

# 永久基本农田中非耕地地块补划方法研究

刘小慧,毛政元\*

(福州大学数字中国研究院(福建),福州 350108)

**摘要:**设立永久基本农田是我国土地管理的重要举措,但其中部分历史划定地块为非耕地或低质量耕地,需要调出并按照“面积平衡”“集中连片”等原则在现有非永久基本农田的耕地中补划。现有地块补划方法多以整块耕地为操作单元,难以同时满足面积精确匹配与空间邻接性要求。为此,本研究提出一种基于Delaunay三角剖分所生成的三角网中三类三角形相对位置关系的地块补划方法。首先采用Delaunay三角剖分将属于耕地的不规则多边形分割为若干三角形单元;其次通过交叉三角形(亦称“跨接三角形”)确定地块主体结构与分支结构,优先补划属于分支结构的地块,并依据面积约束与邻接性优先原则选择候选三角形,当选中的候选三角形面积累加值大于目标补划面积时,使用二分法分割当前三角形;最后迭代处理需要补划的地块,形成完整的地块补划方案。研究表明,该方法能够在保证调入地块面积不低于调出地块面积的前提下,提高补划地块与耕地内永久基本农田的空间连片度,显著增强邻接性,同时减少对地图数据中碎图斑的数量,有效解决永久基本农田进出平衡中的面积与布局双重约束问题,提升补划结果的可行性与空间优化水平,对于促进耕地保护和国土空间规划领域的相关研究具有重要意义。

**关键词:**永久基本农田;进出平衡;地块补划;空间优化;三角剖分

中图分类号:P28

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



永久基本农田(下文简称“永基田”)是我国落实耕地保护制度的重要抓手,是保障国家粮食安全和生态安全的底线<sup>[1]</sup>。根据《土地管理法》《基本农田保护条例》等法律法规,永基田一经划定,必须实行特殊保护,原则上不得占用或调整。然而,随着历次土地利用现状调查、城乡建设用地增减挂钩及国土空间规划的推进,部分历史划定的永基田地块被发现处于非耕地范围或耕作条件明显退化区域,不符合现行划定标准。为此,自2017年起,国家明确提出实行永基田进出平衡制度<sup>[2]</sup>,即调出地块的数量、质量、布局必须通过补划等面积、等质量、布局合理的地块予以平衡,同时要求对“三区三线”划定的耕地和永基田进行全面核实,查清“三区三线”成果启用前因农业结构调整等因素形成的非耕地,并采取恢复整改与调整补划相结合的分类处置措施<sup>[3]</sup>。

地块补划是将较大的候选耕地地块分割为较小的子块并根据补划面积合并子块的过程<sup>[4]</sup>。传统

地块补划方法主要依赖作业人员通过裁剪、合并等地理分析工具逐个操作,切分出预定面积的子块,然而在操作过程中需要不断判断面积是否达到目标补划面积,效率低下,且很难避免因误操作所导致的图斑空间结构混乱与破碎等数据质量退化问题。针对人工作业的局限,前人提出了步长法<sup>[5]</sup>、决策模型法<sup>[6-7]</sup>及遗传算法<sup>[8]</sup>等方法,尽管可以完成地块补划任务,但仍存在不足。其中步长法难以根据权属变化自动调整步长,无法同时保障分割精度与补划效率;决策模型法则需要综合研究地块自身以外的多种因素,虽然在宏观布局优化上具有可行性,但在实践中,受制于地块形状不规则、面积限制严格和邻接性要求较高等因素,往往难以找到面积恰好满足要求且空间上与原永基田相邻的整块耕地,结果导致补划地块分散破碎;而遗传算法在确定补划地块的过程中难以统一分割方向,无法保证地块连通性。

三角剖分(triangulation)作为计算几何中的经

收稿日期:2026-02-06.

基金项目:自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心开放基金项目(KY-030000-04-2024-031).

通信联系人简介:毛政元,男,教授,博士生导师,主要研究方向包括距离与方向关系建模及其在时空数据挖掘与涉图数据治理中的应用、机器学习、形状分析、时空系统认知与测度、人居环境信息化管理与决策服务。

\*通信联系人。E-mail:zymao@fzu.edu.cn.

典方法,可以将任意形状的多边形精确分解为一组没有重叠、缺失的三角形单元,既便于面积精确计算,又有利于后续灵活组合。其中,Delaunay三角剖分因其生成的三角形趋于等边、形状稳定,被广泛应用于土地利用规划、农用地整理与生态修复等方面的空间优化任务<sup>[9]</sup>。针对现有研究中已经提出的永基田补划方法在操作单元、自动化程度与优化效果等方面存在的不足,本文提出一种基于Delaunay三角剖分所生成的三角网中三类三角形相对位置关系的地块补划方法(简称“基于Delaunay三角剖分和交叉三角形的方法”,delaunay triangulation and cross triangle based method,DT-CT),通过划分地块、确定层次结构,筛选出兼顾地块面积、形状和空间关系的子地块,得到有利于实际耕作的最佳补划方案,为永基田进出平衡提供可操作的空间优化技术支撑。

