网络出版时间:2025-09-10 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.03.015

西北干旱地区城市绿色空间格局时空演化特征
——以兰州市为例

李娜[1],唐红[1],杨崇鉴[2]
(1 甘肃农业大学 林学院,甘肃 兰州 730070;2 兰州大学 草地农业科技学院,甘肃 兰州 730070)

[摘 要] 【目的】分析西北干旱地区城市绿色空间格局时空演化特征及其驱动因素,以期为该地区绿色空间优化与管理、可持续维持和健康发展提供参考。【方法】以兰州市为例,将兰州市空间划分为绿色空间和非绿色空间两类,基于该城市 2000,2010,2020 年土地利用数据和《兰州统计年鉴》,分析 2000－2020 年兰州市绿色空间格局演变特征;以兰州市绿色空间面积为因变量,选取自然因素(高程、坡度、坡向)和社会经济因素(人口密度、地区生产总值、第一产业值、第二产业值与第三产业值)为自变量,采用因子探测器对影响兰州市绿色空间变化的主要驱动因素进行分析。【结果】2000－2020 年,兰州市绿色空间面积呈递减趋势,且呈现明显的阶段性特征,2000－2010 年,绿色空间面积减少 1.14 km^2,占总面积比例下降 0.11%,土地利用动态度为－0.01%;2010－2020 年,绿色空间面积减少 103.67 km^2,占总面积比例下降 9.91%,动态度为－1.14%。2000－2020 年,兰州市 106.99 km^2 绿色空间向非绿色空间转移,2.22 km^2 非绿色空间向绿色空间转移。2000－2020 年,兰州市绿色空间以及各土地利用类型的景观格局指数发生了明显变化。随着时间的推移,兰州市绿色空间景观斑块数、斑块密度、景观形状指数均降低,聚集度指数先增加后降低,香农多样性指数和香农均匀度指数均先下降后增加。因子探测器分析结果表明,2000－2020 年,自然因素和社会经济因素对兰州市绿色空间的变化有明显影响,其中社会经济因素中的人口密度、地区生产总值、第一产业值、第二产业值是主要驱动因素。【结论】2000－2020 年兰州市绿色空间被非绿色空间侵占,致使绿色空间景观破碎化加剧,社会经济是影响绿色空间变化的重要因素。

[关键词] 绿色空间;景观格局;时空演变;驱动力;兰州市
[中图分类号] S127 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)03-0143-10

Spatial-temporal evolution characteristics of green space pattern in arid areas of Northwest China: a case study of Lanzhou City

LI Na[1], TANG Hong[1], YANG Chongjian[2]
(1 *Colloge of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2 *College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aimed to analyze the spatial-temporal evolution characteristics and driving factors of urban green space patterns in the arid regions of Northwest China, to provide references for the optimization and management of green spaces, as well as their sustainable maintenance and healthy development in this region. 【Method】 With Lanzhou City as an example, the city's space was divided into two categories: green space and non-green space. Based on the land use data of the city in 2000, 2010 and

[收稿日期] 2024-12-04 [修回日期] 2025-01-25
[基金项目] 甘肃省教育厅创新之星项目(GS202234);兰州市科技局项目"兰州市主要造林树种固碳能力研究"(2024-3-63)
[作者简介] 李娜(1998－),女,甘肃临洮人,硕士,主要从事风景园林规划设计研究。E-mail:2330869156@qq.com
[通信作者] 唐红(1969－),女,山东阳谷人,副教授,主要从事寒旱区景观规划与设计、园林观赏植物遗传育种及培育研究。E-mail:tangh@gsau.edu.cn

2020 and the *Lanzhou Statistical Yearbook*, the evolution characteristics of the green space pattern in Lanzhou City from 2000 to 2020 were analyzed. With the green space area of Lanzhou City as the dependent variable, and natural factors (elevation, slope, aspect) and socio-economic factors (population density, regional gross domestic product, value of primary industry, value of the secondary industry and value of the tertiary industry) as independent variables, the factor detector was used to analyze the main driving factors influencing the change of green space in Lanzhou City. 【Result】 From 2000 to 2020, the area of green space in Lanzhou City showed a decreasing trend and presented obviously different characteristics in different phases. From 2000 to 2010, the area of green space decreased by 1.14 km^2, with the proportion of green space area in the total area dropping by 0.11%, and the land use dynamic degree was −0.01%. From 2010 to 2020, the area of green space decreased by 103.67 km^2, with the proportion of green space area in the total area dropping by 9.91%, and the dynamic rate was −1.14%. From 2000 to 2020, 106.99 km^2 of green space in Lanzhou City were converted to non-green space, while 2.22 km^2 of non-green space were transformed into green space. From 2000 to 2020, the landscape pattern indices of green space and various land use types in Lanzhou City had undergone significant changes. Over time, landscape patch number, patch density and landscape shape index of green space in Lanzhou City all decreased, while the contagion index first increased and then decreased, and Shannon diversity index and Shannon evenness index both first decreased and then increased. Factor detector analysis results showed that from 2000 to 2020, both natural and socio-economic factors had a significant impact on the changes in green space in Lanzhou City. Among the socio-economic factors, population density, regional gross domestic product, value of primary industry, and value of the secondary industry were the main driving forces. 【Conclusion】 From 2000 to 2020, the green space in Lanzhou City was encroached upon by non-green space, leading to an intensified fragmentation of the green space landscape. Social and economic factors significantly influenced the changes in green space.

