

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.027

基于 BRT_DC_Pd 模型的土地利用模拟研究

王宇航 于强 岳德鹏 张启斌 马欢

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过对 Dyna-CLUE 模型进行改进, 嵌入 BRT 模型和 Patch-dynamics 模型, 形成 BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics 模型。以生态脆弱区典型县域磴口县为研究区, 基于 2006 年磴口县土地利用情况, 应用 BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics 模型, 对磴口县 2016 年的土地利用状况进行模拟预测, 并与目前应用较多的 Logistic_CA-Markov 模型进行对比验证。结果表明, Logistic_CA-Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.721 4, BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.782 6, 2 个组合模型的模拟结果精度较高, 均与真实解译结果具有高度一致性, 但 BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics 模型模拟精度更高, 结果更优。因此, 将 BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics 模型应用于当地土地利用变化模拟预测, 具有一定可行性, 可为当地生态治理以及相关政策的实施提供一定的参考。

关键词: Dyna-CLUE; 增强回归树; Patch-dynamics; 磴口县; 土地利用变化模拟

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)03-0225-10

Simulation of Landuse Based on BRT_DC_Pd Model

WANG Yuhang YU Qiang YUE Depeng ZHANG Qibin MA Huan

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model was formed by improving Dyna-CLUE model, by embedding BRT model and Patch-dynamics model. Based on the landuse situation in Dengkou County in 2006, a case study was conducted in Dengkou County, a typical county in the ecologically fragile region. The BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model was used to simulate the landuse situation in 2016 in Dengkou County and compared with the Logistic_CA-Markov model which was currently used more. The results showed that the Kappa coefficient of the Logistic_CA-Markov model was 0.721 4, and the Kappa coefficient of the BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model was 0.782 6. The simulation results of the two combinatorial models were highly accurate and both were highly consistent with the real interpretation results. BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model had high simulation accuracy and good result. Therefore, it is feasible to apply the BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model to the simulation and forecast of local landuse change in order to provide some reference for the implementation of local ecological control and related policies.

Key words: Dyna-CLUE; BRT; Patch-dynamics; Dengkou County; landuse change simulation

0 引言

土地利用变化受到区域自然条件和社会经济条件的综合影响和制约, 同时也影响着区域内各生态过程的变化^[1-2]。内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县位于乌兰布和沙漠东北缘, 是典型的生态脆弱带, 存

在土地沙漠化、风沙危害剧烈、水土流失严重、土壤盐渍化以及草地退化等严重的生态环境问题, 其中土地沙漠化问题严重影响磴口县的生存与发展^[3-6]。定量化模拟和预测区域的土地利用变化有助于研究土地利用对区域生态情况影响及其变化的趋势, 通过预测和优化区域土地利用格局, 为区域生

收稿日期: 2017-12-14 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371189)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD16B00)

作者简介: 王宇航(1992—), 男, 博士生, 主要从事 3S 技术在生态环境中的应用研究, E-mail: seek_wyh@163.com

通信作者: 岳德鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事景观生态学和土地评价研究, E-mail: yuedepeng@126.com

态环境保护提供决策依据^[2]。

随着3S技术的飞速发展,土地利用研究的重点开始向过程、趋势及驱动力研究推进,研究的形式由静态向时空动态模拟形式转化,同时模拟的方法也从传统的单一模型向多元组合模型发展^[7-8]。近年来,许多学者运用CA-Markov、CLUE-S_Markov模型来模拟预测土地利用变化,王友生等^[9]基于CA-Markov模型模拟预测流域土地利用变化,陆汝成等^[10]以江苏省环太湖地区为研究区并基于CLUE-S_Markov模型进行土地利用情景模拟研究。CA模型在构建空间复杂系统方面具有较大优势^[11],但其缺陷在于是一种自下而上的模型,难以进行宏观情景模拟,且未设置限制元胞状态改变的模块,难以有效表达模拟地理因素^[12]。Dyna-CLUE模型克服了这一限制,是一种自下而上与自上而下相结合的模型,VERBURG等^[13-14]在CLUE-S模型的基础上,增加了处理邻域影响的模块,并设计了土地利用连续变化的模拟机制,通过模拟不同土地利用类型之间的竞争关系将各土地利用类型分配到最适宜的空间位置,实现土地利用格局的优化,从而使得Dyna-CLUE模型在模拟土地利用变化上相比于CA模型有明显优势^[15]。Markov模型的局限性在于要求预测对象的变化过程是平稳的^[15],在预测期内要求预测对象保持某一固定的转移概率,但实际上土地利用的变化会因诸多自然或人为因素的影响而随时间有所变化,并不是一个真正的Markov过程^[16-18],而Patch-dynamics模型来源于景观生态学和Markov模型,是一种考虑系统响应的模型,它是对Markov模型的修改和补充^[19],不同之处在于Patch-dynamics模型是根据土地面积的变化率来建立动力方程进行预测,其模拟结果比Markov模型更稳定、更可靠,且建立动力方程更能揭示土地利用变化的机制^[20]。增强回归树(BRT)是基于分类回归树算法(CART)的一种自学习方法^[21],该方法通过随机选择和自学习方法产生多重回归树,能够提高模型的稳定性和预测精度,它弥补了Logistic回归作为二值模型的局限^[22],目前已经被运用到物种分布模拟和土地利用分类研究中,都取得了较好的结果。

本文以磴口县为研究区,通过对Dyna-CLUE模型进行改进,嵌入BRT模型和Patch-dynamics模型,形成BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics模型。该模型结合Dyna-CLUE模型在微观土地利用空间格局最优分配上的优势和Patch-dynamics模型在时间尺度上对宏观土地利用需求进行反映的特点,对磴口县土地利用变化进行模拟预测,从而加强对土地利用时空变化和自然与社会经济等相关系统相

互作用机制的理解和认识,为解决用地规划、生态环境问题评估以及相应对策制定等方面提供一定的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

