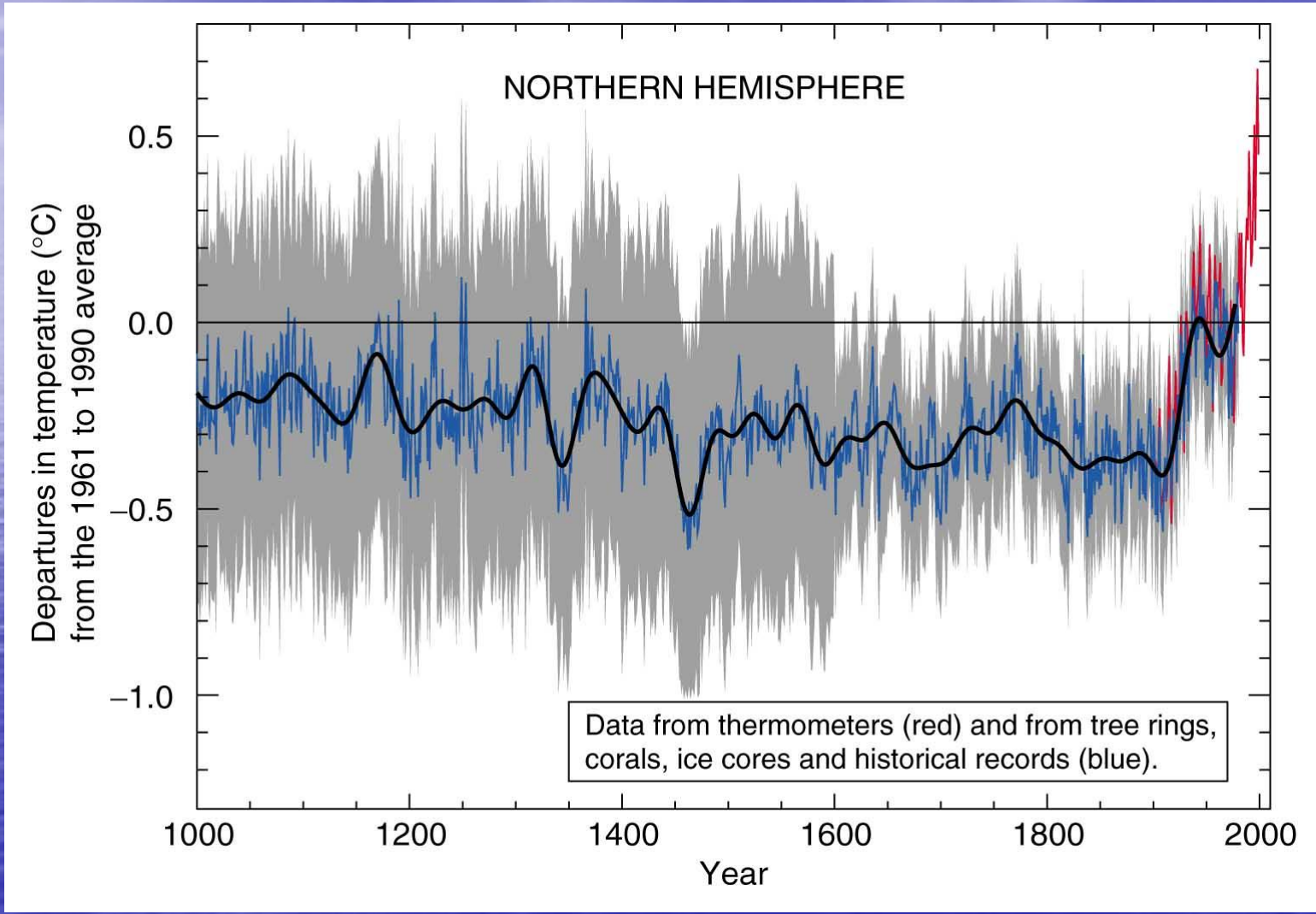
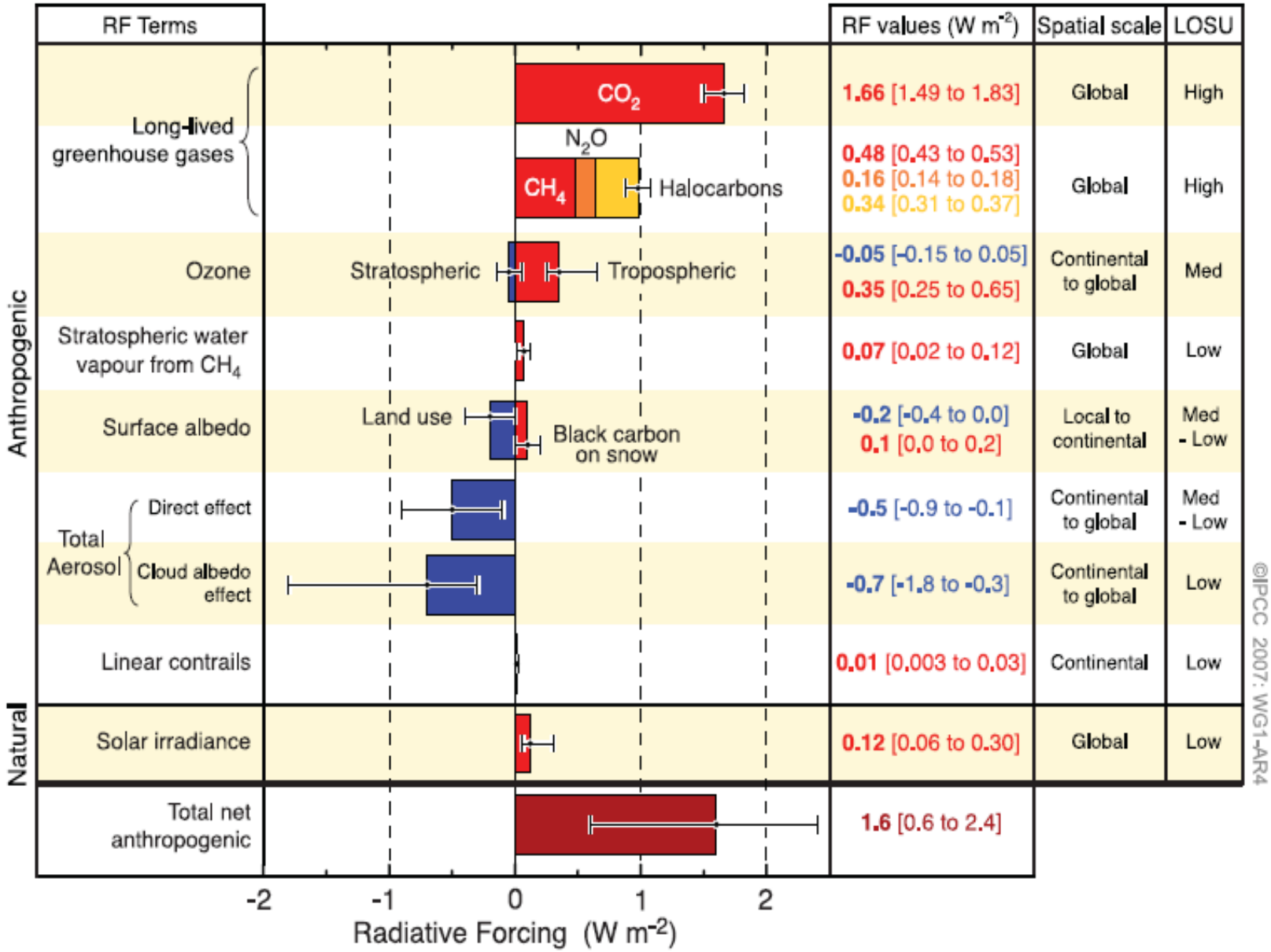
农田生态系统对全球变化的响应
—操作实验研究

朱建国
jgzhu@issas.ac.cn
19/12/2012

Global warming

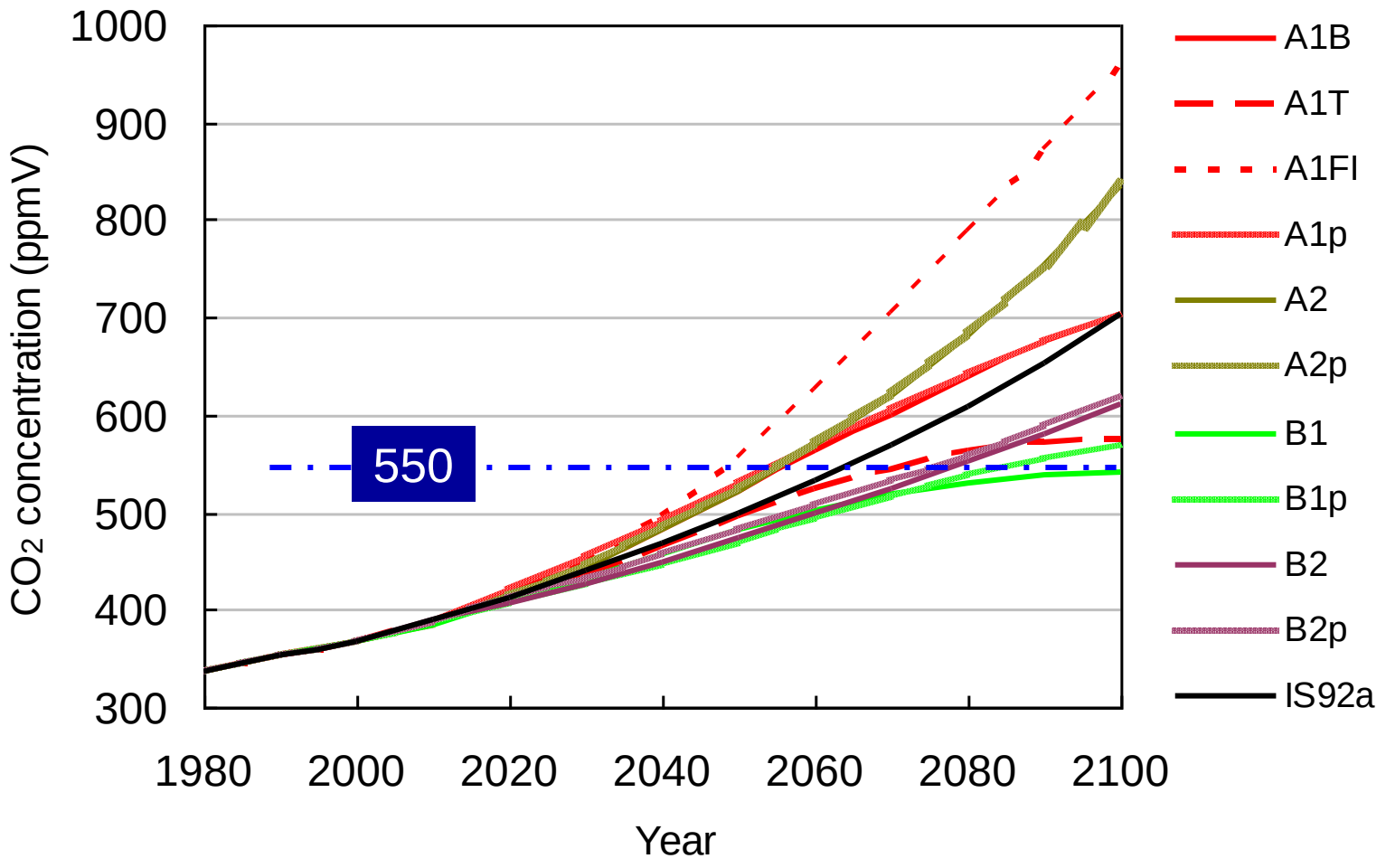


Radiative Forcing Components



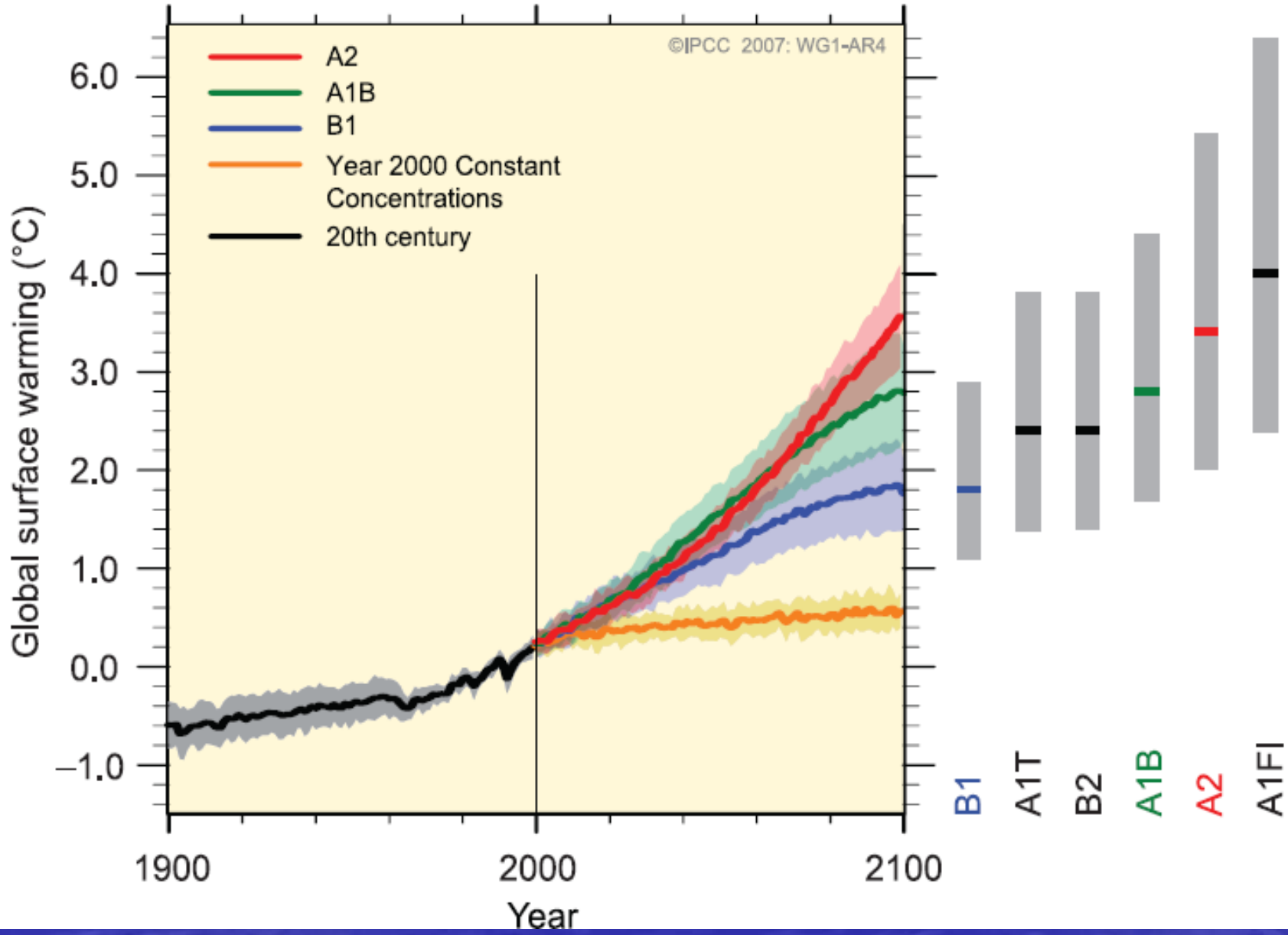
©IPCC 2007: WG1-AR4

21世纪后半叶将达到550 ppmV



Source: IPCC 2001

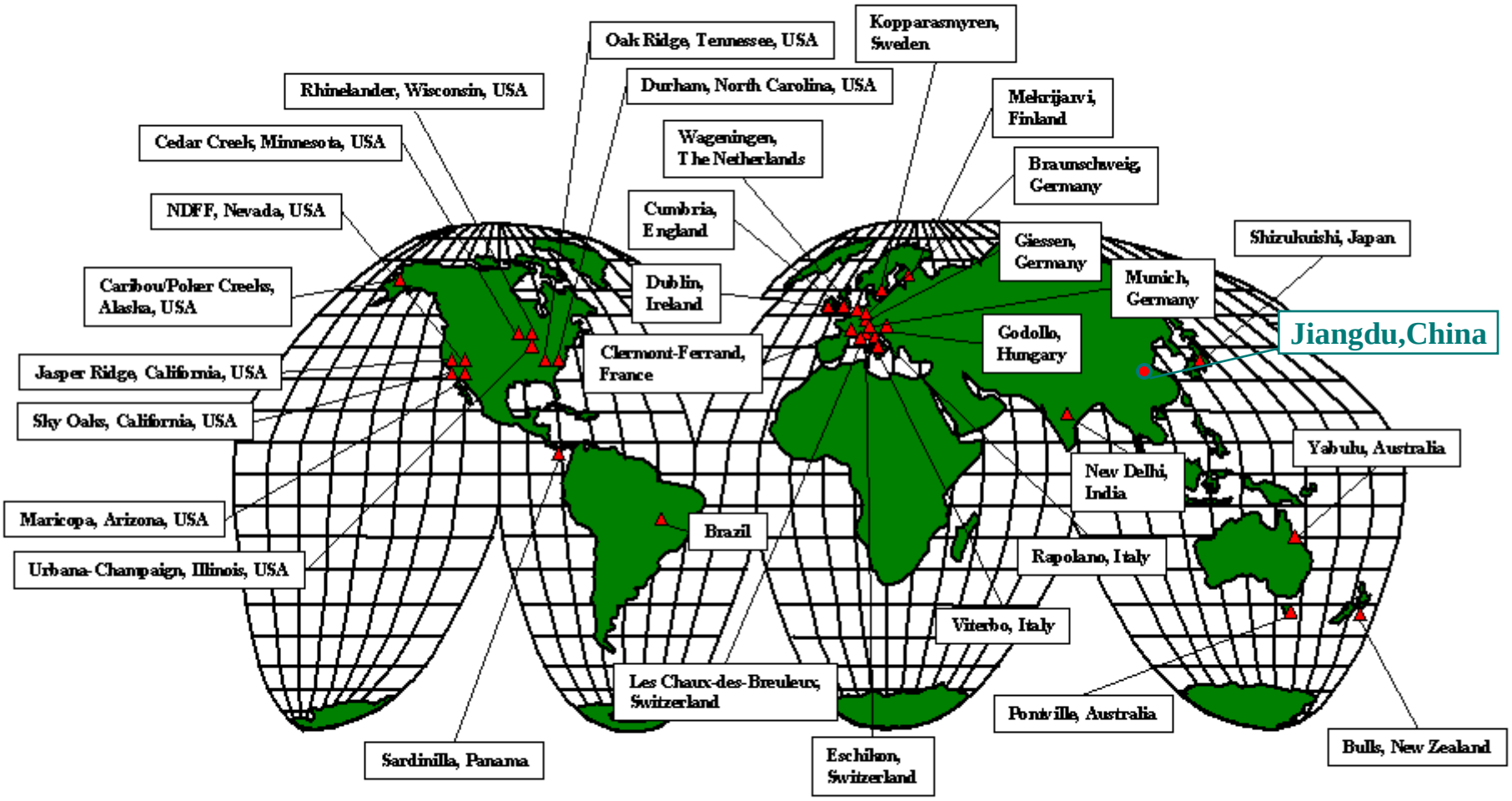
Multi-Model Averages and Assessed Ranges for Surface Warming

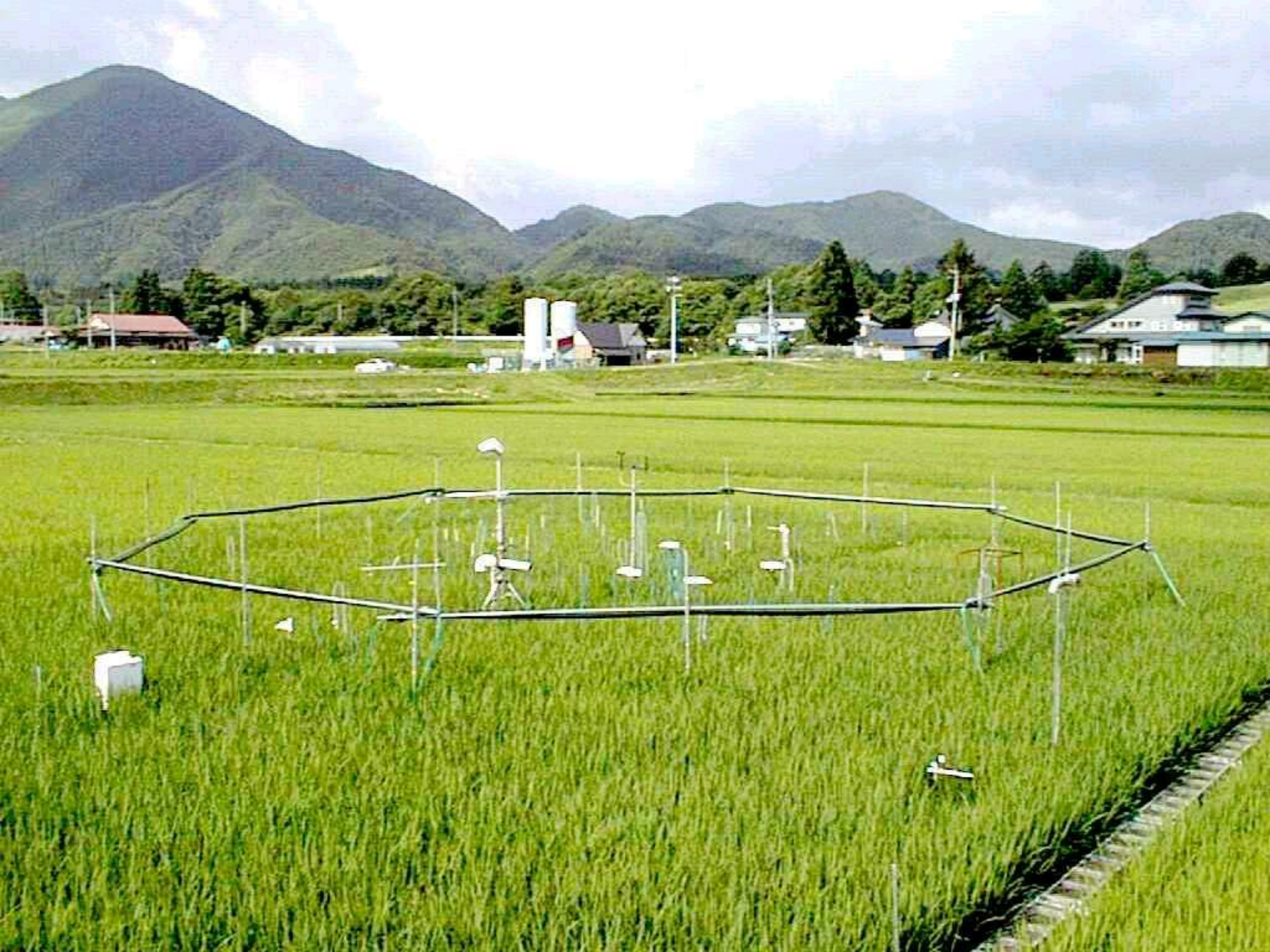


稻田生态系统对大气二氧化碳浓度升高响应的FACE研究

(Free-Air CO_2 Enrichment)

