

引用格式: Wang Yunchen, Huang Chunlin, Feng Yaya, *et al.* Evaluation of the Coordinated Relationship between Land Consumption Rate and Population Growth Rate in the Pearl River Delta based on the 2030 Sustainable Development Goals[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 1168–1177. [王昀琛, 黄春林, 冯娅娅, 等. 基于2030可持续发展目标的珠三角土地消耗率与人口增长率协调关系评价[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 1168–1177.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1168

基于2030可持续发展目标的珠三角土地消耗率与人口增长率协调关系评价

王昀琛^{1,2}, 黄春林¹, 冯娅娅^{1,2}, 顾娟³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 遥感与地理信息科学研究室 甘肃兰州 730000;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 兰州大学资源环境学院 兰州 730000)

摘要: 量化联合国可持续发展目标SDG 11.3.1“土地消耗率与人口增长率的比率(LCRPGR)”有助于了解城市扩张与人口增长之间的关系,为城市国土空间规划和人口城镇化调控提供数据支撑,并且对指导决策者制定城市增长计划至关重要。基于土地利用产品、夜间灯光数据和人口普查数据,提取了城市建成区,利用地理加权回归模型测算了珠三角地区1 km×1 km格网尺度人口密度。依据SDG 11.3.1指标元数据中定义和公式,对珠三角地区可持续发展进行了可靠评价。结果显示:①1990~2010年珠三角建成区面积扩张4.6倍,城区人口增长3.7倍;②1990~2010年珠三角的LCRPGR值由0.71增长到2.01;城市扩张速度与人口增长速度并非成比例协调增长关系;③建成区的扩张主要是由耕地和农村居民用地转换而来。综上,自2000年后珠三角地区土地消耗率已经超过人口增长率,城市扩张速度与人口增长速度并非成比例协调增长关系,二者的差异在增大,应当引起一定注意。

关键词: 可持续发展目标SDG 11.3.1; 城市扩张; 人口增长; 珠三角; 遥感

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2021)05-1168-10

1 引言

城市化最显著的特征包括空间扩张和人口增长^[1]。发达国家和发展中国家的部分城市具有高速率的郊区扩张模式,城市边界通常延伸到更远的边缘,甚至远远超出行政区划边界^[2]。在过去20 a中,随着农村人口大规模迁移到城市,中国城市建成区面积增长了78.5%,城市人口增长了46%^[3]。因此,为了有效监测城市化进程,不仅需要掌握现有城市

空间扩张强度,而且需要监测人口的增长速率^[4]。

城市扩张与人口变化存在着复杂的耦合关系。在城市发展初期,经济的迅速发展吸引大量人口^[5],人口增多驱使城市面积扩张,导致农业用地等其他土地利用类型不断转换为建设用地^[6]。在城市面积不断扩大的同时,更多农村人口涌入城市,加快城市扩张。城市的面积增长与人口增长如果不成比例,可能会导致城市面积与人口关系失衡。当城市扩张大于人口增长时,会导致土地利用在许多形式

收稿日期:2020-06-18;修订日期:2021-07-11

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA19040500)。

作者简介:王昀琛(1991—),女,陕西西安人,博士研究生,主要从事城市可持续发展研究。E-mail: wangyunchen@lzb.ac.cn

通讯作者:黄春林(1979—),男,宁夏青铜峡人,研究员,博士生导师,主要从事多源遥感数据同化及系统集成研究。

E-mail: huangcl@lzb.ac.cn

上效率较低;当人口增长大于城市扩张时,会造成城市资源供给困难。建设用地扩张与人口聚集的相互反馈关系,使城市化过程更加难以预测^[7]。

目前研究集中在定量描述城市扩张和人口变化单一因素的变化规律。在城市方面,研究主要围绕城市或城市群展开,研究内容涉及城市建设用地空间扩张形态、强度、时空格局以及驱动因子等方面^[8-11]。在人口方面,研究内容涉及城市人口预测、老龄化、空间格局、迁徙规律以及收缩城市等方面^[12-16]。然而,目前研究城市扩张与人口增长关系的文章较少^[7,17-18],也很少有学者深入讨论城市扩张速度与人口增长速度是否为成比例协调增长关系。

2015年9月在“联合国可持续发展峰会”通过了“改变我们的世界——2030年可持续发展议程”,涵盖了17项可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs)。其中,指标SDG 11.3.1定义为土地消耗率(Land Consumption Rate, LCR)与人口增长率(Population Growth Rate, PGR)之比,用于描述城市扩张与人口变化之间的关系。LCR反映了用于城市化用途的土地增长率,衡量城市的紧凑程度,代表城市空间的扩张效率。PGR反映城区人口变化速度,用于衡量一个时期内某一地区人口变化速率。

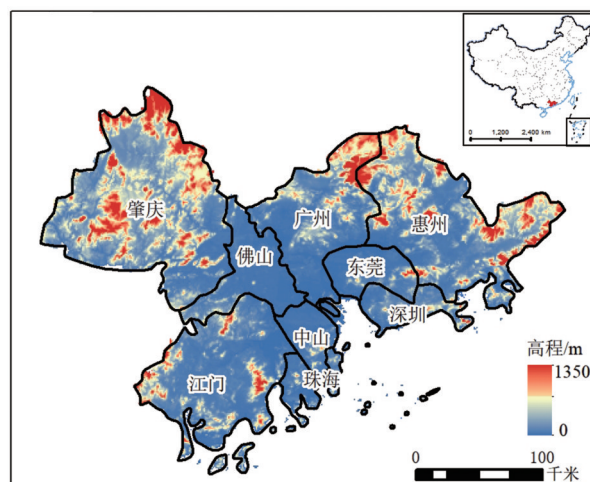
可持续发展目标指标机构间专家组(Inter-Agency and Expert Group on SDG Indicators, IAEG-SDGs)按照计算方法难易程度和数据可获取性,认定指标SDG 11.3.1有清晰的概念和明确的公式,但是缺少数据支撑。随着遥感技术的快速发展,其监测范围广、获取信息周期短、受约束限制少、采集信息手段多样等特点,为监测SDG 11.3.1提供了可靠数据源。常用的提取城市建成区和人口密度制图的数据源包括DMSP/OLS灯光数据、Landsat系列卫星、MODIS^[7,19-20]。遥感提取建成区方法包括监督分类、神经网络、归一化建筑指数(NDBI)等遥感指数以及阈值提取等方法^[21-24];人口密度估算方法包括地理加权回归模型(Geographically Weighted Regression, GWR)、核密度估算以及随机森林模型等^[25-27]。因此,多源遥感数据融合可以弥补监测SDG 11.3.1指标所需的数据空白,已经成为SDG 11.3.1指标监测的趋势和热点。

