第 25 卷第 1 期
2005 年 1 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 25, No. 1
Jan., 2005

山东泰山地区景观结构变化及其分形分析

余世孝，郭 泺
（中山大学生命科学学院，广州 510275）

摘要：将泰山风景区划分为 8 个区域 11 个基本景观类型，包括松林、栎林、刺槐林、侧柏林、针阔叶混交林、经济林、灌丛、裸岩、荒地、水体、建筑。在此基础上，利用 3S 技术和分形理论对各个景观要素进行了分析，并讨论了景观特性及其变化的分形性质。结果表明：(1)分维值的大小反映了景观斑块面积、斑块数量和平均斑块面积等因素的相互作用，在一定尺度下分维的大小反映了区域内景观斑块的不规则程度和复杂程度，斑块越不规则、越复杂，其分维越大，反之亦然。在泰山地区，自 1986 年至 2001 年，刺槐林一直保持着较高的分维值，其它景观类型的分维值则差别不大，而针阔叶混交林的分维值变化较大；(2)森林景观受多种因子的影响，在高海拔区域主要受垂直地带性规律影响为主，在旅游区主要受人类活动的影响为主，15 a 来各个区域分形维数的总体变化趋势相似；(3)大部分区域在 2001 年的景观多样性、破碎度高于 1986 年的，而景观优势度则略为下降。

关键词：景观结构；分形；分维；地理信息系统

Landscape structures and fractal analyses of Taishan Mountain, Shandong Province

YU Shi-Xiao, GUO Luo (*School of Life Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou* 510275, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 129～134.**

Abstract: Eleven types of landscape belonging to eight topographic zones in Taishan Mountain of Shandong Province are recognized. These include: *Pinus* forests, *Quercus* forests, *Robinia pseudoacacia* forests, *Platycladus orientalis* forests, mixed forests, economic forests, shrubs, bare rocks, uncultivated land, waters, and buildings. Based on the remote sensing images and the field-surveyed data, the structural changes during a 15 years period from 1986 to 2001 in various types of landscape within eight zones are analyzed using the 3S techniques and fractal methods. Four kinds of indexes, including the fractal dimension, diversity index, dominance, and fragmentation of landscape, are evaluated for each type of landscape. The results confirm that: (1) the fractal dimension is the characteristic parameter that generally provides the information about the landscape structure and its change. Its value is a comprehensive index reflecting the changes of spatial distributions, patch numbers, and patch areas. The higher the value, the more irregular the patch shape of landscape becomes, and so is the more complex the landscape structure. There are no significant differences on the fractal dimension values measured in 1986 and in 2001 among the landscape types except that *Robinia pseudoacacia* forests maintain a higher value. (2) The landscape structure is affected by many environmental factors. At the tourist sites it is mainly affected by the human activities; while at the high altitude sites it is controlled by the uniqueness of the vertical zonation. The variation tendency of fractal dimension values within each of eight different zones is similar in these two studying periods. (3) The landscape diversity and fragmentation index in 1986 were higher than those in 2001 from most sites, while the landscape dominance indexes were decreased slightly over this period.

基金项目：国家教育部骨干教师基金资助项目；山东省林业科学研究院资助项目
收稿日期：2003-10-24；**修订日期**：2004-05-10
作者简介：余世孝(1962～)，男，广东饶平人，教授，主要从事植被生态学、数量生态学及 3S 技术的应用研究。E-mail：lssysx@zsu.edu.cn
Foundation item: the Funds of National Education Ministry; Academy of Forestry, Shandong Province
Received date: 2003-10-24; **Accepted date**: 2004-05-10
Biography: YU Shi-Xiao, Professor, mainly engaged in vegetation ecology, quantitative ecology and application of 3S. E-mail: lssysx@zsu.edu.cn

