

孟茹,胡江波,田光文,等. 汉中负氧离子浓度分布特征及预测[J]. 陕西气象,2024(1):53-59.

文章编号:1006-4354(2024)01-0053-07

# 汉中负氧离子浓度分布特征及预测

孟茹<sup>1,2</sup>,胡江波<sup>1</sup>,田光文<sup>3</sup>,徐钰<sup>1</sup>,杨利霞<sup>1</sup>

(1. 汉中市气象局,陕西汉中 723000;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 南郑区气象局,陕西南郑 723100)

**摘要:**利用汉中市宁强千山和略阳象山 2018—2021 年的负氧离子观测资料和同期的地面气象观测资料,分析了两地的负氧离子浓度分布特征,采用机器学习方法建立了负氧离子浓度预测模型。结果表明:汉中宁强千山和略阳象山的负氧离子浓度逐年增高,两地负氧离子浓度的季节和月份变化趋势基本一致。夏季的负氧离子浓度最高,冬季最低;8 月最高,1 月最低;日变化呈单峰趋势。温度和相对湿度与负氧离子浓度变化有密切关系。利用 2022 年 1—6 月资料对预测模型进行验证,宁强千山、略阳象山空气清新度等级预测准确率达到 76.2%、73.2%,预报效果较好,可应用于两地的空气清新度预报业务。

**关键词:**汉中;负氧离子浓度;空气清新度;分布特征;预测模型

**中图分类号:**P49:X16

**文献标识码:**A

空气负离子又名负氧离子,是空气分子发生电离后失去一部分围绕原子核旋转的最外层电子而形成的。负氧离子被称为大气中的“维生素”。世界卫生组织发布的健康标准是 1 000 个/cm<sup>3</sup> 以上的负氧离子含量对人类健康是有利的。大气负氧离子与环境、生态、旅游等学科密切相关<sup>[1-3]</sup>。国内外学者针对不同地区的负氧离子开展了大量研究,研究表明不同地区负氧离子存在不同的变化特征。姚益平<sup>[4]</sup>、郁珍艳<sup>[5]</sup>等分析了浙江省负氧离子分布特征,建立指标评价负氧离子资源。金琪<sup>[6-7]</sup>等研究了 2014 年春季湖北负氧离子浓度分布特征,利用概率拟合法对湖北省空气负氧离子浓度等级进行了划分。林宜鸿<sup>[8]</sup>等利用 2018 年 5 月 3—22 日的负氧离子移动监测数据,采用 Kriging 插值法研究发现,永泰县负氧离子分布趋势与研究区地形分布规律一致。更多研究表明<sup>[9-16]</sup>,不同地域、不同环境下,负氧离子浓度受气象因子、环境因子的影响各不相同。在负氧离

子浓度预测方面,多名学者<sup>[17-21]</sup>运用回归建立了本地负氧离子的预报方程。董胜伟<sup>[22]</sup>等将模糊综合评价方法和层次分析方法相结合,根据最小二乘法建立了不同污染物浓度值预测模型,并利用安阳市空气污染物浓度年度均值进行了验证。

汉中市气候温润,森林覆盖率高达 63.81%,水资源丰富,是国家南水北调中线工程水源涵养生态建设区和陕西省引汉济渭工程唯一核心水源区。气候宜居指数显示,汉中人居环境舒适度和较舒适度月达 8 个月,全年均为适游期<sup>[23]</sup>。汉中是陕西省开展负氧离子观测较早的地区,宁强、略阳等县先后获得“中国天然氧吧”“中国气候宜居城市”“2023 全国避暑旅游优选地”等称号,取得了很好的社会效益。本文利用 2018—2021 年的负氧离子观测资料,分析了汉中的负氧离子浓度分布特征,建立负氧离子浓度预测模型,为开展空气清新度预报业务、开发利用秦巴山区尤其是汉中地区丰富的气候资源,拓展生态、环境、旅

收稿日期:2022-10-27

作者简介:孟茹(1971—),女,汉族,陕西汉中人,大学本科,高级工程师,从事生态与农业气象服务工作。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2019M-7)

游等公共气象服务领域提供技术支撑。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究区域概况

为了更好地分析汉中本地负氧离子浓度特征,选择代表性好、建站时间长、观测资料序列相对较好的汉中市宁强千山站、略阳象山站为研究站点。千山负氧离子站位于宁强县城东北 8 km、海拔高度 700 m 的千亩茶园内,象山负氧离子站在象山山顶的略阳县气象局内,海拔高度 795 m。

