

# 基于深度学习算法的山地植物多样性 空间分布格局模拟

言泽旭<sup>1</sup>, 张成福<sup>1</sup>, 王雨晴<sup>2</sup>, 冯霜<sup>1</sup>,  
苗林<sup>1</sup>, 熊慧<sup>3</sup>, 潘思涵<sup>4</sup>, 鲍舒琪<sup>5</sup>, 赵立超<sup>6</sup>

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010011;

2. 赤峰学院 资源环境与建筑工程学院, 内蒙古 赤峰 024000; 3. 西南林业大学  
外国语学院, 云南 昆明 650224; 4. 巴彦淖尔市林业和草原局, 内蒙古 巴彦淖尔 015000;

5. 敖汉旗林业和草原局, 内蒙古 赤峰 024300; 6. 大杨树林业有限责任公司, 内蒙古 呼伦贝尔 165456)

**摘要:** [目的] 分析内蒙古大青山国家级自然保护区不同环境因子条件下植物多样性的变化规律, 明确山区植物多样性与环境的关系, 为山地生态系统的多样性研究、评价、保护及综合管理提供科学依据。[方法] 运用深度学习算法构建植物多样性指数模型, 对模型的准确性进行验证后, 预测大青山植物多样性的空间分布, 并分析不同环境因子条件下植物多样性的变化规律。[结果] ①研究区共有 108 种植物, 隶属于 31 科 77 属, 阴坡植物多样性大于阳坡; ②坡度对 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )、Simpson 优势度指数( $D$ )和 Pielou 均匀度指数( $J$ )相对贡献度最大(42%), 其次是温度植被干旱指数(TVDI, 25%)、温度(17%)、NDVI(8%)和太阳辐射(8%); 温度和太阳辐射对 Margalef 丰富度指数( $R$ )相对贡献度最大(38%), 其次是坡度(9%)、坡向(8%)和 NDVI(7%); ③ Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数、Pielou 均匀度指数和 Margalef 丰富度指数的预测结果均与实测值高度吻合, MAE 分别为 0.08, 0.03, 0.03, 0.05, MSE 依次为 0.020, 0.003, 0.002, 0.004。进一步通过训练集模拟值与观测值的线性回归分析得出, 各多样性指数的  $R^2$  分别达到 0.86, 0.93, 0.92, 0.99。④大青山的 Shannon-Wiener 指数取值范围为 0~3.87, Simpson 优势度指数为 0~0.83, Pielou 均匀度指数为 0~0.95, Margalef 丰富度指数为 0~4.12; ⑤ Shannon-Wiener 指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数与坡度, TVDI, 地表温度(LST)和太阳辐射呈线性负相关, 与 NDVI 呈线性正相关。Margalef 丰富度指数与 LST, 太阳辐射和坡度呈线性负相关, 与坡向和 NDVI 呈线性正相关。总体来说, 植物多样性与 LST, 太阳辐射和坡度呈线性负相关, 与 NDVI 呈线性正相关。[结论] 利用深度学习算法预测山地地貌植物多样性的空间分布具有可行性, 能够深入了解植物多样性与环境之间的复杂关系。

**关键词:** 植物多样性; 深度学习; 环境因子; 内蒙古大青山

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2025)04-0211-11 **中图分类号:** X87, TP18, Q948

**文献参数:** 言泽旭, 张成福, 王雨晴, 等. 基于深度学习算法的山地植物多样性空间分布格局模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 211-221. Yan Zexu, Zhang Chengfu, Wang Yuqing, et al. Simulation of spatial distribution pattern of mountain plant diversity based on deep learning algorithm [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 211-221. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.013; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.013.

## Simulation of spatial distribution pattern of mountain plant diversity based on deep learning algorithm

Yan Zexu<sup>1</sup>, Zhang Chengfu<sup>1</sup>, Wang Yuqing<sup>2</sup>, Feng Shuang<sup>1</sup>,  
Miao Lin<sup>1</sup>, Xiong Hui<sup>3</sup>, Pan Sihan<sup>4</sup>, Bao Shuqi<sup>5</sup>, Zhao Lichao<sup>6</sup>

(1. College of Desertification Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 2. School of Resources, Environment and Architectural  
Engineering, Chifeng University, Chifeng, Inner Mongolia 024000, China; 3. Faculty of Foreign Languages,

收稿日期: 2024-11-18

修回日期: 2025-04-03

采用日期: 2025-04-03

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金“环境变化对内蒙古大青山自然保护区植物多样性影响的研究”(2022MS03039), 内蒙古自治区高等学校科学技术研究项目“气候变化和人类活动对内蒙古草原区植被的影响研究”(NJZZ23101)

第一作者: 言泽旭(1999—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市宁城县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: yanzexu0818@163.com。

通信作者: 张成福(1966—), 男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗人, 教授, 主要从事生态水文模型研究。Email: 2651534893@qq.com。

Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 4. Bayan Nur Municipal Forestry and Grassland Administration, Bayannur, Inner Mongolia 015000, China; 5. Forestry and Grassland Bureau of Aohanqi, Chifeng, Inner Mongolia 24300, China; 6. Big Poplar Forestry Limited Liability Company, Hulunbuir, Inner Mongolia 165456, China)

**Abstract:** [Objective] The changing patterns of plant diversity in the Daqing Mountain Nature Reserve in Inner Mongolia under different environmental factors were analyzed. And the relationship between plant diversity in mountainous areas and the environment was clarified, in order to provide a scientific basis for the research, evaluation, protection and comprehensive management of the diversity in mountain ecosystems. [Methods] The deep learning algorithm were employed to construct a plant diversity index model, and the model accuracy was validated. Subsequently, the spatial distribution of plant diversity in Daqing Mountain was predicted, and the various patterns of plant diversity under different environmental factors were analyzed. [Results] ① There were a total of 108 plant species in the study area, belonging to 77 genera and 31 families. The plant diversity on the shady slopes was greater than that on the sunny slopes. ② The slope had the greatest relative contribution (42%) to the Shannon-Wiener index ( $H'$ ), Simpson dominance index ( $D$ ) and Pielou evenness index ( $J$ ), followed by temperature vegetation dryness index (TVDI, 25%), temperature (17%), NDVI (8%) and solar radiation (8%). Temperature and solar radiation had the largest relative contribution to the Margalef richness index ( $R$ ) (38%), slope (9%), aspect (8%), and NDVI (7%). ③ The predicted results of  $H'$ ,  $D$ ,  $J$ , and  $R$  all showed strong agreement with measured values, with mean absolute error (MAE) values of 0.08, 0.03, 0.03, and 0.05, and mean square error (MSE) values of 0.020, 0.003, 0.002, and 0.004, respectively. Further linear regression analysis between simulated and observed values in the training set revealed that the  $R^2$  values for each diversity index reached 0.86, 0.93, 0.92, and 0.99, respectively. ④ The value range of  $H'$ ,  $D$ ,  $J$  and  $R$  in the Daqing Mountain were 3.87, 0.83, 0.95 and 4.12, respectively. ⑤  $H'$ ,  $D$ , and  $J$  were linearly negatively correlated with slope, TVDI, land surface temperature (LST) and solar radiation, and linearly positively correlated with NDVI.  $R$  was linearly negatively correlated with LST, solar radiation and slope, and linearly positively correlated with aspect and NDVI. Overall, plant diversity was linearly negatively correlated with LST, solar radiation and slope, and linearly positively correlated with NDVI. [Conclusion] Deep learning methods can be feasibly used to predict the spatial distribution of plant diversity in mountainous landforms. This method can deepen our understanding of the complex relationship between plant diversity and environment.

