

# 塞罕坝华北落叶松人工林生产力及其空间分布预测

李文博, 吕振刚, 黄选瑞, 张志东

(河北农业大学林学院, 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 保定 071000)

**摘要:** 准确预测森林立地生产力是进行高效森林经营的关键。立地指数是森林生产力可靠的评价指标之一。基于地形、气候和土壤因子以及220块样地解析木数据, 采用回归克里格(RK)模型对塞罕坝机械林场华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林立地指数(SI)进行空间插值预测, 并分析了不同半变异函数对RK模型精度的影响。拟合结果表明: 基于高斯半变异函数的RK模型精度优于球状和指数RK模型, 且具有较小的残差( $RMSE=0.82$  m,  $MAE=0.66$  m), 表明高斯RK模型具有很强的预测SI能力; 高斯半变异函数分析表明研究区华北落叶松人工林SI存在较强的空间自相关性, 且在724.89 m变程内差异显著; 影响华北落叶松立地指数分布的主要环境因子有土壤全氮、土壤pH、夏季降水量和春季降水量; 立地生产力较高区域一般分布在春季降水适中、夏季降水较多、土壤为中性及偏酸性且全氮含量较高的东南部地区, 占研究区总面积的32.00%, 而在春、夏季降水量少或者春季降水量过多、土壤全氮含量过低且偏碱性的北部边缘地区立地生产力较低, 仅占研究区总面积的8.90%。研究区土壤、气候因子与树木生长习性共同决定了华北落叶松人工林生产力的分布格局。通过降低土壤酸碱度和适当施加氮肥等措施, 可以提高华北落叶松人工林生产力。

**关键词:** 立地指数; 环境因子; 地统计学; 华北落叶松

森林立地生产力是生物燃料供给、碳固存和森林生长预测等多种应用的一个重要指标<sup>[1]</sup>, 确定森林立地生产力能够为森林经营管理提供决策依据, 从而实现森林多功能经营目标<sup>[2]</sup>。在林业研究实践中, 采用蓄积量指标评估森林生产力更为直接, 但其易受林分密度和森林经营活动等因素的影响<sup>[3]</sup>, 不确定性较大。而优势木的高生长受林分结构和森林经营活动影响很小, 因此研究多采用立地指数(Site Index, SI)这一指标来评估森林立地生产力<sup>[4-5]</sup>。

立地指数是林分在基准年龄时优势木的平均高, 通常适用于同龄纯林, 且多用于人工林立地质量评价<sup>[6]</sup>, 它能够反映出与森林生产力直接相关的土壤和气候等固有的立地特征差异<sup>[7-8]</sup>, 因此很多研究基于气候、土壤和地形等环境因子来预测立地指数。如Beaulieu等<sup>[9]</sup>基于林分结构指标并结合夏季降水量等气候因子预测了加拿大魁北克地区7种人工林针叶树种SI; Jiang等<sup>[10]</sup>选取春、夏季降水量和土壤pH等因子建立了美国东部树种SI预测模型; Bucis等<sup>[11]</sup>采用土壤氮含量、坡度等土壤和地形因子预测了西班牙地中海松(*Pinus halepensis*)人工林SI。Falkowski等<sup>[11]</sup>和Parresol等<sup>[12]</sup>认为构建空间明晰的中、高分辨率SI图是制定森林规划的有效途径, 且能为适地适树和制定精准提高森林质量的

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2019-05-15

基金项目: 林业公益性行业科研专项(20150430304); 国家自然科学基金项目(31370636)

作者简介: 李文博(1993-), 女, 河南巩义人, 硕士, 研究方向为森林可持续经营。E-mail: liwenbol@163.com

通讯作者: 张志东(1976-), 男, 河北唐山人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为生物多样性保护和生态系统经营。E-mail: zhzhido@163.com

营、造林方案提供基本的保证。目前我国精准提升森林质量需求迫切,然而,传统直接测量生长潜力及与其相关环境因子的调查方法样本获取量少<sup>[13]</sup>,且很难保证样本点大范围分布,致使绘制不同立地条件下的区域森林生长潜力图困难<sup>[14-15]</sup>。近年来,3S技术的发展解决了大尺度地理空间环境因子数据的生成和获取问题,从而使绘制高精度森林生产力图成为可能<sup>[12]</sup>。目前,预测 $SI$ 常用的方法包括逐步回归模型<sup>[1]</sup>、广义线性模型<sup>[16]</sup>、人工神经网络<sup>[17]</sup>,随机森林模型<sup>[10]</sup>以及回归克里格模型(Regression Kriging, RK)<sup>[18]</sup>等。作为地统计学空间分析技术,克里格法能够较好地描述大尺度范围内的森林立地的空间异质性和随机性,已经在预测杉木人工林的立地指数<sup>[19]</sup>和森林蓄积量<sup>[20]</sup>空间分布上表现出了显著优势。RK具有将回归技术扩大到更广范围以及分别解释模型固定和随机效应的优点<sup>[21-22]</sup>,因此能够更加准确分析 $SI$ 的空间变异程度,从而有效评估森林生产力。基于此,本研究采用RK预测研究区域 $SI$ 及其空间分布变异。

作为生态文明建设范例,塞罕坝机械林场拥有全国最大的人工林基地,而华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林是塞罕坝机械林场主要的森林类型<sup>[23]</sup>,占林场有林地总面积的70.6%。在研究区不同的立地条件下,华北落叶松在生长和适应性方面存在着显著差异<sup>[24]</sup>。如何有效提高其林分生产力,有必要构建针对此树种的空间明晰的 $SI$ 图以指导不同立地的华北落叶松营造林活动,但目前尚无构建研究区华北落叶松 $SI$ 图的相关研究。因此,本研究目的是基于气候、土壤和地形因子采用RK模型构建研究区华北落叶松 $SI$ 预测图,并分析主要环境因子对 $SI$ 空间分布格局的影响。通过此研究,拟为研究区及其他地区华北落叶松人工林生产力提高和高效经营提供理论和技术支撑。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

