

引用格式:Chen Xin,Kuang Wenhui.Remote Sensing Monitoring and Comparison of Urban Land Cover Changes in Typical Cities in China-Kazakhstan Arid Region based on Cloud Platform[J].Remote Sensing Technology and Application,2020,35(3):548-557.[陈馨,匡文慧.基于云平台的中哈干旱区典型城市地表覆盖变化遥感监测与比较[J].遥感技术与应用,2020,35(3):548-557.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.3.0548

基于云平台的中哈干旱区典型城市地表覆盖变化 遥感监测与比较

陈馨^{1,2},匡文慧¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所,陆地表层格局与模拟重点实验室,北京 100101;
2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:城市地表覆盖组分是影响人居生存环境和城市生态系统服务的关键因素。基于 Google Earth Engine 平台,利用 Landsat 5/8 遥感影像数据,采用改进的“植被—不透水面—土壤”模型及线性光谱混合分解方法,提取地处干旱区的中国西部大城市乌鲁木齐市与邻国哈萨克斯坦首都城市努尔-苏丹市、大城市阿拉木图市的地表覆盖信息,对比分析 1990~2015 年 3 个城市地表覆盖的变化特征。结果表明:1990~2015 年间乌鲁木齐市城市建成区扩张面积最大,扩张了 349.81 km²;其次为努尔-苏丹市,城市扩张面积为 158.16 km²;由于哈萨克斯坦首都由阿拉木图市迁往努尔-苏丹市,整个时段阿拉木图市城市扩张最慢,总计扩张了 126.23 km²。在城市建成区内,1990 年到 2015 年间乌鲁木齐市城市地表不透水组分增加了 7.10%,努尔-苏丹市和阿拉木图市分别减少了 14.9%、4.49%。建成区内绿地组分努尔-苏丹市从 1990 年到 2015 年增加了 6.68%;乌鲁木齐市和阿拉木图市分别减少了 6.65% 和 2.75%。城市所表现出来的不同地表覆盖特征乌鲁木齐市主要受国家政策支持,阿拉木图市由于其历史背景和城市规划,努尔-苏丹市城市的快速发展则受哈萨克斯坦迁都的影响。

关键词:不透水面;绿地;土地利用/覆盖;干旱区;Google Earth Engine

中图分类号:TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2020)03-0548-10

1 引言

全球目前有一半以上的人口居住在城市中,预计到 2050 年将达到 67.2%^[1]。随着城市人口的快速增长,人类活动强度也加大,城市扩张和城市空间特征的变化是最直接的结果^[2-3]。城市地表覆盖结构主要由城市水体、城市不透水面、城市绿地空间与裸土组成^[4]。城市不透水面是一种由人工形成的地貌特征,具有阻碍地表水下渗到土壤中的特性,

包括建筑、道路、广场等^[5],城市建成区范围内不透水面组分越高,代表城市不透水面面积越多,城市的生态环境所受影响越大^[6]。城市绿地空间是指城市建成区内的林地、公园、草地等^[7],具有缓解城市热岛,提高居民舒适度等作用^[8];城市水体指城市建成区内的河流、池塘、湖泊等水域,在排水、蓄水、美化城市和调节城市小气候具有重要作用^[9];城市裸土指建成区范围内没有植被、建筑物覆盖的土地^[10],是城市环境的主要污染源同时也是城市绿化

收稿日期:2019-09-16;修订日期:2020-04-13

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”课题(XDA20040400),第二次青藏高原综合科学考察研究资助“人类活动影响与生存环境安全评估”(2019QZKK0608)。

作者简介:陈馨(1993—),女,湖南保靖人,硕士研究生,主要从事土地利用/覆盖变化研究。E-mail:chenx.16s@igsrr.ac.cn

通讯作者:匡文慧(1978—),男,内蒙古乌兰察布人,副研究员,主要从事土地利用/覆被变化、城市生态学研究。E-mail:kuangwh@igsrr.ac.cn

的主要对象^[11]。

目前,对于城市地表覆盖的研究已有很多,谭春阳等^[12]研究了上海市1989~2009年近20年不透水地表的时空格局;Lu等^[13]研究了沿海和内陆大都市的不透水面积的动态变化,发现沿海大都市城市化速度比内陆快得多;匡文慧等^[5]分析了中美六大都市的城市内部土地覆盖结构,发现中国城市不透水地表密度较高;阿里木江·卡斯木等^[14-16]研究了中亚、西亚、中国新疆的城市空间扩张,将中亚国家城市化发展及首都城市时空变化进行了对比分析,发现中国新疆扩张程度最强,西亚次之、中亚相对较弱,但是对于在“一带一路”沿线上干旱区国家的典型城市地表覆盖特征尚未有充分研究。

本文的研究目的是对比分析1990~2015年努尔—苏丹市、阿拉木图市、乌鲁木齐市3个城市地表覆盖变化特征。基于Google Earth Engine(GEE, Google提供的对大量全球尺度地理科学数据进行在线可视化计算和分析处理的云平台),利用1990、2000、2010和2015年四期Landsat-5 TM、Landsat-8OLI/TIR遥感影像数据,采用改进的“植被-不透水面-土壤”(Vegetation-Impervious Surface-Soil, V-I-S)模型及线性光谱混合分析(Linear Spectral Mixture Analysis, LSMA)^[17-19]方法提取城市地表覆盖组分。在此基础上,对比三城市地表覆盖的变化特征,探究不同历史背景、国家、城市发展政策下的城市地表覆盖特征的扩张进程和特点,为生态城

