

岷江干旱河谷植物群落的复杂性

冶民生¹, 关文彬^{1,*}, 吴 斌¹, 马克明², 刘国华², 汪西林¹, 陈篝妍¹

(1. 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;

2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要:通过对岷江干旱河谷植被及环境因子的系统取样调查,研究了该地区植物群落复杂性及其与环境因子的关系,探讨了群落复杂性与多样性、均匀度、物种丰富度之间的关系。随着海拔的增加,群落总复杂性和结构复杂性均表现为“高-低-高”的变化趋势,表明高海拔和低海拔段有较高的复杂性,中海拔段复杂性较低;位于干旱河谷核心区的样带 3、4 较北部过渡区样带 1、2 和南部过渡区样带 5、6 有着较低的群落总复杂性;不同坡位、坡形及坡向,群落总复杂性和结构复杂性,均表现为上坡位 > 下坡位 > 中坡位,凹坡 > 平坡 > 凸坡,阴坡 > 半阴半阳坡 > 阳坡。华帚菊-小黄花馨灌丛的总复杂性最高,西南野丁香灌丛、驼绒藜灌丛的总复杂性最低,檉子栎灌丛和群小花滇紫草灌丛的结构复杂性较高;群落总复杂性与有机质、全 N、土壤含水量、水解 N、速效 K 呈现出显著的二次曲线关系,与全 K、全 P、速效 P、pH 值没有明显的相关关系。总复杂性与多样性、均匀度、物种丰富度的关系密切,均呈现显著的线性正相关关系。均匀度和结构复杂性呈现极显著的线性负相关,表明结构复杂性随均匀度的增加而减小。作为群落总复杂性与多样性的区分,结构复杂性对群落内物种数的变化较为敏感,不仅与均匀度有关,还与群落物种数量有关。结构复杂性和多样性作为群落总复杂性的两个组成部分,对总复杂性的影响随着研究区域和群落的不同而不同。

关键词:群落复杂性; 总复杂性; 结构复杂性; 均匀度; 群落多样性; 物种丰富度; 环境因子; 岷江干旱河谷

文章编号:1000-0933(2006)10-3159-07 中图分类号:Q143, Q941, Q948.15 文献标识码:A

Plant community complexity in the arid valley of Minjiang River

YE Min-Sheng¹, GUAN Wen-Bin^{1,*}, WU Bin¹, MA Ke-Ming², LIU Guo-Hua², WANG Xi-Lin¹, CHEN Qir-Yan¹ (1. College of Soil and Water Conservation of Beijing Forestry University, Key Lab. of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Research Center for Eco-Environment Sciences, CAS, Beijing 100085, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(10): 3159 ~ 3165.

Abstract: The upper reaches of the Minjiang river is the transition zone from the Qinghai Tibet Plateau to the Sichuan basin. It has a typical arid valley climate with complex topography and variable water and heat conditions. A long history of anthropogenic impact in combination with a severe natural environment has resulted in degraded vegetation dominated by xeric shrubs. Therefore, it is important to understand the process of ecosystem dynamics. Biocomplexity theory is becoming increasingly important in understanding natural vegetation dynamics. In this study, based on the field investigation of plant species and environmental factors (slope, elevation, aspect, soil water content and soil nutrients) in the arid valley of Minjiang River, we studied plant community complexity, and its relationship with environmental factors, community diversity, species evenness and richness. Six transects were set up along the arid valley of Minjiang River. Both total and structural complexity of communities showed a 'high-low-high' tendency with the increase of elevation in the study area, which meant that the complexity of communities was highest at the sites of low and high elevation, while the lowest was at the sites of middle elevation. The transects at the center of the valley had lower total complexity than those at the north and south sides of the valley, which probably due to the differences of

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(G2000046807)

收稿日期:2006-02-22; **修订日期:**2006-06-29

作者简介:冶民生(1979~),男,青海人,博士生,主要从事生物多样性保护与荒漠化防治研究。E-mail: ymsbjfu@126.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: desertwx@bjfu.edu.cn.

致谢:周建云、吕一河、谢春华、张育新、杨荣金、黄奕龙、吴建安、卢涛等同志参加了野外工作,在此表示感谢!