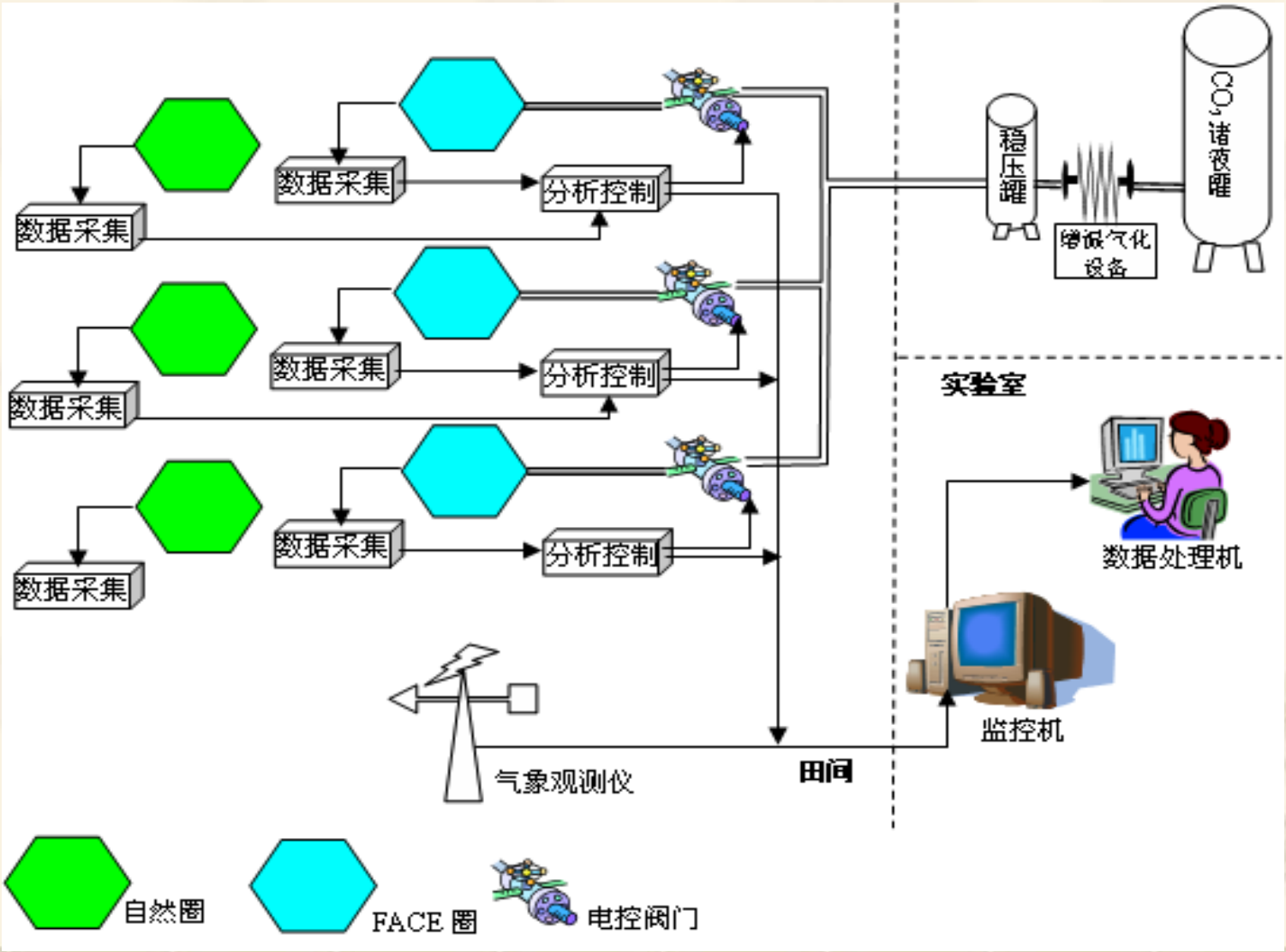
已经进行的 FACE 研究



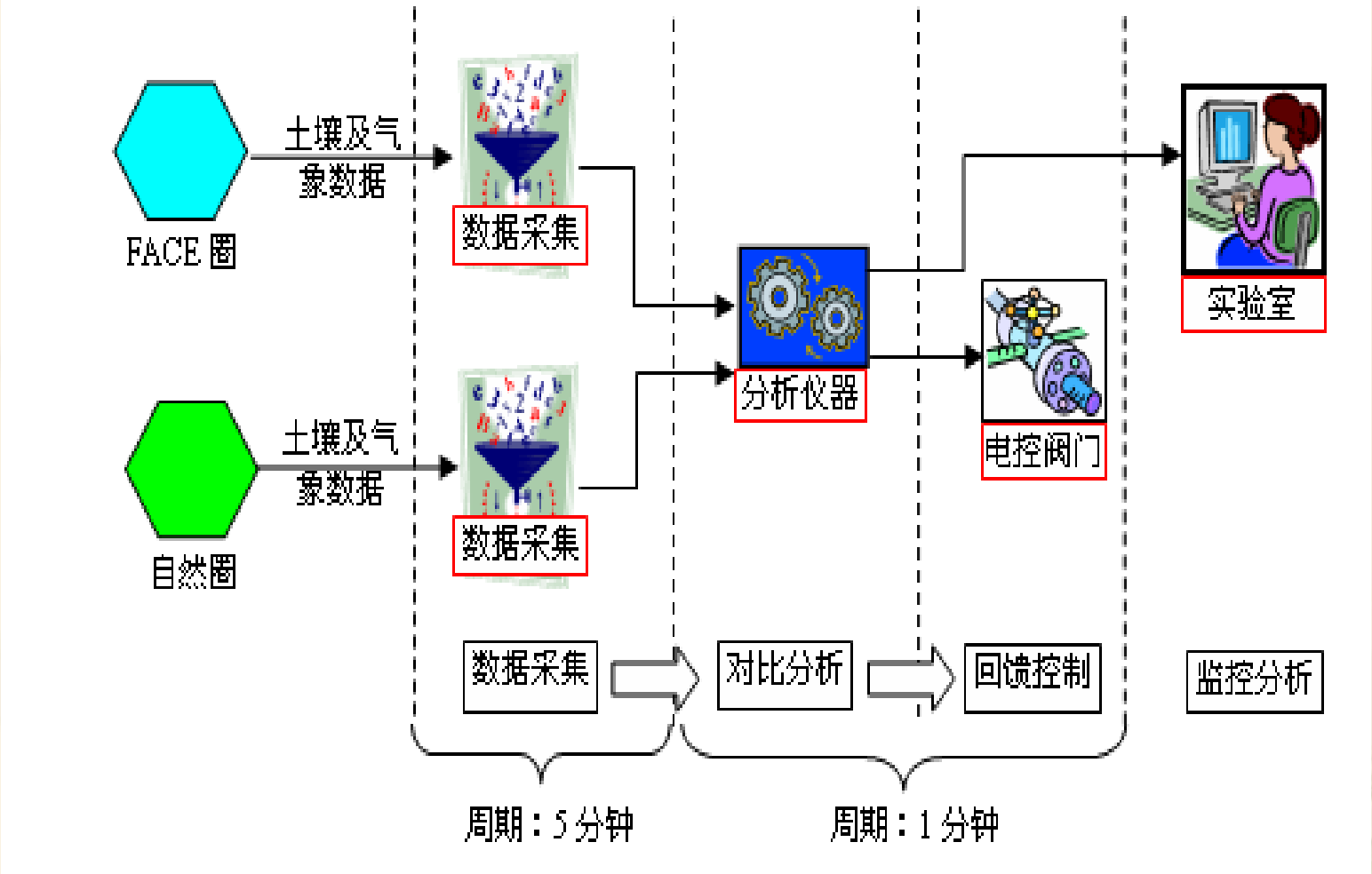


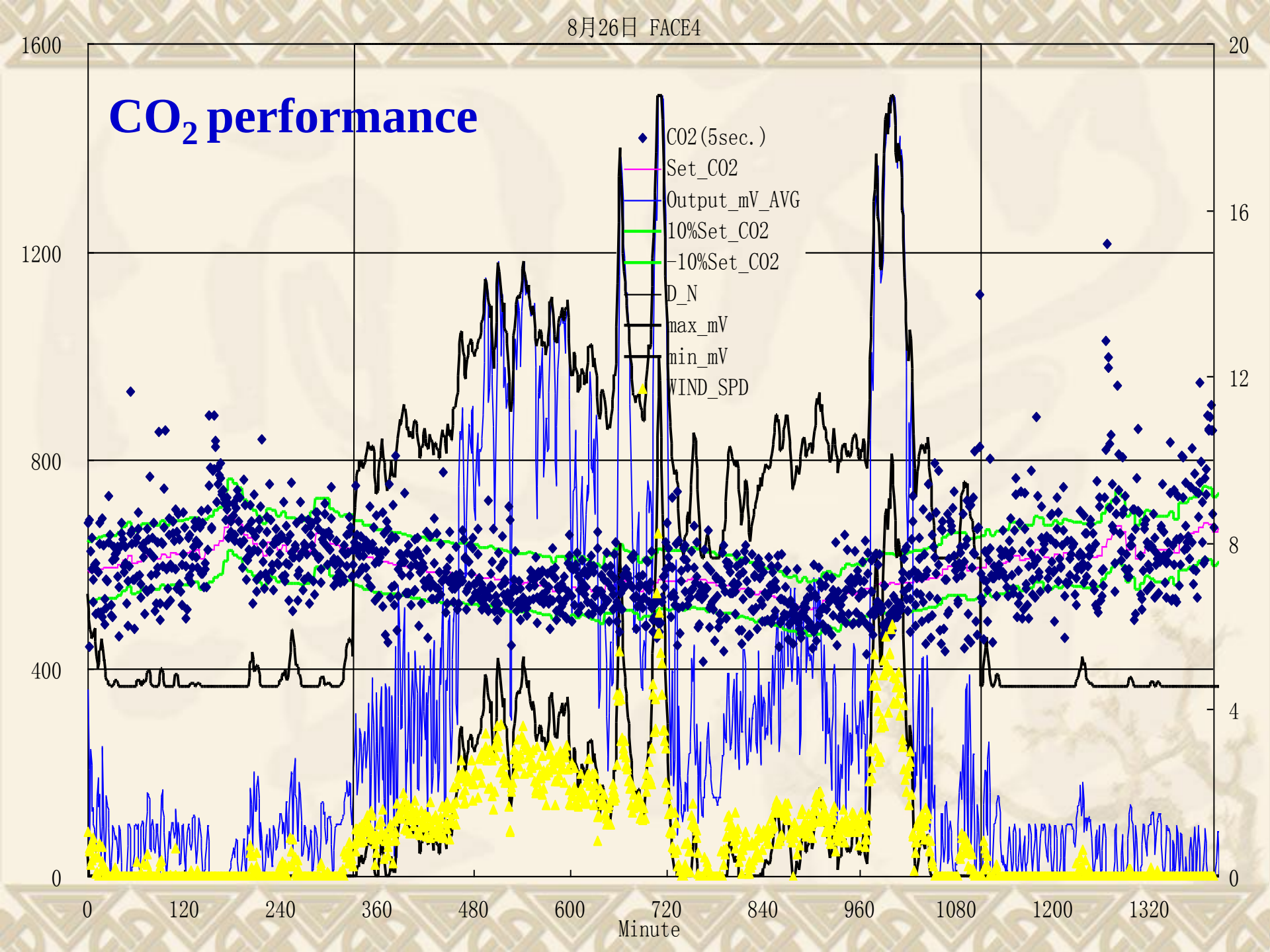
中国
FACE
CO_2 华扬液碳
电话 0523-7212200

FACE(Free Air Controlled Enrichment)
试验平台示意图

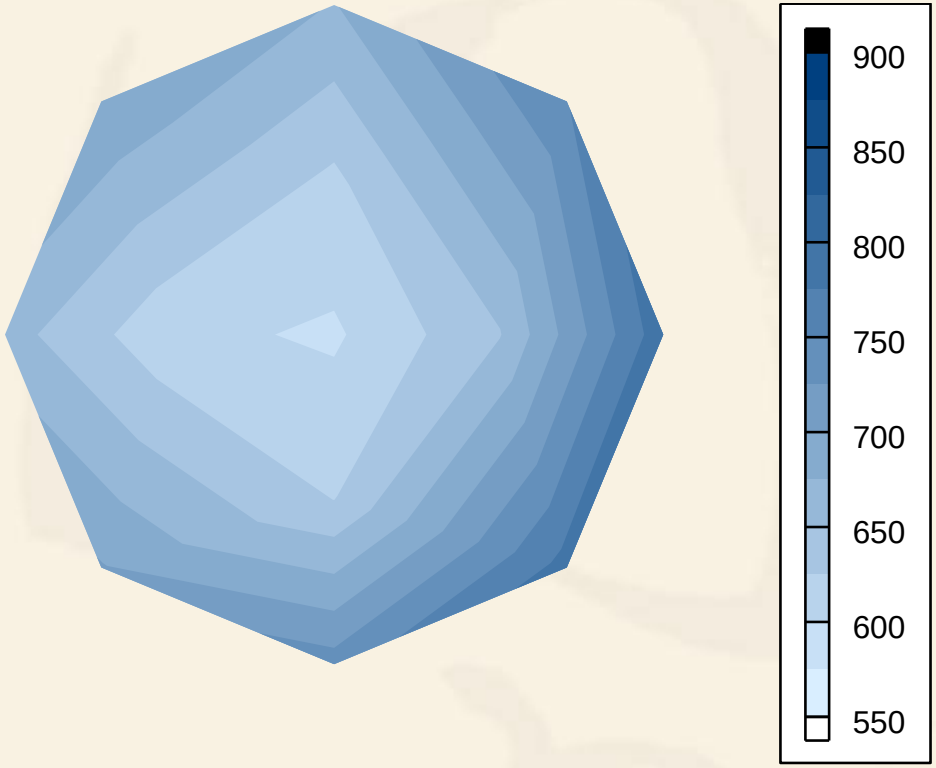


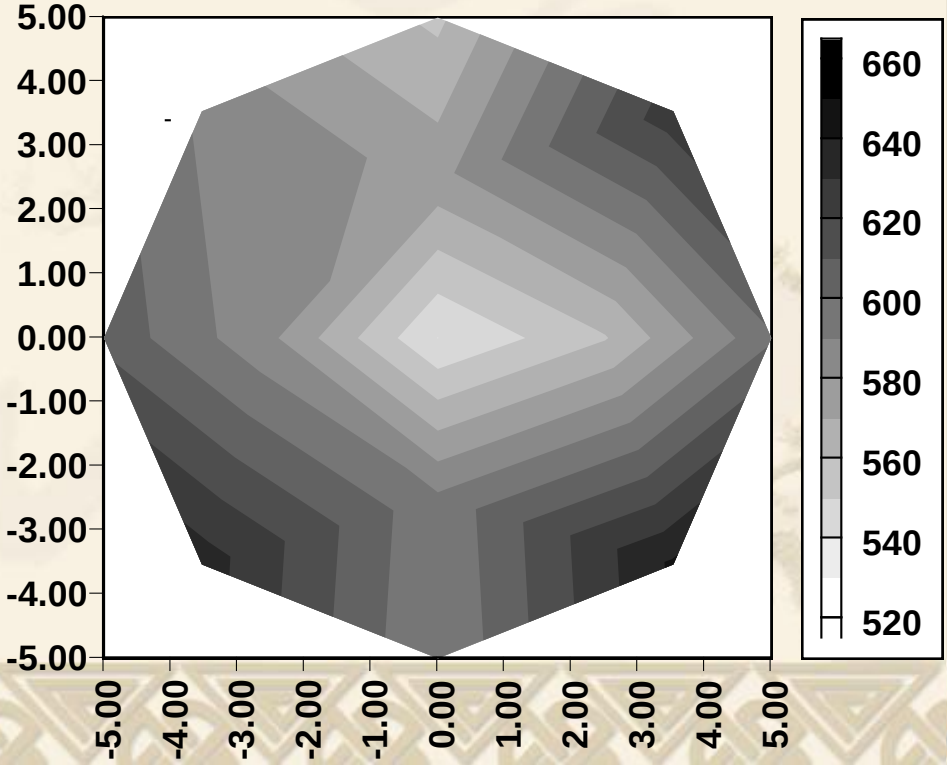
FACE系统控制流程示意




8月26日 FACE4
CO_2 performance
CO2(5sec.)
Set_CO2
Output_mV_AVG
10%Set_CO2
-10%Set_CO2
D_N
max_mV
min_mV
WIND_SPD
1600
1200
800
400
0
20
16
12
8
4
0
0
120
240
360
480
600
720
840
960
1080
1200
1320
Minute

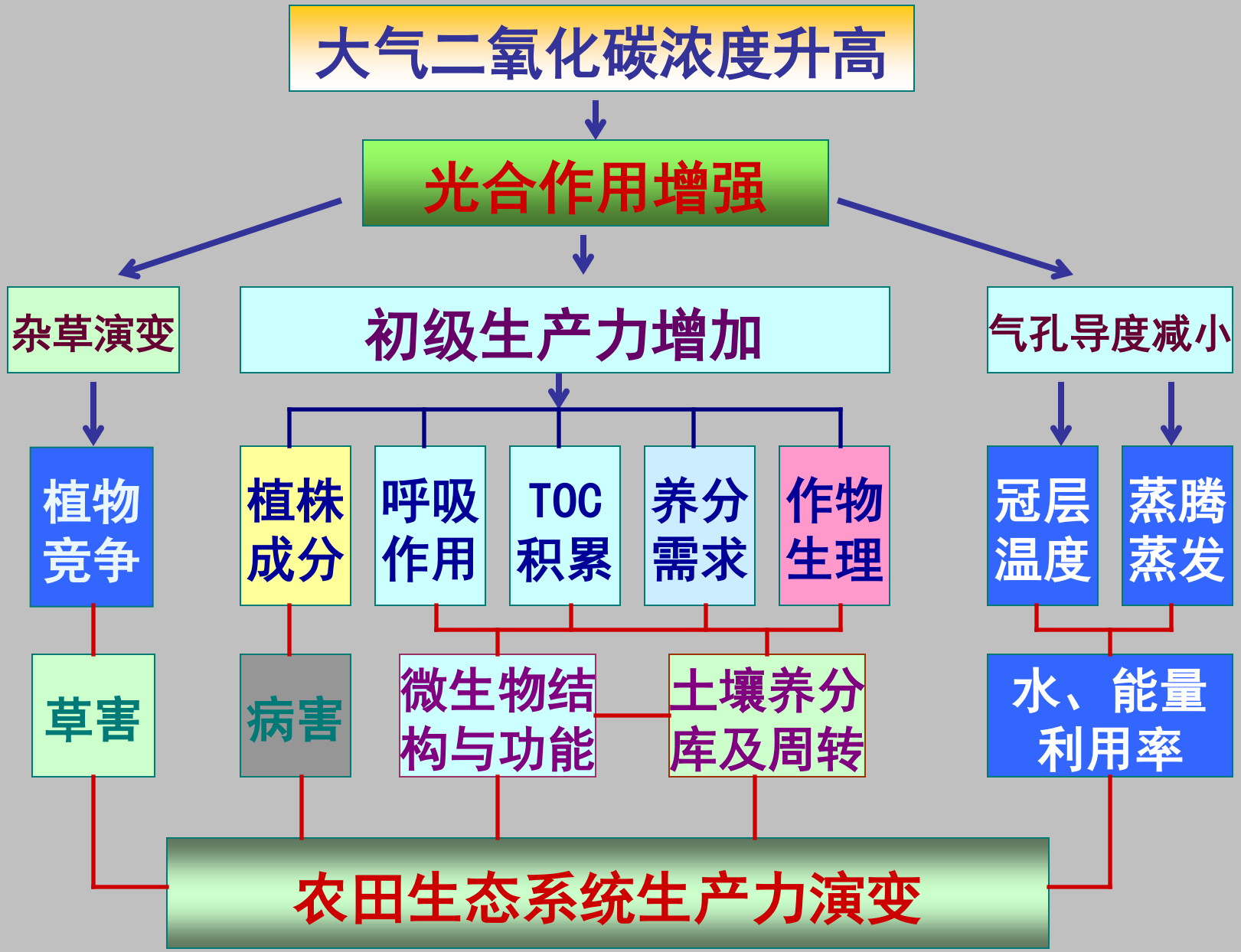
FACE圈 白天CO_2平均分布图





与目标浓度的偏差下降了

10个百分点


大气二氧化碳浓度升高
光合作用增强
杂草演变
初级生产力增加
气孔导度减小
植物竞争
植株成分
呼吸作用
TOC积累
养分需求
作物生理
冠层温度
蒸腾蒸发
草害
病害
微生物结构与功能
土壤养分库及周转
水、能量利用率
农田生态系统生产力演变

研究主体方案

- CO_2浓度升高200 ppmv
- 2-3个氮水平
- 3-4重复为主
- 一个主体品种，其他品种裂区处理
- 杂草及竞争，裂区处理

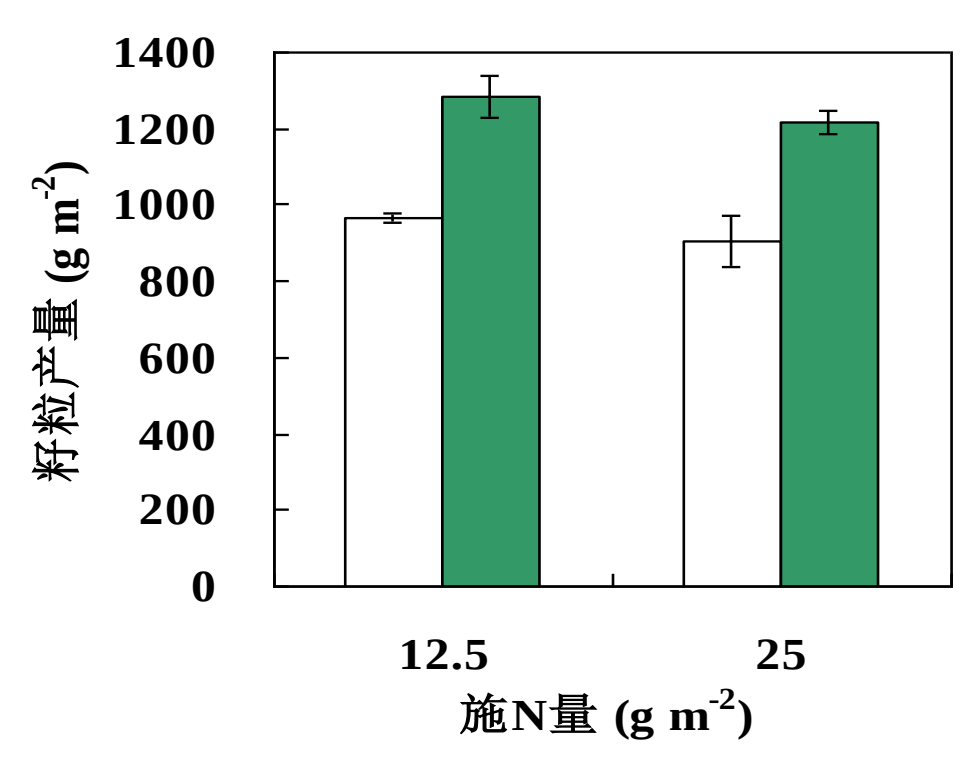
主要研究内容

- 作物产量、品质、物候变化
- 作物光合作用对高CO_2浓度的响应与适应
- 土壤微生物、线虫群落变化、C_3与C_4植物的竞争及田间杂草群落结构变化
- 作物能量和水分利用率变化
- 微量气体土－气交换
- 土壤养分元素矿化和供应、作物养分吸收能力变化

作物生长发育，产量、品质变化

- 作物产量增加，品质下降
- 水稻营养生长期生物量增加但生育期基本不变；生殖生殖期物质生产减速，生育期缩短
- 溶性糖和淀粉含量的增加，蛋白质、养分含量降低

发现对品种高CO_2浓度响应的差异显著



日本FACE，Akitakomachi

+13%（三年平均）

中国FACE，武香粳14号

+12%（三年平均）

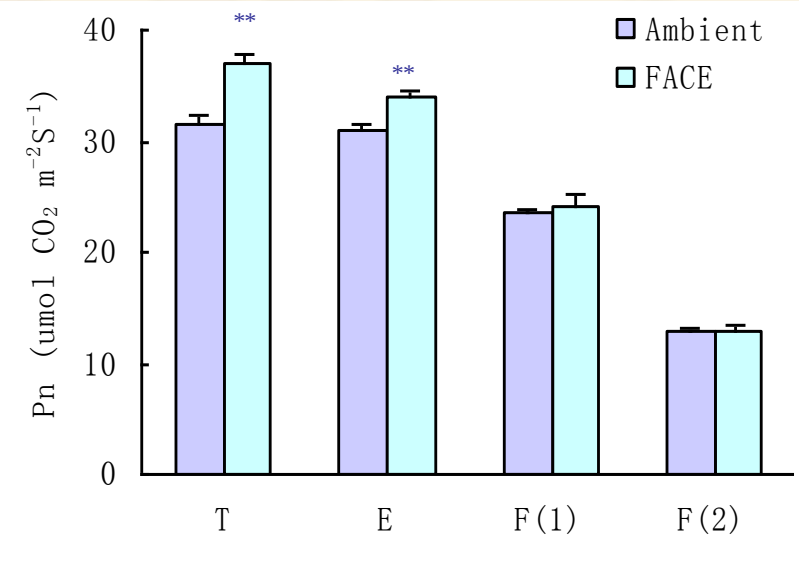
杂交稻产量增幅大 +34%**

国际学术界正重视研究对高CO_2浓度的响应差异和种质资源，以应对气候变化，保障粮食安全。这是FACE研究的方向，我们的研究领先一步。

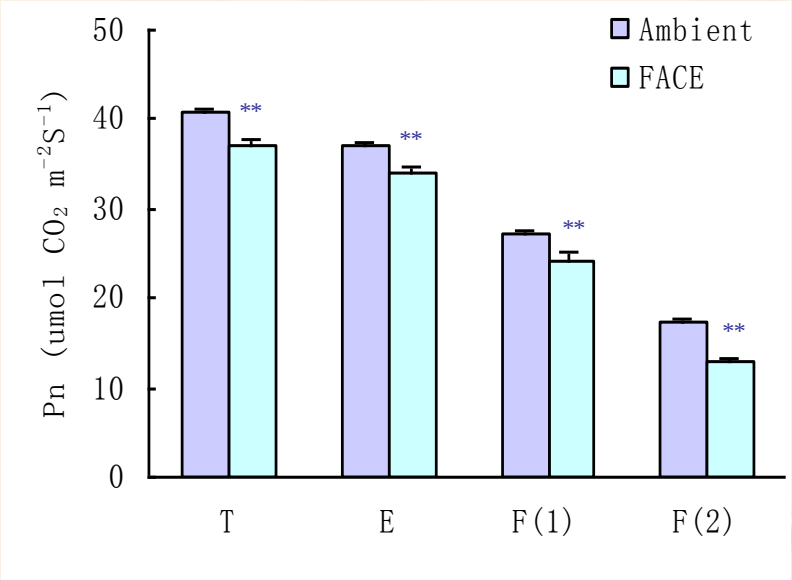
光合适应及其机制研究

- 证实水稻、小麦、稗草等均发生光合适应
- 发现和验证水稻、小麦光合作用适应与气孔导度无关，与Rubisco含量及活性相关
- 可溶性糖累积和ATP含量降低导致RuBP再生限制
- 稗草(C4)的适应机制有所不同，气孔关闭与碳同化酶共同作用，PEP起重要作用
- 初步确认有子代适应现象

水稻叶片光合作用对FACE 的响应与适应

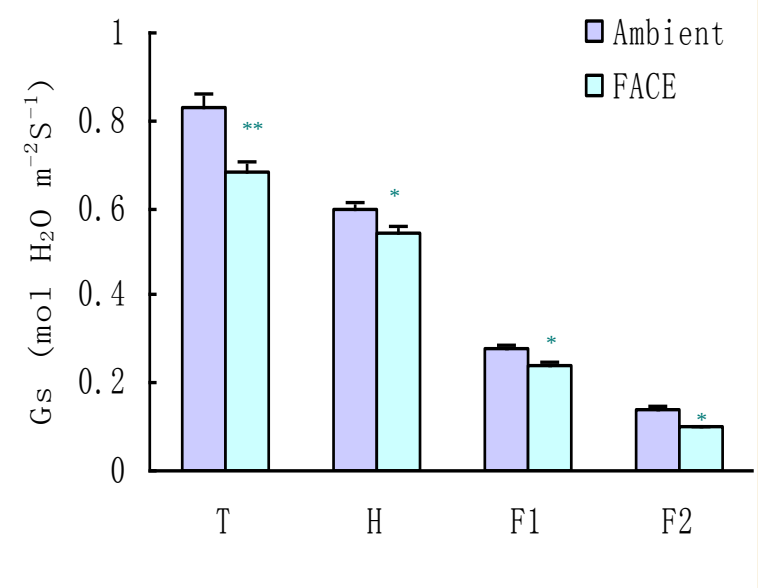


在各自生长CO_2浓度下测定



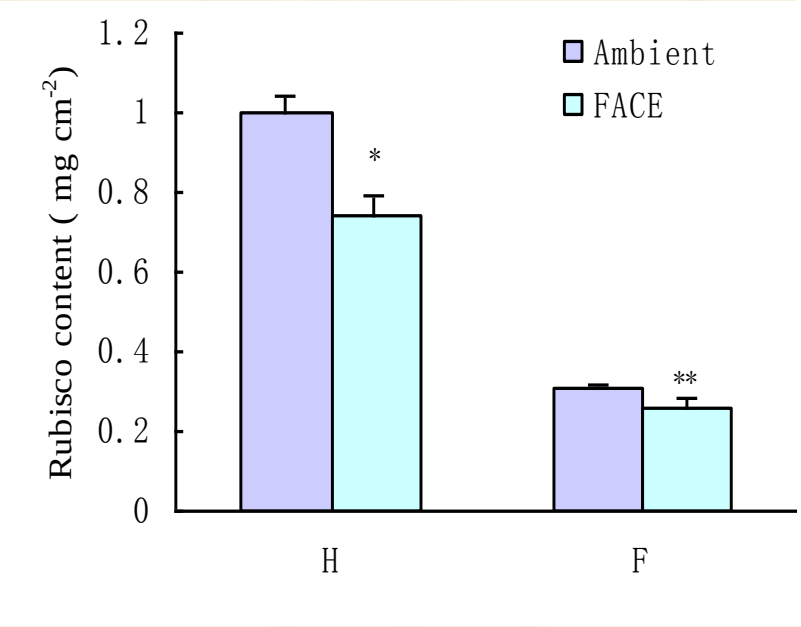
同一CO_2浓度下测定

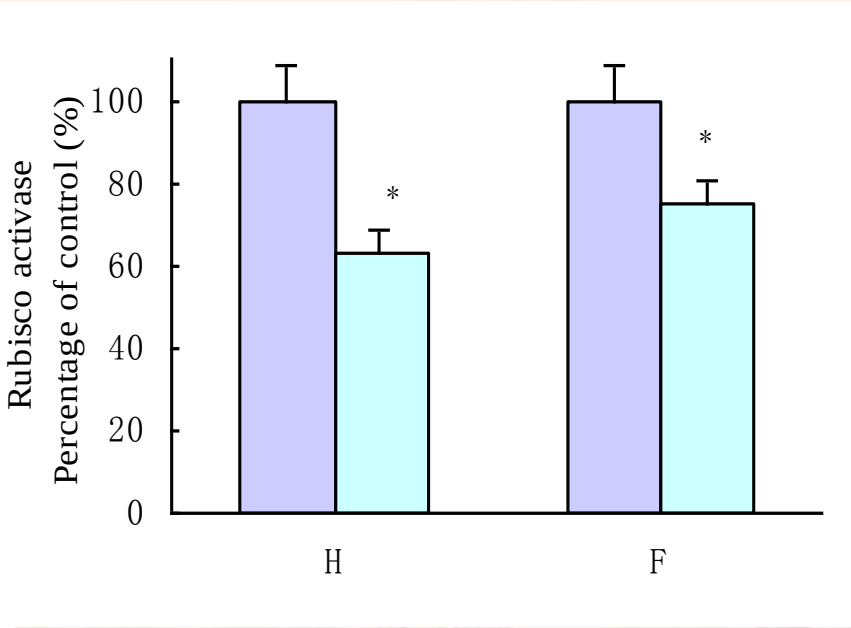
气孔导度下降，但胞间CO2浓度基本不变



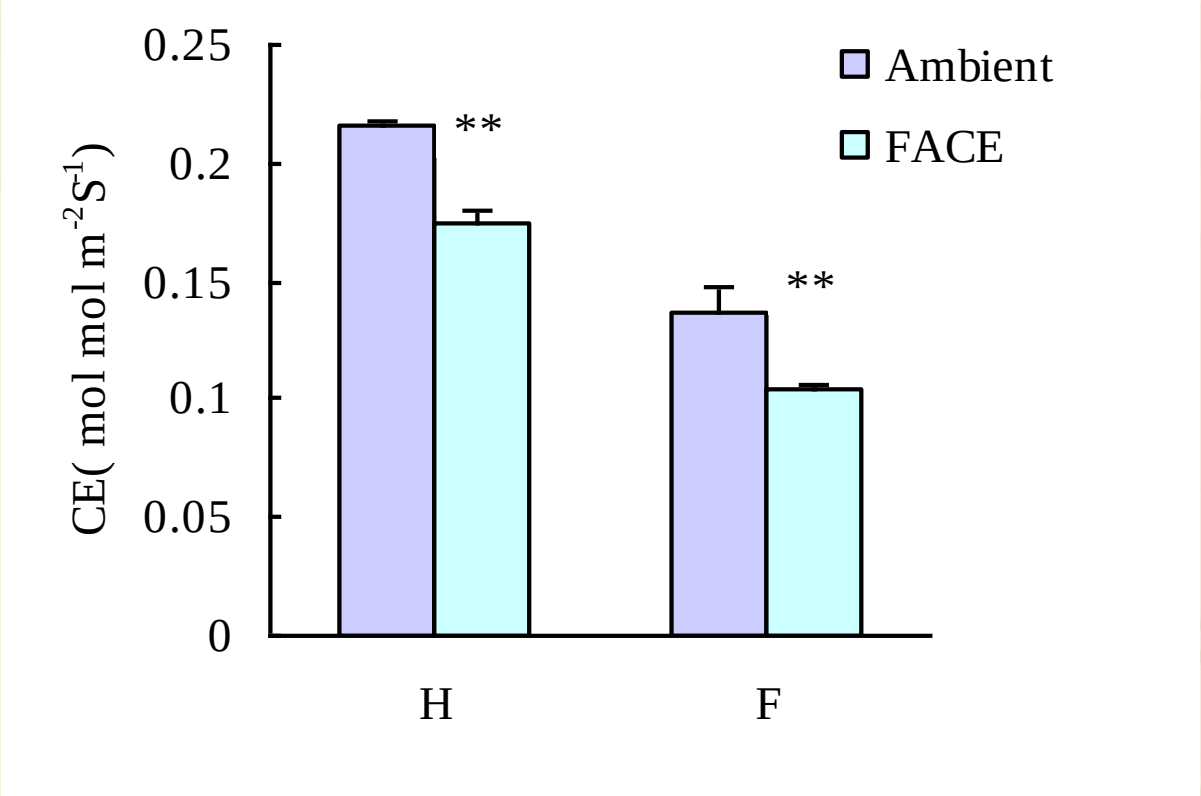
Measured at the same CO_2 concentration (580 umol/mol)

