

基于多模型的黑河中游甘临高地区土地利用情景模拟

蒋小芳^{1,2} 段翰晨^{1,2} 廖杰^{1,2} 宋翔^{1,2} 薛娴^{1,2}

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000;
2. 中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区盐渍化研究站, 兰州 730000)

摘要: 混合元胞自动机 (Mixed-cell cellular automata, MCCA) 模型改进了传统的元胞自动机 (Cellular automata, CA) 模型, 基于现实复杂土地结构引入混合元胞, 实现了从定性、静态模拟到定量、动态模拟的跨越。本文首先探究 MCCA 模型在黑河中游甘临高地区 (甘州区、临泽县和高台县) 的适用性; 之后分别采用多目标线性规划 (Multiple-objective programming, MOP) 模型、普通线性回归模型预测得到 2035 年可持续发展 (Sustainable development, SUD) 情景、基本发展 (Basic development, BAD) 情景中不同地类面积数值, 然后将面积输入 MCCA 模型中进行不同情景的土地利用空间结构可视化, 并开展对比研究。结果表明: 各项精度评价指标均表明 MCCA 模型的模拟精度较高, Kappa 系数、混合元胞质量系数 (Mixed-cell figure of merit, mcFoM) 和平均相对熵 (Relative entropy, RE) 分别为 0.886、0.261 和 0.508, 优于基于纯净元胞的斑块生成土地利用变化模拟 (Patch-generating land use simulation model, PLUS) 模型, 因此 MCCA 模型适用于研究区土地利用结构模拟。2035 年 SUD 情景中林地范围明显高于 BAD 情景, 生态效益较 BAD 情景增速快, 建设用地和耕地适度扩张, 综合效益增速较快。该结果表明耦合 MOP 和 MCCA 模型模拟的土地利用优化配置方案能够更好地协调经济与环境的关系, 既有利于经济快速发展, 又能保护生态环境和维持社会稳定。

关键词: 黑河中游; 土地利用变化; 情景模拟; 混合元胞自动机模型; 多目标线性规划模型

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2022)09-0178-11 **OSID:** 

Multi-model-based Simulation of Different Landuse Scenarios in Gan – Lin – Gao Area in Middle Reaches of Heihe River

JIANG Xiaofang^{1,2} DUAN Hanchen^{1,2} LIAO Jie^{1,2} SONG Xiang^{1,2} XUE Xian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
2. Drylands Salinization Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The mixed-cell cellular automata (MCCA) model improves the traditional cellular automata (CA) model, and introduces mixed cells based on the actual complex land structure, realizing the progress from qualitative and static simulation to quantitative and dynamic simulation. The applicability of the MCCA model in the Gan – Lin – Gao area (Ganzhou District, Linze County and Gaotai County) in the middle reaches of the Heihe River was firstly explored; after that, the multiple-objective programming (MOP) model and the ordinary linear regression model were separately used to predict the area values of different land use types in the sustainable development (SUD) scenario and the basic development (BAD) scenario in 2035, and then the area number was input into the MCCA model to visualize the land use spatial structure of different scenarios, and carry out comparative studies. The results showed that all accuracy evaluation indicators indicated that the simulation accuracy of the MCCA model was relatively high. The Kappa coefficient, mixed-cell figure of merit (mcFoM) and mean relative entropy (RE) were 0.886, 0.261 and 0.508, respectively, which was better than the patch-generating land use simulation model (PLUS) based on pure cells, so the MCCA model was suitable for the simulation of land use

structure in the study area. In 2035, the scope of forest land in the SUD scenario was significantly higher than that in the BAD scenario, and its ecological benefits increased faster than that of the BAD scenario, construction land and arable land expand moderately, and the comprehensive benefits increased relatively fast. The results showed that the optimal land use allocation scheme simulated by coupling the MOP and MCCA model can better coordinate the relationship between economy and environment, which was not only conducive to rapid economic development, but also protected the ecological environment and maintains social stability.

Key words: middle reaches of Heihe River; land use change; scenario simulation; MCCA model; MOP model

0 引言

土地利用变化关系到生态系统的稳定和持续发展,是土地利用/覆被变化(Land use and cover change,LUCC)研究的热点问题^[1]。土地利用模型为这一研究提供了强有力的技术支持。CA 模型出现于 20 世纪 40 年代,TOBLER^[2]于 1979 年首次将 CA 模型应用于地理建模。CA 模型涉及人类系统与城市土地系统之间的相互作用,具有同质性、空间离散性和时空局部性等特点,空间模拟能力优越^[3-5]。然而传统 CA 模型中每个像元内的土地利用类型单一,而实际的土地利用类型分布情况复杂。MCCA 模型利用的混合元胞包括了不同土地利用类型,符合现实中复杂的土地利用结构,在元胞空间、元胞状态和转化规则的元胞邻域方面均与传统的 CA 模型存在差异,实现了从定性、静态模拟到定量、动态模拟的跨越^[6]。

然而单一模型难以兼具数量模拟和空间格局预测的功能^[7]。随着研究的深入,综合数量模型与空间模型的耦合模型出现^[8-14]。目前已有的数量模拟模型主要有马尔可夫链(Markov chain,MC)、灰色预测模型(Grey model,GM)和 MOP 模型等^[5,15-20]。MOP 模型可用于计算土地系统中多维目标函数,具有强大的计算功能,是一种自上而下的方法,但在空间优化方面存在缺陷^[21]。CA 和 MCCA 模型均为自下而上的空间格局模拟方法,能够生成优化的土地利用结构^[22]。因此有必要同时采用自顶向下和自底向上的耦合模型来优化土地利用数量-空间格局^[23]。

部分学者采用包括小尺度土地利用变化及其空间效益模型(Conversion of land use and its effects at small regional extent,CLUE-S)在内的纯净元胞研究模型对黑河中游甘州区或张掖市等区域的土地利用结构进行模拟^[24-25],但是缺乏对混合元胞的探究。鉴于此,本文以黑河中游甘临高地区为例,确定 MCCA 模型在研究区的适用性后,分别将 MOP 和普通线性回归这两个数量预测模型与 MCCA 空间模

拟模型耦合,模拟得到 2035 年可持续发展(Sustainable development, SUD)情景和基本发展(Basic development, BAD)情景下土地利用空间结构,采用效益定量评价方法对比分析,优选最佳的土地配置方案。

1 研究区和研究方法

1.1 研究区域概况

黑河流域地处中国西北干旱气候区。本文研究范围为黑河流域中游的张掖市甘州区、临泽县和高台县(甘临高地区,图 1)。该区域年均气温约为 8.2℃,年均降水量在 80~150 mm 之间,生态环境较为脆弱。土壤类型以水稻土、风沙土、草甸土、石质土和棕钙土为主。土地利用类型较多,主要包括耕地、草地、建设用地和荒漠等。黑河流域中游经济发展速度较快,人口较为稠密,人地矛盾突出。研究该区土地利用变化对于西北地区的经济发展和生态环境保护具有重要意义。

