

北京市侧柏低效林物种多样性改造策略

靳孟理¹, 胡俊², 齐实¹, 逯进生², 李月¹, 蒋九华¹

(1. 北京林业大学水土保持学院水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2. 北京市园林绿化局, 北京 100013)

摘要:【目的】京津风沙源二期低效林改造工程的主要任务之一是提高森林物种多样性。探究影响北京市低效林林下物种多样性指数的环境因素并确定各环境因素影响大小。【方法】以侧柏 *Platycladus orientalis* 低效林为研究对象, 对 35 个低效林样地开展调查, 获取并计算各样地的物种多样性指数; 利用最大熵模型研究 10 个立地环境因子与侧柏低效林林下物种多样性指数的关系, 分析不同立地条件类型对侧柏林下物种多样性的影响。【结果】影响物种多样性的主要环境变量为海拔、坡向、土壤全磷、坡度和土壤全钾, 其累积贡献率之和达 93.8%; 采用提升土壤全磷、土壤全钾和微地形改造的措施后, 侧柏低效林林下物种多样性高于筛选值的分布概率, 由 0.354 分别提升至 0.431、0.654 和 0.379, 同时实施上述 3 种措施后, 分布概率提升至 0.738, 单独和同时实施以上措施均有助于提高物种多样性。【结论】改良立地条件可以提高侧柏低效林的林下物种多样性。图 5 表 3 参 38

关键词: 森林生态学; 物种多样性; 最大熵模型; 侧柏; 低效林; 改造措施

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)01-0027-09

Reconstruction measures of species diversity of low-function *Platycladus orientalis* forest in Beijing

JIN Mengli¹, HU Jun², QI Shi¹, LU Jinsheng², LI Yue¹, JIANG Jiuhua¹

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Gardening and Greening Bureau, Beijing 100013, China)

Abstract: [Objective] One of the main tasks of reconstruction of low-function forest of Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control II Project is to increase species diversity indices. The aim is to explore and assess the effects of various environmental factors on the species diversity indices of understory in low-function forests in Beijing. [Method] 35 low-function *Platycladus orientalis* forest plots were investigated and species diversity indices were also calculated. The Maximum Entropy model was used to study the relationship between 10 environmental variables (such as soil properties and topographic factors) and understory species diversity indices of low-function cypress forests, analyze the effects of site conditions on understory biodiversity of cypress forest. [Result] (1) The main environmental variables affecting the species diversity indices were altitude, slope direction, soil total phosphorus content, slope and soil total potassium content, and the cumulative contribution rate of the five indices reached 93.8%; (2) The probability higher than filter value of species diversity under low-function cypress forests increased from 0.354 to 0.431, 0.654 and 0.379 by improving soil total phosphorus, total potassium content and micro-topography, and the distribution probability was increased to 0.738 after implementing the above three measures. The total phosphorus, total potassium content of soil in classes of low-function cypress forest and slope measures adopted separately and simultaneously can help improve diversity.

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-06-03

基金项目: 北京市京津风沙源治理二期林业工程监测与评价项目(2017022-JC09)

作者简介: 靳孟理, 从事林业监测、流域治理等研究。E-mail: 1750471603@qq.com。通信作者: 齐实, 教授, 从事流域治理与规划等研究。E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

[Conclusion]Improvement of site conditions can increase the species diversity indices of low-function cypress forest. [Ch, 5 fig. 3 tab. 38 ref.]

Key words: forest ecology; species diversity; maximum entropy model; *Platyclusus orientalis*; low-function forest; reconstruction measures

京津风沙源治理工程是国家重要的生态工程,目前已进入到二期。工程任务的出发点是保护和扩大林草植被,建设内容主要以低效林改造、人工造林(困难立地和宜林地造林)、封山(沙)育林为主,达到减少风沙危害和水土流失、改善首都及周边地区生态状况的目标。其中,以提升物种多样性和完善林分结构为目标的低效林改造是投资最多、工期最长、任务最艰巨的工程类型。低效林主要表现为林地生产力、森林生态服务功能和社会服务功能显著低于同等立地条件下同类林分的平均水平,因此,其改造措施的实施与效果的研究显得尤为重要。森林物种多样性在维持陆地生态系统平衡,保证人类和社会经济可持续发展方面发挥着不可替代的重要作用^[1]。其中,研究环境因子对群落组成、植物分布的驱动是群落生态学研究的重要问题^[2-4]。在局地植物群落研究上,影响植物群落组成和分布的首要因素是地形因素和立地条件^[5-8]。物种分布及多样性格局主要受海拔、坡向和坡度、经纬度等立地条件影响^[9-12],通过典型样地调查法的灰色关联度分析^[13-14]、神经网络预测^[15]和典范对应分析(CCA)排序^[16]可知:海拔是影响森林物种多样性的重要因素,坡向和坡度的影响排位则因研究的群落功能层不同而出现较小出入^[17]。同时,土壤养分及各维因素之间的交互作用,也会影响到立地环境条件导致微地形因子环境条件的异质性,从而对群落多样性产生影响^[18-21]。最大熵模型^[22-24](maximum entropy models, MaxEnt 模型)是研究影响物种分布的环境因素并揭示环境因素对物种分布概率影响的生态位模型,被广泛应用于动植物的分布区及保护区研究,并表现出良好的预测效果^[25-28]。根据最大熵原理在给定的环境条件下选择最优的概率分布^[29],并通过逐步修正单一要素的系数来提高增益值,将增益值增额分配给决定该要素的环境变量,将其转化为百分比后给出对影响该物种分布的环境变量贡献率排序,同时生成分布概率对各环境变量的响应曲线。最终通过受试者工作特征曲线(receiver operating characteristic curve, ROC 曲线)评定生成结果是否可信^[30]。本研究利用筛选的北京市京津风沙源侧柏 *Platyclusus orientalis* 低效林调查样地多样性数据和位置数据,选取海拔、坡向、坡度、土壤养分等 10 个立地环境因素,采用最大熵模型方法分析立地环境因素对侧柏低效林的林下物种多样性指数的影响,同时模拟立地环境改造对侧柏低效林物种多样性的响应,并评估立地改造措施对提升侧柏低效林多样性的效果,以期对提升京津风沙源侧柏低效林多样性提供参考。

