



基于联网观测的中国年总初级生产力 空间格局与评估

朱先进，王秋凤，陈智，于贵瑞，等

沈阳农业大学，中国科学院地理科学与资源研究所

2023年8月，沈阳

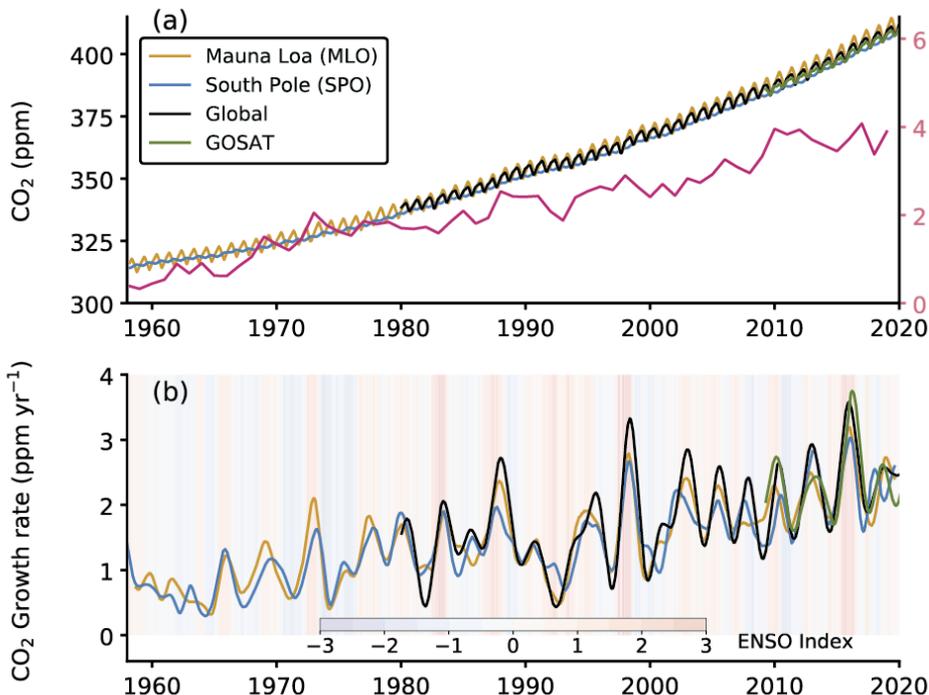
报告提纲

- 研究背景
- 中国年总初级生产力空间格局
- 基于联网观测数据的直接扩展方法
- 中国年总初级生产力的时空变化
- 结论与展望

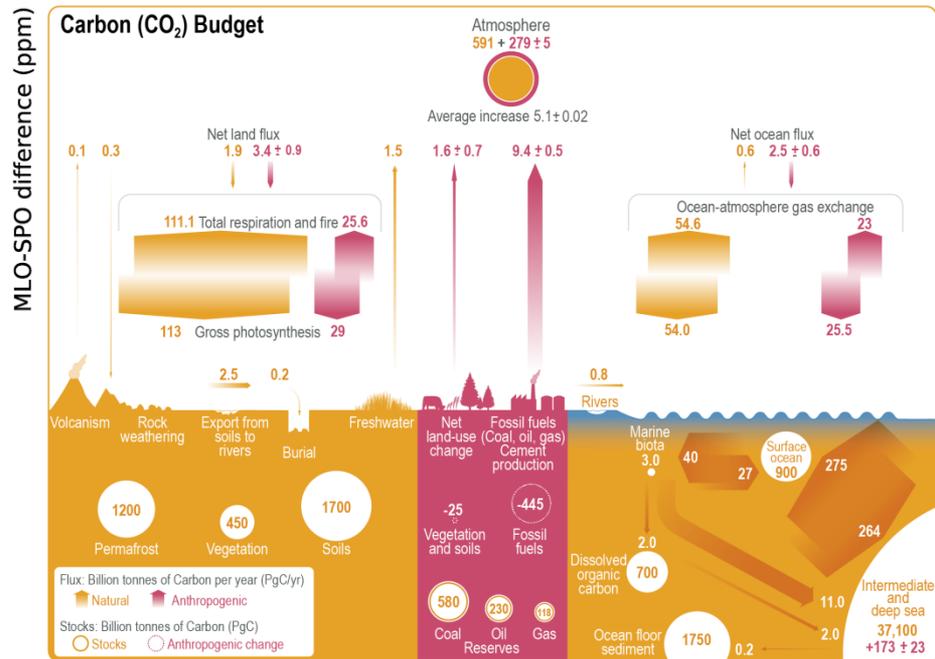


研究背景

➤ 大气CO₂浓度持续增加，引发一系列环境问题

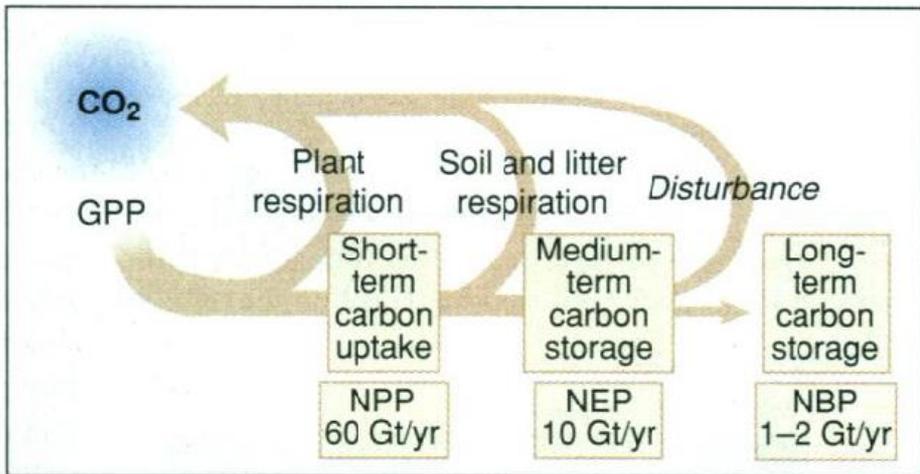


全球CO₂浓度及其增加速率变化趋势 (IPCC, 2021)



全球CO₂收支图 (IPCC, 2021)

➤ 陆地是大气CO₂的汇，增加陆地碳汇有助于减缓大气CO₂增加

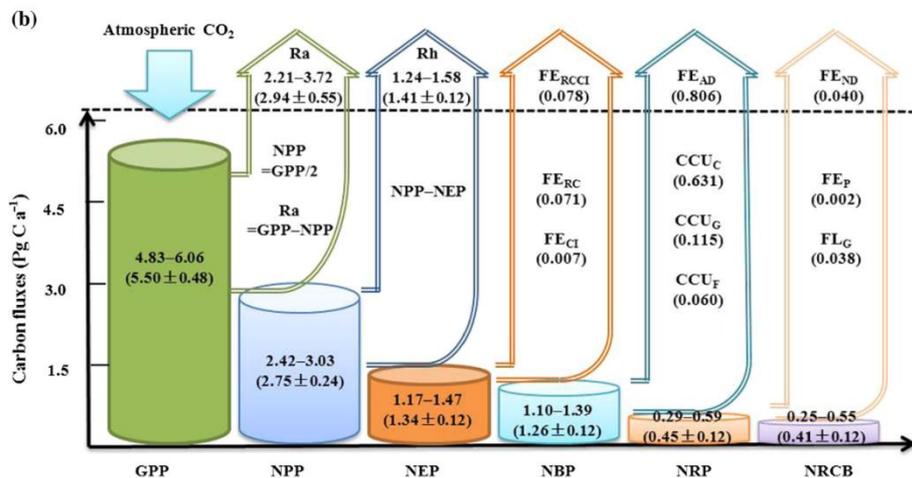


Terrestrial carbon uptake and storage.

陆地碳汇形成过程 (Steffen et al, 1998, Science)

- AGPP是形成陆地碳汇的基础
- 揭示AGPP的时空变异有助于阐明陆地碳汇的变异规律

- 增加陆地碳汇需量化陆地碳汇强度
- 陆地碳汇是GPP经过自然与人为消耗后残留在地面的产物



中国陆地碳汇形成过程 (Wang et al, 2015, Sci. Bull)

- 已有AGPP研究多为累加年内GPP
- 获取GPP的方法有3类：**LUE模型**、**过程模型**、**数据驱动**

The structure and inputs of common light use efficiency models

Model	e_g or e_n (g C m ⁻² MJ ⁻¹ APAR)	e_0 (g C m ⁻² MJ ⁻¹ APAR)
Net primary production		
CASA	$e_n = e_0 \times T_s \times SM$	0.389
Gross primary production		
C-Fix model	$e_g = e_0 \times T_s \times W$	2.484 ^f
EC-LUE	$e_g = e_0 \times T_s \times SM$	1.1
		2.14

LUE模型

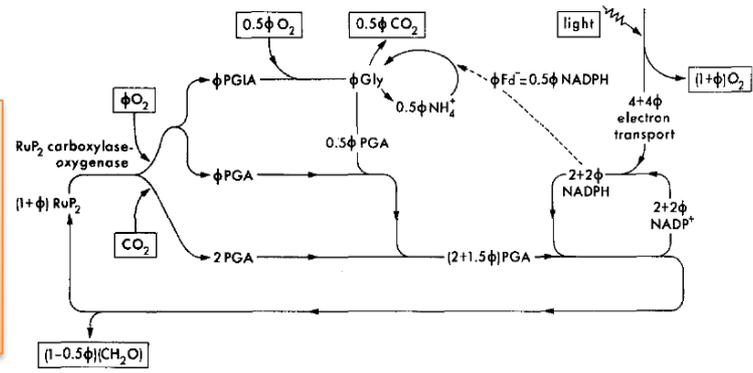
$$GPP = PAR \times fPAR \times LUE_{max} \times f(T_s, W_s, \dots)$$

(Yuan et al. 2007, AFM)

AVIM、CEVSA、BEPS、InTEC...

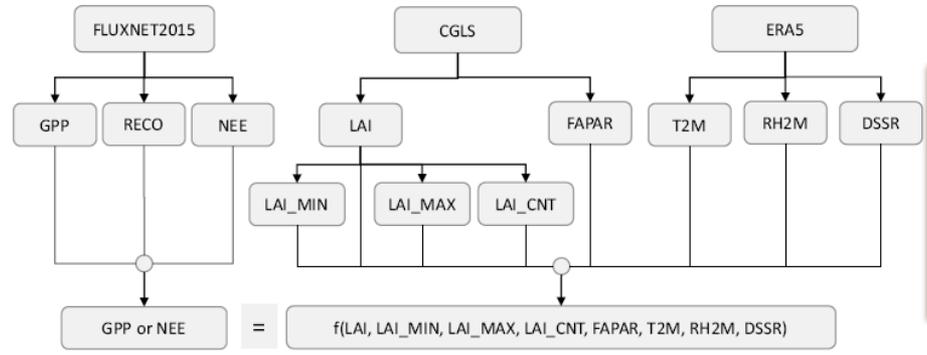
FLUXCOM、MTE、随机森林...

