

黄河上游生态脆弱区城市增长边界划定 ——以临夏回族自治州为例

杨雪荻¹, 白永平¹, 车磊², 周亮^{3,4}, 乔富伟¹, 王治国¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 南京大学建筑与城市规划学院, 南京 210093; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 4. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070)

摘要: 黄河流域是我国重要的生态屏障和经济区, 其上游水源涵养区对黄河流域的生态可持续发展起着决定性的作用。因此, 科学统筹城乡发展、合理划定城市增长边界(UGB), 对于黄河流域生态保护与城市高质量发展具有重要意义。以黄河上游典型城市临夏回族自治州为研究对象, 基于土地利用及相关遥感数据, 运用遥感生态指数(RSEI)、生态敏感性分析评估了临夏回族自治州的生态质量, 并在此基础上, 结合CA-Markov对比分析了有无生态环境质量评价条件下未来城市增长边界发展情况。结果表明: (1) 2005—2015年, 临夏回族自治州生态环境整体较差且逐年下降, 2015年生态质量(RSEI)结果降至最低(0.38)。同时, 生态敏感性也从中度敏感变为低度敏感。(2) 2005—2015年, 研究区城市扩张面积增长6.04 km², 通过CA-Markov模拟得到的2030年城市建设用地规模为95.88 km², 超出规划面积3.2 km², 城市扩张未得到有效约束。(3) RSEI-CA-Markov模拟2030年的城市建设用地为90.36 km², 小于政府规划面积2.32 km², 符合城市可持续发展要求。因此, 基于RSEI-CA-Markov划定的黄河上游生态脆弱地区UGB具有更强的城市管理能力, 有利于引导和实现城市可持续发展, 也可对中国其他生态脆弱城市生态—经济协调发展提供参考依据。

关键词: 黄河上游; 生态脆弱地区; RSEI-CA-Markov模型; 城市增长边界; 临夏回族自治州

世界环境与发展委员会(WCED)提出, 世界各国环境政策与城市发展应积极响应可持续发展目标。在过去几十年中, 中国经历了快速的城市化发展, 联合国《2018年世界城镇化展望》中也提及2050年中国的新增人口预计将达2.55亿。为积极响应2030年包容、可持续的城市发展目标, 且进一步明确了城市在三个方面(环境、经济和社会)的可持续性改革规划体系, 中国政府提出新一轮国土空间规划要求, 具体包括“三区三线”规划项目的实施^[1]。在此过程中, 城市开发边界(Urban Growth Boundary, UGB)的划定将成为国土空间规划的关键。

UGB具有管理区域和协调城市发展的特性, 在帮助城市规划者控制城市扩张方向和形态方面具有广泛应用。不同地区城市发展阶段不同, UGB的划定方法也有较大区别, 依据划分导向可以分为三类。一是生态导向型, 即借鉴“反规划”的理念, 划定城市生态底线。这种划定方法多研究城市化水平高或较高的东南沿海城市^[2,3], 主要通过生态系统服务、生态承载力等方法构建生态安全格局, 进而划定UGB范围^[4-6]。这种生态环境评

收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701173); 甘肃省重点研发计划(18YF1FA052)

作者简介: 杨雪荻(1995-), 女, 甘肃兰州人, 硕士, 研究方向为区域发展与管理。E-mail: yxdlz01@163.com

通讯作者: 白永平(1961-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 研究方向为区域发展与管理。

E-mail: baiyp@nwnu.edu.cn

价方法易于实现,但仍缺乏对自然因素的考虑,如自然降水、气温变化等。二是城市导向型。这种模式是优先考虑城市空间发展的需求,认为城市开发边界应当成为未来城市发展的预留空间^[7],研究也多开展在发展中的大型城市^[8]。基于地理仿真模型的UGB划定方法被广泛运用于此,如利用CLUS-S模型、FLUS模型、约束性CA模型等,模拟未来城市用地需求,划定UGB^[9-11]。其中,CA-Markov模型基于自下而上原理,依靠简单灵活的转换规则,被广泛应用于模拟城市空间增长,研究成果颇丰^[12-14]。三是双向导向型。这种模式考虑了生态保护和城市扩展的双重需求,得到了广泛的应用。如通过划定自然保护区、基本农田边界来减少城市发展对生态环境的侵害,进而推进城市可持续增长^[15]。研究范围较少涉及生态脆弱区,多集中研究城市发展较成熟的地区^[16-18],期望“以点带面”,解决不同地理空间的共性问题。但是,对于黄河上游生态脆弱地区,这种划定方法缺少对当地复杂生态环境的评估,不足以缓解城市化与自然资源短缺之间日渐尖锐的矛盾。因此,全面了解区域自然环境整体状况对UGB的划定是必要的。由于综合遥感生态指数(RSEI)可以通过多个指标综合表征生态环境,不仅适应于复杂的生态环境^[19],还能够对生态环境质量进行快速监控和评价,具有一定现实意义和可信度^[20]。

过度开采地下水 and 大规模砍伐,导致中国黄河上游地区的生态环境极其脆弱,特别是黄土高原地区尤为严重^[21]。临夏回族自治州(简称“临夏州”)地处黄河上游,是黄土高原和青藏高原的交界处,位于中国农牧交错带内。临夏州作为黄河上游重要的水源补给区,境内水资源分布不均,水源丰裕的河谷地区仅占全州土地资源总量的10%,其余均为丘陵山地,土地资源利用率较低。同时,作为黄河上游水土流失最为严重的地区之一,研究区内水土流失状况严重,且占总面积的三分之二^[22]。不仅本底条件脆弱,水资源分布不均、资源匮乏且洪涝灾害、滑坡泥石流等环境危机频发,导致临夏州的可持续发展受到极大制约,也使得研究区成为黄河上游典型的生态脆弱区。另一方面,在“西部大开发”“一带一路”倡议等扶持下,城市化进程迅速。随着《兰州—西宁城市群发展规划》的深入开展,临夏州在经济迅速发展过程中,自觉或不自觉地干扰和破坏了自然生态平衡。但是,UGB作为缓解城市化和自然资源枯竭之间日益尖锐的矛盾核心,在黄河上游研究较少。再者,黄河上游生态—城市协调发展,既关乎本流域的城市可持续发展,也对中国其他生态脆弱地区城市的发展具有重要参考价值。基于此,本文以临夏州为研究区,综合了RSEI和CA-Markov模型,设计了一种新的划定UGB的方法,即在CA-Markov模型中加入生态质量评价结果,以此模拟土地利用空间布局,进而划定UGB。该方法以生态可持续理念为前提,验证了如何将RSEI-CA-Markov模型与规划活动结合到生态环境复杂的地区,能较好地适应未来城市的发展,以期UGB划定提供新的思路,弥补黄河上游地区城市开发边界的空白。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