### 1.2 资料来源及处理

负氧离子观测分别使用 WIMD(略阳象山站)和 EPEX(宁强千山站)的大气负氧离子观测系统。站点建设环境依据中国气象局《大气负氧离子浓度自动观测系统建设指南》。测定原理采用“电容式吸入法”,观测方式为自动、定时、连续观测,观测数据为分钟级<sup>[24-25]</sup>。由于负氧离子观测数据的缺测率和奇异值出现概率较大,需先对研究数据质量控制,方法参照气象观测资料质量控制方法<sup>[26-27]</sup>,以保证负氧离子数据的一致性和可用性。

利用 2018 年 1 月 1 日—2021 年 12 月 31 日宁强千山和略阳象山负氧离子站的负氧离子浓度、日平均温度、日平均相对湿度等,分析负氧离

子浓度变化特征及其与气象条件的关系,负氧离子浓度的小时、日、月、季、年平均值均采用算数平均法计算。季节划分为:3—5 月为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月—次年 2 月为冬季。并将其分别与宁强国家气象站的日平均气压、日降水量、日平均 2 min 风速,宁强环境监测站的 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>日平均质量浓度,略阳象山负氧离子站的日平均气压、日降水量、日平均 2 min 风速、PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub>日平均质量浓度等数据作为训练数据集用于建立预测模型;利用 2022 年 1 月 1 日—6 月 30 日两地的相关数据对预测模型进行检验。

### 1.3 研究方法

本文采用负氧离子浓度来表征空气清新度等级。根据《空气负(氧)离子浓度等级》QX/T 380—2017<sup>[28]</sup>,空气中负氧离子浓度达到 1 200 个/cm<sup>3</sup> 以上,表示空气清新。由于汉中的负氧离子浓度较高,年平均负氧离子浓度在 1 200 个/cm<sup>3</sup> 以上,为了更细致地开展分析,本文结合气象行业标准 and 浙江等地的研究<sup>[10]</sup>,利用 6 级评价标准(表 1)对汉中的空气清新度进行评价。负氧离子浓度预测值准确率计算及验证参照胡江波等<sup>[29]</sup>的空气质量预报验证方法。

表 1 汉中空气清新度等级

等级	负氧离子浓度(N)取值范围/(个/cm <sup>3</sup> )	等级说明
I 级	$N \geq 2100$	浓度特别高,空气特别清新
II 级	$1800 \leq N < 2100$	浓度非常高,空气非常清新
III 级	$1200 \leq N < 1800$	浓度高,空气清新
IV 级	$500 \leq N < 1200$	浓度较高,空气较清新
V 级	$100 \leq N < 500$	浓度中,空气一般
VI 级	$0 < N < 100$	浓度低,空气不够清新

采用概率密度函数来分析负氧离子与气象条件的关系<sup>[30]</sup>。温度(或相对湿度)分布的概率密度计算方法如下:根据统计数据,结合自变量(温度或相对湿度)特性,将日平均温度按照一定间隔划分为 <5 °C、[5,10) °C、[10,15) °C、[15,20) °C、[20,25) °C、[25,30) °C 等 6 个区间,将日平均相对湿度划分为 [0%, 30%)、[30%, 50%)、

[50%, 70%)、[70%, 90%)、[90%, 100%] 等 5 个区间。统计日平均温度(日平均相对湿度)落入各区间范围内的样本数,计算其在总样本中的概率,即为温度(相对湿度)分布概率密度,对应计算该区间的负氧离子浓度平均值。

负氧离子浓度预测模型的建立和检验采用 SPSS 软件。根据宁强千山、略阳象山负氧离子浓

度数据时间序列特征,结合模型强泛化性、多分类要求,对比多种算法后,采用机器学习 Adaboost 回归法建立负氧离子浓度预测模型。Adaboost 回归法通过自适应方式实现特征分类,通过机器学习迭代训练多个弱回归模型,最终完成一个强回归模型,具有强大的拟合能力和自适应的样本权重调整<sup>[31]</sup>。输入训练数据集对模型进行训练,得到负氧离子浓度机器学习 Adaboost 回归模型(简称负氧离子预测模型)。采用未参与建模的 2022 年 1—6 月的检验数据输入预测模型,模型输出得到负氧离子浓度预测值。通过分析预测值与实际观测值的相关性检验模型的预报效果,并进一步通过判定预测和同期观测的空气清新度等级是否一致检验空气清新度预报效果。