市建设奠定基础。

2 研究区域与数据来源

2.1 研究区概况

本研究选择中亚第一大国哈萨克斯坦的首都城市努尔—苏丹市、大城市阿拉木图市以及中国西部第一大城市乌鲁木齐市作为研究对象(图1、表1)。三城市均处于世界上最大的区域性干旱地带上^[20],但城市背景、国家政策、经济发展水平存在较大的差异。1990~2015年间努尔—苏丹市人口由28.33万人增长到75.9万人,阿拉木图市人口由108.01万人增长到152.26万人,乌鲁木齐市人口由124.09万人增长到349.86万人。三城市作为各国的重要城市,经历的发展历程不同:努尔—苏丹市在1997年正式取代阿拉木图市成为哈萨克斯坦的首都,成为中亚最现代化的城市^[21-22]。阿拉木图市在1991年到1997年是哈萨克斯坦的首都,作为该国的第一大城市,经历了快速的城市建设以及国家发展重心的转移^[23]。乌鲁木齐市作为我国西北最大的省会城市,建省以来就是新疆区域的中心,在全疆具有重要的城市职能,自“丝绸之路经济带”提出后,成为向西开放的战略上的重要城市。在中国“一带一路”与哈萨克斯坦的“光明之路”两大战略的支持下,两国合作与交流更加紧密^[24-25],备受世界各国的关注。选取这3个城市,对于对比分析干旱区城市在新的经济全球化发展模式下的城市地表覆盖变化具有典型意义。

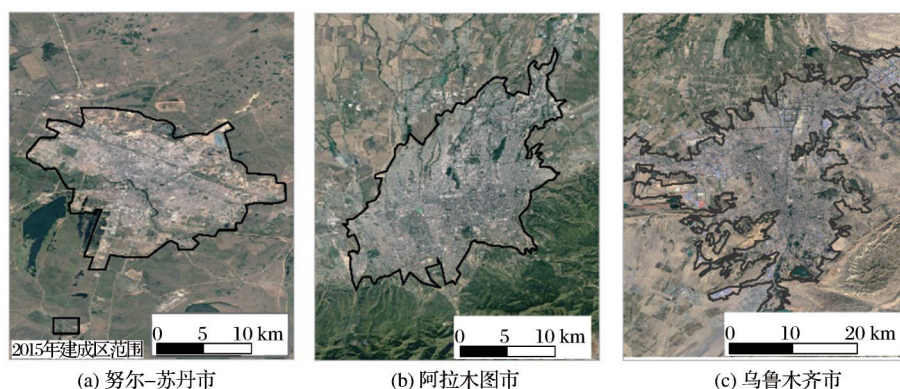


图1 典型城市示意图

Fig 1 Location of selected cities

2.2 数据与预处理

本研究的数据包括遥感影像数据、城市边界数据、人口经济数据以及其他辅助数据。遥感数据采用的Landsat 大气顶端表观反射率数据([\[vis.usgs.gov/\]\(http://vis.usgs.gov/\)\),具体数据信息如表2所示。由于影像质量的原因,为保证数据精度,选取了1990、2000、2010、2015年4个基准影像年份前后不超过两年中含云量最少且在植物成长季\(4~10月\)之间的](http://glob-</p></div><div data-bbox=)

表 1 城市概况
Table1 City overview

城市	国家	坐标	平均海拔 /m	年降水量 /mm	年均气温 /℃	气候类型	人口(万人) ^{注1}	
							1990年	2015年
努尔-苏丹市	哈萨克斯坦	71°30'E, 51°10'N	347	26.45	1.8	温带大陆性气候	28.33	75.9
阿拉木图市		76°55'E, 43°19'N	800	54.46	8.5	温带大陆性气候	108.01	152.26
乌鲁木齐市	中国	87°36'E, 43°48'N	800	15.6	7	中温带大陆性气候	124.09	349.86

注¹:城市人口数据来源于 United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, CD—ROM Edition

数据。城市边界数据主要由 Google Earth(50 m 分辨率)历史遥感影像得到。人口经济数据来自联合国数据(<https://population.un.org>);其他辅助数据为世界行政边界数据,来自国家地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

表 2 遥感影像数据源
Table2 Data sources of Landsat images

城市	数据类型	获取时间	行列号	代表年份
乌鲁木齐市	Landsat5	19890819	143/029	1990
	Landsat5	20010507	143/029	2000
	Landsat5	20090826	142/030	2010
	Landsat8	20140831	143/029	2015
努尔-苏丹市	Landsat5	19890604	154/024	1990
	Landsat5	19980924	155/024	2000
	Landsat5	20090618	155/024	2010
	Landsat8	20140819	155/024	2015
阿拉木图市	Landsat5	19900807	149/030	1990
	Landsat5	19971029	149/030	2000
	Landsat5	20100424	149/030	2010
	Landsat8	20140901	150/030	2015

3 研究方法

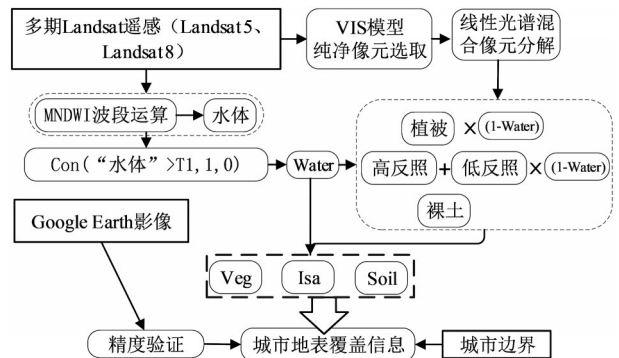
3.1 提取城市扩张边界

参考匡文慧等^[5]的研究,本文将城市建设用地边界内部定义为城市建成区,城市边界则是包括了城市中集中连片的部分以及近郊内联系密切的其他城市建设用地的非农业生产建设用地。由于数据获取的限制,本文将 3 个研究区统一采用如下方法获得城市边界,根据 Pan 等^[26]的研究,选择覆盖 3 个典型城市 4 个年份的影像,提取城市边界。首先,对 1990 年的城市范围进行矢量化,然后依次叠加且矢量化 2000、2010、2015 年的城市边界,由此得到四个年份的城市边界矢量图层。

3.2 提取城市地表组分信息及覆盖特征

城市地表覆盖主要分为不透水面、绿地、水体、裸土四大类。在 GEE 中,选取无云或云量少且处于

植被生长季的 4 个基准年每年一期的影像。而后,根据同期高分辨率遥感影像,选择对应纯净像元区域,根据 V-I-S 模型与 LSMA 模型^[17-18,28]进行混合像元分解,得到高反照、低反照、裸土、植被的影像。结合归一化植被差异水体指数(MNDWI)^[27],将水体提取出来,得到水体的 0-1 值;对比阈值提取出植被^[17],再根据高反照与低反照的影像,提取不透水组分,剩下的视为裸土。在此基础上,结合城市边界数据,裁剪出城市范围内地表组分信息,得到城市内部结构信息。具体流程如图 2 所示。