Rubisco及其活化酶含量下降可导致羧化限制

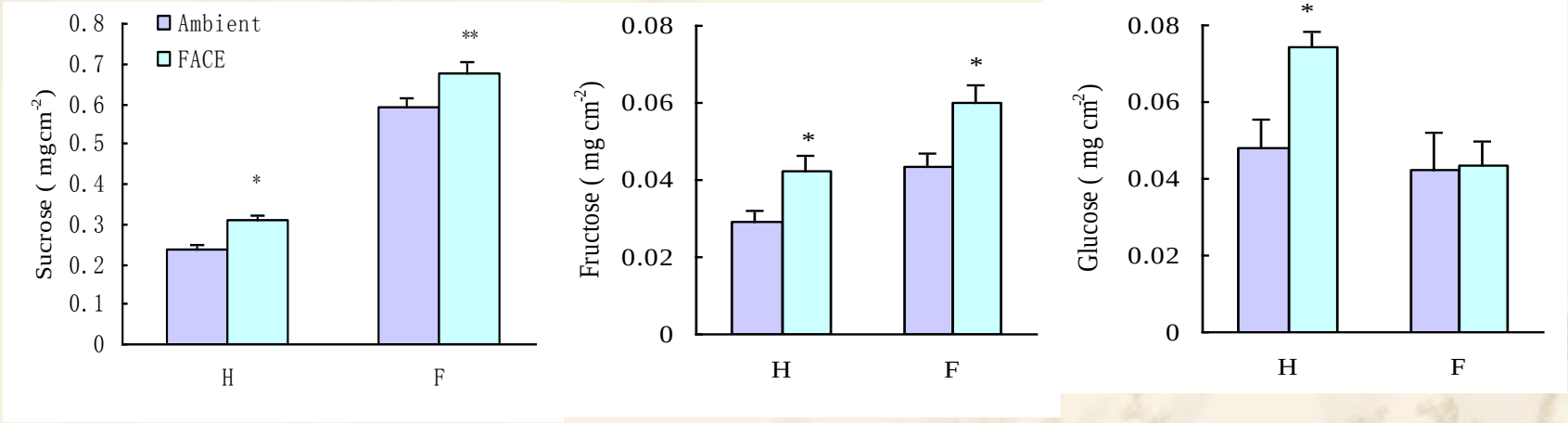




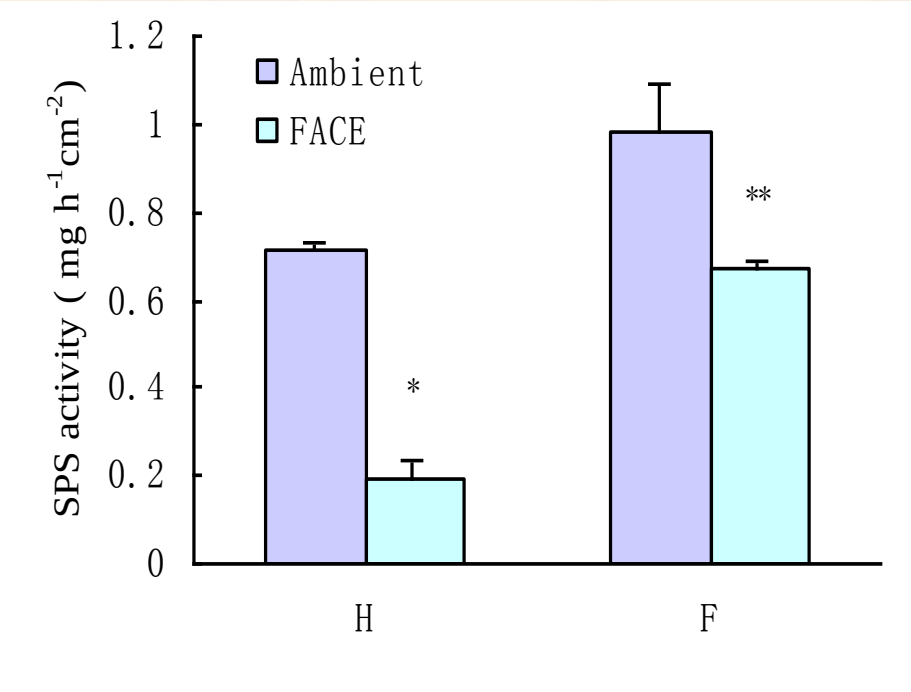
可观测到羧化效率下降



可溶性糖的累积可能导致Rubisco活性下降

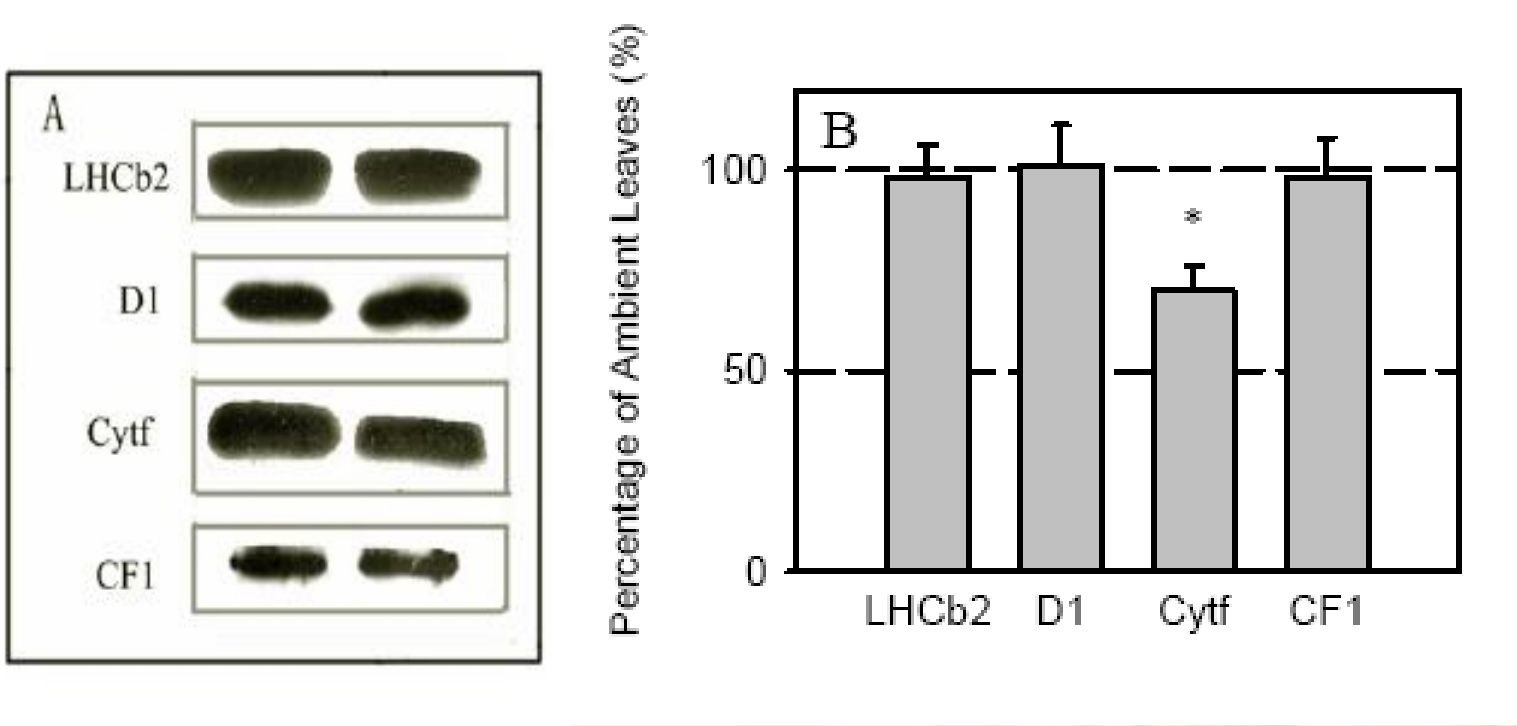


也导致SPS下降



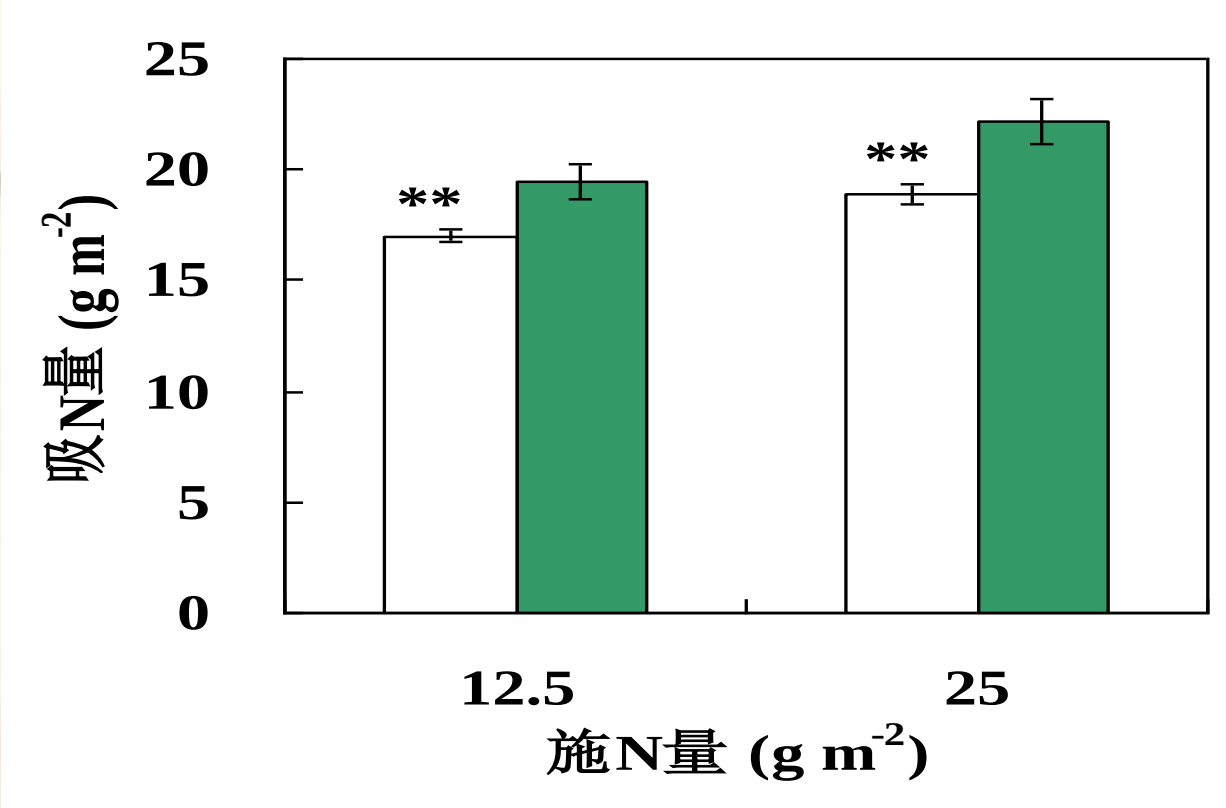
SPS activity is an index of RuBP regeneration, decreased in SPS activity maybe imply the limitation of RuBP regeneration

Cytf含量的变化，以及相关基因mRNA含量（petA和petD）减少证明Cyt b_6/f 复合体能力的下调是 RuBP再生限制的一个决定因素。



LHCb2和D1蛋白是系统 I 和 II 的重要组份，Cytb6f：连接2个光系统的复合体，CF1是合成ATP的酶

N吸收总量虽增加



- Akitakomachi (Japan FACE)：+4%^{ns}
- WXJ 14 (China FACE)：+9%**

Hybrid rice XY63

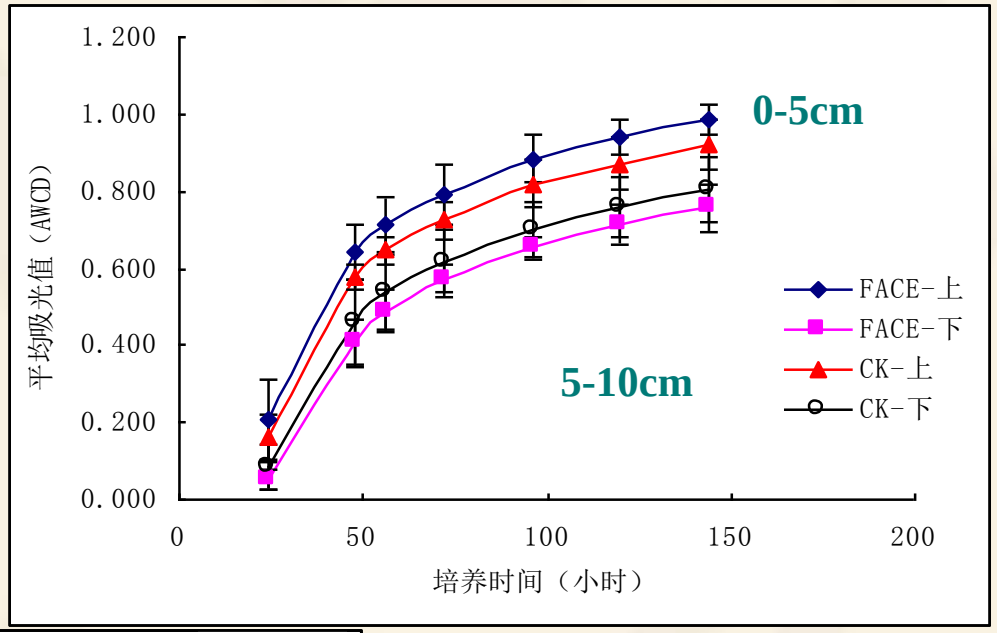
+16%**

生物群落结构与功能演变

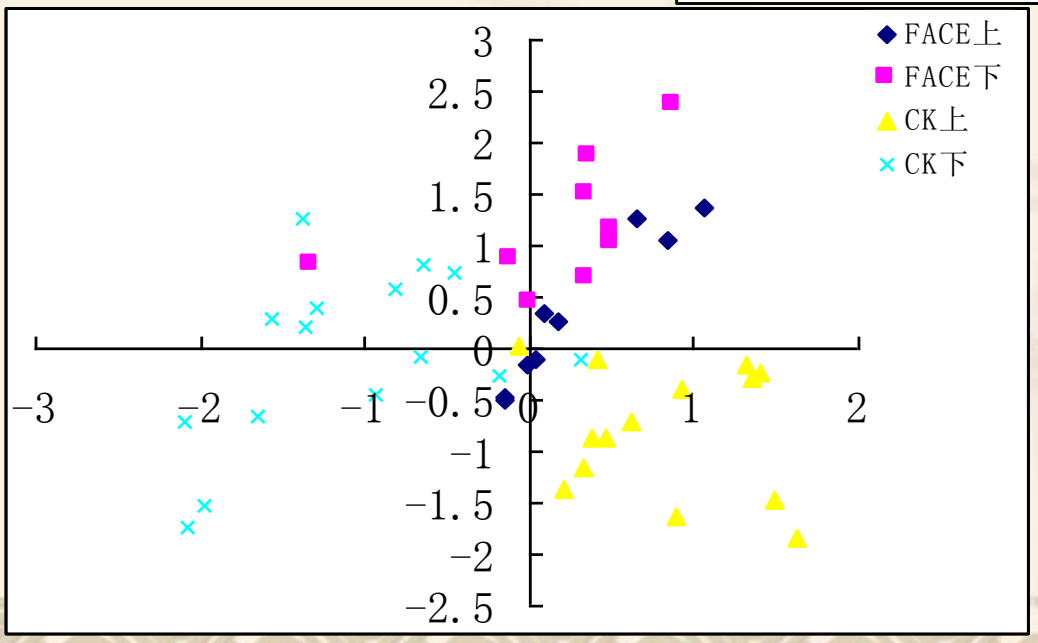
- 明确了FACE条件下土壤微生物类群的区系和分布发生改变，微生物功能多样性增加
- 土壤线虫表现为正响应
- 研究证实C_3植物竞争生存资源和空间的能力相对增加，C_4植物竞争能力相对下降
- C_3杂草耐药性相对增强

土壤微生物群落和功能

—BIOLOG 方法

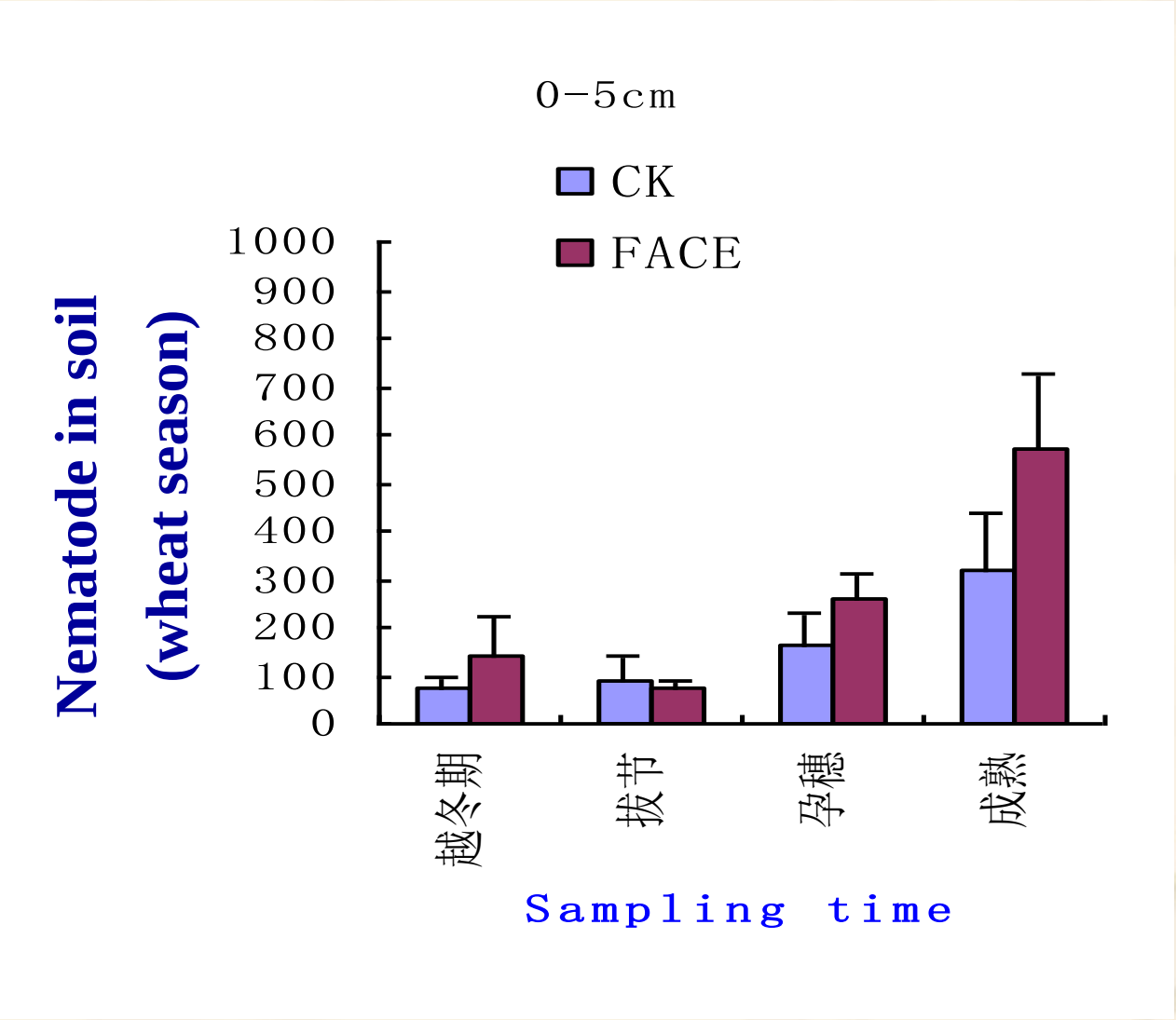


PCR主成分分析，群落演化



例如：
土壤氨氧化细菌的优势菌群发生变化，FACE条件下亚硝化球菌和亚硝化弧菌是优势菌属，而在对照条件下亚硝化单胞菌和亚硝化球菌是优势菌属。

土壤线虫群落变化



Brevibucca, Cephalobus, Hirschmanniella, Ditylenchu, Boleodorus, Tylenchus and Psilienchus are superiority.

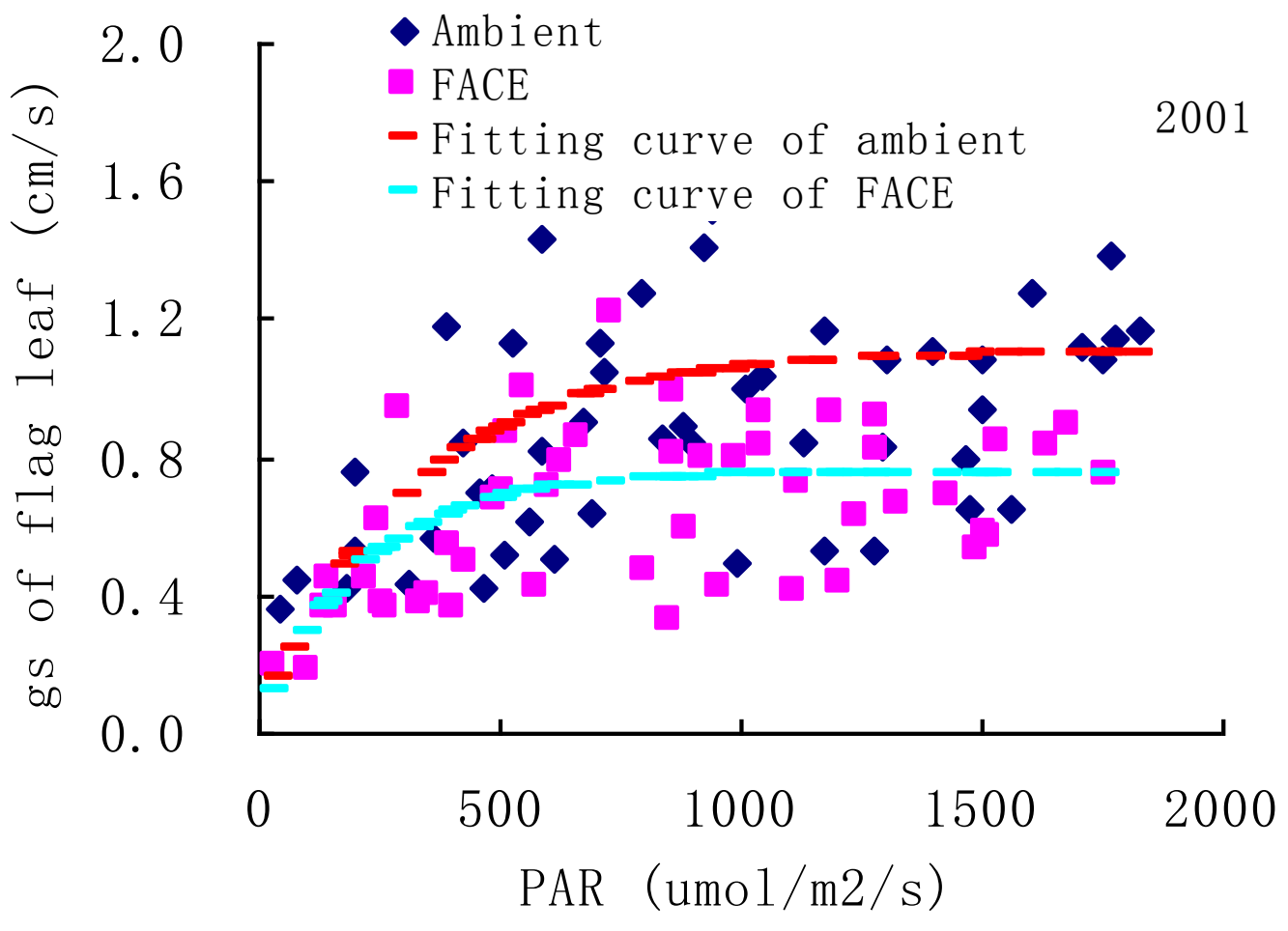
FACE对水稻田C_3和C_4杂草生物量的影响

杂草类型	地上部分干重/gm^{-2}			
	分蘖期		抽穗期	
	Ambient	Face	Ambient	Face
C_3杂草	14.33	44.5	26.76	70.74
C_4杂草	0.082	0.039	0.345	0.032
总计	14.42	44.54	27.102	77.77

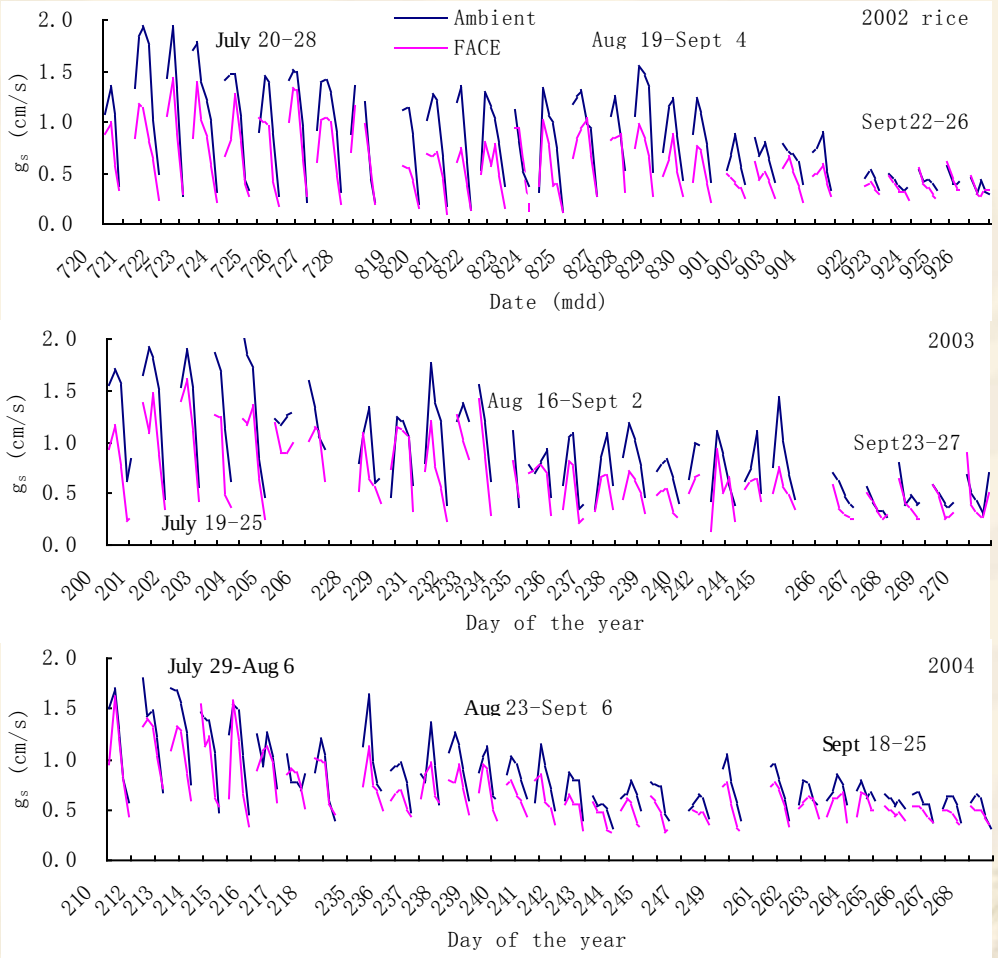
FACE条件下鸭舌草对除草剂2甲4氯的耐药能力增加，这与FACE条件下鸭舌草生物量增加和生育期提前有关。