表 2 2018—2021 年汉中两个监测站年平均负氧离子浓度及空气清新度概率分布

监测站点	年份	年平均浓度 (个/cm <sup>3</sup> )	概率/%				
			特别清新	非常清新	清新	较清新	一般
略阳象山	2018	1 229	5.1	1.6	29.2	64.1	—
	2019	1 512	28.2	9.6	30.9	31.2	—
	2020	1 519	27.7	12.3	29.5	30.5	—
	2021	1 543	59.4	23.6	16.3	0.7	—
宁强千山	2018	1 226	7.2	6.5	37.0	49.3	—
	2019	1 280	28.2	10.3	44.2	17.3	—
	2020	1 656	28.2	11.8	29.5	30.5	—
	2021	2 266	37.8	3.0	32.6	10.5	16.0

注:—为未出现。

外),且“特别清新”等级也呈现一致向好的趋势。

2.1.2 季变化 2018—2021 年略阳象山和宁强千山负氧离子浓度的季节变化(图 1)显示,宁强千山四季的负氧离子浓度值均高于略阳象山,与年平均值特征表现一致,说明茶园的生态环境在四季普遍优于城区。宁强千山和略阳象山的负氧离子浓度在季节变化上呈现一致性,夏季最高,其次是秋季、春季,冬季最低。这与汉中夏秋季的丰沛降水(6—11 月降水约占全年降水的 77%)、适宜温度利于空气中负氧离子生成有关。

2.1.3 月变化 由略阳象山和宁强千山各月平均负氧离子浓度(图 2)可知,两地的月变化趋势

## 2 结果与分析

### 2.1 负氧离子变化特征

2.1.1 年变化 空气中负氧离子含量受多种因素影响,包括地理环境、气象要素、植被、水体、人类活动和大气污染物等。2018—2021 年宁强千山、略阳象山的年平均负氧离子浓度分别为 1 709 个/cm<sup>3</sup>、1 451 个/cm<sup>3</sup>。宁强千山的年平均负氧离子浓度高于略阳象山。宁强千山站建设在植被覆盖度高的茶园中,该地更有利于生成负氧离子。由 4 a 的年平均负氧离子浓度(表 2)可知,两站的负氧离子浓度均呈逐年增高的趋势。这可能与近年来生态文明理念的贯彻以及生态环境的明显改善有关。从两站的空气清新等级概率分布来看,均达到“较清新”以上等级(除了宁强千山 2021 年

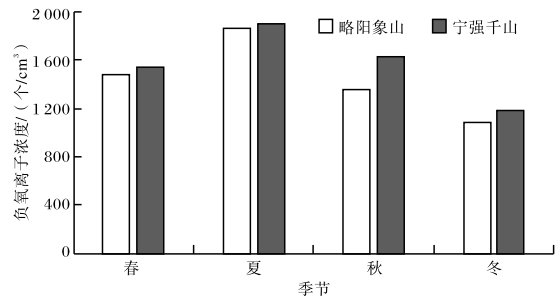


图 1 2018—2021 年略阳象山、宁强千山负氧离子季节变化

基本一致。8 月负氧离子浓度最高,略阳象山为 1 949 个/cm<sup>3</sup>,宁强千山为 2 726 个/cm<sup>3</sup>。8 月降

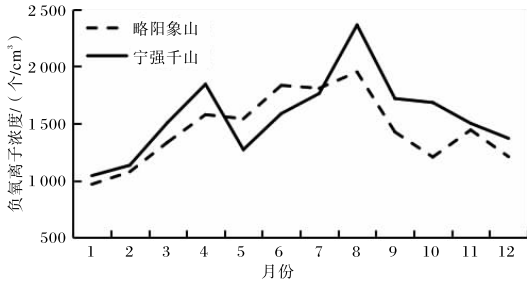


图2 2018—2021年略阳象山、宁强千山负氧离子浓度月变化

水丰沛,日照较6月和7月减弱,空气中合成臭氧水平减弱,有利于负氧离子的生成和存活。宁强千山5月负氧离子浓度较低与该月为春茶生产后期,茶园开展大批量采摘生产活动有关。1月负

