

崔学森,刘轶伦,郭玉彬,等. 基于地理加权 CLUE-S 模型的土地利用变化分区模拟[J]. 江苏农业科学,2019,47(20):287-293.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.20.064

# 基于地理加权 CLUE-S 模型的土地利用变化分区模拟

崔学森<sup>1</sup>, 刘轶伦<sup>1,2</sup>, 郭玉彬<sup>3</sup>, 黎世勇<sup>4</sup>, 胡月明<sup>1,2,5,6</sup>, 张飞扬<sup>1</sup>, 王璐<sup>1,2,5,6</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510000; 2. 广东省土地利用与整治重点实验室, 广东广州 510000;

3. 华南农业大学数学与信息学院, 广东广州 510000; 4. 海南省国土环境资源信息中心, 海南海口 570100;

5. 国土资源部建设用再开发重点实验室, 广东广州 510000; 6. 广东省土地信息工程技术研究中心, 广东广州 510000)

**摘要:**运用 CLUE-S 模型进行大范围的土地利用变化模拟具有其优越性,但是传统模型对于研究区内不同地理区域土地利用变化的自然人文驱动因子的差异缺乏考虑。针对大范围土地利用变化模拟存在的问题,在传统的 CLUE-S 模型的基础上,引入了空间分区的概念,使模拟过程中考虑了不同空间分区对驱动因子敏感性的差异,并用 GWR-Logistics 回归对研究区进行土地利用变化转换适宜性建模。以海南省多期土地利用现状分布图为基础,利用多个影响因子进行分区用地适宜性回归,并集成于 CLUE-S 模型进行模拟。通过对比发现,基于地理加权 CLUE-S 模型对于空间差异性显著的区域具有更好的适用性。

**关键词:**CLUE-S; 分区模拟; 土地利用/覆被变化; GWR-Logistic 回归

**中图分类号:**F323.211 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)20-0287-06

土地利用/覆被变化(land use/cover change, 简称 LUCC)的研究内容包含了土地利用和土地覆被变化过程、驱动机制以及资源、生态和环境效应影响等诸多方面。土地利用变化模拟是 LUCC 的核心内容之一<sup>[1]</sup>。近年来,大区域的土地利用变化模拟受到了更多的关注<sup>[2]</sup>,如何考虑区域空间差异并提高模拟质量成为了在大区域模拟过程中需要考虑的核心问题。

根据近年来学者在土地利用变化的驱动力、结构、模式的研究来看,由于受区位条件、自然条件与行政等级分异等因素的影响,土地利用变化是存在区域分异的,且具有时序性的特点<sup>[3-5]</sup>。土地利用模拟已有分区模拟的探索与应用,如杨俊等基于局部土地利用竞争的 CA-Markov 模型进行土地利用变化模拟<sup>[6]</sup>;柯新利等论证了基于空间聚类的分区元胞自动机比不分区具有更高的精度<sup>[7]</sup>。CLUE-S 模型在大范围区域的土地利用变化情景模拟具有先天优势<sup>[1]</sup>,近年来对 CLUE-S 模型的改进更多地集中在计算用地需求的模型<sup>[8-11]</sup>与驱动力回归算法<sup>[12]</sup>上,而对影响土地利用类型空间分布的驱动因子区域分异问题的研究仍在初步探索阶段。吴桂平等在驱动因子的回归计算中引入了空间自相关变量<sup>[13]</sup>,但其反映的空间关系仍停留在微观层面,忽略了区域上的空间差异,例如对于海南省的中部山地区与沿海经济带则难以用统一的回归方程解释各驱动因子与土地利用变化的关系。因此,有必要在建立土地适宜性回归方程的过程中考虑驱动

因子在不同分区之间的差异,并探索不同的空间分区模拟方式情景下 CLUE-S 的适用性。

CLUE-S 模型一般包括自上而下的宏观控制与自下而上的微观规则 2 个方面<sup>[14]</sup>。但是在这种 CLUE-S 模型的运行机制下,对区域尺度上的空间差异则较少考虑。从其模拟过程来看,CLUE-S 模型注重从宏观全局的角度进行土地利用变化模拟,并认为研究区域具有同质性,这与地理区域在自然与人文各因素在客观上具有空间差异性相矛盾的,驱动因子在不同空间分区上对土地利用变化的影响是不一样的,而用统一的驱动力回归方程驱动具有空间差异性的土地利用变化过程,降低了模拟的准确性。地理加权回归(geographically weighted regression, 简称 GWR)模型允许局部的参数进行函数拟合<sup>[15]</sup>,利用 GWR 模型集成具有不同区域特征的用地适宜性方程可以使模型更好地解决驱动因子的空间异质性问题。因此需要在原有的土地利用变化模拟模型的基础上引入空间分区的概念,以适用于模拟具有宏观空间分区差异的区域。

本研究在利用 CLUE-S 模型进行土地利用变化模拟的基础上,加入了 GWR-Logistics 回归模型以适应不同空间差异的分区模拟。以海南省为例,因其自然条件与经济发展情况具有较为明显的区域分布特征,通过分析驱动因子的分布特征进行区域划分。在海南省 2009 年、2012 年、2015 年土地利用类型现状数据的基础上,对沿海经济带、环形台地带、中部山地区 3 个区域建立不同的驱动力回归方程,并通过地理加权集成到 CLUE-S 模拟的过程中,最后探讨了 CLUE-S 模型在不同的模拟情景之间的优劣。

