



# 空间数据连续尺度表达的矢量金字塔模型

晏雄峰<sup>1</sup> 艾廷华<sup>1</sup> 张 翔<sup>1</sup> 杨 伟<sup>1</sup>

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

**摘要:**连续多尺度表达是当前地图制图领域中的热点问题之一,常规地图采用多级瓦片剖分、多版本存储技术实现空间多尺度表达,存在数据量冗余、跨级别不一致、瓦片间尺度跳跃大等问题。结合传统地图综合、多尺度表达数据结构和空间索引建立等多种策略,在目标数据模型中加入尺度维和操作信息,记录地图综合的过程和尺度变换,建立空间数据矢量金字塔模型。该模型离线综合获取多级基态尺度表达数据,确定每个目标的尺度表达空间范围,并通过面向对象建模技术将目标表达状态及其纵向关联关系、算子类型及控制参数等信息封装在多尺度目标中;同时,建立一端或两端控制的尺度变换结构。基于该模型可快速获取适应用户需求的连续尺度表达状态。

**关键词:**连续多尺度表达;金字塔模型;地图综合;多尺度数据结构;尺度变换

**中图法分类号:**P208; P283

**文献标志码:**A

在现有大数据、多媒体可视化、云计算服务等数字平台支撑下,空间数据获取和多样化表达都取得了突破<sup>[1]</sup>,基于地图的网络服务也逐渐融入了人们的日常生活,例如位置查询、出行导航、餐饮购物等。现有的网络地图表达形式主要有基于栅格地图和影像的多级瓦片或者基于原始数据渲染的可视化地图,可以提供多级比例尺地图的在线可视化服务,但其基础数据的组织结构仍无法满足用户多角度、多视点、多层次对空间认知表达的需求<sup>[2]</sup>。如多级瓦片只能显示存储有限的离散比例尺,栅格数据组织方式也无法针对用户需求制作个性化可视化地图;而基于原始矢量数据的渲染过程,以“资格比例尺”作为控制指标规定某目标在一定比例尺区间显示或消失,会造成相邻比例尺之间地类的整体消失(如居民地要素),数据的横向与纵向一致性关系破坏导致浏览时视觉突变<sup>[3]</sup>。因此,如何对空间矢量数据进行有效的组织,结合网络化服务平台,建立可提供连续尺度可视化定制服务,是目前地理信息科学领域核心研究问题之一。

连续尺度表达实质上是多尺度、多应用主题的数据集成<sup>[4]</sup>,其关键问题之一是数据多尺度表达状态划分,解决方案依赖于地图综合技术,即尺

度变换,其相关研究也颇受学者关注。文献[5-6]从尺度概念阐述了变换操作对象,主要包括时间、空间、语义层次3个维度;文献[7]从映射变换、几何变换、地理变换等角度来描述变换操作过程,并在此基础上将其划分为尺度上推与尺度下推两种类型,前者表现为信息综合,后者表现为数据内插<sup>[8]</sup>。这些研究主要提出了一些单项的尺度变换理论与方法,并没有嵌入到多尺度表达的数据模型中。

针对多尺度表达的数据模型,学者也展开了研究。在概念层次上,文献[9-10]基于层次结构原理分别提出“层次地图空间”和“地图立方体模型”概念,用于描述尺度变换过程及对象之间的层次关系;文献[11]基于空间知识和规则推理,提出多尺度概念模型,存储离散尺度或运用地图综合满足用户多尺度表达的需求;文献[4]基于本体描述逻辑提出多表达地理本体方案,形式化描述拓扑和上下文语义信息;文献[12]总结了综合变换、LOD(level of details)变换、Morphing变换和等价变换4种尺度变换的技术实现策略,并建立空间数据表达的生命期模型;文献[13]从面向空间的角度对土地利用等拓扑覆盖数据进行建模,并加入尺度维度构建“空间-尺度立方体”模型,可通

