海河上游清水河流域土地利用变化特征

刘孟竹，张红娟，杨 佳，裴宏伟
（河北建筑工程学院 市政与环境工程系 河北 张家口 075000）

摘 要：[目的] 海河上游清水河流域处于半湿润向半干旱过渡的生态环境脆弱区，研究该地区土地利用时空变化规律，旨在为当地生态环境建设提供一定的决策依据。[方法] 基于清水河流域 1990—2018 年 4 期 Landsat 遥感影像解译的土地利用数据，在优选的最佳空间尺度下通过 Logistic-CA-Markov 模型对清水河流域土地利用变化进行分析和预测。[结果] ①近 30 a 来清水河流域土地结构主要以耕地、林地、草地为主，三者面积之和比例超过总量的 96%；其中，建设用地面积持续增加且变化程度最剧烈。②通过对受试者工作特征(ROC)曲线进行拟合优度评价，在 100 m×100 m 空间尺度下，各个地类 ROC 值达到最优水平。③2018—2027 年间，草地和水域面积预计分别减少 42.44，5.43 km^2，耕地、林地和建设用地面积分别增加 16.51，16.89，14.67 km^2。[结论] ①100 m×100 m 是针对具有典型小流域特征的清水河流域进行预测模拟研究的最合适尺度；②因 2022 冬奥会的筹备促使建设用地的开发力度加大将成为未来清水河流域土地格局变化的主要因素。

关键词：清水河流域；遥感；土地利用；Logistic-CA-Markov 模型；预测模拟
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)03-0147-08 **中图分类号**：F301.2

文献参数：刘孟竹，张红娟，杨佳，等.海河上游清水河流域土地利用变化特征[J].水土保持通报，2020，40(3)：147-154. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.021；Liu Mengzhu，Zhang Hongjuan，Yang Jia，et al. Characteristics of land use change in Qingshui River watershed in upper reaches of Haihe River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(3)：147-154.

Characteristics of Land Use Change in Qingshui River Watershed in Upper Reaches of Haihe River

Liu Mengzhu，Zhang Hongjuan，Yang Jia，Pei Hongwei
（*Department of Municipal and Environmental Engineering，Hebei University of Architecture，Zhangjiakou，Hebei* 075000，*China*）

Abstract：[Objective] The Qingshui River watershed in the upper reaches of the Haihe River is located in a fragile ecological region where climate varies from arid to semiarid. The spatiotemporal variation of land use in this region was studied for local decision making on ecological construction. [Methods] Based on land use data interpreted from Landsat remote-sensing images at four periods during 1990—2018，the land use changes of the Qingshui River watershed were analyzed and predicted by using the logistic-CA-Markov model under an optimal space scale. [Results] ① During the past 30 years，the land use of the Qingshui River mainly consisted of cultivated land，forest land，and grassland，and the total area of these three land use types accounted for more than 96% of the study area. The area of construction land increased，and its change intensity was the maximum. ② The receiver operating characteristic (ROC) value of each land type reached the best level at a scale of 100 m×100 m，which was obtained based on the goodness-of-fit tests for ROC curves. ③ The area of grassland and water area would decrease by 42.44 and 5.43 km^2，respectively，from 2018 to 2027. The areas of cultivated land，forest land，and construction land would increase by 16.51，16.89，and 14.67 km^2，

收稿日期：2020-03-15 **修回日期**：2020-04-01
资助项目：国家自然科学基金项目“北方农牧交错带典型集约菜田蒸散及水盐运移过程研究(41701017)”；国家重点研发计划项目“京津冀水资源安全 保障技术研发集成与示范应用(2016YFC0401403)”；河北省科技厅项目“河北建筑工程学院院士工作站建设专项(199A4201H)”。
第一作者：刘孟竹(1994—)，男(汉族)，湖北省荆州市人，硕士研究生，研究方向为环境生态学。Email：378765098@qq.com。
通讯作者：裴宏伟(1987—)，男(汉族)，河北省张家口市人，博士，副教授，硕士生导师，从事流域生态水文和城市生态学研究。Email：hwpei@sjziam.ac.cn。

respectively. [Conclusions] ① The scale of 100 m×100 m was the suitable space scale for the prediction simulation on a typical small watershed, such as the Qingshui River watershed. ② The preparations for the 2022 Winter Olympics drastically accelerated the exploitation intensity of construction land, and they were the dominant driver of the land structure change in the Qingshui River watershed.

