

全球陆地总初级生产力对干旱的延续响应

居为民 张振宇

南京大学国际地球系统科学研究所

南京大学仙林校区昆山楼433

邮箱: juweimin@nju.edu.cn, 电话: 89685670

2023年7月28日, USCCC, 南京信息工程大学

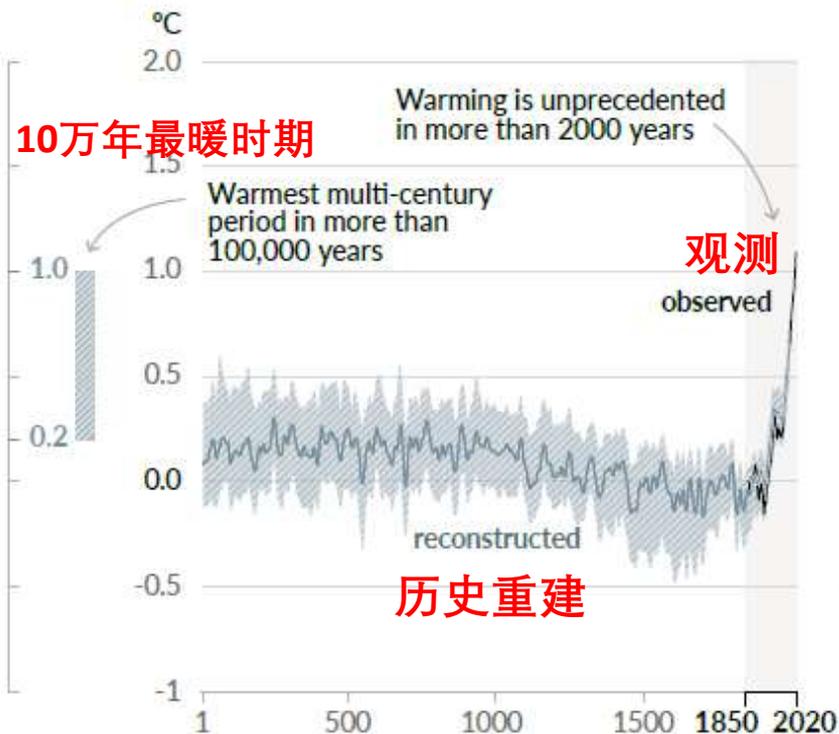
报告提纲

- ◆ 研究背景介绍
- ◆ 研究方法 with 结果
- ◆ 主要研究结论

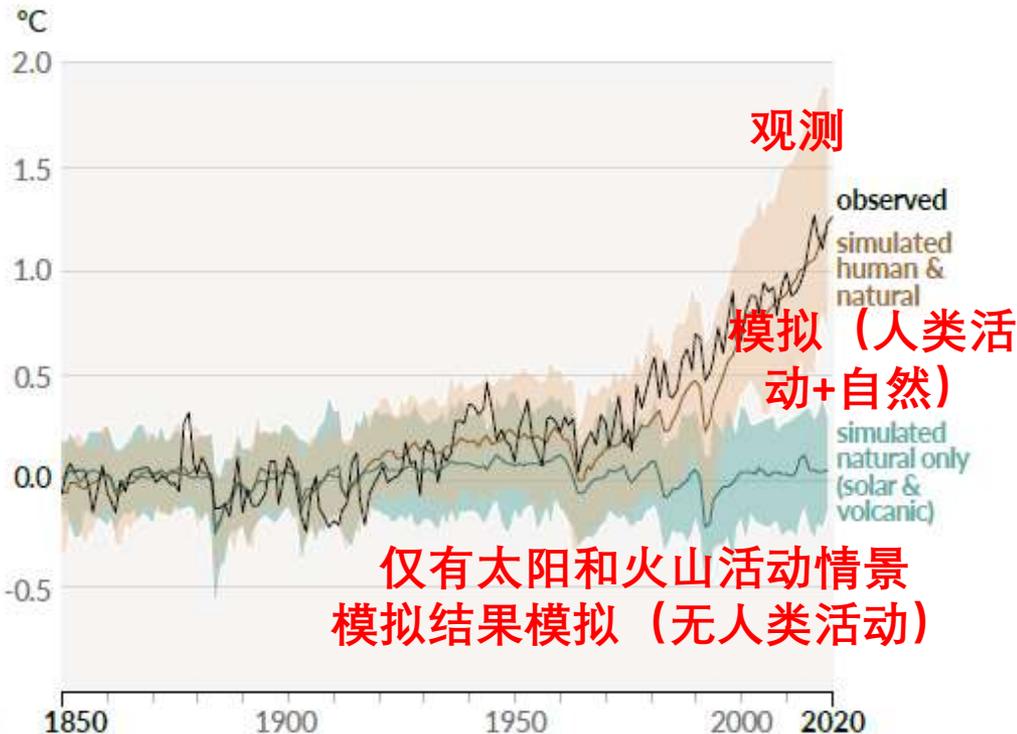
人类活动对气候变化的影响

Changes in global surface temperature relative to 1850-1900 **全球表面温度相对于1850-1900年的变化**

a) Change in global surface temperature (decadal average) as reconstructed (1-2000) and observed (1850-2020)

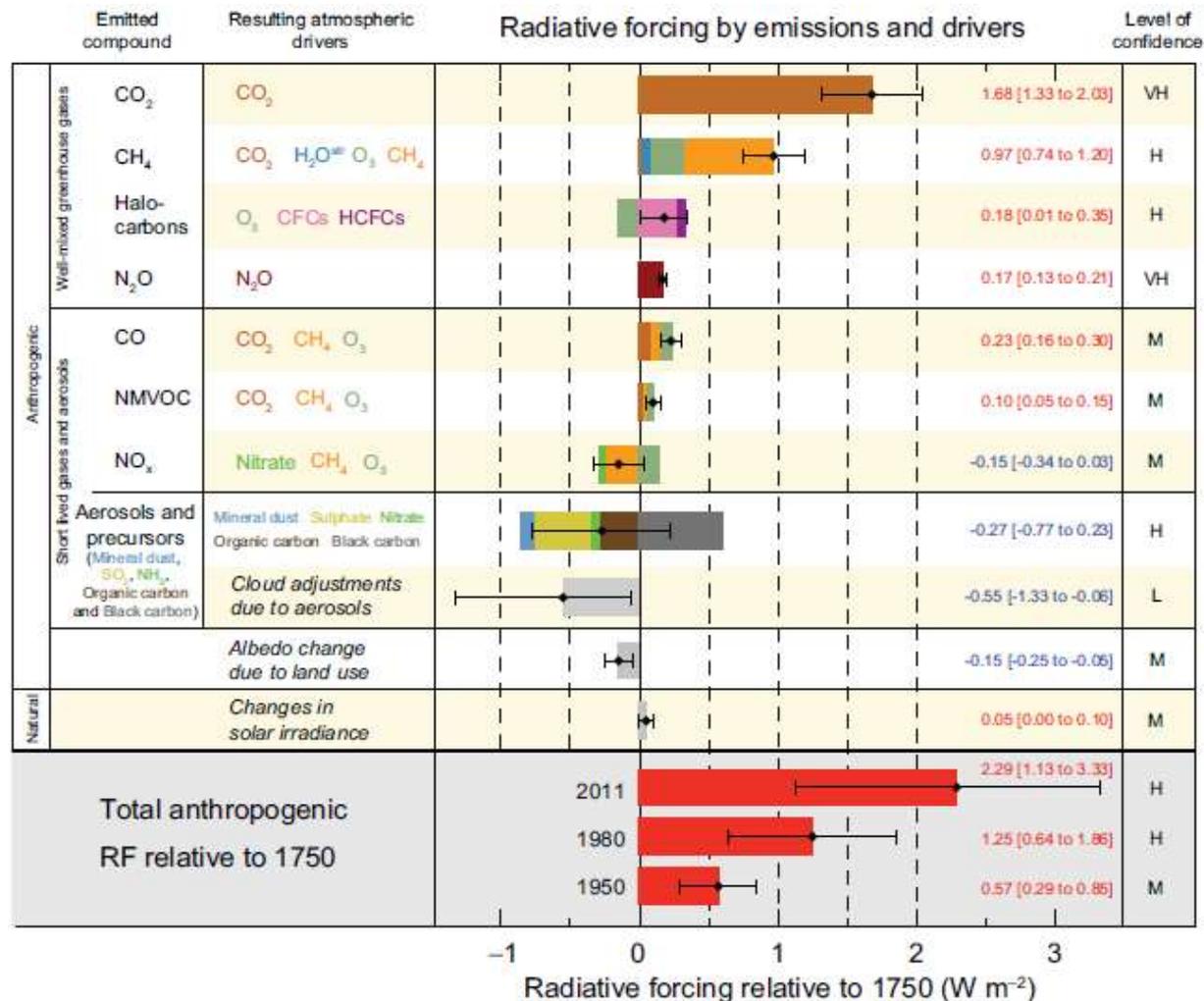


b) Change in global surface temperature (annual average) as observed and simulated using human & natural and only natural factors (both 1850-2020)



考虑人类活动和自然因子，模拟的全球平均温度变化趋势与观测一致；仅考虑自然因子模拟的全球温度明显偏低。因此，**人类活动导致全球温度明显升高。**

气候变化的驱动因子

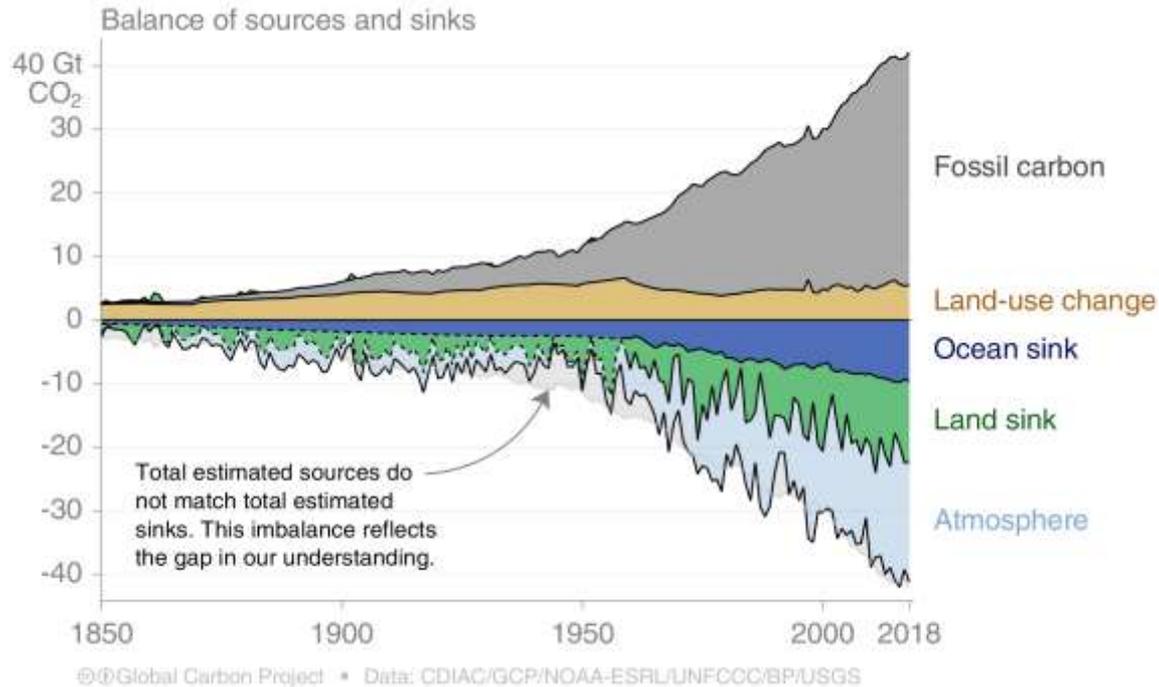


- ◆ CO₂的辐射强迫最强，其次为CH₄、卤碳、N₂O、CO等
- ◆ 气溶胶和土地利用变化导致的反照率变化具有负辐射强迫效应
- ◆ 1950年以来，人类活动导致的辐射强迫（相对于1750年）不断增强

全球碳收支

Carbon emissions are partitioned among the atmosphere and carbon sinks on land and in the ocean
The “imbalance” between total emissions and total sinks reflects the gap in our understanding

