

浑善达克沙地植物适宜性研究 ——以内蒙古自治区正蓝旗沙地区为例

薛 颀¹ 史明昌^{1*} 丁国栋¹ 高广磊¹ 安全喜²

(1.北京林业大学 水土保持学院,北京 100083;

2.内蒙古旭日塔拉文化产业发展有限公司,呼和浩特 010010)

摘 要 以内蒙古自治区正蓝旗沙地区为区域,研究浑善达克沙地植物适宜性。借助 TWINSpan 数量分类法将浑善达克沙地 79 个样方进行植物群落类型划分,并依据浑善达克沙地 342 个植物分布点(79 个样方点加资料整理的 263 个植物分布数据)和 29 个与沙地植物适宜性相关的环境因子(14 个气象因子、12 个土壤因子和 3 个地形因子)数据,运用最大熵模型在 30 m 的空间尺度上分别模拟该地区流动沙地、半流动沙地、半固定沙地、固定沙地、河泛地和林地植物群落的潜在分布,并获取各类植物的适宜地块。结果表明:1)根据潜在环境因子和分布点建立的各类生境植物群落适宜性分布模型,评判模型精准度的 AUC 值均 >0.883 ,达到了好的模拟效果,故此模型在此区域的研究是合理的。2)在 29 个环境因子中,对植物适宜性贡献量较大的是年均降水量、积温、高程和地表土壤 pH(KCl)、大气干燥度、大气气压以及地表土壤粘土含量。3)在流动沙地向固定沙地的正向演替中,土壤粘土含量和土壤 pH(KCl)逐渐减少,土壤阳离子交换量逐渐增加,对应生境植物对降水量的需求量不断增加,对积温要求逐渐降低。4)沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)作为流动沙地的先锋植物以及其他生境的伴生种,适生于正蓝旗沙地区大部分地区,面积为 9 463.53 km²;刺蓬(*Salsola ruthenica*)和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落等半流动沙地植物群落分布在除流动沙地之外的沙地,适宜区面积为 8 551.13 km²。地榆(*Sanguisorba officinalis*)和水麦冬(*Triglochin palustre*)多分布于正蓝旗中部到西北部区域的河泛地,面积为 761.17 km²;黄柳(*Salix gordejewii*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)和沙打旺(*Astragalus adsurgens*)群丛分布于半固定沙地背风坡以及固定沙地阴坡,面积为 3 387.56 km²;榆树(*Ulmus pumila*)和杨树(*Populus*)等乔木受大兴安岭南段山地和燕山北部山地区系的影响,多适宜于东部区域。

关键词 沙地植物; 空间分布; 多元线性回归克里金; 最大熵模型; 适宜性

中图分类号 Q948.11

文章编号 1007-4333(2020)08-0084-16

文献标志码 A

Suitability of plants in Hunshandake sandy land: Taking Zhenglanqi sandy land in Inner Mongolia Autonomous Region as an example

XUE Di¹, SHI Mingchang^{1*}, DING Guodong¹, GAO Guanglei¹, AN Quanxi²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Inner Mongolia Xuritala Cultural Industry Development Co. Ltd., Hohhot 010010, China)

Abstract Based on 342 plant distribution data and 29 environmental factors (14 meteorological factors, 12 soil factors and 3 topographic factors) related to plant suitability in Hunshandake sandy land, the potential of plant communities in this area is simulated at 30 m fine spatial scale by using maximum entropy model and GIS spatial analysis technology.

收稿日期: 2019-07-19

基金项目: 中央引导地方科技发展项目;内蒙古自治区科技重大专项

第一作者: 薛颀, 硕士研究生, E-mail: 172481182@qq.com

通讯作者: 史明昌, 教授, 主要从事地理信息系统、水土保持研究, E-mail: shimc@dtGIS.com

The results show that: 1) AUC values are all above 0.883 indicating that the prediction effect of the model has reached a good standard. 2) The main contributions to plant suitability are annual precipitation, accumulated temperature, elevation, surface soil pH in KCl, atmospheric dryness, atmospheric pressure and clay content. 3) In the positive succession from flowing sandy land to fixed sandy land, the content of soil clay and soil pH in KCl decreased gradually, the cation exchange capacity of soil increased gradually, the demand for precipitation of corresponding habitat plants increased continuously, and the demand for accumulated temperature decreased gradually. 4) *Agriophyllum squarrosum* and *Salsola collina* are suitable for growing in most areas of Zhenglanqi sandy land, with an area of 9 463.53 km². *Salsola ruthenica* and *Cleistogenes squarrosa* communities are distributed in sandy land except mobile sandy land, with an area of 8 551.13 km². *Sanguisorba officinalis* and *Triglochin palustre* distribute in the floodplain with an area of 761.17 km². *Salix gordejewii*, *Caragana korshinskii*, *Hedysarum mongolicum* and *Astragalus adsurgens* distribute in the leeward slope of semi-fixed sandy land and shady slope of fixed sandy land with an area of 3 387.56 km². *Ulmus pumila* and *Populus* trees are mostly suitable for the eastern region because of the influence of the southern Daxingan Mountains and the northern Yanshan Mountains.

Keywords sandy land species; space distribution; multiple linear regression kriging; maximum entropy model; suitability

浑善达克沙地位于内蒙古自治区中部,地处锡林郭勒盟和克什克腾旗,为我国五大沙地之一。东西狭长,中部为大面积的半干旱草原带沙区,东部直达大兴安岭南段西麓,西部深入蒙古高原,植被类型分别为森林草甸草原和荒漠草原^[1]。近几年中受自然因素和过牧等人为干扰的影响,脆弱的浑善达克沙地生态环境遭到了极大的破坏^[2-3]。因此针对浑善达克沙地沙漠化的治理和生态环境的恢复尤为重要。研究该沙地植物适宜性,为浑善达克沙地生态系统的管理和调控提供理论依据,为进一步遏制沙漠化扩展和改善区域生态环境奠定基础。

自然植被分布在地表区域呈现出地带性或超地带性的分异规律。Rockin 等^[4]通过研究以色列内盖夫沙地不同沙地类型与环境因子的关系,发现沙地植物盖度沿降水梯度的变化而变化; Hunt 等^[5]通过分析安大略省北部沙区固沙林演变过程,发现沙地植物组成与水文特性和土壤性质显著相关。Li 等^[6]和 Yang 等^[7]通过比较浑善达克沙地不同生境植被特征,总结出沙地的固定随土壤性质和气候梯度的变化而变化。气候和土壤在大区域尺度上对自然植被分布起主导作用,例如降水、气温和土壤粘土等因素^[8-9],使植被呈现地带性分异。而在小尺度上地形的变化影响局部地区的水热再分配,植被分布展现出超地带性分布^[10]。所以在区域尺度上,气候、土壤和地形三类环境因子是决定植被分布的主要因素。通过研究物种分布与环境因子之间的关系,可以合理研讨并模拟物种分布的适宜范围。近年来,随着 GIS 空间分析技术、DEM 地形分析和非

参数统计技术的发展,物种分布模型已大量用于空间生态学^[11]、物种时空分布格局^[12]、入侵物种的潜在空间分布^[13]、植物病虫害^[14]和有经济价值物种潜在分布区域等的预测^[15],在综合分析利用的基础上,相比较于广义线性(GLM)模型、广义相加(GAM)模型、GRASP 模型等生态位物种分布模型,最大熵模型所需的物种分布点较少,模拟效果比较接近自然格局,评价结果相对客观合理^[16-17]。国内外关于干旱区、半干旱区植物适宜性的研究中, Song 等^[18]采用 Maxent 和 Domain 物种分布模型模拟了中亚东部沙漠区菊苣属、肉苁蓉属和铁木樨属等 13 个地方性植物属的适宜性分布; Store 等^[19]基于 GIS 并结合 Maxent 构建生境适宜性评价模型对高寒旱区森林草原植物进行了研究;邓飞等^[20]采用最大熵模型,模拟了紫花苜蓿在内蒙古自治区锡林郭勒盟典型草原区的适宜地理区域;杨超^[21]通过耦合大尺度环境数据与物种分布数据之间的关系,运用最大熵模型预测了内蒙古地区针茅属植物的适宜分布区;叶永昌等^[22]通过最大熵模型以及 GIS 工具,模拟了内蒙古草甸草原、典型草原和荒漠草原的植被适宜分布区域。