万方数据

Key words: landscape structure; fractal dimension; GIS

文章编号:1000-0933(2005)1-0129-06 **中图分类号**:Q149 **文献标识码**:A

作为景观要素的斑块,其特征由大小与形状所刻划。斑块的形状,相对于斑块的大小而言,由于其复杂多样,通常难以直接地计测,而采用各种指数来描述[1]。分形用以描述不规则的、破碎的、琐屑的几何特征[2],通过分维的计算,可以度量分形几何对象的复杂性程度,应用于景观研究上则可以在多尺度下观察景观,对复杂的边界和斑块形状量化计算[3]。

国内采用分形的方法分析景观空间格局特征的研究起步较晚,分形研究也多从种群和群落角度计算分维或从静态角度研究景观格局与分维的关系。例如马克明等[4]选取从分枝到景观的各个等级层次上若干有代表性的研究实例,介绍了分形维数在植被格局研究中的应用方法,提出植被格局的分形机制,并对植被格局的分形模型进行了评价;张世熔等[5]利用分形维数对川西不同丘陵区的空间格局特征进行了分析。

本文将以山东泰山风景区为研究对象,应用分形理论,定量地分析该区各种景观要素结构的复杂性与稳定性,揭示景观空间结构的分形特征,从景观结构角度研究这一区域森林景观结构变化的分维动态特点,为生态环境保护和可持续发展提供科学依据。

1 研究区自然地理概况

泰山位于山东中部,约当36°05′~36°30′N,116°50′~117°24′E,属于世界文化与自然遗产、国家重点风景名胜区和国家示范森林公园。泰山地势险峻,为中、低山地貌,地势中部高向四周敞开,逐渐降低。主峰海拔1 545m,相对高差达1 400m,梯度变化明显,具有不同的坡向和坡度特征。泰山地处暖温带大陆性季风气候区,山顶年平均气温5.3℃,年平均降水量1 124.6 mm,山下年平均气温12.8℃,年平均降水量715.0m。区内相对高差较大,气候的垂直地带性分异十分明显。地质基底为"泰山杂岩",其覆盖层由片麻岩和花岗岩构成,土壤以中性棕壤森林土为主,略酸性;地带性植被类型为暖温带落叶阔叶林,森林植被包括针叶林、阔叶林、竹林、经济林4个植被型,森林覆盖率达81.5%,主要森林类型有松林、侧柏林、刺槐林、栎林4大类,约占92.9%。泰山主体山脉呈"米"字形分布,按地形方位和沟谷水系分布可划分为8个特征区域,三岔地区位于泰山中部,平均海拔最高;巴山景区海拔440~950m,地势南高北低,地处阴坡,游人少至;佛爷寺景区地势为西南高东北低,海拔500~900m,森林以松林为主;扫帚峪景区地势西南高东部低,有部分山区农业,桃花峪景区位于西部,海拔440~950m,地势东高西低,是旅游开发的新地区;泰前、樱桃园和竹林寺景区整体地势北高南低,海拔300~1 400m,相对高差达1 100m,森林类型多样性镶嵌分布明显,林沿地带与旅游区域相连,景区开发较早,该景区人文景点较多,人类活动频繁。

2 研究方法

2.1 数字图像的处理与信息获取

以1986和2001年两期1∶5万TM影像为主要信息源,结合1∶1万林相图(2000年Ⅱ类调查成果)和1∶5万地形图,借助GPS进行实地调查,编制TM影像目视解译标志数据库,在GIS软件支持下分别对两期TM数据进行监督分类,在此基础上进一步采用人机交互综合解译对监督分类的结果进行纠正,获得两个特征区域在两个时期的景观类型图,进而将研究区斑块状景观划分为11个基本景观类型:松林(*Pinus* forest)、栎林(*Quercus* forest)、刺槐林(*Robinia pseudoacacia* forest)、侧柏林(*Platycladus orientalis* forest)、针阔叶混交林(mixed forest)、经济林(economic forest)、灌丛(shrub)、裸岩(bare rocky)、荒地(abandoned land)、水体(water)、建筑(building)11类,线状景观(如道路)以及竹林、农田因分布零星、面积较小,未考虑。为使TM图像中森林斑块分类更为清晰,前4个纯林类型以图斑中优势种占80%面积为依据,针阔混交林类型则以块状均匀混交为依据。在数字化地形图的基础上建立数字高程模型(DEM),生成坡度图、坡向图以及三维地形图(图1)。利用GIS的空间分析功能,将景观类型图与DEM、坡度图、分区图进行空间叠置分析,提取相应的数据。

