



臭氧污染对中国典型陆地生态系统生产力影响的模拟研究

王钦艺 黄玫 陈斌 刘侦海 王昭生 陈世亮 王绍强

中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院

中国科学院地理资源所



一、研究背景和科学问题

二、研究目标及研究方法

三、研究结果与模拟分析

四、主要结论与未来方向

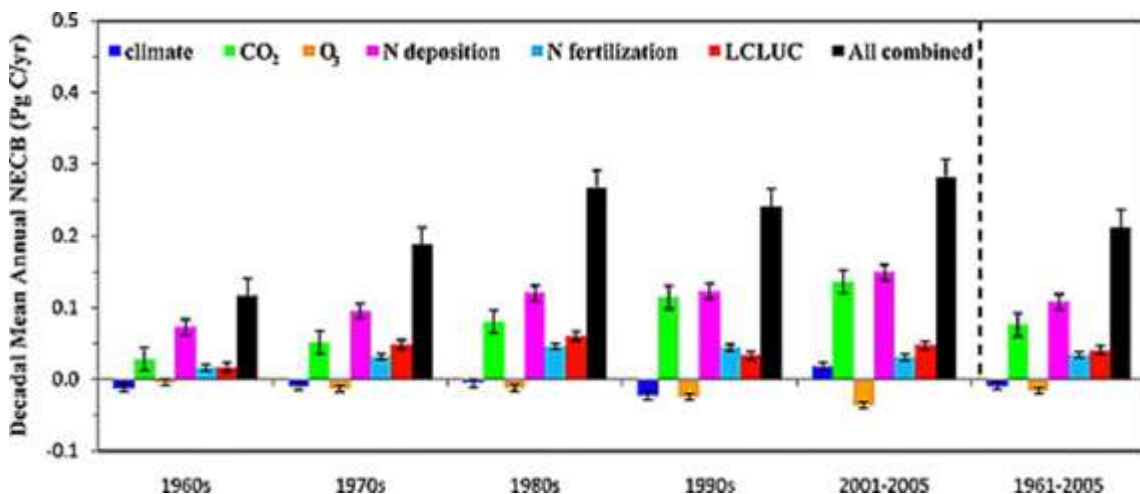


1.1 中国的碳汇正遭到削弱

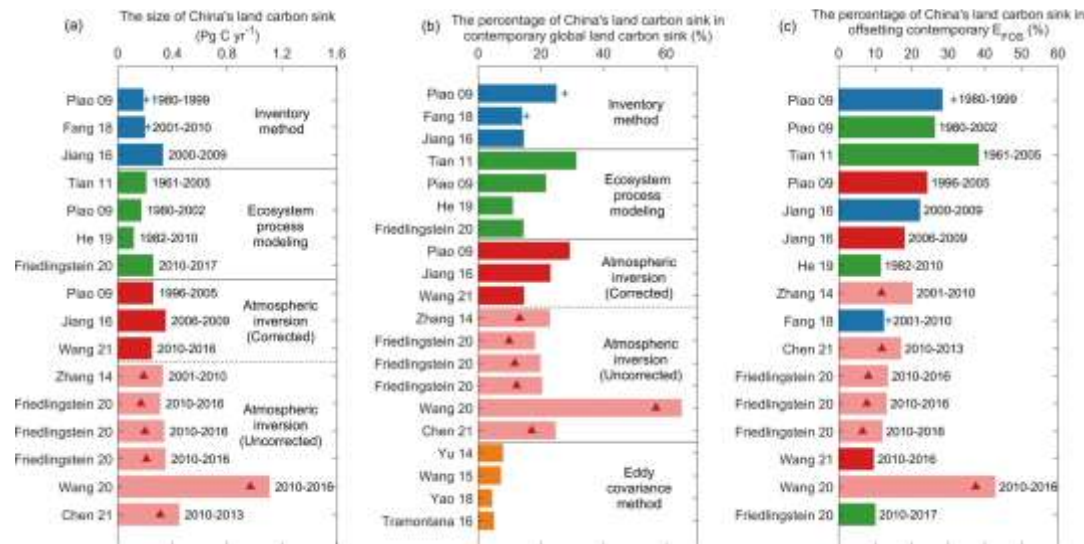
● 中国的碳汇正遭到削弱

- 诸多研究表明中国陆地生态系统是一个弱碳汇，气候变暖、大气污染等问题正在削弱这一碳汇能力。

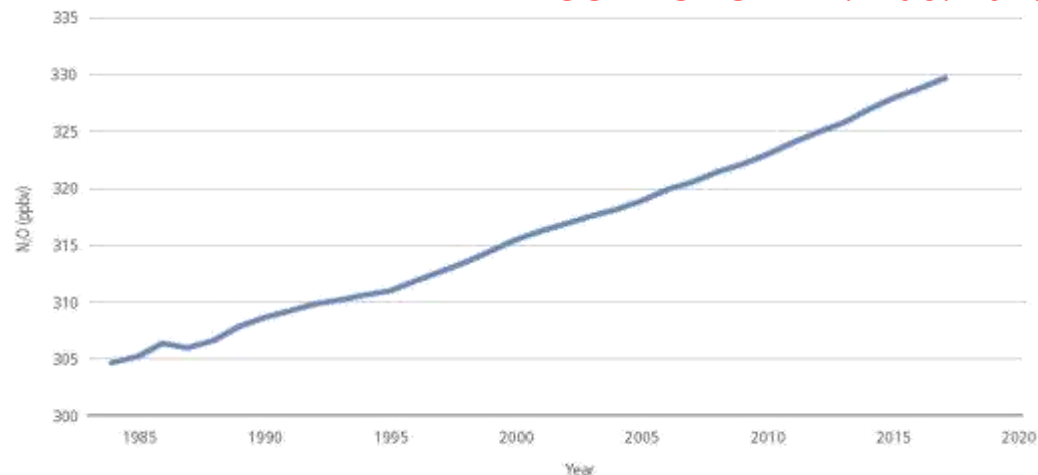
以臭氧的影响最为严重，且O₃浓度还在不断升高



GBC, Tian, 2011



SCIENCE CHINA. Piao. 2020



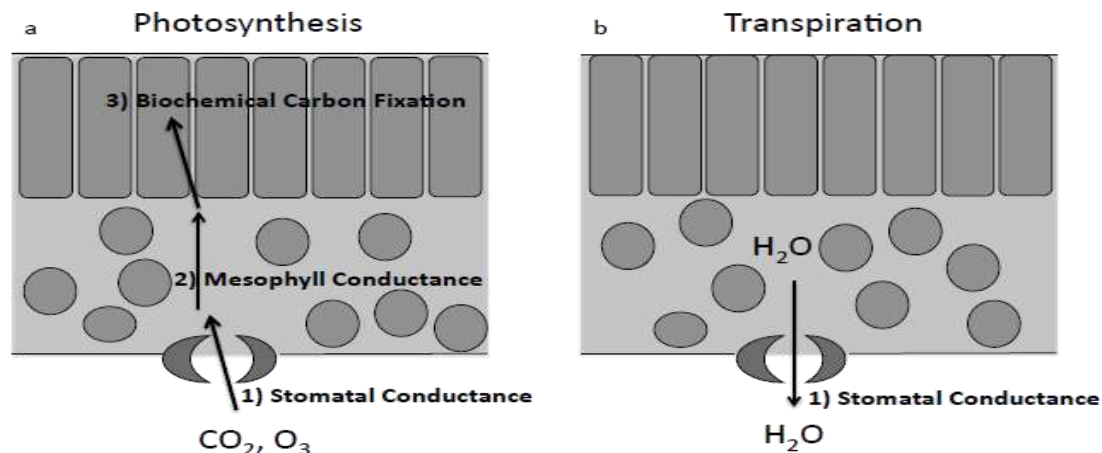
IPCC. 2021

1.1 臭氧是驱动区域碳水循环变化的重要因素之一



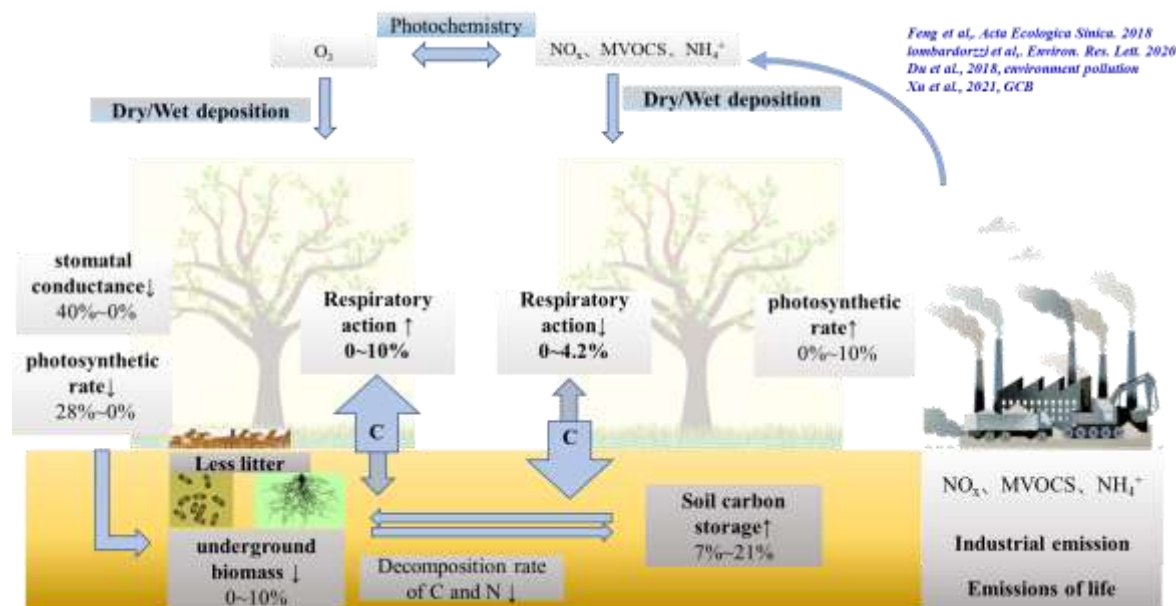
● 臭氧损害植物的生理效应

- ▣ 减少光合作用、增加抗氧化系统循环、增加暗呼吸、降低碳向根的输送，降低叶片质量等。



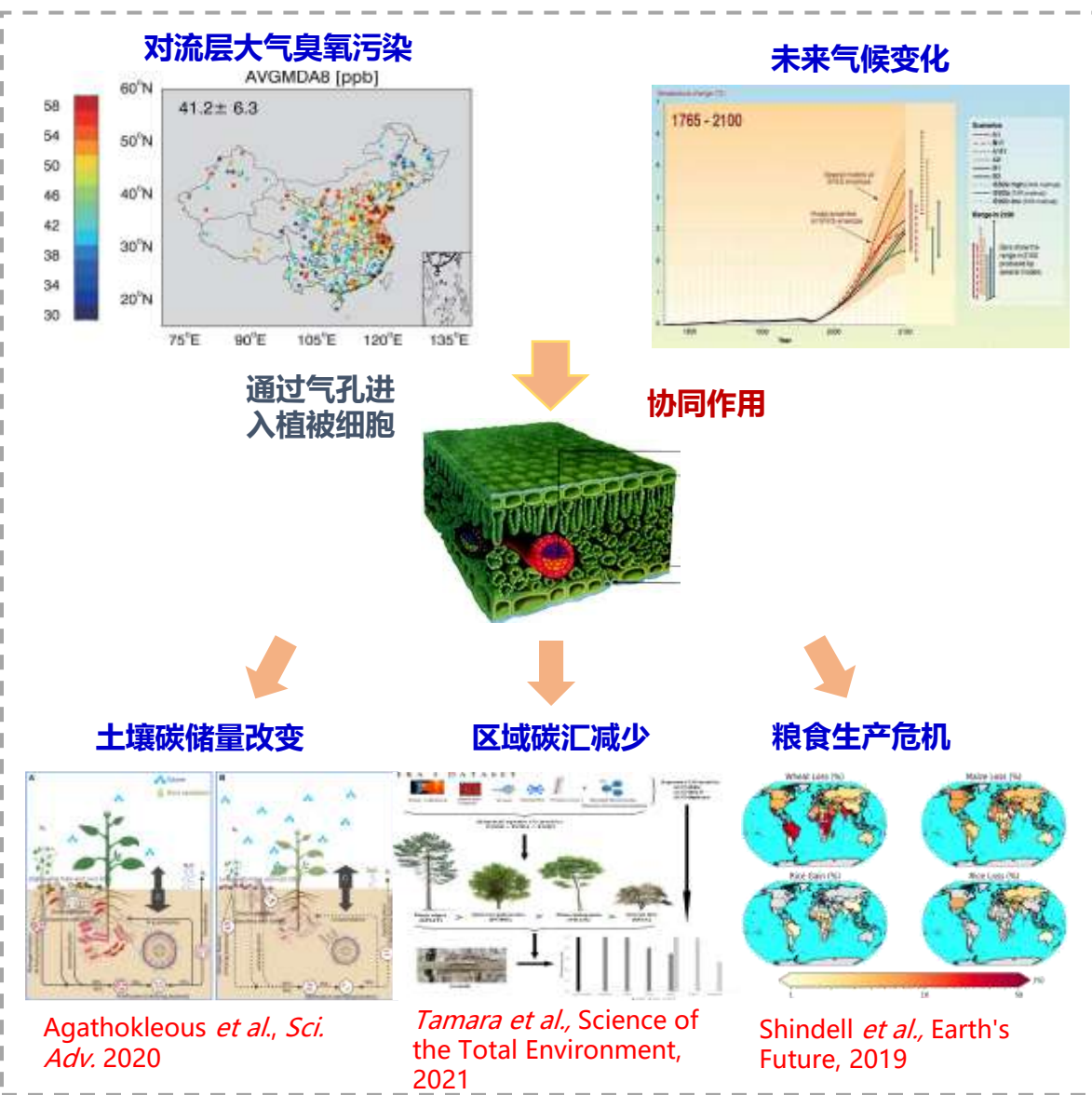
● 冠层尺度的臭氧影响

- 这些效应导致叶片外观出现不同程度的损伤现象（叶片变黄，叶片过早掉落，叶面积减小等现象）。
- 最终导致植物的生物量 and 生产力下降，根生长受到抑制。





1.1 臭氧是驱动区域碳水循环变化的重要因素之一



● 臭氧是一种生理毒性极强，是对植物损害最大的污染气体：

- ① 碳固定、碳分配和养分供应的变化。
- ② 生物多样性的变化。
- ③ 使生态系统更容易受到自然干扰的影响。

● 由于臭氧的长期胁迫将引起生态系统：

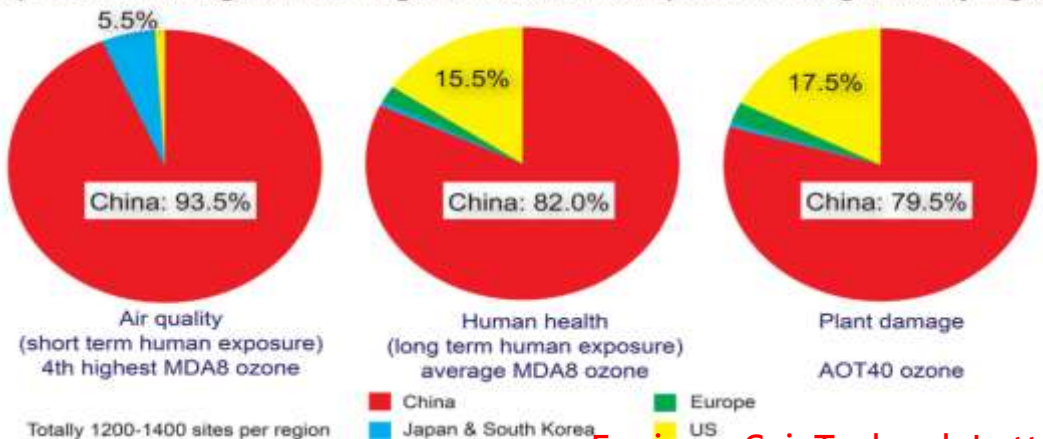
- 碳储量减少
- 碳汇和蒸腾作用削弱
- 植物生物量、产量下降

臭氧通过这些方式参与到生态系统碳循环过程中，并进一步影响全球碳平衡。

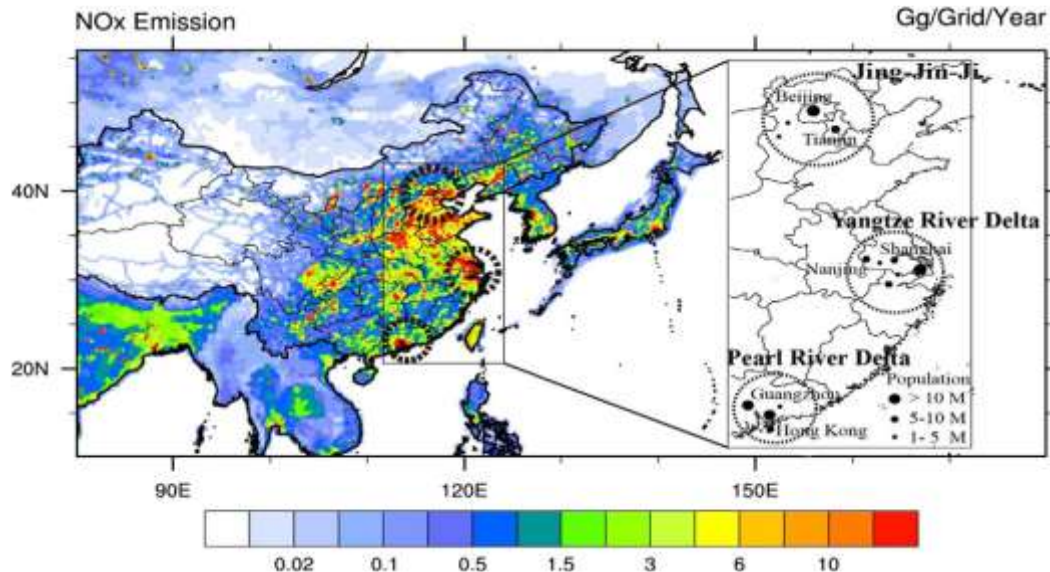
1.1 中国已经成为世界上臭氧污染最严重的地区



Top 200 monitoring sites with highest surface ozone pollution categorized by region



Environ. Sci. Technol. Lett. 2018



Wang Tao ,2017

● 中国已经成为世界上臭氧污染最严重的地区

- 中国高浓度臭氧事件更加频繁，并取代PM2.5成为主要大气污染。
- 相较于2013-2014年，2016-2017年中国臭氧污染仍然呈现上升趋势。
- 中国东部地区的臭氧污染严重威胁森林健康，尤其京津冀、长三角、珠三角等地区。
- 华北平原和华南大部分地区臭氧污染较为严重，对森林、农业生产都有较大影响。



1.2 研究意义



开展臭氧对典型陆地生态系统的模型模拟研究



1.3 量化臭氧污染的评估指标

评估模型 Evaluation model	评估指标 Evaluation indicator	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	常用研究 Commonly research
浓度响应关系	M7、M12	计算简单, 直观易懂, 参数需求较少	仅考虑O3浓度唯一因素, 机理性较差	仅用在城市浓度计量