前人对干旱区植被以及内蒙古沙地草原植被的研究中,常见于单个物种、多种植物属以及草原类型的评价分析,用于评价沙地各类生境植物群落的适宜性分布未见报道,因此,本研究选取浑善达克沙地植物为研究对象,依据植物分布点和气象、地形和土壤三类环境因子,运用最大熵模型结合 GIS 空间分析技术模拟各群落的适宜地块。本研究旨在地块格

局上对浑善达克沙地植物适宜性进行研究,为浑善达克沙地生态系统的管理和调控提供参考和借鉴。

1 研究方法 with 数据

1.1 研究区

正蓝旗地处内蒙古自治区中部,锡林郭勒大草原的最南端,浑善达克沙地腹地,位于 $115^{\circ}00' \sim 116^{\circ}42' E, 41^{\circ}56' \sim 43^{\circ}11' N$ (图1)。全区域东西宽 122 km,南北长 138 km,总面积 10 182 km^2 。正蓝旗属中温带干旱大陆性季风气候,年日照时数 2 800~3 200 h;年平均风速 3.5~5.0 m/s,多年平

均大风日数 49~74 d,占全年的 13%~20%;多年平均降水量 370 mm,各地降水量分布不均匀,自东南向西北递减,东南部年降水 350~400 mm,西北部为 250~300 mm。寒冷、大风、少雨和干旱是本地区气候的显著特点^[23]。南部分布低山丘陵,其间分布草甸草原类型的宽谷草原;中部至北部系属沙漠型草原的浑善达克沙地,面积广阔。整体沙地植被分布具有地带性,分别为东南部的草甸草原、中部的干草原以及西北部的荒漠草原。同时地形分布的差异以及沙丘固定程度、发育阶段的不同,使形成的植被结构系统也有明显的超地带性分异特征^[24-26]。

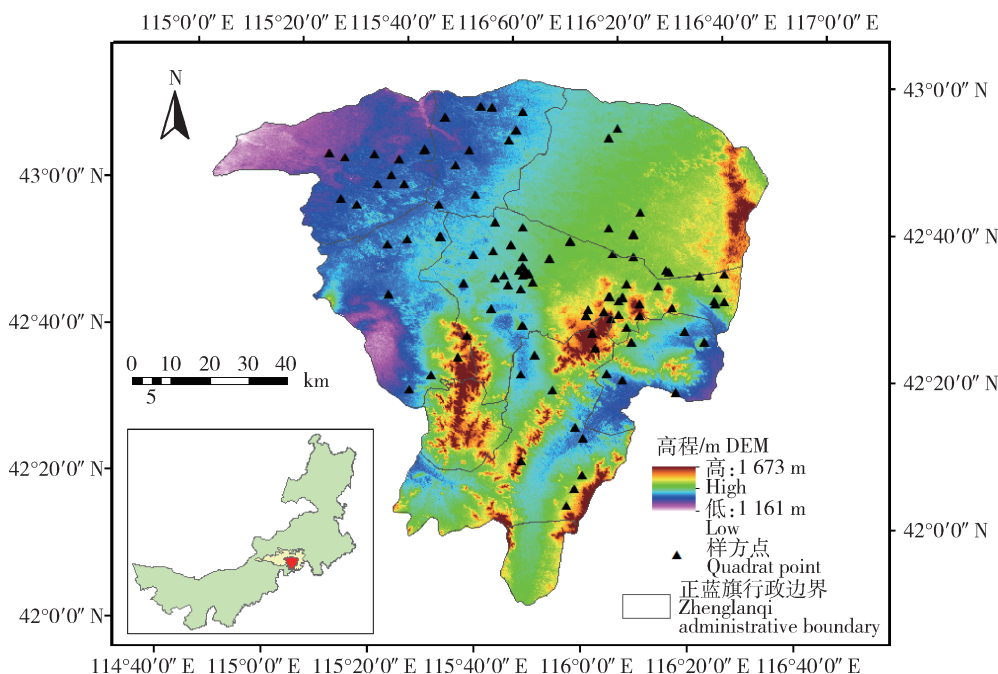


图1 研究区区位图以及样方分布点

Fig. 1 Study area map and sample distribution points

1.2 数据来源

影像数据来源于美国地质调查局 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 2018年7月10日—8月20日的 Landsat 8 OLI 遥感影像,行号 30—31,列号 123—124,影像云面积比 < 5%,共 4 景。根据相关研究,浑善达克沙地植被 7 和 8 月份为茂盛期,此时研究区植被与沙地信息反映明显,获取情况较为客观准确。此影像数据为 30 m 空间分辨率,对于植被信息能够很好的表达,从而根据中国沙漠(沙地)分类标准通过植被状况来进行研究区沙地分类^[2]。

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网

(<http://data.cma.cn>) 提供的近 30 年中国地面累年值年值数据集和中国地面气候资料年值数据集,包含浑善达克沙地及其周边 34 个气象站点的数据。通过显著性检验得到近 30 年年平均降水量、年平均风速、年日照时数、大气干燥度和年蒸发量等 14 个气象数据。

地形数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 30 m 分辨率的数字高程数据 (DEM)。在 ArcGIS 中通过 DEM 数据表面分析得到坡度、坡向、高程数据。土壤数据来源于国际土壤信息中心 (<https://www.isric.org>) 250 m 分辨率的土壤栅格数据。通过显著性检验得到地表及

0.30 和 0.60 m 深的土壤粘土含量,地表及 0.15 和 0.15、0.30、0.60 和 1.00 m 深土壤 pH(KCl)的栅格数据。表 1 为模型所需的环境数据。

表 1 数据类型及描述整合
Table 1 Data type and description integration

数据类型 Data types	变量 Variable	数据名称 Data name	描述 Describe
影像数据	image	研究区遥感影像	研究区分类
气候数据	rain	年均降水量	使用 MLRK 插值转为 ASCII 格式代入 MaxEnt 模型
	at	积温	
	ffp	无霜期	
	prec10	降水量 ≥ 10.0 mm 日数	
	grotem	地面温度	
	hum	相对湿度	
	windspeed	风速	
	mintem	最低气温	
	maxtem	最高气温	
	pre	大气气压	
	tem	平均气温	
	sunh	日照时数	
	dry	大气干燥度	
eva	年蒸发量		
地形数据	dem	高程	转为 ASCII 格式代入 MaxEnt 模型
	aspect	坡向	
	slope	坡度	
土壤数据	cl1	地表土壤粘土含量	重采样后转为 ASCII 格式代入 MaxEnt 模型
	cl2	0.30 m 深土壤粘土含量	
	cl3	0.60 m 深土壤粘土含量	
	ce1	地表土壤阳离子交换量	
	ce2	0.15 m 深土壤阳离子交换量	
	ce3	0.30 m 深土壤阳离子交换量	
	phkcl1	地表土壤 pH(KCl)	
	phkcl2	0.05 m 深土壤 pH(KCl)	
	phkcl3	0.15 m 深土壤 pH(KCl)	
	phkcl4	0.30 m 深土壤 pH(KCl)	
	phkcl5	0.60 m 深土壤 pH(KCl)	
phkcl6	1.00 m 深土壤 pH(KCl)		
样方数据	imv	植物重要值	反映物种群落作用
	lola	样方经纬度	整合为实地调查分布点
分布点	point1	实地调查分布点	删选整合转为 CSV 格式代入 MaxEnt 模型
	point2	文献记录分布点	
	point3	数据库检索分布点	
	point4	植被图分布点	

本研究主要采用大范围的野外调查、设立样地和样方调查等方法进行。野外调查时间为2018和2019年的8月,在野外考查的基础上,结合遥感影像资料,外业组在本研究划定的内蒙古自治区正蓝旗浑善达克沙地地区范围布设了79个样方(图1)。记录的样方信息包括样方的经度、纬度、海拔、坡度、生境类型、土壤类型和典型植被。其中草本植物样方大小为1 m×1 m,记录植物名称、每种植物数量、植物盖度和植物高度;灌木样方大小为5 m×5 m,记录样方内植物东西冠幅、南北冠幅、高度和全体个体数;乔木样方大小为10 m×10 m,记录样方内树种个体数、树高、胸径、东西冠幅、南北冠幅和枝下高。通过样方信息计算重要值进行优势种选取以及样方分类。

收集植物分布数据的均匀合理是生态位模型模拟植物适宜区能否准确的关键,本研究通过实地调查、文献查询和数据库检索等方式获取浑善达克沙地植物分布的地理坐标,具体方法:1)实地调查,采