Key words: green spaces; landscape pattern; evolution space and time; motivation; Lanzhou City

随着城市化迅猛推进,用于城市建设的土地面积持续扩张,致使大量绿色空间遭受破坏与侵占,导致生物多样性锐减[1]、城市热岛效应[2]等城市生态环境问题出现,制约了城市绿色可持续发展。绿色空间是城市范围内所有被植被覆盖区域,既是城市结构基本要素之一,也是影响生态安全格局构建的生态屏障[3-4]。城市绿色空间与人类生活空间紧密关联,能够改善城市生态环境品质[5]、优化生态系统管理效能[6],对于城市扩展及资源可持续利用起着重要的作用。重视绿色空间发展,梳理绿色空间时空演化特征,构建符合城市发展需要的生态廊道多元化城市绿色空间体系,已成为热点与核心议题。

近年来,不同学科领域对城市绿色空间关注度持续上升。国内外学者多采用遥感技术和数学模型研究城市绿色空间布局对气候调节影响,如 MASOUDI 等[7]利用陆地卫星图像绘制土地覆盖和地表温度图,发现城市绿色空间冷却效应受绿地斑块数量、构成及分布的显著影响;谢念斯等[8]结合 ArcGIS、ENVI 等软件对遥感影像和夜间灯光距进行解读,探讨广州市绿地格局与土地集约利用关系;陈慧灵等[9]运用空间分析法,分析了 2000−2019 年长株潭都市圈绿色空间格局变化;李莹莹等[10]以上海为研究对象,对遥感数据进行解译,得到景观类型数据,运用 RS 等技术对该地区景观格局梯度及其时空动态进行分析;杨金炎等[11]对重庆万州区景观格局变化及驱动因素进行探析,为该区域土地资源利用和生态环境改善提供指导。诸多学者运用网络分析[12]、空间统计分析[13]、梯度分析[14]及景观指数分析[15]等方法对不同城市绿色空间开展了大量研究工作,研究对象主要为北京[16]、上海[17]、广州[18]等建设较好的东部大城市,而对西北干旱区绿色空间变化及其驱动因素量化的研究较少。

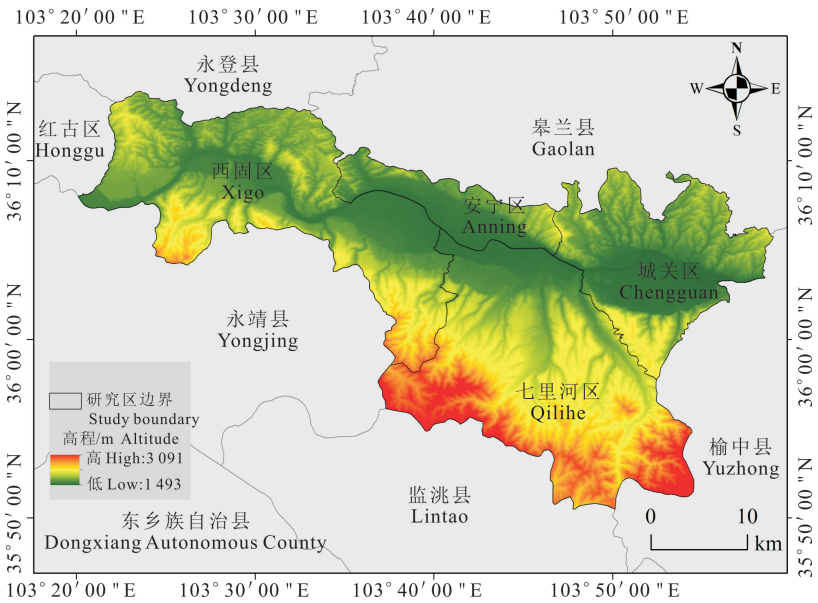
兰州市是西部地区黄河上游的重要经济中心城市,是丝绸之路经济带的核心节点城市,同样经历了快速城市化过程。前人对兰州市的土地利用演变[19-20]、碳储量[21]、生态环境质量[22]及生态效应[23]等进行了研究,关于兰州市绿色空间时空演变及驱动力研究相对较少[24]。基于此,本研究采用 2000−

2020 年土地利用数据，分析兰州市绿色空间时空分布特征及景观破碎化程度，并利用地理探测器探讨影响兰州市绿色空间变化的主要驱动因素，旨在为兰州市景观格局调整和生态优化与管理、区域可持续发展提供支撑。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

兰州市地处甘肃省中部（102°35′58″E－104°34′29″E，35°34′20″N－37°07′07″N），土地总面积 13 085.6 km²，现辖有 3 县（永登县、皋兰县、榆中县）和 5 区（城关区、七里河区、安宁区、西固区、红古区），常住人口 442.51 万人。属温带半干旱气候，降水量少，年均降水量 300～400 mm，地形以山地为主，地势呈西部和南部高，东北低，植被稀疏，地貌属典型黄土丘陵地貌。兰州人口众多，建设用地紧张，城市绿色空间压力增大，尤显是兰州中心城区，因此本研究选取兰州市核心城区（图 1），具体为七里河区、城关区、安宁区和西固区为研究区域，面积约 1 046.09 km²。



审图号为 GS(2019)3333，底图边界无修改，下同。

The drawing review number is GS(2019)3333，and the boundary of the map is not modified. The same below.

图 1　兰州市核心城区地形图

Fig. 1　Topographic map of the core urban area of Lanzhou City

1.2　数据来源

选取源于全球地表覆盖数据（GlobeLand30，GLB30），空间分辨率为 30 m 的兰州市 2000，2010，2020 年 3 期土地利用数据作为研究基础，使用的地理高程（Dem）数据源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/search），空间分辨率为 30 m。本研究参考中国科学院土地利用/土地覆被和《土地利用现状分类》（GB/T 21010－2017）分类系统，将兰州市空间划分为绿色空间和非绿色空间两类，其中绿色空间包括耕地、林地、草地及水域，非绿色空间包括建设用地和其他类型用地。2000，2010 和 2020 年社会经济和人口数据来自《兰州统计年鉴》。

2　研究方法

2.1　土地利用动态度

运用 ArcGIS 10.8 软件的空间分析定量研究绿色空间变化过程[25]，采用土地利用动态度反映研究区内土地利用类型转变的显著程度，其计算公式如下：

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\%。\tag{1}$$

式中：K 表示土地利用动态度，U_a 表示研究起始时某种土地利用类型面积，U_b 表示研究结束时某种土地利用类型面积，T 表示研究起始时至结束时的时间。

2.2　土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵展示了不同土地利用类型在特定研究时段内的面积变化及其相互转移关系[26]，深入分析土地类型转换前后各土地类型的动态演变方向，能反映不同土地利用类型变化的结构特征。具体公式如下：

