

旱区城市扩展过程区位因素研究 ——以中国呼包鄂榆城市群为例

宋世雄^{1,2}, 张金茜^{1,2}, 刘志锋^{1,2}, 何春阳^{1,2}

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 人与环境系统可持续研究中心, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部自然资源学院, 土地资源与区域发展研究中心, 北京 100875)

摘要:认识城市扩展过程的区位因素特征对旱区城市可持续发展具有重要意义。为此,以中国呼包鄂榆城市群为例,利用随机森林方法量化区位因素对城市扩展过程的影响。研究发现:随机森林方法能够有效地量化旱区城市扩展过程区位因素的基本特征,模型的AUC(area under curve)值达到0.97。同时,到城市中心距离对区域1980—2017年城市扩展过程影响最大,重要性达到42.62%。国道、高速公路和铁路等交通因素也有重要的影响,重要性均大于10%。此外,所有区位因素对区域城市扩展过程的影响均存在尺度效应,其中地形、气候和河流对城市扩展过程影响的尺度效应相对比较明显。地形、气候和河流对大城市影响的重要性分别为27.17%、20.23%和8.12%,分别是其对小城市影响的4.02倍、3.91倍和2.36倍。因此,建议在旱区城市建设中,应该高度重视地形、气候和河流等自然要素的约束作用,因地制宜地进行城市规划和建设。

关键词:随机森林;区位因素;城市扩展过程;旱区;呼包鄂榆城市群

旱区是指多年平均降水量与多年平均潜在蒸散量之比小于0.65的地区^[1]。全球有38%的人口生活在旱区,该地区具有生态环境脆弱、城市化迅速以及对气候变化敏感等特点,是全球可持续发展的关键区域之一^[1]。城市扩展过程是指城市化进程中城市土地的增长过程^[2],它在提升人类福祉的同时,也为区域环境带来严重的影响^[3-5]。交通、地形和位置等区位因素能够通过影响城市扩展的空间格局,进而改变城市扩展对区域环境的影响^[6-8]。近年来,伴随着快速的社会经济发展,旱区经历了快速的城市扩展过程^[9,10],这一过程对区域的自然生境^[11]、生物多样性^[12]以及环境可持续性^[3]等产生了严重影响。因此,充分认识城市扩展过程的区位因素特征,对于缓解旱区的环境压力以及实现区域城市的可持续发展具有重要意义。

目前,已有研究通过定性或定量方法来揭示旱区城市扩展过程的区位因素特征。定性分析方面,潮洛濛等^[13]分析了区位因素对呼和浩特市1987—2006年城市扩展过程的影响。李骞国等^[14]分析了影响张掖市1977—2010年城市扩展过程的区位因素。定量分析方面,黄庆旭等^[15]利用Logistic回归方法分析了坡度、高程和交通等区位因素对北京市1991—2004年城市扩展的影响。Shafizadeh-Moghadam等^[16]使用地理加权Logistic回归方

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971270, 41971271)

作者简介: 宋世雄(1990-),男,陕西乾县人,博士研究生,主要从事城市扩展过程模拟及其影响研究。

E-mail: ssx1990@126.com

通讯作者: 刘志锋(1986-),男,江西景德镇人,博士,副教授,主要从事景观地理与景观可持续科学研究。

E-mail: Zhifeng.Liu@bnu.edu.cn

法分析了印度孟买 1973—2010 年城市扩展的区位因素。Wu 等^[17]通过 Logistic 回归方法探索区位因素对京津冀城市群 1980—2010 年城市扩展的影响。可以看出, 现有研究主要通过 Logistic 回归方法定量分析旱区城市扩展过程的区位因素特征。然而由于 Logistic 回归方法不能很好拟合非线性问题并且结果会受到多元共线性的影响, 从而导致对旱区城市扩展过程区位因素特征的认识不够准确。

随机森林是一种机器学习算法, 它能够很好地拟合非线性关系, 而且拟合结果不会受到多元共线性的影响, 同时可以评估特征因素的重要性^[18]。当前, 随机森林已被应用于城市土地利用变化区位因素研究。如 Kamusoko 等^[19]利用随机森林分析了影响津巴布韦 Harare 地区城市土地扩展的主要区位因素。Zhang 等^[20]利用随机森林分析了中国惠州城市内部土地利用变化区位因素的特征。但利用随机森林方法在旱区开展的相关研究仍比较少。

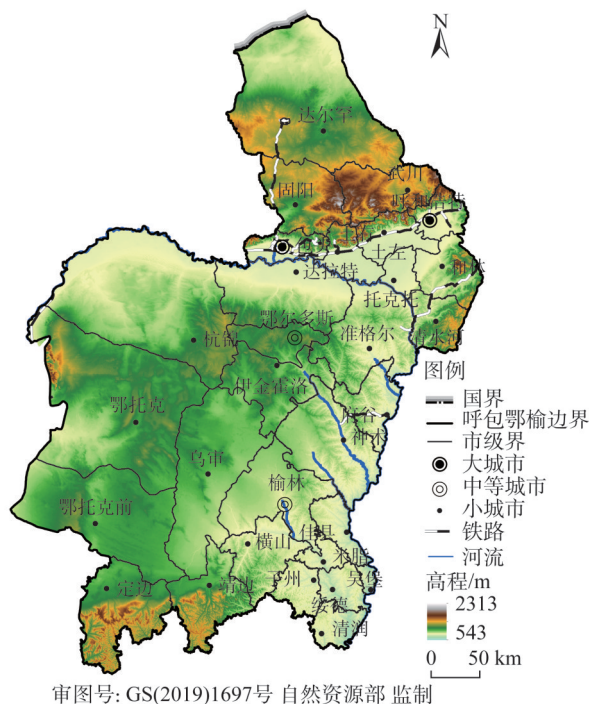
鉴于此, 本文的目的是利用随机森林方法分析旱区城市扩展过程的区位因素特征。首先, 以中国呼包鄂榆城市群为例, 量化区域 1980—2017 年城市扩展过程的时空格局。然后, 利用随机森林方法分析影响区域城市扩展过程的区位因素。最后, 根据区位因素的特征, 为区域未来城市扩展提出相应的政策建议, 以期为区域可持续发展提供帮助。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

呼包鄂榆 (Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin, HBOY) 城市群位于中国北方旱区中部, 在 $36^{\circ}48'50''\sim 42^{\circ}44'5''N$ 、 $106^{\circ}28'16''\sim 122^{\circ}18'7''E$ 之间, 总面积为 17.46 万 km^2 (图 1)。该地区平均海拔约 1300 m。气候类型为温带大陆性季风气候, 多年平均气温约为 8°C , 多年平均降水量约为 320 mm ^[21]。根据 2017 年的人口数据, 参考 Huang 等^[22]的方法, 可将区域内 30 个城市划分为 2 个大城市 (总人口在 100 万~500 万之间)、2 个中等城市 (总人口在 50 万~100 万之间) 和 26 个小城市 (总人口小于 50 万)。

20 世纪 80 年代以来, 呼包鄂榆城市群经历了快速的城市扩展过程。区域生产总值从 1980 年的 25.32 亿元增长到 2017 年的 13722.25 亿元, 年均增长 370.19 亿元, 年均增长率为 14.62%。其中, 第二产业和第三产业分别由 12.62 亿元和 6.07 亿元增长到



注: 本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作, 底图无修改, 下同。

图1 研究区概况

Fig. 1 The study area (Huhhot-Baotou-Ordos-Yulin, HBOY for short)

