

## 1995—2015年三峡库区土地利用变化分形研究

郭晓雁<sup>1</sup>, 李春蕾<sup>2\*</sup>, 张玉虎<sup>1</sup>, 高峰<sup>1</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

**摘要** 运用分形理论从空间形态视角基于分形维数模型对1995—2015年三峡库区土地利用变化进行分形研究。结果表明:①1995—2015年研究区土地利用斑块分形维数均小于临界值1.5,分形维数平均值由1.1621下降至1.1266,整体空间形态随时间变化趋于规则,空间结构趋于稳定;②1995—2015年,耕地斑块分形维数呈增加趋势,空间形态趋于不规则,空间结构趋于不稳定,林地、水域和草地分形维数呈降低趋势,空间形态趋于规则,空间结构趋于稳定;③建设用地和未利用地分形维数呈“先升后降”趋势,由于上升幅度均小于下降幅度,因而建设用地和未利用地空间形态整体趋于规则,空间结构趋于稳定。

**关键词** 土地利用变化;分形维数;稳定性指数;三峡库区

**中图分类号** F301.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)08-0207-05

## Fractal Analysis of Land Use Change in Three Gorges Reservoir Area during 1995-2015

GUO Xiao-yan<sup>1</sup>, LI Chun-lei<sup>2\*</sup>, ZHANG Yu-hu<sup>1</sup> et al (1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048; 2. Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

**Abstract** From space morphology angle, based on the fractal theory, using fractal dimension model the fractal characteristic of land use change were analyzed in Three Gorges Reservoir Area from 1995 to 2015. It indicated that the fractal dimension of each land use class was less than the critical value of 1.5. The average value of fractal dimension dropped from 1.1621 to 1.1266, so the spatial morphology and structure tended to be more regular and stable from 1995 to 2015. The fractal dimension of cultivated land gradually rose from 1995 to 2015, opposite to that for forestry land, water area and grass land. The spatial morphology and structure of cultivated land tended to be more irregular and unstable, opposite to that for forestry land, water area and grass land. Because the spatial structure stability of cultivated land declined, it was critical to deal with the contradiction between development and cultivated land management in the future. The fractal dimension of construction land and unutilized land rose and then reduced, and rising amplitude is bigger. The spatial morphology and structure of construction land and unutilized land tended to be more regular and stable.

**Key words** Land use change; Fractal dimension; Stability indexes; Three Gorges Reservoir Area

三峡工程的建设运行给三峡库区的土地利用带来了剧烈扰动<sup>[1]</sup>,因而与其相关的土地利用变化是国内研究热点。而对于三峡库区土地利用变化的研究,前人主要是采用动态指数和程度指数以及土地利用转移矩阵等模型方法,在库区、市、县、区等尺度研究土地利用数量和空间位置变化。如范月娇<sup>[2]</sup>采用遥感和GIS一体化技术,基于土地利用程度指数对1986—2000年三峡库区土地利用变化状况进行研究;邵怀勇等<sup>[1]</sup>则采用土地利用转移矩阵分析了1955—2000年三峡库区土地利用的动态变化过程;邵景安等<sup>[3]</sup>则借助动态度、综合指数和程度变化指标等分析了三峡库区不同建设阶段土地利用变化特征与轨迹。近年来基于分形理论对土地利用变化的研究也取得了一些研究成果<sup>[4-7]</sup>。然而基于分形理论对三峡库区土地利用空间特征的研究鲜见文献报道。笔者采用1995、2005和2015年共计3期的三峡库区土地利用数据,基于分形理论对三峡库区土地利用动态变化进行分析,为库区土地规划管理和可持续利用提供参考依据。

## 1 数据来源与研究方法

**1.1 研究区与数据** 三峡库区位于106°16'~111°28'E、28°56'~31°44'N,库区地理位置见图1,泛指大坝正常蓄水位175 m淹没所涉及的重庆和湖北库区的20个县、市、区,库区总面积5.8万km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>,到2015年库区统计总人口为1689.61