临夏州地处甘肃省(图1)。研究区面积约8169 km²,位于黄土高原与青藏高原的过渡地带,不仅是黄河上游重要的水源补给区,也是青藏高原生态屏障的重要组成部分。因此,被《全国主体功能区划》确定为重要生态功能区之一。临夏州的高寒区、山区共占全区域的三分之二,平均海拔2000 m,最高处达4636 m,是典型的生态脆弱地区。近年来,随着“三区三州”等深度贫困地区的脱贫计划、战略不断深入,临夏州大力发展交

通、农业、旅游业等，城市化水平迅速提高，城市扩张建设效果明显。但消耗了大量自然资源，生态环境面临着越来越多的问题，例如地下水大量开采、水体污染严重、林线后移、耕地水土流失等。

1.2 数据来源及预处理

遥感数据统一选用 Landsat 影像作为主要数据源，地理空间数据云下载 (<http://www.gscloud.cn/search>)。2005 年太子山生态保护区的建立，标志着临夏州生态保护建设的开始。同时，为了便于后续模拟城市发展规律，遥感影像选择 2005 年、2010 年、2015 年三期数据 (表 1)，以模拟 2030 年城市扩张状况。在 ENVI 中先对每幅影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、图像裁剪等预处理工作。每幅图像进行目视解释，将土地利用分为林地、草地、水域、耕地、城镇用地和未利用地六地类。从谷歌地球图像中收集的验证样本，对城市识别的准确性进行了校验，其精度满足研究需要。研究区 DEM 数据来自于中国科学院资源与环境数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)，基础道路数据来自北京大学地理数据平台 (<http://geodata.pku.edu.cn>)。

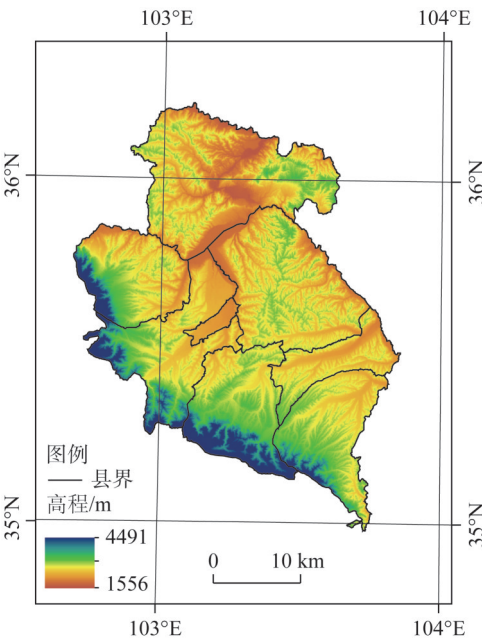


图 1 临夏回族自治州区位
Fig. 1 Location of Linxia Hui Autonomous Prefecture

表 1 遥感数据来源

Table 1 Remote sensing data source

参数	2005 年 7 月	2010 年 8 月	2015 年 8 月
传感器类型	TM	TM	OLI
分辨率/m	30	30	30
波段	1、2、3、4、5、6、7、8	1、2、3、4、5、6、7、8	1、2、3、4、5、6、7、8、9、10
云量/%	<5	<5	<5

1.3 研究方法

本文采用 RSEI-CA-Markov 模型，从生态和资源保护的角度，将 RSEI 的结果耦合 CA-Markov 模型，进行 UGB 的划定 (图 2)；通过建立 RSEI 模型，确定研究区生态状况；结合研究区生态敏感性分析及政府已有的规划，确定禁止建设区。依据设置城市扩张的限制因素^[23]，选取海拔、坡度、公路、铁路、水域五项基本限制条件。在此条件下，利用 CA-Markov 模型模拟 2030 年城市建设用地，得到 2030 年城市扩张状况。最终在 CA-Markov 模型限制因素中加入 RSEI 的研究结果，得到 RSEI-CA-Markov 模型。在新模式中，重新模拟城市扩张面积，进而划定 UGB。

1.3.1 城市生态质量评价

生态环境问题是自然因素和人类活动综合作用的产物，通过 RSEI 和生态敏感性评价两个方面共同刻画城市生态质量。其中，RSEI 是通过绿度 (NDVI)、湿度 (WET)、热度

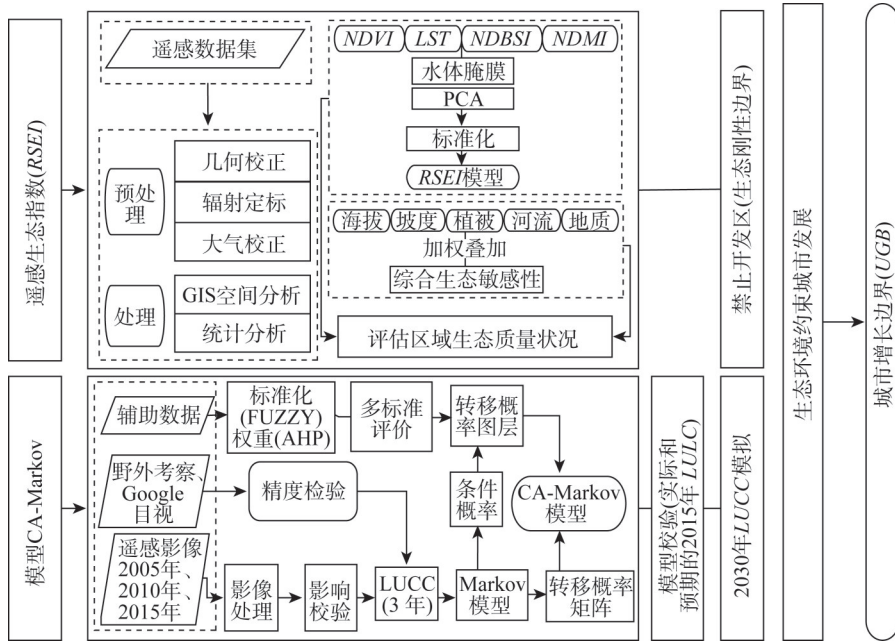


图2 流程图

Fig. 2 The flow chart

(LST) 和干度 ($NDSI$) 四个人类可以直观判断生态环境优劣的指标, 综合反映区域生态环境。其中, B_{blue} 、 B_{green} 、 B_{red} 、 B_{nir} 、 B_{swir1} 、 B_{swir2} 分别代表 Landsat TM 数据的 2、3、4、5、6、7 波段和 OLI 数据的 Blue、Green、Red、NIR、SWIR1、SWIR2 波段的反射率^[24,25]。

