引用格式：饶刚，吴艳，钟雅琪，等，2025. 日本能登半岛流域地貌特征及其地震灾害指示意义[J]. 地质力学学报，31（5）：1030−1043. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025129

Citation: RAO G，WU Y，ZHONG Y Q，et al.，2025. Drainage characteristics of the Noto Peninsula, Japan, and their implications for seismic hazards[J]. Journal of Geomechanics，31（5）：1030−1043. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025129

日本能登半岛流域地貌特征及其地震灾害指示意义

饶　刚，吴　艳，钟雅琪，尹萧涵
RAO Gang，WU Yan，ZHONG Yaqi，YIN Xiaohan

西南石油大学地球科学与技术学院，四川 成都 610500
School of Geoscience and Technology, *Southwest Petroleum University*, *Chengdu* 610500, *Sichuan*, *China*

Drainage characteristics of the Noto Peninsula, Japan, and their implications for seismic hazards

Abstract: ［**Objective**］On January 1, 2024, a M_w 7.5 earthquake occurred on the Noto Peninsula in Ishikawa Prefecture, Japan, resulting in more than 200 fatalities. The seismic event triggered significant crustal deformation, tsunamis, and landslides, leading to widespread damage across the region. Historically, this area has been prone to destructive earthquakes and associated geological hazards, such as landslides. Therefore, accurately evaluating the tectonic activity of major fault zones in the region is both critically important and urgently needed. ［**Methods**］This study aims to employ quantitative morphotectonic analysis of drainage landscape to investigate the characteristics of active tectonic deformation and its implications for potential seismic hazards. Based on ASTER GDEM data with a spatial resolution of 30 meters, the drainage network within the study area was delineated. Geomorphic indices, including slope, relief, hypsometrical integral (*HI*), and normalized channel steepness index (k_{sn}), were calculated for each (sub)watershed basin. Additionally, the stability of drainage divides was assessed. Using this information, and integrating post-earthquake aerial imagery and landslide interpretation data, the influence of earthquake-induced landslides on drainage divides was analyzed. ［**Results**］Comparative analysis of topographic slope, relief, *HI*, and k_{sn} values revealed that the northern coastal region of the peninsula has undergone significant tectonic deformation, exhibiting distinct segmentation characteristics. As well, active tectonic zones were identified in the central and southern parts of the peninsula, with spatial distributions closely aligned with known surface fault zones. Earthquake-induced landslides were predominantly concentrated in areas of high uplift, along drainage divides, and on steep slopes adjacent to river channels, characterized by steep topography and elevated k_{sn} values. Some landslides even crossed the divides, thereby altering the overall morphology of the drainage basins. ［**Conclusion**］As revealed by our geomorphological analysis, the northern regions exhibiting high tectonic activity are consistent with areas that experienced significant surface uplift during the 2024 Noto earthquake. Moreover, the central and southern regions, which are characterized by ongoing active deformation, also require careful assessment of their seismic hazards. ［**Significance**］The findings of this study provide a crucial scientific basis for evaluating future seismic risk in the Noto Peninsula.

Keywords: Noto Peninsula; geomorphic indices; seismic hazards; co-seismic landslides; drainage divide

摘　要： 2024 年 1 月 1 日，日本石川县能登半岛发生了 M_w 7.5 地震，造成 200 多人死亡。强烈的地壳变形、海啸和滑坡对该地区造成了广泛破坏。历史上，该地区曾多次发生破坏性地震，并诱发滑坡等地质灾害。因此，准确评估该区域主要断裂带的构造活动性具有重要的现实意义和紧迫性。文章尝试采用流域地貌定量分析方法，探讨该地区的活动构造变形特征及其对潜在地震灾害风险的影响。基于 30 m 空间

基金项目：国家自然科学基金项目（42272271）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42272271).

第一作者：饶刚（1983— ），男，博士，研究员，从事构造地貌学、构造变形分析与模拟方向研究。Email：raogangss@126.com

收稿日期：2025−09−10；**修回日期：**2025−09−28；**录用日期：**2025−10−11；**网络出版日期：**2025−10−20；**责任编辑：**王婧

分辨率的 ASTER GDEM 数据，提取了研究区的主要流域河网，并获取了（亚）流域盆地的坡度、起伏度、面积−高程积分（*HI*）和归一化河道陡峭指数（k_{sn}）等地貌参数，同时评估了流域分水岭的稳定性。在此基础上，结合震后发布的航拍影像及地震滑坡解译数据，分析了地震滑坡对分水岭的影响。通过对比分析流域盆地的地形坡度、起伏度、*HI* 值和 k_{sn} 值发现，半岛北部沿海地区经历了显著的构造活动变形，且表现出明显的分段性特征。2024 年能登地震中 2 个地表抬升显著的区域正位于该地带。半岛中南部也识别出较强的构造活动区域，其空间分布与地表断裂带高度一致。这些断裂带的构造活动性及其潜在的地震灾害风险应引起高度重视。地震滑坡主要集中在地震高抬升区、流域分水岭及河道附近的陡坡地带，表现出高地形坡度和高 k_{sn} 值特征。部分滑坡甚至跨越分水岭，影响了流域盆地的整体形态。研究结果为进一步评估能登半岛未来潜在的地震灾害提供了重要的科学依据。

关键词：能登半岛；地貌参数；地震灾害；同震滑坡；流域分水岭

中图分类号：P931.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)05−1030−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025129

0　引言

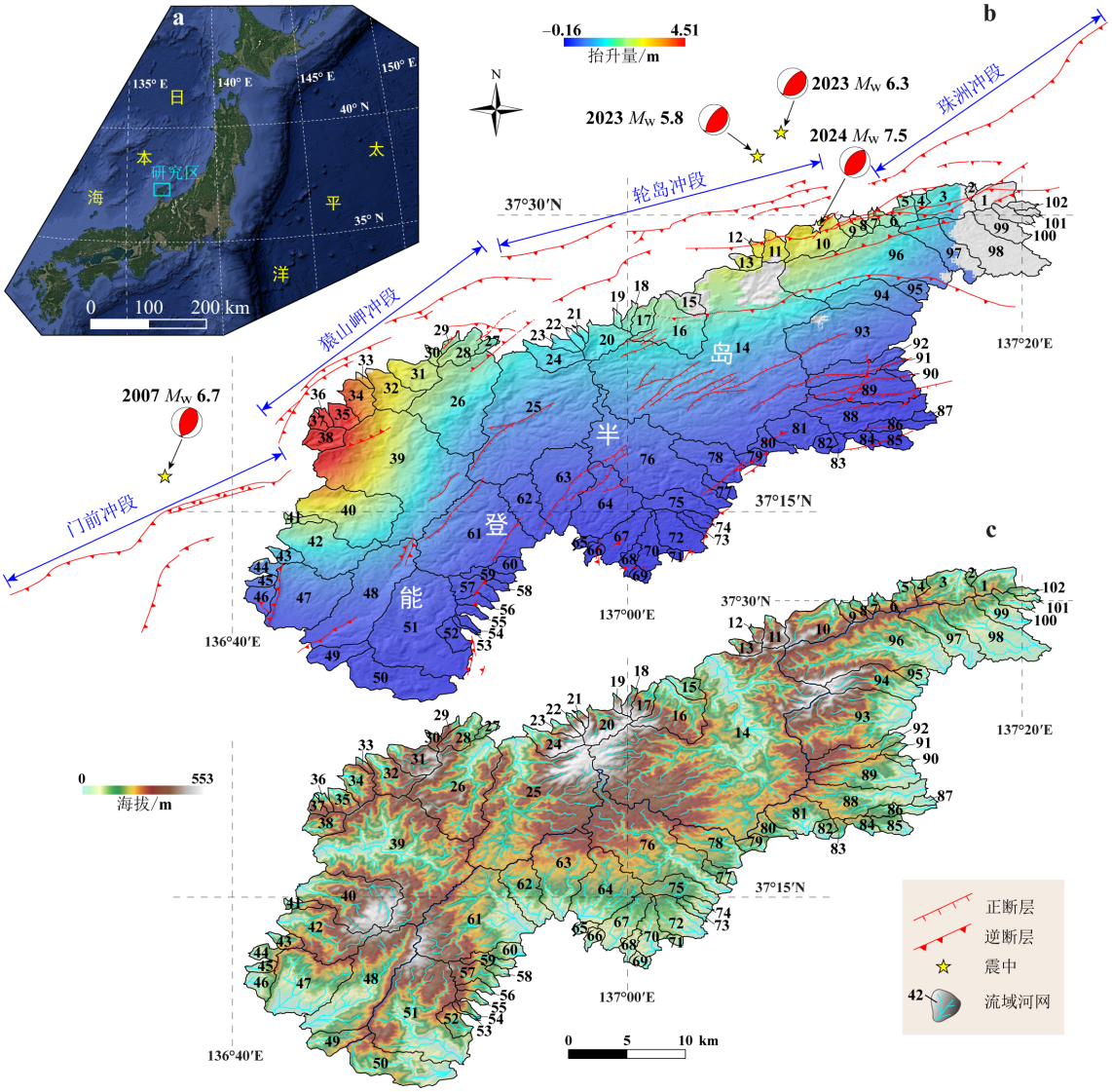
2024 年 1 月 1 日，日本石川县能登半岛发生 M_w 7.5 地震，震中位于 37.5°N、137.2°E，震源深度约为 30 km（Chen et al., 2024）。此次地震造成超过 200 人死亡，并引发了严重的经济损失。震源机制解表明该地震为逆冲型破裂，断层走向呈北东—南西向（Chen et al., 2024; 张凯智和万永革, 2024）。自 2007 年以来，能登半岛进入“密集震群”活跃期，而最新研究表明，此次地震可能与富含流体的断层带破裂有关（Ishikawa and Bai, 2024; Ma et al., 2024; Okuwaki et al., 2024; Yoshida et al., 2024; Peng et al., 2025）。受地震影响，半岛北部沿海地区形成了 2 个显著的地表抬升区域，最大隆升幅度达 5 m，并导致海岸线发生迁移（Ma et al., 2024; Yoshida et al., 2024; Yang et al., 2024）。基于 GNSS 和 SAR 观测数据的地壳形变研究表明，此次地震表现为断裂带的三段式破裂模式（Nakao et al., 2025）。近期关于此次地震事件的研究主要集中在破裂过程、海啸生成机制及同震地表变形带等方面（Fujii and Satake, 2024; Fukushima et al., 2024; Liu et al., 2024; Ma et al., 2024; Yuhi et al., 2024; Kobayashi et al., 2025; Tarumi and Yoshizawa, 2025），而对整个能登半岛活动构造的分布特征及其未来地震灾害风险的研究仍较为薄弱。地震发生后，日本国土地理院（GIAJ, 2024）陆续发布了震后航拍影像以及地震滑坡解译图（https://www.gsi.go.jp/）。目前尚不清楚地震滑坡的分布主要受哪些因素控制，是否与流域地貌特征存在相关性，这些问题仍有待进一步研究。