磴口县地处中国西北(107°05'E,40°13'N),位于内蒙古河套平原源头,黄河中上游,背靠狼山山脉,西邻乌兰布和沙漠,如图1所示。磴口县气候干旱少雨,水资源较为短缺,土地沙漠化严重,土地退化严重,区域蒸发量大,导致土地盐渍化程度深,境内海拔1030~2046m,整个地形除山区外,呈东南高西北低,逐渐倾斜^[23]。属中温带大陆性季风气候,历年平均风速3.0m/s,瞬间最大风速28m/s,多年平均降水量143.9mm,多年平均蒸发量2327mm,多年平均气温7.6℃,无霜期136d。黄河流经磴口县52km,年径流量310亿m³,水域面积2406.67hm²,相对丰富的地表水与地下水对磴口县发展以及生态环境改善提供了有力保障^[24-25]。

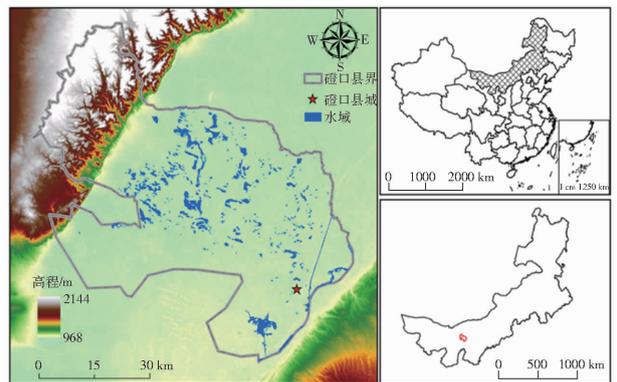


图1 磴口县区位图

Fig. 1 Map of Dengkou metropolitan zone

1.2 数据来源与处理

本研究所用原始数据主要包括研究区2006年和2016年Landsat TM/ETM+分辨率为30m的遥感影像、磴口县分辨率为30m的DEM数据以及自然、社会经济统计数据等。对原始数据进行处理后可分为土地利用数据和驱动因子数据两类。土地利用数据是利用ENVI和ArcGIS软件对3年的遥感影像进行解译,得到磴口县耕地、林地、草地、沙地、水域及水利用地、建设及工矿用地和山体及未利用地7个地类的3期土地利用情况,这3期遥感影像从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)平台上获得,分类精度达到85.6%。驱动因子数据一部分来自于磴口县相关水利部门的测点数据以及磴口县各年社会经济统计年鉴,一部分通过ArcGIS、ENVI软件分析处理得到,可分为自然驱动因子数据、社会

经济驱动因子数据和邻域驱动因子数据3类,共10种。

1.3 BRT 模型

BRT模型是两大算法的组合:回归树算法,通过递归将数据集切分成许多组易建模的数据,再利用线性回归的方法建模。Boosting算法,用来提高弱分类算法的准确度,通过构造一个预测函数系列,然后以一定的方式将它们组合成一个预测函数^[26]。在运算过程中多次重复迭代随机抽取一定量的数据,分析自变量对因变量的影响程度,剩余数据用来对拟合结果进行交叉验证,最后对生成的多重回归树取均值并输出。其可以在其他自变量取均值或不变的情况下,计算该自变量与因变量的相互关系,得出自变量对因变量的影响载荷,从而得出自变量对因变量的影响^[21]。BRT最大的优势在于不必考虑自变量之间的交互作用,数据可以存在缺省值且数据类型灵活多样,输出的自变量贡献度和反应曲线比较直观,倾向于解释,还可以作为预测模型,而传统的线性或非线性回归模型在预测方面相对较差^[27]。在R语言软件中利用ArcGIS随机取样的10000个样点数据,将磴口县土地利用变化值作为因变量 Y ,10种驱动因子作为自变量 X ,分别为DEM(X_1)、坡度(X_2)、坡向(X_3)、NDVI(X_4)、地下水埋深(X_5)、蒸散发量(X_6)、与水体的最近距离(X_7)、与居民点的最近距离(X_8)、与道路的最近距离(X_9)、人口密度(X_{10})。调用Elith编写的BRT方程包进行增强回归树分析。设置学习速率为0.005,每次抽取50%的数据进行分析,剩下的50%用于训练,并进行5次交叉验证。

1.4 Patch - dynamics 模型

1.4.1 Patch - dynamics 模型介绍

Patch - dynamics概念源自英国生态学家WATT在1947年提出的格局与过程学说,认为是斑块镶嵌体、斑块的个体行为和镶嵌体综合特征决定生态系统的结构和功能^[19]。20世纪70年代以来,Patch - dynamics概念被广泛运用到种群和群落生态学的理论和实践研究当中,WU等^[28]在前人的基础上提出了等级Patch - dynamics模型,强调生态系统是由斑块镶嵌体组成的包容型等级系统,而且许多空间格局和生态过程都由斑块和斑块动态来决定,斑块动态是指斑块内部变化和斑块间相互作用导致的空间格局及其变异随时间的变化,模型最突出的特点就是空间斑块性和等级理论的有机结合以及格局、过程和尺度的辩证统一,主要研究斑块的空间格局及其形成、演化与消亡机制,它强调时空异质性、非平衡特性以及等级结构特征^[20]。

1.4.2 Patch - dynamics 模型原理

若以 Y_i 表示第 i 类土地利用类型在初始时刻的面积, Y_{it} 为第 i 类土地利用类型经过时间 t 后的面积, a_{ji} 为第 j 类土地利用类型在 t 段时间内转变为第 i 类土地利用类型的概率,即

$$Y_{it} = \sum_{j=1}^n a_{ji} Y_j \quad (1)$$

时间 t 内第 i 类土地利用类型的变化为

$$Y_{it} - Y_i = \sum_{j=1}^n a_{ji} Y_j - Y_i = \left(\sum_{j=1}^n a_{ji} - 1 \right) Y_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ji} Y_j \quad (2)$$

假设 t 为单位时间,则第 i 类土地面积在单位时间内的变化率为

$$R = \frac{Y_{it} - Y_i}{Y_i} = \frac{Y_{it}}{Y_i} - 1 = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ji} Y_j}{Y_i} - 1 \quad (3)$$