塞罕坝机械林场( $42^{\circ}04'\sim 42^{\circ}36'N$ ,  $116^{\circ}53'\sim 117^{\circ}39'E$ )位于河北省最北部,与内蒙古接壤(图1),主要地貌为内蒙古高原和冀北山地,海拔1010~1939.9 m。属于寒温带半干旱半湿润大陆性气候,年均气温 $-1.3^{\circ}C$ ,降水少,且多集中在6-9月份。受地形与气候影响形成的土壤类型主要有棕壤、灰色森林土、黑土类、风沙土、草甸土和沼泽土。研究区物种主要有华北落叶松、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、云杉(*Picea asperata*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等乔木树种;沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山刺玫(*Rosa davurica*)、稠李(*Prunus padus*)等灌木以及蒲公英(*Herba tarax-*

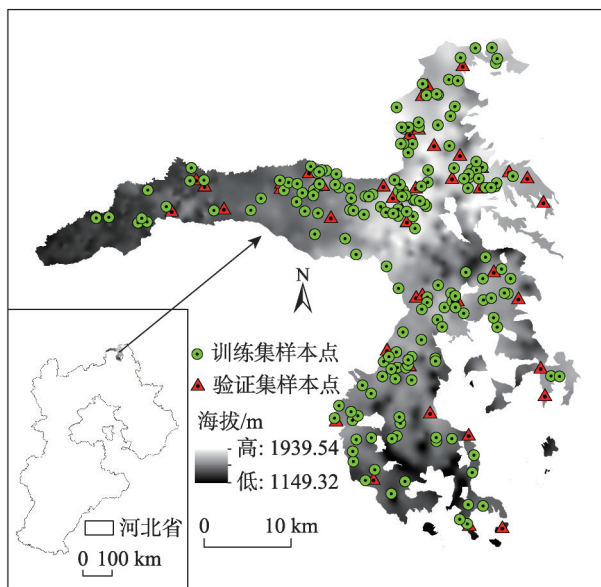


图1 塞罕坝研究区以及调查样地

Fig. 1 Location of Saihanba and plots surveyed

aci)、苔草 (*Carex tristachya*)、老鹳草 (*Geanium daharicum* var. *alpinum*) 等草本植物。

1.2 数据来源

1.2.1 立地指数数据

主要来源于河北省林业调查规划设计院在塞罕坝机械林场的第四次森林资源规划调查中所采用的解析木数据，包括北曼甸、大唤起、第三乡、千层板、三道河口和阴河林场的1578块华北落叶松人工林样地解析木资料以及样地优势木检尺数据。华北落叶松人工林立地指数计算采用5株优势木平均高的方法<sup>[24]</sup>，选取1株平均优势木进行树干解析或检尺调查，以准确确定样木年龄和树高。根据SI定义和已有研究<sup>[25]</sup>，本研究以20年作为华北落叶松人工林基准年龄，选取林龄为20年的华北落叶松人工林样地优势木树高作为样地SI。基于空间广布和数据完整性原则，最终共选取随机分布在研究区大部分区域的220块华北落叶松人工林样地（图1），SI通过了K-S正态分布检验（ $P=0.24>0.05$ ）。建立样地SI空间数据集库，其中，随机选取80%（训练集）参与模型构建，余下20%（验证集）进行模型检验。

1.2.2 环境因子数据

采用样地分布点及随机生成点的经纬度和海拔数据，利用高精度ClimateAP气候模型<sup>[26]</sup>生成研究区范围内包括温度和降水等14个气候因子的栅格数据集<sup>[27]</sup>，分辨率为10 m×10 m；基于研究区等高线、河流等矢量数据，通过GIS插值分析生成DEM，并进一步提取出坡度和坡向等地形栅格数据，分辨率为10 m×10 m；土壤数据来源于北京师范大学的中国土壤数据集<sup>[28]</sup>，分辨率为30弧秒，包含常用的土壤理化性质信息，基于此数据插值生成了研究区包含全磷、全氮等7个土壤因子栅格数据集。初步共选取24个环境因子，包括14个气候因子，3个地形因子以及7个土壤因子。

环境因子数据均采用Xian\_1980\_GK\_Zone\_20投影坐标系，插值精度统一为10 m×10 m。为降低环境因子之间的冗余信息并筛选出对SI影响大的环境变量，对24个环境因子和SI进行了Pearson相关分析。最终选取了9个（之间）相关性较低（ $|r|<0.70$ ）且显著影响SI（ $P<0.05$ ）的变量，用于构建逐步回归模型（表1）。

1.3 研究方法

1.3.1 回归克里格模型

RK是回归分析与克里格法相结合的统计模型，通过构建目标变量与辅助变量间的多

表1 构建预测模型的环境因子、立地指数及基于样地的描述性统计

Table 1 Environmental factors and site index acquired in sampling plots for the predictive model and their descriptive statistics

项目	变量	代码	平均值	标准差	极小值	极大值	均值标准误
气候因子	夏季平均降水量/mm	SUP	285.54	10.20	257.38	316.46	0.69
	年平均降水量/mm	MAP	472.41	20.82	420.10	512.85	1.40
	春季平均降水量/mm	SPP	69.45	3.33	62.02	75.56	0.22
土壤因子	速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK	183.49	32.76	101.53	223.45	2.21
	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AN	175.96	49.24	86.39	273.85	3.32
	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AP	11.03	4.26	3.47	16.29	0.29
	酸碱度pH	pH	6.74	0.39	6.34	8.17	0.03
	全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	TK	1.80	0.34	1.41	2.47	0.02
	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	TN	0.29	0.09	0.12	0.50	0.01
	立地指数/m	SI	9.93	1.37	6.50	13.00	0.09

