



# 南方丘陵山地森林修复与生态系统服务提升

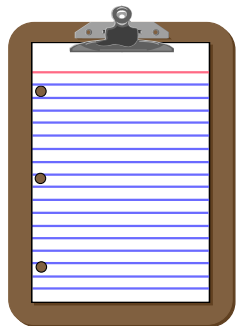
姜春前

jiangchq@caf.ac.cn

010 – 6288 9093

2023年6月18日

# 提 纲



一、森林恢复（修复）

二、森林生态系统服务

三、南方丘陵山地森林修复-提升生态系统服务

灾害防控（浅层滑坡）

水源涵养与土壤保持

水质净化

固碳增汇、物种多样性

四、山水林田湖草沙系统治理视角下的森林修复

# 世界森林分布图 (FAO, 2020)



# 一、森林修复（恢复）、重建

- 自18世纪开始，欧洲国家率先进行了森林恢复，此后森林恢复逐渐出现在其它发达国家与发展中国家（Vina et al,2016），并成为对抗环境退化的重要措施（Ciccarese et al,2012）。
- 学者认为“restoration”和“rehabilitation”这2个词就代表不同的“恢复”含义。通常，这2个词所代表的不同“恢复”是从恢复方式、恢复对象以及恢复目的这3个方面来区分的
- 一般来说，“restoration”是恢复退化森林，并尽可能恢复到原来的状态（FAO，2013）
- “rehabilitation”可以通过人工恢复或自然恢复来恢复退化林地，并且不需要恢复到原来的状态（Harrington 1999；Stanturf 2005；Simula 2009）或者重建森林的生产力，但没必要恢复到原始的状态（FAO，2013）
- 还有学者认为“rehabilitation”是广义的“restoration”活动的一部分，只是“rehabilitation”不需要恢复到原来的状态（Aronson et al，1993）
- Restoration - covers both issues of restoration and rehabilitation (FAO 2013)

# 森林景观恢复Forest Landscape Restoration (FLR)

- 综合方法：FLR结合人类的需求并考虑林区发展与周围景观要素的关系。
- 一个有计划的过程，旨在恢复毁林或森林退化的景观生态完整性和增强人类福祉。
- FLR从景观尺度处理人、自然资源和土地利用之间复杂的相互作用关系。
- FLR包括相关利益方的合作伙伴关系，确定、谈判和执行在广泛的土地利用方式下将森林和林木的生态、社会和经济效益恢复到一致认为的最佳水平。

## 基本特征

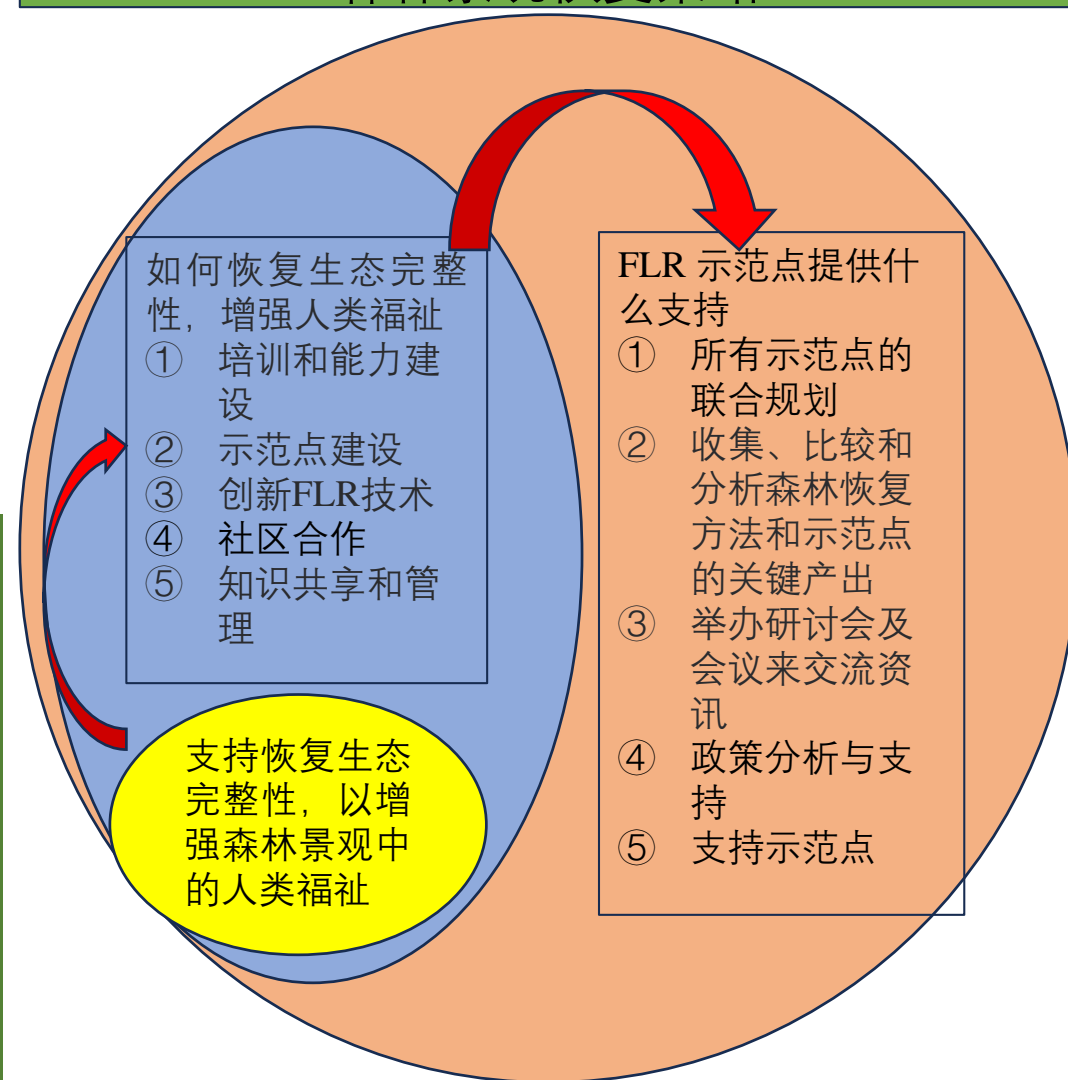
致力于恢复生态完整性 -- **更自然**

森林景观恢复具有过程性—**动态性**

谋求增进人类福祉-- **提升生态系统服务**

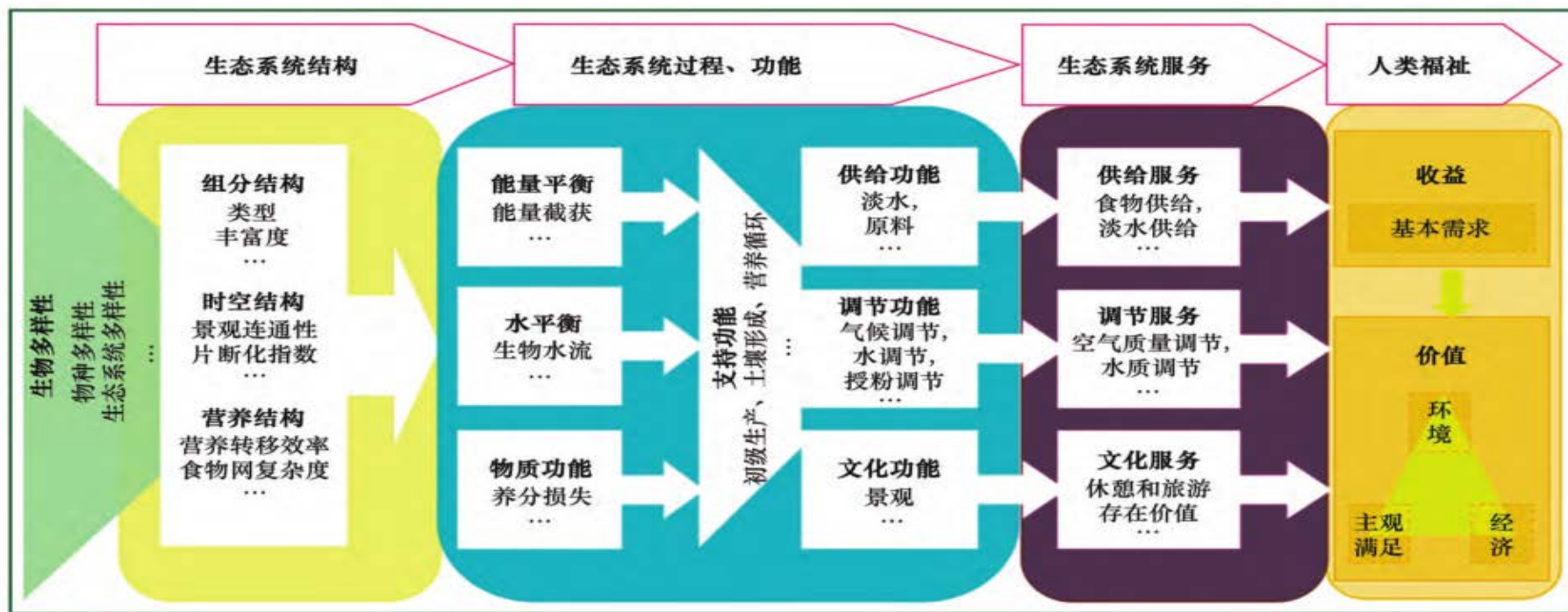
在景观尺度上实施--**恢复活动**

## 森林景观恢复策略



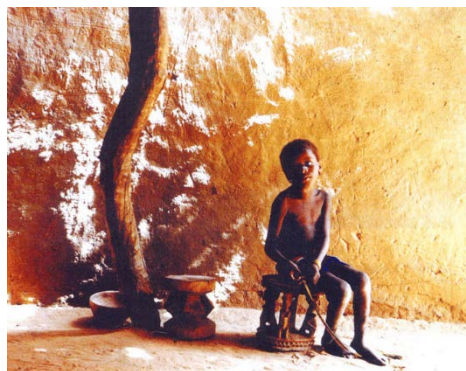
## 二、生态系统服务

- 人们从生态系统中获得的收益
- 生态系统服务是自然生态系统及其组成物种维持和实现人类生活的条件和过程(Daily 1997)。
- 生态系统产品(如食物)和服务(如废物同化)代表了人类直接或间接从生态系统功能中获得的利益(Costanza等人, 1997年)。



# 生态系统服务的研究的热点

- 围绕生态系统服务内涵、类型划分、价值评估等方面开展了大量研究。联合国千年生态系统评估项目（MA）首次在全球范围内开展生态系统及其对人类福祉影响的多尺度评价。
- 生态系统服务研究正从功能识别与价值评估向基于结构—过程—功能—服务机理研究转变，生态系统服务之间的权衡和协同关系也是近期的热点。



