引文格式：张坤,花卫华,车文超,等. 一种高鲁棒性的三维地质模型切割算法[J]. 地理空间信息, 2025, 23(11): 17-21. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.11.004

一种高鲁棒性的三维地质模型切割算法

张　坤[1]，花卫华[2]，车文超[1*]，冯武超[1]，张茂成[2]，赵二龙[3]
（1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 数智化事业部，陕西 西安 710043；2. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，湖北 武汉 430074；3. 西安交通大学 管理学院，陕西 西安 710043）

摘　要：三角网切割算法在三维地质建模与分析中至关重要。提出了一种高鲁棒的三角网切割算法，以提高三维地质软件的建模精度和分析能力。算法包括碰撞检测、求切割交线、将被切割的三角形重新三角化和三角网分边 4 个步骤。通过将定量问题转化为定性问题，有效解决了狭长三角形的切割难题，生成了稳定且正确的剖面。实验结果表明，该算法在处理复杂地质模型时表现出较高的效率和优良的鲁棒性。

关键词：三角网切割算法；三维地质建模；碰撞检测；狭长三角形；鲁棒性
中图分类号：P208　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）11-0017-05

3D Geological Model Segmentation Algorithm with Highly Robustness

ZHANG Kun[1], HUA Weihua[2], CHE Wenchao[1], FENG Wuchao[1], ZHANG Maocheng[2], ZHAO Erlong[3]
(1. Digital Intelligence Business Unit, China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, China;
2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;
3. School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710043, China)

Abstract: Triangular irregular network (TIN) segmentation algorithm is crucial in 3D geological modeling and analysis. We proposed a highly robustness TIN segmentation algorithm to improve the modeling accuracy and analysis capability of 3D geological software. The algorithm consists of four main steps, such as collision detection, cutting intersection lines, re-triangulation of cut triangles, and triangulation mesh splitting. By transforming the quantitative problem into a qualitative problem, the algorithm effectively solves the segmentation problem of narrow triangles, and generates stable and correct profiles. Experimental results show that the algorithm exhibits high efficiency and excellent robustness in dealing with complex geological models.

Key words: TIN segmentation algorithm, 3D geological modeling, collision detection, narrow triangle, robustness

目前大多数三维地质软件中，三维地质模型的面与体均由不规则三角网（TIN）构成，因此在复杂地质体建模过程中，断层或地层之间经常发生相交，需要采用三角网切割算法辅助建模。在模型分析时，需要利用切割算法将体模型切成两部分或获取切割后的地质剖面。人工手动建模时，将无法避免地产生错误或质量较差的模型，而正确处理这些错误情况，对提高算法的鲁棒性具有重要影响。在实际应用中，三角网切割算法的鲁棒性与效率对辅助三维地质建模和模型分析具有重要作用。众多学者[1-9]对三角网切割算法进行了大量研究，并取得了重要成果，但直接用于复杂地质体的切割易产生错误。因此，本文提出了一种三角网切割算法，能正确切割复杂地质体，具有很好的鲁棒性。

1　三角网切割算法基本流程

本文将三角网切割的原始数据——两个三角网记为 MeshA、MeshB，切割后的三角网记为 $MeshA_1$、$MeshA_2$、$MeshB_1$、$MeshB_2$、MeshAB，其中 MeshAB 为 MeshA 与 MeshB 的重叠部分。在不同的切割情况和应用中，切割结果有所不同，因此上述切割结果中，各部分均有可能为空。

MeshA 与 MeshB 切割的基本步骤为：①对 MeshA、MeshB 进行碰撞检测，得到发生相交的三角

项目来源：陕西省创新能力支撑计划资助项目（2024CX-GXPT-10、2025CY-YBXM-204）；中国铁建股份有限公司 2021 年重大科技研发资助项目（2021-A02）；中国铁建股份有限公司地下空间利用领域科研计划资助项目（2024-W03）；中国铁建股份有限公司 2023 年重大科技研发资助项目（2023-Z03）。
第一作者简介：张坤（1984—），硕士，高级工程师，研究方向为铁路工程勘察数智化，E-mail：375857451@qq.com。
通信作者：车文超（1996—），硕士，工程师，研究方向为铁路工程地质信息化，E-mail：2513220899@qq.com。

