

引用格式:杜德林,黄洁,王姣娥.基于多源数据的中国智慧城市发展状态评价[J].地球信息科学学报,2020,22(6):1294-1306. [Du D L, Huang J, Wang J E. Assessment of smart city development status in China based on multi-source data[J]. Journal of Geo-information Science, 2020,22(6):1294-1306.] DOI:10.12082/dqxxkx.2020.190702

基于多源数据的中国智慧城市发展状态评价

杜德林^{1,2}, 黄洁^{1*}, 王姣娥^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

Assessment of Smart City Development Status in China based on Multi-source Data

DU Delin^{1,2}, HUANG Jie^{1*}, WANG Jiaoe^{1,2}

1. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: With the development of information and communication technology, such as mobile internet, cloud computing, and big data, smart city has gradually become the important development tendency of urban construction. During the period of the 13th five-year plan, cities have formulated their smart city construction (or development) plans and regarded these plans as key part of their medium- and long-term urban development strategies. Because smart city involves various context and massive indexes, the assessment of smart cities is undergoing continuous development and improvement. Thus, so far, a unified assessment standard is still lacking. Based on this, we compare the domestic and international index systems to assess smart city development. With the objectives including improving cities' capability of sustainable development, implementing efficient and fair management, and ensuring urban residents' wellbeing, this paper proposes an assessment index system with multiple layers and five sub-systems including smart economy, smart transport, smart healthcare, smart education, and smart management. This paper employs text, webpage, and statistic data and conducts a comprehensive, uniform, and multi-layer assessment to evaluate smart city development status for Chinese cities. Finally, we offer constructive suggestion on smart city development from the perspective of sub-system coordination. Main findings are shown here. First, except 8 cities, namely Beijing, Shanghai, Guangzhou, Wuhan, Chengdu, Hangzhou, Tianjin, and Nanjing, most cities are at a relatively low level of smart city development. Second, based on the spatial pattern, cities in the coastland are at a relatively higher level of smart city development than those in the inland. Municipalities and provincial capitals are at an obviously higher smart development level than the other cities. Third, from the coordination perspective, five sub-systems are not coordinated well with more than 70% cities showing moderate- to low-level coordination. Overall, the average development level of smart education and smart healthcare are the lowest among all sub-systems. More than 80% of cities have disadvantages in the two sub-systems. Based on these findings, this paper provides some policy implications for the future development of cities. The government should pay more attention to the coordination of sub-systems, such as

收稿日期:2019-11-20;修回日期:2020-01-19.

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)资助(XDA19040402)。[**Foundation item:** Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19040402.]

作者简介:杜德林(1994—),男,山西霍州人,博士生,主要从事交通地理与区域发展研究。E-mail: dudl.19b@igsrr.ac.cn

*通讯作者:黄洁(1988—),女,广西桂林人,副研究员,主要从事交通地理与大数据研究。E-mail: huangjie@igsrr.ac.cn

smart education and smart healthcare. For smart transport, most cities have already had a high level of development, and the efficiency and fairness of transport development will be more important in the future. Innovation and global development have become the key factors restricting the development of smart economy and should be considered in future policy-making. In addition, government and the relevant departments should strengthen the top-level design, module construction, and index statistics of the smart management.

Key words: Smart city; multiple-layer index system; big data; smart economy; smart transport; smart education; smart healthcare; smart management

***Corresponding author:** HUANG Jie, E-mail: huangjie@igsrr.ac.cn

摘要:随着移动互联网、云计算、大数据等新一轮信息通信技术的发展,智慧城市逐渐成为城市建设的重要发展趋势。“十三五”期间,全国各城市纷纷制定智慧城市建设或发展规划,并将其定位为城市中长期发展战略的重要组成部分。由于智慧城市涉及范围广泛、内容体系庞杂,目前还在不断发展完善之中,尚未形成统一的评价标准。基于此,本文对比了国内外智慧城市评价重点与趋势,以提高城市可持续发展能力、实现高效、公平的城市管理、保障民生福祉为目标,构建了包括智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育、智慧管理等多子系统的智慧城市评价指标体系;运用文本、网页、统计等多源数据,本文开展了全面的、统一的、多层次、模块化的全国智慧城市发展状态评估,并从子系统协调程度对智慧城市发展提出了建设性意见。研究发现:①从整体评价结果分析,除北京、上海、广州、武汉、成都、杭州、天津和南京8个城市综合得分及各子系统得分都较高外,绝大部分城市的智慧建设水平不高;②在空间分布上,沿海地区的智慧城市建设水平普遍高于内陆地区,直辖市和省会城市高于其他城市;③从协调关系分析,70%以上城市的5个子系统为中度甚至低度协调,80%以上城市以智慧教育或智慧医疗成为发展短板,这也是未来政府应关注的重点。本文通过构建指标体系,探讨了中国智慧城市的发展状态,为城市未来的发展和管理提供了借鉴与参考。

关键词:智慧城市;多层次指标体系;大数据;智慧经济;智慧交通;智慧教育;智慧医疗;智慧管理

1 引言

随着城镇化建设步伐的不断加快和城市人口的不断膨胀,交通拥堵、就医难、养老问题等“城市病”成为困扰城市建设与管理者的难题。同时,信息化技术水平的不断发展为提高城市管理的科学性提供了有力的工具^[1]。智慧城市则是在充分整合、挖掘、利用信息通信技术与信息资源的基础上,采用大数据手段,对城市实施精细化管理,以实现城市资源的集约化利用。智慧城市建设在实现城市可持续发展、引领信息通信技术应用、提升城市综合竞争力等方面具有重要意义,已成为“十三五”时期中国城市发展的重点方向^[2]。

智慧城市是城市可持续发展的高级形态。继2000年美国提出“精明增长”(Smart Growth)之后,IBM于2008年提出了“智慧城市”(Smart City)的理念,认为智慧城市意味着更透彻的感知、更全面的互联互通与更深入的智能化^[3]。近年来,经过各方的引导、推动和实践,中国已经成为智慧城市概念演绎和实践推进的重点国家。2014年,中共中央国务院印发《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》^[4],明确强调将智慧城市作为提高城市可持续发展能

力的重要手段与途径,需要通过智慧城市的建设从经济、社会、管理、民生等不同角度来实现城市的可持续发展。2018年底,国家颁布了《新型智慧城市评价指标(2018)》^[5],具体包括惠民服务、精准治理、生态宜居、智能设施、信息资源、创新发展等方面的指标。实践层面,智慧城市评价逐步成为各个城市建设识别优势与短板的重要参照与指南。

在理论研究中,智慧城市的发展理念自提出就受到了国内外学者的广泛关注。西方学者认为,智慧城市的建设应以新兴硬件基础设施和通信技术为基础,支撑高效的社会发展,并运用新的数字技术协同和整合传统的基础设施^[6-11]。近年来,国内学者们从地理学视角不断发展和延伸智慧城市的理论研究。甄峰等^[12]认为智慧城市规划的重点应是城市产业、民生、建设与管理等领域。从时间地理学的视角,柴彦威等^[13]强调以人为本的基于时空行为的智慧城市研究框架,为城市规划与智慧管理提供了新的思路。从个体主观感受出发,王丰龙和王冬根^[14]提出了主观幸福感的量表体系,并探讨了主观幸福感在智慧城市建设中的重要性。马捷等^[15]和滕吉文等^[16]基于多源数据融合的角度对现代化的智慧城市进行研究。诚然,伴随技术进步、经济

