

河南省山地空气负氧离子预测模型研究

刘玉珠, 张玮

(河南省气象服务中心, 河南 郑州 450003)

摘要:利用河南省西部、南部山区 13 个县区的 34 个空气负氧离子站监测数据和中分辨率成像光谱仪 (MODIS, moderate resolution imaging spectroradiometer) 植被指数产品数据, 使用相关分析、随机森林回归模型等方法, 分析了影响河南省山地空气负氧离子浓度的主要气象因子和环境因子, 并建立预测模型。结果表明, 影响河南省山地负氧离子浓度日变化的主要气象因子是温度和相对湿度, 主要环境因子是 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度和植被覆盖。通过建立负氧离子浓度预测模型, 实现了负氧离子预报的定量化, 为地区空气质量评价提供参考。

关键词: 负氧离子; 气象因子; 环境因子; 预测模型

中图分类号: P49

文献标志码: A

文章编号: 1002-4026(2023)05-0121-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



A forecast model of air negative oxygenion in mountainous

area of Henan Province

LIU Yuzhu, ZHANG Wei

(Henan Province Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003, China)

Abstract : Using the monitoring data of 34 air negative oxygenion stations and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer vegetation index product data of 13 counties in the western and southern mountainous areas of Henan Province, correlation analysis and random forest regression model were used to analyze the main meteorological and environmental factors affecting the concentration of negative oxygenion in these areas to establish a negative oxygenion concentration forecasting model. Results showed that temperature and relative humidity were the main meteorological factors affecting the diurnal variation of negative oxygenion concentration, concentration of $PM_{2.5}$, PM_{10} and vegetation coverage were the main environmental factors. By establishing the negative oxygen ion concentration forecasting model, the quantification of negative oxygen ion prediction was realized. This study provides reference for regional air quality evaluation.

Key words : negative oxygenion; meteorological factor; environmental factor; forecast model

收稿日期: 2023-01-31

基金项目: 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金(KM202121)

作者简介: 刘玉珠(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为生态旅游服务。E-mail: lyz.mail@163.com

空气负氧离子指的是由于获得成对电子而带负电荷的氧气离子^[1],在自然条件下,负氧离子的产生方式通常包括大气电离、辐射、树木枝叶尖端放电、植物光合作用产生光电效应、水的勒纳德效应等^[2]。相关研究表明,空气负氧离子可以降解、中和、吸附空气中的有毒物质和污染悬浮物,具有改善空气质量、提高免疫力、促进人体健康的作用,因此又有“空气维生素”“长寿素”等美誉^[3-5]。受地理空间位置、自然环境、植被覆盖、人类活动等多方面的影响,不同条件下,空气负氧离子浓度会有显著的差异^[6-9]。

作为评价人居环境中空气质量的一项重要指标^[2],负氧离子浓度已经成为游客选择休闲养生旅游目的地的一项重要参考因子,对地方发展自然生态旅游有一定的导向作用。近年来,国内外学者在空气负氧离子时空分布、浓度影响因子等方面对不同地区的空气负氧离子开展了一系列研究。Sawant 等^[10]、Ling 等^[11]、Wang 等^[12]等研究了不同室外环境下、不同影响因子下的大气负氧离子浓度变化。从菁等^[13]、王宝等^[14]、顾小丽等^[15]、张勇等^[16]等分别对大连市、玉溪市、宁波市、峨眉山景区等地区的负氧离子分布状况进行分析,并结合各地具体环境条件和气象条件建立了相应的负氧离子浓度预测模型。

负氧离子浓度是“中国天然氧吧”创建活动重要的创建指标之一^[17],河南省积极开展创建“中国天然氧吧”工作,在三门峡、洛阳、平顶山、南阳、信阳等地共计安装 34 个负氧离子自动监测站,分布于 13 个县区,实现了逐日逐小时自动监测,为科学分析豫西、豫南山区的负氧离子浓度特征提供了数据支持。本文依据自动监测站数据对豫西、豫南山区的负氧离子浓度变化进行分析,确定其与气象因子、环境因子之间的关系,并建立山地负氧离子浓度预测模型,以期对河南省山地负氧离子浓度定量化预报及山地生态旅游规划、生态保护等提供科学依据。

