



基于 CA-Markov 模型的大凌河流域土地利用变化与模拟预测研究

江山, 石旭飞, 郭常来, 冯雨林, 孙秀波, 孙家全, 倪金

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 基于大凌河流域 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据, 采用土地利用动态度、土地利用程度、土地利用转移矩阵等方法分析过去 20 年来研究区土地利用变化规律, 并基于元胞自动机-马尔可夫(CA-Markov)模型模拟预测研究区 2030 年土地利用格局。结果表明: 2000—2020 年大凌河流域土地利用以耕地和草地为主, 二者占比超过 80%。近 20 年间, 研究区内林地、草地和建设用地面积不断增加, 耕地面积持续减少, 且减少的速度在加快, 前后两个 10 年分别减少了 132.85 和 1360.13 km²。2000—2020 年间, 土地综合利用动态度由 43.53% 降低为 10.36%, 处于降低趋势。建设用地动态度由 0.11% 增加至 4.99%, 湿地动态度由 86.32% 变为 -7.22%, 土地利用程度综合指数由 262.53 变为 259.91, 表明大凌河流域近 20 年土地处于衰退期。基于 CA-Markov 模型预测大凌河流域 2030 年土地利用格局, 模拟精度 Kappa 系数为 0.8835。预测结果表明, 2030 年, 大凌河流域耕地面积将进一步减少 1 699.92 km², 主要变为草地、建设用地和林地。

关键词: 大凌河流域; 土地利用; 时空格局; 模拟预测; 元胞自动机-马尔可夫模型; 东北地区

LAND USE CHANGES AND SIMULATION PREDICTION IN DALING RIVER BASIN BASED ON CA-MARKOV MODEL

JIANG Shan, SHI Xu-fei, GUO Chang-lai, FENG Yu-lin, SUN Xiu-bo, SUN Jia-quan, NI Jin

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: According to the land use data of Daling River Basin in 2000, 2010 and 2020, the land use dynamic degree, land use degree and land use transfer matrix are adapted to analyze the change rule of land use in the area in the past 20 years, and the land use patterns in 2030 are simulated and predicted based on the CA-Markov model. The results show that the cultivated land and grassland are dominated during 2000–2020, accounting for over 80% of the total land use in Daling River Basin. In the past 20 years, the area of forest land, grassland and construction land have been continuously increasing, while the area of farm land has been decreasing, and the rate of decline is accelerating, with the decrease of 132.85 and 1360.13 km² respectively in the first and second decades. The dynamic degree of comprehensive land use reduces from 43.53% to 10.36%, showing a decreasing trend. The dynamic degree of construction land increases from 0.11% to 4.99%, and that of wetland changes from 86.32% to -7.22%. The comprehensive index of land use degree changes from 262.53 to 259.91, indicating that the land in Daling River Basin is in decline in recent 20 years. The land use patterns of the area in 2030 are predicted based on CA-Markov model, with the simulation accuracy Kappa coefficient of 0.8835. The prediction results reveal that the farm land will further decrease by 1699.92 km² in 2030, mainly changing into grassland, construction land and forest land.

Key words: Daling River Basin; land use; spatiotemporal pattern; simulation prediction; CA-Markov model; Northeast China

收稿日期: 2022-05-07; 修回日期: 2022-05-23. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北振兴区资源环境承载力监测”(DD20221730)、“东北地区自然资源综合调查”(DD20211383).

作者简介: 江山(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事遥感地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//jiangshan85@qq.com

通信作者: 石旭飞(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水工环地质调查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//396767787@qq.com

0 引言

土地利用和覆被变化(land use and cover change, LUCC)是全球环境变化的重要组成部分和驱动因素之一^[1],研究土地利用变化规律和发展趋势,对于土地资源的合理开发与利用,促进区域协调可持续发展具有重要意义^[2-3].近年来,国内外学者已对土地利用变化时空动态预测模型进行了深入研究,采用的预测模型主要有 CLUE-S 模型、SLEUTH、多智能体系统模型(multi-agent system, MAS)、元胞自动机模型(cellular automata, CA)等^[4-9].其中,CA-Markov 模型耦合了元胞自动机和马尔可夫链的各自优势,可以实现对长时间复杂土地利用类型时空演变过程的可视化模拟和预测,并具有较高的精度.国内不少学者应用 CA-Markov 模型在新疆克州、昌化江流域、云南德宏州、三峡库区、黄河流域、锡林河流域、喀什市、长沙市等地区开展土地利用变化分析与预测研究^[10-16].

