

# 近 30 年来西安市城市用地扩展时空变化研究

封建民, 赵敏宁, 李晓华

(咸阳师范学院 旅游与资源环境学院, 陕西 咸阳 712000)

**摘 要:**目前,中国快速的城市化引起城市用地扩展时空演变加速,由此而引起的大规模土地利用与土地覆盖变化(LUCC)格外引人关注。以 1977、1988、1998 和 2008 年 MSS/TM 影像为基本数据源,在对西安市城市用地信息提取的基础上,应用 GIS 空间叠加技术,选择扩展强度指数、紧凑度、分形维数、重心转移指数等景观结构和变化指标,系统地分析了西安市城市用地扩展模式与时空分异特征。结果表明:1977—2008 年间西安市城市扩展总面积达 312.85 km<sup>2</sup>,年平均扩展速度达 9.92 km<sup>2</sup>,平均扩展强度指数为 1.14,呈快速增长态势;城市用地扩展总体格局表现为非紧凑、不稳定性增强、近同心圆扩展与方向分异十分明显的特征,随着城市用地的扩展城市效率有降低的趋势。

**关键词:**西安市;城市用地扩展;时空变化

**中图分类号:**F299.21

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)04-0183-06

## Spatiotemporal Variation of Urban Land-use Expansion in Xi'an City During the Last 30 Years

FENG Jian-min, ZHAO Min-ning, LI Xiao-hua

(College of Tourism and Resources & Environment, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

**Abstract:** In these days, rapid urbanization process has accelerated spatiotemporal variation of urban land-use expansion in China, which has been one of the important research fields in the land use/land cover change. Based on the landsat images of Xi'an accepted in 1977, 1988, 1998 and 2008, using RS thematic information extraction and GIS spatial overlay analysis, selected expansion speed, expansion intensity index, compactness, barycenter index, extending orientation and direction index as the main features, a study was conducted on the spatiotemporal variations of the urban land use in Xi'an City. The result shows that the built-up areas in Xi'an City over the last 30 years had increased 312.85 km<sup>2</sup>, or 9.92 km<sup>2</sup> per year and the average expansion intensity is 1.14. Expansion of construction land presented a concentric-style with decreasing compactness, increasing instability and obvious extending direction of space differentiation, and city efficiency decreased gradually.

**Key words:** Xi'an City; expansion of urban land use; spatiotemporal variation

城市是社会、经济、政治和文化等多因素聚合的产物。城市化是人地关系的焦点,是工业化、现代化和经济高速增长所无法遏制的必然。改革开放以来,我国城市化水平和城镇建设取得了巨大的成就<sup>[1]</sup>。城市扩展实际上是城市中心的经济、社会、政治和文化等人文因素和土地利用、地貌形态等自然因素在地域上的向外推进与扩散,是城市发育成长的各种因素综合作用的结果。目前,中国的城市化正以空前的速度进行,快速城市化重要的特征之一就是城市用地扩展时空演变加速<sup>[2]</sup>,因而城市化过程当中所引起的大

规模土地利用与土地覆盖变化(LUCC)格外引人关注<sup>[3-5]</sup>。近年来,RS 和 GIS 技术的应用推动了我国城市化进程研究,国内许多学者采用不同的数据源,对北京、上海、南京、成都、厦门、济南等东部平原地区大城市演变过程中所表现的城市用地扩展形态、扩展模式、驱动机制等进行了系统研究。中国大城市用地扩展具有交通脉动规律、定向开发规律、经济集聚与扩散规律<sup>[6]</sup>;平原地区城市土地空间扩展模式主要有圈层式、辐射式、跳跃式等类型<sup>[7-9]</sup>。这些研究成果为中国城市规划与建设走可持续发展之路奠定了理论

基础,但针对西部地区城市用地扩展研究依旧较少。本文拟在这些研究的基础上,采用多时相、多源空间数据,借助RS和GIS技术和景观生态学方法,对近30 a来西安市城市用地扩展模式和时空分异特征进行系统地分析,以期新一轮土地利用规划及城市用地规划提供科学依据,为解决保护耕地总量动态平衡与生态环境建设之间的矛盾提供现实依据。

