

doi: 10.6046/zrzyyg.2022194

引用格式: 排日海·合力力, 咎梅. 干旱区绿洲城市生态环境时空格局变化及影响因子研究[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(3): 201–211. (Pariha H, Zan M. Spatio-temporal changes and influencing factors of ecological environments in oasis cities of arid regions [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(3): 201–211.)

干旱区绿洲城市生态环境时空格局变化及影响因子研究

排日海·合力力¹, 咎梅^{1,2}

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆
干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054)

摘要: 城市作为人类生活和生产的核心区域, 其生态环境质量越来越受到人们关注, 特别是生态环境脆弱的干旱区城市。在新疆的南疆和北疆 2 个典型绿洲城市(乌鲁木齐市和喀什市)分别选取研究区, 基于 Google Earth Engine (GEE) 构建 2 个城市遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 比较 2000 年、2010 年和 2020 年 2 个研究区生态环境质量的时空变化特征, 并利用随机森林模型定量分析 2 个研究区 RSEI 的影响因素。结果表明: ①近 20 a 间研究区 1 生态环境质量变差, 研究区 2 生态环境质量变好, 研究区 1 生态环境改善的区域集中在城市中心的老城区, 而城区外围的新建区生态环境变差, 研究区 2 东北部生态环境明显改善, 而城市中心周围的新建区生态环境质量变差; ②植被覆盖度是影响 2 个研究区 RSEI 最重要的因子, 气温和降水量是影响 2 个研究区 RSEI 次要的因子, 影响因子对 2 个研究区 RSEI 的影响范围有所差异; ③近 20 a 间研究区 1 城市规模的扩大、不透水面的增加和植被覆盖度的减小是生态环境变差的主要原因, 而研究区 2 城市化与绿色健康城市发展模式共同推进的举措对生态环境质量的改善发挥了重要作用。研究结果可以为研究区城市健康发展提供科学依据。

关键词: 乌鲁木齐市; 喀什市; RSEI; GEE; 随机森林

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0201-11

0 引言

生态环境质量是指生态环境在一定时间和空间内影响人类生存和社会经济发展的程度, 是生态环境的基本属性^[1]。城市化是人类进步的必然过程, 也成为对社会、经济和城市环境持续施加压力的主要因素, 是全球关注的问题。遥感技术具有快速、实时和大规模监测的优点, 已广泛应用于生态环境领域。有学者利用遥感反演的植被指数和地表温度评价森林群落生长情况^[2], 利用地表温度进行城市热岛效应分析^[3]。但生态系统的形成与发展受多种因素影响, 在一定程度上单一指标不能全面反映自然过程的真实情况。2013 年徐涵秋^[4]提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI), 综合利用多种指标定量评价生态环境质量。近年来, RSEI 被广泛应用于区域生态环境质量评价^[5-7]和建模。在研究内容方面 RSEI 被用于地区、环境质量时空演变分析^[8-10]、城市化环境效应的定量分

析^[11-12]、生态环境驱动因子探讨^[13-14], 以及生态环境质量与城市扩张影响机制的研究^[15]。Google Earth Engine(GEE)云计算平台为实现大区域长时期 RSEI 的遥感估算提供了数据源和技术保障。该平台可以快速高效地批量处理海量遥感影像, 弥补了传统单机模式处理遥感数据的缺陷^[16]。

目前, 利用 RSEI 分析城市生态环境质量的研究主要集中在我国经济发达的东部沿海地区, 对西部干旱区城市的关注较少, 尤其是不同城市化水平的多个城市之间生态环境质量对比的研究更少。乌鲁木齐市人口密集, 经济高速发展, 是我国向西开放的桥头堡。近年来随着乌鲁木齐市城市化水平的提高出现了一些生态环境问题, 如大气和水环境的恶化、大面积开垦草原引起的沙漠化和土地沙化现象以及过度放牧引起的草原退化等^[17]。喀什市位于塔克拉玛干沙漠边缘, 生态环境及其脆弱, 近些年来土地盐渍化加剧, 沙化草场退化的生态环境问题也

收稿日期: 2022-05-16; 修订日期: 2022-09-21

基金项目: 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室开放课题“玛纳斯湖湖滨植被水分利用效率对于干旱胁迫的影响研究”(编号: XJDX0909-2021-01)和新疆师范大学博士科研启动基金项目“新疆森林碳储量影响因子研究”(编号: XJNBS2003)共同资助。

第一作者: 排日海·合力力(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事干旱区生态环境研究。Email: 1601250145@qq.com。

通信作者: 咎梅(1979-), 女, 副教授, 主要从事干旱区生态环境与遥感应用研究。Email: zanmei1102@163.com。

比较严峻^[18]。此外,乌鲁木齐市和喀什市是新疆北疆和南疆城市化发展较快的典型城市。因此,本文在 2 个城市分别选取研究区,利用遥感数据计算 2 个研究区 2000 年、2010 年和 2020 年绿度指标归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、湿度指标(wetness, WET)、热度指标地表温度(land surface temperature, LST)和干度指标(normalized difference building and soil index, NDBSI),采用主成分分析法(principal component analysis, PCA)构建 RSEI 模型,并对 2 个研究区生态环境质量的时空变化特征进行对比分析。选取研究区与 RSEI 紧密相关的 6 种因子,利用随机森林模型比较分析 2 个研究区 RSEI 影响因子的重要性及偏依赖性。本研究结果可以为促进新疆南北疆城市化和生态环境质量协调发展提供理论依据,对研究区环境保护和可持续发展也具有实际意义。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市位于新疆天山北麓,准噶尔盆地南缘(E86°46′10″~88°59′48″, N42°54′16″~44°58′16″),是中国乃至中亚和欧洲的交通枢纽,已成为中国向西开放的桥头堡^[19]。乌鲁木齐市属于温带大陆性干旱半干旱气候,是新疆城市化进程最快的城市,城市土地和人口的增长对周围生态环境产生了很大影响。喀什市位于新疆天山南部,塔里木盆地西缘(E75°50′~76°21′, N39°24′~38°37′),是我国连接中亚、西亚和南亚,进而连接欧洲的天然路桥和黄金通道。喀什市属于典型的暖温带大陆性干旱气候。近年来,喀什市的城市化得到很大发展。本文在 2 个城市分别选取研究区,如图 1 所示。

