

DOI:10.11918/202309006

基于增强回归树的东北地区冻土分布

张明虎¹, 张妍¹, 张中琼², 达虎³, 李亮¹, 贾玉诚¹

(1. 兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室, 兰州 730000; 3. 甘肃省计算中心, 兰州 730000)

摘要: 中国东北地区多年冻土是兴安-(外)贝加尔型多年冻土的重要组成部分, 兼具高纬度和高海拔冻土特征。多年冻土的存在和变化, 对区域寒区生态环境、水-碳循环、寒区工程设计与运行等都会产生直接影响。目前, 基于热边界条件的经验模型、半经验模型对多年冻土的分布面积存在高估现象, 且对气温以外的环境因素影响考虑不足。为更精准刻画区域多年冻土分布, 在区域调查和数据耦合的基础上, 获取影响区域多年冻土分布的地带性与非地带性因素的空间变化特征, 采用增强回归树模型进行模拟分析。结果表明: 地带性因素中, 纬度、经度与海拔的贡献度分别为 45.3%、42.4%、12.3%; 非地带性因素中: 气温(包含冻结指数和融化指数)、降水、水土条件、积雪与植被的贡献度分别为 46.4%、18.9%、13.1%、12.5%、9.1%。明晰了环境因素对兴安-(外)贝加尔型多年冻土发育和变化的贡献。与分类回归决策树作对比, 增强回归树模型分类精度达 0.91。该研究为区域冻土和相关领域研究提供了数据支持和参考。

关键词: 兴安-(外)贝加尔型多年冻土; 增强回归树; 环境因素; 贡献度; 多年冻土分布

中图分类号: TP399

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)03-0173-08

Permafrost distribution in northeast China based on boosted regression tree

ZHANG Minghu¹, ZHANG Yan¹, ZHANG Zhongqiong², DA Hu³, LI Liang¹, JIA Yucheng¹

(1. School of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Science and Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Computing Center, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The permafrost in northeastern China constitutes an important component of the Xing'an-(trans) Baikal permafrost, exhibiting characteristics of both high latitude and high altitude permafrost. The presence and dynamics of permafrost directly impact the ecological environment of the regional cold zone, water-carbon cycles, cold region engineering design, and operations. Currently, empirical and semi-empirical models based on thermal boundary conditions tend to overestimate the areal extent of permafrost and insufficiently consider environmental factors beyond temperature. To more accurately delineate the regional distribution of permafrost, this paper obtained the spatial variation characteristics of zonal and non-zonal factors influencing regional permafrost distribution through regional surveys and data integration and employed the boosted regression tree model for simulation and analysis. The results indicate that among the zonal factors, latitude, longitude, and altitude contribute 45.3%, 42.4%, and 12.3%, respectively. Among the non-zonal factors, temperature (including freezing and thawing indices), precipitation, soil-water conditions, snow cover, and vegetation contribute 46.4%, 18.9%, 13.1%, 12.5%, and 9.1%, respectively. This analysis clarifies the contributions of environmental factors to the development and dynamics of Xing'an-(trans) Baikal permafrost. Compared with a classification and regression decision tree, the boosted regression tree model achieves an accuracy of 0.91. This study provides data support and reference for regional permafrost research and related fields.

Keywords: Xing'an-(trans) Baikal permafrost; boosted regression tree; environmental factor; contribution; permafrost distribution

中国东北地区多年冻土位于欧亚大陆高纬度冻土区的南缘地带, 有着不同于高海拔和其他高纬度多年冻土的独特性^[1-2], 被称为兴安-(外)贝加尔

型(以下简称“兴贝型”)多年冻土。该类多年冻土温度高、厚度薄, 对气候变化敏感。随着中蒙俄经济走廊建设、沿边开放开发、新型城镇化建设等重要战

收稿日期: 2023-09-04; 录用日期: 2023-12-13; 网络首发日期: 2024-06-25

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240624.1556.014>

基金项目: 国家自然科学基金(42271492, 41771074); 冰冻圈科学与冻土工程全国重点实验室(CSFSE-FX-2504); 中国电力建设集团有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2023-35)

作者简介: 张明虎(1986—), 男, 副教授, 研究生导师

通信作者: 张中琼, zhongqionghao@163.com

略的实施,兴贝型多年冻土的时空分布和演化规律受到越来越多的关注。

现有对东北地区多年冻土分布的研究,主要依托特定工程,以钻探等点线方式进行^[3]。目前,冻土制图方法主要分两类:经验统计模型及数值模型^[4]。经验统计模型基于实测资料和地形等单个或者几个自然因素建立,其数据由点扩展到整个研究区域。点线数据结合气象站资料,包括年平均气温^[5]、冻结指数^[6]、土壤、植被、地形数据^[7]和辐射参数^[8]等,并使用一些模型(如 BTS 模型^[9]和冻结指数模型)研究东北地区多年冻土的分布和变化^[10-12],深化了对兴贝型多年冻土分布和变化的认识,所生成的冻土图为区域社会经济发展提供了基础数据。然而,2007年,孙广友根据现有数据划定的冻土界限与模型计算结果差异显著,模型对岛状零星冻土的刻画不够精准^[13]。气温对东北地区冻土变化的影响正在减弱,其他环境因素的影响正在逐年增强^[14]。现有模型以热边界条件为基础,考虑的其他环境因素有限,可能导致多年冻土分布范围的高估。随着科学技术的发展,特别是再分析数据集的出现,显著提高了区域基础数据的精度和质量,使得充分考虑影响兴贝型多年冻土分布和变化的地带性与非地带性因素成为可能,为深入研究区域多年冻土的分布和变化提供了条件。数据样本的扩大为机器学习方法的使用和环境因素的全面考量奠定了基础,其中增强回归树模型能够综合考虑多个影响多年冻土形成的因素,确定最具影响性的因素和阈值,并提供对各特征相对重要性的评估,有助于提高对兴贝型多年冻土的认识和理解。因此,本文使用增强回归树的方法,充分考虑更多环境因素对多年冻土的影响,建立分类决策树,以研究东北地区多年冻土的分布。

