

引用格式:罗婷文,姚尧,罗平,等. 秉承三维思维的土地立体化利用评价指标研究[J]. 资源科学, 2017, 39(1): 74-84. [Luo T W, Yao Y, Luo P, et al. Evaluation indexes for stereoscopic land-use in three-dimensional thinking[J]. *Resources Science*, 2017, 39(1): 74-84]. DOI: 10.18402/resci.2017.01.08

秉承三维思维的土地立体化利用评价指标研究

罗婷文^{1,2}, 姚尧^{1,2}, 罗平^{1,2}, 肖琳^{1,2}, 文楚君^{1,2}

(1. 国土资源部城市土地资源监测与仿真重点实验室, 深圳 518034;

2. 深圳市数字城市工程研究中心, 深圳 518034)

摘要:基于土地立体化利用趋势及管理技术需求等辨析土地评价向三维思维转变的必要性, 解析土地立体化利用评价的三维思维, 研究提出秉承三维思维的土地立体化利用评价对象、单元及指标, 采用文献调研法、综合分析法, 得到如下研究结果: ①基于三维思维探索土地立体化利用评价技术方法符合土地利用管理实际需求; ②土地立体化利用评价的对象为具有综合效益、多元结构、内部异质性的空间范围, 评价单元为空间体; ③基于土地立体化利用的主要效应, 面向建筑立体利用、立体交通建设以及立体绿化三种主要的利用行为, 从利用形态及效益两方面, 提出9个蕴含三维思维的土地立体化利用评价指标; ④该指标具备可拓展性, 是体现了立体空间形态与综合质量内涵的数量化指标。总体而言, 秉承三维思维的土地立体化利用评价技术的探索, 是从二维平面到三维空间的一次技术转变与尝试, 不仅将对土地立体化利用管理提供技术支撑, 也是土地科学理论方法在三维思维下的一次创新, 从而支撑立体化发展模式下土地的科学合理利用。

关键词: 立体化利用; 三维思维; 土地评价; 评价指标; 土地利用

DOI: 10.18402/resci.2017.01.08

1 研究背景

土地立体化利用是伴随着土地资源紧缺、社会经济要素集聚等而出现的土地利用行为, 如立体交通枢纽、综合体等。日本东京、中国香港及深圳等城市已涌现出大量土地立体化利用的案例, 相关研究及实践日渐增多。土地资源的分层开发、功能的分空间配置是土地立体化利用的主要特征, 不同于一宗地一个功能的土地平面利用。合理引导功能的纵向布局, 及认识此种利用行为下土地资源的利用潜力及适宜用途, 需要秉承三维思维的研究视角及方法。

土地评价是合理利用土地资源的基础。20世纪70年代之前, 土地评价主要关注土地的自然属性, 如土地潜力评价^[1]、土地适宜性评价^[2]等; 80年代之后逐渐向土地的综合属性转变, 开展土地质量评价、建设用地集约利用评价^[3]、土地可持续利用评

价^[4]等研究。在评价方法上, 层次分析法^[5]、主成分分析法、多因素综合评价法^[6]等应用较多, 有些学者尝试采用人工神经网络^[7]、物元分析法、“压力-状态-响应”模型^[8]等进行研究, 土地评价逐渐从“定性评价”向“量化、精确化、动态化”发展。总体而言, 现行土地评价主要关注的是如何诠释土地平面组织形态及社会经济要素的聚集特征等, 多是以科学引导土地利用的平面布局为目标。随着土地立体化利用的出现, 部分学者尝试开展面向地上及地下空间立体开发的评价研究。张彦等以改善城市交通、集约利用城市土地、优化城市环境等目标针对城市高架桥下立体空间利用的适宜性进行评价^[9]。王海刚等利用GIS技术, 采用定量评价、定性评价相结合的评估方法, 构建评价系统, 开展房山新城地下空间资源综合质量分区评价^[10]。夏方舟等引入数字立体空间潜力模型(DSSPM), 构建基于山水视野

收稿日期: 2016-07-29; 修订日期: 2016-10-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAJ05B04)。

作者简介: 罗婷文, 女, 湖南衡阳人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土地利用与管理。E-mail: 6451368@qq.com

2017年1月

约束的立体空间开发潜力的评价模型,研究数字立体空间潜力表面,形成立体空间分布等值线和立体潜力三维效果图^[11]。此外,部分学者在地下空间价格评估以及立体空间区位收益测算等领域也开展定性及定量研究^[12,13]。在评价指标方面,Edelenbos等提出面向地下空间开发适宜性的评价指标体系,包括投资、内外部安全性、对居民和环境的影响等^[14]。Hulme等选取地质、水文、环境、心理、经济社会发展等评价指标,对新加坡的地下空间规划和选址进行研究^[15]。姜云等构建涵盖工程地质、水文地质、岩土体条件、地面地下空间条件、地理区位多指标的城市地下空间开发利用容量评估体系^[16]。王海刚等从地下空间开发难度和潜在开发价值两个方面提出城市地下空间资源综合质量评价指标体系,包括自然环境条件、开挖成本、土地利用、地铁站域等^[10]。胡宁针对地下空间开发利用潜力,构建涵盖地理区位、工程水文地质条件、经济效益、基础设施建设、社会参与等评价因子的指标体系^[17]。夏方舟等选取地质构造、地质灾害、水文、气候、规划要素评价城市立体空间开发潜力^[11]。

