

齐丹卉,杨洪晓,卢琦,等.浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释[J].中国沙漠,2021,41(6):65-77.

浑善达克沙地植物群落物种多样性及环境解释

齐丹卉^{1a,2}, 杨洪晓³, 卢琦^{1ab}, 褚建民^{1c}, 袁祺^{1c},
甘红豪^{1c}, 赵帅^{1c}, 陈加伟^{1c}, 徐晓庆^{1c}

(1.中国林业科学研究院 a.荒漠化研究所,b.沙漠林业实验中心,c.林业研究所,北京 100091; 2.西南林业大学 生态与环境学院,云南 昆明 650224; 3.青岛农业大学 资源与环境学院,山东 青岛 266109)

摘要:认识沙地植物群落物种多样性及其与环境的关系,对维护沙地生态系统的结构与功能具有重要意义。本研究基于浑善达克沙地83个样地的群落数据及环境数据,通过数量生态学方法对群落物种多样性及其影响因子进行分析,探讨浑善达克沙地物种多样性特征及其环境解释。结果表明:(1)主要群落有榆树(*Ulmus pumila*)群落、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)群落、黄柳(*Salix gordejewii*)群落及长梗扁桃(*Prunus pedunculata*)群落等,其中榆树群落分布在降水和土壤养分都比较高的区域,小叶锦鸡儿群落适生环境为降水较少且土壤贫瘠的区域;影响该区域群落分布的主要环境因子依次为生长季降水量、生长季温度、土壤全氮和全钾含量,降水量的差异显著影响群落分布格局。(2)浑善达克沙地植物多样性的分布呈现出一定的规律性变化。物种多样性指数均随经度和海拔的增加而增加;Patrick指数与Shannon-wiener指数随纬度的增加呈现减少的趋势;Simpson指数与Pielou指数随纬度增加而增加;Patrick指数、Simpson指数和Shannon-wiener指数与生长季降水量、土壤有机碳和有效氮含量呈显著正相关,与生长季均温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季风速呈显著负相关,所有环境变量与Pielou指数均无显著相关性。研究结果阐明了浑善达克沙地物种多样性及植物群落分布的规律以及与关键环境因子之间的关系,有利于提高沙地植物多样性和稳定性,增强沙地植被的生态功能。

关键词:植物多样性;环境因子;CCA;浑善达克沙地

文章编号:1000-694X(2021)06-065-13

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00080

中图分类号:Q145

文献标志码:A

0 引言

生物多样性随环境梯度的变化规律是生物多样性研究的重要内容^[1-2]。物种多样性是生物多样性研究中最基础的部分,是群落功能复杂性与稳定性的重要度量指标^[3-4]。关于植物群落物种多样性的研究历来为国内外学者所重视^[5-6],了解影响植物群落物种多样性的关键因素及其相互关系对预测群落多样性的动态变化有着重要意义^[7]。环境因素包括经纬度、海拔、气候、土壤、地形等^[8],其中经纬度和海拔常用于大尺度物种多样性分布格局的研究^[9];在区域尺度上,地形、气候、土壤3种环境要素的不同组合产生了复杂的群落物种多样性格局^[10]。探讨群落物种多样性的特征和影响因素,对维护生

态系统的结构和功能的稳定性具有重要意义^[11-13]。

生态学家对物种多样性格局的形成机制提出了中域效应假说、种库假说、物种-能量假说、地史成因假说等一系列假说^[14]。其中以气候因素为基础的能量假说是目前最受关注的假说之一,寒冷忍耐假说认为随着冬季温度的降低物种多样性逐渐减少^[15-16],生态学代谢假说试图从机制上解释环境温度与物种多样性地理格局的关系^[17-18],水热动态假说认为物种多样性的大尺度格局由水分和热量共同决定^[19-20]。水分和热量的作用在不同生境与尺度上并不一致^[21-22],在水分充足的区域,多样性主要受温度控制,而在水分亏缺的区域,物种多样性受水分和温度的共同制约^[23]。此外,土壤质地与肥力等因素也被证明对植物物种多样性格局存在重要

收稿日期:2021-05-24;改回日期:2021-07-14

资助项目:科技部科技基础资源调查专项(2017FY100205);中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2020ZB001)

作者简介:齐丹卉(1979—),女,山东昌邑人,博士研究生,主要从事荒漠生态学研究。E-mail:7942965@qq.com

通信作者:褚建民,E-mail:cjmcaf@163.com

作用^[24-26]。这些因子对物种多样性格局的作用在前期有一定的研究支持,但对环境因子的相对重要性尚存在一定的争议^[27],对不同尺度上的物种多样性格局的形成机制并未达成共识。

浑善达克沙地位于内蒙古高原中东部,跨越中国半湿润-半干旱区-干旱区,因水分条件的不同,浑善达克沙地植被从东到西具有明显的地带性特征,由东部的疏林草原、中部的典型草原向西部的荒漠草原过渡^[28]。近年来研究人员已从土壤、微地形、放牧等方面对影响浑善达克物种多样性的环境因素进行了一系列研究。宋创业等^[29]发现浑善达克沙地固定沙丘的物种丰富度指数和多样性指数最高,均匀度指数与土壤 pH 值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;张志永等^[30]的研究表明微地形能够显著影响浑善达克沙地的群落分布和物种多样性特征;詹瑾等^[31]的研究显示浑善达克沙地不同放牧程度下土壤有机碳和全氮含量存在极显著差异,而丰富度、多样性和均匀度指数差异均不显著。这些研究多在单一群落类型或浑善达克沙地的局部区域,尚未发现从生物多样性角度分析浑善达克沙地的环境对植物群落影响的理论和成果,这不利于对浑善达克沙地生物多样性格局及形成机制的认识。研究浑善达克沙地植物群落物种多样性及其与环境的关系,是深入研究沙地生态系统功能变化规律并科学解读沙地植被恢复机理的有效途径,对于促使植被恢复具有重要参考价值。本研究在野外群落调查的基础上,通过数量生态学研究方法对群落的物种多样性、空间分布格局及其影响因子进行了分析,尝试阐明该区域的主要植物群落、物种多样性特征及其环境解释。研究结果可为浑善达克沙地生物多样性保护、植被演替和多样性维持机制等生态问题的进一步研究提供数据支撑和理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

浑善达克沙地位于内蒙古高原中东部,东起大兴安岭南段西麓达里诺尔,向西一直延伸到集二线铁路沿线,南部为阴山山地隆起区^[32-33]。本研究区域包括浑善达克沙地及其周边小面积沙地,地理坐标为 41°56′—44°26′N、112°22′—117°57′E,海拔

1 000—1 400 m。东部以固定半固定沙地为主,沙丘高度 10—15 m,西部以半固定、流动沙地为主^[34]。多年平均气温 2—5 °C,年降水量东部为 350—400 mm、西部为 100—200 mm,降水集中在生长季(6—8月),其中 7 月降雨最多;年蒸发量为 2 000—2 900 mm,属于温带大陆性半干旱气候区^[35]。土壤以风沙土和栗钙土为主,其次为棕钙土。植被具有明显的地带性,从东到西依次分布着疏林草地、灌丛和荒漠草原,建群种主要有榆树(*Ulmus pumila*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、盐蒿(*Artemisia halodendron*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与群落调查

采用科技部科技基础资源调查专项“中国荒漠主要植物群落调查”方法,每隔 10 km 布设一个样地,共 83 个样地(图 1)。用 GPS 对每一个样地精确定位,记录地理位置、海拔、坡向、坡度、土壤类型、群落特征、干扰情况等信息。参照《中国植被》和《中国植被及其地理格局——中华人民共和国植被图集 1:100 万说明书》及补充材料^[36]中的植物生活型分类系统,将树高≥2 m 且有明显主干的木本植物界定为乔木,没有明显主干或树高<2 m 的木本植物界定为灌木。参考方精云等^[37]提出的植物群落调查技术规范,设置 1 个 100 m×100 m 的大样方,对其中的乔木采用逐木调查的方法,记录高度、胸径和冠幅;在大样方中布设 5 个 10 m×10 m 的灌木样方,逐一测定灌木的高度和冠幅;在大样方中布设 9 个 1 m×1 m 的草本样方,记录样方中每种植物的种类、个体数和盖度,并选择 3 个标准株测量其高度以估算平均高度。共调查了 83 个样地,包括 83 个 100 m×100 m 的乔木样方、415 个 10 m×10 m 的灌木样方和 747 个 1 m×1 m 的草本样方。野外调查时间为 2018—2020 年 7—8 月。

