

尺度效应对西藏自治区生态系统多功能性地理格局及驱动因素的影响

王海波¹ 熊松¹ 张开江¹ 李皓¹ 邓惺位¹ 杨豹¹

1. 四川省地质环境调查研究中心 成都 610000

DOI:10.32629/ems.v8i6.20565

[摘要] 研究采用 Anne Chao 等人提出的基于 Hill-Chao 数的多功能性量化方法,以西藏自治区为例,选取 8 个生态系统功能从 10×10km、20×20km 和 40×40km 三个不同景观尺度评估了 EMF 及其驱动因素的尺度效应。结果表明:(1)不同景观尺度上 EMF 及其驱动因素存在显著的尺度效应。随着景观尺度的增大,EMF 值也随之增加;在 10×10km 尺度上 EMF 指数均值为 0.022,在 20×20km 尺度上 EMF 指数均值为 0.024,在 40×40km 尺度上 EMF 指数均值为 0.028;西藏自治区的生态系统多功能性总体呈现出“西北低-东南高”的地理空间分布格局。高值区主要集中在山南市、林芝市和昌都市 3 个藏东南地区,拉萨市总体以中值区域为主;阿里地区、那曲市和日喀则市则均以低值区域为主。(2)通过构建结构方程模型(PLS-SEM),从生物群落、地形条件、气候条件和人类活动四个方面分析了其对 EMF 的驱动作用,结果表明:在 10×10km、20×20km 和 40×40km 三个景观尺度上气候条件、人类活动和生物群落对 EMF 均具有显著正向影响;地形条件对多功能性的直接影响效应在 10×10km、20×20km 景观尺度上为负向影响,而在 40×40km 景观尺度上转变为不显著正向影响。研究发现,随着研究尺度的增加,这些因素对 EMF 变化的解释能力显著增强。综上所述,研究揭示了 EMF 及其驱动因素具有显著的空间尺度依赖性,为研究生态系统多功能性提供了新的思路和见解,有助于进一步深入探讨其特性。对在不同尺度上协调和管理人类活动与生态环境之间的关系,制定科学合理的生态环境保护政策和措施,推动可持续发展具有重要意义。

[关键词] 生态系统多功能性;驱动因素;Hill-Chao 数;结构方程模型

生态系统多功能性及其驱动因素具有空间效应^[1-2],以往的研究多基于样地尺度进行分析,而基于景观尺度的生态系统多功能性及其驱动因素的关系研究较为少见。随着研究的深入,研究者们已经认识到研究尺度选择的差异会影响生态系统多功能性的表达^[3-4]。本研究以西藏自治区生态系统为研究对象,考虑到生态系统多功能性的尺度效应、数据获取和处理的可行性以及能够全面反映景观在不同尺度下的特征和变化规律,反映区域内的生态过程和格局,基于 10×10km、20×20km 和 40×40km 三个景观尺度,探讨了不同景观尺度下西藏自治区生态系统多功能性的空间分布格局,并利用结构方程模型分析地形条件、人类活动、气候条件及生物群落与生态系统多功能性之间的耦合关系。

1 材料与方法

1.1 数据来源

1.1.1 生态系统服务数据

在本研究中我们选取 2020 年中国生态系统服务空间价值数据集的 8 个生态系统服务指标来定义生态系统的多功能性(食物生产、水资源供给、原料生产、净化环境、气候调节、气体调节、水文调节、土壤保持)。这些指标使用 2020 年生态系统分类数据作为基础,综合遥感、监测站点、统计文献等多元数据,在前人的定点研究基础上获得拟合生态系统产生服务功能过程中的关键参数,构建了机理明确、数据可获得性强的模型系统。

1.1.2 驱动因素数据

在本研究中,为了确保数据的可用性,我们从已发表的科学文献和可广泛获取的数据库中进行了数据的收集与提取。鉴于驱动因素之间可能存在的多重共线性问题,我们采用了方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)来

评估各因素间的多重共线性，并排除了共线性较高的因素。最终，我们筛选出了 7 类通过多重共线性检验（VIF≤10）的驱动因素。这些驱动因素的统计特征在表 1 中进行了详细描述。

表 1 生态系统多功能性驱动因素

驱动因素	量化指标	数据来源
地形条件	平均海拔	国家地球系统科学数据中心
	平均坡度	国家地球系统科学数据中心
生物群落	NDVI	国家青藏高原科学数据中心
	林冠层高	[10]
气候条件	年均降水	国家青藏高原科学数据中心
	年均温度	国家青藏高原科学数据中心
人类活动	人口密度	Landsat

