

# 服务于国家碳中和目标的陆地生态系统 模型研究

袁文平、乐旭、王应平、何斌、居为民等

---

2023年7月27日

# 提 纲

---

- ① 陆地生态系统CO<sub>2</sub>源汇模型
- ② 湿地生态系统CH<sub>4</sub>模型
- ③ 生态系统N<sub>2</sub>O模型

## 双碳目标：减排-增汇



**减排**

碳中和目标

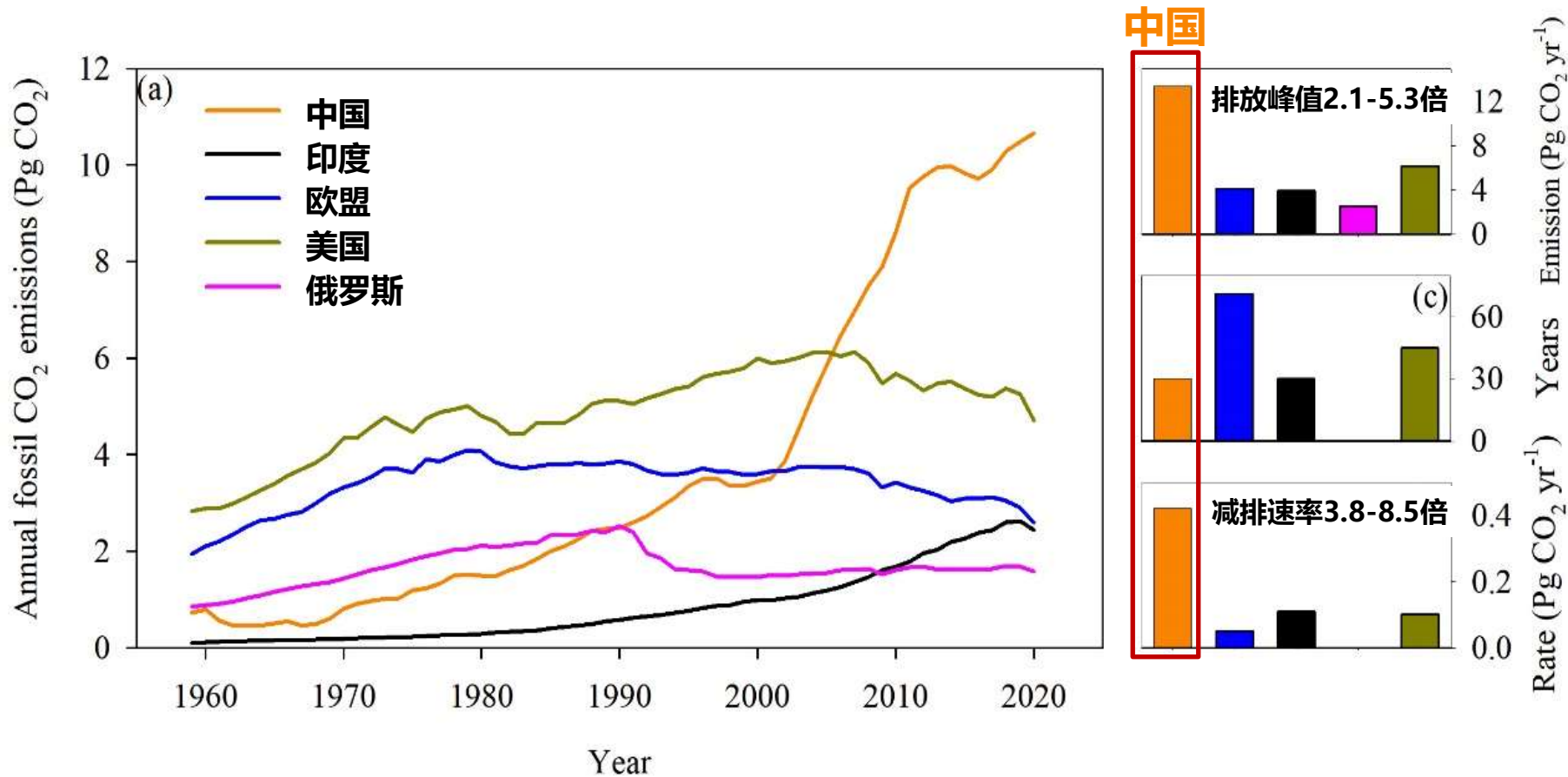


**增汇**

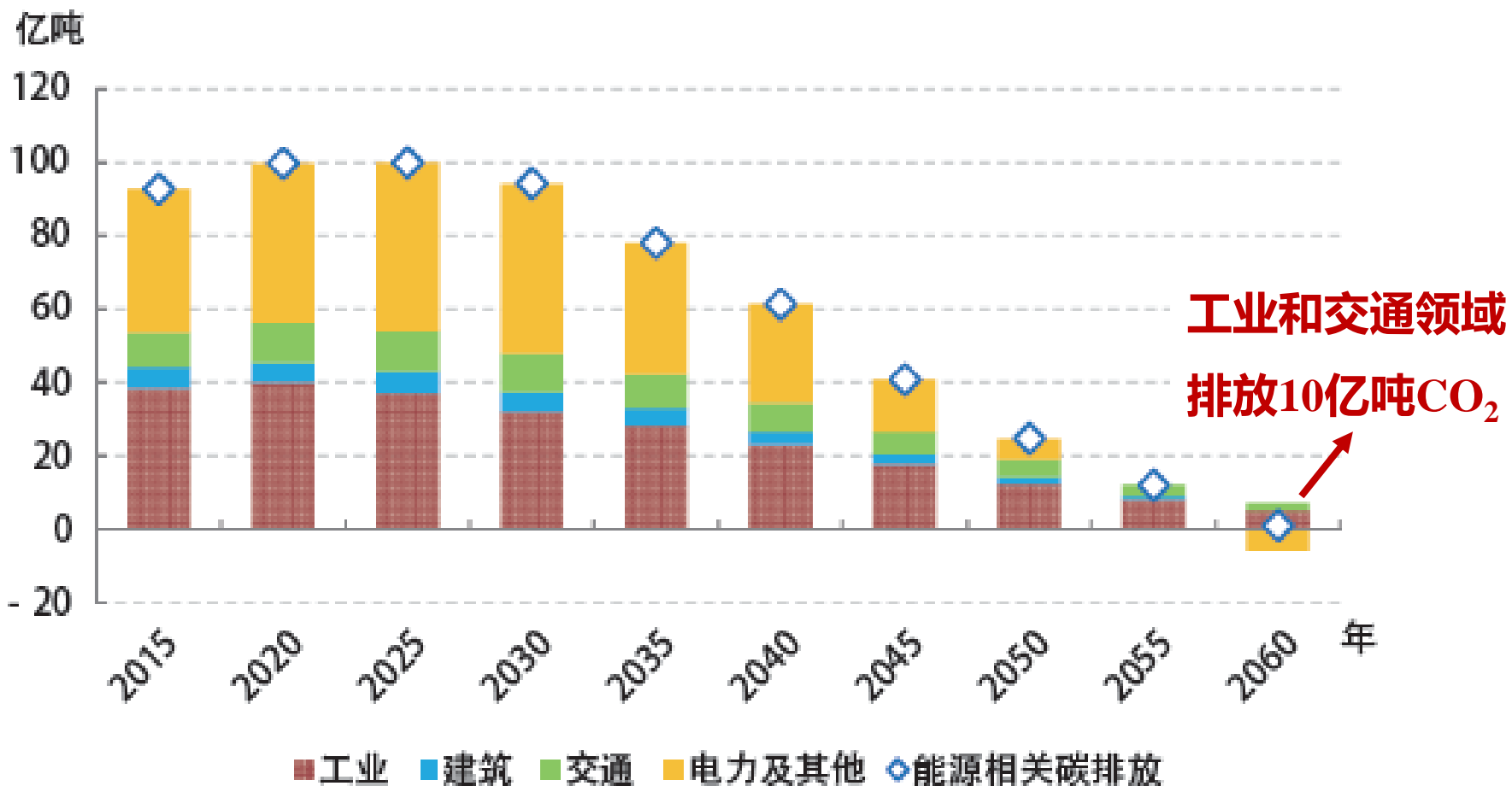
**要加强风险识别和管控，处理好减污降碳和能源安全、产业链供应链安全、粮食安全、群众正常生活的关系。**

