引文格式：刘时城. 基于地统计学的西河流域土壤侵蚀空间分布研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(7): 63-66. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.07.012

基于地统计学的西河流域土壤侵蚀空间分布研究

刘时城[1]
（1. 中南安全环境技术研究院股份有限公司，湖北 武汉 430079）

摘 要：基于西河流域水土流失调查成果，采用土壤侵蚀综合指数法量化不同地类的土壤侵蚀强度，并采用分形维数、Moran's I 等地统计学方法探究侵蚀强度分布格局特征。结果表明，西河流域土壤侵蚀与土地利用类型存在良好耦合关系，不同地类的土壤侵蚀强度大小为水域<林地、草地、园地<旱地<裸地；不同土壤侵蚀强度的景观斑块存在一定的分形特征，各侵蚀等级的分形维数大小为中度>轻度>微度>强烈>极强烈>剧烈。受地类、地形等因素影响，流域内土壤侵蚀斑块呈现复杂的空间异质性。各侵蚀强度斑块表现出显著的空间自相关性，且随侵蚀强度的增加而减弱。

关键词：土壤侵蚀；分形维数；空间特征；空间自相关性；西河流域
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）07-0063-04

Study on Spatial Distribution of Soil Erosion in Xi River Basin Based on Geostatistics

LIU Shicheng[1]
(1. Central Southern Safety & Environment Technology Institute Co., Ltd., Wuhan 430079, China)

Abstract: Based on the investigation results of water and soil loss in the Xi River basin, we used the soil erosion comprehensive index method to calculate the soil erosion intensity of different land-use types, and used fractal dimension, Moran's I, and other geostatistical methods to analyze the spatial distribution characteristics of soil erosion patches. The results show that there is a good coupling relationship between soil erosion and land-use types in the Xi River basin. The soil erosion intensity across different land-use types are ranked as follows, water < forest, grassland, garden land < dry land < bare land. Different soil erosion intensity patches exhibit good fractal characteristics. The fractal dimensions of each erosion grade are in the order of moderate > mild > slight > intense > extremely intense > severe. The soil erosion patches in the basin demonstrate complex spatial heterogeneity due to land-use type, topography, and other factors. The soil erosion intensity patches show significant spatial autocorrelation, which decrease as erosion intensity increase.

Key words: soil erosion, fractal dimension, spatial characteristic, spatial autocorrelation, Xi River basin

土壤侵蚀引发水肥流失、地力下降、水系淤积、水污染等环境危害，并威胁农业可持续发展与生态安全[1]。研究土壤侵蚀空间格局可为流域综合治理与土地开发提供信息基础。土壤侵蚀景观分布与陆面水文过程密切相关[2]。降雨是土壤侵蚀的驱动因素，耦合因素包括地形、地类、土壤质地、人为干扰等[2-3]。自然因素是控制侵蚀景观空间分布的结构性因素，二者在一定尺度上具有空间关联性，人为因素则加剧了侵蚀景观的空间复杂性和随机性[4-5]。部分学者[6-9]基于地统计学方法研究了土壤侵蚀景观与环境之间的空间关联性，揭示了典型区域土壤侵蚀的主控因素及其空间依赖性。

丹江流域是南水北调中线水源地之一，也是豫陕鄂交界地区重要的饮用水源。区域内地形破碎、土地利用强度大、降雨丰富，是我国土壤侵蚀严重的地区之一。目前的研究主要针对该地区水沙运移规律、植被与地类对土壤侵蚀的影响等，很少关注土壤侵蚀空间分布特征[4-5]，因此本文以丹江口西河流域为典型区域，应用分形维数、空间自相关函数、土壤侵蚀综合指数等指标揭示了土壤侵蚀格局的分形特征和空间聚集模式，可为流域综合治理与水资源管理提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

陕南西河流域为丹江一级支流，发源于秦岭南坡，流域面积为 44 km^2。受海陆位置、地形、东亚季风环流影响，研究区属北亚热带季风气候，具有物候分明、雨热同期的特点，多年平均气温为 14℃，年均降水量为 803.2 mm。地带性植被为亚热带常绿阔叶林、针阔混交林、落叶阔叶林，具有南北过渡的特点。地形以低山、丘陵、沟谷为主，海拔为 425~1 150 m，垂直高差为 665 m。流域内河流密布，上游支流纵

