

哀牢山区哈尼梯田的分形特征

角媛梅¹, 杨丽萍²

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650092; 2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 以哀牢山区元阳县哈尼梯田为研究对象, 以快鸟影像为原始数据, 经矢量化得到小流域梯田田块分布图, 运用 Arcview 计算得到梯田边缘的计盒维数和信息维数。结果表明: (1) 各地貌单元尺度上的盒子边长 ε 与其对应的非空盒子数 $N(\varepsilon)$ 在双对数坐标下呈显著线性相关, 体现出标度不变性的特征, 证明梯田边缘是分形体; (2) 梯田形状具有多重自相似结构, 且不同尺度梯田形状的自相似程度受下覆地形限制, 其自相似结构单元是田块; (3) 在研究范围最大的小流域尺度, 信息维数最大, 梯田边缘的复杂性最高, 而在面积较小的坡面尺度上, 信息维数值较小, 梯田边缘则较简单、结构较清晰。另外, 作为刻画格局与过程独立于尺度的分形维数, 其应用还存在诸多难题。

关键词: 梯田; 分形; 计盒维数; 信息维数

文章编号: 1000-0933 (2007) 11-4583-07 中图分类号: Q149 文献标识码: A

The fractal characteristics of Hani terrace in Ailao Mountain

JIAO Yuan-Mei¹, YANG Li-Ping²

1 Tourist and Geography College of Yunnan Normal University, Kunming, 650092, China

2 Geography College of Fujian Normal University, Fuzhou, 350007, China

Acta Ecologica Sinica 2007, 27 (11): 4583 ~ 4589.

Abstract: With Hani terrace fields in the Quanfuzhang basins, Ailao Mountain in Yuanyang County as research area, this paper used the QuickBird Images as the input data for obtaining vector map of the distribution of terrace field plots. Arcview was used to calculate the box-counting dimension and information dimension of the terrace field edges. The results indicate that: (1) At four geomorphic unit scales, (a) the Quanfuzhuang basin, (b) the sub basin 21 and 22, (c) the terrace field patch 31, 32 and 33, and (d) the slope face 41, 42, 43 and 44, the side length (ε) of the box showed a significant linear correlation with the number of corresponding non-empty box $N(\varepsilon)$, which reflects the property of their scale variance and demonstrates that the edges of terrace fields are fractal. (2) The shapes of terrace fields have a multiple self-similar structure, the degree of self-similar terrace field shapes are limited by the underlying terrains and their self-similar structural units are field plots. (3) At the largest studied scale of the Quanfuzhuang basin, the information dimension is the largest and the complexity of terrace field edges is highest; At the smallest scale of the slope face, the information dimension is the smallest and the edges of terrace fields are simple and the structures are clear. However, fractal dimension as a measure, independent of scale, to describe the characteristics of the patterns and processes still has some problems in the practical application.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40401022); 云南省自然科学基金资助项目 (2004D0016Q)

收稿日期: 2006-08-25; 修订日期: 2007-08-23

作者简介: 角媛梅 (1972 ~) 女, 云南马龙人, 博士, 副教授, 主要从事景观生态研究. E-mail: ymjiao@sina.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40401022); Natural Science Foundation of Yunnan Province (No. 2004D0016Q)

Received date: 2006-08-25; **Accepted date**: 2007-08-23

Biography: JIAO Yuan-Mei, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in landscape ecology. E-mail: ymjiao@sina.com

Key Words : terrace field ; fractal ; box-counting dimension ; information dimension

景观由斑块组成,许多空间格局和生态过程都由斑块和斑块动态决定。斑块受自然和人为因素影响。人类影响的斑块面积大、形状单一、边界整齐且结构简单^[1]。种植斑块主要是由人类引种植物形成的,其中农田斑块是最基本的景观结构单元,其形态、功能和变化更应成为研究的重点^[2]。与景观格局和过程一样,斑块形态和功能也具有尺度依赖性,对于它们采用经典欧氏几何描述总是不准确或不全面。分形几何是刻画尺度依赖问题的有力工具^[3]。采用分形理论,寻找景观格局与过程、斑块形态与功能独立于尺度的特征(即自相似性),可提供全面反映其整体特征的指标^[4],并为解决生态现象尺度依赖性难题提供参考。

