

# 城市交通与土地利用系统演化图景和结构研究

诸葛承祥, 邵春福\*, 高 健, 孟 梦, 计 寻

(北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044)

**摘要:** 城市交通与土地利用系统(Urban Transportation and Land Use System, 简称UTLU系统)是一个开放的、复杂的、非平衡的系统。针对现状中缺乏对UTLU系统内在演化机理的研究, 本文以北京市为例, 分别利用混沌理论和分形理论从时间序和空间序的角度揭示UTLU系统自组织演化的图景和结构复杂性。首先, 利用小数据量算法对北京市UTLU系统协同度的时间序列进行分析, 确定最大Lyapunov指数, 判断UTLU系统是否存在混沌现象, 并结合混沌系统的特性进一步揭示系统演化图景; 其次, 分别从城市交通系统和土地利用系统中, 选取适当的规模对象, 利用位序-规模分形模型对北京市的UTLU系统自组织演化结构进行评定。

**关键词:** 城市交通; 演化图景和结构; 混沌理论; 城市交通与土地利用系统; 分形理论

## Evolution Prospect and Structure of Urban Transportation and Land Use System

ZHU-GE Cheng-xiang, SHAO Chun-fu, GAO Jian, MENG Meng, JI Xun

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,  
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Urban Transportation and Land Use System (UTLU system) is open, complex and nonequilibrium. Since the study on evolution mechanism of UTLU system is limited, this paper takes Beijing as example, both chaos theory and fractal theory are employed to reveal the evolution prospect and structural complexity respectively. Firstly, small-data method is used to analyze the time series of synergy degree of UTLU system, and the largest Lyapunov exponent is calculated which is used for judging the chaos phenomenon of UTLU system. Then the feature of chaos system is utilized to reveal the evolution prospect in depth. Secondly, select proper scale objects from transportation system and land use system respectively, and then the Rank-Size rule is adopt to evaluate the evolution of UTLU system.

**Key words:** urban traffic; evolution prospect and structure; chaos theory; UTLU system; fractal theory

### 1 引言

国民经济的快速增长加快了城市化的进程, 城市规模不断扩张, 机动化进程加快, 居民交通需求猛增, 道路交通拥堵问题日益突出。国内外实践证明, 城市交通与土地利用的一体化规划, 从规划

层面协同二者之间的关系, 是从根源上解决城市交通问题的重要前提, 是决定城市可持续发展的关键。国内外对城市交通与土地利用的研究较为广泛, 相关的理论与研究成果可分为以下三方面:

(1) 城市交通与土地利用系统相互影响研究。

收稿日期: 2013-10-11

修回日期: 2013-11-26

录用日期: 2013-12-27

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划资助课题(2012CB725403); 国家自然科学基金面上项目(51178032); 中央高校基本科研业务费专项项目(2012YJS069)。

作者简介: 诸葛承祥(1988-), 男, 浙江温州人, 博士生。

\*通讯作者: cfshao@bjtu.edu.cn

如孙胜阳以北京地铁1号线为例研究轨道交通对沿线土地利用的影响<sup>[1]</sup>; Debrezion G对荷兰房地产市场中轨道交通对房价的影响进行了研究<sup>[2]</sup>。

(2)城市交通与土地利用系统的相协调研究。如谢秉磊对TOD下城市轨道交通与土地利用的协调关系进行了评价<sup>[3]</sup>; Yigitcanlar T提出了一个评价城市土地利用、环境和交通的可持续性发展的模型<sup>[4]</sup>。

(3)城市交通与土地利用系统的互动关系模型研究。应江黔提出了关于交通运输与土地利用的综合模型的连续最优化及敏感性分析的基本框架<sup>[5]</sup>; Kakaraparthi S K利用UrbanSim仿真软件对美国德州奥斯汀的城市交通和土地利用系统的互动关系进行了建模<sup>[6]</sup>。