## 1 模型与方法

### 1.1 CLUE-S 模型

CLUE-S 模型是荷兰瓦赫宁根大学“土地利用与变化”研究小组在 CLUE 模型的基础上开发的。CLUE-S 模型是

收稿日期:2018-06-13

基金项目:国家自然科学基金(编号:41601404);广东省自然科学基金(编号:2016A030310444);广东省科技计划(编号:2017A050501031、2017A040406022、2013A040600002)。

作者简介:崔学森(1995—),男,广东云浮人,硕士研究生,主要从事土地利用变化模拟研究。E-mail:604257699@qq.com。

通信作者:王璐,博士,副教授,硕士生导师,主要从事土地评价与地理信息系统应用研究。E-mail:selinapple@163.com。

一种未来用地变化及其空间分布的多情景的、动态的、区域性的小尺度分析预测模型。基于系统论的方法, CLUE-S 模型利用社会经济与自然资源的驱动因子来分析用地变化。该模型还提出土地利用系统中的分层结构、位置与定义用地类型转换弹性的一系列变量所影响的稳定性之前的空间关系<sup>[16]</sup>。

CLUE-S 分为土地需求模块与土地利用变化空间分配模块 2 个部分。土地需求模块从宏观的角度上计算研究区内由土地需求驱动因素导致的土地利用类型数量的变化, 或者计算设定不同情景条件的土地需求。土地利用变化空间分配模块则把土地需求模块计算出的土地需求结果分配到研究区的空间位置上, 达到空间模拟的目的<sup>[17]</sup>。一般土地利用变化空间分配模块的第一步是借助外部模型计算出土地利用适宜性回归方程, 最常用的模型是二元 Logistics 回归模型:

$$\log \left\{ \frac{P_i}{1 - P_i} \right\} = \beta_0 + \beta_1 x_{1,i} + \beta_2 x_{2,i} + \cdots + \beta_m x_{m,i} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  地类在区域内每个像元中出现的概率;  $x_{1,i}$ 、 $x_{2,i}$ 、 $\cdots$ 、 $x_{m,i}$  为各驱动因子(1, 2,  $\cdots$ ,  $m$ ) 在  $i$  地类上的值;  $\beta$  为回归方程解释变量系数。

利用得到的回归方程计算模拟年份在不同土地利用类型上的土地适宜性分布概率, 再计算栅格在迭代过程中一定搜索半径中不同土地类型出现的频率, 从而得到各栅格的邻域影响值。最后综合由土地适宜性、预定义的转换弹性与邻域影响 3 个因素计算得到的总体转换概率进行空间配置, 并通过迭代计算使模拟土地数量符合土地需求为止<sup>[18]</sup>, 其核心公式为

$$TPROP_{i,u} = P_{i,u} + ELAS_u + N_{i,u} + ITER_u \quad (2)$$

式中:  $TPROP_{i,u}$  表示栅格  $i$  对  $u$  土地类型的总体转换概率;  $P_{i,u}$  表示栅格  $i$  对  $u$  土地类型的土地适宜性, 其值越接近 1 表示出现  $u$  土地类型的概率越大;  $ELAS_u$  表示  $u$  土地类型的转换弹性, 越接近 0 表示转换耗费越低, 反之越高;  $N_{i,u}$  表示栅格  $i$  对  $u$  土地类型的邻域适宜性, 其反映了  $i$  栅格被周围  $u$  土地类型同化程度的高低;  $ITER_u$  表示迭代变量, 在每一次迭代中, 当  $u$  土地类型总量与土地需求不符则自动改变并进入下一轮空间配置。

## 1.2 基于 CLUE-S 的分区模拟

本研究在 CLUE-S 模型的基础上, 对研究区进行区域划分。针对不同的区域分别进行土地利用变化驱动力的回归分析, 使驱动因子与土地利用变化的关系由全区域变为分区各自的驱动力方程, 减少了不同分区合并而造成的方程特征模糊。根据各组驱动力回归方程计算整个研究区的用地适宜性概率, 该组土地适宜性概率包含了不同分区的发展特征, 考虑到不同的土地适宜性对不同分区的解析程度不一致且具有空间上连续衰减的特点, 再引入地理加权的方法将分区适宜性合并输入到 CLUE-S 模型进行模拟。

1.2.1 GWR-Logistics 回归 Logistics 回归是一种计算各个土地利用类型在空间上分布的概率的常用方法, 反映不同土地利用受驱动因子影响在空间上的适宜性。在分区模拟的思路下, 对不同分区分别将回归因子与土地利用现状数据输入到 SPSS 中的二元 Logistics 逐步回归, 得到反映不同区域土地利用特征的回归方程, 并推测出分区适宜性概率。根据研究区的空间分布特征, 构建反映区域局部特征的地理加权因子,

将分区适宜性概率加权叠加得到总体土地适宜性。

1.2.2 土地需求计算 一般情况下土地需求计算依赖于外部模型来完成, 本研究使用操作性较强的曲线拟合方式来预测不同土地利用类型的土地需求数量。曲线拟合的方法使用最小二乘法, 拟合曲线类型使用二次函数。