分形是指其组成部分以某种方式与整体相似的几何形态,或是在很宽的尺度范围内,无特征尺度却有自相似性和自仿射性的一种现象。分形维数是描述分形的特征量,是刻画分形体复杂结构的主要工具^[5]。由于自相似性普遍存在于客观的自然和社会领域及主观的思维领域,因而分形理论自 Mandelbrot 创立以来已广泛运用到地学、生物、物理、化学、材料工程、计算机科学和医学等领域,并在经济学、艺术学和社会学领域有良好的运用前景^[6]。分形维数在生态学中的运用集中在植物群落分布格局^[7~10]与生物量^[11,12]、生境破碎化与生物多样性保护^[13~15]、景观格局与斑块动态^[16~20]等方面,鲜见对农田斑块内部分形结构的研究。

广泛分布于云南省南部、哀牢山南段的哈尼梯田是以哈尼族为主的各民族利用当地独特自然条件而创造出的具有分形特性和极高美学价值的景观,因其“分布之广,规模之大,建造之奇,在中国独有,在世界罕见”而成为闻名中外的旅游地,已于2001年被国家建设部列入“世界遗产预备清单”。哈尼梯田之所以于20世纪末才为人所识,与1993年在元阳举行的首届哈尼文化国际学术研讨会及由法国著名导演扬·拉马执导的反映哀牢山哈尼族垦殖梯田的电影《山岭的雕塑家》在世界47个国家和地区的放映密不可分。之后,来自海内外的民族学者和社会学者充分研究和总结了哈尼族的世界观、民俗文化及梯田生产和管理方式、梯田稻作礼仪以及梯田历史^[21,22];自然科学方面,对哈尼梯田的形成原因、景观保护、湿地生态系统、聚落格局与耕作半径、景观格局及其美学特征^[23~26]等方面进行了讨论和分析,这些成果为进一步研究哈尼梯田提供了良好的基础。同时,以上研究表明,规模巨大的梯田是哈尼梯田景观的主体,梯田美丽线条构成的紧紧相连而又错落有致的层迭田片是旅游者的主要审美对象。由此可见,梯田线条(边缘)的特性及其美学意义是梯田景观价值的核心所在。因此,本文以元阳县胜村乡的全福庄梯田为研究对象,采用两个经典的分形维数——计盒维数和信息维数来刻画和分析该村梯田边缘的分形特征,探讨梯田边缘的分形特征与下伏地形、水文过程及人类(修筑)影响等因素的关系,以期对梯田景观的保护和区域的持续发展提供参考。

1 研究区概况

地处哀牢山南段的云南省红河哈尼族彝族自治州的元阳县以奇特的哈尼梯田景观闻名,梯田、云海、蘑菇房聚落浑然一体的美景已使之成为名扬海内外的观光胜地和摄影场所^[24]。目前,元阳县境内的坝达、多依树、麻栗寨、老虎嘴(猛品)4个梯田片区是红河州哈尼梯田保护区的核心区。元阳县胜村乡的全福庄梯田属于坝达梯田片区,是观赏梯田景观最易进入的核心地区,位于北纬23.09°~23.14°,东经102.72°~102.79°之间,研究中选取的梯田分布在海拔1470~1850 m之间,梯田面积共955316 m²,田块共有6541块,平均每块田的面积是146 m²,最大田块面积为2828 m²(为一平坦山顶),最小仅为5 m²(地处河谷边)。梯田(田埂)形状变化万千,有近圆形、近长方形、近正方形、近椭圆形的等无数形状,各不相同而又有异曲同工之妙,且它们均与地貌(主要是微地貌)如影随形,放眼望去,条条蜿蜒曲折而又溜光水滑的田埂与明镜般的田面相互映衬,确是一幅精美的分形画面,顺畅无比而又精致绝伦。

2 研究方法

2.1 数据与取样方法

本文的原始数据为2005年4月23日接收的分辨率为0.6 m的快鸟影像,运用 ArcView 经数字化获得全福庄梯田分布图(见图1)。从哈尼梯田景观格局的角度看,梯田是一种规模巨大的斑块类型,全福庄梯田属

