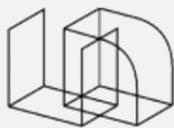




武汉大学
WUHAN UNIVERSITY



武汉大学城市设计学院
SCHOOL OF URBAN DESIGN
WUHAN UNIVERSITY

将生态系统服务的时空异质性与驱动机制纳入跨城市层级的空间管理——以中国长江经济带为例

Integrating Spatial–Temporal Heterogeneity and Driving Mechanisms of Ecosystem Services Into Spatial Management Across Urban Hierarchies : A Case of the Yangtze River Economic Belt, China

武汉大学城市设计学院

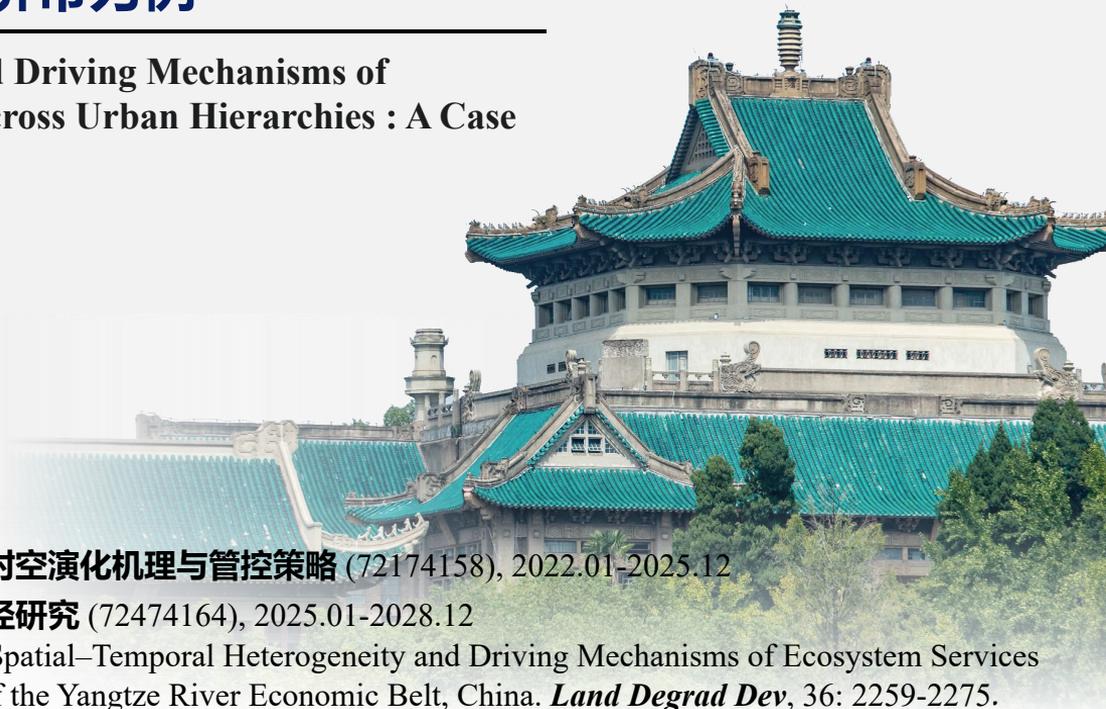
汇报人：罗巧灵 教授 博士生导师

时 间：2025年06月26日

国家自然科学基金：异质性视角下长江流域生态系统服务时空演化机理与管控策略 (72174158), 2022.01–2025.12

国家自然科学基金：城市绿地系统碳汇效能机理与提升路径研究 (72474164), 2025.01–2028.12

Luo, Q., Zhou, J., Liu, M. and Huang, R. (2025), Integrating Spatial–Temporal Heterogeneity and Driving Mechanisms of Ecosystem Services Into Spatial Management Across Urban Hierarchies: A Case of the Yangtze River Economic Belt, China. *Land Degrad Dev*, 36: 2259–2275.



目录

Contents



1、研究背景 | Introduction



2、研究思路 | Research Framework



3、材料和方法 | Materials and Methods



4、研究结果 | Results



5、结论 | Conclusions

1.1 气候变化和城镇化背景下全球生态系统服务持续退化问题

- 快速城市化、气候变化、人口增长及自然资源过度开发**导致生态系统服务持续退化**，威胁区域乃至全球生态安全。
- 过去半个世纪，全球超过60%的生态系统服务呈下降趋势，且退化速度仍在加快。

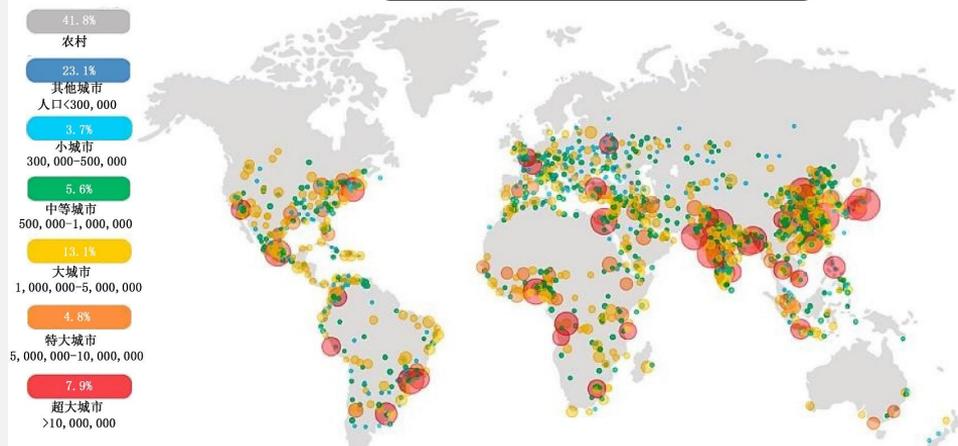


全球现状

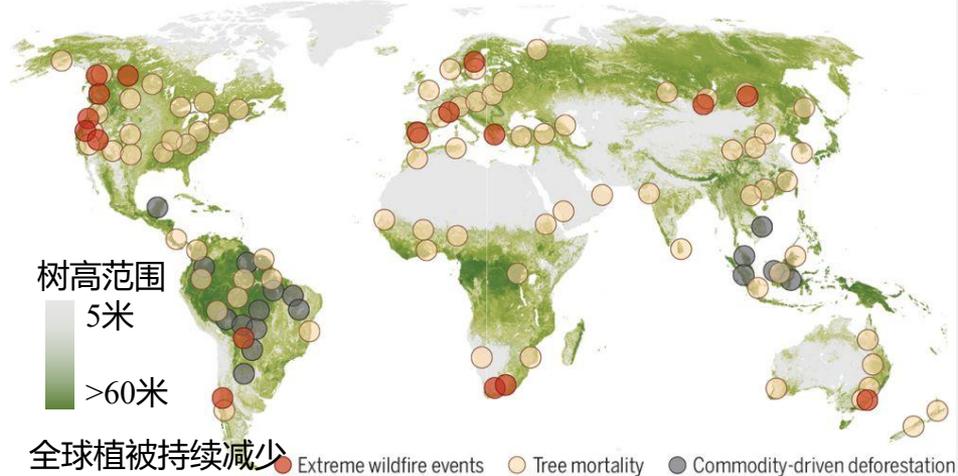
- 60% 生态系统退化(UN2005)
- 100万 物种濒危(IPBES)

C N 中国现状

- 27.6% 国土水土流失(2022)
- 26.8% 国土荒漠化面积(截至2019)
- 17.58%沙化土地面积(截至2019)



2020年全球城市人口分布



2050年全球城市化率将达到68%

全球生态系统持续减少

1.2 从城市层级视角理解生态系统服务，对指导中国的生态治理与决策至关重要。

■ 以往的多尺度分析维度



■ 缺少从城市层级的角度



1.3 长江经济带具有重要的经济和生态地位，同时也面临严峻的生态退化问题

经济地位

- **全国经济重心**：占全国GDP 46.4% (2021年)，覆盖11省市，人口经济超全国40%。
- **产业优势**：电子信息、装备制造等产业规模占全国50%以上。
- **发展格局**：国家三大战略之一。“一轴（长江）、两翼、三极（长三角/中游/成渝）、多点”。

生态地位

- **中华民族战略水源地**：长江流域水资源总量约9871亿立方米，占全国总量的34.9%；
- **世界生态基因宝库**：全球关键区域，含白鱃豚、江豚等珍稀物种。
- **生态功能**：鄱阳湖、洞庭湖调节水位，南水北调重要水源。

生态退化问题

- **石漠化问题**：599.3万公顷石漠化(2016)
- **水土流失问题**：40.6万km² 水土流失(2013)
- **生物多样性退化**：长江上游受威胁鱼类种类占全国总数的40%，白鱃豚已功能性灭绝，江豚面临极危态势。