目前土地立体化利用评价及其指标的研究主要集中在立体空间开发潜力、适宜性等方面,适用于评价地下空间开发利用活动,具有一定的体系性,部分研究体现了三维视角与思维,但对土地立体化利用的用途及三维空间内的功能配比及布局缺乏相关研究,评价指标缺乏对土地立体化利用在垂直方向上数量和结构特征的定量描述,此外,现有评价成果主要面向地下空间开发,未能全面考虑地上地下不同空间、不同功能类型的立体化利用行为,缺乏对土地立体化利用的系统性评价。本文旨在面向城市土地立体化利用趋势,基于土地立体化利用的特征辨析,探讨秉承三维思维的土地立体化利用评价指标及方法,以支撑立体化发展模式下土地的科学合理利用。

2 关于三维思维的解析

2.1 三维思维的必要性

土地立体化利用的基本特征是土地空间垂直方向上利用的多元化,即地上、地表、地下空间的分层开发和多功能利用^[18,19],如地铁、垂直农业、建筑综合体等。以建筑综合体为例,它是主要依托于地

铁而建造的、多种功能纵向拓展的建筑或建筑群。基于平铺模式(Sprawl Mode)而发展的土地评价技术在面向土地立体化利用行为时体现出局限性,具体如下:

(1)平面分类描述与空间综合功能的不适应。现行土地评价是基于土地平面分类而形成的关于土地利用结构、布局、效益的评价指标及方法,难以定量评估土地立体化利用呈现的空间复合功能。

(2)平面线面计量与空间立体形态的不适应。现行土地管理的对象主要是线、面,线主要用于界址定位和长度衡量,面主要用于面积数量的统计。随着城市空间的纵向扩展,基于线面而形成的计量单位难以直接支撑立体空间形态的描述与统计^[19],或许需在二维平面统计指标(面积等)的基础上发展三维空间统计指标(体积等)。

(3)数量控制主线与质量管理目标的不适应。基于平面扩张控制理念而发展的土地评价技术,其主要目标为控制城市建设的无序外扩,核心是土地开发规模的管控。土地立体化利用体现的是多功能、多要素的空间聚集,强调的是多功能、多要素如何协调而发挥出最大的综合效益,需要评价技术支撑描述功能及要素间的关系及效益,其更多是质量的内涵。

综上所述,现行土地利用评价技术已不足以支撑具备三维空间形态及综合效益内涵的土地立体化利用管理。有必要转换视角,探索秉承三维思维的土地评价技术,构建能够表达土地立体化利用特征的空间化度量指标,以促进科学合理的土地立体化利用。

2.2 三维思维的基本内容

2.2.1 核心理念

三维思维下的土地评价,是由面向二维土地表层资源的评价向面向三维土地空间资源的评价的转变,对于土地立体化利用在不同空间的利用功能、效益、结构等属性,将不被投影至二维土地平面上进行分析,而是将其在评价指标中充分体现出来,使评价价值能够反映三维空间内的属性异质性,在技术条件成熟的情形下可探索三维表达与分析。

2.2.2 评价对象的转变

土地立体化利用活动及所形成的物质体为土

地立体化利用评价的目标对象,其形式多样,地表及以上的空间主要表现为建筑综合体、轻轨、立交桥、垂直农场、立体绿化等,地下空间主要表现为地铁、地下停车场、地下道路、地下生产生活空间、市政管沟等。土地立体化利用突破土地平面上的功能布局,产生垂直方向上的要素配置,同一宗地的上、下空间可具有住宅、商业、交通等多种功能,各类要素在纵向上呈现异质性并相互影响(图1)。具体而言,不同于平面土地利用评价所聚焦的土地表层资源,三维思维下土地立体化利用评价的基本对象转变为土地立体化利用活动所形成的物质体中的三维空间范围,其具有多元结构与内部异质性。

2.2.3 评价单元的转变

现行土地评价的单元一般是面状单元(多边形、栅格)或线状单元(路网),主要评价目标是研究面或线状单元上的土地利用行为,以及各平面单元之间的关系。在土地立体化利用中,由于土地的纵向功能配置、分层开发,会出现同一宗地具备多种利用功能(图2),以平面单元进行评价时,难以界定评价单元的利用类型及边界。因此需要以三维空间体作为评价单元,其特点在于能够更准确地对土地立体空间利用形态进行表达,将立体化利用信息赋予到评价对象的各空间层面。