用GPS测量仪记录每个样方中心点的经纬度坐标;2)查询相关文献及地方植物志,获取植物分布点;3)检索中国数字植物标本馆(<http://www.cvh.org.cn/>)、国家标本资源共享平台(<http://www.nsii.org.cn/>)、全球生物多样性信息网络(<http://www.gbif.org/>)等信息平台获取植物分布记录;4)通过中国科学院植物研究所(<http://www.ibcas.ac.cn/>)提供的中国植被类型图提取的植物分布数据。整合得到各类沙地植物分布点342个(表2)。对具有准确经纬度的植物信息直接使用,对已知具体分布地点的植物记录,根据地名记录通过Google earth软件查找出相应经纬度,对文献植被分布图以及数字化图集,通过研究区区划叠加,创建取样点提取经纬度。将整合的物种分布点信息在Excel中进行整理,去除经纬度重复和信息缺失的条目,将剩下的342个有效记录点按照沙地类型植物名、经度和纬度的样式保存为最大熵模型识别的.csv格式。

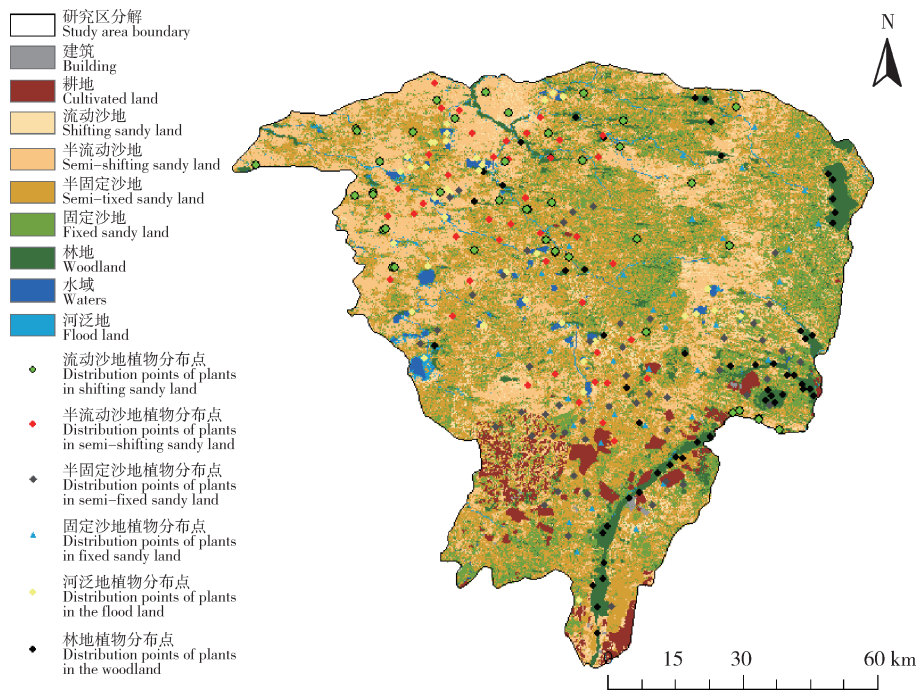


图2 研究区土地类型及植物分布点示意图

Fig. 2 Sketch map of land type and plant distribution points in the study area

1.3 研究方法

1.3.1 重要值选取优势种

本研究采用重要值作反映某个物种在群落中作用和地位的综合数量指标,识别出各生境类型植物群落的优势种以及主要伴生植物。其计算公式如下^[25]:

$$\text{物种重要值} = (\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对盖度}) / 3 \quad (1)$$

$$\text{相对密度} = (\text{某种植物的密度} / \text{全部植物的总密度}) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{相对频度} = (\text{该种的频度} / \text{所有种的频度总和}) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{相对盖度} = (\text{某一物种的分盖度} / \text{所有分盖度}) \times 100\% \quad (4)$$

计算每个样方中物种的重要值,并统计所在样方重要值排名靠前的物种作为潜在优势物种。若在多个样方中出现,则统计其每个样方的重要值求平均作为该物种的重要值。当物种的重要值和出现频率均较大时,将该物种作为此生境类型植物群落的优势种;重要值和出现频率低于前者且较稳定的为伴生种^[27]。

1.3.2 沙地分类方法

在对研究区沙地类型的分类中,首先利用掩膜提取出浑善达克沙地区域中的水体、耕地、城镇建筑物等非沙地地物类型,再选择植被覆盖度指标对沙地地区进行不同类型的划分。植被覆盖度是指植被在地面的垂直投影面积占该区域面积的百分比,为干旱和半干旱地区地表形态、生态环境以及荒漠化特征的有效评估指标,计算公式为^[28]:

$$\text{NDVI} = (R_2 - R_1) / (R_2 + R_1) \quad (5)$$

$$\text{VC} = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) / (\text{NDVI}_{\text{veg}} - \text{NDVI}_{\text{soil}}) \quad (6)$$

式中:VC为植被覆盖度,NDVI为植被覆盖度归一化植被指数, R_2 是Landsat OLI影像近红外波段的反射率; R_1 是Landsat OLI影像红波段的反射率。为裸土或无植被覆盖区域的NDVI值, veg 代表完全被植被所覆盖的像元的NDVI值,即纯植被像元的NDVI值。在本次研究中取累积概率为5%的NDVI值代替,95%的NDVI值代替^[29]。

基于中国沙漠(沙地)标准,对研究区沙地地区按照植被覆盖度 $<5\%$ 、 $5\% \sim 20\%$ 、 $21\% \sim 50\%$ 和 $>50\%$ 分为流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙地^[2,30-31]。

1.3.3 空间数据处理方法

本研究采用多元线性回归克里金方法(MLRK)通过R语言建模,对所需气象因子进行精准插值。此插值方法在普通克里金插值方法的基础上,考虑海拔、坡向和坡度等环境要素,用逐步回归法筛选目标变量,对回归残差协方差结构建模筛选最优变异函数模型,利用普通克里金对回归残差进行插值。这种方法相比于单纯用气象站所测数值进行的结果来说,精度更高,不仅是分布趋势的显示,更符合气象因子的空间分布规律^[32]。为确保边界处数据精度,本研究在正蓝旗边界基准外扩30 km的基础上,将14个气象因子插值成30 m分辨率的栅格数据,再通过裁剪得到正蓝旗区域的气象空间

因子。因子插值结果交叉验证值 R^2 均 $>90\%$ 。

为消除最大熵模型在栅格数据运算时存在的栅格数目和栅格单元大小不一致的问题,对分辨率为250 m的土壤数据采用最邻近分配法重采样为30 m分辨率栅格数据。并将所有环境数据统一以WGS_1984为地理坐标系,以Albers为投影坐标系,通过研究区边界裁剪统一栅格数据行列数,存储为最大熵模型可识别的ASCII格式。

1.3.4 植物适宜性模型构建方法

最大熵模型是基于最大熵算法的一种生态位物种分布模型,该模型认为在已知条件下,熵最大的事物最接近真实状态,模拟物种分布较为客观和准确。将CSV格式的分点数据和ASCII格式的环境数据带入最大熵模型进行计算,构建植物地理分布与环境因子关系模型。25%的物种数据被随机选取作为检验数据,75%的数据作为训练集数据,栅格大小设定为输入栅格的最大值,设置刀切法和环境响应曲线判定模型模拟准确性。通过基于非阈值依赖的受试者工作特征曲线分析衡量模型准确性,将AUC值(ROC曲线下的面积)作为分析模型模拟精度的指标。AUC值代表构建出的模型的5种评价标准:失败、较差、一般、好和非常好,取值分别对应为:0.50~0.60、0.61~0.70、0.71~0.80、0.81~0.90和0.91~1.00。构建的模型在AUC值 >0.75 的情况下被认为可用。利用最大熵模型模拟该地区各类生境植物群落的潜在分布。

1.3.5 植物适宜性评价分析

在30 m的空间单元上对浑善达克沙地植物适宜性进行分析。根据物种分布数据和环境图层,探索物种已知分布区的环境特征与研究区域的非随机关系,确定浑善达克沙地植物群落适宜性因子的权重系数。应用加权平均法和ArcGIS中的栅格运算功能对评价因子进行计算形成植物适宜区图层,根据前人对植物种适宜区划分标准和沙地植物本身分布特点^[27],将其适宜性指数划分为4个等级:不适宜区(<0.10),低适宜区($0.10 \sim 0.29$),中适宜区($0.30 \sim 0.50$),高适宜区(>0.50),将适宜性指数 ≥ 0.30 的区域划为沙地植物适宜区。