**习近平，2021 年中央财经委员会第九次会议的讲话**

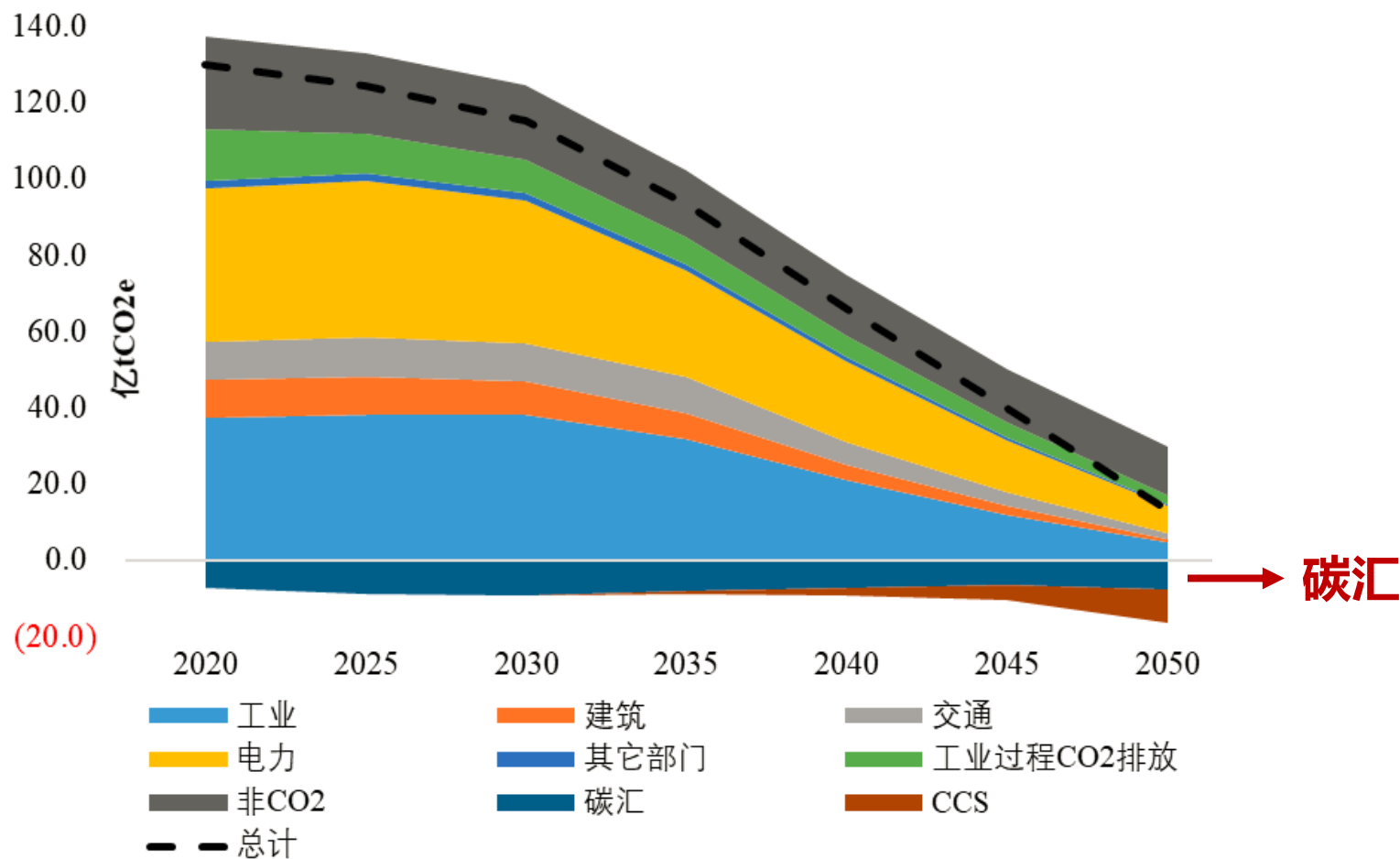
# 能源工业减排面临着极大的挑战



# 我国难以完全依靠减排实现碳中和



# 生态系统碳汇作用应该得以重视



来源：清华大学气候变化与可持续发展研究院《中国低碳发展战略与转型路径研究》

# 生态系统碳汇是实现碳中和的关键

## 碳源



**工业排放**

**86%**

344亿吨 CO<sub>2</sub>/年



**土地利用变化**

**14%**

57亿吨CO<sub>2</sub>/年

2010-2019年均值

## 碳汇

**大气**

**46%**

186亿吨CO<sub>2</sub>/年



**陆地**

**31%**

125亿吨CO<sub>2</sub>/年



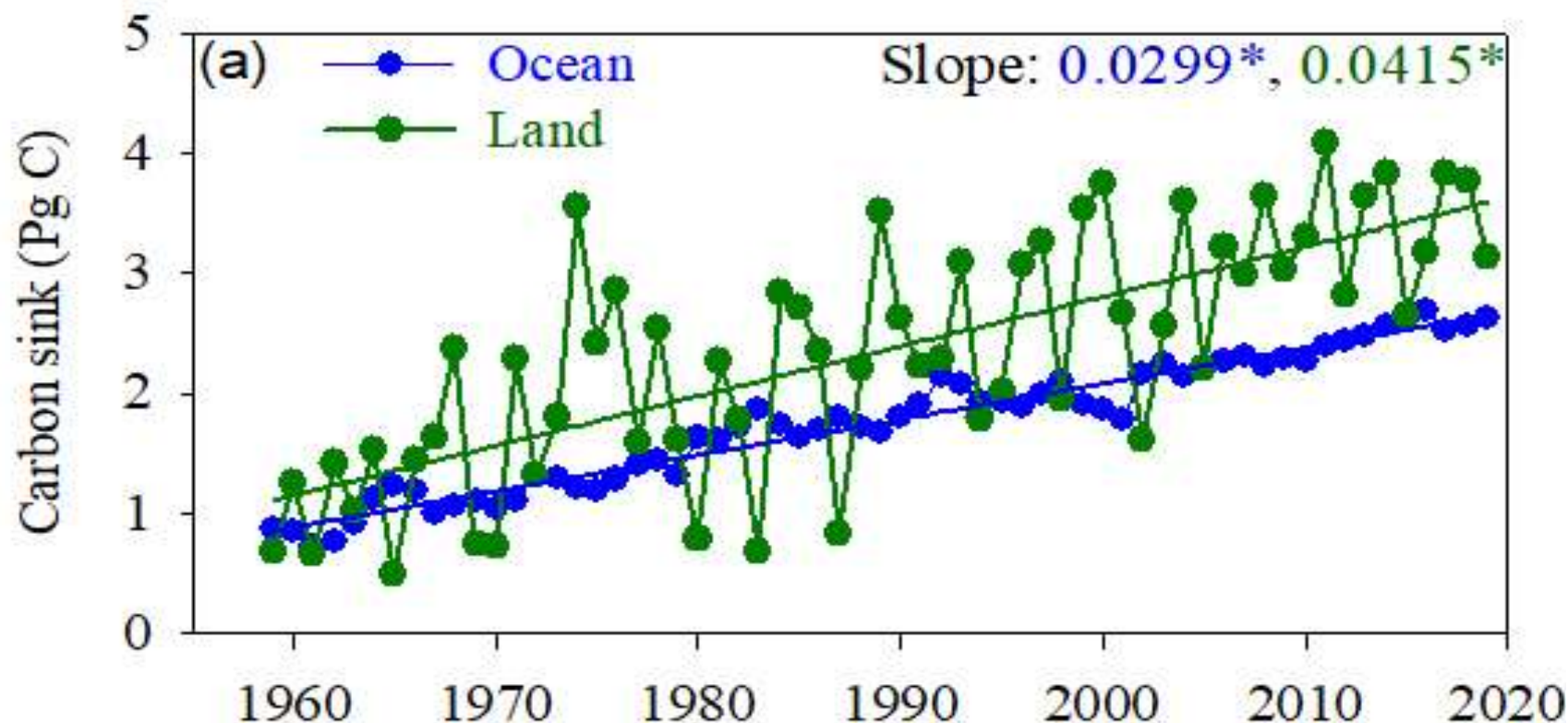
**海洋**

**23%**

92亿吨CO<sub>2</sub>/年

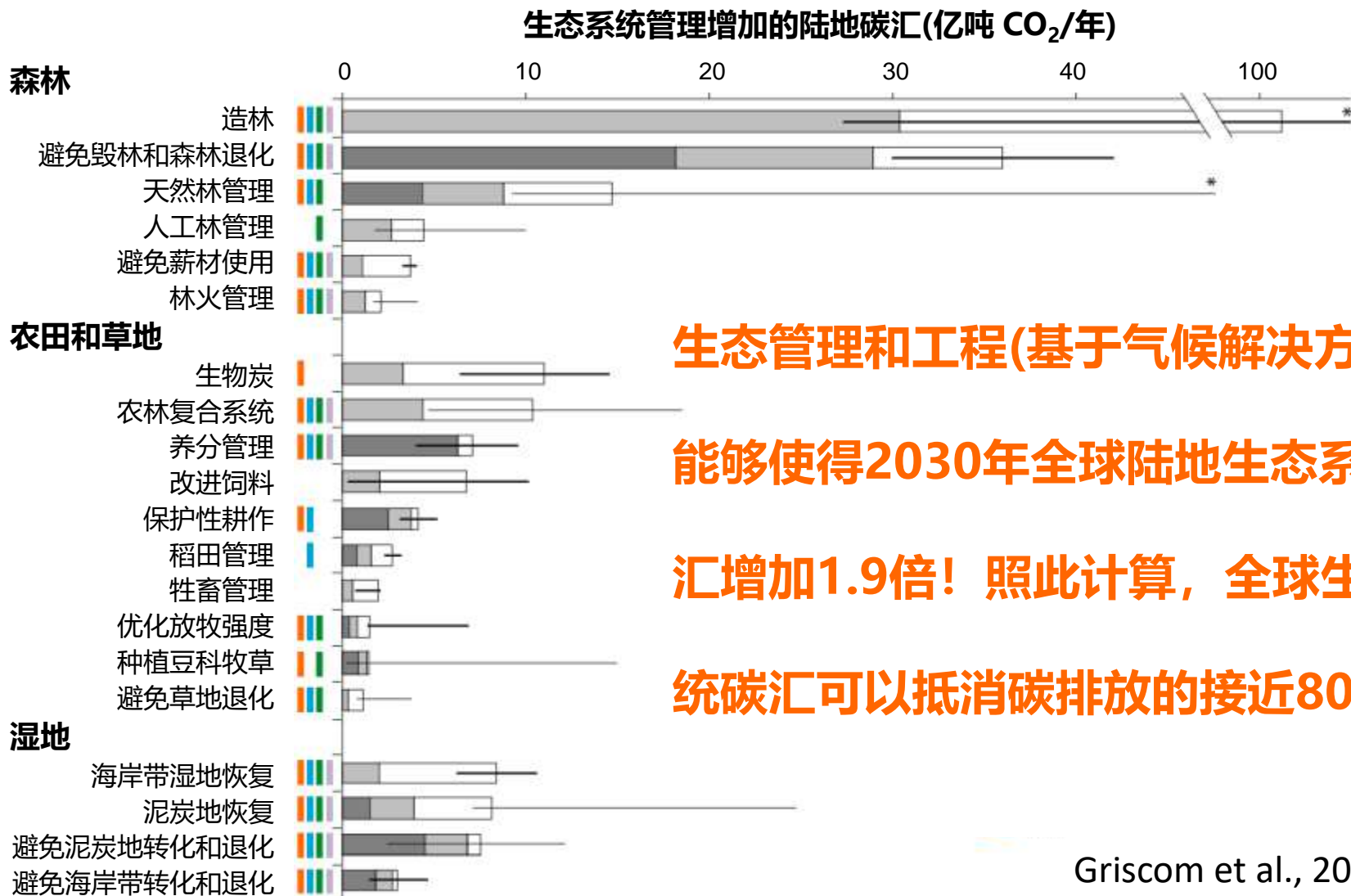


# 陆地生态系统是最重要的碳汇之一





# 生态系统管理显著增加陆地碳汇



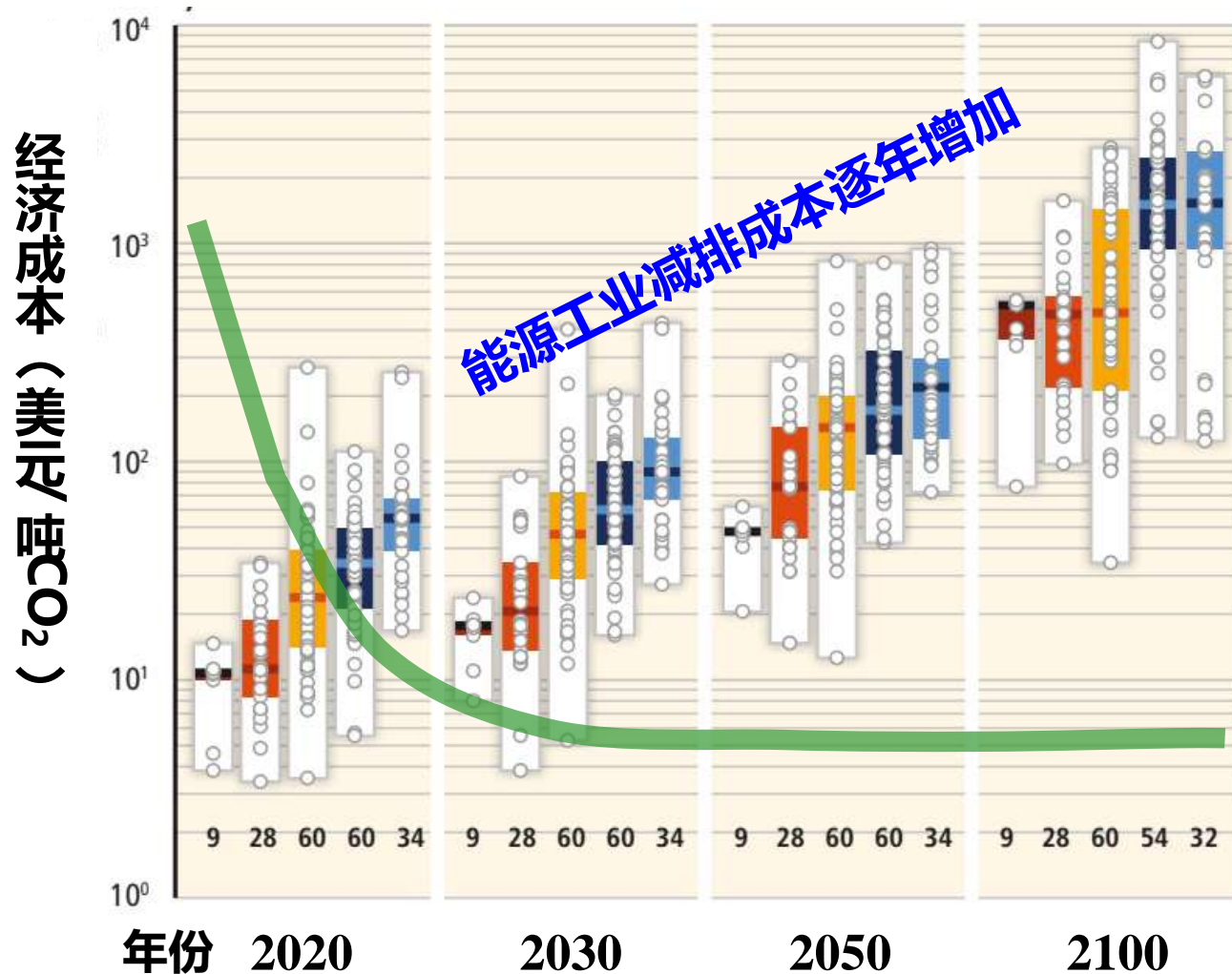
生态管理和工程(基于气候解决方案)

能够使得2030年全球陆地生态系统碳

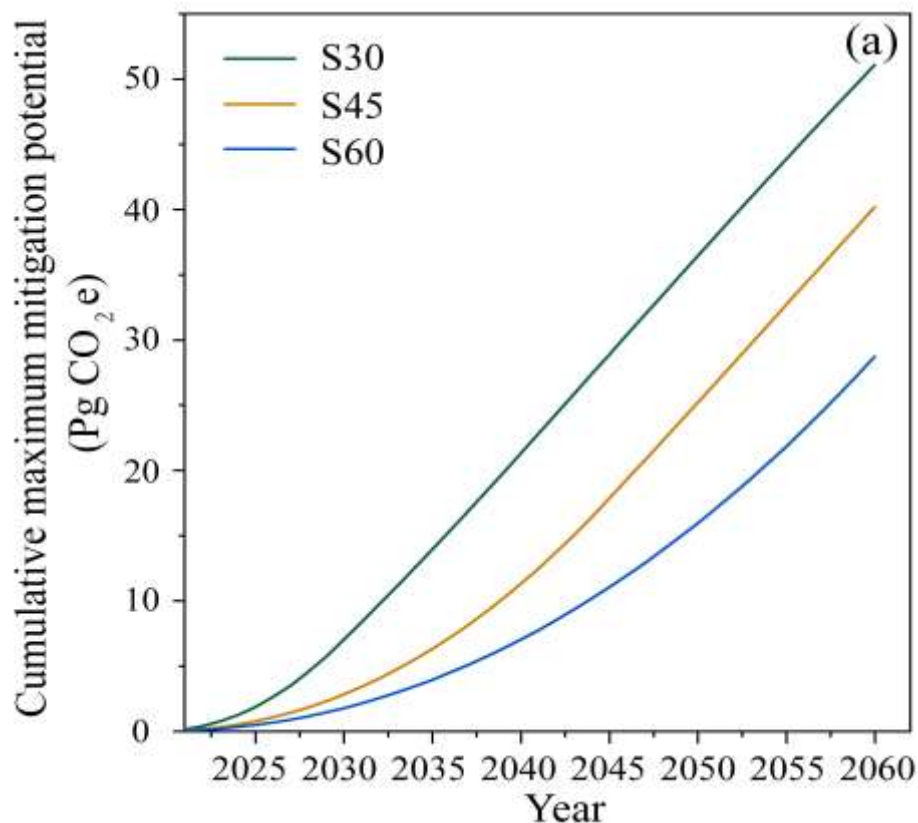
汇增加1.9倍! 照此计算, 全球生态系

统碳汇可以抵消碳排放的接近80%

# 增汇和减排成本比较是决定碳中和路径的关键

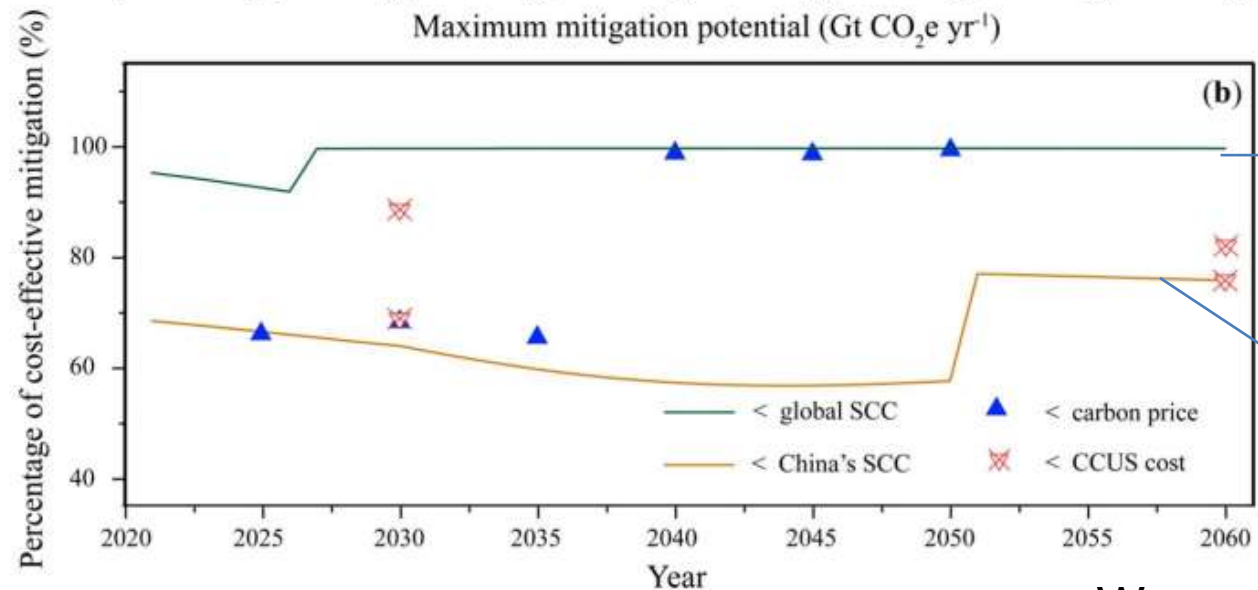
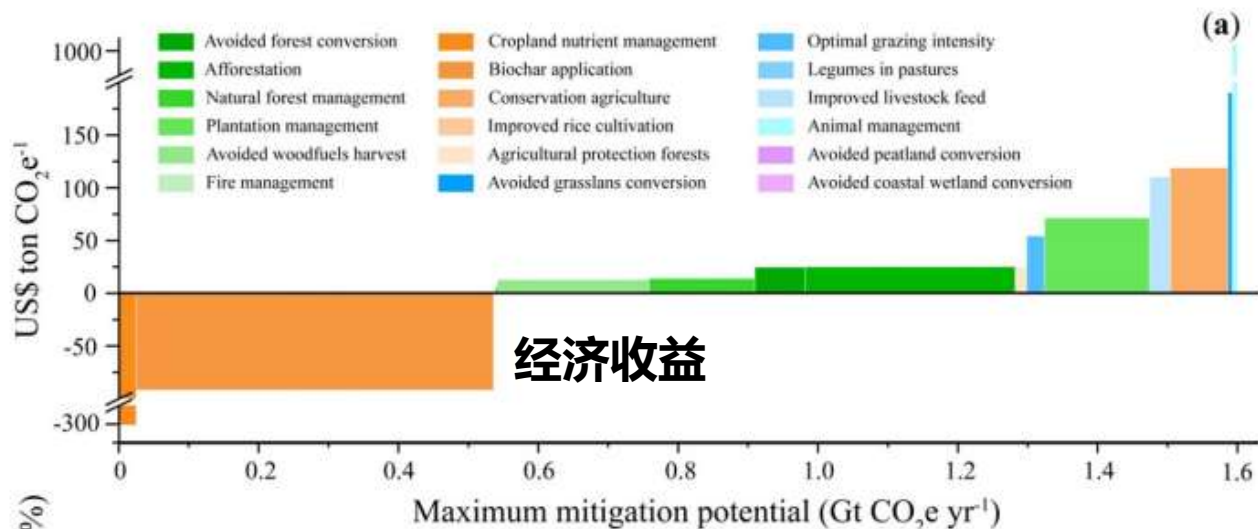


# 基于气候解决方案显著加强中国陆地碳汇



- S30方案：在2030年实施全部的基于自然气候解决方案
- 基于自然气候解决方案每年增加陆地碳汇13亿吨，是目前中国陆地碳汇的1.36倍

# 基于气候解决方案的经济成本



碳排放全球社会负担  
(US\$ 417/ton CO<sub>2</sub>)

碳排放中国社会负担  
(US\$ 24/ton CO<sub>2</sub>)

# 中国陆地生态系统碳汇强度的不确定性

中国陆地碳汇:  $0.177-1.11 \text{ Pg C yr}^{-1}$

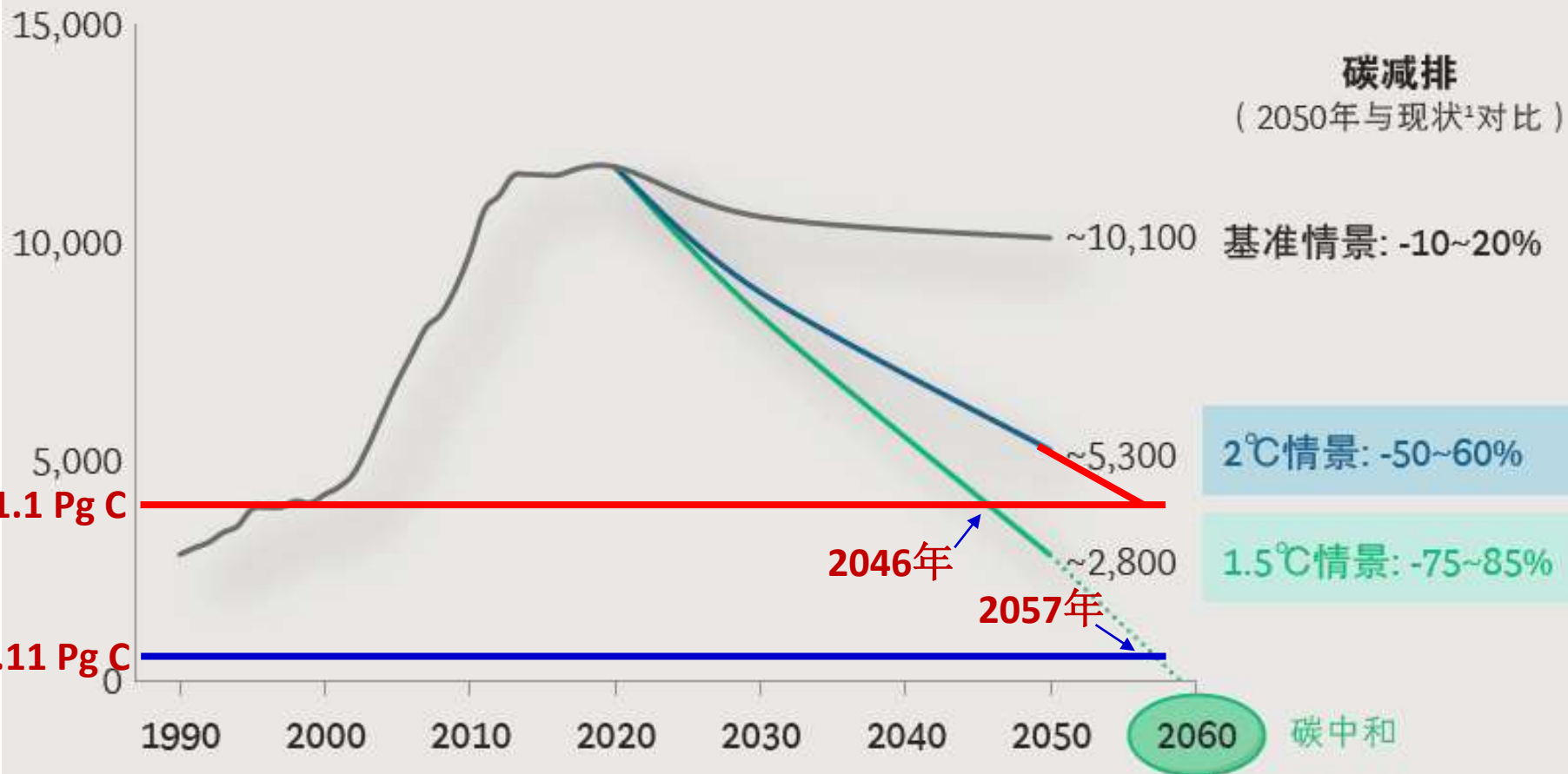
Table 1 | Carbon dioxide fluxes over China and East Asia