2.2.4 三维思维的研究推进

首先面向土地立体化利用数量及结构功能的安排,构建赋予三维空间内涵的评价指标体系,其

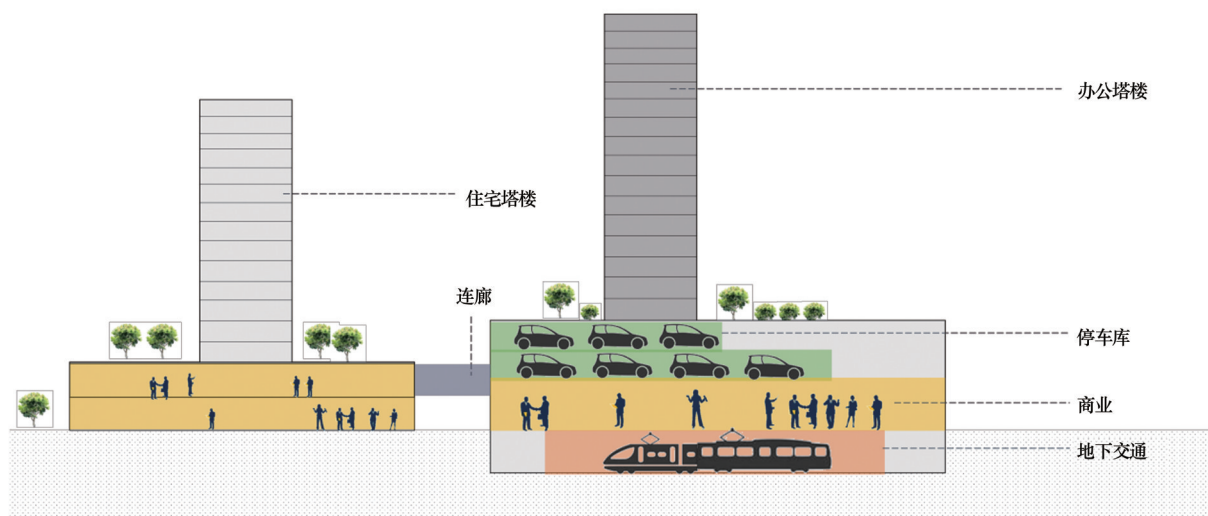


图1 土地空间功能的垂直配置

Figure 1 Vertical configuration of land spatial function

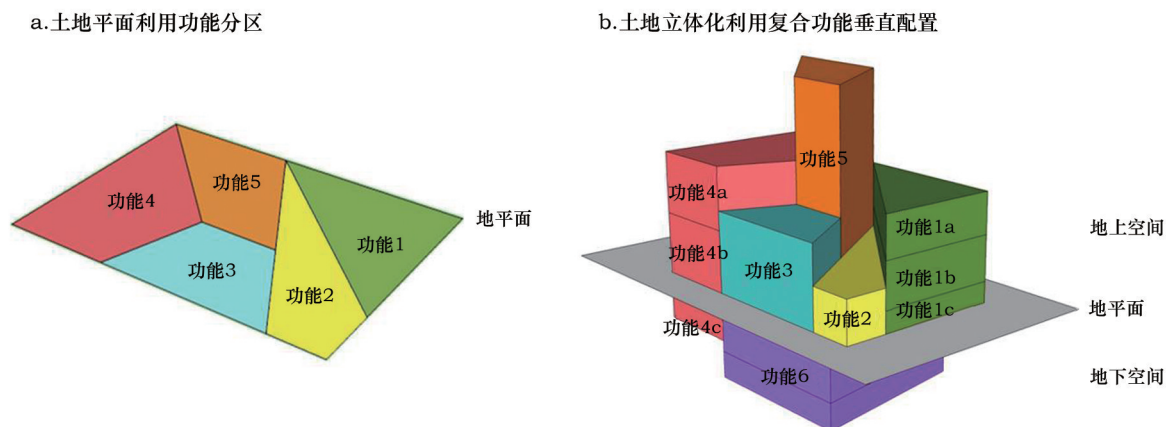


图2 土地利用评价单元的变化

Figure 2 Change of land-use evaluation unit

2017年1月

尺度可覆盖城市、片区、立体利用物质单体等。其次,构建适用于空间体功能、布局调控的土地立体化利用评价空间模型,引进BIM、GIS、系统仿真等技术,实现土地立体化利用评价对象的可视化以及空间分析功能。本文将主要针对第一点开展探索性研究。

3 指标构建思路与框架

3.1 目标

以简洁、实用为基本原则,科学描述土地立体化利用形态,定量表征土地立体化利用的空间异质性,量化土地立体化利用综合效益,从而支撑土地立体化利用形态与效益响应关系的研究,为土地立体化利用的优化调控提供技术支撑。

3.2 特征

(1)空间内涵。基于三维思维,视同一平面位置上、不同纵向位置的空间利用为独立存在的实质,具备空间异质性特征及质量内涵。

(2)数量化表达。将蕴含异质性及质量内涵的空间要素投影在平面上,以数量指标表征该空间要素特征,包括空间形态及利用效益。

(3)可拓展性。本文所构建的指标并非封闭的体系,可在扩充目标内容的基础上进行补充。此外,指标构建还应遵循科学性、可操作性等原则。

3.3 框架

土地立体化利用对城市发展的贡献主要体现在经济、社会及生态三方面,即集聚社会经济活动

以提高土地利用效益、连通活动空间以提升要素流通效率、拓展绿色空间以改善人居环境。本文面向上述三种主要的贡献,立足于以下评价目标,从探索土地立体化利用形态与利用效益响应关系的角度,研究构建评价指标(图3)。

(1)提高土地利用综合效益。土地立体化利用通过提升建设用地开发强度、开展立体空间混合利用以提高用地效益,通常以建筑物或建筑群的高强度地上地下空间开发、功能复合利用等形式体现,因此构建立体建筑评价指标,以数量指标表征立体开发强度,以结构指标体现空间混合利用程度,以综合效益指数衡量立体利用效益,设3个评价指标。

(2)提升要素流通效率。土地立体化利用通过缩小不同单元间的平面距离,或连通不同单元,以提高人文经济要素的流通效率。主要通过空中廊道、地铁等立体交通建设实现,因此构建立体交通评价指标,以立体路网密度等指标评价立体交通形态,以立体交通通达度指标评价立体连通性,设3个评价指标。

(3)改善人居环境。土地立体化利用突破传统生态用地约束,采用屋顶绿化、墙面绿化等立体绿化方式提高城市绿化覆盖率,提高人居生态效益,因此构建立体绿化指标,以三维绿量为计量单位,量化立体绿化数量结构,基于人体绿量效用建立可表达空间特征的绿化效益指标,设3个评价指标。