过程模型



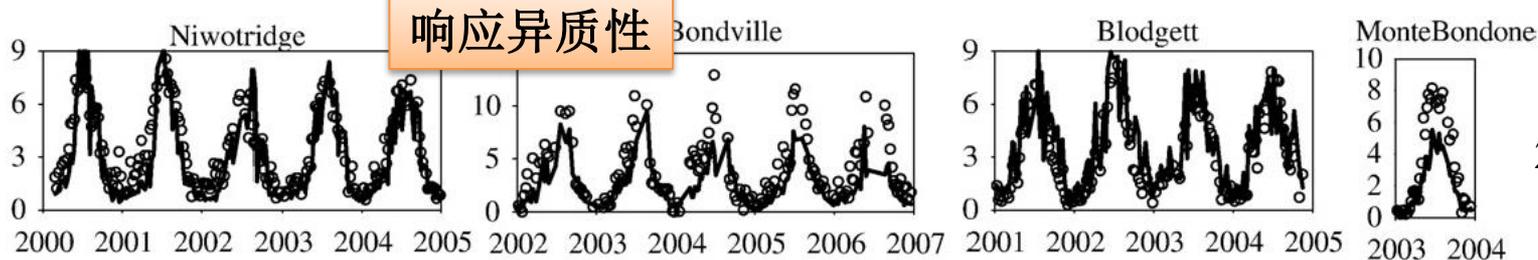
(Farquhar et al, 1980, Planta)

数据驱动

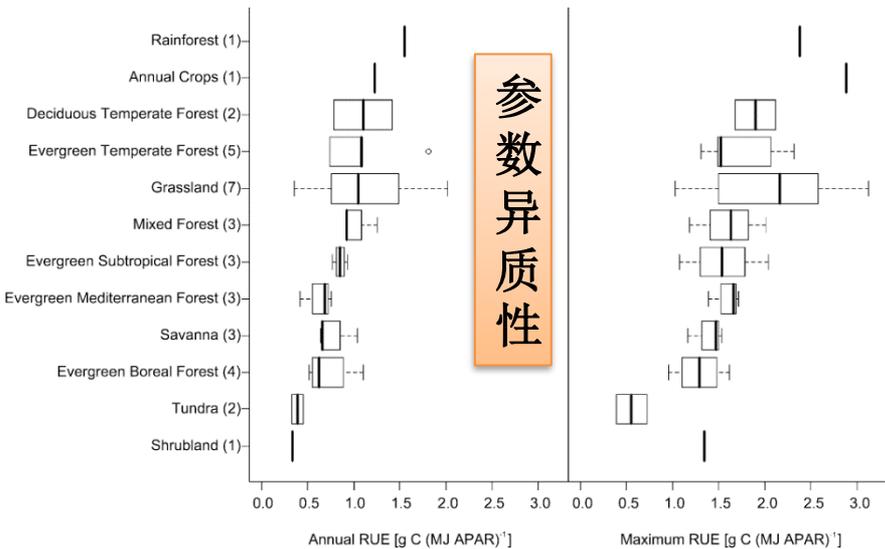


(Zeng et al, 2020, Sci. Data)





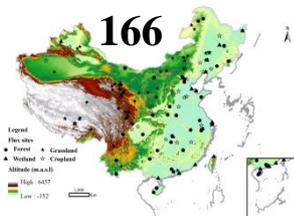
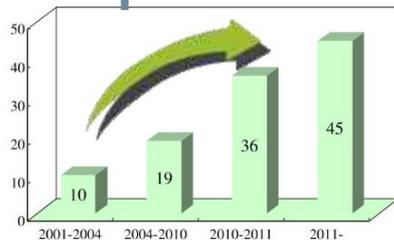
(Yuan et al, 2010, RSE)



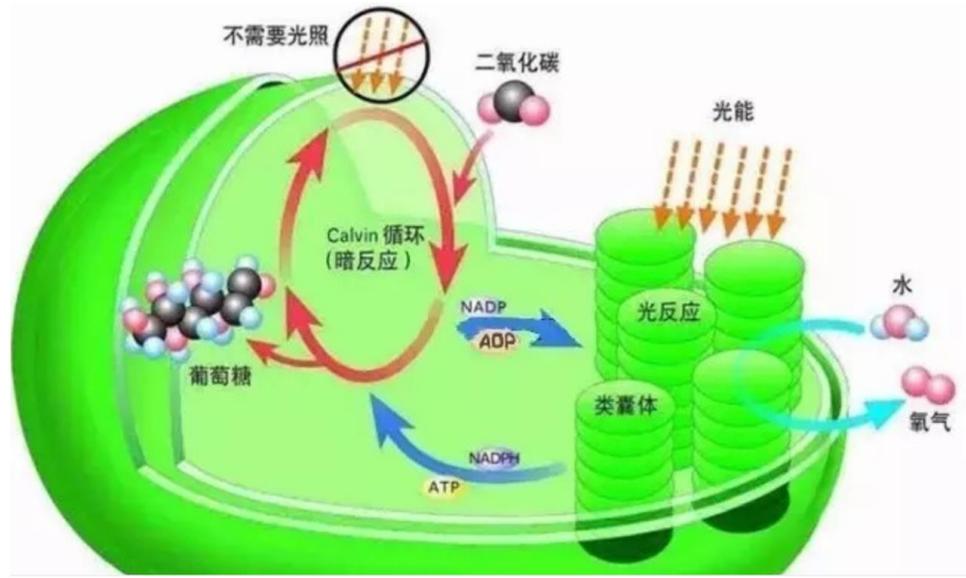
(Garbulsky et al, 2010, GEB)

➤ 基于观测AGPP直接扩展，评估其时空变化

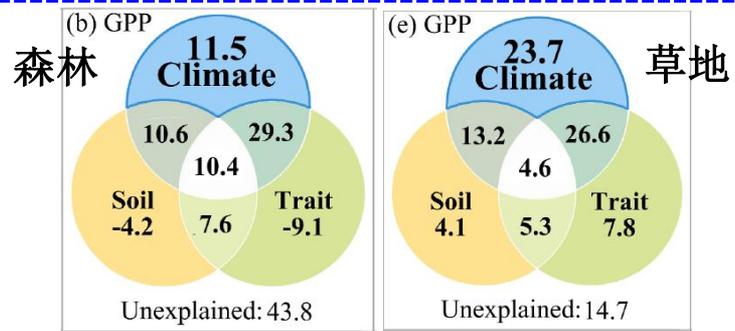
➤ 不断发展的涡度相关联网观测使扩展站点AGPP至区域水平成为可能



- 当前AGPP认知局限于GPP动态过程
- AGPP空间变异规律的复杂性



光合作用过程



(Zhou et al, 2021, AFM)

- AGPP呈现何种空间变异及影响因素？
- 如何扩展站点观测AGPP至区域水平？
- AGPP存在何种时空变化？

报告提纲

- 研究背景
- 中国年总初级生产力空间格局
- 基于联网观测数据的直接扩展方法
- 中国年总初级生产力的时空变化
- 结论与展望



中国年总初级生产力空间格局

Global Change Biology

Global Change Biology (2013) 19, 798–810, doi: 10.1111/gcb.12079

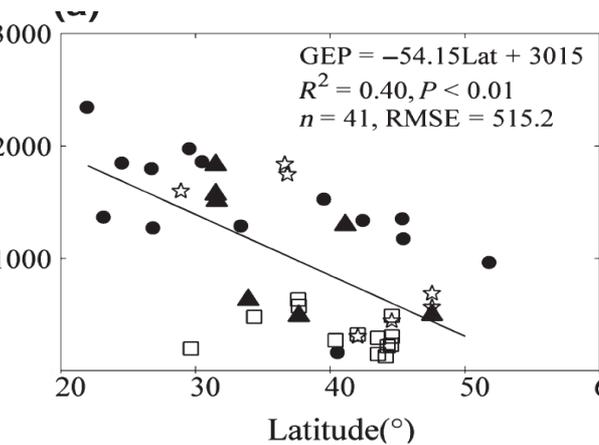
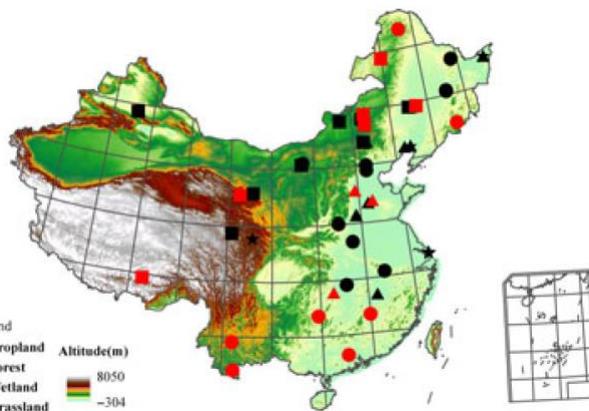
Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China

GUI-RUI YU*, XIAN-JIN ZHU*†, YU-LING FU*, HONG-LIN HE*, QIU-FENG WANG*, XUE-FA WEN*, XUAN-RAN LI*†, LEI-MING ZHANG*, LI ZHANG*, WEN SU*, SHENG-GONG LI*, XIAO-MIN SUN*, YI-PING ZHANG‡, JUN-HUI ZHANG§, JUN-HUA YAN¶, HUI-MIN WANG*, GUANG-SHENG ZHOU||, BING-RUI JIA||, WEN-HUA XIANG**, YING-NIAN LI††, LIANG ZHAO††, YAN-FEN WANG†, PEI-LI SHI*, SHI-PING CHEN||, XIAO-PING XIN‡‡, FENG-HUA ZHAO*, YU-YING WANG§§ and CHENG-LI TONG¶¶

*Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101, China,

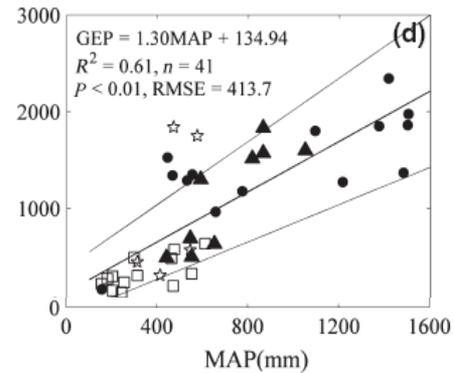
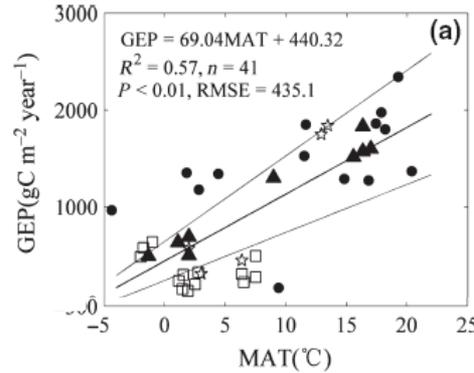
†University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China, ‡Key Lab of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, China, §Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China, ¶South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510650, China,

||State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing



显著的纬向递减格局

MAT和MAP的显著促进作用



生态系统类型的影响?





Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Effects of ecosystem types on the spatial variations in annual gross primary productivity over terrestrial ecosystems of China

Xian-Jin Zhu^a, Fu-Yao Qu^a, Ren-Xue Fan^a, Zhi Chen^{b,c,*}, Qiu-Feng Wang^{b,c,*}, Gui-Rui Yu^{b,c,*}

^a College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

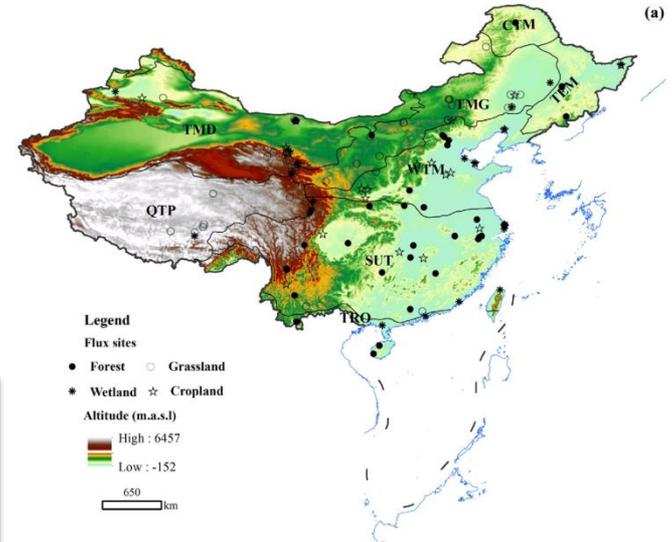
^b Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

