

顾及多重分类与粒度划分的国土空间数据 模型研究与应用

周海洋¹, 汪 洋¹, 兰 馨², 周良辰^{2,3,4}

(1.南京市国土资源信息中心, 江苏 南京 210005)

(2.南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(3.南京师范大学江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京 210023)

(4.南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 国土空间数据在分类分级、过程演化等方面都存在着分类、互依赖、组合构成和前后次序等高阶关系, 现有的图层、面向对象、数据立方体等数据模型难以完全刻画全部关系. 本文提出了基于有向超图的顾及多重分类与颗粒体系的国土空间数据模型, 运用关联矩阵进行逻辑描述, 基于超级图形数据库进行物理模型实现和国土空间演化过程的时空分析, 解决了全域、全要素、全空间国土空间数据多重分类与颗粒体系表达的难题. 相关成果在南京市国土空间基础信息平台得到了应用验证, 增强了平台对复杂关系的运营效能, 实现了多维关系数据的聚合, 为平台实现数据资源自动分类和信息智能定向推送奠定了基础.

[关键词] 国土空间数据模型, 多重分类, 多颗粒分割, 有向超图

[中图分类号] P208 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)01-0053-10

Research and Application of National Spatial Data Model Concerning Multiple Classification and Granularity Division

Zhou Haiyang¹, Wang Yang¹, Lan Xin², Zhou Liangchen^{2,3,4}

(1.Nanjing Land and Resources Information Center, Nanjing 210005, China)

(2.School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3.Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(4.Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The national spatial data exhibits complex relationships in terms of classification, hierarchical structure, and process evolution. These relationships involve high-order attributes such as classification, interdependence, composition, and temporal sequence. Existing data models like layers, object-oriented, and data cubes struggle to fully capture all these relationships. This paper introduces a national spatial data model based on directed hypergraphs, which takes into account multiple classifications and granularity divisions. A relational matrix is used for logical description, and a hypergraph database is employed for the physical model implementation and spatiotemporal analysis of national spatial evolution processes. This model effectively addresses the challenge of expressing multiple classifications and granularity divisions for nationwide, all-element, and entire space national spatial data. The proposed approach has been validated through application on the Nanjing City National Spatial Basic Information Platform. It enhances the platform's operational efficiency in handling complex relationships, enables aggregation of multidimensional relational data, and establishes the foundation for the platform to achieve automatic data categorization and intelligent targeted information dissemination.

Key words: National spatial data model, multiple classifications, multiple granularity divisions, directed hypergraph

随着国家生态文明体制改革的不断推进,对自然资源的认识和管理要求不断深化. 生态文明建设、美丽中国、数字中国等上升到国家战略,山水林田湖草生命共同体、自然资源“两个统一”管理的理念也得到了各级政府和社会大众的广泛认同,管理对象由土地、国土资源向自然资源乃至国土空间扩展^[1-2]. 国土空间包含了海量的自然环境、人文社会等信息,存在着复杂的人地关系、人类活动的地域空间分布规律与区域发展规律、地理要素的演化规律、尺度特征和相互作用关系等^[3-4].

国土空间管理分别面向实际、管理、实施和服务进行了多层级划分,形成了多重分类、多重颗粒体系和具有优先级的国土空间数据关系^[5-7],为了全面高效支持上述关系的表达,本文针对传统图层结构、面向对象结构、数据立方体结构等数据组织表达方式无法全面支持国土空间全空间、全要素、多模态、多切面间多重分类与颗粒体系和演化过程表达的问题,提出了基于有向超图的顾及多重分类与颗粒体系的国土空间数据模型.

1 国土空间高阶数据关系

在国土空间数据分类分级方面,按照中央关于生态文明建设的总体部署和山水林田湖草是一个生命共同体的理念,及“连续、稳定、转换、创新”的改革总要求,可从资源体系、资源层次、地理空间要素、自然资源全要素、空间形态维度、时间维度和空间尺度等对国土空间数据进行了分类分级. 分类分级间又存在复杂的关联关系,如资源体系维度的现状数据与地理空间要素维度的基础要素,资源体系维度的管理数据与自然资源层次维度的业务管理层等相互关联;资源体系维度分类和地理空间形态维度分类又可按照空间形态划分为二维、三维数据,可从过程演变维度可划分国土调查、规划计划、用地审批、工程建设和资产运营五大阶段,可从空间尺度划分国家、区域、省、市、区县、街镇等^[8];从权利空间管理角度,国土空间具有“宗地-自然幢-逻辑幢(单元、功能区)-层-户-室”的颗粒关系^[9],从城市规划管理等角度,国土空间具有“城市-组团-社区-邻里-街坊-街块-地块-建筑-构件”的颗粒关系. 国土空间数据分类、分级及其之间的内在联系不是简单的两两间的关系,具有层次等级、相互依赖、相互包含和次序先后的关系特征,如图 1 所示.

综上国土空间数据在数据分类分级、数据服务、过程演化等方面都存在着复杂的关联关系,这些关系都具有高阶的特征且主要表现为分类 (KindOf)、互依赖 (RelateOf)、组合构成 (PartOf) 和前后次序 (ProcessOf).