1.2.2 环境数据获取

在 83 个样地内挖土壤剖面,按照 0—5、5—10、10—20 cm 分为 3 层采集土壤样品,混合后装入封口袋带回实验室。依据中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》测定土壤养分含量:有机碳含量(soil organic carbon, SOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法,全氮(total nitrogen, TN)用半微量凯氏法,全磷(total phosphorus, TP)和全钾(total phosphorus, TK)采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消解-ICP-OES

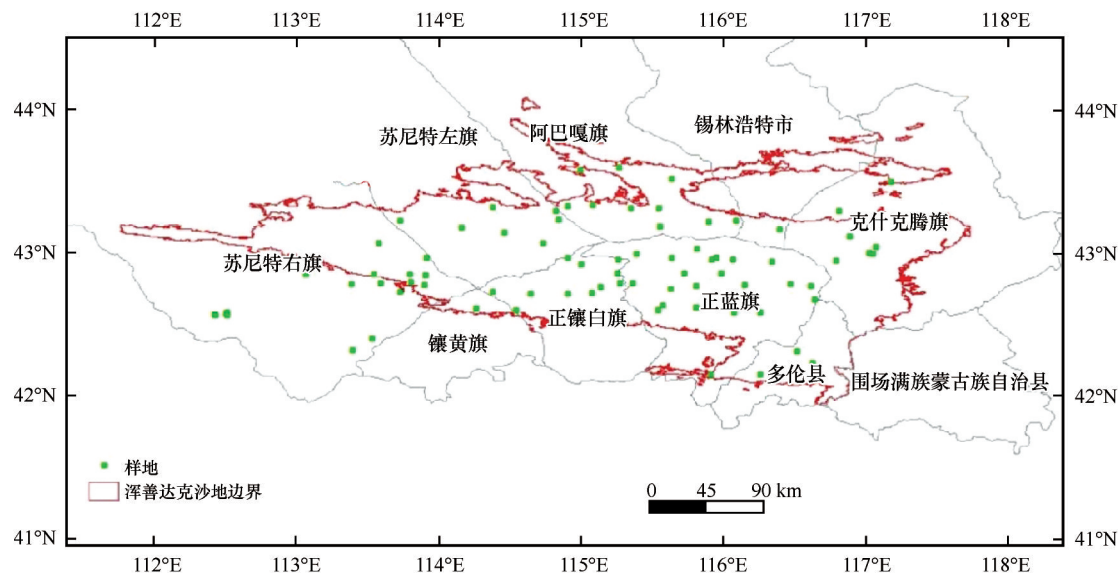


图1 研究区域及样地位置
Fig.1 Location of the study area and sample plots

法,有效氮(available nitrogen, AN)用碱解-扩散法,有效磷(available phosphorus, AP)用比色法,有效钾(available phosphorus, AK)用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵浸提-ICP-OES 法。

利用“中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)”^[38]的日尺度降水、温度和风速数据,计算每个像元的月均温度、降水和风速数据,提取每个像元 1979—2018 年的平均值,计算得到生长季降水量、生长季均温和生长季平均风速。≥0℃积温(经 TEM 校正)数据获取自《中国气象背景数据集》^[39]。环境因子见表 1。

表 1 环境因子对照表			
Table 1 Environmental factors in the study area			
环境因子		简称	单位
气候因子	生长季降水量	PGS	mm
	生长季均温	TGS	°C
	≥0℃积温	AT0	°C
	生长季平均风速	WGS	m·s ⁻¹
土壤因子	有机碳	SOC	g·kg ⁻¹
	全氮	TN	g·kg ⁻¹
	全磷	TP	g·kg ⁻¹
	全钾	TK	g·kg ⁻¹
	有效氮	AN	mg·kg ⁻¹
	有效磷	AP	mg·kg ⁻¹
	有效钾	AK	mg·kg ⁻¹

1.2.3 数据分析

采用 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数测度浑善达克沙地不同植物群落的物种多样性程度^[40-41]。根据样方中每个物种的高度、盖度和频度计算出重要值,作为计算多样性指数的基础^[7]。

重要值=(相对盖度+相对高度+相对频度)/3×100%

Patrick 指数: $R = S$

Simpson 指数: $D = 1 - \sum P_i^2$

Shannon-Wiener 指数: $H' = -\sum P_i \ln P_i$

Pielou 指数: $E = H' / \ln S$

某种植物的存在度(%)=该植物出现的样地数/样地总数×100%

式中: S 为物种数; P_i 为第 i 个物种的重要值。

以浑善达克沙地群落的物种重要值与气候、土壤因子为数据源,分别构成物种与气候、土壤因子数据矩阵,用 Canoco 5 软件的 CCA(典范对应分析法)对不同物种和群落类型与环境因子进行数量排序,得到物种或群落类型与气候、土壤因子的 CCA 二维排序图。依据软件给出的排序轴的特征值和累计解释率检验排序结果是否可信。

2 结果与分析

2.1 群落类型与植物组成

浑善达克沙地主要群落类型有榆树群落(Form.

Ulmus pumila)、小叶锦鸡儿群落(Form. *Caragana microphylla*)、黄柳群落(Form. *Salix gordejvii*)、长梗扁桃群落(Form. *Prunus pedunculata*)等(表2)。本次调查共记录维管植物248种, 分属46科149属。其中菊科(Asteraceae)植物种数最多(38种), 其次为禾本科(Poaceae)、豆科(Fabaceae)、苋科(Amaranthaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、唇形科(Lamiaceae)等, 这6个科的属数与种数分别占浑善达克沙地调查记录物种的53.6%和55.2%, 为浑善达克沙地主要优势科。

表 2 浑善达克沙地主要植物群落类型
Table 2 Mean community types of the Otindag Sandy Land

群落名称	样方数	优势种
榆树群落	23	榆树(<i>Ulmus pumila</i>)、盐蒿(<i>Artemisia halodendron</i>)、冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)、蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)、冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)、黄柳(<i>Salix gordejvii</i>)
小叶锦鸡儿群落	18	小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)、沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)、蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)、猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)
黄柳群落	7	黄柳(<i>Salix gordejvii</i>)、蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)、小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)、沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)、盐蒿(<i>Artemisia halodendron</i>)、乌柳(<i>Salix cheilophila</i>)
长梗扁桃群落	8	长梗扁桃(<i>Prunus pedunculata</i>)、糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)、大针茅(<i>Stipa grandis</i>)、小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)、画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)、狭叶锦鸡儿(<i>Caragana stenophylla</i>)

沙地植物中, 糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)的存在度最高, 其次为蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)等(表3)。根据《中国植被》对植物生活

表 3 浑善达克沙地常见植物(存在度>30%)
Table 3 Common plant species in the Otindag Sandy Land (Presence>30%)