近年来，随着构造地貌学理论的发展及计算机运算能力的提升，基于全球覆盖、可免费获取的数字高程模型（DEM）数据开展流域地貌定量分析的方法，在评估区域构造相对活动性方面展现出高效性，并被广泛应用于相关研究（El Hamdouni et al., 2008; Bagha et al., 2014; 常直杨等, 2014; Cheng et al., 2018; 童方彤等, 2024; 徐琴如等, 2024; 李阳阳等, 2025; Rao et al., 2025; 张梨君等, 2025; Zhong et al., 2026）。文章基于 30 m 分辨率的 DEM 数据，对能登半岛开展流域地貌分析，通过对比流域盆地的地形坡度、起伏度、面积−高程积分及归一化河道陡峭指数等地貌参数，评估研究区内活动构造变形的空间分布特征。同时结合震后发布的地震滑坡空间分布及流域分水岭稳定性特征，探讨地震过程中滑坡对流域盆地形态的影响。研究结果将为评估能登半岛未来潜在的地震灾害提供新的科学依据。

1　区域地质概况

日本列岛位于四大板块交汇处，地质构造复杂且高度活跃。日本海为一个弧后盆地，形成于晚渐新世至早中新世的弧后扩张作用。日本岛弧是一个复杂的火山弧系统，主要受太平洋板块向其下方俯冲的影响，同时在其南端还受到菲律宾海板块沿琉球−台湾海沟向西俯冲的控制（吕政和邵喜彬, 2004）。能登半岛位于日本本州岛日本海沿岸（图 1a），向海洋延伸约 100 km，构成石川县北部地区，地形相对平坦（方登甲等, 2024）。该区域受欧亚板块、北美板块、太平洋板块及菲律宾海板块相互作用的影响，是多板块交汇挤压的典型区域。能登半岛周

边，特别是富山海槽西侧，沿海岸线方向发育一系列活跃的逆断层，主要分布在半岛北岸，自西向东依次为门前冲段、猿山岬冲段、轮岛冲段和珠洲冲段（图1b; Inoue and Okamura, 2010）。这些断层均为向南倾斜的逆断层，是中新世日本海扩张时期形成的正断层后期重新活动的结果。半岛内部则以正断层与逆断层为主，主要分布于中部和北部地区，走向以北东—南西向为主，断层分布并不均匀，其中次级断层呈网状排列，部分为近东西向或北西—南东向。半岛东侧活动断层较少，地形也更为平缓。能登半岛出露新生界，基底主要为飞騨带的片麻岩类和花岗岩类，分布范围较小。半岛北部区域主要由中新世火山碎屑岩和沉积岩覆盖古近纪基底岩石组成，其中基底主要由玄武岩至安山岩的喷发岩和火山碎屑岩构成，并被由闪长岩和辉长岩组成的侵入体侵入（Umeda et al., 2024）。露头地层以渐新世至中新世火山岩和沉积岩为主，局部覆盖有上新世沉积岩和更新世沉积薄层（Wang et al.,



a—日本能登半岛地理位置；b—2024年 M_W 7.5 地震引起的同震地表抬升；c—研究区流域河网分布

图1 日本能登半岛区域地质背景、地貌特征及震源机制解（活动断裂的分布引自 Inoue et al.，2010；同震地表抬升量结果据 Ma et al.，2024）

Fig. 1 Regional geological background, geomorphic features and focal mechanism solutions of the Noto Peninsula, Japan（Distribution of active faults is soured from Inoue et al., 2010; Co-seismic uplift amounts are based on Ma et al., 2024）

(a) The geographical location of the Noto Peninsula, Japan; (b) Co-seismic uplift associated with the M_w 7.5 earthquake in 2024; (c) Drainage network distribution within the study area

2025）。地震群是指在特定时空范围内密集发生、无单一主导地震的地震序列事件（Mogi, 1963）。自2020 年 11 月 30 日起，日本中部能登半岛（非火山或地热区）持续发生强烈震群活动，震源深度呈现由深部向浅部迁移的趋势，被认为与深部流体持续上涌有关。截至 2023 年 2 月，$M \geqslant 1$ 的地震事件已超过 14000 次（Nishimura et al., 2023）。在 2023 年 M_W 6.2 主震发生前，该区域经历了持续约 2.5 年的震群活动，尤其自 2022 年底起显著增强，其中最大地震为 2022 年 6 月的 M_W 5.2 事件。震群主要分布在主震断层附近，通过复杂的断层系统活动，上升的流体与加速的地震滑移共同促成了主震的发生。

2　研究数据与方法

研究区用于流域地貌分析的 30 m 分辨率的数字高程模型数据（ASTER GDEM）来源于地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/）。文章借助 ArcGIS 10.8 空间分析工具中的水文分析模块，提取了研究区主要的河网及流域盆地，并进一步利用 ArcGIS 扩展工具 CalHypso（Pérez-Peña et al., 2009），计算了各流域的面积−高程积分（*HI*）值以及对应的曲线。此外，采用基于 Matlab 软件平台开发的 RiverProAnalysis 工具（王一舟等, 2022）提取了归一化河道陡峭指数（k_{sn}）以及地貌参数 Chi（χ）值的空间分布特征。鉴于能登半岛研究区域临近海域，文中统一采用海平面（0 m）作为基准面进行计算。而流域盆地之间分水岭的移动性则通过 DivideTools 工具对比两侧河道 χ 值大小、地形高程、坡度和起伏度来判定（Forte and Whipple, 2018）。在此基础上，结合日本国土地理院发布的震后航拍影像以及同震滑坡分布图（https://www.gsi.go.jp/），与能登半岛的地形特征进行对比分析，探讨同震滑坡的主控因素及其对流域地貌演化的影响。

2.1　面积−高程积分（*HI*）

流域盆地的面积−高程积分最先由 Strahler (1952) 提出，其能够指示地形演化的发育阶段，从而间接反映构造抬升的差异空间展布。通常的计算方法为：$HI=(H_{mean}-H_{min})/(H_{max}-H_{min})$。其中，$H_{max}$、$H_{min}$ 和 H_{mean} 分别是流域内高程的最大值、最小值以及平均值。高 *HI* 值说明地形演化的时间短，地貌处于幼年期，可能受到近期活动构造变形的影响；其积分曲线往往呈现上凸型。当地形经历长时间演化，地貌进入老年期，*HI* 值较低，其积分曲线表现为下凹型。而中年期的地形则位于两者之间，*HI* 曲线表现为凹凸型或 S 型。