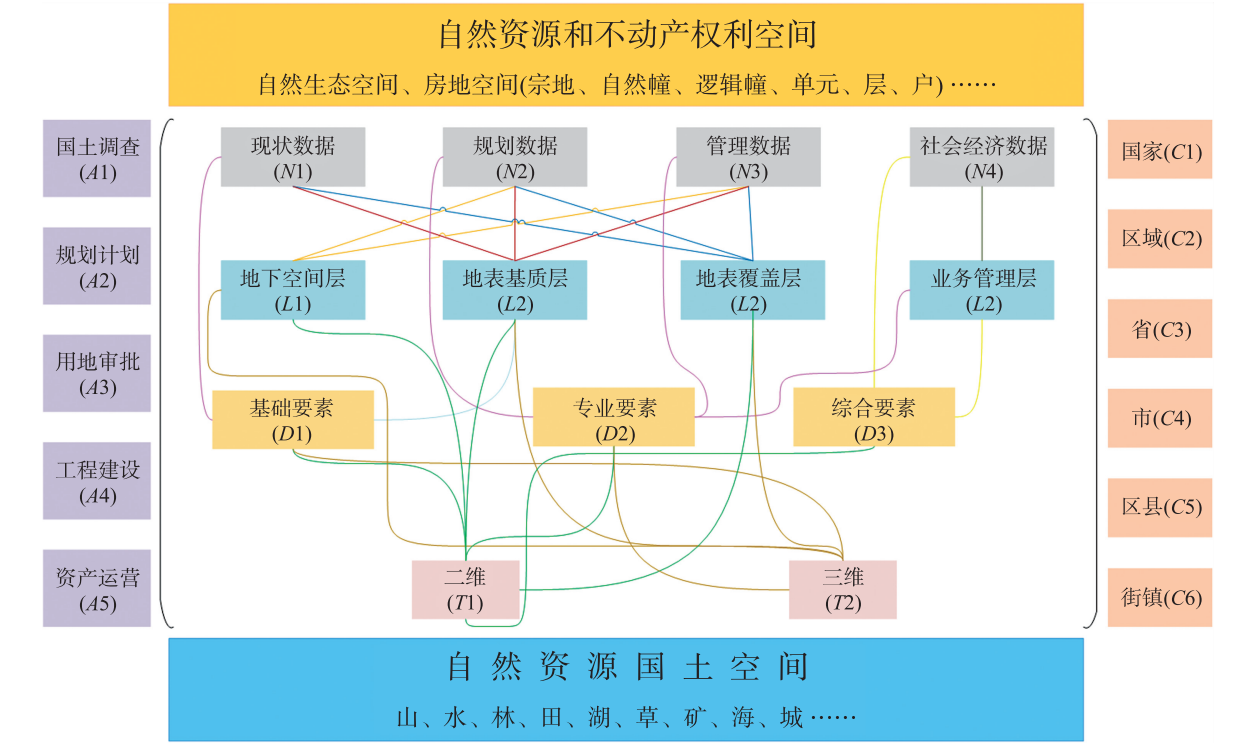


图 1 国土空间数据分类分级关系图

Fig. 1 Land spatial data classification and grading relationship diagram

2 顾及多重分类与粒度的数据模型

2.1 现有关系表达数据模型分析

现有数据模型主要包含层次模型、网状模型、关系模型和面向对象模型(如图2所示)。这些模型的根本区别在于数据结构的不同,即数据之间联系的表达方式不同,层次模型用“树结构”来表示数据之间的联系^[10-11]。网状模型用“图结构”来表示数据之间的联系。关系模型是用“二维表”来表示数据之间的联系。面向对象模型以更接近人类思维的方式将客观世界的实体抽象为一系列对象类,每个对象类都有其内部状态和行为,不同对象间的相互联系和相互作用构成不同的面向对象系统。现有数据模型主要特点如表1所示。

