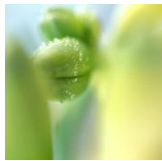
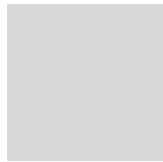
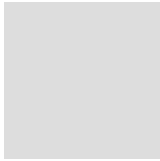




第四届全国稳定同位素生态学学术研讨会

分会场一总结报告——

大气温室气体的稳定同位素研究进展与科学问题



李旭辉、**温学发**

曲斌、徐家平、黄文晶、谢燕红、
赵佳玉、张秀芳

提纲

1、仪器和技术问题

1.1 仪器现状、研发与维修服务

1.2 工作标气与数据溯源至国际标准

1.3 数据质控与统计方法应用

2、关注的主要科学问题

2.1 基于单种或多种同位素的来源拆分

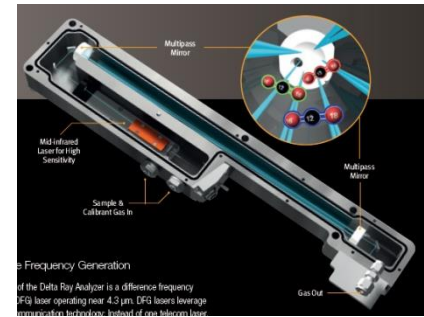
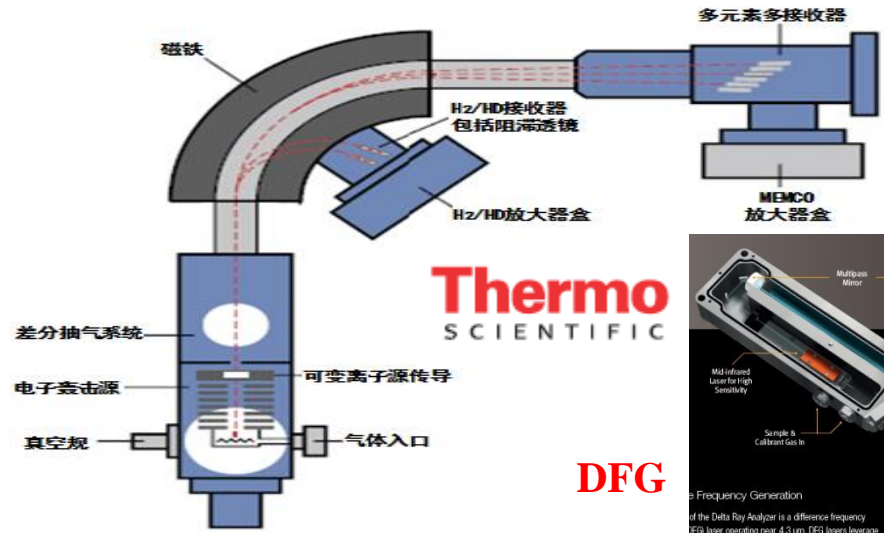
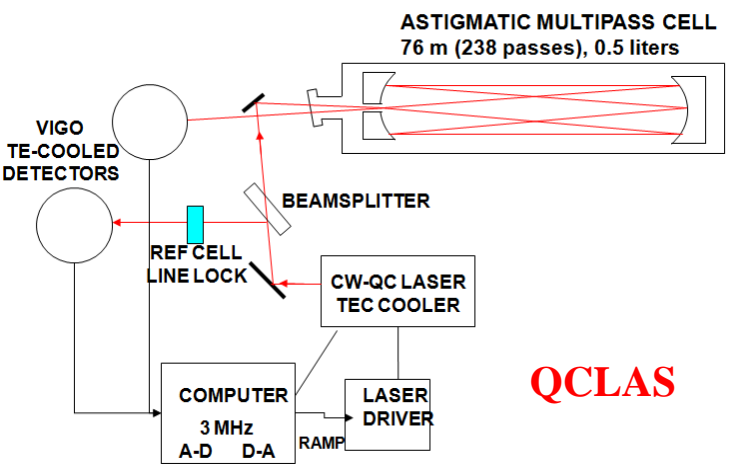
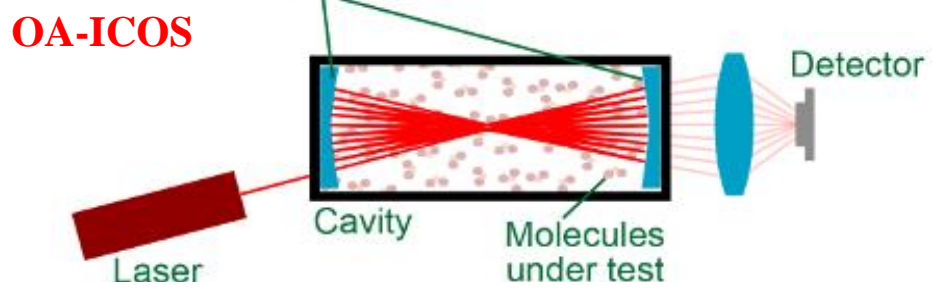
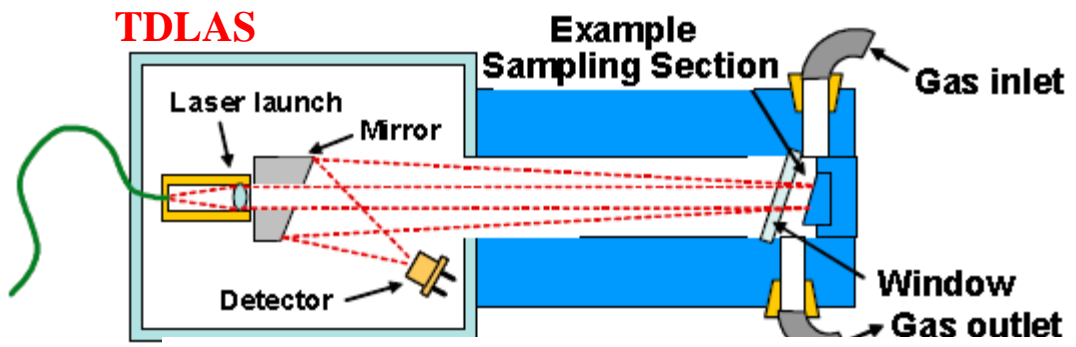
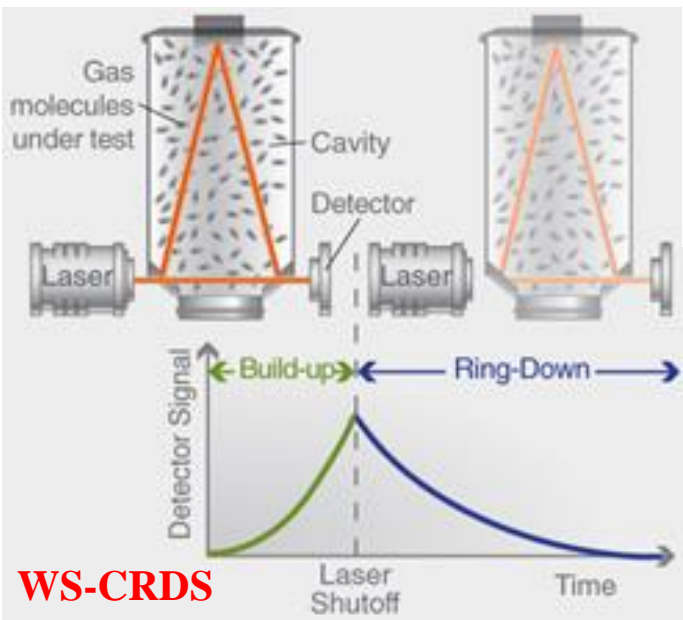
2.2 复杂地形条件下同位素观测的作用

2.3 碳氮稳定同位素标记的应用



1.1 仪器现状、研发与维修服务

IRIS vs. IRMS

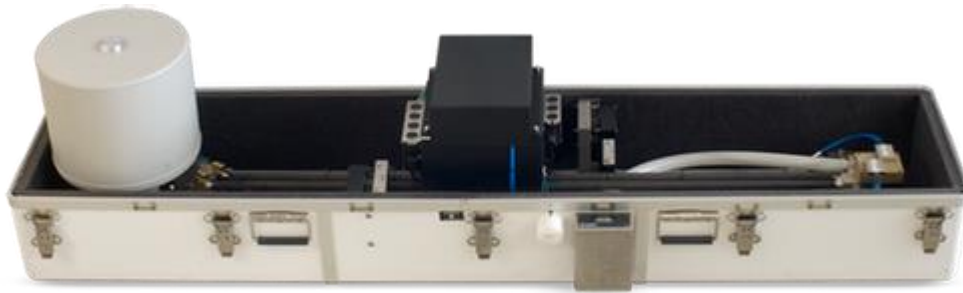


稳定同位素红外光谱(IRIS) — 浓度依赖性和时间漂移

δD 和 $\delta^{18}O-H_2O$ 、 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O-CO_2$ 、 $\delta^{13}C-CH_4$ 、 $\delta^{15}N$ 和 $\delta^{18}O-N_2O$



TDLAS



Thermo SCIENTIFIC DFG



【 L G R 】

OA-ICOS



PICARRO

WS-CRDS



Aerodyne Research
QCLAS



稳定同位素红外光谱(IRIS)仪器与前处理设备连用?



