



地质力学学报
Journal of Geomechanics
ISSN 1006-6616, CN 11-3672/P
中文核心期刊
中国科技核心期刊
CSCD 来源期刊（核心库）

《地质力学学报》预出版论文

论文题目：大型逆冲推覆构造地质背景下岩溶地质分形特征

作者：史箫笛，姚建新，赵碧义，姚丹，况丽

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025039

投稿时间：2025-04-09

录用时间：2025-11-24

预出版时间：2026-07-23

预出版版权说明

预出版，是指在网络出版或纸质版印刷出版之前，文章的电子版本在网上提前公开，是正式出版的预备版本。预出版的文章是通过严格的“三审制”审查后，本刊确定录用的文章，其内容的著作权等受《著作权法》等法律法规保护。预出版的文章将在之后的印刷版上刊发，印刷版的文章可能与预出版的文章略有不同，预出版文章经录用后便以电子版本形式在网站发出，没有经过排版和编校，会存在部分文字及编排格式与正式出版有出入，但文章主体内容是完全一致的。

学者研究或引述预出版文章，应当以印刷纸质版内容为准；但如果牵涉首创权等时间问题，则应当以适当方式注明文章的预出版日期。

引用格式: 史箫笛, 姚建新, 赵碧义, 等, 2026. 大型逆冲推覆构造地质背景下岩溶地质分形特征[J].地质力学学报, 32 (2) 000-000. DOI: 10. 12090 /j. issn. 1006-6616. 2025039

Citation: SHI X D,YAO J X, ZHAO B Y, et al., 2026. Fractal characteristics of karst geology under the geological background of large-scale thrust tectonic [J].Journal of Geomechanics, 32 (2) 000-000. DOI: 10. 12090 /j. issn. 1006-6616.2025039

大型逆冲推覆构造地质背景下岩溶地质分形特征

史箫笛¹, 姚建新, 赵碧义, 姚 丹, 况 丽

SHI Xiaodi, YAO Jianxin, ZHAO Biyi, YAO Dan, KUANG Li

湖北省地质局第八地质大队, 湖北 襄阳 441000

The Eighth Geological Brigade of Hubei Provincial Geological Bureau, Xiangyang 441000, Hubei, China

Fractal characteristics of karst geology under the geological background of large-scale thrust tectonic

Abstract: [Objective] Large-scale thrust tectonics have a significant impact on the regional geological environment and are important factors controlling the development of karst systems. Exploring the fractal characteristics of karst geology in this context can provide a scientific basis for analyzing nonlinear problems in complex karst systems. [Methods] Taking the karst area of the Qingfeng fault zone as the research object, the box dimension method of geological fractal theory was used to quantify the typical elements in the area, explore the fractal characteristics of regional and watershed unit elements, and determine the fractal dimension and characteristics of each element. [Results] The stratigraphic boundaries of the region and watershed units have obvious fractal characteristics. Karstification significantly increases the dimensionality of stratigraphic boundaries, the more developed the karst, the greater the fractal dimension. Furthermore, thrust nappe structures and tectonic movements significantly influence the fractal characteristics of water systems, altering the general mapping relationship between surface and groundwater systems. The fractal dimension of surface water systems and underground karst water systems exhibit an approximately positive correlation. The peaks in the study area exhibit a juvenile peak cluster landform, indicating early stages in the karst cycle development. [Conclusion] Karst in the region exhibits fractal characteristics, and the peak evolution follows the three-stage patterns common in karst areas. Surface and groundwater systems have positively correlated fractal patterns, and the fractal dimension of stratigraphic boundaries clearly indicates the degree of karst development. [Significance] Clarifying the self-similarity of karst in thrust-nappe tectonic zones provides a quantitative reference and theoretical basis for studying fault structures and karst distribution, development, and evolution. This approach also offers new insights into karst geological issues in similar regions.

Keywords: thrust tectonics; karst; fractal dimension; dimension increase; fractal characteristics

摘 要: 大型逆冲推覆构造对区域地质环境具有显著影响, 是控制岩溶体系发育的重要因素, 探究在此背景下的岩溶地质分形特征, 能够为分析复杂岩溶系统非线性问题提供科学依据。以青峰断裂带岩溶区为研究对象, 采用地质分形理论盒维数法量化区内各典型要素, 探讨区域要素及流域单元要素分形特征, 确定了各典型要素分维值及分形特征。研究结果表明: 区域和流域单元地层线均具有明显分形特征, 岩溶化进程对地层线具有明显的增维作用, 岩溶越发育, 分维值越大; 同时逆冲推覆构造及构造运动对水系分形特征影响较大, 会改变地

¹作者简介: 史箫笛 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水文地质、工程地质方面工作。Email:1326921800@qq.com

通信作者: 姚建新 (1976—), 男, 高级工程师, 主要从事水文与工程地质勘察、设计和基础工程施工方面工作。Email: 362183636@qq.com

收稿日期: 2025-04-09; 修回日期: 2025-10-27; 录用日期: 2025-11-24; 网络出版日期: 2025-X-X; 责任编辑: 范二平

Received: 2025-04-09; Revised: 2025-10-27; Accepted: 2025-11-24; Available online: ; Handling Editor: Fan Erping

表水系与地下水系的一般映射关系,地表水系分维值与地下岩溶水系统分维值呈现近似正相关规律。研究区峰体则表现为幼年期峰丛地貌,表明其现处于岩溶旋回发育的早期。区内岩溶具有分形特征,峰体演化遵循一般岩溶区的三段式演化规律,地表水系与地下水系表现出正相关的分形规律,地层线分维值对岩溶发育程度具有明显的指示意义。明确逆冲推覆构造区的岩溶自相似性,为研究断裂构造与岩溶分布、发育程度及演化规律提供定量化分析的参考和理论依据,也为解决同类地区中岩溶地质问题提供新思路。

关键词: 逆冲推覆构造; 岩溶; 分维值; 增维; 分形特征

中图分类号: P642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (202×) 00-0000-00

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2025039

0 引言

1967年美国数学家曼德布罗特提出了分形概念,并于1975年开创了分形几何学,成为研究各种复杂对象的有利工具(Mandelbrot, 1975)。自然界的许多物理现象并不是有序、稳定和确定性的,而是无序、不稳定和随机的,其发生与发展并不是线性的,因此难以用传统数学诸如微分、函数等描述其过程与结果,而分形理论通过研究复杂系统的自相似性(申维和赵鹏大, 1998; 朱晓华等, 2001; 李苍松, 2006; 张佳瑞等, 2017),揭示非线性系统中有序与无序的统一、确定性与随机性的统一,并得出隐藏在复杂现象背后的规律及局部和整体之间的本质联系。