目录

Contents



1、研究背景 | Introduction



2、研究思路 | Research Framework



3、材料和方法 | Materials and Methods



4、研究结果 | Results



5、结论 | Conclusions

2.1 研究区域：长江经济带（YREB）是中国重要的生态屏障、经济区域和粮食生产基地

基本情况：

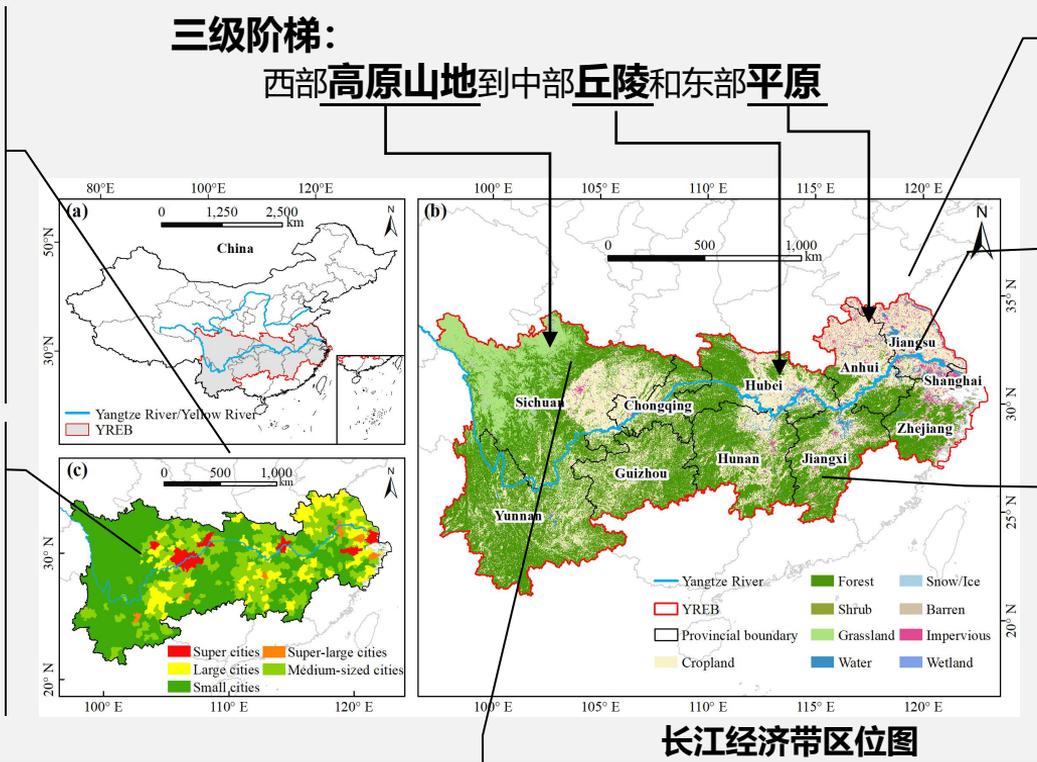
- 横跨中国东中西部，涵盖上海、江苏等11个省市
- 总面积约**207**万平方公里，占国土面积的**21.4%**
- **2020年GDP达6.7万亿美元**
- **人口6.06亿**
- **城镇化率为61.7%**

五个等级城市：

- 小城市（455个县）
- 中等城市（268个县）
- 大城市（230个县）
- 特大城市（40个县）
- 超大城市（76个县）

三级阶梯：

西部**高原山地**到中部**丘陵**和东部**平原**



粮食主产区：

- 耕地面积占全国**32.1%**
- 水田面积占全国**63.3%**

生态系统类型丰富

- 森林覆盖率达**43.3%**
- 河湖水库湿地面积占全国**20%**

亚热带季风气候：

- 年均气温**14.2°C-17.8°C**
- 年降水量**873.9-2397.5毫米**
- 水资源储量**9616亿立方米**，占中国内陆水域面积的**20%**。

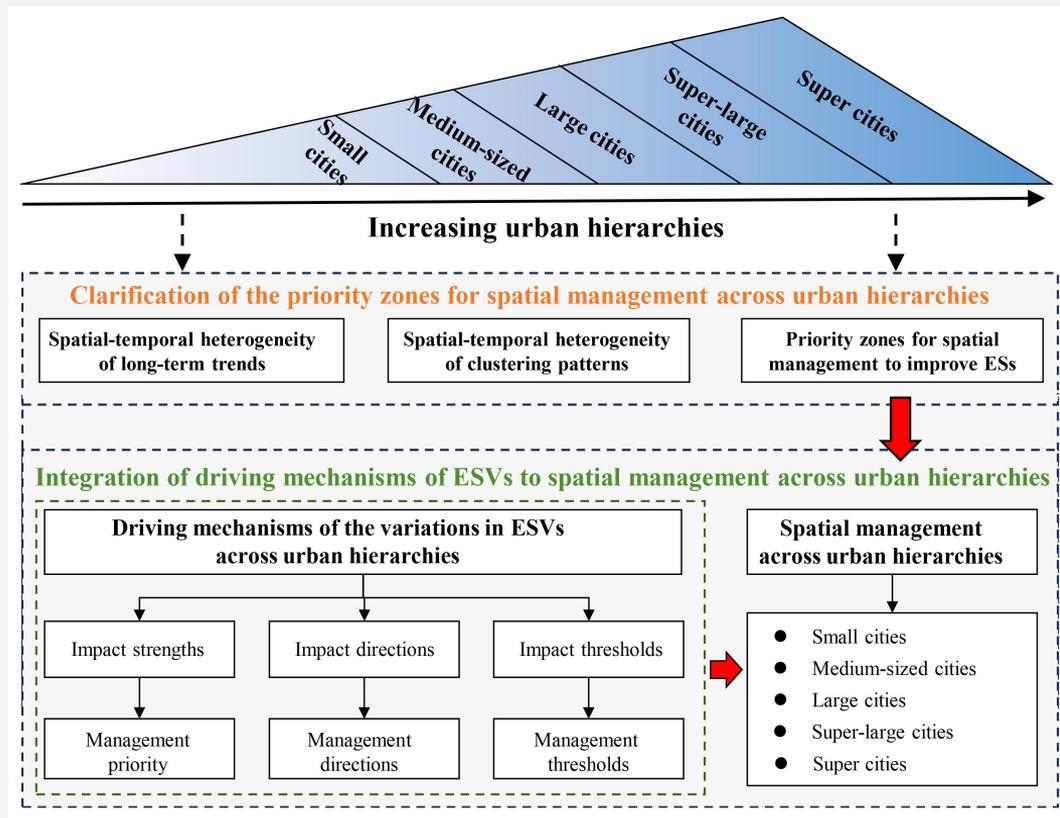
长江经济带承载全国40%以上人口和经济总量，拥有5个城市层级，是研究不同城市层级下生态系统服务时空异质性及驱动机制融入空间管理的理想案例。

2.2 研究框架

本研究以中国三大经济发展战略之一的长江经济带（YREB）为例，提出一个创新框架，将2000–2020年间长江经济带生态系统服务的时空异质性与驱动机制整合到城市层级的空间管理中。

具体目标包括：

- (1) 揭示不同城市层级下生态系统服务价值（ESVs）的**长期变化趋势**时空异质性；
- (2) 探索不同城市层级下ESVs**空间聚集模式**的时空异质性；
- (3) 识别不同城市层级下ESVs的**驱动机制**（包括影响程度、作用方向及影响阈值）；
- (4) 为不同城市层级提升生态系统服务提供政策建议。这些发现可帮助地方政府及利益相关者推动可持续发展，减少决策误导。



目录

Contents



1、研究背景 | Introduction



2、研究思路 | Research Framework



3、材料和方法 | Materials and Methods



4、研究结果 | Results



5、结论 | Conclusions

3.1 生态系统服务 (ESV) 的量化评估方法

■ 当量因子法量化ESV

当量因子法是评估生态系统服务价值 (ESVs) 的常用方法 (Costanza et al., 1997), 该方法通过量化不同生态系统类型单位面积提供的各项服务经济价值进行评估。结合中国生态系统服务稀缺性和经济发展水平等实际状况, 谢高地等提出了适用于中国的生态系统服务价值当量因子表, 用于量化不同土地利用/覆被 (LULC) 类型对应的ESV。计算公式(1-2)。

■ ESV当量因子修正

全国统一参数通常难以准确反映区域尺度的ESV空间细节。相同土地利用类型 (如耕地、草地) 因植被生长状况差异, 其提供的ESV可能存在显著异质性。为此, 本研究基于遥感植被指数 (即净初级生产力NPP) 对长江经济带当量因子进行修正, 公式(3)。

$$ESV_{ut} = \sum_i^n A_u \times EF_{ij} \times C \times V_{ut} \quad \text{公式(1)}$$