This study ( $\text{Pg C yr}^{-1}$ )			Previous studies ( $\text{Pg C yr}^{-1}$ )			
Year	SR-1	SR-2	Method	Period	Carbon balance	Reference
2010	$-0.60 \pm 0.51$	$-0.99 \pm 0.38$	Inventory-satellite-based or process-based model estimation	1961-2005	$-0.179^a$	16
2011	$-0.74 \pm 0.53$	$-1.32 \pm 0.36$		1980-1999	$-0.177 \pm 0.073^b$	15
2012	$-0.74 \pm 0.53$	$-1.25 \pm 0.39$		1990-2009	$-0.224 \pm 0.141^{b,c}$	14
2013	$-0.61 \pm 0.55$	$-0.87 \pm 0.45$		2001-2010	$-0.966^b$	18
2014	$-0.68 \pm 0.49$	$-1.08 \pm 0.39$		2006-2009	$-0.33^b$	4
2015	$-0.52 \pm 0.54$	$-1.03 \pm 0.34$		Atmospheric inversion	1996-2005	$-0.35 \pm 0.33^a$
2016	$-0.77 \pm 0.47$	$-1.25 \pm 0.31$	1990-2009		$-0.270 \pm 0.507^{b,c}$	14
			2001-2010		$-0.33^a$	17
			2008-2012		$-0.46 (-1.18 \text{ to } -0.01)^{a,c,d}$	3
			2006-2009		$-0.45^a$	4
<b>2010-2016 mean</b>	$-0.66 \pm 0.52$	$-1.11 \pm 0.38$				

引自: Wang et al., 2020, Nature

## 中国温室气体排放量

百万吨二氧化碳当量

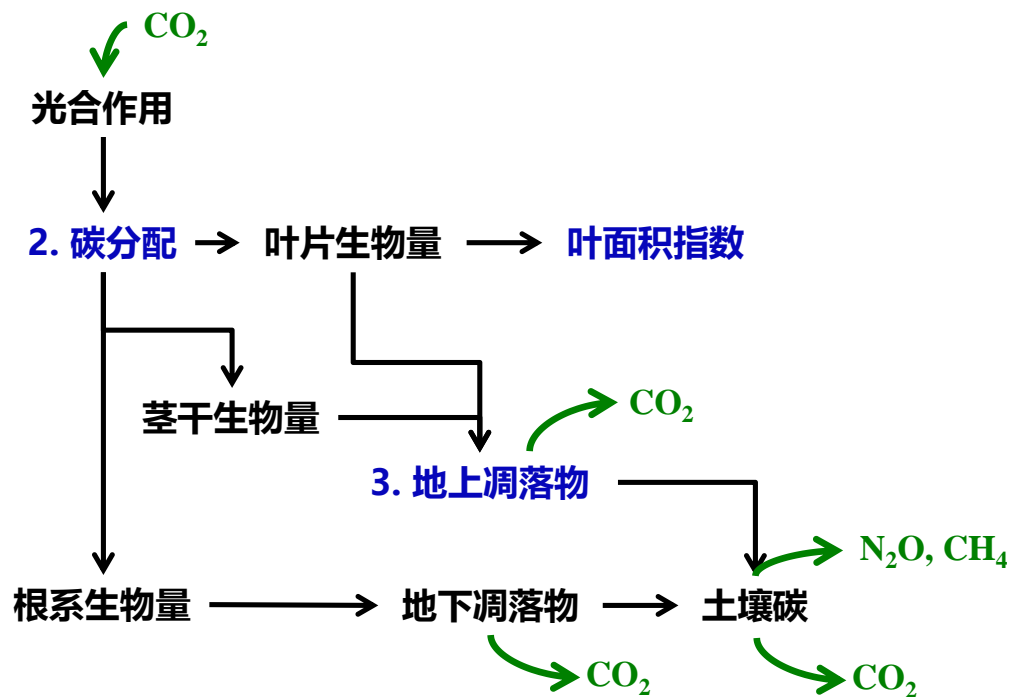


# 发展和改进IBIS(Integrated Biosphere Simulator)模型

## 1. 植物返青

返青前

返青后



## 1. 植物返青物候模型

Zhang & Yuan..., 2014, J Geophys Res.

Zhang & Yuan..., 2018, Global Change Biol.

## 2. 碳分配

Xia & Yuan..., 2015, Tellus

Xia & Yuan..., 2019, J Geophys Res.

## 3. 地上凋落物

Zhang & Yuan..., 2014, Ecol Complex

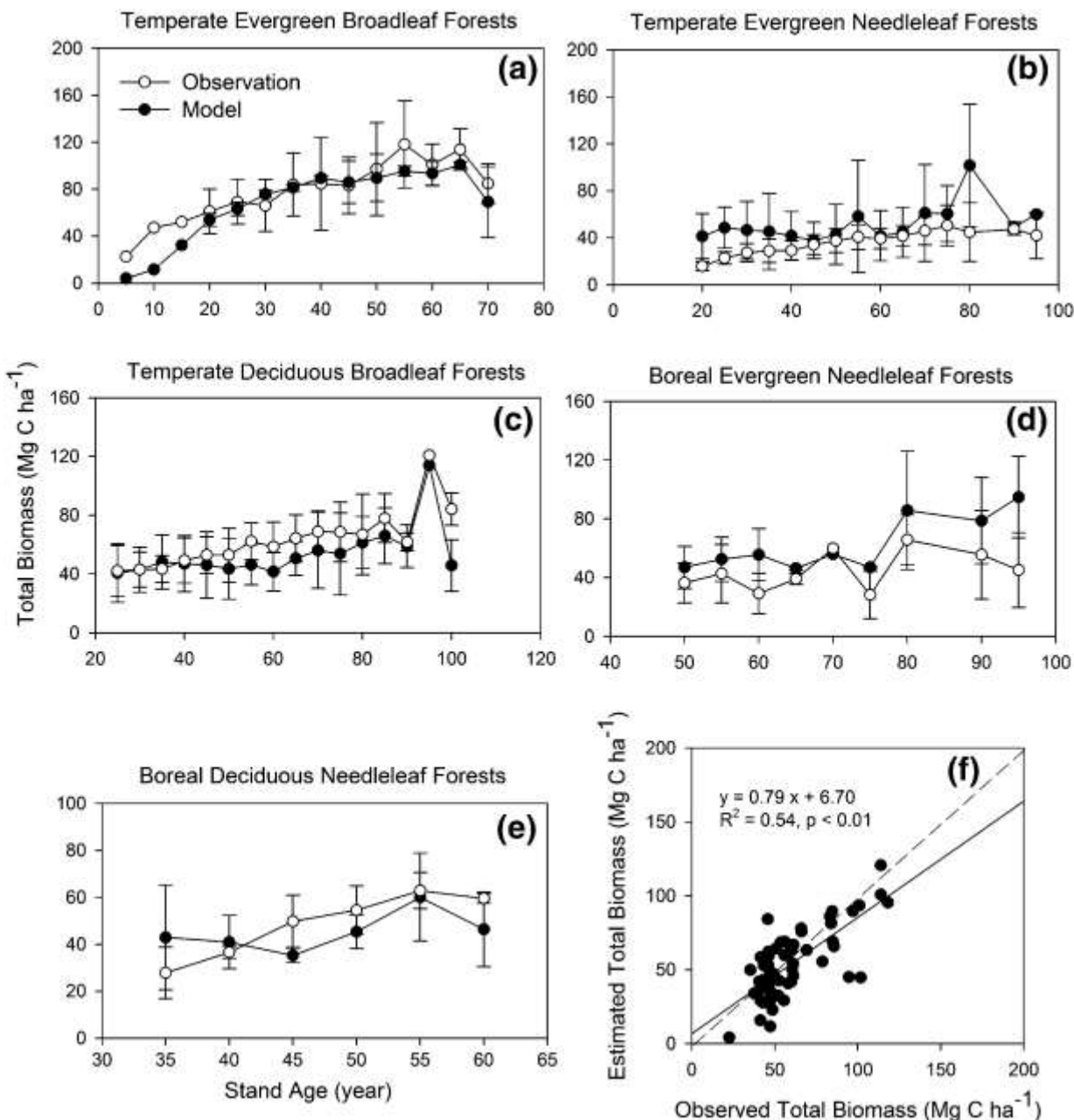
## 4. 动态根系

Lu & Yuan..., 2019, JAMES

## 5. CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O排放

Song & Yuan..., 2019, JAMES; Ma et al., 2021, JAMES

# 第 19 届中美碳联盟 (USCCC) 年会



- 中国森林蓄积量的观测数据（834个站点；罗天祥，1996）
- 模型能够很好反映树木生物量随林龄的变化及空间变化



# 模型验证

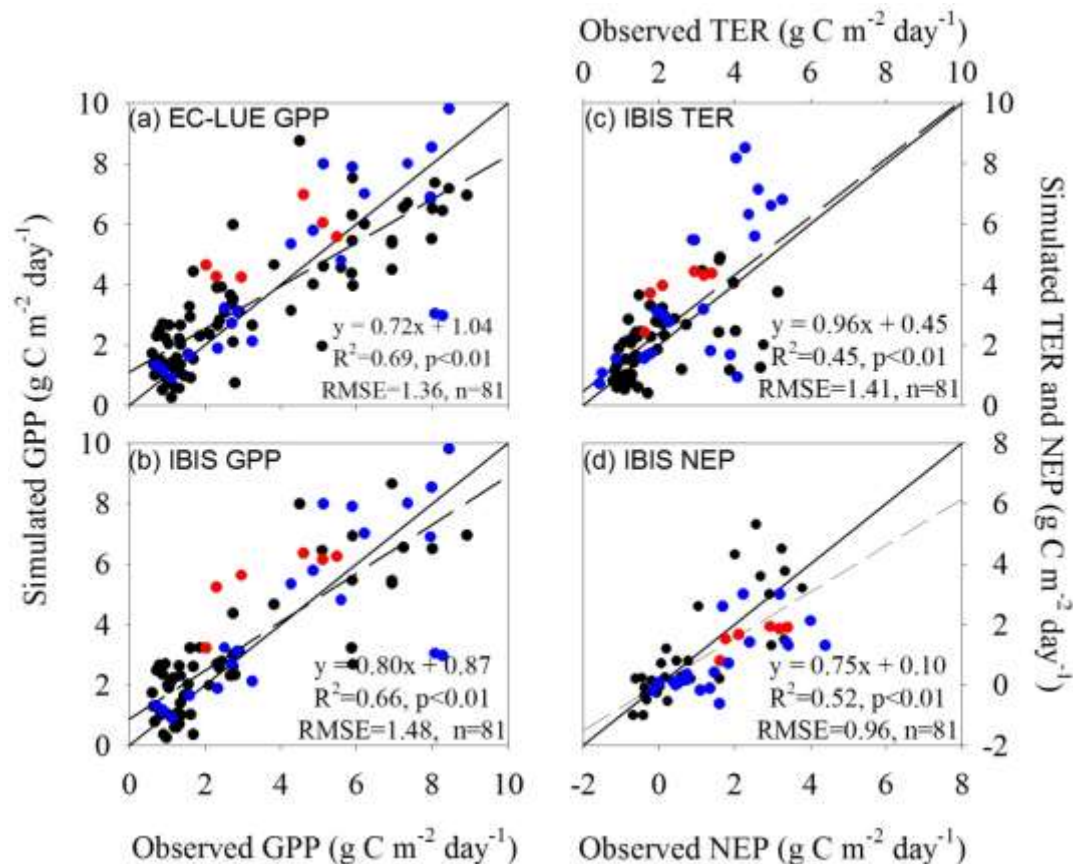
## ● IBIS模型(机理模型)

□ VPD、土壤湿度限制植物生长

制植物生长

## ● EC-LUE模型(遥感模型)

□ VPD限制植物生长



## IBIS模型参加“全球碳计划”

- **全球碳计划 (Global Carbon Project) 采用多个陆地生态系统碳循环, 从2011年至今每年更新模拟全球陆地碳收支动态, 直接服务于IPCC评估报告**

Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, 2020  
<https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>  
 © Author(s) 2020. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.



Open Access  
 Earth System  
 Science  
 Data

### Global Carbon Budget 2020

Pierre Friedlingstein<sup>1,2</sup>, Michael O'Sullivan<sup>2</sup>, Matthew W. Jones<sup>3</sup>, Robbie M. Andrew<sup>4</sup>, Judith Hauck<sup>5</sup>, Are Olsen<sup>6,7</sup>, Glen P. Peters<sup>4</sup>, Wouter Peters<sup>8,9</sup>, Julia Pongratz<sup>10,11</sup>, Stephen Sitch<sup>12</sup>, Corinne Le Quéré<sup>3</sup>, Josep G. Canadell<sup>13</sup>, Philippe Ciais<sup>14</sup>, Robert B. Jackson<sup>15</sup>, Simone Alin<sup>16</sup>, Luiz E. O. C. Aragão<sup>17,12</sup>, Almut Arneth<sup>18</sup>, Vivek Arora<sup>19</sup>, Nicholas R. Bates<sup>20,21</sup>, Meike Becker<sup>6,7</sup>, Alice Benoit-Cattin<sup>22</sup>, Henry C. Bittig<sup>23</sup>, Laurent Bopp<sup>24</sup>, Selma Bultan<sup>10</sup>, Naveen Chandra<sup>25,26</sup>, Frédéric Chevallier<sup>14</sup>, Louise P. Chini<sup>27</sup>, Wiley Evans<sup>28</sup>, Liesbeth Florentie<sup>8</sup>, Piers M. Forster<sup>29</sup>, Thomas Gasser<sup>30</sup>, Marion Gehlen<sup>14</sup>, Dennis Gillfillan<sup>31</sup>, Thanos Gkritzalis<sup>32</sup>, Luke Gregor<sup>33</sup>, Nicolas Gruber<sup>33</sup>, Ian Harris<sup>34</sup>, Kerstin Hartung<sup>10,a</sup>, Vanessa Haverd<sup>13</sup>, Richard A. Houghton<sup>35</sup>, Tatiana Ilyina<sup>11</sup>, Atul K. Jain<sup>36</sup>, Emilie Joetzjer<sup>37</sup>, Koji Kadono<sup>38</sup>, Etsushi Kato<sup>39</sup>, Vassilis Kitidis<sup>40</sup>, Jan Ivar Korsbakken<sup>4</sup>, Peter Landschützer<sup>11</sup>, Nathalie Lefevre<sup>41</sup>, Andrew Lenton<sup>42</sup>, Sebastian Liener<sup>43</sup>, Zhu Liu<sup>44</sup>, Danica Lombardozzi<sup>45</sup>, Gregg Marland<sup>31,46</sup>, Nicolas Metzl<sup>41</sup>, David R. Munro<sup>47,48</sup>, Julia E. M. S. Nabel<sup>11</sup>, Shin-Ichiro Nakaoka<sup>26</sup>, Yosuke Niwa<sup>26,49</sup>, Kevin O'Brien<sup>50,16</sup>, Tsuneo Ono<sup>51</sup>, Paul I. Palmer<sup>52,53</sup>, Denis Pierrot<sup>54</sup>, Benjamin Poulter<sup>55</sup>, Laure Resplandy<sup>56</sup>, Eddy Robertson<sup>57</sup>, Christian Rödenbeck<sup>58</sup>, Jörg Schwinger<sup>59,7</sup>, Roland Séférian<sup>37</sup>, Ingunn Skjelvan<sup>59,7</sup>, Adam J. P. Smith<sup>3</sup>, Adrienne J. Sutton<sup>16</sup>, Toste Tanhua<sup>60</sup>, Pieter P. Tans<sup>61</sup>, Hanqin Tian<sup>62</sup>, Bronte Tilbrook<sup>42,63</sup>, Guido van der Werf<sup>64</sup>, Nicolas Vuichard<sup>14</sup>, Anthony P. Walker<sup>65</sup>, Rik Wanninkhof<sup>64</sup>, Andrew J. Watson<sup>12</sup>, David Willis<sup>66</sup>, Andrew J. Wiltshire<sup>57</sup>, Wenping Yuan<sup>67</sup>, Xu Yue<sup>68</sup>, and Sönke Zaehle<sup>58</sup>

