

DOI: 10.5846/stxb201710091797

王美权, 黄宗胜, 邹军. 木本植物对喀斯特石质生境岩石形态结构的适应性. 生态学报, 2018, 38(21): - .

Wang M Q, Huang Z S, Zou J. The adaptability of woody plants to the rock morphostructure in karst rocky habitat. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(21): - .

木本植物对喀斯特石质生境岩石形态结构的适应性

王美权¹, 黄宗胜^{2,*}, 邹 军³

¹ 贵州大学林学院, 贵阳 550002

² 贵州大学建筑与城市规划学院, 贵阳 550002

摘要: 为弄清植物对喀斯特岩石形态结构的适应性, 选择 3 种岩石类型及 7 种木本群落为研究对象, 基于分形、空间句法理论研究岩石结构面孔裂隙形态结构及其与群落特征的关系。结果表明: 石灰岩结构面孔裂隙间隙度大、白云岩居中、白云质砂岩小, 分维数则反之; 白云质砂岩结构面孔裂隙整合度、控制值、密度值大, 白云岩居中, 石灰岩小; 白云岩生境下群落物种多样性及优势种碳、氮含量高、白云质砂岩次之、石灰岩低; 分形与空间句法指数间呈显著相关关系, 两者能较好的揭示岩石形态结构; 总体上 3 种岩石生境下物种多样性及优势种碳、氮含量与岩石结构面孔裂隙分形及空间句法指数具较强相关关系; 大致相同的环境下白云岩形态结构适宜植物生长、白云质砂岩次之、石灰岩差; 研究岩石形态结构对喀斯特植被恢复具有重要意义。

关键词: 喀斯特石质生境; 岩石形态结构; 植物适应性; 分形; 空间句法; 结构面孔裂隙

The adaptability of woody plants to the rock morphostructure in karst rocky habitat

WANG Meiquan¹, HUANG Zongsheng^{2,*}, ZOU Jun³

¹ College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, 550002, China

² School of Architecture And Urban Planning, Guizhou University, 550002, China

Abstract: The objective of this study was to characterize plant adaptation to the morphostructure of rock in karst areas. Selecting seven types of woody communities growing on three rock types (limestone, dolomite rock, dolomitic sandstone) as test objects, the fractal dimension and spatial syntax were adopted to study the morphostructure of cracks and pores of the rock structural plane, and its correlations with the characteristics of plant communities. Results indicated that the lacunarity index of cracks and pores of the limestone structural plane was the largest, that of dolomite was intermediate, and that of dolomitic sandstone was the smallest. The fractal dimension showed the opposite trend to that of the lacunarity index. With respect to the integration degree, control value, and density value of cracks and pores, the rocky structural plane of dolomitic sandstone was ranked as the largest, followed by that of dolomite, while that of limestone was the smallest. The species diversity and the carbon and nitrogen content of the dominant species in dolomite habitat were the highest, followed by those in the dolomitic sandstone habitat, while these were the lowest in the limestone habitat. The index of fractal dimension had a significant correlation with the index of spatial syntax, both of which could reveal the rock morphostructure well. In general, the species diversity index and the carbon and nitrogen content of the dominant species had a strong correlation with the fractal dimension index and the spatial syntax. Provided that the growing environment is similar, the rock morphostructure of dolomite was the most suitable for plant growth, followed by that of dolomitic sandstone. However,

基金项目: 国家自然科学基金(31560187); 贵州省应用基础重大项目(黔科合 JZ 字(2014)2002, 2009); 贵州省社会发展攻关项目(黔科合 SY 字(2012)3012); 贵州省农业攻关项目(黔科合 NY(2013)3055); 贵州大学人才引进项目(贵州大学基合字(2013)02)

收稿日期: 2017-10-09; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hzsxjh@126.com

the rock morphostructure of limestone was comparatively unfit for plant growth. It is necessary to study the rock morphostructure in karst areas for vegetation restoration in these areas.

Key Words: Karst rocky habitat; rock morphostructure; adaptation of vegetation; fractal dimension; spatial syntax; cracks and pores of rock structural plane

贵州喀斯特区,石漠化严重,土壤浅薄且不连续,成土速率慢^[1],生态环境恶劣,生境空间异质性显著,生态环境一旦遭受破坏则难以恢复,严重影响生态平衡及生态经济发展^[2]。喀斯特地区主要岩性为碳酸盐岩,碳酸盐岩因结构、成因不同,其溶蚀过程及机理形成也不同,直接造成它们在溶蚀作用下形成孔裂隙类型上的差异^[3]。白云岩及白云质砂岩硬度大,易破碎,以物理风化为主,石灰岩以溶蚀作用为主,在受力时节理裂隙分布很不均匀,易形成大小不同、形状较为复杂的岩石裂缝和洞穴系统^[4],大气中的二氧化碳及降水加速了岩石孔裂隙的形成。由于碳酸盐岩呈多孔裂隙结构,造成土壤漏失,难以附着于岩石表面,导致基岩上覆盖的粘土层非常少,极易被破坏,至使岩石裸露,形成石漠化^[5],一些近地面的孔裂隙不断被表层土壤所填充,形成可供植被生长的多层空间^[6],植被凭借较强的根系穿串能力,将根系扎根于岩石孔裂隙之中,获取孔裂隙中的水分及营养,不同类型的岩石形态结构是否影响植物的生长及群落分布,至今极少有学者关注。因此,研究岩石形态结构与喀斯特岩溶地区植被生长、养分水分利用,对喀斯特区植被恢复、生态修复等具有重要意义。近年来,学者对岩溶区植被对生境的适应性研究主要集中在地下生境^[6]、土壤质量^[7]、干旱胁迫^[8]等对于植物生理生态特征的影响,也有关于大范围喀斯特地貌特征及机理形成过程的相关研究^[9],然而植物对岩石形态结构的适应性研究极少。基于此,本研究以喀斯特石质生境下植物及岩石为研究对象,采用室内外实验相结合的研究方法,对植物生理生态、岩石形态结构等开展研究,以期揭示不同岩性植物生理生态特性、岩石形态结构特征,探讨不同岩性下植物生理生态特征与岩石形态结构特征之间的关系,进一步弄清楚植物对喀斯特石质生境岩石形态结构的适应性,旨在为更好地揭示植物对喀斯特石质生境适应机理提供理论依据,为丰富喀斯特石漠化地区植被恢复的理论与实践提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本次研究区分别位于贵州省凯里市凯棠乡(26.58°N, 107.97°E),关岭县花江镇普利乡(25.56°N, 105.37°E)及修文县龙场镇沙溪村(26.50°N, 106.35°E),森林覆盖率分别为56%、35%、44%,海拔高度分别为532—1447m、650—1270m、666—1616m,气候类型同属亚热带季风湿润气候,年均温为凯棠乡13.6—16.2℃、普利乡13.2—16.3℃、沙溪村13.2—15.8℃,年降雨量为凯棠乡1240mm、普利乡1205mm、沙溪村1250mm,空气相对湿度为凯棠乡62%、普利乡70%、沙溪村58%,日照时数为凯棠乡1288h、普利乡1164h、沙溪村1114h,无霜期为凯棠乡289d、普利乡288d、沙溪村285d。三地地处喀斯特岩溶区,碳酸盐岩分布广泛,属岩石裸露型地貌。研究区内植被丰富,少数地域为中亚热带原生性喀斯特森林,主要为常绿落叶阔叶混交林,多数地域为不同程度退化的演替群落,其中以灌草为主。主要岩石类型为石灰岩(普利乡)、白云质砂岩(凯棠乡)、白云岩(沙溪村)。土壤类型多样,有黄壤、黄棕壤、石灰土等,土面上层浅薄且不连续,地表易缺水,土壤持水性差,肥力强,表层含有大量腐殖质及微生物。整体生境具有较强的空间异质性,适合多种类型植被的生长。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及依据