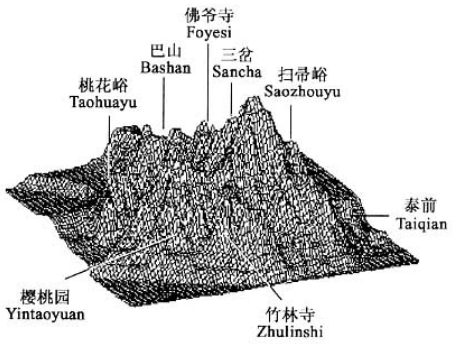

图1 各景区空间分布格局三维图

Fig. 1 3 D-spatial pattern of Taishan Mountain, Shandong Province

2.2 分维的计算

景观中的斑块大都是不规则的图形,由各种景观要素斑块在空间上镶嵌分布并有机地结合在一起而形成的景观镶嵌体是自然界中最典型的分形几何体,并在特定时间呈二维空间分布,可采用二维欧氏空间的分数维公式计算景观的动态变化维数,

万方数据

描述景观斑块的复杂性。结合景观多样性(Diversity index)指数、优势度(Dominance)、破碎度(Landscape fragmentation)等指标进行定量化描述[6,7]。

(1)分维数(Fractal dimension)

$$\ln A(r) = \frac{2}{D}\ln P(r) + C \tag{1}$$

式中，$A(r)$表示以 r 为量测尺度的某景观斑块的面积，$P(r)$为其周长，C 为截距，$2/D$ 为斜率，分形维数 D 的理论范围为 1.0～2.0。D 值越大代表图形形状越复杂。景观要素的稳定性指数 $SK=1.5-D$，也即当$D=1.5$时，则代表图形处于布朗随机运动状态，越接近该值，斑块稳定性越差。分维几何中斑块周长和斑块面积的关系被定义为：

$$P = kA^{D/2} \tag{2}$$

式中，D 值为 1.0 代表形状最简单的正方形斑块，2.0 表示等面积下周边最复杂的斑块。对单个正方形斑块，常数 k 等于 4，则：

$$P = 4A^{D/2}$$

即有：

$$D = 2\log(P/4)/\log A \tag{3}$$

(2)多样性指数(Diversity index)

一个区域内不同景观类型分布的均匀化和复杂化程度，可以用景观多样性指数表示[8,9]。依据 Shannon-Wiener 指数，景观多样性指数为：

$$H = -\sum_{i=1}^{m}(P_i \log P_i) \tag{4}$$

式中，P_i 是第 i 类景观所占的面积比例，m 为景观类型的数目。H 值越大，景观要素类型愈丰富，景观多样性越大，其最大值为：

$$H_{\max} = \log m$$

(3)优势度(Dominance)

少数嵌块体在景观中的支配程度由优势度表示，其表达式为：

$$D = H_{\max} + \sum_{i=1}^{m} P_i \log P_i \tag{5}$$

式中，D 值大时，表示景观只受一个或少数几个嵌块体类型支配，而 D 值小时，反映该景观是由多个面积大致相当的嵌块体所组成。它与多样性指数刚好相反，对于景观类型数目相同的不同景观，多样性指数越大，其优势度越小。

(4)破碎度(Fragmentation)