(注²: T1 表示水体的阈值, water 表示水体的 0-1 值, Veg 表示植被的组分, Isa 表示不透水面组分, Soil 表示裸土组分)

图 2 城市地表覆盖组分数据提取流程图

Fig.2 Flow chart of urban land cover extraction

采用建立距城市中心点不同距离的缓冲区方法,分析 1990~2015 年城市地表覆盖组分的变化特征(表 3)。首先,分别以 4 个基准年份城市建成范围的中心点为原点,以 0.5 km 为半径,建立缓冲区。然后,应用空间统计方法,获取不同距离缓冲区内城市地表覆盖组分的值。

3.3 精度验证

选取努尔-苏丹市、阿拉木图市、乌鲁木齐市 2015 年份的城市地表组分提取结果进行精度验证。首先,在 2015 年城市建成区范围内,分别随机选取了 100、100、140 个验证点。然后,根据这些验证点生成 90 m×90 m 网格,结合 2015 年 Google Earth 高

表3 建成区内缓冲区的个数

Table3 The number of buffers in the urban built-up areas

	努尔-苏丹市		阿拉木图市		乌鲁木齐市	
	缓冲区个数/个	最大缓冲区半径/km	缓冲区个数/个	最大缓冲区半径/km	缓冲区个数/个	最大缓冲区半径/km
1990	15	12	24	7.5	39	19.5
2000	24	12	24	12	41	20.5
2010	24	15.5	31	12	50	25
2015	27	17.5	35	13.5	58	29

分辨率遥感影像(2.16 m),在网格内进行人工解译和验证。具体操作是对照遥感影像,将网格划分为城市不透水地表、绿地、水体、裸土四大类。统计每个网格内各类别的占比,与网格内估算提取的四类城市土地组分占比做比较^[5,29]。采用平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)来验证城市内部结构的数据精度,具体公式如下:

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_i - Y_i|}{Y_i} \right)}{n} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{a}_i - \bar{a})^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (2)$$

其中 X_i , Y_i 分别为估算的地表组分比例与地面真实比例, n 为样本个数, a_i 为数值。

4 结果与分析

4.1 地表覆盖组分比例精度验证

精度验证的结果表明,2015年提取的3个城市地表覆盖组分的精度均较好。城市不透水地表组分努尔-苏丹市的提取精度最高(图3),3个城市的平均MRE为0.16, R^2 的平均值为0.82。其中,努尔-苏丹市、阿拉木图市、乌鲁木齐市 R^2 分别为:0.84、0.81、0.80,MRE分别为:0.17、0.12、0.19。城

市绿地组分3个城市的平均MRE为0.21, R^2 的平均值为0.83;裸土组分0.18为, R^2 的平均值为0.81。不同城市间的精度差异主要由于各城市选取的影像,以及城市本身地表结构的复杂程度、模型在不同植被状况的城市具有差异。努尔-苏丹市城市绿地较多,在遥感影像上易于与其他地物区分开来,而阿拉木图市和乌鲁木齐市城市内部裸土较多,在遥感图像上不易区分。

4.2 典型城市内部结构变化特征

努尔-苏丹市、阿拉木图市、乌鲁木齐市三城市的建成区范围在1990~2015年间持续扩张(图4、图5)。乌鲁木齐市城市建成区面积扩张最多且最快,从193 km²扩张到542.81 km²;阿拉木图市由于受资源、地形和迁都等因素影响,城市扩张面积最少,从142.48 km²扩张到268.71 km²;努尔-苏丹市作为新首都则从48.83 km²扩张到206.99 km²(图6(a1)、(a2))城市扩张速度最快的城市是乌鲁木齐市,平均每年扩张6.33 km²。从不同时段来看,阿拉木图市作为故都其城市建设有一定的基础,其建成区范围快速扩张的时间段为2000~2010年,较早于乌鲁木齐市和努尔-苏丹市(2010~2015年),20世纪90年代乌鲁木齐市经济开始发展,城市也大规模扩张,到了21世纪正式进入快速发展的阶段,而努尔-苏丹市城市的快速发展则在1997年哈萨克斯坦将首都迁至此。后。