(1) 绿度指标 ($NDVI$):

$$NDVI = (B_{nir} - B_{red}) / (B_{nir} + B_{red}) \quad (1)$$

(2) 湿度指标 (WET):

$$WET(OLI) = 0.1511B_{blue} + 0.1973B_{green} + 0.3283B_{red} + 0.3407B_{nir} - 0.7117B_{swir1} - 0.4559B_{swir2} \quad (2)$$

$$WET(TM) = 0.0315B_{blue} + 0.2021B_{green} + 0.3102B_{red} + 0.1594B_{nir} - 0.6806B_{swir1} - 0.6109B_{swir2} \quad (3)$$

(3) 热度指标 (LST):

$$LST = T_b / \left[1 + \left((\lambda T_b) / \rho \right) \ln \varepsilon \right] - 273 \quad (4)$$

$$T_b = K_2 / \left(\frac{K_1}{L} + 1 \right) \quad (5)$$

$$L = gain \times DN + bias \quad (6)$$

式中: λ 为 Landsat 数据第 10 波段的中心波长 10.9 mm; ρ 等于 1.4×10^{-2} mk; K_1 和 K_2 为定标参数; T_b 为亮度温度 (K); DN 代表 Landsat 数据像元的灰度值; $gain$ 和 $bias$ 分别为波段增益值和偏置值; L 代表热红外波段的辐射值 (μm)。

(4) 干度指标 ($NDSI$):

$$NDSI = (SI + IBI) / 2 \quad (7)$$

$$SI = \left[(B_{swir2} + B_{red}) - (B_{blue} + B_{nir}) \right] / \left[(B_{swir2} + B_{red}) + (B_{blue} + B_{nir}) \right] \quad (8)$$

$$IBI=\left[\frac{2B_{swir1}}{B_{swir1}+B_{nir}}-\left(\frac{B_{nir}}{B_{nir}+B_{red}}+\frac{B_{green}}{B_{green}+B_{swir1}}\right)\right]\bigg/\left[\frac{2B_{swir1}}{B_{swir1}+B_{nir}}+\left(\frac{B_{nir}}{B_{nir}+B_{red}}+\frac{B_{green}}{B_{green}+B_{swir1}}\right)\right]\quad(9)$$

(5) 遥感生态指数建立:

$$RSEI_0=1-\{PC_1[NDVI、WET、NDBSI、LST]\}\quad(10)$$

$$RSEI=[RSEI_0-RSEI_{0min}]/[RSEI_{0max}-RSEI_{0min}]\quad(11)$$

式中： $RSEI$ 为代表区域生态环境状况的遥感生态指数，值越大代表生态质量越好； $RSEI_{0min}$ 、 $RSEI_{0max}$ 分别代表 $RSEI_0$ 的最小值和最大值。

由于生态环境具有综合性和复杂性特点，区域差异导致生态敏感性有较大区别。为避免各生态因子之间的相关性，同时考虑数据的代表性和可操作性，参考《全国生态环境保护纲要（2020年）》，借鉴已有研究成果^[26,27]，选取坡度、海拔、植被覆盖度、水域和地质灾害作为临夏州生态敏感性分析的主要因子。根据生态系统可能遇到外界不良干扰时发生的生态环境问题，对每个因子进行等级划分（表2）。

表2 生态敏感性评价因子分级及权重

Table 2 The grades and weights of ecological sensitivity factors

生态因子	权重	生态敏感性分级				
		极高敏感	高敏感	中敏感	低敏感	非敏感
坡度/(°)	0.23	>60	45~60	25~45	10~25	0~10
海拔/m	0.20	>1300	1000~1300	800~1000	500~800	<500
植被覆盖度	0.27	>0.5	0.4~0.3	0.2~0.3	0.1~0.2	0~0.1
河流水库距离/m	0.12	<50	50~100	100~150	150~200	>200
地质灾害易发性	0.17	高易发区	—	中易发区	低易发区	不易发区

分级后对各因子的生态敏感性进行加权叠加，得到临夏州生态敏感性综合得分；然后，运用自然断裂法将其划分为生态极高敏感区、高敏感区、中敏感区、低敏感区和非敏感区五类；最后结合《全国自然保护名录（2015）》将已有的国家级、省级自然保护区、湿地等生态敏感区叠加到生态极高敏感区中，得到最终的生态敏感性分区图。

1.3.2 城市用地扩张模拟

利用CA-Markov模型对临夏州的土地类型变化进行动态模拟与演变分析。CA模型和Markov模型的操作过程可表示为：

$$C_{(i+1)}=F(C_i,N)\quad(12)$$

式中： C_i 、 $C_{(i+1)}$ 分别表示在*i*、*i*+1时刻元胞的状态； F 为转换规则； N 为元胞的邻域。

在约束条件中，水域作为限制因子，而高程、坡度、铁路、公路作为限制条件。为保证结果的准确性，对模拟的土地利用状况与土地利用现状做Kappa检验。通过检验后，再用训练好的CA-Markov模型对研究区2030年城市用地扩展进行模拟，计算原理如下：

$$Kappa=(P_0-P_C)/(1-P_C)\quad(13)$$

$$P_0=s/n\quad(14)$$

$$P_C=(a_1\times b_1+a_2\times b_2)/(n\times n)\quad(15)$$

式中： n 为栅格像元总数（个）； a_1 表示真实栅格为建设用地的像元数（个）； a_2 表示非建设用地的像元数（个）； b_1 表示模拟栅格为建设用地的像元数（个）； b_2 表示非建设用地的像元数（个）； s 为真实栅格与模拟栅格中对应像元值相等的像元数（个）。

1.3.3 城市开发边界划定

城市开发边界以生态优先为划定目标,提取 *RSEI* 结果中生态质量好和生态敏感评价中极高敏感地区,参考《临夏市临夏县城市总体规划(2016—2030年)》《临夏回族自治州土地利用总体规划(2006—2020年)》,将其定为城市禁止开发区,即刚性扩张边界。在 CA-Markov 中将其定为限制因素,得到新的城市增长范围,其过程可表示为:

$$UGB = UGB_1 \cap UGB_2 \quad (16)$$

式中: *UGB* 为城市增长的边界划定结果; *UGB*₁ 是禁止开发区的划定结果; *UGB*₂ 是 CA-Markov 模型对城市用地扩展进行的模拟结果。

2 结果分析

2.1 生态质量评价及刚性边界划定

2.1.1 *RSEI* 评价结果

研究期间,临夏州生态质量逐年下降,从 0.401 下降至 0.382 (表 3),生态极度脆弱。其中,湿度和绿度值均为正值,促进生态积极发展;干度和热度值为负值,表明对生态环境有阻碍作用,这也与实际情况相符。进