6635.86亿元和6600.76亿元,年均增长率分别为14.18%和29.36%^[23-25]。该地区非农人口从1990年的239.87万人增加到2010年的462.13万人,增长了92.66%^[26]。城市土地面积从1990年的151.29 km²增加到了2017年的1230.86 km²,增长了8.14倍^[27]。途经研究区的高速公路主要有北京—拉萨高速公路、荣成—乌海高速公路和包头—茂名高速公路,国道主要包括109和110国道,铁路主要有包头—兰州、包头—西安和北京—包头等铁路线,还包括呼和浩特—包头高铁和呼和浩特—鄂尔多斯动车等。未来,区域将建设呼和浩特—准格尔—鄂尔多斯、准格尔—朔州、蒙西—华中和神木—瓦塘等铁路,建设保德—榆林、呼和浩特—朔州、赛罕塔拉—二连浩特等高速公路^[23]。

1.2 数据来源

本文使用的数据主要包括Landsat遥感影像、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、气象数据和地理信息辅助数据。Landsat遥感影像来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。其中,1980年的影像数据来源于Landsat MSS传感器,空间分辨率为60 m;1990年、2000年、2010年和2017年的影像数据来源于Landsat TM/OLI传感器,空间分辨率为30 m。DEM数据来源于美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)发布的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) DEM数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>),空间分辨率为90 m。研究区周边29个气象观测站数据来自于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/site/index.html>),主要包括气温和相对湿度数据。降雨数量来自中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=229>)。基础地理信息数据包括研究区的行政边界、县级驻地和河流等,数据来源于国家基础地理信息中心(<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。2000年、2009年和2016年的高速公路、铁路、国道等交通数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(<http://geodata.pku.edu.cn>)。区域1990年交通数据是基于已有交通数据结合谷歌地球高分影像目视解译获取。为了保证数据一致性,所有数据采用统一的Albers投影,并重采样为30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 提取区域1980—2017年城市土地信息

基于Google Earth Engine平台在线获取Landsat MSS/TM/OLI影像,并通过目视解译提取呼包鄂榆城市群1980—2017年城市土地信息(图2)。主要包括以下三个步骤:首先,提取潜在的城市土地信息。参考Liu等^[28]的研究,基于预处理后的Landsat影像分别计算归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、归一化建筑指数(Normalized Difference Built-up Index, NDBI)和归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)指数,然后采用阈值法提取该区域潜在的城市土地信息。具体公式如下:

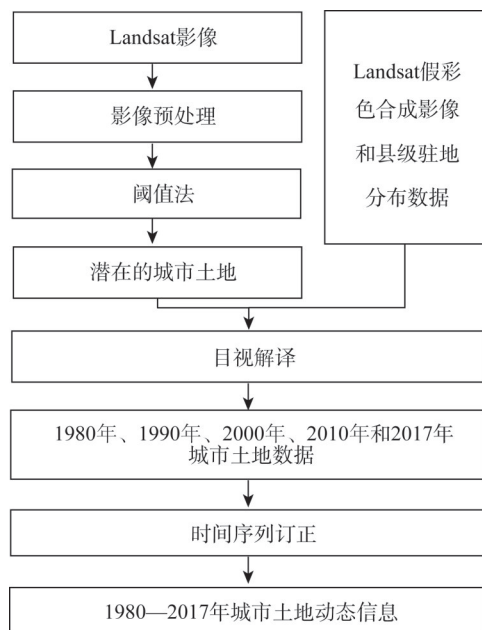


图2 区域近四十年城市土地提取流程

Fig. 2 The flow chart for extracting urban land of the HBOY from 1980 to 2017

$$UL_{(n,i)} = \begin{cases} 1, & (NDVI_{(n,i)} \leq 0.15) \& (NDBI_{(n,i)} \geq -0.1) \& (NDWI_{(n,i)} \leq 0.05) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $UL_{(n,i)}$ 表示第*i*个像元第*n*年是否为潜在城市，1表示潜在城市，0表示非潜在城市； $NDVI_{(n,i)}$ 表示第*i*个像元第*n*年的NDVI值； $NDWI_{(n,i)}$ 表示第*i*个像元第*n*年的NDWI值； $NDBI_{(n,i)}$ 表示第*i*个像元第*n*年的NDBI值。其次，获取1980年、1990年、2000年、2010年和2017年的城市土地数据。在潜在城市土地信息基础上，结合Landsat假彩色影像和县级驻地分布数据，进行目视解译获取城市土地数据。最后，获取1980—2017年城市土地动态信息。参考He等^[11]的研究，对城市土地数据进行时间序列订正。时间序列订正的基本假设是城市土地为持续增长的，通过订正可得到区域1980—2017年的城市土地动态信息。具体公式如下：

$$UL_{(n,i)} = \begin{cases} 0 & UL_{(n+1,i)} = 0 \\ 1 & UL_{(n+1,i)} = 1 \& UL_{(n-1,i)} = 1 \\ UL_{(n,i)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $UL_{(n,i)}$ 、 $UL_{(n+1,i)}$ 和 $UL_{(n-1,i)}$ 分别表示第*i*个像元第*n*年、第*n*+1年和第*n*-1年是否为城市，1表示城市，0表示非城市。

1.3.2 分析区域1980—2017年城市扩展过程

参照董宁等^[29]的研究，选择斑块密度（Patch density, PD）、景观形状指数（Landscape shape index, LSI）和景观扩展指数（Landscape expansion index, LEI）等三个指标来表征城市景观的破碎度和形状以及城市扩展模式。其中PD的计算公式如下：

$$PD = N/A \quad (3)$$

式中：*N*表示景观中斑块的总数（个）；*A*为景观总面积（ hm^2 ）。PD值越大，表示斑块的破碎化程度越高。

LSI的计算公式如下：

$$LSI = 0.25E/\sqrt{A} \quad (4)$$

式中：*E*表示景观中斑块边界的总长度（m）；*A*为景观总面积（ hm^2 ）。LSI值越大，表示斑块的形状越不规则。

LEI的计算公式如下：

$$LEI = \frac{A_o}{A_o + A_v} \times 100\% \quad (5)$$

式中： A_o 表示新增城市用地的缓冲区与已有城市用地相交的面积（ m^2 ）； A_v 表示该缓冲区与非城市用地相交的面积（ m^2 ）。参考Liu等^[30]的研究，新增城市用地缓冲区设置为1 m。根据LEI值的不同，可将城市扩展模式分成蛙跃型、边缘型和内填型三种类型^[30]。蛙跃型是指新增的城市土地与已有城市土地之间没有直接接触的扩展模式，即 $LEI=0$ 。边缘型是指在已有城市土地的边缘继续扩展的模式，即LEI值在0~50之间。内填型是指新增城市土地被已有城市土地包围的区域的扩展模式，即LEI在50~100之间^[30]。

1.3.3 分析区域1980—2017年城市扩展过程的区位因素

随机森林模型可以通过计算袋外数据错误率来得到因素的重要性评分^[18,20]。首先，随机森林模型通过有放回的随机抽样法在原始数据中随机选择部分数据作为样本数据集，

未被选择的数据成为袋外数据。然后,针对样本数据进行多个决策树建模,并通过众数投票的方式得到样本数据的训练结果。最后,通过与袋外数据进行比较,计算模型的预测错误率来得到影响因素的重要性评分。