1.2 生态系统多功能性量化

在本研究中，我们采用了 Anne Chao 等人所构建的一套基于 Hill-Chao 数的统计框架来量化生态系统多功能性。其相关计算公式为：

$$d_{ij} = \sqrt{1 - |r_{ij}|}$$
 (1)

$$a_i(\tau) = \sum_{j=1}^L (1 - \frac{d_{ij}(\tau)}{\tau}) f_j$$
 (2)

$${}^qMF(\tau) = (\sum_{i=1}^L w_i \frac{f_i^2}{a_i(\tau)} (\frac{a_i(\tau)}{\sum_{j=1}^L w_j f_j^2})^q)^{\frac{1}{1-q}}, q \geq 0, q \neq 1$$
 (3)

式中： r_{ij} 为功能之间的相关性矩阵， d_{ij} 为功能之间的距离矩阵（ $d_{ij}(\tau) = \min(d_{ij}, \tau)$ ）， $a_i(\tau)$ 为函数 i 的性能水平， w_i w_j 为功能权重， q 为阶数。

1.3 结构方程模型构建

为了探究多功能性与各驱动因子的相互关系及潜在影响过程，我们利用近年来越来越主流的偏最小二乘结构方程模型（PLS-SEM）技术，研究了驱动因素与生态系统多功

能性之间的相互关系。PLS-SEM 可以通过采用预先定义的假设结构定量测量潜在参数和表现参数之间的相互作用和路径系数。本研究根据上述假设和既定的指标进行初始 PLS-SEM 模型构建，结构方程模型通过 R 中的 plspm 包进行建立分析。

2 研究结果

2.1 不同尺度下西藏自治区多功能性空间分布格局

由（图 1）可知，在不同景观尺度下，西藏自治区生态系统多功能性（EMF）表现出明显的空间异质性，西藏自治区的生态系统多功能性总体均呈现出“西北低-东南高”的地理空间分布格局。高值区主要集中在山南市、林芝市和昌都市 3 个藏东南地区，拉萨市总体以中值区域为主；阿里地区、那曲市和日喀则市则均以低值区域为主。这一格局揭示了区域生态环境的差异性和生态系统服务功能的空间分异规律。西藏自治区 EMF 指数的这种分布格局可能与其驱动因素密切相关，后文将对此进行详细探讨。

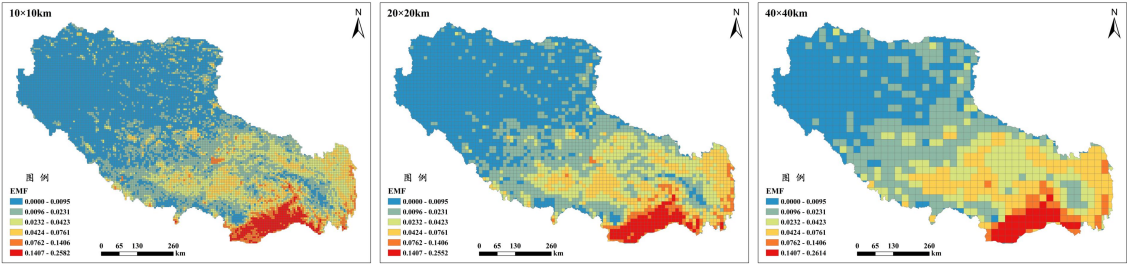


图 1 不同景观尺度下西藏自治区 EMF 的空间分布

2.2 驱动因素（单因素）与多功能性的关系

表 2 展示了不同景观尺度下多功能性与各驱动因子的相

关性分析结果。从整体上看（图 2-图 4），7 类驱动因子均与正相关关系。由单因素回归结果我们可以看出，EMF 与其驱动因素之间关系存在着非常强烈的尺度依赖性。

呈显著负相关关系外，其余各驱动因子对多功能性均呈显著

表 2 不同景观尺度下多功能性与驱动因子的相关性分析结果

驱动因子	10×10km	20×20km	40×40km
NDVI	0.799***	0.788***	0.775***
林冠层高	0.838***	0.827***	0.809***
年均降水	0.849***	0.783***	0.724***
年均温度	0.810***	0.774***	0.745***
平均海拔	-0.876***	-0.809***	-0.765***
平均坡度	0.486**	0.508**	0.512**
人口密度	0.471*	0.529**	0.571**

