DOI: 10.20103/j.stxb.202209112590

毛诚瑞,任强,李磊,何春阳.青藏高原城市扩展过程的区位因素——基于随机森林的多尺度分析.生态学报,2023,43(17):6983-6998.

Mao C R, Ren Q, Li L, He C Y. Location factors of urban expansion on the Qinghai Tibet Plateau-Multi-scale analysis based on random forest. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 6983-6998.

青藏高原城市扩展过程的区位因素
——基于随机森林的多尺度分析

毛诚瑞[1,2,3,4],任 强[1,2,3,4],李 磊[1,2,3,4],何春阳[1,2,3,4,*]

1 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京 100875

2 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875

3 应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院,北京 100875

4 北京师范大学地理科学学部,北京 100875

摘要:过去几十年,青藏高原快速的城市扩展过程给生态环境带来了严重威胁。区位因素会影响城市扩展的空间格局,进而改变其对区域生态环境的影响。因此,认识青藏高原城市扩展过程的区位因素特征对于保护区域生态环境具有重要意义。在全区、生物群区和生态区 3 个尺度上分析了区位因素对青藏高原城市扩展过程的影响。基于长时间序列城市土地数据分析青藏高原城市扩展过程。利用随机森林模型分析青藏高原城市扩展区位因素特征。研究表明,青藏高原在 1990—2020 年期间经历了快速的城市扩展过程。全区城市土地面积从 277.4 km^2增加到 974.9 km^2,增长了 2.5 倍。对青藏高原城市扩展影响最大的区位因素高程对城市扩展的重要性不断下降。与之相对,铁路因素的重要性迅速上升,其重要性从 2.15%增长到 10.56%,增加了 3.9 倍。然而,铁路建设在促进青藏高原城市发展的同时,也会对区域内近三成的濒危物种产生影响。因此,在青藏高原未来城市发展过程中,既要重视铁路对城市扩展带动作用,也要注意减少铁路对区域生物多样性的影响,进而促进高原的可持续发展。

关键词:青藏高原;区位因素;随机森林;城市扩展;生物多样性

Location factors of urban expansion on the Qinghai Tibet Plateau-Multi-scale analysis based on random forest

MAO Chengrui[1,2,3,4], REN Qiang[1,2,3,4], LI Lei[1,2,3,4], HE Chunyang[1,2,3,4,*]

1 *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disasters, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

2 *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

3 *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing* 100875, *China*

4 *Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*

Abstract: In recent decades, the Qinghai Tibet Plateau (QTP) has experienced a rapid urban expansion, which has brought serious threats to the local ecology and environment. Location factors (e.g. topography, transportation and river, etc.) will affect the spatial pattern of urban expansion, and then change its impact on regional ecology and environment. Therefore, it is of great significance to understand the characteristics of the location factors of urban expansion for the protection of the ecology and environment on the QTP. In this study, we analyzed the impact of location factors on the urban expansion of the QTP at multiscale, that is, the whole region, the biome and the ecoregion. First, based on the long-term urban land dataset, we analyzed the urban expansion of the QTP. Second, the random forest model was used to analyze the location factors of urban expansion on the QTP. We found that the QTP experienced rapid urban expansion during 1990—

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0405);国家自然科学基金面上项目(41971270)

收稿日期:2022-09-11; **网络出版日期**:2023-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hcy@bnu.edu.cn

2020. The urban land area of the whole plateau increased from 277.4 km^2 to 974.9 km^2, an increase of 2.5 times. Elevation was the most important location factor affecting the urban expansion of the QTP, and its importance was 30.1%. However, the importance of elevation to urban expansion declined from 1990 to 2020. In contrast, the railway factor was the location factor with the largest change in importance to urban expansion, increasing its importance by a factor of 3.9 from 2.15% to 10.56%. The study also found that the construction of the railway not only promoted the urban development of the QTP, but also affected nearly a third of the endangered species in the region. Therefore, in the future urban development process of the QTP, attention should be paid not only to the role of railways in driving urban expansion, but also to reducing the impact of railways on surrounding biodiversity, so as to promote regional sustainable development.

Key Words: Qinghai Tibet Plateau; location factors; random forest; urban expansion; biodiversity

青藏高原是我国乃至全球生物多样性保护的热点地区[1]。然而,由于生态系统结构单一且对人类活动极为敏感,青藏高原也是我国最大的生态脆弱区[2]。近年来,在“西部大开发”与“一带一路”倡议的共同推动下,青藏高原城市经历了快速的城市扩展过程[3]。这导致了土壤流失、草地退化和水质污染等一系列生态环境问题[4—5],使得区域社会经济的发展与脆弱的高原生态系统保护之间的矛盾日益突出。城市的区位因素是指促使城市区位地理特征和功能形成及变化的条件,包括自然区位因素(例如,地形、气候和河流等)和社会经济区位因素(例如,交通、政治和宗教等)[6—7]。区位因素会影响城市扩展的空间格局,从而改变城市扩展对区域生态环境的影响[8]。未来,青藏高原的城市还会进一步扩展[9]。认识青藏高原城市扩展过程的区位因素特征是优化高原城市土地空间格局的基础,对实现高原可持续发展目标和生态文明建设具有重要意义。

目前,已有学者揭示了青藏高原典型城市的扩展过程区位因素特征。这些研究定性或定量的分析了地形、交通和河流等区位因素对青藏高原城市扩展的重要性[10—14]。例如,唐艳等[10]和蒲光昕等[11]采用定性的方式分析了西宁市城市扩展过程的区位因素特征,发现地质地貌条件限制了西宁市的城市扩展。Pan 等[12]和 Tang 等[13]采用定量的方式分别分析了西宁市和拉萨市的城市扩展过程的区位因素特征,发现交通因素对两个城市的扩展具有重要的推动作用。这些局地尺度的研究为认识青藏高原城市扩展的区位因素特征提供了良好的基础,然而对于青藏高原全域尺度的城市扩展过程区位因素特征的分析还有待进一步研究。此外,已有区位因素研究的分析尺度集中于行政区划尺度,缺乏基于生态学尺度的区位因素研究。然而,生物群区和生态区是生态学尺度的重要组成单元,具有相似的生境类型和生物多样性的属性,是分析城市扩展过程对自然生境和生物多样性影响的重要尺度[15—16]。基于生态学尺度进行区位因素研究,可以与生物多样性保护相结合,进一步分析区位因素影响下的城市扩展对生物多样性的影响,进而为青藏高原的生物多样性保护提供政策建议。

随机森林为从生态学尺度分析青藏高原城市扩展过程区位因素提供了有效的方法。随机森林是一种机器学习算法,可以很好地拟合与城市扩展密切相关的区位因素间的线性关系,进而准确评估各区位因素的相对重要性。目前,已有学者使用随机森林的方法在不同地区开展了城市扩展区位因素研究。例如,Zhang 等[17]采用随机森林方法分析了惠州市惠城区 2000—2010 年城市扩展区位因素的特征,发现交通因素对惠城区城市扩展具有重要的影响。宋世雄等[18]利用随机森林分析了呼包鄂榆城市群城市扩展的主要区位因素,发现到城市中心的距离是影响区域城市扩展最重要的因素。

本文的目的是从生态学尺度分析青藏高原城市扩展过程的区位因素特征。首先,基于高分辨率长时间城市土地数据集(GAIA),通过目视解译的方法提取青藏高原 1990—2020 年城市土地,并分析区域 30 年来的城市扩展过程。然后,利用随机森林方法在全区、生物群区和生态区 3 个尺度上分析青藏高原城市扩展的区位因素特征。本研究的结果有利于全面认识青藏高原城市扩展区位因素特征,进而为该地区生物多样性保护和可持续发展提供政策建议。

1　研究区与数据

1.1　研究区

青藏高原位于 25°59′—40°1′N、67°40′—104°40′E 之间,北起西昆仑山-祁连山山脉北麓,南抵喜马拉雅山等山脉南麓,西自兴都库什山脉和帕米尔高原西缘,东抵横断山等山脉东缘,跨中国、印度、巴基斯坦和尼泊尔等 9 个国家。总面积为 308.3 万 km^2,平均海拔约 4320 m[19](图 1)。由于地域广阔且地形复杂,青藏高原具有热带、亚热带、温带和寒带等多种气候类型[20]。高原多年平均温度为 1.37℃,降水量在 300—400 mm 之间[21]。