*剂量响应关系	SUM06、W126、AOTX	计算简单, 同时关注O3浓度和暴露时间, 应用广泛	只探讨O3对植物的影响, 没有考虑其他环境因子的影响, 缺乏生物学意义	欧洲地区常用, AOT40常用于计算生物量损失以及GPP损失。
*通量响应关系	PODY	同时考虑环境因子(物候、温度、光照、蒸气压和土壤水势等参数)和植物自身对O3响应的影响	所需参数较多, 计算过程复杂, 树种特异性限制较大, 现有观测实验仍然十分有限	普遍用于计算生物量损失, 蒸腾损失, GPP损失等研究中。

1.3 区域尺度臭氧污染的模型模拟研究



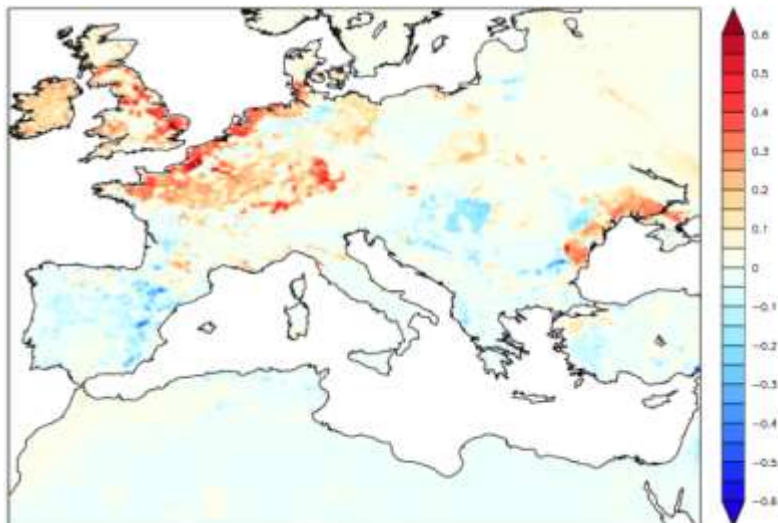
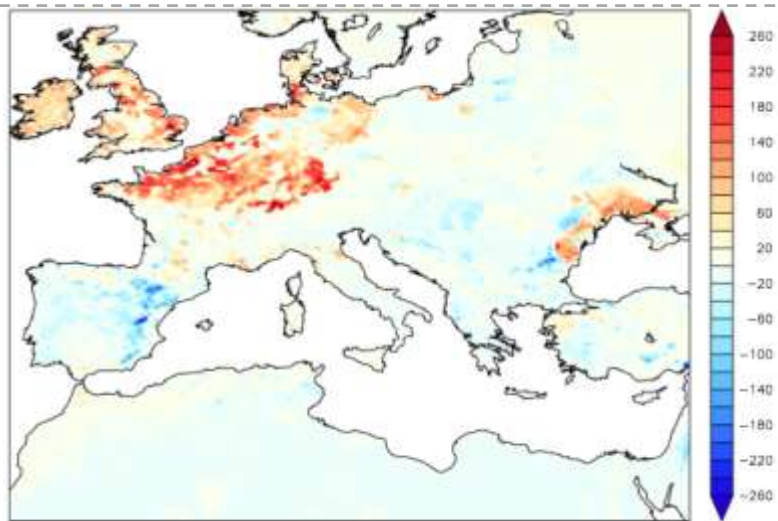
● 基于AOT40的模型方法

$$F = \alpha \times g_s \times AOT40$$

代表研究：Anav(2011) 的模拟表明臭氧影响下总初级生产(GPP)减少约22%， LAI减少15%-20%。

优点： 具有较多的观测数据作为支撑； 考虑了臭氧对光合作用和GPP的影响；

缺点： 未考虑气孔和臭氧的交互作用； 大部分研究使用平均气孔导度， 不能满足小时/次小时级研究中臭氧和光合的迭代。



Anav *et al.*, Global Change Biology , 2011



1.3 区域尺度臭氧污染的模型模拟研究

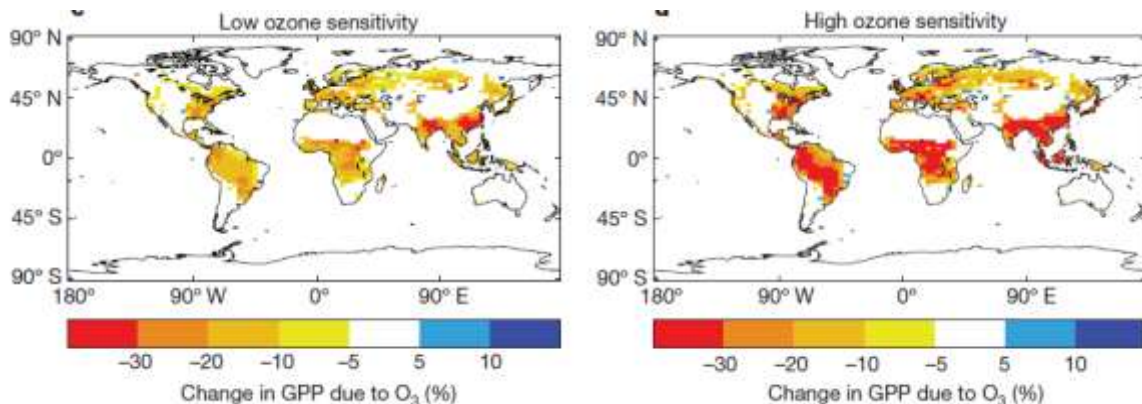
● 基于CUOY的植被过程模型

$$F = \alpha \times UO_y$$

代表研究: Sitch(2007)等人的研究预测, 在考虑二氧化碳施肥效应作用下2100年全球GPP由于O₃暴露将降低了8-15%, 不考虑CO₂增加的情况下将降低14-23%。

优点: 考虑了气孔-臭氧的相互作用; 拥有较多的观测实验作为系数参数集。

缺点: 部分植被类型的阈值设置不合理。



	BT	NT	C3	C4	Shrub
F_{O_3crit} (nmol m ⁻² s ⁻¹)	1.6	1.6	5.0	5.0	1.6
'High' a (mmol ⁻¹ m ⁻²)	0.15	0.075	1.40	0.735	0.10
'Low' a (mmol ⁻¹ m ⁻²)	0.04	0.02	0.25	0.13	0.03

Nature, Sitch, 2007

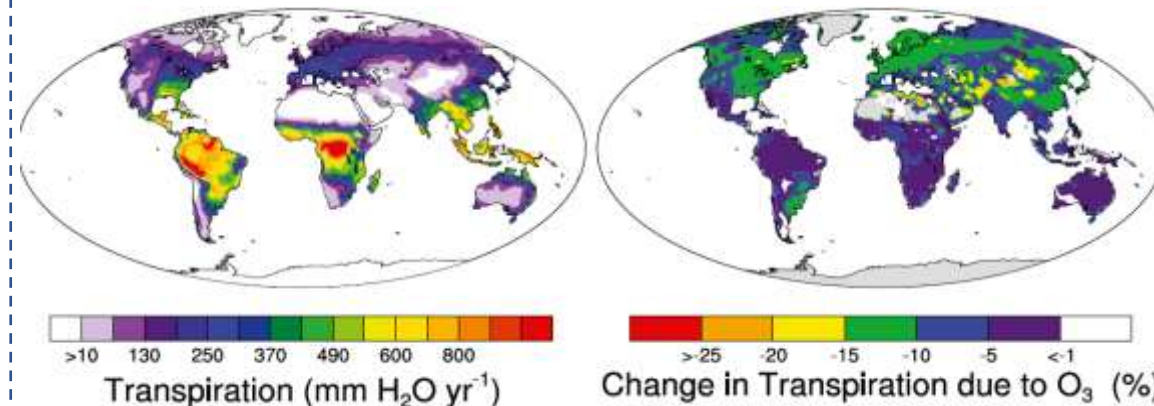
1.3 区域尺度臭氧污染的模型模拟研究



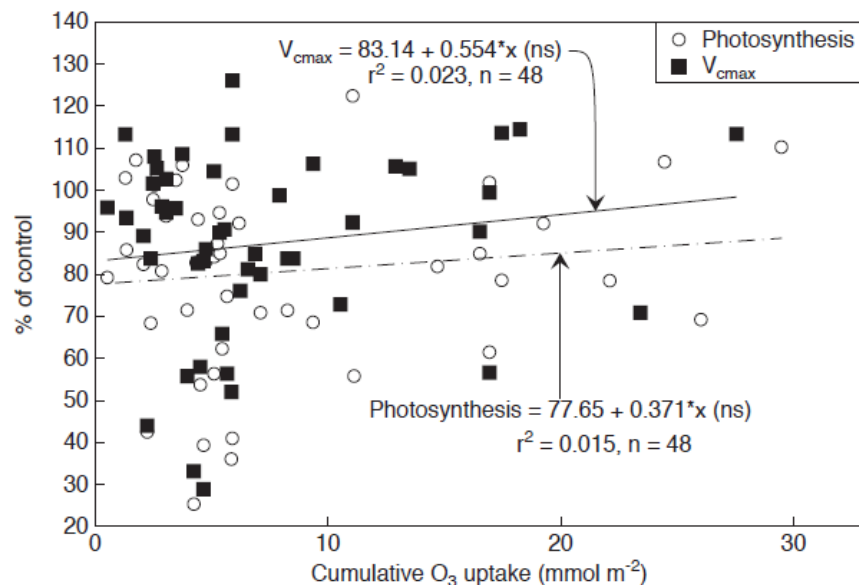
● 基于CUOY+b的植被过程模型

$$F = \alpha \times CUO_y + b$$

代表研究：Lombardozzi (2014) 的研究结果表明全球的GPP损失在8%-12%之间。



Lombardozzi *et al.*, Journal of Climate, 2015



Lombardozzi *et al.*, Journal of Climate, 2013

优点：增加了气孔导度的截距，让气孔导度模拟更贴近实际情况；重新校准了草地、农作物、森林的系数。

缺点：校准系数的阈值为人为主观设定；植被类型数据相对较少，难以满足更精细的研究内容。



1.3 中国的臭氧研究情况及存在的问题

● 对于臭氧影响生产力的研究相对有限

Table 4 A summary of effects of ozone on carbon sequestration in different ecosystems based on models in China

