

昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究

孙云华^{1,2}, 郭涛³, 崔希民¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101; 3. 湖南科技大学计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:在遥感、地理信息系统和统计定量分析结合的基础上, 引进土地利用变化强度分析理论方法。作为一种解释性的数学框架, 通过不同时间间隔的土地利用转移矩阵计算了每个时间间隔和每种地类的变化面积和变化强度。强度分析自上而下分为3个层次: 间隔层次、地类层次和转变层次, 将观察变化强度与平均变化强度比较, 揭示不同层次的变化特征, 并依次用快速的与缓慢的、活跃的与平稳的、来源与转变三对术语来描述。本文以昆明市的土地利用变化为例, 深入阐述了不同层次的变化面积和强度变化, 并对不同层次的稳定性进行了深入分析。结果表明: 在间隔层次, 2000年后昆明市的土地利用变化强度逐渐加大; 在地类层次, 建设用地的变化强度是最活跃的, 林地的变化强度是最平稳的; 在转变层次, 增加的建设用地主要来源于耕地, 减少的林地主要转变为草地。强度分析在土地利用变化过程分析中具有系统性的优势, 对深入挖掘土地利用变化信息、理解土地利用变化过程具有重要作用。

关键词:强度分析; 关联表; 土地利用变化; 稳定性; 昆明市

1 引言

土地利用变化是全球环境变化的主要研究内容, 受到越来越多的重视 (McMahon et al, 2005; Sterling et al, 2012; 张增祥等, 2012; Herrick et al, 2013; Mooney et al, 2013; 刘纪远等, 2014)。土地利用转移矩阵/关联表可全面而又具体地分析区域土地利用变化的数量结构特征与各地类变化的方向 (何春阳等, 2001; Pontius Jr et al, 2004; Takada et al, 2010; Romero-Ruiz et al, 2012), 因而在土地利用变化和模拟分析中具有重要意义, 并得到了广泛应用 (刘瑞等, 2010; 乔伟峰等, 2013)。但对关联表中的数据进行简单比较, 直接分析土地利用类型面积的变化信息, 并不能揭示土地利用变化过程中人类与环境之间的内在相互作用过程, 也不能系统地对多个连续时间间隔形成的转移矩阵进行深入研究 (Pontius et al, 2008; Romero-Ruiz et al, 2012)。为

此, 美国克拉克大学研究团队 Aldwaik 等 (2012) 首次提出了强度分析的概念, 从系统论的角度出发, 在间隔层次、地类层次和转变层次分别计算地类之间转换面积的强度大小。Pontius 等 (2013) 从以下四个方面讨论了强度分析在土地利用过程中可解决的问题: ①利用强度分析解释遥感影像解译地图上的分类错误; ②分析在研究区占很大面积且表现为沉寂的地类对土地利用变化结果产生的影响; ③利用强度分析的研究方法可有效地选取合适的研究区域; ④对强度分析自上而下的分层等级框架进行解释, 在一个时间间隔内地类变化大小取决于 $t+1$ 时刻地类变化面积, 而不是 t 时刻地类变化面积。强度分析每一个层次对观察变化强度和假设统一变化强度以及系统的稳定性进行了描述。目前, 许多学者已利用 Pontius 等提出的强度分析方法进行了研究。Huang 等 (2012) 和 Zhou 等 (2014) 把强度分析方法和土地利用变化过程联系起来, 对中国东南

收稿日期: 2015-06; 修订日期: 2015-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51474217, 71150001) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 51474217, No.71150001]。

作者简介: 孙云华 (1985-), 女, 山东临清人, 博士生, 主要从事土地利用变化研究, E-mail: yunhua07@163.com。

引用格式: 孙云华, 郭涛, 崔希民. 2016. 昆明市土地利用变化的强度分析与稳定性研究[J]. 地理科学进展, 35(2): 245-254. [Sun Y H, Guo T, Cui X M. 2016. Intensity analysis and stationarity of land use change in Kunming City[J]. Progress in Geography, 35(2): 245-254.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.02.011

沿海地区九龙江流域土地利用时空动态变化模式与变化过程进行了分析。Mallinis 等(2014)利用强度分析在多个层次上对 Parnitha 和 Penteli 两个地区近 62 年的土地利用/植被覆盖变化(LUCC)进行了对比研究。

目前,强度分析理论已基本成熟,但尚未见到国内学者用此理论研究土地利用变化。本文以云南省昆明市土地利用变化为例,阐述了土地利用变化强度分析 3 个层次的概念,对强度分析自上而下层级的解释性框架进行了分析描述,同时还对强度分析 3 个层次的稳定性进行了界定,将有助于研究者将图表与土地利用变化过程联系起来。昆明作为高原型城市,总体地形北部高,由北向南呈阶梯状逐渐降低,中部隆起,东西两侧较低(谭文彬等, 2009),导致土地利用变化方式的差异显著,与强度分析理论的 3 个层次关系紧密。因此,本文以昆明市为例,分析不同层次的土地利用变化强度及其稳定性,可以为国土资源部门合理开发利用土地资源提供科学依据,实现保护高原城市生态环境的目的。

2 研究区域与数据

2.1 研究区域概况

昆明市是云南省省会,位于云南省中部,属于滇中盆地城市,也是中国西南地区的中心城市之一。地处 102°10'E-103°40'E, 24°23'N-26°33'N,土地总面积 21011 km²。昆明市位于云贵高原,以湖盆岩溶高原地貌形态为主,红色山原地貌次之,大部分地区海拔 1500~2800 m。昆明属低纬度高原山地季风气候,年平均气温 15℃,年均日照 2200 h,无霜期 240 d 以上,年均降水约 1000 mm(张薇等,