1.2.3 邻域分析 传统的 CLUE-S 模型所采用的二元 Logistics 逐步回归方法往往忽略了空间数据内部具有自相关性, 为了弥补这一缺陷, 参考 CA 元胞自动机定义转换规则的方法<sup>[19]</sup>, 在原有的 CLUE-S 模型的基础上, 引入了邻域约束作为空间配置的一个因子。邻域类型包括 von Neumann 邻域和 Moore 邻域, 为了方便运算, 采用  $3 \times 3$  Moore 邻域窗口针对每一种土地利用类型建立邻域约束, 若中心元胞的约束邻域内存在的土地利用类型越多, 则其值越高, 表示受该土地利用类型的影响程度越高。

1.2.4 转换弹性 传统的 CLUE-S 模型多根据经验来定义土地利用类型之间的转换弹性矩阵, 其取值越低表示土地类型转换的概率越低, 反之越高。这种方法受主观影响较大, 并且需要在模型检验中不断调试。本研究参考了 Markov 链模型的思路, 认为当前一年的土地利用状况受前一年的土地利用状况影响, 用 1 年作为步长, 以历年土地利用类型的数量作为状态序列, 计算不同相邻状态的转换概率并构建土地利用转移矩阵。该矩阵取能反映历史土地利用类型之间的转移概率, 再取倒数用于表示土地利用类型之间的转换弹性。

$$P(X_{n+1} = x | X_1 = x_1, X_2 = x_2, \cdots, X_n = x_n) = P(X_{n+1} = x | X_n = x_n) \quad (3)$$

式中:  $X_n$  为 Markov 过程中的某一时刻的状态;  $x_n$  为其对应的状态值。

## 2 模型应用与验证

### 2.1 研究区概况

海南省是我国最南端的一个岛屿, 全省陆地总面积 3.5 万  $\text{km}^2$ , 自 2010 年提出建设国际旅游岛以来经历了快速城镇化的过程, 土地利用方式与模式也随着经济的发展而改变。海南省先天性具有自然条件与社会经济条件相对独立的特点, 受周边地区影响较少, 另一方面, 海南省又存在着环形的分层结构, 沿海地区经济与发展均优于中部山区, 而农田与植被覆盖也存在以中部山区向外辐射减少的趋势。自从 2010 年国务院下发《国务院关于推进海南国际旅游岛建设发展的若干意见》以来, 海南省在保护生态环境及基本农田的基础上, 大力扶持开发多种旅游资源。因此, 需要结合海南省各区域特点来合理地制定发展规划方案。

### 2.2 数据源及预处理

本研究所需数据包括 3 期土地利用现状数据及 6 个驱动因子数据, 数据均由海南省国土资源厅信息中心提供。将海南省 2009 年、2012 年、2015 年的第 2 次土地调查及变更调查图件数据归并为 5 种土地利用类型(表 1)。在保证计算效率的前提下, 确定数据源的空间分辨率为 500 m  $\times$  500 m。

土地利用变化一般受自然资源条件与社会经济条件 2 类因素影响(表 2)。其中自然资源因子包括植被、水体、农业适宜性 3 种指数, 社会经济因子选取了县城中心、高速公路、省道 3 种要素并通过 ArcGIS 通过距离制图得到。