DRI-碳分析仪

Aerodyne 碳同位素分析仪



iTOC - CRDS 碳同位素分析仪

稳定同位素质谱(IRMS)—信号强度依赖性与时间漂移

- 动态快速燃烧法 (Flash EA) 测定固体 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$
- 高温裂解法 (TC / EA) 测定液态水或固体 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
-



元素分析仪
Flash 2000 HT



专用气相色谱仪
GC-IsoLink

- 各种含氮有机物体系中单体的 $\delta^{15}\text{N}$
- 天然气中单体的 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$
- 石油单体中的 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$
- 混合体系中正构烷烃的 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$
- 大气颗粒中多环芳烃中单体的 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$
- 葡萄酒中乙醇的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$
- 香料中香草醛中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$
- 混合体系中咖啡因的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$
-



多用途气体在线制备装置
Gasbench



痕量气体预浓缩装置
Precon

ThermoFisher
SCIENTIFIC



碳酸盐装置
KIELIV

- 通过 H_2/Pt 水平衡测定水中的 δD
- 通过 CO_2 水平衡测定水中的 $\delta^{18}\text{O}$
- 固体碳酸盐中的 $\delta^{13}\text{C}$
- 溶解性无机碳(DIC) 的 $\delta^{13}\text{C}$
- 溶解性有机碳(DOC) 的 $\delta^{13}\text{C}$
- 大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
- 大气 O_2 或水中溶解 O_2 的 $\delta^{18}\text{O}$
- 大气 N_2 的 $\delta^{15}\text{N}$
- 与 Precon 或反硝化组件联用时:
- 大气 CH_4 的 $\delta^{13}\text{C}$ 或 N_2O 的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
- 水体硝酸盐中的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$
-



专用液相色谱仪
LC IsoLink

- 蜂蜜中各类糖分如葡萄糖、果糖、二糖和三糖的 $\delta^{13}\text{C}$
- 葡萄酒中乙醇和甘油的 $\delta^{13}\text{C}$
- 果汁饮品中柠檬酸、苹果酸和奎尼酸等有机酸的 $\delta^{13}\text{C}$
- 饮料中咖啡因的 $\delta^{13}\text{C}$
- 香料提取物中香草醛的 $\delta^{13}\text{C}$
- 天然水体溶解性有机碳的 $\delta^{13}\text{C}$
- 有机酸、氨基酸、RNA 的 $\delta^{13}\text{C}$
-



Thermo Scientific (Isoprime/SerCon/ nu instruments) 主机+外设联用

仪器研发以及售后服务问题

- 1.特殊环境（高温、高湿、高原环境）条件下仪器的稳定性问题有待解决
- 2.返厂维修时间长，国内售后维修服务还有待提高
- 3.增加仪器培训内容，加强自检能力

1.2 工作标气与数据溯源至国际标准

▶ 同位素组分表示方法:

$$\delta_{\text{sp}} = \left(\frac{R_{\text{sp}}}{R_{\text{std}}} - 1 \right) \times 1000$$

▶ 国际通用的同位素标准物质:

同位素	测定比率	同位素组成标记	国际参照标准
^2H	$^2\text{H}/^1\text{H}$	δD	SMOW或V-SMOW
^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	$\delta^{13}\text{C}$	PDB或V-PDB(碳酸盐)
^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	$\delta^{15}\text{N}$	大气 N_2
^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	SMOW或V-SMOW
			PDB或V-PDB (碳酸盐)
^{34}S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	$\delta^{34}\text{S}$	CDT

- SMOW, Standard Mean Ocean Water, 标准平均海洋水;
- V-SMOW, Vienna-Standard Mean Ocean Water, 维也纳SMOW;
- PDB, Pee Dee Belemnite, 南卡罗来那州白垩系皮狄组的海成石灰石化石;
- V-PDB, Vienna-PDB, 维也纳PDB;
- CDT, Canyon Diablo Meteorite, 亚利桑那州Canyon Diablo 铁陨石中的陨铁硫。

稳定同位素红外光谱(IRIS/IRMS) —— 数据溯源

(1) 单点溯源:

相对于参考气单点溯源: 通过将参考气 δ 值溯源至国际标准化进行IRMS内部计算

单个标准物质单点溯源: 测定序列中添加单个已知 δ 值($\delta_{T, \text{std}}$)的标准物质溯源, 但只适用于标准物质与样品 δ_T 较为接近的情况。样品的真值 $\delta_{T, s}$ 为:

$$\delta_{T, s} = \delta_{m, s} + (\delta_{T, \text{std}} - \delta_{m, \text{std}})$$

(2) 两点或多点溯源: 建立两个或多个涵盖样品 δ 值($\delta_{T, \text{std}}$)的标准物质真值 $\delta_{T, \text{std}}$ 和测定值 $\delta_{m, \text{std}}$ 的线性关系:

$$\delta_{T, \text{std}} = a * \delta_{m, \text{std}} + b$$

其中, a 和 b 分别为线性回归拟合参数。

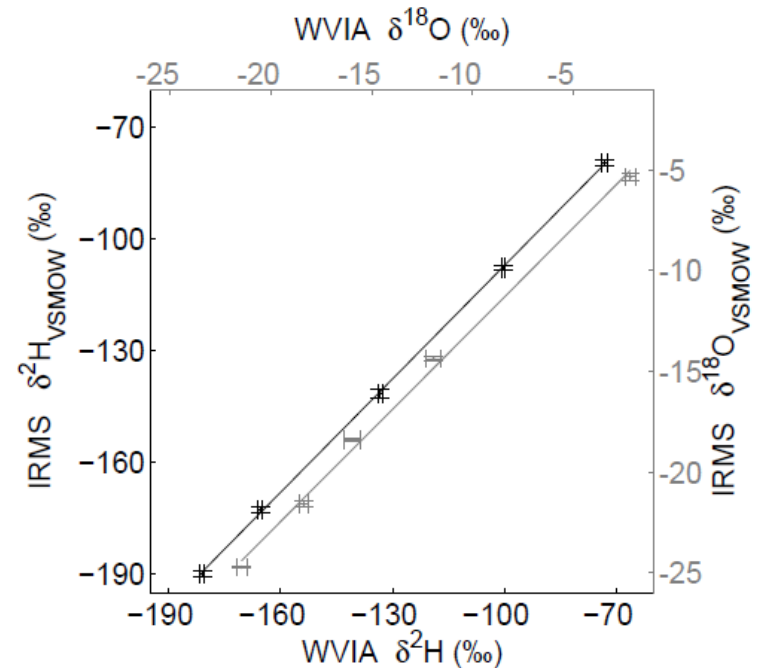
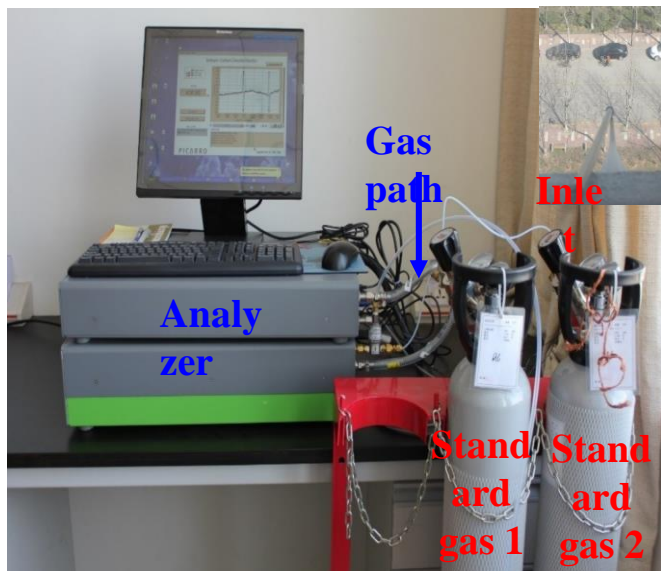


Fig. 9. Calibration of $\delta^2\text{H}$ (black) and $\delta^{18}\text{O}$ (grey) with different water standards. Weighted least squares fit through the data results in $\delta^2\text{H}_{\text{IRMS}} = (1.013 \pm 0.011)\delta^2\text{H}_{\text{WVIA}} - (5.82 \pm 1.53)$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{IRMS}} = (1.007 \pm 0.019)\delta^{18}\text{O}_{\text{WVIA}} - (2.92 \pm 0.32)$ (solid lines), $R^2 > 0.99$.