源
汇

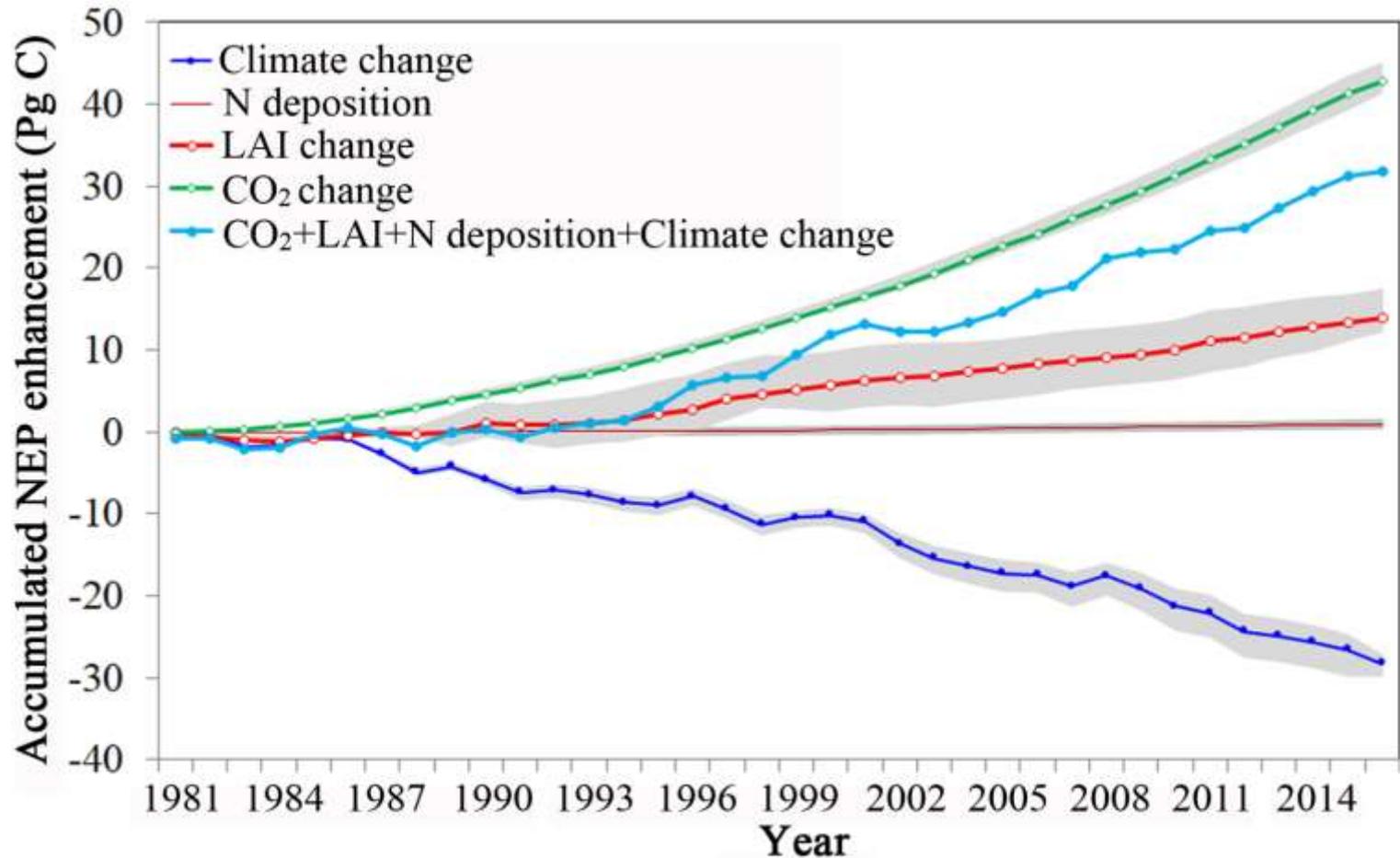


全球碳源（向大气排放CO₂）和汇（从大气吸收CO₂）变化趋势
1950年代以来，全球陆地和海洋碳汇呈现增大趋势

问题：陆地和海洋碳汇的变化趋势有何差异？

Source: [CDIAC](#); [NOAA-ESRL](#); [Houghton and Nassikas 2017](#); [Hansis et al 2015](#); [Joos et al 2013](#); [Khaliwala et al. 2013](#); [DeVries 2014](#); [Friedlingstein et al 2019](#); [Global Carbon Budget 2019](#)

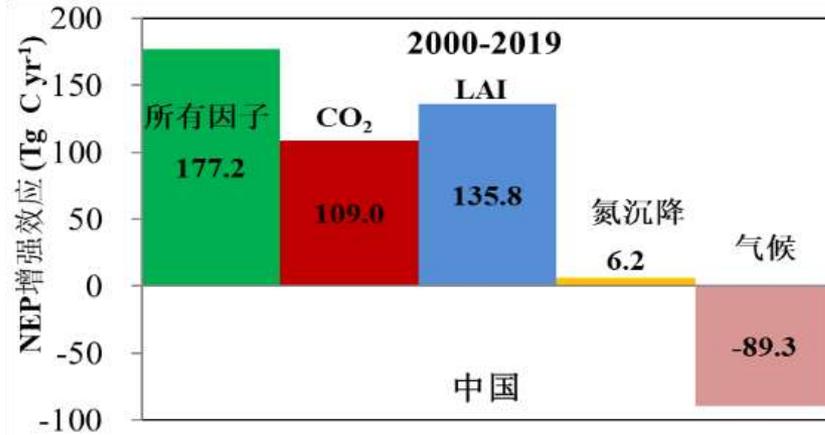
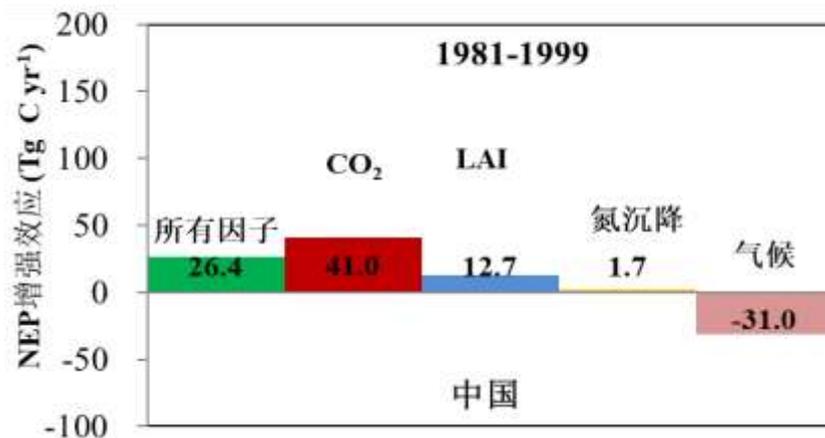
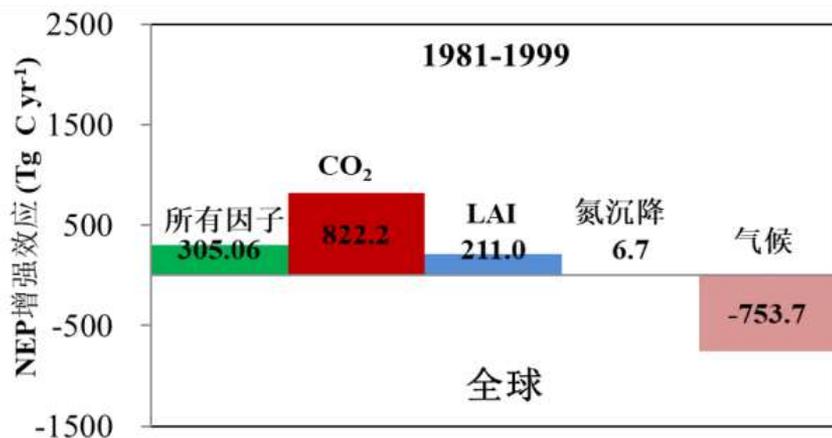
不同因子对全球陆地生态系统碳汇的贡献



1981-2016年全球陆地生态系统碳汇累计为 95 ± 5 Pg C

CO₂、LAI、N沉降和气候变化的贡献分别为**44.6**、**11.7**、**1.1**和**-27.1**Pg C

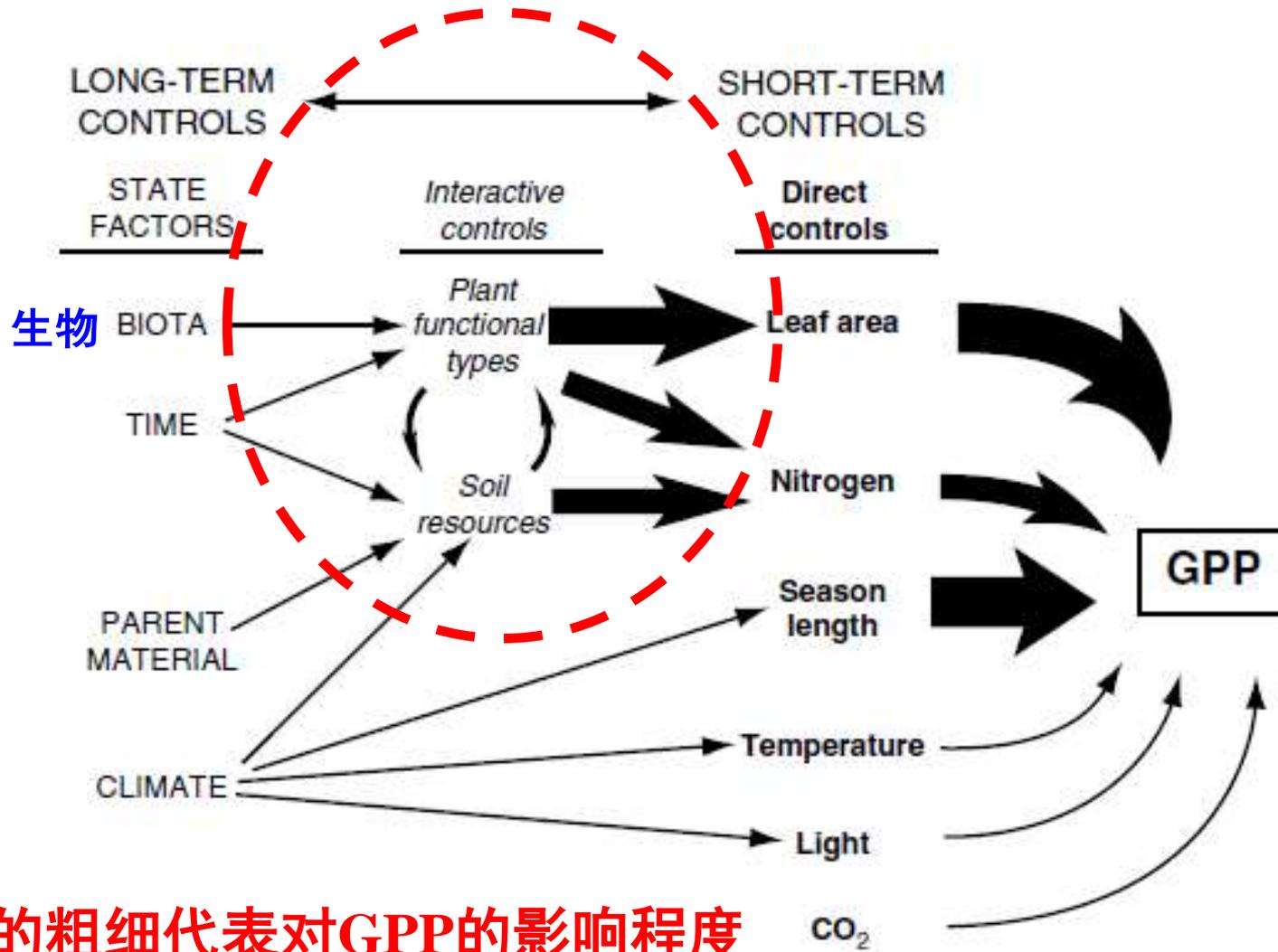
不同因子对全球陆地生态系统碳汇的贡献



中国植被变绿 (LAI上升) 对陆地生态系统碳汇有显著增强作用

影响陆地生态系统GPP的关键因子

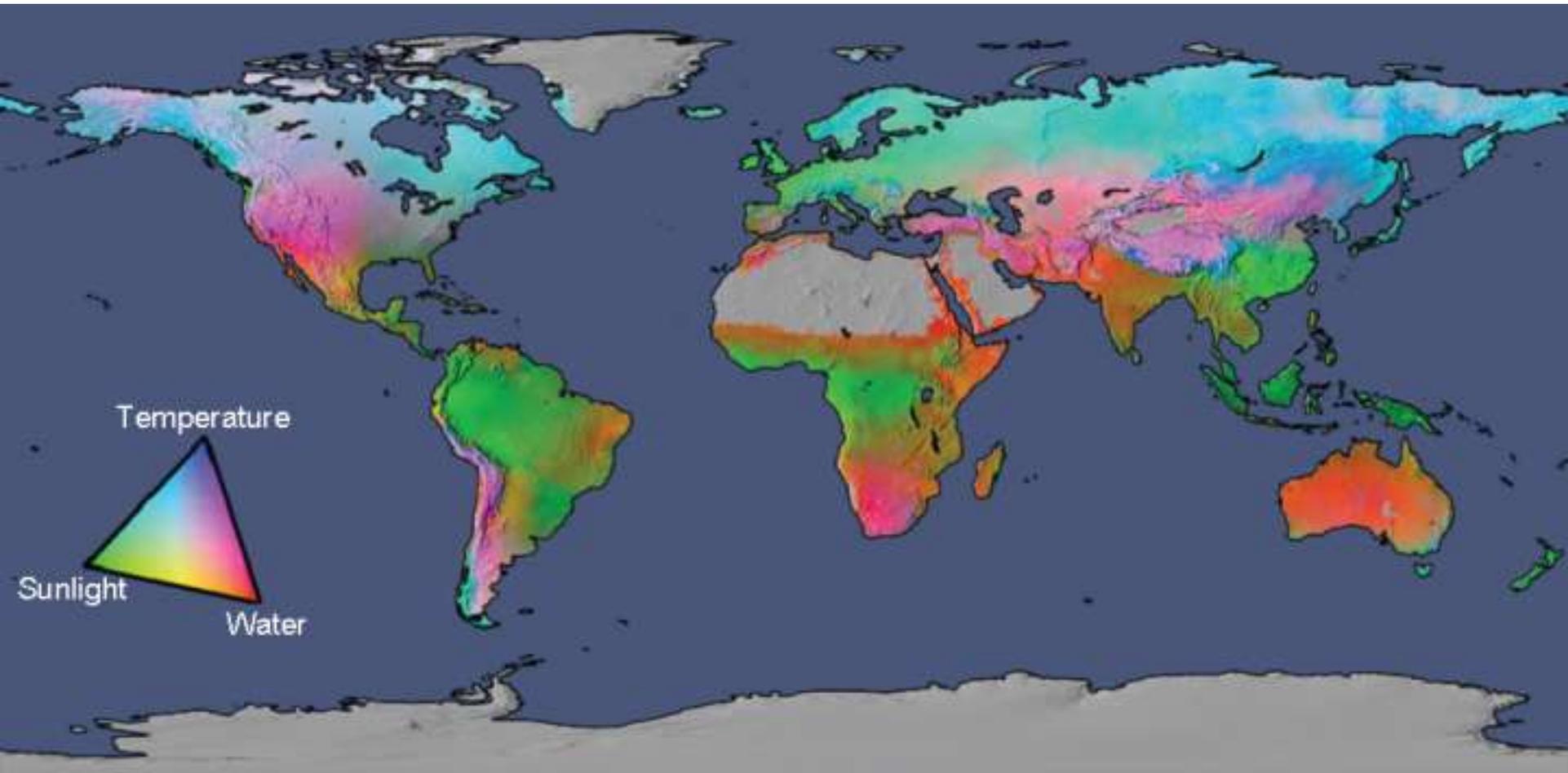
- ◆ 长期因子通过影响植被功能类型和土壤资源间接影响GPP
- ◆ 短期因子（叶面积指数、氮、生长季长度、温度、光和CO₂）直接影响GPP