水分和能量利用变化

Calibration of leaf stomatal conductance

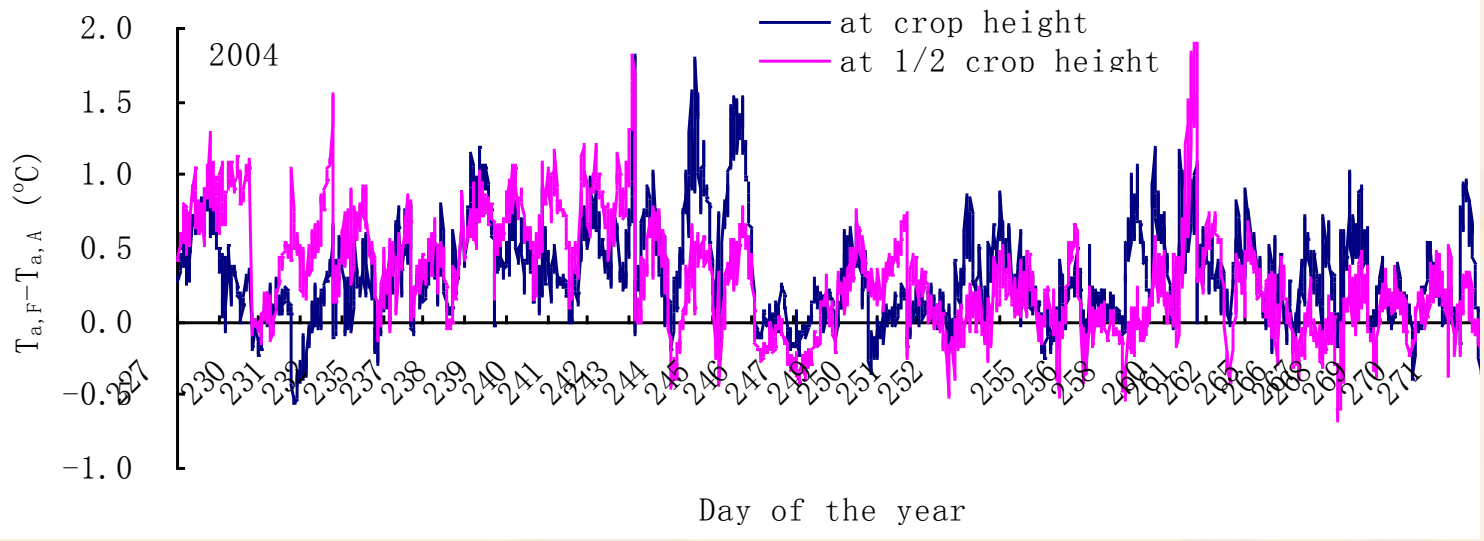


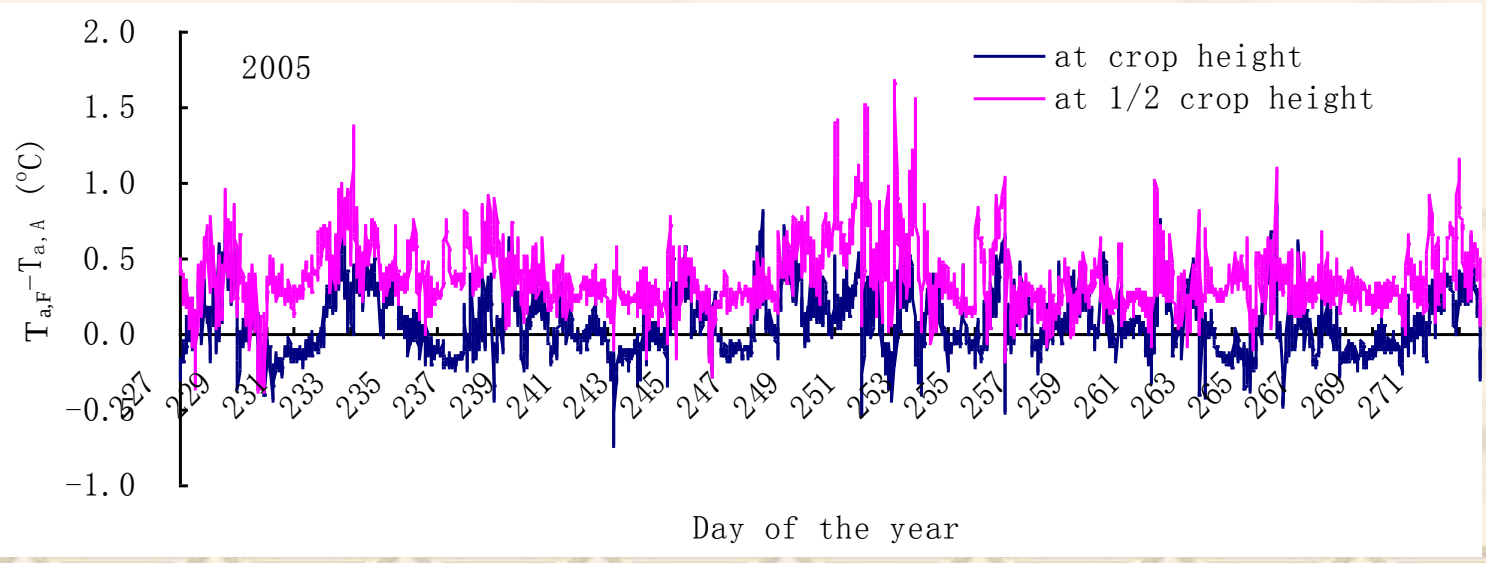
Effects of FACE on rice canopy microclimate



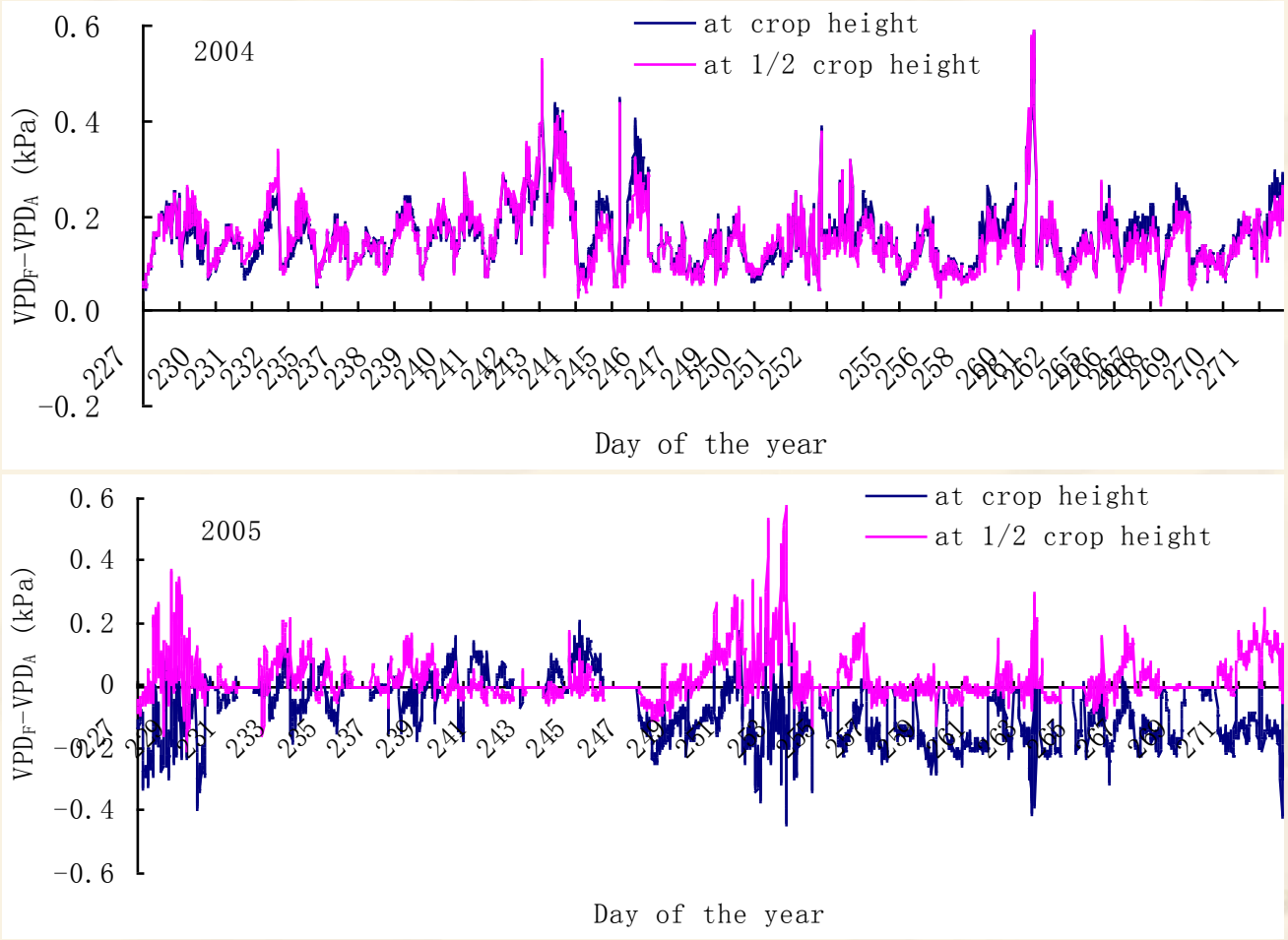
Daily and seasonal time course of rice leaf stomatal conductance (g_s, average value of the upper 4 leaves，data of 2002 and 2003 are from experiments in Wuxi, data of 2004 are from experiments in Jiangdu)

Effects of FACE on rice canopy microclimate





Effects of FACE on rice canopy microclimate

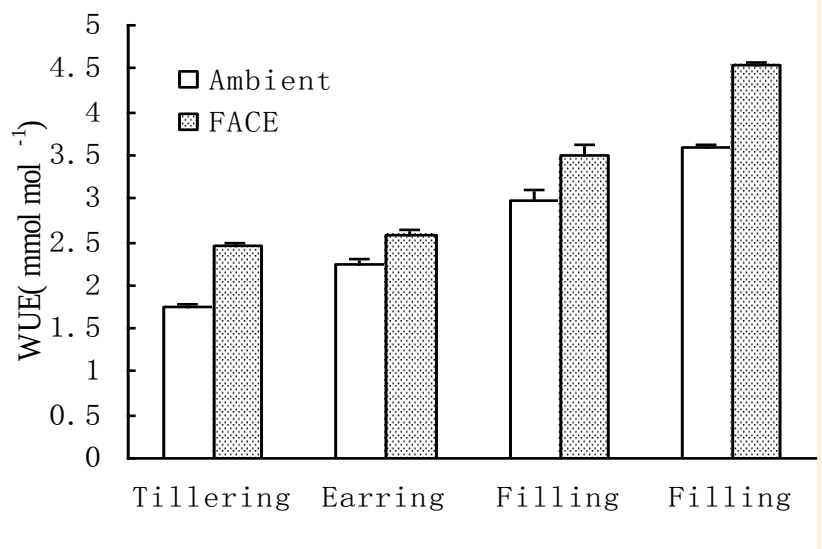


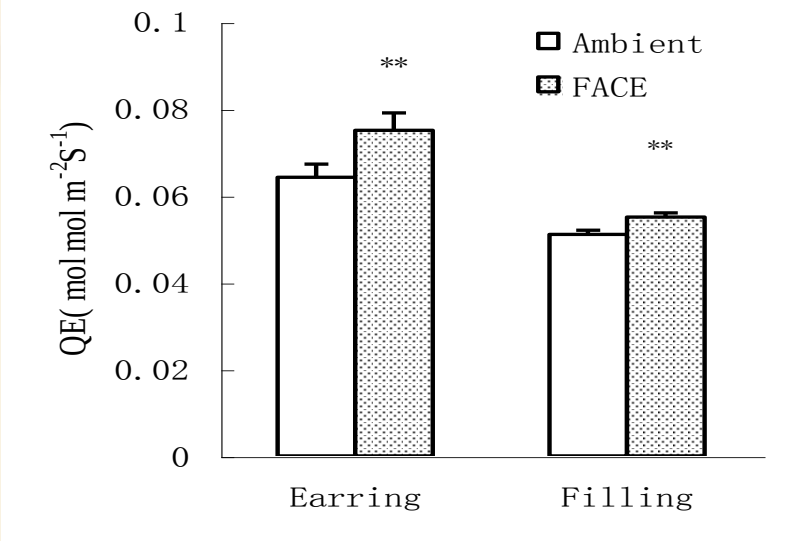
Effects of FACE on rice canopy microclimate

Maximum daily air temperature (T) and humidity (VPD) differences between FACE and Ambient at crop height (H) and 1/2H of rice canopies

Year	T_F-T_A (^oC)		VPD_F-VPD_A (kPa)		$g_{s,F}$- $g_{s,A}$ (%)
	H	1/2H	H	1/2H	
2001	0.9	1.2	0.26	0.21	
2002	1.2	1.6	0.33	0.62	31
2003	1.0	1.4	0.70	0.98	26.8
2004	1.8	1.9	0.44	0.59	16
2005	0.8	1.7	0.21	0.58	17.5

水稻水分和能量利用变化

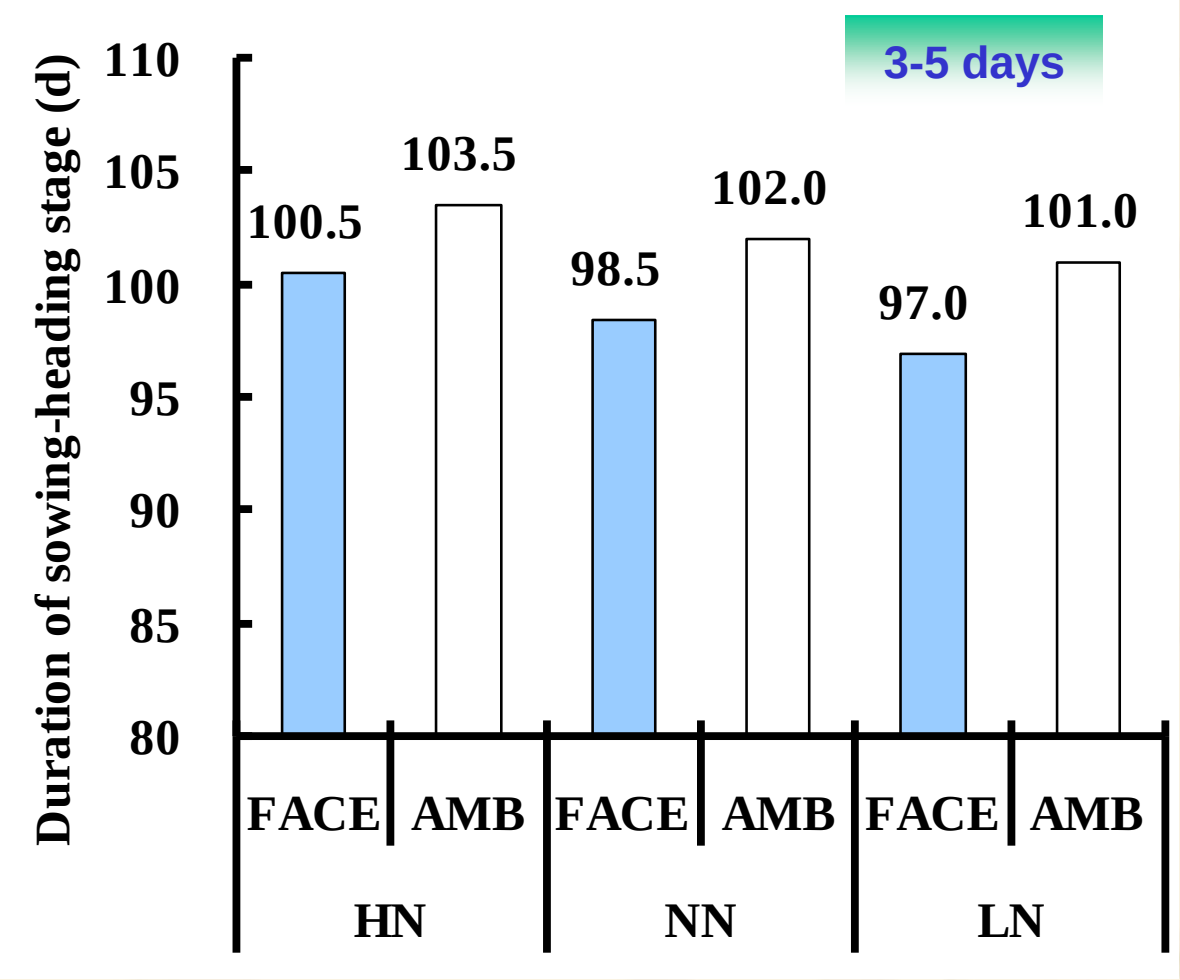




水分利用率提高　　能量利用率提高

年份	2002	2003	2004
FACE与对照冠层叶片平均气孔导度差值	30.2%	26.2%	19%
FACE与对照冠层水分利用率差异	24%	25.6%	22.8%

生育期缩短



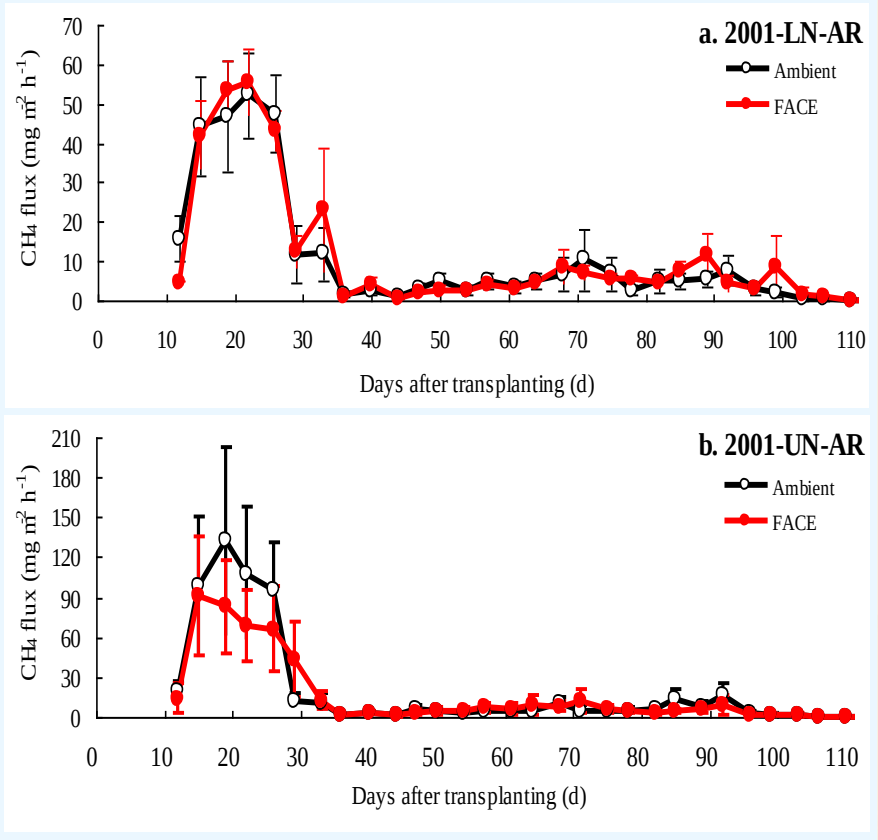
Duration from sowing to heading

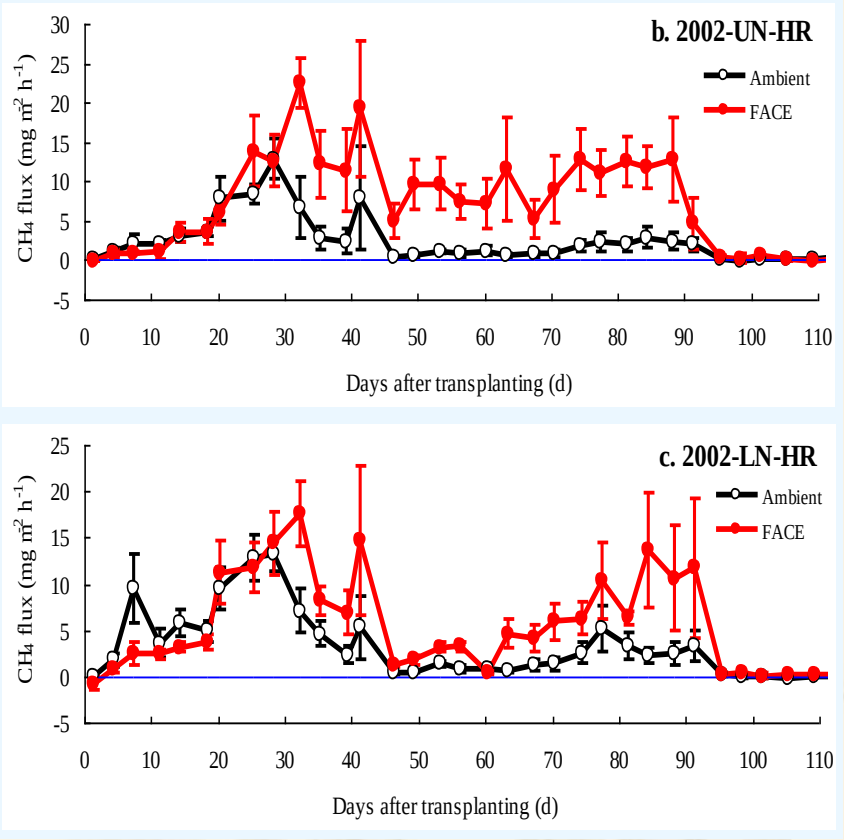
2001/09/27

温室气体排放的FACE效应

- 甲烷排放，FACE正效应
- 甲烷排放与有机质、氮施用量的关系用方程模拟，其结果可用于预测和调控对策
- N_2O、NO表现为FACE负效应趋势
- 有微生物观测佐证

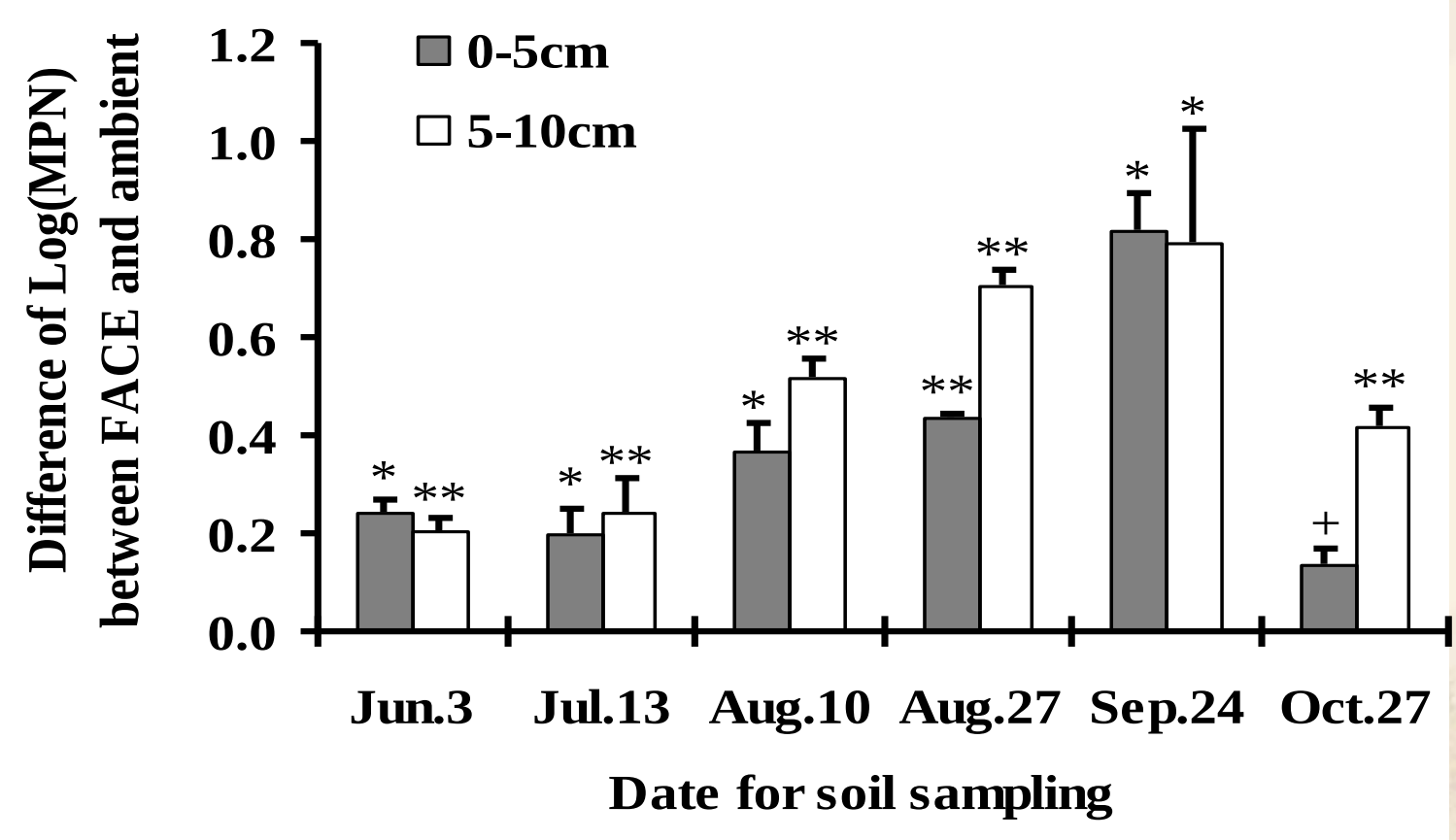
CH_4排放FACE效应





第一年，效应小，不显著；第二年，效应大，显著

耕层土壤中产甲烷菌数量增加



土壤排放的CO_2各地下来源的贡献比例

处理	土壤总释放量	源于新有机质	源于原有机质	源于根系呼吸
	%	%	%	%
Ambient-HN	100	19.9	50.4	29.7
FACE-HN	100	34.1	40.8	25.1
Ambient-LN	100	16.2	54.9	28.9
FACE-LN	100	30.9	44.1	25.0

13C同位素法研究土壤碳周转，FACE显著增加了土壤呼吸中源于新有机碳分解的贡献，而降低了原有机碳分解的贡献，这对增加土壤碳积累有积极作用。

高[CO_2]下的土壤养分有效性和供应能力

- 系统地分析观测分析了田面水（水稻季）、土壤溶液和土壤溶提液中养分元素含量(形态)，明确高CO_2 浓度下土壤养分有效性增加，供应能力增强，同时养分流失的风险加大。
- 通过观测土壤Eh、溶液的pH、DOC、HCO_3^-、CO_2等指标，结合土壤微生物活性分析，揭示土壤养分活性提高的机制。
- 通过不同土壤类型的类比试验论证这种FACE效应的普遍性。

大气CO_2浓度升高显著改变土壤溶液养分浓度

氮肥水平	深度（cm）	K	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Si	P	DOC	HCO_3^-	Cl^-	NH_4^+	NO_3^-
N	5	+	-	+	+	+	+		+		+	+	+	-	+
												+		-	+
	15	-	-	+	+	+	+	+	+		+	+		-	+
L	5	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+
			-									+		-	
	15	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
			-									+			

+ 正效应，- 负效应； 绿色，2004；红色，2005

养分供应

FACE条件下土壤溶液养分含量的变化

			CO_2 effect (%)	
			2004	2005
Ca	5cm	WP		25(-7~64)
		NN	24(18~31)	3(-22~24)
		LN	33(25~46)	1(-5~7)
	15cm	WP		30(0~94)
		NN	-5(-15~7)	18(3~35)
		LN	27(16~32)	16(12~23)
Mg	5cm	WP		80(-15~265)
		NN	4(-2~126)	43(-15~143)
		LN	190(2~585)	26(-9~49)
	15cm	WP		77(19~161)
		NN	28(-6~237)	23(-5~62)
		LN	96(25~236)	91(19~272)
Fe	5cm	WP		80(-15~265)
		NN	4(-2~126)	43(-15~143)
		LN	190(2~585)	26(-9~49)
	15cm	WP		77(19~161)
		NN	28(-6~237)	23(-5~62)
		LN	96(25~236)	91(19~272)

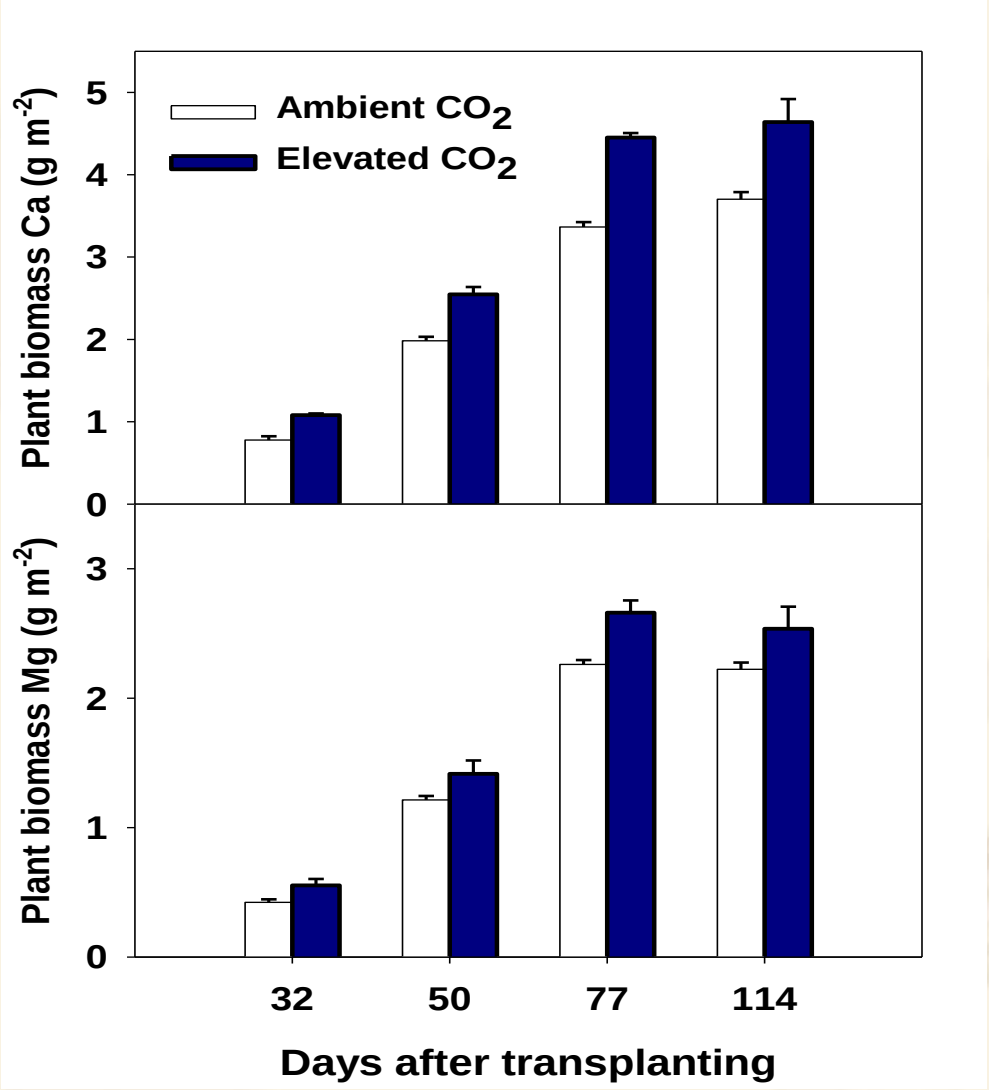
			CO_2 effect (%)	
			2004	2005
Mn	5cm	WP		51(16~144)
		NN	22(-36~68)	35(-9~120)
		LN	55(16~184)	12(-9~23)
	15cm	WP		42(18~44)
		NN	-16(-31~7)	31(5~82)
		LN	36(13~69)	21(15~34)
Zn	5cm	WP		2(-28~38)
		NN	6(-24~24)	9(-55~43)
		LN	10(-19~60)	-13(-35~-5)
	15cm	WP		30(19~38)
		NN	-6(-45~49)	41(-24~191)
		LN	1(-36~37)	9(-38~50)
Si	5cm	WP		6(-10~26)
		NN	33(22~42)	23(10~39)
		LN	27(17~39)	18(6~35)
	15cm	WP		16(2~51)
		NN	-4(-17~9)	15(3~23)
		LN	30(9~53)	10(-5~27)

