

DOI: 10.5846/stxb201812032636

郝晓敬, 张红, 徐小明, 王荔, 崔严. 晋北地区土地利用覆被格局的演变与模拟. 生态学报, 2020, 40(1): 257-265.

Hao X J, Zhang H, Xu X M, Wang L, Cui Y. Evolution and simulation of land use/land cover pattern in northern Shanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 257-265.

晋北地区土地利用覆被格局的演变与模拟

郝晓敬¹, 张红^{1,*}, 徐小明², 王荔¹, 崔严¹

¹ 山西大学环境与资源学院, 太原 030006

² 伊利诺伊大学大气科学系, 厄巴纳 IL61801

摘要: 区域土地利用覆被变化及未来发展情景对区域土地管理和可持续发展具有重要意义。以地处农牧交错带、土地利用覆被变化剧烈的晋北地区为研究区, 获取其 2010、2015 年的土地利用覆被 (Land use/land cover, LULC) 数据, 选取高程、人口、经济、气温、降水等 9 种影响因素作为驱动因子, 采用 CLUE-S 模型拟合研究区 2015 年的土地覆被格局并判断拟合精度, 在此基础上, 分别设置了 3 种社会经济发展情景, 模拟这些情景下研究区 2020 年的土地利用覆被格局演变。结果表明: 1) 晋北地区土地利用覆被以耕地、林地和草地为主, 各类型土地主要呈西北斜向的条带状分布; 2) Logistic 回归模型可以很好地提取 LULC 与驱动因子之间的关系, 反映不同的驱动因素对不同的土地利用类型分布格局的影响效果及程度; 3) CLUE-S 模型在晋北地区土地利用覆被格局的拟合上有较好的精度, 模拟 Kappa 系数值达 0.89, 表明该模型能够很好地模拟晋北地区的土地利用覆被; 4) 情景模拟结果表明, 研究区生态保护情景 (c) 下的土地利用覆被格局明显优于维持现状情景 (a) 和经济优先情景 (b), 建议在未来土地开发利用过程中, 应当减缓工矿用地增加速度, 严格控制建设用地规模, 优化土地利用格局。

关键词: 土地利用覆被变化; 驱动因子; 情景模拟; CLUE-S 模型

Evolution and simulation of land use/land cover pattern in northern Shanxi Province

HAO Xiaojing¹, ZHANG Hong^{1,*}, XU Xiaoming², WANG Li¹, CUI Yan¹

¹ College of Environment and Resource Sciences, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

² Department of Atmospheric Sciences, University of Illinois, Urbana IL61801, USA

Abstract: Regional land use/cover change and future development scenarios are of great significance for the regional sustainable development and land management. In this study, we selected northern Shanxi province, an agro-pastoral ecotone, as the research area. The land use/land cover (LULC) maps of the study area in 2010 and 2015, as well as the driving factors including elevation, population, economy, temperature, and precipitation were extracted from various national-level datasets. We first used the CLUE-S model to simulate the LULC of 2015 based on 2010 LULC data and driving factors, and evaluated the simulation accuracy with the obtained 2015 LULC data. Then, we used the evaluated CLUE-S model to simulate the LULC patterns in 2020 under three future development scenarios. The results showed that the LULC of northern Shanxi was dominated by cultivated land, forestland, and grassland. The LULCs mainly distributed in strip-shapes toward the northwest. The logistic regression model could extract the relationship between LULC and driving factors well, and reflected the effect and degree of different driving factors on the LULC pattern. The CLUE-S model had high accuracy in fitting the LULC of northern Shanxi, with a Kappa coefficient of 0.89. The scenario simulation showed that

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41871193, U1810101); 山西省科技重大专项 (20121101011); 山西省应用基础研究计划 (201601D021111)

收稿日期: 2018-12-03; **网络出版日期:** 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghong@sxu.edu.cn

the LULC under the environmental protection scenario (c) was more sustainable than the business-as-usual scenario (a) and economic development scenario (b) in the study area. The results suggest that the increasing rate of the industrial and mining land should be slowed down, and the size of construction land should be strictly controlled in future land development, and the LULC pattern should be further optimized.

Key Words: land use/cover change; driving factors; scenarios simulation; CLUE-S model

土地利用覆被变化对区域生态经济系统的可持续发展和全球环境有着重要的影响。土地利用覆被变化改变了区域的自然景观、物质循环、能量流动以及各种生态过程^[1],进而引起全球生态系统发生变化^[2-3]。土地利用覆被(Land use/land cover, LULC)格局的演变与模拟已经成为研究区域和全球生态系统变化的主要趋势和潮流^[4]。

LULC 的演变是一个复杂的过程^[5-6],对这个复杂过程进行建模具有挑战性。LULC 的演变实际上是社会经济文化因素与土地潜力相互作用的结果,也是人类为了生存发展不断开发自然资源这一动态过程的开始^[7],各种驱动因子在不同的时空尺度上以复杂的方式影响着土地利用覆被变化^[8],从而在局部、区域乃至全球尺度上影响着经济、社会和环境发生变化^[9]。

