

引用格式: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.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.07

河谷城市空间扩展的生态效应 ——以兰州市主城区为例

王梓洋^{1,2,3}, 石培基^{1,2,3}, 石晶^{1,2}, 张学斌^{1,2,3}, 刘玥^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070; 3. 甘肃省绿洲资源环境与可持续发展实验室, 兰州 730070)

摘要:【目的】城市空间扩展的生态效应是贯穿城市化过程的关键的人地关系问题,而河谷城市由于扩展空间受限,其生态效应更加复杂,因此多角度探讨典型河谷城市空间扩展所引起的生态效应尤为重要,同时可为相关学者提供较新的视角、思路和方法。【方法】本文以典型河谷城市兰州市主城区为例,通过计算1995、2005、2015和2020年城市空间扩展规模、强度和景观格局指数,以反映1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的时空变化特征,并将研究区分为12184个网格,利用空间主成分分析法、大气辐射传输方程法以及修正的生态系统服务价值测算模型,从多角度分析城市空间扩展的生态风险、热岛和生态系统服务效应,探讨了自然环境条件对河谷城市空间扩展生态效应的影响,并提出了城市可持续发展与生态保护修复对策。【结果】①1995—2020年兰州市主城区城市扩展规模和强度呈增长趋势,城市景观破碎化程度降低,城市扩展方向以西部和北部为主,城市扩展模式由组团水平扩展向跳跃式扩展转变。②1995—2020年兰州市主城区整体生态风险效应和热岛效应存在减弱趋势,但河谷谷地却有上升趋势,研究期末总体格局呈谷地高、四周低的特征。③生态系统服务效应存在微弱提升,主要表现为河谷周边区域生态系统服务价值显著提升,且建成区部分区域由生态系统服务低值区向中值区转变。④城市扩展会对区域自然基底产生一定影响,而自然基底也影响着城市扩展的规模、方向与模式,协调两者之间的关系对人类与自然可持续和谐发展至关重要。【结论】从多角度出发构建城市空间扩展的生态效应研究框架,发现在网格尺度上城市空间扩展对生态风险、热岛和生态系统服务效应影响较为显著,并对定量可视化研究城市演变与生态环境之间的动态关系提供了一种新的途径,可为城市智慧管理、生态文明建设提供一定的科学借鉴。

关键词:城市扩展;生态效应;生态系统服务价值测算模型;河谷城市;兰州市

DOI: 10.18402/resci.2023.12.07

1 引言

长期以来人口持续向城市集聚^[1,2],使城市空间持续扩张,农业和生态用地不断向城市用地转变^[3],迫使城市生态环境承受着巨大压力^[4],往往也伴随着生境退化、生态系统服务价值损失等一系列生态环境安全问题^[5,6],严重制约人类社会经济可持续发展进程^[7]。可见,城市空间扩张与区域生态环境保护之间存在冲突,这一问题对生态敏感、地形复杂的干旱半

干旱河谷城市而言,尤为明显^[8]。因此,在资源和生态环境约束日益加大的形势下,研究河谷城市扩展所引起的生态效应对推动区域经济、社会、生态的可持续发展至关重要。

目前学界对城市空间扩展的相关研究主要集中在城市扩展的过程^[9]、模式^[10]、动力机制^[11]、模拟预测以及城市扩展效应与调控等5个方面^[12,13],且主要研究对象为平原城市^[14],对于干旱区河谷盆地型城市

收稿日期: 2023-07-05 修订日期: 2023-09-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771130; 42101276; 42161043); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(22JJD790015)。

作者简介: 王梓洋,男,甘肃庆阳人,博士生,研究方向为城市与区域发展研究。E-mail: 2019212399@nwnu.edu.cn

通讯作者: 石培基,男,甘肃临洮人,教授,博士生导师,研究方向为城市与区域发展研究。E-mail: xbsdspj@163.com

的研究相对欠缺。而与城市空间扩展生态效应相关的研究,主要集中在城市空间扩展对自然地理环境的影响^[15]、城市空间扩展对生态环境的影响评价^[16]、城市空间扩展引起生态环境质量变化的驱动因素辨析以及城市空间扩展的生态效应模拟预测与调控等方面^[17-19]。综合来看,近年来城市空间扩展过程及其所伴随的生态问题研究引起国内外学者广泛关注^[20-22],但对城市空间扩展的生态效应研究主要侧重于城市空间扩展对气候^[23]、水文^[24]、温度^[25]、水资源以及土壤资源等单个生态要素或资源的影响^[26,27],研究角度较为单一,且在人为因素对城市空间扩展生态效应的影响研究方面相对欠缺。因此,面对城市空间扩展所引起的生态效应这种复杂的科学问题,本文以人地关系地域系统理论为指导,充分考虑人为活动对城市空间扩展生态效应的影响,以及从城市存在的普遍问题出发,尝试选取既能反映人为因素又能兼顾到生态环境的生态风险效应、热岛效应和生态系统服务效应3个维度,综合、系统地入手解决这一问题,从3个维度共同构成城市空间扩展生态效应研究的核心框架。其中,生态风险效应侧重于自然和人为要素对城市生态系统构成潜在威胁性,热岛效应侧重于人类活动引起城市生态系统生态环境状况变化,生态系统服务则侧重于反映城市生态系统向人类提供生态服务的能力,如供给服务、调节服务等。开展系统、全面的城市空间扩展生态效应研究,形成对其潜在生态风险、生态环境状况以及生态系统服务能力及其演变的全面认知,识别关键生态问题并提出相应的解决策略,有助于科学指导认识和改造城市生态系统的理论与实践。

河谷城市是指城市核心部分在河谷中形成和发展的城市,其发展直接受河谷地形及周边山脉或丘陵的制约^[28]。兰州市处于典型的河谷盆地,其过去快速的工业化和城市化使人口、产业迅速集中在河谷滩地,造成河谷盆地内土地资源及其匮乏,以及填河造地等非自然、不合理的开发方式,导致城市水体、湿地大幅减少,脆弱的生态环境进一步恶化^[29]。干旱区河谷城市发展生态环境保护之间的矛盾愈加凸显^[30],如何在生态优先的情况下破解河谷城市发展受到的巨大制约,为城市化发展提供良好的空间和基础载体成为关键问题。因此,本文顺

应河谷城市可持续发展需求,以兰州市主城区为研究对象,通过分析1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的时空变化特征,从生态风险效应、城市热岛效应和生态系统服务效应3个角度系统性分析城市空间扩展的生态效应,并探讨河谷城市空间扩展与生态空间之间的影响,以期为河谷型城市的国土空间规划和生态环境布局优化提供决策支持。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文以中国西部甘肃省省会兰州市主城区为研究区(35°5'N—36°1'N, 103°2'E—104°0'E),其地处于黄河流域上游,主要由城关、七里河、安宁和西固4个行政区组成(图1),总面积为1047.57 km²,2020年建设用地面积达到235.48 km²。根据2020年第七次人口普查。研究区常住人口为257.44万人,平均每km²建设用地承载人口达10932.56人。2020年兰州市GDP为2176.35亿元,是西北地区重要的交通枢纽和综合性商业中心之一。研究区平均海拔1520 m,地形以山地和河谷盆地为主,黄河自西向东横穿而过,与峡谷盆地形成串珠形河谷。研究区深居大陆内部,年平均降水量仅为327 mm,且日照强、蒸发量大,总体气候干旱少雨^[31]。

2.2 数据来源

本文采用的1995、2005、2015、2020年土地利用矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的“中国多时期土地利用土地覆盖遥感监测数据库”(CNLUCC),采用人机交互目视判读方式解译,总精度为88.95%,精确度较

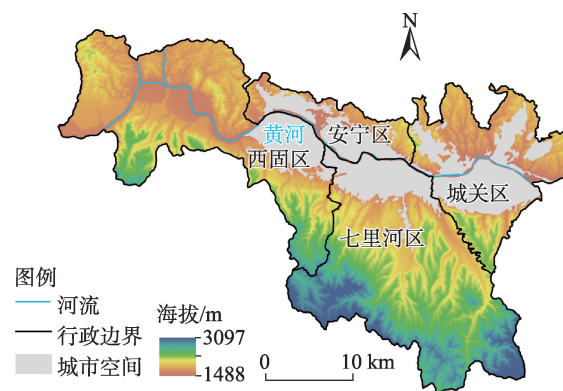


图1 研究区概况

Figure 1 Overview of the study area

2023年12月

高,分辨率为30 m,符合研究需要^[32]。数字高程模型(DEM)、土壤侵蚀、NDVI、人口密度和年均降水量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),数据分辨率为1 km。地表温度反演数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),选取夏季的1995年、2005年、2015年和2020年兰州市主城区Landsat 4-5 TM、Landsat 7 ETM、Landsat 8 OLI/TIRS 遥感影像数据,数据分辨率为30 m,云量均小于10%,地表温度反演效果佳。

