

# 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

乔伟峰<sup>1,2</sup>, 盛业华<sup>1,2</sup>, 方 斌<sup>2</sup>, 王亚华<sup>2</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210046;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046)

**摘要:** 深入分析土地利用转移矩阵和地类转移概率矩阵, 提出利用连续分时段土地利用转移矩阵求算总时段转移矩阵的方法, 进而改进地类变化量和地类动态度计算模型, 提出了地类转移无序度的概念、含义并构造计算模型。以苏州市为例进行实证分析, 结果显示: 1999-2008年苏州市耕地的总变化量最大, 其次是其它农用地和独立工矿用地; 其中耕地和独立工矿用地的主导变化是净变化, 而其它农用地以交换变化为主; 10年间位列各地类动态度前三位的依次为独立工矿用地、其它农用地和建制镇用地, 综合动态度在2004年和2002年最大, 1999-2001年较低; 地类转移无序度的前二位是其它农用地和交通运输用地, 其它地类该值均不高, 说明苏州市10年间的土地利用演化较为有序。研究表明, 基于转移矩阵的相关模型的改进和构造深入挖掘了土地利用演变信息, 有利于对土地利用变化进行深入研究。

**关键词:** 转移矩阵; 转移概率; 土地利用演变; 苏州市

## 1 引言

随着全球变暖、生态失衡和资源短缺等诸多全球性问题的出现, 土地利用/覆被变化(LUCC)作为自然环境对人类活动响应的表现形式之一, 逐渐成为全球变化研究的重要方向, 近年来受到国内外学者越来越密切的关注<sup>[1-5]</sup>。在土地利用/覆被变化研究中, 土地利用转移矩阵将土地利用变化的类型转移面积按矩阵的形式加以列出, 作为用地结构与变化方向分析的基础, 可细致反映各地类之间的相互转化关系, 进而了解转移前后各地类的结构特征, 在土地利用变化分析和地类模拟方面具有重要作用, 并且应用广泛。当前, 转移矩阵的应用主要表现在以下两个方面: ① 采用GIS技术对2期土地利用图进行叠置分析从而获得土地利用转移矩阵, 研究两期之间各土地利用类型的转移变化情况, 了解研究期初各类型土地的流失去向以及研究期末各类型土地的来源与构成, 通常结合土地利用数量变化、程度变化、空间变化等指数进行分析<sup>[6-14]</sup>; ② 根据一定时期的土地利用转移矩阵, 求得期间区域土地利用结构的转移概率矩阵, 运用Markov方法, 对未来若干年土地利用结构的演变趋势进行预测<sup>[15-19]</sup>, 或将Markov模型与CA模型进行结合, 基于土地利用

收稿日期: 2012-09-15; 修订日期: 2013-03-15

基金项目: 教育部人文科学研究青年基金项目(11YJC840051); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 乔伟峰(1975-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 讲师, 主要从事土地遥感和GIS应用研究。

E-mail: qwf@263.net

通讯作者: 盛业华(1965-), 男, 安徽庐江人, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感和GIS应用研究。

E-mail: shengyehua@njnu.edu.cn

栅格图, 预测土地利用的空间格局分布<sup>[20-22]</sup>。

已有研究多是基于单一时期的转移矩阵对期初、期末各地类的转入、转出情况进行分析, 缺乏基于连续时段、高时间分辨率和高空间分辨率转移矩阵对区域土地利用演变规律的分析, 缺乏对转移矩阵信息的深入挖掘。因此, 本文试图在对转移矩阵的应用进行系统总结的基础上, 以快速城市化区域的苏州市为例, 基于连续时段(1999-2008)的高时间分辨率和高空间分辨率的土地利用转移矩阵, 对已有分析模型进行改进并构造新的模型, 以提取转移矩阵中的丰富隐含信息, 对区域土地利用演化进行深入探讨。

## 2 研究方法

### 2.1 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵反映了某一区域某一时段期初和期末各地类面积之间相互转化的动态过程信息, 它不但包括静态的一定区域某时间点的各地类面积数据, 而且含有更为丰富的期初各地类面积转出和期末各地类面积转入的信息。土地利用转移矩阵通用形式为<sup>[6]</sup>:

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

式中:  $s$ 代表面积;  $n$ 代表转移前后的土地利用类型数;  $i$ 、 $j$ ( $i, j=1, 2, \dots, n$ )分别代表转移前与转移后的土地利用类型;  $s_{ij}$ 表示转移前的 $i$ 地类转换成转移后的 $j$ 地类的面积。矩阵中的每一行元素代表转移前的 $i$ 地类向转移后的各地类的流向信息, 矩阵中的每一列元素代表转移后的 $j$ 地类面积从转移前的各地类的来源信息。转移前后土地利用类型数可以有所不同, 这时 $s_{ij}$ 的行数和列数不同, 它是一个一般的矩阵。为研究方便, 转移前后通常采用相同的分类体系和分类精度, 这样 $s_{ij}$ 的行数和列数相同, 它就是一个 $n$ 阶方阵。