ESV_{ut} 单元 u 在 t 年是ESV总量, A_u 是单元 u 的面积, EF_{ijt} 是单元 u 土地利用类型 j 内ES类型 i 的当量因子, n 是ES 类型数量。

$$C = \frac{\sum_t^m \left(\frac{\sum_k P_{kt} \times A_{kt}}{\sum_k A_{kt}} \right)}{m} \quad \text{公式(2)}$$

c 是2000年至2020年1个标准当量因子的平均经济价值(\$202.17/ha), P_{kt} 和 A_{kt} 是农作物 k 在 t 年的单位面积净利润和播种面积。 m 年份数量。

$$V_{ut} = \frac{NPP_{ut}}{\overline{NPP}_t} \quad \text{公式(3)}$$

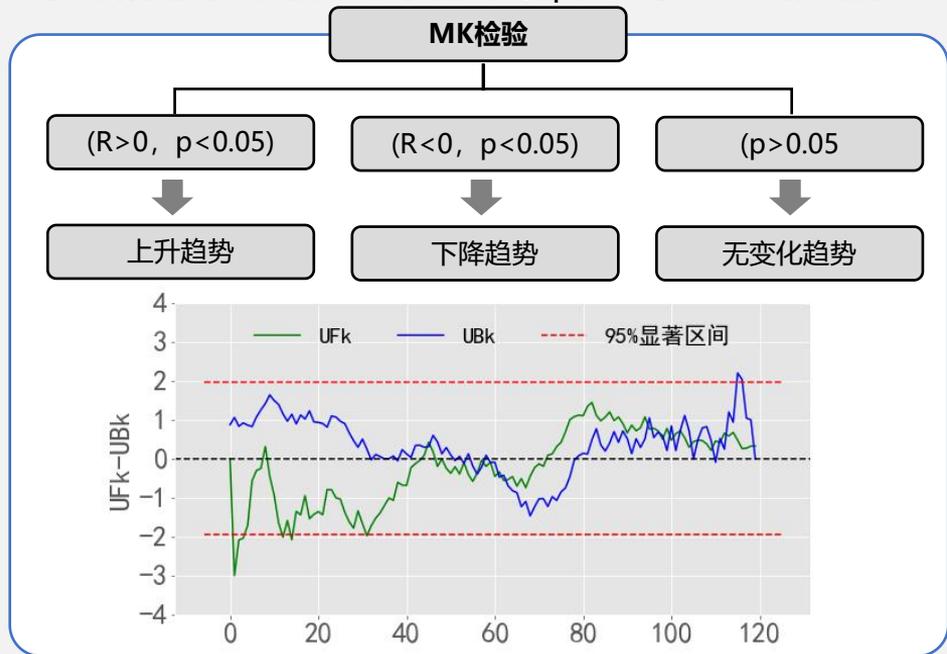
V_{ut} 是单元 u 在 t 年的当量修正因子, NPP_{ut} 是单元 u 在 t 年的平均NPP, \overline{NPP}_t 是全国所有单元在 t 年的平均NPP。

3.2 生态系统服务 (ESV) 的空间异质性分析方法

ESV长期趋势的时空异质性检测

曼-肯德尔(MK)检验是用于识别长期数据显著单调趋势的非参数统计方法。

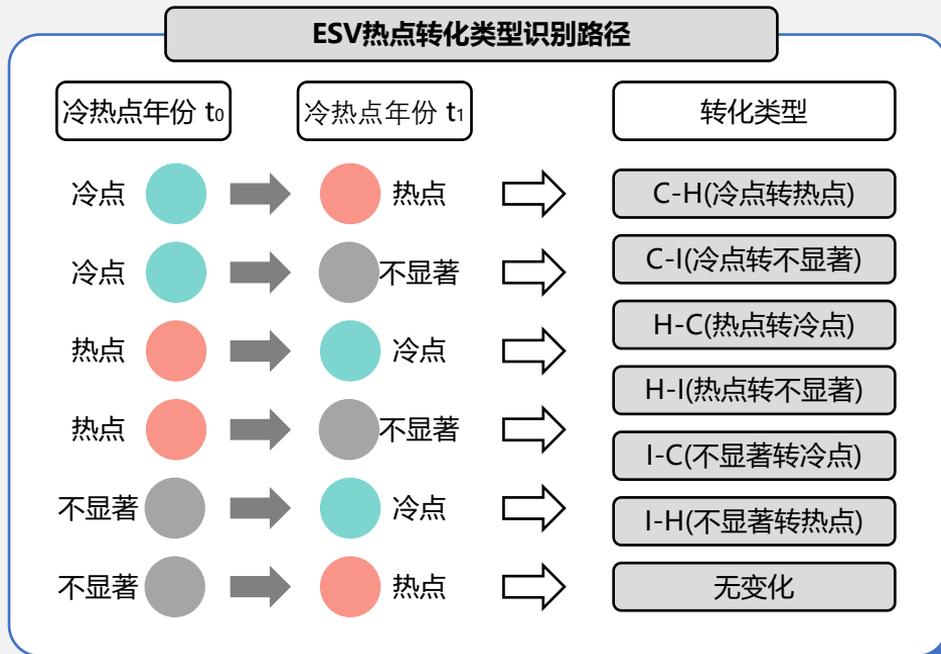
采用MK检验在5%显著性水平下评估2000-2020年ESV的时空变化趋势。根据MK检验的R值和p值,判断ESV变化趋势。



ESV集聚模式的时空异质性分析

热点分析用于评估ESV空间集聚的时空异质性。

热点和冷点分别指ESV高值或低值空间集聚区域。



3.3 城市层级生态系统服务 (ESV) 驱动机制分析

■ 影响因素指标体系构建

选取8个驱动因子探究气候变化、地形条件和人类活动对ESV的潜在影响，以长江经济带县域为统计单元，计算各县ESV与驱动因子均值。

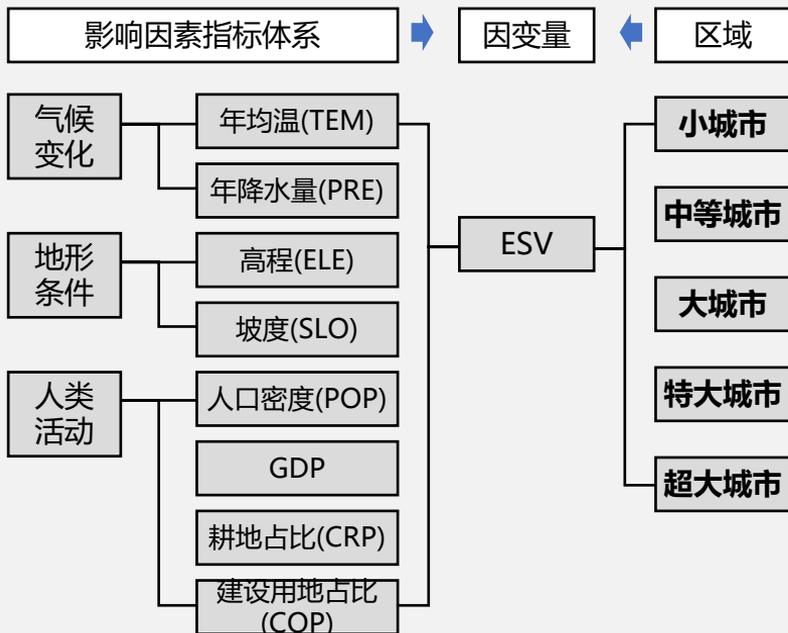


表 本文使用的驱动因素数据来源

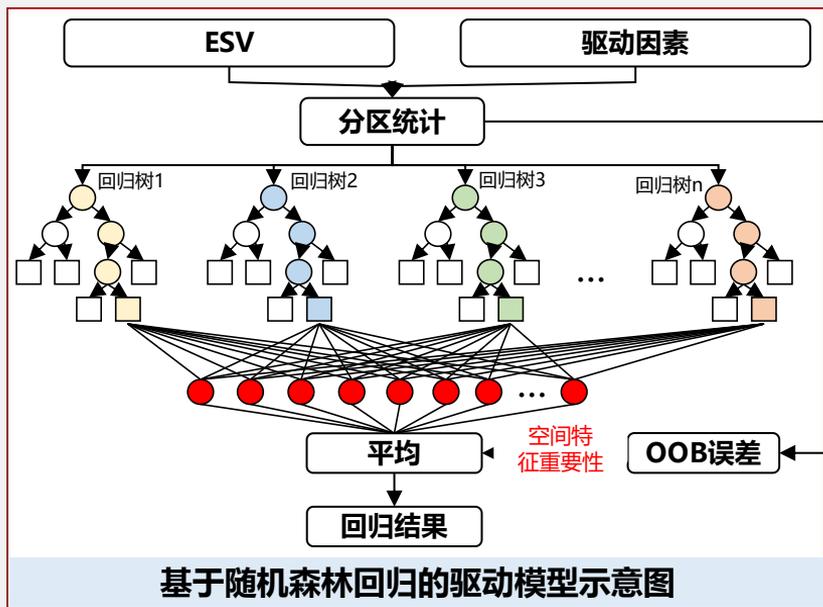
Table External driving factors used in this study.