发展以及城镇化进程,智慧城市的发展理念在不断地更新^[16-19]。

整体而言,国内地理学界关于智慧城市的理论研究很多,但是目前还缺乏统一的、综合的智慧城市评价体系与方法,更有研究对中国进行全面的智慧城市评价。鉴于此,本文将构建符合智慧城市构建理论体系、建设实际需求、及城镇化进程的综合评价指标体系,并基于多源数据开展全国地市级尺度的综合评价。

2 智慧城市评价指标体系

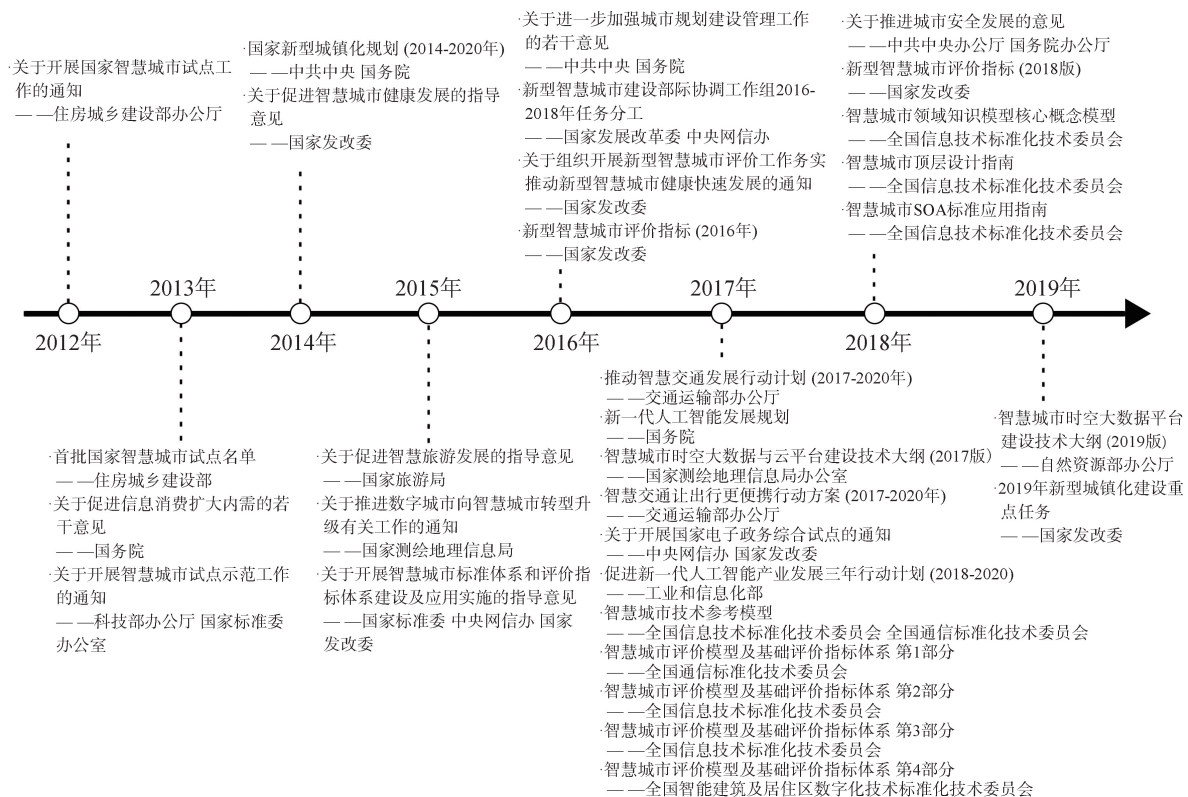
2.1 国内外指标体系对比

智慧城市作为21世纪城市发展的重要理念,自提出以来就受到学术界和社会界的广泛关注,不同研究机构和管理部门基于自身对智慧城市概念和内涵的理解,从不同角度构建指标体系来探讨城市的发展,相互之间既存在一定相似之处,又各有差异^[20-23]。

国外研究机构与学者相继提出了模块化的智慧城市评价体系。IBM作为智慧城市概念的提出

者,认为智慧城市的评估应量身定制、统一、全面、具有可比性,其指标体系涉及城市服务、市民、商业、交通、通信、水、能源7个系统^[24],各系统具体又包含物联、互联和智联等方面的指标。欧盟智慧城市研究自2007年开始以来,主要从智慧经济、智慧出行、智慧环境、智慧公民、智慧生活、智慧治理6个方面分别对欧洲中等规模城市进行评价分析^[25],2015年又在此基础上增加了对大城市的评价。西班牙IESE商学院发布的2018年全球智慧城市报告^[26],重点从经济、人力资本、社会凝聚力、环境、公共管理、政府、城市规划、国际影响力、科技、移动和交通等方面对全球165个城市进行了评估分析。此外,近年来国外学者构建了模块化的智慧城市评价指标体系,评价重点在于智慧政府、智慧建筑、智慧交通等方面^[27-28]。

结合我国城镇化发展的特色和社会各界关注的民生热点,自2012年住建部发布《关于开展国家智慧城市试点工作的通知》^[29]以来,相关机构相继发布了一系列政策意见以及评价指标体系等(图1)。2016年国家发改委发布的《新型智慧城市评价指标》^[30]包括了惠民服务、精准治理、生态宜居、智能设



注:图中内容根据中国政府网、国家发改委、住建部、自然资源部、交通运输部等官方网站检索相关材料并整理。

图1 2012—2019年中国智慧城市相关政策变化

Fig. 1 Policies related to smart cities in China from 2012 to 2019

施、信息资源、网络安全、改革创新、市民体验8大指标,其中惠民服务占比37%,市民体验占比20%,权重明显大于其他各项。在惠民服务中,政务、交通、社保、医疗、教育、就业等均被纳入评价体系,成为重要的指标项。2018年,国家发改委发布了更新版本的智慧城市评价指标,市民体验的指标权重进一步提升。《中国智慧城市发展水平报告》提出,智慧城市评价的主要要素应包括智慧基础设施、智慧治理、智慧民生、智慧经济、智慧人群和保障体系6个部分^[31]。国家质量监督检验检疫总局与国家标准化委员会发布的《智慧城市评价模型及基础评价指标体系》^[32]中包含了智慧基础设施、社会治理、公共服务、保障体系、产业经济、创新能力等模块。

通对比可以发现(表1),智慧城市的评价体系各有侧重,最早的IBM指标体系侧重衡量智慧城市基础设施方面的指标,而欧盟的评价更注重以人为本主义、关注智慧经济和人文发展,IESE评价指标体系则试图兼顾智慧城市的硬条件和软文化。类似的,中国标准的指标体系主要评估智慧治理、智慧基础设施、智慧民生等方面。整体上,国内外智慧城市评估的重点集中在智慧治理、交通、医疗、教育、经济5个方面,因此本文将以此作为智慧城市指标体系构建的基本框架。