土地利用转移矩阵含有丰富的研究时段期初和期末各地类之间相互转化的信息, 并具有丰富的统计学意义。在转移矩阵中,  $s_{ij}(i=j)$ 表示 $n$ 阶方阵中的主对角线上的各元素, 为研究期初的 $i$ 地类在研究时段面积没有发生转化的部分,  $s_{ij}(i \neq j)$ 为研究时段 $i$ 地类面积发生转化的部分。  $S_i = \sum_{j=1}^n s_{ij}$ 是 $n$ 阶方阵中第 $i$ 行元素之和, 表示研究期初 $i$ 地类的面积,  $D_i = \sum_{j=1}^n s_{ij} - s_{ii}$ 表示研究期内 $i$ 地类的减少面积;  $S'_j = \sum_{i=1}^n s_{ij}$ 表示 $n$ 阶方阵中第 $j$ 列元素之和, 表示研究期末 $j$ 地类的面积,  $I_j = \sum_{i=1}^n s_{ij} - s_{jj}$ 表示研究期内 $j$ 地类的新增面积; 对 $S_i$ 按 $i$ 进行累加或对 $S'_j$ 按 $j$ 进行累加, 结果均为 $S_{\text{总}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n s_{ij}$ , 即矩阵中所有元素之和, 表示研究区域的总面积;  $D_i$ 按 $i$ 累加为 $D_{\text{总}} = S_{\text{总}} - \sum_{i=1}^n s_{ii}$ , 表示研究期内所有地类减少面积之和,  $I_j$ 按 $j$ 累加为 $I_{\text{总}} = S_{\text{总}} - \sum_{j=1}^n s_{jj}$ , 表示研究期内所有地类增加面积之和,  $D_{\text{总}}$ 和 $I_{\text{总}}$ 表示的都是土地利用转移矩阵中各元素之和减主对角线各元素之和, 因此 $D_{\text{总}} = I_{\text{总}}$ , 表示整个研究区域土地利用景观的新增量和减少量相等。

当土地利用分类精度不同时, 分类精度高时的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$  不等于分类精度低时的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$ , 且一般是分类精度高时的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$  大于分类精度低时的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$ 。如某一时期初和期末面积都按《全国土地分类》(过渡期间适用) 三级地类生成的转移矩阵中的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$  大于期初和期末面积都按二级地类生成的转移矩阵中的  $D_{\text{总}}(I_{\text{总}})$ , 原因是大类下面的小类相互之间也会有面积的转化, 而某一大类下面的小类之间的转化面积在不细分到小类时得不到体现。

## 2.2 地类转移概率矩阵

在事件的某一时段的变化过程中, 从时段初的某一种状态开始, 时段末转移到其它状态的可能性, 称为状态转移概率。根据条件概率的定义, 由状态  $s_i$  转为  $s_j$  的转移概率  $p(s_i \rightarrow s_j)$  就是条件概率  $p(s_j|s_i)$ , 即

$$p(s_i \rightarrow s_j) = p(s_j|s_i) = p_{ij} \quad (2)$$

如果某一事件可能产生的状态数为  $n$  个, 即  $s_1, s_2, \dots, s_n$ , 假设时段初的状态  $s_i$  转移到时段末期的状态  $s_j$  的条件概率记为  $p_{ij}$ , 那么该事件全部一次转移概率的集合组成一个矩阵, 称转移概率矩阵<sup>[23]</sup>。表示如下:

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如果某一事件转移时段初处于状态  $s_i$ , 那么到时段末, 它可能由状态  $s_i$  转向  $s_1, s_2, \dots, s_n$  中的任一状态, 因此必有<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} 0 \leq p_{ij} \leq 1 & (i, j = 1, 2, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1 & (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4)$$

根据转移概率的定义, 将事件考虑成某区域某时段的土地利用结构, 将状态考虑成区域内时段期初或期末某地类的面积是合适的。结合土地利用转移矩阵, 转移矩阵与其同型转移概率矩阵各要素之间的关系如下:

$$P_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_i} \quad (5)$$

即转移概率矩阵中的各元素为相应转移矩阵各元素与所在行元素之和的比。

对某一转移时段来说, 时段期初所有地类的面积向量  $S$  和时段期末所有地类的面积向量  $S'$  之间的关系如下:

$$S' = S \times P_{ij} \quad (6)$$

对于  $n$  个连续的时段, 存在  $n+1$  个面积向量  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_{n+1}$ ,  $S_1$  代表第一个时段期初的面积向量,  $S_{n+1}$  代表第  $n$  个时段期末的面积向量,  $n$  个时段可求出  $n$  个  $P_{ij}$ , 用  $P_{ij}^n$  或简称为  $P^n$  表示 ( $n=1, 2, \dots$ ), 这时有:

$$S_{n+1} = S_1 \times P^1 \times P^2 \times \cdots \times P^n = S_1 \times \prod_{i=1}^n P^i \quad (7)$$

即  $n$  时段的期末的面积向量为第 1 时段的面积向量与  $1-n$  各时段转移概率矩阵的乘积。定义:

$$P_{(a, a+n)} = \prod_{i=a}^{a+n} P^i \quad (8)$$

$P_{(a,a+n)}$  表示由  $a$  时段的期初到  $a+n$  时段的期末共  $n+1$  个连续时段总的转移概率矩阵。上式给出了由各连续分时段转移概率矩阵求总时段的转移概率矩阵的方法。该式的一个特例是  $n$  个 1 年步长的转移矩阵相乘成为 1 个  $n$  年步长的转移矩阵。