氧离子浓度最低,略阳象山为966个/cm<sup>3</sup>,宁强千山为1041个/cm<sup>3</sup>。冬季空气流动性差,空气中的大颗粒离子稀释速度减缓,这些大颗粒离子会吸附负氧离子,从而降低负氧离子的存活率。

2.1.4 日变化 从图3可以看出,宁强千山、略阳象山的负氧离子浓度日变化特征呈单峰趋势,日峰值出现在10—18时,日最小值宁强千山、略阳象山分别出现在22时至次日02时、18时至次日01时。日变化幅度在400~1000个/cm<sup>3</sup>。按照各时负氧离子浓度对应的空气清新度等级,除宁强千山19时、略阳象山19—22时为“空气较清新”(Ⅳ级)外,其余时次均达到“空气清新”(Ⅲ级)等级。

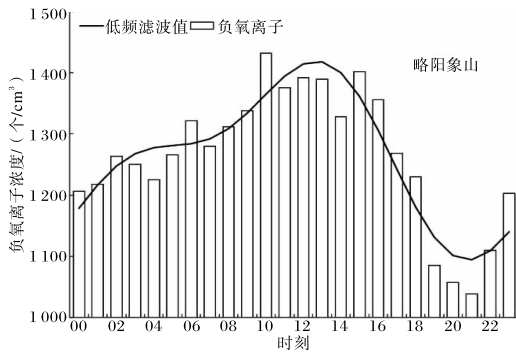
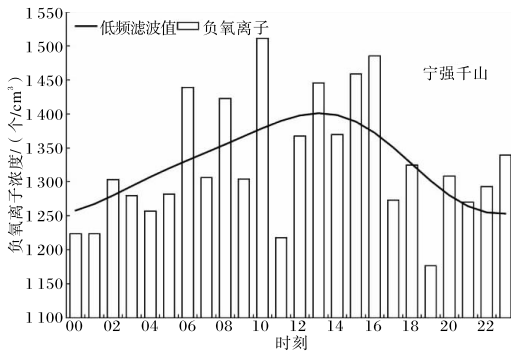


图3 2018—2020年宁强千山、略阳象山负氧离子浓度日变化

2.2 负氧离子与气象条件的关系

2.2.1 负氧离子与气温 由宁强千山、略阳象山的温度分布概率密度和负氧离子浓度随温度变化(图4)可以看出,随着温度升高,两站平均负氧离子浓度也随之升高。在[20,25)℃的温度概率密度最大,宁强千山、略阳象山分别为24%、25%,对应的平均负氧离子浓度分别为1855个/cm<sup>3</sup>、1766个/cm<sup>3</sup>,均为最高值。这说明,温度升高,空气中的分子运动加速,碰撞的概率增大,分子失去电子成为负氧离子的概率也增大,负氧离子浓度增大。当温度高于25℃后,宁强千山、略阳象山的平均负氧离子浓度都有所下降。这与温度升高到一定程度,分子运动与负氧离子运动都加快,空气分子与负氧离子发生碰撞的频率增加,降低了负氧离子的寿命有关<sup>[32]</sup>。此外,在较高温度环境下,空气中的水分子和其他气体成分更容易电离,一定程度上抑制了负氧离子的生成,而温度较

高同时又加快了负氧离子的自然衰减速度,导致其数量减少<sup>[32-33]</sup>。

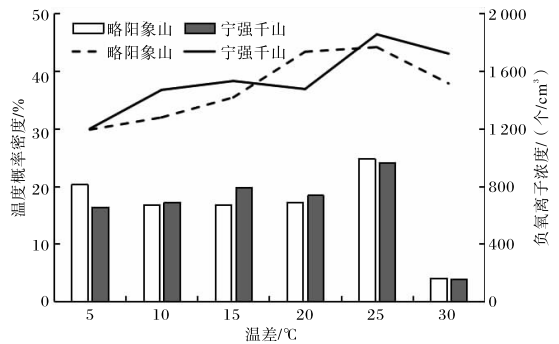


图4 2018—2021年宁强千山、略阳象山温度分布概率密度(直方图)和负氧离子浓度(折线)随温度变化

2.2.2 负氧离子与相对湿度 由宁强千山、略阳象山的相对湿度分布概率密度和负氧离子浓度随相对湿度变化曲线(图5)可知,两站的变化趋势基本保持一致,在日平均相对湿度小于30%时,