2.2　归一化河道陡峭指数（k_{sn}）

依据基岩河道水力侵蚀模型，河道坡度（S）与上游汇水面积（A）存在幂函数关系：$S = k_s \times A^{-\theta}$（Howard and Kerby, 1983; Whipple and Tucker, 1999）。其中，k_s 为河道陡峭指数，反映河道纵剖面的整体陡峭程度；θ 为河道纵剖面的凹度系数，反映河道纵剖面的上凹程度。为了对比不同面积大小流域的河道陡峭程度，通常会选取一个参考凹度（θ_{ref}）对其进行归一化处理（Wobus et al., 2006; Kirby and Whipple, 2012）。文中选取以往研究中的常用值 0.45 来计算研究区基岩河道的 k_{sn} 值。

裂点（knickpoint）是指河道纵剖面上分隔上下游河段、表现为坡度突然变化的不连续点，通常具有向上凸起的特征。当裂点发育时，河流系统往往受到岩性差异或构造作用力的影响，处于非稳定状态。该研究在识别裂点的过程中，综合考虑河道剖面形态及 k_{sn} 值的空间展布特征，从而分析研究区域内活动构造变形的空间格局。

2.3　分水岭稳定性的判别标志

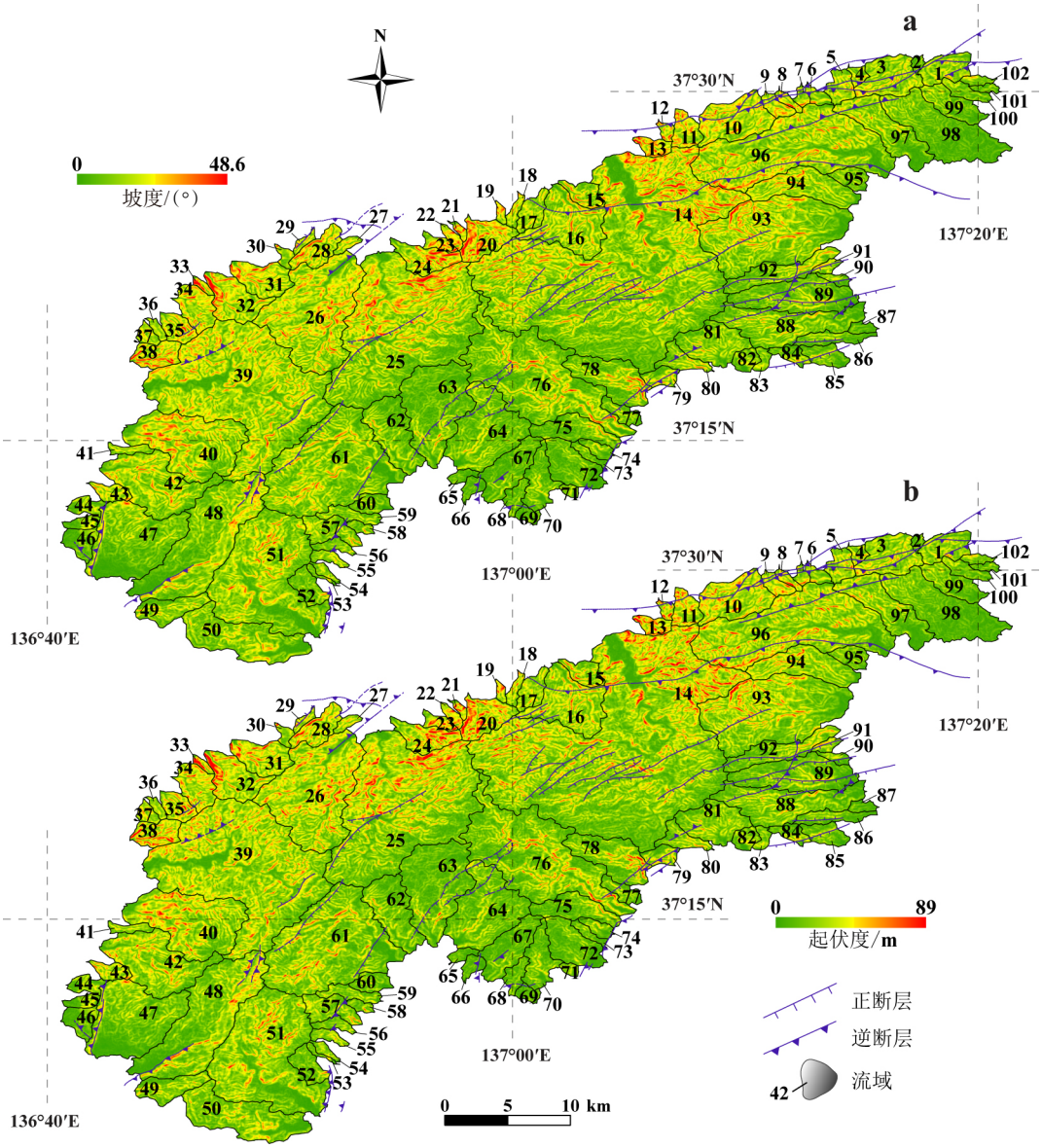
分水岭作为流域河网的重要地貌单元，其位置并非固定不变。分水岭会随着时间推移发生动态迁移，并趋向于自发演化至稳定状态，这一过程主要受到构造运动、岩性特征、气候条件等因素的影响（Willett et al., 2014; Whipple et al., 2017; He et al., 2019, 2021, 2024）。分水岭两侧的 Chi（χ）值差异常被用于判断其稳定性：当两侧 χ 值接近时，分水岭趋于稳定；反之，则可能发生从低 χ 值向高 χ 值一侧的迁移（Willett et al., 2014）。然而，在应用该方法判断分水岭迁移方向时，需满足构造、气候和岩性条件在区域上的均一性，否则将影响判断的准确性（Forte and Whipple, 2018; Wu et al., 2022）。

3　结果

3.1　地形地貌参数

基于地貌分析提取的流域河网，研究区共可划分为 102 个流域盆地（图 1b、1c）。其中，编号为 14 的流域面积最大，达 170.14 km^2（附表 1）。能登半岛的坡度范围为 0°～48.6°，陡峭地形主要集中在北

部海岸带附近。相比之下，东南海岸的坡度较为平缓，而内陆地区则以中陡坡和缓坡为主。地形起伏度的分布特征与坡度相似，在整体呈现西北高、东南低的趋势下，东南部分区域也出现了坡度和起伏度的异常高值（图2）。