^c College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

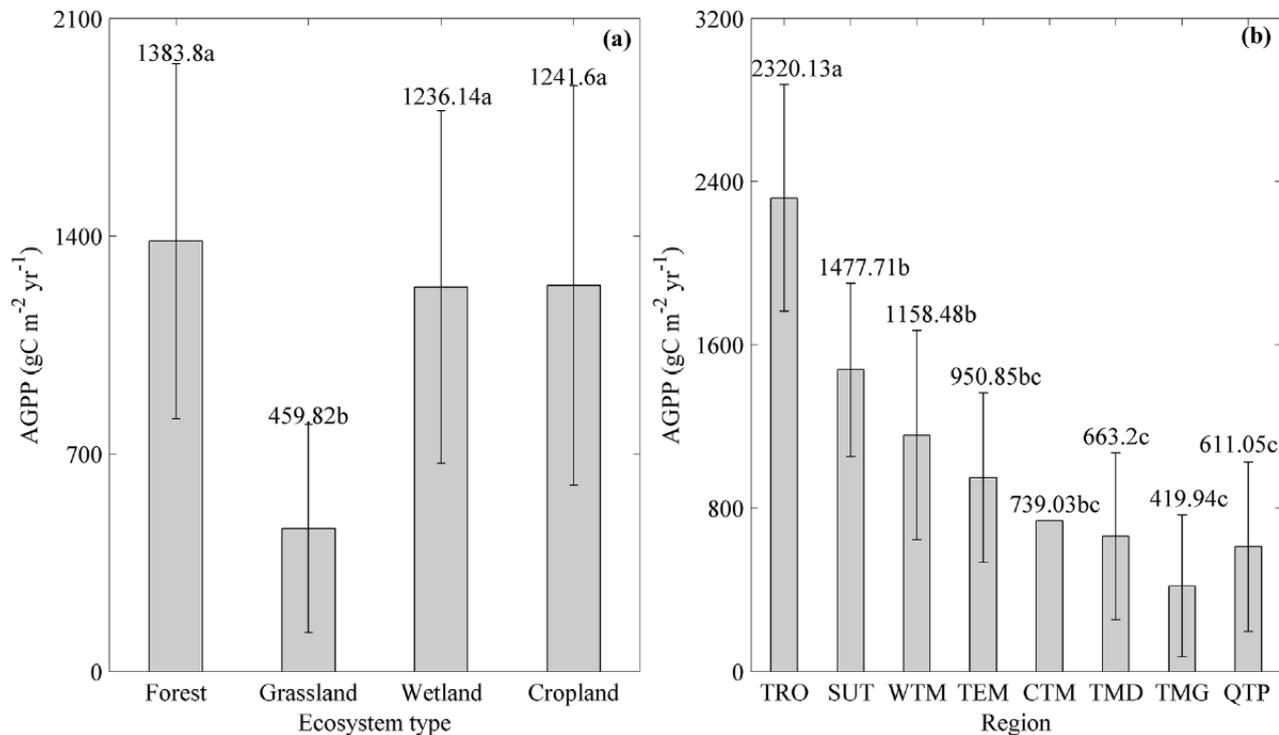
➤ 以“涡度相关”或“eddy covariance”为关键词

➤ 获得全国128个站点的观测结果

➤ 森林：34；草地：45；湿地：24；农田：25



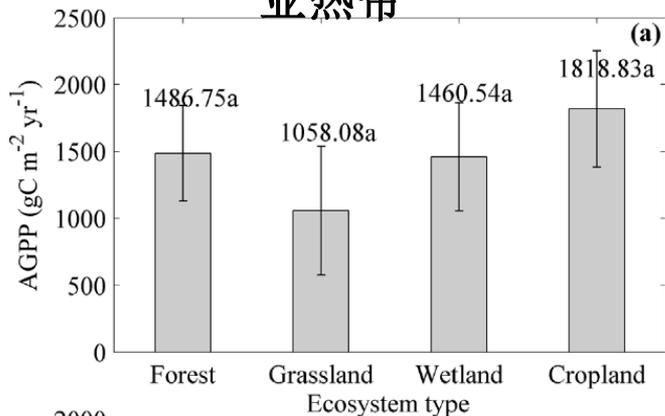
中国植被区划的8大植被区



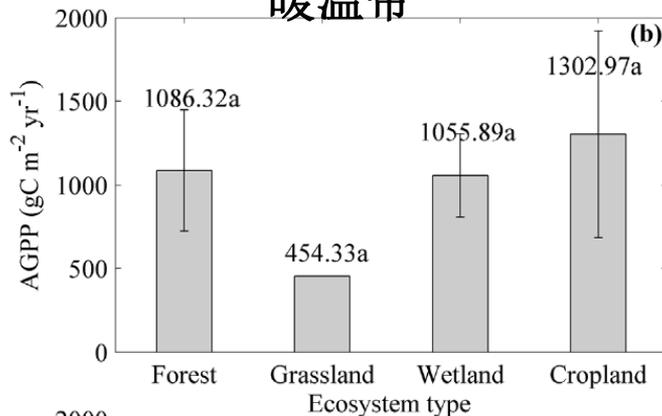
- 森林、湿地、农田的AGPP显著高于草地的数值
- 不同植被区AGPP存在显著差异，以温带草原的数值为最低