## 1 研究区概况

西安,古称长安,位于黄河中游关中盆地中部渭河平原的二级阶地上,北临渭河,南依秦岭,是世界四大文明古都之一,地理范围界于东经107.40°—109.49°和北纬33.42°—34.45°之间。本文所研究的区域包括新城区、碑林区、莲湖区、雁塔区、未央区、灞桥区及周围一些繁华地区,研究区面积872.01 km<sup>2</sup>,截至2011年5月12日,有常住人口846万,其中主城区人口497.38万,在全国大城市中排名第七。研究区属暖温带半湿润季风气候,四季冷暖干湿分明;春季升温迅速,干燥多风;夏季炎热高温,日照强烈;秋季温和湿润、时有阴雨;冬季寒冷干燥,雨雪偏少,年平均气温13.3℃,极端最高气温为45.2℃,极端最低气温-20.6℃,年均降水量604.2 mm,无霜期207 d。对农作物生长和人民生息都极为有利。

西安是中国七大区域中心城市之一,亚洲知识创新中心,新欧亚大陆桥中国段和黄河流域最大的中心城市,中国大飞机制造基地。同时,西安也是中国中西部地区最大、最重要的科研、高等教育、国防科技工业和高新技术产业基地,电子信息产业基地,航空、航天工业的核心基地,是中国科技实力最强,工业门类最齐全的特大型中心城市之一,是活力四射的内陆新特区,中国中西部和北方内陆地区的金融中心、交通中心,全国科技资源统筹试验特区、以及关中—天水经济区的核心,国家赋予西安的定位是:建设现代化国际大都市。

## 2 研究方法

### 2.1 数据处理及信息提取

以西安市新城区、碑林区、莲湖区、雁塔区、未央区、灞桥区及周围一些繁华地区为监测区域,以城市建成区为研究对象。以1977年4月10日、1988年8月23日、1998年10月22日、2008年11月2日Landsat MSS/TM/ETM影像和同期西安市统计年鉴和土地利用变更调查资料为基本数据源,影像分辨率分别为79 m、30 m和28.5 m。数据处理主要包括:在Erdas Imaging 9.3平台中,以研究区1:5万

地形图为基准,进行影像的几何精纠正,校正精度在一个像元以内;将校正后的影像和土地利用现状扫描栅格图统一变换到UTM投影,坐标系以WGS-84为基准;进行图像的增强与融合处理、研究区域裁剪,最后形成4个时相的遥感图像。

本研究中城市用地主要指西安市(含建制镇)城市建成区,及城市行政区内实际已成片开发建设、市政公用设施和公共设施基本具备的地区<sup>[10]</sup>。城市用地扩展是指土地利用中的城市建成区的动态变化过程。城市建成区信息的获取因数据源类型的不同而采用不同的提取方法,遥感影像主要采用监督分类法中的最大似然法和人机交互目视解译法<sup>[11]</sup>;土地利用现状图主要采用扫描矢量化方法<sup>[12]</sup>。城市用地扩展信息主要是在对研究区1977年、1988年、1998年和2008年图像进行城市和建制镇建成区用地识别和边界提取基础上,在ArcGIS 9.3软件中利用空间叠加功能来提取。根据上述方法,在对研究区4个时相城市用地信息提取的基础上,制作了西安市各时期城市用地分布和空间扩展图。

### 2.2 城市用地扩展时序特征分析

城市用地扩展时序变化是指研究时段内起止时相城市用地规模数量在时间维上的变化特征,一般采用扩展强度指数(UII)<sup>[13-15]</sup>来表征,其计算公式如下:

$$UII = \frac{(U_b - U_a) \times 100}{TLA \times T}$$

式中:UII——城市扩展强度指数; $U_a$ 、 $U_b$ ——起、止时间城市用地数量; $T$ ——扩展年数;TLA——研究单元土地总面积。

按上述方法,对研究区城市用地扩展进行统计分析,求出其扩展面积、扩展倍数以及扩展强度指数,并用GIS空间叠加分析方法对西安市4个时相的建成区地块分布图进行叠置,制作扩展过程演变图。

### 2.3 城市用地扩展空间特征分析

城市用地扩展空间变化特征是指研究时段内起止时相城市用地规模在空间分布维上的变化特征,评价指标依据景观结构与变化评价指标选择,主要有紧凑度( $C$ )、分形维数( $D$ )、重心转移指数(重心坐标、重心转移距离、重心转移角度)、扩展方位指数(OP)等<sup>[16]</sup>,其计算公式见表1。

