

武汉城市圈公路沿线 土地利用变化规律分析

王慧敏 危小建 刘耀林

- (1. 广东工业大学机电工程学院, 广东广州 510006;
2. 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室, 汪西南昌 330013;
3. 东华理工大学测绘工程学院, 江西南昌 330013;
4. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北武汉 430079)

【摘要】区域交通土地一体化规划需要明晰公路沿线的土地利用变化过程。基于随机概率的土地转移矩阵模型及相关结构指数, 分析了武汉城市圈公路沿线的土地利用变化规律。结果显示, 从变化量而言, 武汉城市圈各类型公路沿线耕地转为建设用地的比例最人, 且以国道最为明显; 从系统的变化方向而言, 各公路类型沿线建设用地占用耕地现象显著, 此外, 高速沿线建设用地占用水域, 国道沿线耕地、林地, 以及各类型公路沿线耕地、林地闲置现象也需及时监测和预警。

【关键词】土地转移矩阵; 武汉城市圈; 系统随机过程; 交通土地一体化

【中图分类号】F301.2 **【文献标识码】**A

【文章编号】1004-8227(2016)10-1585-09

【DOI】10.11870/cjlyzyyhj201610013

公路作为承担区域交通运输功能的主要载体, 已成为地区发展的重要组成部分。大规模的公路建设在给人类活动带来便利的同时, 也直接影响着周围土地利用的分布格局和强度, 进而对生态环境过程产生直接或间接的影响。相关研究显示, 在全球范围内, 公路对周边环境的影响至少涉及陆地面积的 15%, 20%, 其中我国受公路影响的面积占国土面积的 18.37%。随着人地矛盾的日益突出, 公路交通对沿线土地利用变化影响的研究逐渐受到国内外研究者的广泛关注。

目前多项研究已经评价了交通网络对土地利用 / 覆被变化的影响。例如, 李京涛等^[1]运用空间形态和景观指数对南京市的交通和城市土地变化的时空异质性进行了分析; 杨思等运用土地结构指数对深圳市的道路网络与建设用地扩张及林地景观格局的关系进行了研究。这些研究大多集中在城市内部, 并且从度量方法上多是基于量化的结构指数或景观形态指数来分析交通网络沿线土地变化过程。不同地类之间的转移具有空间置换性和方向变化性, 并且存在系统变化和随机变化的区别, 因此, 有必要挖掘系统的土地转移规律以进一步了解复杂的土地利用变化动力学机制。Pontius 等提出了基于随机概率的土地转移矩阵模型, 该模型能够识别出系统的土地利用变化, 有助于解释现有土地利用格局的变化过程, 目前已在农业资源和土地利用研究领域得到了广泛应用。例如, 乔伟峰等采用基于随机概率的土地转移矩阵模型, 揭示了苏州市在 1999-2008 年间的土地利用演变规律。此外, 概率转移矩阵作为马尔可夫链分析中的主要方法, 可结合元胞自动机、人工神经网络等模型进行土地利用变化多情景的模拟。例如, 欧定华等利用上述模型分析了成都市龙泉驿区在 1992-2014 年间土地利用的演变特征, 并模拟了 2021 年和 2028 年的景观变化趋势。

以武汉城市圈为研究范围，引入基于随机概率的土地转移矩阵模型来分析土地利用变化对不同类型公路响应机制的差异性，从而全面揭示系统的变化规律，为快速城市化背景下的区域交通土地一体化规划、区域可持续发展提供科学依据和理论基础。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

武汉城市圈地处华中湖北省腹地，位于江汉平原东部，长江与汉水交汇处，地理位置在 $112^{\circ} 29' - 116^{\circ} 10' E, 28^{\circ} 59' - 31^{\circ} 51' N$ ，总面积为 5.78 万平方公里。武汉城市圈，又称“1+8”城市圈，是指以武汉为圆心的一百公里半径范围内，包括黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门、潜江周边 8 个城市所组成的区域经济联合体，如图 1 所示。其中武汉为中心城市，黄石为副中心城市。它是中国中部经济区及长江中游最大、最密集的城市群，是中部崛起的战略中最具活力与潜力的增长极，也是我国东部、中部、西部协调一体化发展的重要连接点之一。

1.2 数据来源与处理

武汉城市圈土地利用数据来源于 2000、2011 年的 LandsatTM/ETM+30 米分辨率的遥感数据。参照中国土地资源分类系统，并结合研究区土地利用特征，将研究区分为耕地、林地、建设用地、水域及未利用地 5 种土地利用类型。具体的坐标系设置为 1980_3_Degree_GK_Zone_38，投影方式为 GaussKruger 投影，并使用 ENVI4.8 和 ArcGIS9.3 对各影像进行影像校正、投影坐标变换、空间配准等操作，然后采用监督分类法中的最大似然法进行分类，最后将分类结果转换为矢量数据。对于 2000 年至 2011 年间未发生变化的区域，运用 1:5 万湖北省第二次土地调查缩编成果(2009)辅助进行分类属性的确认。