## 生态系统服务内涵

1997年Constanza等人提出了生态系统服务内涵，并发表了全球生态系统服务价值评估报告，也使其成为生态系统服务价值评估的一个分水岭。

## 生态系统服务价值评估

MA对生态系统服务的内涵进行了重新归纳和概括，并在全球范围内开展生态系统及其对人类福祉影响的多尺度评价。

## 重点与热点

结构-过程-功能-服务机理及对干扰的响应

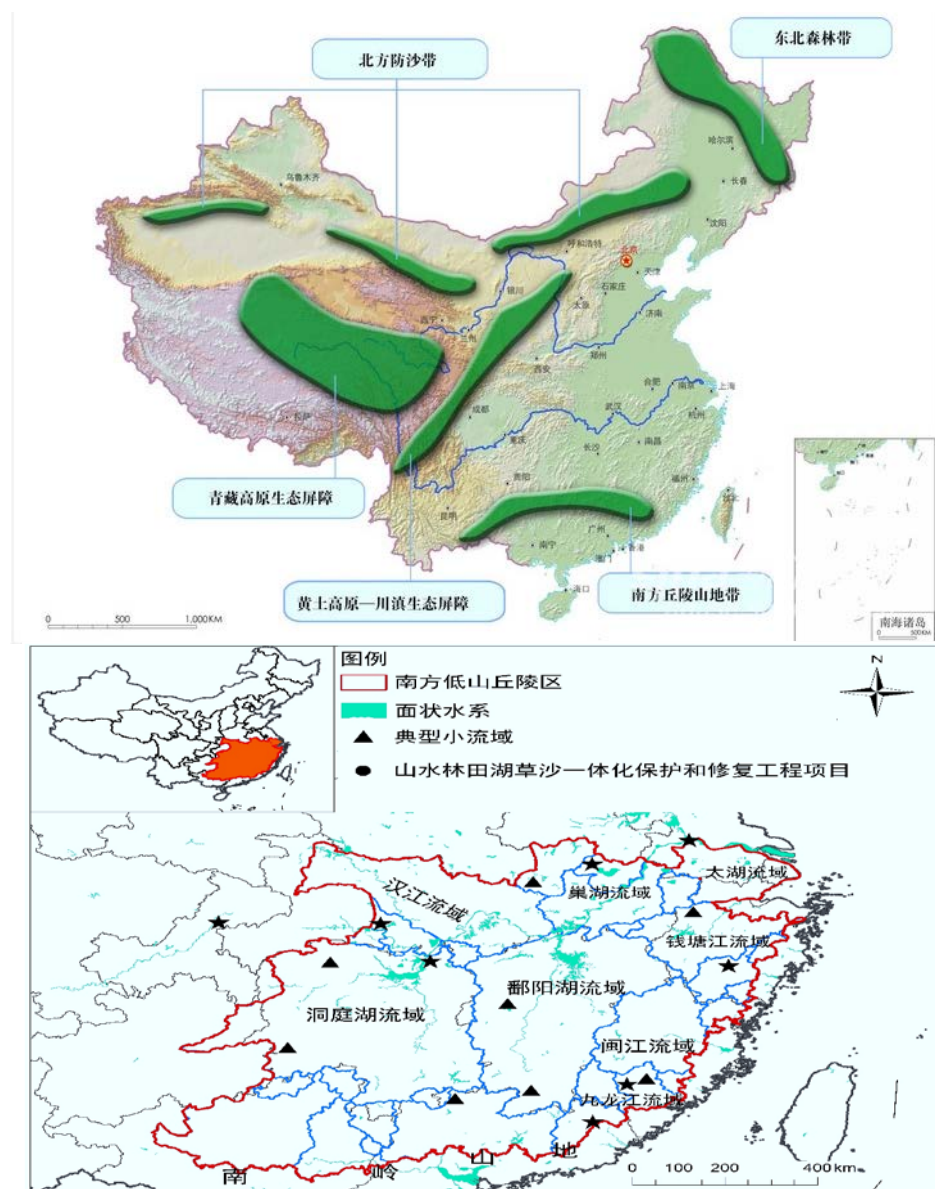
生态系统服务之间的相互关系（权衡和协同）

生态系统服务的尺度转换

生态系统服务的供需与服务流

### 三、南方丘陵山地屏障带森林修复与生态系统服务提升

- 南方丘陵山地屏障带是国家生态保护和建设的战略重点，也是我国生态修复与保护的核心和关键区域，是我国“两屏三带”（三区四带）生态格局的重要组成部分；
- 分布有世界同纬度带上面积最大、保存最完整的中亚热带森林生态系统，是我国重要的野生动植物种质基因库；
- 重要的江河汇集区
- 人工林、次生林、经济林（经果林）重要分布区（低质低效林比例大）



# (一) 存在的生态问题

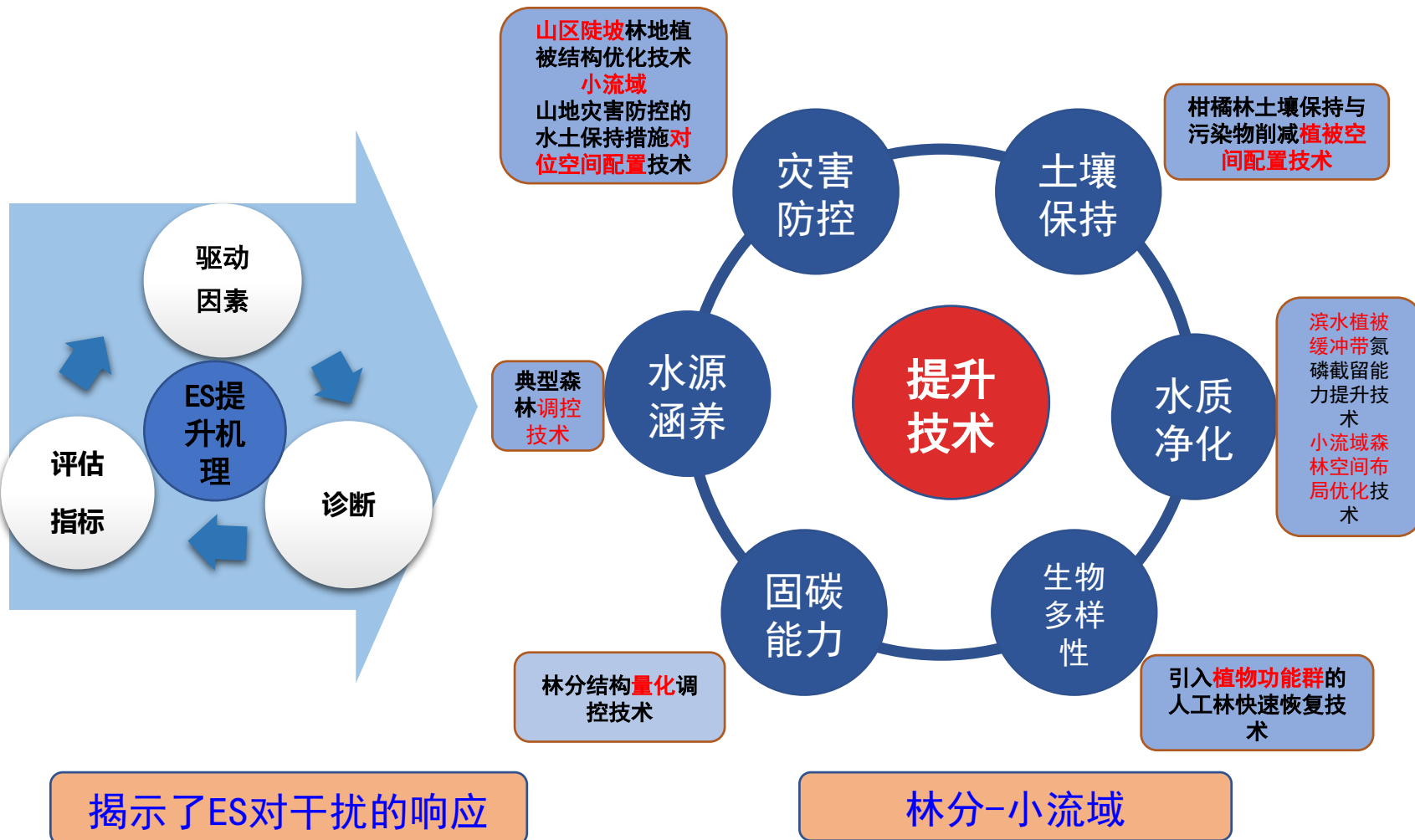
- 自然和人为干扰导致的土壤退化、生物多样性锐减、自然灾害频发、水源涵养能力下降和水质恶化等生态系统服务能力降低问题严重地威胁着区域可持续发展和国家生态安全；
- 以森林为主体的生态系统具有涵养水源、固碳释氧、生物多样性和土壤保育等多种服务，在提升生态安全保障方面发挥主体作用。



## （二）研究思路

ES提升机理

ES提升技术



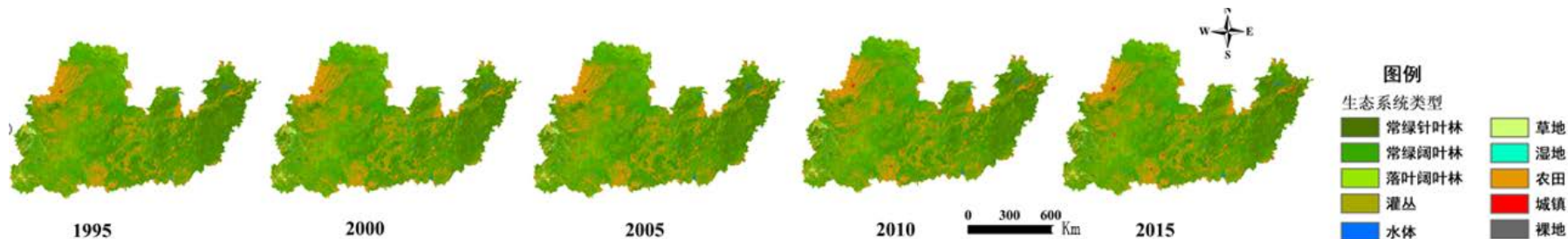
森林生态系统结构-过程-功能-服务

### (三) 南方丘陵山地屏障带生态系统服务格局的时空演变规律

#### (1) 南方丘陵山地屏障带生态系统服务时空变化特征研究

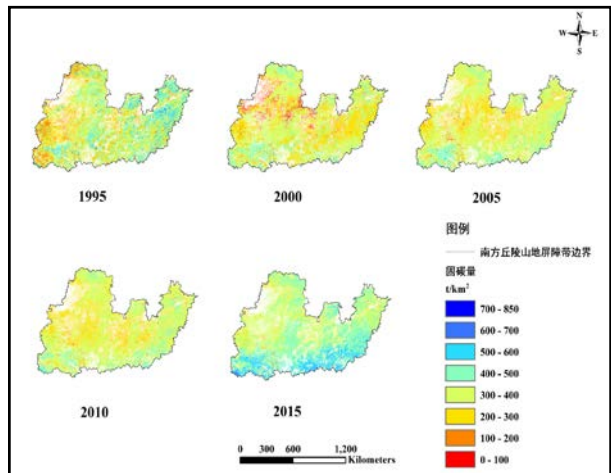
1995-2015年间针叶林主要向常绿阔叶林、农田和灌丛转化。研究区内森林生态系统服务提升的潜力巨大。