于元阳梯田斑块中最大的一片,面积达 9132.6hm²。由于地形地貌、水文及人类影响程度的差异,斑块内部存在明显分异,导致不同尺度(范围)内的梯田形状显著不同^[27]。为探索不同尺度范围内各梯田单元的分形特征,研究中分别选取小流域、子流域、梯田片区和坡面四个不同范围的梯田田片为研究对象,具体的划分原则和基础如下:(1)在梯田分布区,梯田一般以天然河谷或人工水沟为界成片分布(山脊线附近往往由于田块跨越山脊而不能用作分区标准)。因此,研究中主要以两条天然河谷为界,数字化两河谷之间的梯田,此为小流域尺度;(2)然后,在小流域基础上,根据较小的天然河谷选取 2 个子流域 21 和 22,此为子流域尺度;(3)在子流域内,以人工水沟为界,选取 3 个梯田片区 31、32 和 33,它们都是位于山脊线附近的由两个坡面组成的相对独立的微地貌单元,此为梯田片区尺度;(4)最后,以天然河谷、人工水沟或山脊线为界,在小流域内选取 4 个小坡面 41、42、43 和 44 为最小地貌单元进行计算,各梯田坡面的位置、形状和复杂程度均有较大差异,是整个梯田局部形状的典型代表,此为坡面尺度。4 个尺度 10 个梯田片区的位置关系见图 1。

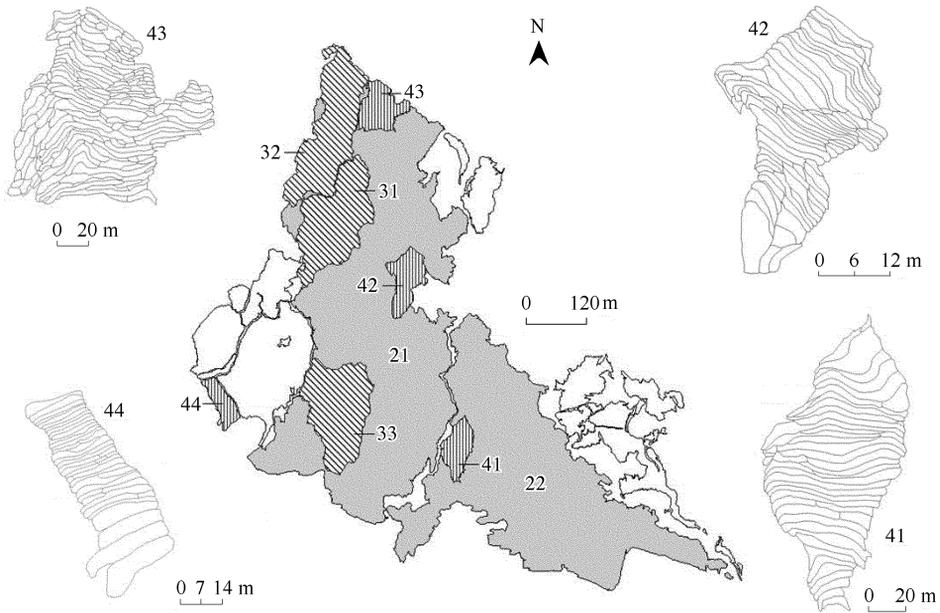


图 1 不同尺度上梯田片区的分布图

Fig. 1 The distribution map of terrace pieces at different scales

2.2 分形维数及其计算

(1) 计盒维数

计盒维数表征的是相同形状的小集合覆盖一个集合的效率。根据计盒维数计算公式:

$$D_b = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N(\varepsilon))}{-\log(\varepsilon)} \quad (1)$$

式中 D_b 为计盒维数, ε 为覆盖方格的边长, $N(\varepsilon)$ 为对应于划分尺度的非空盒子数。计算中,应用 Arcview3.2 将各梯田片区按其方格边长逐次格栅化,得到各梯田片区一系列不同方格边长 ε 的覆盖结果,将每次划分所得的非空格子数与对应的网格边长在双对数坐标下进行直线拟合,所得拟合直线斜率的绝对值为计盒维数。计盒维数揭示了梯田边缘在覆盖方格中的占据程度,其存在意味着梯田边缘具有统计自相似性。