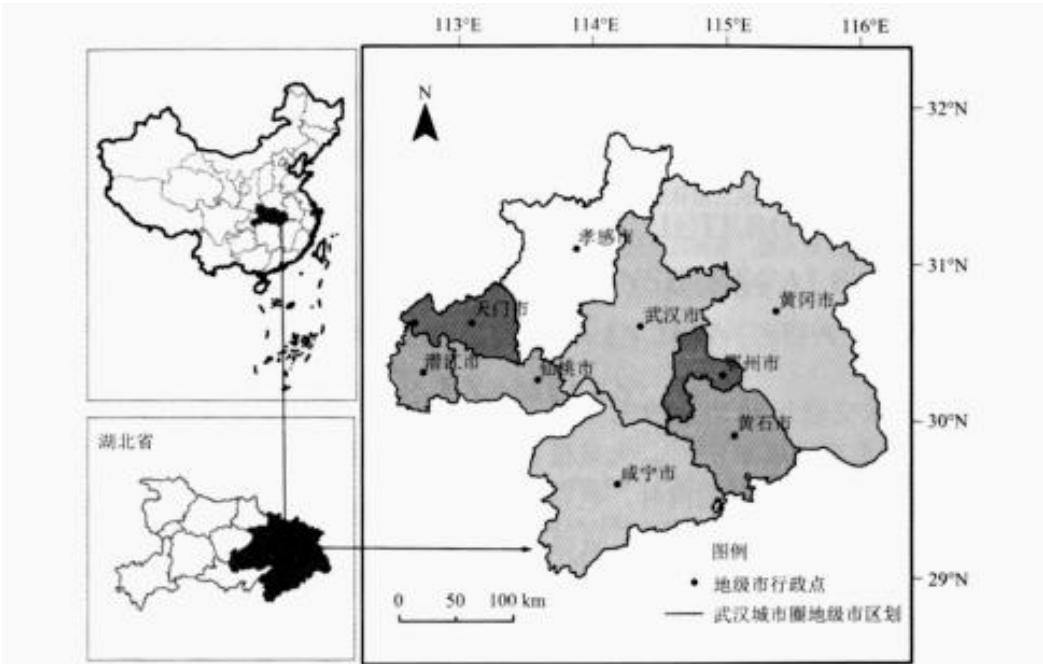
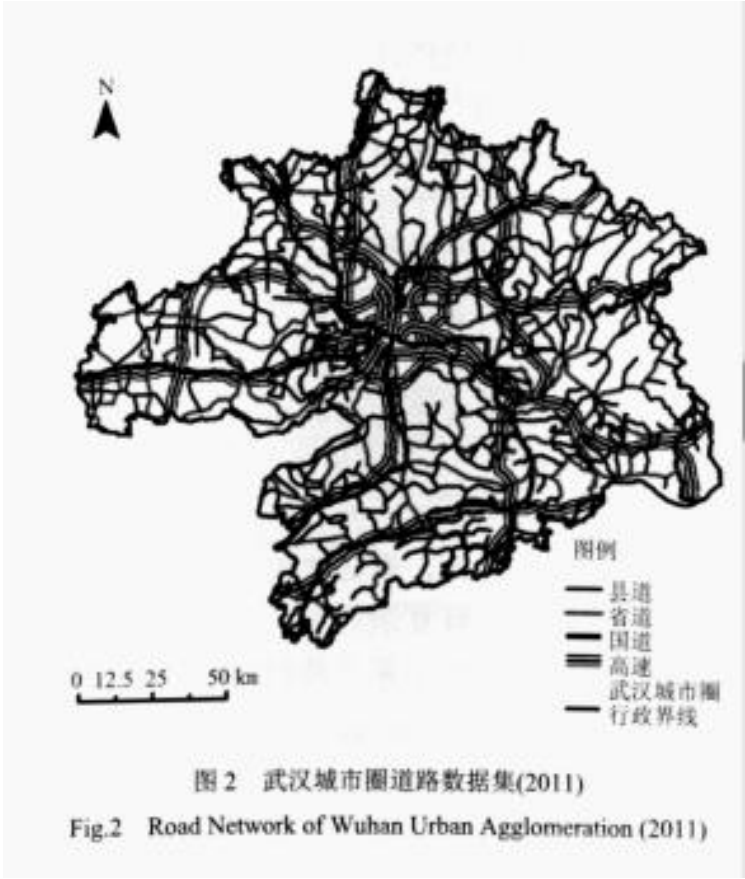


图1 武汉城市圈行政区划图

Fig.1 Administrative Map of Wuhan Urban Agglomeration

研究所需的公路矢量数据来自 1:1 万湖北省第二次土地调查成果(2009)和湖北及周边省区公路里程地图册（2011），包括县乡道、省道、国道以及高速公路（图 2）。公路影响域的设定主要参照以下标准：高速公路（1km），国道（500m），省道(250m)，县乡道（100m），然后通过缓冲区分析功能对不同公路等级作相应的缓冲区，为了避免各等级公路的联合影响的干扰，因此去除掉各公路等级缓冲区中相交的部分，仅对各自不相交的部分与土地利用数据进行叠加分析。



2 研究方法

2.1 土地利用变化指标

单一地类变化率是指某研究区一定时间范围内某种土地利用 / 覆被类型的数量变化情况，用 K 表示，其表达式如公式 1 所示：

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

式中： U_a 、 U_b 为研究区初始阶段及现有阶段某种土地利用类型的面积； T 为研究时段，当 T 的单位为年时， K 值就是该研究区某种土地利用类型的年变化率。