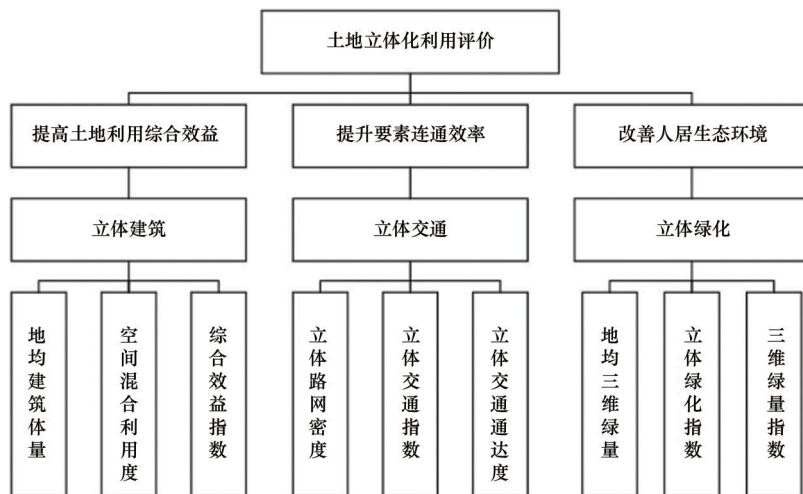


图3 城市土地立体化利用评价指标

Figure 3 Evaluation indexes for urban stereoscopic land-use

应用上述指标对单个土地立体化利用活动进行评价时,按照利用类型选择相应指标,其指标值反映出利用数量、结构及效益的情况。当上述指标应用于有多种立体化利用类型的区域时,结合多目标优化的技术方法,通过调控不同利用类型的效益值在区域内实现综合效益最大化,得出不同利用类型的数量、结构值,从而得出区域的立体化利用方案。

该指标是面向三个评价目标、三类土地立体化利用活动而构建的,旨在表征利用数量、结构及效益,从而通过关联利用数量结构与效益而实现优化利用,因此适用于此三类立体化利用活动的优化调控。不适用于评价地下管线、地下停车场等立体化利用活动,因其主要涉及的是地下空间利用适宜性的评价及如何与地上空间的功能进行协调的问题。

4 数据来源、指标内涵与量化

4.1 数据来源

本文所提出的土地立体化利用评价指标涉及的主要数据有:①人口普查及经济普查数据,包括从业人员人数、地区生产总值等,来自城市统计年鉴,如《深圳统计年鉴2015》^[20];②建筑普查数据,包括建筑物地上地下分层、分行业的建筑面积及建筑高度,来自城市国土部门、规划部门、物业管理单位等;③道路交通数据,包括地面道路网、地上立交系统及地铁线路,来自城市交通部门、交通营运机构、数字地图提供商等;④植被数据,包括地表及建筑物上的植物种类、株数、冠幅、冠型、灌木每平方米株数、灌木高度等,来自实地调查测量。

4.2 指标内涵与量化

4.2.1 立体建筑

在立体建筑评价中,以地均建筑体量来描述建筑立体化利用的空间开发强度(数量特征),以空间混合利用度来反映建筑立体化利用的空间功能配置成熟度(结构特征),以综合效益指数来测度建筑立体化利用的空间综合效益水平(效益特征)。

(1)地均建筑体量。地均建筑体量是指单位建设用地面积上所有功能类型的建筑空间总体量:

$$V = \frac{A}{S} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i}{S} \quad (1)$$

式中 V 为地均建筑体量; A_i 为住宅、商业娱乐、金融

办公等第 i 种功能类型建筑空间的体量; S 为建设用地面积。

在平面土地利用评价中,建筑密度和容积率是衡量建设用地利用强度的两项重要指标。前者反映城市空地率和建筑密集程度,却无法测度地上、地下空间的开发强度;后者虽可表征地上空间的开发强度,却同样忽略地下空间,因此这两项指标在建筑空间立体化利用评价中均存在不足。本文在建筑密度和容积率两项评价指标的基础上引入高度因子,充分考虑地上和地下空间的开发利用,提出地均建筑体量指标以表征建筑立体化利用的空间开发强度。该指标一方面通过引入高度因子,将容积率指标转化为可表达空间开发强度的立体化指标;另一方面,对容积率指标的内涵进行扩展,涵盖地下空间利用状况,通过对建筑分层、分功能利用状况的统计分析,表达建筑物地上、地表及地下空间的立体开发强度。

(2)空间混合利用度。空间混合利用度指建筑立体化利用下各种功能类型的空间配置丰富度以及均衡度。城市土地利用结构的信息熵模型可以定量分析城市土地利用的均衡性,然而评价对象仍在二维平面上,无法表征土地立体化利用下不同功能的空间配置情况。因此,本文在土地利用信息熵模型的基础上,将平面土地利用不同职能类型面积拓展为各种功能类型建筑空间体量,充分考虑到建筑地上和地下空间分层、分类使用,以反映建筑立体化利用的空间结构:

$$H = -\sum_{i=1}^N P_i \log P_i, \quad P_i = \frac{A_i}{A} = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2)$$

式中 H 为空间混合利用度; P_i 为住宅、商业娱乐、金融办公等第 i 种功能类型建筑体量占建筑总体量的比例。

根据熵值最大和最小原理,当区域处于未开发状态时,其空间混合利用度为0,即 $H_{\min} = 0$;当区域已发展成熟,建筑功能丰富且各职能类型的建筑体量趋于均衡时,满足熵值最大化条件,有 $P_1 = P_2 = \dots = P_N = 1/N$, 此时空间混合利用度为最大,即 $H_{\max} = \log N$ 。

空间混合利用度指标意味着在三维思维下、对

2017年1月

于土地立体化利用行为,城市土地功能的配置合理性不唯一依赖于平面土地利用类型,而在一定程度上由建筑空间利用功能结构所体现。一般而言,土地空间利用程度越高,建筑空间利用的功能配置越完善,空间混合利用度就越大,城市社会和经济发

展也就越成熟。

(3)综合效益指数。综合效益指数指建筑地上、地下空间所有功能类型的综合效益水平。该指标的量化方法为:不同建筑功能类型的单位面积产出效益与规划标准相比后成为无量纲数值,赋予该数值以相应类型的建筑体量占比这一权重,进而加和形成立体建筑的综合效益指数:

$$PI = \frac{\sum_{i=1}^N (w_i \times A_i)}{\sum_{i=1}^N A_i}, \quad w_i = \frac{A_i}{A} = \frac{Q_i/S_i}{C_i} \quad (3)$$