生态系统类型	年份	区域	损失量	方法	参考文献
草地生态系统	1961—2000年	全国	NPP: -14 Tg · a ⁻¹ ; 总碳储量: 0.11 Pg · a ⁻¹	DLEM 模型	Ren et al., 2007b
陆地生态系统	1961—2000年	全国	NPP: -4.5%; 总碳储量: -0.9%	DLEM 模型	Ren et al., 2007a
森林生态系统	1961—2005年	全国	总碳储量: -7.7%	DLEM 模型	Ren et al., 2011
农田生态系统	1981—2010年	全国	产量: -10% (臭氧和干旱复合影响)	DLEM 模型	Tian et al., 2016
陆地生态系统	2014年	全国	NPP: -14% (-0.6 Pg · a ⁻¹)	NASA GISS ModelE2 模型 和 YIBs 模型	Yue et al., 2017

表 2 臭氧对木本植物生物量影响的整合分析研究汇总

Table 2 A summary of effects of ozone on woody plants' biomass based on meta-analysis

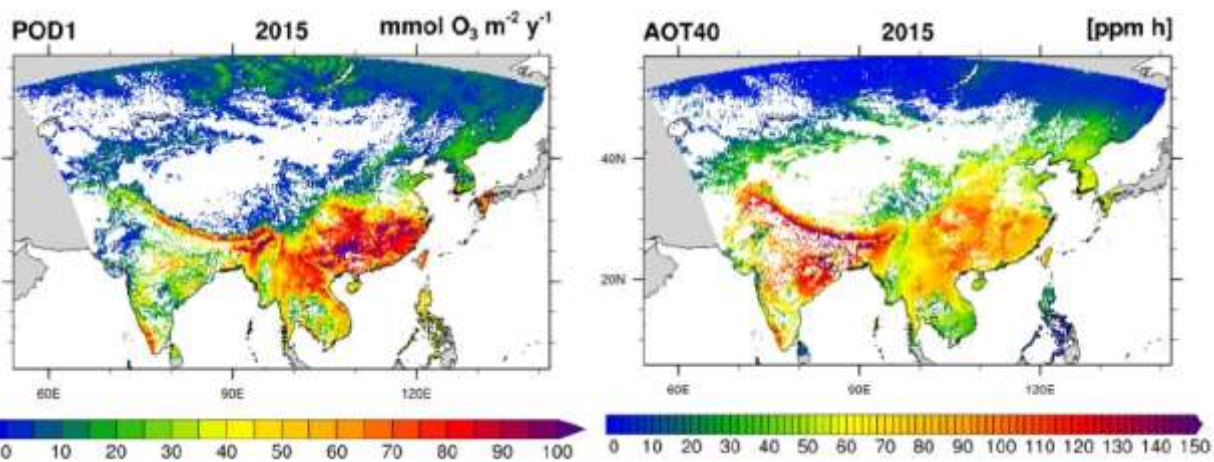
物种	树木生物量减少量	臭氧处理浓度/ppb	臭氧对照	数据量	参考文献
树木	7%	40	过滤臭氧	99	Wittig et al., 2009
树木	17%	97	过滤臭氧	406	Wittig et al., 2009
裸子植物	7%	92	过滤臭氧	72	Wittig et al., 2009
被子植物	23%	74	过滤臭氧	114	Wittig et al., 2009
树木	11%	64	环境臭氧	177	Wittig et al., 2009
裸子植物	没有显著降低	57	过滤臭氧	46	Wittig et al., 2009
被子植物	15%	58	环境臭氧	77	Wittig et al., 2009
树木	14%	116	对照 (21 ppb)	20	Li et al., 2017
常绿	7%	127	对照 (20 ppb)	10	Li et al., 2017
阔叶	24%	107	对照 (20 ppb)	8	Li et al., 2017
杨树	4%	50	过滤臭氧 (18 ppb)	24	Feng et al., 2019a
杨树	24%	83	过滤臭氧 (26 ppb)	142	Feng et al., 2019a
非杂交杨	14%	80	过滤臭氧 (27 ppb)	46	Feng et al., 2019a
杂交杨	27%	85	过滤臭氧 (25 ppb)	96	Feng et al., 2019b
橡树	没有显著降低	53	对照 (18 ppb)	33	Cotrozzi, 2021

表 3 基于剂量关系评估臭氧对我国作物产量和森林生产力影响的研究汇总

Table 3 A summary of ozone effects on crop yield and forest productivity in China based on the dose-response relationship

物种	年份	区域	损失量/%	评价指标	参考文献
小麦	1990—1995年	重庆	2.5—6.6	AOT40	Liu et al., 2009
小麦	2014—2017年	华北平原	18.5—30.8	AOT40	Hu et al., 2020
小麦	2015年	长三角地区	9.9—36.1	AOT40	Zhao et al., 2018
小麦	1990—1995年	长三角地区	7.1—8.4	AOT40	Liu et al., 2009
小麦	2015年	全国	6	AOT40	Feng et al., 2019a
小麦	2017—2019年	全国	33	AOT40	Feng et al., 2022
小麦	2015—2016年	全国	17.1—18.1	AOT40	Feng et al., 2019c
小麦	2015—2016年	全国	10.2—10.6	POD12	Feng et al., 2019c
冬小麦	2014—2019年	长三角地区	9.4—19.3	AOT40	Ren et al., 2020
冬小麦	2014年	全国	8.5—14	AOT40	Lin et al., 2018
冬小麦	2015—2018年	全国	20.1—33.3	AOT40	Zhao et al., 2020
水稻	1990—1995年	重庆	1.1—5.8	AOT40	Liu et al., 2009
水稻	1990—1995年	长三角地区	2.5—6.6	AOT40	Liu et al., 2009
水稻	2014—2019年	长三角地区	4.9—11.4	AOT40	Ren et al., 2020
水稻	2015年	长三角地区	7.25—23.9	AOT40	Zhao et al., 2018
水稻	2014年	全国	3.9—15	AOT40	Lin et al., 2018
水稻	2015年	全国	8	AOT40	Feng et al., 2019a
水稻	2017—2019年	全国	23	AOT40	Feng et al., 2022
双季早稻	2015年	中国南方	6.8	AOT40	Cao et al., 2020
双季早稻	2015年	中国南方	1.20	M7	Cao et al., 2020
双季早稻	2015—2018年	全国	3.9—6.8	AOT40	Zhao et al., 2020
双季晚稻	2015年	中国南方	10.2	AOT40	Cao et al., 2020
双季晚稻	2015年	中国南方	1.9	M7	Cao et al., 2020
双季晚稻	2015—2018年	全国	5.9—7.1	AOT40	Zhao et al., 2020
单季稻	2015年	中国南方	10.4	AOT40	Cao et al., 2020
单季稻	2015年	中国南方	2	M7	Cao et al., 2020
单季稻	2015—2018年	全国	7.3—8.8	AOT40	Zhao et al., 2020
玉米	2014—2017年	华北平原	8.2—13.4	AOT40	Feng et al., 2020
玉米	2014年	全国	2.2—5.5	AOT40	Lin et al., 2018
玉米	2015—2018年	全国	5—6.3	AOT40	Zhao et al., 2020
玉米	2017—2019年	全国	9	AOT40	Feng et al., 2022
树木	2015年	中国	11—13	AOT40	Feng et al., 2019a

1.3 中国的臭氧研究情况及存在的问题



Marco et al., Environ. Res. 2020

	BT	NT	C3	C4	Shrub
F_{O_3crit} ($\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	1.6	1.6	5.0	5.0	1.6
'High' a ($\text{mmol}^{-1} \text{m}^{-2}$)	0.15	0.075	1.40	0.735	0.10
'Low' a ($\text{mmol}^{-1} \text{m}^{-2}$)	0.04	0.02	0.25	0.13	0.03

● 有限的研究也并不总是用适合的方式进行校准和验证

➢ AOT40的40ppb阈值可能已经远远高出了敏感性植物的承受能力。

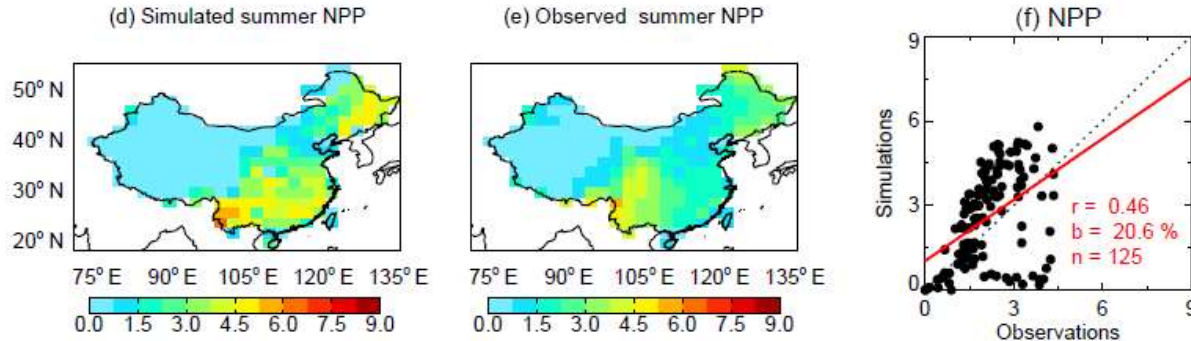
● 所选择的参考物种对应的响应关系对结果也会带来不确定性

➢ 较高的阈值与较小的气孔导度将导致北方地区植被受到的臭氧影响被忽略。

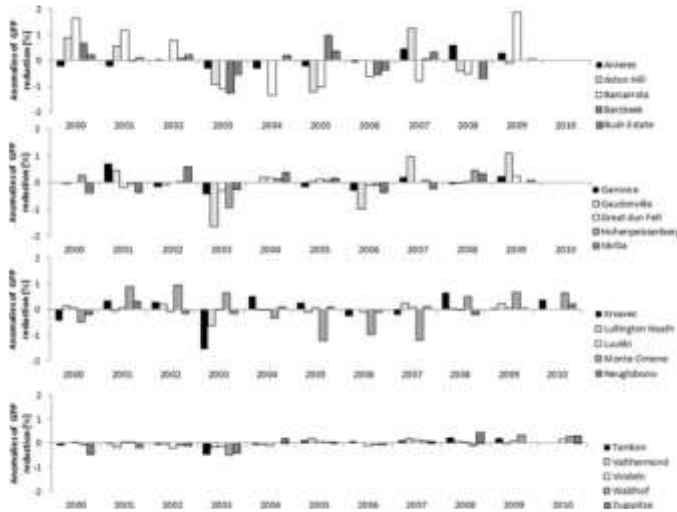
➢ 非本土物种获得的响应关系并不一定适应所有地区。



1.3 中国的臭氧研究情况及存在的问题



Atmos. Chem. Phys., Yue, 2017



$$I_{O3} = \alpha \times g_{sto} \times AOT40$$

$$I_{O3month} = \alpha \times g_{sto} \times AOT40_{month}$$

$$GPP_{O3} = GPP(1 - I_{O3month})$$

● 模型研究尺度带来的不确定性

- Yue (2017) 的研究使用了半小时步长, 但是分辨率仅为 $1^\circ \times 2^\circ$ 。
- Ren (2007) 和Proietti (2017) 等人的研究虽然具有较高分辨率 (0.25°), 但是是以月尺度步长进行驱动。

为了使模型应用在区域性或全球尺度上, 建模时通常要在**时间分辨率**和**空间分辨率**之间做出选择, 而不同选择下的建模方法是迥异的。

1.3 问题总结



- **存在问题**

- (1) 对于空间尺度上气候-臭氧引起的异质性关注不足;
- (2) 缺乏观测实验和本土物种的风险评估参数;
- (3) 臭氧影响植物的机制不明确, 在模型模拟中产生较大的不确定性。

- **研究目标**

- (1) 丰富不同地区臭氧对植被的特异性参数化方案;
- (2) 厘清臭氧污染对典型陆地生态系统的影响程度;
- (3) 探明臭氧污染和典型生态系统的影响-响应机制。