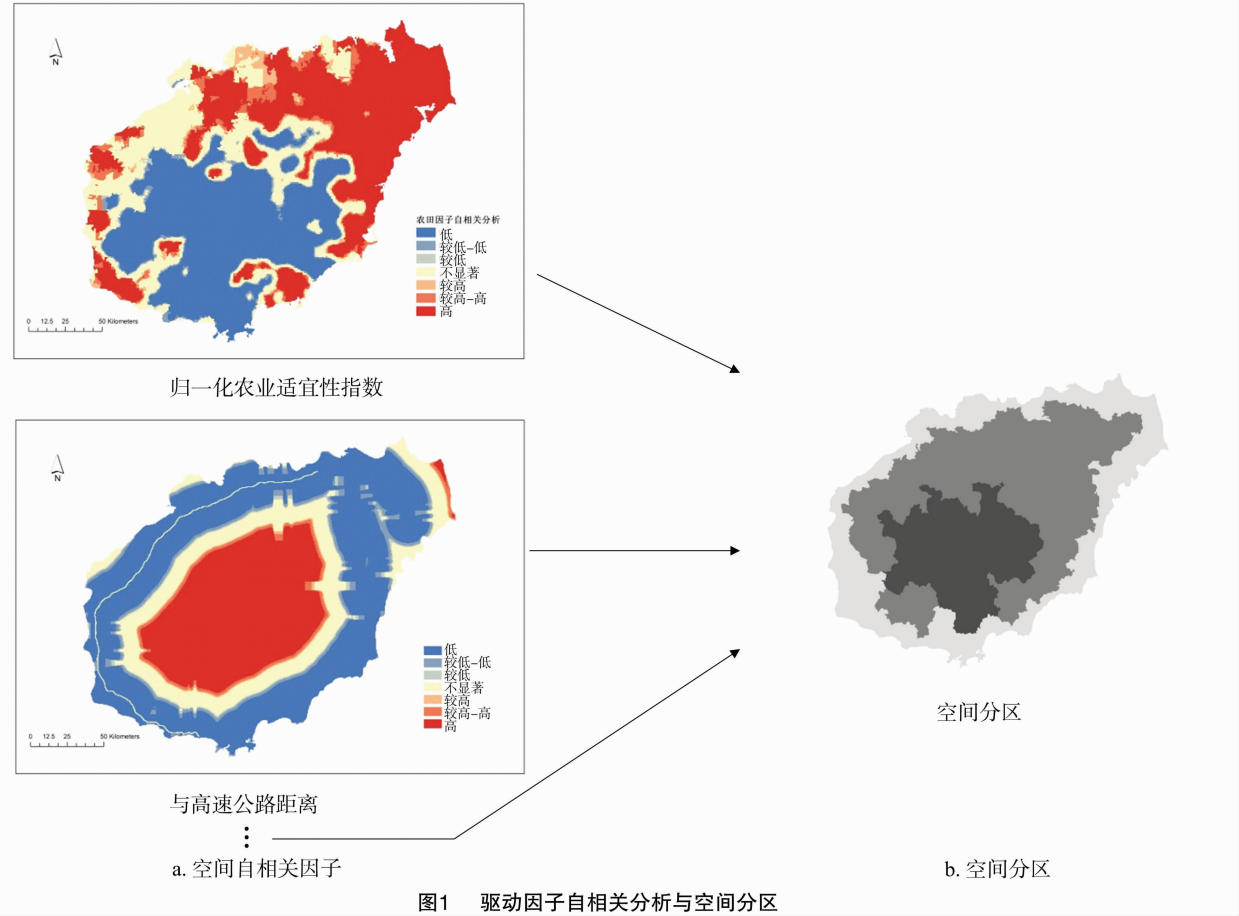
表 1 土地利用分类体系

| 城镇     | 植被    | 水体   | 旅游用地      | 农田    |
|--------|-------|------|-----------|-------|
| 公路用地   | 人工牧草地 | 坑塘水面 | 风景名胜及特殊用地 | 水浇地   |
| 管道运输用地 | 其他园地  | 水库水面 |           | 旱地    |
| 农村道路   | 其他林地  | 内陆滩涂 |           | 水田    |
| 城市     | 其他草地  | 沟渠   |           | 田坎    |
| 建制镇    | 天然牧草地 | 河流水面 |           | 设施农用地 |
| 铁路用地   | 有林地   | 沼泽地  |           |       |
| 机场用地   | 果园    | 湖泊水面 |           |       |
| 村庄     | 灌木林地  | 沿海滩涂 |           |       |
| 水工建筑用地 | 茶园    |      |           |       |
| 港口码头用地 | 沙地    |      |           |       |
| 采矿用地   | 裸地    |      |           |       |
|        | 盐碱地   |      |           |       |

表 2 驱动因子体系

| 分类   | 驱动因子       |
|------|------------|
| 自然资源 | 归一化水体指数    |
|      | 归一化农业适宜性指数 |
| 社会经济 | 与县城中心距离    |
|      | 与高速公路距离    |
|      | 与省道距离      |

空间自相关反映的是一块区域中某种现象与邻近区域单元上同一现象的相关程度,而某个驱动因子的值在同一区域对同一土地利用类型呈现出区域性的空间自相关行为。利用 ArcGIS 通过 Getis - Ord  $G_i^*$  统计方法<sup>[20]</sup>对 6 个驱动因子进行热点分析,发现其聚集现象存在不同程度的环形结构(图 1 - a),结合叠加分析各驱动因子得到的聚集趋势进行空间分区,可将研究区分为沿海经济带、环形台地带、中部山地区 3 个区域(图 1 - b)。



2.3 参数设置

通过对研究区的 2009 年、2012 年、2015 年的土地利用数

量进行二次方程的曲线拟合,计算出 2015 年、2020 年、2025 年的土地需求(表 3)。以历史土地利用转换情况为基础,构

建 Markov 链模型,得到土地转移弹性矩阵(表 4,水体设定为不允许转换)。由于研究区具有近似环形的分区结构,可以利用距中心点衰减、增强及两者叠加的方式构建出近似环形的权重文件 $[w_1, w_2, w_3]$ ,其中 $w_x$ 的取值为 $[0, 1]$ ,将不同分区回归预测结果分别与 $[w_1, w_2, w_3]$ 加权求和得到总体土地适宜性(图 2)。以生态保护红线作为限制区域。将土地需求、转移弹性、土地适宜性与限制区域输入到 CLUE - S 模型中,模拟不分区、分区模拟及分区集成 3 种情况下的土地利用分布。

| 表 3 土地利用需求 |                          |           |          |        |          |
|------------|--------------------------|-----------|----------|--------|----------|
| 年份         | 土地利用需求(km <sup>2</sup> ) |           |          |        |          |
|            | 城镇                       | 植被        | 水体       | 旅游用地   | 农田       |
| 2015 年     | 2 824.25                 | 22 062.75 | 1 453.50 | 343.25 | 7 527.75 |
| 2020 年     | 3 437.75                 | 21 567.25 | 1 431.75 | 356.50 | 7 418.25 |
| 2025 年     | 3 711.75                 | 21 660.50 | 1 402.50 | 319.50 | 7 117.25 |