不同生态系统类型与植被区AGPP的差异

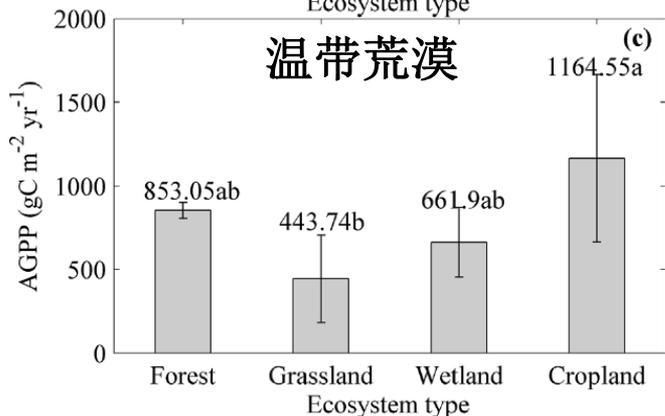
亚热带



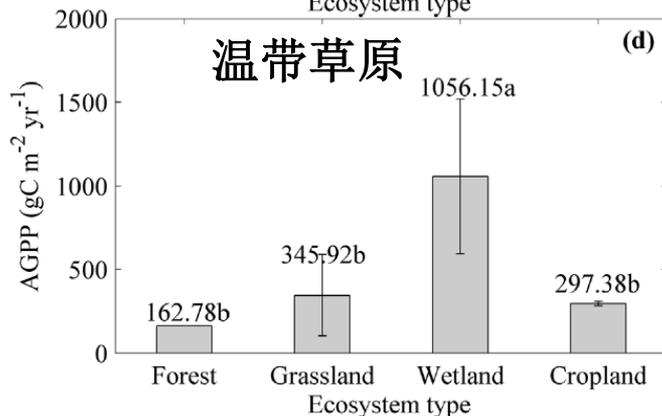
暖温带



温带荒漠

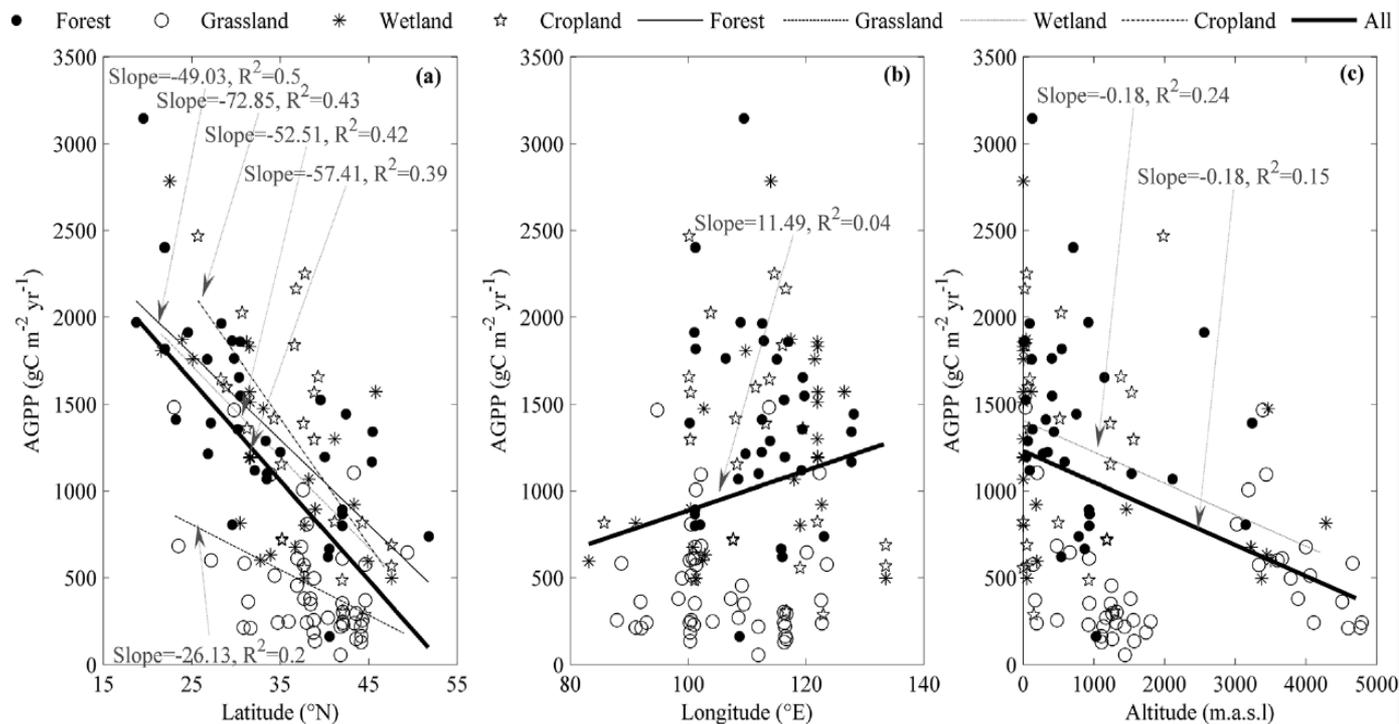


温带草原



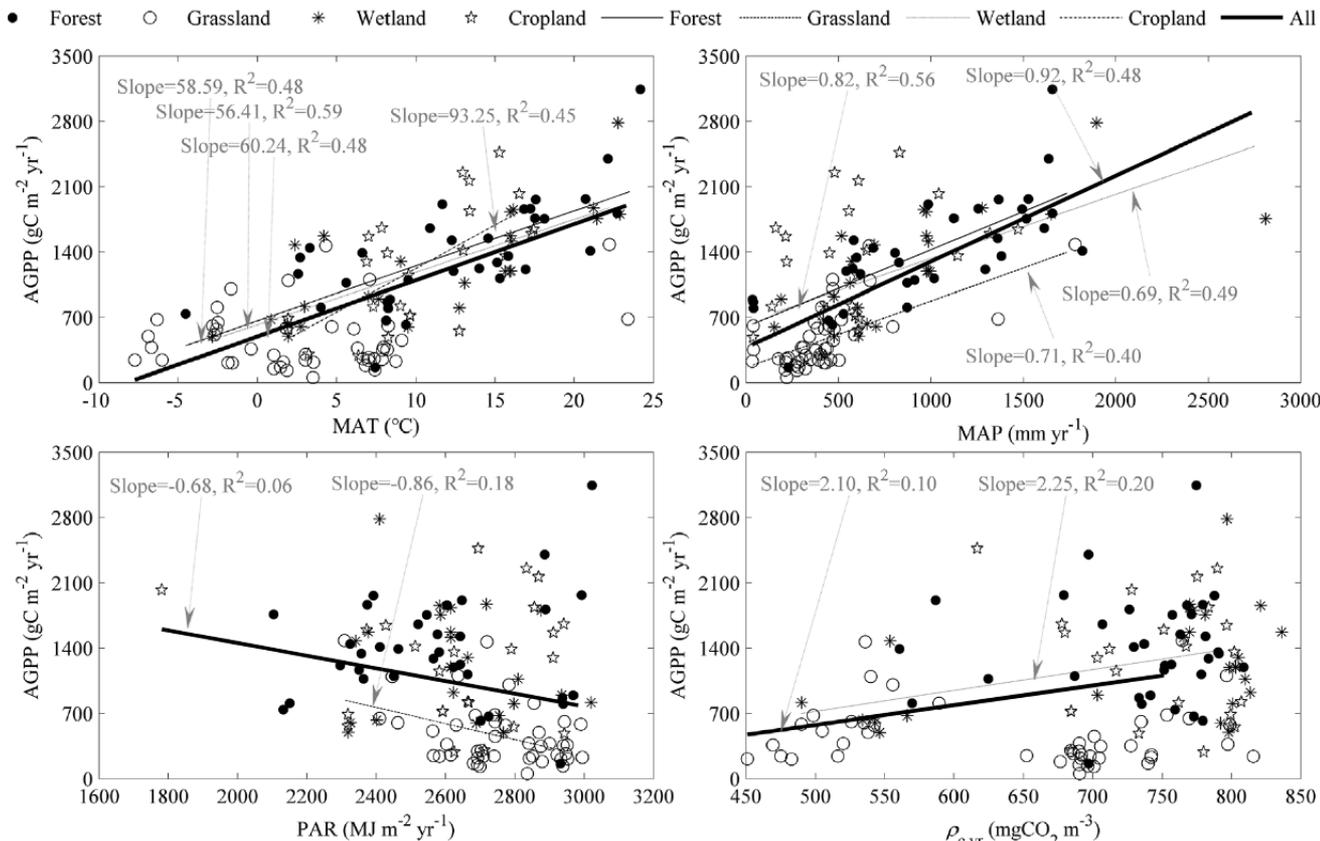
同一植被区不同生态系统类型AGPP的差异

- 湿润地区不同生态系统类型的AGPP没有显著差异
- 干旱区农田或湿地AGPP显著高于其他类型生态系统



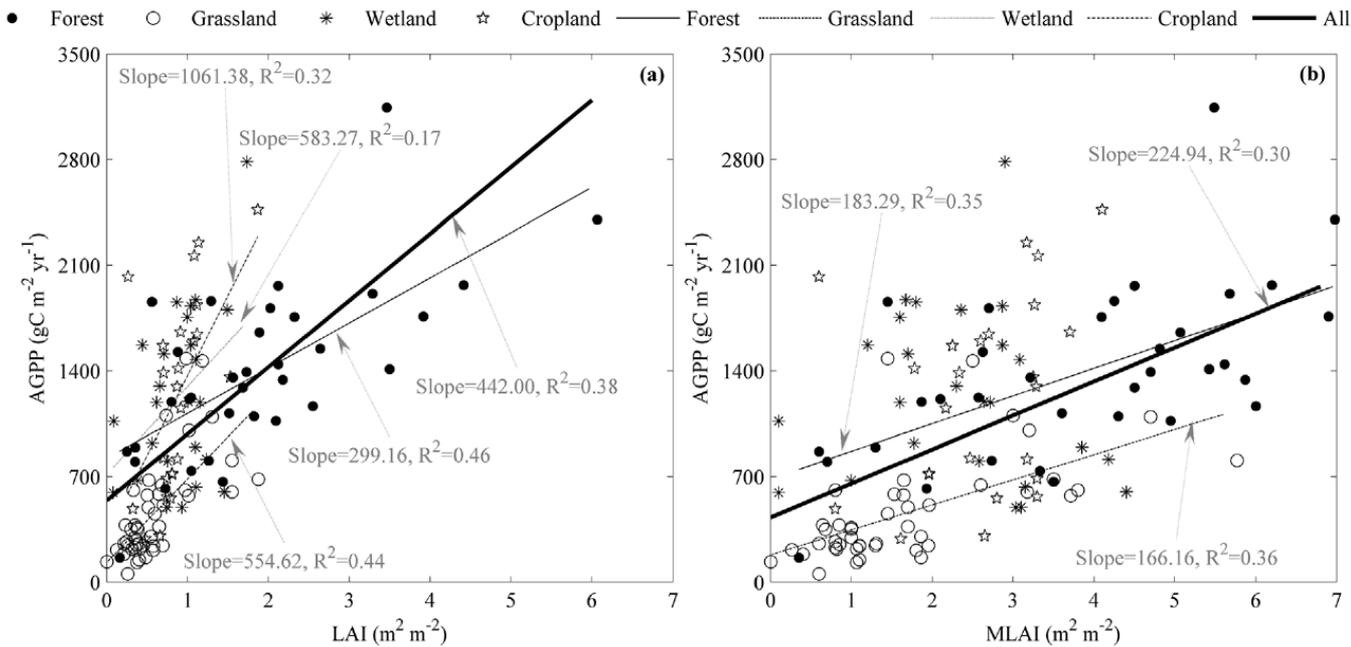
不同生态系统类型AGPP的纬向 (a)、经向 (b) 及垂向 (c) 格局

- 不同类型生态系统的AGPP均呈现显著的纬向递减格局
- 但纬向降低速率在生态系统类型之间有所差异



主要气候因素对不同生态系统类型AGPP空间变异的影响

- MAT和MAP是影响AGPP空间变异的主要气候因素
- 气候因素的作用在不同生态系统类型之间有所差异



➤ 生物因素显著影响AGPP空间变异

➤ 生物因素的作用在不同生态系统类型之间有所差异

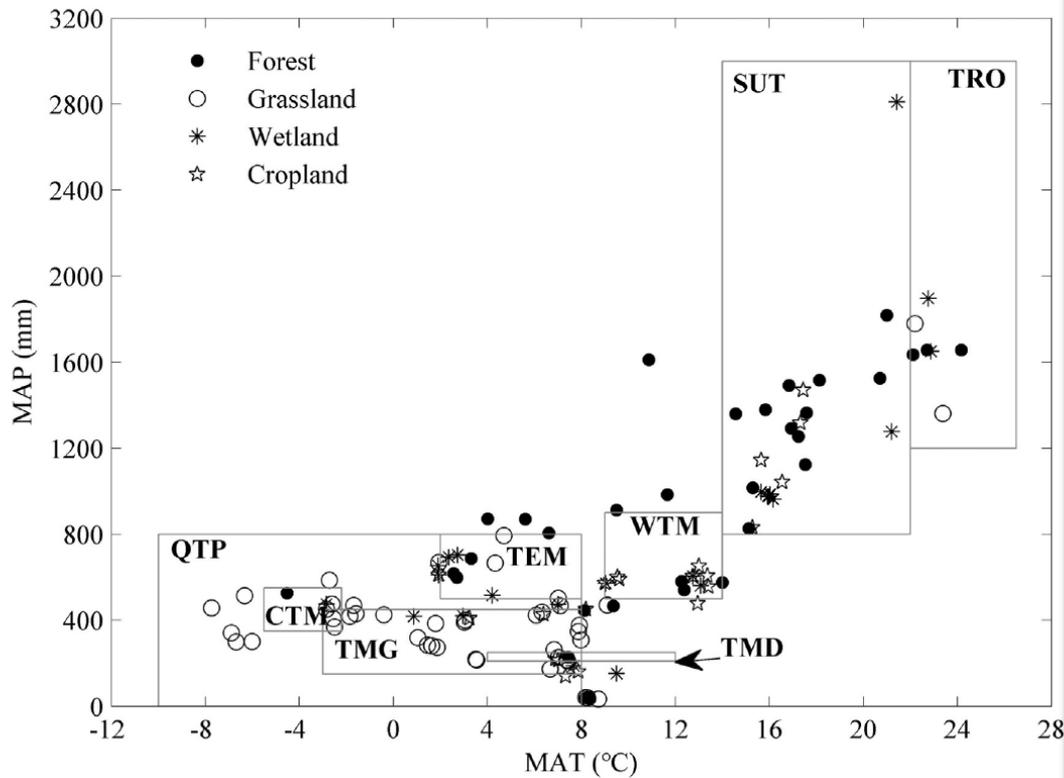
主要生物因素对不同生态系统类型AGPP空间变异的影响



- 各生态系统类型AGPP空间变异均由气候因素与生物因素的共同作用来实现
- 生物气候因素对不同生态系统类型AGPP空间变异的影响存在差异

Stepwise analysis of deriving factors dominating the spatial variations in annual gross productivity (AGPP) in different eco

Ecosystem type	Regression equation	Statistics of Regression	
		n	R ²
Forest	$Y = 26.69MAT + 0.33MAP + 150.19LAI + 458.37$	34	0.64
Grassland	$Y = 0.39MAP + 364.66LAI + 81.42$	45	0.49
Wetland	$Y = 29.86MAT + 1090.91LAI - 311.70MLAI + 665.41$	25	0.66
Cropland	$Y = 95.91MAT + 261.28MLAI - 416.75$	24	0.53
All	$Y = 41.48MAT + 0.36MAP + 143.93MLAI + 107.16$	128	0.65



所用站点的气候分布

- 不同生态系统类型AGPP有所不同，但相似气候下不同生态系统类型的AGPP大致相似
- 站点分布引起的气候范围差异使影响不同生态系统空间变异的因素存在区别，但均呈现气候与生物的共同作用

报告提纲

- 研究背景
- 中国年总初级生产力空间格局
- **基于联网观测数据的直接扩展方法**
- 中国年总初级生产力的时空变化
- 结论与展望



基于联网观测数据的直接扩展方法



Global and Planetary Change 118 (2014) 52–61



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Global and Planetary Change

journal homepage: www.elsevier.com/locate/gloplacha



Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: Results from upscaling network observations



Xian-Jin Zhu^{a,b}, Gui-Rui Yu^{a,*}, Hong-Lin He^a, Qiu-Feng Wang^a, Zhi Chen^{a,b}, Yan-Ni Gao^{a,b}, Yi-Ping Zhang^c, Jun-Hui Zhang^d, Jun-Hua Yan^e, Hui-Min Wang^a, Guang-Sheng Zhou^f, Bing-Rui Jia^f, Wen-Hua Xiang^g,

$$Cflux = \min\{f(MAT), f(MAP)\} \quad (1)$$

$$Cflux = A + B \times MAT + C \times MAP \quad (2)$$

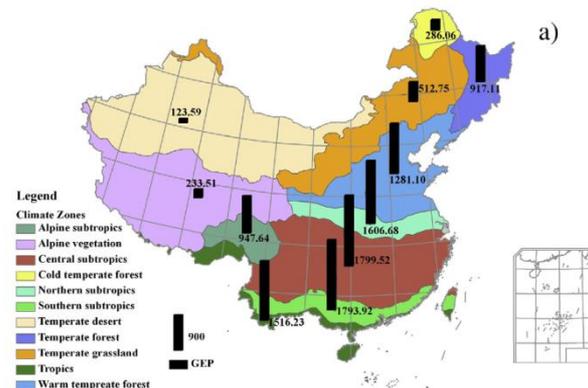
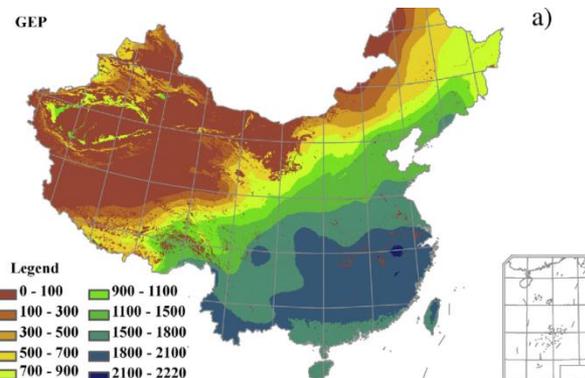
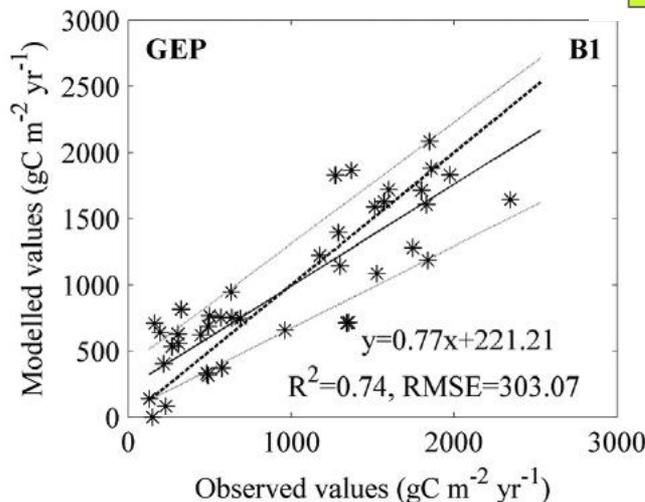
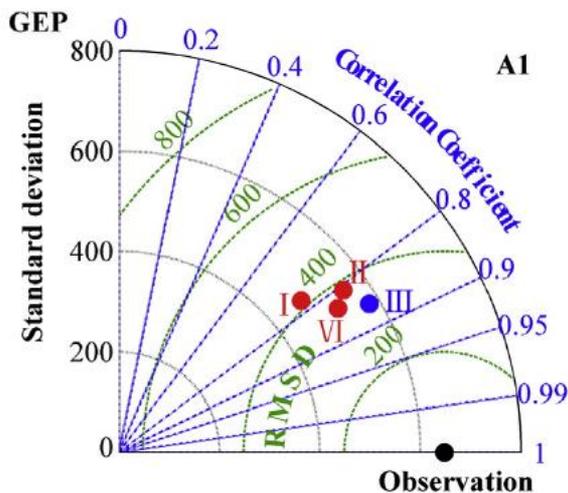
$$Cflux = A + B \times MAT + C \times MAP + D \times MAT \times MAP \quad (3)$$