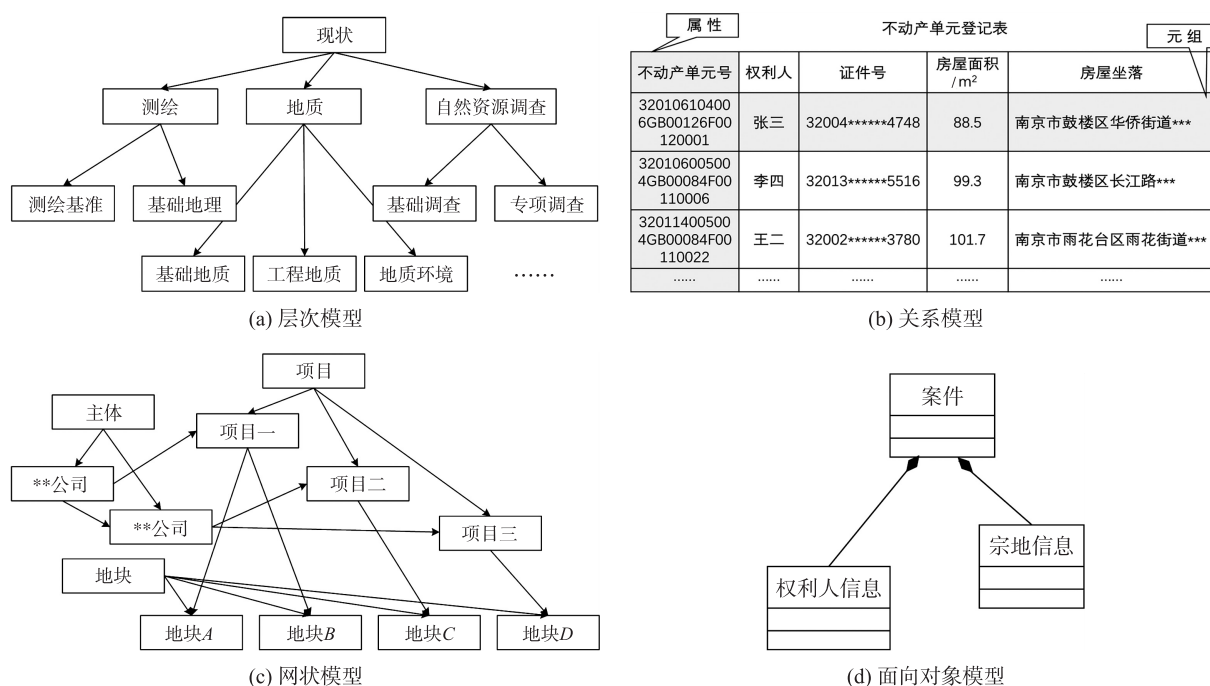


图2 现有数据模型示意图

Fig. 2 Existing data model schematic diagram

表1 现有数据模型分析表

Table 1 Existing data model analysis table

	层次模型	网状模型	关系模型	面向对象模型
定义	用树形结构来表达实体及实体间联系的模型,将数据组织成一对多的关系。	用网状结构来表达实体及实体间联系的模型,将数据组织成多对多的联系。	用二维表来表达实体及实体间联系的模型,将数据组织成规范的二维表。	用面向对象的观点来描述实体及其联系的模型,将数据组织成对象类。
特点	①有且仅有一个节点无双亲,即根节点。 ②其他节点有且仅有一个双亲。 ③只能处理一对多的实体联系。	①允许一个以上的节点无双亲。 ②一个节点可以有多个双亲。 ③两个节点之间可以有多种联系。	①一个实体由一个或多个关系组成。 ②关系表集合构成了关系模型。	①支持类、对象、继承等概念的数据模型。 ②多粒度对象的组合。

显然,要在层次模型中实现多对多联系的表示,要对模型进行拆分简化,层次模型中节点之间的多对多联系表示不自然。网状模型能够更直接地描述现实世界中实体之间的联系,如一个节点可以有多个双亲。另外,存取效率较高,具有良好的性能。其主要弊端是数据结构复杂,程序实现难度较其他模型更大,对程序实现不友好。关系模型并不是现实世界中事物之间关联关系的直观描述,而是一种简化表示,事物之间的联系经常是分散在几个关系表中进行存储,实际应用中经常要进行关系表的关联查询才能完整刻画一个具体的事物实体。面向对象模型通过分类概括,把一组具有相同属性结构和操作方法的对象抽象为一个公共类,通过类间的关联关系来表达现实世界中实体间不同的关系。

从概念定义和模型特点上看,层次模型是网状模型的特例,是对网状模型的约束限制和简化实现。而关系模型为了数据库实现上的方便,对现实世界中实体间广泛存在的各种复杂关系进行拆分简化,对地理

空间中事物之间复杂关系的表达既不自然也十分低效,特别是关系表的关联查询效率很低.面向对象模型对现实世界具有强大的分类概括和抽象描述能力,能够较好地描述现实世界中事物自身的基本属性特征,但对事物之间复杂关系的描述仍显不足,特别是地理空间中实体之间的演化机制.而网状模型最贴近现实世界中事物间关联关系的直观表达.

综上,网状模型是现实世界中最直接、最贴近、最自然的实体关系表示方式,存取效率非常高,具有良好的性能,为更好地描述国土空间实体间复杂关联关系,本文采用图谱结构的网状模型对地理实体间复杂关系进行表达.

2.2 基于有向超图的国土空间数据模型

有向超图理论规定具有相同特征或者性质的对象属于一个集合,集合中的点是全连接关系,与一般图不同是一个超边包含多个节点^[12].该图谱最基础的优势在于能更加准确描述存在多元关联的对象之间的关系,按照某一规则,将各个节点组成不同的超边.

一个赋权有向超图 $G(V, E, W)$ 由顶点的集合 V ,超边的集合 E ,以及各超边权重的集合 W 构成.这里,每一条超边 $e_i (i=1, \dots, N; N$ 表示超边个数) 都被赋予了一个权重 $W(e_i)$.对于图谱 G ,用关联矩阵 $H \in \mathbf{R}^{|V| \times |E|}$ 来表示各顶点和超边之间的关系及超边的方向,定义

$$H(v, e) = \begin{cases} n, & \text{if } v \in e, v \text{ 不是 } e \text{ 的起始点,} \\ -1, & \text{if } v \in e, v \text{ 是 } e \text{ 的起始点,} \\ 0, & \text{if } v \notin e. \end{cases} \quad (1)$$

在关联矩阵中,如果一个顶点 v 不在超边 e 上,则 $H(v, e) = 0$;如果一个顶点 v 在超边 e 上,且为超边的起始点则 $H(v, e) = -1$;如果一个顶点 v 在超边 e 上,且不是超边的起始点则 $H(v, e) = n$,表示顶点 v 在超边中的顺序.