大凌河是辽宁西部地区最大的河流,位于大凌河流域的锦州、阜新、朝阳三市是东接辽沈,西联京津唐地区的重要城市.大凌河流域内地形复杂,石漠化、水土流失等问题严重,其生态系统稳定直接关系着辽西的经济发展^[17-18].一些学者在大凌河流域开展的土地利用变化研究有力揭示了流域生态环境变化特征^[19-20],只是研究数据较陈旧,不能反映流域新变化.鉴于此,本研究基于自然资源部新发布的土地覆盖数据,从土地利用动态度、土地利用程度和土地利用转移矩阵等不同角度,分析研究区过去 20 年来土地利用变化规律,并基于 CA-Markov 模型对研究区 2030 年土地利用格局进行预测,以期为大凌河流域生态环境保护与区域经济和社会发展提供科学依据.

1 研究区简介

研究区大凌河流域覆盖的地理范围为:118°53′—121°52′E、40°28′—42°38′N.河流全长 435 km,上游分南、北两支,于喀左县大城子东南汇合后流经朝阳、北票、凌海、义县等地,最终汇入渤海(图 1).流域总面积 $2.33 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中 $2.08 \times 10^4 \text{ km}^2$ 位于辽宁省境内.地貌以山地丘陵为主,少量平原区.气候类型属于中温带气候,四季冷暖干湿分明,温度变化较大,多年平均气温 8.3 °C,平均相对湿度 53%,日照时数 2 800 h,年均降雨量 465 mm,年蒸发量 1 974.4 mm,年均径流量

$17.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[19].

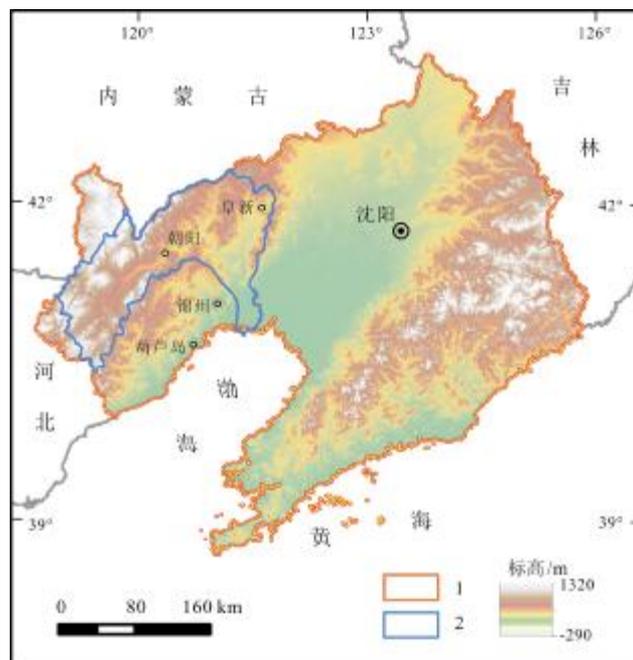


图 1 大凌河流域地理位置图

Fig. 1 Geographical location map of Daling River Basin
1—辽宁省界(boundary of Liaoning Province); 2—研究区范围(study area)

2 数据来源及预处理

本研究主要基于自然资源部发布的 30 m 全球地表覆盖数据(GlobeLand30).该数据从 2014 年开始发布,目前已完成 2020 年版更新.GlobeLand30 数据研制所使用的分类影像主要有美国陆地资源卫星(Landsat)、中国环境减灾卫星(HJ-1)和高分一号(GF-1)等多光谱影像,优选植被生长季少云影像^[21].GlobeLand30 数据共包括 10 个一级类型,分别是:耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表(建设用地)、裸地、冰川和永久积雪,研究区内共有其中 7 类数据(如表 1 所示).GlobeLand30 数据精度评价由同济大学和中国科学院空天信息创新研究院等牵头完成,平均总体精度为 84.61%,平均 Kappa 系数为 0.80.

本次研究共收集了 6 幅数据,数据列表为:N50_40_2000LC030、N51_40_2000LC030、N50_40_2010LC030、N51_40_2010LC030、N50_40_2020LC030、N51_40_2020LC030.数据处理与分析采用 ArcGIS 和 IDRISI 软件完成.

表1 土地利用类型分类表
Table 1 Classification of land use types

类型	含义
耕地	水田、灌溉旱地、雨养旱地、菜地、牧草种植地、大棚用地、茶园
林地	落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、混交林和疏林地
草地	草原、草甸、稀树草原、荒漠草原、城市人工草地
湿地	内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥炭沼泽、红树林、盐沼
水体	江河、湖泊、水库、坑塘
建设用地	城镇等各类居民地、工矿、交通设施
裸地	荒漠、沙地、砾石地、裸岩、盐碱地

3 研究方法

3.1 土地利用动态度

土地利用动态主要用于表征一段时间内土地利用类型的变化情况,即土地利用的变化速度,分为单一土地利用动态度和综合土地利用动态度^[22-24]. 计算公式如下:

$$L = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中, L 为研究时段内单一土地利用类型的动态度; U_a 和 U_b 分别表示该类土地利用类型研究始、末的面积; LC 为综合土地利用动态度, LU_i 为第 i 类土地利用类型在研究初期的面积; ΔLU_{i-j} 为研究时段内第 i 类土地利用类型转变为非 i 类 (j 类) 土地利用类型面积的绝对值; T 为研究时段, 当该时段设定为年时, L 为该研究区某种土地利用类型年变化率, LC 为研究区土地利用年变化率^[23].