a—地形坡度图；b—地形起伏度图

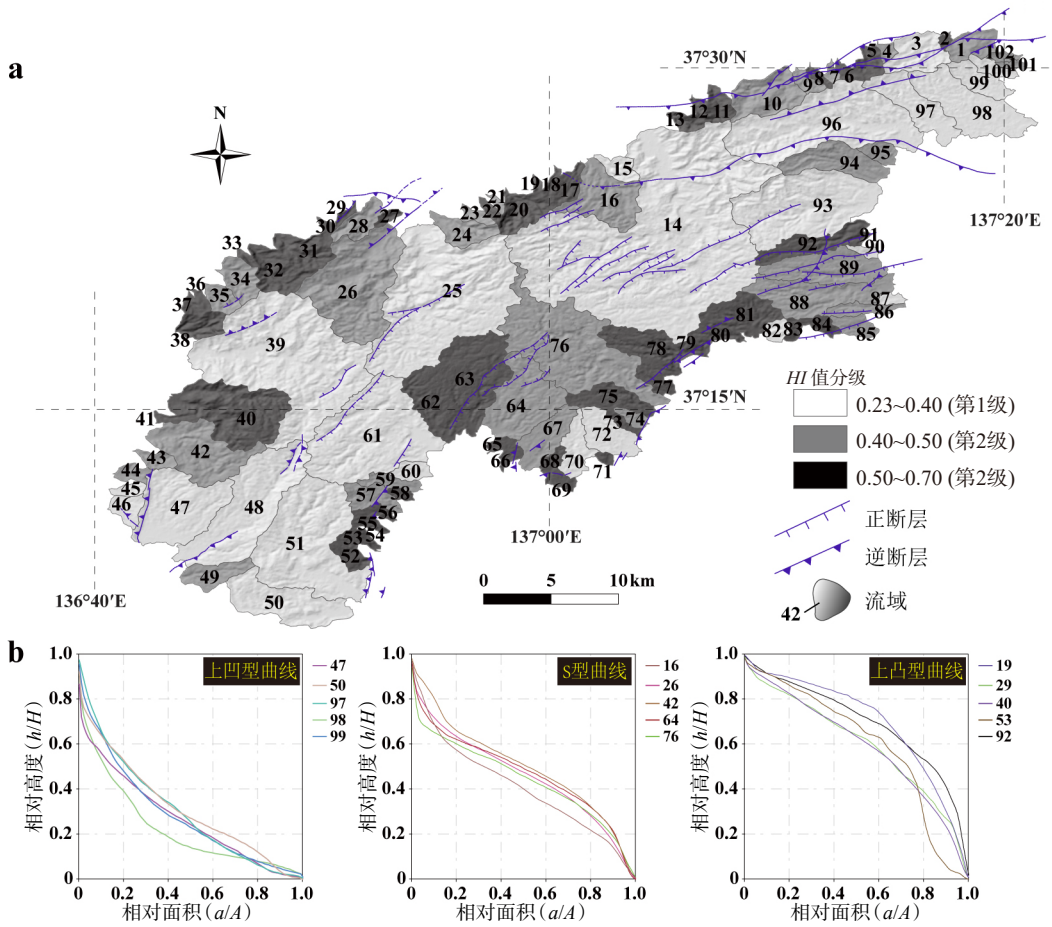
图2 日本能登半岛地形坡度和起伏平面分布图

Fig. 2 Topographic gradient and relief map of the Noto Peninsula, Japan

(a) Topographic gradient map; (b) Topographic relief map

通过计算得到的单个流域盆地*HI*值范围为0.23～0.70，平均值为0.49（附表1）。根据Strahler（1952）对*HI*值的分级标准，可将其划分为3个等级：第1级为*HI*<0.40；第2级为0.40≤*HI*≤0.50；第3级为*HI*>0.50（图3a）。从*HI*值的空间分布来看，能登半岛流域的北西侧与南东侧沿海地区表现出较高的*HI*值（第3级和第2级），且在北部沿海区域呈现出明显的分段特征（图3a）。相比之下，低值主要集中在半岛中部地区（第1级）。不同形态的面积–高程积分曲线（图3b）进一步表明，研究区地形处于不同的演化阶段，可能经历了不同的构造抬升与剥蚀历史。

从插值后的k_{sn}分布图中可以明显看出，k_{sn}的高值主要集中在半岛的北部沿海地区，并呈现出明



a—*HI* 值分级图；b—上凹型、S 型和下凹型 3 种代表性面积–高程积分曲线图

图 3　研究区流域盆地 *HI* 值分级及代表性曲线图

Fig. 3　Classification of *HI* values and representative hypsometric curves for the drainage basins within the study area

(a) Classified *HI* values; (b) Representative hypsometric curves with upwardly convex, S-shaped and upwardly concave geometries

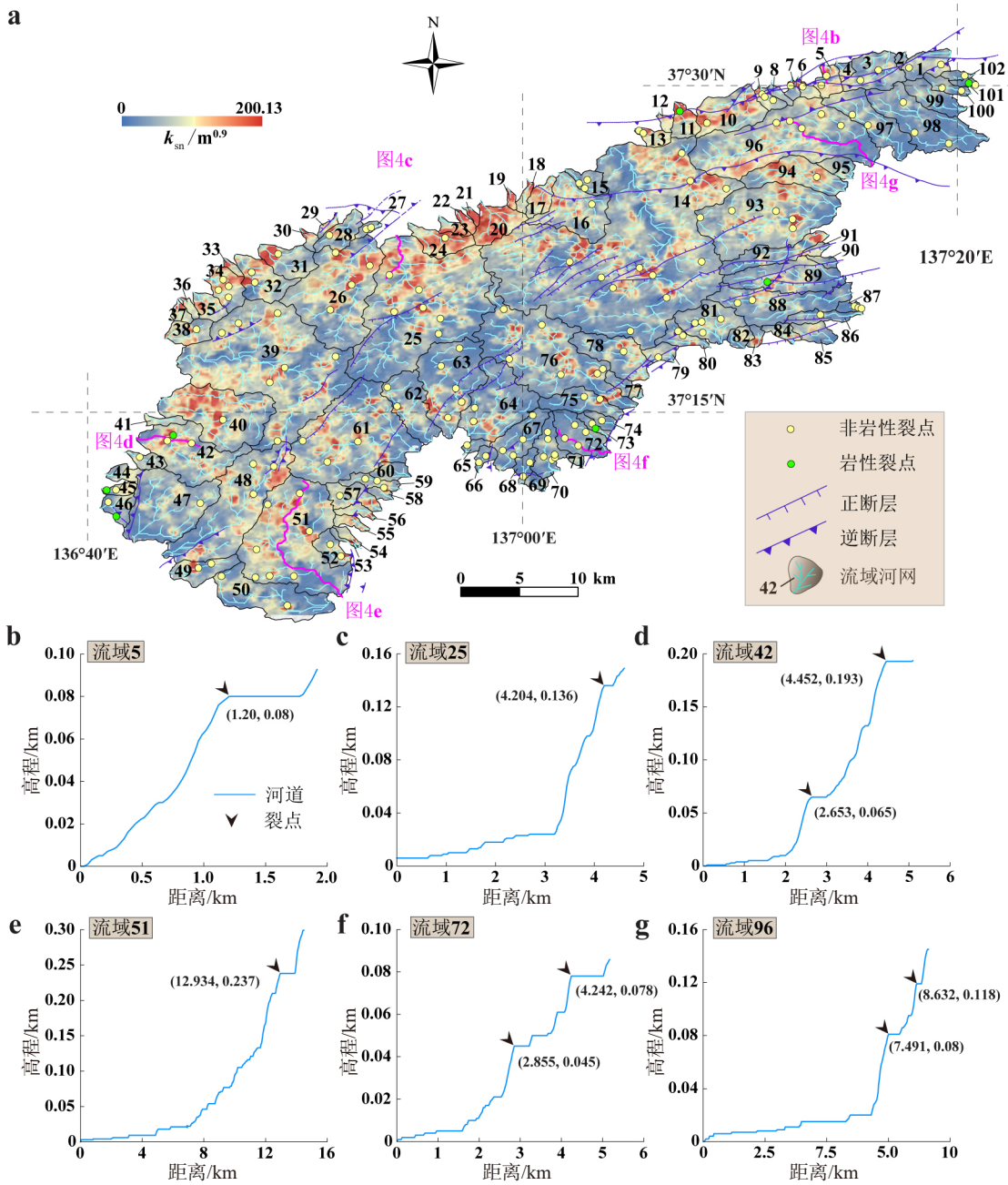
显的分段特征(图 4a)。这一现象与流域盆地的地形坡度及地形起伏特征相一致(图 2)。同时，在半岛的中南部也存在部分 k_{sn} 高值区域，但其分布较为零散。如代表性河道高程剖面所示，一个或多个裂点可以被清晰识别出来(图 4b—4g)。为有效区分构造裂点与岩性裂点，文章结合研究区岩性分布图进行综合判别。结果表明，研究区主要河道共识别出 170 个裂点，其中 7 个为岩性裂点，其余均为非岩性裂点。从整个研究区域来看，裂点在各流域盆地中的广泛发育表明当前的流域河网仍处于瞬态调整阶段。

3.2　同震滑坡分布特征

通过对比日本国土地理院发布的 2024 年能登半岛地震的同震滑坡数据(https://www.gsi.go.jp/)与既往研究所绘制的同震抬升量分布图(据 Ma et al., 2024 修改)可以发现，大多数地震滑坡集中分布在半岛北部沿海的高抬升区域(图 5a)。该区域同时也是地形坡度较大(图 5b)和高 k_{sn} 值集中分布的区域(图 5c)。与此同时，尽管半岛中南部的滑坡分布较为零散，但其仍表现出与地形坡度及 k_{sn} 值的显著相关性。通过航拍影像解译得到的代表性地震滑坡显示，其位置分别位于研究区最大的第 14 号流域及其相邻流域的分水岭附近(图 6)。

3.3　分水岭稳定性

根据各流域盆地内河道 χ 值的分布特征(图 7)，研究区内的主要分水岭普遍表现出不稳定性，尤其是贯穿整个研究区的主分水岭。在半岛东北部(第 1 号至第 10 号流域附近)，当前主分水岭更靠近北海岸线，呈现出明显的不对称性。较高的 χ 值主要集中于主分水岭的南侧，表明其具有向南东方向迁移的趋势。相比之下，中部主分水岭受面积最大的第 14 号流域影响，位置更靠近南海岸线。然而，其



a—k_{sn} 插值与裂点空间分布图；b—g 代表性河道剖面及裂点示意图

图 4 k_{sn} 分布图及代表性河道剖面上识别的裂点

Fig. 4 The k_{sn} map and knickpoints identified from the representative river long-profiles