研究区生态系统服务水平呈总体下降趋势。

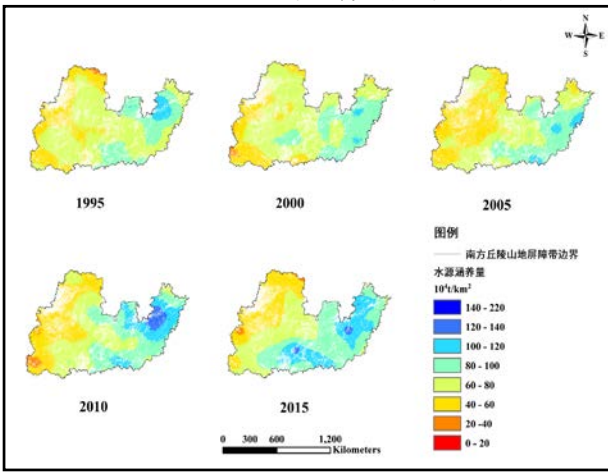


南方丘陵山地屏障带生态类型的时空变化特征

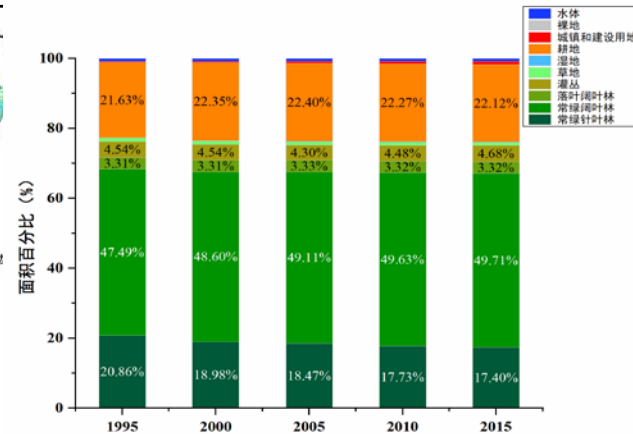
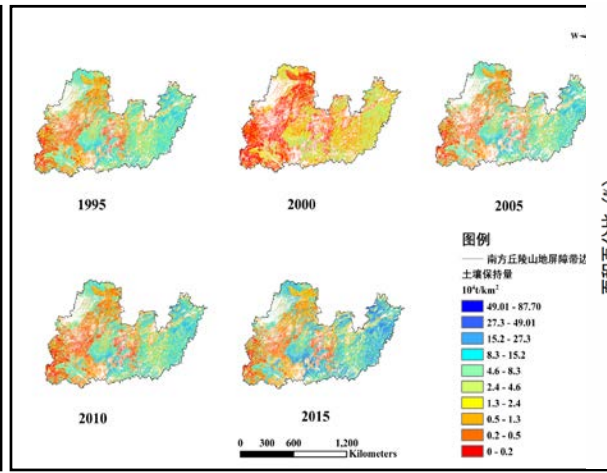
固碳能力的时空变化



水源涵养能力的时空变化



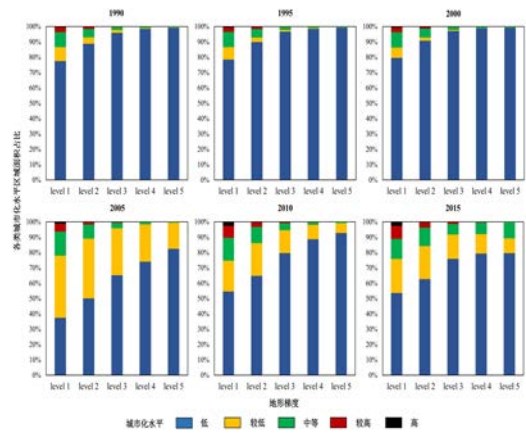
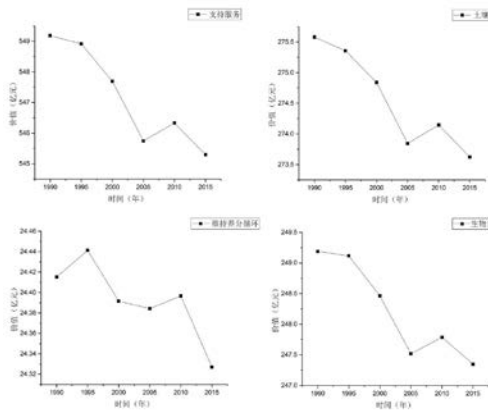
土壤保持的时空变化



(2) 典型区域生态系统服务格局变化特征

1990-2015年粤北生态系统服务价值呈**轻微减少的趋势**。各个地形梯度上的ESV随时间变化均呈现**缓慢下降的趋势**。

赣南地区在1990-2015年的生态系统服务价值呈现**下降的趋势**，总价值与调节服务的变化趋势一致。

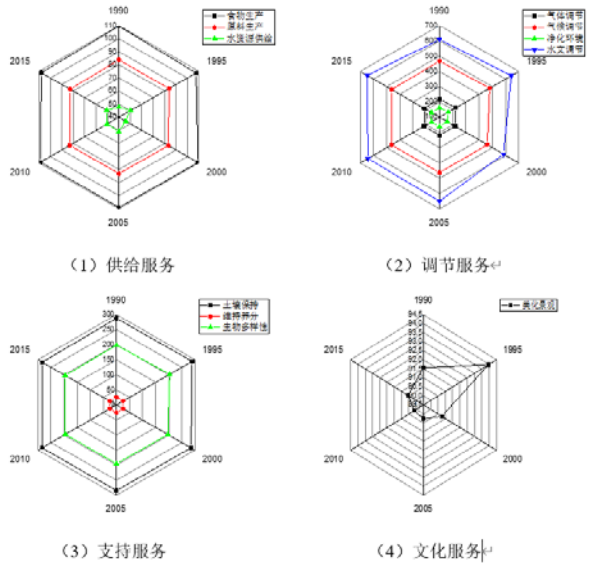


川东地区生态系统服务价值空间变化趋势为由东北、东南两翼向中部及西部逐级递减。研究时段间，生态系统服务总价值**持续增加**，调节服务功能最突出。

年份 Years	耕地 farmland		林地 forestland		草地 grassland		水域 Water land		未利用地 Unused land		总计 Total
	ESV	(%)	ESV	(%)	ESV	(%)	ESV	(%)	ESV	(%)	
1990	973.14	32.28	1279.57	42.45	151.21	5.02	610.61	20.26	0.02	0.00	3014.53
1995	960.54	31.09	1299.75	42.07	156.69	5.07	672.52	21.77	0.03	0.00	3089.52
2000	974.42	31.64	1301.75	42.07	150.12	4.87	653.61	21.22	0.03	0.00	3079.93
2005	968.61	31.08	1319.39	42.34	147.80	4.75	680.30	21.83	0.02	0.00	3116.33
2010	961.35	30.47	1322.51	41.91	148.66	4.71	722.76	22.91	0.02	0.00	3155.31
2015	950.30	30.09	1321.30	41.48	148.04	4.69	738.01	23.37	0.02	0.00	3157.67

湘西地区服务价值的变化一直处于**波动状态状态**，2005年-2015年湘西地区总ESV呈现负增长。

年份	湘西州	张家界	怀化	邵阳	娄底	湘西地区
1990	1059.250	612.443	1895.791	1264.618	458.210	5290.312
2015	1056.951	619.147	1914.167	1264.786	456.356	5311.407
1990-2015	-0.22%	1.09%	0.97%	0.01%	-0.40%	0.40%

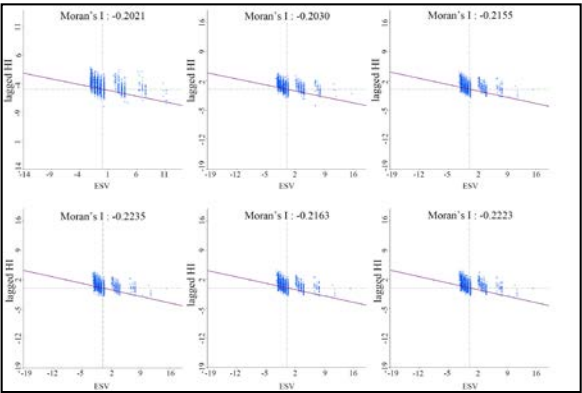


鄂西北地区生态系统服务价值总量随着时间的变化呈现**波动的状态**1990-2000年、2000-2010年先增后减的趋势2010-2015年呈上升趋势。

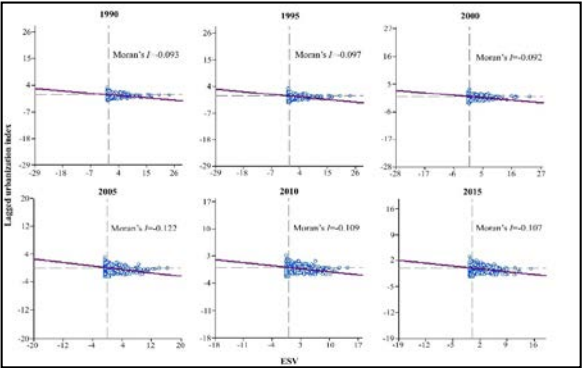
图 4-32 1990-2015 年鄂西北地区不同生态系统服务类型生态系统服务价值变化

### (3) 典型区域生态系统服务格局的驱动因素

赣南地区生态系统价值服务与人为干扰



赣南地区生态系统服务价值和人为干扰度值呈现出极强的**负相关关系**，局部相关性结果显示两者存在极为**显著的空间集聚现象**。高人为干扰和低生态系统服务价值聚类效应的8个县市都呈现出明显的**低海拔和低坡度**的特征。



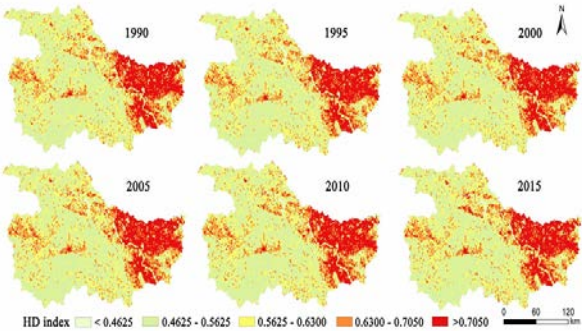
粤北生态系统服务价值与城市化呈现**较强的负相关性**，在研究期间**负相关性明显增强**，同时两者存在**显著的空间集聚效应**。