分形理论已被广泛应用于海岸地貌、喀斯特地貌、流水地貌、冰川冻土、沙漠化、岩石结构演化及构造地质等地质领域中(秦耀辰和刘凯, 2003; 高义等, 2011; 文力等, 2020; 侯圣山等, 2024)。在岩溶地质学领域,运用分形理论计算构成岩溶形态系统的峰体、洼地、洞穴系统及水文网的分维值,可揭示分维的岩溶学含义,从岩溶系统介质场结构及岩溶作用过程的非线性动力特征分析岩溶形态系统的分形机理(胡章喜和沈继方, 1994; 许模等, 2011)。李苍松等(2017)研究认为岩溶地下水化学特征参数仍具有分形特征,溶蚀实验水化学分形评价指标与偏光显微镜实验微观岩溶分形指数之间显著相关,并通过水化学动力学-分形指数综合分维值评价了岩溶发育程度。在构造地质领域中,中国大陆壳体中深大断裂的分布具有分形结构特征,大陆全境的分维值为1.493,各构造区的分维值为0.827~1.624,构造活动区分维值显著大于稳定区(谭凯旋等, 1998)。同时发育于构造活动强烈的较浅部脆性、张扭性断裂带分维值较大,发育于构造活动较弱地区的深部韧性、剪切断裂带分维值较小(成永生, 2010)。区域上断裂构造分形维数值能够反映地层能干性及构造应力的传递过程,指示逆冲推覆过程中主应力面作用方向(姜颜良等, 2023)。分形理论也被应用于油气藏、矿产及灾害地质领域。储层孔隙结构是油气储能的关键因素,在页岩储层微观研究中通过分形维数这一标度参数可有效描述孔隙表面的粗糙度与孔隙结构的复杂程度,为页岩储集与空间评价提供理论基础(李琦等, 2025; 李帅智等, 2025)。构造活动与成矿作用存在密切的时空及成因联系,断裂容量维高值区构造复杂,连通性较好,能保证成矿流体远距离流动,利于成矿;断裂容量维低值区构造简单,能圈闭住成矿流体,为高值区输送来的成矿流体沉积提供壁垒(张元等, 2024)。利用分形理论也能够实现坡面形态特征的随机模拟,为危岩崩塌落石运动坡面细观形态难以准确建模及定量表征的问题提供了解决方法(赵海军等, 2025)。

岩溶发育主要受控于岩性、构造及水动力条件等因素,各因素不断相互叠加与转化造成了岩溶系统的复杂性,运用经典数学理论尚无法表达出岩溶系统结构的复杂性。各种岩溶形态是岩溶内部系统的外在体现,而分形理论能够通过研究地表岩溶形态来定量描述和刻画岩溶系统结构,通过分析岩溶地貌分形特征、岩溶区水文网分形特征、岩溶裂隙及洞穴分形特征、岩溶水化学分形特征等,可揭示岩溶系统内部系统特征及量化岩溶发育程度(高伟等, 2016; 李苍松等, 2017)。在大型逆冲推覆构造地质背景下,采用分形理论定量分析岩溶的自相似性及分形特征,量化岩溶规律及发育程度,对山区隧道等地下洞室的围岩稳定、涌突水问题及道桥工程建设中基础稳定性具有重要意义。

1 研究区地质背景

青峰-襄樊（襄阳）-广济断裂是分隔秦岭造山带和扬子克拉通 2 个一级构造单元的区域性大断裂，其中襄樊（襄阳）以西称为青峰大断裂，经多期构造作用叠加，构造形迹十分复杂。北大巴山逆冲-褶皱带以低角度平缓地向南逆掩于扬子克拉通的边缘之上，两侧发育与主断裂近似平行向北缓倾的多条长度不一的次级逆冲断裂（陈璘，2009；王志元等，2014；张国伟等，2019）。以青峰大断裂为界，可划分北大巴山逆冲推覆构造带和南大巴山前陆构造带。南大巴山前陆构造带又可分为北部前陆褶冲带及南部前陆褶皱带（董云鹏等，2008）。北大巴山逆冲推覆构造带发育韧性剪切带、紧闭褶皱及糜棱岩化，变形强度大。南大巴山前陆构造带以冲断-褶皱变形为主，自北向南进一步分为叠瓦冲断带、冲断褶皱带、逆冲推覆扩展褶皱带及低缓褶皱带，变形强度递减，褶皱由紧闭渐变为宽缓箱状。研究区位于丰溪镇中部地区，属前陆褶冲带，以冲断变形为主，形成一系列叠瓦式逆冲断裂构造。区内青峰大断裂主要由主断裂（F1）及 5 条次级（F2—F6）断裂组成，构成叠瓦式冲断系统。其中主断裂西起陕鄂边界西米河村，东至丰溪镇辽叶村，绵延超过 20 km，走向由北东向在丰溪镇下坝村附近渐变为东西向；5 条次级断裂近东西向展布，以青峰主断裂为界，北部为震旦系耀岭河组（Z_{yl}）板岩，南部为寒武系灰岩组、震旦系白云岩组，南部也是研究的主要区域。

丰溪镇中部地区碳酸盐岩广泛分布（图 1），主要包括寒武系石龙洞组（C_{1sl}）灰岩、天河板组（C_{1t}）灰岩、水井沱组（C_{1s}）灰岩及覃家庙组（C_{2qn}）泥质白云岩及震旦系灯影组（Z_{2dn}）白云岩。根据岩性及沉积构造特征可划分为纯层状碳酸盐岩类、间互状碳酸盐岩类及夹层状碳酸盐岩类 3 大类。石龙洞组（C_{1sl}）灰岩及灯影组（Z_{2dn}）白云岩属纯层状碳酸盐岩类，多为厚层—巨厚层构造，地层均匀且连续性较好，岩溶强烈发育；水井沱组（C_{1s}）灰岩属间互状碳酸盐类，表现为可溶岩与非可溶岩交替沉积出现，岩溶中等发育；天河板组（C_{1t}）灰岩、覃家庙组（C_{2qn}）泥质白云岩属夹层状碳酸盐岩类，表现为非可溶岩中夹有可溶岩，可溶岩呈夹层状产出，岩溶弱发育。从地貌上来看（图 2），周家坝村、纸坊村、庙子沟及辽叶湖一带发育有溶蚀盆地、溶蚀平原及峰丛谷地，岩溶洼地、落水洞、溶洞及暗河等岩溶地貌个体形态种类齐全，但无论是岩溶发育的密度，还是岩溶发育的深度都远不及鄂西同类岩溶山区（王增银等，1995；周宁和刘波，2009；史箫笛等，2023）。