**Keywords:** plant diversity; deep learning; environmental factors; Daqing Mountain in Inner Mongolia

生物多样性是维持生态系统稳定性的重要因素<sup>[1]</sup>,物种多样性是生物多样性研究的基础,是物种分布均匀度和丰富度的综合反映<sup>[2]</sup>,物种多样性越高,群落抵抗力和恢复力越高,生态系统的稳定性越好<sup>[3]</sup>,反之,将破坏生态系统的功能<sup>[4]</sup>。植物多样性与环境因子的相互作用一直是生态学领域的重点研究方向。探究植物群落的物种多样性特征、关键环境影响因子及其相互关系,不仅有助于预测群落多样性的动态变化,对维持生态系统结构稳定和功能完整性也具有重要价值<sup>[5]</sup>。山地生态系统约占全球陆地面积的 27%,承载了约 25% 的陆地生物多样性<sup>[6]</sup>,是全球生物多样性保护的重要区域,同时也为人类提供了关键的生态服务功能<sup>[7]</sup>。

国内外学者对植物群落物种多样性与环境因子间的关系进行了大量研究<sup>[8]</sup>,梁道省等<sup>[9]</sup>研究了松嫩平原植物群落多样性分布格局及其对环境因子的响应;潘婷婷等<sup>[10]</sup>研究了南京北部郊野森林植物群落

的结构特征和物种多样性,并分析了其与海拔、温度和土壤性质等环境因子间的关系;艾尼瓦尔·吐米尔等<sup>[11]</sup>研究了乌鲁木齐市苔藓植物的多样性特征和分布及其与环境因子之间的关系;陈廷贵等<sup>[12]</sup>研究了关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境的关系;聂莹莹等<sup>[13]</sup>研究了阳坡和阴坡生境下植物群落  $\alpha$  多样性与  $\beta$  多样性的变化趋势及其与环境因子的关系。深度学习 (deep learning, DL) 算法具有强大的非线性映射能力与学习能力,广泛应用于较复杂的生态环境模拟预测,不仅有效提高了估测的准确度和效率,而且对生态学、地理信息系统、计算机科学进行了跨学科的技术融合创新,为生物多样性空间格局的研究提供了全新方案。Večeřa M 等<sup>[14]</sup>采用植被样地数据库的  $\alpha$  多样性数据构建预测模型,并结合气候变化及多维环境参数,实现了对标准化样地尺度内物种多样性的高精度估算。Chang G J 等<sup>[15]</sup>对多种机器学习算法(包括决策树、随机森林、支持向量机)与

深度神经网络模型在生物多样性估算中的性能进行了对比研究,同时利用环境变量对以色列地区的生物多样性空间分布格局进行了预测分析。Cai Lirong等<sup>[16]</sup>综合运用机器学习技术(包括随机森林、极端梯度提升和神经网络)与传统统计方法(如广义线性和广义加性模型),对环境因素驱动的大尺度植物多样性分布模式进行了预测研究,并将其应用于全球植物多样性的模拟与估算。

尽管深度学习已经广泛应用于较复杂的生态环境模拟预测,但是运用深度学习对植物多样性空间分布及其与环境因子关系的描述较少。本文基于前人的研究,选取内蒙古大青山自然保护区为研究对象,运用深度学习方法,分析不同环境因子条件下植物多样性的变化规律。研究结果有助于明确山区植物物种多样性与环境的关系,为山地生态系统的多样性研究、评价、保护及综合管理提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

内蒙古大青山国家级自然保护区位于阴山山脉中段,南起土默川平原,北与包头市固阳县、呼和浩特市武川县相接,东接乌兰察布市卓资县头道北山山脊,西至包头市昆都仑河。地理坐标为 $109^{\circ}47'—112^{\circ}17'E$ , $40^{\circ}34'—41^{\circ}14'N$ ,海拔范围为 $936—2296\text{ m}$ ,山体呈东西走向,保护区总面积为 $3.89\times 10^5\text{ hm}^2$ 。该区域属温带大陆性半干旱季风气候,春季多风少雨;夏季降雨居多且集中,主要集中在7—8月;秋季凉爽,降雨骤减;冬季寒冷干燥,少雨雪。年均降水量 $350—400\text{ mm}$ 。全年光照充足,平均气温 $6.7^{\circ}\text{C}$ ,蒸发量最高可达降水量的4倍<sup>[17]</sup>。大青山自然保护区地处半干旱的典型草原地带,植被呈垂直分布。随地势升高,植被类型呈现出灌丛草原—森林灌丛草原—森林草原—山地草原的分布规律<sup>[18]</sup>。研究区内分布着油松(*Pinus tabulaeformis*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、圆柏(*Sabina chinensis*)等乔木,三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、蒙古莢迷(*Viburnum mongolicum*)等常见灌木;早熟禾(*Poa annua*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、本氏针茅(*Stipa capillata*)、羊茅(*Festuca ovina*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)等常见草本<sup>[19]</sup>。

### 1.2 数据来源

#### 1.2.1 样地与调查指标

为了反映不同地貌类型对植物多样性的影响,

分别选取敕勒川、喇嘛洞和黄花窝铺3个较完全涵盖内蒙古大青山国家级自然保护区地貌类型和植被类型的区域为研究对象。在每个区域分别选取3个阳坡和3个阴坡,在每个阳坡或阴坡坡面上按相对高程大小选取3~5个坡位设置样点,共计75个样点。在每个样点内设置1个乔木样方,大小为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ ,在每个乔木样方的中点和4角设置灌木样方( $5\text{ m}\times 5\text{ m}$ ),运用同样的方法在灌木样方中设置5个草本样方( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ )。若样点内无乔木,只设置灌木样方(5个),并在其内部设置草本样方(5个)。若样点内无灌木,只设置草本样方(5个)。总计获取乔木样方3个,灌木样方320个,草本样方375个。

本研究于2022年8月在野外进行调查,分别记录样方内乔木的种名、数量、冠幅、胸径、高度、盖度,以及灌木、草本植物的种名、数量、盖度、高度等,使用手持GPS记录各样地的经度、纬度、海拔和坡向等。

#### 1.2.2 指标计算

(1) 植物多样性指数。物种的丰富度和均匀度是由物种多样性指数综合反映的<sup>[20]</sup>,植物群落物种多样性主要由物种丰富度指数、物种多样性指数及均匀度指数表达,其中,Margalef丰富度指数( $R$ )、Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )应用较为普遍。本文采用这4种多样性指数来测算内蒙古自治区大青山国家级自然保护区植物群落的物种多样性。计算公式<sup>[21-23]</sup>分别为:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$D = 1 / \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (3)$$

$$P_i = N_i / N \quad (4)$$

$$J = H' / \ln S \quad (5)$$

式中: $R$ 为Margalef丰富度指数; $H'$ 为Shannon-Wiener指数; $D$ 为Simpson优势度指数; $J$ 为Pielou均匀度指数; $S$ 为每个样方内的物种数; $N$ 为每个样方内总植株数; $N_i$ 为第*i*个物种的个体数量; $P_i$ 为第*i*个物种的个体数量占植物总数量的比例。

(2) 温度植被干旱指数。温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)可以反演地表水分情况,从而表征降水情况和干旱程度,常用于干旱动态监测<sup>[24]</sup>。

$$TVDI = (T_s - T_{s\min}) / (T_{s\max} - T_{s\min}) \quad (6)$$

$$T_{s\max} = a_1 + b_1 NDVI \quad (7)$$

$$T_{s\min} = a_2 + b_2 NDVI \quad (8)$$

式中:NDVI为归一化植被指数;  $T_i$ 为任意像元的地表温度;  $T_{\max}$ 为某一NDVI值对应的最高地表温度;  $T_{\min}$ 为某一NDVI值对应的最低地表温度。TVDI的取值范围为0~1, TVDI的值越接近1, 土壤湿度越低, 干旱程度越大, 该值越接近0, 土壤湿度越高, 干旱程度越小。