Keywords: Qingshui River watershed; remote sensing; land use; logistic-CA-Markov model; prediction simulation

随着气候变化、人口激增、环境恶化和能源短缺等一系列全球性问题的持续发酵,土地利用/覆盖变化(land use/cover change, LUCC)的研究逐渐成为全球环境变化研究中的核心部分[1]。其中,应用多种方式构建 LUCC 的动态变化和预测模型,一直是的 LUCC 研究的热点[2]。近年来,随着遥感影像向着高分辨率的方向发展,使得土地利用变化与遥感影像在时空尺度上具有了更高的一致性,利用高时间、高空间分辨率的影像数据来研究多时空尺度的土地利用变化已成众多学者的选择[3-4]。多尺度的遥感影像同样被应用于土地利用/覆盖变化的各种预测模型[5]。在这些预测模型中,Logistic 回归模型、灰色模型、Markov 模型等数量变化预测模型以及元胞自助机、多智能体系统、CLUE-S 等空间预测模拟模型,均得到了较为广泛的应用。然而目前,国内外学者更青睐于采用多模型结合的耦合模型方法来深入到对土地利用的预测模拟研究中,如 CA-Markov 模型,MAS-CA 模型,Logistic-CA-Markov 和 WLC-CA-Markov 模型等。

从已有的 LUCC 相关的研究来看,理论和方法均已趋于成熟,但仍然存在一些问题,如:①土地单元面积的选择大小不一,未能对土地预测模拟中产生的尺度效应问题有效考虑;②研究区选择多为热点区域,空间尺度上至国家、江河经济带、城市结合群,下至市、区、县不等,而一些与水文、气候条件响应强烈的小流域尺度区域往往缺乏重视。位于海河上游的清水河流域具有典型小流域尺度特征,而且在过去 20 a 经历了剧烈的土地结构变化。一方面,该流域生态环境比较脆弱,全国 400 mm 年等降水量线从流域穿过,整个流域都处在半湿润向半干旱过渡的生态环境脆弱区,流域内的植被条件和水文环境对于气候变化和人类活动都极为敏感[6];另一方面,由于该区城乡建设加快以及 2022 冬奥会的筹办,该区已计划建设 76 个场馆相关项目,其中滑雪旅游和竞技滑雪可供开发的面积多达 300 km^2,2018—2019 年仅雪季期间游客涌入人次多达 2.80×10^6,在未来冬奥会期间该情形将更加严峻。上述种种因素会使得流域内土地格局变化十分显著,相关的水文、环境条件也随之改变。然而该区地广人稀,地方政府在面对如此大量繁多的土地资源时对于土地的建设管理不能一概而论,因而需要有相应的针对性地制定土地资源的管理和可持续利用措施。目前针对该流域的土地利用变化的相关研究集中在崇礼区,而非与水文条件密切相关的清水河流域,时间也较为滞后,特定地关注其流域空间单元尺度效应以及模型预测的研究尚不多见。基于此,本文以清水河流域为研究区,利用遥感影像解译的土地利用数据分析流域内土地利用时空变化特征;同时,考虑到社会数据的可比性、可获得性等因素,选择与清水河流域边界几乎吻合的崇礼区作为土地预测模拟的研究区,结合该区域土地数据以及栅格化的驱动因子数据共设计了 6 个空间尺度并从中优选出最佳尺度,在该尺度下通过耦合 Logistic-CA-Markov 模型进行流域内的土地利用变化预测模拟,以期对清水河流域土地利用/覆盖方面的研究做必要补充,同时为当地有关土地资源开发利用决策提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海河上游清水河流域介于 114°47′—115°31′E,40°49′—41°16′N,位于河北省西北部,地处内蒙古高原与华北平原过渡地带。流域内气候属东亚大陆性季风气候中温带亚干旱区,冬季干冷,春季回温较快,大风日数较多。多年平均降水量约 442 mm,降雨主要集中于 6—9 月;多年平均气温 3.9 ℃,年内季节均温最高相差 40 ℃[7]。流域总面积约 2 200 km^2,东高西底,海拔高度约为 780～2 200 m[8],地貌属坝上坝下过渡型山区,山峰陡峭,海拔多在 1 500～2 000 m 之间。受山区地貌影响,局部冰雹、暴雨灾害时有发生。在地理、气候、人为等多重综合因素影响下,清水河流域水土流失较为严重,生态环境极为脆弱,曾在 1983 年被国家列入永定河流域重点治理区。

清水河流域崇礼区人口在 1990—2018 年期间由 1.20×10^5 增长至近 1.30×10^5,整个行政区总面积约 2 326 km^2,人口密度在 51.6～55.9 人/km^2,可谓是“地广人稀的燕赵大地”。2017 年当地 5 大行业产值结构中,农、林、牧产值比例分别大致为 53%,21%,25%,渔业和农林渔牧服务业占比均不到 0.01%。其中,蔬菜产值占 5 大行业产值的近 42%。

1.2　数据源及其处理

1.2.1　*数据源*　研究选取的 1990,2000,2009,2018 年 4 期 Landsat OLI/TM 影像以及 DEM 数据均来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),分辨率均为 30 m。4 期影像成像时间均选在 10 月份避开集中降雨期,云量均低于 2%且成像质量较好。鉴于清水河流域边界和张家口市崇礼区行政边界基本吻合,流域内的社会数据和地理数据来源于《张家口统计年鉴》和国家基础地理数据中心(http://www.ngcc.cn/ngcc)。