万<sup>[9]</sup>。库区位于大巴山褶皱带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起带三大构造交汇带,地貌类型复杂多样,土地利用类型以耕地、林地、建设用地和水域为主,面积比例约占库区总面积的98%,最高海拔约3032 m,最低海拔约40 m<sup>[10]</sup>。

1995和2005年三峡库区土地利用数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为30 m,分类精度分别达到92.9%<sup>[11]</sup>和88.95%<sup>[12]</sup>。土地利用类型执行《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010—2007),同时结合三峡库区的实际土地利用情况,将三峡库区土地利用分为6种类型:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地。三峡库区2015年土地利用数据采用与前2期数据统一标准,基于Landsat 8数据解译所得。2015年三峡库区Landsat 8遥感影像来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),基于ENVI 5.2软件对其进行辐射定标、大气校正、裁剪拼接等预处理,通过地物波谱分析以及现有野外调查资料选择训练样本,采用监督分类进行解译,并采用混淆矩阵对最终结果进行精度评价,分类精度达到92.97%。1995、2005和2015年三峡库区土地利用分类见图2。

**1.2 研究方法** Mandelbrot<sup>[13]</sup>提出表面积 $S(r)$ 与体积 $V(r)$ 的关系公式:

$$S(r)^{1/D} \sim V(r)^{1/3} \quad (1)$$

对公式(1)进行推导,可得出适应于 $n$ 维欧氏空间几何关系的分形公式<sup>[14]</sup>:

$$S(r)^{1/D_{n-1}} = K \times r^{(n-1-D_{n-1})/D_{n-1}} \times V(r)^{1/n} \quad (2)$$

**基金项目** 中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406035)。  
**作者简介** 郭晓雁(1991—),女,山西临汾人,硕士研究生,研究方向:土地利用。\*通讯作者,助理研究员,从事林业遥感研究。  
**收稿日期** 2017-03-08

对于式(2),令 $n=2$ 即可得到2维欧氏空间几何的面积和周长的分形公式。令 $A(r)$ 代表以 $r$ 为量测尺度的图形面积, $P(r)$ 代表同一图斑的周长,则有<sup>[14]</sup>:

$$P(r)^{1/D} = K \times r^{(1-D)/D} \times A(r)^{1/2} \quad (3)$$

对式(3)予以变换,两边同时取自然对数,即可得到<sup>[15]</sup>:

$$\ln P(r) = \frac{D}{2} \ln A(r) + C \quad (C \text{ 为常数}) \quad (4)$$

$$D = 2 \times \frac{\ln P(r) - C}{\ln A(r)} = 2k \quad (C \text{ 为常数}) \quad (5)$$

式(4)中,由公式推导可得, $k$ 为图斑的周长对数与面积对数线性回归产生的斜率;分形维数 $D$ 的大小代表了某图斑形状的复杂性,其理论值范围为 $[0,2]$ 。在土地利用分形研究中,

分形维数 $D$ 的范围一般为 $[1,2]$ <sup>[16]</sup>。 $D$ 值越趋近于1,土地利用斑块形状越规则,接近于方形; $D$ 值越趋近于2,则土地利用斑块形状越不规则; $D=1.5$ 时,土地利用斑块形状及空间结构处于一种类似布朗运动的随机状态。为了定量描述土地利用空间结构的稳定性,定义了空间结构的稳定性指数 $SI$ <sup>[7]</sup>:

$$SI = |D - 1.5| \quad (6)$$

式中, $SI$ 的取值范围为 $[0,0.5]$ , $SI$ 值越趋向于0.5,土地利用空间结构越稳定; $SI$ 值越趋近于0,土地利用空间结构越不稳定; $SI$ 值对土地利用空间结构潜在运动趋势具有一定的指示意义。

