

浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系^{*}

宋创业^{1,3,*} 郭柯² 刘高焕¹

(¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ²中国科学院植物研究所, 北京 100093;

³中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 2004年8月,以浑善达克沙地植物群落样方调查资料为基础,对流动半流动沙丘、固定沙丘、丘间低地和淖尔边缘4种生境的21种群落类型的物种丰富度指数、物种多样性指数、生态优势度指数和均匀度指数进行比较分析,并通过相关分析对各种指数与土壤因子的关系进行了研究。结果表明:分布在流动半流动沙丘的植物群落的物种丰富度指数和物种多样性指数最低,生态优势度指数较高,群落均匀度指数高于其它3种生境;固定沙丘的物种丰富度指数、物种多样性指数最高,优势度指数最低;丘间低地和淖尔边缘的植物群落的丰富度指数和多样性指数低于固定沙丘,但高于流动半流动沙丘,优势度指数高于固定沙丘,均匀度指数低于流动半流动沙丘。相关分析表明,均匀度指数与土壤pH以及全氮含量显著相关,丰富度指数与有机质含量显著相关。

关键词 浑善达克沙地; 植物群落; 多样性指数; 土壤

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2008)01-0008-06

Relationships between plant community's species diversity and soil factors on Otingdag sandy land. SONG Chuang-ye^{1,3}, GUO Ke¹, LIU Gao-huan¹ (¹ Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ² Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(1): 8-13.

Abstract: Based on the plot investigation data about the plant communities on the Otingdag sandy land in August 2004, the richness index, Shannon-Wiener index, Simpson index and Pielou index of 21 types of plant communities on moving and semimoving dune, fixed dune, interdune lowland, and lake-brim were compared, and the relationships between the biodiversity indices and soil factors were studied by employing correlation analysis. The results showed that on moving and semimoving dune, the richness index and Shannon-Wiener index of the plant communities were the lowest, while the Simpson index was higher and the Pielou index was the highest. On fixed dune, the richness index and Shannon-Wiener index of the communities were the highest, while the Simpson index was the lowest. On interdune lowland and lake-brim, the richness index and Shannon-Wiener index of the communities were higher than those on moving and semimoving dune but lower than those on fixed dune, and the Simpson index was higher than that on fixed dune but the Pielou index was lower than that on moving and semimoving dune. The correlation analysis showed that soil pH value and total N content had significant effects on the Pielou index, and soil organic matter content had significant effects on the richness index.

Key words: Otingdag sandy land; plant community; biodiversity index; soil

* 中国科学院知识创新工程资助项目 (KSCX1-08)。

** 通讯作者 E-mail: songcy@lreis.ac.cn

收稿日期: 2007-03-22 接受日期: 2007-11-03

植物物种多样性以及由此构成的植被类型多样性是地区性生物多样性的支持系统,物种多样性构成了生物多样性的基本环节,它们是生物与环境相关的主体(陈廷贵和张金屯,2000)。物种多样性不仅可以反映群落或生境中物种的丰富度、变化程度或均匀度,也可反映不同自然地理条件与群落的相互关系。可以用物种多样性来定量表征群落和生态系统的特征,包括直接和间接地体现群落和生态系统的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度、生境差异等(张丽霞等,2000)。土壤是植物生长的重要物质基础,土壤物理性质、化学性质和土壤母质的不同,都可能影响生长于其中的植物,从而影响到物种多样性。土壤的性质与植物群落组成结构和植物多样性有着密切的关系,并且多年来一直是生态学家研究的热点(Goldberg & Miller, 1990; 安树青等, 1997; 杨万勤等, 2001),因此,对植物物种多样性及其与土壤环境因子的关系的研究,是群落生态学研究 and 生物多样性保护与管理的基础。