川东社会经济因素与生态系统服务价值变化率**呈负相关**，低-低型和高-低型聚集在西部，低-高型和高-高聚集在南部地区。

$$Y = -0.013X_1 - 0.156X_2 - 0.310X_3 + 2.495X_4 - 0.004X_5 + 3184.596$$

鄂西北地区生态系统价值服务与人为干扰

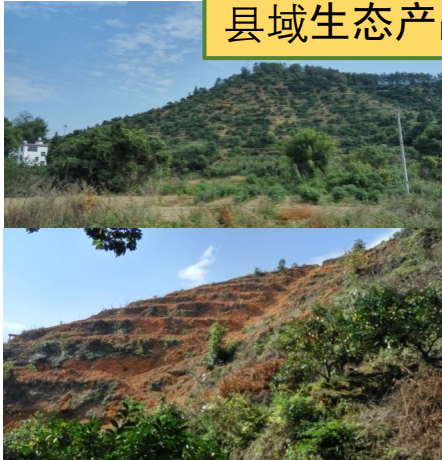


1990-2015年鄂西北典型生态系统服务和人为干扰指数的**空间相关性降低**，**空间分布的聚类现象出现略减弱趋势**。

## (4) 南方丘陵山地屏障带生态系统服务诊断

### 南方丘陵山地屏障带生态系统服务诊断研究

#### 县域生态产品类型调查



林果业种植对土壤保持水源涵养等影响调查



崇义县龙沟乡典型脐橙林地及其下游河流水体浑浊度

#### 县域典型人类干扰活动调查

调查崇义县的赣南脐橙林、南酸枣林，慈利县的柑橘林、茶叶林，华蓥县的速生林、采矿区，竹山县的山地开垦区、种植区等。



崇义县脐橙林地和南酸枣林



华蓥市桉树林和采矿区



慈利县柑桔林地和茶叶林地

#### 林果业种植对水源涵养土壤保持等影响的试验研究

崇义县脐橙典型种植区分别设置样点，每个样点分别5种林型分别设置20m\*20m的样方对不同林中的林分特征和进行调查，对五种林型的水源涵养能力进行评估



(a)脐橙林地（1年） (b)脐橙林地（3年）



(c)环刀取土

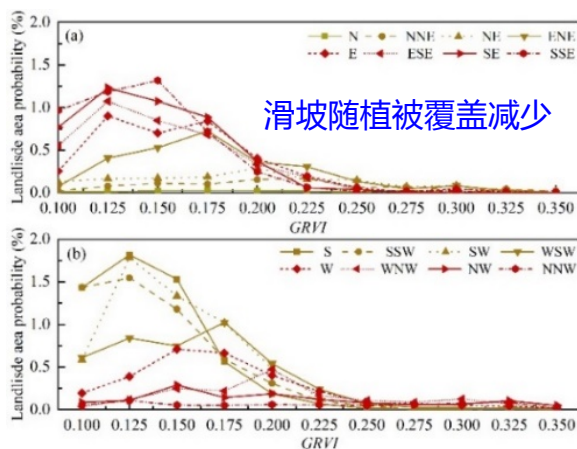
(d)林下雨收集



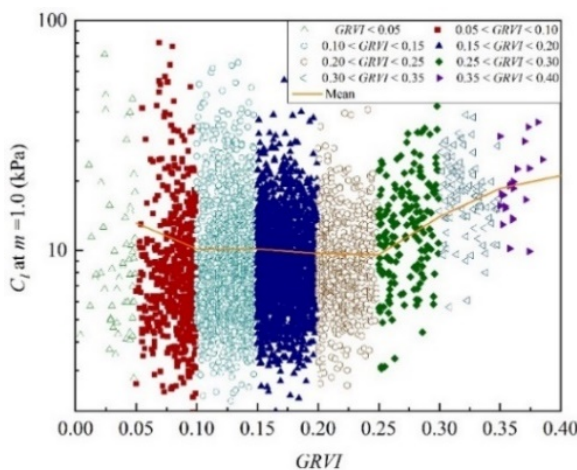
# (四) 灾害防控 (浅层滑坡)

传统认识  
植被的正作用

植被好，滑坡少，土体强度大

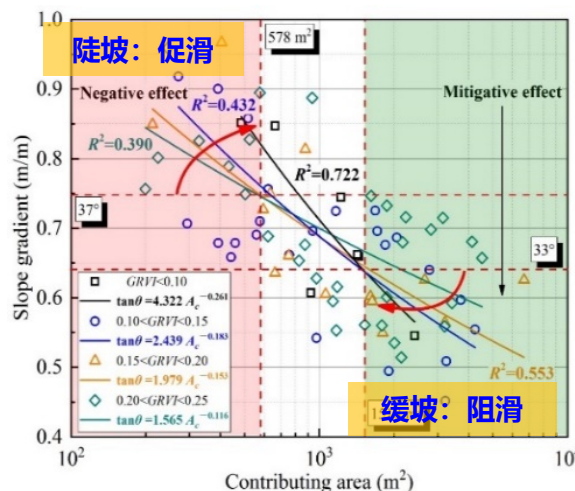
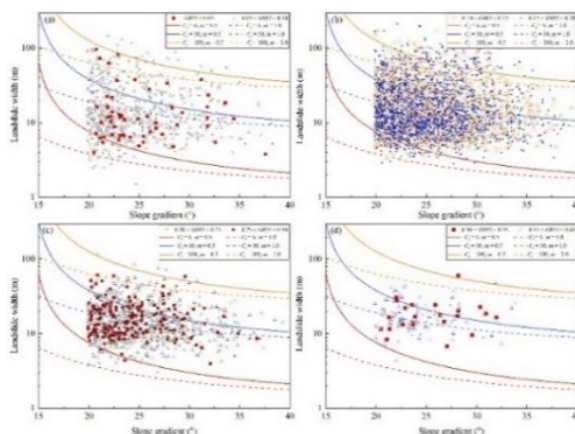


滑坡随植被覆盖减少



新观点  
植被的副作用

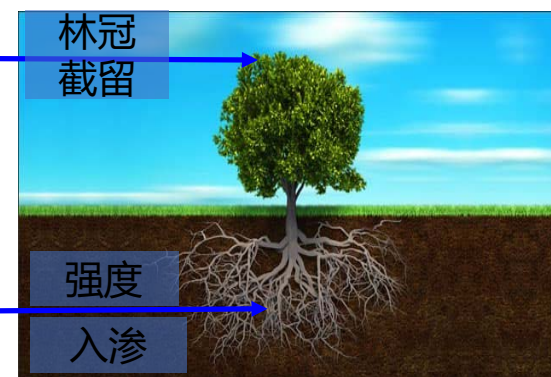
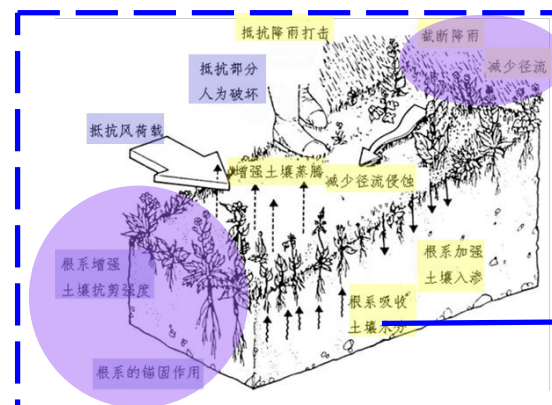
植被好，滑坡规模大  
陡坡促滑，缓坡阻滑



植被防灾功能

I: 降雨拦截能力

II: 根系稳固斜坡能力



筛选最适合的防灾型森林生态系统  
3个要求

1. 林冠截留功能强

2. 林分/植株护坡能力强

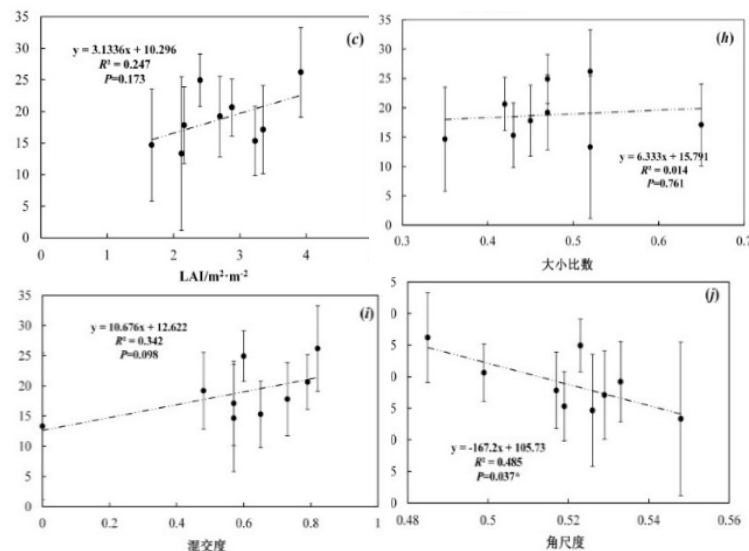
3. 适合陡坡条件



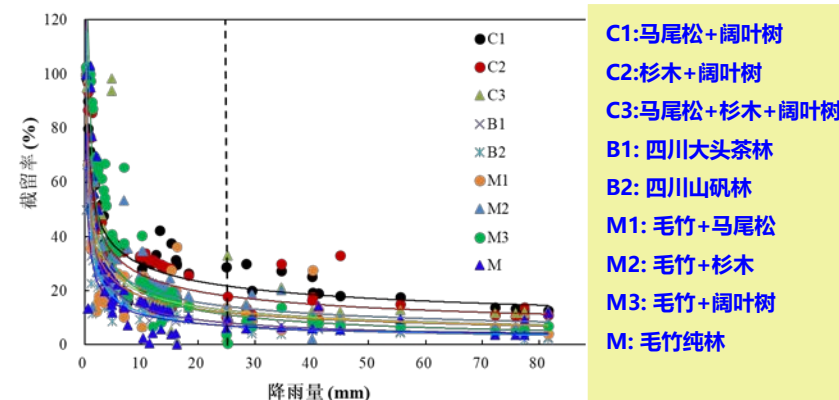
# (四) 灾害防控 (浅层滑坡)

降雨拦截能力

林冠截留率

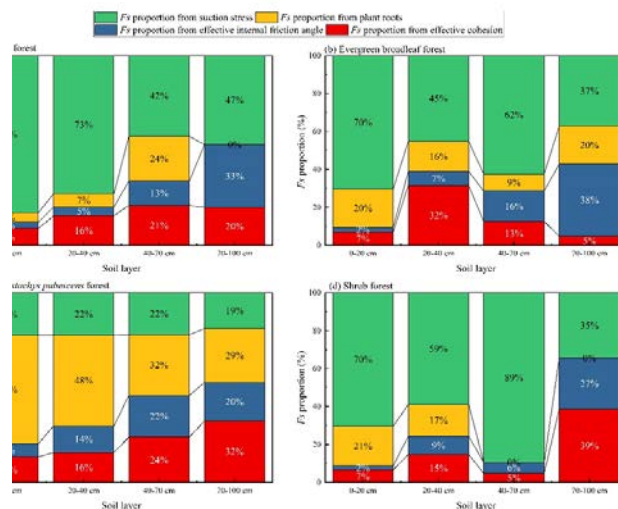
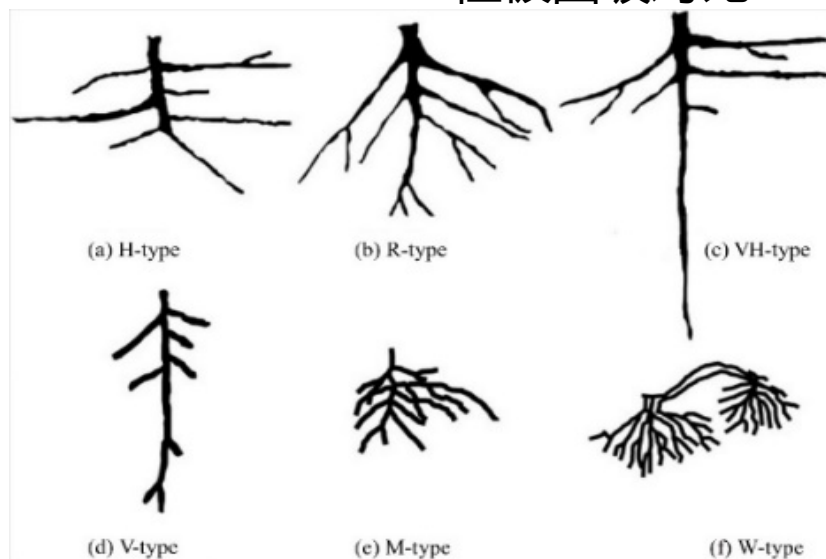