元回归模型和对回归残差进行普通克里格 (Ordinary Kriging, OK) 插值分析来预测目标变量的空间特征<sup>[22]</sup>。设样地为  $S$ ,  $\hat{Z}(S)$  为预测变量, 则可用下式预测:

$$\hat{Z}(S) = m(S) + \varepsilon(S) \quad (1)$$

式中:  $m(S)$  表示模型趋势项;  $\varepsilon(S)$  表示模型残差项。趋势项基于 176 块训练集样地  $SI$  和 9 个环境因子 (表 1) 构建逐步回归模型, 最终筛选出显著影响  $SI$  的环境因子, 回归方程如下:

$$SI = \sum_{i=1}^N b_i \times F_i + I \quad (2)$$

式中:  $SI$  是立地指数;  $N$  为参与建模的环境因子总数;  $F_i$  代表第  $i$  个环境因子;  $b_i$  代表第  $i$  个环境因子  $F_i$  的回归系数;  $I$  为截距。模型残差项基于逐步回归预测值建立半变异函数, 将半变异函数的基台 (sill) 值、变程 (range) 等结果参数带入 ArcGIS 10.2 中通过 OK 插值分析获得。

### 1.3.2 半变异函数

也称半方差函数, 能用来描述变量性质的空间连续变异<sup>[20]</sup>。区域化变量  $Z(S)$  在样地  $S_j$  和  $S_j+h$  处的观测值  $Z(S_j)$  和  $Z(S_j+h)$  差的方差的一半即为  $SI$  的半方差函数, 计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{j=1}^{N(h)} (Z(S_j) - Z(S_j+h))^2 \quad (3)$$

式中:  $\gamma(h)$  代表  $SI$  半变异函数;  $N(h)$  是某一方向上距离等于  $h$  的点对数;  $Z(S_j)$  为第  $j$  块样地  $S_j$  处变量的  $SI$  逐步回归预测值;  $Z(S_j+h)$  指与样地  $S_j$  偏离  $h$  处变量的  $SI$  值。块金值 ( $C_0$ )、基台值和变程是半变异函数的三个重要参数。基台值表示由于调查误差和小于调查取样尺度引起的变异, 为  $C_0$  与偏基台值 ( $C$ ) 之和, 块金值为系统内部总变异, 通常采用块金值与基台值的比值衡量系统变量空间相关程度:  $C_0/(C_0+C) < 25\%$ , 强相关;  $C_0/(C_0+C)$  在  $25\% \sim 75\%$  之间, 中等相关;  $C_0/(C_0+C) > 75\%$ , 弱相关<sup>[19-20]</sup>。

### 1.3.3 环境因子相对重要性

采取相对权重指标 (Relative weight, RW) 评价环境因子的重要性。 $RW$  指每个预测因子对模型  $R^2$  的贡献率, 兼顾每个预测因子及其与其他变量间的联合效应的模型贡献<sup>[29-30]</sup>。因此, 当预测因子有相关关系时, 可很好地解释回归方程中预测因子的相对重要性。首先变换原始预测因子以获得与其高度一一对应的正交变量集, 设  $\beta$  为关联正交变量与目标变量的  $k \times 1$  回归权重向量,  $1$  为关联相关和不相关预测因子的  $n \times k$  回归系数矩阵, 分别求  $\beta$  与  $1$  中元素的平方 (即  $\beta_k^2$  与  $\lambda_{nk}^2$ ), 则第一个变量相对权重  $\phi_1$  计算公式如下:

$$\phi_1 = \lambda_{11}^2 \beta_1^2 + \lambda_{12}^2 \beta_2^2 + \dots + \lambda_{1k}^2 \beta_k^2 \quad (4)$$

### 1.3.4 模型精度评价

基于 20% 的验证集数据 (44 个) 进行预测模型精度评估。主要采用模型决定系数 ( $R^2$ )、均方根误差 ( $RMSE$ ) 和绝对平均误差 ( $MAE$ ) 来评价模型精度,  $RMSE$  和  $MAE$  计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (y_j - \hat{y}_j)^2}{k}} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{\sum_{j=1}^k |y_j - \hat{y}_j|}{k} \quad (6)$$

式中:  $k=44$ ;  $y_j$  为第  $j$  块样地  $SI$  实测值;  $\hat{y}_j$  为第  $j$  块样地  $SI$  预测值。



1.3.5 统计分析

相关分析、逐步回归与变异函数分析以及相对权重计算等均在 R 3.5.0 软件中实现，回归残差分析、*SI* 空间预测及绘图在 ArcGIS 10.2、SigmaPlot 12.5 和 R 3.5.0 软件中完成。