(2) 信息维数

在对梯田边缘实施网格覆盖的过程中,计盒维数只考虑了每个格子中是否有梯田边缘存在,而对每个非空格子中到底有多少个单元梯田边缘未予区分。信息维数则将每一格子均给出一个概率密度,进而通过信息量公式 $I = -P_i \ln P_i$ 给出每一尺度与对应信息量的幂律关系。

根据信息维数计算公式:

$$D_I = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{I(\epsilon)}{\ln(\epsilon)} \tag{2}$$

式中, D_I 为信息维数 $I(\epsilon) = -\sum P_i \ln P_i$ 是覆盖方格边长为 ϵ 时的 Shannon 信息量, 其中 P_i 为梯田边缘落在第 i 个格子中的概率。计算中, 将 $I(\epsilon)$ 与相应的方格边长 (ϵ) 在双对数坐标下进行直线拟合, 所得拟合直线斜率的绝对值为信息维数。信息维数表征不同尺度上系统结构复杂性之间的联系和规律性, 揭示了系统结构复杂性的尺度变化程度。小的信息维数表明系统结构复杂性的尺度变化微弱, 结构简单; 大的信息维数则表明系统具有高的结构复杂性^[4]。因此, 高的梯田边缘信息维数表明梯田格局强度尺度变化强烈, 田块形状差异大。

根据分形维数的计算原理和方法, 在选取的包括 4 个尺度、共 10 个梯田片区的分形维数的计算过程中, 均以每个梯田片区的长边边长为基准, 分别选取其边长的 1/2、1/4、1/8、...、1/1024 为方格边长, 计算各梯田片区的计盒维数和信息维数 (具体方格数目及结果见表 1 和表 2)。

3 结果分析

3.1 梯田边缘的计盒维数与其标度不变性和自相似性

小流域尺度上的梯田边缘计盒维数计算结果见图 2, 不同尺度上梯田边缘计盒维数的计算结果见表 1。由图 2 和表 1 可见, 小流域、子流域、梯田田片和坡面 4 个尺度上的梯田边缘计盒维数线性关系均为显著相关, 说明梯田边缘具分形特性, 且具有典型的自相似特性。

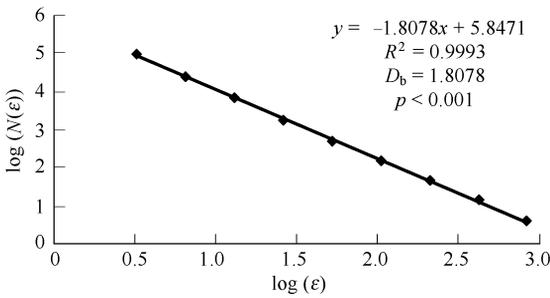


图 2 小流域尺度上的梯田边缘计盒维数

Fig. 2 The box-counting dimension of terrace edge at basin scale

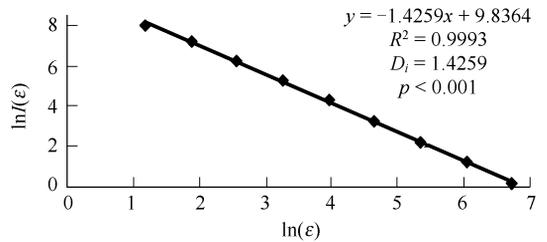


图 3 小流域尺度上的梯田边缘信息维数

Fig. 3 The information dimension of terrace edge at basin scale

如图 2 所示, 在面积最大、田块数目最多、形状最复杂的小流域尺度上, 双对数坐标上, 各点呈现出明显的线性分布特征, 随着盒子的增大, $\log(\epsilon)$ 和 $\log(N(\epsilon))$ 的比值基本保持不变, 计盒维数为 1.8078, 即具有标度不变性特征, 体现了梯田的分形性质。同时, 在子流域、梯田片区和坡面尺度上, 双对数坐标上, $\log(\epsilon)$ 和 $\log(N(\epsilon))$ 的比值也呈现出明显的线性分布特征, 它们的直线拟合公式见表 1。由表 1 可见, 由于 4 个尺度 10 个梯田片区的长边边长不同, 因而其边长的取值个数稍有差异。但不论是小流域、2 个子流域、3 个梯田片区还是 4 个坡面尺度上, 各计算单元相应的 $\log(\epsilon)$ 和 $\log(N(\epsilon))$ 均呈极显著线性相关, 显示出明显的标度不变性特征。因此, 可以用分形维数来表征梯田的形态特征。