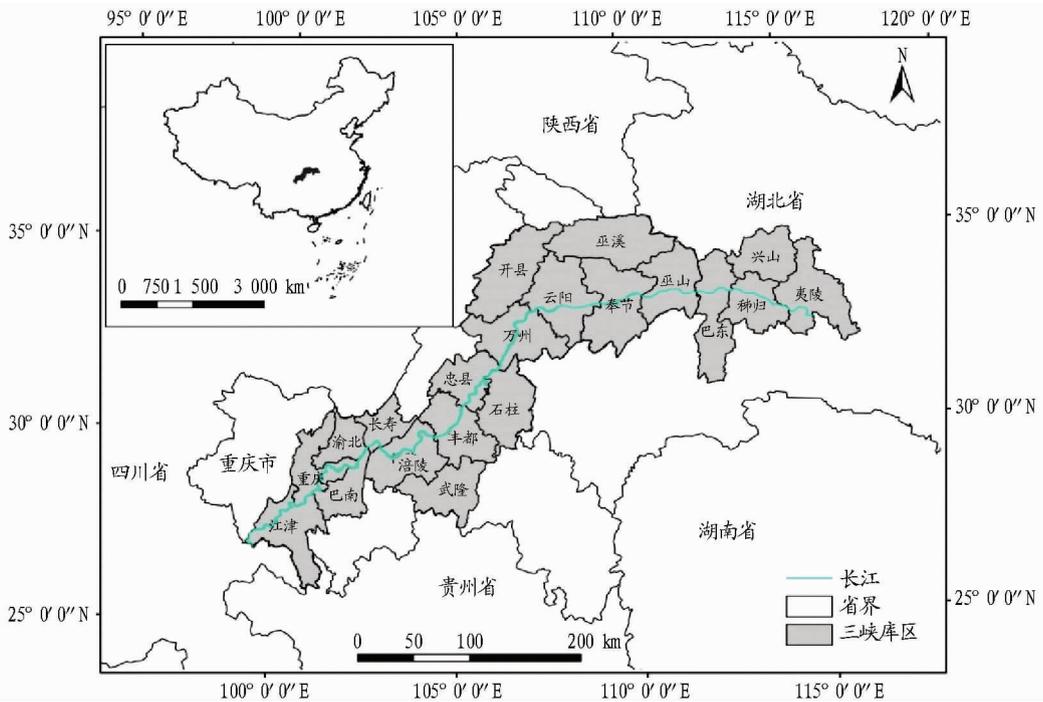


图1 三峡库区地理位置示意

Fig. 1 Location of Three Gorges Reservoir Area

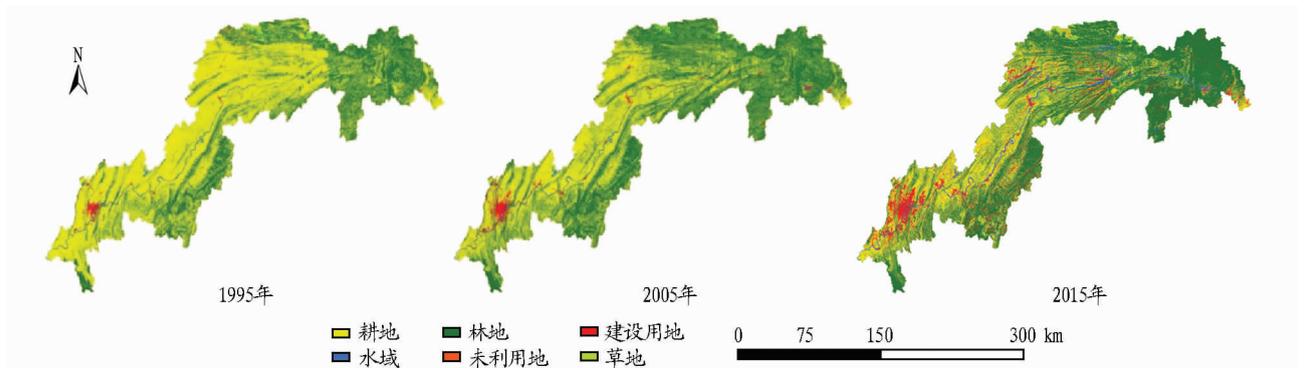


图2 1995—2015年三峡库区土地利用分类

Fig. 2 Land use classification results of Three Gorges Reservoir Area from 1995 to 2015