$$\text{Mean}((1),(2),(3)) \quad (4)$$



$$GEP = 107.02MAT + 2.18MAP - 0.10MAT \times MAP - 544.35$$

- 总量: $7.51 \pm 0.51 \text{ PgC yr}^{-1}$
- 空间上自东南向西北逐渐减少
- 以亚热带的数值为最高



不同方案预测效果的差异及最优方案的模拟效果

AGPP的空间分布

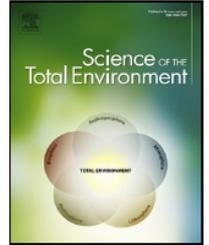


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

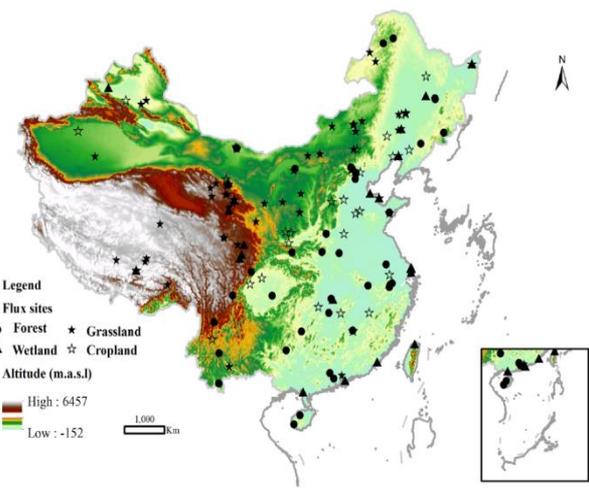
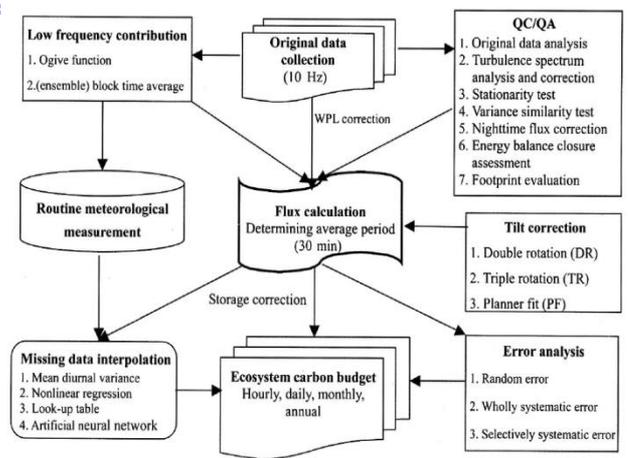


Mapping Chinese annual gross primary productivity with eddy covariance measurements and machine learning

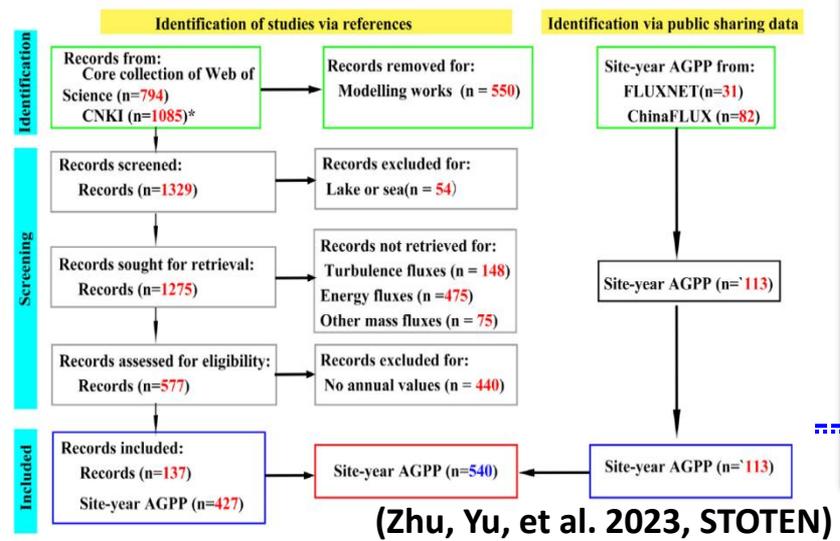


Xian-Jin Zhu ^{a,ac}, Gui-Rui Yu ^{b,c,*}, Zhi Chen ^{b,c}, Wei-Kang Zhang ^b, Lang Han ^d, Qiu-Feng Wang ^{b,c,*}, Shi-Ping Chen ^e, Shao-Min Liu ^f, Hui-Min Wang ^b, Jun-Hua Yan ^g, Jun-Lei Tan ^h, Fa-Wei Zhang ⁱ, Feng-Hua Zhao ^b, Ying-Nian Li ⁱ, Yi-Ping Zhang ^j, Pei-Li Shi ^b, Jiao-Jun Zhu ^k, Jia-Bing Wu ^k, Zhong-Hui Zhao ^l, Yan-Bin Hao ^m, Li-Qing Sha ^j, Yu-Cui Zhang ⁿ, Shi-Cheng Jiang ^o, Feng-Xue Gu ^p, Zhi-Xiang Wu ^q, Yang-Jian Zhang ^{b,c}, Li Zhou ^r, Ya-Kun Tang ^s, Bing-Rui Jia ^e, Yu-Qiang Li ^h, Qing-Hai Song ^j, Gang Dong ^t, Yan-Hong Gao ^h, Zheng-De Jiang ^k, Dan Sun ^g, Jian-Lin Wang ^u, Qi-Hua He ^v, Xin-Hu Li ^w, Fei Wang ^x, Wen-Xue Wei ^y, Zheng-Miao Deng ^y, Xiang-Xiang Hao ^z, Yan Li ^w, Xiao-Li Liu ^{aa}, Xi-Feng Zhang ^{ab}, Zhi-Lin Zhu ^{b,c}

通量数据处理流程



文献数据提取流程



➤ 通过联网观测与文献数据提取，获得了166个站点872个站点年的观测结果

➤ 数据剔除重复数据，获得中国166个站点641个站点年的AGPP数据



扩展方案的设置

Annual gross primary productivity (AGPP) mapping schemes used in this study.

Scheme category	Scheme ID	Mapping tool	Dependent variable	Independent variables ^b	Scheme objective	
I	I1	Multiple linear regressions	AGPP	MAT, MAP, PAR, PET, VPD, CO ₂ , SWC, SOC, STN, LAI, MLAI	Mapping tool selection	
	I2	Partial least square regressions				
	I3	BP artificial neural network				
	I4	Support vector machine				
	I5	Random forest regression tree				
	I6	Boosted regression tree				
II	II1	The optimal tool of category I	AGPP	MAT, MAP, PAR	Variable combination selection	
	II2					MAT, MAP, PAR, PET, VPD, CO ₂
	II3					MAT, MAP, PAR, PET, VPD, CO ₂ , SWC, SOC, STN
	II4					MAT, MAP, PAR, PET, VPD, CO ₂ , SWC, SOC, STN, LAI, MLAI
III	III1	The optimal tool of category I	AGPP	The optimal independent variables of category II	Mapping approach selection	
	III2					PAGPP
	III3					LUE
	III4					PLUE

扩展工具

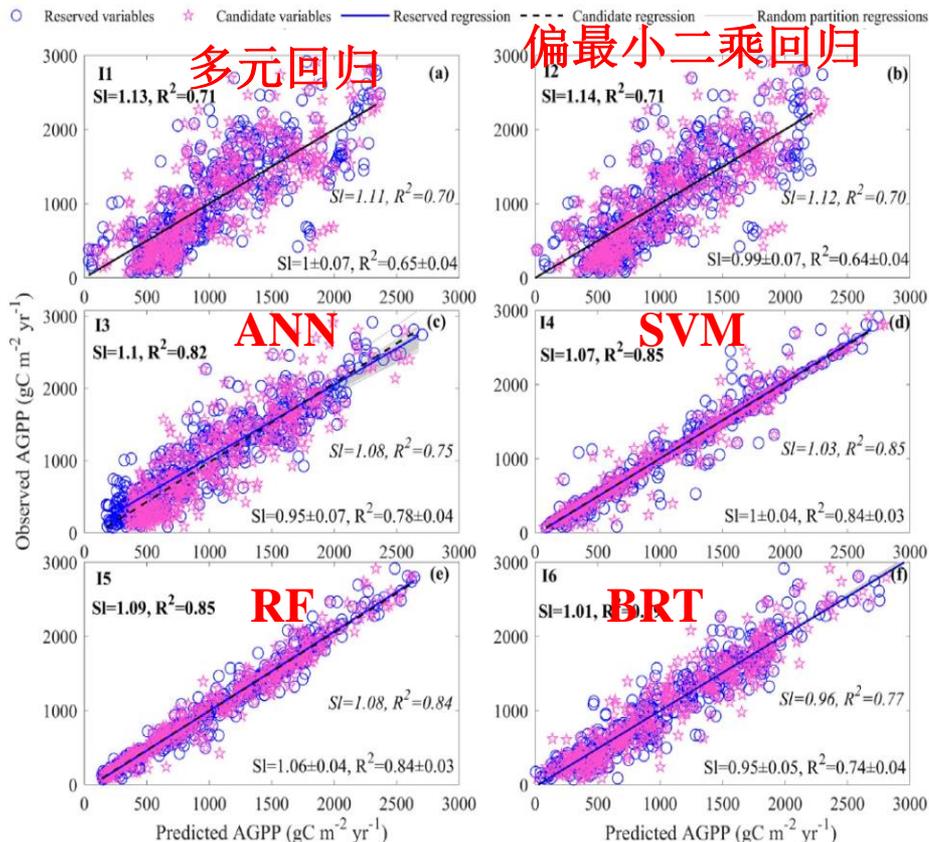
变量组合

扩展途径

数据集划分

训练集：测试集=7:3，重复100次

不同扩展工具的差异



- 机器学习语言的预测能力明显优于经典统计学方法
- 随机森林回归 (RF) 具有最优预测能力
- 预测能力及其在不同扩展工具之间的差异不因数据集随机划分及输入变量来源不同而发生改变

不同扩展工具对测试集观测AGPP的预测能力

(Zhu, Yu, et al. 2023, STOTEN)



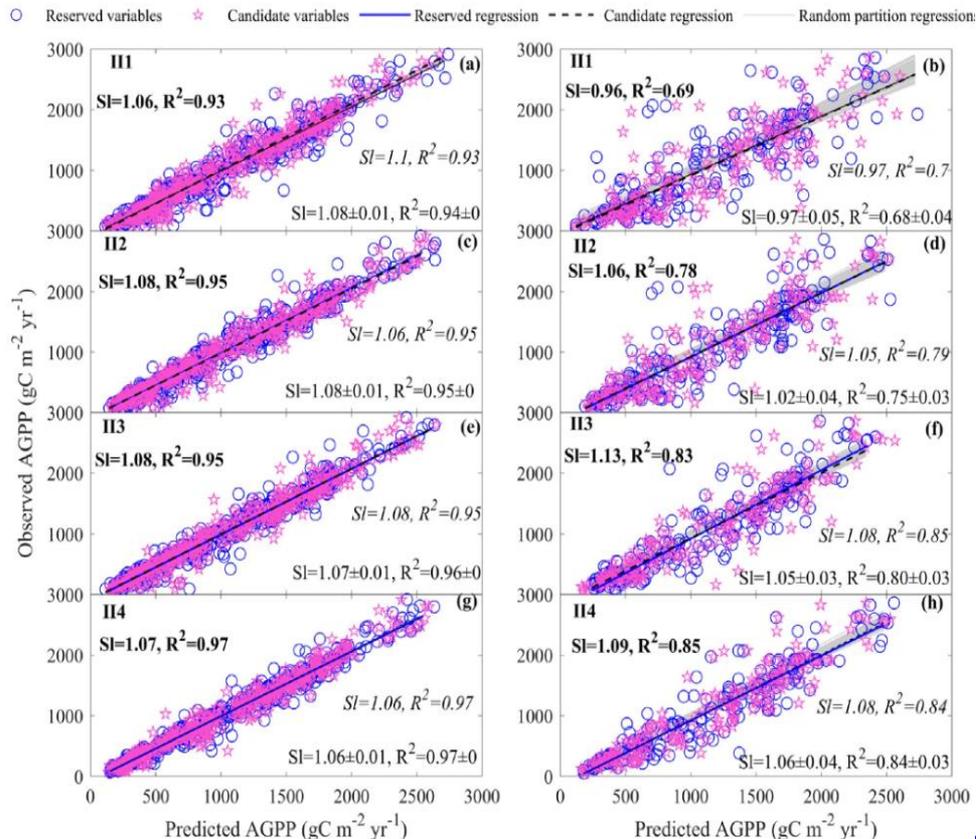
不同变量组合的差异

光温水

气候

气候+
土壤

气候+
土壤+
生物



- 训练集预测能力大致相当
- 测试集以**气候+土壤+生物**的预测能力为最高
- 预测能力及其在不同变量之间的差异不因数据集随机划分及输入变量来源不同而发生改变