### 1.2.3 遥感数据来源与预处理

本研究高程数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。使用MRT(MODIS Reprojection Tool)软件提取地表温度(land surface temperature, LST)、地表反照率和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)等数据, 温度植被干旱指数由ENVI计算得出。利用ArcGIS软件的空间分析工具计算提取海拔、坡度、坡向等地形因子数据。使用投影变换功能将所有空间数据坐标系统一为WGS\_1984 UTM、空间分辨率为90 m。

### 1.2.4 基于深度学习的植物多样性指数空间分布模型构建

深度学习的本质是利用深层次网络的多层的非线性信息处理来进行低层次特征提取和转换, 并进行模式分析和分类, 得到更高层次的抽象特征<sup>[25]</sup>。

本研究模型的构建基于Anaconda的Jupyter Notebook平台, 利用以Tensorflow 2.0为后端的深度学习库Keras, 以决策树模型选取的环境因子作为输入层数据集, 植物多样性指数作为输出层数据, 划分输入层数据集的70%为训练集, 20%为测试集, 10%为预测集。经多次训练后, 构建最优植物多样性指数模型, 从而预测出内蒙古自治区大青山国家级自然保护区植物多样性指数的空间分布。

用回归损失函数均方误差(mean squared error, MSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)衡量模型预测值与实测值的差距, 评估模型的模拟性能和预测精度。MSE值越小, 说明模型预测精度越高。MAE可以准确反映实际预测误差情况。

## 2 结果与分析

### 2.1 大青山自然保护区植物物种组成与植物多样性指数

经调查, 研究区共有108种植物, 隶属31科77属, 以菊科、豆科、蔷薇科和禾本科植物为主。其中乔木1科, 1属, 1种植物; 灌木6科, 11属, 16种植物; 草本29科, 67属, 91种植物。

由表1可知, 对于相同坡向, 植物科、属、种的数

量多少依表现为: 草本 > 灌木 > 乔木; 在不同坡向中, 阳坡灌木的物种数大于阴坡、乔木和草本则相反。总体来说, 阴坡植物多样性显著大于阳坡。

表1 研究区不同坡向的乔木、灌木、草本植物的科、属、种数量

Table 1 Number of families, genera and species of trees, shrubs and herbaceous plants in different aspects of study area

坡向	分类	乔木/种	灌木/种	草本/种
阳坡	科	0	6	16
	属	0	9	31
阴坡	科	1	4	25
	属	1	7	50

比较各研究区域植被物种多样性指数发现(表2), 黄花窝的各植物物种多样性指数最高, Shannon-Wiener指数( $H'$ )为1.45, Simpson优势度指数( $D$ )为0.72, Pielou均匀度指数( $J$ )为0.87, Margalef丰富度指数( $R$ )为1.35; 其次是喇嘛洞, 分别为1.34, 0.64, 0.83, 1.32; 最低的是敕勒川, 分别为1.26, 0.63, 0.79, 1.23。

表2 各研究区域物种多样性指数

Table 2 Species diversity indices in different study areas

项目	Shannon-Wiener指数( $H'$ )	Simpson优势度指数( $D$ )	Pielou均匀度指数( $J$ )	Margalef丰富度指数( $R$ )
敕勒川	1.26	0.63	0.79	1.23
黄花窝	1.45	0.72	0.87	1.35
喇嘛洞	1.34	0.64	0.83	1.32

### 2.2 基于深度学习环境因子贡献度分析

选取对植物多样性指数变化有影响的7个环境因子, 分别为温度、海拔、坡度、坡向、太阳辐射、NDVI和TVDI, 经决策树模型筛选出相对贡献度较高的因子。由图1可知, 对Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )相对贡献度较高的因子为坡度、TVDI、温度、NDVI和太阳辐射, 贡献度分别为42%, 25%, 17%, 8%, 8%, 相对贡献度较低的因子为海拔和坡向因子, 贡献度均为0; 对Margalef丰富度指数( $R$ )相对贡献度较高的因子为温度、太阳辐射、坡度、坡向和NDVI, 贡献度分别为38%, 38%, 9%, 8%, 7%, 相对贡献度较低的因子为TVDI和海拔因子, 贡献度均为0。

### 2.3 深度学习模型构建与精度评价

本研究借助深度学习算法, 对各环境因子与植物多样性之间的关系特征展开学习与训练, 通过设

置调整模型参数指标使模型训练达到最优。在模型构建过程中,重点对激活函数、优化器、误差评估指标及训练轮次等关键参数进行调控,本研究的建模流程也将从上述多个维度对深度学习算法加以优化。为调试最优模型的各个参数,基于 Tensorflow 2.0 框架,运用第三方库进行深度学习模型构建,对输入数据集和输出数据集进行多次训练,通过调整激活函数 Relu 下不同隐藏层节点数和迭代次数,从而调试

出用于后续植物多样性模拟预测的最优模型。随着训练次数的增加,模型评估指标 MAE 和 MSE 不断减小,历经 20000 次迭代训练后得到最优模型。从表 3 可以看出, $H'$ , $D$ , $J$ , $R$  指数的回归损失函数平均绝对误差分别为 0.08,0.03,0.03,0.05,均方误差依次为 0.020,0.003,0.002,0.004。这表明模型模拟的植物多样性指数与实际测量值之间的差距较小,模型模拟具备较高的准确度。

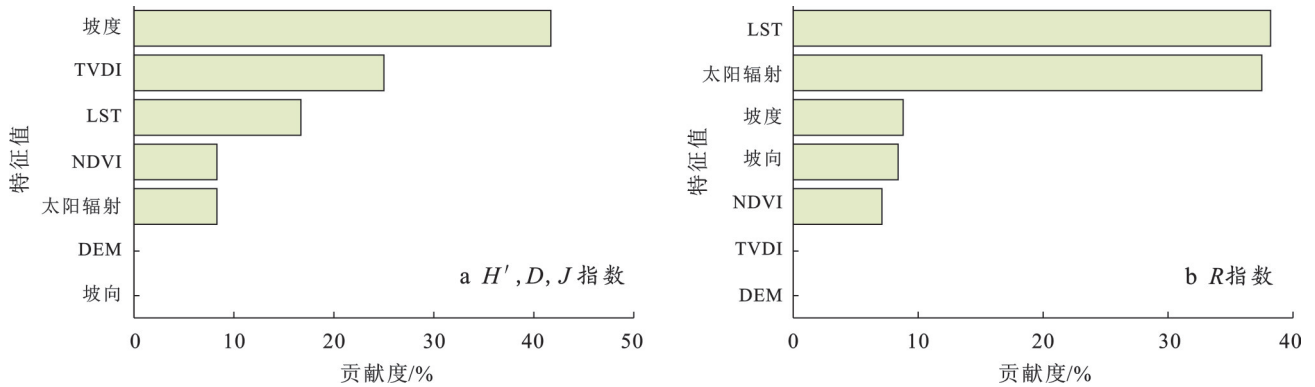


图 1 研究区植物多样性指数空间分布的环境因子贡献度

Fig.1 Contribution of environmental factors to spatial distribution of plant diversity indices at study area

表 3 研究区模型模拟植物多样性指数的精度  
Table3 Accuracy of plant diversity index simulated by model at study area

