

白洋淀大清河流域油松精准适宜性空间分布

郭虹扬^{1,2}, 史明昌^{1,2}, 杨建英^{1,2}, 陈春阳^{1,2}

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 【目的】油松 *Pinus tabulaeformis* 作为白洋淀大清河流域上游山区主要造林树种, 研究其精准适宜性空间分布对流域内水源涵养林的建设与提升具有生产指导作用。【方法】依据植物生态学、植物地理学原理, 采用空间限制性因子叠加及最大熵模型(MaxEnt), 以白洋淀大清河流域油松为研究对象, 基于野外 190 个样方数据, 结合 24 个地理环境变量(高程、坡度、坡向、气象、岩石类型、土壤类型等), 其中气象因子通过多元线性回归克里金插值方法(multiple linear regression Kriging, MLRK)得到, 对白洋淀大清河流域油松的适宜性空间分布进行了研究。【结果】油松适宜性预测模型效果达到准确水平(受试者工作曲线 ROC 值为 0.869), 积温、年均最大日降水量、高程、年均气温标准差为流域油松适宜性主导地理环境变量, 油松高适宜区主要分布在灵丘县、涞源县、涞水县、易县、房山区等。【结论】白洋淀大清河流域油松的适宜性条件为: 积温 2 800~3 800 °C、海拔 500~1 200 m、年均日最大降水量 70~110 mm、年均气温标准差 0.31~0.42 °C, 按照该适宜性条件进行油松林营造, 可充分发挥其有益机能。图 8 表 2 参 30

关键词: 适宜性; 多元线性回归克里金(MLRK); 空间叠加; 最大熵模型; 油松

中图分类号: S791.254; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)06-1100-09

Precise spatial distribution of suitability of *Pinus tabulaeformis* in Daqing River Basin, Baiyangdian

GUO Hongyang^{1,2}, SHI Mingchang^{1,2}, YANG Jianying^{1,2}, CHEN Chunyang^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] This study, with an investigation of the precise spatial distribution of suitability of *Pinus tabulaeformis*, a main afforestation tree species in the upper reaches of Baiyangdian Daqing River Basin, is aimed to enhance its guiding role in the construction of water conservation forest and improve the forest water conservation capacity in the basin. [Method] Based on the principles of plant ecology and plant geography, with 190 sample siets data obtained from field survey, and the 24 geographical environment variables (elevation, slope, slope, meteorology, rock type, soil type, etc.) examined, an analysis was conducted of the meteorological factors using multiple linear regression Kriging interpolation (MLRK). [Result] The model of the suitability prediction of *P. tabulaeformis* reached a very accurate level (ROC=0.869). The accumulated temperature, the annual maximum daily precipitation, elevation and the standard deviation of annual temperature were the main geographical environment variables of the suitability of the *P. tabulaeformis*. The

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2021-05-07

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07110001)

作者简介: 郭虹扬 (ORCID: 0000-0002-8938-4789), 从事“3S”技术集成开发与应用研究。E-mail: hongyangguo@yeah.net。通信作者: 史明昌 (ORCID: 0000-0001-8289-552X), 教授, 从事“3S”技术集成开发与应用研究。E-mail: shimc@bjfu.edu.cn

high suitable area of *P. tabulaeformis* enjoyed better spatial distribution of suitability in areas like Lingqiu County, Laiyuan County, Laishui County, Yi County, Fangshan District among other counties and districts.

[**Conclusion**] The suitable conditions of *P. tabulaeformis* in Baiyangdian Daqing River Basin are as follows: the accumulated temperature staying at 2 800–3 800 °C, the altitude remaining 500–1 200 m, the average annual maximum daily precipitation being 70–110 mm whereas the average annual standard deviation of temperature kept at 0.31–0.42 °C. And it can be seen that with such conditions *P. tabulaeformis* forest can grow well and develop better. [Ch, 8 fig. 2 tab. 30 ref.]

Key words: suitability; multiple linear regression Kriging(MLRK); spatial superposition; maximum entropy model; *Pinus tabulaeformis*

白洋淀及大清河水系是雄安新区水资源安全保障体系的重要部分, 但气候干旱、上游土壤流失严重、森林水源涵养功能低下, 导致白洋淀干涸、上游断流, 难以为新区发展提供保障^[1]。土地或岩石的裸露、造林树种的不适宜以及森林空间结构不良等是森林水源涵养功能低下的主要原因^[2-3]。早期植树造林时, 主要根据区划及经验进行判断, 导致油松 *Pinus tabulaeformis* 等部分防护林违背适宜性原则, 致使其逐渐衰退为低效林, 未达预期效果^[4-5]。张春霞等^[6]以海拔、坡度、坡向为主要立地因子对陕西黄陵油松进行立地质量评价, 赖文豪等^[7]通过地形、土壤、气象等立地因子分析了油松的适宜性情况。可见, 已有研究主要集中在小流域等小尺度范围内, 难以为当地区域防护林的营造提供支撑, 且各立地因子精度较低, 如仅用个别站点数据直接代表整个区域, 或克里金插值(Kriging)的气象因子站点数据较少, 不够精准化, 进而导致适宜性分析结果无法贴合生产实际。本研究基于植物生态学特性, 考虑了地形、土壤地质、气象等因子, 且将各因子落实到 30 m 分辨率, 采用了空间限制性因子叠加和最大熵模型(MaxEnt), 对较大尺度下油松的精准适宜性空间分布进行了研究, 以期为白洋淀大清河流域造林规划提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