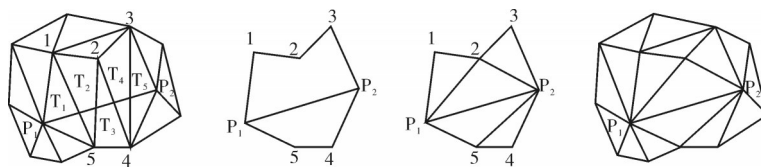


图1 边界约束三角网生成策略

Fig. 1 Boundary constrained triangulation generation strategy

根据三角形与耕地单元边界存在的公共边数量,三角网中的三角形分为端点三角形(与耕地单元边界有2条公共边)、节点三角形(与耕地单元边界有1条公共边)和交叉三角形(与耕地单元边界没有公共边),如图2所示。

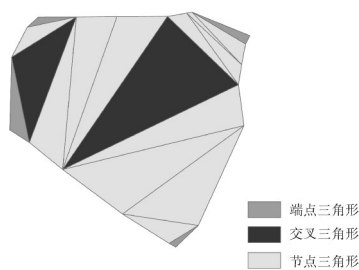


图2 三角形分类

Fig. 2 Triangle classification

骨架线能够反映面状要素的主延伸方向和形状特征,可有效描述形状主体与分支结构的层次关系<sup>[12]</sup>。骨架线分支节点蕴含了形状分支结构的起始位置信息,一般情况下,骨架线分支节点与端点间的部分对应着形状上向外突出的子结构,可用于指导形状分解<sup>[13]</sup>。交叉三角形中心点对应多边形骨架线的分支点,连接该中心点与其各边中点可得

## 1 研究方法 with 数据

### 1.1 Delaunay三角剖分与交叉三角形

三角剖分是以平面上的一组离散点为顶点将给定空间单元分割为一组三角形的过程,本文涉及的应用场景是以多边形的界址点为顶点将多边形分割为一组三角形<sup>[10]</sup>,将在多边形中寻找补划子块的问题转化离散三角形组合问题。相对于同类算法所得到的结果,Delaunay三角剖分生成的三角网整体质量更好<sup>[11]</sup>,故本研究基于Delaunay三角剖分算法中的逐点插入法生成以备选调入耕地地块多边形界址点为顶点的三角网,再以两步算法(算法思想如图1所示, $P_1P_2$ 为约束边)构建以耕地地块多边形图元边界为约束的约束Delaunay三角网,删除三角网中落入多边形边界之外的三角形,保留位于多边形内的三角形备用。

到骨架线<sup>[14]</sup>。本研究将交叉三角形作为分割节点,通过交叉三角形将耕地单元初步分割为若干子块,其中面积较小的子块通常对应耕地单元较不规则且向外突出的区域,如子块面积满足补划面积,则遍历合并子块内的三角形单元形成补划地块,否则继续遍历其他子块,形成地块层次补划结构。

### 1.2 实验区与数据

本文以福建省安溪县部分永久基本农田调整业务为实证研究案例。安溪县位于福建省东南部,泉州市西南隅,介于 $24^{\circ}50' \sim 25^{\circ}26' N$ , $117^{\circ}36' \sim 118^{\circ}17' E$ 之间。地势自西北向东南倾斜,地貌类型以山地和丘陵为主,河谷盆地分布其间。

本研究所利用的地图数据均来源于泉州市自然资源局,涉及安溪县2022年土地利用变更调查成果、永久基本农田保护区调查成果、永久基本农田划定工作报告等,其中耕地图层和永基田图层均为国家2000大地坐标系(CGCS2000),主要字段包括图斑ID、地类、面积、坡度、耕地等别等。实验区耕地面积 $94.16 \text{ hm}^2$ ,永基田面积 $91.46 \text{ hm}^2$ 。

## 2 地块补划实证研究

### 2.1 补划流程

本文的研究目标是通过合理选取三角形单元,使其形成的补划子块能够满足面积、形状整体规则和空间连片等约束条件.具体处理过程主要分为4步:1)获得永基田图层中的非耕地并调出,再根

据权属关系统计需要补划的实际面积;2)优先选取与耕地内永基田相邻的耕地作为补划地块,并生成以该地块界址点为顶点的 Delaunay 三角网;3)对该三角网中的三角形分类,基于交叉三角形分割补划地块得到若干子地块,通过遍历累加子地块内三角形和二分法精分割确定补划地块边界;4)输出地块补划方案.算法流程如图3所示.