1 研究区概况

研究区位于北京市山区(39°28'~41°05'N, 115°25'~117°30'E)。该区属暖温带大陆性季风气候,多年平均降水量为 583.0 mm,年均气温为 10.0~12.0 °C。主要土壤类型为褐土。原始植被类型主要为阔叶落叶林和温带针叶林,山地植被类型为杂草草甸和混生次生的阔叶落叶林,由于环境破坏,山地植被演替为灌丛和萌生丛。

北京市京津风沙源治理工程的低效林改造区主要分布在北京山区,改造区面积约 11 218.76 km²,占北京市总面积的 68%。2013 年至今,北京市京津风沙源二期工程总面积约 729.35 km²,其中侧柏低效林面积约 240.92 km²,占京津风沙源二期工程总面积的 33%。

2 研究方法

2.1 样地设置

北京市京津风沙源二期低效林改造工程位于北京市西北侧的房山区、门头沟区、昌平区、延庆区、怀柔区、密云区、平谷区以及松山、西山、八达岭和十三陵 4 个林场。依据工程 2013 年以来的实施状况、立地条件类型、实施面积、空间布局,选定 35 个侧柏低效林调查样地(图 1)。

2.2 样地调查与数据处理

2.2.1 样地调查 ①在低效林改造小班内设置 1 个 20 m × 20 m 样地,使用全球定位系统(GPS)获取样

地的经纬度、海拔信息，用罗盘测定坡度和坡向。②采用方格纸描点的方法记录样地内乔木株数和位置，用红外线测高器测量乔木的高度，用胸径尺测量乔木胸径，通过设置 5 个 5 m × 5 m 大小的灌木样方和 10 个 1 m × 1 m 的草本样方调查林下物种多样性及各个物种的盖度，多样性的植物鉴定精确到种，盖度调查以 5% 为等级间距进行分级估测^[31]。样地基本情况见表 1。

2.2.2 森林物种多样性计算 森林物种多样性包括乔木层、灌木层和草本层各层次的多样性，本研究的研究对象侧柏低效林大多未郁闭和成林，应多关注灌木层和草本层植物群落的多样性，即林下群落的物种多样性指数 $D^{[32]}$ ： $D=W_1D_1+W_2D_2$ 。其中： D_1 和 D_2 为灌木层和草本层的物种多样性指数； W_1 和 W_2 为给定的灌木层和草本层的权重系数，取值均为 0.5。物种多样性指数包括 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数、Gleason 指数、Margalef 指数和 Pielou 均匀度指数，计算详见文献^[33]。

2.3 最大熵模型数据采集和样地数据筛选

2.3.1 立地因子数据采集 选取北京市海拔、坡向、坡度、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾和土壤有机质共 10 个立地条件作为环境变量。其中海拔源于 30 m 分辨率数字高程模型(DEM)，坡向和坡度由高程数据提取而来，全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾和土壤有机质来源于寒区旱区科学数据中心 (<http://westdc.westgis.ac.cn/data/>)。

2.3.2 多样性数据筛选 将各个样地对应的 Shannon-Wiener 指数按升序排列。排列结果显示：Shannon-Wiener 指数从 0.707 开始有显著提升。结合相关对物种多样性的研究^[34-35]，以 Shannon-Wiener 指数 0.707 作为侧柏低效林林下物种多样性高低的筛选点，当 Shannon-Wiener 指数高于 0.707 时，认为此时的侧柏低效林林下物种多样性水平高。最终选出 12 个林下物种多样性水平高的样地作为最大熵模型的点位数据。