大清河地处海河流域中部(38°10′~40°10′N, 113°39′~117°34′E), 西起太行山, 东临渤海湾, 北临永定河, 南至子牙河。河系跨山西、河北、北京、天津 4 省市, 总面积 43 060 km², 其中山区 18 659 km², 丘陵平原 24 401 km², 分别占河系总面积的 43.33% 和 56.67%。大河流域地处温带半干旱大陆性季风气候区, 多年平均气温为 6.58~13.26 °C, 多年平均降水量为 365~626 mm, 年内降水量极为不均, 多年平均积温为 858~4 664 °C, 多年平均无霜期为 73~217 d。研究区内优势植物有华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii*、油松、侧柏 *Platycladus orientalis*、杨树 *Populus* spp.、刺槐 *Robinia pseudoacacia*、臭椿 *Ailanthus altissima*、绣线菊 *Spiraea salicifolia*、荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*、胡枝子 *Lespedeza bicolor* 等。

1.2 数据来源

本研究数据分为地形、土壤地质、气象等 3 类, 其中: 地形数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>); 土壤地质数据来源于中国寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)和全国地质资料馆(<http://ngac.org.cn/Map/List>); 气象数据为站点数据, 来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)各数据集。站点数量为 79 个, 其中流域内 36 个, 流域外 43 个, 各地理环境变量如表 1。

在白洋淀大清河流域上游山区, 以油松为优势种, 随机选取不同高程、坡度、坡向、坡位、土壤类型、龄组的样方进行调查, 高程按照中山、低山区间结合太行山植物垂直地带性进行考虑^[8], 记录树高、胸径、郁闭度、植被覆盖度、林下灌草种类及盖度和地理位置等信息。在样方调查时, 山脉、高大植物会遮挡全球定位系统(GPS)卫星信息接收^[9], 故地理位置信息通过手持 GPS 仪结合卫星地图比对位置并标注后自动获取, 其精确度要高于手持 GPS 仪直接获取的位置数据, 样方分布如图 1 所示。根据植物学和植物地理学等原理, 在筛选油松可能适宜性空间单元时, 考虑人为干预较少的样方和海拔 100 m

表 1 地理环境变量数据

Table 1 Geographical environment data

变量类型	变量名称	变量代码	单位	变量类型	变量名称	变量代码	单位
地形	高程	1	m	气象	多年平均气温	13	℃
	坡度	2	(°)		多年年极端最高气温	14	℃
	坡向	3			多年年极端最低气温	15	℃
土壤地质	土壤类型	4			多年年平均气温标准差	16	℃
	岩石类型	5			多年年平均气温年较差	17	℃
气象	多年日平均降水量	6	mm		多年年平均气温日较差	18	℃
	多年年平均最大日降水量	7	mm		多年最冷月平均气温	19	℃
	多年年平均降水量标准差	8	mm		多年最热月平均气温	20	℃
	多年平均最湿季降水量	9	mm		多年平均地面温度	21	℃
	多年平均最干季降水量	10	mm		多年年平均积温	22	℃
	多年平均相对湿度	11	%		多年平均日照时数	23	h
	多年年平均无霜期日数	12	d		多年年平均年蒸发量	24	mm

说明：多年平均数据均为1981–2019年的数据(共39 a)

以上地区，因此，本研究调查样方主要分布于流域西部山区，共计 190 个 30 m×30 m 油松样方数据(图 1)。

1.3 地理环境数据处理方法

采用多元线性回归克里金法 (multiple linear regression Kriging, MLRK) 对气象站点数据进行插值，得到连续气象空间分布数据，其主要公式如下^[10–11]：

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{k=0}^{\rho} \hat{\beta}_k q_k(s_0) + \sum_{i=1}^n \lambda_i e(s_i) \quad (1)$$

式 (1) 中： $\hat{z}(s_0)$ 表示预测位置 s_0 点的插值结果，

$\sum_{k=0}^{\rho} \hat{\beta}_k q_k(s_0)$ 是通过回归拟合的确定性部分； $\sum_{i=1}^n \lambda_i e(s_i)$

是普通克里金 (OK) 对回归残差的插值结果部分；

k 表示回归拟合时的位置序号， ρ 表示空间位置总数， $\hat{\beta}_k$ 是回归模型的系数，当 $k=0$ 时， $\hat{\beta}_0$ 是截距； i 表示回归残差插值时的位置序号， n 表示空间位置总数， $q_k(s_0)$ 是预测位置 s_0 点辅助变量的值， λ_i 是由回归残差的空间相关性结构确定的普通克里金插值的权重； $e(s_i)$ 是位置 s_i 处的残差。