箭头的粗细代表对GPP的影响程度

不同地区NPP的主要限制因子

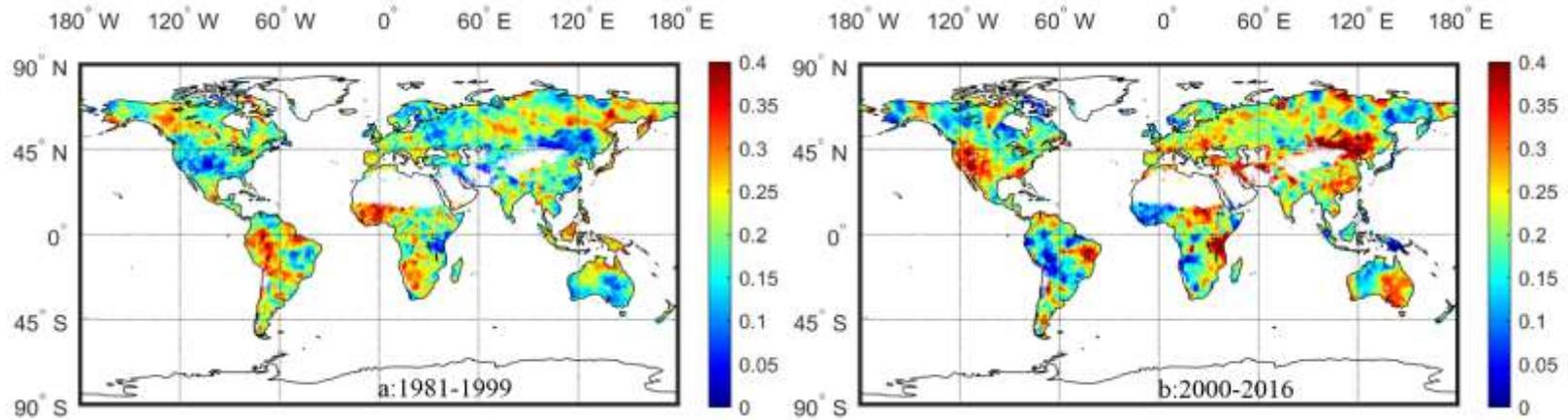
- ◆ 利用1982-1999年AVHRR 遥感数据驱动模型得到每个像元、每年的NPP
- ◆ 确定温度、水分和辐射对NPP影响的权重，进行合成制图



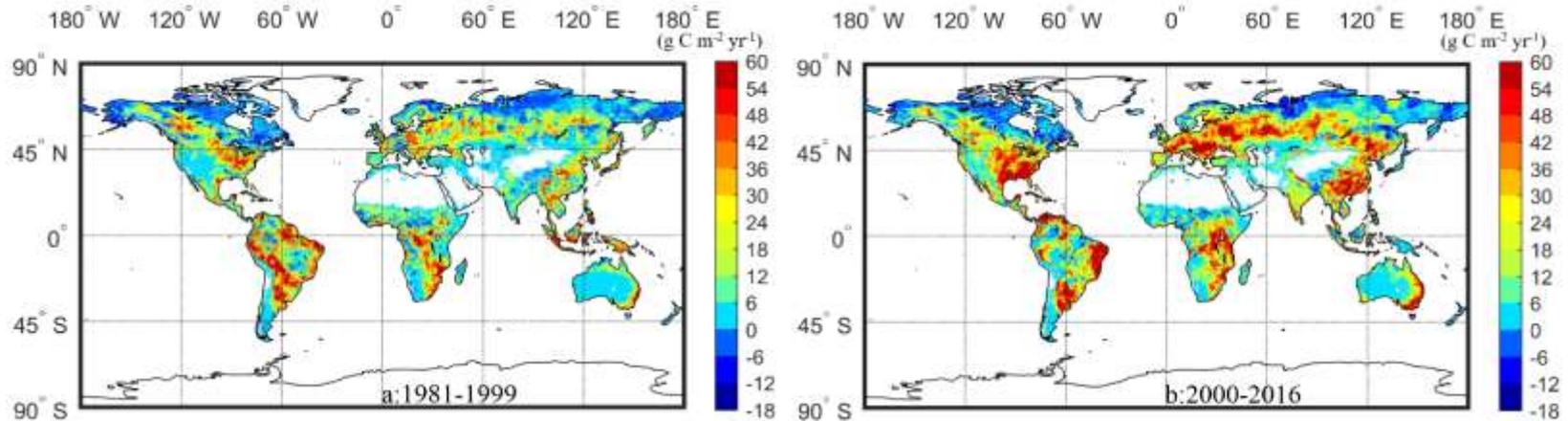
(Boisvebeu and Running, 2006)

全球GPP受干旱影响的风险

- 利用SPEI指数判断干旱是否发生，计算干旱发生频率
- 计算GPP干旱影响的脆弱性=正常年GPP与干旱年GPP之差
- 风险性等于脆弱性与干旱频率的乘积



干旱发生概率



GPP的干旱风险增大

报告提纲

- ◆ 研究背景介绍
- ◆ **研究方法**与**结果**
- ◆ 主要研究结论

基于最优理论的P模型

$$GPP = LUE \times APAR$$

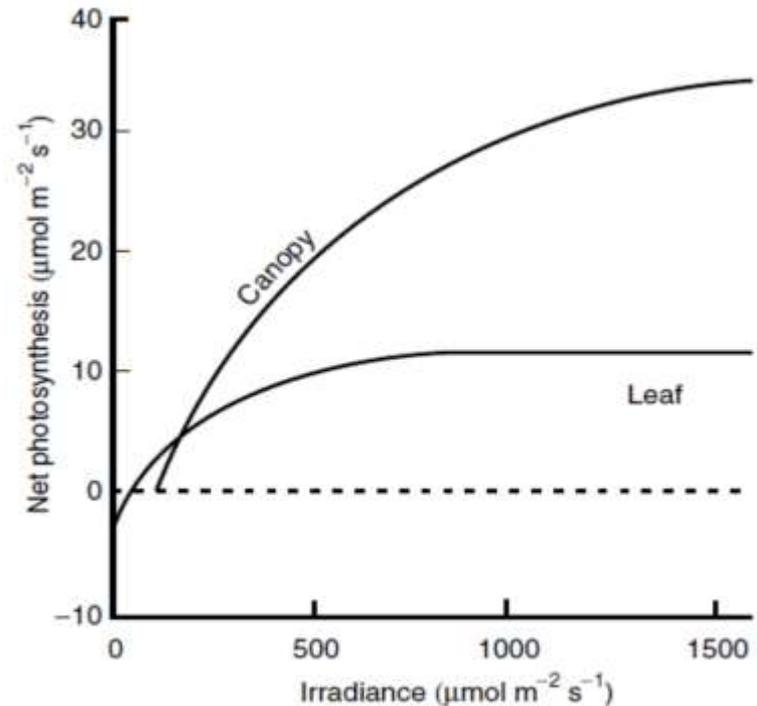
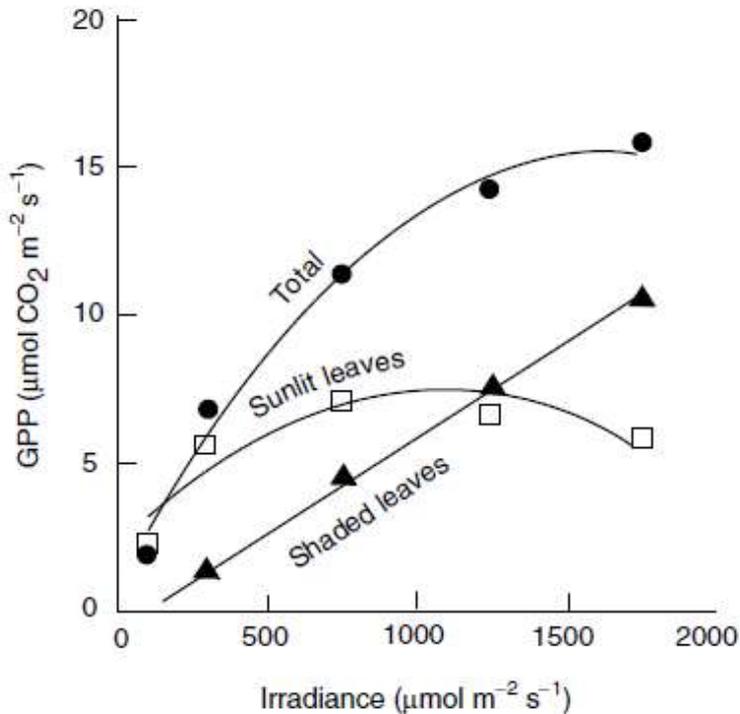
$$LUE = \varphi_0 \times m \times \sqrt{1 - \left(\frac{c}{m}\right)^{\frac{2}{3}}} \times f(\text{water})$$

$$f(\text{water}) = LE / RN$$

式中, φ_0 是本征量子产率效率 (mol C mol^{-1}); $APAR$ 是吸收的光合有效辐射 ($\text{mol m}^{-2} \text{ month}^{-1}$); m 代表 CO_2 的限制因子, c 为维持最大电子传导速率 (J_{\max}) 的碳成本, 约等于0.41; LE 为潜热通量 (W m^{-2}), RN 为净辐射通量 (W m^{-2}).

P模型的改进

- ◆ **阳叶**（冠层顶部）可利用直接和散射辐射，其 GPP 少受辐射限制；过强的辐射会导致阳叶GPP降低
- ◆ **阴叶**（位于冠层中下部）仅能利用散射光，其GPP受辐射限制；辐射增加，阴叶GPP线性上升
- ◆ 冠层的光补偿点和饱和点高于叶片

