

# 长时序海量土地利用时空数据统计优化方法<sup>\*</sup>

郜允兵<sup>1,2</sup> 张翼鹏<sup>2,3</sup> 高秉博<sup>2,4</sup> 潘瑜春<sup>2,5</sup> 张晓东<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;  
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 4. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097;  
5. 北京市农业物联网工程技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 针对任意查询区域年度现状地类面积统计困难、长时序变更流量分析计算耗时等问题, 提出基于时空变化图模型的统计优化方法。运用图的连通性原理, 对查询统计区域内和边界处的要素实体进行分类, 实现了时序快照统计优化算法, 解决了任意查询区域时点现状统计困难的问题, 提高了时序快照统计的效率。运用多商品流原理进行时空网络图约化性判定, 实现了变更流量统计优化算法, 减少了要素空间叠置分析次数, 解决了长时序土地利用变化变更流量统计耗时问题, 提高了统计的效率。最后, 以 2009—2012 年琼海市土地利用数据为例, 进一步验证优化算法的有效性和可行性。

**关键词:** 土地利用变化 图论模型 时空数据统计 时空数据分析

**中图分类号:** P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)S0-0290-07

## Statistical Optimization Method of Massive Spatio-temporal Data for Long Time Series Land Use

Gao Yunbing<sup>1,2</sup> Zhang Yipeng<sup>2,3</sup> Gao Bingbo<sup>2,4</sup> Pan Yuchun<sup>2,5</sup> Zhang Xiaodong<sup>1</sup>

(1. *College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China*  
2. *Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China*  
3. *National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China*  
4. *Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China*  
5. *Beijing Engineering Research Center of Agricultural Internet of Things, Beijing 100097, China*)

**Abstract:** Statistics analyses of spatio-temporal land use data, such as historical review, flow analysis, change index analysis and trend analysis, are important land management operations, and attract more and more attention from management and planning department. To overcome the difficulty in statistics of annual land use type in any query region and the time consuming problem in long time series change flow analysis, the statistical optimization method based on spatio-temporal variation model was proposed. For the former difficulty, the feature entities in the statistical region and boundary were classified with the proposed method based on the principles of connectivity of graphics, and then the statistical optimization algorithm of sequential snapshots was used to realize the statistics of time point status in any query area. For the latter problem, the spatio-temporal network approximation judging was carried out with the method based on multi-commodity flow principle, to reduce time consuming and improve the efficiency of long time series change flow analysis through reducing the number of spatial overlay analysis. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method were verified through case study using land use data of Qionghai City, Hainan Province from 2009 to 2012.

**Key words:** Land use change Graph theory model Spatio-temporal data statistics Spatio-temporal data analysis

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-13

<sup>\*</sup> “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAJ23B04)

**作者简介:** 郜允兵, 博士生, 主要从事时态数据库和土地资源信息化研究, E-mail: gybgis@163.com

**通讯作者:** 张晓东, 教授, 博士生导师, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: zhangxd@cau.edu.cn

### 引言

我国第2次全国土地调查、变更调查积累了海量土地利用数据,大量历史数据、现势性成果数据亟待深度挖掘利用<sup>[1-2]</sup>。随着应用的不断深入,土地管理部门对于图斑回溯、地类流向分析、土地利用变化发展规律及趋势预测等高级查询、分析功能需求更加强烈<sup>[2-4]</sup>。近年来,各类指标分析<sup>[5-7]</sup>、分析模型<sup>[8-10]</sup>和预测方法<sup>[4,11]</sup>在土地利用变化分析研究与实际应用中得到广泛应用,为土地利用的定量分析、结构调整、总体规划等提供了详实的数据<sup>[9,12]</sup>。这些指标、模型以及预测方法均以时空变化统计数据为基础<sup>[1]</sup>。土地利用数据(矢量数据)在精度、准确度等方面较遥感数据(卫星)具有明显优势,因此基于土地利用调查数据进行土地利用变化分析与预测是一个重要研究方向。土地利用时空数据管理多采用基态修正模型<sup>[3,13-14]</sup>。模型采用现状库+变更历史库形式组织数据,刻画土地利用变化。将地理实体变化更新后的数据保存到现状库,更新前的数据存储到变更历史库,记录其产生时间、消亡时间以及实体变更关系,通过要素变更关系可追溯变化过程、重现历史现状,统计分析不同时期地类变化情况,展示土地利用时空演变过程<sup>[3,15-17]</sup>。