样地选择主要根据《贵州省岩性分布图》^[10]及实地调查选择3种典型岩性样地,并依据贵州省二类森林资源调查数据,结合实地调研,确定3个不同地点样地具有相同植物优势种。3种典型样地分别位于石灰岩(普利乡)、白云岩(沙溪村)、白云质砂岩(凯棠乡),调查样地按照群落最上层优势种划分群落类型,每种群

落设置 3 个重复,其中石灰岩地区 7 种群落类型,分别为马桑(*Coriaria nepalensis*)、光皮桦(*Betula luminifera*)、园果化香(*Platycarya strobilacea*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、柏木(*Cupressus funebris*)、桤木(*Alnus cremastogyne*)、白花刺(*Morina nepalensis*),共 21 块样地。白云岩地区 5 种群落类型:柏木、猴樟、光皮桦、马桑、桤木,共计 15 块样地。白云质砂岩地区 4 种群落类型:马桑、猴樟、柏木、园果化香,共 12 块样地。3 种岩石类型共计 48 块样地。将每个调查样地面积设为 $20\text{m} \times 20\text{m}$,即 400m^2 ^[11],再将每个样地划分成 10 个 $4\text{m} \times 10\text{m}$ 的小样方,按群落垂直结构分为乔木层、灌木层,分别进行比较分析。在每个样地中各取乔木层、灌木层 3 株标准木,采集根、枝、叶、枯落物各部位样品,置于 80°C 烘箱内,烘干至恒定质量,进行相关元素含量测定。样地基本情况见表 1。

1.2.2 样地调查

(1) 群落调查

样地群落调查采用常规的群落调查方法^[12],对每块样地内的树种进行记录,包括乔木层和灌木层的种类、株数,根据样地记录数据,计算每个样地不同物种的多度,并以物种多度为基础,计算物种多样性指数,本研究采用的测度指标为 α 多样性指数,包括 Shannon-Wiener 香浓维纳指数 H 、Simpson 辛普森指数 D 、Pielou 均匀度指数 J 、丰富度指数 RI 、生态优势度指数 λ ^[13],各样地因乔木物种数较少,故所有多样性指数均不分乔木层和灌木层,以统一的木本植物为计算依据。公式如下:

$$\text{Abundance 多度} = p_i = n_i / N \quad (1)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(H) = -\sum p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

$$\text{Simpson 指数}(D) = 1 - \sum (n_i / N)^2 \quad (3)$$

$$\text{pielou 均匀度指数}(J) = -\sum H / \log_2 S \quad (4)$$

$$\text{丰富度}(RI) = (S-1) / \log_2 N \quad (5)$$

$$\text{生态优势度}(\lambda) = \sum n_i(n_i-1) / N(N-1) \quad (6)$$

式中, $p_i = n_i / N$, $i = 1, 2, 3 \dots n$; n_i 为第 i 个物种的个体数; N 为所有物种的个体数总数; S 为样地中物种数目。

(2) 岩石调查

岩石类型的调查采用现场识别及稀盐酸检测^[5]的方法辨别岩性,采用测线法对结构面的迹长、隙间距及张开度等结构面的形态特征进行调查^[14],并拍摄岩石结构面孔裂隙现状照片,群落中岩石结构面样方面积设为 10m^2 ^[15],回到室内实验室后,依据测线法所测数据,并结合现状照片,在 AutoCAD 软件中绘制岩石结构面孔裂隙平面图。

1.2.3 植物碳(C)、氮(N)含量测定

将采集的植物(根、枝、杆、叶、枯落物)样品放置 80°C 烘箱,烘干至恒重,利用四分法 3 次磨碎、100 目过筛后保存于自封袋中用于测定,采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 硫酸外加热法^[2]测定全碳含量^[2],采用凯氏消煮法^[16]测定全氮含量。

1.2.4 岩石结构面孔裂隙形态结构测定

岩石内部的形态结构可由岩石结构面及其孔裂隙形态结构来表征。依据岩石调查中绘制的岩石结构面孔裂隙平面图,结合现状调查照片记录的岩石结构面孔裂隙形态特征,之后再运用 AutoCAD 勾绘岩石结构面孔裂隙,由于岩石的孔裂隙即包含结构面节理孔裂隙,又包含碳酸盐岩溶蚀等其它作用而得的孔裂隙,因此最后所得的岩石结构面孔裂隙图是由结构面和其它孔裂隙共同组成的综合平面图,为便于称呼将其统称为结构面孔裂隙。运用空间句法分析结构面孔裂隙的结构特征,空间句法是建立在拓扑学基础上,用于研究对象间的各种关系,空间句法中的“轴线法”可以将空间用轴线来表征,即“将空间结构转译为轴线图”^[17],故可将每条岩石结构面孔裂隙空间结构用轴线代替,将轴线关系简化成拓扑学表达法,做空间重映射,然后运用 Depthmap 软件生成图像并对图像进行数据处理(整合度、控制值、密度值)以表征岩石结构面孔裂隙的结构特征,其中整合度可以定义为度量每条线段距离其它所有线段有多近,或理解为从其它所有线段到达该线段的

容易程度^[18],控制值表示某一空间与之相交空间的控制程度,密度值是指单位面积内线段数量。以上整合度值、控制值、密度值均为总体平均值。

应用容量维数、间隙度分析岩石结构面的肌理形态特征。分形维数是分形几何学定量描述分形集合特征和几何复杂程度的重要参数^[19],主要包括容量维数、信息维数、相关维数 3 种,本文主要采用容量维数(覆盖法)分析岩体结构面分布特征,岩体结构面孔裂隙分形维数越小,结构面分布越稀疏,分形维数越大,结构面分布越越密集^[20]。容量维数的计算步骤为:设 F 为平面上的一个有界点集,总可以找到一个矩形将 F 包含其中,将矩形分割成若干个边长为 r 的小方格, F 占领的小方格数为 $N(r)$,则容量维数运算如下^[21]:

$$\text{容量维数: } Dc(F) = \lim_{r \rightarrow 0} \ln(N(r)) / \ln(1/r) \quad (7)$$

间隙度主要运用于景观生态学中,是建立在格子图的基础上,其指数直接受观测方格大小及研究斑块密度和形状的影响,将岩石结构面孔裂隙近似看作研究斑块,运用移动格子法^[21]求间隙度指数,在相同尺度下,间隙度越大,说明研究对象(斑块)分布越聚集;间隙度越小,分布越均匀。间隙度的计算步骤为:设有一张格子图覆盖所有岩石孔裂隙,每个小格子边长设为一个单位(每块岩面的取样面积为 10 m^2 ,将其划分为 1000 个小格子,则每个小格子边长为 0.1 m),然后将一个边长为 $r \times r$ 个单位的方格放在岩面图的左上角($r \times r$ 为大于或等于 2 的整数单位)。在方格覆盖下的格子中, S 为研究对象占据大格子的数目(一个大格子由四个小格子组成,每次上下、左右移动一个小格),这样就得到随大方格(边长= r)移动而获得的数值,记作 $n(S, r)$,将岩面上可容纳边长为 r 的方格总数记作 $N(r)$,则间隙度运算如下^[22]:

$$N(r) = (M - r + 1)^2 \quad (8)$$

在式(8)中 M 为岩面图的边界长度,将 $n(s, r)$ 的频率分布转为概率分布 $Q(S, r)$:

$$Q(S, r) = n(S, r) / N(r) \quad (9)$$

则 $Q(S, r)$ 的均方差和方差分别为:

$$Z^{(8)} = \sum S Q(S, r) = S(r) \quad (10)$$

$$Z^{(9)} = \sum S^2 Q(S, r) = S_s^2(r) + S^2(r) \quad (11)$$

则 Mandelbent 将间隙度定义为:

$$\Lambda(r) = Z / Z^2 = S_s^2(r) / S^2(r) + 1 \quad (12)$$

依据公式(8)——(12)求间隙度指数的过程,称为移动格子法。

1.3 数据处理

通过 Excel、Depthmap、SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异,显著性水平 $\alpha = 0.05$,采用相关性双变量分析法比较不同数据组间的相关性。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石质生境 3 种类型岩石外观及结构面孔裂隙形态特征