### 2.3 地类的变化量和土地利用动态度

#### 2.3.1 地类的变化量

(1) 地类的净变化量 (Net Change, NC)。地类净变化量是地类数量的绝对变化量, 是某地类的研究期末面积与研究期初面积之差的绝对值。对于  $a$  地类来说, 由于:

$$NC_a = |S'_a - S_a| = \left| \sum_{i=1}^n s_{ia} - \sum_{j=1}^n s_{aj} \right| = \left| \left( \sum_{i=1}^n s_{ia} - s_{aa} \right) - \left( \sum_{j=1}^n s_{aj} - s_{aa} \right) \right| = |I_a - D_a| \quad (9)$$

所以净变化量还是研究时段期末某地类新增面积与期初该地类的减少面积之差的绝对值。

由于土地利用具有空间区位的固定性与可转化性, 仅采用地类净变化量进行分析难以全面准确反映各地类的真实变化情况, 因为很有可能某地类在一定区域出现了转出, 而在其它区域出现了转入, 虽然净变化量很小或为 0, 但实际转化量很大。所以, 仅用净变化量在很大程度上低估了土地利用变化的程度<sup>[24]</sup>。

(2) 地类的交换变化量 (Swap Change, SC)。地类的交换变化量同时考虑某地类在一定区域出现了转出, 而在同一时期在其它区域又出现转入 2 种情况, 该量可揭示出地类变化中隐含的信息, 真实反映地类变化情况<sup>[25]</sup>。对某地类来说, 交换变化量的公式为:

$$SC_a = 2 \times \min(I_a, D_a) \quad (10)$$

(3) 地类的总变化量 (Total Change, TC)。某地类新增面积与某地类减少面积之和, 代表某土地利用类型景观的总变化量。对于  $a$  地类来说, 由于:

$$TC_a = NC_a + SC_a = |I_a - D_a| + 2 \times \min(I_a, D_a) = I_a + D_a \quad (11)$$

因此, 总变化量也是净变化量和交换变化量之和。

#### 2.3.2 土地利用动态度

(1) 单项地类动态度 (Land Use Dynamic Degree, LUDD)。已有研究中, 将某种土地利用类型转化为其它非该种土地利用类型的面积之和与研究时段初该种土地利用类型面积之比定义为单项地类动态度, 用以反映某种地类在转移时段的活跃程度。但该指标仅考虑了第  $i$  类土地转变为其它非  $i$  类土地这一单项变化过程, 而忽略了其它非  $i$  类土地在该研究时期内由其它空间区位上同时转变为第  $i$  类土地的变化过程, 从而存在严重缺陷: 那些转化慢, 但增长快的土地利用类型动态变化程度被严重低估<sup>[24]</sup>。

因此对该指标进行改造, 采用公式:

$$LUDD_i = \frac{TC_i}{TC_i + s_{ii}} \times 100\% \quad (12)$$

即某地类的总变化量与总变化量和未变化量的和之比。该模型可有效解决上述缺陷。

(2) 综合土地利用动态度 (Total Land Use Dynamic Degree, TLUDD)。区域内各地类土地利用总减少量 (或总增加量) 与区域土地总面积的比值, 测算区域土地利用变化的总体或综合活跃程度。

$$TLUDD = \frac{D_{\text{总}}(I_{\text{总}})}{S_{\text{总}}} \times 100\% \quad (13)$$

从区域整体上看, 区域各土地利用类型之间的相互转换是一个双向但等量的过程, 所以该指标适合对综合动态度进行描述。

## 2.4 地类转移无序度 (Land Use Transfer Disorder Degree, LUTDD)

由式(8),可求得各连续分时段转移概率矩阵的乘积获得总时段的转移概率矩阵;基于此矩阵和期初面积向量,由式(6)可得总时段的转移矩阵。

假设总时段内各土地利用类型都是在朝着既定的方向在转化(即不会出现同一块地第一年由地类*a*转为地类*b*,第二年又由地类*b*转为地类*a*的情况),则因为各分时段的矩阵都是同型矩阵,则可将分时段的矩阵相加(此时应注意将主对角线的元素置0,因为主对角线的元素代表某地类没有转化的面积,各时段相加没有意义)。这样也可得到一个转移矩阵。

各分时段同型矩阵相加后的转移矩阵可以和按转移概率矩阵计算出的总时段的转移矩阵进行比较,后者是实际情况,作为比较的标准。则当前者和后者相等时,表示土地利用转化非常有序,各地类图斑一直朝着既定的方向在转化,而前者与后者的差别越大,表示区域土地利用转化越无序,同一图斑地类反复转化的情况越严重。

为易于比较,可采用下面公式表示*i*地类转移无序度:

$$LUTDD_i = \frac{Z'_i - Z_i}{S_i} \quad (14)$$

式中: $Z'_i$ 代表*i*地类采用同型矩阵累加的方法得出的地类面积转移矩阵中*i*地类的新增量; $Z_i$ 为采用通过求总的转移概率矩阵方法进而求出的地类面积转移矩阵中*i*地类的新增量; $S_i$ 为*i*地类的期初面积。式(14)是通过地类的新增量计算的地类转移无序度,通过地类的减少量同样可对其进行计算。 $LUTDD_i=0$ 表示总时段*i*地类转移处于有序状态, $LUTDD_i$ 越大表示*i*地类的转移越无序。