物种	科	生活型	生态类型	存在度/%
糙隐子草(<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	禾本科(Poaceae)	多年生草本	旱生	81.93
蒙古虫实(<i>Corispermum mongolicum</i>)	苋科(Amaranthaceae)	一年生草本	旱生	80.72
猪毛菜(<i>Salsola collina</i>)	苋科(Amaranthaceae)	一年生草本	旱中生	77.11
雾冰藜(<i>Bassia dasyphylla</i>)	苋科(Amaranthaceae)	一年生草本	旱生	66.27
狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	禾本科(Poaceae)	一年生草本	中生	62.65
冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)	菊科(Asteraceae)	多年生草本	旱生	61.45
盐蒿(<i>Artemisia halodendron</i>)	菊科(Asteraceae)	半灌木	中旱生	60.24
小叶锦鸡儿(<i>Caragana microphylla</i>)	豆科(Fabaceae)	灌木	旱生	57.83
冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)	禾本科(Poaceae)	多年生草本	旱生	45.78
蒙古韭(<i>Allium mongolicum</i>)	石蒜科(Amaryllidaceae)	多年生草本	旱生	43.37
细叶韭(<i>Allium tenuissimum</i>)	石蒜科(Amaryllidaceae)	多年生草本	旱生	43.37
花苜蓿(<i>Medicago ruthenica</i>)	豆科(Fabaceae)	多年生草本	中旱生	42.17
寸草(<i>Carex duriuscula</i>)	莎草科(Cyperaceae)	多年生草本	中旱生	42.17
藜(<i>Chenopodium album</i>)	苋科(Amaranthaceae)	一年生草本	中生	39.76
羊草(<i>Leymus chinensis</i>)	禾本科(Poaceae)	多年生草本	旱生-中旱生	39.76
沙鞭(<i>Psammochloa villosa</i>)	禾本科(Poaceae)	多年生草本	旱生	38.55
榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	榆科(Ulmaceae)	乔木	旱中生	33.73
画眉草(<i>Eragrostis pilosa</i>)	禾本科(Poaceae)	一年生草本	中生	33.73
地梢瓜(<i>Cynanchum thesioides</i>)	夹竹桃科(Apocynaceae)	多年生草本	中旱生	30.12

型的划分,浑善达克沙地植物以多年生草本(129种,占比52%)为主;依据植物对水分的适应特点将陆生植物划分为湿生、中生、旱生及中间类型,浑善达克沙地植物的生态类型以旱生植物为主(113种,占比45.6%)。

2.2 群落物种多样性随经纬度和海拔的变化特征

在东西方向上,植物群落的物种丰富度和多样性指数均随经度的增加而呈上升趋势($P<0.01$)。从图2可见,Patrick指数集中在8—39,均值为20.37;Simpson指数0.77—0.96,平均值为0.91;Shannon-Wiener指数2—3.5,平均值为2.64;Pielou指数0.7—0.96,平均值为0.89。其中112°—115°E的地区丰富度大都低于30,小叶锦鸡儿灌丛大多分布在这一区

域;丰富度比较高的区域集中在116°E附近,这个区域恰好是榆树疏林的分布区,说明榆树群落是浑善达克沙地上物种丰富度最高的群落类型。

在南北方向上,植物群落的Patrick指数和Shannon-Wiener指数随纬度升高而下降,Simpson指数和Pielou指数整体呈上升趋势(图3),但相关性不显著($P>0.05$)。中部区域(42.6°—43.3°N)Patrick指数最高,均值21.1,最大值(39)出现在该区域;南部区域(42.1°—42.6°N)群落的Patrick指数为14—37,平均值21,略低于中部区域;北部区域(43.3°—43.6°N)群落的Patrick指数为9—30,平均18.6,显著低于中部和南部区域。Simpson指数最高值0.96出现在北部区域,Shannon-Wiener指数的最高值(3.43)出现在中部地区。

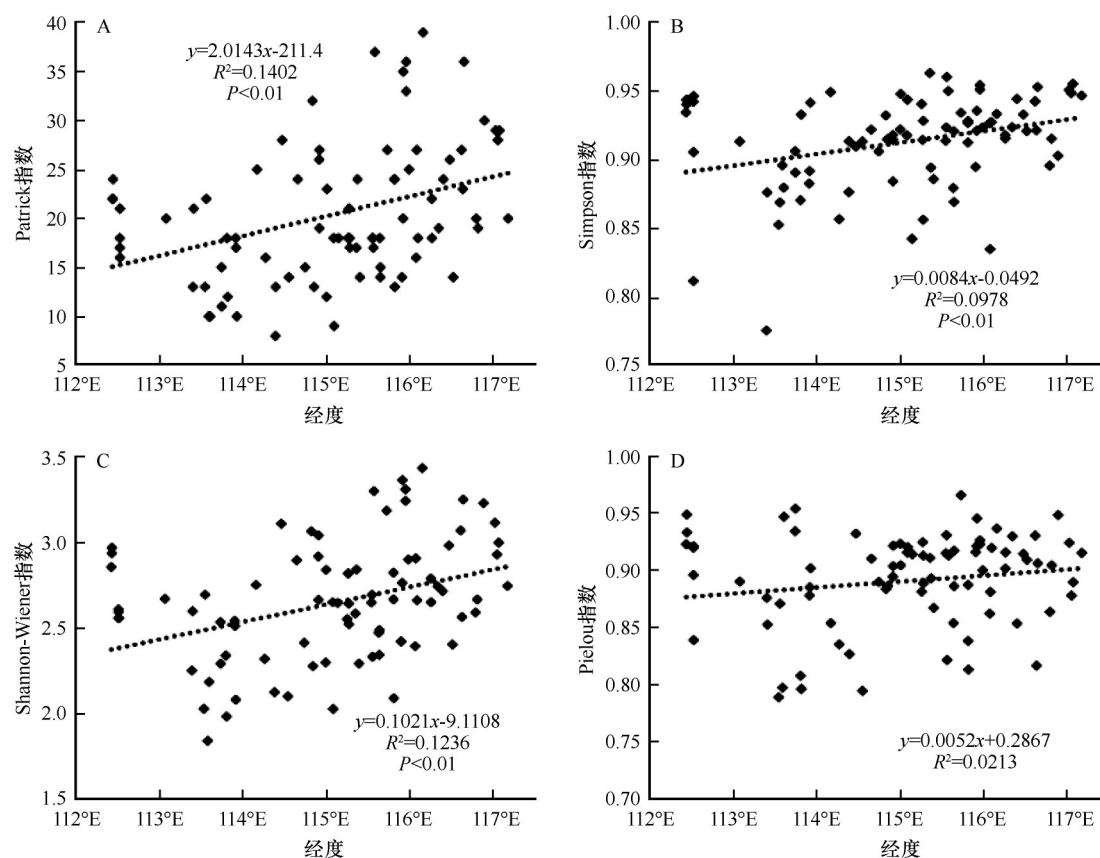


图2 浑善达克沙地物种多样性指数经向变化

Fig.2 Longitudinal variation of species diversity indexes in the Otindag Sandy Land

研究区整体呈现东高西低的地势,海拔1 000—1 400 m。图4显示了多样性指数随海拔的变化趋势:随着海拔的升高,群落的Patrick指数($P<0.01$)、Shannon-Wiener指数($P<0.01$)、Simpson指数($P<0.05$)呈现增加的趋势。群落的丰富度和多样性的最高值出现在海拔1 300 m附近,最低值出现在1 100 m