若某景观内斑块数目增多，单个或某些斑块的面积相对减少，则斑块形状更趋复杂化、不规则化。景观破碎度的表达式为：

$$I = \sum_{i=1}^{m} N_i / A \tag{6}$$

式中，I 为景观破碎度；N_i 为第 i 类景观斑块数；A 为景观总面积，I 值越大，破碎化程度越高。

3　结果与讨论

3.1　森林景观要素的分维及其变化

在 GIS 支持下，对景观要素斑块进行空间分析，生成各景观要素斑块的面积和周长，拟合回归模型，得出分形维数(表 1)。可以看出，泰山森林景观的空间分布在一定尺度范围内具有分形性质，其分维的值阈为 $0<D<2$。分维能够定量描述森林景观结构的特征参数，不随测量尺度的改变而变化。分维的大小反映了一定区域内森林景观结构的复杂程度，森林景观要素斑块越不规则、越复杂，其分维越大。不同时段的分维变化可以表征森林景观斑块在时间维上的空间变化。1986 年泰山各森林景观类型的分维自大到小的排列顺序为：刺槐林(1.627)＞侧柏(1.318)＞栎林(1.302)＞ 松林(1.279)＞针阔混交林(1.021)＞ 经济林(1.108)。这说明，刺槐林在泰山的分布最为复杂和不规则，侧柏和栎林的分维值虽然不及刺槐的高，但它们的分维值也都远大于 1，它们都是境内重要的植被类型，松林在泰山的分布最广，但分维数小于刺槐林，表明松林的斑块较规则；针阔混交林和经济林的分维都接近于 1，说明它们在境内分布规模较小，斑块比较规则。

2001 年泰山各森林景观类型的分维自大到小的排列顺序为：2001 年松林、刺槐、侧柏、栎林在泰山森林景观中仍处于主导地位，分维自大到小的排列顺序为：刺槐林(1.606)＞松林(1.380)＞侧柏(1.395)＞针阔混交林(1.350)＞ 栎林(1.258)＞经济林(1.212)。但森林类型分维数的大小与 1986 年相比则发生了变化，其中 1986 年的部分松林到 2001 年变为了栎林和刺槐林，大面积的松林被分割，斑块面积减小，使 2001 年的松林分维值上升到第 2 位。针阔混交林和经济林的分维均有所增加，特别是针阔混交林增加较快。从整个研究区所有森林景观的分维来看，1986 年为 1.279，2001 年为 1.328，稳定性指数为 0.272。表明

万方数据

通过 15a 来的林业建设与保护，泰山的森林资源状况未发生恶化，森林面积的变化不明显，但森林景观的分布趋于复杂化。

表 1 泰山景观要素斑块分维数

Table 1 The changes of fractal dimension on the landscape of Taishan Mountain from 1986 to 2001

景观类型 Landscape type	1986 分维数 Fractal dimension D	1986 相关性 Correlation R^2	1986 稳定性指数 Stability index SK	1986 样本数 No. of Samples n	2001 分维数 Fractal dimension D	2001 相关性 Correlation R^2	2001 稳定性指数 Stable index SK	2001 样本数 No. of Sample n
松林 *Pinus* forest	1.279	0.942	0.246	87	1.381	0.942	0.223	92
栎林 *Quercus* Forest	1.302	0.883	0.198	79	1.258	0.883	0.242	87
刺槐 *Robinia pseudoacacia*	1.627	0.910	0.126	62	1.606	0.910	0.106	68
侧柏 *Platycladus orientalis*	1.318	0.963	0.192	65	1.395	0.963	0.105	69
针阔混交林 Mixed forest	1.021	0.976	0.221	20	1.350	0.976	0.150	25
经济林 Economic forest	1.108	0.959	0.392	10	1.212	0.959	0.288	14
灌丛 Shrub	1.324	0.877	0.176	19	1.369	0.877	0.131	17
裸岩 Bare rocky	1.423	0.806	0.076	22	1.401	0.806	0.009	25
荒地 Abandoned land	1.316	0.903	0.184	17	1.238	0.903	0.242	13
水体 Water	1.120	0.927	0.380	10	1.199	0.927	0.301	14
建筑 Building	1.279	0.938	0.267	16	1.328	0.938	0.299	22