式中 PI 为综合效益指数; w_i 为第 i 种建筑功能类型的单位面积产出效益与对应规划标准的比值; Q_i 为第 i 种建筑功能类型的产出效益; S_i 为第 i 种建筑功能类型的建筑面积; C_i 为对应第 i 种功能类型产出效益的规划标准。当 $PI > 1$ 时,表明建筑立体化利用的空间产出效益水平相对高于规划标准;反之,则未达到规划标准。

本文通过引入规划标准这一转换桥梁,将不同量纲的效益转化为同一量纲。该指标突破对单一类型或单一空间的效益测度,从效益角度充分体现建筑立体化利用的功能综合性及空间异质性。

4.2.2 立体交通

在立体交通评价中,以立体路网密度来反映交通立体化利用的空间开发强度(数量特征),以立体交通指数来描述交通立体化利用的多层次空间配置情况(结构特征),以立体交通通达度来表征交通立体化利用的空间综合通达性(效益特征)。

(1)立体路网密度。立体路网密度指单位建设用地面积的地上、地表、地下多层次交通空间路网总长度:

$$TD = \frac{L_u + L_s + L_d}{S} \quad (4)$$

式中 TD 为交通路网密度; L_u 、 L_s 、 L_d 分别为地上、地表、地下各个层次路网长度。

在平面土地利用中,路网密度用于度量平面交

通的开发强度,未能考虑地上和地下空间的立体交通建设。本文提出的立体路网密度指标,综合考虑土地立体化利用下地上、地表、地下多层次交通系统,将平面道路、高架立交、地铁轨道等所有立体路网类型视为整体来评价立体交通的空间开发强度。

(2)立体交通指数。立体交通指数指地上和地下空间路网总长度与平面路网长度的比值,该指标能够反映多层次、多种类立体路网的空间结构特征:

$$TI = \frac{L_u + L_d}{L_s} \quad (5)$$

式中 TI 为立体路网指数; L_u 、 L_s 、 L_d 同公式(4)。

(3)立体交通通达度。立体交通通达度指地上、地表、地下多层次交通空间中由某点出发到达最近重要地物点的便利程度。

交通通达度是衡量交通形态效益的一项重要指标。在传统平面思维下,交通通达度指标一般仅测算平面路网上单一交通方式通达度,无法体现立体交通不同层次交通空间的综合效益。而在三维思维下,本文融入空间句法理论的基本思想,基于平均深度值对原有空间句法全局集成度进行修正,提出立体交通通达度指标。

空间句法中的深度值指某一结点距其它所有结点的最短距离,通常采用平均深度值表示。在城市立体交通系统中,地上立交、地下轨道交通和地面道路交通车辆运行速度各不相同,故某一结点通过不同交通系统到达其它结点的最短距离也不同。运行速度快的交通系统,结点间距离越小,平均深度值越小。由于车辆运行速度快,交通系统也越便捷,城市交通通达度也就越高。而对某空间而言,平均深度值越小,表明该空间结点越浅,在网络上与其它空间之间通达较为便捷,集成度更高。因此,本文采用加权平均深度值的倒数来表征立体交通通达度:

$$SA_i = \frac{n-2}{2K_{ij}(MD_i-1)} \quad (6)$$

式中 SA_i 为立体交通通达度; MD_i 为节点 i 平均深度值; n 为自然连接图的总节点数; $K_{ij} = 1000/V_j$ 为节点 i 在交通系统 j 的权重值。

本文所构建的立体交通通达度指标,不仅实现对土地立体化利用视角下空间通达性更为精准的

测度,而且能够反映不同道路交通系统在立体交通通达性水平中的作用,从而对立体交通的合理化布局提供技术指导。

4.2.3 立体绿化

在立体绿化评价中,以地均三维绿量来描述立体绿化的空间覆盖强度(数量特征),以立体绿化指数来反映立体绿化不同类型的空间布局(结构特征),以三维绿量指数来测度基于人体效用的植被三维绿量(效益特征)。

(1)地均三维绿量。地均三维绿量指单位建设用地面积上所有覆盖于建筑体上、地表及地下总的三维绿量:

$$GA = \frac{G_b + G_u + G_g}{S} \quad (7)$$

式中 GA 为地均三维绿量; G_b 、 G_u 、 G_g 分别为建筑体上、地下、地表的三维绿量; S 同公式(4)。

在平面土地利用中,城市绿地评价主要通过人均公共绿地面积、绿化覆盖率、绿地率三项指标体现^[21]。然而,这些评价指标尚停留在二维平面上,难以体现屋顶绿化、垂直绿化等立体绿化状况。在土地立体化利用中,三维绿量(所有生长中的植物茎叶所占据的空间体积,单位一般为 m^3)成为城市绿化指标体系的第一立体指标,可表征屋顶绿化、垂直绿化等各种立体绿化形式,且能够反映不同植被覆盖类型的绿化结构与质量。基于此本文构建地均三维绿量指标,用于评价区域内所有形式城市立体绿化的空间覆盖强度。

(2)立体绿化指数。立体绿化指数指所有覆盖于建筑体上和地下的三维绿量与地表三维绿量的比值,该指标旨在体现涵盖墙体绿化、屋顶绿化以及檐口绿化等类型的城市立体绿化的空间结构特征:

$$GI = \frac{G_b + G_u}{G_g} \quad (8)$$

式中 GI 为立体绿化指数。当 $GI=0$ 时,表明该区域不具备任何形式立体绿化,因而具有较大的集约绿化潜力。

(3)三维绿量指数。三维绿量指数指单位空间一定范围内所有覆盖于地表与建筑物上的植被三维绿量。该指数基于人体的绿量空间感受,以某一点人体所能捕获的单位三维绿量进行评价,从空间