左右,而群落的均匀度指数的低值出现在1 050、1 200、1 300 m这3个海拔范围,出现在这3个海拔范围的植被类型以灌丛居多,多为小叶锦鸡儿灌丛。

2.3 植物群落物种多样性与环境因子的关系

浑善达克沙地物种多样性指数与环境因子表

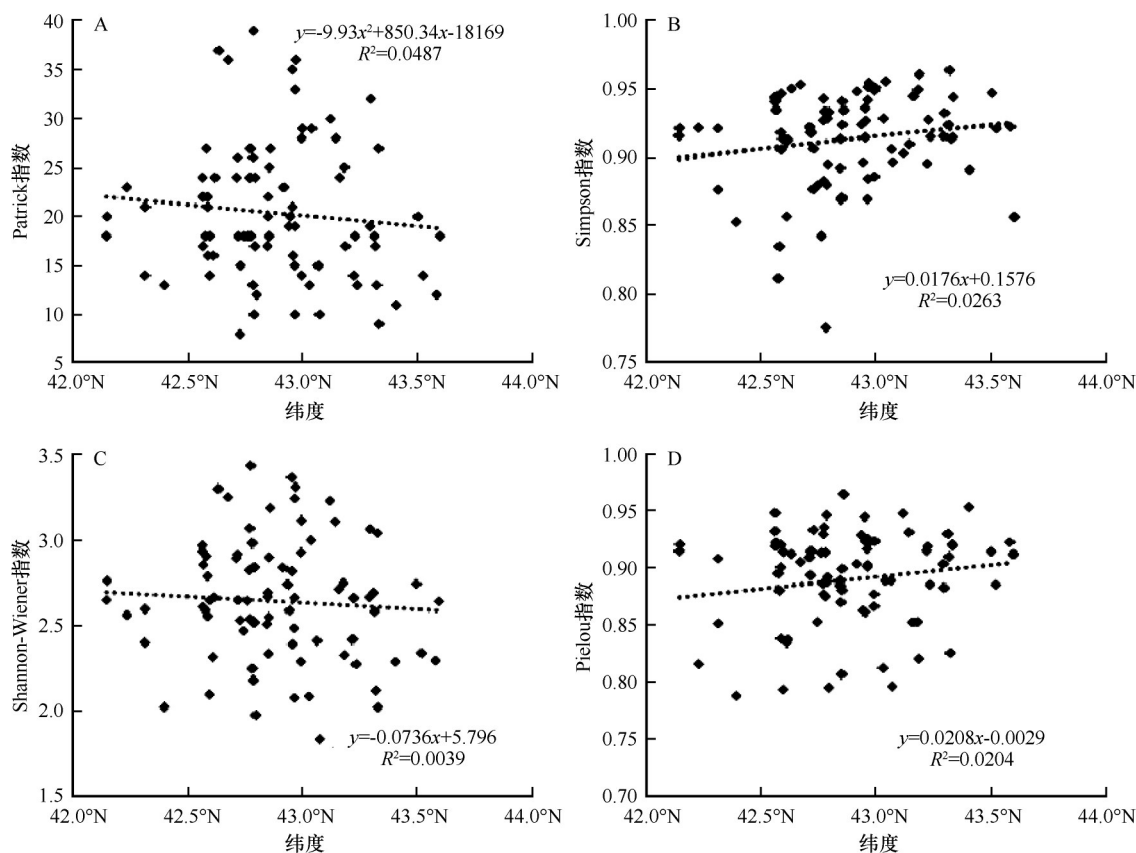


图3 浑善达克沙地物种多样性指数纬向变化

Fig.3 Latitudinal variation of species diversity indexes in the Otindag Sandy Land

现出不同程度相关性(表4)。群落的 Patrick 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数均与生长季降水量和有效氮呈显著正相关($P<0.01$),与土壤有机碳呈显著正相关($P<0.05$),与生长季温度、生长季风速、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温呈显著负相关($P<0.01$); Shannon-Wiener 指数与全磷呈现出显著负相关($P<0.05$); Pielou 均匀度指数与各环境因子之间的关系均不显著。这说明气候因子和部分土壤因子对浑善达克沙地植物群落的丰富度和多样性影响较大。

2.4 群落物种组成与环境因子的关系

以浑善达克沙地植物群落物种的重要值与气候和土壤因子为数据源,构成物种与环境因子数据矩阵,对浑善达克沙地物种及群落类型和环境因子进行数量排序,得到物种和群落类型与土壤因子的 CCA 二维排序图。从表 5 得知,前两轴的特征值分别为 0.398 和 0.312,分别解释了 26.87% 和 21% 的物种-环境关系,累计方差解释率为 71.87%,能较为完整地反映排序信息,说明选择的

环境因子可较好地反映植物群落的分布格局,排序结果可信。

从表 6 可以看出各个环境因子对浑善达克沙地植物群落组成和分布的解释与贡献率,其中生长季降水量的贡献率最高为 25.1%,其次是生长季温度、土壤全氮和全钾含量,贡献率均超过 10%,前三者 P 值小于 0.01,说明在浑善达克沙地,气候和土壤因子对植物群落的分布有极显著的影响。

图 5 横轴反映了浑善达克沙地生境的气候变化对物种分布的影响,从左到右降水量逐渐减小,温度、积温和风速逐渐增加,生境从湿润转向干旱。纵轴反映的是生境的土壤养分含量的差异,从上到下土壤中全氮和有机碳的含量逐渐减少,全磷含量逐渐增加。小果白刺(*Nitraria sibirica*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)等植物位于第一象限,其生境特征是干旱、温度高、土壤养分较好,这样的生境下生长的多为旱生、强旱生的植物。位于第二象限的植物有小叶锦鸡儿、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)等,均为耐旱、耐贫瘠的沙生植物。女娄菜(*Silene aprica*)、

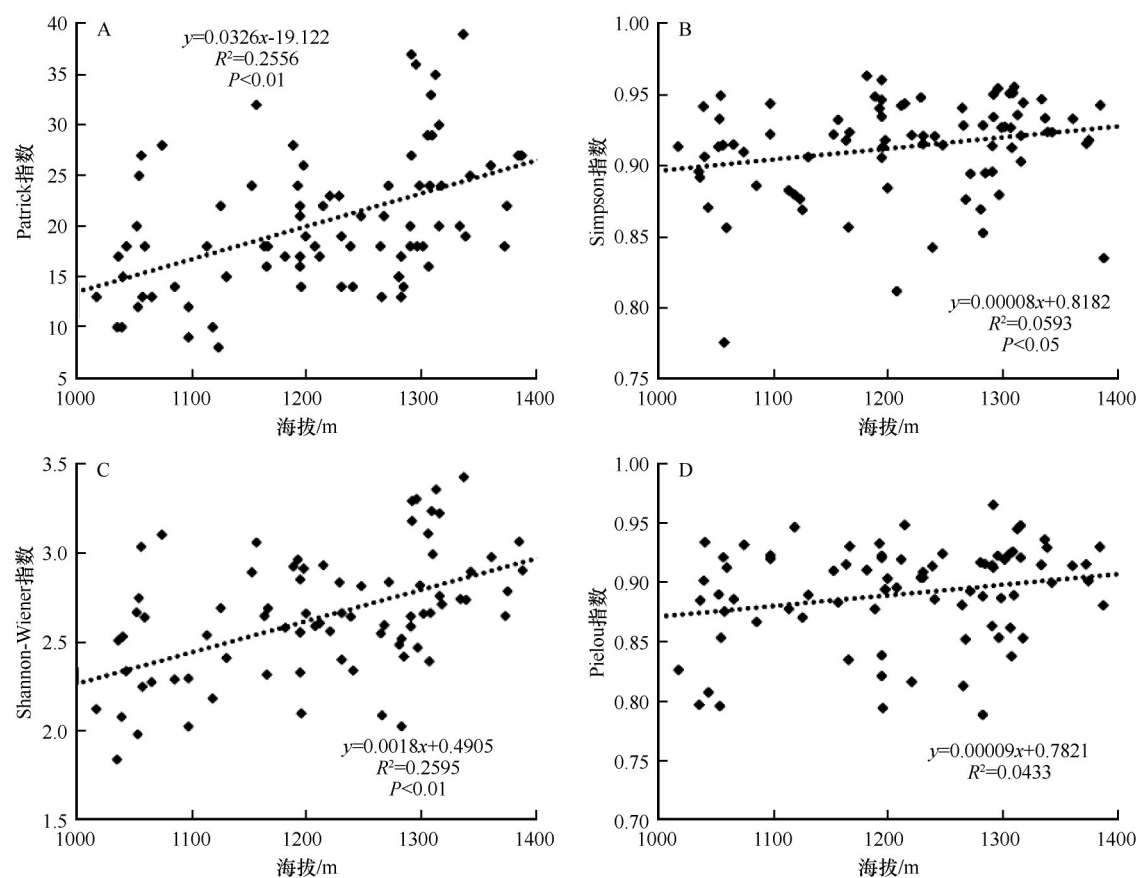


图4 浑善达克沙地物种多样性指数随海拔的变化

Fig.4 Elevational variation of species diversity indexes in the Otindag Sandy Land