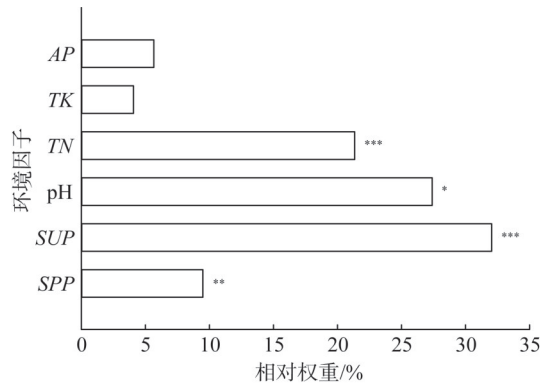
2 结果分析

2.1 环境因子相对重要性

采用逐步回归模型拟合 *SI* 与 9 个预测变量之间的关系，得到的回归方程为： $SI=0.151\times AP+1.846\times TK+6.099\times TN-0.550\times pH+0.062\times SUP-0.166\times SPP+0.670$ 。土壤全氮（*TN*）、土壤 pH、夏季平均降水量（*SUP*）和春季平均降水量（*SPP*）的模型显著性较高（ $P<0.05$ ），*RW* 值分别为 21.35%，27.4%，32.04% 和 9.48%（图 2），由此确定 *TN*、pH、*SUP* 和 *SPP* 是影响塞罕坝华北落叶松人工林 *SI* 的相对重要因子。这与华北落叶松喜湿润气候、中性偏酸性土壤的生长习性紧密相关。

2.2 半变异函数分析与 RK 模型检验

运用三种半变异函数模型进行计算和分析，块基比值均小于 25%，表明 *SI* 具有很强的空间自相关关系，可采用 OK 进行插值，而交叉验证 *RMSE* 值相差很小（表 2），为得到更为精确的预测模型，分别采用三种不同的半变异函数模型进行 OK 插值，在 ArcGIS 中将逐步回归趋势项分别与 OK 插值残差项相加。基于验证集数据（44 个样地 *SI*）RK 模型精度验证结果表明，采用高斯半变异函数模型参数进行插值得到的 *RMSE* 和 *MAE* 分别为 0.816 m 和 0.660 m，模型决定系数（ $R^2=0.425$ ）比球状和指数模型分别提高了 7.1% 和 11.0%（图 3）。因此将基于高斯半变异函数的 RK 模型作为最优预测模型。



注：\*、\*\*、\*\*\*表示在 0.001、0.01、0.05 水平上显著。

图2 环境因子相对权重  
Fig. 2 Relative weights of environmental factors

表2 半变异函数模型参数

Table 2 Parameters of semivariance model

半变异函数模型	基台值 ( $C_0+C$ )	块金值 ( $C_0$ )	块基比 $[C_0/(C_0+C)]/\%$	变程/m	均方根误差 <i>RMSE</i>
球状	1.407	0.014	1.0	1716.726	1.363
指数	1.420	0.020	1.4	634.318	1.247
高斯	1.407	0.014	1.0	724.887	1.290

2.3 立地指数及主要环境因子空间分布

塞罕坝华北落叶松人工林 *SI* 分布在 6.49~12.98 m 之间，不同区域差异明显。进一步将 *SI* 自动划分为 I~V 级别，依次代表低（6.49~8.40 m）、较低（8.40~9.42 m）、中等（9.42~10.33 m）、较高（10.33~11.17 m）和高立地生产力（11.17~12.98 m）（图 4e）。第 I 级分布很少（8.9%），集中分布在北部边缘区域，而 IV~V 级占到总面积的 32.0%，集中

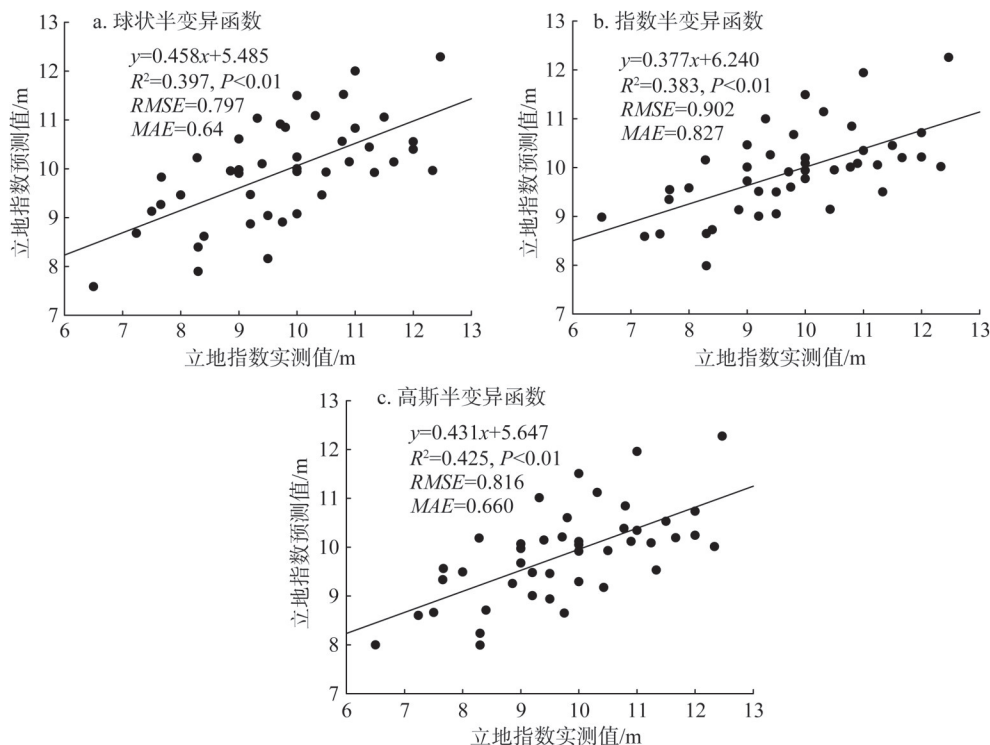


图3 不同半变异函数回归克里格插值精度比较

Fig. 3 Accuracy comparison of RK with semivariogram regression

分布在东南部地区。立地生产力整体呈现出西北向东南逐渐增高的趋势, 由图4可知, 研究区 *SUP* 与 *SPP* 由西向东逐渐增加 (图4a、图4b), 土壤 pH 和 TN 南北差异较为明显 (图4c、图4d), 分别主导了研究区立地生产力的东西和南北差异。