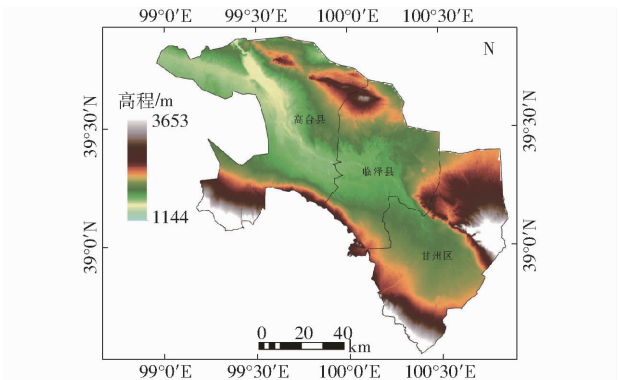


图 1 研究区简图

Fig. 1 Chart of study area

1.2 土地利用研究模型

1.2.1 MCCA 模型

(1)MCCA 模型原理

MCCA 模型主要包括 3 部分^[6](图 2)。第 1 部分是混合元胞内多维土地利用变量连续变化的机理挖掘。MCCA 模型基于起始年份和目标年份两期土地利用数据得出不同地类的连续变化,采用随机森林回归(Random forest regression, RFR)算法挖掘不

同地类与驱动力因素之间的映射关系。RFR 有利于克服不同空间变量的多重共线性问题。RFR 首先训练各地类的变化量(即增加量)与驱动因素之间的关系,因变量为每个地类的变化量,自变量为各驱动因素;然后预测得到各地类中每个元胞的

变化潜力。与以前的模型不同,RFR 并未同时拟合多个地类,而是分别训练每种地类的变化潜力;而某一地类的增加表示其他地类的减少,因此模型只关注增加的地类,减少表示不增加,避免重复计算。

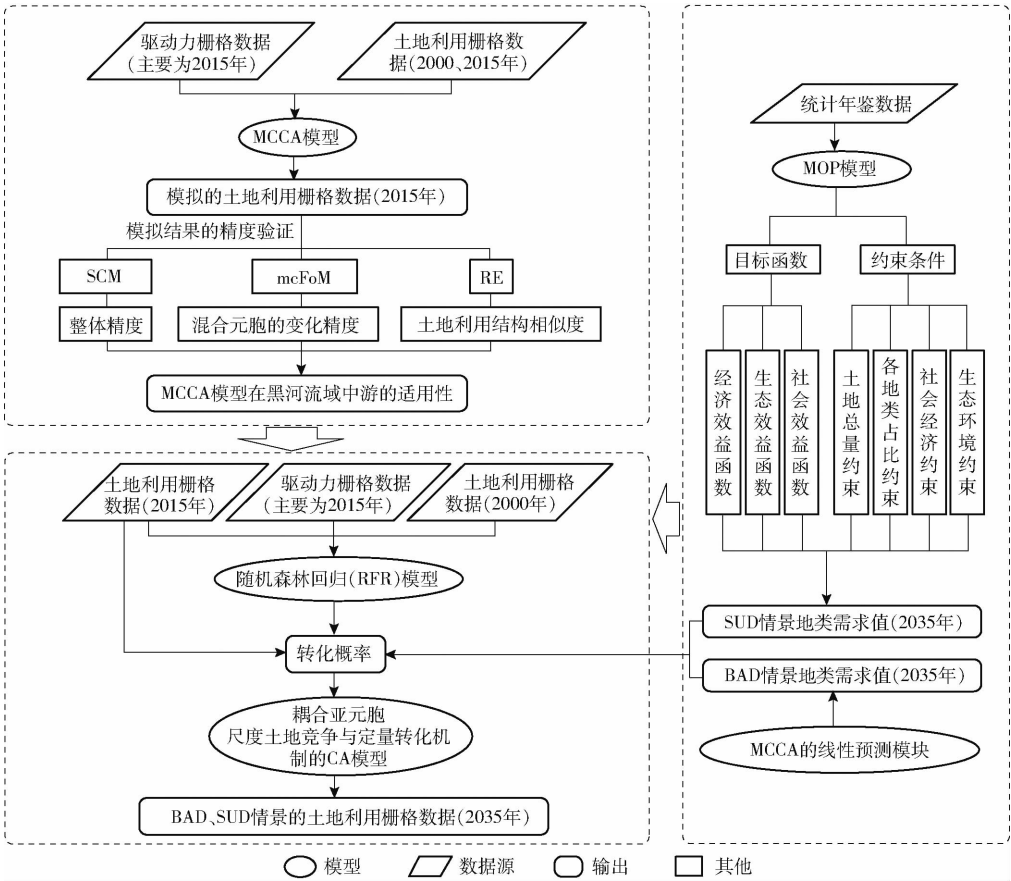


图 2 技术流程图

Fig. 2 Flow chart of this research

第 2 部分是耦合亚元胞尺度土地竞争与定量转化机制的 CA 模型。传统的 CA 模型基于纯净元胞进行模拟,每个元胞代表一个地类,这脱离了实际情况,现实中每个元胞内部含有多个地类;而 MCCA 模型基于混合元胞内部每种地类的占比进行模拟,即亚元胞。该模型通过驱动系数调节不同地类的变化方向,首先需要计算土地利用成分的总变化概率,计算公式为

$$O_{i,k}^t = P_{i,k} \Omega_{i,k}^t D_k^t \tag{1}$$

式中 t ——迭代次数 i ——混合元胞
 k ——地类组分 O ——总变化率
 P ——变化潜力 Ω ——领域效应
 D ——需求反馈

在计算过程中对 D_k^t 和 $O_{i,k}^t$ 进行归一化处理。MCCA 在进行空间分布模拟时,根据 $O_{i,k}^t$ 构建轮盘,轮盘的每个扇区代表一个地类;随机打乱各地类的顺序,每个地类通过轮盘与其他地类竞争。每个元胞有 k 轮竞争,每一轮竞争一个地类。当地类 k 在

其竞争中获胜时,地类 k 的数量会增加,其他地类将下降。然后通过一组数量转换规则估计转换为增加的地类的其他地类数量。当模拟的地类数值等于目标数值时,MCCA 将输出 k 层模拟结果,每层为一个地类的空间分布。

第 3 部分是 MCCA 模型模拟结果评价体系,主要包括亚像元混淆矩阵(Sub-pixel confusion matrix, SCM)、平均相对熵(Relative entropy, RE)和混合元胞质量系数(Mixed-cell figure of merit, mcFoM),分别表征模拟结果的整体精度、土地利用结构相似度和混合元胞的变化精度。SCM 越低说明模拟结果的整体精度越高,RE 越接近 0 说明模拟过程中信息丢失越少,mcFoM 越接近 1 说明模拟结果越准确。除此之外还有总体分类精度(Overall accuracy, OA)、生产者精度(Producer's accuracy, PA)和用户精度(User's accuracy, UA),均是越接近 1 模拟精度越高。

MCCA 模型采样率设置为 10%,回归树数目为

100,领域为 3;转换矩阵中 0 表示两种土地利用类型之间无法转换,1 表示可以转换,本研究在模拟过程中未设置限制转换区域;步长表示土地利用类型的转化率,经多次测试发现步长均为 1 时各项精度预测指标值最大。