结合植物种生境以及伴生关系,分别叠加各类生境植物适宜性数据,得出各类植物的适生区域。对植物适宜性空间分布图进行GIS空间分析,将研究区某一立地适宜的物种予以显示,从而在具体地块上模拟浑善达克沙地植物的适宜性分布。

2 结果与分析

2.1 群落 TWINSpan 分类结果

对外业记录的 79 个浑善达克沙地植物群落样

地进行 TWINSpan 排序分类。采用层级权重为 1 的 3 级分级重要值矩阵： $<0.3, 0.3 \sim 0.5, >0.5$ 。最少样地分类组为 9，指示种的最大数目为 9，最大分类水平为 9^[33] (图 3)。

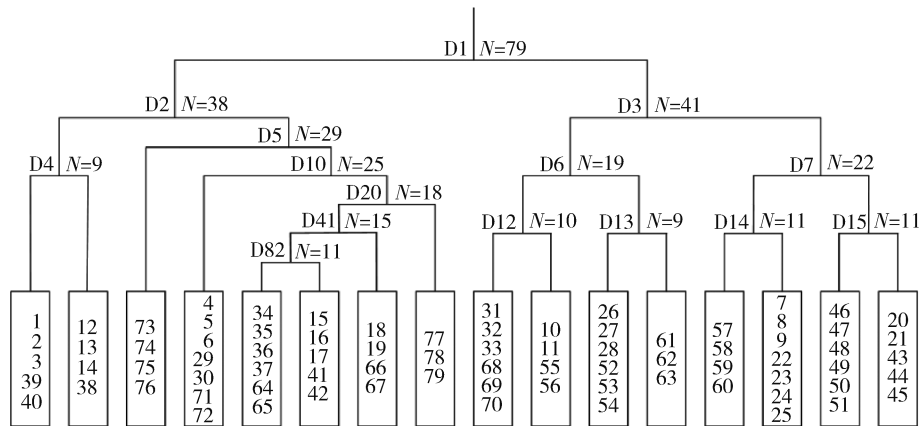


图 3 浑善达克沙地植物群落 TWINSpan 分类结果树状示意图

Fig. 3 Plant communities TWINSpan classification results in Hunshandake sandy land

在浑善达克沙地正蓝旗沙地区中,植物群落的形成受各类环境因素的影响,结合野外调查发现,群落各层次中占优势的植物为植物群落优势种,其在数量、体积和群落学作用上最为重要,对群落的分类起到决定性或主要影响;与优势种稳定存在、处于非优势地位的为伴生种,与群落其他物种有着广泛的联系,是群落分类的参考物种。优势种与伴生种构成的植物群落主要因生境类型的改变而发生改变,不同生境的植物群落具有显著的差异性^[27]。

通过 TWINSpan 等级划分,参照《中国植被》分类标准并结合野外采样植物群落的生境类型和物种组成等综合特征,将浑善达克沙地植物群落分为六大类:1)流动沙地植物群落:沙米(*Agriophyllum squarrosum*)群落、猪毛菜(*Salsola collina*)群落;2)半流动沙地植物群落:糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)群落、刺蓬(*Salsola ruthenica*)群落;3)半固定沙地植物群落:拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)群落、黄柳(*Salix gordejewii*)群落、披碱草(*Elymus dahuricus*)群落、柠条(*Caragana korshinskii*)群落、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)群落;4)固定沙地植物群落:糙隐子草群落、沙蒿(*Artemisia desertorum*)群落、黄柳+杨柴群落、冷蒿(*Artemisia frigida*)+糙隐子草群落、沙柳(*Salix cheilophila*)+杨柴群落、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)群落、柠条群落、榆树

(*Ulmus pumila*) + 柳灌群落、樟子松(*Pinus sylvestris*) + 沙柳群落;5)河泛地群落:金莲花(*Trollius chinensis*)群落、地榆(*Sanguisorba officinalis*)群落、芦苇(*Phragmites australis*)群落、乌柳(*Salix cheilophila*)群落、水麦冬(*Triglochin palustre*)群落;6)林地植物群落:杨树(*Populus*)群落、榆树群落(表 2)。

2.2 群落潜在分布及其适宜性分布结果

2.2.1 Maxent 模型模拟精准度及各群落主导环境因子

基于潜在环境因子构建的各类生境植物群落适宜性分布模型,除了半流动沙地和固定沙地植物群落训练数据的 AUC 值都 >0.900 ,表明模型模拟效果达到了非常好的标准,半流动沙地植物群落的训练数据的 AUC 值为 0.883,固定沙地植物群落的训练数据 AUC 值为 0.895,模型模拟效果好。

根据 29 个环境因子对各类生境植物群落分布的贡献量,模拟分布前 3 贡献量的环境因子及训练集 AUC 值见表 3。年均降水量和积温为沙地植物群落分布模型的主要贡献因子,即为影响各生境类型植物群落的主要因素。以半流动沙地植物群落分布模型为例,年均降水量(34.5%)和积温(17.8%)占到了五成以上的贡献率。流动沙地、半固定沙地、河泛地以及林地植物群落的最大贡献率因子分别为地表土壤粘土含量(34.0%)、坡向(33.7%)和地表

土壤 pH(KCl)(23.5%和 22.8%)。整体可见,对浑善达克沙地植物模拟贡献量较大的环境因子是年均

降水量、积温、高程、地表土壤 pH(KCl)、大气干燥度、大气气压以及地表土壤粘土含量。

表 2 浑善达克沙地不同群落类型汇总

Table 2 Summary of different community types in Hunshandake sandy land

生境类型 Habitat type	样本量 Sample size	优势种 Dominant species	伴生种 Companion species
I 流动沙地	52	沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	羊草 <i>Leymus chinensis</i> 、马唐 <i>Digitaria sanguinalis</i> 、虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>
		猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、虫实、寸草 <i>Carex duriuscula</i> 、冰草 <i>Agropyron cristatum</i> 、糙隐子草
II 半流动沙地	41	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> 、野葱 <i>Allium fistulosum</i> 、雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i> 、刺蓬、鹤虱 <i>Carpesium abrotanoides</i> 、苔草 <i>Carex</i> 、花苜蓿 <i>Medicago ruthenica</i> 、冰草、羊草
		刺蓬 <i>Salsola ruthenica</i>	沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i> 、叉分蓼 <i>Polygonum divaricatum</i> 、沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i> 、狗尾草、沙米
III 半固定沙地	56	拂子茅 <i>Calamagrostis epigeios</i>	沙蒿、叉分蓼
		黄柳 <i>Salix gordejewii</i>	羊草、拂子茅、沙蒿、叉分蓼
		披碱草 <i>Elymus dahuricus</i>	刺蓬、羊胡子草 <i>Carex rigescens</i> 、克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i> 、糙隐子草
		柠条 <i>Caragana korshinskii</i>	披针叶黄桦 <i>Thermopsis lanceolata</i> 、风毛菊 <i>Saussurea japonica</i> 、羊草、糙隐子草
		杨柴 <i>Hedysarum mongolicum</i>	猪毛菜、冰草、茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> 、刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>
IV 固定沙地	83	糙隐子草	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> 、沙茴香 <i>Ferula bungeana</i> 、沙葱 <i>Allium mongolicum</i> 、唐松草 <i>Thalictrum aquilegifolium</i> 、大萼委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i> 、木地肤 <i>Kochia prostrata</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、披碱草
		沙蒿	野麻 <i>Acalypha venetum</i> 、苔草、猪毛菜、沙鞭
		黄柳+杨柴	香叶天竹葵 <i>Pelargonium graveolens</i> 、猪毛菜、花苜蓿、刺藜
		冷蒿+糙隐子草	苔草、猪毛蒿、刺藜、羊草、花苜蓿
		沙柳 <i>Salix cheilophila</i> +杨柴	绣线菊 <i>Spiraea salicifolia</i> 、猪毛菜、冰草、花苜蓿、刺藜
		沙打旺 <i>Astragalus adsurgens</i>	茵陈蒿、糙隐子草、雾冰藜
		柠条	狗尾草、克氏针茅、雾冰藜、糙隐子草、沙蒿
榆树 <i>Ulmus pumila</i> +柳灌	冷蒿、苔草、沙生冰草 <i>Agropyron desertorum</i> 、红柳 <i>Tamarix ramosissima</i>		
		樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> +沙柳	刺藜、花苜蓿、牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i> 、冰草