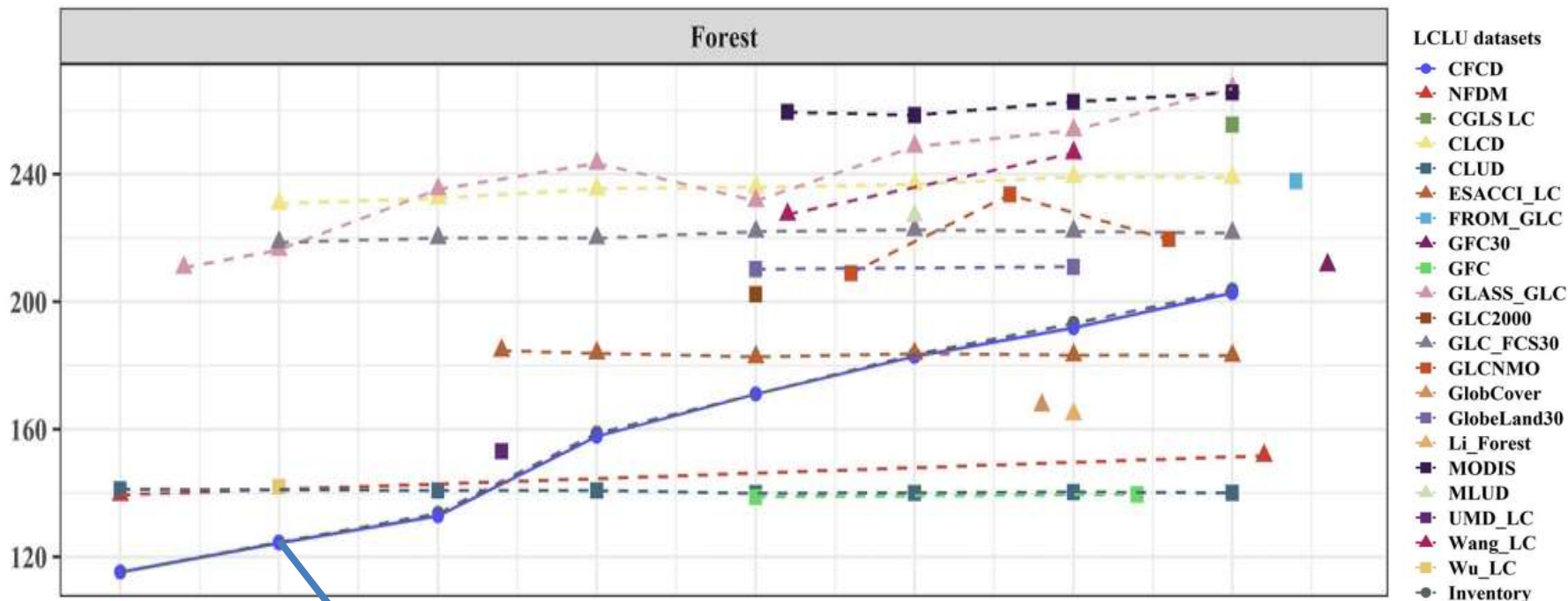
<sup>67</sup>School of Atmospheric Sciences, Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Zhuhai Key Laboratory of Dynamics Urban Climate and Ecology, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 510245, China

Model/Data name	Reference	Change from Global Carbon Budget 2019 (Friedlingstein et al., 2019)
<b>Bookkeeping models for land-use change emissions</b>		
BLUE	Hansis et al. (2015)	No change
HandN2017	Houghton and Nassikas (2017)	No change
OSCAR	Gässer et al. (2020) <sup>a</sup>	New this year
<b>Dynamic global vegetation models</b>		
CABLE-POP	Haverd et al. (2018)	No change
CLASSIC	Melton et al. (2020)	Formerly called CLASS-CTEM; evaporation from top soil layer is reduced which increases soil moisture and yields better GPP especially in dry and semi-arid regions
CLM5.0	Lawrence et al. (2019)	No change
DLEM	Tian et al. (2015) <sup>b</sup>	Updated algorithms for land-use change processes.
IBIS	Yuan et al. (2014)	<b>New this year</b>
ISAM	Meiyappan et al. (2015)	No change
ISBA-CTRIP	Delire et al. (2020) <sup>c</sup>	Updated spin-up protocol + model name updated (SURFEXv8 in GCB2017) + inclusion of crop harvesting module
JSBACH	Mauritsen et al. (2019)	No change
RULES-ES	Sellar et al. (2019) <sup>d</sup>	No change
LPJ-GUESS	Smith et al. (2014) <sup>e</sup>	Bug fixes and output code restructuring.
LPJ	Pouher et al. (2011) <sup>f</sup>	No change
LPJ-Ber	Liener and Joos (2018)	Changed compiler to Intel Fortran from PGI.
OCN	Zaehle and Friedl (2010) <sup>g</sup>	No change (uses r294).
ORCHIDEEv3	Vuichard et al. (2019) <sup>h</sup>	Inclusion of N cycle and CN interactions in ORCHIDEE2.2 (i.e. CMIP6) version
SDGVM	Walker et al. (2017) <sup>i</sup>	No changes from version used in Friedlingstein et al. (2019).
VISIT	Kato et al. (2013) <sup>j</sup>	Change to distinguish managed pasture/rangeland information when conversion from natural vegetation to pasture occurs. Add upper limit of deforested biomass from secondary land using the mean biomass density data of LUH2.
YIBs	Yue and Unger (2015)	New this year