## 3 实证研究

### 3.1 研究区概况

苏州市位于江苏省东南部,北枕长江,西傍太湖,紧邻上海,辖区面积8488 km<sup>2</sup>,家境处太湖水网平原区,地势低平,港汉湖泊交错纵横,气候温和,雨量充沛。苏州作为一座现代化程度较高的城市,是江苏重要的经济、工商业、外贸、物流和交通中心。2011年实现地区生产总值10717亿元,居江苏省第1位,全市城市化率达70.6%。近年来,在社会、经济快速发展、人口城市化率迅速提高的同时,苏州的土地利用/覆被也发生了剧烈的变化,耕地连年减少,建设用地迅速扩张。因此,对苏州市土地利用结构演变进行研究具有典型性和示范性。

### 3.2 数据来源

使用苏州市1999-2008年土地利用年度变更平衡表数据。年度变更数据的形成过程是苏州市各县区在1:5000-1:10000土地利用现状调查的基础上,每年对辖区所有发生变更的图斑进行变更汇总,从而形成各县区的年度变更平衡表,在此基础上再进行汇总,最终形成全市的年度变更平衡表。该数据以年为时段长,每张平衡表均反映了年初各地类和年末各地类之间的面积转化信息,且地类细化到了1:5000-1:10000的土地调查的精度。在中国,因为2002年之前和之后的土地利用现状调查采用的是不同分类体系,所以首先需要按照前后分类体系的对应关系将较老的地类转为较新的地类,以统一标准,利于构造同型的转移矩阵<sup>[26]</sup>。研究过程中为简化起见并充分考虑到对各地类重视程度的区别,将2002

年之后采用的《全国土地分类》(过渡期间适用)中的农用地大类细分至二级类,即分成耕地、园地、林地、牧草地、其他农用地5类,将建设用地大类在细分为居民点及独立工矿用地、交通运输用地、水利设施用地3个二级类的基础上,考虑到居民点及独立工矿用地的重要性,将其进一步细分为城市、建制镇、农村居民点、独立工矿用地、特殊用地。

通过对该数据的地类转换和地类合并等处理,形成10期土地利用转移矩阵,该数据的特点是连续的一年一期(高时间分辨率)的,且是基于1:5000-1:10000实地调查并逐级统计汇总(高空间分辨率)的,它与通过2期遥感影像分类解译和GIS叠置分析获得的转移矩阵相比具有分辨率上的优势。

### 3.3 结果分析

**3.3.1 地类变化量分析** 由表1、表2,10年间耕地总变化量最大,其次为其他农用地和

**表1 1999-2008年10年间土地利用转移矩阵**

**Tab. 1 Land use transfer matrix from 1999 to 2008**

	11	12	13	15	201	202	203	204	206	26	27	31	32
11	260.329	4.697	1.076	37.325	5.108	6.360	2.035	37.437	0.099	4.367	0.135	0.106	1.407
12	0.579	22.694	0.009	0.722	0.054	0.320	0.170	2.021	0.004	0.096	0.014	0.077	0.045
13	0.227	0.108	11.126	0.160	0.057	0.063	0.061	0.603	0.003	0.114	0.006	0.047	0.005
15	4.924	0.326	0.059	55.631	0.872	1.764	0.635	5.917	0.017	1.837	0.053	0.384	10.051
201	0.062	0	0	0.001	12.620	0	0	0.009	0	0.004	0	0	0
202	0.130	0.002	0.001	0.015	0.496	12.616	0.003	0.049	0	0.014	0	0	0
203	1.474	0.133	0.021	0.172	0.912	1.784	67.033	3.020	0.001	0.400	0.003	0	0.038
204	1.076	0.056	0.011	0.263	0.757	2.334	0.029	29.668	0.002	0.091	0.001	0.001	0.035
206	0.022	0	0.005	0.003	0.008	0.014	0.012	0.024	2.052	0.004	0	0	0.002
26	0.094	0.015	0	0.013	0.851	0.427	0.002	0.097	0	9.437	0.001	0.001	0.006
27	0.129	0.001	0	0.015	0.004	0.046	0.001	0.038	0	0.005	2.899	0	0
31	0.680	0.018	0	0.029	0.031	0.027	0.021	0.672	0	0.012	0	7.077	0.037
32	2.501	0.041	0.021	0.502	0.565	0.349	0.040	2.845	0.002	0.357	0.085	0.011	350.173

注:①表中数据为地类间面积转移量占区域土地总面积千分比;②因牧草地所占比重极小,故不予考虑;③表中行列标题中的地类代码:11耕地,12园地,13林地,15其它农用地,201城市,202建制镇,203农村居民点,204独立工矿用地,206特殊用地,26交通运输用地,27水利设施用地,31未利用土地,32其他土地。下表同。