收稿日期:2016-05-16

项目资助:国家自然科学基金(41531180, 41401447);国家高技术研究发展计划(2015AA1239012, 2015AA124103)。

第一作者:晏雄峰,博士生,主要从事空间数据匹配及更新研究。xiongfeng.yan@whu.edu.cn

通讯作者:艾廷华,博士,教授。tinghua\_ai@tom.com

过切割操作查询出细粒度的尺度。此类研究结合尺度维度,建立空间实体或现象的认知模型,然而,由于其认知的抽象性和表达的复杂性,与现有 GIS 技术兼容性并不是很好,实现难度较大。在逻辑层次上,多尺度研究集中在两方面:一是支持多尺度表达的数据结构,其思想是在矢量数据的组织结构中加入尺度信息,通过尺度的控制,对目标内片段(如点坐标)重组排列,实现多尺度表达<sup>[14]</sup>,常见的数据结构包括 BLG-Tree (binary line generalization-Tree)、Strip-Tree、PR-File、变化累积模型等。二是多尺度空间索引,它是在多级尺度之间建立目标的关联关系,侧重于描述上下尺度之间的过程和关系,而不是仅记录结果,文献[15]对现有几种多尺度空间索引技术的优缺点做了较详实的综述。多尺度表达的数据结构是几何细节层次的尺度划分,而空间索引方法是目标层次的尺度划分<sup>[2]</sup>。另外,一些学者也尝试结合两者建立混合型的多尺度数据模型,以满足特定的应用需求<sup>[16]</sup>。然而,该类研究仍集中于针对单一或少数地理要素或几何类型,在实践上缺乏集成化的应用。

基于上述分析,本文结合多级尺度预存储、多尺度数据结构和多尺度空间索引等技术策略,运用地图综合技术处理并存储几级关键尺度作为基态数据,在目标数据模型中加入尺度维和操作信息,记录地图综合的过程和尺度变换,构建一种新的空间数据模型—金字塔模型。该模型通过离线式地图综合确定目标的尺度表达空间范围,并建立目标之间的纵向关联关系,同时通过面向对象思想将该综合过程中目标表达状态、算子类型及控制参量等信息进行集成封装。在金字塔模型中,每个目标都具有独立的表达状态,可通过尺度信息的查询并结合尺度变换操作控制目标的几何细节层次,实现尺度的连续表达。

## 1 多尺度表达金字塔模型

在现有空间数据模型中常用的描述结构是实体-关系( $\langle entities\text{-relationships} \rangle$ ),其中实体包括点、线、面等,用平面坐标( $x, y$ )和语义状态描述;实体间关系包括拓扑、顺序和度量等空间关系。这种结构静态地描述了单一尺度下目标的状态和关系,是地图综合的结果;但不能动态地描述多尺度之间目标的状态和关系变化情况,缺乏地图综合的中间过程信息,无法实现多层次的视觉变换。因此,本文在此基础上加入尺度维和综合

操作信息,其结构形式为 $\langle entities(x, y, s)\text{-relationships-operations} \rangle$ ,其中尺度维( $s$ )用于描述在地图表达空间中每一个空间实体存在的尺度范围,实体之间的关系描述也不单指同一尺度下的横向拓扑关系,还包括不同尺度之间的纵向关联关系,而操作则记录空间实体在地图综合过程中的综合操作算子类型及过程控制参量等信息。

金字塔模型在存储设计上包括两个部分:基态数据和尺度变换。其中基态数据是预存储的几级关键性尺度数据,主要为了避免在地图表达空间中由于数据尺度跨越太大而在表达形式上出现非常大的差异。预存储的基态尺度可以根据应用场景、存储大小及地理区域特征确定。而尺度变换是通过对基态数据控制,采用 LOD、Morphing 变换技术获取中间的连续尺度数据。金字塔模型及其与用户交互的框架结构如图 1 所示。

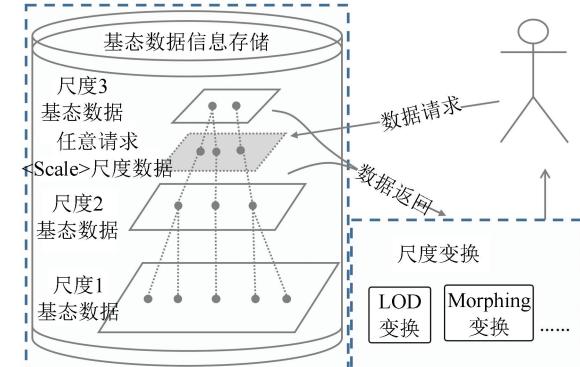


图 1 多尺度金字塔模型框架

Fig.1 Framework of Multi-scale Pyramid Model

在每一级基态数据中采用面向对象思想,将空间对象或现象组织成点、线、面等实体目标,而每个目标在表达的状态也有相应的尺度范围 $[S_0, S_t]$ ,在该范围内包含了离线式综合操作过程 $G(s)$ 和在线式尺度变换过程 $T(s)$ 两个过程。因此,可将其形式化描述为:

$$\{O(x, y, s), O', G(s), T(s)\}, s \in [S_0, S_t]$$

其中, $O(x, y, s)$ 为基态中实体目标, $O'$ 记录了在下一邻近基态中的对应目标,若不存在对应目标则为 null; $G(s)$ 记录了综合操作的过程信息,包括综合算子类型、综合尺度区间/点、综合参数以及综合结果; $T(s)$ 记录了尺度变换时目标几何表达层次信息,其内容可设计相应的支持多尺度表达的数据结构记录,如 BLG 树。

### 1.1 综合操作过程信息 $G(s)$

综合过程信息  $G(s)$ 可用四元组 $\langle operators, scale, parameters, result \rangle$ 结构形式记录。其中

operators 表示综合算子类型,包括选取、化简、聚合、融合、合并、中轴化、夸大、符号化、重分类等<sup>[17]</sup>; scale 表示执行操作的尺度点或者区间,例如化简区间和多边形合并的尺度点; parameters 表示操作参数,例如最小弯曲大小;而 result 则记录了操作执行的结果,也即相邻的下一级基态比例上与之相关联的目标,部分操作执行后目标被删除,result 表示为 null。每一个目标可记录多个操作信息。

不同的综合操作在算法决策、动作执行方式、参数类型等方面都存在差异,因此其金字塔结构中记录的指令也不同。下面针对不同操作特点,对不同的综合算子归类划分,相应介绍其在金字塔模型中操作过程的记录。

1)选取。选取是对目标进行取舍,传统综合是对目标的批量取舍,而在金字塔结构中则需要逐个目标确定其表达尺度范围,其核心思想是对目标进行重要性排序。在确定每个目标的重要次序后,依据开方根规律等控制数量和比例尺之间的关系,即可计算出每个目标的最小表达尺度  $S_{\min}$ 。算法上,文献[18-19]中提出的空间竞争思想,可实现点群和网络进行逐个目标的重要性排序。

2)聚合、合并。该类算子都是将语义特征相同的多个目标,在某一尺度点综合为单一目标表示,是几何形态上的变化,其综合过程信息  $G(s)$  可按四元组结构统一表示。例如,目标 A、B 在尺度点  $S_0$  处聚合为新目标 C 表示,聚合距离参数为 dis, 则 A、B 综合过程信息  $G(s)_A$  和  $G(s)_B$  可记录为  $G(s)_A = G(s)_B = \langle \text{operators: aggregation, scale: } S_0, \text{ parameters: dis, result: } C \rangle$ , A、B 尺度范围为  $[0, S_0]$ , 而 C 尺度范围  $[S_0, 1]$ 。

3)融合。融合是将不同语义特征的多边形目标在某一尺度点进行合并的过程,主要涉及语义结构的综合。在不考虑剖分的情况下<sup>[20]</sup>,目标 A 在尺度点  $S_0$  融合到目标 B 得到新目标  $B'$ , 则  $G(s)_A$  表示为  $\langle \text{operators: merge, scale: } S_0, \text{ parameters: Semantic } \{x_B\} = \text{semantic } \{x_B\}, \text{ result: } B' \rangle$ ,  $G(s)_B$  可表示为  $\langle \text{operators: merge, scale: } S_0, \text{ parameters: null, result: } B' \rangle$ , A、B 尺度范围为  $[0, S_0]$ ,  $B'$  尺度范围  $[S_0, 1]$ 。数据结构上,GAP 树也提供了支持融合操作的多尺度表达策略。

4)夸大、收缩、中轴化。该类算子都是单一目标在某一尺度点发生几何形态上的变化,其过程都是“突变”成新状态。例如,目标 A 在尺度点  $S_0$

中轴化表达出新目标  $A'$ , 其最小宽度为  $w_{\min}$ , 则  $G(s)_A$  为  $\langle \text{operators: axis, scale: } S_0, \text{ parameters: } w_{\min}, \text{ result: } A' \rangle$ , A 和  $A'$  的尺度范围分别为  $[0, S_0]$  和  $[S_0, 1]$ 。