2014)。

2.2 数据来源与处理

利用中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)提供的云南省 1990 年、2000 年、2008 年比例尺 1:10 万土地利用现状遥感监测数据为原始数据,裁切出昆明市的土地利用变化数据,采用一级分类体系,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。这三期影像的土地利用一级类型综合评价精度达到 94.3% 以上,满足比例尺 1:10 万用户制图精度 (Liu, 2003, 2010)。

2014 年土地利用变化数据采用 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数据,下载自地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>),轨道号分别为 129/42、129/43、130/41、130/42、130/43,行号为 129 的影像采集时间为 2014 年 4 月 23 日,行号为 130 的影像采集时间为 2014 年 4 月 14 日,云量均小于 1%。在 2008 年土地利用 Coverage 的基础上,利用 2014 年的遥感影像对比 2008 年变化部分予以修正,修正完成后在 Arc 模块中重建拓扑,形成 2014 年的 Coverage,并对其进行验证,数据解译精度符合研究需要,最终在 GIS 软件的支持下建立各期空间属性数据库,并进行合并、提取、转化、叠置、量算等操作。经检验 2014 年数据的一级地类分类总精度为 94%(表 1),符合研究的精度要求。为了便于在 IDRISI Selva 17.0 软件中进行有效的研究,所有数据均处理成 30 m×30 m 分辨率,统一使用 WGS1984 坐标系和 Kravosky-1940-Albers 投影。图 1 为昆明市 4 期土地利用变化数据。

表 1 2014 年遥感影像分类精度检验

Tab.1 Test of classification accuracy of remote sensing images in 2014

数据源	抽样数	分类正确数	判读精度	Kappa
Landsat8-OLI-TIRS	100	94	94%	0.9012

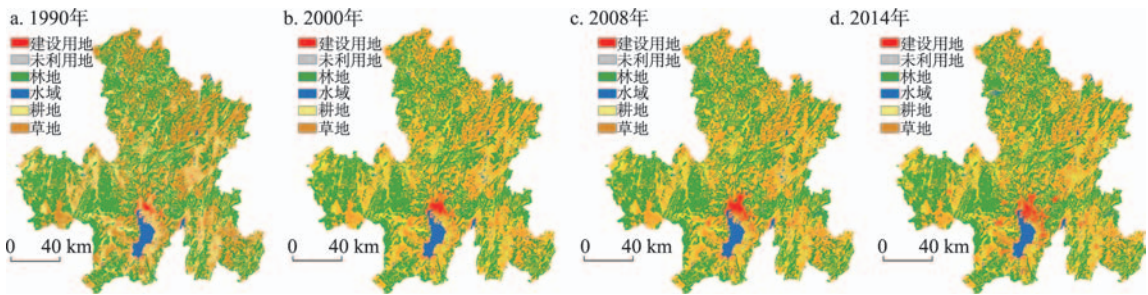


图 1 昆明市四期土地利用变化数据

Fig.1 Land use change maps of Kunming City

3 研究方法

强度分析是一种自上而下的分层等级的解释性框架结构,用于分析地类之间的变化差异(Pontius et al, 2013)。强度分析一方面给予直接的解释,另一方面对多个时期的遥感影像解译地图和多种土地利用类型进行了更深层次的理解。这种解释性框架得到了广泛的应用(Manandhar et al, 2010; Gitau et al, 2012)。它考虑多期遥感影像解译地图,从系统论的角度建立框架结构解释土地利用变化过程与人类和环境的变化影响。因此,强度分析包括3个层次:间隔层次、地类层次和转变层次。间隔层次通过对各个时期的遥感影像解译地图的总变化面积 S 和观察变化强度 U 进行计算,得出每个时间间隔变化在整个研究时间变化中是快速的还是缓慢的。地类层次是对某一个特定的时间间隔,分别针对地类的增加模式和减少模式,分析增加面积变化和相对应的强度变化大小以及减少面积变化和相对应的强度变化大小,并进一步分析每个地类总增加和总减少的变化面积和观察变化强度。转变层次是针对特定时间间隔内特定地类 n 的增加模式或者特定地类 m 的减少模式,对特定的地类转换为其他地类的面积和强度大小以及其他地类转换为这一特定地类的面积和强度大小进行计算,从而更进一步对转移矩阵的转变信息进行系统和详细的解释。

图2是强度分析技术流程图。对每个时间间隔的遥感影像解译结果作出每个连续时间间隔的关联表,沿着行的方向末端计算每个地类的总增加面积,沿着列的方向末端计算每个地类的总减少面积,在关联表的右下角计算每个时间间隔的总变化面积。通过比较每个时间间隔面积变化和强度变化,建立间隔层次的强度分析。同时也计算了多个层次的平均变化强度比率,称之为平均变化强度线或者平均变化强度。在间隔层次分别用每个时间间隔的观察变化强度与平均变化强度线作比较,如果某一时间间隔观察变化强度大于平均变化强度线,称该时间间隔变化强度是快速的,否则为缓慢的。同理,从地类层次计算了地类增加模式的面积变化、强度大小,以及地类减少模式的面积变化、强度大小,通过比较观察变化强度大小和平均变化强度线,如果某地类的观察变化强度大于平均变化强度线,称该地类是活跃的;反之则是平稳的。此外,从转变层次计算了特定地类 n 的增加模式和特定地类 m 的减少模式,利用类似的逻辑也比较特定地类的观察变化强度和平均变化强度线;如果特定地类的变化强度大于平均变化强度线,就认为该特定地类转变为其他地类,反之就来源于其他地类。强度分析的3个层次中,后面层次是对前面层次的详细解释,前面层次是对后面层次的补充;3个层次共同解释了土地利用变化过程和相互作用机制,也有助于将土地利用变化过程与图表联系起来。