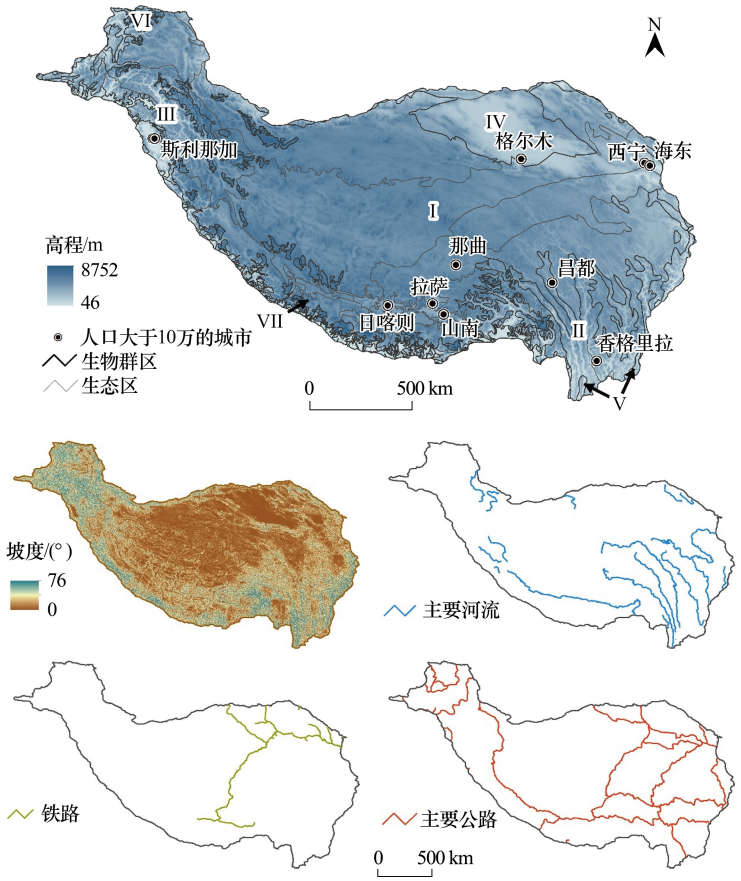

图 1　研究区

Fig.1　Study area

图中罗马数字为生物群区编号;Ⅰ:山地草原和灌丛群区;Ⅱ:温带针叶林群区;Ⅲ:温带阔叶和混交林群区;Ⅳ:荒漠和干旱灌丛群区;Ⅴ:热带和亚热带湿润阔叶林群区;Ⅵ:温带草原、稀疏草原和灌丛群区;Ⅶ:热带亚热带针叶林群区

青藏高原独特的地质历史与丰富的自然环境孕育了众多特有的动植物物种,形成了具有高海拔特征的生态系统和物种多样性中心,被誉为“珍稀野生动植物天然园和高原物种基因库”[1]。根据世界自然基金会(WWF)的划分,青藏高原一共有 40 个生态区,隶属于 7 个生物群区[15]。从生物群区尺度看,山地草原和灌丛群区的面积最大,约为 232.8 万 km^2,占青藏高原总面积的 75.5%。从生态区尺度上看,青藏高原中部高山草原生态区的面积最大,约为 62.9 km^2,占青藏高原总面积的 20.4%(图 1)。根据世界自然保护联盟(IUCN)红色名录,青藏高原共有 1193 种濒危物种[22]。其中,山地草原和灌丛群区有 1157 种,占青藏高原濒危物种总数的 96.98%。青藏高原中部高山草原生态区有 330 种,占青藏高原脊椎动物总数的 18.72%。

2000—2020 年,青藏高原经历了快速的城市化进程。青海省城镇人口从 180 万增长到 337 万,增长了

87.2%。西藏自治区城镇人口从 50 万增长到 110 万,增长了 1.2 倍。同期,青海省国内生产总值(GDP)从 263.7 亿元增长到 3005.9 亿元,增长了近 10 倍。西藏自治区 GDP 从 117.8 亿元增长到 1902.7 亿元,增长了近 16 倍[23—24]。

1.2 数据

本文使用的数据主要包括长时间序列城市土地数据、高程数据和地理信息辅助数据。其中,城市土地数据来源于清华大学数据平台发布的全球人造不透水层数据集(GAIA)(http://data.ess.tsinghua.edu.cn/gaia.html)。GAIA 数据基于 Sentinel-1 数据和夜间灯光数据,采用改进后的"排除/包含"算法提取,总体精度为 89%,空间分辨率为 30 m[25]。高程数据来源于地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn/),空间分辨率为 90 m。地理信息辅助数据包括研究区边界、河流和公路等。其中,研究区边界来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/)。河流数据来源于全球水文数据集(HydorSHEDS)提供的全球河流数据(https://www.hydrosheds.org/),主要公路和铁路等交通数据来源于中科院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)。生物群区和生态区边界来源于 WWF 发布的全球陆地生态区划(https://www.worldwildlife.org/publications/wildfinder-database)。该区划以生物多样性保护为目标,属于生物地理区划范畴[26]。以生物的地域分异规律作为核心划分依据,该区划将生物群区和生态区划分为具有相似属性的自然生境和生物多样性聚集的地理单元[15]。为了保证数据一致性,将所有数据转换为统一的阿尔伯斯(Albers)等积圆锥投影,并将栅格数据重采样为 30 m 分辨率。

2 研究方法

本研究的研究流程见图 2,共分为 2 个步骤。首先,结合 GAIA 数据和目视解译提取青藏高原 1990—2020 年城市土地信息,在此基础上多尺度分析青藏高原的城市扩展过程。其次,采用随机森林的方法分析区域 1990—2020 年城市扩展过程的区位因素。

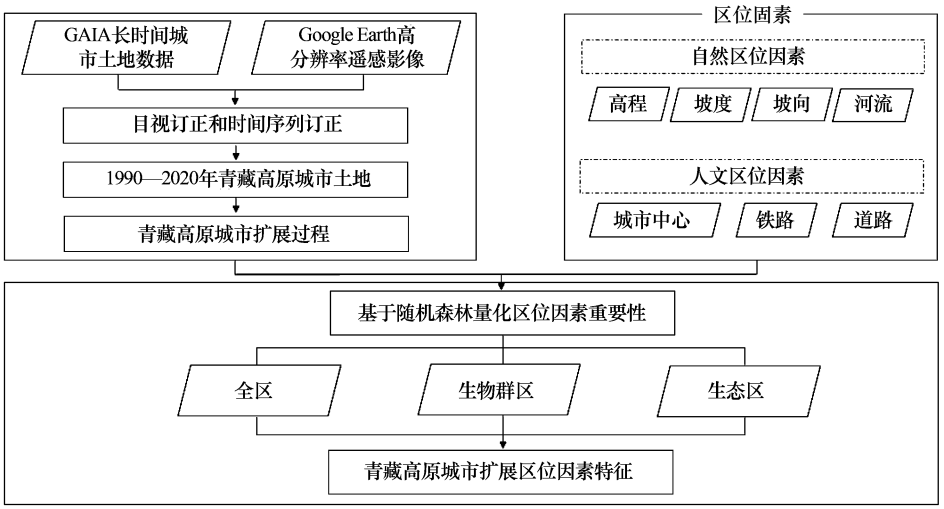

图 2 流程图

Fig.2 Flow chart

GAIA: 全球人工不透水层数据集 Global artifical impervious area

2.1 提取区域 1990—2020 年城市土地信息

由于青藏高原城市化率低且城市土地异质性较大,GAIA 数据获取的城市土地信息与青藏高原实际的城市土地存在一定的误差。因此,本研究首先基于谷歌地球高分辨率遥感影像对 GAIA 数据进行目视解译,获取 1990—2018 年的青藏高原城市土地。然后,在 2018 年青藏高原城市土地的基础上,通过目视解译的方式

获取 2020 年城市土地数据,得到 1990—2020 年青藏高原城市土地。

参考 Liu[27] 的研究,基于城市土地不会转化为其它土地利用类型的假设,对城市土地数据进行时间序列订正,具体公式如下:

$$UL_{(n,i)}=\begin{cases}0 & UL_{(n+1,i)}=0\\ 1 & UL_{(n+1,i)}=1\ 且 UL_{(n-1,i)}=1\\ UL_{(n,i)} & 其他\end{cases} \tag{1}$$

式中,$UL_{(n-1,i)}$、$UL_{(n,i)}$ 和 $UL_{(n+1,i)}$ 分别表示第 n-1 年、第 n 年和第 n+1 年像元是否为城市土地,1 表示城市土地,0 表示非城市土地。

2.2　分析区域 1990—2020 年城市扩展过程

参照 Pan 等[12] 的研究,选择景观扩展指数(LEI)、斑块密度(PD)和景观形状指数(LSI)3 个指标,分别表征城市扩展模式、城市景观的破碎度以及形状。其中景观扩展指数的计算公式如下:

$$\mathrm{LEI}=\frac{A_o}{A_o+A_v}\times 100\% \tag{2}$$

式中,LEI 表示景观扩展指数,其取值范围为 0—100[28]。当 LEI=0 时,新增城市土地为蛙跃型。当 0<LEI≤50 时,新增城市土地为边缘型。当 50<LEI≤100 时,新增城市土地为内填型。A_o 表示新增城市土地缓冲区与已有城市土地相交的面积,A_v 表示该缓冲区与非城市用地相交的面积。