在进行气象数据插值时，将高程、坡度、坡向数据标准化后作为辅助变量，利用逐步回归法筛选后进行回归拟合，计算多元线性回归在气象站点位置的残差，再利用普通克里金法对回归残差进行插值，将每个预测点的确定部分和残差插值结果部分相加得到各点的预测值^[12]。本研究在插值时考虑到研究区面积较大且跨越不同气候区，故将研究区按照气候区划分为 2 个区，即半湿润大区与半干旱大区，分别扩宽 30 km 进行插值。为提升流域边缘结果的准确性，站点除选取流域内的 36 个站点外，另选取流域周围 43 个站点纳入插值过程，插值完成后再进行拼接得到连续的气象要素空间分布数据，分辨率为 30 m，根据精度检验，各气象数据 MLRK 插值结果交叉验证值 R^2 均大于 0.9，插值结果达到准确水平。

1.4 精准适宜性研究方法

1.4.1 油松可能适宜空间单元筛选 根据油松的生态习性，利用限制性因子叠加^[13]，得到油松生长的可能适宜单元。油松是中国特有树种，主产华北、西北；生于海拔 100~2 600 m，为研究区中、低山区重要的造林树种。喜光，适干冷气候，产区极端低温 -25 ℃，年降水量 400~750 mm，耐干旱，也能生长在年降水量 250 mm 的部分山区；在酸性、中性、钙质土壤中均能生长，极耐干瘠，石质荒山亦能生

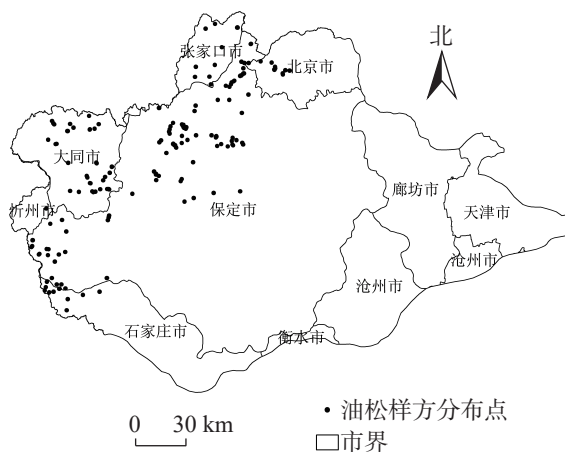


图 1 白洋淀大清河流域油松样方分布示意图

Figure 1 Distribution of *P. tabulaeformis* quadrats in Baiyangdian Daqing River Basin

长, 不耐水涝和盐碱^[14-15]。考虑到以上生态习性, 空间叠加模型为:

$$P_{SG} = D \times T \times S \times R. \quad (2)$$

式 (2) 中: P_{SG} 表示油松可能适宜单元, 当 $P_{SG} = 1$ 时, 为油松可能适宜空间单元, 当 $P_{SG} = 0$, 为不适宜; 当高程 ≥ 100 m 时, D 取值为 1, 反之则取值为 0; 当极端最低气温 ≥ -25 °C 时, T 取值为 1, 反之则取值为 0; S 表示土壤类型, S 为草甸土、沼泽土及城区、岛屿、盐土时, 取值为 0, 其余土壤类型为 1; R 表示岩石类型, R 为水域时, 取值为 0, 其余类型取值为 1。由于大清河流域降水量符合油松降水量限制条件, 故在叠加模型中暂不予考虑。

1.4.2 油松适宜性计算方法 油松适宜性计算主要采用最大熵模型 (MaxEnt)。PHILLIPS 等^[16] 基于最大熵原理编写了 MaxEnt 生态位模型软件, 被广泛用来预测各物种的潜在适宜分布区^[17-19]。本研究使用 MaxEnt 3.4.1, 将分辨率为 30 m 的 24 个地理环境变量作为模型的输入参数, 地形变量如图 2, 土壤地质变量如图 3, 气象变量如图 4。

2 结果与分析

2.1 最大熵模型精度分析

经 MaxEnt 软件计算, 得到受试者工作曲线 (ROC) 图, 该图反映模型灵敏度, 可评价预测模型的准确程度, ROC 曲线下面积 (AUC) 越大, 评价模型越准确^[20]。由图 5 可见: 基于 MaxEnt 模型和地理环境变量构建的油松适宜性预测模型的训练数据集 AUC 为 0.869, 大于 0.8, 达到很准确水平; 检验数据集 AUC 为 0.817, 大于 0.8, 达到很准确水平。综合模型准确性, 说明油松适宜性预测模型有效性较高, 可用于白洋淀大清河流域油松精准适宜性空间分布研究。

刀切法 (Jackknife)^[21-22] 可预测各地理环境变量对油松适宜性空间分布影响的得分情况, 可确定各个环境变量的重要程度。从图 6 可见: 多年年平均积温、多年年平均最大日降水量、高程、多年年平均气