# 中国陆地碳源汇估算

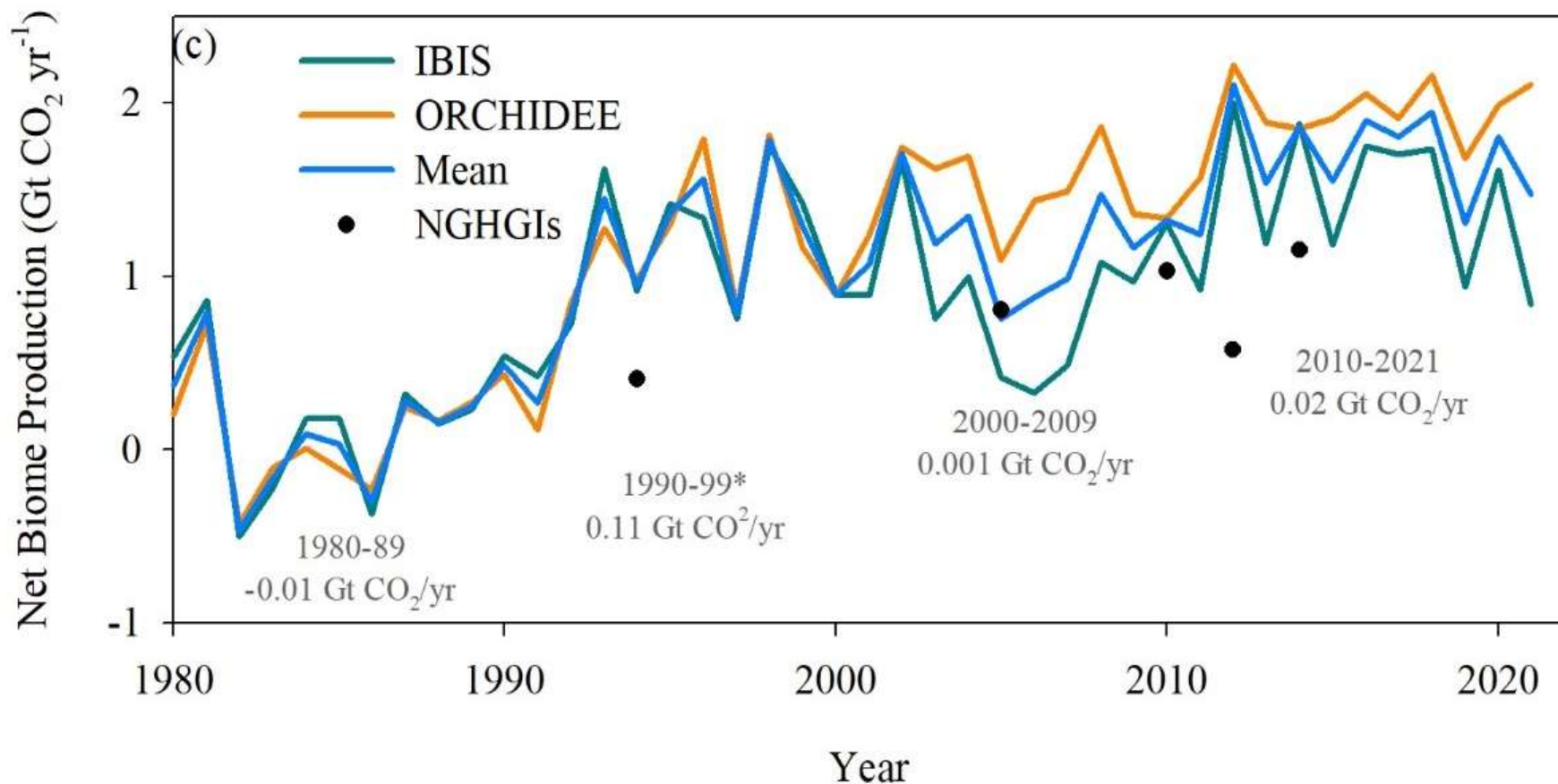
## 过去40年中国森林覆盖变化

森林覆盖面积百万平方公里



中国森林覆盖数据集 (CFCD) 和森林清查面积

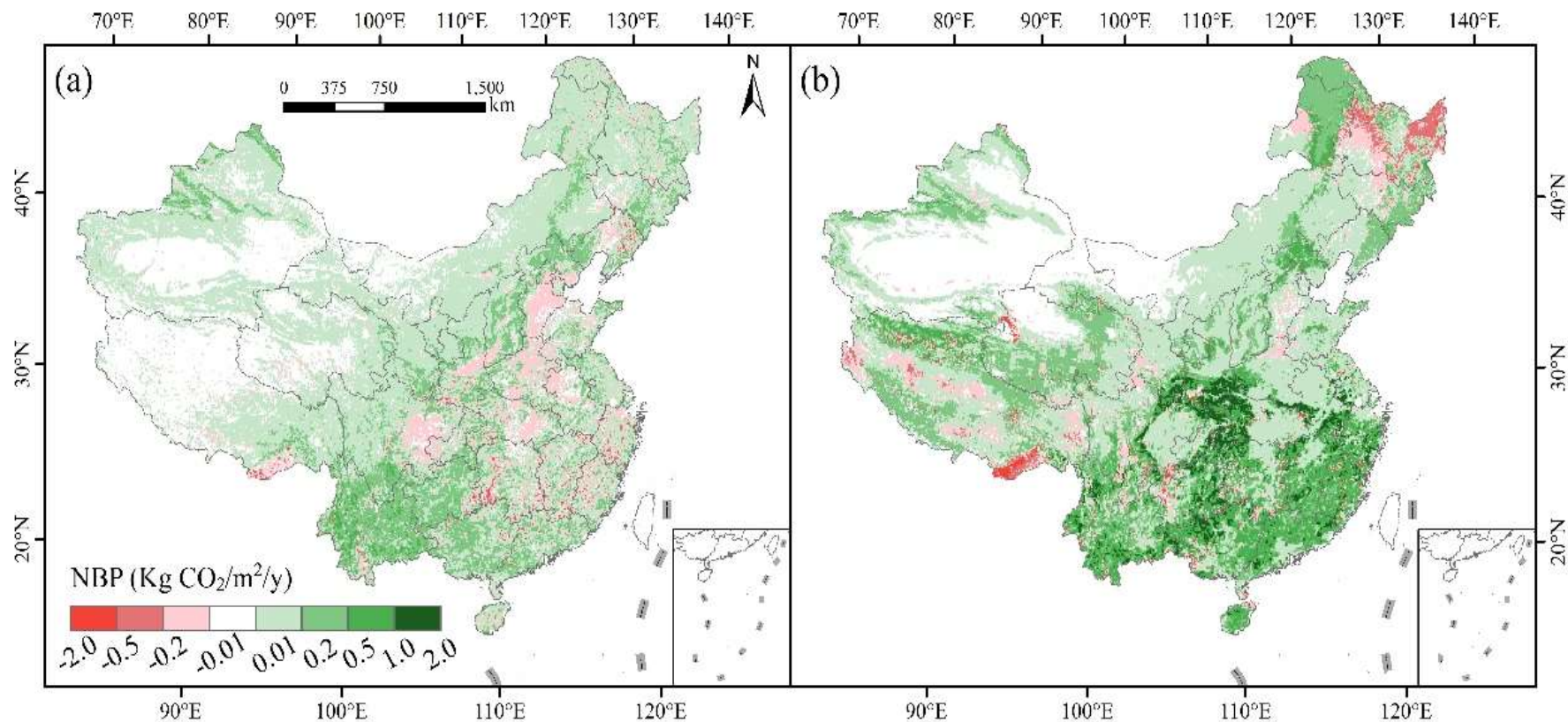
# 过去40年中国陆地碳汇变化趋势



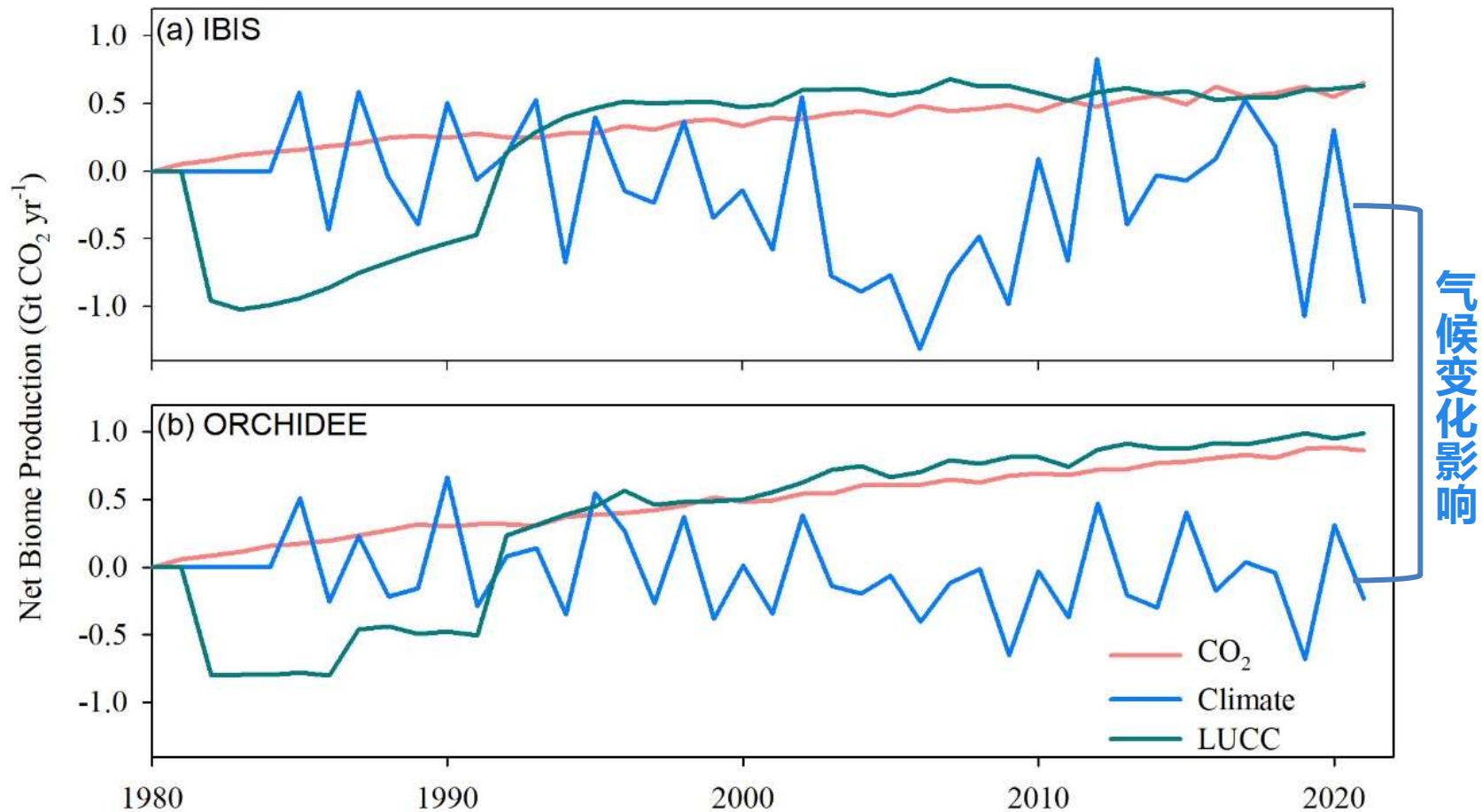
# 中国陆地碳汇空间格局

IBIS

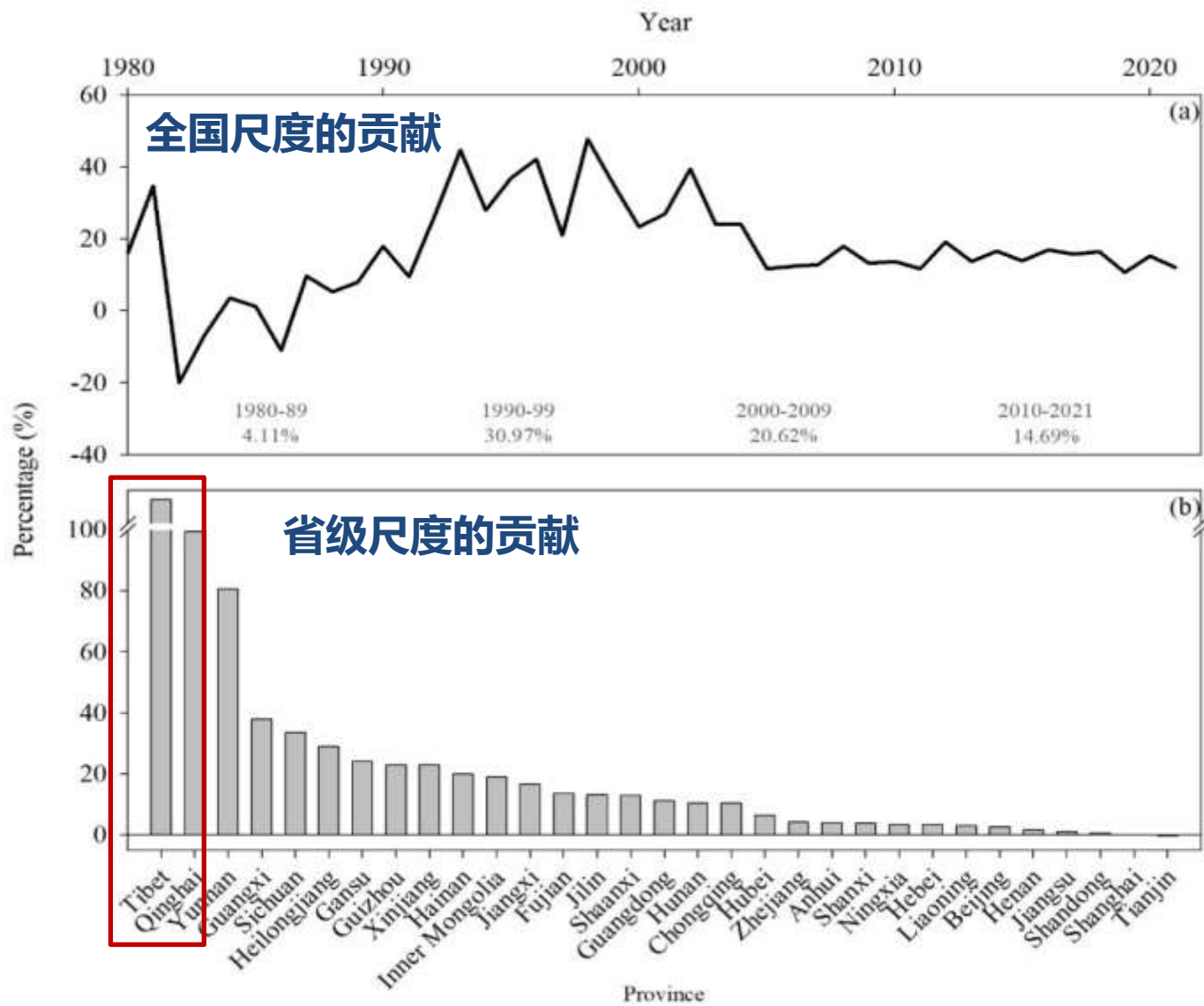
Orchidee



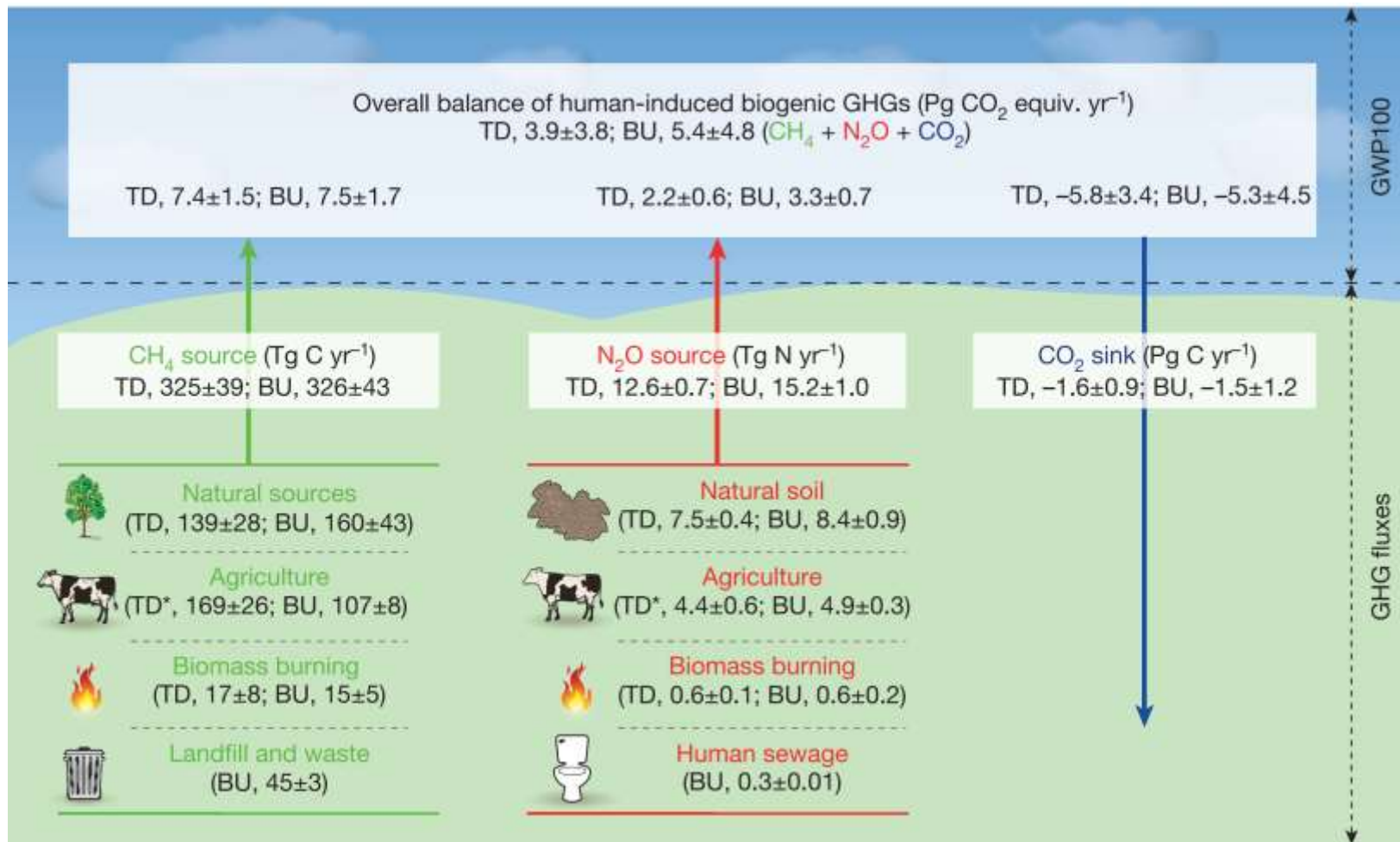
# 过去40年中国陆地碳汇变化原因



# 中国大陆碳汇对于能源工业排放的抵消作用

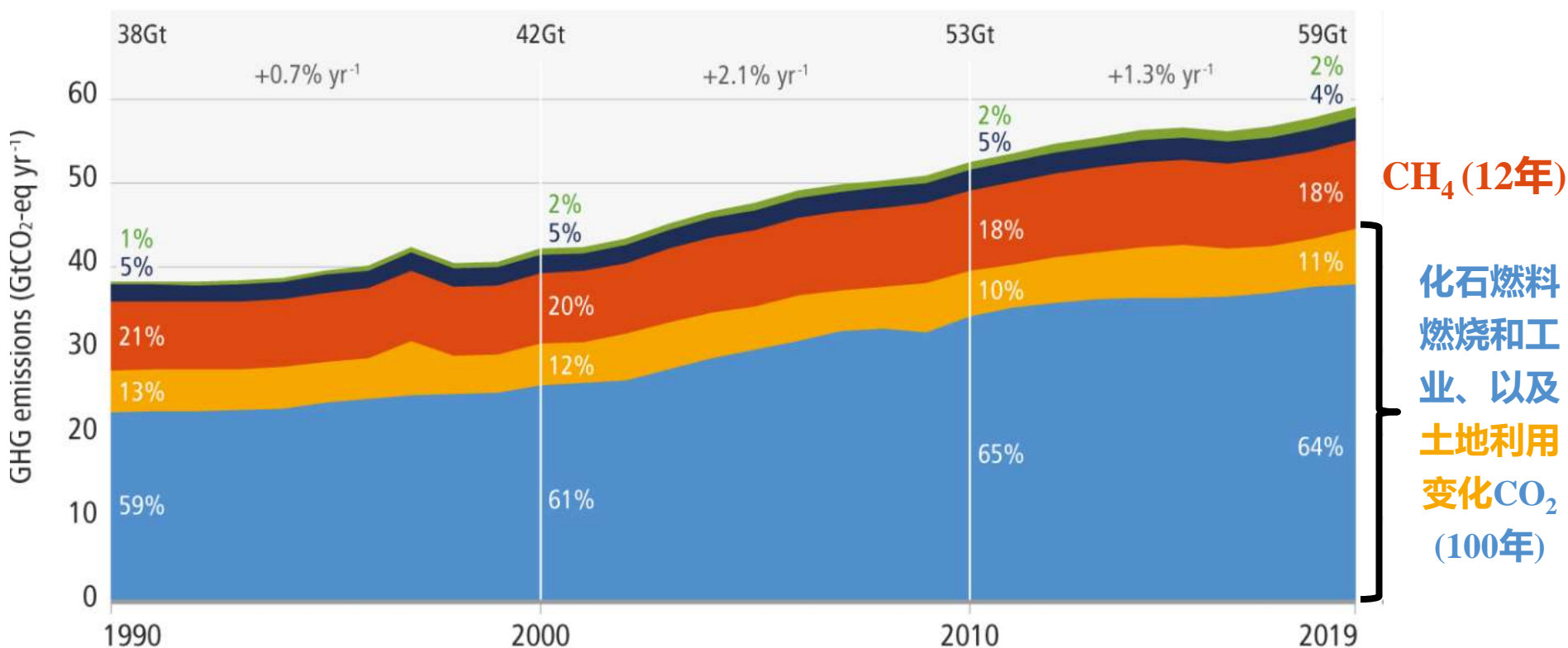


# “碳中和” 到 “净零排放”

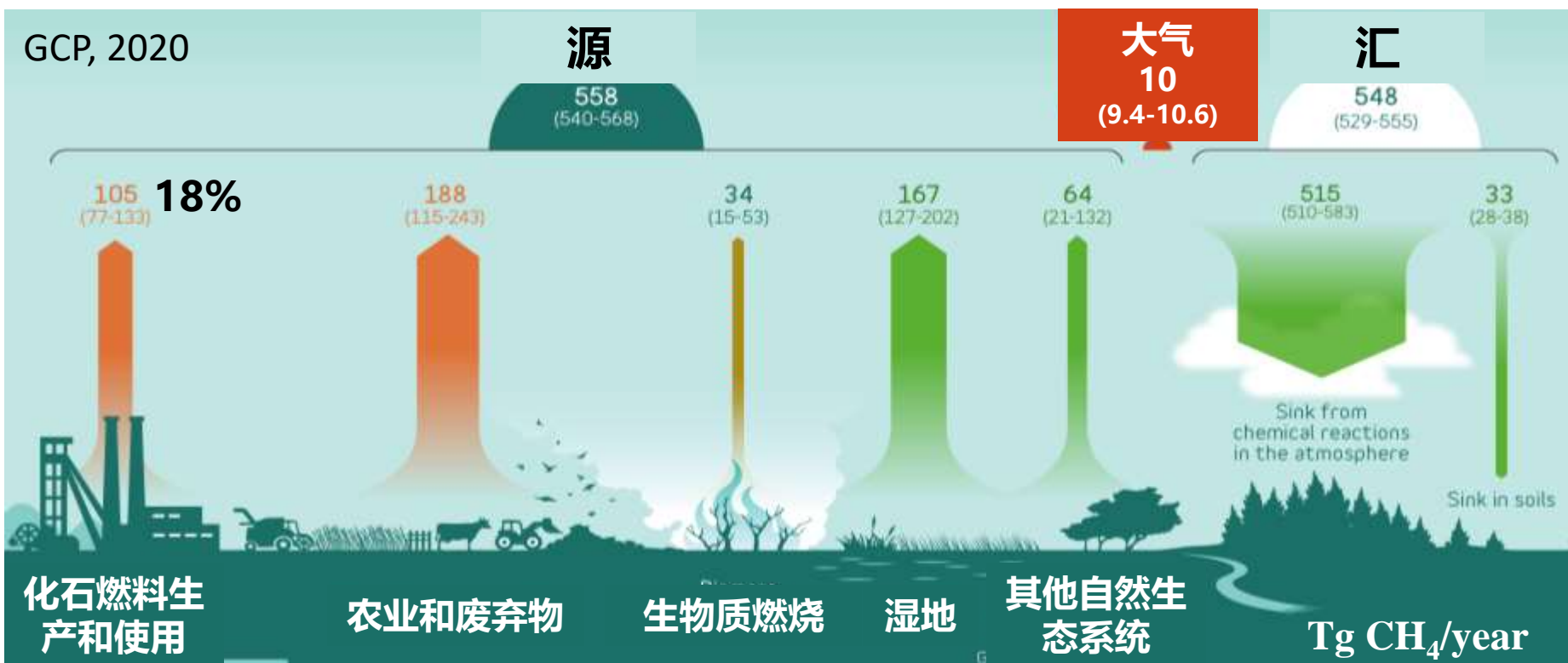




## 甲烷是重要的温室气体之一，也是减缓全球变化的关键



# 陆地生态系统在全球甲烷收支中扮演着重要角色

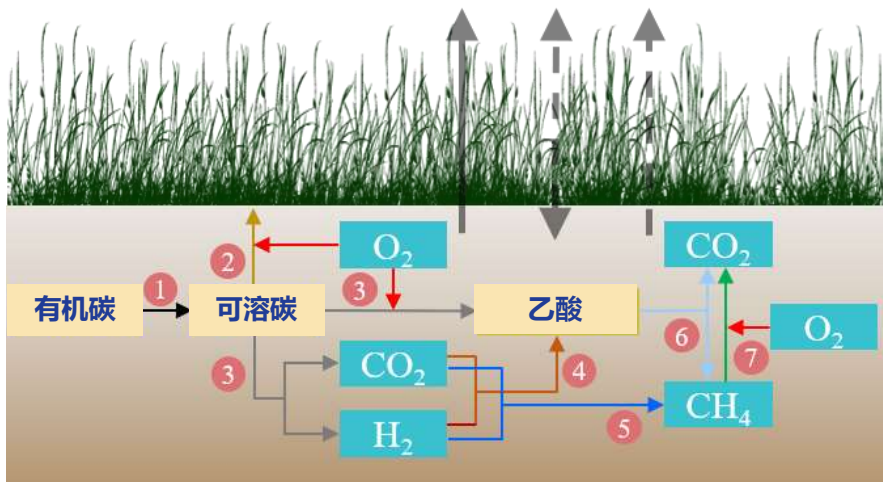


# 为什么还需要发展新的CH<sub>4</sub>模型?

## 湿地CH<sub>4</sub>排放过程

### IV. CH<sub>4</sub>排放过程

植物介导的传输    分子扩散    气泡传输



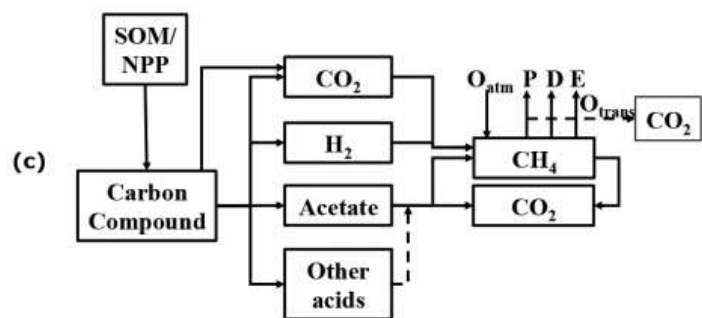
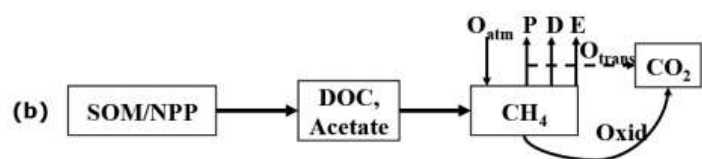
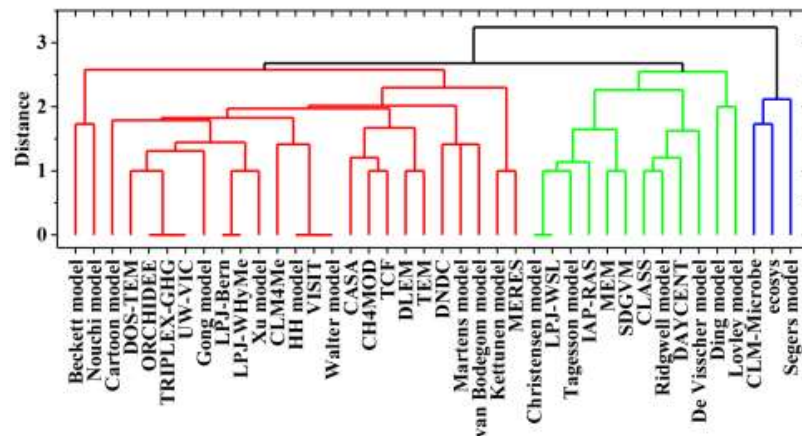
### I. 有机碳产生乙酸和H<sub>2</sub>