1.2.2　*影像数据处理*　在 ENVI 软件中完成影像的几何校正、辐射校正、裁剪镶嵌等预处理工作;分类方法采用监督分类中分类精度和 kappa 系数较高的最大似然法[9];土地利用分类根据中国科学院土地利用/覆盖分类体系中一级分类标准并参考流域内的实际情况分为 5 类:耕地,林地,草地,水域,建设用地;将分类后的影像进行小斑块处理,并根据 Google Earth 中的邻近时段相同地区的高分辨影像结合目视解译法做分类后处理。通过生成的随机样本点在 Google Earth 对比目视判读进行分类精度验证。最后得到的 4 期影像分类精度均在 85%～90%,可以满足后续的分析要求。

1.2.3　*驱动因子栅格化*　土地利用/覆盖变化驱动主要受自然和人类活动两方面因素影响[10]。根据驱动因子的数据可获取性、时空一致性、因子显著性以及可量化性等原则,结合清水河流域崇礼区内的实际情况,共选择了 7 个因子:坡度、坡向、高程、人口密度和距河流、道路、村落距离。以上数据采用的 ArcMap 软件中的 Aspect,Slope,Kernel Density,Distance 等工具栅格化所得。因所选区域较小,降雨、温度等气象数据在栅格内变化较均质,故暂不考虑。同时将土地利用的 5 个地类数据单独成层并通过 Reclass 工具进行二值化,每一图层对应的地类栅格值为 1,非该地类均为 0。

1.2.4　*空间尺度设计*　栅格数据单元格大小均以 30 m 为基准,在 ArcMap 中利用 Resample 工具,设计了 30 m×30 m,60 m×60 m,100 m×100 m,150 m×150 m,200 m×200 m,250 m×250 m 共计 6 种尺度的栅格数据,部分空间尺度区间不一致主要是综合考虑尺度间隔的均匀性以保证更细节的变化特征同时在更大尺度范围进行对结果进行比较。所有的栅格数据经过 Raster to ASCII 工具转换成文本数据,具体过程是在 6 种不同尺度下,将各个土地利用类型二值化数据分别与 7 个驱动因子数据结合对应生成 5 组,经过 Dyna-CLUE 软件全部转换成 SPSS 中待分析的共计 30 个文本数据。

1.3　研究方法

1.3.1　*土地利用时空变化研究*　本文采用土地动态度来定量分析流域内土地利用的变化剧烈程度,用土地转移矩阵来研究各阶段时期内土地的动态转移变化。单一土地利用动态度指某一区域内在一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况,此指标可定量描述研究区内某种土地类型在研究时段内变化的速率。表达式如下:

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times 100\% \tag{1}$$

式中:K 为研究时段内某一土地利用类型动态度;U_a,U_b 分别为研究初期和研究末期某一种土地利用类型的数量;T 为研究时段长[11]。

土地转移矩阵反映了某一区域在研究初期和研究末期各类土地类型面积互相转化的动态信息,不仅可以定量地表明不同土地利用类型之间的转化情况,还可以揭示不同土地利用类型间的转移速率。转移矩阵表达式参考乔伟峰等[12]的研究,表达如下:

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

式中:S 为面积(km^2);n 为转移前后土地利用类型数;$i,j(i,j=1,2,3,\cdots,n)$分别表示转移前后的土地类型;S_{ij} 表示转移前的 i 类土地转换成转移后 j 类土地类型的面积。

1.3.2　*土地利用预测模拟*　尺度效应是指当空间数据经聚合而改变其粒度或栅格单元大小时,分析结果也随之变化。反映土地利用类型及其面积变化的数据必然涉及尺度效应问题[13]。在土地利用预测模拟中,选择合适的空间尺度能够使得模型预测精度更高,结论也更合理。Logistic 回归模型是一种广义的线性回归分析模型,被广泛应用于土地利用分析中,能够很好地揭示土地变化和驱动因素之间的定量关系[14]。本文采用 Logistic 回归分析方法得到受试者工作曲线(receiver operating characteristic,ROC)作为参考来优选出最佳空间尺度[15],以 ROC 曲线下的面积值作为精度指标来检验回归方程的解释效果[16],从而判定预测模型的模拟精度。当 0.50<ROC 值<0.70 之间时,回归方程具有一般解释效果;当 ROC 值>0.70 时,方程具有良好解释效果,值越高代表解释力度越大。

元胞自助机(cellular automata,CA)模型是一种

在空间上相互作用、时间上又具有因果关系的一种网格动力学模型，具有处理复杂空间系统的能力[17]。Markov 模型基于 Markov 链，因其较好的稳定性和无后效性，能够预测土地利用变化中各个时刻的变动过程[18]。CA-Markov 模型综合了 Markov 模型的时序预测和 CA 模型的空间分布模拟，广泛被应用于土地利用数量变化、空间格局变化的模拟中[19]。