(2)MCCA 模型数据源及预处理

2000 年和 2015 年的土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所的资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),为纯像元数据。该数据的每个像元表征一种地类,空间分辨率为 30 m(表 1)。通过 ArcGIS 10.2 软件的分区统计制表工具将这一数据聚合成空间分辨率为 250 m 的混合像元数据,并计算得到每个像元内部耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的覆盖比例数据。

表 1 MCCA 模型数据源信息

Tab.1 Research data information of MCCA model		
类型	数据	分辨率/m
土地利用数据	土地利用分类数据	30
	(2000、2015 年)	
	年均气温(2015 年)	1 000
自然环境驱动力数据	年均降水(2015 年)	1 000
	高程	30
	坡度	30
	坡向	30
社会经济驱动力数据	人口数量(2015 年)	1 000
	GDP(2015 年)	1 000
	像元与道路的距离	30
	像元与河流的距离	30
	像元与居民点的距离	30

其他表征土地利用变化的驱动力数据主要有自然环境数据(高程、坡度、坡向、河流矢量数据、2015 年的年均气温及年均降水量数据)和社会经济驱动力数据(道路矢量数据、居民点矢量数据、2015 年的人口和国内生产总值(Gross domestic product,GDP)),与土地利用数据的来源相同。ArcGIS 10.2 软件中的欧氏距离计算工具可处理得到每个像元与道路、河流、居民点的距离栅格数据,该数据的空间分辨率为 30 m。MCCA 模型提供类似于 ArcGIS 软件重采样的坐标对齐机制,不要求驱动力栅格数据具有统一的像元分辨率(见 MCCA 模型操作手册,下载网址:https://github.com/HPSCIL/Mixed_Cell_Cellullar_Automata)。考虑到大部分驱动力数据的空间分辨率为 30 m,为提高 MCCA 模型运行效率,通过 ArcGIS 10.2 软件中的重采样工具将驱动力数据的空间分辨率统一为 30 m。

1.2.2 普通线性回归模型

MCCA 模型主要用于土地利用空间结构可视化

模拟,该模型开发者研发的 MCCA 软件同时具有普通线性回归功能(图 2 中简称为 MCCA 的线性预测模块),该功能基于一次函数进行预测^[6]。除 MCCA 模型空间模拟需要的 2000 年和 2015 年的土地利用数据外,本文引入 2005 年和 2010 年各土地利用类型的面积数据对未来各地类面积进行线性回归预测,其来源和处理方法与 2000 年和 2015 年土地利用数据一致。

1.2.3 MOP 模型

MOP 模型包括目标函数和约束条件两部分,其研究结果对于认识未来的土地利用结构和当前土地利用规划具有参考价值^[26]。研究区面积为 1 073 078 hm²,本研究利用 MOP 算法,基于 Lingo 12.0 软件,对 2035 年各地类面积进行了优化。

(1) 目标函数

土地利用结构的优化应该遵循动态性、统筹兼顾和生态优先原则。土地系统内部的各个要素处在动态变化过程中。土地利用结构优化时应基于系统论观点,兼顾整体和局部、协调人地矛盾,保证人与自然和谐发展。

生态效益目标函数的确定能提高研究区的生态价值,增强生态服务功能,维持生态系统的稳定性。当前生态效益主要采用价值量估算,并用货币值量化。本研究采用谢高地等^[27]的中国生态系统服务价值当量因子表来估算生态效益,采用黑河中游张掖地区的粮食单位面积产量与全国粮食单位面积产量的比值作为修订系数。参考《中国统计年鉴》和《张掖年鉴》^[28-29],2015 年全国粮食单位面积的产量为 5 482.900 kg/hm²,全国粮食平均价格为 2.370 元/kg,张掖市同年的粮食单产为 7 198.260 kg/hm²,计算得到修订系数为 1.313。单位面积耕地生态系统服务价值当量因子的经济价值为本年度全国粮食单产价值的 1/7,其计算结果为 1 856 元/hm²。校正后耕地、林地、草地、水域和未利用地的生态效益分别为 16 840、53 250、17 650、112 040、1 020 元/hm²,建设用地的生态效益较低,本研究按零值计算。

黑河中游甘临高地区土地利用结构优化是为获得最大经济效益,经济效益目标的实现有利于提升工农业发展水平。本文采用每种地类单位面积的国内生产总值作为经济效益目标函数的系数。参考 2015 年相关统计年鉴的经济指标数据^[28-31],耕地、林地、草地、水域和建设用地的经济效益核算结果分别为 30 400、400、1 700、200、379 000 元/hm²。

社会效益主要包括粮食安全保障和农民生存保障,参考前人的研究,耕地、林地、草地、水域、建设用

地和未利用地的社会价值分别设置为 23 360、2 520、2 340、5 160、99 040、10 元/hm²^[32]。

(2) 约束条件

约束条件包括 3 部分:土地总量约束、社会经济约束和生态环境约束。研究区各种土地利用类型的约束条件主要参考 2015 年实际土地类型面积比例、各土地面积变化趋势以及普通线性回归模型得到的 2035 年土地类型面积比例。社会经济约束包括经济总量约束、土地开发强度约束和土地利用率约束。

生态环境约束包括生态承载力和生态绿当量两方面。

生态承载力是产量因子、均衡因子与各土地利用类型面积的乘积,用来衡量生态系统服务能力的上限^[33-34]。参考相关研究,耕地、林地、草地、水域和建设用地的均衡因子分别为 2.210、1.340、0.490、0.360 和 2.210^[35],产量因子分别为 1.310、0.910、0.390、0.980 和 1.660^[36-37],研究区的生态承载力应高于 2015 年(表 2)。