形对；②对相交的三角形对逐一求交，得到有向交线段，并按顺序连接起来，生成交线；③逐一对两个三角网中被切割的三角形进行重新三角化；④三角网分边，利用交线将重新三角化后的三角网分成两部分。上述步骤与大多数三角网切割算法[5-6,10]相同。

切割存在狭长三角形的网格时，易出现以下问题，导致三角化或切割后分边错误：①由浮点运算中的容差问题导致狭长三角形的交点计算错误；②由交点计算错误导致狭长三角形求交后的网格重构错误；③网格重构后的三角形分边，计算量很大，导致算法效率低下。

本文通过将三角形求交的浮点定量运算问题转化为大小定性比较问题，可提高算法的鲁棒性；同时在网格分边时，根据交线附近网格与远处网格的不同特点采用不同的分边算法，以提高算法效率。

2 含狭长三角形的地质模型求交算法

2.1 不共面三角形求交线段

共面三角形求交相对简单，这里不作讨论。很多学者[11-16]对三角形相交检测方法进行了研究，本文采用Möller[11]提出的快速三角形相交检测方法。该方法效率较高、易于实现，不仅可检测两个不共面三角形是否发生相交，而且能计算交线段的方向。假设△$A_1B_1C_1$、△$A_2B_2C_2$分别为MeshA、MeshB中的三角形（图1），△$A_1B_1C_1$与△$A_2B_2C_2$是一对发生碰撞的三角形对，所在平面分别为π_1、π_2，法向量分别为$\vec{M}$、$\vec{N}$，交线方向$\vec{L}=\vec{M}\times\vec{N}$，有向交线段为$\overrightarrow{P_1P_2}$，$\overrightarrow{P_1P_2}$与$\vec{L}$方向相同。$\vec{M}$方向由△$A_1B_1C_1$顶点顺序确定，不能随意变更，$\vec{N}$同理。本文对Möller[11]的方法进行简要介绍，并加以扩展，以提高算法鲁棒性。

2.1.1 求交线段方法

将三维空间的求交转换为一维区间的求交：分别计算三维坐标点P_3、P_4、P_5、P_6对应的值t_3、t_4、t_5、t_6，得到P_3P_4、P_5P_6对应的区间$[t_3,t_4]$,$[t_5,t_6]$，若$[t_3,t_4]\cap[t_5,t_6]\neq\Phi$，则存在交线段（两端点可能重合）；否则不存在交线段。根据图1的情况，$[t_3,t_4]\cap[t_5,t_6]=[t_3,t_4]$，所求的交线段$\overrightarrow{P_1P_2}=\overrightarrow{P_3P_4}$，因此仅需计算$P_3$、$P_4$即可，$P_5$、$P_6$则不必计算。