令 W 表示各超边权重的对角矩阵,表示各超边的权重:

$$W = \begin{bmatrix} w(e_1) & & & \\ & w(e_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & w(e_n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

以不动产确权登记的宗地分类为例,宗地从权利设定方式、所有权、使用权和权利性质等不同维度进行划分,按照权利设定方式可划分为地表宗地、地上宗地、地下宗地,按照所有权可划分为国家土地所有权、集体土地所有权宗地,按照使用权可划分为国有建设用地使用权、集体建设用地使用权、宅基地使用权、农用地其它使用权宗地等,按照权利性质可划分为划拨、出让、作价出资、授权经营宗地等.不同划分维度间又存在着一定的关联和依赖关系,如国家土地所有权宗地可分为地表宗地、地上宗地和地下宗地,国有建设用地使用权依赖于国家土地所有权,集体建设用地使用权、宅基地使用权等又依赖于集体土地所有权(如图 3 所示).

以图谱的顶点表示各分类对象,以图谱的超边表示不同维度的分类关系,以图谱的有向超边表示依赖关系,形成相应的图谱模型,如图 4 所示,对应的关联矩阵如图 5 所示.

以不动产产权空间颗粒分割为例,在国有建设用地使用权与房屋所有权不动产权利管理方面,最小管理单元一般分割到户,需从“宗地-自然幢-逻辑幢(单元)-层-户”分割房地产权空间,如图 6 所示.

以图谱的顶点表示各空间节点,以图谱的超边表示空间的划分关系,以图谱的有向超边表示构成关系,以 n 值的大小表示先后顺序,形成相应的图

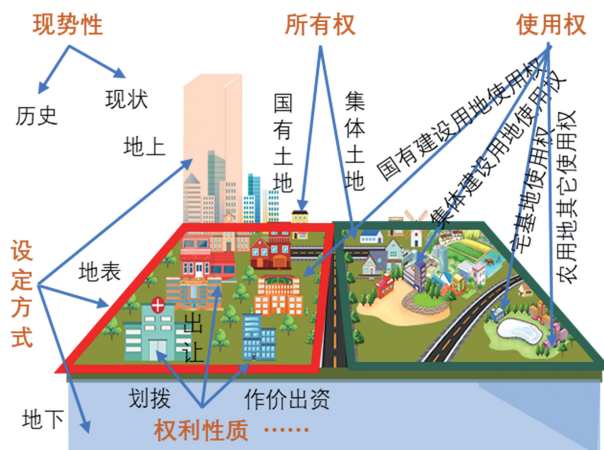


图 3 宗地不同维度分类及分类关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of parcel classification in different dimensions and classification relationships

谱模型如图 7 所示,对应的关联矩阵如图 8 所示.

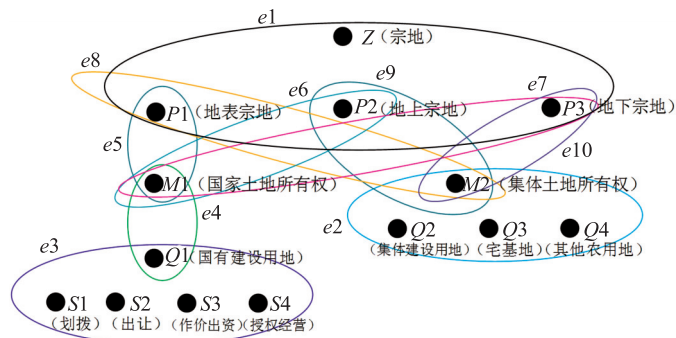


图 4 宗地不同维度分类及分类关系图谱模型图

Fig. 4 Model diagram of parcel classification in different dimensions and classification relationships

	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10
Z	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
P2	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
P3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
M1	0	0	0	-1	1	1	1	0	0	0
M2	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	1
Q1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
Q2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Q3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Q4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
S1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
S4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

图 5 宗地不同维度分类及分类关系图谱关联矩阵

Fig. 5 Matrix of relationships for parcel classification in different dimensions and classification relationships

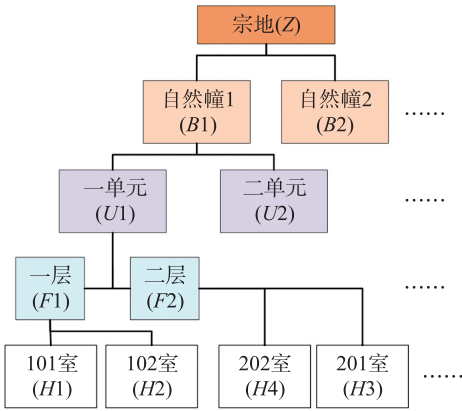


图 6 房地不动产空间颗粒体系示意图

Fig. 6 Real estate spatial granularity division diagram

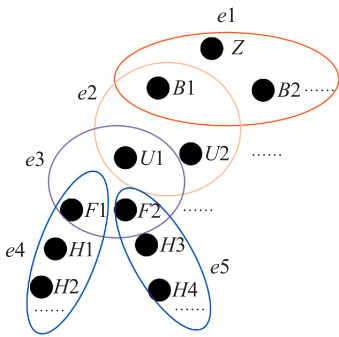


图 7 房地不动产空间颗粒体系图谱模型图

Fig. 7 Real estate spatial granularity division chart model

	e1	e2	e3	e4	e5	...
Z	-1	0	0	0	0	
B1	1	-1	0	0	0	
B2	2	0	0	0	0	
U1	0	1	-1	0	0	
U2	0	2	0	0	0	
F1	0	0	1	-1	0	
F2	0	0	2	0	-1	
H1	0	0	0	1	0	
H2	0	0	0	2	0	
H3	0	0	0	0	1	
H4	0	0	0	0	2	
...						