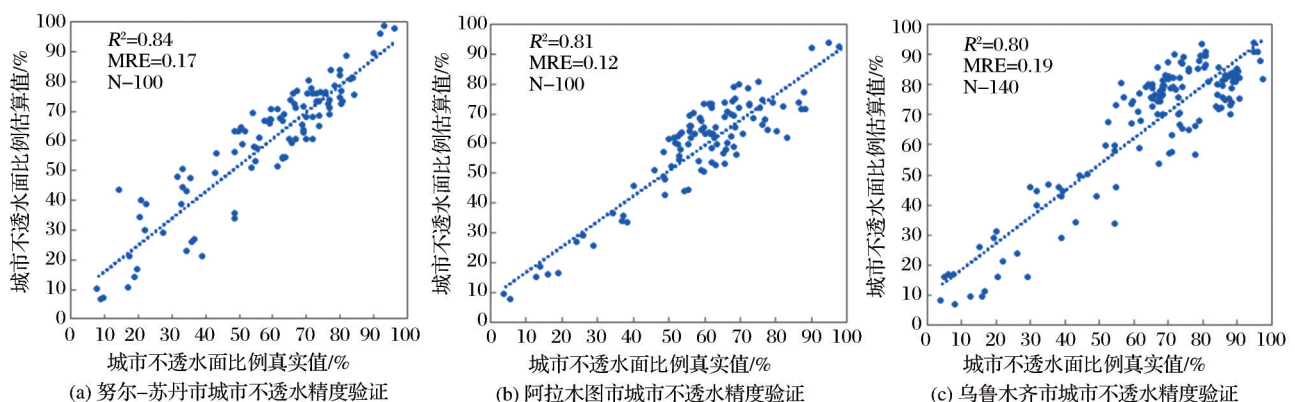


图3 不同城市的城市不透水地表组分精度验证

Fig.3 Accuracy verification of impervious surface area in different cities

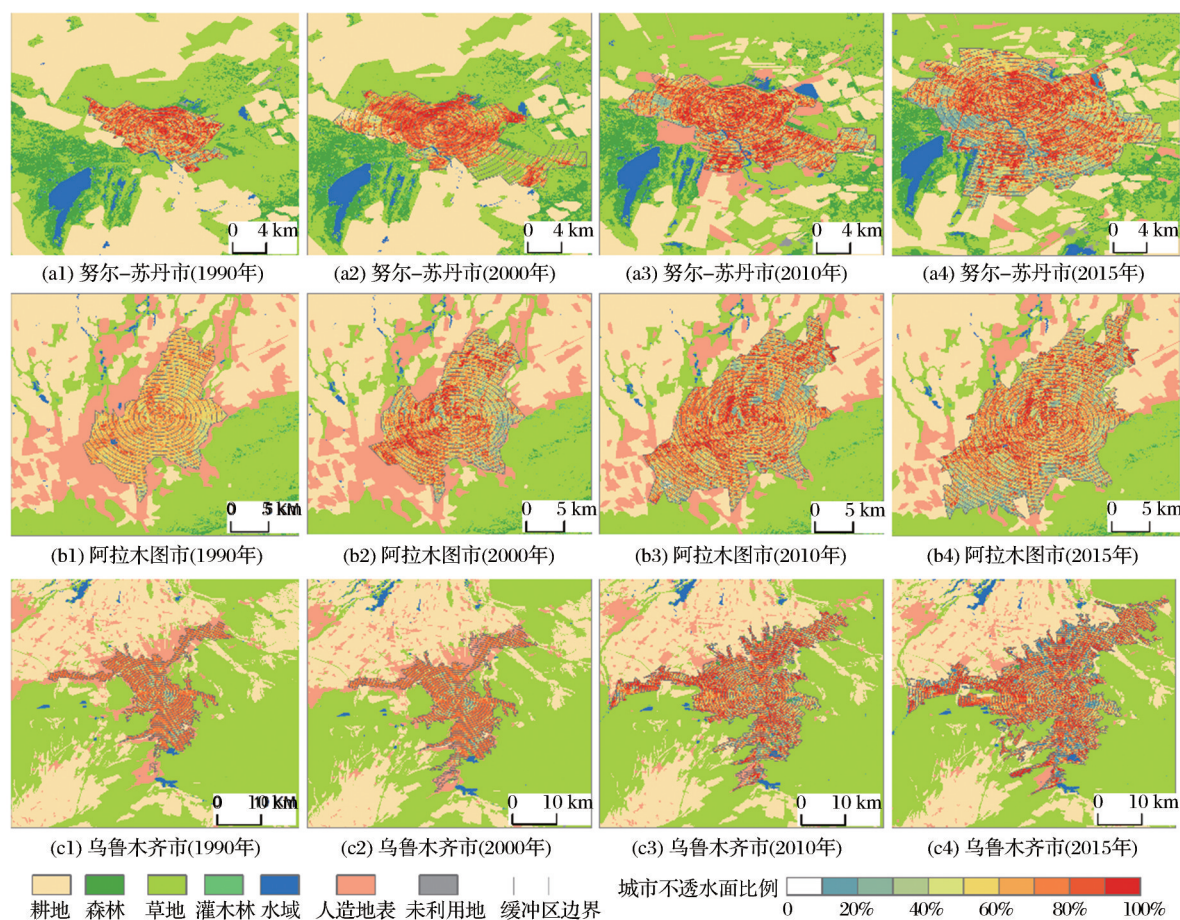
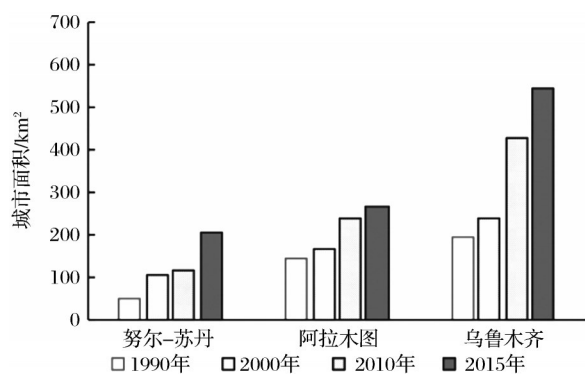


图 4 各城市不同年份城市地表不透水组分图

Fig.4 Surface impervious composition map of different cities in different years

图 5 各城市不同年份城市土地面积 (km^2)Fig.5 Urban land area in different years (km^2)

城市不透水面积增加最多的城市是乌鲁木齐市,从 132.13 km^2 增加到 410.17 km^2 ,其次是努尔—苏丹市,从 38.30 km^2 增加到 131.34 km^2 ,阿拉木图市增加最少,从 97.06 km^2 到 170.98 km^2 (图 6(b1)、(b2))。阿拉木图市城市不透水面积快速增加的时间段在 2000~2015 年,比乌鲁木齐市和努尔—苏丹市早;但乌鲁木齐市城市增加的速度较快。

3 个城市中,城市绿地面积增加最多的是努尔—苏丹市,城市绿化面积从 8.27 km^2 增加到 48.89 km^2 ,并且在 2010~2015 年间增长最多。努尔—苏丹市自 1990 年城市在建设的同时,也十分注重城市的绿地建设(图 6(c1)、(c2))。另外两座城市,由于城市规划及历史因素,在城市发展中城市绿地面积呈现波动趋势。乌鲁木齐市城市绿地总面积从 35.49 km^2 增加到 63.73 km^2 。阿拉木图市绿地总面积从 38.30 km^2 增加到 64.84 km^2 。

城市裸土面积除阿拉木图市在 1990~2000 年内减少了 5.09 km^2 ,其余城市的各时段内均呈增长趋势。城市裸土面积变化最大的是乌鲁木齐市,从 23.10 km^2 增加到 63.82 km^2 ,面积变化最小的是努尔—苏丹市。从不同时段来看,乌鲁木齐市与努尔—苏丹市增加最多时段在 1990~2000 年;而阿拉木图市则在 2010~2015 年间。在城市建成区范围扩张的同时 3 个城市的水体面积都在增加,其中增加最多的是努尔—苏丹市,共增加了 4.04 km^2 。