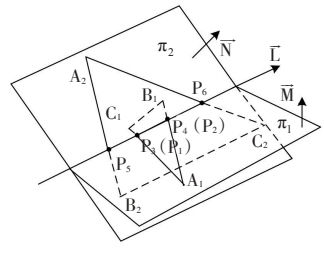


图1 不共面三角形相交

2.1.2 有符号距离对算法鲁棒性的影响

计算t_i(i=3,4,5,6）时，需用到A_1、B_1、C_1到π_2的有符号距离以及A_2、B_2、C_2到π_1的有符号距离，分别记为sd_{A1}、sd_{B1}、sd_{C1}、sd_{A2}、sd_{B2}、sd_{C2}。在同一平面两边的点，相对该平面的有符号距离的符号相反。有符号距离将影响t_i值，因此关系到算法鲁棒性。若A_1的坐标为(x_{A1},y_{A1},z_{A1})，π_2的法向量为$\vec{N}(n_x,n_y,n_z)$，π_2的平面方程为$n_xx+n_yy+n_zz+d=0$，则A_1到π_2的有符号距离为$sd_{A1}=n_xx_{A1}+n_yy_{A1}+n_zz_{A1}+d$；$A_1$到$\pi_2$的距离为$d_{A1}=|n_xx_{A1}+n_yy_{A1}+n_zz_{A1}+d|/|\vec{N}|$。$|\vec{N}|$值过大或过小都会导致$|sd_{A1}|$与$d_{A1}$产生数量级上的差别。如图2所示，假设$A_2(0,0,10^4)$，$B_2(0,10^4,0)$，$C_2(0,0,0)$，则其所在平面$\pi_2$的法向量为$\vec{N}=(0,0,10^8)$。对于$A_1(0,0,10^{-8})$，相对$\pi_2$：$d_{A1}=10^{-8}$，$sd_{A1}=1$。若容差设置为$10^{-6}$，$A_1$本应判定为在$\pi_2$上，由于$sd_{A1}=1$，导致$A_1$被判定位于$\pi_2$外；同理，也存在将平面外的点判定于平面上的情况。错误的位置关系判断将影响算法鲁棒性。

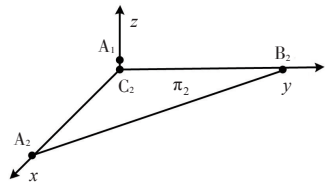


图2 A_1与π_2位置关系的判断

若先将π_2的法向量$\vec{N}(n_x,n_y,n_z)$单位化，再计算sd_{A1}，则$|sd_{A1}|=d_{A1}$，但需要开根号运算。本文采用以下方法：若$\vec{N}\neq\vec{0}$，令$n_{max}=\max(n_x,n_y,n_z)$，$\vec{N}=1/n_{max}\times\vec{N}$，此时$1\leqslant|\vec{N}|\leqslant\sqrt{3}$，$d_{A1}/\sqrt{3}\leqslant|sd_{A1}|\leqslant d_{A1}$，$|sd_{A1}|$与$d_{A1}$不会产生数量级上的差别，就能更准确地判断点的位置，提高算法的鲁棒性，而且避免了开根号运算。

2.1.3 确定交点位置

交点位置信息对提高算法鲁棒性具有重要作用，因此在计算交线段$\overrightarrow{P_1P_2}$时，需推断并记录P_1、P_2相对于三角形的位置。例如，在图3a中$[t_3,t_4]\cap[t_5,t_6]=[t_3,t_4]$，需要做如下判断：①若$sd_{C1}=0$，可判断$P_1$与$C_1$重合（图3b），若$sd_{A1}=0$，可判断$P_1$与$A_1$重合（两个三角形仅存在一个交点），否则$P_1$位于$A_1C_1$内部（图3a），$P_2$的判断方法同$P_1$；②若$sd_{B2}=0$且$sd_{C2}=0$，可判断$P_1$、$P_2$均位于$B_2C_2$内部（图3c），否则$P_1$、$P_2$均位于△$A_2B_2C_2$内部。在图3d中$[t_3,t_4]\cap[t_5,t_6]=[t_3,t_4]=[t_5,t_4]$，需要做如下判断：①$P_1$、$P_2$判断方法与上一例相同；②若$sd_{B2}=0$，则$P_1$与$B_2$重合（图3e），若$sd_{C2}\neq0$，则$P_2$位于△$A_2B_2C_2$内部（图3d、3e），若$sd_{B2}=0$且$sd_{C2}=0$，则$P_2$位于$B_2C_2$内部（图3f）。其余情况不再一一列举。有符号距离在计算交点前已计算过，此处不必重复计

算，可提高算法的效率。

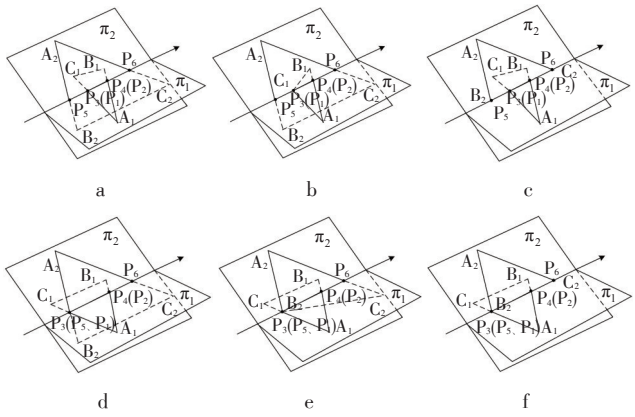


图3　判断交点位置

每计算一条有向交线段，就要将其插入不共面三角网切割生成的交线链表中，直至找完所有交线段，生成不共面三角网切割交线。在每次边与三角形求交点后，都要保存求交信息，避免重复求交。