**表2 1999-2008年10年间各地类的变化量(单位:%)**

**Tab. 2 Land use type changes from 1999 to 2008 (%)**

地类	期内减少量	期内新增量	净增量	NC	SC	TC	NC/TC(%)
11	100.153	11.897	-88.256	88.256	23.794	112.050	79
12	4.111	5.398	1.287	1.287	8.222	9.509	14
13	1.453	1.203	-0.250	0.250	2.406	2.656	9
15	26.839	39.220	12.381	12.381	53.678	66.059	19
201	0.077	9.715	9.639	9.639	0.153	9.792	98
202	0.710	13.489	12.778	12.778	1.421	14.199	90
203	7.959	3.009	-4.951	4.951	6.017	10.968	45
204	4.657	52.732	48.075	48.075	9.313	57.388	84
206	0.093	0.129	0.035	0.035	0.187	0.222	16
26	1.506	7.303	5.797	5.797	3.013	8.810	66
27	0.241	0.297	0.057	0.057	0.481	0.538	11
31	1.527	0.627	-0.900	0.900	1.254	2.154	42
32	7.320	11.627	4.308	4.308	14.639	18.947	23

独立工矿用地,三者分别占土地总面积的112‰、66‰和57‰,其他地类的总变化量相对较小;在总变化量的构成中,耕地和独立工矿用地的主导变化是净变化,净变化量占总变化量的比例分别为79%和84%,说明10年间耕地和独立工矿以数量的变化为主,结合净增量数据可知耕地以数量的减少为主,独立工矿用地以数量的增加为主;其他农用地净变化量占总变化量的比例为19%,以交换变化为主导,表明其变化主要表现为空间位置的转移;总变化量构成中的净变化量占比例最大的是城市用地和建制镇用地,其比例分别占98%和90%,突出表现为量的增加,而林地的净变化量只占9%,反映出其变化以空间的位移为主。

表3 1999-2008年耕地历年变化量(单位:%)

Tab. 3 Cultivated land changes in 1999-2008 (%)

年份	年内减少量	年内新增量	净增量	NC	SC	TC
1999	0.14	0.14	-0.01	0.01	0.28	0.28
2000	0.37	0.13	-0.24	0.24	0.25	0.49
2001	0.44	0.13	-0.30	0.30	0.27	0.57
2002	1.97	0.30	-1.67	1.67	0.61	2.27
2003	1.08	0.29	-0.78	0.78	0.59	1.37
2004	3.04	0.21	-2.83	2.83	0.42	3.25
2005	1.40	0.08	-1.32	1.32	0.16	1.48
2006	0.76	0.09	-0.67	0.67	0.18	0.85
2007	0.79	0.21	-0.59	0.59	0.41	1.00
2008	0.42	0	-0.42	0.42	0.01	0.42

分年度考察变化最剧烈的耕地、居民点及独立工矿用地的变化量。1999-2008年耕地、居民点及独立工矿用地的历年变化量见表3。由表3、图1和图2,10年间在2004年耕地的总变化量最大,占区域土地总面积的3.25%;其次是2002年、2005年和2003年,分别占总面积的2.27%、1.48%和1.37%,总体而言,耕地总变化量在1999-2001年处于低值,2002-2005年处于最大一个时期,2006年之后逐渐降低。

从交换变化量和净变化量来看,交换变化量历年较为均一,在平均值0.32上下浮动。由于交换变化量的历年变化幅度不大,所以净变化量的年度变化规律和总变化量相同。对于1999-2008年间社会经济快速发展的苏州市而言,净变化量体现为耕地的净减少,2002-2005年耕地的减少出现峰值,反映出由于经济发展加速,建设用地迅速扩张,耕地迅速减少。1999年的交换变化量几乎等于总变化量,显示出耕地的演变主要体现为空间的转移,而2008年则相反,表明2008年耕地的变化主要表现为数量的减少。

表4 1999-2008年居民点及独立工矿用地历年变化量(单位:%)

Tab. 4 Residence, independent industrial and mining land changes in 1999-2008 (%)

年份	年内减少量	年内新增量	净增量	NC	SC	TC
1999	0.36	0.48	0.12	0.12	0.71	0.83
2000	0.05	0.21	0.16	0.16	0.11	0.27
2001	0.08	0.48	0.40	0.40	0.15	0.55
2002	0.19	0.73	0.53	0.53	0.39	0.92
2003	0.11	0.98	0.86	0.86	0.23	1.09
2004	0.17	1.56	1.39	1.39	0.35	1.73
2005	0.36	1.02	0.66	0.66	0.72	1.38
2006	0.10	0.77	0.67	0.67	0.20	0.87
2007	0.04	1.07	1.03	1.03	0.08	1.11
2008	0.05	0.79	0.73	0.73	0.11	0.84

由表4、图3和图4,居民点与独立工矿用地总变化量在2004年最大,达到总面积的1.73%,其次是2005年和2007年,分别达到1.38%和1.11%。总体而言,总变化量在2003-2005年处于最大的一个时期,这段时期之前和之后相对较低。在总变化量的构成中,1999年交换变化量占总变化量的86%,主要体现为该地类景观在空间上的交

换，而2007年和2008年净变化量占总变化量的93%和87%，表明该地类的变化主要体现在为数量的增加。1999-2008历年居民点及独立工矿用地的新增量都大于减少量，因此净增量都是正值。