3 研究方法

3.1 研究思路

本文通过计算城市空间扩展的规模、强度和景观格局指数来反映兰州市主城区城市空间扩展的时空变化特征,运用ArcGIS对研究区进行300 m×300 m网格化处理,将研究区分为12184个网格,并利用ArcGIS中的重采样工具将各类数据转换为300 m×300 m网格数据,且均采用统一地理坐标系(GCS_WGS_1984)。最后,利用空间主成分分析法、大气辐射传输方程法和生态系统服务价值测算

模型得到每个网格的生态风险值、地表温度值和生态系统服务价值,并分为高、较高、中等、较低和低5个等级,以辨析每个网格城市空间扩展所引起的生态效应(图2)。

3.2 城市空间扩展特征测度方法

本文对城市扩展特征的分析主要从城市扩展的规模、强度和城市景观格局3个方面考虑:①城市扩展的规模以城市扩展面积(UEA)表征;②城市扩展的强度以城市扩展强度指数(UEII)表征^[33]。③城市景观格局以斑块数量(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、景观百分比(PLAND)、景观形状指数(LSI)、斑块凝聚指数(COHESION)、相似邻接百分比(PLADJ)、破碎度指数(SPLIT)8个景观格局指数表征,并通过Fragstata 4.2软件计算来分析城市景观格局特征^[34,35]。城市扩展特征指标的具体公式和描述见表1。

3.3 生态效应分析

3.3.1 生态风险评价

根据研究区实际情况以及相关文献^[36,40],共选

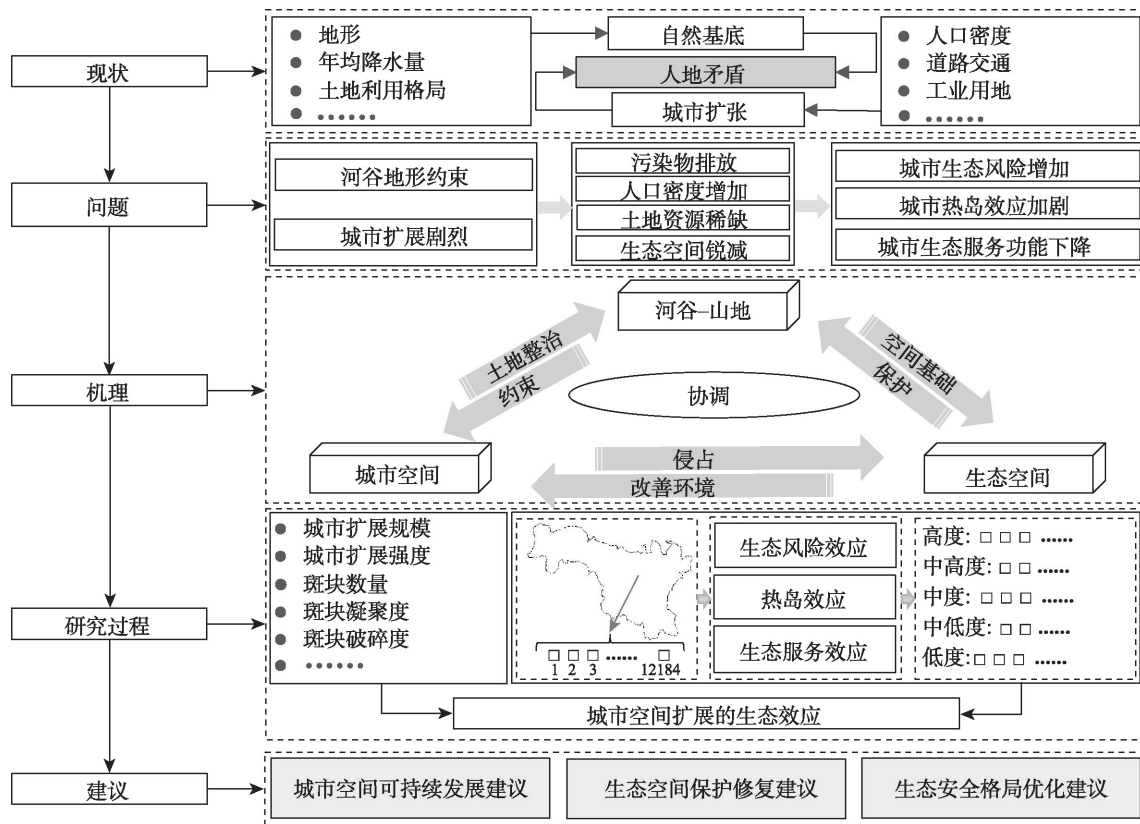


图2 研究思路

Figure 2 Framework of analysis

表1 城市空间扩展指标描述

Table 1 Description of urban spatial expansion indicators

| 指标 | 公式 | 解释 |
|----------|--|---|
| 城市扩展规模 | $UEA=U_{\text{end}}-U_{\text{start}}$ | U_{start} 和 U_{end} 分别为城市扩展初期规模和城市扩展末期城市面积 |
| 城市扩展强度指数 | $UEII=\left(\sqrt[T]{\frac{U_{\text{end}}}{U_{\text{start}}}}\right)\times 100\%-1$ | T 为以年为单位的时间段 |
| 斑块数量 | $NP=n$ | n 为斑块的数量 |
| 斑块密度 | $PD=\frac{n}{A}$ | A 为景观总面积 |
| 最大斑块指数 | $LPI=\frac{\max a_{ij}}{A}\times 100\%$ | a_{ij} 为第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的面积 |
| 景观百分比 | $PLAND=\frac{a_{ij}}{A}\times 100\%$ | 指 a_{ij} 在 <i>A</i> 中的百分比 |
| 景观形状指数 | $LSI=\frac{0.25\sum_{k=1}^m e_{ik}}{\sqrt{A}}$ | e_{ik} 为景观 <i>i</i> 和 <i>k</i> 之间的边缘总长度 |
| 斑块凝聚指数 | $COHESION=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n P_{ij}}{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n p_{ij}\sqrt{a_{ij}}}\right)\left(1-\frac{1}{\sqrt{A}}\right)^{-1}\times 100\%$ | P_{ij} 为第 <i>i</i> 类景观中第 <i>j</i> 个斑块的周长 |
| 相似邻接百分比 | $PLADJ=\left(\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{k=1}^m g_{ik}}{\sum_{i=1}^m\sum_{k=1}^m a_{ik}}\right)\times 100\%$ | g_{ik} 为景观 <i>i</i> 内部斑块之间的相似邻接数量; g_{ik} 为景观 <i>i</i> 和 <i>k</i> 之间的相似邻接数量 |
| 破碎度指数 | $SPLIT=\frac{A^2}{\sum_{i=1}^m\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}$ | |

取 10 个评价因子来构建研究区生态风险评价指标体系(表 2),这与 Wei 等^[36]对于旱地区生态风险评价因子选取相似。运用空间主成分法进行生态风险分析,通过 ArcGIS 软件获得统计上显著的主成分(累计贡献率在 85%以上),以及每个主成分对应的空间负荷图和每个主成分的累计贡献率。将生态风险综合指数定义为几个主成分的加权和,每个主成分所对应的方差贡献率作为权重。再根据相关文献经验^[41,42],利用自然断点法将生态风险程度分

为低、较低、中等、较高、高 5 个等级,等级越高生态风险越高。公式^[43]为:

$$ERI_s=\sum_{f=1}^z P_{sf}W_f \tag{1}$$

式中: ERI_s 为第*s*个评价单元(栅格)的生态风险指数; P_{sf} 为第*s*个评价单元的第*f*个指标; W_f 为第*f*个指标的权重。

3.3.2 地表温度反演

地表温度(LST)的计算主要是基于热红外波段

表2 生态风险评价因子及分类

Table 2 Ecological risk assessment factors and classification

| 评价因子 | 1级(低) | 2级(较低) | 3级(中等) | 4级(较高) | 5级(高) |
|---------------------------|-------|--------------|--------------|--------------|-------|
| 高程/m | ≤1800 | (1800, 2100] | (2100, 2400] | (2400, 2700] | >2700 |
| 坡度/° | ≤5 | (5, 10] | (10, 20] | (20, 30] | >30 |
| 植被覆盖度 | ≥0.60 | (0.45, 0.60] | (0.30, 0.45] | (0.15, 0.30] | <0.15 |
| 年均降水量/mm | ≥550 | (550, 500] | (500, 450] | (450, 400] | >400 |
| 人口密度/(人/km ²) | ≤500 | (500, 1000] | (1000, 1500] | (1500, 2000] | >2000 |
| 土地覆被类型 | 水域、林地 | 草地 | 耕地 | 未利用地 | 建设用地 |
| 土壤侵蚀 | 微度侵蚀 | 轻度侵蚀 | 中度侵蚀 | 强度侵蚀 | 剧烈侵蚀 |
| 距水体距离/m | ≤100 | (100, 500] | (500, 1000] | (1000, 1500] | >1500 |
| 距工业用地距离/m | ≥2000 | (2000, 1500] | (1500, 1000] | (1000, 500] | <500 |
| 距道路距离/m | ≥1500 | (1500, 1000] | (1000, 500] | (500, 100] | <100 |