3.2 土地利用程度

土地利用程度是在某个时间内由自然因素和人为因素双重作用的结果, 它反映了土地利用的广度和深度. 根据刘纪远等^[1]提出的土地利用程度的综合分析方法, 按照土地自然综合体在社会因素影响下的自然平衡状态将土地利用程度分为 4 个级别, 依次赋予分

级指数(表 2), 在此基础上建立土地利用程度综合指数及变化模型^[25].

表2 土地利用类型及分级表
Table 2 Land use types and grading indexes

类别	未利用地级	林、草、水地级	农用地级	城镇聚落地级
土地利用类型	裸地	林地、草地、湿地、水体	耕地	建设用地
指标	1	2	3	4

1) 土地利用程度综合指数

土地利用程度综合指数计算公式如下:

$$L_i = \sum_{i=1}^n A_i C_i \quad L \in [100, 400] \quad (3)$$

式中, L_i 表示土地利用程度综合指数; A_i 表示第 i 级的土地利用程度分级指数; C_i 表示第 i 级的土地利用类型面积百分比; n 为土地利用程度分级数. L_i 数值位于 100~400 区间内, 数值大小反映土地利用程度的高低.

2) 土地利用程度变化

土地利用程度的变化是指特定区域在一定的时段内的综合变化, 通常由土地利用程度的变化量表征, 计算公式如下:

$$\Delta L_{b-a} = L_b - L_a = 100 \times \left(\sum_{i=1}^n A_i C_{ib} - \sum_{i=1}^n A_i C_{ia} \right) \quad (4)$$

式中, L_a 和 L_b 分别为 a 、 b 两个时间的研究区土地利用程度综合指数; A_i 为第 i 级的土地利用程度分级指数; C_{ia} 和 C_{ib} 分别为研究区 a 时间和 b 时间第 i 级土地利用程度面积百分比. 如果 $\Delta L_{b-a} > 0$, 表示研究区土地利用处于发展时期; 如果 $\Delta L_{b-a} < 0$, 表示该区域的土地利用处于衰退期.

3.3 土地利用转移矩阵

土地利用变化不仅是面积数量上的增减, 而且还存在类型之间的转换关系. 土地利用转移矩阵能够定量描述各种土地利用类型之间的变化, 有助于了解期初各地类的流失去向和期末各地类的来源和构成. 通过对任意两期土地利用数据进行空间叠加, 获取各研究时段土地利用类型转移矩阵, 其表达式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, S 为面积; n 为土地利用类型数量; i, j 分别为研究初期与末期的土地利用类型.

3.4 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型结合了元胞自动机模型和马尔可夫链的优势, 常用于土地利用时空格局的模拟预测, 具有高精度、可视化等优点^[26]. Markov 链描述的是土地利用从一个时刻(t)到另一个时刻($t+1$)的变化趋势, 并以此为规则预测将来的变化趋势^[26-27]. 公式如下:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t \quad (6)$$

式中, S_t, S_{t+1} 分别为 $t, t+1$ 时刻的系统状态, P_{ij} 为状态转移概率.

CA 模型同时具备时间和空间预测功能, 模型变量包括状态、领域空间和时间等离散变量, 公式如下:

$$S_{t+1} = f(S_t, N) \quad (7)$$

式中, S 为元胞有限、离散的状态集合; t 和 $t+1$ 表示不同时刻; N 为元胞的邻域; f 为局部空间元胞转换规则^[28].

4 结果分析

4.1 土地利用空间格局

研究区土地利用以耕地和草地为主. 其中耕地占总面积的 50%左右, 主要集中分布在大凌河中、下游, 少量位于上游丘陵地区谷地; 草地占比超过 30%, 主要分布在上游丘陵区; 林地占比 12%左右; 建设用地约占比 5%; 湿地和水体面积较小, 约占总面积的 1%; 裸地面积可忽略不计(图 2, 表 3), 表明研究区土地开发程度处于较高水平.

4.2 土地利用变化分析

1) 土地利用结构变化

2000、2010、2020 年研究区土地利用结构有较大变化. 2000—2020 年期间, 研究区内耕地持续减少, 其中前 10 年减少了 132.85 km², 后 10 年减少了 1 360.13 km², 减少速度在加快. 近 20 年间, 耕地共减少了 1 492.97 km², 面积占比由 2000 年的 53.23% 减少为 2020 年的 46.02%. 与此同时, 林地、草地和建设用地面积不断增加, 其中, 草地增加了 616.17 km², 建设用地增加 492.23 km², 林地共增加 346.97 km² (表 3).