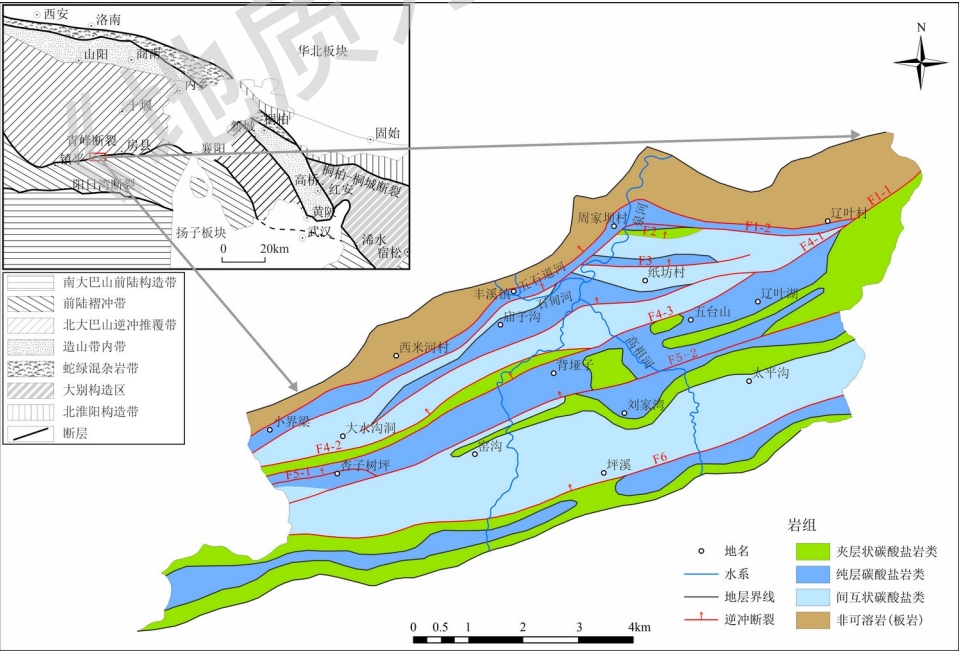


图 1 丰溪镇中部地区构造及地质简图

Fig. 1 Structural and geological maps of central Fengxi Town

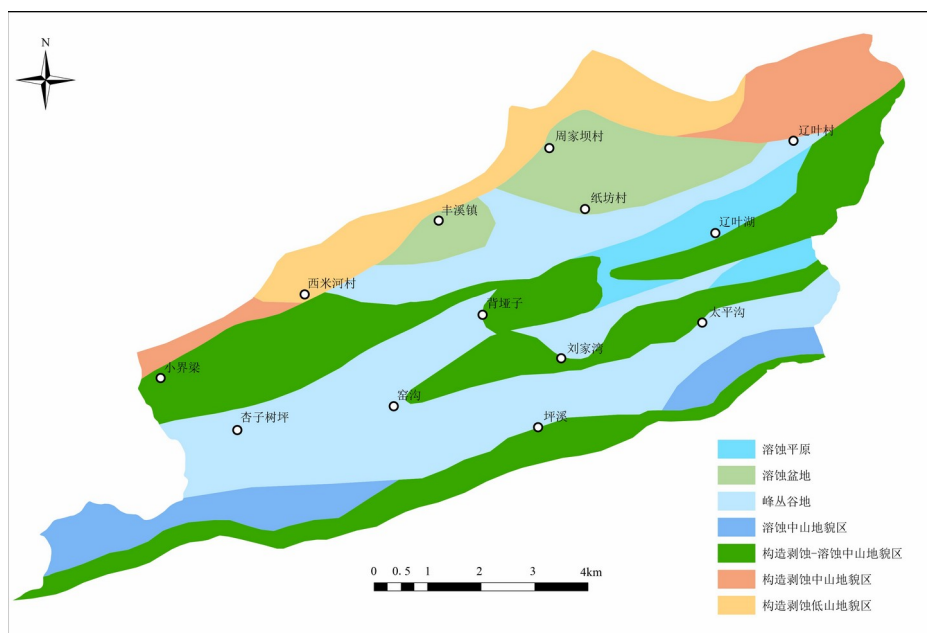


图2 丰溪镇中部地区喀斯特地貌分区图
Fig. 2 Map of karst landform zoning in central Fengxi Town

2 分形理论及计算方法

2.1 理论基础

分形理论能够量化断裂系统与岩溶系统的复杂程度，分维值是分形理论的量化标准和基本参数。现已演化出多种计算方法，如相似维数、盒维数、信息维数、关联维数、Lyapunov 维等，其中在构造地质学、岩溶地质学中应用最为广泛的是盒维数与信息维数（邹明清，2007；许模等，2011；张元等，2024）。其中盒维数法能够高效降低多维数据，适用于多尺度及地质复杂结构，故研究采用盒维数法进行计算。盒维数法通常采用不同边长的二维正交网格（盒子）覆盖研究区，统计包含目标要素的盒子数量，将网格边长与盒子数在对数坐标系中进行回归分析。若其存在良好的线性关系，则说明分形几何结构明显，回归直线的斜率即为分维值。假设网格边长为 r ，盒子数为 $N(r)$ ，则满足如下函数关系（胡章喜和沈继方，1994；张飞燕和陈晓山，2008；张满仓等，2023；王榕臻等，2024）：

$$N(r)=C_1r^{-D_1} \quad (1)$$

对统计结果在双对数坐标中进行回归分析，拟合曲线为一条直线，则满足线性回归方程：

$$\lg N(r)=-D\lg r+C \quad (2)$$

式中， r —网格边长； $N(r)$ —盒子数； C 、 C_1 —常数； D 、 D_1 —分维值。

2.2 计算方法

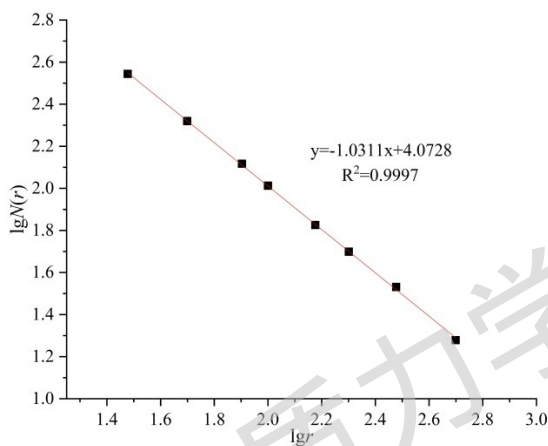
文章采用不同尺度进行分形特征研究，即区域大尺度和流域单元小尺度，试图揭示从宏观到微观自相似的递归迭代规律。不同尺度上计算方法相同，均按照不同大小的方形网格去覆盖水系及地层线等要素，各要素数据来源于中国地质调查局地质云平台 1:20 万地质图（<https://geocloud.cgs.gov.cn/>）和 1:20 万水文地质图（<https://geocloud.cgs.gov.cn/>）；计算方形网格大小分别为 30 m×30 m、50 m×50 m、80 m×80 m、100 m×100 m、150 m×150 m、200 m×200 m、300 m×300 m、500 m×500 m，通过统计分析 $\lg r$ 与 $\lg N(r)$ 之间的线性回归关系，得到各要素分维值。如对水系（高祖河）利用 ArcGIS 渔网工具将研究区划分不同大小的方形网格，再利