本研究中,以西安市钟楼为中心点(108°56′32.28″E,34°15′39.5″N),将研究区划分为8个方向进行扩展空间分异分析,利用ArcGIS软件的空间分析功能,按上述相关公式测算4个时相城市建成区用地规模在空间上的变化特征值,并制作城市建成区空间扩展方位和扩展强度演变图。

表 1 城镇用地扩展时空变化评价指标

评价指标	计算公式	参数含义
紧凑度指数	$C=2\sqrt{\pi A}/P$	$C$ 为城市用地空间紧凑度, $A$ 为城市用地面积, $P$ 为城市用地周长
分形维数	$\ln A=\frac{2}{D}\ln P+C$	$D$ 为分形维数, $A$ 为城市用地面积, $P$ 为城市用地周长, $C$ 为截距
重心转移指数	空间中心坐标:	
	$X_t=\sum_{i=1}^nC_{ii}\times X_i/\sum_{i=1}^nC_{ii}$	
	$Y_t=\sum_{i=1}^nC_{ii}\times Y_i/\sum_{i=1}^nC_{ii}$	$X_i, Y_i$ 分别为 $t$ 时相城市用地重心坐标, $X_i, Y_i$ 为第 $i$ 块城市用地的几何中心坐标, $C_{ii}$ 为第 $i$ 个片区面积;
	空间中心转移距离(L):	$L_{t+1}$ 表示从 $t$ 到 $t+1$ 时期地理单元空间重心转移距离; $\alpha_{t+1}$ 表示从 $t$ 到 $t+1$ 时期地理单元空间重心转移方向与正东方向夹角
	空间中心转移角度( $\alpha$ ):	
扩展方位指数	$\alpha_{t+1}=\arctan(\frac{Y_{t+1}-Y_t}{X_{t+1}-X_t})$ ; 当 $x_{t+1}-x_t\geq 0$	
	$\alpha_{t+1}=\pi-\arctan(\frac{Y_{t+1}-Y_t}{X_{t+1}-X_t})$ ; 当 $x_{t+1}-x_t<0$	
	$OP_i=\frac{d_iS_{t2}-d_iS_{t1}}{S_{t2}-S_{t1}}\times 100\%$	$OP_i$ 为 $t_2-t_1$ 时段的 $d_i$ 方位比重; $d_iS_{t2}$ 为 $d_i$ 方位上 $t_2$ 时刻的面积; $d_iS_{t1}$ 为 $d_i$ 方位上 $t_1$ 时刻的面积; $S_{t1}$ 为 $t_1$ 时刻的区域总面积; $S_{t2}$ 为 $t_2$ 时刻的区域总面积

3 结果与分析

3.1 城市用地扩展时序变化特征

城市用地扩展时序变化特征主要由各时期城市用地分布(图 1)和扩展图(图 2)反映,具体数值见表 2。从表 2 可以看出,西安市在 20 世纪 70 年代末城

市建成区面积仅 128.43 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 14.7%,经过 30 a 的建设到 2008 年已扩展到 441.28 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 50.6%,增加了近 2.5 倍,平均扩展速率为 9.92 km<sup>2</sup>/a,平均扩展强度指数为 1.14,可以看出,近 30 a 来西安市城市用地扩展表现为快速增长的态势。具体特征为:

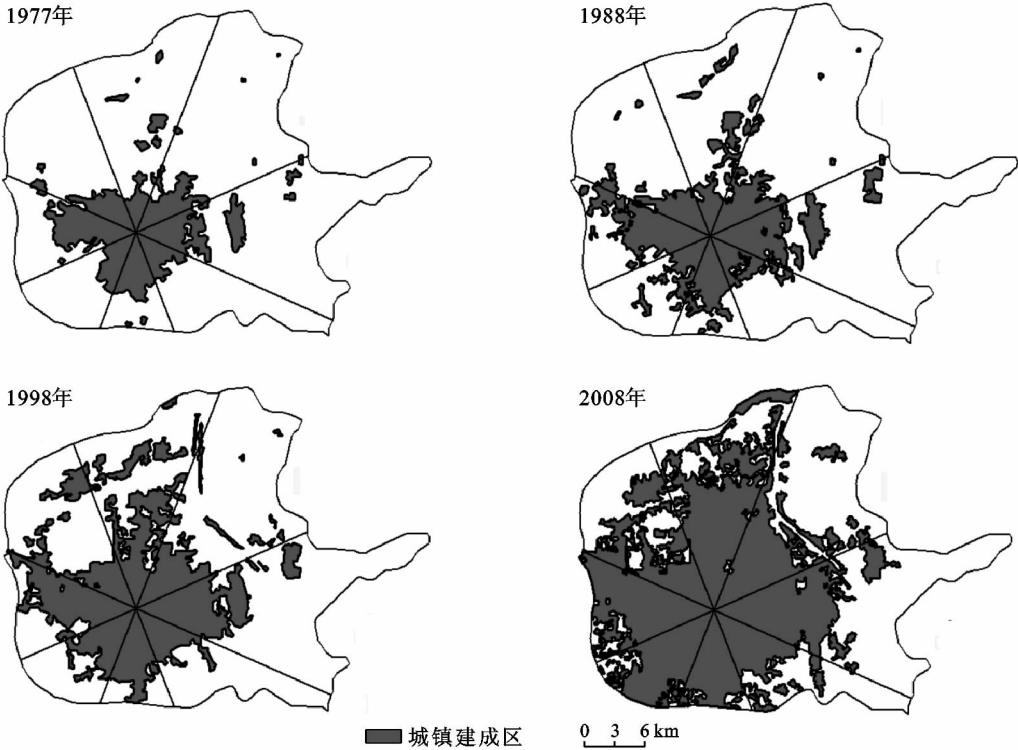


图 1 1977—2008 年西安市 4 个时相城市建成区用地分布

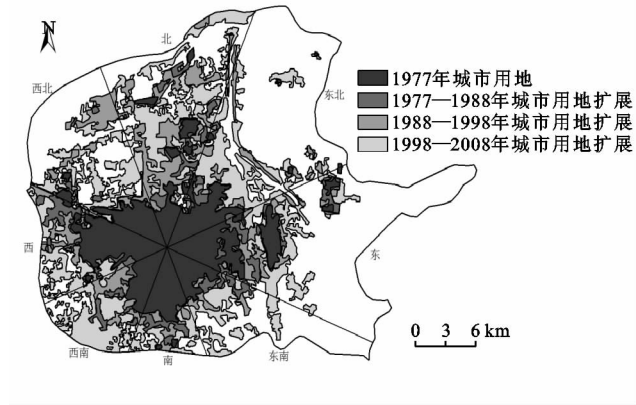


图 2 1977—2008 年西安市城市建成区扩展情况

表 2 1977—2008 年西安市城市用地扩展情况

时相	1977 年	1988 年	1998 年	2008 年
建成区面积/km <sup>2</sup>	128.43	171.90	255.0	441.28
非农业人口/万人	137.06	188.50	240.02	258.90
扩展面积/km <sup>2</sup>	43.47	83.1	186.28	
扩展速率/(km <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	3.83	8.04	18.58	
扩展强度/%	0.44	0.94	2.13	

(1) 扩展速率和扩展强度指数持续增长。20 世纪 70 末到 80 年代末为低速增长期,这一时期的城市用地年均扩展速率虽然>1,扩展强度指数>0,但明显低于整个研究时段的平均水平(多年平均扩展速率和扩展强度指数分别为 9.92 km<sup>2</sup>/a 和 1.13);20 世纪 90 年代为稳步增长期,年均扩展速率和扩展强度指数略低于整个研究时段的平均水平,城市用地面积达到 255 km<sup>2</sup>,比 1988 年增加了近 50%;21 世纪为快速增长期,年均扩展速率和强度指数均超过整个研究

时段的平均水平,分别达到 18.58 km<sup>2</sup>/a 和 2.13,建成区面积达到 441.28 km<sup>2</sup>,超过了整个研究区面积的 50%,比 1998 年增加了 73%。

(2) 城市用地规模扩展不断加快。城市用地规模一般取决于人口规模和人均用地指标,只有二者的增长速度使得人均用地规模符合人均用地的国家标准时,城市用地的扩展才是较为合理的扩展<sup>[17]</sup>。城市用地扩展系数( $k$ )(建成区面积的年均增长速度与非农业人口的年均增长速度的比值)为衡量城市用地扩展是否合理的指标,当  $k>1.12$  时,城市用地规模扩展过快;当  $k<1.12$  时,城市用地规模扩展不足;当  $k=1.12$  时,城市用地规模扩展较为合理<sup>[15]</sup>。由表 2 数据计算得知,西安市各时段城市用地扩展系数分别为 0.9、1.77 和 9.28,多年平均值为 2.74。1977—1988 年城市用地扩展系数<1.12,表明这一时段城市用地规模扩展不足;1988—1998,1998—2008 年这两个时段内城市用地扩展系数均>1.12,用地增长速度远远高于非农业人口增长速度,说明其城市用地规模扩展过快,处于相对不合理状态,特别是 1998—2008 年城市用地扩展系数高达 9.28,为极不合理状态,表明存在非理性圈地现象。