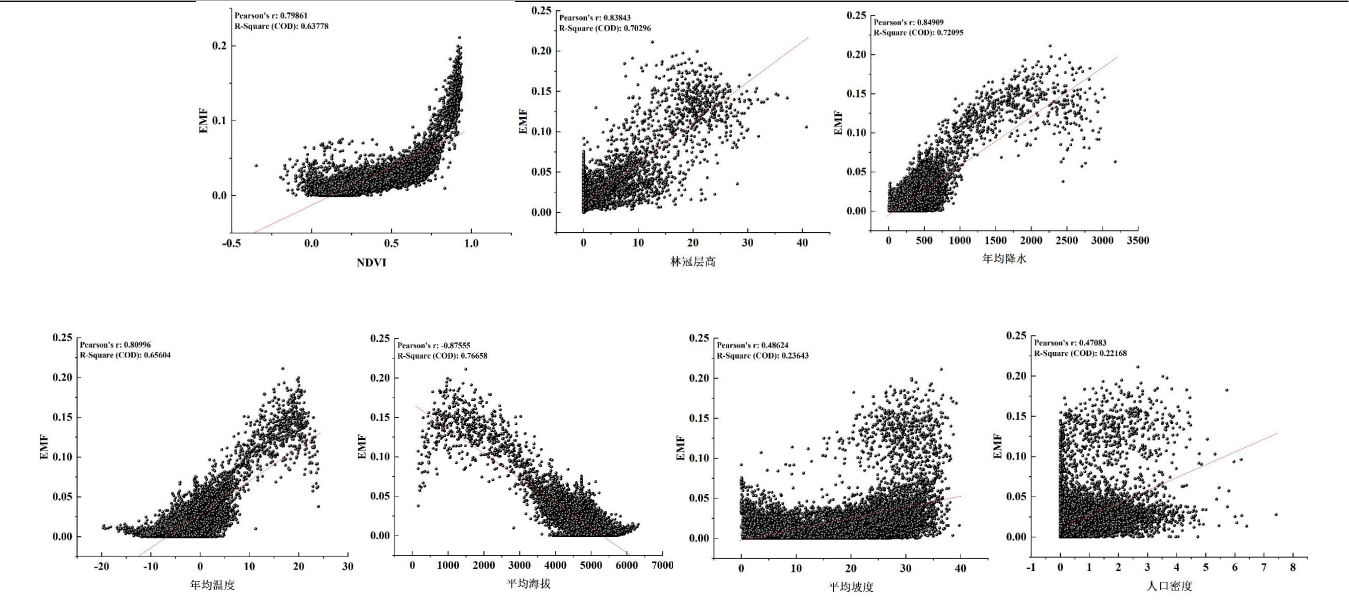
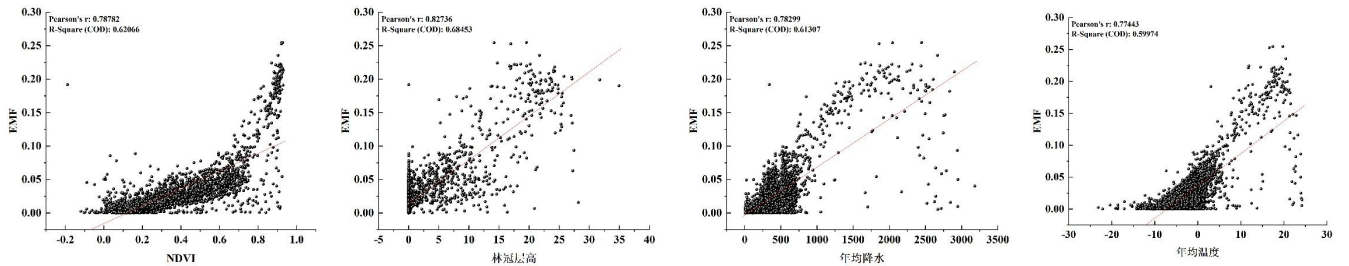