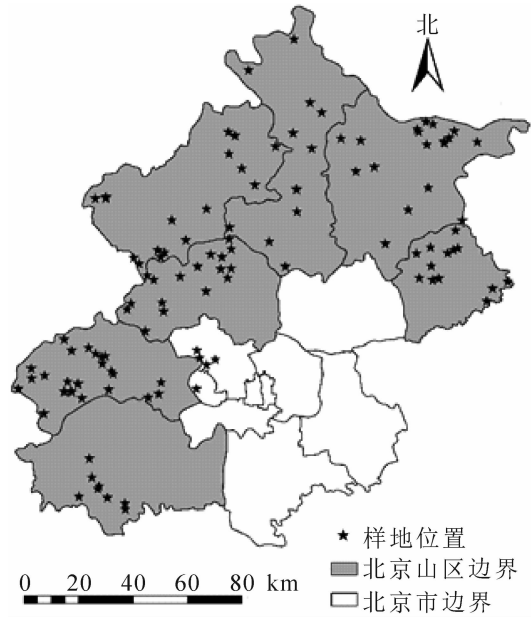


图 1 侧柏低效林调查样地位置示意图

Figure 1 Sample plots distribution of low-function forest of *P. orientalis*

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample plots

样地编号	样地位置	坡向	坡度/(°)	海拔/m	样地编号	样地位置	坡向	坡度/(°)	海拔/m
1	十三陵林场花园分区	阳坡	25	260	19	房山张坊镇东关上村	半阳坡	26	268
2	房山长沟镇	半阴坡	10	118	20	门头沟沿河城村	半阳坡	15	370
3	门头沟斋堂镇 1 号	阴坡	12	420	21	密云区古北口镇	半阳坡	12	230
4	门头沟斋堂镇 2 号	阳坡	5	450	22	密云区不老屯镇	阴坡	15	305
5	平谷王辛庄镇	半阳坡	14	118	23	平谷区大华山镇	阳坡	20	301
6	延庆帮水峪村 1 号	半阳坡	6	640	24	延庆区四海镇	半阳坡	18	660
7	十三陵林场沟崖分区	半阳坡	25	260	25	八达岭林场	阳坡	24	198
8	房山区张坊镇	阳坡	10	260	26	十三陵林场蟒山分区	半阳坡	10	120
9	房山区长沟镇	半阳坡	17	204	27	松山自然保护区	阳坡	8	1 010
10	门头沟斋堂镇 3 号	半阴坡	12	468	28	西山林场广宁	正北	15	150
11	门头沟斋堂镇 4 号	半阳坡	14	490	29	昌平流村镇古将村	阳坡	10	270
12	密云高岭镇 1 号	阳坡	8	209	30	房山区水头村	正西	35	189
13	密云高岭镇 2 号	阳坡	20	280	31	房山区穆家口	正北	30	104
14	延庆帮水峪村 2 号	阳坡	22	600	32	怀柔九渡河西水峪村	阳坡	22	295
15	平谷金海湖镇	半阳坡	19	300	33	怀柔九渡河镇黄坎村	半阳坡	34	143
16	怀柔桥梓镇	阳坡	12	474	34	门头沟清水林场	阳坡	26	521
17	松山管理处	半阴坡	13	221	35	门头沟北岭东五村	阴坡	27	750
18	昌平流村镇西峰山	半阴坡	11	220					

2.3.3 最大熵模型(MaxEnt)计算原理 最大熵模型是以最大熵理论为基础的物种地理尺度空间分布模型。其核心是通过不完全信息推断未知信息,求概率分布在熵值达最大时的条件^[36]。模型运行结果采用受试者工作特征曲线(ROC)进行模型的精度验证,通过计算曲线与横坐标轴围成的面积(A_{UC})判断预测精度。一般而言,当 $A_{UC}>0.8$ 时,预测结果可被采纳。

3 结果与分析

3.1 侧柏低效林样地物种多样性分析

由表2可知:35个侧柏低效林样地中,Shannon-Wiener指数的极差最大,Pielou指数的极差最小;Gleason指数的标准差最小,离散程度最低。可推断大多数样地林下植物组成比较固定,种类相对一致。各个多样性指数均能反映样地的物种多样性水平。由于Shannon-Wiener指数是物种多样性指数中最常用的指标,因此,选用Shannon-Wiener指数作为最大熵模型样地筛选的指标。

表2 侧柏低效林样地林下物种多样性指数

Table 2 Undergrowth species diversity index of cypress low-function forest sample plots

样地 编号	Shannon- Wiener 指数	Simpson 指数	Gleason 指数	Margalef 指数	Pielou 指数	样地 编号	Shannon- Wiener 指数	Simpson 指数	Gleason 指数	Margalef 指数	Pielou 指数
1	0.501	0.542	0.567	0.907	0.827	20	0.119	0.049	0.501	0.542	0.109
2	0.668	0.844	0.424	0.844	0.608	21	0.674	0.483	0.334	0.434	0.971
3	0.167	0.238	0.125	0.458	0.359	22	0.868	0.510	0.501	1.116	0.790
4	0.264	0.298	0.133	0.297	0.131	23	0.203	0.084	0.501	0.442	0.185
5	1.001	1.111	0.536	1.029	0.574	24	0.706	0.360	0.668	0.900	0.509
6	0.669	0.891	0.713	1.327	0.953	25	0.665	0.861	0.334	0.402	0.959
7	0.528	0.297	0.501	0.509	0.480	26	1.438	0.725	0.835	1.516	0.893
8	1.358	0.691	0.835	1.200	0.844	27	0.588	0.314	0.501	0.550	0.535
9	0.442	0.344	0.268	0.533	0.349	28	0.999	0.556	0.668	0.749	0.721
10	1.024	0.620	0.501	0.638	0.932	29	0.162	0.073	0.334	0.205	0.234
11	1.069	0.496	1.001	1.365	0.597	30	0.245	0.124	0.334	0.244	0.353
12	0.466	0.291	0.334	0.353	0.672	31	1.038	0.672	1.001	1.365	0.579
13	0.167	0.339	0.268	0.567	0.349	32	1.399	0.708	0.835	0.929	0.869
14	0.707	0.342	0.835	0.878	0.439	33	0.349	0.143	0.668	0.813	0.251
15	0.206	0.082	0.501	0.520	0.187	34	1.560	0.781	0.835	0.908	0.970
16	1.221	0.667	0.668	1.303	0.881	35	0.582	0.393	0.334	0.209	0.840
17	0.623	0.354	0.501	0.499	0.568	极差	1.441	1.062	0.876	1.311	0.862
18	0.203	0.084	0.501	0.442	0.186	标准差	0.410	0.275	0.231	0.376	0.281
19	0.511	0.214	0.835	1.228	0.318						