Indicator	Abbreviated	Dataset	Resolution	Period	Source
Land use and land cover	LULC	The annual China land cover dataset	30 m	2000-2020	https://zenodo.org/record/4417810
Elevation	DEM	Landsat data products	30 m	2020	https://www.gscloud.cn/
Temperature	TEM	The 1 km monthly temperature dataset for China	1 km	2000-2020	http://www.geodata.cn/
Precipitation	PRE	The 1 km monthly precipitation dataset for China	1 km	2000-2020	http://www.geodata.cn/
The annual vegetation net primary productivity	NPP	China Annual Vegetation Index (NPP) Spatial Distribution Dataset	500 m	2000-2020	https://www.resdc.cn/
Population	POP	The WorldPop Open Population Repository	100 m	2000-2020	http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v4
Gross Domestic Product	GDP	Global 1 km × 1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption based on calibrated nighttime light data	1 km	2000-2020	https://figshare.com/

3.3 城市层级生态系统服务 (ESV) 驱动机制分析

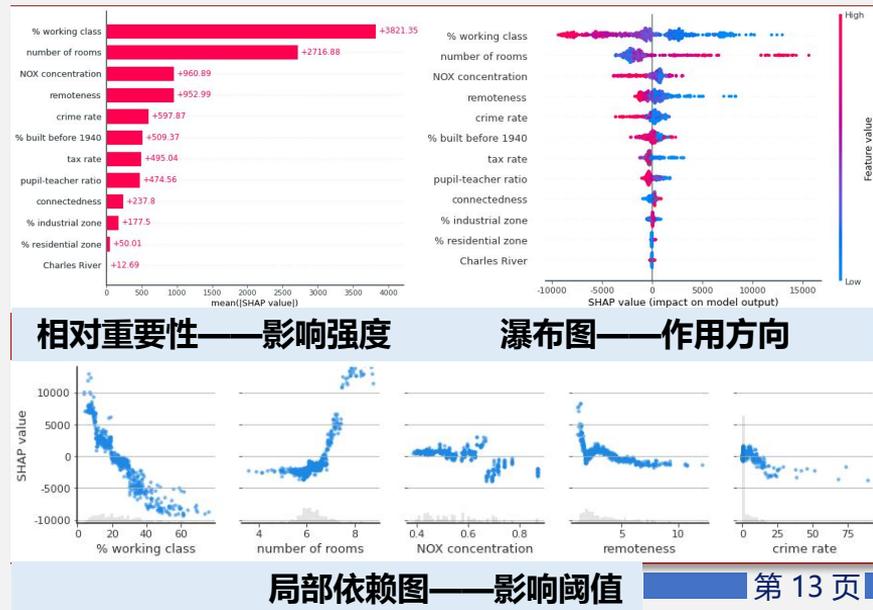
■ 影响因素测度方法：随机森林回归模型

采用**随机森林回归模型**揭示各城市层级ESV与驱动因子的关系，并通过**五折交叉验证**评估模型稳健性。五类城市层级模型的交叉验证决定系数(R^2)均高于0.92。本研究采用平均精度下降值(MDA) 衡量8个驱动因子的全局特征重要性，**MDA值越高表明驱动因子重要性越强**。



■ 可解释机器学习模型

基于博弈论最优Shapley值的**SHAP方法**解释随机森林模型输出结果。SHAP值显示各驱动因子对样本ESV的边际贡献，正值表示正向影响，负值则相反。通过**SHAP局部依赖分析**识别驱动因子对ESV的影响阈值，揭示长江经济带五级城市ESV驱动机制的阈值特征。



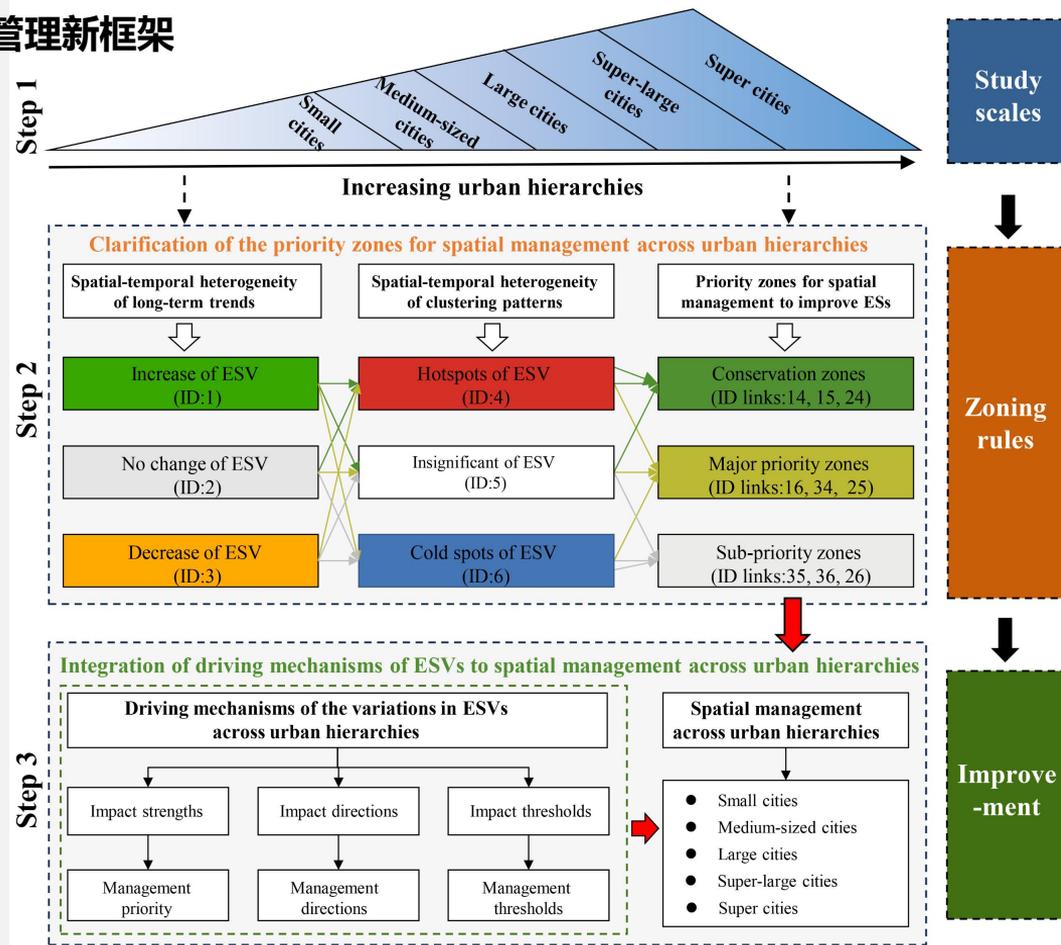
3.4 整合ES时空异质性和驱动机制的城市层级空间管理新框架

管理框架构建思路

在ES评估及时空异质性与驱动机制分析基础上，提出**整合ES时空异质性和驱动机制的城市层级空间管理新框架**(图2)。该框架包含三个核心步骤：

- 步骤1，识别研究区及**五级城市层级**(小城市、中等城市、大城市、特大城市和超大城市)；
- 步骤2，明确ES提升的空间管理优先区，基于ESV**长期趋势和集聚格局的时空异质性**划定优先区；
- 步骤3，将ESV**驱动机制融入空间管理**，将驱动因子的影响强度、方向和阈值转化为**管控优先级、调控方向和推荐管控范围**。