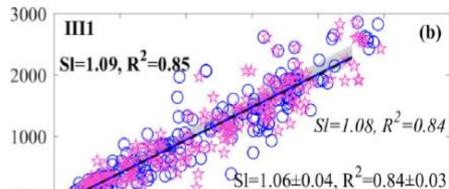
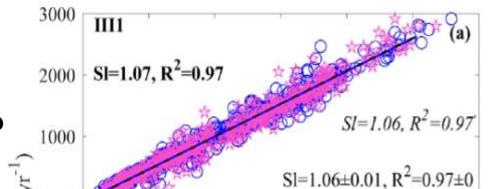
不同变量组合对训练集（左）和测试集（右）观测AGPP的预测能力



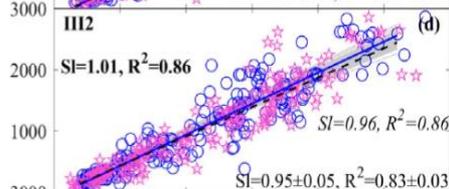
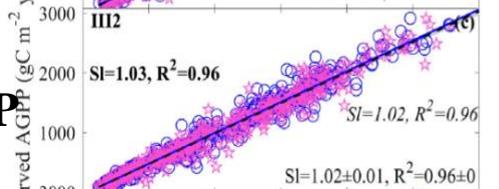
不同扩展途径的差异

○ Reserved variables * Candidate variables — Reserved regression - - - Candidate regression — Random partition regressions

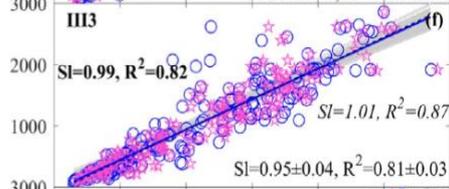
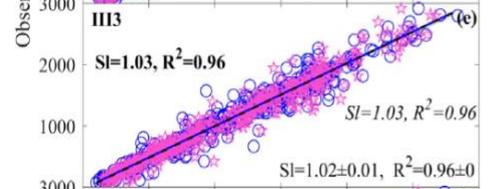
AGPP



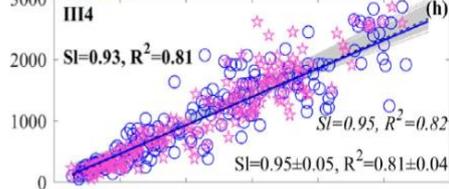
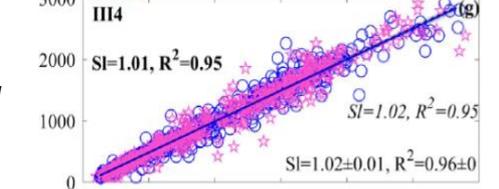
PAGPP



LUE



PLUE



- 训练集预测能力大致相当
- 测试集以**通过PAGPP**的预测能力为最高
- 预测能力及其在不同扩展途径之间的差异不因数据集随机划分及输入变量来源不同而发生改变



不同变量组合对训练集（左）和测试集（右）观测AGPP的预测能力

(Zhu, Yu, et al. 2023, STOTEN)

➤ 与已有数据产品的一致性

数据驱动 → Jung

LUE模型 → GLASS

过程模型 → NACP

➤ 评价方法

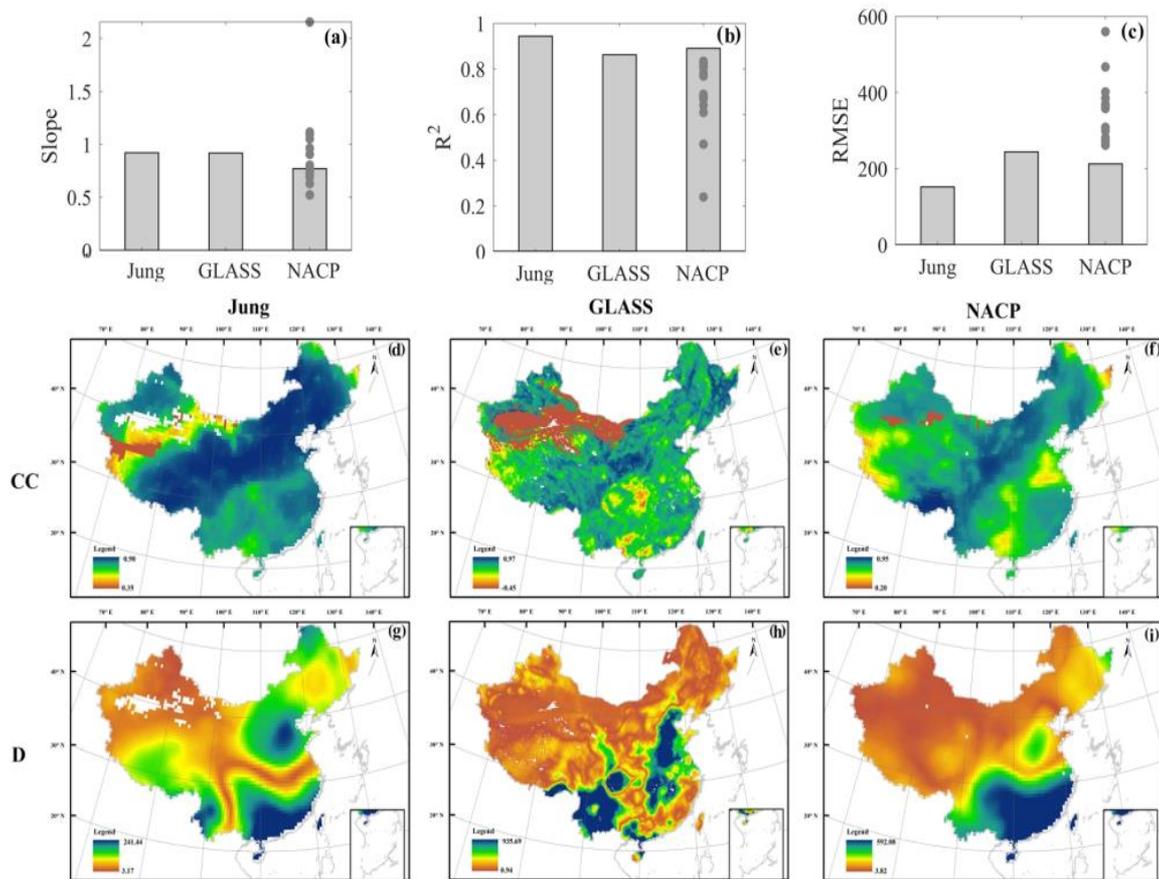
◆ 线性回归比较总体一致性

◆ 比较图剖面（CMP）方法比较空间一致性

$$CC = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{(x_{ij} - \bar{x}) \times (y_{ij} - \bar{y})}{\sigma_x \times \sigma_y} \quad \text{空间相似性}$$

$$D = abs(\bar{x} - \bar{y}) \quad \text{绝对差异}$$

空间变化



➤ 与各类产品的空间一致性均较高，但与数据驱动结果 (**Jung**) 的一致性最高，不同过程模型差异明显

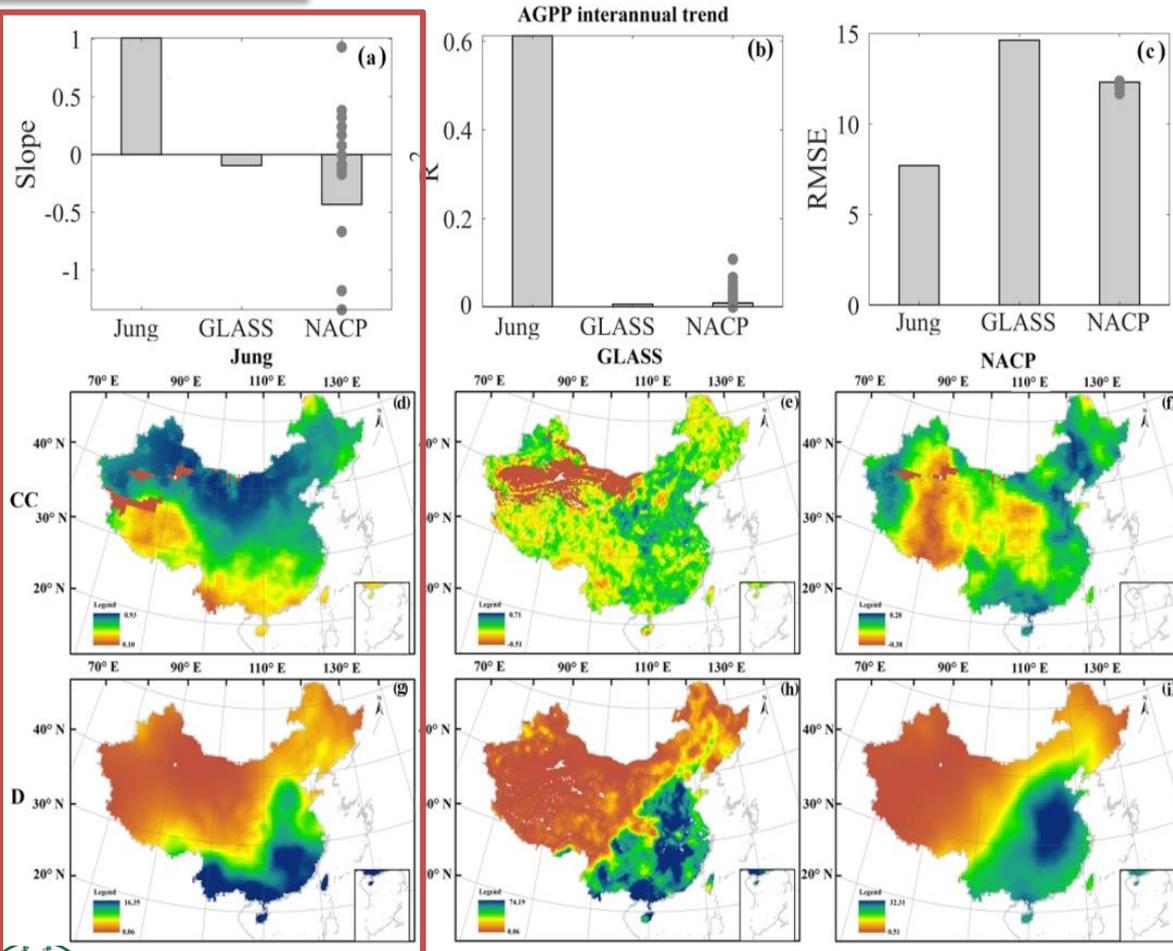
➤ 一致性也呈现明显的空间差异

空间变化一致性

(Zhu, Yu, et al. 2023, STOTEN)