1 资料与方法

1.1 资料选取

研究采用 2021 年 4 月至 2022 年 3 月卢氏县、嵩县、鲁山县、西峡县、新县等 13 个县区位于山区的 34 个负氧离子自动监测站的逐小时监测数据,包括负氧离子浓度(个/cm³)、温度(℃)、相对湿度(%)、风速(m/s)、风向、PM₁₀浓度(mg/m³)、PM_{2.5}浓度(mg/m³)数据,监测站所在县区采用 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer,中分辨率成像光谱仪)植被指数产品数据。

空气负氧离子浓度以每立方厘米空气中离子迁移率 $\geq 0.4\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的离子数目来表示^[18]。负氧离子监测仪器型号包括成都晴好科技有限公司的 RYQ-7 型、QH-001 型、FF-NOI 型等。仪器采用国际通行的吸入式电容收集法对大气中负离子浓度进行测量。研究中对监测数据进行了质量控制,剔除异常值和缺测值,运用算术平均的方法,对负氧离子进行小时、日、季节等不同时间尺度的计算统计^[19]。

1.2 研究方法

按监测站所处的下垫面环境,将 34 个负氧离子监测站分为两类进行分析,一类区域为风景区,二类区域为居民区,其中风景区监测站有 20 个,居民区监测站有 14 个。对负氧离子浓度(个/cm³)与温度(℃)、相对湿度(%)、风速(m/s)等气象因子以及 PM₁₀浓度(mg/m³)、PM_{2.5}浓度(mg/m³)、NDVI(归一化差异植被指数,normalized difference vegetation index)等环境因子进行皮尔逊相关性分析,探讨负氧离子浓度与气象因子、环境因子之间的关系。选取具有代表性的特征观测参数,运用随机森林(random forest)回归建立河南山地负氧离子浓度的预测模型。

随机森林属于集成学习算法的一种,是一组由决策子树 $\{h(x, \theta_t), t = 1, 2, \dots, T\}$ 构成的组合模型。其中 x 为自变量, θ_t 为服从独立同分布的随机变量, T 为决策子树的个数。通过样本选取随机性和特征选取随机性,对自助法样本单独构建决策子树,然后结合集成学习思想,将各决策子树的结果按照一定规则汇总作为最后输出^[20]。

随机森林回归模型预测结果为:

$$\hat{h}(x) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \{h(x, \theta_i)\} \quad , \quad (1)$$

式(1)中, $\hat{h}(x)$ 表示回归预测结果, $h(x, \theta_i)$ 表示基于 x 和 θ 的输出。

2 结果与分析

2.1 负氧离子日变化规律

对 2021 年 4 月至 2022 年 3 月的负氧离子监测站点的逐小时浓度进行算术平均,负氧离子变化特征见图 1。可以看出空气负氧离子有明显的日变化规律,而且风景区和居民区的日变化趋势表现一致,总体上,负氧离子浓度分布日变化规律呈 U 型,表现为一天之中清晨的负氧离子浓度最高,其次是夜间,午后负氧离子浓度相对最低。考虑是由于中午前后,随着温度的升高和湿度的降低,植物光合作用的效率下降,同时午后太阳辐射减少,从而造成负氧离子的浓度降低,而傍晚之后,人类活动逐渐减少,负氧离子浓度则会逐渐回升。研究区域内风景区负氧离子浓度的变化范围介于 1 719~1 955 个/cm³,居民区负氧离子浓度的变化范围介于 1 515~1 733 个/cm³。根据世界卫生组织划定的清新空气负氧离子浓度1 000~1 500 个/cm³的标准^[18],河南山地空气中负氧离子浓度达到了空气清新的等级。由于风景区的植被覆盖普遍高于居民区,并且人类活动相对较少,故风景区的空气负氧离子浓度一般会高于居民区。