2.2 评价指标体系构建

根据国际重要研究机构、国内政府管理部门及相关学术研究对智慧城市的定义和评价体系,基于

科学性、系统性、合理性以及数据可获取性等原则,本文从智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育、智慧管理5个子系统构建智慧城市评价指标体系(表2)。其中,智慧经济包括经济发展活力、人民生活水平、创新能力、全球化发展等方面,具体包括15个三级指标,重点反映经济的增长潜力、产业结构合理性以及知识产权资源分布情况;智慧交通重点从城市对外交通发展水平、城市内部交通便捷程度以及快递物流时效性等方面综合评估,包含14个指标,重点反映城市对外的连通性、城市内部交通和智能化物流网点的布局合理性;智慧医疗主要从就医可达性、高质量就医以及养老普惠性3个方面选择8个指标,重点反映就医的基本保障、高质量医疗资源以及养老基础设施建设情况;智慧教育主要从高等教育资源分布、义务教育的普及程度、职业技术教育发展水平等方面选择14个指标,重点反映不同阶段、不同层次的教育资源分布,并结合人口规模、师生比例评价教育资源的品质;智慧管理方面主要包括通信网络高效化、城市建设管理、电子政务以及居民素质等方面的13个指标,重点反映通信网络普及程度、城市高品质管理程度以及数字化政务服务程度。

3 数据与研究方法

在智慧城市评价指标体系构建的基础上,本文搜集并处理相关数据,借助确定客观权重的熵值

表1 智慧城市指标体系评价重点对比

Tab. 1 A comparison of focuses insmart city assessment index systems

指标	IBM	欧盟	IESE	Frost & Sullivan	Cohen	中国标准	总计
政府/治理/管理		√	√	√	√	√	5
能源	√			√			2
建筑	√		√	√	√		4
交通/移动	√	√	√	√	√	√	6
基础设施	√		√	√		√	4
科技			√	√			2
医疗		√		√		√	3
市民/人力/教育	√	√	√	√	√	√	6
经济	√	√	√		√	√	5
环保		√	√		√		3
国际影响力			√				1
社会凝聚力			√				1
公共服务	√	√				√	3
社会保障		√				√	2

注:根据相关材料^[24-32]整理。

表2 智慧城市评价指标体系
Tab. 2 The smart city assessment index system

一级指标	二级指标	三级指标			一级指标	二级指标	三级指标			
		指标名称	编号	权重			指标名称	编号	权重	
智慧经济A1	经济发展活力指数B1	GDP总量	C1	0.073	智慧教育A4	高等教育优质指数B11	双一流学校数量	C38	0.027	
		GDP增长率	C2	0.035			普通高等学校专任教师数	C39	0.111	
		人均GDP	C3	0.104			普通高等学校在校生数	C40	0.118	
		第三产业产值	C4	0.055			普通高等学校师生比	C41	0.029	
		第二产业产值	C5	0.104			义务教育普及指数B12	普通中学专任教师数	C42	0.050
		二三产业比例	C6	0.047				普通小学专任教师数	C43	0.052
	人民生活水平指数B2	城镇人均可支配收入	C7	0.117		每万人普通中学数量		C44	0.067	
		农村居民人均可支配收入	C8	0.049		每万人普通小学数量	C45	0.099		
		创新能力指数B3	R&D内部经费支出	C9		0.042	普通中学师生比	C46	0.05	
	R&D人员数量		C10	0.047		普通小学师生比	C47	0.105		
	专利授权量		C11	0.063		职业技术教育发展指数B13	中等职业教育学校数	C48	0.103	
	每亿元GDP专利授权量		C12	0.079			中等职业教育专任教师数	C49	0.091	
	每万人专利授权量		C13	0.097			中等职业教育在校生人数	C50	0.063	
	商标注册量		C14	0.040			中等职业教育师生比	C51	0.035	
	全球化发展指数B4	进出口贸易总额	C15	0.048			智慧管理A5	通信网络高效化指数B14	移动电话用户数	C52
智慧交通A2		城市对外交通发展指数B5	机场*	C16	0.153				互联网宽带接入用户数	C53
		国际机场*	C17	0.141	移动电话用户比例	C54			0.072	
	高铁站*	C18	0.109	互联网宽带接入用户比例	C55	0.056				
	高速公路*	C19	0.002	电信业务收入	C56	0.044				
	港口*	C20	0.132	城市管理指数B15	建成区绿化覆盖率	C57		0.067		
	高铁发车量	C21	0.024		人均公园绿地面积	C58		0.049		
	航班吞吐数量	C22	0.017		污水处理厂集中处理率	C59		0.054		
城市交通便捷指数B6	地铁里程	C23	0.012	生活垃圾无害化处理率	C60	0.052				
	城市公路里程	C24	0.025	电子政务信息化指数B16	百度搜索年均指数	C61		0.118		
	建成区路网密度	C25	0.018		市政府政务公开网站*	C62		0.011		
	互联网+交通普及度*	C26	0.159		居民素质指数B17	城镇人口比重		C63	0.108	
	城市交通拥挤指数 ⁻	C27	0.040	每万人高校在校生人数		C64		0.166		
	快递物流时效指数B7	顺丰可达*	C28	0.002						
智慧医疗A3	就医可达性指数B8	小区智能快递提取点*	C29	0.166						
		百万人医院数	C30	0.122						
		百万人医院床位数	C31	0.103						
		百万人医师数	C32	0.086						
	高质量就医指数B9	城镇职工基本医疗保险参保人数	C33	0.097						
		三甲医院比重	C34	0.254						
	养老普惠性指数B10	三甲医院数量	C35	0.113						
		养老院数量	C36	0.109						
			城镇职工基本养老保险参保人数	C37	0.116					

注:表中权重根据3.1节计算而得; *为逻辑数据,即0/1; ⁻为负向指标,其余为正向指标。

法,从5个系统综合评估智慧城市的发展水平,并依据等分法识别不同水平的城市空间分布特征,较为全面地评估我国智慧城市的发展状态。对于单个城市来说,各子系统发展水平的协调程度是智慧城市长期发展的关键因素,因此本文运用耦合协调度模型进一步研究各城市子系统之间的协调关系,以此识别城市类型,探讨智慧城市的建设情况。

3.1 多源数据收集

本文提出的多层次智慧城市评价指标体系涉及内容较为广泛,需要进行多源数据收集。从智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育、智慧管理5个子系统构建评价指标体系,包含了17个二级指标和64个三级指标,涉及研究机构或企业报告数据、网络抓取数据、统计数据等类型的数据(表3)。

表3 智慧城市评价指标数据来源

Tab. 3 Data source of the smart city assessment index

数据类型	指标	数据来源
文本报告数据	C14、C27	《中国商标品牌战略年度发展报告》 ^[33] 、《中国主要城市交通分析报告》 ^[34]
网络抓取数据	C16-C22、C34-C36、C38、C61、C62	12306铁路服务网、Flightradar24网站、国家卫健委网站、教育部官网、养老网、各地政府公开网站、百度检索等
APP数据检索	C26、C28、C29	支付宝、ofo/摩拜等共享单车APP、百度地图等
统计数据	C1- C13、C15、C23- C25、C30- C33、C37、C39-C60、C63、C64	《中国城市统计年鉴》 ^[35] 、《中国城市建设统计年鉴》 ^[36] 、《从统计看民航》 ^[37] 、各省市的统计年鉴和国民经济与社会发展统计公报等