3.2 最大熵模型模拟及结果分析

3.2.1 模拟精度分析 将筛选的样地数据代入最大熵模型,生成ROC曲线(图2)。从图2可见:模型训练集曲线的 A_{UC} 达0.949,完全可以满足分析精度要求^[37-38],说明最大熵模型可用于模拟和分析侧柏低效林多样性的概率分布。

3.2.2 环境因子对物种多样性的影响 由最大熵模型生成的立地环境因子变量对多样性指数影响的贡献率排序见表3。表明影响侧柏低效林多样性指数的环境变量主要有8个。影响侧柏低效林物种多样性指数的主要立地环境因子是海拔、坡向和土壤全磷,这三者的累积贡献率之和达86.1%。其中:海拔对侧柏低效林物种多样性

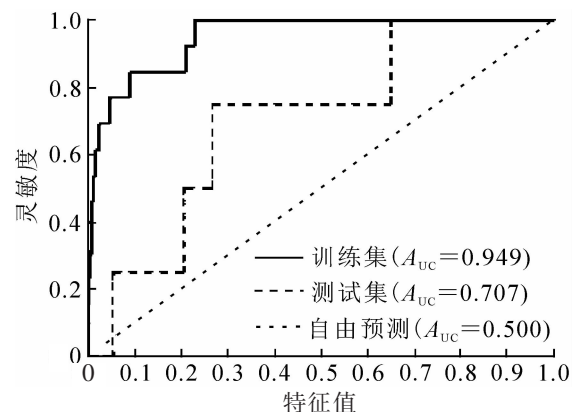


图2 模型生成的ROC曲线

Figure 2 ROC curve generated by model

指数的贡献率最大, 达 46.8%。由图 3 可知: 海拔 100~250 m 侧柏低效林物种多样性指数高于筛选值的分布概率最大。随着海拔的增加, 侧柏低效林林下物种多样性指数高于筛选值的分布概率急剧下降; 坡向对侧柏低效林物种多样性指数贡献率次之, 达 28.9%, 从坡向来看, 0~90°阴坡对应的侧柏林下物种多样性高于筛选值的分布概率不超过 0.5, 此范围内坡向对侧柏低效林林下物种多样性高于筛选值的分布概率无影响, 在其余坡向上概率值基本维持在 0.6 左右, 此时侧柏低效林在阴坡和阳坡均有可能呈现高林下多样性水平, 因此阴坡和阳坡在多样性水平上并无明显差异。土壤全磷是土壤化学性质中贡献率最高的, 达 10.4%, 对侧柏低效林的林下物种多样性具有重要作用; 土壤全钾的贡献率为 3.9%, 当土壤全钾为 $24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时其对林下物种多样性高于筛选值的分布概率最大; 土壤速效氮贡献率为 3.8%, 与林下物种多样性呈负相关; 坡度的贡献率为 3.2%, 当坡度为 $10^\circ \sim 20^\circ$ 时, 林下物种多样性高于筛选值的分布概率最大; 由于土壤速效钾和速效磷的贡献率低于 2.0%, 因此不予考虑。

表 3 环境变量贡献率

Table 3 Contribution rate of environmental variables

环境变量	贡献率/%	累积贡献率/%
海拔	46.8	46.8
坡向	28.9	75.7
全磷	10.4	86.1
全钾	3.9	90.0
坡度	3.8	93.8
速效氮	3.2	97.0
速效钾	1.7	98.7
速效磷	1.3	100.0
土壤有机质	0	100.0
全氮	0	100.0