LULC 模拟前提是假设区域 LULC 格局受该区域土地利用覆被需求驱动,区域 LULC 格局与该区域土地需求以及自然环境和社会经济状况长期处于动态平衡之中,基于历史时期的变化可预测未来 LULC 格局并采用有效的管理政策将生态系统引导到期望的路径^[10]。

LULC 动态预测与模拟主要包括数量预测和时空格局模拟。随着研究的深入,土地利用覆被变化的研究逐渐从简单的数量预测转向复杂的时空格局演变模拟。众多学者运用了多种模型及其相互间的组合模型对区域的土地利用覆被演变进行了分析研究,如 CA、CLUE、Markov、CLUE-S 等^[11-12],这些模型可以通过 GIS 环境下的遥感数据提供对土地利用覆被变化的适当识别,使 LULC 预测与模拟发生革命性的变化^[13]。

晋北地区位于黄土高原农牧交错带,分布有大量矿产资源,因长期受自然因素和人类活动的综合影响,生态环境变得极其敏感。近些年,在人口数量及经济快速增长的背景下,该区域土地利用变化剧烈。徐小明等研究了晋北地区 1986—2010 年土地利用变化的时空格局及其驱动力,由此结合不同时期政策导向和特征推断出土地利用变化的原因^[14],Xu 等采用 CA-Markov 预测了晋北地区 2020 年的土地利用变化,但其影响因子未考虑 GDP、人口等社会经济因素^[15]。因此,研究近年来该区域土地利用覆被的演变情况以及影响因素,并预测未来不同情景下土地利用的时空分布,对优化区域土地利用格局,促进生态、经济和社会协调发展有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

晋北地区地处 38°39'56"—40°44'35"N, 110°56'30"—114°32'30"E 之间,位于黄土高原地区的东北部边缘,包括大同市部分县区、朔州市所有县区及忻州市的部分县区,属于温带大陆性季风气候,四季分明。区内山岳、丘陵、盆地交错分布,地质地貌结构复杂,是我国典型的农牧交错带(图 1)。受地理位置、生态环境等自然因素的影响,晋北地区的矿藏资源丰富,但水资源十分匮乏,水土流失和土地沙化现象严重,生态环境脆弱。

1.2 数据来源与处理

本文采用的土地利用覆被数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),在 ArcGIS 中进行数据提取、裁剪等步骤,得到晋北地区 2010 和 2015 年的 LULC 数据,空间分辨率为 1km×1km。结合研究区特点,将土地利用覆被分为 8 类:耕地(0)、林地(1)、草地(2)、居民用地(3)、工矿用地(4)、水域(5)、盐碱地(6)、裸地(7)。