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

式中:S 表示面积,n 表示土地利用类型总数,i、j 表示土地利用类型,$\boldsymbol{S}_{ij}$ 表示第 i 类土地转换为第 j 类土地面积。

2.3 景观格局指数

运用景观格局指数可以评估绿色空间的空间构成、结构特性和分布特征,有助于解释绿色空间的空间配置规律。基于绿色空间分布结果,采用 Fragstats 4.2 软件的标准法,在绿色空间景观水平选取斑块数(number of patches,NP)、斑块密度(patch density,PD)、景观形状指数(landscape shape index,LSI)、香农多样性指数(Shannon diversity index,SHDI)、聚集度指数(contagion,CONTAG)和香农均匀度指数(Shannon evenness index,SHEI)6 项指数[24-25]。NP 反映了景观空间的多样性与复杂性,其值越大则景观多样性越高;PD 体现景观的分散程度,其值越高说明斑块分布越分散;LSI 衡量斑块形状的复杂程度;SHDI 反映景观异质性,其值越高表明景观格局越复杂;CONTAG 描述景观的聚集状态,其值越高表明斑块越集中,反之则越分散;SHEI 趋近于 1 时景观类型优势度低,且各斑块类型呈均匀分布。在不同土地利用类型水平选取 NP、PD、最大斑块指数(largest patch index,LPI)、周长面积分维数(perimeter-area fractal dimension,PAFRAC)和斑块所占景观面积比例(percentage of landscape,PLAND)5 项指数[26-27],分析研究区不同土地类型景观格局的演化特征及绿色空间斑块单元的景观格局指数。LPI 表示景观的斑块规模和优势类型;PAFRAC 用于衡量斑块形状的复杂程度,其值越高表示景观形状愈发复杂;PLAND 反映各斑块类型在整个景观中的相对面积和分布状况,其值越高表明景观优势越明显。

2.4 地理探测器

地理探测器是用于空间分析的统计模型,其通过空间异质性探测因变量与自变量之间空间分布格局的一致性[28],揭示空间分异特性及其驱动因素,主要包括因子探测器、风险探测器、交互作用探测器和生态探测器 4 种类型,其中因子探测器能衡量各驱动因子(X)对因变量(Y)空间分布差异上的解释力度。参考前人的研究结果[29-30],本研究选取兰州市绿色空间面积为因变量(Y),选取高程(X_1)、坡度(X_2)、坡向(X_3)、人口密度(X_4)、地区生产总值(X_5)、第一产业值(X_6)、第二产业值(X_7)与第三产业值(X_8)为自变量,采用因子探测器对影响兰州市绿色空间变化的驱动因素进行分析,计算各个影响因子的解释力,其计算公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2}。 \quad (3)$$

式中:q 为某一影响因子的解释力,取值为[0,1],q 值越大,说明影响因子的影响程度越大;h 为影响因子分类数;N_h 为 h 的单元数;σ_h^2 为 h 的方差;N 为整体的单元数;σ^2 为整体方差。

3 结果与分析

3.1 兰州市绿色空间面积的变化特征

2000—2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间的分布见图 2,2000,2010 和 2020 年兰州市绿色空间及其各土地利用类型面积、占比和动态度的变化见表 1 和表 2。由表 1 和表 2 可知,2000—2010 年兰州市绿色空间面积减少 1.14 km^2,占总面积比例下降 0.11%,土地利用动态度为−0.01%,其中耕地和草地面积有小幅增长;林地面积不变;水域面积下降,占总面积比例下降 0.34%,土地利用动态度为−1.81%。

2010—2020 年兰州市绿色空间面积较 2000—2010 年变化更明显,面积减少 103.67 km^2,占总面积比例下降 9.91%,土地利用动态度为−1.14%,其中耕地和草地面积大幅下降,减少面积分别为 73.72 和 52.36 km^2,占总面积比例分别下降 7.05%,5.01%,土地利用动态度分别是−1.76%,−1.12%;林地面积明显增长,增加面积为 23.82 km^2,占总面积比例上升 2.28%,土地利用动态度为 44.23%;水域面积小幅降低。

2000—2020 年兰州市绿色空间总面积共减少 104.80 km^2,占总面积比例下降 10.02%,土地利用动态度为−0.58%。其中耕地和草地面积变化幅度最大,分别减少了 71.69 和 51.97 km^2,占总面积比例分别下降 6.85%,4.97%,土地利用动态度分别为−0.86%,−0.56%;林地面积增加了 23.82 km^2,占总面积比例增加 2.28%,土地利用动态度为 22.13%;水域面积变化较小。非绿色空间面积增加 104.80 km^2,占总面积比例提高 10.02%,土地利用动态度为 3.81%。

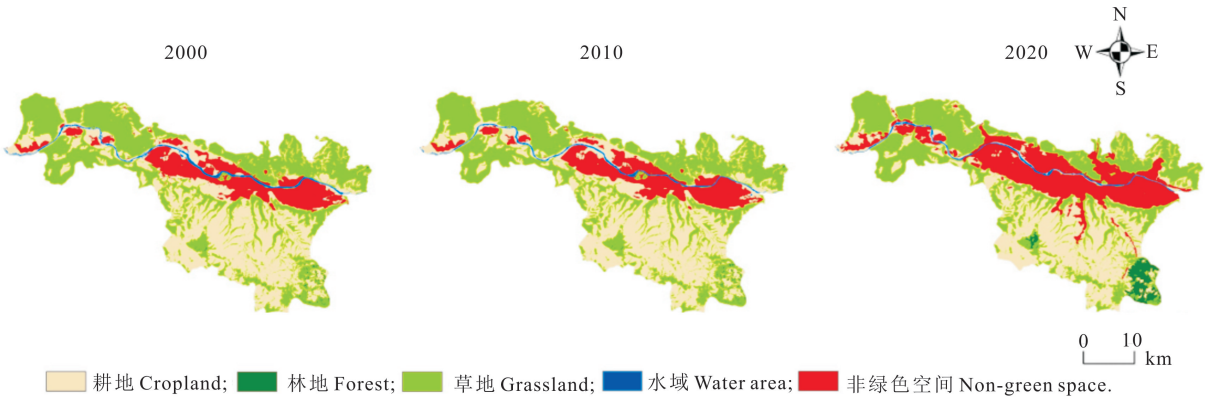


图 2　2000－2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间的分布情况

Fig. 2　Distribution of green spaces and non-green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