5)符号化、重分类。符号化和重分类都可归类为语义结构综合,在金字塔结构中需要记录目标的操作执行点和语义结构变化情况。例如二级类 A 在尺度点  $S_0$  处重分类为一级类 B, 则所有二级类目标  $G(s)$  为  $\langle \text{operators: classification, scale: } S_0, \text{ parameters: semantic } \{code\} = B, \text{ result: null} \rangle$ , 由于其几何状态并不会变化, 尺度范围为  $[0, 1]$ 。

## 1.2 尺度变换 $T(s)$

通过记录综合过程信息,每个目标在尺度空间下都有独立的尺度存在范围,但是不同尺度的表达不但表现在目标数量上的变化,还包含几何细节的变化<sup>[21]</sup>,因此需要通过化简、LOD 变换等操作控制目标的几何表达详细程度,获得连续尺度变化。在记录综合过程信息时,由于选取和融合等操作,相邻基态数据之间目标也并不是严格的 1:1 对应关系,部分目标在小尺度基态数据中并不存在匹配对象,因此,尺度变换也可以有两端控制和一端控制两种情形。

1)两端控制。两端控制是指相邻基态数据之间存在匹配关系的目标,可以综合考虑上下两个状态并进行融合内插得到新状态的过程,如采用 Morphing 形态变换实现线、面目标的连续表达<sup>[22]</sup>。其尺度变换过程  $T(s)$  可形式化为:

$$T(s) = M(g_0, g_t, s), s \in [S_0, S_t]$$

其中,  $g_0$  和  $g_t$  分别代表相邻两个基态数据。

2)一端控制。一端控制是指在相邻基态数据中大尺度下存在而小尺度下消失的目标,只能通过一端控制,得到中间状态表达,如采用 BLG 树、变化累积模型等 LOD 技术实现不同粒度的细节层次表达。其尺度变换过程  $T(s)$  可形式化为:

$$T(s) = L(g_0, s) = g_0 \pm \sum \Delta R_i, s \in [S_0, S_t]$$

其中,  $g_0$  代表基态数据,  $\Delta R_i$  为不同的细节层次。

尺度变换过程是几何不同细节层次表达,能实现化简等操作,可以通过 BLG 树等多种数据结构记录细节层次信息,并达到快速变换的目的。移位操作主要是解决地图综合或符号化操作完成后,进一步保证表达正确性和关系一致性,需要实时进行。

## 2 金字塔模型的建立和应用

金字塔模型的显著特点是将地图综合的过程、目标之间的关联关系以及尺度变换操作记录到数据库或数据结构中,使得该模型可以动态快速导出连续式的尺度表达。由大比例尺基态数据离线式综合生成下一级别小比例尺基态数据,在综合过程中,选取、合并、中轴化等操作会导致相邻基态数据出现旧目标消失、新目标出现等情况,目标之间也存在多种对应关系。通过对综合过程的记录不但可以得到这种关联关系,还可以得到其关系演变过程,这是仅记录相邻基态数据时无法实现的。

金字塔模型建立的过程与基态数据之间的综合过程相对应,只不过其将综合过程信息按照指定的形式结构进行存储,在实体-关系的结构上加入了尺度维和操作信息,控制目标的表达范围和建立目标之间的关联关系。在此基础上,进一步采用 LOD 技术从一端或两端控制目标的几何细节层次变换,实现连续尺度表达。

