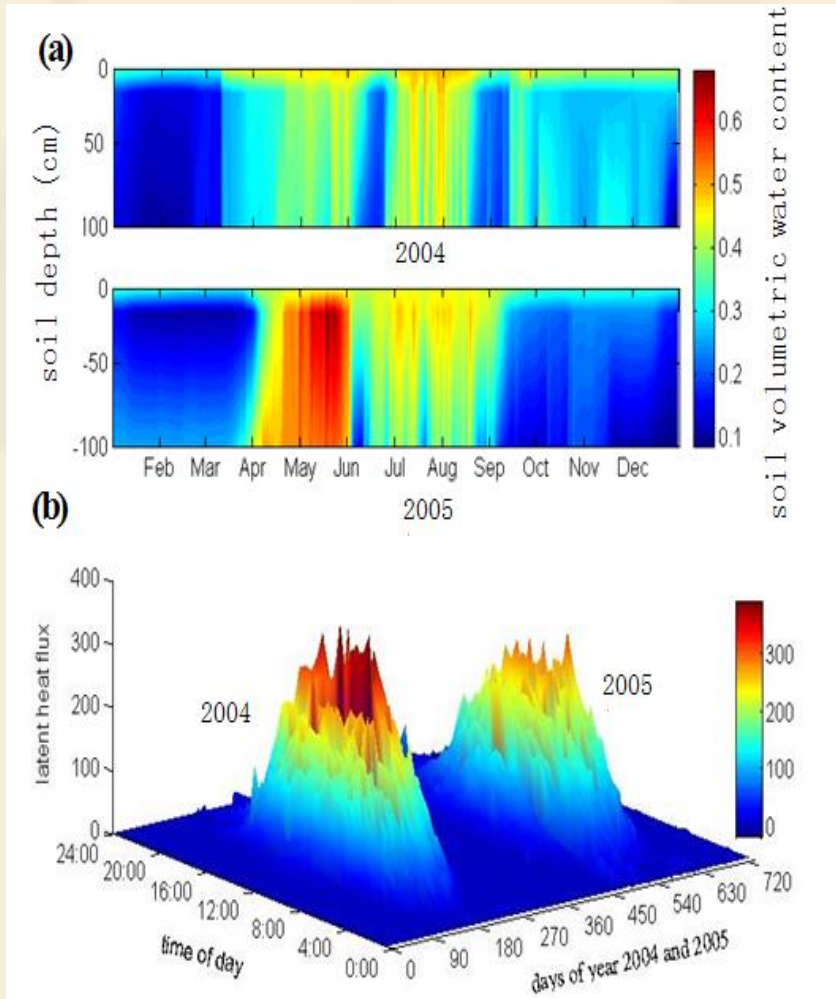
Xufeng Wang^{1,2}, Jingfeng Xiao², Xin Li^{3,4}, Guodong Cheng^{1,5}, Mingguo Ma⁶, Gaofeng Zhu⁷, M. Altaf Arain⁸, T. Andrew Black⁹ & Rachhpal S. Jassal⁹

Phenology plays a fundamental role in regulating photosynthesis, evapotranspiration, and surface energy fluxes and is sensitive to climate change. The global mean surface air temperature data indicate a global warming hiatus between 1998 and 2012, while its impacts on global phenology remains unclear. Here we use long-term satellite and FLUXNET records to examine phenology trends in the northern hemisphere before and during the warming hiatus. Our results based on the satellite record show that the phenology change rate slowed down during the warming hiatus. The analysis of the long-term FLUXNET measurements, mainly within the warming hiatus, shows that there were no widespread advancing (or delaying) trends in spring (or autumn) phenology. The lack of widespread phenology trends partly led to the lack of widespread trends in spring and autumn carbon fluxes. Our findings have significant implications for understanding the responses of phenology to climate change and the climate-carbon feedbacks.