通过查阅文献及现状调查分析可知:白云岩色泽呈灰白色,整体产状和风化作用明显,主要呈刀砍状,分化后沿节理破碎,形成颗粒状,与地表层土壤相连紧密,土层厚度均匀,易形成表层发育的生态空间,与浓度为 10% 浓度稀盐酸反应微起泡^[23];石灰岩呈深灰色或灰色,结构面破碎,孔隙较多,整体产状不明显,呈多层性,但局部产状明显,风化作用具有明显差异性,导致土层厚度不均且不连续,难以形成表层生态空间,植物生长利用空间复杂多样,根系主要沿岩石结构面孔裂隙寻找土壤和水源,岩石与浓度为 10% 的稀盐酸反应后,气泡反应剧烈;白云质砂岩是白云岩与砂岩的混合,其中砂岩成分不少于 50%,呈灰白色,感官上粗糙,沙粒清楚,与浓度为 10% 的稀盐酸作用几乎无反应。

表 1 样地基本情况调查表

Table 1 Basic information of the plots												
岩性 Lithology	地理坐标 Geographical coordinates	土壤类型 Soil type	坡度 Slope	海拔 Elevation/ m	坡向 Direction	优势种 Dominate species	起源 Origin	植被特征 Vegetation characteristic	岩石裸露率% Rock exposure rate	生境 Habitat	林龄 Tree age/a	样方数 Sample
石灰岩 Limestone	105°33'E, 25°58'N	黄壤	25°	1230m	NE	马桑	天然	层次结构单一,有少量乔木,以灌木层为主,植被高1—4m,盖度达70%,地表有较多藤刺	40.23	石面、石沟	10	3
石灰岩 Limestone	105°34'E, 25°46'N	黄壤	10°	1404m	NE	光皮桦	人工	层次结构完整,乔木层覆盖度占40%,高度为8m,灌木层占20%	35.52	石面、石沟、石缝	16	3
石灰岩 Limestone	105°30'E, 25°48'N	石灰土	60°	1581m	S	园果化香	天然	层次结构较单一,灌木层发达,覆盖度达40%,植被高1.8m	70.22	石面、石缝	14	3
石灰岩 Limestone	105°28'E, 25°55'N	黄壤	15°	1432m	SE	猴樟	人工	层次结构完整,群落植被整体覆盖度较低为65%,其中乔木层覆盖度35%,灌木层为10%,植被高3—8m,地表少量藤刺	60.23	石面、石沟、石缝、土面	16	3
石灰岩 Limestone	105°28'E, 25°55'N	石灰土	45°	1545m	NE	柏木	人工	群落中乔木层、灌木层覆盖度较低,分别为40%及10%,植被高度为4—8m	85.32	石面、石缝、石沟	16	3
石灰岩 Limestone	105°28'E, 25°55'N	黄壤	25°	1468m	NE	桉木	天然	群落层次分化明显,乔木层发达,覆盖度达90%,平均高度为13m,灌木层盖度较低占20%,地表有少量藤刺,蕨类及苔藓植物分布	60.12	土面、石缝、石沟	20	3
石灰岩 Limestone	105°28'E, 25°55'N	黄壤	15°	1094m	NW	白花刺	天然	林分层次结构单一,无或者者有少量乔木,主要以灌木层及草本层为主,其中灌木层覆盖度为30%,植被高度为1.5—3m	10.26	土面、石沟	8	3
白云质砂岩 Domilite sandstone	107°59'E, 26°30'N	黄壤	45°	668m	NW	园果化香	天然	层次结构较单一,以灌木层为主,灌木层覆盖度为30%,平均高度1.8m,草本盖度高达80%,地表有少量藤刺及苔藓分布	45.25	碎砂岩	13	3
白云质砂岩 Domilite sandstone	107°59'E, 26°30'N	黄壤	30°	622m	NW	马桑	天然	层次结构较单一,主要为灌木层为主,灌木层覆盖度为50%,植被高度为1.5—3m	10.06	碎砂岩	10	3
白云质砂岩 Domilite sandstone	107°59'E, 26°34'N	黄壤	38°	615m	NW	猴樟	人工	群落层次结构完整,主要以乔木层为主,乔木层覆盖度为60%,灌木层覆盖度最低仅为20%,植被高度为1.5—6.5m	55.22	碎砂岩	13	3
白云质砂岩 Domilite sandstone	107°28'E, 25°72'N	黄壤	30°	626m	NW	柏木	人工	群落层次结构完整,乔木层最为发达,其覆盖度为75%,高4—6m,其次为灌木层,覆盖度为40%,地表少量藤刺植被	75.23	碎砂岩	38	3
白云岩 Domilite	106°35'E, 26°51'N	黄壤	25°	1350m	NW	桉木	人工	群落层次结构完整,乔木层覆盖度70%,灌木层覆盖度40%,植被高度5—8m	5.91	石面	15	3
白云岩 Domilite	106°33'E, 26°50'N	黄壤	40°	1414m	NE	柏木	人工	群落层次结构完整,乔木层盖度65%,植被高度为4—5m,地表少量枯落物	80.31	石沟、石面	16	3
白云岩 Domilite	105°28'E, 25°55'N	黄壤	10°	1283m	NE	马桑	天然	群落层次主要为灌木和草本,其灌木层覆盖度为40%,植被高度1.5—3m,地表面较少藤刺植被,苔藓、蕨类植被相对分布较多	30.72	石沟、石面、土面	10	3
白云岩 Domilite	106°33'E, 26°50'N	黄壤	25°	1358m	E	猴樟	人工	群落层次结构完整,乔木层覆盖度占70%,植被高度为4.5m	10.68	土面	16	3
白云岩 Domilite	106°33'E, 26°50'N	黄棕土	15°	1368m	NE	光皮桦	人工	群落层次结构完整,乔木层覆盖度占60%,植被高2.5—8m,地表枯落物较多	85.00	石面、土面	16	3

由表 2 及现状调查分析可知:石灰岩结构面孔裂隙间隙度值总体最大(1.1301—1.4245),分布最聚集,总体孔隙较多,裂隙清晰且较少,由明显 3 到 4 条主裂隙分别组成几组相对独立的网脉系统且成片分布,各网脉系统之间几乎没有或通过极少数次级裂隙连接,连通性较差,其各个群落内岩石结构面孔裂隙间隙度从大到小依次为:桉木、白花刺、马桑、柏木、猴樟、光皮桦、园果化香;白云岩间隙度指数(1.0594—1.1316)仅次于石灰岩,裂隙数相对较多有明显主裂隙,分布相对分散,连通性较好,其间隙度从大到小依次为:桉木、柏木、猴樟、光皮桦、马桑;白云质砂岩间隙度指数(1.0052—1.0209)最小,结构面形态分布最均匀(呈零星分布),结构面破碎且无明显主裂隙,裂隙数最多,连通性最强,其间隙度从大到依次为:猴樟、柏木、园果化香、马桑。以上结果表明,桉木、白花刺、柏木较易生长在孔裂隙分布较集中的岩石结构面中,而光皮桦、园果化香更适宜生长在孔裂隙均匀分布的岩石结构面中,马桑、猴樟则较少受结构面孔裂隙分布形式的影响。由此反映出结构面孔裂隙聚散分布形式不同,生长的植物类型也不同。