于是

$$\frac{dY_i}{dt} = Y_i R = Y_i \left(\frac{\sum_{j=1}^n a_{ji} Y_j}{Y_i} - 1 \right) = \sum_{j=1}^n a_{ji} Y_j - Y_i \quad (4)$$

在式(4)中,关键是确定各个土地类型之间的转移概率,本文利用磴口县土地利用变化数据获得转移概率,有了各个土地类型之间的转移概率就可以代入上式进行模拟,然后比较模拟结果和实际值之间的差异。

1.5 Dyna - CLUE 模型

1.5.1 Dyna - CLUE 模型介绍

Dyna - CLUE模型是在CLUE、CLUE - S模型基础上发展而来的。CLUE模型^[29]是基于大尺度而开发的,为了满足小尺度上对于土地利用变化时空模拟的需求,研究人员在CLUE模型的基础上开发了CLUE - S模型^[30],该模型主要用以解决小尺度上的土地利用类型空间合理布局以及多种土地利用类型用地需求的协调分配。Dyna - CLUE模型是最新版本的CLUE模型,该模型综合了土地利用变化的宏观驱动因素与微观格局演化特征,对于多尺度的应用具有更强的适用性^[2]。

1.5.2 Dyna - CLUE 模型原理

Dyna - CLUE模型分为非空间需求和空间分配过程2个模块。其中,非空间要求模块是在时间层面输入各模拟年土地利用需求情况。而空间分配过程模块是以栅格为单元,计算每一个栅格内土地利用的变化情况,依据土地利用类型的概率分布、土地利用类型间的竞争力以及转移规则矩阵,在空间上

对各模拟年的土地利用需求进行分配^[2]。

模型运行时,其输入主要分为4部分^[2]:①空间政策与限制部分,该部分表示由于地区政策限制或者特殊的地区因素在模拟时段内土地利用类型不允许发生改变或者改变方向相对固定,如自然保护区、基本农田等,其他区域允许土地类型的自由转换。②土地利用类型转移部分,该部分主要包括各类土地的转移弹性系数与可转移性设置(转移矩阵)。③土地利用需求部分,该部分主要对应模型的非空间模块,表明从模拟起始年到终止年各类土地每年的需求变化情况,这里嵌入 Patch - dynamics 模型,土地利用需求作为与 Patch - dynamics 模型的接口,通过输入 Patch - dynamics 模型计算结果实现。④空间分布适宜性部分,该部分主要研究各类土地利用方式与各驱动因子之间的定量关系,这里选用空间增强回归树(BRT)分析进行计算,该定量关系表示研究区域内每一栅格单元可能出现某种土地利用类型的概率,概率越大,该栅格单元的空间分布适宜性越高^[30]。

综上所述:完成上述4部分计算后,进行空间分配,完成土地利用变化空间化模拟和预测。空间分配是 Dyna - CLUE 模型核心。基本原理是:首先确定允许转换的土地利用单元并计算每个栅格单元对于每种土地利用类型的转换可能性(总可能性等于可能性、转换规则和叠代系数之和),形成最初的土地利用分配图;然后与土地利用需求比较,进行土地利用面积空间分配,直到满足土地利用需求为止^[12],计算流程图见图2。模拟结束后,如结果不理想,可进行校验,包括对数据质量、需求目标设置、驱动因子选择以及相关参数的调整,如图2所示。

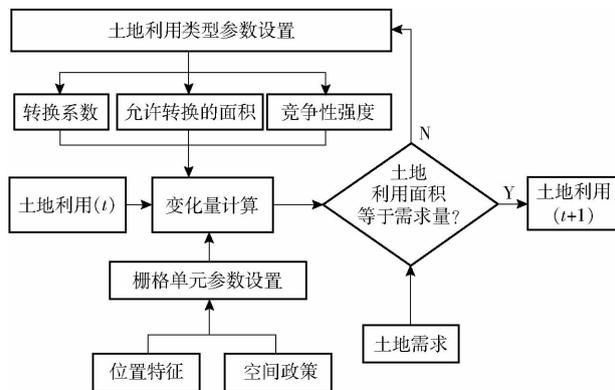


图2 Dyna - CLUE 模型土地利用分配流程图

Fig.2 Flow chart of landuse allocation module of Dyna - CLUE model

1.5.3 土地利用类型转移设置

该部分主要包括各类土地的转移弹性系数设置与可转移性设置。转移弹性系数(ELAS)是0到1

之间的数,表示土地改变的难易程度,ELAS 等于0为极易变化,ELAS 等于1为不会变化。在 ELAS 设定过程中,可参考该区域已有研究中 ELSA 进行设定,并在计算过程中通过比较每次调整后计算结果的 Kappa 系数,选取模拟结果最优的 ELSA^[31]。本文首先结合磴口县土地利用变化转出率及该区域已有的研究结果^[32]对 ELSA 值进行初步设定,然后以2006年为模拟起始年模拟2016年的土地利用布局,将模拟结果与2016年的遥感解译数据进行对比,计算其 Kappa 系数,多次调整 ELSA,最终确定2006—2016年模拟实验的 ELSA。

可转移性设置指在一定情景下,各种土地利用类型之间相互转移的可能性,具体通过矩阵形式来表示各地类之间转化的可能性^[2](表1)。表1中横向表示未来的土地利用类型,纵向表示现在的土地利用类型,其转移的可能性用0或1表示,0表示不能转化,1表示可以转化。该转移矩阵一般要结合研究区的实际情况与确定的 ELSA 进行设定。本文从自然发展的角度考虑,不强制限制转化。

表1 土地可转移性矩阵表

Tab.1 Landuse transition sequences

土地利用类型	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	1	1	1	1	1	1
C2	1	1	1	1	1	1	1
C3	1	1	1	1	1	1	1
C4	1	1	1	1	1	1	1
C5	1	1	1	1	1	1	1
C6	1	1	1	1	1	1	1
C7	1	1	1	1	1	1	1