参考相关研究^[13,15,31,32]以及数据的可获取性,首先从自然和人文两个方面选择了9个影响区域城市扩展过程的区位因素,分别是高程、坡度、坡向、到河流(主要河流)距离、干燥度、到高速公路距离、到铁路距离、到国道距离和到城市中心距离,并使用ArcGIS 10.6进行空间化(表1)。

然后,通过四个步骤构建随机森林模型以分析区位因素对城市扩展过程的影响(图3)。第一,随机选择66%的区位因素数据为样本数据集,34%为袋外数据。第二,构建100个决策树对样本数据集进行训练,并与袋外数据进行对比计算袋外得分,以此评估模型的精度。一般得分越高代表模型精度越好,在本文中,袋外得分大于0.95时认为模型精度符合要求。第三,利用袋外数据与每个决策树计算误差(e_1),然后随机调换袋外数据中的某一个因素 j 的顺序得到新的袋外数据,并再次计算误差(e_2)。第四,将每个决策树 e_1 和 e_2 的差值标准化后求均值即可得到因素 j 的重要性。本文将因素的重要性得分作为判断某一因素对城市扩展过程影响程度的指标,得分越高说明该因素对城市扩展过程的影响越大。

表1 区位因素选取及其空间化方法

Table 1 The location factors and spatialization methods

类别	指标	空间化方法
自然因素	高程	基于DEM数据,利用ArcGIS的地表分析模型进行计算坡度和坡向;利用ArcGIS的距离分析模型计算到河流距离
	坡度	
	坡向	
	到河流距离	参考相关研究 ^[1] ,利用多年平均降雨量与多年平均潜在蒸散量之比计算
	干燥度	
人文因素	到城市中心距离	利用ArcGIS的距离分析模型计算到城市中心、高速公路、铁路和国道距离
	到高速公路距离	
	到铁路距离	
	到国道距离	

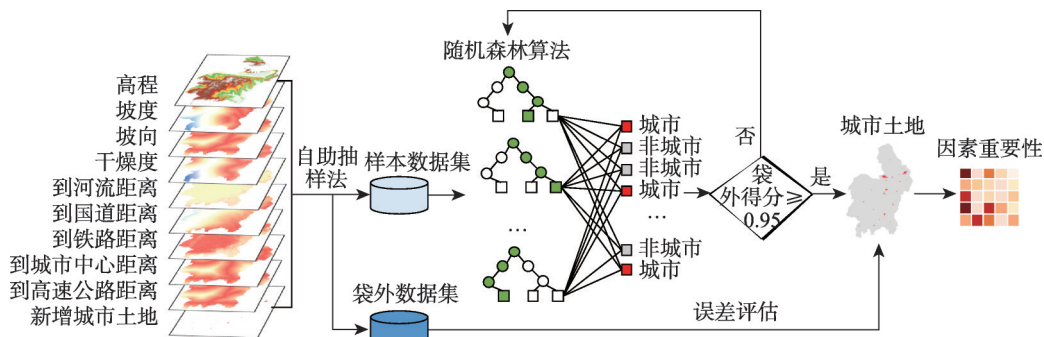


图3 随机森林结构

Fig. 3 The structure of random forest

2 结果分析

2.1 区域城市扩展过程

区域1980—2017年经历了快速的城市扩展过程(图4)。全区城市土地面积由81.57 km²增加到1231.33 km²,年均增长率为7.61%(图5a、表2)。区域1980—2017年新增城市土地主要分布在大城市,大城市新增城市土地占全区扩展总面积的49.10%。在大城市中,