图 8 房地不动产空间颗粒体系图谱关联矩阵

Fig. 8 Real estate spatial granularity division chart correlation matrix

综上所述,宗地分类和不动产产权空间颗粒分割,以城乡一体化房地不动产产权空间管理为例,类别划分上,宗地按照所有权可划分为国家土地所有权和集体土地所有权. 依赖关系上国有建设用地使用权依赖于国家土地所有权,宅基地使用权和集体建设用地使用权依赖于集体土地所有权. 颗粒分割方面,国有建设用地使用权宗地上的房屋可从“自然幢-逻辑幢(单元)-层-户”分割产权空间,宅基地上的房屋可从“自然幢-户”分割产权空间(如图 9 所示).

以图谱的顶点表示各对象节点,以图谱的超边表示对象的分类关系,以图谱的有向超边表示分割和依赖关系,以 n 值的大小表示先后顺序,形成相应的图谱模型如图 10 所示,对应的关联矩阵如图 11 所示.

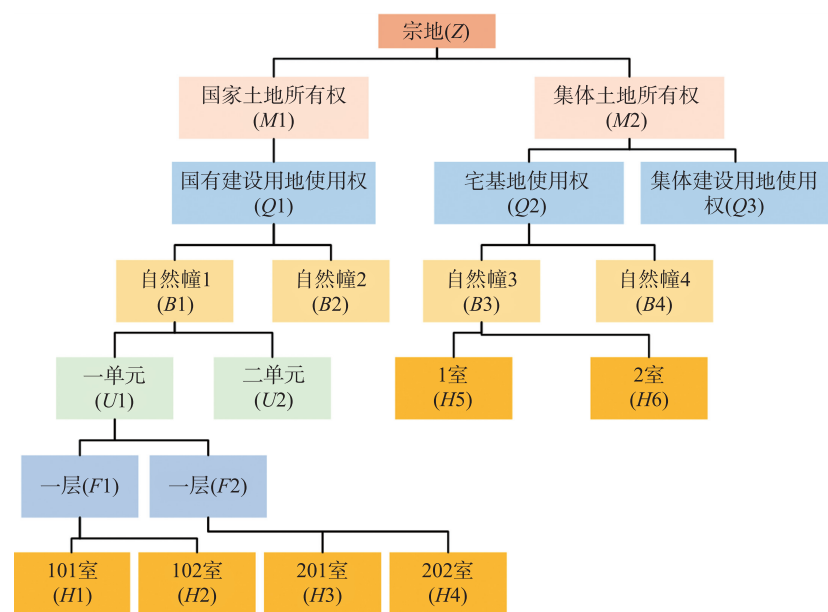


图 9 城乡不动产产权空间分类和颗粒体系示意图

Fig. 9 Urban and rural real estate property rights spatial classification and granular system diagram

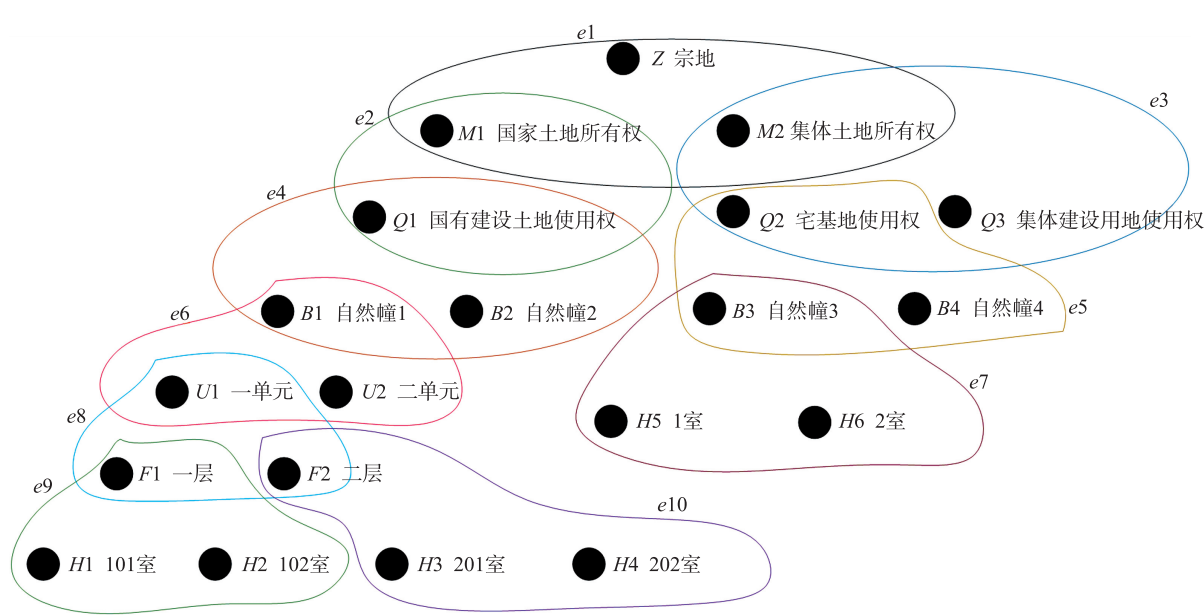


图 10 城乡不动产产权空间分类和颗粒体系图谱模型图

Fig. 10 Urban and rural real estate property rights spatial classification and granular system diagram model

以自然资源全生命周期国土空间过程演变中的用地审批阶段为例,用地审批阶段主要包含用地报批、规划选址、“四合一”和土地供应环节,“四合一”环节中又包含规划条件、建设用地规划许可、用地预审核土地勘测定界等环节,各环节间存在先后的关系,如图 12 所示.