2) 土地利用动态度

从土地利用动态度计算结果(表 4)来看, 2000—2010 年间, 研究区综合土地利用动态度为 43.53%, 单地类中动态度最大的是湿地, 平均每年增加 86.32%, 动态度最小的是耕地, 平均每年减少 0.12%. 2010—2020 年间, 研究区综合土地利用动态度为 10.36%, 单地类中动态度最大的是水体, 平均每年增加 5.00%, 动态度最小的是湿地, 平均每年减少 7.22%. 总体来看, 近 20 年间, 研究区综合土地利用动态度为 15.60%, 处于不断减少的状态. 单地类中动态度最大的是湿地, 平均每年增加 8.38%, 动态度最小的是耕地, 平均每年减少 0.68%.

3) 土地利用程度

根据式(3)(4)计算了研究区 2000、2010 和 2020 年土地利用综合指数, 从数据(表 5)来看, 研究区平均土地利用程度综合指数为 261.5, 土地利用程度处于中等偏高水平. 由 2000 年的 262.53 变为 2020 年 259.91, 土地利用变化量在持续降低, 表明大凌河流域

表 3 大凌河流域土地利用面积统计表

Table 3 Statistics of land use area in Daling River Basin

类别	面积/km ²			占比/%			面积变化/km ²		
	2000 年	2010 年	2020 年	2000 年	2010 年	2020 年	2000—2010 年	2010—2020 年	2000—2020 年
耕地	11024.48	10891.63	9531.50	53.23	52.59	46.02	-132.85	-1360.13	-1492.97
林地	2309.12	2342.50	2656.09	11.15	11.31	12.82	33.39	313.59	346.97
草地	6236.09	6282.03	6852.26	30.11	30.33	33.09	45.94	570.23	616.17
湿地	6.57	63.33	17.59	0.03	0.31	0.08	56.75	-45.74	11.01
水体	152.46	156.90	235.37	0.74	0.76	1.14	4.44	78.47	82.91
建设用地	954.21	964.80	1446.44	4.61	4.66	6.98	10.58	481.65	492.23



图2 大凌河流域2000、2010、2020年土地利用空间格局图
Fig. 2 Land use spatial patterns of Daling River Basin in 2000, 2010 and 2020

1—耕地(farm land); 2—林地(forest land); 3—草地(grassland); 4—湿地(wetland); 5—水体(water body); 6—人造地表(artificial surface)

近20年土地处于衰退期,且后半期(2010—2020年)衰退速度大于前半期(2000—2010)。

表4 大凌河流域土地利用动态度统计表

Table 4 Dynamic degree statistics of land use in Daling River Basin

时段	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地	综合动态度
2000—2010年	-0.12	0.14	0.07	86.32	0.29	0.11	43.53
2010—2020年	-1.25	1.34	0.91	-7.22	5.00	4.99	10.36
2000—2020年	-0.68	0.75	0.49	8.38	2.72	2.58	15.60

单位:%.

表5 大凌河流域土地利用综合指数统计表

Table 5 Comprehensive land use index of Daling River Basin

时间	2000年	2010年	2020年
土地利用综合指数/%	262.53	261.93	259.91

时段	2000—2010年	2010—2020年	2000—2020年
土地利用程度变化量/%	-0.6	-2.02	-2.62

4)土地利用变化矩阵

通过建立土地利用转移矩阵(图3,表6),可知2000—2010年间,耕地减少了132.85 km²,主要转为草地、林地和建设用地.其中转为草地和林地的耕地面积分别为130.74和54.96 km²,主要分布于大凌河下游义县—锦州一带;共有33.34 km²耕地转为建设用地,主要分布于朝阳市和锦州市等地.2010—2020年间,耕地减少面积达1360.13 km²,其中有723.68 km²耕地转为草地,主要发生在大凌河上游和下游;共有403.15 km²耕地转为林地,主要位于大凌河上游地区;另有473.15 km²耕地转为建设用地,集中分布在阜新市一带.与此同时,有少量的草地和林地转化为耕地,面积分别为143.18和77.74 km²(如图3,表7).

4.3 土地利用预测分析

本研究利用 IDRISI 软件进行土地利用的模拟预测分析.第一步在 Markov 模块设置相对误差为 0.15,分别计算研究区 2000—2010 年、2010—2020 年的土地利用转移概率矩阵;第二步在 CA-Markov 模块以 2000—2010 年的土地利用转移概率矩阵为条件,设置 30 m×30 m 元胞、5×5 邻域结构、元胞自动机循环次数为 10 等参数,模拟预测 2020 年研究区土地利用分布