表4 浑善达克沙地植物群落物种多样性与环境因子的相关性($n=83$)

环境因子		多样性指数			
		Patrick 指数	Simpson 指数	Shannon-Wiener 指数	Pielou 指数
气候因子	生长季降水量	0.426**	0.289**	0.394**	0.114
	生长季均温	-0.458**	-0.321**	-0.445**	-0.173
	≥0 °C积温	-0.426**	-0.332**	-0.418**	-0.163
	生长季风速	-0.356**	-0.329**	-0.318**	-0.097
土壤因子	有机碳	0.275*	0.439**	0.244*	0.128
	有效氮	0.382**	0.465**	0.332**	0.131
	全磷	-0.215	-0.185	-0.263*	-0.153

*在 0.05 水平(双侧)上显著相关; **在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

华北岩黄芪(*Hedysarum gmelinii*)、蒙古虫实(*Corispermum mongolicum*)等植物位于第三象限,其生境是水分条件较好,但土壤较为贫瘠的区域。第四象限的植物如榆树、耧斗菜叶绣线菊(*Spiraea aquilegifolia*)、斜茎黄芪(*Astragalus laxmannii*)等,其生境是水分条件和土壤养分比较高的地方,多数广布

种也生活这样的生境下,如芦苇(*Phragmites australis*)。CCA 排序图比较直观地显示了群落中的植物与环境因子的相互关系。

从图 6 可以看出,榆树群落适合生长在降水量和土壤碳氮都比较高的区域,小叶锦鸡儿群落适生生境为降水较少且土壤贫瘠的区域。长梗扁桃群

表 5 浑善达克沙地植物群落与环境因子的 CCA 对应分析结果

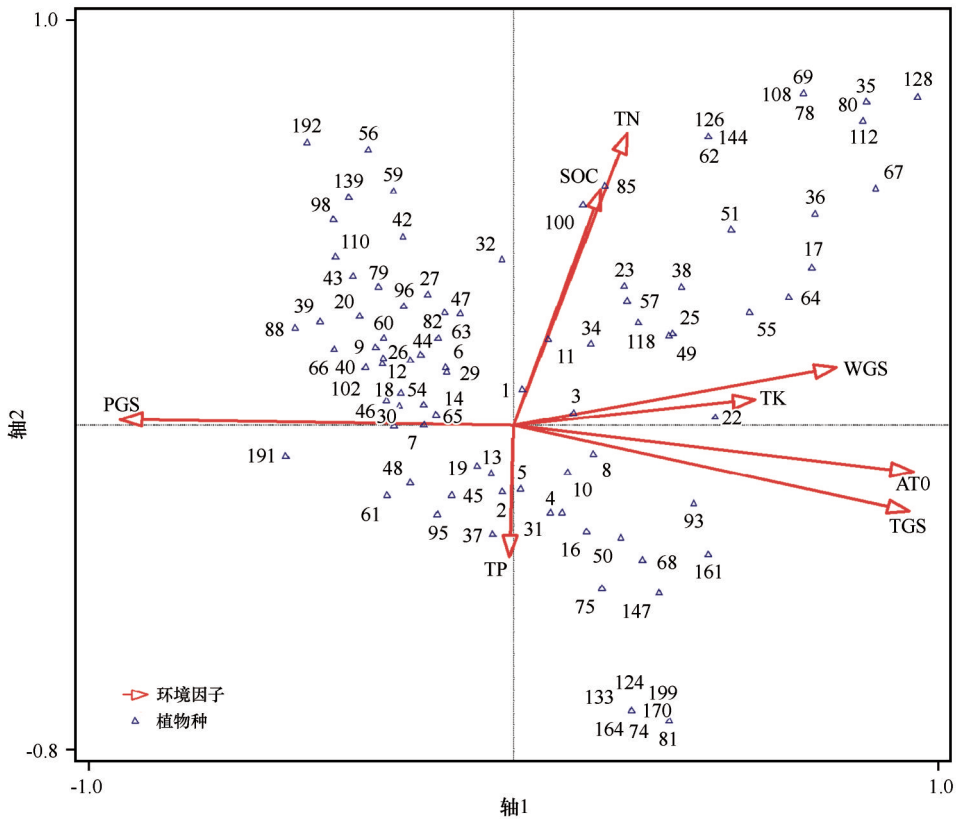
Table 5 Results for the first four axes of the CCA of communities and environmental factors in the Otindag Sandy Land				
统计轴	特征值	物种-环境相关性	累计变异率/%	
			物种数据方差	物种-环境关系
第 1 轴	0.398	0.941	7.19	26.87
第 2 轴	0.312	0.938	12.81	47.87
第 3 轴	0.204	0.928	16.49	61.65
第 4 轴	0.151	0.897	19.23	71.87

落分布在干旱、风速较大且土壤养分较高的生境下。黄柳群落对水分条件要求不高,主要分布在土

表 6 浑善达克沙地环境因子对群落的解释与贡献率
Table 6 Explains and Contribution rate of community with environmental factors in the Otindag Sandy Land

环境因子	解释率/%	贡献率/%	P 值
生长季降水量	6.7	25.1	0.002
生长季温度	4.8	18.1	0.002
全氮	4.1	15.2	0.004
全钾	2.8	10.3	0.054
生长季风速	2.4	8.9	0.248
土壤有机碳	2.3	8.6	0.172
≥0℃积温	1.8	6.6	0.782
全磷	2	7.4	0.572

壤较为贫瘠的沙地。CCA 排序图反映的植物群落生境与自然分布规律较为一致。



PGS:生长季降水量; TGS:生长季均温; AT0:≥0℃积温; WGS:生长季风速; SOC:有机碳; AN:有效氮; TP:全磷
图 5 浑善达克沙地群落的物种分布与气候和土壤因子的 CCA 排序图

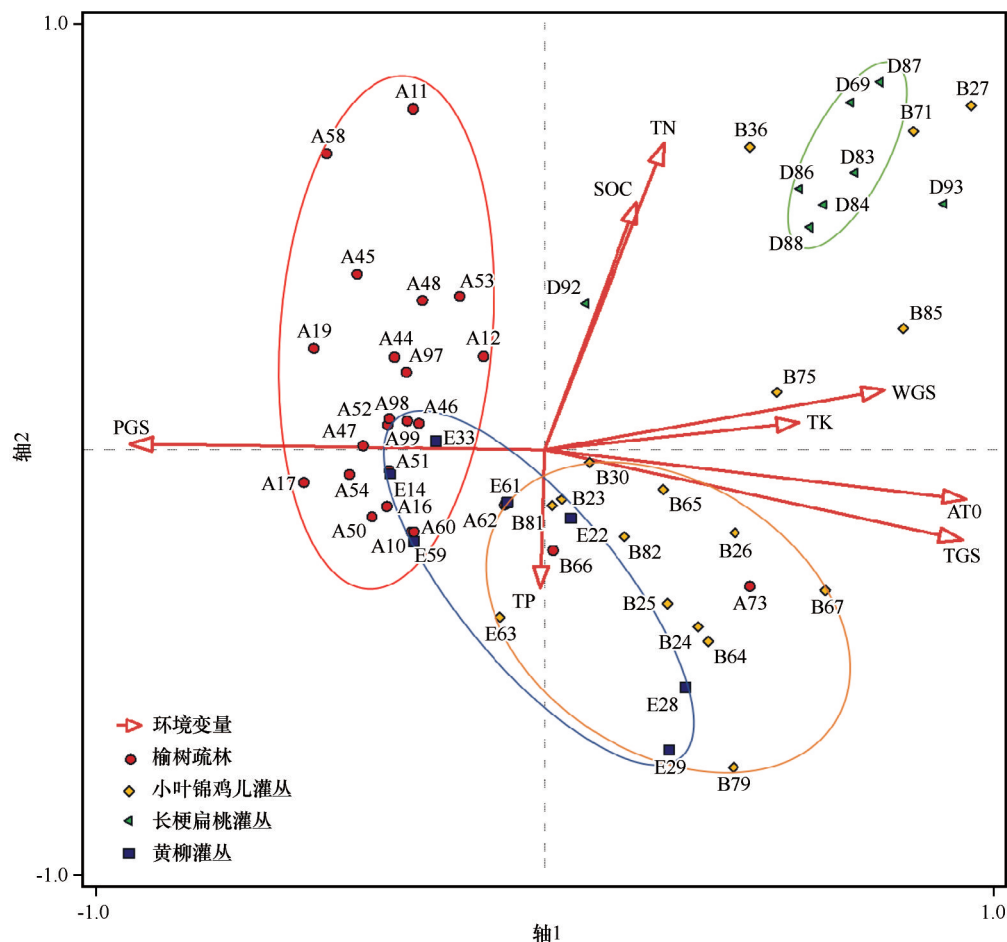
Fig.5 CCA ordination of species distribution and climatic and edaphic factors in the Otindag Sandy Land