作者简介：刘时城（1991—），硕士，工程师，主要从事水利信息化与GIS应用工作，E-mail：xinongtudou@foxmail.com。

列、水流湍急，在中下游地形开阔地带形成汇流，居民区沿河岸离散分布。受人类活动影响，西河流域存在坡面侵蚀、林下侵蚀和崩岗侵蚀。

1.2 土壤侵蚀强度综合指数

土壤侵蚀强度综合指数是一种基于侵蚀单元内土壤侵蚀面积与土地利用面积量化分级的土壤侵蚀程度表征方法，计算公式为：

$$I=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}G_{ij}P_{ij} \quad (1)$$

式中，i、j 为土地利用类型、土壤侵蚀强度分级的序列数；G、P 为各侵蚀强度分级、地类的面积[10-12]。

1.3 分形理论

分形理论源于几何学中对空间变量的不规则性度量。其在地统计学中主要揭示景观要素空间镶嵌结构的复杂性，通常由面积—周长关系计算[13-14]，即

$$\lg P=\frac{D}{2}\lg A+\mathrm{C} \quad (2)$$

式中，P、A 为某景观要素的分布面积与周长；C 为常数；D 为分形维数，表征景观斑块面积与周长双对数曲线关系，$1<D\leqslant 2$，通常认为 $D=1.5$ 时，该景观处于随机状态，无稳定结构。

1.4 空间自相关性

通常采用 Moran's I 检测空间自相关性[15]，计算公式为：

$$\text{Moran's I}=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}}\times\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \quad (3)$$

式中，$\bar{x}$ 为侵蚀景观 x 的平均值；n 为斑块数量；w_{ij} 为空间权重；Moran's I 的取值范围为[-1,1]，正值表示呈正向自相关性，负值则呈负向自相关性，绝对值越大，空间自相关性越强烈。

1.5 数据处理

本文采用的数据来源于陕西省第四次水土流失遥感调查结果，首先在 ArcGIS 10.2 平台上利用空间叠加分析工具汇总土地利用—侵蚀强度关系矩阵；再基于土壤侵蚀空间数据属性表计算土壤侵蚀综合指数，并提取各侵蚀斑块的面积、边长；最后在 Geoda 软件中进行空间自相关和分形维数分析。

2 研究结果与分析

2.1 西河流域土地利用特征

西河流域内不同地类纵横交错，呈带状、块状不规则分布，上游地区以生态用地为主，包括林地、草地，草地的空间异质性复杂；中下游为居民聚集区，以建筑用地、交通用地为主，外围集中了旱地、水田、水浇地、果园等地类。通过面积计算可知，研究区中草地、林地的分布面积最广，分别占流域总面积的35.99%、35.92%；耕地、建筑用地、水域和未利用地的面积占比为14.42%、10.74%、0.87%、0.08%。

2.2 西河流域土壤侵蚀特征

西河流域各侵蚀强度等级斑块呈无规则离散分布（图1），强烈及以上侵蚀主要分布于河流支流的上游地段，中度、轻度、微度侵蚀集中于河流干流的中下游。统计结果表明，该流域土壤侵蚀以微度水蚀为主，面积为 19.88 km^2，占区域总面积的45.26%；其次为中度侵蚀，面积占比为30.12%。由于流域内林草覆被程度高、裸地与农用地的分布较少，强烈、极强烈和剧烈侵蚀分布面积不大，分别为3.13、0.53、0.23 km^2。