本文结合区域工程地质调查资料 and 前人研究成果,以分类回归决策树(CART 决策树)^[15-16]模型作为对比模型,使用增强回归树模型对兴贝型多年冻土的影响因素与空间分布进行研究,分析不同环境因素对多年冻土分布的影响以及阈值,建立相应的决策树,分析区域多年冻土的分布,为区域冻土及相关研究提供数据支持和参考。

1 研究区概况和数据

1.1 研究区概况

东北地区(39°45'N~53°33'N,113°27'E~135°5'E)是中国第二大多年冻土分布区,主要分布于大、小兴安岭和松嫩平原北部,在三江平原、呼伦贝尔高原和

45°N以南高山区有零星分布。区域多年冻土年平均地温为-3.0~0℃,多年冻土厚度在0~150m,活动层厚度大部分区域在1.5~3.5m,以少冰和多冰冻土为主,局部存在富冰和含土冰层。

1.2 指标选择

东北地区多年冻土受地带性因素和非地带性因素的综合影响。研究表明,东北地区多年冻土表现出纬度地带性,局部受高度地带性和经度地带性的影响,同时受到局地环境因素的影响^[17],且气温以外的环境因素的影响正在逐年增加。

地带性规律:东北地区多年冻土的厚度和地温自南向北呈现规律性变化,表现出明显的纬度地带性特征。同时,海拔高度的叠加作用使得东北地区多年冻土的分布格局更具独特性。在我国东北地区多年冻土的发育过程中,海拔高度是影响大片多年冻土形成与分布的重要因素。大片、大片-岛状的多年冻土主要分布在大兴安岭,而小兴安岭地区则以岛状和稀疏岛状多年冻土为主。整体上,大兴安岭地区的多年冻土发育程度高于小兴安岭地区,且后者的分布更突出地体现出经度地带性规律。

非地带性规律:多年冻土分布与年平均气温存在一定相关性^[18],大、小兴安岭地区位于温带和寒带交界处北部,不同类型多年冻土的分布与气温和地温年较差存在对应关系。冻结指数和融化指数反映了土壤冻结和融化的能力;积雪和降水通过保温和降温作用影响冻土分布,东北地区是我国第二大稳定积雪区,积雪厚度<50cm,积雪日数为34.40~176.50天,年降水量为120~1300mm;植被通过改变区域的辐射、拦截积雪和改变地表性质调控冻土的分布与发育^[19];水土条件(含浅层含水量、土壤密度)通过改变土体的导热性质影响冻土变化,东部区域的土壤湿度较高,阻碍地温升高,延缓冻土退化,而西部土壤湿度较低,容易使地温升高,冻土退化速度较快。

基于上述规律,选取指标如下:地带性因素包括纬度、经度与海拔;非地带性因素包括年平均气温、冻结指数、融化指数、年降水量、平均积雪厚度、积雪日数、植被盖度、土壤密度、土壤浅层含水量。

1.3 数据来源

1) 调查点数据

通过收集钻探、坑探等工程地质调查资料,收集到3032个钻孔资料,及漠河到北极村、月牙湖、额木尔河、嫩江等地区的物探资料与孙吴等地的坑探资料。结合文献记录的因冻土变化引起的道路损坏、冰缘地貌发育位置,完成调查点标记,调查资料

覆盖研究区的所有冻土区,提取环境因素数据作为模型训练的原始数据。

2) 遥感数据

数字高程模型 (DEM) 数据:融合 SRTM1 数据与 ASTER 数据(水平精度 30 m, 高程精度 16 m),生成 100 m 分辨率的 DEM,为研究提供地形资料。

归一化植被指数 (NDVI) 数据:利用 Landsat8,对影像数据进行辐射校正和大气校正预处理后,通过近红外和红光波段计算 NDVI。通过地形校正与时间归一化处理,采用多景数据替补及插值法去除云影,再经过 NDVI 镶嵌、投影变换、重采样、工作区制图等步骤,获取研究区 2010 ~ 2019 年 100 m 分辨率的 NDVI 数据,用以表征植被状况。

3) 再分析数据

气象数据:源于中国区域地面气象因素驱动数据集,时间范围为 1980 ~ 2018 年,时间分辨率为 3 小时,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。考虑地温对气温响应的滞后性,本文使用近 10 年的数据计算逐月和逐年平均气温,并基于 10 年月平均数据计算冻结指数和融化指数。