土地利用变化统计分析可分为时序快照统计和变更流量统计两类。基态修正模型组织土地利用数据可以降低存储冗余度,快速查询各时点要素和变

更前、后的要素,在一定程度上提高了查询统计效率<sup>[3]</sup>,但其统计分析功能有限,同时,统计分析往往耗时过长,成为海量时空数据挖掘分析的瓶颈。不支持任意查询区域时序现状统计,当查询区域与地类要素存在空间相交时,地类面积统计困难,海量数据时空查询、统计耗时过长;长时序变更流量统计时,要素空间叠置分析频繁,统计分析效率低下等。针对上述问题,本文引入土地利用时空变化图论模型,采用图的连通性原理对时序现状统计过程进行优化,解决任意查询区域的时序快照统计分析困难和计算耗时问题;基于土地利用时空流量网络图,运用图论多商品流理论,对时空流量网络进行约化性判定,解决变更流量统计分析耗时的的问题,为土地利用长时序时空数据挖掘提供分析数据。

### 1 基于图论模型的优化原理研究

土地利用数据具有空间数据离散而时态变化连续的时空变化特点,可以通过现状库、变更历史库中要素对象及变更事件之间的关系构建时空数据图论模型<sup>[18]</sup>(图1)。由于包含线状地物、零星地物的优化统计方法与面要素图论模型的统计优化方法一致,本文仅以图斑为例描述土地利用数据变化图论模型。图的顶点表示在时点上发生空间变化所形成的新时空要素;图的边连接空间上交叉、时间上相遇的顶点,表达空间对象的时空变化;边的容量表示要素变更流量。由于时间不可逆,这种拓扑关系形成的图是有向无环图(DAG)。

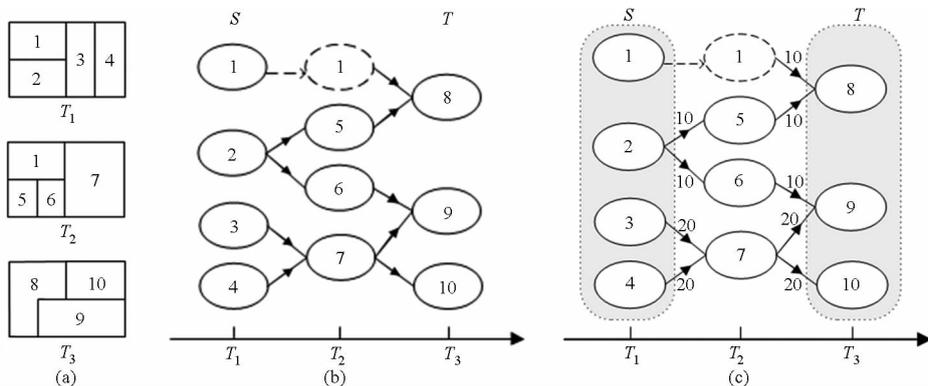


图1 时空数据图论模型

Fig. 1 Graph theory-based spatio-temporal data model

(a) 要素时序变化 (b) 要素时空变化 (c) 要素时空变化流量网络

根据以上描述可知,若2个时空实体相连,则在时间上紧邻并且存在演化关系。在空间上,由于土地利用地理空间连续铺盖无重叠,可以如下具体分析:

(1) 若顶点A只有一条“后边”指向顶点B,且顶点B只有一条“前边”指向顶点A,则空间上地块A等于地块B。

(2) 若顶点A只有一条“后边”指向顶点B,且顶点B有 $m(m > 1)$ 条“前边”,如果这 $m$ 条前边中有且仅有一条“前边”指向A,则空间上地块A包含于地块B。

(3) 若顶点A有 $m(m > 1)$ 条“后边”,且如果这 $m$ 条“后边”中只有一条指向顶点B。如果B有

且只有一条“前边”指向顶点 A,则空间上地块 A 包含地块 B。

(4) 若图中共有  $m(m > 1)$  条以 A 为起点的边,且只有一条的终点为 B,如果顶点 B 有  $n(n > 1)$  条“前边”,且有且只有一条起点为 A,则在空间上地块 A 与地块 B 相交。

图 1b、1c 时空数据图 G 的起始顶点集(图论中的源)为 S,每个源点  $s_i(i$  为整数),终止顶点集(图论中的汇)为 T,每个汇点为  $t_i(i$  为整数), $v_1、v_2$  表示不同时间点的要素实体, $g(v)$  表示时空实体  $v$  的空间投影的几何形状, $g(v_1) \cap g(v_2) \neq \emptyset$  表示要素  $v_1$  与要素  $v_2$  在空间上相交。 $S_i$  为源中某顶点, $T_j$  为汇中某顶点,对于每一个  $(s_i, t_j)$  对,设  $s_i$  到  $t_j$  相应要素的空间相交面积为  $f_{ij}$ 。可得如下结论:

(1) 在空间上离散的时空实体集合 V 和离散事件集合 E 组成的时空变化图  $G(V, E)$  中,若  $g(v_1) \cap g(v_2) \neq \emptyset (v_1, v_2 \in V)$ ,则  $v_1$  与  $v_2$  连通。