(1)梳理对比国内行政管理部门、研究机构或权威网站发布的分析报告,筛选获取了相关指标数据。其中,商标注册量来源于《中国商标品牌战略年度发展报告》^[33],该报告汇总统计了全国各类商标数据,是区域创新能力的表征之一;城市交通拥挤指数来源于高德地图的《中国主要城市交通分析报告》^[34],该报告基于高德积累的海量交通出行数据,通过大数据挖掘计算所得,能较为准确反映城市拥堵状况。

(2)网络抓取数据的收集主要依赖批量检索权威网页的方法,在此基础上进行人工校验和修正。

(3)批量检索相关APP信息的技术用于互联网+交通普及度、快递物流时效指数等数据的收集。

(4)统计数据的收集主要是梳理了权威统计年鉴。

3.2 数据处理流程

多源数据的处理过程主要分为异构数据整合、数据空间化、数据存储等环节(图2)。首先,异构数据整合的第一步是根据可获取的数据集确定一个兼容性高、具有时效性的时间节点。基于这一原

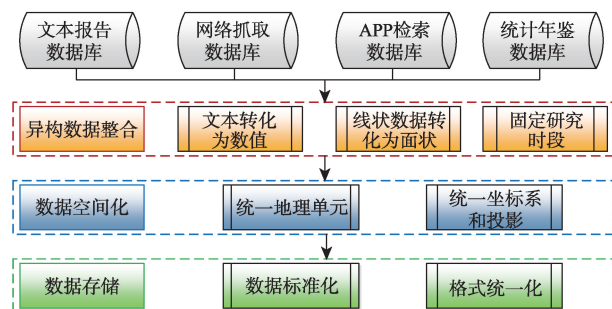


图2 智慧城市发展状态评价的多源数据处理流程

Fig. 2 Multi-source data processing for the assessment of smart city development status

则,本文的数据年份是2017年。针对已收集的数据,异构数据整合包括将文本报告中的文本数据转化为数值,将网页搜索文本进行语义识别并转化为相关指标的数据,将线性数据(如高铁班次)转化为面状数据(如每个城市的高铁发车量)。接着,数据空间化需要确定统一的地理单元、坐标系和投影,以完成在ArcGIS中的数据矢量化过程。根据评价指标的主题,本文选取地级行政单元为统一的地理单元评估智慧城市的发展状态,将整合后的数据统一到地市级尺度并进行矢量化,共选择了286个城市作为研究对象。最后,多源数据应按照一定的数据标准和格式存储,具体步骤包括无量纲化、科学计数法等。

3.3 系统发展水平评价方法

智慧城市综合系统和各子系统是多指标的集成表达,需要通过综合分析来评价系统的发展水平。因此首先要确定各指标的权重,为了避免人为确定权重的主观性方法所产生的偏差以及多指标变量之间的信息交叉问题,本文采用基于指标变异性大小来确定客观权重的熵值法^[38]。首先采用极值法对数据进行无量纲化和标准化处理,其次分别计算各项指标的信息熵和效用值,最后在此基础上计算各项指标的权重。主要过程如下:

(1)首先采用极值法对数据进行无量纲化和标准化处理,公式为:

$$\text{正向指标: } x'_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } x'_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j) \quad (2)$$

式中: x_{ij} 和 x'_{ij} 分别表示城市 i 的第 j 项指标值和标准化值。

(2)标准化后的数据存在0值,由于熵值法过程中存在对数运算,因此对标准化后数据正向平移1

个单位,再计算城市的各项指标比重,公式为:

$$p_{ij} = (x'_{ij} + 1) / \sum_i (x'_{ij} + 1) \quad (3)$$

式中: P_{ij} 表示城市*i*的第*j*项指标的占比。

(3)计算各项指标的信息熵,信息熵越大,则指标的差异越大,对结果的影响也越大,因此进一步计算出信息的效用值。公式为:

$$E_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n (p_{ij} \times \ln(p_{ij})) \quad (4)$$

$$D_j = 1 - E_j \quad (5)$$

式中: E_j 和 D_j 分别表示第*j*项指标的信息熵和信息效用值; n 和 m 分别表示城市数量和指标数量。

(4)基于各项指标的信息效用值,确定指标的权重。公式为:

$$W_j = D_j / \sum_{j=1}^m D_j \quad (6)$$

式中: W_j 表示第*j*项指标的权重。为便于比较城市各子系统之间的发展差异,对各子系统的指标权重分别独立计算,即各子系统的指标权重和均为1。

(5)最后,采用综合加权法计算城市各子系统的得分,综合各子系统得分即得到智慧城市综合系统的发展水平。公式为:

$$U_{ia} = 10 \times \sum_{j=1}^m W_j x'_{ij} \quad (7)$$

$$U_i = \sum_a U_{ia} \quad (8)$$

式中: U_{ia} 表示城市*i*的子系统*a*的得分; U_i 表示城市*i*的综合系统得分; A 表示智慧城市的子系统合集。由于指标数量众多,为提高结果可读性,计算时将各项指标得分扩大10倍,即各子系统满分为10,综合系统满分50。在此基础上,依据等分方法可将智慧城市综合系统的发展水平划分为5个等级,即高水平(40~50)、较高水平(30~40)、中等水平(20~30)、较低水平(10~20)和低水平(0~10),各子系统的发展也用同样方法划分为5个等级,以便于全面的评估智慧城市发展情况。

3.4 系统协调关系评价方法

智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育、智慧管理是智慧城市发展的基础,5个子系统之间的协调关系对于智慧城市的长期发展具有十分重要的影响。因此,本文在系统发展水平评价的基础上,借鉴物理学中的容量耦合概念和模型,构建反

映系统之间演进同步性的耦合度模型,但由于耦合度模型不能表现系统的发展水平,进一步构建了协调度模型,以更好的评价智慧城市各子系统之间的关系^[39-40]。主要步骤为:

(1)首先在系统发展水平评价的基础上,采用式(1)将智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育、智慧管理5个子系统的发展评分进行标准化处理,然后计算城市各子系统之间的耦合度。公式为:

$$C = \left[\frac{U_1 \cdot U_2 \cdot U_3 \cdot U_4 \cdot U_5}{\left(\frac{U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5}{5} \right)^5} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (9)$$

式中: C 为城市子系统的耦合度; U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 和 U_5 分别反映智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育以及智慧管理5个子系统的标准化分值。

(2)计算城市各子系统之间的调和指数,并据此计算系统发展的协调度。公式为:

$$D = \sqrt{C \times T}, \quad T = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 + \beta_4 U_4 + \beta_5 U_5 \quad (10)$$

式中: D 为城市子系统协调度; T 为各子系统之间的调和指数,反映其空间分布的整体协同的效应或贡献; β_i 分别是5个子系统对应的系数,反映其重要性差异,对于智慧城市的长期发展,各子系统都具有重要的地位,因此均设定为1/5。

为便于智慧城市发展状态的识别和分析,参考目前学者的研究^[40],将协调度划分以下4个类型:当 $D \leq 0.3$ 时,表明子系统之间属于低度协调类型;当 $0.3 < D \leq 0.5$ 时,表明属于中度协调类型;当 $0.5 < D \leq 0.8$ 时,属于高度协调类型;当 $0.8 < D \leq 1$ 时,属于极度协调类型。