3 讨论

3.1 浑善达克沙地的物种多样性

浑善达克沙地的植物多样性具有一定的特殊

性。研究区属于温带大陆性气候区,寒冷、少雨、风沙大,广泛分布的土壤为风沙土,常与盐碱土、草甸土相间分布,形成坨甸相间的格局^[42]。在这样的环境条件下发育的植物群落以旱生的沙生植物最为常见,以多年生草本植物和灌木、小灌木、半灌木形



PGS: 生长季降水量; TGS: 生长季均温; AT0: $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温; WGS: 生长季风速; SOC: 有机碳; AN: 有效氮; TP: 全磷

图6 浑善达克沙地不同群落类型与气候和土壤因子的 CCA 排序图

Fig.6 CCA ordination of different community types and climatic and edaphic factors in the Otindag Sandy Land

成的灌丛和草地植被为主,在东部水分条件较高的区域形成榆树疏林草原。植物物种向优势科集中,表现出多数种属于少数科的特点。与毛乌素沙地^[43]和科尔沁沙地^[44]做对比,毛乌素沙地以菊科、蔷薇科、豆科、禾本科为主,苋科比例明显降低;科尔沁沙地以菊科、豆科、禾本科为主,蔷薇科比例较低;浑善达克沙地以菊科、禾本科、豆科、苋科、蔷薇科、唇形科为主,占到总物种数的半数以上。优势科的组成和数量体现着一个区域的区系特点,这些科表现出沙地植被的特殊性和半干旱气候影响下的植被特征。

物种多样性具有丰富性和均匀性两方面内容^[40], Patrick 指数是最常用的丰富度指数, 本文研究表明, 浑善达克沙地的物种丰富度程度最高的区域在 43°N、116°E、海拔 1 300 m 附近, 是正蓝旗榆树疏林分布的核心区^[45]。研究区 Pielou 指数整体较高, 较高的均匀度有利于维持群落结构的稳定

性^[46]。在均匀度差异不显著的情况下,Shannon-Wiener指数对群落的丰富度较为敏感^[40]。本研究显示,物种多样性指数的变化趋势与物种丰富度基本一致,表现为物种数越多,多样性指数越高,这与在内蒙古西部的研究基本一致^[7]。

3.2 气候因子对浑善达克沙地物种多样性的影响

气候是植被大尺度分布格局的决定性因子^[47], 植物种群和群落的分布都是由气候(主要是水热条件)决定的。降水量被认为是影响干旱区、半干旱区荒漠植被和沙地植被的最主要因子, 有研究表明, 地下水位及土壤阳离子对于毛乌素沙地丘间地植物群落分布产生重要影响^[48-51]; 浑善达克沙地镶嵌于典型草原地带之中^[52], 年降水量从东部的 440 mm 向西逐渐减少至 150 mm^[28]。随着降水量的递减, 自东向西依次分布着疏林、灌丛、荒漠等植被类型, 在空间上呈现出斑块镶嵌的景观^[53]。其中, 疏

林和灌丛是最常见的两种,以榆树疏林和小叶锦鸡儿灌丛为典型代表。榆树疏林分布在沙地中东部,物种多样性较高,这与之之前对榆树疏林植物多样性的结果相近^[54-55]。研究区的小叶锦鸡儿灌丛分布在沙地的中西部,水分条件稍差,因而多样性水平较低,这是草原灌丛化对群落多样性和生态系统功能的影响^[56]。研究表明,物种多样性的大尺度格局由水分和温度共同决定^[57-58]。在水分条件充足时,温度是影响物种丰富度的主要因子,而在降水不足时则受降水量控制^[59-60]。降水量是影响浑善达克沙地植被的主要气候因素^[61];本研究证明,植物群落的Patrick指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数与生长季降水量呈显著的正相关关系,这与前期的研究是一致的,水分条件是影响物种多样性的最主要因子^[62-64]。

温度因子是影响植物群落物种多样性的重要因子^[60]。一般认为物种多样性与温度因子呈正相关关系^[65],而在内蒙古干旱、半干旱区的部分研究显示,物种多样性却与年均温呈显著的负相关关系^[7,61,66-68]。本研究结果与后者基本一致,Patrick指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou指数均与生长季均温呈显著负相关关系。这说明,温度因子确实对研究区内的物种多样性存在影响。呈现负相关的原因可能有两个:一是尺度问题,浑善达克沙地东西跨度大而南北跨度小,温度因子的梯度变化不明显,气候因子的解释率反而下降^[67];二是生长季温度高的地方往往蒸发量也高,而蒸发量与水分因子呈现负相关^[69]。温度因子对物种多样性的影响还需进一步探讨。

3.3 土壤养分对浑善达克沙地物种多样性的影响

土壤是决定小尺度植被分布的重要环境因子,沙地土壤质地、理化因子、微生物等都对植被的分布有直接的影响^[70-71]。土壤和植被是土壤-植被-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, SPAC)的共同组成部分^[72],是相互依存、相互影响的因子,对二者之间关系的研究具有重要意义^[67]。目前针对这方面的研究很多,有研究显示土壤中氮含量与物种多样性呈正相关^[73],也有试验显示氮素添加会降低物种多样性^[74-75];还有研究指出,在贫瘠土壤上氮含量增加可以提高物种丰富度,而养分丰富的土壤提高含氮量可能会破坏原有生态系统的共

存机制而造成物种丰富度的降低^[76]。位于内蒙古草原上的浑善达克沙地属于氮限制地区,土壤氮含量较高的区域群落的物种多样性相应也会提高^[76]。本研究结果基本一致,土壤有效氮与Patrick指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数均呈正相关关系。对土壤磷含量与物种多样性的研究显示,土壤磷含量与物种丰富度呈现负相关关系^[67,77-78],本研究结果显示出类似的趋势,Shannon-Wiener指数随土壤全磷含量的增加而降低。土壤有机碳是表征土壤肥力的重要指标,不仅代表土壤有机质的水平,还能说明氮、磷等元素的可利用状态^[79]。土壤有机碳的含量越高,土壤肥力越高,可支持的物种多样性水平也越高。土壤有机碳与多样性指数呈现正相关^[7,61,67,80-81]。浑善达克沙地植物群落的Patrick指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数均与有机碳呈显著正相关,这与前人的研究一致,说明土壤养分含量对群落的物种多样性具有一定的促进作用。

4 结论

浑善达克沙地共发现维管植物248种,生活型以多年生草本为主,生态类型以旱生植物为主。主要优势科为菊科、禾本科、豆科、苋科、蔷薇科、唇形科等,出现频率高的植物有糙隐子草、蒙古虫实、猪毛菜等。主要群落有榆树群落、小叶锦鸡儿群落、黄柳群落及长梗扁桃群落等,其中榆树群落分布在降水和土壤养分都比较高的区域,小叶锦鸡儿群落适生生境为降水较少且土壤贫瘠的区域。影响该区群落分布的主要环境因子按贡献率依次为生长季降水量、生长季温度、土壤全氮和全钾含量。在诸多环境因子中,降水量的不同导致了群落生境的重要差异,并显著影响到群落的分布格局。