2023年12月

数据,利用大气辐射传输方程法来反演兰州市主城区研究期内的地表温度变化。利用均值标准差法将研究区LST划分为高、较高、中等、较低和低5个等级,并以高温区与次高温区代表城市热岛效应区域。热红外辐射亮度值 L_λ 辐射传输方程为^[44]:

$$L_\lambda = [\varepsilon B(T) + (1 - \varepsilon)L_l] \gamma + L_t \quad (2)$$

式中: L_λ 为由TIRS·Band·10辐射定标后得到的辐射亮度($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); ε 为地表比辐射率; T 为地表真实温度(K); $B(T)$ 为黑体热辐射亮度($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); γ 为大气在热红外波段透过率; L_t 为大气向上辐射亮度($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); L_l 为大气向下辐射亮度($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$)。

3.3.3 生态系统服务价值评估

由于受多种因素影响,生态系统服务价值具有多种测算模型,其中Costanza等^[45]的研究成果最具代表性。谢高地等^[46]学者参考Costanza等^[45]提出的生态系统服务价值概念,以生态系统服务功能贡献程度、农田生产服务价值为主体,分别在2002年和2006年对中国700位生态学家进行问卷调查,分析得出新的“生态系统服务价值当量表”,1个生态系统服务当量因子的经济价值相当于每年每公顷粮食价值的1/7。该方法在生态系统服务价值研究方面已相当成熟,但其认为城市建成区不具有生态系统服务价值,与实际不符。中国长期以来对城市人居环境的提升使人工绿地面积持续增加,城市生态系统服务价值得到提升,说明该方法亟待进一步改进。由于城市人工绿地分布分散且面积较小,原有方法难以将其纳入城市生态系统服务价值计算范畴,因此,本文构建了城市建设用地生态系统服务价值系数计算模型,该模型可最大程度地实现城市绿地系统的生态系统服务价值计算。参考谢高地等^[47]的生态系统服务价值当量表,耕地林地、草地、水域和未利用地生态系统服务价值系数分别为5606.87、19957.61、8282.55、32186.26和986.52元/($hm^2 \cdot a$);利用本文构建的建设用地生态系统服务价值系数计算模型得到1995、2005、2015和2020年兰州市主城区建设用地生态系统服务价值系数分别为1128.60、2085.57、2514.66和3306.98元/($hm^2 \cdot a$)。最终利用自然断点法将计算的生态系统服务价值分为高、较高、中等、较低和低5类^[48]。

生态系统服务价值(ESV)的计算公式为:

$$ESV = \sum_{x=1}^p \sum_{y=1}^q B_{xy} \times C_x \quad (3)$$

$$ESVC_{cl} = \frac{(ESVC_{wl} + ESVC_{gl})A_t}{2} \quad (4)$$

式中: ESV 为生态系统服务价值总量; $ESVC_{cl}$ 、 $ESVC_{wl}$ 和 $ESVC_{gl}$ 分别为建设用地、林地和草地生态系统服务价值系数; A_t 为第 t 年城市建城区绿化覆盖率,1995、2005、2015和2020年兰州市主城区城市绿化覆盖率分别为11.31%、20.90%、25.20%和33.14%; B_{xy} 为第 x 种土地利用第 y 种生态系统服务类型单位面积所创造的生态系统服务价值系数; C_x 为评价小区内第 x 种土地利用的面积。

4 结果与分析

4.1 城市空间扩展

4.1.1 城市空间扩展时空特征

由图3可知,1995—2020年研究区城市扩展规模总体呈波动增长态势,共增长102.26 km^2 。1995—2005年城市扩展强度相对较低,以组团式水平扩展为主,河谷滩地能够基本满足城市发展的需求,新增城市用地主要在雁滩等高新技术开发园区,此阶段建成区持续扩展使城市规划者逐步意识到河谷内城市用地略显不足的问题,城市内部垂直向上和外部水平向外同时扩展的趋势初步显现。随着西部大开发战略的实施以及兰州经济技术开发区的成立,2005—2015年间城市扩展规模最大,达40.85 km^2 ,此阶段彭家坪、马滩和刘家堡等地迎来城市发展建设高峰期,以及九州开发区、恒大文旅城等项目的添盘使城市用地规模扩大,城市发展的重心逐步由东部向西部转移,城市东西两侧均出现服务能力较强的城市中心,使研究区开始由单核心城市空间结构转变为多核心城市空间结构。2015—2020年城市空间扩展强度最高,此阶段河谷滩地建筑密度的增加导致城市用地需求与土地供给矛盾更加凸显,南北两侧山体阻碍了建设用地向周边地区无限制的扩展,跳跃式扩展模式成为主要的发展方式,在青白石片区碧桂园和银河国际等大型房产开发项目的带动下逐步大规模对北部低山丘陵进行开山造地,有效缓解了城市用地的供需矛盾,也促使城市空间进一步扩大。总体来看,

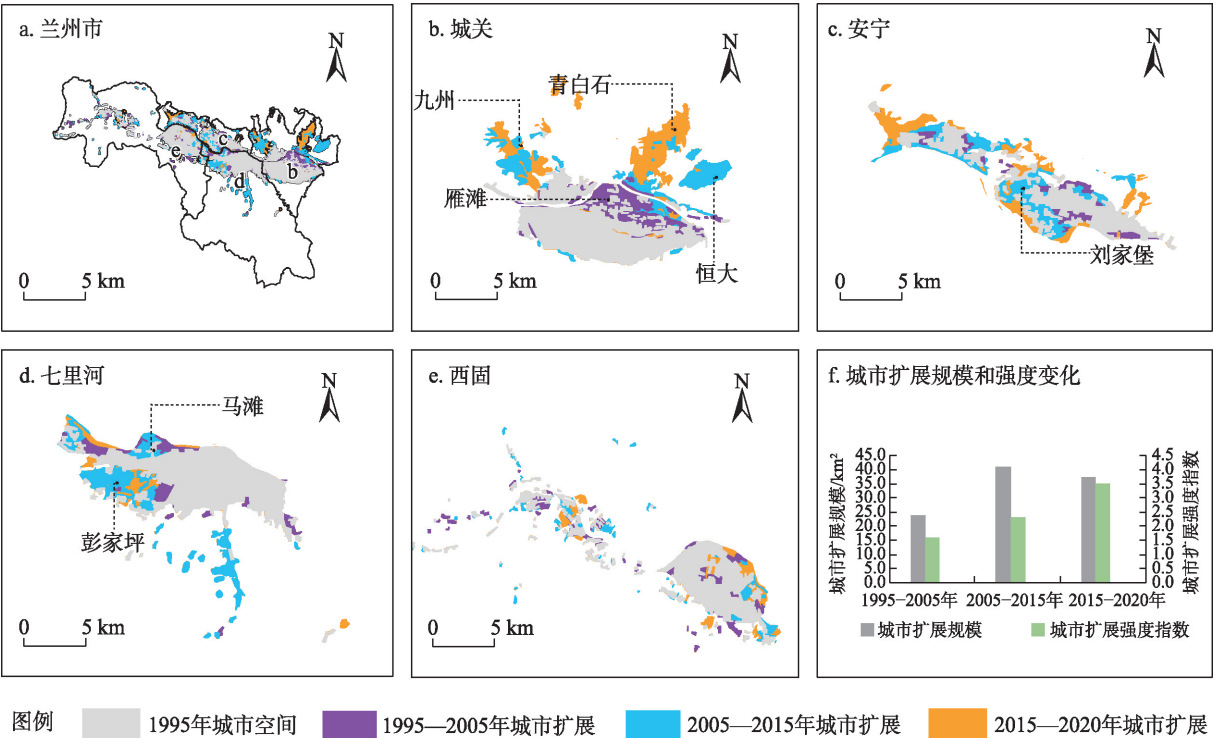


图3 1995—2020年兰州市主城区城市空间分布、扩展规模和强度变化图

Figure 3 Spatial distribution, expansion scale, and intensity change of the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