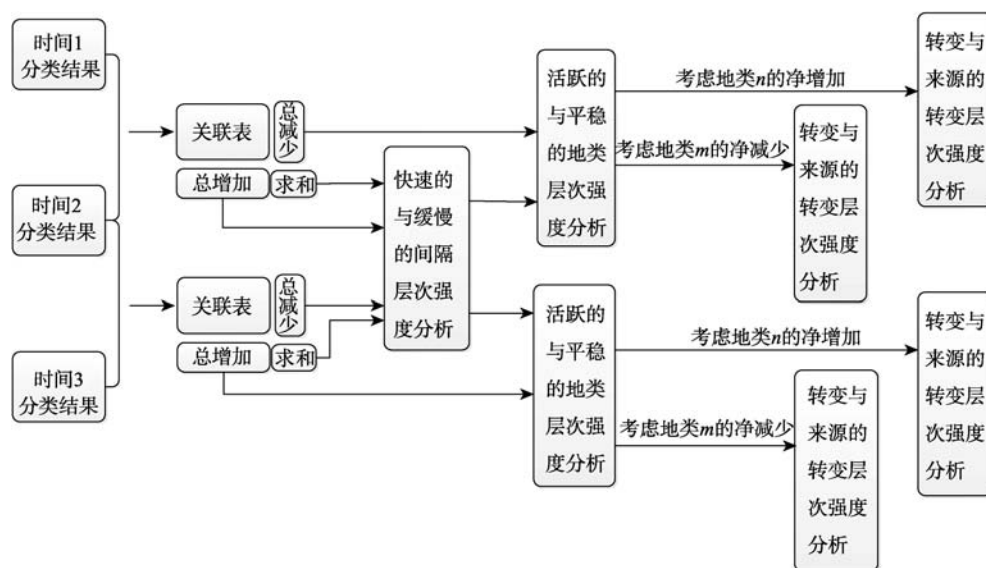


图2 强度分析流程图

Fig.2 Flowchart of land use change intensity analysis

3.1 强度分析的稳定性

对每个时间间隔的解译地图建立关联表后,在3个层次上形成了从概括到更详细的解释性框架,根据观察变化面积大小和强度大小分析了其不同层次的变化,目的是提取3个层次的变化信息。强度分析流程图2从左至右依次详细地解释了该方法的流程。

第一个层次称为“间隔层次”,分析了每个时间间隔的总变化,检查不同时间间隔的观察变化面积和观察变化强度。在计算每个时间间隔的观察变化强度之后,与平均变化强度比较,后者存在的条件是平均变化强度平均分配至整个时间间隔。

第二个层次称为“地类层次”,计算了每个地类随空间变化观察面积多少及观察变化强度的总减少和总增加。计算完每种地类的总减少和总增加变化强度之后,比较观察变化强度和平均变化强度,后者存在的条件是每个间隔内的平均变化强度平均分配至整个空间范围。

第三个层次称为“转变层次”,分析了特定地类的转变,以检查该转变在不同种类之间可用的观察转变变化面积大小和观察转变变化强度。当地类减少或增加时,通过比较每种转变的观察变化强度和平均变化强度,后者存在的条件是转变平均变化强度平均分配至所有转变可用的地类中,该层次的分析可以区分其他地类是否强烈转变为或来源于该转变。

3.2 强度变化分析

3.2.1 间隔层次变化分析

在强度分析的间隔层次,假设了第一个研究问题:“在整体时间间隔中,哪个时间间隔的强度变化是相对缓慢的或快速的?”该部分给出两个公式用于回答第一个研究问题,式(1)定义了每个时间间隔内整个研究区的观察变化强度 S_t ,即 $T-1$ 个时间间隔内年均变化速率,意味着每个时间间隔都存在一个变化速率 S_t 。式(2)给出了研究区域整个时间范围的平均变化强度,如果考虑整个变化速率时存在平均变化强度线,变化模式就是完全稳定。换言之,如果在所有的时间间隔内 S_t 相等,那么这些 S_t 值就等于 U 。这个逻辑是整个强度分析的前提,也应用于随后的地类和转变层次中。

$$S_t = \frac{\left\{ \sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tij} \right] \right\} / \left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) \right]}{Y_{t+1} - Y_t} \times 100\% \quad (1)$$

$$U = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \left\{ \sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tij} \right] \right\} / \left[\sum_{j=1}^J \left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) \right]}{Y_T - Y_1} \times 100\% \quad (2)$$

3.2.2 地类层次变化分析

在地类层次假设了第二个研究问题:“在特定的时间间隔内,哪种地类是相对平稳的或活跃的?”。式(3)和(4)回答了这个问题,对于每个特定时间间隔,式(3)和(4)分别给出了地类的年均观察增加变化强度和年均观察减少变化强度,并为每种地类产生了一个输出结果。式(2)给出了时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 内的平均变化强度,因此式(2)是间隔层次分析和地类层次分析的桥梁。如果对于所有地类 j ,平均变化强度 U 与观察增加变化强度 G_{ij} 值相等,则年均观察增加变化强度就等于 S_t 。类似的,如果对于所有地类 i ,平均变化强度 U 与 L_{ii} 值相等,年均观察减少变化强度也会等于 S_t 。

$$G_{ij} = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{tij} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (3)$$

$$L_{ii} = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tij} \right) - C_{tii} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (4)$$

