

云南高原的林火干扰：驱动机制、生态效应与响应

沈泽昊

北京大学城市与环境学院

2023.2.24

内 容

0 研究背景

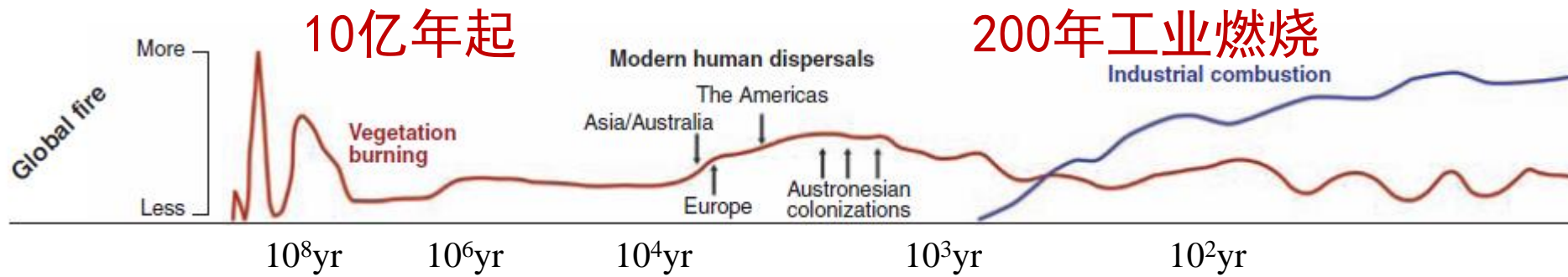
1 云南的林火格局与驱动机制

2 滇中高原森林的火后恢复与群落构建

3 滇中森林优势物种的火后更新策略

4 小结与展望

0、火的存在与意义



(Bowman et al. 2009, Science)



Review

TRENDS in Ecology and Evolution Vol.20 No.7 July 2005

Full text provided by www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems

William J. Bond¹ and Jon E. Keeley^{2,3}

0、火的生态与进化意义

Received: 3 April 2019 | Accepted: 6 February 2020

DOI: 10.1111/1365-2745.13403

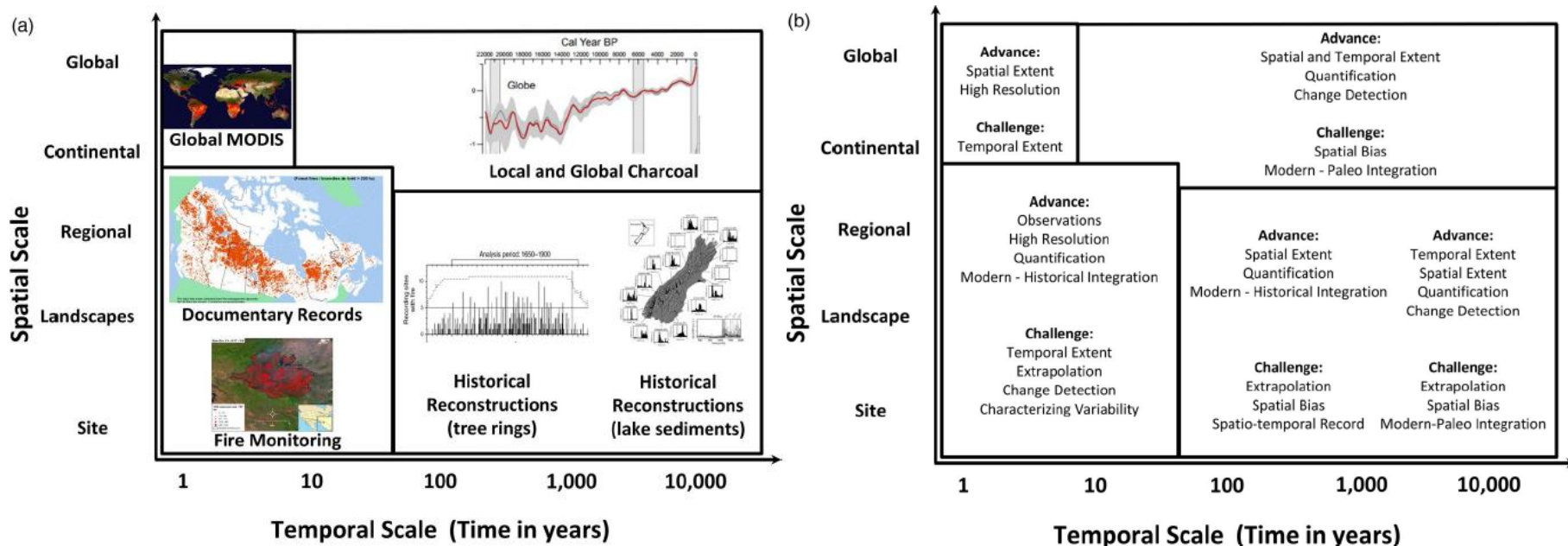
ESSAY REVIEW

Journal of Ecology

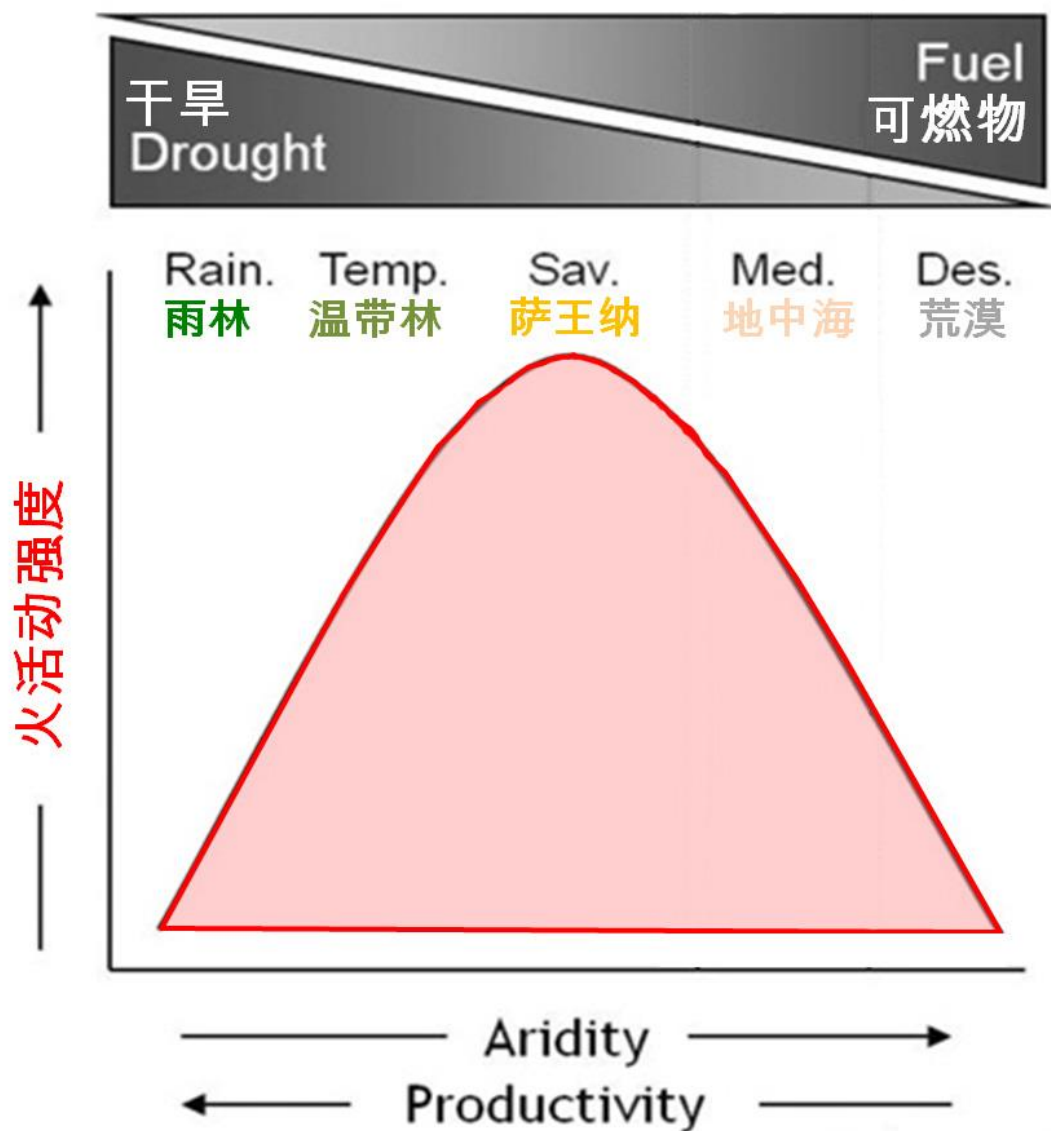


Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers

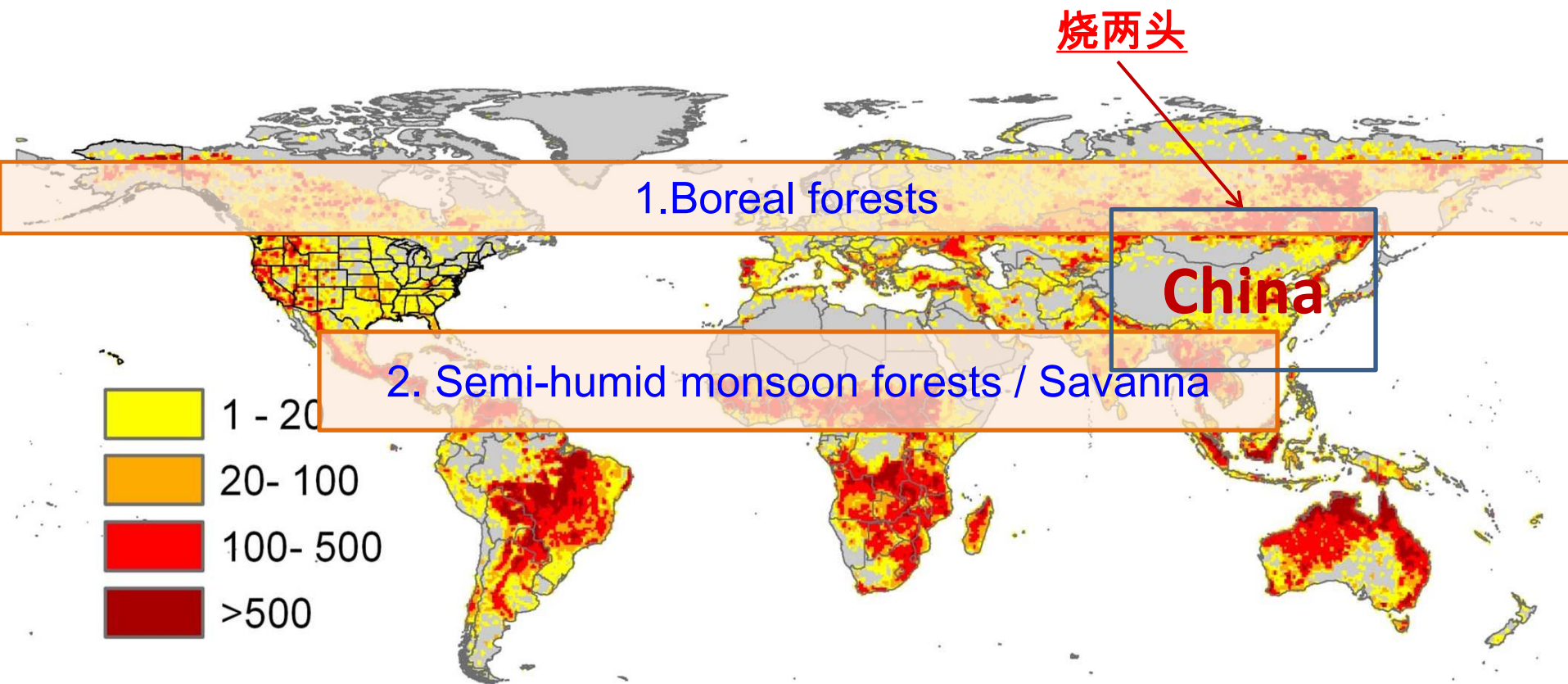
Kendra K. McLauchlan¹ | Philip E. Higuera² | Jessica Miesel³ |