用叠加分析功能，统计水系跨越的网格数（表 1），经线性回归统计分析（图 3），即可得出分维值 1.0311，其余各要素分析方法亦同。

表 1 水系（高祖河）分形网格数

Table 1 Water system (Gaozu River) fractal grid number

方形网边长 r	网格数 $N(r)$	lgr	$lgN(r)$
500m	19	2.6990	1.2788
300m	34	2.4771	1.5315
200m	50	2.3010	1.6990
150m	67	2.1761	1.8261
100m	103	2.0000	2.0128
80m	131	1.9031	2.1173
50m	209	1.6990	2.3201
30m	350	1.4771	2.5441



r —网格边长； $N(r)$ —盒子数

图 3 水系（高祖河）线性回归曲线

Fig. 3 Water system (Gaozu River) linear regression curve

r —Grid spacing; $N(r)$ —Number of boxes

区域上以水系及地层线要素整体为研究对象，量化各要素空间结构的自相似性及复杂性，构建空间分析的统一框架。流域作为一个相对独立的单元，通过水流的作用与周围区域进行物质和能量交换。流域单元是水文循环与岩溶作用的空间载体，遵循补给-径流-排泄的动态平衡，具层级嵌套结构，地表水文过程与地下岩溶地质结构的时空耦合构成完整的水资源循环单元（韩行瑞和周游游，1996；蒙海花和王腊春，2010；吴乔枫等，2017）。流域单元与岩溶作用的关系表现为流域边界控制岩溶发育空间格局，水文过程作为岩溶水动力场驱动溶蚀效应。岩溶作用正是基于这样的单元而不断发展的，因此将丰溪镇中部地区划分为一定数量的流域单元，探究地层线在各单元内的分形特征及与岩溶的关系。底图采用 ALOS（Advanced Land Observing Satellite）卫星相控阵型 L 波段合成孔径雷达采集的 12.5m 分辨率数字高程模型（DEM），利用 ArcGIS 水文分析工具，将丰溪镇中部地区划分为 103 个流域单元（图 4），仍按照上述不同大小方格网去覆盖地层线要素，并统计分析 lgr 与 $lgN(r)$ 之间的线性回归关系，得到流域单元内要素分维值。

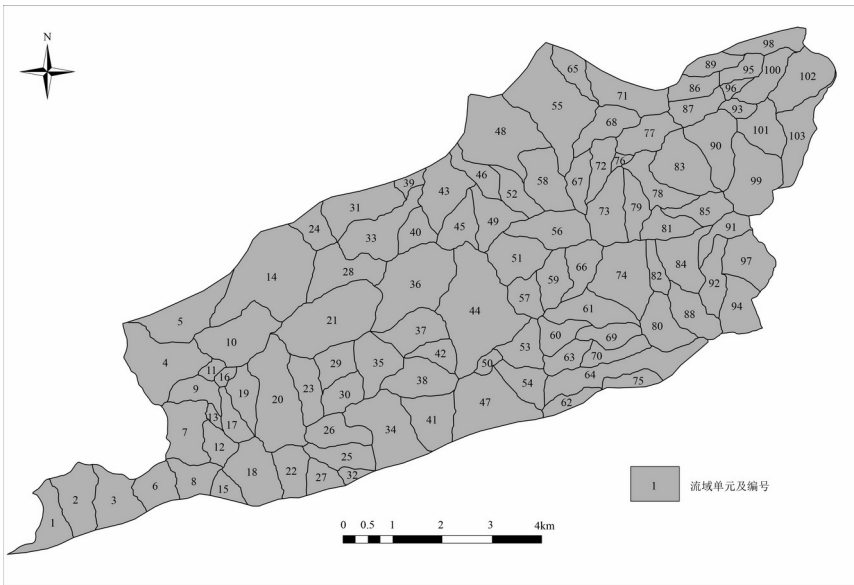


图4 流域单元分区图

Fig. 4 Map of basin unit zoning

3 区域要素分形特征

3.1 水系分形特征

树枝状的河流，包括干流及支流在内的河网体系，其本身就具有自相似性，其分维值的大小反映了水系的发育程度及流域地貌的侵蚀发育程度。区内水系属堵河水系，堵河为汉江第一大支流，而汉江为长江的第一大支流，长江流域水系分维值为 1.3292（朱晓华和蔡运龙，2003）。区内水系分维值为 0.8382~1.0473（表 2），泉河作为区内最大河流，其分维值最大，反映出其发育及侵蚀程度更大，而低于长江水系流域分维值正是随着河流级次降低分维值一般逐渐降低规律的体现。在岩溶区，地表水系的形成既有流水侵蚀作用，也有流水溶蚀作用。地表水系与地下水系存在一定程度上的映射关系，通常地表水系强发育的地区，地下水系相对弱发育，而地表水系弱发育的地区，地下水系相对强发育。若按此规律，区内地表水系分维值较低，发育程度低，那地下水系将会强发育；但事实并非如此，地下仅零星分布规模不大的管道网络系统。由此可见，逆冲推覆构造及构造运动对水系的发育具有重要影响，会改变这种映射的相对关系。区内断裂构造控制地表河流形态分布与流向，局部断裂错断导致水系错动（雷东宁等，2012），诱发水系重组；而断裂带上下盘的导水差异性及其断裂形成的裂隙网络介质塑造了地下水系的基本分布格局。更新世以来的构造运动则通过抬升作用改变了分水岭位置，引发河流袭夺（李俊涛和张毅，2007）；抬升作用也造成了侵蚀基准面下降，改变了原有的补给-排泄条件，进一步影响地下水系的发育（王增银等，1995），映射关系的异化正是两者协同作用的结果，这种关系反映了地表水系统向地下水系统的独特转化过程。就常流水系而言，岩溶区地表水系的分枝结构仍具有自相似性，且一般地表水系分维值大于地下水系分维值。如贵州喀斯特流域地表水系分维值为 1.16~1.64，而地下水系分维值为 1.11~1.27（梁虹和卢娟，1997），与之表现不同的是区内地表水系分维值普遍更低，推测地下水系分维值更甚之，故未形成大规模地下河网系统。因此，就本逆冲推覆构造区而言，地表水系分维值与地下岩溶水系统分维值并不符合呈负相关的一般规律，亦即是不遵循地表水系分维数与岩溶发育强度呈负相关，而是呈现出一种近似正相关的规律。

表2 区域水系分形特征

Table 2 Fractal characteristics of regional water systems

方形网边长 (r) /m	500	300	200	150	100	80	50	30	分维值
水系名称	网格数 $N(r)$								
高祖河	19	34	50	67	103	131	209	350	1.0311
泉河	38	72	106	143	221	287	446	739	1.0473
石甸河	8	14	22	28	42	50	85	134	0.9956
五石道河	3	4	5	6	9	11	19	30	0.8382

3.2 地层线分形特征

在岩溶地貌分形特征研究中，等高线与岩溶洼地等线状或面状形态最为常见。其具有自相似性，等高线分维值越大，岩溶发育越强烈；而岩溶洼地分维值越小，岩溶发育越强烈（王迪等，2010；高伟等，2016）。等高线与岩溶洼地的本质仍然是区域或局部可溶岩经溶蚀作用形成的空间分布不均的具有典型边界特征的溶蚀单元，因此文章仍然可以采用这种方法来研究地层线的分形特征。事实上，地层界线两侧岩性的可溶性差异是控制岩溶发育的重要因素，可溶岩与非可溶岩或质纯碳酸盐岩与不纯碳酸盐岩接触界面常形成岩溶发育的边界条件，非可溶岩或不纯碳酸盐岩往往成为限制岩溶地下水侧向运移边界或岩溶地下水的排泄边界，边界带范围具备良好的水动力条件。这种岩性界面可导致岩溶发育强度突变，形成明显的岩溶分带，是平面上研究岩溶发育程度的理想线性要素。区内覃家庙组（ C_{2qn} ）、天河板组（ C_{1t} ）、石龙洞组（ C_{1sl} ）、水井沱组（ C_{1s} ）、灯影组（ Z_2dn ）地层线分维值分别为 0.9399、0.9589、1.0475、1.0137、1.0242（表 3）。其中石龙洞组（ C_{1sl} ）地层线分维值最大，该地层为质纯灰岩，落水洞、溶洞及暗河管道等岩溶个体形态均存在，岩溶最为发育；而覃家庙组（ C_{2qn} ）地层线分维值最小，该地层为泥质白云岩，各类岩溶个体形态稀少，地表及地下岩溶相对最不发育。区内各地层岩溶发育程度与分维值大小一一对应，分维值越大，岩溶越发育，说明岩溶对地层线具有明显的增维作用；反之，分维值越小，岩溶越不发育。且质纯灰岩组分维值高于质纯白云岩组，地层线分维值对岩溶发育程度具有明显的指示意义。