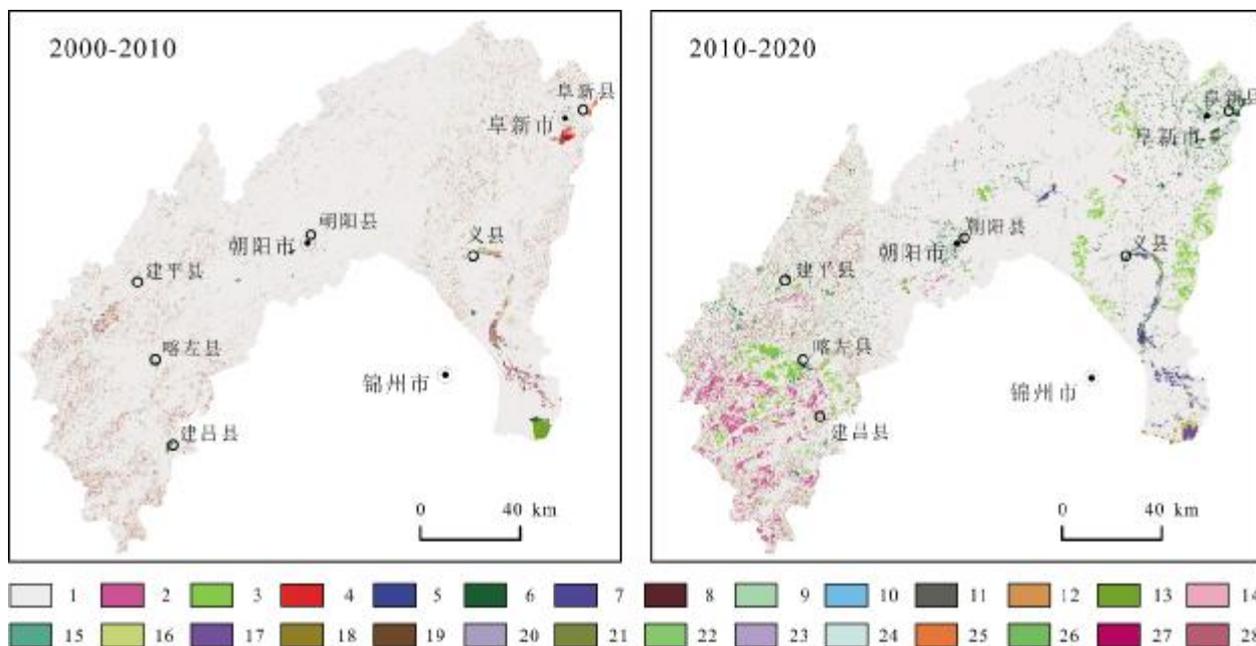


图 3 大凌河流域土地利用分类变化图

Fig. 3 Land use variation map of Daling River Basin

1—未变的地类(unchanged); 2—耕地变林地(farm land to forest); 3—耕地变草地(farm land to grassland); 4—耕地变湿地(farm land to wetland); 5—耕地变水体(farm land to water); 6—耕地变建设用地(farm land to construction land); 7—林地变耕地(forest to farm land); 8—林地变草地(forest to grassland); 9—林地变水体(forest to water); 10—林地变建设用地(forest to construction land); 11—草地变耕地(grassland to farm land); 12—草地变林地(grassland to forest); 13—草地变湿地(grassland to wetland); 14—草地变水体(grassland to water); 15—草地变建设用地(grassland to construction land); 16—湿地变耕地(wetland to farm land); 17—湿地变草地(wetland to grassland); 18—湿地变水体(wetland to water); 19—湿地变建设用地(wetland to construction land); 20—水体变耕地(water to farm land); 21—水体变林地(water to forest); 22—水体变草地(water to grassland); 23—水体变湿地(water to wetland); 24—水体变建设用地(water to construction land); 25—建设用地变耕地(construction land to farm land); 26—建设用地变林地(construction land to forest); 27—建设用地变草地(construction land to grassland); 28—建设用地变水体(construction land to water)

表 6 大凌河流域 2000—2010 年土地利用变化矩阵

Table 6 Land use change matrix of Daling River Basin during 2000—2010

2000 年 \2010 年	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地
耕地	10802.64	54.96	130.74	1.54	0.63	33.34
林地	7.30	1988.66	312.38	0.04	0.02	0.10
草地	45.48	295.98	5824.93	41.92	1.82	25.16
湿地	0.00	0.00	0.00	6.57	0.00	0.00
水体	3.66	0.38	0.96	0.00	147.42	0.03
建设用地	32.32	2.39	12.77	0.00	0.55	906.15

面积单位:km².

表 7 大凌河流域 2010—2020 年土地利用变化矩阵

Table 7 Land use change matrix of Daling River Basin during 2010—2020

2010 年 \2020 年	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地
耕地	9255.38	403.15	723.68	1.56	34.72	473.15
林地	77.74	2057.00	200.37	0.00	0.86	6.54
草地	143.18	194.08	5896.47	0.42	3.64	44.25
湿地	14.89	0.00	24.88	7.34	15.76	0.46
水体	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
建设用地	0.05	0.06	0.06	0.00	0.06	0.06

面积单位:km².