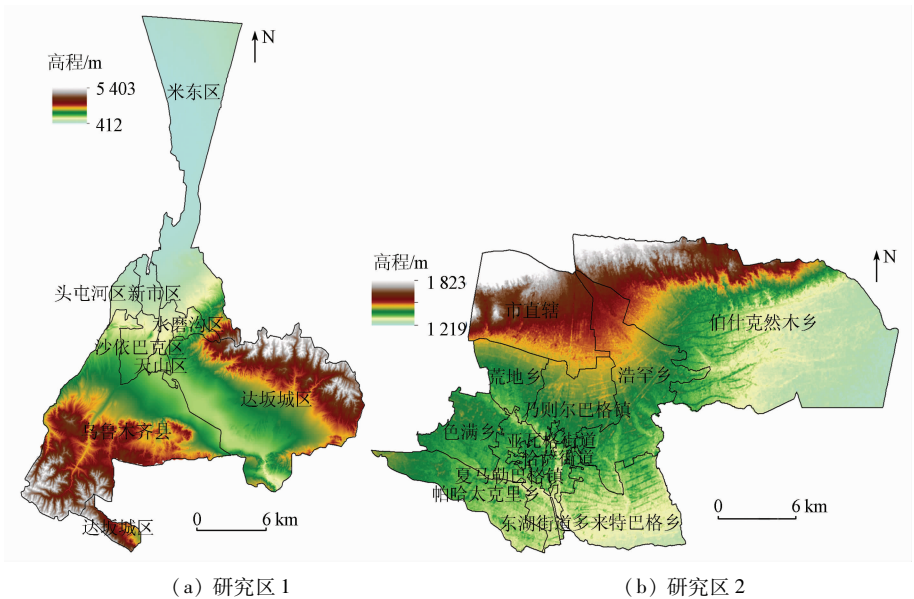


图 1 研究区位置示意图
Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源

GEE 平台的快速发展为遥感数据提供了强大处理平台。本研究基于 GEE 利用 2000 年、2010 年和 2020 年共 211 景 Landsat 影像数据,在 GEE 平台中对遥感数据进行批量拼接、裁剪和水体掩模等预处理。为了避免季节差异造成的影响,选取每年 5—10 月之间的夏季和秋季的数据。基于 GEE 平台计算研究区 NDVI, WET, LST 和 NDBSI,并利用 PCA 法构建研究区 RSEI。数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 30 m。研究区 2000 年、2010 年和 2020 年土地利用类型数据、植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)、气

温、降水量、人口空间分布以及国内生产总值(gross domestic product, GDP)空间分布网格数据集(经济密度)都来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率均为 1 km。根据分类标准对土地利用数据采用耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地 6 个一级类型进行处理^[20]。并对以上空间数据进行坐标系统和空间分辨率的统一。

2 研究方法

2.1 构建 RSEI

综合考虑了研究区干旱、脆弱的生态环境特征

及适用性选取了 RSEI 模型,该模型可以对大区域生态环境实现快速监测和评价。模型包括 4 个指标^[21],分别反映面积广大的研究区与人类生存息息相关的绿色、湿度、热度和干度生态因素,这些指标也是评价干旱区生态环境质量必须包含的重要因素。其中 NDVI 可以反映植被生长和覆盖度的状况;WET 可以较好地反映研究区土壤和植被的水分信息;LST 与城市生态环境密切相关,因而使用 LST 表征热度指标;城区建筑用地面积不断扩大,

$$WET_{TM} = 0.031\ 5\ \rho_{Blue} + 0.202\ 1\ \rho_{Green} + 0.310\ 2\ \rho_{Red} + 0.159\ 4\ \rho_{NIR} - 0.680\ 6\ \rho_{SWIR1} - 0.610\ 9\ \rho_{SWIR2}, \quad (2)$$

$$WET_{OLI} = 0.151\ 1\ \rho_{Blue} + 0.197\ 2\ \rho_{Green} + 0.328\ 3\ \rho_{Red} + 0.340\ 7\ \rho_{NIR} - 0.711\ 7\ \rho_{SWIR1} - 0.455\ 9\ \rho_{SWIR2}, \quad (3)$$

式中 ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别为遥感影像相应的蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率。LST 的公式为:

$$B(T_s) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{6(10)}} + 1\right)} - 273.15, \quad (4)$$

$$LST = B(T_s) / \{1 + [\lambda B(T_s) / \rho] \ln \varepsilon\}, \quad (5)$$

$$IBI = \left[\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right) \right] / \left[\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} + \frac{\rho_{Green}}{\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}} \right) \right], \quad (6)$$

$$SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) - (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}) + (\rho_{NIR} + \rho_{Blue})], \quad (7)$$

$$NDBSI = (IBI + SI) / 2. \quad (8)$$

在构建 RSEI 前对 4 个指标进行归一化处理,确保 4 个指标的数值范围在[0,1]之间。基于 4 个标准化指数,采用 PCA 计算 RSEI 的初始值 $RSEI_0$ 。 $RSEI$ 的计算公式为:

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0-\min}) / (RSEI_{0-\max} - RSEI_{0-\min}), \quad (9)$$

式中 $RSEI_{0-\max}$ 和 $RSEI_{0-\min}$ 分别为初始值 $RSEI_0$ 的最大值和最小值。 $RSEI$ 越接近 1 表明生态环境质量越好;越接近 0 表明生态环境质量越差。

2.2 随机森林模型

随机森林算法是 Breiman^[24]提出的一种包含大量决策树的多分类器组合算法,被认为是一种有效的机器学习算法。其基本原理是在 CART 决策树中引入 Bagging 算法进行多次有放回的随机抽样,然后训练得到单个决策树分类器,完成对集成模型的构建。与其他模型相比,随机森林算法可以处理高维数据集,具有较高的可靠性和较低的时间复杂度,算法灵活、稳健和实用性高。此外,随机森林算法在参数优化、变量排序以及后续变量解释力分析等方面优势较为明显。近年来该方法被广泛应用于解决复杂的地理综合问题中,例如驱动因子分析、因子贡

加上城市周围裸地广泛分布是造成研究区土壤干化危害区域生态环境的原因,所以本文将裸地指数 (soil index, SI) 和建筑指数 (index - based built - up index, IBI) 加权平均后得到的 NDBSI^[22] 作为干度指标反映研究区干旱化的程度。总之 RSEI 模型能够针对研究区存在的生态环境问题进行客观的评价并对研究区具有较好的适用性。其中 NDVI 和 WET 的公式分别为:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{Red}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Red}), \quad (1)$$

式中: $B(T_s)$ 为黑体辐射亮度;对于 Landsat5 影像, $K_1 = 607.76\ W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, $K_2 = 1\ 260.56\ K$;对于 Landsat8 影像, $K_1 = 774.89\ W / (m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$, $K_2 = 1\ 201.14\ K$ ^[23]; $L_{6(10)}$ 为 TM (TIRS) 热红外波段在传感器处的辐射值; λ 为热红外波段中心波长; $\rho = 1.438 \times 10^{-2}\ mK$; ε 为地表比辐射率。IBI, SI 和 NDBSI 的公式分别为:

献、预测分析和遥感大数据分类等领域^[25-27]。综上所述,本文选取随机森林算法定量计算研究区 RSEI 影响因子的重要性的和偏依赖性,其中变量重要性的值越大说明该因子对因变量的贡献权重越高。

2.3 RSEI 模型适用性的检验

为了评价 RSEI 模型对研究区生态环境质量的综合代表性,分别计算了研究区 2020 年的 RSEI, NDVI, WET, LST 和 NDBSI 之间的相关系数 (图 2)。由各生态因子与 RSEI 的相关系数可以看出,研究区 1 的 RSEI 分别与各生态因子之间相关系数绝对值的平均值为 0.838, RSEI 与 NDBSI 相关性最显著,相关系数为 -0.891; NDBSI 与 NDVI, WET 和 LST 的相关性较高,相关系数分别为 -0.870, -0.670 和 0.532; 研究区 2 的 RSEI 与各生态因子之间相关系数绝对值的平均值为 0.961, RSEI 与 NDBSI 的相关性最为显著,相关系数为 -0.994; NDBSI 与 NDVI, WET 和 LST 的相关性比较高,分别为 -0.985, -0.925 和 0.902。以上结果说明 2 个研究区 RSEI 与各生态因子相关性较好,比任意单一指标更具代表性。即 RSEI 能够综合表达研究区各指标的信息。同时也说明选取 RSEI 评价研究区城市生态环境质量的适用性较好,评价结果客观准确性较好。