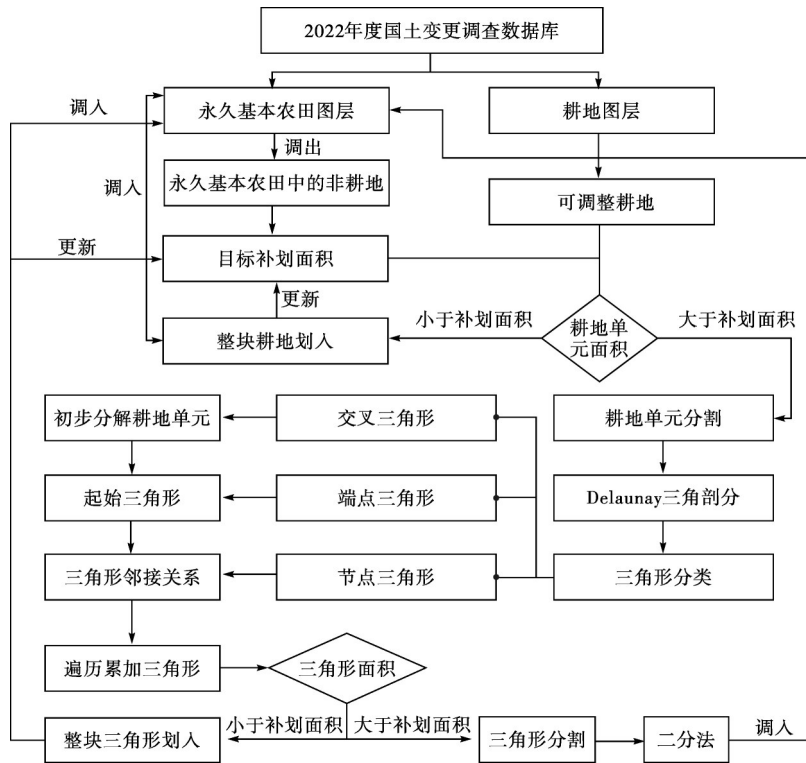


图3 DT-CT算法流程图

Fig. 3 DT-CT algorithm flowchart

### 2.2 实现方法

2.2.1 非耕地调出 永基田中的非耕地指已划定的永基田边界内包含的非耕地地块.按照国家设立永久基本农田的初衷<sup>[15]</sup>,永基田优化过程中应将此类地块从永基田中调出.利用安溪县耕地图层和已划定的永基田图层做叠加操作,得到现有永基田中的非耕地,具体分布情况如图4.耕地图层内永基田为80.56 hm<sup>2</sup>,永基田中的非耕地面积为10.9 hm<sup>2</sup>,占研究区永基田面积的比例为11.92%.从现有永基田成果中调出非耕地,同时按照永基田保护任务要求,补划相当面积的耕地地块合并到原来的永基田图斑.

2.2.2 耕地调入 对耕地图层与耕地内永基田图层做擦除操作后得到可调整耕地图层,面积为13.6 hm<sup>2</sup>.可调整耕地图层中的多边形图元按照与耕地内永基田的空间关系进一步分为与耕地相邻图斑和不相邻图斑,在其中优先选择与已有永基田

相邻者作为调入永基田的候选耕地.

计算可调整耕地中各耕地单元到非耕地永基田的距离,根据距离对耕地单元排序,优先选择较近的耕地单元作为补划地块.

若整块耕地单元面积小于补划面积,全部划为补划地块;若整块耕地单元面积大于补划面积时,则采用DT-CT算法实现耕地单元的Delaunay三角剖分,并根据剖分结果中各三角形与耕地单元边界存在的公共边数对其进行分类,得到端点三角形、节点三角形和交叉三角形.根据单个图斑包含交叉三角形的个数按以下3种情况分别处理.

1) 无交叉三角形.对于无交叉三角形的耕地单元,生成端点三角形集合.遍历端点三角形集合,判断是否与已有永基田相邻,若相邻,则以该端点三角形为起始三角形,否则以距离已有永基田质心最近的端点三角形为起始三角形.根据三角形边相邻关系遍历相邻三角形,并累加三角形面积,

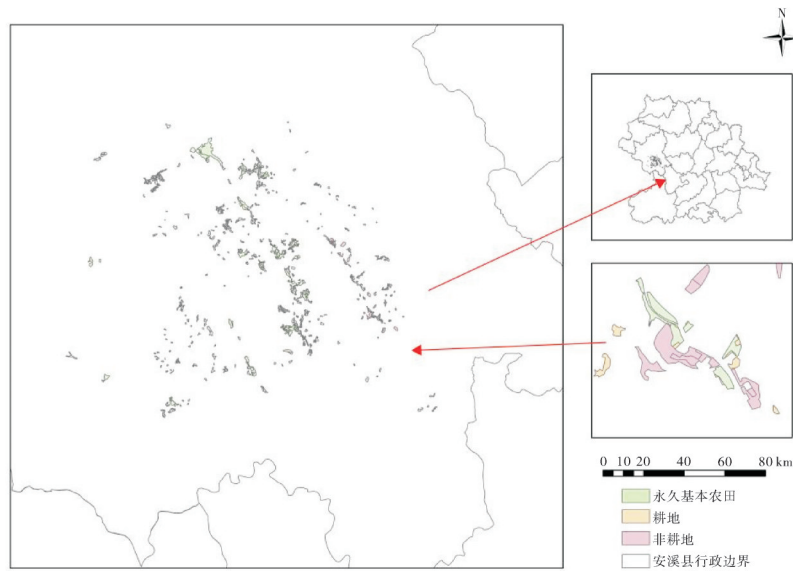


图 4 安溪县永久基本农田中非耕地分布

Fig. 4 Distribution of non-cultivated land within permanent basic farmland in Anxi County

直至满足补划面积要求。

2) 一个交叉三角形. 对于只有一个交叉三角形的耕地单元, 根据交叉三角形将耕地单元分割成三个子块(不考虑自身). 若耕地单元与已有永基田相邻, 则对子块按与已有永基田相邻关系排序, 相邻关系相同的情况下按照面积从小到大排序; 若耕地单元与已有永基田不相邻, 则对子块按面积从小到大排序。

若第一个子块面积大于补划要求, 则按无交叉三角形情况进行处理, 若该子块面积小于补划要求, 则将该子块标记为补划地块; 若第一个子块补划后仍未满足面积要求, 继续处理第二个子块, 处理操作和第一个子块相同; 若第二个子块补划后仍未满足面积要求, 则基于连片性要求将交叉三角形作为当前补划待处理地块. 若交叉三角形面积小于补划面积, 则将交叉三角形标记为补划地块; 若交叉三角形补划后仍未满足面积要求, 继续处理第三个子块. 以与交叉三角形相邻且未补划的三角形作为起点, 遍历累加子块内的三角形。