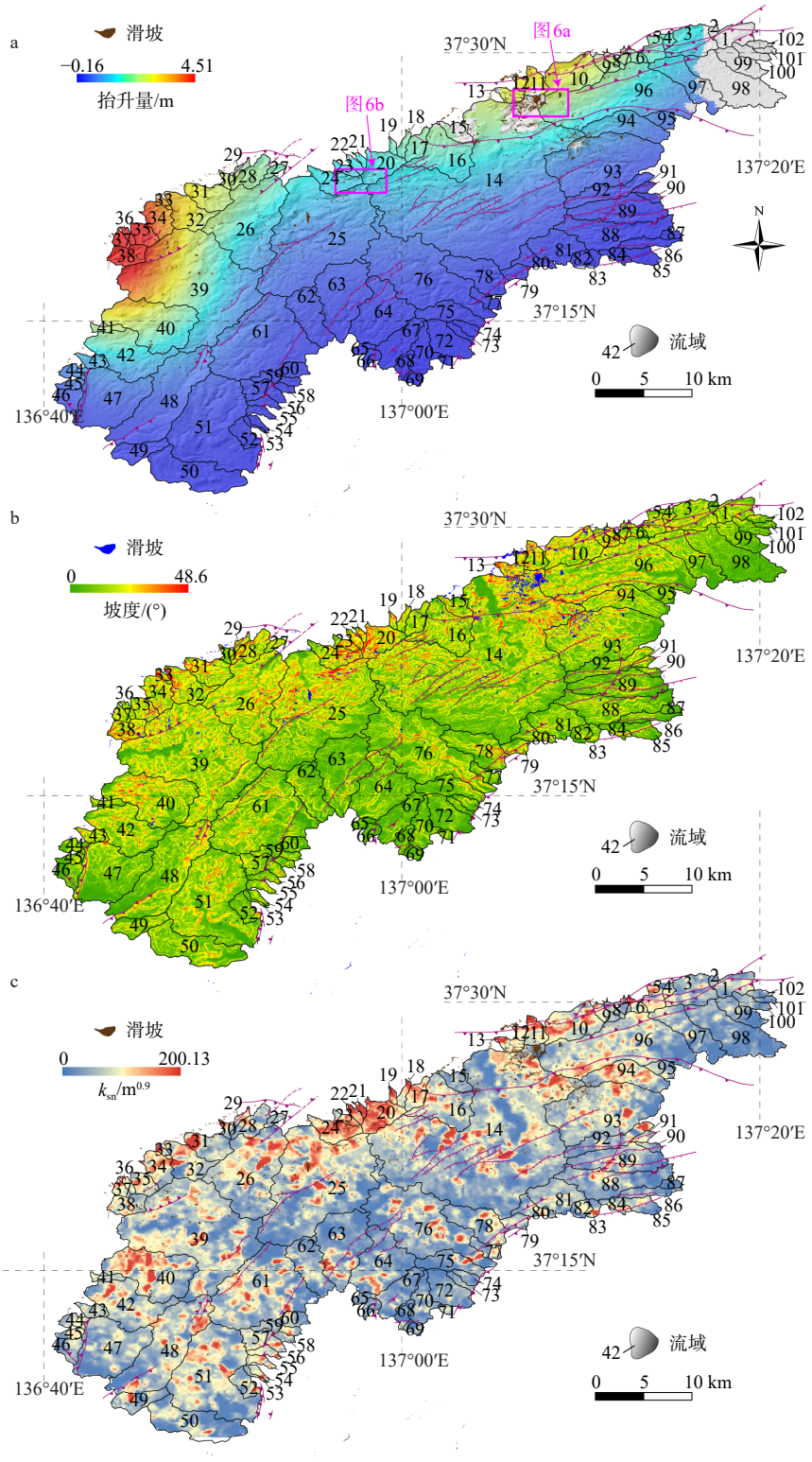
(a) The interpolated k_{sn} map with identified knickpoints; (b–g) Representative river long-profiles exhibiting knickpoints

两侧 χ 值的显著差异表明主分水岭未来可能向北迁移。在半岛南部，主分水岭呈蜿蜒状分布，迁移趋势也存在差异。例如，在第 39 号和第 25 号流域附近的主分水岭倾向于向北迁移，而在更南端的第 48 号和第 49 号流域附近，主分水岭则表现出向相反方向迁移的趋势。与此同时，其他大多数流域盆地之间的分水岭也显示出一定程度的迁移性。

4 讨论

4.1 能登半岛活动构造变形特征及其对地震灾害的启示

该研究获得的地形坡度与起伏度（图 2）以及 *HI* 和 k_{sn} 等地貌参数（图 3，图 4）的分布特征表明，能登半岛的构造活动性在空间上具有显著的差异

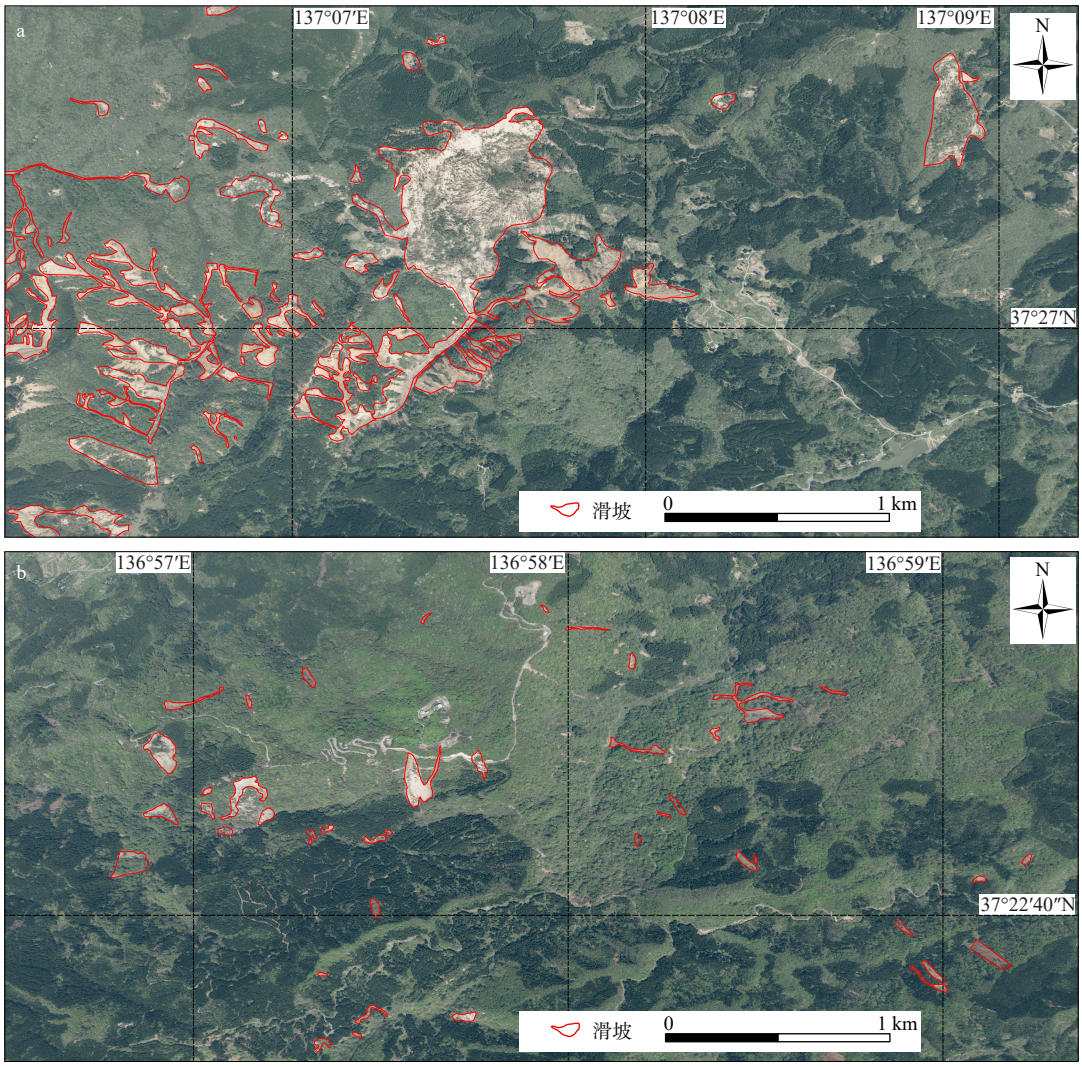


a—地震滑坡分布特征和地表抬升样式；b—地震滑坡与地形坡度；c—地震滑坡与插值的 k_{sn}

图 5　地震滑坡分布特征和抬升样式及其与地形因子的对比

Fig. 5　Characteristics of the co-seismic landslide distribution and uplift patterns, and their correlation with topographic metrics