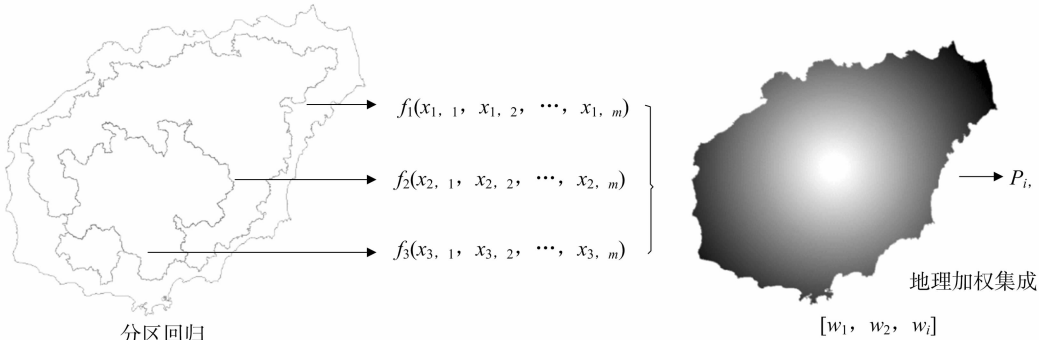


图2 分区 Logistics 回归

| 表 5 分区 Logistics 回归系数 |    |         |         |         |        |
|-----------------------|----|---------|---------|---------|--------|
| 驱动因子                  | 分区 | 回归系数    |         |         |        |
|                       |    | 城镇      | 植被      | 旅游用地    | 农田     |
| 归一化植被指数               | 山地 | -16.941 | -2.637  | —       | -4.207 |
|                       | 海岸 | -8.351  | -2.620  | -18.679 | -4.257 |
|                       | 台地 | -17.927 | -2.915  | -7.847  | -4.393 |
| 归一化水体指数               | 山地 | -13.006 | -16.719 | 2.960   | —      |
|                       | 海岸 | —       | -17.504 | -17.403 | -3.763 |
|                       | 台地 | -19.314 | -15.663 | -5.093  | -4.421 |
| 归一化农业适宜性指数            | 山地 | 2.678   | -3.601  | -1.931  | 3.953  |
|                       | 海岸 | -0.679  | -0.827  | -2.844  | 1.852  |
|                       | 台地 | 2.316   | -3.501  | 1.342   | 3.342  |
| 与县城中心距离               | 山地 | -1.336  | 0.614   | -8.160  | -0.426 |
|                       | 海岸 | -0.617  | 0.335   | —       | 0.093  |
|                       | 台地 | -2.234  | 0.419   | -1.545  | -0.239 |
| 与高速公路距离               | 山地 | —       | 0.387   | 1.452   | -0.498 |
|                       | 海岸 | -0.174  | 1.944   | -1.719  | -2.067 |
|                       | 台地 | 0.464   | 0.471   | -2.402  | -1.035 |
| 与省道距离                 | 山地 | 0.558   | —       | —       | —      |
|                       | 海岸 | -1.767  | 1.209   | -0.460  | -0.487 |
|                       | 台地 | -0.413  | —       | —       | 0.158  |
| 常数                    | 山地 | 11.756  | 7.256   | -4.100  | 0.225  |
|                       | 海岸 | 5.451   | 4.405   | 14.854  | 2.947  |
|                       | 台地 | 15.591  | 6.222   | 2.766   | 2.721  |
| ROC 值                 | 山地 | 0.861   | 0.850   | 0.834   | 0.831  |
|                       | 海岸 | 0.758   | 0.769   | 0.754   | 0.667  |
|                       | 台地 | 0.738   | 0.747   | 0.754   | 0.672  |

| 表 4 转移弹性矩阵 |           |           |           |           |
|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 土地<br>利用类型 | 城镇        | 植被        | 旅游用地      | 农田        |
| 城镇         | 0         | 0.222 320 | 0.274 768 | 0.189 202 |
| 植被         | 0.541 868 | 0         | 0.413 700 | 0.809 211 |
| 旅游用地       | 0.030 732 | 0.022 733 | 0         | 0.001 586 |
| 农田         | 0.427 400 | 0.754 946 | 0.311 533 | 0         |

分区 Logistics 回归示意图 2 所示,  $f_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \cdots, x_{i,m})$  表示第  $i$  个分区由  $m$  个驱动因子得到的回归方程,  $P_{i,u}$  表示栅格  $i$  对  $u$  土地类型的土地适宜性,  $[w_1, w_2, \cdots, w_i]$  表示地理加权因子。