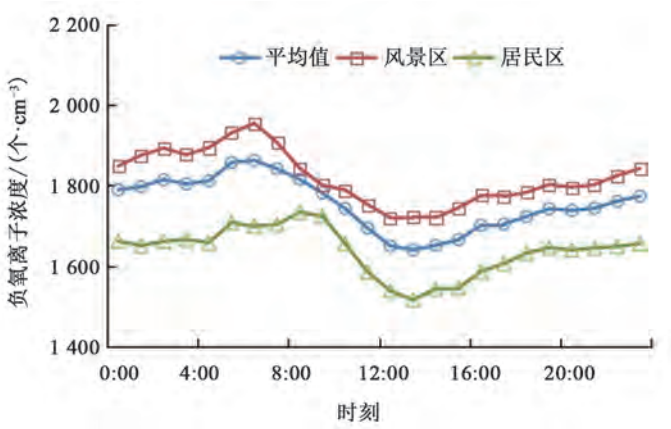


图 1 河南省山地负氧离子日平均浓度变化
Fig.1 Daily mean concentration of negative oxygen ion
in mountainous area of Henan

2.2 负氧离子季节变化规律

根据河南省气候特征,每年 3 至 5 月为春季,6 至 8 月为夏季,9 至 11 月为秋季,12 月、1 月和 2 月为冬季。对负氧离子监测数据进行算术平均,浓度季节变化特征见图 2。研究区域负氧离子平均浓度季节变化由低到高为冬季、春季、秋季、夏季,其中风景区负氧离子季节差异显著,夏季的负氧离子浓度明显高于冬季。这与夏季雷雨天气多、草木繁茂吸收气溶胶粒子多有关,相反冬季降水量较少空气干燥,植物枯黄落叶,光合作用和生物放电能力都明显下降,造成了冬季负氧离子浓度较低的情况。研究也发现居民区的负氧离子浓度季节变化并不明显,考虑和居民区人类活动密集、植被绿地较少、汽车尾气等造成空气质量不佳等因素有关,由于目前样本有限,未来可做进一步研究。

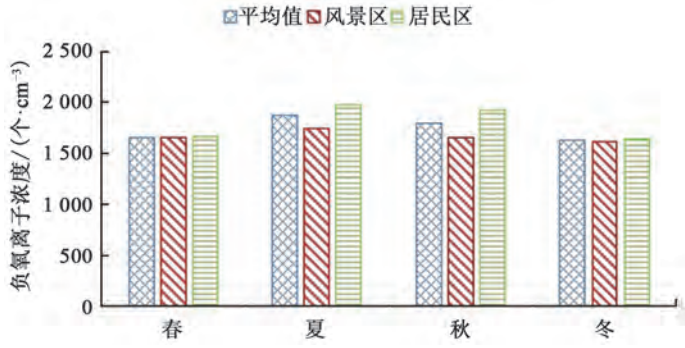


图 2 河南省山地负氧离子季节平均浓度变化
Fig.2 Seasonal mean concentration of negative oxygen ion
in mountainous area of Henan

2.3 负氧离子浓度变化相关性分析及预测模型

2.3.1 负氧离子浓度变化相关性分析

对空气负氧离子平均浓度日变化和主要气象因子相关性进行分析,相关系数见表 1,结果表明空气负氧离子同温度、相对湿度的相关性较好,同风速、风向的相关性较弱,并且存在明显的季节差异。在季节尺度上,不同季节的空气负氧离子浓度日变化与气温日变化呈负相关,相关系数均通过 0.01 显著性检验。这与吴楚材^[6]、从菁^[13]、顾小丽^[15]等的研究结论一致,主要原因或在于随着环境温度的升高,污染物扩散下降的过程中易吸附负氧离子,造成了负氧离子浓度的下降^[21]。空气负氧离子浓度日变化与相对湿度呈正相关,随着相对湿度增加,不同季节的空气负氧离子浓度均增加,尤其对春季而言,空气负氧离子和相对湿度的相关系数达到 0.87。这是因为负氧离子的主要存在形式是水分子和带多余电荷的分子的结合体,比如 $O_2^-(H_2O)_n$,或 $OH^-(H_2O)_n$ 、 $CO_4^-(H_2O)_2$,所以当环境中达到一定湿度才会形成负氧离子,相对湿度较大时,有利于空气中负氧离子浓度增加。此外风速和风向对空气负氧离子的影响较小,主要差异来自季节变化。