模型评估指标	Shannon-Wiener 指数( $H'$ )	Simpson 优势度指数( $D$ )	Pielou 均匀度指数( $J$ )	Margalef 丰富度指数( $R$ )
MAE	0.08	0.03	0.03	0.05
MSE	0.020	0.003	0.002	0.004

为了验证并评估训练模拟得出的植物多样性结果,将深度学习训练模拟得到的植物多样性指数与实测值绘制成散点图,并针对训练模拟值与观测值的散点图开展线性趋势分析,以此来评估模型训练结果的精度。

图 2 展示了深度学习模型预测模拟的植物多样性指数与实测值的对比情况。从图 2a, 2c, 2e, 2g 可以看出,训练模拟值与观测值的对比结果较为吻合。并且,散点图的决定系数  $R^2$  分别达到了 0.86, 0.93, 0.92, 0.99, 这意味着所构建的深度学习模型能够较好地模拟植物多样性指数的变化趋势,训练模拟值与观测值的变化波动规律一致,表明模型模拟结果较为准确。由图 2b, 2d, 2f, 2h 可知,深度学习模型训练模拟的植物多样性指数值与实测值的散点分布较为集中,紧密贴合在相关线附近。这些数据充分说明深度学习模型能够出色地预测模拟植物的多样

性。由此可见,运用深度学习方法对植物多样性指数进行模拟具备一定的可靠性。

2.4 植物多样性空间分布的模型预测分析

图 3 是深度学习方法预测的内蒙自治区大青山自然保护区植物多样性的空间分布。图 3a 为 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )空间分布预测图,取值范围在 0~3.87 之间,其中  $H'$  的取值区间为 2.32~3.09,面积占比最大,所占面积最小的取值区间为 3.09~3.87;图 3b 为 Simpson 优势度指数( $D$ )空间分布预测图,取值范围在 0~0.83 之间,其中  $D$  取值区间(0.49~0.66)所占大青山面积最大,取值区间为 0.66~0.83 所占面积最小;图 3c 为 Pielou 均匀度指数( $J$ )空间分布预测图,取值范围在 0~0.95 之间,其中  $J$  取值区间 0.19~0.38 占大青山面积最大,取值 0~0.19 所占面积最小;图 3d 为 Margalef 丰富度指数( $R$ )空间分布预测图,取值范围在 0~4.12 之间,其中  $R$  取值区间(0.82~1.65)占大青山面积最大,0~0.82 的取值范围所占面积最小。

2.5 单一环境因子与大青山植物物种多样性空间分布的关系

图 4 反映了 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )随单一控制变量变化的规律。结果表明, $H'$  与坡度、TVDI, LST 和太阳辐射呈线性负相关,与 NDVI 呈线性正相关。图 5 反映了 Simpson 优势度指数( $D$ )随单一控

制变量变化的规律图。结果表明,  $D$  与坡度、TVDI、LST 和太阳辐射呈线性负相关, 与 NDVI 呈线性正相关。

图 6 表明, Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 与坡度、TVDI,

LST 和太阳辐射呈线性负相关, 与 NDVI 呈线性正相关。图 7 为 Margalef 丰富度指数 ( $R$ ), 结果表明,  $R$  与 LST、太阳辐射和坡度呈线性负相关, 与坡向和 NDVI 呈线性正相关。

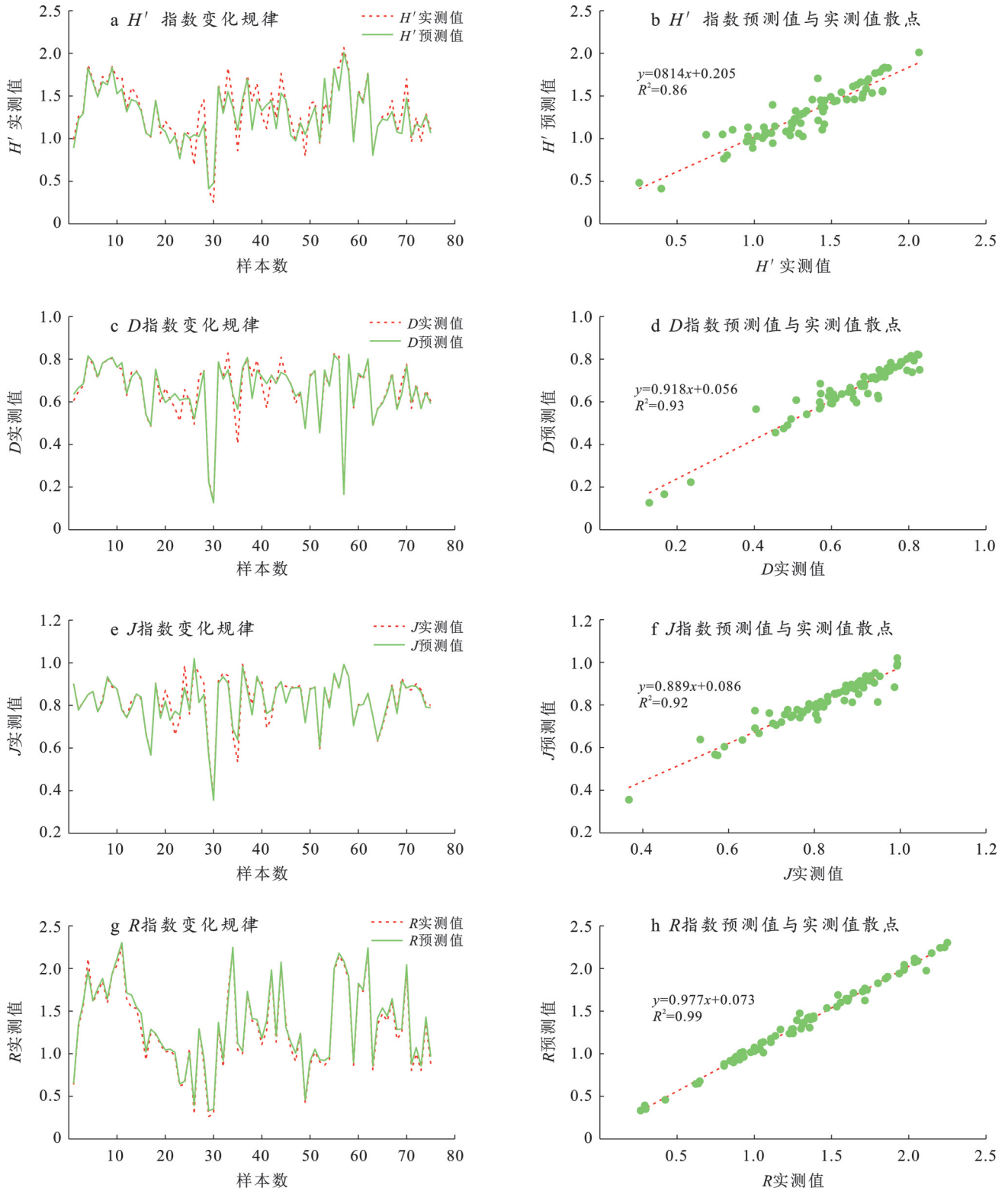


图 2 研究区模型预测模拟的植物多样性指数与实测值对比

Fig.2 Comparison between plant diversity index simulated by model prediction and measured value at study area