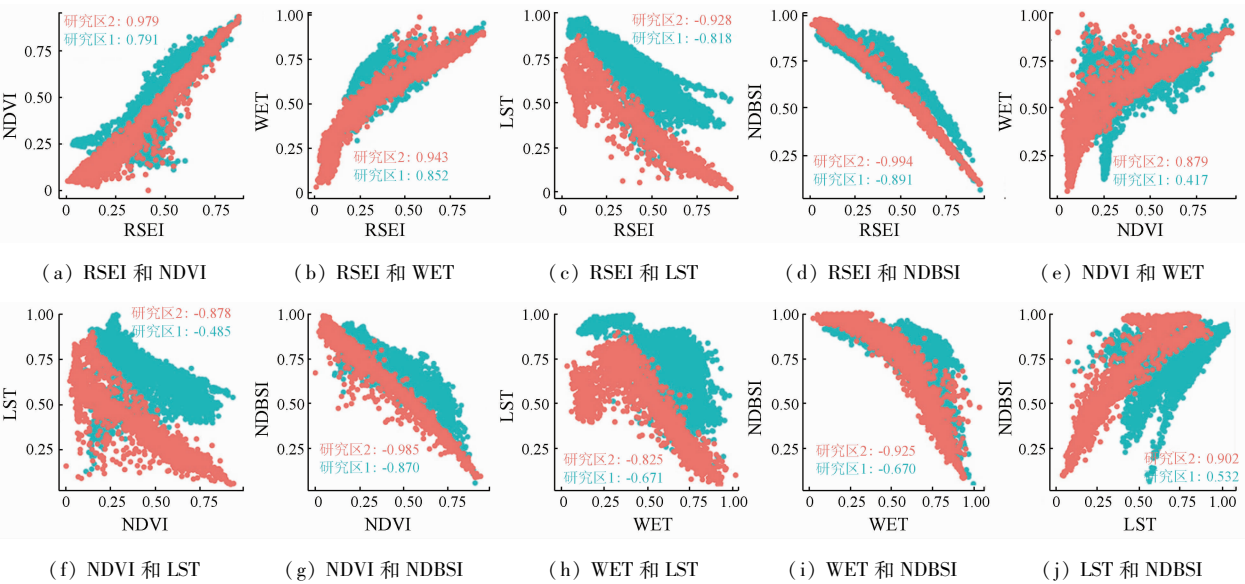


图 2 2020 年 RSEI,WET,NDBSI,NDVI 和 LST 之间的相关系数及相关性检验

Fig.2 Correlation coefficient and correlation test among RSEI, WET, NDBSI, NDVI and LST in 2020

3 结果与分析

3.1 RSEI 和生态因子的时间变化特征

由表 1 可以看出：研究区 1 在 2000 年、2010 年和 2020 年 RSEI 均值分别为 0.38,0.36 和 0.34 呈逐渐下降的趋势,2020 年的 RSEI 相比 2000 年降低了 0.04,降幅约为 10.52%。研究区 2 在 2000 年、

2010 年和 2020 年 RSEI 均值分别为 0.37,0.40 和 0.41,呈逐渐增加趋势,相比 2000 年,研究区 2 在 2020 年 RSEI 增加了 0.04,增幅约为 10.81%。研究期内 2 个研究区的 NDVI 和 NDBSI 均值整体呈下降趋势,LST 的均值整体呈增加趋势。研究区 1 的 WET 均值呈下降趋势,而研究区 2 的 WET 均值整体呈略微增加的趋势。

表 1 2 个研究区各年份指标和 RSEI 的变化

Tab.1 Change in 4 indicators and RSEI in each year of the two study areas

研究区	年份	NDVI		WET		LST		NDBSI		RSEI
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	
研究区 1	2000 年	0.32	0.16	0.62	0.19	0.70	0.14	0.79	0.13	0.38
	2010 年	0.36	0.19	0.57	0.21	0.70	0.18	0.74	0.16	0.36
	2020 年	0.24	0.18	0.48	0.18	0.74	0.14	0.73	0.15	0.34
研究区 2	2000 年	0.37	0.31	0.48	0.27	0.48	0.25	0.69	0.30	0.37
	2010 年	0.36	0.29	0.53	0.25	0.39	0.22	0.66	0.27	0.40
	2020 年	0.27	0.20	0.53	0.25	0.53	0.26	0.60	0.28	0.41

3.2 RSEI 时空格局分析

3.2.1 RSEI 等级空间分布特征

参考已有生态质量分级标准以 0.2 为间隔分成 5 级,分别代表生态质量优、良好、中等、较差和差^[28-29],对估算得到的 2 个研究区 3 期 RSEI 分别进行分级并统计面积,如表 2 所示。2000 年、2010 年和 2020 年研究区 1 生态环境质量以较差和中等级为主,其中较差的生态环境的面积分别占总面积的 44.09%,41.55%和 46.92%,中等级生态环境的面积分别占总面积的 30.41%,24.76%和 22.64%。生态环境质量较差和差区域的面积呈增加趋势,2020 年较差和差区域面积最多,达到 66.43%。说明 2000 年以来研究区 1 生态环境质量呈现下降趋势。2000

表 2 各年份生态等级和面积比例统计

Tab.2 Statistic of ecological grades

and area rations in each year (%)

研究区	年份	差	较差	中等	良好	优
研究区 1	2000 年	14.75	44.09	30.41	7.63	1.84
	2010 年	20.53	41.55	24.76	9.86	3.29
	2020 年	19.51	46.92	22.64	8.12	2.81
研究区 2	2000 年	44.30	11.21	15.99	16.36	12.13
	2010 年	36.63	15.57	16.48	23.44	7.88
	2020 年	33.27	19.74	15.72	16.64	14.63

年研究区 2 生态环境质量处于差和较差的区域占总面积的比例超过 50%,中等及以上的区域面积比例为 44.48%。2010 年和 2020 年研究区 2 生态环境差的面积相比 2000 年分别减少 7.67%和 11.03%,

而 2020 年生态质量优的区域面积相比 2000 年增加 2.50%,说明研究期内研究区 2 生态环境质量整体呈上升趋势。可以看出近 20 a 研究区 2 生态环境质量等级优和良好的面积占比明显高于研究区 1,研究区 1 生态环境质量等级差和较差的占比整体呈增加趋势,而研究区 2 生态环境质量差的占比明显减少。

2 个研究区 RSEI 的等级分布如图 3 所示。由

图 3(a)—(c)可知,研究期内研究区 1 生态环境差和较差的区域主要分布在北部米东区和中部达坂城区植被稀疏的裸地区域。近 20 a 间研究区 1 生态环境质量以中等级转为较差和差的等级为主,土地利用类型以城市、耕地和草地为主。由图 3(d)—(f)可知,研究期内研究区 2 生态环境良好和优的区域主要分布在中南部的耕地区域,而生态环境差的区域主要分布在北部的裸地和主城区外围新开发的区域。