斑块密度的计算公式如下:

$$PD=N/A \tag{3}$$

式中,PD 表示斑块密度。PD 值越大,表示斑块的破碎化程度越高,反之则破碎化程度越小。N 表示景观中城市斑块的总数,A 为景观的总面积。

景观形状指数的计算公式如下:

$$\mathrm{LSI}=0.25E/\sqrt{A} \tag{4}$$

式中,LSI 表示景观形状指数。E 表示景观中城市斑块边界的总长度,A 为景观总面积。LSI 值越大,表示斑块的形状越不规则。

2.3　分析区域 1990—2020 年城市扩展过程的区位因素

根据 Pan 等[12] 的研究和数据的可获取性,本研究从自然和人文两个方面选择了 7 个对青藏高原城市扩展过程影响较大的区位因素,并使用随机森林的方法分析了青藏高原城市扩展的区位因素。选取的区位因子包括高程、坡度、坡向、到河流距离、到公路距离、到铁路距离和到城市中心距离。值得注意的是,本研究在像元层面对各区位因素的重要性进行计算,文章中所采用的“距离”是指任意像元距离目标源(河流、公路和铁路等)最短的欧式几何距离。

基于随机森林的区位因素影响分析包括以下 4 个步骤。第一,在区位因素数据集中随机选取 66%的数据为训练样本,其余 34%的数据作为袋外数据。第二,基于训练样本构建决策树,通过与袋外数据对比评估模型精度,当袋外得分大于 0.85 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某个因素 j 的顺序得到新的袋外数据,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,得到因子 j 的重要性。本研究以区位因素的重要性作为指标,来确定该因素对城市扩展的影响程度。区位因素的重要性越大,说明该因素对城市扩展的影响越大。

最后,在全区、生物群区和生态区 3 个尺度上计算了 1990—2020 年青藏高原城市扩展各区位因素重要性。同时,本研究还计算了 1990—2000 年和 2010—2020 年青藏高原城市扩展各区位因素的重要性,并基于此分析了区位因素重要性的变化。

3　结果

3.1　1990—2020 年城市扩展过程

青藏高原 1990—2020 年期间经历了快速的城市扩展过程。全区城市土地面积由 277.4 km^2 增长到

974.9 km^2,增长了 697.5 km^2,增长了 2.5 倍。各生物群区中,山地草原灌丛群区城市扩展面积最大。该群区城市扩展面积为 467.5 km^2,占全区城市扩展总面积的 67.0%。在山地草原灌丛群区中,藏东南灌丛草甸生态区城市扩展面积最大,为 244.3 km^2,占山地草原灌丛群区扩展总面积的 52.3%(表 1、表 2、图 3)。

表 1 1990—2020 年青藏高原各群区城市土地扩展过程

Table 1 The urban expansion in Qinghai Tibet Plateau from 1990 to 2020

生物群区 Biomes	城市面积/km^2 Urban area					城市扩展指数 Urban expansion index			
	1990	2020	1990—2020			斑块密度		景观形状指数	
			边缘型	内填型	蛙跃型	1990	2020	1990	2020
MGS	173.49	640.98	284.21	44.20	139.08	0.006	0.016	0.88	2.92
TBMF	42.89	122.11	25.09	36.50	17.63	0.137	0.146	2.63	3.86
DXS	31.71	78.56	22.84	6.48	17.53	0.009	0.014	0.56	1.12
TCF	27.12	116.92	40.84	5.04	43.92	0.008	0.041	0.44	2.15
TSMBF	1.12	7.51	3.35	0.04	3.01	0.013	0.082	0.10	0.79
TSCF	0.81	2.23	0.48	0.09	0.85	0.045	0.113	0.19	0.50
TGSS	0.28	6.59	5.44	0.12	0.74	0.012	0.017	0.06	0.38
全区 Whole region	277.43	974.91	382.23	92.48	222.77	0.009	0.021	1.46	4.20

表中缩写代表 7 个不同的生物群区;分别为 MGS:山地草原和灌丛群区 Montane grasslands and shrublands;TBMF:温带阔叶和混交林群区 Temperate broadleaf and mixed forests;DXS:荒漠和干旱灌丛群区 Deserts and xeric shrublands;TCF:温带针叶林 Temperate conifer forests;TSMBF:热带亚热带湿润阔叶林群区 Tropical and subtropical moist broadleaf forests;TSCF:热带亚热带针叶林群区 Tropical and subtropical coniferous forests;TGSS:温带草原和灌丛群区 Temperate grasslands, savannas and shrublands

表 2 1990—2020 年山地草原和灌丛群区各生态区城市扩展过程

Table 2 The urban expansion of each ecoregions in the montane grassland and shrubland biome from 1990 to 2020

生态区 Ecoregion	城市面积/km^2 Urban area					城市扩展指数 Urban expansion index			
	1990	2020	1990—2020			斑块密度		景观形状指数	
			边缘型	内填型	蛙跃型	1990	2020	1990	2020
STSM	97.54	341.80	154.40	29.63	60.23	0.018	0.039	1.13	3.37
YTAS	36.64	111.24	50.57	4.52	19.52	0.033	0.117	0.98	3.20
CTPAS	16.74	92.48	51.16	3.87	20.97	0.003	0.007	0.20	1.14
TPASM	16.55	76.41	32.29	3.87	23.69	0.006	0.020	0.27	1.22
KWTPAS	2.04	8.07	1.92	0.11	4.00	0.006	0.018	0.11	0.39
EHASM	1.16	1.94	0.22	0.03	0.53	0.001	0.002	0.01	0.05
WHASM	0.94	3.95	0.70	0.07	2.24	0.004	0.014	0.07	0.25
PADT	0.27	2.04	1.29	0.09	0.39	0.001	0.001	0.02	0.05
NHASM	0.08	1.29	0.33	0	0.88	0.001	0.008	0.01	0.11
QMSM	0.06	0.26	0.08	0	0.12	0.001	0.001	0.01	0.01
HKAM	0.03	0.05	0.01	0	0.01	0.001	0.001	0.01	0.02
NTPQMAS	0	0.02	0.02	0	0	0	0.001	0	0.01

表中缩写代表 12 个不同的生态区;分别为 STSM:藏东南灌丛草甸生态区 Southeast Tibet shrublands and meadows;YTAS:雅鲁藏布江干旱草原生态区 Yarlung Tsangpo arid steppe;CTPAS:青藏高原中部高寒草原生态区 Central Tibetan Plateau alpine steppe;TPASM:青藏高原高寒灌丛草甸生态区 Tibetan Plateau alpine shrublands and meadows;KWTPAS:喀喇昆仑-青藏高原西部高寒草原生态区 Karakoram-west Tibetan Plateau alpine steppe;EHASM:喜马拉雅东部高山灌丛草甸生态区 Eastern Himalayan alpine shrub and meadows;WHASM:喜马拉雅西部高山灌丛草甸生态区 Western Himalayan alpine shrub and Meadows;PADT:帕米尔高寒荒漠和苔原生态区 Pamir alpine desert and tundra;NHASM:喜马拉雅西北部高山灌丛草甸生态区 Northwestern Himalayan alpine shrub and meadows;QMSM:祁连山亚高山草甸生态区 Qilian Mountains subalpine meadows;HKAM:印度库什高山草甸生态区 Hindu Kush alpine meadow;NTPQMAS:青藏高原北部-昆仑山高寒荒漠生态区 North Tibetan Plateau-Kunlun Mountains alpine desert

青藏高原城市扩展过程以边缘型为主。全区边缘型扩展面积为 382.2 km^2,占城市扩展总面积的 54.8%。

蛙跃型和内填型扩展面积分别为 222.8 km^2和 92.5 km^2,分别占总扩展面积的 32.0%和 13.2%。在各生物群区中,有 5 个群区以边缘型城市扩展为主。其中,山地草原和灌丛群区边缘型扩展面积最大,为 284.2 km^2,占该生物群区扩展总面积的 60.8%。在山地草原和灌丛群区中,75%的生态区以边缘型城市扩展为主。其中,藏东南灌丛草甸生态区边缘型扩展面积最大,为 154.4 km^2,占该生物群区扩展总面积的 63.2%(表 1、表 2)。地形的限制是青藏高原城市扩展过程呈现以边缘型为主的可能原因。青藏高原的城市土地主要集中在河湟谷地、“一江两河”地区和克什米尔谷地等河谷地区。这些地区地势较低,光照充足,水资源丰富且土壤肥沃,为城市扩展提供了良好的自然区位条件[29]。然而,受周边地形的限制,这些河谷地区的城市扩展主要沿着河流主干道向外线性延伸,导致以边缘型扩展为主[10—11]。