表 1 全年和各季节负氧离子浓度日变化与主要气象因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between annual and seasonal diurnal variation of negative oxygen ion concentration and major meteorological factors

时间段	相关性			
	温度	相对湿度	风速	风向
全年	0.33 **	0.41 **	-0.15 **	0.05 **
春季	-0.36 **	0.87 **	-0.08 **	-0.08 **
夏季	-0.29 **	0.47 **	-0.05 ⁻	0.01 ⁻
秋季	-0.11 **	0.06 **	0.03 ⁻	0.23 **
冬季	-0.33 **	0.52 **	0.08 **	-0.09 **

注: ** 表示通过 0.01 显著性检验, - 表示未通过检验。

分析空气负氧离子浓度日变化和不同环境因子的相关性,发现空气负氧离子同 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度及归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)的相关性较好,通过 0.01 显著性检验,但是存在明显的季节差异。全年负氧离子浓度同 $PM_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度呈负相关。 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度与人类活动、空气污染密切相关,当 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度增加时,容易吸附负氧离子使其消失,造成负氧离子浓度的下降。空气负氧离子和植被指数存在正相关关系,随着植被指数增加,不同季节的空气负氧离子均增加,这与植被覆盖增多、植物尖端放电和光合作用等有利于负氧离子生成有关。四个季节中,空气负氧离子和植被指数存在显著正相关关系,主要差异来自季节变化。

表 2 全年和各季节负氧离子浓度日变化与主要环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between annual and seasonal diurnal variation of negative oxygen ion concentration and major environmental factors

时间段	相关性		
	$PM_{2.5}$ 浓度	PM_{10} 浓度	归一化植被指数
全年	-0.14 **	-0.16 **	0.48 **
春季	0.11 **	0.09 **	0.26 **
夏季	-0.06 ⁻	-0.06 **	0.3 **
秋季	-0.08 **	-0.07 **	0.22 **
冬季	0.03 ⁻	0.06 **	0.19 **

注: ** 表示通过 0.01 显著性检验, - 表示未通过检验。

2.3.2 负氧离子预测模型

通过相关性分析,对备选影响因子进行了初步筛查,考虑到季节、经纬度等影响因素,构建浓度预测模型需要对初步筛选的影响因子进行进一步的特征选择。研究利用极端随机树算法(extremely randomized trees)对各因子对负氧离子浓度的影响进行进一步分析。将所有因子输入模型,得到每一个因子的重要性评分。该评分取值为 0 到 1 之间,评分高的因子对模型提供了更高的信息增益。本研究选择评分在 0.01 以上的特征因子形成特征集,然后使用该特征集进行模型的训练。各个因子对负氧离子浓度的重要性评分结果如图 3 所示。

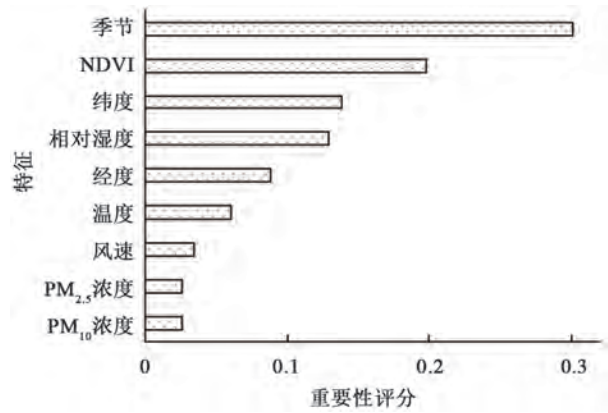


图 3 主要影响因子对负氧离子浓度的重要性评分结果

Fig.3 Importance score of the main influencing factors on the concentration of negative oxygen ion