水分数据:来源于中国气象局陆面数据同化系统 (CLDAS-V2.0)。该数据覆盖亚洲区域,始于 2015 年,每日发布两次 (00:00 和 12:00),分辨率为 $0.06^\circ \times 0.06^\circ$,提取 0 ~ 200 cm 土壤湿度(垂直分为 5 层:0 ~ 5 cm, 0 ~ 10 cm, 10 ~ 40 cm, 40 ~ 100 cm, 100 ~ 200 cm),计算 2 m 以内土壤湿度的平均值。

积雪数据:源于中国雪深时间序列数据集,时间跨度为 1979 ~ 2021 年^[20],单位为 cm,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,计算平均积雪厚度和积雪日数。

4) 其他数据

采用 1:500 万的中国第四纪地质图和工程地质图,通过数据属性重组,获取研究区基岩与第四纪沉积物的工程地质分类信息。将区内岩土类型划分为:黏性土(不含粉质黏土)、粉质黏土、砂类土、砾类土、黏性土混砂类土、黏性土混砾类土、粉质黏土混砂类土、粉质黏土混砾类土、砂类土混砾类土、火成岩、火成变质岩、沉积岩、沉积火成岩与沉积火成变质岩^[21]。根据工程地质手册和水分条件确定各土类的密度,并形成土壤密度的空间分布数据,为研究提供土性条件。

2 研究方法

基于东北地区 3 032 个站点的观测数据,利用增强回归树模型对东北地区多年冻土进行分类,并使用 CART 决策树作为对比模型。增强回归树模型

具有非参数性、强解释性和鲁棒性等优点,能有效处理数据噪声和异常值,避免过拟合问题。

增强回归树是一种基于分类回归树的机器学习算法,与传统回归方法寻求单一“最优”模型不同,增强回归树结合大量相对简单的树模型优化预测性能^[22]。分类回归树是一种递归分解方法,主要应用于二元分类问题,通过构建由多个节点构成的决策树模型进行预测(图 1)。增强回归树通过迭代训练一系列回归树,预测目标变量,并使用梯度提升算法增强这些树的预测性能,得到更加准确的分类结果^[23]。

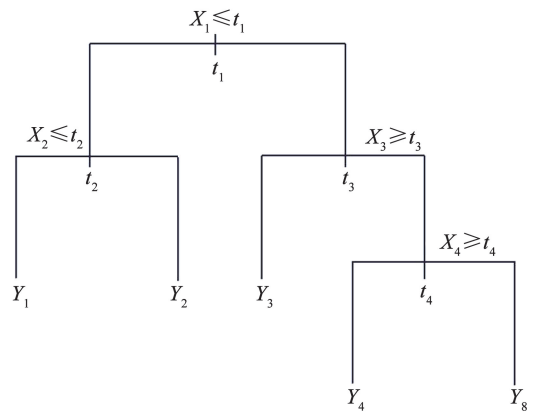


图 1 决策树模型

Fig. 1 Decision tree model

2.1 核心公式

回归树预测:在第 m 次迭代中,增强回归树模型训练一个回归树拟合当前残差。回归树的预测公式为

$$f_m(x) = f_{m-1}(x) + \gamma T_m(x) \quad (1)$$

式中: $f_m(x)$ 为模型在第 m 次迭代中对样本 x 的预测值; $f_{m-1}(x)$ 为模型前 $m-1$ 次迭代对样本 x 的累计预测值; γ 为学习率,用于控制每棵树的贡献度; $T_m(x)$ 为第 m 棵回归树对样本 x 的预测结果。

残差计算:当前模型的残差公式为

$$r_m(x) = y(x) - f_{m-1}(x) \quad (2)$$

式中: $y(x)$ 为样本 x 的实际目标值。

2.2 计算步骤

在每一轮迭代中,先计算当前模型预测值与实际值之间的残差,然后将残差作为新的目标值,训练一个新的弱回归树模型,最后通过加权融合方式将该树与已有模型组合,形成更优的集成预测。

增强回归树模型可以处理非线性问题,适用于高维度、大规模数据,并能量化每个预测变量的相对重要性,使模型结果更易于解释,可以更好地理解模型的预测结果,制定更为科学合理的决策。

3 增强回归树模型的建立和验证

3.1 冻土分布分类树的确定

相对于传统单一的决策树模型,增强回归树模型可以更好地处理数据。对于涉及多个地带性因素以及非地带性因素的东北地区多年冻土分布问题,增强回归树模型可以更好地处理因素间的复杂关系,提高模型分类的准确性。

研究以纬度、经度、海拔、年平均气温、融化指数、冻结指数、年降水量、积雪日数、平均积雪厚度、浅层含水量、土壤密度以及植被盖度为预测变量,以站点是否存在多年冻土为响应变量,构建增强回归树模型。模型拟合使用 R 语言(4.2.2 版本)gbm 包和 Elith 的函数包^[22]。

增强回归树模型中的重要参数包括:学习率(learning rate, lr),用来控制每棵树的贡献程度,较小的 lr 会使模型更加稳定,但需要更多的树;树的复杂度(tree complexity, tc),用来控制每棵树的分裂次数,较大的 tc 会增加模型复杂度;树的数量(n. trees, nt),影响模型稳定性与计算开销。为寻求最优参数组合以最小化预测误差,测试了不同 lr(0.1 ~ 0.001)与 tc(5, 7, 9, 11)下,预测偏差随 nt(100 ~ 10 000)的变化情况。