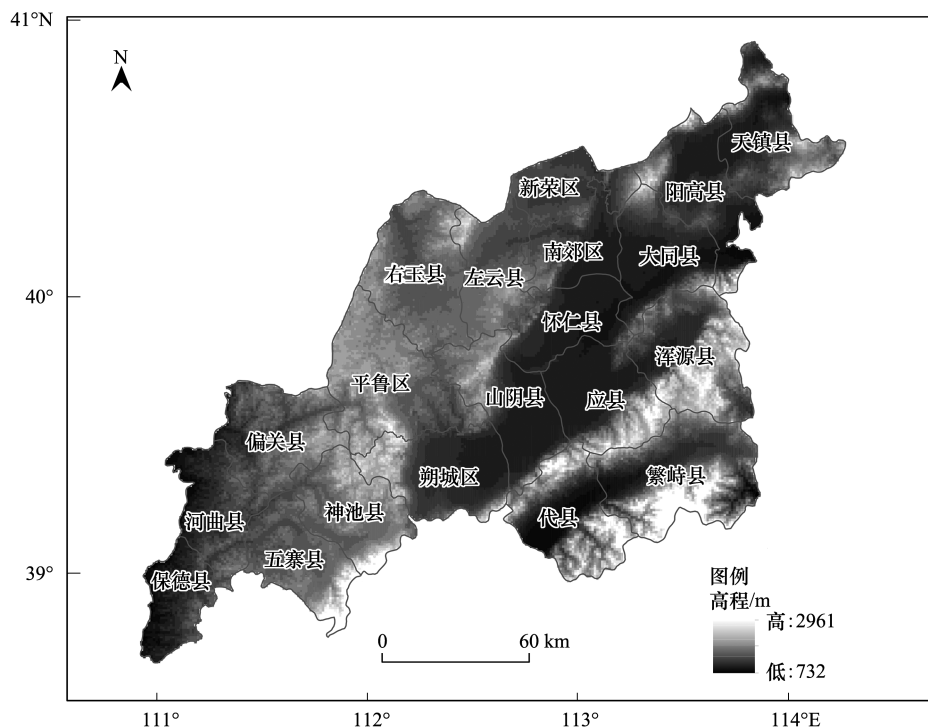


图 1 研究区高程及行政区划

Fig.1 Digital elevation model and administrative divisions of study area

考虑到土地利用覆被变化的影响因子包括自然因素与社会经济因素,本文选取高程(a)、坡度(b)、坡向(c)、国内生产总值(d)、人口(e)、气温(f)、降水(g)、距公路距离(h)和距水系距离(i)共9种影响因素,数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)和中国气象数据网(www.nmic.cn)。其中,气象因子采用研究区站点的实测数据并进行反距离权重空间插值,得到气温和降水的空间分布;高程(DEM)数据进行重采样并提取坡度和坡向信息;国内生产总值(GDP)和人口栅格数据基于居民点密度、土地利用类型和夜间灯光亮度等信息,利用多因子权重分配法将以行政区为基本统计单元的GDP数据与人口数据展布到栅格单元上^[16]。距离因子依据获取的主要公路和水系数据,计算得到每个栅格到主要公路和水系的欧氏距离。所有数据空间分辨率为1km×1km,并进行归一化处理。影响因子数据见图2,土地利用数据见图3。

1.3 研究方法

首先采用逻辑斯蒂(Logistic)回归模型模拟各个土地利用类型与影响因子间的关系,然后基于回归结果构造CLUE-S模型需求参数,以2010年为基年模拟2015年的LULC格局,将模拟结果与实际结果进行精度检验。依据研究区历史时期发展特征设置2020年不同发展情景下的土地需求,运行CLUE-S模型模拟晋北地区2020年不同情景下的LULC空间格局。

1.3.1 逻辑斯蒂回归模型

逻辑斯蒂(Logistic)回归模型是一种概率统计模型,能够定量分析土地利用类型的空间分布与驱动因子间的相关度^[17],并筛选出相关性较大的驱动因素,排除相关性不显著的驱动因素^[18],从而判别每个栅格成为某种地类的可能性。

采用ROC曲线(Receiver operating characteristic curve)检验Logistic回归结果,依据ROC曲线下面积的大小判断回归结果的拟合优度^[19]。ROC面积范围在0.5(随机分离)到1(完全区分)之间,当ROC曲线下面积大于0.7时,即可认为回归结果的解释力较好。

1.3.2 CLUE-S模型

CLUE-S(Conversion of Land Use and its Effects at Small region extent)以栅格作为土地利用类型的表达基