(2) 在一个有  $m$  个源  $s_1, s_2, \dots, s_m$  和  $n$  个汇  $t_1, t_2, \dots, t_n$  的有向无环时空变化流量网络(运输网络)中,每一个边所通过的流量都是已知并且是满容量的,中间顶点的流入流出的流量之和相等。

(3) 对于存在混淆顶点的时空变化流量子网络(顶点由多于 1 个源连通,并且连通到多于 1 个汇),其流量  $f_{ij}$  不能通过从  $s_i$  到  $t_j$  的多商品流唯一确定。

(4) 对于不存在混淆顶点的时空变化流量子网络,其流量  $f_{ij}$  可通过从  $s_i$  到  $t_j$  的多商品流唯一确定。

基于上述研究结论,下文分别讨论时序现状统计和变更统计的优化。

## 2 时空数据统计优化与分析

### 2.1 时序快照统计的图论优化

#### 2.1.1 时序快照统计优化

时序快照统计根据查询的系列时点、区域范围 Region(与要素实体存在切割)、地类 Attributes,统计满足条件的特征要素实体并汇总其面积。其统计过程从起始时间  $T_1$  开始到  $T_n$  结束,逐次对数据库进行时空断面查询,查询每个时点满足条件的要素 F 集合 X。集合 X 描述为

$$\{ [T_1, T_2, \dots, T_n], \text{Region}, \text{Attributes} \} \\ \left\{ X \in \left( \sum_{T_1 \in t(O_i), F(O_i) \in A_i} \text{Area}(g(O_i) \cap \text{Region}), \dots, \sum_{T_n \in t(O_i), F(O_i) \in A_i} \text{Area}(g(O_i) \cap \text{Region}) \right) \right\} \quad (1)$$

式中  $O_i$ ——时空对象

$g$ ——获取要素几何的函数

$t$ ——求要素生命周期的函数

$F(O_i)$ ——获取对象的地类

$A_i$ ——要素地类集合

时序快照统计空间范围不变,在统计起始年之前和终止年之后分别添加 2 个顶点  $In、Ex$ ,以及  $In'、Ex'$ ,分别代表起始年的统计区域和非统计区域,以及终止年的统计区域和非统计区域。通过查询事件表可以获得这段时间中所有参与变化的时空对象,并构建时空拓扑图。之后基于空间拓扑关系,将  $In$  连接到所有包含于统计区域的起始年地块,将  $Ex$  连接所有与统计区域相离的起始年地块,而同时用  $In$  和  $Ex$  连接所有与统计区域部分相交的地块;按相同的拓扑连接规则将所有终止年的地块与  $In'、Ex'$  连接。以图 2a 地块变化为例,基于图论模型的地块时空变化图及连通如图 2b 所示。

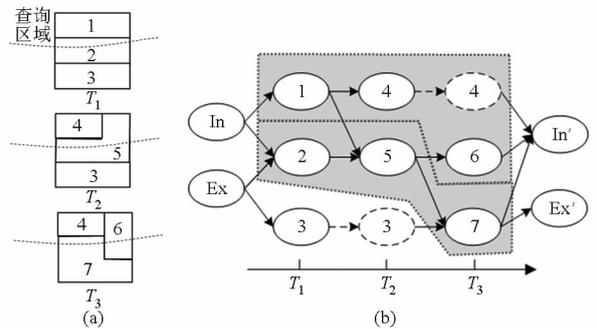


图 2 扩展的时空变化图

Fig. 2 Extension graph of spatio-temporal change

(a) 各时点查询区域 (b) 要素时空变化扩展

经过扩展后的时空变化图仍满足拓扑连接规则(图 2)。对于所有仅存在于  $T_1$  和  $T_n$  时刻之间的时空对象,根据结论 1 的逆反命题,所有仅包含于统计区域的时空对象,都不能由  $Ex$  通达,也不能通达到  $Ex'$ ,将所有这样的要素 F 计入集合 P;其中与统计对象存在相交或被包含关系的对象必然能从  $In$  连通,也能连通到  $In'$ ,将所有这样的且不属于 P 的对象计入集合 Q,即

$$P = \{ v | v \in V, v \text{ 不与 } Ex \text{ 或 } Ex' \text{ 连通} \}$$

$$Q = \{ v | v \in V, v \notin P, v \text{ 与 } In \text{ 或 } In' \text{ 连通} \}$$

时序快照统计可看作统计区内起始时间段内对不变要素和变更要素的统计。任意一个时刻 T,统计值等于整段时间都未发生变化的对象符合属性和空间筛选条件的统计面积与在时刻 T 存在的 P 类以及 Q 类对象统计面积三者之和。时序统计数学模型为

$$g[T] = \sum_{[T_1, T_n] \subset t(v_i), F(v_i) \in A_i} \text{Area}(g(v_i) \cap \text{Region}) + \sum_{T \in t(v_i), v_i \in P, F(v_i) \in A_i} \text{Area}(g(v_i) \cap \text{Region}) + \sum_{T \in t(v_i), v_i \in Q, F(v_i) \in A_i} \text{Area}(g(v_i) \cap \text{Region}) \quad (2)$$