浑善达克沙地植物多样性的分布呈现出一定的规律性变化。物种多样性指数均随经度和海拔的增加而增加;Patrick指数与Shannon-Wiener指数随纬度的增加呈现减少的趋势;Simpson指数与Pielou指数随纬度增加而增加。浑善达克沙地Patrick指数、Simpson指数和Shannon-Wiener指数与生长季降水量、土壤有机碳和有效氮含量呈显著正相关关系,与生长季均温、 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 积温、生长季风速呈显著负相关关系;所有环境变量与均匀度指数均无显著相关性。

参考文献:

- [1] Kratochwil A, Okologie F. Biodiversity in Ecosystems: Some Principles[M]. Netherlands: Springer, 1999.
- [2] 马克平. 生物多样性科学的热点问题[J]. 生物多样性, 2016, 24(1): 1-2.
- [3] 高贤明, 马克平, 黄建辉, 等. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究XI. 山地草甸 β 多样性[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 24-24.
- [4] Huang E, Chen Y, Fang M, et al. Environmental drivers of plant distributions at global and regional scales[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(3): 697-709.
- [5] Whittaker R J, Field W R. Scale and species richness: towards a general, hierarchical theory of species diversity[J]. Journal of Biogeography, 2001, 28(4): 453-470.
- [6] Harrison S, Cornell H. Toward a better understanding of the regional causes of local community richness[J]. Ecology Letters, 2008, 11(9): 969-979.
- [7] 杨崇曜, 李恩贵, 陈慧颖, 等. 内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J]. 生物多样性, 2017, 25(12): 1303-1312.
- [8] 汪殿蓓, 暨淑仪, 陈飞鹏. 植物群落物种多样性研究综述[J]. 生态学杂志, 2001, 20(4): 55-60.
- [9] Tilman D, Wedin D, Knops J. Productivity and sustainability influenced by biodiversity in grassland ecosystems[J]. Nature, 1996, 379(6567): 718-720.
- [10] Phillips O L, Vargas P N, Monteagudo A L, et al. Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach[J]. Journal of Ecology, 2003, 91(5): 757-775.
- [11] Hansen J, Ruedy R, Sato M, et al. Global surface temperature change[J]. Reviews of Geophysics, 2010, 48(4): 1-29.
- [12] Isaac M H. Climate science: the cause of the pause[J]. Nature, 2013, 501(7467): 318-319.
- [13] Poulter B, Pederson N, Liu H Y, et al. Recent trends in inner Asian forest dynamics to temperature and precipitation indicate high sensitivity to climate change[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2013, 178: 31-45.
- [14] 方精云. 群落生态学迎来新的辉煌时代[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 531-532.
- [15] Hawkins B A. Ecology's oldest pattern? [J]. Trends in Ecology and Evolution, 2001, 16: 470.
- [16] Hawkins B A, Porter E E, Diniz-Filho J A F. Productivity and history as predictors of the latitudinal diversity gradient of terrestrial birds[J]. Ecology, 2003, 84: 1608-1623.
- [17] Allen A P, Brown J H, Gillooly J F. Global biodiversity, biochemical kinetics, and the energetic-equivalence rule [J]. Science, 2002, 297: 1545-1548.
- [18] Stegen J C, Enquist B J, Ferriere R. Advancing the metabolic theory of biodiversity [J]. Ecology Letters, 2009, 12: 1001-1015.
- [19] O'Brien E M. Water-energy dynamics, climate, and prediction of woody plant species richness: an interim general model[J]. Journal of Biogeography, 1998, 25: 379-398.
- [20] Hawkins B A, Field R, Cornell H V, et al. Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness [J]. Ecology, 2003, 84: 3105-3117.
- [21] Xu H, Ca O M, Wu Y, et al. Disentangling the determinants of species richness of vascular plants and mammals from national to regional scales[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 21988.
- [22] Wang Z H, Fang J Y, Tang Z Y, et al. Relative role of contemporary environment versus history in shaping diversity patterns of China's woody plants[J]. Ecography, 2013, 35(12): 1124-1133.
- [23] 王志恒, 唐志尧, 方精云. 物种多样性地理格局的能量假说[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 613-624.
- [24] Wang J, Long T, Zhong Y, et al. Disentangling the influence of climate, soil and belowground microbes on local species richness in a dryland ecosystem of Northwest China [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 18029.
- [25] Zellweger F, Braunisch V, Morsdorf F, et al. Disentangling the effects of climate, topography, soil and vegetation on stand-scale species richness in temperate forests [J]. Forest Ecology and Management, 2015, 349: 36-44.
- [26] Tuomisto H, Zuquim G, Glenda C. Species richness and diversity along edaphic and climatic gradients in Amazonia [J]. Ecography, 2014, 37(11): 1034-1046.
- [27] 吕丽莎, 蔡宏宇, 杨永, 等. 中国裸子植物的物种多样性格局及其影响因子[J]. 生物多样性, 2018, 26(11): 1133-1146.
- [28] 齐丹卉, 杨洪晓, 卢琦, 等. 浑善达克沙地植物群落主要类型与特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(4): 24-34.
- [29] 宋创业, 郭柯, 刘高焕. 浑善达克沙地植物群落物种多样性与土壤因子的关系[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 10-15.
- [30] 张志永, 时忠杰, 张晓, 等. 浑善达克沙地不同微地形的土壤物理性质和草本群落分布及其相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2017(1): 69-76.
- [31] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 等. 放牧对浑善达克沙地丘间低地植被群落及土壤的影响[J]. 中国沙漠, 2019, 39(6): 187-194.
- [32] 李红丽. 浑善达克沙地沙漠化过程及其植被恢复的基础研究: 以正蓝旗为例[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2003.
- [33] 张志永, 时忠杰, 杨晓晖, 等. 浑善达克沙地榆树疏林中木本植物空间格局及种内和种间关系分析[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(3): 33-43.
- [34] 李钢铁, 姚云峰, 左合君. 浑善达克沙地桑根达来地区榆树疏林的分布与立地因子的关系的研究[J]. 世界林业研究, 2008, 21: 82-86.
- [35] 丁国栋, 蔡京艳, 王贤, 等. 浑善达克沙地沙漠化成因、过程及其防治对策研究: 以内蒙古正蓝旗为例[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(4): 15-19.
- [36] 王璇, 陈国科, 郭柯, 等. 1:100万中国植被图森林和灌丛群系类型的补充资料[J]. 生物多样性, 2019, 27(10): 1138-1142.
- [37] 方精云, 朱江玲, 郭兆迪, 等. 植物群落清查的主要内容和规范[J]. 生物多样性, 2009, 17(6): 533-548.
- [38] 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018)