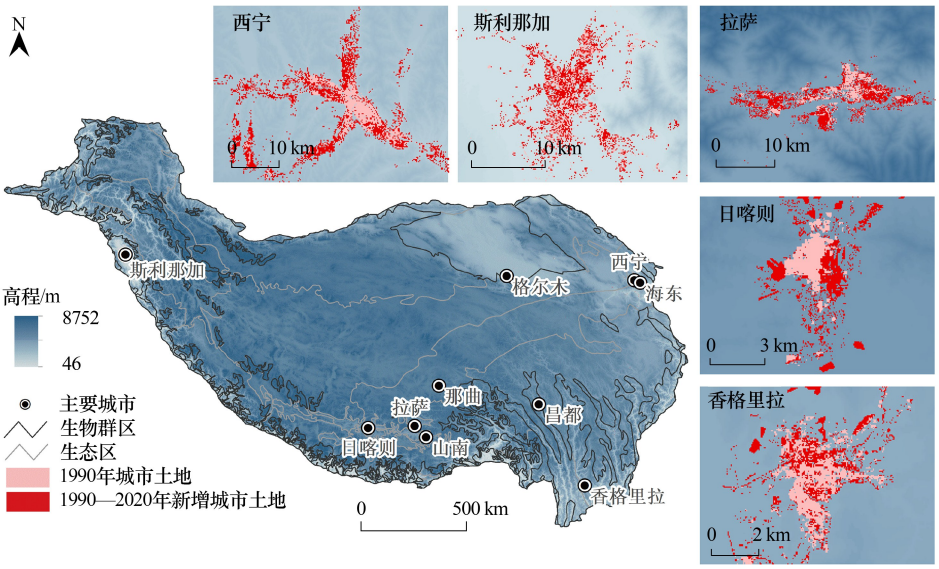

图 3　1990—2020 年青藏高原城市扩展过程

Fig.3　The urban expansion on the Qinghai Tibet Plateau from 1990 to 2020

青藏高原城市景观呈破碎化趋势。1990—2020 年,青藏高原城市的斑块密度和景观形状指数不断增加。其中,斑块密度从 0.009 增长至 0.021,增长了 1.33 倍。景观形状指数从 1.46 增加至 4.20,增加了 1.88 倍。各生物群区中,斑块密度和景观形状指数也呈增加趋势。其中,山地草原和灌丛群区的斑块密度和景观形状指数增加最多。斑块密度从 0.006 增加到 0.016,增加了 1.67 倍。景观形状指数从 0.88 增加到 2.92,增加了 2.32 倍。在山地草原和灌丛群区,雅鲁藏布江干旱草原生态区的斑块密度增加最多,增加了 2.55 倍。藏东南灌丛草甸生态区的景观形状指数增加最多,增加了 1.98 倍(表 1、表 2)。青藏高原城市景观呈现破碎化是多种因素综合作用的结果。一方面,在河谷城市发展的过程中会规避山体与水体的阻隔,从而新增不连续的城市土地斑块[30]。另一方面,受交通因素辐射带动作用的影响,青藏高原城市土地易沿着交通干线增长,加大了城市斑块的破碎化[31]。

3.2　城市扩展过程区位因素重要性

高程是影响青藏高原城市扩展最主要的区位因素。在全区尺度上,高程对青藏高原城市扩展的重要性为 32.81%。到城市中心距离、公路和坡向等区位因素的重要性次之,分别为 19.39%、14.98%和 10.77%。铁路、坡度和河流因素对城市扩展的重要性均小于 10%。各生物群区中,高程均是影响青藏高原城市扩展最主要的区位因素。其中,山地草原和灌丛群区高程的重要性最大。该群区高程的重要性为 31.93%。到城市中心距离、公路和坡度的重要性分别为 21.63%、13.22%和 11.14%。铁路、坡度和河流等因素的重要性小于 10%(图 4)。在山地草原和灌丛群区的各生态区中,高程也均是影响青藏高原城市扩展最主要的区位因素。其中,青藏高原中部高寒草原生态区的高程重要性最大,重要性为 30.59%。到城市中心距离、公路、坡向和铁路

的重要性次之,分别为 22.29%、13.36%、12.25%和 11.92%。坡度和河流等因素的重要性小于 10%(图 5)。

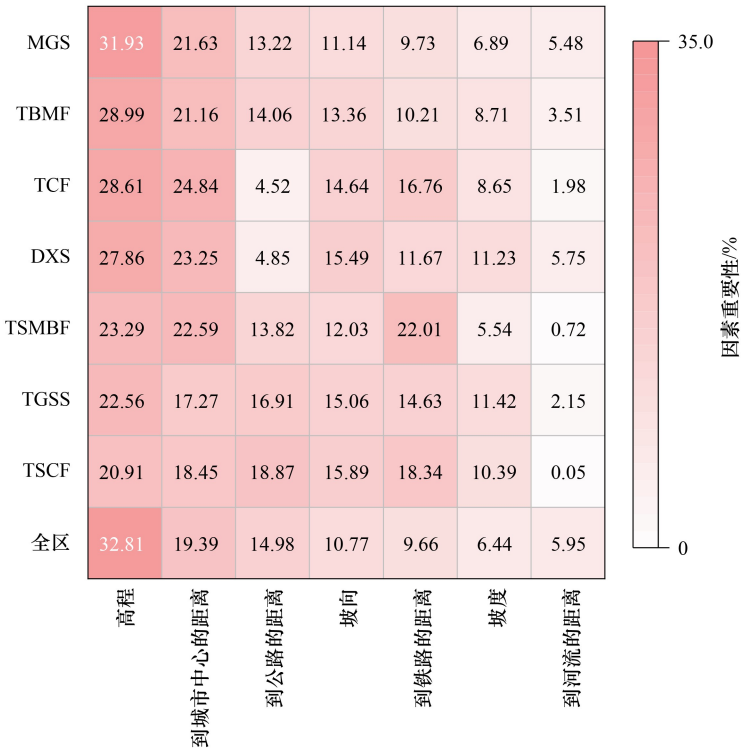

图 4 1990—2020 年不同生物群区城市扩展过程区位因素的重要性

Fig.4 The importance of location factors of urban expansion in different biomes from 1990 to 2020

图中缩写代表 7 个不同的生物群区;分别为 MGS:山地草原和灌丛群区 montane grasslands and shrublands;TBMF:温带阔叶和混交林群区 Temperate broadleaf and mixed forests;TCF:温带针叶林 Temperate conifer forests;DXS:荒漠和干旱灌丛群区 Deserts and xeric shrublands;TSMBF:热带亚热带湿润阔叶林群区 Tropical and subtropical moist broadleaf forests;TGSS:温带草原和灌丛群区 Temperate grasslands, savannas and shrublands;TSCF:热带亚热带针叶林群区 Tropical and subtropical coniferous forests

在不同扩展模式下,高程也都是对城市扩展影响最大的区位因素。全区尺度上,在城市扩展面积最大的边缘型扩展模式中,高程的重要性为 30.62%。第二重要的区位因素是到城市中心距离,为 19.67%。在蛙跃型和内填型扩展模式中,高程的重要性分别为 32.03%和 25.21%(图 6)。在城市扩展面积最大的山地草原灌丛群区中,高程对蛙跃型、边缘型和内填型三种城市扩展模式的重要性分别为 32.04%、29.25%和 25.78%,也都是不同扩展模式下重要性最大的区位因素(图 7)。在山地草原灌丛群区城市扩展面积最大的藏东南灌丛草甸生态区中,高程对蛙跃型、边缘型和内填型三种城市扩展模式的重要性分别为 27.07%、31.33%和 27.43%,同样均为不同扩展模式下重要性最大的区位因素(图 8)。

3.3 城市扩展过程区位因素重要性的变化

高程对城市扩展的重要性在 1990—2020 年期间减小。全区尺度上,高程重要性由 1990—2000 年的 35.10%减小到 2010—2020 年的 31.06%。在生物群区尺度上,高程重要性也呈现减小的趋势。其中,山地草原和灌丛群区的高程重要性减小最多,由 35.77%减小到 31.46%(表 3)。在山地草原和灌丛生物群区中,各生态区高程重要性减小了 1.72%—5.49%。其中,该生物群区城市扩展面积最大的藏东南灌丛草甸生态区的高程重要性减小 4.04%(图 9)。已有研究发现青藏高原的城市土地正在不断地往高海拔地区扩展[12],这也意味着高程对青藏高原城市扩展的限制作用正在减小。由于国家与地方对高质量生境和耕地的保护,青藏高原用于建设的土地资源受限。然而,城市土地的需求仍不断增长,这一定程度上导致城市不断往高海拔地区发展[32]。

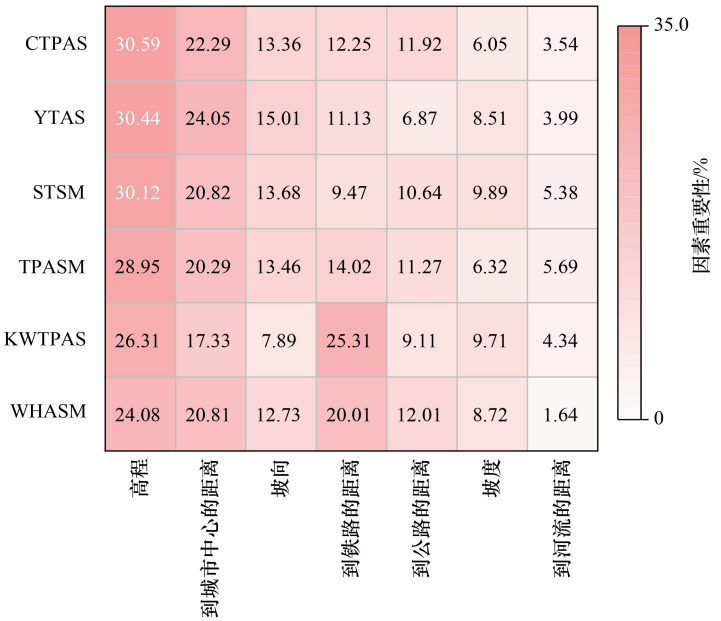

图 5　1990—2020 年山地草原和灌丛群区内不同生态区城市扩展过程区位因素的重要性

Fig.5　The importance of location factors of urban expansion in different ecoregions of montane grasslands and shrublands from 1990 to 2020