3.2 森林景观与其它景观类型分维的比较

景观的分维是可定量表征景观要素空间分布状况的特征参数，主要与其空间分布的不规则性有关。由表 1 可以看出，对于多数景观类型来说，如松林、经济林、针阔混交林、灌丛、荒地、水体随着斑块数量的增加，其分维也增大；而对于少数类型，如栎林、裸岩虽然斑块数量增多，但其分维数减小。比较泰山所有景观类型的分维数，数值最大的是仍是刺槐林，1986 年分维数自大到小的排列顺序为刺槐林(1.627)＞裸岩(1.423)＞灌丛(1.324)＞侧柏(1.318)＞荒地(1.316)＞栎林(1.302)＞ 松林 (1.279)＞建筑(1.233)＞针阔混交林(1.021)＞水体(1.120)，经济林最小为(1.108)。荒地、灌丛与建筑因斑块不规则，分布复杂导致分维数较大。2001 年景观类型的分维数发生了变化，自大到小的排列顺序为：刺槐林(1.606)＞裸岩(1.401)＞ 松林 (1.381)＞侧柏(1.395)＞ 灌丛(1.369)＞针阔混交林(1.350)＞ 栎林(1.258)＞荒地(1.238)＞ 经济林(1.212)＞建筑(1.201)＞水体(1.199)。刺槐林的分维数一直最大，其次是裸岩；其中，松林从 1986 年的第 8 位上升到 2001 的第 3 位，灌丛从第 9 位上升到 2001 的第 4 位，这与泰山近十几年来一直坚持改造纯林，分隔大面积的针叶林斑块以及山顶造林的措施密切相关。经济林的分维数略有上升，而荒地则从第 4 位下降到 2001 的第 8 位，表明荒地的利用受到重视，部分荒地变为经济林。虽然建筑和水体局部地区的变化大，但因面积小，分布零星，其总体的变化不明显。

表 2 泰山 8 个地形区景观分维数

Table 2 The fractal dimension values of landscape in different zones of Taishan Mountain

分区 Zone	1986 分维数 Fractal dimension D	1986 相关性 Correlation R^2	1986 稳定性指数 Stable index SK	1986 样本数 No. of Sample n	2001 分维数 Fractal dimension D	2001 相关性 Correlation R^2	2001 稳定性指数 Stable index SK	2001 样本数 No. of Sample n
三岔 Shanc zone	1.399	0.925	0.101	35	1.413	0.941	0.087	38
桃花峪 Taohy zone	1.263	0.923	0.237	65	1.389	0.945	0.111	70
竹林寺 Zhuls zone	1.331	0.934	0.169	57	1.642	0.931	0.242	75
扫帚峪 Saozy zone	1.140	0.894	0.440	47	1.211	0.890	0.201	47
泰前 Taiq zone	1.211	0.932	0.209	42	1.401	0.904	0.090	50
樱桃园 Yingty zone	1.297	0.931	0.222	58	1.451	0.931	0.049	62
佛爷寺 Foys zone	1.202	0.921	0.298	36	1.319	0.929	0.172	39
巴山 Bas zone	1.177	0.944	0.357	39	1.267	0.933	0.227	39

3.3 各分区的分形维数与景观指数的变化

表 2 显示在 RS 与 GIS 支持下，计算出泰山 8 个不同地形区景观斑块的基本统计数据，包括景观分形维数、景观多样性指数、优势度和破碎度。可以看出，8 个地区的 11 类景观要素斑块面积与周长之间双对数散点图的线性关系均很好，表明周长-面