表 2 不同岩石结构面孔裂隙间隙度指数
Table 2 Lacunarity-index of crack and pores of rock structural plane in different types of rocks(mean±SD)

岩性 Lithology	群落类型 Plant community	样方数 Quadrat	间隙度值 Lacunarity-index	岩性 Lithology	群落类型 Plant community	样方数 Quadrat	间隙度值 Lacunarity-index
石灰岩 Limestone	园果化香	3	1.1301±0.0327	白云岩 Domilite	猴樟	3	1.1121±0.0040
石灰岩 Limestone	光皮桦	3	1.1684±0.0011	白云岩 Domilite	柏木	3	1.1207±0.0038
石灰岩 Limestone	猴樟	3	1.1686±0.0049	白云岩 Domilite	马桑	3	1.0594±0.0190
石灰岩 Limestone	柏木	3	1.1942±0.0148	白云岩 Domilite	桉木	3	1.1316±0.0100
石灰岩 Limestone	马桑	3	1.1994±0.0535	白云质砂岩 Domilitic sandstone	园果化香	3	1.0141±0.0007
石灰岩 Limestone	白花刺	3	1.2349±0.0220	白云质砂岩 Domilitic sandstone	马桑	3	1.0052±0.0004
石灰岩 Limestone	桉木	3	1.4245±0.0506	白云质砂岩 Domilitic sandstone	柏木	3	1.0159±0.0009
白云岩 Domilite	光皮桦	3	1.0948±0.0250	白云质砂岩 Domilitic sandstone	猴樟	3	1.0209±0.0029

2.2 喀斯特石质生境岩石结构面孔裂隙结构特征

由表 3 可知,总体上,整合度、控制值、密度值样地所有指标从大到小依次为:白云质砂岩、白云岩、石灰岩,这表明白云质砂岩的空间可达性最高,结构面孔裂隙之间相互连接紧密,结构面孔裂隙数量较多且分布密集,节点与邻接节点的个数较多,结构面孔裂隙网络系统整体控制性强,反之亦然。石灰岩则相反,空间的可达性较低,连接不紧密且平均密度较低,节点之间的连接数较少,故整体控制性较弱。白云岩居于白云质砂岩与石灰岩之间。

2.3 三种类型岩石结构面孔裂隙渗透性特征

由表 4 可知,白云质砂岩结构面孔裂隙分形维数(1.6761—1.6942)最大,分布密集,肌理破碎,裂隙多,结构面间连通性最大,故水分可通过大量裂隙渗透,其各个群落内岩石结构面孔裂隙分形维数从大到小依次为:马桑、园果化香、柏木、猴樟;白云岩分形维数(1.6514—1.6682)仅次于白云质砂岩,其分形维数大小排序依次为:马桑、光皮桦、柏木、桉木、猴樟;最小为石灰岩(1.4954—1.6574),孔裂隙分布稀疏,连通性差,水分主要通过少数 3—4 条主裂隙渗透,其分形维数从大到小依次为:光皮桦、园果化香、马桑、猴樟、柏木、白花刺、桉木,以上结果表明,白云质砂岩渗透性强,白云岩次之,石灰岩最差。这与空间句法的密度值、连接值等所表明的结果一致。

2.4 喀斯特石质生境不同岩性植物群落物种多样性

由表 1 可知,除少数同类型群落林龄相差较大外(如柏木),其它多数群落林龄均属于相同龄级,故林龄导致的各指标差异可忽略不计。表 5 显示:从岩性看,总体上白云岩上群落物种多样性指数最高、白云质砂岩

次之、石灰岩最低;石灰岩上,桉木群落与白花刺群落物种多样性指数高,柏木群落与猴樟群落居中,园果化香群落与马桑群落、光皮桦群落最低,这说明在石灰岩上除白花刺外常绿树种多样性指数高于落叶树种;白云岩上,乔木群落之间物种多样性指数没有明显差异,但乔木群落物种多样性指数要高于灌木群落,说明白云岩上乔木群落长势基本一致;白云质砂岩上,猴樟群落与柏木群落物种多样性指数高于园果化香和马桑群落,说明白云质砂岩上常绿树种的生长优势高于落叶树种。综上所述表明岩石种类不同,植物适应性不同,同一岩性上植物不同亦表现出不同的适应性。

表 3 不同岩石结构面孔裂隙空间句法指标值

Table 3 spatial syntax of crack and pores of rock structural plane in different types of rocks (mean±SD)

岩性 Lithology	群落类型 Plant community	样方数 Quadrat	整合度 Integration value	控制值 Control value	密度值 Density value	线段数 Segment
白云岩 Domilite	光皮桦	3	0.907±0.0028	1.016±0.0028	6.585±0.0029	93±3.56
白云岩 Domilite	马桑	3	0.882±0.0022	0.983±0.0035	6.562±0.0036	92±2.67
白云岩 Domilite	柏木	3	0.866±0.0043	0.968±0.0014	6.347±0.0886	92±2.67
白云岩 Domilite	桉木	3	0.854±0.0035	0.967±0.0062	6.271±0.0034	88±3.45
白云岩 Domilite	猴樟	3	0.827±0.0064	0.964±0.0028	6.216±0.0079	85±3.74
石灰岩 Limestone	光皮桦	3	0.714±0.0083	0.965±0.0041	4.712±0.0035	75±4.22
石灰岩 Limestone	园果化香	3	0.707±0.0057	0.963±0.0026	4.523±0.0087	71±2.28
石灰岩 Limestone	猴樟	3	0.680±0.0039	0.955±0.0036	4.488±0.0085	69±2.17
石灰岩 Limestone	马桑	3	0.673±0.0021	0.950±0.0045	4.453±0.0023	67±1.63
石灰岩 Limestone	柏木	3	0.672±0.0086	0.942±0.0035	4.451±0.0127	66±1.68
石灰岩 Limestone	白花刺	3	0.661±0.0028	0.942±0.0035	4.418±0.0065	65±3.58
石灰岩 Limestone	桉木	3	0.659±0.0045	0.940±0.0038	4.382±0.0088	61±2.67
白云质砂岩 Domilitic sandstone	马桑	3	1.403±0.0064	1.033±0.0064	7.239±0.0079	106±5.83
白云质砂岩 Domilitic sandstone	园果化香	3	1.369±0.0028	0.984±0.0028	6.98±0.0032	100±3.56
白云质砂岩 Domilitic sandstone	柏木	3	1.335±0.0043	0.977±0.0035	6.975±0.0085	98±3.45
白云质砂岩 Domilitic sandstone	猴樟	3	1.289±0.0042	0.973±0.0036	6.966±0.0045	86±7.12

表 4 不同岩石结构面孔裂隙分形维数

Table 4 Fractal dimension of crack and pores of rock structural plane on different types of rocks (mean±SD)