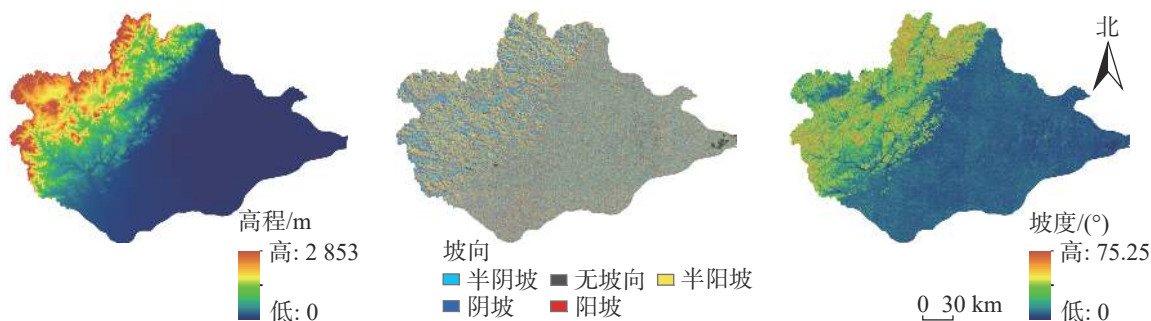


图 2 地形变量示意图

Figure 2 Terrain variables

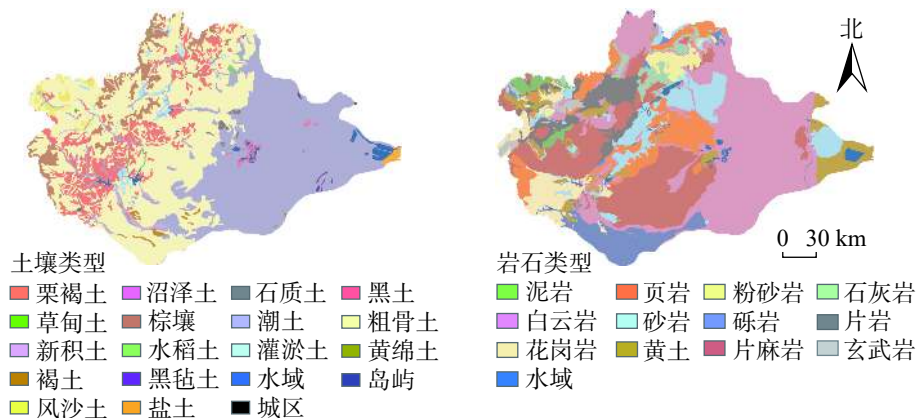


图 3 土壤地质变量示意图

Figure 3 Soil geological variables

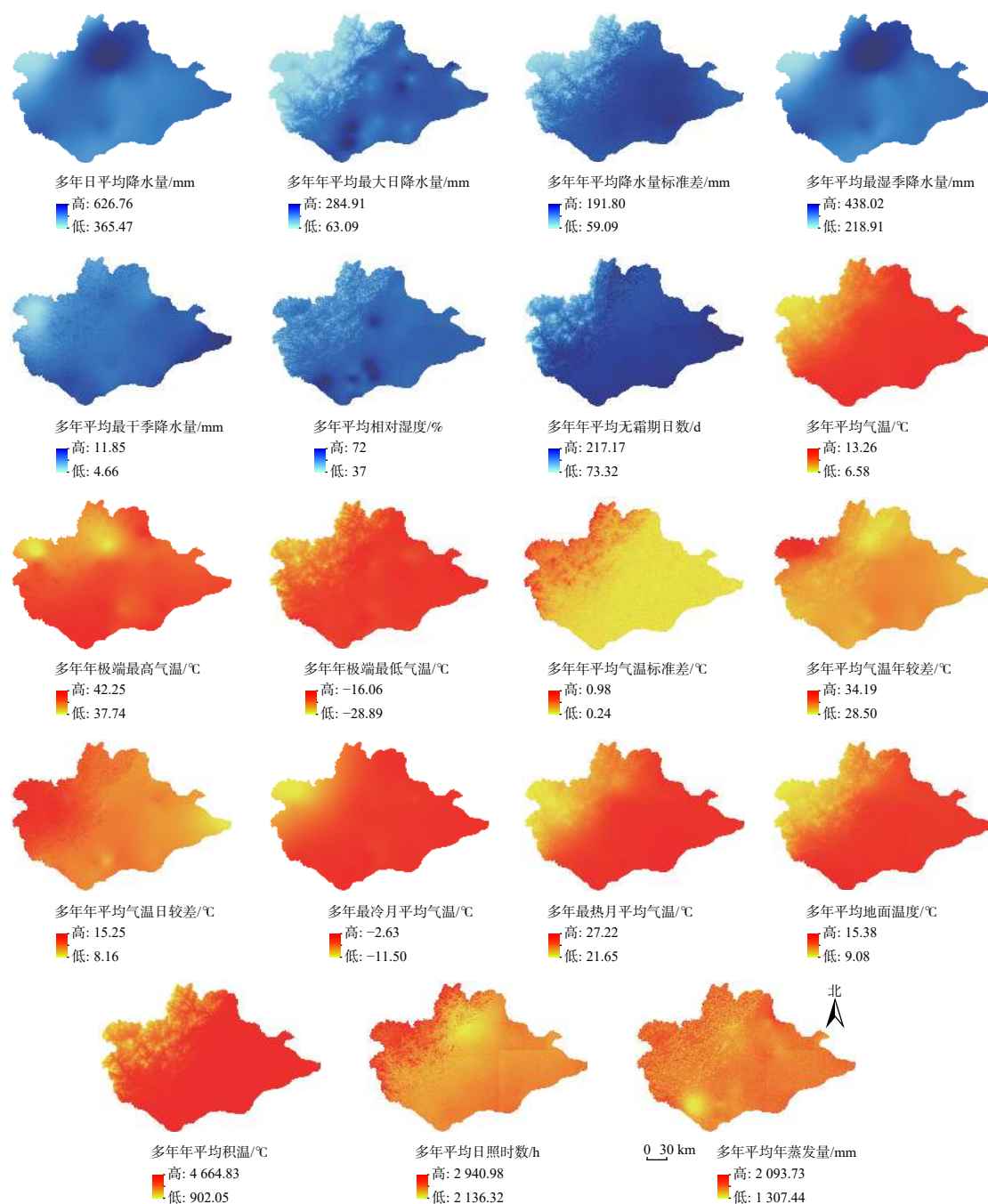


图4 气象变量示意图

Figure 4 Meteorological variables

温标准差依次是对油松预测贡献率最高的地理环境变量，为流域内油松精准适宜性预测提供了丰富信息。此外，当忽略岩石类型变量时，会最大程度上降低地理环境变量总得分，因此，它具有最多其他变量中没有的信息，也需要综合考虑。