**3.3.2 土地利用动态度分析** 由表5，10年间各地类中活跃程度位列前3位的依次为独立工矿、其他农用地、建制镇，活跃程度均超过了50%，分别达到65.92%、54.28%和52.95%，另外交通运输用地和城市用地的活跃程度也比较高。其他土地和特殊用地的活跃程度最低，均不到10%，分别为5.13%和9.76%。

综合动态度为一定时期内发生变化的土地面积占总面积之比，反映区域内总的景观活跃度。因在一个较短时期区域内的土地利用演变驱动因素以人文因素为主导，所以该指标能在一定程度上反映人类对土地利用的影响程度。由表6，该值在2004年和2002年最大，分别为4.17%和3.39%，1999-2001年的动态度较低，经过了2002-2004年的峰值后呈逐年降低状态。

**3.3.3 地类转移无序度分析** 因通过转移矩阵计算的各地类的新增面积为实际值，矩阵相加的前提是各地类朝着既定的方向转化，实际上会有出入，所以  $Z_i$  的面积一定大于  $Z_i$ ，两者之间的差值可认为是无序变化量，该量形成的原因是属于a地类的某地块在10年间的某一年转为了非a地类，10年间的随后的某一年又转回了a地类，这表示土地利用演变没有朝着规划既定的方向发展，土地利用存在无序现象。

求  $Z_i$ 、 $Z_i$  的差值与1999年初各地类面积的比值发现（表7），其它农用地的转移无序度最大，其值为8.95%；其次为交通运输用地，值为7.87%。原因是由于村村通道路的修建、养殖水面的扩大、农田水利设施的建设使得耕地转为其它农用地，而居民点及独立工矿用地的扩张又占用大量其它农用地；交通运输用地的转移无序度为7.87%，是因为城镇周边大量交通运输用地通过占用农用地等

等进行转化，而随着城镇用地的快速扩张被扩进城镇建成区的大量交通用地在土地变更调

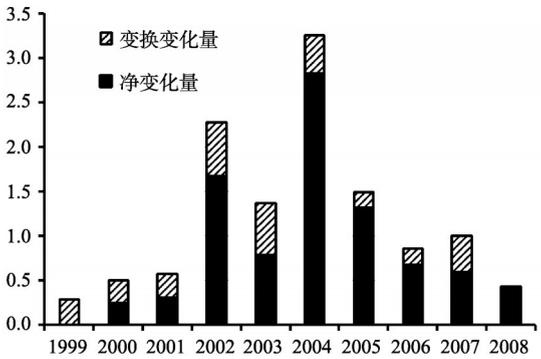


图1 耕地总变化量构成

Fig. 1 Composition of total cultivated land changes

注：图中变化量数据为各量占区域土地总面积的百分比。

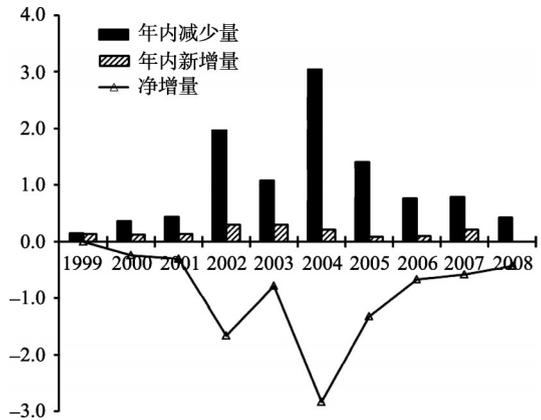


图2 耕地动态变化分析图

Fig. 2 Analysis of cultivated land dynamic changes

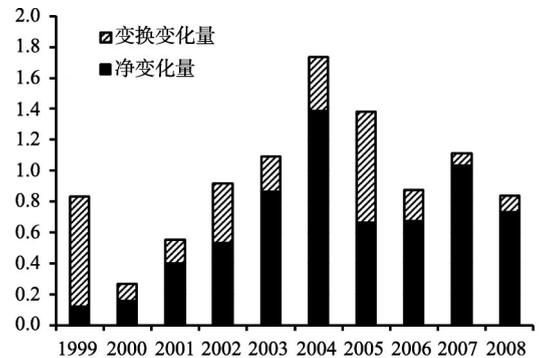


图3 居民点及独立工矿用地总变化量构成

Fig. 3 Composition of residence, independent industrial and mining land changes

表5 1999-2008年单项地类动态度(%)

Tab. 5 Land use dynamic degree in 1999-2008 (%)

地类	11	12	13	15	201	202	203	204	206	26	27	31	32
LUDD	30.09	29.53	19.27	45.28	43.69	52.95	14.06	65.92	9.76	48.28	15.66	23.33	5.13

查的时候被调查成城镇用地, 这项数字较大和土地变更调查的地类认定有关。除以上2地类外, 独立工矿用地和城镇建设用地的无序度为 3.31% 和 3.01%, 耕地、园地、未利用土地的转移无序度均在 1%左右, 其他地类均小于 1%。总体上看, 苏州市 10 年间的土地利用在按照土地利用规划的控制进行有序地演化, 地类无序转化度比较小, 土地管理工作扎实有效。1999-2008 年的地类转移无序度分析恰与上轮苏州市土地利用总体规划的规划执行期(1997-2010 年)基本吻合, 可部分反映上轮规划的执行情况, 说明规划执行比较有效。