岩性 Lithology	群落类型 Plant community	样方数 Quadrat	分形维数值 Fractal dimension	岩性 Lithology	群落类型 Plant community	样方数 Quadrat	分形维数值 Fractal dimension
石灰岩 Limestone	马桑	3	1.6121±0.0105	白云岩 Domilite	猴樟	3	1.6514±0.0111
石灰岩 Limestone	柏木	3	1.5270±0.0059	白云岩 Domilite	桉木	3	1.6572±0.0133
石灰岩 Limestone	桉木	3	1.4954±0.0225	白云岩 Domilite	柏木	3	1.6620±0.0092
石灰岩 Limestone	光皮桦	3	1.6574±0.0111	白云岩 Domilite	马桑	3	1.6682±0.0082
石灰岩 Limestone	猴樟	3	1.6115±0.0333	白云质砂岩 Domilitic sandstone	马桑	3	1.6942±0.0062
石灰岩 Limestone	园果化香	3	1.6412±0.0085	白云质砂岩 Domilitic sandstone	园果化香	3	1.6836±0.0069
石灰岩 Limestone	白花刺	3	1.5153±0.0004	白云质砂岩 Domilitic sandstone	柏木	3	1.6807±0.0060
白云岩 Domilite	光皮桦	3	1.6671±0.0062	白云质砂岩 Domilitic sandstone	猴樟	3	1.6761±0.0044

表 5 不同岩性生境木本植物物种多样性
Table 5 Woody plant species diversity in different types of rock habitat (mean±SD)

岩性 Lithology	群落类型 Plant community	S	D	H	RI	J	λ	备注 Remark
石灰岩 Limestone	园果化香	7	0.58±0.012	1.70±0.045	0.73±0.026	0.57±0.017	0.35±0.014	乔灌
石灰岩 Limestone	马桑	6	0.62±0.018	1.93±0.005	0.83±0.006	0.78±0.005	0.29±0.005	乔灌
石灰岩 Limestone	光皮桦	12	0.69±0.005	2.06±0.042	1.57±0.006	0.57±0.025	0.38±0.018	乔灌
石灰岩 Limestone	猴樟	9	0.70±0.018	2.23±0.025	1.26±0.009	0.70±0.028	0.29±0.016	乔灌
石灰岩 Limestone	柏木	10	0.76±0.041	2.37±0.037	1.14±0.005	0.52±0.006	0.24±0.023	乔灌
石灰岩 Limestone	白花刺	12	0.78±0.008	2.76±0.027	1.46±0.021	0.26±0.018	0.23±0.015	乔灌
石灰岩 Limestone	桤木	17	0.84±0.005	3.06±0.026	1.94±0.008	0.77±0.025	0.15±0.017	乔灌
白云质砂岩 Domilitic sandstone	马桑	7	0.67±0.034	2.07±0.056	1.02±0.083	0.74±0.026	0.32±0.042	乔灌
白云质砂岩 Domilitic sandstone	园果化香	11	0.76±0.021	2.62±0.063	1.38±0.024	0.76±0.015	0.23±0.032	乔灌
白云质砂岩 Domilitic sandstone	柏木	14	0.83±0.008	2.93±0.050	1.46±0.040	0.81±0.016	0.17±0.015	乔灌
白云质砂岩 Domilitic sandstone	猴樟	16	0.86±0.020	3.01±0.043	1.54±0.032	0.81±0.012	0.18±0.006	乔灌
白云岩 Domilite	马桑	14	0.8±0.005	2.92±0.047	2.05±0.047	0.80±0.032	0.19±0.008	乔灌
白云岩 Domilite	光皮桦	17	0.81±0.012	3.09±0.020	2.23±0.030	0.76±0.024	0.18±0.012	乔灌
白云岩 Domilite	柏木	13	0.88±0.020	3.24±0.041	1.56±0.041	0.88±0.010	0.11±0.019	乔灌
白云岩 Domilite	桤木	23	0.91±0.007	3.87±0.065	2.48±0.022	0.87±0.029	0.08±0.018	乔灌
白云岩 Domilite	猴樟	18	0.92±0.004	4.12±0.040	3.85±0.020	0.87±0.026	0.13±0.013	乔灌

S:物种,Species;D:辛普森,Simpson;H:香浓-维纳,Shannon-Wiener;RI:丰富度,Richness;λ:生态优势度,Ecological concentration

2.5 不同岩性群落优势种碳(C)、氮(N)含量

碳(C)、氮(N)在植物生长和生理过程中发挥着重要作用,彼此关系密切。其中 C 是构成植物体内干物质的主要元素,N 则与植物的光合作用及细胞的生长分裂等重要生理有关。表 6 显示,植物 N 含量总体上,在 3 种岩性下都表现为叶片中的 N 含量最多,其次为枯落物,根与枝中的 N 含量最少;从岩性上看,总体上,除猴樟在石灰岩中的 N 含量高于白云质砂岩,其余树种都显示为白云岩上植物 N 含量最高,白云质砂岩次之,石灰岩最低;石灰岩上,白花刺、桤木 N 含量最高,园果化香、马桑、光皮桦居中,柏木、猴樟最低;白云岩上,桤木、马桑、光皮桦 N 含量高于柏木、猴樟;白云质砂岩上,马桑、园果化香 N 含量高于柏木、猴樟,这说明在 3 种岩性中,落叶树种 N 含量普遍大于常绿树种。植物中 C 含量总体上,除白云岩上的桤木、猴樟小于白云质砂岩及石灰岩,其余树种都显示为白云岩上植物 C 含量最高,白云质砂岩次之,石灰岩最低;石灰岩上桤木、光皮桦 C 含量最高,猴樟、白花刺、柏木居中,马桑、园果化香最低;白云岩上,桤木、柏木 C 含量最高,光皮桦居中,马桑、猴樟 C 含量最低,这说明在石灰岩、白云岩上,树种之间 C 含量并无明显差异;白云质砂岩上,柏木、猴樟 C 含量高于马桑、园果化香,这说明在白云质砂岩上,乔木常绿树种 C 含量高于灌木落叶树种。综上所述,不同岩性上,植物含 N、含 C 量不同,同一岩性上植物不同亦表现出不同的含 N、含 C 量。

2.6 植物对岩石形态结构特征适应性

由表 7 可知,不同岩性下,各物种多样性指数都与岩石结构面孔裂隙间隙度指数、分形维数指数相关性显著($P<0.05$),其中物种多样性指数与间隙度呈显著正相关,与分形维数、整合度、控制值、密度值呈显著负相关,这说明间隙度越大,分形维数、整合度、控制值、密度值越小,岩石结构面孔裂隙分布越集中(几条相邻相交的结构面孔裂隙聚集为一组)、每组斑块分布相对独立,从一组斑块内的孔裂隙到另一组斑块内孔裂隙需要经过较多中间连通的孔裂隙,则物种多样性指数越高;反之,间隙度越小,分形维数、整合度、控制值、密度值越大,岩石结构面孔裂隙分布越均匀(无法聚集为一组)、越密集,两条孔裂隙之间到达较容易,孔裂隙之间的控制关联性强,则物种多样性指数越低。

表 6 群落优势种 C、N 含量
Table 6 Dominant species' Carbon and Nitrogen correlation (mean±SD)