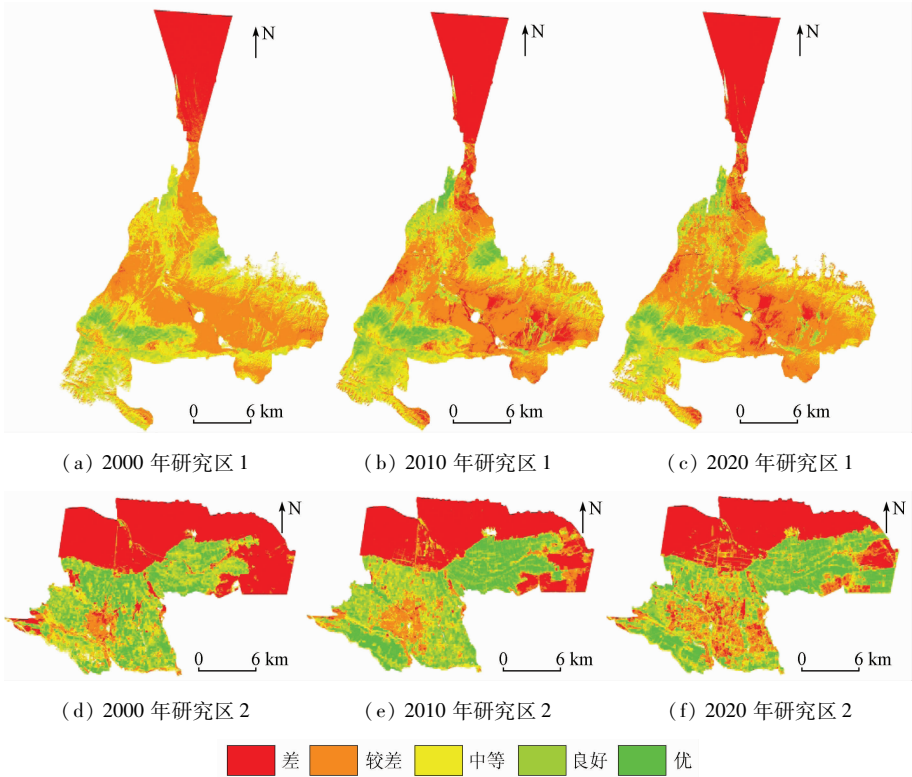


图 3 2 个研究区 RSEI 的等级分布

Fig. 3 Spatial distribution of RSEI value classes of the two study areas

3.2.2 RSEI 等级变化检测

为了更好地提取研究区 RSEI 变化特征,将共 20 a 的研究期分为 3 个时段,分别为 2000—2010 年、2010—2020 年和 2000—2020 年。将 RSEI 相比前一时期面积变化的剧烈程度分为 7 个级别:急剧变差、明显变差、略微变差、生态不变、略微变好、明显变好和急剧变好,并分别用 -3,-2,-1,0,1,2 和 3 表示。其中急剧变差、明显变差和略微变差归

为变差类,生态不变为一类,略微变好、明显变好和急剧变好归为一类。检测结果如表 3 所示。由以上不同时段统计结果表明,2 个研究区生态环境质量等级不变的面积极别约占整个区域面积的 70% 和 50% 左右。研究区 1 在 2010—2020 年生态环境质量变差的面积比 2000—2010 年的多,说明 2010 年后生态环境变差速度比前 10 a 的快;研究区 2 在 2000—2010 年生态环境变好速度比 2010—2020 年

表 3 2000—2020 年 2 个研究区 RSEI 等级变化检测

Tab. 3 Detection of the change of RSEI level of the two study areas from 2000 to 2020								
研究区	类别	级差	2000—2010 年		2010—2020 年		2000—2020 年	
			面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
研究区 1	变差	-3,-2,-1	1 399.19	10.14	2 694.28	20.36	2 584.41	19.53
	不变	0	10 547.88	76.47	9 933.21	75.06	8 992.78	67.96
	变好	1,2,3	1 845.92	13.38	605.46	4.58	1 655.81	12.51
研究区 2	变差	-3,-2,-1	93.07	16.92	90.37	16.49	112.26	20.49
	不变	0	257.78	46.86	272.22	49.69	213.48	38.97
	变好	1,2,3	199.20	36.21	185.21	33.81	222.10	40.54

的变化速度快。近 20 a 研究区 1 生态环境质量整体呈变差趋势,而研究区 2 呈变好趋势(图 4)。由

图 4 可以看出,生态变差的区域主要分布于人口聚集区、耕地和草地区域。

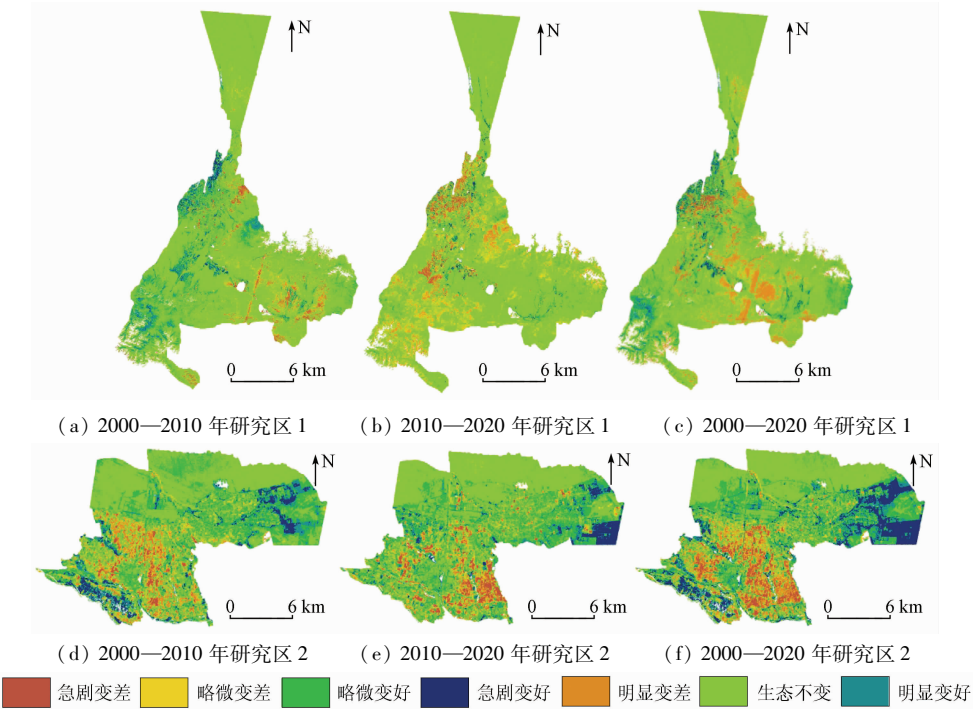


图 4 2000—2020 年 2 个研究区 RSEI 变化监测
Fig. 4 Change detection of RSEI of the two study areas from 2000 to 2020

3.3 驱动因子分析

3.3.1 因子重要性分析

利用随机森林模型定量分析不同因子对研究区 RSEI 的影响,包括自然因素(FVC、气温、降水量和 DEM)和人为因素(经济密度、人口密度和土地利用类型)。首先,对研究区 2000 年、2010 年和 2020 年的 RESI 和对应年份的 7 个影响因子分别进行 2 km × 2 km(研究区 1)和 1 km × 1 km(研究区 2)网格化处理,并求算每个格网各指标的均值;然后,将 RSEI 作为随机森林模型的因变量,7 个影响因子作为模型自变量进行不同年份影响因子重要性分析。由图 5 可知,2000 年、2010 年和 2020 年研究区 1 的