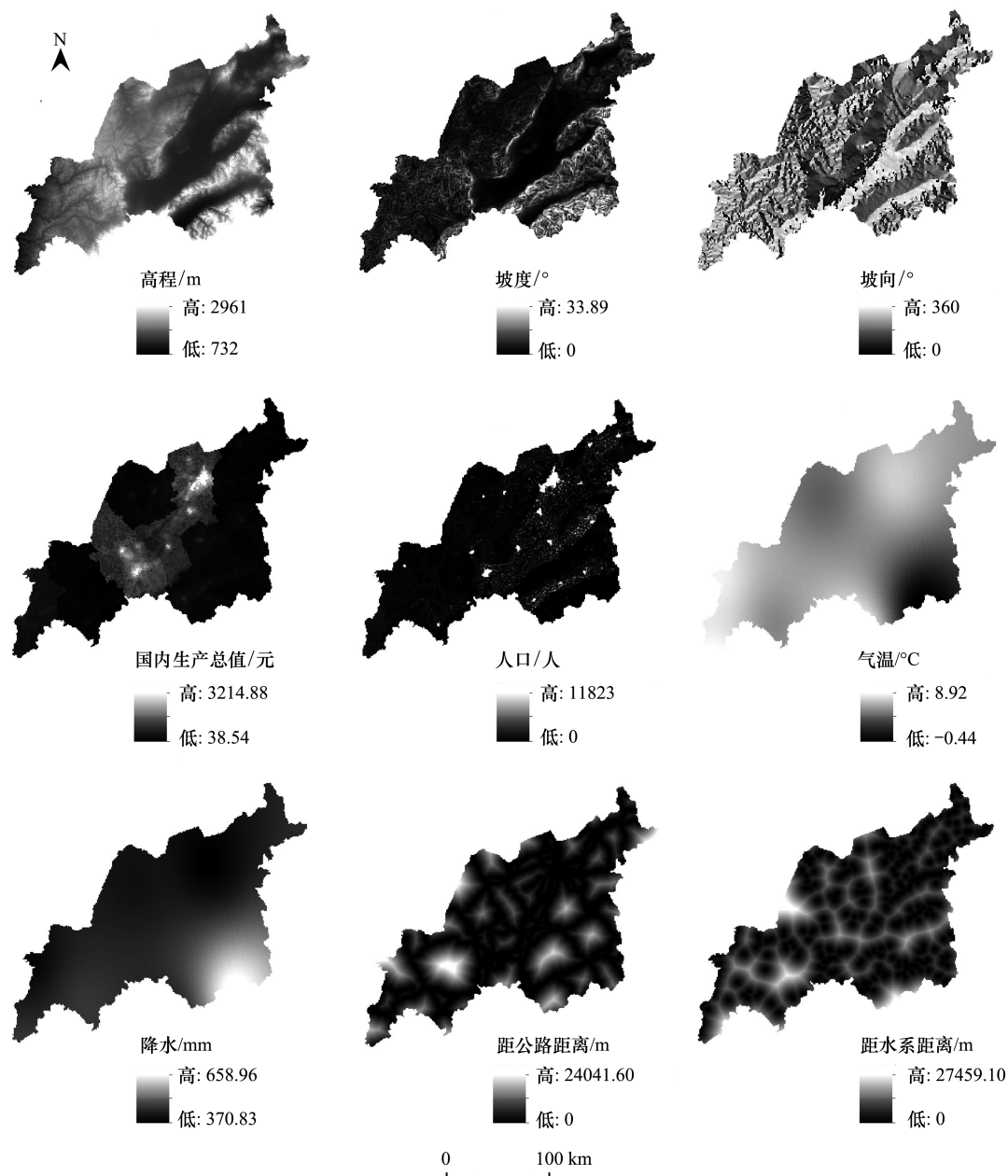


图2 晋北地区 2010 年 9 种驱动因子栅格图

Fig.2 Grid diagram of 9 driving factors in the northern Shanxi in 2010

质,用每个栅格上占地比例最高的土地利用类型代表该栅格的地类^[20-21]。CLUE-S 模型提供了一个研究土地利用覆被变化及其与环境间相互关系的方法论框架,由非空间土地利用需求模块和空间分配模块组成^[22]。

非空间土地利用需求模块需要结合研究区的社会、政策、经济、自然环境等特点、现状以及发展规律,逐年计算出该区域不同土地利用类型的用地需求以作为空间配置的约束。空间分配模块基于空间分布概率、土地利用转换规则和基年土地利用模式,其中,每种土地利用类型空间分布概率的计算是模型模拟的核心,使用二元 logistic 回归模型分析选定的驱动因子与土地利用变化之间的关系,得到未来 LULC 空间分布格局^[23]。

采用 Kappa 指数验证 CLUE-S 模型模拟精度,Kappa 指数通常介于 0—1 之间,当 Kappa 指数>0.75 表明一致性较好。

1.3.3 情景分析

Kappa 指数通过验证后,表明 CLUE-S 模型对研究区 2015 年土地利用的模拟是可信的。在此基础上,本文根据研究区的实际土地利用覆被变化特征,首先采用系统动力学模型构建数学方程式和结构流程图进行仿真实验^[15],设置了 3 种发展情景,对研究区未来土地利用需求进行数量上的预测,然后采用 CLUE-S 模型对 3 种发展情景下的 LULC 格局进行空间上的预测。

情景 a 为维持现状情景,代表发展速率维持现状的情景。在本情景下,人口、GDP 和 3 大产业的发展维持 2010—2015 年间的发展速度。由于人口基数大,为了满足更多人的生活需求,扩大原有的耕地面积,减缓了植树造林政策的实施进程,也使得草地面积大幅度减少;同时由于发展过程中并不太注重生态环境的保护,进而导致水域的面积减少,盐碱地、裸地的面积增加。

情景 b 为经济优先情景,代表发展速率较快,重视经济发展的情景。在该情景下,工矿业迅速扩展,城镇化速度加快,居民用地占比增高;农民为提高收入,不断扩大现有耕地,致使草地面积不断减少,林地面积增速减慢;同时忽略了对生态环境的保护,导致水资源总量急剧降低,水域面积不断减少,土地质量下降,土地退化现象加剧,甚至使得部分土地成为废弃地,土地利用下降。

情景 c 为生态保护情景,代表重视生态保护的情景。在该情景下,GDP 呈中速上涨,第三产业比重增加,生态环境得到很大程度的改善。工矿用地和居民用地的增加速度减缓,生态系统的部分功能得到恢复,使得研究区的水域面积增多,盐碱地和裸地面积不断减少;同时由于植树造林政策的优化施行,林地面积逐渐增加,耕地基本维持原有的状态,生态系统向更健康的方向发展。

2 结果分析

2.1 晋北地区土地利用覆被变化特征

晋北地区的土地覆被类型(表 1)以耕地、林地和草地为主,耕地面积占比最大,高达 40%以上,其次为林地和草地,分别为 20%和 30%左右,表明研究区以农牧业为主要生产方式。晋北地区的 LULC 格局(图 3)主要呈西北斜向的条带状分布,是气候、地貌特征等多种因素共同作用的结果。草地和林地集中分布在西北部 and 东南部,零散分布于其他地方;耕地几乎遍布整个研究区,但在东南部由于五台山与恒山纵横,限制耕地发展,分布较少;水域大致沿东北斜向流经中部地区;大部分的工矿用地和居民用地集中分布在朔州市绝大部分地区和大同市的南郊区;盐碱地主要集中分布于朔州市的山阴县和应县;裸地在研究区域内零散分布。

表 1 2010、2015 年各土地利用类型面积及比例
Table 1 Land use type area and proportion in 2010 and 2015