视角综合考虑距离、高度等因素对人体绿量效用影响,从而定量评估三维空间下立体绿化的效益:

$$TGBI_i = \ln \frac{\sum_j (G_g + G_b)}{Vol_i}, D_{ij} \leq 100 \quad (9)$$

式中 $TGBI_i$ 为三维绿量指数; G_g 为地表上的三维绿量; G_b 为建筑物上的三维绿量; D_{ij} 为指人所处的位置 i 与周边植被 j 之间的距离。研究揭示,城市绿地的降温等生态效用的作用范围在 100–200m 之间^[22],本研究将人所处位置 i 所能接收到的生态效益作用范围 D_{ij} 取值为 100m; Vol_i 指 i 的建设体积,当 i 为植被时, Vol_i 取值为 1。在没有任何三维绿量覆盖的区域上, $TGBI_i$ 的值为 $-\infty$ 。

三维绿量的计算采用立体量推算立体量的方法,通过累加单株三维绿量获得目标区域的三维绿量总量。其中,乔木三维绿量的计算需依据不同的冠型,选择表 1 中对应的冠型公式进行计算;灌木三维绿量的计算中,单株栽植的灌木三维绿量计算同乔木,密栽灌木的三维绿量为面积与高度的乘积;草本植物三维绿量的计算为面积与高度的乘积,其中,草本植被的高度一般以 5cm 为平均水平^[23]。

表 1 植物树冠体积计算公式^[23]

Table 1 Formulas of canopy volume

序号	树冠形状	计算公式
1	卵形	$\pi x^2 y / 6$
2	圆锥形	$\pi x^2 y / 12$
3	球形	$\pi x^2 y / 6$
4	半球形	$\pi x^2 y / 6$
5	球扇形	$\pi(2y^3 - y^2 \cdot \sqrt{4y^2 - x^2}) / 3$
6	圆柱体	$\pi x^2 y / 4$

注:表中 x 为冠幅(m); y 为冠高(m)。

与传统绿化评价指标相比,上述指标采用三维绿化体积替代了传统的绿化面积,能够更好地反映城市绿色空间的构成特征,且将绿化差异及对于人体效用转化为基于空间度量的评价指标,对于支撑城市绿化资源配置与绿化空间规划具有重要意义。

5 案例示范

鉴于建筑、交通的三维数据信息库尚处于建立阶段,包含建筑结构功能的空间分布、地上高架以及人行连廊的空间信息等,立体建筑与立体交通两

2017年1月

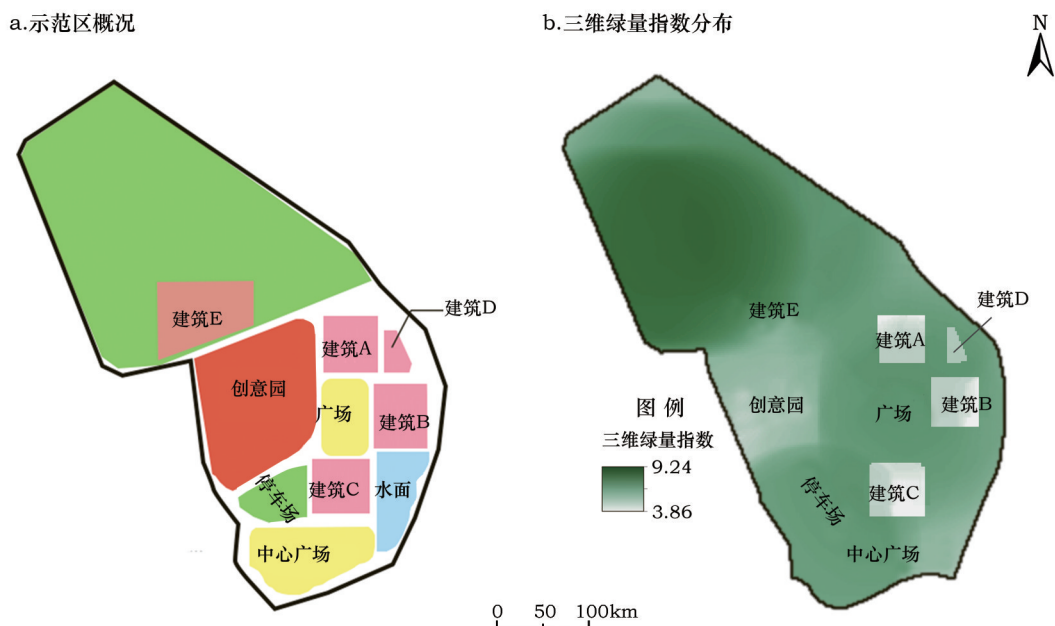


图4 深圳国际低碳城示范区概况及三维绿量指数分布

Figure 4 Distribution of TGBI and overview in Shenzhen international low-carbon city

方面评价指标的应用还需后续完善。因此,基于现有数据的情况,本文选取立体绿化评价指标中的三维绿量指数,以 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 的栅格为计算单元,以深圳国际低碳城为研究区域进行示范应用。区域内共有5处建筑,其中建筑A、B、C均存在垂直绿化、屋顶绿化等立体绿化形式(图4a)。基础数据主要依据区域的景观规划图结合实地考察获得,植被数据的测量时间为5-6月。经计算,整个示范区的三维绿量总量为 $69\,099.84\text{m}^3$,三维绿量指数平均值为7.37。其中,建筑A、B、C及其周边的三维绿量指数都存在差异,且不存在立体绿化的建筑物D由于受益于周边平面绿地也具有一定的三维绿量指数,为5.0左右(图4b)。结果表明,三维绿量指数可表达屋顶绿化、垂直绿化、平面绿化等三维空间内所有绿化对于人体的生态效益,可以表征不同立体绿化行为的效益差异,是一个可应用于指导立体绿化活动的评价指标。