RSEI 影响因子重要性排序基本保持一致,其中 FVC 的贡献率最大,平均约为 60%;其次是气温和降水量;人口密度的贡献率最小,平均约为 25%。2010 年和 2020 年研究区 2 的 RSEI 主要影响因子重要性顺序基本一致,而 2000 年影响因子重要性顺序与后 2 个时期稍有差异,整体上 FVC 对 RSEI 的贡献率最大,平均约为 55%;其次是降水量和气温;经济密度的贡献率最小,平均约为 12%。总之,研究期内 2 个研究区的自然因素比人为因素对 RSEI 的影响更大,其中 2 个研究区自然因素重要性分别约为 65.6% 和 73.9%。

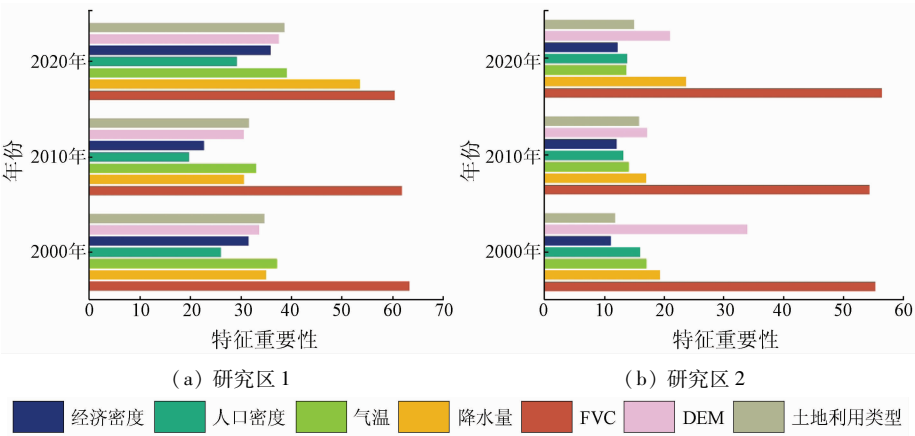


图 5 影响因子重要性排序
Fig. 5 Importance ranking of influencing factors

3.3.2 因子偏依赖性分析

随机森林模型的偏依赖性表示因变量对自变量的边缘依赖性,是机器学习对结果可解释性的指标^[30]。本文选取 2000 年、2010 年和 2020 年 FVC、气温、降水量、经济密度、人口密度、土地利用类型和

DEM 的年均值分别和研究区 1 与研究区 2 的 RSEI 年均值进行偏依赖性分析。由图 6 和图 7 可以看出,不同因子对 2 个研究区 RSEI 的影响区间和影响程度有所差异。