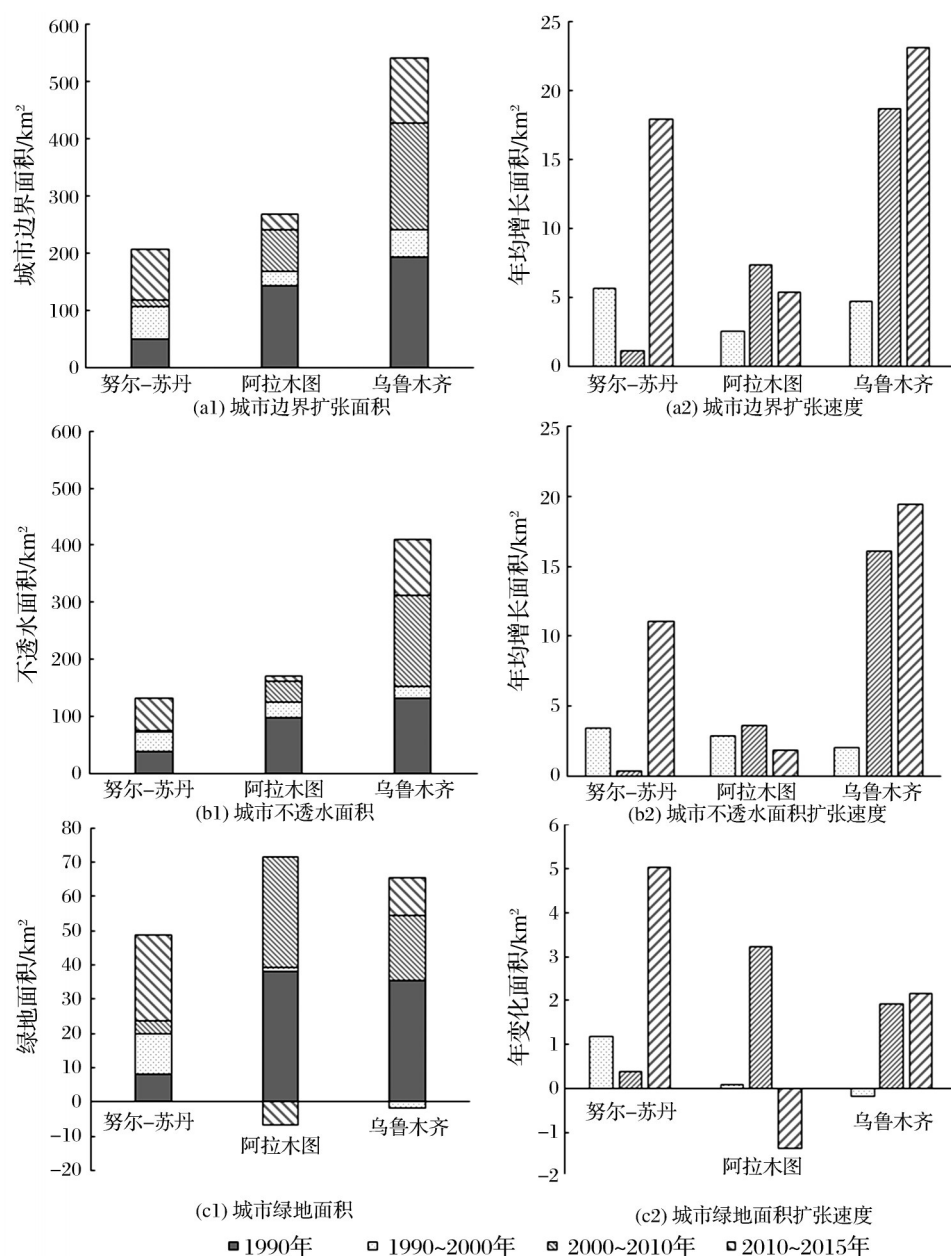


图6 城市内部结构面积比较

Fig. 6 Comparison of urban internal structural areas

4.3 典型城市间土地利用/覆盖差异

努尔—苏丹市城市不透水地表组分具有明显的持续下降趋势,与之相反,城市绿地组分、水体组分和裸土组分呈上升趋势(图7)。城市不透水地表组分共减少了14.99%;城市绿地组分共增加了6.68%;同时,城市裸土和水体组分分别增加了6.62%、1.69%。从不同时期来看,城市不透水地表组分在1990~2000年减少速度最快为0.97%/a。城市绿地组分增加的速度则刚好相反,2000年以后绿地组分增加的速度比2000年以前更快。城市裸土组分在1990~2010年间持续增加,2010年后开始

减少(图4(a1)、(a2)、(a3)、(a4))。

阿拉木图市城市不透水地表组分呈现先增加后下降,总体下降了4.49%;绿地组分先减少后增加后又减少,共减少了2.75%。1990~2015年间组分变化最大的是裸土,共增加了6.34%。2000~2010年城市不透水地表组分减少速度最快为0.78%/a,此间减少了7.77%。绿地、裸土、水体组分发生变化速度最快都在2010~2015年内,绿地组分以1.1%/a的速度减少了5.50%;裸土组分以1.60%/a的速度,增加了8.01%;水体组分以0.18%/a的速度,增加了0.91%(图4(b1)、(b2)、(b3)、(b4)、图7)。

乌鲁木齐市25 a间变化最大的是城市不透水地表组分和绿地组分(图4(c1)、(c2)、(c3)、(c4)、图7)。城市不透水地表组分先下降后增加,总体增加7.1%。绿地组分一直在减少,由18.39%减少到11.74%。裸土组分和水体组分变化不大,分别减少了0.21%、0.24%。1990~2000年城市向外扩张,但城市建设速度较慢,导致城市裸土组增加,城市不透水地表组分下降。2000年以后城市快速扩张,建设用地快速增加,城市不透水地表组分以0.82%/a的速度增加,15 a间增加了12.36%。城市绿地组分在1990~2000年绿地组分减少最大,减少了4.36%;在这阶段城市裸土组分增加较多,增加了9.82%;2000年以后由于城市建筑设施的完善,裸土面积减少了10.04%。