有研究表明,人口密度较高以及人口分布过于集中使得城市问题日益尖锐^[28]。珠三角地区作为中国人地关系矛盾突出的典型城市群^[29],因此,基

于SDG 11.3.1和GWR模型,对珠三角地区9个地级市的土地消耗率与人口增长率之间的关系进行定量分析,尝试回答以下科学问题:①珠三角地区的土地消耗率与人口增长率时空特征是什么?②珠三角地区的土地消耗率与人口增长率的空间分布形成的原因是什么?据此对珠三角地区可持续发展做出初步评价,以期服务于中国大中城市的国土空间规划和人口城镇化建设,为使用遥感数据和技术监测可持续发展目标提供本土化案例。

2 研究区概况

研究区包括广州、深圳、珠海、东莞、佛山、中山、江门、惠州以及肇庆9个地级市(图1)。改革开放以来,珠三角地区政策优厚,位置优越,经济发达,因而成为我国典型快速发展的城市群之一。珠三角9个地级市总面积为5.6万km²,1990~2010年珠三角总人口由2 559万人增长到5 612万人;GDP由0.15万亿增长到3.8万亿。



审图号:GS(2019)1823

图1 研究区位置

Fig.1 The geographical position map of study area

3 数据和方法

3.1 数据

使用了多源遥感数据和人口普查数据,具体包括:①土地利用数据集:该数据集使用了Landsat系列卫星影像,空间分辨率为30 m;②DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program/Operational Linescan System)数据:DMSP数据可以监测城镇灯光、极光、渔火以及火灾等地表现象,光谱分辨率为6比特,灰度值范围为0~63,在使用时,需要对数据连续性校正,并且消除像元饱和现象。连续

性校正时依据 Elvidge 等^[30]提出的不变目标法和校正系数。

消除像元饱和时依据 Wang 等^[25]提出方法,使用建设用地范围作为掩膜数据,提取覆盖建设用地

范围内的 DMSP/OLS 数据,消除像元饱和现象;③人口普查数据:从 1949 年至今,中国已经进行过 6 次全国人口普查。实验选取县级行政区常住人口数据。所有的数据来源如表 1 所示。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据集	分辨率	时间	数据来源
土地利用数据	100 m	1990、2000、2010 年	中国科学院资源与环境科学数据中心
DMSP/OLS 夜间 灯光数据	1 km	1992、2000、2010 年	美国国家海洋和大气管理局国家地理数据中心
人口普查数据	县级	1990、2000、2010 年	第四、第五和第六次中国人口普查数据

3.2 方法

3.2.1 SDG 11.3.1 背景简介

指标 SDG 11.3.1 旨在实现在给定的空间范围和时期内,监测城市土地消耗率与人口增长率之间的关系。城市消耗率表示城市建成区扩张过程中,侵占其他土地覆盖类型的强度。城市扩张在空间上主要表现为建设用地的扩张^[7]。由于 20 世纪以来,发展中国家和地区的建设用地呈现出加速扩张的趋势^[8],因此,前人在监测 SDG11.3.1 指标时,通常使用建成区增长率反映城市土地消耗率^[31-32]。SDG 11.3.1 元数据中定义的公式如下:

$$LCR = \ln(\text{Urb}_{t+n} / \text{Urb}_t) / y \quad (1)$$

$$PGR = \ln(\text{Pop}_{t+n} / \text{Pop}_t) / y \quad (2)$$

$$LCRPGR = LCR / PGR \quad (3)$$

其中: Urb_t 和 Urb_{t+n} 分别为过去和当前年份城市建成区面积; Pop_t 和 Pop_{t+n} 分别为过去和当前年份城区人口(建成区范围内人口总量)。 y 表示两个时段的间隔年份。 \ln 表示以常数 e 为底数的自然对数。 LCR 为城市的土地消耗率,反映在一个时期城市建成区面积的增长速率; PGR 为人口增长率,反映了两个时期城区人口增长速率。 $LCRPGR$ 为 LCR 和 PGR 两个增量比值。

LCR 和 PGR 定量描述了在给定的时期建成区扩张强度和人口变化的方向和速率。 $LCR < 0$ 表示建成区面积比前一时期减少, $LCR > 0$ 表示建成区面积增长。 $PGR > 0$ 表示人口比前一阶段增加, $PGR < 0$ 表示人口减少。 LCR 或 PGR 正向值越大,表示建成区面积或人口增长越快,反之,则表示建成区面积或人口减少更快。 $LCRPGR$ 反映了 LCR 和 PGR 两个增量之间的关系。当 $LCRPGR > 1$ 时,表示建成区增速大于人口增速,该城市

属于土地增长型;当 $LCRPGR < 1$ 时,表示建成区增速落后于人口增速,该城市属于人口增长型。理想情况下, $LCRPGR$ 应该约等于 1,表示 LCR 与 PGR 同步增长。

3.2.2 人口数据空间化

城市总人口通常是以行政区划边界为统计口径,而城市建成区范围通常小于城市行政边界范围,城市总人口数据和建成区范围存在统计口径不匹配的问题,无法使用城市总人口代替城区人口。因此,需要准确计算建成区范围内的人口,作为实验所需的城区人口。在计算时,需要使用人口空间化方法,计算人口密度数据,再聚合建成区范围内人口密度数据,以获取城区人口。