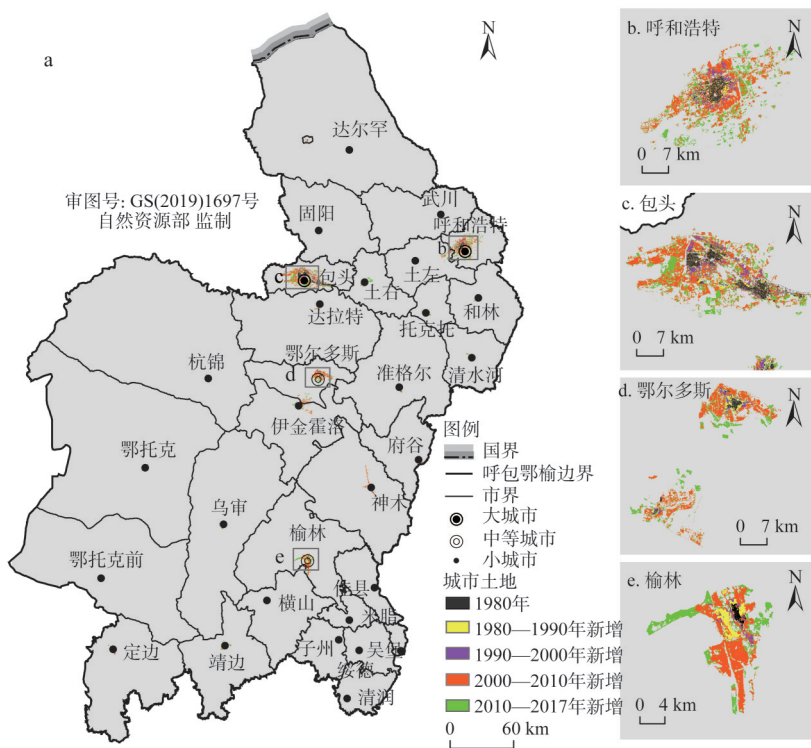


图4 1980—2017年区域城市土地的空间格局

Fig. 4 The spatial patterns of urban land in the HBOY from 1980 to 2017

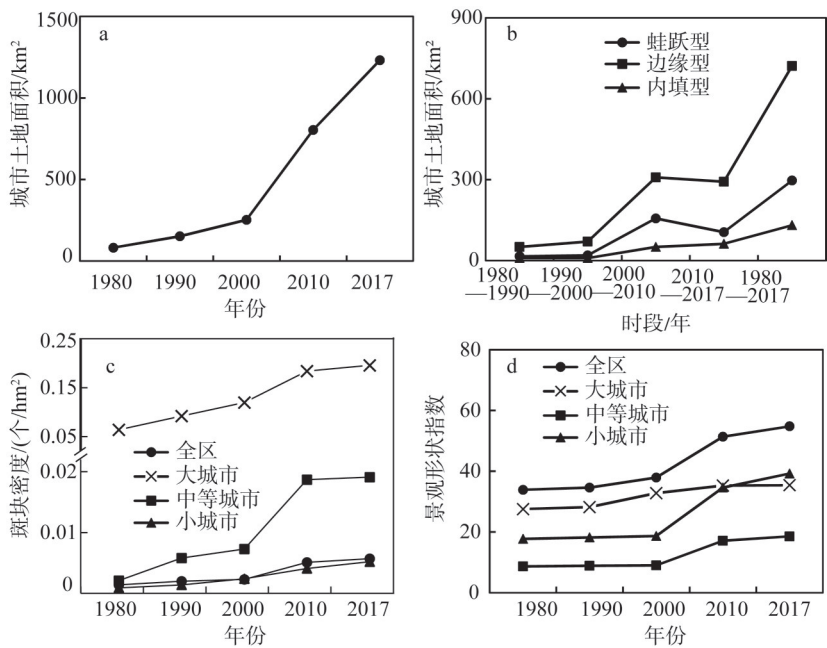


图5 1980—2017年区域城市扩展过程

Fig. 5 Urban expansion in the HBOY from 1980 to 2017

表2 1980—2017年区域城市扩展过程

Table 2 Urban expansion in the HBOY from 1980 to 2017

地区	城市扩展过程			城市扩展模式					
	面积/km ²	占全区比例/%	年均增长率/%	边缘型		蛙跃型		内填型	
				面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
呼包鄂榆	1149.76	100	7.61	721.73	62.77	296.91	25.82	131.12	11.40
大城市	564.55	49.10	6.91	343.99	60.45	137.51	24.16	87.58	15.39
呼和浩特	226.12	19.67	7.39	139.60	59.00	71.35	30.15	25.67	10.85
包头	338.43	29.43	6.64	204.39	61.48	66.16	19.90	61.91	18.62
中等城市	211.80	18.42	9.18	173.36	75.13	45.21	19.59	12.18	5.28
鄂尔多斯	120.76	10.50	8.60	96.84	72.23	32.58	24.30	4.66	3.48
榆林	91.03	7.92	10.21	76.52	79.16	12.63	13.07	7.52	7.78
小城市	373.41	32.48	8.25	204.38	58.41	114.19	32.63	31.36	8.96
土默特左	37.93	3.30	10.31	10.98	37.30	16.01	54.38	2.45	8.32
托克托	15.44	1.34	11.55	10.95	70.97	3.13	20.29	1.35	8.75
和林格尔	9.63	0.84	7.22	6.04	62.59	2.80	29.02	0.81	8.39
清水河	3.85	0.34	8.40	2.50	63.94	1.06	27.11	0.35	8.95
武川	8.73	0.76	6.36	7.14	80.50	1.17	13.19	0.56	6.31
土默特右	32.21	2.80	8.06	20.63	64.09	8.38	26.03	3.18	9.88
固阳	8.58	0.75	6.44	6.35	72.41	1.78	20.30	0.64	7.30
达茂旗	7.92	0.69	7.61	0.98	12.36	6.67	84.11	0.28	3.53
达拉特	27.83	2.42	7.20	18.81	66.94	4.38	15.59	4.91	17.47
准格尔	13.86	1.21	8.60	6.00	43.01	6.80	48.75	1.15	8.24
鄂托克前	7.03	0.61	6.26	4.27	60.83	1.93	27.49	0.82	11.68
鄂托克	12.30	1.07	7.60	7.09	57.83	3.60	29.36	1.57	12.81
杭锦	9.86	0.86	4.05	7.32	72.69	1.43	14.20	1.32	13.11
乌审	11.57	1.01	6.88	6.56	56.65	4.45	38.43	0.57	4.92
伊金霍洛	35.93	3.13	10.81	11.98	49.79	11.51	47.84	0.57	2.37
靖边	30.95	2.69	12.77	21.50	69.13	7.06	22.70	2.54	8.17
定边	20.99	1.83	8.00	14.08	67.30	5.27	25.19	1.57	7.50
府谷	9.13	0.79	7.32	6.05	65.05	2.37	25.48	0.88	9.46
神木	36.18	3.15	11.83	15.83	42.85	17.79	48.16	3.32	8.99
佳县	1.26	0.11	10.17	1.12	83.58	0.15	11.19	0.07	5.22
横山	11.21	0.98	10.85	3.95	64.54	1.56	25.49	0.61	9.97
米脂	6.58	0.57	8.97	4.22	63.36	1.72	25.83	0.72	10.81
子州	3.15	0.27	6.81	2.16	69.90	0.88	28.48	0.05	1.62
绥德	6.65	0.58	8.09	4.92	74.89	0.70	10.65	0.95	14.46
吴堡	2.38	0.21	5.76	1.70	72.03	0.61	25.85	0.05	2.12
清涧	2.27	0.20	8.41	1.25	54.35	0.98	42.61	0.07	3.04

包头城市土地扩展面积最大，为338.43 km²，占全区城市土地扩展总面积的29.43%（表2）。同期，区域城市扩展过程以边缘型为主。在全区尺度上，边缘型城市扩展面积为721.73 km²，占城市扩展总面积的62.77%。蛙跃型和内填型城市扩展面积分别为296.91 km²和131.12 km²，分别占城市扩展总面积的25.82%和11.40%（图5b、表2）。对于不同规模

等级城市,城市扩展过程均以边缘型为主。其中,大城市边缘型扩展面积最大,为343.99 km²,占大城市扩展总面积的60.45% (表2)。在大城市中,包头边缘型扩展面积最大,为204.39 km²,占包头城市扩展总面积的61.48% (表2)。

区域1980—2017年间城市景观越来越破碎,形状越来越复杂。在全区尺度上,斑块密度在1980—2017年之间呈现不断增长趋势,由0.0014增长至0.0057。对于大中小城市,斑块密度均呈现增加趋势,其中大城市增加最多,由0.0639增加到0.1957 (图5c)。同时,在全区尺度上,城市景观的形状指数在1980—2017年之间也不断增加,由33.88增长至54.78。对于大中小城市,景观形状指数都呈现增加趋势,其中小城市增加最多,由17.72增加到39.23 (图5d)。

2.2 区域城市扩展的区位因素

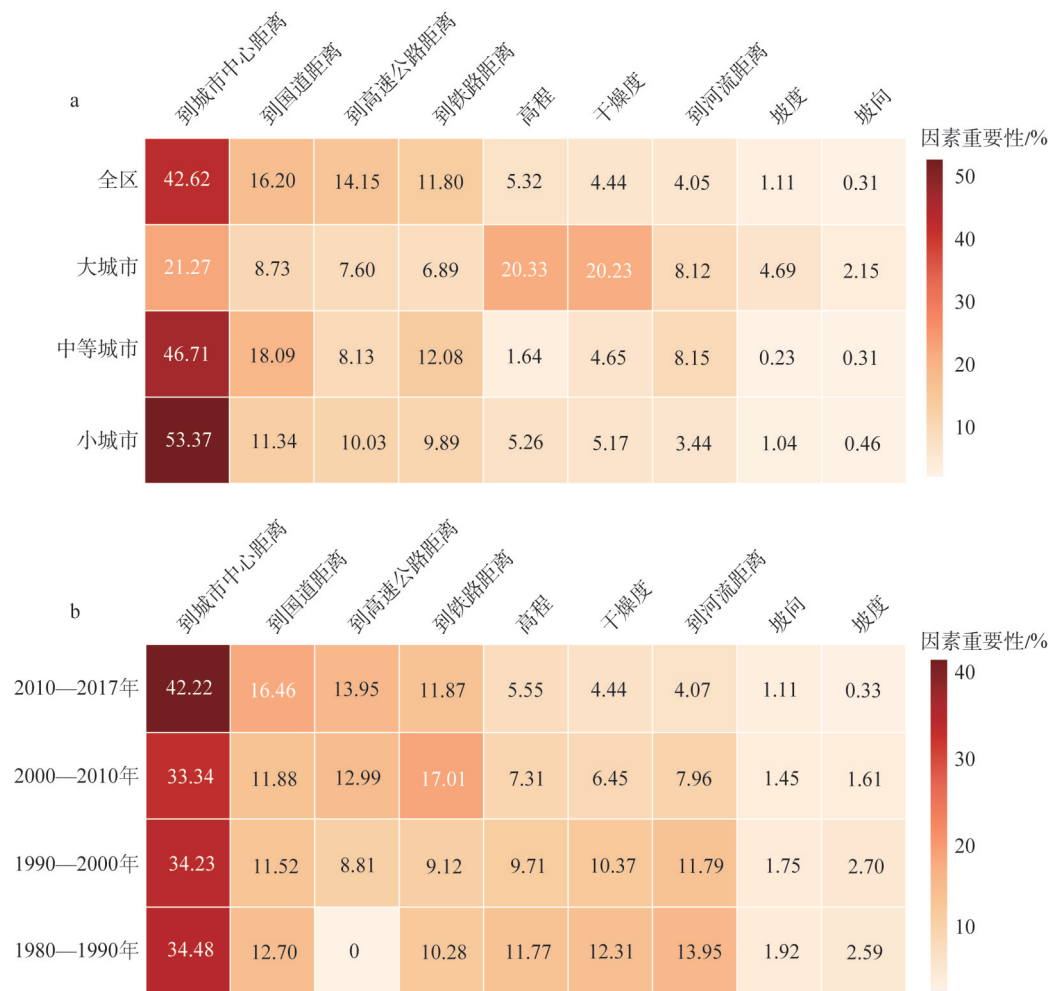
在全区尺度上,到城市中心距离的重要性最高,为42.62%。国道、高速公路和铁路等交通因素的重要性也比较高,分别为16.20%、14.15%和11.80%。不同规模等级城市的区位因素重要性存在明显差异。对于大城市,到城市中心距离、高程和干燥度都比较重要,重要性分别为21.27%、20.33和20.23%;其次国道和河流的影响也比较大,分别为8.73%和8.12%。对于中等城市,到城市中心距离影响最大,为46.71%;国道、铁路、高速公路等交通因素和到河流距离都比较重要,重要性分别为18.09%、12.08%、8.13%和8.15%。对于小城市,到城市中心距离重要性最高,为53.37%;国道、高速公路和铁路等交通因素的重要性也比较高,分别为11.34%、10.03%和9.89% (图6a)。总体来看,到城市中心距离在区域1980—2017年城市扩展过程中扮演了最重要的角色。其次,交通因素、高程、干燥度与到河流距离等区位因素的影响也比较大。