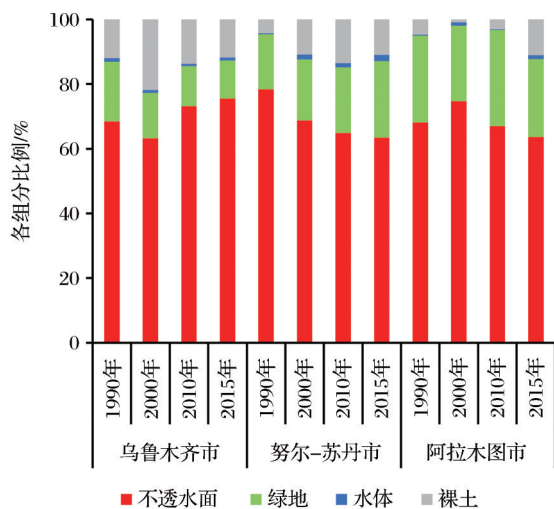


图7 各城市不同年份组分比较

Fig.7 Comparison of urban land cover fractions among different cities during 1990~2015

4.4 城市地表不透水组分差异及影响因素

分析城市内部不透水地表组分发现:在空间上3个城市距城市中心越近地表不透水组分越高,越远则越低的特征明显,时间上则表现出努尔-苏丹市城市地表不透水组分4个时间点变化幅度较大,阿拉木图市的城市地表不透水组分总体下降,乌鲁木齐市城市不透水地表组分则是增加(图8)。

1990~2000年间,在相同距离的缓冲区范围内,努尔-苏丹市的不透水组分差距较大,1990年的不透水组分比2000年高;阿拉木图市的不透水组分呈增加趋势,乌鲁木齐市则是下降趋势。努尔-苏丹市1990~2000年间城市人口增长率为30.99%,其在1994年被预备为哈萨克斯坦的新首都。由于政府对于新首都的城市生态环境十分重

视,在城市建设发展中注重城市内部结构的平衡,2000年城市不透水地表组分有明显下降的态势。阿拉木图市由于其丰厚的历史背景和经济基础,迁都后城市依然在快速发展,仍为国家文化和经济的中心,建成区范围内城市不透水地表的组分依旧在增加。乌鲁木齐市在改革开放的带动下,由于拆迁、扩建导致了不透水组分下降,裸土组分增加。

努尔-苏丹市、乌鲁木齐市不透水组分在2000~2010年间呈上升趋势,阿拉木图市不透水组分下降。哈萨克斯坦在1997年正式将首都由阿拉木图市迁往努尔-苏丹市后,努尔-苏丹市的城市建设加快,导致其不透水组分增加。乌鲁木齐市在2000年中国实施西部大开发战略的影响下,社会经济得到了高速发展,其城市建设、机场、公路等基础设施建设都取得显著成效。阿拉木图市由于考虑城市资源、人口、城市生态环境等因素,在城市发展的过程中开始注重城市绿地空间等的建设,其城市地表不透水组分开始下降,并且明显可以看出,2000~2010年扩张的城市建成区范围内不透水地表组分下降。

努尔-苏丹市在2000年举行了第二次首都规划设计大赛,对于新城的建设更加注重协调自然和共同发展,而阿拉木图市在城市可持续发展的影响下,完善了城市的生态规划,并实施了环境改善计划,所以这两城市的不透水组分在2010年后都呈下降趋势。乌鲁木齐市对于生态城市的建设也更加注重,尤其突出可见的是不透水组分在新建的城市范围内明显下降。

5 结 语

5.1 结 论

本文基于努尔-苏丹市、阿拉木图市、乌鲁木齐市三城市1990~2015年四期遥感影像采用混合像元分解法,提取城市内部结构不透水地表信息,进行地表结构特征的比较分析,揭示了不同城市的地表结构组成具有明显的差异。得出以下主要结论:

(1)各城市扩张进程明显,城市间的差异也明显。乌鲁木齐市城市边界范围扩张面积最大为349.81 km²,城市不透水地表面积增加最多,为278.04 km²,其次是努尔-苏丹市,阿拉木图市;3个城市绿地面积都有所增加,增加最多的是努尔-苏丹市40.62 km²;3个城市的城市边界扩张最快和城

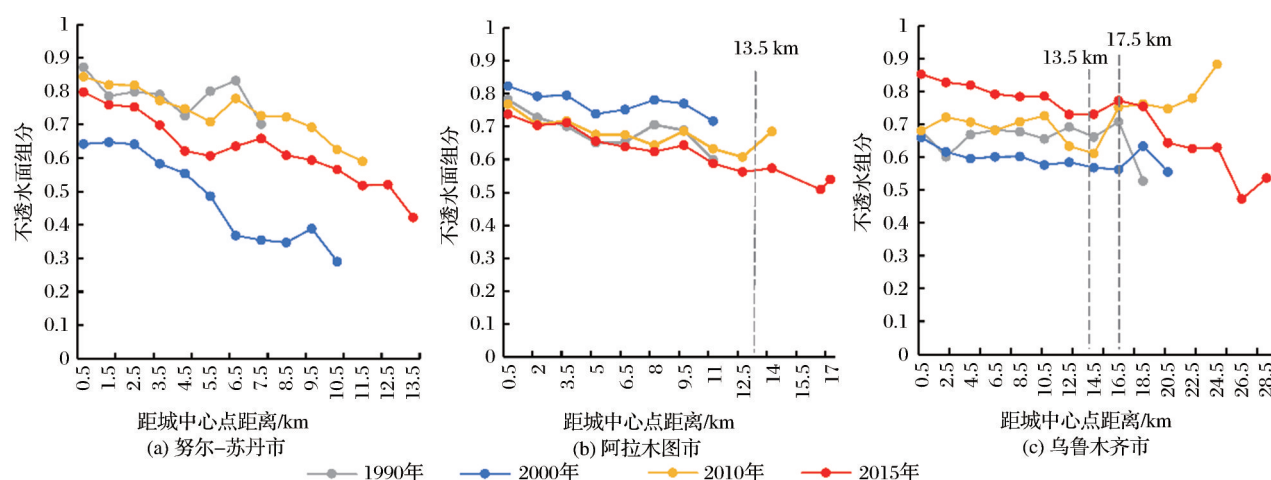


图8 距城市不同距离内城市不透水地表组分

Fig.8 Urban impervious surface fraction at different distances from the center of cities