一步对比可知:干旱程度对生态发展阻碍作用不断增强,2005—2010 年干度贡献率始终保持在 0.63 左右,2015 年增至 0.64。湿度相关度最低,尽管 2010—2015 年相关性呈上升趋势,但仍在各指标中最低 (0.29),符合干旱区气候特征。

将 *RSEI* 结果以 0.2 为间隔分为差、较差、中、较好、好五个等级^[26,27]。整体来看,2005—2015 年临夏州生态质量不断降低。同时,生态差的区域逐渐向北转移,继而取代生态环境优的区域 (图 3)。临夏市、永靖县两地,依靠黄河大力发展旅游业、农业。尤其是刘家峡—盐锅峡水库一带生态破坏较大,其主要原因是水上旅游业发展较快,加速带动周边产业,基础设施较完善,利于城镇建设与扩张的大规模发展。研究期内,生态质量好和较好区域的面积涨幅较小,且主要集中在太子山天然保护区。“十二五”期间,太子山国家保护区由于不断深化自然保护区工作,加强自然保护区管理,促进康乐

表 3 *RSEI* 各指标荷载值

Table 3 Load values of *RSEI* indexes

指标	2005 年		2010 年		2015 年	
	均值	荷载值	均值	荷载值	均值	荷载值
<i>WET</i>	0.388	0.217	0.413	0.341	0.440	0.291
<i>NDVI</i>	0.777	0.345	0.748	0.319	0.613	0.357
<i>LST</i>	0.579	-0.579	0.617	-0.609	0.578	-0.644
<i>NDSI</i>	0.531	-0.631	0.513	-0.637	0.487	-0.621
<i>RSEI</i>	0.401		0.397		0.382	

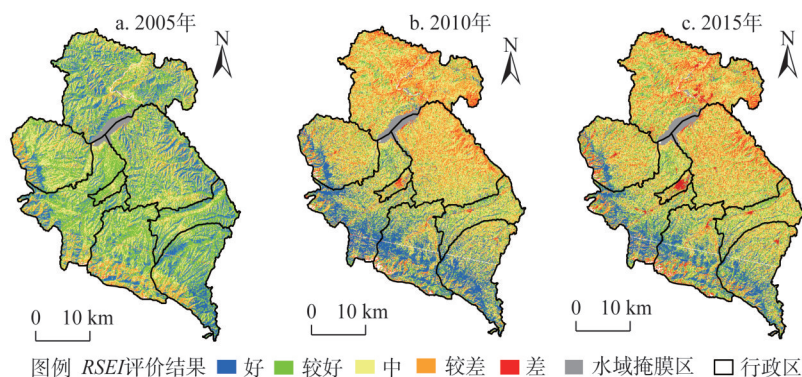


图 3 2005—2015 年 *RSEI* 评价结果

Fig. 3 *RSEI* evaluation results from 2005 to 2015

县、和政县生态保护区环境逐步向好。

2.1.2 敏感性分析结果

通过 ArcGIS 对数据进行加权叠加获得研究区生态敏感性结果，并划定敏感性分区（图4），2005—2015年高、低生态敏感性两极化发展逐渐凸显。总体而言，2005年临夏州整体呈现中、低度敏感，特别是中心城区敏感性较低。临夏州生态敏感性主要以中度敏感性为主，占全州的52.8%。敏感地区呈片状分布，由北向南贯穿整个研究区，且主要分布在南部太子山—莲花山一带，该区域为自然保护区，生态环境脆弱，需要限制开发。2015年临夏州生境敏感性主要为低敏感区，占全州的69.6%。其次是非敏感区，非敏感区域仅占11.2%，主要为中心城区建设用地和村镇居民点以及部分地势平坦的建设用地。高敏感区、极高敏感区则多分布在自然保护区内，如莲花山国家森林公园、太子山自然保护区、黄河三峡风景区等。

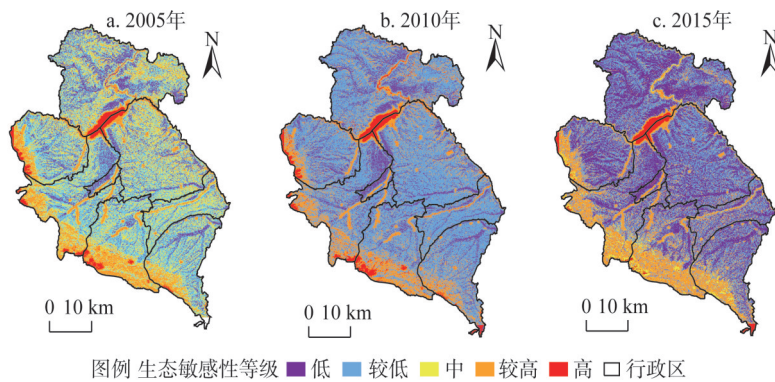


图4 2005—2015年生态敏感性评价结果

Fig. 4 Evaluation results of ecological sensitivity from 2005 to 2015

2005年生态敏感性低的地区仅为临夏市，2015年增至临夏市、临夏县和永靖县三市（县）。三市（县）随着“十二五”规划的深入发展，建立、扩建一二三产业融合示范区、现代科技产业园等项目，依靠农林畜牧、绿色能源、交通运输等产业逐渐成为临夏州的经济核心区。研究期间，生态敏感性高、极高等级的面积分布变化不大，主要以和政县、康乐县为主。对不同敏感性分区应因地制宜，确定不同的保护和开发建议。如低敏感区和非敏感区适于农业生产建设，将此类区域作为适宜发展区，应注意在社会经济持续发展和生态环境得以保护的前提下，统筹优化土地利用结构和布局。极高敏感区生态环境脆弱且包含多个生态保护区，对人类活动的反应极敏感，更应严格控制建设活动，有效改善土地生态环境。

基于此，将2015年RSEI得分评价结果及生态敏感性分析叠加分析后，参照临夏州实际情况，应对生态质量好、生态敏感性极高的地区采取生态涵养不开发战略，定为禁止开发区，即城市刚性边界（图5）。

2.2 城市扩张结果及模拟验证

研究区现阶段城市扩张变化如图6所示。2005—2015年临夏州城市建设用地面积变化呈现出逐渐扩张的趋势，研究期间城市



图5 禁止开发区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of prohibited development zone