本文还验证了地类层次的增加观察强度和减少观察强度在地类模式的时间间隔内是否稳定。对于地类层次的增加模式分析,将稳定性定义为地类的增加观察变化强度大于所有间隔的平均变化强度或者小于所有间隔的平均变化强度。类似的逻辑,如果地类的减少观察强度大于所有间隔的平均变化强度或者小于所有间隔的平均变化强度,则认为该地类在考虑减少观察强度时是稳定的。特定地类的强度可能从一个时间间隔变化到另一个时间间隔,但本文对稳定的定义仅考虑所有时间间隔的强度位于平均变化强度线的哪一侧。

3.2.3 转变层次变化分析

在转变层次,提出了第三个需要回答的研究问题为:“在特定的时间间隔内哪种转变是强烈的?”转变层次分析了从一个特定地类转变为另一种地类时的任意转变强度,同时解释了整个研究区域所有单个地类的变化面积大小。分析从地类 m 转变为不同的地类 n 的转变强度是稳定的。本节首先检查地类 n 的增加模式,然后考虑地类 m 的减少模式。

考虑地类 n 的观察增加模式,式(5)和(6)界定了在一个特定的时间间隔内,特定地类 n 的增加来源于或转变为非 n 地类。式(5)给出了在 $i \neq n$ 时,每种地类 i 转变为地类 n 的观察变化强度。式(5)在每个时间间隔内产生了 $J-1$ 个强度,即在每个时间间隔内每种非 n 地类均会有一个观察变化强度。对于每个时间间隔,式(6)为每个地类 n 产生一个平均变化强度,定义为假设地类 n 在整个研究区内统一增加时,地类 n 的年均观察转变变化强度。式(6)的平均变化强度是式(2)解出的 $J-1$ 个强度的加权平均,每个地类 i 的权重是地类 i 在时间间隔 $[Y_t, Y_{t+1}]$ 的变化面积。那么式(6)的分母是式(5)的 $J-1$ 个强度分母的求和。如果 n 在整个空间范围内是统一增加的,则对所有 i 而言, $R_{tin} = W_m$ 。

$$R_{tin} = \frac{C_{tin}/(Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (5)$$

$$W_m = \frac{\left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tin} \right) - C_{mm} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{j=1}^J \left[\left(\sum_{i=1}^J C_{tij} \right) - C_{mj} \right]} \times 100\% \quad (6)$$

在转变层次,通过调查所有时间间隔的观察变化强度,检查从地类 m 转变为地类 n 的稳定性。如果地类 n 的增加在所有时间间隔内都是转变为地类 m ,或者在所有时间间隔内都不是转变为地类 m ,则称为考虑地类 n 的增加时,从地类 m 转变为地类 n 时是稳定的。

为考虑地类 m 的减少观察变化面积和变化强度,式(7)和(8)分析了地类 m 的减少模式,类似于式(5)和(6)分析的地类 n 的增加模式。考虑到地类 m 的减少模式,式(7)和(8)界定了在一个特定的时间间隔内,地类 m 转变为其他地类是否强烈,式(7)给出了在 $j \neq m$ 时,地类 m 转变为其他地类时的观察变化强度。式(7)在每个时间间隔内产生了 $J-1$ 个观察变化强度,意味着每个时间间隔内每种非 m 地类都会有一个观察变化强度。式(8)对每种地类 m 产生了一个输出结果,定义了地类 m 在每个时间间隔的后一个时间点上转变为其他地类的平均转变变化强度。这个平均转变强度描述了地类 m 转变为其他地类的情况,而所有非 m 地类的增加来自地类 m ,和后一时间点非 m 地类的相对大小是成比例的。如果地类 m 以一种统一方式减少为所有其他地类,那么对所有 j 而言, $Q_{tmj} = V_m$ 。

$$Q_{tmj} = \frac{C_{tmj}/(Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^J C_{tij}} \times 100\% \quad (7)$$

$$V_m = \frac{\left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tmj} \right) - C_{mm} \right] / (Y_{t+1} - Y_t)}{\sum_{i=1}^J \left[\left(\sum_{j=1}^J C_{tij} \right) - C_{im} \right]} \times 100\% \quad (8)$$

本文也定义了所有时间间隔的观察变化强度从地类 m 转为地类 n 的稳定性。如果地类 m 的减少在所有时间间隔内均转变为地类 n ,或者在所有时间间隔内均来源于地类 n ,则称为考虑地类 m 的减少时,地类 m 转变为地类 n 是稳定的。

4 结果与分析

4.1 间隔层次变化

在间隔层次,如图3所示,图的右侧1990-2000年的变化强度小于平均变化强度,说明1990-2000年的变化强度是缓慢的。2008-2014年的变化强度大于平均变化强度,说明在这个时间间隔变化是快速的。2000-2008年的变化强度等于平均变化强度,说明在这个时间间隔变化是快速的。从图3左侧的面积变化可以看出,面积变化和强度变化是基本成比例的,1990-2000年的变化面积最少,仅占研究区域的2%;2008-2014年的变化面积最多,占研究区域的11%。主要原因是云南省委省政府在2003年作出了加快现代新昆明发展的战略决策,提出了昆明市“一湖四环、一湖四片(城)”的空间战略构想,力争到2020年,城市建成规模达