人口空间化的步骤如下:①根据 DMSP / OLS 数据(Light 图层)的 DN 值,将灯光数据划分为两个图层:DN 值为 0(Light₀)和 DN 值大于 0(Light₁)。使用城市建设用地,农村建设用地和其他建设用地(包括工矿用地等)3 个图层为掩膜,将 Light₀和 Light₁图层划分为 6 个图层:DN 值等于 0 的城市图层(Urban₀),DN 值大于 0 的城市图层(Urban₁),DN 值等于 0 的农村图层(Rural₀),DN 值大于 0 的农村图层(Rural₁),DN 值等于 0 的其他建设用地图层(Other₀),DN 值大于 0 的其他建设用地图层(Other₁)。②分别汇总县级尺度 Light 图层 DN 值以及城市建设用地、农村建设用地和其他建设用地的面积百分比数据,依次命名为 T_Light 、 T_S_1 、 T_S_2 和 T_S_3 。然后,计算 T_Light 与 T_S_1 、 T_S_2 和 T_S_3 之间偏相关系数,依次命名为 F_1 、 F_2 和 F_3 。然后,使用公式(4)计算亮度指数(L_j):

$$L_j = \text{Light} \frac{T_S_j \times F_j}{\sum_j T_S_j \times F_j} \quad (4)$$

其中: L_j 代表亮度指数;Light 为 DMSP/OLS 数据;

F_j 为偏相关系数; T_S_j 为县级尺度城市建设用地、农村建设用地和其他建设用地面积总和; j 的取值范围为 1、2 和 3。③以 $Urban_0$ 、 $Urban_1$ 、 $Rural_0$ 、 $Rural_1$ 、 $Other_0$ 、 $Other_1$ 、 L_1 、 L_2 和 L_3 共 9 个图层在县级尺度汇总值为自变量,以县级人口普查数据为因变量,建立 GWR 模型估算人口密度。最后,获得了 1990~2010 年 3 期 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的人口密度图(图 2)。由于 1990 年缺少夜间灯光数据,在人口空间化时,使用 1992 年 DMSP/OLS 夜间灯光数据作为代替。详细的方法可以参考 Wang 等^[25]的研究。

3 期人口密度模型拟合优度(R^2)在 1990、2000 和 2010 年分别达到 0.79、0.81 和 0.84。为反映 GWR 模型计算的人口密度精度,选取珠三角地区 1990、2000 和 2010 年 3 个时期区、县级人口普查数据进行精度检验。采用相对误差(Relative Error, RE)和均方根相对误差(Root Mean Squared Relative Error, RMSRE)反映模型模拟的精度,公式如下:

$$RE = \frac{\sum |(\text{Pop}_i - C_i)|}{\sum C_i} \tag{5}$$

$$\text{RMSRE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\frac{\text{Pop}_i - C_i}{C_i})^2} \tag{6}$$

其中: i 表示第 i 个县; Pop_i 表示本文计算的第 i 个县人口总数; C_i 表示第 i 个县人口普查数据; n 代表珠三角地区的区、县总数。2 个精度检验指标计算结果见表 2。

3.2.3 SDG 11.3.1 计算过程

SDGs 11.3.1 计算过程包括以下 3 个步骤:①提取城市建成区:实验选取 1990、2000 和 2010 年土地

表 2 精度检验结果

Table 2 Accuracy assessment result		
年份	RE/%	RMSRE/%
1990 年	3.79	5.67
2000 年	2.94	4.84
2010 年	2.44	4.55

利用数据集,其中建设用地又被分为城市建设用地和农村居民点用地。将城市建设用地作为建成区范围,提取了 1900~2010 年 3 期珠三角的建成区范围(图 2)。②获取城市人口:选取 1990~2010 年 3 期珠三角地区建成区范围为掩膜数据,分别提取 1990~2010 年 3 期珠三角地区人口密度数据,获取当年的城区人口数据。③SDGs 11.3.1 计算:聚合建成区范围内建设用地面积和人口密度数据,获得城市建成区面积和城区人口。依据公式(1)~(3),分别计算地级市尺度和区域尺度 1990~2000 年和 2000~2010 年 2 个时期的 LCR、PGR 和 LCRPGR 指标结果。

4 结果分析

4.1 城市扩张时空特征

1990~2010 年,珠三角建设用地面积一直在持续扩张,面积增长了 4.6 倍,扩张强度和范围明显增加(图 2(a)~图 2(c))。从空间分布上,建设用地集中在珠三角东南部,建设用地外围环绕着水域和耕地,适宜城市的发展和人口的生存。从总量上,1990 年珠三角建设用地面积为 910 km^2 ,占该地区总面积的 1.7%;2000 年增长为 $1\ 686\text{ km}^2$,面积占比增长到 3.1%;2010 年则增长为 $4\ 179\text{ km}^2$,占总面积

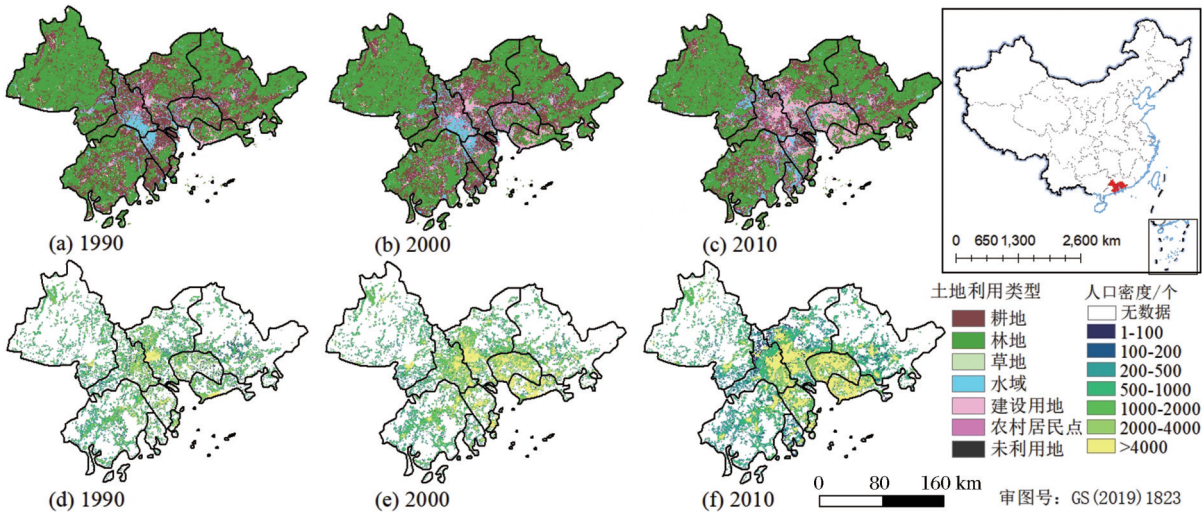
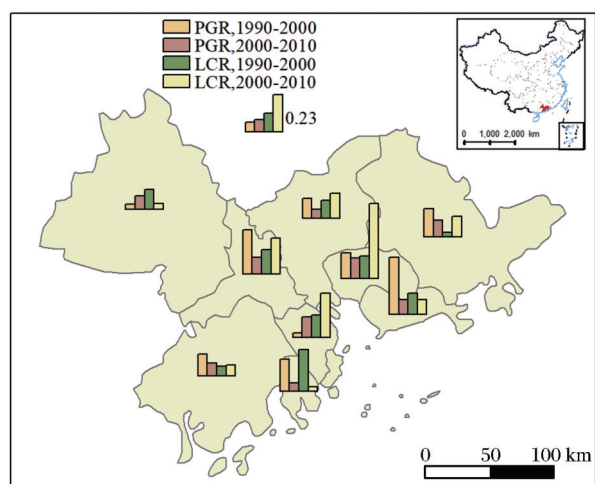