表 2 MOP 模型的目标函数和约束条件

Tab.2 Objective function and constraint conditions of MOP model

模型结构	名称	公式	描述
目标函数	经济效益函数	$f_1(x) = \max \sum_{i=1}^5 a_i x_i = \max (1\ 073\ 078 (30\ 400x_1 + 400x_2 + 1\ 700x_3 + 200x_4 + 379\ 000x_5))$	a_i 为各土地利用类型的经济效益系数(单位:元/hm ²)
	生态效益函数	$f_2(x) = \max \sum_{i=1}^5 b_i x_i = \max (1\ 073\ 078 (16\ 840x_1 + 53\ 250x_2 + 17\ 650x_3 + 112\ 040x_4 + 1\ 020x_5))$	b_i 为各土地利用类型的生态效益系数(单位:元/hm ²)
	社会效益函数	$f_3(x) = \max \sum_{i=1}^6 c_i x_i = \max (1\ 073\ 078 (23\ 360x_1 + 2\ 520x_2 + 2\ 340x_3 + 5\ 160x_4 + 99\ 040x_5 + 10x_6))$	c_i 为各土地利用类型的社会效益系数(单位:元/hm ²)
	SUD 情景	$f = \max(f_1(x), f_2(x), f_3(x))$	
约束条件	土地总量约束	$\sum_{i=1}^6 x_i = 1$	各土地利用类型面积比重之和保持不变
	各地类占比约束	$0.203 < x_1 < 0.249$	耕地以 2015 年的耕地覆盖度 0.203 为下限,以 2035 年的耕地覆盖度为上限,普通线性回归预测 2035 年的耕地覆盖度为 0.249
		$x_2 > 0.011$	未来的林地面积应高于 2015 年
		$0.133 < x_3 < 0.140$	以 2015 年的草地覆盖度 0.140 为上限,以 2035 年普通线性回归预测的草地覆盖度 0.133 为下限
		$0.023 < x_4 < 0.024$	以 2015 年的水域面积比例 0.023 为上限,以 2035 年普通线性回归预测的水域面积比例 0.024 为下限
	社会经济约束	$x_5 > 0.021$	以 2015 年建设用地面积比例 0.021 为下限
		$0.560 < x_6 < 0.602$	以 2035 年的未利用地面积比例 0.560 为下限,以 2015 年普通线性回归预测的未利用地面积比例 0.602 为上限
		$x_5 \leq 0.200$	土地开发强度系数:以国际宜居标准中的土地开发强度比例为准
		$\sum_{i=1}^5 x_i \geq 0.440$	土地利用率约束:2035 年的土地利用率应大于普通线性回归预测值
		$1\ 073\ 078 (30\ 400x_1 + 400x_2 + 1\ 700x_3 + 200x_4 + 379\ 000x_5) \geq 14\ 390 \times 1\ 073\ 078$	经济总量约束:经济总量高于现状
生态环境约束		$1\ 073\ 078 (2.895x_1 + 1.219x_2 + 0.191x_3 + 0.353x_4 + 3.669x_5) \geq 0.714 \times 1\ 073\ 078$	生态承载力约束:生态承载力高于现状
		$1\ 073\ 078 (0.316x_1 + x_2 + 0.331x_3) \geq 0.122 \times 1\ 073\ 078$	生态绿当量约束:生态绿当量高于现状

注: $x_1 \sim x_6$ 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的面积比例,研究区总面积为 1 073 078 hm²。

生态绿当量主要用于衡量某一区域生态环境的优劣。因地制宜确定本研究区的耕地、林地、草地均为拥有绿当量的土地。生态绿当量计算公式为

$$G = \frac{F_i}{F_2} \quad (i = 1, 2, 3)$$

(2)

式中 F ——生态服务功能价值系数
 i 等于 1 为耕地, i 等于 2 为林地, i 等于 3 为草地。

2 结果与分析

2.1 MCCA 模型适用性评价

2.1.1 模型精度评价

采用 OA、Kappa 系数、mcFoM、RE、PA 和 UA 等参数评估 MCCA 模型的预测精度。OA、Kappa 系数和 mcFoM 的计算结果分别为 0.934、0.886 和 0.261。所有地类的 PA 和 UA 均高于 0.700，且除林地和建设用地外其他土地利用类型的 PA 和 UA 均高于 0.800。RE 越低，模拟过程中损失的信息量越少，说明模型模拟结果与实际结果更相符。模拟结果和实际土地利用数据之间的 RE 均值为 0.508，表明模拟过程中信息损失较少，二者之间的相似度高。各项评估指标值均较理想，这说明模型可用于预测黑河中游甘临高地区未来的土地利用变化情况。

采用 MCCA 模型分别计算耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的 2015 年模拟结果和实际土地利用分布数据较 2000 年的变化情况，变化程度为 -1~1，值为正表示土地利用类型的面积在扩张，值为负则表示减少。可以发现所有土地利用类型的变化区域基本吻合，变化地类的位置拟合效果较好，

变化的斑块数量差异不明显。各土地利用成分的模拟结果与真实情况的变化规律基本一致，仅有少数像元在变化程度上存在差异(图 3，图中左图为实际的土地利用成分的变化程度，右图为模拟的土地利用成分的变化程度)。

2.1.2 与基于纯净元胞的 PLUS 模型模拟结果对比

为更深入探究基于混合元胞的 MCCA 模型的优越性，使用 PLUS 模型对空间分辨率 250 m 的纯像元土地利用结构数据进行模拟，模拟结果的 FoM、Kappa 系数、OA 分别为 0.117、0.853、0.916，而 MCCA 模型的 OA、Kappa 系数和 mcFoM 的计算结果分别为 0.934、0.886 和 0.261。据此可以确认 MCCA 模型的模拟结果与地表实际状况吻合度更高，能够很好地模拟复杂土地利用结构。

2.1.3 MCCA 模型在研究区的最适模拟尺度

不同模型对于栅格尺度的要求存在差异。LIANG 等^[6]采用 4 种空间分辨率(250、500、750、1 250 m)的混合像元验证 MCCA 模型的模拟精度，发现 250 m 的模拟精度最高。鉴于此本文将混合像元空间分辨率缩小至 250~500 m 之间进一步确定最佳的混合像元大小，结果表明在 250、300、350、400、450、500 m 的混合像元中，依然是 250 m 混合像