## 2.4 主要环境因子对立地生产力空间分布格局的影响

森林生产力与环境因子间的相关分析表明, 整体上立地生产力等级随 *SUP*、*SPP*、*TN* 的增加而提高, 而随土壤 pH 的增加而下降。*SUP* 在 280~300 mm、pH<7.0、*SPP* 在 68 mm 左右、*TN* 在  $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  左右时立地生产力等级较高 (图5)。以上结果表明, 在春季降水适中, 夏季降水较多, 中性及偏酸性土壤且土壤全氮含量较高的立地条件下, 华北落叶松生产力较高, 而在春季、夏季降水量少、全氮含量过低且偏碱性的土壤条件下, 立地生产力较低。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本研究采用回归克里格空间预测模型精准预测研究区立地指数, 预测结果不仅反映了研究区立地生产力的空间变异性, 更体现出区域内环境因子对立地指数分布格局的影响。基于此模型绘制了塞罕坝区域立地指数分级图, 为可视化评估塞罕坝华北落叶松立地生产力提供了可行的方法。研究结果表明: 塞罕坝华北落叶松人工林立地指数存在较强的空间自相关性; 区域环境因子与华北落叶松人工林生长习性主导其生产力分布格局

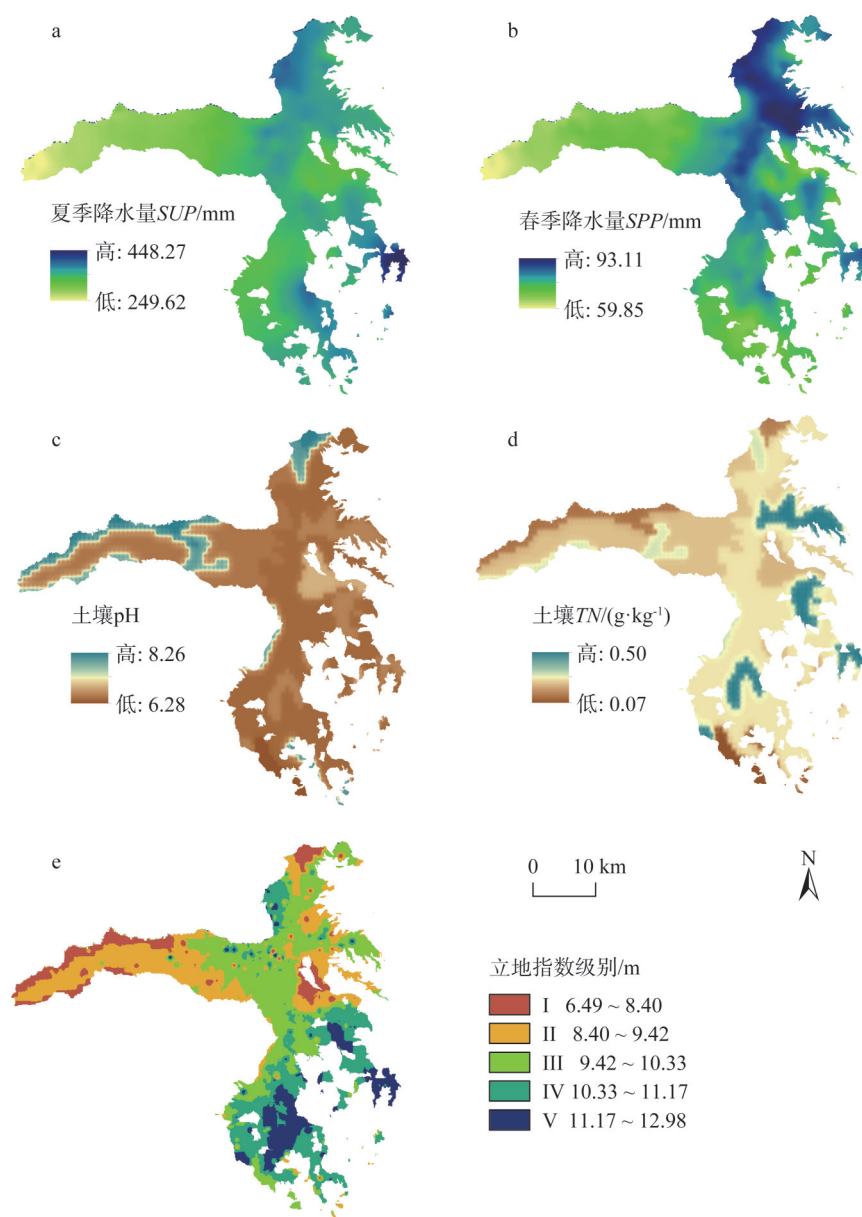


图4 塞罕坝地区环境因子与立地指数级别分布

Fig. 4 Distribution of environmental factors and *SI* grades in Saihanba

为：立地生产力高的一般分布在春季降水适中、夏季降水较多、中性及偏酸性土壤且土壤全氮含量较高的中部和南部区域。华北地区未来气候变化幅度小<sup>[31]</sup>，因此在华北落叶松人工林的经营实践中，西北和东北部立地较差地区可通过降低土壤pH值、适当施加氮肥等措施来改善立地质量，提高森林生产力。

### 3.2 讨论

塞罕坝地区华北落叶松立地指数的空间分布是不同环境因子综合作用的结果。气候和土壤相关因子对其影响显著（图2），这与以往研究结果略有不同<sup>[25]</sup>。在景观尺度上，