FACE条件下土壤DTPA浸提液中的微量元素含量变化

FACE效应		Cu	Fe	Mn	Zn
5cm	NN	11(8~18)	5(-5~10)	-7(-21~18)	56(25~117)
	LN	8(6~11)	8(3~12)	-2(-13~7)	51(31~74)
15cm	NN	17(12~22)	12(7~17)	-4(-17~8)	57(31~94)
	LN	10(9~10)	6(-3~13)	-4(-12~5)	38(17~50)

养分吸收

FACE条件下植株生物量Ca和Mg显著升高



Ca

Mg

养分吸收

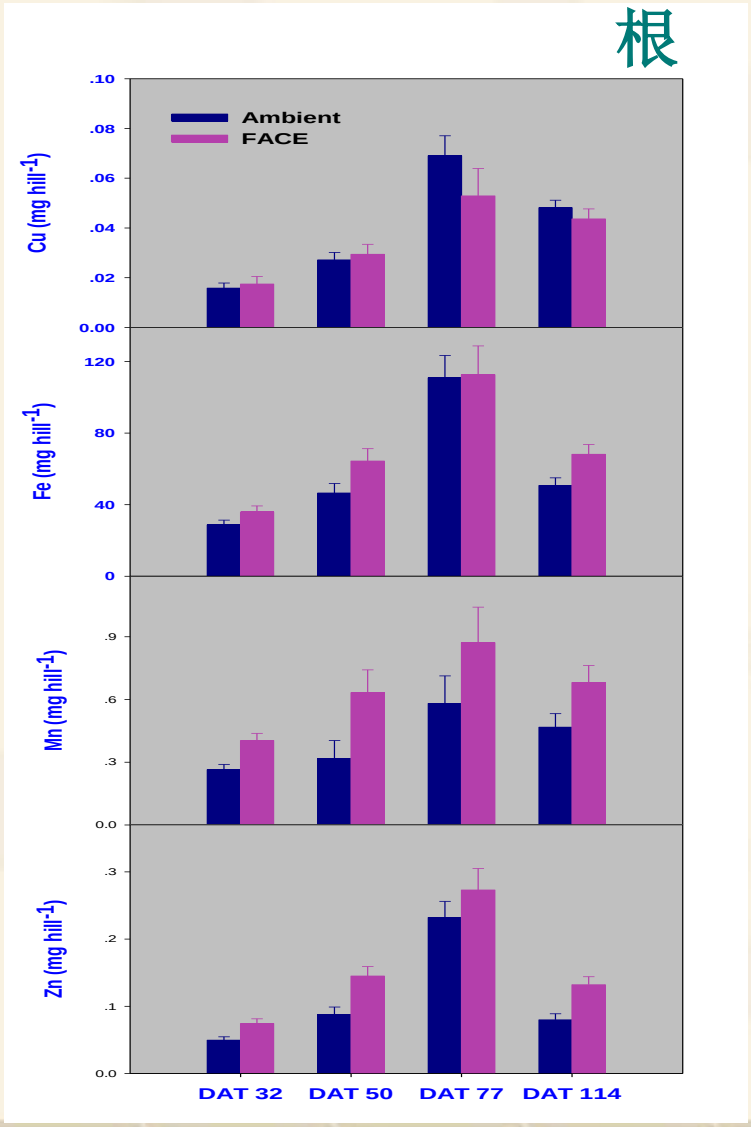
FACE条件下微量元素吸收量变化

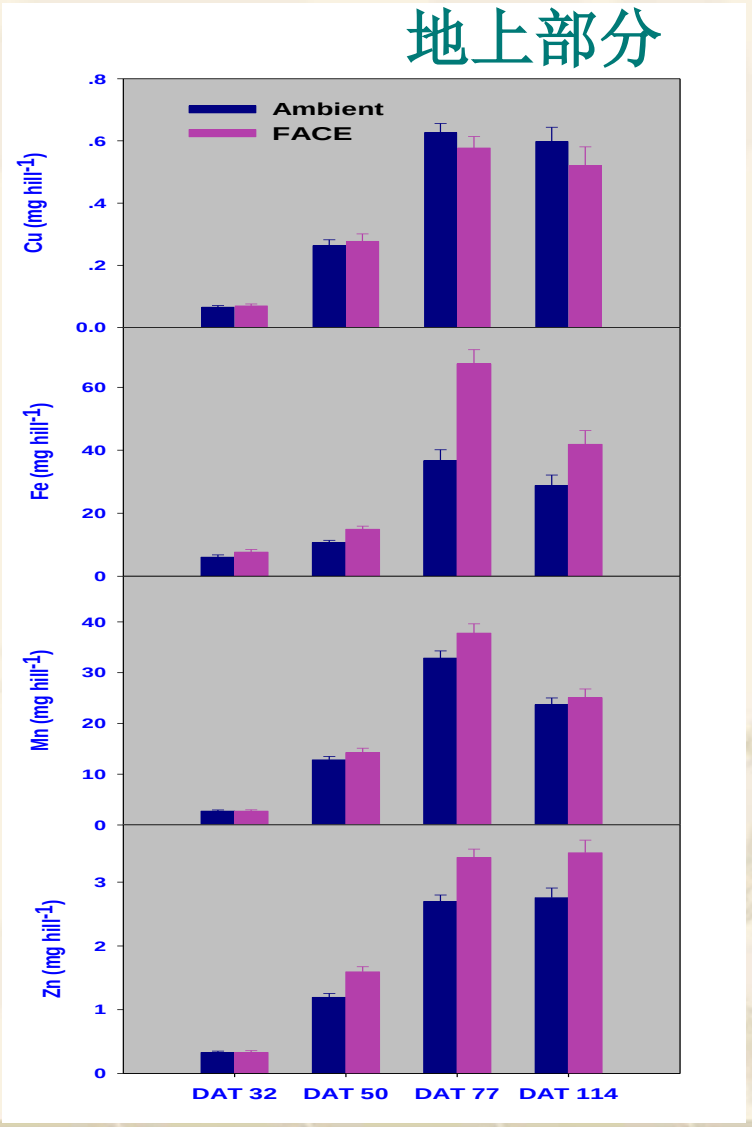
Cu

Fe

Mn

Zn





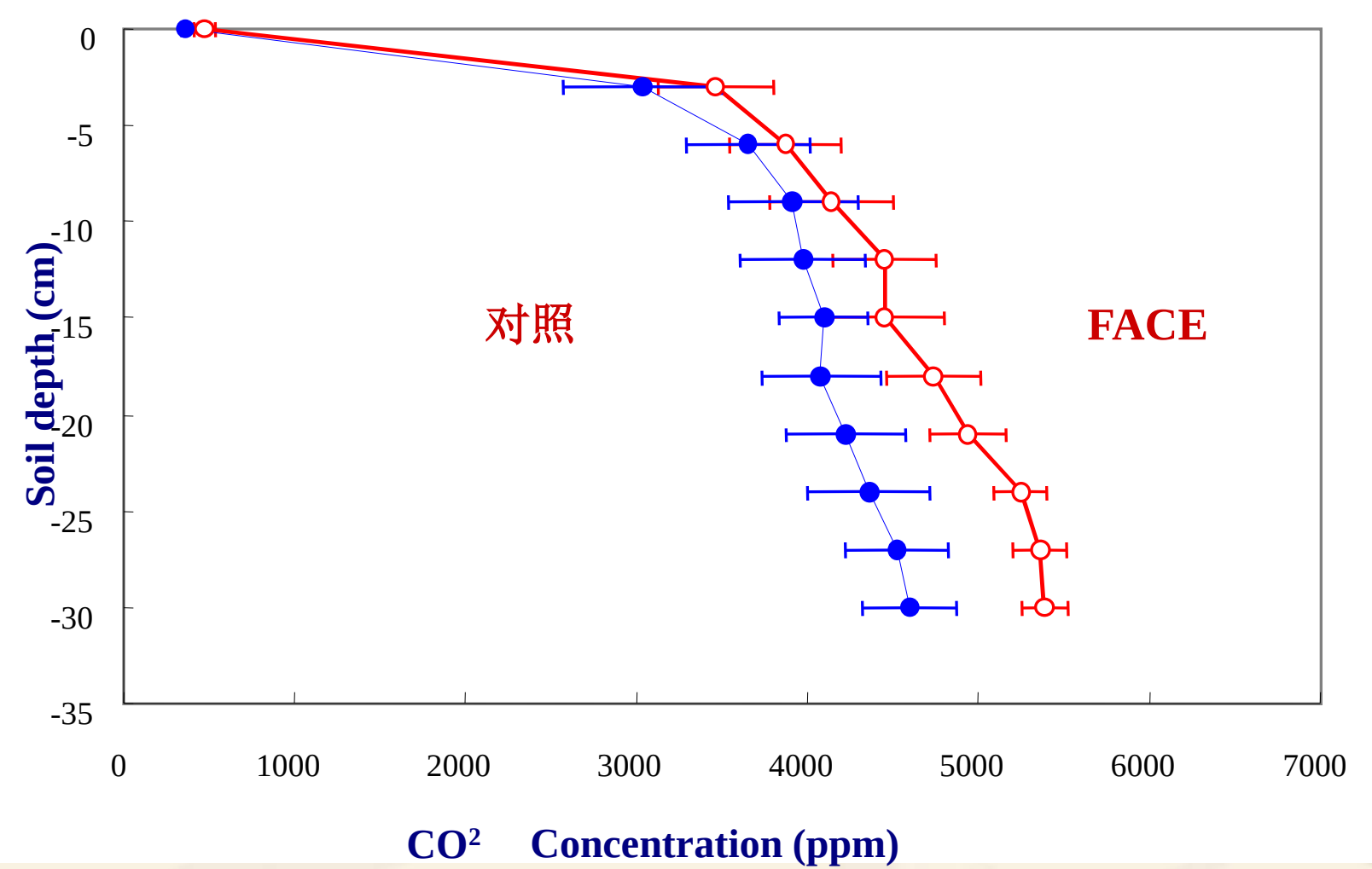
影响土壤养分有效性和供应能力的机制

土壤的物理、化学、生物环境诸多因素对矿化、风化产生影响，从溶液介质条件作初步观测分析：

- P_{CO2} $CaAl_2Si_2O_8+2CO_2+3H_2O \longrightarrow Ca^{2+}+2HCO_3^-+AlSi_2O_5(OH)_4$
- pH 白云母(9.5)、蒙脱石(7.0-8.5)、高岭石（3-3.5）
- Eh 氧化还原作用
- DOC 配位作用、微生物活性等

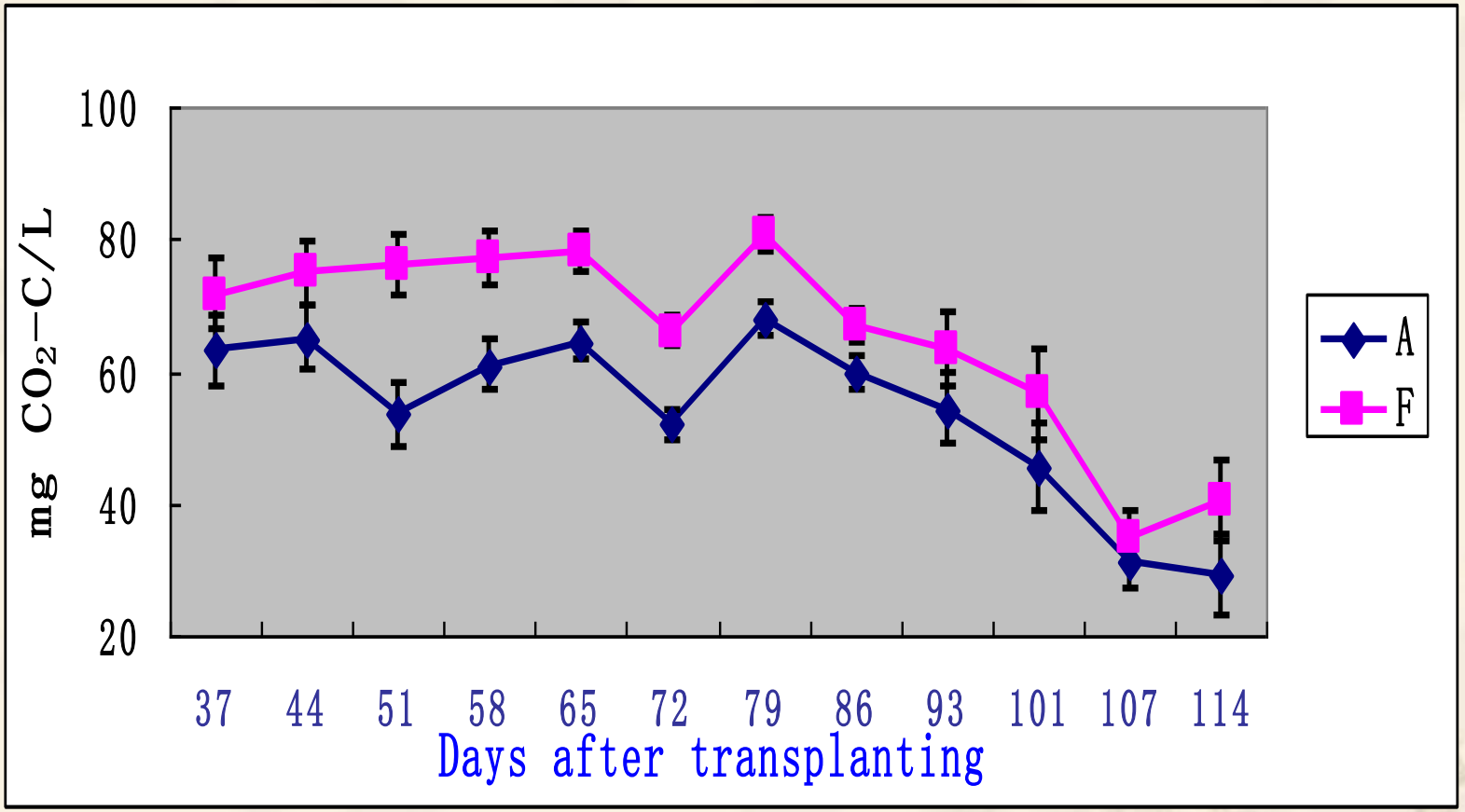
原因分析

土壤中CO_2浓度廓线揭示土壤呼吸增强



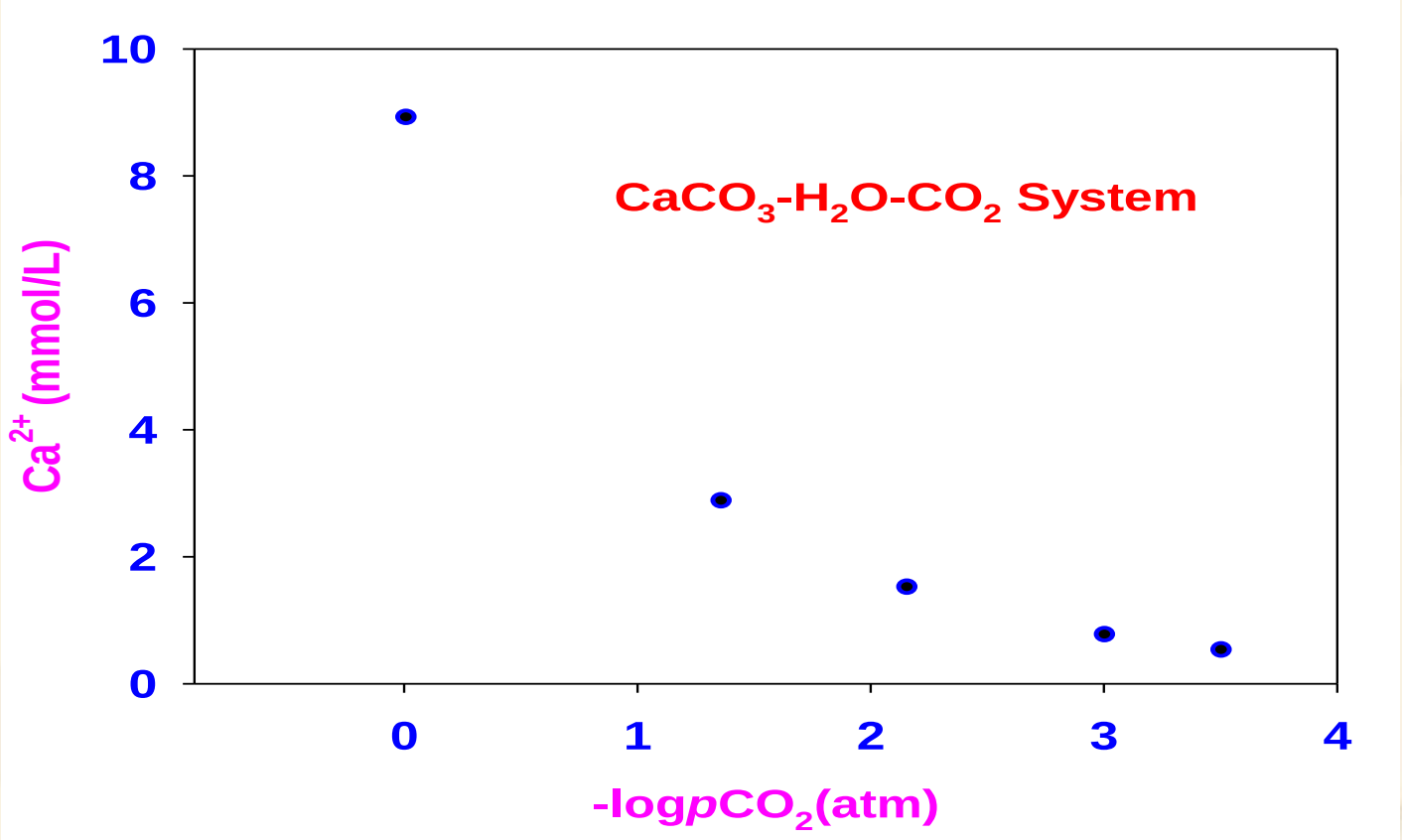
原因分析

FACE条件下土壤溶液中的CO_2含量显著升高



means ±1 SE

P_{CO2} 与 溶液Ca^{2+}



$$CaAl_2SiO_8+2CO_2+3H_2O \longrightarrow Ca_2^{+}+2HCO_3^{-}+AlSi_2O_5(OH)_4^{2-}$$

Y=9.008*exp(-0.8299X) , Frear 1929

计算值

P_{CO2}：0.2 to 0.25 atm ⟶ 8% Ca^{2+}

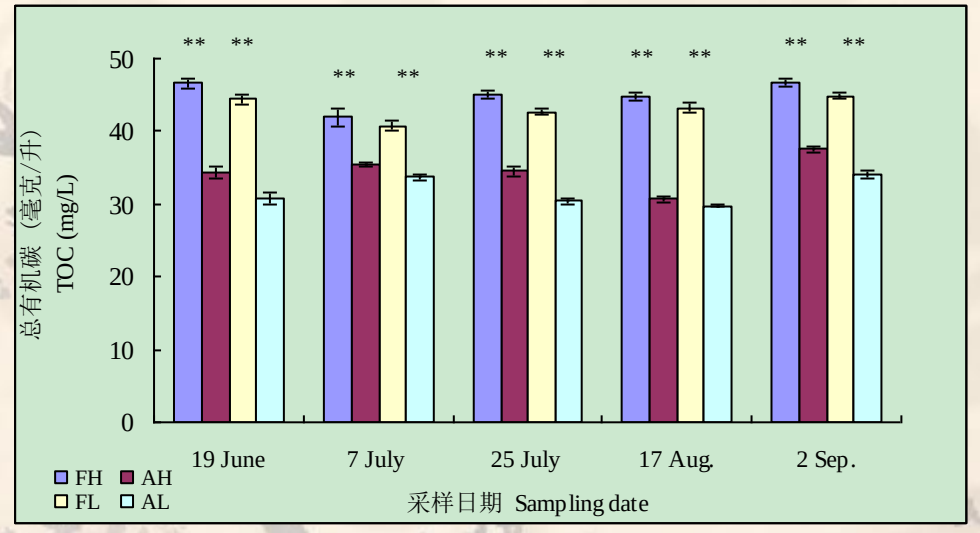
观测值 (Calcareous Soil)