市不透水地表扩张最快的时间段相同,努尔—苏丹市和乌鲁木齐市为2010~2015年,阿拉木图市为2000~2010年。

(2)各城市地表覆盖组分变化差异明显。城市不透水地表组分努尔—苏丹市变化最大,减少了14.9%,其次为乌鲁木齐市增加了7.10%,阿拉木图市变化最小,减少了4.49%;城市绿地组分努尔—苏丹市变化最大增加了6.68%,乌鲁木齐市减少了6.65%,阿拉木图市减少了2.75%。

(3)城市地表覆盖变化受到当地城市规划和政策影响。努尔—苏丹市由于迁都初期,城市建设进程大,前10 a其城市地表不透水组分变化幅度较大,同时由于重视生态城市理念,其城市不透水地表组分较低。阿拉木图市在城市发展的过程中城市不透水地表组分也呈持续下降趋势。乌鲁木齐市在城市扩张的同时,城市不透水地表组分自2000年以来持续增加。

5.1 讨论

本文选择了中国和哈萨克斯坦两国的3个干旱区典型城市,在GEE云平台上对遥感影像进行混合像元分解,提取1990、2000、2010和2015年的城市地表覆盖信息,并对此进行了精度验证。研究发现,三城市的城市面积均一直扩张,其中乌鲁木齐市的城市扩张面积最大,城市不透水组分增加最大,这与阿力木江·卡斯木等(2012、2013、2017)^[14-16]、Pan等(2017、2019)^[6,26]对“一带一路”沿线城市与中国新疆—中亚城市空间扩张的结论基本一致。由于对努尔—苏丹市和阿拉木图市的城市经济、人口、坡度、地形以及河流等数据的缺乏,本研究没有对城市地表覆盖变化的影响因素进行深入的分析,

仅从国家政策和历史背景等方面进行了简单分析。区域自然本底条件和社会经济对于城市地表覆盖变化也会产生一定的影响^[13,30-31],因此,在下一阶段的工作中,将综合自然环境因素、社会经济因素、历史背景以及国家政策等因素进行城市地表覆盖变化及其影响因素的研究。

参考文献 (References):

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, [DB/OL]. <https://population.un.org/wup/Download/>, 2018, 2019.
- [2] Li X, Zhou W, Ouyang Z. Forty Years of Urban Expansion in Beijing: What is the Relative Importance of Physical, Socio-economic, and Neighborhood Factors [J]. *Applied Geography*, 2013, 38(1):1-10.
- [3] McDonnell M J, Macgregor-Fors I. The Ecological Future of Cities [J]. *Science*, 2016, 352(6288): 936.doi:10.1126/science.Aaf3630.
- [4] Voorde T V D, Wolfgang J, Frank C. Mapping form and Function in Urban Areas: An Approach based on Urban Metrics and Continuous Impervious Surface Data [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2011, 102(3): 143-155.
- [5] Kuang Wenhui, Chi Wenfeng, Shi Wenjiao. Spatio-temporal Characteristics of Intra-urban Land Cover in the Cities of China and USA from 1978 to 2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 883-895.[匡文慧,迟文峰,史文娇. 中国与美国大都市区城市内部土地覆盖结构时空差异 [J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 883-895.]
- [6] Pan T, Lu D, Zhang C, et al. Urban Land-Cover Dynamics in Arid China based on High-Resolution Urban Land Mapping Products [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9 (7): 730. doi: 10.3390/RS9070730.
- [7] Kuang Wenhui, Chen Lijun, Liu Jiyan, et al. Remote Sens-