3) 多个交叉三角形. 对于有多个交叉三角形的耕地单元, 若耕地单元与已有永基田相邻, 则计算每个交叉三角形与已有永基田地块质心的距离, 选择距离最近的交叉三角形作为待处理的第一个交叉三角形; 若耕地单元与已有永基田不相邻, 则计算每个交叉三角形与所在耕地单元质心的距离, 选择距离最远的交叉三角形中作为待处理的第一个交叉三角形, 即从耕地单元的某一端开始分割。

初始处理与只有一个交叉三角形的情况类似, 当遍历第三个子块内的三角形时, 若该三角形是交叉三角形, 则以该交叉三角形作为下一个待处理的交叉三角形, 同时结束第一个交叉三角形的处理, 注意后续交叉三角形分割只得到两个子块. 处理后续交叉三角形时, 当第一个子块补划后仍未满足面积要求, 则补划交叉三角形, 再处理第二个子块, 并以与交叉三角形相邻且未补划的三角形作为遍历起点。

当遍历累加到某个三角形的面积时, 可能出现超出补划面积的情况, 此时需要对该三角形进行分割, 从而减少面积误差. 本研究利用二分法<sup>[16]</sup>对三角形进行精分割, 即首先在三角形的中间部分执行分割操作, 若三角形的上一半面积小于目标补划面积, 则移动分割线至三角形的下一半的中间部分, 反之则移动分割线至三角形的上一半的中间部分. 此过程循环进行, 直到分割的三角形部分满足目标补划面积. 为了保证最终补划结果的连片性, 需要设置基准边. 若存在上一次补划区域, 则基准边为上一次补划区域与该三角形的相邻边, 否则以待分割三角形与耕地地块边界重合的边作为基准边. 分割点的位置选取规则为: 原则上尽量不增加新界址点, 若待分割三角形与耕地地块边界存在公共边, 则在该公共边上选取分割点, 否则在基准边的两个顶点中选取共享三角形数最多的(即度数最大的)顶点和另一顶点构成的边上选取分割点。

基于DT-CT算法的补划结果如图5所示。

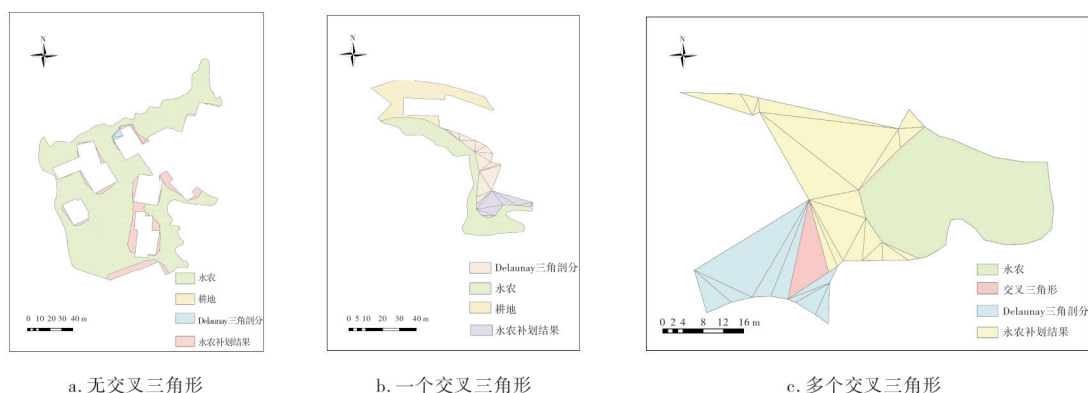


图 5 DT-CT算法补划过程

Fig. 5 Replacement process based on DT-CT algorithm

### 2.3 评价指标

为验证本文方法应用于永基田补划业务的可行性,结合耕地的几何结构特征和社会经济属性,选取面积误差、地块形状指数和连片度作为补划地块方法的评价指标.

2.3.1 面积误差 面积误差指标用于衡量实际补划面积与目标补划面积之间的偏差,根据《农村土地承包经营权调查规程》设置面积误差范围在5%以内.以面积误差为评价指标的目标函数为:

$$d_{\text{area}} = \frac{\text{abs}(S_{\text{actual}} - S_{\text{target}})}{\max(S_{\text{target}}, S_{\text{actual}})}, \quad (1)$$

式中,  $d_{\text{area}}$  表示面积误差,取值范围为0~1;  $S_{\text{actual}}$  为实际补划面积;  $S_{\text{target}}$  为目标补划面积.

2.3.2 地块形状指数 地块形状指数 (parcel shape index, PSI) 是一种综合多个指标的形状评价指标,主要有短边数、锐角数、优角数和紧凑度4个指标<sup>[17-18]</sup>,具体计算方法见表1.边长过短、锐角和优角数量较多,以及形态狭长或尖锐的耕地会对农业机械作业产生不良影响<sup>[19]</sup>.因此,在补划过程中需以提升地块形状规则性为目标,以满足机械化作业的基本要求. PSI 指标的计算公式为:

$$I_{\text{PS}} = \sum_{i=1}^n P_i W_i, \quad (2)$$

式中,  $i$  表示指标编号;  $P_i$  表示指标  $i$  的得分;  $W_i$  表示指标  $i$  的权重,各指标权重之和为1;  $n$  为指标数.