式(2)中第1项在整个时序统计中只需计算一次,而一般在土地变化中占大多数的P类对象不需要空间运算,Q类对象数据计算量不大,因此可提高计算效率。

### 2.1.2 算法实现与效率分析

时序快照统计时根据查询的系列时点、区域范围(与要素实体存在切割)获取包含于时空范围内的未变要素 $P_0$ 、时空范围边界处未变要素 $Q_0$ ,根据 $P_0$ 、 $Q_0$ 的要素标识码获取要素地类及几何形状,按地类汇总地类面积。创建要素时空变化图结构,查询时空范围内变更事件 $E$ ,并生成要素时空变化图 $G$ (图2b),采用图的有向边起点、端点连通性原理,并用图的连通性算法遍历中间顶点,标记中间顶点的源点、汇点,判别图的中间顶点的源点、汇点的连通特性划分要素为P类或Q类要素,也即中间顶点 $V$ 未标记 $Ex$ 或 $Ex'$ 的即为查询区域内要素(P类要素),否则即为被查询边界切割的要素(Q类要素)。 $P_0$ 、 $Q_0$ 、 $S_0$ 以及变更事件 $E$ 等的查询算法可通过时空查询语句(STQL语句)表达,在此不赘述。 $SumPart(Q_0)$ 表示获取要素对象几何形状(Shape),利用拓扑关系计算相交部分的面积,精确统计区域边界部分地类面积。时序快照统计完整计算流程如图3所示。

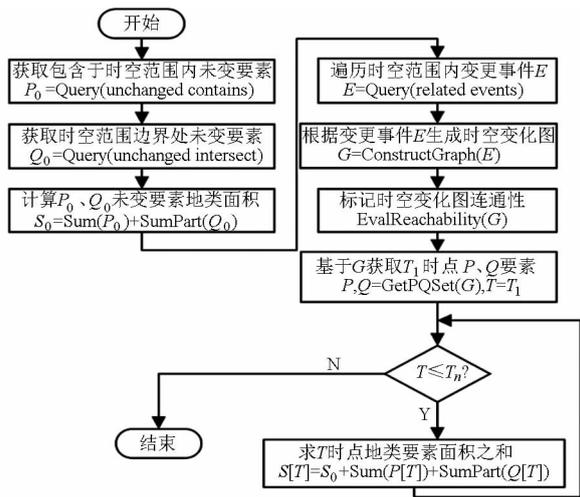


图3 时序快照统计流程

Fig. 3 Statistical process of sequential snapshot

连通性标记算法(广度优先算法)可描述为:  
 ①建立扩展时空图起始源点集(In、In')。②取任一源点 $v_1$ 的出边 $b_1$ ,查找出边 $b_1$ 的终点 $v_2$ ,将顶点 $v_2$ 连通的源点标记为 $v_1$ 连通的源点,并将 $v_2$ 标记为已访问。③若该中间顶点连接1个源点,则中间顶点的源(也即有向边起点)中记录源ID(In或In'),若中间顶点连接多个源点,则中间顶点的源标记为-1。④逐层对时空变化图G的中间顶点遍历,直到所有中间顶点标记所连接源(In、In')。中间顶点

的汇点标记与源点标记方法类似。

在整个时序统计过程中只需要进行一次完整的时空查询,是传统逐年现状统计时间消耗 $1/(T_n - T_1)$ 。P类要素仅为历年不变要素的一小部分,时间消耗也不大;同时,实际查询时被查询区域切割的变更要素(Q类要素)非常小,算法所需的空间对象的查询及统计计算量也很小,时间消耗也很小。另外,参与时空变化图构建的事件数为 $k$ ,易知其遍历的时间复杂度为 $O(k)$ ,获取P类要素时间,对于统计时间损耗贡献不大。因此该算法在效率上比基于时序快照直接查询统计有显著提高。