岩性 Lithology	树种 Plant	N/%			C/%				
		根 Root	枝 Branch	叶 Leaf	枯 Litter	根 Root	枝 Branch	叶 Leaf	枯 Litter
石灰岩 Limestone	园果化香	0.4±0.03	0.6±0.05	1.8±0.08	1.4±0.05	41.2±0.45	39.5±0.89	45.9±0.32	41.5±0.46
石灰岩 Limestone	马桑	1.0±0.05	1.0±0.13	2.7±0.09	1.5±0.02	40.2±0.33	45.1±0.50	46.2±0.35	42.1±0.28
石灰岩 Limestone	光皮桦	0.2±0.06	0.5±0.05	2.2±0.05	1.7±0.11	44.0±0.28	44.9±0.35	47±0.33	46.7±0.50
石灰岩 Limestone	柏木	0.3±0.05	0.5±0.06	1.1±0.05	0.8±0.12	42.4±0.31	40.8±0.40	44.5±0.52	44.7±0.73
石灰岩 Limestone	猴樟	0.2±0.08	0.5±0.06	1.5±0.09	0.8±0.08	41.5±0.33	45.9±0.22	45.8±0.47	46.3±0.42
石灰岩 Limestone	白花刺	1.7±0.12	1.7±0.11	3.1±0.11	2.2±0.05	41.2±0.40	45.3±0.25	46.2±0.35	43.4±0.40
石灰岩 Limestone	桉木	0.5±0.15	0.9±0.08	3.2±0.11	2.1±0.06	41.7±0.28	45.0±0.25	47.5±0.38	49.7±0.31
白云质砂岩 Domilitic sandstone	马桑	1.3±0.05	0.5±0.04	2.1±0.12	1.7±0.06	38.6±0.41	43.6±0.32	43.0±0.68	43.7±0.32
白云质砂岩 Domilitic sandstone	园果化香	0.4±0.03	0.6±0.05	1.4±0.06	1.8±0.08	39.8±0.25	40.4±0.41	44.5±0.52	44.3±0.25
白云质砂岩 Domilitic sandstone	柏木	0.4±0.02	0.4±0.05	1.7±0.09	1.5±0.08	46.6±0.35	45.0±0.69	48.6±0.45	47.1±0.41
白云质砂岩 Domilitic sandstone	猴樟	0.2±0.06	0.4±0.03	1.3±0.05	0.7±0.13	41.4±0.35	46.7±0.25	46.6±0.33	46.1±0.44
白云岩 Domilite	马桑	1.2±0.12	1.5±0.12	2.6±0.08	1.6±0.10	43.5±0.21	45.5±0.45	46.1±0.31	44.4±0.39
白云岩 Domilite	光皮桦	0.5±0.01	0.5±0.03	2.7±0.05	1.9±0.08	43.7±0.22	45.9±0.35	46.8±0.41	47.1±0.41
白云岩 Domilite	柏木	0.3±0.05	0.6±0.05	1.6±0.05	0.9±0.09	46.2±0.33	44.2±0.48	47.4±0.60	46.2±0.51
白云岩 Domilite	桉木	0.9±0.03	1.1±0.08	3.0±0.03	2.3±0.05	43.6±0.21	46.4±0.50	48.7±0.57	48.4±0.60
白云岩 Domilite	猴樟	0.6±0.02	0.4±0.08	1.9±0.05	1.3±0.05	36.9±0.33	45.6±0.45	47.5±0.38	45.5±0.45

表 7 岩石形态结构与植物特征的相关性

Table 7 The correlation between plants characteristic and rock morphology and morphostructure

岩性 lithology 指标 Index	白云质砂岩 domilitic sandstone						石灰岩 limestone						白云岩 Domilite					
	分维数 Fractal dimension	间隙度 Lacunarity	控制值 Control	整合度 Integration	密度值 Density	分维数 Fractal dimension	间隙度 Lacunarity	控制值 Control	整合度 Integration	密度值 Density	分维数 Fractal dimension	间隙度 Lacunarity	控制值 Control	整合度 Integration	密度值 Density			
分维数 Fractal dimension	-0.998**	1	0.91**	0.918**	0.9**	-0.955**	1	0.626*	0.716**	0.707**	-0.914**	1	0.795**	0.727**	0.886**			
整合度 Integration	-0.952**	0.91**	1	0.827**	0.998**	-0.611*	0.626*	1	0.958**	0.904**	-0.686**	0.795**	1	0.889**	0.936**			
控制值 Control	-0.948**	0.918**	0.827**	1	0.821**	-0.723**	0.716**	0.958**	1	0.854**	-0.837**	0.727**	0.889**	1	0.849**			
密度值 Density	-0.905**	0.9**	0.998**	0.821**	1	-0.538**	0.707**	0.904**	0.854**	1	-0.898**	0.886**	0.936**	0.849**	1			
S	0.970**	-0.864**	-0.337	-0.161	-0.464*	0.800**	-0.497*	-0.361	-0.45*	-0.169	0.504	-0.627*	-0.976*	-0.925*	-0.872*			
D	0.966**	-0.938**	-0.928*	-0.857*	-0.999**	0.670**	-0.367	-0.68*	-0.762*	-0.447	0.971**	-0.888**	-0.960*	-0.937*	-0.887*			
H	0.918**	-0.878**	-0.941*	-0.752*	-0.921*	0.849**	-0.726**	-0.765*	-0.802*	-0.575*	0.859**	-0.943**	-0.923*	-0.970*	-0.933*			
RI	0.793**	-0.730**	-0.725*	-0.365	-0.559*	0.547*	-0.353	-0.328	-0.373	-0.058	0.373	-0.690**	-0.9*	-0.992**	-0.970*			
J	0.897**	-0.859**	-0.851*	-0.946*	-0.916*	0.186	0.054	0.022	0.125	-0.043	0.901**	-0.741**	-0.919*	-0.84	-0.771*			
λ	-0.975**	0.958**	0.638*	0.716*	0.848*	-0.525*	0.336	0.922**	0.940**	0.862*	-0.865**	0.631*	0.869*	0.966*	0.934*			
根 Root	-0.956**	0.945**	0.443	0.693*	0.31	0.167	-0.207	-0.536*	-0.471*	-0.464*	-0.681**	0.557*	0.842*	0.993**	0.988*			
枝 Branch	-0.929**	0.930**	0.641*	0.725*	0.404	0.338	-0.34	-0.593*	-0.53*	-0.503*	-0.631*	0.530*	0.672*	0.322	0.207			
叶 Leaf	-0.909**	0.891**	0.364	0.352	0.359	0.642**	-0.479*	-0.418	-0.346	-0.306	-0.45	0.433	0.754*	0.876*	0.888*			
枯 Litter	-0.666*	0.620*	0.125	0.107	0.139	0.570**	-0.378	-0.223	-0.225	-0.125	-0.276	0.282	0.889*	0.501*	0.407			
根 Root	-0.146	0.096	0.633*	0.236	0.46*	0.185	0.325	0.51*	0.339	0.721*	-0.154	0.517*	-0.497	-0.61*	-0.569*			
枝 Branch	0.133	-0.116	-0.086*	0.05	0.05	0.433*	-0.072	-0.358	-0.184	-0.043	0.284	-0.575*	-0.691*	-0.242	-0.121			
叶 Leaf	0.545*	-0.279	-0.709*	-0.808*	-0.81*	0.451*	0.096	0.046	0.046	0.152	0.597*	-0.366	-0.74*	-0.791*	-0.739*			
枯 Litter	0.624*	-0.646*	-0.324	-0.6*	-0.33	0.704**	-0.327	-0.219	-0.219	-0.008	0.640*	-0.474	-0.781*	-0.758*	-0.693*			

n=48; * P<0.05; ** P<0.01.

