

地下空间开发与社会经济指标的相关性研究*

孙利萍^{1,2}, 李晓昭^{1,2}, 周丹坤^{1,2}, 王睿^{1,2}, 刘超^{1,2}

(1. 南京大学 华东有色地勘局地下空间与地质环境研究所, 南京 210023; 2. 南京大学 地球科学与工程学院, 南京 210023)

摘要: 地下空间是一种重要的资源。本文通过对比研究地下空间开发数据, 将中国城市地下空间发展水平进行了分级, 并分析不同等级下社会经济的特点, 然后分别从不同角度对地下空间指标与人口密度、地均 GDP、人均汽车保有量等指标进行了相关性分析。结果表明, 不同城市的地下空间开发强度与其地均 GDP、人口密度具有高度的线性相关性。以上海市为例研究发现, 同一城市不同时期的地下空间开发强度与人口、GDP、汽车保有量等指标可能存在多元线性关系。研究结果一方面验证了地下空间开发对社会经济发展的依赖性, 即较高的地均 GDP 是所须具备的外部条件, 较高的人口密度则是内在驱动力。另一方面也表明某些社会经济指标对地下空间发展阶段具有重要的指示作用。

关键词: 地下空间; 社会经济; 相关性; 开发强度; 人口密度

中图分类号: TU98

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-0859-10

Study on the Correlation between Underground Space Development and Socio-economic Factors

Sun Liping^{1,2}, Li Xiaozhao^{1,2}, Zhou Dankun^{1,2}, Wang Rui^{1,2}, Liu Chao^{1,2}

(1. Institute for Underground Space and Geo-environment, NJU-ECE, Nanjing 210023, P.R. China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, P.R. China)

Abstract: Urban underground space (UUS) is a kind of important space resource. Based on collecting data on UUS developed area and urban economic and social factors, the levels of UUS development in different Chinese cities have been classified. Then the corresponding urban socio-economic characteristics under different levels of UUS development have been compared and analyzed. Afterwards, the correlations between UUS data and socio-economic data, which include permanent population density, GDP per km² and vehicles possessive quantity per capita, have been respectively analyzed from the horizontal and vertical aspects. The results have shown that there is a highly linear correlation between UUS development intensity and GDP per km², as well as population density. Furthermore, it has been found that there could be multivariate linear relationship among UUS development intensity, population density, GDP per km² and vehicles possessive quantity per capita of a certain city (e.g. Shanghai) in different periods of urban development. The results indicate that UUS development is highly depended on urban socio-economic level, that is, high GDP per km² is an essential external condition while high population density is internal driving force. Also, results indicate that some socio-economic indexes maybe have important indicator function on UUS development stage.

Keywords: underground space; socio-economic; correlation; development intensity; population density

* 收稿日期: 2018-01-20(修改稿)

作者简介: 孙利萍(1994-), 女, 安徽淮南人, 硕士生, 主要从事城市地下空间资源调查与评估方面的科研工作。

E-mail: slpnju@163.com

基金项目: 中瑞典型城对比研究项目(2009DFA22680); 欧盟 Marie-Curie 合作计划(FP7-IRSES-612665); 国家自然科学基金(41272314)

0 引言

近年来,随着城市化进程的不断加快,越来越多的人涌向城市。据统计,1980年中国城市人口仅占总人口的19%,而到2020年,政府预期这一数字将会达到60%。不断集聚的人、车等要素使得城市空间资源日益紧缺,不断增大的空间需求与当前有限的城市空间容量之间的矛盾日益突出,扩展城市空间成为解决这一矛盾最直接的方法。城市地下空间是21世纪人类重点开发利用的空间资源,城市发展空间由地上向地下延伸,是世界城市发展的必然趋势^[1]。

城市地下空间开发利用是提高土地利用效率、缓解交通拥堵、保护环境的重要手段,对促进城市可持续发展具有重要意义。但这种资源本身是不可再生的,一旦被用作某种特定的功能,就很难再改变^[2]。若地下空间的开发慢于城市的发展,可能会导致空间紧缺、交通拥堵等问题,进而妨碍城市总体的发展。若地下空间的开发快于城市的发展,则又可能造成严重的资源浪费和开发成本过大^[3]。因此,在城市化和城市现代化的进程中,应该适时适度地开发利用地下空间,进行整体性地规划,抓住正确的开发时机^[4-5]。地下空间的开发必须与城市化水平相协调,开发规模必须在合理的范围内^[6]。

对地下空间和城市发展社会经济要素的定量研究,有助于发现地下空间发展与城市社会经济水平的相互关系,从而为合理开发规划地下空间提供参考。王波等^[7]根据统计数据研究发现,上海、北京、广州等一线城市人均GDP在800~1 000美元时进入地下空间的综合开发利用阶段,在人均5 000美元时左右地下空间的利用进入高速发展期,而二、三线城市受城市规模的影响,在人均3 000~5 000美元时才逐步进入地下空间开发阶段。Liu等^[8]认为,人均GDP是决定地下空间发展阶段的重要指标。陈立道等^[9]提出可以根据人均地下空间合理容量及基于城市人口统计学的预测结果计算地下空间合理容量。He等^[3]以上海各区县为案例,分析了地下空间的开发强度与人口密度、人均GDP和房价3个城市化指标的相关性,结果显示,人口密度和人均GDP对地下空间开发强度均具有较强的预测能力。Monnikhof等^[10]论述了在城市地下空间开发时,首先需要判断哪些区域具有开发潜力,需要开发哪些功能以及合理的开发时