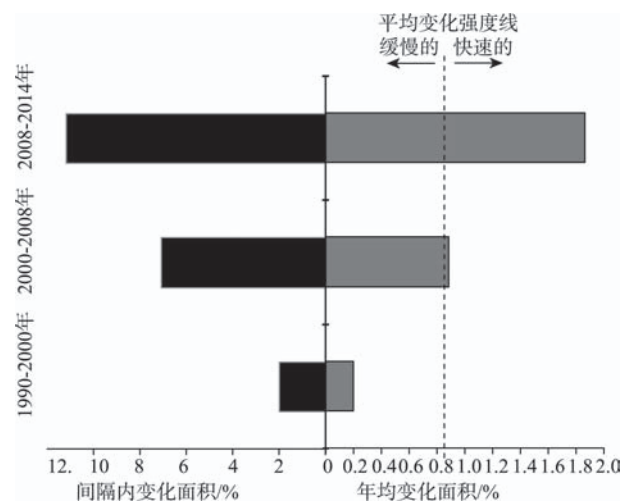


图3 昆明市间隔层次土地利用变化的面积变化和强度变化
Fig.3 Land use area and intensity changes in three time intervals in Kunming City

460 km², 城市人口 450 万 (http://szfyjs.km.gov.cn/structure/dycg/zw_85203_1.htm)。

4.2 地类层次变化

在地类层次,从图4右侧的变化强度来看,林地变化强度的增加和减少小于平均增加变化强度和平均减少变化强度,林地在整个时间间隔内都是平稳的。建设用地的增加变化强度和减少变化强度大于平均增加变化强度和平均减少变化强度,在整个时间间隔内都是活跃的。其他地类的增加变化强度或减少变化强度在3个时间间隔内表现为不同的强度变化趋势。根据地类层次稳定性的界定,在整个时间间隔内,建设用地的变化强度均大于平均变化强度,受交通因素、社会经济、政策和规划等因素的影响,昆明市建设用地持续扩张;而林地的变化强度均小于平均变化强度,是因为退耕还林、保护生态环境等政策措施的实施,林地变化微弱,因

此建设用地和林地在整个时间间隔范围内是稳定的。

从图4左侧的面积变化来看,林地的增加和减少面积在每个时间间隔内均是最大的,这和林地占研究区域的比重最大有关,林地在前两个时间间隔的增加面积大于减少面积,产生空间转换现象。草地在1990-2000年和2008-2014年的减少面积居其次,耕地在2000-2008年的减少面积大于草地的面积。对六种地类进行对比可以看出,建设用地的增加面积远大于减少面积,并且其强度也是最活跃的。这是因为自20世纪90年代起,随着经济迅速发展形成“开发区热”和“房地产热”的发展势头,并且2000年后西部大开发战略的实施,吸纳了大量的资金、人才和技术,使城镇扩展速度明显加快。变化强度的较活跃程度仅次于建设用地(刘纪远等, 2014)。