表 1　2000－2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间的面积及占比

Table 1　Area and proportion of green spaces and non-green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

类型 Type	2000		2010		2020	
	面积/km² Area	比例/% Ratio	面积/km² Area	比例/% Ratio	面积/km² Area	比例/% Ratio
耕地 Cropland	417.31	39.89	419.34	40.09	345.62	33.04
林地 Forest	5.38	0.51	5.38	0.51	29.20	2.79
草地 Grassland	466.01	44.55	466.40	44.59	414.04	39.58
水域 Water area	19.68	1.88	16.11	1.54	14.70	1.41
绿色空间 Green spcae	908.38	86.84	907.24	86.73	803.57	76.82
非绿色空间 Non-green space	137.70	13.16	138.84	13.27	242.51	23.18

表 2　2000－2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间的面积变化及动态度

Table 2　Area change and dynamics of green and non-green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

类型 Type	2000－2010		2010－2020		2000－2020	
	面积变化/km² Area change	土地利用动态度/% Land use change dynamic	面积变化/km² Area change	土地利用动态度/% Land use change dynamic	面积变化/km² Area change	土地利用动态度/% Land use change dynamic
耕地 Cropland	2.04	0.05	－73.72	－1.76	－71.69	－0.86
林地 Forest land	0.00	0.01	23.82	44.23	23.82	22.13
草地 Grassland	0.39	0.01	－52.36	－1.12	－51.97	－0.56
水域 Water area	－3.56	－1.81	－1.41	－0.88	－4.98	－1.26
绿色空间 Green spcae	－1.14	－0.01	－103.67	－1.14	－104.81	－0.58
非绿色空间 Non-green space	1.14	0.08	103.67	7.47	104.80	3.81

兰州是典型的河谷型城市，具有线性带状的空间格局，近年来随着城市化发展进程的加快，同时伴随着剧烈的人类活动，城市植被和生态环境受到明显影响，进而促使绿色空间向非绿色空间转移。2000－2020 年兰州市绿色空间与非绿色空间的动态变化和转移矩阵分别见图 3 和表 3～5。图 3 和表 3～5 显示，2000－2010 年，兰州市绿色空间向非绿色空间转移的面积为 7.15 km²，其中耕地和水域面积变化较大，其转为非绿色空间面积分别为 5.36 和 1.73 km²；其次为草地，其转为非绿色空间面积为 0.06 km²；林地未进行转移。共有 6.01 km² 非绿色空间转为绿色空间。绿色空间与非绿色空间面积之间的转换区域集中于兰州城市建成区周围。

图 3 和表 3～5 显示，2010－2020 年，随着城镇的迅速扩张，兰州市绿色空间转为非绿色空间面积为 105.29 km²，较 2000－2010 年大幅上升，其中耕地和草地转为非绿色空间的面积较大，分别达 74.46 和 29.82 km²，其空间分布呈现出明显的集中态势；其次 1.00 km² 水域转为非绿色空间；0.01 km² 林地转为非绿色空间。仅有 1.67 km² 非绿色空间转移为绿色空间。2000－2020 年绿色空间转为非绿色空间面积为 106.99 km²，主要表现在耕地、草地面积减少，其中 74.63 km² 耕地、29.57 km² 草地转移为非绿色空间，主要分布在兰州东北部和西北部。共有 2.22 km² 的非绿色空间转为绿色空间，其中转为耕地、草地和水域的面积分别为

1.71,0.35 和 0.16 km^2,未向林地进行转移。绿色空间与非绿色空间面积之间的转换区域主要分布于兰州城市建成区周围。

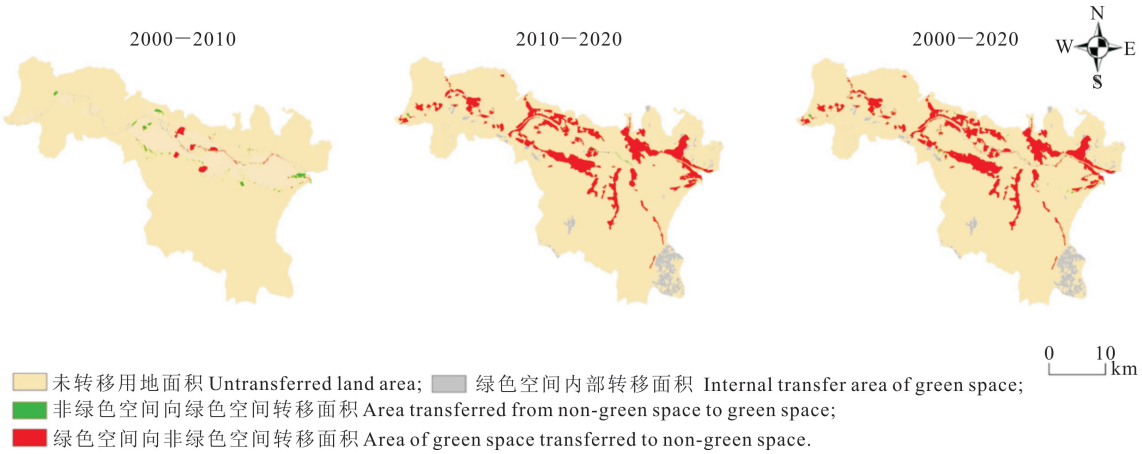


图 3 2000—2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间动态变化的分布

Fig. 3 Dynamic changes distribution of green and non-green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