本研究选择综合熵权法和层次分析法的赋权法计算各形状指标的权重:随机选取并分别计算15个地块对应的客观权重和主观权重,通过乘法合成确定各形状指标的最终权重(见表1).具体计算公式如下:

$$\omega_j = \frac{\sqrt{\alpha_j \beta_j}}{\sum_{k=1}^n P_k W_k}, \quad (3)$$

式中,  $\omega_j$  表示各指标的综合权重;  $\alpha_j$  表示根据熵权法计算得到的权重;  $\beta_j$  表示根据层次分析法计算得到的权重.

PSI 的取值范围为0~1,当  $0 \leq I_{\text{PS}} \leq 0.50$  时,表明形状复杂度极高,不具有规则性;当  $0.50 < I_{\text{PS}} \leq 0.70$  时,表明形状有一定复杂度且不具有规则性;当  $0.70 < I_{\text{PS}} \leq 0.90$  时,表明形状较为简单,整体上较为规则;当  $0.90 < I_{\text{PS}} \leq 1$  时,表明形状是简单多边形,整体非常规则<sup>[20]</sup>.

表 1 形状指标计算公式

Tab. 1 Shape index calculation formula

参数	含义	计算公式	变量定义	权重
短边数	根据《土地整治项目规划设计规范》的相关规定,平原区地块的边长若小于20米即为短边	$S = 1.0 / (1.0 + 0.4 \times v_i)$	S表示短边数量的量化函数; $v_i$ 表示第 $i$ 个地块所包含的短边数量	0.264
锐角数	地块中内角小于 $90^\circ$ 的数量	$A = 1.0 / (1.0 + 0.8 \times x_i)$	A表示锐角数量的量化函数; $x_i$ 为表示第 $i$ 个地块所包含的锐角数量	0.176
优角数	地块中内角大于 $180^\circ$ 且小于 $360^\circ$ 的数量	$R = 1.0 / (1.0 + 0.8 \times y_i)$	R表示优角数量的量化函数; $y_i$ 为表示第 $i$ 个地块的优角数量	0.147
紧凑度	衡量形状接近圆形的程度,形状越不规则、越长,紧凑度越低	$C = 4 \times \pi \times a / l^2$	C为紧凑度量化函数; $a$ 为地块面积 area; $l$ 为地块周长 length	0.413

2.3.3 空间连片度 连片的耕地更有利于规模生产<sup>[21]</sup>,此前对于永基田仅仅从数量和生产能力上进行保护,忽略集中管理的重要性,导致部分永久基本农田分布零散,无法在利用过程中实现规模化生产<sup>[22]</sup>.

连片度是表征地块空间集聚程度的指标,地块间的空间距离越小,意味着连片程度越高.针对连片度的计算问题,前人开展了大量的研究.周尚意等<sup>[23]</sup>提出了空间相连接性计算方法,通过栅格化计算

地块相连接性;杨柳等<sup>[24]</sup>通过构建缓冲区提出地块连片判定标准,其设置的缓冲半径为 12 m,将落入该范围内的相邻地块认定为连片;杨建宇等<sup>[25]</sup>提出了基于耕地连片网络的局部耕地连片度计算公式来评价耕地的连片性.本研究选取 20 m 为缓冲区范围,即认为在 20 米之内的永久基本农田地块是集中连片的.

2.4 结果与分析

实验区基于 DT-CT 补划的结果如图 6 所示.

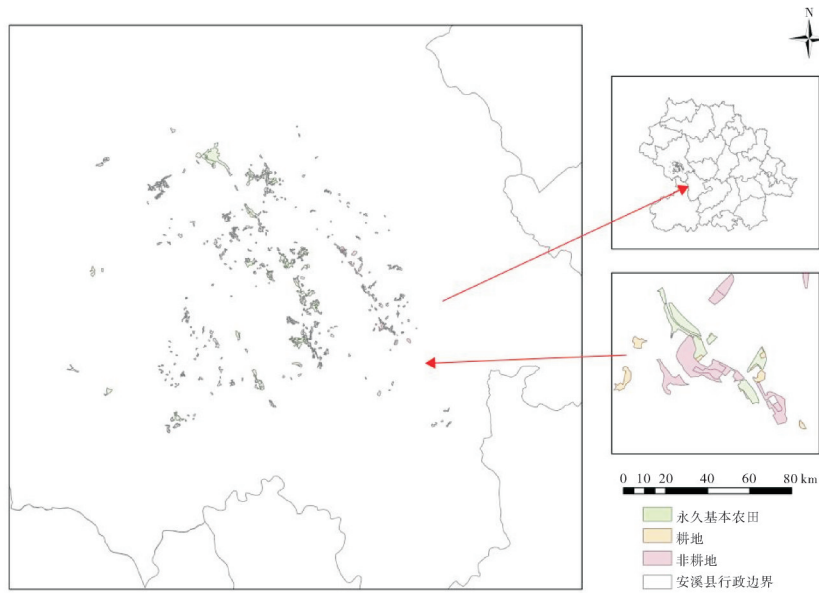


图 6 基于 DT-CT 算法的补划结果

Fig. 6 Replacement results based on DT-CT algorithm

DT-BS 算法是一种结合 Delaunay 三角剖分 (delaunay triangulation, DT) 和二分查找 (binary search, BS) 的地块分配算法 (图 7). 该算法首先构建待分割地块的最小外接矩形,完成其三角剖分;

随后在地块内部通过累加三角形面积进行搜索,当累计面积接近补划面积时,利用二分法进一步调整选取范围.