总体而言,有关土地利用与交通系统之间存在相互影响、互动调节研究较多,但对两者相互影响、互动调节现象背后所隐藏的内在演化机理研究较为缺乏。本文将分别利用混沌理论和分形理论从时间序和空间序的角度揭示UTLU系统自组织演化的演化图景和结构复杂性。混沌理论和分形理论在城市交通领域的研究中应用较为广泛,混沌理论主要应用于短时交通流预测、智能交通系统、交通控制、交通系统预测等;分形理论主要应用于交通事故分析、交通网络分析、道路交通控制系统等。

每个城市的UTLU系统均有自身的特点,系统演化图景和演化结构各异,本文在演化实例研究中需用到历年的城市交通和土地利用数据,因此出于研究数据收集的难易程度考虑,仅以北京

市为例进行研究,其它城市的研究方法类似。本文首先对UTLU系统的混沌特性进行判断,接着对系统的初值敏感性、分岔特性、混沌吸引子、内部随机性等特性进行分析,揭示系统的演化过程与图景;其次,以位序—规模分形模型对UTLU系统自组织演化结构进行评定。

## 2 基于混沌理论的UTLU系统演化图景研究

利用混沌理论揭示UTLU系统演化图景,首要问题是判断UTLU系统是否存在混沌现象。传统方法是选取表征UTLU系统演化的时间序列,计算其最大Lyapunov指数并进行判断,若最大Lyapunov指数大于0,则系统存在混沌现象,反之则无。相空间重构理论认为:系统的任一变量的演化是由与之相互作用的其它分量所决定,而这些相关分量的信息隐藏在任一分量的发展过程中。因此,可通过从某一分量的一批时间序列中提取和恢复出系统原来的规律,这种规律是一个系统在高维相空间下所展现的一种轨迹<sup>[7]</sup>。在与本文相关的前期研究中,已利用协同学确定了北京市UTLU系统自组织演化的序参量为城市人口、机动车保有量和道路面积,三者共同决定了系统的演化方向。因此,本文在混沌特性的分析中,并非像传统想法一样只选择某一个序参量进行分析,而是选择三个序参量的“合并量”——系统协同度的时间序列作为研究对象。系统协同度可用来衡量系统的自组织协同演化程度高低。如表1所示为1979—2010年北京市UTLU系统的协同度。

表1 1979—2010年北京市UTLU系统的协同度  
Table 1 Synergy degree of UTLU system from 1979 to 2010

年份	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
协同度	0.5	0.500 3	0.499	0.497 1	0.495 2	0.495 3	0.497 8	0.495
年份	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
协同度	0.492 2	0.492 3	0.493 2	0.495 2	0.495 4	0.497 1	0.500 4	0.502 7
年份	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
协同度	0.490 7	0.481 9	0.500 8	0.507 8	0.507	0.493	0.488 5	0.498 2
年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
协同度	0.500 1	0.488	0.489 4	0.485 7	0.468 9	0.474 2	0.494 4	0.5

本文将对系统协同度的时间序列进行分析,计算其最大Lyapunov指数。通过时间序列计算最大Lyapunov指数的方法主要有:Wolf法、Jacobian

方法、P范数算法、奇异值分解法、小数据量计算法等。考虑到北京市UTLU系统协同度的时间序列数据量较少(1984—2010年),因此采用小数据量

计算法.下面将对系统是否存在混沌现象进行判断,其具体计算步骤如下<sup>[8]</sup>:

**Step1** 对时间序列  $\{x_i | i=1,2,\dots,N\}$  进行快速傅里叶变换,计算序列平均周期  $p=16$ .

**Step2** 分别采用G-P算法和自相关法确定延迟时间  $\tau$  和嵌入维数  $m$ ,经计算得到,北京市UTLU系统协同度的时间序列延迟时间  $\tau=1$ ,嵌入维  $m=4$ .

**Step3** 根据延迟时间  $\tau$  和嵌入维数  $m$  重构相空间  $\{Y_j | j=1,2,\dots,M\}$ .

根据延迟时间  $\tau=1$  和嵌入维数  $m=4$  重构相空间,结果如式(1)所示.

$$\begin{cases} Y_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_4\} \\ Y_2 = \{x_2, x_3, \dots, x_5\} \\ \vdots \\ Y_{29} = \{x_{29}, x_{30}, \dots, x_{32}\} \end{cases} \quad (1)$$