地类 Land use type	2010 年		2015 年	
	面积 Area/10km ²	比例 Proportion/%	面积 Area/10km ²	比例 Proportion/%
耕地 Cropland	1293.7	41.80	1305.3	42.17
林地 Forestland	716.6	23.15	716.1	23.14
草地 Grassland	921.1	29.76	922.5	29.80
居民用地 Residential land	93.4	3.02	94.1	3.04
工矿用地 Industrial and mining land	27.5	0.88	28.2	0.91
水域 Water area	13.0	0.42	14.0	0.45
盐碱地 Saline and alkaline land	11.4	0.37	6.6	0.22
裸地 Bare land	18.5	0.60	8.4	0.27
总和 Total	3059.2	100	3059.2	100

对比 2010 年和 2015 年的土地利用变化(表 1、图 3),在 2010—2015 年间,所有土地利用类型均发生变化。其中,面积增加最多的是耕地,与人口增加以及粮食需求的上涨有直接关系;林地和草地面积的平稳变化、居民用地和工矿用地面积的少量增加以及盐碱地和裸地面积的大幅下降均得益于政府的管控措施以及民众环保意识的觉醒。

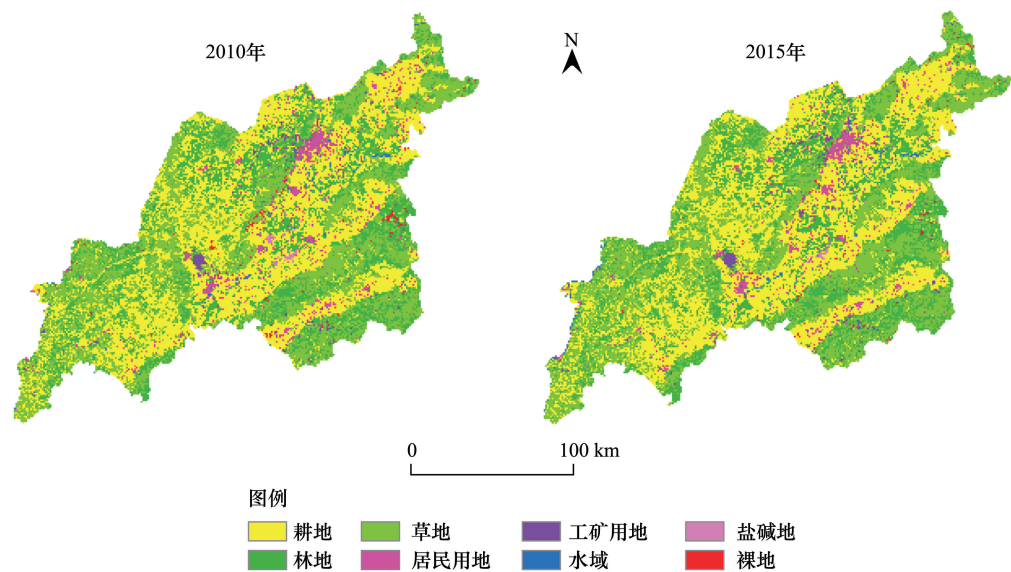


图 3 2010、2015 年土地利用覆被格局

Fig.3 Land use and cover pattern in 2010 and 2015

2.2 晋北地区土地利用覆被变化影响因素分析

从研究区土地利用覆被的 logistic 回归结果(表 2)看,耕地和林地均受 DEM、坡度、GDP 这 3 种因素的影响最明显;草地与居民用地、工矿用地的分布则与 DEM、人口和 GDP 相关性较大,此外,工矿用地还与距公路距离有关,经济越发达,人口越稀疏,且交通越便利的地方越适合建厂;水域和盐碱地的分布主要受 DEM、距水系距离以及降水量和气温的影响;盐碱地的分布受人口、坡度和坡向影响较大。

表 2 2010 年各土地利用类型的 Logistic 回归结果

Table 2 Logistic regression results of various land use types in 2010

编号 Code	驱动因子 Driving factors	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	居民用地 Residential land	工矿用地 Industrial and mining land	水域 Water area	盐碱地 Saline and alkaline land	裸地 Bare land
a	高程 DEM	-2.832	1.717	1.729	-9.329	-2.480	-14.660	-15.044	-3.598
b	坡度 Slope	-6.414	1.436	2.455	-1.100	1.235	—	-20.532	3.881
c	坡向 Aspect	-0.357	0.583	—	-0.377	-0.795	-1.283	-1.554	-1.050
d	国内生产总值 GDP	-5.108	-87.421	-9.711	6.912	8.530	—	—	—
e	人口 POP	-2.784	—	-57.237	19.030	-5.143	—	-77.754	—
f	降水 Precipitation	—	-1.411	1.456	-2.967	—	-5.410	—	-0.870
g	气温 Temperature	-1.028	-1.113	2.660	-3.775	—	-3.678	-3.506	—
h	距公路距离 Distance to highways	-2.020	0.537	0.990	-4.748	-3.305	—	—	—
i	距水系距离 Distance to rivers	—	-1.058	1.100	—	—	-1.520	—	1.051
	ROC	0.919	0.745	0.747	0.873	0.769	0.851	0.680	0.651