表 3 区域地层线分形特征

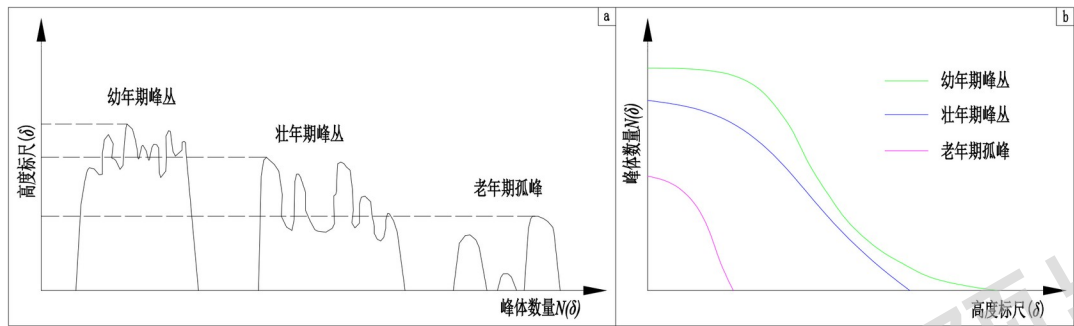
Table 3 Fractal characteristics of regional stratigraphic boundaries

地层代 号	岩溶层组	方形网边长 (r) /m	500	300	200	150	100	80	50	30	分维值	岩溶发育程度
		岩性	网格数 $N(r)$									
C_{2qn}	夹层状碳酸盐岩	泥质白云岩	10	15	22	29	43	52	83	138	0.9399	弱
C_{1t}	夹层状碳酸盐岩	灰岩	11	15	20	28	43	55	89	149	0.9589	弱
C_{1sl}	纯层碳酸盐岩	灰岩	119	222	352	472	706	882	1410	2350	1.0475	强
C_{1s}	间互状碳酸盐岩	灰岩	90	151	231	316	476	597	953	1591	1.0137	中等
Z_2dn	纯层碳酸盐岩	白云岩	43	60	93	123	184	231	366	609	1.0242	强

3.3 峰体形态特征

地表不同类型和规模的峰体形态是岩溶发育的典型外在表现形式之一，峰丛、峰林及孤峰通常分别对应于幼年期、壮年期及老年期 3 个岩溶化阶段（图 5a）。幼年期的峰丛通常成簇突起，中下部相连，峰体高度参差不齐，数量众多；壮年期的峰林成群簇生，基部微微相连，各峰体相对散开，高度参差不齐，数量较多；而老年期的孤峰为孤立的石灰岩山峰，数量少，高度显著降低。

若以不同的高度标尺(δ)统计高度超过此标尺的峰体个数 $N(\delta)$ ，并形成拟合曲线，幼年期峰体会出现“先缓再陡后缓”的曲线形式(图5b)，壮年期峰林表现出较平缓下降的曲线形式，而老年期孤峰则呈先缓后陡降的曲线形式(王迪等，2010)。区内峰体个数随着高度标尺的增大，呈“先缓再陡后缓”的曲线形式(图6)。峰体表现为幼年期峰丛地貌，表明现处于岩溶发育的早期。但区内地下仍发育规模不大的岩溶管道系统，其更可能是壮年期岩溶化的产物，或者说是区内岩溶化阶段曾很可能达到过壮年期。因更新世以来强烈的构造抬升运动，原始溶蚀夷平面基本被完全改造，在未完成一个完整的岩溶旋回基础上，，转而开始下一个岩溶旋回，而现今正处于该岩溶旋回的早期。构造运动对区内峰体形态影响较大，并影响着地表岩溶地貌形态，峰体分形特征能够横向上说明岩溶发育的当前期次，但无法解释纵向上岩溶发育的历史和期次问题。



a—岩溶化阶段与峰体形态示意图；b—岩溶化阶段峰体曲线示意图

图5 峰体演化阶段示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the peak body evolution stage

(a) Schematic diagram of karstification stages and peak morphology; (b) Schematic diagram of peak curves during karstification stages

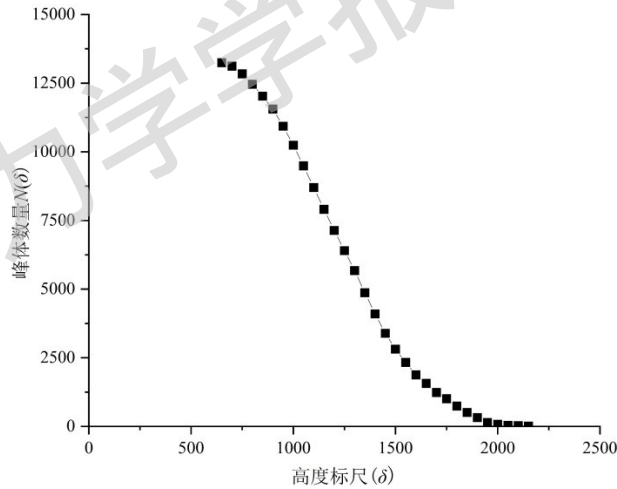


图6 丰溪镇中部地区峰体特征曲线

Fig. 6 Peak body characteristic curve for central Fengxi Town

4 流域单元分形特征

区域地层线具有明显的分形特征，而流域单元地层线是否仍具有分形特征，尚不明确。区内流域单元内地层线分维值为0.7342~1.0814(表4)，平均值为0.8843，低于区域地层线分维值平均值0.9868。但相较于区域地层线分维值，流域单元地层线分维值小于其最小值而高于其最大值，分维值分布区间范围较大，数据也较为离散。这也从侧面反映出岩溶发育的空间不均匀性，即使是同一地层在不同区段(流域单元)因构造、地貌及水文地质条件的差异而导致岩溶发育程度不尽相同。基于对区域及流域单元内各地层线的分类统计结果(表5)，流域单元内各地层线分维值均值较区域分维值已有明显降低，石龙洞组(C_1sl)、灯影组(Z_2dn)、水井