2.2　重新三角化

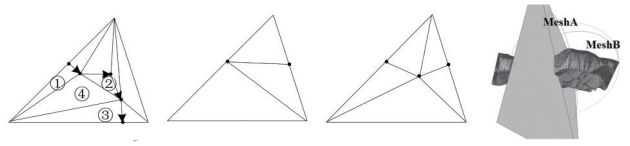
将被切割的三角形集合记为 $Tri=\{tri_1,tri_2,tri_3,\cdots,tri_k\}$，求交完成后，需对Tri中的元素重新三角化，以便于对三角网正确分边。常用方法是调用带约束线段的三角化函数对 tri_i 重新三角化，本文将重新三角化分为两种情况，一般情况采用带约束线段的三角化处理，特殊情况进行特殊处理。

2.2.1　一般情况的三角化

将 tri_i 的顶点和落在 tri_i 上的交点投影到某个二维平面，利用二维平面内带约束线段的三角化函数重新三角化，并将结果中的点对应回投影前的点。图4a中△ABC上有 P_1、P_2、…、P_5 五个交点，这些交点顺次连接构成4条约束线段。

2.2.2　特殊情况的三角化

由于相交过程中记录了交点的位置信息，因此本文定义了两种特殊情况，可根据位置信息直接连接顶点，生成重构后的三角形。图4 b中交点 P_1、P_2 分别位于△ABC的两条边上，无论 P_1P_2 是否为约束线段，都可用 P_1P_2 作约束线段简单构成3个三角形；在图4c中有一个交点位于三角形内部，也可按图示方法直接连接顶点构成三角形。在利用矩形平面切割地质体时，上述特殊情况较多。例如，图4d中MeshA切割MeshB，MeshA中只有两个大三角形，仅有一条边穿过MeshB，且穿进与穿出的次数均为一次，对于MeshB的三角形重构来说，若不考虑顶点顺序，最多只有两个三角形重新三角化为图4c的情况，其余均为图4b的情况。特殊情况仅需进行几次简单的判断即可生成三角形，无需进行投影，避免了坐标运算，能够提高运算速度。



a 一般情况　b 特殊情况1　c 特殊情况2　d 平面切割地质体

图4　重新三角化

2.2.3　鲁棒性分析

图4a中 P_5 位于BC内部，由于计算交点或三角化时产生的误差，重新三角化时可能生成△P_5BC。△P_5BC会将交线两边的三角网在拓扑上连通起来，而根据拓扑信息和交线对三角网进行分边时，将导致分边失败。由于在前面的计算中已记录了交点位置信息，因此可判断 P_5、B、C三点共线，△P_5BC为无效三角形，直接将其删除。图4b中若B、C两点之间的距离很小，即△ABC是由于某种原因形成的狭长三角形，将导致 P_1、P_2 之间的距离很小或重合。由于特殊情况的三角化方法不涉及坐标计算，不论△ABC形状如何均能保证正确三角化，也能保持拓扑的正确性，因此自然就解决了狭长三角形切割后的三角化和分边问题。

对于狭长三角形切割狭长三角形的情况，某一个狭长三角形内部或边界上可能产生多个距离很近的交点，这时在边界上仅保留两个交点。如图5所示，假设三角形均为狭长三角形，两个三角形网格相交时产生的交点距离小于容差限制，采用传统方法易造成误判。△$A_2B_2C_2$ 与△$A_1B_1C_1$ 和△$A_1D_1C_1$ 相交，对于△$A_2B_2C_2$，在边界上仅保留两个交点，即保留 P_1、P_3；同理，对于△$A_1B_1C_1$，保留 P_1、P_2；对于△$A_1C_1D_1$，保留 P_2、P_3，从而将三角形的重新三角化转换为图4b的情况，即可高鲁棒性地处理交点计算和分边的问题。