Foundation item: The project was supported by State Key Basic Research and Development Plan (No. G2000046807)

Received date: 2006-02-22; **Accepted date:** 2006-06-29

Biography: YE Min-Sheng, Ph.D. candidate, mainly engaged in biodiversity conservation and desertification combating. E-mail: ymsbjfu@126.com

environmental conditions. We found that both total and structural community complexity varied with degree, shape and aspect of slope, with an order of upper slope > middle slope > lower slope, shaded slope > half shaded slope > sunny slope, and concave slope > straight slope > convex slope. Our study indicated that Form. *Pertyasinensis*, *Jasminum humile* had the highest total complexity, and Form *Leptodermis purdomi* and Form *Ceratoides arborescens* communities had the lowest total complexity, while Form *Quercus coccoferoides* and Form *Onosma farrerii* communities had the highest structural complexity. We also found that total community complexity had significant quadratic correlations with soil organic matter (SOM) content, total nitrogen (N), hydrolyzable N, soil water content, and available potassium (K), respectively, while it had no significant correlations with soil total K, total phosphorus (P), available P, and pH value. Total community complexity positively correlated with community diversity, evenness and species richness, while structural complexity negatively correlated with community evenness. As two components of total community complexity, structural complexity was more sensitive than diversity to the change of species in the community, which was not only related to community evenness, but also to community richness. The relative contribution of structural complexity and diversity to total complexity would be different for different study area or ecosystems.

Key words: community complexity; total complexity; structural complexity; evenness; community diversity; species richness; environmental factors; the arid valley of Minjiang River

生物复杂性是近年来生物学研究的一个重要领域。生物复杂性指生命系统与环境之间复杂的相互关系,旨在了解生命系统及其环境之间的相互作用及其特点^[1~4]。生物复杂性主要研究生命系统如何反映并适应各种胁迫、在变化的环境中,生物的适应性和变化性可否预测、预测气候和社会经济变化产生的综合影响、多样性如何影响系统的可持续性^[2]。生态复杂性作为生物复杂性的一个重要组成部分,是生态系统内不同层次上的结构与功能的多样性,是生态学研究的重要内容^[5],它是生态学理论与生态系统模型的高度融合,属于非线性范畴,侧重于对整个系统的研究,而不是针对系统某一部分或者个体的研究。因此,复杂性对更好地了解生态系统动态以及生态系统各个组分之间相互关系方面起着日益重要的作用^[6]。近年来,复杂性理论已逐渐被用于生态学领域的研究^[6~12],并开始受到广泛关注。

现有的群落复杂性研究主要关注复杂性与经纬度、干扰之间的关系^[10],不同森林类型的群落复杂性^[12]以及群落复杂性随污染源距离的变化情况^[9]。群落复杂性随海拔、微地形、土壤养分、水分等的变化还未见有报道。区域或景观以及更小尺度上,土壤均表现出较大的分异规律和空间异质性^[7,8],影响着植物群落的分布和发育。另一方面,坡向、坡形、坡位、海拔等地形因子对土壤性质产生影响,同样会影响植物群落的特征^[9]。以往对岷江干旱河谷的研究中,未曾涉及到植物群落复杂性方面的研究。本文对岷江干旱河谷植物群落复杂性的研究,试图揭示:(1)海拔、地形、土壤养分、水分等环境梯度上的群落复杂性变化情况;(2)群落复杂性与多样性、均匀度、物种丰富度之间的一般关系。

1 研究地区概况

研究地区概况及样带、样地设计,取样方法和数据的采集参见文献^[16]。

2 复杂性测度

采用 Anand & Orlóci^[7]、李镇清^[10]对群落复杂性的测度方法,将群落总复杂性分解为基于无序的复杂性和

结构复杂性。用描述群落的最小剩余码的平均码长 $L(S) = \sum_{i=1}^q p_i l_i$ 测度群落总复杂性,其中 l_i 为群落中物种

S 的重要值的 Huffman 码字长度, q 是群落中物种数, p_i 满足 $\sum_{i=1}^q p_i = 1$; 用 Renyi 熵 $H_a(S) = \frac{1}{1-a} \log_2 \sum_{i=1}^q p_i^a$

测度基于无序的复杂性。将总复杂性和基于无序的复杂性之差 $\Delta_a(S) = L(S) - H_a(S)$ 作为群落结构复杂性测度来研究岷江干旱河谷地区植物群落复杂性:分析海拔、群系、样带、地形、养分、水分等环境梯度上的群落复杂性。海拔和群系的划分参见文献^[16,17]。根据前人研究经验^[7,10],有一个一般的法则:Renyi 熵计算多样性时高阶熵指数具有更高的灵敏度,因此在比较群落间的复杂性和多样性时,适合用较高阶熵指数。本研究