综合土地利用动态度是指某研究区一定时间范围内综合土地利用/覆被类型的数量变化情况，用 LC 表示，其表达式如公式2所示^[22, 23]：

$$LC = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right\} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中： LU_i 为初始阶段某种土地利用类型 i 的面

积； $\Delta LU_{i,j}$ 为某种土地利用类型 i 转向 j 地类的面积； T 为研究时段，一般以年为单位。

土地利用强度是指区域范围内土地利用的综合程度用 I 来表示，其表达式如公式3所示^[22, 25]：

$$I = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \tag{3}$$

式中： C_i 为某一土地利用类型的面积百分比， A_i 为该土地利用类型的利用程度等级。

2.2 基于随机概率的土地转移矩阵模型

基于概率的转移矩阵方法是采用土地利用转移矩阵计算随机状态下各地类间相互转移的理论值，并与实际转移率作对比（表 1），以识别系统的地类间转移规律。具体的，首先从获得和损失角度，计算随机状态下的理论获得量（ G_{ij} ）和损失量（ L_{ij} ）然后对比实际获得量与理论获得量以及实际损失量与理论损失量之间的差值。若差值为正，表明实际转换值大于理论转换值，说明该转换具有倾向性优势；如果该值为负，则说明该转换不具有倾向性转换优势；如果该值为 0，表明实际转换值等于相应理论转换值，说明该转换为非倾向性转换。如果从获得和损失两个角度，土地类型 A 到土地类型 B 的实际转换值都大于理论转换值，即以上差值为正，则表明 A 到 B 是系统的转移变化。

表 1 土地利用转移矩阵						
Tab.1 Land Use Transition Matrix						
	时间2				总量时间1	损失量
	地类1	地类2	地类3	地类j		
时间1						
地类1	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{1j}	P_{1+}	$P_{1+}-P_{11}$
地类2	P_{21}	P_{22}	P_{23}	P_{2j}	P_{2+}	$P_{2+}-P_{22}$
地类3	P_{31}	P_{32}	P_{33}	P_{3j}	P_{3+}	$P_{3+}-P_{33}$
...	...	...	...	...	...	...
地类j	P_{j1}	P_{j2}	P_{j3}	P_{jj}	P_{j+}	$P_{j+}-P_{jj}$
总量时间2	P_{+1}	P_{+2}	P_{+3}	P_{+j}		
获得量	$P_{+1}-P_{11}$	$P_{+2}-P_{22}$	$P_{+3}-P_{33}$	$P_{+j}-P_{jj}$		

(1) 地类的不变量 (Persistence)

地类的不变量表示在 t1、t2 时期内地类未发生变化的面积比，通常是转移矩阵的对角线位置所对应的数值 P_{ij} 。

(2) 地类的获得量 (Gain)

地类的获得量表示在 t1、t2 时期内某地 j 从其他类型获得的面积百分比，为时段 2 中地 j 的比例减去该地类的不变量。

$$G_j = P_{+j} - P_{jj} \tag{4}$$

(3) 地类的损失量 (Loss)

地类的损失量表示在 t1、t2 时期内某地 j 转移给其他类型的面积百分比，为时段 1 中地 j 的比例减去该地类的不变量。

$$L_j = P_{j+} - P_{jj} \tag{5}$$

(4) 地类的总变化量 (Totalchange)

地类的总变化量表示地类 j 在 t1、t2 时期的获得量和损失量之和。

$$T_j = L_j + G_j \tag{6}$$

(5) 地类的交换量 (Swapchange)

地类的交换量表示地类 j 在 t1,t2 时期内发生空间置换的面积百分比，为获得量和损失量两者最小值的两倍。

$$S_j = 2 \times \text{Min}(L_j, G_j) \quad (7)$$

(6) 地类的净变化量 (Netchange)

地类的净变化量表示地类 j 在 t1、t2 时期内的绝对变化量，为该地类在 t1、t2 时期的面积百分比差值的绝对值。

$$N_j = |P_{+j} - P_{j+}| \quad (8)$$

(7) 地类转移概率

识别系统转换规则应同时考虑土地利用转换的数量信息和各土地利用类型本身的数量信息。公式 9 和公式 10 分别从获得和损失的角度计算得到土地利用类型之间转化的随机理论值。

$$G_{ij} = (P_{+j} - P_{jj}) \times \left(\frac{P_{i+}}{100 - P_{j+}} \right), i \neq j \quad (9)$$

$$L_{ij} = (P_{i+} - P_{ii}) \times \left(\frac{P_{+j}}{100 - P_{+i}} \right), i \neq j \quad (10)$$

3 结果分析

3.1 公路网络对土地利用结构变化的影响

缓冲区范围是公路影响在一定区域范围内的聚集。使用 ArcGIS 统计不同公路类型影响的各土地利用类型面积，如表 2 所示，得出武汉城市圈公路影响的土地利用面积为 3228.48 平方公里，占区域总体面积的 5.62%。其中，高速公路影响土地利用的面积最大，其次是省道，然后是国道，县乡道的影响面积最小。由于公路的影响面积取决于缓冲区宽度及公路长度，尽管县乡道的总长度是最长的，但因为较小的影响缓冲区，它的总影响面积仍比其他类型的公路影响面积小。从综合土地利用动态度来看，如图 3 所示，国道影响域内的综合土地利用动态度是最大的，其次是省道、高速，最后是县乡道。对比不同地类的变化率，如图 4 所示，林地、建设用地和未利用地在高速公路沿线增长最快，水域在县乡道附近扩张最快，而耕地在不同等级公路附近均呈现减少态势。