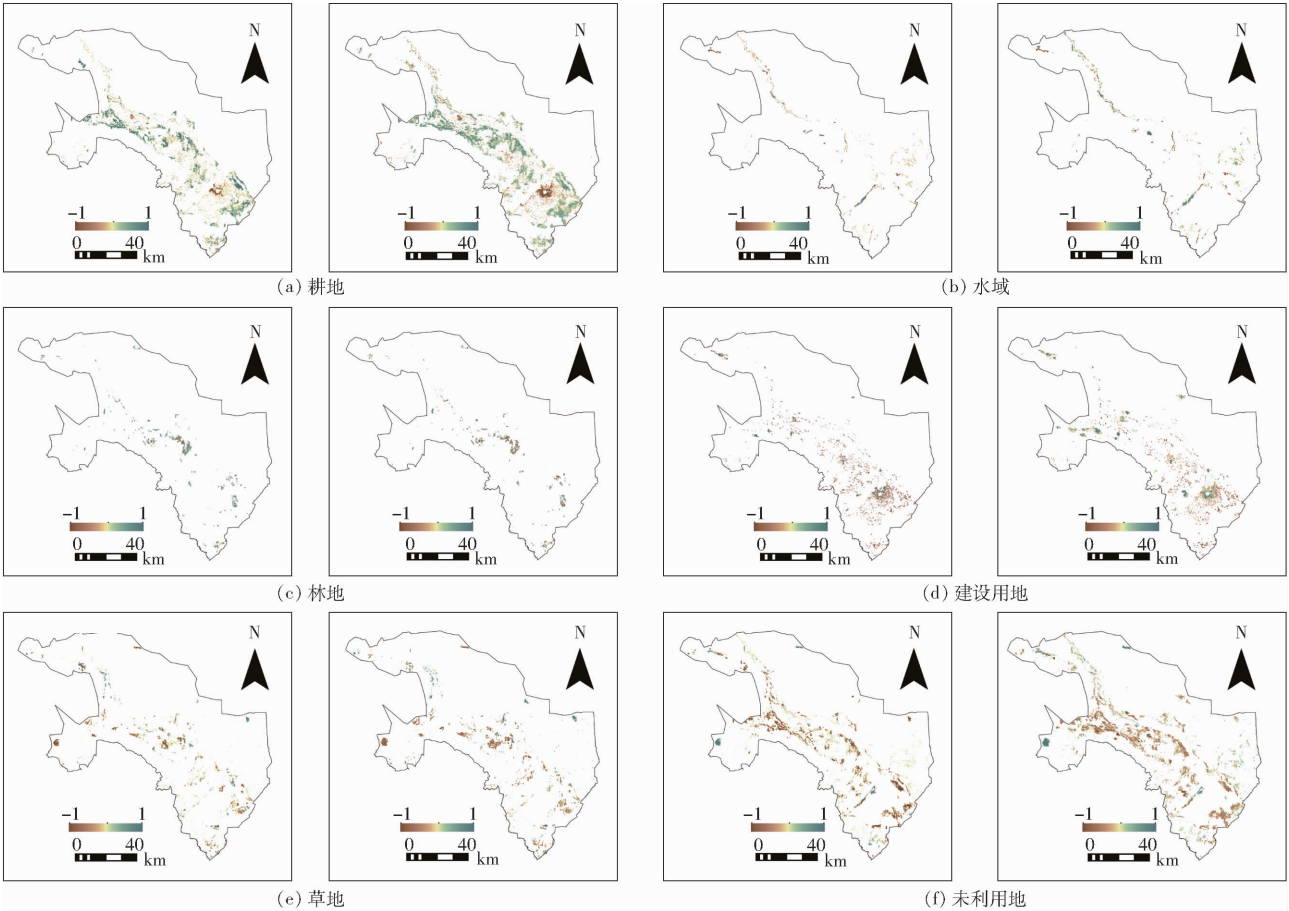


图 3 2000—2015 年实际和模拟的土地利用成分变化程度

Fig. 3 Actual and simulated land use changes during 2000—2015

元模拟精度最高。不同栅格尺度的模拟准确度评价指标值见图 4,6 种栅格尺度模拟结果的 OA 均高于 0.920,RE 均值均低于 0.550,Kappa 系数均高于 0.870,mcFoM 均高于 0.210。随着混合像元的增大,RE 均值波动上升,说明栅格尺度越大模拟过程中丢失的栅格信息越多;OA、Kappa 系数和 mcFoM 则波动降低,说明 MCCA 模型的拟合准确度随着栅格尺度的增大而趋于降低。

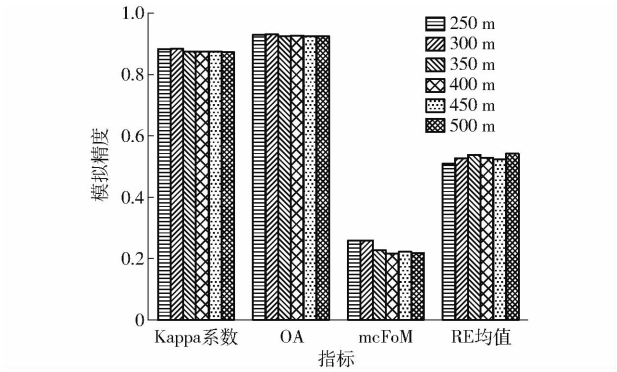


图 4 不同栅格尺度的模拟精度

Fig. 4 Simulation accuracy of different raster scales

2.2 2035 年不同情景预测结果

预知未来的土地利用情况对维持生态系统的稳定性有重要意义,本文基于普通线性回归模型的 BAD 情景中 2015—2035 年期间耕地、水域和建设用地逐年递增(图 5)。说明随着城市化进程的加快,二三产业的投资明显增多,建设用地面积迅速扩

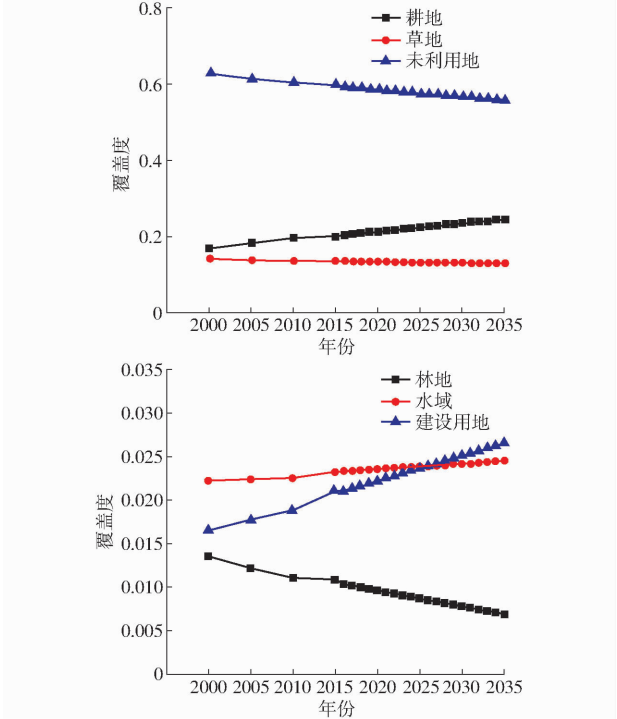


图 5 研究区 2000—2015 年实际的和 2015—2035 年预测的土地利用类型覆盖度

Fig. 5 Actual (2000—2015) and predicted (2015—2035) land use proportions in study area

张。尤其是人口老龄化导致二孩政策开放,人口数量的增加对粮食的需求量加大,耕地面积也在逐年上升。BAD 情景中草地、林地和未利用地类型逐年递减,表明生态环境在逐渐恶化。

BAD 和 SUD 情景的耕地、水域和建设用地均较 2015 年有所增长,而草地则低于 2015 年。SUD 情景中 2035 年的林地面积占比明显高于 BAD 情景,草地略高于 BAD 情景,而耕地、建设用地和未利用地则略低于 BAD 情景。SUD 情景占用的未利用土地较少,说明 SUD 情景的经济发展状况有利于保护脆弱的生态环境(表 3)。

表 3 不同情景下的 2035 年土地利用面积占比预测结果
Tab.3 Land use percentage under different scenarios in 2035

类型	2015 年	2035 年	
		普通线性回归模型- BAD 情景	MOP 模型- SUD 情景
耕地	0. 203	0. 249	0. 245
林地	0. 011	0. 007	0. 011
草地	0. 140	0. 133	0. 133
水域	0. 023	0. 024	0. 024
建设用地	0. 021	0. 027	0. 027
未利用地	0. 602	0. 560	0. 560

MCCA 模型对 2035 年地类结构进行空间可视化的结果显示(图 6,水域变化程度较小,故未列出),BAD 情景中研究区的耕地不断向外扩张,侵占林地和草地;SUD 情景的耕地和草地变化趋势与 BAD 情景一致,但是占用林地的现象较少。IPCC 报告指出 2016—2035 年全球气温和降水会逐年增加^[38],研究区的水域范围的增加验证了这一结论。随着城市化进程的加快,两种情景中城镇用地和农村用地均在原有基础向外扩张,甘州区的市区范围扩展尤为明显;高台县和临泽县的城市发展依托于交通网络,未来在城市周边的交通集散地将形成较大的卫星城。两种情景中的建设用地和耕地在未来 20 年将向未利用地延伸,现有的沙漠和耕地交界处在未来有极大可能转变为农耕区,这可能是经济技术发展以及政策引导的结果。但是并不是所有的建设用地均会向外扩展,MCCA 模型的模拟结果可能与现实情况存在少数不一致之处,比如临泽北部的工矿用地未来可能会萎缩,而模拟的结果却显示该区域将会扩张,这可能是因为 MCCA 模型模拟过程中受到驱动因素时间滞后性的影响。