表 3 2000—2010 年兰州市绿色空间和非绿色空间变化转移矩阵

Table 3 Change transfer matrix of green space and non-green space in Lanzhou City from 2000 to 2010

年份 Year	类型 Type	2010 耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	非绿色空间 Non-green space	总计 Total
2000	耕地 Cropland	410.59	0.00	0.12	1.23	5.36	417.31
	林地 Forest land	0.00	5.38	0.00	0.00	0.00	5.38
	草地 Grassland	0.02	0.00	465.88	0.06	0.06	466.01
	水域 Water area	3.05	0.00	0.22	14.67	1.73	19.68
	非绿色空间 Non-green space	5.68	0.00	0.18	0.15	131.69	137.70
	总计 Total	419.34	5.38	466.40	16.11	138.84	1 046.08

表 4 2010—2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间变化转移矩阵

Table 4 Change transfer matrix of green space and non-green space in Lanzhou City from 2010 to 2020

年份 Year	类型 Type	2020 耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	非绿色空间 Non-green space	总计 Total
2010	耕地 Cropland	326.30	6.68	10.77	0.79	74.46	419.01
	林地 Forest land	0.06	4.43	0.87	0.00	0.01	5.37
	草地 Grassland	16.29	18.04	400.98	0.06	29.82	465.19
	水域 Water area	1.55	0.00	0.03	13.46	1.00	16.05
	非绿色空间 Non-green space	1.06	0.00	0.28	0.33	137.17	138.84
	总计 Total	345.27	29.15	412.93	14.65	242.46	1 044.45

表 5 2000—2020 年兰州市绿色空间和非绿色空间变化转移矩阵

Table 5 Change transfer matrix of green space and non-green space in Lanzhou City from 2000 to 2020

年份 Year	类型 Type	2020 耕地 Cropland	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water area	非绿色空间 Non-green space	总计 Total
2000	耕地 Cropland	323.87	6.68	10.64	1.17	74.63	417.00
	林地 Forest land	0.06	4.43	0.86	0.00	0.00	5.36
	草地 Grassland	16.25	18.04	400.85	0.10	29.57	464.80
	水域 Water area	3.37	0.00	0.22	13.21	2.79	19.59
	非绿色空间 Non-green space	1.71	0.00	0.35	0.16	135.47	137.70
	总计 Total	345.27	29.15	412.93	14.65	242.46	1 044.45

3.2 兰州市绿色空间景观格局的演变

3.2.1 绿色空间景观格局指数的变化 由表 6 可知,2000,2010,2020 年兰州市绿色空间景观水平指数变化有明显差异。随着时间的推移,景观斑块数(NP)、斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)均呈降低的趋势,说明景观破碎化程度减少,不同斑块之间

的分布更加聚集，连通性增加，同时景观复杂程度也随之降低。2000，2010，2020 年兰州市聚集度指数（CONTAG）均在 55％以上，且随着时间的推移呈先增加后降低趋势，反映出绿色空间景观连通性颇为优良。随着时间的推移，香农多样性指数（SHDI）和香农均匀度指数（SHEI）均呈先下降后增加趋势，说明 2000－2010 年，兰州市绿色空间规模扩大，非绿色空间规模相应缩减；2010－2020 年，各类型景观斑块更加复杂和多样性，并趋于均匀分布。

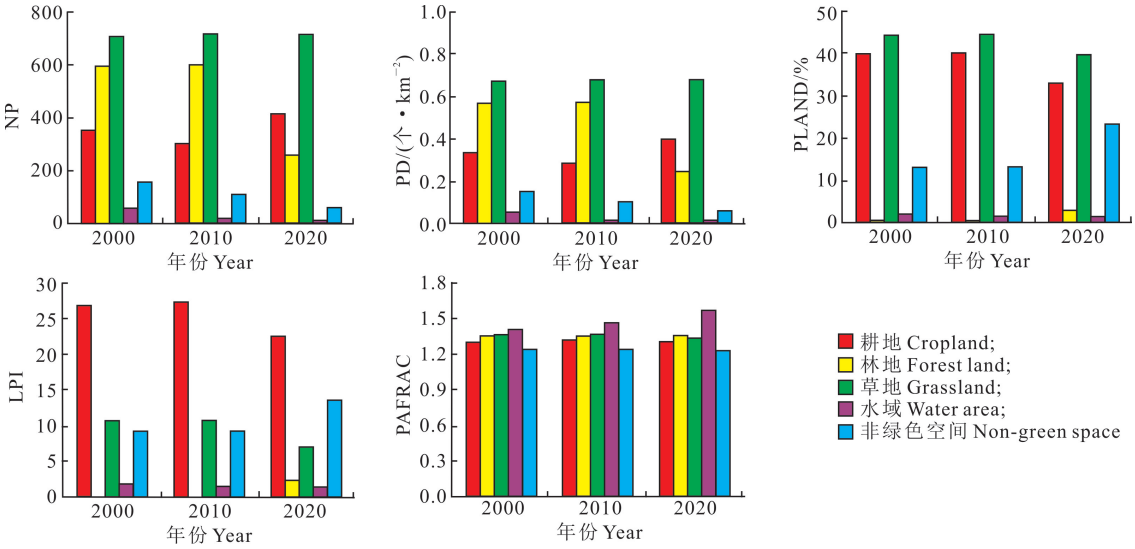
表 6　2000－2020 年兰州市绿色空间景观格局指数的变化

Table 6　Changes in the landscape pattern index of green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

年份 Year	斑块数 Number of patches	斑块密度/（个·km^{-2}） Patch density	景观形状指数 Landscape shape index	聚集度指数 Contagion	香农多样性指数 Shannon diversity index	香农均匀度指数 Shannon evenness index
2000	1 857	1.775 2	25.876 2	59.695 9	1.095 6	0.680 7
2010	1 735	1.658 6	25.543 3	60.138 1	1.086 0	0.674 8
2020	1 458	1.393 8	23.564 9	55.833 6	1.231 5	0.765 2