从特征变量的分析来看,季节、NDVI、纬度、相对湿度等变量的重要性排序比较靠前,说明这些变量是影响负氧离子浓度变化的主要影响因素。从图 4 各季节特征变量的分析来看,在春季,相对湿度重要性超过 0.7;夏季,纬度、相对湿度的重要性排序在前;秋季,纬度、NDVI 的重要性排序在前;在冬季,相对湿度和纬度重要性排序在前。

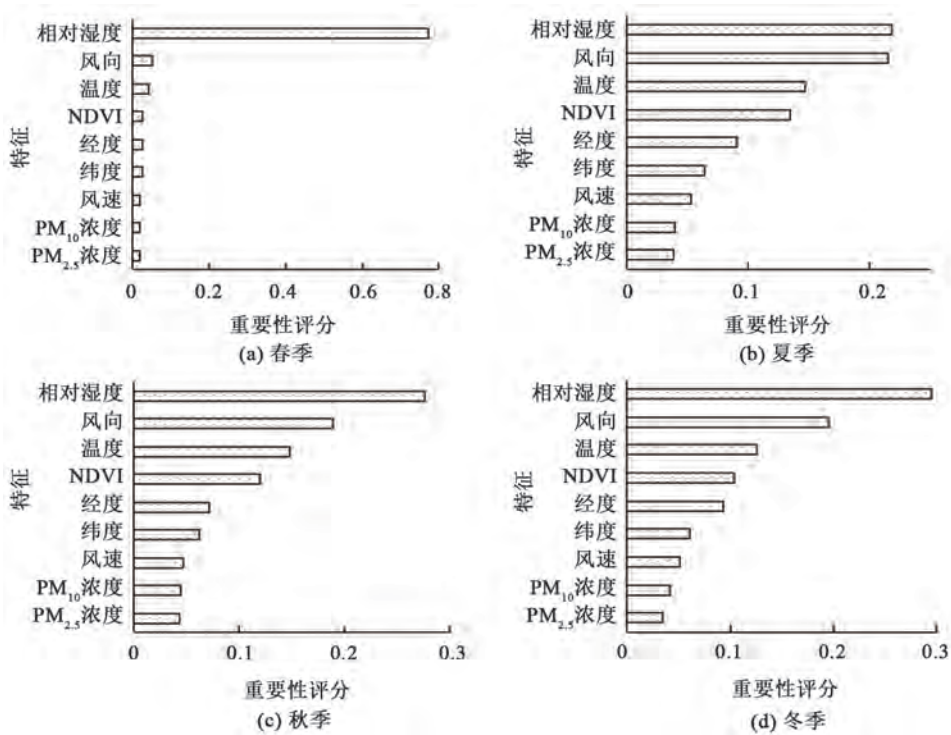


图 4 各季节主要影响因子对负氧离子浓度的重要性评分结果

Fig.4 Importance score of main influencing factors on the concentration of negative oxygen ion in each season

2.3.3 预测效果检验

将负氧离子和影响因子构建的数据集按照 3:1 的比例随机划分为两个子集,其中 75%的数据作为训练集,用于随机森林回归模型训练,以建立负氧离子日平均浓度的预测模型,另外 25%的数据作为测试子集,用于独立检验。为保证模型的稳定性,基于训练集数据,采用 5 折交叉验证的方法进行动态调参,最终确定的主要模型参数为:最大树深度为 10,最小叶子数为 2,组成森林的树数量为 30。由于季节因素对负氧离子日平均浓度影响较大,为了提高预测效果,分别进行分季节建模和不分季节建模。选择决定系数 R^2 、平均相对误差(δ_{MRE})、均方根误差(δ_{RMSE})等指标对预测效果进行检验,结果如表 3 所示。