一、研究背景和科学问题

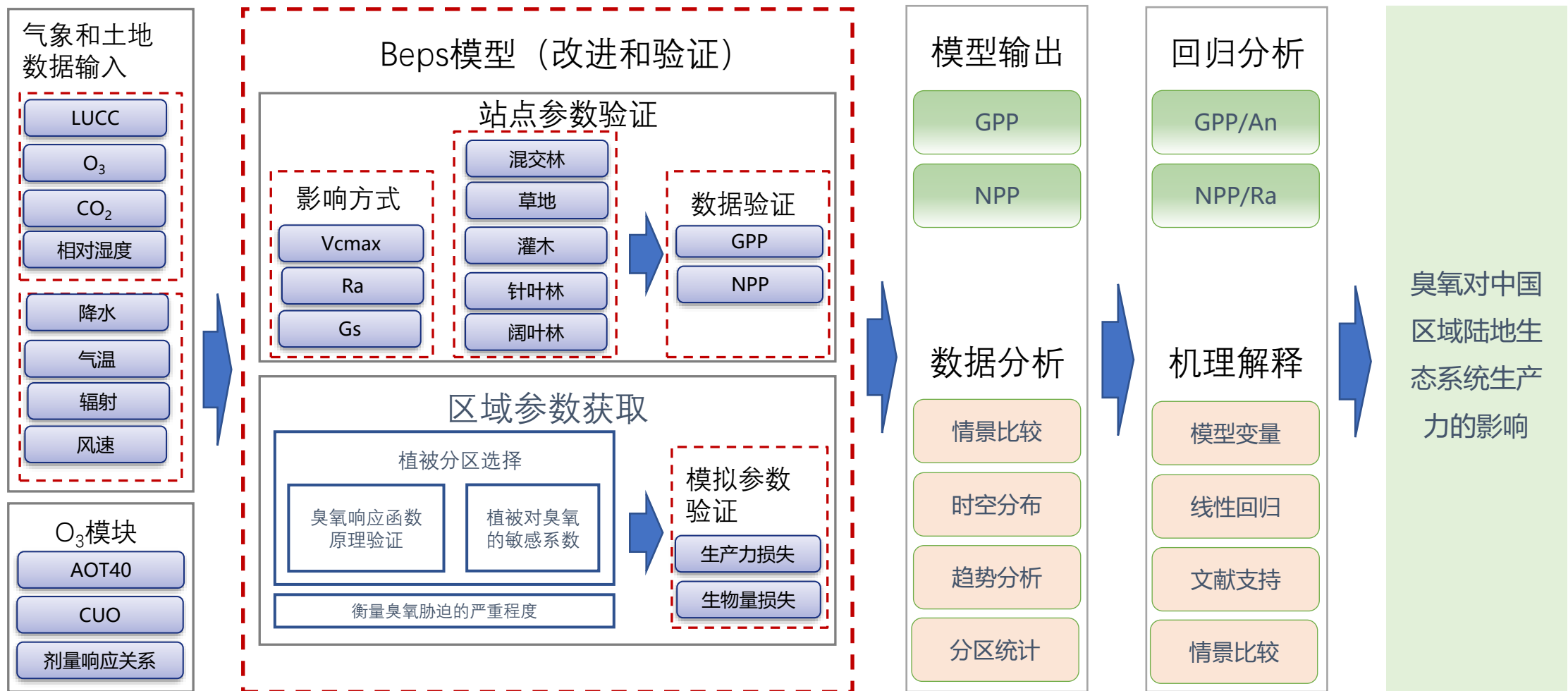
二、研究目标及研究方法

三、研究结果与模拟分析

四、主要结论与未来方向



2.1 总体技术路线图



模型构建

参数获取

影响评估

探索机制

凝练结论



2.2 臭氧模块的耦合

● 臭氧模块耦合BEPS模型的方法示意

- 剂量响应关系模块构建

$$GPP_{O_3} = GPP \times (1 - I_{O_3month})$$

$$I_{O_3mont} = \alpha \times g_{sto} \times AOT40$$

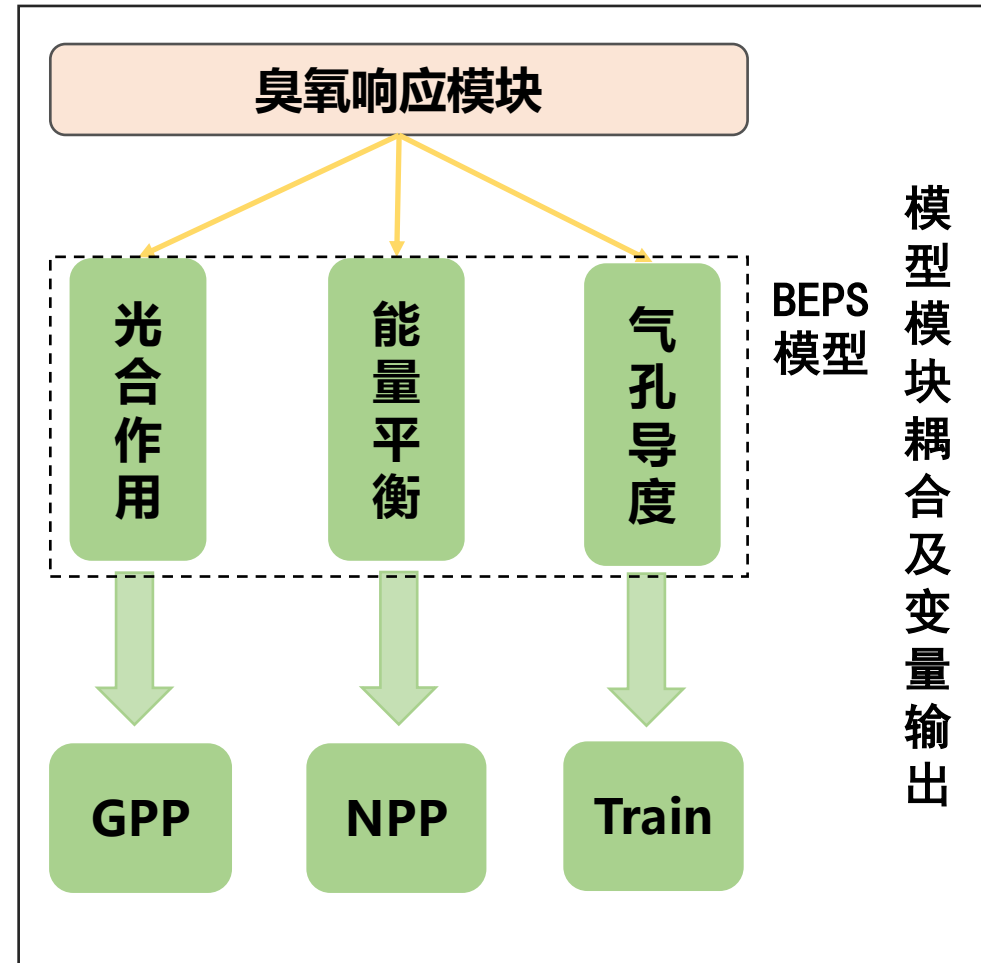
$$AOT40 = \sum_{i=1}^n ([O_3] - 40) \times \Delta t$$

- 通量响应关系模块构建*

$$A = A_p F$$

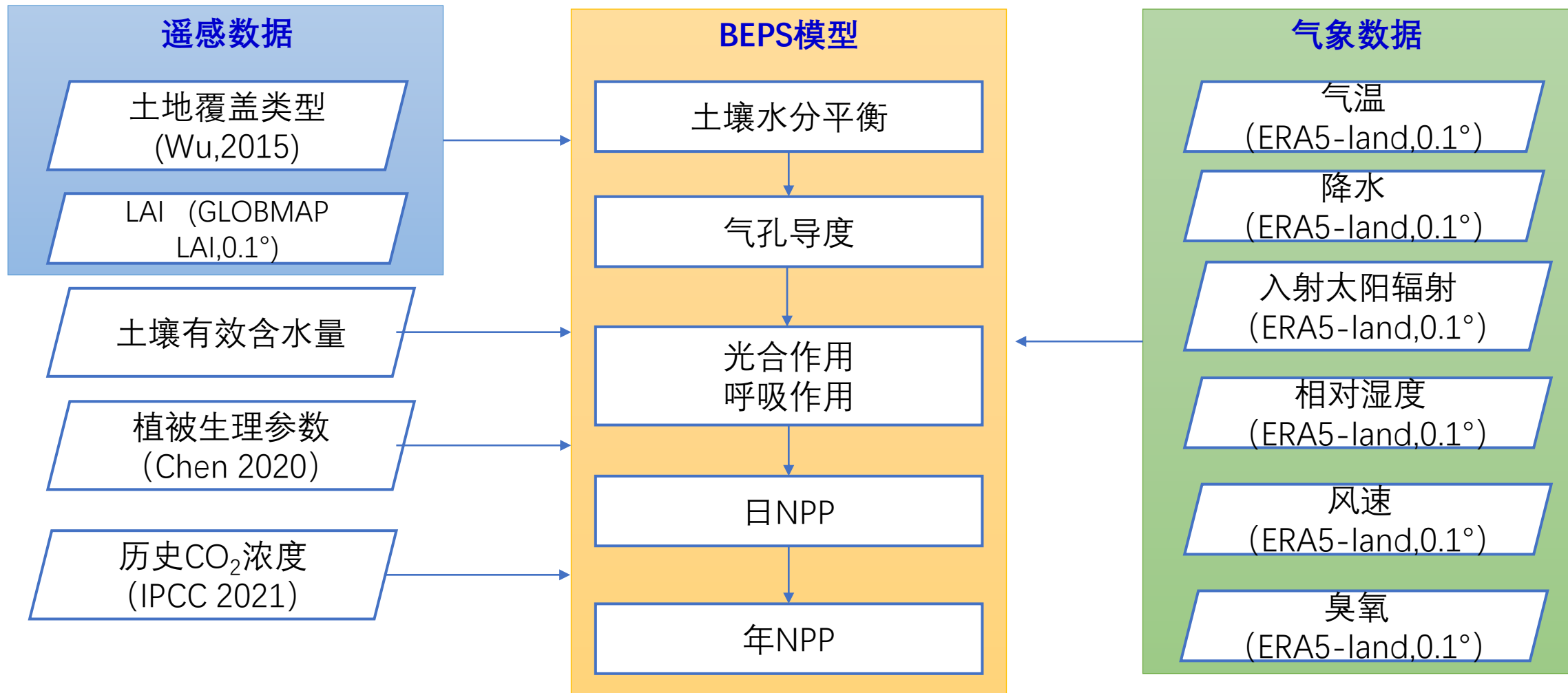
$$F = 1 - \alpha(POD_y)$$

$$POD_y = \frac{O_3}{R_a + \frac{K_{O_3}}{g}}$$





2.3 驱动数据介绍





2.4 模拟情景设置

● 情景设置分类

- ① **历史气象数据 (Climate)** : 使用历史气象数据作为驱动。
- ② **气象+臭氧 (C+O₃)** : 不考虑CO₂浓度增加, 历史O₃浓度。
- ③ **气象+二氧化碳变化 (C+CO₂)** : 历史CO₂浓度, 不考虑O₃浓度。
- ④ **气象+二氧化碳+臭氧 (C+CO₂+O₃)** : 历史CO₂浓度, 历史O₃浓度。

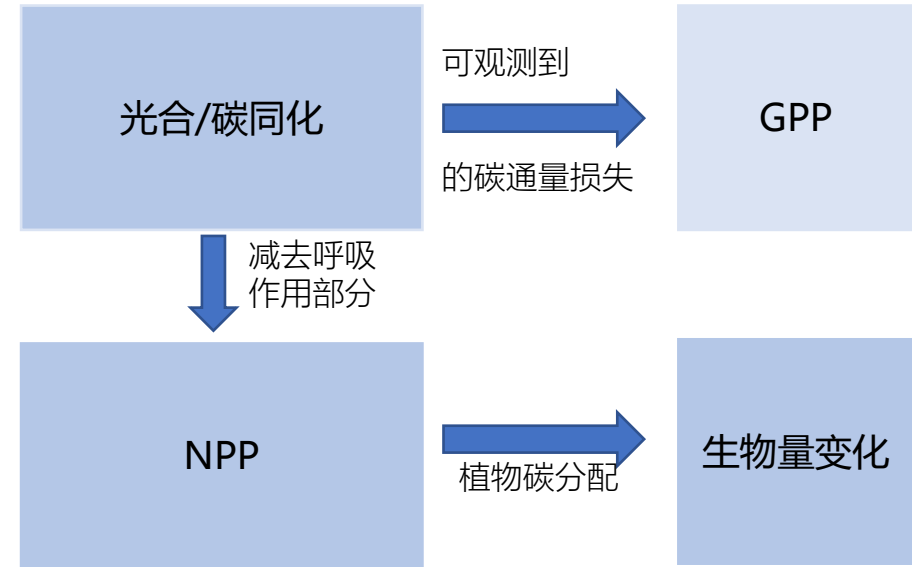
Experiment no.	Climate	History_O ₃	History_CO ₂
Climate	✓		
C+O ₃	✓	✓	
C+CO ₂	✓		✓
C+CO ₂ +O ₃	✓	✓	✓



2.5 参数获取

• 臭氧响应参数原理及验证

- 臭氧对光合作用的影响在长期观测中会反映为GPP的损失或生物量的变化。
- 通过穷举法使臭氧造成的产量损失和GPP/NPP损失一致。



植被类型	Grass (草地)	Shrub (灌木)	Mix (混交林)	DBF (落叶阔叶)	EBF (常绿阔叶)	ENF (常绿针叶)	DNF (落叶针叶)
α (Sub./Tem.)	0.24/0.15	0.08	0.07/0.06	0.151	0.09/0.085	0.055/0.06	0.08/0.09
函数式	$y=1-0.03POD_1$	$y=99.6-0.90POD_1$	$Y=100-0.27POD_1$	$y=99.6-0.90POD_1$	$y=100.3-0.32POD_1$	$y=99.8-0.22POD_1$	$y=99.8-0.22POD_1$



一、研究背景和科学问题

二、研究目标及研究方法

三、研究结果与模拟分析

四、主要结论与未来方向



3.1 站点验证和多方案对比

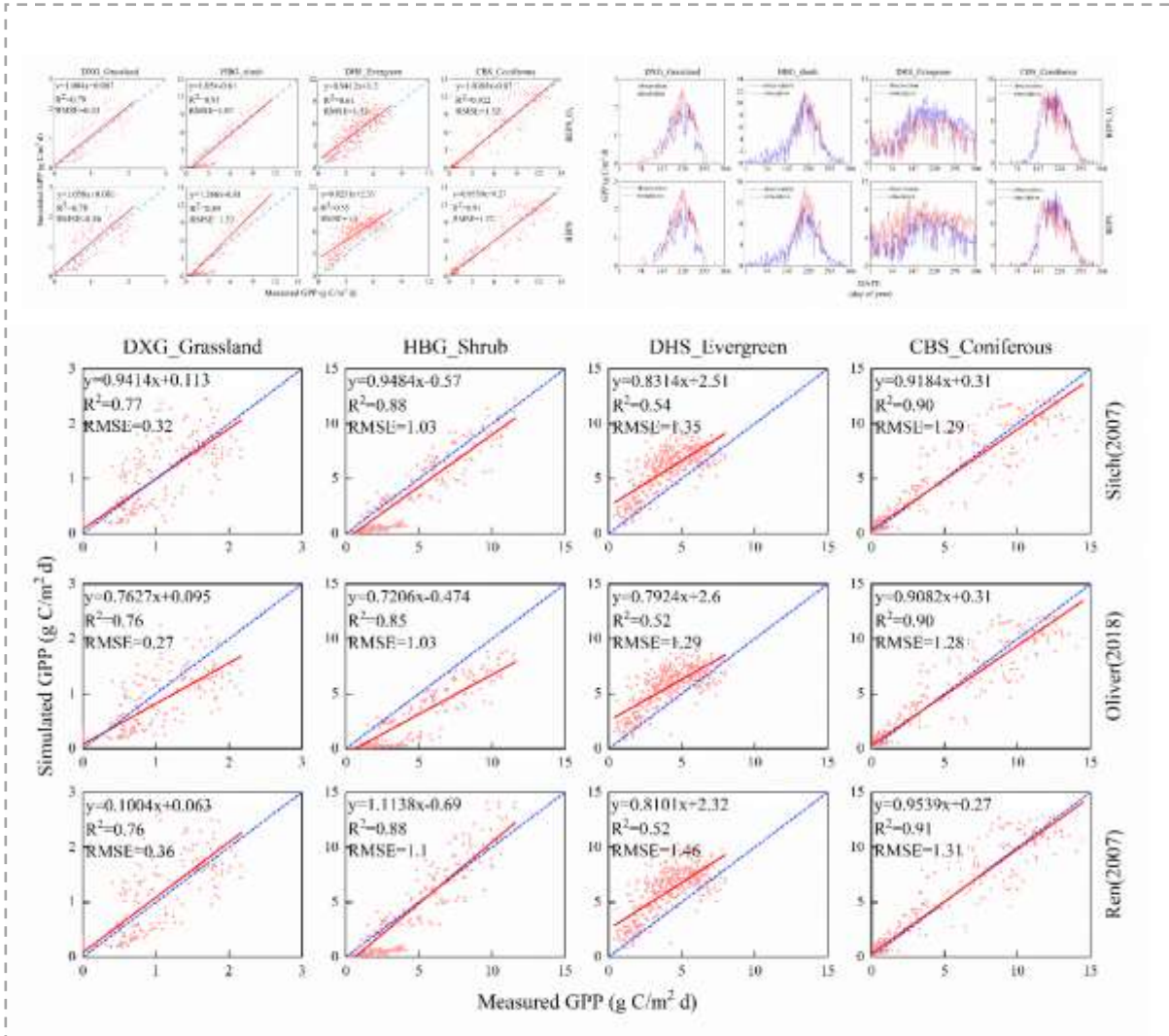
• 多种植被类型的站点验证

- 多站点验证显示出了BEPSozone在站点尺度对GPP更好的相关性。

• 多种方案的站点模拟结果对比

- Sitch的方案在常绿林、灌木和草地站点表现较差。
- Oliver的结果整体上表现均不好。
- Ren的方案在常绿林和灌木站点表现较差。

相比于三种方案，本研究重新校准的参数在各个站点的表现较好。



3.2 臭氧对GPP的影响



生态系统GPP

总初级生产力（GPP）是指在单位时间和单位面积上，绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量。GPP代表了植被光合能力的强弱，反映了植被的健康状况。