## 2.2 变更流量统计的图论优化

### 2.2.1 变更流量统计优化

土地利用变更流量统计严格按变更前后要素的空间位置进行计算<sup>[19]</sup>,计算时将 $T_1$ 年、 $T_2$ 年2个时点指定区域范围内的参与变更的点、线、面要素图层的所有空间对象进行叠置求交(Intersect),其相交后形成要素M的几何面积为变更前要素到变更后要素地类转移的流量。遍历所有相交要素M的流量可以统计出整个区域的全部地类面积流量,但此方法空间叠置计算耗时过长。阮森轩等提出基于事务的土地利用时态统计模型,通过构建“变更索引表”以加速统计查询过程<sup>[16]</sup>,但此方法不适用于同一区域内 $T_1-T_2$ 年多次变更的情况。

对于每次土地利用变化,变化前地理要素集合 $v$ 和变化后地理要素集合 $v'$ 可看做对地理空间全集的2次划分,叠置后叠置层的要素集合可看做是 $v$ 和 $v'$ 的交叉划分,其中要素的面积 $Area(g(O_i) \cap g(O_j))$ ( $O_i \in V, O_j \in V'$ )即为这次变化的流量单元。对于所有涉及到流量变化的时间上紧邻的( $O_i, O_j$ )关系,可在变更事件表扩展一个字段ChangeArea(变更面积),记录流量单元大小 $Area(g(O_i) \cap g(O_j))$ 。变更事件表中预存流量之后,对于只发生一次变更的要素,其相应流量可以直接从表中读出,统计时不必叠置分析。然而,当统计时段内包含多次变化时,并不能够通过包含流量信息的变更事件表来直接计算最初时刻到最末时刻之间的变化流量。在这种情况下,可通过每一个地块的始末状态、事件表中的变化历史以及紧邻年间的一次流量记录构建时空变化流量图进行统计。

以图1b中要素变化的时空变化图为例,图1c中时空实体 $v_i$ 到 $v_j$ 的边记为 $(v_i, v_j)$ , $v_i$ 到 $v_j$ 的容量记为 $c(v_i, v_j) = Area(g(v_i) \cap g(v_j))$ ,起始时刻到终止时刻之间所有的时空实体(顶点集 $V$ )、变更事件(有向边集 $E$ )以及相应变更面积(容量函数 $c$ )组成一个多源、多汇的运输网络(图1c),记作

$N(V, E, c)$ 。对于每一个  $(s_i, t_j)$  对, 设  $s_i$  到  $t_j$  相应要素的空间相交面积大小为  $f_{ij}$ ,  $f_{ij}(u, v)$  表示在事件  $E$  中参与变更的  $s_i$  到  $t_j$  的流量分量, 则  $N(V, E, c)$  的多商品流为

$$f_{ij}(u, v) = \begin{cases} \text{Area}(g(s_i) \cap g(t_j) \cap g(u) \cap g(v)) & ((u, v) \in E) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (3)$$

在记录时间相邻变化的流量信息之后, 其变更面积已知, 也即所有的边容量  $c$  已知。

由于  $\bigcup_{i=1}^m g(s_i) = \bigcup_{j=1}^n g(t_j) = U$ , 多商品流  $f$  应当满足条件

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}(u, v) = \text{Area}(g(u) \cap g(v)) = c(u, v) \quad (4)$$

$N(V, E, c)$  还具备以下特性, 即对于每个中间顶点  $v$  有

$$c^-(v) = \sum_{(u,v) \in E} \text{Area}(g(u) \cap g(v)) = \text{Area}(g(v_i)) \quad (5)$$

$$c^+(v) = \sum_{(v,w) \in E} \text{Area}(g(v) \cap g(w)) = \text{Area}(g(v_i)) \quad (6)$$

其入边和出边容量之和相等, 即  $c^-(v) = c^+(v)$ 。

### 2.2.2 网络流约化性判定

以图 1c 时空变化流量网络为例, 当时空网络中存在一个  $S-T$  独占割  $\delta(X)$  时  $S-T$  独占割是一种特殊有向边的集合, 仅由某一个源  $s_i$  通达并且仅通达达到某一个汇  $T_j$  的有向边组成, 所有顶点对  $(s_i, t_j)$  的流量  $f_{ij}$  是唯一确定的,  $f_{ij}$  为  $\delta(X)$  中所有  $s_i$  到  $t_j$  独占边的流量和 (证明略)。而  $\delta(X)$  的存在性依赖于网络中是否存在混淆顶点, 因此可利用  $\delta(X)$  存在性来判定一个网络是否可以唯一确定每一个  $S-T$  顶点对的流量分量。若网络中不存在混淆顶点, 则该网络可约化, 该网络中所有  $S, T$  顶点之间的流量可直接利用  $\delta(X)$  的预存流量信息计算; 否则, 该网络不可约化, 需使用叠置分析法来计算该网络中  $S-T$  之间的流量。约化性判断如图 4 所示。