图; 第三步在 CROSSTAB 模块对 2020 年预测值和实际值进行交叉验证, 得到 Kappa 系数为 0.8835, 满足精度要求. 然后重复第二步, 以 2020 年实际土地利用数据为基础, 模拟预测研究区 2030 年土地利用格局^[29] (如图 4a 所示).

根据预测结果, 建立 2020—2030 年土地利用转移矩阵(图 4b, 表 8). 结果表明 2030 年研究区耕地将进一步减少 1 699.92 km², 其中有 630.42 km² 耕地转为草地, 主要位于大凌河上游和下游; 共有 571.65 km² 耕地转为建设用地, 主要发生在朝阳市和义县—锦州

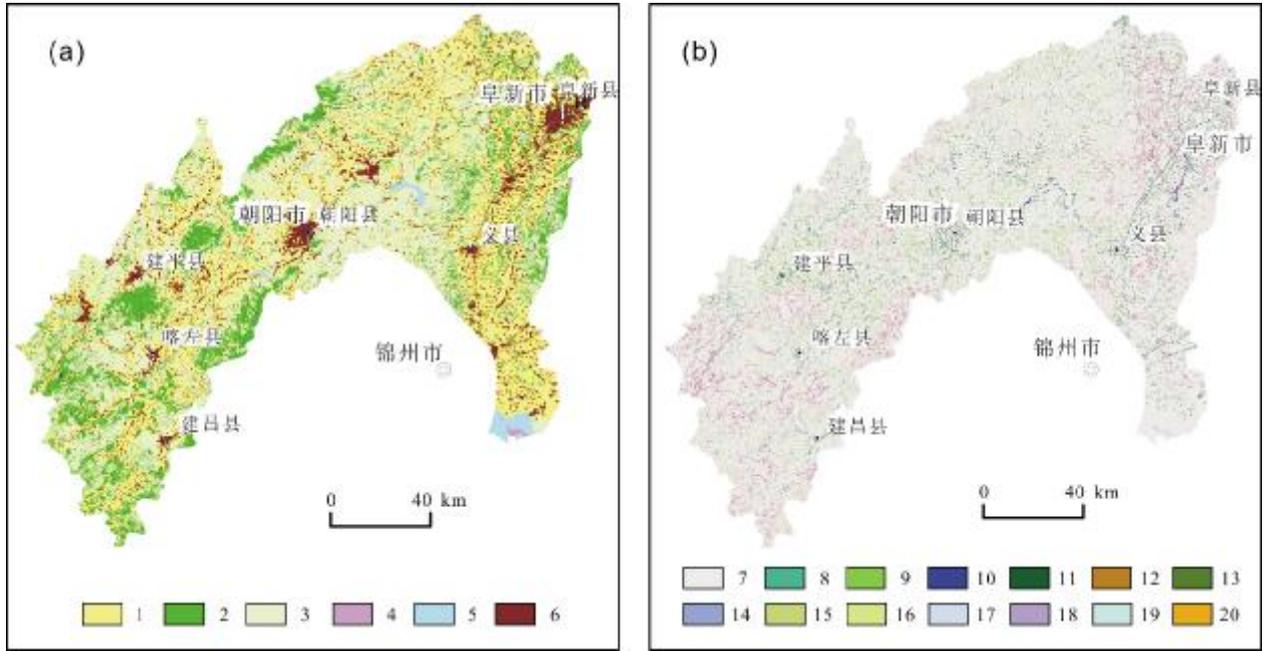


图 4 大凌河流域 2030 年土地利用分类及变化预测

Fig. 4 Land use classification and variation prediction of Daling River Basin in 2030

1—耕地(farm land); 2—林地(forest land); 3—草地(grassland); 4—湿地(wetland); 5—水体(water body); 6—建设用地(construction land); 7—未变的地类(unchanged); 8—耕地变林地(farm land to forest); 9—耕地变草地(farm land to grassland); 10—耕地变水体(farm land to water); 11—耕地变建设用地(farm land to construction land); 12—林地变草地(forest to grassland); 13—草地变林地(grassland to forest); 14—草地变建设用地(grassland to construction land); 15—湿地变耕地(wetland to farm land); 16—湿地变草地(wetland to grassland); 17—湿地变水体(wetland to water); 18—水体变湿地(water to wetland); 19—水体变建设用地(water to construction land); 20—建设用地变水体(construction land to water)

表 8 大凌河流域 2020—2030 年土地利用变化矩阵
Table 8 Land use change matrix of Daling River Basin during 2020–2030

2020 年 \ 2030 年	耕地	林地	草地	湿地	水体	建设用地
耕地	7831.32	454.19	630.42	0.00	43.92	571.65
林地	0.00	2629.90	26.20	0.00	0.00	0.00
草地	0.00	255.22	6494.02	0.00	0.00	103.01
湿地	0.26	0.00	1.07	15.01	1.25	0.00
水体	0.00	0.00	0.00	4.14	231.19	0.05
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	1446.34

面积单位: km².

一带;另有 454.19 km² 转为林地,主要发生在大凌河中上游地区.