万方数据

积法计算鲁中山区景观类型斑块综合的分形维数是适用的(图 2)。计算结果也表明,1986 年 8 个地区的分形维数值按从小到大的顺序依次为巴山<扫帚峪<佛爷寺<泰前<桃花峪<樱桃园<竹林寺<三岔。而 2001 年 8 个地区的分形维数值按从小到大的顺序依次为扫帚峪<巴山<佛爷寺<桃花峪<泰前<三岔<樱桃园<竹林寺。可以看出 15a 来各个地区分形维数的总体变化趋势相似,海拔高差大,坡度陡的地区由于地势险峻,斑块被分割,破碎化严重,分维数也较高;在相对海拔小,坡度缓的地区,景观要素的分维数较低;但是在旅游活动频繁,建设项目集中的南部和东南部分维数值明显高于泰山的西北和东北部人为活动干扰弱的地区。地形的不同和人为干扰强度的差异也表现在各地区景观时空变化的结果上,如 2001 年南部的竹林寺地区,其分形维数值比 1986 年增加较多。

从表 3 可以看到,大部分地区的景观多样性随时间变化呈增加趋势,景观类型总的斑块数增加,总的斑块密度指数增加,反映了景区各种景观类型随时间变化更加丰富和复杂;只有巴山地区的景观多样性减少。但也看到,15a 来,这种变化幅度在各个地区并不相同,多样性的变化率为巴山(2.1%)<三岔(5%)<竹林寺 (3.9%)<扫帚峪(4%)<樱桃园(4.3%)<佛爷寺(6.3%)<桃花峪(8%)<泰前(8.1%),说明同一景区景观中各景观类型面积比例随时间变化不大,占据面积比例较大的森林景观类型并未遭到严重破坏,从表 3 还可发现,尽管各景区景观多样性指数变化所指示的景观生态意义是一致的,但不同景区同一时间多样性指数指标值差异较大。南部地区森林景观类型丰富,多样性指数较高;而北部地区松林占比例较大,多样性指数相对较小。与多样性相反,除巴山地区外在同一景区不同时期的优势度表现为递减趋势,扫帚峪景区 1986 年优势度最大为 1.33,这主要是因为松林在景观中起到主要支配作用所致。表明各个景区优势度递减的趋势基本相似,15a 来这种变化并不明显。表 3 还反映了两个景区破碎度的变化都随时间变化呈上升趋势,从单位面积斑块数来看,南部的竹林寺、桃花峪和泰前地区比中部北部的巴山、佛爷寺和三岔地区景观破碎化程度高,而且破碎度的变化率分别为 31.7%、30.6%、37.0%,变化较大;巴山、佛爷寺和三岔地区分别只有 10%、8.5%和 12%,变化较小。

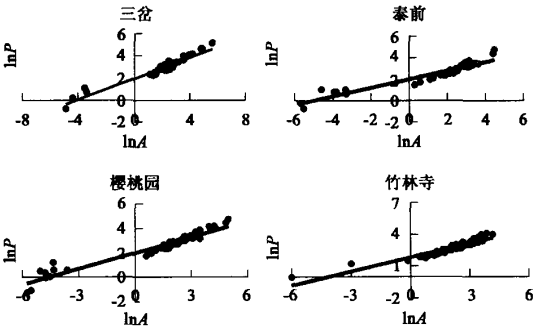

图 2　不同地区斑块面积与周长的双对数图

Fig. 2　The log-log of the areas and perimeters for landscape patches in the four selected zones

表 3　泰山 8 个地形区景观结构分析

Table 3　The analyses of landscape patterns analysis in different zone of Taishan Mountain

分区 Zone	1986 多样性指数 Diversity	1986 优势度 Dominance	1986 破碎度 Fragmentation	2001 多样性指数 Diversity	2001 优势度 Dominance	2001 破碎度 Fragmentation
三岔 Shanc zone	1.18	1.28	2.81	1.24	1.13	3.15
桃花峪 Taohy zone	2.08	1.19	3.88	2.26	1.07	5.07
竹林寺 Zhuls zone	2.32	1.16	3.91	2.40	1.06	5.15
扫帚峪 Saozy zone	1.75	1.33	3.17	1.82	1.37	3.58
泰前 Taiq zone	2.11	1.25	3.97	2.28	1.07	5.44
樱桃园 Yingty zone	2.08	1.14	3.42	2.17	1.08	4.17
佛爷寺 Foys zone	1.59	1.21	3.07	1.69	1.11	3.42
巴山 Bas zone	0.92	1.21	2.89	0.97	1.31	3.18