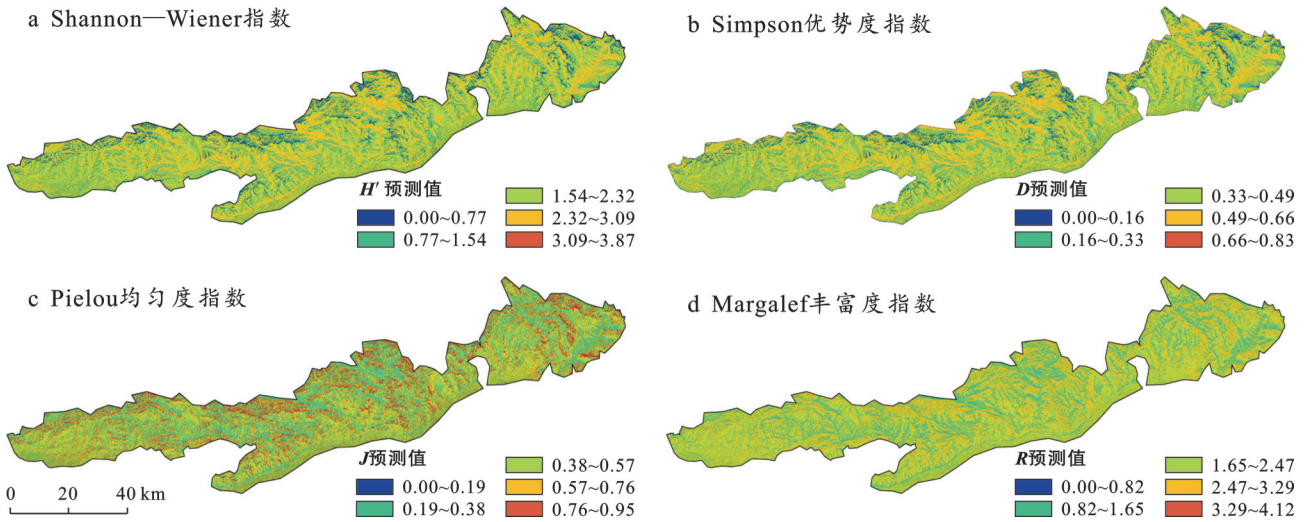


图 3 大青山自然保护区的植物多样性空间分布预测

Fig.3 Predicted spatial distribution of plant diversity in Daqing Mountain Nature Reserve

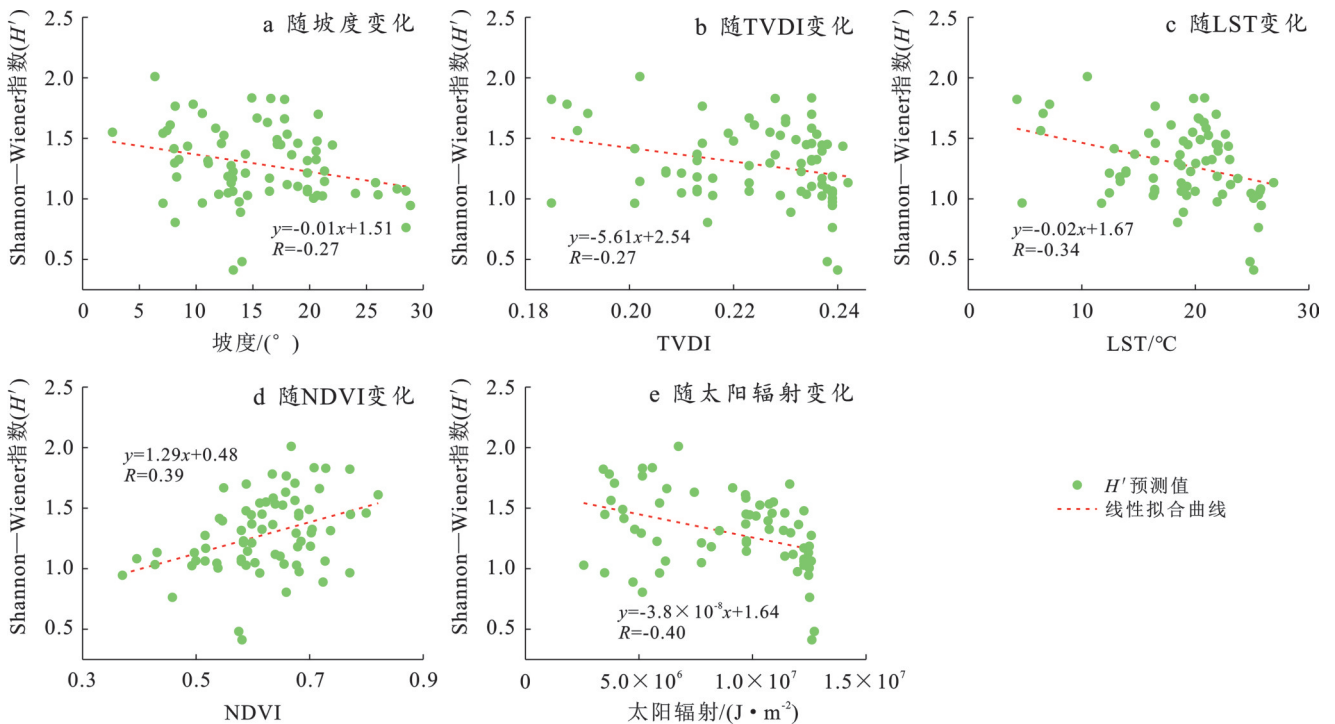


图 4 研究区 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ ) 随单一控制变量变化的规律

Fig.4 Regularity plot of Shannon-Wiener index ( $H'$ ) variation with single control variable at study area

### 3 讨论

本研究运用深度学习预测了内蒙古大青山自然保护区植物多样性的空间分布,并对模型的精度进行了验证,同时分析了植物多样性空间分布与环境因子的关系。

结果显示,深度学习能够有效预测研究区植物多样性的空间分布。传统研究多采用简单的线性分析方法探讨植物多样性空间分布与环境因子的关系,然而,环境因子之间往往存在复杂的相互作

用,仅依靠线性模型难以充分揭示其内在关联。相比之下,非线性多元回归模型更适用于解析植物多样性与环境因子的复杂关系特征。深度学习方法凭借其强大的非线性映射能力,能够高效整合多源环境因子,实现植物多样性分布的高精度反演。在模型验证阶段,各植物多样性指数的回归损失函数均方误差(MSE)和平均绝对误差(MAE)均处于较低水平:Shannon-Wiener 指数( $H'$ )的 MAE 为 0.08, MSE 为 0.020; Simpson 优势度指数( $D$ )的 MAE 为 0.03, MSE 为 0.003; Pielou 均匀度指数( $J$ )的 MAE 为

0.03, MSE 为 0.002; Margalef 丰富度指数 ( $R$ ) 的 MAE 为 0.005, MSE 为 0.004。

这些结果表明,模型模拟的植物多样性指数与实际观测值高度吻合,具有较高的准确性。在构建深度学习模型时,输入因子的合理选择、隐藏层节点

数的优化以及训练次数的调整均对模型精度具有重要影响。为提高模型性能,本研究在建模前采用决策树算法对环境因子进行特征重要性分析,筛选关键变量,有效降低了数据冗余,进一步提升了模型的模拟精度。