浑善达克沙地地处锡林郭勒高原中部,是内蒙古四大沙地之一。历史上的浑善达克沙地曾是优良的天然牧场。近几十年来草原发生了不利于生物多样性维持的变化,如:群落优势种和结构发生改变,可食性牧草减少,毒草和杂草增加;生产力下降,产草量下降;草原土壤生态条件发生巨变,沙化和风暴严重;固定沙丘复活,流沙掩埋草原;动、植物资源遭到严重破坏,生物多样性下降迅速。目前,许多学者就浑善达克沙地植被与环境的关系(杨淑宽,1964; 刘海江和郭柯,2003)、沙地形成及环境演变(李森等,1995;李孝泽和董光荣,1998;李春雨等,2003)、沙漠化成因、现状与防治对策(陈平等,2003;陈玉福和蔡强国,2003;贾鲜艳等,2004)、沙地景观格局(王牧兰,2007)、沙尘天气特征(王革丽和吕达仁,2002;刘鸿雁等,2003)以及沙地植物的光合、蒸腾特征(李红丽等,2003;牛淑丽等,2003)等方面进行了研究。为了定量研究沙地植物群落物种多样性特征及其与环境因子的关系,本文以2004年8月对浑善达克沙地中部地区进行的植被调查资料为基础,对不同生境中植物群落物种多样性,以及多样性指数与土壤理化性质的关系进行了研究,以期对浑善达克沙地生物多样性维持与生态系统管理、恢复对策提供参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

采样点主要分布在内蒙古正蓝旗浑善达克沙地植被恢复与风沙环境综合治理试验示范研究区(42°53.5'N—42°57'N, 116°01'E—116°08'E),面积2700 hm²,于2001年围栏围封,地貌为垄状、堆状沙丘和丘间低地。根据正蓝旗气象局1960—1999年的气象资料统计,该地区年平降水量378 mm,降水主要集中在7—9月,3个月降水量占全年降水总量的64%。年均风速为4.4 m·s⁻¹。年均气温为1.8℃,7月平均温度18.7℃,1月平均温度-17.9℃。沙地全区海拔1100~1300 m,地势由东南向西北倾斜。浑善达克沙地位于中国温带草原地带,该区的地带性植被为典型草原,其发育的沙地是一种独特的土地类型,是植物的特殊生活环境,使该地植被既受地带性影响,又具有一些超地带性的特征。砂质或砂壤质的湖相沉积物经过风力的长期作用,形成了现在的地表景观,即沙丘和丘间低地有规律的交错结合,这对植被的分布有着很大影响(刘海江和郭柯,2003)。由于区域水热差异,地质地貌特征以及因此而引起的水分养分条件的变化,使得沙地植被类型多样化,植物物种资源较为丰富。

1.2 群落调查及土壤样品分析

2004年8月下旬进行群落学调查,选取流动半流动沙丘(A)、固定沙丘(B)、丘间低地(C)和淖尔边缘(D)4种生境类型,在各个生境的代表性地段选取样地,进行样方调查,样方规格1 m×1 m,共选择21种植物群落,124个样方,其中沙米群落样方4个,其余每种群落类型有6个样方。调查时记录每个样方的总盖度及样方内各物种的盖度和高度,同时挖40 cm深的土壤剖面,用环刀取0~30 cm土样,土壤混合均匀后带回实验室分析。风干土样后过2 mm的筛子,研磨后用100目分子筛过筛。土样测定项目包括全氮(TN)、有机质、土壤含水量和土壤pH。全氮用凯氏定氮法测定,有机质用重铬酸钾氧化外加加热法测定,土壤含水量采用烘干方法,pH值用电位法测定(刘光崧,1996)。

1.3 植物群落物种多样性

1) 群落物种丰富度指数:

$$R = S$$

式中, R 为群落物种丰富度指数, S 为群落中的总物种数。

2)生态优势度指数 (Simpson 指数) (Piebu, 1975):

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^s N_i(N_i - 1) / N_i(N_i - 1)}$$

式中, D 为 Simpson 指数, N 为群落中全部种的总个体数, N_i 为第 i 种的个体数。

3)物种多样性指数 (Shannon-W iener 指数) (Magurran, 1988):

$$H = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i$$

式中, H 为 Shannon-W iener 指数, $P_i = N_i / N$ 。

4)均匀度指数 (Piebu 指数) (Magurran, 1988):

$$E = H / \ln S$$

式中, E 为 Piebu 指数。为了避免个体大小对计算结果的影响, 本文在计算时用各物种的重要值来代替其个体数。即: 重要值 = 某一物种盖度 / 所有种盖度之和 $\times 100$ (张金屯, 1995; 宋永昌, 2001)。