从 Logistic 回归结果的 ROC 检验(表 2)可知,除盐碱地和裸地外,耕地、林地、草地等其他土地利用类型的 ROC 值都在 0.74—0.95 之间,表明采用本文选取的影响因子拟合研究区耕地、林地、草地等土地利用类型的分布是可行的;盐碱地的 ROC 值为 0.680,裸地的 ROC 值为 0.651,表明模型对这两种地类的解释能力稍差,这是因为盐碱地和裸地在遥感解译时难以判别,分类精度不高,因此这两种地类的拟合效果稍差。总体而

言,本文所建立的 logistic 回归模型具有较好的解释能力,基本能够反映自然和社会经济因子对土地利用类型分布的影响。

2.3 晋北地区 2015 年土地利用覆被的模拟和精度检验

基于研究区 2010 年的土地利用覆被和驱动因子数据以及 logistic 回归结果,采用 CLUE-S 模型模拟 2015 年的 LULC 格局。将实际解译效果与模型模拟结果进行对比,可以得知 93.4%的区域一致,仅有 6.6%的区域不一致(图 4)。

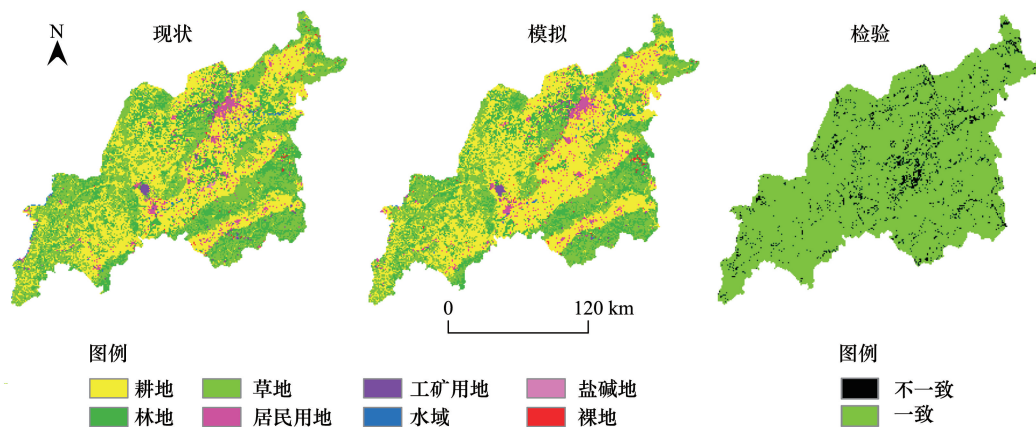


图 4 2015 年土地利用覆被模拟及检验图

Fig.4 Simulation and inspection of land use and cover in 2015

进一步采用 Kappa 系数对 2015 年 CLUE-S 模型模拟精确度进行检验,结果见表 3。其中,耕地、林地、草地的模拟精度都在 0.87 以上,表明 CLUE-S 模型能较好地模拟晋北地区的主要土地利用类型覆被格局。但是,检验结果也表明,盐碱地和裸地的 Kappa 系数较低,这是因为相对于其他地类而言,盐碱地和裸地在遥感解译时难以判别和剥离,存在一定的分类误差,而且数据空间分辨率较低,对土地利用类型空间细节水平的描述较弱,导致模型对这两种地类的解释能力稍差,logistic 回归结果也表明这一点。总体来看,研究区整体的 Kappa 系数为 0.89,表明我们所建立的模型能够较好的模拟研究区的 LULC 格局,可以进行 2020 年的情景模拟。

表 3 2015 年土地利用类型模拟精确度检验结果

Table 3 Simulated accuracy test results of land use type in 2015

地类 Land use type	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	居民用地 Residential land	工矿用地 Industrial and mining land	水域 Water area	盐碱地 Saline and alkaline land	裸地 Bare land	整体 Overall
Kappa	0.87	0.95	0.90	0.98	0.99	0.87	0.50	0.54	0.89

2.4 晋北地区 2020 年土地利用覆被格局情景模拟

根据前文的 3 种情景设置得到 2020 年各土地利用类型需求(表 4),并以 2010 年的 LULC 数据为基年数据,模拟 2020 年这 3 种发展情景下晋北地区的 LULC 格局(图 5)。

对比 3 种发展情景下晋北地区 2020 年的土地利用覆被格局(图 5),可知:研究区在注重生态保护情景下的居民用地、工矿用地、盐碱地和裸地的面积低于其他两种发展情景,林地、草地以及水域面积较多,特别是盐碱地和裸地的空间分布明显较少,水域的分布范围较广;3 种发展情景下,耕地、林地和草地的面积虽有所不同,但分布格局基本保持一致。因此,注重生态保护情景是晋北地区 2020 年最适宜的 LULC 格局。建议积极采取合理的水资源使用和土地利用以及恰当的生态修复措施,提高各种土地的资源有效利用率,实现土地资源的均衡利用,更多地关注生态环境系统的保护,实现区域生态、经济和社会的可持续发展。

表 4 2010—2020 年(3 种情景)不同土地利用类型面积需求

Table 4 The demand of different land use types in 2010—2020 (three scenarios)