GPP的时空分布

气候变暖、二氧化碳施肥



臭氧的影响情况

臭氧浓度、气孔导度

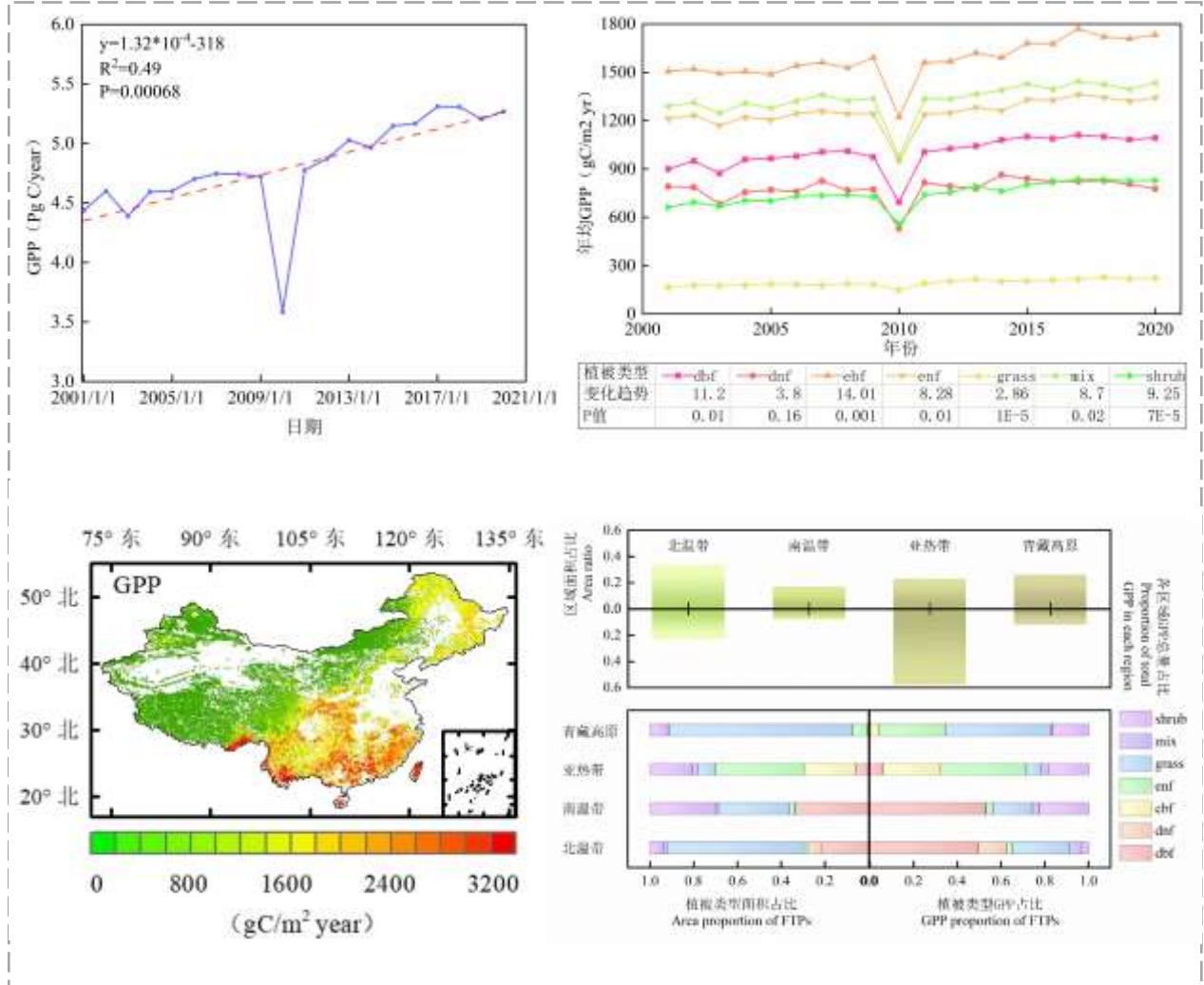


气候变化下GPP的响应机制

冠层导度、光合作用



3.2 GPP时空变化特征



• GPP模拟结果

- 年均GPP约为 4.8 ± 0.04 Pg C, 整体表现上升趋势 (P=0.0006)。
- GPP按大小排序: 常绿阔叶林>混交林>常绿针叶林 >落叶阔叶林>落叶针叶林>灌木>草地

• GPP的空间分布

- GPP自南向北逐渐降低, 从沿海向内陆降低。
- 森林是湿润地区GPP的主要贡献植被, 西北地区GPP贡献主要来自草地。

3.2 臭氧引起的GPP损失时空变化特征

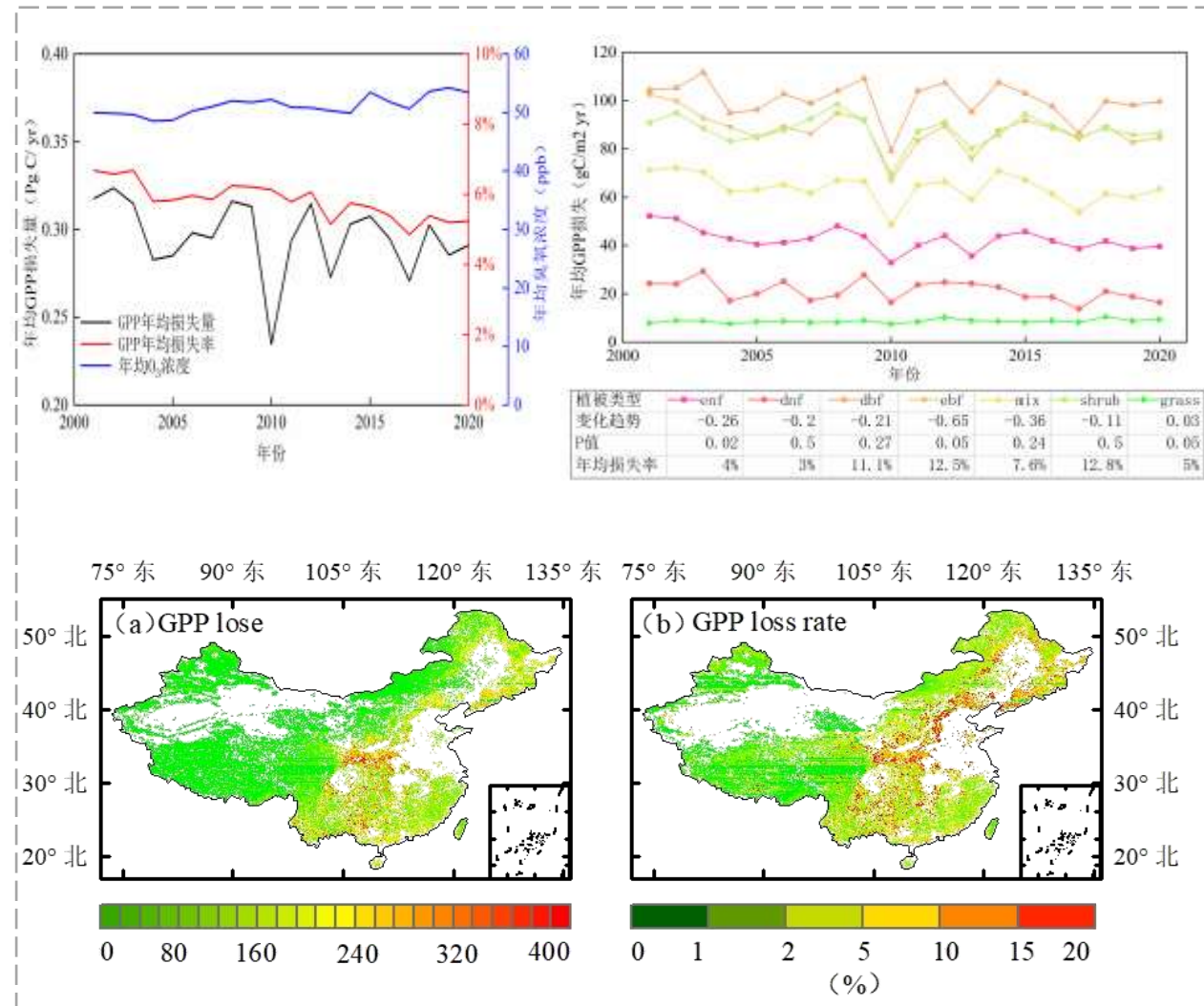


• 臭氧影响GPP的年际变化

- 臭氧污染引起的GPP年均损失约为 $37.5 \pm 1 \text{ gC/m}^2 \text{ yr}$ ，年均损失率约为5.8%。
- 落叶林对臭氧的敏感性 > 常绿林对臭氧的敏感性
- 阔叶林的敏感性 > 针叶林的敏感性