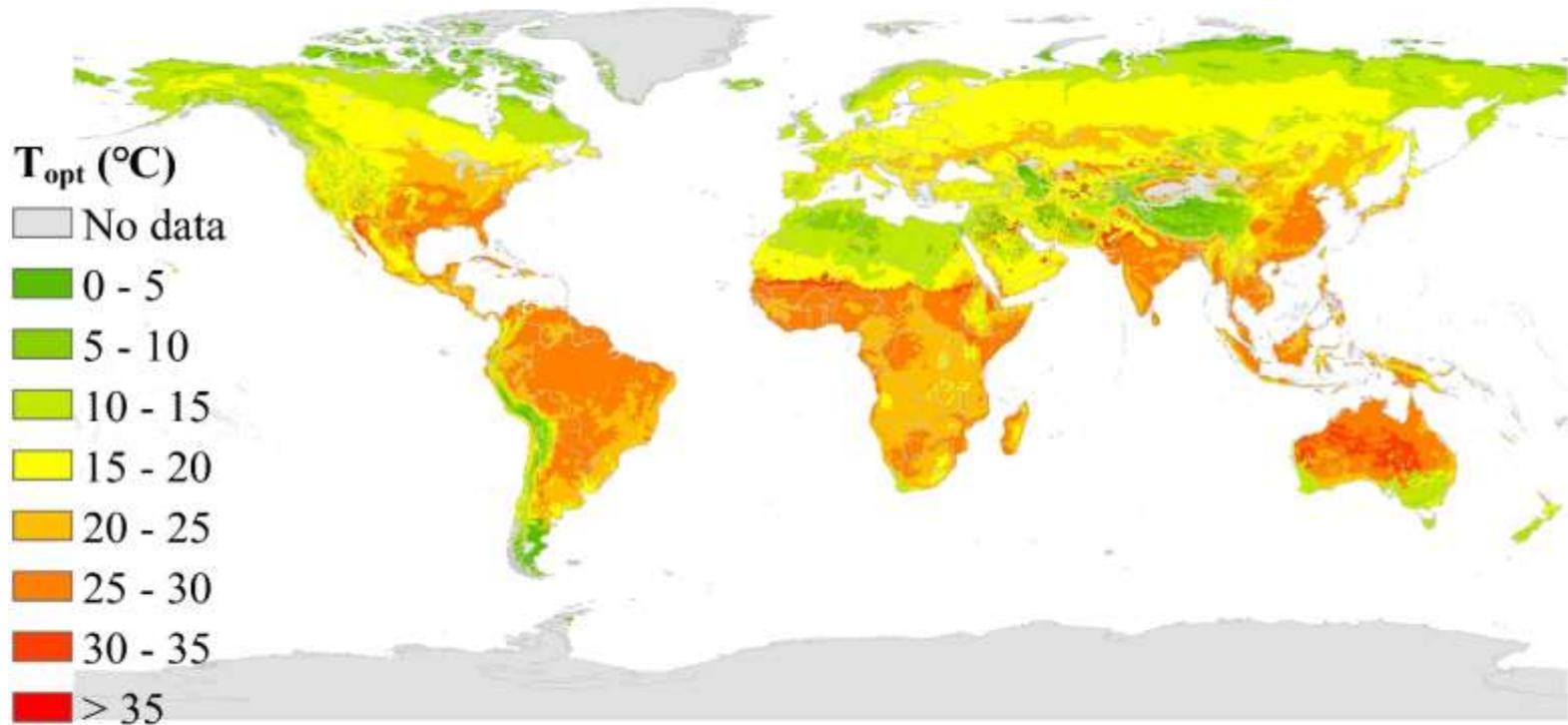


Leaf \neq foliage \neq canopy

P模型的改进

$$GPP = LUE \times (APAR_{sun} + APAR_{shade})$$

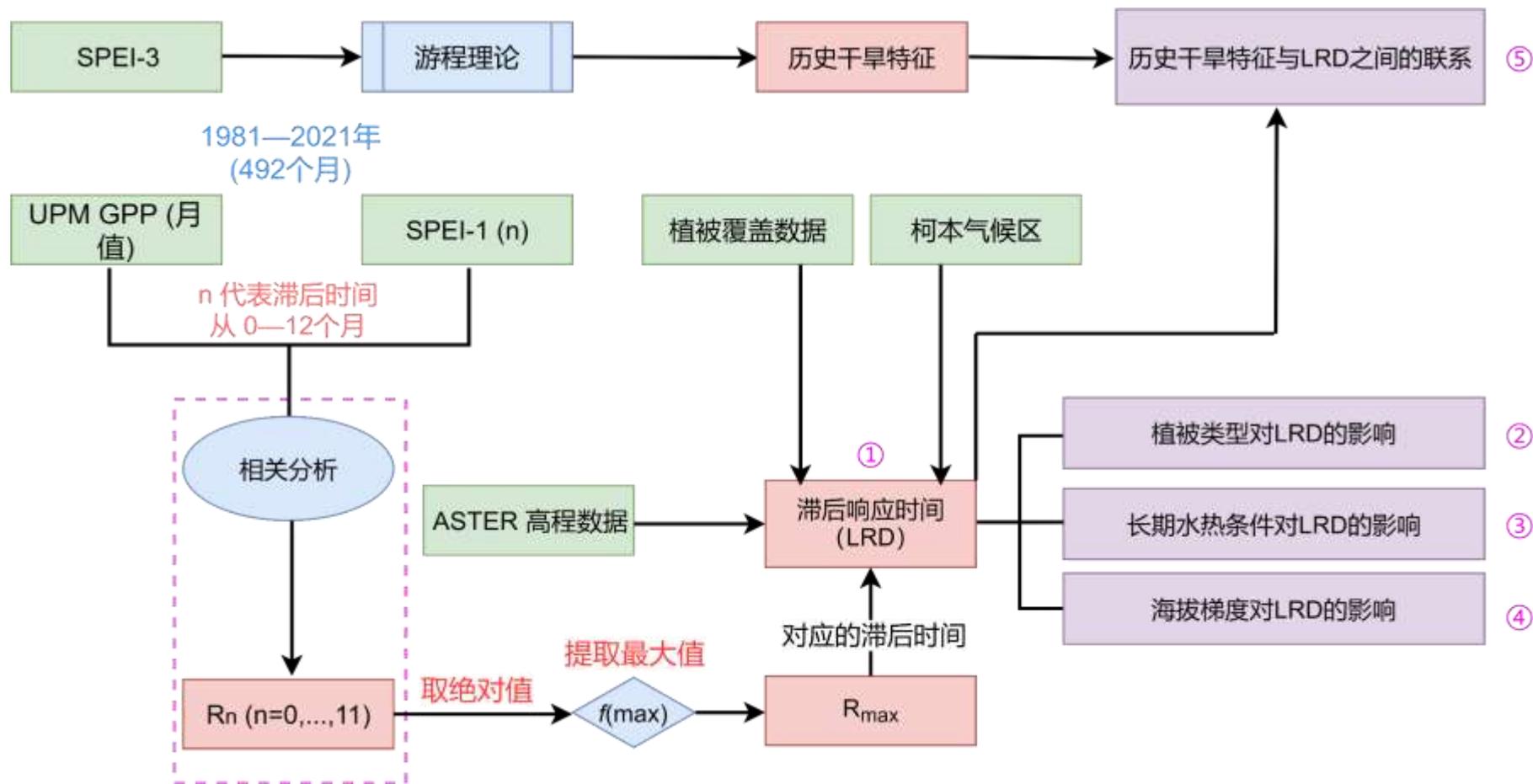
$$LUE = \varphi_{0max} \times \exp\left(-\left(\frac{T - T_{opt}}{T_{opt}}\right)^2\right) \times m \times \sqrt{1 - \left(\frac{c}{m}\right)^{\frac{2}{3}}} \times LE/RN$$



不同策略对P模型改进作用的评价方案

方案	APAR 计算方法	φ_0 计算方法
方案 1	$FPAR = 0.95 - 0.94 \times e^{-0.5 \times LAI / \cos \theta}$ $APAR = FPAR \times PAR$	$\varphi_0 = \frac{0.352 + 0.021T - 0.00034T^2}{8}$
方案 2	$APAR = APAR_{sunlit} + APAR_{shade}$	$\varphi_0 = \frac{0.352 + 0.021T - 0.00034T^2}{8}$
方案 3	$FPAR = 0.95 - 0.94 \times e^{-0.5 \times LAI / \cos \theta}$ $APAR = FPAR \times PAR$	$\varphi_0 = \varphi_{0max} \times f(T)$ $f(T) = \exp\left(-\left(\frac{T - T_{opt}}{T_{opt}}\right)^2\right)$
方案 4	$APAR = APAR_{sunlit} + APAR_{shade}$	$\varphi_0 = \varphi_{0max} \times f(T)$ $f(T) = \exp\left(-\left(\frac{T - T_{opt}}{T_{opt}}\right)^2\right)$

GPP对干旱的滞后响应

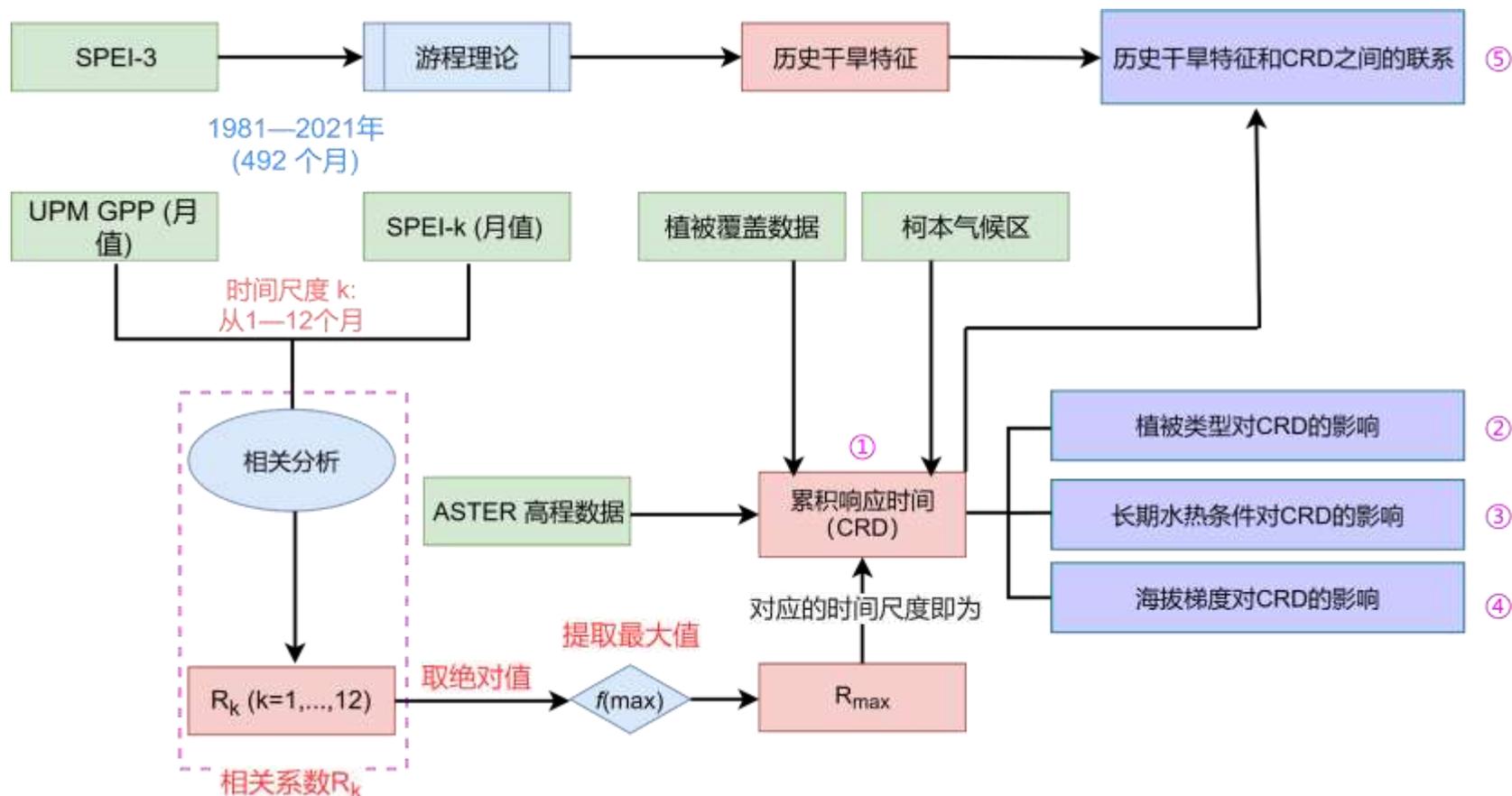


① 计算GPP与不同滞后时间 (lag) 下SPEI-1的相关性 R_{lagged} :

② 使用滞后响应时间 (Lagged response duration, LRD) 量化GPP对干旱的滞后响应;

③ 对于每个植被像元, 对应 R_{lagged} 绝对值最大值|的滞后时间 (lag) 即为LRD。

GPP对干旱的累积响应



- ① 计算GPP与不同时间尺度 (k) 的SPEI的相关系数；
- ② 用累积响应时间 (Cumulative response duration, CRD) 表征GPP对干旱的延续响应；
- ③ 对于每个植被像元, 对应 $R_{cumulative}$ 绝对值最大值的SPEI时间尺度即为CRD。