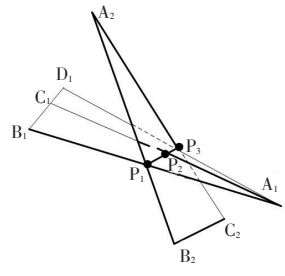


图5　狭长三角形相交

若 P_2 判定位于 A_2B_2 内部，则仅保留 P_1、P_2 中的一个点；若位于 A_2C_2 内部，则保留 P_2、P_3 中的一个点。对于△$A_2B_2C_2$，保留的交点为 P_1、P_3，则将其约束线段由 P_1P_2、P_2P_3 改为 P_1P_3，交线链表需做相应处理。对△$A_2B_2C_2$ 三角化和分边时忽略 P_2，而对△$A_1B_1C_1$ 和△$A_1C_1D_1$ 三角化和分边时则不能忽略 P_2。对于 P_1、P_3 之间有更多交点的情况，处理方式类似。本文将定量

问题转化为定性问题进行处理，既能解决狭长三角形的切割问题，又能避免由错误三角形导致的拓扑错误，从而提高了算法鲁棒性。

2.3 三角网重构后的分边

三角网分边的方式主要包括根据拓扑进行分边和根据相对位置进行分边。当采用平面进行切割时，按点到平面的有符号距离进行分边，既快又准。当切割面是任意的开放曲面或封闭曲面时，则可采用按相对位置、按拓扑以及二者相结合的3种分边方式。

1）根据拓扑进行分边。首先对三角网进行拓扑调整，搜索靠近交线一侧的所有三角形；再以这些三角形为基础，搜索所有与其在相同一侧的三角形；最后将剩下的三角形划分到交线的另一侧。该方法对拓扑要求较高，当三角网产生拓扑错误时，不能采用。

2）根据相对位置进行分边。该方法更稳定，但计算量较大。如图6所示，首先在MeshA的边缘添加合适的三角形，对MeshA进行延展，记为$MeshA_x$，需保证$MeshA_x$足够大，使得MeshB中位于$MeshA_x$两边的点相互不可见（图7）；然后以MeshB中一点P_x为参考点（P_x不能位于A_x上），对于MeshB中的某个点P_y，若P_y不在$MeshA_x$上，则可按线段P_xP_y与$MeshA_x$的交点个数为奇数或偶数将其分为两类，从而根据点的分边情况将MeshB中的三角形分为两边。此时，必须保证MeshA的延展部分（$MeshA_x$–MeshA）与MeshB不相交。

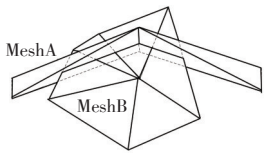


图6 MeshA与MeshB相交

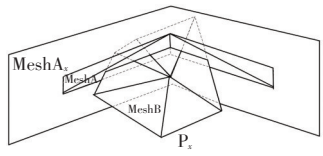


图7 构造MeshAx

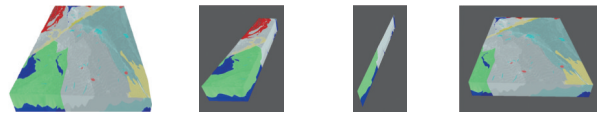
3）根据拓扑与相对位置进行分边。对于切割交线附近的三角形，以相对位置为分边依据；其余部分按拓扑搜索的方式分边。由于本文能很好地处理狭长三角形，重新三角化时也能删除错误的三角形，保证了三角网拓扑的正确性，因此大多数情况下采用拓扑方法进行分边。若被切割面存在多个拓扑不连通的区域，每个区域只需对一个三角形按相对位置进行分边，其余三角形可按三角形的位置进行拓扑分边。