0 野火干扰体系的关键约束因子



0、全球野火空间分布Spatial patterns



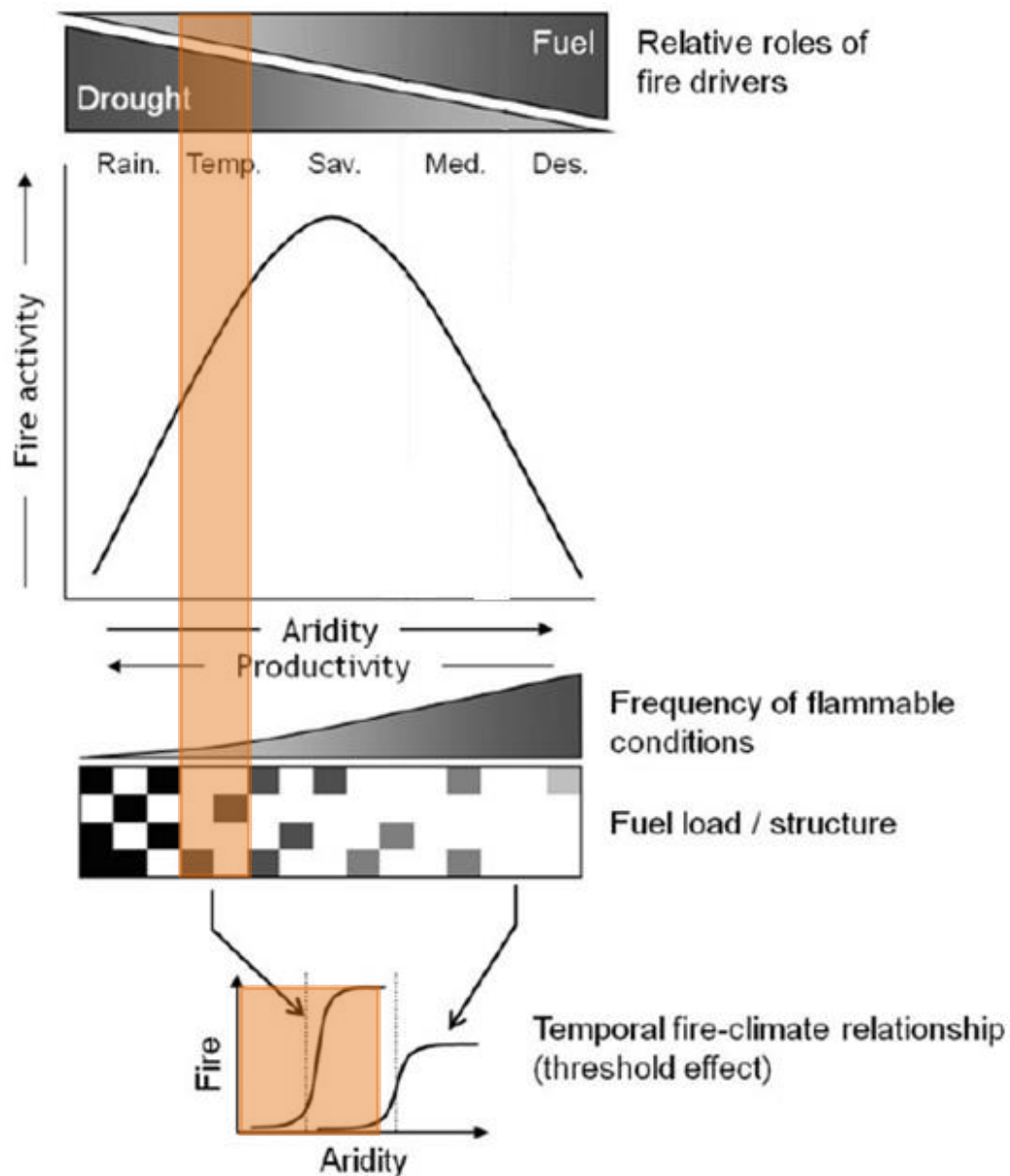
0 野火干扰体系的关键约束因子constraint

1) 燃料可燃性约束

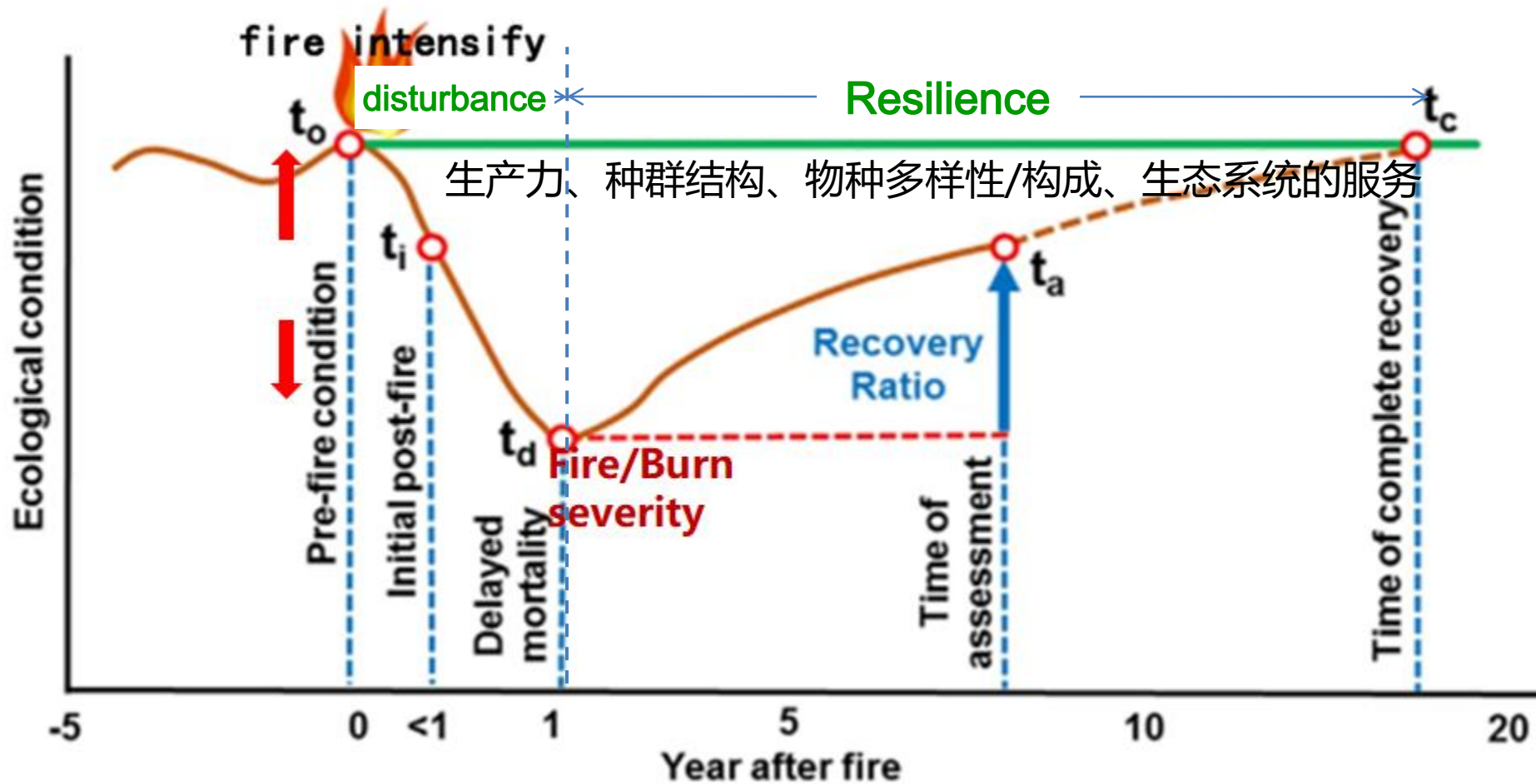
- 湿润多产气候
- 丰富而连续的可燃物
- 高温和/或干旱驱动为主

2) 燃料分布约束

- 更干旱的气候
- 生物量密度较低
- 可燃物有限且离散分布



0 林火的生态/进化响应 **Eco**-Evo response



0 林火的生态/进化响应Eco-**Evo** response

火烧选择的植物功能性状traits：

1. 延迟果裂和林冠种子库Serotiny & canopy seedbank
2. 火后开花、播种 Postfire flowering, seeding
3. 萌条能力 Resprouting
4. 厚的树皮 Thick bark
5. 易燃性树冠 Flammable canopy

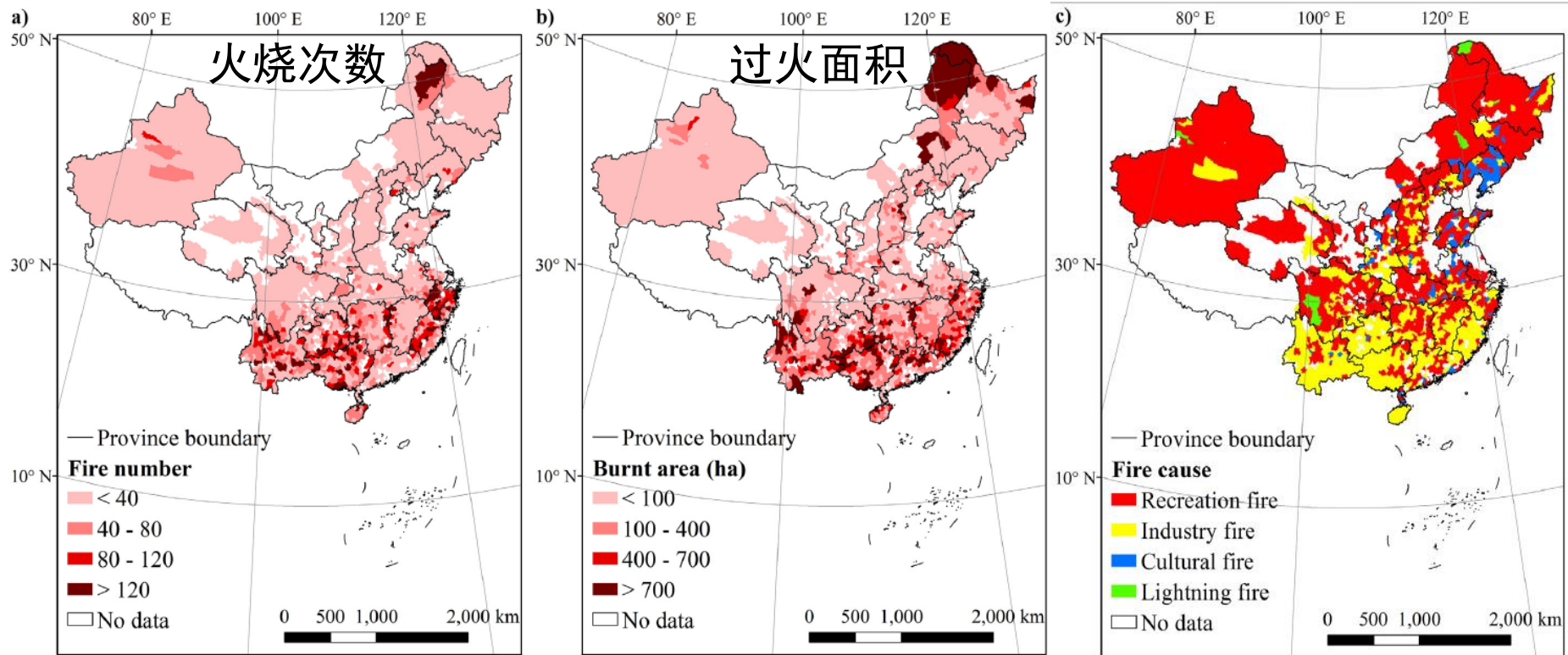
火适应策略类型

惹火型、耐火型、适(避)火型
Embracer, Tolerator, Evaders



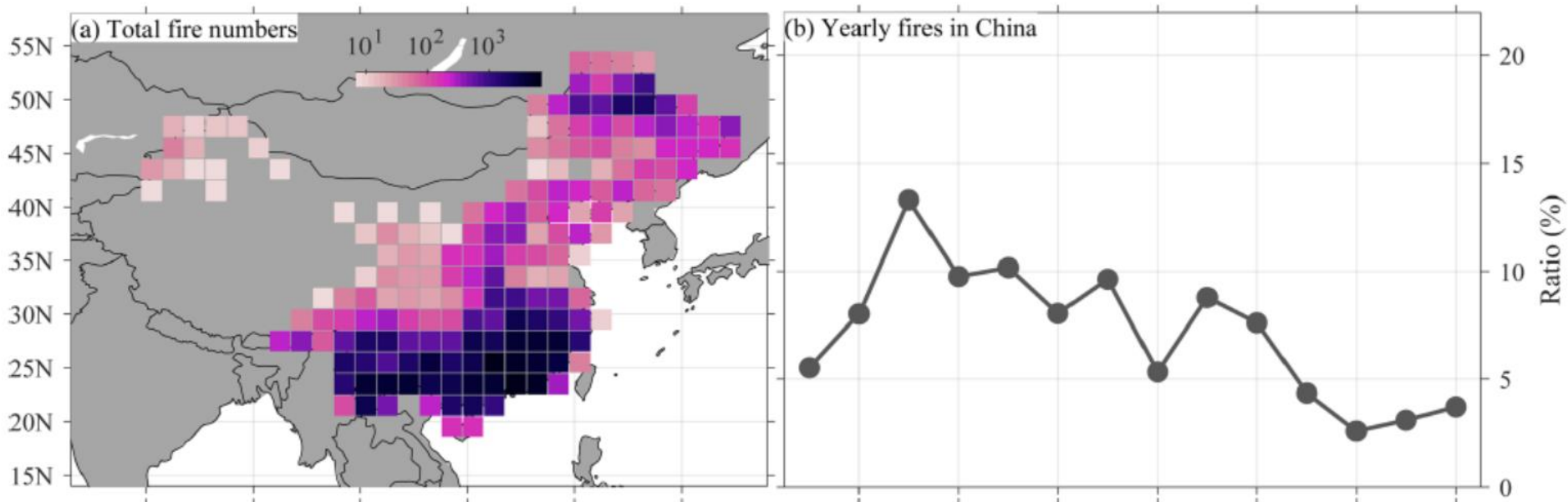
0 中国的林火格局与驱动因子的区域差异

1988–1991年全国县级林火统计



ENSO modulates wildfire activity in China

Keyan Fang^{1,2,12}✉, Qichao Yao^{3,4,12}, Zhengtang Guo^{5,6}, Ben Zheng⁷, Jianhua Du⁸, Fangzhong Qi⁴, Ping Yan³, Jie Li³, Tinghai Ou², Jane Liu^{1,9}, Maosheng He¹⁰ & Valerie Trouet¹¹✉



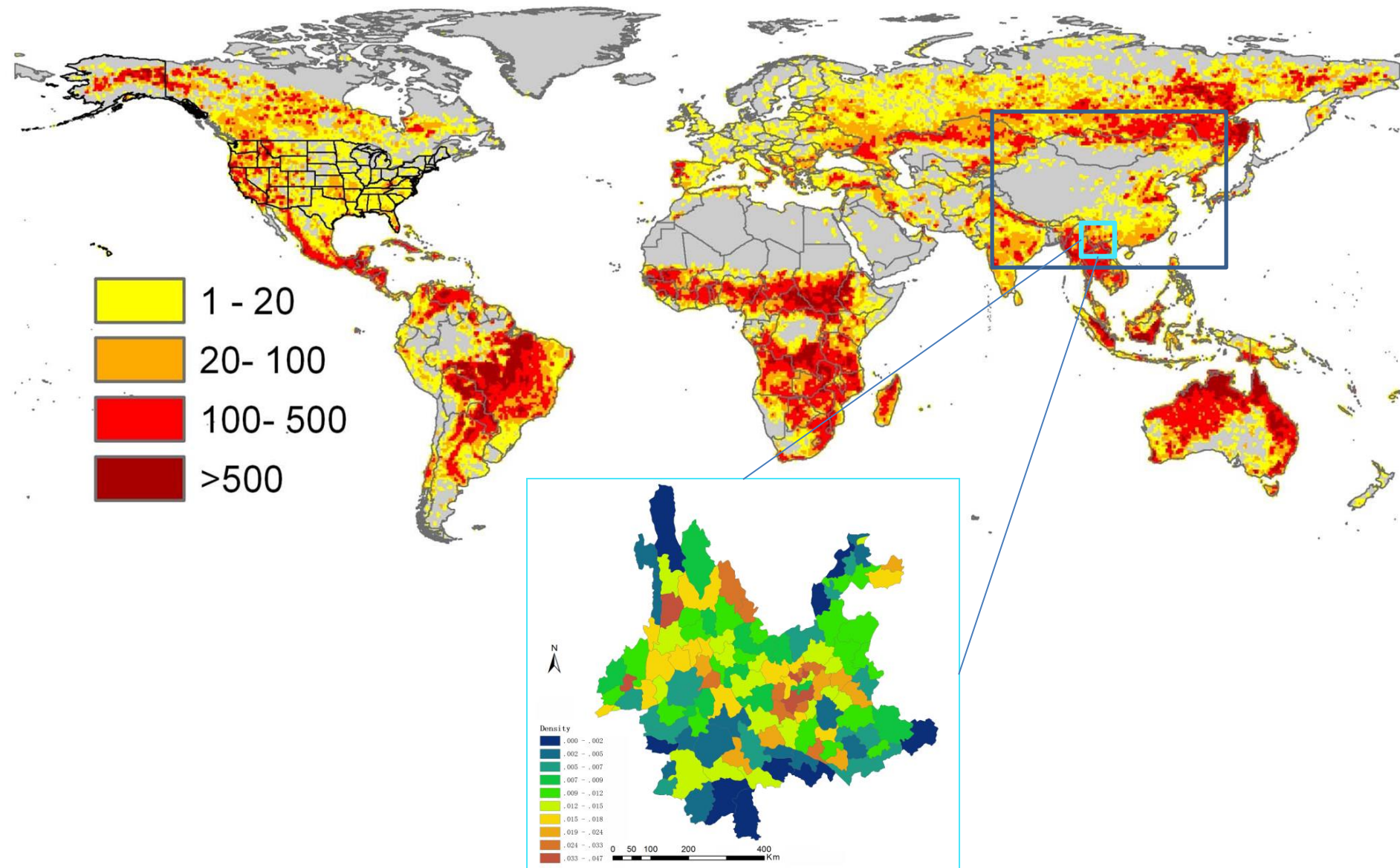
基于2005-2018年MODIS林火数据产品结合地面数据矫正

1、云南林火格局与驱动机制

科学问题：

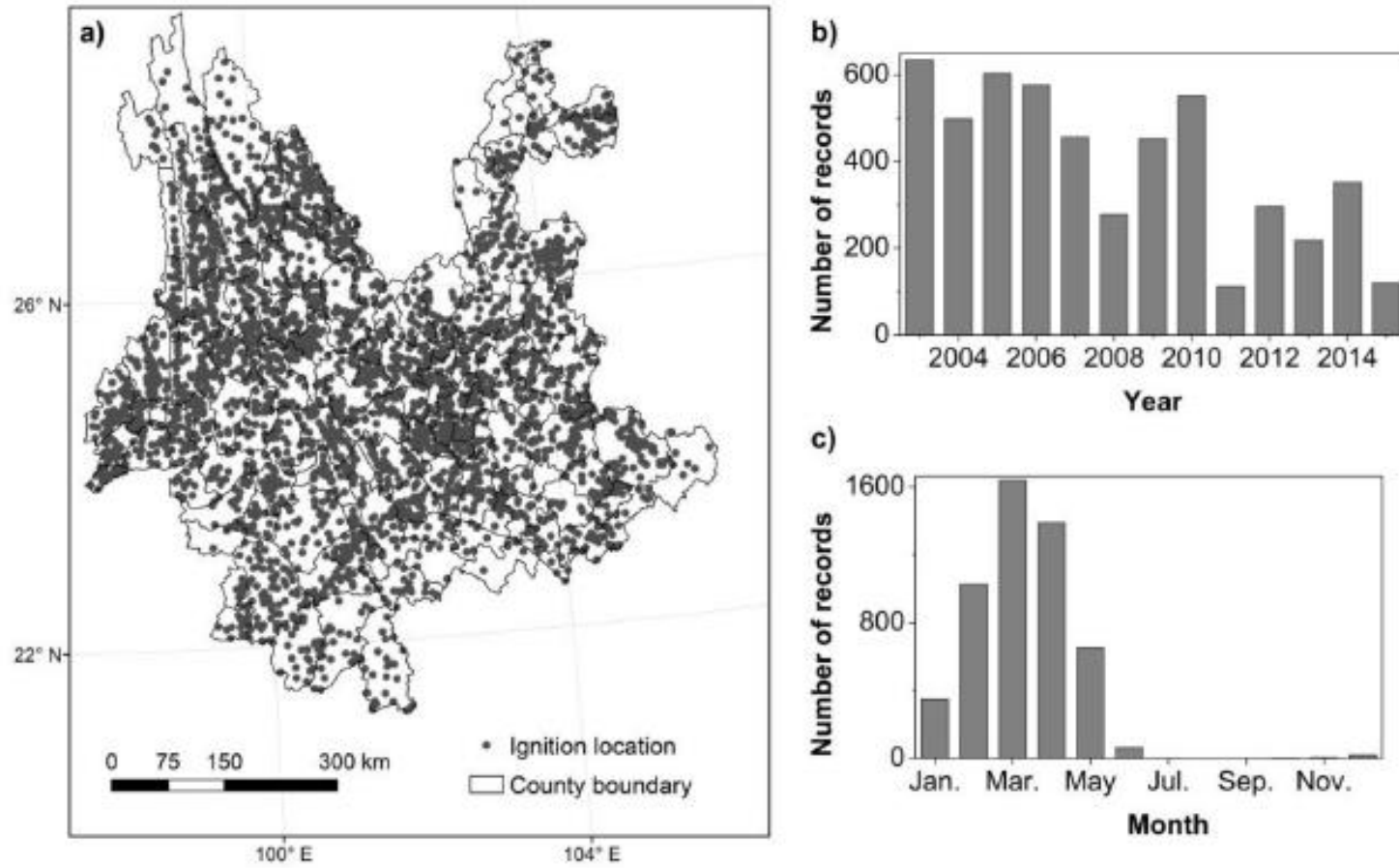
- 1) 不同数据源的林火评估结果比较？
- 2) 林火时空格局和域内驱动机制如何？
- 3) 域外环境对云南林火活动有何影响？