1.4 数据统计

数据统计分析用 SPSS 11.5, 作图采用 Sigma-Plot 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 群落结构及其物种组成

依据群落外貌结构和植物种类组成等特征 (杨淑宽, 1964), 对野外实地调查所获得的 124 个样方进行了分析, 并按照样方中建群种和优势种的重要值归纳为 21 个群落类型, 分别分布于流动半流动沙丘、固定沙丘、丘间低地和淖尔边缘 4 种生境。

狗尾草 (*Setaria viridis*) 群落、沙米 (*Agriophyllum pungens*) 群落、蒙古虫实 (*Corispermum mongolicum*) 群落和沙地雀麦 (*Bromus irtutensis*) 群落等是分布于流动半流动沙丘的先锋植物群落。分布区土壤水分、养分状况较差, 地表有流沙侵蚀。群落结构简单, 盖度较低, 大约在 5% 左右, 伴生种常有雾冰藜 (*Bassia dasyphylla*) 和猪毛菜 (*Salsola collina*) 等, 有时形成单优群落。

又分蓼 (*Polygonum divaricatum*) 群落、褐沙蒿 (*Artemisia intramongolica*) 群落、沙芦草 (*Agropyron mongolicum*) 群落、沙鞭 (*Pennisetum villosa*) 群落和山竹岩黄芪 (*Hedysarum fruticosum*) 群落分布在固定沙丘上, 群落分布区土壤基质较为稳定, 偶有流沙侵袭。群落盖度为 30% ~ 65%, 群落物种组成丰富, 伴生种常有展枝唐松草 (*Thalictrum squarro-*

sum)、瓣蕊唐松草 (*T. petaloideum*)、草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*)、砂引草 (*Messerschmidia sibirica*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、苔草 (*Carex sp.*) 和兴安天门冬 (*Asparagus dauricus*) 等。

冷蒿 (*Artemisia frigida*) 群落、冰草 (*Agropyron cristatum*) 群落、苔草群落、克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 群落、羊草 (*Leymus chinensis*) 群落、赖草 (*Leymus secalinus*) 群落、无芒雀麦 (*Bromus inermis*) 群落和草地风毛菊 (*Saussurea amara*) 群落为丘间低地分布范围较广的群落, 分布区地表没有流沙干扰且发育有结皮层, 固定时间较长, 基质稳定, 土壤水分、养分状况良好。群落盖度较高, 通常在 50% ~ 85%, 群落组成稳定, 物种组成丰富, 群落中常有糙隐子草、二裂委陵菜 (*Potentilla bifurca*)、星毛委陵菜 (*P. acaulis*) 和草木樨状黄芪等分布。

拂子茅 (*Calamagrostis epigejos*) 群落、芦苇 (*Phragmites communis*) 群落、星星草 (*Puccinellia tenuiflora*) 群落和金戴戴 (*Halerpestes nuthenica*) 群落分布在地下水位较高的湿润草甸化草原、草甸、沼泽化草甸和盐碱地。群落分布区土壤水分和养分状况良好。植被盖度较高, 平均盖度在 60% 以上, 群落结构复杂, 群落结构和生产力都很稳定, 物种丰富度较高, 样方中常见物种有苔草、地榆 (*Sanguisorba officinalis*)、茵陈蒿 (*Artemisia scopariae*)、水麦冬 (*Triglochin palustre*)、西伯利亚剪股颖 (*Agrostis sibirica*)、草地风毛菊、鹅绒委陵菜 (*Potentilla anserine*) 和海乳草 (*Glaux maritima*) 等。

2.2 不同群落类型、不同生境的物种多样性

表 1 和图 1 为浑善达克沙地主要群落类型以及 4 种生境中的物种多样性和均匀度指数。狗尾草群落、沙米群落、沙地雀麦群落和沙鞭群落等 Simpson 指数较高, 物种丰富度指数和 Shannon-W iener 指数偏低, 群落的 Piebu 指数较高。褐沙蒿群落、又分蓼群落和山竹岩黄芪群落等分布在固定沙丘上, 群落中物种种类较多, 都在 10 种以上, 它们具有较高的丰富度指数和 Shannon-W iener 指数, 而优势度指数较低, 均匀度指数较高。分布在丘间低地的克氏针茅群落、冰草群落、冷蒿群落、羊草群落和赖草群落等以及分布在淖尔边缘的芦苇群落、金戴戴群落、拂子茅群落和星星草群落等, 物种丰富度指数和 Shannon-W iener 指数高于流动半流动沙丘, 但是低于固定沙丘。