降雨截留重分配



植被固坡对比

林分固坡对比



(1) R型和V型对斜坡稳定是最有效的根系构型，其次是W和M。

(2) 从根系产生的附加粘聚力来看，毛竹林虽然根系强度低，但是根数量较多，粘聚力最大。

(3) 从斜坡稳定性角度看。毛竹林斜坡稳定性波动小，灌木林的安全系数波动太大，常绿阔叶林和针阔混交林在降雨强度较大的时候可能出现失稳。

(4) 植被组合和适宜坡度

林分、植被固坡能力

# (五) 水源涵养能力提升技术

问题诊断



35° 以下马尾松-杉木针叶混交林为主，林冠截留、枯落物持水能力较弱



林分过密，林木材质较差，地表植被稀疏，地表径流拦截能力差



森林以马尾松为优势种，病虫害现象

具体措施

## 林分结构调整措施

- a) 纯林或几种针叶树种共存的混交林→针阔混交林
- b) 通过间伐、补植营造马尾松-香樟针阔混交林加强林冠截留，增加枯落物持水
- c) 密度控制，促进林木质量提升

## 径流调控措施

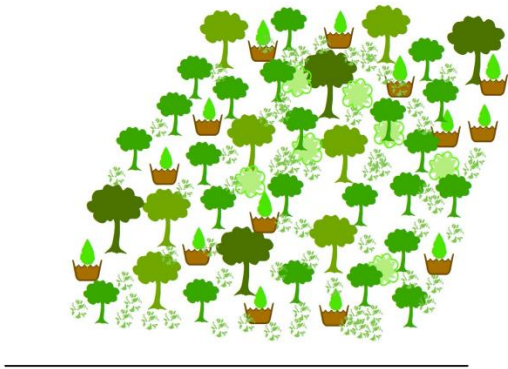
- a) 因地制宜布设径流调控措施，削减水势，弥补暴雨事件下由地表植被稀疏造成的地表径流拦截缺陷
- b) 根据地形综合配置径流调控措施

实施效果



优势木 亚优势木 中等木 被压木 濒死木 灌木 草本

间伐前



栽植苗 优势木 亚优势木 中等木 灌木 草本

补植后



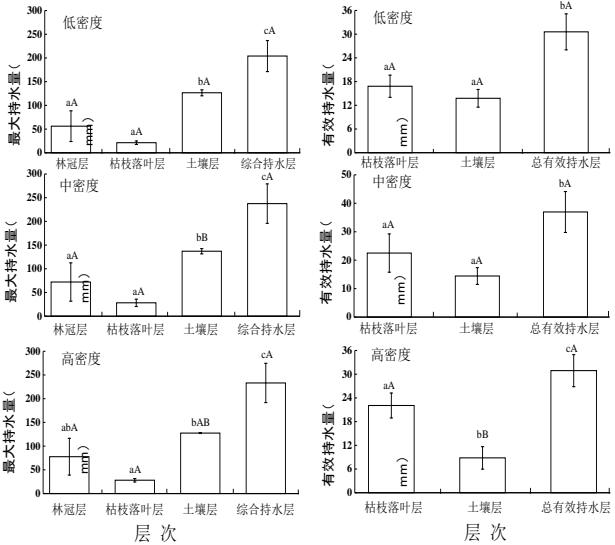
## (五) 水源涵养能力提升技术

### •密度优化提升马尾松林水源涵养能力

采用综合蓄水能力法，从林冠层、枯枝落叶层、土壤层对3种密度马尾松人工林最大持水量、有效持水量研究，明确了库区马尾松人工林水源涵养能力最优最适经营密度为1300-1500株/公顷，应在林业经营过程中合理调控林分密度，达到最佳水源涵养效果。

### •森林植被类型优化配置提升森林水源涵养能力

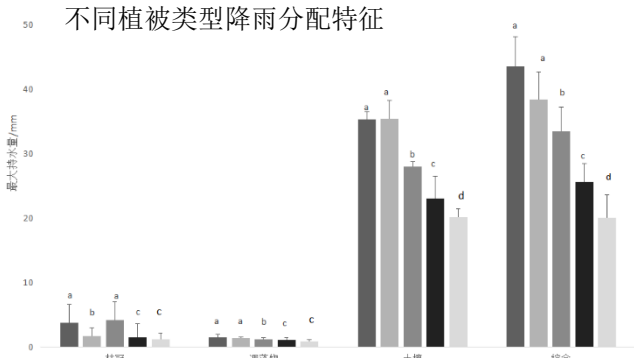
综合林冠截留、凋落物持水和土壤蓄水，发现马尾松栓皮栎混交林和马尾松纯林水源涵养能力最大，其余依次为栓皮栎纯林、竹林和荒草灌丛。因此，马尾松栓皮栎混交林水源涵养能力最优的混交比例为1：1，通过密度控制、林分组成和混交比例等结构调控可提升库区森林水源涵养能力13%以上。



不同密度马尾松人工林水源涵养能力综合评价

植被类型	林外降雨	林冠截留	林内降雨	树干茎流
III	71.2±50.6a	3.8±2.8b	62.8±49.1c	4.6±1.5a
I	74±55.4a	1.7±1.3c	68.4±53a	3.9±1.2b
II	73.4±49.6a	4.2±2.8a	65.6±50b	3.6±0.5c
IV	72.1±38a	1.5±0.8c	69.7±45a	1.1±2.1d
V	72.3±27.6a	1.1±0.7c	70.1±32a	-

不同林分土壤水源涵养能力综合评价



# (六) 石漠化区柏木林土壤保持能力提升技术（微地形改造+林分结构调整）

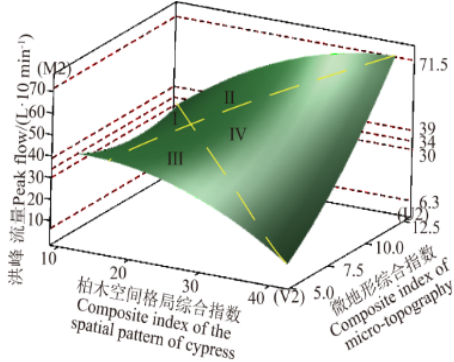
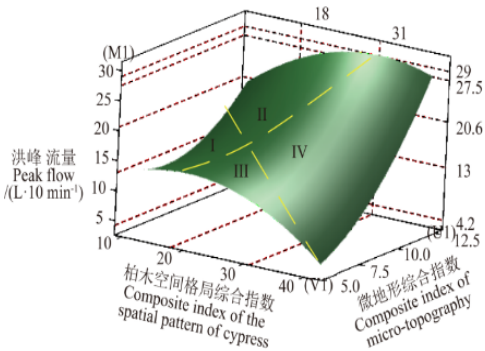
问题诊断



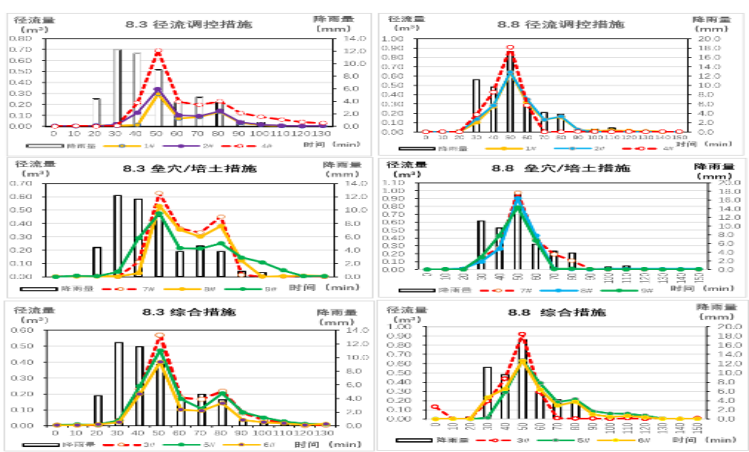
土壤瘠薄、地形破碎、岩石裸露、水土流失严重

植被结构单一，更新能力差，低质低效林

微地形和植被空间格局耦合



产流产沙洪峰流量削减效果



# (六) 石漠化区柏木林土壤保持能力提升技术（微地形改造+林分结构调整）

技术措施

## 单项措施

- a) 单项措施以水平阶为代表，布设在已经形成的坡面侵蚀沟上，根据坡降调整水平阶的间隔
- b) 宽度10-15cm，长度对应侵蚀沟宽度
- c) 适用条件：林分密度<3600株/hm<sup>2</sup>，径流路径密度>1000m/hm<sup>2</sup>



垒树穴/培土

## 综合措施

- a) 工程措施+植物措施：水平阶、垒树穴/培土、适生植物种补植（白夹竹）
- b) 树穴尺寸30cm×30cm，补植后林分密度控制在7000株/hm<sup>2</sup>；同时布设水平阶时，林分密度控制在5000株/hm<sup>2</sup>
- c) 适用条件：林分密度>3600株/hm<sup>2</sup>，径流路径密度<1000m/hm<sup>2</sup>