时空流量网络中 (图 4), 查询起始时刻要素  $v_1, v_2, v_3, v_4$  为源, 查询终止时刻要素  $v_8, v_9, v_{10}$  为汇; 其上部子网络中, 存在割  $[\{v_1, v_2\}, \{v_5, v_6, v_8, v_9\}]$ , 其中边  $(v_1, v_8)$  只连通源  $v_1$  和汇  $v_8$ ,  $(v_2, v_5)$  只连通源  $v_2$  和汇  $v_8$ ,  $(v_2, v_6)$  只连通源  $v_2$  和汇  $v_9$ ; 因此存在  $S-T$  独占割, 可约化, 流量可直接从边的容量获取,  $v_2$  到  $v_8$  的流量为  $c(v_2, v_5)$ ,  $v_2$  到  $v_9$  的流量为  $c(v_2,$

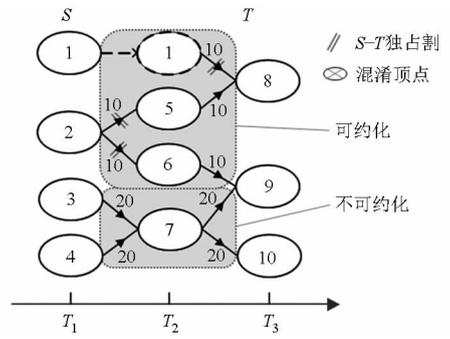


图 4 约化性判定

Fig. 4 Reducible decomposition method

$v_6$ )。其下部子网络中,  $v_7$  同时连通源  $v_3, v_4$  和汇  $v_9, v_{10}$ , 是一个混淆顶点, 不可约化, 需通过要素叠置分析计算地类流量。

### 2.2.3 算法实现与效率分析

时空流量网络可由时空变化图生成, 标记时空变化图的连通性即可确定网络中是否存在混淆顶点。在实际计算中, 运用基于图的广度优先算法 (BFS) 寻找网络中的所有混淆顶点, 将网络分为可约化的不含混淆顶点和不可约化的包含混淆顶点的 2 类子网络。对于其可约化子网络寻找  $S-T$  独占割, 逐一查询变化前后要素地类, 统计其变化流量。对于不可约化子图, 根据混淆顶点编号从数据库中获取包含要素几何 (shape) 并利用叠置分析计算流量。以图 4 为例, 变更统计图论优化的完整计算流程如图 5 所示。

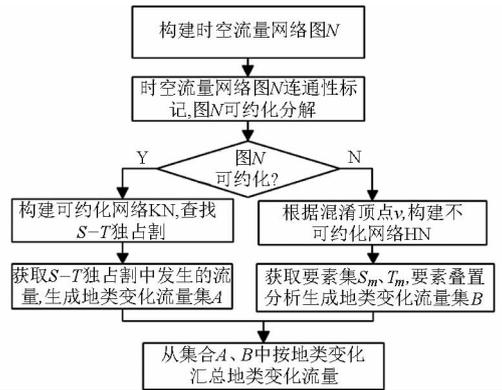


图 5 变更流量计算流程

Fig. 5 Process of change flow

变更流量计算的算法实现步骤如下:

- (1) 根据查询起始时点 ( $T_b$ )、终止时点 ( $T_e$ )、空间范围 (Region) 获取变更事件, 以及事件表中逐年间的要素空间相交的面积, 构建时空流量网络  $N$ 。
- (2) 使用连通性标记算法对时空流量网络  $N$  的中间顶点和源点的末端连通性是否唯一进行标记。
- (3) 遍历时空流量网络  $N$ , 利用连通性标记结果取出混淆顶点集合  $v_{mix}$ 。找到所有混淆顶点, 将

与这些顶点连通的部分组成的网络看作不可约化网络 HN, 转到步骤(4)、(5)。

(4) 对其补网络(可约化网络 KN)寻找  $S-T$  独占割( $S-T$  独占边集合 cuts), 转到步骤(6)。

(5) 利用混淆顶点找到不可约化子图的起始时点要素集以及终止时点要素集  $S_m$  和  $T_m$ , 从时空数据库获取这些要素包含 shape 的数据并利用叠置分析计算流量。

(6)  $S_m$  与  $T_m$  之外的源和汇及不与  $S_m$  和  $T_m$  连通的中间顶点组成可约化子图, 查找并取出子图中  $S-T$  独占割( $S-T$  独占割查找算法如图 6 所示, 其中  $ed_1$  表示网络流向图中的出边), 也即 cuts 中不是由  $S_m$  连通且不通达到  $T_m$  的边组成的集合, 逐一查询变化前后要素, 统计其地类变化流量。