中取 $\alpha = 12$, 这时 $H_\alpha(S)$ 已达到稳定。均匀度测度采用: $E_\alpha = H_\alpha(S) / \log_2 S (\alpha = 12)$ 。该方法对复杂性测度已有较为详细的报和论述^[7,8,10], 这里就不再赘述。

采用 Huffman 的编码方法计算 I_j 的码子长度。它能满足最省编码准则, 因为给较低的 P_j 值编一个较长的码, 给较高的 P_j 值编一个较短的码^[7]。编码软件用 Visual C 语言编写。

3 结果与分析

3.1 海拔梯度上的群落复杂性

如图 1A 所示, 总复杂性 $L(S)$ 与结构复杂性 $\Delta\alpha(S)$ 有着非常近似的变化趋势, 多样性也有类似的变化趋势。随海拔的增加都呈现了“高一低—高”的变化趋势, 在海拔 1400 ~ 1600m 及海拔 2000 ~ 2200m 的范围内都有较高的群落复杂性和多样性。从海拔 1400m 到 1500m, 物种数从 44 增加到 74, 在物种数迅速上升的同时, 12 阶的均匀度 E_α 也增加, 从 0.5061 增加到 0.5786, 结构复杂性却呈减小趋势。海拔 1500m 处, 多样性也达到最高值, 峰值为 3.5930。调查区域的中海拔段, 即 1700 ~ 1900m 处, 总复杂性和多样性均较低都出现了最低值。结构复杂性在这一海拔段内也出现了最低值。结构复杂性与均匀度有着近似相反的变化趋势, 即均匀度越高, 结构复杂性越低。在 1800m 海拔段, 结构复杂性为最低值, 而均匀度是整个海拔段内的最高值。在海拔 2000m 处, 样方内物种数虽然比较多, 有 67 个物种, 但小花滇紫草 (*Onosma farrerii*) 为优势种, 使得其他物种数量偏少, 样方的均匀度 E_α 仅为 0.4857, 在所有海拔段内为最低值, 这使得群落内物种组分差异增大, 结构复杂性增大, 是整个海拔段内最高的。另外, 从图中可看出, 沿海拔梯度, 群落的总复杂性变化趋势与结构复杂性的变化趋势更为接近, 受结构复杂性的影响更大。

3.2 不同群系的群落复杂性

各个群系的复杂性如图 1B 所示。群系 1 即华帚菊-小黄素馨灌丛 (Form. *Pertysinensis*, *Jasminum humile*) 的总复杂性和多样性均为最高。该群系多处于阴坡的凹坡或平坡, 土壤水分、养分条件都较好, 物种丰富度为 43, 是所有群系中最大的, 群系的均匀度较高, 结构复杂性较低。

群系 5 西南野丁香灌丛 (Form. *Leptodermis purdomi*) 多处于阳坡的凸坡或平坡位置, 生境比较差, 土壤、水分和养分较为匮乏。该群系的物种丰富度较低, 且西南野丁香分布密度较大, 群系均匀度是所有群系中最低的, 仅为 0.396, 但结构复杂性却不是最高的, 原因可能是群系包含的物种数太少, 仅有 17 个物种, 导致结构复杂性相对偏低。群系 9 驼绒藜灌丛 (Form. *Ceratoides arborescens*) 也有类似的情况, 均匀度不高, 为 0.513, 但结构复杂性也相对较低, 该群系只有 15 个物种, 是所有群系中包含物种数最少的。这两个群系的总复杂性和多样性均为所有群系中最小的。

另外, 群系 4 即檉子栎灌丛 (Form. *Quercus cocciferoides*) 和群系 6 小花滇紫草灌丛 (Form. *Onosma farrerii*) 的均匀度较低, 分别为 0.4239, 0.4190, 但结构复杂性却是所有群系中最高的。这种情况的原因一方面可能是由于均匀度较低导致的结构复杂性较高, 另一方面可能是这两个群系包含的物种数较多, 分别有 36 和 43 个物种, 导致了结构复杂性的增加。这说明, 结构复杂性可能受均匀度和物种数量两方面的影响。

3.3 不同样带的群落复杂性

从图 1C 中可以看出, 位于干旱河谷核心区的样带 3、4 的群落总复杂性、多样性均低于南部和北部过渡区的样带 1、2 和样带 5、6。这两条样带处在干旱河谷的核心区飞虹, 土壤养分和水分状况在 6 条样带中都是最差的。