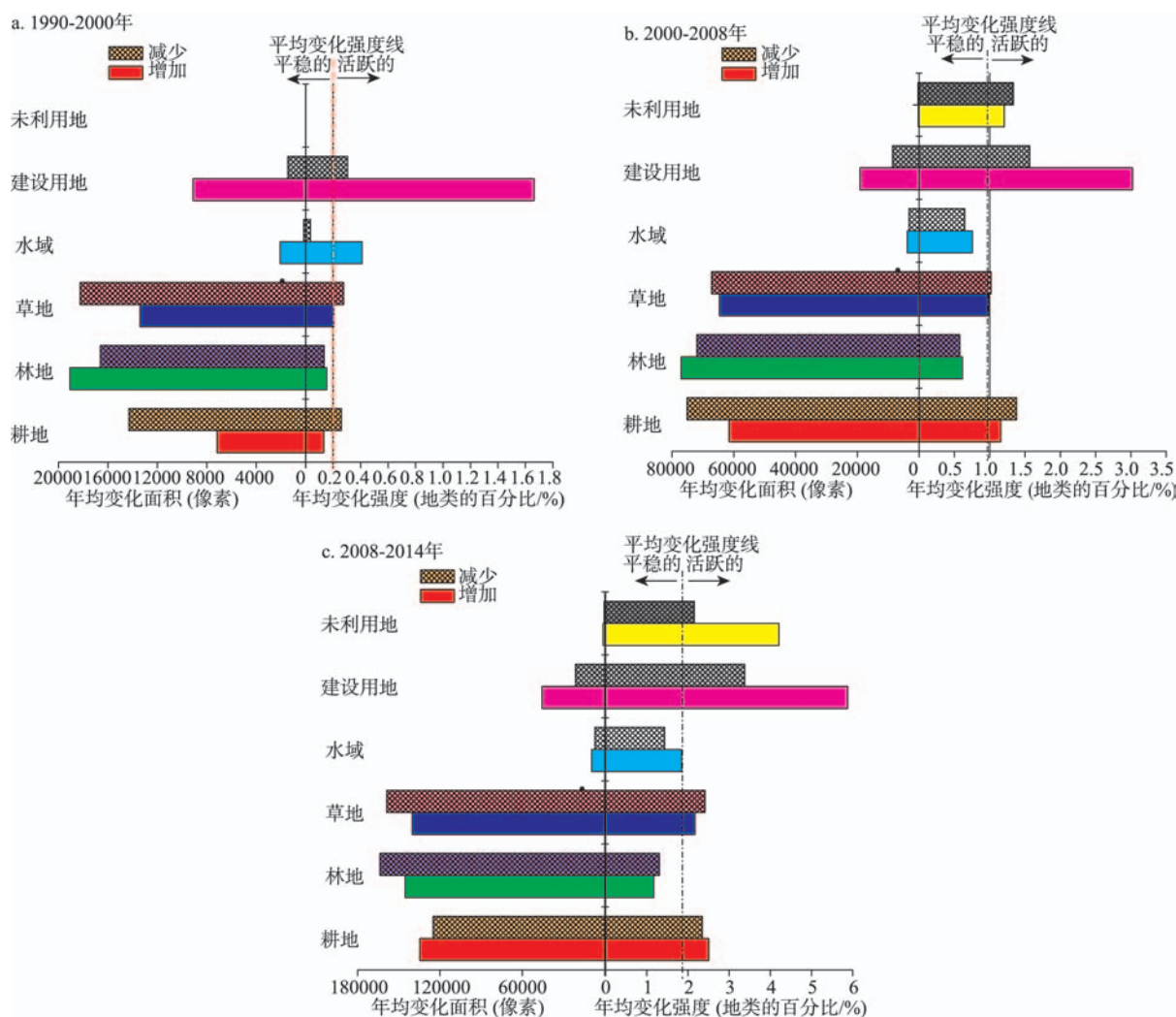


图4 昆明市地类层次土地利用变化的面积变化和强度变化
Fig.4 Area and intensity changes for six land use categories in Kunming City

4.3 转变层次变化

从转变层次的增加模式来看,以建设用地为例。如图5右侧所示,1990-2000年和2000-2008年,耕地的增加转变变化强度大于平均转变变化强度,耕地的增加转变变化强度大于平均转变变化强度,

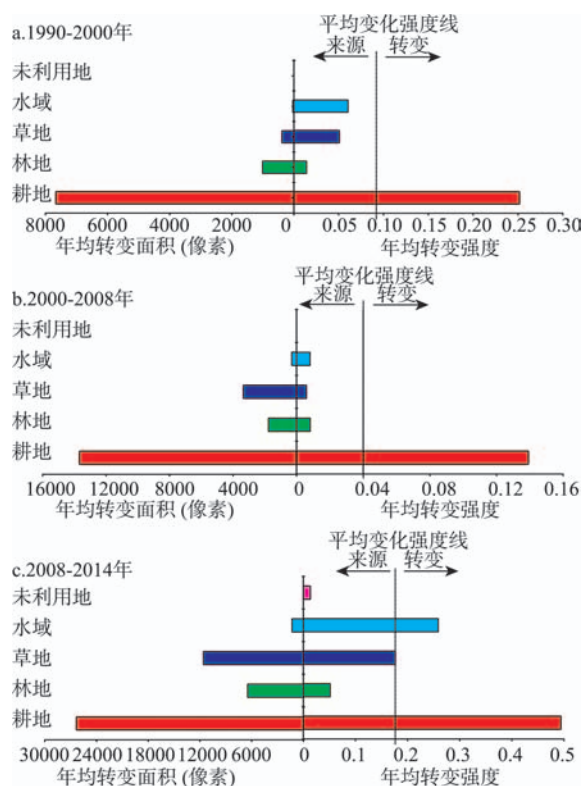


图5 3个时间间隔内转变到建设用地的增加模式的面积变化和强度变化

Fig.5 Intensity analysis for conversion in to built-up areas based on the observed gains in three time intervals

建设用地的增加主要来源于耕地,而不是其他用地。2008-2014年,耕地、草地和水域的增加转变变化强度大于平均转变变化强度,建设用地的增加主要来源于耕地、草地和水域,原因是昆明市围绕滇池开发建设用地的强度增加。图5左侧的面积变化也说明建设用地的增加所占耕地面积最多,源于其他地类的面积较少。根据转变层次增加模式稳定性的界定,在3个时间间隔内,建设用地的增加均来源于耕地,而不是林地和未利用地,因此,从耕地转变为建设用地是稳定的,而林地和未利用地没有转变为建设用地的趋势也是稳定的。

从转变层次的减少模式来看,以林地为例(图6),可以看出,1990-2000年林地的减少转变为建设用地和草地,2000-2008年转变为草地和耕地,2008-2014年仅为转变为草地。在3个时间间隔内林地的减少均转变为草地,这和草地所占面积比重较大有关。根据转变层次减少模式的稳定性界定,在3个时间间隔内,林地的减少均转变为草地是稳定的,不转变为未利用地和水域也是稳定的。

5 结论与讨论

强度分析是一个自上而下的等级层次解释性数学框架,对系统性地深入理解土地利用变化过程具有重要意义。昆明市的地势复杂,由山地、丘陵和平坝组成,梯度性较显著,因此,较适合使用强度分析理论的3个层次来分析土地利用变化,和其他