**Step4** 寻找相空间中每个点  $Y_j$  的最近邻点  $Y_{j'}$ ,并限制短暂分离,即

$$d_j(0) = \min \|Y_j - Y_{j'}\|, |j - j'| > P \quad (2)$$

**Step5** 对相空间中每个点  $Y_j$ ,计算该邻点对  $(Y_j, Y_{j'})$  之间  $i$  个离散时间步长后的距离  $d_j(i)$ ,计算公式如下:

$$d_j(i) = \min \|Y_{j+i} - Y_{j'+i}\|, i=1,2,\dots,\min(M-j, M-j') \quad (3)$$

**Step6** 对每个  $i$ ,求出所有  $j$  的  $\ln d_j(i)$  平均值  $y(i)$ ,即

$$y(i) = \frac{1}{q\Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i) \quad (4)$$

式中  $q$  是非零  $d_j(i)$  的数目,并利用最小二乘法作回归直线,所得直线斜率即为最大 Lyapunov 指数  $\lambda_{\max}$ .

根据 Step4、Step5 和 Step6,计算得最小二乘法耦合结果如图1所示.其中最小二乘法求出的回归直线的斜率为 0.192,即最大 Lyapunov 指数  $\lambda_{\max}=0.192$ ,大于0,可推断北京市的UTLU系统存在混沌现象.

在判定北京市UTLU系统存在混沌特性后,根据混沌系统的初值敏感性、内在随机性、分岔、混沌吸引子、自相似等特性对系统进一步分析,揭示系统演化图景.其中初值敏感性揭示自组织优化措施的产生是系统演化的源泉;分岔揭示UTLU系统演化具有多种可能性;内在随机性揭示UTLU系统应动态规划和动态设计,并建立有效的反馈机制;混沌吸引子揭示UTLU系统的演化遵循收敛机制,收敛机制表现为选择,建立科学的选择机制是UTLU系统良好演化的关键;自相似性揭示UTLU系统演化不是组成元素简单放大的过程,而是层次不断增加的过程,且部分和整体之间具有自相似的特性<sup>[9]</sup>.

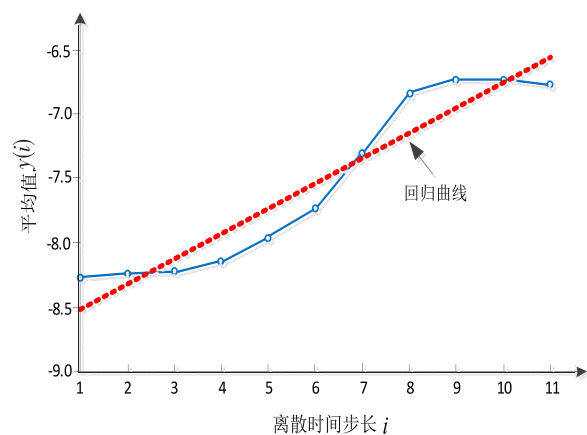


图1 最大 Lyapunov 指数的小数据量法计算结果图  
Fig.1 The largest Lyapunov exponent calculated based on small-data method

### 3 基于分形理论的UTLU系统自组织演化结构研究

在系统自组织演化过程中,分形理论(Fractal Theory)可对系统的演化结构做出评价.系统演化的结构包括空间结构和等级结构两方面,前者以中心地的分形研究为标志,后者以位序,二者具有内在的逻辑关系,是分形城市体系最具代表性的研究领域,共同构成了城市系统空间复杂性的两个数量标志<sup>[10]</sup>.考虑到采用前者进行研究对数据的要求较高,本文将以北京市为例,利用位序-规模分形模型对UTLU系统自组织演化结构进行评定.

### 3.1 基于位序—规模分形模型的UTLU系统自组织演化结构评价

分形理论主要用于解释和解决非线性世界中一些具有随机性和复杂性特征的现象和问题.在UTLU系统中,根据Zipf法则,城市的各个区县可按某种规模(如建设用地面积、道路网络、机动车保有量等)从大到小进行排序,则各个区县的位序 $r$ 与区县规模 $P(r)$ 之间存在以下关系:

$$P(r) = P_1 r^{-q} \quad (5)$$

式中  $P(r)$  为城市区县规模位序中位次为 $r$ 的城市规模;  $P_1$  为首位区县规模;参数 $q$ 为Zipf指数.