1995—2020年兰州市主城区城市扩展规模和强度呈持续增长趋势,新增城市空间主要分布在城关区和安宁区,而西固区作为兰州市重要工业区,长期受企业“出城入园”政策影响,城市扩展规模较小。城市总体扩展方向呈现出“西拓”和“北移”的态势。

4.1.2 城市景观格局变化特征分析

通过Fragstatas 4.2软件计算得到4期景观格局指数,分析研究区城市景观格局及演变特征,结果见表3。1995—2020年兰州市主城区城市景观斑块数量和密度均呈先增后减的趋势,主要由于城市用地初期向外扩展,随后开始内部填充,最后斑块趋于整合。最大斑块指数和景观百分比指数均呈上升趋势,表明城市扩展导致城市景观优势度在逐渐

升高。景观形状指数呈减小趋势,表明城市景观斑块受其他类型斑块的影响程度在降低,受城市扩展影响河谷谷地建设用地趋于饱和,不规则性降低,斑块形状趋于简单。斑块凝聚指数呈先增后降的趋势,主要由于1995—2015年城市扩展以水平扩张为主,2015年后以跳跃式扩展模式为主,导致城市景观之间的空间连通性降低。相似邻接百分比呈增加的趋势,城市扩展导致城市景观先不断积聚在河谷谷地,使城市景观整体聚集程度升高。而后当河谷滩地不能满足城市发展需求,在政策、经济、环境等多方面影响下城市景观会持续跳出河谷寻求发展空间,但城市仍然在河谷边缘以“削山造地”式扩张为主,使城市景观集聚程度持续升高。破碎度

表3 1995—2020年兰州市主城区城市用地景观格局指数

Table 3 Landscape pattern indices of urban land in the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

| 年份 | 斑块数量 | 斑块密度 | 最大斑块指数 | 景观百分比 | 景观形状指数 | 斑块凝聚指数 | 相似邻接百分比 | 破碎度指数 |
|------|------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1995 | 104 | 0.0997 | 6.0578 | 12.7136 | 13.0495 | 99.1639 | 96.5990 | 92.2243 |
| 2005 | 109 | 0.1041 | 10.4662 | 14.9901 | 12.9239 | 99.4131 | 97.1193 | 89.5193 |
| 2015 | 111 | 0.1064 | 12.0704 | 18.8870 | 12.0124 | 99.4884 | 97.2392 | 65.9783 |
| 2020 | 105 | 0.1007 | 12.9229 | 22.5751 | 11.3421 | 99.4547 | 97.7825 | 55.5484 |

指数呈持续下降的趋势,从1995年的92.2243下降为2020年的55.5484,表明城市景观延展性进一步提高,区域城市景观整体破碎化程度降低。

4.2 城市空间扩展的生态效应

4.2.1 生态风险效应

通过空间主成分分析法对生态风险评价因子降维处理,每个年份得到10个主成分的信息载荷。前6个主成分的累积贡献率均大于85%,说明前6个主成分可以反映研究区的生态风险状况。将前6个主成分的方差贡献率作为权重进行加权求和,获得研究区每个小区的生态风险综合指数及空间分布。利用自然断点法分为5个等级,得到兰州市主城区生态风险等级分布(图4)。1995—2020年,高风险和较高风险区面积从180.99 km²增长到367.56 km²,占总面积比例从17.28%增长到35.09%,与城市空间扩展关系密切。低风险和较低风险区面积从397.53 km²增长到497.25 km²,占总面积比例从37.95%增长到47.47%,主要为林地、草地和湿地生态系统。中等风险区面积变化最大,研究期内共减少286.29 km²,中等风险区面积的减少伴随着其他4

类风险区的增加,北部和南部呈现低、较低风险区增加,而河谷地区呈现高、较高风险区增加。研究区生态风险的空间分布极度不均衡,几乎整个河谷谷地均处于生态高风险区,且存在向外扩散的趋势,这与河谷谷地人口密度过高密切相关;南部地区的生态低风险区逐渐由点向面发展,且逐年由南向北扩张,这可能是由于近年来全球气候变暖,西北地区降水略有增多,加之积极实施植树造林、飞播种植等措施,使植被覆盖度明显增加;同时,社会经济的发展使人口普遍向城市集聚,城市建成区以外的区域逐渐人口空心化,人类活动对生态恢复的干扰减少,使得河谷周边区域生态风险普遍降低。整体而言,兰州市主城区生态风险水平有所降低,区域生态风险格局总体呈河谷谷地高、四周低的特征,这种不平衡的生态风险空间分布格局不利于区域内动物流、植物流、养分流以及遗传基因的扩散,对区域生态和人类社会可持续发展带来了较大阻力。

4.2.2 热岛效应

如图5所示,1995—2020年兰州市主城区整体

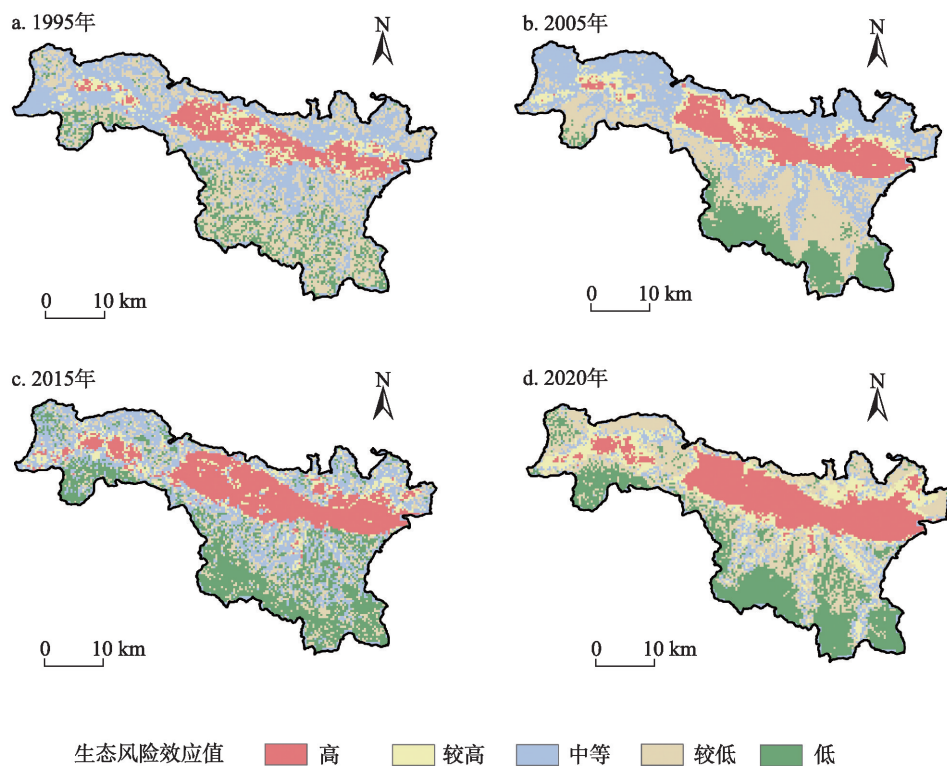


图4 1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的生态风险效应分布图

Figure 4 Distribution of ecological risk effect of urban spatial expansion in the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

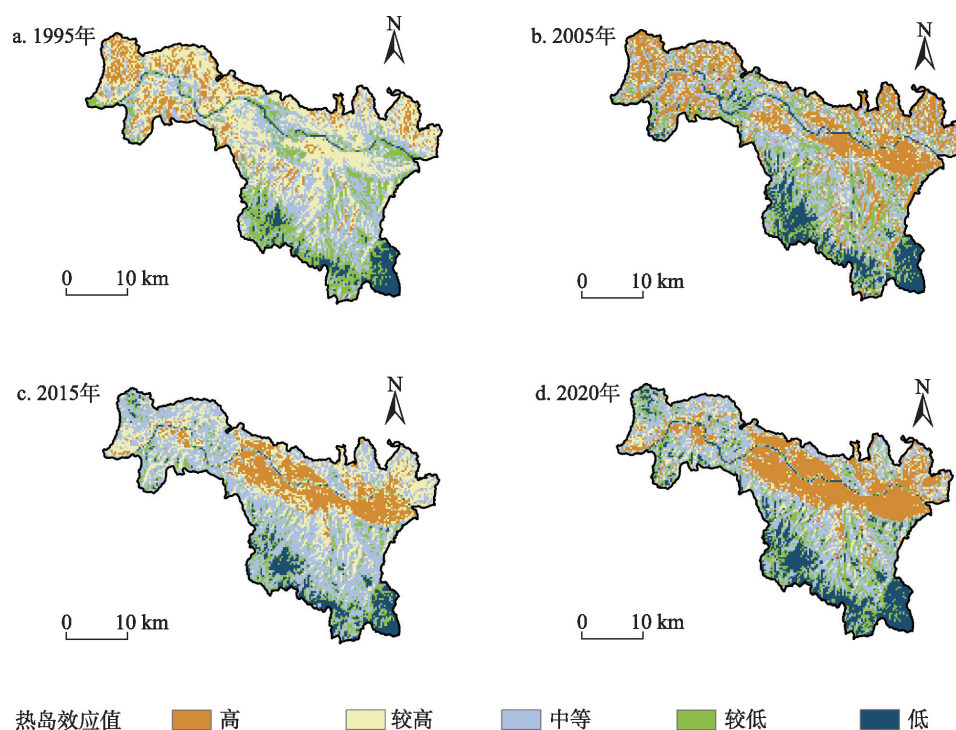


图5 1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的热岛效应分布图

Figure 5 Distribution of heat island effect of urban spatial expansion in the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