1、云南林火格局与驱动机制



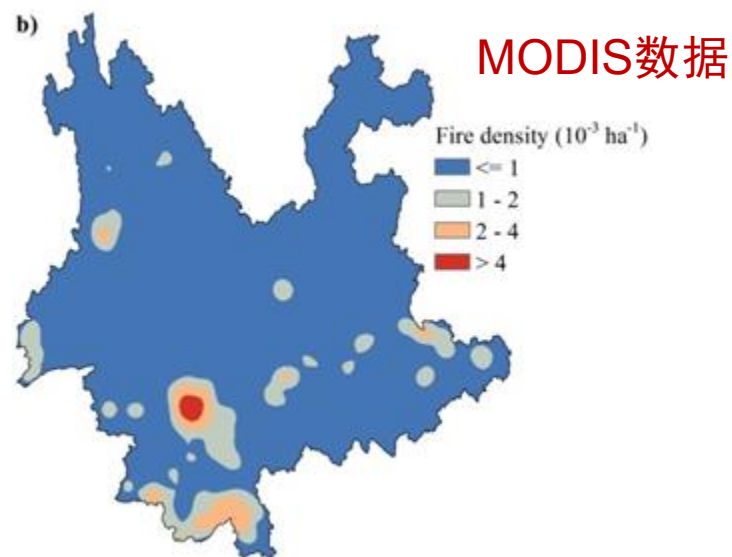
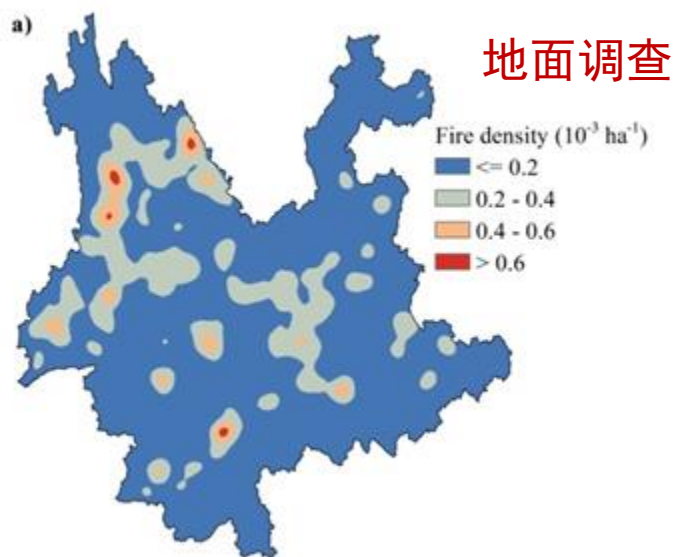
1、云南林火格局与驱动机制

2003-2015年县域林火事件Ignition统计 (5145起)

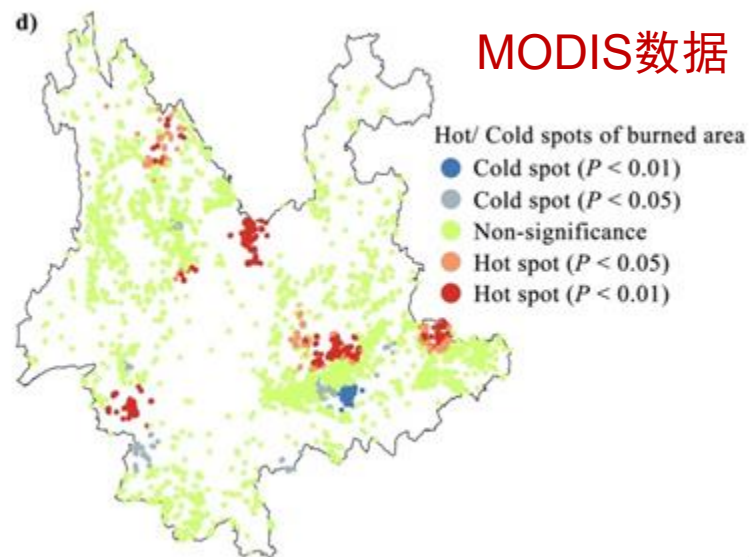
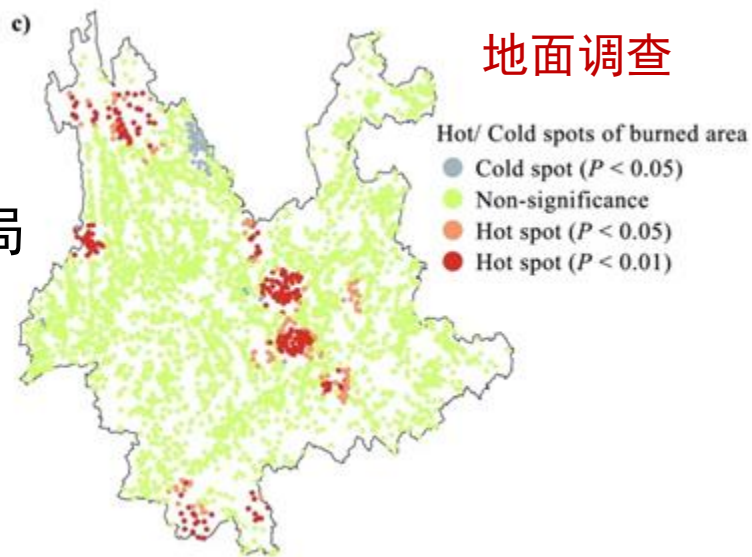