图中缩写代表 6 个不同的生态区;分别为 CTPAS:青藏高原中部高寒草原生态区 Central Tibetan Plateau alpine steppe;YTAS:雅鲁藏布江干旱草原生态区 Yarlung Tsangpo arid steppe;STSM:藏东南灌丛草甸生态区 Southeast Tibet shrublands and meadows; TPASM:青藏高原高寒灌丛草甸生态区 Tibetan Plateau alpine shrublands and meadows;KWTPAS:喀喇昆仑-青藏高原西部高寒草原生态区 Karakoram-west Tibetan Plateau alpine steppe; WHASM:喜马拉雅西部高山灌丛草甸生态区 Western Himalayan alpine shrub and Meadows

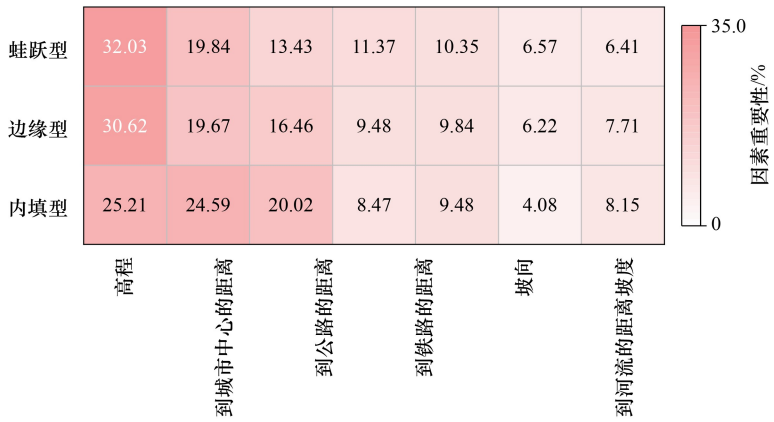

图 6　青藏高原不同城市扩展模式下区位因素的重要性

Fig.6　The importance of location factors in different urban expansion modes on the Tibetan Plateau

1990—2020 年,到铁路的距离是重要性增加最多的区位因素。全区尺度上,到铁路的距离对城市扩展的重要性从 2.15%增长到 10.56%,增加了 3.9 倍。到城市中心的距离和坡向的重要性分别增加了 1.08%和 0.05%。在生物群区尺度上,山地草原与灌丛群区到铁路的距离的重要性增加最多,增加了 6.62%。山地草原和灌丛生物群区中有超过 70%生态区,到铁路的距离是区域内重要性上升最多的区位因素,重要性增加了 1.36%—9.17%。其中,在城市扩展面积最大的藏东南灌丛草甸生态区中,到铁路的距离重要性增加了 2.21%(图 9)。

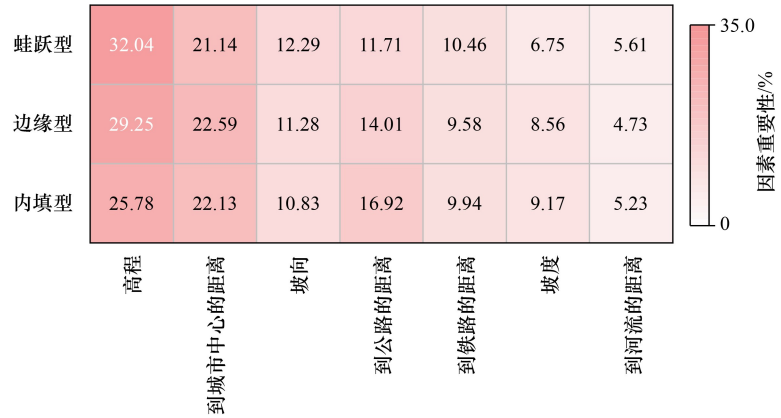

图 7 山地草原和灌丛群区不同城市扩展模式下区位因素的重要性

Fig.7 The importance of location factors in different urban expansion modes on montane grasslands and shrublands

图 8 藏东南灌丛草甸生态区不同城市扩展模式下区位因素的重要性

Fig.8 The importance of location factors in different urban expansion modes on southeast Tibet shrublands and meadows

表 3 高程和到铁路的距离对青藏高原城市扩展的重要性

Table 3 Importance of elevation and distance to railways for urban expansion in Qinghai Tibet Plateau

生物群区 Biomes	区位因素重要性 Importance of location factors/%			
	高程		到铁路的距离	
	1990—2020 年	2010—2020 年	1990—2000 年	2010—2020 年
MGS	35.77	31.46	3.26	9.88
TBMF	31.05	28.10	0	18.87
DXS	27.99	26.71	6.93	14.71
TCF	30.83	27.72	14.42	19.72
TSMBF	19.20	24.26	17.33	18.94
TSCF	21.78	19.20	0.84	16.40
TGSS	23.49	20.23	0	20.22
全区 Whole region	35.10	31.06	2.15	10.56

4 讨论

4.1 目视解译的城市土地数据和随机森林模型可以准确反映青藏高原城市扩展过程的区位因素特征

青藏高原城市土地空间异质性较强,城市斑块易出现“同物异谱”的现象,这导致该地区城市土地的识别

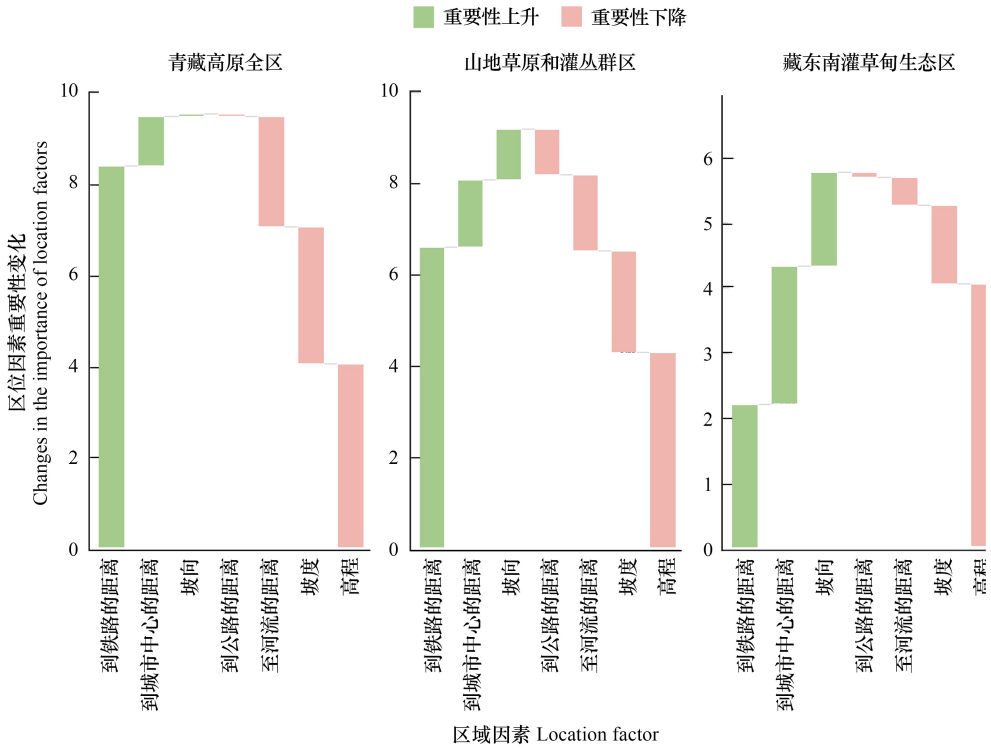

图 9　青藏高原 1990—2020 城市扩展区位因素重要性变化

Fig.9　Changes in the importance of location factors for urban expansion on the Qinghai Tibet Plateau from 1990 to 2020

精度低于全球平均水平[25]。因此,本研究结合 GAIA 数据和目视解译方法订正青藏高原城市土地数据,从而提高城市土地信息的准确性。参考 Liu[27]的研究,本文基于社会经济数据和高分辨率遥感影像评估了青藏高原 1990—2020 年的城市土地提取精度。首先,基于统计年鉴数据分别分析了 GDP 年均增长量、城镇人口年均增长量与城市土地年均增长量之间的相关关系。研究发现,本文获取的青藏高原城市土地信息与 GDP 和城镇人口数据均显著相关,Pearson 相关系数分别为 0.90(P<0.001)和 0.87(P<0.001),高于其它城市土地数据(图 10、图 11)。其次,采用等量分层随机抽样的方法选取了 1000 个样本点,结合谷歌地球高分辨率影像(4 m)评估了本文获取的城市土地信息与已有其它城市土地信息[25,33—34]的精度。考虑其他城市土地数据的时间范围,本文对比了 1990—2010 年各城市土地数据的精度。研究发现,本文获取的青藏高原城市土地信息更加可靠,青藏高原 1990—2010 年城市土地动态信息的 Kappa 系数和总体精度分别为 0.76 和85.47%,高于其它城市土地信息。在西宁、拉萨和山南等不同城市化水平的城市中,本文获取的城市土地斑块的错分误差和漏分误差更小(图 12)。