水平阶

微地形改造：降低地形起伏度、增加地表粗糙度、切断径流路径；改造措施包括水平阶、垒树穴/培土。

林分结构调整：以适生植物种补植为主，视下垫面的特征而定，其核心在于提升（消除）柏木与局部微地形形成的抑制（促进）产流机制。

减流效果：水平阶（26.6%）>综合措施（26.1%）>补植（23.9%）>垒穴/培土（22.8%）

减沙效果：综合措施（40.7%）>垒穴/培土（39.3%）>水平阶（36.8%）>补植（35.4%）

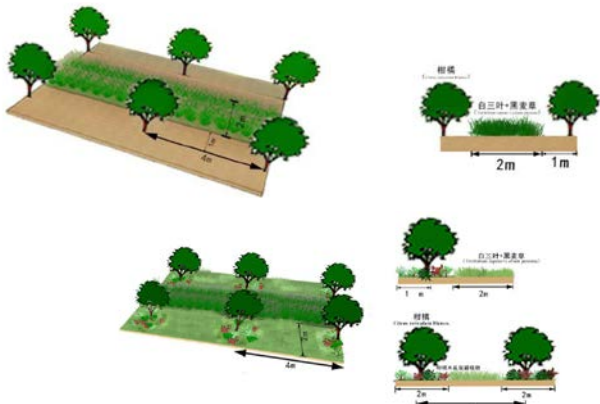


补植（白夹竹）

# (七) 水质净化功能提升

## (1) 构建了土壤保持和污染物削减的柑橘人工林林下植被配置技术

- 在白三叶、箭舌豌豆+高羊茅、南苜蓿+狗牙根、白三叶+黑麦草、自然生草模式中，白三叶模式是控制水土流失和N、P面源污染的最佳模式。白三叶模式对泥沙削减率达到91.49%、全氮削减率为25.47%、硝态氮削减率为74.59%、氨态氮削减率为90.71%、全磷削减率为72.69%。
- 选择对柑橘木虱具有显著驱避作用的物种和对柑橘木虱天敌具有吸引力的草本植物物种构建柑橘人工林下农药污染物削减功能提升的林下植被配置模式：对柑橘木虱达到显著驱避的物种有辣椒、红凤菜、韭菜、烟草、喜树、番石榴等，对柑橘木虱天敌瓢虫有吸引力的物种有樟树、马缨丹、阴香、韭菜等。



柑橘林林下植被配置模式图

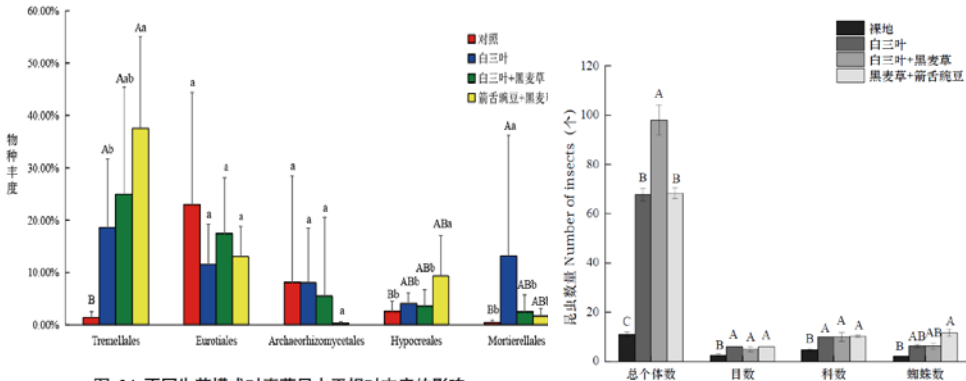


图 94 不同生草模式对直茎日水平相对丰度的影响



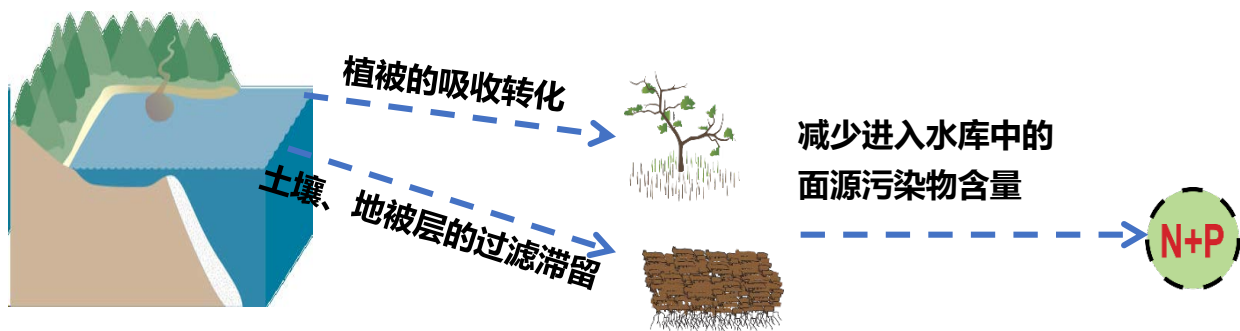
示范区无柑橘木虱危害



对照区柑橘木虱危害状况

上述林下植被配置模式均极显著提高了柑橘人工林物种多样性：提高了柑橘人工林内节肢动物的个体数及科数和目数，增加土壤动物的个体数和类群数，提高土壤动物多样性，还可有效改良土壤，增加土壤有机质和全氮含量。

## (2) 滨水植被缓冲带氮磷截留能力提升技术



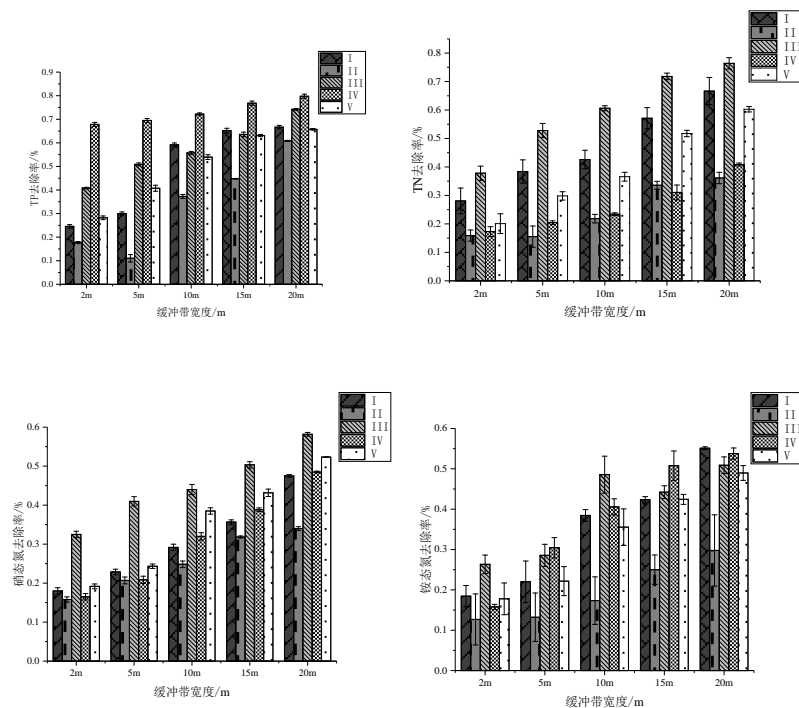
氮磷污染物	宽度	马尾松纯林	栓皮栎纯林	马尾松栓皮栎混交林	刚竹林	荒草灌丛
TN	20m	0.67±0.05a	0.36±0.02b	0.76±0.02c	0.41±0.01b	0.60±0.01d
TP	20m	0.67±0.007ab	0.61±0.002a	0.74±0.003bc	0.80±0.009c	0.66±0.003ab
NH <sub>4</sub> -N	20m	0.55±0.003a	0.30±0.088b	0.51±0.021a	0.54±0.014a	0.49±0.018a
NO <sub>3</sub> -N	20m	0.48±0.003b	0.34±0.005a	0.58±0.005d	0.49±0.002b	0.52±0.001c

### ① 滨水植被缓冲带的类型

库区马尾松栓皮栎混交林的截留效果最好，20m宽度的截留率为76.40%；同样宽度条件下，截留率主要受枯落物厚度和土壤渗透性能的影响；

### ② 滨水植被缓冲带的宽度

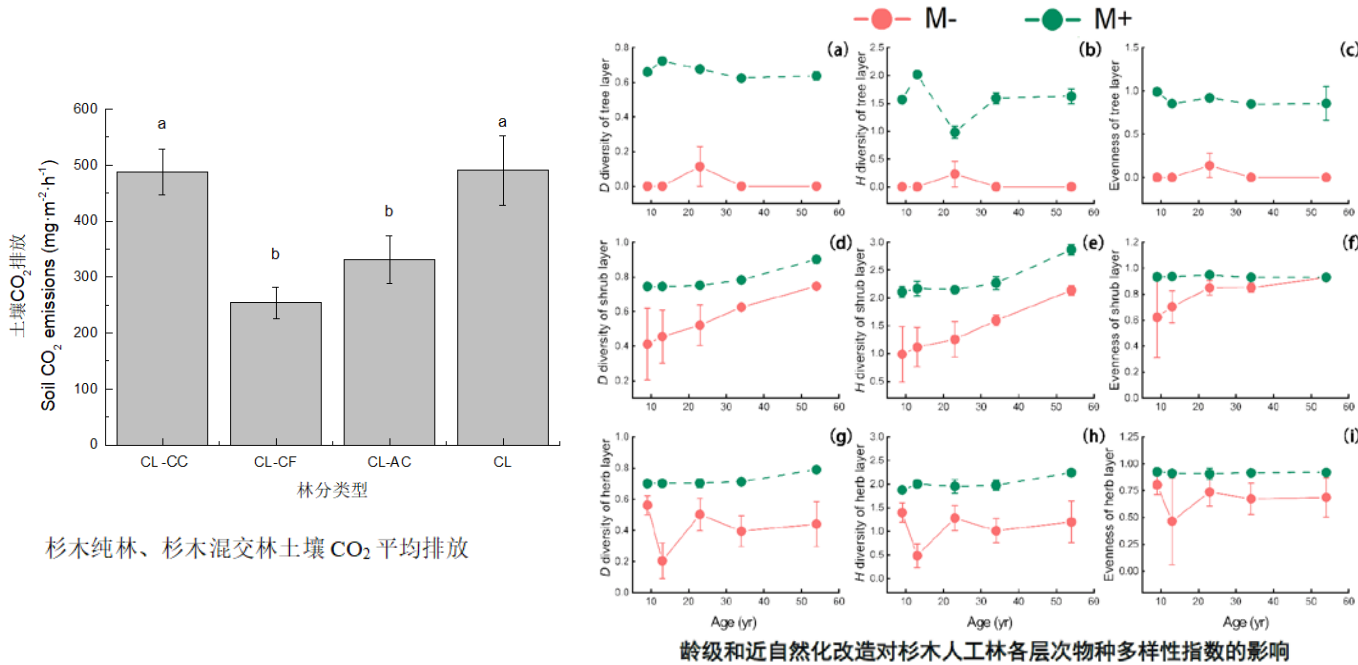
通过控制实验和模型模拟，马尾松纯林、栓皮栎纯林、马尾松栓皮栎混交林、刚竹林、荒草灌丛截留率达80%以上时宽度最少为41.8m、70.2m、23.8m、52.4m、36.6m。