Sturm et al., 2010

仪器工作标气的制备与应用



(1)工业来源的标气($\delta^{13}\text{C}=-30\text{‰}$)与实验目标同位素比值(如大气 -8‰)存在巨大差异,并且只能实现单点标定,急需特殊同位素比值的标气。

(2)无法实现混合比和同位素比值的单独校准,采用混合比的矫正方案对标气混合比的精度提出了更高要求。

(3)长时间观测过程中,标气可能由于内部压力减少和轻微漏气导致混合比及同位素比值的改变,可能影响标定结果。

(4)根据标气特点、数量对标定方案的合理选择

(5)不同公司仪器观测技术方案的不同对标定周期、进气口是否做除水处理等都要做特定的考虑。

标气信息。

标气	CO_2 ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)*	使用时间
1低	381.89 ± 0.99	-29.75 ± 0.27	2013年3月-2014年8月
1高	502.35 ± 0.28	-30.01 ± 0.18	2013年3月-2014年8月
2低	380.92 ± 0.95	-29.75 ± 0.27	2014年9月-2015年8月
2高	501.05 ± 0.33	-30.01 ± 0.18	2014年9月-2015年8月

* (n=41) 检测结果来自中国农科院(CAAS)和中国林科院(CAFS).

1.3 数据质控与统计方法应用

- **理论**：理想的校正方法是利用不同同位素组成(δ_T)的CO₂等标准物质产生多个浓度梯度系列涵盖待测CO₂等样品的浓度和 δ 测定值(δ_m)，可有效校正浓度依赖性和时间漂移并溯源至国际标准。
- **实践**：标定气体涵盖标定目标CO₂等浓度的范围比其涵盖 δ 的范围更为重要(建议标定气体 δ 接近目标气体 δ)；两点动态跟踪大气CO₂等浓度的校正策略。

浓度依赖性校正—理论校正

□ 利用**2个工作标气**建立轻重同位素混合比($C^{16}O_2$ 和 $C^{16}O^{18}O$; $^{12}CO_2$ 和 $^{13}CO_2$)测量值和真值的线性关系, 对样品气体进行校正, 校正方程可以表示为:

$$X_{s,t}^L = \frac{X_{2,t}^L - X_{1,t}^L}{X_{2,m}^L - X_{1,m}^L} (X_{s,m}^L - X_{1,m}^L) + X_{1,t}^L$$

$$X_{s,t}^H = \frac{X_{2,t}^H - X_{1,t}^H}{X_{2,m}^H - X_{1,m}^H} (X_{s,m}^H - X_{1,m}^H) + X_{1,t}^H$$

其中 $X_{s,t}$ 、 $X_{1,t}$ 和 $X_{2,t}$ 为样品气、标气1和标气2的摩尔混合比真值, $X_{s,m}$ 、 $X_{1,m}$ 和 $X_{2,m}$ 为样品气、标气1和标气2的摩尔混合比测量值。上标L和H分别为轻、重同位素。

□ 利用校正后的轻重同位素的混合比计算 δ_a 值:

$$\delta_a = (R_a / R_{VPDB} - 1) \times 1000$$

其中, $R_a^{-18O} = 0.5 \times [C^{18}O^{16}O] / [C^{16}O_2]$, $R_a^{-13C} = [^{13}CO_2] / [^{12}CO_2]$ 。

[¹²CO₂]和[¹³CO₂]的计算

标准气体中的[¹²CO₂]和[¹³CO₂]值可以从已知总[CO₂]和δ¹³C值根据如下公式获得:

$$[CO_2] = [^{12}CO_2] + [^{13}CO_2] + f[CO_2]$$

$$R_a = \frac{[^{13}C]}{[^{12}C]} = \frac{[^{13}CO_2]}{[^{12}CO_2]} = R_{VPDB} (1 + \delta_a / 1000)$$

$$[^{12}CO_2] = [CO_2] (1 - f) / (1 + R_{VPDB} (1 + \delta_a / 1000))$$

$$[^{13}CO_2] = [CO_2] (1 - f) - [^{12}CO_2]$$

其中[CO₂]是包括所有同位素的总CO₂混合比。

f是包含除了[¹²CO₂]和[¹³CO₂]外其他同位素含量的比例(0.00474)。

R_a是样品轻重同位素的摩尔比值。

R_{VPDB}是标准的¹³C/¹²C摩尔比值(0.0111797)。

δ_a是碳同位素组成。

[C¹⁶O₂]和[C¹⁸O¹⁶O]的计算

标准气体中的[C¹⁶O₂]和[C¹⁸O¹⁶O]可以从已知总[CO₂]和δ¹⁸O值根据如下公式获得：

$$[CO_2] = [C^{16}O_2] + [C^{18}O^{16}O] + f[CO_2]$$

$$R_a = \frac{[^{18}O]}{[^{16}O]} = 0.5 \times \frac{[C^{18}O^{16}O]}{[C^{16}O_2]} = R_{VPDB} (1 + \delta_a / 1000)$$

$$[C^{16}O_2] = [CO_2] (1 - f) / (1 + 2R_{VPDB} (1 + \delta_a / 1000))$$

$$[C^{18}O^{16}O] = [CO_2] (1 - f) - [C^{16}O_2]$$

其中[CO₂]是包括所有同位素的总CO₂混合比。

f是包含除了C¹⁶O₂和C¹⁸O¹⁶O外其他同位素含量的比例(0.01185)。

R_a是样品轻重同位素的摩尔比值，0.5的因子为CO₂中存在轻重两个氧原子，忽略了含量较少的¹²C¹⁸O¹⁸O的影响。

R_{VPDB}是标准的¹⁸O/¹⁶O摩尔比值(0.002088349077)。

δ_a是氧同位素组成。

高频率同位素数据分析模型及统计回归方法

Keeling图和Miller-Tans方法

$$C_a = C_b + C_s \quad (1)$$

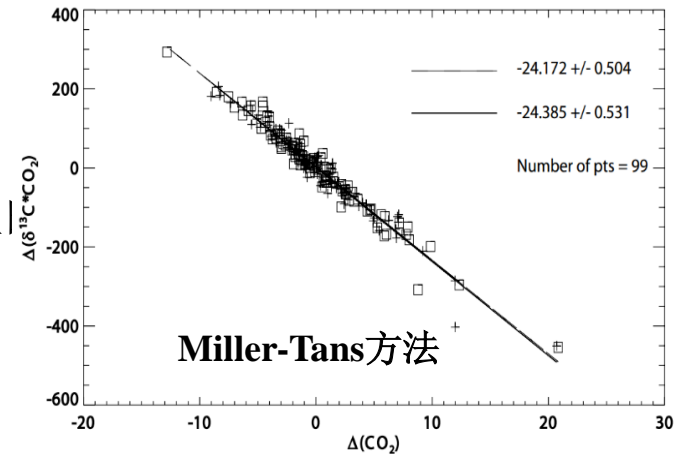
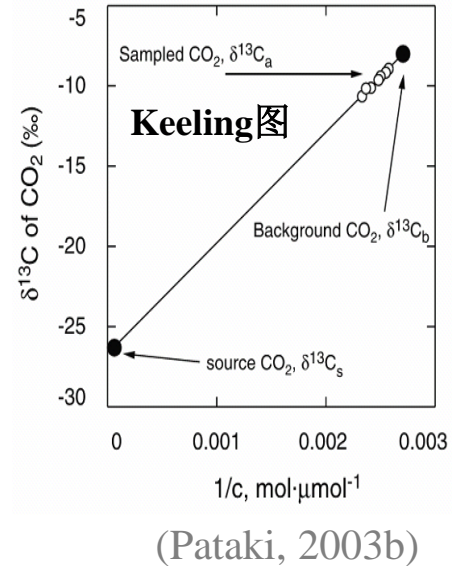
$$\delta_a C_a = \delta_b C_b + \delta_s C_s \quad (2)$$

$$\delta_a = C_b(\delta_b - \delta_s)/C_a + \delta_s \quad (3) \quad (\text{Keeling, 1958})$$

$$\delta_a C_a - \delta_b C_b = \delta_s (C_a - C_b) \quad (4) \quad (\text{Miller, 2003})$$