氢营养型的CH<sub>4</sub>产生

乙酸营养型的CH<sub>4</sub>产生

### II. 乙酸和H<sub>2</sub>产生CH<sub>4</sub>的过程

### III. CH<sub>4</sub>氧化消耗



## 新的CH<sub>4</sub>模型公式

### CH<sub>4</sub>产生和氧化

➤ 氢营养型的CH<sub>4</sub>产生

$$\begin{aligned} H_{2\text{prodCH}_4} &= V_{H_{2\text{prodCH}_4, \text{max}}} \times H_{2\text{methanogens}} \times \frac{[H_2]}{K_{H_{2\text{prodCH}_4}} + [H_2]} \\ &\times \frac{[CO_2]}{K_{CO_2\text{prodCH}_4} + [CO_2]} \times f_T \times f_{pH} \end{aligned}$$

➤ 乙酸营养型的CH<sub>4</sub>产生

$$\begin{aligned} \text{Acecons} &= V_{\text{Acecons, max}} \times \text{Acemethanogens} \times \frac{[\text{Ace}]}{K_{\text{AceprodCH}_4} + [\text{Ace}]} \times \\ &\times f_T \times f_{pH} \end{aligned}$$

$$\text{AceprodCH}_4 = K_{\text{CH}_4\text{prod}} \times (1 - \text{Grow}_{\text{Acemethanogens}}) \times \text{Acecons}$$

➤ CH<sub>4</sub>氧化

$$\begin{aligned} R_{\text{cons,CH}_4} &= V_{\text{CH}_4\text{oxid, max}} \times \text{Methanotrophs} \times \frac{[\text{CH}_4]}{K_{\text{CH}_4\text{oxidCH}_4} + [\text{CH}_4]} \\ &\times \frac{[O_2]}{K_{\text{CH}_4\text{oxidO}_2} + [O_2]} \times f_T \times f_{pH} \end{aligned}$$

## 新的CH<sub>4</sub>模型公式

### CH<sub>4</sub>传输

- 分子扩散

$$F_{\text{diff,CH}_4} = D_{\text{CH}_4} \frac{\partial C_{\text{CH}_4}}{\partial z}$$

- 植物介导的传输

$$Q_{\text{plant,CH}_4} = \frac{D_{\text{air,CH}_4}}{\tau} \times \varepsilon(z) \times \frac{C_{\text{CH}_4}(z, t) - C_{\text{eq,CH}_4}}{z}$$

$$\varepsilon(z) = a_{\text{mA}} \times \frac{f_{\text{root}}}{dz} \times \frac{\text{LAI}}{\text{SLA}}$$

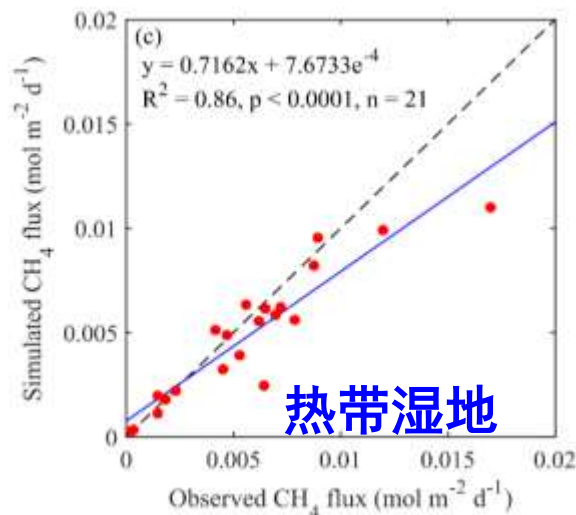
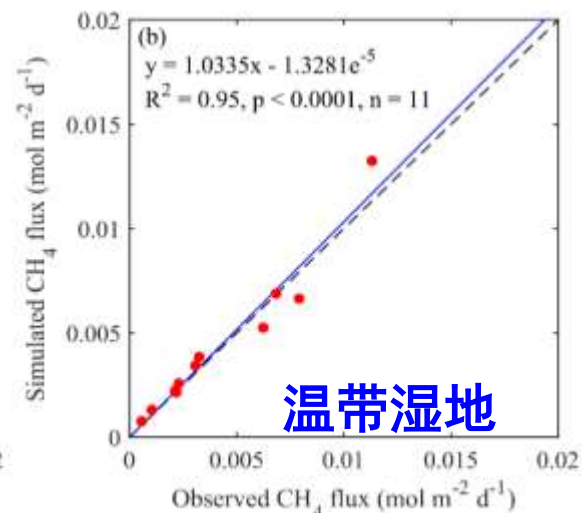
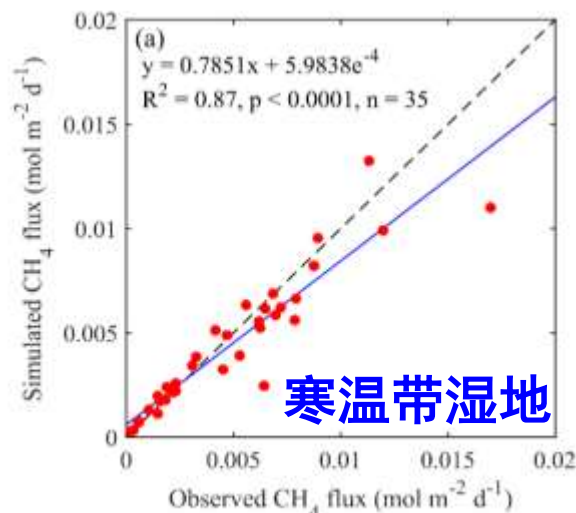
- 气泡传输

$$Q_{\text{ebull,CH}_4} = k \times \frac{\sigma \times f_{\text{ebull}}(z) \times \text{PP}_{\text{CH}_4}(z)}{RT}$$

$$f_{\text{ebull}}(z) = \frac{\Sigma_X \text{PP}_X(z) - (P_{\text{atm}} + P_{\text{hyd}})}{\Sigma_X \text{PP}_X(z)}$$