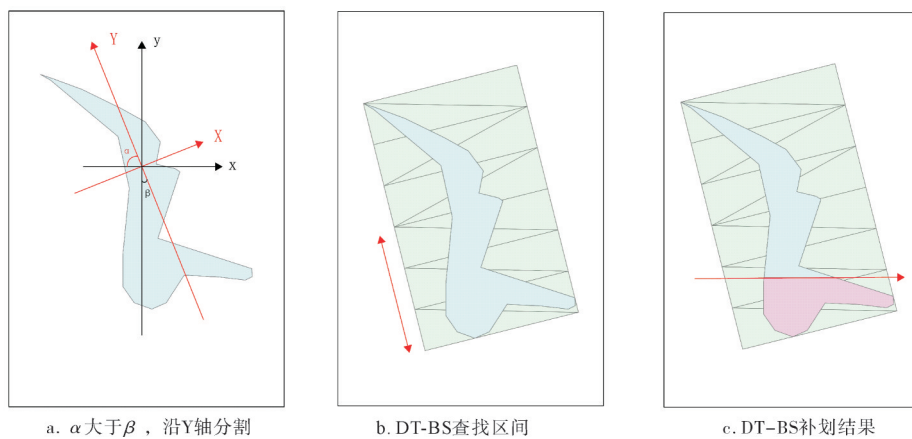


图 7 DT-BS 算法流程

Fig. 7 DT-BS algorithm process

表2展示了本文提出的DT-CT算法和同类成果中的DT-BS算法在同一数据集上的处理结果对比,评价指标包括面积精度、形状指数和连片度。

由表2可知,两种算法生成的各补划地块的面积相对误差均满足5%的精度要求,但DT-CT算法的面积精度明显高于DT-BS算法。

由于本研究在地块分割补划过程中主要以面积作为约束条件,且DT-CT和DT-BS均未对地

块形状进行优化,因此两者在地块的形状指数上差异并不显著,但DT-CT算法在整体地块形状规则方面仍有一定提升,总体规则度提高4%。

尽管DT-CT算法基于缓冲区分析的连片度指标没有显著提升,但其补划结果直观的可视化效果较DT-BS算法在整体形状规则性和连片程度两个方面更佳(图8)。

表2 两种算法在面积误差、形状指数和连片度指标上的比较

Tab. 2 Comparison of area error, shape index, and connectivity between two algorithms

地块编号	目标补划面积/m <sup>2</sup>	面积误差/%		形状指数		连片度/m <sup>2</sup>	
		DT-BS	DT-CT	DT-BS	DT-CT	DT-BS	DT-CT
1	285.06	0.00	0.00	0.44	0.46	1 448.42	1 448.56
2	408.90	0.70	0.01	0.26	0.28	2 419.52	2 416.52
3	167.27	0.40	0.03	0.49	0.52	1 677.68	1 676.92
4	400.56	0.00	0.00	0.34	0.37	1 743.80	1 774.87
5	523.56	0.90	0.12	0.19	0.34	2 028.12	2 033.21
6	240.98	0.00	0.00	0.14	0.32	2 274.10	2 154.24
7	468.26	2.00	0.02	0.26	0.26	10 127.00	10 136.58
8	476.64	0.20	0.00	0.22	0.21	14 919.34	14 918.07
9	547.60	0.40	0.21	0.46	0.48	9 512.63	9 510.03
10	491.86	0.60	0.00	0.23	0.21	3 166.66	3 169.65
11	121.59	0.70	0.00	0.39	0.39	5 600.37	5 601.33
12	539.69	0.00	0.00	0.37	0.39	3 737.87	3 738.26
13	130.83	0.80	0.00	0.12	0.22	6 448.30	6 447.64
14	508.13	4.60	0.37	0.16	0.20	1 114.73	1 091.28
15	405.63	0.00	0.00	0.31	0.39	2 320.75	2 325.49
总和	5 431.50	10.60	0.76	4.38	5.04	68 539.29	68 442.65

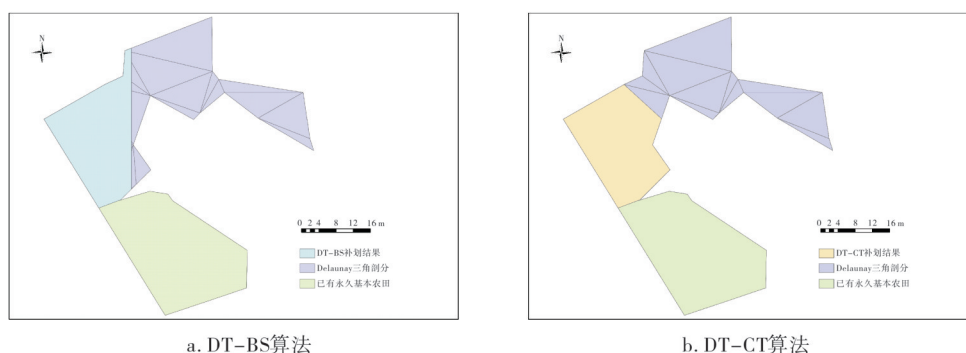


图8 两种算法在与已有永基田相邻关系上的对比

Fig. 8 Comparison of adjacency relationship with existing permanent basic farmland between the two algorithms