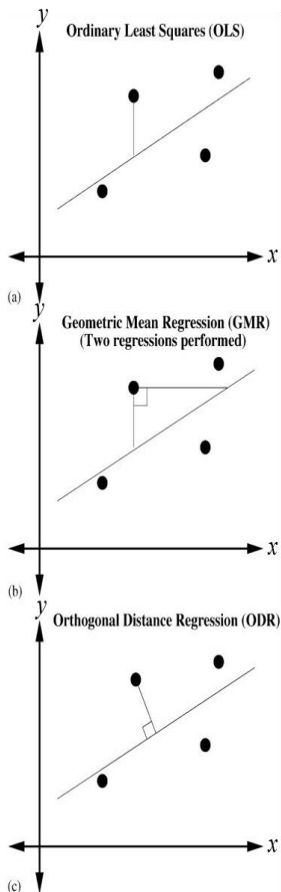
a:大气, b:本底, s:排放源

C:摩尔分数, δ :同位素比值



- (1) Miller-Tans 方法和Keeling图对估算不同冠层 δ_s 值的影响;
- (2) Miller-Tans 方法强迫截距为0对估算 δ_s 值的影响;
- (3) 本底站的选取对估算 δ_s 值的影响;
- (4) 不同回归方式对估算 δ_s 值的影响(OLS和GMR)。
- (5) 利用多种同位素与示踪物提升来源拆分的能力

高频率同位素数据分析模型及统计回归方法



ODR、GMR (Miller and Tans, 2003; Pataki et al., 2003a; Ogée et al., 2003)

GMR+OLS (Pataki et al., 2003b)

OLS (Zobitz et al., 2006)

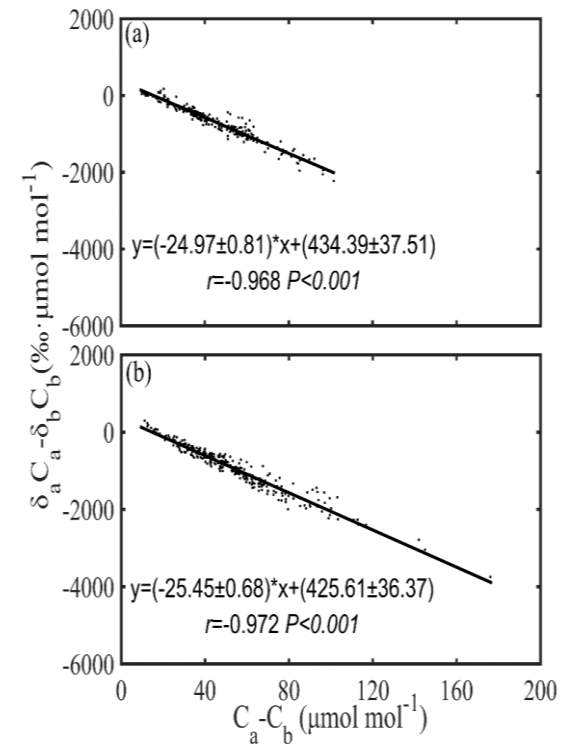
OLS

或者GMR在高浓度差情况下

(Kayler et al., 2010)

York solution
或者OLS

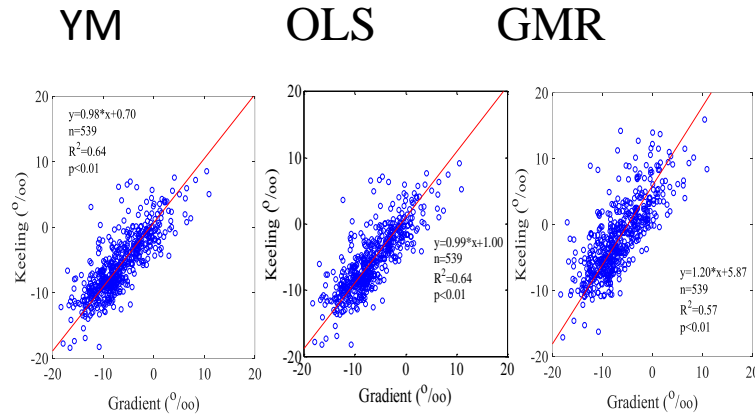
(Wehr and Saleska, 2017)



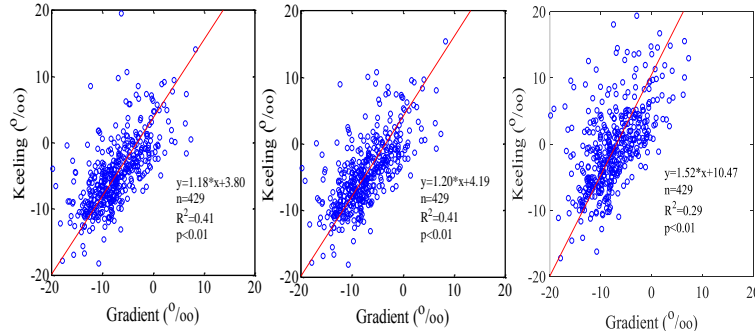
不同回归方式对估算 δ_s 值的影响(OLS和GMR)

高频率数据的处理 Keeling Plot

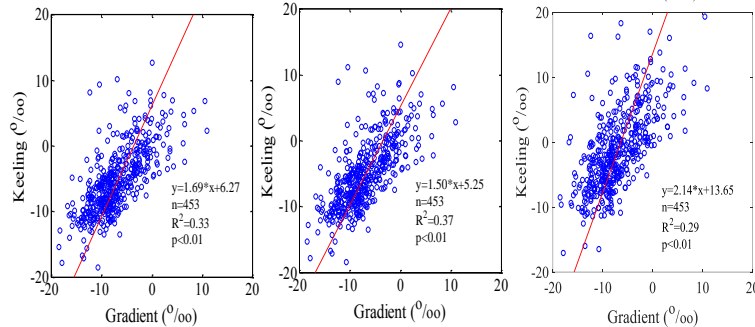
Two Inlet



Lower Inlet



Higher Inlet



(Provided by Hu et al.)

土壤箱式(同位素)测定技术：理论公式

Keeling Plot方法：

$$C_E = C_a + C_s \quad (1)$$

式中， C_E 、 C_a 、 C_s 分别为混合大气 CO_2 浓度、本底大气 CO_2 浓度、源增加的 CO_2 浓度。根据同位素质量守恒定律可得：

$$\delta_E C_E = \delta_a C_a + \delta_s C_s \quad (2)$$

式中， δ_E 、 δ_a 、 δ_s 分别为混合大气、本底大气和源增加的 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 。由(1)和(2)式得：

$$\delta_E = C_a(\delta_a - \delta_s)(1/C_E) + \delta_s \quad (3)$$

方程(3)中 $1/C_E$ 为自变量， δ_E 为因变量，方程的截距可用来解释生态系统呼吸 $\delta^{13}C_R$ 特征 (Keeling, 1958; Bowling et al., 2003; Santos et al., 2012)。

Flux Ratio方法：

$$\delta^{13}C_{\text{resp}} = \left(\frac{F^{13}CO_2 / F^{12}CO_2}{R_{VPDB}} - 1 \right) \times 1000$$

式中， $F^{13}CO_2$ 和 $F^{12}CO_2$ 分别为 $^{13}CO_2$ 和 $^{12}CO_2$ 的同位素通量； R_{VPDB} 是标准样品的 ^{13}C 与 ^{12}C 的摩尔比值（常数，0.11174） (Kammer et al., 2011)。