表 2 不同公路类型影响面积统计

Tab.2 Affected Areas of Different Type Roads

公路类型	总长度(Rm)	影响面积(Rm ²)	比例(%)
高速	1 555.95	1 555.95	48
国道	1 241.96	620.98	19
省道	3 098.15	774.54	24
县乡道	5 540.22	277.01	9
总计	11 436.28	3 228.48	100

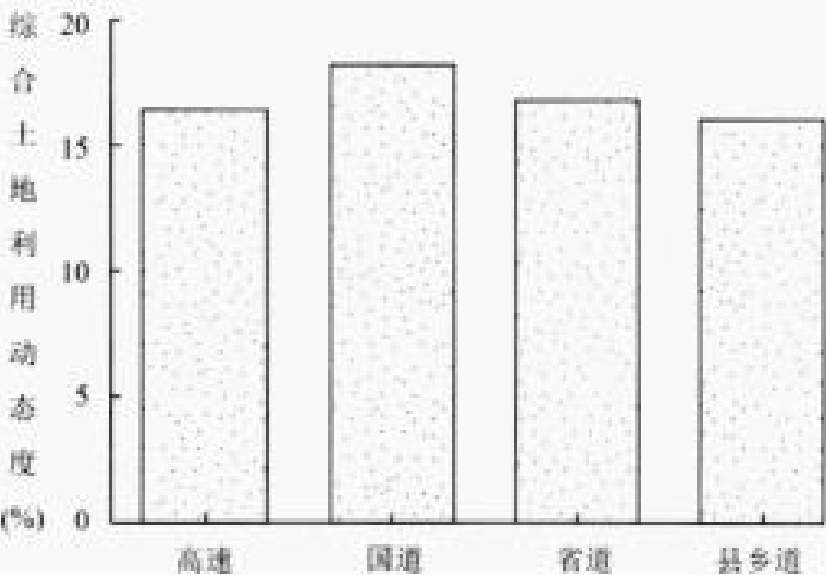


图 3 不同类型公路沿线土地利用综合动态度

Fig.3 Land Use Dynamic Degree along Different Road Types

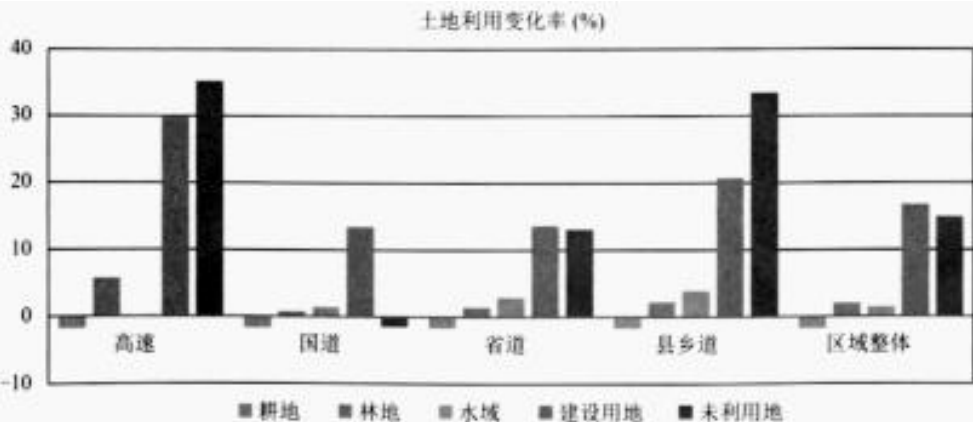


图 4 不同类型公路沿线土地利用变化率

Fig.4 Land Use Change Rate along Different Road Types

3.2 公路网络对土地利用强度变化的影响

参照土地利用程度的分级指数，设置土地利用强度等级如下：耕地设为 3，林地、水域设为 2，建设用地设为 4，未利用地设为 1，分别对不同等级的公路影响域内土地利用强度进行估计，如表 3 所示。不同公路类型影响域内，国道附近的土地利用强度显著加强，由 2010 年的 2.92 增加到 2011 年的 3.05，变化率为 4.63%，其次是高速公路和省道，为国道沿线强度变化率的一半，而县乡道附近的土地利用强度逐渐降低。这种变化趋势表明，国道所带来的位置优势和交通便利条件显著影响着人类对土地资源的利用和改造活动的强度。

表 3 不同公路类型影响域土地利用强度变化统计			
Tab.3 Land Use Intensity along Different Road Types			
	土地利用强度(2010)	土地利用强度(2011)	变化率(%)
高速	2.90	2.96	2.05
国道	2.92	3.05	4.63
省道	2.95	3.01	2.05
县乡道	2.85	2.80	-1.96