如图 2 所示, 在小流域尺度上, 双对数坐标上拟合直线的相关系数为 0.9993 ($p < 0.001$), 显著相关, 表明梯田边缘具有自相似性。同时, 在子流域、梯田片区和坡面尺度上, 双对数坐标上拟合直线的相关系数均大于 0.99 ($p < 0.001$), 可见不同尺度上虽然梯田片区形状不一、大小不等, 但均存在自相似特性, 即具有多重自相似结构, 且不同尺度梯田形状的自相似程度受下覆地形限制, 其自相似结构单元是田块。事实上, 实际的梯田分布图也可以观察到梯田边缘的自相似特性。从快鸟影像上矢量化得到的梯田分布图 (图 1 中的 41、42、43 和 44) 可见, 无论地表是复杂多变的还是简单规律的坡面, 分布在 4 个坡面上的梯田均表现出以下相似性: A 田块大致沿东西方向延伸, 田片基本沿南北方向展布; B 田块的长度远大于宽度, 均呈现狭长形。据计算, 92.2% 的田块形状指数均大于正方形; C 田块的边缘均比较平滑; D 田片内部田块形状的变化取决于下覆地

形的变化,地形单元起伏越大,田片内部田块形状的变化越大(如图 1 中的 43)。反之地形单元起伏越小,则田块形状越相似(图 1 中的 44)。

表 1 不同尺度上的梯田边缘计盒维数

Table 1 The box-counting dimension of terrace edge at different scales

样本尺度 Sample Scale	r 取值数 No. of Box	样本边长 (m) Edge length of box	回归方程 Regression equation	相关系数 (R ²) Correlation	计盒维数 Box-counting dimension	信度 Significant level
小流域 Basin	9	1671	$y = -1.8078x + 5.8$	0.9993	1.8078	<0.001
子流域 Sub-basin	21	1426	$y = -1.8382x + 5.5699$	0.9995	1.8382	<0.001
	22	1035	$y = -1.7673x + 5.2564$	0.999	1.7673	<0.001
梯田田片 Terrace piece	31	399	$y = -1.7789x + 4.5692$	0.997	1.7789	<0.001
	32	477	$y = -1.7553x + 4.592$	0.998	1.7553	<0.001
	33	344	$y = -1.8182x + 4.5882$	0.9985	1.8182	<0.001
坡面 Slope	41	201	$y = -1.8557x + 4.0183$	0.9996	1.8557	<0.001
	42	213	$y = -1.7622x + 4.073$	0.9973	1.7622	<0.001
	43	167	$y = -1.8337x + 4.1129$	0.9998	1.8337	<0.001
	44	160	$y = -1.732x + 3.7867$	0.9966	1.732	<0.001

3.2 梯田边缘的信息维数与其复杂性

小流域尺度上的梯田边缘信息维数的计算结果见图 3,不同尺度上梯田边缘的 $\ln(\epsilon)$ 和 $\ln I(\epsilon)$ 在双对数坐标上的比值也呈现出明显的线性分布特征,它们的直线拟合公式和信息维数的计算结果见表 2。从图 3 可以看出,在双对数坐标系上,各点呈现出明显的线性分布特征,随着盒子尺度的变化, $\ln(\epsilon)$ 和 $\ln I(\epsilon)$ 的比值基本保持稳定,即具有标度不变性特征,表 2 中其它尺度上的信息维数也显示了同样的特征。由此可见,梯田形态特征确实具有分形性质,因此,可以用信息维数值来表征地貌形态特征。