另外, 从综合土地利用动态度上分析, 10 年间总的综合动态度 15.66%, 而历年综合动态度的累加值为 17.13%, 两者差距不大, 这也能从另一个侧面反映出区域土地利用无序度较小。

### 4 结论

① 深入分析了土地利用转移矩阵的统计规律, 归纳了其统计特点; 结合对地类转移概率矩阵的分析, 提出了利用连续分时段土地利用转移矩阵求算总时段转移矩阵的方法; 改进了地类变化量的计算方法和单项地类动态度的计算模型以及综合土地利用动态度模型; 提出了地类转移无序度的概念、含义并构造了计算模型。② 1999-2008 年 10 年间苏州市耕地的总变化量最大, 占土地总面积的 11.2%, 其次是其他农用地和独立工矿用地; 在总变化量的构成中, 耕地和独立工矿的主

表6 历年综合土地利用动态度变化表(%)

Tab. 6 Changes of total land use dynamic degree (%)

年份	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
TLUDD	0.65	0.59	0.69	3.39	1.61	4.17	1.92	1.86	1.38	0.85

表7 土地转移无序度分析表

Tab. 7 Analysis of land transfer disorder degree

地类	$Z_i$ (hm <sup>2</sup> )	$Z'_i$ (hm <sup>2</sup> )	$Z'_i - Z_i$ (hm <sup>2</sup> )	$S_i$ (hm <sup>2</sup> )	LUTDD <sub>i</sub> (%)
11	10097.78	13452.87	3355.10	305970.51	1.10
12	4581.53	4862.69	281.15	22751.97	1.24
13	1021.13	1113.21	92.08	10676.69	0.86
15	33289.03	39553.63	6264.60	69999.37	8.95
201	8246.13	8266.51	20.38	10776.49	0.19
202	11449.03	11789.28	340.25	11311.24	3.01
203	2553.56	2678.39	124.83	63651.92	0.20
204	44757.65	45720.85	963.20	29134.09	3.31
206	109.13	110.35	1.22	1820.66	0.07
26	6198.86	6930.21	731.35	9288.70	7.87
27	252.47	258.37	5.90	2664.75	0.22
31	532.24	605.51	73.27	7302.81	1.00
32	9869.06	10013.85	144.78	303433.39	0.05

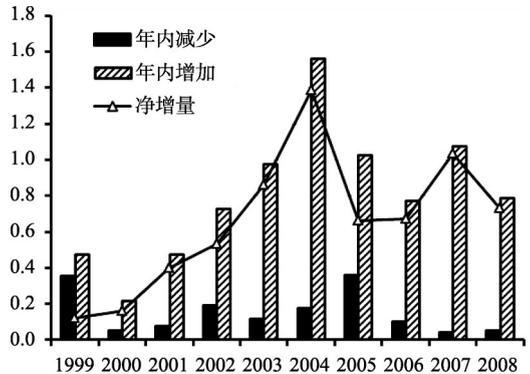


图4 居民点及独立工矿用地动态变化分析图

Fig. 4 Analysis of residence, independent industrial and mining land dynamic changes

导变化是净变化, 10年间耕地以数量的减少为主, 独立工矿以数量的增加为主, 而其他农用地以交换变化为主导, 表明其变化主要表现为空间位置的转移; 分年份考察耕地、居民点及独立工矿用地的变化量, 2004年耕地的总变化量最大, 其次是2002年, 耕地历年交换变化量的变化幅度不大, 净变化量的年度变化规律和总变化量相同, 居民点与独立工矿用地总变化量在2003-2005年处于最大的一个时期, 1999年交换变化量占总变化量的86%, 以地类景观在空间上的交换为主, 而2007年和2008年净变化量占总变化量的93%和87%, 主要体现为数量的增加。③ 10年间位列各地类动态度前三位的依次为独立工矿用地、其他农用地、建制镇, 单项地类动态度均超过了50%, 其他土地和特殊用地的动态度最低, 均不到10%; 综合动态度在一定程度上反映人类对土地利用的影响程度, 该值在2004年和2002年最大, 分别为4.17%和3.39%; 1999-2001年的动态度较低, 经过了2002-2004的峰值后呈逐年降低状态。④ 在地类转移无序度方面, 其他农用地、交通运输用地的地类转移无序度居前2位, 分别为8.95%和7.87%, 交通运输用地该值较大在一定程度上与变更调查的地类认定有关; 其他地类的地类转移无序度均不高, 说明苏州市10年间的土地利用演化较为有序。1999-2008年的地类转移无序度分析与上轮苏州市土地利用总体规划的规划执行期(1997-2010年)基本吻合, 可部分反映上轮规划的执行情况, 说明规划的执行比较有效。