表 1 不同群落类型的物种多样性指数

Tab 1 Species diversity indices of different plant communities

群落类型	生境类型	丰富度指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
狗尾草群落	A	3	0.50	0.82	0.80
沙米群落	A	3	0.53	0.73	0.85
蒙古虫实群落	A	5	0.49	0.85	0.84
沙地雀麦群落	A	4	0.57	0.78	0.65
沙鞭群落	A	8	0.28	1.57	0.78
褐沙蒿群落	B	10	0.24	1.55	0.67
沙芦草群落	B	13	0.21	1.92	0.75
叉分蓼群落	B	10	0.29	1.31	0.53
山竹岩黄芪群落	B	12	0.31	1.66	0.67
冷蒿群落	C	10	0.36	1.47	0.65
冰草群落	C	10	0.31	1.55	0.73
苔草群落	C	8	0.32	1.39	0.73
克氏针茅群落	C	8	0.23	1.66	0.81
羊草群落	C	6	0.50	1.03	0.58
赖草群落	C	6	0.27	1.66	0.71
无芒雀麦群落	C	8	0.47	1.17	0.58
草地风毛菊群落	C	8	0.42	1.24	0.62
拂子茅群落	D	6	0.73	0.62	0.34
芦苇群落	D	8	0.36	1.37	0.68
星星草群落	D	9	0.34	1.47	0.67
金戴戴群落	D	7	0.36	1.27	0.65

A. 流动 半流动沙丘, B. 固定沙丘, C. 丘间低地, D. 淖尔边缘。下同。

2.3 物种多样性指数与土壤理化性质的关系

从图 2 可以看出,流动 半流动沙丘和固定沙丘的土壤溶液 pH、含水量、全氮含量和土壤有机质含量均较低;丘间低地和淖尔边缘 2 种生境的含水量、全氮含量和土壤有机质含量显著高于流动 半流动沙丘和固定沙丘 ($P < 0.05$),丘间低地的土壤溶液酸碱度与固定沙丘的差异不显著,但是显著高于流动沙丘,低于淖尔边缘 ($P < 0.05$)。

从表 2 可见,丰富度指数与有机质含量呈显著相关 ($P < 0.05$),与 pH 和全氮含量相关系数相对较高,但没有达到显著相关; Simpson 指数与上述 4 个土壤理化指标均没有达到显著相关,但与土壤 pH 之间的相关系数相对较高; Shannon-Wiener 指数与上述 4 个土壤理化指标也没有达到显著相关,但与土壤有机质含量和土壤 pH 的相关系数相对较高; Pielou 指数与土壤溶液的 pH 呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与土壤全氮含量达到显著负相关 ($P < 0.05$)。