3.2 城市用地扩展空间分异特征

城市用地扩展空间分异特征值列于表 3 和表 4。由表 3—4 可以看出,西安市近 30 a 来城市用地扩展总体空间格局变化特征是:城市用地扩展表现为非紧凑、不稳定性增强、近同心圆扩展与方向分异十分明显的特征。具体表现为:

表 3 1977—2008 年西安市城市用地扩展空间变化特征指数

时相	紧凑度	分形维数	重心坐标(经度 E)	重心坐标(纬度 N)	重心转移距离/m	重心转移角度/(°)
1977 年	0.14	1.27	108°56′55.5″	34°15′56.0″	—	—
1988 年	0.10	1.43	108°56′57.2″	34°16′12.2″	499.82	83.86
1998 年	0.10	1.40	108°56′43.1″	34°17′2.9″	1605.07	101.85
2008 年	0.08	1.43	108°56′55.1″	34°17′14.3″	466.36	47.52

表 4 1977—2008 年西安市城市用地空间八方位扩展情况

时段	统计项	正东	东北	正北	西北	正西	西南	正南	东南
1977—1988 年	扩展面积/km <sup>2</sup>	10.35	3.50	8.23	2.84	8.68	2.79	3.77	3.32
	扩展幅度/%	38.51	21.04	65.53	20.71	36.73	25.80	25.93	34.14
	扩展强度/%	0.47	0.17	0.51	0.22	1.15	0.44	0.93	0.37
1988—1998 年	扩展面积/km <sup>2</sup>	9.86	9.07	28.59	11.95	7.72	8.12	3.75	4.04
	扩展幅度/%	26.51	45.07	137.61	72.31	23.88	59.77	20.51	30.92
	扩展强度/%	0.50	0.48	2.00	1.04	1.14	1.42	1.03	0.50
1998—2008 年	扩展面积/km <sup>2</sup>	23.14	31.79	40.09	22.00	18.11	25.45	9.09	16.59
	扩展幅度/%	49.16	108.88	81.21	77.24	45.24	117.28	41.25	97.06
	扩展强度/%	1.19	1.70	2.84	1.93	2.72	4.51	2.54	2.10

(1) 扩展形状向非紧凑、复杂化方向发展。城市紧凑度和分形维数是反映城市空间扩展过程中建成区形状变化的重要指标,一般紧凑度指数越高,城市效率也就相应高<sup>[18]</sup>,分形维数  $D$  值越大,表示空间上

的镶嵌结构越复杂,当  $D=1.50$  时,空间结构最不稳定,徐建华等<sup>[19]</sup>定义了景观要素的稳定性指数  $S=|1.50-D|$ ,  $S$  值越大,表示空间形态越稳定。由表3可知,4个时期的紧凑度均 $<1$ ,分形维数均 $<1.5$ ,但紧凑度有逐渐减小的趋势,二分形维数有逐渐增大的趋势,表明城市用地扩展形态属非紧凑型且形态趋向复杂化,稳定性差但有逐步增强的趋势。20世纪80年代紧凑度值由0.14下降到0.10,分形维数值1.27上升到1.43,城市形态偏离紧凑且不规则、不稳定性程度明显在增强,城市用地表现为由中心城区向外扩展;90年代紧凑度变化不明显,分形维数值由1.43下降到1.40,规则性、稳定性呈缓慢增强趋势,城市用地表现为由中心城区向外快速组团式扩展;21世纪紧凑度值由0.10下降到0.08,分形维数值由1.40上升到1.43,城市形态偏离紧凑且不规则、不稳定性程度明显在增强,城市用地表现为中心城区和各组团城市建设用地的内部填充与四周蔓延。总的来说,上世纪80年代以来,城市用地稳定性指数  $S$  有减小的趋势,这种扩展形态的转变在一定程度上反映了西安市城市用地不规则、不稳定性程度有增强的趋势,城市效率有降低的趋势,进一步表明城市扩展为快速增长型。