表 3 基于测试集数据的预测检验
Table 3 Test of forecast based on test set

检验指标	不分季节建模	分季节建模			
		春季	夏季	秋季	冬季
R^2	0.75	0.84	0.59	0.60	0.50
δ_{RMSE}	262.47	95.28	247.47	401.61	149.88
δ_{MRE}	0.13	0.04	0.11	0.15	0.11

图 5 是不分季节建模的预测效果散点图,可以发现,整体一致性较好,秋季和夏季的一致性较差,测试集 δ_{RMSE} 为 262.47, R^2 为 0.75。

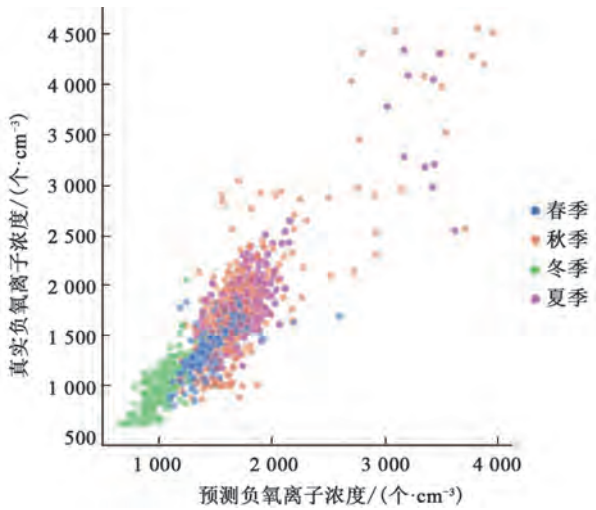


图 5 不分季节建模预测负氧离子浓度散点图

Fig.5 Scatter plot of prediction of negative oxygen ion concentration by modeling regardless of season

按照季节分别建模的预测效果如图 6 所示,可以看出,随机森林模型对不同季节的负氧离子浓度预测能力不尽相同,春季与实际观测值的分布趋势最为一致,冬季的一致性最低。春季模型在测试集上 δ_{RMSE} 为 95.28, δ_{MRE} 为 0.04,拟合程度最佳,而冬季模型在测试集上的拟合程度仅有 50%。一定程度上体现了负氧离子浓度可能存在本研究运用到气象因子和环境因子以外的影响因子,且不同季节的影响情况有差异。