通过 MaxEnt 模型得到各地理环境变量与发生概率之间的反馈曲线，该曲线可反映单个地理环境变量值与发生概率之间的响应关系。从图 7A 可以看出：随着多年年平均积温的升高，分布概率呈先增大后减小的趋势，以分布概率 0.5 为界，积温适宜区间为 2 800~3 800 ℃。由图 7B 看出：随着高程升高，分布概率先增大后减小，以分布概率 0.5 为界，高程适宜区间为 500~1 200 m。由图 7C 看出：随着多年年平均最大日降水量升高，分布概率先增大后减小，以分布概率 0.5 为界，年平均最大日降水量适宜区间为 70~110 mm。由图 7D 看出：随着多年年平均气温标准差升高，分布概率先增大后减小，以分布概率 0.5 为界，年平均气温标准差适宜区间为 0.31~0.42 ℃。

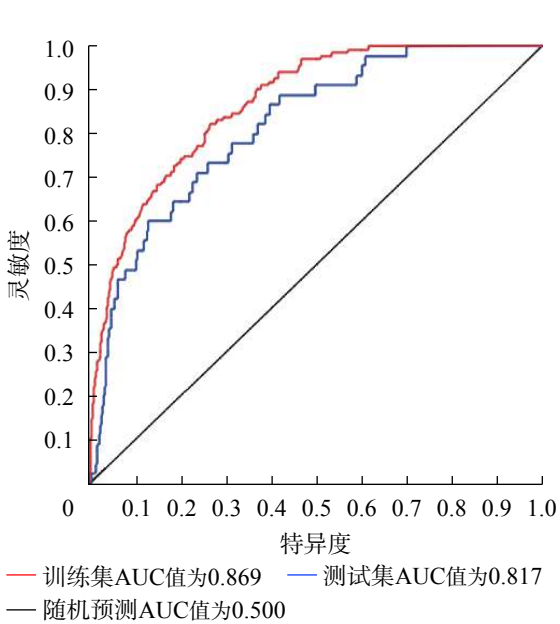
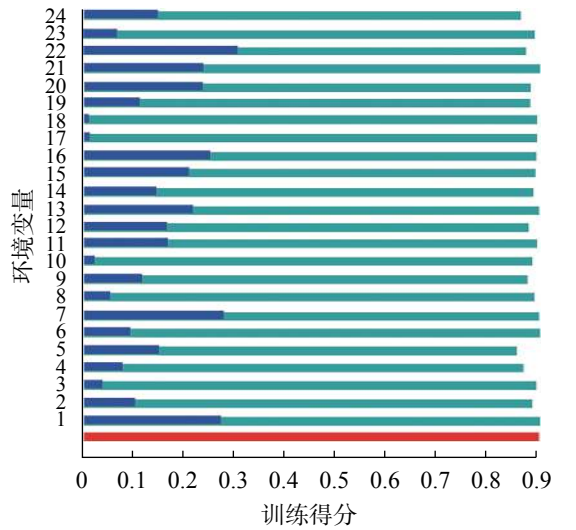