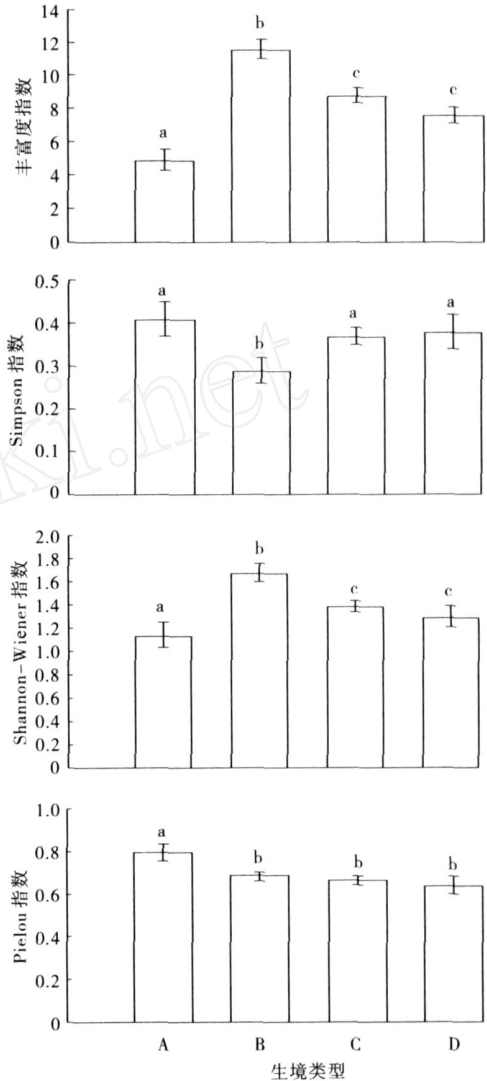


图 1 4 种生境类型的物种多样性指数对比

Fig 1 Biodiversity index of four different habitats 数值为平均值 ± 标准差; 图柱上方不同字母为差异显著。下同。

表 2 物种多样性指数与土壤因子的相关系数

Tab 2 Correlation coefficients of diversity indexes and soil factors

土壤因子	丰富度指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
pH	0.201	0.165	-0.076	-0.384**
含水量	0.153	0.026	0.053	-0.227
全氮含量	0.194	0.058	0.025	-0.297*
有机质含量	0.238*	0.064	0.143	-0.186

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

2.4 物种多样性指数之间的关系

从表 3 可以看出,丰富度指数与 Simpson 指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$),与 Shannon-Wiener 指数呈极显著正相关 ($P < 0.05$),与 Pielou 指数相关性不显著。Simpson 指数与 Shannon-Wiener 指数、

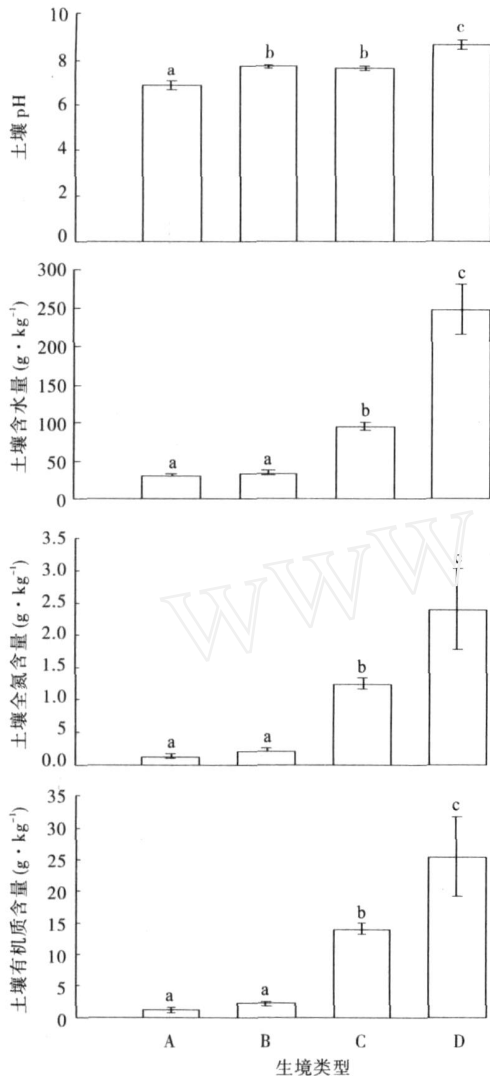


图 2 4种生境类型的土壤 pH、土壤水分、全氮和有机质含量对比

Fig 2 pH, soil moisture, total nitrogen and organic matter of four different habitats

表 3 物种多样性指数之间的关系

Tab 3 Correlation coefficients among the species diversity indices of different communities

	丰富度指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
丰富度指数	1			
Simpson 指数	-0.555**	1		
Shannon-Wiener 指数	0.775**	-0.942**	1	
Pielou 指数	0.107	-0.843**	0.647**	1

** $P < 0.01$.

Pielou 指数呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。Shannon-Wiener 指数与 Pielou 指数呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同生境、不同群落的物种多样性分布特点