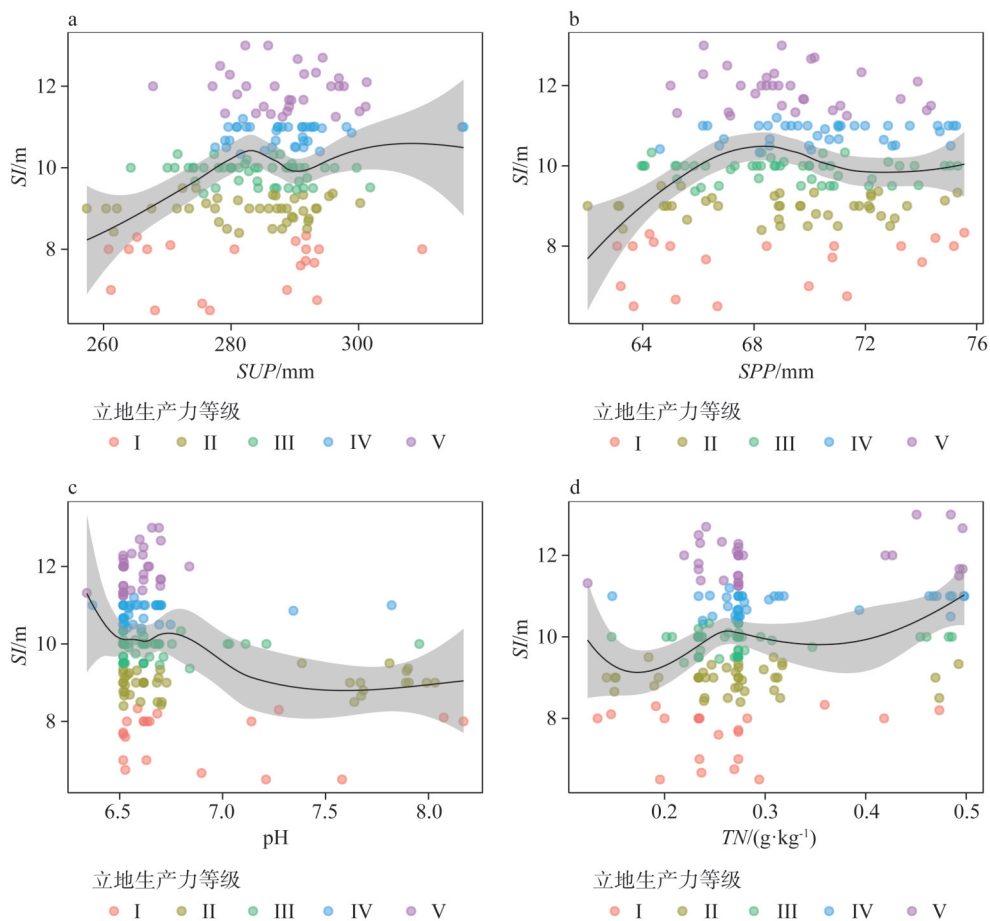


图5 立地生产力等级与主要环境因子的关系

Fig. 5 Relationships between environmental factors and site productivity grades

气候、土壤都具有明显的空间地域特征<sup>[19]</sup>，地形因子可以调节区域水热以及土壤养分的空间分布<sup>[32-34]</sup>，且与气候和土壤因子存在显著的相关关系 ( $P<0.01$ )；本研究立地指数与林木生长直接相关的气候与土壤因子显著相关，地形因子作用弱化，相关性不显著。

立地指数预测模型是评估立地生产力的有效方法之一<sup>[4]</sup>。回归克里格基于回归残差保留目标变量固有的空间结构这一假设<sup>[35]</sup>，可量化立地指数的空间变异程度，适合预测立地指数的分布格局。以往研究一般根据交叉验证结果选取半变异函数进行插值分析<sup>[20]</sup>，但本研究中三种半变异函数块基比均远小于25%，且交叉验证RMSE值差异很小，因此分别进行了插值分析。根据回归克里格模型精度验证结果（表3），选取 $R^2$ 值最高的高斯模型作为最优半变异函数。研究表明：立地指数的空间相关性强，区域分布差异明显（图3），随机误差引起的空间异质性仅占总变异的1.0%，较好地反映了环境因子对立地指数的作用<sup>[20]</sup>；另一方面，在研究区华北落叶松人工林分布面积较大，本研究调查样地分布广泛而均匀（图1），能较好地反映华北落叶松立地指数的空间变异（图3）。因此，在获取较大尺度上具有代表性的样地并且样本量足够大的前提下，通过回归克里格模型构建景观尺度下的立地指数分布图，能为研究区及其他地区森林高效经营提供科学指导。



从影响立地生产力的主要环境因子来看,研究区夏、春季降水量和土壤pH值、全氮含量显著影响塞罕坝华北落叶松人工林生产力的分布格局,分别主导了研究区的东西和南北差异,这与华北落叶松人工林的生长习性紧密相关。立地生产力随夏季降水的增加而提高(图5a),这是因为研究区夏季水热组合不仅可以增强植物根系呼吸,更能够激活土壤微生物的活性,增加微生物的种群数量,进而增强分解活动<sup>[36]</sup>,促进落叶松人工林的生长活动。对于春季降水来讲,立地生产力先随降水量的增加而增加,当降水量达到70 mm左右时,又随降水量的增加而逐渐减少(图5b),这可能受春季气温限制(平均2.55 °C),水分蒸发减弱,降水量多,导致土壤温度低且水分含量高,土壤空隙减小,土壤呼吸所需氧气的进入以及呼吸产物CO<sub>2</sub>的排放受到限制<sup>[36]</sup>,不利于华北落叶松吸收生长所需营养物质。土壤pH值越低,立地生产力越高(图5c),这恰好印证了华北落叶松更喜弱酸性或中性土壤环境的生长习性<sup>[23]</sup>。研究区内土壤全氮含量与立地生产力整体上呈正相关关系(图5d),可能是因为土壤中全氮含量的增加能够促进植物吸收氮这一必需的营养元素<sup>[37]</sup>,从而提高光合效率,加速生长。因此在林业生产实践中,需充分考虑环境因子与林木生长的交互作用,提高立地质量的同时促进森林立地生产力的提高。