区位因素对区域城市扩展过程的影响都存在尺度效应,其中地形、干燥度和到河流距离因素的尺度效应相对比较明显。高程、坡度和坡向等地形因素对大中小城市的扩展过程影响分别为27.17%、2.18%和6.96%,其对大城市的影响是对小城市的4.02倍。干燥度对大中小城市的影响分别为20.23%、4.65%和5.17%,其对大城市的影响是对小城市的3.91倍。到河流距离对大中小城市的影响分别为8.12%、8.15%和3.44%,其对大城市的影响是对小城市的2.36倍。此外,到城市中心距离和交通因素,其对大城市的影响分别是对小城市的0.40倍和0.74倍 (图6a)。总体来看,地形因素对不同规模等级城市扩展过程影响的尺度效应最明显,其次是干燥度和到河流距离因素。

城市扩展的区位因素重要性在不同时间段存在明显的变化。国道和高速公路因素对新增城市土地影响在2010—2017年间最大,分别为16.46%和13.95%,为其在1990—2000年间重要性的1.43倍和1.58倍 (图6b)。铁路在2000—2010年间对城市扩展影响最高,为17.01%,是其在1990—2000年影响的1.87倍 (图6b)。此外,高程、干燥度和河流等因素在不同时期对新增城市的影响呈现递减趋势,其重要性分别下降了52.85%、63.93%和70.82% (图6b)。

对于不同城市扩展模式,到城市中心距离均是最重要的区位因素。对于蛙跃型、边缘型和内填型城市扩展,到城市中心距离的重要性分别为19.52%、29.99%和14.73% (图7a)。其次河流和交通因素也比较重要。其中,到河流距离对三种不同扩展模式的影响分别为14.79%、9.59%和14.39%。交通因素的重要性分别达到38.07%、39.80%和40.45% (图7a)。

区位因素对于不同扩展模式的重要性随时间的变化而变化。对于蛙跃型扩展,到城



注：a为1980—2017年区位因素的重要性；b为全区不同时间段区位因素的重要性。

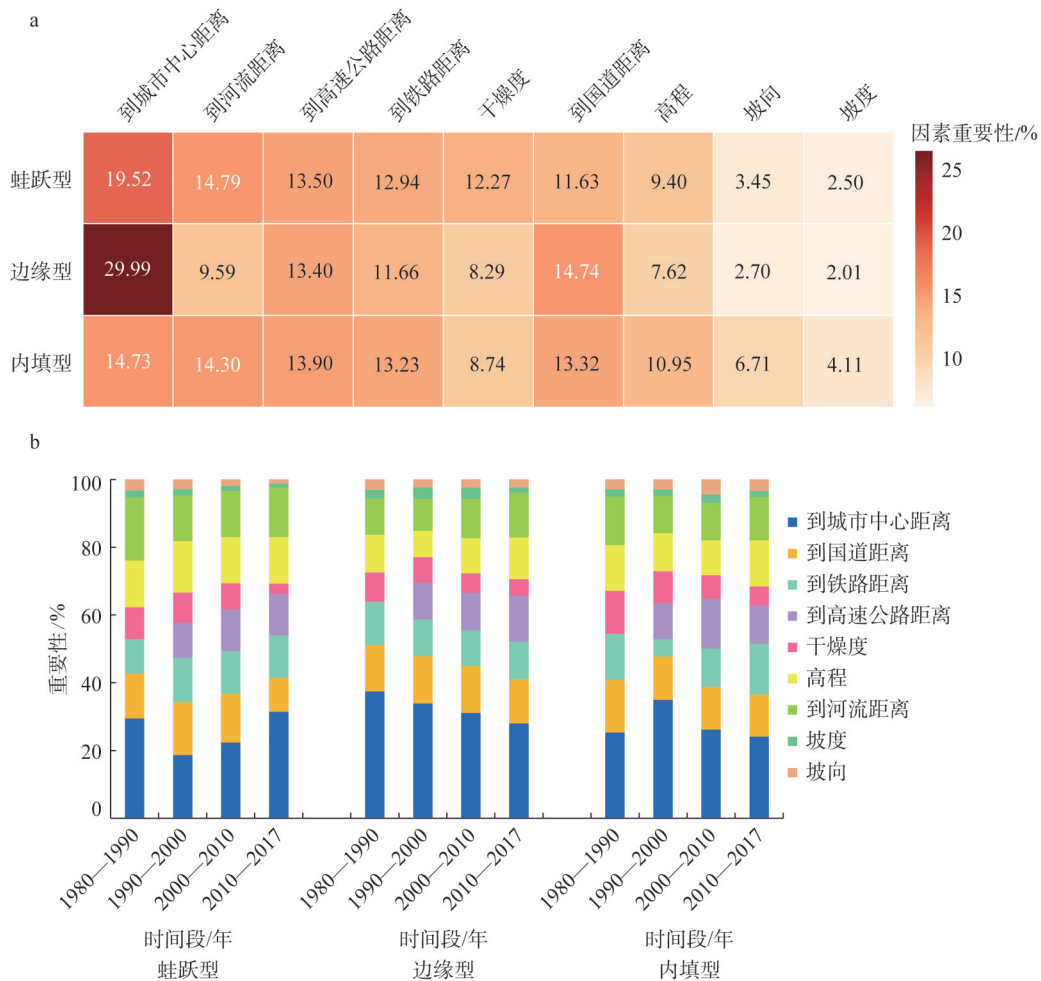
图6 区位因素的重要性
Fig. 6 The importance of location factors