根据增强回归树模型的预测偏差与决策树数量的关系(图 2)可知,lr = 0.05 时,模型所需树量较少,但偏差曲线在达到最小值后快速上升,表明发生过拟合;当 lr = 0.01 时,模型约在 1 800 ~ 3 000 次迭代后达到最小预测偏差(0.43 ~ 0.44);当 lr = 0.005 时,约在 6 000 ~ 8 000 次迭代后达到最小预测偏差(0.42 ~ 0.43);当 lr = 0.001 时,大于 10 000 次迭代后达到最小偏差。综合考虑不同 lr 和 tc 下模型预测偏差,选定 lr = 0.005, tc = 9 构建增强回归树模型。

在 tc = 9, lr = 0.005 的情况下,对数据进行交叉验证,并生成增强回归树模型。通过迭代生成多棵分类树后,选取了一棵涵盖大部分要素且最能反映东北多年冻土实际分布范围的分类树作为代表(图 3)。该树的影响因素包括:冻结指数、经度、植被盖度、积雪日数、土壤密度、年平均气温及年降水量等。虽然并没有包含纬度、海拔、融化指数、浅层含水量与积雪深度,但多年冻土作为寒区自然生态

环境的重要组成部分,其生成、演化和分布格局受气候、植被、景观等多重因素影响。在东北地区,年平均气温与降水量的空间格局本身已隐含了纬度、经度以及海拔的影响,且非地带性因素之间也存在相互影响,共同影响着多年冻土的分布和变化。

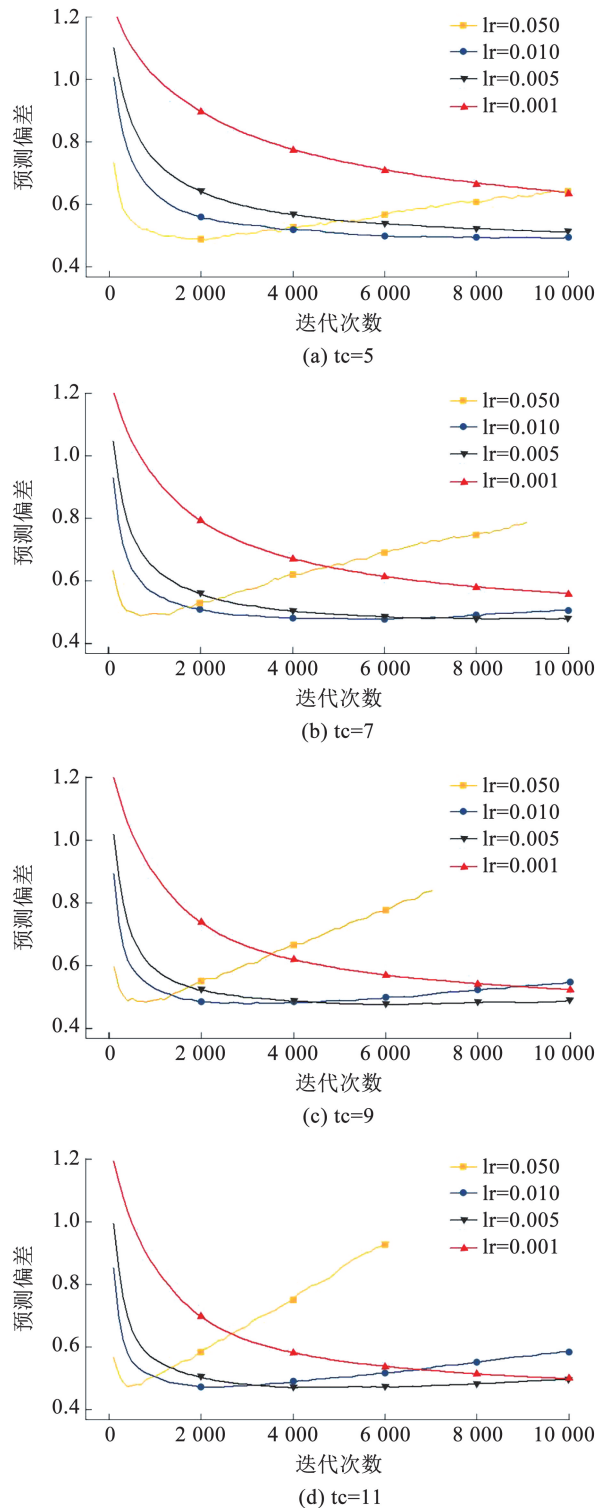


图 2 增强回归树模型的预测偏差与决策树数量的关系

Fig. 2 Relationship between prediction bias of boosted regression tree model and number of decision trees