(a) Co-seismic landslide distribution and uplift patterns; (b) Distribution of co-seismic landslides and slope gradient; (c) Distribution of co-seismic landsides and interpolated k_{sn} values



a—流域14内主要滑坡分布图；b—流域24内主要滑坡分布图

图6 航拍影像解译得到的代表性地震滑坡（位置见图6a）

Fig. 6 Representative landslides identified through the analysis of aerial images (The locations are shown in Fig. 6a)

(a) Co-seismic landslides within the drainage basin 14; (b) Co-seismic landslides within the drainage basin 24

性。具体而言，北部海岸带集中分布着较高的地形因子和流域地貌参数，显示出强烈的构造变形特征。该区域的地表亦存在活动断层迹线，并表现出分段变形的特征。这一构造活动的空间分布特征得到了2024年1月1日能登地震的进一步佐证（Ma et al., 2024）。地震过程中，海域逆冲断层的多段同时破裂，导致该地区形成了至少2个显著的抬升区域（图1b）。同时，受此次地震事件影响，在流域分水岭及河道两侧坡度较陡的区域，发生了大量地震诱发的滑坡灾害（图5—图7）。

与此同时，半岛南部地区识别出的高*HI*值（图3b）以及相对零散分布的高k_{sn}值（图4）与现今地表活动断层的走向基本一致，反映出一定的构造活动特征。此外，在第13号和第25号流域内部断裂带附近曾发生多起地震诱发滑坡事件（图5）。然而，目前的观测尚无法确认2024年此次事件中半岛内陆断层是否发生了显著的地震滑移。已有研究表明，同震地表破裂及活动断层所形成的地形陡坎，可能直接或间接影响滑坡灾害的空间分布格局（Ren and Lin, 2010; Ren et al., 2014; Rao et al., 2017）。一方面，当活动断层引发地震时，强烈的地震动常直接诱发同震滑坡；另一方面，断层长期累积滑移所形成的地表陡坎地带，因地形陡峭、岩土体破裂发育，亦成为滑坡易发区域。因此，能登半岛中南部地区广泛分布的地表断裂带不仅具有构造活动性，也提示该区域存在潜在的地震灾害风险，亟需引起重视，并开展系统深入的科学研究。

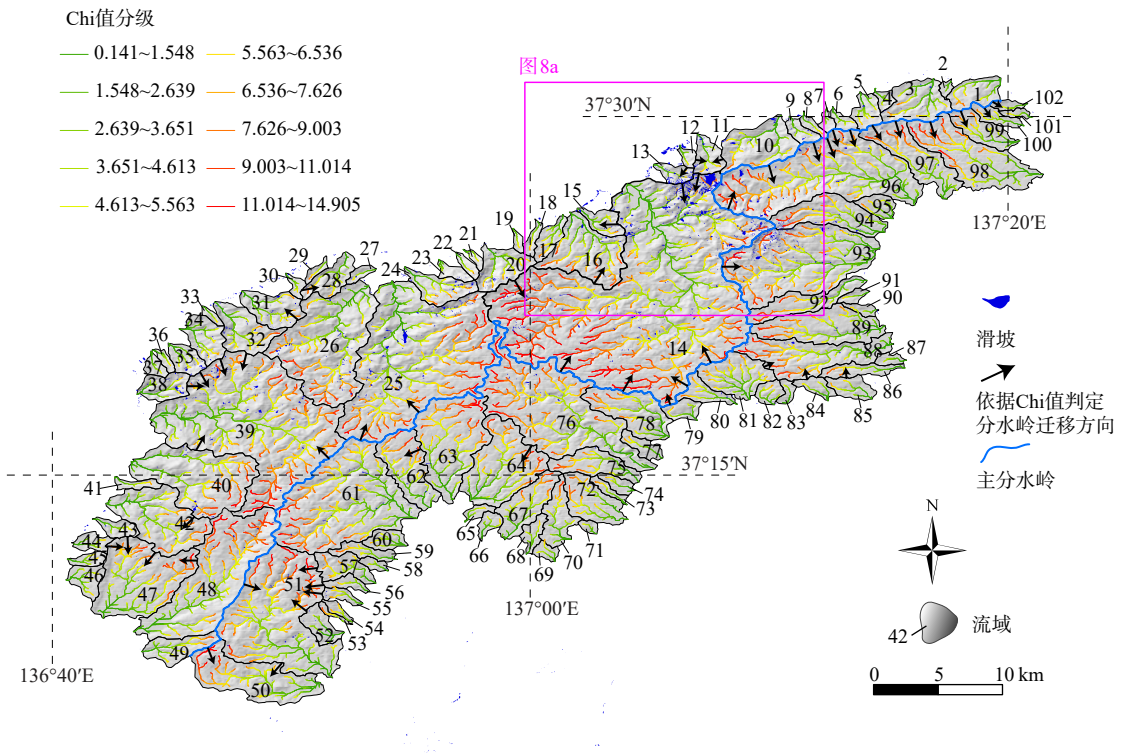
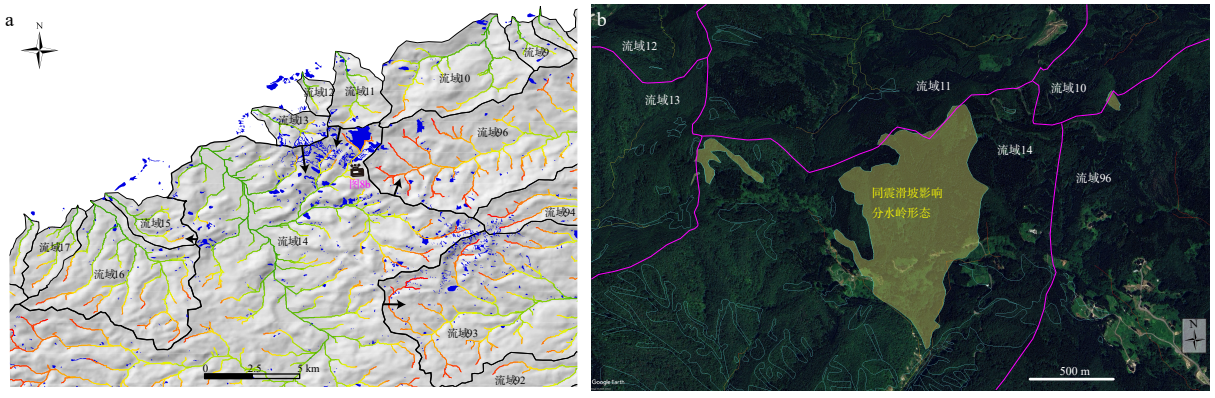


图 7　基于 Chi 值推断的主分水岭迁移方向

Fig. 7　The migration direction of the main drainage divide predicted by χ values

4.2　地震滑坡对流域分水岭的影响

众所周知，流域盆地的形态并非固定不变，而是受到构造运动、降雨强度及岩性差异等多种因素的影响，常通过分水岭迁移、河流袭夺等方式进行动态调整，最终趋向于新的稳定状态（如 Bishop, 1995; Willett et al., 2014; He et al., 2019, 2021, 2024; Yang et al., 2020; Shi et al., 2021; Zhong et al., 2026）。其中，分水岭的迁移方向通常可通过对比两侧的 χ 值、坡度及地形起伏度等地形因子进行判断。然而，诸如地震或强台风等极端事件引发的滑坡也可能导致分水岭位置发生显著变化（Dahlquist et al., 2018）。2024 年能登地震后发布的震后航拍影像及地震滑坡分布图，为研究地震滑坡如何影响流域分水岭提供了重要实例。研究区最大的第 14 号流域分水岭附近发生了大量地震滑坡（图 8a）。其中，该次地震中最大的滑坡（面积为 0.42 km^2）甚至跨越了



a—地震滑坡分布情况以及 Chi 值预测的分水岭迁移方向；b—同震滑坡跨过流域分水岭（底图为谷歌影像）

图 8　第 14 号流域分水岭附近的同震滑坡分布

Fig. 8　Distribution of co-seismic landslides near the divide of the drainage No. 14

(a) Distribution of co-seismic landslides and the divide migration direction predicted by χ values; (b) Co-seismic landslides crossing the drainage divide (Base map derived from Google Earth imagery)

地震前的分水岭，导致其向第11号流域方向迁移（图8b）。然而，若依据χ值和地形因子判断分水岭的稳定性，则会得出截然不同的结论（图9）。从分水岭两侧的χ值来看，第14号流域明显高于第11号流域，指示分水岭具有向南迁移的趋势。尽管南北两侧的海拔高程相近，但南部的地形起伏度更高，坡度整体也更大，表明分水岭有向北迁移的趋势。此外，第14号流域的面积显著大于其他流域，可能经历了复杂的流域重组过程。地表侵蚀速率还可能受到局部岩性差异和构造变形等因素的影响。从地震滑坡的空间分布来看，其主要受地形坡度和起伏度控制（图5），反映了短期内的流域调整过程。为了更准确地揭示流域调整的时间和方式，在形貌学参数对比分析的基础上，还需结合河流袭夺所形成的盆地形态特征，以及指示物源变化的沉积学证据（Yang et al., 2020; Fan et al., 2021; Dal Pai et al., 2023）。