白云岩间隙度与白云岩上植物含 N 量呈显著负相关,石灰岩间隙度与石灰岩上植物 N 含量呈正相关,白云质砂岩间隙度与白云质砂岩上植物 N 含量呈负相关这说明,白云岩、白云质砂岩上,岩石结构面孔裂隙分布越聚集,植物含 N 量越低,而在石灰岩上岩石结构面孔裂隙分布越聚集,植物 N 含量越高,可见岩石结构面孔裂隙对白云岩上植物 N 含量有较大影响。三种岩性间隙度指数与植物叶片及枯落物中的 C 含量有显著相关性,可见岩石结构面孔裂隙形态特征对植物体内的 C 含量有一定影响。

以上指数相关性分析表明:岩石结构面孔裂隙形态结构特征对植物群落物种多样性影响较大,对植物体内 N、C 含量也有一定影响,在选择植被恢复地时,应考虑岩石结构面孔裂隙形态对植物生长的影响。

3 讨论

3.1 植物对喀斯特石质生境岩石形态结构适应性特征

本研究显示,岩石结构面孔裂隙分形维数与空间句法等指标呈显著正相关、与间隙度指数呈显著负相关($P<0.05$),这说明岩石结构与岩石形态相关性显著;间隙度与物种多样性指数呈显著正相关,与植物 C、N 含量相关性较弱,分形维数及空间句法等指标与物种多样性呈显著负相关,与植物 C、N 含量相关性较弱,这说明岩石结构和岩石形态与植物生理生态总体相关性较强。在同一岩性下,物种多样性指数随间隙度增大、分形维数减小而递增,由此说明在同种岩性下岩石结构面孔裂隙越聚集成片分布,植物群落物种多样性指数越高,反之结构面孔裂隙分布越均匀分散,物种多样性指数也相应降低,根据样地实际调查发现岩石结构面孔裂隙分布越聚集,孔裂隙中枯落物、土壤、砂等生长基质较多且分布集中,因此聚集成片分布的岩石结构面孔裂隙空间容量较大,可以赋存更多水分及土壤养分,为植物提供相对较好的生长基质。

不同岩性的岩石结构面孔裂隙形态结构也会对植物生长产生影响,石灰岩岩石结构面间隙度指数最大平均为(1.2172),分形维数最小平均为(1.58),但同一物种多样性指数低于白云岩及白云质砂岩,其一可能是石灰岩与白云岩、白云质砂岩的结构构造不同,由于石灰岩硬度不及白云岩、白云质砂岩,不易破碎成块进而风化成土,且不易破碎形成密集的结构面孔裂隙网络结构,水分渗透途径较少^[5],其二可能是因为少量集中分布的孔裂隙只能供应少数竞争力强的植物生长,优势种占据了主要生存空间,导致其它植物无法有效生长,裂隙与裂隙间的连通性较低^[18],进一步妨碍植物根系向其它空间延伸,水分渗透及土壤堆积不均,导致在旱季时植物根系无法从其它连通裂隙中获取充足的水分及养分,阻碍植物生长。白云质砂岩间隙度指数最小平均为(1.0140),分形维数最大平均为(1.678),物种多样性指数高于石灰岩低于白云岩,虽然白云质砂岩岩石结构面分布较均匀密集,裂隙间连通性好,水分可通过裂隙下渗,但由于白云质砂岩岩石结构面分布过于破碎,导致渗透的水分不能长时间储存孔裂隙中,土壤不易堆积,水分和养分会随着降雨等迅速流失,植物只能通过根系不断延伸的方式寻找更充足的水分及养分,故浅根系植物生长较难。白云岩间隙度指数与分形维数都位于二者之间平均值分别为 1.1037、1.655,但相同物种在白云岩下的物种多样性指数最高,这可能是因为白云岩的裂隙聚集程度及网络连通性都较适中,裂隙空间能赋存适量的水分及养分,其适当的连通性也使水分渗透不至于流失,同时根系可以较好的延伸。综合以上分析,白云岩形态结构最适宜多种植物类型生长,植被恢复较容易,白云质砂岩其次,石灰岩最差,植被恢复较难。综上表明在喀斯特石质生境中,岩石的形态结构可表现为空间网格形态结构,网格的发达程度不同,其地下生境特征亦不同,从而导致可供植物生长的能力也不同,植物会根据不同的空间网格特征而采取相应的适应策略,本研究显示植物更适合生长在空间网络中等发达的白云岩石质生境中,而对空间网络不发达的石灰岩石质生境和空间网络发达的白云质砂岩石质生境均表现出较差的适应性。

3.2 空间句法与分形理论在揭示岩石形态结构中的可行性及意义

分形维数是一种分形几何学定量描述分形集合特征和几何复杂程度的重要指标^[18],分形维数最早由 Hausdorff(1919)提出,后来 Mandelbrot 将分维数推广形成分形几何学^[24],再由谢和平院士率先在国内开展分形理论应用于岩石力学方面的研究^[25],现已被广泛运用。本研究在前人研究的基础上对喀斯特三种岩性的

岩石结构面孔裂隙进行分析,研究结果与盛建龙、伍佑伦^[19]对铁矿工程岩体结构面分布特征的研究结论基本一致,即分形维数越大结构面分布越密集,越小结构面分布越稀疏,说明本研究结果较为可靠。间隙度指数是由 Mandelbrot 于 1983 年在《自然世界》一书提出,后由 plot-nick 等引入景观生态学研究。主要用于研究变化的景观格局及研究对象的空间分布特征^[25]。常学礼^[21]将其应用于流动沙丘的景观变化格局中,吴洁^[26]应用于城市典型用地的聚簇格局中,二者都是描述研究对象空间分布的聚集、离散程度。本研究将其应用于分析岩石结构面孔裂隙分布聚集、离散程度,研究结果与实际观察相一致,即间隙度越大,孔裂隙分布越聚集,间隙度越小,孔裂隙分布越分散,说明研究结果较为可靠。岩体结构面(节理、裂隙、断层)分布极其复杂,具有随机性,难以做到精确的测定及控制,前人多通过 RQD 法、CSIR 法、岩体强度法等对岩体结构面进行定性或部分定量描述,这些方法都很难对岩体结构面孔裂隙做到真正定量分析。近年通过研究发现,岩石结构面孔裂隙具有明显的自相似性,说明结构面迹线是可分形的^[20],分形维数凭借其定量分析可以准确的反映岩石结构面孔裂隙分布特征。由此表明分形理论应用于揭示岩石形态结构已有较多成功的实践案例,可行性强,其应用的理论与实践意义重大。

空间句法是由比尔希列尔^[18](Bill Hiller)于 1970 年提出,是将空间结构转译成拓扑结构以后,用于计算空间与空间之间的关系,其思路是把空间中的每个元素都分别看作是一个中心,进行空间重映射,然后计算这一空间的整合度、控制值等。空间句法中的“轴线法”可以用直线代替空间,将空间结构转译为轴线图,用“最长且最短”的轴线概括空间结构以后,就可以把每个轴线作为元素,进行拓扑学运算。本研究基于此方法进行相关整合度、控制值等计算,核心区域整合度、密度、控制值越高,表明可达性、连通性最好,表 7 表明分形维数与整合度、密度值、控制值具有显著的相关关系,说明空间句法能够很好的揭示岩石孔裂隙的结构特征,而且本研究结果与实际调查结果相一致,由此说明将空间句法应用于揭示岩石结构面孔裂隙网络系统具有很好的可行性。应用分形理论及空间句法可以更加客观的反映喀斯特岩石结构面孔裂隙空间形态结构特征,进而更好的揭示石质生境特征,为植物与生境关系研究奠定基础。分形理论已被前人证明可有效用于与岩石结构面有关的探井工程、铁矿工程当中,有利于开采过程中更准确的预测岩石断裂位置,空间句法除可应用于建筑、城市规划之外,基于本研究实践,可以预测空间句法还可应用于与岩石结构面有关的水利水电、边坡治理、土石方工程,喀斯特石质生境等,其工程应用前景广阔,具有极大的理论与实践意义,但未来还需要更多研究实践来验证该方面应用的可行性及丰富拓展该理论应用领域。