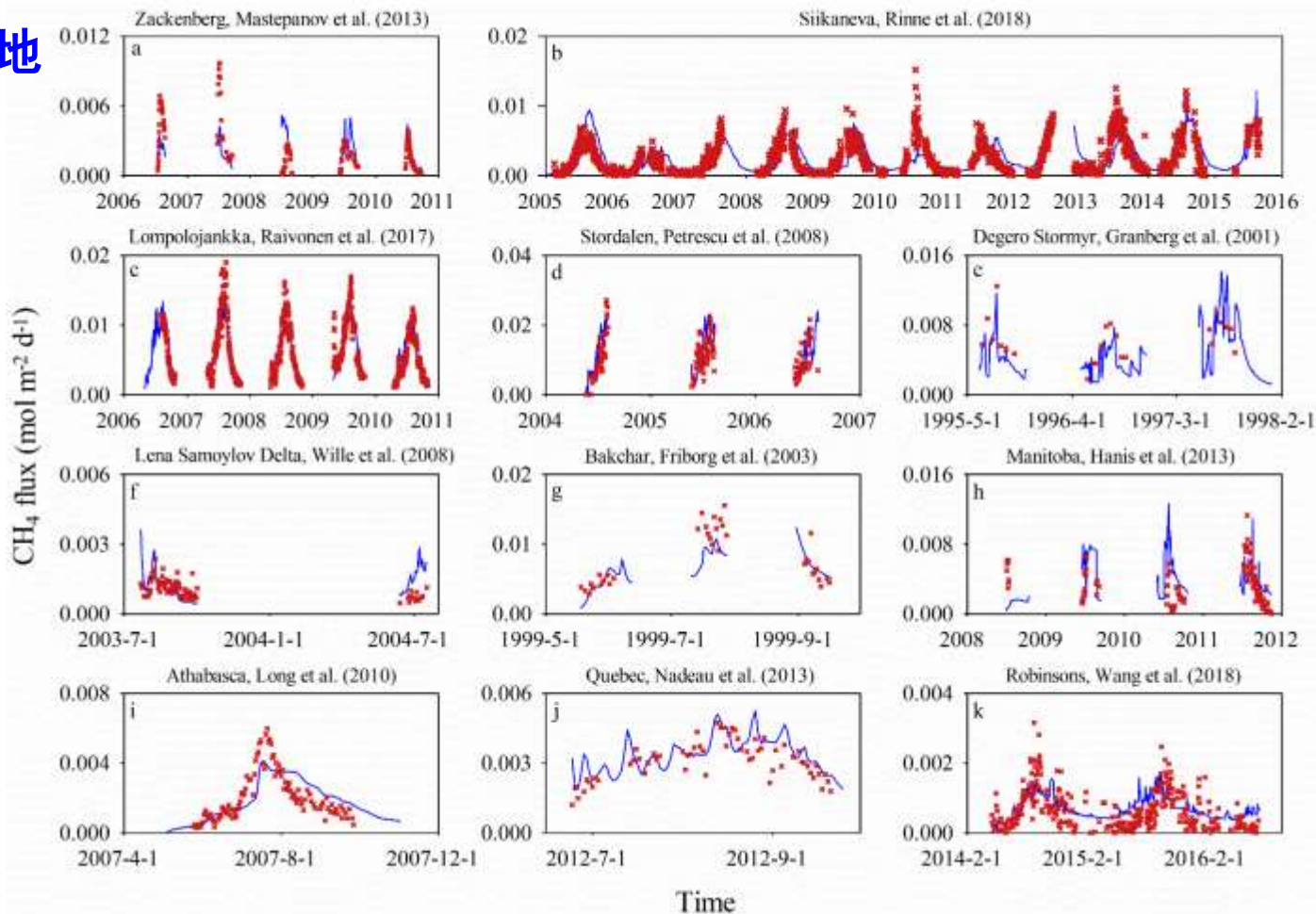
## 湿地CH<sub>4</sub>排放模拟的站点验证分析

观测数据：全球24个湿地站点的CH<sub>4</sub>通量观测数据，覆盖不同气候区域

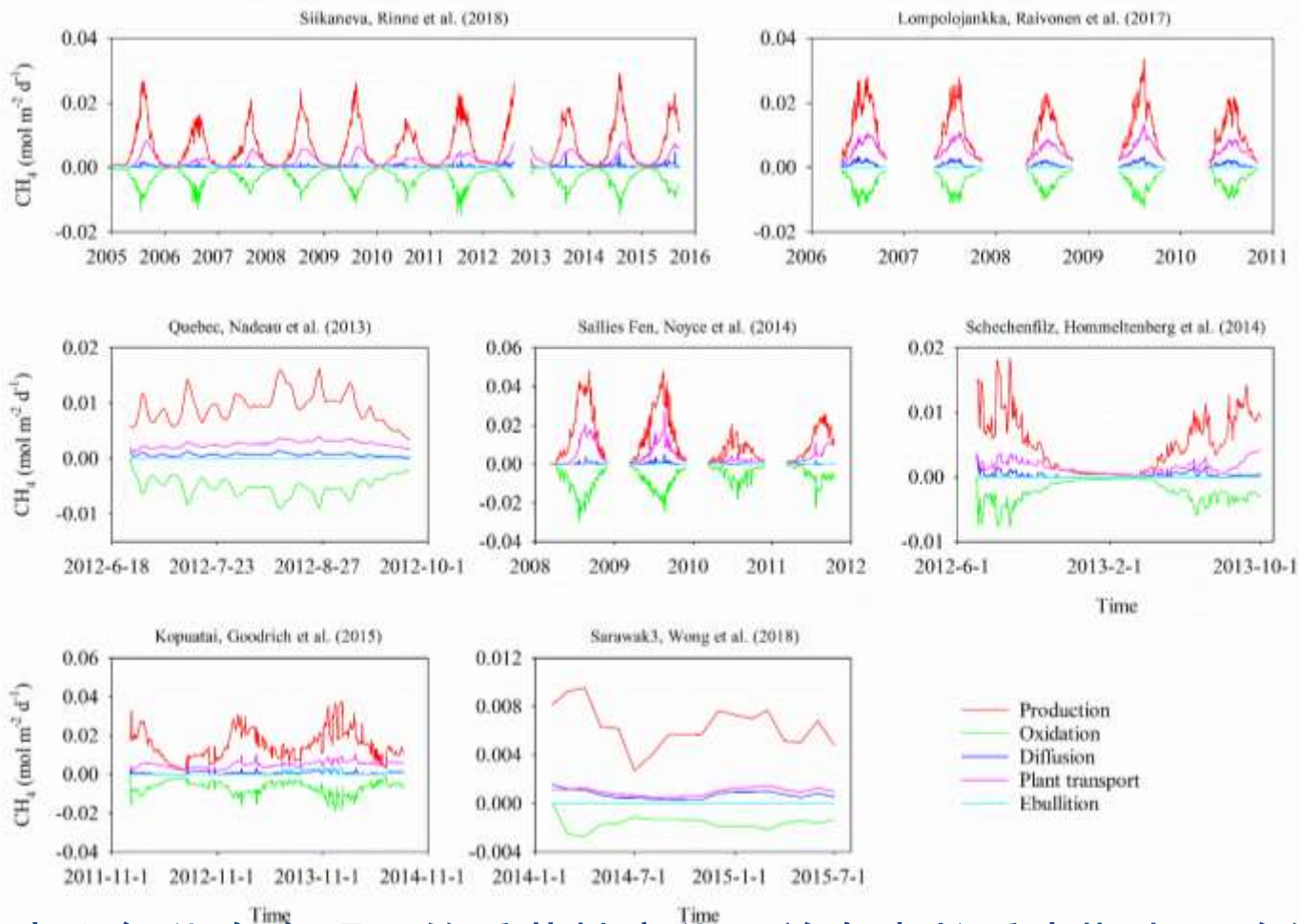


# 湿地CH<sub>4</sub>排放模拟的站点验证分析

寒温带湿地



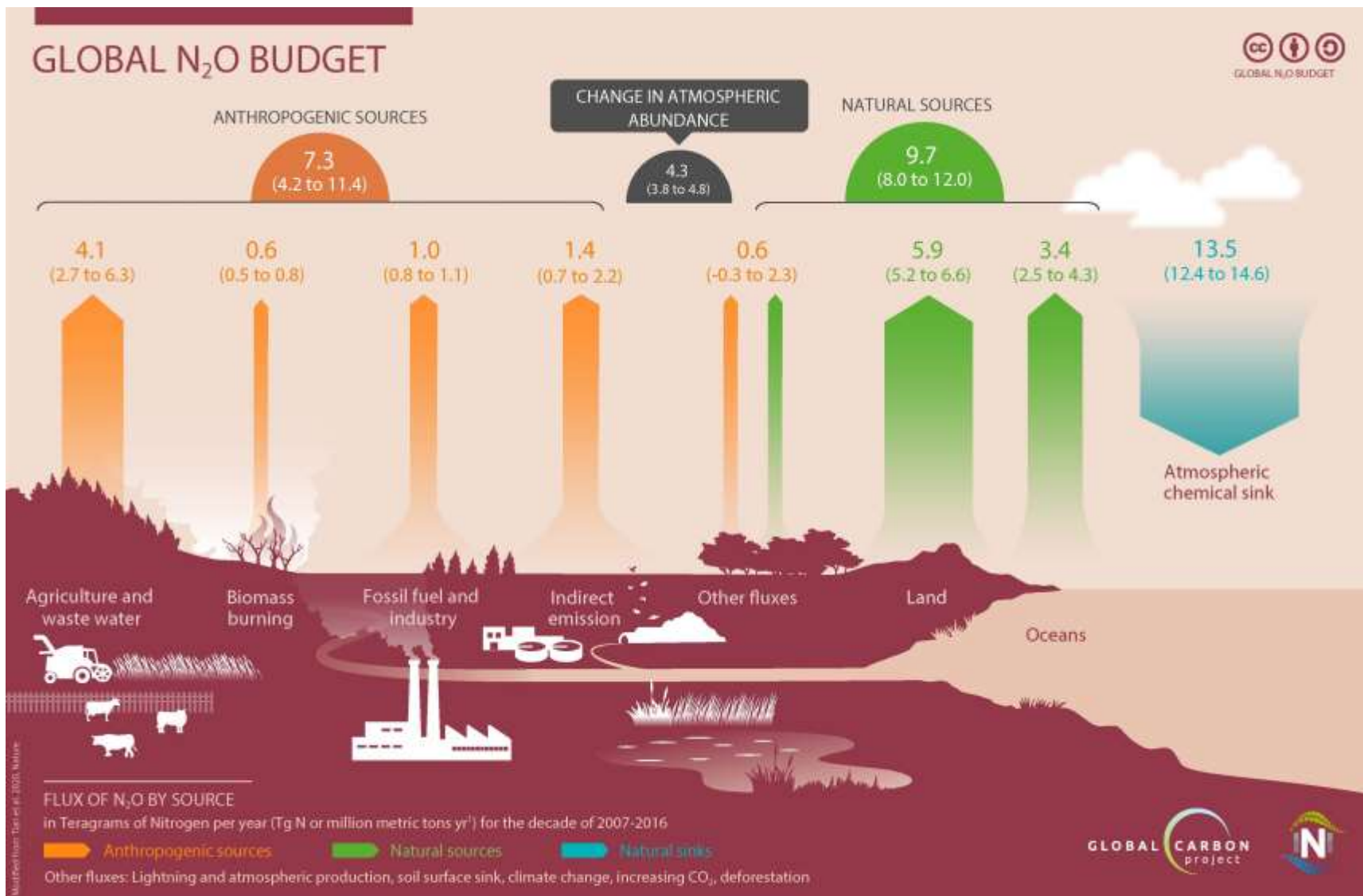
## 湿地CH<sub>4</sub>排放模拟的模型结构分析



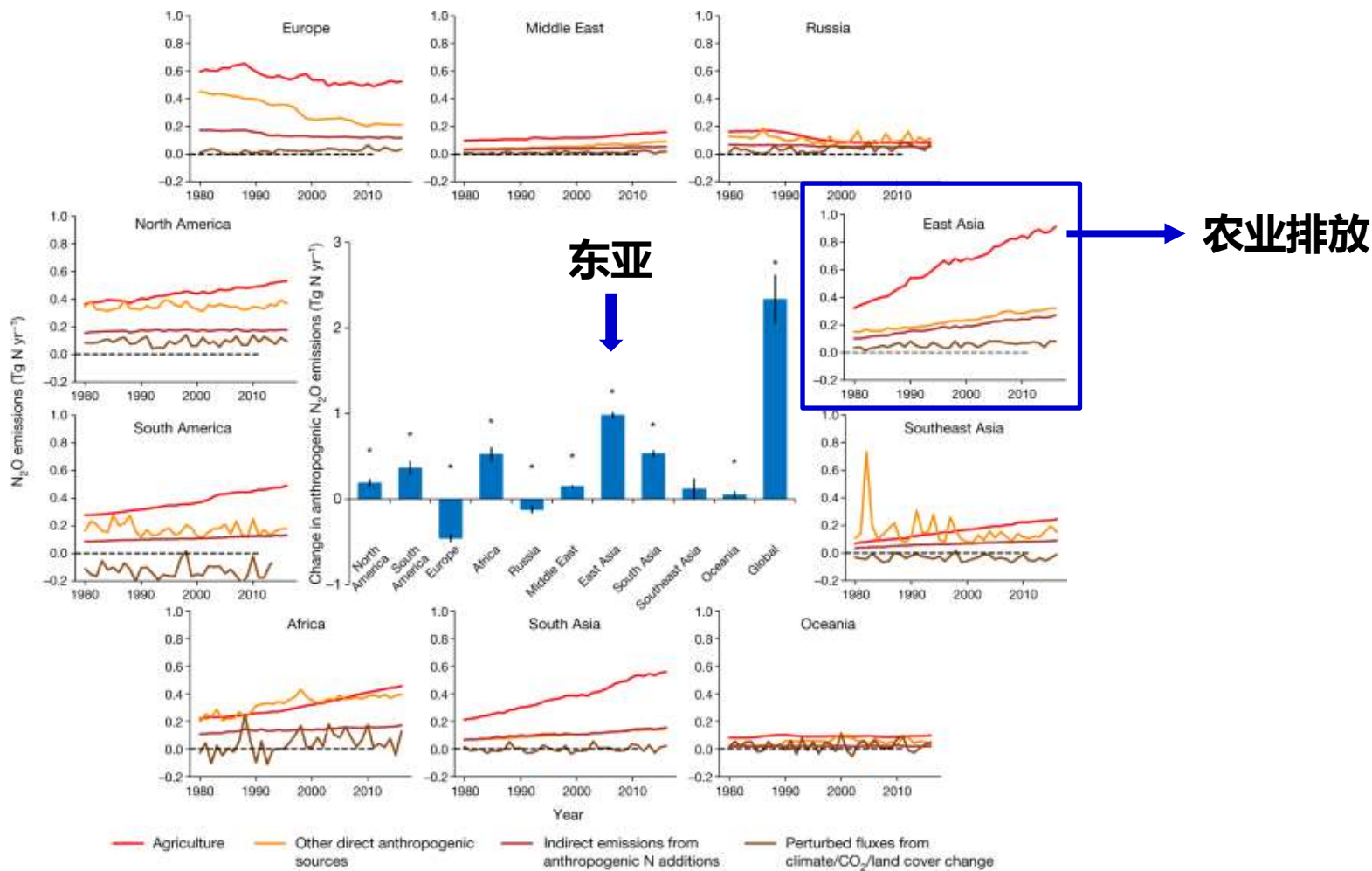
CH<sub>4</sub>产生和氧化存在明显的季节性变化，并在生长季中期出现峰值，植物介导的传输是最主要的CH<sub>4</sub>排放方式



# 生态系统是重要的N<sub>2</sub>O排放源

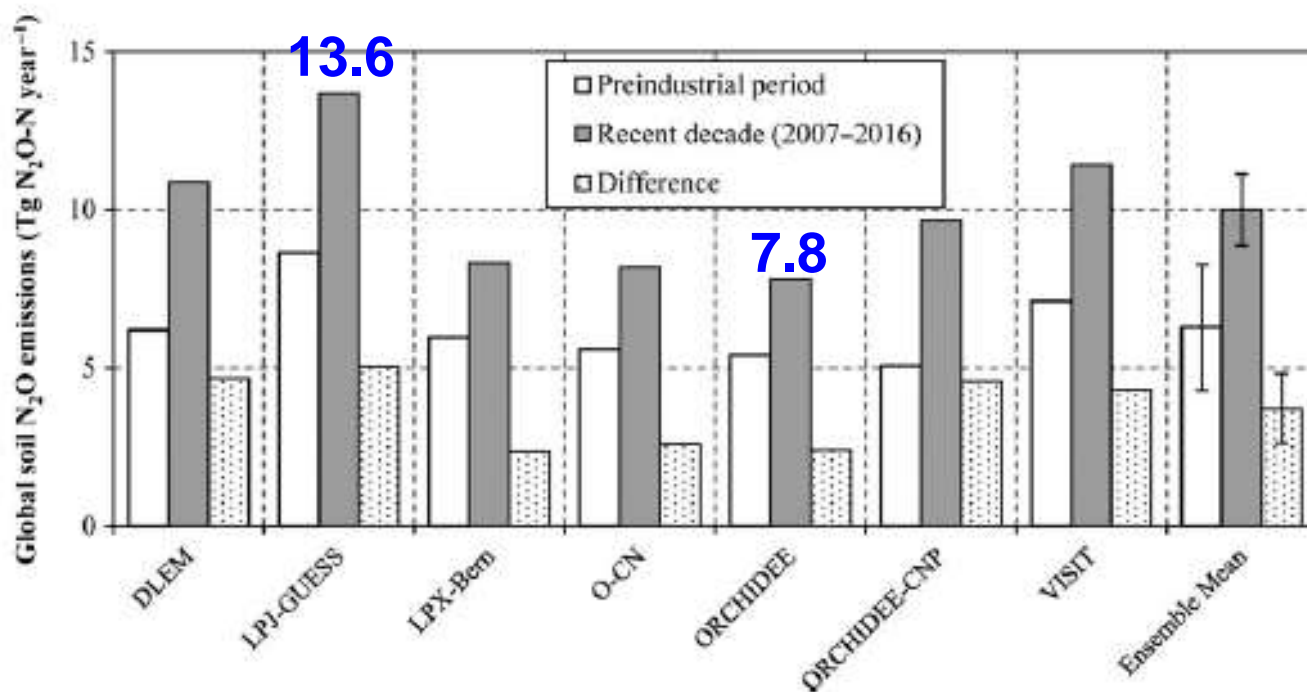


# 我国尤其需要重视研究N<sub>2</sub>O



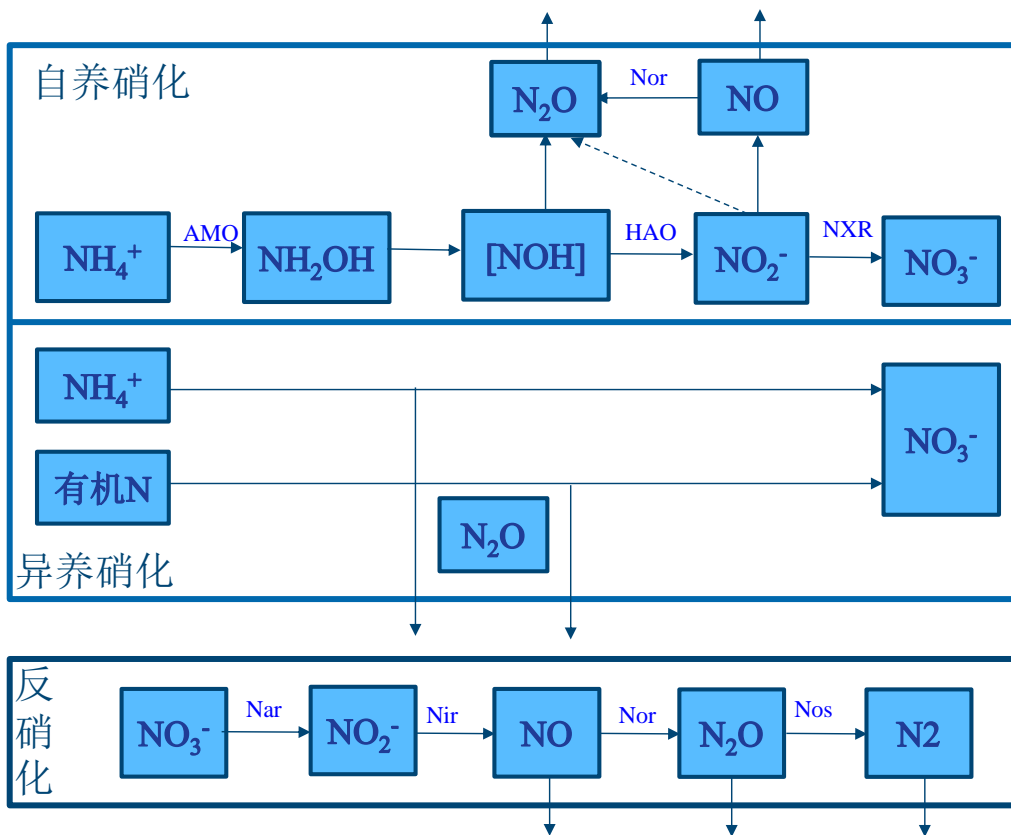
# 已有的N<sub>2</sub>O模型存在显著模拟差异

## 全球N<sub>2</sub>O排放模拟结果



# 为什么需要发展新的N<sub>2</sub>O模型?

## N<sub>2</sub>O产生和消耗过程



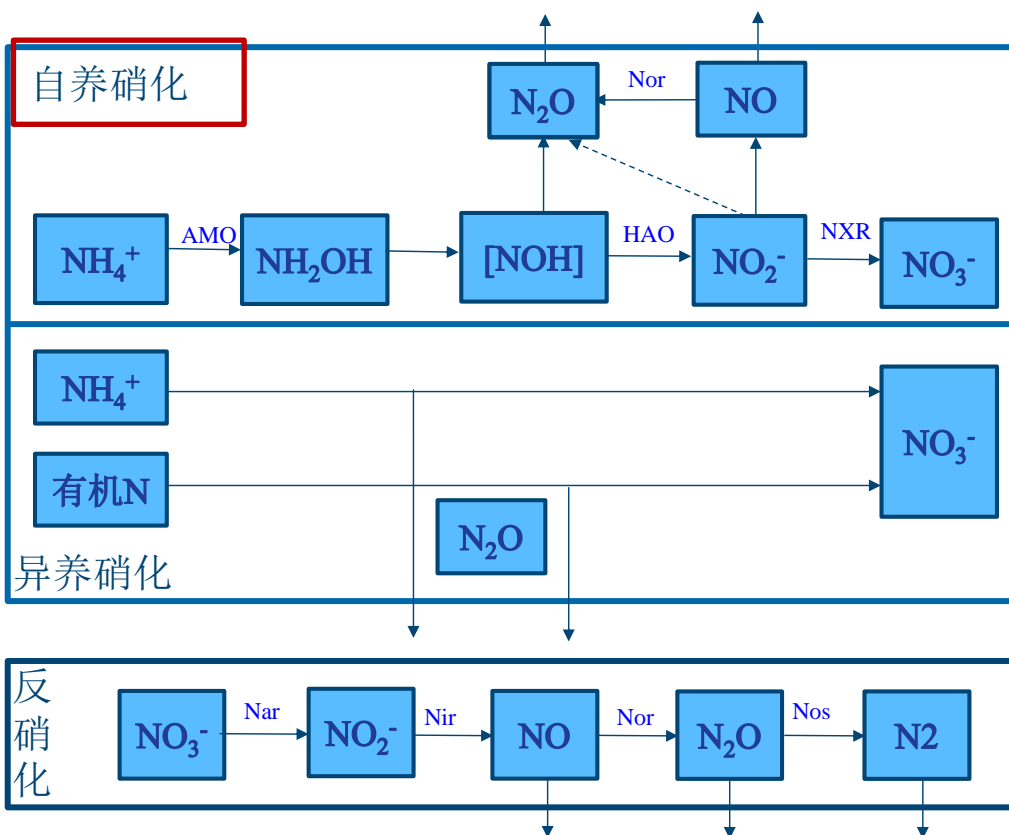
- 大多数模型(DayCent、NOE等)采用经验方程模拟

$$N_2O = NH_4^+ \times f(T, W, pH) \times R$$

- 模型精度依赖于构建经验方程是观测数据的代表性，而N<sub>2</sub>O观测相对缺乏
- 过程缺失会显著影响N<sub>2</sub>O排放对未来气候和环境变化的响应