图 5 ROC 曲线图
Figure 5 ROC curve



深蓝色表示仅有该变量时的得分，浅蓝色表示除去该地理环境变量外其他环境变量的得分和，红色表示所有环境变量的得分和，数值所代表的环境变量见表 1

图 6 刀切法地理环境变量贡献图
Figure 6 Jackknife environmental variable contribution graph

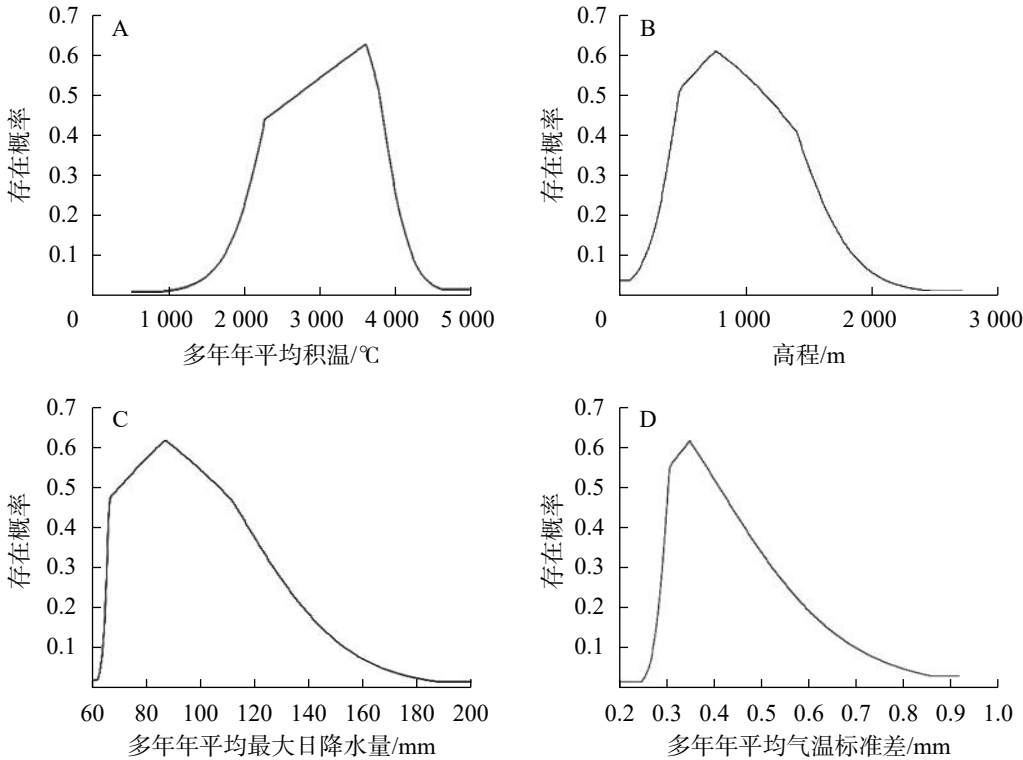


图 7 主导地理环境变量反馈曲线
Figure 7 Leading environmental variable feedback curve

2.2 适宜性结果分析

参考李培琳^[23]、麻亚鸿^[24]的适宜性分级标准，确定概率在 0~0.05 为不适宜区，0.05~0.30 为低适宜区，0.30~0.50 为中适宜区，0.50~1.00 为高适宜区。白洋淀大清河流域油松高适宜区面积为 1 924 km²，中适宜区为 3 477 km²，低适宜区为 7 621 km²，不适宜区为 30 038 km²，中、高适宜区面积达到流域总面积的 12.54%，中、高适宜区主要分布在大清河流域上游山区的西北部，在灵丘县、涞源县、涞水县、易县、房山区、阜平县等区县。油松精准适宜性空间分布及其细节放大图如图 8，分辨率为 30 m。表 2 为油松高适宜区面积大于 20 km² 的县，可见，高适宜区主要集中在涞源县、灵丘县、易县、涞水

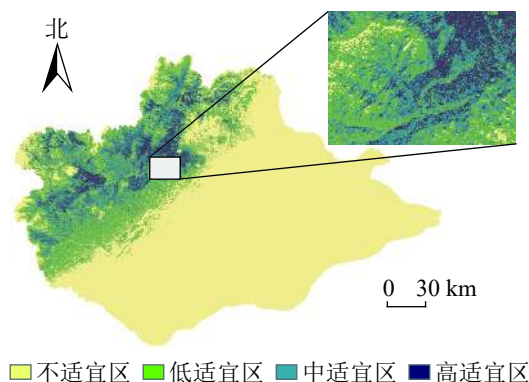


图 8 油松精准适宜性分布及细节放大图

Figure 8 Accurate suitability distribution and detailed enlarged drawing of *P. tabulaeformis*

表 2 各县高适宜区面积及比例

Table 2 Area and proportion of high suitable area in each county		
适生区	面积/km ²	占总面积比例/%
涞源县	462.60	1.00
灵丘县	402.65	0.87
易县	366.42	0.80
涞水县	181.62	0.39
清苑县	74.38	0.16
涿鹿县	64.29	0.14

县、清苑县、涿鹿县，其中涞源县面积最大，为 462.60 km²，占流域总面积的 1%，这是由于这些县符合油松适宜条件的区域较多，在利用油松林进行绿化时可着重考虑。