注:C1:建设及工矿用地,C2:水域及水利用地,C3:耕地,C4:林地,C5:山体及未利用地,C6:草地,C7:沙地。

1.5.4 空间分布适宜性设置

土地利用方式的变化往往与某些因素高度相关,如土地特征和海拔,然而,当前区域土地管理的决策不能仅仅依赖区域的自然特征,还需综合考虑其他的社会经济因素^[2]。因此在空间分布适宜性部分,本文充分考虑了区域的自然因素与社会经济因素,结合数据的可获取性,最终选定了 $X_1 \sim X_{10}$ 等10个驱动力因子,采用 R 软件,选用增强回归树(BRT)分析,计算土地利用空间布局及其驱动因子之间的定量关系。

1.5.5 Dyna - CLUE 模型校准

选用 Kappa 系数进行 Dyna - CLUE 模型的校准。Kappa 系数一般用于评价遥感图像分类的正确程度,由 COHEN 于1960年提出。将模拟结果与真实的土地利用类型进行比较,获得 Kappa 系数^[30],Kappa 系数是介于0~1之间的连续数值,其值越接

近 1,表明拟合精度越高。通常,当系数在 (0.8, 1] 范围时,表明真实图与模拟图几乎完全一致,当系数在 (0.6, 0.8] 范围时,表明高度的一致性;当系数在 (0.4, 0.6] 范围时,中等的一致性;当系数在 (0.2, 0.4] 范围时,一般的一致性;当系数在 [0, 0.2] 范围时,极低的一致性。其计算公式为^[33]

$$K_{appa} = \frac{P_o - P_c}{P_p - P_c} \quad (5)$$

式中 P_o ——真实图与模拟图间的一致性比例,可以应用 ArcGIS 10.2 中 Spatial Analyst 的 Map Algebra 模块计算

P_c ——随机情况下期望的一致性比例,由模拟图与真实图的转移矩阵求得

P_p ——理想情况下一致性比例,一般取 1,即真实图与模拟图完全一致^[2]

1.6 模型组合

本文通过集成 Patch - dynamics 模型和 Dyna - CLUE 模型来反映巴彦淖尔市磴口县土地利用变化时空过程,模型主要在时间和空间 2 个尺度上展开,如图 3 所示。时间尺度上,利用 Patch - dynamics 模型模拟不同土地利用类型在时间尺度上的土地总需求量。Dyna - CLUE 模型用于模拟空间尺度上的土地利用空间变化细节,主要采用“自下而上与自上而下”相结合的土地利用空间分配方法,最终完成土地利用变化空间化。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

对 2006 年和 2016 年两期的土地利用解译结果进行面积统计,得出图 4、表 2 所示结果。综合两期的面积数据可知,大面积土地类型为耕地、草地、沙地、山体及未利用地,林地、水域及水利用地、建设及工矿用地占地面积相对较小。2006—2016 年,草地、水域及水利用地面积基本上未发生变化,相对稳

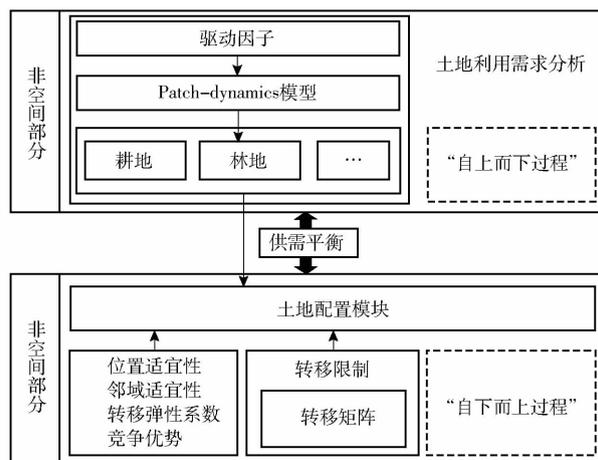


图 3 Dyna - CLUE 模型与 Patch - dynamics 模型的组合模型流程图

Fig. 3 Flowchart of integrated model of Dyna - CLUE model and Patch - dynamics model

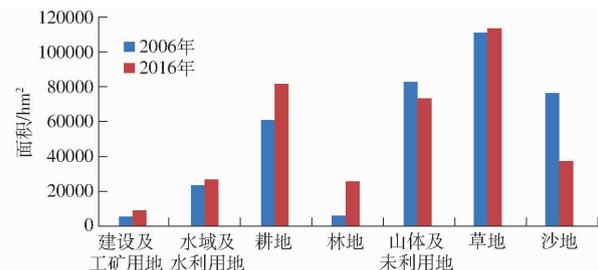


图 4 2006 年、2016 年不同土地利用类型利用面积

Fig. 4 Landuse area of different types in 2006 and 2016

定。建设及工矿用地、山体及未利用地出现较小幅度变化;由于城市发展,建设及工矿用地面积增多,由 5 780.55 hm²变为 8 952.67 hm²;山体及未利用地面积减少,由于山体面积相对稳定,可见未利用地利用率有所提高。林地出现大面积增加,由 6 179.25 hm²增加为 25 559.13 hm²;相反,沙地面积出现了大面积的减少,由 76 616.15 hm²减少为 37 511.71 hm²;结合 10 年内磴口县颁布的一些政策,可见磴口县植树造林等生态治理取得了一定成效,耕地也出现了一定面积的增加。

表 2 2006 年、2016 年不同土地利用类型占地比例

Tab. 2 Proportion of different types of landuse in 2006 and 2016

年份	建设及工矿用地	水域及水利用地	耕地	林地	山体及未利用地	草地	沙地
2006 年	1.57	6.49	16.55	1.68	22.56	30.29	20.85
2016 年	2.44	7.26	22.31	6.96	19.90	30.92	10.21

根据 2006 年和 2016 年两期的土地利用分类数据,利用 ARCGIS 软件的空间分析功能模块,可以计算得到两期的土地利用转移矩阵(表 3),从而进一步得到土地利用转移概率矩阵(表 4)。从表 3 可以看出,2006—2016 年间,耕地、未利用地、建设用地、林地变化情况更为稳定,沙地变化较

大。在转出方面,水域用地转为耕地和草地较多,林地转为耕地较多,未利用地转为草地和耕地较多,草地转为林地和耕地较多,沙地转为草地和耕地较多。在转入方面,耕地和未利用地更倾向于转为建设用地,林地、建设用地和水域用地更倾向于转为耕地,草地更倾向于转为林地,沙地更倾向