图 2 珠三角地区土地利用类型和人口密度分布图

Fig.2 Land use types and population density map in the Pearl River Delta

的7.7%。

1990~2010年,珠三角9个城市LCR值均为正值,建设用地面积增长速度各不相同(图3)。在1990~2000年,珠海建成区面积扩张最快,LCR值为0.13;其次是佛山、东莞、中山和深圳,4个城市LCR值在0.07附近;再次,肇庆、广州、江门和惠州建成区扩张最慢。在2000~2010年,东莞的建成区面积扩张最快,LCR值达到0.23;其次是中山、佛山、惠州和广州,LCR值为0.1附近;深圳、江门、肇庆和珠海的建成区面积扩张最慢。从LCR值20 a的变化趋势可知(图3),2000~2010年深圳、珠海和肇庆的LCR值低于1990~2000年LCR值,城市虽然持续扩张,扩张强度出现下降趋势。广州、东莞、佛山、中山、江门和惠州6个城市LCR值呈增长趋势,城市持续加速扩张。东莞在1990~2010年,LCR值增加最快,建设用地面积超过20倍,远超过9个城市增幅平均值(4.6倍),需要引起关注。



审图号:GS(2019)1823

图3 珠三角地区土地消耗率和人口增长率

Fig.3 The LCR and PGR value in the Pearl River Delta

建成区的增长需要消耗其他土地利用类型,在1990~2010年期间,耕地和农村居民点用地(位于城市周边)是城市新增长建城区的主要来源。如图4(a)所示,在1990~2000年,建成区消耗耕地的比例最大(55%),其次是对林地的消耗(20%),再次是农村居民点用地的消耗(15%),对水域(7%)和草地(3%)的消耗最少。在2000~2010年(图4(b)),建成区的增长消耗耕地的比例最大(40%),其次是对农村居民点用地的消耗(31%),以及对林地的消耗(15%),对水域(11%)和草地(1%)的消耗最少。相比1990~2000年,2000~2010年期间建成区增长

对耕地的消耗比例下降明显,对农村居民点用地的消耗比例增长明显。其中,东莞、佛山和深圳对农村居民点用地消耗明显。东莞对农村居民点用地消耗超过耕地。

4.2 人口增长速度

1990~2010年,珠三角建成区范围内人口总数分别为1 240万、2 956万、4 643万,城区人口增长了3.7倍。同时,人口密度较高(即人口密度超过4 000人/km²)的范围明显持续扩大(图2(d)、图2(f))。在1990年,人口密度较高的区域面积占珠三角地区总面积的7.4%;2000年占总面积的17.7%;2010年增长到28.7%。其中,广州、东莞和深圳在人口密度超过4 000人/km²的范围增长最快,惠州、江门和肇庆则增长缓慢。说明珠三角城区人口总量和人口密度在1990~2010年持续增长,东莞和深圳的人口分布更加密集。

从增长率的角度来看(图3),1990~2010年珠三角9个地级市PGR值均为正值,人口持续增长,但是部分城市人口增长率下降,人口增速放缓。1990~2000年深圳人口增长率最高,PGR值超过0.15。其次是佛山、珠海、惠州、东莞、江门和广州,PGR值在0.05和0.15之间。人口增长率最低的是肇庆和中山市,PGR值不足0.05。2000~2010年,中山、东莞、惠州和佛山的人口增长率最高,PGR值超过了0.05。广州、深圳、珠海、江门、以及肇庆5个城市PGR值不足0.05,人口增长趋势相对缓慢。相比较1990~2000年,在2000~2010年期间,除中山和肇庆2个城市,其余7个城市的人口增长率相对上一阶段均呈现出不同幅度的下降。

4.3 土地消耗率与人口增长率的比率

1990~2010年,珠三角9个城市之间土地消耗率与人口增长率空间差异明显。如图5所示,1990~2000年珠海、肇庆和中山3个地级市的LCRPGR值大于1,城市的LCR值大于PGR值。其中肇庆和中山的LCRPGR值大于4,LCR值与PGR值差异很大,需要有效控制城市扩张。广州、深圳、佛山、江门、惠州和东莞6个城市LCRPGR值小于1,城市的LCR值小于PGR值。2000~2010年,广州、深圳、佛山、惠州、东莞和中山的LCRPGR值大于1,城市的LCR值大于PGR值。其中,东莞LCRPGR值大于3,需要有效控制城市空间范围扩张。珠海、江门和肇庆的LCRPGR值小于1,表示LCR值小于PGR值。