关键在于协调空间管理优先区与ESV驱动机制，实现城市层级ES协同提升。



3.4 整合ESV时空异质性和驱动机制的城市层级空间管理新框架

■ 空间管理优先区划定方法

通过耦合ESV长期变化趋势与空间集聚特征的时空异质性，划定生态系统服务提升的空间管理优先区。

变化趋势	冷热点	Types	Codes	Descriptors	Priority ranks	Categories
ID1 (上升区)	ID4 (热点区)	ID 1 & ID 4	14	High ESV is clustering and increasing	1	Conservation zone 严格保护区 (需维持现状高值)
ID1 (上升区)	ID5 (不显著区)	ID 1 & ID 5	15	ESV is non-clustering but increasing	2	
ID2 (稳定区)	ID4 (热点区)	ID 2 & ID 4	24	High ESV is clustering but relatively stable	3	
ID1 (上升区)	ID6 (冷点区)	ID 1 & ID 6	16	Low ESV is clustering but increasing	4	Major priority zone 重点改善区(需重点干预衰退区)
ID2 (稳定区)	ID5 (不显著区)	ID 2 & ID 5	25	ESV is non-clustering and relatively stable	5	
ID3 (下降区)	ID4 (热点区)	ID 3 & ID 4	34	High ESV is clustering but decreasing	6	Sub-priority zone 次级优先区 (需预防性管理)
ID2 (稳定区)	ID6 (冷点区)	ID 2 & ID 6	26	Low ESV is clustering but relatively stable	7	
ID3 (下降区)	ID5 (不显著区)	ID 3 & ID 5	35	ESV is non-clustering but decreasing	8	
ID3 (下降区)	ID6 (冷点区)	ID 3 & ID 6	36	Low ESV is clustering and decreasing	9	

3.4 整合ES时空异质性和驱动机制的城市层级空间管理新框架

■ 优先区分类及管理策略

严格保护区

严格保护区指生态系统服务长期保持高质量状态，仅需采取简单的维护或保护策略即可避免退化风险。

重点改善区

重点改善区表明生态系统服务具有较高的提升潜力，即通过适当措施可实现较大程度的改善。

次级优化区

次级优化区则指生态系统服务长期处于较差状态，需投入大量资源进行修复。

地方政府及利益相关者应优先关注严格保护区，其次是重点改善区。

■ 将ESV驱动机制融入空间管理

跨城市层级的生态系统服务驱动机制

影响强度

调控优先级

由驱动因子的**相对重要性**决定，对ESV影响越大的因子，其调控优先级越高，从而明确**主要管控目标**。

影响方向

调控方向

依据驱动因子的**作用方向**（正向或负向影响），指导具体调控策略的制定。

影响阈值

推荐调控范围

则基于影响因子的**阈值**划定，确定指标调控的合理区间。

目录

Contents



1、研究背景 | Research Background



2、研究思路 | Research Path



3、材料和方法 | Materials and Methods



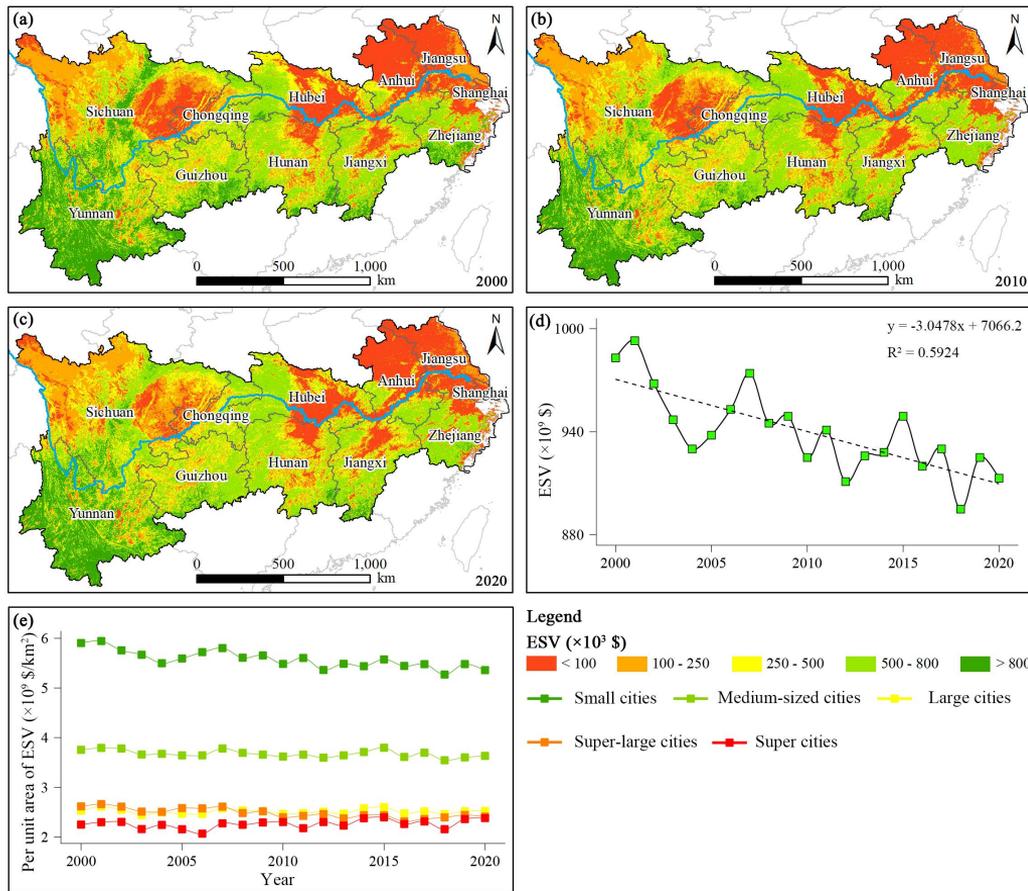
4、研究结果 | Results



5、结论 | Conclusions

4.1 不同城市层级ESV长期趋势的时空异质性

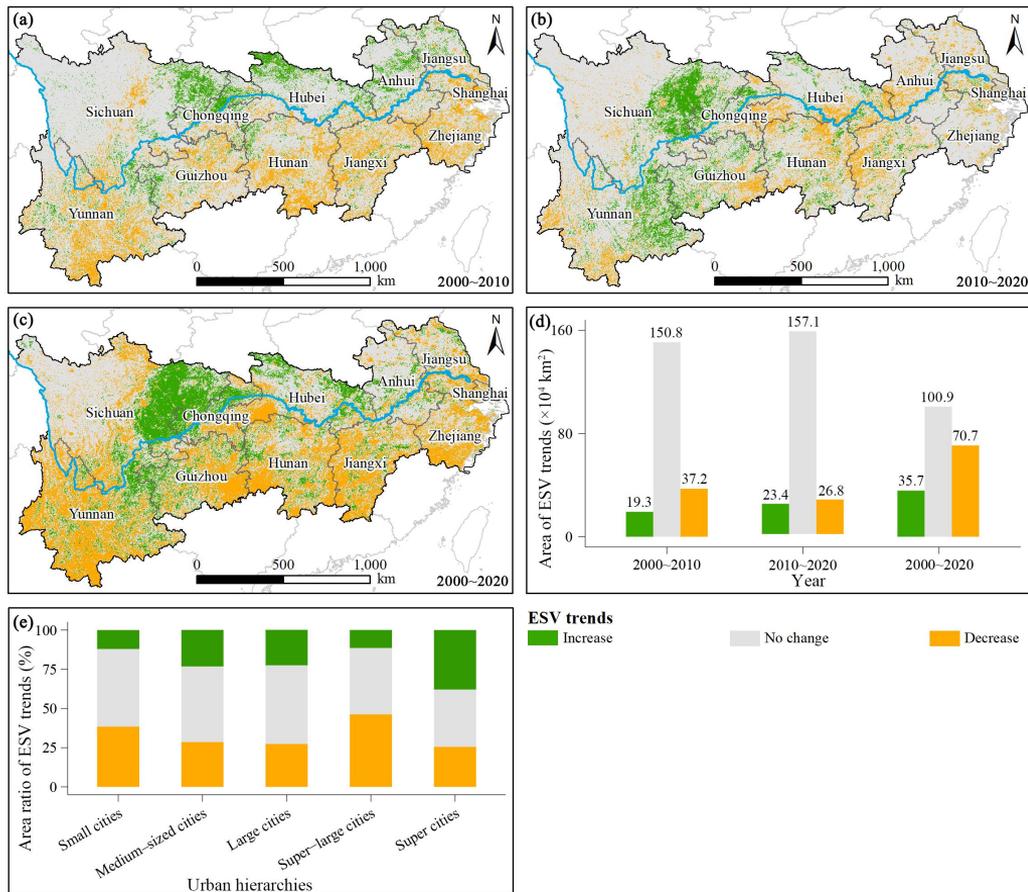
- 低ESV区集中分布于东北部的江苏、安徽和上海等地。
- 高ESV区主要位于西南部的云南和贵州。
- 研究期间，长江经济带ESV总量呈**波动下降趋势**，从2000年的9839亿美元降至2020年的9136亿美元，线性斜率为-3.0478，年均减少325亿美元）。
- 值得注意的是，**单位面积ESV随城市层级提升呈递减趋势**（图3e）。