### 参考文献(References):

- [1] HUANG S L, RAMIREZ C, CONWAY S, et al. Mapping site index and volume increment from forest inventory, Landsat, and ecological variables in Tahoe National Forest, California, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 2017, 47(1): 113-124.
- [2] BUEIS T, BRAVO F, PANDO V, et al. Site factors as predictors for *Pinus halepensis* Mill. productivity in *Spanish* plantations. *Annals of Forest Science*, 2017, 74(1): 6.
- [3] LATTI G, TEMESGEN H, BARRETT T M. Mapping and imputing potential productivity of pacific northwest forests using climate variables. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39(6): 1197-1207.
- [4] MCKENNEY D W, PEDLAR J H. Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2003, 175(1-3): 497-507.
- [5] NIGH G D, YING C C, QIAN H. Climate and productivity of major conifer species in the interior of British Columbia, Canada. *Forest Science*, 2004, 50(5): 659-671.
- [6] 吴恒, 党坤良, 田相林, 等. 秦岭林区天然次生林与人工林立地质量评价. *林业科学*, 2015, 51(4): 78-88. [WU H, DANG K L, TIAN X L, et al. Evaluating site quality for secondary forests and plantation in Qinling mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(4): 78-88.]
- [7] LITTKKE K M, HARRISON R B, ZABOWSKI D. Determining the effects of biogeoclimatic properties on different site index systems of Douglas-fir in the Coastal Pacific northwest. *Forest Science*, 2016, 62(5): 503-512.
- [8] ANTÓN- FERNÁNDEZ C, MOLA-YUDEGO B, DALSGAARD L, et al. Climate- sensitive site index models for Norway. *Canadian Journal of Forest Research*, 2016, 46(6): 794-803.
- [9] BEAULIEU J, RAULIER F, PRÉGENT G, et al. Predicting site index from climatic, edaphic, and stand structural properties for seven plantation- grown conifer species in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(4): 682-693.
- [10] JIANG H Q, RADTKE P J, WEISKITTEL A R, et al. Climate- and soil-based models of site productivity in Eastern US tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(3): 325-342.
- [11] FALKOWSKI M J, WULDER M A, WHITE J C, et al. Supporting large-area, sample-based forest inventories with very high spatial resolution satellite imagery. *Progress in Physical Geography*, 2009, 33(3): 403-423.
- [12] PARRESOL B R, SCOTT D A, ZARNOCH S J, et al. Modeling forest site productivity using mapped geospatial attributes within a South Carolina landscape, USA. *Forest Ecology and Management*, 2017, 406: 196-207.
- [13] BRAVO-OVIEDO A, ROIG S, BRAVO F, et al. Environmental variability and its relationship to site index in Mediterranean maritime pine. *Forest Systems*, 2011, 20(1): 50-64.
- [14] WARING R H, MILNER K S, JOLLY W M, et al. Assessment of site index and forest growth capacity across the Pacific and Inland Northwest U.S.A. with a MODIS satellite-derived vegetation index. *Forest Ecology and Management*,