通过耦合 Logistic-CA-Markov 模型，首先对崇礼区 2009 年的参数文本数据进行二元 Logistic 回归分析并分析各个尺度下的 ROC 曲线从中优选出最佳尺度，在该尺度下，将回归分析得到的 5 种地类分布适宜性图通过 IDRISI 软件中的 collection editor 工具组合生成各类土地分布概率适应性图集并作为 CA 模型的转换规则，同时以 2009 年土地利用分类结果和 Markov 工具中生成的 2000—2009 年面积转移矩阵作为预测模拟初始参数，共同参与到 CA-Markov 模型进行崇礼区 2018 年的土地预测模拟；将生成的土地分类预测结果与 2018 土地实际分类与进行叠置分析，采用 Kappa 系数、混淆矩阵等指标验证模型预测模拟的精度，在模拟精度良好的情况下利以同样方法进行 2027 年的预测模拟。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化分析

1990—2018 年清水河流域 4 期遥感影像解译土地利用分类结果如图 1 所示，具体数据如表 1 所示。

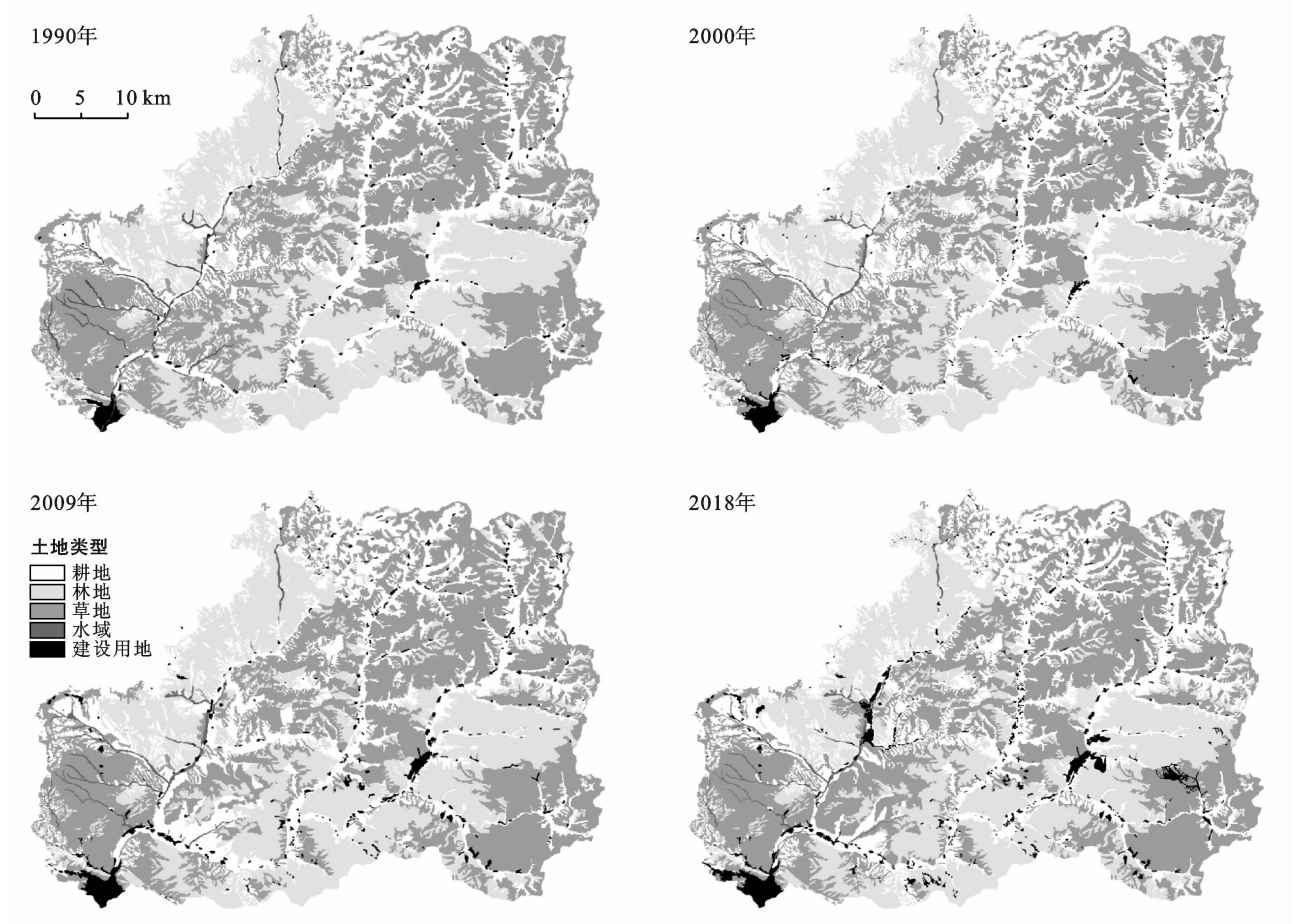


图 1 1990－2018 年清水河流域土地利用变化特征

从整个时期的土地组成结构来看，清水河流域土地类型总体上主要以林地、草地、耕地为主，三者面积之和占据流域总面积 96.00%以上，水域和建设用地面积在 2000 年共计占比不到 2.00%，在 2018 年占比达到 3.96%；从流域的土地结构可以分析，其与整个研究区的地貌存在一定相关性，清水河流域最低海拔在 800 m 左右，群山峻岭密布，人类活动区域相对较小，适宜林地、草地的生长；从总的变化形势上看，1990—2018 年清水河流域土地利用变化中，林地、草地、和水域是处于减少态势，耕地面积变化不明显，而建设用地面积呈显著上升趋势，近 30 a 来增加了近 51.72 km^2；分阶段来看，1990—2000 年，耕地变更的面积最大，10 年间增加了约 44.74 km^2，建设用地变化的面积最小，仅 3.20 km^2；2000—2009 年期间仅有耕地面

积在减少,其余四种土地类型面积均有不同程度的增加;2009—2018 年间,流域内仅有耕地和建设用地面积处于增加态势,增加面积分别为 20.24,18.02 km^2;林地、草地和水域面积分别减少了 12.72,20.76,4.84 km^2。

单一土地动态度反映的是某一类型土地变化的剧烈程度。由表 1 可知,在 1990—2018 年整个时期内,清水河流域内建设用地的变化速率最为剧烈,其中以 2000—2009 年的变化较为显著;林地面积无明显变化,其动态度最高仅为 0.21%;分阶段比较,2000—2009 年土地整体变化剧烈程度较显著于其余 2 个时期,且在每一阶段内,土地变化速率大小按地类依次排序为:建设用地>水域>耕地>草地>林地。综合各个地类单一动态度可以看出,近 30 a 来清水河流域内农业用地更迭趋势比较平稳,而建设用地的增加较为迅猛,当地社会对交通用地、工矿地和居民用地等建设用地开发需求较大。

表 1　1990—2018 年清水河流域土地利用类型面积与动态度

土地类型	面积/km^2				动态度/%			
	1990 年	2000 年	2009 年	2018 年	1990—2000 年	2000—2009 年	2009—2018 年	1990—2018 年