沱组（ C_{1s} ）、天河板组（ C_{1t} ）及覃家庙组（ C_{2qn} ）降维幅度分别为 14%、12.6%、15.1%、10.4%、13.1%，平均降维幅度为 13%，尤其以水井沱组（ C_{1s} ）间互状碳酸盐地层分维值降幅最大，反映出在空间上岩溶发育程度变化更为离散，这与其间互状地层结构密切相关。各地层中，石龙洞组（ C_{1sl} ）地层线分维值最大，为 0.9008，岩溶最为发育；而覃家庙组（ C_{2qn} ）地层线分维值最小，为 0.8170，岩溶相对最不发育。该结果与区域上地层线分形特征表现出了良好的一致性，再次证明了岩溶系统的自相似作用，说明流域单元内地层线仍具有分形特征。地层线在区域大尺度或局部小尺度下分维值可能存在差异，即同一地区不同大小尺度下分维值不同，但其反映的岩溶作用内涵是一致的，满足自相似规律，也是岩溶作用微观与宏观的统一。

表 4 流域单元地层线分形特征

Table 4. Fractal characteristics of stratigraphic boundaries in watershed units

单元 编号	分维值	单元 编号	分维值	单元 编号	分维值	单元 编号	分维值	单元 编号	分维值	单元 编号	分维值
1	0.8523	16	/	31	/	46	1.0115	61	0.7553	76	0.8496
2	0.8814	17	/	32	0.7664	47	0.8873	62	0.8506	77	
3	0.9111	18	0.8437	33	0.9520	48	0.8379	63	/	78	0.9170
4	/	19	/	34	0.8613	49	/	64	0.8916	79	0.8753
5	/	20	/	35	0.9220	50	/	65	/	80	0.8889
6	0.8834	21	/	36	/	51	0.8726	66	0.9040	81	1.0267
7	/	22	0.9220	37	0.9329	52	0.8814	67	0.8287	82	0.8922
8	0.9379	23	/	38	/	53	0.7356	68	0.9450	83	0.7805
9	/	24	/	39	/	54	0.8344	69	/	84	0.9225
10	0.9144	25	0.9502	40	0.8646	55	0.9127	70	/	85	0.9992
11	/	26	/	41	0.9161	56	0.9401	71	/	86	/
12	/	27	0.9174	42	/	57	0.7369	72	0.9085	87	/
13	/	28	0.8994	43	0.9149	58	0.8287	73	0.9776	88	0.8860
14	0.9825	29	0.9613	44	0.8414	59	0.7533	74	0.8836	89	/
15	0.7342	30	/	45	/	60	0.7426	75	0.8048	90	1.0814

“/”表示该单元内无地层线

表 5 区域-流域单元各地层线分形特征

Table 5. Fractal characteristics of stratigraphic boundaries in regional watershed units

级次	分形特征	地层代号				
		C_{2qn}	C_{1t}	C_{1sl}	C_{1s}	Z_2dn
流域单元	分维值	0.8170	0.8589	0.9008	0.8607	0.8954
区域单元		0.9399	0.9589	1.0475	1.0137	1.0242

5 岩溶地质分形的思考与讨论

大型逆冲推覆构造对区域地质环境的影响是显著的，构造也是控制岩溶体系的重要因素。宏观上，岩溶形态发育各异，但从岩溶最小溶蚀单位开始，再到溶孔→溶隙→溶槽→溶洞→岩溶暗河，不同级次岩溶形态具有自相似性，又具有形态特征不变即标度不变性。改变观察尺度标度（李苍松等，2007），诸如现今观测的溶洞，其必然是由一个自相似的更小溶蚀单元逐步发育而成。岩溶系统的物质结构背景具有多层次性，其由不同岩溶层组、区域构造形成总体格局，局部岩性结构并不是单一不变的，不同区段空间组合不一。构造特征也是如此，

诸如褶皱及断裂。区域褶皱及断裂中包含着许多次级褶皱和断裂，而次级断裂与褶皱又被更低级别的褶皱与断裂分割至肉眼可见的节理或至显微电镜可见的裂隙。随着观察尺度的不断缩小，总是相似重现，亦是岩溶地质分形的本质。宏观上对岩溶区水系、地层线等要素进行地质分形研究，其意义在于能够通过线性解来解决岩溶系统的非线性问题，即通过地表宏观简单线性组合要素推测地下岩溶发育情况，诸如地层线的分形特征对岩溶发育程度的指示意义。近年来，岩溶地质分形多集中于对岩溶孔隙的微观研究（李苍松等，2018；武东强等，2021；谭谣等，2024），且具有宏观向微观转变的趋势。但不管微观还是宏观，都可以尝试找到这样一个尺度，在这一尺度上岩溶的复杂性能够被分解成为一个或多个简单线性组合，通过对线性结构的研究来分析和处理岩溶系统的非线性问题。

6 结论

（1）逆冲推覆构造及构造运动对地下水系的发育具有重要影响，甚至会改变地表水系与地下水系映射的一般规律，但水系仍具有分形特征。丰溪镇中部地区地表水系分维值为 0.8382~1.0473，分维值随着河流级次降低而降低，同时地下水系分维值较地表水系分维值更低，难以形成大规模地下河网系统，仅零星分布规模不大的管道网络系统。区内地表水系分维值与地下岩溶水系统分维值并不呈现负相关的一般规律，而是呈现出一种近似正相关的规律。

（2）丰溪镇中部地区峰体个数随着高度标尺的增大，呈“先缓再陡后缓”的曲线形式。峰体表现为幼年期峰丛地貌，表明其现处于岩溶发育的早期；但区内各类岩溶个体形态更可能暗示其为壮年期岩溶化的产物。这说明构造运动对区内峰体形态影响较大，构造抬升运动将原始溶蚀夷平面改造，而现今正处于岩溶旋回的发育早期。

（3）区域上石龙洞组（ E_1sl ）地层线分维值最大，岩溶也最为发育；而覃家庙组（ E_2qn ）地层线分维值最小，岩溶最不发育。各地层岩溶发育程度与分维值大小具有一致性，分维值越大，岩溶越发育；而分维值越小，岩溶越不发育，岩溶化作用对地层线具有明显的增维作用。流域单元内地层线也具有明显的分形特征，但分维值大小较区域地层线分维值更为离散，反映出岩溶发育的空间不均匀性；且流域单元内各地层线分维值均值较区域有明显降低，平均降维幅度为 13%。其中石龙洞组（ E_1sl ）地层线分维值最大，覃家庙组（ E_2qn ）地层线分维值最小。流域单元与区域上地层线分形特征一致，也证明了岩溶系统在区域及局部的自相似作用，地层线分形特征对岩溶发育程度具有明显的指示意义。

作者贡献声明：史箫笛、姚建新负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作；史箫笛、姚建新、赵碧义参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图；史箫笛、姚丹、况丽参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: SHI Xiaodi and YAO Jianxin conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; SHI Xiaodi, YAO Jianxin, and ZHAO Biyi participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; SHI Xiaodi, YAO Dan and KUANG Li were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

CHEN L, 2009. Study of structural characteristics of Xiangfan-Guangji fault in Hubei province[J]. Petroleum Geology & Experiment, 31(2): 186-191. (in Chinese with

English abstract)