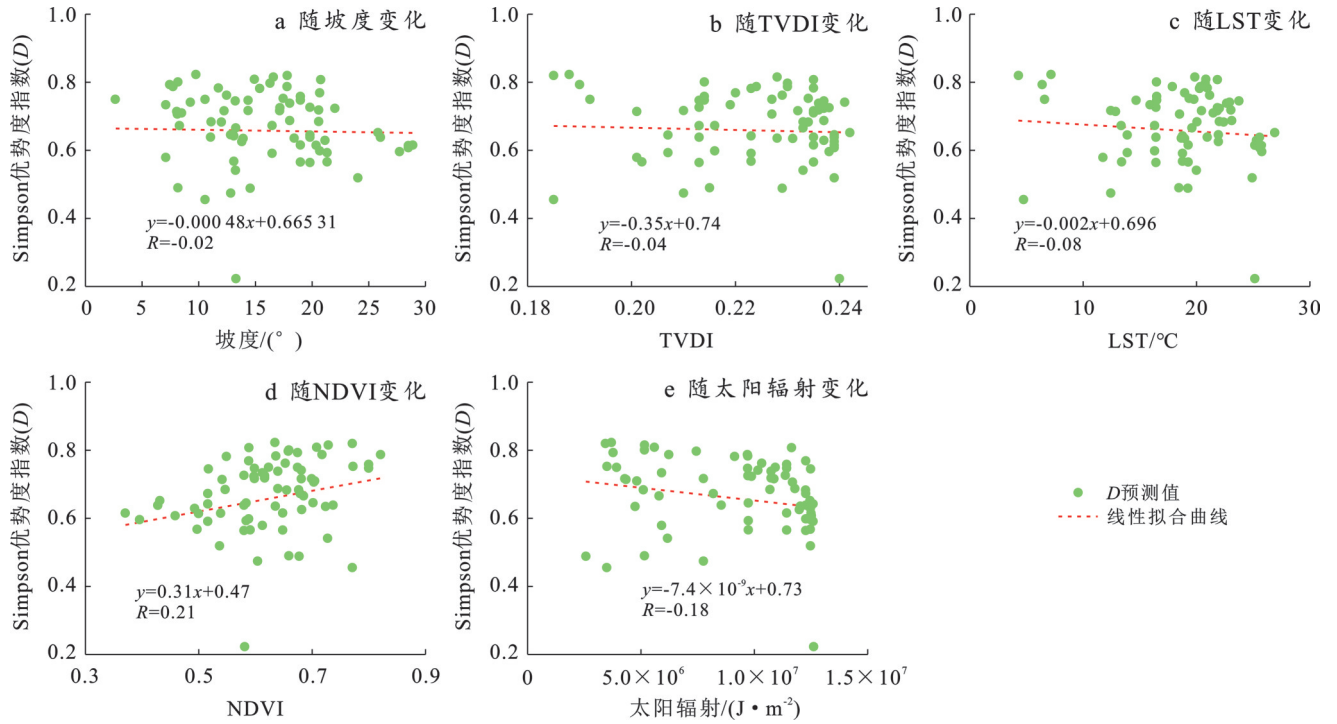


图 5 研究区 Simpson 优势度指数 ( $D$ ) 随单一控制变量变化的规律

Fig.5 Regularity plot of variation of Simpson dominance index ( $D$ ) with single control variable at study area

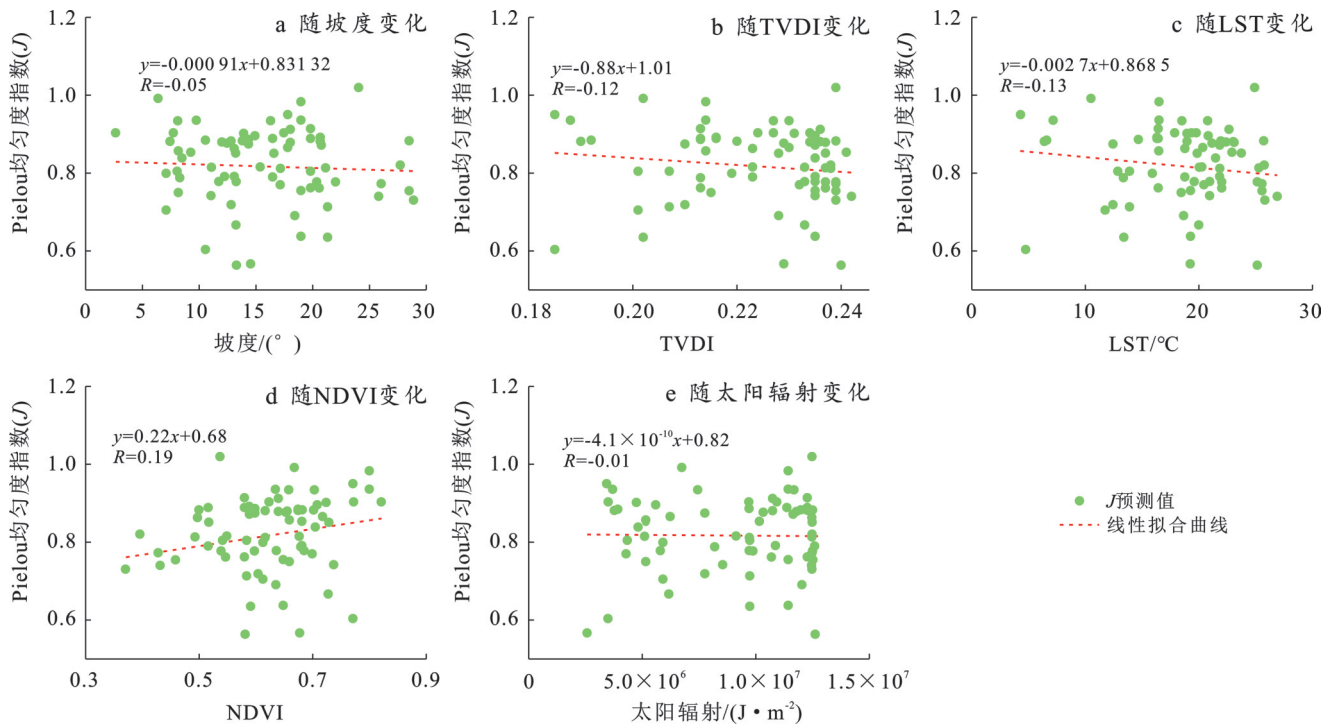
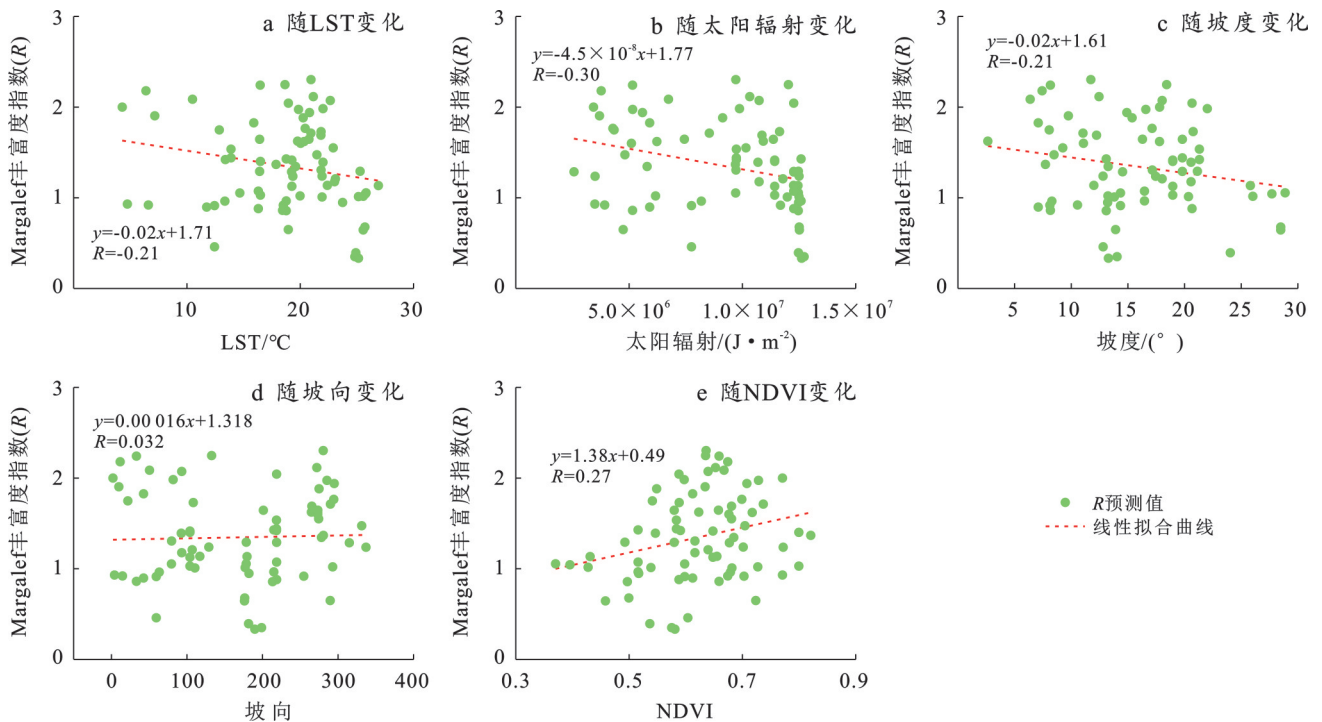