3 讨论

油松是华北地区主要造林树种，由于早期造林时，没有考虑油松适宜性或仅根据气候区划种植了大面积的人工油松林，使得油松生长缓慢，或衰退现象明显^[25-26]。近年来，针对油松适宜性的研究仅停留在小尺度，且数据和研究成果精度不高，难以为油松防护林营造提供科学支撑。

本研究从油松生态习性的角度，得出影响油松适宜分布的主导地理环境变量有积温、最大日降水量、高程、年平均气温标准差，贡献率均大于 20%，高适宜区分布在积温 2 800~3 800 °C、高程 500~1 200 m、年平均最大日降水量 70~110 mm、年平均气温标准差 0.31~0.42 °C 的区域内。张春霞等^[6]认为：油松中低海拔 (900~1 100 m) 立地质量为中等以上水平，与本研究高程最大值接近，最小值有差异，是由于其调查样方集中于 900 m 以上。魏安琪^[27]认为：坡向是影响油松适宜性最大的因子，但在本研究中坡向不是主导因子，这是由于该研究仅考虑了地形因子未考虑气象因子，且本研究分析后认为坡向通过影响区域局部水热条件而对气象因子产生影响，这在气候因子中有所体现。

在油松林管护过程中，针对不适宜导致的油松低效林，可间伐及间种其他适宜植物，通过逐渐演替由新植物种代替油松成为优势种；其次，在油松防护林营造时，需根据上述条件判断该地块是否适宜油松生长。本研究由于研究区范围较大，仅考虑了土壤类型对油松生长的影响，没有考虑土壤理化性质^[28]、土壤厚度^[21]等，在防护林建设中需综合考虑。此外，在以地理环境为角度进行油松适宜性研究时，未考虑林业经营管理、经济因素、其他人为因素等。在防护林建设中，整地方式、苗木品质、森林采伐等经营管理技术均对油松有较大影响；从经济角度看，造林成本、管护投入等因素也会造成一定影响^[29-30]，也需综合考虑。

4 参考文献

- [1] 夏军, 张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1199 – 1205.
XIA Jun, ZHANG Yongyong. Problems and challenges faced by the construction of water safety security in Xiong'an New Area [J]. *J Chin Acad Sci*, 2017, 32(11): 1199 – 1205.
- [2] 姜凤岐, 曾德慧, 于占源. 从恢复生态学视角透析防护林衰退及其防治对策: 以章古台地区樟子松林为例[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2229 – 2235.
JIANG Fengqi, ZENG Dehui, YU Zhanyuan. Decline of protective forest and its prevention strategies from viewpoint of restoration ecology: taking *Pinus sylvestris* var. *mongolica* pantation in Zhanggutai as an example [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(12): 2229 – 2235.
- [3] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 等. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 589 – 598.
HUANG Senwang, LI Xiaosong, WU Bingfang, et al. The distribution and drivers of land degradation in the Three-North