样带 1、2 群落总复杂性和多样性处于中间水平, 位于样带 5、6 和 3、4 中间。但结构复杂性都较高, 与它们包含的物种数量较多有关。另外, 与均匀度也有关系, 其中样带 2 的均匀度是最低的。样带 5、6 的均匀度分别为 0.6468、0.6412, 是 6 条样带中最高的, 总复杂性和多样性也是最高的。结构复杂性相应较低, 但两条样带差别较大, 样带 5 的结构复杂性要高于样带 6, 原因可能是样带 5 包含的物种数为 58, 远远高于样带 6 的物种数 37。因此, 在均匀度相似的情况下, 物种数量对结构复杂性的影响较大。样带 3、4 均匀度在 6 条样带中较低, 分别为 0.5097, 0.5375, 物种数量也最少, 分别为 23 和 29, 因此, 总复杂性和多样性也最低。样带 4 的

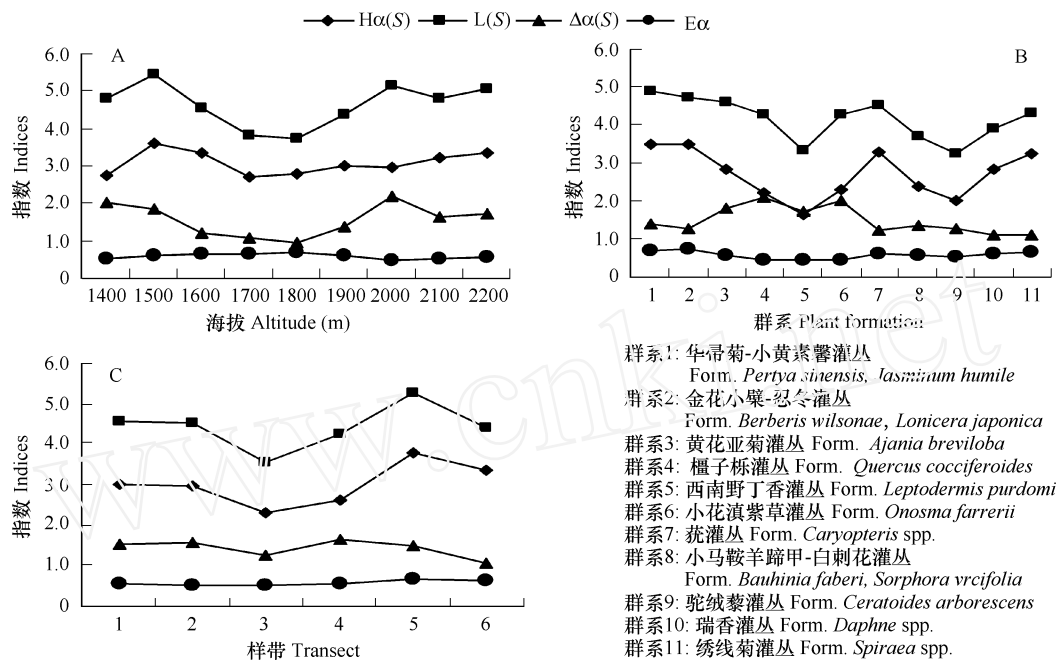


Fig. 1 Plant community complexity in different altitude , plant formation and transect

结构复杂性达到最高。样带 3 优势度较高,其中三花蕨 (*Caryopteris terniflora*) 为主要优势种,但结构复杂性较低,这与所含物种数量较少有关。

3.4 坡面不同景观位置上的群落复杂性

表 1 给出了坡面不同景观位置上的群落总复杂性、结构复杂性、均匀度和多样性值。不同坡位,总复杂性和结构复杂性以及物种丰富度,均表现为上坡位 > 下坡位 > 中坡位,均匀度则表现出相反的趋势。中坡位的复杂性不高,可能是因为岷江干旱河谷,山坡的下部坡度较大,人类干扰较少,而在坡的中部,坡度较小,地势相对平缓,是人们定居和从事农业活动较多的地段,对植物群落的干扰也较大,在这一位置的群落表现出较低的复杂性和多样性。另外,不同坡位的结构复杂性变化比多样性变化更为明显,与总复杂性的趋势更为一致。因此,不同坡位而言,结构复杂性对总复杂性的影响要高于多样性对总复杂性的影响。

表 1 不同坡位、坡向、坡形的植物群落复杂性和多样性和均匀度

指数 Indices	坡位 Slop position			坡形 Slope shape			坡向 Slope direction		
	上	中	下	凸	凹	平	阴	阳	半阴半阳
	Upper	Middle	Lower	Convex	Concave	Straight	Shaded	Sunny	Semi-sunny and semi-shaded
$H_{\alpha}(S)$	3.7244	3.7889	3.7646	2.6529	3.8620	3.5747	3.9802	3.6216	3.2840
$L(S)$	5.6770	5.5613	5.5869	4.2165	5.7703	5.4679	5.8250	4.6442	4.9569
E_{α}	0.5492	0.5943	0.5743	0.5579	0.5232	0.5706	0.5814	0.6674	0.5358
$\Delta\alpha(S)$	1.9526	1.7724	1.8223	1.5636	1.9083	1.8932	1.8449	1.0226	1.6728