## 参考文献(References)

- [1] Lambin E F, Turner B L, Geist H J et al. The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 2001, 11(4): 261-269.
- [2] Geist H J, Lambin E F. What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on subnational scale case study evidence. *LUCC Report Series NO.4*. LUCC International Project Office, Louvain-la-Neuve, 2001.
- [3] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域: 土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 553-558.
- [4] Turner II B L, Skole D, Sanderson S et al. Land-use and land-cover change science/research plan. *IGBP Report No.35 and HDP Report No.7*. Stockholm: IGBP, 1995.
- [5] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N et al. Land-use and land-cover change (LUCC) implementation strategy. *IGBP Report No. 48 and HDP Report No.10*. Stockholm: IGBP, 1999.
- [6] 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. *地理学报*, 2003, 58(5): 643-650.
- [7] 岳东霞, 杜军, 刘俊艳, 等. 基于RS和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价. *生态学报*, 2011, 31(9): 2550-2558.
- [8] 蔡为民, 唐花俊, 吕钢, 等. 景观格局分析法与土地利用转换矩阵在土地利用特征研究中的应用. *中国土地科学*, 2006, 20(1): 39-44.
- [9] 张俊, 周成虎, 李建新. 新疆焉耆盆地绿洲景观的空间格局及其变化. *地理研究*, 2006, 25(2): 350-359.
- [10] 刘传胜, 张万昌, 雍斌. 绿洲景观格局动态及其梯度分析的遥感研究. *遥感信息*, 2007, (3): 61-67.
- [11] 郝慧梅, 郝永利, 任志远. 近20年关中地区土地利用/覆被变化动态与格局. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4525-4536.
- [12] 刘瑞, 朱道林. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨. *资源科学*, 2010, 32(8): 1544-1550.
- [13] 白根川, 夏建国, 王昌全, 等. 基于地类空间转化趋势模型的眉山市东坡区土地利用转化分析. *资源科学*, 2009, 31(10): 1793-1799.
- [14] 陈书卿, 刁承泰. 三峡库区生态经济区用地结构演变及驱动机制: 以梁平县为例. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(12): 1125-1131.
- [15] 刘琼, 欧名豪, 彭晓英. 基于马尔柯夫过程的区域土地利用结构预测研究: 以江苏省昆山市为例. *南京农业大学学报*, 2005, 28(3): 107-112.
- [16] 牛星, 欧名豪. 基于MARKOV理论的扬州市土地利用结构预测. *经济地理*, 2007, 27(1): 153-156.
- [17] 陈江龙, 曲福田, 王启仿. 经济发达地区土地利用结构变化预测: 以江苏省江阴市为例. *长江流域资源与环境*, 2003,

12(4): 317-322.

- [18] 吴桂平, 曾永年, 杨松. 县(市)级土地利用总体规划中耕地需求量预测方法及其应用. 经济地理, 2007, 27(6): 995-998.
- [19] 王鹏, 黄贤金, 张兆干, 等. 生态脆弱地区农业产业结构调整与农户土地利用变化研究: 以江西省上饶县为例. 南京大学学报(自然科学版), 2003, 39(6): 814-821.
- [20] 刘淑燕, 余新晓, 李庆云. 基于CA-Markov模型的黄土丘陵区土地利用变化. 农业工程学报, 2010, 26(11): 297-303.
- [21] 张怀清, 唐晓旭, 刘锐, 等. 盐城湿地类型演化预测分析. 地理研究, 2009, 28(6): 1713-1721.
- [22] 赵建军, 张洪岩, 乔志和, 等. 基于CA-Markov模型的向海湿地土地覆被变化动态模拟研究. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2178-2186.
- [23] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [24] 刘盛和, 何书金. 土地利用动态变化的空间分析测算模型. 自然资源学报, 2002, 17(5): 533-540.
- [25] 段增强, 张凤荣, 孔祥斌. 土地利用变化信息挖掘方法及其应用. 农业工程学报, 2005, 21(12): 60-66.
- [26] 乔伟峰, 孙在宏, 邵繁荣, 等. 高度城市化区域土地利用结构演化与驱动因素分析: 以苏州市为例. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 557-564.

## Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province

QIAO Weifeng<sup>1,2</sup>, SHENG Yehua<sup>1,2</sup>, FANG Bin<sup>2</sup>, WANG Yahua<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Visual Geographic Environment (Ministry of Education), Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 2. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

**Abstract:** This paper makes a deep analysis of land use transfer matrix and transfer probability matrix. It puts forward that consecutive time periods of land use transfer matrix can be used to calculate the total time periods of the transfer matrix, also improves the calculation method of land use change and the computational model of land use dynamic degree, further proposes the concept of land use transfer disorder degree and constructs the computational model. Taking Suzhou as an example, this study conducts an empirical analysis of the above models. The results show that: from 1999 to 2008, the total change of cultivated land is the largest, followed by the other agricultural land, independent industrial and mining land. In the composition of the total change, the major change of cultivated land and independent industrial and mining land is the net change, while the major change of the other agricultural land is the swap change. In this decade, the top three of land use dynamic degree are independent industrial and mining land, agricultural land and town land, total dynamic degree is the highest in 2004 and 2002, and less from 1999 to 2001. The top two of land use transfer disorder degree are the other agricultural land and transportation land and the values of other land use types are low. This can reflect that 10 years' land use in Suzhou is in an orderly evolution process. The results show that the improvements and construction of model based on the transfer matrix can explore the information of land use evolution, and also be more conducive to the research of land use changes.

**Key words:** transfer matrix; transfer probability; land use change; Suzhou