地类 Land use type	2010	2015	2020 情景 a Scenario a	2020 情景 b Scenario b	2020 情景 c Scenario c
耕地 Cropland	1293.7	1305.3	1308.3	1351.3	1300.8
林地 Forestland	716.6	716.1	779.6	749.1	801.6
草地 Grassland	921.1	922.5	800.9	720.4	820.9
居民用地 Residential land	93.4	94.1	123.6	168.1	107.6
工矿用地 Industrial and mining land	27.5	28.2	34.5	46.0	29.0
水域 Water area	13.0	14.0	11.5	9.5	19.0
盐碱地 Saline and alkaline land	11.4	6.6	14.3	18.8	6.3
裸地 Bare land	18.5	8.4	22.5	32.0	10.0
总面积 Total area	3095.2	3095.2	3095.2	3095.2	3095.2

a. 维持现状情景 b. 经济优先情景 c. 生态保护情景

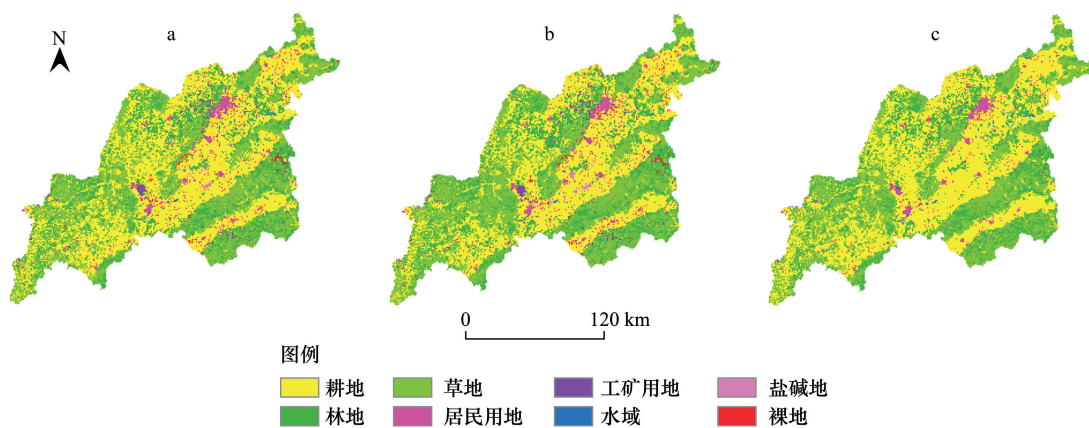


图 5 2020 年三种发展情景的土地利用覆被

Fig.5 Land use and cover of three development scenarios in 2020

a. 维持现状情景 b. 经济优先情景 c. 生态保护情景

3 结论和讨论

本文对晋北地区土地利用格局变化进行了分析和模拟,得到如下结论:

(1) 晋北地区 2010、2015 和 2020 年的 LULC 格局整体分布基本一致,以耕地、林地和草地为主,土地利用类型主要呈西北斜向的条带状分布。

(2) 在影响因子中,DEM、GDP、人口三者对于各类型土地利用空间格局的影响较大。具体而言,DEM 对水域和盐碱地的空间分布影响较大,GDP 则在林地分布中较为重要,受人口影响较大的包括草地、居民用地和盐碱地等。耕地和裸地受到多个影响因子的共同作用。

(3) CLUE-S 模型在晋北地区土地利用覆被格局的拟合上有较好的精度,Kappa 系数达 0.89,表明模型能够很好地模拟晋北地区的 LULC 格局;情景模拟结果表明,研究区在重视生态保护情景下的 LULC 格局明显优于着重维持发展现状情景和致力于经济优先发展情景,研究区未来发展方向应趋向重视生态保护情景,通过比较 3 种情景,也可以为未来决策提供更多信息。

总体来看,CLUE-S 模型可以成功应用于晋北地区土地利用覆被演变和模拟,但是由于模型本身结构不完善、影响因素的复杂性以及数据分辨率等限制,仍然存在一些不足:

(1) 尺度的大小和空间现象的本质有内在的联系,在某一尺度上的空间现象,在另一尺度上不一定存在或发生,遥感数据的最佳分辨率,与所研究景观或格局问题的内在特征和目标有关,本文所采用数据的空间分

分辨率为 1 km×1 km,对土地利用空间细节水平的描述较弱,尤其是对盐碱地和裸地在低分辨率时难以判别和剥离,使得单个栅格包含地面多种土地利用类型信号^[24],因此理解尺度和空间分辨率对 LULC 的精确模拟是非常有帮助的。

(2) CLUE-S 模拟模型是一种基于宏观尺度模拟土地利用覆被变化的经验统计模型,忽略了系统内部微观层次变化对区域整体 LULC 格局演变的影响;在空间配置方面,CLUE-S 模型所需参数较多,且各参数都有其特定的内涵和规则,设置复杂^[25];在驱动因子方面,由于土地利用类型复杂,所需的驱动因子较多且某些因子难以量化,致使驱动因素完整性降低^[26]。

(3) 在情景模拟方面,情景预测结果会因不同的预测者经验不同带有一定的主观性,反映特定情景下的模拟结果具有不确定性^[27];土地利用数量变化预测是 CLUE-S 模型的缺陷,因此,结合土地利用总量模拟模型与 CLUE-S 模型将成为该领域研究的热点和重要方向^[28]。