提纲

1、仪器和技术问题

1.1 仪器现状、研发与维修服务

1.2 数据质控与统计方法应用

1.3 工作标气与数据溯源至国际标准

2、关注的主要科学问题

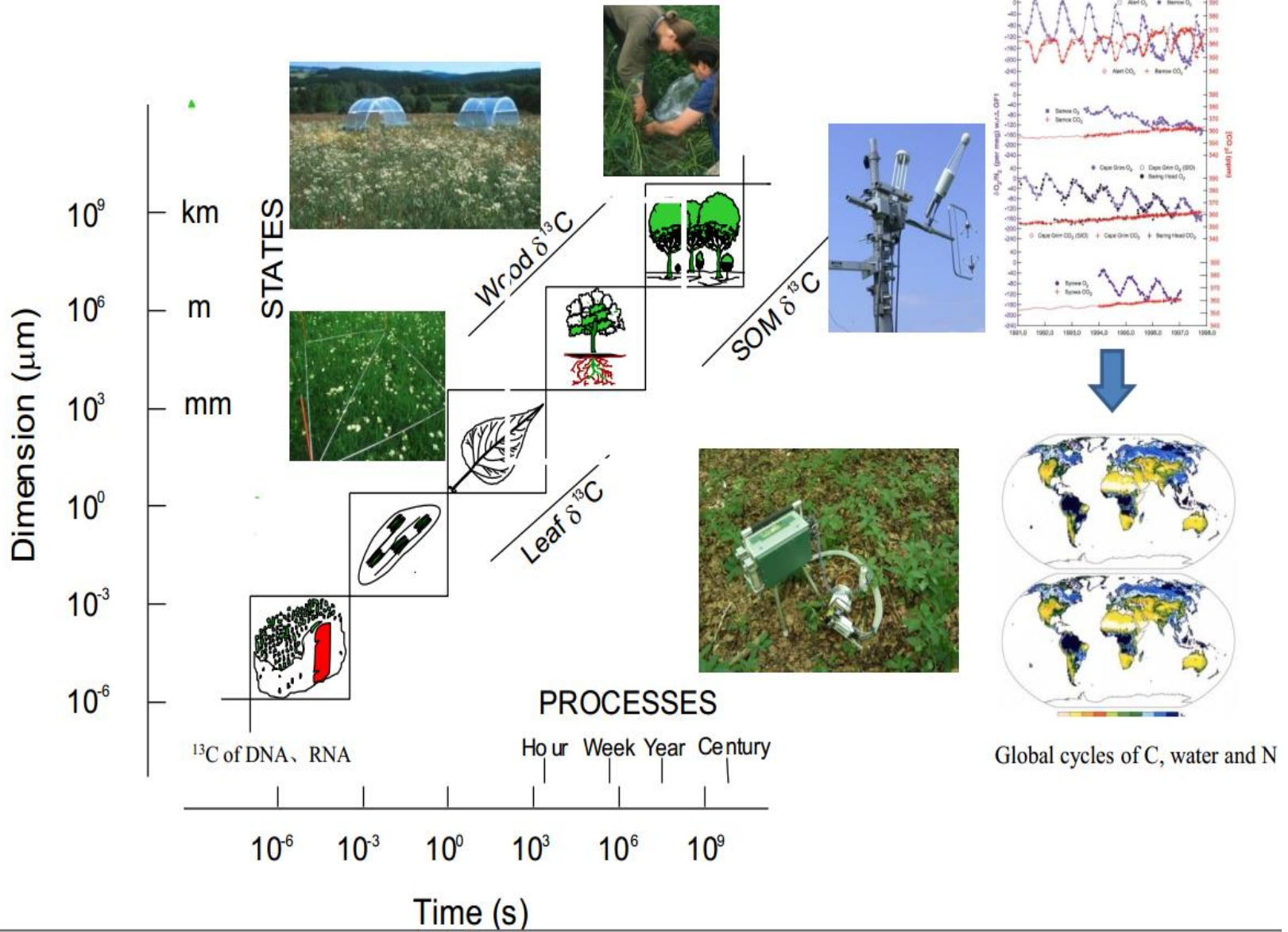
2.1 基于单种或多种同位素的来源拆分

2.2 复杂地形条件下同位素观测的作用

2.3 碳氮稳定同位素标记的应用



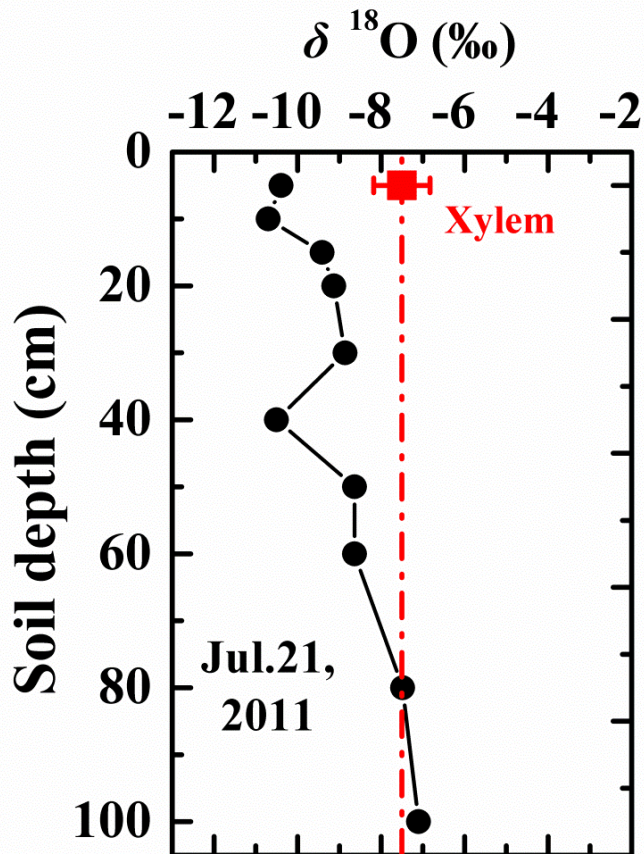
指示、示踪、整合



2.1 基于单种或多种同位素的来源拆分

□ 直接定性判断 (Cramer, 199; Li et al, 2007; Wang et al., 2010)。

□ 模型定量分析 (West et al., 2007)。常用模型有IsoSource (Phillips et al., 2005) 和 MixSIR (Moore and Semmens, 2008)等。



直接定性判断法示意图

同位素质量守恒方程:

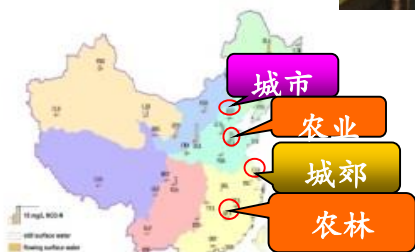
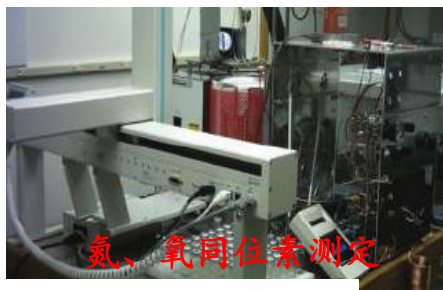
$$\delta_x = f_1 \times \delta_1 + f_2 \times \delta_2 + \dots + f_n \times \delta_n \quad (1)$$

$$f_1 + f_2 + f_3 = 1 \quad (2)$$

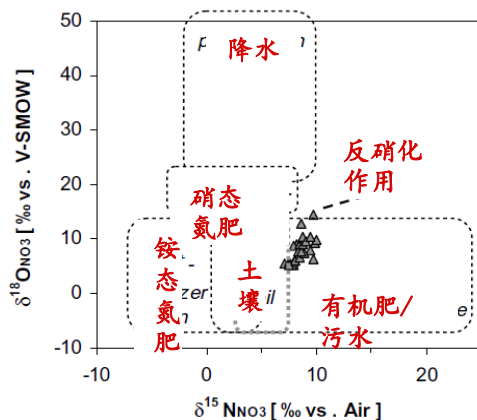
其中, δ_x 和 δ_i ($i = 1:n$) 分别为是茎秆水和土壤水的 $\delta^{18}\text{O}$ (或 δD), f_i 是第*i*层土壤水对植物的贡献比例。

模型定量分析

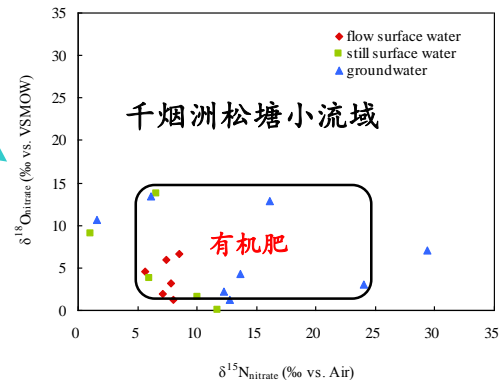
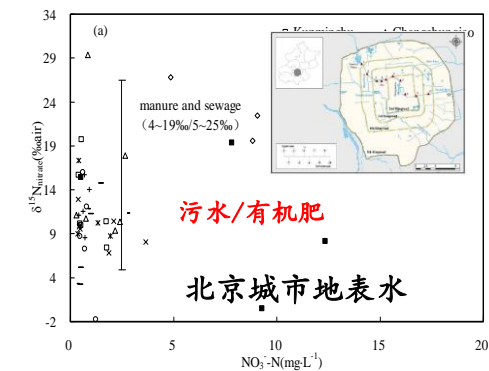
硝酸盐中氮、氧双稳定同位素示踪