机。Li等^[11]以南京新街口、上海人民广场和柏林亚历山大广场为案例,对比研究了不同区域地下空间的开发强度、开发功能,并论述了地下空间开发的需求与驱动因素。刘莹^[12]分析了国内三、四线城市地下空间开发利用的特点,并以宜宾市为例讨论了地下空间合理的开发功能及规模。冯艳君等^[13]以中山市为例,结合案例分析、功能分类等定性定量方法,计算了基于不同发展情景的地下空间开发规模预测值。徐辉等^[14]以中外10个典型区域作为研究案例,分析了地下空间开发与表征城市化的因素地均GDP的相关性。然而,目前针对不同城市的地下空间开发指标与各项社会经济指标之间相互关系的定量研究还比较少,城市尺度上地下空间发展水平与社会经济水平的关系规律还有待揭示。

本文从城市尺度上研究了国内19个城市的地下空间开发指标和人口密度、地均GDP、人均汽车保有量等社会经济指标之间的相关性,并根据人均和地均地下空间开发指标,将城市地下空间开发划分为不同的发展水平,论述了不同发展水平的城市社会经济指标的特点。本研究有助于不同城市根据自身社会经济水平确定合理的地下空间开发规模和强度,促进地下空间的科学规划与合理开发利用,从而实现城市可持续发展。

1 研究方法和数据

1.1 研究方法

1.1.1 文献研究

通过广泛阅读文献,了解掌握本研究领域国内外的研究现状和研究焦点,形成本文研究的理论框架。由于各城市地下空间开发数据难以通过官方公布的统计资料获得,因此本文用到的城市地下空间开发面积数据大多来源于前人文献、城市规划报告书或政府新闻报道,但各指标的统计口径是一致的,均为特定城市特定时期的地下空间已开发面积。

1.1.2 定性与定量分析

通过查找统计年鉴,获取各城市的人口、GDP和汽车保有量等社会经济指标数据。在此基础上,定性与定量相结合地划分地下空间发展等级,并定量地对不同城市不同时期的地下空间开发与社会经济等指标数据进行研究分析,其中包括对各项指标数据的统计分析、相关性分析,以及建立多元线性回归模型等。

1.1.3 对比研究

对比研究包括横向对比和纵向对比。横向对比了国内不同区域不同发达程度的城市地下空间开发水平及社会经济特点,纵向对比了案例城市上海在不同时期的地下空间与社会经济的发展状况及相关性。

1.2 数据

1.2.1 地下空间数据

Bobylev^[15]认为地下空间是衡量城市发展水平的重要指标,并提出地下空间开发体积(m^3)、地下空间开发密度(m^3/m^2)和人均地下空间体积($\text{m}^3/\text{人}$)这3个关键指标作为衡量地下空间发展水平的指标。孙艳晨等^[16]提出城市地下空间开发强度是指地下空间开发量与开发地块面积的比例系数,比例系数越高,地下空间开发强度越大。笔者收集到的城市地下空间数据主要是已开发面积,由于不

同城市人口数量和地域面积差异较大,为更好地体现各地发展水平,选取人均地下空间面积和地均地下空间面积两个指标衡量城市地下空间开发水平。

1.2.2 社会经济数据

影响地下空间开发水平的社会经济要素有很多,包括人口、交通、经济、区位等多种因素。各因素的影响机制和程度也有所不同,有外部条件和内在驱动因素,有直接和间接因素,也有主要和次要因素。在文献研究的基础上,本着广泛性、代表性和定量性3个原则,本文选取人口、经济和交通3个要素代表城市社会经济发展状况。同时,为进行定量研究与分析,分别采取常住人口密度、地均GDP和百人汽车保有量来衡量城市人口、经济和交通发展水平。各指标的含义和计算方法如表1。

表 1 指标的含义和计算方法

Table 1 Index system and computing method

| 因素 | | 指标 | 单位 | 计算方法 |
|------|----------|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| 社会经济 | 人口 | 常住人口密度 | 人/ km^2 | 常住人口总数÷市辖面积 |
| | 经济 | 地均 GDP | 万元/ km^2 | 地区生产总值÷城市行政面积 |
| | 交通 | 百人汽车保有量 | 辆 | 民用汽车保有量÷常住总人口×100 |
| 地下空间 | 人均地下空间面积 | $\text{m}^2/\text{人}^1$ | 地下空间开发面积÷常住总人口 | |
| | 地均地下空间面积 | 万 $\text{m}^2/\text{km}^{-2}$ | 地下空间开发面积÷城市行政面积 | |

1.3 研究对象

本文研究对象为国内 19 个城市,包括上海、北京、广州、深圳、杭州、南京、宁波、沈阳、青岛、南昌、无锡、郑州、绍兴、温州、苏州、福州、哈尔滨、成都和徐州。其中上海市地下空间数据较丰富,涵盖 2004~2013 年共 8 个数据年份,其他城市由于地下空间数据有限,仅有某一年或某几年的数据。样本数据合计 35 个,从城市等级上,涵盖了我国 4 个一线城市、主要省会城市和二线城市,以及部分中小城市,如表 2 所示。从地理分布上,既有沿海城市,也有内陆城市,因此具有较广泛的代表性。

2 地下空间发展分级及社会经济特点

2.1 城市地下空间发展水平分级

中国不同区域的城市地下空间开发水平具有

较大的差异,总体上呈现出东部沿海地区较为发达,地下空间开发规模大、起步早,而中西部地区地下空间发展较为落后的特征。然而,当前地下空间的开发主要集中于人口、经济等要素最密集的区域中心——城市,根据地区进行分类并不能代表城市地下空间的真实发展水平。此外,地下空间的开发是动态持续的过程,在时间上具有渐变性。近年来,随着经济飞速发展,许多城市陆续兴建地铁,地下商场、地下停车库、地下综合体等工程的修建也在不断进行,地下空间发展水平随时间飞速变化。地下空间开发的现状水平并不能完全反映未来的发展趋势。因此,本文综合考虑不同城市(横向对比)和不同时期(纵向对比),分别根据人均、地均地下空间指标,对城市地下空间发展水平进行分级(图 1、图 2)。