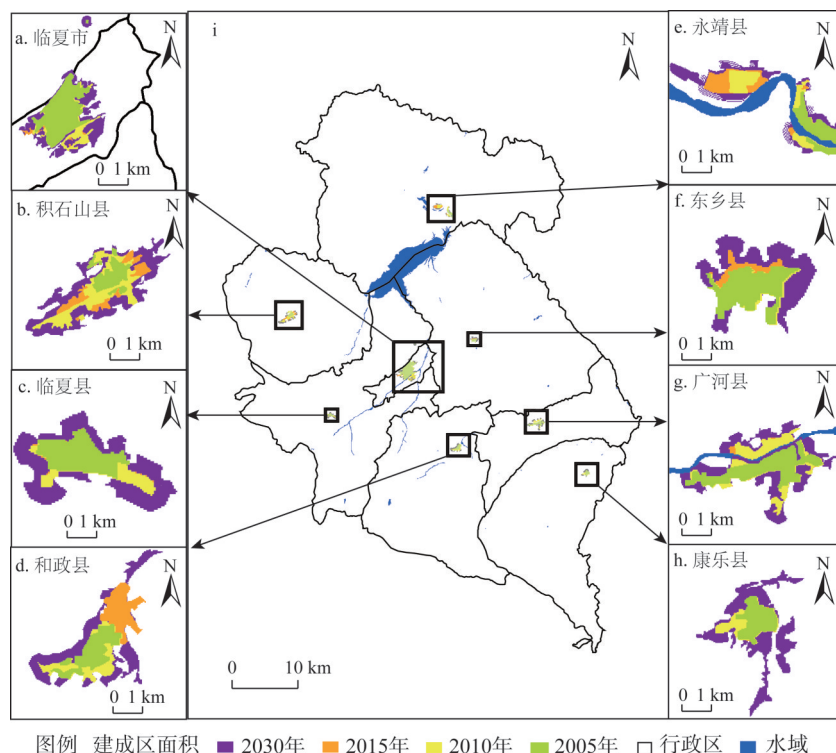


图6 建设用地扩张趋势

Fig. 6 Construction land expansion trend

建成区面积共增加了 6.04 km^2 。按城市发展速度临夏州的发展过程可以分为两个阶段：2005—2010年临夏州为低速发展阶段，城市建成区面积从 13.1 km^2 增长至 15.23 km^2 ，占总面积的比例分别为 0.17% 和 0.21% ，增加 2.13 km^2 ；2010—2015年临夏州为中速发展阶段，城市建成区面积增加了 3.91 km^2 ，占总面积的 0.39% 。总体而言，临夏州的城市扩张速度呈中低速发展，这主要受自然因素的影响较大。临夏州最主要的地貌类型是黄土侵蚀沟壑型。《中国城市综合发展质量报告》也提到，临夏州作为黄河上游地区最贫穷的地级市，经济发展十分有限。恶劣的生态、经济条件给城镇形成带来极大约束力，同时，城镇发展特征呈现孤立性和封闭性。地形条件是城镇聚落布局与选址的首要影响因素，地形起伏度大的地区不仅不适于城镇集聚发展，也会对生产生活带来较大影响。同时，地形碎片化使得土地利用效率极低，人地矛盾格外突出。因此，临夏州城镇变化较大的地区，主要是在人类活动密集、生物资源丰富的平坦的河谷地区。其次是气候条件，作为衡量城市宜居性的重要指标，影响着临夏州城镇集聚发展，以及农业生产布局。再次，人口与经济要素也逐渐成为城镇发展的重要组成部分。随着人口数量的增加和社会经济发展水平的提升，临夏州的建筑增多，交通路网密度逐渐增大，带动建设用地面积不断增加，这在自然地理条件相对优越的临夏市表现得最为明显。最后，水资源分布对于黄土高原地区也格外重要。积石山县、东乡县两县位于山区，水资源紧缺，不仅居民生活用水难以保证，且随着降雨量的增多县内地质灾害频发。

从城镇化发展速度来看，研究期内，各县市城镇化发展水平差距较大，尤其以临夏市和其他七县的差距为甚。临夏市作为临夏州政治、经济、文化中心，承接兰州、面向

藏区的门户性枢纽,形成全州发展动力引擎。城镇化的增速在整个研究区中最为明显,2005年临夏市的城镇化率为67.01%,到2015年升至89.22%。其次是城镇发展较快的是永靖县。永靖县作为临夏州的次中心,依靠刘家峡、盐锅峡工业园区发挥产业基础优势,结合南山森林公园、黄河两岸生态湿地发展以旅游业为主导的创新服务业,2005年城镇化水平为30.19%,2015年达到44.23%。

从发展类型来看,2005—2015年临夏州扩张类型主要以外延式扩张为主,且临夏市、积石山县、临夏县(图6a~图6c)建设用地所占面积较大,分别占全部用地面积的27.5%,11.19%和9.12%。临夏市以发展制造业、化工业为主,且城市扩张趋势与实际情况相符。和政县(图6d)、永靖县(图6e)两县均呈蔓延式增长,增长速度较快。东乡县、广河县和康乐县(图6f~图6h)以生态保护为主,导致研究期内城市扩张速度较慢。

为保证CA-Markov研究结果的可信度,首先通过2005年、2010年土地利用现状对2015年土地利用进行模拟。模拟结果显示Kappa指数为0.869,说明模拟效果较好。以此建立土地转移矩阵,模拟2030年研究区城市扩张面积。2030年城市用地扩张模拟结果见图6。2030年城市建成区面积较2015年增加9.69 km²,占总面积的0.57%。和政县(图6d)、积石山县(图6a)城市建成区扩张面积分别为2.67 km²和1.92 km²,位居第一、第二,该模拟结果与《临夏市临夏县城市总体规划(2015—2030)》中州域城镇空间规划有一定差别。在政府规划中,永靖县(图6e)、和政县(图6d)作为次中心城市,是辐射带动州域南北部的重要发展极核。同时,两县分别带动临夏州北部和南部的区域城乡发展,导致城市建成区面积迅速增长。

2.3 城市增长边界划定

将CA-Markov模拟得到的建设用地与RSEI得到的城市刚性边界叠加,发现模拟的建设用地范围拓展到了生态质量禁止建设区,表明CA-Markov模型模拟的城市扩张范围与政府规划范围存在分歧。为减少城市土地利用开发对生态环境的破坏,将禁止建设区作为限制条件加入CA-Markov模型。通过RSEI-CA-Markov模型,得到新的2030年城市扩张面积(图7)。2030年研究区城市扩展边界内面积共计90.36 km²,占研究区总面积的1.51%。边界内已有建设面积63.27 km²,剩余可建设用地面积27.09 km²。比单纯CA-Markov所预测的建设用地可增长面积方案少5.52 km²。在政府规划中,预计2030年城市建成区面积达92.68 km²。RSEI-CA-Markov的模拟结果比政府规划面积少2.32 km²,为可持续的城市扩张提供一定保障。