(7) 汇总步骤(5)、(6)计算的流量得到整个时空查询区域的地类变化流量。

状地物共 18 万个(零星地物较少, 不计), 2009—2012 年变更图斑 2 233 个(年度变化前后图斑累加), 线状地物 1 048 个(图 7)。在 Windows 7 64 位系统, 双核 2.83 GHz CPU、6 GB 内存的台式机上, 地类变化幅度分析查询统计耗时 41 237 ms, 地类变化转移分析计算耗时 2 867 ms。

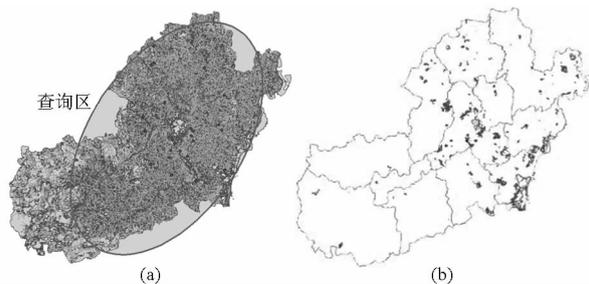


图 7 试验区现状及变化(2009—2012 年)

Fig. 7 Present situation and change of statistical area from 2009 to 2012

(a) 土地利用现状 (b) 要素变化

时序现状统计、变更流量统计要素变更情况及优化统计信息见表 1、表 2。可以看到, 时序现状统计优化方法, 仅需要统计 2009—2012 年内不变要素一次和年度变更要素(线状地物、地类图斑), 且对于任意查询区域边界与要素切割下的面积统计有明显优势。将时序统计中参与变更统计要素分为  $P$  类变更要素和  $Q$  类变更要素, 实证知边界处变更要素( $Q$  类要素)很少, 故提高了时序现状统计效率。对于变更流量统计来说, 起止年变更要素叠置分析最耗时, 通过本文优化方法可大大减少叠置分析数量, 因此流量分析效率得到大幅提高。

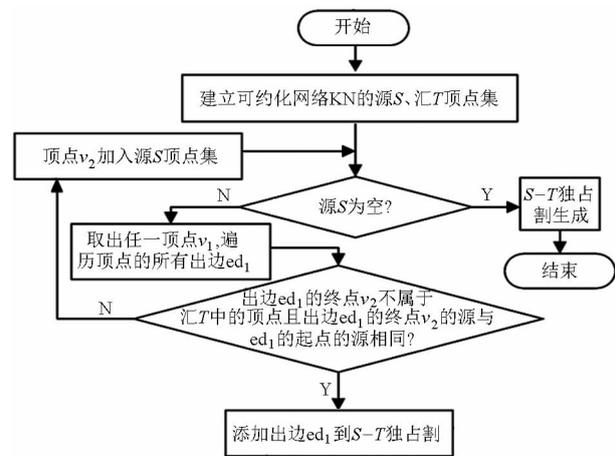


图 6 独占割查找算法

Fig. 6 Exclusive cuts searching

从上述优化过程知, 基于时空变化流量网络图的连通性标识、独占割查找等步骤均以图的广度优先算法(BFS)为基础, 其遍历算法的时间复杂度是  $O(l * \lambda)$  ( $l$  为变更事件数,  $\lambda$  为时空变化流量网络图中顶点的平均扇出也即平均边数)。由于步骤(5)以外的过程不涉及空间几何要素运算, 复杂度不大于  $O(l * \lambda)$ , 整个算法的速度瓶颈只在步骤(5); 而在步骤(5)中, 需要运算的空间几何要素非常小, 因此效率明显提高。

### 2.3 实例分析

以琼海市 2009—2012 年土地利用数据为例, 基于基态修正模型建立了时空数据库, 记录要素年度变更事件、要素生命周期以及紧邻 2 年要素变化流量, 通过统计 2009—2012 年查询区域(图 7 中椭圆区域)内地类变化幅度(统计各年地类面积)和计算 2009—2012 年的地类变化转移情况(起止年地类流量), 来验证其优化效率。整个试验区地类图斑、线

表 1 时序现状统计

Tab. 1 Time sequence snapshot statistics

查询条件	不变要素 (紧邻年间)	变更要素 (变化前后)	P 类要素 (2009— 2012 年)	Q 类要素 (2009— 2012 年)
2009—2010 年	180 707	1 025	3 265	5
2010—2011 年	180 964	598	3 265	2
2011—2012 年	180 613	1 316	3 265	6

表 2 变更流量统计

Tab. 2 Change flow statistics

统计条件	变更前要素	变更后要素	通路数	不可约化
2009—2011 年	837	869	873	12
2009—2012 年	1 424	1 468	1 493	18