由表 2 可见,在小流域、子流域、梯田片区和坡面尺度上,各尺度相应信息维数分别为: 1.4259 (小流域)、1.3808 (21)、1.3346 (22)、1.0897 (31)、1.2237 (32)、1.0944 (33)、1.0035 (41)、0.9622 (42)、1.1177 (43) 和 1.0207 (44),它们的直线拟合的相关系数均在 0.963 以上,均达显著相关 ($p < 0.001$)。由各尺度的信息维数值可见,小流域尺度上信息维数最大,约为 1.4;子流域 (21 和 22) 的值次之,均处于 1.3 左右;梯田片区和坡面两个尺度上的值差异不大,处于 0.96 ~ 1.22 之间。表现出研究范围越大,信息维数越大,梯田边缘的复杂性越高,不确定性越明显的特征。反之,在面积较小的坡面尺度上,4 个坡面的信息维数均接近 1,体现出梯田边缘较简单、结构较清晰的特征。究其原因,是因为局地地形在小流域范围内变化强烈,使梯田形状随地形起伏变化较大,而在较小的坡面范围内,地形的变化趋势比较一致,梯田形状也比较接近。

表 2 不同尺度上的梯田边缘信息维数

Table 2 The information dimension of terrace edge at different scales

样本尺度 Sample scale	回归方程 Regression equation	相关系数 R ² Correlation	信息维数 Information dimension	信度 Significant level
小流域 Basin	$y = -1.4259x + 9.8364$	0.9993	1.4259	<0.001
子流域 Sub-basin	21 $y = -1.3808x + 8.8959$	0.9979	1.3808	<0.001
	22 $y = -1.3346x + 8.4189$	0.9997	1.3346	<0.001
梯田田片 Terrace piece	31 $y = -1.0897x + 5.8423$	0.9963	1.0897	<0.001
	32 $y = -1.2237x + 6.5433$	0.9981	1.2237	<0.001
	33 $y = -1.0944x + 5.8099$	0.9978	1.0944	<0.001
坡面 Slope	41 $y = -1.0035x + 4.6032$	0.9631	1.0035	<0.001
	42 $y = -0.9622x + 4.7812$	0.9683	0.9622	<0.001
	43 $y = -1.1177x + 5.2918$	0.9948	1.1177	<0.001
	44 $y = -1.0207x + 4.7297$	0.997	1.0207	<0.001

3.3 梯田边缘计盒维数与信息维数的比较分析

比较表 1 和表 2 可见,梯田边缘的计盒维数与信息维数值有以下特点:A 4 个尺度上的计盒维数值均大于相应尺度的信息维数值;B 计盒维数值的大小与尺度(范围)的增大和减少无显著相关;C 信息维数值除坡面尺度上的 43 大于微地貌单元尺度的 31 和 33 外,其余均呈现出随尺度(范围)减少而信息维数降低的特点,即面积最大的小流域信息维数值最高,其后依次是子流域、微地貌单元和坡面尺度,体现出尺度(范围)越大则梯田边缘越复杂,反之则越简单的特点;D 坡面尺度上 42 的信息维数值小于 1,其余均大于 1,体现出小尺度上信息维数的复杂性。通过计算方法和过程可知,信息维数能更准确地反映梯田边缘在非格子中的比例,因而其值在四个尺度上都较低是合理的;正因为如此,计盒维数值与尺度变化的相关性较低,而信息维数与尺度变化呈显著相关,坡面尺度上 43 的信息维数偏高的主要原因是因为其内部的田块数目最多且面积差别小,同时 42 的信息维数值小于 1,说明小(坡面)尺度梯田边缘的复杂程度差异极大。

4 结论与讨论

(1)在小流域、子流域、梯田片区和坡面等 4 个尺度上,其相应的计盒维数、信息维数均体现出梯田边缘具有明显的标度不变性特征,充分说明梯田边缘是分形体,具有多重自相似结构,且其自相似单元是田块。一般而言,分维值越高说明分布现象愈复杂,各尺度的梯田边缘计盒维数值在 1.73 ~ 1.86 之间,信息维数在 0.96 ~ 1.42 之间,与分维值为 2.2 的地形^[3]相比,具有相对简单的特征。

(2)各尺度上的信息维数值显示,研究范围越大,其信息维数也大,梯田边缘的复杂性也高,不确定性也最明显,反之则值小,体现出随研究幅度的减小而下降的尺度效应。朱永清等^[27]的研究也表明,当像元尺度(边长)接近或小于 1 倍等高距时,信息维数随像元尺度(粒度)的增大表现出单调递减的趋势,也体现出了信息维数的尺度(粒度)效应特征。因此,未来的研究中应加强分形维数尺度效应方面的研究。