6 讨论与总结

本文从土地立体化利用趋势及管理技术需求等方面分析土地评价向三维思维转变的必要性,并面向建筑立体利用、立体交通建设以及立体绿化等三种主要的立体化利用行为,研究构建土地立体化

利用评价指标。该指标秉承了三维思维,具备可拓展性,是一种体现了立体空间形态与综合质量内涵的数量化指标,可定量评估土地立体化利用的形态特征及综合效益,将对科学合理的土地立体化利用提供科技支撑。

土地立体化利用评价研究尚处于初期阶段,且当前三维空间分析技术主要应用在功能表面分析或三维视域分析等方面,或根据某些领域需要定制专业分析模型(如日照分析、水淹分析等)等,难以应对土地立体化利用研究复杂的分析需求,因而难以支撑基于真三维空间的土地立体化利用评价与分析。本文仅探索基于三维思维的土地立体化利用评价指标构建及二维量化分析,如何通过三维空间分析技术实现指标定量核算与应用仍待进一步研究。

(1)土地立体化利用评价需要三维数据获取、大数据分析等技术的支持。现有土地利用评价数据以平面调查或统计数据为主,如遥感影像数据、建筑物普查数据、人口普查及经济普查数据等,这些数据基本可满足平面土地利用评价需求。但在土地立体化利用评价中,由于其纵向分层利用的特点,需获取评价对象的三维空间信息及内部微观利

用特征才能满足评价需求。例如通过倾斜摄影测量技术,采用航空遥感手段,对城市地物进行三维成像及建模,通过空间分析等方法快速获取建筑表面模型,基于BIM、大数据分析、多源空间数据融合、空间与非空间数据的关联等技术构建面向立体利用对象的内部信息数据库及空间模型,才能满足土地立体化利用评价的三维表达与分析的需求。

(2)土地立体化利用评价是一种三维思维下的评价方法,立体化评价指标的核算需要三维空间分析技术提供支撑。在三维思维下,评价对象自身的利用形态、与其他对象的拓扑关系与平面视角相比变化较大,因此构建土地立体化利用的空间形态、空间功能配置模型,实现立体空间评价指标的核算与表达,需要拓扑学、景观学、生态学等多学科空间化研究的技术支持。

总体而言,秉承三维思维的土地立体化利用评价技术的探索,是土地利用管理技术在面临三维特征的土地立体化利用活动时,从二维平面到三维空间的一次技术转变与尝试,不仅将对土地立体化利用管理提供技术支撑,也是土地科学理论方法在三维思维下的一次创新,对于推动土地科学技术发展具有重要意义。后续可在此基础上开展立体空间三维规划技术、面向立体空间对象的三维地籍及不动产统一登记技术、发展基于BIM模型的土地审批及监管技术等研究工作。

参考文献(References):

- [1] 马素兰. 土地潜力评价[J]. 农业区划, 1989, (3): 29-36. [Ma S L. Land capability evaluation[J]. *Agricultural Regionalization*, 1989, (3): 29-36.]
- [2] 严兵. 土地适宜性评价[J]. 农业区划, 1989, (4): 60-63. [Yan B. Land suitability evaluation[J]. *Agricultural Regionalization*, 1989, (4): 60-63.]
- [3] 赵小凤, 黄贤金, 陈逸, 等. 城市土地集约利用研究进展[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1979-1996. [Zhao X F, Huang X J, Chen Y, et al. Research progress in urban land intensive use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1979-1996.]
- [4] 尹君. 土地资源可持续利用评价指标体系研究[J]. 中国土地科学, 2001, 15(2): 6-9. [Yin J. Research on assessment indicator system of sustainable land use[J]. *China Land Sciences*, 2001, 15(2): 6-9.]
- [5] 赵亚辉, 钟毅, 卫学众. 基于层次分析法的土地整理项目工程风险分析[J]. 国土资源导刊, 2008, 5(2): 41-44. [Zhao Y H, Zhong Y, Wei X Z. Risk analysis of land consolidation projects based on analytic hierarchy process[J]. *Land & Resources Herald*, 2008, 5(2): 41-44.]
- [6] 孟鹏, 郝晋珉, 周宁, 等. 新型城镇化背景下的工业用地集约利用评价研究-以北京亦庄新城为例[J]. 中国土地科学, 2014, 28(2): 83-89. [Meng P, Hao J M, Zhou N, et al. Research on evaluation of industrial land intensive use in the context of new urbanization: A case study in Yizhuang new town[J]. *China Land Sciences*, 2014, 28(2): 83-89.]
- [7] 高娟, 戴兰, 陈锐, 等. 三种开发区土地集约利用评价方法比较分析[J]. 测绘地理信息, 2014, 39(3): 62-67. [Gao J, Dai L, Chen R, et al. Comparison of three methods for land intensive use evaluation of development zone[J]. *Journal of Geomatics*, 2014, 39(3): 62-67.]
- [8] 郭旭东, 邱扬, 连纲, 等. 基于“压力-状态-响应”框架的县级土地质量评价指标研究[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 579-583. [Guo X D, Qiu Y, Lian G, et al. Land quality evaluation indicators at county scale based on “press-state-response” framework[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 579-583.]
- [9] 张彦. 基于土地集约利用的城市高架路桥下空间利用研究-以苏州为例[M]. 苏州: 苏州科技学院, 2014. [Zhang Y. The Research of the Use of the Space Under the Urban Viaducts-A Case Study in Suzhou[M]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2014.]
- [10] 王海刚, 贾三满, 杨艳, 等. 基于GIS的城市地下空间资源综合质量评估研究[J]. 上海国土资源, 2011, 32(1): 59-62. [Wang H G, Jia S M, Yang Y, et al. The assessment of synthesized quality for urban underground space resources based on GIS[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2011, 32(1): 59-62.]
- [11] 夏方舟, 沈悦, 严金明. 基于山水视野约束的城镇立体空间开发潜力评价[J]. 中国土地科学, 2014, 28(5): 81-89. [Xia F Z, Shen Y, Yan J M. Study on the potential evaluation of urban stereo space development based on the constraints of landscape view[J]. *China Land Sciences*, 2014, 28(5): 81-89.]
- [12] 唐焱, 杨伟洪. 城市地下空间价格及其评估研究-以南京市商业用地为例[J]. 中国房地产, 2012, (9): 58-65. [Tang Y, Yang H W. Study on underground space price and its appraisal-a case of commercial land in Nanjing[J]. *China Real Estate*, 2012, (9): 58-65.]
- [13] 杨伟洪. 立体空间土地价格的评估及其实证研究-以南京市商业用地为例[M]. 南京: 南京农业大学, 2010. [Yang H W. Study on Land Price Appraisal of Three-Dimensional Space and Its Demonstration-A Case of Commercial Land in Nanjing[M]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.]
- [14] Edelenbos J, Monnikhof R, Haasnoot J, et al. Strategic study on