3.3 公路网络对土地利用转移方向的影响

基于以上数量分析，本节进一步对武汉城市圈公路影响域内的地类转移情况进行统计，结果如表 4 所示。在 2000 年至 2011 年间，国道缓冲区内具有最大的总变化量（52.67%），其次是高速公路（47.48%）、县乡道（47.71%）和省道（45.52%）。其中，不同类型公路周边，耕地的总变化量是最大的，并呈现面积减少的净变化，说明公路周边的耕地量逐渐减少并转变为其他的土地利用类型；建设用地则主要表现为面积增加的净变化，是公路周边的第二大变化类型；林地和水域两者的交换量数值均大于净变化量数值，表现为以空间置换为主导的变化过程；未利用地在高速公路、省道、县乡道附近均呈增加态势，但在国道周边，未利用地逐渐减少并以空间置换变化为主。

基于面积数量值，对武汉城市圈不同类型公路周边的土地转移矩阵进行分析，结果如图 5 所示，耕地转出的面积比例最大，即耕地与非耕地间的转化是公路沿线最显著的变化标志。其中，耕地转化成建设用地最为明显，反映了“公路经济”的现象。具体的，从不同公路类型来看，耕地转为建设用地在国道附近的比例相对较大，而县乡道附近这类比例是相对较小，大部分耕地转移为了林地和未利用地。

大面积的耕地转移为建设用地是武汉城市圈公路周边最为显著的变化过程，但并不能因此就确认这类变化是系统性的发生，主要是由于耕地和建设用地的原始面积就相当大，即使是随机的变化也能在数量上具有显著性。为了系统地识别不同地类间的变化规律，我们计算了随机状态下各地类间相互转移的理论值，然后与实际的转移值作对比，从而得出系统的转移规律，即如果类别 A 系统性地减少向类别 B，并且 B 系统性地从类别 A 获得，我们就可以认为 A 变化成 B 是系统性的转化过程。以总变化量最大的国道为例，计算得出从获得和损失两个角度的土地利用变化矩阵，如表 5、表 6 所示，我们对转移变化面积比例占 1% 以上的系统转化规律进行了识别。参照此方法，也依次计算了高速公路、省道、县乡道沿线的土地利用变化矩阵，总结得出如下结论：高速公路沿线土地利用系统转移规律为耕地转移为林地，水域转移为建设用地，耕地、林地转移为未利用地；国道沿线为耕地转移为建设用地，林地

转移为耕地，耕地转移为未利用地：省道沿线为耕地转移为建设用地，耕地、林地转移为未利用地；县乡道沿线为耕地系统地转移为未利用地。

表 4 不同公路类型影响域内的土地利用转移面积百分比统计							
Tab.4 Land Use Transition Indicators (%) along Different Road Types							
公路类型	地类	不变量	获得量	损失量	总变化量	交换量	净变化量
高速	耕地	64.06	2.49	18.75	21.24	4.98	-16.26
	林地	2.79	3.99	1.36	5.34	2.71	2.63
	水域	5.74	3.41	3.27	6.68	6.54	0.14
	建设用地	3.63	11.89	0.00	11.89	0.00	11.89
	未利用地	0.05	1.96	0.37	2.32	0.73	1.59
国道	总计	76.26	23.74	23.74	47.48	14.97	0.00
	耕地	57.03	4.75	19.19	23.93	9.49	-14.44
	林地	5.84	4.15	3.38	7.53	6.76	0.77
	水域	1.37	1.46	1.06	2.52	2.12	0.40
	建设用地	9.27	13.74	0.00	13.74	0.00	13.74
省道	未利用地	0.15	2.23	2.70	4.94	4.47	-0.47
	总计	73.67	26.33	26.33	52.67	22.84	0.00
	耕地	62.85	3.16	18.23	21.39	6.32	-15.07
	林地	4.41	3.28	2.21	5.49	4.43	1.06
	水域	2.39	2.59	1.36	3.95	2.72	1.23
县乡道	建设用地	7.52	11.29	0.00	11.29	0.00	11.29
	未利用地	0.07	2.44	0.96	3.40	1.91	1.48
	总计	77.24	22.76	22.76	45.52	15.39	0.00
	耕地	61.45	3.65	18.75	22.40	7.31	-15.10
	林地	10.18	6.56	3.19	9.74	6.37	3.37
	水域	1.44	1.99	0.96	2.95	1.91	1.03
	建设用地	2.96	6.74	0.00	6.74	0.00	6.74
	未利用地	0.11	4.92	0.96	5.88	1.92	3.96
	总计	76.15	23.85	23.85	47.71	17.51	0.00