2.3 2015 年与 2035 年的土地资源价值核算

通过量化 2035 年 BAD 情景下的生态效益、经济效益、社会效益(表 4)可以发现,2035 年综合效

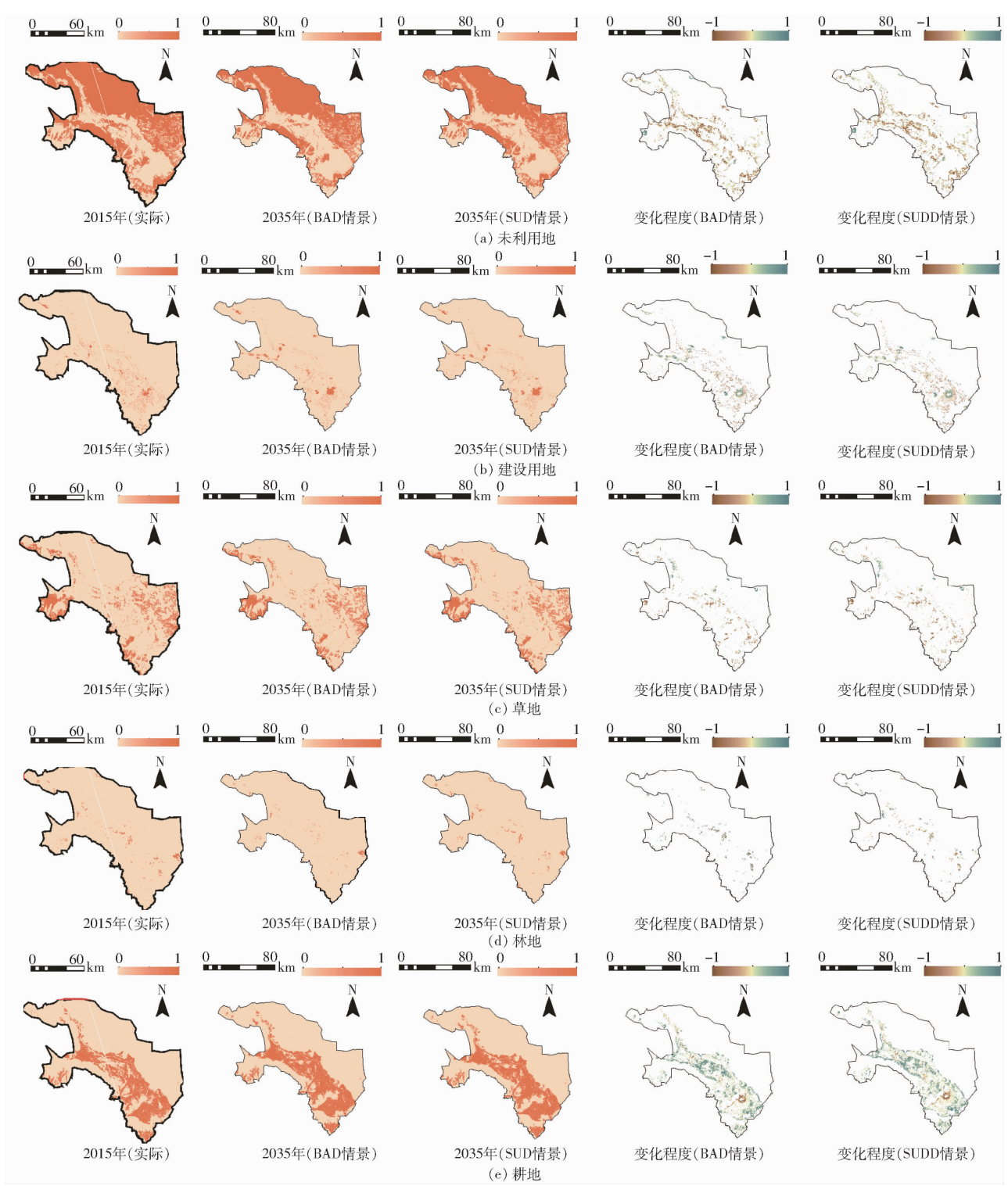


图 6 2015 年实际土地利用结构、2035 年模拟土地结构和 2015—2035 年土地利用成分变化程度

Fig. 6 Actual land use structure in 2015, simulated land use structure in 2035, and change of land use percentage during 2015—2035

益达 3 504 943 万元,而 2015 年仅为 2 930 312 万元。BAD 情景下耕地、水域和建设用地的 3 种效益均增加,且耕地及建设用地的效益增速较水域快。西部大开发战略的实施带动经济发展,企业投资增加,建设用地随之扩张。国家人口政策的实施带动了未来总人数的上涨,粮食需求量大增,农用地面积增加。BAD 情景虽然经济效益快速增加,

但是生态效益增速较慢,社会效益增速居中。BAD 情景下林地生态效益、经济效益和社会效益均明显降低。

2015 年研究区建设用地的经济效益、社会效益分别为 854 144、223 213 万元,而 2035 年 SUD 情景下则分别增至 1 077 746、281 647 万元。黑河中游甘临高地区的经济总量持续增长,建设用地的范围大

表 4 研究区不同情景效益对比

Tab.4 Benefit comparison of different scenario in study area

类型	2015 年			2035 年 BAD 情景			2035 年 SUD 情景		
	生态效益	经济效益	社会效益	生态效益	经济效益	社会效益	生态效益	经济效益	社会效益
耕地	212 761	663 444	509 783	260 454	812 166	624 059	256 253	799 065	613 992
林地	36 021	467	2 948	22 752	295	1 862	36 057	468	2 951
草地	153 330	25 520	35 082	145 717	24 253	33 340	145 719	24 253	33 341
水域	161 392	498	12 843	170 092	525	13 535	170 092	525	13 535
建设用地		854 144	223 213		1 077 990	281 711		1 077 746	281 647
未利用地	38 285		581	35 651		541	35 651		541
各效益总和	601 789	1 544 073	784 450	634 666	1 915 229	955 048	643 772	1 902 057	946 007
综合效益		2 930 312			3 504 943			3 491 836	

幅扩张。2035 年耕地面积得到了优化,耕地的各项效益高于 2015 年。但是耕地并未盲目扩张,占用林地的现象较少,增加的耕地主要是未利用地和草地演变而来,这有利于保障资源的可持续利用。2035 年 SUD 情景下草地和未利用地的效益略低于 2015 年,而林地与 2015 年持平。这说明政府在发展经济的同时注重保护环境。

2035 年 SUD 情景和 BAD 情景中林地的生态效益分别为 36 057、22 752 万元,SUD 情景的生态效益较 BAD 情景增速更快。SUD 情景较 BAD 情景更好地协调了生态、经济和社会三者之间的关系。SUD 情景建设用地和耕地各效益的增速低于 BAD 情景,而林地的三大效益高于 BAD 情景,工农业用地的适度增加有助于维持社会稳定、保障粮食安全和保护生态环境。尤其是西北干旱区生态脆弱,环境问题突出,保护环境势在必行。