- CHENG Y S, 2010. Fractal characteristics of fractures in Jiuwandashan area and their geological significance[J]. *Geology in China*, 37(1): 127-133. (in Chinese with English abstract)
- DONG Y P, ZHA X F, FU M Q, et al., 2008. Characteristics of the Dabashan fold-thrust nappe structure at the southern margin of the Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1493-1508. (in Chinese with English abstract)
- GAO W, QI J H, XU M, et al., 2016. Influence of fractal characteristics of a surface karst landform on tunnel construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 53(2): 35-43. (in Chinese with English abstract)
- GAO Y, SU F Z, ZHOU C H, et al., 2011. Scale effects of China mainland coastline based on fractal theory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 66(3): 331-339. (in Chinese with English abstract)
- HAN X R, ZHOU Y Y, 1996. Discussion on harnessing unit drainage basin in karst mountain area[J]. *Carsologica Sinica*, 15(1-2): 11-17.
- HOU S S, HE X, MENG X S, et al., 2024. Mesostucture and strength characteristics of granite under freeze-thaw cycles based on CT scanning[J]. *Journal of Geomechanics*, 30(3): 462-472. (in Chinese with English abstract)
- HU Z X, SHEN J F, 1994. Study on fractal characteristics of karst morphology system and its mechanism[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 19(1): 102-107. (in Chinese with English abstract)
- JIANG Y L, SUN W J, KONG X, et al., 2023. Developmental characteristics and geological significance of the fault system in the Junggar-North Tianshan Basin transition zone[J]. *Chinese Journal of Geology*, 58(2): 398-411. (in Chinese with English abstract)
- LEI D N, CAI Y J, WU J C, et al., 2012. Quaternary active characteristics of Fangxian segment of Qingfeng fault zone[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 32(4): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- LI C S, 2006. The applied study on the fractal forecasting method of karst geology[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University. (in Chinese with English abstract).
- LI C S, GAO B, MEI Z R, 2007. Basic study on method of karst geology forecasting based on fractal theory[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 42(5): 542-547. (in Chinese with English abstract)
- LI C S, LIAO Y K, DING J F, 2017. Study on karst development in tunnels by hydrochemical kinetics-fractal index evaluation technology [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 54(6): 24-31, 44. (in Chinese with English abstract)
- LI C S, WU F S, ZHAO Y J, et al., 2018. Fractal and hydro-chemical characteristics of microscopic karst morphology based on dissolution experiments [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 55(2): 110-120. (in Chinese with English abstract)
- LI J T, ZHANG Y, 2007. Geological—geomorphological background of the drainage system evolution in Hubei province[J]. *Journal of University of Jinan (Science & Technology)*, 21(3): 267-271. (in Chinese with English abstract)
- LI Q, CHEN R Q, SHANG F, et al., 2025. Pore structure and fractal characteristics of shale reservoirs in Jurassic Lianggaoshan Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 47(2): 323-335. (in Chinese with English abstract)
- LI S Z, LIU C L, LIU W P, et al., 2025. Microporous structure of the Longmaxi Formation shale reservoirs in southern Sichuan Basin and its effect on adsorption capacity[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 32(2): 22-32. (in Chinese with English abstract)
- LIANG H, LU J, 1997. The fractal, entropy and geomorphological meaning of karst drainage[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 17(4): 310-315. (in Chinese with English abstract)
- MANDELBROT B B, 1975. *Les Objets Fractals: Forme, Hasard et Dimension*[M]. Paris, France: Flammarion.
- MENG H H, WANG L C, 2010. Advance in karst hydrological model[J]. *Progress in Geography*, 29(11): 1311-1318. (in Chinese with English abstract)
- QIN Y C, LIU K, 2003. Advancement of applied studies of fractal theory in geography[J]. *Progress in Geography*, 22(4): 426-436. (in Chinese with English abstract)
- SHEN W, ZHAO P D, 1998. The theory study of fractal statistical model and its application in geology[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 234-243. (in Chinese with English abstract)
- SHI X D, YAO J X, ZHAO B Y, et al., 2023. Karst development characteristics and its controlling factors in Fengxi segment of Qingfeng fault zone[J]. *Resources Environment & Engineering*, 37(5): 537-544, 577. (in Chinese with English abstract)
- TAN K X, HAO X C, DAI D G, 1998. Fractal features of fractures in China and their implication for geotectonics [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 22(1): 17-20. (in Chinese with English abstract)
- TAN Y, QI J H, XU M, et al., 2024. Application of fractal characteristics of drill hole karst geology in analyzing the degree of karst development [J]. *Geological Journal of China Universities*, 30(5): 603-612. (in Chinese with English abstract).

- WANG D, XU M, QI J H, et al., 2010. Analysis on morphologic features of the peak-cluster depression in Qiubei, Southeast Yunnan[J]. Carsologica Sinica, 29(3): 239-245. (in Chinese with English abstract)
- WANG R Z, XING L T, DENG X, et al., 2024. Karst development characteristics of aquifer medium in Jinan spring area[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 38(3): 280-287. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z Y, SHEN J F, XU R C, et al., 1995. Karst landscapes and their evolution in reaches of the Qingjiang River, western Hubei[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 20(4): 439-444. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z Y, JIAN Y B, ZHOU S D, 2014. Division of large-scale of deformation structures and main characteristics in Hubei province [J]. Resources Environment & Engineering, 28(1): 94-107. (in Chinese with English abstract)
- WEN L, WEI P F, LI X M, et al., 2020. Study on the river network, geomorphological features and tectonic activity in the Danjiangkou reservoir and its surrounding areas[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 252-262. (in Chinese with English abstract)
- WU D Q, XING L T, LAN X X, et al., 2021. Pore structure characteristics of karst water-bearing media in Jinan[J]. Carsologica Sinica, 40(4): 680-688. (in Chinese with English abstract).
- WU Q F, LIU S G, CAI Y, et al., 2017. Effect of unclosed characteristics of the basin on hydrological modeling in Karst regions[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 48(4): 457-466. (in Chinese with English abstract)
- XU M, WANG D, QI J H, et al., 2011. Study on morphological characteristics of karst landform based on the fractal theory[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(3): 328-333. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG F Y, CHEN X S, 2008. Concept of fractal and its application in structural geology field[J]. Coal Geology of China, 20(3): 16-19. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG G W, GUO A L, DONG Y P, et al., 2019. Rethinking of the Qinling orogen[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 746-768. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J R, WANG J M, ZHU Y C, et al., 2017. Application of fractal theory on pedology: a review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 48(1): 221-228. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG M C, LAN T W, JIA W D, et al., 2023. Effect of fractal geometric characteristics of fracture structure on rock burst control [J]. Coal Engineering, 55(5): 103-110. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y, WANG H Y, LI Y, et al., 2024. Fractal structural characteristics of fault structures and metallogenic prediction in Xiahe-Hezuo region of West Qinling Mountains[J]. Mineral Deposits, 43(2): 359-372. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H J, ZHANG J X, PENG H, et al., 2025. Analysis of the motion law of dangerous rock collapse in strong earthquake area considering parameter uncertainty[J]. Journal of Engineering Geology, 33(1): 224-239. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU N, LIU B, 2009. Varying regulation of epikarst developing intensity in southwest Hubei karst area[J]. Carsologica Sinica, 28(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- ZHU X H, WANG J, LU J, 2001. Some thinking about the application of fractal theory in geography[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science), 24(3): 93-98. (in Chinese with English abstract)
- ZHU X H, CAI Y L, 2003. On box dimensions of river basins of China[J]. Advances in Water Science, 14(6): 731-735. (in Chinese with English abstract)
- ZOU M Q, 2007. Fractal theory and its applications to porous media, rough surface and thermal contact conductance[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology. (in Chinese with English abstract)