## 2 结果与分析

### 2.1 分形计算与检验

采用 ArcGIS 软件计算 3 期不同土地利用类型斑块周长 $P(r)$ 和面积 $A(r)$ ,导入 Excel 软件中计算周长和面积的自然对数 $\ln P(r)$ 和 $\ln A(r)$ ,进行相关性分析

及线性拟合,并绘制其散点图(图3),线性回归模型的 $R^2$ 值均大于0.9,通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验;并且检验值 $F$ 亦通过了 $\alpha=0.01$ 的检验(表1)。对周长自然对数和面积自然对数的线性拟合结果显示:研究区的土地利用空间结构是

随机分形结构,对其进行分形研究是有意义的。

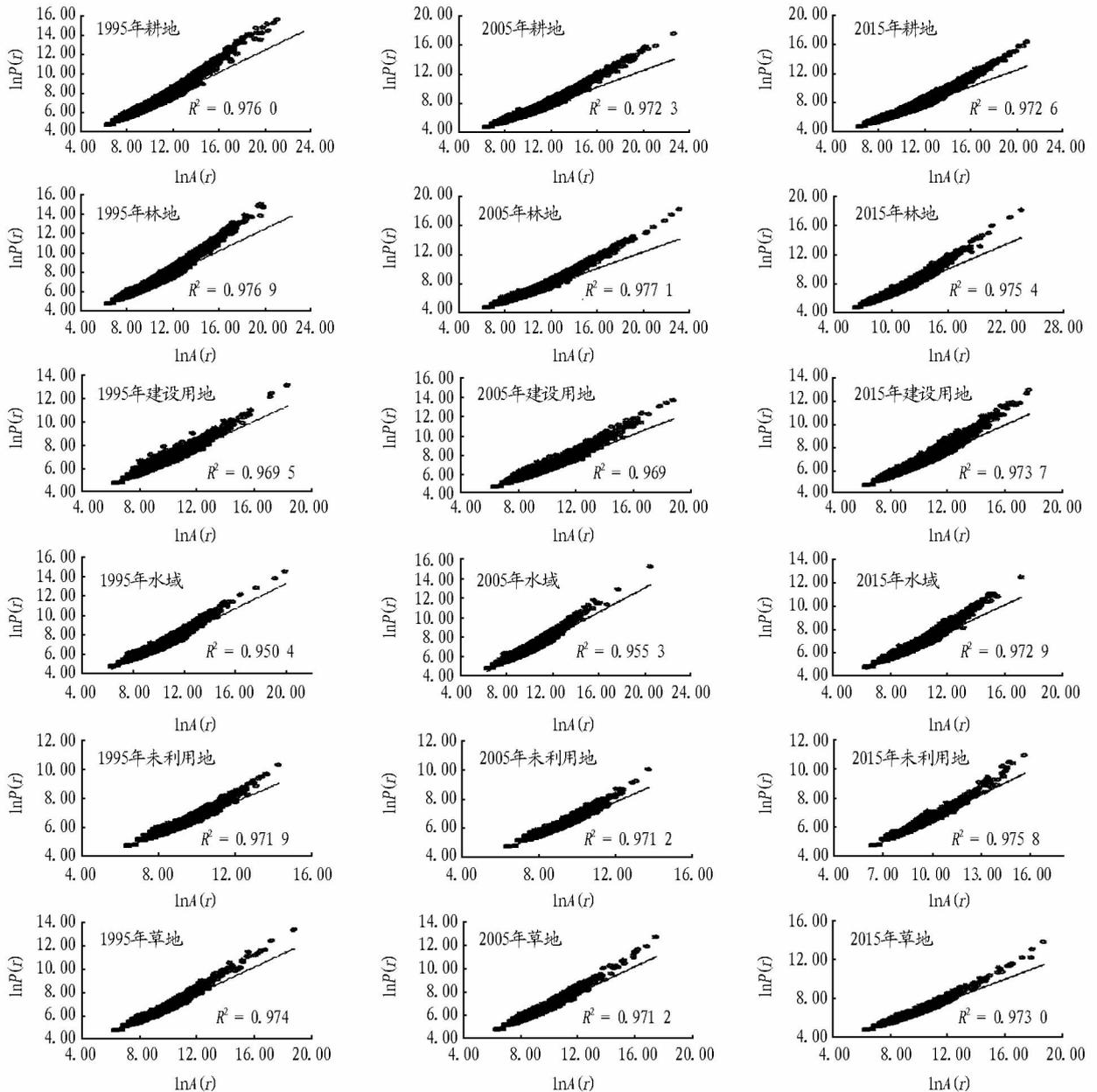


图3 1995—2015年三峡库区土地利用周长自然对数和面积自然对数拟合情况

Fig. 3 The relationship between  $\ln P(r)$  and  $\ln A(r)$  of land use of Three Gorges Reservoir Area from 1995 to 2015

## 2.2 土地利用分形动态

**2.2.1 分形特征总体变化。**计算出1995、2005和2015年三峡库区各土地利用斑块分形维数和稳定性系数,具体计算结果见表1。1995、2005和2015年三峡库区土地利用斑块分形维数均小于临界值1.5,并且趋近于1。由此可知:①三峡库区土地利用斑块形状趋向规则,土地利用空间结构趋向稳定;②根据公式(6),该研究中稳定性指数 $SI$ 与分形维数 $D$ 呈负相关,分形维数越小,稳定性指数越大,土地利用空间形态越趋向规则,空间结构越趋向稳定。