3 讨论

3.1 基于混合元胞的 MCCA 模型模拟精度和时间跨度分析

MCCA 模型能够自下而上生成优化的土地利用空间格局,改进了传统的纯像元 CA 模型,混合元胞的转化规则是定量的,其邻域和元胞空间的状态具有混合、连续和多维的特点,与传统元胞土地利用成分离散、一维和定性相反,是从定性的静态模拟到定量的动态模拟的跨越^[6]。因此,MCCA 模型较基于纯净元胞的 PLUS 模型的模拟准确度更高,本文的研究结果证实了这一点。而 LIANG 等^[6]将 MCCA 模型与基于纯净像元的未来土地利用(Future land use simulation model,FLUS)模型进行对比分析同样得出基于混合元胞的 MCCA 模型模拟准确度更高。

受到现实情况的制约,MCCA 模型未统一两期现有数据的时间跨度与现有数据-预测年份数据的时间跨度,PLUS、FLUS 和 CLUE-S 等空间模拟模型也存在类似问题。这类模型通常是基于土地利用

栅格数据以及驱动力栅格数据采用回归算法(如随机森林回归、人工神经网络和逻辑斯蒂回归等算法)挖掘不同地类与驱动力因素之间的关系^[6,39-40];然后基于现有的土地利用数据中各地类的面积,采用数量预测模型(如马尔科夫链、灰色预测模型、多目标线性优化模型和系统动力学模型等)预测未来指定年份的地类面积,因此时间跨度的不统一在地类面积数值预测方面存在合理性^[41];最后基于基期土地利用栅格数据、地类变化可能性和未来指定年份的地类面积进行预测,获得未来的土地利用栅格数据。当研究中可获得栅格数据之间时间跨度过短时,考虑到社会发展的惯性及预测年份数据的参考作用,本研究未统一时间跨度。

3.2 不同情境效益分析和 MOP 模型优势

多目标空间优化问题较为复杂,需要同时兼顾多方面因素^[42]。MOP 模型采用自上而下的方式解决复杂土地系统问题,具备强大的数据处理能力,能够在综合考虑生态效益、经济效益和社会效益的基础上,从多个方面优化土地利用结构^[43]。而普通线性回归模型仅从各地类面积的数量变化方面进行分析,难以实现土地优化配置的目的。将基于普通线性回归的 BAD 情景与基于 MOP 算法的 SUD 情景进行对比,计算不同情景下各土地利用类型的生态效益、经济效益和社会效益,发现 2035 年土地优化配置的 SUD 情景综合效益远高于 2015 年,虽然其经济效益和社会效益略低于 BAD 情景,但生态效益明显高于 2015 年,这有利于缓解当地脆弱的生态环境。而将 MOP 和 MCCA 进行耦合模拟 2035 年研究区的土地利用空间结构,能够充分利用数量模拟模型和空间模拟模型的优势,实现未来土地利用结构的可视化,为相关部门进行土地规划和生态修复提供参考。

4 结论

(1) 采用 Kappa 系数、OA、PA、UA、RE 和

mcFoM 等指标进行精度验证,各项指标的计算结果均说明 MCCA 模型的模拟准确度高,且 MCCA 模型的模拟精度明显优于基于纯净元胞的 PLUS 模型,这验证了 MCCA 模型在黑河中游甘临高地区具有高度适用性。为进一步确定最佳像元尺度,选择分辨率 250、300、350、400、450、500 m 的混合元胞数据进行模拟,结果表明分辨率为 250 m 时模型模拟精度最高,Kappa 系数、mcFoM 和平均 RE 分别为 0.886、0.261 和 0.508,因此采用 250 m 的混合像元数据预测 2035 年的土地利用结构。

(2)在基于普通线性回归模型的 BAD 情景中,

2000—2035 年期间的耕地、水域和建设用地范围逐年增加,林地、草地和未利用地则相反,存在工农业用地占用林草地的现象。SUD 情景的建设用地、草地和未利用地的变化趋势与 BAD 情景基本一致。但 SUD 情景耕地的增加速率较 BAD 情景偏低,其 2035 年林地的范围大于 BAD 情景,该情景中工农业用地占用林草地的情况较少。SUD 情景的经济效益和社会效益略低于 BAD 情景,而生态效益明显高于 BAD 情景。这说明基于多目标线性规划(MOP)模型与 MCCA 模型的 SUD 情景能够实现土地优化配置,在发展工农业的同时保护生态环境。

参 考 文 献

[1] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报,2018,73(5):789-802.
LIU Jiuyan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802. (in Chinese)

[2] TOBLER W R. Cellular geography[M]. Springer, 1979: 379-386.

[3] WESTMAN W E. How much are nature's services worth? [J]. Science, 1977, 19: 43-47.

[4] 戴尔阜,马良. 土地变化模型方法综述[J]. 地理科学进展,2018,37(1):152-162.
DAI Erfu, MA Liang. Review on land change modeling approaches[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 152-162. (in Chinese)

[5] 赵莉,杨俊,李闯,等. 地理元胞自动机模型研究进展[J]. 地理科学,2016,36(8):1190-1196.
ZHAO Li, YANG Jun, LI Chuang, et al. Geographic cellular automata model research progress[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(8): 1190-1196. (in Chinese)

[6] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Mixed-cell cellular automata: a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J]. Landscape Urban Plan, 2021, 205: 1-17.

[7] 杨露,颜耀文,宗乐丽,等. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置[J]. 地球信息科学学报,2020,22(3):568-579.
YANG Lu, XIE Yaowen, ZONG Leli, et al. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS model of agro-pastoral ecotone in Northwest China[J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(3): 568-579. (in Chinese)

[8] MOHAMED A, WORKU H. Simulating urban land use and cover dynamics using cellular automata and Markov chain approach in Addis Ababa and the surrounding[J]. Urban Climate, 2020, 31: 1-17.

[9] LYU R, MI L, ZHANG J, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH-3r model and InVEST model[J]. Ecological Research, 2019, 34(3): 380-393.

[10] ZHAO M, HE Z, DU J, et al. Assessing the effects of ecological engineering on carbon storage by linking the CA-Markov and InVEST models[J]. Ecological Indicators, 2019, 98: 29-38.