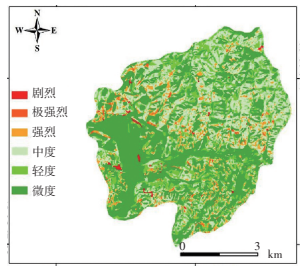


图1 西河流域土壤侵蚀强度空间分布图

审图号：GS(2020)4619

2.3 西河流域土壤侵蚀综合指数特征

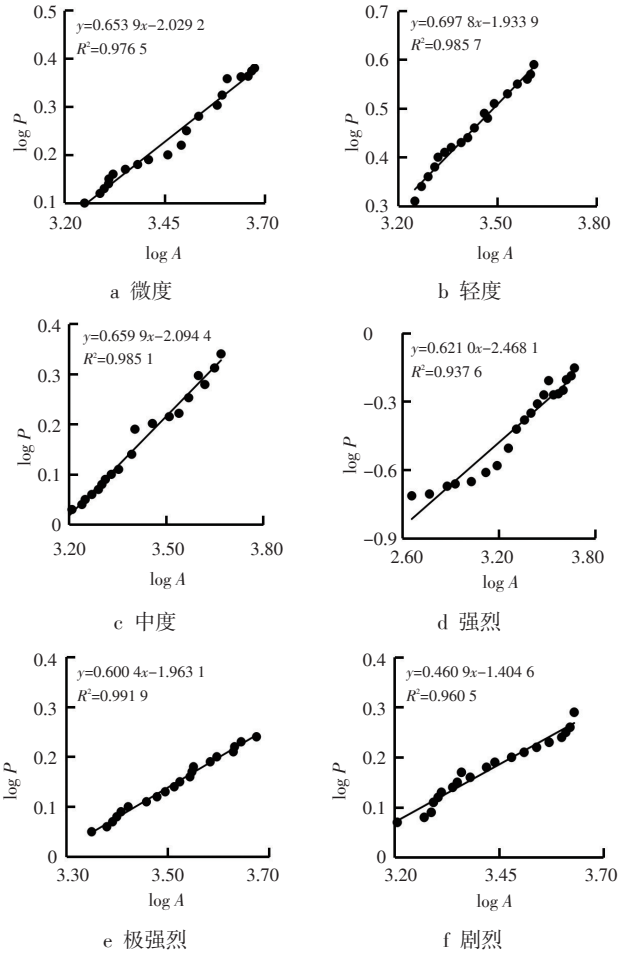
本文计算西河流域15种地类土壤侵蚀面积与综合指数（表1）发现，各侵蚀强度下地类结构存在一定差异，微度侵蚀主要发生在草地（35.90%）、旱地（19.77%）；轻度侵蚀以林地（49.33%）、草地（2.20%）、园地（12.49%）为主；中度侵蚀主要发生在林地（56.63%）、草地（22.13%）和园地（8.63%）；强烈侵蚀主要发生在林地（43.00%）、旱地（39.12%）；极强烈侵蚀主要发生在旱地（70.65%）、有林地（19.15%）、疏林地（4.30%）和园地（3.42%）；剧烈侵蚀主要发生在裸地（48.95%）、水浇地（31.40%）和建筑用地（13.61%）。裸地与水浇地是研究区土壤侵蚀最严重的地类，综合指数分别高达9.887、8.077；建筑用地、旱地、中低覆盖草地、疏林地、中覆盖草地、沙地、果园、有林地的综合侵蚀指数介于3.581~5.883之间；其他园地的侵蚀指数最低，仅为3.303，说明了不同土地利用条件下的土壤侵蚀异质性。

2.4 西河流域土壤侵蚀强度的分形特征

由不同土壤侵蚀强度的分形特征（图2）可知，

表1　不同侵蚀强度地类分布面积与土壤侵蚀综合指数

地类	微度/m²	轻度/m²	中度/m²	强烈/m²	极强烈/m²	剧烈/m²	土壤侵蚀综合指数
水田	1 113.71	2 565.52	967.97	0	0	679.63	2.366
果园	3 525.75	52 381.42	207 241.99	11 888.09	0	0	3.654
旱地	15 919.72	172 370.09	462 853.97	700 381.80	266 931.63	0	5.273
建筑用地	2 731.20	10 766.38	9 144.47	3 300.45	374.97	17 956.28	5.883
裸地	18.29	191.07	958.53	0	0	64 591.79	9.887
其他园地	1 840.50	688 539.56	776 549.80	111 364.96	12 934.88	187.19	3.303
沙地	2 395.68	742.51	473.31	1 589.26	676.78	502.87	3.661
疏林地	1 983.99	331.73	22 144.12	23 527.68	16 262.03	3 776.17	4.855
水浇地	5 669.10	3 862.04	2 518.08	81.78	174.45	41 436.52	8.077
水域	5 386.34	7 013.38	2 058.36	0	83.46	49.37	1.605
有林地	7 797.88	2 720 335.25	5 098 608.77	769 831.08	72 364.36	1 255.70	3.581
中低覆盖草地	488.39	2 880.56	43 471.32	22 636.99	7 408.62	81.32	4.879
中覆盖草地	2 756.89	66 555.35	375 260.86	139 391.06	0	31.08	4.231
中高覆盖草地	10 584.65	1 775 778.53	1 992 408.97	5 026.53	448.08	320.77	3.054
高覆盖草地	18 325.14	10 517.11	8 667.00	1 347.88	137.25	1 084.73	2.690