- ing-based Artificial Surface Cover Classification in Asia and Spatial Pattern Analysis[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2016, 46(9): 1162-1179.[匡文慧,陈利军,刘纪远,等.亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析[J].中国科学:地球科学,2016,46(9):1162-1179.]
- [8] Nor A N M, Abdullah S A. Developing Urban Green Space Classification System Using Multi-Criteria: The Case of Kuala Lumpur City, Malaysia[J]. *Journal of Landscape Ecology*, 2019, 12(1):16-36.
- [9] Chou Baoxing . The Connotation, Ways and Prospects of Sponge City (LID) [J]. *Construction Science and Technology*, 2015(1): 11-18.[仇保兴.海绵城市(LID)的内涵、途径与展望[J].建设科技,2015(1):11-18.]
- [10] Chi W, Shi W, Kuang W. Spatio-temporal Characteristics of Intra-urban Land Cover in the Cities of China and USA from 1978 to 2010[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(1): 3-18.
- [11] Hou Langong, Fu Juanlin. Research on Landscape Ecological Effects of Urban Bare Soil [J]. *Shanxi Architecture*, 2008(13): 344-345.[符娟林,侯兰功.城市裸土地景观生态效应研究[J].山西建筑,2008(13):344-345.]
- [12] Tan Chunyang, Kuang Wenhui, Xu Tianshu, *et al.* Analyzing Spatio-temporal Pattern of Impervious Surface for Recent Two Decades in Shanghai Analyzing Spatio-temporal Pattern of Impervious Surface for Recent Two Decades in Shanghai [J]. *Journal of Geomatics*. 2014, 39(3):71-74.[谭春阳,匡文慧,徐天蜀,等.近20年上海市不透水地表时空格局分析[J].测绘地理信息,2014,39(3):71-74.]
- [13] Lu D, Li L, Li G. *et al.* Examining Spatial Patterns of Urban Distribution and Impacts of Physical Conditions on Urbanization in COASTAL and Inland Metropolises [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1101.doi:10.3390/RS/0071101.
- [14] Alimujiang kasimu , Tang Bing, Anwaer Maimaitiming . Human Geography, Study on Spatio-Temporal Dynamics of Urban Expansion In Five Central Asian Cities based on Remote Sensing Data [J]. *Human Geography*, 2012, 27(4): 83-87.[阿里木江·卡斯木,唐兵,安瓦尔·买买提明.基于遥感数据的中亚五国城市时空扩展变化研究[J].人文地理,2012,27(4):83-87.]
- [15] Alimujiang kasimu , Tang Bing, Anwaer Maimaitiming . Study on the Urbanization Development Characteristics of Central Asia (1960-2009) [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1), 21-26.[阿里木江·卡斯木,唐兵,安瓦尔·买买提明.近50年来中亚五国城市化发展特征研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(1):21-26.]
- [16] Alimujiang kasimu . Research on the Urban Expansion of Xinjiang in China, Central Asia and West Asia along the Belt and Road [J]. *Economic Geography*, 2017, 37(5): 51-57.[阿里木江·卡斯木.“一带一路”沿线之中国新疆—中亚—西亚城市空间扩张[J].经济地理,2017,37(5):51-57.]
- [17] Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) Model for Urban Ecosystem Analysis Through Remote Sensing: Comparative Anatomy for Cities [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [18] Wu J, Jenerette G.D, David J.L. Linking Land-use Change with Ecosystem Processes: A Hierarchical Patch Dynamic Model. In: Guhathakurta S. (eds) *Integrated Land Use and Environmental Models* [M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [19] Xu Hanqiu, Wang Meiya. Remote Sensing-based Retrieval of Ground Impervious Surfaces [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1270-1289.[徐涵秋,王美雅.地表不透水面信息遥感的主要方法分析[J].遥感学报,2016,20(5):1270-1289.]
- [20] Liu Yuzhi, Wu Chuqiao, Jia Rui, *et al.* An Overview of the Influence of Atmospheric Circulation on the Climate in Arid and Semi-arid Region of Central and East Asia [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2018, 48(9): 1141-1152.[刘玉芝,吴楚樵,贾瑞,等.大气环流对中亚干旱半干旱区气候影响研究进展[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1141-1152.]
- [21] Bi Geng, Assan M. The Status Quo of Astana City Image Spreading in China and Its Improvement Countermeasures [J]. *Media Forum*, 2019, 2(3): 4-6.[毕耕,ASSAN M.阿斯塔纳城市形象在中国的传播现状及其改进对策[J].传媒论坛,2019,2(3):4-6.]
- [22] Wei Youyin. Cultural Impression of the Capital of Kazakhstan [N]. *China Culture Daily*, 2019, 05-22 (004).[未酉寅.哈萨克斯坦首都文化印象[N].中国文化报,2019,05-22(004).]
- [23] Bo Teer, Gao Hong. The Role of Kazakhstan in the Construction of the Silk Road [J]. *Reform & Opening*, 2017(15): 62-63.[波特尔,高宏.哈萨克斯坦在丝绸之路建设中的作用[J].改革与开放,2017(15):62-63.]
- [24] Madina B. The path of the "Bright Road" and the "Silk Road Economic Belt" [J]. *Sci-Tech & Development of Enterprise*, 2018, 438(4):43-45.[Madina B.“光明之路”与“丝绸之路经济带”的对接路径[J].企业科技与发展,2018,438(4):43-45.]
- [25] Li Junyi. Research on Trade Development between China and Kazakhstan under the Background of “Belt and Road” [J]. *Marketing Management Review*, 2019(1): 248.[李俊毅.“一带一路”背景下中国与哈萨克斯坦的贸易发展研究[J].现代营销(下旬刊),2019(1):248.]
- [26] Pan T, Kuang W, Hamdi R *et al.* City-Level Comparison of Urban Land-Cover Configurations from 2000 - 2015 across 65 Countries within the Global Belt and Road [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1515.doi:10.3390/rs11131515.
- [27] Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 19(5): 589-595.[徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,19(5):589-595.]
- [28] Kuang Wenhui, Yang Tianrong, Liu Alin, *et al.* An Eco City Model for Regulating Urban Land Cover Structure and Thermal Environment: Taking Beijing as an Example [J]. *Science China Earth*, 2017, 47(7): 847-859.[匡文慧,杨天荣,刘爱琳,等.城市地表覆盖结构组分与热环境调控模型(EcoCity)

- 研究——以北京城市为例[J]. 中国科学:地球科学, 2017, 47(7): 847-859.]
- [29] Kuang W, Liu J, Zhang Z, *et al.* Spatiotemporal Dynamics of Impervious Surface Areas Across China During the Early 21st Century[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(14): 1691-1701.
- [30] Schneider A, Mertes C M. Expansion and Growth in Chinese Cities, 1978~2010 [J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(2): 24008. doi: 10.1088/1748-9326/19121024008.
- [31] Park H, Fan P, John R, *et al.* Urbanization on the Mongolian Plateau after Economic Reform: Changes and Causes[J]. Applied Geography, 2017, 86: 118-127. doi: 10.1016/J. Ap-geog.2017.06.026.

Remote Sensing Monitoring and Comparison of Urban Land Cover Changes in Typical Cities in China-Kazakhstan Arid Region based on Cloud Platform

Chen Xin, Kuang Wenhui

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern And Simulation, Institute of Geographic Sciences And Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: Urban land cover composition is the key factor affecting the living environment and urban ecosystem service. Based on the Google Earth Engine platform, Landsat 5/8 remote sensing image data were used to adopt the improved "Vegetation-Impervious Surface-Soil" model and linear spectral mixed decomposition method. The variation characteristics of land cover in Nur-Sudan, Almaty, Urumqi cities from 1990 to 2015 were compared and analyzed. The results show that the urban built-up area of Urumqi city expanded the largest area of the three cities from 1990 to 2015, with an expansion of 349.81 km², followed by Nur-Sultan, with a city expansion area of 158.16 km². As the capital of Kazakhstan was relocated from Almaty to Nur-Sultan, the city of Almaty expanded the slowest during the entire period, with a total expansion of 126.23 km². In the urban built-up area, the urban surface in Urumqi increased by 7.10% from 1990 to 2015, and the Nur-Sultan and Almaty decreased by 14.9% and 4.49%, respectively. The green space component of the built-up area, Nur-Sultan increased by 6.68% from 1990 to 2015, while Urumqi and Almaty decreased by 6.65% and 2.75%, respectively. The different surface cover patterns of cities are different for different reasons. Urumqi is mainly supported by national policies, and Almaty is known for its historical background and urban planning, while the rapid development of Nur-Sudan was affected by the relocation of Kazakhstan.

Key words: Impervious surface; Green space; Urban Land Cover Change; Arid areas; Google Earth Engine