表3 2006—2016年间各土地利用类型面积的转化状况

Tab.3 Transformation condition of all kinds of land types between 2006 and 2016

hm²

		2016年						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
2006年	C1	5 002.43	20.14	826.70	0.59	17.18	302.30	0.59
	C2	216.37	18 026.80	2 858.98	1.69	257.40	2 027.33	0
	C3	1 855.65	4 030.25	58 504.62	1 316.96	3 488.16	683.56	160.79
	C4	0	63.36	1 934.00	9 446.91	122.44	96.87	0
	C5	1 673.70	2 093.35	3 900.55	1 087.55	67 137.88	5 779.86	0
	C6	195.33	2 341.02	9 070.60	13 516.52	1 577.56	89 614.89	100.61
	C7	9.19	104.18	4 868.69	188.91	494.04	15 056.93	37 249.72

表4 2006—2016年间各土地利用类型面积的转移概率

Tab.4 Transformation matrix of land types between 2006 and 2016

		2016年						
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
2006年	C1	0.810 776	0.003 264	0.133 989	0.000 096	0.002 784	0.048 996	0.000 096
	C2	0.009 251	0.770 753	0.122 238	0.000 072	0.011 005	0.086 680	0.000 000
	C3	0.026 494	0.057 542	0.835 303	0.018 803	0.049 802	0.009 760	0.002 296
	C4	0.000 000	0.005 432	0.165 815	0.809 949	0.010 498	0.008 305	0.000 000
	C5	0.020 493	0.025 631	0.047 758	0.013 316	0.822 034	0.070 768	0.000 000
	C6	0.001 678	0.020 109	0.077 915	0.116 105	0.013 551	0.769 778	0.000 864
	C7	0.000 159	0.001 797	0.083 984	0.003 259	0.008 522	0.259 729	0.642 551

于转为草地,沙地基本上未有转入,可见当地沙漠化治理取得了一定成效。

2.2 BRT 结果分析

根据前述的10个驱动力因子,采用R软件,选用增强回归树(BRT)方法分析各土地利用类型以及总体与各驱动力因子之间的关系,并对各回归结果进

行相关操作特性(Relative operating characteristics, ROC)检验,2006—2016年回归结果如图5所示,横坐标是10个驱动因子,纵坐标是驱动因子对土地利用变化的相对影响程度。对土地利用类型总体上影响较大的因子分别是地下水埋深、蒸散发量、NDVI、人口密度、与水体的最近距离、与居民点的最近距