市中心距离的重要性在1990—2017年间呈增长趋势，由18.64%增长到31.43%。干燥度和高程因素的重要性呈减少趋势，分别由8.93%和15.25%下降到3.03%和13.73%（图7b）。对于边缘型扩展，1990—2017年间，到城市中心距离对区域城市扩展的影响呈下降趋势，由33.85%下降到28.07%。高程和到河流距离影响呈现增加趋势，分别由7.77%和9.51%增长到12.42%和13.14%（图7b）。对于内填型扩展，国道、高速公路和铁路等交通因素的重要性呈增长趋势，由29.07%增长到38.70%。到城市中心距离在1990—2017年间呈下降趋势，由35.01%下降到24.13%（图7b）。

3 讨论

3.1 城市土地数据可靠性评价

本文中目视解译获取的城市土地数据能够准确地反映区域城市土地的实际状况。首先，参考相关研究^[33,34]，分别利用区域GDP年均增长量和城镇人口年均增长量与城市土



注：a 为 1980—2017 年区位因素的重要性；b 为不同时间段区位因素的重要性。

图 7 不同城市扩展模式的区位因素重要性

Fig. 7 The importance of location factors on urban growth modes

地年均增长量进行相关分析。结果显示本文提取的城市土地信息与区域 GDP 和城镇人口数据有显著相关性，相关系数分别为 0.85 和 0.96，都通过了 0.001 的显著性检验（图 8）。其次，采用等量分层随机抽样（Equalized stratified random sampling）的方法选取 1000 个样本点，结合 Google Earth 高分辨率（4 m）影像计算误差矩阵。结果显示，1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2017 年的城市土地数据 Kappa 系数分别为 0.86、0.87、0.87、0.85 和 0.86，总体精度分别为 92.80%、93.30%、93.40%、92.60% 和 92.80%。此外，以 1990—2010 年的数据为例，将本文获取的城市土地数据与已有的长时间序列且同分辨率的数据^[28]进行对比发现，本文的城市土地数据明显地减少了漏分和错分，更符合区域城市土地的实际状况（图 9）。

3.2 随机森林方法比 Logistic 回归更有利于揭示区位因素的基本特征

ROC（Receiver operating characteristic）曲线和 AUC（Area under curve）指标是判断机器学习二分类预测模型优劣的常用方法，AUC 值越大表示该算法精度越高^[19,35]。为此，基于相同的区位因素，分别利用随机森林和 Logistic 回归方法模拟区域 1980—2017 年

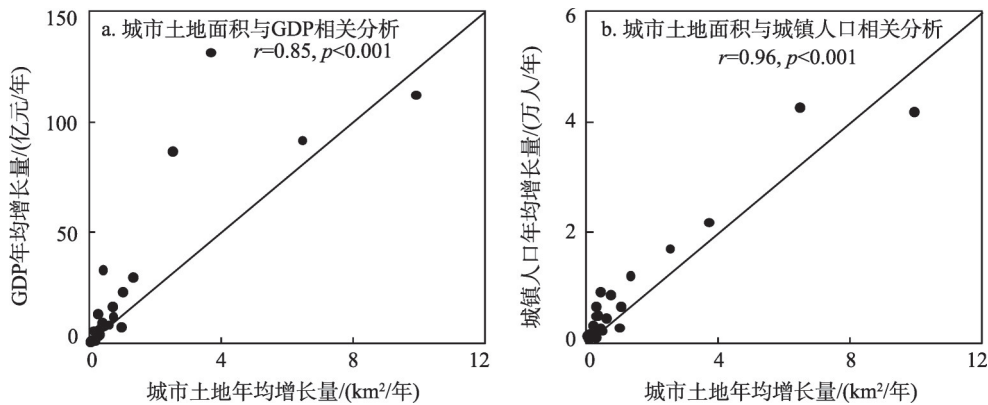


图8 1980—2017年区域城市土地数据的质量精度验证

Fig. 8 The quantitative accuracy assessment of urban land in the HBOY from 1980 to 2017

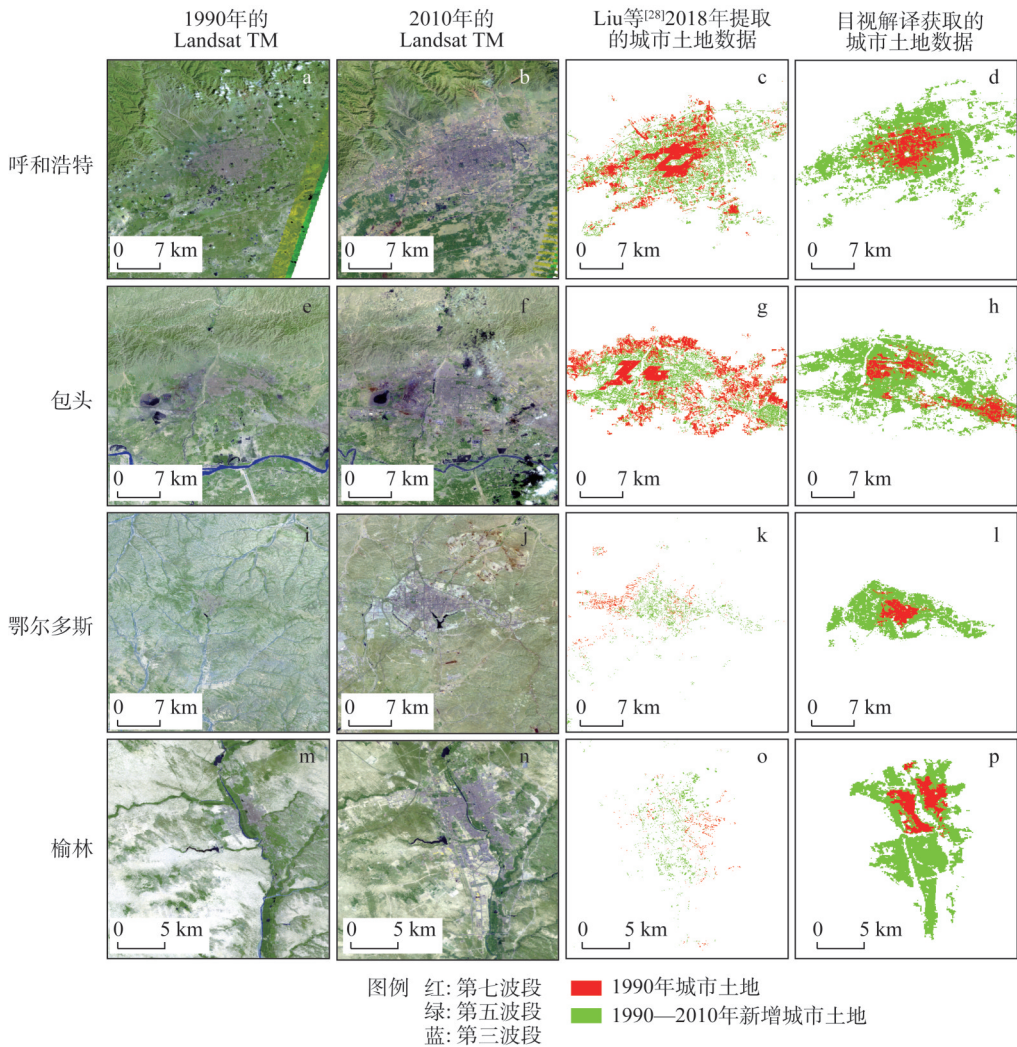


图9 目视解译获取的区域1990—2010年城市土地数据与已有数据对比

Fig. 9 The comparison between the urban land data obtained by visual interpretation and the existing data from 1990 to 2010