对式(5)两边取对数得

$$\ln P(r) = \ln P_1 - q \ln r \quad (6)$$

在城市地理学研究中,齐普夫(G K Zipf)定律也属于一种分形模型,因此,令  $A = P_1^{1/q}$ ,  $D_f = 1/q$ , 则有

$$\ln r = \ln A - D_f \ln P(r) \quad (7)$$

由此可见,  $D_f$  和  $q$  均具有分维的性质,且互为倒数.分形维数  $D_f$  和 Zipf 维数  $q$  的大小与空间分布等级规模结构相关<sup>[11]</sup>:

当  $D < 1$  ( $q > 1$ ) 时,规模分布趋于分散,城市的各个区县分布差异较大,首位区县垄断性较强;

当  $D > 1$  ( $q < 1$ ) 时,规模分布均衡,中间位序的区县数目较多,整个城市体系发育比较成熟;

当  $D \rightarrow 0$  ( $q \rightarrow \infty$ ) 时,城市只有一个区县,为绝对首位型分布;

当  $D \rightarrow \infty$  ( $q \rightarrow 0$ ) 时,城市内各个区县规模一样大,无差别.

下面对UTLU系统中位序—规模分形模型的应用步骤进行说明:

**Step1** 确定UTLU系统分析的规模对象;

**Step2** 若系统由 $n$ 个区县构成,则按照上述某种规模进行大小排序,得到点序  $(P(r), r)$ ,  $r = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

**Step3** 绘制系统位序—规模双对数

$\ln r - \ln P(r)$  坐标图,并进行一元线性回归,得分形维数  $D_f$ 、Zipf 指数  $q$  和相关系数.

### 3.2 基于位序—规模分形模型的UTLU系统自组织演化结构评价

分形理论认为相对规则的分析体在任何尺度下都是自相似的,具有严格的无标度性,而随机分析体在一定的尺度范围内则表现出自相似性.按照3.1节中介绍的位序—规模分形模型的应用步骤,本文以北京市的16个区县为研究对象,综合考虑规模对象数据获取的难易程度,以及是否能代表UTLU的演化程度,最终选定6个规模对象,其中4个为交通系统规模的指标:人均道路里程、人均道路面积、人均机动车保有量和人均公共停车设施;另外2个为土地利用系统规模的指标:人均建筑施工企业个数和人均建筑施工企业从业人员数.分别绘制上述6个规模对象的位序—规模双对数  $\ln r - \ln P(r)$  坐标图,利用一元线性方程对北京市的UTLU系统位序—规模模型进行回归分析,结果如表2所示.通过分析位序—规模对数相关系数,表明北京市UTLU系统规模对数与区县位序对数存在较强的相关性.

图2和图3分别为2008-2011年北京市区县交通系统和土地利用系统规模分维值变化图.从图2可知交通系统的规模变化如下:人均机动车保有量的分维值无明显变化;人均道路里程和人均道路面积的分维值在2010年均增加,表明北京市各区县人均道路里程和人均道路面积的规模趋于集中,差异变小,但分维值在2011年恢复到原先水平,即各区县人均道路里程和人均道路面积规模趋于分散,差异变大,恢复到原先水平;人均公共停车设施的分维值在2010年降低,表明北京市各区县人均公共停车设施的规模趋于分散,差异变大.从图3可知土地利用系统的规模变化如下:人均建筑施工企业个数的分维值变化不明显,人均建筑施工企业从业人员的分维值在2010年均减少,表明北京市各区县人均建筑施工企业从业人员的规模趋于分散,差异变大.