2.4 结果与检验

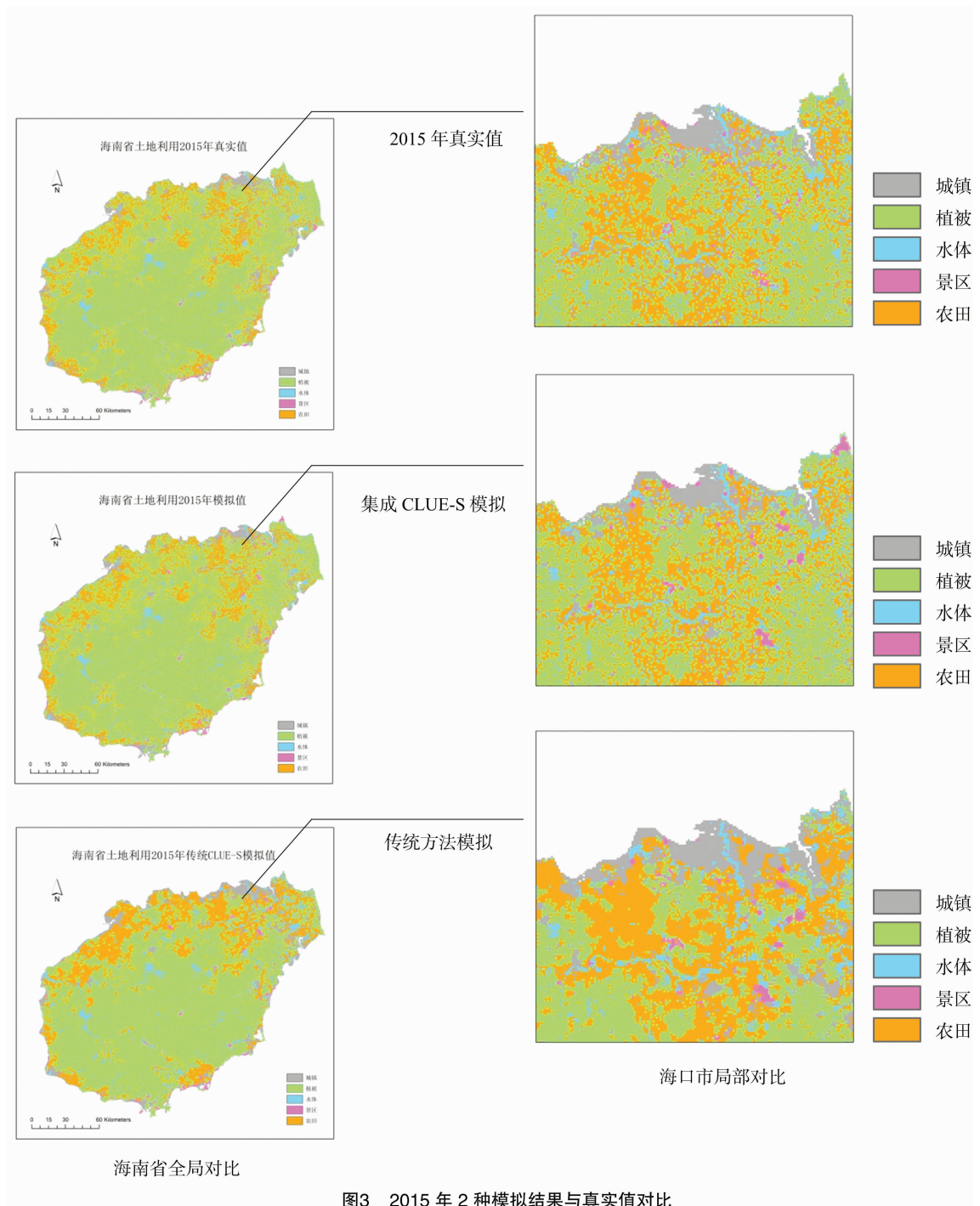
将 3 个分区下的 5 种土地利用类型与 6 个驱动因子栅格数据转换成文本文件, 根据分区二元 Logistics 逐步回归建模方法计算不同区域特征的回归方程(表 5), 其中“—”表示被

剔除的因子。对回归方程使用 ROC 曲线检验,该值越大,说明回归方程的拟合精度越高,通常认为 ROC 值大于 0.7 时,所选的驱动因子具有良好的解释能力。运用 Python 语言编写 GWR 集成工具集成用地适宜性概率,将该概率值与其他参数输入到 JAVA 编写的 CLUE-S 模型模拟工具,输出 2 种模拟方式的结果并与 2015 年的真实值进行对比(图 3)。

由 3 个分区的 Logistics 回归系数(表 5)对比发现,在 ROC 检验效果总体表现良好的情况下,不同区域的回归系数具有较大的区别,尤其是自然资源因子区别更明显,说明其回归方程的共线性较低。

从图 3 中海口局部的模拟结果对比发现,集成 CLUE-S 模拟方法与传统 CLUE-S 方法的土地利用分布形态均与 2015 年现状分布类似,但是传统方法表现出同质化现象更严重,说明土地适宜性回归方程对土地利用类型变化的解释性比邻域模块弱,而集成 CLUE-S 模拟方法考虑了 3 个区域之间驱动因子的空间差异,分区域计算 Logistics 回归方程再耦合到整个研究区,因此能更合理地解释土地利用变化情况。

为了进行模拟结果检验,本研究同时使用传统模型及改进的 CLUE-S 模型进行控制性试验:按照传统的 CLUE-S 模型进行模拟(以下简称传统模型);在 3 个区域中分别使用



传统的 CLUE - S 模型进行模拟(以下简称分区模型);在分区进行 Logistic 回归的基础上,利用 GWR 集成的 CLUE - S 模型进行模拟(以下简称分区集成模型)。

2.4.1 模拟准确性检验 将 2015 年模拟结果与研究区同一年份的实际土地利用状况进行叠加分析,比较分区集成前后模拟的准确率。通过对比发现,对比传统 CLUE - S 模拟的结果,除了农田的正确率降低了,其他的土地利用类型正确率均有所提高,而对比分区模型(均值),只有旅游用地的正确率降低了(表 6)。

| 表 6 模拟准确性检验 |        |          |        |
|-------------|--------|----------|--------|
| 土地利用类型      | 准确率(%) |          |        |
|             | 传统模型   | 分区模型(均值) | 分区集成模型 |
| 建设用地        | 43.13  | 43.42    | 43.54  |
| 植被          | 81.77  | 81.80    | 81.83  |
| 旅游用地        | 37.49  | 42.91    | 41.51  |
| 农田          | 53.49  | 53.41    | 53.45  |
| 总正确率        | 70.13  | 70.39    | 70.41  |