热岛效应存在减弱趋势。但高温区面积共增加 147.33 km², 主要分布在河谷盆地内。由于城市化发展所引起的人口和产业的大量集聚, 使不透水面扩张和汽车尾气排放加剧, 且所产生的热量受河谷地形气流下沉影响而难以散热, 从而形成了河谷内高温区不断扩展的现象。较高温区面积收缩达 239.67 km², 主要分布在河谷北部山区, 该区域多为裸土地, 土地利用程度不高, 初始植被覆盖度极低, 且植被含水量较少、蒸腾作用较弱, 使地表温度升温较快; 随着河谷南北山区植树造林和生态保护修复等工程的实施, 黄河北部开始出现部分绿岛, 有效提升了河谷盆地向周边山体散热的效果。低温区和较低温区面积共增长 67.84 km², 主要分布在南部山区和河流流域, 有从南向北扩展的趋势, 山区林草地和河流对周围区域有明显的降温作用, 且此区域相对海拔较高, 因而形成冷岛与冷廊。综合来看, 研究期城市空间扩展大量侵占盆地内部的草地、湿地等冷岛, 以及人口碳排放加剧, 导致了盆地内升温明显; 而盆地周边山体人工林草地的扩大起到一定降温作用, 使研究区地表温度形成中部高、四周低的分布格局。

4.2.3 生态系统服务效应

如图6所示, 1995—2020年兰州市主城区生态系统服务价值高值区范围明显扩张, 主要分布在黄河沿岸和河谷南北两侧, 这是由于此地区人类开发活动较少, 水土条件较好, 加之植树造林和退耕还林等措施使生态系统服务价值得到增强, 但2020年高值区仍仅占研究区总面积的15.02%, 生态系统服务价值需进一步提高。生态系统服务较高值区分布范围最广, 主要分布在海拔相对较高的地区, 人为侵扰较少, 且降水相对较多, 是生态系统服务价值提高的潜力区, 也是大规模建设人工生态系统的优势区。生态系统服务价值中值区以耕地和草地生态系统为主, 受城市扩展和退耕还林还草政策影响, 面积从354.39 km²缩小到266.55 km², 此区域将是城市空间扩展的储备用地, 可将黄河以北的中值区作为城市发展区, 将黄河以南中值区作为生态保护修复提升区, 使国土空间格局进一步得到优化。兰州市主城区城市空间的大规模扩展导致生态系统服务低值区面积变化最大, 从92.07 km²增加到182.07 km², 主要分布在河谷盆地以及周边低山丘陵区, 与城市空间扩展的变化趋势大体一致。但从

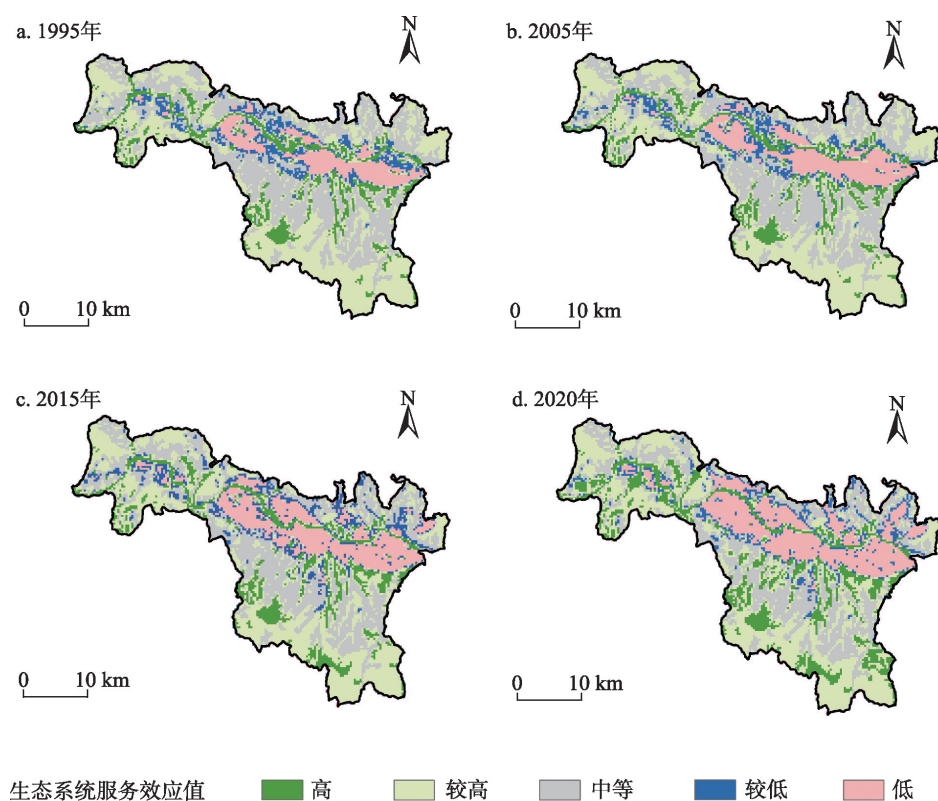


图6 1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的生态系统服务效应分布图

Figure 6 Distribution of ecosystem service effect of urban spatial expansion in the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

2015年开始建成区内零星分布的低值区生态系统服务价值开始提升,逐步向较低值和中值区转变,说明城市在不断向外野蛮生长的过程中开始兼顾建成区的生态建设,使城市内部生态系统服务能力和人居环境得到明显提升,这与2012年党的十八大提出大力推进生态文明建设的战略决策有关。

5 讨论

5.1 与相关研究的比较

以往研究普遍认为城市化是引起区域生态风险、热岛效应和生态系统服务价值变化的重要因素^[49-52],这与本文观点基本一致。目前地理学者、环境学者和生态学者分别从区域宏观分析、微观机理分析和生态系统耦合机理分析对城市扩展所引起的各类生态效应进行了广泛研究^[53,54],然而从单一角度和学科背景难以综合反映城市扩展所引起的生态环境变化。相比之下,从不同学科背景和多角度研究分析能够更加合理和有效。同时,以往不少研究认为,城市化对区域生态只有负面效应^[55];而黄金川等^[56]的研究认为,区域生态环境随着城市化发

展存在先衰退、后改善的演变规律。通过本文实证研究发现,城市周边区域生态环境不仅得到很大改善,甚至建成区内部生态环境也在逐步提升。造成此差异的原因可能是,以往研究多以行政区为研究单元^[57],并且忽视了城市人工绿地建设的影响^[58]。而本文将研究结果落实到空间的每一个网格上,使得通过划分小尺度从多角度系统性研究城市空间扩展的生态效应成为可能,提高了研究结果的可视化与实用性。

5.2 城市空间扩展对生态空间的影响

根据土地利用形式决定论,从是否开发利用的视角^[59],在土地利用数据基础上分为生态空间、城市空间和其他空间,并利用转移矩阵模型获取3类空间的转移矩阵表(表4),来揭示研究期间城市空间扩展对区域生态空间的侵占。1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展侵占生态空间面积45.21 km²以及其他空间面积60.34 km²,与中国其他省会城市相比,兰州市主城区城市空间扩展规模明显偏小^[60],但过去长期缺乏对河谷城市规划建设的科学