面积精度、形状规则度和连片度指标的计算结果表明,DT-CT算法较DT-BS算法具有相对优势,并且由于研究区位于安溪县西北部,山峦起伏,坡度大,河谷狭窄,耕地形状较为复杂,采用DT-CT算法的优势将随待补划地块数量累计递增而更加显著。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文提出了一种基于Delaunay三角剖分和交叉三角形的永久基本农田地块补划方法,并以福建省安溪县永基田业务数据为样本验证其相对优势。研究结果表明,该方法能够将不规则耕地单元细分为精细的三角形单元,并在面积约束、地块规则及邻接性优先原则下,灵活合并生成满足补划面积要求且尽量与原永基田形成连续片区的地块分配方案,显著提高了补划地块的空间连片度与邻接性,同时有效降低了地块破碎度,有利于当地农业生产 and 基础设施利用。该方法不仅能精确匹配调出地块面积,实现政策要求的进出平衡,也为未来耕地保护、空间优化及永基田动态管理提供了可操作的技术路径。

#### 3.2 讨论

本文提出的研究方法在永久基本农田地块补划中显示出较好的精度与空间连片效果,但仍存在进一步优化的空间。未来研究可以从以下几个方面展开:当数据量较大时,三角剖分和邻接合并计算量大,可通过优化算法或并行计算提升数据处理效率。此外,本研究主要基于面积和邻接性进行优化,未来可进一步引入生态指标、灌溉条件或农机作业便捷性等多目标约束,以实现更综合的空间优化。

#### 参考文献:

- [1] 陈秧分,王介勇,张凤荣,等. 全球化与粮食安全新格局[J]. 自然资源学报, 2021, 36(6): 1362-1380.  
CHEN Y F, WANG J Y, ZHANG F R, et al. New patterns of globalization and food security [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(6): 1362-1380. (Ch).
- [2] 刘金花,王雨晴,蒋海明,等. 进出平衡视角下耕地恢复潜力重点区域识别[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 216-225.  
LIU J H, WANG Y Q, JIANG H M, et al. Identifying the key regions of potential arable land restoration from the perspective of in-out balance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(12): 216-225. (Ch).
- [3] 刘灵伟,程超,闫少凯,等. 规划管控下非粮化耕地恢复适宜性评价与时序识别[J]. 农业工程学报, 2025, 41(9): 254-262.  
LIU L W, CHENG C, YAN S K, et al. Evaluation of suitability and priority identification of non-grain cultivated land under the management and control in territorial spatial planning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(9): 254-262. (Ch).
- [4] UYAN M, CAY T, AKCAKAYA O. A spatial decision support system design for land reallocation: a case study in Turkey[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2013, 98: 8-16.
- [5] 杨林波,刘欧,谢飞,等. 基于ArcMap的地块分割插件设计与实现[J]. 地理空间信息, 2016, 14(10): 80-81;6.  
YANG L B, LIU O, XIE F, et al. Design and implementation of land segmentation plug-in based on ArcMap [J]. Geospatial Information, 2016, 14(10): 80-81;6. (Ch).
- [6] 石英,程锋,朱德举. 基本农田保护区划定自动化成图中图斑分割决策模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(5): 39-42.  
SHI Y, CHENG F, ZHU D J. Study on decision - making models of polygon partition during the mapping automatically of prime farmland protection planning [J]. Geography and Geo-Information Science, 2003, 19(5): 39-42. (Ch).
- [7] 张运平,林建平,黄艺敏,等. 基于空间决策模型的耕-果错位空间分析与协调布局优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(6): 330-338.  
ZHANG Y P, LIN J P, HUANG Y M, et al. Spatial analysis and coordinated layout optimization of farmland-orchard mismatch using spatial decision modeling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(6): 330-338. (Ch).
- [8] DEMETRIOU D, SEE L, STILLWELL J. Integrating GIS and genetic algorithms for automating land partitioning[C]// Proceedings of SPIE: Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014). Bellingham: SPIE, 2014: 9229.
- [9] 邵春丽,胡鹏,黄承义,等. DELAUNAY三角网的算法详述及其应用发展前景[J]. 测绘科学, 2004, 29(6): 68-71.  
SHAO C L, HU P, HUANG C Y, et al. The expatiation of delaunay algorithms and a promising direction in application [J]. Science of Surveying and Mapping, 2004, 29(6): 68-71. (Ch).
- [10] 梁其洋,吴保国,赵春江,等. 基于德劳内三角化和二分查找法的土地自动分配方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 261-268.  
LIANG Q Y, WU B G, ZHAO C J, et al. Approach for automating land reallocation based on delaunay triangulation and binary search[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 261-268. (Ch).
- [11] 张卫正,徐武峰,裘正军,等. 基于多视角图像的植物叶片建模与曲面面积测量[J]. 农业机械学报, 2013, 44(7):