表2 2008-2011年北京市区县UTLU系统位序-规模分形模型线性回归分析结果  
Table 2 Linear regression results of Rank-Size model for UTLU system of districts in Beijing from 2008 to 2011

指标	年份	位序-规模双对数模型 线性回归方程	相关系数	q 值	D <sub>f</sub> 值
人均道路 里程	2008	$\ln r=5.1365-0.6635 \ln P(r)$	-0.8602	1.5072	0.6635
	2009	$\ln r=5.0769-0.6526 \ln P(r)$	-0.8635	1.5324	0.6526
	2010	$\ln r=5.4059-0.7096 \ln P(r)$	-0.9102	1.4092	0.7096
	2011	$\ln r=5.1011-0.6323 \ln P(r)$	-0.9243	1.5816	0.6323
人均道路 面积	2008	$\ln r=6.1139-0.5553 \ln P(r)$	-0.8411	1.801	0.5553
	2009	$\ln r=6.0636-0.5493 \ln P(r)$	-0.8425	1.8204	0.5493
	2010	$\ln r=7.1269-0.6703 \ln P(r)$	-0.89	1.4918	0.6703
	2011	$\ln r=6.2403-0.5431 \ln P(r)$	-0.9368	1.8413	0.5431
人均机动 车保有量	2008	$\ln r=5.9467-0.8449 \ln P(r)$	-0.7709	1.1836	0.8449
	2009	$\ln r=6.1232-0.8657 \ln P(r)$	-0.7595	1.1551	0.8657
	2010	$\ln r=6.1818-0.8642 \ln P(r)$	-0.7755	1.1572	0.8642
	2011	$\ln r=6.2021-0.8671 \ln P(r)$	-0.7817	1.1533	0.8671
人均公共 停车设施	2008	$\ln r=4.2355-0.7772 \ln P(r)$	-0.8671	1.2867	0.7772
	2009	$\ln r=4.2229-0.7592 \ln P(r)$	-0.8711	1.3172	0.7592
	2010	$\ln r=4.1152-0.7144 \ln P(r)$	-0.8894	1.3998	0.7144
	2011	$\ln r=4.1361-0.7092 \ln P(r)$	-0.9134	1.4101	0.7092
人均建筑 施工企业 个数	2008	$\ln r=3.1825-1.9153 \ln P(r)$	-0.8735	0.5221	1.9153
	2009	$\ln r=3.2171-2.0213 \ln P(r)$	-0.8485	0.4947	2.0213
	2010	$\ln r=3.0966-2.0746 \ln P(r)$	-0.8205	0.482	2.0746
	2011	$\ln r=3.0321-1.9448 \ln P(r)$	-0.8491	0.5142	1.9448
人均建筑施 工企业从业 人员数	2008	$\ln r=10.0624-1.4866 \ln P(r)$	-0.8149	0.6727	1.4866
	2009	$\ln r=10.4457-1.5298 \ln P(r)$	-0.8136	0.6537	1.5298
	2010	$\ln r=9.4655-1.3528 \ln P(r)$	-0.8291	0.7392	1.3528
	2011	$\ln r=9.0168-1.3127 \ln P(r)$	-0.8046	0.7618	1.3127

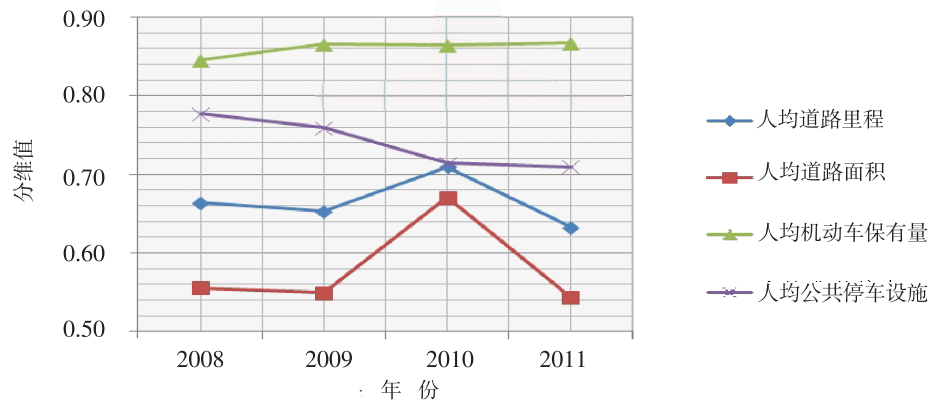


图2 2008-2011年北京市区县交通系统规模分维值变化图

Fig.2 The change of fractal dimension value of the transportation system scale in Beijing's districts and counties from 2008 to 2011