3.2.2　不同土地利用类型景观格局指数的变化

图 4 显示，2000－2020 年，随着时间的推移，耕地的斑块数（NP）和斑块密度（PD）呈先降低后上升的趋势，经历了由疏散-汇聚-疏散的变化过程，说明在 2010 年以前人类活动对耕地破碎化程度的影响相对较少，在 2010 年以后城镇用地不断扩张导致斑块数量增加，斑块密度也随之提高，破碎化程度愈加明显；草地的 NP 和 PD 变化幅度较小，基本保持不变；林地、水域和非绿色空间的 NP 和 PD 持续降低，表明景观中斑块更加集中和连片，从而减少景观的破碎化程度。随着时间的推移，耕地、草地斑块所占景观面积比例（PLAND）和最大斑块指数（LPI）总体均降低；水域的 PLAND、LPI 变化不明显；林地的 PLAND 和 LPI 均上升；非绿色空间的 PLAND 上升，LPI 先降低后上升，表明该空间内部链接程度逐渐提高，景观相对集中。在绿色空间的各土地利用类型中，水域的周长面积分维数（PAFRAC）均最高，且随着时间的推移呈逐步上升趋势，表明水域景观受人类活动干预程度逐渐增加，斑块边界的复杂性和不规则性逐渐增强，使斑块形状呈现更加多样化特征；耕地、林地、草地和非绿色空间的 PAFRAC 值变化幅度较小，均未超过 1.5，说明其产生的边缘效应相对较弱，斑块形状趋于规则化。



NP. 斑块数；PD. 斑块密度；PLAND. 斑块所占景观面积比例；LPI. 最大斑块指数；PAFRAC. 周长面积分维数。

NP. Number of patches; PD. Patch density; PLAND. Percentage of landscape; LPI. Largest patch index; PAFRAC. Perimeter-area fractal dimension.

图 4　2000－2020 兰州市绿色空间中不同土地利用类型景观格局指数的变化

Fig. 4　Changes in landscape pattern index of different land use types in green spaces in Lanzhou from 2000 to 2020

3.3　兰州市绿色空间驱动因子分析

本研究选取兰州市绿色空间面积为因变量（Y），高程（X_1）、坡度（X_2）、坡向（X_3）、人口密度（X_4）、地区生产总值（X_5）、第一产业值（X_6）、第二产业值（X_7）与第三产业值（X_8）为自变量，分析了各类因子对兰州市绿色空间变化的影响，结果见表 7。

表 7 显示,2000 年,坡度、坡向的解释力(q)均为 0.61,说明这 2 个因子的影响力较高;其余因子的 q 均<0.5,其中地区生产总值和第二产业值的 q 均为 0.01,说明其对绿色空间的影响不明显。2010 年,人口密度、第一产业值和第二产业值的 q 值均为 0.89,说明其对绿色空间的影响较明显;地区生产总值和第三产业值的 q 值均不到 0.1,可知其对绿色空间无明显驱动作用。2020 年,人口密度的 q 值达到 0.92,说明其对绿色空间的影响最强。2000—2020 年,人口密度的 q 值呈增长的趋势,说明人口密度对绿色空间变化的驱动作用更为强烈,同时也说明人类活动对绿色空间的驱动作用愈发显著;第一产业值和第二产业值对绿色空间的影响总体较大,说明农业、工业的发展和产业布局调整明显影响绿色空间的分布;高程、坡度、坡向对绿色空间的影响较稳定。

以上结果表明,自然因素和社会经济因素在不同程度上影响了兰州市绿色空间变化,其中自然因素的影响较稳定,影响力相对变化较小;社会经济因素的影响力度更强,明显占主导优势,直接影响绿色空间的分布,也进一步说明人类活动加快了城市化进程,同时推动绿色空间演变愈加强烈。

表 7 2000—2020 兰州市绿色空间变化地理探测器影响因子及探测结果

Table 7 Influence factor of geographic detectors and detection results of green space changes in Lanzhou City from 2000 to 2020

影响因子 Influence factor	2000		2010		2020	
	解释力(q) Explanatory power	排序 Sequence	解释力(q) Explanatory power	排序 Sequence	解释力(q) Explanatory power	排序 Sequence
高程(X_1) Elevation	0.44	2	0.43	3	0.45	3
坡度(X_2)Slpoe	0.61	1	0.62	2	0.57	2
坡向(X_3)Slpoe aspect	0.61	1	0.62	2	0.57	2
人口密度(X_4)Population density	0.10	3	0.89	1	0.92	1
地区生产总值(X_5)Regional GDP	0.01	4	0.09	4	0.12	4
第一产业值(X_6)Value of primary industry	0.44	2	0.89	1	0.45	3
第二产业值(X_7)Value of the secondary industry	0.01	4	0.89	1	0.57	2
第三产业值(X_8)Value of the tertiary industry	0.10	3	0.09	4	0.12	4

4 结 论

基于兰州市土地利用数据,采用土地利用动态度、土地利用转移矩阵、景观格局指数和地理探测器等方法,分析了该地区 2000,2010 和 2020 年绿色空间的时空变化及其驱动因素,得到以下结论:

1)2000—2020 年兰州市绿色空间面积占研究区总面积比例较大,但呈逐渐减少趋势,其中耕地、草地面积减小占比较大,林地面积总体上升;非绿色空间面积逐渐增加。说明 20 年城市化快速发展推动了兰州核心城区绿色空间转为非绿色空间面积增加,非绿色空间转为绿色空间面积减小。

2)2000—2020 年兰州市绿色空间景观斑块数、斑块密度、景观形状指数均呈现下降趋势,聚集度指数先增加后减少,香农多样性指数和香农均匀度指数明显增加。随着时间的延长,耕地景观多样性和破碎程度先增加后减少,景观优势度先增强后降低;林地的破碎程度降低,景观优势度增强;草地景观未出现明显变化;水域景观多样性减少,破碎程度和景观优势度逐渐降低,景观的复杂性减小;非绿色空间景观多样性减少,破碎程度降低,景观优势度增强,景观复杂性减小,斑块形状趋于规则化。

3)2000—2020 年兰州市绿色空间演变的主要驱动力因素为社会经济因素,其中人口密度、地区生产总值、第一产业值、第二产业值对绿色空间的影响较大。

[参考文献]

[1] 王伟,周越,田瑜,等. 自然保护地生物多样性保护研究进展[J]. 生物多样性,2022,30(10):52-65.
WANG W,ZHOU Y,TIAN Y,et al. Biodiversity conservation research in protected areas:a review[J]. Biodiversity Science,2022,30(10):52-65.