1、云南林火格局与驱动机制

火烧次数
核密度格局

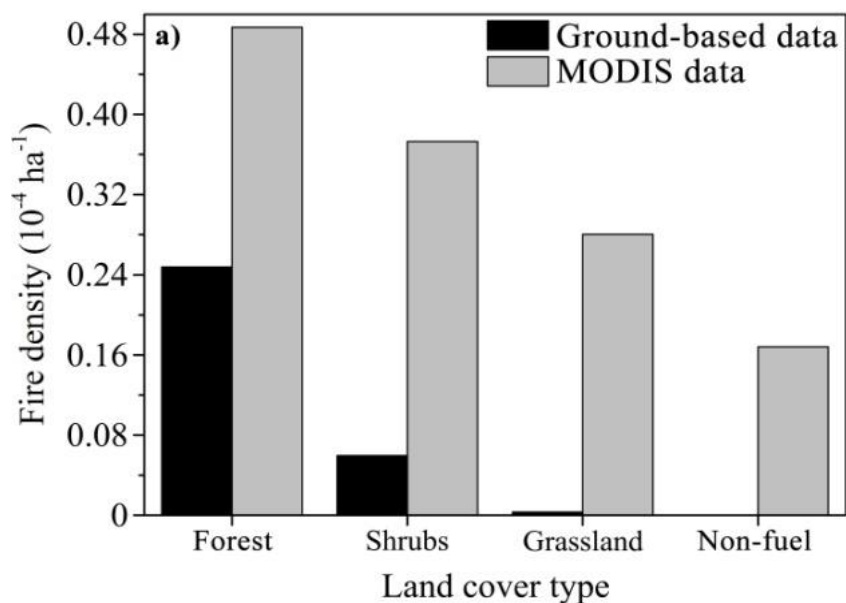


过火面积
热/冷点格局

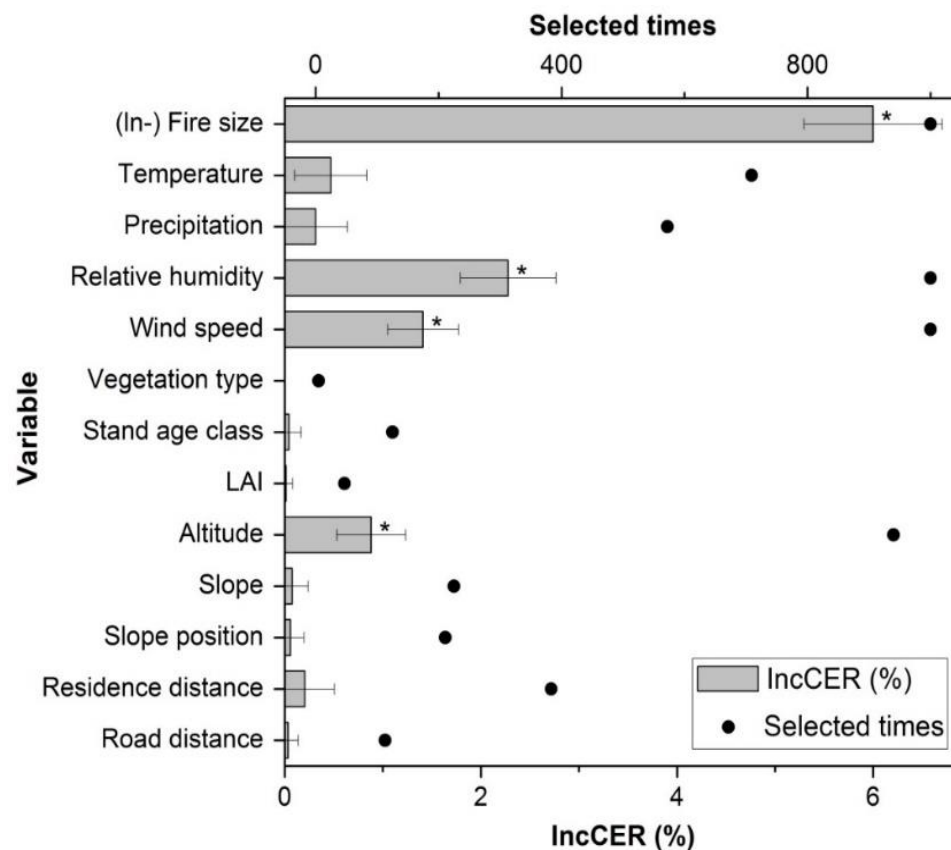


1、云南林火格局与驱动机制

MODIS和地面记录的林火发生

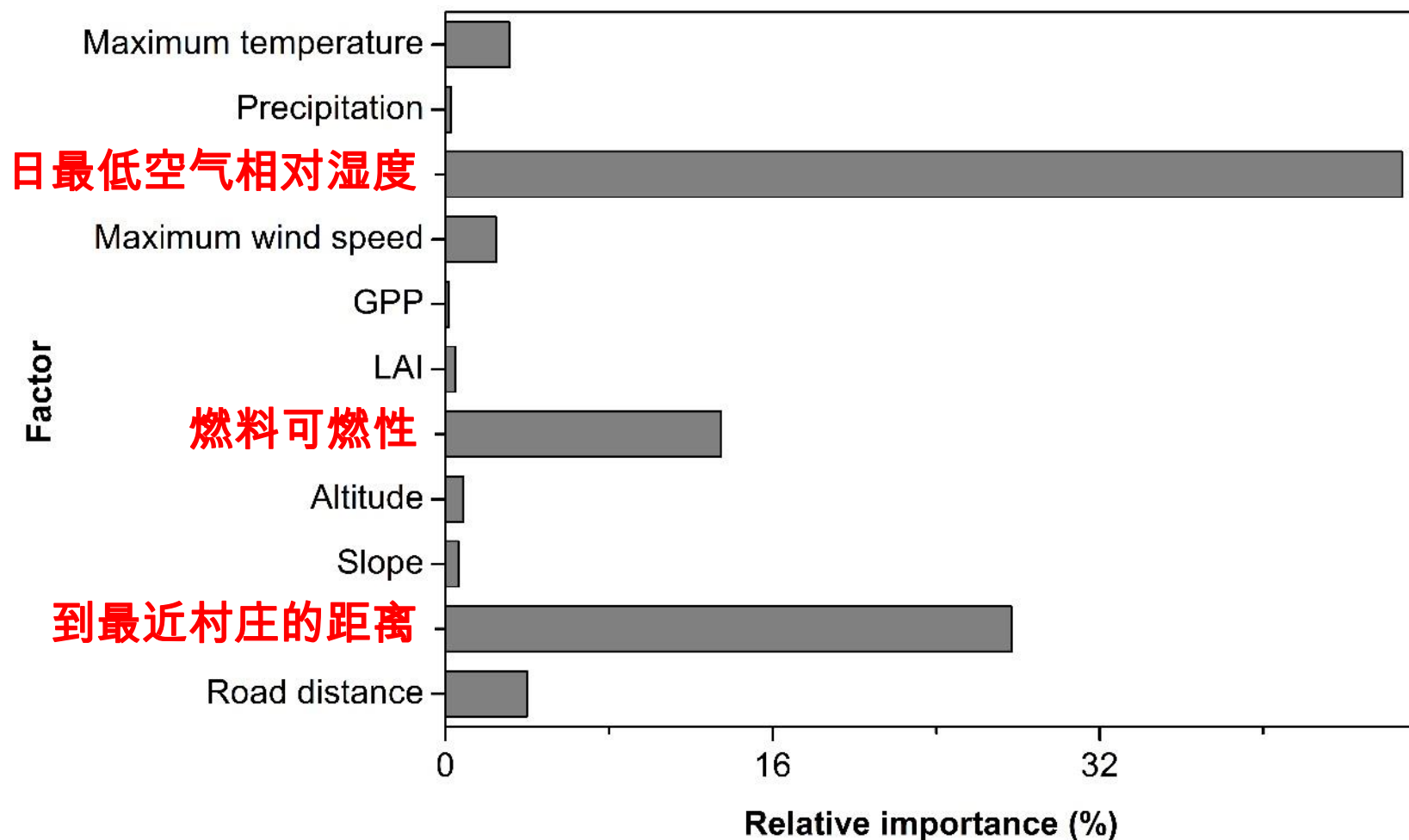


林火探测差异的影响因子



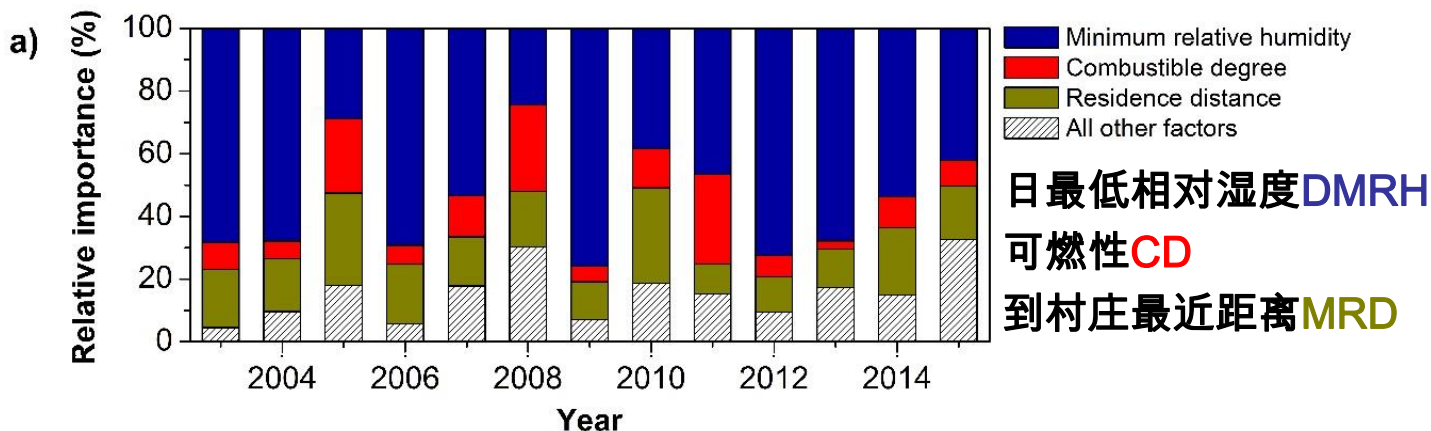
1、云南林火格局与驱动机制

基于Logistic模型的Ignition事件因子贡献

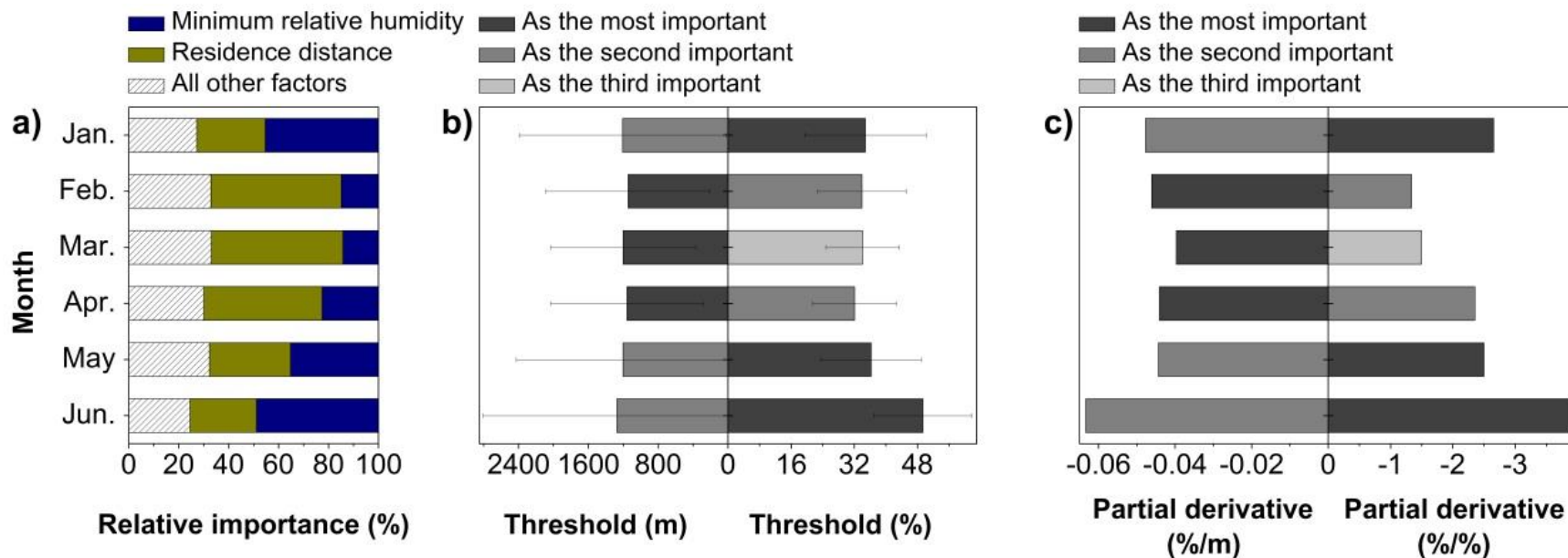


1、云南林火格局与驱动机制

逐年归因：

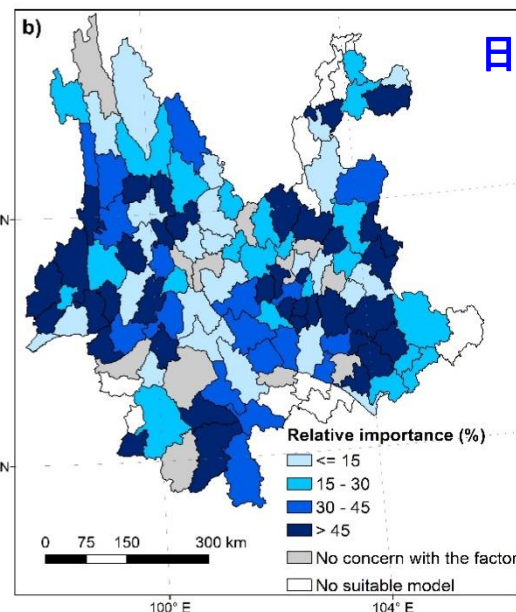
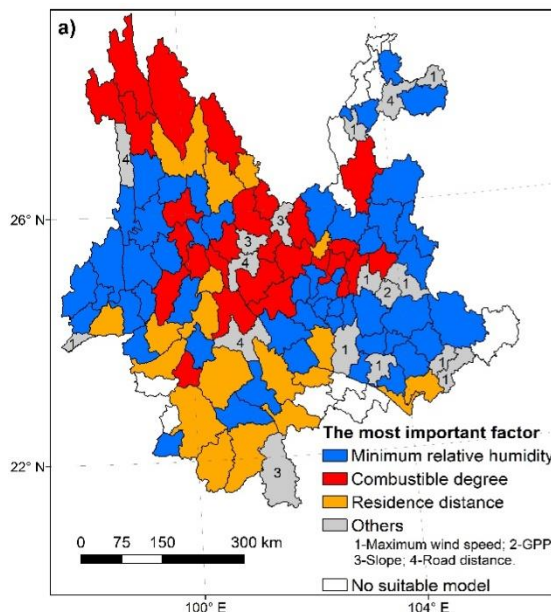


各月归因：



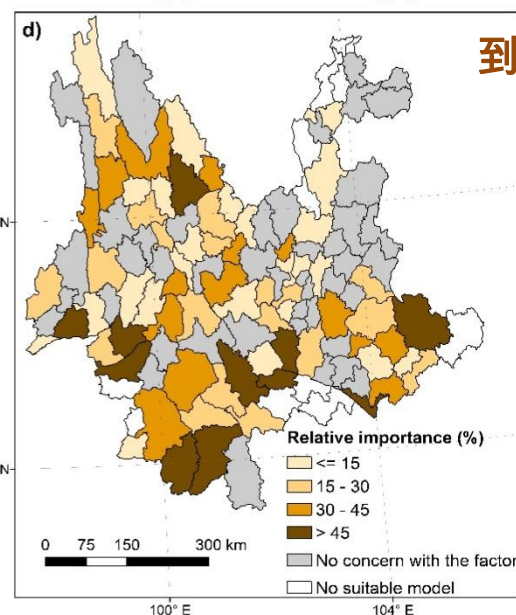
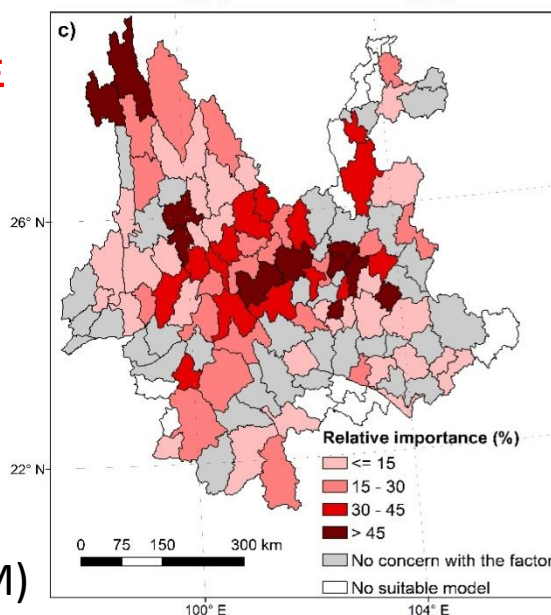
1、云南林火格局与驱动机制