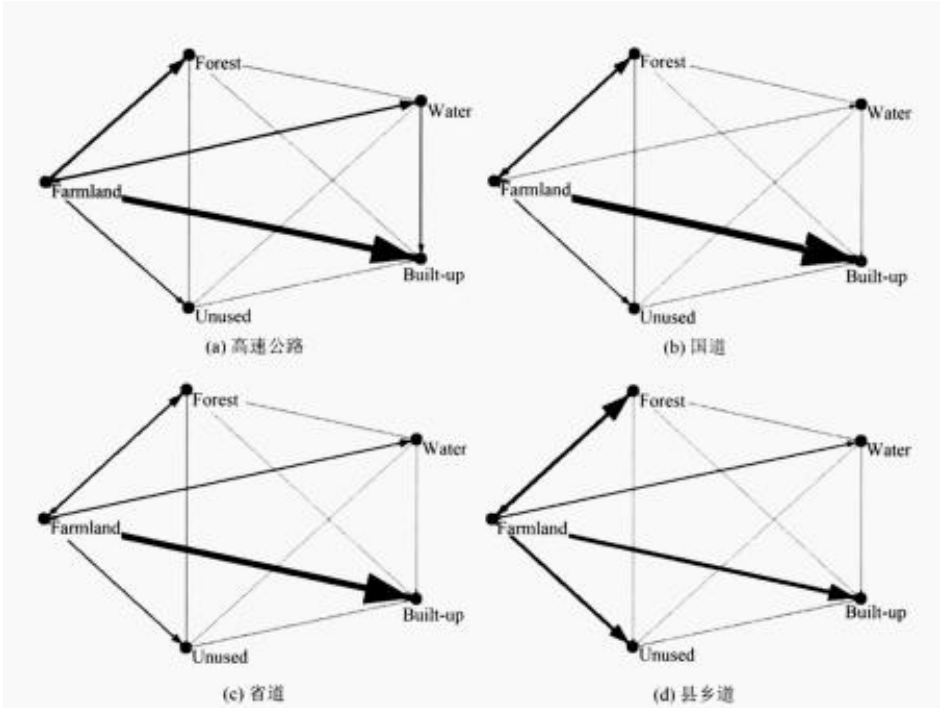


图 5 不同类型公路沿线地类转移变化量
Fig.5 Land Use Transition Matrix along Different Road Types

备注：Farmland耕地，Forest林地，Water水域，Built-up建设用地，Unused未利用地。

表 5 国道沿线2000~2010年从获得角度分析土地利用变化矩阵							
Tab.5 2000~2010 Land Use Transitions along National Roads from the Perspective of Gain							
	2011					总计	损失量
	耕地	林地	水域	建设用地	未利用地		
2000							
耕地	57.03	4.00	1.15	12.00	2.04	76.22	19.19
	<i>57.03</i>	<i>3.49</i>	<i>1.14</i>	<i>11.55</i>	<i>1.75</i>		
	<u>0.00</u>	<u>0.51</u>	<u>0.01</u>	<u>0.46</u>	<u>0.29</u>		
林地	2.48	5.84	0.05	0.69	0.17	9.23	3.38
	<i>1.84</i>	<i>5.84</i>	<i>0.14</i>	<i>1.40</i>	<i>0.21</i>		
	<u>0.63</u>	<u>0.00</u>	<u>-0.09</u>	<u>-0.71</u>	<u>-0.04</u>		
水域	0.49	0.02	1.37	0.52	0.03	2.43	1.06
	<i>0.49</i>	<i>0.11</i>	<i>1.37</i>	<i>0.37</i>	<i>0.06</i>		
	<u>0.00</u>	<u>-0.09</u>	<u>0.00</u>	<u>0.15</u>	<u>-0.03</u>		
建设用地	0.00	0.00	0.00	9.27	0.00	9.27	0.00
	<i>1.85</i>	<i>0.42</i>	<i>0.14</i>	<i>9.27</i>	<i>0.21</i>		
	<u>-1.85</u>	<u>-0.42</u>	<u>-0.14</u>	<u>0.00</u>	<u>-0.21</u>		
未利用地	1.78	0.13	0.26	0.53	0.15	2.85	2.70
	<i>7.41</i>	<i>0.31</i>	<i>0.08</i>	<i>0.72</i>	<i>0.15</i>		
	<u>-5.62</u>	<u>-0.18</u>	<u>0.18</u>	<u>-0.20</u>	<u>0.00</u>		
总计	61.78	10.00	2.83	23.01	2.38	100.00	0.00
获得量	4.75	4.15	1.46	13.74	2.23	0.00	0.00

注：各类型第一行数字表示各地类实际转换面积百分比 $P_{ij}(\%)$ ；斜体数字表示随机情况下各地类新增面积百分比的理论值 $G_{ij}(\%)$ ；带下划线的数字是地类间转换的实际值与理论值之间的差值 $P_{ij}-G_{ij}(\%)$ ，其中加粗数字表示从获得和损失两个角度，差值均为正，且变化比例 $\geq 1\%$ 。

表 6 国道沿线2000~2010年从损失角度分析土地利用变化矩阵							
Tab.6 2000~2010 Land Use Transitions along National Roads from the Perspective of Loss							
	2011					总计	损失量
	耕地	林地	水域	建设用地	未利用地		
2000							
耕地	57.03	4.00	1.15	12.00	2.04	76.22	19.19
	<i>57.03</i>	<i>5.02</i>	<i>1.42</i>	<i>11.55</i>	<i>1.19</i>		
	<u>0.00</u>	<u>-1.02</u>	<u>-0.27</u>	<u>0.45</u>	<u>0.84</u>		
林地	2.48	5.84	0.05	0.69	0.17	9.23	3.38
	<i>2.32</i>	<i>5.84</i>	<i>0.11</i>	<i>0.86</i>	<i>0.09</i>		
	<u>0.15</u>	<u>0.00</u>	<u>-0.06</u>	<u>-0.17</u>	<u>0.08</u>		
水域	0.49	0.02	1.37	0.52	0.03	2.43	1.06
	<i>0.67</i>	<i>0.11</i>	<i>1.37</i>	<i>0.25</i>	<i>0.03</i>		
	<u>-0.18</u>	<u>-0.09</u>	<u>0.00</u>	<u>0.27</u>	<u>0.00</u>		
建设	0.00	0.00	0.00	9.27	0.00	9.27	0.00
用地	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>9.27</i>	<i>0.00</i>		
	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>	<u>0.00</u>		
未利	1.78	0.13	0.26	0.53	0.15	2.85	2.70
用地	<i>1.71</i>	<i>0.28</i>	<i>0.08</i>	<i>0.64</i>	<i>0.15</i>		
	<u>0.07</u>	<u>-0.15</u>	<u>0.19</u>	<u>-0.11</u>	<u>0.00</u>		
总计	61.78	10.00	2.83	23.01	2.38	100.00	0.00
获得量	4.75	4.15	1.46	13.74	2.23	0.00	0.00