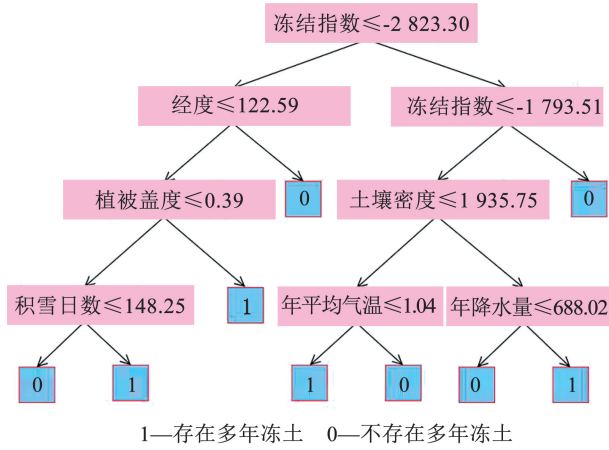


图3 增强回归树-多年冻土分类阈值确定

Fig. 3 Boosted regression tree-determination of classification threshold for permafrost

3.2 模型验证与对比

通过比较准确率 (Accuracy)、Kappa 系数、AUC 值、 F_1 值这 4 个指标来评估模型性能。

准确率是指分类模型正确预测的样本数占总样本数的比例,衡量模型的整体分类性能;Kappa 系数考虑了随机分类的影响,对不平衡数据集更具鲁棒性,取值范围为 $[-1, 1]$,越接近 1 表示一致性越好;AUC 是衡量二分类模型性能的常用指标,表示 ROC 曲线下的面积,取值范围为 $[0, 1]$,越接近 1 表示模型性能越好,越接近 0.5 表示模型性能越接近随机分类,而低于 0.5 则表示模型性能较差; F_1 值是精确率 (Precision) 和召回率 (Recall) 的调和平均数,用于综合评估模型对正负类别的识别能力。

各个指标的计算公式如下:

$$A = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (3)$$

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (4)$$

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{r_i + r_{i-1}}{2} (f_i - f_{i-1}) \quad (5)$$

$$F = \frac{2pr}{p + r} \quad (6)$$

相关中间量定义如下:

$$r = \frac{a}{a + c} \quad (7)$$

$$f = \frac{b}{b + d} \quad (8)$$

$$p = \frac{a}{a + b} \quad (9)$$

$$P_e = \frac{(a + b)(a + c) + (b + d)(c + d)}{(a + b + c + d)^2} \quad (10)$$

式中:A 为准确率 (Accuracy);K 为 Kappa 系数;U 为

AUC 值,表示 ROC 曲线下面积; F 为 F_1 指标; a 、 b 、 c 、 d 分别为 4 类样本数量 (TP、FP、FN、TN); p 为精确率 (Precision); r 为正类识别率 (TPR); f 为假正率 (FPR); P_o 为模型预测一致概率; P_e 为随机预测条件下的一致概率。

模型对比结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,增强回归树模型的准确率为 0.91,显著高于 CART 决策树的 0.82;增强回归树模型的 Kappa 值、AUC 值与 F_1 值也都全面优于 CART 决策树模型,这意味着增强回归树模型的性能更好,更适用于东北地区多年冻土的分类识别。

表 1 增强回归树模型与 CART 策树性能对比

Tab. 1 Performance comparison of boosted regression tree model and CART

分类方法	Accuracy	Kappa 系数	AUC 值	F_1 值
增强回归树	0.91	0.81	0.95	0.86
CART 决策树	0.82	0.66	0.88	0.76

4 结果与讨论

4.1 影响因子分析

图 4 为各影响因子与冻土存在概率的拟合关系曲线,图 5 进一步展示了各影响因子与冻土分布的关系以及相对重要性。根据地带性因素分析,东北地区多年冻土主要出现在以下范围:纬度 $43.57^\circ\text{N} \sim 46.67^\circ\text{N}$ 、 $50.49^\circ\text{N} \sim 50.63^\circ\text{N}$ 及 $52.94^\circ\text{N} \sim 53.01^\circ\text{N}$;经度 $120.16^\circ\text{E} \sim 120.65^\circ\text{E}$ 、 $121.23^\circ\text{E} \sim 122.59^\circ\text{E}$ 及 $124.41^\circ\text{E} \sim 129.43^\circ\text{E}$;海拔 $494.79 \sim 643.97 \text{ m}$ 及 $1052.72 \sim 1371.67 \text{ m}$ 。从非地带性因素来看,年降水量介于 $419.51 \sim 547.56 \text{ mm}$ 与 $608.54 \sim 1084.15 \text{ mm}$ 时,东北地区多年冻土分布较多;当年平均气温在 $-4.66 \sim -2.25^\circ\text{C}$ 之间时,东北地区多年冻土分布较多,且当年平均气温在 $-3.93 \sim 1.87^\circ\text{C}$ 范围内,气温与冻土存在概率整体呈现负相关,表明升温可能会加速多年冻土的退化。冻结指数在 $-3339.53 \sim -3140.29^\circ\text{C} \cdot \text{d/a}$ 及 $-2214.19 \sim -1369.44^\circ\text{C} \cdot \text{d/a}$,融化指数在 $1467.98 \sim 1933.88^\circ\text{C} \cdot \text{d/a}$ 、 $2157.02 \sim 2266.68^\circ\text{C} \cdot \text{d/a}$ 及 $2652.89 \sim 2727.27^\circ\text{C} \cdot \text{d/a}$,植被盖度在 $0.01 \sim 0.15$ 及 $0.20 \sim 0.40$,浅层含水量在 $0.17\% \sim 0.18\%$ 及 $0.22\% \sim 0.23\%$,平均积雪厚度在 $16.51 \sim 35.00 \text{ cm}$,积雪日数在 $139.31 \sim 160.15 \text{ d}$ 时,有利于多年冻土发育与保存。土壤密度曲线整体波动较小,表明其对多年冻土存在与否的影响相对较小。