(3)哈尼梯田是由人工修造形成的独特农田斑块,是当地人根据具有分形特性的地形修筑而成,因而具有分形特性。首先,内营力作用使梯田在整个分布区内均沿等高线呈长条状分布。其次,局地地貌部位对梯田形状具有决定性影响。在地势起伏和缓、坡度较小的宽缓山坡上可修造田面较宽且长的田块(如图 1 中的 41),而越接近地形变化部位,如河(沟)谷附近、缓陡坡交界带等地形破碎区,则梯田田块面积小而边缘复杂(如图 1 中的 43)。除地形因素外,水文过程也是影响梯田边缘复杂性的重要因素。一般情况下,只要水源充足,哈尼梯田一年四季都淹水,田埂常年在水力作用下容易产生变形,因而水源条件好的梯田边缘形状比水源差的复杂,如图 1 中的 42 位于缺水的山坡上,干季常缺水,故其信息维数值偏低。此外,梯田乃人工修筑斑块,田块边缘形状也受人为修筑和维护程度的影响,距居民点近则边缘较简单(如图 1 中的 41 和 44),这也是梯田边缘比较光滑或分形维数低于原地形的根本原因。

总之,分形维数作为刻画格局与过程独立于尺度的特征指标,无疑具有重要的科学意义和应用前景。然而,分形维数的应用还存在诸多难题。首先,如何解释和分析分形维数在特定研究中的实际意义是应用中的难点;其次,分形维数的计算工作量大且计算过程复杂,如何确定计算路线并简化计算过程是广泛应用分形维数解决实际问题的瓶颈;第三,分形维数自身具有特定的几何与科学意义,但应与特定的研究目标相结合。如本研究中可应用梯田边缘的分形维数分析和解释梯田景观的美学特性。

References :

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* Principles and Application of Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2001. 43 - 54.
- [2] Xiao D N, Li X Z, Gao J, *et al.* Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2003. 33 - 35.
- [3] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman, San Francisc, 1982.
- [4] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of vegetation pattern. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24 (1): 111 - 117.
- [5] Sun X, Wu Z Q, Huang Y *et al.* Fractal theory and its application. Hefei: Chinese Science and Technology University Press, 2006.
- [6] Zhang J Z. Fractal. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [7] Ma K M, Zu Y G. Fractal properties of the spatial pattern of *Larix gmelini* population: Information dimension. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20 (2): 187 - 192.

- [8] Liang S C, Wang B S. Fractal characteristics of the height structure of *Bruguiera gymnorrhiza* population. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (4) :408—412.
- [9] Tian Y Q, Li X, Jiang M X. Fractal properties of the spatial pattern of rare and endangered plant populations in Houhe Nature Reserve. *Chin J Appl Eco*, 2003, 14 (5) :681—684.
- [10] Alados C L, Pueyo Y, Giner M L, et al. Quantitative characterization of the regressive ecological succession by fractal analysis of plant spatial patterns. *Ecological Modeling*, 2003, 163 :1—17.
- [11] He C Q, Zhao K Y. Fractal relationship between aboveground biomass and plant height or sheath height of *Carex lasiocarpa* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (4) :640—642.
- [12] Sun Z G, Liu J S, Wang J D. The Fractal characteristics of spatial structure of aboveground biomass in typical *Calamagrostis angustifolia* population in Sanjiang Plain. *Ecology and Environment*, 2006, 15 (4) :775—780.
- [13] Milne B T. Spatial aggregation and neutral models in fractal landscapes. *Nature*, 1992, 139, 32—57.
- [14] Riitters K H, O'Neill RV, Hunsaker C T, et al. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecol*, 1995, 10, 23—39.
- [15] Han O, Mark E R. Fragmented nature : consequences for biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58, 83—92.
- [16] Liu C R, Chen L Z. Landscape scale fractal analysis of patch shape in the vegetation of the Beijing region. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24 (2) :129—134.
- [17] Cheng Y C, Lee P J, Lee T Y. Self-similarity dimensions of the Taiwan Island landscape. *Computers & Geosciences*, 1999, 25, 1043—1050.
- [18] Li B L. Fractal geometry applications in description and analysis of patch patterns and patch dynamics. *Ecological Modeling*, 2000, 132, 33—50.
- [19] Yu S X, Guo L. Landscape structures and fractal analyses of Taishan Mountain, Shandong Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (1) :129—134.
- [20] Kojima N, Laba M, Liendo X M, et al. Causes of the apparent scale independence of fractal indices associated with forest fragmentation in Bolivia. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 61, 84—94.
- [21] Mao Y Q, Li Q B. Hani Nationality. Kunming : Nationality Press, 1989.
- [22] Wang Q H. Terrace Field Culture. Kunming : Yunnan University Press, 1999.
- [23] Jiao Y M, Zhang J Y. Analysis on the factor of steeper terrace field in Southwest China : a case of Hani terrace in South bank of Hong River. *Economic Geography*, 2000, 20 (4) :94—96.
- [24] Jiao Y M, Cheng G D, Xiao D N. The cultural landscape of Hani terrace and its protection. *Geography Research*, 2002, 21, 733—741.
- [25] Yao M, Cui B S. The vertical characteristics of ecosystem of Hani's terrace paddy field in Yunnan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (7) :2115—2124.
- [26] Jiao Y M, Yang Y J, Hu W Y, et al. Analysis on the landscape pattern and aesthetic characteristic of Hani terraced field. *Geography Research*, 2006, 25 (4) :624—632.
- [27] Zhu Y Q, Li Z B, Lu K X, et al. Relationship between fractal dimension of watershed topography characteristics and grid cell size. *ShuiLi Xuebao*, 2005, 36 (3) :333—338.