参考文献 (References):

- [1] 田义超,任志远.基于分形理论的黄土丘陵区土地利用研究——以延安市宝塔区为例.地域研究与开发,2011,30(6):121-125,139-139.
- [2] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. Landscape and Urban Planning, 2017, 168: 94-116.
- [3] 廉丽姝,李宝富,陈忠升,陈亚宁,孙小银.基于 WRF 模式评估土地利用/覆被变化的气候和水文效应.生态学报,2018,38(3):917-925.
- [4] 张丽,杨国范,刘吉平.1986—2012 年抚顺市土地利用动态变化及热点分析.地理科学,2014,34(2):185-191.
- [5] Irwin E G, Geoghegan J. Theory, data, methods: developing spatially explicit economic models of land use change. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 85(1/3): 7-24.
- [6] Zheng F Y, Hu Y C. Assessing temporal-spatial land use simulation effects with CLUE-S and Markov-CA models in Beijing. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(32): 32231-32245.
- [7] Oñate-Valdivieso F, Sendra J B. Application of GIS and remote sensing techniques in generation of land use scenarios for hydrological modeling. Journal of Hydrology, 2010, 395(3/4): 256-263.
- [8] Shao J A, Dang Y F, Wang W, Zhang S C. Simulation of future land-use scenarios in the three gorges reservoir region under the effects of multiple factors. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(12): 1907-1932.
- [9] Xia T, Wu W B, Zhou Q B, Tan W X, Verburg P H, Yang P, Ye L M. Modeling the spatio-temporal changes in land uses and its impacts on ecosystem services in Northeast China over 2000—2050. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(11): 1611-1625.
- [10] Wu M, Ren X Y, Che Y, Yang K. A coupled SD and CLUE-S model for exploring the impact of land use change on ecosystem service value: a case study in Baoshan District, Shanghai, China. Environmental Management, 2015, 56(2): 402-419.
- [11] Zadbagher E, Becek K, Berberoglu S. Modeling land use/land cover change using remote sensing and geographic information systems: case study of the Seyhan Basin, Turkey. Environment Monitoring and Assessment, 2018, 190(8): 494.
- [12] Li W L, Wu C S, Zang S Y. Modeling urban land use conversion of Daqing City, China: a comparative analysis of “top-down” and “bottom-up” approaches. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(4): 817-828.
- [13] Schulz J J, Cayuela L, Echeverria C, Salas J, Benayas J M R. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975-2008). Applied Geography, 2010, 30(3): 436-447.
- [14] 徐小明,杜自强,张红,冯凌,申小雨.晋北地区 1986—2010 年土地利用/覆被变化的驱动力.中国环境科学,2016,36(7):2154-2161.
- [15] Xu X M, Du Z Q, Zhang H. Integrating the system dynamic and cellular automata models to predict land use and land cover change. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 52: 568-579.
- [16] 徐新良.中国人口空间分布公里网格数据集.北京:中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统,2017.
- [17] Zhang H, Liao X L, Zhai T L. Evaluation of ecosystem service based on scenario simulation of land use in Yunnan Province. Physics and Chemistry of the Earth, 2018, 104: 58-65.
- [18] 王芳,陈芝聪,谢小平.太湖流域建设用地与耕地景观时空演变及驱动力.生态学报,2018,38(9):3300-3310.
- [19] Pontius R G, Schneider L C. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2001, 85(1/3): 239-248.
- [20] Verburg P H, Soepboer W, Veldkamp A, Limpiada R, Espaldon V, Mastura S S A. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. Environmental Management, 2002, 30(3): 391-405.
- [21] 吴健生,冯喆,高阳,黄秀兰,刘洪萌,黄力. CLUE-S 模型应用进展与改进研究.地理科学进展,2012,31(1):3-10.
- [22] 卞子浩,马小雪,龚来存,赵静,曾春芬,王腊春.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.地理科学,2017,37(2):252-258.
- [23] 许小亮,李鑫,肖长江,欧名豪.基于 CLUE-S 模型的不同情景下区域土地利用布局优化.生态学报,2016,36(17):5401-5410.
- [24] 高云,谢苗苗,付梅臣,曹翊坤.高原河谷城市植被时空变化及其影响因素——以青海省西宁市为例.生态学报,2014,34(5):1094-1104.
- [25] 王丽艳,张学儒,张华,王卫. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展.地理与地理信息科学,2010,26(3):73-77.
- [26] 李娜,张丽,闫冬梅,张增祥,杨林平.基于 CLUE-S 模型的天津滨海新区土地利用变化情景模拟.遥感信息,2013,28(4):62-68,74-74.
- [27] 马利邦,牛叔文,杨丽娜.基于 Markov 和 CLUE-S 模型的敦煌市土地利用/覆盖格局情景模拟.生态学报,2012,31(7):1823-1831.
- [28] 冯仕超,高小红,顾娟,亢健,郭丽峰,吴国良,邹婵.基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟.生态学报,2013,33(3):985-997.