3 算法实验与分析

如图8所示，M_1是由很多地质体组成的复杂地质模型，利用一个垂直切割面S_1切割M_1，其中含有大量狭长三角形，传统算法切割易出错，本文算法则可得到正确的剖面（图8c）和分边结果（图8b、8d）。实验的计算机配置为：处理器Inter(R)Core(TM)i7–4790 CPU、3.6 GHz，内存4 G，Windows7 64位操作系统。5个复杂地质体模型切割的耗时情况见表1，可以看出，对同一模型的同一位置进行多次切割时，耗时存在几百ms的波动；对同一模型的不同位置进行切割时，切割的三角形不同，耗时有较大波动；算法细节的优化情况对效率也存在较大影响；总体上水平切割耗时大于垂直切割，而生成分边后的地质体也会造成较大的时间消耗。

表1 模型切割实验时间性能

模型	三角形数量/个	点数量/个	仅生成垂直剖面/ms	仅生成水平剖面/ms	生成垂直剖面且分边/ms	生成水平剖面且分边/ms
M_1	1 935 060	1 038 728	3 394	3 287	6 697	5 605
M_2	2 147 025	1 182 035	3 956	5 197	7 007	9 806
M_3	2 249 227	1 207 415	4 056	5 135	5 235	6 951
M_4	2 621 070	1 465 882	3 999	5 937	6 316	11 161
M_5	3 555 118	1 885 436	5 143	5 630	8 982	9 543



a 被切割地质模型M b 模型M_{11} c 垂直剖面S_{11} d 模型M_{12}

图8 地质体模型切割

4 结 语

本文提出的三角网切割算法可对任意曲面进行剖切，包括使用任意平面或曲面进行切割。在算法鲁棒性方面，由于在重新三角化和删除错误三角形时，将定量问题转换为定性问题，避免了坐标计算误差导致的切割失败，从而解决了狭长三角形切割以及重新三角化时的拓扑错误问题。此外，本文也提出了切割自相交体以及包含复合面的体生成剖面方法，因此本文算法对错误地质体切割的容错能力更强。实验结果表明，本文算法具有较高的效率和较好的稳定性，已应用于三维地质模型的剖面生成、隧道模拟、基坑开挖、虚拟钻孔等业务中。

参考文献

[1] Biermann H,Kristjansson D,Zorin D. Approximate Boolean Operations on Free-form Solids[C]// SIGGRAPH Conference on Computer Graphics,2001:185-194

[2] Smith J M,Dodgson N A. A Topologically Robust Algorithm for Boolean Operations on Polyhedral Shapes Using Approximate Arithmetic[J]. Computer-aided Design,2007,39(2):149-163

[3] Guo K B,Zhang L C,Wang C J,et al. Boolean Operations of STL Models Based on Loop Detection[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,33(5/6):627-633

[4] Wang C C L. Approximate Boolean Operations on Large Polyhedral Solids with Partial Mesh Reconstruction[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics,2011,17(6):836-849

[5] 花卫华,邓伟萍,刘修国,等. 一种改进的不规则三角网格曲面切割算法[J]. 地球科学,2006,31(5):619-623

[6] 毕林,王李管,陈建宏,等. 三维网格模型的空间布尔运算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(5):82-85

[7] 明镜,潘懋,屈红刚,等. 基于TIN数据三维地质体的折剖面切割算法[J]. 地理与地理信息科学,2008,24(3):37-40

[8] Zhao H, Wang C C L, Chen Y, et al. Parallel and Efficient Boolean on Polygonal Solids[J]. The Visual Computer, 2011,27(6/8):507-517

[9] Karamete B K,Dey S,Mestreau E L,et al. An Algorithm for Discrete Booleans with Applications to Finite Element Modeling of Complex Systems[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2013,68:10-27

[10] Lindenbeck C H, Ebert H D, Ulmer H, et al. TRICUT: AProgram to Clip Triangle Meshes Using the Rapid and Triangle Libraries and the Visualization Toolkit[J]. Computers and Geosciences,2002,28(7):841-850

[11] Möller T. A Fast Triangle-triangle Intersection Test[J]. Journal of Graphics Tools,1997(2):25-30

[12] Devillers O,Guigue P. Faster Triangle-triangle Intersection Tests[C]. Rapport de Recherche 4488,INRIA,2002