基于上述思想,本文以图 2 中居民地、道路、水系和植被等主要基础地理要素为示例说明金字塔建立和连续尺度导出的过程,但限于篇幅并不深入讨论地图综合的决策过程。

在图 2 中,居民地  $b_1$ 、 $b_2$ ,道路  $r_1$  等目标由于选取操作,在小尺度基态数据中消失,其消失的尺度点可通过选取算法计算得到,因此可按综合操作过程信息  $G(s)$  四元组结构记录信息,具体见表 1。对于面状水系  $h_1$ ,其在小尺度基态数据中以线状目标  $h'_1$  呈现,其可能在某一尺度点  $S_4$  出现中轴化操作,因此可在表结构中记录  $h_1$  的尺度范围  $[0, S_4]$  和新状态  $h'_1$  及其尺度范围  $[S_4, 1]$ 。 $b_4$ 、 $h_2$  执行化简操作,  $b_5$  执行夸大操作, 相应记录其参数信息。 $v_1$  在尺度点  $S_3$  处融合到  $v_2$  得到新的状态  $v'_2$ ,因此  $v_1$ 、 $v_2$  的尺度范围为  $[0, S_3]$ ,而  $v'_2$  尺度范围为  $[S_3, 1]$ 。对于目标  $b_5$ 、 $b_6$ 、 $b_7$ ,在小尺度基态数据中的匹配对象为  $b'_7$ ,其可能存在的关系演变过程是开始综合时在  $S_1$  处  $b_5$ 、 $b_6$  聚合为中间目标  $b'_5$ ,进一步综合时  $b'_5$ 、 $b_6$  在  $S_5$  处聚合为新目标  $b'_7$ ,因此可记录中间状态  $b'_5$  及其尺度范围  $[S_1, S_5]$  和新状态  $b'_7$  及其尺度范围  $[S_5, 1]$ 。由于每个目标都存在完整的尺度范围和明确的对应关系,因此可将目标的出现和消失等变化状态在尺度空间中以直线形式刻画,图 2 中主要目标的状态变化可抽象表达如图 3 所示。

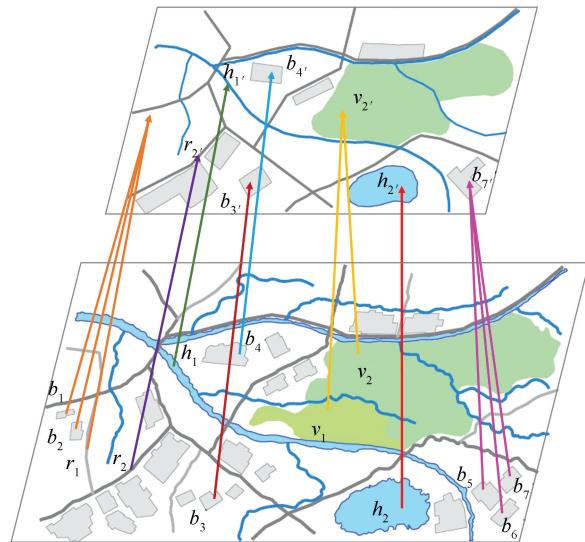


图 2 基态数据目标之间的纵向关联关系

Fig.2 Longitudinal Association Between Objects in Different Levels

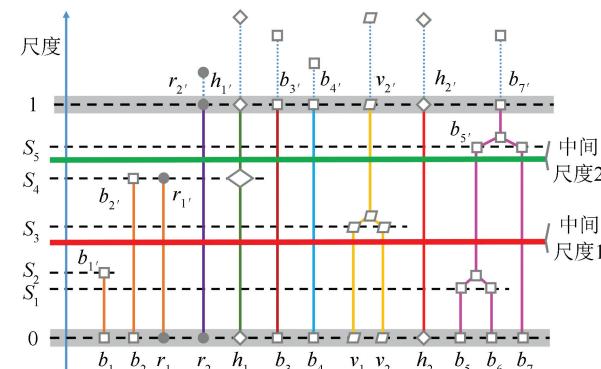


图 3 目标尺度空间抽象表达

Fig.3 Abstract Expression of Scale Space

建立金字塔后,当用户请求任意中间尺度数据时,可按尺度信息直接从金字塔结构中查询出目标集,并通过变换单元控制其几何表达的详细程度。例如中间尺度 1 介于  $S_2$ 、 $S_3$  之间,查询出满足条件目标集为  $\{b_2, r_1, r_2, h_1, b_3, b_4, v_1, v_2, h_2, b_7, b'_5\}$ , 其中子集  $\{r_2, b_3, b_4, h_2\}$  采取两端控制进行尺度变换,  $\{b_2, r_1, h_1, v_1, v_2, b_7, b'_5\}$  仅一端控制;当中间尺度 2 介于  $S_4$ 、 $S_5$  之间,查询出目标集则为  $\{r_2, b_3, b_4, h_2, b_7, b'_5, h'_1, v'_2\}$ , 其中子集  $\{r_2, b_3, b_4, h_2\}$  采取两端控制,  $\{b_7, b'_5, h'_1, v'_2\}$  一端控制。因此,由中间尺度 1 和中间尺度 2 请求得到的中间尺度数据如图 4(b)、图 4(c) 所示。从图 4 中,大尺度数据(图 4(a))可直接地图综合得到小尺度数据(图 4(d)),而通过记录该综合过程信息构建金字塔结构,可快速获取中间尺度的数据(图 4(b)、图 4(c)),并不需要从大尺度(图 4(a))重新执行一次完整的