平均负氧离子浓度最低(宁强千山为  $1\,316$  个/ $\text{cm}^3$ , 略阳象山为  $1\,065$  个/ $\text{cm}^3$ );在  $90\% \sim 100\%$  时,平均负氧离子浓度达到最大(宁强千山为  $1\,649$  个/ $\text{cm}^3$ , 略阳象山为  $1\,545$  个/ $\text{cm}^3$ )。当相对湿度增大时,空气中的水分含量增加,水分子( $\text{H}_2\text{O}$ )与空气中的气体分子碰撞,产生电离过程,从而释放负氧离子。同时,负氧离子在空气中通常会因为静电吸附在空气中的灰尘、颗粒物和其他微粒上,当相对湿度较高时,水分能增加空气中微粒的湿润程度,减小它们之间的静电力,使得负氧离子更容易从微粒上脱离进入空气中<sup>[32-34]</sup>。

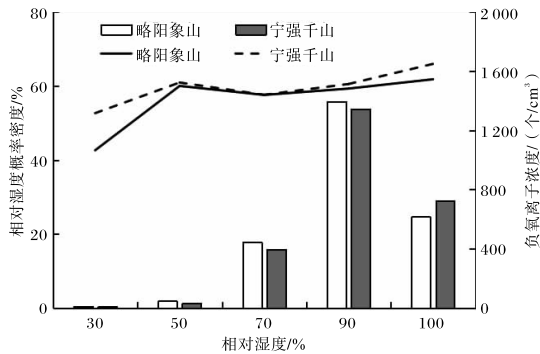


图5 2018—2021年宁强千山、略阳象山相对湿度分布概率密度(直方图)和负氧离子浓度(折线)随相对湿度变化

## 2.3 负氧离子预测模型的建立和检验

### 2.3.1 预测模型建立 将建模训练数据集通过

机器学习 Adaboost 回归法不断迭代训练,建立负氧离子预测模型。预测模型训练数据集  $R^2$  分别为  $0.999$ (宁强千山)、 $0.944$ (略阳象山),说明预测模型拟合效果较好,具有解释性且泛化能力较强。自变量对两站负氧离子浓度预测值的贡献率从高到底,宁强千山依次为日平均气温、日平均相对湿度、日降水量、日平均气压、 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均质量浓度、 $\text{PM}_{10}$ 日平均质量浓度、日平均  $2\text{ min}$  风速,略阳象山依次为日平均  $2\text{ min}$  风速、日平均温度、日平均气压、日平均相对湿度、 $\text{PM}_{10}$ 日平均质量浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 日平均质量浓度、日降水量。

2.3.2 预报效果检验 分别利用宁强千山、略阳象山 2022 年 1—6 月的气象观测值、环境观测值对未来  $24\text{ h}$  负氧离子浓度值进行预测,对比预测和观测数据(图 6)发现:预测值与观测值的变化趋势基本一致,两站的预测误差近似服从正态分布,表明两站的预测模型能够较好地捕捉到负氧离子浓度的变化规律;宁强千山和略阳象山的负氧离子浓度预测值和观测值之间的相关系数分别为  $0.779$  和  $0.758$ ,存在较强的正相关性;两站负氧离子浓度预测值的中位数均小于观测值的中位数,说明预测值存在负偏差。综上所述,可以认为该模型在预测宁强千山、略阳象山负氧离子浓度方面表现较好。