的城市扩展过程。通过与实际的城市土地数据对比,随机森林方法的AUC值为0.97,而Logistic回归的AUC值为0.88(图10),表明随机森林方法在呼包鄂榆城市群的实践应用上表现更好,精度更高。这主要是因为随机森林方法更适宜于解决非线性问题。一方面,相较于Logistic回归,随机森林可以处理非线性特征,而且考虑了各特征变量之间的相互作用,能够很好地解决特征变量之间的多重共线性影响^[18,35]。另一方面,随机森林模型在数据训练的过程中采用有放回的随机抽样,同时在选取特征变量也是随机选取,这样保证了决策树之间的独立性,提高了模型的模拟能力^[18,36]。

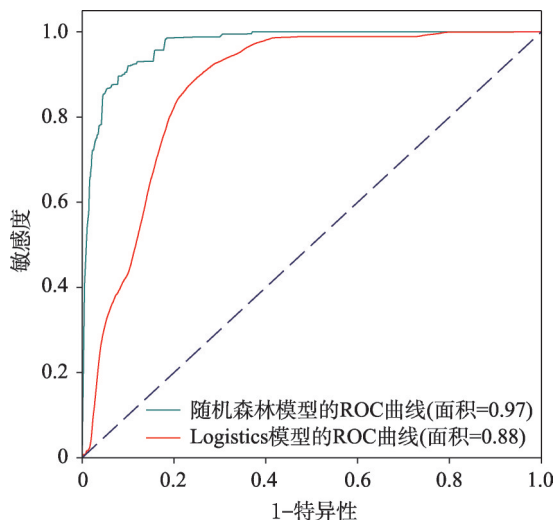


图10 随机森林和Logistic回归的ROC曲线

Fig. 10 The ROC curves of random forest and logistic regression

4 结论

随机森林方法能够更加有效地量化旱区城市扩展过程区位因素的基本特征。在呼包鄂榆城市群案例分析中,随机森林方法的AUC值达到了0.97,明显高于Logistic回归方法的AUC值。其次,到城市中心距离对区域1980—2017年城市扩展过程影响最大,重要性为42.62%。此外,区位因素对区域城市扩展过程的影响都存在尺度效应,其中高程、坡度和坡向等地形因素、气候以及到河流距离的尺度效应最为明显。

为此,建议在未来的城市规划和建设中,区域上应继续高度重视地形、气候和河流等自然要素的制约作用。对于大城市,应结合区域高精度的地形数据制定城市规划,同时应该将气候条件纳入城市规划中,充分考虑气候对新增城市土地的制约影响。此外,也需要考虑河流对新增城市土地的影响。比如,在制定包头市国土空间总体规划(2021—2035年)的过程中,应将地形、干燥度和到河流距离作为优先考虑的限制条件,引导城市向地形条件相对较好、水资源丰富以及相对湿润的南部扩展。对于中等城市,应主要依托交通网络制定城市规划,充分发挥交通因素对城市的带动作用。比如,鄂尔多斯市未来城市建设应充分考虑呼包鄂榆城市群规划“三纵三横”交通网络中“鄂—准—乌交通运输大通道”和“包茂综合运输大通道”的影响,借助城市群综合交通运输网带动区域城市发展^[23]。对于小城市,需要紧密依托现有的城市格局,充分发挥老城区的辐射带动作用。此外,在未来的城市规划中对于不同模式的城市扩展也应该采取针对性的措施。事实上,旱区的生态环境脆弱,气候和河流等自然因素对城市发展的制约作用比湿润地区更明显^[37,38]。对旱区的城市发展,应该保持高度的谨慎态度,特别要注意在水资源承载力和地形的约束范围内进行,对不同规模等级城市和扩展模式针对性地制定规划,因地制宜地进行城市建设。

本文运用随机森林方法定量分析了区位因素对旱区不同规模等级城市扩展过程的影

响,并提出相应的政策建议,这对旱区城市可持续发展具有重要意义。但本文也存在一些不足。首先,未考虑周边区位因素对目标像元的影响。目标像元是否转化为城市像元,不仅受该像元处的区位因素影响,往往还受到一定邻域范围内的区位因素影响^[6]。其次,本文只分析了区位因素对城市扩展的影响。城市扩展过程是一个极其复杂的过程,受到政策规划、社会经济发展和微观区位等多方面因素的影响^[8,38]。在未来的研究中,可以使用深度卷积神经网络,通过设置卷积核参数来分析目标像元一定邻域范围内区位因素对城市扩展过程的影响。此外,可以整合社会经济、规划政策以及地理区位等多因素综合分析旱区城市扩展的驱动机制。

参考文献(References):

- [1] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being. Synthesis. Vol. 42. Washington DC: Island Press, 2005: 29.
- [2] BAI X M, CHEN J, SHI P J. Landscape urbanization and economic growth in China: Positive feedbacks and sustainability dilemmas. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(1): 132-139.
- [3] CLARKE K C, HOPPEN S, GAVDOS L J. A self-modified cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning B*, 1997, (24): 247-261.
- [4] 摆万奇, 赵士洞. 土地利用变化驱动力系统分析. *资源科学*, 2001, 23(3): 39-41. [BAI W Q, ZHAO S D. An analysis on driving force system of land use changes. *Resources Science*, 2001, 23(3): 39-41.]
- [5] 方创琳, 宋吉涛, 蔺雪芹. 中国城市群可持续发展理论与实践. 北京: 科学出版社, 2010: 31-36. [FANG C L, SONG J T, LIN X Q. Theory and Practice of Sustainable Development of Urban Agglomerations in China. Beijing: Science Press, 2010: 31-36.]
- [6] HE C Y, LI J W, ZHANG X L, et al. Will rapid urban expansion in the drylands of Northern China continue: A scenario analysis based on the land use scenario dynamics-urban model and the shared socioeconomic pathways. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 57-69.
- [7] HE C Y, LIU Z F, GOU S Y, et al. Detecting global urban expansion over the last three decades using a fully convolutional network. *Environmental Research Letters*, 2019, 14(3), Doi: 10.1088/1748-9326/aaf936.
- [8] HE C Y, LIU Z F, TIAN J, et al. Urban expansion dynamics and natural habitat loss in China: A multiscale landscape perspective. *Global Change Biology*, 2014, 20(9): 2886-2902.
- [9] MCDONALD R I, KAREIVA P, FORMAN R T T. The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation. *Biological Conservation*, 2008, 141(6): 1695-1703.
- [10] LIU Z F, DING M H, HE C Y, et al. The impairment of environmental sustainability due to rapid urbanization in the dryland region of Northern China. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 187: 165-180.
- [11] 蒋祺, 郑伯红. 城市用地扩展对长沙市水系变化的影响. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1429-1439. [JIANG Q, ZHENG B H. The relationship between the change of water system and the urban land expansion in Changsha. *Journal of Natural Resources*, 2019, 39(7): 1429-1439.]
- [12] 宋世雄, 刘志锋, 何春阳, 等. 城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展. *地球科学进展*, 2018, 33(10): 1094-1104. [SONG S X, LIU Z F, HE C Y, et al. Research progress on assessing the impacts of urban expansion on natural habitats. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1094-1104.]
- [13] 潮洛濛, 翟继武, 韩倩倩. 西部快速城市化地区近20年土地利用变化及驱动因素分析: 以呼和浩特市为例. *经济地理*, 2010, 30(2): 239-243. [CHAO L M, ZHAI J W, HAN Q Q. Urban expand and driving factors in the recent 20 years in case of Huhhot city. *Economic Geography*, 2010, 30(2): 239-243.]
- [14] 李骞国, 石培基, 魏伟. 干旱区绿洲城市扩展及驱动机制: 以张掖市为例. *干旱区研究*, 2015, 32(3): 598-605. [LI Q G, SHI P J, WEI W. Research on urban expansion and drive mechanism in an oasis town of arid region: A case of Zhangye city. *Arid Zone Research*, 2015, 32(3): 598-605.]
- [15] 黄庆旭, 何春阳, 史培军, 等. 城市扩展多尺度驱动机制分析: 以北京为例. *经济地理*, 2009, 29(5): 714-721.