4 结果与分析

4.1 系统的综合发展水平

截至2017年,我国智慧城市综合发展水平较低,智慧医疗的发展水平参差不齐,而智慧管理的水平差异较小。2017年全国智慧城市评价综合得分平均值为12.71(表4),约为满分的1/4,其中有103个城市综合得分超过平均水平,大部分城市(183个)在平均水平之下。对比各子系统,智慧医疗的平均水平最低,其次为智慧教育和智慧经济;智慧管理和智慧交通的平均值明显较高,整体发展水平较好,尤其智慧交通的平均得分超过经济、医

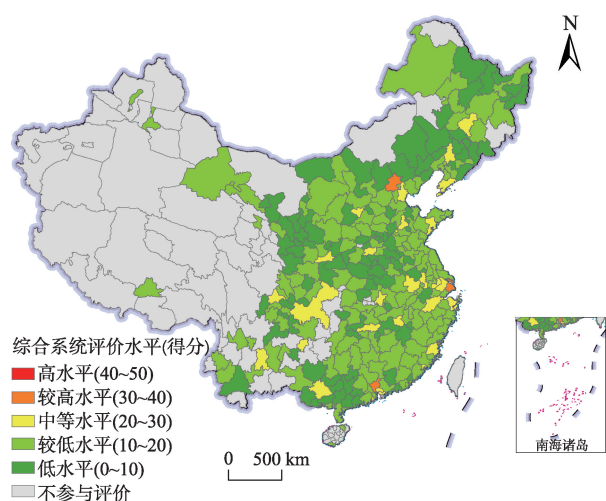
表4 2017年中国智慧城市综合评价结果统计特征

Tab. 4 Statistics of evaluation results of Chinese smart city assessment index system in 2017

统计指标	智慧经济	智慧交通	智慧医疗	智慧教育	智慧管理	综合系统
平均值	1.90	4.62	1.31	1.58	3.31	12.71
最大值	8.16	9.43	6.83	5.48	6.92	35.68
最小值	0.63	0.48	0.18	0.67	1.72	5.55
变异系数	0.62	0.53	0.73	0.47	0.26	0.42

疗以及教育子系统的2倍,这也反映了5个子系统之间的发展程度存在一定差异。根据变异系数以及最大值和最小值比值,可以发现在智慧管理方面,城市间的发展差异最小,明显低于其他子系统以及综合系统,相比之下,其他子系统的差异均高于综合系统,其中以智慧医疗的变异系数最高、城市发展差异最大。

通过对智慧城市综合系统发展水平评价(图3),可以发现只有直辖市和省会城市具有明显的发展优



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2880号的标准地图制作,底图无修改。

图3 2017年中国智慧城市综合系统评价结果的空间分布
Fig. 3 Spatial pattern of evaluation results of Chinese smart city assessment index system in 2017

势,但仍有一定提升空间。其中:①尚无城市达到高水平类型,表明智慧城市建设仍有待提升;②较高水平类型包括北京、上海和广州3个城市,其智慧城市综合系统得分最高,在全国具有一定的领先地位;③中等水平类型包括28个城市,其中19个为直辖市或省会城市,其余均属于沿海地区社会经济较为发达的类型;④较低水平城市数量最多,达152个(53.1%),空间分布也较为广泛。这类型城市中,又以沿海地区的城市得分普遍较高,分值介于15~20的城市中,60%以上分布于浙江、广东、江苏、山东和河北;⑤低水平类型共103个城市,集中分布于中西部地区,其中半数左右分布于河南、广西、甘肃、黑龙江、辽宁和四川等省区。

4.2 子系统的空间分布特征

智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育和智慧管理5个子系统的发展差异明显,空间分布特征不尽相同(表5和图4)。其中:

(1)智慧经济的发展水平表现出明显的东西差距。其中深圳达高水平类型,北京、上海、苏州和广州属于较高水平类型,中等水平城市主要集中于长江三角洲和珠江三角洲地区,较低水平类型主要为沿海城市以及中西部的省会城市,中部和西部大部分城市属于低水平类型。

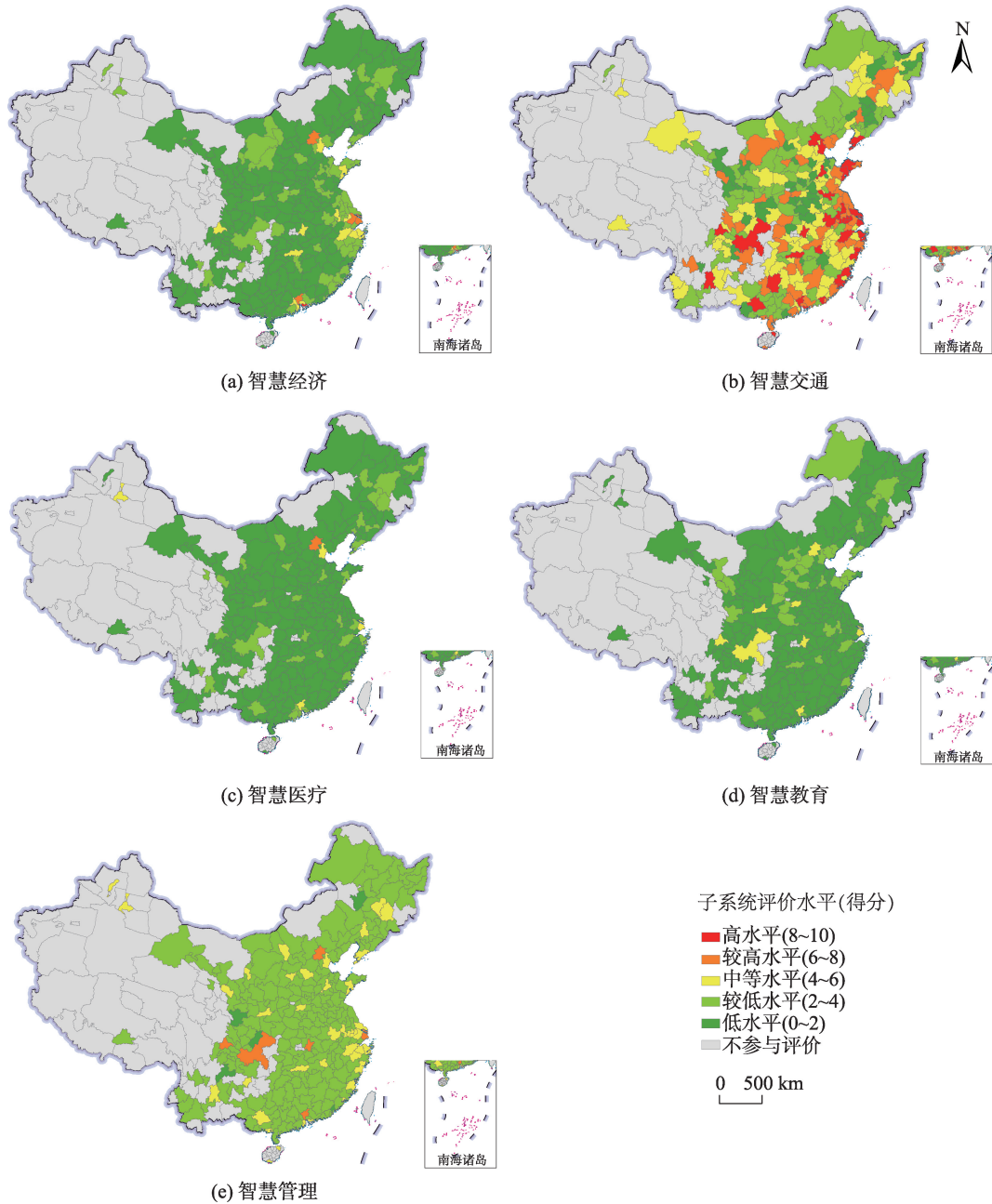
(2)智慧交通的发展水平普遍较高,达到高水平 and 较高水平城市远多于其他子系统,且省会和直辖市的发展水平明显高于周边地区。空间上表现出围绕省会或直辖市的“核心—边缘”结构,全国31个省会和直辖市中,除乌鲁木齐和拉萨属于中等水平外,其余城市全部达高水平或较高水平,且其智慧交通得分基本为本省最高。