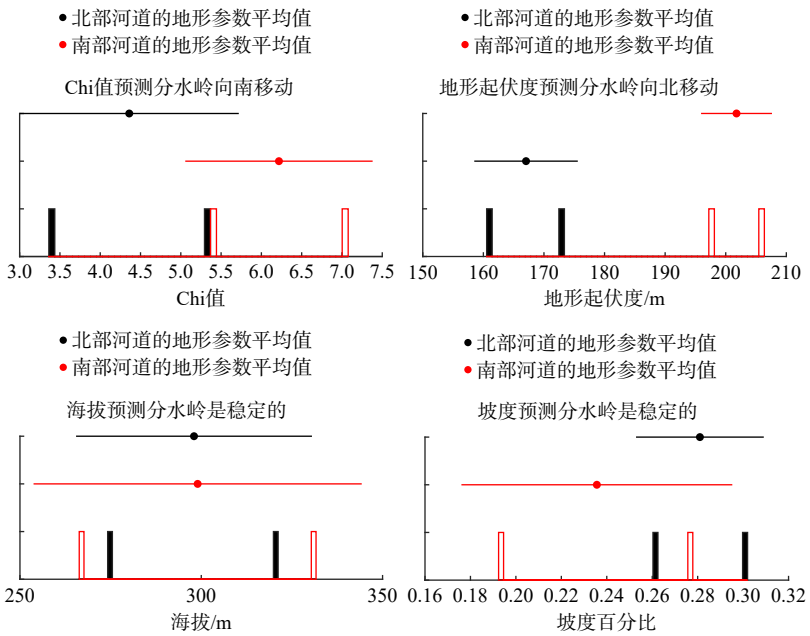


图9 第14号（北部）和第11号（南部）流域之间的分水岭迁移方向预测结果

Fig. 9 The predicted migration direction of the drainage divide between basins 11 and 14 in the north and south, respectively

5 结论

（1）流域盆地的地形坡度、起伏度、*HI*和k_{sn}等地貌参数表明，半岛北部沿海地区经历了显著的活动构造变形，并呈现出明显的分段性特征。2024年能登地震中2个地表抬升显著的区域恰好分布于该地带，进一步验证了流域地貌定量分析方法在识别构造活动区方面的有效性。此外，半岛中南部也识别出较强的构造活动区域，其空间分布与地表断裂带具有良好的一致性。这些断裂带的现今构造活动性及其潜在地震灾害风险应引起高度重视。

（2）结合震后公开发布的航拍影像及其解译结果，地震滑坡主要集中在同震高抬升区、流域盆地的分水岭及河道附近的陡坡地带，表现为高地形坡度和高k_{sn}值特征。部分滑坡甚至跨越分水岭，对流域盆地形态产生影响。当χ值与Gilbert参数在判断分水岭稳定性方面出现不一致时，应进一步结合流域盆地的地貌特征、沉积物源变化以及局部构造发育情况进行综合分析。

附加材料：附表由作者提供，数据真实性由作者负责，在线查看网址：https://journal.geomech.ac.cn/cn/article/doi/10.12090/j.issn.1006-6616.2025129

References

BAGHA N, ARIAN M, GHORASHI M, et al., 2014. Evaluation of relative tectonic activity in the Tehran basin, central Alborz, northern Iran[J]. Geomorphology, 213: 66-87.

BISHOP P, 1995. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion[J]. Progress in Physical Geography, 19(4): 449-473.

CHANG Z Y, WANG J, BAI S B, et al., 2014. Appraisal of active tectonic in Bailongjiang basin based on DEM data[J]. Quaternary Sciences, 34(2):

292-301. (in Chinese with English abstract)

CHEN G Q, WU Y Q, XIA M Y, et al., 2024. Focal mechanics and disaster characteristics of the 2024 *M* 7.6 Noto Peninsula Earthquake, Japan[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 18(9): 1378-1387.

CHENG Y L, HE C Q, RAO G, et al., 2018. Geomorphological and structural characterization of the southern Weihe Graben, central China: implications for fault segmentation[J]. Tectonophysics, 722: 11-24.

DAHLQUIST M P, WEST A J, LI G, 2018. Landslide-driven drainage divide migration[J]. Geology, 46(5): 403-406.

DAL PAI M O, SALGADO A A R, DE SORDI M V, et al., 2023. Comparing morphological investigation with χ index and gilbert metrics for analysis of drainage rearrangement and divide migration in inland plateaus[J]. Geomorphology, 423: 108554.

EL HAMDOUNI R, IRIGARAY C, FERNÁNDEZ T, et al, 2008. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (southern Spain)[J]. Geomorphology, 96(1-2): 150-173.

FAN N N, KONG P, ROBL J C, et al., 2021. Timing of river capture in major Yangtze River tributaries: insights from sediment provenance and morphometric indices[J]. Geomorphology, 392: 107915.

FANG D J, SUN W Y, ZHOU Y, et al. , 2024. Characteristics statistical analysis for records of Mw7.5 earthquake occurred at Noto Peninsula in Japan on January 1, 2024[J]. Journal of Vibration and Shock, 43(23): 155-163, 185. (in Chinese with English abstract)

FORTE A M, WHIPPLE K X, 2018. Criteria and tools for determining drainage divide stability[J]. Earth and Planetary Science Letters, 493: 102-117.

FUJII Y, SATAKE K, 2024. Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (M_{JMA} 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data[J]. Earth, Planets and Space, 76(1): 44.

FUKUSHIMA Y, ISHIMURA D, TAKAHASHI N, et al., 2024. Landscape changes caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake in Japan[J]. Science Advances, 10(49): eadp9193.

Geospatial Information Authority of Japan, 2024. Information regarding the 2024 Noto Peninsula earthquake[EB/OL]. [2024-05-08]. https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html. (in Japanese)

HE C Q, RAO G, YANG R, et al., 2019. Divide migration in response to asymmetric uplift: insights from the Wula Shan horst, North China[J]. Geomorphology, 339: 44-57.

HE C Q, YANG C J, TUROWSKI J M, et al., 2021. Constraining tectonic uplift and advection from the main drainage divide of a mountain belt[J]. Nature Communications, 12(1): 544.

HE C Q, BRAUN J, TANG H, et al., 2024. Drainage divide migration and implications for climate and biodiversity[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 5(3): 177-192.

HOWARD A D, KERBY G, 1983. Channel changes in badlands[J]. Geological Society of America Bulletin, 94(6): 739-752.

INOUE T, OKAMURA Y, 2010. Explanatory notes of 1: 200, 000 marine geological map around the northern part of Noto peninsula[R]. Tsukuba: Geological Survey of Japan, AIST. (in Japanese)

INOUE T, OZAKI M, OKAMURA Y, 2010. 1: 200, 000 Seamless geological map of the northern part of Noto Peninsula[EB/OL]. https://www.gsj.jp/data/coastal-geology/GSJ_DGM_S1_2010_03_a.pdf. (in Japanese)

ISHIKAWA Y, BAI L, 2024. The 2024 M_j 7.6 Noto Peninsula, Japan earthquake caused by the fluid flow in the crust[J]. Earthquake Research Advances, 4(3): 100292.

KIRBY E, WHIPPLE K X, 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes[J]. Journal of Structural Geology, 44: 54-75.

KOBAYASHI H, WATANABE T, KOKETSU K, 2025. Rupture process of the 2024 Noto Peninsula earthquake inferred from strong motion, teleseismic, and geodetic data[J]. Earth, Planets and Space, 77: 104.

LI Y Y, YANG R, XU C C, 2025. Analysis of morphological variability on the southeastern Tibetan Plateau and its causes: a case study of the Yajiang area[J]. Quaternary Sciences, 45(1): 117-131. (in Chinese with English abstract)

LIU C L, BAI Y F, LAY T, et al., 2024. Shallow crustal rupture in a major M_w 7.5 earthquake above a deep crustal seismic swarm along the Noto Peninsula in western Japan[J]. Earth and Planetary Science Letters, 648: 119107.

LÜ Z, SHAO X B, 2004. Research on the diving plate shape characteristic of global diving belt[J]. Seismological Research of Northeast China, 20(3): 17-25. (in Chinese with English abstract)

MA Z F, ZENG H Y, LUO H P, et al., 2024. Slow rupture in a fluid-rich fault zone initiated the 2024 M_w 7.5 Noto earthquake[J]. Science, 385(6711): 866-871.