2000-2020年长江经济带ESV的空间格局

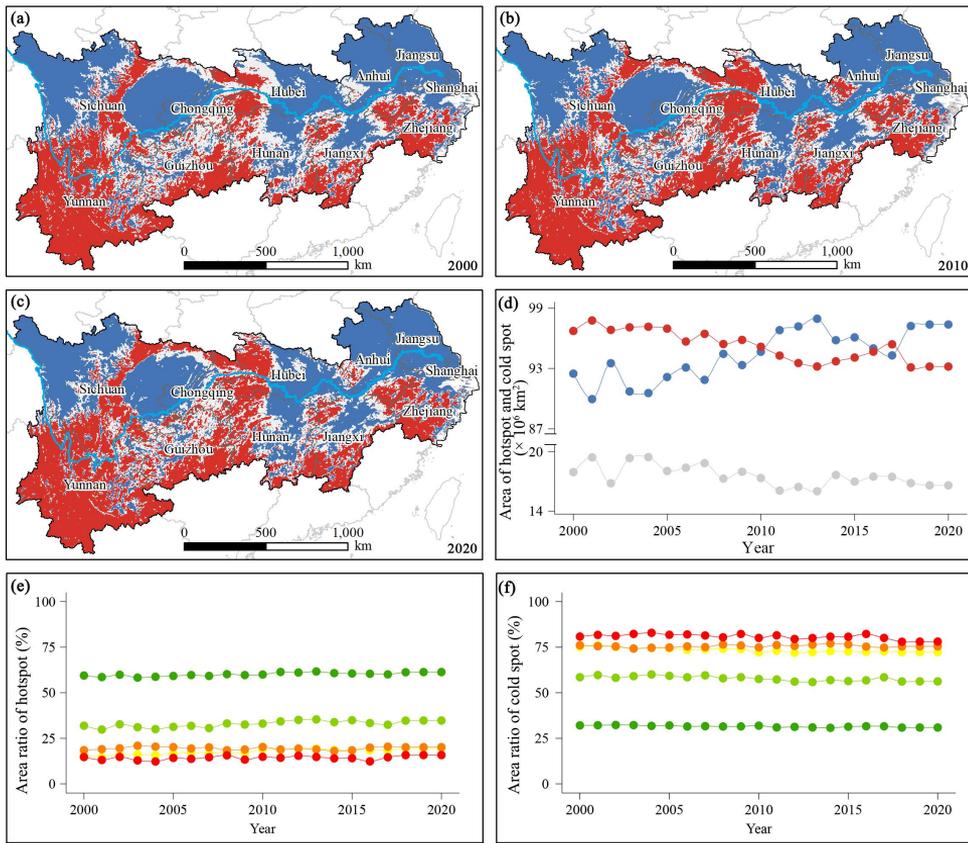
4.1 不同城市层级ESV长期趋势的时空异质性

- 2000-2010年ESV上升区主要分布湖北、安徽、重庆和江苏等中北部区域 (占比9.3%)
- 相比之下, 2010-2020年上升区转移至贵州、云南、四川东部和重庆北部等中部地区 (占比11.3%)
- 2000-2020年间四川东部和重庆北部等中北部区域ESV增加最为显著
- 同时, ESV下降区面积占比在2000-2010年、2010-2020年和2000-2020年三个阶段分别为18.0%、12.9%和34.1%
- **ESV上升区面积占比随城市层级变化呈"S"型波动**: 从小城市到大城市逐步增加, 至特大城市下降, 超大城市又有所回升。而下降区面积占比则呈现"降-升-降"的波动模式。

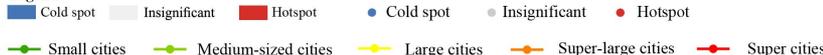


4.2 不同城市层级ESV集聚格局的时空异质性

- **冷点区**主要集中于长江以北的四川、重庆、湖北、安徽、江苏和上海；
- **热点区**则主要分布在长江以南的云南、贵州、江西和浙江。
- 时序分析表明，2020年较2000年**热点区面积减少**，而**冷点区面积增加**。
- 随着城市层级提升，**热点区面积占比呈递减趋势**，**冷点区占比则线性递增**。



Legend



2000-2020年长江经济带ESV的冷热点

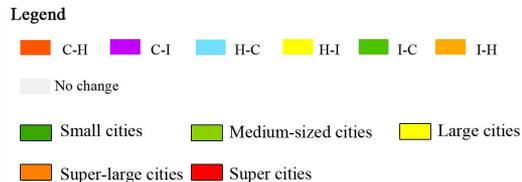
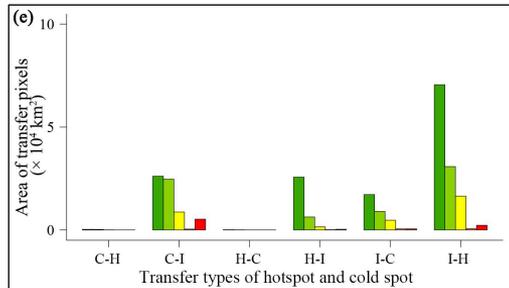
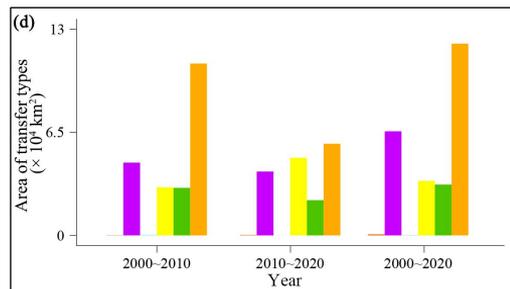
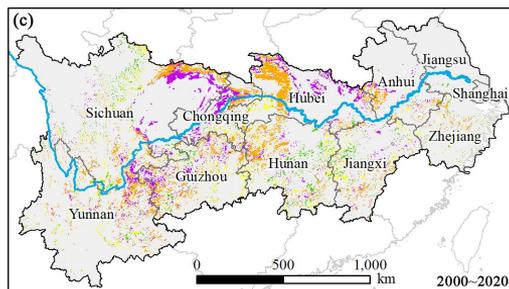
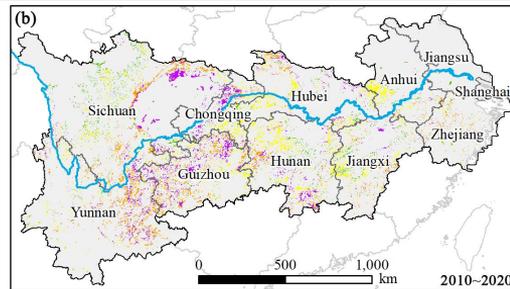
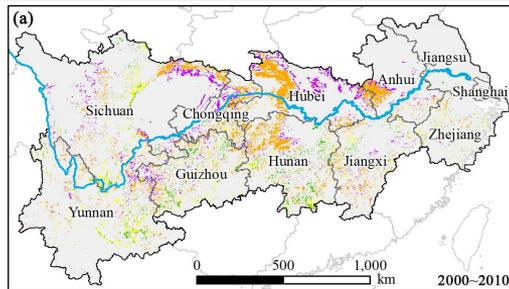
4.2 不同城市层级ESV集聚格局的时空异质性

➤ ESV冷热点转化类型包括：冷点转不显著（C-I）、热点转不显著（H-I）、不显著转热点（I-H）和不显著转冷点（I-C），表明ESV变化主要发生在**集聚与非集聚状态的转换过程中**。

热点与冷点间的直接转化较少，反映集聚区ESV具有相对稳定性。

➤ 虽然三个时段冷热点空间格局基本一致，但**局部区域存在差异**，主要集中在重庆、四川北部、云南东部、贵州西部以及湖南湖北等中部地区。2000-2010年、2010-2020年和2000-2020年冷热点转化面积占比分别为10.4%、8.2%和12.2%。