(3)大部分城市的智慧医疗水平有待提升。智慧医疗的低水平数量在各子系统中最多,尚无高水平类型城市,较高水平和中等水平的城市也不足

表5 2017年中国分类城市数量和占比统计

Tab. 5 Statistics of city numbers and proportions based on the development levels in China in 2017 (个(%))

类型	综合系统	智慧经济	智慧交通	智慧医疗	智慧教育	智慧管理
高水平	0(0.0)	1(0.3)	32(11.2)	0(0.0)	0(0.0)	0(0.0)
较高水平	3(1.0)	4(1.4)	54(18.9)	1(0.3)	0(0.0)	6(2.1)
中等水平	28(9.8)	14(4.9)	74(25.9)	4(1.4)	8(2.8)	40(14.0)
较低水平	152(53.1)	60(21.0)	83(29.0)	40(14.0)	38(13.3)	235(82.2)
低水平	103(36.0)	207(72.4)	43(15.0)	241(84.3)	240(83.9)	5(1.7)



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2880号的标准地图制作,底图无修改。

图4 2017年中国智慧城市子系统评价结果的空间分布

Fig. 4 Spatial pattern of evaluation results of Chinese cities' sub-systems in 2017

2%,仅包括北京、上海、广州和天津等,较低水平城市中半数以上为各省省会。

(4)绝大部分城市的智慧教育发展属于低水平类型。其中,仅8个城市达中等水平;而较低水平城市38个,以河北、山西、山东等省居多。

(5)多数城市的智慧管理处于较低水平,而智慧管理达中等水平及以上的城市在长江三角洲地区聚集。

整体上,智慧交通和智慧管理的发展相对较好,智慧经济、智慧医疗和智慧教育则相对较弱。从空间分布来看,省会城市和直辖市的各子系统发展水平较高,同时长江三角洲和珠江三角洲等沿海地区的子系统发展也相对较好。

进一步从位序角度对比前20位城市(表6),北京、上海、广州、武汉、成都、杭州、天津和南京8个城市在综合系统及各子系统均排前列,表明城市整体

表6 2017年智慧城市评价得分前20名城市
Tab. 6 Top 20 cities based on the evaluation results in China in 2017

指标	城市
综合系统	北京、上海、广州、重庆、深圳、武汉、成都、天津、杭州、南京、西安、郑州、长沙、南昌、济南、青岛、厦门、宁波、苏州、昆明
智慧经济	深圳、北京、上海、苏州、广州、杭州、东莞、宁波、无锡、天津、南京、佛山、中山、成都、绍兴、珠海、武汉、青岛、长沙、常州
智慧交通	广州、北京、上海、南京、深圳、武汉、扬州、重庆、桂林、天津、无锡、揭阳、杭州、成都、济南、常州、青岛、徐州、厦门、长沙
智慧医疗	北京、上海、广州、天津、乌鲁木齐、东莞、武汉、佛山、南京、杭州、太原、西宁、厦门、深圳、南昌、成都、西安、贵阳、沈阳、长春
智慧教育	重庆、郑州、北京、广州、西安、武汉、成都、上海、石家庄、天津、南宁、哈尔滨、昆明、太原、长春、南京、济南、沈阳、杭州、长沙
智慧管理	广州、北京、上海、成都、重庆、武汉、郑州、西安、南京、杭州、南昌、兰州、长沙、苏州、济南、天津、乌鲁木齐、深圳、珠海、昆明

发展和各子系统在全国都具有较高地位。深圳和长沙仅有1个子系统位于20名之后,分别为智慧教育和智慧医疗。重庆、西安和济南的2个子系统略低,其中重庆和济南的智慧经济和智慧医疗位于20名外,西安的智慧经济与智慧交通较低。重庆和郑州在智慧教育方面最高,主要因义务教育和职业技术教育的优势较大,2017年重庆中小学专任教师及中等职业教育专任教师和在校生均为各城市首位,郑州中等职业教育学校、专任教师以及在校生等为前3位。此外,部分城市仅在个别子系统的位序较高。

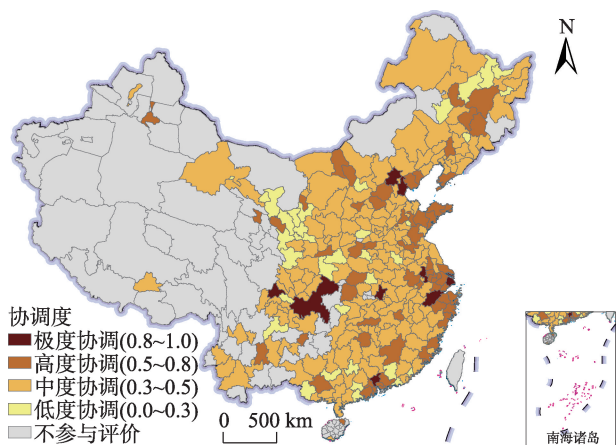
4.3 子系统的协调关系

通过对系统协调关系的评价(图5),可以发现仅少数城市在智慧经济、智慧交通、智慧医疗、智慧教育和智慧管理5个子系统之间表现出极高的协调性。具体而言,北京、广州、上海、重庆、武汉、成都、天津、南京和杭州9个城市的协调度超过0.8,属于

极度协调类型,此类城市的综合得分以及各子系统得分都相对较高,在全国具有一定优势。高度协调类型的城市共63个,以长江三角洲、珠江三角洲、京津冀以及山东半岛等地区的分布较为密集,中西部地区主要为省会城市属于该类型。

省会城市和直辖市的协调度相对较高,大多数城市属于中度协调型。中度协调型城市共178个,占比达62.2%,这反映了在智慧城市的建设方面,大部分城市已有一定基础,但整体发展水平有限,各系统之间可能存在均衡性问题。此外,低度协调类型包括34个城市,数量相对较少,空间上主要集中于甘肃、黑龙江、广东和广西等省。

智慧城市发展水平的综合得分与协调度成正相关关系。以协调度结果为基础,对各类型城市的子系统得分进行均值分析(图6),可以发现,各类型城市具有明显的层级特征和相似性分布结构。相