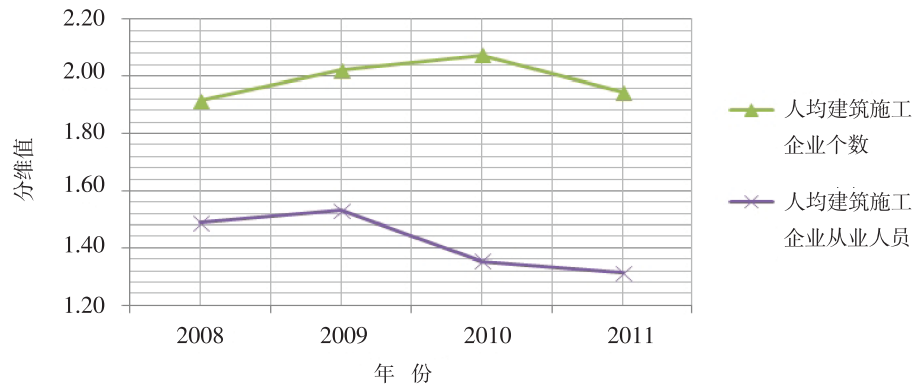


图3 2008-2011年北京市区县土地利用系统规模分维值变化图

Fig.3 The change of fractal dimension value of the land use system scale in Beijing's districts and counties from 2008 to 2011

#### 4 研究结论

本文以北京市为例,分别利用混沌理论和分形理论从时间序和空间序的角度揭示UTLU系统自组织演化的演化图景和结构复杂性问题.主要结论如下:

(1)以北京市为例,通过计算UTLU系统协同度时间序列的最大Lyapunov指数,判断系统是否存在混沌现象.结果表明,北京市的UTLU系统存在混沌现象.在此基础上,分析UTLU系统的初值敏感性、内在随机性、分岔、混沌吸引子、自相似等特性.

(2)以北京市为例,选取人均道路里程、人均道路面积、人均机动车保有量、人均公共停车设施、人均建筑施工企业个数和人均建筑施工企业从业人员数6个规模对象,利用位序—规模分析模型分别对UTLU系统中的交通系统和土地利用系统的演化结构进行评定,表明北京市区县UTLU系统规模差异处在变化中.

由于现阶段所收集的研究数据有限,本文所提出的方法只在北京市进行了应用分析,在今后的研究中,将选取其它城市进一步验证混沌理论和分形理论在UTLU系统中的适用性.

#### 参考文献:

[1] 孙胜阳,王江燕.轨道交通沿线土地利用分析及建议

——以北京地铁1号线为例[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(6): 52-56. [SUN S Y, WANG J Y. Analysis and suggestions of land use patterns along rail transit corridor—a case study of Beijing metro line 1[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(6): 52-56.]

[2] Debrezion G, Pels E, Rietveld P. The impact of rail transport on real estate prices an empirical analysis of the dutch housing market[J]. Urban Studies, 2011, 48(5): 997-1015.

[3] 谢秉磊,丁川. TOD下城市轨道交通与土地利用的协调关系评价[J]. 交通运输系统工程与信息, 2013, 13(2): 9-13. [XIE B L, DING C. An evaluation on coordinated relationship between urban rail transit and land use under TOD mode[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2013, 13(2): 9-13.]

[4] Yigitcanlar T, Dur F. Developing a sustainability assessment model: the sustainable infrastructure, land-use, environment and transport model[J]. Sustainability, 2010, 2(1): 321-340.

[5] 应江黔. 交通运输与土地利用综合模型的连续最优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(3): 64-72. [YING J Q. Continuous optimization method for integrated land use/transport models[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(3): 64-72.]

[6] Kakaraparthi S K, Kockelman K M. Application of UrbanSim to the Austin, Texas, Region: Integrated-model forecasts for the year 2030[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2010, 137(3): 238-247.

[7] 韩文秀,郁俊莉,王其文. 我国资本市场混沌特性研究

(下转第32页)