[11] 卞子浩,马小雪,龚来存,等. 不同非空间模拟方法下 CLUE-S 模型土地利用预测——以秦淮河流域为例[J]. 地理科学,2017,37(2):252-258.
BIAN Zihao, MA Xiaoxue, GONG Laicun, et al. Land use prediction based on CLUE-S model under different non-spatial simulation methods: a case study of the Qinhuai River watershed[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 252-258. (in Chinese)

[12] 陆汝成,黄贤金,左天惠,等. 基于 CLUE-S 和 Markov 复合模型的土地利用情景模拟研究——以江苏省环太湖地区为例[J]. 地理科学,2009,29(4):577-581.
LU Rucheng, HUANG Xianjin, ZUO Tianhui, et al. Land use scenarios simulation based on CLUE-S and Markov composite model[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 577-581. (in Chinese)

[13] 马欢,于强,岳德鹏,等. 基于 MAS-LCM 的沙漠化空间模拟方法研究[J]. 农业机械学报,2017,48(10):134-141.
MA Huan, YU Qiang, YUE Depeng, et al. Spatial simulation method of desertification based on MAS-LCM model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 134-141. (in Chinese)

[14] 林伊琳,赵俊三,陈国平,等. 基于 MCR-FLUS-Markov 模型的区域国土空间格局优化[J]. 农业机械学报,2021,52(4):159-170.
LIN Yilin, ZHAO Junsan, CHEN Guoping, et al. Optimization of regional territory space pattern based on MCR-FLUS-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 159-170. (in Chinese)

[15] PONTIUS G R, MALANSON J. Comparison of the structure and accuracy of two land change models[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2005, 19(2): 243-265.

[16] MARULL J, PINO J, TELLO E, et al. Social metabolism, landscape change and land-use planning in the Barcelona metropolitan region[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 497-510.

[17] WANG Y, LI X, ZHANG Q, et al. Projections of future land use changes: multiple scenarios-based impacts analysis on ecosystem services for Wuhan City, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 430-445.

[18] LIANG X, GUAN Q, CLARKE K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021,

- 85: 1 – 14.
- [19] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [20] FORRESTER J W. Principles of systems[M]. MIT, MA: Wright-Allen Press, 1968.
- [21] SADEGHI S H R, JALILI K, NIKKAMI D. Land use optimization in watershed scale[J]. Land Use Policy, 2009, 26(2): 186 – 193.
- [22] WANG S, WANG X, ZHANG H. Simulation on optimized allocation of land resource based on DE – CA model[J]. Ecological Indicators, 2015, 314: 135 – 144.
- [23] KAIM A, CORD A F, VOLK M. A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 105: 79 – 93.
- [24] 梁友嘉,徐中民,钟方雷. 基于 SD 和 CLUE – S 模型的张掖市甘州区土地利用情景分析[J]. 地理研究,2011,30(3): 564 – 576.
- LIANG Youjia, XU Zhongmin, ZHONG Fanglei. Land use scenario analyses by based on system dynamic model and CLUE – S model at regional scale: a case study of Ganzhou District of Zhangye City[J]. Geographical Research, 2011, 30(3): 564 – 576. (in Chinese)
- [25] 张华,张勃,孟宝,等. 张掖市土地利用/覆盖变化模拟[J]. 遥感技术与应用,2004,19(5):359 – 363.
- ZHANG Hua, ZHANG Bo, MENG Bao, et al. Land use and land cover change modeling in Zhangye City[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(5): 359 – 363. (in Chinese)
- [26] NEWLAND C P, MAIER H R, ZECCHIN A C, et al. Multi-objective optimisation framework for calibration of cellular automata land-use models[J]. Environmental Modelling & Software, 2018, 100: 175 – 200.
- [27] 谢高地,鲁春霞,肖玉,等. 青藏高原高寒草地生态系统服务价值评估[J]. 山地学报,2003,21(1):50 – 55.
- XIE Gaodi, LU Chunxia, XIAO Yu, et al. The economic evaluation of grassland ecosystem services in Qinghai – Tibet Plateau [J]. Mountain Research, 2003, 21(1): 50 – 55. (in Chinese)
- [28] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [29] 张掖年鉴编纂委员会. 张掖年鉴[M]. 兰州:敦煌文艺出版社,2015.
- [30] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [31] 甘肃发展年鉴编委会. 甘肃发展年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2015.
- [32] 郭杰,吴斌,欧名豪,等. 兰州市多目标区域土地利用系统优化研究[J]. 中国土地科学,2011,25(7):72 – 79.
- GUO Jie, WU Bin, OU Minghao, et al. Multi-objectives optimization of regional land use in Lanzhou City[J]. China Land Science, 2011, 25(7): 72 – 79. (in Chinese)
- [33] 白艳莹,王效科,欧阳志云,等. 苏锡常地区生态足迹分析[J]. 资源科学,2003,25(6):31 – 37.
- BAI Yanying, WANG Xiaoke, OUYANG Zhiyun, et al. Ecological footprints of south Jiangsu Province: the case of Suzhou – Wuxi – Changzhou region[J]. Resources Science, 2003, 25(6): 31 – 37. (in Chinese)
- [34] 徐中民,张志强,程国栋. 可持续发展定量研究的几种新方法评介[J]. 中国人口·资源与环境,2000,10(2):61 – 65.
- XU Zhongmin, ZHANG Zhiqiang, CHENG Guodong. Review indicators of measuring sustainable development[J]. China Population, Resources and Development, 2000, 10(2): 61 – 65. (in Chinese)
- [35] 余慧容,蒲春玲,李玉,等. 绿洲城市土地利用多目标优化研究——以新疆奎屯市为例[J]. 中国沙漠,2013,33(4): 1267 – 1272.
- YU Huirong, PU Chunling, LI Yu, et al. Multi-objective land-use optimization of oasis city: a case study in Kuytun, Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1267 – 1272. (in Chinese)
- [36] 徐中民,程国栋,张志强. 生态足迹方法:可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例 [J]. 生态学报,2001,21(9):1484 – 1493.
- XU Zhongmin, CHENG Guodong, ZHANG Zhiqiang. Measuring sustainable development with the ecological footprint method—take Zhangye prefecture as an example[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(9): 1484 – 1493. (in Chinese)
- [37] 周朕,蒙古军. 基于改进生态足迹模型与生态重要性识别的最小生态用地优化——黑河中游案例研究[J]. 干旱区地理,2016,39(3):513 – 520.
- ZHOU Lian, MENG Jijun. Optimization of minimum ecological land based on modified ecological footprint model and ecological importance assessment: a case of middle reaches of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2016, 39(3): 513 – 520. (in Chinese)
- [38] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 159 – 254.
- [39] LIU X P, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94 – 116.
- [40] VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamis of regional land use: the CLUE – S model[J]. Environmental Management, 2002, 30(3): 391 – 405.
- [41] 赵冬玲,杜萌,杨建宇,等. 基于 CA – Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. 农业机械学报,2016,47(3):278 – 285.
- ZHAO Dongling, DU Meng, YANG Jianyu, et al. Simulation and forecast study of land use change based on CA – Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 278 – 285. (in Chinese)
- [42] 王华,陈梦奇,蔡恩香,等. 基于多目标粒子群优化算法的永久基本农田划定模型[J]. 农业机械学报,2021,52(8):138 – 146.
- WANG Hua, CHEN Mengqi, CAI Enxiang, et al. Permanent basic farmland delineation model based on multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 138 – 146. (in Chinese)
- [43] 曹帅,金晓斌,杨绪红,等. 耦合 MOP 与 GeoSOS – FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化[J]. 自然资源学报, 2019,34(6):1171 – 1185.
- CAO Shuai, JIN Xiaobin, YANG Xuhong, et al. Coupled MOP and GeoSOS – FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan District[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(6): 1171 – 1185. (in Chinese)