2017年1月

- the utilization on underground space in the Netherlands[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1998, 13(2): 159-165.
- [15] Hulme T W, Zhao J. Underground space development in Singapore the past, present and future[J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 1999, 14(4): 407-407.
- [16] 姜云, 吴立新, 杜立群. 城市地下空间开发利用容量评估指标体系的研究[J]. 城市规划, 2005, 12(5): 47-51. [Jiang Y, Wu L X, Du L Q. On the index system for city underground space developing- utilization capacity evaluation[J]. *Urban Studies*, 2005, 12(5): 47-51.]
- [17] 胡宁. 基于可拓法的城市地下空间开发利用潜力评价-以郑州市为例[M]. 成都: 成都理工大学, 2012. [Hu N. Based on the Extension Method of City Underground Space Development and Utilization Potential Evaluation-Taking Zhengzhou as an Example [M]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.]
- [18] 贺彪. 三维地籍空间数据模型及拓扑构建算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011. [He B. Research on Three Dimensional Cadastral Spatial Data Model and Topology Construction Algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University, 2011.]
- [19] 应申, 郭仁忠, 李霖. 三维地籍[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Ying S, Guo R Z, Li L. Three Dimensional Cadastre[M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [20] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴 2015 [EB/OL]. (2016-06-07) [2016-07-29]. http://www.szjt.gov.cn/xxgk/tjsj/tjnj/201606/t20160607_3686823.htm. [Shenzhen Statistics Bureau. Shenzhen Statistical Yearbook 2015[EB/OL]. (2016-06-07)[2016-07-29]. http://www.szjt.gov.cn/xxgk/tjsj/tjnj/201606/t20160607_3686823.htm.]
- [21] 毛齐正, 罗上华, 马克明, 等. 城市绿地生态评价研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5589-5600. [Mao Q Z, Luo S H, Ma K M, et al. Research advances in ecological assessment of urban greenspace[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5589-5600.]
- [22] 邱海玲. 北京城市热岛效应及绿地降温作用研究[D]. 北京林业大学, 2014. [QIU H L. Study on urban heat island effect and cooling effect of greenland in Beijing[D]. Beijing Forestry University, 2014.]
- [23] 李英汉, 王俊坚, 李贵才, 等. 居住区植物绿量与其气温调控效应的关系[J]. 生态学报, 2011(3): 830-838. [LI Y H, WANG J J, LI G C, et al. Research of the vegetation's cooling effect in city's residential quarter[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(3): 830-838.]

Evaluation indexes for stereoscopic land-use in three-dimensional thinking

LUO Tingwen^{1,2}, YAO Yao^{1,2}, LUO Ping^{1,2}, XIAO Lin^{1,2}, WEN Chujun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Land and Resources of China, Shenzhen 518034, China;

2. Shenzhen Research Center of Digital City Engineering, Shenzhen 518034, China)

Abstracts: Based on the tendency of stereoscopic land-use and increasing technological demand of land-use management, we analyzed the necessity of land evaluation converting from two-dimensional perspective to three-dimensional perspective, dissected the attributes of three-dimensional thinking for stereoscopic land-use evaluation, and put forward the evaluation objects, units and indices for stereoscopic land-use in three-dimensional thinking. Document retrieval, comprehensive analysis and application demonstration were adopted to carry out in our research. We found that exploring evaluation techniques and methods for stereoscopic land-use in three-dimensional thinking conforms to the demand of both land management and land-use practice. The evaluation objects are spatial scope with synthetic efficiency, multiple structures and inner heterogeneity. Meanwhile, the evaluation units are three-dimensional spatial units. Taking the major contributions of stereoscopic land-use into full consideration, and oriented by the three kinds of typical stereoscopic land-use forms comprising stereo-building, stereo-traffic construction and vertical greening, nine evaluation indices for stereoscopic land-use implying three-dimensional thinking were proposed to characterize morphological structure and efficiency. These indices are numerical and extensible, quantitatively reflecting the connotation of spatial pattern and comprehensive quality for stereoscopic land-use. In summary, the exploration of the evaluation technique for stereoscopic land-use under three-dimensional thinking is a technological transition from two-dimensions to three-dimensions, which provides technological support for stereoscopic land-use management and supports theoretical innovation for land science on the basis of three-dimensional thinking. This research supports scientific and rational land use under a stereoscopic development mode.

Key words: stereoscopic land-use; three-dimensional thinking; land evaluation; evaluation index; land use