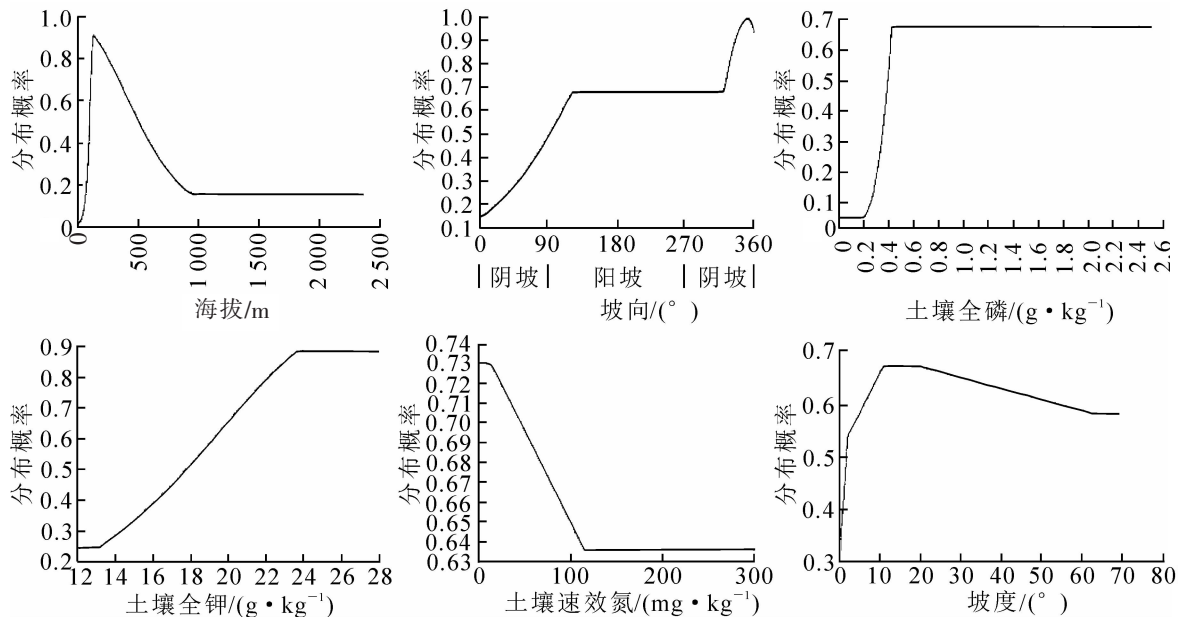


图 3 主要立地环境因子的响应曲线

Figure 3 Response curve of main site environmental factors

3.3 侧柏低效林空间布局分析

分布概率即相应区域林下物种多样性高于筛选值的概率, 数值越大, 对应的物种多样性高于筛选值的概率越大, 可认为相应区域的林下物种多样性越高。从图 4 可见: 所有侧柏低效林小班的平均分布概率为 0.350, 90%以上的小班分布概率低于 0.707, 侧柏低效林小班的物种多样性有待提高。

3.4 侧柏低效林改造策略分析

为提升侧柏低效林小班的林下物种多样性, 修改相应环境变量至对应的分布概率表达为最大值的状态是非常必要的。在这些环境变量中, 海拔、坡向、年均降水量是自然因素, 人为改造难度极大。为了更贴近真实人为改造措施, 针对土壤全磷、土壤全钾、坡度实施相应的人工干预措施。现提出 4 种改造措施: ①提高土壤全磷质量分数。保证侧柏低效林小班的土壤全磷最低为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; ②微地形改造。采用水平条、水平阶将坡度高于 20° 的侧柏低效林小班的坡度降到 15° ; ③提高土壤全钾质量分数。保证侧柏低效林小班的土壤全钾最低为 $24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; ④同时施用上述 3 种措施, 提高土壤全磷和全钾质量分数, 并进行微地形改造。

3.5 侧柏低效林空间改造策略模拟

侧柏低效林小班在改造措施实施后林下物种多样性产生明显变化，空间变化如图5。实施改造前侧柏低效林小班的分布概率为0.354，提高土壤全磷(措施①)后分布概率提升至0.431，微地形改造(措施②)后概率提升至0.379，提高土壤全钾(措施③)后分布概率提升至0.654，同时实施上述3种措施(措施④)后分布概率提升至0.738。微地形改造措施实施后分布概率提升了7%，与改造前相比没有显著差异，是较为微弱的。主要由于坡度对物种多样性高于筛选值的分布概率影响较小，这个结果很好地解释了最大熵模型对立地环境因子贡献率排序的准确性。说明增施磷肥和钾肥可提高土壤全磷和全钾质量分数，微地形改造措施可提升侧柏低效林的物种多样性，这3种措施之间并无冲突，同时施用效果更佳。

4 结论与讨论

影响北京市侧柏低效林物种多样性的主要立地环境因子是海拔、坡向和土壤全磷，这三者的累积贡献率之

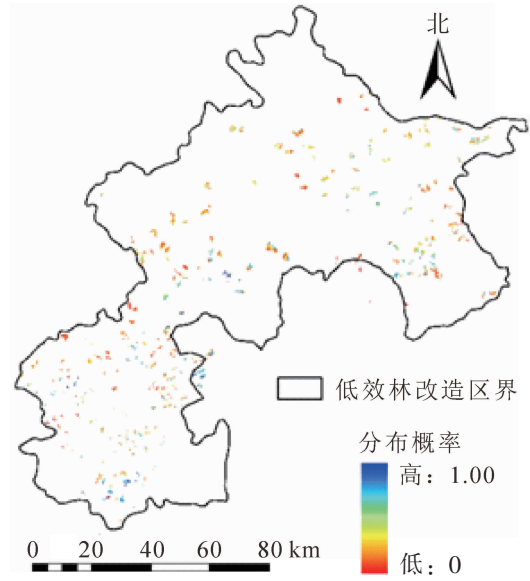


图4 侧柏低效林小班林下物种多样性的空间分布概率示意图

Figure 4 Spatial probability distribution of understory species diversity in low-function cypress classes