图 2 10×10km 尺度驱动因素与 EMF 的拟合结果



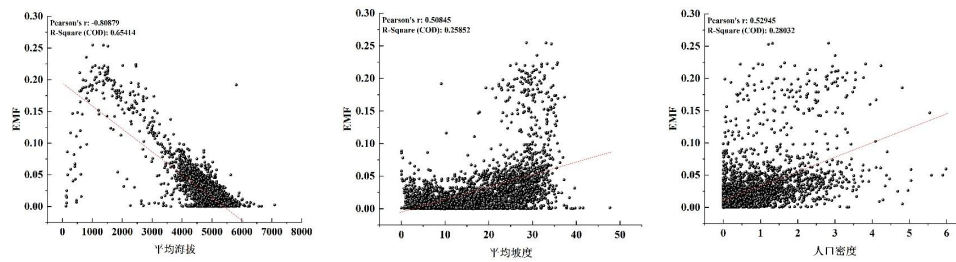


图3 20×20km 尺度驱动因素与 EMF 的拟合结果

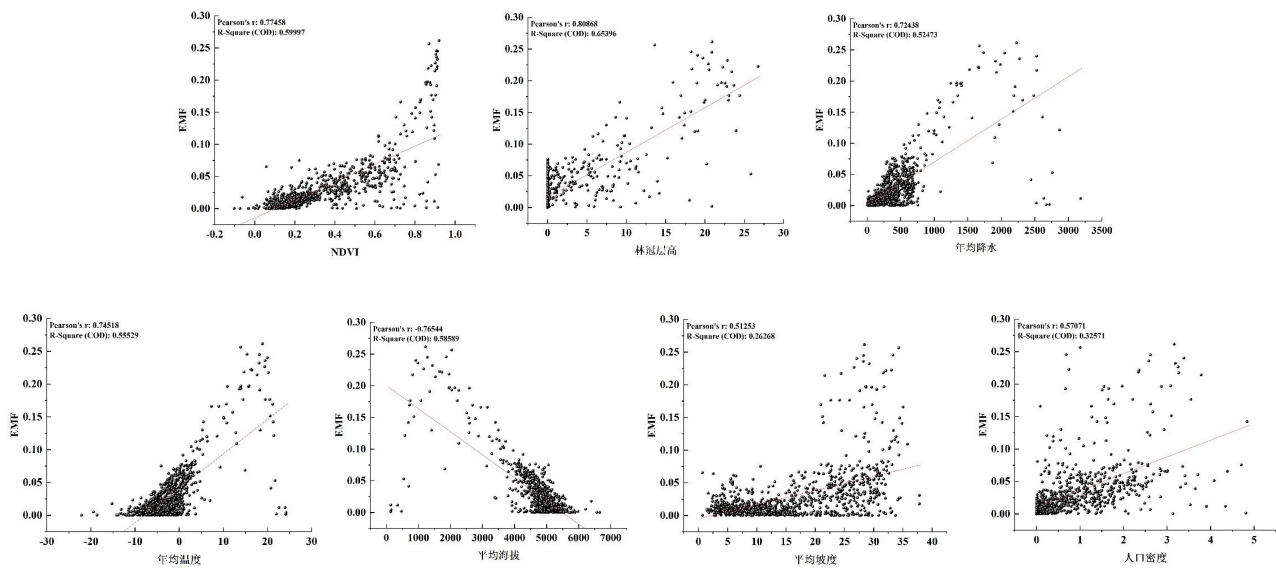


图4 40×40km 尺度驱动因素与 EMF 的拟合结果

2.3 驱动因素对多功能性的潜在影响过程

不同景观尺度下 EMF 分布潜变量与显变量关系的 PLS-SEM 模型如图 5 所示。从图中我们可以看出 PLS-SEM 模型分别解释了 10×10km、20×20km 和 40×40km 三个景观尺度发生的 86.1%、86.3%和 88.1%的方差，这一发现反映了随着研究尺度的增加，这些因素对 EMF 变化的解释能力越来越

强。结果表明：在 10×10km、20×20km 和 40×40km 三个景观尺度上气候条件、人类活动和生物群落对 EMF 均具有显著正向影响；地形条件对多功能性的直接影响效应在 10×10km、20×20km 景观尺度上为负向影响，而在 40×40km 景观尺度上转变为不显著正向影响。

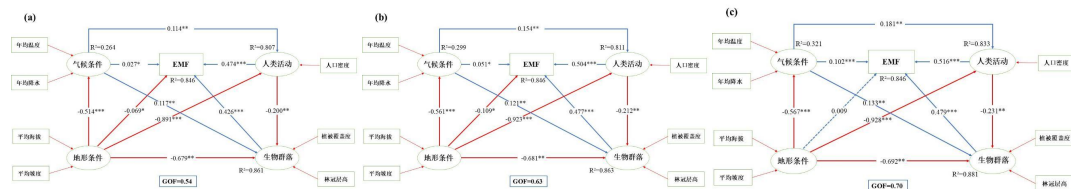


图5 PLS-SEM 模型图

3 研究讨论

3.1 西藏自治区生态系统多功能性的尺度依赖性

在三个不同的景观尺度上西藏自治区多功能性总体呈现出“西北低-东南高”的分布格局，这深刻反映了区域环境梯

度及其对生态系统结构与功能的控制作用。该格局的核心驱动因素是自东南向西北急剧递减的水热资源组合：藏东南南市、林芝市和昌都市得益于印度洋季风输送的充沛降水和相对温暖气候，发育了以森林、灌丛和高山草甸为主的复杂