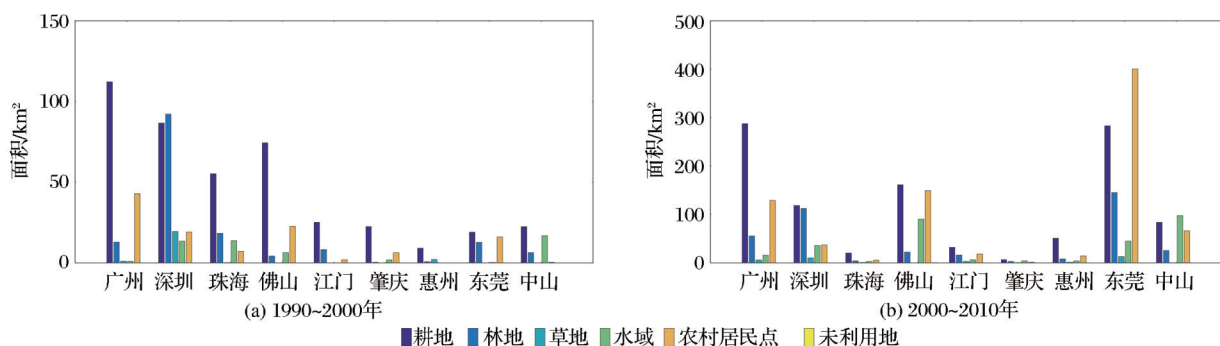
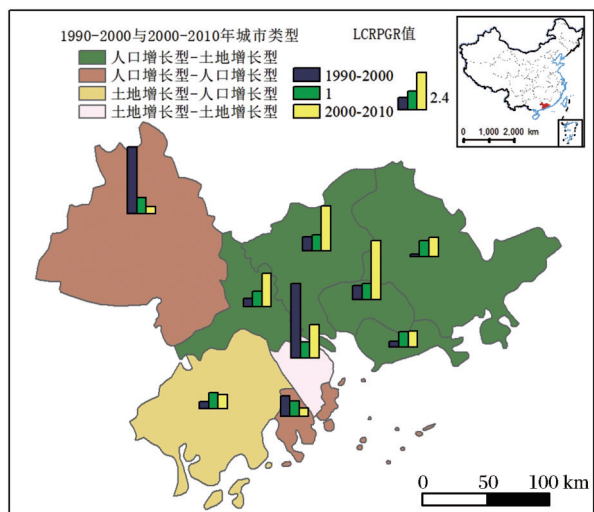


图4 珠三角城市建设用地的来源

Fig.4 The source of built-up area in Peral River Delta



审图号:GS(2019)1823

图5 珠三角地区土地增长率与人口增长率比值

Fig.5 The ratio of LCR to PGR value in the Pearl River Delta

1990~2010年,9个城市土地消耗率与人口增长率时间变化趋势不同。广州、深圳、佛山、江门、惠州和东莞6个地级市的LCRPGR值呈现增长趋势,主要包括2种类型。第一,广州、佛山、江门、惠州和东莞LCR值呈增长趋势,PGR值呈减少趋势,建成区持续增长,人口增速放缓;第二,深圳的LCR和PGR值均呈减少趋势,虽然建城区面积和人口都在增长,但二者的增速同时放缓,PGR增速小于LCR增速。

1990~2010年,珠海、肇庆和中山3个地级市的LCRPGR值呈现减少趋势,包括2种类型。第一,珠海的LCR值和PGR值在同时减少,建成区和人口持续增长,但二者增速放缓,LCR值增速小于PGR值;第二,肇庆和中山LCR值在减少,而PGR值增长。

1990~2010年,在城市尺度,土地增长型城市

从3个增长至6个;人口增长型城市从6个减少至3个。在区域尺度上,1990~2000年和2000~2010年期间,珠三角地区的LCR值由0.06增长到0.09;PGR值由0.08下降到0.04;LCRPGR值由0.71增长到2.01。因此,1990~2010年珠三角地区的土地增长率与人口增长率的差异增大。自2000年后,珠三角地区的土地增长率超过人口增长率,城市建成区扩张速度大于人口增长速度。

5 讨论

由于社会经济、区域位置和政策导向等因素的差异,不同城市扩张强度存在差异。由于工业发展是带动中国建设用地开发的重要因素之一^[33],东莞作为扩张最快的城市,工业的快速发展需要大量土地,带动了城市快速扩张。佛山、中山和珠海紧邻广州、深圳、香港3个一线城市,受到一线城市的辐射带动,城市扩张较快。肇庆、惠州和江门3个城市林地比例较高,不利于建成区扩张;并且距离广州等经济发达城市较远,城市扩张速率较慢。

不同城市人口增长速度各不相同,城市人口数量受到出生率(包括育龄妇女数量和生育水平)以及人口流动等多因素影响。从空间分布来看,珠三角城市群核心区(广州、东莞和深圳)人口密度明显高于城市群边缘城市(惠州、江门和肇庆)。除了出生率的因素,人口数量还受到政策、经济、就业等多因素的影响,部分位于城市群边缘城市的人口,从外部地区迁移到经济发达的城市群核心区。中心城市对边缘城市的吸引作用,表现为“核心外围效应”^[34]。

广州和深圳,同为珠三角地区的两个一线城市,由图3可知,两个城市在1990~2000和2000~2010年两个时期PGR均呈减少趋势,LCR则存在差异。广州的LCR呈增长趋势,深圳的LCR呈减

少趋势。究其原因,①受制于行政区划面积:由于深圳最早实行改革开放政策,是我国的经济特区和计划单列市,2010年建成区面积已经达到约830 km²,2010年广州市建成区面积为871 km²,面积约为深圳市的1.04倍。但是,深圳行政区划面积1 990 km²,可供开发的土地空间趋于饱和,并且面临无县可改区的状况。广州行政区划面积为7 434 km²,面积约为深圳的3.7倍,可供开发的土地资源较为丰富。②地形和地理位置限制:深圳市的丘陵地面积比广州的大,且只能向北部的东莞和惠州扩散。广州及周边城市地势平坦,可以与西部的佛山构成广佛同城经济区,也可以向东部的东莞、惠州扩散,或者向北部的清远扩散。③产业链限制:深圳的发展优势更多在金融和科技创新方面。而广州发展更早、具有更为全面系统的产业链,提供的基础经济建设比深圳要更为丰富。