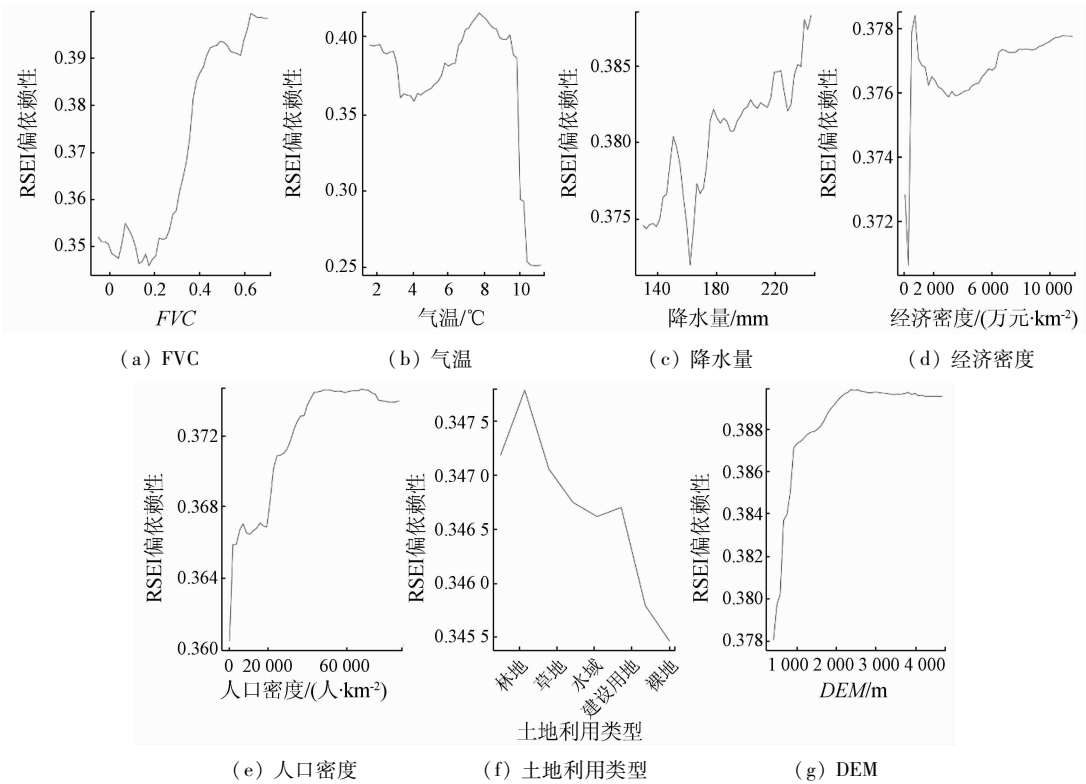


图 6 研究区 1 影响因子对 RSEI 的偏依赖

Fig. 6 Partial dependency of the study area 1 for the factors in the RSEI

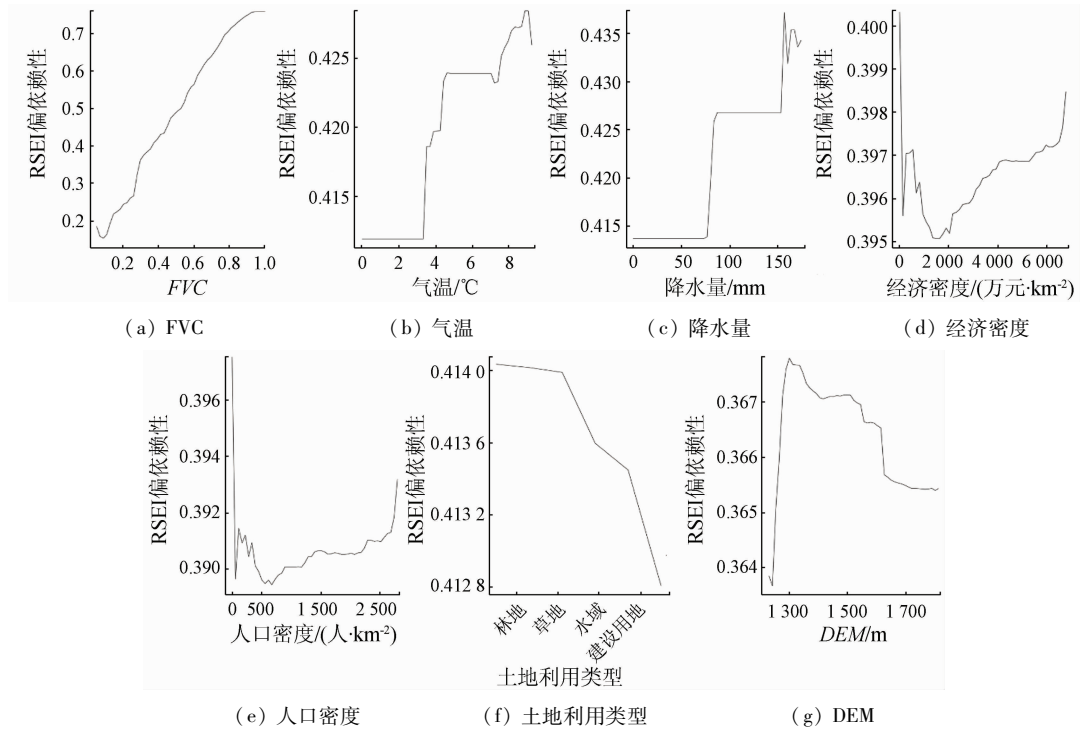


图 7 研究区 2 影响因子对 RSEI 的偏依赖

Fig. 7 Partial dependency of the study area 2 for the factors in the RSEI

由图 6 可以看出,研究区 1 的 FVC 增加对 RSEI 的影响程度逐渐上升,当 $FVC > 0.6$ 后对 RSEI 的影响程度达到最大且几乎保持不变;当气温在 $2 \sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候对 RSEI 的影响程度比较高,大于 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后对 RSEI 的影响程度急剧下降;降水量大于 160 mm 后对 RSEI 的影响程度急剧上升;经济密度大于 $2\text{ }000\text{ 万元}/\text{km}^2$ 后对 RSEI 的影响程度逐渐增加;人口密度大于 $40\text{ }000\text{ 人}/\text{km}^2$ 后对 RSEI 的影响程度达到最大且几乎保持不变;林地对 RSEI 的影响最大,而建设用地和裸地对 RSEI 的影响逐渐下降; $DEM > 2\text{ }000\text{ m}$ 后对 RSEI 的影响达到最大且几乎保持不变。

由图 7 可以看出,对于研究区 2, FVC 对 RSEI 的影响趋势与研究区 1 相似;气温在 $0 \sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的时候对 RSEI 的影响程度比较低,大于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后对 RSEI 的影响程度急剧上升,达到 $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后对 RSEI 的影响逐渐下降;降水量的增加对 RSEI 的影响程度逐渐上升,当降水量大于 150 mm 时对 RSEI 的影响程度达到最大且几乎保持不变;经济密度对 RSEI 的影响趋势与研究区 1 类似;人口密度大于 $1\text{ }500\text{ 人}/\text{km}^2$ 后对 RSEI 的影响程度逐渐上升;研究区 2 土地利用类型对 RSEI 的影响趋势与研究区 1 相似;当 $DEM = 1\text{ }300\text{ m}$ 时对 RSEI 的影响达到最大,之后对 RSEI 的影响逐渐下降,此外当 $DEM > 1\text{ }500\text{ m}$ 时影响明显下降。

4 讨论

4.1 不同土地利用类型的 RSEI 等级变化分析

生态环境质量的变化与土地利用类型的转换有一定关系(图 8)。从图 8 可以看出,2 个研究区裸地和建设用地的生态环境质量等级较低,主要集中在差和较差等级,其中约超过 90% 的裸地面积是生态环境质量差和较差状态。草地、裸地和建设用地中几乎没有生态环境质量优的等级。耕地和森林生态环境质量较高,都在中等以上等级。研究区 1 中等和良好等级的耕地面积占总耕地面积的 70%,良好和优等的森林面积占总森林面积的 85%。研究区 2 中等及以上等级的耕地面积占总耕地面积的 90% 以上。在 2 个研究区不同土地利用类型主要是在中等等级比例变化较明显。从研究区生态环境质量的等级所占的比例来看,对生态环境质量变化影响大小的排序依次为裸地 > 建设用地 > 草地 > 耕地 > 森林。相比 2000 年,2020 年研究区 1 生态环境质量降低的原因在于裸地和草地生态环境质量差和较差的面积比例的增加以及建设用地生态环境质量较差面积比例的增加。对于研究区 2 生态环境质量变好的原因在于耕地生态环境质量良和优的面积比例的增加和草地与建设用地生态环境质量差和较差

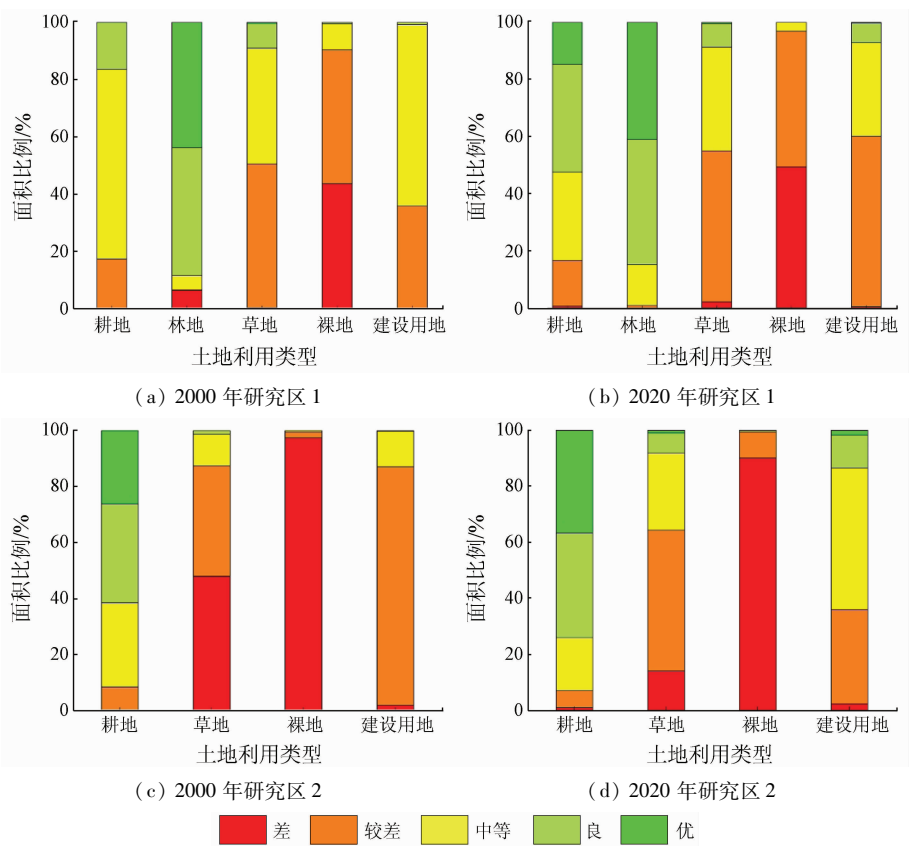


图 8 2000 年和 2020 年不同土地利用类型的 RSEI 等级面积比例

Fig. 8 RSEI levels proportions of different land - use types in 2000 and 2020

面积的比例明显减少。以上分析可知,耕地和草地与裸地和建设用地对生态环境质量影响的差异本质上是由植被覆盖和不透水表面导致的,在生态环境退化中生态环境质量差和较差等级主要是由于在城市扩张过程中,建设用地占领了原有的耕地和草地。