以图谱的顶点表示各环节节点,以图谱的超边表示环节间的关系,以图谱的有向超边表示依赖关系,以 n 值的大小表示先后顺序,形成相应的图谱模型,如图 13 所示,对应的关联矩阵如图 14 所示.

2.3 基于有向超图的国土空间数据模型物理实现

为了充分实现图谱数据模型,采用原子空间对图谱模型进行物理实现,原子空间是原子和依附于原子的键值数据的一个集合,图谱的顶点和超边作为一个个原子,每个原子都有一个关联的键值存储,原子既表示数据又表示过程. 存储模型如图 15 所示,原子分为顶点和超边,顶点具有唯一标签“name”标识,原子具有唯一性和不变性,智能新增和删除,可变的是原子的性值,即键值数据库.

	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10
Z	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
M2	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0
Q1	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	0
Q2	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0
Q3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
B1	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
B2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
B3	0	0	0	0	1	0	-1	0	0	0
B4	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
U1	0	0	0	0	0	1	0	-1	0	0
U2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
F1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
F2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	-1
H1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
H2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0
H3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
H5	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H6	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

图 11 城乡不动产产权空间分类和颗粒体系图谱关联矩阵

Fig. 11 Urban and rural real estate property rights spatial classification and granular system diagram matrix of associations

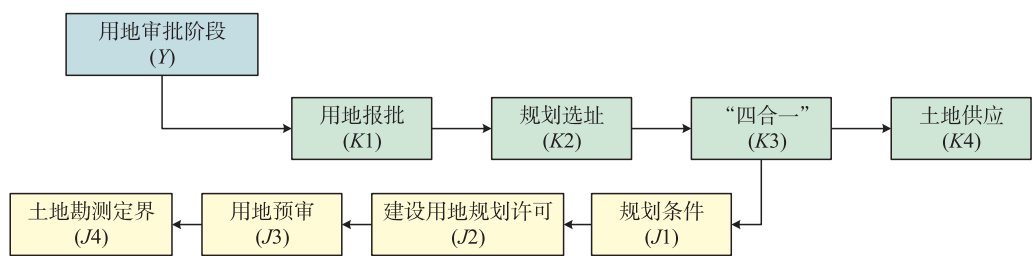


图 12 用地审批阶段过程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of land use approval stage process

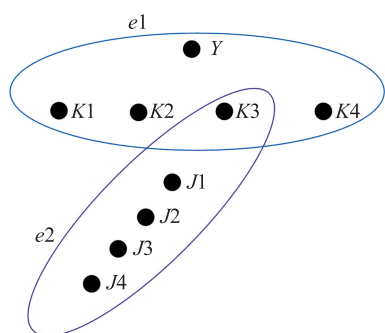


图 13 用地审批阶段过程图谱模型图

Fig. 13 Model diagram of land use approval stage process

	e1	e2
Y	-1	0
K1	1	0
K2	2	0
K3	3	-1
K4	4	0
J1	0	1
J2	0	2
J3	0	3
J4	0	4

图 14 用地审批阶段过程图谱关联矩阵

Fig. 14 Matrix of relationships for land use approval stage process

原子是原子空间中的存储类型,原子空间可以相互嵌套,原子是原子空间中存储的基本类型,原子具体分为表示数据实体的顶点和表示实体间关系的超边,原子空间的概念模型如图 16 所示。

以自然资源与不动产确权登记的宗地分类为例,图中所有的类别概念都是原子空间中的原子节点(图谱的顶点),原子节点之间的关联关系通过原子空间中的原子链接(图谱的超边)来表示。根据图 4 的分析结果,整个模型中存在原子节点 14 个,原子链接 10 个,所有的原子存储在一个原子空间中。首先,创建原子空间和 14 个原子节点,每个原子节点以其编码(如 Z、P1)作为其“name”,对原子进行唯一标识,对应中文名称作为名称标签 nameTag,通过原子属性的方式进行表示。然后,按照图 5 的分析针对原子节点建立链接关系,构建 10 个原子链接,从而构成自然资源与不动产确权登记的宗地分类的图谱物理存储与表达,如图 17 所示。