[2] 王剑强,王志泰. 基于缓解热岛效应的山地城市生态斑块研究:以贵州省贞丰县为例[J]. 西北林学院学报,2014,29(2):232-236.
WANG J Q,WANG Z T. Mountainous urban ecological plaques based on relieving heat island effect:a case study in Zhenfeng County,Guizhou Province[J]. Journal of Northwest Forestry University,2014,29(2):232-236.

[3] 于长明,吴培阳. 城市绿色空间可步行性评价方法研究综述[J]. 中国园林,2018,34(4):18-23.
YU C M,WU P Y. Review of urban green space walkability assessment method[J]. Chinese Landscape Architecture,2018,34(4):18-23.

[4] 杨振山，张慧，丁悦，等. 城市绿色空间研究内容与展望[J]. 地理科学进展，2015，34(1)：18-29.
YANG Z S，ZHANG H，DING Y，et al. Progress and prospect on urban green space research[J]. Progress in Geography，2015，34(1)：18-29.

[5] XUE K，YU P Y，ZHANG H. Accessibility analysis and optimization strategy of urban green space in Qingdao City Center，China[J]. Ecological Indicators，2023，156：111087.

[6] HUANG Y Y，LIN T，ZHANG G Q，et al. Spatial patterns of urban green space and its actual utilization status in China based on big data analysis[J]. Big Earth Data，2021，5(3)：391-409.

[7] MASOUDI M，TAN P Y，LIEW S C. Multi-city comparison of the relationships between spatial pattern and cooling effect of urban green spaces in four major Asian cities[J]. Ecological Indicators，2019，98：200-213.

[8] 谢念斯，刘胜华. 广州市城市绿地空间格局及其关联性分析[J]. 生态科学，2019，38(3)：55-63.
XIE N S，LIU S H. Spatial pattern of urban green spaces and its effects on land use intensification in Guangzhou City[J]. Eco-logical Science，2019，38(3)：55-63.

[9] 陈慧灵，杨雪珂，袁梦，等. 长株潭都市圈绿色空间分布特征及其公平性[J]. 生态学报，2025(5)：1-13.
CHEN H L，YANG X K，YUAN M，et al. The distribution characteristics and equity of green space in Changzhutan metroplitan area[J]. Acta Ecologica Sinica，2025(5)：1-13.

[10] 李莹莹，黄成林，张玉. 快速城市化背景下上海绿色空间景观格局梯度及其多样性时空动态特征分析[J]. 生态环境学报，2016，25(7)：1115-1124.
LI Y Y，HUANG C L，ZHANG Y. Investigating spatiotemporal patterns of landscape gradient and diversity of urban green spaces of Shanghai in response to rapid urbanization[J]. Ecology and Environmental Sciences，2016，25(7)：1115-1124.

[11] 杨金炎，王子懿，杨洁，等. 重庆市万州区 1992—2022 年土地利用和生态风险分析[J]. 西北林学院学报，2024，39(5)：241-251，262.
YANG J Y，WANG Z Y，YANG J，et al. Land use and ecological risks in Wanzhou district，Chongqing during 1992－2022[J]. Journal of Northwest Forestry University，2024，39(5)：241-251，262.

[12] 李翅，邢晓娟. 网络分析法在市域绿色空间体系规划方案评估中的应用[J]. 规划师，2016，32(S2)：58-63.
LI C，XING X J. Application of network analytic method in urban green spatial system planning evaluation[J]. Planners，2016，32(S2)：58-63.

[13] 李方正，解爽，李雄. 基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间时空演变研究(1992—2016)[J]. 风景园林，2018，25(8)：46-51.
LI F Z，XIE S，LI X. The spatio-temporal evolution of green spaces in central Beijing based on multisource data(1992—2016)[J]. Landscape Architecture，2018，25(8)：46-51.

[14] 陶宇，李锋，王如松，等. 城市绿色空间格局的定量化方法研究进展[J]. 生态学报，2013，33(8)：2330-2342.
TAO Y，LI F，WANG R S，et al. Research progress in the quantitative methods of urban green space patterns[J]. Acta Ecologica Sinica，2013，33(8)：2330-2342.

[15] 李启珍，胡希军，韦宝婧，等. 长沙市绿色空间与城市扩张耦合关系研究[J]. 经济地理，2022，42(11)：87-94.
LI Q Z，HU X J，WEI B J，et al. Coupling relationship between green space and urban expansion in Changsha[J]. Economic Geography，2022，42(11)：87-94.

[16] 杨冉，侯文星，王丽丽，等. 北京浅山区绿色空间及生态环境质量变化研究[J]. 环境保护科学，2024，50(1)：74-80.
YANG R，HOU W X，WANG L L，et al. Green space and ecological environment quality change in Beijing shallow mountain area[J]. Environmental Protection Science，2024，50(1)：74-80.

[17] 李莹莹，黄成林. 快速城市化背景下上海绿色空间时空动态演变[J]. 安徽农业大学学报，2017，44(1)：87-93.
LI Y Y，HUANG C L. The spatio-temporal dynamics of the green space and landscape in rapidly urbanizing Shanghai[J]. Journal of Anhui Agricultural University，2017，44(1)：87-93.