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2016)2880号的标准地图制作,底图无修改。

图5 2017年中国城市耦合协调度

Fig. 5 The coordination degree of the sub-systems in Chinese cities in 2017

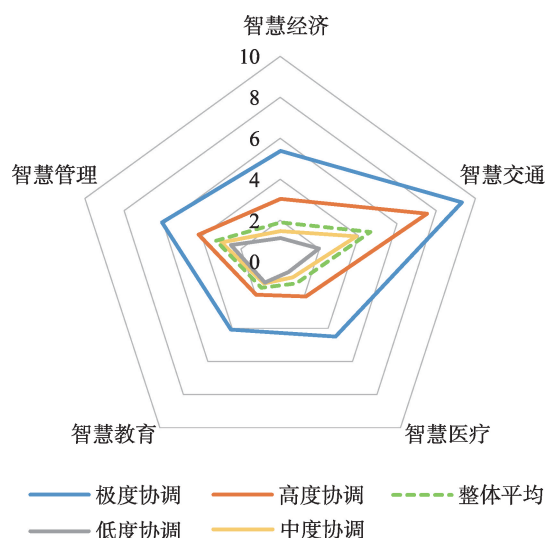


图6 2017年中国各类型城市的子系统均值对比
Fig. 6 Comparison of sub-system mean values of Chinese cities in different development levels in 2017

比于全部城市的整体平均水平,极度协调和高度协调的城市在各子系统的均值都较高,尤其在智慧交通和智慧经济方面的领先幅度较大。中度协调和低度协调则在平均水平之下,中度协调城市数量众多,各子系统均值也与整体均值相近,低度协调城市在智慧交通、智慧经济和智慧医疗方面的评分与整体均值相比差距较大。进一步对比各类型城市在子系统之间的差异,可以发现普遍以智慧交通优势突出,其次为智慧管理,智慧经济、智慧医疗和智慧教育方面的发展较弱,尤其智慧医疗和智慧教育是较为明显的短板,分别有62.6%和22.4%的城市以2个子系统的得分最低。对于极度协调型城市,其各方面发展基本处于全国领先,但仍未能达到高水平状态,因此仍需要进一步发展和提升。

5 结论与展望

5.1 结论

智慧城市作为城市信息化发展的高级阶段^[12],正在成为城市发展的重要选择和建设目标。然而智慧城市内涵丰富、范围广泛,尚未形成统一的评价标准,因此本文归纳对比国际重要研究机构、国内政府管理部门以及相关学术研究对智慧城市的定义和评价体系,从经济、交通、医疗、教育和管理5个方面构建智慧城市综合评价的指标体系。研究综合运用了文本、网页、统计等多源数据,构建了多源数据的标准化处理过程,既考虑反映规模体量的指标,又重点关注反映效率与公平的指标,并借助熵值法、综合加权分析、耦合度和协调度模型等方法,从全面、统一、多层次、模块化的角度评估智慧城市发展状态,为城市未来的发展和管理提供借鉴与参考。相比于以往评价^[13-17],本文注重客观指标和定量分析,在智慧城市综合发展评价的基础上更关注子系统的协调关系。

根据中国智慧城市发展状态的评价结果,本文主要得到如下结论:

(1)全国智慧城市的整体发展水平并不高,少数综合得分较高的城市也显现出各子系统协调发展的特征,具体为北京、上海、广州、武汉、成都、杭州、天津和南京等,这些城市在各子系统的得分均位于全国前20位。大部分城市的综合得分较低,属于中低和低水平发展类型。

(2)空间分布上,智慧城市综合评价结果表现出明显的行政等级差异和东西差异,一方面,直辖市和省会城市的发展水平明显高于其他城市,综合评价得分达中等水平及以上的城市中约71.0%为直辖市或省会城市;另一方面,沿海地区较高于内陆地区的发展水平,综合评价为中等水平及以上的城市中约61.3%分布于东部沿海省市。

(3)对比智慧城市的5个子系统,仅少数城市表现出明显较高的协调性,超过70%的城市为中度甚至低度协调类型。其中,智慧教育和智慧医疗的城市平均分最低,且80%以上的城市以智慧教育或智慧医疗得分最低,表明是多数城市的发展短板,智慧交通方面的发展则普遍相对较好。

5.2 展望

根据当前智慧城市发展状态的综合评估,本文建议中国智慧城市未来发展应以目前的发展状态为基础,结合城镇化发展等方面的特点,优化顶层设计,给予教育、医疗、城市创新能力等方面的政策支持,并重视各子系统的协调发展。具体在各子系统方面,今后需要开展如下工作:①教育、医疗等公共服务关系到人民福祉和切身利益,而目前多数城市的智慧教育、智慧医疗等方面为短板,因此未来需要给予更多的关注和政策支持;②智慧交通方面,多数城市在基础设施方面都处于较高的发展水平,未来应注重交通实时管理,兼顾交通发展的效率与公平;③经济方面,创新能力和全球化发展两个方面成为了制约城市智慧经济发展的主要因素,未来的经济政策制定应注意促进城市创新发展和全球化发展;④管理方面,可获取城市管理的量化指标较为局限,且缺乏针对智慧城市管理的相应指标,相关政府部门和统计部门应加强智慧管理的顶层设计、模块建设、以及指标统计。

此外,智慧城市仍处于不断探索和发展过程中,未来城市发展势必会产生新的需求和特点,因此该议题仍值得持续关注和研究。

参考文献(References):

- [1] Loo B P Y, Wang B. Progress of e-development in China since 1998[J]. Telecommunications Policy, 2017,41(9): 731-742.
- [2] 吴志峰,柴彦威,党安荣,等.地理学碰上大数据:热反应与冷思考[J].地理研究,2016,34(12):2207-2221. [Wu Z F,