附件中文参考文献

- 陈璘, 2009. 襄樊-广济断裂湖北段构造特征研究[J]. 石油实验地质, 31 (2): 186-191.
- 成永生, 2010. 九万大山地区断裂构造分形特征及其地质意义[J]. 中国地质, 37 (1): 127-133.
- 董云鹏, 查显峰, 付明庆, 等, 2008. 秦岭南缘大巴山褶皱-冲断推覆构造的特征[J]. 地质通报, 27 (9): 1493-1508.
- 高伟, 漆继红, 许模, 等, 2016. 地表岩溶地貌分形特征对隧道工程建设作用初探[J]. 现代隧道技术, 53 (2): 35-43.
- 高义, 苏奋振, 周成虎, 等, 2011. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究[J]. 地理学报, 66 (3): 331-339.

- 侯圣山, 何箫, 孟宪森, 等, 2024. 基于岩石 CT 扫描的冻融作用对花岗岩微观结构及力学强度影响研究[J]. 地质力学学报, 30 (3): 462-472.
- 胡章喜, 沈继方, 1994. 岩溶形态系统的分形特征及其机理探讨[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 19 (1): 102-107.
- 姜颜良, 孙文洁, 孔雪, 等, 2023. 准噶尔—北天山盆山过渡带断裂系统发育特征及地质意义[J]. 地质科学, 58 (2): 398-411.
- 雷东宁, 蔡永建, 吴建超, 等, 2012. 青峰断裂带房县段第四纪活动特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 32 (4): 46-50.
- 李苍松, 2006. 岩溶地质分形预报方法的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学.
- 李苍松, 高波, 梅志荣, 2007. 岩溶地质预报的分形理论应用基础研究[J]. 西南交通大学学报, 42 (5): 542-547.
- 李苍松, 廖烟开, 丁建芳, 2017. 隧道岩溶发育程度的水化学动力学-分形指数评价技术探讨[J]. 现代隧道技术, 54 (6): 24-31, 44.
- 李苍松, 吴丰收, 赵岩杰, 等, 2018. 基于溶蚀实验的微观岩溶形态分形特征和水化学动力学特征研究[J]. 现代隧道技术, 55 (2): 110-120.
- 李俊涛, 张毅, 2007. 湖北水系演化的地质地貌背景[J]. 济南大学学报 (自然科学版), 21 (3): 267-271.
- 李琦, 陈睿倩, 商斐, 等, 2025. 川东北地区侏罗系凉高山组页岩储层孔隙结构及分形特征[J]. 石油实验地质, 47 (2): 323-335.
- 李帅智, 刘成林, 刘文平, 等, 2025. 川南龙马溪组页岩储层微观孔隙结构及其对吸附能力的影响[J]. 特种油气藏, 32 (2): 22-32.
- 梁虹, 卢娟, 1997. 喀斯特流域水系分形、熵及其地貌意义[J]. 地理科学, 17 (4): 310-315.
- 蒙海花, 王腊春, 2010. 岩溶流域水文模型研究进展[J]. 地理科学进展, 29 (11): 1311-1318.
- 秦耀辰, 刘凯, 2003. 分形理论在地理学中的应用研究进展[J]. 地理科学进展, 22 (4): 426-436.
- 申维, 赵鹏大, 1998. 分形统计模型的理论研究及其在地质学中的应用[J]. 地质科学, 33 (2): 234-243.
- 史箫笛, 姚建新, 赵碧义, 等, 2023. 青峰断裂带丰溪段岩溶发育特征及控制因素研究[J]. 资源环境与工程, 37 (5): 537-544, 577.
- 谭凯旋, 郝新才, 戴塔根, 1998. 中国断裂构造的分形特征及其大地构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 22 (1): 17-20.
- 谭瑶, 漆继红, 许模, 等, 2024. 钻孔岩溶地质分形特征在岩溶发育程度分析中的应用[J]. 高校地质学报, 30 (5): 603-612.
- 王迪, 许模, 漆继红, 等, 2010. 滇东南丘北区峰丛-洼地地貌形态特征分析[J]. 中国岩溶, 29 (3): 239-245.
- 王榕臻, 邢立亭, 邓兴, 等, 2024. 济南泉域岩溶含水介质发育特征研究[J]. 济南大学学报 (自然科学版), 38 (3): 280-287.
- 王增银, 沈继方, 徐瑞春, 等, 1995. 鄂西清江流域岩溶地貌特征及演化[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 20 (4): 439-444.
- 王志元, 简玉兵, 周少东, 2014. 湖北省大型变形构造划分及主要特征[J]. 资源环境与工程, 28 (1): 94-107.
- 文力, 魏鹏飞, 李学敏, 等, 2020. 丹江口水库库区及周边地区河网形态、地貌特征及构造活动性意义[J]. 地质力学学报, 26 (2): 252-262.
- 武东强, 邢立亭, 兰晓荀, 等, 2021. 济南岩溶含水介质孔隙结构特征[J]. 中国岩溶, 40 (4): 680-688.
- 吴乔枫, 刘曙光, 蔡奕, 等, 2017. 流域非闭合特性对岩溶地区水文过程模拟的影响[J]. 水利学报, 48 (4): 457-466.
- 许模, 王迪, 漆继红, 等, 2011. 基于分形理论的喀斯特地貌形态分析[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 38 (3): 328-333.
- 张飞燕, 陈晓山, 2008. 分形概念及其在构造地质研究中的应用[J]. 中国煤炭地质, 20 (3): 16-19.
- 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等, 2019. 关于秦岭造山带[J]. 地质力学学报, 25 (5): 746-768.
- 张佳瑞, 王金满, 祝宇成, 等, 2017. 分形理论在土壤学应用中的研究进展[J]. 土壤通报, 48 (1): 221-228.
- 张满仓, 兰天伟, 贾伟东, 等, 2023. 断裂构造分形几何特征对冲击地压的控制作用研究[J]. 煤炭工程, 55 (5): 103-110.
- 张元, 王红岩, 李育, 等, 2024. 西秦岭夏河-合作地区断裂构造分形结构特征及成矿预测[J]. 矿床地质, 43 (2): 359-372.
- 赵海军, 张家祥, 彭昊, 等, 2025. 考虑参数不确定性的强震区危岩崩塌运动规律分析[J]. 工程地质学报, 33 (1): 224-239.
- 周宁, 刘波, 2009. 鄂西南岩溶地区表层岩溶带发育强度变化规律研究[J]. 中国岩溶, 28 (1): 1-6.
- 朱晓华, 王建, 陆娟, 2001. 关于地学中分形理论应用的思考[J]. 南京师大学报 (自然科学版), 24 (3): 93-98.
- 朱晓华, 蔡运龙, 2003. 中国水系的盒维数及其关系[J]. 水科学进展, 14 (6): 731-735.
- 邹明清, 2007. 分形理论的若干应用[D]. 武汉: 华中科技大学.