现有研究主要采用 Logistic 回归模型分析城市扩展区位因素重要性[35—37]。因此,参考宋世雄等[18]的研究,本文基于曲线下面积(AUC)指数对比了两个模型对城市土地的模拟精度,进而验证两个模型分析青藏高原城市扩展区位因素的可靠性。AUC 指数是机器学习领域中判断分类和检测结果好坏的常用指标,AUC 值越大表示该模型的精度越高[38]。研究发现,随机森林方法比 Logistic 回归拥有更高的模拟精度,二者的 AUC 值分别为 0.98 和 0.84(图 13)。一方面,随机森林模型具有较强的泛化能力。模型在进行数据训练的过程中,采用无偏估计计算泛化误差,减小了模型的过拟合,从而提高模型的泛化能力。另一方面,随机森林模型还具有较强的模拟能力。该模型在构建决策树的过程中采用有放回的随机抽样,这种随机性提高了模型的抗噪声能力,从而提高了模型的模拟能力。因此,随机森林方法可以准确揭示青藏高原区位因素的基本特征。

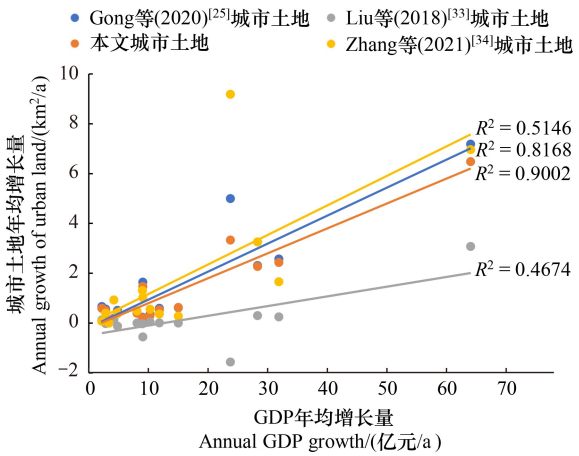

图 10 2000—2020 年青藏高原城市土地年均增长量与国内生产总值(GDP)年均增长量的相关性

Fig.10 Correlation between the average annual growth of urban land and the average annual growth of GDP in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

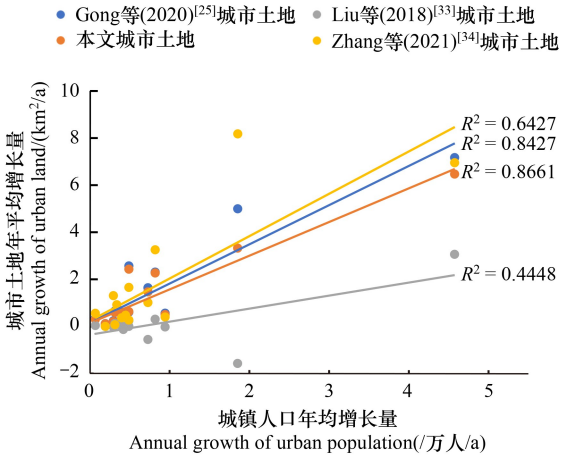

图 11 2000—2020 年青藏高原城市土地年均增长量与城镇人口年均增长量的相关性

Fig.11 Correlation between the average annual growth of urban land and the average annual growth of urban population in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020

4.2 铁路的建设推动了青藏高原的城市扩展过程

研究发现,虽然高程在 1990—2020 年是青藏高原城市扩展最重要的区位因素,但其重要性正在下降。在此期间,到铁路的距离这一要素的重要性迅速上升,这与青藏高原铁路工程的建设有关。2000 年,青藏高原铁路仅有西宁至格尔木段建成通车,铁路里程共 1134 公里。2000—2020 年,青藏高原铁路不断发展,不但实现了西宁至拉萨的全线通车,还建设了敦格铁路、拉日铁路和拉林铁路等,铁路总里程达到 4416 km,是 2000 年铁路总里程的近 4 倍。这改善了青藏地区的交通运输条件,提升了区域发展能力,加快了青藏高原地区城市化进程[13]。

一方面,铁路促进了青藏地区工业的发展,从而提升区域的城市化率。受能源供应不足和交通不便的制约,工业一直是青藏地区经济的短板[39]。青藏铁路建成后,能源运输的制约因素减弱,工业在经济中的地位随着制约的减少而逐步上升,区域的城市化率也随之提升[40]。此外,青藏高原铁路的建设,进一步加强了高原与内地之间的经济社会联系,推动了高原矿产业和特色农副产品加工业的发展[41—42]。另一方面,铁路促进旅游业的发展,从而提升区域的城市化率。青藏高原独特自然和人文景观对国内外的旅游者具有很强的吸引力。青藏高原铁路网络未完善之前,由于交通不便,使得游客难以到达。铁路交通完善后,青海省和西藏自治区的客运量由 2006 年的 389 万增长至 2019 年的 1527 万,旅游业收入同比增长了近 18 倍,青藏高原旅游业得到了快速的发展[23,24]。本结果与已有研究一致。这些研究发现青藏铁路促进了青藏高原城市与内地之间的联系,增强了城市经济的发展,对高原城市的扩展过程具有明显的推动作用[13,43—44]。

4.3 青藏高原铁路的建设对区域濒危物种产生影响

在城市扩展的区位因素研究中,本研究发现铁路因素的重要性迅速增加,这意味着铁路因素对青藏高原的城市扩展具有重要的推动作用。然而,铁路的建设会带来生境破碎化[45],进而影响区域的生物多样性[46]。参考连新明等[47]的研究,本研究将铁路周围 500 m 的缓冲区作为铁路对濒危物种的影响范围,并与濒危物种最适宜生境进行叠加分析,从而量化青藏高原新增铁路对濒危物种的影响,以期为高原的城市扩展提供政策建议。

新增铁路对青藏高原内 380 种濒危物种造成了威胁,占 IUCN 红色名录公布的青藏高原濒危物种总数的 31.85%(380 种/1193 种)[22]。其中,鸟类 353 种、哺乳动物 25 种和爬行动物 2 种。在所有的生态区中,藏东