不同坡形,植物群落的总复杂性和结构复杂性均表现为凹坡 > 平坡 > 凸坡。但凹坡的均匀度最低,样方中小花滇紫草和三花蕨占绝对优势,结构复杂性是最高的。当群落中各种群比例产生较大差异的时候,群落结构复杂性会升高。另外,凸坡均匀度要高于凹坡,但结构复杂性却是最低的,因为凸坡样方内物种数只有 27 种,远远小于凹坡上的物种数 114。凹坡不同于平坡和凸坡,是凸坡和平坡养分水分流失的一个汇,养分经过淋溶等主要集中在凹坡的位置,因此凹坡有较高的土壤养分和水分,有利于植物群落的生长和分布。不同坡形,总复杂性的变化趋势与多样性变化趋势更为接近。

坡向是山地景观的重要特征因素,阴坡和阳坡在温度、水分、土壤物理性质等方面的因素的差异,往往会限制植被的生长,造成地面植被景观的不同,因此坡向是干旱河谷地带植被景观的限制性因子之一。从比较结果可以看出,总复杂性和结构复杂性,均为阴坡>半阴半阳坡>阳坡。阴坡的群落总复杂性、结构复杂性和多样性和远远高于阳坡。均匀度则是阳坡最高。阴坡的均匀度要高于半阴半阳坡的,但结构复杂性却较低,因为阴坡的物种数为 115,远远高于半阴半阳坡 70。值得说明的是,对于多样性而言,则表现为半阴半阳坡>阴坡>阳坡。结构复杂性的变化较多样性更为明显,而且与总复杂性的趋势更为一致,因此,不同坡向而言,结构复杂性对总复杂性的影响要高于多样性对总复杂性的影响。

这种结果可能与阳坡的生境条件有关,阳坡往往温度比较高,水分蒸发快、土壤物理风化和化学分化比较高,因此土壤养分含量较少,植被发育比较差,导致较低的总复杂性和多样性。这在水分和养分为植物生长主要限制因子的干旱河谷来说表现的更明显。

3.5 养分、水分梯度上的群落复杂性

土壤作为植物生存的重要环境条件,是自然生态系统生产力的主导因素之一,土壤养分、水分状况会对植物群落结构和功能产生重要的影响,制约着生态系统的演替过程和对环境变化的响应^[18]。分析群落复杂性随土壤养分与水分梯度的变化,采用的指标为土壤全 N、水解 N、全 K、速效 K、全 P、速效 P、有机质、pH 值。

曲线拟合结果表明,总复杂性与有机质和全 N 呈现显著的二次曲线关系 ($p < 0.05$),与土壤含水量、水解 N、速效 K 呈现出极显著的二次曲线关系 ($p < 0.01$),如图 2 所示。总复杂性与全 K、全 P、速效 P、pH 值没有明显的相关关系。从二次曲线可以看到,并不是养分、水分含量越高,群落总复杂性就越高,复杂性的最高植物群落,其样地的土壤养分和水分含量处于所调查样地的中间水平。如:各土壤养分、水分等环境因子梯度上的群落总复杂性达到最大时,其含量分别为:全 N 含量为 0.36 % 时,速效 N 含量为 226.30mg/kg,土壤含水量为 7.90 %,速效 K 含量为 142.9 mg/kg,有机质含量为 6.79 %。由此可见,复杂性并不是随土壤养分和水分含量的增加而呈现简单的线性增加关系。