从空间上来看,RSEI-CA-Markov规划模式与政府总体规划在中心城区重合度较高,但在外围空间上差异明显。中心城区(临夏市、临夏县)表现出的高重合性与已成熟的城镇发展有关,由于建设空间饱和与旧城镇发展方向的固定性,城市用地发展的范围也较为稳定。在外围空间上,政府的总体规划着重考虑了城市发展,忽视了现状城镇基础与生态可持续发展,部分城区划定的空间范围有欠妥当,主要为研究区北部的永靖县和东北部的广河县,已经侵占了该区域大量生态空间。广河县作为临夏州的重点贫困县,政府规划中主要以交通发展,建立开发区为主要发展方向,新增面积积达6.94 km²。但是,境内的广通河及林桦沟、南沟等五大流域片区属于生态敏感区,应减少开发。在RSEI-CA-Markov模式下,剔除了部分流域周围的零碎面积,2030年新增面积为6.11 km²。而永靖县作为副中心城市,政府规划中主要强调发展二三产业,新建产业园区。在生态保护模式下,考虑到境内包含黄河三峡湿地公园、炳灵寺等多处自

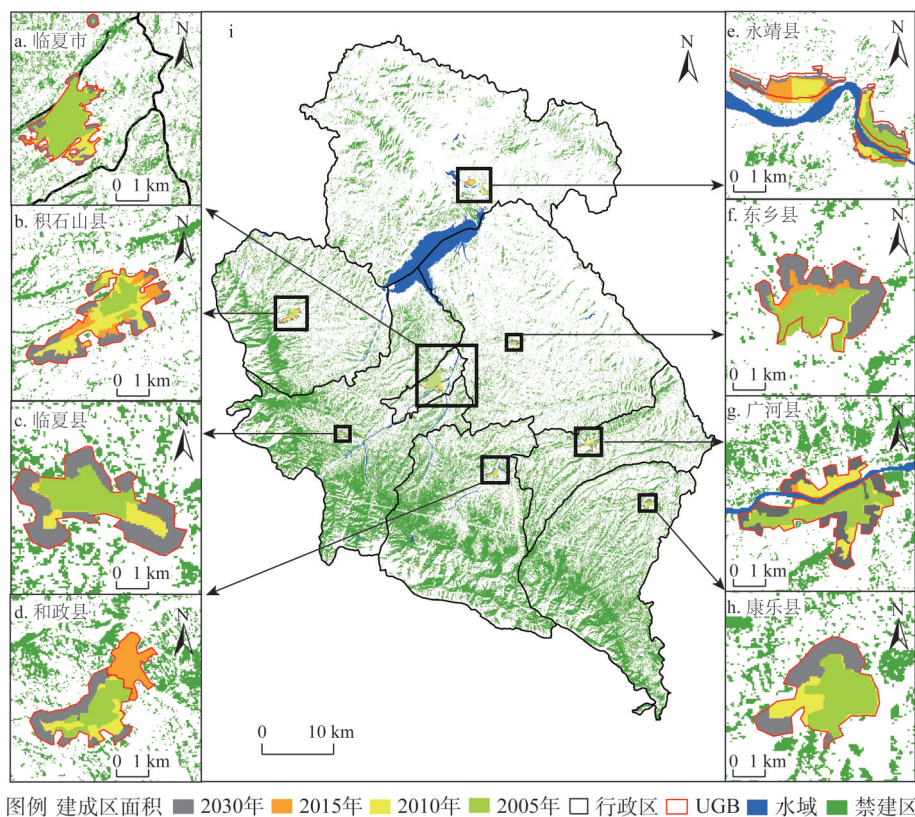


图7 2030年城市扩张模拟及城市开发边界

Fig. 7 Urban expansion simulation and urban development boundary in 2030

然资源景观, 建设用地面积比政府规划中减少了 0.57 km^2 。

除此之外, 基于RSEI-CA-Markov模型的2030年城市建设用地在发展方向上与“总归”中提出的“一主两副, 四轴三区”的城市空间结构基本一致。调整后的城市建设用地将继续以临夏市(图7a)中心城区为核心。积石山县(图6b)以挖掘历史文化为主, 城市发展缓慢。临夏县(图7c)、和政县(图7d)和永靖县(图7e)为重要发展环节, 带动周边发展。东乡县(图7f)、广河县(图7g)分别建立物流基地、节点, 并联合南部康乐县(图7h), 连片发展特色畜牧产业。总的来说, 新模式下的城市发展规划符合临夏州发展规划。结合生态质量评价和城市扩张模拟的空间协调机制, 划定的UGB基本符合规划中对临夏州城市扩张趋势, 同时由于考虑了生态质量, UGB的范围不仅可以约束城市盲目发展, 也保护了区域内的生态和农业空间。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文从生态保护的角度出发, 以生态质量评价为基础, 提出了一种在生态脆弱区划定未来UGB的新方法。(1) 依据RSEI模型得到临夏州生态质量评价结果。结果显示: 临夏州生态质量逐年下降, 2015年最差, 生态环境异常脆弱。其中, 干旱的气候条件对自然环境胁迫最大, 到2015年干度指标达 -0.63 , 并基于生态质量评价结果将生态质量

好、较好地区定为刚性边界。(2) 根据2005—2015年城市扩张概率,利用CA-Markov模拟2030年临夏州城市扩张情况。2030年城市扩张面积为95.88 km²,超过了当地政府预期的2030年城市扩张面积(92.68 km²),且与政府规划方向有一定差别。(3) 基于RSEI-CA-Markov模型,2030年研究区城市扩展边界内面积共计90.36 km²,占研究区总面积的0.51%。该方法模拟的未来城市扩张面积,比政府预期规定的建设面积缩小2.32 km²。在此基础上,划定的未来UGB模式,可以对未来城市扩张程度进行强有力的控制,实现生态与城市发展的协调发展。

目前,中国许多城市面临着与临夏州同样的可持续城市规划问题。因此,当地政府应当因地制宜指导生态脆弱城市的规划活动,特别是在城市发展较快,生态环境较复杂的地区。从研究结果来看,RSEI-CA-Markov模型划定边界城市开发边界的方法,在城市规划与城市可持续发展中,是一种具有较高可行性的创新方法,也是一次有意义的尝试。