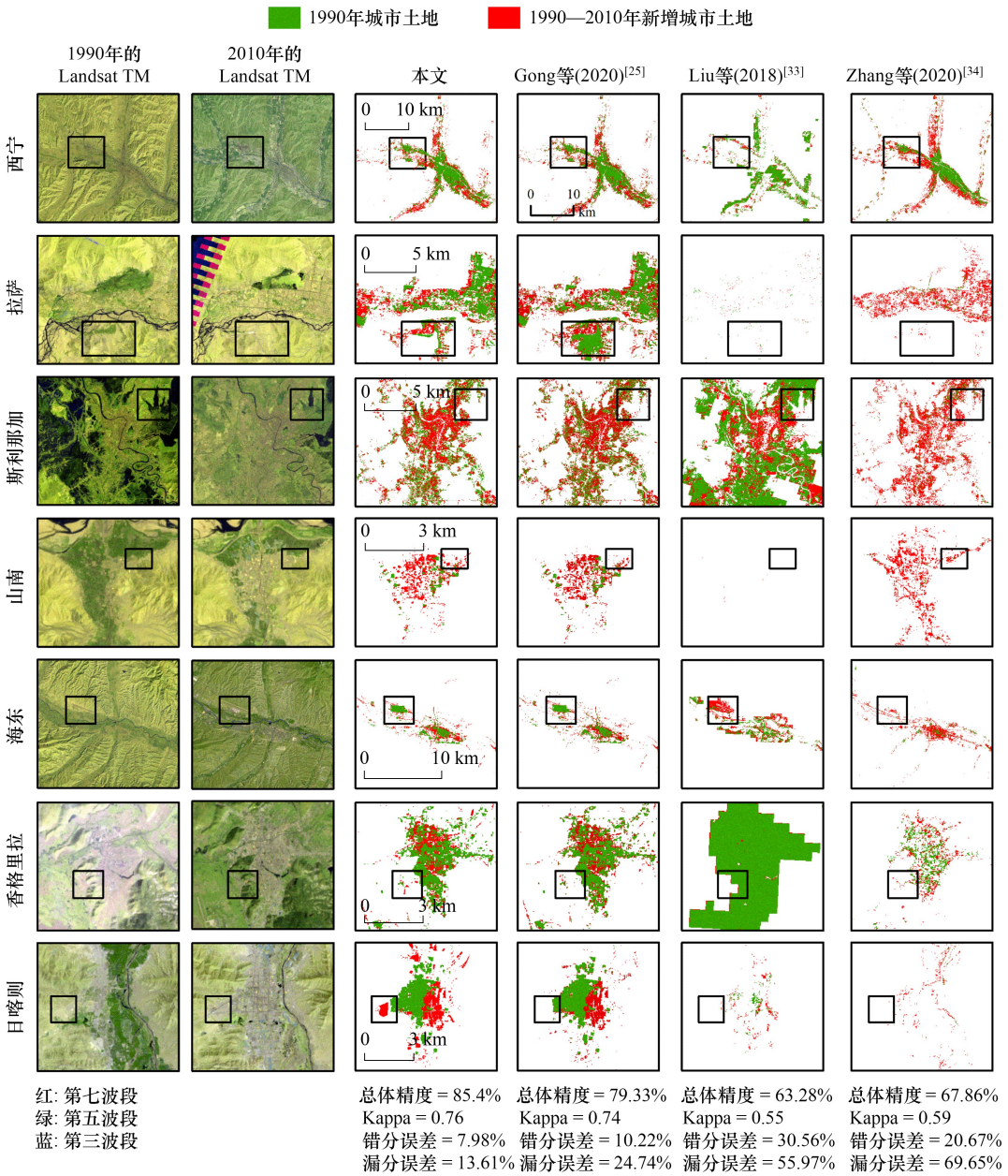

图 12　1990—2010 年城市土地动态精度对比

Fig.12　Precision comparison of urban land dynamics from 1990 to 2010

南灌丛草甸生态区的铁路建设对濒危物种的影响最大,该生态区共有 335 种濒危物种受到铁路的影响,占藏东南灌丛草甸生态区濒危物种总数的 52.5%,占青藏高原濒危物种总数的 21.29%。其中,鸟类 313 种、哺乳动物 20 种和爬行动物 2 种(表 4)。已有学者也发现青藏高原铁路的建设对濒危物种产生了影响。例如,夏霖等[48]研究发现,青藏铁路高耸的路基对可可西里藏羚羊的季节性迁徙造成影响。殷宝法等[49]研究发现,青藏铁路对藏羚羊、藏原羚、藏野驴等蹄类动物的日常活动均有不同程度的影响。王云等[50]发现,青藏铁路对藏羚羊的迁移具有明显的阻隔作用。

在“一带一路”的背景下,未来青藏高原还将进一步推进铁路的建设,发挥铁路对城市扩展的辐射带动作用。这将进一步增加城市扩展与区域生物多样性保护之间的矛盾。为了实现青藏高原的可持续发展,建议在加强铁路建设带动区域城市发展的同时,也要采用有效措施减小铁路建设对濒危物种的影响。首先,在野生

动物经常出没的地方构建廊道,确保自然生境间的连通性,减小铁路建设带来的生境破碎化对野生动物的影响。其次,严格规划铁路的建设路线,避免铁路建设占用高质量的自然生境。同时,借助铁路对城市扩展的辐射作用,引导未来城市有方向性的扩展,避免对区域草甸和湿地等重要生境的占用。最后,调整铁路的运行时间,在铁路两侧动物活动的高峰时段控制火车的过往频次,减小铁路对动物活动的影响。同时,加快青藏高原铁路的电气化改造工程,减小铁路污染物排放而对野生动物带来的间接影响。

4.4 未来展望

本研究的贡献主要体现在两个方面。首先,本研究分析了青藏高原全域城市扩展的区位因素特征,为理解青藏高原地区城市扩展过程提供了整体视角。其次,本研究基于生态学尺度,分析了区位因素对区域内濒危物种的影响,为青藏高原的生物多样性保护提供了理论基础。

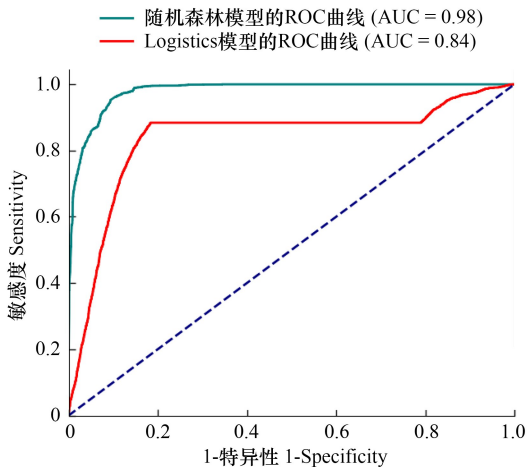

图 13 随机森林和 Logistic 回归的 ROC 曲线

Fig.13 The ROC curves of random forest and logistic regression

ROC:接受者操作特性曲线 Receiver operating characteristic curve;AUC:曲线下面积 Area under curve

表 4 受铁路影响的濒危物种数量

Table 4 The number of endangered species affected by railway

生态区 Ecoregions	鸟类/只 Birds	哺乳动物/只 Mammals	爬行动物/只 Reptiles	总计 All	占青藏高原濒危物种的比例/% Proportion of endangered species in Qinghai Tibet Plateau
STSM	313	20	2	335	28.08
CTPAS	221	14	0	235	19.70
YTAS	198	8	1	207	17.35
QBSD	164	9	0	173	14.50
NHSCF	151	6	1	158	13.24
TPASM	109	6	1	116	9.72
全区 Whole region	353	25	2	380	31.85

NHSCF:喜马拉雅东北部亚高山针叶林生态区 Northeastern Himalayan subalpine conifer forests;QBSD:柴达木盆地半荒漠生态区 Qaidam Basin semi-desert

然而,本研究仍存在一定的不足。首先,在基于随机森林模型量化区位因素重要性过程中,忽略了目标像元邻域区位因素的影响。目标像元转化为城市像元是受该像元所处位置以及该位置一定邻域范围内区位因素综合影响的结果[8]。其次,本研究仅分析了各区位因素对青藏高原城市扩展的重要性及其变化,没有分析各区位因素之间的联系。最后,在分析铁路对濒危物种影响时,只简单的将铁路周围 500 m 缓冲区作为铁路对濒危物种的影响区域,忽略了铁路对 500 m 范围外濒危物种的影响。然而,500 m 范围已经覆盖了大部分铁路对周边物种影响的区域[51—52]。虽然本研究可能低估了铁路对青藏高原濒危物种的影响,但是研究结果仍然可以为区域生物多样性保护提供依据。

在未来研究中,可以结合全卷积网络方法,通过添加卷积核来量化目标像元一定邻域范围内区位因素对城市扩展的综合影响。其次,采用多变量分析的方法进一步分析各区位因素之间的相关性,结合区位因素之间的相关性提出更加全面性的政策建议。最后,结合物种分布模型和实测的野外站点数据综合分析铁路对濒危物种的影响,从而提高评估结果的精度。

5　结论

1990—2020 年,青藏高原经历了快速的城市扩展过程。全区城市土地面积由 277.4 km^2 增加到 974.9 km^2,增长了 697.5 km^2,增长了 2.5 倍。其中,青藏高原城市扩展过程以边缘型为主。边缘型模式扩展 382.2 km^2,占扩展总面积的 54.8%。快速的城市扩展过程使得城市景观变得破碎化。其中,斑块密度从 0.009 增长至 0.021,增长了 1.33 倍。景观形状指数从 1.46 增加至 4.20,增加了 1.88 倍。

高程是影响青藏高原城市扩展最主要的区位因素。然而,其对新增城市土地的重要性正在减小。全区尺度上,高程重要性由 1990—2000 年的 35.10%减小到 2010—2020 年的 31.06%,减小了 4.04%。在城市扩展面积最大的山地草原和灌丛群区中,其重要性减小了 4.31%。在山地草原和灌丛群区城市扩展面积最大的藏东南灌丛草甸生态区中,其重要性减小了 4.04%。

1990—2020 年,到铁路的距离对青藏高原城市扩展的重要性增大。在全区尺度上,到铁路的距离的重要性由 2.15%增加到 10.56%,重要性增加了 8.41%。在城市扩展面积最大的山地草原与灌丛群区中,到铁路的距离的重要性增加了 6.62%。在该生物群区城市扩展面积最大的藏东南灌丛草甸生态区中,铁路重要性增加了 2.21%。

青藏高原铁路的建设对区域濒危物种造成威胁。青藏高原铁路对区域内近三成(380 种/1193 种)的濒危物种造成了威胁。其中,鸟类 353 种、哺乳动物 25 种和爬行动物 2 种。因此,在发挥铁路对区域城市扩展辐射作用的同时,还要通过建立野生动物廊道和限制铁路运行时间段等方式减小铁路对濒危物种的影响,实现区域的可持续发展。

参考文献(References):

[1] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298-1306.

[2] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Gao Y H, Zhu D, Yang G, Tian J Q, Kang X M, Piao S L, Ouyang H, Xiang W H, Luo Z B, Jiang H, Song X Z, Zhang Y, Yu G R, Zhao X Q, Gong P, Yao T D, Wu J H. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2013, 19(10): 2940-2955.

[3] 戚伟. 青藏高原城镇化格局的时空分异特征及影响因素. 地球信息科学学报, 2019, 21(8): 1196-1206.