年际趋势



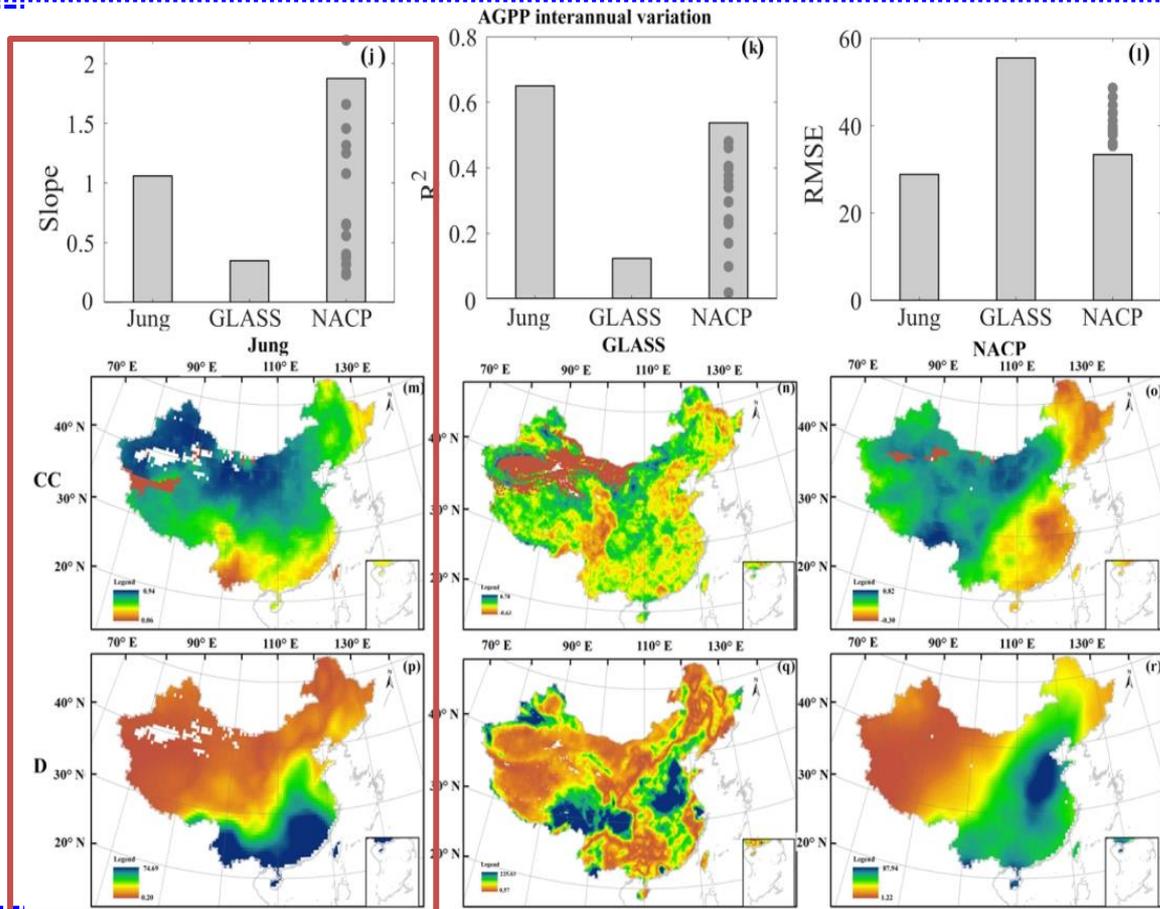
- 与Jung的一致性最高，但与GLASS差异较为明显，过程模型各有不同
- 在东南沿海地区的一致性较差

年际趋势的一致性

(Zhu, Yu, et al. 2023, STOTEN)



年际幅度



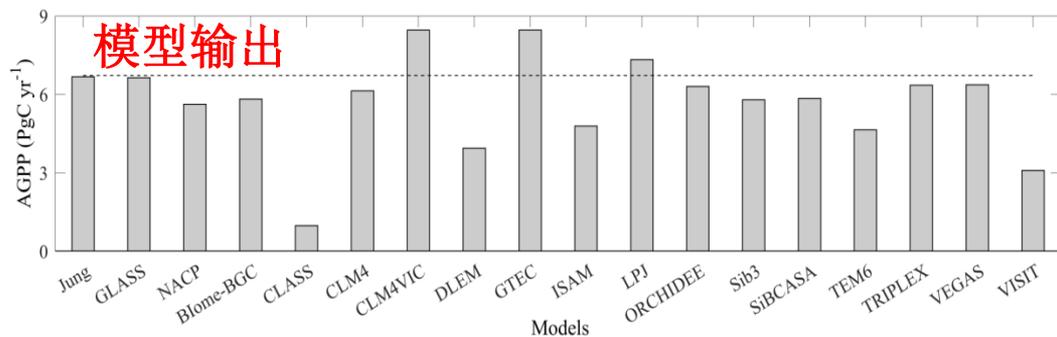
➤ 与年际趋势的一致性相似，Jung的一致性最高，但与GLASS差异较为明显，过程模型各有不同

➤ 在东南沿海地区的一致性较差

年际变化幅度的一致性



年总量



文献

Theoretical basis	Methods	Periods	AGPP (PgC yr ⁻¹)	References
Physiological processes	TRENDY models	1982-2010	7.85	(Sitch et al., 2015)
Light efficiency	use MODIS	2000-2014	5.53	(Zhao et al., 2005)
Light efficiency	use EC-LUE	2000-2009	6.04	(Li et al., 2013)
Light efficiency	use EC-LUE	2000-2009	5.38	(Yuan et al., 2010)
Classical statistics	Multiple linear regression	2001-2010	7.78	(Zhu et al., 2014)
Machine learning	SVM	2000-2015	7.81	(Ichii et al., 2017)
Machine learning	MTE	1982-2015	6.62	(Yao et al., 2018b)
Machine learning	MTE	1982-2010	6.35	(Jung et al., 2011)
Machine learning	RFR	2000-2020	7.03	This study

➤ **总量一致性：与数据驱动结果及LUE模型结果具有较高一致性，也落于各模型结果的范围内**

➤ **略高于部分文献结果：本项目所得结果涵盖最新的时间跨度，AGPP年际呈增加趋势**

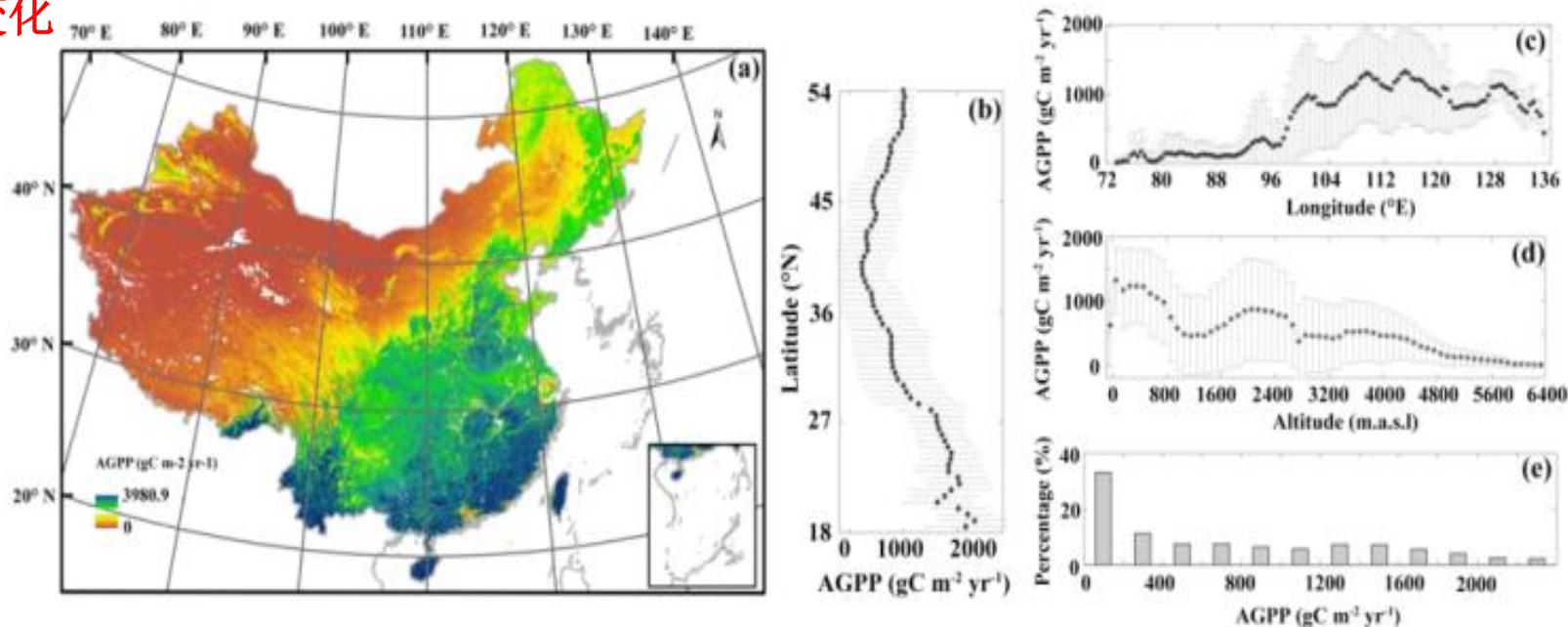
报告提纲

- 研究背景
- 中国年总初级生产力空间格局
- 基于联网观测数据的直接扩展方法
- 中国年总初级生产力的时空变化
- 结论与展望



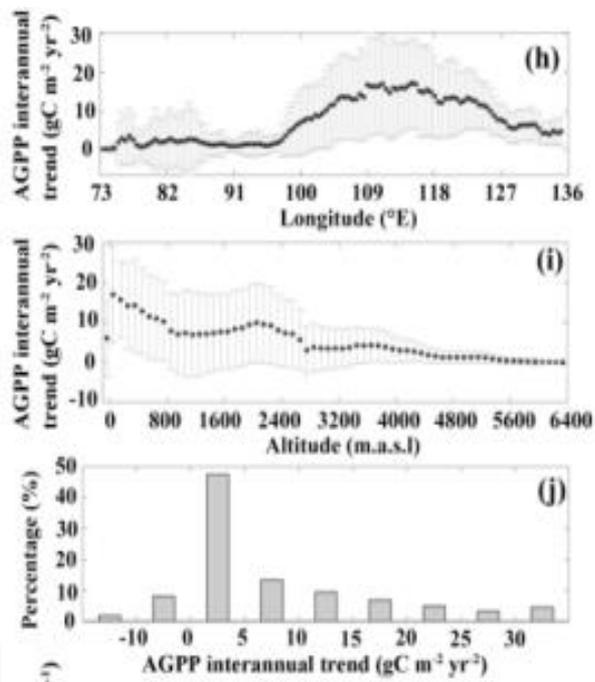
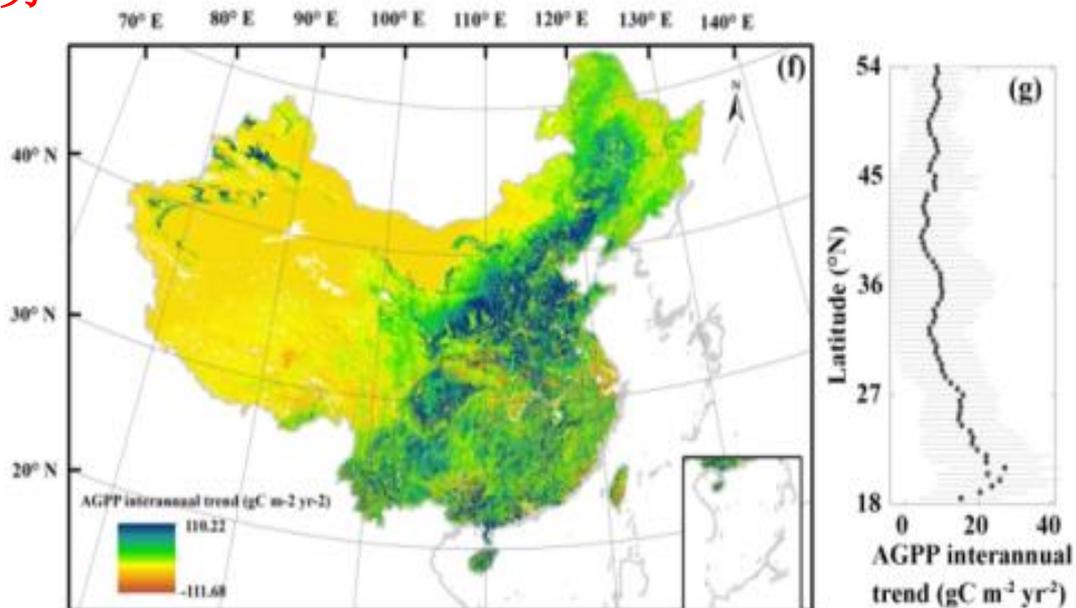
中国AGPP的时空变化