主要结论：1998年到2012年间是个短暂的气候变暖间歇期，这个期间没有发生明显的物候期变化

3.3 基于通量观测的森林水文学研究

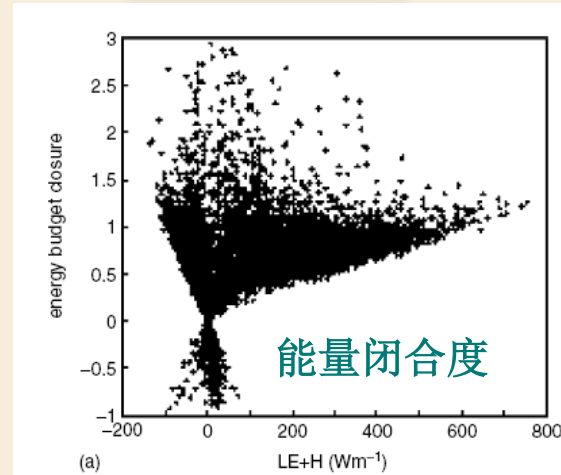
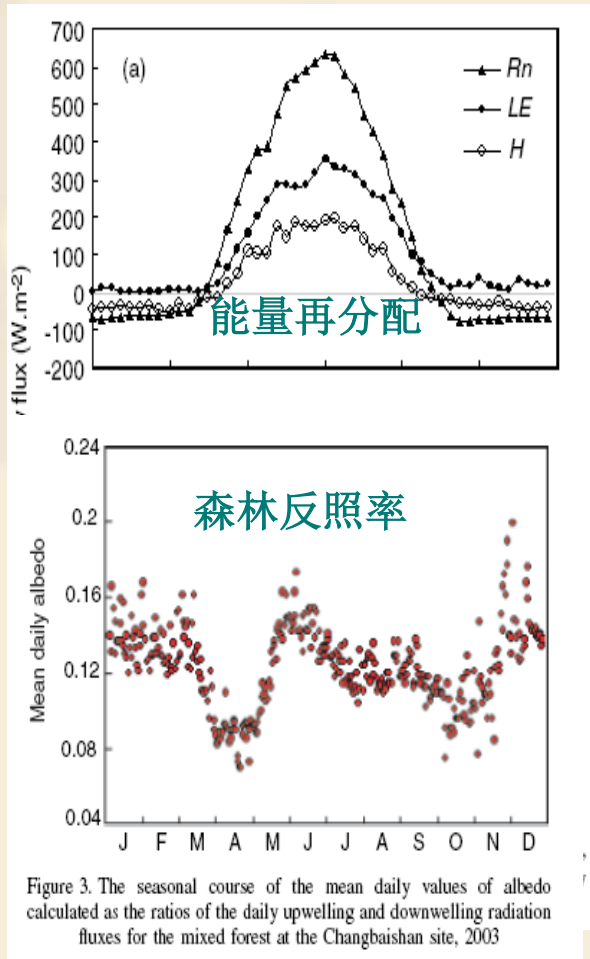


- ❖ 轻度干旱的年份，森林的蒸散耗水反而高于正常年份
- ❖ 未来降水减少的气候变化情境下，森林覆盖的增加会有加剧流域干旱的趋势

Wu et al .2013. Ecohydrology

Diao et al. 2021. Can. J. For. Res.

3.4 森林能量平衡研究



主要结论:

- 森林反照率低于绝大多数地表覆盖类型
- 森林的能量再分配过程：潜热通量占主导
- 森林能量闭合度接近86%

---Wu et al. 2007. *Hydrol. Process.*

3. 基于长白山通量观测的生态学研究

3.1. 森林CO₂浓度环境研究

3.2 森林物候研究

3.3 森林水文学研究

3.4 森林能量平衡研究

3.5 生态系统模型构建、优化与验证研究

-----Shi et al. 2010. J. Geophys. Res

3.6 同位素生态学研究

----- Diao et al., 2020. Forests; Diao et al., 2020. Sci. Total Environ; Diao et al. 2023. Ecological Indicators

3.7 遥感产品的验证研究

----Wu et al., 2009. Internat. J. Remote Sens. Wu et al. 2011. J. Appl. Remote Sens.



请您多提宝贵意见！

吴家兵

wujb@iae.ac.cn

http://www.iae.cas.cn/gb2019/stqh_iae/jj_stqh/