表2(续)

生境类型 Habitat type	样本量 Sample size	优势种 Dominant species	伴生种 Companion species
V 河泛地	53	金莲花 <i>Trollius chinensis</i>	苔草、委陵菜
		地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>	木贼 <i>Equisetum hyemale</i> 、唐松草、黄花草木樨 <i>Melilotus officinalis</i> 、火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i> 、鹅绒委陵菜 <i>Potentilla anserina</i> 、桔梗 <i>Platycodon grandiflorus</i> 、花苜蓿
		芦苇 <i>Phragmites australis</i>	苔草、拂子茅、蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> 、委陵菜、海乳草 <i>Glaux maritima</i> 、沙蒿、甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i> 、鸢尾 <i>Iris tectorum</i>
		乌柳 <i>Salix cheilophila</i>	披针叶黄桦、风毛菊、羊草
		水麦冬 <i>Triglochin palustre</i>	苔草、海乳草
VI 林地	57	杨树 <i>Populus</i> 榆树	大针茅 <i>Stipa grandis</i> 、狗尾草、 冷蒿、糙隐子草、雾冰藜、唐松草、叉分蓼、沙蒿

表3 基于刀切法检测 29 个环境因子对 Maxent 模型模拟各类生境植物群落分布的贡献率及 AUC 值

Table 3 Contribution and AUC value of 29 environmental factors to Maxent model for simulating plant community distribution of different habitat types based on knife-cutting method

群落类型 Community type	前 3 个环境因子 The top three environmental factors	贡献率/% Contribution rate	AUC 值 AUC value
流动沙地植物群落	地表土壤粘土含量	34.010 9	0.916
	年均降水量	22.284 0	
	高程	10.908 8	
半流动沙地植物群落	年均降水量	34.476 9	0.883
	积温	17.756 4	
	大气气压	6.927 6	
半固定沙地植物群落	坡向	33.742 1	0.915
	年均降水量	30.915 4	
	大气干燥度	5.389 2	
固定沙地植物群落	年均降水量	28.503 8	0.895
	高程	18.790 2	
	大气干燥度	15.527 8	
河泛地植物群落	积温	26.465 3	0.940
	地表土壤 pH(KCl)	23.503 1	
	大气干燥度	14.419 1	
林地植物群落	地表土壤 pH(KCl)	22.842 8	0.907
	年均降水量	18.028 4	
	积温	14.758 6	

2.2.2 各类生境植物群落空间适宜性分析

曲线进行量化分析,得到其环境因子的适宜范围

对各类生境植物群落分布概率-环境变量关系

(表 4)。正蓝旗年降水量自东南向西北递减,东南部

表 4 各类生境植物群落环境因子适宜性要素范围

Table 4 Scope of suitability elements for environmental factors of plant communities in different habitat types

环境因子 Environmental variable	范围 Range					
	流动沙地 植物群落	半流动沙地 植物群落	半固定沙地 植物群落	固定沙地 植物群落	河泛地 植物群落	林地植物 群落
年均降水量/mm	270~358	275~375	315~425	310~450	280~370	322~448
积温/(d·°C)	2 030~2 560	2 040~2 480	1 660~2 350	1 400~2 300	2 150~2 550	1 400~2 420
无霜期/d	105~150	105~138	102~130	90~132	110~140	85~128
降水量≥10.0 mm 日数/d	5.6~11.9	6.2~12.5	7.5~13.3	8.2~13.5	7.0~11.4	7.6~13.4
地面温度/°C	3.0~7.1	3.0~9.0	3.0~9.0	3.0~10	3.0~9.5	3.0~9.0
相对湿度	50.7~59.8	49.0~59.6	49.0~61.0	52.3~62.0	49.0~59.5	49.0~62.0
风速/(m/s)	2.9~4.0	1.6~3.9	2.0~3.6	1.4~3.8	2.4~4.0	1.6~3.7
最低气温/°C	-6.0~-1.2	-5.7~2.0	-6.0~2.0	-6.0~3.0	-6.0~3.0	-6.0~3.0
最高气温/°C	7.0~11.9	7.0~15.5	8.0~14.0	8.0~15.0	8.0~16.0	7.5~15.0
大气气压/Pa	858~960	860~905	848~910	845~886	862~940	848~918
平均气温/°C	1.1~5.1	1.2~8.0	0.0~8.0	1.0~9.0	1.0~9.0	1.0~9.0
日照时数/h	2 940~3 100	2 910~3 105	2 730~3 070	2 890~3 010	2 920~3 150	2 750~3 150
大气干燥度	4.7~9.3	4.6~8.5	4.4~7.0	4.6~6.2	4.9~7.4	4.3~6.7
年蒸发量/mm	1 560~2 300	1 575~2 205	1 500~2 200	1 500~2 150	1 560~2 300	1 580~2 175
地表土壤粘土含量/%	17.8~32.0	10.0~32.0	0.0~21.0	10.0~23.9	16.2~32.0	0.0~27.0
0.30 m 土壤粘土含量/%	20.0~34.0	15.0~34.0	2.0~24.0	17.2~24.1	18.0~34.0	0.0~27.0
0.60 m 土壤粘土含量/%	19.5~34.0	12.0~33.0	0.0~23.0	16.2~23.8	17.0~34.0	0.0~26.0
地表土壤阳离子交换量/ (cmol/kg)	9.8~20.0	9.5~21.0	7.0~37.5	10.2~45.0	11.0~50.0	14.0~50.0
0.15 m 土壤阳离子交换量/ (cmol/kg)	10.5~17.5	5.0~18.0	5.0~40.0	8.0~45.0	12.5~45.0	14.0~45.0
0.30 m 土壤阳离子交换量/ (cmol/kg)	11.0~17.8	10.0~40.0	5.0~40.0	10.0~45.0	13.0~45.0	14.0~45.0
地表土壤 pH(KCl)	5.9~7.1	6.0~7.3	5.9~6.8	5.0~6.8	5.6~6.7	0.0~6.4
0.05 m 土壤 pH(KCl)	6.1~7.2	6.1~7.1	5.8~6.9	5.0~6.8	5.8~6.7	0.0~6.3
0.15 m 土壤 pH(KCl)	6.1~7.3	6.1~7.1	5.8~6.9	5.0~6.7	5.8~6.7	0.0~6.5
0.30 m 土壤 pH(KCl)	6.3~7.5	6.3~7.3	6.1~7.2	5.5~7.1	5.6~6.9	0.0~6.7
0.60 m 土壤 pH(KCl)	6.3~7.8	6.4~7.3	5.9~8.0	5.4~7.3	5.6~7.1	0.0~6.9
1.00 m 土壤 pH(KCl)	6.6~7.8	6.5~7.7	6.2~8.0	5.5~7.5	5.8~7.1	0.0~7.1
高程/m	1 190~1 380	1 210~1 450	1 260~1 650	1 295~1 560	1 190~1 350	1 205~1 620
坡度/(°)	0~10	0~25	0~40	0~16.5	0~12	0~22
坡向/(°)	0~360	10~360	0~200 320~360	0~360	0~350	0~355

年降水 350~450 mm,西北部为 250~300 mm。在气象因子中,从流动沙地到固定沙地的植物群落对年均降水量的需求量不断增加;而半固定和固定沙地植物群落对积温的需求量相比较流动和半流动沙地植物群落减少,从 2 030~2 560 ($d \cdot ^\circ C$)减少到 1 400~2 300 ($d \cdot ^\circ C$);在土壤方面,对土壤粘土含量需求从 17.8%~32.0% 逐渐降至 10.0%~23.9%,对土壤阳离子交换量的需求从 9.8~20.0 cmol/kg 逐渐放宽至 10.2~45.0 cmol/kg,对土壤 pH(KCl)需求从 5.9~7.1 降至 5.0~6.8;在地形上,坡度方面除了半固定沙地植物群落适应 40° 以内的范围,其余沙地类型的植物大多适宜 25° 以内区域;坡向上除了半固定沙地植物群落不适宜

在迎风坡生长,其他沙地类型的植物群落在各坡向均有分布。结合表 3,总体上降水量对流动沙地至固定沙地的植物的分布起到决定性作用。河泛地植物群落对降水量的需求并不严格(280~370 mm),但对积温的需求量相对较高(2 150~2 550 ($d \cdot ^\circ C$)),且土壤粘土含量(16.2%~32.0%)以及阳离子交换量(11~50 cmol/kg)偏高。林地植物群落则对降水量需求是各类生境中最大的(322~448 mm),对土壤各方面需求则相对较为宽松。