典型生态系统应用

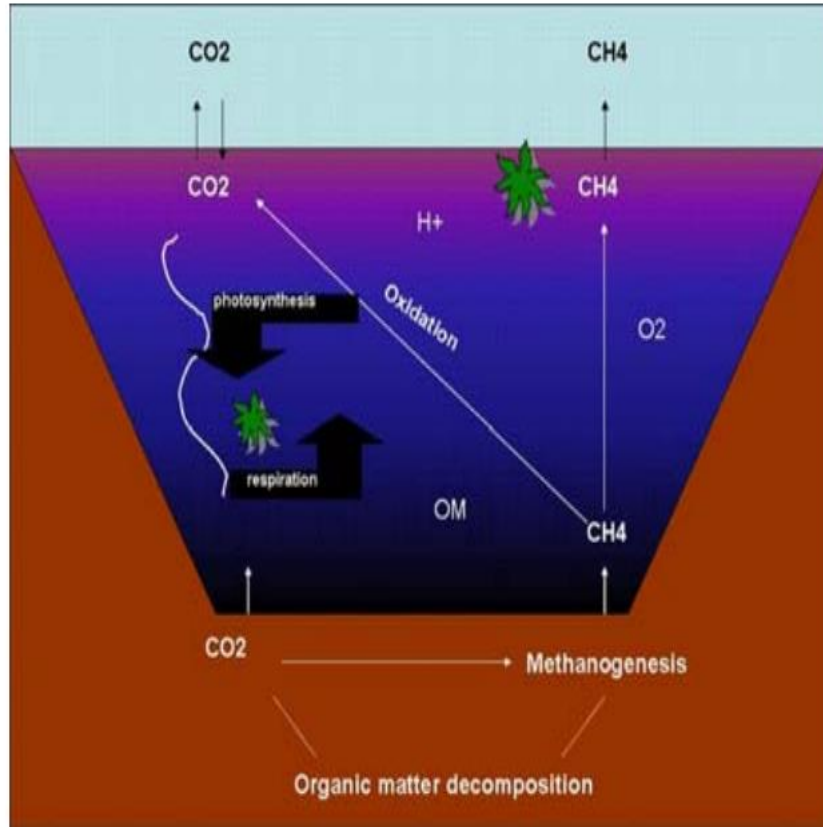


硝酸盐氮氧同位素溯源机理



水体硝酸盐来源稳定同位素示踪

水体(如养殖塘) CO₂及CH₄中C的来源及解析问题



水体（如养殖塘）

水-气界面温室气体

CO₂及CH₄中C的来源

及解析问题

(Schrier-Uijl et al., 2011)

同位素通量拆分的基本原理

由于对叶片呼吸的不同处理，IFP可区分为：1) 不包括叶片呼吸的 isoflux-based flux partitioning(Bowling *et al.*, 2001; Ogee *et al.*, 2003; Knohl and Buchmann, 2005; Zobitz *et al.*, 2008), 拆分组分为FA (gross assimilation plus daytime leaf respiration) 和FR (the sum of heterotrophic soil, root and stem respiration during the day)。2) 考虑叶片光呼吸和暗呼吸的an improved IFP(Wehr and Saleska, 2015; Wehr *et al.*, 2016), 拆分组分为GEE和Reco, 与基于夜间温度回归或光响应曲线(Reichstein, Falge *et al.* 2005, Lasslop, Reichstein *et al.* 2010)的standard method的拆分组分含义一致。

- 包含叶片呼吸的IFP和standard method中:
- 不包含叶片呼吸的IFP中:

$$\begin{aligned} \text{GEE} &= F_P + F_{PR} \\ \text{Reco} &= F_{DR} + F_{NR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_A &= F_P + F_{PR} + F_{DR} \\ F_R &= F_{NR} \end{aligned}$$

$$\text{NEE} = F_P + F_{PR} + F_{DR} + F_{NR}$$

其中, GEE为总初级生产通量, $\text{GEE} < 0$; Reco为叶片暗呼吸和非叶片呼吸; NEE为净生态系统交换通量; F_P 为总光合, $F_P < 0$; F_{PR} 为叶片光呼吸; F_{DR} 为叶片暗呼吸; F_{NR} 为非叶片呼吸, 包括土壤异养呼吸和植物根、干呼吸。(单位 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

同位素通量拆分的基本原理(不含叶片呼吸)

□ 利用稳定同位素技术与冠层尺度通量测量相结合，根据同位素质量平衡原理，能够将冠层CO₂的净通量拆分为光合和呼吸通量组分。

□ 基本假设：光合作用的同位素组成($\delta^{13}C_A$)和生态系统呼吸的同位素组成($\delta^{13}C_R$)之间存在差异($D=\delta^{13}C_A-\delta^{13}C_R$, disequilibrium)。

$$F_N = F_R + F_A \quad (\text{Eq.1})$$

$$F_N = \overline{\rho w' C'} + \rho \frac{dC}{dt}$$

$$\delta^{13}C_N F_N = \delta^{13}C_i F_R + (\delta^{13}C_a - \Delta_{canopy}) F_A \quad (\text{Eq.2}) \quad \delta^{13}C_N F_N = isoflux = \overline{\rho w' (\delta^{13}C_a C)'} + \rho \frac{d(\delta^{13}C_a C)}{dt}$$

$$\Delta_{canopy} = a + (b_3 - a) \frac{C_i}{C_a} \quad (\text{Eq.3})$$

$$-F_A = g_c (C_a - C_i) \quad (\text{Eq.4})$$

- $\delta^{13}C_N F_N$ 通过对空气样品总CO₂含量和 $\delta^{13}C$ -CO₂与传统的快速（10Hz）红外气体分析仪测定的CO₂含量的线性回归模型得到；
- Δ_{canopy} 由叶片尺度模型计算，其中a是大气CO₂的扩散分馏，其值为4.4‰；b₃是酶促羧化分馏，其值为27.5‰；
- g_c 为冠层总CO₂导度，由Penman – Monteith（PM）大叶方程的倒数计算。

同位素通量拆分的基本原理(区分叶片光/暗呼吸)

□ 包含叶片呼吸的净通量拆分: **IFP** (Wehr et al., 2015, 2016; Oikawa, Sturtevant et al. 2017)

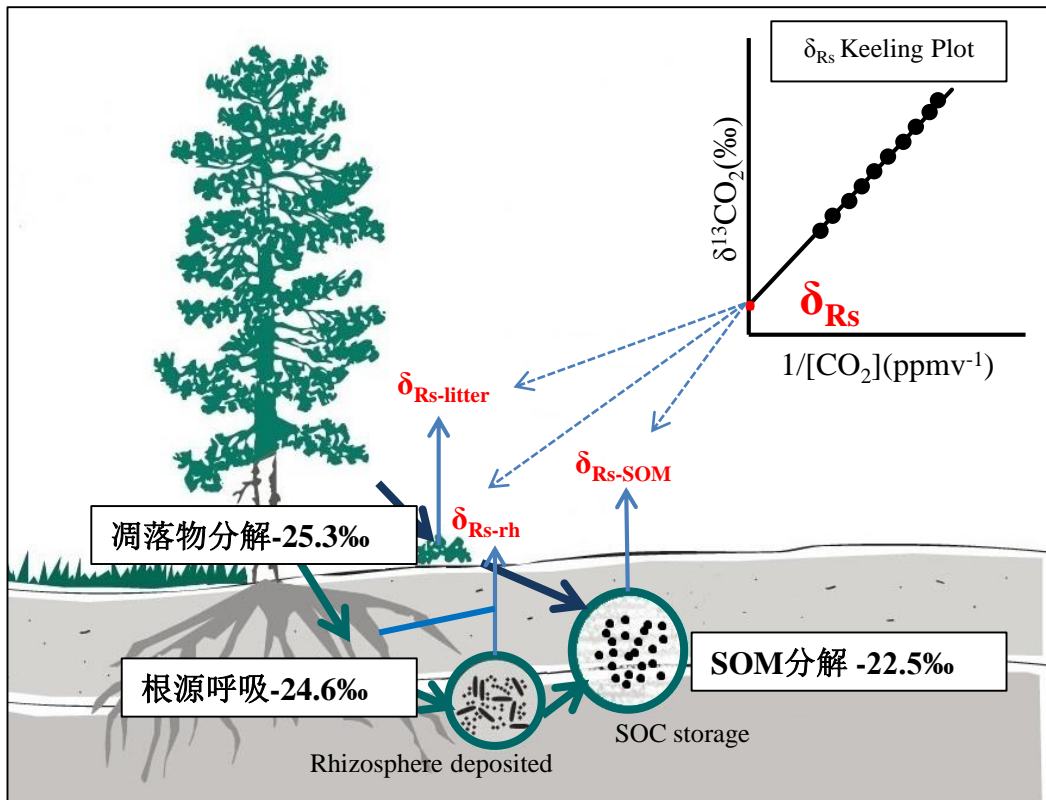
$$\mathbf{F_N} = \mathbf{F_P} + \mathbf{F_{PR}} + \mathbf{F_{DR}} + \mathbf{F_{NR}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\mathbf{R_N F_N} = \mathbf{R_P F_P} + \mathbf{R_{PR} F_{PR}} + \mathbf{R_{DR} F_{DR}} + \mathbf{R_{NR} F_{NR}} \quad (\text{Eq.2})$$

其中, F_N 为NEE通量($\text{umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); F_P 为总光合通量($\text{umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), F_{PR} 为白天叶片光呼吸通量($\text{umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); F_{DR} 为白天叶片暗呼吸通量($\text{umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); F_{NR} 为非叶片呼吸通量($\text{umol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$); R 为下标对应通量的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值。
标红项为通过观测可获得