注：各类型第一行数字表示各地类实际转换面积百分比 $P_{ij}(\%)$ ；斜体数字表示随机情况下各地类减少面积百分比的理论值 $G_{ij}(\%)$ ；带下划线的数字是地类间转换的实际值与理论值之间的差值 $P_{ij}-G_{ij}(\%)$ ，其中加粗数字表示从获得和损失两个角度，差值均为正，且变化比例 $\geq 1\%$ 。

表 7 不同公路类型沿线系统地类转移方向		
Tab.7 Systematic Land Use Transitions along Different Road Types		
(Change Percentage $\geq 1\%$)		
公路类型	地类转移	变化比例(%)
高速	耕地→林地	3.91
	水域→建设用地	1.88
	耕地→未利用地	1.85
	林地→未利用地	1.00
国道	耕地→建设用地	12.00
	林地→耕地	2.48
	耕地→未利用地	2.04
省道	耕地→建设用地	10.31
	耕地→未利用地	2.30
	林地→未利用地	1.92
县乡道	耕地→未利用地	4.63

4 结论与讨论

为了探究公路对沿线土地利用的动态作用机制，需要深入分析沿线土地利用复杂的变化过程。从影响面积来看，高速公路影响土地利用的面积最大，其次是省道，然后是国道，县乡道的影响面积最小。从综合土地利用动态度来看，国道影响域内的综合土地利用动态度是最大的，其次是省道、高速，最后是县乡道。分地类来看，公路缓冲区内耕地的主导变化是面积减少的净变化；建设用地主要表现为面积增加的净变化；林地和水域表现为以空间置换为主导的变化过程；未利用地在高速公路、省道、县乡道附近均呈增加态势，但在国道周边，未利用地比例逐渐减少并且以空间置换变化为主。从不同地类间的系统转移规律来看，高速公路沿线不同地类间系统的转移规律主要是耕地转移为林地；国道、省道附近主要是耕地转移为建设用地；乡道附近主要是耕地转移为未利用地。

根据系统的土地利用转移方向结果显示，在高速公路及县乡道附近，具有较大数量优势的耕地转为建设用地并不是系统的转移类型，而是呈现类型差异。在高速公路缓冲区内，观察到的实际从耕地类型转为建设用地的增加量远小于随机过程期望的数量值。因此，在高速公路附近，耕地并不系统地转移为建设用地。有趣的是如图 5(a) 所示，虽然水域转移为建设用地的面积远小于耕地转移为建设用地的面积，但是前者却是重要的系统转移类别之一。此规律主要是由于高速公路具有特定的出入口导致作用机制与范围有限，此外退耕还林政策的实施，有效地约束了大部分的耕地转化为建设用地现象，因此上述变化并不具有系统性，而是随机的变化过程。与高速公路类似，县乡道附近的耕地转移为建设用地也不是系统化的，最系统的变化是耕地转移为未利用地。这主要是因为农村地区，存在耕地闲置现象，农田的季节性耕作以及部分耕地荒芜是主要的影响因素。因此除了从数量上需公路关注周边建设用地增加占用耕地现象，高速公路沿线水域转移为建设用地，以及县乡道附近耕地系统地转化为未利用地的现象也应引起足够的关注及预警。

上述结果表明，公路交通对武汉城市圈的土地利用结构和变化方向具有显著的驱动作用。近年来，依托“一环十三射四联线”的公路主骨架网，武汉城市圈内各城市之间的交流联系不断增强，形成了以武汉市为核心、多中心轴向发展的一体化格局。这种发展趋势可能促进建设用地沿公路向外扩展和自发式的增长，并能引起公路沿线耕地面积的减少，从而形成新的建设用地组团和产业带。另一方面，为实现“资源节约型和环境友好型社会”改革试验区的建设目标，交通发展所导致的生态服务效应变化也应当引起重视。我们建议下一步的公路管理措施应结合不同的公路类型分别处理。除了进一步严格落实公路周边管理建设用地占用耕地现象外，相关部门还应重点关注高速公路沿线，部分建设用地占用水域现象；国道和省道沿线耕地、林地退化现象；县乡道沿线耕地闲置未利用现象等。为深入分析公路沿线的土地利用变化过程，后期需进一步结合多期社会经济及空间数据，构建数理统计模型分析不同阶段的公路交通驱动机制，缩小地区差异，从而实现交通土地一体化的规划目标。

参考文献:

[1]CAO J, LIU X C, WANG Y H, et al. Accessibility impacts of China's high-speed rail network[J]. Journal of Transport Geography, 2013, 28: 12-21.