表2 不同城市不同时期的地下空间指标和社会经济指标一览表
Table 2 Data on UUS and social economy of different cities and periods

| 城市 | 年份 | 常住人口密度 /(人·km ⁻²) | 百人汽车保有量/辆 | 地均 GDP /(万元·km ⁻²) | 地下空间开发 面积/(万 m ²) | 人均地下空间 面积/(m ² ·人 ⁻¹) | 地均地下空间 面积/(m ² ·km ⁻²) |
|-----|------|----------------------------------|-----------|-----------------------------------|----------------------------------|---|--|
| 上海 | 2013 | 3 809 | 9.7 | 34 410.8 | 6 875 | 2.847 | 1.084 |
| | 2011 | 3 702 | 8.3 | 30 274.7 | 5 699 | 2.428 | 0.899 |
| | 2010 | 3 632 | 7.6 | 27 073.5 | 4 500 | 1.954 | 0.710 |
| | 2009 | 3 486 | 6.7 | 23 730.7 | 4 300 | 1.945 | 0.678 |
| | 2008 | 3 376 | 6.2 | 22 190.5 | 2 800 | 1.308 | 0.442 |
| | 2007 | 3 255 | 5.8 | 19 705.1 | 2 496 | 1.210 | 0.394 |
| | 2006 | 3 098 | 5.4 | 16 674.1 | 1 600 | 0.815 | 0.252 |
| | 2004 | 2 748 | 4.8 | 11 750.3 | 440 | 0.253 | 0.069 |
| 北京 | 2012 | 1 261 | 24.0 | 10 895.1 | 6 600 | 3.189 | 0.402 |
| | 2010 | 1 196 | 23.4 | 8 600.3 | 6 000 | 3.058 | 0.366 |
| | 2008 | 1 033 | 18.8 | 6 773.1 | 5 000 | 2.950 | 0.305 |
| | 2006 | 963 | 15.4 | 4 946.7 | 3 000 | 1.898 | 0.183 |
| 南京 | 2010 | 1 216 | 10.4 | 7 609.9 | 730 | 0.912 | 0.111 |
| | 2006 | 1 092 | 5.2 | 4 288.5 | 480 | 0.668 | 0.073 |
| | 2007 | 1 126 | 6.2 | 5 074.3 | 480 | 0.648 | 0.073 |
| | 2005 | 1 048 | 4.5 | 3 725.0 | 280 | 0.406 | 0.043 |
| 杭州 | 2015 | 543 | 20.5 | 6 057.8 | 5 760 | 6.387 | 0.347 |
| | 2013 | 533 | 19.0 | 5 027.4 | 4 000 | 4.523 | 0.241 |
| | 2010 | 524 | 14.3 | 3 584.7 | 2 425 | 2.787 | 0.146 |
| | 2002 | 384 | 3.3 | 1 073.7 | 200 | 0.314 | 0.012 |
| 广州 | 2010 | 1 710 | 12.6 | 14 457.5 | 1 900 | 1.495 | 0.256 |
| 深圳 | 2005 | 4 235 | 9.3 | 25 352.4 | 1 900 | 2.298 | 0.973 |
| 沈阳 | 2012 | 635 | 13.7 | 5 102.6 | 1 222 | 1.485 | 0.094 |
| 宁波 | 2015 | 797 | 22.9 | 8 161.7 | 3 201 | 4.091 | 0.326 |
| 郑州 | 2008 | 999 | 8.4 | 4 034.3 | 382.7 | 0.515 | 0.051 |
| 南昌 | 2011 | 688 | 8.6 | 3 632.4 | 355.6 | 0.699 | 0.048 |
| 无锡 | 2005 | 964 | 6.4 | 5 983.2 | 200 | 0.442 | 0.043 |
| 青岛 | 2004 | 686 | 4.2 | 2 031.0 | 200 | 0.274 | 0.019 |
| 绍兴 | 2011 | 596 | 10.7 | 3 975.4 | 247.54 | 0.502 | 0.030 |
| 温州 | 2013 | 763 | 13.7 | 3 319.7 | 1 400 | 1.522 | 0.116 |
| 苏州 | 2007 | 1 039 | 7.9 | 6 715.0 | 300 | 0.340 | 0.035 |
| 福州 | 2014 | 621 | 11.5 | 4 319.2 | 1 199.6 | 1.615 | 0.100 |
| 哈尔滨 | 2010 | 198 | 6.1 | 680.9 | 331.2 | 0.311 | 0.006 |
| 成都 | 2010 | 1 134 | 9.9 | 4 480.5 | 998 | 0.710 | 0.081 |
| 徐州 | 2015 | 769 | 9.8 | 4 725.4 | 550 | 0.635 | 0.049 |