3.2 讨论

比较不同情景下的结果,发现城市规划在指导城市发展中起着重要作用。在两种情况下,未来城市土地的面积都在增加,但是增加的幅度却有很大的不同。在注重生态可持续发展的理念下,未来的城市用地面积要比单一注重城市发展的规划面积小得多。从城市扩张的角度来看,个别地区在不同模式下具有相同的发展趋势。(1) 由于经济快速发展和人口密度较大,以及受到数据空间分辨率的限制,临夏市、临夏县的城市土地在2015年已处于饱和状态,意味着将不会有从其他土地转换来的新建设用地。因此,到2030年,两地在城市土地面积中的份额预计将保持不变。(2) 尽管有些地区的发展趋势相同,但变化原因并不相同。康乐县的城市土地面积将在2015—2030年间出现较大增长,不同模式下的城市土地面积差距将近30%。在注重城市发展的情景下,康乐县位于临夏州的边缘,并且这些行政区内有许多破碎的斑块,在CA-Markov模型中这些斑块作为新的城市土地,因此在2030年这些地区将出现较大幅度的增长。然而,在生态可持续发展模式下,这些地区的城市土地面积变化受到生态约束的影响。在新的规划模式中,由于康乐县规划的发展目标是保护生态用地,因此大量土地被划分为禁止开发区。因此,两种模式下的康乐县建设用地面积差距较大。除此之外,还有积石山县、和政县。在不受限制的发展中,由于城市用地余量较大,截至2030年新增大量建设用地。但是在生态约束的发展下,由于大型生态公园的建设,城市土地面积增长较少。在发展不受限制的情况下,由于缺乏与生态和耕地保护相关的约束,两县未来的城市土地将呈现出无序扩张的状态。限制开发区和所有生态保护区中的许多土地将来都将转换为城市土地,这与生态可持续发展目标相矛盾。但是在生态优先模式下的城市发展将更加可持续,只有少部分受限制的开发用地将被转化为城市用地,生态保护区将保留其原始土地用途,并且不会完全转换为建设用地。

临夏州正处于快速城市化发展的阶段,城市内部的土地资源通常被优先用于生产、生活基本用途,如居住、商业、交通等。城市内部原本保留的一些公共空间,如绿地、水域等不断被占用。因此,本文优先考虑生态质量发展变化及其保护措施,进而划定禁止开发区,以期通过适度扩张,实现对环境 and 资源的广泛而有效的保护,避免与保护目标相冲突的发展和城市用途。临夏州作为“脱贫攻坚战”的重要区域,在资源约束的背景下,规划面临增量向存量的转型。RSEI-CA-Markov模型下划定的城市开发边界充分考虑了生态脆弱地区的资源环境承载力对城市发展的本底作用,并对黄河上游及其他生态

脆弱区的城市提供了有效借鉴。模型通过“先落实保护边界,再落实开发边界”的思路,确定城市发展规模。面对城市发展速度快、生态敏感的地区,政府可以在规划中将河流湖泊、森林公园、水源保护区等生态核心资源,以及重要的资源空间作为生态保护红线,予以永久保护。在此基础上划定城镇开发边界,不仅可以体现城市功能和结构,也体现出城市及其所处自然环境的相互作用。

此外,就UGB而言,刚性太强容易约束城市的合理发展,弹性太强又无法有效抑制城市蔓延以保护自然资源。城市的规模差异、类型差异都应被考虑进城市开发边界的划定标准中。城市增长边界需动态调整,而不是永久划定。基于此,本文提出以下建议:(1)加强存量开发与再开发,形成用地发展的良性循环。UGB是推动城市发展、转变的有效手段与管理工具。一方面,对UGB的贯彻落实可以控制城镇无序扩张,促进土地集约利用;另一方面,通过挖掘城镇内部潜力,可以间接缓解城市扩张的压力,这对已划定的城市增长边界是一种保护。例如,可更新老旧城区的区域规划,提高其交通可达性,不仅可以有效完善城市功能,还可以减轻城市周边农用地、生态用地的压力。(2)完善政策机制,保障UGB的有效实施。可以将UGB融入现行的城市规划体系之中,使其作为法定规划的一部分,或出台相关地方法规、管理条例等,实现UGB对开发建设活动的控管效力。(3)实行双线管控,保证UGB的约束性与灵活性。城市增长边界应当通过“总量约束”与“形态控制”共同引导城镇建设用地发展方向与空间布局。除了强调建设用地的数量要求、空间上的边界范围以及发展方向外,不强制约束城市发展。

已有遥感影像主要为观察研究夏季植被情况,未能获得2020年夏季数据,将在未来研究中加以补充、更新。同时,由于影像分辨率的限制,本文未能进一步考虑不同城市扩张程度下UGB的弹性变化。在今后的研究中,将尝试划定多类型的弹性城市开发边界,并考虑到不同城市的扩张程度以及同一城市内限制建设区、有条件建设区的边界划定,以更好地解释RSEI-CA-Markov在城市发展中的适宜性,为国土空间规划提供可靠支撑。

参考文献(References):

- [1] 王亚飞,樊杰,周侃.基于“双评价”集成的国土空间地域功能优化分区.地理研究,2019,38(10): 2415-2429. [WANG Y F, FAN J, ZHOU K. Territorial function optimization regionalization based on the integration of "Double Evaluation". Geographical Research, 2019, 38(10): 2415-2429.]
- [2] 龙花楼,刘永强,李婷婷,等.生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究.经济地理,2014,34(5): 1-8. [LONG H L, LIU Y Q, LI T T, et al. Spatial interlinking of land use planning and environmental protection planning from the perspective of ecological civilization construction. Economic Geography, 2014, 34(5): 1-8.]
- [3] 彭建,赵会娟,刘焱序,等.区域生态安全格局构建研究进展与展望.地理研究,2017,36(3): 407-419. [PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419.]
- [4] 吴大放,胡悦,刘艳艳,等.城市开发强度与资源环境承载力协调分析:以珠三角为例.自然资源学报,2020,35(1): 82-94. [WU D F, HU Y, LIU Y Y, et al. Empirical study on the coupling coordination between development intensity and resources-and-environment carrying capacity of case core cities in Pearl River Delta. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 82-94.]
- [5] 徐文彬,尹海伟,孔繁花.基于生态安全格局的南京都市区生态控制边界划定.生态学报,2017,37(12): 4019-4028. [XU W B, YIN H W, KONG F H. Development of ecological control boundaries in Nanjing metropolis district based on ecological security patterns. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(12): 4019-4028.]
- [6] 苏伟忠,马丽雅,陈爽,等.城市生态空间冲突分析与系统优化方法.自然资源学报,2020,35(3): 601-613. [SU W Z, MA L Y, CHEN S, et al. Conflict analysis and system optimization of urban ecological space. Journal of Natural Resources, 2020, 35(3): 601-613.]
- [7] 丛佃敏,赵书河,于涛,等.综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定:以天水市规划区(2015—