➤ 随着城市层级提升，**冷热点转化面积呈“先降后升”趋势**，转折点出现在特大城市层级。



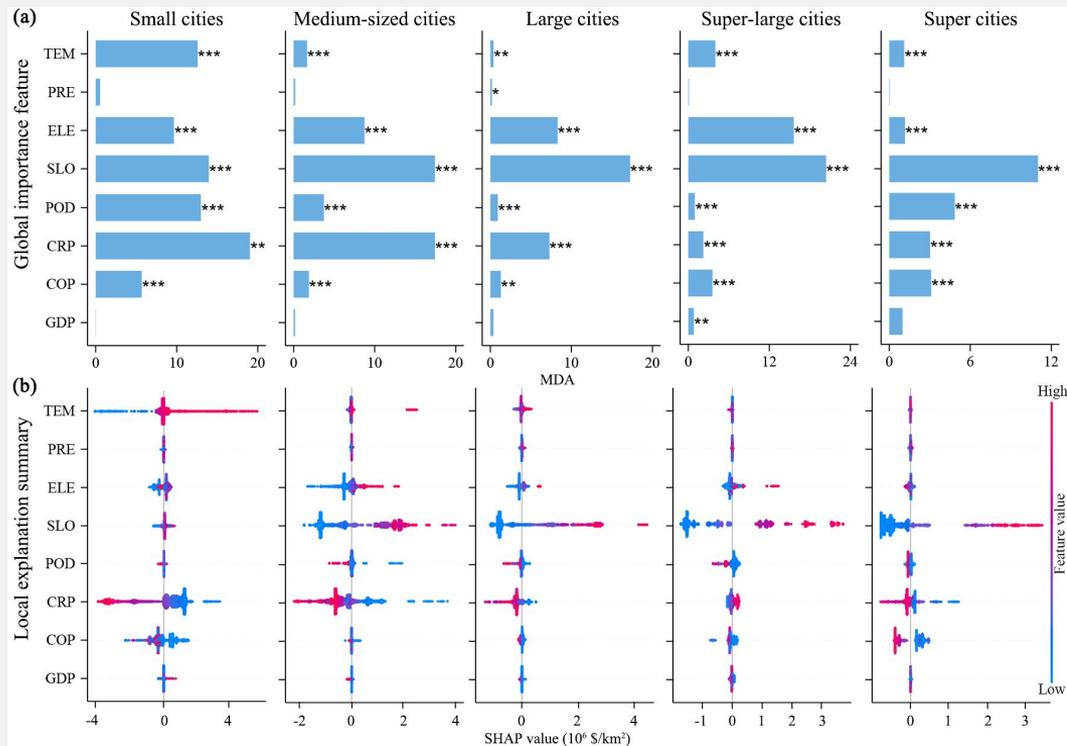
4.3 不同城市层级ESV的驱动因素分析

■ 驱动因子作用方向分析

- **自然因子**：坡度 (SLO)、高程 (ELE) 和降水 (PRE) 主要呈现**正向影响**
- **人为因子**：人口密度 (POD)、耕地占比 (CRP) 和建设用地占比 (COP) **总体呈负向效应**

■ 特殊规律：

- **人类活动在特定城市层级可能产生正向影响** (如特大城市CRP与ESV呈协同关系, 而其他城市层级的ESV多为权衡关系)
- **相同因子在不同城市层级作用方向可能逆转** (如气温 (TEM) 在小/中/大城市与ESV协同, 在特大/超大城市转为权衡; 高程 (ELE) 在超大城市呈权衡关系, 其他等级则为协同)



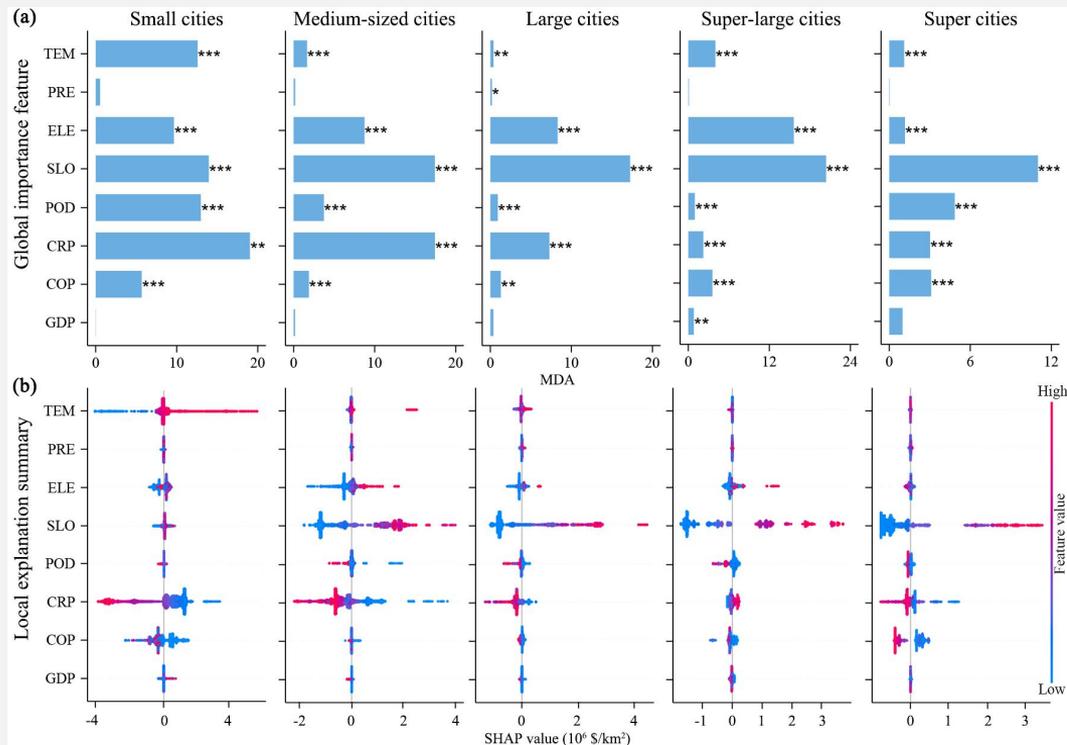
驱动因素对 YREB 城市层级 ESV 的影响强度和作用方向

4.3 不同城市层级ESV的驱动因素分析

■ 各驱动因子对五级城市ESV的差异化影响

- **小城市**：耕地占比（CRP）影响最显著，其次为坡度（SLO）、人口密度（POD）和年均温（TEM），降水（PRE）与GDP无显著相关性
- **中等城市**：CRP与SLO为主导因子，高程（ELE）影响增强
- **大城市与特大城市**：地形因子（SLO、ELE）成为关键驱动力
- **超大城市**：SLO仍居主导地位，POD次之

总体而言，随着城市层级提升，地形因子的影响力持续增强。地形、气候与人类活动共同塑造ESV格局，其中地形和人为因子的解释力普遍高于气候因子。



驱动因素对 YREB 城市层级 ESV 的影响强度和作用方向

4.3 不同城市层级ESV的驱动因素分析

■ 阈值效应特征

前四位驱动因子的阈值特征呈现显著城市层级差异：

➤ 小城市：

CRP (37%)、SLO (13°)、POD (316人/km²)、TEM (17°C)

➤ 中等城市：

CRP (<52%)、SLO (>3°)、ELE (>321m)、POD (<500人/km²)

➤ 大城市：

SLO (1.8°)、ELE (176m)、CRP (36%)、COP (16%)

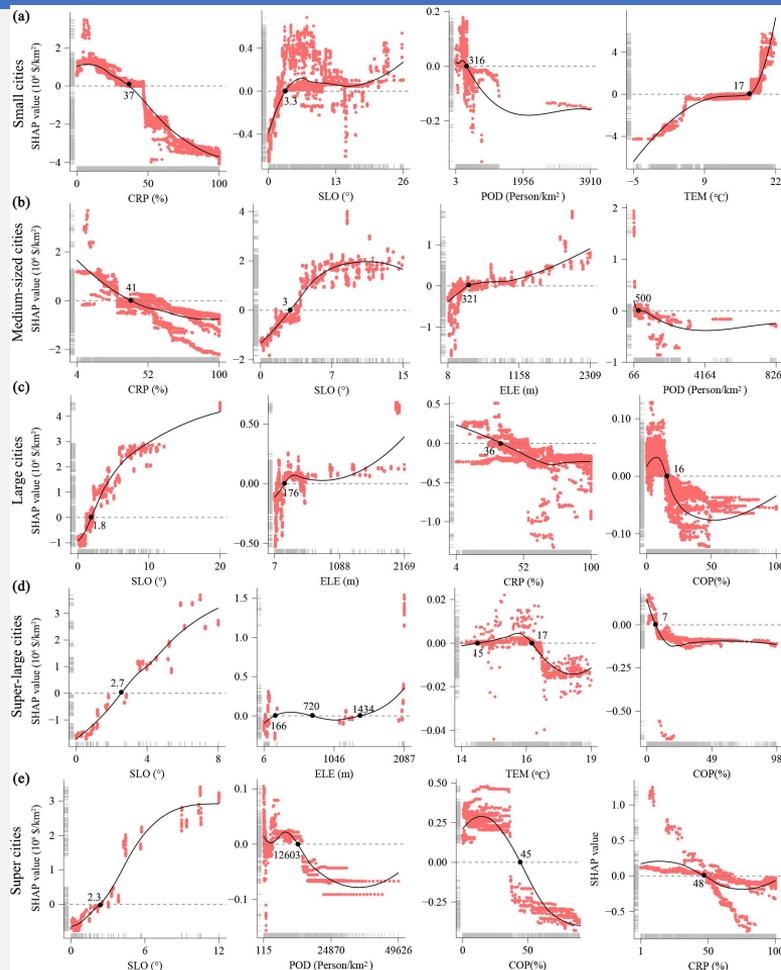
➤ 特大城市：

SLO (>2.7°)、ELE (166-720m或>1343m)、TEM (15-17°C)、COP (<7%)