2.2.3 沙地植物适生性状况

根据表 2 各类植物群落的物种组成,将各类生境植物适宜性数据通过 GIS 栅格叠加得到各种植物的适生性状况(图 4)。根据 1.3.5 的沙地植物适宜性指

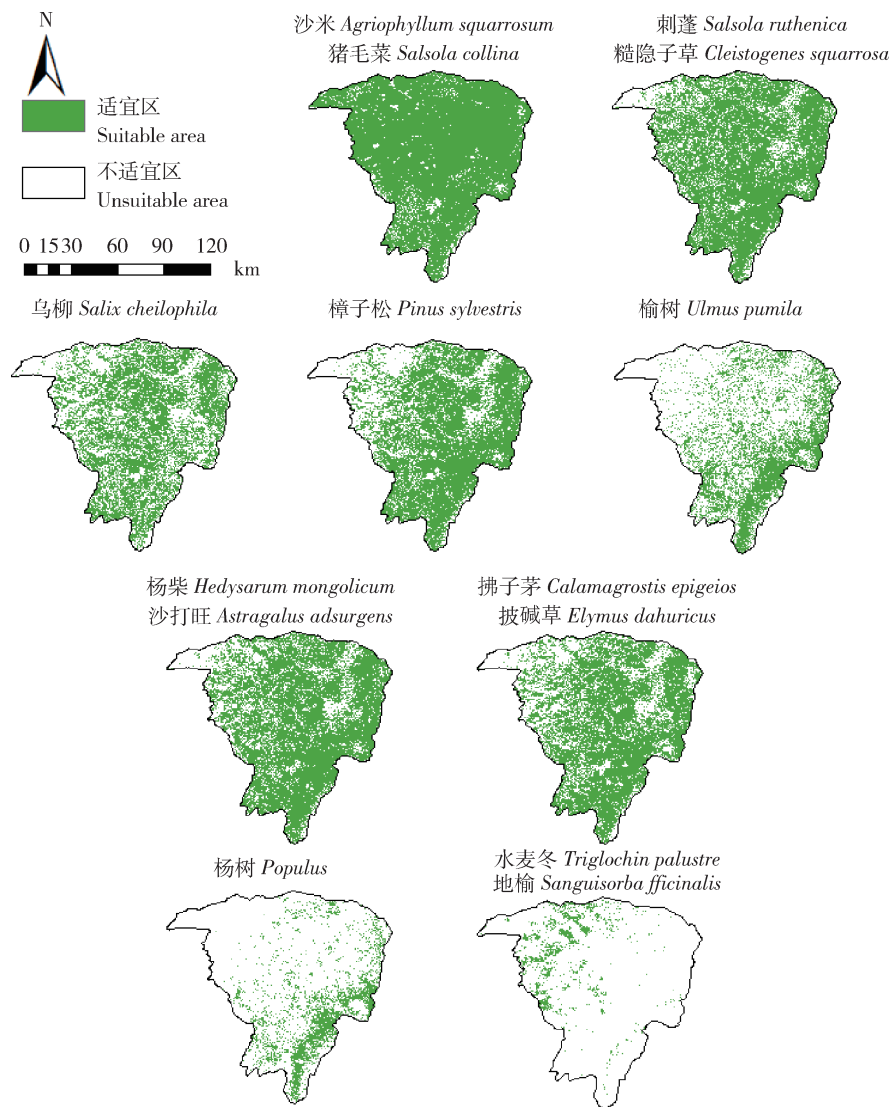


图 4 沙地主要物种适宜性区域图(示例)

Fig. 4 Regional map of suitability of main species in sandy land (example)

数划分等级,绿色区域为适宜性指数 ≥ 0.30 的沙地植物适宜区,白色部分为适宜性指数 < 0.30 的不适宜区。流动、半流动沙地多分布于正蓝旗北部,属沙漠型草原类型。沙米、猪毛菜是流动沙地的先锋植物以及植物群落的建群种,可在研究区大部分地区种植,包括降水量相对较少的正蓝旗西北部区域,适宜区面积为 9 463.53 km²。半流动沙地的群落类型大致分为以一年生草本为优势种的群落以及以多年生草本为优势种的植物群落,例如刺蓬和糙隐子草群落,分布在除流动沙地之外的沙地,后期也渐渐作为伴生种分布在固定沙地中,适宜区面积为 8 551.13 km²,占研究区面积的 83.98%。

河泛地多分布于正蓝旗西北部到中部区域,由隐域性的草甸植物组成,多分布于正蓝旗的河、湖岸低地且在丘间沟谷洼地汇水地段上有小面积的分布,地榆、水麦冬为此代表性植物种,适宜区面积为 761.17 km²,占研究区面积的 7.48%。西部混生冷蒿、糙隐子草和克氏针茅(*Stipa krylovii*)等,组成典型草原植被类型。

正蓝旗南部为低山丘陵,多宽谷草原分布。半固定沙地迎风坡基本不生长植物,背风坡多生长黄柳、

柠条、杨柴和沙打旺群落,间杂以河泛地多分布的披碱草、拂子茅等,后者适宜区面积为 4 571.89 km²,占研究区面积的 44.90%。固定沙丘阳坡植被较阴坡稀疏,常见植物种为沙蒿和冷蒿,适宜区面积为 8 169.33 km²,占研究区面积的 80.23%;阴坡植被除乔灌木外还分布有蒿属半灌木群落、沙生丛生禾草、杂类灌丛等,例如乌柳、沙柳、杨柴和黄柳群落等,适宜区面积为 3 387.56 km²,占研究区面积的 33.27%。坡麓长有榆树以及沙生冰草(*Agropyron desertorum*)等,其中榆树适宜区面积为 3 826.17 km²,占研究区面积的 37.58%。杨树等乔木多适宜于东部区域,适宜区面积 1 819.45 km²,占研究区面积的 17.87%。

结合 GIS 空间分析技术,将研究区域建筑、耕地、湖泊等立地类型以及各类植物适生性区域予以叠加显示,在区域空间上对植被分布及适宜类型进行直观展示(图 5)。以正蓝旗桑根达来镇东部为例,东部区域分布沙地、草场以及湖泊,适宜种植生长沙米、猪毛菜、刺蓬和糙隐子草等沙地植物,草场上适宜种植拂子茅、沙打旺和杨柴等,河泛地适宜种植地榆、水麦冬和芦苇等。在决策时,即可据此安排相应的物种进行植被恢复重建工作。

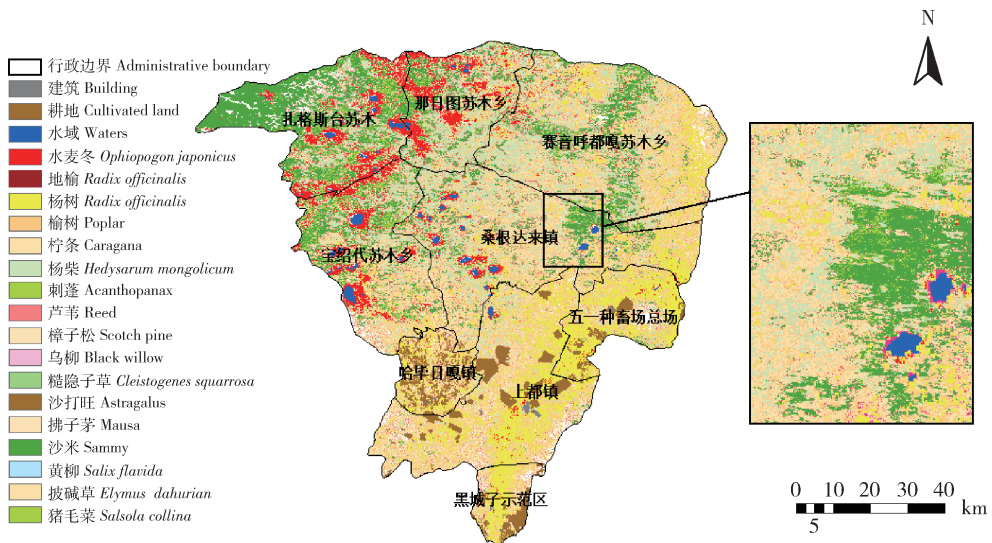


图 5 正蓝旗立地植物适宜性分布

Fig. 5 Suitability distribution of site plants in Zhenglanqi

3 结论与讨论

本研究通过植物分布点数据以及气象、地形、土壤三类环境数据,运用最大熵模型和 GIS 空间分析技术在 30 m 空间尺度上模拟了浑善达克沙地正蓝

旗地区植物的适宜性分布。根据 ROC 曲线,分布区模型的 AUC 值均 0.883,表明该模型预测结果精确,与前人结论一致,可用于该地区的适宜性分布研究^[22]。