图 6 研究区 Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 随单一控制变量变化规律

Fig.6 Regularity plot of Pielou evenness index ( $J$ ) variation with single control variable at study area

图7 研究区 Margalef 丰富度指数 ( $R$ ) 随单一控制变量变化规律Fig.7 Regularity of Margalef richness index ( $R$ ) with single control variables at study area

经过特征值的筛选,结果表明影响大青山植物多样性空间分布的主要环境因子有LST、太阳辐射、坡度、TVDI, NDVI和坡向。其中,影响Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )最大的因子是坡度,这与胡刚等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。本研究表明坡度与4个物种多样性指数呈显著负相关,这与Rose等<sup>[26]</sup>的研究结果一致。坡度通过影响植物生境的水分和土壤养分进而影响其分布和多样性。随着坡度的增加,地表径流速率升高,加剧了土壤侵蚀程度,进而引发水土资源与养分的流失。此外,坡度增加会导致地表接收太阳辐射的面积增大,进而加剧蒸散发作用,造成土壤水分流失更为显著。这种资源流失制约了植被的生长条件及其空间分布模式,从而对植物多样性的形成与维持产生影响。影响Margalef丰富度指数( $R$ )的最大的因子是温度,本研究表明随着温度升高,4个物种多样性指数均呈下降趋势,与杨崇曜等<sup>[5]</sup>的研究结果相同。温度的升高致使蒸散发活动强烈,从而导致植物水分胁迫,降低其存活率,减少植物的多样性。除此之外,温度的变化会影响植物之间的竞争<sup>[27]</sup>,进而改变植物群落的组成。太阳辐射也是影响植物多样性分布的重要因子,太阳辐射强度越大,植物多样性指数越小。这是因为太阳辐射通过影响温度来控制植物多样性的分布,太阳辐射强度越大,温度越高,土壤蒸散发越强,土壤含水量越少,植物的多样性指数越低,反之亦然。TVDI是表示土壤含

水量的重要指标,受太阳辐射、温度和植被覆盖度的共同影响<sup>[28]</sup>。本研究表明,TVDI与植物多样性指数呈负相关关系,这是因为TVDI值越大,土壤湿度越低,干旱程度越强,这与姜蓝齐等<sup>[29]</sup>研究结果一致。坡向会直接影响植物生境的太阳辐射,从而间接影响蒸散发量和土壤含水量<sup>[30]</sup>,对植物多样性分布格局产生影响。本研究发现阴坡植物群落物种多样性大于阳坡<sup>[13]</sup>。这可能是由于阳坡的光照强度大,温度高,土壤的蒸散发强度大,导致土壤的含水量少,相较于阴坡的干旱程度高,从而导致阳坡多样性较低。

由不同环境因子与大青山植物物种多样性空间分布的关系可知,单一环境因子与植物多样性的相关性较小,这可能是由于植物多样性的空间分布受LST、太阳辐射、坡度、TVDI、NDVI和坡向的共同影响,而受单一环境因子的影响并不明显,也可能因为各环境因子对植物多样性空间分布的贡献度是相对而言的。

综上所述,植物多样性空间分布受气象因子、地形因子和人为活动等多种因素的共同影响,且这些因素之间也相互作用,使得植物多样性空间分布具有一定的复杂性和差异性。在以往的研究中,更多通过冗余分析或回归性分析方法简单分析植物多样性空间分布与环境因子的关系。而本文运用了深度学习模型,通过整合实地调查获取的植物多样性数据与公开的大规模空间数据库,实现高精度大尺度的植物多样性空间分布预测。研究表明该方法模拟山地植物多样性空间分布具有可行性。机器学习和

深度学习技术在生态建模中的引入为生物多样性监测与管理提供了全新的技术支撑。这些算法凭借复杂的结构设计,在性能和精度上显著优于传统统计方法。这一方法推动了生物多样性与环境因子关系的深入研究,为未来相关领域提供了重要研究方向,有助于揭示复杂的生物多样性形成机制。然而,该方法仍存在一定的局限性。

本研究采用的植物多样性数据源于实地调查,样本量为75个,虽然样地选择较全面地涵盖了研究区的地貌和植被类型,但数量相对较少。对于机器学习和深度学习算法而言,样本量的增加通常有助于提升模型性能与预测精度。此外,植物多样性与环境因子的相互作用机制较为复杂,尽管研究纳入了气候、地形等环境变量,但由于环境变量空间数据的分辨率与实地调查数据存在差异,可能导致预测结果与实际观测值之间出现一定偏差。并且,由于数据的获取难度以及研究水平的局限性,并未对人为干扰和土壤因子进行分析。

## 4 结论

本文基于环境因子数据集,利用深度学习算法模拟预测了大青山植物多样性的空间分布,并分析各环境因子与植物多样性空间分布的关系。

(1) 研究区共有108种植物,隶属31科77属,以菊科、豆科、蔷薇科和禾本科植物为主。阳坡灌木物种数大于阴坡、乔木和草本则相反。总体来说,阴坡植物多样性显著大于阳坡。

(2) 通过决策树模型运算发现,坡度对Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )的相对贡献度最大(42%),其次是TVDI(25%)、温度(17%)、NDVI(8%)和太阳辐射(8%),贡献最低的是海拔(0)和坡向(0)因子;温度和太阳辐射对Margalef丰富度指数( $R$ )相对贡献度较大(38%),其次坡度(9%)、坡向(8%)和NDVI(7%),贡献最低的是TVDI(0)和海拔(0)因子。

(3) 模型验证结果显示,Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )和Margalef丰富度指数( $R$ )的预测结果均与实测值高度吻合,其回归损失函数的平均绝对误差(MAE)分别为0.08,0.03,0.03,0.05,均方误差(MSE)依次为0.020,0.003,0.002,0.004。进一步通过训练集模拟值与观测值的线性回归分析表明,各多样性指数的决定系数( $R^2$ )分别达到0.86,0.93,0.92,0.99。这些数据充分说明深度学习模型能够出色地预测模拟植物的多样性。由此可见,运用深度学习方法对植物多样性指数进行模拟具备一定的可靠性。