土壤呼吸组分拆分的基本原理

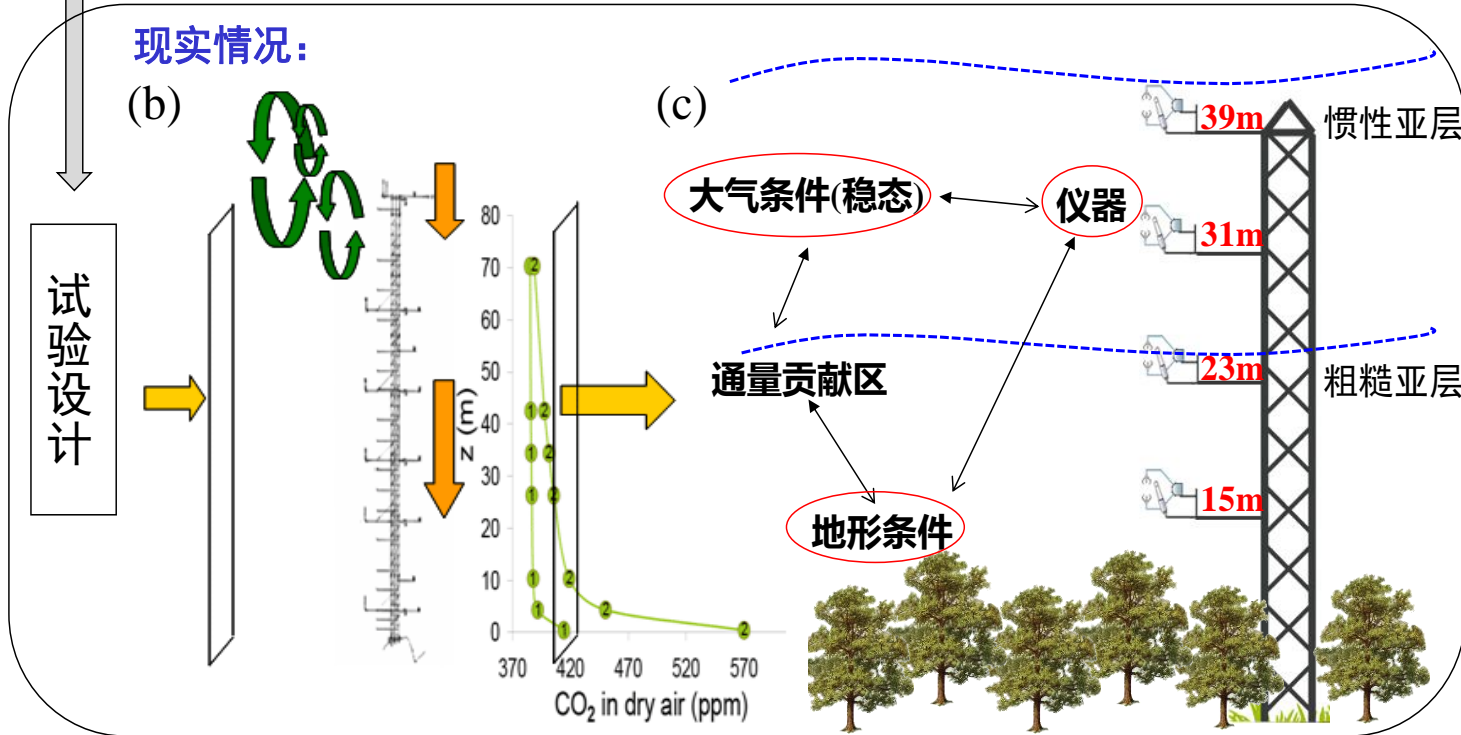
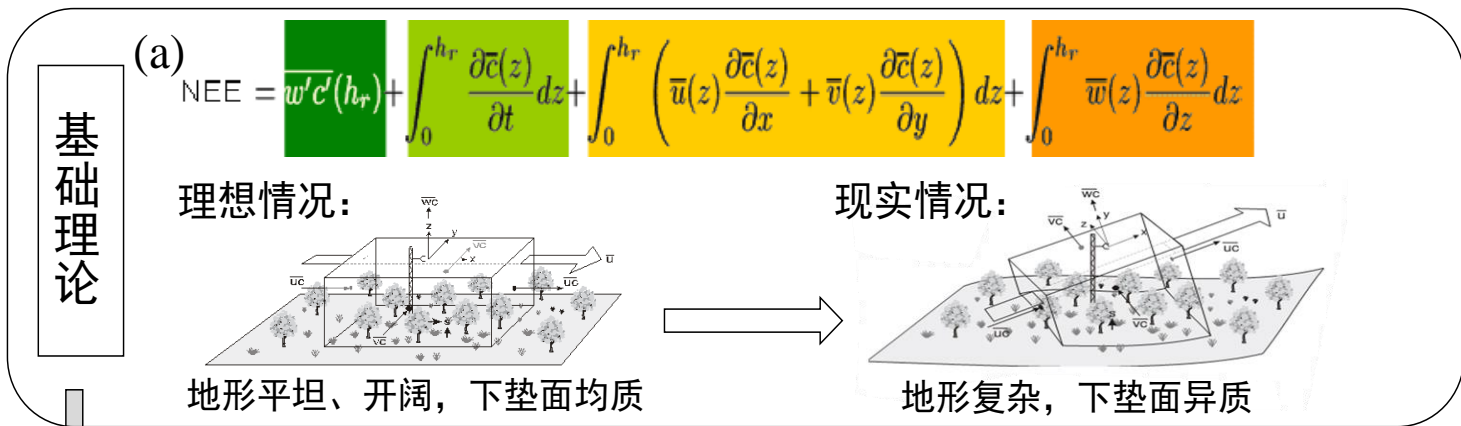
- 土壤呼吸通量 (F_s) 动态是气候变化研究的关键问题 (Davidson and Janssens, 2006; Kirschbaum, 2006)。
- 土壤呼吸可分为根源呼吸 (纯根和根际微生物)、凋落物和土壤有机质分解三个组分 (Kuzyakov, 2002; Raich and Mora, 2005)。



地下呼吸¹³C分配(Tu and Dawson, 2005)

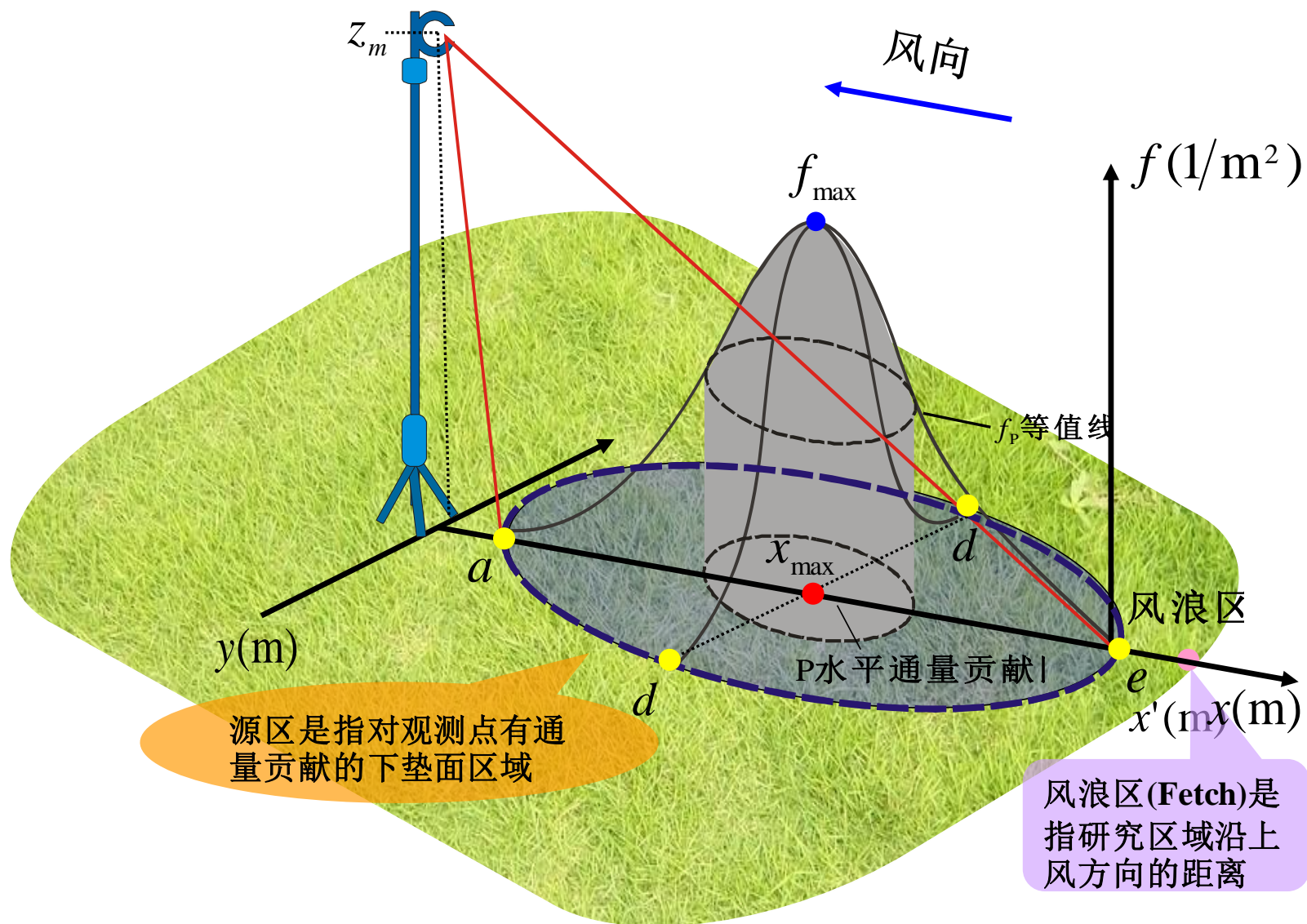
- 土壤呼吸 $\delta^{13}C$ s和各组分的 $\delta^{13}C$ 值以及各组分之间 CO_2 流动所发生的同位素效应是有差异的, 根据这些差异可以建立它们之间的联系并阐明土壤和各组分的呼吸过程与机制 (Tu and Dawson, 2005; Midwood and Millard, 2011; Werner and Gessler, 2011)。