- 229-234.  
ZHANG W Z, XU W F, QIU Z J, et al. Plant leaf modeling and surface area measuring based on multi-view images [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(7): 229-234. (Ch).
- [12] 宋仁波, 朱瑜馨, 丁上珊, 等. 基于 GIS 空间分析的任意多边形骨架线自动提取方法[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 51-59.  
SONG R B, ZHU Y X, DING S S, et al. An automatic method for extracting skeleton lines from arbitrary polygons based on GIS spatial analysis [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2020, 32(1): 51-59. (Ch).
- [13] RENIERS D, TELEA A. Patch-type segmentation of voxel shapes using simplified surface skeletons [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(7): 1837-1844.
- [14] 刘远刚, 郭庆胜, 孙雅庚, 等. 地图目标群间骨架线提取的算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(2): 264-268.  
LIU Y G, GUO Q S, SUN Y G, et al. An algorithm for skeleton extraction between map objects [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 264-268. (Ch).
- [15] 张莉莉, 李友安. 通过日常变更机制完成永久基本农田核实处置工作的创新实践[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(S1): 106-108;111.  
ZHANG L L, LI Y A. Innovative practice of verifying and disposing work of permanent basic farmland through daily land use change mechanism [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2025, 48(S1): 106-108; 111. (Ch).
- [16] 王海涛, 朱洪. 改进的二分法查找[J]. 计算机工程, 2006, 32(10): 60-62;118.  
WANG H T, ZHU H. Modified binary search [J]. Computer Engineering, 2006, 32(10): 60-62;118. (Ch).
- [17] 张晓滨, 叶艳妹, 陈莎, 等. 国外农地整理权属调整技术方法研究进展及借鉴[J]. 中国土地科学, 2018, 32(11): 81-88.  
ZHANG X B, YE Y M, CHEN S, et al. Research progress and implications from international research on technology and methodology of land reallocation in agricultural land consolidation [J]. China Land Science, 2018, 32(11): 81-88. (Ch).
- [18] DEMETRIOU D, SEE L D, STILLWELL J. A parcel shape index for use in land consolidation planning [J]. Transactions in GIS, 2013, 17(6): 861-882.
- [19] 黄慧, 柯新利. 权衡耕地保护与城市扩张的永久基本农田划定——以武汉市为例[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3): 592-604.  
HUANG H, KE X L. Demarcating of permanent prime farmland for synergy of farmland protection and urban expansion: a case study of Wuhan [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(3): 592-604. (Ch).
- [20] CAY T, UYAN M. Evaluation of reallocation criteria in land consolidation studies using the Analytic Hierarchy Process (AHP) [J]. Land Use Policy, 2013, 30(1): 541-548.
- [21] 郭姿含, 杨永侠. 基于 GIS 的耕地连片性分析方法与系统实现[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 59-62.  
GUO Z H, YANG Y X. GIS-based farmland connectivity analysis methods research and system implementation [J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(3): 59-62. (Ch).
- [22] 梁晓玲, 王璐, 黎诚, 等. 基于数量、质量、生态三位一体的永久基本农田快速优化布局研究[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(6): 946-956.  
LIANG X L, WANG L, LI C, et al. Research on the rapid optimization of the layout of permanent basic farmland based on quantity, quality, and ecology [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(6): 946-956. (Ch).
- [23] 周尚意, 朱阿兴, 邱维理, 等. 基于 GIS 的农用地连片性分析及其在基本农田保护规划中的应用[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 72-77.  
ZHOU S Y, ZHU A X, QIU W L, et al. GIS based connectivity analysis and its application in prime farmland protection planning [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 72-77. (Ch).
- [24] 杨柳, 余平祥, 胡月明, 等. 基于景观生态指标的农用地连片阈值调整方法[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 112-117.  
YANG L, YU P X, HU Y M, et al. Farmland connectivity threshold adjustment based on landscape ecological indexes [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(2): 112-117. (Ch).
- [25] 杨建宇, 赵龙, 徐凡, 等. 基于耕地连片度的高标准基本农田建设划区[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 142-148.  
YANG J Y, ZHAO L, XU F, et al. Zoning of high standard prime farmland construction based on arable lands connectivity [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 142-148. (Ch).

## Research on the method for replacement of non-cultivated land parcels in permanent basic farmland

LIU Xiaohui, MAO Zhengyuan

(The Academy of Digital China, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The designation of permanent basic farmland is a crucial measure in China's land management. However, some historically delineated parcels are currently non-cultivated land or low-quality cropland, which need to be removed and replaced with existing cultivated land beyond permanent basic farmland, following principles such as areal "equivalence" and "contiguous aggregation". Existing methods for parcel supplementation often operate at the scale determined by the selected individual cultivated land parcels, making it difficult to simultaneously satisfy the requirements of precise area matching and spatial adjacency. To solve the problem, this study proposes a parcel supplementation method based on the relative positional relationships of three triangle types within a triangular network generated by the Delaunay Triangulation. Firstly, Delaunay Triangulation is employed to partition irregular polygons representing cropland into multiple triangular units. Subsequently, the main structure and branches of each parcel are identified by using "cross triangle" (also referred to as "bridging triangles"). Sub-parcels belonging to branch structures are prioritized for supplementation, and candidate triangles are selected based on area constraints and adjacency priority principles. When the cumulative area of the selected candidate triangles exceeds the target supplementation area, the current triangle is subdivided employing the bisection method. Finally, the parcels requiring supplementation are processed iteratively to form a complete parcel supplementation scheme. Research results indicate that this method can ensure the supplemented area is no less than the removed area, while improving the spatial contiguity between the supplemented parcels and the existing permanent basic farmland within the cultivated land. It significantly enhances adjacency, reduces the number of fragmented patches in the corresponding map data, effectively resolves the dual constraints of area and layout in the balance of permanent basic farmland adjustments, and improves the feasibility and spatial optimization level of the supplementation results. This holds significant importance for advancing related research in the fields of cultivated land protection and territorial spatial planning.

**Key words:** permanent basic farmland; in-out balance; land parcel replacement; space optimization; triangulation