耕 地	593.20	637.94	584.23	604.47	0.75	−0.94	0.38	0.07
林 地	669.39	656.36	660.30	647.58	−0.19	0.07	−0.21	−0.12
草 地	899.92	863.96	879.76	859.00	−0.40	0.20	−0.26	−0.16
水 域	20.87	17.09	20.64	15.79	−1.81	2.31	−2.61	−0.87
建设用地	19.68	22.88	53.38	71.40	1.63	14.81	3.75	9.39

2.2　土地利用转移矩阵分析

考虑到社会数据的可获取性,仅对 2000—2018 年 3 期的清水河流域土地转移情况进行分析。通过叠置分析得到不同阶段的土地利用转移矩阵如表 2 所示。从整个阶段来看,清水河流域在 2000—2018 年期间,耕地、草地和建设用地的的转换较明显,约有 22.30 km^2 的草地和 29.63 km^2 的建设用地由耕地转换而来;水域转为其它类型土地的程度不够显著,最多仅有 1.17 km^2 水域的转出;农业用地到建设用地的转入较为显著,转入面积约 53.25 km^2,从实际情况考虑是由于近年来当地人口增多和冬奥会场地筹建等因素对建设用地的需求增大。

分阶段来看,2000—2009 年和 2009—2018 年各土地流转程度比较相似,均有大量耕地和草地互相转化,转化面积在 40～50 km^2 不等;其中,2000—2009 年约有 5.37 km^2 的水域由农业用地转入,这与近年来当地洪水等自然灾害频发以及农业经济发展对用水需求增多等因素进而引起对水库、水坝等水利设施的新建扩建有关;建设用地也基本由农业用地转入而来,转入面积的大小按地类排序依次为:耕地>草地>林地。其中有一定程度的林草地转入耕地,该区 2000 年后虽然已经实行退耕还林还草政策,但少量开荒复垦现象仍然存在,同时不排除分类精度带来的影响。

表 2　2000—2018 年清水河流域土地利用转移矩阵　　km^2

项 目	土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2000—2009 年面积	耕 地	535.84	3.99	39.65	0.67	4.06
	林 地	26.70	627.21	5.90	0.01	0.46
	草 地	52.16	19.94	806.42	0.36	0.85
	水 域	2.11	1.14	2.12	15.20	0.06
	建设用地	21.14	4.08	9.87	0.84	17.45
2009—2018 面积	耕 地	521.19	27.21	47.28	2.09	6.69
	林 地	4.77	622.60	18.05	0.99	1.17
	草 地	43.95	6.11	804.73	1.91	2.30
	水 域	0.52	0.03	0.15	14.98	0.14
	建设用地	13.78	4.36	9.51	0.67	43.08
2000—2018 面积	耕 地	583.81	2.13	13.42	0.70	4.41
	林 地	1.71	644.64	0.74	0.11	0.48
	草 地	22.30	0.55	834.82	0.34	0.99
	水 域	0.48	0.01	0.40	14.87	0.03
	建设用地	29.63	9.04	14.58	1.17	16.97