从各时期分形维数和稳定性指数的平均值变化情况来看,三峡库区分形维数平均值从1995年的1.1621下降到2015年的1.1266,稳定性指数平均值从1995年的0.3379

上升至2015年的0.3734,表明1995—2015年三峡库区土地利用整体斑块空间形态趋于规则,空间结构趋于稳定。

**2.2.2 各地类分形动态。**1995—2015年三峡库区各土地利用类型斑块分形维数动态变化见图4,稳定性指数动态变化见图5。

(1)1995—2015年耕地分形维数 $D$ 在分形维数持续升高,而稳定性指数呈相反变化趋势。说明耕地向斑块形态趋于不规则化,空间结构趋于不稳定化发展。1994年底三峡大坝开工建设,占用部分耕地;2002年三峡库区退耕还林还草工程全面启动,使得部分耕地转变为林地和草地;库区蓄水使得处于水位线以下的耕地被淹没,耕地面积快速减少,由表1可知,研究期间耕地面积减少了15956.2 km<sup>2</sup>。由于三

峡库区的坡耕地较多,工程蓄水淹没大量平原耕地,并且在退耕还林还草政策影响下易被占用变更,因而其空间形态不规则,稳定性指数相比于同时期的其他地类一直处于较低水

平,1995和2005年空间结构稳定性指数仅高于水域,2015年最低,三峡库区在今后发展过程中要更加重视耕地资源的合理分配与利用。

表1 1995—2015年三峡库区土地利用类型分形维数与稳定性指数

Table 1 Fractal dimension and stability indexes statistics of land use of Three Gorges Reservoir Area from 1995 to 2015