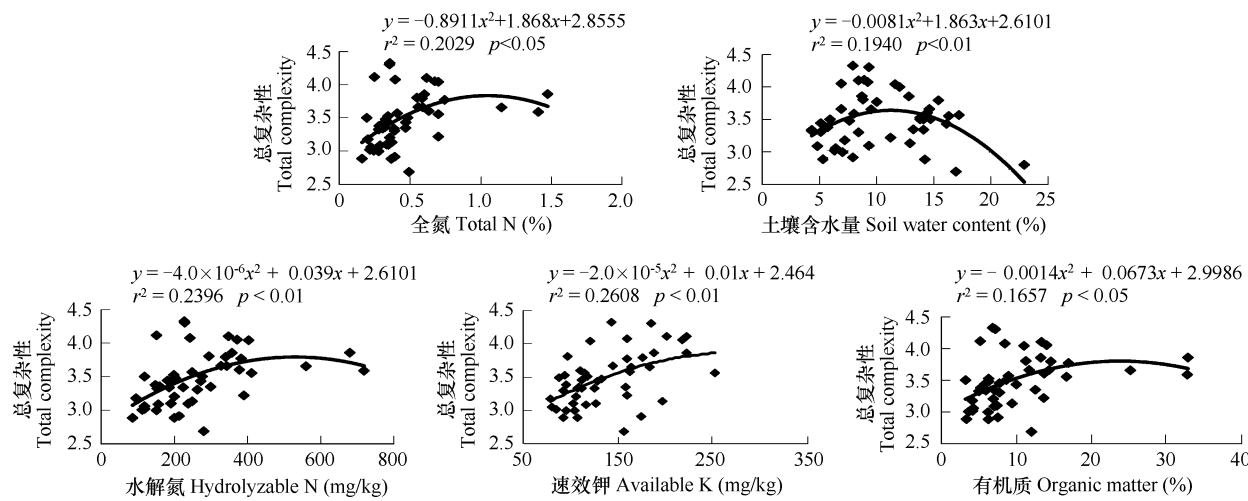


图 2 土壤养分和水分梯度上的群落复杂性

Fig.2 Community complexity along gradient of soil nutrient and water content

3.6 复杂性与多样性、物种丰富度之间的关系

图 3 反映了群落总复杂性、结构复杂性、群落多样性、均匀度以及群落物种丰富度之间的关系。从图中可以看出总复杂性和多样性及物种丰富度的关系密切,均呈现出极显著的线性正相关关系 ($p < 0.01$),与均匀度也有显著的线性正相关关系 ($p < 0.05$)。可见,物种丰富度、均匀度和多样性直接影响群落的总复杂性。另外,均匀度和结构复杂性呈现出极显著的线性负相关 ($p < 0.01$),表明结构复杂性随均匀度的增加而减小。即群落均匀度较高,其结构复杂性就较低。这在不同海拔、群系、地形上群落复杂性的分析中都有很好的体现。

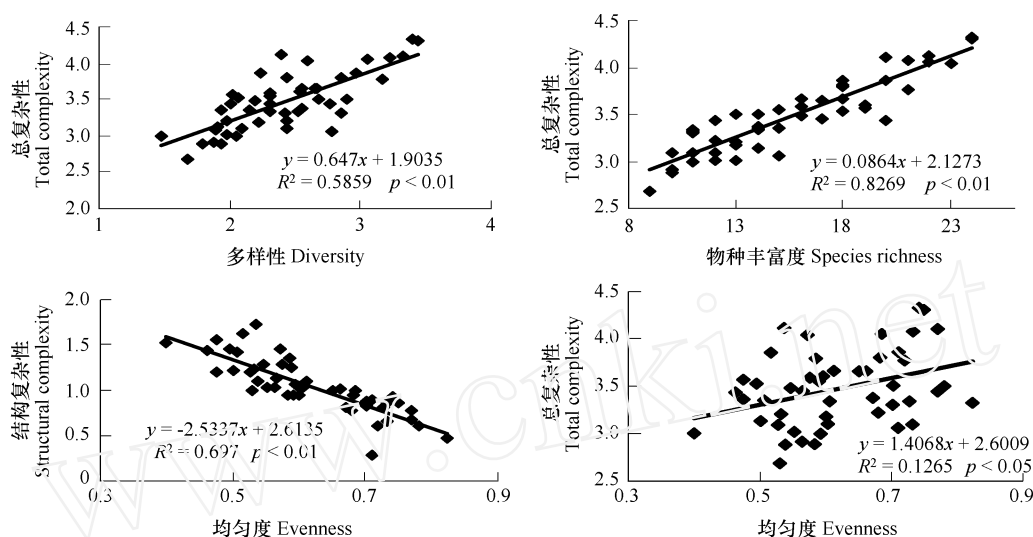


图3 复杂性、多样性、物种丰富度、均匀度之间的关系

Fig. 3 The relationship between complexity and diversity, species richness and evenness