在前人的研究中,范进等^[33]通过协调度模型测定中国土地城镇化和人口城镇化关系,认为在2000年前,中国人口城镇化快于土地城镇化,2000年后,土地城镇化快于人口城镇化。谢思梅等^[5]发现珠三角地区建成区扩张速度大于人口增长速度^[5],与本研究的结论相一致。土地消耗率大于人口增长率的原因如下,①外在制度方面:二元土地制度导致中国土地市场形成农地和非农地2个市场,过低的征地成本以及快速的工业发展,使得大量农地市场转化为非农地市场,推动了城市土地消耗率增长。同时,城乡二元户籍制度对城市人口增长率起到抑制作用,城市人口增长需要吸纳更多农村人口,却无法提供所需的就业、医疗、教育、住房等基础生存条件。②内在机制方面:为了吸引投资,通常会压低工业用地价格,低价的工业用地促使城市土地消耗率增长。住宅用地价格被抬高,增加了人口迁移的成本,抑制了城市人口增长率^[33]。通常会出现农民的土地被城镇化了,而农民依然未被城镇化的现象。③城市规划方面:由于城市土地建设与规划并未协同,造成城市土地空置、空间分布不合理等现象,造成城市土地的闲置和浪费,将进一步加速建成区扩张。综上,政府管控、土地政策、户籍制度、经济水平、基础设施等因素是导致人口城镇化与土地城镇化失衡与滞后的主要原因。此外,珠三角地区的城市人口增长率与改革开放以后的人口流动有很大关系,外来务工人员的增加可能导致当地的夜间灯光有很大增加,LCRPCR的关系可能更加

复杂。

与前人研究结果不同的是,谢思梅等^[5]认为珠三角城市群的人口出现负增长,本研究的计算结果表明人口呈持续正向增长,仅仅增长率出现减少。这可能是因为前人在计算时,使用的人口数据分别为统计年鉴中非农业人口和城镇人口(在不同年份),数据的一致性存在问题。同时,人口具有流动性的特点,由于珠三角高度发达的经济和就业机会,城市外来人口占到一定比例。城区常住人口不受到户籍制度的限制。因此,相比较于非农业人口和城镇人口,本研究中城区常住人口更能有效地反映城区实际人口。

以珠三角为例,探讨城市土地消耗率与人口增长率之间的时空关系。研究受到研究区尺度限制,尚未和中国其他城市做横向对比,中国的中小城市约占城市总数量的56%,因此,下一步将在中国的中小城市展开。

6 结 论

依据SDG 11.3.1指标元数据中的概念和公式,使用DMSP/OLS遥感影像数据、土地利用数据和人口普查数据,提取珠三角地区建成区范围并且计算人口密度,定量监测了1990~2010年珠三角地区9个地级市土地增长率与人口增长率之间的关系。结果显示:①珠三角建成区面积和人口总量均呈增长趋势,在1990~2010年期间,珠三角建设用地区面积分别为910、1 686、4 179 km²,扩张了4.6倍,扩张强度和范围明显增加;城区人口分别为1 240万、2 956万、4 643万,增长了3.7倍,人口分布更加集中。伴随着城市建成区范围的增长,城区人口也在不断增长;随着城区人口的增长,建成区范围也进一步扩张,二者互相影响,没有明确的先后顺序,很难区别二者中哪一个是驱动因子或者响应机制。②在1990~2000和2000~2010年两个时期,珠三角地区LCRPCR值由0.71增长到2.01。虽然城市人口总数在持续增长,7个城市的PGR出现下降,人口增速放缓,PGR减少是受到城乡二元户籍制度和住宅用地价格较高等抑制作用。而受到二元土地制度和工业用地价格较低的推动作用,6个城市LCR值呈增长趋势,城市持续加速扩张,珠三角地区土地消耗率大于人口增长率会成为发展趋势。③在1990~2010年,耕地和农村居民点用地均为城市新增长建城区的主要来源,随着城市的不断扩

张,农村居民点将成为城市扩张的储备资源。综上,自2000年后珠三角地区的土地消耗率已经超过人口增长率,城市扩张速度与人口增长速度并非成比例协调增长关系,二者的差异在增大,应当引起一定注意。

量化SDG 11.3.1指标有助于了解城市扩张与人口增长之间的关系,认识城市空间扩张范围和强度的规律,并且对指导决策者制定城市增长计划至关重要^[35-37]。

此外,LCRPGR指标存在的局限性包括以下3点:当LCRPGR值为负时,无法仅仅依靠LCRPGR指标反映人口或建成区是否增长,还需要结合LCR和PGR的正负;当LCR和PGR值均为负值且 $LCRPGR > 1$ 时,建成区的减少速度要快于人口减少速度。相反,当LCR和PGR值均为正值且 $LCRPGR > 1$ 时,建成区扩张速度快于人口增长速度。在这里,同样需要依靠LCR和PGR的正负;LCRPGR指标不适合在空间单位和时间跨度中保持不变的建成区或人口;最后,使用LCRPGR指标反应的是两个增长率之间的关系,而并非直接反应城市建成区扩张与人口增长关系。

本研究实现了SDG11.3.1指标在区域尺度的定量监测,并且证明了遥感数据监测可持续发展目标潜力。今后将进一步开展以下研究:①开展基于深度学习和地球大数据提取城市建成区的研究,提高城市建成区面积数据准确性。②引入更多的社会经济数据,例如微博、微信、腾讯位置数据、推特数据等。进一步提高人口密度制图数据精度;此外,由于人口老龄化已经成为我国面临的严重问题,未来对SDG 11.3.1监测,将考虑年龄分层,进一步细化监测结果。③继续提高SDG 11.3.1监测结果的可信度,并对数据进行持续更新,进一步挖掘多源遥感数据以及其他地球大数据,深入、全面地结合SDG 11中其他指标,综合评价城市可持续发展。

参考文献(References):