2.2 复杂地形条件下同位素观测的作用



涡度相关技术的基本理论

通量贡献区的基本概念



喀斯特关键带植被及土壤

贵州喀斯特： 年降水量1200-1800mm，年均温 $>15^{\circ}\text{C}$
植被覆盖度低，生物量积累少，土壤不连续分布

复杂地形（如：山地森林、山谷和喀斯特地貌）

涡度相关观测遇到的难题：

通量源区的确定、夜间观测、由点到面的问题

贵州甘龙洞喀斯特

2.3 碳氮稳定同位素标记的应用



自然标记

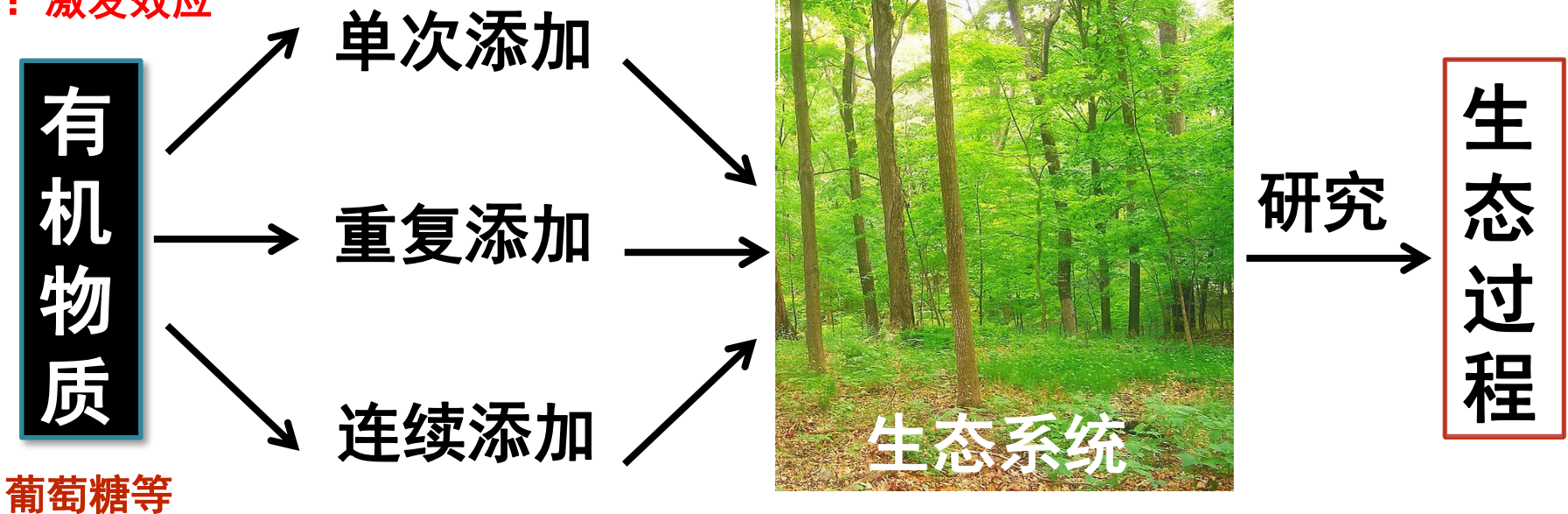


野外人工标记



室内标记

例：激发效应



葡萄糖等

同位素标记在生态系统中的应用

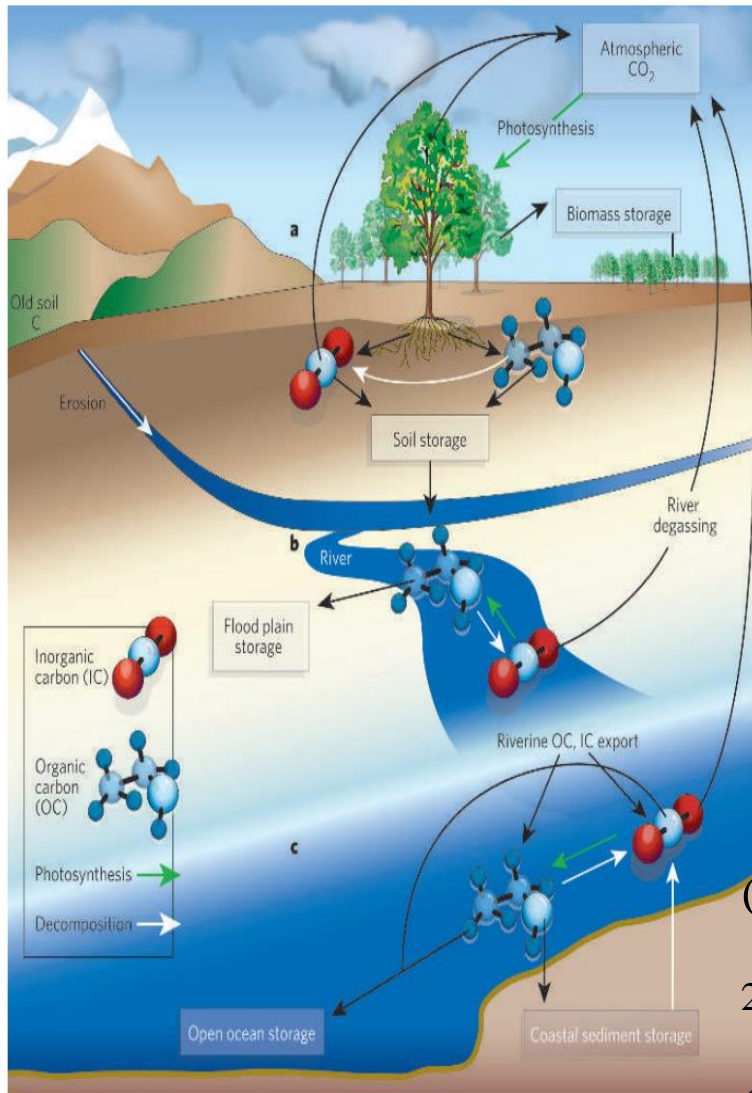


大气 CO_2 增加情景下，
水稻 CH_4 各途径排放量
和控制机制会如何改变？

CO_2 浓度升高，是否影
响同位素比率，分馏系
数，消除 CO_2 浓度升高
造成的不确定性因素。

叶片，光合作用，尺度
转换 遥感手段

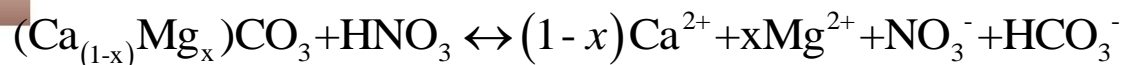
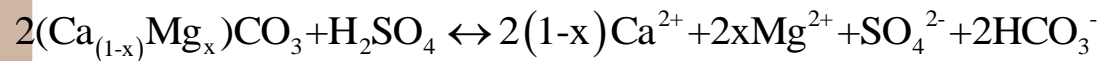
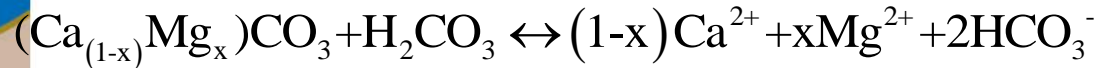
同位素标记在生态系统中的应用



(Raymond, 2015)

- 河流水体碳-开放生态系统
同位素，其他辅助手段
- 14-C -成本相对较高
 - EEMs (三维荧光光谱矩阵)
 - 其他?

土壤CO₂溶于水后形成的碳酸溶解碳酸盐形成的HCO₃⁻有一半来自于土壤CO₂，一半来自于碳酸盐；而强酸溶解碳酸盐形成的HCO₃⁻全部来自于碳酸盐。



敬请批评指正