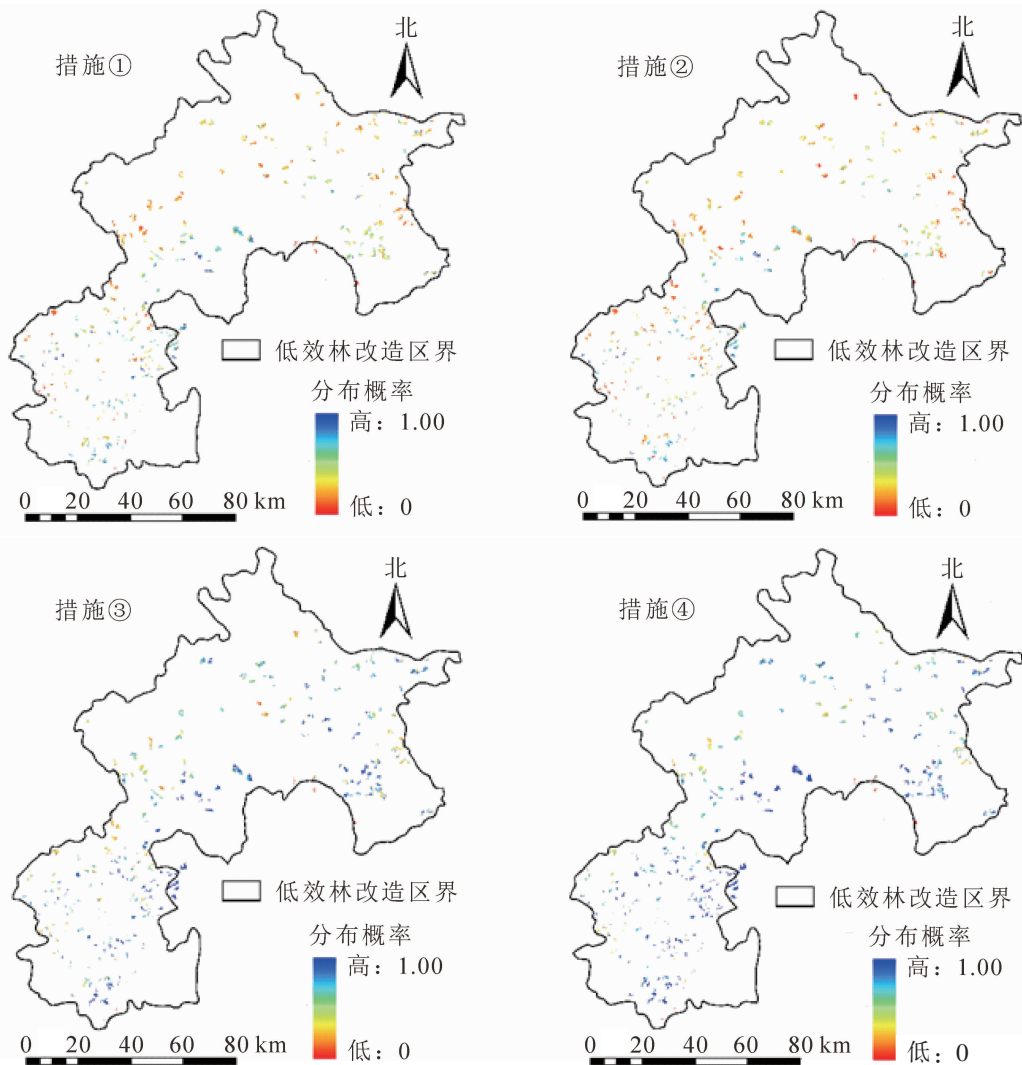


图5 侧柏低效林小班的多样性分布概率示意图

Figure 5 Probability distribution of diversity in low-function cypress classes

和达 86.1%，其中贡献率最高的为海拔，为 46.8%，该结果与么旭阳等^[13]、薛鸥等^[14]、苏日古嘎等^[15]的研究一致。其原因是热量在垂直梯度上受海拔的变化引起不均匀分配，从而使植物群落结构和组成呈不同的表达^[10, 16]；坡向贡献率达 25.9%，坡面的不同朝向导致植物对光照的接收呈较大差异，从而引起植物群落的分布和结构变化。海拔和坡度的变化直接导致侧柏低效林林下群落在温度和光照上的不均衡；土壤全磷的贡献率为 9.4%，土壤的速效氮、速效磷和速效钾的贡献率明显小于全氮、全磷、全钾，主要在于森林群落对土壤速效氮、速效磷钾的吸收是一个缓慢的过程，而且低效林的生长环境大都处于坡陡、土壤侵蚀较大的北京市土石山区，对土壤速效养分的吸收能力不佳。

提高土壤全钾的措施效果最明显，增施磷肥和钾肥以及微地形改造措施可以对提升侧柏低效林的物种多样性起到积极作用。这 3 种措施同时施用效果比单项措施好，说明改良立地条件可以起到提高侧柏低效林的林下物种多样性的作用。