表4 1995—2020年兰州市主城区城市、生态和其他空间转移矩阵

Table 4 Urban space, ecological space, and other space transfer matrix in the main urban area of Lanzhou City, 1995-2020

| 时段 | 空间类型 | 城市空间/km ² | 生态空间/km ² | 其他空间/km ² |
|------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1995—2005年 | 其他空间 | 19.04 | 6.09 | 242.44 |
| | 生态空间 | 6.50 | 625.92 | 10.44 |
| | 城市空间 | 130.83 | 1.15 | 0.66 |
| 2005—2015年 | 其他空间 | 26.60 | 26.96 | 199.98 |
| | 生态空间 | 17.61 | 604.32 | 11.22 |
| | 城市空间 | 152.85 | 1.46 | 2.08 |
| 2015—2020年 | 其他空间 | 15.34 | 26.95 | 161.72 |
| | 生态空间 | 30.28 | 591.90 | 27.79 |
| | 城市空间 | 180.97 | 4.69 | 3.44 |
| 1995—2020年 | 其他空间 | 60.34 | 47.93 | 148.52 |
| | 生态空间 | 45.21 | 572.31 | 41.64 |
| | 城市空间 | 121.02 | 3.30 | 2.78 |

认知,盲目沿用平原城市的建设模式,甚至出现填河造地的现象,使本就脆弱的生态环境遭受不可逆转地破坏,造成生态环境持续恶化、可利用土地资源严重短缺等一系列人居环境问题^[61],严重影响了城市社会经济可持续发展^[62]。其中,1995—2005年兰州市主城区城市空间扩展年均侵占生态和其他空间面积共2.55 km²,而到2015—2020年时年均侵占面积达到9.12 km²,这与实际情况相符。2015年实施棚户区改造政策以来,城市扩张明显加快,城市规模的扩大势必对周边的虹吸效应增强,加之甘肃省提出做大做强省会发展战略,使城市扩展对生态空间的挤占较为突出。未来在黄河流域生态保护与高质量发展重大国家战略加持下,兰州市将力争实现合理、有效、优质、可持续发展,城市扩展对生态空间侵占速度有望逐步减缓。

5.3 自然环境条件对城市空间扩展生态效应的影响

城市空间扩展的生态效应受自然环境、社会经济等多种因素影响,而对于干旱区河谷型城市,受自然环境因素制约显著^[63],自然环境因素主要包括地形、太阳能辐射、水文条件等。地形因素往往诱导城市建设用地的范围、规模、形态和发展方向^[64],兰州市境内“两山夹一川”的自然基底成为其向外扩展的门槛。虽然削山造地工程可有效增加适宜建设用地、缓解用地供求矛盾,但此类工程致使兰州市主城区北部低山丘陵区生态风险和热岛效应加剧,生态系统服务能力降低。太阳能辐射为居

民及植物提供充足的能量来源,对居民创造和谐、舒适的生活环境至关重要^[65]。兰州市主城区南部受高海拔地形影响,山体与河谷之间落差大、坡度大,导致南部采光不足;而北部能够接受更多的太阳能辐射,致使人口向北部转移居住的意愿更为强烈,城市空间北拓加快,加剧了北部生态风险和热岛效应,使生态系统服务能力南北差异更加明显。同时,南部降水相对较多,地形起伏度大,发生泥石流、滑坡等地质灾害的风险较大,不利于城市大规模建设开发,抑制了城市生态风险和热岛效应的形成;相对丰沛的降水也使植被覆盖度较高,生态系统服务能力较强。因此,在多种自然环境因素影响下兰州市主城区北部城市空间扩展的负效应相较南部更加明显。

5.4 政策建议

5.4.1 城市空间可持续发展建议

本文发现,受河谷地形影响,兰州市主城区发展初始阶段以组团式水平扩展为主,逐步形成带状城市形态,但带状城市的无限延展并不利于城市可持续发展,而飞地跳跃式成为现阶段最有效的城市扩展模式,如在青白石、九州等片区的城市开发建设案例,有力证明了跳跃式发展将是河谷城市发展的未来。兰州市是甘肃省重点开发地区,是区域人口产业的主要聚集地,随着人口产业进一步集聚势必加剧城市用地供需矛盾。因此,需立足于资源禀赋条件,以资源环境承载能力为基础,以智能化、低

2023年12月

排放的方式对旧城区低密度和低层建筑群更新改造,优化城区基础设施、公共服务、生产力和公共资源布局,注重延续历史文脉、突出地域特色,坚持开发与保护并重,统筹开展分类保护、整治、修复与更新。同时,本文发现,人口密度对兰州市主城区生态风险影响显著,这主要是由于城市适宜性建设用地不足,因此需在生态保护优先的情况下适度对北部荒山丘陵区实施推山造地和未利用土地综合治理工程,解决城市发展空间不足的问题,以疏解旧城区高密度人口,使其有充足的空间进行生态补充与修复,在河谷南北两侧打造两山生态风光带和城市森林公园,使城市复合生态系统更加协调,助力城市可持续发展。

5.4.2 区域景观生态保护修复建议

本文发现,兰州市主城区城市空间扩展的生态负效应略有下降,但仍存在景观生态格局不均衡、生境质量和生态系统服务能力偏低的问题,这主要是由于持续的城市扩张使区域景观生态格局变化,并导致局部空间生态失衡。因此,需构建生态安全网络格局,以稳定城市复合生态系统以及协调城市与生态空间之间的冲突^[6],以生境质量高的湿地和林地作为生态源地,以黄河作为河流型生态廊道,以河谷南北两山和环城道路两侧绿化景观为基底,构建山地型和道路型生态廊道,以阻隔城市所产生的空气、噪声等环境污染对周边地区的影响,利于生物物种在源地和基质间的流动,促进区域生态结构的稳定性和连通性。在宝塔山、仁寿山等生态基底较好的公园建立山地型生态节点,在黄河两岸构建河流型生态节点,通过增加节点植被覆盖度和生物物质丰富度,以减少生态廊道的耗费成本,提高生态网络的生态服务能力,增强生态流在区域生态网络中的流通。同时,需实施重大生态保护与修复工程,坚持保护优先、自然恢复为主,推进重点区域和重要生态系统保护与修复,系统实施以黄河两岸、南北两山面向城市立面的区域为重点的生态保护和修复工程,以大砂沟、大青沟等城区周边山洪沟道为重点的水土保持与生态修复工程,加快百万亩国家储备林建设工程实施以提高全域森林草地覆盖率,全面提升河谷周边山体生态系统自我修复和水土保持能力,缓解城市功能区与生态功能区之间

的冲突,促进全域可持续发展。

6 结论

本文通过计算城市空间扩展规模、强度和景观格局指数,以反映1995—2020年兰州市主城区城市空间扩展的时空变化特征,利用空间主成分法、大气辐射传输方程法和生态系统服务价值测算模型在网格尺度上得到兰州市主城区城市空间扩展的生态风险效应、热岛效应和生态系统服务效应,并探讨了城市空间扩展与自然基底之间的影响。主要得出以下结论:

(1)1995—2020年兰州市主城区城市扩展规模和强度呈增长趋势,其中2005—2015年城市新增面积最大,2015—2020年城市空间扩展强度最高。城市扩展方向呈现出“西拓”和“北移”的态势,以及建成区的“内部填充”使城市景观破碎化程度降低。

(2)人口密度、坡度、土地覆被类型、距水体距离、距工业用地距离和距道路距离6个因子对兰州市主城区生态风险的影响较为显著,且整体生态风险水平有所降低,区域生态风险格局总体呈河谷高、四周低的特征。

(3)1995—2020年高温区和较高温区总面积共减少92.34 km²,低温区和较低温区面积共增长67.84 km²,说明兰州市主城区整体热岛效应存在减弱趋势,但城市扩展使河谷盆地内升温明显,而植被覆盖率提升使盆地周边降温效果显著。

(4)1995—2020年兰州市主城区整体生态系统服务高值区和低值区面积均有所增大,且在建成区部分低值区开始向较低值和中值区转变,这是城市扩展与生态保护修复共同作用的结果,说明生态文明建设战略决策实施以来兰州市城市发展与生态保护逐步向协调可持续方向发展。

参考文献(References):

- [1] Jessica C F, Jake E B, Katherine N I, et al. Exploring how urban nature is associated with human wellbeing in a neotropical city[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2021, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2021.104119.
- [2] 张博胜, 杨子生. 中国城镇化的农村减贫及其空间溢出效应: 基于省级面板数据的空间计量分析[J]. *地理研究*, 2020, 39(7): 1592—1608. [Zhang B S, Yang Z S. Rural poverty reduction and its spatial spillover effects of Chinese urbanization: Based on the