2.3 尺度模拟结果

经 SPSS 中二元 Logistic 回归分析得到结果如图 2 所示。通过对比各个地类的 ROC 值可以观察到，随着空间尺度的不同，各个地类的 ROC 值也随之产生不同变化，即驱动因子对各个地类的解释水平随着空间尺度的不同产生了“尺度效应”的特征。

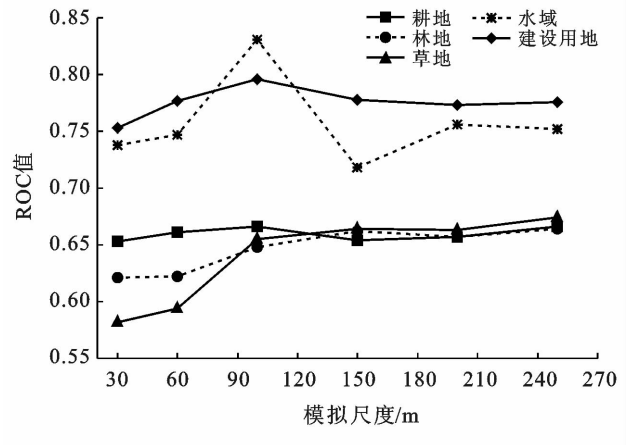


图 2 清水河流域 6 种尺度下的 ROC 值

由图 2 可知，在空间尺度为 100 m×100 m 时，水域、耕地和建设用地 ROC 值出现转折趋势，其中，水域 ROC 值的转折尤为明显且达到了峰值，说明该尺度下水域与驱动因子的拟合方程的可信水平较高；此外，在 100 m 之后，草地和建设用地 ROC 值接近最大值且变化趋势近乎平稳，尺度的改变对模型回归拟合的影响趋于微小。以上结果表明，该尺度下的二元 Logistic 回归模型相比其余 5 种尺度其拟合效果更优，因此可以认为 100 m×100 m 是进行本次土地预测模拟的最佳空间尺度。由图 3 可知，在选定的最佳空间尺度下，各类土地 ROC 值分别为耕地 0.67，林地 0.65，草地 0.66，水域 0.83，建设用地 0.79。通过比较，耕地、林地、草地的 ROC 值均接近 0.70，水域和建设用地均大于 0.70，回归方程拟合效果较好，ROC 值满足检验标准，回归模型的结果可以作为 CA-Markov 模型中的转换规则进行下一步的土地利用变化预测模拟。

2.4 预测结果与精度验证

在 ENVI 软件中对 2018 年土地实际分类和预测分类结果。进行混淆矩阵运算，结果如表 3 所示，得到预测图与实际图中像元一致的个数占比为 84.68%，kappa 系数为 0.78。一般而言，当 kappa 系数大于0.75 时可以认为两种分类图像一致性较高，模型模拟精度满足预测要求，可以进行下一时期的模拟。将数据对应的年份均更新至 2018 年，以此作为模拟的初始参数进行 2027 年的土地预测模拟，结果如图 3 所示。

表 3 2018 年清水河流域崇礼区土地模拟混淆矩阵

项 目		2018 年实际				
	土地类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地
2018 预测	耕地	51 241	5 581	3 991	163	1 723
	林地	933	63 801	8 190	108	732
	草地	7 897	1 796	78 068	200	1 199
	水域	159	139	16	1 098	101
	建设用地	1 513	715	589	42	3 654