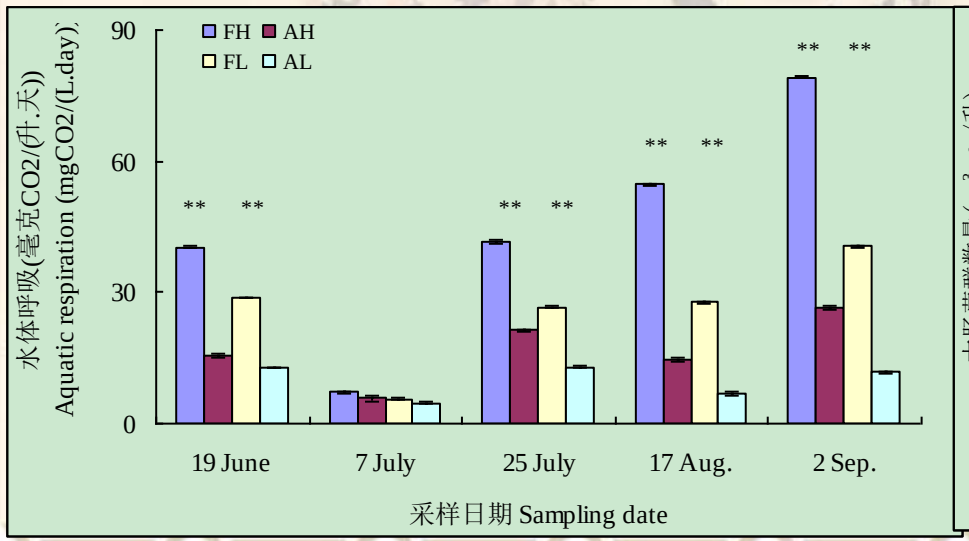
P_{CO2}：0.1 to 0.5 atm ⟶ 6% Ca^{2+}

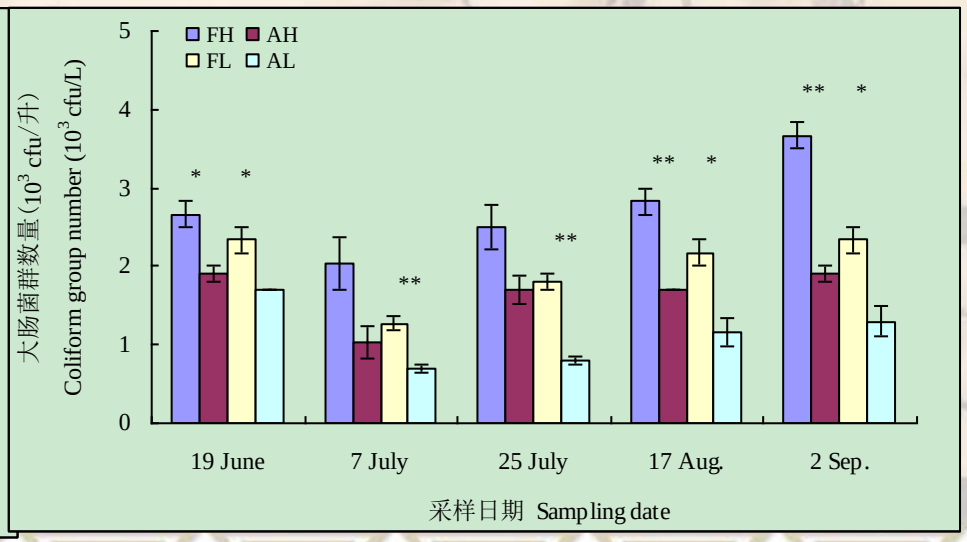
(J.W. Shi,G.X. Xing 1995）

原因分析

FACE条件下田面水TOC及微生物活性变化

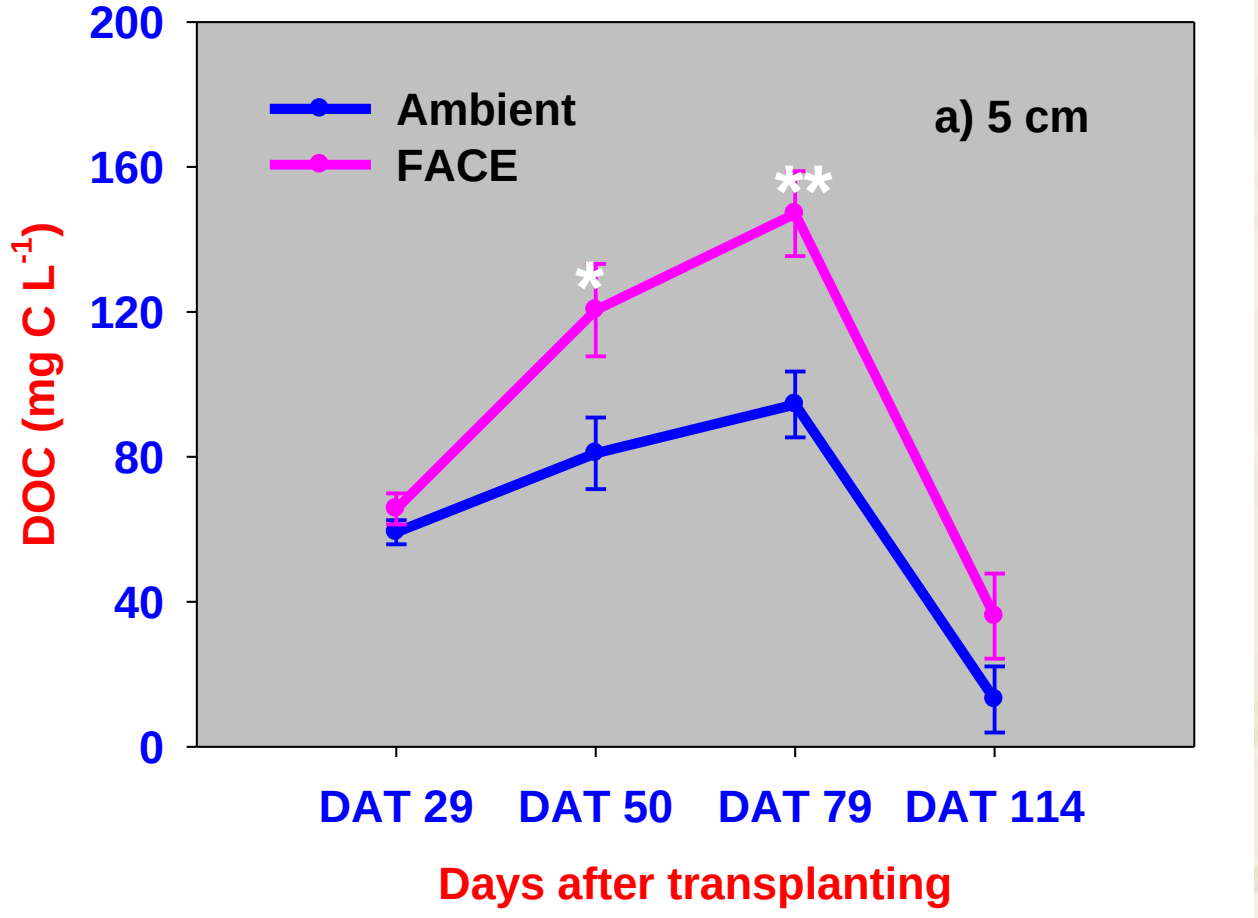






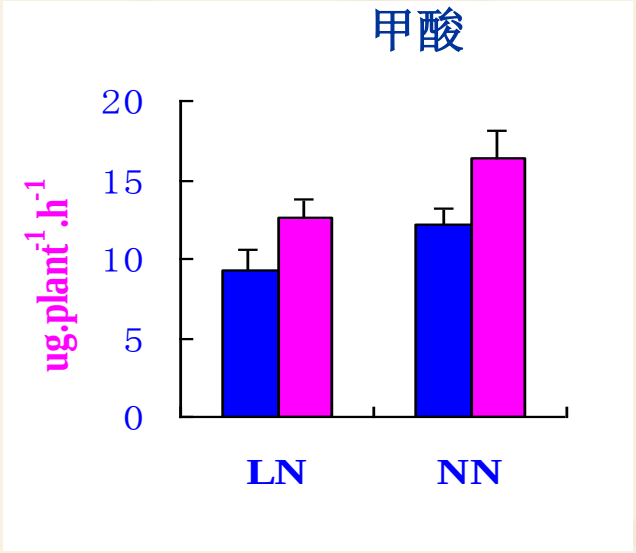
原因分析

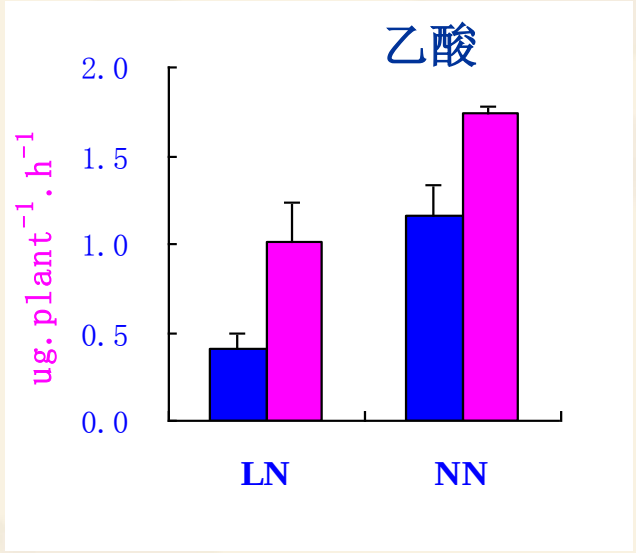
FACE 条件下土壤溶液中DOC含量增加显著

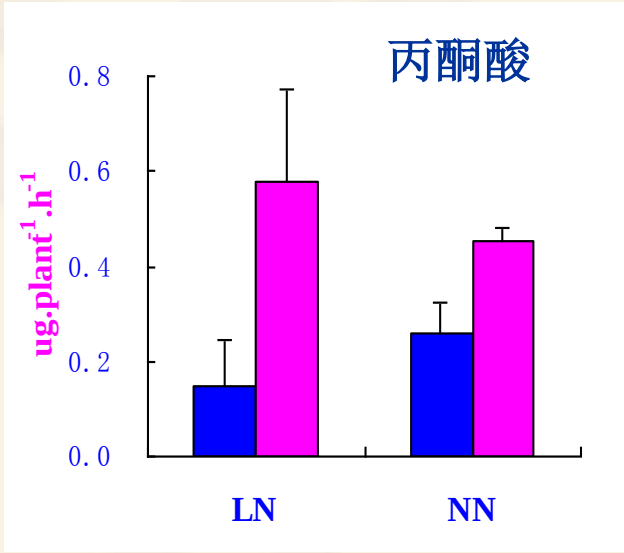


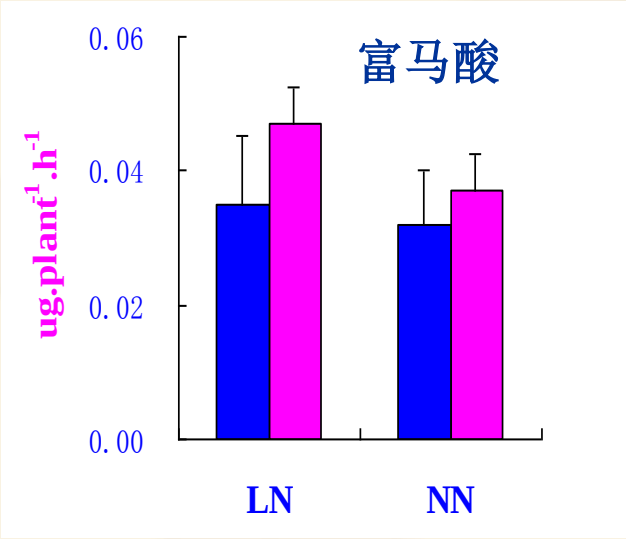
原因分析

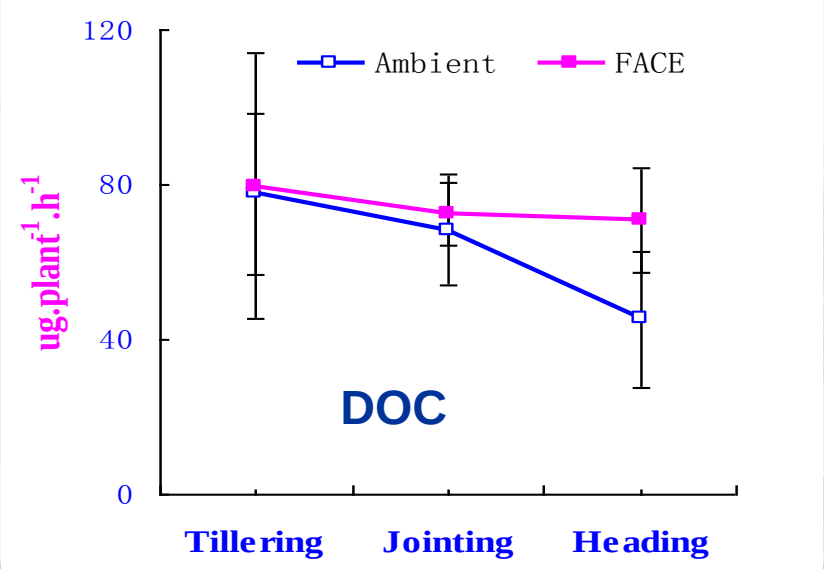
水培试验表明根系分泌增加







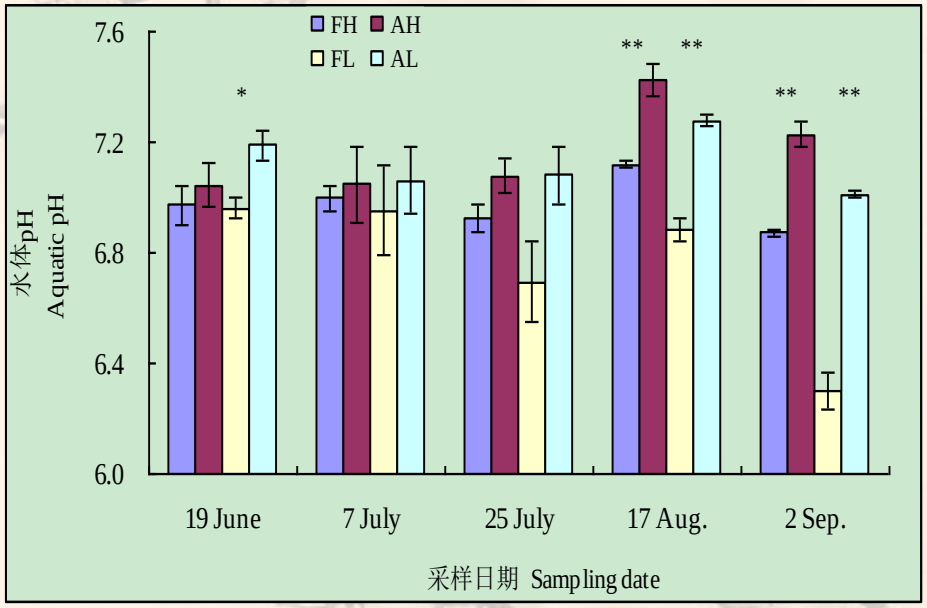




FHN
FLN
AHN
ALN

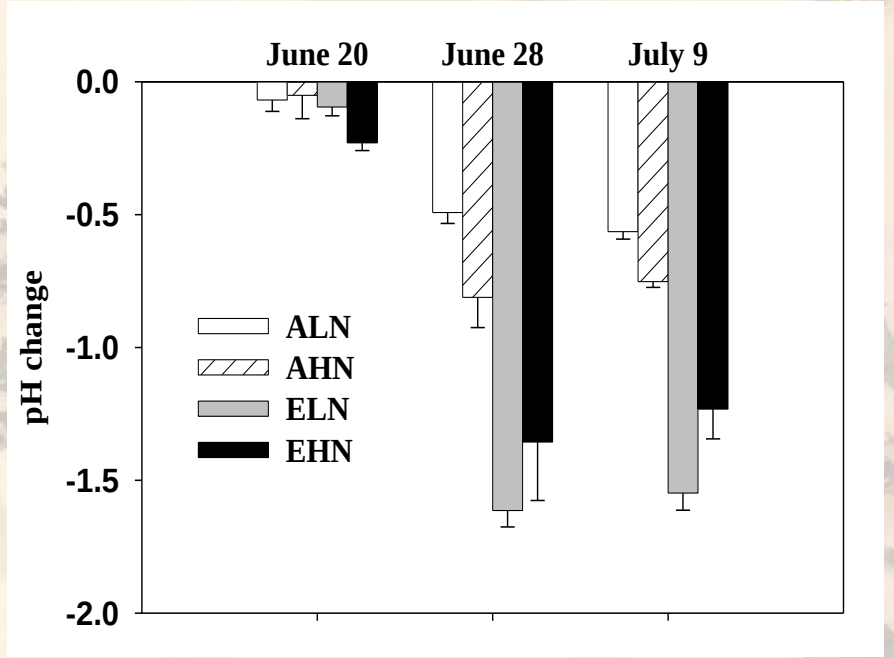
原因分析

FACE条件下溶液pH变化



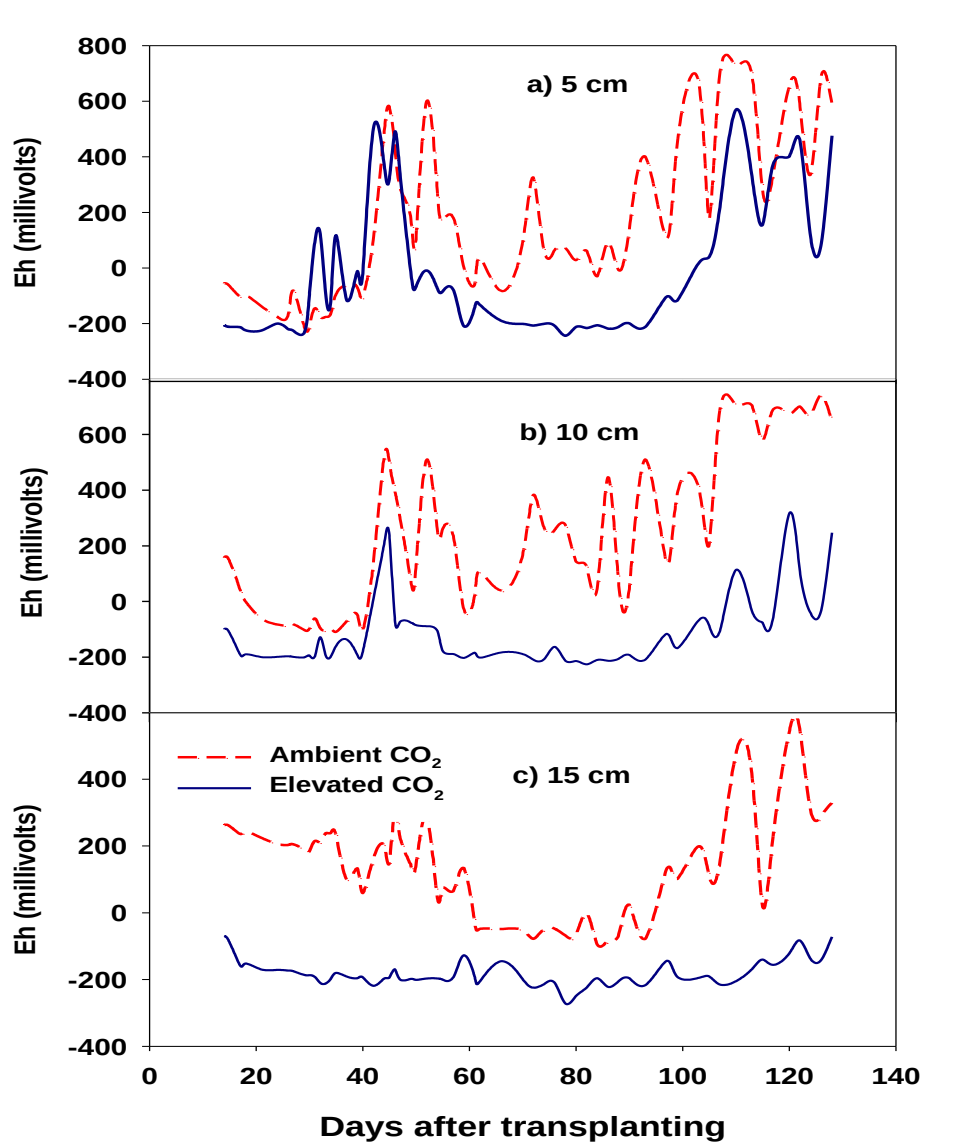
田面水pH变化

水培试验中
营养液pH的变化差异

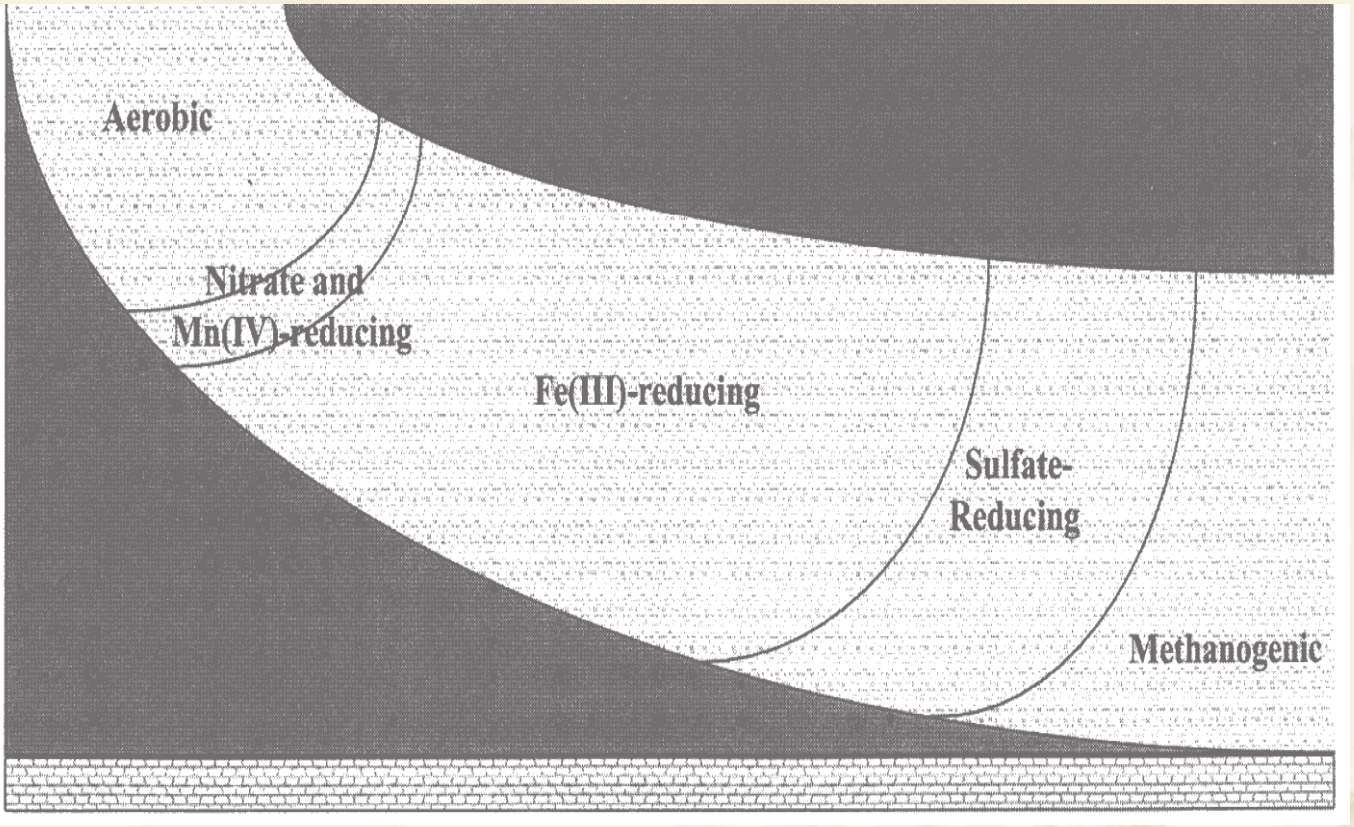


原因分析

土壤Eh变化（水稻季节）

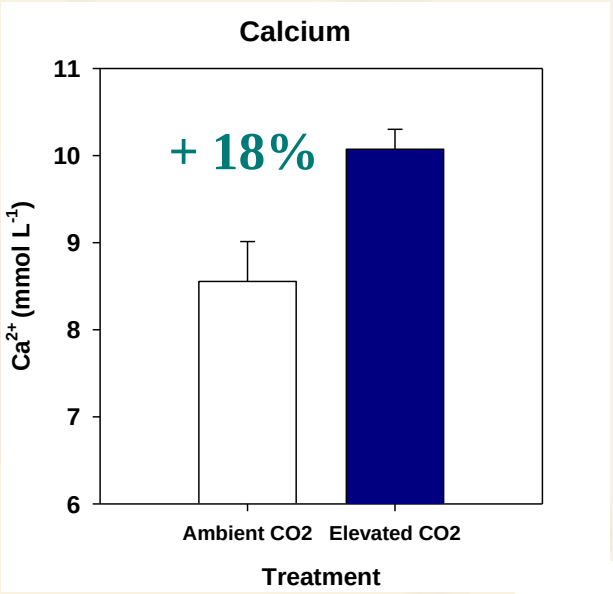


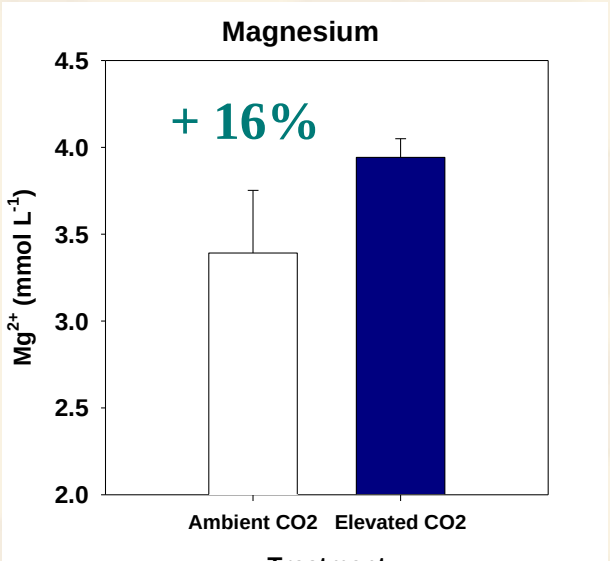
水稻土壤的还原序示意



Modified from Lovley 1995 Adv. Agro.

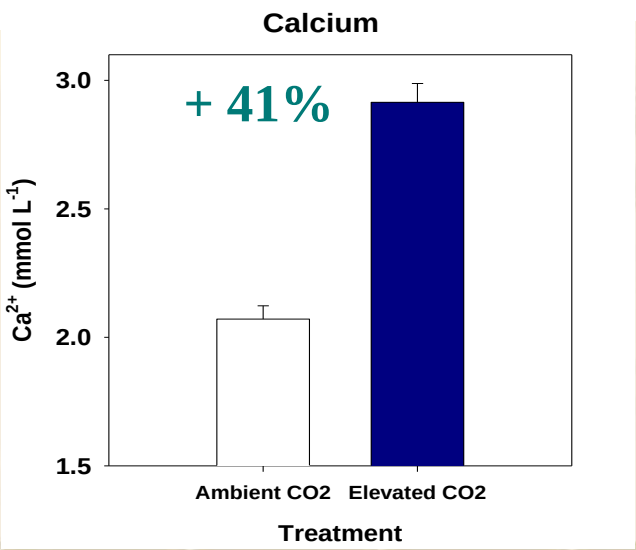
不同土壤类型上的试验说明这种FACE效应的必然性

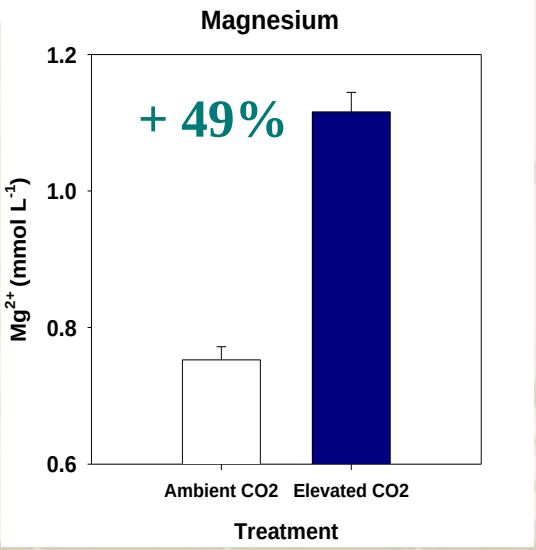




江西土壤

江都土壤





初步结论

高大气[CO_2]提高作物叶片光合作用效率，植物生物量增加，养分需求增强，根系分泌增多，强化土壤生物和物理化学过程，总体上短期内使土壤养分有效性提高，供应能力增高，但由于存在养分特别是盐基离子流失的趋势，其长期效应可能导致土壤养分供应能力的降低。

FACE方法研究水稻和小麦对近地层臭氧浓度升高的响应

大气层O_3上减下增

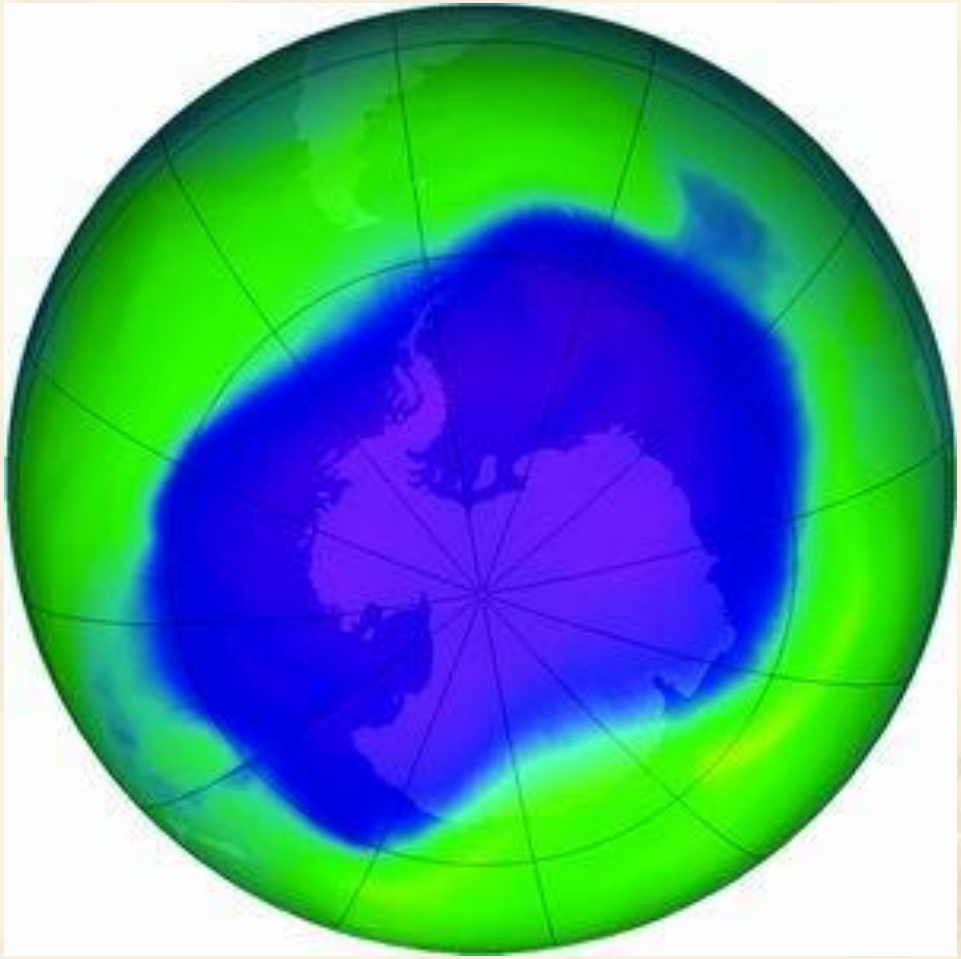
- 平流层臭氧是有益的：
  吸收紫外线而保护地球生物
- 对流层臭氧是有害的
  为主要的空气污染物、氧化剂，损伤人的呼吸功能和植物的光合功能；
  吸收地表散射的红外线，为主要的三个温室气体之一

平流层臭氧在减少

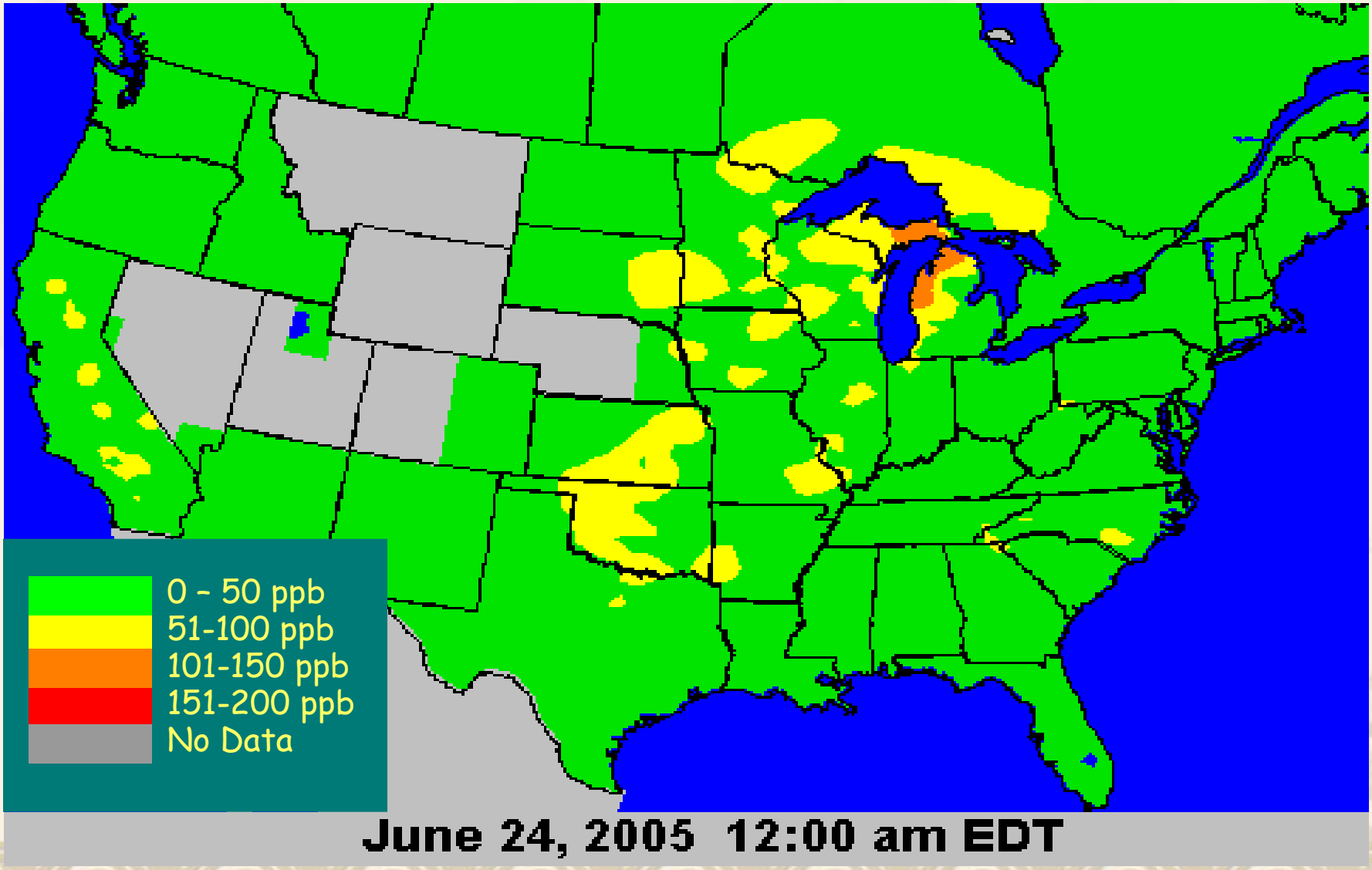
南极的臭氧空洞:

27.5 百万 Km^2

从 300降至 93 Dobson

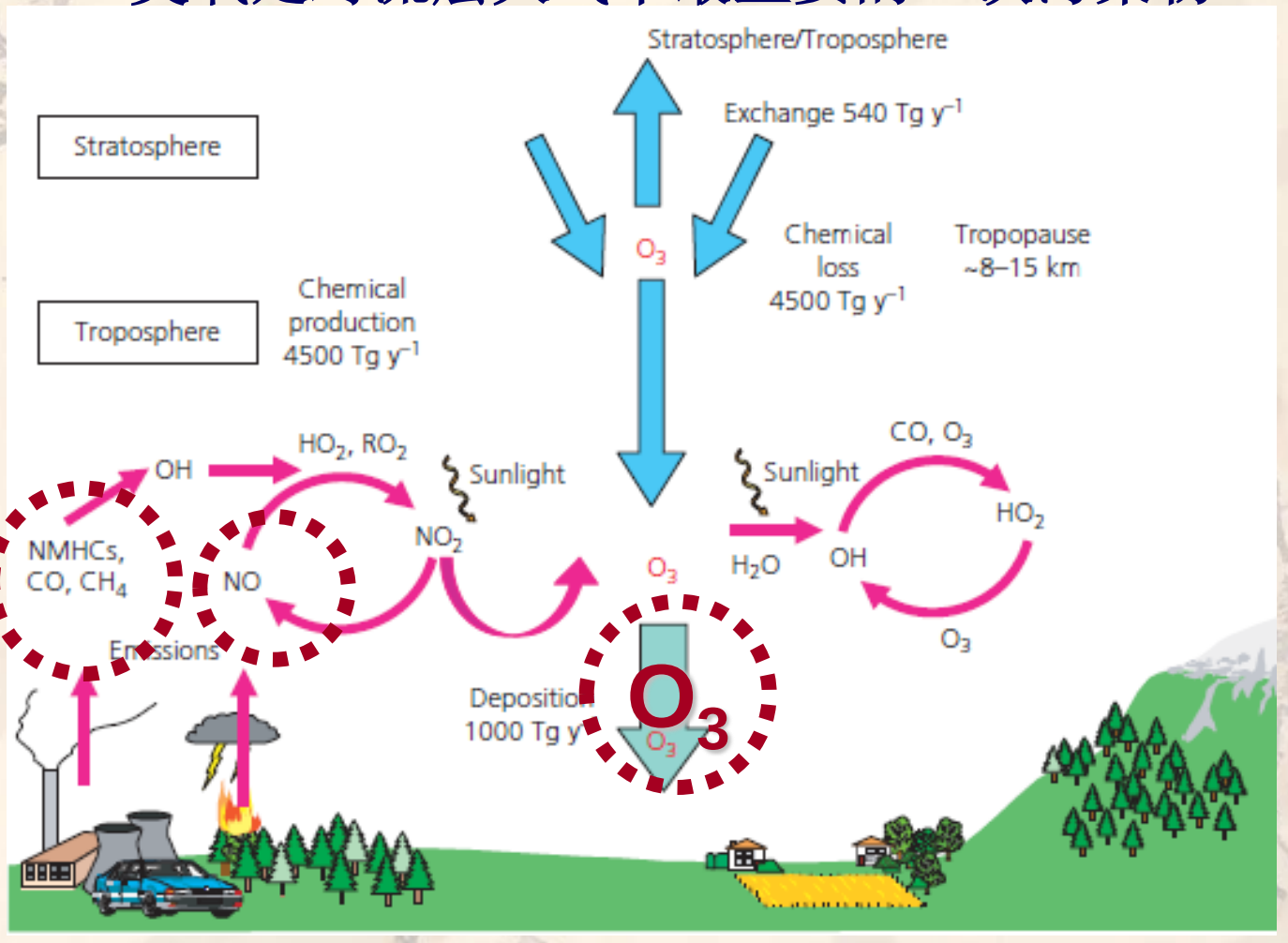


上世纪臭氧污染由从大城市周边扩展到大区域



研究背景

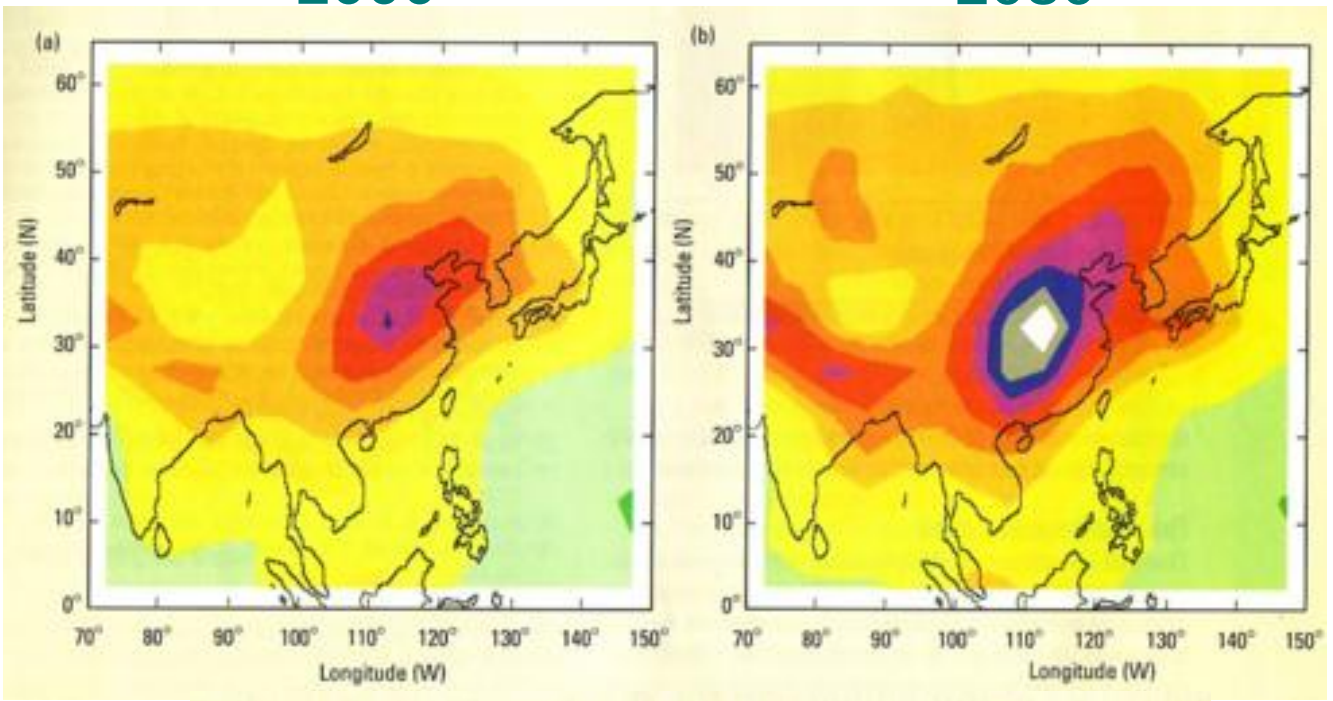
- 臭氧是对流层大气中最主要的二次污染物



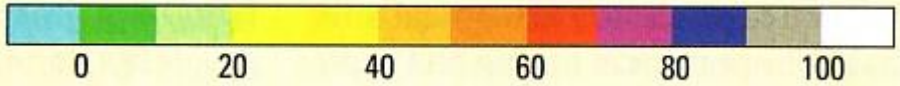
Tropospheric O3 increase may become a pressing issue in Asia

Simulated surface O3 concentration in July

2000 2030

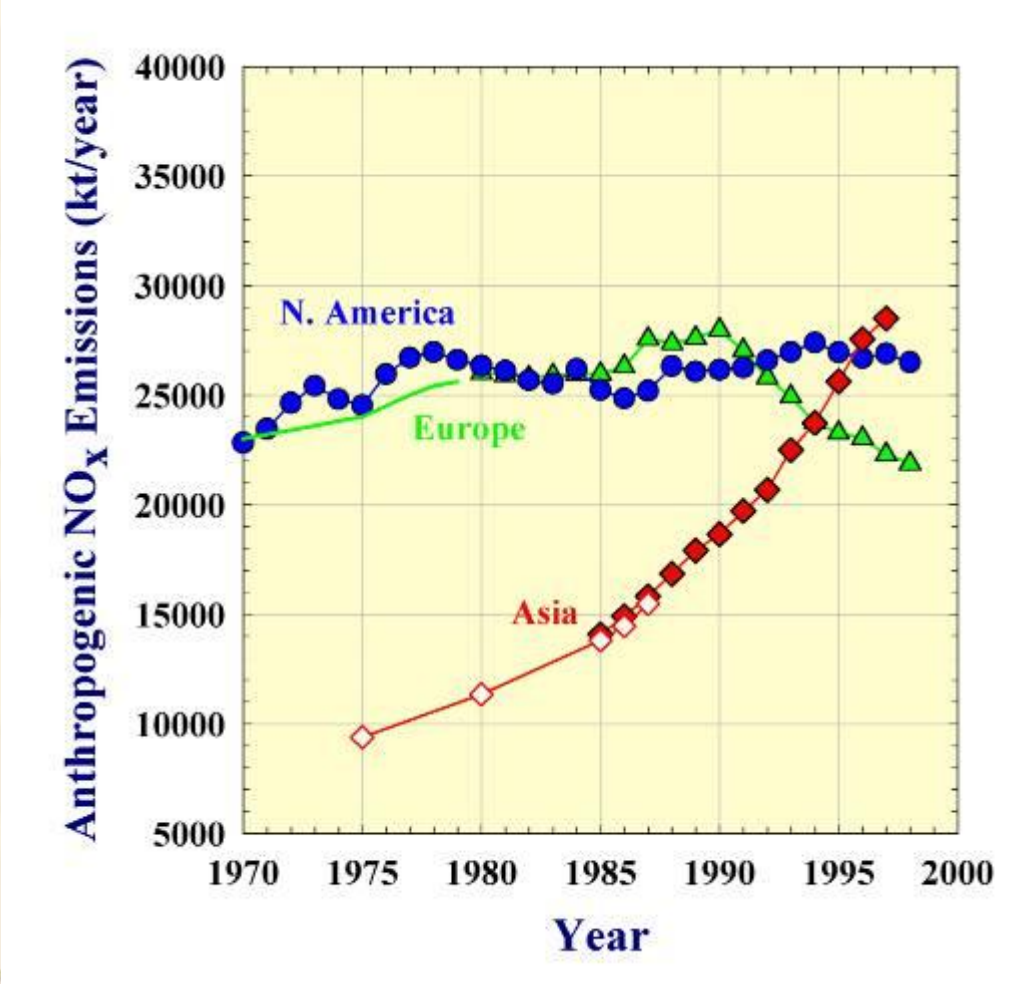


O3 (ppb)



Source: Derwent et al. (2002)

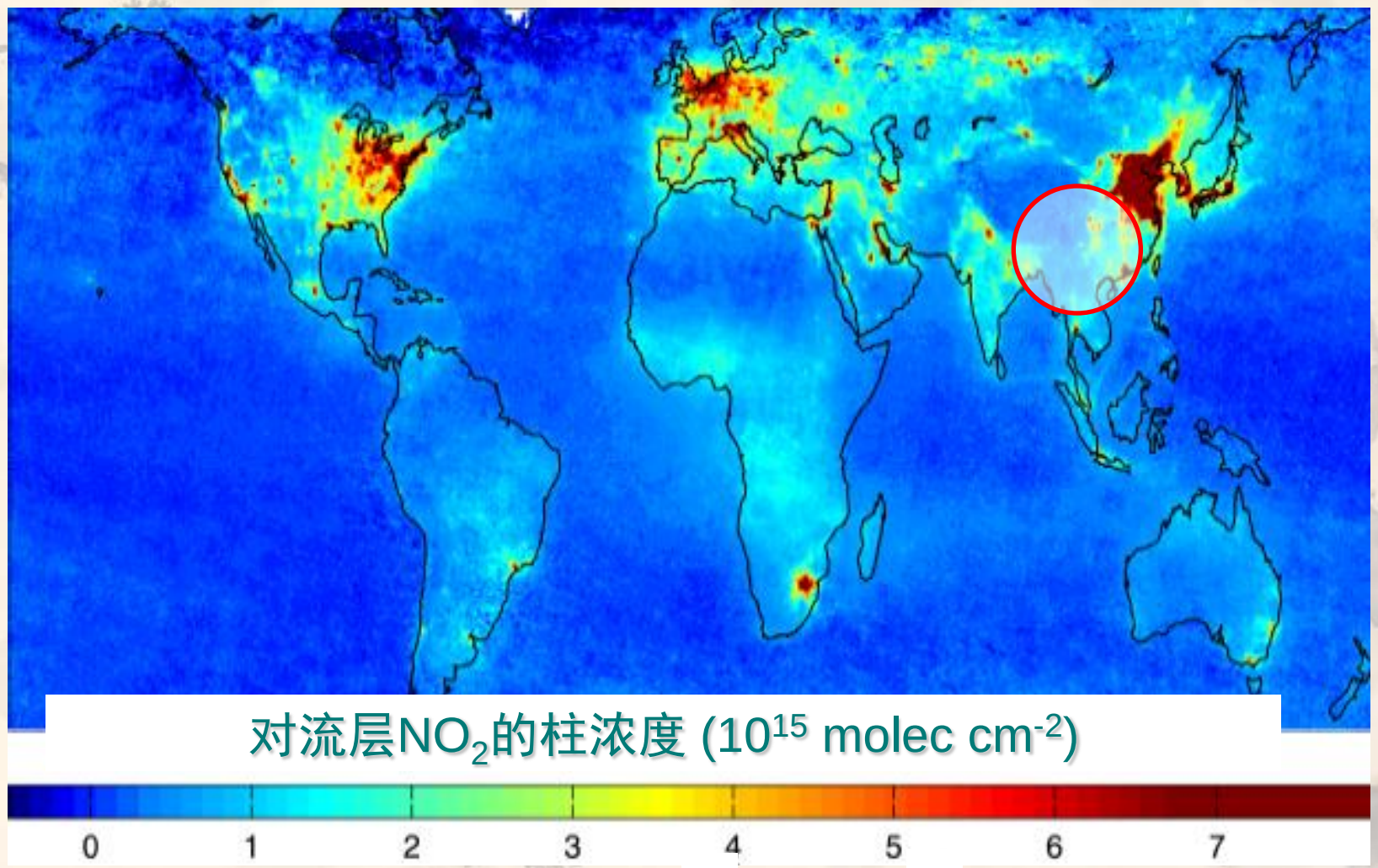
Asia has surpassed N. America and Europe in NOx emission



Source: Akimoto (2003) Science 302.

N. America: USA + Canada, Europe: including FSU, Asia: South, SE and NE

➢ 我国中东部［NO_2］分布成为全球三大热点之一

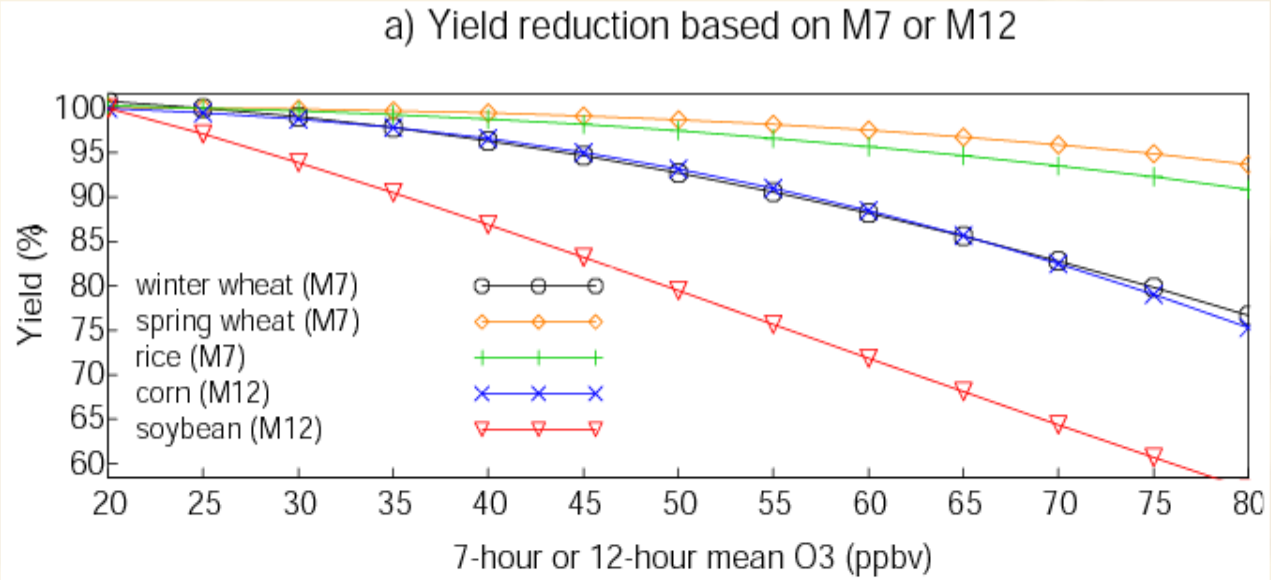


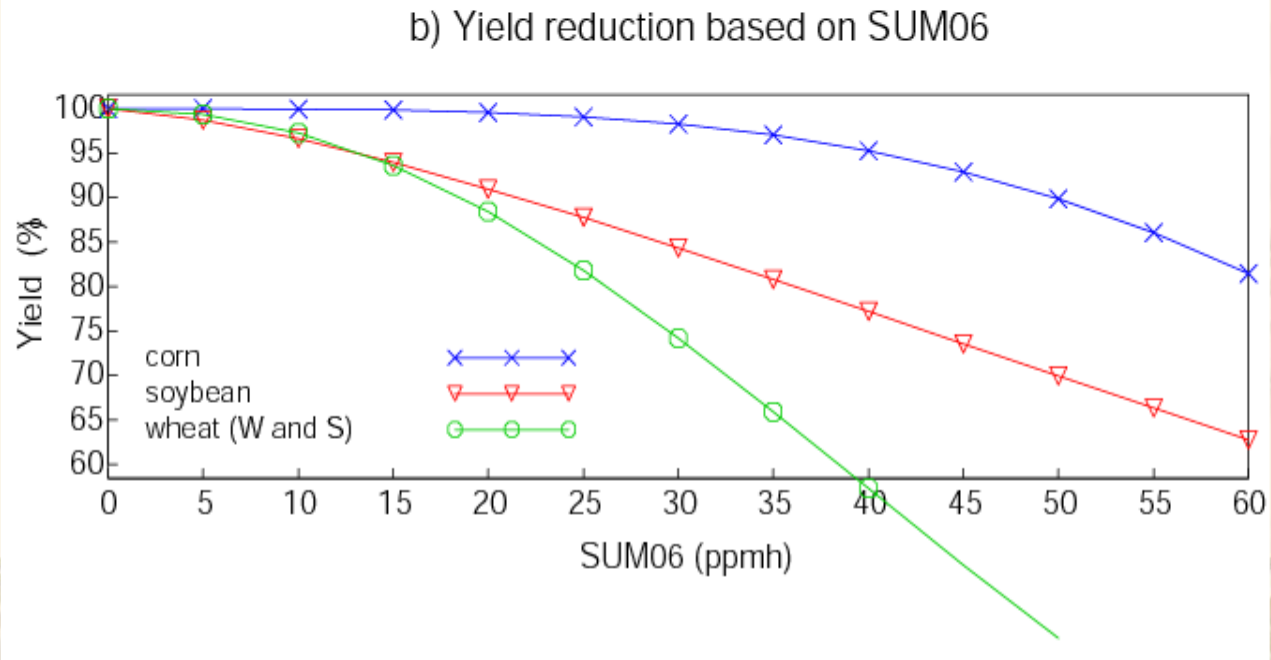
Source: Martin et al. (2006) JGR 111 D15308

O_3 injury to rice, **Pakistan**
(courtesy of A. Wahid)

WHEAT cv. CHAK-86
TR: FILTERED AIR
WHEAT cv. CHAK-86
TR: UNFILTERED AIR
WHEAT cv. CHAK-86
TR: AMBIENT AIR

Crop Yield Reductions Resulting from Exposure to Ozone





Data from the US NCLAN study. Plots use median of Weibull parameters obtained from all cultivars studied

Relative Yield Loss (%) in 1990 and 2020 (based on Mean7/12 and SUM06)

1990

	China	Japan	South Korea
Winter wheat	6 - 13 %	7 – 5 %	9 – 43 %
Single rice	4 %	4 %	2 %
Spring corn	8 - 4 %		
Soybeans	23 - 19 %	24 - 18 %	27 – 36 %

2020

	China	Japan	South Korea
Winter wheat	7- 63 %	9 – 16 %	8 – 59 %
Single rice	8 %	5 %	4 %
Spring corn	16 – 39 %		
Soybeans	33 – 45 %	28 – 32 %	35 – 59 %

迄今估测中的不确定因素较多

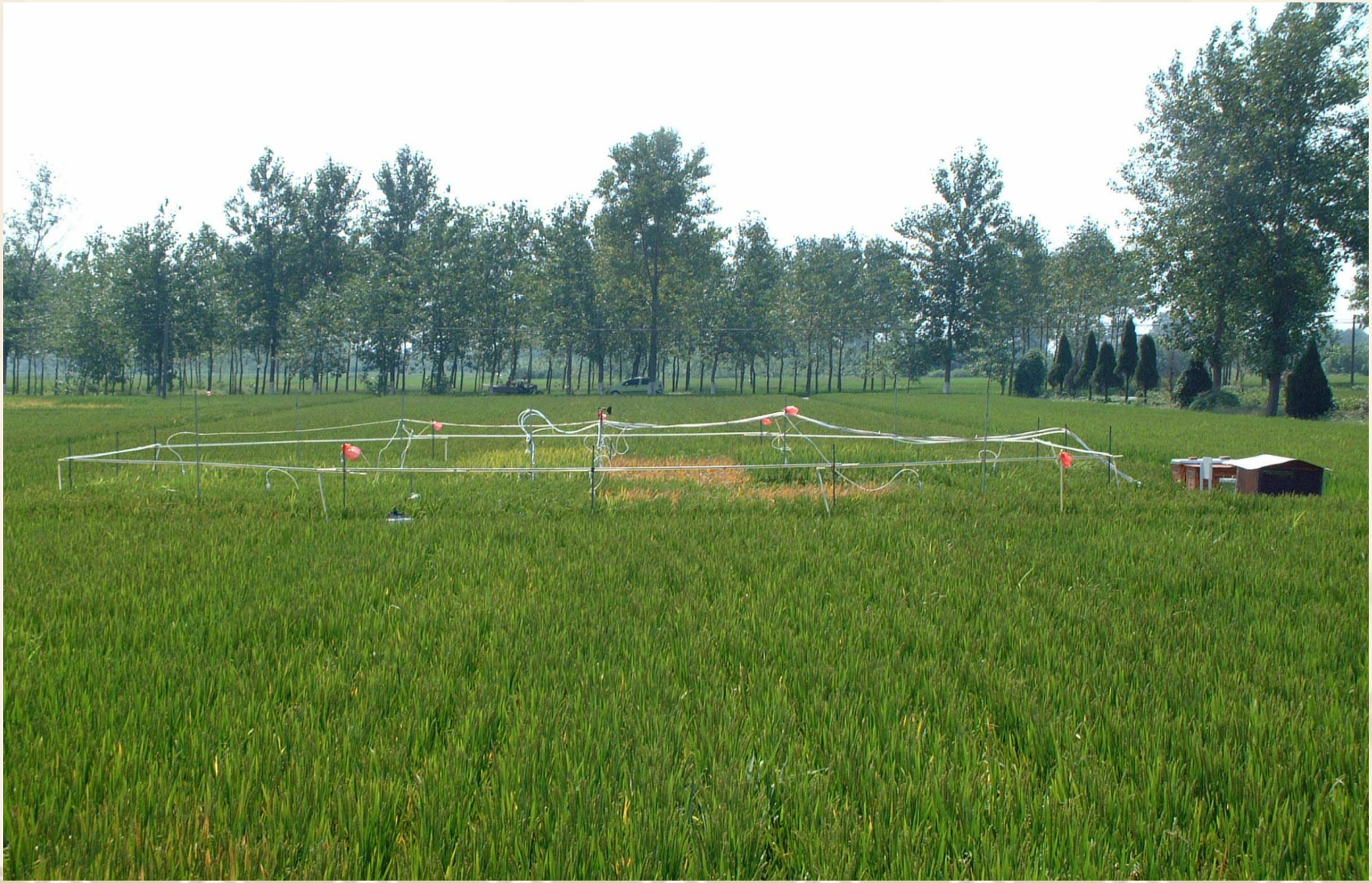
- OTC试验中的“箱室效应”
- ERR方法间差异及验证不足
- 不同品种响应数据缺乏
- 观测对象的个体与群体差异
- 环境因子干扰程度难于评估

FACE方法

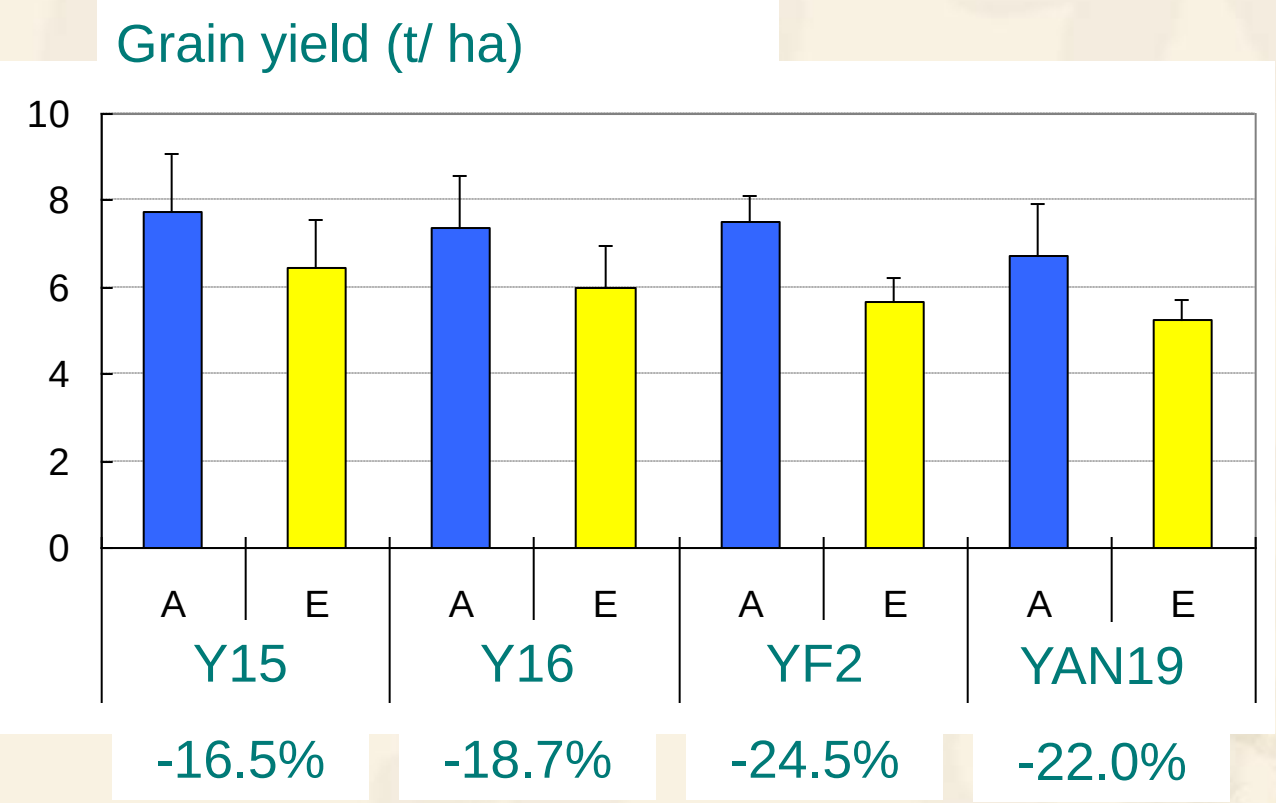
FACE (Free Air Controlled Enrichment) 方法的优点

- 在自然环境中实现观测单因子影响
- 相同条件下观测多个群体对臭氧的响应
- 以通量指标建立剂量－效应关系（2002年联合国欧经委会议推荐），可避开环境因素干扰
- 小区尺度上观测群落生态对臭氧长期污染的响应

试验区设置－FACE圈实景



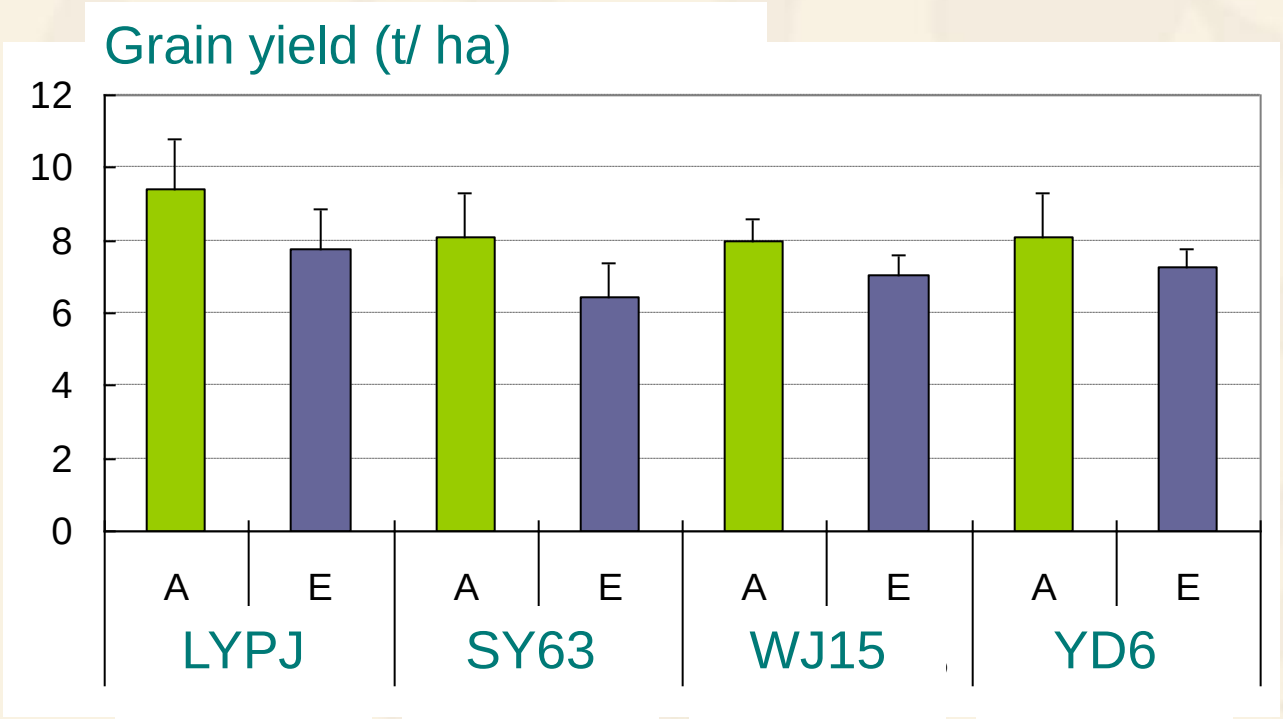
臭氧胁迫下小麦的产量损失
4 品种 x 4 年



Effect	F/P[a]
Year (Y)	<.0001
Varity (V)	<.0001
O_3	<.0001
Y×V	<.0001
Y×O_3	0.0003
V×O_3	0.0555
Y×V×O_3	0.0324