延续响应包括滞后响应和累积响应

改进的P模型总体验证

方案1: 大叶APAR, 原 φ_0 方法

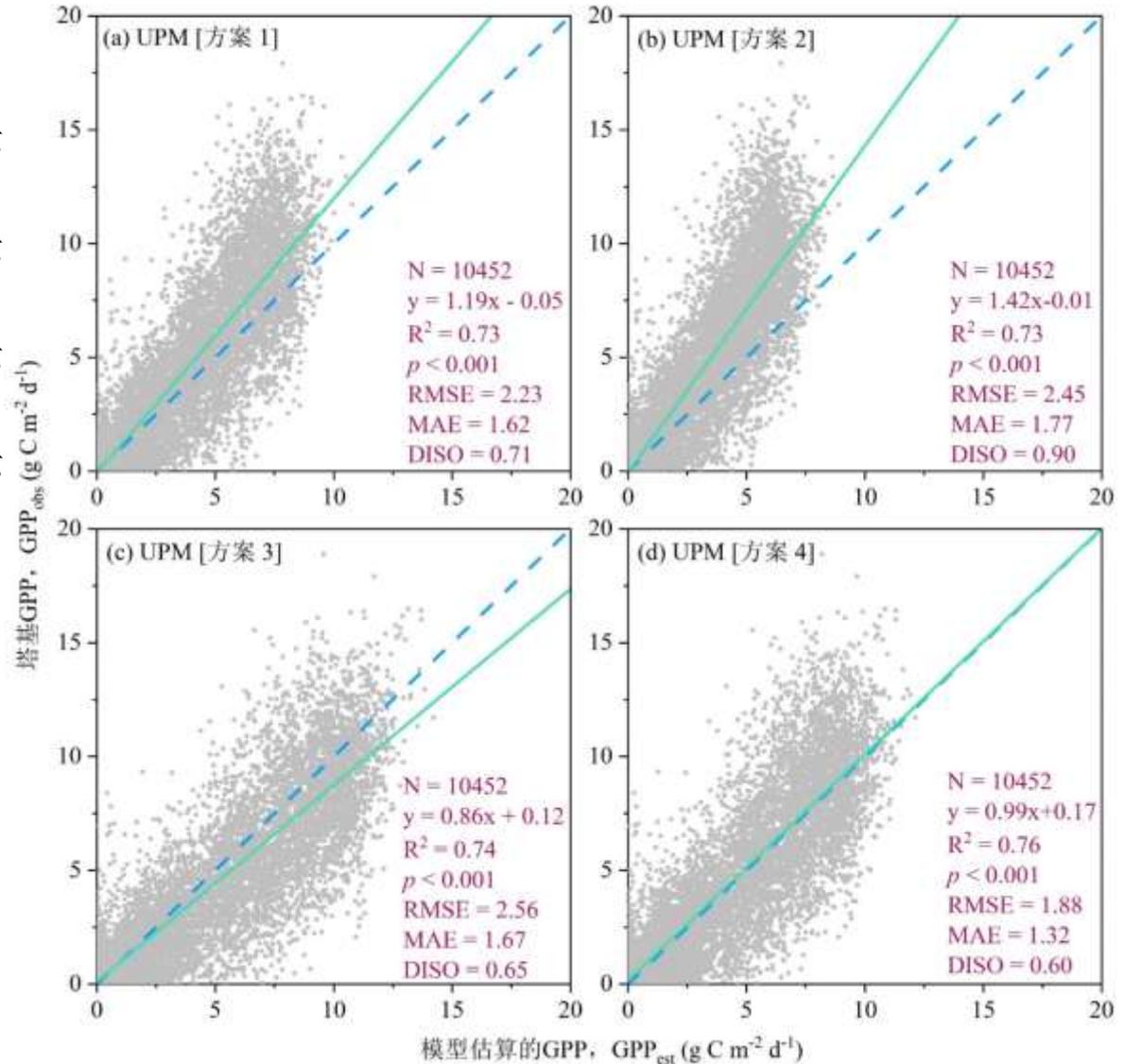
方案2: 两叶APAR, 原 φ_0 方法

方案3: 大叶APAR, 新 φ_0 方法

方案4: 两叶APAR, 新 φ_0 方法

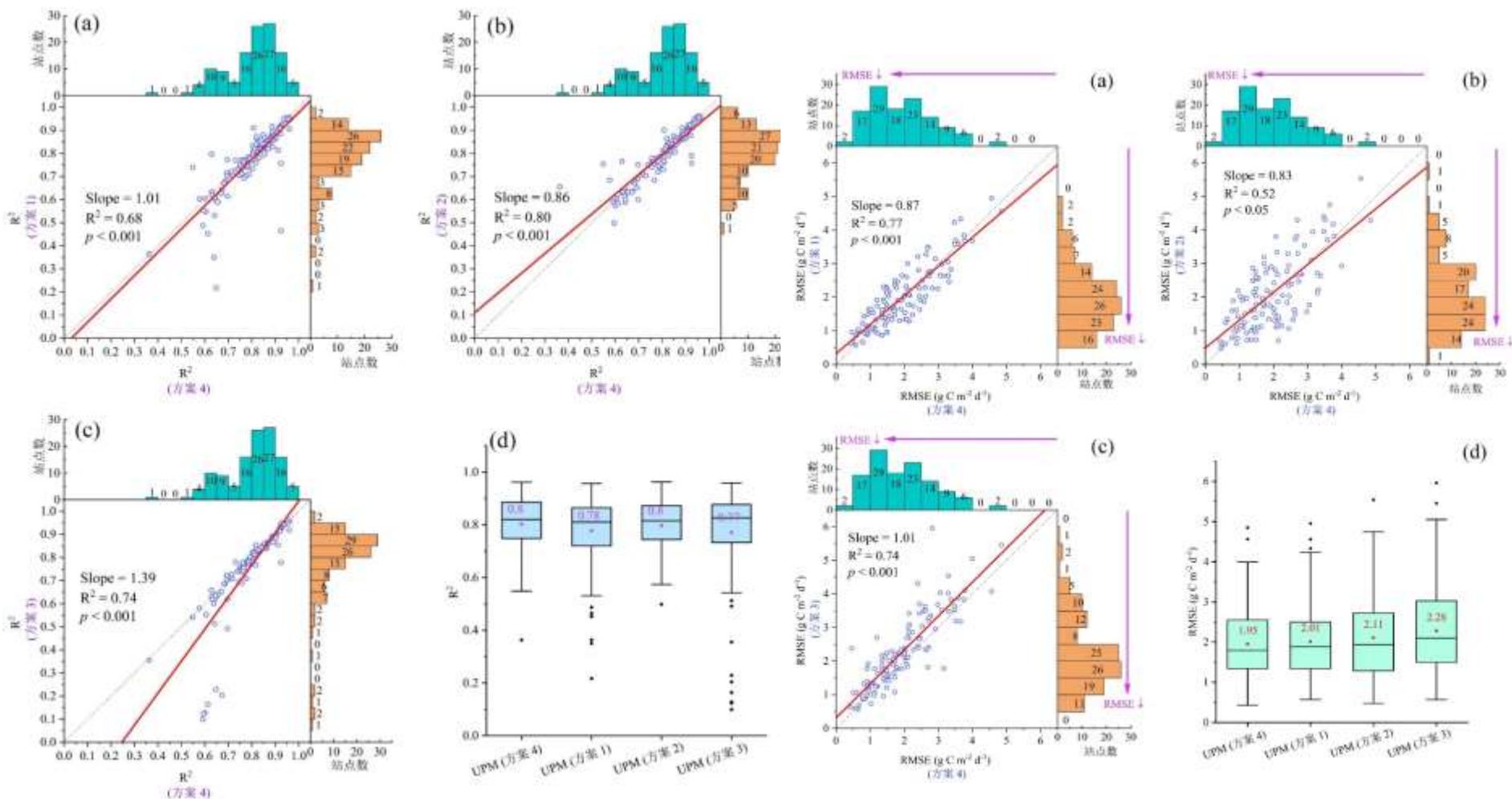
两叶APAR和新 φ_0 方法

可显改进GPP的模拟效果



改进的P模型站点验证

- 方案4和2的平均 R^2 为0.8，方案1的平均 R^2 为0.78，方案3的平均站点 R^2 为0.77
- 方案4、1、2和3的平均RMSE分别为1.95、2.01、2.11和2.28 $\text{g C m}^{-2} \text{d}^{-1}$