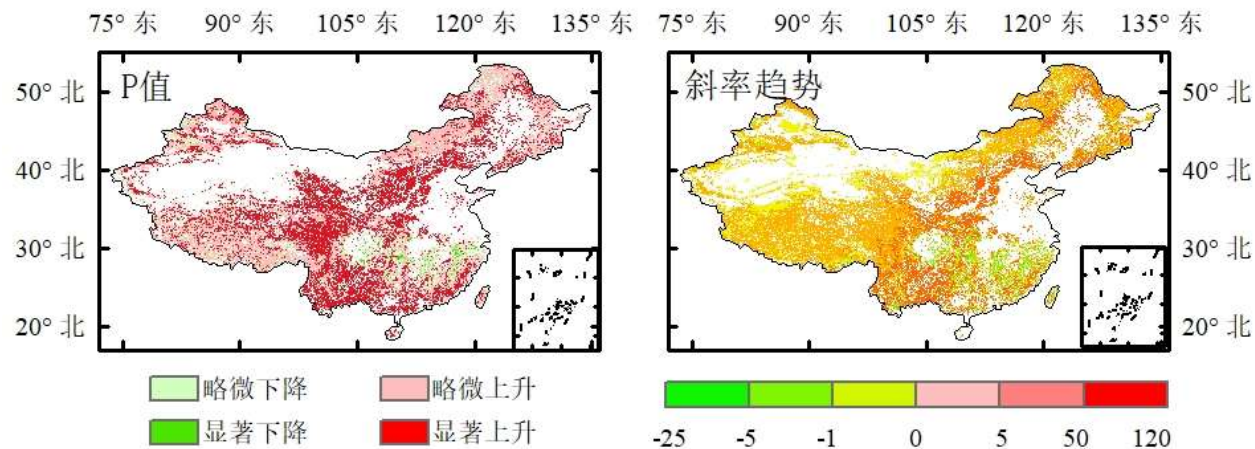
• GPP损失的空间分布

- 长江三角洲地区、成渝地区、华北地区是臭氧GPP损失较为严重的区域。GPP损失沿城市群向外逐渐降低。



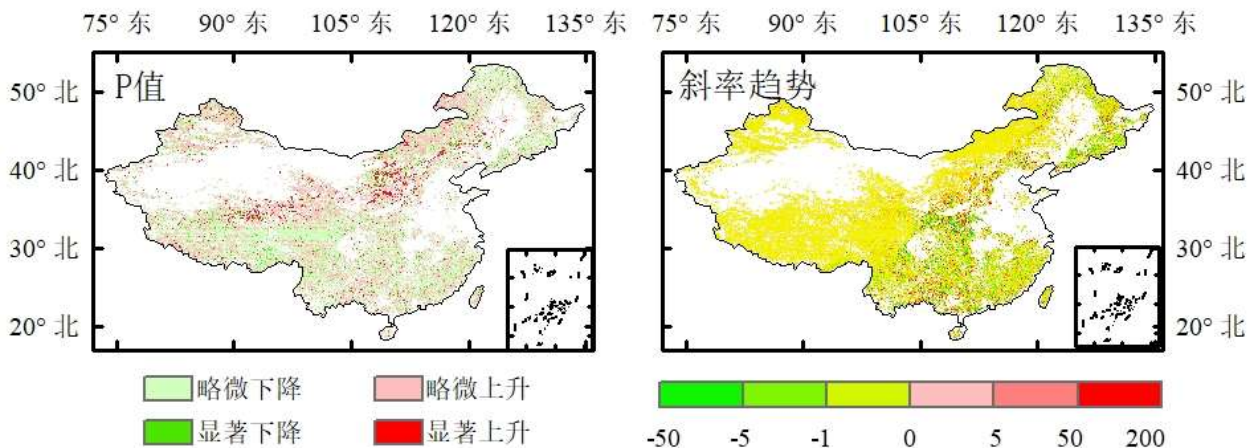


3.2 GPP的变化趋势



• GPP的变化趋势

- GPP呈显著增加趋势，除亚热带部分地区出现下降



• 臭氧影响GPP的年际趋势

- 大部分地区呈现显著下降趋势。
- 部分草地的GPP损失呈现上升趋势。

历史臭氧浓度不断增加，但是臭氧的影响在逐渐减弱。
表明GPP的变化受到多种因素的协同作用。

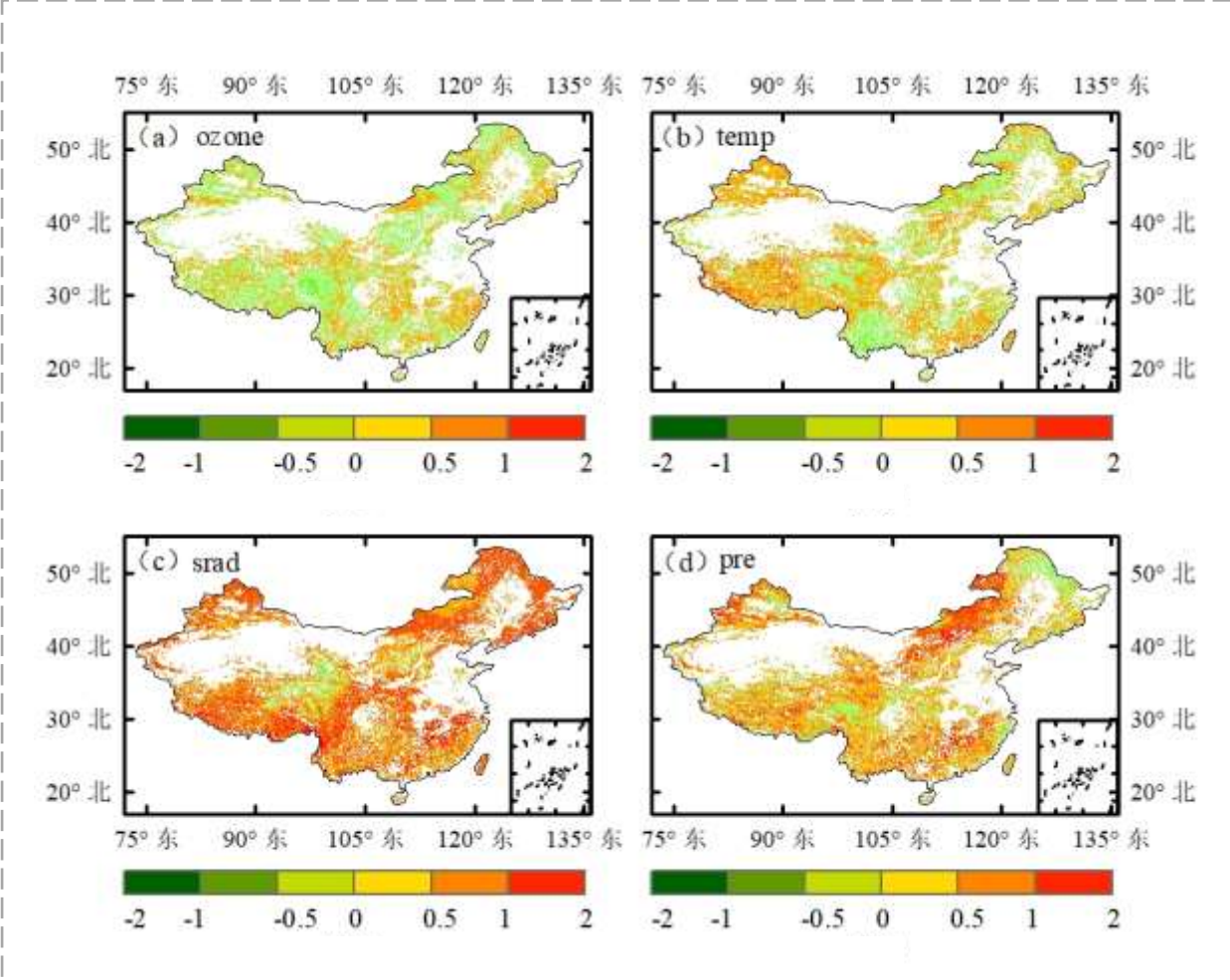
3.2 GPP对环境因子的响应



• 环境因子对GPP的贡献

- 年际变化突出了二氧化碳和辐射对GPP极高的正相关，以及臭氧的负相关贡献。
- 区域变化强调了温度和臭氧在区域上的异质性。解释了温度影响不显著的原因。

变量	系数	标准误差	P-value
截距	-0.38	0.06	<0.01
CO ₂	0.91	0.07	<0.01
O ₃	-0.036	0.05	0.05
降水	0.14	0.04	<0.01
辐射	0.81	0.05	<0.01
温度	0.06	0.04	0.18

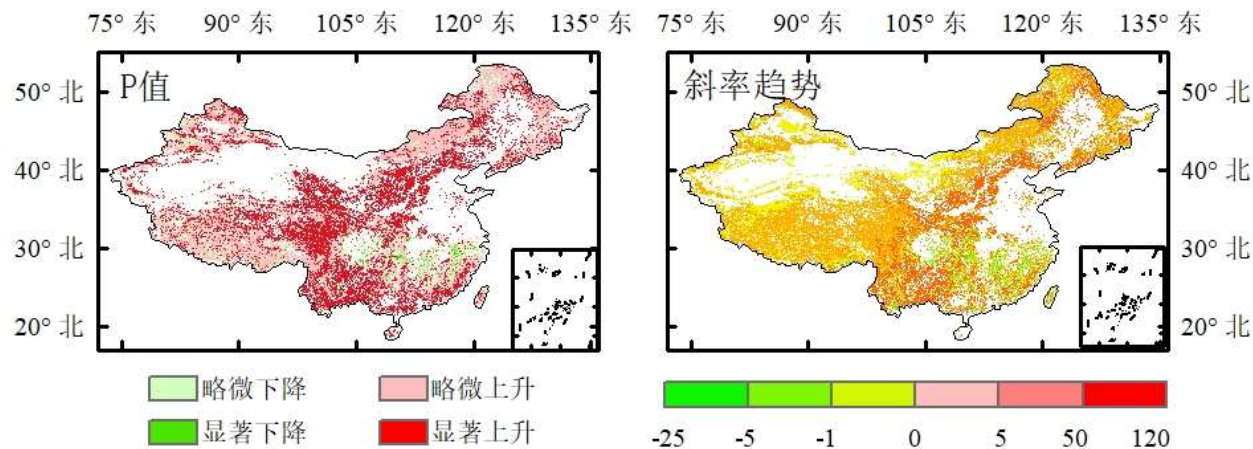
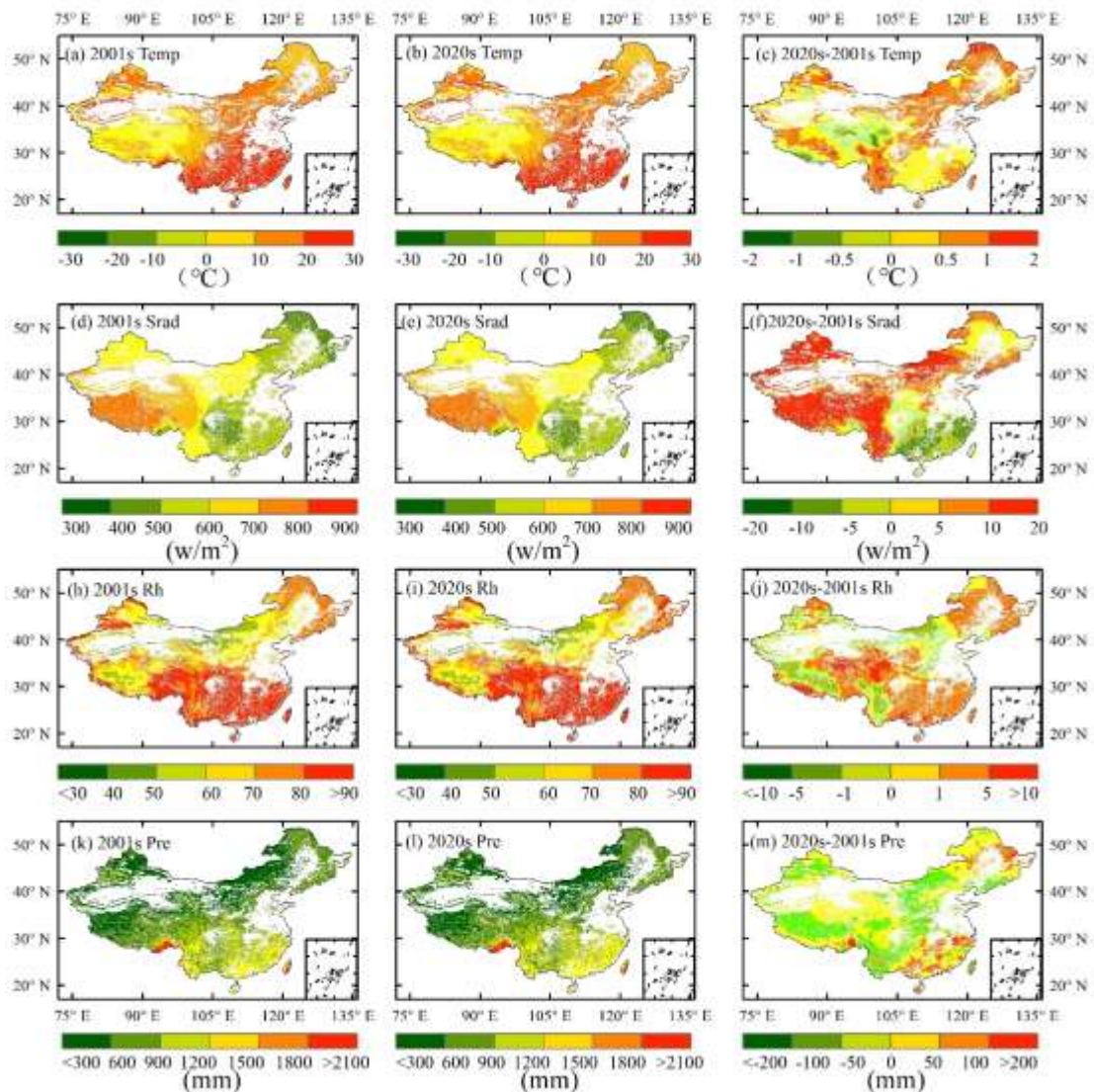




3.2 GPP对环境因子的响应

气象因子变化对GPP的影响

- 亚热带地区普遍的辐射减弱导致部分地区GPP减少。
- 西南地区、华北、东北地区的GPP增加可以归因于叶面积指数的增长（来源于气候变暖和CO₂施肥）。
- 青藏高原的GPP增加主要是气候变暖导致的永久冻土退化。

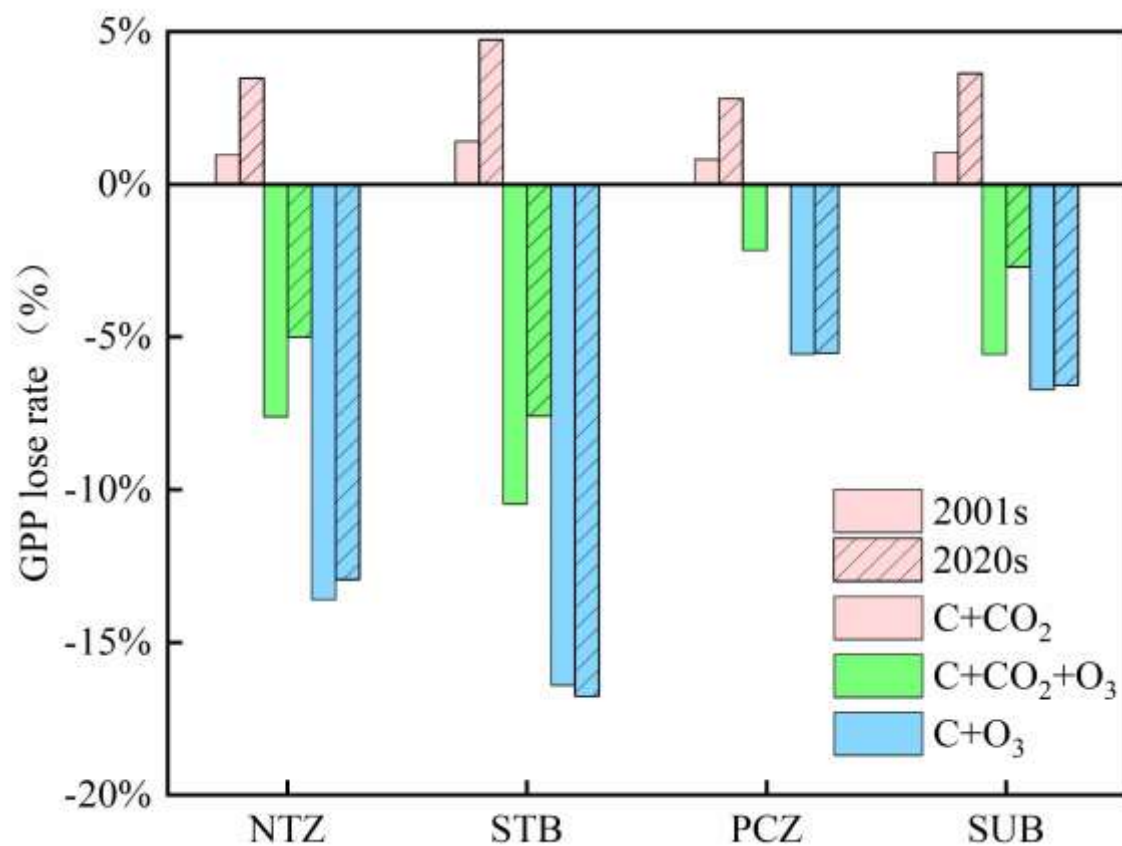
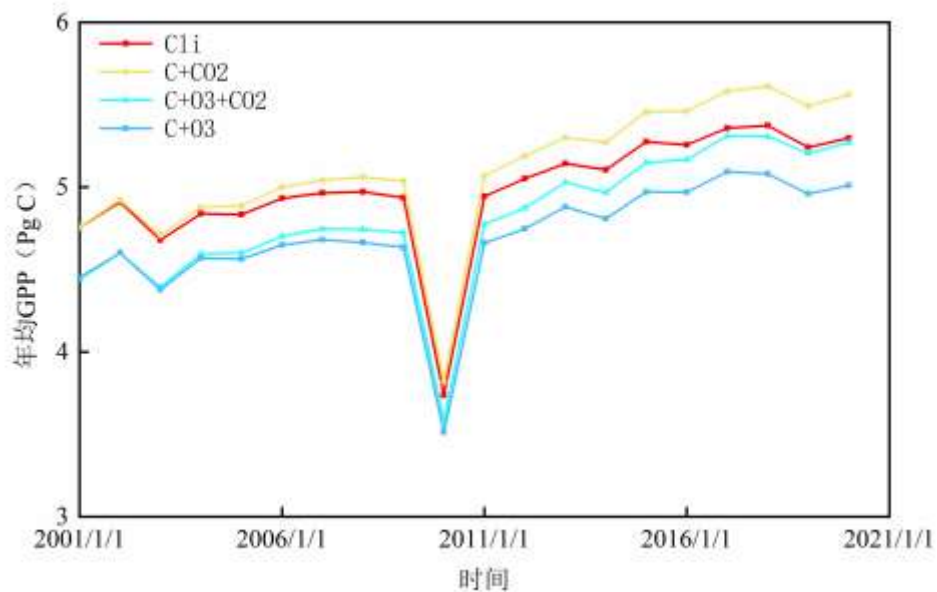