4 结论与讨论

影响和潜在改变植物群落结构和功能环境因子是复杂的。海拔、地形、土壤水分、土壤养分等环境因子,均对植物群落的生长和分布产生一定的影响^[19]。以往的研究多集中在群落多样性与环境因子之间的关系上^[18~22],但群落复杂性环境因子之间的关系未见有报道。本研究结果表明,岷江干旱河谷地区,群落复杂性随海拔、坡向、土壤养分等生境的异质性特征而产生明显的差异,与生境条件有密切的关系。总复杂性随海拔梯度表现为“高—低—高”的变化趋势,而且群落多样性也有类似的变化趋势。坡面不同景观位置上的群落总复杂性和结构复杂性均表现为:上坡位 > 下坡位 > 中坡位,半阴半阳坡 > 阴坡 > 阳坡,凹坡 > 平坡 > 凸坡。不同坡向和坡形上的群落总复杂性差别较大,不同坡位上的总复杂性差别较小。

土壤养分梯度与植物群落物种多样性的关系已引起了普遍重视,并开展了广泛研究^[18,20~22],研究结果表明不同地区植物群落物种多样性随土壤养分梯度的变化规律性不尽一致。但群落复杂性随土壤养分和水分的变化未见报道。研究结果表明,在岷江干旱河谷地区,土壤含水量、水解 N、速效 K、土壤有机质、全 N 对群落复杂性有显著的影响,呈现出显著或极显著的二次曲线关系。在对同地区植物群落 β 多样性的研究发现类似的情况,即 β 多样性与水解 N、速效 K、全 N、全 P、土壤水分含量呈现出显著的二次曲线关系^[23]。因此,复杂性和多样性都不是随土壤养分和水分含量的增加而呈现简单的线性增加关系。并不是养分、水分含量越高,群落总复杂性和多样性就越高,复杂性和多样性最高植物群落,其样地的土壤养分和水分含量处于所调查样地的中间水平。

复杂性与群落多样性、均匀度、物种丰富度之间的关系,总体上来讲,当群落均匀度下降,优势度增加时,群落的结构复杂性增加。即当从各种群植物个体完全相等排列的群落变化到各种群个体比例有较大的差异的群落时,结构复杂性增加。群落总复杂性和多样性差距随着均匀度的增加而减小。结构复杂性作为群落总复杂性与多样性的区分,在均匀度较高的群落中,群落总复杂性和多样性差距较小,结构复杂性较低。结构复杂性能很好的反映群落结构和组织范畴内的性质,将 $\Delta\alpha(s)$ 作为结构复杂性或结构多样性的一个测度是合适的^[7,10],结果再次验证了这点。但也存在特殊情况,即当群落中物种数量较少时,即使较低的均匀度也不会使群落的结构复杂性达到最高,结构复杂性也可能会相对较低,如群系 5 的情况。因此,均匀度和物种数共同影响着群落的复杂性。这说明结构复杂性对群落内物种数的变化较为敏感,与物种数量有关,海拔和群系梯度上表现的比较明显。随着物种数的增加,结构复杂性受到的影响较大,这也许表明随着群落中物种数量的增加,对组织和结构组建的压力将会增大^[7]。另外,结构复杂性和多样性作为群落总复杂性的两个组成部分,

对总复杂性的影响也不尽一致,如海拔、坡位、坡向梯度上,结构复杂性与总复杂性的变化趋势更为一致,而在群系、坡位、坡形梯度上,多样性与总复杂性的变化趋势更为一致,因此,群落多样性和结构复杂性对群落总复杂性的影响随着研究对象的不同而不同。

References:

- [1] Colwell R. Balancing the biocomplexity of the planet 's living systems: A twenty-first century task for science. *Bioscience* , 1998 ,48 :786 ~ 787.
- [2] Michener W K, Baerwald T J, Firth P, *et al.* Defining and unraveling biocomplexity. *Bioscience* , 2001 ,51(12) :1018 ~ 1023.
- [3] Anand M, Tucker B C. Defining biocomplexity-an ecological perspective. *Comments on Theoretical Biology* , 2003 ,8: 497 ~ 510.
- [4] Covich A. Biocomplexity and the future: The need to unite disciplines. *Bioscience* , 2000 ,50(12) :1035.
- [5] Zhang Z B, Wang Z W, Li D M. Ecological complexity —— Review and prospect. *Acta Ecologica Sinica* ,1998 , 18(4) :433 ~ 441.
- [6] Anderson O R. A Model of Biocomplexity and its Application to the Analysis of Some Terrestrial and Marsh Eukaryotic Microbial Communities with an Emphasis on Amoeboid Protists. *Journal of Eukaryot. Microbiol.* , 2003 ,50(2) : 86 ~ 91.
- [7] Anand M, Orlóci L. Complexity in plant communities: the notion and quantification. *Journal of Theoretical Biology* , 1996 ,179: 179 ~ 186.
- [8] Anand M, Orlóci L. On hierarchical partitioning of an ecological complexity function. *Ecological Modelling* ,2000 ,132: 51 ~ 62.
- [9] Desrochers R, Anand M. Quantifying the components of biocomplexity along ecological perturbation gradients. *Biodiversity and Conservation* ,2005 ,14 :3437 ~ 3455.
- [10] Li Z Q. The complexity and diversity of typical plant communities along the northeast China Transect (NECT) . *Acta Botanica Sinica* ,2000 ,42(9) :971 ~ 978.
- [11] Li Z Q. Partitioning out the species interactive component of ecological variation. *Journal of Biomathematics* ,2001 ,16(3) :320 ~ 333.
- [12] Qin L, Yu S X. Complexity of forest communities: a case study of three different forest types in Heishiding Nature Reserve , Guangdong. *Biodiversity Science* , 2004 ,12(3) :354 ~ 360.
- [13] Benning T L, Seastedt T R. Landscape-level interactions between topo-edaphic features and nitrogen limitation in tall-grass prairie. *Landscape Ecology* , 1995 ,10 :337 ~ 348.
- [14] Jackson R B, Galdwell M M. Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *Journal of Ecology* ,1993 ,81 :683 ~ 692.
- [15] Liu S L, Ma K M, Fu B J, *et al.* The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in The Donglinshan mountain region , Beijing. *Acta Phytocologica Sinica* ,2003 ,27(4) :496 ~ 502.
- [16] Ye M S, Guan W B, Tan H, *et al.* The α diversity of shrubs community in the arid valley of the Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24(6) :1123 ~ 1130.
- [17] Guan W B, Ye M S, Ma K M, *et al.* Vegetation classification and the main types of vegetation in the arid valley of Minjiang River. *Journal of Mountain Science* ,2004 ,22(6) : 679 ~ 686.
- [18] Bart F, Hans D, Frank B. Soil nutrient heterogeneity alters competitions between two perennial grass species. *Ecology* ,2001 ,82 :2534 ~ 2546.
- [19] Burke A. Classification and ordination of plant communities of the Naukluft Mountain ,Namibia. *Journal of Vegetation Science* ,2001 ,12 :53 ~ 60.
- [20] Wang S Z, Chen G C, Bai Y P, *et al.* Interrelation between plant species diversity and soil environmental factors in bird island of Qinghai Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2005 ,16 (1) :186 ~ 188.
- [21] Hardtle W, Oheimb G V, Westphal C. The effects of light and soil conditions on the species richness of the ground vegetation of deciduous forests in northern Germany (Schleswig-Holstein). *Forest Ecology and Management* ,2003 ,182 :327 ~ 338.
- [22] Roem W J, Berendse F. Soil acidity and nutrient supply ratio as possible factors determining changes in plant species diversity in grassland and heathland communities. *Biological Conservation* , 2000 ,92 :151 ~ 161.
- [23] Guan W B, Ye M S, Ma K M, *et al.* The relationships between plant community species turnover rates and environmental factors in the arid valley of Minjiang River. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24(11) : 2367 ~ 2373.

参考文献:

- [5] 张知彬,王祖望,李典谟. 生物复杂性研究——综述与展望. *生态学报* ,1998 ,18(4) :433 ~ 441.
- [10] 李镇清. 中国东北样带(NECT)植物群落复杂性与多样性研究. *植物学报* ,2000 ,42(9) 971 ~ 978.
- [11] 李镇清. 分离生态变化中的物种相互作用组分. *生物数学学报* ,2001 ,16(3) :320 ~ 333.
- [12] 覃林,余世孝. 森林群落复杂性分析:以广东黑石顶森林为例. *生物多样性* ,2004 ,12(3) :354 ~ 360.
- [16] 冶民生,关文彬,谭辉,等. 岷江干旱河谷灌丛 α 多样性分析. *生态学报* ,2004 ,24(6) :1123 ~ 1130.
- [17] 关文彬,冶民生,马克明,等. 岷江干旱河谷植被分类及其主要类型. *山地学报* ,2004 ,22(6) :679 ~ 686.
- [20] 王顺忠,陈桂琛,柏玉平,等. 青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系. *应用生态学报* ,2005 ,16 (1) 186 ~ 188.
- [23] 关文彬,冶民生,马克明,等. 岷江干旱河谷植物群落物种周转速率与环境因子的关系. *生态学报* ,2004 ,24(11) : 2367 ~ 2373.