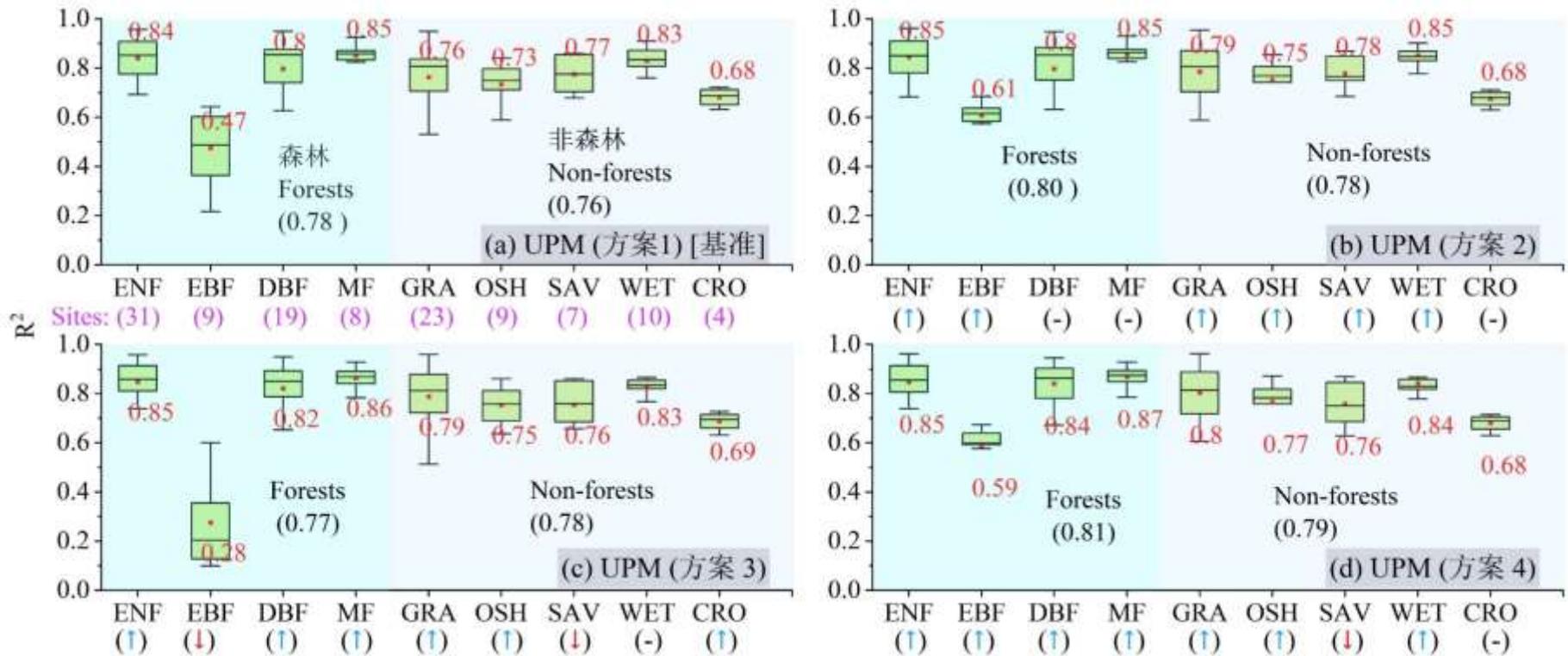


R²

RMSE

改进的P模型不同植被类型站点验证

- 方案2提升了6种植被的站点平均 R^2 ，方案3提升了6种植被的站点平均 R^2 ，方案4提升了7种植被的站点平均 R^2 。

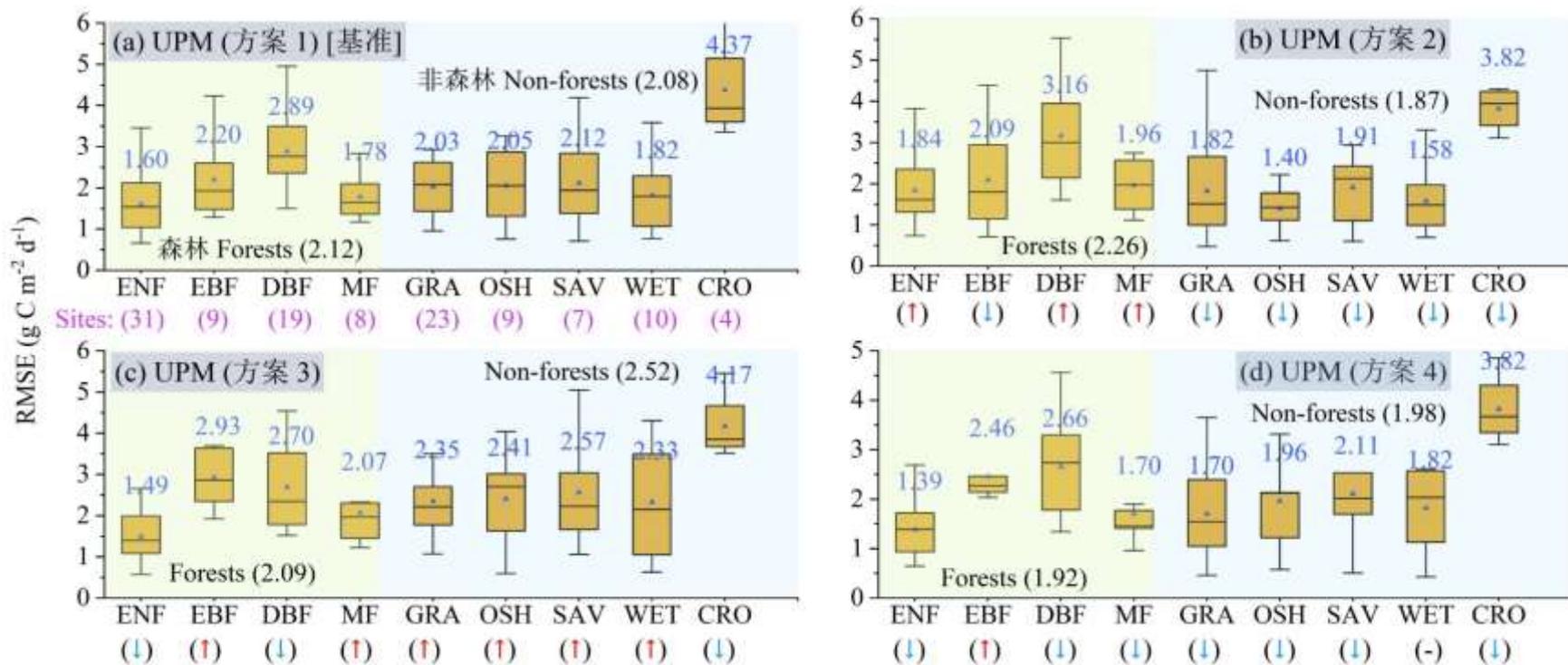


方案1：大叶APAR, 原 φ_0 方法； 方案2：两叶APAR, 原 φ_0 方法

方案3：大叶APAR, 新 φ_0 方法； 方案4：两叶APAR, 新 φ_0 方法

改进的P模型站点验证

- 方案2降低了6种植被的站点平均RMSE，方案3降低了3种植被的站点平均RMSE，方案4降低了7种植被的站点平均RMSE。

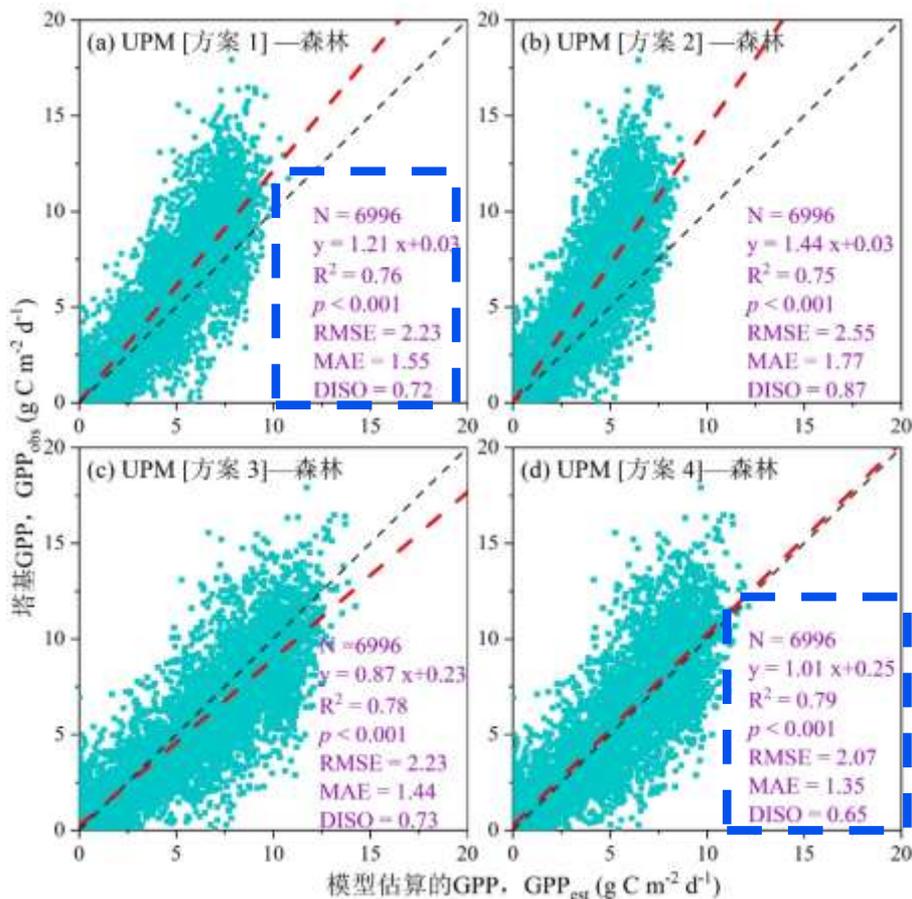


方案1：大叶APAR, 原 φ_0 方法； 方案2：两叶APAR, 原 φ_0 方法

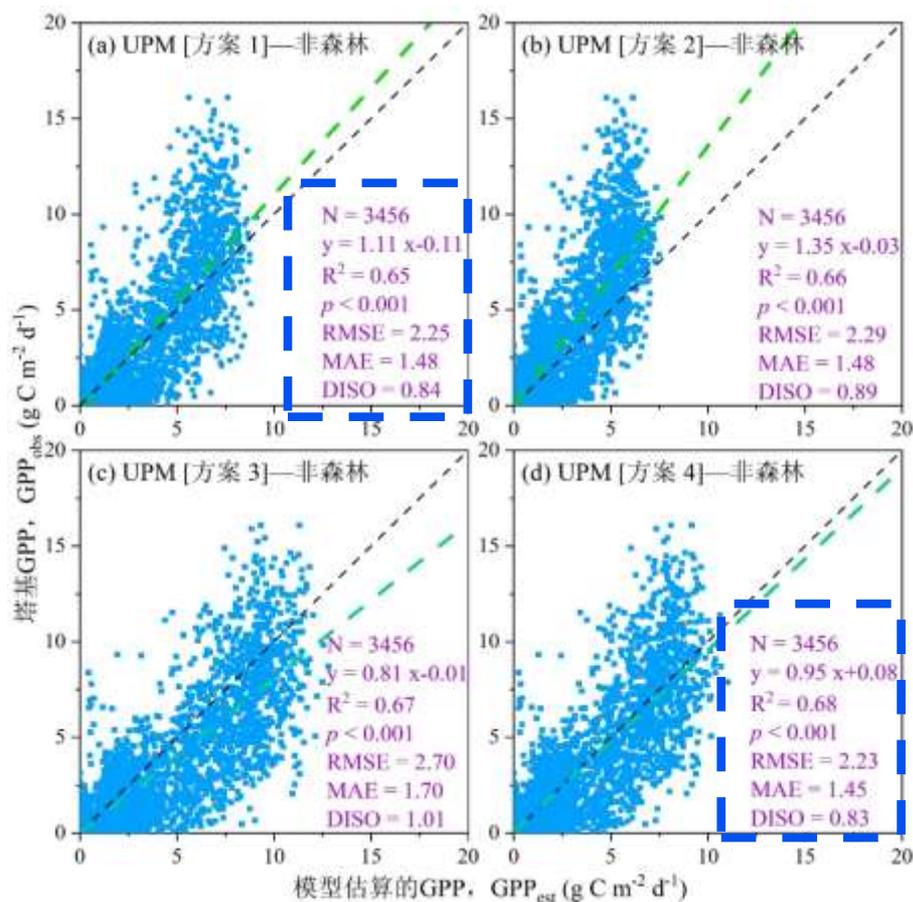
方案3：大叶APAR, 新 φ_0 方法； 方案4：两叶APAR, 新 φ_0 方法