首要因子 空间格局



日最小相对湿度

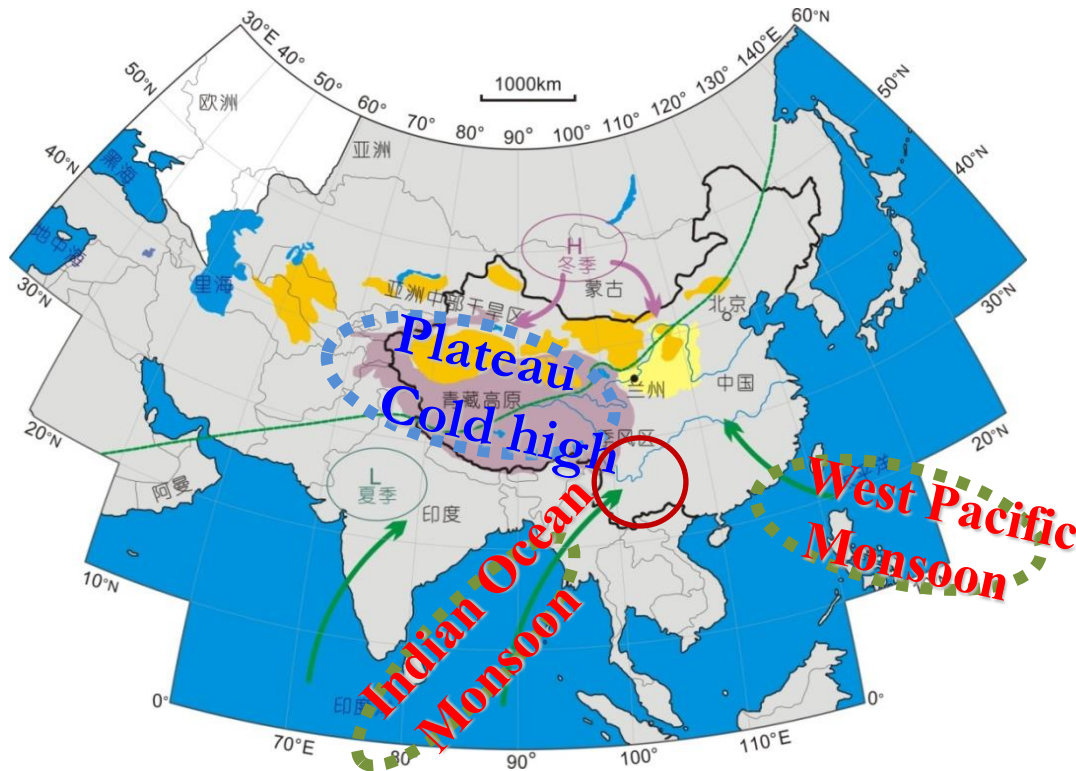
植被可燃性



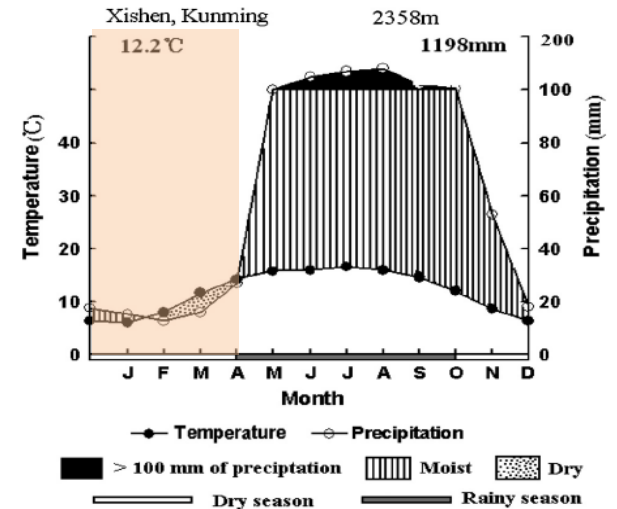
到最近村庄距离

1、云南林火格局与驱动机制

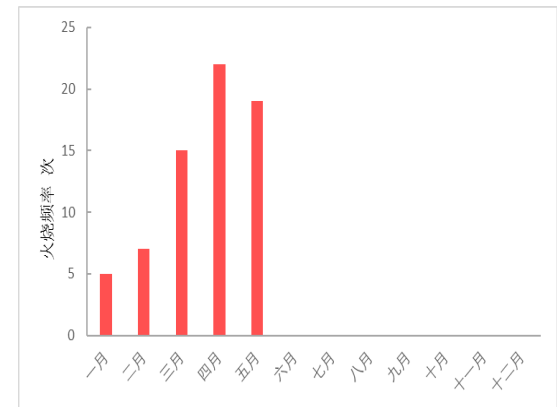
云南林火气候的域外因素——季风和大洋暖池



Climate-降水季节性

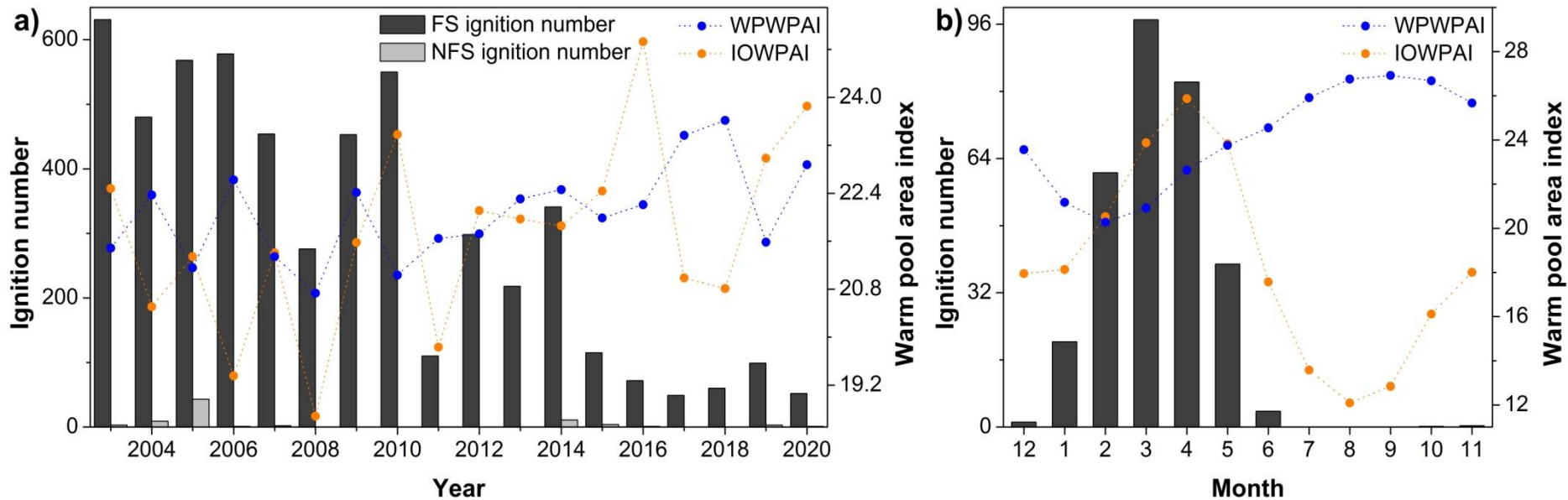


Fire-发生频率季节性



1、云南林火格局与驱动机制

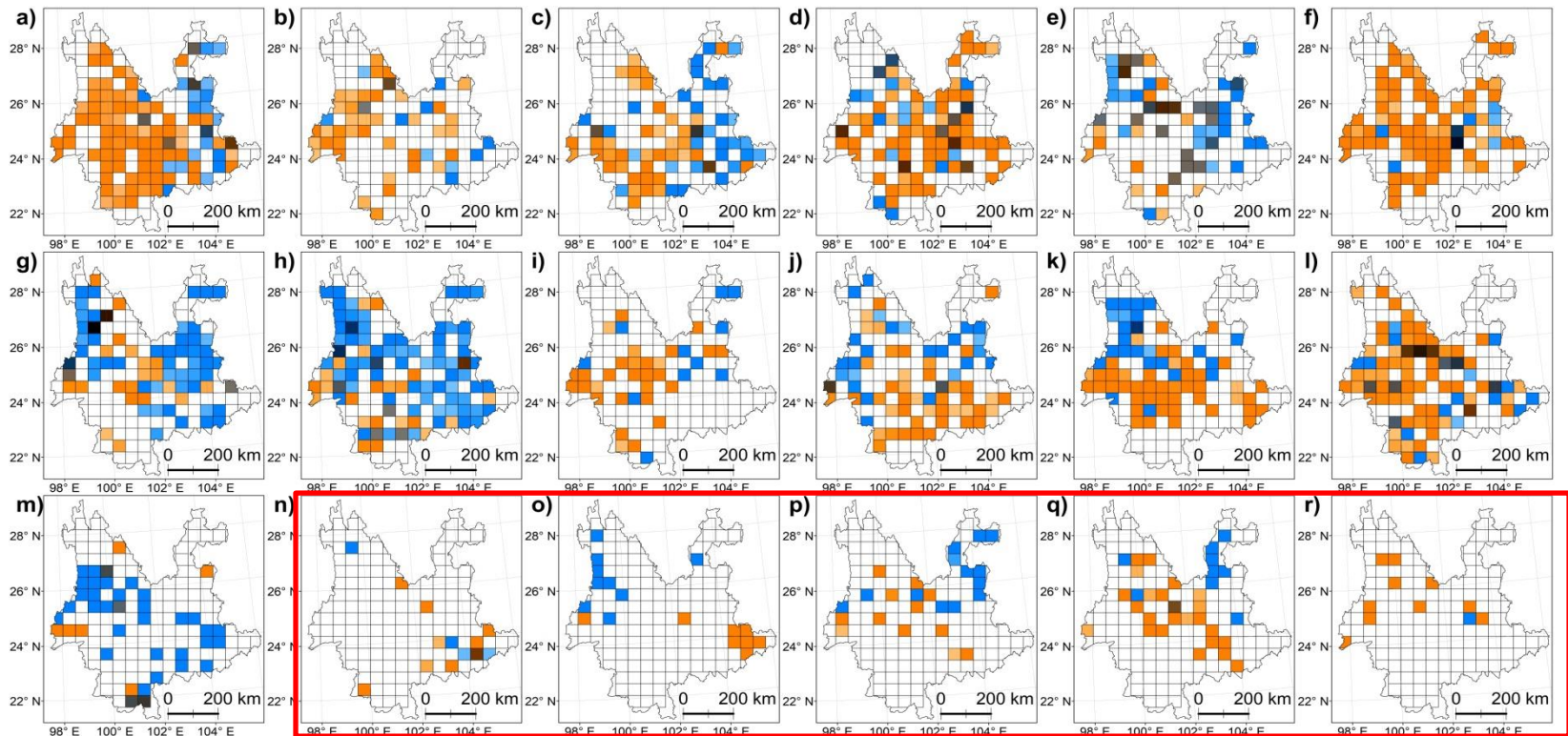
- 2003-2015年共发生5146次林火
- 平均每年396次，过火面积 $1.08 \times 10^3 \text{ha}$



- 林火频率与印度洋暖池指数IOWPAI的季节变化有显著的正相关
- 与西太暖池指数WPWPAI的年际变化的负相关较IOWPAI更明显

1、云南林火格局与驱动机制

- IO和WP暖池对林火年际变化(2003-2020)的影响在空间上相互消长，
- IO和WP暖池的影响以分别云南西南和东北为主；
- 近5年来，暖池效应在减弱



1、云南林火格局与驱动机制

认识1：

- 气候对云南高原的林火发生兼具直接（**空气湿度**）和间接（**通过植被——可燃物**）的影响

推论：云南林火多发区植被是fire-prone ecosystem

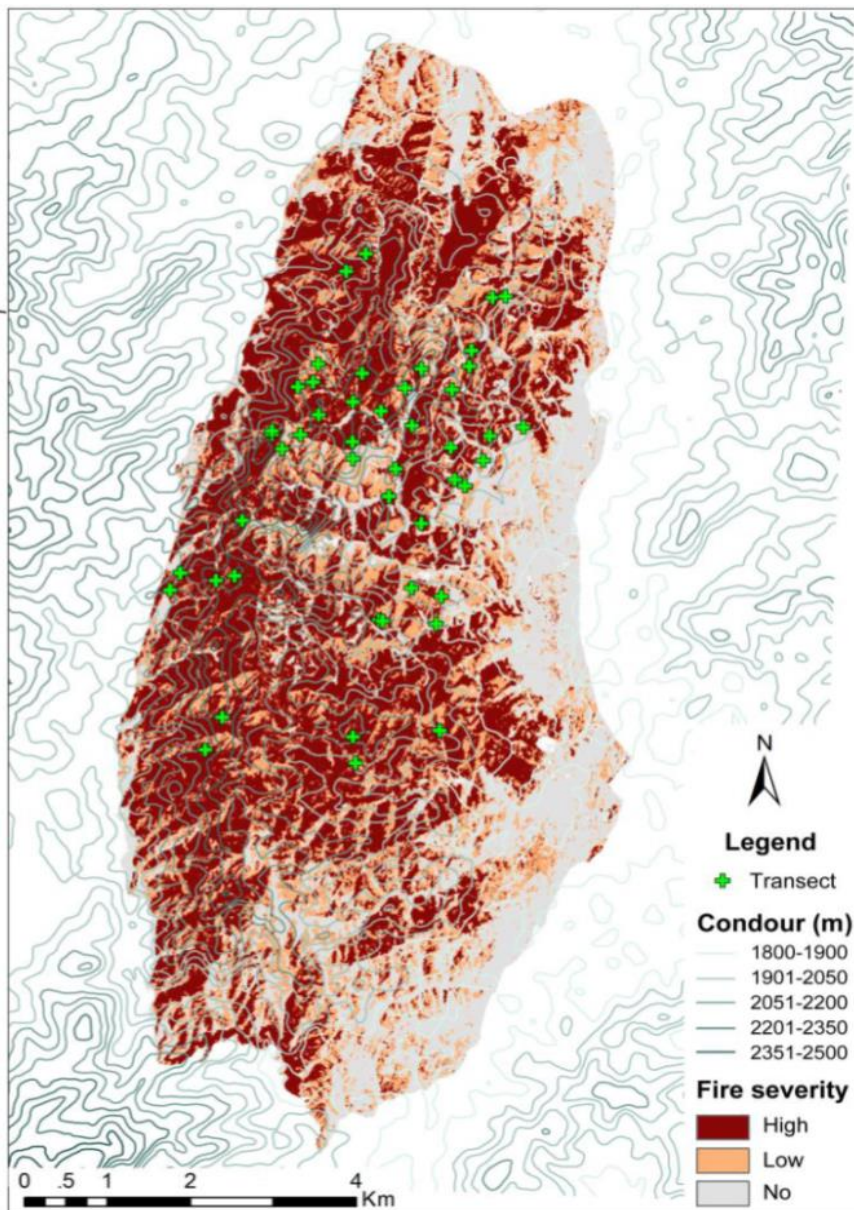
- **植被易受火干扰（气候和植被决定）**
- **植被对火干扰具有稳定性和恢复力**
- **植被的功能性状对火干扰具有关联性和适应性**

2、云南高原森林火后群落构建

科学问题： 云南高原森林群落对火干扰的稳定性如何？

- 火后森林植物种群更新速率
- 火后植被盖度和生物量的恢复速率
- 火后森林群落组成变化

2.1 种群、物种多样性恢复



2013. 4. 23云南禄丰县勤丰镇特大火灾

- 约2000hm²过火面积
- 当年9~10月开始火后森林更新调查
- 10m×100m样带47条



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Forest Ecology and Management

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

Early post-fire regeneration of a fire-prone subtropical mixed Yunnan pine forest in Southwest China: Effects of pre-fire vegetation fire severity and topographic factors [☆]

Jie Han ^a, Zehao Shen ^{a,*}, Lingxiao Ying ^a, Guixiang Li ^b, Anping Chen ^c

2.1 种群、物种多样性恢复

火后种群更新旺盛，恢复很快，当年更新群落相似性达到~53%

Table 3 Early post-fire regeneration of forests in different regions. AP, annual mean precipitation; MAT, mean annual temperature;

| Vegetation type | Region | AP (mm) | MAT (°C) | Months after fire | Reg. density (stems ha ⁻¹) | Notes | References |
|----------------------|-----------------------------|-----------|----------|-------------------|--|------------------------|----------------------|
| Mixed pine forest | Semi-humid subtropic, China | 912 | 14.3 | 5 | $10^5 \pm 10^4$ | | This study |
| Chaco Serrano forest | Central Argentina | 644 | 13.8 | 12 | 4567 ± 170 | >90% are resprouts | Torres et al. (2014) |
| Woodland | Mediterranean | 1400~1600 | 10~12.5 | 2 | 700–1200 | | Maia et al. (2012) |
| | | | | 18 | 5800–13,900 | | |
| <i>Larix</i> forest | Cool temperate North Japan | 1560 | 7.1 | 24 | 1.0×10^5 1.7×10^5 | Resprouts Seedlings | Goto (2004) |

3.3. Pre- and post-fire community species composition similarity (SCS)

SCS between the early post-fire regeneration and pre-fire communities ranged from 0.07 to 0.914 with a mean \pm SD of 0.530 ± 0.222 for the Morisita–Horn index (with population density included). 84.8% of regenerating stems in all transects were composed of the six most abundant species, *P. yunnanensis*, *P. yunnanensis* var. *pygmaea*, *L. ovalifolia*, *Cyclobalanopsis glaucoides*, *L.*

2.1 种群、物种多样性恢复

种群密度和物种构成恢复的调控因子

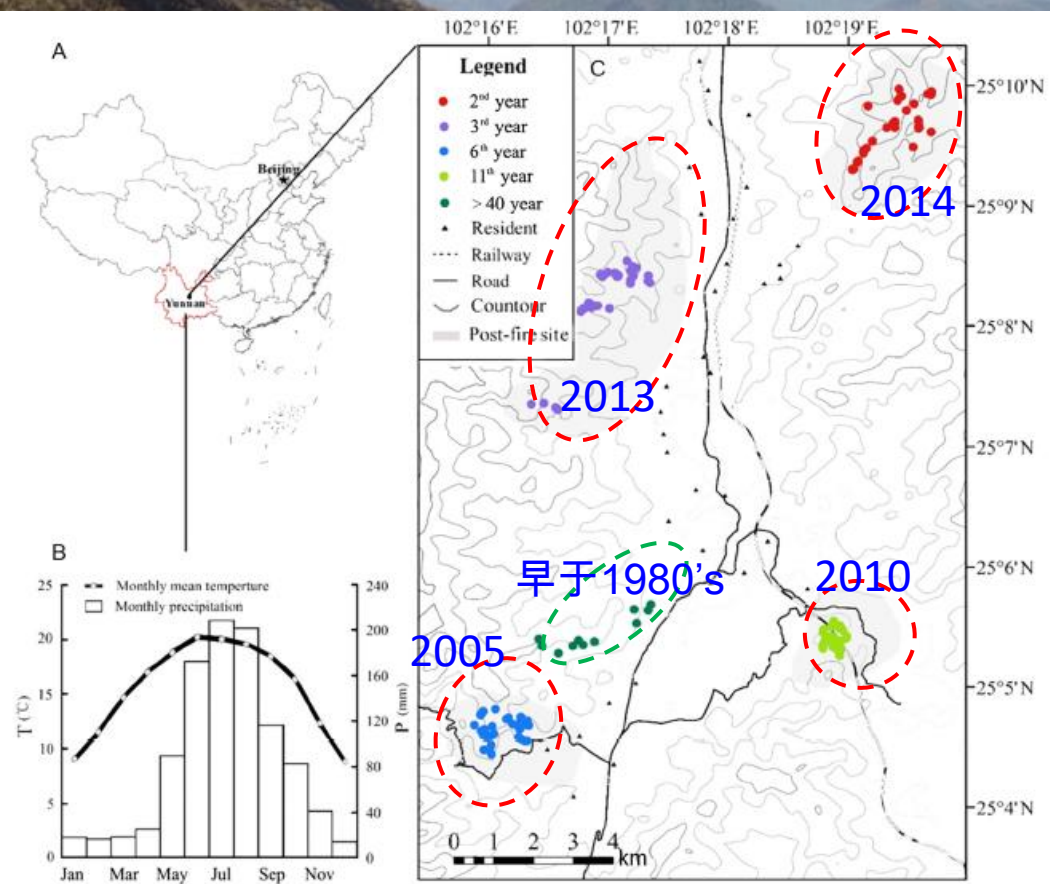
| Variable | Density | | SCS | | Density | | SCS | |
|-----------------------|---------|------|---------|------|----------------|---------|----------------|--------|
| | %IncMSE | rank | %IncMSE | Rank | R ² | P | R ² | P |
| Elevation | 15.60 | 1 | 13.07 | 1 | 0.549 | 2.4e−09 | 0.272 | 0.0001 |
| Type [†] | 16.36 | 2 | 10.92 | 2 | 0.550 | 1.5e−07 | 0.294 | 0.001 |
| Position [†] | 3.44 | 3 | 6.79 | 4 | 0.367 | 5.6e−05 | 0.215 | 0.004 |
| Slope | 2.76 | 4 | 7.52 | 3 | 0.117 | 0.012 | 0.157 | 0.004 |
| Aspect | 2.02 | 5 | −2.08 | 7 | 0.026 | n.s. | − | n.s. |
| TBA | 1.65 | 6 | 4.96 | 5 | 0.201 | 0.002 | 0.144 | 0.012 |
| Shape [†] | 1.56 | 7 | −2.02 | 6 | − | n.s. | − | n.s. |
| f.ratio | 0.66 | 8 | −2.90 | 8 | − | n.s. | − | n.s. |
| Vari.exp% | 56.2% | | 28.7% | | | | | |

- 滇中植被对火烧表现了种群更新和物种构成上较快的恢复速率——即对火干扰的弹性；
- 生境和火前群落类型，而非火烧烈度，决定火后的植被恢复力

2.2 群落物种组成变化

火后群落更新的群落组成变化

- 火后更新群落Beta多样性格局与及环境和空间因素的影响
- 火干扰与环境的歷史效应对植物群落构建的贡献



(Han, Shen et al. 2018. Front. Plant Sci.)

2.2 群落物种组成变化



2 year-since-fire



3 year-since-fire



6 year-since-fire



11 year-since-fire



> 40 year-since-fire

(Han, Shen et al. 2018. Front. Plant Sci.)