a 微度　b 轻度　c 中度　d 强烈　e 极强烈　f 剧烈

图2　不同土壤侵蚀强度的分形特征

土壤侵蚀强度斑块的面积与周长双对数线性关系平稳，拟合关系稳定（R^2均大于0.93），说明不同土壤侵蚀强度分布具有分形结构，具体可通过线性斜率识别。双对数拟合斜率越大表明分形维数越大，微度、轻度、中度、强烈、极强烈和剧烈侵蚀的分形维数依次为1.395 6、1.200 8、1.307 8、1.319 8、1.242 0和0.921 8，虽相差不大，但其指示了不同侵蚀斑块复杂程度。分形维数结果表明，轻度、微度、中度侵蚀的斑块更易受自然环境变化或人类活动影响，导致相应景观结构不稳定而发生变化；而剧烈、极强烈、强烈侵蚀的斑块与地形、地类等耦合密切，其空间特征稳定，侵蚀程度不易变化。

2.5　西河流域不同侵蚀强度的空间自相关特征

本文计算得到的不同土壤侵蚀强度的空间自相关参数见表2，可以看出，各侵蚀强度斑块的标准化 Z 值均高于临界值1.96，说明它们均具有显著的空间自相关特征。空间自相关性由小到大依次为剧烈、极强烈、强烈、中度、轻度、微度，表明随着土壤侵蚀强度的减小，其空间自相关性逐渐减弱，即侵蚀景观斑块聚集性增强则自相关性减弱。

表2　不同土壤侵蚀强度的空间自相关参数

土壤侵蚀强度	Moran's I	Z	土壤侵蚀强度	Moran's I	Z
微度	0.896	14.32	强烈	0.382	6.54
轻度	0.574	11.04	极强烈	0.301	5.34
中度	0.497	9.42	剧烈	0.216	4.68

为直观了解流域内土壤侵蚀斑块的空间聚集性，本文利用局域Moran's I计算了空间关联局域指标（LISA）的显著水平，结果见图3，可以看出，研究区土壤侵蚀斑块存在高—低（H—L）、低—高（L—H）、高—高（H—H）3种聚集模式，其中微度侵蚀斑块主要呈L—H聚集模式，集中在流域中游地区；轻

度侵蚀斑块呈3种聚集模式，H—H和H—L聚集在北部山区少量分布，其余大部分地区为L—H聚集；中度和剧烈侵蚀斑块分别呈L—H、H—H聚集单一模式分布；强烈侵蚀斑块主要呈H—L聚集，集中于在北部山地、南缘丘陵区，局部有L—H、H—H聚集模式分布；极强烈斑块呈H—H、L—H聚集模式，集中在流域中部。