改进的P模型站点验证

- 无论在森林还是非森林，方案4的总体性能都是最优；这种优势在森林更明显。



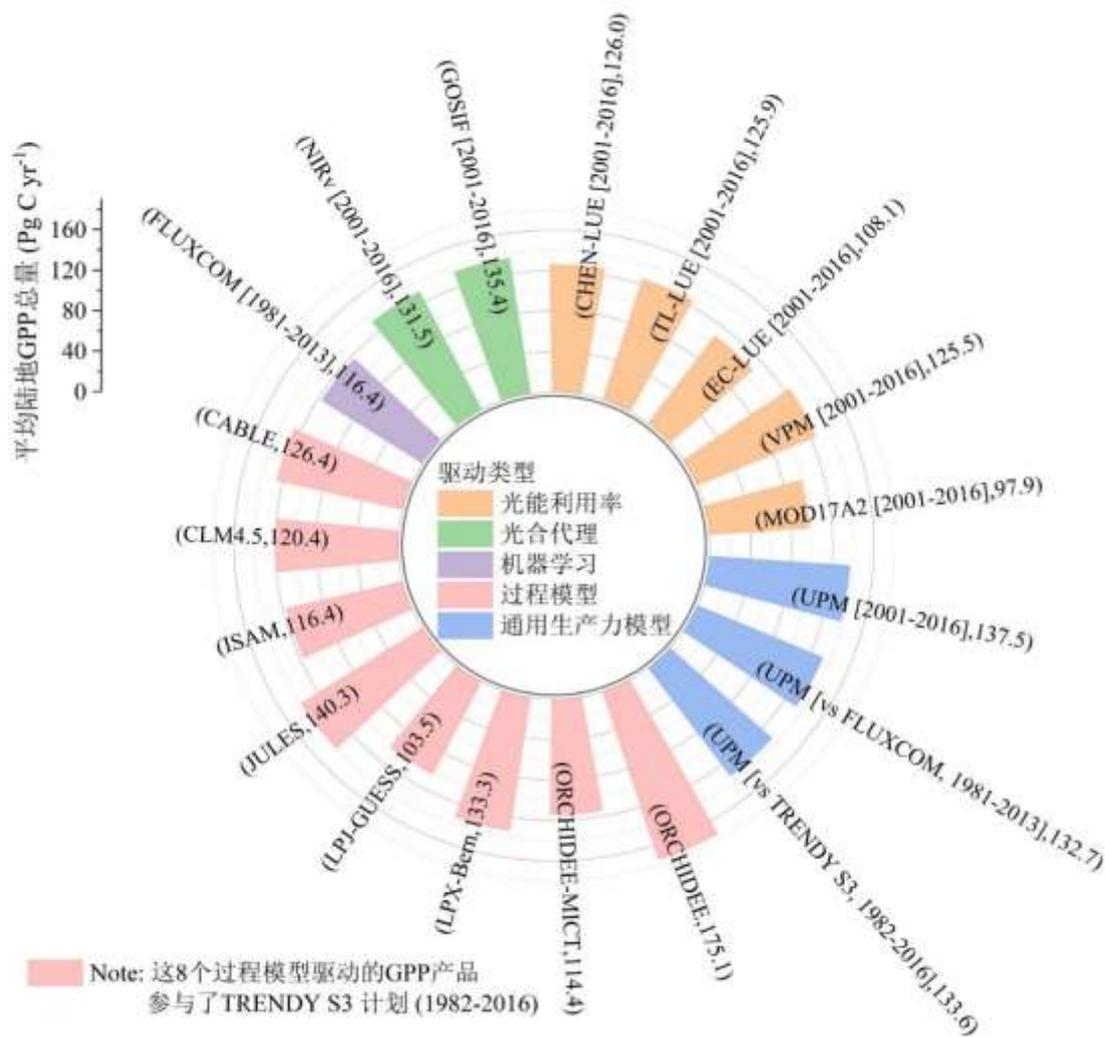
森林



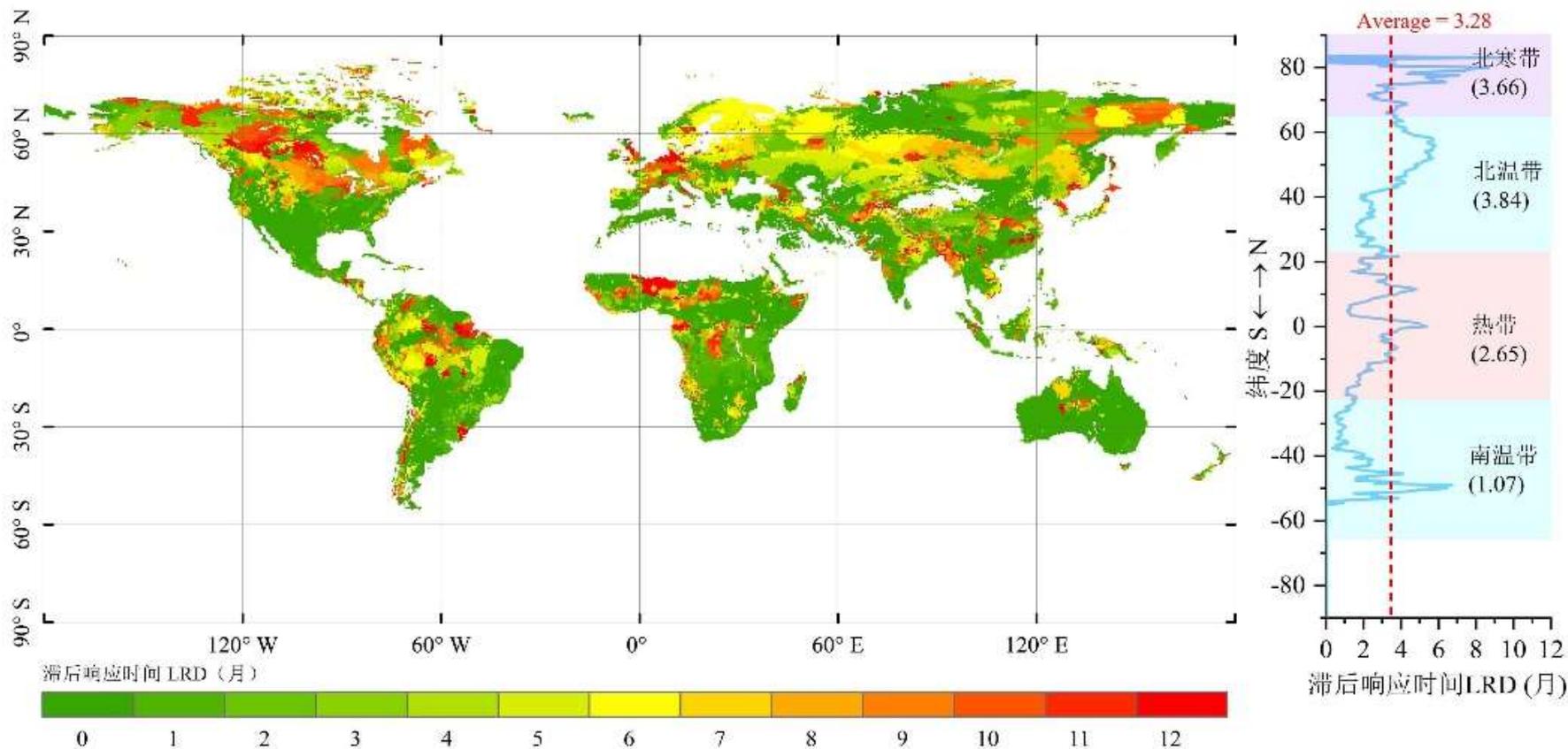
非森林

模拟的全球GPP总量比较

- UPM GPP对陆地GPP总量的估计值介于历史产品估计之间，与TRENDY S3 均值和GOSIF GPP的估计值十分接近。

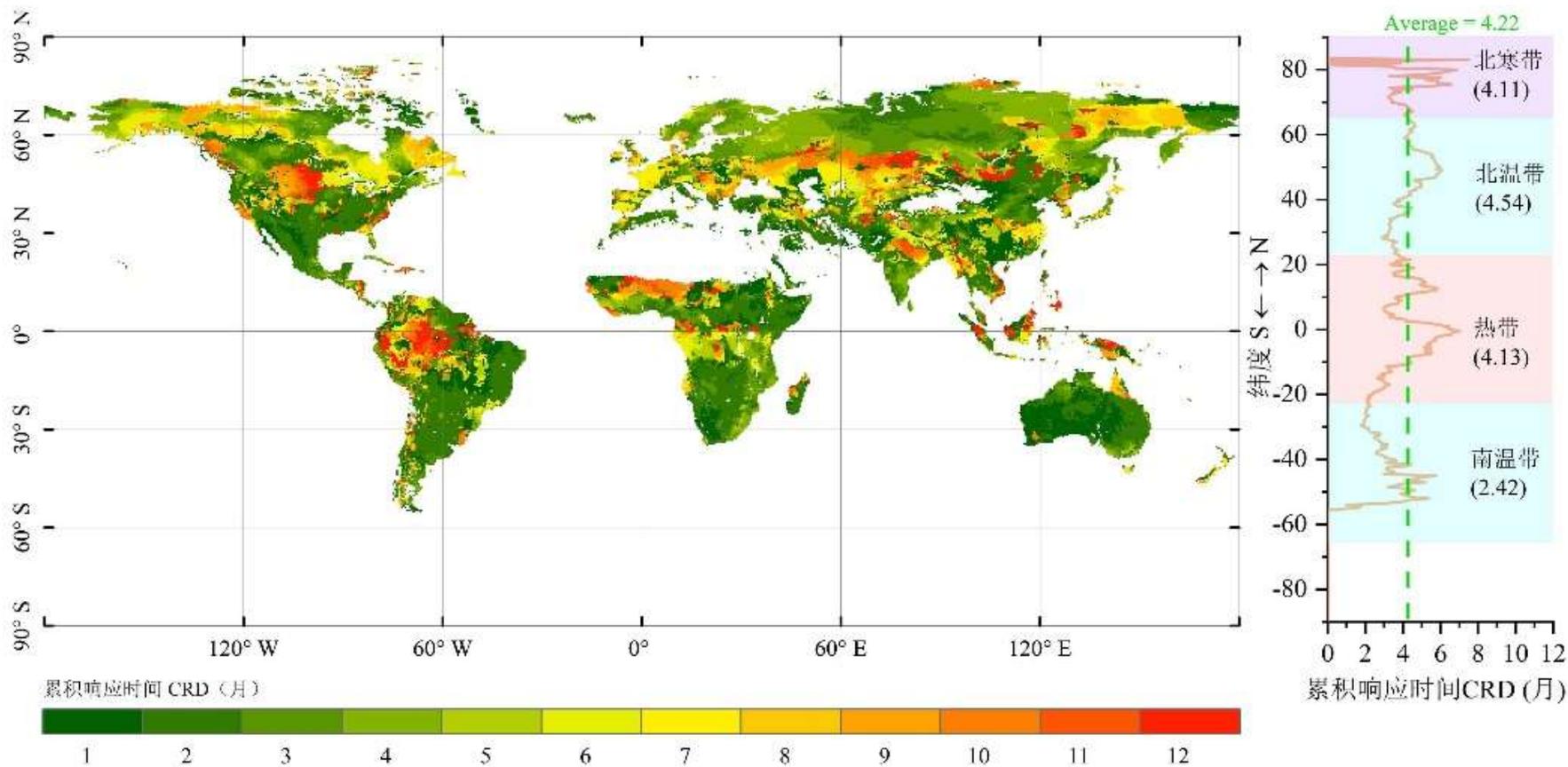


GPP对干旱的滞后响应



- GPP对干旱的平均滞后响应时间LRD为3.3个月。
- 沿着纬度从北向南，LRD呈现减少态势。

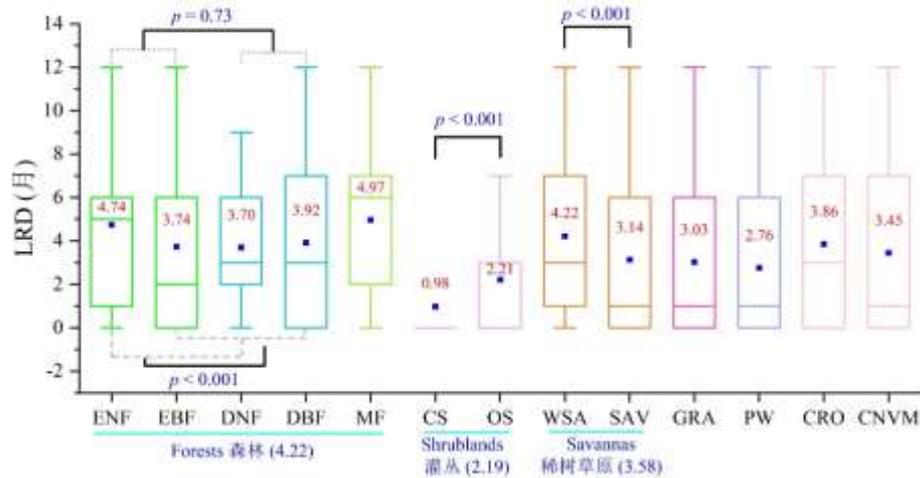
GPP对干旱的累积响应



➤ 陆地GPP对干旱的平均累积响应时间CRD为4.2个月

➤ 北温带植被平均CRD最高为4.54个月，南温带植被平均CRD为2.42个月

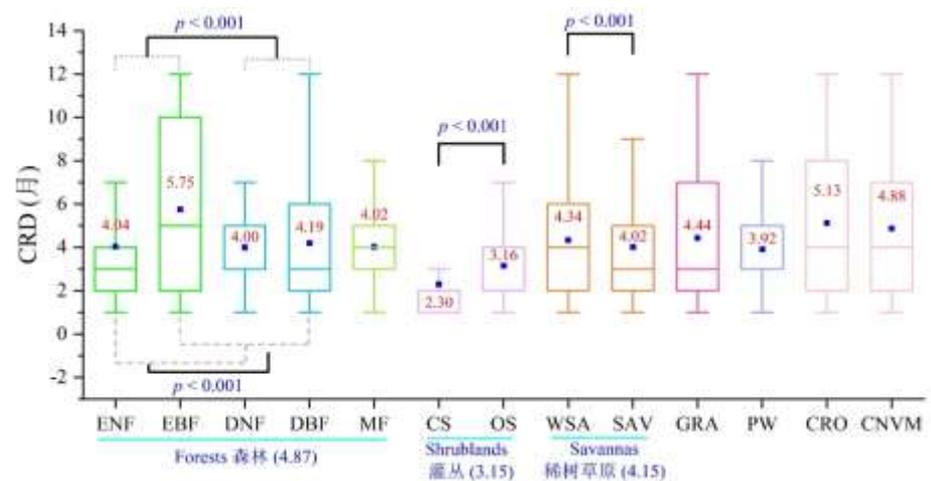
不同植被类型GPP对干旱的滞后和累积响应



滞后响应

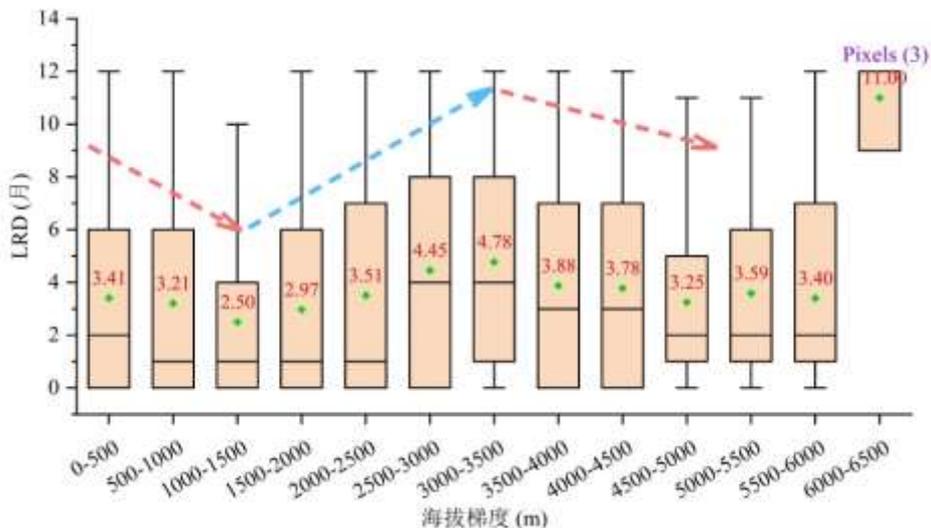
➤ 混交林MF的平均LRD最高，为4.94个月；郁闭灌丛CS的平均LRD最低，为0.98个月。

➤ 常绿阔叶林F的平均CRD最高，为5.75个月；郁闭灌丛CS的平均CRD最低，为2.30个月。



累积响应

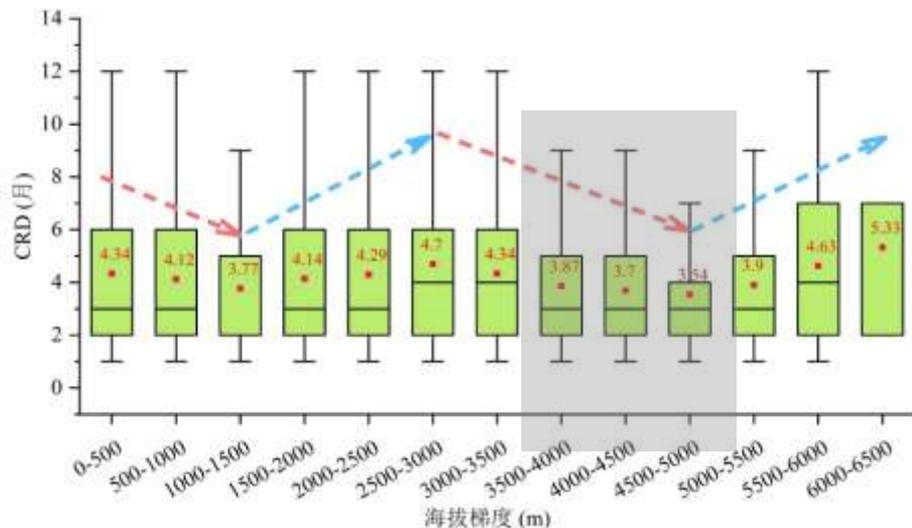
GPP对干旱的滞后和累积响应时间随海拔变化



滞后响应

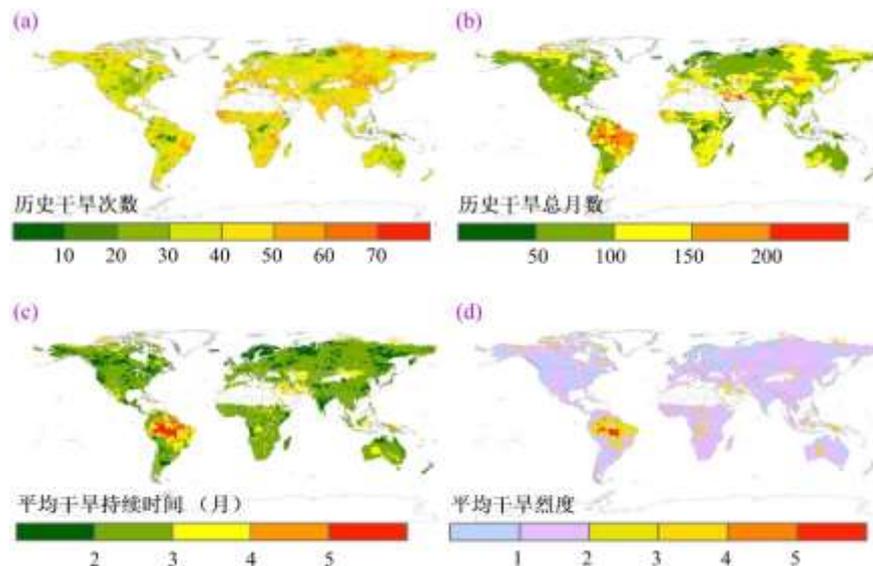
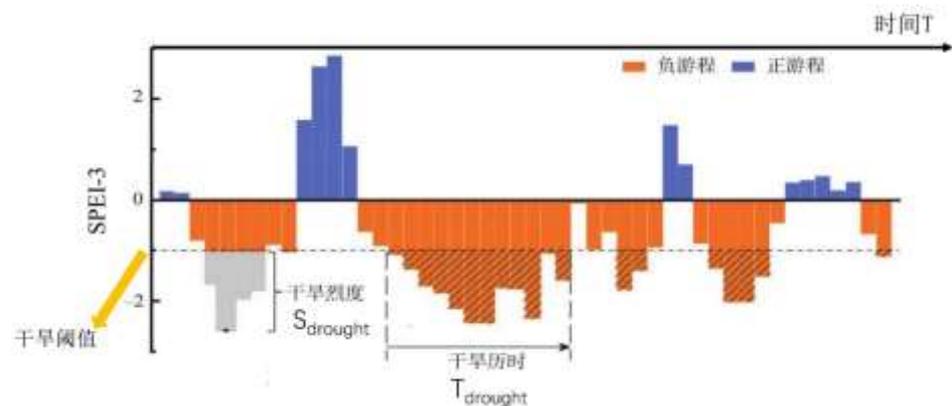
➤ 随着海拔梯度的增加，LRD呈现减少（0—1500 m）、增加（1500—3500 m）和再减少（> 3500 m）的趋势。