注:表中人口密度、汽车保有量、GDP 等数据来源于各市统计年鉴,地下空间数据来源于城市规划报告、政府新闻报道和参考文献^[17-21]。

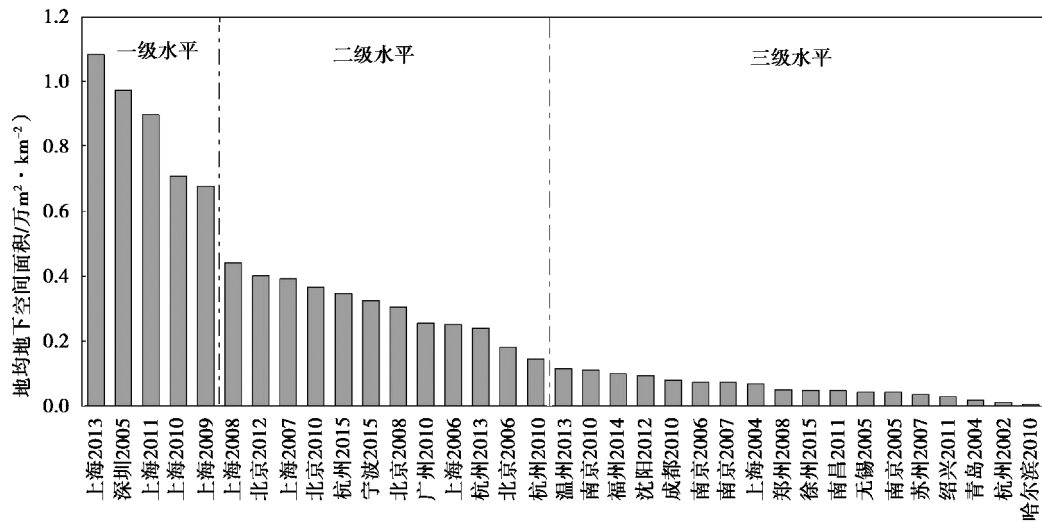


图1 地下空间发展水平分级(按地均地下空间面积)

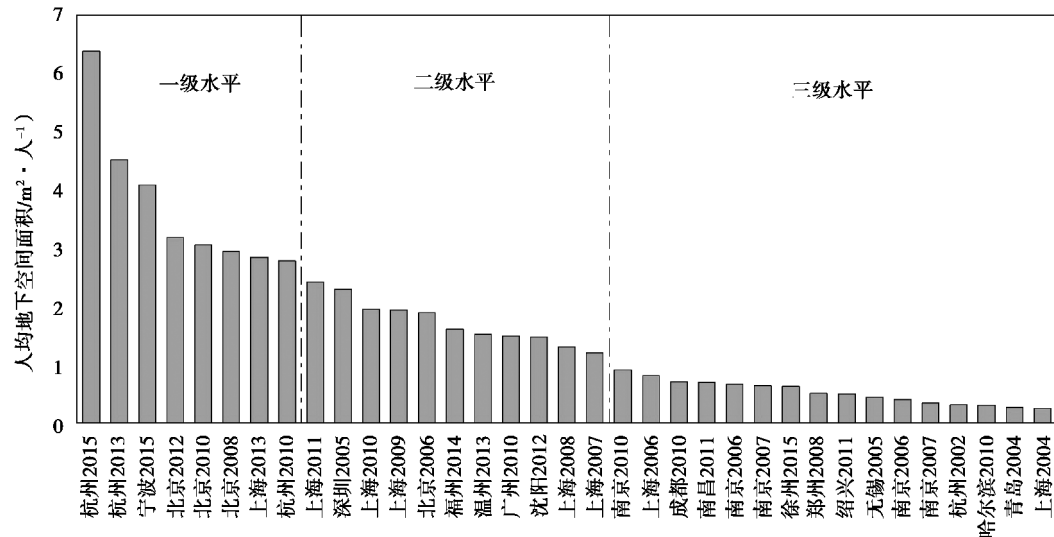
Fig. 1 Classification of UUS developmental level (based on UUS area per km^2)

图2 地下空间发展水平分级(按人均地下空间面积)

Fig. 2 Classification of UUS developmental level (based on UUS area per capita)

从图1、图2可见,以地均地下空间面积为分级标准时,上海、深圳、北京等一线城市的地下空间发展水平明显高于同时期的杭州、南京、沈阳、南昌等二、三线城市。而以人均地下空间面积为分级标准时,杭州、宁波等二、三线城市的地下空间发展水平却超过了北京、上海等一线城市。此外,对比北京和上海,上海地均地下空间指标普遍高于同时期的北京,且2009年以后地下空间发展就达到一级水平,而北京市人均地下空间面积指标则普遍高于上海。经过分析,这一现象是多方面因素共同产生的,其中最主要的原因可能有3个:(1)不同城市人口密集程度和增长速度的差异。一线大城市虽然地下空间开发总量大,但是人口基数也较大,人

口集聚速度也更快,因此,人均地下空间指标反而稍稍落后于某些人口密集度较低的二、三线城市;(2)不同城市市域面积本来就存在较大差距,而地下空间开发强度又与城市面积直接相关,因此,按照地均地下空间指标(即地下空间开发强度)来衡量地下空间开发水平时,面积较大的北京市不及面积较小的上海市发展速度快。

以上分析表明,地均地下空间指标和人均地下空间指标在反映城市地下空间发展水平上具有不同的含义。地均地下空间指标反映了城市单位土地的地下空间开发强度,而人均地下空间指标则反映了城市当前地下空间开发总量能够满足人口对空间需求的程度。根据国内外城市地下空间开发

经验,在不同的区域地理位置、经济条件以及新旧城市中心区,地下空间的开发强度具有较大的差异^[16]。人口密度的高低则直接影响了城市空间资源的紧缺程度。因此,笔者认为在确定某一城市的地下空间合理开发规模时,特别是对人口快速增长型的城市(如上海),需重点考虑人均地下空间指标;而对于城市内部的某一区域,如南京新街口商