[13] Shen H,Heng P A,Tang Z. A Fast Triangle-triangle Overlap Test Using Signed Distances[J]. Journal of Graphics Tools,2003,8(1):17-23

[14] Guigue P, Devillers O. Fast and Robust Triangle-triangle Overlap Test Using Orientation Predicates[J]. Journal of Graphics Tools,2003,8(1):25-32

[15] Tropp O, Tal A, Shimshoni I. A Fast Triangle to Triangle Intersection Test for Collision Detection[J]. Computer Animation and Virtual Worlds,2006,17(5):527-535

[16] 邹益胜,丁国富,何邕,等. 空间三角形快速相交检测算法[J]. 计算机应用研究,2008,25(10):2 906-2 910

(上接第16页)

[10] 邹振学,朱萝云,赵澳欣,等. 近30年粤西海陵岛海岸线演变特征与驱动因素[J]. 应用海洋学学报,2025,44(2):332-345

[11] 胡浩然,张绍良,侯湖平,等. 长时序遥感支持下的江苏海岸线时空变化分析[J]. 遥感信息,2025,40(1):104-113

[12] Zhang X D, Tan X W, Hu R J, et al. Using a Transect-focused Approach to Interpret Satellite Images and Analyze Shoreline Evolution in Haiyang Beach, China[J]. Marine Geology,2021,438:106 526

[13] Zhang X D, Wu C, Zhang Y C, et al. Using Free Satellite Imagery to Study the Long-term Evolution of Intertidal Bar Systems[J]. Coastal Engineering,2022,174:104 123

[14] Zhang X D, Wu C, Hu R J, et al. Can Satellite-derived Beach Images Resolve the Responses to Human Activities?[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2024,129(2):e2023JF007339

[15] 杨超,朱龙海,张晓东. 基于大量卫星影像研究莱州湾东北部界河海滩近40年的海岸线演变[J]. 海洋学报,2024,46(12):13-25

[16] 徐君亮,罗章仁,王文介,等. 珠江三角洲河道港湾发育演变与港口合理布局[M]. 北京:海洋出版社,1993

[17] 殷飞,田林亚,王涛,等. 海岸线遥感解译和提取方法研究[J]. 地理空间信息,2018,16(8):64-66

[18] 丁叶,陈志禄,王璇,等. 基于多源数据的海岸线综合提取及时空演变研究[J]. 海洋技术学报,2024,43(1):27-38

[19] 李志强,李维泉,陈子燊,等. 华南岬间弧形海岸平面形态影响因素及类型[J]. 地理学报,2014,69(5):595-606

[20] 张有鹏,宫厚诚. 海域海岛监视监测体系研究及在南沙区的应用[J]. 海洋开发与管理,2023,40(11):26-30

[21] 张晓东,谢睿,范代读,等. 长江入海泥沙锐减下河口最大无人沙岛的持续淤涨[J]. 中国科学:地球科学,2021,51(11):1 990-2 000

[22] 郑慧玲,王永红. 1960—2020年黄河、长江、珠江入海水沙通量演变特征[J]. 水土保持通报,2024,44(1):147-157

[23] 侯庆志,陆永军,王志力,等. 河口湾水动力环境对滩涂利用的累积响应:以珠江口伶仃洋为例[J]. 水科学进展,2019,30(6):789-799

[24] 刘俊勇,徐峰俊. 广州港出海航道疏浚工程对珠江口水动力及河势稳定影响研究[J]. 人民珠江,2006,27(4):11-14

[25] 许祥向,丁晓瑛,余顺超,等. 珠江口伶仃洋整治开发对河势发展影响分析[C]//中国海洋工程学会. 第十二届中国海岸工程学术讨论会论文集. 珠江水利委员会科学研究院,2005:224-229

[26] 李孟国,韩志远,李文升,等. 伶仃洋滩槽演变与水沙环境研究进展[J]. 海洋湖沼通报,2019,41(5):20-33

[27] 胡晓张,王汉岗,杨聿,等. 高强度人类活动引起的蕉门口河势变化及规划治理对策研究[J]. 水利规划与设计,2019(1):12-18