- [DS].时空三极环境大数据平台,2019.DOI:10.11888/AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.CSTR:18406.11.AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.
- [39] 徐新良,张亚庆.中国气象背景数据集[DS].中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统,2017.DOI:10.12078/2017121301.
- [40] 张金屯.数量生态学[M].北京:科学出版社,2011.
- [41] 马克平,黄建辉,于顺利,等.北京东灵山地区植物群落多样性的研究II丰富度、均匀度和物种多样性指数[J].生态学报,1995,15(3):268-277.
- [42] 赵娜.浑善达克沙地榆分布与地面因素关系的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [43] 段义忠,李娟,杜忠毓,等.毛乌素沙地天然植物多样性组成及区系特征分析[J].西北植物学报,2018,38(4):188-197.
- [44] 王寅.科尔沁沙地植物物种丰富度格局及其影响因素[D].北京:北京林业大学,2019.
- [45] 彭羽,蒋高明,李永庚,等.浑善达克沙地榆树疏林自然保护区核心区设计的初步研究[J].植物生态学报,2005,29(5):775-780.
- [46] Hillebrand H, Bennett D M, Cadotte M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes[J]. Ecology, 2008, 89(6): 1510-1520.
- [47] Gaston K J. Global patterns in biodiversity[J]. Nature, 2000, 405(6783): 220-227.
- [48] 朱媛君,张璞进,邢娜,等.毛乌素沙地丘间低地植物群落分类与排序[J].中国沙漠,2016,36(6):1580-1589.
- [49] 马龙,王静茹,刘廷玺,等.2000-2012年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J].农业机械学报,2016,47(4):162-172.
- [50] 张腊梅,刘新平,赵学勇,等.科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应[J].生态学报,2014,34(10):2737-2745.
- [51] 常学礼,赵爱芬,李胜功.科尔沁沙地固定沙丘植被物种多样性对降水变化的响应[J].植物生态学报,2000,24(2):147-151.
- [52] 元志辉,包刚,银山,等.2000-2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J].草业学报,2016,25(1):33-46.
- [53] 姚雪玲,李龙,王锋,等.放牧方式对浑善达克沙地榆树疏林退化的影响[J].生态学报,2020,40(5):163-171.
- [54] 杨利民,周广胜,王国宏,等.人类活动对榆树疏林土壤环境和植物多样性的影响[J].应用生态学报,2003,14(3):321-325.
- [55] 左小安,赵学勇,张铜会,等.科尔沁沙地榆树疏林草地物种多样性及乔木种群空间格局[J].干旱区资源与环境,2005,19(4):63-68.
- [56] 丁威,王玉冰,向官海,等.小叶锦鸡儿灌丛化对典型草原群落结构与生态系统功能的影响[J].植物生态学报,2020,44(1):33-43.
- [57] Brown J H. Two decades of homage to Santa Rosalia: toward a general theory of diversity[J]. American Zoologist, 1981, 21(4): 877-888.
- [58] Wright D H. Species-energy theory: an extension of species-area theory[J]. Oikos, 1983, 41(3): 496-506.
- [59] O'Brien E M. Climatic gradients in woody plant species richness: towards an explanation based on an analysis of southern Africa's woody flora[J]. Journal of Biogeography, 1993, 20(2): 181-198.
- [60] Hawkins B A, Porter E E, Felizola D F. Productivity and history as predictors of the latitudinal diversity gradient of terrestrial birds[J]. Ecology, 2003, 84(6): 1608-1623.
- [61] 孙小丽,康萨如拉,张庆,等.荒漠草原物种多样性、生产力与气候因子和土壤养分之间关系的研究[J].草业学报,2015,24(12):10-19.
- [62] Bai Y F, Wu J G, Xing Q, et al. Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau[J]. Ecology, 2008, 89(8): 2140-2153.
- [63] Collins S L, Koerner S E, Plaut J A, et al. Stability of tallgrass prairie during a 19-year increase in growing season precipitation[J]. Functional Ecology, 2012, 26(6): 1450-1459.
- [64] Volder A, Briske D D, Tjoelker M G. Climate warming and precipitation redistribution modify tree grass interactions and tree species establishment in a warm temperate savanna[J]. Global Change Biology, 2013, 19(3): 843-857.
- [65] Francis A P, Currie D J. A globally consistent richness-climate relationship for angiosperms[J]. The American Naturalist, 2003, 161(4): 523-536.
- [66] 刘先华,李凌浩,陈佐忠.内蒙古锡林河流域植被多样性特点及其与气候因子的关系[J].植物生态学报,1998,22(5):466-472.
- [67] 白永飞,李凌浩,王其兵,等.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的样带研究[J].植物生态学报,2000,24(6):667-673.
- [68] Zhang Q, Wu J, Buyantuev A, et al. Plant species diversity is correlated with climatic factors differently at the community and the functional group levels: a case study of desert steppe in Inner Mongolia, China[J]. Giornale Botanico Italiano, 2016, 150(1): 121-123.
- [69] Currie D J. Energy and large-scale patterns of animal and plant-species richness[J]. The American Naturalist, 1991, 137(1): 27-49.
- [70] 山丹,朱媛君,王百竹,等.呼伦贝尔沙地北部沙带植物群落分布格局与土壤特性的关系[J].中国沙漠,2020,40(1):145-155.
- [71] 朱媛君,张璞进,牛明丽,等.毛乌素沙地丘间低地主要植物群落土壤酶活性[J].生态学杂志,2016,35(8):2014-2021.
- [72] 杨雪梅,杨太保,刘海猛,等.气候变暖背景下近30a北半球植被变化研究综述[J].干旱区研究,2016,33(2):379-391.
- [73] Perroni Y, Montana C, Garcia F. Relationship between soil nutrient availability and plant species richness in a tropical semi-arid environment[J]. Journal of Vegetation Science, 2006, 17(6): 719-728.
- [74] Cornwell W K, Grubb P J. Regional and local patterns in plant species richness with respect to resource availability[J]. Oikos, 2003, 100(3): 417-428.
- [75] Zhang J Q, Qi L I, Ren Z W, et al. Effects of nitrogen addition

- on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 23(1): 33–38.
- [76] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, et al. Trade offs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from Inner Mongolia Grasslands [J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 358–372.
- [77] Jouany C, Cruz P, Daufresne T, et al. Biological phosphorus cycling in grasslands: interactions with nitrogen [M]// Bunemann E K, Oberson A, Frossard E. Phosphorus in Action: Biological Processes in Soil Phosphorus Cycling. Berlin, Germany: Springer, 2011: 275–294.
- [78] Perroni Y, Garcia-Oliva F, Souza V. Plant species identity and soil P forms in an oligotrophic grassland-desert scrub system [J]. Journal of Arid Environments, 2014, 108(9): 29–37.
- [79] 王艳芬, 陈佐忠, Tieszen LT. 人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(6): 66–72.
- [80] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in sandy grassland in Horqin sand land [J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 945–951.
- [81] 沙威, 董世魁, 刘世梁, 等. 阿尔金山自然保护区植物群落生物量和物种多样性的空间格局及其影响因素 [J]. 生态学报, 2016, 35(2): 330–337.

Biodiversity of plant communities and its environmental interpretation in the Otindag Sandy Land, China

Qi Danhui^{1a,2}, Yang Hongxiao³, Lu Qi^{1ab}, Chu Jianmin^{1c}, Yuan Qi^{1c}, Gan Honghao^{1c},
Zhao Shuai^{1c}, Chen Jiawei^{1c}, Xu Xiaoqing^{1c}

(1. a. Institute of Desertification Studies / b. Experimental Center of Desert Forestry / c. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China)

Abstract: It is important to study the characteristics of species diversity and the relationship between species diversity and environment in sandy land communities to maintain the structure and function of sandy land ecosystem. Based on the community and environmental data of 83 plots in the Otindag Sandy Land, this study analyzed the community species diversity and its influencing factors by quantitative ecology method, and explored the characteristics of species diversity and its environmental explanations in the Otindag Sandy Land. The results showed that: (1) The main communities are Form. *Ulmus pumila*, Form. *Caragana microphylla*, Form. *Salix gordejewii* and Form. *Prunus pedunculata*. The main environmental factors affecting the community distribution in this area are precipitation in the growing season, temperature, soil total nitrogen and total potassium content. The difference of precipitation significantly affects the distribution pattern of the community. (2) The distribution of plant diversity in the Otindag Sandy Land shows regular changes. The diversity indices increases with the increase of longitude and altitude, Patrick index and Shannon-wiener index decreases with the increase of latitude, Simpson index and Pielou index increases with the increase of latitude. Patrick index, Simpson index and Shannon-wiener index are significantly positively correlated with precipitation in the growing season, soil organic carbon and available nitrogen contents, and negatively correlated with mean temperature, accumulated temperature above 0 °C and wind speed in the growing season. None of the environmental variables is significantly correlated with Pielou index. The results of this study elucidate the rules of species diversity and plant community distribution in the Otindag Sandy Land, as well as their relationships with key environmental factors, which are beneficial to improve the diversity and stability of plants in the sandy land and enhance the ecological function of vegetation in the sandy land.

Key words: plant diversity; environmental factor; CCA; Otindag Sandy Land