- 2030年)为例. 自然资源学报, 2018, 33(1): 14-26. [CONG D M, ZHAO S H, YU T, et al. Urban growth boundary delimitation method integrating comprehensive ecological security pattern and urban expansion simulation: A case study of planning areas in Tianshui city (2015-2030). *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 14-26.]
- [8] YANG Y Z, ZHANG L, YE Y M, et al. Curbing sprawl with development-limiting boundaries in urban China: A review of literature. *Journal of Planning Literature*, 2020, 35(1): 25-40.
- [9] 刘辉, 张志赞, 税伟, 等. 资源枯竭型城市增长边界划定研究: 以淮北市为例. 自然资源学报, 2017, 32(3): 391-405. [LIU H, ZHANG Z Y, SHUI W, et al. Urban growth boundary delimitation of resource-exhausted cities: A case study of Huaibei city. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 391-405.]
- [10] ZHANG D C, LIU X P, LIN Z Y, et al. The delineation of urban growth boundaries in complex ecological environment areas by using cellular automata and a dual-environmental evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120361>.
- [11] 王旭, 马伯文, 李丹, 等. 基于FLUS模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, 2020, 35(1): 230-242. [WANG X, MA B W, LI D, et al. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 230-242.]
- [12] ZHOU L, DANG X W, SUN Q K, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55(C). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102045>.
- [13] 张学儒, 周杰, 李梦梅. 基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析. 地理学报, 2020, 75(1): 160-178. [ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178.]
- [14] 成超男, 胡杨, 冯尧, 等. 基于CA-Markov模型的城市生态分区构建研究: 以晋中主城区为例. 生态学报, 2020, 40(4): 1455-1462. [CHEN C N, HU Y, FENG Y, et al. Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: A case study of the main urban area of Jinzhong. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(4): 1455-1462.]
- [15] SONG M J, CHEN D M, WOODSTOCK K, et al. An RP-MCE-SOP framework for China's county-level "Three-Space" and "Three-Line" planning: An integration of rational planning, multi-criteria evaluation, and spatial optimization. *Sustainability*, 2019, 11(11), 2997. [Doi: 10.3390/su11112997](https://doi.org/10.3390/su11112997).
- [16] 邱思齐, 岳文泽. 刚性弹性相结合的城市开发边界划定: 以浙江省义乌市为例. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1607-1616. [QIU S Q, YUE W Z. Delineation of urban development boundary based on the combination of rigidity and elasticity: A case of Yiwu city in Zhejiang province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1607-1616.]
- [17] 高晓路, 吴丹贤, 周侃, 等. 国土空间规划中城镇空间和城镇开发边界的划定. 地理研究, 2019, 38(10): 2458-2472. [GAO X L, WU D X, ZHOU K, et al. The urban space and urban development boundary under the framework of territory spatial planning. *Geographical Research*, 2019, 38(10): 2458-2472.]
- [18] 赵越, 罗志军, 曹丽萍, 等. 基于空间决策的区域城镇发展与农业生产协调布局优化: 以江西省临川区为例. 自然资源学报, 2019, 34(3): 526-538. [ZHAO Y, LUO Z J, CAO L P, et al. Layout optimization of regional urban development and agricultural production based on spatial decision-making: A case study of Linchuan district in Jiangxi province. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(3): 526-538.]
- [19] WEN X L, MING Y L, GAO Y G, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of Pingtan Comprehensive Experimental Zone, a new type of sea island city, based on RSEI. *Sustainability*, 2019, 12(1): 23-45.
- [20] XU H Q, WANG Y F, GUAN H D, et al. Detecting ecological changes with a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2345. <https://doi.org/10.3390/rs11202345>.
- [21] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响: 以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844. [DENG Y J, YAO S B, HOU M Y, et al. Effect of returning farmland to forest and grassland on ecosystem carbon storage service: A case study of Zichang county in hilly and gully region of Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(4): 826-844.]
- [22] FIROZJAEI M K, SEDIGHI A, ARGANY M, et al. A geographical direction-based approach for capturing the local variation of urban expansion in the application of CA-Markov model. *Cities*, 2019, 93: 120-135.
- [23] MANSOUR S, MOHANMMED A B, TALAL A A. Monitoring land use and land cover changes in the mountainous cities of Oman using GIS and CA-Markov modelling techniques. *Land Use Policy*, 2020, 91(C): 104414. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104414>.
- [24] 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. 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 219-229.]
- [25] SHAN W, JIN X B, REN J, et al. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118-126.

- [26] SHI Y Y, LI J Q, XIE M Q. Evaluation of the ecological sensitivity and security of tidal flats in Shanghai. *Ecological Indicators*, 2018, 85: 729-741.
- [27] TSOU J Y, GAO Y F, ZHANG Y Z, et al. Evaluating urban land carrying capacity based on the ecological sensitivity analysis: A case study in Hangzhou, China. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 529. <https://doi.org/10.3390/rs9060529>.

Delimitation of urban growth boundary in ecologically vulnerable areas in the Upper Yellow River:

Take Linxia Hui Autonomous Prefecture as an example

YANG Xue-di¹, BAI Yong-ping¹, CHE Lei², ZHOU Liang^{3,4},
QIAO Fu-wei¹, WANG Zhi-guo¹

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 3. State Key

Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic Sciences

and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. Faculty of Geomatics,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The Yellow River Basin is an important ecological barrier and economic zone in China, and its upstream water-conserving areas play a decisive role in the sustainable ecological development of the Yellow River Basin. Therefore, scientific coordination of urban and rural development and reasonable delineation of urban growth boundary (*UGB*) are of great significance for ecological protection and high-quality urban development in the Upper Yellow River Basin. This paper takes Linxia, a typical prefecture-level city in the upper reaches of the Yellow River, as the research object, and assesses its ecological quality based on land use and related remote sensing data using remote sensing ecological index (*RSEI*) and ecological sensitivity analysis. On this basis, the future urban growth boundary development with and without ecological quality assessment conditions is analyzed in combination with CA-Markov comparison. The results show that: (1) From 2005 to 2015, the overall ecological environment of the study area was poor and decreased year by year, and the ecological quality (*RSEI*) result dropped to the lowest (0.38) in 2015. Meanwhile, the ecological sensitivity changed from moderate to low sensitivity. (2) The urban expansion area increased by 6.04 km², and the scale of urban construction land in 2030 obtained by CA-Markov simulation was 95.88 km², which exceeded the planned area by 3.2 km², and the urban expansion was not effectively restrained. (3) Simulation of RSEI-CA-Markov shows that the urban construction land in 2030 is 90.36 km², which is smaller than the planned government planning area of 3.3 km², and meets the requirements of urban sustainable development. Based on this, the designated *UGB* has stronger urban management capabilities. The delineation of *UGB* in the ecologically fragile area in the Upper Yellow River is conducive to guiding and realizing sustainable urban development, which can also provide reference for the sustainable development of other ecologically fragile cities in China.

Keywords: Upper Yellow River; ecologically fragile area; RSEI-CA-Markov model; urban growth boundary; Linxia Hui Autonomous Prefecture