- Shelter Forest region of China during 1982–2006 [J]. *Acta Geogr Sin*, 2012, **67**(5): 589 – 598.
- [4] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 等. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究[J]. *生态学报*, 2019, **39**(16): 5847 – 5856.
- WANG Yao, ZHANG Changshun, LIU Chunlan, *et al.* Research on the pattern and change of forest water conservation in Three-North Shelterbelt Forest program region, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(16): 5847 – 5856.
- [5] 胡耀升, 翟洪波, 田野. 太行山绿化工程建设可持续性分析[J]. *林业经济*, 2017, **39**(9): 48 – 52.
- HU Yaosheng, ZHAI Hongbo, TIAN Ye. Analysis on sustainability of Taihang Mountain Greening Program construction [J]. *For Econ*, 2017, **39**(9): 48 – 52.
- [6] 张春霞, 冯自茂, 李文鑫, 等. 陕西黄陵油松人工林立地类型划分及评价[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, **49**(1): 55 – 63.
- ZHANG Chunxia, FENG Zimao, LI Wenxin, *et al.* Site classification and evaluation of *Pinus tabulaeformis* plantation in Huangling, Shaanxi [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2021, **49**(1): 55 – 63.
- [7] 赖文豪, 席沁, 武海龙, 等. 内蒙古兴和县低山丘陵立地类型划分与林草适宜性评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(2): 331 – 339.
- LAI Wenhao, XI Qin, WU Hailong, *et al.* Site classification type and vegetation suitability evaluation for hilly land in Xinghe, Inner Mongolia [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(2): 331 – 339.
- [8] 武吉华. 植物地理学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [9] 苏忠. 城市峡谷中 GPS/BeiDou 伪距单点定位性能分析[J]. *测绘通报*, 2019(增刊): 30 – 35.
- SU Zhong. Positioning performance analysis of GPS/BeiDou pseudorange single point positioning in the urban canyon[J]. 2019 (suppl): 30 – 35.
- [10] JIN Qitong, ZHANG Jutao, SHI Mingchang, *et al.* Estimating loess plateau average annual precipitation with Multiple Linear Regression Kriging and Geographically Weighted Regression Kriging [J]. *Water*, 2016, **6**(8): 266 – 286.
- [11] HENGL T. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables [J]. *Geoderma*, 2007, **140**: 417 – 427.
- [12] WANG Ku, ZHANG Chuanrong, LI Weidong. Comparison of geographically weighted regression and regression Kriging for estimating the spatial distribution of soil organic matter [J]. *GISci Remote Sensing*, 2013, **49**(6): 915 – 932.
- [13] 张年国, 王娜. 基于大数据的沈阳国土空间规划用地适宜性评价探讨[J]. *价值工程*, 2019, **38**(14): 10 – 13.
- ZHANG Nianguo, WANG Na. Discussion on suitability evaluation of shenyang land use planning based on big data [J]. *Value Eng*, 2019, **38**(14): 10 – 13.
- [14] 陈有民. 园林树木学[M]. 2 版. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [15] 任宪威. 树木学 (北方本)[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997.
- [16] PHILLIPS S J, ANDERSON R P, SCHAPIRE R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. *Ecol Modelling*, 2006, **190**(3/4): 231 – 259.
- [17] ELITH J, PHILLIPS S J, HASTIE T, *et al.* A statistical explanation of MaxEnt for ecologists [J]. *Diversity Distrib*, 2011, **17**(1): 43 – 57.
- [18] QIN Aili, JIN Kun, BATSAIKHAN M E, *et al.* Predicting the current and future suitable habitats of the main dietary plants of the Gobi Bear using MaxEnt modeling [J]. *Global Ecol Conserv*, 2020, **22**: e1032. doi: [10.1016/j.gecco.2020.e01032](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01032).
- [19] 邱浩杰, 孙杰杰, 徐达, 等. 基于 MaxEnt 模型预测鹅掌楸在中国的潜在分布区[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, **37**(1): 1 – 8.
- QIU Haojie, SUN Jiejie, XU Da, *et al.* MaxEnt model-based prediction of potential distribution of *Liriodendron chinense* in China [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2020, **37**(1): 1 – 8.
- [20] HANLEY J A, MCNEIL B J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve [J]. *Radiology*, 1982, **143**(1): 29 – 36.
- [21] 邓飞, 李晓兵, 王宏, 等. 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 Fei, LI Xiaobing, WANG Hong, *et al.* The suitability of geographic distribution and the dominant factors of alfalfa based on MaxEnt model in Xilin Gol [J]. *Grassl Sci*, 2014, **31**(10): 1840 – 1847.
- [22] PEARSON R G, RAXWORTHY C J, NAKAMURA M, *et al.* Predicting species distributions from small numbers of

- occurrence records: a test case using cryptic geckos in Madagascar [J]. *J Biogeogr*, 2007, **34**(1): 102 – 117.
- [23] 李培琳. 浙江省森林立地分类与杉木适宜性研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
LI Peilin. *Forest Site Classification and Suitability of Cunninghamia lanceolata (Lamb.) Hook in Zhejiang Province*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018.
- [24] 麻亚鸿. 基于最大熵模型 (MaxEnt) 和地理信息系统 (ArcGIS) 预测藓类植物的地理分布范围[D]. 上海: 上海师范大学, 2013.
MA Yahong. *Applying MaxEnt and ArcGIS to Predict Mosses Geographic Distribution Range: A Case Study of Huaping Nature Reserve, Guangxi*[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013.
- [25] 周立江. 低效林评判与改造途径的探讨[J]. *四川林业科技*, 2004(1): 16 – 21.
ZHOU Lijiang. Discussion on judgment and rebuilding approaches of low-efficiency forest [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2004(1): 16 – 21.
- [26] 李铁民. 太行山低质低效林判定标准[J]. *山西林业科技*, 2000(3): 1 – 8.
LI Tiemin. The criterion of low-quality-and-benefit forests in Taihang Mt. [J]. *Shanxi For Sci Technol*, 2000(3): 1 – 8.
- [27] 魏安琪. 陕西吴起退耕还林植被恢复及常见造林树种适生性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
WEI Anqi. *Study on Vegetation Restoration and Adaptability of Common Afforestation Tree Species in Converted Farmland to Forestry Region: A Case of Wuqi County, Shaanxi Province*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [28] 王志明. 基于 GIS 的晋西黄土区立地因子分析及类型划分研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
WANG Zhiming. *Based on “GIS” Technology of Research of Forest Site Classification in the Semiarid Loss Hilly-Gully Region*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [29] 李超, 裴顺祥, 张连金, 等. 北京油松人工林竞争指数的适用性评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, **36**(6): 1115 – 1124.
LI Chao, PEI Shunxiang, ZHANG Lianjin, et al. Applicability evaluation of competition indexes for *Pinus tabulaeformis* plantations in Beijing [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2019, **36**(6): 1115 – 1124.
- [30] 侯淑艳. 北京市低山区低效人工林结构特征与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
HOU Shuyan. *Study on the Assessment and Structure Feature of Low Function Plantation in the Low Mountain of Beijing*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.