浑善达克沙地位于内蒙古锡林郭勒盟草原南

端,属于干旱、半干旱区域,对水热条件变化较为敏感。如西北干旱区^[34]、内蒙古草原^[22,35]、内蒙古自治区西部^[36]的研究表明,水热因子对该区域植物群落分布存在较大影响。在本研究中,环境因子中对浑善达克沙地植物模拟贡献量较大的是年均降水量、积温、高程、地表土壤 pH(KCl)、大气干燥度、大气气压以及地表土壤粘土含量,其中年均降水量和积温为主要贡献因子,这与以往的研究结果基本一致,表明水热因子对沙地植物分布有较大的影响^[4,6,37]。气候变化对干旱、半干旱区域生态系统结构的影响有重要的作用。在本研究中,从流动沙地到固定沙地的植物群落对年均降水量的需求量不断增加,对积温的需求相对减少,植被也由一年生沙生先锋植物群落阶段演替至乔灌木混生沙地疏林阶段。与 Volder 等^[38]和 Rockin 等^[4]研究结果相似,降水量是群落生态结构最主要的影响因子。并且积温的变化使潜在蒸散发发生改变,亦影响到干旱区植被的分布^[22]。因此,发展草原节水和保水技术将有利于维持干旱区植被生态系统的稳定。

在浑善达克沙地流动沙地向固定沙地正向演替的过程中,植物群落优势种和伴生种发生更迭,群落结构趋于复杂,土壤阳离子交换量逐渐增加。土壤阳离子交换量为土壤胶体所能吸附各种阳离子的总量,基本上代表土壤可能保持的养分数量,可作为评价土壤保肥能力的指标。本研究中随着沙地的逐步固定,土壤肥力得到改善,与其他相关研究结论一致,万勤琴^[39]通过对内蒙古呼伦贝尔沙地流动沙地、半固定沙地、固定沙地和典型草场等不同类型群落及土壤的调查研究,沙地逐步固定的过程中,土壤结构和理化性质得到改善,植物种类增多;Zhang 等^[40]通过主成分分析表明毛乌素沙地植被恢复模式中,随着植被恢复,土壤阳离子交换量增加,土壤质量逐渐改善。在决策中结合沙地生境类型,对退化草场进行草场围封,加大优良适宜植物种比例,改善草场质量;对流动、半流动沙地进行沙障固沙以及发展保水技术,防风阻沙,遏制流沙蚀积;对固定和半固定沙地栽种固沙适宜植物种,促进土壤形成,改善土壤肥力^[39]。以此为浑善达克沙地生态系统的管理和调控提供理论依据,为进一步遏制沙漠化扩展和改善区域生态环境奠定基础。

在植物适宜性空间分布的研究中,通过实地调查、文献查询和数据库检索等方式整合植物分布数据。其中标本鉴定的正确性、分布记录的准确性以

及标本采集方法是否近似于随机采样是物种地理分布模拟结果影响的关键因素^[32]。同时本研究考虑了气象、土壤和地形相关的环境因子,没有考虑种间竞争和极端气候事件以及人类活动等环境因子的影响,由于竞争、经营、病虫害、人类活动和极端气候事件等都可能造成植被消失,因此这些环境因子都可能会影响分布模型的结果及适宜分布。因此在对采样点分布是否均衡合理和环境因子的分析基础上,对物种模拟分布还需要做进一步的研究^[41]。

参考文献 References

- [1] Li X S, Zheng G X, Wang J Y, Ji C C, Sun B, Gao Z H. Comparison of methods for estimating fractional cover of photosynthetic and non-photosynthetic vegetation in the Otindag sandy land using gf-1 wide-field view data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(10): 800-819
- [2] 元志辉,包刚,银山,雷军,包玉海,萨楚拉. 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
Yuan Z H, Bao G, Yin S, Lei J, Bao Y H, Sa C L. Study on vegetation cover change in Hunshandake sandy land from 2000 to 2014[J]. *Journal of Grassland Industry*, 2016, 25(1): 33-46 (in Chinese)
- [3] Liu H J, Zhou C H, Cheng W M, Long E, Li R. Monitoring sandy desertification of Otindag sandy land based on multi-date remote sensing images[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 627-635
- [4] Roskin J, Tsoar H, Porat N, Blumberg G D. Palaeoclimate interpretations of Late Pleistocene vegetated linear dune mobilization episodes: Evidence from the northwestern Negev dunefield, Israel[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(23-24): 3364-3380
- [5] Hunt S L, Gordon A M, Morris D M. Understory vegetation in northern Ontario jack pine and black spruce plantations: 20-year successional changes[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(9): 1791-1803
- [6] Li G, Jiang G M, Li Y G, Liu M Z. Biomass carbon storage and net primary production in different habitats of Hunshandake sandland, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(4): 217-224
- [7] Yang X P, Wang X L, Liu Z T, Li H W, Ren X Z, Zhang D G, Ma Z B, Patrick R, Jin X D, Louis S. Initiation and

- variation of the dune fields in semi-arid China: with a special reference to the Hunshandake sandy Land, Inner Mongolia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 7(8): 369-380
- [8] 李珍珍, 王数, 张宏飞, 毛率全, 任娜欧. 黏土对沙地土壤改良效果的微形态研究以内蒙古科尔沁沙地为例[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 115-123
- Li Z Z, Wang S, Zhang H F, Mao S L, Ren N O. Micromorphological study on soil amelioration effect of clay on sandy Land: A case study of Horqin sandy land in Inner Mongolia [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018, 23(11): 115-123 (in Chinese)
- [9] 范豫川, 闫旭东, 张宏飞, 逢好胜, 刘利宁, 王天舒, 李淑娟, 俞杨浏, 左强, 石建初. 内蒙古宜耕沙地作物适宜性评价与节水灌溉方式配置[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 115-127
- Fan Y C, Yan X D, Zhang H F, Pang H S, Liu L N, Wang T S, Li S J, Yu Y L, Zuo Q, Shi J C. Evaluation of crop suitability and allocation of water-saving irrigation methods for arable sandy land in Inner Mongolia [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (21): 115-127 (in Chinese)
- [10] 赵存玉, 王涛, 董治宝, 赵学勇, 薛嫻. 科尔沁沙地草场物种多样性特征及其与生境的关系[J]. 草业科学, 2007, 24(10): 11-18
- Zhao C Y, Wang T, Dong Z B, Zhao X Y, Xue X. Species diversity characteristics of grassland in Horqin sandy land and their relationship with habitats [J]. *Grassland Science*, 2007, 24(10): 11-18 (in Chinese)
- [11] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 刘世荣, 孙鹏森, 王同立. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用以云南松分布模拟为例[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659
- Zhang L, Wang L L, Zhang X D, Liu S R, Sun P S, Wang T L. Basic idea of random forest algorithm and its application in Ecology: A case study of *Pinus yunnanensis* distribution simulation [J]. *Journal of Ecology*, 2014, 34(3): 650-659 (in Chinese)
- [12] 杨洋. 基于四种模型的肉苁蓉潜在地理分布预测及空间格局变化分析[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017
- Yang Y. Potential geographical distribution prediction and spatial pattern change analysis of *Cistanche deserticola* based on four models [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2017
- [13] Allen J, McMullin R T. Modeling algorithm influence on the success of predicting new populations of rare species: Ground-truthing models for the Pale-Belly Frost Lichen (*Physconia subpallida*) in Ontario [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2019, 28(7): 1853-1862
- [14] 张杰, 张畅, 赵振勇, 李敏. 中国飞蝗(*Locusta migratoria*)灾害地理分布模拟及其生物气候因子分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 590-598
- Zhang J, Zhang Y, Zhao Z Y, Li M. Geographical distribution modeling and bioclimatic factor analysis of *Locusta migratoria* disasters [J]. *Arid Region Geography*, 2019, 42(3): 590-598 (in Chinese)
- [15] Jayasinghe S L, Kumar L. Modeling the climate suitability of tea [*Camellia sinensis* L] o kuntze in Sri Lanka in response to current and future climate change scenarios [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 10(2): 272-273
- [16] Theodore C. Weber. Maximum entropy modeling of mature hardwood forest distribution in four US states [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(3): 0-788
- [17] 高蓓, 高茂盛, 董金芳. 基于最大熵模型和 Arcgis 的陕西省单季稻种植分布预测及适宜性[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(3): 8-15
- Gao B, Gao M S, Dong J F. Prediction and suitability of single cropping rice distribution in Shaanxi Province based on maximum entropy model and Arcgis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2016, 21(3): 8-15 (in Chinese)
- [18] Ma S M, Zhang M L, Ni J, Chen X. Modelling the geographic distributions of endemic genera in the eastern Central Asian desert [J]. *Nordic Journal of Botany*, 2012, 30(3): 15-26
- [19] Store R, Jukka J. A GIS-based multi-scale approach to habitat suitability modeling [J]. *Ecological Modelling*, 2003, 169(1): 1-15
- [20] 邓飞, 李晓兵, 王宏, 张蒙, 李旭, 李瑞华. 基于 MaxEnt 模型评价紫花苜蓿在锡林郭勒盟的分布适宜性及主导因子[J]. 草业科学, 2014, 31(10): 1840-1847
- Deng F, Li X B, Wang H, Zhang M, Li X, Li R H. Evaluation of distribution suitability and dominant factors of alfalfa in Xilinguole league based on MaxEnt model [J]. *Grassland Science*, 2014, 31(10): 1840-1847 (in Chinese)
- [21] 杨超. 蒙古高原和青藏高原原针茅属植物适宜分布区及其与气候因子的相关性[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016
- Yang C. The suitable distribution area of *Stipa* in Mongolian Plateau and Qinghai Tibet Plateau and its correlation with climate factors [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2016