表1 逐目标记录金字塔结构信息

Tab.1 The Stored Pyramid Structure Information in Objects One by One

目标	属性1	属性	目标表达		地图综合过程信息 G(s)		
			尺度范围	operators	scale	parameters	result
$b_1$	建筑物	/	$[0, S_2]$	选取、化简	$S_2$	化简： $<0, S_2>$	/
$b_2$	建筑物	/	$[0, S_4]$	选取、化简	$S_4$	化简： $<0, S_4>$	/
$r_1$	道路	/	$[0, S_4]$	选取、化简	$S_4$	化简： $<0, S_4>$	/
$r_2$	道路	/	$[0, 1]$	化简	$[0, 1]$	化简： $<0, 1>$	$r_{2'}$
$h_1$	水系	/	$[0, S_4]$	中轴化、化简	$S_4$	中轴化： $S_4$ 、化简： $<0, S_4>$	$h_{1'}$
$h_{1'}$	水系	中间状态	$[S_4, 1]$	中轴化、化简	$S_4$	中轴化： $S_4$ 、化简： $<S_4, 1>$	$h_{1'}$
$b_3$	建筑物	/	$[0, 1]$	夸大	$[0, 1]$	夸大： $<0, 1>$	$b_{3'}$
$b_4$	建筑物	/	$[0, 1]$	化简	$[0, 1]$	化简： $<0, 1>$	$b_{4'}$
$v_1$	植被	/	$[0, S_3]$	融合、化简	$S_3$	融合： $S_3$ 、化简： $<0, S_3>$	$v_{2'}$
$v_2$	植被	/	$[0, S_3]$	融合、化简	$S_3$	融合： $S_3$ 、化简： $<0, S_3>$	$v_{2'}$
$v_{2'}$	植被	中间状态	$[S_3, 1]$	融合、化简	$S_3$	融合： $S_3$ 、化简： $<S_3, 1>$	$v_{2'}$
$h_2$	水系	/	$[0, 1]$	化简	$[0, 1]$	化简： $<0, 1>$	$h_{2'}$
$b_5$	建筑物	/	$[0, S_1]$	聚合、化简	$S_1$	聚合： $S_1$ 、化简： $<0, S_1>$	$b_{7'}$
$b_6$	建筑物	/	$[0, S_1]$	聚合、化简	$S_1$	聚合： $S_1$ 、化简： $<0, S_1>$	$b_{7'}$
$b_{5'}$	建筑物	中间状态	$[S_1, S_5]$	聚合、化简	$S_1$	聚合： $S_1$ 、化简： $<S_1, S_5>$	$b_{7'}$
$b_7$	建筑物	/	$[S_1, S_5]$	聚合、化简	$S_5$	聚合： $S_5$ 、化简： $<S_1, S_5>$	$b_{7'}$
$b_{7'}$	建筑物	中间状态	$[S_5, 1]$	聚合、化简	$S_5$	聚合： $S_5$ 、化简： $<S_5, 1>$	$b_{7'}$

地图综合。可知,金字塔模型支持多种要素的多种综合算子操作,包括道路网选取、居民地聚合和植被融合等控制数量变化的操作和目标边界、线要素化简等控制几何表达细节详细程度的操作。

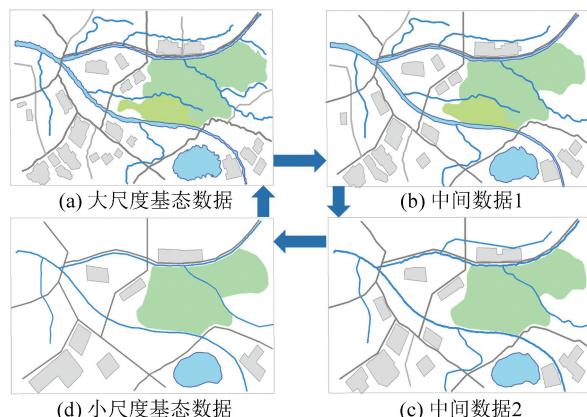


图4 基于金字塔模型的空间数据连续化表达

Fig.4 Continuous Representations of Spatial Data Based on Pyramid Model

### 3 结语

本文提出的金字塔模型将尺度维和操作信息加入到数据模型中,通过面向对象技术存储基态数据之间的综合过程信息,从尺度空间中对每个目标的表达状态进行划分,并通过变换操作控制其几何细节层次,实现连续表达。