年份 Year	地类 Land class	面积 Area km <sup>2</sup>	比例 Proportion %	$R^2$	$F$ 检验值 $F$ value	分形维数 $D$ Fractal dimension $D$	稳定性指数 $SI$ Stability index $SI$
1995	耕地	34 128.91	59.01	0.976 0	8 904 731	1.149 4	0.350 6
	林地	21 312.93	36.85	0.9769	16 297 247	1.138 6	0.361 4
	建设用地	545.83	0.94	0.969 5	1 024 112	1.125 6	0.374 4
	水域	1 206.15	2.09	0.950 4	274 117	1.296 8	0.203 2
	未利用地	170.55	0.29	0.971 9	1 135 569	1.113 2	0.386 8
	草地	472.75	0.82	0.974 0	868 314	1.149 2	0.350 8
	平均值	—	—	—	—	1.162 1	0.337 9
2005	耕地	24 775.90	42.84	0.972 3	13 455 056	1.161 4	0.338 6
	林地	30 124.95	52.09	0.977 1	19 479 795	1.131 4	0.368 6
	建设用地	1 206.23	2.09	0.969 0	2 423 098	1.151 8	0.348 2
	水域	1 360.74	2.35	0.955 3	316 180	1.263 6	0.236 4
	未利用地	52.11	0.09	0.971 2	341 107	1.127 8	0.372 2
	草地	317.18	0.55	0.971 2	869 683	1.136 2	0.363 8
	平均值	—	—	—	—	1.162 0	0.338 0
2015	耕地	18 172.71	31.42	0.972 6	7 607 858	1.163 4	0.336 6
	林地	32 760.43	56.64	0.975 4	8 299 700	1.128 4	0.371 6
	建设用地	4 248.14	7.35	0.973 7	7 837 575	1.116 6	0.383 4
	水域	2 062.00	3.57	0.972 9	3 533 869	1.148 6	0.351 4
	未利用地	99.62	0.17	0.975 8	609 746	1.086 2	0.413 8
	草地	494.22	0.85	0.973 0	404 030	1.116 4	0.383 6
	平均值	—	—	—	—	1.126 6	0.373 4

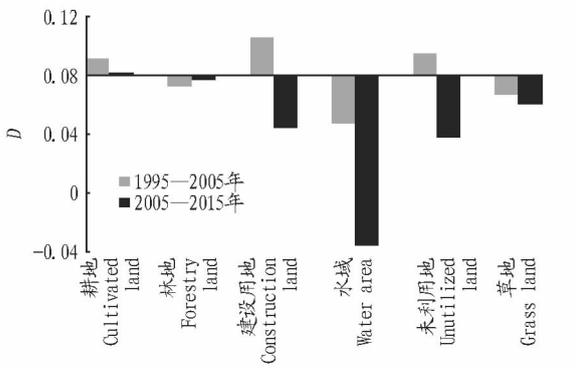


图4 1995—2015年分形维数( $D$ )动态变化

Fig. 4 Dynamics of fractal dimension ( $D$ ) from 1995 to 2015

(2)1995—2015年林地分形维数持续降低,而稳定性指数呈相反变化趋势。表明林地斑块形态趋于规则,空间结构趋于稳定方向发展。三峡库区地处长江防护林带,并且由于天然林保护工程、退耕还林工程、水库周边绿化等生态屏障区建设使其林地面积持续增加,1995—2015年增加了11 447.5 km<sup>2</sup>。防护林带、生态屏障带、退耕还林、人工经济林等林地斑块在人类影响下,其斑块形态较规则,空间结构较稳定。