3.2 二氧化碳和臭氧对GPP协同作用



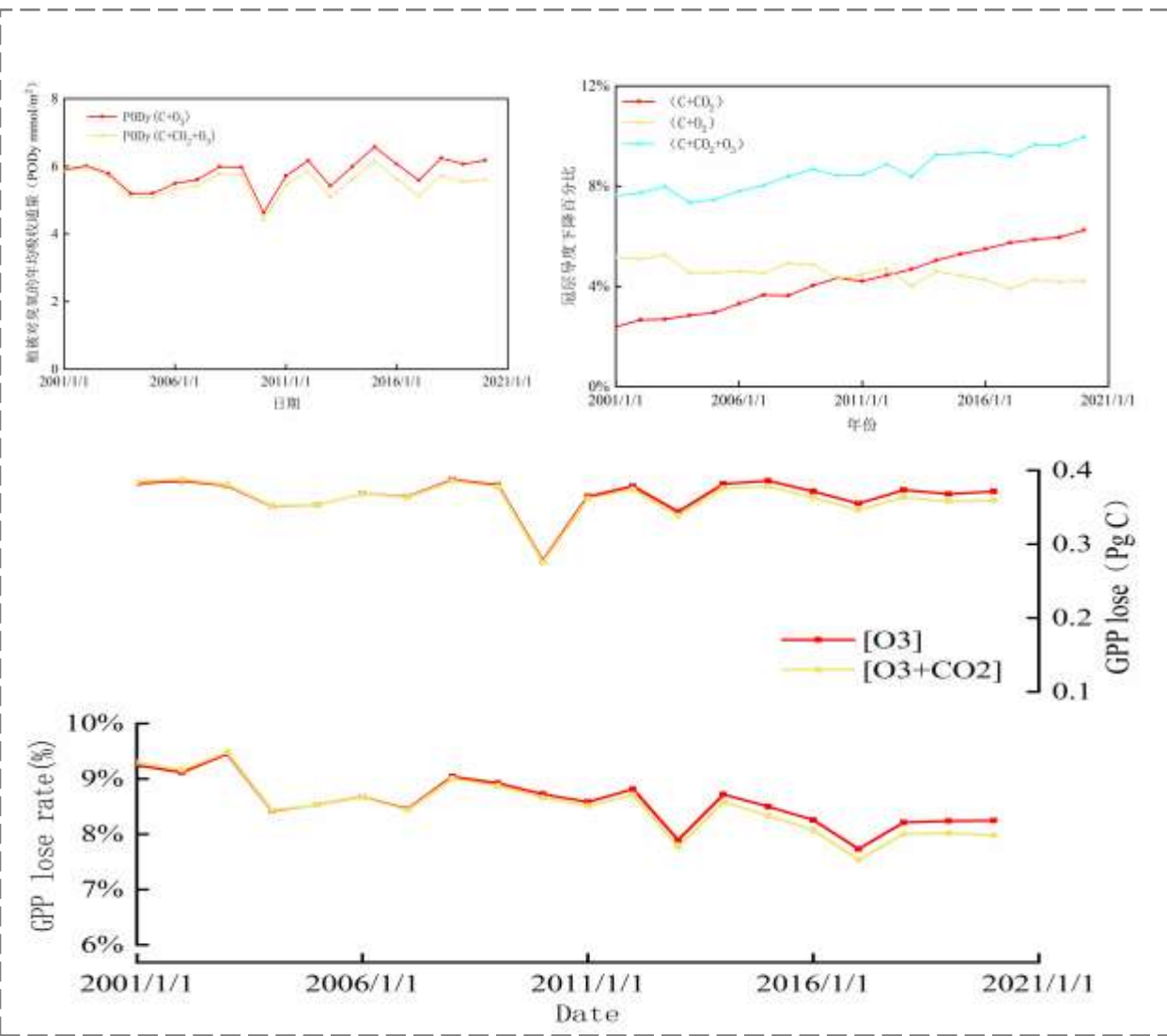
• CO₂和O₃对GPP的影响

- CO₂显著增加了典型陆地生态系统GPP。
- O₃造成的影响远高于CO₂对光合作用的增加。
- CO₂在进一步削弱O₃的影响。





3.2 二氧化碳和臭氧对GPP协同作用



• CO₂和O₃对冠层导度的影响

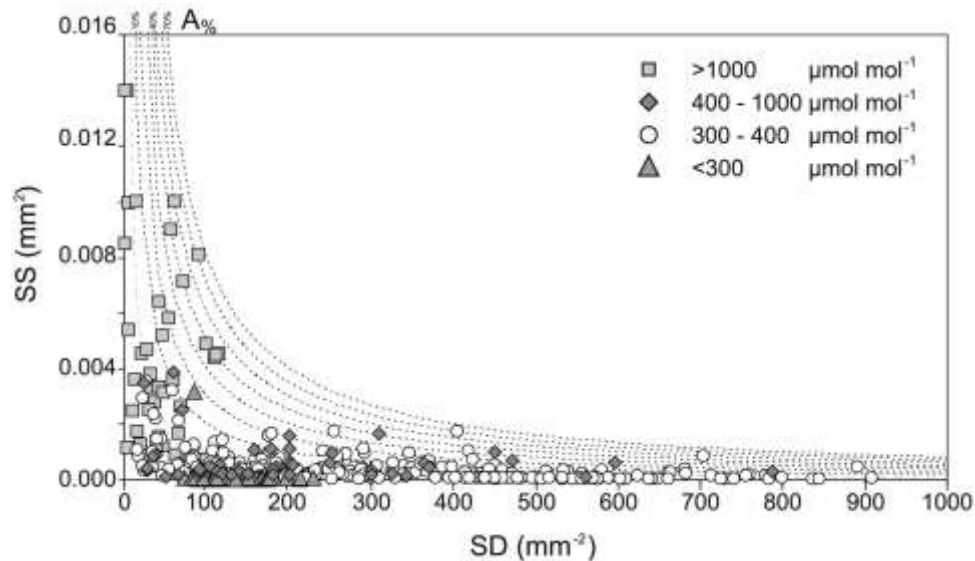
- 历史二氧化碳浓度情景下，臭氧吸收减少年均0.5 mmol/m² yr、冠层导度下降。
- 结果表明CO₂升高导致冠层导度减小4.2±1%，臭氧污染导致冠层导度减小4.5%。
- 仅臭氧污染下，GPP损失将持续增加。

在未来气候情景下，控制二氧化碳排放和大气污染治理都需要引起关注。

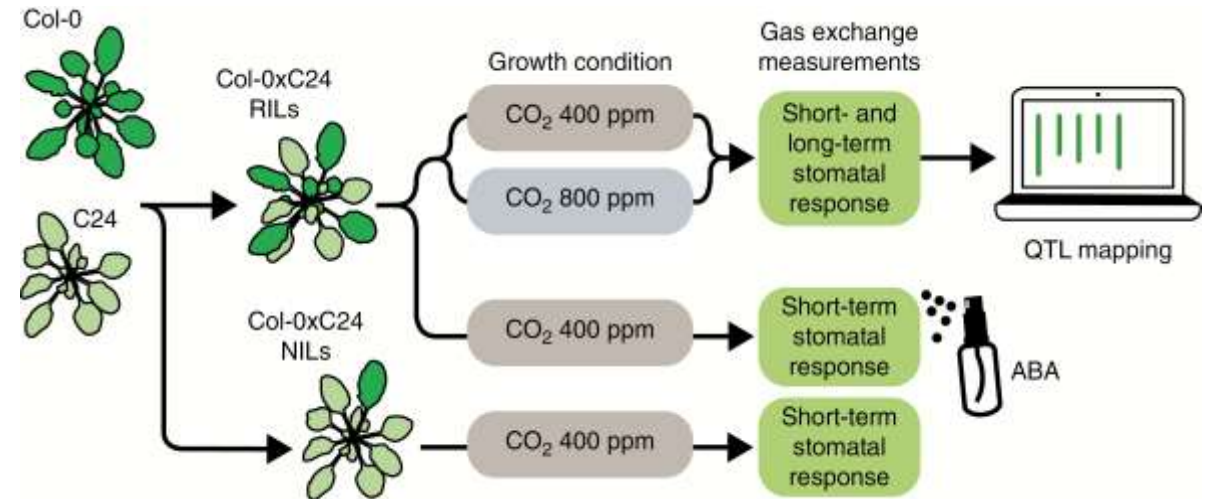
3.2 二氧化碳和臭氧对GPP协同作用

• CO₂和O₃对GPP影响的影响机制

- 二氧化碳浓度升高会刺激植物叶片气孔关闭。
- 导致新生叶片的气孔密度减小，部分叶片酶数量发生改变。
- 然而这种气孔导度的减小和气孔密度的降低并不会影响胞间二氧化碳浓度，也不会造成光合作用的减弱。



Matthew Haworth, Total Environment, 2023



Karin S L Johansson, Annals of Botany, 2020

3.3 臭氧对NPP的影响



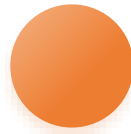
生态系统NPP

净初级生产力 (NPP) 指在初级生产过程中, 植物光合作用固定的能量中扣除植物呼吸作用消耗掉的那部分, 剩下的可用于植物的生长和生殖的能量。因此, NPP不仅体现绿色植被固碳的能力, 也表征植被将碳转化有机产物的效率。



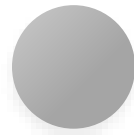
NPP的时空分布

气候变暖、呼吸作用增加



臭氧的影响情况

NPP/GPP、呼吸作用



气候变化下NPP的响应机制

冠层导度、光合作用



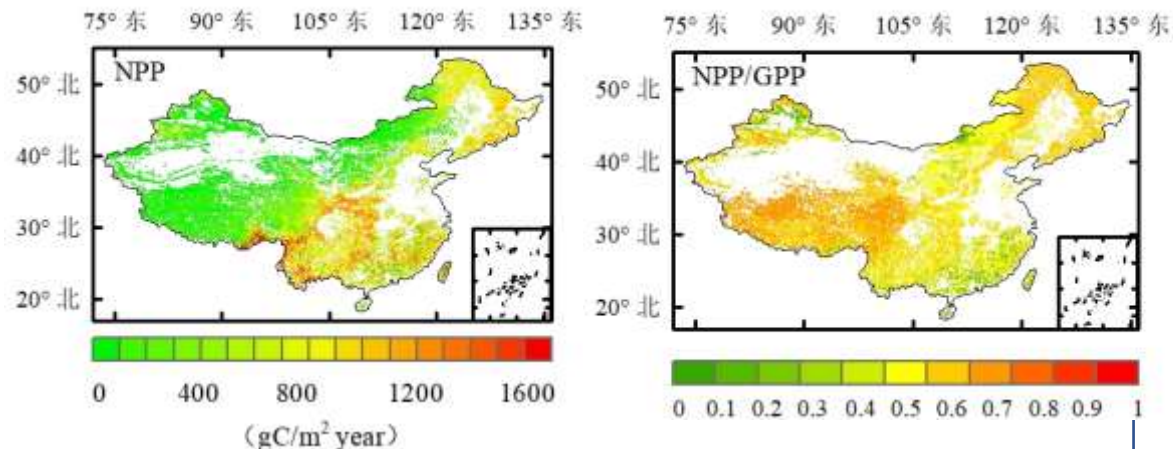
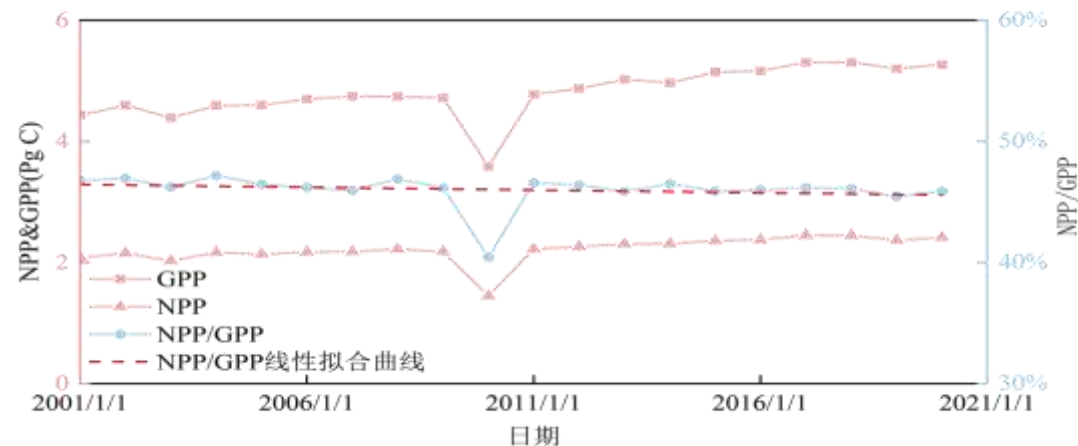
3.3 NPP时空变化特征

● NPP及NPP/GPP的年际变化

- 年均NPP约为 2.4 ± 0.03 Pg C，整体呈现上升趋势，年均上升约0.01 Pg C。
- NPP/GPP比例逐年降低，表明植被呼吸作用在增加，净碳转化率在减少。