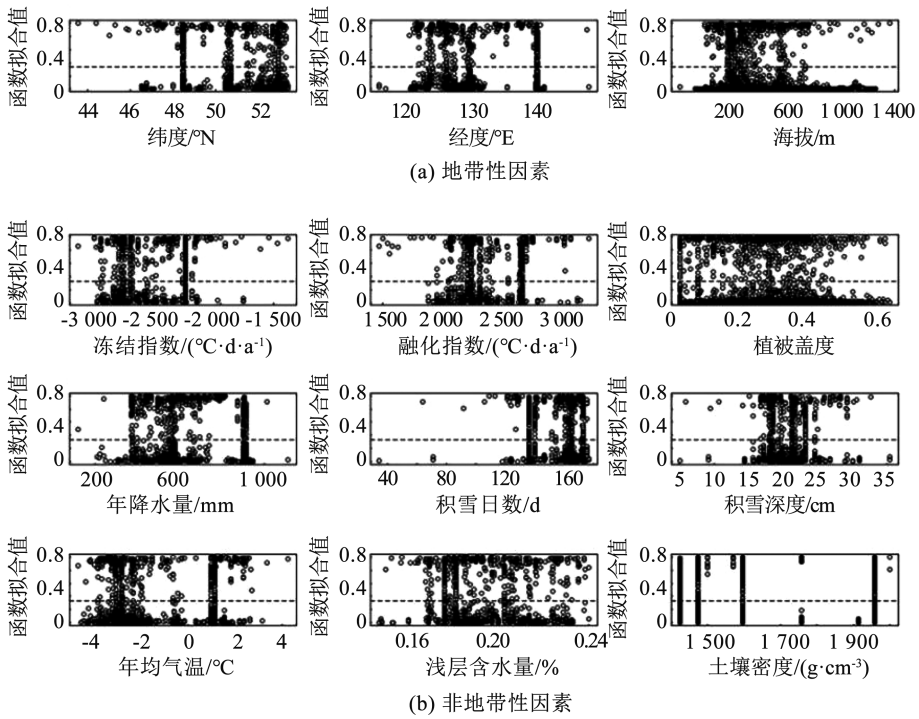


图 4 影响因素拟合值

Fig. 4 Fitted values of influencing factors

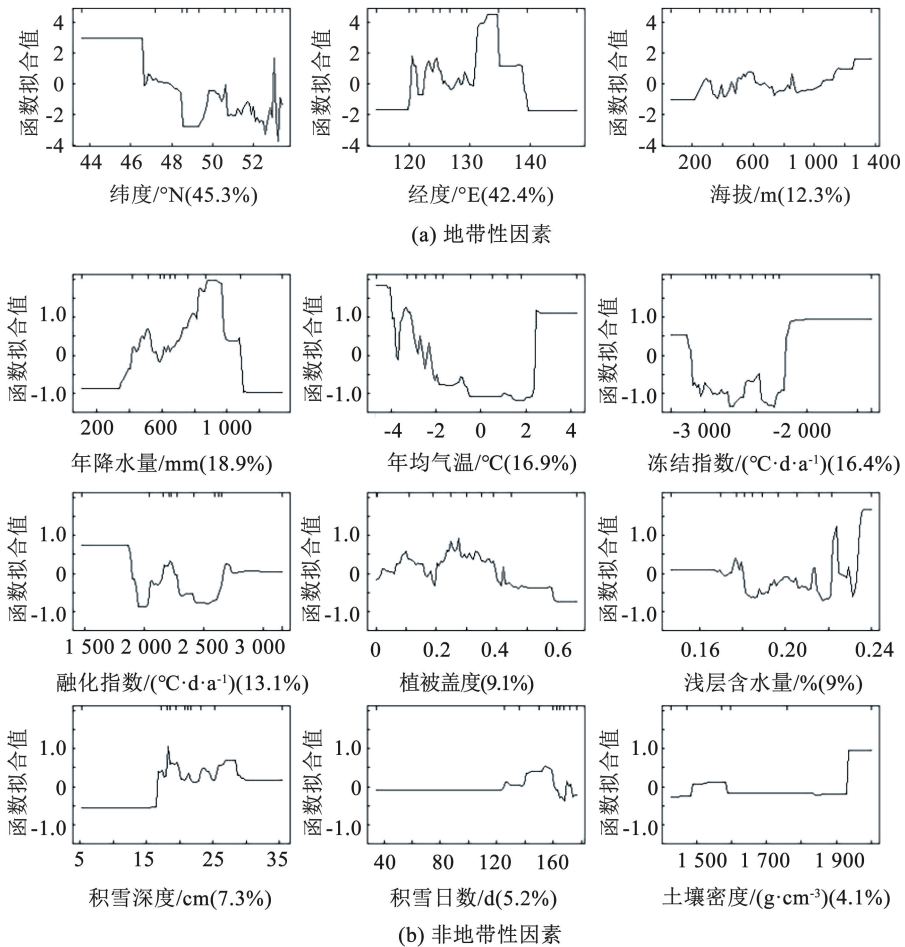


图 5 多年冻土分布与各因素之间的关系

Fig. 5 Relationships between permafrost distribution and various factors

4.2 东北地区多年冻土分布分析

基于构建的增强回归树分布阈值,利用 PyCharm 软件和 Python 编程语言对研究地区的地带性因素和非地带性因素的空间数据进行精确分类判定,生成冻土存在与否的空间分类数据,并在 ArcGIS 中进行可视化制图,如图 6 所示。由图可知,多年冻土主要分布于大、小兴安岭和松嫩平原北部。模拟的冻土分布范围与 TTOP 等模型的计算结果接近^[24-25],但是 TTOP 等以热边界条件为主的模型在刻画冻土融区方面存在局限。增强回归树的分类结果刻画了