➤ 随着海拔梯度的增加，LRD呈现减少（0—1500 m）、增加（1500—3000 m）、再减少（3000—5000 m）和再增加（>5000 m）的趋势



累积响应

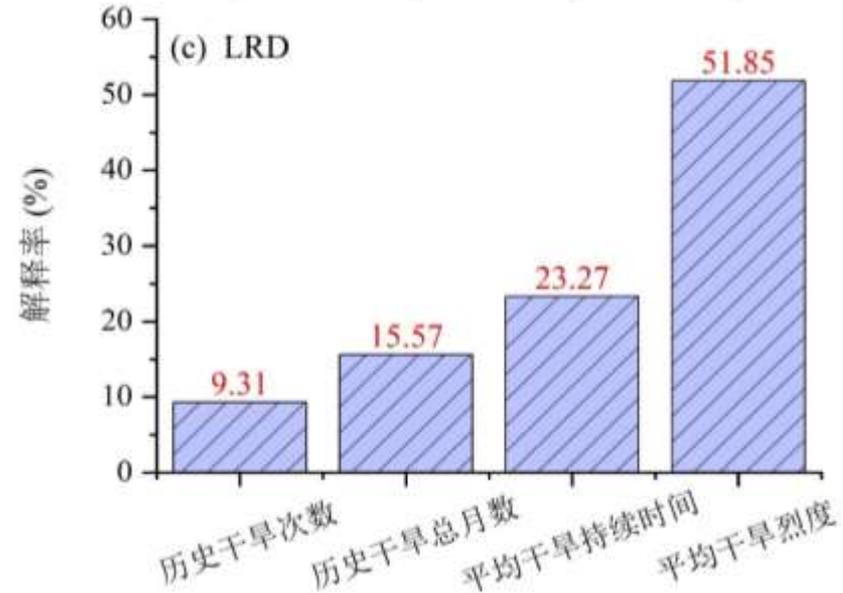
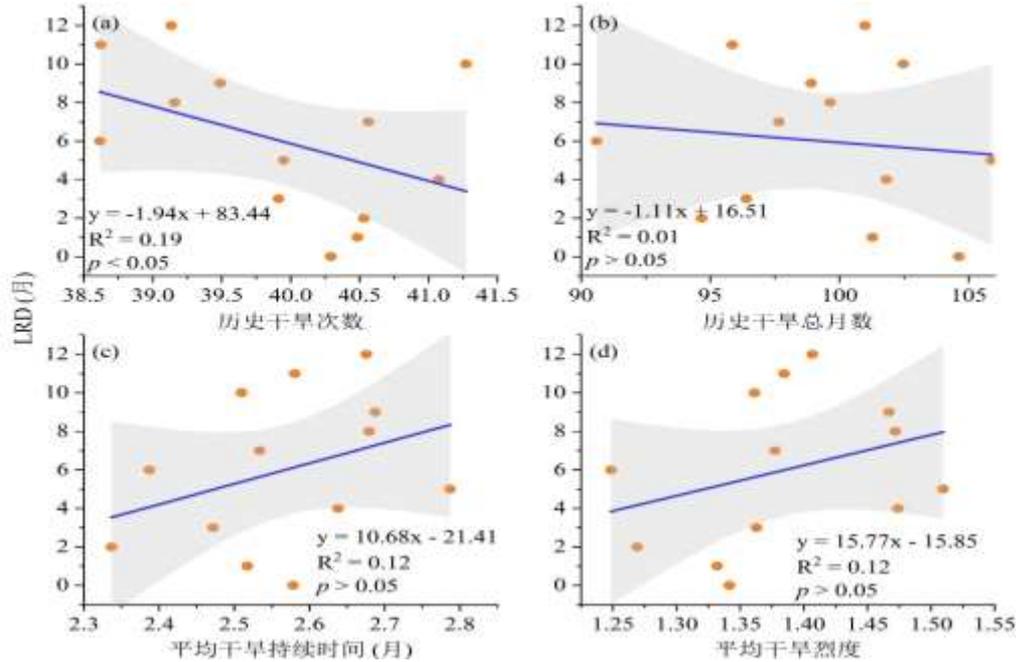
历史干旱发生特征



根据游程理论确定干旱特征指标

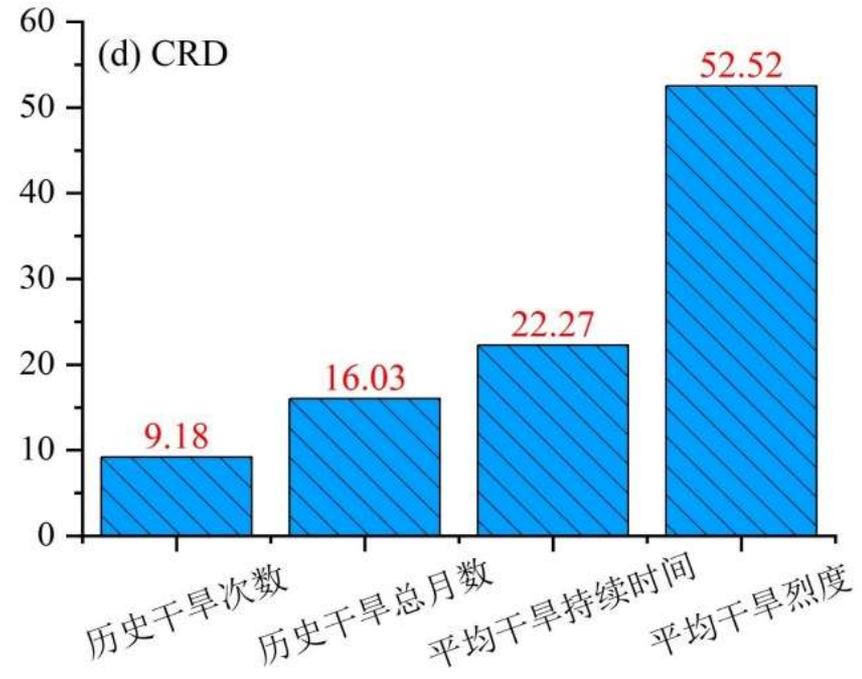
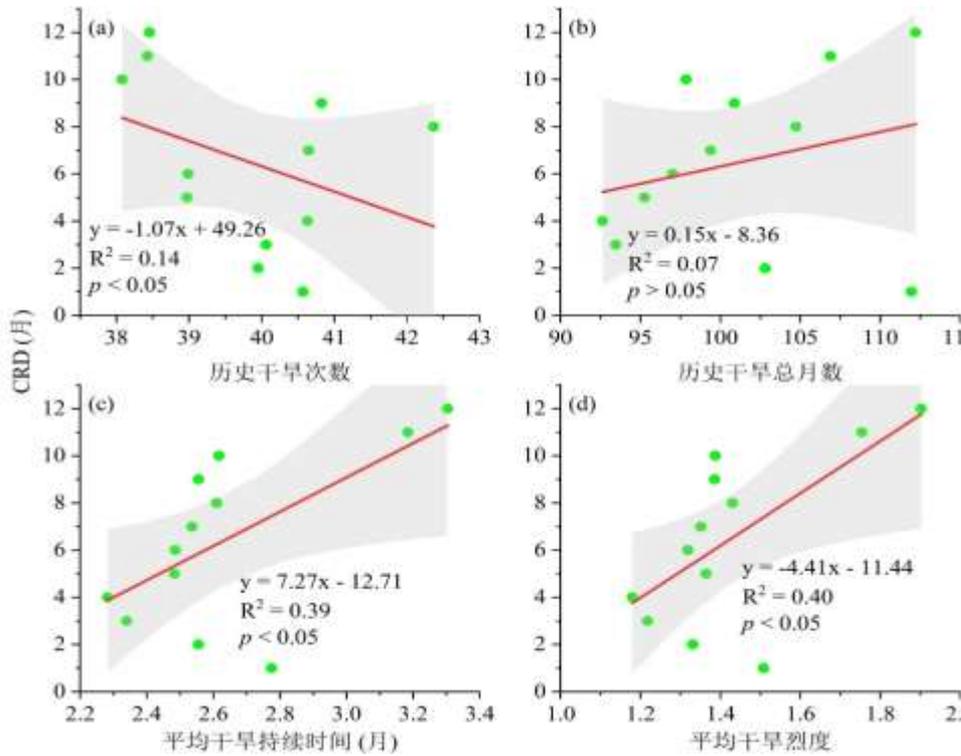
- 在85.7%的被覆盖地区的平均干旱持续时间小于3个月；在91.37%的植被覆盖区域，平均干旱烈度小于2。
- 历史干旱次数小于10次、20次、30次、40次、**50次**的区域分别占到植被覆盖区域的0.78%、2.41%、11.94%、47.03%和**85.50%**。
- 在54.87%的植被覆盖地区，历史干旱总月数小于100个月；在8.33%的植被覆盖地区，历史干旱总月数超过150个月。

GPP对干旱的滞后响应时间与历史干旱特征关系



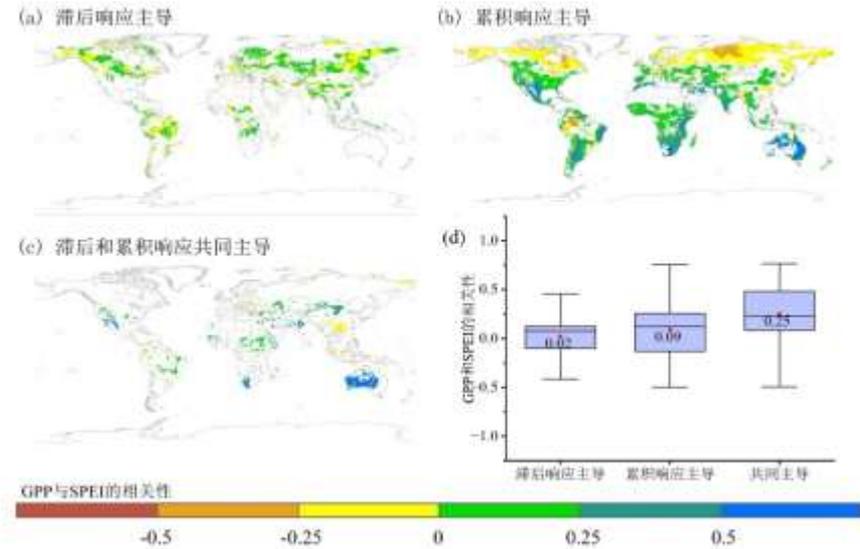
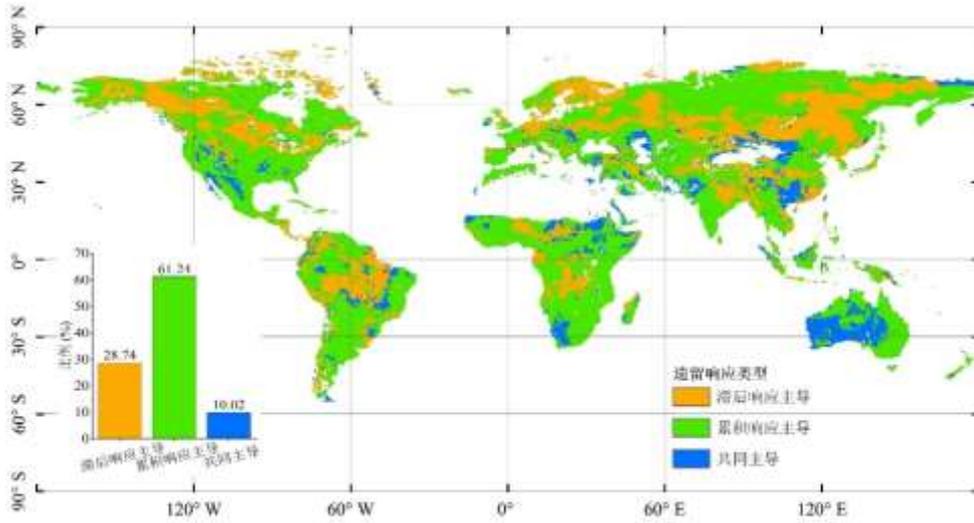
- LRD与历史干旱次数和干旱总月数负相关。
- LRD与干旱持续时间以及干旱烈度正相关。
- 烈度解释51.85%的GPP对干旱的滞后响应时间变化。

GPP对干旱的累积响应时间与历史干旱特征关系



- CRD与与历史干旱次数现显著负相关，与历史干旱总月数的不显著正相关。
- CRD与平均干旱持续时间以及平均干旱烈度均呈现显著正相关关系。
- 干旱烈度可解释52.5%的GPP对干旱的累积响应时间变化。

GPP对干旱的滞后和累积响应相对重要性



- 在28.74%的植被覆盖区域，GPP对干旱的延续响应以滞后响应为主。
- 在61.24%的植被覆盖区域，GPP对干旱的延续响应以累积响应为主导。
- 在10.02%的植被覆盖区域，滞后响应和累积响应的作用相当。

报告提纲

- ◆ 研究背景介绍
- ◆ 研究方法与结果
- ◆ **主要研究结论**

主要研究结论

- 改进P模型的APAR以及 φ_0 的计算方法可降低GPP估算的不确定性
- 全球陆地GPP对干旱存在普遍而显著的滞后和累积响应
- GPP对干旱的延续响应特征与海拔梯度和历史干旱特征等有关
- GPP对干旱的延续响应在全球大部分地区由累积响应所主导

谢谢大家!



敬请推荐优秀青年学者加盟

南京大学国际地球系统科学研究所

方向：碳循环数据同化、遥感科学与技术、生态系统模型、全球变化生态学

途径：博士后、准聘长聘教师、海外优青

<https://rczp.nju.edu.cn/sylm/jylgw/zrjs/20230703/i248815.html>

一流平台、一流团队、一流学生、一流待遇