4.2 生态环境质量差异的原因分析

以上研究表明,20 a 间研究区 1 的生态环境质量总体表现为变差的状态,而研究区 2 生态环境质量呈变好的状态。主要是由于城市规模、自然和人文环境不同,以及生态环境主要影响因子的变化导致不同城市生态环境质量有所不同。乌鲁木齐市是新疆城市规模最大的城市,随着城市化进程的推进,不透水面增加,植被覆盖减少,导致城市中心地表温度升高,热岛效应加剧,环境质量恶化。而喀什市自 2010 年 5 月获批设立经济特区后城市化的进程不断加快^[31],绿色健康的城市发展模式有序推进,植被覆盖对该城市的生态环境质量起了很重要的作用。此外,影响生态环境的因子对全球气候变化产生的不同响应也可能是 2 个研究区生态环境表现出差异的原因。

从研究区生态环境质量的时空分布特征来看,20 a 间研究区 1 生态环境质量差的区域主要集中在北部米东区和中部的达坂城区,生态环境质量好的区域主要分布在城市西南和东北部。研究区 2 生态环境质量差的区域主要集中在研究区 2 中心区和北部,生态环境质量好的区域主要分布在城市中部和南部。20 a 间 2 个研究区城市化进程加快,城市迅速向外围扩展,以建筑物为代表的透水面逐渐代替原有草地和耕地是研究区生态环境质量下降的原因之一。其中研究区 1 以天山区、沙依巴克区和新市区为代表的中心城区的扩张最为明显。研究区 2 除了城市中心扩张外,城乡交接带明显向城郊延伸。从地形地貌角度看,研究区 1 北部邻接沙漠以戈壁沙地为主,研究区 2 北部位于山地南坡以裸地为主,所以导致 2 个研究区生态环境质量差的区域集中在北部。2 个研究区部分区域生态环境质量有所改善的原因可能与旧城改造工程以及环境保护和恢复政策的出台有关。

总之,气温和降水等自然要素在气候变化作用下直接影响生态环境质量,人类活动引起的土地利用和植被覆盖的变化导致城市生态环境的变化更加复杂。有研究表明城市生态环境质量的短期变化主要是由人类活动引起的,而城市生态环境质量的长时期变化主要是自然和人类活动综合作用的结果^[32]。快速城市化伴随着社会经济的繁荣,但其威胁城市可持续发展的负面影响也不能忽视。根据干旱区绿洲城市的特点,今后应该在节水前提下提高

城市植被覆盖度,增加绿度,从而改善城区小气候环境。对城市建设用地规模科学规划,提高现有城区土地利用效率,倡导集约和节约型城市化发展模式。此外,通过生态环境综合治理措施促进城市生态环境的改善,推进绿色生产和生活方式,实现城市化与生态环境质量协调发展。

5 结论

在乌鲁木齐市和喀什市分别选取研究区,基于 GEE 平台利用 Landsat 系列遥感数据构建了 2000 年、2010 年和 2020 年 RSEI 模型,对 2 个研究区生态环境质量进行评价,并利用随机森林模型对研究区影响 RSEI 的因子进行定量分析。主要结论如下:

1) 20 a 间 2 个研究区生态环境质量呈相反的变化特征。其中,研究区 1 生态环境质量整体变差,变差速度先慢后快;研究区 2 生态环境质量整体变好,变好速度呈先快后慢的特征。研究区 1 生态环境显著改善的区域集中在城市中心的老城区,生态环境变差的区域主要集中在城市外围的新建区;研究区 2 生态环境改善的区域主要集中在城市东北部,生态环境质量变差的区域主要分布在城市中心周围的新建区。

2) FVC 是影响 2 个研究区 RSEI 最重要的因子,气温和降水量分别是影响 2 个研究区 RSEI 次重要的因子。不同影响因子对 2 个研究区 RSEI 的影响范围有所差异。2 个研究区 FVC 分别大于 0.6 和 0.9 后,FVC 因子对其城市 RSEI 的影响程度达到最大且几乎保持不变;2 个研究区气温分别在 2~8℃ 和 4~9℃ 范围内时对其城市 RSEI 的影响逐渐增大;研究区 1 降水量大于 160 mm 后对 RSEI 的影响程度急剧上升,而研究区 2 年降水量大于 150 mm 时对 RSEI 的影响程度达到最大且几乎保持不变。

3) 20 a 间研究区 1 城市化规模不断扩大、不透水面增加和 FVC 的减小是城市生态环境变差的主要原因。而研究区 2 城市化与绿色健康城市发展模式共同推进的举措对该城市生态环境质量变好发挥了重要作用。因此在节水前提下提高干旱区绿洲城市植被覆盖,科学规划建设用地规模,提高现有城区土地利用效率,倡导集约、节约型绿色城市化发展模式,进而促进城市化与生态环境质量协调发展。

参考文献 (References):

[1] 王东升,王小磊,雷泽勇. 基于遥感生态指数的阜新市生态质量评估[J]. 生态科学,2020,39(3):88-94.
Wang D S, Wang X L, Lei Z Y. Ecological change assessment of Fuxin based on remote sensing ecological index[J]. Ecological Science, 2020, 39(3): 88-94.