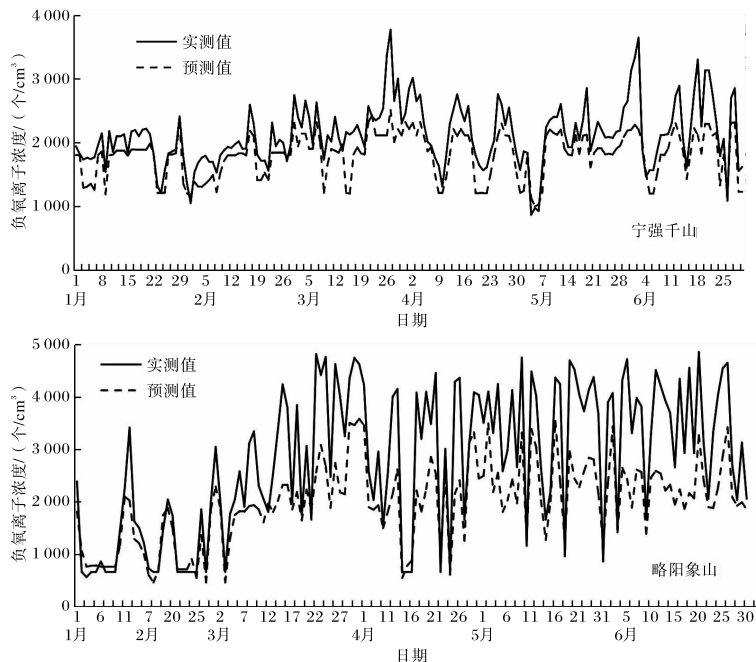


图6 2022年1—6月宁强千山、略阳象山负氧离子预测值与观测值对比

相较于负氧离子浓度,公众更关注空气清新度等级,因此,从空气清新度等级的角度对模型进行检验。对比分析 2022 年 1—6 月宁强千山、略阳象山预测和观测的空气清新度等级(表 3),结果显示预测准确率总体在 76.2%、73.2%,且预测误差均在 1 级范围内。具体来看,Ⅲ级空气清新度的预测准确率最高,达到了 97.4%(宁强千山)和 81.8%(略阳象山),Ⅱ级和Ⅳ级的预测准

准确率宁强千山达到 80%以上,略阳象山达到 76%以上。Ⅰ级空气清新度预测等级与观测等级之间的偏差大于Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级。预测模型对Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级空气清新度的预测效果较好,Ⅰ级空气清新度的标准是负氧离子浓度 $\geq 2\ 100$ 个/cm<sup>3</sup>,浓度特别高,空气特别清新,该等级的个例较少,模型误差相对较大。后期可随着资料的积累,对模型进一步改进,提高预报准确率。

表 3 2022 年 1—6 月宁强千山、略阳象山空气清新度等级预报准确率 %

站点	等级误差	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	总计
宁强千山	0 级	64.4	80.9	97.4	80.0	76.2
	1 级	35.6	19.1	2.6	20.0	23.8
略阳象山	0 级	70.5	76.9	81.8	76.9	73.2
	1 级	29.5	23.1	18.2	23.1	26.8

### 3 结论与讨论

(1)2018—2021 年汉中宁强千山和略阳象山负氧离子浓度年际变化呈逐年增高的趋势;两地季、月变化趋势基本一致,负氧离子浓度从高到低依次为夏季、秋季、春季、冬季,8 月负氧离子浓度最高,1 月最低;日变化呈现单峰趋势,峰值一般在 10—18 时出现,最小值一般在 18 时至次日 02 时出现。富集的负氧离子浓度,使汉中宁强千山、略阳象山空气清新度等级整体较高,达到“较清新”以上等级(除了宁强千山 2021 年外),并在“特别清新”等级方面呈一致向好的趋势。

(2)宁强千山和略阳象山的负氧离子浓度值与温度、相对湿度密切相关。当日平均温度低于 25℃时,负氧离子浓度随着温度的升高增加。温度在[20,25)℃时对应的平均负氧离子浓度最高。当温度继续升高,负氧离子浓度有所下降。负氧离子浓度在相对湿度高于 90%时最大,在低于 30%时最小,说明增加相对湿度可以促进负氧离子的生成和在空气中的散布。

(3)采用机器学习 Adaboost 回归法建立的负氧离子预测模型预测的负氧离子浓度值和观测值的相关系数分别为 0.779 和 0.758,模型对宁强千山、略阳象山的空气清新度等级预测准确率达到 76.2%、73.2%,预报效果较好,可应用于两

地的空气清新度等级预报业务。

(4)负氧离子受到多种因素的影响,本文是在宁强千山、略阳象山近 4 a 负氧离子观测数据的基础上建立的预测模型,后期,随着负氧离子观测时序的增加,可积累更多的数据进一步训练优化预测模型,从而提高模型的预测精度,以期更好地利用本地优势气候资源,为社会经济增长做出贡献。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林金明,宋冠群,赵利霞. 环境、健康与负氧离子[M]. 北京:化学工业出版社,2006.
- [3] 黄彦柳,陈东辉,陆丹,等. 空气负离子与城市环境[J]. 干旱环境监测,2004,4(18):208-211.
- [4] 姚益平,郁珍艳,李正泉,等. 浙江省空气负离子浓度分布特征[J]. 气象科技,2019,47(6):1006-1013.
- [5] 郁珍艳,李正泉,樊高峰,等. 浙江省气象及环境因子对负氧离子浓度的影响分析[J]. 中国环境科学,2023,43(2):514-524.
- [6] 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分析[J]. 气象科技,2015,43(4):728-733.