- [HUANG Q X, HE C Y, SHI P J, et al. Understanding multi-scale urban expansion driving forces: In the case study of Beijing. *Economic Geography*, 2009, 29(5): 714-721.]
- [16] SHAFIZADEH-MOGHADAM H, HELBICH M. Spatiotemporal variability of urban growth factors: A global and local perspective on the megacity of Mumbai. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35: 187-198.
- [17] WU W J, ZHAO S Q, HENEBRY G M. Drivers of urban expansion over the past three decades: A comparative study of Beijing, Tianjin, and Shijiazhuang. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191: 34.
- [18] BREIMAN L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45: 5-32.
- [19] KAMUSOKO C, GAMBA J. Simulating urban growth using a Random Forest-Cellular Automata (RF-CA) Model. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2015, 4(2): 447-470.
- [20] ZHANG D C, LIU X P, WU X Y, et al. Multiple intra-urban land use simulations and driving factors analysis: A case study in Huicheng, China. *GIScience & Remote Sensing*, 2018, Doi: 10.1080/15481603.2018.1507074.
- [21] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国快速城市化干燥地区的生态系统服务权衡关系多尺度分析: 以呼包鄂榆地区为例. *生态学报*, 2016, 36(15): 4881-4891. [SUN Z X, LIU Z F, HE C Y, et al. Multi-scale analysis of ecosystem service trade-offs in urbanizing drylands of China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin region. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15): 4881-4891.]
- [22] HUANG Q X, MENG S T, HE C Y, et al. Rapid urban land expansion in earthquake-prone areas of China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 2019, 10(1): 43-56.
- [23] 国家发改委. 呼包鄂榆城市群发展规划. www.gov.cn/xinwen/2018-03/07/content_5271788.htm, 2019-08-04. [National Development and Reform Commission. The plan for Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin cluster. www.gov.cn/xinwen/2018-03/07/content_5271788.htm, 2019-08-04.]
- [24] LIU Z F, VERBURG P H, WU J G, et al. Understanding land system change through scenario-based simulations: A case study from drylands in Northern China. *Environmental Management*, 2017, 59: 440-454.
- [25] 丁美慧, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国北方农牧交错带城市扩展过程对植被净初级生产力影响研究: 以呼包鄂地区为例. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 614-621. [DING M H, LIU Z F, HE C Y, et al. Impacts of urban expansion on net primary productivity in the agro-pastoral ecotone in Northern China: A case of Hohhot-Baotou-Ordos region. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 614-621.]
- [26] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 等. 中国北方干燥地区城市扩展过程对生态系统服务的影响: 以呼和浩特—包头—鄂尔多斯城市群地区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1691-1704. [SUN Z X, LIU Z F, HE C Y, et al. Impacts of urban expansion on ecosystem services in the drylands of Northern China: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos Urban Agglomeration region. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1691-1704.]
- [27] SONG S X, LIU Z F, HE C Y, et al. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model. *Ecological Indicators*, 2020, 112, Doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106071.
- [28] LIU X P, HU G H, CHEN Y M, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 227-239.
- [29] 董宁, 韩兴国, 郭建国. 内蒙古鄂尔多斯市城市化时空格局变化及其驱动力. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 1097-1103. [DONG N, HAN X G, WU J G. Changes in the spatiotemporal pattern of urbanization in Erdos of Inner Mongolia and related driving forces. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4): 1097-1103.]
- [30] LIU X P, LI X, CHEN Y M. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. *Landscape Ecology*, 2010, 25: 671-682.
- [31] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析. *生态学报*, 2014, 34(3): 727-737. [LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727-737.]
- [32] 翟涌光, 屈忠义, 吕萌. 西北部少数民族地区城市扩展特征分析: 以呼和浩特市为例. *测绘科学*, 2020, 45(4): 97-104, 124. [ZHAI Y G, QU Z Y, LYU M. Analysis of urban expansion in northwest minority area: A case study of Hohhot city. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(4): 97-104, 124.]

- [33] LIU Z F, HE C Y, ZHANG Q F, et al. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data from 1992 to 2008. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 106(1): 62-72.
- [34] XU M, HE C Y, LIU Z F, et al. How did urban land expand in China between 1992 and 2015? A multi-scale landscape analysis. *PLoS One*, 2016, 11(5): 1-19.
- [35] PONTIUS R G JR, SCHNEIDER L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environmet*, 2001, 85: 239-248.
- [36] BIAU G. Analysis of a random forests model. *Journal of Machine Learning Research*, 2012, 13: 1063-1095.
- [37] LI G D, SUN S A, FANG C L. The varying driving forces of urban expansion in China: Insights from a spatial-temporal analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 174: 63-77.
- [38] 曹小曙. 基于人地耦合系统的国土空间重塑. *自然资源学报*, 2019, 34(10): 2051-2059. [CAO X S. Geogovernance of national land use based on coupled human and natural systems. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(10): 2051-2059.]

Study on the location factors of urban expansion in the drylands: A case study in the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Urban Agglomeration, China

SONG Shi-xiong^{1,2}, ZHANG Jin-xi^{1,2}, LIU Zhi-feng^{1,2}, HE Chun-yang^{1,2}

(1. Center for Human-Environment System Sustainability (CHESS), State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Understanding the characteristics of location factors of urban expansion is important to urban sustainable development in the drylands. Taking the Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Urban Agglomeration in China as an example, this study assessed the impacts of location factors on urban expansion using the random forest model. The results indicated that the random forest model can effectively quantify the basic characteristics of location factors of urban expansion in the drylands, with the area under curve (AUC) index of 0.97. The distance to the urban centers had the greatest influence on urban expansion from 1980 to 2017, with the importance of 42.62%. The traffic factors such as highways, national roads, and railways also played an important role with the importance above 10%. All location factors had scaling effects on regional urban expansion, among which the topographic, the climate and the river factors had the most obvious effects. The importance of topography, climate and rivers to large cities was 27.17%, 20.23% and 8.12%, respectively, 4.02 times, 3.91 times and 2.36 times that of small cities. Thus, we suggest that the local governments should pay close attention to the constraint effects of the natural factors (e.g., topography, climate and rivers) on the urban construction in the drylands, and perform urban planning and construction according to local conditions.

Keywords: random forest; location factor; urban expansion; drylands; Hohhot-Baotou-Ordos-Yulin Urban Agglomeration