(2) 扩展重心转移特征。根据表3,1977—2008年西安市城市用地扩展重心总体趋势为向正北部转移,转移距离达2 411.31 m,转移角度为89.13°。其中,上世纪80年代以向北方向扩展为主,空间重心向北移动499.82 m,与正东方向的夹角为83.86°;90年代继续向北偏西方向扩展,空间重心移动1 605.7 m,与正东方向的夹角为101.85°;21世纪初以向东北和东两个方向扩展为主,空间重心继续向东北方向移动466.36 m,与正东方向的夹角为47.52°。

(3) 扩展方位分异特征。根据表4数据,利用GIS和其他统计软件测算8个方位城市用地扩展指数,并制作不同时间段西安市城市建成区用地空间强度演变图(图3)。由表3可以看出,西安市城市用地在3个时段向各个空间方位均有扩展,但扩展面积和强度明显不同:①从扩展面积来看,20世纪70年代末至80年代正东、正西和正北方向较大,分别增加了10.35、8.68 km<sup>2</sup>和8.23 km<sup>2</sup>,其它方向都在3 km<sup>2</sup>左右;80年代末至90年代正北方向最大,增加了28.59 km<sup>2</sup>,正东、东北、西北、正西和西南方向次之,增加了7~12 km<sup>2</sup>,而正南和东南方向增加较少,仅增加了4 km<sup>2</sup>左右;90年代末至新世纪初正北和东北方向增加较多,分别增加了40.09 km<sup>2</sup>和31.79 km<sup>2</sup>,正南方向最少,仅增加了9.09 km<sup>2</sup>,其它方向均

增加了20 km<sup>2</sup>左右;②从扩展幅度来看,20世纪70年代末至80年代正北、正东、正西和东南方向较大,分别增加了65.53%、38.51%、36.73%和34.14%,其它方向较小,都在26%以下;80年代末至90年代正北和西北方向较大,分别增加了137.617%、72.317%和59.77%,正东、正西和正南方向较小,增幅仅为26.517%、23.887%和20.51%,其它均在30%~50%;90年代末至21世纪初东北和西南方向增加较多,分别增加了108.887%和117.28%,西北、东南和正北方向次之,增加幅度在70%以上,其它方向较小,仅45%左右;③从扩展强度来看,20世纪70年代末至80年代正西和正南方向较大,强度指数分别达到1.15和0.93,东北方向最小,仅为0.17;80年代末至90年代正北方向最大,强度指数为2.00,正南、西南、西北、正西和西南方向次之,均为1.0左右,而其它方向较小,均在0.5左右;90年代末至21世纪初各方向的扩展强度都在1.0以上,其中最大的是西南方向,达4.51,正东、东北和西北较小,均小于2.0,其它方向均在2.0~3.0之间。由此可见,西安市在1977—2008年这30 a间,正北方向一直保持快速扩展态势,西南和东北方向在80年代末以来处于快速扩展态势,东南和正东表现为稳步扩展趋势,而正南与西北一直处于低速扩展。因此,西安市城市用地扩展具有十分明显的方位分异特征。

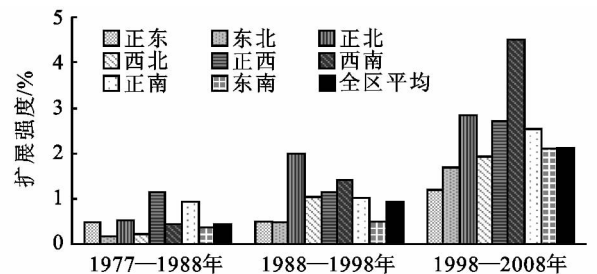


图3 1977—2008年西安市不同时段建成区空间扩展强度演变

### 3.3 城市用地扩展模式分析

西安城区在1977—2008年30 a间,城市用地以中心城区为核心向四周呈近同心圆式扩展,但其扩展模式在各个时期呈现明显的空间差异,具体来讲,20世纪80年代改革开放初期城市扩展速度较慢,城市用地在各方位差异不大,表现为以中心城区向四周呈放射状蔓延辐射;90年代以来,城市扩展出现明显的空间分异特征,其中西部、北部和东北部呈现组团式扩展,西部工业区、北部经济开发区和东北部灞河生态区初具规模,东部和西南部为镶嵌式扩展,表现为主城区与远离主城区的工业用地间农业用地、未利用土地和闲置土地向城市用地的转化,其它方向依然为