参考文献 :

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用. 北京 : 科学出版社, 2001. 43—54.
- [2] 肖笃宁, 李秀珍, 等. 景观生态学. 北京 : 科学出版社, 2003. 33—35.
- [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] 孙霞, 吴自勤, 黄响编著. 分形原理及其运用. 合肥 : 中国科学技术大学出版社, 2006.
- [6] 张济忠. 分形. 北京 : 清华大学出版社, 1995.
- [7] 马克明, 祖元刚. 兴安落叶松种群格局的分形特征 : 信息维数. *生态学报*, 2000, 20 (2) :187—192.
- [8] 梁士楚, 王伯荪. 红树植物木榄种群高度结构的分形特征. *植物生态学报*, 2002, 26 (4) :408—412.
- [9] 田玉强, 李新, 江明喜. 后河自然保护区珍稀濒危植物种群分布格局的分形特征 : 计盒维数. *应用生态学报*, 2003, 14 (5) :681—684.
- [11] 何池全, 赵魁义. 毛果苔草种群地上生物量与株长或鞘高分形特征. *应用生态学报*, 2003, 14 (4) :640—642.
- [12] 孙志高, 刘景双, 王金达. 三江平原典型小叶章种群地上生物量的空间结构分形特征. *生态环境*, 2006, 15 (4) :775—780.
- [16] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观斑块形状的分形分析. *植物生态学报*, 2000, 24 (2) :129—134.
- [19] 余世孝, 郭冻. 山东泰山地区景观结构变化及其分形分析. *生态学报*, 2005, 25 (1) :129—134.
- [21] 毛佑全, 李期博. 哈尼族. 昆明 : 民族出版社, 1989.
- [22] 王清华. 梯田文化论. 昆明 : 云南大学出版社, 1999.
- [23] 角媛梅, 张家元. 云贵川大坡度梯田形成原因探析——以红河南岸哈尼梯田为例. *经济地理*, 2000, 20 (4) :94—96.
- [24] 角媛梅, 程国栋, 肖笃宁. 哈尼梯田文化景观及其保护研究. *地理研究*, 2002, 21 (6) :733—741.
- [25] 姚敏, 崔保山. 哈尼梯田湿地生态系统的垂直特征. *生态学报*, 2006, 26 (7) :2115—2124.
- [26] 角媛梅, 杨有洁, 胡文英, 速少华. 哈尼梯田景观空间格局与美学特征分析. *地理研究*, 2006, 25 (4) :624—632.
- [27] 朱永清, 李占斌, 鲁克新, 崔灵周. 地貌形态特征分形信息维数与像元尺度关系研究. *水利学报*, 2005, 36 (3) :333—338.