4　讨论

泰山景观中各个类型斑块的分形分析表明,除刺槐林因分布广,斑块形状复杂,分维数较高外,其他类型的差异不明显,且 15a 来的变化率也不大;主要是因为松林、侧柏、栎林平均斑块面积大,大的斑块对干扰过程有较高的缓冲能力,即同一过程可能导致中等斑块发生极大的变化,而大斑块很少变化。林业活动改造纯林,减少针叶林面积,使得针阔混交林斑块增加,分维数也升高;农业活动使荒地斑块在形状上相对规则,因而分维数降低。水体的面积减少,维数也减少;主要受人为活动影响的建筑斑块的空间格局也较复杂,分维数升高较快。结果表明,景观分维在度量景观及其变化上的具有综合性特征,分维的大小反映了区域内景观斑块的不规则程度和复杂程度,斑块越不规则、越复杂,其分维越大,反之亦然。不同时段的分维数,如本研究 1986 至 2001 年的分维变量可以表征景观结构在时间维上的空间变化。

由地区分维数的统计指标可见:在自然与区位条件好的南部地区,斑块个数多,平均面积小,景观类型多样。在高海拔地区

万方数据

景观斑块受控于地貌的变化，其分布也十分不规则。总体来看，地处中部、南部、东南和西南的三岔、竹林寺、泰前、樱桃园的景观斑块要比西北和东北部的巴山、扫帚峪、佛爷寺地区形状复杂。这是因为不同地区人类活动与自然因素的作用强度不同，人类活动空间扩展趋势明显。在地形条件好的地区人类活动频繁，其原来景观斑块的形状受人工景观的切割大大改变了景观类型的形状、结构和自然分布，以人类活动影响为主。而在高海拔地区人类活动空间受地形、地貌条件限制，则以自然因素作用为主，森林景观的分布仍遵循垂直地带性规律。人类活动通过增加或降低景观斑块的复杂性而改变景观结构。

References:

[1] Forman R. *Land Mosaics: the Ecology of Landscapes and Regions.* Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

[2] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical selfsimilarity and fractional dimension, *Science*, 1967, **156**(3775): 636～638.

[3] Krummel J R, Gardner R H, Susihara G, *et al.* Landscape pattern in a disturbed environment. *Oikos*, 1987, **48**(3): 321～324.

[4] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of vegetation pattern. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2000, **24**(1): 111～117.

[5] Zhang S R, Gong G S, *et al.* Analysis of landscape spatial patterns in the hill region in the west of Sichuan Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(2): 380～386.

[6] Dong L K. *Fractal Theory and Application.* Shenyang: Liaoning Science Press, 1991.

[7] Wu J G. *Landscape Ecology——Pattern, Process, Scale And Hierarchy.* Beijing: Higher Education Press, 2000.

[8] Li H & Reynolds J F. A new contagion index to quantify spatial pattern. *Landscape Ecology*, 1993, **8**: 155～162.

[9] O'Neill RV, Krummel J R, Gardner R V, *et al.* Indices of landscape Pattern. *Landscape Ecology*, 1998, **1**(3): 153～162.

参考文献:

[4] 马克明，祖元刚. 植被格局的分形特征. 植物生态学报，2000，**24**(1)：111～117.

[5] 张世熔，龚国淑，等. 川西丘陵区景观空间格局分析. 生态学报，2003，**23**(2)：380～386.

[6] 董连科. 分形理论及应用. 沈阳：辽宁科学出版社，1991.

[7] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京：高等教育出版社，2000.

万方数据