5 结论

通过分析和预测大凌河流域土地利用格局,得出如下结论:

1) 2000—2020 年大凌河流域土地利用以耕地和

草地为主,二者占比超过 80%. 近 20 年间,研究区内林地、草地和建设用地面积不断增加,耕地面积持续减少,且减少的速度在加快,前后两个 10 年分别减少了 132.85 km²、1 360.13 km², 耕地面积占比由 2000 年的 53.23%,减少为 2020 年的 46.02%. 林地和草地增加主要位于大凌河上游和下游, 建设用地增加主要位于朝阳市和锦州市周边. 这些变化表明区域内“退耕还林还草”工程实施效果明显,建设用地的扩张规模基本可控.

2) 从土地利用动态度分析来看,近 20 年来,大凌河流域综合土地利用动态度从 2000—2010 年期间的 43.53%,下降到 2010—2020 年期间为 10.36%,处于不断减少的状态. 单地类来看,湿地动态度最大,平均每年增加 8.38%. 表明区域土地利用方式趋于稳定,湿地等生态系统正在恢复.

3) 2000—2020 年间,大凌河流域土地利用程度综合指数由 2000 年的 262.53 变为 2020 年 259.91,表明区域土地处于衰退期,土地开发利用程度在逐步降

低,自然生态系统正在恢复之中。

4)基于 2010—2020 年土地利用变化概率矩阵,利用 CA-Markov 模型预测了大凌河流域在自然条件下 2030 年土地利用格局,模拟精度 Kappa 系数为 0.8835,说明结果可靠。统计表明,2030 年,大凌河流域耕地面积将进一步减少 1 699.92 km²,主要变为草地、建设用地和林地。当然,土地利用变化预测是一个系统工程,除了历史土地变化规律外,还受到人口、经济、环境和土地调控政策等多因素的影响,今后研究中需综合考虑其他因素,进一步优化预测模型。

参考文献(References):

- [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 J Y, Ning J, Kuang W H, 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.
- [2]侯西勇,常斌,于信芳. 基于 CA-Markov 的河西走廊土地利用变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 286—291.
Hou X Y, Chang B, Yu X F. Land use change in Hexi Corridor based on CA-Markov methods [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(5): 286—291.
- [3]陈龙泉,郑海金. 基于 Markov-CA 的土地利用/土地覆盖变化动态模型研究[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(1): 36—38.
Chen L Q, Zheng H J. Dynamic models of land use/land cover changes based on Markov-CA [J]. Journal of Geomatics, 2004, 29(1): 36—38.
- [4]汤洁,汪雪格,李昭阳,等. 基于 CA-Markov 模型的吉林省西部土地利用景观格局变化趋势预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2): 405—411.
Tang J, Wang X G, Li Z Y, et al. The tendency forecast on land use landscape pattern change in western Jilin Province based on CA-Markov model [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 405—411.
- [5]马梓策,于红博,张巧凤,等. 基于 CA-Markov 模型的锡林河流域土地利用变化及预测分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 169—177.
Ma Z C, Yu H B, Zhang Q F, et al. Land use change and forecast analysis in the Xilin River Basin based on CA-Markov model [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 169—177.
- [6]张永民,赵士洞,Verburg P H. CLUE-S 模型及其在奈曼旗土地利用时空动态变化模拟中的应用[J]. 自然资源学报, 2003, 18(3): 310—318.
Zhang Y M, Zhao S D, Verburg P H. CLUE-S and its application for simulating temporal and spatial change of land use in Naiman Banner [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(3): 310—318.
- [7]涂小松,濮励杰,吴骏,等. 基于 SLEUTH 模型的无锡市区土地利用变化情景模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 860—865.
Tu X S, Pu L J, Wu J, et al. Using SLEUTH model to simulate land use change scenarios in Wuxi district [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(6): 860—865.
- [8]陈海,王涛,梁小英,等. 基于 MAS 的农户土地利用模型构建与模拟——以陕西省米脂县孟岔村为例[J]. 地理学报, 2009, 64(12): 1448—1456.
Chen H, Wang T, Liang X Y, et al. Simulation and application of household's LUCC based on a multi-agent system: A case study for Mengcha Village of Mizhi County of Shaanxi Province [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(12): 1448—1456.
- [9]Muller M R, Middleton J. A Markov model of land-use change dynamics in the Niagara Region, Ontario, Canada [J]. Landscape Ecology, 1994, 9(2): 151—157.
- [10]Subedi P, Subedi K, Thapa B. Application of a hybrid cellular automaton-Markov (CA-Markov) model in land-use change prediction: A case study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida [J]. Applied Ecology and Environmental Sciences, 2013, 1(6): 126—132.
- [11]Halmy M W A, Gessler P E, Hicke J A, et al. Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA [J]. Applied Geography, 2015, 63: 101—112.
- [12]于涛,沈浩,仲嘉亮. 基于 CA-Markov 模型的新疆克州土地利用动态模拟研究[J]. 新疆环境保护, 2008, 30(1): 11—14.
Yu T, Shen H, Zhong J L. Dynamic analogue research of land utilization of Kizilsu Kirgiz Autonomous Prefecture Xinjiang base on CA-Markov model [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2008, 30(1): 11—14.
- [13]杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(5): 414—418.
Yang G Q, Liu Y L, Wu Z F. Analysis and simulation of land-use temporal and spatial pattern based on CA-Markov model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2007, 32(5): 414—418.
- [14]施成超,周英,刘滢,等. 基于 CA-Markov 模型的云南省德宏州土地利用变化和预测研究[J]. 西部林业科学, 2022, 51(1): 102—109.
Shi C C, Zhou Y, Liu Y, et al. Modeling and prediction of land use change in Dehong Prefecture of Yunnan Province based on CA-Markov model [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(1): 102—109.
- [15]张晓娟,周启刚,王兆林,等. 基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 268—277.
Zhang X J, Zhou Q G, Wang Z L, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges reservoir area based on MCE-CA-Markov [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 268—277.