2.2 群落物种组成变化

4) 多样性分析方法 :

- **α diversity:** Species richness per plot
- **β diversity:** Sorenson = turnover + nestedness

$$\beta = \beta_{\text{sor}} = \frac{\max(b,c) + \min(b,c)}{2a + \max(b,c) + \min(b,c)}$$

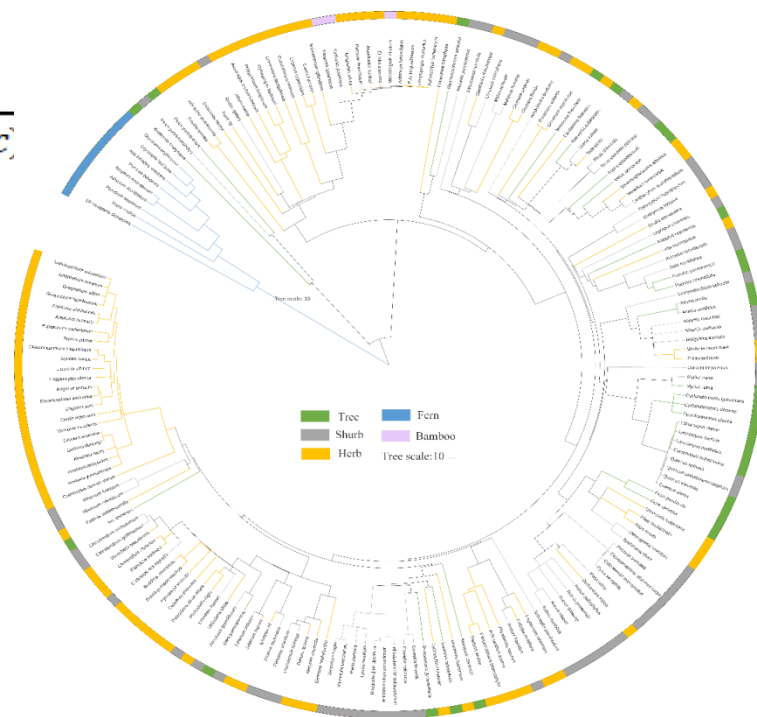
$$\beta_{\text{nes}} = \frac{\max(b,c) - \min(b,c)}{2a + \min(b,c) + \max(b,c)} \times \frac{a}{a + \min(b,c)}$$

$$\beta_{\text{turnover}} = \frac{\min(b,c)}{a + \min(b,c)}$$

- **Phylogenetic structure:**

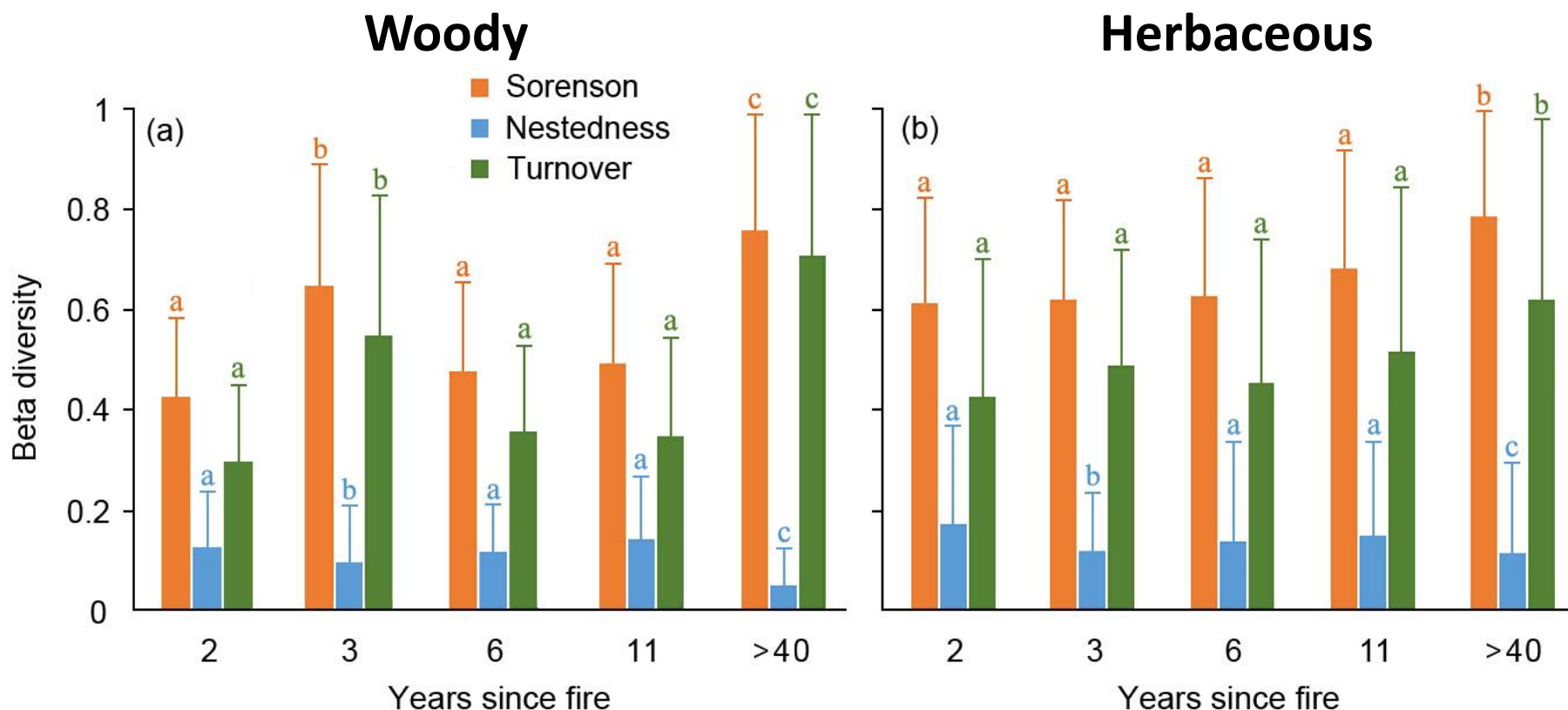
$$NRI = -\frac{MPD_{\text{observed}} - \text{mean}(MPD_{\text{null}})}{sd(MPD_{\text{null}})}$$

- $NRI < -1$, overdispersed
- $NRI > 1$, clustering
- $-1 < NRI < 1$, random



2.2 群落物种组成变化

1) 火后植物群落间 β 多样性的年际差异



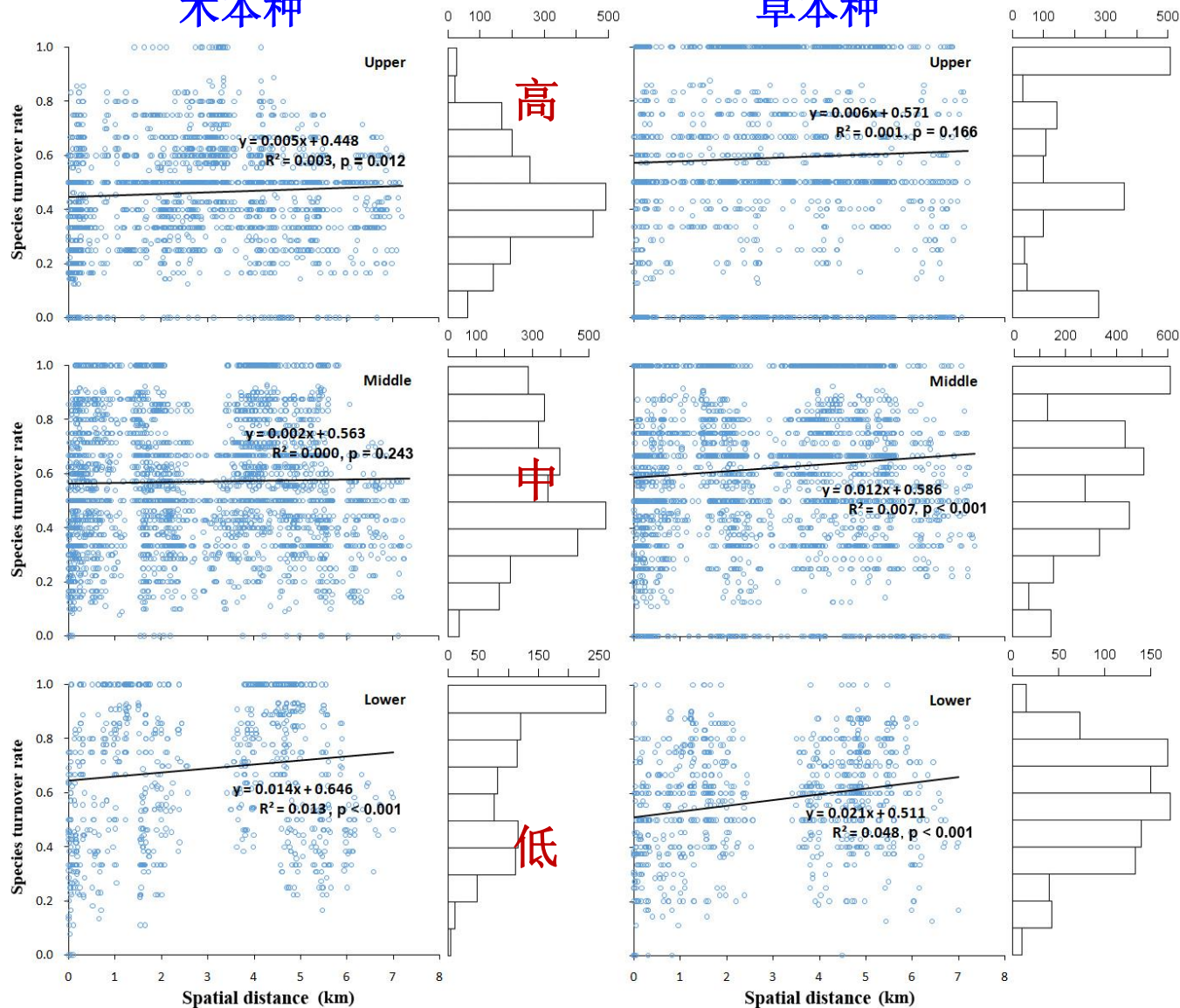
火后更新群落的物种更替随火后年份而增加但差别不大，草本物种更替更明显，且有增大趋势

2.2 群落物种组成变化

2) 不同坡位群落物种更替与空间距离的关系

木本种

草本种

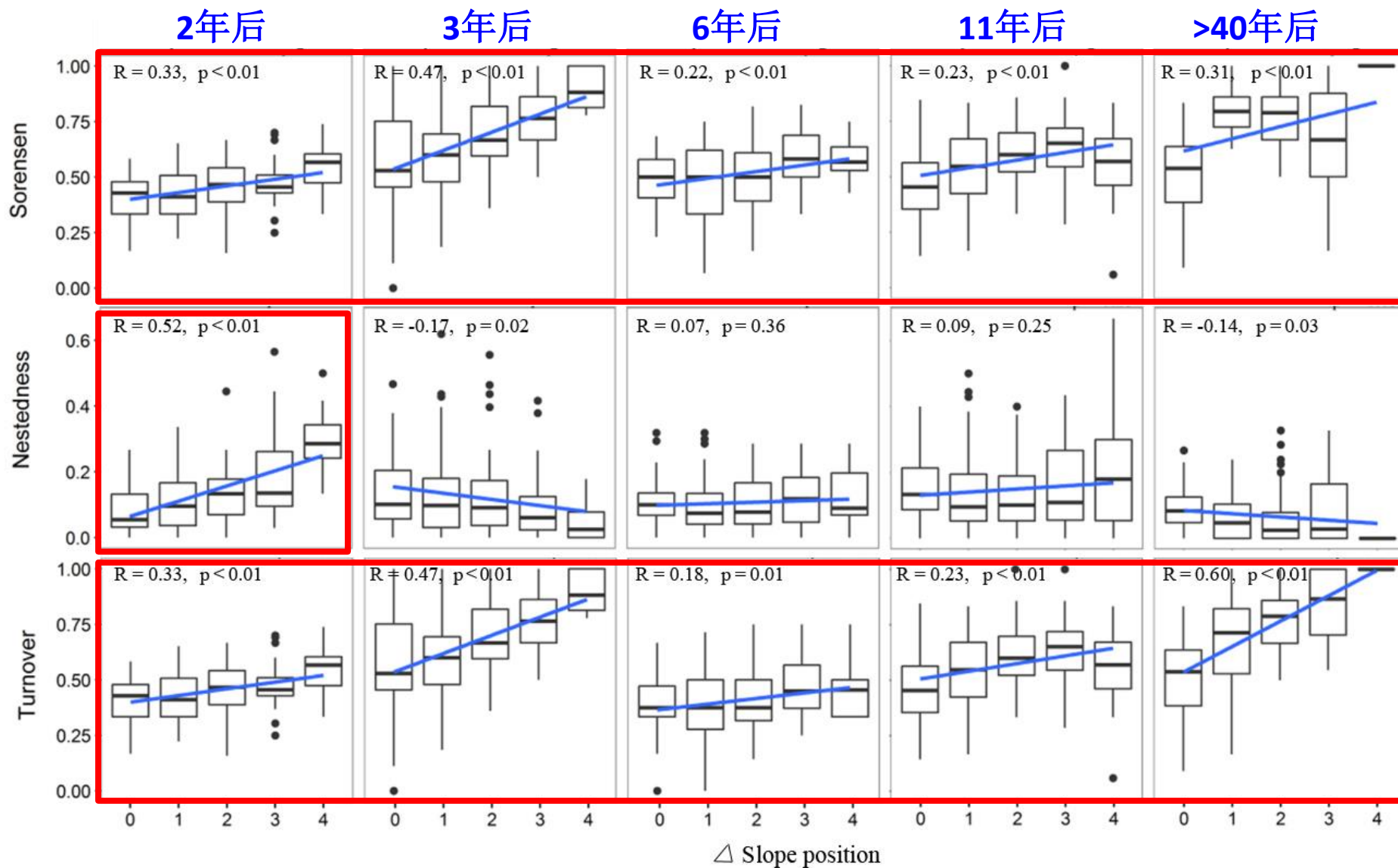


- 木本物种随空间距离增大的替换速率低于草本种；

- 随坡位上升，物种替换速率降低

2.2 群落物种组成变化

3) 坡位差与群落 β 多样性的关系(木本)



2.2 群落物种组成变化

初步结论：

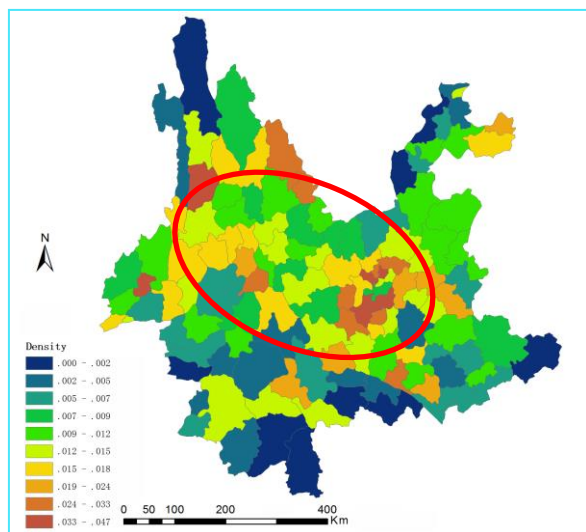
- 1) 地形梯度影响火后群落更新的空间格局和更替速率
- 2) 火干扰强化了地形主导的环境过滤和初始植物区系驻留机制，决定了火后植被结构的确定性和随机性构建过程

3、云南高原森林植物性状火干扰适应

科学问题：

- 植被的功能性状如何适应火干扰？
- 群落木本物种更新的火干扰适应策略

滇中高原常见木本植物的干扰适应策略普遍存在



| Scientific name | Growth form | Presence | Post-cut resprouting | Post-fire resprouting | Serotiny |
|--|-------------|----------|----------------------|-----------------------|----------|
| <i>Castanopsis delavayi</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Castanopsis orthacantha</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Cyclobalanopsis delavayi</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Cyclobalanopsis glaucoides</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Lithocarpus dealbatus</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Keteleeria evelyniana</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Olea yunnanensis</i> | Tree | V | Yes | Yes | No |
| <i>Quercus aliena</i> var. <i>aculeserrata</i> | Tree | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Albizia mollis</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Cupressus duclouxiana</i> | Tree | III | No | No | Yes |
| <i>Lithocarpus confinis</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Lithocarpus craibanus</i> | Tree | III | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Morus australis</i> | Tree | III | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Prunus conradinae</i> | Tree | III | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Pinus armandii</i> | Tree | III | No | No | No |
| <i>Pinus yunnanensis</i> var. <i>yunnanensis</i> | Tree | III | No | No | Yes |
| <i>Pistacia chinensis</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Pistacia weinmannifolia</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Quercus acutissima</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Quercus variabilis</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Quercus gilliana</i> | Tree | III | Yes | Yes | No |
| <i>Alnus nepalensis</i> | Tree | II | No | No | No |
| <i>Quercus senescens</i> | Tree | II | Yes | Yes | No |
| <i>Eurya nitida</i> | Tall shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Lindera communis</i> | Tall shrub | V | Unconfirmed | Unconfirmed | No |
| <i>Lyonia ovalifolia</i> | Tall shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Temstroemia gymnanthera</i> | Tall shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Toxicodendron succedaneum</i> | Tall shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Vaccinium sprengelii</i> | Tall shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Schima argentea</i> | Tall shrub | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Diospyros mollifolia</i> | Tall shrub | III | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Pyrus pashia</i> | Tall shrub | III | Yes | Yes | No |
| <i>Schoepfia jasminodora</i> | Tall shrub | III | Yes | Yes | No |
| <i>Styrax grandiflora</i> | Tall shrub | III | Yes | Yes | No |
| <i>Zanthoxylum esquiralii</i> | Tall shrub | III | Yes | Yes | No |
| <i>Ilex micrococca</i> | Tall shrub | II | Yes | Yes | No |
| <i>Zanthoxylum armatum</i> | Tall shrub | II | Yes | Yes | No |
| <i>Fargesia</i> sp. | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Hypericum uralum</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Michela yunnanensis</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Myrsine africana</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Nothonanax delavayi</i> | Shrub | V | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Pinus yunnanensis</i> var. <i>pygmaea</i> | Shrub | V | Yes | Yes | Yes |
| <i>Rhododendron microphyton</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Rhododendron spinuliferum</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Smilax siderophylla</i> | Shrub | V | Yes | Yes | No |
| <i>Camellia reticulata</i> | Shrub | IV | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Campylotropis polyantha</i> | Shrub | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Elsholtzia rugulosa</i> | Shrub | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Reinwardtia indica</i> | Shrub | IV | Yes | Unconfirmed | No |
| <i>Rhododendron decorum</i> | Shrub | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Rhamnus virgatus</i> | Shrub | IV | Yes | Yes | No |
| <i>Vaccinium figile</i> | Shrub | IV | Yes | Yes | No |

^a I, II, III, IV, and V indicate a range of frequency of each species from most rare (I) to most common (V).