Wheat RYL： -20.4±6.1%

臭氧胁迫下水稻的产量损失
4 品种 x 3 年

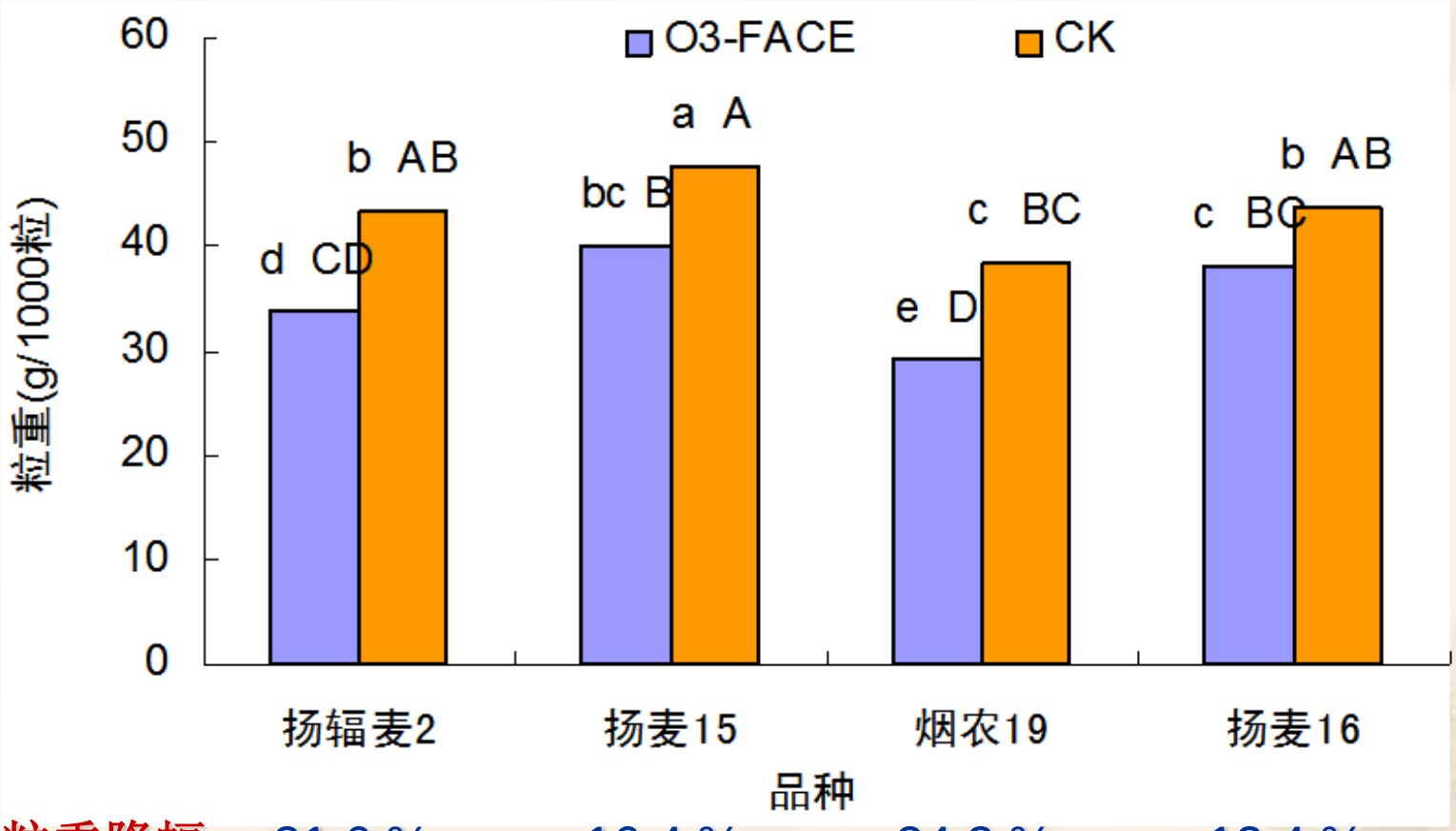


Effect	F/P[a]
Year (Y)	<.0001
Varity (V)	<.0001
O_3	<.0001
Y×V	<.0001
Y×O_3	0.4758
V×O_3	0.0848
Y×V×O_3	0.2402

Rice RYL: -15.0±5.7%

小麦减产在于粒重减小

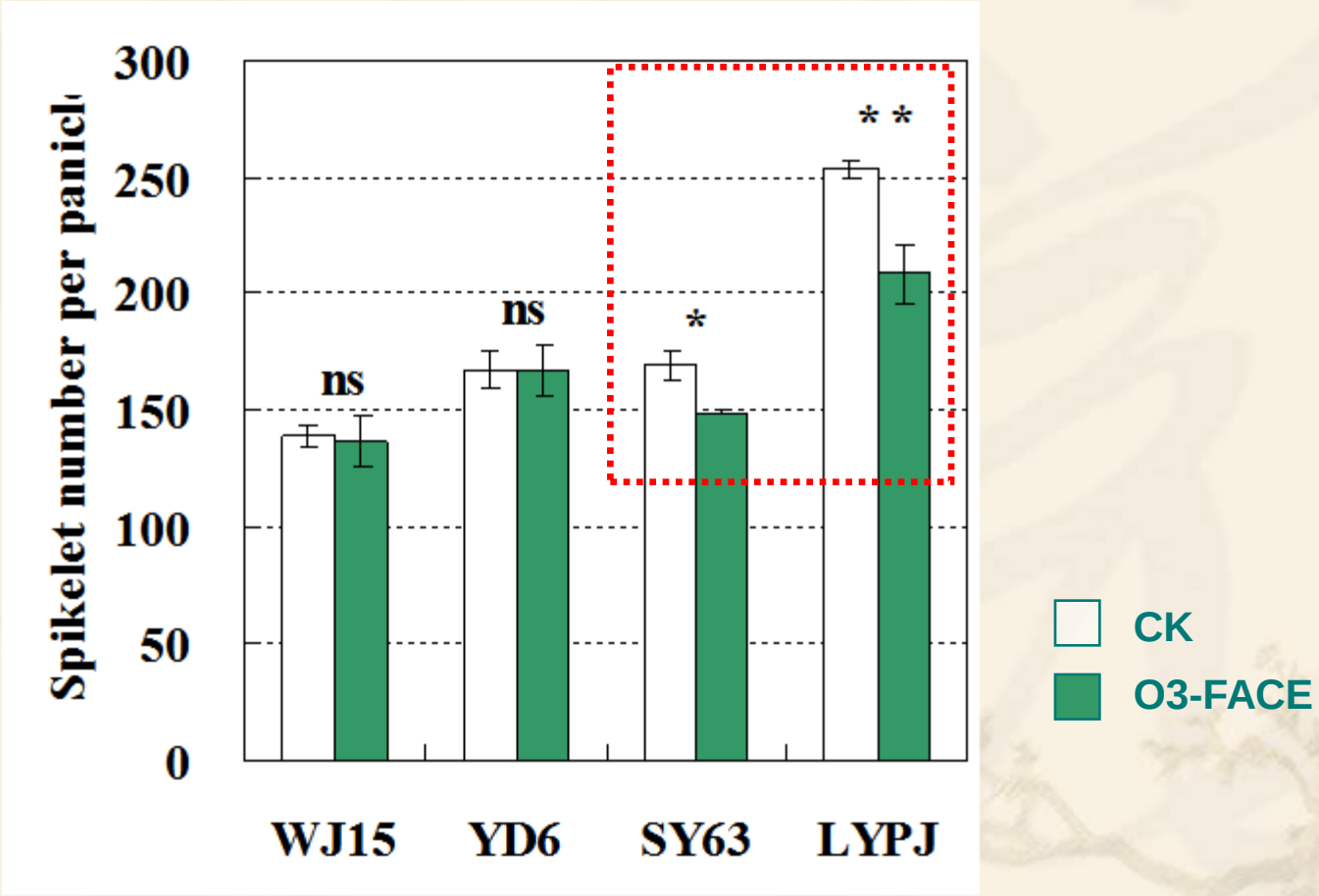
臭氧对小麦子粒粒重的影响



粒重降幅： 21.6 % 16.4 % 24.2 % 12.4 %

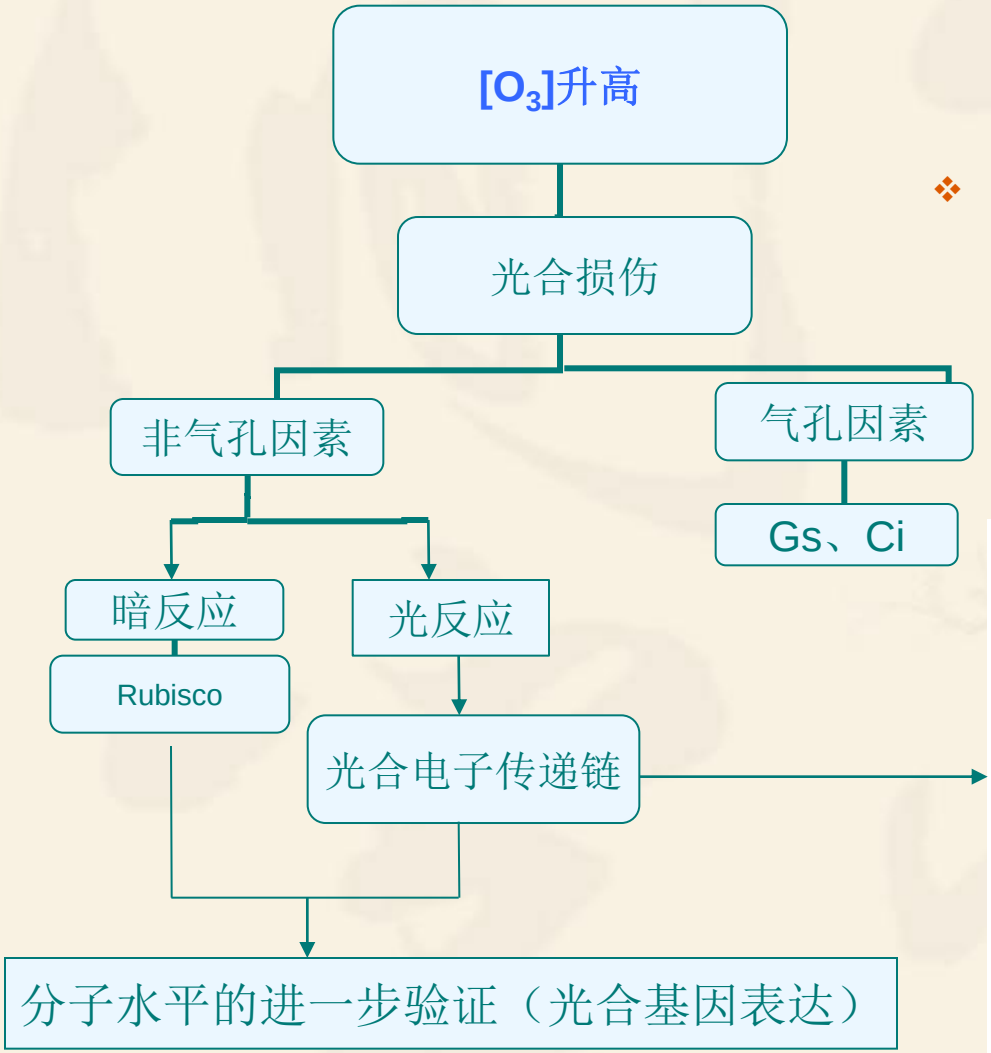
水稻减产在于每穗颖花数（籽粒数）降低

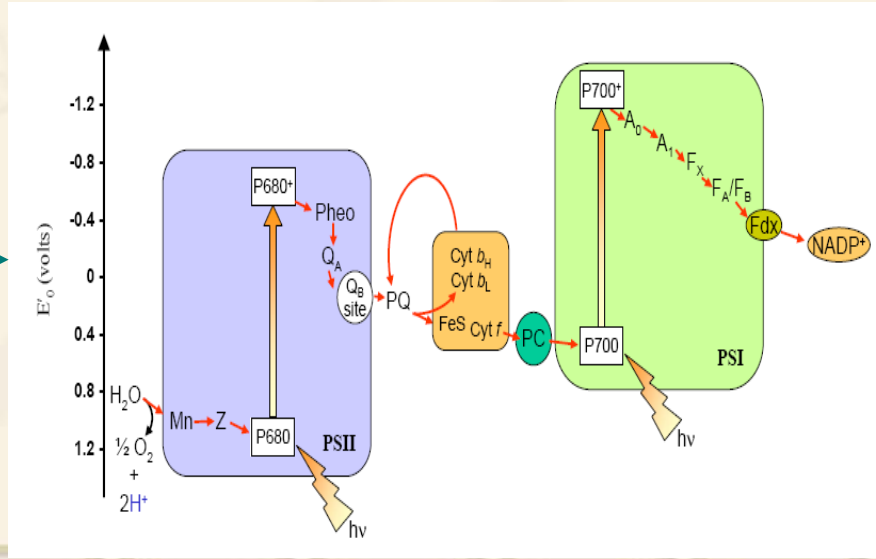
臭氧对水稻每穗颖花数的影响



臭氧光合损伤机制研究

- PSII光反应中心被光能激发生成一个强氧化剂氧化H_2O而获得电子，PSI接受光能生成一个弱还原剂，可接受来自PSII的电子。
- 核酮糖1，5二磷酸羧化酶（Rubisco）是暗反应CO_2固定过程的关键和限速酶。





臭氧胁迫下的小麦光合基因表达差异

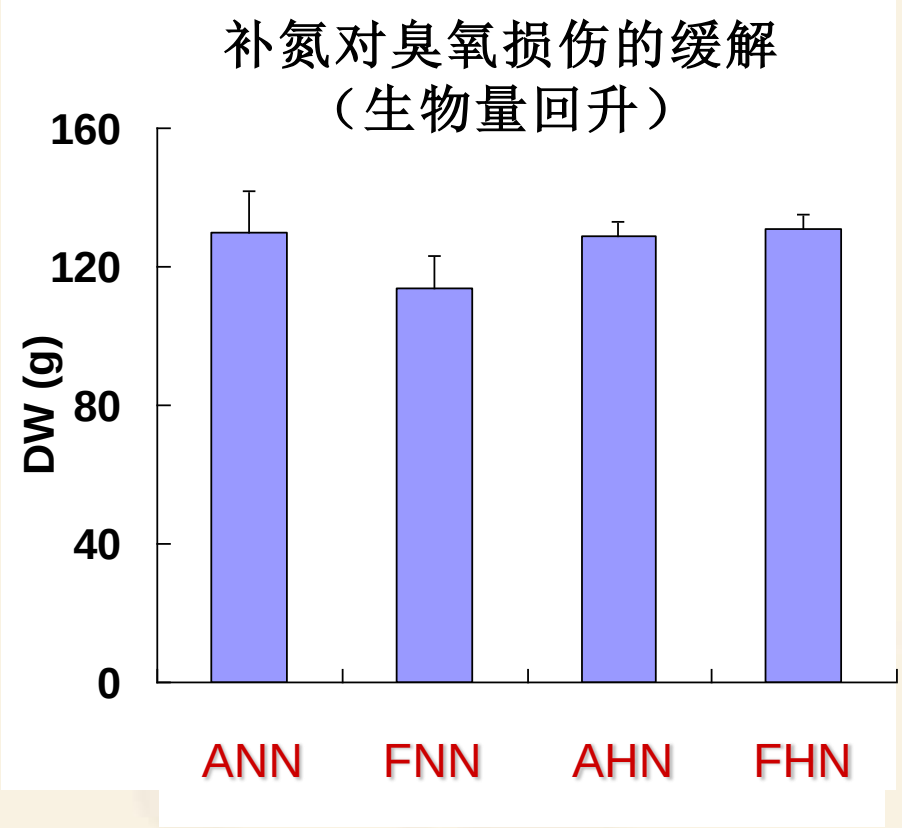
处理时间(天)		烟农19		扬麦16		P_{O3}	P_{CV}	P_{O3*CV}
		Ambient	O_3FACE	Ambient	O_3FACE			
atpA	58	100 ±2.3	38.5±1.3 **	25.9±0.9	22.2±1.2	**	**	**
	68	67.8±4.3	12.8±0.4 **	66.8±4.9	52.3±0.8	**	**	**
	78	43.2±2.6	13.1±0.9 **	24.6±1.6	31.8±2.4	**	ns	**
atpB	58	100 ±5.5	41.4±3.1 **	40.3±4.9	19.0±1.2**	**	**	**
	68	90.6±4.0	23.3±1.1 **	37.8±2.6	32.4±0.9 **	**	**	**
	78	49.9±0.5	9.4±0.5 **	20.4±0.8	17.1±1.8 **	**	**	**
psaA	58	100 ±6.8	60.9±1.4 **	97.0±8.0	68.5±0.3 *	**	ns	ns
	68	98.1±4.7	35.3±3.2 **	99.5±2.7	51.9±2.6 **	**	*	ns
	78	93.8±4.7	8.05±0.4 **	31.9±1.2	24.7±1.2 *	**	**	**
psbA	58	100 ±2.8	56.9±3.3 **	212±11	107±8.6 **	**	**	**
	68	201±11	46.1±0.7 **	628±32	61.0±1.3 **	**	**	**
	78	3.9±0.3	1.11±0.01 **	4.18±0.2	2.56±0.1 **	**	**	**
rbcL	58	100±4.7	20.6±0.6 **	52.6±2.6	23.9±1.0 **	**	**	**
	68	97.1±2.3	11.9±0.3 **	154±4.5	15.8±1.0 **	**	**	**
	78	4.9±0.2	0.65±0.01 **	2.93±0.1	2.41±0.1 *	**	ns	**

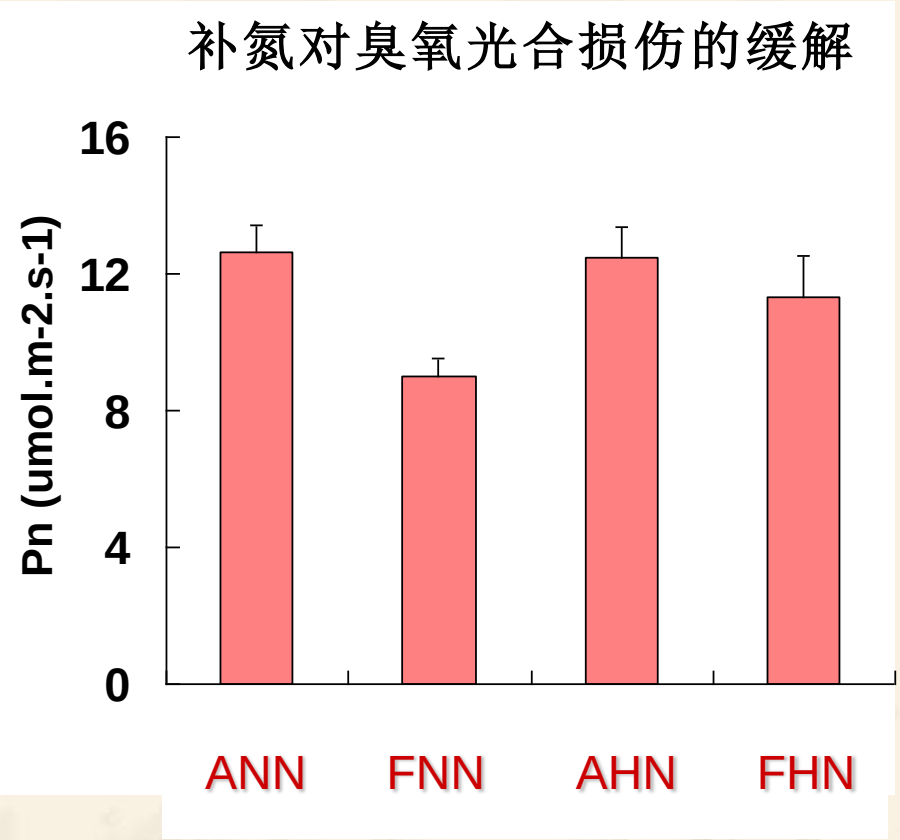
- ns 、* 、** 分别表示差异不显著、显著差异、极显著差异
- 以臭氧处理58天时AS的含量为100%的相对含量表示

减缓臭氧污染危害的对策考虑

- 品种选择 — 抗逆性
- 农艺措施 — 提高抵御和恢复能力
- *防护措施 — 如使用抗氧化剂EDU等*
- *空气质量标准和管理等*

补充氮肥有助于臭氧损伤修复





ANN: 对照常氮；FNN:FACE常氮；AHN: 对照补氮；FHN:FACE补氮

补氮后的生产效率

不同臭氧和N肥处理对小麦N素利用率的影响

Table4.5 Significance of ozone, nitrogen and their interactions on the nitrogen use efficiency of winter wheat

O_3 Level	N素利用效率		N素收获指数		N肥生产效率	
	NN	HN	NN	HN	NN	HN
Ambient	60.29±0.67	60.20±2.91	0.725±0.004	0.713±0.015	38.23±1.88	32.90±2.19
Elevated	58.43±1.52	56.00±1.60	0.737±0.008	0.706±0.010	33.40±1.23	31.04±1.06
O_3RC (%)	-3.09	-9.82	1.66	-0.98	-12.63**	-5.65
ANOVA						
O_3	*		**		ns	
N	ns		**		**	
O_3*N	ns		ns		ns	

注：*表示差异显著(P<0.05)，**表示差异极显著(P<0.01)，ns表示差异不显著

Notes: * *P*<0.05, ***P*<0.01, ns=no significance

发展了通量评价方法，优化了臭氧通量模型参数

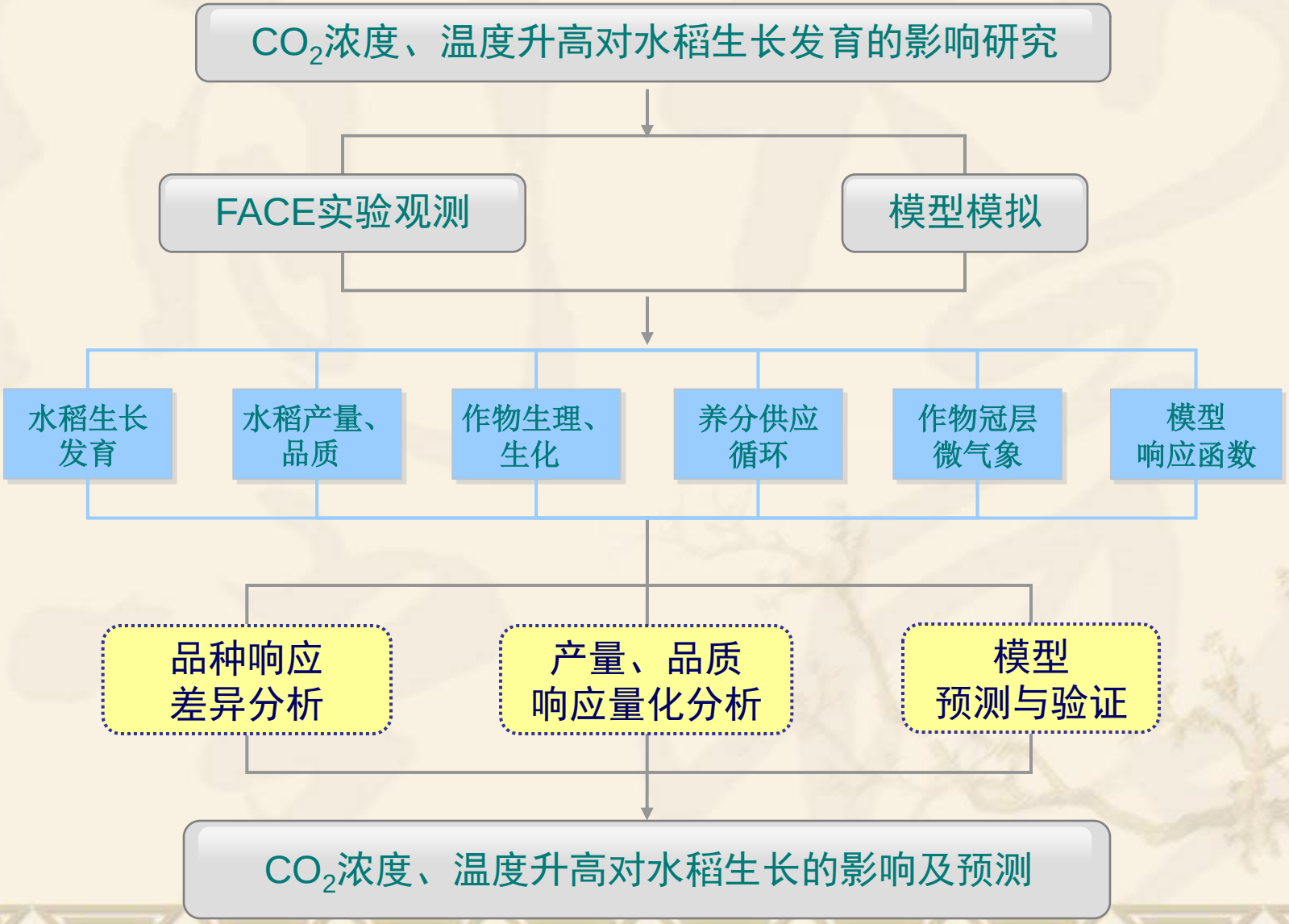
利用连续观测的气象数据、O_3数据及原位条件下水稻叶片气孔导度数据，得到的O_3吸收通量模型可以较好的模拟水稻叶片O_3吸收量的连续变化。

水稻不同品种同期臭氧吸收通量不同，产量响应也不同。例，两优培九叶片吸收的O_3量高于武运粳21，O_3吸收量$AFst_6$为7左右时会导致武运粳21减产约10%，$AFst_6$为10左右时会导致两优培九减产约20%。这可能是武运粳21比两优培九较耐O_3的原因之一。

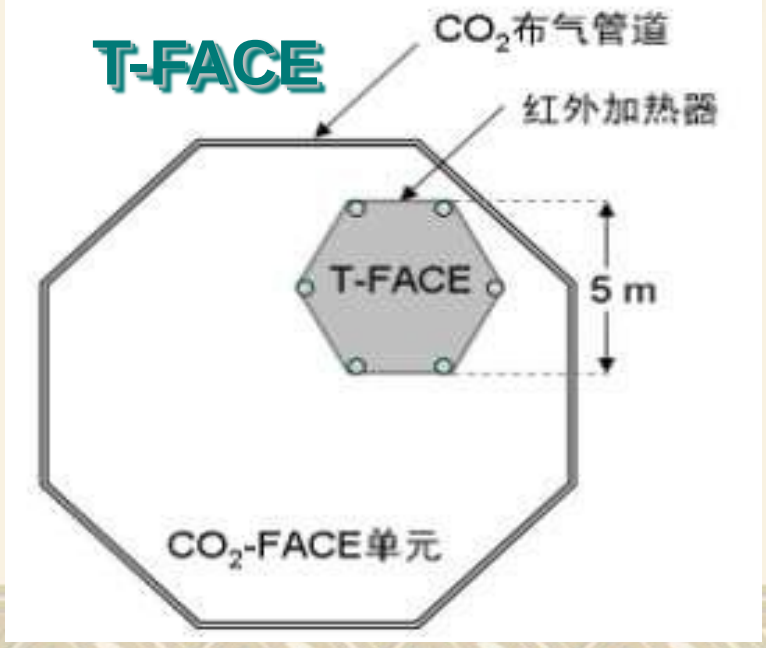
大气 CO_2 浓度与温度升高对水稻生长发育和产量形成的影响

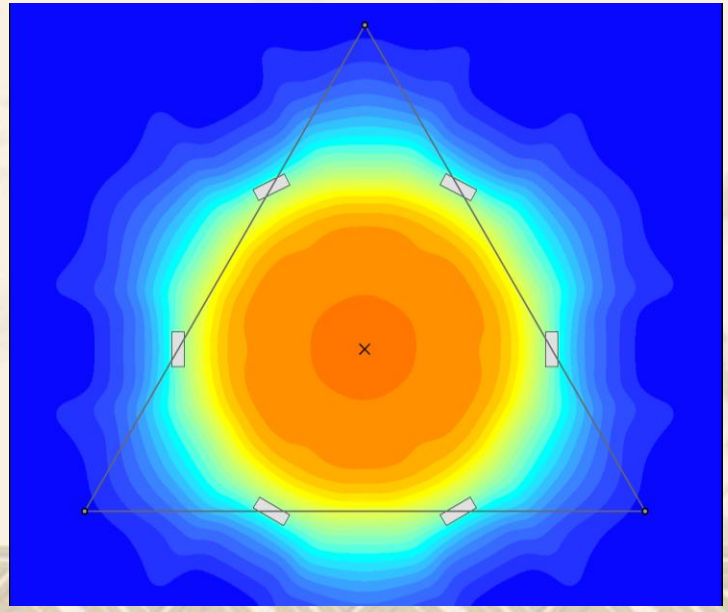
依托单位：中国科学院南京土壤研究所
合作单位：国际水稻研究所
参加单位：扬州大学、南京信息工程大学

研究方案

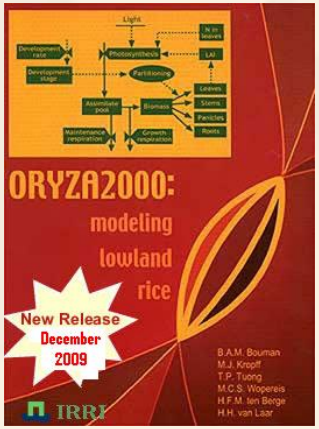

CO_2浓度、温度升高对水稻生长发育的影响研究
FACE实验观测
模型模拟
水稻生长发育
水稻产量、品质
作物生理、生化
养分供应循环
作物冠层微气象
模型响应函数
品种响应差异分析
产量、品质响应量化分析
模型预测与验证
CO_2浓度、温度升高对水稻生长的影响及预测

技术手段





偶合方案



水稻生长模型

温度

CO_2

Light

Development rate

photosynthesis

LAI

Development stage

partition

Leaves

Stems

Panicles

Roots

Assimilate pool

Biomass

maintenance respiration

growth respiration

养分循环模型

Stem N uptake

Leaves N uptake

N mineralization

Soil N available

Net fertilizer N supply

谢谢！