该模型是对现有几种多尺度表达技术进行集成,其金字塔结构信息通过面向对象技术记录,操作性和扩展性强;离线式记录综合过程信息和在

线式尺度变换相分离,也可与现有网络应用环境下B/S架构很好地融合,移植性高。后续工作一是探索稳健的综合算,实现高效益的目标表达状态划分;二是针对不同的空间数据,寻找适宜的尺度变换操作及其数据结构,实现精细化尺度表达。

### 参 考 文 献

- [1] Goodchild M F. Citizens as Sensors: The World of Volunteered Geography[J]. *GeoJournal*, 2007, 69(4): 211-221
- [2] Ai Tinghua, Cheng Jianguo. Key Issues of Multi-scale Representation of Spatial Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 377-382(艾廷华,成建国.对空间数据多尺度表达有关问题的思考[J].武汉大学学报·信息科学版,2005,30(5):377-382)
- [3] Van Kreveld M. Smooth Generalization for Continuous Zooming[C]. The 20th International Geographic Conference, Beijing, China, 2001
- [4] Zheng Maohui, Feng Xuezhi, Jiang Yingying, et al. A Formal Approach for Multiple Representations in GIS Based on DL Ontologies[J]. *Acta Geodaetica Cartographica Sinica*, 2006, 35(3): 261-266(郑茂辉,冯学智,蒋莹滢,等.基于描述逻辑本体的GIS多重表达[J].测绘学报,2006,35(3):261-266)
- [5] Wu Jianguo, Li Harbin. Concepts of Scale and Scaling[M]//Wu Jianguo, Jones K B, Li Harbin, et al. *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology*. Netherlands: Springer, 2006: 3-15
- [6] Liu Kai, Wu Hehai, Ai Tinghua, et al. Three-Tiered Concepts of Scale of Geographical Informa-

- tion and its Transformation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(11): 1178-1181(刘凯, 毋河海, 艾廷华, 等. 地理信息尺度的三重概念及其变换[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(11): 1178-1181)
- [7] Li Jingzhong. An Object-Oriented Model for Map Data Multiple Representation over Scale Space[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009(李精忠. 尺度空间地图多重表达的面向对象数据模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009)
- [8] Bierkens M, Finke P, de Willigen P. Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [9] Stell J, Worboys M. Stratified Map Spaces: A Formal Basis for Multi-resolution Spatial Databases [C]. The 8th International Symposium on Spatial Data Handling, Vancouver, 1998
- [10] Timpf S. Hierarchical Structures in Map Series[D]. Vienna: Technical University of Vienna, 1998
- [11] Jones C B, Kidner D R. Database Design for a Multi-scale Spatial Information System[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, 10(8): 901-920
- [12] Ai Tinghua, Li Jingzhong. The Lifespan Model of GIS Data Representation over Scale Space[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(7): 757-762(艾廷华, 李精忠. 尺度空间中GIS数据表达的生命期模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(7): 757-762)
- [13] Van Oosterom P, Meijers B M. Towards a True Vario-scale Structure Supporting Smooth-Zoom[C]. The 14th Workshop of the ICA Commission on Generalisation and Multiple Representation & the ISPRS Commission II/2 Working Group on Multi-scale Representation of Spatial Data: Geographic Information on Demand, Paris, 2011
- [14] Cheng Changxiu, Niu Fangqu, Cai Jun, et al. Extensions of GAP-Tree and its Implementation Based on a Non-topological Data Model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(6): 657-673
- [15] Cheng Changxiu. A Multi-scale Spatial Index Method[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(5): 597-601(程昌秀. 矢量数据多尺度空间索引方法的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(5): 597-601)
- [16] Van Oosterom P. Variable-Scale Topological Data Structures Suitable for Progressive Data Transfer: The GAP-Face Tree and GAP-Edge Forest [J]. *Cartography and Geographic Information Science*, 2005, 32(4): 331-346
- [17] Shea K S, McMaster R B. Cartographic Generalization in a Digital Environment: When and how to Generalize[C]. AutoCarto 9, Falls Church, VA, USA, 1989
- [18] Ai Tinghua, Liu Yaolin. A Method of Point Cluster Simplification with Spatial Distribution Properties Preserved[J]. *Acta Geodaetica Cartographica Sinica*, 2002, 31(2): 175-181(艾廷华, 刘耀林. 保持空间分布特征的群点化简方法[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 175-181)
- [19] Yang Min, Ai Tinghua, Zhou Qi. A Method of Road Network Generalization Considering Stroke Properties of Road Object[J]. *Acta Geodaetica Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 581-587(杨敏, 艾廷华, 周启. 顾及道路目标stroke特征保持的路网自动综合方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 581-587)
- [20] Ai Tinghua, Liu Yaolin. Aggregation and Amalgamation in Land-use Data Generalization[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(5): 486-492(艾廷华, 刘耀林. 土地利用数据综合中的聚合与融合[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(5): 486-492)
- [21] Ai Tinghua. Granularity and Order Issues in Progressive Transfer of Web Map[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(6): 999-1007(艾廷华. 网络地图渐进式传输中的粒度控制与顺序控制[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(6): 999-1007)
- [22] Nöllenburg M, Merrick D, Wolff A, et al. Morphing polylines: A Step Towards Continuous Generalization[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(4): 248-260