5 参考文献

- [1] LEVINEL J M, LAMBERS J H R. The importance of niches for maintenance of species diversity [J]. *Nature*, 2009, **461**(7621): 254 – 257.
- [2] PHILIPS O L, VARGAS N P, MONTEAGUDO A L, *et al.* Habitat association among Amazonian tree species: a landscape-scale approach [J]. *J Ecol*, 2003, **91**(5): 757 – 775.
- [3] 于顺利, 马克平, 徐存宝, 等. 环境梯度下蒙古栎群落的物种多样性特征[J]. *生态学报*, 2004, **24**(12): 2932 – 2939.
YU Shunli, MA Keping, XU Cunbao, *et al.* The species diversity characteristics comparison of *Quercus mongolica* community along environmental gradient factors [J]. *Acta Ecol Sin*, 2004, **24**(12): 2932 – 2939.
- [4] 张斌, 张金屯, 苏日古嘎, 等. 协方差分析与典范对应分析在植物群落排序中的应用比较[J]. *植物生态学报*, 2009, **33**(5): 842 – 851.
ZHANG Bin, ZHANG Jintun, Suriguga, *et al.* A comparison of co-inertia analysis and canonical correspondence analysis in plant community ordination [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2009, **33**(5): 842 – 851.
- [5] HUO Hong, FENG Qi, SU Yonghong. Shrub communities and environmental variables responsible for species distribution patterns in an alpine zone of the Qilian Mountains, Northwest China [J]. *J Mt Sci*, 2015, **12**(1): 166 – 176.
- [6] 区余端, 苏志尧, 李镇魁, 等. 地形因子对粤北山地森林不同生长型地表植物分布格局的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1107 – 1113.
OU Yudian, SU Zhiyao, LI Zhenkui, *et al.* Effects of topographic factors on the distribution patterns of ground plants with different growth forms in montane forests in North Guangdong, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(5): 1107 – 1113.
- [7] MOHAMMADI M F, JALALI S G, KOOCH Y, *et al.* The influence of landform on the understory plant community in a temperate Beech forest in northern Iran [J]. *Ecol Res*, 2015, **30**(2): 385 – 394.
- [8] SVENNING J C. Small canopy gaps influence plant distributions in the rain forest understory [J]. *Biotropica*, 2000, **32**(2): 252 – 261.
- [9] KRAFT N J B, COMITA L S, CHASE J M, *et al.* Disentangling the drivers of β diversity along latitudinal and elevational gradients [J]. *Science*, 2011, **333**(6650): 1755 – 1758.
- [10] 马旭东, 张苏峻, 苏志尧, 等. 车八岭山地常绿阔叶林群落结构特征与微地形条件的关系[J]. *生态学报*, 2010, **30**(19): 5151 – 5160.
MA Xudong, ZHANG Sujun, SU Zhiyao, *et al.* Community structure in relation to micro topography in a montane evergreen broadleaved forest in Chebaling National Nature Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(19): 5151 – 5160.
- [11] BURKE I C, LAUENROTH W K, RIGGLE R, *et al.* Spatial variability of soil properties in the short grass steppe: the relative importance of topography, grazing, microsite, and plant species in controlling spatial patterns [J]. *Ecosystems*, 1999, **2**(5): 422 – 438.
- [12] KAMRANI A, JALILI A, NAQINEZHAD A, *et al.* Relationships between environmental variables and vegetation across mountain wetland sites, N. Iran [J]. *Biologia*, 2011, **66**(1): 76 – 87.
- [13] 么旭阳, 胡耀升, 刘艳红. 长白山阔叶红松林典型森林群落功能多样性及其与地形因子的关系[J]. *西北农林*

科技大学学报, 2014, **42**(10): 95 – 102.

YAO Xuyang, HU Yaosheng, LIU Yanhong. Functional diversity of typical broad-leaved Korean pine forest communities in Changbai Mountains and its relationship with topographical factors [J]. *J Northwest A&F Univ*, 2014, **42**(10): 95 – 102.