[18] 陈康林，龚建周，刘彦随，等. 近 35 a 来广州城市绿色空间及破碎化时空分异[J]. 自然资源学报，2016，31(7)：1100-1113.
CHEN K L，GONG J Z，LIU Y S，et al. The spatial-temporal differentiation of green space and its fragmentation during the past thirty-five years in Guangzhou[J]. Journal of Natural Resources，2016，31(7)：1100-1113.

[19] 胡艳兴，潘竟虎. 基于土地利用空间格局的兰州市景观稳定性[J]. 中国沙漠，2016，36(2)：556-563.
HU Y X，PAN J H. The stability of landscape pattern in Lanzhou，Gansu，China[J]. Journal of Desert Research，2016，36(2)：556-563.

[20] 陈喜东，石培基，王川，等. 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[J]. 生态学杂志，2018，37(11)：3381-3389.
CHEN X D，SHI P J，WANG C，et al. Responses of landscape ecological pattern to the expansion of urban construction land in river valley city under different scenarios：a case study of Lanzhou[J]. Chinese Journal of Ecology，2018，37(11)：3381-3389.

[21] 刘文辉，董林泉. 兰州-白银地区 1987 年与 2014 年表层土壤有机碳储量和碳密度变化趋势及影响因素探讨[J]. 甘肃地质，2023，32(2)：48-55.
LIU W H，DONG L Q. Changes of soil organic carbon storage and density in Lanzhou-Baiyin region from 1987 to 2014 and their influencing factors[J]. Acta Geologica Gansu，2023，32(2)：48-55.

[22] 张燕，梁进一，韦玲霞. 兰州市生态环境质量时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境，2023，37(10)：65-74.
ZHANG Y，LIANG J Y，WEI L X. Change in spatial-temporal patterns of eco-environment quality and its driving forces for the Lanzhou City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment，2023，37(10)：65-74.

[23] 王梓洋,石培基,石晶,等.河谷城市空间扩展的生态效应:以兰州市主城区为例[J].资源科学,2023,45(12):2385-2399.
WANG Z Y,SHI P J,SHI J,et al. Ecological effect of urban spatial expansion in river valleys:a case study in the main urban area of Lanzhou City[J]. Resources Science,2023,45(12):2385-2399.

[24] 王玺,周亮,唐相龙,等.西北典型山地城市绿色空间时空演化特征:以兰州市为例[J].干旱区资源与环境,2023,37(1):106-112.
WANG X,ZHOU L,TANG X L,et al. Spatial-temporal evolution characteristics of urban green space in typical mountainous cities of Northwest China:a case study in Lanzhou[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2023,37(1):106-112.

[25] 杨珺,李豪,马青,等.汾河流域土地利用景观格局演变及其驱动因素探究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(6):83-94.
YANG J,LI H,MA Q,et al. Evolution and driving factors of land use landscape pattern in the Fenhe River Basin[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2024,52(6):83-94.

[26] 孙晨,贡璐,马勇刚,等.塔里木河上游典型绿洲土地利用时空格局分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2020,48(7):113-122.
SUN C,GONG L,MA Y G,et al. Temporal and spatial pattern analysis of land use in typical oasis in the upper reaches of the Tarim River[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition),2020,48(7):113-122.

[27] 马小雪,吴昊,秦伯强,等.长江经济带景观格局动态演变及其景观生态环境效应[J].地理科学,2022,42(10):1706-1716.
MA X X,WU H,QIN B Q,et al. Spatiotemporal change of landscape pattern and its eco-environmental response in the Yangtze River economic belt[J]. Scientia Geographica Sinica,2022,42(10):1706-1716.

[28] 吴镇宇,罗梦琦,郭红丽,等.基于地理探测器的江苏省沿江地区土壤侵蚀定量分析[J].水土保持通报,2022,42(2):184-188,387.
WU Z Y,LUO M Q,GUO H L,et al. Quantitative analysis of soil erosion along Yangtze River in Jiangsu Province based on geographic detector[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2022,42(2):184-188,387.

[29] 贾静,宿星,张军,等.1985—2020年甘肃省通渭县滑坡区土地利用变化及驱动力[J].应用生态学报,2024,35(10):2833-2841.
JIA J,SU X,ZHANG J,et al. Land use changes and driving forces of landslide area in Tongwei County,Gansu Province,Northwest China from 1985 to 2020[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2024,35(10):2833-2841.

[30] 李旭东,韩亮,吉杲钇.能源型城市景观格局时空演变与驱动机制的量化研究:以山西省大同市为例[J].山西大同大学学报(自然科学版),2024,40(6):118-123.
LI X D,HAN L,JI G Y. Quantitative study of the spatiotemporal evolution and driving mechanism of landscape pattern in energy intensive cities:a case study of Datong City,Shanxi Province[J]. Shanxi Datong University Journal,2024,40(6):118-123.

(责任编辑:李小平)

(上接第142页)

[20] LI R L,XIE J R,XU W,et al. LPS-induced PTGS2 manipulates the inflammatory response through trophoblast invasion in preeclampsia via NF-κB pathway[J]. Reproductive Biology,2022,22(4):100696.

[21] LI H Y,LIU C,LI R,et al. AARS1 and AARS2 sense l-lactate to regulate cGAS as global lysine lactyltransferases[J]. Nature,2024,634(8036):1229-1237.

[22] ZONG Z,XIE F,WANG S,et al. Alanyl-tRNA synthetase,AARS1,is a lactate sensor and lactyltransferase that lactylates p53 and contributes to tumorigenesis[J]. Cell,2024,187(10):2375-2392.e33.

[23] XU H J,WANG H,NING X P,et al. Integrated bioinformatics and validation reveal PTGS2 and its related molecules to alleviate TNF-α-induced endothelial senescence[J]. In Vitro Cellular & Developmental Biology-Animal,2024,60(8):888-902.

(责任编辑:马秋明)