蔓延式扩展;21 世纪初东部、东南部、南部、西南部和西部为组团式扩展,东部工业区、西南部旅游度假区、南部文教区和西南部高新技术产业开发区、西部工业区形成,东北部、北部和西北部为镶嵌式扩展,表现为主城区与先期形成的各组团间农业用地、未利用土地和闲置土地向城市用地的转化,北部经济开发区、西北部汉城遗址和东部工业区建成。

## 4 结论与讨论

(1) 通过对不同时期城市用地信息提取和空间叠加分析研究发现,西安市城市用地扩展总体格局表现为非紧凑、不稳定性增强、近同心圆扩展与方向分异十分明显的特征,其扩张速率在 1988—2008 年要远远高于 1977—1988 年。

(2) 西安市区城市建设用地扩展的主要原因是城市人口快速增长和 20 世纪 90 年代以来新兴工业用地和经济开发区的建设。城市用地快速扩展和土地利用始终是一对矛盾,造成的负面影响较多,并带来诸如耕地大量被占用、生态环境破坏、城市负荷增大、城市效率降低等问题。因此,在城市发展过程中,如何有效控制城市人口和城市建成区面积,根据发展需要不断调整产业结构,正确、合理、科学地进行城市建设规划,集约利用土地,增强土地利用强度,提高城市效率,控制城市盲目扩张是政府和相关人员需要进一步研究的问题。

(3) 本文仅就西安市城市建设用地空间扩展的总体特征进行了定量监测,由于数据分辨率的限制,并未对城市建设用地进行进一步分类,如未对城市内部工业用地、商业用地、行政用地、住宅用地等进行时空扩展分析,同时缺少城市及其周边城镇动态扩展的比较分析,缺少以城市环路为单元的分析探讨,这些无疑对未来建设用地区域调控更具有针对性,也为下一步研究提供了方向。

### 参考文献:

[1] 方创琳. 改革开放 30 年来中国的城市化与城市发展[J]. 经济地理, 2009, 29(1): 19-25.

[2] 苏高华. 基于省域尺度的中国城市住宅用地扩张演变过程研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 102-105.

[3] 孔次芬, 李月臣, 简太敏. 基于 RS 和 GIS 重庆都市区土地利用/覆盖变化过程及预测分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 205-209.

[4] 陈红顺, 夏斌. 快速城市化地区土地利用变化研究: 以广东省东莞市为例[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 239-242.

[5] 钟凤, 李秀霞. 吉林省四平市城市化发展动力机制研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 263-268.

[6] 姚士谋, 陈爽, 吴建楠, 等. 中国大城市用地空间扩展若干规律的探索: 以苏州市为例[J]. 地理科学, 2009, 29(1): 15-23.

[7] 牟风云, 张增祥, 迟耀斌, 等. 基于多源遥感数据的北京市 1973—2005 年间城市建成区的动态监测与驱动力分析[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 257-267.

[8] 杨存建, 张果, 陈军, 等. 基于遥感的成都市及其周边城镇的扩展[J]. 地理研究, 2008, 27(1): 100-108.

[9] 戴均良, 高晓路, 杜守帅. 城镇化进程中的空间扩张和土地利用控制[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1822-1833.

[10] 曾勇. 区域生态风险评价: 以呼和浩特市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 668-673.

[11] 党安荣, 王晓栋, 肖作鹏, 等. ERDAS IMAGINE 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[12] 刘湘南, 黄方, 王平. GIS 分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[13] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 412-427.

[14] 陈本清, 徐涵秋. 城市扩展及其驱动力遥感分析: 以厦门市为例[J]. 经济地理, 2005, 25(1): 7-14.

[15] 王伟武, 金建伟, 肖作鹏, 等. 近 18 年来杭州城市用地扩展特征及其驱动机制[J]. 地理研究, 2009, 28(3): 685-693.

[16] 董廷旭, 秦其明, 王建华. 近 30 年来绵阳市城市用地扩展模式研究[J]. 地理研究, 2011, 30(4): 667-675.

[17] 朱英明, 姚士谋, 李玉见, 等. 我国城市化进程中的城市空间演化研究[J]. 地理学与国土研究, 2000, 16(2): 12-16.

[18] 郭腾云, 董冠鹏. 基于 GIS 和 DEA 的特大城市空间紧凑度和城市效率分析[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(4): 482-490.

[19] 徐建华, 艾南山, 金炯, 等. 西北干旱区景观要素镶嵌结构的分形研究: 以黑河流域为例[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 36-39.