# 为什么需要发展新的N<sub>2</sub>O模型?

## N<sub>2</sub>O产生和消耗过程



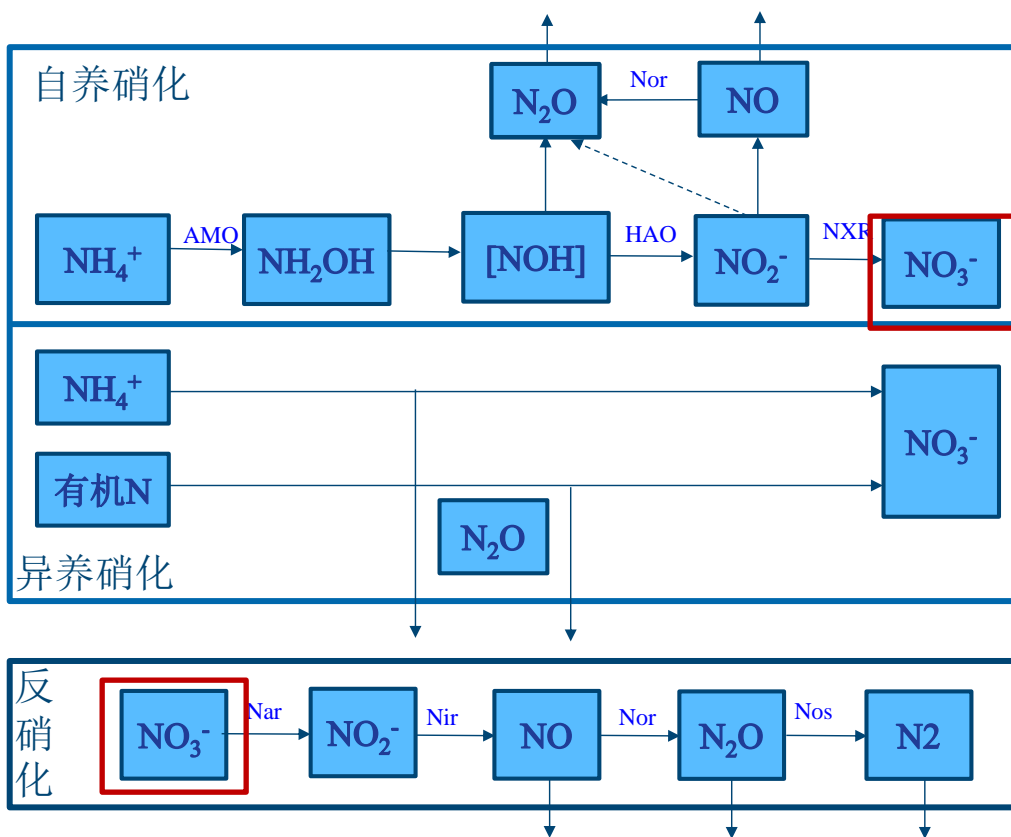
- 少数模型描述了机理过程，但是错误描述了微生物生长过程

比如：DNDC以土壤有机碳为自养硝化微生物的底物

- 自养微生物类似于绿色植物，直接以CO<sub>2</sub>为底物实现自身生长
- 不当的处理方式会使得其空间分布格局的模拟误差

# 为什么需要发展新的N<sub>2</sub>O模型?

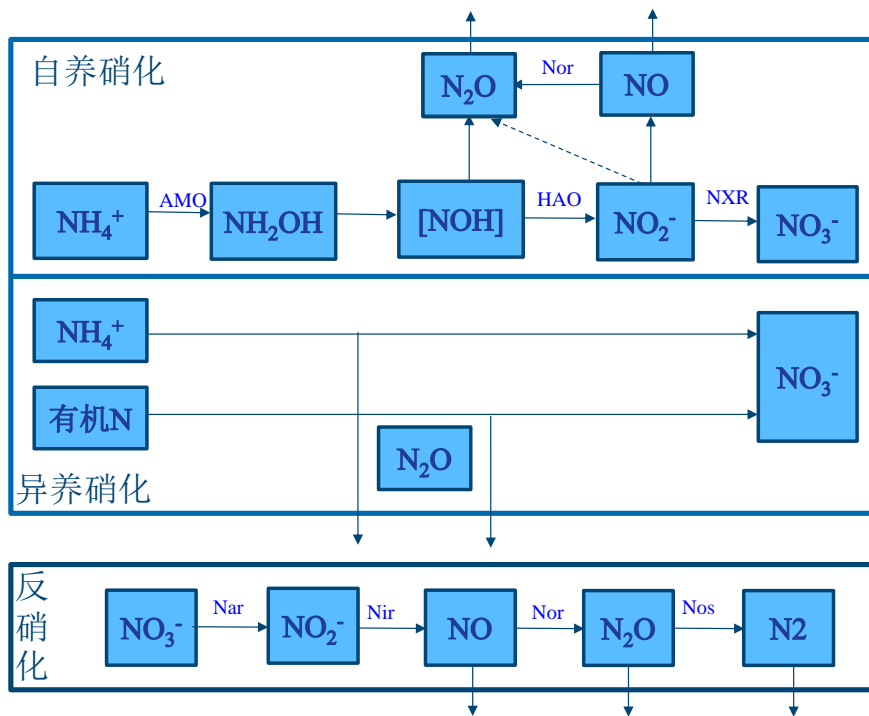
## N<sub>2</sub>O产生和消耗过程



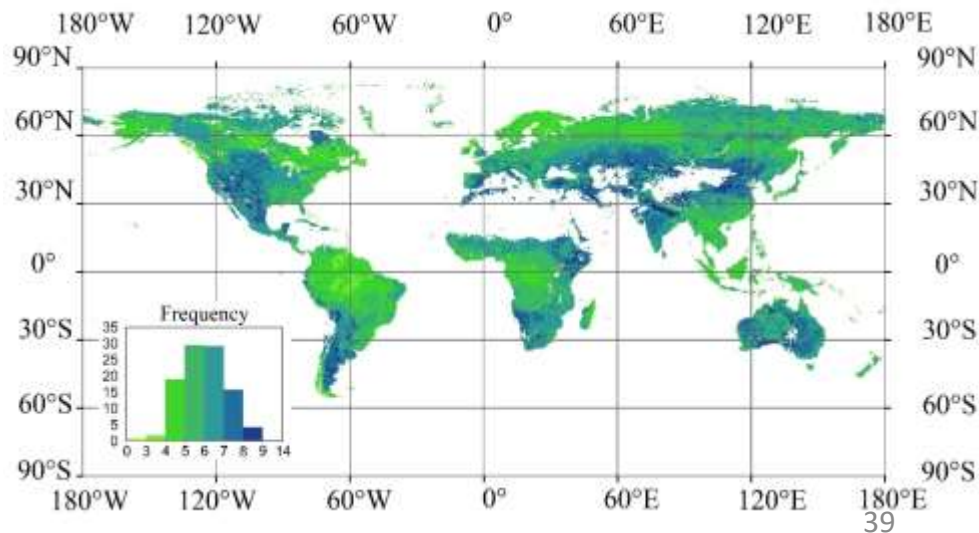
- 多个过程生成N<sub>2</sub>O，没有充分的过程验证会导致“错误+错误=正确”的效应，对于N<sub>2</sub>O未来变化产生极大的理解偏差

# 为什么需要发展新的N<sub>2</sub>O模型?

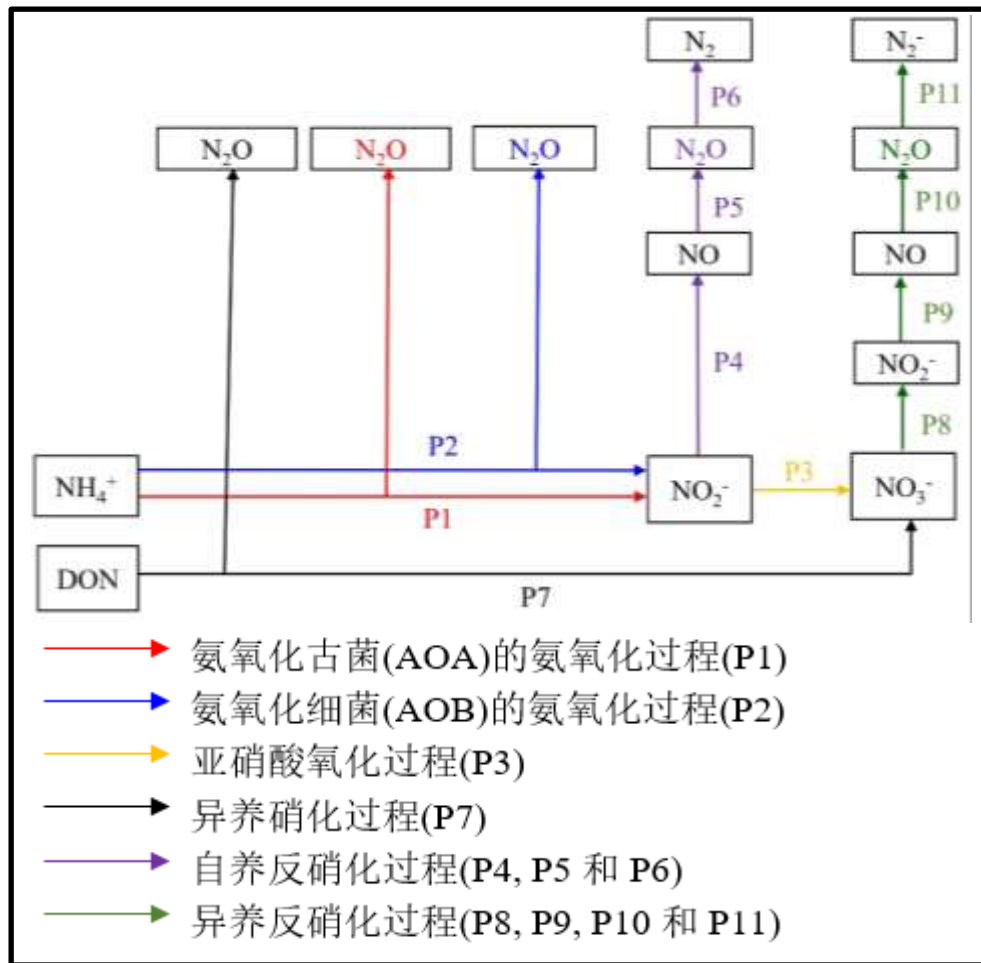
## N<sub>2</sub>O产生和消耗过程



- 所有模型缺失异养硝化和自养反硝化。在酸性土壤，异养硝化产生N<sub>2</sub>O比重可以达到27% ~ 85% (Zhang et al., 2015)。



# 新发展的N<sub>2</sub>O模型(MicN)



## N<sub>2</sub>O产生和消耗过程

- 自养硝化
- 异养硝化
- 自养反硝化
- 异养反硝化

## 氮循环相关微生物

- 氨氧化古菌(AOA)
- 氨氧化细菌(AOB)
- 亚硝酸氧化菌(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>)
- 异养硝化微生物
- 异养反硝化微生物

## 其他氮循环过程

- 植物无机氮吸收
- 氨挥发
- 硝酸淋溶

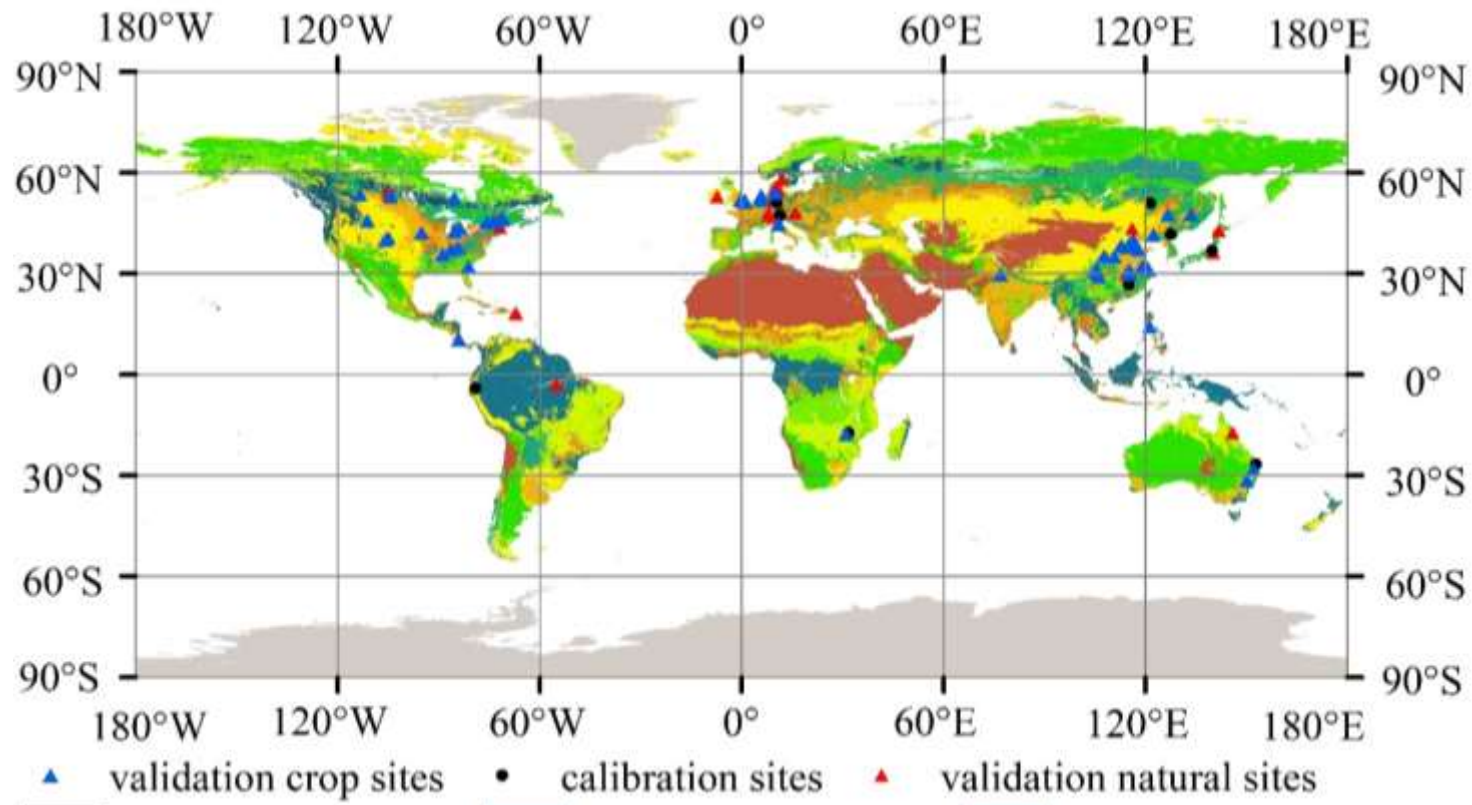


# N<sub>2</sub>O模型结构与其他模型的对比

模型	N <sub>2</sub> O产生和消耗过程				气体扩散	微生物动态				植物吸收和淋溶
	自养硝化	异养硝化	自养反硝化	异养反硝化		自养硝化微生物	AOA AOB NOB	异养硝化微生物	异养反硝化微生物	
DAYCENT	√			√						
DLEM	√			√						
DNDC	√			√	√	√			√	√
DyN	√			√						√
NGAS	√			√						
NOE	√			√						
MicN	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

“√”代表模拟了某过程

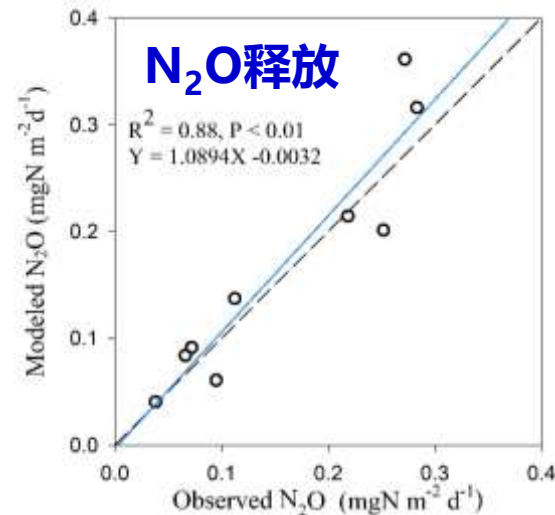
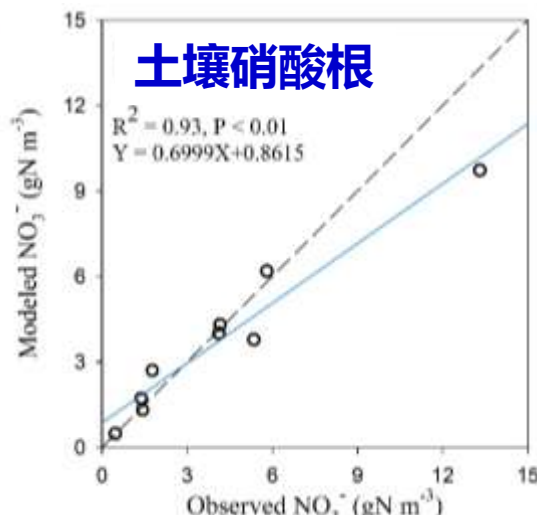
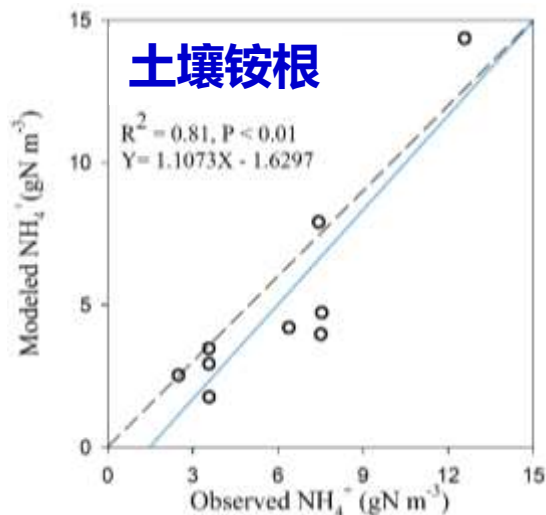
## N<sub>2</sub>O模型验证站点



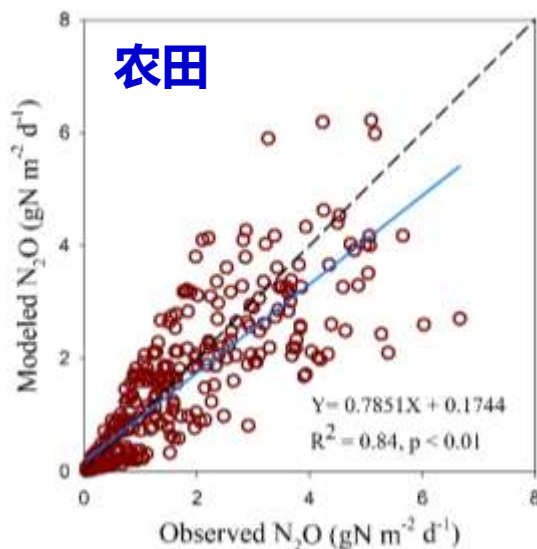
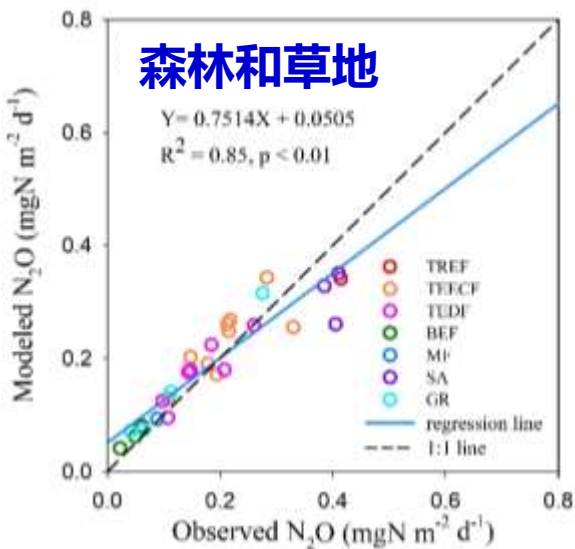
**N<sub>2</sub>O观测站点：29个森林站点；10个草地站点；65个农田站点**

# N<sub>2</sub>O模型验证

九个拟合站点



全部站点



## 小 结

- 陆地生态系统碳汇功能对于实现国家碳中和愿景目标具有重要作用
- 国家尺度上，对于陆地碳汇评估仍然存在很大的不确定性
- 重视CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O的重要作用，改进和发展非CO<sub>2</sub>温室气体模型，特别是充分利用从实验中总结的过程认识

**感谢各位专家**

**敬请批评指正!**