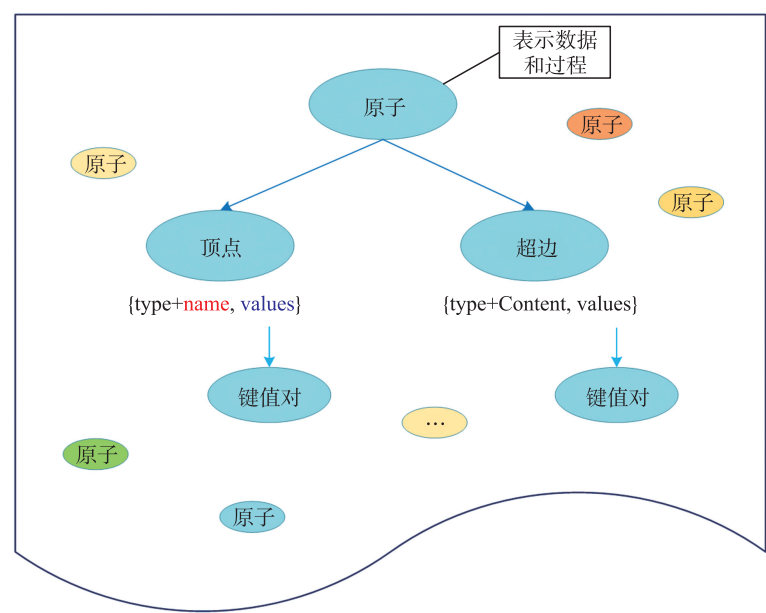


图 15 图谱原子空间示意图

Fig. 15 Schematic diagram of graph atomic space

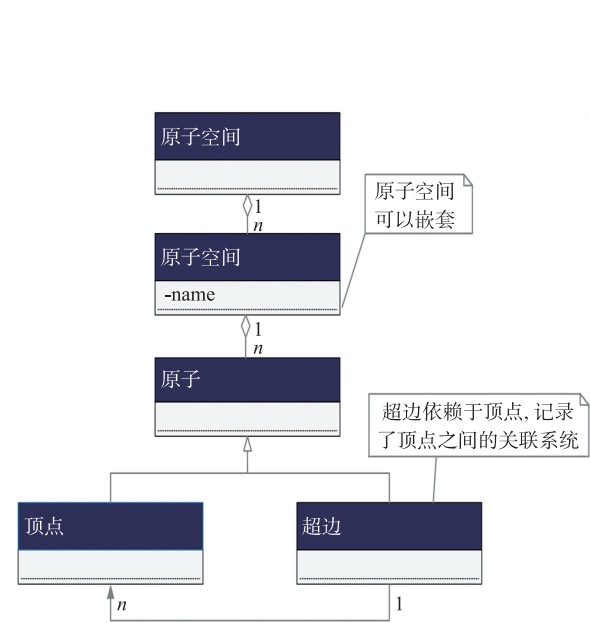


图 16 图谱原子空间概念模型图

Fig. 16 Conceptual model diagram of graph atomic space

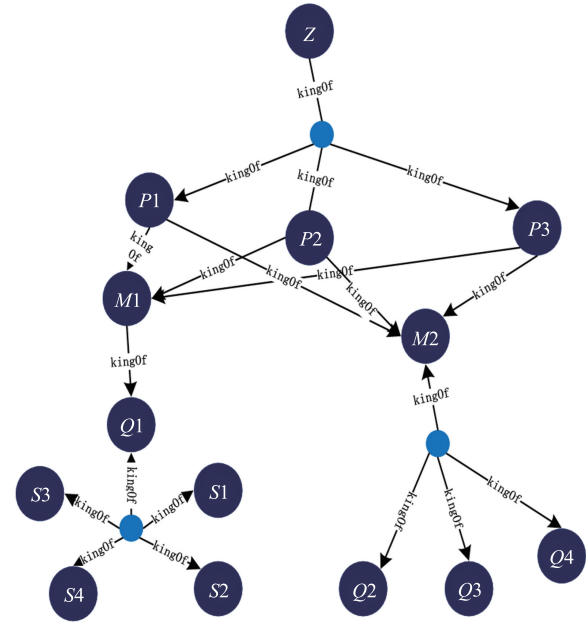


图 17 宗地分类的物理存储可视化表达

Fig. 17 Visual representation of physical storage for parcel classification

3 模型应用与应用成效

基于有向超图的顾及多重分类与颗粒度的数据模型在南京市国土空间基础信息平台建设中进行了应用(如图 18 所示),通过该模型构建了建筑视角、产权视角、土地使用视角等不同视角的全域、全要素、全维度的国土空间信息表达体系,增强了平台对复杂关系的运营效能,实现多维关系数据的聚合,为平台实现数据资源自动分类和信息智能定向推送奠定了基础,取得了良好效果。

(1)解决了全域、全要素、全空间国土空间数据多重分类与颗粒体系表达难题,实现了核心数据的高效表达与存储. 南京市基于有向超图国土空间关系表达模型,利用图谱在分类、互依赖、组合构成和前后次序等关系表达的优势,实现了国土空间核心数据的多重分类与多颗粒体系表达与存储,构建了面向调查监测评价、监管决策、政务服务 3 大类专题应用系统、房产、公安、住建等近 20 个部门单位的灵活、高效的