47°N 以南、120°E 以西区域的多年冻土分布情况,并且精细刻画了大兴安岭中段以及小兴安岭局部的冻土融区,同时提供了小兴安岭地区更详细的多年冻土分布信息。相比之下,CART 决策树的分类结果较差。这是因为增强回归树模型是一种集成学习模型,通过迭代优化能够更好地处理复杂数据模式与非线性关系,从而提高模型的分类效果;而 CART 决策树是一种经典的分类算法,在面对复杂问题时,其学习能力有限,容易产生欠拟合。

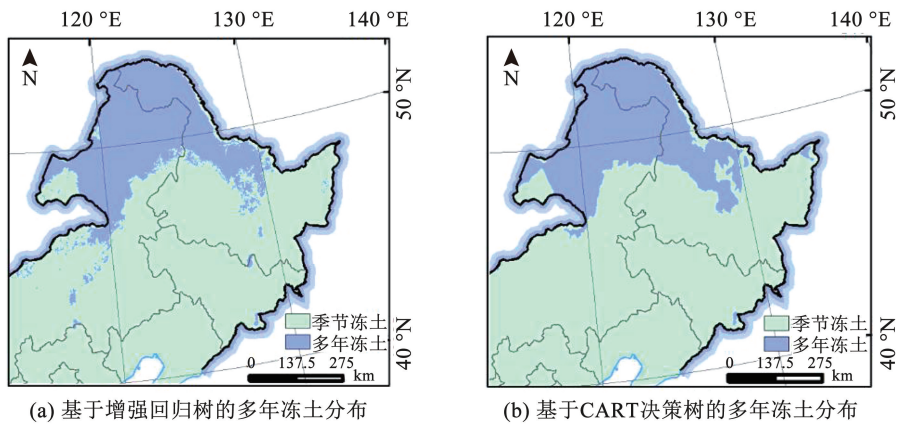


图 6 多年冻土分布情况

Fig. 6 Distribution of permafrost

5 结 论

为了研究东北地区多年冻土的分布情况,本研究引入基于机器学习的增强回归树方法,系统考察了多环境因子的影响,并对冻土分布进行了模拟研究。主要结论如下:

1)对东北地区多年冻土分布影响最大的地带性因素是纬度,其次是经度、海拔。在非地带性因子中,气温是最大影响因素,其次是降水、水土条件、积雪、植被盖度。综合考虑较多的环境因素能够更准确地刻画东北地区多年冻土的分布情况。

2)环境因素对多年冻土分布的影响具有区间差异性。当年降水量为 419.51 ~ 547.56 mm 或 608.54 ~ 1084.15 mm,年平均气温为 -4.66 °C ~ -2.25 °C,植被盖度为 0.01 ~ 0.15 或 0.20 ~ 0.40,浅层含水量为 0.17% ~ 0.18% 或 0.22% ~ 0.23%,平均积雪厚度为 16.51 ~ 35.00 cm,积雪日数为 139.31 ~ 160.15 天时,最有利于东北地区多年冻土的发育与保存。

3)模拟结果显示,东北地区多年冻土主要分布在大、小兴安岭和松嫩平原北部,并且在 50°N 以北、120°E 以西区域存在多年冻土融区。使用增强回归树模型对东北地区多年冻土分类的精度达到

0.91。未来随着训练样本的增加,模型精度有望进一步提升,对融区等细节特征的刻画也将更加精确。

参考文献

- [1]周幼吾. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000
ZHOU Youwu. Chinese frozen soil[M]. Beijing: Science Press, 2000
- [2]QIAO Y, ZHAO G, SHI Y, et al. Numerical simulation of influence of the Qinghai-Tibet Plateau rising rates on formation of permafrost [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(6): 901. DOI: 10.1111/j.1755-6724.2010.00328.x
- [3]WANG G, HU H, LI T. The influence of freeze-thaw cycles of active soil layer on surface runoff in a permafrost watershed[J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3-4): 438. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.05.016
- [4]常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 大兴安岭北部多年冻土监测进展 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 93
CHANG Xiaoli, JIN Huijun, HE Ruixia, et al. Progress of permafrost monitoring in northern Greater Xing'an Mountain [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 93. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0011
- [5]HE R X, JIN H J, MA W, et al. Recent changes of permafrost and cold regions environments in the northern part of northeastern China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 525. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2009.0009
- [6]RISEBOROUGH D, SHIKLOMANOV N, ETZELMÜLLER B, et al. Recent advances in permafrost modelling [J]. Permafrost and