空间变化



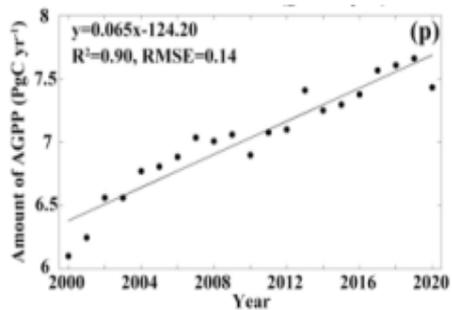
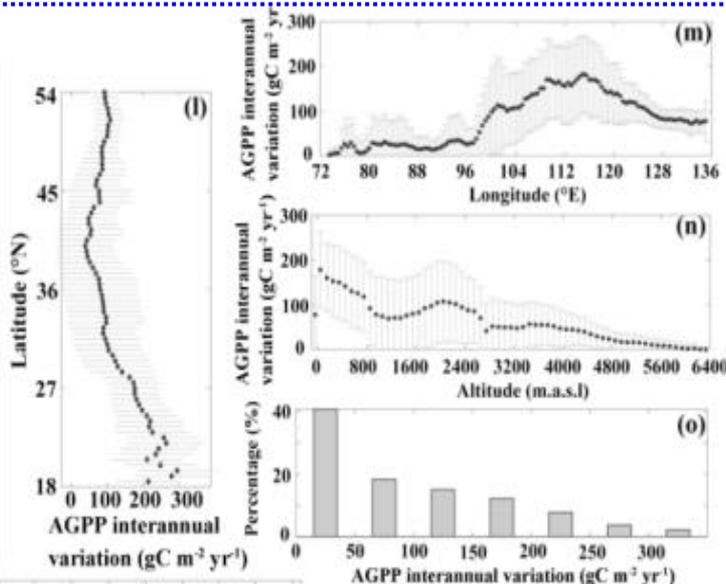
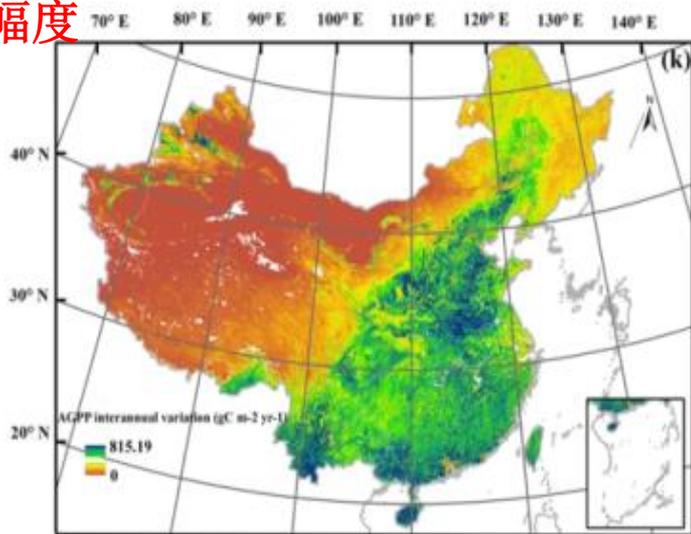
- **AGPP自东南向西北递减**
- **明显的纬向与垂向递减及经向增加趋势**

年际趋势



- **AGPP自东向西递减**
- **明显的纬向与垂向递减及经向增加趋势**

年际变化幅度



- 与AGPP空间变化相似
- 中国AGPP总量为 $7.03 \pm 0.45 \text{ PgC yr}^{-1}$ ，年际间呈现显著的增加趋势。



2000-2020 年中国陆地生态系统年总初级生产力数据集

ISSN 2096-2223
CN 11-6035/N



范仁雪¹, 朱先进^{1,29*}, 陈智^{2,3*}, 于贵瑞^{2,3}, 张维康², 韩朗⁴,
王秋凤^{2,3}, 陈世苹⁵, 刘绍民⁶, 王辉民², 闫俊华⁷, 谭俊磊⁸,
张法伟⁹, 赵风华², 李英年⁹, 张一平¹⁰, 石培礼², 朱教君¹¹,
吴家兵¹¹, 赵仲辉¹², 郝彦宾¹³, 沙丽清¹⁰, 张玉翠¹⁴, 姜世成¹⁵,
顾峰雪¹⁶, 吴志祥¹⁷, 张扬建^{2,3}, 周莉¹⁸, 唐亚坤¹⁹, 贾丙瑞⁵,
李玉强⁸, 宋清海¹⁰, 董刚²⁰, 高艳红⁸, 蒋正德¹¹, 孙鹏⁷,
王建林²¹, 何其华²², 李新虎²³, 王飞²⁴, 魏文学²⁵, 邓正苗²⁵,
刘利²⁷, 章熙锋²⁸, 朱治林^{2,3}



文献 CSTR:
32001.14.11-6035.csd.2023.0037.zh



文献 DOI:
10.11027/11-6035.csd.2023.0037.zh

访问ScienceDB

中国科学数据

首页 编委会 投稿指南 关于我们 阅读中心

2000-2020年中国陆地生态系统年总初级生产力数据集

A dataset of annual gross primary productivity in China's terrestrial ecosystems during 2000-2020

https://www.scidb.cn/detail?dataSetId=b496b208f51e44fcf326e8b0f792c34

科学数据银行 Science Data Bank

提交数据 注册 登录 EN 中文

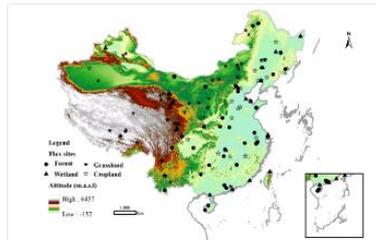
首页 浏览数据集 合作伙伴 帮助 关于ScienceDB

开放获取 | 出版时间 2023-02-01 · 最近更新 2023-02-22 | CC BY 4.0

2000-2020年中国陆地生态系统年总初级生产力数据集

VERSION: 3

A dataset of annual gross primary productivity over Chinese terrestrial ecosystems during 2000-2020



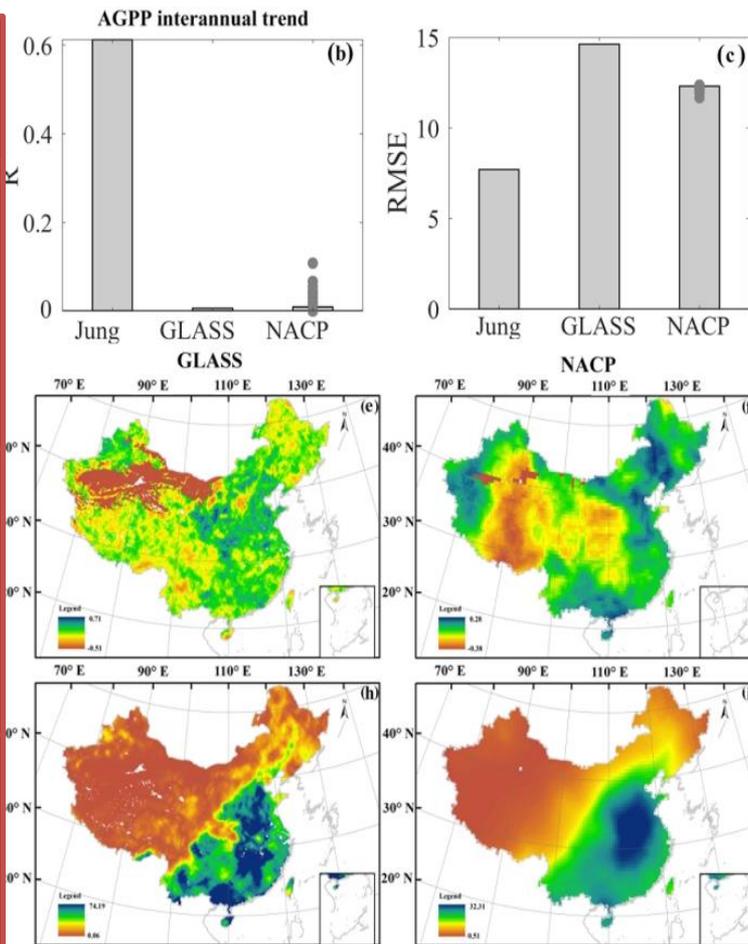
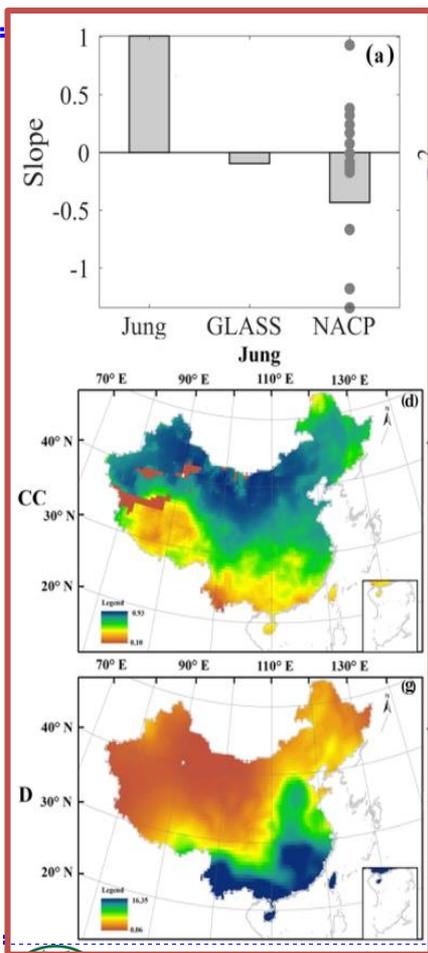
1,146 | 1,429 | 0 | 3 | 0

范仁雪; 朱先进; 陈智; 于贵瑞; 张维康; 韩朗; 王秋凤; 陈世苹; 刘绍民; 王辉民; 闫俊华; 谭俊磊; 张法伟; 赵风华; 李英年; 张一平; 石培礼; 朱教君; 吴家兵; 赵仲辉; 郝彦宾; 沙丽清; 张玉翠; 姜世成; 顾峰雪; 吴志祥; 张扬建; 周莉; 唐亚坤; 贾丙瑞; 李玉强; 宋清海; 董刚; 高艳红; 蒋正德; 孙鹏; 王建林; 何其华; 李新虎; 王飞; 魏文学; 邓正苗; 郝翔翔; 李彦; 刘晓利; 章熙锋; 朱治林

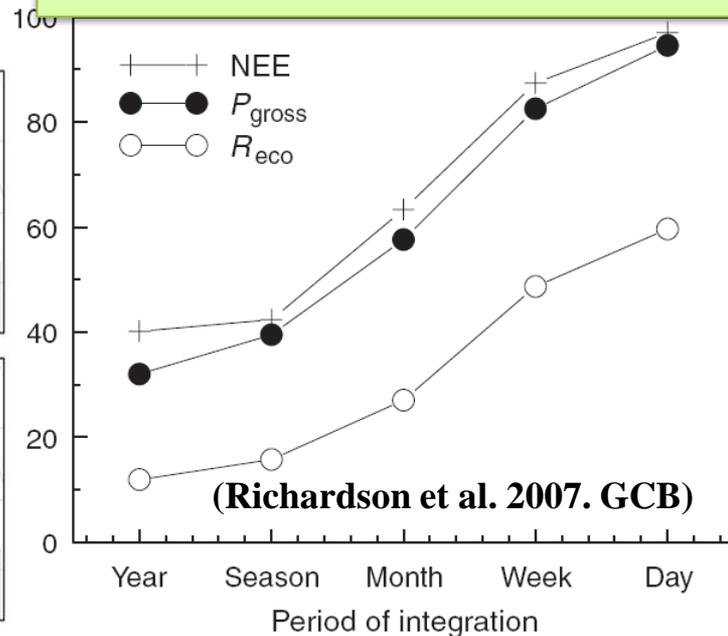
CSTR 15732.11.scidb.00077 DOI 10.57760/scidb.o00119.00077

基于最全面中国观测数据所得的结果





- 现有结果无法完全反映年际变化
- 生态系统响应起主导作用



环境要素对不同时间尺度碳通量的贡献

报告提纲

- 研究背景
- 中国年总初级生产力空间格局
- 基于联网观测数据的直接扩展方法
- 中国年总初级生产力的时空变化
- 结论与展望



结论

- 中国AGPP受**气候与生物因素**的共同作用呈现显著的**纬向递减格局**，生态系统类型的差异没有显著引起AGPP空间格局的不同
- 基于**随机森林回归、整合气候土壤生物因素、通过预测PAGPP**都是扩展站点AGPP至区域水平的最优模式；基于最优扩展模式所得AGPP与已有数据具有相似的空间变化，但在时间变化方面存在较大差异，并与**数据驱动产品**相似度最高
- 基于最优扩展模式生成了2000-2020年中国AGPP数据，发现AGPP的时空变化特征及其年际间显著递增趋势，生态系统响应主导AGPP年际变异，但影响强度及途径存在区域差异。

展望

- **AGPP数值的准确获取**：复杂地形、数据插补与拆分
- **AGPP年际变化的模拟**：联网+长期连续观测
- **AGPP扩展方法的再优化**：数据驱动+机理认知



衷心感谢!