(3)2005年建设用地分形维数 $D$ 最高,稳定性指数 $SI$ 最低,在2015年分形维数最低,稳定性指数最高。分形维数先

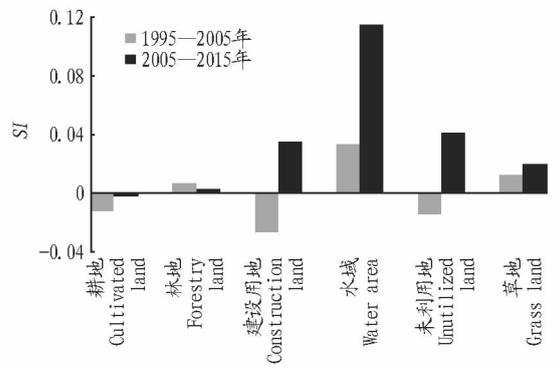


图5 1995—2015年稳定性指数( $SI$ )动态变化

Fig. 5 Dynamics of stability indexes ( $SI$ ) from 1995 to 2015

升高后降低,稳定性指数先降低后升高。由此可知,建设用地斑块形态先趋于不规则后趋于规则,空间结构先趋于不稳定后趋于稳定,并且2015年稳定性水平高于1995年,建设用地空间结构整体趋于稳定。1992年三峡工程附属移民迁建已经开始移民试点安置,1994年以后,搬迁安置任务日益加重,在2002年底已完成60%以上的移民搬迁。库区蓄水淹没,县城迁建新建使得在1995—2005年建设用地斑块变动较大,面积增加了660.40 km<sup>2</sup>,斑块形态趋于不规则,空间结构变得不稳定。2009年三峡库区移民迁建任务基本完成,库区社会经济发展逐渐趋于稳定,城市开始逐渐扩张,建设

用地面积增加较快,增加了 3 041.91 km<sup>2</sup>,斑块形态逐渐趋于规则,空间结构趋于稳定。建设用地主要在人类活动影响下形成,斑块形态规则,因而相比于同时期其他地类,建设用地在研究期间稳定性指数均处于较高水平。

(4) 水域的分形维数  $D$  在 1995—2015 年持续降低,稳定性指数  $SI$  持续升高,表明水域斑块空间形态趋于规则,空间结构趋于稳定。三峡工程大江截留、大坝蓄水,使得水域面积持续扩大,1995—2015 年水域面积增加 855.85 km<sup>2</sup>。在三峡大坝蓄水后,水域斑块空间形态更多受大坝蓄水或开闸放水的影响,因而其斑块形态逐渐趋于规则,空间结构趋于稳定。但因水域斑块主要是自然形成的特点,因而 1995 和 2005 年水域空间结构稳定性指数相比于同时期其他地类均处于最低水平,在 2015 年稳定性指数仅高于耕地。

(5) 未利用地在 2005 年分形维数  $D$  最高,稳定性指数  $SI$  最低,2015 年分形维数最低,稳定性指数最高。分形维数先升高后降低,稳定性指数先降低后升高,表明其用地斑块形态先趋于不规则后趋于规则,空间结构先趋于不稳定后趋于稳定。三峡库区未利用地占地面积较少,1995—2015 年最高占地面积也仅有 0.29%,并且大部分分布于三峡库区北部山区,受人类活动影响较少,空间结构整体上趋向稳定。相比于同时期其他地类,未利用地稳定性指数始终处于最高水平。

(6) 1995—2015 年草地分形维数  $D$  持续降低,稳定性指数  $SI$  呈相反变化趋势,说明草地斑块形态趋于规则,空间结构趋于稳定。与同时期其他地类相比,草地的稳定性指数在逐步上升,在 1995 年仅高于水域,而在 2015 年仅次于未利用地。退耕还草和生态屏障带建设使得草地斑块形态趋于规则,空间结构趋于稳定。

### 3 结语

基于分形理论对 1995、2005 和 2015 年 3 个时期三峡库区土地利用分形维数  $D$  和稳定性指数  $SI$  及其动态变化计算分析可以得出以下初步结论。

(1) 三峡库区土地利用类型空间结构在统计意义上具有自相似性,属于随机分形结构。并且 3 个时期土地利用分形维数  $D$  均小于 1.5,说明三峡库区土地利用斑块形态规则,稳定性指数  $SI$  与分形维数  $D$  呈负相关,土地利用空间结构稳定。

(2) 1995—2015 年三峡库区土地利用斑块空间形态与结构发生了较大变化。从 1995、2005 和 2015 年 3 个时期分形维数和稳定性指数平均值来看,整体上三峡库区土地利用类型的空间形态经历了由不规则到规则,空间结构由不稳定到稳定的变化过程。综合 1995 和 2015 年不同地类的分形维数和稳定性指数变化来看,除耕地外,其他 5 种地类的空间形态均随时间变化趋于规则,空间结构趋于稳定。