注: 变更前后图斑指参与变更的图斑, 不含变更统计中间年变化图斑。

### 3 结论

(1) 基于基态修正模型构建的土地利用时空数据库, 通过相邻年间要素对象唯一标识码、变更前后

关系以及变更要素之间的变更面积,可快速建立时空变化图和时空流量网络图。

(2) 基于时空变化扩展图,运用图的连通性原理,可对查询区域边界内和边界处的变更要素进行标记,有效地解决任意查询区域时序快照统计的问题,避免统计中未变更要素重复查询统计,提高了时序快照统计的效率。

(3) 基于时空网络流量图,运用多商品流原理,可有效提取流量图中可约化子网络,大幅降低多年变化流量分析中要素空间叠置分析次数,提高了变更流量统计效率。

(4) 该方法也适用于土地利用规划、地籍管理等其他领域的地类面积统计分析。

## 参 考 文 献

- 彭朝冰,张禾裕,罗斌,等. 我国土地空间数据挖掘应用现状与趋势综述[J]. 国土资源信息化, 2013(2): 33-36.
- 朱炎,滕龙妹,徐财江,等. 土地动态利用时空数据挖掘的方法及其实现[J]. 经济地理, 2006, 26(增刊1): 124-127.
- 郜允兵,潘瑜春,高秉博,等. 面向土地利用调查的时空数据库构建技术[J]. 测绘科学, 2015, 40(5): 49-54.  
Gao Yunbing, Pan Yuchun, Gao Bingbo, et al. Key technologies for land use survey oriented spatio-temporal database construction [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(5): 49-54. (in Chinese)
- 杜云艳,王丽敬,季民,等. 土地利用变化预测的案例推理方法[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1421-1429.
- 万远,李霖,应申,等. 土地利用变化分析与决策系统的设计与实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 313-318.  
Wan Yuan, Li Lin, Ying Shen, et al. Design and implementation of land use change analysis and decision system [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 313-318. (in Chinese)
- 刘瑞,朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 2010, 32(8): 1544-1550.  
Liu Rui, Zhu Daolin. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix [J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550. (in Chinese)
- 王秀兰,包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 83-89.
- 赵小汎. 区位熵模型在土地利用变化分析中的新运用[J]. 经济地理, 2013, 33(2): 162-167.
- 朱会义,李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.  
Zhu Huiyi, Li Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 643-650. (in Chinese)
- 杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007, 32(5): 414-418.  
Yang Guoqing, Liu Yaolin, Wu Zhifeng. Analysis and simulation of land use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414-418. (in Chinese)
- 梁明,孙毅中,罗荣,等. 基于综合多尺度特征决策树模型的土地利用变化分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 259-267.  
Liang Ming, Sun Yizhong, Luo Rong, et al. Analysis on land use change based on decision-tree model with comprehensive multi-scale characteristics [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 259-267. (in Chinese)
- 李秀彬. 对加速城镇化时期土地利用变化核心学术问题的认识[J]. 中国人口:资源与环境, 2009, 19(5): 1-5.  
Li Xiubin. Research priorities for land use change in the accelerated phase of urbanization [J]. China Population Resources and Environment, 2009, 19(5): 1-5. (in Chinese)
- 余江峰,冯学智,都金康. 时空数据模型的研究进展评述[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2005, 41(3): 259-267.  
She Jiangfeng, Feng Xuezhi, Dou Jinkang. A review on progress in spatiotemporal data modeling [J]. Journal of Nanjing University: Natural Sciences, 2005, 41(3): 259-267. (in Chinese)
- 尹章才,李霖. 基于快照-增量的时空索引机制研究[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 257-261.  
Yin Zhangcai, Li Lin. Research of spatio-temporal indexing mechanism based on snapshot-increment [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2005, 34(3): 257-261. (in Chinese)
- 唐远彬. 土地利用更新的联动机制与增量提取[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- 阮淼钎,刘仁义,刘南,等. 基于事务的土地利用时态统计模型研究[J]. 计算机应用研究, 2005, 22(7): 31-33.  
Ruan Miaochan, Liu Renyi, Liu Nan, et al. Research on land utilization temporal statistic model based on event [J]. Application Research of Computers, 2005, 22(7): 31-33. (in Chinese)
- 滕龙妹,刘仁义,刘南. 基于双效机制的时空数据模型研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(6): 634-639.  
Teng Longmei, Liu Renyi, Liu Nan. A study on spatio-temporal data model based on feature and event [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(6): 634-639. (in Chinese)
- 尹章才,李霖,艾自兴. 基于图论的时空数据模型研究[J]. 测绘学报, 2003, 32(2): 168-172.  
Yin Zhangcai, Li Lin, Ai Zixing. A study of spatio-temporal data model based on graph theory [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2003, 32(2): 168-172. (in Chinese)
- 国务院第二次全国土地调查领导小组办公室. 第二次全国土地调查数据库更新技术规范(试行)[S]. 2009.