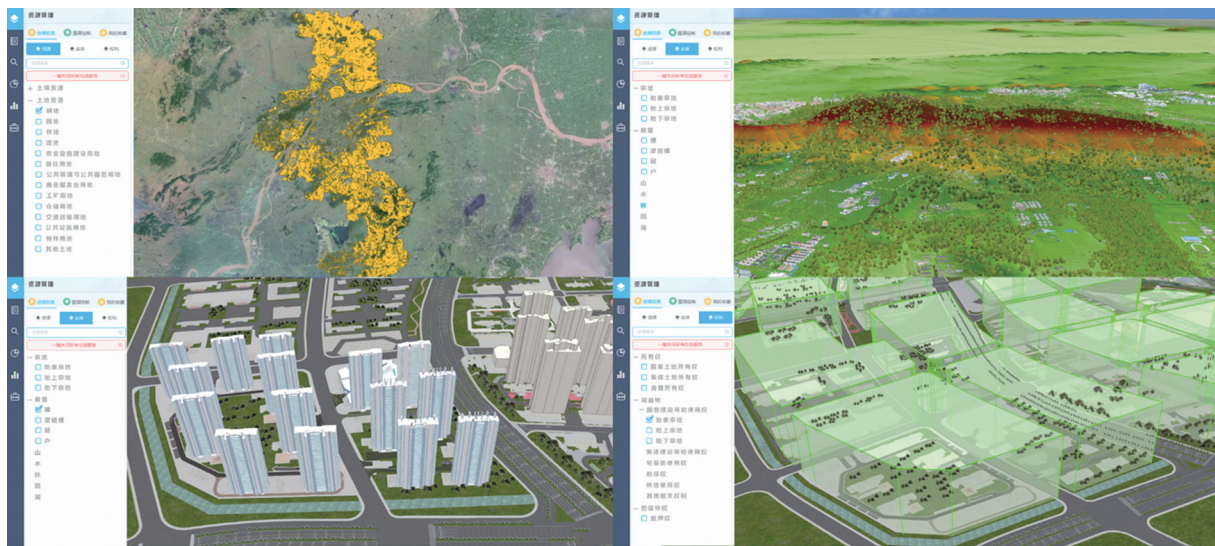


图 18 面向不同视角的国土空间信息表达

Fig. 18 Spatial information representation of national territory from different perspectives

数据资源关联体系。

(2)增强了国土空间基础信息平台对复杂关系的运营效能,实现多维关系数据的聚合。图谱模型采用原子空间的统一物理实现方式,结构简单快捷,即实现了复杂关系数据的存储,也表达了数据操作过程,与关系数据和非结构化数据存储方式相比,提升了对于复杂关系的存储和查询效率。

(3)为国土空间基础信息平台实现数据资源自动分类和信息智能定向推送奠定了基础。有向超图模型具有图谱划分、超边推理等系列评价与优化算法,为实现自然资源自动分类、分类评价优化,文件、图像、图形等信息关联识别,以及针对分类用户和个人用户的信息智能推送奠定了良好的基础。

4 结论

围绕国土空间管理中国土空间数据多重分类与颗粒体系表达难问题,在分析国土空间数据在分类分级、数据服务、过程演化等方面存在的复杂关系和现有关系表达数据模型的基础上,基于有向超图构建了顾及多重分类与粒度体系的国土空间数据模型,运用关联矩阵进行逻辑描述,采用原子空间对数据模型进行物理实现,并对相关成果进行了应用与成效分析。研究成果有效解决了国土空间数据多重分类与颗粒体系表达难题,增强了国土空间基础信息平台对复杂关系的运营效能,为国土空间基础信息平台实现数据资源自动分类和信息智能定向推送奠定了基础。在实际应用过程中,在数据资源分类体系梳理和多重关系识别建模等方面存在大量人工工作量,需要结合大数据分析、人工智能等技术,研究实现数据资源自动分类及评价、关系自动识别归类、分类用户智能信息推送等,充分发挥数据模型的图谱划分、超边推理等优势。

[参考文献] (References)

- [1] 王硕. 当前形势下推进自然资源领域治理体系和治理能力现代化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(4): 132-137.
- [2] 宋马林, 崔连标, 周远翔. 中国自然资源管理体制与制度: 现状、问题及展望[J]. 自然资源学报, 2022, 37(1): 1-16.
- [3] 闫国年, 袁林旺, 俞肇元. 信息地理学: 地理三元世界的新支点[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(2): 374-376.
- [4] 闫国年, 俞肇元, 周良辰, 等. 地理实体分类与编码体系的构建[J]. 现代测绘, 2019, 42(1): 1-6.
- [5] 沈镭. 自然资源分类相关问题探讨及新分类方案构建[J]. 资源科学, 2021, 43(11): 2160-2172.
- [6] 宁晶. 将分类指南贯穿自然资源全生命周期管理——《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南(试行)》解读[J]. 资源导刊, 2021(2): 16-17.
- [7] 唐华, 汪洋, 周海洋. 国土空间信息模型构建研究[J]. 自然资源信息化, 2022(4): 1-9.
- [8] 俞肇元, 袁林旺, 吴明光, 等. 地理学视角下地理信息的分类与描述[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(1): 17-24.

-
- [9] 唐华,周海洋,周良辰,等. 城乡一体化三维房地不动产权籍信息模型构建研究与应用[J]. 自然资源信息化,2022(2): 34-42.
- [10] HAMMODAT W W, IBRAHEEM A T, DEMIR Y K. Using airport geographic information systems (AGIS) to develop a comprehensive digital library for Erbil international airport[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020,737(1):012144.
- [11] IMRAN A, MITHAS A D, TESFA G, et al. GIS-based multi-criteria evaluation for deciphering of groundwater potential[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 2020,48(2),305-313.
- [12] 刘胜久,伍小兵,曹小平,等. 有向超图的超网络能量及其性质[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2022,22(4): 36-44.

[责任编辑:陈 庆]