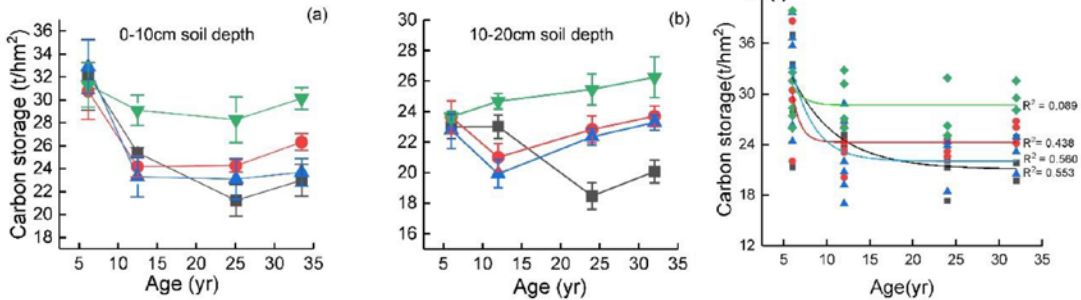
# (八) 固碳增汇技术

## (1) 人工林近自然化改造提升固碳增汇能力

基于闽楠+刨花楠+木荷组合的演替顶极群落优势树种引入的近自然化改造后，杉木混交林土壤CO<sub>2</sub>排放显著低于杉木纯林，降低土壤碳排放48.04%以上；通过合适的栽植密度和间伐改造，增加林分、凋落物和土壤碳储量，提升人工林生态系统固碳能力（10.63%）。



	Carbon storage of different components			
	0-10 cm soil depth	10-20 cm soil depth	Trees	Ecosystem
Stand stage				
Young	31.52 ± 1.22a	23.28 ± 0.41ns	31.22 ± 1.30a	119.7
Middle-aged	24.67 ± 0.79b	22.16 ± 0.65ns	71.71 ± 2.27b	145.45
Pre-mature	23.43 ± 1.08b	22.28 ± 0.83ns	82.18 ± 2.37c	155.65
Mature	25.09 ± 1.03b	23.33 ± 0.76ns	93.11 ± 3.67d	170.73
Selective thinning management				
UT	25.74 ± 1.05a	21.62 ± 0.43a	60.33 ± 4.12a	135.84
T	27.81 ± 0.78b	23.90 ± 0.41b	68.37 ± 4.71b	150.28
Initial density				
High density	25.79 ± 0.92ns	21.97 ± 0.45 a	63.27 ± 3.65a	139.56
Low density	27.64 ± 0.95ns	23.55 ± 0.46b	65.14 ± 5.07b	146.17



通过人工林间接土壤管理模式（近自然化改造—在不同林龄杉木人工林引入闽楠+刨花楠+木荷组合的演替顶极群落优势树种），提升人工林生态系统固碳增汇能力。



## (八) 固碳增汇技术

### (2) 次生林结构调整提高林分固碳能力

- 通过**结构调整、密度控制**等措施恢复退化的次生林（马尾松林和青冈栎林），提高碳汇能力。
- 强度疏伐（50%）显著提高了青冈栎土壤总有机碳含量，弱度疏伐（15%）降低了土壤总有机碳含量；疏伐提高了微生物量碳含量，降低了可溶性有机碳的含量；疏伐提高了微生物量碳含量，降低了可溶性有机碳的含量。
- 均衡曲线下：①疏伐提高马尾松的固碳潜力。马尾松疏伐强度30%的碳储量略高于疏伐强度50%和15%。
- ②疏伐对未来（30年左右）稳定状态下的固碳能力影响不大，但70年后，疏伐15%的青冈栎具有最大的固碳潜力。
- 最优均衡曲线经营下马尾松次生林碳汇净增12%

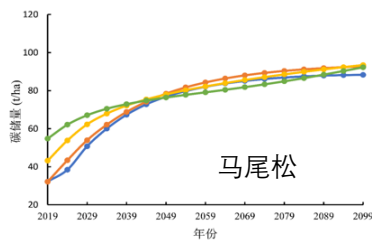


图3 不同间伐强度下马尾松林的碳储量的模拟值（考虑补植）

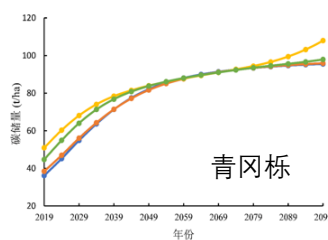


图4 不同间伐强度下青冈栎林的碳储量的模拟值（考虑补植）

$$\log(\text{DDS}+1) = (1.604 + b_1) + (0.031 + b_2)\text{DBH} + (-0.405 + b_3)\text{BAL} + (-0.00002 + b_4)\text{EL} + (-0.00004 + b_5)\text{NT} + e_{ij}$$

其中，

马尾松次生林单木生长模型

$$b_i = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} \sim N \left( \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \psi_i = \begin{pmatrix} 0.2773 & -0.741 & -0.334 & -0.253 & -0.380 \\ -0.741 & 0.0125 & 0.518 & -0.228 & -0.045 \\ -0.334 & 0.518 & 0.2420 & -0.295 & -0.349 \\ -0.253 & -0.228 & -0.295 & 0.0004 & 0.064 \\ -0.380 & -0.045 & -0.349 & 0.064 & 0.0001 \end{pmatrix} \right)$$

$$e_{ij} \sim N(0, R_{ij} = 0.8032 G_{ij}^{0.5} \Gamma_{ij} G_{ij}^{0.5}), \text{varPower}(e_{ij}) = 0.8032 \exp(-\hat{\psi}_{ij} \cdot 0.5757)$$

$$\log(\text{DDS}+1) = (2.0435 + b_1) + (-2.6339 + b_2) \cdot 1/\text{DBH} + (0.2826 + b_3)\text{RD} + (-0.0001 + b_4)\text{N} + (-0.0002\text{EL} + (-0.3122 + b_5)\text{GC} + e_{ij}$$

where

栎类次生林单木生长模型

$$b_i = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix} \sim N \left( \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \psi_i = \begin{pmatrix} 0.4416 & -1.1944 & -0.0751 & -4.3714 \times 10^{-6} & -0.0301 \\ -1.1944 & 3.7795 & 0.1654 & 6.5388 \times 10^{-7} & 0.0982 \\ -0.0751 & 0.1654 & 0.0207 & 4.7760 \times 10^{-6} & 0.0418 \\ -4.3714 \times 10^{-6} & 6.5388 \times 10^{-7} & 4.7760 \times 10^{-6} & 0.0091 \times 10^{-6} & 8.1599 \times 10^{-6} \\ -0.0301 & 0.0982 & 0.0418 & 8.1599 \times 10^{-6} & 0.2692 \end{pmatrix} \right)$$

$$e_{ij} \sim N(0, R_{ij} = 0.1604 G_{ij}^{0.5} \Gamma_{ij} G_{ij}^{0.5}), \text{varPower}(e_{ij}) = \exp(-0.2111 \hat{\psi}_{ij}); \Gamma_{ij} = \text{AR}(1), \rho = 0.1023$$

# (九) 生物多样性提升技术

## 人工林林下植被快速恢复的植物功能群筛选

植物功能群构建分别针对杉木、毛竹人工林经营管理过程中土壤退化-生产力下降（氮营养缺乏）、生物多样性降低、碳汇减少等生态服务功能下降问题，筛选出分别以固氮提高土壤养分、增加林下植被多样性的植物功能物种，筛选出3类功能群配置模式：  
南方红豆杉+鸡血藤+山奈、黄檀+山奈+草珊瑚、 南方红豆杉+黄檀+草珊瑚

## 植物功能群对人工林林下植被恢复、土壤养分和微生物多样性的影响

杉木人工林下和效果：以筛选3类功能群配置模式引入不同林龄杉木林，引入物种在灌木层占据优势（如红豆杉、草珊瑚和山奈），促进林下生境和物种组成稳定性；增加了中龄林、近熟林、成熟林灌草层物种丰富度和多样性，促进林下植被生长与恢复；提高杉木林土壤养分，改善土壤微生物群落的生长、多样性及稳定性。  
提升林下物种多样性（22%-210%）、土壤微生物多样性（8%-30%），提升林下植被固碳、土壤有机碳（5.1%-14.2%）。

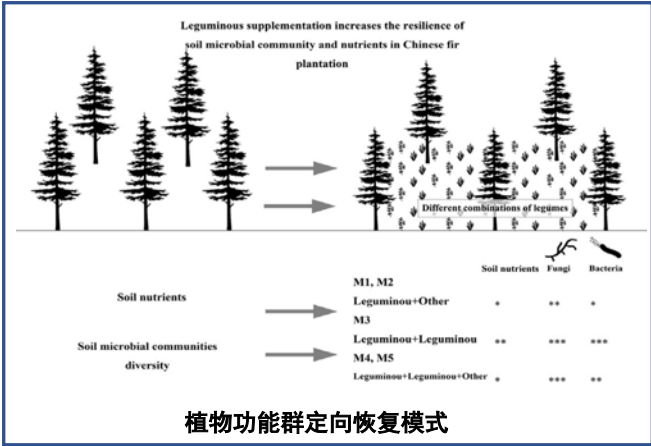
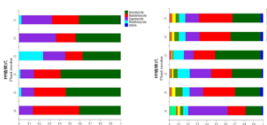


表 1 林下植物功能群的筛选与引入

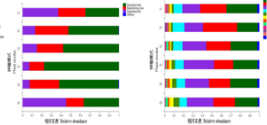
	模式编号	植物组合模式及数量	株行距	
	Y1/Z1/J1/C1/G1	10 株红豆杉+10 株黄檀	2.00m×2.00m	提高土壤有效P
	Y2/Z2/J2/C2/G2	20 株黄檀+60 个山奈块茎	2.00m×2.00m	
	Y3/Z3/J3/C3/G3	15 株鸡血藤+15 株黄檀	1.60m×1.66m	
	Y4/Z4/J4/C4/G4	16 株鸡血藤+8 株黄檀+8 株红豆杉	1.60m×1.66m	提高土壤有效性养分
	Y5/Z5/J5/C5/G5	20 株红豆杉+16 株鸡血藤+60 个山奈块茎	1.33m×1.66m	提高土壤微生物多样性
	Y6/Z6/J6/C6/G6	对照		

林龄Age	丰富度指数Richness index		多样性指数Diversity index	
	灌木Shrub	草本Herb	灌木Shrub	草本Herb
幼龄林	22.33±3.21a	8.00±1.73a	2.66±0.32a	1.71±0.08a
中龄林	23.67±2.08a	10.00±1.73a	2.62±0.33a	2.00±0.07a
近熟林	23.67±5.03a	12.00±3.61a	2.79±0.39a	2.13±0.38a
成熟林	25.67±2.08a	9.00±1.00a	2.61±0.31a	1.93±0.22a
过熟林	27.00±1.00a	8.50±0.50a	2.68±0.08a	1.62±0.08a