## A Vector Pyramid Model to Support Continuous Multi-scale Representation of Spatial Data

YAN Xiongfeng<sup>1</sup> AI Tinghua<sup>1</sup> ZHANG Xiang<sup>1</sup> YANG Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** The continuous multi-scale representation is one of attractive problems in mapping technolo-

gy. Conventional mapping which uses the subdivision of multilevel tiles or multi-version storage to accomplish spatial multi-scale representations has the problems including data redundancy, inconsistency between diffident levels, the dramatic change in scale range and others. This study comprehensively applies various multi-scale representation strategies, including the cartography generalization and the spatial index technology, and put scale dimension and operations information in data model to build The Vector Spatial Data Pyramid Model. This model builds up key scale representations data and controls the scales space of every target through the off-line processing. And the process information, including the representation status of object, the longitudinal association between object A and object B in diffident levels, the generalize operators and parameters, is encapsulated in the attributes of objects through object-oriented modeling. Meanwhile, this model establishes scale transformation structure through one end and both end of the control. Based on the pyramid model, the generalization action can be executed in real-time to obtain continuous scale representation.

**Key words:** continuous multi-scale representation; pyramid model; map generalization; multi-scale data structure; scale transform

**First author:** YAN Xiongfeng, PhD candidate, specializes in spatial data matching and updating. E-mail: xiongfeng.yan@whu.edu.cn

**Corresponding author:** AI Tinghua, PhD, professor. E-mail: tinghua\_ai@tom.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41531180, 41401447; the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China, Nos. 2015AA1239012, 2015AA124103.

(上接第 501 页)

## Indices and Methods for Evaluating Quantificationally the Quality of Simplification of a Depth-Contour in Nautical Chart

ZHANG Lihua<sup>1,2</sup> WEN Lianfa<sup>1,2</sup> JIA Shuaidong<sup>1,2</sup>

1 Department of Hydrography and Cartography, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China

2 Key Laboratory of Hydrographic Surveying and Mapping of PLA, Dalian Navy Academy, Dalian 116018, China

**Abstract:** To address the limitation that the quality of simplification of a depth-contour in nautical chart can only be analyzed qualitatively, not quantificationally, these indices including the contour length of extending deep area, the mean distance of extending deep area, the reducing deep area, the curvature and the dispersion to a smoothed curve are defined, respectively from the safety of navigation, the representation of available depth space and the smoothness, the corresponding evaluating methods are proposed, and the indispensable formulas are concluded. The experimental results demonstrate: (1) the defined indices can effectively and reasonably estimate the quality of simplification of depth-contour in nautical chart from the safety of navigation, the representation of available depth space and the smoothness; (2) the proposed methods can estimate the quality of depth-contour simplification and overcome the shortcoming of the existing methods which can only analyze qualitatively.

**Key words:** depth-contour; simplification; quality; quantitative evaluation

**First author:** ZHANG Lihua, PhD, professor, specializes in marine surveying and mapping. E-mail: zlhua@163.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471380, 41171349, 41601498, 41774014.