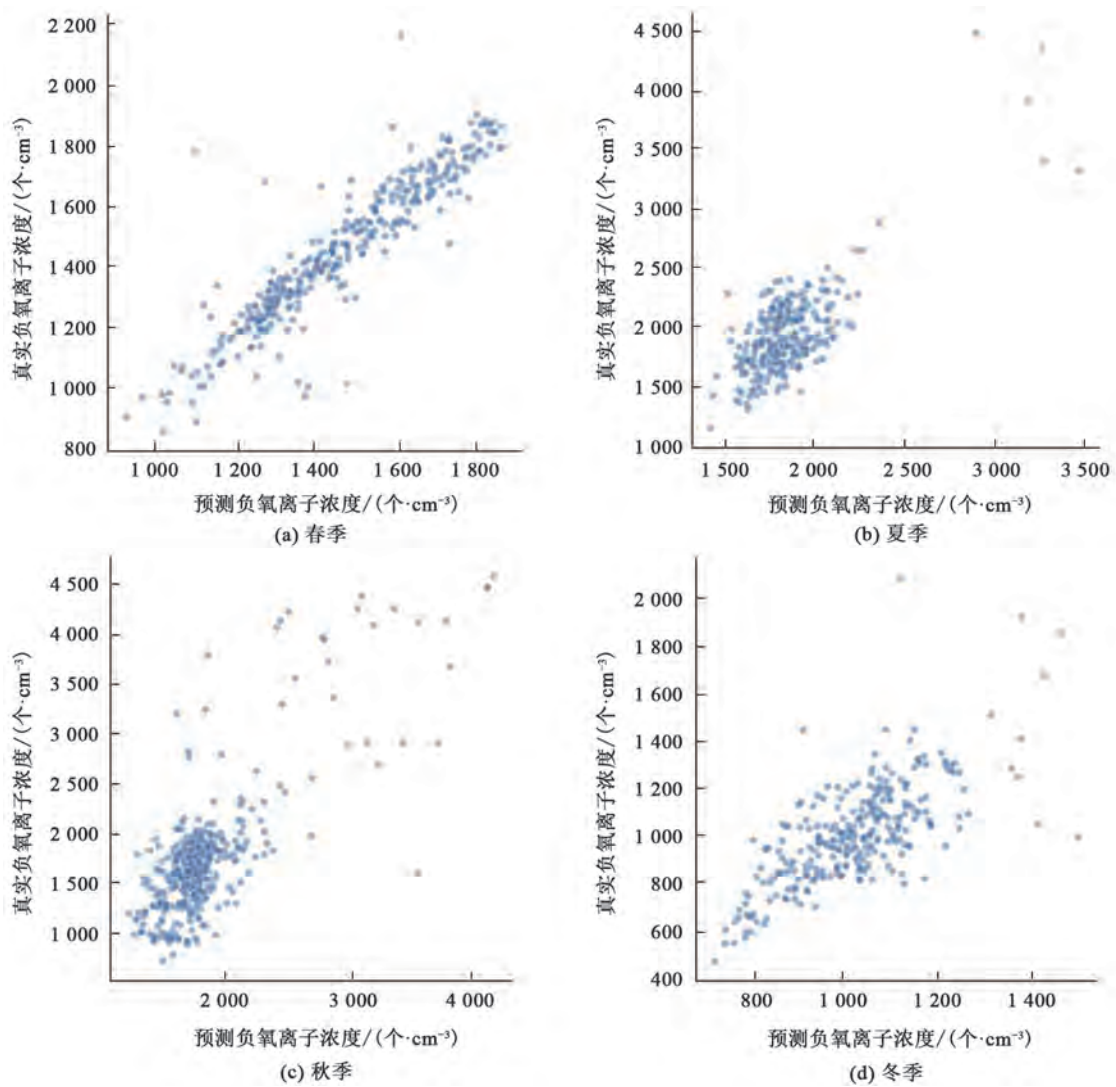


图 6 分季节建模预测负氧离子浓度散点图

Fig.6 Scatter plot of prediction of negative oxygen ion concentration by seasonal modeling

3 结论与讨论

- (1)河南省西部、南部山地地区空气负氧离子平均浓度有明显的日变化规律:最高浓度出现在清晨,夜晚次之,最低值出现在午后。全天负氧离子浓度均达到空气清新的等级。季节浓度变化规律表现为夏季高,秋、春次之,冬季最低。
- (2)根据现有的因子分析,温度和相对湿度是影响河南省山地空气负氧离子浓度的主要气象因子,风速、风向对负氧离子浓度有一定的影响,相对湿度和负氧离子浓度正相关,不同季节的空气负氧离子浓度日变化与气温日变化呈负相关。影响空气负氧离子浓度的环境因子主要是 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度和植被覆盖,且 $PM_{2.5}$ 浓度、 PM_{10} 浓度和负氧离子浓度负相关,植被覆盖和负氧离子浓度正相关。
- (3)采用随机森林回归模型对河南省山地负氧离子日平均浓度进行预测,具有较好的预测能力,可以为开发精细化负氧离子浓度预报产品、提升生态旅游气象服务水平提供技术支撑,意义重大。不过由于空气负氧离子观测资料的年限较短,同时本研究采用的气象因子和环境因子的数据类型并不全面,比如没有考虑降水量、海拔高度、AQI(空气质量指数)等与负氧离子浓度的关系,因此建立的预测模型较为粗略,随着观测数据的完善,未来将考虑增加影响因子,优化预测模型,在负氧离子浓度预测上做进一步研究。