滇中植物火适应特征

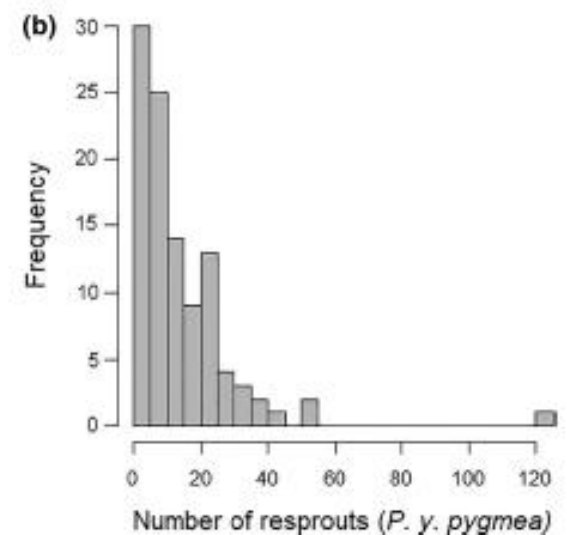
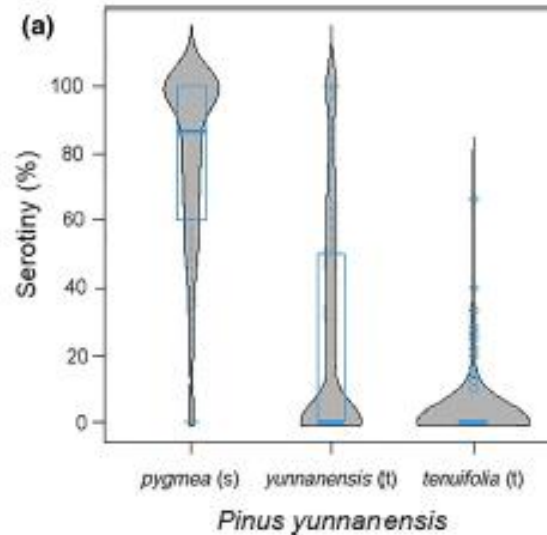


3.1 云南松的火适应特征

Pinus yunnanensis 典型的fire-prone species

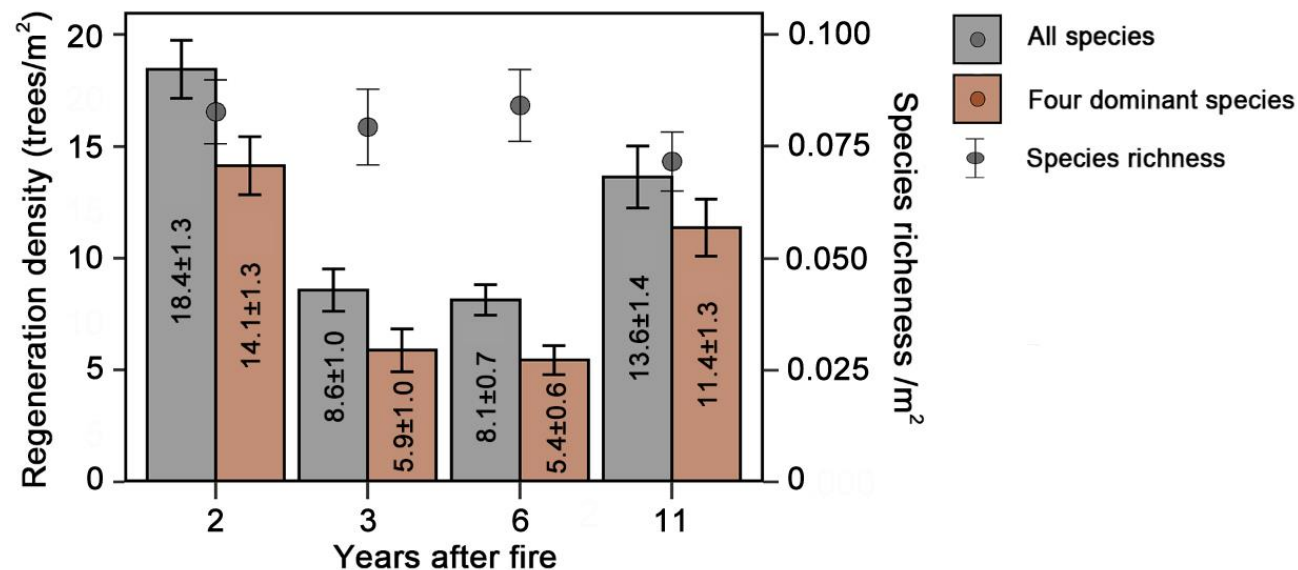
关键性状：

- 分化出亚种—地盘松*P. yunnanensis* var. *pygmea*
- 球果延迟开裂Serotiny
- 火后有性繁殖早熟
- 强烈萌枝resprouting
- 林冠矮化



(Pausas, ..., Shen*, 2021, Ecology)

3.2 火干扰适应的木本物种更新策略



云南松 *Pinus yunnanensis*



毛叶珍珠花 *Lyonia villosa*



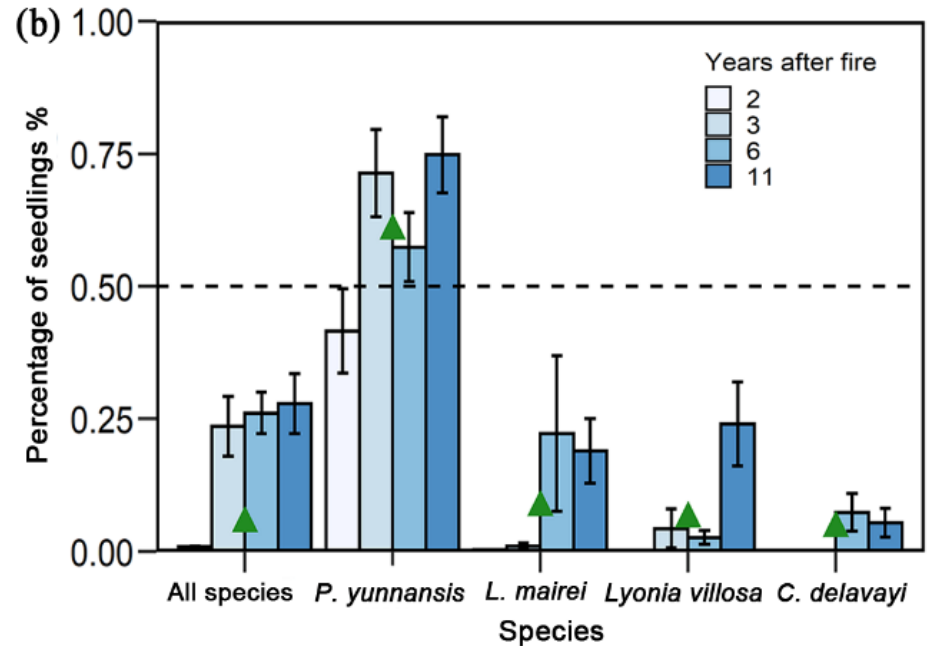
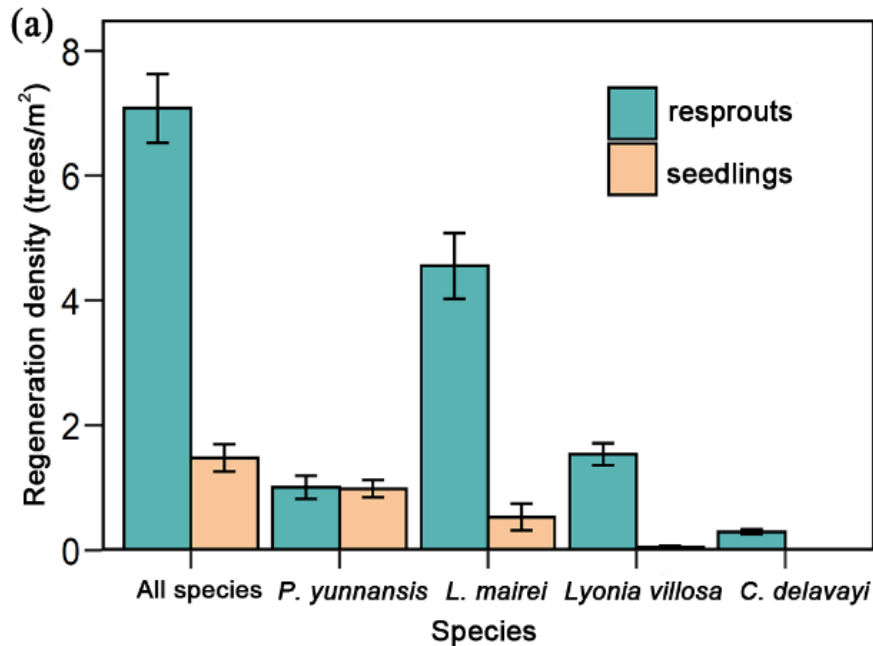
滇石栎 *Lithocarpus mairei*