[4] 牟雪洁, 赵昕奕, 饶胜, 黄琦, 柴慧霞. 青藏高原生态屏障区近 10 年生态系统结构变化研究. 北京大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 279-286.

[5] 冯雨雪, 李广东. 青藏高原城镇化与生态环境交互影响关系分析. 地理学报, 2020, 75(7): 1386-1405.

[6] 陆锋, 陈洁. 武汉城市圈城市区位与可达性分析. 地理科学进展, 2008, 27(4): 68-74.

[7] 许学强, 周一星, 宁越敏. 城市地理学. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[8] He C Y. 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.

[9] Zhuang H M, Chen G Z, Yan Y C, Li B J, Zeng L, Ou J P, Liu K Y, Liu X P. Simulation of urban land expansion in China at 30 m resolution through 2050 under shared socioeconomic pathways. GIScience & Remote Sensing, 2022, 59(1): 1301-1320.

[10] 唐艳, 杨永春, 贾伟, 高丽文. 西宁市 2001—2016 年空间扩展及驱动力分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 2019, 55(3): 365-372.

[11] 蒲光昕, 李玲琴, 柏家平, 薛军. 西宁市城市用地时空扩展研究. 国土资源科技管理, 2011, 28(4): 19-24.

[12] Pan X H, Wang Y H, Liu Z F, He C Y, Liu H M, Chen Z R. Understanding urban expansion on the Tibetan Plateau over the past half century based on remote sensing: the case of Xining city, China. Remote Sensing, 2020, 13(1): 46.

[13] Tang W, Zhou T C, Sun J, Li Y R, Li W P. Accelerated Urban Expansion in Lhasa City and the Implications for Sustainable Development in a Plateau City. Sustainability, 2017, 9(9), 1499.

[14] 任秀金. 青海省德令哈市城市建设用地扩展研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.

[15] Olson D M, Dinerstein E, Wikramanayake E D, Burgess N D, Powell G V N, Underwood E C, D'Amico J A, Itoua I, Strand H E, Morrison J C, Loucks C J, Allnutt T F, Ricketts T H, Kura Y, Lamoreux J F, Wettengel W W, Hedao P, Kassem K R. Terrestrial Ecoregions of the World: a New Map of Life on Earth: a new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. BioScience, 2001, 51(11): 933-938.

[16] Arlington, VA: The Nature Conservancy. The Nature Conservancy and World Wildlife Fund. Standards for Ecoregional Assessments and Biodiversity Visions. 2006.

[17] Zhang D C, Liu X P, Wu X Y, Yao Y, Wu X X, Chen Y M. Multiple intra-urban land use simulations and driving factors analysis: a case study in Huicheng, China. GIScience & Remote Sensing, 2019, 56(2): 282-308.

[18] 宋世雄, 张金茜, 刘志锋, 何春阳. 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. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1021-1035.
[19] 张镱锂, 李炳元, 刘林山, 郑度. 再论青藏高原范围. 地理研究, 2021, 40(6): 1543-1553.
[20] 刘宪锋, 任志远, 林志慧. 青藏高原生态系统固碳释氧价值动态测评. 地理研究, 2013, 32(4): 663-670.
[21] 韩熠哲, 马伟强, 王炳赟, 马耀明, 田荣湘. 青藏高原近 30 年降水变化特征分析. 高原气象, 2017, 36(6): 1477-1486.
[22] IUCN (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources). The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download.
[23] 青海省统计局, 青海统计年鉴-2019, 2020. 北京: 中国统计出版社, 2019, 2020.
[24] 西藏自治区统计局, 西藏统计年鉴-2019, 2020. 北京: 中国统计出版社, 2019, 2020.
[25] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. Remote Sensing of Environment, 2020, 236: 111510.
[26] 刘焱序, 傅伯杰, 王帅, 赵文武. 从生物地理区划到生态功能区划——全球生态区划研究进展. 生态学报, 2017, 37(23): 7761-7768.
[27] Liu Z F. 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.
[28] Liu X P, Li X, Chen Y M, Tan Z Z, Li S Y, Ai B. A new landscape index for quantifying urban expansion using multi-temporal remotely sensed data. Landscape Ecology, 2010, 25(5): 671-682.
[29] 陈喜东, 石培基, 王川, 岳晓新, 刘骁啸, 张文敏. 不同情景下河谷型城市建设用地扩张的景观生态格局响应——以兰州市为例. 生态学杂志, 2018, 37(11): 3381-3389.
[30] Liu X, Luo Y Y, Huang M H. Study on the spatial structure and city form construction of river valley-type cities in the context of artificial intelligence—a case study of northwest China. Wireless Communications and Mobile Computing, 2022, 2022: 1-12.
[31] 达佤扎喜, 王静, 张志明, 秀措, 赵秀玲, 王嘉丽, 周伟奇. 高原河谷城镇化对植被覆盖度的影响. 生态学报, 2020, 40(17): 6025-6036.
[32] 周亮, 党雪薇, 周成虎, 王波, 魏伟. 中国建设用地的坡谱演化规律与爬坡影响. 地理学报, 2021, 76(7): 1747-1762.
[33] Liu X P, Hu G H, Chen Y M, Li X, Xu X C, Li X Y, Pei F S, Wang S J. 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.
[34] Zhang X, Liu L Y, Chen X D, Gao Y, Xie S, Mi J. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery. Earth System Science Data, 2021, 13(6): 2753-2776.
[35] 李春林, 刘淼, 胡远满, 徐岩岩, 孙凤云. 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.
[36] Luo, T., Tan, R., Kong, X., Zhou, J. Analysis of the Driving Forces of Urban Expansion Based on a Modified Logistic Regression Model: A Case Study of Wuhan City, Central China. Sustainability, 2019, 11, 2207.
[37] Mawuli A, Wahib S, Brigitta S. Assessment of land cover dynamics and drivers of urban expansion using geospatial and logistic regression approach in wa municipality, Ghana. Land, 2021, 10(11): 1251.
[38] 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.
[39] Yang X T, Qiu X P, Fang Y P, Xu Y, Zhu F B. Spatial variation of the relationship between transport accessibility and the level of economic development in Qinghai-Tibet Plateau, China. Journal of Mountain Science, 2019, 16(8): 1883-1900.
[40] 苗毅, 刘海猛, 宋金平, 戴特奇. 青藏高原交通设施建设及影响评价研究进展. 地球科学进展, 2020, 35(3): 308-318.
[41] Gao X C, Wang B, Sun D Q. Do railways improve territorial cohesion of the Tibetan Plateau? A case study of the Qinghai-Tibet Railway. Applied Geography, 2022, 144: 102720.
[42] 西藏自治区农牧厅. 西藏高原特色农产品基地发展规划. (2018-11-26). http://www.xizang.gov.cn/zwgk/xxfb/ghjh_431/201902/t20190223_61982.html.
[43] Li S C, Gong J, Deng Q H, Zhou T Y. Impacts of the Qinghai-Tibet railway on accessibility and economic linkage of the third pole. Sustainability, 2018, 10(11): 3982.
[44] Gao D, Li S C. Spatiotemporal impact of railway network in the Qinghai-Tibet Plateau on accessibility and economic linkages during 1984-2030. Journal of Transport Geography, 2022, 100: 103332.
[45] 王德智, 邱彭华, 方源敏. 丽香铁路建设对沿线景观格局影响的尺度效应及其生态风险. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2493-2503.
[46] 江腊沙. 青藏铁路唐拉段工程建设对沿线生物多样性的影响分析. 环境保护, 2008, 36(16): 31-33.
[47] 连新明, 李晓晓, 徐图. 可可西里四种有蹄类动物对道路的回避距离及保护建议. 生态学杂志, 2012, 31(1): 81-86.
[48] 夏霖, 杨奇森, 李增超, 武永华, 梁孟元. 交通设施对可可西里藏羚季节性迁移的影响. 四川动物, 2005, 24(2): 147-151.
[49] 殷宝法, 淮虎银, 张镱锂, 周乐, 魏万红. 青藏铁路、公路对野生动物活动的影响. 生态学报, 2006, 26(12): 3917-3923.
[50] 王云, 关磊, 杜丽侠, 曲家鹏, 王明月, 韩用顺, 杨艳刚, 周红萍, 孔亚平. 青藏公路和铁路对青藏高原四种典型有蹄类动物的叠加阻隔和回避影响. 生态学杂志, 2021, 40(4): 1091-1097.
[51] Yu H, Song S Y, Liu J Z, Li S, Zhang L, Wang D J, Luo S J. Effects of the Qinghai-Tibet railway on the landscape genetics of the endangered przewalski's gazelle (*Procapra przewalskii*). Scientific Reports, 2017, 7: 17983.
[52] Piccini I, Pittarello M, Gili F, Dotta A, Lorizzo R, Magnani C, Grieco P, Lonati M, Bertolino S, Bonelli S. Using forest compensation funds to reverse biodiversity loss: a case study of Turin-Lyon high-speed railway line. Sustainability, 2022, 14(8): 4411.