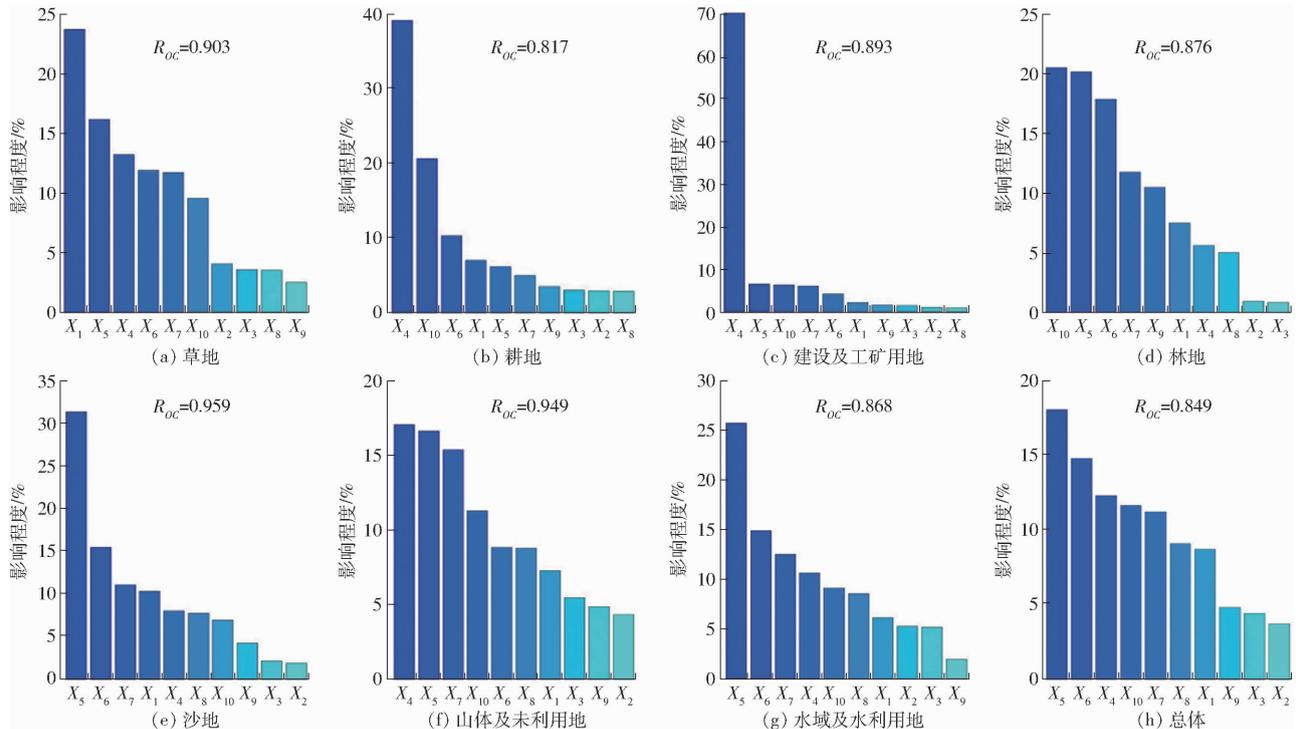


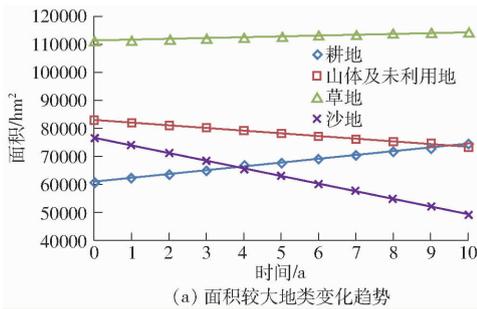
图5 7种土地类型与总体土地利用变化的BRT回归结果

Fig.5 BRT regression results of seven land types and overall landuse change

离,影响程度分别占到了 18.3%、15%、12.4%、11.8%、11.4%、9.2%,ROC 值为 0.849。综合 7 种土地类型的回归结果可见,水利条件、植被覆盖度以及人口密度是影响磴口县土地利用变化的主要因素。一般认为 ROC 值大于 0.7 时,表示回归结果对该土地利用类型有很好的解释能力。回归结果中,7 种土地类型以及总体回归的 ROC 值均大于 0.7,因此该 7 种土地类型的回归结果均能很好地解释各驱动因子与土地利用类型的关系,对空间区域栅格单元的空间适宜性解释度很高,这也是 BRT 方法在精度上优于 Logistic 之处。因此,总体来说回归结果对各土地类型均具有良好的解释能力。

2.3 Patch - dynamics 土地利用需求分析

结合上面的土地利用转移概率矩阵,利用 Patch -



dynamics 模型对磴口县土地利用变化状况进行动力学模拟和预测,以 1a 为步长,结果如图 6 所示。在面积较大的地类当中,草地和耕地是呈现上升的趋势,草地由原来占地比例的 30.29% 增加为 31.14%,耕地由原来的 16.55% 增加为 20.30%;山体及未利用地、沙地呈现减少趋势,山体及未利用地由原来占地比例的 22.56% 下降为 20.05%,沙地由原来的 20.85% 下降为 13.46%。面积较小的地类均呈现上升的趋势,其中水域及水利用地由原来占地比例的 6.49% 增加为 7.20%,林地由原来的 1.68% 增加为 5.56%,建设及工矿用地由原来的 1.57% 增加为 2.29%。此趋势与 2006—2016 年实际发展趋势相符,将作为 Dyna - CLUE 模型模拟的土地需求数据。

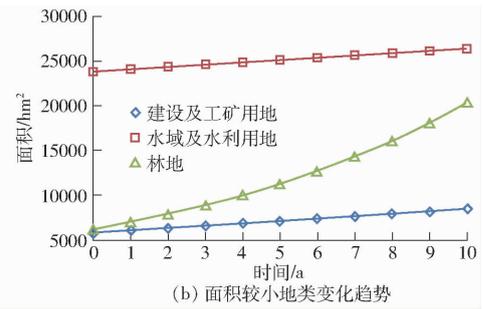


图 6 Patch - dynamics 模拟结果

Fig. 6 Patch - dynamics simulation results

2.4 模拟结果及精度检验

根据 BRT 回归结果以及 Patch - dynamics 模型的土地利用需求分析结果,应用上面所设置的参数,利用 Dyna - CLUE 模型在空间模拟上的功能优势,对 2016 年的土地利用空间分布进行模拟,并计算模拟结果的 Kappa 系数,对其模拟的准确程度进行解释,为了验证精度的准确性,本文与目前研究较多的 Logistic_CA_Markov 模型的模拟结果进行精度比较,来说明 BRT_Dyna - CLUE_Patch - dynamics 模型的优势性。2016 年磴口县土地利用解译数据与模拟结果如图 7 所示。经计算,2016 年 Logistic_CA_Markov 模型模拟结果的 Kappa 系数为 0.721 4,2016 年 BRT_Dyna - CLUE_Patch - dynamics 模型模

拟结果的 Kappa 系数为 0.782 6,2 个组合模型的模拟结果的 Kappa 系数均介于 0.61 与 0.80 之间,模拟精度较高,均与真实解译结果具有高度一致性,但 BRT_Dyna - CLUE_Patch - dynamics 模型模拟精度更高,结果更优。因此,利用 BRT_Dyna - CLUE_Patch - dynamics 模型对磴口县土地利用变化进行模拟预测,模拟精度较高,结果可靠。

2.5 模型应用

利用 Dyna - CLUE 模型情景模拟的优势,假设对磴口县土地利用采取生态保护模式,基于 2016 年磴口县土地利用数据,运用 BRT_Dyna - CLUE_Patch - dynamics 模型,对 2026 年土地利用状况进行模拟预测。情景设定:根据《中华人民共和国水土

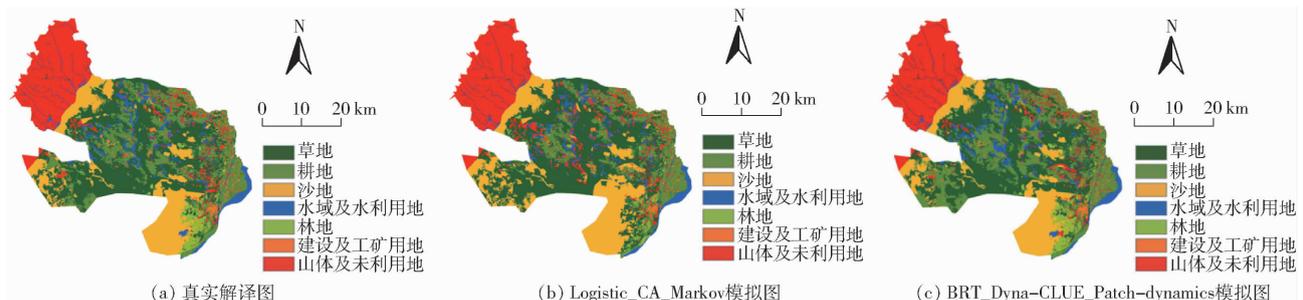


图 7 磴口县土地利用解译数据与模拟结果

Fig. 7 Landuse interpretation data and simulation results in Dengkou County

保持法》,坡度大于 25° 的坡地禁止开垦农作物,故对于坡度大于 25° 的耕地进行退耕还林还草^[2]。加大沙漠化防治力度,结合当地沙漠化数据及县志,参考国内外流行的“四分法”^[6,34-35],对轻度 and 中度沙漠化区域进行沙漠化治理,模拟结果如图8所示。从图8中可直观看,林草地以及水域面积增多,沙地面积减少,但也可以发现狼山附近的重度沙漠化地带仍有蔓延趋势,可见生态治理刻不容缓。林地由2016年的 $25\,559.13\text{ hm}^2$ 增加为 $32\,081.33\text{ hm}^2$,草地由2016年的 $113\,561.70\text{ hm}^2$ 增加为 $139\,216.60\text{ hm}^2$,沙地由2016年的 $37\,511.71\text{ hm}^2$ 减少为 $33\,070.32\text{ hm}^2$ 。