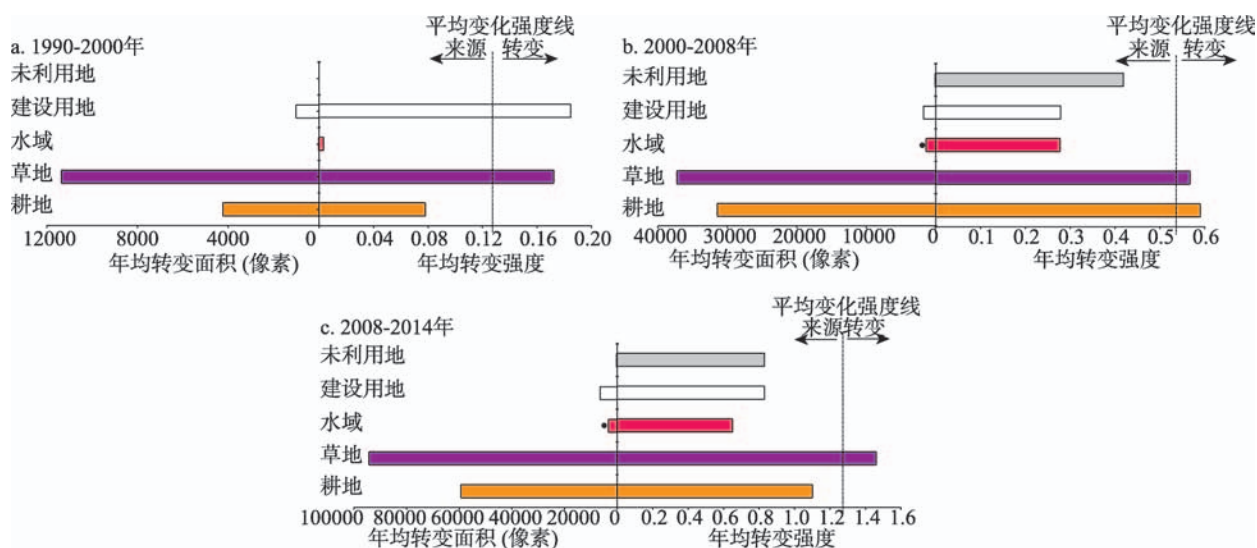


图6 3个时间间隔内林地转变为其他用地的减少模式的面积变化和强度变化

Fig.6 Intensity analysis for conversion from forest based on the observed losses in three time intervals

土地利用变化研究方法相比,更具系统性。本文的结论主要如下:

(1) 从变化强度来看,在间隔层次,昆明市在2000年后的土地利用变化强度逐渐加大。在地类层次,在整个时间间隔范围内,建设用地的增加强度和减少强度均是活跃的,林地的增加强度和减少强度均是平稳的,其他地类的增加强度或减少强度表现不一。在转变层次,建设用地的增加主要来源于耕地,在2008-2014年还来源于水域,而不是其他地类;林地的减少主要转变为草地。

(2) 从变化面积来看,在间隔层次,1990-2000年变化面积最少,2008-2014年变化面积最多。在地类层次,年均变化面积较多的土地利用类型是林地、草地、耕地,未利用地年均变化面积最少,建设用地的增加面积远大于减少面积。在转变层次,建设用地的增加面积主要来自耕地的减少面积,林地的减少面积主要转变为草地,其次是耕地。

(3) 从3个层次的稳定性来看,间隔层次是不稳定的。地类层次仅有建设用地和林地是稳定的,其他地类是不稳定的。转变层次,在考虑建设用地的增加时,从耕地转变为建设用地是稳定的,来源于未利用地、草地、林地也是稳定的;在考虑林地的减少时,转变为草地是稳定的,来源于未利用地和水域也是稳定的。

(4) 利用强度分析与国内外流行的分析土地利用变化过程的Markov模型(Bell et al, 1997; Mertens et al, 2000; Pelorosso et al, 2011)进行对比,Markov模型结构假设是一个自下而上的过程,Markov每一行的转变强度决定了整个时间间隔的变化过程,它计算了 t 时刻转变为 $t+1$ 时刻的地类比例,且 t 时刻地类的转变大小与其他地类在 t 时刻转变地类大小无关。与强度分析地类层次的增加模式和减少模式相比,Markov模型只考虑了特定地类的增加转变强度。同时与强度分析的特定增加地类相比较,Markov模型没有考虑关联表中每一列的转变分布情况,忽略了关联表中每一列不同层次之间相互联系的变化强度和转变面积大小。可以看出,强度分析在分析土地利用变化过程时更具系统性的优势。

(5) 强度分析是一个对土地利用变化过程分析的有效方法,下一步工作是把强度分析的多个层次的强度变化大小进行时空表达,在空间上可以清楚看到各个层次的强度在空间范围的变化情况。

此外还把各个层次转变面积大小和变化强度表达在同一个地图上,可以深入了解每个层次变化面积和变化强度的空间分布趋势。

致谢:感谢美国克拉克大学地理学院 Robert Gilmore Pontius Jr 教授给予指导并提出宝贵意见;以及中国科学院遥感与数字地球研究所张增祥研究员提出的宝贵意见。

参考文献(References)

- 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 2001. 北京地区土地利用/覆盖变化研究[J]. 地理研究, 20(6): 679-687. [He C Y, Shi P J, Chen J, et al. 2001. A study on land use/cover change in Beijing area[J]. Geographical Research, 20(6): 679-687.]
- 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 2014. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 69(1): 3-14.]
- 刘瑞, 朱道林. 2010. 基于转移矩阵的土地利用变化信息挖掘方法探讨[J]. 资源科学, 32(8): 1544-1550. [Liu R, Zhu D L. 2010. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 32(8): 1544-1550.]
- 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 2013. 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, 32(8): 1497-1507. [Qiao W F, Sheng Y H, Fang B, et al. 2013. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: A case study of Suzhou, Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 32(8): 1497-1507.]
- 谭文彬, 刘斌, 张增祥, 等. 2009. 近三十年来昆明市建成区扩展遥感监测与分析[J]. 地球信息科学学报, 11(1): 117-124. [Tan W B, Liu B, Zhang Z X, et al. 2009. Remote sensing monitoring and analyzing of the urban built-up land expansion in Kunming in 1974-2004[J]. Journal of Geo-information Science, 11(1): 117-124.]
- 张薇, 刘森, 戚与珊. 2014. 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, 33(6): 1655-1662. [Zhang W, Liu M, Qi Y S. 2014. Land-use scenarios simulation based on the CLUE-S model in Kunming[J]. Chinese Journal of Ecology, 33(6): 1655-1662.]
- 张增祥, 赵晓丽, 汪潇, 等. 2012. 中国土地利用遥感监测[M]. 北京: 星球地图出版社. [Zhang Z X, Zhao X L, Wang X, et al. 2012. Monitoring land use in China by re-