- Chai Y W, Dang A R, et al. Geography interact with big data: Dialogue and reflection[J]. *Geographical Research*, 2016,34(12):2207-2221.]
- [3] 曹阳,甄峰.基于智慧城市的可持续城市空间发展模型总体架构[J].*地理科学进展*,2015,34(4):430-437. [Cao Y, Zhen F. The overall architecture of sustainable urban spatial development model based on the construction of smart cities[J]. *Progress in Geography*, 2015,34(4):430-437.]
- [4] 中共中央国务院.国家新型城镇化规划(2014-2020年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2644805.htm, 2014.
- [5] 国家发展改革委,中央网信办.关于继续开展新型智慧城市建设评价工作深入推动新型智慧城市健康快速发展的通知[EB/OL].<http://info.hebei.gov.cn/eportal/fileDir/hbszfxgk/resource/cms/2019/01/2019012311124372140.pdf>, 2019.
- [6] Caragliu A, Del Bo C, Nij-kamp P. Smart cities in Europe [J]. *Journal of Urban Technology*, 2011,18:65-82.
- [7] Batty M. Smart cities, big data[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2012,39(2):191-193.
- [8] Law K H, Lynch J P. Smart city: Technologies and challenges[J]. *IT Professional*, 2019,21(6): 46-51.
- [9] De Marsico M, Mecca A, Barra S. Walking in a smart city: Investigating the gait stabilization effect for biometric recognition via wearable sensors[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2019,80:106501.
- [10] Yigitcanlar T, Han H, Kamruzzaman M. Approaches, advances, and applications in the sustainable development of smart cities: A commentary from the guest editors[J]. *Energies*, 2019,12(23):4554.
- [11] 刘杨,龚烁,刘晋媛.欧美智慧城市最新实践与参考[J].*上海城市规划*,2018(1):12-19. [Liu Y, Gong S, Liu J Y.Recent smart city practice in Europe and the United States [J].*Shanghai Urban Planning Review*, 2018(1):12-19.]
- [12] 甄峰,席广亮,秦萧.基于地理视角的智慧城市规划与建设的理论思考[J].*地理科学进展*,2015,34(4):402-409. [Zhen F, Xi G L, Qin X.Smart city planning and construction based on geographic perspectives: Some theoretical thinking[J]. *Progress in Geography*, 2015,34(4):402-409.]
- [13] 柴彦威,申悦,陈梓烽.基于时空间行为的人本导向的智慧城市规划与管理[J].*国际城市规划*,2014,29(6):31-37. [Chai Y W, Shen Y, Chen Z F. Towards smarter cities: Human-oriented urban planning and management based on space-time behaviour research[J]. *Urban Planning International*, 2014,29(6):31-37.]
- [14] 王丰龙,王冬根.主观幸福度量研究进展及其对智慧城市建设的启示[J].*地理科学进展*,2015,34(4):482-493. [Wang F L, Wang D G. Measures of subjective well-being: A review[J]. *Progress in Geography*, 2015,34(4):482- 493.]
- [15] 马捷,葛岩,蒲泓宇,等.基于多源数据的智慧城市数据融合框架[J].*图书情报工作*,2019,63(15):6-12. [Ma J, Ge Y, Pu H Y, et al. Intelligent city data fusion framework based on multi-source data[J]. *Library and Information Service*, 2019,63(15):6-12.]
- [16] 滕吉文,司芴,刘少华.当代新型智慧城市属性、理念、构筑与大数据[J].*科学技术与工程*,2019,19(36):1-20. [Teng J W, Si X, Liu S H. Contemporary new smart city attributes, ideas, construction and big data[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019,19(36):1-20.]
- [17] 费明明,黄健.中国城市化进程与智慧城市建设的探讨[J].*资源与产业*,2013,15(3):100-104. [Fei M M, Huang J. Smart urban construction and China's urbanization progress[J]. *Resources & Industries*, 2013,15(3):100-104.]
- [18] 巫细波,杨再高.智慧城市理念与未来城市发展[J].*城市发展研究*,2010,17(11):56-60. [Wu X B, Yang Z G. The concept of smart city and future city development[J]. *Urban Development Studies*, 2010,17(11):56-60.]
- [19] 韦颜秋,李瑛.新型智慧城市建设的逻辑与重构[J].*城市发展研究*,2019,26(6):108-113. [Wei Y Q, Li Y. The logic and reconstruction of new smart city construction[J]. *Urban Development Studies*, 2019,26(6):108-113.]
- [20] Albino V, Berardi U, Dangelico R M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives[J]. *Journal of Urban Technology*, 2015,22(1):3-21.
- [21] Angelidou M. Smart cities: A conjuncture of four forces [J]. *Cities*, 2015,47:95-106.
- [22] Dall O G, Bruni E, Panza A, et al. Evaluation of cities' smartness by means of indicators for small and medium cities and communities: A methodology for Northern Italy [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017,34:193-202.
- [23] Letaifa B, Soumaya. How to strategize smart cities: Revealing the SMART model[J]. *Journal of Business Research*, 2015,68(7):1414-1419.
- [24] 尹丽英,张超.中国智慧城市理论研究综述与实践进展[J].*电子政务*,2019(1):111-121. [Yin L Y, Zhang C.Review and practice progress of China's smart city theory research[J]. *E-Government*, 2019(1):111-121.]
- [25] Giffinger R, Fertner C, Kramar H, et al. Smart cities: Ranking of European medium-sized cities[R]. Vienna, Austria: Centre of Regional Science, Vienna University of Technology, 2007.

- [26] Smartcity. IESE uncovers world's smartest cities of the year 2018[EB/OL]. <https://www.smartcity.press/iese-top-10-smart-cities-2018/>.
- [27] Frost & Sullivan. IBM 2014 global best-in-class smart city integrator visionary innovation leadership award[R]. Palgrave Macmillan, 2014:1-7.
- [28] Cohen B. The Top 10 smartest cities in North America and the top 10 smartest cities in Europe[R]. Fast Coexist, 2013.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部办公厅. 住房和城乡建设部办公厅关于开展国家智慧城市试点工作的通知[EB/OL]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201212/t20121204_212182.html, 2012. [General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice of the General Office of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on the pilot work of national smart cities [EB/OL]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201212/t20121204_212182.html, 2012.]
- [30] 国家发展改革委办公厅, 中央网信办秘书局, 国家标准委办公室. 关于组织开展新型智慧城市评价工作务实推动新型智慧城市健康快速发展的通知[EB/OL]. http://www.smartcityjs.com/index.php?route=information/news&news_id=6, 2016. [General Office of the National Development and Reform Commission, Secretariat of Cyberspace Administration of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Notice on organizing the evaluation of new smart city and promoting the healthy and rapid development of new smart city [EB/OL]. http://www.smartcityjs.com/index.php?route=information/news&news_id=6, 2016.]
- [31] 陈桂龙. 中国智慧城市发展水平评估报告发布——我国智慧城市建设离散趋势显著[J]. 中国建设信息化, 2016(23):38-47. [Chen G L. China smart city development level assessment report released: China smart city construction discrete trend is significant[J]. Informatization of China Construction, 2016(23):38-47.]
- [32] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 智慧城市评价模型及基础评价指标体系第1部分: 总体框架及分项评价指标制定的要求[EB/OL]. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=94A3D226FB1D802A5F2E348B0C4BEDBC>, 2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Smart city evaluation model and basic evaluation index system, Part1: requirements for overall frame-
- work and sub evaluation index formulation [EB/OL]. <http://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=94A3D226FB1D802A5F2E348B0C4BEDBC>, 2017.]
- [33] 国家工商行政管理总局商标局商标评审委员会. 中国商标品牌战略年度发展报告(2017版)[R]. 北京: 中国工商出版社, 2018. [Trademark Office/Trademark Review and Adjudication Board of The State Administration for Industry and Commerce. Annual development report on China's trademark strategy 2017[R]. Beijing: China Industry & Commerce Press, 2018.]
- [34] 高德地图. 2017年度中国主要城市交通分析报告[R]. 北京: 高德地图, 2018. [AutoNavi Traffic. Traffic analysis reports for major cities in China[R]. Beijing: AutoNavi Traffic, 2018.]
- [35] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. [Urban Social and Economic Investigation Department of National Provincial Bureau of Statistics. China City Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [36] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China Urban Construction Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [37] 中国民用航空局发展计划司. 从统计看民航[M]. 北京: 中国民航出版社, 2018. [Development and planning department of CAAC. Statistical data on civil aviation of China[M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House: 2018.]
- [38] 于伟, 吕晓, 宋金平. 山东省城镇化包容性发展的时空格局[J]. 地理研究, 2018, 37(2):319-332. [Yu W, Lv X, Song J P. The spatial and temporal patterns of inclusive development in the urbanization of Shandong province[J]. Geographical Research, 2018, 37(2):319-332.]
- [39] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析——兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5):788-799. [Jiang L, Bai L, Wu Y M. Coupling and coordinating degrees of provincial economy, resources and environment in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5):788-799.]
- [40] 马丽, 金凤君, 刘毅. 中国经济与环境污染耦合度格局及工业结构解析[J]. 地理学报, 2012, 67(10):1299-1307. [Ma L, Jin F J, Liu Y. Spatial pattern and industrial sector structure analysis on the coupling and coordinating degree of regional economic development and environmental pollution in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(10):1299-1307.]