生态系统, 支撑了高水平的生物多样性保育、水源涵养、碳固存和土壤保持等综合服务功能; 拉萨市作为河谷地带, 在适度水热条件和人类活动影响下呈现中等多功能性; 而阿里地区、那曲市和日喀则市的低值区, 受限于高寒干旱气候、稀疏植被覆盖和脆弱的高原荒漠生态系统, 加之过度放牧、矿产开发等人类活动干扰, 导致生态系统服务供给能力显著下降, 呈现水源涵养不足、固碳能力薄弱和生物多样性保护压力较大的特征。

3.2 驱动因素对多功能性影响的尺度依赖性

生物群落对 EMF 的影响在各个研究尺度上均为正向影响, 随着研究尺度的增加, 人类活动对生态系统多功能性 (EMF) 的直接正向影响有增强的趋势。Bradford 等人通过对模拟草地生态系统土壤动物群落组成与氮肥施用相结合的调控, 反复测量了与植物生产力、碳储量和养分周转相关的 5 个生态系统过程, 结果发现土壤生物群落的功能复杂性对这些指数有一致的正向影响, 这与我们的研究结果较为一致。随着遥感技术的不断发展, 未来的研究可以选取更多的景观遥感指数来表征生物群落, 从而更深入和合理地探讨生物群落对 EMF 的驱动机制。

与其他研究尺度不同的是, 地形条件在 $40 \times 40 \text{ km}$ 景观尺度上地形条件对 EMF 的影响由 $10 \times 10 \text{ km}$ 和 $20 \times 20 \text{ km}$ 景观尺度上的显著负向影响变为了不显著的正向影响, 这可能是由于大景观尺度覆盖范围广, 包含多样的生态系统类型和复杂的环境条件, 这种高度的异质性可能导致地形条件因素的作用被其他宏观因素掩盖或抵消, 整体效应趋于平均化, 表现为不显著。这一转变生动说明了生态过程具有尺度依赖性, 选择与分析目标过程相匹配的空间尺度对于准确揭示生态机制至关重要。

人类活动对 EMF 的影响在各个研究尺度上均为正向影响, 随着研究尺度的增加, 人类活动对生态系统多功能性 (EMF) 的直接正向影响逐渐增强。这是由于随着研究尺度扩大, 多种人类活动的综合效应会显现, 包括正面的管理措施如适度放牧、轮牧等城市区域的高人口密度对局部生态系统的多功能性影响显著。本研究以人口密度指标来表征人类活

动, 未来的研究工作扩展更多的指标来表征人类活动仍有很大的研究潜力。

4 结论

我们的研究结果揭示了西藏自治区生态系统多功能性景观尺度生态系统多功能性的空间分布及其驱动因素具有显著的尺度依赖性。随着景观尺度的增大, 生态系统多功能性总体上呈现出增加的趋势, 不同驱动因素在不同景观尺度上表现出不同的驱动作用。这凸显了生态系统多功能性及其驱动因素与研究尺度之间的密切耦合关系。理解这一关系对于在不同尺度上协调和管理人类活动与生态环境之间的关系, 制定科学合理的生态环境保护政策和措施, 推动可持续发展具有重要意义。因此, 我们在接下来的研究中将继续从不同的景观尺度出发, 进一步探索生态系统多功能性在不同景观尺度上的特性。

[参考文献]

[1] 徐炜, 井新, 马志远, 等. 2016. 生态系统多功能性的测度方法[J]. 生物多样性, 24(01): 72-84.

[2] 吕一河, 马志敏, 傅伯杰, 等. 2013. 生态系统服务多样性与景观多功能性——从科学理念到综合评估[J]. 生态学报, 33(04): 1153-1159.

[3] 文志, 郑华, 欧阳志云. 生物多样性与生态系统服务关系研究进展[J]. 应用生态学报, 2020, 31(01): 340-348.

[4] Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, et al. 2014. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions[J]. Methods in Ecology and Evolution, 5(2): 111-124.

基金项目: 四川省地质调查研究院科技创新项目 (No. SCIGS2026CZZX0104)。

作者简介: 王海波 (1983—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 硕士研究生, 从事国土空间生态修复研究工作;

*通讯作者: 杨豹 (1980—), 男, 四川成都人, 高级工程师, 硕士研究生, 从事国土空间生态修复研究工作。