3.3 揭示喀斯特石质生境岩石形态结构对植被恢复的启示

前人的研究主要是针对石生环境下某一要素对植物生长的影响进行研究,如土壤质量^[27]、水分含量^[8]、微生物作用^[28]、立地条件等^[29],或是将这些要素放入岩石地下三维空间进行不同空间环境下的对比研究;也有学者针对喀斯特岩石特性进行了研究,如表层岩溶带的形成、结构面三维网状结构特征^[30],以及岩石结构力学在工程上的应用等^[31]。以上这些研究是将岩石作为研究背景,分析不同岩性下土壤、植物的生长情况,或仅研究岩体本身工程特性,而真正将岩石结构面孔裂隙形态特征与植物生长状况相结合的研究还极少。喀斯特岩石结构面孔裂隙为植物提供了最基本的生存空间,岩石结构面孔裂隙空间形态结构对于植物具有选择性,而植物对岩石结构面孔裂隙空间形态结构具有适应性,植物会选择适应其自身生长的岩石形态结构,如果无法适应就会被其它适应生长的植物渐渐取代,所以岩石结构面孔裂隙特征是限制喀斯特区植物生长的重要因素,这表明揭示喀斯特石质生境岩石形态结构对植被恢复具有重要价值。本研究仅初步的揭示了植物对岩石形态结构的适应性,而对广大喀斯特区不同岩石形态结构下水分赋存规律,以及形态结构对植物水养利用、生理生态等影响规律均没有涉及,而这些研究对喀斯特植被恢复具有重要的基础理论价值和物种选择上的实践价值,因此深入研究喀斯特岩石结构面孔裂隙空间形态结构与植物的互作关系对植被恢复具有重要意义。

4 结论

同一岩性下,岩石形态与岩石结构相关性显著($P < 0.05$),岩石形态结构与植物生理生态特征相关性较

强,其中间隙度与分形维数、空间句法等指标呈显著负相关,与物种多样性呈显著正相关;分形维数与空间句法等指标呈显著正相关,与物种多样性呈显著负相关;间隙度、分形维数与植物 C、N 含量相关性较弱,岩石结构面形态结构特征主要对植物群落结构影响较大,而对植物体内养分元素含量影响较小。不同岩性下,石灰岩岩石结构面间隙度指数最大(1.1301—1.2349)、白云岩居中(1.0594—1.1121)、白云质砂岩最小(1.0052—1.0209);白云质砂岩岩石结构面孔裂隙分形维数指数最大(1.67—1.69)、白云岩居中(1.65—1.66)、石灰岩最小(1.49—1.66);白云质砂岩岩石结构面孔裂隙整合度最大(1.289—1.403)、白云岩居中(0.827—0.907)石灰岩最小(0.659—0.680);控制值、密度值与分形维数指数趋势相同;白云岩上的物种多样性指数及群落优势种 N、C 含量均为最高、白云质砂岩次之,石灰岩最低,其物种多样性指数分别为:白云岩(2.92—4.12)、白云质砂(2.07—3.01)、石灰岩(1.70—3.06);间隙度、分形维数及空间句法等指标大小居中的情况下,岩石结构面孔裂隙形态结构分布的聚集离散程度最为适中,最适合多种植物类型的生长。

参考文献(References):

- [1] 朱守谦,祝小科,喻理正. 贵州喀斯特区植被恢复的理论和实践. 贵州环保科技, 2000, 6(1): 41-41.
- [2] 黄宗胜,喻理飞,符裕红,杨瑞. 茂兰退化喀斯特森林植被自然恢复中生态系统碳吸存特征. 植物生态学报, 2015, 39(6): 554-564.
- [3] 李文兴. 岩溶洞穴长度空间形态的分形研究. 广西科学, 1998, 5(3): 237-240.
- [4] 杨瑞东,魏晓,文雪峰,盛学庸. 利用 Google Earth 研究构造对喀斯特地貌的控制和对碳酸盐岩岩系风化成土的影响. 地球与环境, 2009, 37(4): 319-325.
- [5] 王尚彦,况顺达,戴传固,王明章,刘家仁. 白云岩和石灰岩山区石漠化速度差异原因分析. 贵州地质, 2009, 26(1): 49-51.
- [6] 符裕红,黄宗胜,喻理飞. 岩溶区不同根系地下生境类型白栎叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化. 应用生态学报, 2012, 23(11): 2961-2967.
- [7] 魏媛,喻理飞,张金池,俞元春. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤生态肥力质量评价——以贵州花江喀斯特峡谷地区为例. 中国岩溶, 2009, 28(1): 61-67.
- [8] 刘长成,刘玉国,郭柯. 四种不同生活型植物幼苗对喀斯特生境干旱的生理生态适应性. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1070-1082.
- [9] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理. 热带地理, 1998, 18(4): 322-326.
- [10] 喀斯特科学数据中心. (2007-08-06) [2018-03-18]. <http://www.karstdata.cn/downloadData.aspx?id=663>.
- [11] 龙成昌. 贵州喀斯特石漠化地区人工群落生态系统及其养分循环研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2005.
- [12] 董鸣,王义凤,孔繁志. 陆地生物群落调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1997: 30-33.
- [13] 杨持. 生态学. 北京: 高等教育出版社, 1999: 42-46.
- [14] 赵文,唐春安. 结构面间距和迹长的测量理论. 中国矿业, 1998, 7(3): 36-38.
- [15] 李东伟. 岩石结构面调查与分析. 城市建设理论研究; 电子版, 2014, 11(5): 203-205.
- [16] 范志影,刘庆生,张萍. 用凯氏法和杜马斯法测定植物样品中的全氮. 现代科学仪器, 2007, (1): 46-47.
- [17] 张晓瑞,程志刚,白艳. 空间句法研究进展与展望. 地理与地理信息科学, 2014, 30(3): 82-87.
- [18] 段进,比尔. 希列尔. 空间句法在中国. 南京: 东南大学出版社, 2015: 62-65.
- [19] 盛建龙,伍佑伦. 基于分形几何理论的岩体结构面分布特征研究. 金属矿山, 2002, (8): 45-47.
- [20] 荣冠,周创兵. 基于裂隙网络模拟技术的结构面分布分维数计算. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3465-3469.
- [21] Plotnick R E, Gardner R H, O'Neill R V. Lacunarity indices as measures of landscape texture. Landscape Ecology, 1993, 8(3): 201-211.
- [22] 常学礼. 景观间隙度指数在沙漠化研究中的应用. 中国沙漠, 1997, 17(4): 351-354.
- [23] 符裕红,喻理飞,黄宗胜. 喀斯特不同岩石产状生境类型下白栎群落的物种多样性研究. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 972-980.
- [24] 谢和平,鞠杨,黎立云,彭瑞东. 岩体变形破坏过程的能量机制. 岩石力学与工程学报, 2009, 27(9): 170-179.
- [25] Xie H P. Fractals in Rock Mechanics. Rotterdam, Netherlands: AA Balkema Press, 1993: 32-37.
- [26] 吴浩,周璐,陈晓玲,蔡晓斌,袁凌云,严冬. 基于间隙度维数的城市土地利用聚簇格局模拟分析. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2012, 46(2): 235-238.
- [27] 符裕红,黄宗胜,喻理飞,杨瑞. 岩溶区典型根系地下生境的土壤质量分析. 水土保持研究, 2012, 19(3): 67-73.
- [28] 吴小玲. 喀斯特地区土壤微生物量效应研究. 湖南农业科学, 2011, (15): 79-82.
- [29] 陈朝明,王克林. 云贵高原东部喀斯特斜坡地带的脆弱环境特征与持续发展对策. 国土与自然资源研究, 1996, (4): 18-21.
- [30] 区永和. 碳酸盐岩的裂隙网络连通度及其对岩溶的控制. 地球科学——中国地质大学学报, 1991, 16(1): 71-77.
- [31] 杜时贵,黄曼,罗战友,贾汝达. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2263-2270.