➤ 超大城市：

SLO (2.3°)、POD (12,603人/km²)、COP (45%)、CRP (48%)

这些阈值明确了各驱动因子对ESV的正负向影响区间，为将生态系统服务纳入空间管理提供了关键调控依据。



4.4 面向城市层级的生态系统服务提升策略

■ 长江经济带差异化治理策略

➤ 分区与城市层级空间关系

小城市

严格保护区：生态良好的山地地区

次级优化区：城市外围过渡带

中等城市与大城市

严格保护区：城市周边自然保留地

重点改善区：作为缓冲过渡带

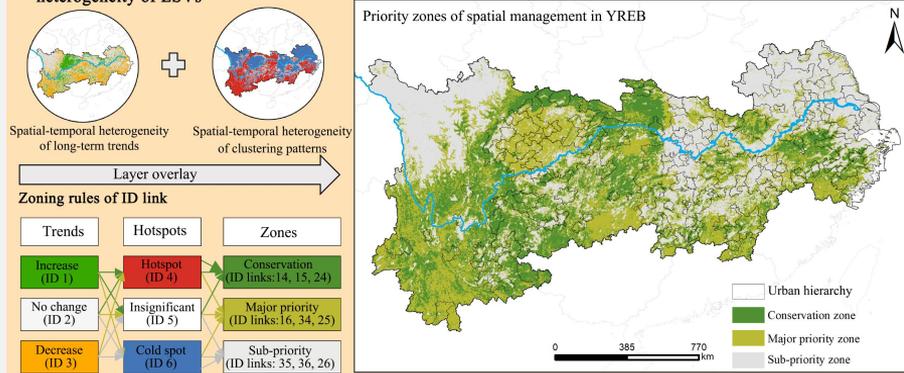
次级优化区：城乡结合部

特大城市与超大城市

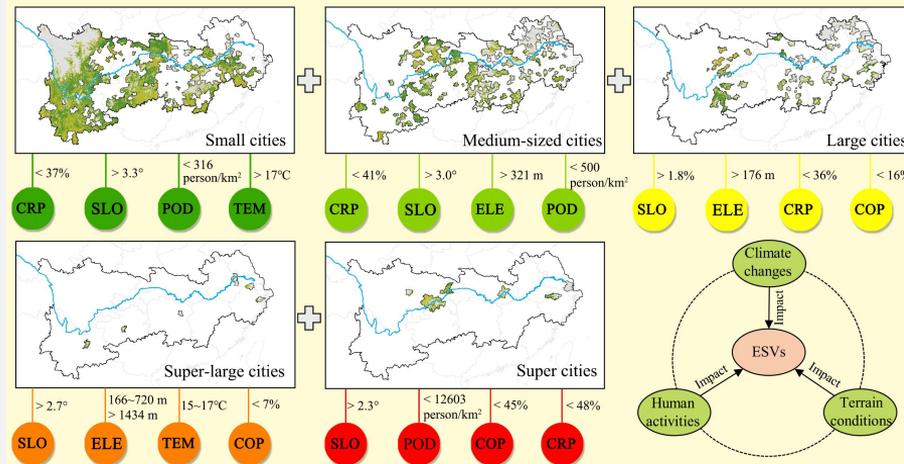
严格保护区：仅存于未开发的生态飞地

重点/次级优化区：面临显著的城市扩张压力

(a) Identification of the priority zones for spatial management by coupling urban hierarchies and spatial-temporal heterogeneity of ESVs



(b) Spatial management strategies for improving ESs based on the driving mechanisms of ESVs across urban hierarchies



4.4 面向城市层级的生态系统服务提升策略

■ 长江经济带差异化治理策略

严格保护区

- 作为生态价值核心区域，应采取最小干预原则：
- 建立自然保护地体系与生态保护红线
- 重点维持生态系统原真性和完整性

重点改善区

针对不同城市层级实施靶向治理：
小城市：

- 严控耕地扩张 (CRP<37%)
- 坡度>3.3°区域限制开发建设
- 人口密度控制在316人/km²以内

中等/大城市：

- 优化城乡交错带土地利用结构
- 建立生态廊道缓解景观破碎化

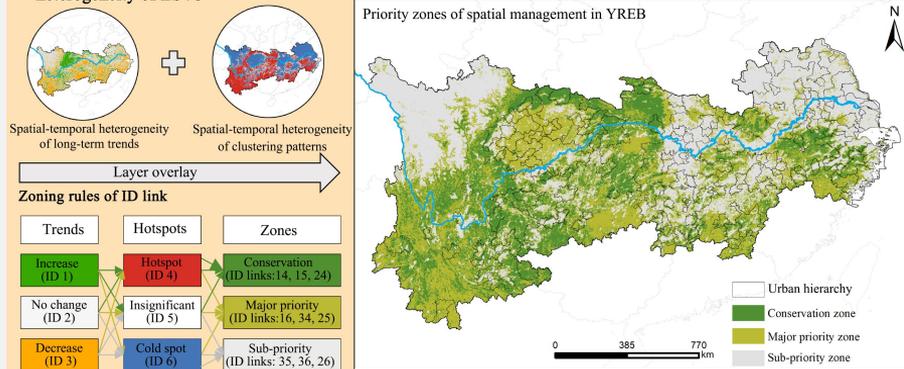
特大/超大城市：

- 强化城市增长边界管控
- 推行基于自然解决方案的生态修复

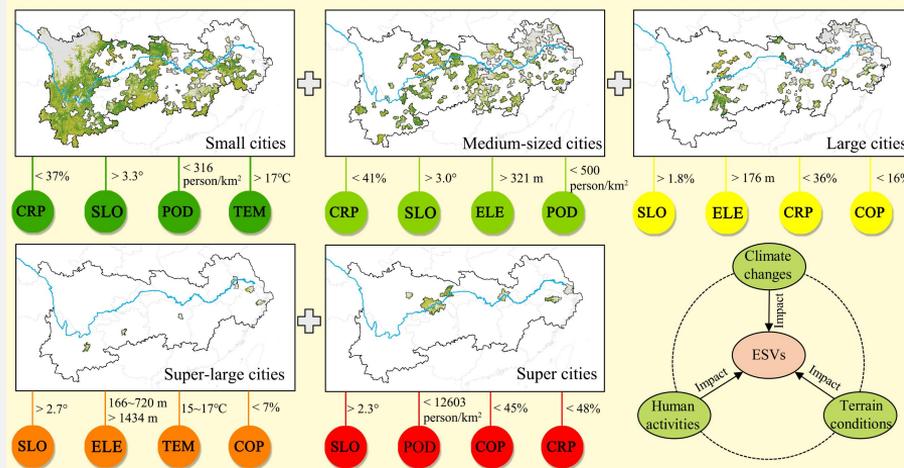
次级优化区

- 遵循“低干预、重预防”原则，避免过度管制造成资源浪费

(a) Identification of the priority zones for spatial management by coupling urban hierarchies and spatial-temporal heterogeneity of ESVs



(b) Spatial management strategies for improving ESs based on the driving mechanisms of ESVs across urban hierarchies



Policy implications for spatial management

目录

Contents



1、研究背景 | Introduction



2、研究思路 | Research Framework



3、材料和方法 | Materials and Methods



4、研究结果 | Results



5、结论 | Conclusions

□ 本研究的主要结论

- 生态系统服务的有效管理对区域可持续发展至关重要。**多尺度生态系统服务评估**为空间治理提供新视角。
- 本研究以**中国长江经济带**为例，构建了一个**创新框架**，将2000-2020年间五级城市规模（小城市、中等城市、大城市、特大城市和超大城市）生态系统服务的**时空异质性特征与驱动机制纳入空间管理体系**。
- 研究结果表明：
 - (1) 在五个城市层级中观察到**ESV变化趋势存在差异**，ESV增长趋势面积比从小城市到超级城市逐渐上升，但在特大城市中明显较低。
 - (2) 2000-2020年间高值簇区呈现**随城市层级升高而递减**的趋势，而低值簇区则**呈线性递增**态势。
 - (3) **人类活动对较低等级城市**生态系统服务起主导作用，**地形条件**显著影响**较高城市层级**的ESV。
 - (4) 提出了一种新的框架将生态系统服务**时空异质性和驱动机制**整合到空间管理，强调生态系统服务**多尺度管理**。

该研究揭示的尺度化生态系统管理策略，可为地方政府及利益相关者推动可持续发展、避免决策误导提供科学依据。



武汉大学

WUHAN UNIVERSITY



武汉大学城市设计学院
SCHOOL OF URBAN DESIGN
WUHAN UNIVERSITY

汇报完毕 感谢观看!

罗巧灵 教授

武汉大学城市设计学院

2025年6月25日

Email: qiaolingluo@whu.edu.cn