区,则需重点考虑地均地下空间指标,根据其地面建设情况、地价水平、人流量等客观条件确定最合理的地下空间开发强度。

2.2 不同地下空间发展等级的社会经济状况

通过对图 1、图 2 不同地下空间发展等级的城市社会经济数据进行整理与统计,得到表 3、图 3。

表 3 不同地下空间发展等级的社会经济状况

Table 3 Socio-economic situation under different levels of UUS development

| 地下空间发展指标 | | 社会经济指标 | | | | | | |
|-----------|----|------------------------------|-------------|-------------------------------|---------------|-----------|----------|------|
| | | 常住人口密度/(人·km ⁻²) | | 地均 GDP/(万元·km ⁻²) | | 百人汽车保有量/辆 | | |
| | | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 | 范围 | 均值 |
| 按地均地下空间面积 | 一级 | 0.869 | 3 486~4 235 | 3 798 | 23 730~34 411 | 28 426 | 6.7~9.7 | 8.3 |
| | 二级 | 0.305 | 524~3 376 | 1 585 | 3 585~22 191 | 10 918 | 5.4~24 | 15.6 |
| | 三级 | 0.059 | 198~2 748 | 942 | 681~11 750 | 4 748 | 3.3~13.7 | 8.1 |
| 按人均地下空间面积 | 一级 | 3.729 | 524~3 809 | 1 402 | 3 585~34 411 | 12 151 | 9.7~24.0 | 18.6 |
| | 二级 | 1.742 | 621~4 235 | 2 403 | 3 320~30 275 | 16 467 | 5.8~15.4 | 10.2 |
| | 三级 | 0.528 | 198~3 098 | 1 171 | 681~16 674 | 5 767 | 3.3~10.7 | 7.0 |

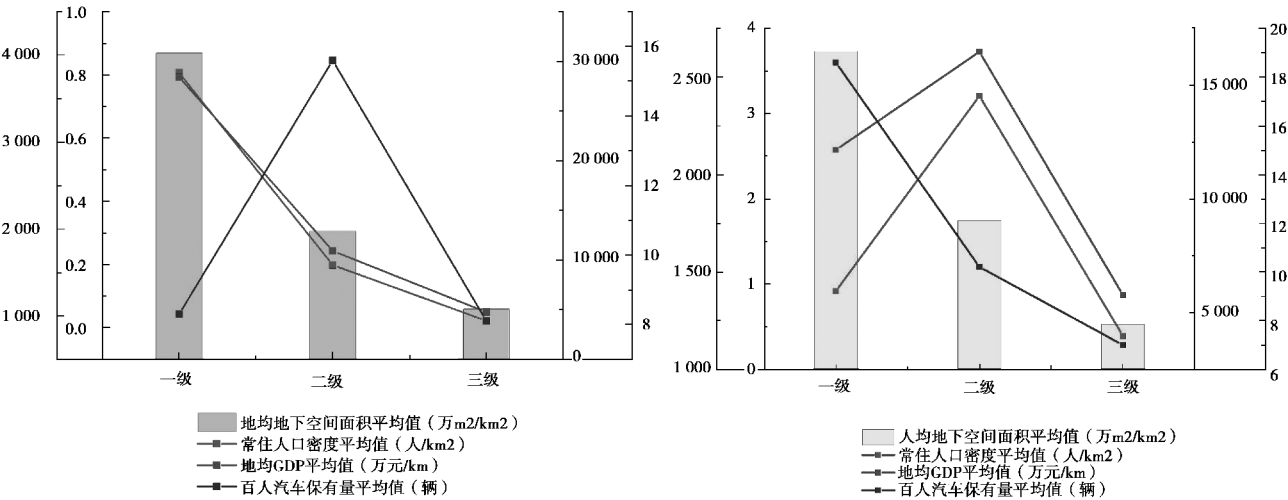


图 3 不同地下空间发展等级的社会经济指标均值

Fig. 3 The average level of socio-economic index under different UUS development levels

从表 3 和图 3 可见,根据地均地下空间面积进行分级,不同地下空间发展水平下的常住人口密度和地均 GDP 呈现明显的规律性。其中,一级水平的城市人口密度平均值为 3 798 人/km²,地均 GDP 平均值为 28 426 万元/km²,二级、三级相应的指标依次降低。而百人汽车保有量则出现异常,一级城市的均值反而低于二级。通过分析,原因可能是地

下空间发展水平处于一级的上海(2013 年)和深圳(2005 年)相应的人口规模也很大,因而人均汽车保有量数值反而小于地下空间发展水平处于二、三级的城市。

此外,根据人均地下空间面积进行分级,不同城市地下空间发展水平下的人均汽车保有量存在逐级降低的规律,而常住人口密度和地均 GDP 虽

然总体上仍有逐级降低的趋势,但是一级水平的城市社会经济指标出现异常。经过分析,笔者认为原因可能是该地下空间分级标准很大程度上受城市人口规模的影响。因此,尽管杭州(2015年)和宁波(2015年)的地下空间开发总面积远小于北京、上海等一线城市,但由于人口密度较小,因此人均地下空间指标反而高于北京、上海等城市。

综上所述,对于不同地下空间发展水平的城市,相应的社会经济水平也存在明显的差异。除了个别特例,大体上呈现出同高同低的规律性,即城市常住人口密度、地均 GDP 和人均汽车保有量等社会经济指标越高,地下空间发展水平也越高。

3 地下空间与社会经济的相关性分析

3.1 不同城市地下空间与社会经济的相关性

分别对 19 个城市的地均地下空间面积、人均地下空间面积与常住人口密度、地均 GDP 和百人汽车保有量等 3 个社会经济要素的相关性进行分析,结果如图 4、图 5。