- [7] 金琪,严婧. 湖北空气负氧离子浓度等级划分及适应性研究[J]. 环境科学与技术,2017,40(5):194-199.
- [8] 林宜鸿,何中声,杨素慧,等. 永寿县夏季空气负氧离子空间异质性研究[J]. 西北林学院学报,2019,34(6):82-88.
- [9] 胡猛,陈蝶聪,任文斌,等. 揭西县空气负氧离子浓度的时空特征分析[J]. 广东气象,2021,43(1):53-56.
- [10] 林锦冰,李晓桃,陈浩,等. 揭西县负氧离子浓度特征及与气象条件的关系[J]. 广东气象,2021,43(4):40-44.
- [11] 张楠,尚可政,徐军昶,等. 西安浐灞生态区降雨及气象环境因素对负氧离子浓度的影响分析[J]. 甘肃科学学报,2020,32(4):43-49.
- [12] 谭静,陈正洪,罗学荣,等. 湖北省旅游景区大气负氧离子浓度分布特征以及气象条件的影响[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(2):314-323.
- [13] 周德平,佟维华,温日红,等. 闾山国家级森林公园负氧离子观测及其空气质量分析[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(3):181-187.
- [14] 桂翰林,任桂林,张秀红. 大气负氧离子及其在不同环境中的变化规律[J]. 黑龙江气象,2018(1):18-19.
- [15] 吕国红,贾庆宇,王笑影,等. 芦苇湿地大气负氧离子变化特征及影响分析[J]. 环境科学与技术,2018(增刊1):72-76.
- [16] 朱宾宾,孙双红,王立军,等. 呼伦贝尔山地樟子松林负氧离子浓度及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报,2021,36(4):55-59.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李正泉,郑健,胡晓,等. 负氧离子浓度等级预测[J]. 林业与环境科学,2021,37(5):84-90.
- [20] 胡亚男. 阿尔山五里泉负氧离子预报方程的建立及检验[J]. 内蒙古科技与经济,2021(7):68-70.
- [21] 顾小丽,段月,王晓慧,等. 四明山空气清新度分布变化特征及预测模型[J]. 浙江气象,2021,42(3):10-17.
- [22] 董胜伟,苏婷,黄玲玲,等. 空气质量的模糊综合评价与曲线拟合预测模型[J]. 数学的实践与认识,2018,48(6):102-108.
- [23] 胡江波,杨睿敏,苏俊辉,等. 汉中地区旅游气候舒适度评价[J]. 陕西气象,2014(4):20-24.
- [24] 李伟,王经业,陆勇,等. 大气负氧离子自动测报仪的研制[J]. 气象科技,2008,36(6):834-836.
- [25] 崔炜. 负离子监测仪安装与维修技术要领[J]. 陕西气象,2017(6):45-46.
- [26] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:121-125.
- [27] 姜燕敏,李正泉,郁珍艳,等. 空气负离子观测数据质量控制方法研究[J]. 气象水文海洋仪器,2021(1):5-10.
- [28] 空气负(氧)离子浓度等级:QX/T 380—2017[S].
- [29] 胡江波,李小芳,彭诗军,等. 汉中市空气质量预报模型及验证[J]. 陕西气象,2018(2):33-36.
- [30] 李杰,陈建兵,张琳琳,等. 中国大陆地区年最大平均风速的概率密度函数[J]. 自然灾害学报,2006,15(5):76-82.
- [31] 张红坡,张海锋. SPSS 统计分析实用宝典[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [32] 张月娟,袁庆叶,刘艺芳,等. 森林康养区空气负氧离子与环境因素相关性研究:以北京松山自然保护区为例[J]. 林业科技,2023,48(1):52-57.
- [33] 张嘉昕,邹嘉南. 江西大岗山负离子浓度与气象因子之间的响应关系[J]. 气象与减灾研究,2021,44(1):51-57.
- [34] 吴迪,李佳珊,张冬有. 森林空气负离子浓度与环境温湿度指数的关系研究[J]. 森林工程,2017,30(6):25-30.