(3) 1995、2005 和 2015 年 3 个时期各土地利用类型分形维数排序从高到低依次排序分别如下:1995 年,水域、耕地、草地、林地、建设用地、未利用地;2005 年,水域、耕地、建设用地、草地、林地、未利用地;2015 年,耕地、水域、林地、建设用地、草地、未利用地。分形维数越小,土地利用斑块形态越规则,土地利用空间结构越稳定;分形维数越大,土地利用斑块形态越不规则,土地利用空间结构越稳定。

(4) 1995—2015 年三峡库区不同土地利用类型分形动态变化趋势不同。耕地斑块空间形态趋于不规则,空间结构越来越不稳定;林地、水域和草地斑块空间形态趋于规则,空间结构越来越稳定;建设用地和未利用地斑块空间形态先趋于不规则后趋于规则,空间结构先趋于不稳定后趋于稳定。这些变化说明三峡工程及其附属工程建设、移民迁建等对库区土地利用空间形态与结构造成了一定的影响,但同时退耕还林还草、生态屏障带建设等政策也产生了良好效果。

人类社会活动会造成土地利用空间形态与结构产生较大变化,基于分形理论的分形维数和稳定性指数是研究土地利用空间形态与结构变化的两个有效指标。三峡库区未来土地利用规划开发中,应继续坚持林草保护政策,处理好建设发展与耕地资源保护之间的矛盾,加强水域保护与管理。

### 参考文献

- [1] 邵怀勇,仙巍,杨武年,等.三峡库区近 50 年间土地利用/覆被变化[J].应用生态学报,2008,19(2):453-458.
- [2] 范月娇.基于遥感和 GIS 一体化技术的三峡库区土地利用变化研究[J].地理科学,2002,22(5):599-603.
- [3] 邵景安,张仕超,魏朝富.基于大型水利工程建设阶段的三峡库区土地利用变化遥感分析[J].地理研究,2013,32(12):2189-2203.
- [4] BATT Y M, LONGLEY P A. The morphology of urban land use[J]. Environment and planning B: Planning and design, 1988, 15(4): 461-488.
- [5] SAMBROOK R C. Spatial behavior analysis at the global level using fractal geometry[J]. Nonlinear dynamics, psychology and life sciences, 2008, 12(1): 3-13.
- [6] 荣琨.基于分形理论的山美水库流域土地利用结构变化研究[J].生态科学,2016,35(3):129-133.
- [7] 张珂,赵耀龙,付迎春,等.滇池流域 1974 年至 2008 年土地利用的分形动态[J].资源科学,2013,35(1):232-239.
- [8] 国家环境保护总局.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].1997.
- [9] 中华人民共和国环境保护部.长江三峡工程生态与环境监测公报[R].2015.
- [10] 曾立雄.三峡库区不同植被类型生物量与生产力研究[D].武汉:华中农业大学,2007:108.
- [11] 刘修远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变化的空间格局分析[J].中国科学(D辑:地球科学),2002,32(12):1031-1040.
- [12] 徐新良,庞治国,于信芳.土地利用/覆被变化时空信息分析方法及应用[M].北京:科学技术文献出版社,2014:105.
- [13] MANDELROT B B, AIZENMAN M. Fractals: Form, chance, and dimension [J]. Physics today, 1979, 32(5): 65-66.
- [14] 董连科.分形理论及其应用[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1991:112-114.
- [15] 邵怀勇,仙巍,杨武年.三峡库区土地利用格局变化的分形结构研究:以开县为例[J].测绘科学,2009,34(6):295-297.
- [16] 唐华俊,吴文斌,杨鹏,等.土地利用/土地覆被变化(LUCC)模型研究进展[J].地理学报,2009,64(4):456-468.