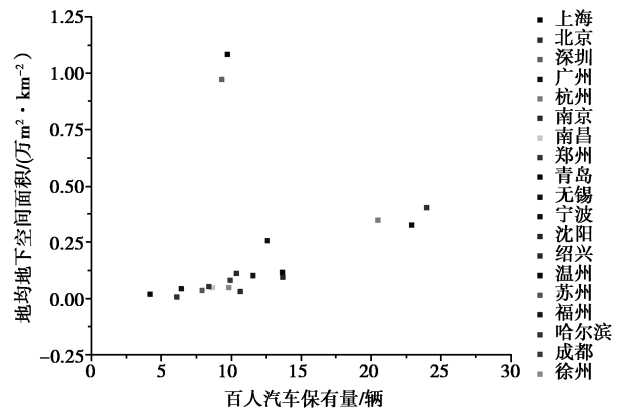
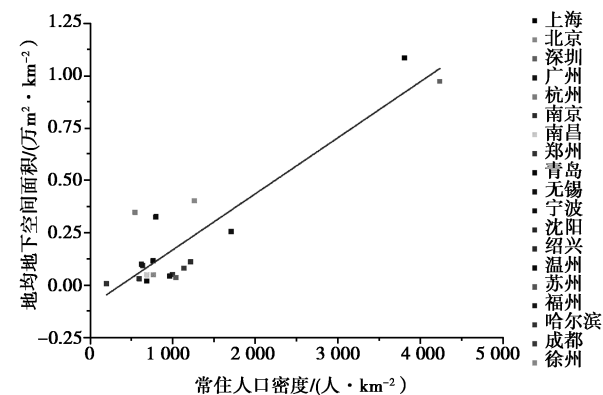


图 4 地均地下空间面积与社会经济的相关性

Fig. 4 The correlation between UUS per km^2 and social economy

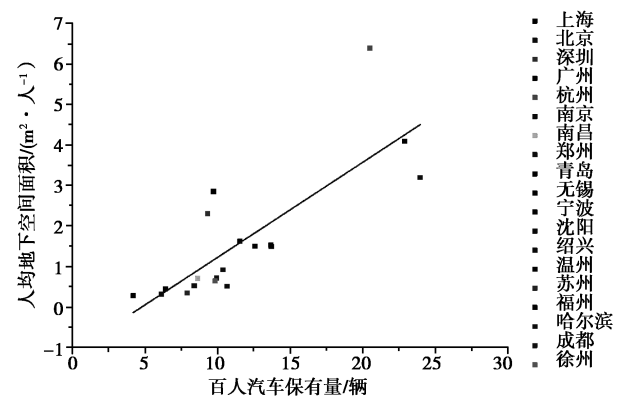
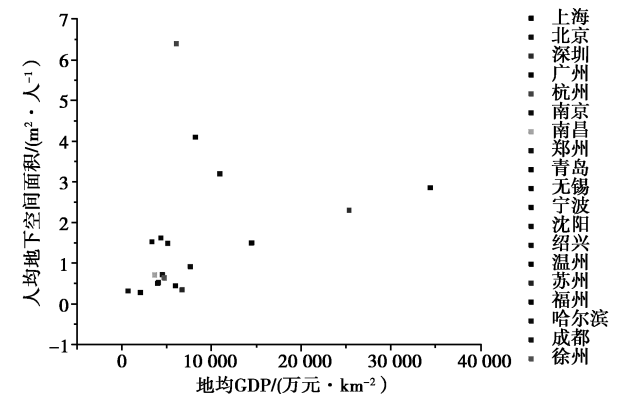
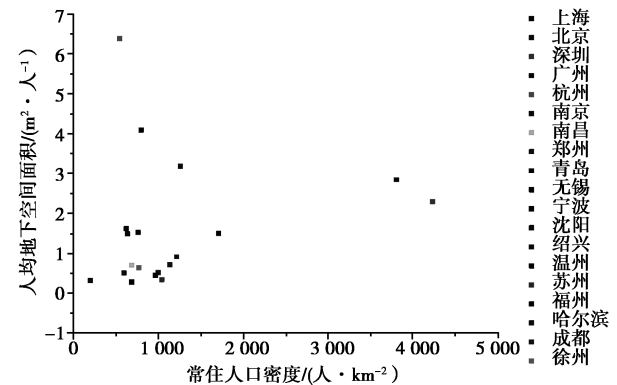


图 5 人均地下空间面积与社会经济的相关性

Fig. 5 The correlation between UUS per capita and social economy

表 4 地下空间指标与社会经济指标的相关性分析结果

Table 4 Analysis result of correlation between UUS index and socio-economic index

| 变量 1 | 变量 2 | 相关系数 | | 相关性 强弱 |
|--------------|---------|-------|-------|-----------|
| | | r | r^2 | |
| 地均地下空间 面积 | 地均 GDP | 0.950 | 0.897 | 强 |
| | 常住人口密度 | 0.911 | 0.820 | 强 |
| | 百人汽车保有量 | — | — | 弱 |
| 人均地下 空间面积 | 地均 GDP | — | — | 弱 |
| | 常住人口密度 | — | — | 弱 |
| | 百人汽车保有量 | 0.803 | 0.624 | 较强 |

通过国内 19 个城市的地下空间指标和社会经济指标的相关性分析可以看出,总体而言,地下空间开发强度(即地均地下空间面积)与地均 GDP 呈现出非常高度的线性正相关,与常住人口密度也呈现出较强的线性正相关性,而与百人汽车保有量之间则没有表现出明显的线性相关,上海(2013)、深圳(2005)的地下空间开发强度比人均汽车保有量相当的其他城市高出很多。而人均地下空间规模则与百人汽车保有量具有较强的线性相关性,与地均 GDP 和常住人口密度两个指标之间则没有表现出明显的线性相关。通过分析,笔者认为出现以上现象的原因可能是不同城市不同时期的社会经济背景差异较大,例如北京(2012)和杭州(2015),尽管地下空间开发总量相当,但由于北京市常住人口远远多于杭州市,因此人均地下空间规模相差很大。

3.2 不同时期地下空间与社会经济的相关性

社会经济因素对地下空间开发的影响具有阶段性,即在地下空间开发的不同阶段,影响地下空间的社会经济因素也在不断变化,各因素所占的主次地位也有所不同^[3]。此外,不同城市的社会经济背景差异较大,导致研究地下空间和社会经济的相关性难以得到定量的数学规律。因此,本文选取地下空间数据较为丰富的上海市作为案例,如图 6,表 5 所示。分析同一城市不同时期地下空间与社会经济指标的相关性。