狗尾草群落、沙米群落、沙地雀麦群落和沙鞭群

落等分布在流动、半流动沙丘上,分布区地表覆沙层厚,植被盖度低,偶遇降水较好的月份,常有夏雨型的 1 年生草本植物组成层片,群落中各个物种所占的比例差距不大,各个物种在群落中分布均匀,群落的 Pielou 指数较高。这是因为均匀度与物种数目无关,在物种数目一定的情况下,均匀度指数只与个体数目或生物量等指标在各个物种中分布的均匀程度有关。褐沙蒿、叉分蓼和山竹岩黄芪等群落分布在固定沙丘上,其土壤结构、土壤养分以及水分等条件都有了明显的改善,它们的丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数都较高,而组成群落的物种种数较多,单个物种的优势并不明显,所以优势度指数较低,均匀度指数较高。丘间低地和淖尔边缘的水分和养分条件较固定沙丘有了进一步的改善,但是分布在丘间低地的克氏针茅群落、冰草群落、冷蒿群落、羊草群落和赖草群落等以及分布在淖尔边缘的芦苇群落、金戴戴群落、拂子茅群落和星星草群落等,物种丰富度指数和 Shannon-Wiener 指数高于流动、半流动沙丘,但是低于固定沙丘。

3.2 物种多样性指数与土壤因子之间的关系

由于研究区的海拔变化范围不大,样地的气候环境相似,所以由海拔变化所引起的热量、水分等气候因素对于多样性的影响不是很大。本文主要分析了土壤因素所引起的多样性指数的变化。从物种多样性在土壤含水量、pH 梯度上的变化可以看出, Pielou 指数与 pH 呈极显著相关 ($P < 0.01$),物种丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数与土壤 pH 虽然没有达到显著相关,但是与其他土壤理化指标相比,相关系数相对较大;与其他土壤环境因子与多样性指标的相关性相比,土壤含水量与多样性指标相关性相对较小。浑善达克沙地土壤盐碱化程度高,使生长在盐碱化土壤上的植物向耐盐碱的生态适应方向发展,因而土壤 pH 成为与多样性相关的限制性因子。浑善达克沙地地下水埋深较浅,基本上可以满足植物生长发育的需要,而且当地主要分布一些旱生或超旱生植物,利用有限的水分可以完成生活史。总体上看,pH 是对浑善达克沙地植物群落多样性具有较大影响的土壤因子。

土壤养分与物种多样性的关系,存在不同看法。多数人认为,植物群落高的物种多样性出现在土壤养分梯度的中间位置 (Gentry, 1988)。白永飞等 (2000)对锡林河流域草原植物群落的研究以及李新荣等 (2000)对沙坡头植物群落的研究表明,物种

丰富度和多样性指数与土壤有机质及全氮含量呈正相关。Timan等(2000)对人工草地小区研究认为,高的多样性能够更完全地利用土壤的限制性养分使土壤养分的总量增加。本研究表明,浑善达克沙地植物群落物种多样性在固定沙丘上最高,其土壤全氮和有机质的含量并非处在最高水平,即高于流动-半流动沙丘,但低于丘间低地和淖尔边缘,植物群落高的物种多样性出现在土壤养分梯度的中间位置。

3.3 多样性指数之间的关系

物种多样性不仅反映了群落组成中物种的丰富程度,也反映了不同自然地理条件与群落的相互关系以及群落的稳定性与动态,是群落组织结构的重要特征。多样性指数、丰富度指数、均匀度指数和优势度指数反映了物种多样性水平,可通过相关性分析进一步了解它们之间的关系(彭少麟等,1989)。多样性指数与均匀度指数的相关性显著,是因为多样性指数是把物种丰富度和均匀度结合起来的一个统计量,是以不同的方式表达物种丰富度和均匀度的结合,故三者之间的关系很密切(Magurran, 1988)。另外,还可以看到优势度指数和其它各指数均呈负相关,这是由于在优势度较为明显的群落中,优势种排挤其它种,从而使群落物种多样性降低。在生境恶劣的干旱地区,占优势的植物抢占了更多的生存空间,其它非优势物种就很难再进入这一群落空间,这样就导致了优势度指数与多样性指数的负相关性。此外,丰富度指数与均匀度指数之间的相关性不明显,可能是群落的物种均匀性与物种数目关系不大造成的。一般说来,物种多样性指数与物种丰富度指数、群落均匀度指数呈正相关,与生态优势度指数呈负相关(彭少麟等,1989)。但是这种关系并非一贯如此,要结合群落类型,群落结构和生境条件具体分析,即生物多样性表现出与群落结构或者群落外貌以及其它尚未被弄清楚的关系有密切的相关性,3种指标同时使用才能较好地表征群落的组成结构水平(Whittaker & Niering, 1975)。