- Periglacial Processes, 2008, 19(2): 137. DOI: 10.1002/ppp.615
- [7] FUNK M, HOELZLE M. A model of potential direct solar radiation for investigating occurrences of mountain permafrost[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1992, 3(2): 139. DOI: 10.1002/ppp.3430030211
- [8] ANISIMOV O A, NELSON F E. Permafrost distribution in the Northern Hemisphere under scenarios of climatic change[J]. Global and Planetary Change, 1996, 14(1-2): 59. DOI: 10.1016/S0921-8181(96)00011-0
- [9] 常晓丽, 金会军, 孙海滨, 等. 积雪底部温度(BTS)方法在冻土分布调查和模型研究中的应用: 研究进展[J]. 冰川冻土, 2010(4): 741
CHANG Xiaoli, JIN Huijun, SUN Haibin, et al. Application of snow bottom temperature (BTS) method in frozen soil distribution investigation and model research: Research progress[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010(4): 741. DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2010.0107
- [10] WILLIAMS D J, BURN C R. Surficial characteristics associated with the occurrence of permafrost near Mayo, central Yukon Territory, Canada[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1996, 7(2): 193. DOI:10.1002/ppp.3430070206
- [11] LACELLE D, DOUCET A, CLARK I D, et al. Acid drainage generation and seasonal recycling in disturbed permafrost near Eagle Plains, northern Yukon Territory, Canada[J]. Chemical Geology, 2007, 243(1-2): 157. DOI:10.1016/j.chemgeo.2007.05.021
- [12] OSTERKAMP T, ROMANOVSKY V. Evidence for warming and thawing of discontinuous permafrost in Alaska[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1999, 10(1): 17. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1530(199903)10:1<17::AID-PPP524>3.0.CO;2-2
- [13] 孙广友, 于少鹏, 王海霞. 大小兴安岭多年冻土的主导成因及分布模式[J]. 地理科学, 2007, 27(1): 7
SUN Guangyou, YU Shaopeng, WANG Haixia. The dominant genesis and distribution pattern of permafrost in the Greater and Lesser Xing'an Mountains[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(1): 7. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2007.01.68
- [14] YU Z, WANG G, WANG Y. Response of biomass spatial pattern of alpine vegetation to climate change in permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7(4): 301. DOI:10.1007/s11629-010-2094-7
- [15] 姚亮, 周晏. 基于决策树算法的地灾数据可用性分类研究[J]. 信息技术与信息化, 2023(6): 44
YAO Liang, ZHOU Yan. Research on usability classification of land disaster data based on decision tree algorithm[J]. Information Technology and Informatization, 2023(6): 44
- [16] 蒙张. 基于 CART 决策树方法的各拉丹冬地区冰川变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2018
MENG Zhang. Study on glacier change in the Geladandong region based on CART decision tree method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018
- [17] LI X, JIN H, SUN L, et al. Climate warming over 1961-2019 and impacts on permafrost zonation in Northeast China[J]. Journal of Forestry Research, 2021, 33(3): 1. DOI:10.1007/s11629-021-6884-9
- [18] ZHANG Z Q, LI M, WEN Z, et al. Degraded frozen soil and weakened frost heave in China due to climate warming[J]. Science of the Total Environment, 2023, 893: 164914. DOI:10.1016/j.scitotenv.2023.164914
- [19] GUO W, LIU H, ANENKHONOV A O, et al. Vegetation can strongly regulate permafrost degradation at its southern edge through changing surface freeze-thaw processes[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 252: 10. DOI:10.1016/j.agrformet.2018.02.016
- [20] 车涛, 戴礼云, 李新. 中国雪深长时间序列数据集(1979-2021)[DB/OL]. 时空三极环境大数据平台, 2015[2023-09-04]
CHE Tao, DAI Liyun, LI Xin. Long-term series of daily snow depth dataset in China (1979-2021)[DB/OL]. Big Earth Data Platform for Three Poles, 2015[2023-09-04]. https://doi.org/10.11888/Cryos.tpd.270084
- [21] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1987
TANG Daxiong. Engineering geotechnics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987
- [22] ELITH J, LEATHWICK J R, HASTIE T. A working guide to boosted regression trees[J]. Journal of Animal Ecology, 2008(4): 77. DOI:10.1111/j.1365-2656.2008.01390.x
- [23] 李红琴, 张亚茹, 张法伟, 等. 增强回归树模型在青藏高原高寒灌丛通量数据插补中的应用[J]. 植物生态学报, 2022, 46(12): 1437
LI Hongqin, ZHANG Yaru, ZHANG Fawei, et al. Application of enhanced regression tree model in data imputation of alpine shrubland flux data on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Plant Ecology, 2022, 46(12): 1437. DOI:10.17521/cjpe.2022.0134
- [24] ZHANG Z Q, LI M, WANG J, et al. A calculation model for the spatial distribution and reserves of ground ice: A case study of the Northeast China permafrost area[J]. Engineering Geology, 2023, 315: 107022. DOI:10.1016/j.enggeo.2023.107022
- [25] LI X Y, JIN H J, SUN L, et al. TTOP-model-based maps of permafrost distribution in Northeast China for 1961-2020[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2022, 33(4): 425. DOI:10.1002/ppp.2095

(编辑 丁晓清)