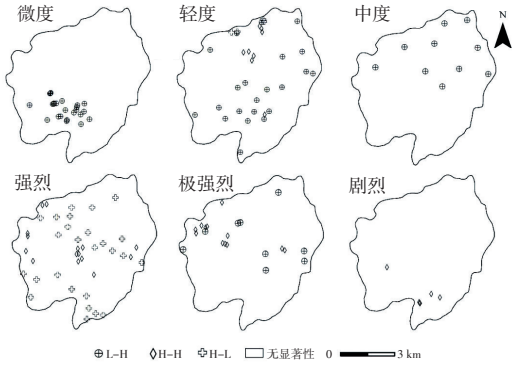


图3 研究区土壤侵蚀强度的LISA图

审图号：GS(2020)4619

地表覆被是降雨—侵蚀过程中的特殊障碍，土壤侵蚀景观的空间分布差异与土地利用类型密切相关[16-18]。不同地类下的侵蚀强度分布存在一定差异，从区域地形特征来看，水田沿河流分布于地形平缓地带，田垄的保水作用，极大地降低了水田的侵蚀强度；而旱地集中于陡坡地带，促进了地表产流、泥沙侵蚀的发生，因而侵蚀综合指数较大，这与周泽丽[19]在重庆岩溶山区的研究结果一致。地表覆被类型将影响土壤侵蚀强度分异。根据生态过程物质能量转换方向，林地、草地、水域等地类景观为“汇”，而旱地、园地、裸地、建筑等地类景观为“源”，“源”景观通常对侵蚀发生演进具有促进作用，而“汇”景观则产生阻滞、消解效应[20]。西河流域以林地、草地为主，与其他地类景观相比，这种层次性植被景观能有效截留减蚀[21]。旱地、水浇地、园地是西河流域强烈侵蚀发生的主体，该类“源”景观上的作物季节性变化频繁，加之稀疏的田间覆盖度、人为干扰，增加了土壤侵蚀概率。

西河流域包括中低山、丘陵、河谷等多种地貌形态和复杂的用地结构，其土壤侵蚀景观极具空间异质性。分形维数结果表明，不同土壤侵蚀强度斑块交错分布、空间自相关性各异，其中中低侵蚀强度斑块的空间结构最复杂，而剧烈水蚀区的结构最简单。部分林、草地受环境演变与人为破坏影响，土壤侵蚀斑块的空间结构随机性强、稳定性弱；剧烈侵蚀斑块的自相关性高、分形结构稳定，这与沈中原等[22]在大理河流域的研究结果一致。西河流域不同土壤侵蚀强度斑块呈现一致的空间自相关性，全局Moran’s I随土壤侵蚀强度的增加而减弱，表明在低侵蚀强度下，土壤侵蚀过程与自然环境的趋势属于宏观趋势，因而呈现良好的空间自相关性；在高侵蚀强度下，反映了更多的随机因素（人为干扰、动物活动），因而空间自相关性减弱。

3 结 论

本文利用地统计学方法深入分析了丹江水源区西河流域的土壤侵蚀空间分布特征，揭示了土壤侵蚀强度与土地利用类型之间存在的显著空间耦合关系。结果表明，西河流域中裸地和水浇地的侵蚀程度最严重，综合指数高达9.887、8.077；流域内以微度和中度侵蚀为主，占比分别为45.26%和30.12%，说明整体侵蚀状况相对温和；通过分形分析发现，低侵蚀强度斑块呈现复杂且不稳定的空间结构，而高侵蚀强度斑块则表现出稳定的分形特征；空间自相关分析进一步表明，随着侵蚀强度的增加，斑块的空间自相关性逐渐减弱，说明人类活动可能是诱发高强度侵蚀的关键因素。鉴于此，建议针对不同地类制定差异化的水土保持措施，特别关注高风险区域的监测和治理。未来研究可关注于长时间序列的动态监测、气候变化和人类活动对侵蚀格局的影响机制以及土壤侵蚀与生态系统服务功能的关系，为丹江水源区的水土保持和生态管理提供科学依据，促进区域可持续发展。

参考文献

[1] McAuliffe J R. Landscape Evolution, Soil Formation, and Ecological Patterns and Processes in Sonoran Desert Bajadas[J]. Ecological Monographs, 1994, 64(2):111-148

[2] 高璐，王学凤，曲本亮，等. 基于RUSLE模型的辽宁省土壤侵蚀定量研究[J]. 长江科学院院报，2015，32(12):25-29

[3] 梁音，杨轩，苏春丽，等. 基于EI的南方红壤区土壤侵蚀县域差异与趋势分析[J]. 土壤学报，2009，46(1):24-29

[4] 张铁钢. 丹江中游小流域水—沙—养分输移过程研究[D]. 西安:西安理工大学，2016

[5] 李婷，刘康，马力阳，等. 秦岭山地丹江流域土地利用变化的土壤侵蚀效应评价[J]. 自然资源学报，2016，31(4):583-595

[6] 王瑶，刘前进，于兴修. 沂蒙山区土壤侵蚀垂直景观格局的分形特征[J]. 农业工程学报，2010，26(11):304-309

[7] 熊波，陈学华，蒋锦刚，等. 云南省土壤侵蚀强度空间结构特征分析[J]. 水土保持研究，2009，16(3):6-10

（下转第71页）