- [2] Ochoa - Gaona S, Kampichler C, De Jong B H J, et al. Amulti - criteri on index for the evaluation of local tropical forest conditions in Mexico[J]. *Forest Ecology Management*, 2010, 260: 618 - 627.
- [3] 张瑞钢, 莫兴国, 林忠辉. 淳沱河上游山区近 50 年蒸散变化及主要影响因子分析[J]. *地理科学*, 2012, 32(5): 628 - 634.
Zhang R G, Mo X G, Lin Z H. The trend and the principal influence factors of evapotranspiration in Hutuo River basin during last 50 years [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 32(5): 628 - 634.
- [4] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7853 - 7862.
Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7853 - 7862.
- [5] 朱泓, 王金亮, 程峰, 等. 滇中湖泊流域生态环境质量监测与评价[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1289 - 1297.
Zhu H, Wang J L, Cheng F, et al. Monitoring and evaluation of eco - environmental quality of lake basin regions in central Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(4): 1289 - 1297.
- [6] 蒋超亮, 吴玲, 刘丹, 等. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测——以古尔班通古特沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 877 - 883.
Jiang C L, Wu L, Liu D, et al. Dynamic monitoring of eco - environmental quality in arid desert area by remote sensing: Taking the Gurbantungut Desert China as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(3): 877 - 883.
- [7] Karbalaee S S, Amoushahi S, Gholipour M. Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: A case study of central Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(5): 305 - 305.
- [8] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(6): 1598 - 1605.
Zhang Y Q, Jiang F, Ji M D, et al. Assessment of the ecological environment at district and county level based on remote sensing index [J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(6): 1598 - 1605.
- [9] 刘立冰, 熊康宁, 任晓冬. 基于遥感生态指数的龙溪一虹口国家级自然保护区生态环境状况评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(2): 202 - 210.
Liu L B, Xiong K N, Ren X D. Assessment of ecological environment status in the Longxi - Hongkou National Nature Reserve based on remote sensing ecological index [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36(2): 202 - 210.
- [10] 万虹麟, 霍飞, 牛玉芬, 等. 顾及 PM_{2.5} 浓度遥感生态指数模型的沧州市区生态环境质量动态监测分析[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 953 - 960.
Wan H L, Huo F, Niu Y F, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological environment change in Cangzhou City based on RSEI model considering PM_{2.5} concentration [J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 953 - 960.
- [11] 郑子豪, 吴志峰, 陈颖彪, 等. 基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(2): 717 - 729.
Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Analyzing the ecological environment and urbanization characteristics of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on Google Earth Engine [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 717 - 729.
- [12] 杭鑫, 罗晓春, 曹云, 等. 基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响——以南京市为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 219 - 229.
Hang X, Luo X C, Cao Y, et al. Ecological quality assessment and the impact of urbanization based on RSEI model for Nanjing, Jiangsu Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 219 - 229.
- [13] 李婷婷, 马超, 郭增长. 基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(4): 1154 - 1165.
Li T T, Ma C, Guo Z C. Ecological quality evaluation and influencing factors analysis of Helan Mountain based on RSEI [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(4): 1154 - 1165.
- [14] 张华, 宋金岳, 李明, 等. 基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1883 - 1894.
Zhang H, Song J Y, Li M, et al. Eco - environmental quality assessment of Qilian Mountain National Park based on GEE [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(6): 1883 - 1894.
- [15] 约日古丽·卡斯木, 孜比布拉·司马义, 王蕾, 等. 新疆博乐市生态环境变化对城市建设用地扩张的响应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(1): 252 - 259.
Yueriguli K, Zhibibula S, Wang L, et al. Response of ecological environment change to urban construction land expansion in Bole City of Xinjiang [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(1): 252 - 259.
- [16] Xiong Y, Xu W, Lu N, et al. Assessment of spatial - temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake basin, Yunnan Province, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107518.
- [17] 韩芹芹, 张克潭. 乌鲁木齐市环境应急监测体系存在的问题及对策[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(2): 86 - 90.
Han Q Q, Zhang K T. The Study on problems and countermeasures of environmental emergency monitoring system in Urumqi [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(2): 86 - 90.
- [18] 阿力木江·塔依尔, 木合塔尔·艾买提. 城市化与干旱区环境耦合度分析——以喀什市为例[J]. *环境影响评价*, 2016, 38(4): 92 - 96.
Alimjan T, Muhetaer A. Analysis on coupling degree between urbanization and arid area: Taking Kashi City as an example [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2016, 38(4): 92 - 96.
- [19] 哈孜亚·包浪提将, 毋兆鹏, 陈学刚, 等. 乌鲁木齐市景观格局变化及驱动力分析[J]. *生态科学*, 2018, 37(1): 62 - 70.
Haziya B, Wu Z P, Chen X G, et al. Analysis of landscape pattern change and driving force in Urumqi City [J]. *Ecological Science*, 2018, 37(1): 62 - 70.
- [20] 王志杰, 苏娜. 南水北调中线汉中市水源地生态脆弱性评价与特征分析[J]. *生态学报*, 2018, 38(2): 432 - 442.
Wang Z J, Su Y. Analysis of eco - environmental vulnerability characteristics of Hanzhong City, near the water source midway along the route of the South - to - North Water Transfer Project, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 432 - 442.
- [21] Xu H. A new index for delineating built - up land features in satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269 - 4276.
- [22] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(7): 91 - 97, 294.
Xu H Q. Remote sensing assessment of ecological changes in soil and water loss areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Ag-*

ricultural Engineering,2013,29(7):91 – 97,294.

[23] Jiménez – Muoz J C, Sobrino J A. A generalized single – channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres,2003,108(22):4688.

[24] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning,2001,45(1):5 – 32.

[25] 陈兵红,靳全锋,柴红玲,等. 浙江省大气 PM_{2.5} 时空分布及相关因子分析[J]. 环境科学学报,2021,41(3):817 – 829.

Chen B H, Jin Q F, Chai H L, et al. Spatiotemporal distribution and correlation factors of PM_{2.5} concentrations in Zhejiang Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41(3):817 – 829.

[26] 张文强,罗格平,郑宏伟,等. 基于随机森林模型的内陆干旱区植被指数变化与驱动力分析:以北天山北坡中段为例[J]. 植物生态学报,2020,44(11):1113 – 1126.

Zhang W Q, Luo G P, Zheng H W, et al. Analysis of vegetation index changes and driving forces in inland arid areas based on random forest model: A case study of the middle part of northern slope of the north Tianshan Mountains [J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2020,44(11):1113 – 1126.

[27] 赖自力,向杰,陈建平,等. 基于随机森林模型的云南元阳梯田地形因子分析[J]. 地质学刊,2016,40(3):518 – 525.

Lai Z L, Xiang J, Chen J P, et al. Analysis on topographic factors of the Yuanyang terrace in Yunnan Province based on random forest model[J]. Journal of Geology,2016,40(3):518 – 525.

[28] 杨保华,杨清华,陈剑虹. 关于《生态环境状况评价技术规范(试行)》中土地退化指数的权重及计算方法的探讨[J]. 生态与农村环境学报,2011,27(3):103 – 107.

Yang B H, Yang Q H, Chen J H. Weight of land (soil) degradation indeces and optimization of their calculation in “echnical criteria or evaluation of ecological environment (Trial)” [J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2011,27(3):103 – 107.

[29] 刘盼,任春颖,王宗明,等. 南瓮河自然保护区生态环境质量遥感评价[J]. 应用生态学报,2018,29(10):3347 – 3356.

Liu P, Ren C Y, Wang Z M, et al. Assessment of the eco – environmental quality in the Nanweng River Nature Reserve, Northeast China by remote sensing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(10):3347 – 3356.

[30] Guidotti R, Monreale A, Ruggieri S, et al. A survey of methods for explaining black box models[J]. ACM Computing Surveys,2018,51(5):1 – 42.

[31] 哈尚辰,阿里木江·卡斯木. 近 20 年来喀什市乡村转型发展评价[J]. 水土保持通报,2016,36(6):282 – 287.

Ha S C, Alimujiang K. Evaluation of rural transformation development in Kashgar City during last 20 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(6):282 – 287.

[32] Liu C, Yang M H, Hou Y T, et al. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: A comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, Southeast China[J]. Ecological Indicators,2021,124:107438.

Spatio – temporal changes and influencing factors of ecological environments in oasis cities of arid regions

PARIHA Helili¹, ZAN Mei^{1,2}

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Cities are core areas for human life and production. The ecological environment quality is a growing concern in cities, especially cities with fragile ecological environments in arid regions. This study selected 2 study areas from two typical oasis cities, namely Urumqi City in northern Xinjiang and Kashgar City in southern Xinjiang. It compared the spatio – temporal changes in the ecological environment quality of the two study areas in 2000, 2010, and 2020 using two urban remote sensing – based ecological indices (RSEIs) constructed based on the Google Earth Engine (GEE). Furthermore, it quantitatively analyzed the factors influencing the RESIs of the two cities using the random forest model. The results are as follows: ① Over the past 20 years, the ecological environment quality in study area 1 worsened but that in study area 2 improved overall. In study area 1, the ecological environment improved mainly in the old urban area and deteriorated in the newly built area at the periphery of the urban area. In study area 2, the ecological environment significantly improved in the northeastern part and deteriorated in the newly built area around the city center. ② The fractional vegetation cover is the most critical factor influencing RESIs of both study areas, followed by temperature and precipitation. These influencing factors had different influences on the RSEIs of the two study areas. ③ The primary reasons for the deterioration of the ecological environment in study area 1 included the expanded urban scale, the increased impervious surfaces, and the decreased fractional vegetation cover in the past 20 years are. In contrast, urbanization and green and healthy urban development pattern jointly played a significant role in improving the ecological environment quality in study area 2. The results of this study can provide a scientific basis for healthy urban development in both study areas.

Keywords: Urumqi City; Kashgar City; RSEI; GEE; random forest

(责任编辑: 张 仙)