● NPP的空间格局

- NPP格局与GPP略有不同，沿海地区NPP低于亚热带中部、西南地区。
- NPP/GPP自南向北逐渐升高，自东向西逐渐升高。



3.3 臭氧引起NPP损失的年际变化及空间分布



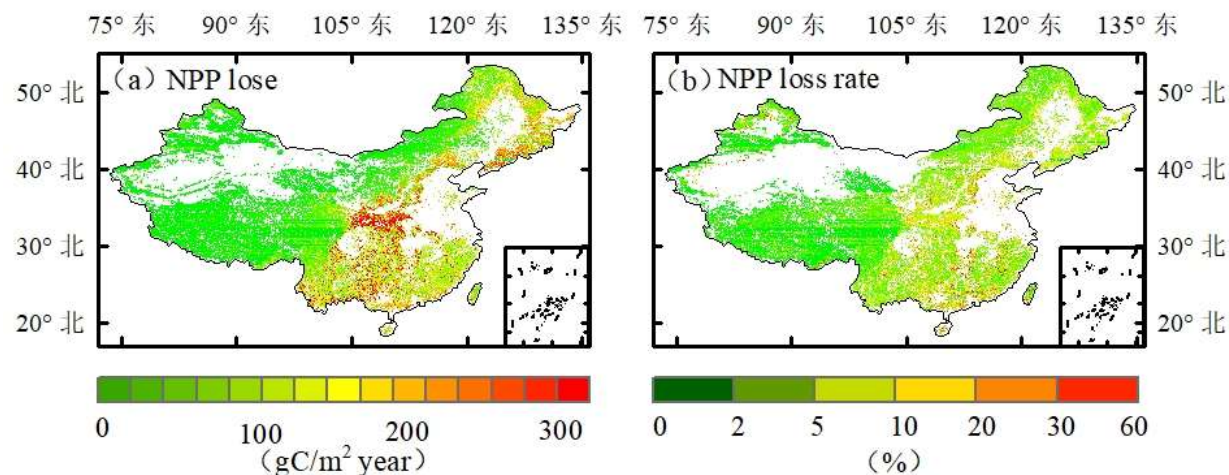
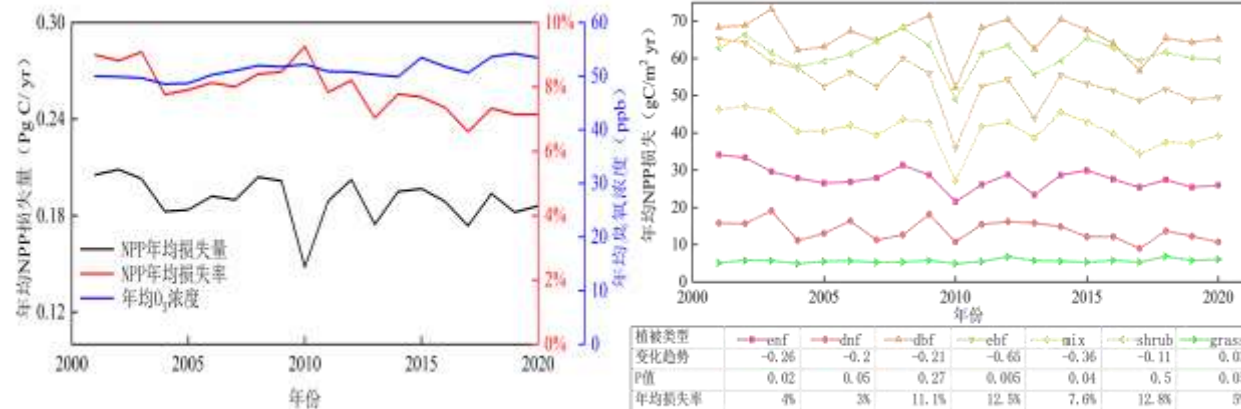
● NPP损失的年际变化

□ 臭氧污染引起的NPP年均损失约为 0.19 ± 0.05 Pg C/yr, 年均损失率约为7.9%。

□ 年均NPP损失量:落叶阔叶林>灌木>常绿阔叶>混交林>针叶林。

● NPP损失的空间分布

□ NPP损失高值集中在北亚热带和南温带的落叶阔叶林, 以及西南地区的常绿阔叶林和灌木。



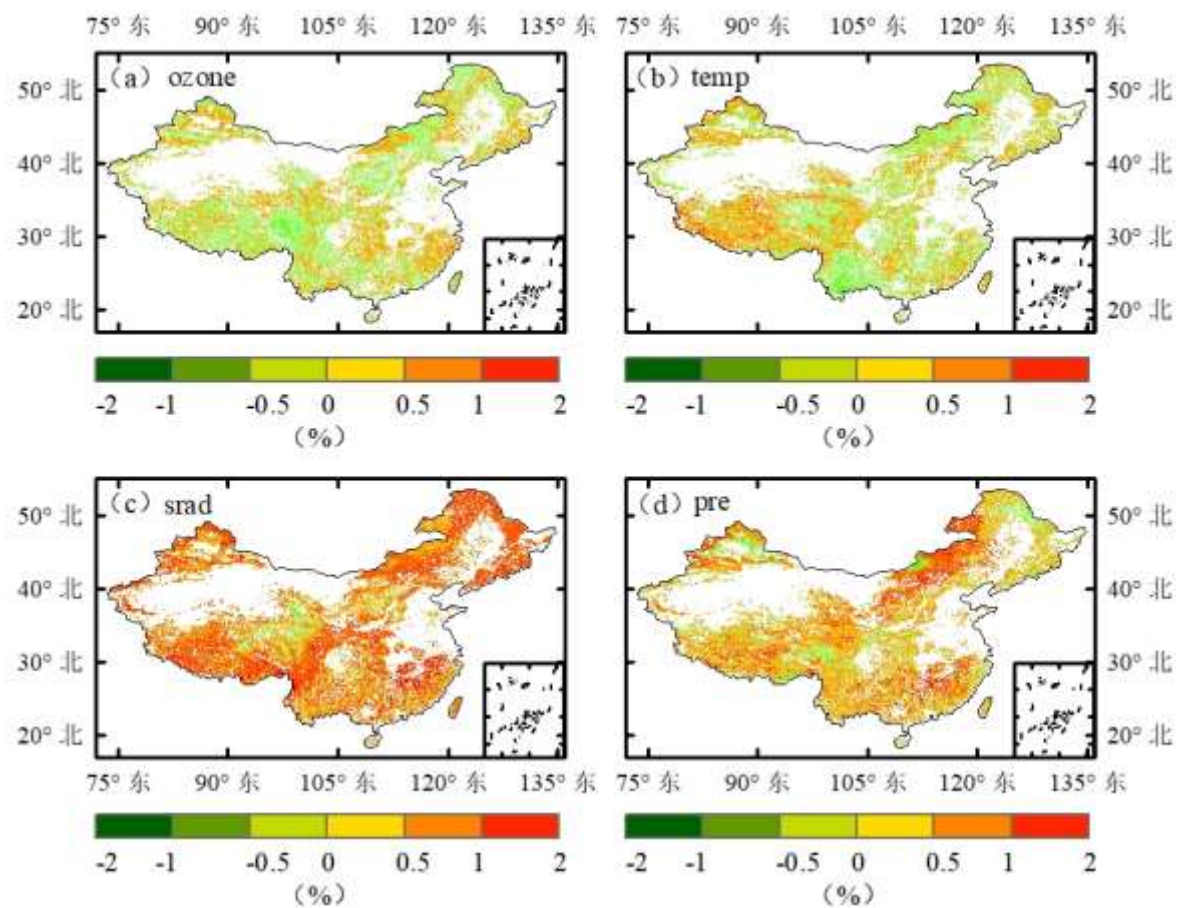
3.3 NPP对气象因子的响应



● 环境因子对GPP的贡献

- 对于NPP而言，辐射是主要的影响因素，CO₂施肥效应对NPP的影响减弱。
- 区域上NPP对气象因子的敏感性与GPP的情况基本一致。
- 温度的正相关性仍然不显著。

变量	系数	标准误差	P-value
截距	-0.3	0.06	<0.01
CO ₂	0.72	0.07	<0.01
O ₃	-0.05	0.05	0.03
降水	0.14	0.04	<0.01
辐射	0.88	0.05	<0.01
温度	0.03	0.04	0.056



3.3 臭氧对NPP和呼吸作用的影响机制



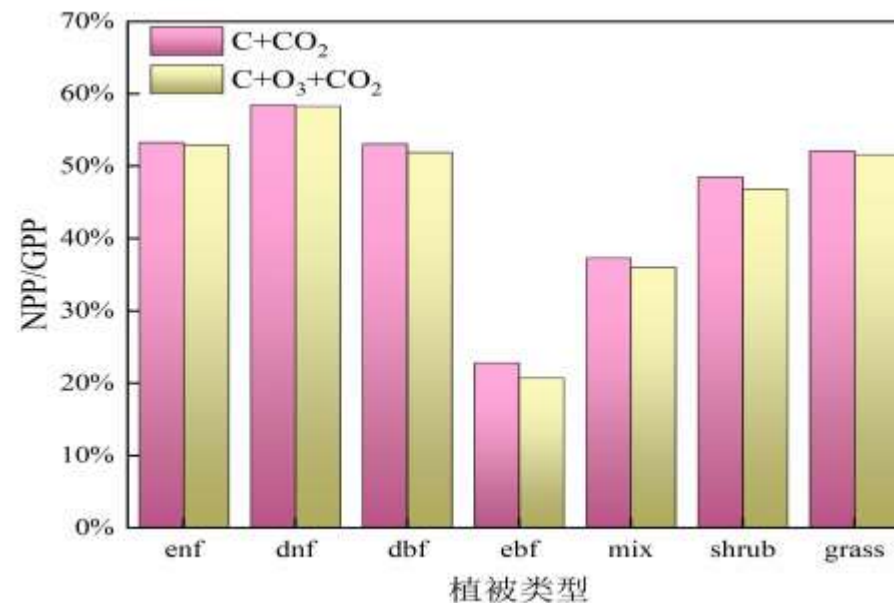
● Ra 的气象贡献

- 针对呼吸作用回归结果表明**臭氧浓度的增加将引起植被呼吸作用的继续上升。**
- 研究表明气候变暖将增加植物的夜间呼吸作用。

Ra (1-NPP/GPP)	系数	标准误差	P-value
截距	0.6	0.09	<0.01
CO ₂	-0.76	0.17	<0.01
O ₃	0.54	0.18	<0.01
温度	0.19	0.15	0.08

● 臭氧引起的NPP/GPP损失

- 气候变暖造成的NPP/GPP降低约2%。
- 臭氧导致植物NPP/GPP的降低约1%。

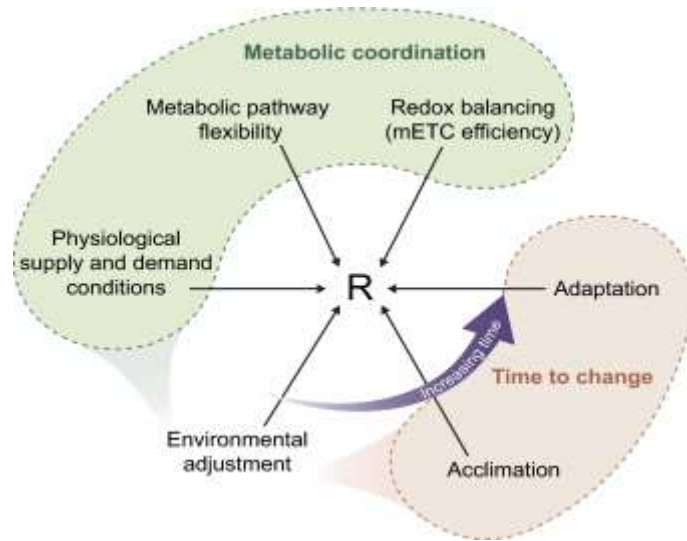




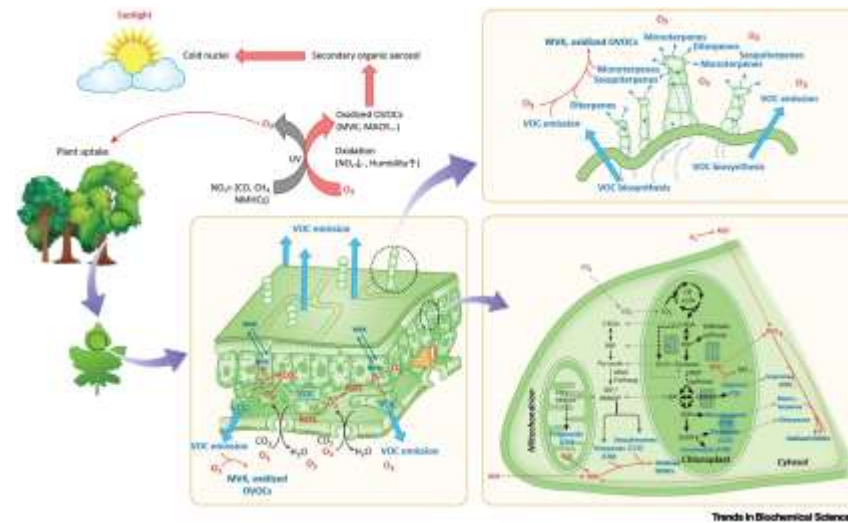
3.3 臭氧对NPP和呼吸作用的影响机制

● NPP/GPP降低的生理机制

- 臭氧对氧化还原反应的破坏会引起呼吸作用增加，以及呼吸代谢底物的合成。
- 叶面积指数的不断上升也导致了植被呼吸作用的压力不断增加。



New Phytologist, O' Leary, 2019



Biochemical Sciences, Jesica, 2021



一、研究背景和科学问题

二、研究目标及研究方法

三、研究结果与模拟分析

四、主要结论与未来方向

主要结论及未来方向



● 臭氧对于典型陆地生态系统的影响

- 臭氧对典型陆地生态系统GPP和NPP的影响分别为 $-5.8\% \pm 0.5\%$ 、 $-7.9\% \pm 0.6\%$ 。
- 臭氧将增加植被约1%的呼吸作用。
- 臭氧造成了1~4.5%的冠层导度损失。

● 生态系统对气候的响应

- 臭氧污染抵消了二氧化碳施肥效应。
- 气候变暖和二氧化碳浓度增加削弱了臭氧污染的影响。
- 臭氧污染对草地GPP、NPP的影响均呈现上升趋势。

● 未来的研究方向

- 由于观测实验的缺乏，还有很多植被类型数据不能被纳入模型。植被参数的调试和模拟结果的验证仍然是未来的主要工作内容。
- 臭氧污染在机理上对植被的生物量、呼吸作用、光合作用等都造成了影响，为更准确地臭氧-植被响应的机理过程，模块之间的耦合是过程模型模拟中主要的研究难点。
- 这两个问题的解决将有利于在未来情景下预测臭氧对植被的影响情况和影响机制。

致谢



感谢各位倾听
敬请批评指正！