- [22] 叶永昌, 周广胜, 殷晓洁. 1961—2010年内蒙古草原植被分布和生产力变化基于 MaxEnt 模型和综合模型的模拟分析[J]. 生态学报, 2016, 36(15): 4718-4728
- Ye Y C, Zhou G S, Yin X J. Vegetation distribution and productivity change in Inner Mongolia grassland during 1961—2010: Simulation analysis based on MaxEnt model and comprehensive model[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 36(15): 4718-4728 (in Chinese)
- [23] 贺晶, 吴新宏, 杨婷婷, 李鹏. 基于临界起沙风速的草地防风固沙功能研究[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 103-107
- He J, Wu X H, Yang T T, Li P. Study on the function of grassland wind and sand fixation based on critical wind speed[J]. *Chinese Journal of Grassland Science*, 2013, 35(5): 103-107 (in Chinese)
- [24] 张素丽, 佟宝全, 郝晶晶. 内蒙古正蓝旗聚落发展演变(1933—1983)[J]. 经济地理, 2018, 38(10): 163-169
- Zhang S L, Tong B Q, Hao J J. Development and evolution of Zhenglanqi settlements in Inner Mongolia (1933—1983)[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(10): 163-169 (in Chinese)
- [25] 田海晨, 刘果厚. 浑善达克沙地飞播区植物多样性的变化以内蒙古正蓝旗为例[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 269-273
- Tian H C, Liu G H. Change of plant diversity in aerial sowing area of Hunshandake sandy land: A case study of Zhenglanqi, Inner Mongolia[J]. *Soil and Water Conservation Bulletin*, 2015, 35(2): 269-273 (in Chinese)
- [26] 饶胜, 林泉, 王夏晖, 张惠远, 陆军. 正蓝旗草地生态系统服务权衡研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 81-86
- Rao S, Lin Q, Wang X H, Zhang H Y, Lu J. Study on the balance of grassland ecosystem services in Zhenglanqi[J]. *Resources and Environment in Arid Areas*, 2015, 29(3): 81-86 (in Chinese)
- [27] 宗敏, 韩广轩, 栗云召, 王光镇, 王安东, 杨显基. 基于 MaxEnt 模型的黄河三角洲滨海湿地优势植物群落潜在分布模拟[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1833-1842
- Zong M, Han G X, Li Y Z, Wang G Z, Wang A D, Yang X J. Potential distribution simulation of dominant plant communities in coastal wetlands of the Yellow River delta based on MaxEnt model[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(6): 1833-1842 (in Chinese)
- [28] 武洁, 史明昌, 丁国栋. 浑善达克沙地正蓝旗沙漠化时空格局[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(5): 110-119
- Wu J, Shi M C, Ding G D. Temporal and spatial pattern of desertification in Zhenglanqi, Hunshandak sandy land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(5): 110-119 (in Chinese)
- [29] 柏菊, 闫峰. 2001—2012年毛乌素沙地荒漠化过程及驱动力研究[J]. 南京师大学报:自然科学版, 2016, 39(1): 132-138
- Bai J, Yan F. Study on desertification process and driving force of Mu Us sandy land from 2001 to 2012[J]. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2016, 39(1): 132-138 (in Chinese)
- [30] 李杨, 艾力·买买提明, 刘艳, 张璞, 吉春容. 古尔班通古特沙漠积雪覆盖、沙尘天气特征及其相互关系[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 961-967
- Li Y, Ali M, Liu Y, Zhang P, Ji C R. The weather characteristics of snow cover and sand dust in Gurbantongut desert and their relationship[J]. *China Desert*, 2010, 30(4): 961-967 (in Chinese)
- [31] 王志波. 基于面向对象方法的土地沙化遥感信息提取技术研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012
- Wang Z B. Research on remote sensing information extraction technology of land desertification based on object-oriented method[D]. Beijing: China Academy of Forestry Sciences, 2012 (in Chinese)
- [32] Jin Q T, Zhang J T, Shi M C, Huang J X. Estimating loess plateau average annual precipitation with multiple linear regression kriging and geographically weighted regression kriging[J]. *Water*, 2016, 8(6): 154-168
- [33] 包小婷, 丁陆彬, 姚帅臣, 王景升, 石培礼, 王彤, 李超, 刘文婧. 拉萨河流域植物群落的数量分类与排序[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 779-786
- Bao X T, Ding L B, Yao S C, Wang J S, Shi P L, Wang T, Li C, Liu W J. Quantitative classification and ordination of plant communities in the Lhasa River Basin[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 39(3): 779-786 (in Chinese)
- [34] 蒋霞. 西北干旱区多种植物地理分布与气候的相关性及其可能潜在分布预测[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2003
- Jiang X. The correlation between the geographical distribution of many plants and the climate and the prediction of their potential distribution in the arid area of northwest China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Botany), 2003
- [35] Zhang Q, Wu J, Buyantuev A, Niu J, Zhou Y, Ding Y, Kang

- S, Ma W. 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
- [36] 杨崇曜, 李恩贵, 陈慧颖, 张景慧, 黄永梅. 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
- Yang C Y, Li E G, Chen H Y, Zhang J H, Huang Y M. Species diversity of natural vegetation in western Inner Mongolia and its influencing factors[J]. *Biodiversity*, 2017, 25(12): 1303-1312 (in Chinese)
- [37] 杨丽萍, 代海燕, 陈素华, 秦艳, 吕迪波, 郭晓丽. 气候变化对科尔沁沙地木本植物物候期的影响[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 518-523
- Yang L P, Dai H Y, Chen S H, Qin Y, Lv D B, Guo X L. Effects of climate change on phenophase of woody plants in Horqin sandy land[J]. *Arid Region Studies*, 2017, 34(3): 518-523 (in Chinese)
- [38] 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
- [39] 万勤琴. 呼伦贝尔沙地沙漠化成因及植被演替规律的研究[D]. 北京:北京林业大学, 2008
- Wan Q Q. Study on the causes of desertification and vegetation succession in Hulunbuir sandy land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008 (in Chinese)
- [40] Zhang M D A, Borjigin E, Zhang H. Mongolian nomadic culture and ecological culture: On the ecological reconstruction in the agro-pastoral mosaic zone in Northern China[J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(1): 19-26
- [41] 刘丹, 李玉堂, 洪玲霞, 国红, 谢阳生, 张卓立, 雷相东, 唐守正. 基于最大熵模型的吉林省主要天然林潜在分布适宜性[J]. 林业科学, 2018, 54(7): 1-15
- Liu D, Li Y T, Hong L X, Guo H, Xie Y S, Zhang Z L, Lei X D, Tang S Z. Potential distribution suitability of main natural forests in Jilin Province based on MaxEnt model[J]. *Forestry Science*, 2018, 54(7): 1-15 (in Chinese)

责任编辑: 王燕华