- analysis of spatial econometric model with provincial panel data [J]. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1592–1608.]
- [3] 周俊俊, 樊新刚, 杨美玲, 等. 县域生态效率驱动机制对比: 以宁南山区3县为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 239–248. [Zhou J J, Fan X G, Yang M L, et al. Comparison on driving mechanism of county ecological efficiency: With three counties in the mountainous area of Southern Ningxia, China as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 239–248.]
- [4] Tong H L, Shi P J, Zhang X B, et al. Optimization of urban land development spatial allocation based on ecologyeconomy comparative advantage perspective[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2018, DOI: 10.1061/(ASCE)UP.1943–5444.0000444.
- [5] 张国兴, 张婧钰, 周桂芳. 黄河流域资源型城市生态安全等级边界及演化趋势[J]. *资源科学*, 2023, 45(4): 762–775. [Zhang G X, Zhang J Y, Zhou G F. Ecological security level of resource-based cities in the Yellow River Basin and trend of change[J]. *Resources Science*, 2023, 45(4): 762–775.]
- [6] Yang K. Impact of urban expansion on vegetation: The case of China (2000–2018)[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112598.
- [7] Parivar P, Quanrud D, Sotoudeh A, et al. Evaluation of urban ecological sustainability in arid lands (case study: Yazd–Iran)[J]. *Environmental Development Sustainability*, 2021, DOI: 10.1007/s10668–020–00637–w.
- [8] 陈喜东, 石培基, 岳晓新, 等. 河谷盆地型城市景观格局演变及其生态效应[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2): 205–210. [Chen X D, Shi P J, Yue X X, et al. Landscape pattern evolution and its ecological effects in a valley–basin city[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(2): 205–210.]
- [9] 申志成, 徐新良, 娜日嘎拉, 等. 中美典型城市群土地开发模式对比研究[J]. *资源科学*, 2022, 44(5): 968–983. [Shen Z C, Xu X L, Narigala, et al. Comparative study of the land development patterns in typical urban agglomerations of China and the United States[J]. *Resources Science*, 2022, 44(5): 968–983.]
- [10] Chakraborty S. Building in or out? Examining urban expansion patterns and land use efficiency across the global sample of 466 cities with million+ inhabitants[J]. *Habitat International*, 2022, DOI: 10.1016/j.habitatint.2021.102503.
- [11] Asempah M, Sahwan W, Schütt B. Assessment of land cover dynamics and drivers of urban expansion using geospatial and logistic regression approach in WA Municipality, Ghana[J]. *Land*, 2021, DOI: 10.3390/land10111251.
- [12] Zhang Y, Liu Y F, Wang Y H, et al. Urban expansion simulation towards low-carbon development: A case study of Wuhan, China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102455.
- [13] Yan H, Wang K, Lin T, et al. The challenge of the urban compact form three-dimensional index construction and urban land surface temperature impacts[J]. *Remote Sensing*, 2021, DOI: 10.3390/rs13061067.
- [14] Yang Y R, Song F, Ma J, et al. Spatial and temporal variation of heat islands in the main urban area of Zhengzhou under the two-way influence of urbanization and urban forestry[J]. *PloS ONE*, 2022, DOI: 10.1371/journal.pone.0272626.
- [15] Yu Z P, Yan T H, Liu X R, et al. Urban land expansion, fiscal decentralization and haze pollution: Evidence from 281 prefecture-level cities in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116198.
- [16] Oyalowo B. Implications of urban expansion: Land, planning and housing in Lagos[J]. *Buildings and Cities*, 2022, 3(1): 692–708.
- [17] Li S C, Zhao Y L, Xiao W, et al. Optimizing ecological security pattern in the coal resource-based city: A case study in Shuozhou City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108026.
- [18] Kabeja C, Li R, Duan J W. Monitoring land use/cover changes by using multi-temporal remote sensing for urban hydrological assessment: A case study in Beijing, China[J]. *Remote Sensing*, 2022, DOI: 10.3390/rs14174273.
- [19] Han Y, Qiao D M, Zhang Y X, et al. Urban expansion dynamic and its potential effects on dry-wet circumstances in China's national-level agricultural districts[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158386.
- [20] Xiao S. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 622: 974–987.
- [21] Tian S Q, Wu W, Shen Z, et al. A cross-scale study on the relationship between urban expansion and ecosystem services in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115774.
- [22] 韩瑞丹, 张丽, 郑艺, 等. 曼谷城市扩张生态环境效应[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6322–6334. [Han R D, Zhang L, Zheng Y, et al. Urban expansion and its ecological environmental effects in Bangkok, Thailand[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6322–6334.]
- [23] Diem J, Pangle L, Milligan R, et al. Intra-annual variability of urban effects on streamflow[J]. *Hydrological Processes*, 2021, DOI: 10.1002/hyp.14371.
- [24] Kondo K, Mabon E, Bi Y F, et al. Balancing conflicting mitigation and adaptation behaviours of urban residents under climate change and the urban heat island effect[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, DOI: 10.1016/j.scs.2020.102585.
- [25] Zhou D C, Sun S L, Li Y, et al. A multi-perspective study of atmospheric urban heat island effect in China based on national meteorological observations: Facts and uncertainties[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.

2023年12月

- 158638.
- [26] 杨俊, 单灵芝, 席建超, 等. 南四湖湿地土地利用格局演变与生态效应[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 856–864. [Yang J, Shan L Z, Xi J C, et al. Land use pattern changes and ecological effects in Nansihu Wetland[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 856–864.]
- [27] Wang B, Liang Y J, Peng S Z. Harnessing the indirect effect of urban expansion for mitigating agriculture–environment trade-offs in the Loess Plateau[J]. Land Use Policy, 2022, DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106395.
- [28] 杨永春. 中国西部河谷型城市的形成与发展[J]. 经济地理, 1999, (2): 44–49. [Yang Y C. The formation and development of the valley cities in West China[J]. Economic Geography, 1999, 19 (2): 44–49.]
- [29] 杨永春. 论典型河谷盆地型城市兰州的发展模式[J]. 人文地理, 2000, (1): 10–14. [Yang Y C. The research on the developing model of Lanzhou: A typical valley basin city in the Northwest China [J]. Human Geography, 2000, (1): 10–14.]
- [30] 汪建珍, 卢李朋, 赵锐锋, 等. 基于土地转移流的干旱区河谷城市土地系统稳定性评价: 以兰州市近郊四区为例[J]. 经济地理, 2014, 34(4): 153–158. [Wang J Z, Lu L P, Zhao R F, et al. Estimation of urban land system stability of river valley: A case study of the four districts in suburbs of Lanzhou City[J]. Economic Geography, 2014, 34(4): 153–158.]
- [31] Li G D, Zhang X, Parham A, et al. Urban heat island effect of a typical valley city in China: Responds to the global warming and rapid urbanization[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 38(4): 36–745.
- [32] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 等. 中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集[DB/OL]. (2018–11–11) [2022–01–01]. <http://www.resdc.cn/>. [Xu X L, Liu J Y, Zhang S W, et al. China Multi-period Land Use and Land Cover Remote Sensing Monitoring Data Set[DB/OL]. (2018–11–11) [2022–01–01]. <http://www.resdc.cn/>.]
- [33] Li W J, Xie S Y, Wang Y, et al. Effects of urban expansion on ecosystem health in Southwest China from a multi-perspective analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126341.
- [34] Getu K, Bhat G. Analysis of spatio-temporal dynamics of urban sprawl and growth pattern using geospatial technologies and landscape metrics in Bahir Dar, Northwest Ethiopia[J]. Land Use Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.landusepol.2021.105676.
- [35] Jia Y Q, Tang L N, Xu M, et al. Landscape pattern indices for evaluating urban spatial morphology A case study of Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2019, 99(4): 27–37.
- [36] Wei S M, Pan J H. Landscape ecological safety assessment and landscape pattern optimization in arid inland river basin: Take Ganzhou District as an example[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2020, 26(3): 782–806.
- [37] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420–1437. [Li Q P, Zhang Z D, Wan L W, et al. Landscape pattern optimization in Ningjiang River Basin based on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(7): 1420–1437.]
- [38] 陶卓霖, 喻忠磊, 王砾, 等. 基于空间区位条件的城市扩展生态阻力面模型及应用[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 199–208. [Tao Z L, Yu Z L, Wang L, et al. The urban expansion ecological resistance surface model incorporated with spatial locational conditions and its application[J]. Geographical Research, 2018, 37(1): 199–208.]
- [39] 李航鹤, 马腾辉, 王坤, 等. 基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(8): 1036–1045. [Li H H, Ma T H, Wang K, et al. Construction of ecological security pattern in Northern Peixian based on MCR and SPCA[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(8): 1036–1045.]
- [40] Huang S M, Hu Q W, Wang S H, et al. Ecological risk assessment of world heritage sites using RS and GIS: A case study of Huangshan Mountain, China[J]. Chinese Geographical Science, 2022, 32 (5): 808–823.
- [41] Liang T, Yang F, Huang D, et al. Land–use transformation and landscape ecological risk assessment in the Three Gorges Reservoir Region based on the “production–living–ecological space” perspective[J]. Land, 2022, DOI: 10.3390/land11081234.
- [42] Zou T H, Kunihiko Y. Environmental vulnerability evaluation using a spatial principal components approach in the Daxing’ Anling Region, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 78(7): 405–415.
- [43] Karunaratne S, Athukorala D, Murayama Y, et al. Assessing surface urban heat island related to land use/land cover composition and pattern in the temperate mountain valley city of Kathmandu, Nepal[J]. Remote Sensing, 2022, DOI: 10.3390/rs14164047.
- [44] 王莹书, 石培基, 赵武生, 等. 兰州市热环境时空特征及影响因素研究[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 59–65. [Wang Y S, Shi P J, Zhao W S, et al. Spatial–temporal characteristics and influencing factors of thermal environment in Lanzhou[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 59–65.]
- [45] Robert C, Ralph D, Rudolf D G, et al. The value of the world’s ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253–260.
- [46] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911–919. [Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911–919.]
- [47] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243–1254. [Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per