参考文献:

- [1] REITER R. Part B Frequency distribution of positive and negative small ion concentrations, based on many years' recordings at two mountain stations located at 740 and 1780 m ASL[J]. International Journal of Biometeorology, 1985, 29(3): 223-231. DOI: 10.1007/BF02189654.
- [2] 王薇, 余庄. 中国城市环境中空气负离子研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(4): 705-711. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2013.04.027.
- [3] 邵海荣, 贺庆棠. 森林与空气负离子[J]. 世界林业研究, 2000, 13(5): 19-23. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2000.05.004.
- [4] STAVROVSKAIA, I G, SIROTA T. V., SAAKIAN I R. Optimization of energy-dependent processes in mitochondria from rat liver and brain after inhalation of negative air ions[J]. Biofizika, 1998, 43: 766.
- [5] 钟林生, 吴楚材, 肖笃宁. 森林旅游资源评价中的空气负离子研究[J]. 生态学杂志, 1998, 17(6): 56-60. DOI: 10.1088/0256-307X/15/12/025.
- [6] 吴楚材, 郑群明, 钟林生. 森林游憩区空气负离子水平的研究[J]. 林业科学, 2001, 37(5): 75-81. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20010513.
- [7] 王薇, 张之秋. 城市住区空气负离子浓度时空变化及空气质量评价:以合肥市为例[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1783-1791. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.11.007.
- [8] 孟丽红, 张敏, 姚青. 2009 年天津城区空气负离子变化规律[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(1): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2011.01.005.
- [9] 毛成忠, 于乃莲, 杜佳乐, 等. 典型城市区与森林区空气负氧离子特征比较分析[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1083-1089. DOI: 10.19517/j.1671-6345.2014.06.023.
- [10] SAWANT V S, MEENA G S, JADHAV D B. Effect of negative air ions on fog and smoke[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12(5): 1007-1015. DOI: 10.4209/aaqr.2011.11.0214.
- [11] LING X, JAYARATNE R, MORAWSKA L. Air ion concentrations in various urban outdoor environments[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(18): 2186-2193. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.03.026.
- [12] WANG J, LI S H. Changes in negative air ions concentration under different light intensities and development of a model to relate light intensity to directional change[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(8): 2746-2754. DOI: 10.1016/j.jenvman.2009.03.003.
- [13] 丛菁, 孙立娟. 大连市负氧离子浓度分布及预测模型的建立[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2010.04.009.
- [14] 王宝, 解福燕, 张自祥, 等. 玉溪空气负氧离子预测模型的建立[J]. 高原气象, 2015, 34(1): 251-257. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00131.
- [15] 顾小丽, 钱燕珍, 鲍岳建, 等. 宁波市负氧离子浓度分布与预测模型及其在旅游气象中的应用[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(6): 128-133. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2013.06.020.
- [16] 张勇, 陈兰英, 刘婷, 等. 峨眉山景区负氧离子浓度变化特征及预测模型研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(2): 61-68. DOI: 10.3969/j.issn.1673-503X.2018.02.008.
- [17] 中国气象服务协会. 天然氧吧评价指标: T/CMSA 0003—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [18] 林金明, 宋冠群, 赵利霞, 等. 环境、健康与负氧离子[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [19] 金琪, 严婧, 杨志彪, 等. 湖北春季大气负氧离子浓度分布特征及与环境因子的关系[J]. 气象科技, 2015, 43(4): 728-733. DOI: 10.19517/j.1671-6345.2015.04.027.
- [20] 杜续. 基于随机森林的 $PM_{2.5}$ 浓度预测模型研究[D]. 西安: 西安邮电大学, 2018.
- [21] 邓玲, 廖春花, 李学敏, 等. 山岳型景区空气负离子浓度分布特征及其与气象要素相关性研究综述[J]. 气象科技, 2017, 45(5): 882-888. DOI: 10.19517/j.1671-6345.20160548.