图 6 表现了上海市 2004—2013 年地下空间与经济、人口和交通三个要素之间的关系。可以看到,2004—2013 年,上海市地均地下空间面积与常住人口密度、地均 GDP 和百人汽车保有量三者均呈现出高度的线性正相关。

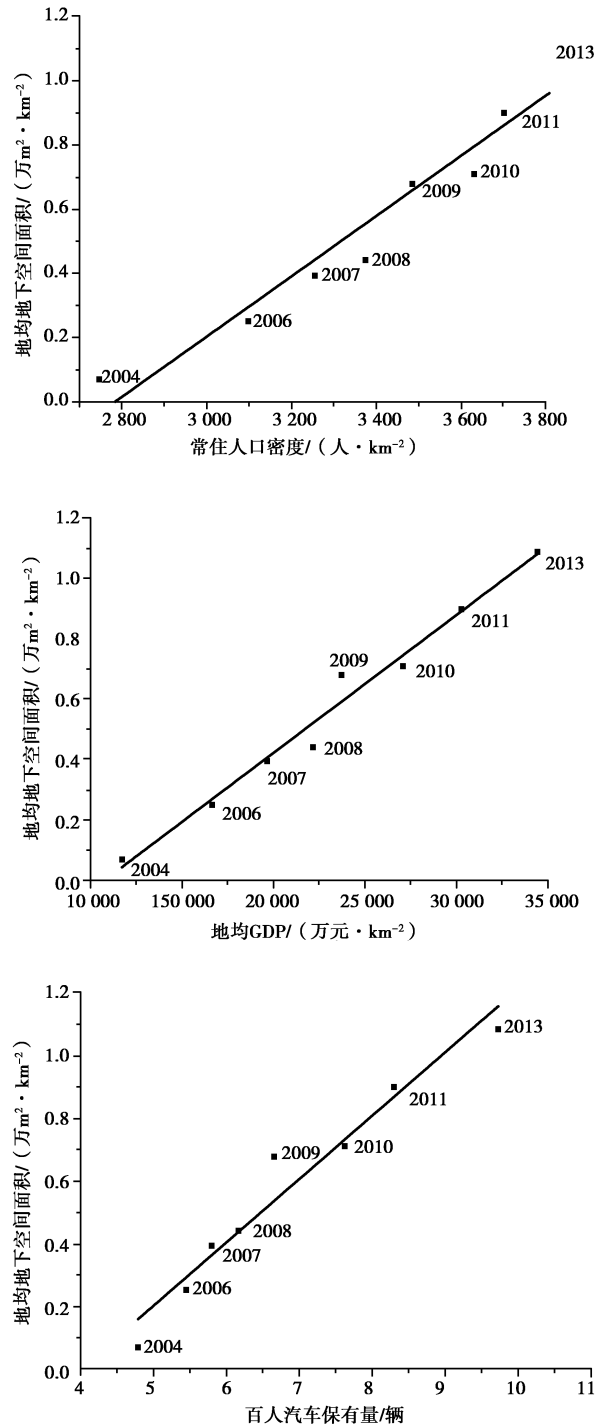


图 6 上海市 2004—2013 年地下空间指标与社会经济指标

Fig. 6 UUS index and socio-economic index of Shanghai from 2004 to 2013

基于上述发现,笔者提出以下假设:同一城市不同时期的地下空间开发强度(即地均地下空间面积)与常住人口密度、地均 GDP 和百人汽车保有量存在显著的线性相关性。该假设可以用多元线性回归模型表示:

$$U = \beta_0 + \beta_1 \times P + \beta_2 \times E + \beta_3 \times T \quad (1)$$

式中: U 为地下空间发展指标,即地均地下空间面积; P 为人口发展指标,即常住人口密度; E 为经济发展指标,即地均GDP; T 为交通发展指标,即百人汽车保有量; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 为4个未知的回归系数,可通过回归分析计算得到。

表5 上海市不同时期地下空间与社会经济的相关性分析结果

Table 5 Analysis result of correlation between UUS and social economy of Shanghai

| 变量1 | 变量2 | 相关系数 | | 相关性 强弱 |
|--------------|---------|-------|-------|-----------|
| | | R | R^2 | |
| 地均地下 空间面积 | 常住人口密度 | 0.967 | 0.925 | 强 |
| | 地均GDP | 0.990 | 0.976 | 强 |
| | 百人汽车保有量 | 0.976 | 0.945 | 强 |

表6、图7是利用SPSS软件对上海市进行多元线性回归分析的结果。其中预测变量为地均GDP、常住人口密度和百人汽车保有量,因变量为地均地下空间开发面积。可以看到,模型拟合度和显著性都很高。表中各回归系数的数值即为适合上海市的参数。该模型只能反映当前上海市地下空间与社会经济要素的关系,对未来预测的准确性有待检验。笔者认为,其他城市的地下空间开发强度与人口密度、地均GDP和汽车保有量等社会经济指标可能也存在这一多元线性回归关系,只是对于不同城市, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 等回归系数有所不同。这一假设有待后续研究的验证。

表6 SPSS多元线性回归分析结果

Table 6 Results of multi-variable linear return analysis based on SPSS

| 条目 | 分析结果 |
|-------|--|
| 模型拟合度 | $R=0.992$,说明该模型拟合度很高 |
| 显著性 | $\text{Sig}=0.001<0.005$,说明具有非常高的显著性 |
| 回归系数 | β_0 -1.827 |
| | β_1 4.76×10^{-4} |
| | β_2 -5.95×10^{-6} |
| | β_3 0.135 |
| 拟合公式 | $U_{\text{SH}}=-1.827+4.76\times10^{-4}\times P-5.95\times10^{-6}\times E+0.135\times T$ |