2.4.2 Kappa 检验 1960 年 Cohen 提出用 Kappa 值作为评价判断的一致性的指标<sup>[21]</sup>,而实践证明它是一个描述一致性较为理想的指标。其中 Kappa 值由下式算得:

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \tag{4}$$

式中: $P_o$  为对角线单元中观测值的总和; $P_e$  为对角线单元中期望值的总和。

通过表 7 可知,分区集成比不进行空间分区及单纯分区模拟的 Kappa 值都要高,模拟结果更为理想。

| 表 7 Kappa 检验结果 |         |
|----------------|---------|
| 模型分类           | Kappa 值 |
| 传统模型           | 0.432   |
| 分区模型(均值)       | 0.437   |
| 分区集成模型         | 0.438   |

2.4.3 Moran's I 检验 Moran's I 指数可以用于衡量地图数据的空间格局及分布,其绝对值越大说明空间相关性越明显,当值为 0 时表示空间呈随机分布。用该指数检验了分区集成与传统 CLUE - S 方法,基于分区集成的 CLUE - S 模型所模拟的结果的 Moran's I 指数值更接近于实际情况的 2015 年土地利用分布情况(表 8),因此,使用分区集成的方式更符合实际情况。

| 表 8 Moran's I 指数检验结果 |             |
|----------------------|-------------|
| 分类                   | Moran's I 值 |
| 2015 年实际             | 0.038       |
| 传统模型                 | 0.065       |
| 分区集成模型               | 0.050       |

3 结论与讨论

本研究针对以往对中 - 大范围区域的土地利用模拟研究中缺乏考虑区域差异的问题,在传统 CLUE - S 模型的基础上引入 Logistics 回归模型,试验结果表明其更能反映土地利用在空间上的区域差异,增强了模型对区域差异明显的研究区的适用性和模拟的精度。

本研究利用 2009 年海南省土地利用数据模拟未来的土地利用情况,对比分析了传统的 CLUE - S 模型与分区模拟的 CLUE - S 模型,分区集成的 CLUE - S 模型均有更理想的结果,说明不同区域条件下土地适宜性受驱动因子的影响程度有所区别,在进行土地利用变化模拟的过程中应充分考虑驱动因子方程在不同区域的差异。

另一方面,本研究从探索区域间不同要素间自然与人文差异的角度出发,在土地利用变化模拟过程中先对不同区域的驱动因子回归方程进行拟合,结合研究区的区域特征利用地理加权回归模型对各区域的土地适宜方程集成到 CLUE - S 模型中。由于该分区集成模拟过程中侧重考虑了不同区域的空间分布状态,因此对于区域间各要素差异越大并且区域空间分布规律性越强的案例,具有较好的模拟效果。而区域的划定方法与回归方程的集成方法对模拟结果是否有影响以及影响的程度则是需要进一步研究。

参考文献:

[1] 后立胜,蔡运龙. 土地利用/覆被变化研究的实质分析与进展评述[J]. 地理科学进展,2004,23(6):96-104.

[2] 王海军,夏 畅,刘小平,等. 大尺度和精细化城市扩展 CA 的理论与方法探讨[J]. 地理与地理信息科学,2016,32(5):1-8.

[3] 甘 静,郭付友,陈 才,等. 2000 年以来东北地区城市化空间分异的时空演变分析[J]. 地理科学,2015,35(5):565-574.

[4] 徐 霞,王静爱,朱玉洁,等. 内蒙古中部地区土地利用变化区域差异分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2006,42(3):310-314.

[5] 徐嘉兴,王继尧,梁 涛,等. 近 18 年太湖流域土地利用变化及区域差异分析[J]. 地理空间信息,2009,7(4):48-51.

[6] 杨 俊,解 鹏,席建超,等. 基于元胞自动机模型的土地利用变化模拟——以大连经济技术开发区为例[J]. 地理学报,2015,70(3):461-475.

[7] 柯新利,邓祥征,陈 勇. 元胞空间分区及其对 GeoCA 模型模拟精度的影响[J]. 遥感学报,2011,15(3):512-523.

[8] 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.

[9] Luo G P, Yin C Y, Chen X, et al. Combining system dynamic model and CLUE - S model to improve land use scenario analyses at regional scale: a case study of Sangong watershed in Xinjiang, China [J]. Ecological Complexity, 2010, 7(2):198-207.

[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.

[11] 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.

[12] Jiang W G, Chen Z, Lei X, et al. Simulating urban land use change by incorporating an autologistic regression model into a CLUE - S model[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(7):836-850.

[13] 吴桂平,曾永年,冯学智,等. CLUE - S 模型的改进与土地利用变化动态模拟——以张家界市永定区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(3):460-470.

[14] 吴健生,冯 喆,高 阳,等. CLUE - S 模型应用进展与改进研究[J]. 地理科学进展,2012,31(1):3-10.



余雪梅,彭书明,王洪婷,等.耐镉芽孢杆菌对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附机制[J].江苏农业科学,2019,47(20):293-297.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.20.065

# 耐镉芽孢杆菌对 $\text{Cd}^{2+}$ 的吸附机制

余雪梅,彭书明,王洪婷,伏媛,李璟,张山

(成都理工大学环境学院/国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室,四川成都 611059)