- unit area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243–1254.]
- [48] Pan N H, Guan Q Y, Wang Q Z, et al. Spatial differentiation and driving mechanisms in ecosystem service value of arid region: A case study in the middle and lower reaches of Shule River Basin, NW China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128718.
- [49] 李嘉艺, 孙聰, 郑曦. 基于适应性循环理论的区域生态风险时空演变评估: 以长江三角洲城市群为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(07): 2609–2621. [Li J Y, Sun C, Zheng X. Assessment of spatio-temporal evolution of regionally ecological risks based on adaptive cycle theory: A case study of Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2609–2621.]
- [50] Zhang N Y. Block-based variations in the impact of characteristics of urban functional zones on the urban heat island effect: A case study of Beijing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, DOI: 10.1016/j.scs.2021.103529.
- [51] Xiong Y Q, Li H, Fu M C, et al. Evaluation of ecosystem service change patterns in a mining-based City: A case study of Wu'an City[J]. *Land*, 2022, DOI: 10.3390/land11060895.
- [52] Zhang Y Z, Wang L W, Tang Z, et al. Spatial effects of urban expansion on air pollution and eco-efficiency: Evidence from multi-source remote sensing and statistical data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132973.
- [53] Liu G, Zhang F. How do trade-offs between urban expansion and ecological construction influence CO₂ emissions? New evidence from China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.109070.
- [54] Guo H W, Han J, Qian L L, et al. Assessing the potential impacts of urban expansion on hydrological ecosystem services in a rapidly urbanizing lake basin in China[J]. *Sustainability*, 2022, DOI: 10.3390/su14084424.
- [55] Zhou Y, Chang J, Feng S S. Effects of urban growth boundaries on urban spatial structural and ecological functional optimization in the Jinan Metropolitan Area, China[J]. *Land Use Policy*, 2022, DOI: 10.1016/j.landusepol.2022.106113.
- [56] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 2003, (2): 211–210. [Huang J C, Fang C L. Analysis of coupling mechanism and rules between urbanization and eco-environment[J]. *Geographical Research*, 2003, (2): 211–210.]
- [57] 杨清可, 段学军, 王磊, 等. 长三角地区城市土地利用与生态环境效应的交互作用机制研究[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(2): 220–231. [Yang Q K, Duan X J, Wang L, et al. Mechanism of interaction between urban land expansion and ecological environment effects in the Yangtze River Delta[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(2): 220–231.]
- [58] Luiza P M, Siqueira-Gay J, Lucia C F. Understanding land use change impacts on ecosystem services within urban protected areas [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, DOI: 10.1016/j.landurbplan.2022.104404.
- [59] 喻锋, 李晓波, 张丽君, 等. 中国生态用地研究: 内涵、分类与时空格局[J]. *生态学报*, 2015, 35(14): 4931–4943. [Yu F, Li X B, Zhang L J, et al. Study of ecological land in China: Conception, classification, and spatial-temporal pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4931–4943.]
- [60] 张翰超, 宁晓刚, 王浩, 等. 基于高分辨率遥感影像的2000–2015年中国省会城市高精度扩张监测与分析[J]. *地理学报*, 2018, 73(12): 2345–2363. [Zhang H C, Ning X G, Wang H, et al. High accuracy urban expansion monitoring and analysis of China's provincial capitals from 2000 to 2015 based on high-resolution remote sensing imagery[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2345–2363.]
- [61] 张志斌, 巨继龙, 李花. 兰州市人居环境与住宅价格空间特征及其相关性[J]. *经济地理*, 2018, 38(6): 69–76. [Zhang Z B, Ju J L, Li H. The spatial characteristics and correlation between living environment and the housing prices in Lanzhou[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(6): 69–76.]
- [62] Ren Q, He C Y, Huang Q X, et al. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(10): 869–878.
- [63] 杨永春, 张从果, 刘治国. 快速集聚发展过程中的河谷型城市的空间整合与规划: 以兰州市为例[J]. *干旱区地理*, 2004, (4): 603–609. [Yang Y C, Zhang C G, Liu Z G. Spatial integration and planning of the valley cities in the rapid agglomeration and development: A case study in Lanzhou City[J]. *Arid Land Geography*, 2004, (4): 603–609.]
- [64] 王阳. 山区河谷型城市建设用地规模论证初探: 以秦岭山区商南县为例[J]. *现代城市研究*, 2019, (7): 99–109. [Wang Y. Preliminary study on scale of urban development land of valley cities in mountain areas: Taking Shangnan County in Qinling Mountains as an example[J]. *Modern Urban Research*, 2019, (7): 99–109.]
- [65] 刘文惠, 谢昌卫, 李韧, 等. 基于DEM的马街山山顶辐射平衡特征分析[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(6): 88–96. [Liu W H, Xie C W, Li R, et al. Analysis of radiation balance over terrain factors of Mahan Mountain based on DEM[J]. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(6): 88–96.]
- [66] Li Y G, Liu W, Feng Q, et al. The role of land use change in affecting ecosystem services and the ecological security pattern of the Hexi Regions, Northwest China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.158940.

Ecological effect of urban spatial expansion in river valleys: A case study in the main urban area of Lanzhou City

WANG Ziyang^{1,2,3}, SHI Peiji^{1,2,3}, SHI Jing^{1,2}, ZHANG Xuebin^{1,2,3}, LIU Yue^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Land Use and Comprehensive Improvement Engineering Research Center, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Resource Environment and Sustainable Development of Oasis, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The ecological effect of urban spatial expansion is the key problem of human-environment relationship in the process of urbanization. It is of great significance to explore the complex scientific problem of ecological effect caused by urban spatial expansion from multiple angles to promote the sustainable and high-quality development of urban and ecological space. **[Methods]** Taking the main urban area of Lanzhou City in China as an example, this study calculated the scale, intensity, and landscape pattern indices of urban spatial expansion in 1995, 2005, 2015, and 2020 to reflect the spatiotemporal variation characteristics of urban spatial expansion in the city from 1995 to 2020, and divided the research area into 12184 grids. Using the spatial principal component analysis method, atmospheric radiation transfer equation method, and revised ecosystem service value estimation model, this study analyzed the ecological risk effect, heat island effect, and ecosystem service effect of urban spatial expansion from various angles, and discussed the impact of natural environment conditions on the ecological effect of urban spatial expansion of cities in river valleys. **[Results]** The results show that from 1995 to 2020, the scale and intensity of urban expansion in Lanzhou City have increased, the fragmentation of urban landscape has decreased, urban expansion has mainly occurred in the western and northern parts of the city, and the urban expansion mode has changed from group expansion to leaping expansion. The overall ecological risk effect and heat island effect in the city have shown a weakening trend, but a rising trend was observed in the river valley, and the overall pattern of effects has been characterized by high in the valley and low at the peripheries. There is a slight improvement in the ecosystem service effect, which mainly shows that the ecosystem service value in the surrounding areas of the river valley has improved significantly, and some areas in the built-up area have changed from low-value area to medium-value area. Urban expansion negatively affects the natural substrates of the region, while the natural substrates also affects the scale, direction, and mode of urban expansion. Coordinating the relationship between the two is essential for the sustainable and harmonious development of human beings and nature. **[Conclusion]** The research framework of ecological effects of urban spatial expansion was constructed from multiple perspectives. Urban spatial expansion has a significant impact on ecological risk, heat island, and ecosystem service effects at the grid scale, which provides a new way of quantitative visualization of the dynamic relationships between urban evolution and ecological environment.

Key words: urban expansion; ecological effect; ecosystem service value estimation model; valley city; Lanzhou City