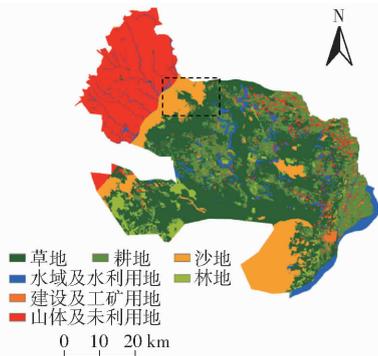


图8 基于BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics模型的2026年磴口县土地利用模拟结果

Fig.8 Simulation result of landuse in Dengkou County in 2026 based on BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics model

3 结论

(1)磴口县域内,占地面积较大土地类型为耕地、草地、沙地、山体及未利用地,占地面积较小的土地类型为林地、水域及水利用地、建设及工矿用地。2006—2016年间,沙地面积呈现减少趋势,林、草地和水域面积呈现增加趋势,可见当地沙漠化治理取得一定成效。未利用地面积减少,土地利用率提高。建设用地面积增多,可见城市化进程仍在继续,城市发展的同时也应重视生态治理。

(2)对磴口县土地利用变化影响较大的因子分别是地下水埋深、蒸散发量、NDVI、人口密度、与水体的最近距离、与居民点的最近距离,解释程度分别占到了18.3%、15%、12.4%、11.8%、11.4%、9.2%,由此可见,水利条件、植被覆盖度以及人口密度对磴口县土地利用变化起到了主要影响作用。

(3)BRT_Dyna-CLUE_Patch-dynamics模型结合了Patch-dynamics模型在时间预测以及Dyna-CLUE模型在空间分布模拟上的优势,对磴口县土地利用变化进行模拟预测,模拟结果的Kappa系数为0.7826,模拟精度较高,与真实解译结果具有高度一致性,且优于目前研究较多的Logistic_CA-Markov模型的模拟结果,对当地的土地利用变化模拟具有一定可行性。

参 考 文 献

- GUO X D, CHEN L D, FU B J. Effects of land use/land cover changes on regional ecological environment[J]. Advances in Environmental Science, 1999, 7(6): 66-75.
- 陆文涛,代超,郭怀成.基于Dyna-CLUE模型的滇池流域土地利用情景设计与模拟[J].地理研究,2015,34(9):1619-1629.
LU Wentao, DAI Chao, GUO Huaicheng. Land use scenario design and simulation based on Dyna-CLUE model in Dianchi Lake Watershed[J]. Geographical Research, 2015, 34(9): 1619-1629. (in Chinese)
- 董智,李红丽,孙保平,等.乌兰布和沙漠东北缘磴口县沙尘天气变化规律及其对防护林体系建设的响应[J].干旱区资源与环境,2004,18(增刊1):269-275.
DONG Zhi, LI Hongli, SUN Baoping, et al. The change of sand-wind climate and response to the shelter belt system construction in the Northeastern Ulanbuh Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2004, 18(Supp. 1): 269-275. (in Chinese)
- 赵志峰.内蒙古磴口县生态环境脆弱性评价[D].兰州:西北师范大学,2007.
ZHAO Zhifeng. Evaluation of eco-environment fragility in Dengkou County, Inner Mongolia, China[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2007. (in Chinese)
- 杨根生,刘连友,刘志民.磴口县土地沙漠化及其整治[J].干旱区资源与环境,1991,5(1):1-11.
YANG Gensheng, LIU Lianyou, LIU Zhimin. Land desertification and its integrated transformation of Dengkou County[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1991, 5(1): 1-11. (in Chinese)
- 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/OL].农业机械学报,2017,48(10):134-141.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.016.
MA Huan, YU Qiang, YUE Depeng, et al. Spatial simulation method of desertification based on MAS-LCM model[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 134-141. (in Chinese)
- 阎金凤,陈曦.基于GIS的干旱区LUCC分析和模拟方法探讨[J].干旱区地理,2003,26(2):185-191.