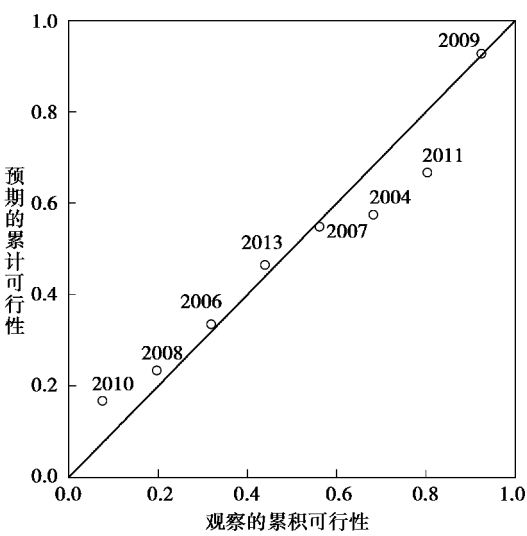


图7 多元线性回归分析的正态P-P图

Fig. 7 Normal P-P of multi-variable linear return analysis

4 结论

(1)城市地下空间开发是一个持续动态的过程,人均指标与地均指标在衡量城市地下空间开发水平时具有不同的含义。在进行地下空间开发规划时,应根据情况综合考虑不同指标。

(2)城市地下空间发展水平与社会经济状况具有较强的相关性,大体上呈现同高同低的规律,即人口密度越大、地均GDP越高、人均汽车保有量越多的城市,其地下空间开发规模也越大。

(3)对不同城市,地下空间开发强度与地均GDP和常住人口密度两个指标呈现较强的线性正相关,而人均地下空间规模则与人均汽车保有量具有一定的相关性。

(4)对同一城市不同时期,地下空间开发强度指标与地均GDP、常住人口密度和人均汽车保有量均存在显著的线性相关性。对于上海市,这一规律可用多元线性回归模型表示,且该模型的拟合度较高,但对未来的预测情况有待验证。对于其他城市,也有待进一步的研究。

地下空间的开发利用是紧凑城市理论的内涵之一^[22]。为了实现城市的紧凑形态,促进可持续发展,必须要充分分析城市地下空间和地面社会经济因素的不同特点,找寻其中蕴含的规律。本文通过对地下空间指标和社会经济指标的相关性分析,归纳总结了地下空间与社会经济之间可能存在的

某些规律与特点,其研究结果对城市根据自身社会经济发展水平科学合理规划地下空间开发规模、开发程度等方面具有一定的参考价值。对于城市地下空间开发与社会经济因素之间更深刻的内在关联,仍有待更进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] Bobylev N. Mainstreaming sustainable development into a city's master plan: a case of urban underground space use[J]. *Land Use Policy*, 2009, 26(4): 1128-1137.
- [2] Sterling R. Planning for underground space [R]. American Planning Association Planning Advisory Service, 1983, Report No. 375.
- [3] He L, Song Y, Dai S Z, et al. Quantitative research on the capacity of urban underground space—the case of Shanghai, China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, 32(11): 168-179.
- [4] 童林旭. 中国城市地下空间的发展道路[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(1): 1-6. (Tong Linxu. The way of development of urban underground space in China[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(1): 1-6. (in Chinese))
- [5] Li X Z, Li C C, Parriaux A, et al. Multiple resources and their sustainable development in urban underground space [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 59-66.
- [6] 李建龙, 田毅, 师学义. 北京市什刹海地区地下空间用地需求研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(4): 841-844. (Li Jianlong, Tian Yi, Shi Xueyi. The research of land demand for underground space in Beijing Shichahai Lake area [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(4): 841-844. (in Chinese))
- [7] 王波. 城市地下空间开发利用问题的探索与实践 [D]. 北京: 中国地质大学, 2013. (Wang Bo. Exploration and practice of the development and utilization of urban underground space [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013. (in Chinese))
- [8] Liu Y F, Song Z Q, Sun H L. Analysis of the influence of economic factors on the development and utilization of underground space in the city center [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 584-586: 2404-2410.
- [9] 陈立道, 朱雪岩. 城市地下空间规划理论与实践 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (Chen Lidao, Zhu Xueyan. The theory and practice of urban underground space planning [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [10] Monnikhof R A H, Edelenbos J, Hoeven F V D, et al. The new underground planning map of the Netherlands: a feasibility study of the possibilities of the use of underground space [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1999, 14(3): 341-347.
- [11] Li X Z, Xu H, Li C C, et al. Study on the demand and driving factors of urban underground space use [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 52-58.
- [12] 刘莹. 三四线城市地下空间规划研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(3): 593-599. (Liu Ying. Research on underground space planning of third-tier / fourth-tier cities [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(3): 593-599. (in Chinese))
- [13] 冯艳君, 曹轶. 基于情景分析法的地下空间规模预测[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(5): 1094-1103. (Feng Yanjun, Cao Yi. Underground space scale prediction in view of scenario analysis [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(5): 1094-1103. (in Chinese))
- [14] 徐辉, 李晓昭, 车晶. 不同阶段地下空间开发的功能配比研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(3): 573-579. (Xu Hui, Li Xiaozhao, Che Jing. A research on the function matching of underground space development in different stages [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(3): 573-579. (in Chinese))
- [15] Bobylev N. Underground space as an urban indicator: Measuring use of subsurface [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 55: 40-51.
- [16] 孙艳晨, 赵景伟. 城市地下空间开发强度及布局模式分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38(4): 272-275. (Sun Yanchen, Zhao Jingwei. Urban underground space development intensity and pattern analysis [J]. *Sichuan Building Science*, 2012, 38(4): 272-275. (in Chinese))