- 2006, 228(1-3): 285-291.
- [15] WEISKITTEL A R, CROOKSTON N L, RADTKE P J. Linking climate, gross primary productivity, and site index across forests of the Western United States. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(8): 1710-1721.
- [16] FARRELLY N, NÍ-DHUBHÁIN Á, NIEUWENHUIS M. Site index of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) in relation to different measures of site quality in Ireland. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(2): 265-278.
- [17] HLÁSNY T, TROMBIK J, BOŠEĽA M, et al. Climatic drivers of forest productivity in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 234-235: 258-273.
- [18] SHARMA R P. Modelling height, height growth and site index from National Forest Inventory Data in Norway. Oslo, Norway: Norwegian University of Life Sciences, 2013.
- [19] 曾春阳, 唐代生, 唐嘉锴. 森林立地指数的地统计学空间分析. *生态学报*, 2010, 30(13): 3465-3471. [ZENG C Y, TANG D S, TANG J K. Spatial pattern of forest ecosystem site index using geostatistical technology. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3465-3471.]
- [20] 王海宾, 彭道黎, 范应龙, 等. 基于辅助信息的森林蓄积量空间模拟. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 283-289. [WANG H B, PENG D L, FAN Y L, et al. Spatial modeling of forest stock volume based on auxiliary information. *Transactions of the CSAM*, 2016, 47(6): 283-289.]
- [21] 赵安玖, 陈昆, 郭世刚. 基于不同空间插值模型的川西南山地常绿阔叶林叶面积指数估测. *自然资源学报*, 2014, 29(4): 598-609. [ZHAO A J, CHEN K, GUO S G. Estimation LAI of montane evergreen broad-leaved forest in Southwest Sichuan using different spatial prediction models. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(4): 598-609.]
- [22] HENGL T, HEUVELINK G B M, ROSSITER D G. About regression-kriging: From equations to case studies. *Computers & Geosciences*, 2007, 33(10): 1301-1315.
- [23] 张树梓, 李梅, 张树彬, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子. *生态学报*, 2015, 35(16): 5403-5411. [ZHANG S Z, LI M, ZHANG S B, et al. Factors affecting natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(16): 5403-5411.]
- [24] 段劫, 马履一, 贾黎明, 等. 北京低山地区油松人工林立地指数表的编制及应用. *林业科学*, 2009, 45(3): 7-12. [DUAN J, MA L Y, JIA L M, et al. Establishment and application of site index table for *Pinus tabulaeformis* plantation in the low elevation area of Beijing. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(3): 7-12.]
- [25] 王冬至, 张冬燕, 蒋凤玲, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林立地指数模型. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3413-3420. [WANG D Z, ZHANG D Y, JANG F L, et al. A site index model for *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba, North China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3413-3420.]
- [26] WANG T L, WANG G Y, INNES J, et al. Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region. *Forest Ecology and Management*, 2016, 360: 357-366.
- [27] 范顺祥, 郑建伟, 魏士凯, 等. 河北省森林草原区主要草本植物功能群适宜分布预测. *草业学报*, 2018, 27(3): 24-32. [FAN S X, ZHENG J W, WEI S K, et al. Predicting suitable distribution of dominant herbaceous plant functional groups in a forest-steppe zone of Hebei, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 24-32.]
- [28] WEI S G, DAI Y J, LIU B Y, et al. A China data set of soil properties for land surface modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(2): 212-224.
- [29] JOHNSON J W. Factors affecting relative weights: The influence of sampling and measurement error. *Organizational Research Methods*, 2004, 7(3): 283-299.
- [30] JAMES M L, SCOTT T. Multivariate relative importance: Extending relative weight analysis to multivariate criterion spaces. *Journal of Applied Psychology*, 2008, 93(2): 329-345.
- [31] 张冬峰, 石英. 区域气候模式 RegCM3 对华北地区未来气候变化的数值模拟. *地球物理学报*, 2012, 55(9): 2854-2866. [ZHANG D F, SHI Y. Numerical simulation of climate changes over North China by the RegCM3 model. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(9): 2854-2866.]
- [32] 汝海丽, 张海东, 焦峰, 等. 黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1752-1763. [RU H L, ZHANG H D, JIAO F, et al. Plant and soil C, N, P stoichiometric characteristics in relation to micro-topography in the hilly Loess Plateau region, China. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1752-1763.]
- [33] 张杰, 李栋梁, 王文. 夏季风期间青藏高原地形对降水的影响. *地理科学*, 2008, 28(2): 235-240. [ZHANG J, LI D L, WANG W. Influence of terrain on precipitation in Qinghai-Tibet Plateau during summer monsoon. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(2): 235-240.]
- [34] 杨昕, 汤国安, 王春, et al. 基于DEM的山区气温地形修正模型: 以陕西省耀县为例. *地理科学*, 2007, 27(4): 525-

530. [YANG X, TANG G A, WANG C, et al. Terrain-revised ground surface temperature model of mountain area based on DEM: A case study in Yaodian county of Shanxi province. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(4): 525-530.]
- [35] 邱乐丰, 杨超, 林芬芳, 等. 基于环境辅助变量的拔山茶园土壤肥力空间预测. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3099-3104. [QIU L F, YANG C, LIN F F, et al. Spatial pattern of soil fertility in Bashan tea garden: A prediction based on environmental auxiliary variables. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3099-3104.]
- [36] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(7): 778-785. [ZHANG D Q, SHI P L, ZHANG X Z. Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7): 778-785.]
- [37] 王丹丹, 岳书礼, 林芬芳, 等. 东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应. *土壤学报*, 2012, 49(4): 625-635. [WANG D D, YUE S P, LIN F F, et al. Response of spatial variability of soil total nitrogen to expansion of uplands in scale in Northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 625-635.]

## Predicting productivity and spatial distribution of *Larix principis-rupprechtii* plantation

LI Wen-bo, LYU Zhen-gang, HUANG Xuan-rui, ZHANG Zhi-dong

(College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Hebei Province Key Laboratory of Forest Trees Germplasm Resources and Forest Protection, Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:** The accurate prediction of forest site productivity is crucial for the effective forest management. Site index (*SI*) is one of the main measures of forest productivity. In this study, we integrated 220 field inventory, topography, climate and soil factors to predict *SI* of *Larix principis-rupprechtii* using regression Kriging (RK) model in Saihanba Mechanized Forest Farm, Hebei province. The influence of different semivariograms on the accuracy of RK model was also analyzed. Fitting results showed that the accuracy of RK model based on Gaussian semivariogram was higher than that based on spherical and exponential semivariogram, and had little residual variation ( $RMSE=0.82$  m and  $MAE=0.66$  m), indicating RK model based on Gaussian semivariogram had a highly predictive power to predict *SI* in the study area. Gaussian semivariogram analysis showed that there was a strong spatial autocorrelation in *SI* in the study area, and the spatial variation was significant in the range of 724.89 m; The major environmental factors affecting spatial variation in *SI* of *L. principis-rupprechtii* plantations included: soil total nitrogen (*TN*), soil pH, mean summer precipitation (*SUP*) and mean spring precipitation (*SPP*). The sites with high productivity of *L. principis-rupprechtii* might tend to potentially occur in the southeast part with suitable *SPP*, relatively high *SUP*, neutral or acidic soil and relatively high *TN*, accounting for 32.00% of the total area of the study region. However, sites with low productivity of *L. principis-rupprechtii* were typically found at the northern edge with excessive *SPP* or lower *SUP*, high soil pH and extremely low *TN*, only accounting for 8.90% of the whole region. Accordingly, the distribution patterns of productivity for *L. principis-rupprechtii* plantation were jointly determined by climatic and soil factors as well as tree growth characteristics in the study area. Improving productivity of *L. principis-rupprechtii* plantation can be realized by soil pH reduction and appropriate nitrogen increase in the study area.

**Keywords:** site index; environmental factors; geostatistics; *Larix principis-rupprechtii*