**摘要:**从攀枝花矿区淤泥样品中通过逐级提高  $\text{Cd}^{2+}$  浓度进行驯化,获得 1 株高耐镉菌株 PFYN01,经 16S rDNA PCR 鉴定为芽孢杆菌(*Bacillus* sp.),最大耐  $\text{Cd}^{2+}$  浓度为 3 900 mg/L。研究初始  $\text{Cd}^{2+}$  浓度、pH 值、菌量对菌株吸附  $\text{Cd}^{2+}$  的影响,利用扫描电镜(SEM)和傅叶里红外光谱(FIR)探究菌株吸附机制。结果表明,PFYN01 在初始  $\text{Cd}^{2+}$  浓度为 75 mg/L、菌量为 1.0 g/L、pH 值为 5.0 时,对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率达到 34.98%;吸附符合 Langmuir 模型,最大吸附量为 1.974 mg/g。对比分析  $\text{Cd}^{2+}$  吸附前后的细胞形态和红外光谱变化,证实了“细胞成分羟基(O—H)、酰胺基(N—H)、羟基(C—H)、羧基(C=O)、羰基(—COOH)参与了  $\text{Cd}^{2+}$  与 PFYN01 的相互作用”的结论。PFYN01 是一株对  $\text{Cd}^{2+}$  有较强吸附能力的细菌菌株,对其吸附  $\text{Cd}^{2+}$  影响因素及吸附机制研究的结果将为重金属污染微生物修复提供指导。

**关键词:**镉污染;耐镉细菌;驯化;生物吸附;吸附机理

**中图分类号:**X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)20-0293-05

随着工业的发展,尤其是采矿、冶炼、工业活动的大肆开展,越来越多重金属通过不同途径进入到土壤或水体环境中,对生态环境和人体健康产生严重威胁<sup>[1-2]</sup>。镉是一种毒性很强的重金属,可降低酶活性,引起 DNA 断裂、细胞氧化损伤<sup>[3-4]</sup>。由于镉具有难迁移、难降解和生物累积等特点,如何有效治理重金属镉污染问题已成为目前国内外研究热点之一<sup>[5-6]</sup>。

微生物是生态系统中营养物质循环的关键,尤其可以在各种极端的 pH 值、温度甚至有毒金属条件下生存和生长,部分微生物群已对重金属形成了一定的耐性和抗性。研究表明,从市政废水中分离出能够耐受 1 000 mg/L  $\text{Cd}^{2+}$  的芽孢杆菌,并对其他重金属  $\text{Cr}^{6+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$  也有一定抗性<sup>[7]</sup>;从韩

国重金属污染土壤中分离出 1 株能够耐镉浓度为 200 mg/L 的芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)菌株,该菌株也对其他单一重金属 Pb、Cu、Ni、Mn、Cr、Co、Zn 和混合重金属有较高的吸附性<sup>[8]</sup>。通过 UV 照射获得枯草芽孢杆菌的突变种,该菌株能够耐受的镉浓度为 337.23 mg/L,对其他重金属 Cr、Hg、Pb 的耐受浓度分别为 208、100、932.4 mg/L,而野生型枯草芽孢杆菌只能耐受的镉浓度为 28 mg/L<sup>[9]</sup>。从重金属镉污染土壤中筛选出 1 株能在镉浓度为 200 mg/L 的固体培养基上生长的蜡状芽孢杆菌,具有较高的抗性能力<sup>[10]</sup>。然而,这些报道的芽孢杆菌属对  $\text{Cd}^{2+}$  耐受和抗性浓度主要集中在 1 000 mg/L 以下,而对其他有较高耐受的芽孢杆菌属的报道较少。

考虑到从矿堆的淤泥中筛选的微生物有很高的耐受性,可能存在多重吸附机制以及许多微生物能够同时降解或吸附多种污染物,有助于高效降低矿堆重金属浓度<sup>[11-12]</sup>。因此,本研究从渣场堆淤泥中分离出 1 株高耐镉细菌菌株,研究影响菌株吸附  $\text{Cd}^{2+}$  的最佳条件,通过扫描电镜观察  $\text{Cd}^{2+}$  在吸附过程中微观形貌的变化,利用红外光谱,通过官能团吸收峰值的变化和位移,分析  $\text{Cd}^{2+}$  存在时细胞壁表面化学基团的变化情况,以期对  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附行为有一个更加清晰的认识。本研究可为寻找具有高选择性和高吸附能力的吸附剂提供理论依据,为微生物在镉污染治理中的应用奠定基础。

收稿日期:2018-07-10

基金项目:四川省科技计划(编号:2017SZ0185);科技部国际科技合作计划(编号:2013DFA21690);国家自然科学基金面上项目(编号:3137070605)。

作者简介:余雪梅(1991—),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为矿山环境生态治理。E-mail:644483798@qq.com。

通信作者:彭书明,博士,副教授,研究方向为水土介质污染恢复与治理、退化生态系统恢复与治理研究。E-mail:pengshuming06@cdut.cn。

[15]邵一希,李满春,陈振杰,等.地理加权回归在区域土地利用格局模拟中的应用—以常州市孟河镇为例[J].地理科学,2010,30(1):92-97.

[16]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.

[17]王丽艳,张学儒,张华,等. CLUE - S 模型原理与结构及其应用进展[J].地理与地理信息科学,2010,26(3):73-77.

[18]许小亮,李鑫,肖长江,等.基于 CLUE - S 模型的不同情景下

区域土地利用布局优化[J].生态学报,2016,36(17):5401-5410.

[19]杨俊,张永恒,葛全胜,等.基于 GA - MCE 算法的不规则邻域 CA 土地利用模拟[J].地理研究,2016,35(7):1288-1300.

[20]Ord K,Getis A. Local spatial autocorrelation statistics:distributional issues and an application[J]. Geographical Analysis,2010,27(4):286-306.

[21]Cohen J A. A coefficient of agreement for nominal scales[J]. Educational & Psychological Measurement,1960,20(1):37-46.