黄毛青冈 *Cyclobalanopsis delavayi*

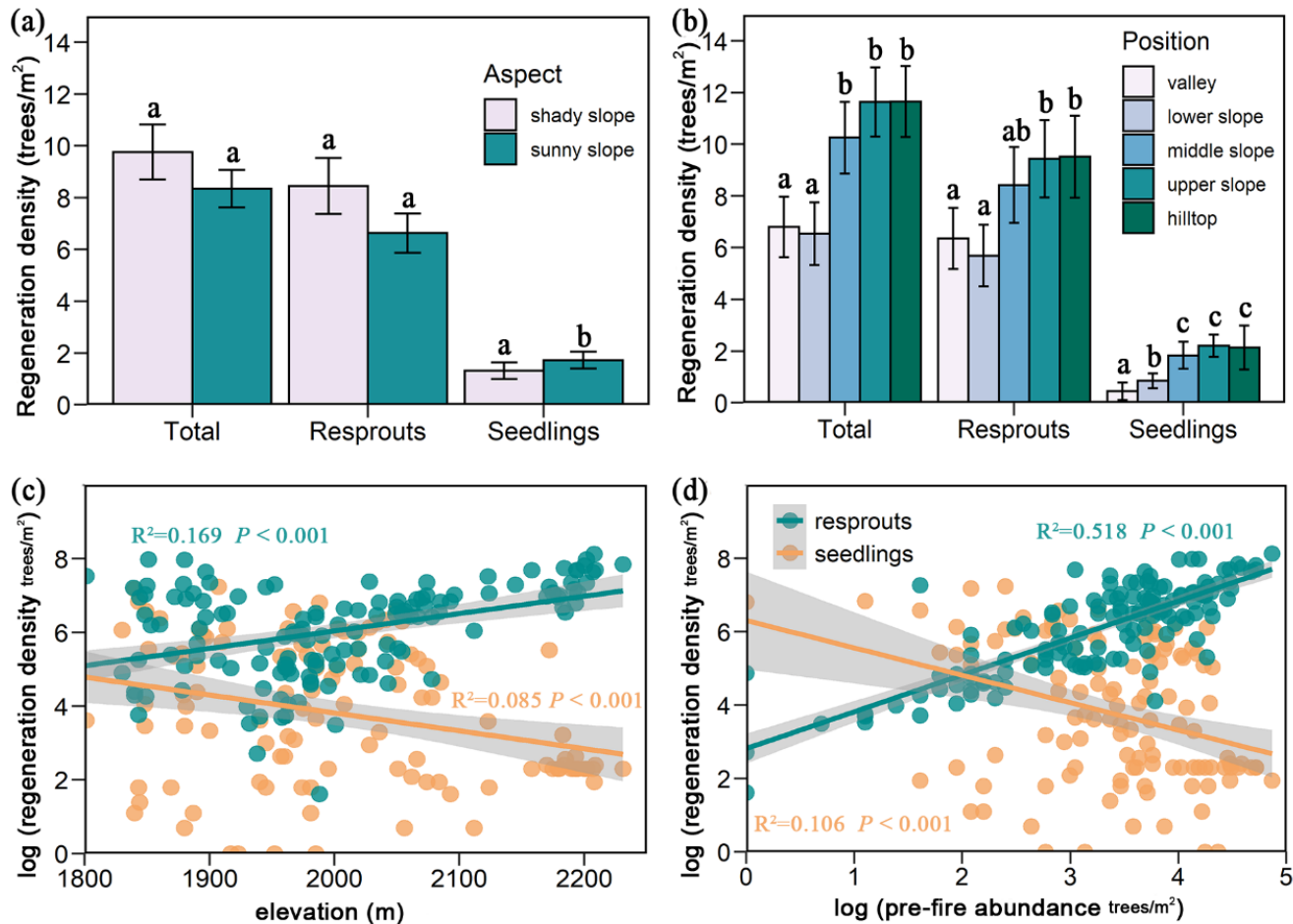
3.2 火干扰适应的木本物种更新策略

- 云南松种子更新、萌发更新各占一半；阔叶树以萌发更新为主；
- 萌发更新居先、种子更新随后



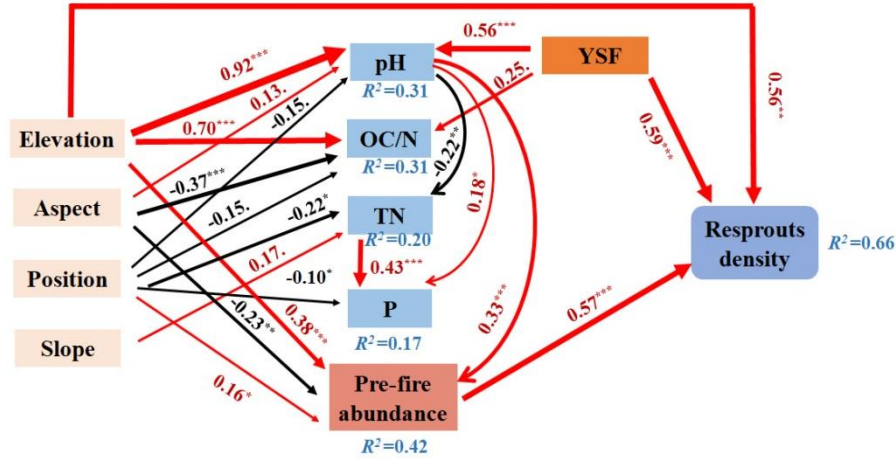
3.2 火干扰适应的木本物种更新策略

- Seeding和Sprouting更新密度的坡向坡位格局差异明显
- 海拔和火前植被多盖度的对更新密度的效应相反

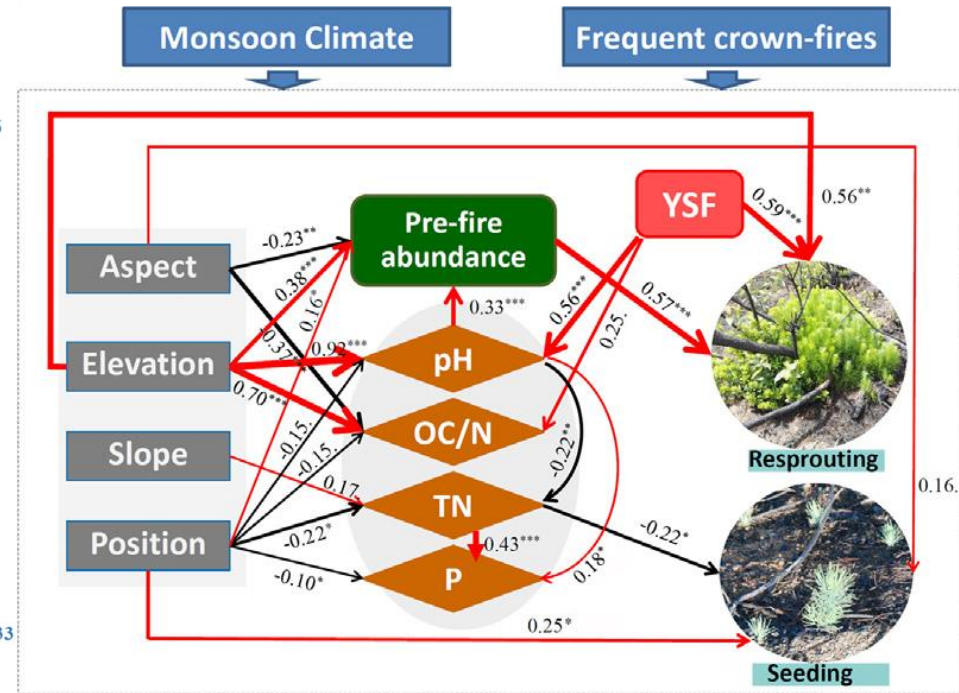
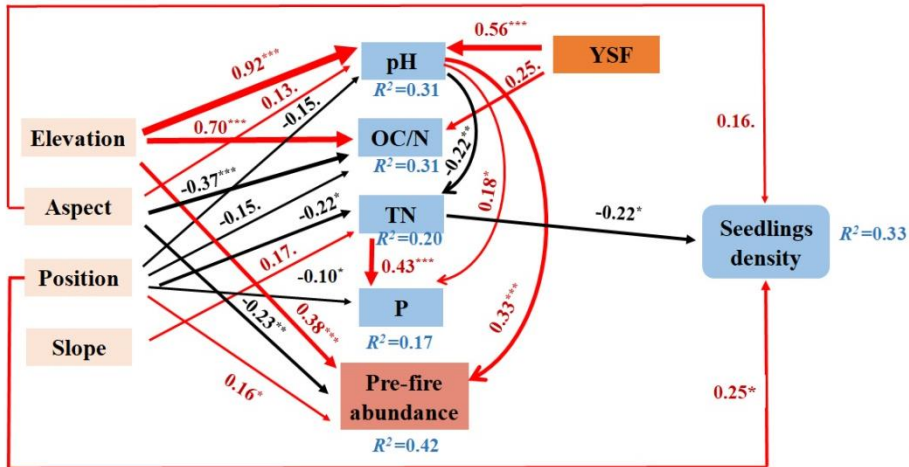


3.2 火干扰适应的木本物种更新策略

(b) N=120, Fisher's C = 27.17, AIC= 105.17, P=0.855



(c) N=120 Fisher's C = 27.17 AIC= 105.17 P=0.855

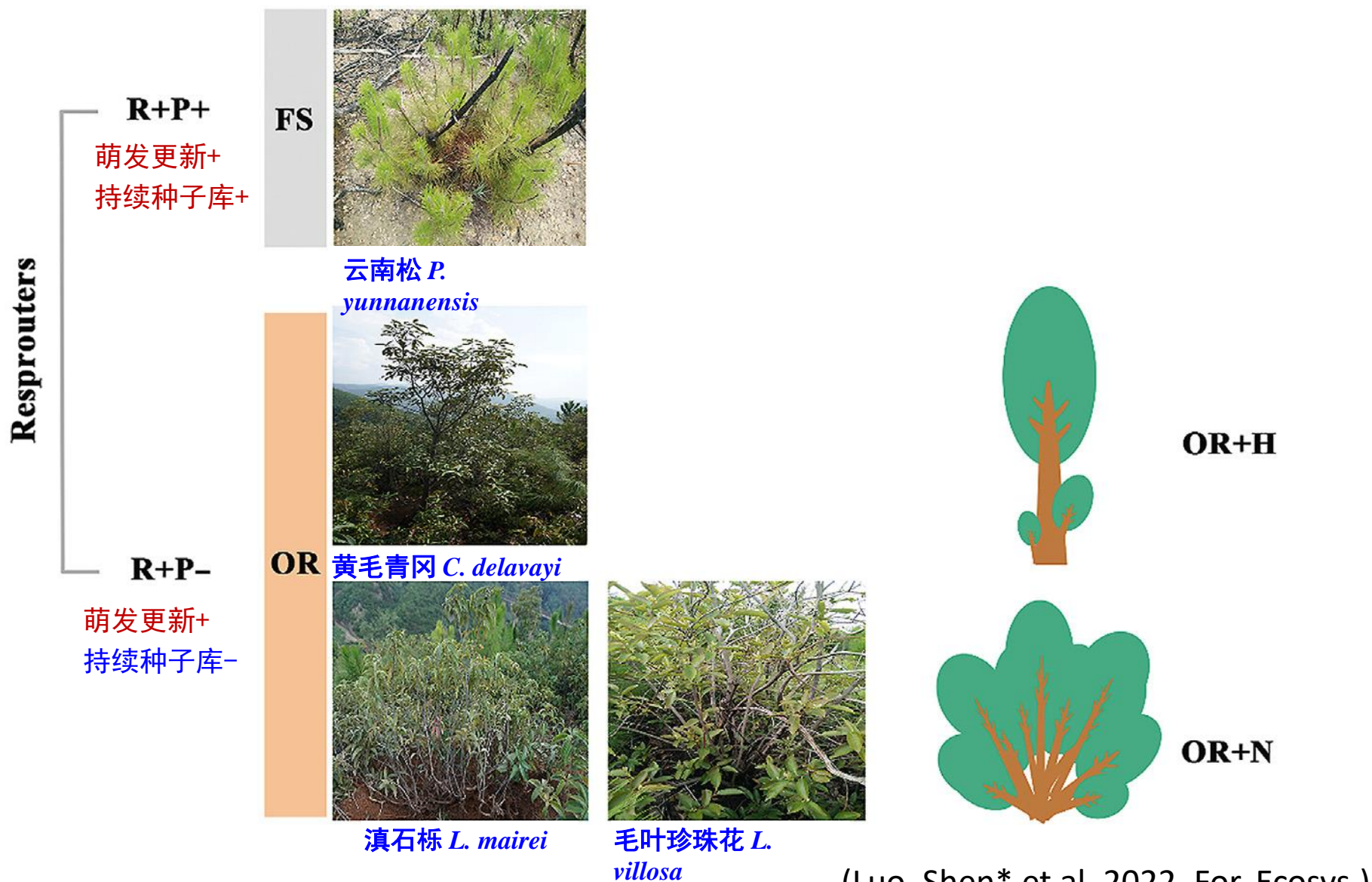


3.2 火干扰适应的木本物种更新策略

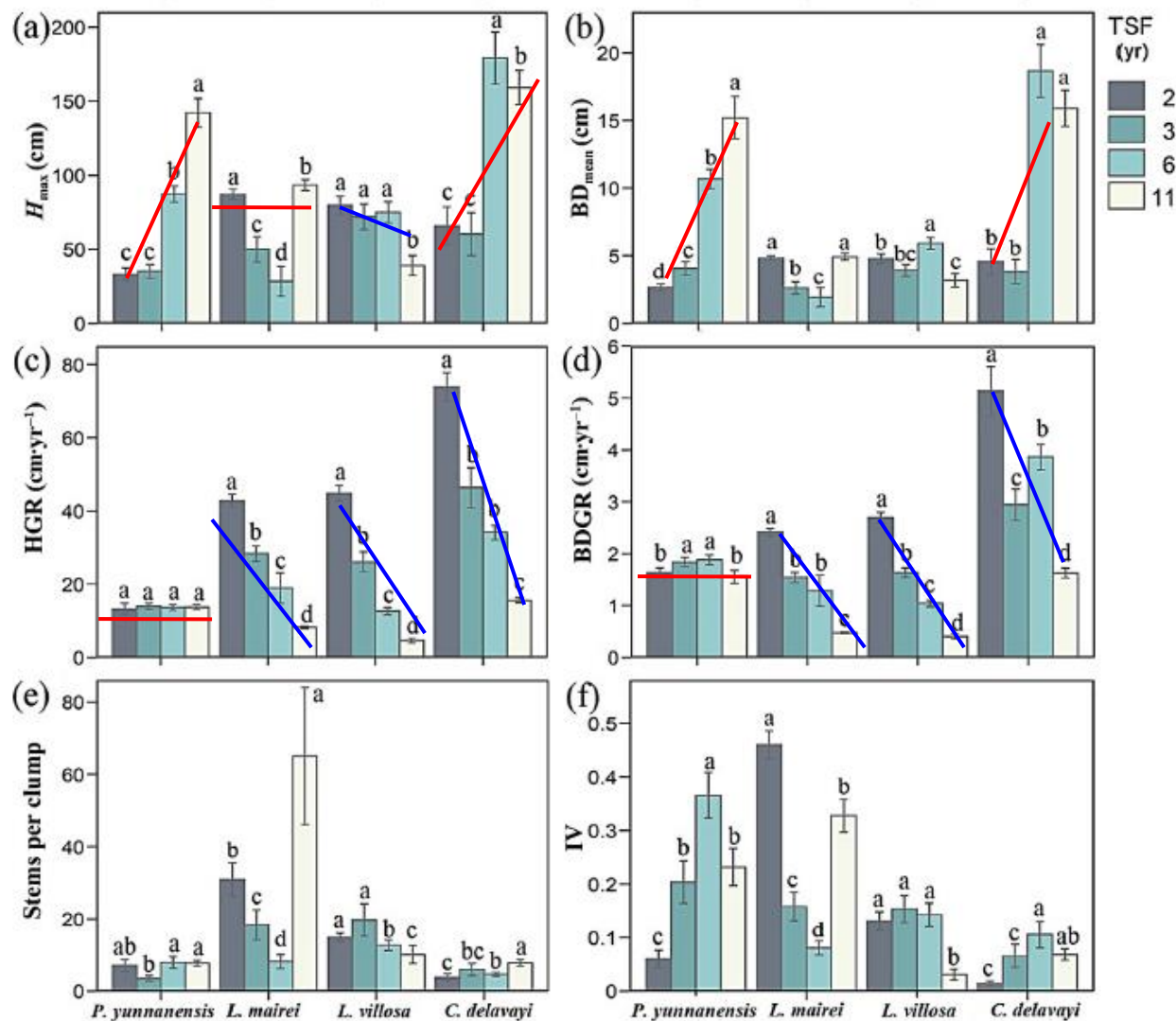
初步结论：

- 火后更新以萌发苗为主，实生苗较少且出现较晚；海拔、火前丰度和土壤pH值较高的生境，火后更新密度较大。
- 萌发苗密度受火前丰度、海拔、土壤pH值和火后年份的显著影响；实生苗优先出现在贫瘠的生境中，主要受地形位置和土壤养分的影响。
- 环境对**萌发**($R^2=0.66$)的约束强于**播种**($R^2=0.33$)，显示了**确定性**和**随机性**过程对火后更新不同策略的影响差异性。
- 火后**萌发与播种更新**的生境占据具有**时空上的互补性**。

3.3 物种更新的火后空间拓殖策略



3.3 物种更新的火后空间拓殖策略



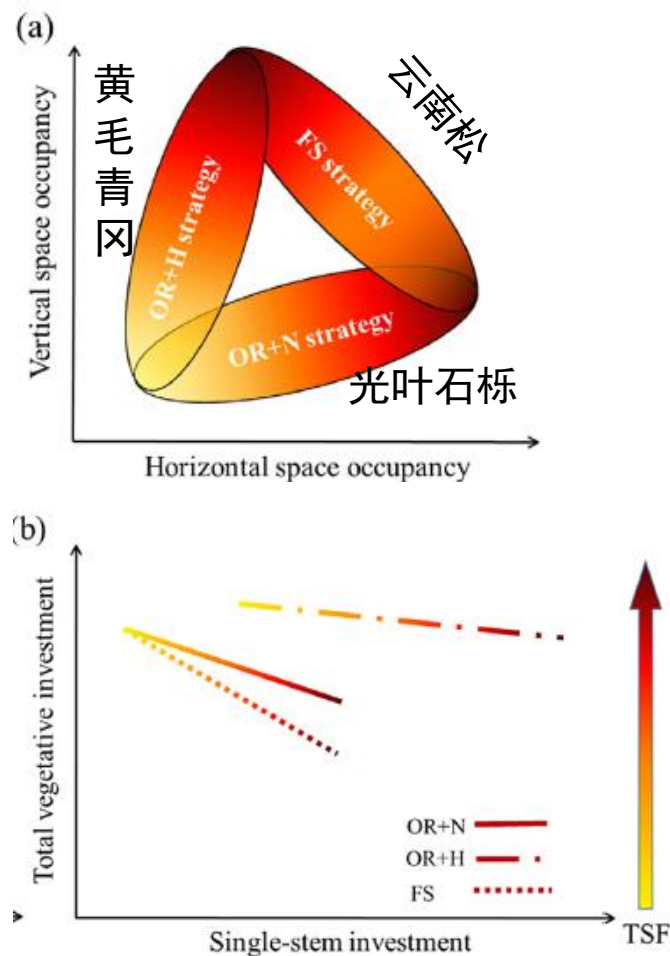
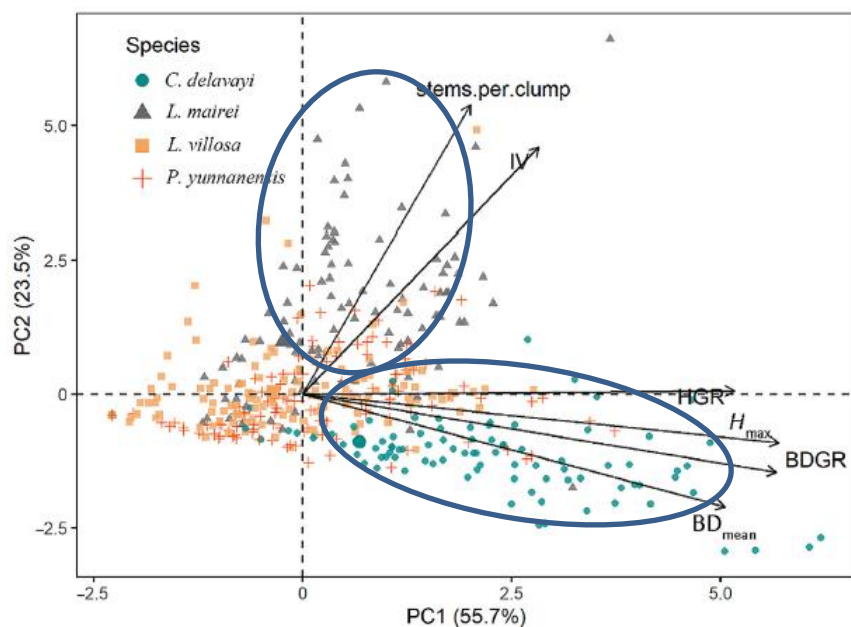
云南松、黄毛青冈、
光叶石栎有完全不同
的高生长、径生长和
分支比变化特征

单株：黄毛青冈占优
种群：云南松、光叶
石栎占优

3.3 物种更新的火后空间拓殖策略

云南松、黄毛青冈、光叶石栎有完全不同的高生长、径生长和分支比变化特征
单株——高空间：黄毛青冈占优

种群——水平空间：云南松、光叶石栎占优



4、小结

主要认识：

- 1) 滇中高原典型森林（包括云南松林及其混交林）是一种**fire-prone 生态系统**；常见物种已形成多种火适应特征；
- 2) 火后植物**种群更新、物种构成和植被覆盖**的迅速恢复，展现了滇中高原森林对火干扰的恢复力；
- 3) 火烧后植被快速恢复的外在决定因素可能是丰沛的**季风降雨**；
- 4) 火烧烈度对火后**植被盖度恢复**起决定性作用；火前植被物种构成对火后植物**群落物种变化**起主导作用；
- 5) **萌发和实生苗更新的互补**，是滇中森林树种火后快速恢复的响应策略，和森林适应火干扰的主要弹性机制；萌发更新也分化了对**水平和垂直空间优先占据**的策略；
- 6) **异质地形主导和火干扰强化的更新选择与植物适应策略**，是物种生态位分化和群落多样性维持的关键机制。

谢谢！

Email: shzh@urban.pku.edu.cn

<https://www.ues.pku.edu.cn/szdw/qbjs/s/311935.htm>