- [16]黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(12): 107-116.
- Li Y Y, Chang J X, Wang Y M, et al. Land use simulation and prediction in the Yellow River Basin based on CA-Markov model[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(12): 107-116.
- [17]王禹浪, 孙军, 王文轶. 大、小凌河流域的古代文明与历史文化[J]. 黑龙江民族丛刊, 2008(1): 83-88.
- Wang Y L, Sun J, Wang W Y. Ancient civilization and culture along the Big and Small Ling River[J]. Heilongjiang National Series, 2008(1): 83-88.
- [18]邸志强, 金洪涛, 苗英, 等. 辽西蓄水构造及找水方向[J]. 地质与资源, 2007, 16(2): 112-115.
- Di Z Q, Jin H T, Miao Y, et al. Water storage structure and water search target in western Liaoning Province[J]. Geology and Resources, 2007, 16(2): 112-115.
- [19]裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 525-531.
- Pei L, Chen C, Dai J G, et al. Research on forecast trend of land use and land cover change in Daling River Basin based on Markov model[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 525-531.
- [20]魏晶, 王涌翔, 吴钢, 等. 辽西大凌河流域土地利用变化及驱动力分析[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 559-563.
- Wei J, Wang Y X, Wu G, et al. Driving forces analysis of land utilization in Dalinghe River watershed of western Liaoning Province during 1987-2002[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(3): 559-563.
- [21]陈军, 陈晋, 廖安平, 等. 全球地表覆盖遥感制图[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Chen J, Chen J, Liao A P, et al. Remote sensing mapping of global land cover[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [22]王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87.
- Wang X L, Bao Y H. Study on the methods of land use dynamic change research[J]. Progress in Geography, 1999, 18(1): 81-87.
- [23]朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- Zhu H Y, Li X B. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(5): 643-650.
- [24]杨佳佳, 张一鹤, 冯雨林, 等. 松嫩平原东部土地利用时空动态变化分析[J]. 地质与资源, 2020, 29(6): 627-634, 602.
- Yang J J, Zhang Y H, Feng Y L, et al. Spatiotemporal dynamic change analysis of land use in eastern Songnen Plain[J]. Geology and Resources, 2020, 29(6): 627-634, 602.
- [25]张安定, 李德一, 王大鹏, 等. 山东半岛北部海岸带土地利用变化与驱动力——以龙口市为例[J]. 经济地理, 2007, 27(6): 1007-1010.
- Zhang A D, Li D Y, Wang D P, et al. Analysis of land use dynamic changes and its driving forces in the north of Shandong Peninsula: Taking Longkou as an example[J]. Economic Geography, 2007, 27(6): 1007-1010.
- [26]张俊平, 李净. 基于 CA-Markov 模型的甘州区土地利用变化预测分析[J]. 中国农学通报, 2017, 33(4): 105-110.
- Zhang J P, Li J. Prediction and analysis of land use change based on CA-Markov model in Ganzhou District[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(4): 105-110.
- [27]刘淑燕, 余新晓, 李庆云, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土丘陵区土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 297-303.
- Liu S Y, Yu X X, Li Q Y, et al. Land use change in loess hilly region based on CA-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(11): 297-303.
- [28]何丹, 周璟, 高伟, 等. 基于 CA-Markov 模型的滇池流域土地利用变化动态模拟研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(6): 1095-1105.
- He D, Zhou J, Gao W, et al. An integrated CA-Markov model for dynamic simulation of land use change in Lake Dianchi watershed[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(6): 1095-1105.
- [29]席梅竹, 赵中秋, 吴攀升, 等. 基于改进 CA-Markov 模型的溥沱河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 150-158.
- Xi M Z, Zhao Z Q, Wu P S, et al. Changes and predictions of land use in mountain section of the Hutuo River Basin based on improved CA-Markov model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 150-158.