- [14] 薛鸥, 魏天兴, 朱金兆. 环境因子对北京低山区低效林林下植物物种组成和丰富度的影响[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(9): 2321 – 2328.
- XUE Ou, WEI Tianxing, ZHU Jinzhao. Effects of environmental factors on the composition and richness of understory species in low-function forests in Beijing low mountain areas [J]. *Chin J Ecol*, 2016, **35**(9): 2321 – 2328.
- [15] 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞. 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测[J]. 生态学报, 2013, **33**(11): 3394 – 3403.
- Suriguga, ZHANG Jintun, WANG Yongxia. Species diversity of forest communities and its forecasting by neural network in the Songshan National Nature Reserve, Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(11): 3394 – 3403.
- [16] 张昌顺, 谢高地, 包维楷, 等. 地形对澜沧江源区高寒草甸植物丰富度及其分布格局的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(11): 2767 – 2774.
- ZHANG Changshun, XIE Gaodi, BAO Weikai. Effects of topographic factors on the plant species richness and distribution pattern of alpine meadow in source region of Lancang River, Southwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2012, **31**(11): 2767 – 2774.
- [17] MUJURU L, KUNDHLANDE A. Small-scale vegetation structure and composition of Chirinda Forest, southeast Zimbabwe [J]. *Afr J Ecol*, 2007, **45**(4): 624 – 632.
- [18] GASTON K J. Global patterns in biodiversity [J]. *Nature*, 2000, **405**(6783): 220 – 227.
- [19] SÁNCHEZ-GONZÁLEZ A, LÓPEZ-MATA L. Plant species richness and diversity along an altitudinal gradient in the Sierra Nevada, Mexico [J]. *Diversity Distrib*, 2005, **11**(6): 567 – 575.
- [20] LACOUL P, FREEDMAN B. Relationships between aquatic plants and environmental factors along a steep Himalayan altitudinal gradient [J]. *Aquatic Bot*, 2006, **84**(1): 3 – 16.
- [21] ELLUM D S. *Demographic Patterns and Disturbance Responses of Understory Vegetation in a Managed Forest of Southern New England: Implications for Sustainable Forestry and Biodiversity Maintenance* [D]. New Haven: Yale University, 2007.
- [22] 朱耿平, 乔慧捷. MaxEnt 模型复杂度对物种潜在分布区预测的影响[J]. 生物多样性, 2016, **24**(10): 1189 – 1196.
- ZHU Gengping, QIAO Huijie. Effect of the Maxent model's complexity on the prediction of species potential distributions [J]. *Biodiversity Sci*, 2016, **24**(10): 1189 – 1196.
- [23] 张颖, 李君, 林蔚, 等. 基于最大熵生态位元模型的入侵杂草春飞蓬在中国潜在分布区的预测[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(11): 2970 – 2976.
- ZHANG Ying, LI Jun, LIN Wei, et al. Prediction of potential distribution area of *Erigeron philadelphicus* in China based on MaxEnt [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2011, **22**(11): 2970 – 2976.
- [24] 张路. MAXENT 最大熵模型在预测物种潜在分布范围方面的应用[J]. 生物学通报, 2015, **50**(11): 9 – 12.
- ZHANG Lu. Application of MAXENT maximum entropy model in predicting the potential distribution range of species [J]. *Biol Bull*, 2015, **50**(11): 9 – 12.
- [25] NA Xiaodong, ZHOU Haitao, ZANG Shuying, et al. Maximum Entropy modeling for habitat suitability assessment of Red-crowned crane [J]. *Ecol Indic*, 2018, **91**(5): 439 – 446.
- [26] JALAEIAN M, GOLIZADEH A, SARAFRAZI A, et al. Inferring climatic controls of rice stem borers' spatial distributions using maximum entropy modelling [J]. *J Appl Entomol*, 2018, **142**(4): 388 – 396.
- [27] XU Xiang, ZHANG Huayong, YUE Junjie, et al. Predicting shifts in the suitable climatic distribution of walnut (*Juglans regia* L.) in China: Maximum Entropy Model paves the way to forest management [J]. *Forests*, 2018, **9**(3): 103.
- [28] SARIKAYA O, KARACEYLAN I B, SEN I. Maximum Entropy Modeling (maxent) of current and future distributions of *Ips mansfeldi* (Wachtl, 1879) (Curculionidae: Scolytinae) in Turkey [J]. *Appl Ecol Environ Res*, 2018, **16**(3): 2527 – 2535.

- [29] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Mod*, 2006, **190**(3): 231 – 259.
- [30] PHILLIPS S J, DUDIK M, SCHAPIRE R E. *A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling in Proceedings of The Twenty-First International Conference on Machine Learning* [M]. New York: ACM Press, 2004.
- [31] ARES A, NEILLA R, PUETTMANN K. Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **260**(7): 1104 – 1113.
- [32] 张峰, 张金屯, 上官铁梁. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植物多样性研究[J]. 植物生态学报, 2002, **40** (增刊 1): 46 – 51.
ZHANG Feng, ZHANG Jintun, SHANGGUAN Tieliang. Plant diversity of forest community in Zhuweigou of Lishan Mountain Nature Reserve [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, **40**(suppl 1): 46 – 51.
- [33] 卢炜丽. 重庆四面山植物群落结构及物种多样性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
LU Weili. *Studies on Forest Plant Community Structure and Biodiversity in Chongqing Simian Mountains* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [34] 汪平, 贾黎明, 李效文, 等. 侧柏游憩林抚育对林下植物组成及多样性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2012, **40**(11): 78 – 82.
WANG Ping, JIA Liming, LI Xiaowen, *et al.* Effects of tending on species composition and diversity of undergrowth in *Platyclusus orientalis* recreational stands [J]. *J Northeast For Univ*, 2012, **40**(11): 78 – 82.
- [35] 涂磊. 北京西山国家森林公园植物群落研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 70 – 72.
TU Lei. *A Study on the Plant Community of Beijing Xishan National Forest Park* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016: 70 – 72.
- [36] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, *et al.* A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. *Diversity Distrib*, 2011, **17**(1): 43 – 57.
- [37] 李灿, 刘贤安, 王娟, 等. 基于 MaxEnt 模型的四川省红豆杉潜在分布区分析及适宜性评价[J]. 林业调查规划, 2018, **43**(1): 22 – 29.
LI Can, LIU Xian'an, WANG Juan, *et al.* Potential distribution and habitat suitability assessment of *Taxus chinensis* based on MaxEnt in Sichuan Province [J]. *For Inventory Plann*, 2018, **43**(1): 22 – 29.
- [38] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve [J]. *Radiology*, 1982, **143**: 29 – 36.