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al.* Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319: 756-60. DOI:10.1126/science.1150195.
- [2] Mwaniki D. Module 3: Indicator 11.3.1 Land Consumption Rate to Population Growth Rate. Availablenline: https://www.unescwa.org/sites/www.unescwa.org/files/u593/module_3_land_consumption_edited_23-03-2018.pdf (accessed on 20 November).]
- [3] Bai X, Shi P, Liu Y. Realizing China's urban dream[J]. *Nature*, 2014, 509: 158-160. DOI:10.1038/509158a.
- [4] Zhu J. A Transitional institution for the emerging land market in urban China[J]. *Urban Studies*, 2005, 42: 1369-1390. DOI: 10.1080/00420980500150714.
- [5] Xie Simei, Gong Jianya, Huang Xin, *et al.* A study on coordination of urbanization in the Pearl River Delta between 1990 and 2015[J]. *Guangdong Land Science*, 2017, 16(6): 18-26. [谢思梅,龚健雅,黄昕,等.珠江三角洲地区1990~2015年城市化协调性研究[J]. *广东土地科学*, 2017, 16(6): 18-26.]
- [6] Xu Qiheng, Huang Yingbing. Analysis of urban expansion measurement and driving mechanism in typical region of Pearl River Delta[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 41(1): 45-53. [徐启恒,黄莹冰.珠三角典型地区城市扩张测度及驱动机制分析[J]. *测绘科学*, 2018, 41(1): 45-53.]
- [7] Liu Zhijia, Huang Heqing. Tempo-spatial characteristics of interactions among changes in built-up land, GDP and demography in the Pearl River Delta[J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 1394-1402. [刘志佳,黄河清.珠三角地区建设用地扩张与经济、人口变化之间相互作用的时空演变特征分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(7): 1394-1402.]
- [8] Zhang Nannan. Research on spatial form and expansion analysis method of urban built-up area[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(8): 104-113. [张楠楠.城市建成区空间形态及扩张分析方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(8): 104-113.]
- [9] Li Zhiying, Liu Yang, Long Ye. Study of urban construction land expansion characteristics in Kunming central city from 1990 to 2017[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2019, 41(5): 964-973. [李志英,刘阳,龙晔.基于GIS的昆明中心城区1990~2017年建设用地扩展特征研究[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(5): 964-973.]
- [10] Fu Yan, Wang Jianhui, Zhang Ya. Research of temporal and spatial characteristics of urban construction land expansion based on multi-source data: a case study of Shunde district, Foshan city[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019, (8): 111-115. 符彦,王剑辉,张亚. [基于多源数据的城市建设用地扩张时空特征分析——以佛山市顺德区为例[J]. *测绘通报*, 2019, (8): 111-115.]
- [11] Zhu Wenlong, Sun Qianxiang, Qin Xiao, *et al.* Spatial expansion and driving force of Huaihai urban agglomeration based on Nighttime Lighting Data[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 55(5): 106-113. [朱文龙,孙乾翔,秦箫,等.基于夜间灯光数据的淮海城市群空间扩张及驱动力研究[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(5): 106-113.]
- [12] Gao Fengwei, Wu Yimin, Li Zhuangzhuang, *et al.* The building and application of the population structure prediction model in Anhui province—take Suzhou city for example[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 39(4): 1-5. [高凤伟,武以敏,李壮壮,等.安徽省人口结构预测模型的构建及应用——以宿州市为例[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(4): 1-5.]