[2]BARTH^LEMY M. Spatial networks[J]. Physics Reports, 2011, 499(1/3): 1-101.

[3]COFFIN A W. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads[J]. Journal of Transport Geography, 2007, 15(5): 396-406.

[4]CAI X J, WU Z F, CHENG J. Using kernel density estimation to assess the spatial pattern of road density and its impact on landscape fragmentation[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013, 27(2): 222-230.

[5]FORMAN R T T, ALEXANDER L E. Roads and their major ecological effects[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1998, 29(1): 207-231.

[6]FORMAN R T T, DEBLINGER R D. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (U.S.A.) suburban highway[J]. Conservation Biology, 2000, 14(1): 36-46.

[7]李双成, 许月卿, 周巧??, 等. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析[J]. 地理科学进展, 2004, 23(5): 78-85.

【LI S C, XU Y Q, ZHOU Q F, et al. Statistical analysis on the relationship between road network and ecosystem fragmentation in China[J]. Progress in Geography, 2004, 23(5): 78-85.】

[8] 王军, 顿权尼. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808.

【WANG J, DUN Y L. A review on the effects of land use change on ecosystem services[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(5): 798-808.】

[9]李京涛, 周生路, 吴绍华. 道路交通网络与城市土地利用时空耦合关系——以南京市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(1): 18-25.

【LI J T, ZHOU S L, WU S H. Relationship between traffic network and urban land use in Nanjing with landsat TM/ETM+images[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(1): 18-25.】

[10]杨思, 孔德良. 基于道路网络特征的建设用地扩张及其对林地现状的影响——以深圳市为例[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 286-292.

【YANG S, KONG D L. Expansion of construction land and its effect on forest based on road network character: a case study of Shenzhen city[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2): 286-292.】

[11] 王丽, 铎辉. 深圳市道路网络结构特征的成因及其景观格局效应[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 853-862.

【WANG L, ZENG H. The principle of road network structures and its ecological effects on landscape in Shenzhen[J]. Geographical Research, 2012, 31(5): 853-862.】

[12]吕晓芳,王仰麟,彭述,等.深圳快速城市化地区公路沿线土地利用空间集聚[J].地理学报,2008,63(8):845-855.

【LV X F, WANG Y L, PENG J, et al. Spatial concentration characteristics of urban land use along highways in rapidly urbanized region of Shenzhen[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(8): 845-855.】

[13]汪自书,刘语凡,魏達兵,等.快速城市化地区道路格局对土地利用的影响研究[J].环境科学研究,2008,21(2):180-185.

【WANG Z S, LIU Y F, WEI J B, et al. The impacts of road pattern on land uses in rapidly urbanizing regions[J]. Research of Environmental Sciences, 2008,21(2):180-185.】

[14]PONTIUS R G, SHUSAS E, MCEACHERN M. Detecting important categorical land changes while accounting for persistence[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 101(2/3): 251-268.

[15]BRAIMOH A K. Random and systematic land-cover transitions in northern Ghana[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 113(1/4): 254-263.

[16]ROMERO-RUIZ M H, FLANTUA S G A, TANSEY K, et al. Landscape transformations in savannas of northern South America: land use/cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia[J]. Applied Geography, 2011, 32(2): 766-776.

[17]段增强,张凤荣,孔祥斌.土地利用变化信息挖掘方法及其应州[J].农业工程学报,2005,21(12):60-66.

【DUAN Z Q, ZHANG F R, KONG X B. Method for information mining of land-use change and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 60-66.】

[18]乔伟峰,盛、Ik 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.

【QIAO W F, SHENG Y H, FANG B, et al. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: a case study of Suzhou, Jiangsu Province[J]. Geographical Research, 2013,32(8): 1497-1507.】

[19]欧定华,夏建 W.城市近郊区景观格局变化特征、潜力与模拟——以成都市龙泉驿区为例[J].地理研究,2016,35(3):534-550.

【OU D H, XIA J G. Characteristics, potential and simulation of landscape pattern change in peri-urban areas: a case of Longquanyi district[J]. Geographical Research, 2016,35(3): 534-550.】

[20]张横华,封志明,姜鲁光.土地利用/土地覆被分类系统研究进展[J].资源科学,

2011, 33(6): 1195-1203.

【ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G. Progress on studies of land use/land cover classification systems[J]. Resources Science, 2011, 33(6):1195-1203.】

[21]LIU S L, DONG Y H, DENG L, et al. Forest fragmentation and landscape connectivity change associated with road network extension and city expansion: a case study in the Lancang River Valley[J]. Ecological Indicators, 2014, 36: 160-168.

[22]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.

【ZHU H Y, LI X B. Discussion on the index method of regional land use change[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 58(5): 643-650.】

[23]刘纪远, 匡文蕙, 张增祥, 等. 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, 2014, 69(1): 3-14.

【LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 3-14.】

[24]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 [J]. 资源科学, 2010, 32(8):1544-1550.

【LIU R, ZHU D L. Methods for detecting land use changes based on the land use transition matrix[J]. Resources Science, 2010, 32(8): 1544-1550.】

[25]刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 158-188.

【LIU J Y. Macro-scale survey and dynamic study of natural resources and environment of China by remote sensing[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1996: 158-188.】