(4) 通过深度学习方法可以模拟出大青山植物多样性的空间分布,Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )、Pielou均匀度指数( $J$ )、Margalef丰富度指数( $R$ )的取值范围分别为0~3.87,0~0.83,0~0.95,0~4.12。

(5) Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Simpson优势度指数( $D$ )和Pielou均匀度指数( $J$ )与坡度、TVDI、LST和太阳辐射呈线性负相关,与NDVI呈线性正相关。Margalef丰富度指数( $R$ )与LST、太阳辐射和坡度呈线性负相关,与坡向和NDVI呈线性正相关。

## 参考文献(References)

- [1] 田平,程小琴,韩海荣,等.环境因子对山西太岳山典型森林类型物种多样性及其功能多样性的影响[J].西北植物学报,2017,37(5):992-1003.  
Tian Ping, Cheng Xiaoqin, Han Hairong, et al. Effect of environment factors on species diversity and functional diversity of the typical forests of Taiyue Mountain Shanxi, China [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(5):992-1003.
- [2] 盘远方,李娇凤,姚玉萍,等.桂林岩溶石山青冈群落植物功能多样性和环境因子与坡向的关联研究[J].生态学报,2021,41(11):4484-4492.  
Pan Yuanfang, Li Jiaofeng, Yao Yuping, et al. Changes in plant functional diversity and environmental factors of *Cyclobalanopsis glauca* community in response to slope gradient in karst hills, Guilin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11):4484-4492.
- [3] 姚天华,朱志红,李英年,等.功能多样性和功能冗余对高寒草甸群落稳定性的影响[J].生态学报,2016,36(6):1547-1558.  
Yao Tianhua, Zhu Zhihong, Li Yingnian, et al. Effects of functional diversity and functional redundancy on the community stability of an alpine meadow [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6):1547-1558.
- [4] Naeem S, Thompson L J, Lawler S P, et al. Declining biodiversity can alter the performance of ecosystems [J]. Nature, 1994, 368(6473):734-737.
- [5] 杨崇曜,李恩贵,陈慧颖,等.内蒙古西部自然植被的物种多样性及其影响因素[J].生物多样性,2017,25(12):1303-1312.  
Yang Chongyao, Li Engui, Chen Huiying, et al. Biodiversity of natural vegetation and influencing factors in western Inner Mongolia [J]. Biodiversity Science, 2017, 25(12):1303-1312.
- [6] Körner C, Spehn E M. Mountain biodiversity: A global assessment [J]. Mountain Biodiversity: A Global Assessment, 2019:1-350.
- [7] Rahbek C, Borregaard M K, Antonelli A, et al. Building mountain biodiversity: Geological and evolutionary pro-

- cesses [J]. Science, 2019, 365(6458): 1114-1119.
- [8] Bai Jiaye, Shangguan Tieliang, Guo Donggang. Multi-dimensional diversity patterns of the subalpine meadow on Heyeping Peak, Luya Mountain, Shanxi Province, China [J]. Community Ecology, 2019, 20(2): 194-204.
- [9] 梁道省, 牟长城, 高旭, 等. 松嫩平原湿地植物群落多样性的环境梯度分布格局及控制因子[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 339-351.
- Liang Daosheng, Mu Changcheng, Gao Xu, et al. Environmental gradient distribution patterns of wetland plant community diversity and controlling factors in Songnen Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 339-351.
- [10] 潘婷婷, 陈林, 杨国栋, 等. 南京北部郊野森林群落物种多样性及其环境解释[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(6): 48-54.
- Pan Tingting, Chen Lin, Yang Guodong, et al. Species diversity of communities and environmental interpretation of the suburban forest in Northern Nanjing [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(6): 48-54.
- [11] 艾尼瓦尔·吐米尔, 维尼拉·伊利哈尔, 买买提明·苏来曼. 乌鲁木齐市苔藓植物多样性和分布及与环境因子的关系[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(8): 137-144.
- Tumur Anwar, Ilghar Winira, Sulayman Mamtimin. Diversity and distribution of bryophytes and their relationship with environmental factors in Urumqi [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(8): 137-144.
- [12] 陈廷贵, 张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究: I. 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(5): 406-411.
- Chen Tinggui, Zhang Jintun. Plant species diversity of Shenweigou in guandi mountains (Shanxi, China): I. richness, evenness and diversity indexes [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2000, 6(5): 406-411.
- [13] 聂莹莹, 李新娥, 王刚. 阳坡—阴坡生境梯度上植物群落 $\alpha$ 多样性与 $\beta$ 多样性的变化模式及与环境因子的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 73-79.
- Nie Yingying, Li Xin'e, Wang Gang. Variation mode of  $\alpha$  diversity and  $\beta$  diversity of plant community of different habitat gradients from south-facing slope to north-facing slope and its relation with different environmental factors [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(3): 73-79.
- [14] Večeřa M, Divišek J, Lenoir J, et al. Alpha diversity of vascular plants in European forests [J]. Journal of Biogeography, 2019, 46(9): 1919-1935.
- [15] Chang Geba Jisung. Biodiversity estimation by environment drivers using machine/deep learning for ecological management [J]. Ecological Informatics, 2023, 78: 102319.
- [16] Cai Lirong, Kreft H, Taylor A, et al. Global models and predictions of plant diversity based on advanced machine learning techniques [J]. New Phytologist, 2023, 237(4): 1432-1445.
- [17] 郝晨阳, 马秀枝, 李长生, 等. 短期增温对内蒙古大青山油松人工林土壤呼吸的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(11): 72-77.
- Hao Chenyang, Ma Xiuzhi, Li Changsheng, et al. Effects of short-term warming on soil respiration of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqingshan Mountains [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(11): 72-77.
- [18] 银朵朵, 王艳慧. 温带大陆性半干旱季风气候区植被覆盖度时空变化及其地形分异研究[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 1158-1167.
- Yin Duoduo, Wang Yanhui. Temporal and spatial changes of vegetation coverage and its topographic differentiation in temperate continental semi-arid monsoon climate region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1158-1167.
- [19] 玉苏普江·艾麦提, 玉苏甫·买买提, 阿里木江·卡斯木. 基于分类回归树分析的棉花种植面积提取: 以库、新、沙三县为例[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 187-191.
- Yusupujiang Aimaiti, Yusufu Maimaiti, Alimujiang kasimu. Cotton planted areas extraction based on the CART analysis: Taking three Counties (Kuqa, Xinha and Shaya) as examples [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(5): 187-191.
- [20] 吕婷, 刘玉萍, 亢俊铎, 等. 德令哈—哈拉湖沿线不同生境下群落的物种组成及其多样性[J]. 草地学报, 2021, 29(增刊1): 146-155.
- Lyu Ting, Liu Yuping, Kang Junhua, et al. Studies on composition and diversity of species based on different habitats along the Delingha-Hala Lake [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(Suppl.1): 146-155.
- [21] 魏嘉琪, 郑诚, 崔梦莹, 等. 黄土丘陵区生物多样性与生态系统功能响应关系的分析[J]. 草地学报, 2023, 31(5): 1490-1500.
- Wei Jiaqi, Zheng Cheng, Cui Mengying, et al. Analysis on the relationship between biodiversity and ecosystem function in loess hilly region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(5): 1490-1500.
- [22] 王鹏军, 刘永英, 佳依娜·别尔马汉, 等. 新疆巴尔鲁克山国家级自然保护区苔藓植物群落生态类型和组成[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(4): 146-152.
- Wang Pengjun, Liu Yongying, Jiayina Permanhan, et al. Ecological types and composition of bryophyte communities in the Barluk Mountain National Nature Reserve, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(4): 146-152.