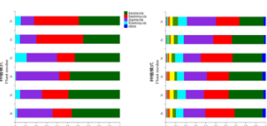
幼龄林土壤真菌和细菌的相对丰度



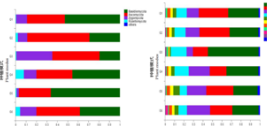
中龄林土壤真菌和细菌的相对丰度



成熟林土壤真菌和细菌的相对丰度



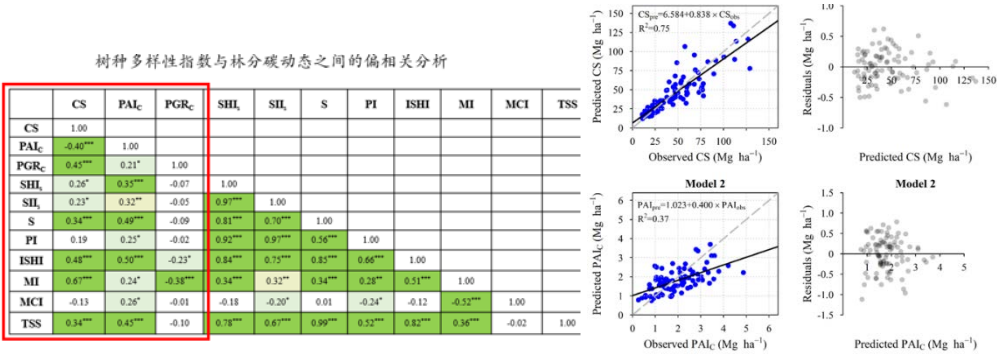
过熟林土壤真菌和细菌的相对丰度



次生林群落多样性和森林碳汇协同提升的量化经营技术

解析林分结构多样性与森林固碳能力之间的相关性

树种多样性指数与林分碳储量CS呈现显著正相关的关系，位置多样性MI与CSI



制定马尾松次生林群落多样性和碳汇协同提升的量化经营技术方案

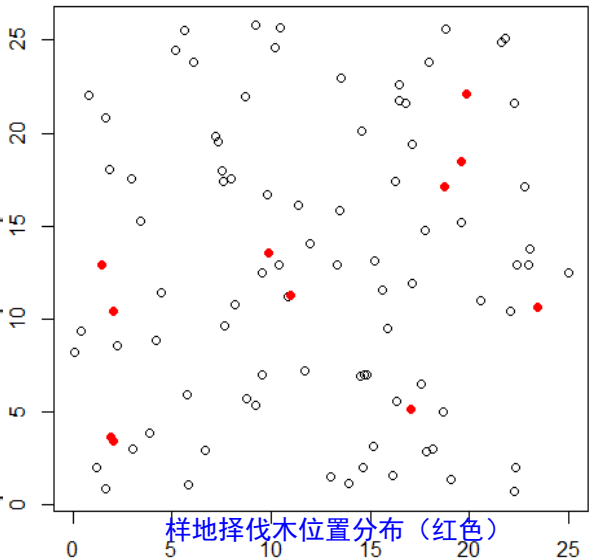
- ① 构建关于马尾松天然次生林空间结构综合指数和生物多样性与固碳能力的协同综合功能指数
- ② 依据多目标优化的思想，得到基于固碳能力与生物多样性协同最优情况下的林分空间结构模式
- ③ 实施慈利县天心阁林场多样性和碳汇权衡的量化调整方案

模拟优化之后林分空间结构得到了明显的改进，即全混交度增大，大小比降低，角尺度减小，空间综合指数增大。模拟优化后的森林空间结构是生物多样性和碳汇协同下的最优结构。



马尾松天然次生林样地模拟优化前后多功能指标预测值对比

功能指标	优化前预测值	优化后预测值	理想值	预测值增幅
物种多样性功能	0.6224	0.6041	1.1749	-2.95%
固碳功能	53677.0958	60259.5151	147181.6000	12.26%



森林碳储量与生物多样性综合功能指数

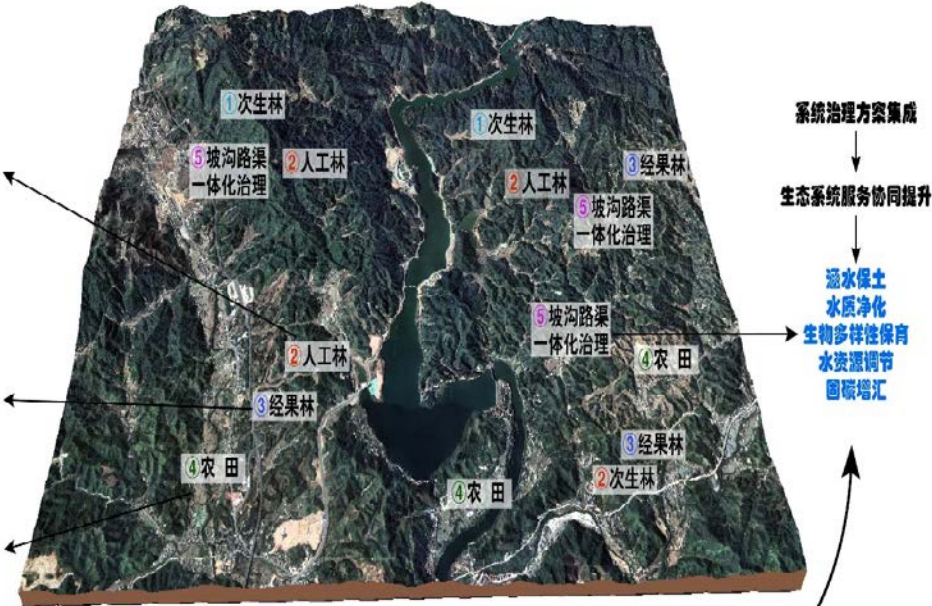
马尾松天然次生林样地模拟优化前后空间结构参数对比

参数	优化前	优化后	变化趋势	变化幅度
树种数(N)	12	12	不变	-
径级数(D)	7	7	不变	-
全混交度(M)	0.4046	0.4129	增大	2.0499%
大小比数(U)	0.5118	0.5095	减小	-0.4433%
角尺度( W-0.5 )	0.0943	0.0762	减小	-19.2381%
空间结构指数(Q)	9.8484	12.2848	增大	24.7391%

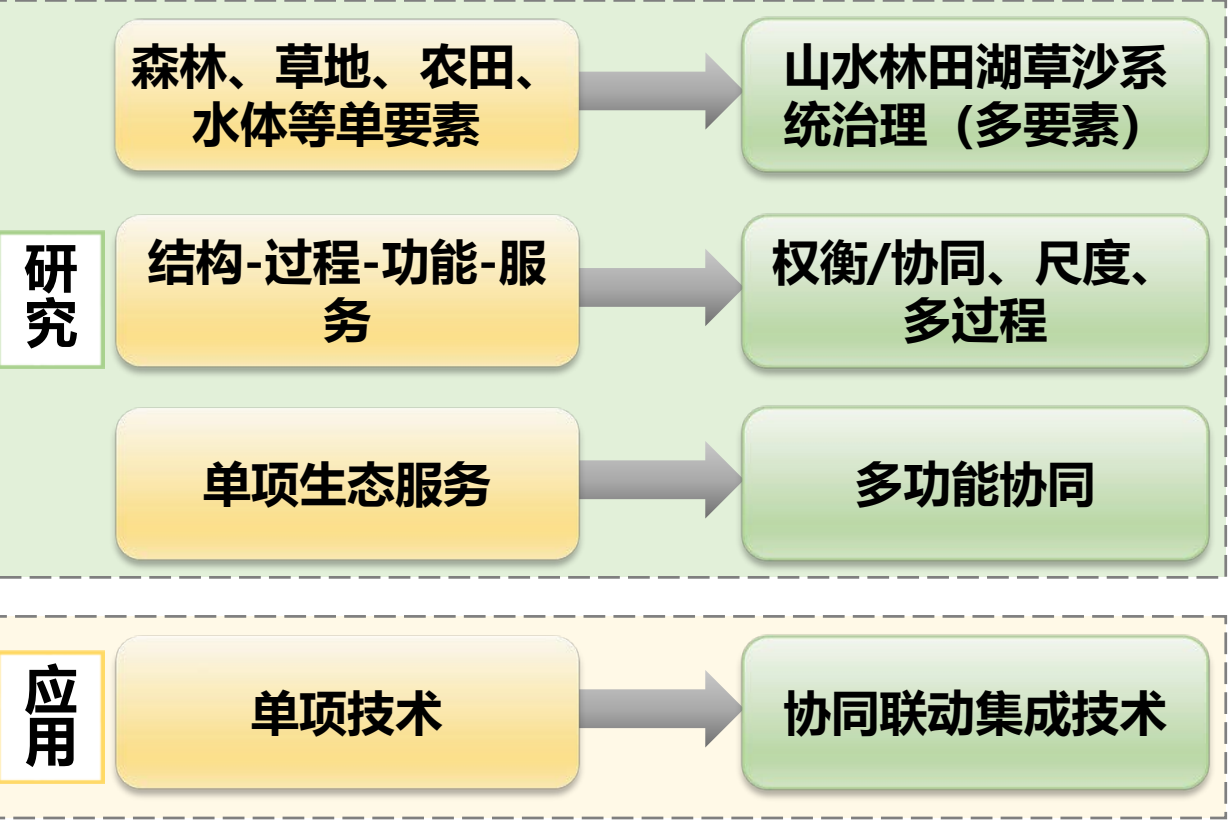
# 五、山水林田湖草沙系统治理视角下的森林修复

## 存在问题

- 水土流失问题十分突出
- 生态系统功能退化严重
- 水体污染和富营养化
- 社会-生态互馈机制失衡



- ①：次生林——林窗调控、关键种配置、林分结构调整等  
②：人工林——外源物添加、植物功能群构建、林分密度调整和树种配置  
③：经果林——多功能植物配置、生态化经营、景观形态空间格局调控、供给与调节服务协同提升  
④：农田——源头减量、过程阻断、养分再利用和生态修复技术  
⑤：坡沟路渠一体化治理——多要素间物质运移规律分析、坡面植被恢复与生态护坡、沟道雨洪调蓄、水文连通路径优化、面源污染与水资源控制、近自然治理



# 五、山水林田湖草沙系统治理视角下的森林修复

- 从区域、流域和小流域尺度诊断生态系统退化程度及其空间分布格局；阐明水源涵养、土壤保持、水质净化、固碳增汇、物种多样性保育等生态系统服务的**权衡与协同关系**；
- 揭示基于水文、生态、社会过程的次生林、人工林、经果林、灌草、农田、水体等山水林田湖草沙各要素的**耦合机理**
- 解析森林、草地、耕地、水体等相邻要素间的**物质流特征**
- 研发经果林水土流失系统治理、低质低效林涵水保土和固碳增汇等生态服务整体提升技术
- 小流域水文连通性路径优化与坡沟路渠一体化治理技术；
- 揭示**关键社会-生态过程**对生态系统功能的影响和治理需求，在小流域、流域和区域尺度，提出多目标多功能协调的山水林田湖草沙系统治理方案，并在巢湖、鄱阳湖、洞庭湖等选择典型小流域开展集成示范。
- 支撑山水林田湖草沙一体化保护和修复和国家生态文明建设。



An aerial photograph of a scenic landscape featuring a large, calm lake in the foreground and middle ground. The lake is surrounded by lush green mountains and hills. In the lower-left corner, there is a small cluster of buildings, possibly a resort or a village, nestled among the trees. The sky is bright blue with scattered white clouds. Overlaid in the center of the image is the Chinese text '谢谢!' (Thank you!) in a bold, red font.

谢谢!