注：每个像元代表实地 100 m×100 m。

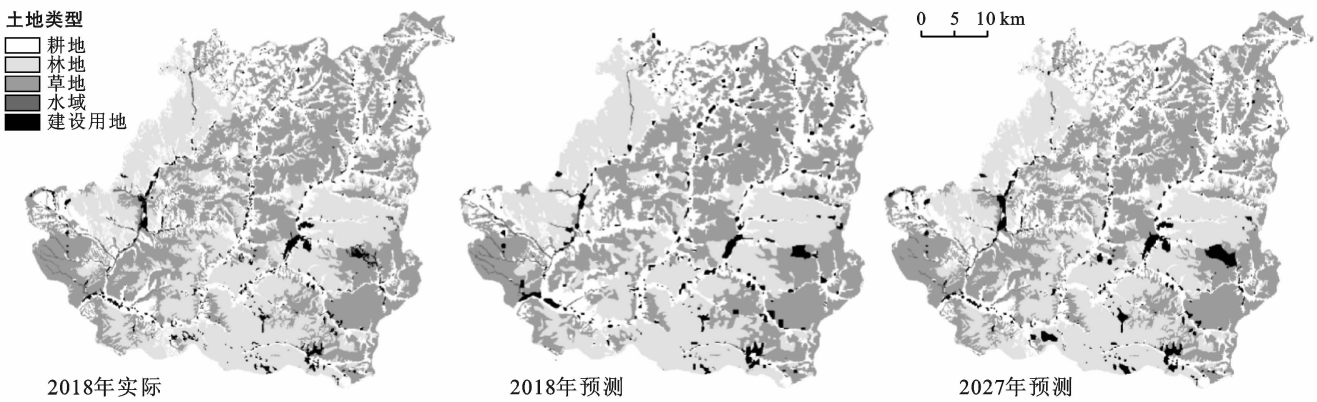


图 3 清水河流域崇礼区土地利用变化模拟

表 4 为清水河流域崇礼区土地利用的预测结果。由表 4 可知，2018 年预测模拟得到的崇礼区土地利用变化面积中除了建设用地的误差稍大以外，其余 4 类土地预测的误差均在 1.50%～6.02%，误差在可接受范围内。结合当地实际情况分析，对 2018 年建设用地面积预测误差较大的主要原因是因为崇礼区于当年新建了 2022 年冬奥会的滑雪场地，从而导致预测值的误差较大。因此，排除该因素的干扰，该模型预测模拟的实际精度会更高。对 2027 年进行预测模拟得到的土地分类结果如表 4 所示，预计未来 9 a，崇礼区内的耕地、林地和建设用地均会增加 14.00～17.00 km^2 不等，草地和水域面积将分别减少 42.44，5.43 km^2。

表 4　清水河流域崇礼区土地利用状况预测

土地类型	2018 年预测值/km²	2018 年实际值/km²	较预测值/km²	2018 误差/%	2027 年预测值/km²	较 2018 年差值/km²
耕 地	627.23	617.94	−9.29	−1.50	634.45	16.51
林 地	737.74	720.54	−17.20	−2.39	737.43	16.89
草 地	891.91	908.95	17.04	1.87	866.51	−42.44
水 域	15.14	16.11	0.97	6.02	10.68	−5.43
建设用地	65.13	74.09	8.96	12.09	88.76	14.67

3　讨论与结论

3.1　讨 论

本研究中,由于所选研究区域较小,加之影像分辨率的限制,经目视判读选取的分类训练样本中会无可避免地掺杂进混合像元,对土地的分类精度造成一定影响;清水河流域自 2000 年实施退耕还林还草政策后,林地开荒、草地复垦现象得到显著改善但并未完全杜绝,经各期土地数据叠置分析后检验可知,受分类精度的影响出现部分林草地逆向转化为耕地的不合理转入,同时 2000—2010 年耕地较为显著下降印证了该政策取得了一定成效。此外,占地面积较小的水域和建设用地均在分类后处理中由目视解译所得,影像时间的选取已考虑降雨期和冬季结冰的影响均选择在 10 月份,所得分类数据中,清水河流域农业用地占地比例与建设用地面积与钟良子等[20],王磊等[21]所得清水河流域以及崇礼区的数据结果基本一致。经过 Google Earth 高精度实地影像检测研究区内未利用地甚少,故未对其进行分类,同时考虑流域内河流时常发生断流、降水量不稳定,如 2009 年崇礼区降水量仅为 334 mm,而其前后两年却高达 540 mm 以上,即使同一时期不同年份的河流面积变化仍可能不同,本研究参考水域二级分类将水库坑塘、水域设施均也纳入其中。在可控的分类精度影下本文结果具有一定参考性。

本文出于对数据可获取性以及可量化性等原则的考虑,假定了降雨、蒸发等气象因素在单元栅格面上对该类小空间尺度区域土地流转的影响较为均质,未能对该类因素在驱动土地利用变化的影响程度上做深入研究。在未来的研究中会考虑选择更高分辨率的影像和高精度的分类算法,对驱动因素的考量也会更加科学。

经分析,同类土地利用预测模拟研究中研究区多集中在市及市以上区域,以行政区为对象的研究对人为、社会政策因素驱动土地格局发展上具有很好的解释水平。经参考流域面积相近且同为 CA-Markov 模型的模拟研究[22],其土地结构与动态变化与本文相似,均较为稳定;对于地域较大的研究区域笔者认为其预测结果是由 CA-Markov 模型中单个的元胞基于 Markov 链与 Logsitic 模型概率公式对于空间单元的独立计算组成,市级以上的预测模拟近似于市内各县域模拟结果的共同叠加,其结果包含多个稳定子区域模型的误差累计,而以小范围的县域为研究区其驱动因素对于 Logistic 模型的表达更敏感,小尺度区域空间异质性也相对较低减弱了结果的不确定性。鉴于清水河流域崇礼区内 2018 年 10 月许多建设项目并未完工,而 Logisric-CA-Markov 模型是基于前一时期的参数进行后一时期的模拟,其结合流域内崇礼区前一时期自然、人为政策驱动因素下土地的变化,对未来主要由冬奥会驱动下的土地格局变化仍然具有相对程度的刻画。在驱动因素方面选择了 3 个自然因素和 4 个人类活动因素,本研究主要关注 7 个驱动因素与各个地类在 Logistic 模型中不同尺度下 ROC 曲线的变化以做尺度效应分析,未对 7 个因素与各个地类之间的驱动关系进行定量描述;模拟的时间点是基于模型预测时段与前一阶段保持一致的考量。综合比较,本文中对崇礼区 2027 年的土地格局的预测模拟具有一定的参考意义。此外,经查证目前崇礼区政府针对建设土地严格管控一系列措施的出台,预计在 2022 年冬奥会步入尾声时,清水河流域内建设用地的增加将会进入饱和状态,如果考虑该影响,则模型计算出的 2027 年建设用地面积预测值可能偏高。