- mote sensing[M]. Beijing, China: Star Map Press.]
- Aldwaik S Z, Pontius R G Jr. 2012. Intensity analysis to unify measurements of size and stationarity of land changes by interval, category, and transition[J]. *Landscape and Urban Planning*, 106(1): 103-114.
- Bell E J, Hinojosa R C. 1997. Markov analysis of land use change: continuous time and stationary processes[J]. *Socio-Economic Planning Sciences*, 11(1): 13-17.
- Gitau M, Bailey N. 2012. Multi-Layer assessment of land use and related changes for decision support in a coastal zone watershed[J]. *Land*, 1(1): 5-31.
- Herrick J E, Urama K C, Karl J W, et al. 2013. The global land-potential knowledge system (landPKS): supporting evidence-based, site-specific land use and management through cloud computing, mobile applications, and crowd sourcing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 68(1): 5A-12A.
- Huang J L, Pontius R G Jr, Li Q S, et al. 2012. Use of intensity analysis to link patterns with processes of land change from 1986 to 2007 in a coastal watershed of southeast China[J]. *Applied Geography*, 34: 371-384.
- Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. 2003. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 46(4): 373-384.
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. 2010. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 20(4): 483-494.
- Mallinis G, Koutsias N, Arianoutsou M. 2014. Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece[J]. *Science of the Total Environment*, 490: 262-278.
- Manandhar R, Odeh I O A, Pontius R G Jr. 2010. Analysis of twenty years of categorical land transitions in the lower Hunter of New South Wales, Australia[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135(4): 336-346.
- McMahon G, Benjamin S P, Clarke K, et al. 2005. Geography for a changing world: a science strategy for the geographic research of the U.S. geological survey, 2005-2015[R]. Sioux Fall, SD: U.S. Geological Survey Circular, 1281: 1-76.
- Mertens B, Lambin E F. 2000. Land-cover-change trajectories in southern Cameroon[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(3): 467-494.
- Mooney H A, Duraiappah A, Larigauderie A. 2013. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(S1): 3665-3672.
- Pelorusso R, Chiesa S D, Tappeiner U, et al. 2011. Stability analysis for defining management strategies in abandoned mountain landscapes of the Mediterranean basin [J]. *Landscape and Urban Planning*, 103(3-4): 335-346.
- Pontius R G Jr, Boersma W, Castella J-C, et al. 2008. Comparing the input, output, and validation maps for several models of land change[J]. *Annals of Regional Science*, 42(1): 11-47.
- Pontius R G Jr, Gao Y, Giner N M, et al. 2013. Design and interpretation of intensity analysis illustrated by land change in Central Kalimantan, Indonesia[J]. *Land*, 2(3): 351-369.
- Pontius R G Jr, Shusas E, McEachern M. 2004. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 100(2-3): 251-268.
- Romero-Ruiz M H, Flantua S G A, Tansey K, et al. 2012. Landscape transformations in savannas of northern South America: land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia[J]. *Applied Geography*, 32(2): 766-776.
- Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. 2012. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle[J]. *Nature Climate Change*, 3(4): 385-390.
- Takada T, Miyamoto A, Hasegawa S F. 2010. Derivation of a yearly transition probability matrix for land-use dynamics and its applications[J]. *Landscape Ecology*, 25(4): 561-572.
- Zhou P, Huang J L, Pontius R G Jr, et al. 2014. Land classification and change intensity analysis in a coastal watershed of southeast China[J]. *Sensors*, 14(7): 11640-11658.

Intensity analysis and stationarity of land use change in Kunming City

SUN Yunhua^{1,2}, GUO Tao³, CUI Ximin¹

(1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China; 2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Computer Science and Technology, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: Intensity analysis is a popular method as a top-down hierarchical accounting framework to analyze land use maps by considering cross-tabulation matrices and calculating change area and intensity of each land use category in every time interval with the use of remote sensing, geographic information system, and statistical methods. It was applied to analyze land use changes at three levels: temporal (time interval), categorical (land use types), and direction of conversion. At each level, we compared the observed change intensity to a uniform change intensity in order to reveal the characteristics of change. At the temporal level, we identify in which time intervals changes were relatively fast in terms of overall annual change. At the categorical level, we identify which categories were stable as opposed to active relative to the size of the categories. At the direction of conversion level, when a given category gains or loses, we can identify intensive targeting or avoidance of the other categories. In this article, we took land use change in Kunming City as an example to explore area and intensity changes at different levels and analyze stationarity. The results show that temporally land use intensity in Kunming City has gradually increased since 2000 (in the last time interval). With regard to land use categories, built-up areas' change intensity was most active, while the change intensity of forests was most stable. With regard to the direction of conversion, the increased built-up areas were mainly from previous cropland, while the reduced forest areas were mainly changed into grassland. Intensity analysis theory has great advantages in analyzing land use change processes, which facilitates the mining of change information and understanding of land use change processes and is very useful for scientists.

Key words: intensity analysis; cross-tabulation; land use change; stationarity; Kunming City