- YAN Jinfeng, CHEN Xi. Analysis and stimulation method discussion on LUCC of arid region based on GIS[J]. *Arid Land Geography*, 2003, 26(2): 185 - 191. (in Chinese)
- 8 施云霞,王范霞,毋兆鹏. 基于 CLUE_S 模型的精河流域绿洲土地利用空间格局多情景模拟[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(2): 154 - 160.
- SHI Yunxia, WANG Fanxia, WU Zhaopeng. Multi-simulation of spatial distribution of land use based on CLUE_S in Jinghe Watershed[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(2): 154 - 160. (in Chinese)
- 9 王友生,余新晓,贺康宁,等. 基于 CA - Markov 模型的藉河流域土地利用变化动态模拟[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 330 - 336.
- WANG Yousheng, YU Xinxiao, HE Kangning, et al. Dynamic simulation of land use change in Jihe Watershed based on CA - Markov model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(12): 330 - 336. (in Chinese)
- 10 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—a case study of Taihu Lake rim in Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(4): 577 - 581. (in Chinese)
- 11 黎夏,叶嘉安. 知识发现及地理元胞自动机[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(9): 865 - 872.
- LI Xia, YE Jiaan. Knowledge discovery and cellular automata[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2004, 34(9): 865 - 872. (in Chinese)
- 12 严冬,李爱农,南希,等. 基于 Dyna - CLUE 改进模型和 SD 模型耦合的山区城镇用地情景模拟研究——以岷江上游地区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(4): 514 - 525.
- YAN Dong, LI Ai'ong, NAN Xi, et al. The study of urban land scenario simulation in mountain area based on modified Dyna - CLUE model and SDM: a case study of the upper reaches of Minjiang river[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2016, 18(4): 514 - 525. (in Chinese)
- 13 HELLMANN F, VERBURG P H. Spatially explicit modelling of biofuel crops in Europe[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(6): 2411 - 2424.
- 14 VERBURG P H, OVERMARS K P. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna - CLUE model[J]. *Landscape Ecology*, 2009, 24(9): 1167 - 1181.
- 15 JUSTIN P W, WILLIAM S C G, CLIVE G J. Patch dynamics in a landscape modified by ecosystem engineers[J]. *OIKOS*, 2004, 105: 336 - 348.
- 16 THORNTON P K, JONESB P G. A conceptual approach to dynamic agricultural land-use modelling[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(4): 505 - 521.
- 17 JANE S, DARLA M, HARINI N. Land cover change and landscape fragmentation-comparing the utility of continuous and discrete analyses for a western Honduras region[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2004, 101(2 - 3): 185 - 205.
- 18 BRITALDO S S-F, GUSTAVO C C, CA'SSIO L P. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 154(3): 217 - 235.
- 19 冉圣宏,李秀彬,吕昌河. 土地覆被及生态服务价值变化的多时间尺度模拟——以四川省渔子河流域为例[J]. *地理学报*, 2006, 61(10): 1113 - 1120.
- RAN Shenghong, LI Xiubin, LÜ Changhe. Multi-scale modeling of land-cover change and ecosystem service values: a case of the Yuzixi Catchment in Sichuan[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(10): 1113 - 1120. (in Chinese)
- 20 谢正磊,许学工,孙强. 基于 Patch - Dynamics 模式的土地覆被变化预测——以北京市为例[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2008, 44(3): 452 - 458.
- XIE Zhenglei, XU Xuegong, SUN Qiang. Prediction of land cover change based on the Patch - Dynamics model: a case study of Beijing[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2008, 44(3): 452 - 458. (in Chinese)
- 21 尹才,刘森,孙风云,等. 基于增强回归树的流域非点源污染影响因子分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 911 - 919.
- YIN Cai, LIU Miao, SUN Fengyun, et al. Influencing factors of non-point source pollution of watershed based on boosted regression tree algorithm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 911 - 919. (in Chinese)
- 22 李春林,刘森,胡远满,等. 基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 727 - 737.
- LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 727 - 737. (in Chinese)
- 23 于强,岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 EnKF - MCRP 模型的生态用地扩张模拟研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(9): 285 - 293. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160939&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.039.
- YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Simulation on ecological land use expansion based on EnKF - MCRP model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(9): 285 - 293. (in Chinese)
- 24 于强,岳德鹏,郝玉光,等. 磴口县荒漠绿洲景观特征及时空变化研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(4): 178 - 183.
- YU Qiang, YUE Depeng, HAO Yuguang, et al. The spatial and temporal variations of oasis desera landscape in Dengkou County

- [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, 30(4): 178 - 183. (in Chinese)
- 25 于强, 岳德鹏, YANG Di, 等. 基于 BCBS 模型的生态节点布局优化[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 330 - 336, 329. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161241&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.041.
YU Qiang, YUE Depeng, YANG Di, et al. Layout optimization of ecological nodes based on BCBS model[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 330 - 336, 329. (in Chinese)
- 26 ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77: 802 - 813.
- 27 葛跃, 王明新, 孙向武, 等. 基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例[J]. *环境科学*, 2017, 38(2): 485 - 494.
GE Yue, WANG Mingxin, SUN Xiangwu, et al. Variation analysis of daily PM_{2.5} concentrations based on boosted regression tree: a case study in Changzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2): 485 - 494. (in Chinese)
- 28 WU J, LOUCKS O. From balance of nature to hierarchical Patch dynamics: a paradigm shift in ecology[J]. *Biology*, 1995, 70(4): 439 - 466.
- 29 VELDKAMP A, FRESCO L O. CLUE: a conceptual model to study the conversion of land use and its effects[J]. *Ecological modelling*, 1996, 85(2): 253 - 270.
- 30 VERBURG P H, SOEPBOER W, VELDKAMP A, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE - S model[J]. *Environmental Management*, 2002, 30(3): 391 - 405.
- 31 刘庆凤, 刘吉平, 宋开山, 等. 基于 CLUE - S 模型的别拉洪河流域土地利用变化模拟[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(1): 64 - 67.
LIU Qingfeng, LIU Jiping, SONG Kaishan, et al. Simulation on spatial pattern of land use change in Bielahong River Basin based on CLUE - S model[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(1): 64 - 67. (in Chinese)
- 32 张薇, 刘淼, 戚与珊. 基于 CLUE - S 模型的昆明市域土地利用预案模拟[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1655 - 1662.
ZHANG Wei, LIU Miao, QI Yushan. Land-use scenarios simulation based on the CLUE - S model in Kunming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(6): 1655 - 1662. (in Chinese)
- 33 布仁仓, 常禹, 胡远满, 等. 基于 Kappa 系数的景观变化测度: 以辽宁省中部城市群为例[J]. *生态学报*, 2005, 25(4): 778 - 784.
BU Rencang, CHANG Yu, HU Yuanman, et al. Measuring spatial information changes using Kappa coefficients: a case study of the city groups in central Liaoning province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 778 - 784. (in Chinese)
- 34 罗平, 李森, 李满春, 等. 海南岛西部土地沙漠化时空模拟及虚拟政策实验[J]. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(6): 66 - 70.
LUO Ping, LI Sen, LI Manchun, et al. Spatio-temporal simulation and experiment of policies of desertification land in the west of Hainan Island[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(6): 66 - 70. (in Chinese)
- 35 段翰晨, 王涛, 薛嫻, 等. 科尔沁沙地沙漠化时空演变及其景观格局——以内蒙古自治区奈曼旗为例[J]. *地理学报*, 2012, 67(7): 917 - 928.
DUAN Hanchen, WANG Tao, XUE Xian, et al. Spatial-temporal evolution of aeolian desertification and landscape pattern in Horqin sandy land: a case study of Naiman Banner in Inner Mongolia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 917 - 928. (in Chinese)