3.2　结 论

(1) 近 30 a 来,清水河流域土地利用类型主要以耕地、林地和草地为主,三者面积共计占比在 96%以上,其与清水河流域平均海拔较高、地貌多为陡峭山区、人类可活动区域较少等因素有关;近几年来建设用地的转入较为明显,主要是由于冬奥会的筹备新建了滑雪场以及相关场馆加大了对建设用地的开发。

(2) 对二元 Logistic 回归模型中的 ROC 曲线进行分析,可以认为适合清水河流域这类小尺度流域研究区进行预测模拟的最佳空间尺度为 100 m×100 m,该尺度下构建的方程模型对土地利用变化与驱动因素之间的定量描述具有较高的解释水平。

(3) 至 2027 年,预计清水河流域内耕地、林地和建设用地面积将呈现增加态势,草地会大幅度减少。通过调查 2018 年崇礼区的实际情况后考虑,当地虽然已建成万龙、云顶、太舞等冬奥会滑雪场地,但还未达到规划用地规模的最高值,预计未来一段时间流域内的农业用地将在冬奥会的用地需求下持续转化为建设用地。

[参 考 文 献]

[1] 刘纪远,邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展[J]. 科学通报,2009,54(21):3251-3258.

[2] 李旭亮,杨礼箫,田伟,等. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J]. 应用生态学报,2018,29(10):3487-3495.

[3] 赵珍珍,冯建迪. 1980—2016 年科尔沁沙地土地利用重心的时空迁移特征[J]. 水土保持通报,2019,39(4):256-260.

[4] 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.

[5] 周锐,苏海龙,王新军,等. 基于 CLUE-S 模型和 Markov 模型的城镇土地利用变化模拟预测:以江苏省常熟市辛庄镇为例[J]. 资源科学,2011,33(12):2262-2270.

[6] 章予舒,王立新,张红旗,等. 疏勒河流域土地利用变化驱动因素分析:以安西县为例[J]. 地理科学进展,2003,22(3):270-278.

[7] 裴宏伟,杨佳,张红娟,等. 变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J]. 南水北调与水利科技,2020,18(2):1-13.

[8] 何挺. 清水河流域多年径流量变化特征分析[J]. 海河水利,2017(3):8-11.

[9] 成淑艳,曹生奎,曹广超,等. 基于高分辨率遥感影像的青海湖沙柳河流域土地覆盖监督分类方法对比[J]. 水土保持通报,2018,38(5):261-268.

[10] 蔺卿,罗格平,陈曦. LUCC 驱动力模型研究综述[J]. 地理科学进展,2005,24(5):79-87.

[11] 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.

[12] 乔伟峰,盛业华,方斌,等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘:以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究,2013,32(8):1497-1507.

[13] 邓祥征,战金艳. 中国北方农牧交错带土地利用变化驱动力的尺度效应分析[J]. 地理与地理信息科学,2004,20(3):64-68.

[14] 谢花林,李波. 基于 logistic 回归模型的农牧交错区土地利用变化驱动力分析:以内蒙古翁牛特旗为例[J]. 地理研究,2008,27(2):294-304.

[15] Kolb M, Mas J F, Galicia L. Evaluating drivers of land-use change and transition potential models in a complex landscape in Southern Mexico [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013,27(9):1804-1827.

[16] Adler W, Lausen B. Bootstrap estimated true and false positive rates and ROC curve [J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2009,53(3):718-729.

[17] Wang Yang, Li Shuangcheng. Simulating multiple class urban land-use/cover changes by RBFN-based CA model [J]. Computers & Geosciences, 2011,37(2):111-121.

[18] 郭碧云,张广军. 基于 GIS 和 Markov 模型的内蒙古农牧交错带土地利用变化[J]. 农业工程学报,2009,25(12):291-298.

[19] 胡雪丽,徐凌,张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1652-1660.

[20] 钟良子,马俊杰,张慧卿,等. 张家口市崇礼区景观生态风险评价[J]. 河北农业大学学报,2019,42(6):30-37.

[21] 王磊,刘亭亭,谢建治. 基于 SWAT 模型的张家口清水河流域土地利用情景变化对径流影响研究[J]. 水土保持研究,2019,26(4):245-251.

[22] 肖明,吴季秋,陈秋波,等. 基于 CA-Markov 模型的昌化江流域土地利用动态变化[J]. 农业工程学报,2012,28(10):231-238.