参考文献

安树青,王铮峰,朱学雷,等. 1997. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响. 武汉植物研究, 15(2): 143-150.
白永飞,李凌浩,王其兵. 2000. 锡林河流域草原群落植物多样性和初级生产力沿水热梯度变化. 植物生态学报, 24(6): 667-673.
陈平平,丁国栋,王 贤. 2003. 浅谈浑善达克沙地的综合治理模式. 水土保持学报, 17(5): 74-76.
陈廷贵,张金屯. 2000. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多

样性与环境关系的研究. 应用与环境生物学报, 6(5): 406-411.
陈玉福,蔡强国. 2003. 京北浑善达克沙地荒漠化现状、成因与对策. 地理科学进展, 22(4): 353-359.
贾鲜艳,海 棠,王月琴. 2004. 浑善达克地区草场沙漠化原因与防治对策. 中国草地, 26(1): 69-72.
李 森,孙 武,李孝泽,等. 1995. 浑善达克沙地全新世沉积特征与环境演变. 中国沙漠, 15(4): 323-332.
李春雨,徐兆良,孔昭宸. 2003. 浑善达克沙地高西马格剖面孢粉分析及植被演化的初步探讨. 植物生态学报, 27(6): 797-803.
李红丽,董 智,丁国栋,等. 2003. 浑善达克沙地植物蒸腾特征的研究. 干旱区资源与环境, 17(5): 135-140.
李孝泽,董光荣. 1998. 浑善达克沙地的形成时代与成因初步研究. 中国沙漠, 18(1): 16-21.
李新荣,张景光,刘立超. 2000. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究. 植物生态学报, 24(3): 257-261.
刘光祚. 1996. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社.
刘海江,郭 柯. 2003. 浑善达克沙地丘间低地植物群落分类排序. 生态学报, 23(10): 2163-2169.
刘鸿雁,田育红,丁 登. 2003. 内蒙古浑善达克沙地和河北坝上地区不同地表覆盖类型对北京沙尘天气物源的贡献. 科学通报, 48(11): 1229-1232.
牛淑丽,蒋高明,高雷明,等. 2003. 内蒙古浑善达克沙地97种植物的光合生理特征. 植物生态学报, 27(3): 318-324.
彭少麟,周厚成,陈天杏,等. 1989. 广东森林群落的组成结构数量特征. 植物生态学与地植物学报, 13(1): 10-17.
宋永昌. 2001. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社.
王革丽,吕达仁. 2002. 浑善达克沙地沙尘暴气候特征分析. 气候与环境研究, 7(4): 433-439.
王牧兰. 2007. 浑善达克沙地景观格局变化研究. 干旱区资源与环境, 21(5): 121-125.
杨淑宽. 1964. 内蒙古小腾格里沙地的植被. 地理集刊, (8): 32-46.
杨万勤,钟章成,陶建平. 2001. 缙云山森林土壤速效 P 的分布特征及其与物种多样性的关系研究. 生态学杂志, 20(1): 24-27.
张金屯. 1995. 植被数量生态学方法. 北京: 中国科学技术出版社.
张丽霞,张 峰,上官铁梁. 2000. 芦芽山植物群落的多样性研究. 生物多样性, 8(4): 361-369.
Gentry AH. 1988. Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75: 1-34.
Goldberg DE, Miller TE. 1990. Effects of different resource additions on species diversity in annual plant community. *Ecology*, 71: 213-225.
Magurran AE. 1988. *Ecological Diversity and its Measurement*. New Jersey: Princeton University Press.
Piebu EC. 1975. *Mathematical Ecology*. New York: John Wiley & Sons Inc.
Timan D. 2000. Cause, consequence and ethics of biodiversity. *Nature*, 405: 208-211.
Whittaker RH, Niering WA. 1975. Vegetation of the Santa Catalina Mountain, Arizona. V. Biomass, production, and diversity along the elevation gradient. *Ecology*, 56: 771-790.

作者简介 宋创业,男,1980年生,博士研究生。主要从事植被生态学研究。E-mail: songcy@leis.ac.cn
责任编辑 刘丽娟