MOGI K, 1963. Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper)[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 41: 615-658.

NAKAO K, ICHIMURA T, MUNEKANE H, et al., 2025. Simultaneous Bayesian estimation of multisegment fault geometry and complex slip distribution: application to the 2024 Noto Peninsula earthquake[J]. Geophysical Journal International, 242(2): ggaf231.

NISHIMURA T, HIRAMATSU Y, OHTA Y, 2023. Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan[J]. Scientific Reports, 13(1): 8381.

OKUWAKI R, YAGI Y, MURAKAMI A, et al., 2024. A multiplex rupture sequence under complex fault network due to preceding earthquake swarms during the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula, Japan, Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 51(11): e2024GL109224.

PENG Z G, LEI X L, WANG Q Y, et al., 2025. The evolution process between the earthquake swarm beneath the Noto Peninsula, Central Japan and the 2024 *M* 7.6 Noto Hanto earthquake sequence[J]. Earthquake Research Advances, 5(1): 100332.

PÉREZ-PEÑA J V, AZAÑÓN J M, AZOR A, 2009. CalHypso: an ArcGIS extension to calculate hypsometric curves and their statistical moments. Applications to drainage basin analysis in SE Spain[J]. Computers & Geosciences, 35(6): 1214-1223.

RAO G, CHENG Y L, LIN A M, et al., 2017. Relationship between land-

slides and active normal faulting in the epicentral area of the AD 1556 M～8.5 Huaxian Earthquake, SE Weihe Graben (Central China)[J]. Journal of Earth Science, 28(3): 545-554.

RAO G, ZHONG Y Q, YIN X H, 2025. Geomorphological evidence for superimposed deformation in the southern Sichuan Basin, SW China: implications for seismic hazards[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 50(9): e70120.

REN Z K, LIN A M, 2010. Co-seismic landslides induced by the 2008 Wenchuan magnitude 8.0 Earthquake, as revealed by ALOS PRISM and AVNIR2 imagery data[J]. International Journal of Remote Sensing, 31(13): 3479-3493.

REN Z K, ZHANG Z Q, DAI F C, et al., 2014. Topographic changes due to the 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake as revealed by the differential DEM method[J]. Geomorphology, 217: 122-130.

SHI F, TAN X B, ZHOU C, et al., 2021. Impact of asymmetric uplift on mountain asymmetry: analytical solution, numerical modeling, and natural examples[J]. Geomorphology, 389: 107862.

STRAHLER A N, 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography[J]. GSA Bulletin, 63(11): 1117-1142.

TARUMI K, YOSHIZAWA K, 2025. Frequency-dependent seismic radiation process of the 2024 Noto Peninsula earthquake from teleseismic P-wave back-projection[J]. Earth and Planetary Science Letters, 666: 119509.

TONG F T, DONG Y P, LIU Y, et al., 2024. Migration characteristics of the watershed between Nanpan River and Red River based on morphotectonics[J]. Chinese Journal of Geology, 59(2): 535-548. (in Chinese with English abstract)

UMEDA K, YAMAZAKI Y, SUMINO H, 2024. Geochemical signature of deep fluids triggering earthquake swarm in the Noto Peninsula, Central Japan[J]. Geophysical Research Letters, 51(13): e2024GL108581.

WANG F W, LI R, ZHANG S, et al., 2025. Characteristics and controlling factors of landslides triggered by the 2024 Noto Peninsula Earthquake[J]. Nat Hazards, 121(16): 18551-18572.

WANG Y Z, ZHENG D W, ZHANG H P, 2022. The methods and program implementation for river longitudinal profile analysis: RiverProAnalysis, a set of open-source functions based on the Matlab platform[J]. Science China Earth Sciences, 65(9): 1788-1809.

WHIPPLE K X, TUCKER G E, 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 104(B8): 17661-17674.

WHIPPLE K X, FORTE A M, DIBIASE R A, et al., 2017. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: implications for the role of divide mobility in landscape evolution[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 122(1): 248-273.

WILLETT S D, MCCOY S W, PERRON J T, et al., 2014. Dynamic reorganization of river basins[J]. Science, 343(6175): 1248765.

WOBUS C, WHIPPLE K X, KIRBY E, et al. , 2006. Tectonics from topography: procedures, promise, and pitfalls[M]//WILLETT S D, HOVIUS N, BRANDON M T, et al. Tectonics, climate, and landscape evolution. Boulder: Geological Society of America: 55-74.

WU Y P, YANG R, HE C Q, et al., 2022. Caution on determining divide migration from cross-divide contrast in χ[J]. Geological Journal, 57(10): 4090-4098.

XU Q R, DONG Y P, XIE Z P, et al., 2024. Tectonic and geomorphological characteristics of Laoyingshan in the eastern Sichuan-Yunnan block: insights into the uplift and rotation of the blocks[J]. Journal of Geomechanics, 30(4): 535-546. (in Chinese with English abstract)

YANG R, SUHAIL H A, GOURBET L, et al., 2020. Early Pleistocene drainage pattern changes in Eastern Tibet: constraints from provenance analysis, thermochronometry, and numerical modeling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 531: 115955.

YANG S Y, SANG C F, HU Y, et al., 2024. Coseismic and early postseismic deformation of the 2024 Mw7.45 Noto Peninsula earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 51(11): e2024GL108843.

YOSHIDA K, TAKAGI R, FUKUSHIMA Y, et al., 2024. Role of a hidden fault in the early process of the 2024 M_w7.5 Noto Peninsula earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 51(16): e2024GL110993.

YUHI M, UMEDA S, ARITA M, et al., 2024. Dataset of post-event survey of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Tsunami in Japan[J]. Scientific Data, 11(1): 786.

ZHANG K Z, WAN Y G, 2024. Inversion of rupture process of the Japan M_W7.6 earthquake on January 1, 2024[J]. Acta Seismologica Sinica, 46: 1-18. (in Chinese with English abstract)

ZHANG L J, YUAN D Y, LI H Q, et al., 2025. Tectonic geomorphological evidence of late Quaternary segmented activity along the northern margin fault of Lajishan[J]. Journal of Geomechanics, 31(3): 411-426. (in Chinese with English abstract)

ZHONG Y Q, RAO G, YIN X H, et al., 2026. Drainage response to superimposed deformation of the Weiyuan anticline in the southwestern Sichuan Basin, China[J]. Journal of the Geological Society, 183(1): jgs2025091.

附中文参考文献

常直杨，王建，白世彪，等，2014. 基于DEM的白龙江流域构造活动定量分析[J]. 第四纪研究，34(2)：292-301.

方登甲，孙纬宇，周宇，等，2024. 2024年1月1日日本Mw7.5级能登半岛地震记录特征统计分析[J]. 振动与冲击，43(23)：155-163，185.

李阳阳，杨蓉，徐陈超，2025. 青藏高原东南缘地貌差异性成因分析：以雅江地区为例[J]. 第四纪研究，45(1)：117-131.

吕政，邵喜彬，2004. 全球俯冲带形态特征研究[J]. 东北地震研究，20(3)：17-25.

童方彤，董有浦，刘益，等，2024. 基于构造地貌学的南盘江与红河分水岭特征分析[J]. 地质科学，59(2)：535-548.

王一舟，郑德文，张会平，2022. 河流高程剖面分析的方法与程序实现：基于Matlab平台编写的开源函数集RiverProAnalysis[J]. 中国科学：地球科学，52(10)：2039-2060.

徐琴如，董有浦，谢志鹏，等，2024. 川滇地块东部老鹰山的构造地

貌特征及其揭示的地块隆升和旋转运动[J]. 地质力学学报，30(4)：535-546.

张凯智，万永革，2024. 2024 年 1 月 1 日日本 M_W7.6 地震破裂过程反演研究[J]. 地震学报，46：1-18.

张梨君，袁道阳，李红强，等，2025. 拉脊山北缘断裂第四纪晚期分段活动的构造地貌证据[J]. 地质力学学报，31(3)：411-426.

第一作者简介：



饶刚，西南石油大学地球科学与技术学院研究员、博士生导师。入选四川省“天府峨眉计划”创新领军人才、四川省学术和技术带头人后备人选；担任“蓉漂计划”创新团队负责人。主要从事活动构造与地震灾害、构造地貌学、含油气区构造变形分析与模拟相关科研工作，重点关注褶皱-冲断带的构造几何学和运动学演化过程、活动构造三维生长及其地貌响应机理等。主持国家自然科学基金等纵向研究课题 10 余项。在 *Nature Communications* 等期刊发表 SCI 学术论文 50 余篇。