- [13] Zhou Rong, Zhang Rulong, Huang Chenxi. Pattern evolution and formative mechanism of aging in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(10): 2163-2177. [周榕, 庄汝龙, 黄晨熹. 中国人口老龄化格局演变与形成机制[J]. *地理学报*, 2019, 74(10): 2163-2177.]
- [14] Li Juan, Dong Ping, Lu Yuqi, *et al.* Study on the relationship between population and economic spatial distribution in Central Plains Economic Zone[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(10): 2222-2230. [李娟, 董平, 陆玉麒, 等. 中原经济区人口与经济空间格局演变研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10): 2222-2230.]
- [15] Gu Hengyu, Liu Ziliang, Shen Tiyan. Spatial pattern and influencing mechanism of interprovincial migration's Hukou transfer intention in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(11): 1702-1710. [古恒宇, 刘子亮, 沈体雁. 中国省际流动人口户籍迁移意愿的空间格局及影响机制分析[J]. *地理科学*, 2019, 39(11): 1702-1710.]
- [16] Mao Qizhi, Long Ying, Wu Kang. Spatio-temporal changes of population density and exploration on urbanization pattern in China: 2000~2010[J]. *Planning Studies*, 2015, 39(2): 38-43. [毛其智, 龙瀛, 吴康. 中国人口密度时空演变与城镇化空间格局初探——从2000年到2010年[J]. *城市规划*, 2015, 39(2): 38-43.]
- [17] Wang Xuefeng, Wen Yanping. Study on the spatial pattern evolution and coordination of population urbanization and land urbanization in Hunan province[J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2019, 42(5): 34-43. [王雪峰, 温彦平. 湖南省人口城镇化与土地城镇化空间格局演化及协调性研究[J]. *湖南师范大学自然科学学报*, 2019, 42(5): 34-43.]
- [18] Wang Y, Huang C, Feng Y, Zhao M., *et al.* Using earth observation for monitoring SDG 11.3.1-Ratio of land consumption rate to population growth rate in mainland China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12: 357. <https://doi.org/10.3390/rs12030357>.
- [19] Sun Qinke, Zhou Liang, Shen Ruru, *et al.* Spatial heterogeneity of urban land use in Yangtze River economic belt based on DMSP/OLS data[J]. *Remote Sensing Information*, 2019, 34(4): 79-86. [孙钦珂, 周亮, 申如如, 等. 基于DMSP/OLS数据的长江经济带城市用地空间分异特征[J]. *遥感信息*, 2019, 34(4): 79-86.]
- [20] Qu Yiting, Meng Dan, Li Xiaojuan. Study on urban expansion and its influence on urban warming effect in Beijing[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 38(2): 77-82. [屈益挺, 孟丹, 李小娟. 北京市城市扩张及其对城市增温效应的影响[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(2): 77-82.]
- [21] Liu J, Kuang W, Zhang Z, *et al.* Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24: 195-210. DOI: 10.1007/s11442-014-1082-6.
- [22] Zhang Xiaorui, Fang Chuanglin, Wang Zhenbo, *et al.* Prediction of urban built-up area based on RBF neural network[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013, 22(6): 691-697. [张晓瑞, 方创琳, 王振波, 等. 基于RBF神经网络的 urban 建成区面积预测研究——兼与BP神经网络和线性回归对比分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, 22(6): 691-697.]
- [23] Liu ZhiLi, Zhang Qibin, Yue Depeng, *et al.* Extraction of urban built-up areas based on sentinel-2A and NPP-VIIRS nighttime light data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2019, 31(4): 27-234. [刘智丽, 张启斌, 岳德鹏, 等. 基于Sentinel-2A与NPP-VIIRS夜间灯光数据的城市建成区提取[J]. *国土资源遥感*, 2019, 31(4): 227-234.]
- [24] Gao Ning, Ge Yingchun, Song Xiaoyu. Study of urban expansion and driving factors in Xi'an city based on Nighttime Light Data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(1): 207-215. [高宁, 盖迎春, 宋晓谕. 基于夜间灯光数据的西安市城市扩张及驱动因素研究[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(1): 207-215.]
- [25] Wang L, Wang S, Zhou Y, *et al.* Mapping population density in China between 1990 and 2010 using remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 210: 269-281. DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.007.
- [26] Lu Anmin, Li Chengming, Lin Zongjian, *et al.* Spatial distribution of statistical population data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(3): 301-305. [吕安民, 李成名, 林宗坚, 等. 人口统计数据的空间分布化研究[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2002, 27(3): 301-305.]
- [27] Tan Min, Liu Kai, Liu Lin, *et al.* Spatialization of population in the Pearl River Delta in 30 m grids using Random Forest Model[J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(10): 1304-1312. [谭敏, 刘凯, 柳林, 等. 基于随机森林模型的珠江三角洲30 m格网人口空间化[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(10): 1304-1312.]
- [28] Li Lihua, Liu Xiaoping, Ou Jinpei, *et al.* Spatial-temporal changes and mechanism analysis of urban 3D expansion based on Random Forest Model[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(2): 53-60. [李柳华, 刘小平, 欧金沛, 等. 基于随机森林模型的城市扩张三维特征时空变化及机制分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(2): 53-60.]
- [29] Deng Shiwen, Yan Xiaopei, Zhu Jincheng. Growth of urban and town construction land in the Pearl River Delta[J]. *Economic Geography*, 1999, 19(4): 80-84. [邓世文, 阎小培, 朱锦成. 珠江三角洲城镇建设用地增长分析[J]. *经济地理*, 1999, 19(4): 80-84.]
- [30] Elvidge C D, Sutton P, Baugh K E, *et al.* National trends in satellite observed lighting: 1992~2009[C]// AGU Fall Meeting, 2009.
- [31] Schiavina M, Melchiorri M, Corbane C, *et al.* Multi-scale estimation of land use efficiency (SDG 11.3.1) across 25 years using global open and free data[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 5674. DOI: 10.3390/su11205674.
- [32] Nicolau R, David J, Caetano M, *et al.* Ratio of land consumption rate to population growth rate—analysis of different formu-

- lations applied to mainland Portugal[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2019, 8: 10. DOI: 10.20944/preprints201912.0047.v2.
- [33] Fan Jin, Zhao Dingtao, Coordination of urbanization and population and its influencing factors[J]. Economist, 2012(5): 61-67 [范进, 赵定涛. 土地城镇化与人口城镇化协调性测定及其影响因素[J]. 经济学家, 2012(5): 61-67.]
- [34] Wu Kang, Misunderstanding of urban shrinking and responding to spatial planning[J]. Beijing Planning Review, 2019(3): 4-11. [吴康. 城市收缩的认知误区与空间规划响应[J]. 北京规划建设, 2019(3): 4-11.]
- [35] Hu J, Wang Y, Taubenböck H, *et al.* Land consumption in cities: a comparative study across the globe[J]. Cities, 2021, 113, 103163. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103163.
- [36] Song Y, Wu P. Earth observation for sustainable infrastructure: a review[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 1528. DOI: 10.1016/j.cities.2021.103163.
- [37] Ghazaryan G, Rienow A, Oldenburg C, *et al.* Monitoring of urban sprawl and densification processes in Western Germany in the light of SDG indicator 11.3.1 based on an automated retrospective classification approach[J/OL]. Remote Sensing, 2021, 13: 1694. <https://doi.org/10.3390/rs13091694>.

Evaluation of the Coordinated Relationship between Land Consumption Rate and Population Growth Rate in the Pearl River Delta based on the 2030 Sustainable Development Goals

Wang Yunchen^{1,2}, Huang Chunlin¹, Feng Yaya^{1,2}, Gu Juan³

(1. *Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

3. College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Quantifying the United Nations Sustainable Development Goal 11.3.1—"Ratio of Land Consumption Rate to Population Growth Rate (LCRPGR)" is helpful to understand the relationship between urban expansion and population growth, provide data support for urban land space planning and population control, and is crucial to guide decision makers to formulate urban growth plans. Based on the land use products, night lighting data and census data, we extracted the urban built-up areas and used the geographic weighted regression model to mapping the population density of the 1 km × 1 km grid scale in the Pearl River Delta region. Based on the definition and formula in SDG 11.3.1 indicator metadata, the reliable evaluation of the SDG 11.3.1 indicator was achieved in the Pearl River Delta region. The results showed: (1) the built-up area in the Pearl River Delta increased by 4.6 times and the urban population increased by 3.7 times from 1990 to 2010; (2) During the period of 1990~2000 and 2000~2010, the LCRPGR value increased from 0.71 to 2.01. The rate of urban expansion and the rate of population growth were not proportionally coordinated. In summary, the land consumption rate of the Pearl River Delta region has exceeded the population growth rate since 2000. The urban expansion rate and the population growth rate are not proportional. Attention needs to be paid to the rapid expansion of cities.

Key words: SDG 11.3.1; Urban expansion; Population grown; Pearl River Delta; Remote sensing