

沈姣姣,胡皓,和骅芸,等. 陕西南部空气负离子浓度特征及等级预测[J]. 陕西气象,2026(3):75-83.

文章编号:1006-4354(2026)03-0075-09

陕西南部空气负离子浓度特征及等级预测

沈姣姣^{1,2}, 胡皓^{1,2}, 和骅芸^{2,3}, 张月帆^{1,2}, 郭琦¹

(1. 陕西省气象服务中心, 西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710016;

3. 陕西省气象科学研究所, 西安 710016)

摘要:选取 2022 年 1 月—2024 年 4 月陕西南部石泉县城区公园(代表城区)和云雾山(代表林区)空气负离子浓度(negative air ions concentration, NAIC)观测资料和同期气象数据(日平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、降雨量、风速等),分析了林区和城区 NAIC 的时空变化特征,利用逐步回归法建立城区和林区 NAIC 等级预报模型。结果表明:(1)林区 NAIC 高于城区,年均值分别为 1 780.9 个/cm³ 和 1 283.0 个/cm³,都达到空气清新标准;NAIC 都是夏季最高,春季次之,秋冬季较低;NAIC 日变化呈单峰型,峰值和谷值分别出现在 06—08 时和 14 时左右。(2)NAIC 与平均气温和降雨量呈正相关,与相对湿度春夏季呈正相关,秋冬季呈负相关;林区 NAIC 与风速春夏季呈正相关,秋冬季呈负相关,城区 NAIC 与风速呈正相关(夏季除外)。(3)林区 NAIC 等级预报模型的预报能力优于城区,NAIC 等级越高,模型模拟能力越强,夏秋季模拟能力优于冬春季,模型对林区和城区四个季节未参与建模样本的 NAIC 等级预报准确率达 70% 以上,整体效果较好。

关键词:空气负离子浓度;气象因子;分季节;等级预测模型;康养旅游

中图分类号:P49

文献标识码:A

空气负离子(negative air ions, NAI)是指带负电荷的单个气体分子或离子团的总称,主要来源于自然界中雷电、紫外线、水体冲击、植物叶片尖端放电等^[1]。NAI 能中和空气污染物中的正离子,并吸附降解有害物质,具有杀菌抗菌、净化空气的作用^[2],此外,NAI 还具有促进新陈代谢和增强免疫力的作用,被称为“空气维生素”^[3-4],是生态康养旅游的重要评价指标之一^[5-7]。

目前关于 NAI 的研究多集中在时空变化规律和影响因素方面^[7-8],其中气象因子对空气负离子浓度(negative air ions concentration, NAIC)的影响会受到地区、季节、天气以及局地环境的影响。研究发现,林区 NAIC 高于城区^[9],夏季高,

冬季低,清晨和傍晚前后为浓度峰值^[10-11]。雷雨天 NAIC 较高,闪电强度越强,NAIC 增加越明显,但随着雷雨过程持续,雷雨对 NAIC 影响逐渐趋于平缓^[12-13]。大风天气 NAIC 高于微风天气,晴天高于雾霾天^[14]。雨日 NAIC 与降雨量、相对湿度呈显著正相关,与气压呈显著负相关;无雨日 NAIC 与日照时数呈显著正相关^[15]。NAIC 与降雨量呈正相关^[8,10],但当雨量达到暴雨级别、风速达到强风级别以上时,NAIC 反而下降^[8]。NAIC 与气温^[10,16-17]和风速^[8,17]呈正相关,与相对湿度^[16-19]和日照时数^[17]的相关性并不完全一致。不同季节 NAIC 与同一气象要素的相关性并不完全相同:与气温春夏季呈正相关,夏秋季呈负相

收稿日期:2025-03-18

作者简介:沈姣姣(1986—),女,汉族,山西运城人,博士,高级工程师,主要从事气象服务与生态气候评价。

通信作者:张月帆(1997—),女,汉族,陕西西安人,硕士,工程师,主要从事生态气候评价服务。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2024G-7);秦岭气候经济研究中心(院)开放研究基金课题(202502)

关;与相对湿度冬季呈负相关,夏季呈正相关^[14,20]。近些年来有学者以气温、气压、风速和相对湿度等为自变量,先后建立了宁波^[21]、海南^[18]、承德^[9]、峨眉山^[22]、汉中^[23]等地的 NAIC 预报模型。也有学者认为 NAIC 受季节影响较大,建立了分季节的 NAIC 预报模型^[24]。

考虑到 NAIC 局地性较强,各地预测模型选用的预报因子各有不同,没有借鉴性,因此需结合当地气象条件建立 NAIC 预报模型。以往研究多为 NAIC 预报,但社会公众更关注的是 NAIC 等级预报,目前的预报产品并不能完全满足公众需求。因此,基于 2022 年 1 月—2024 年 4 月陕西南部石泉县城和云雾山景区 NAIC 观测资料和同期气象数据,分析了 NAIC 的时空变化特征,对 NAIC 与气象因子的相关性进行统计分析,明确主要影响因子及其与 NAIC 的关系,建立不同季节 NAIC 等级预报模型。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

选取陕西南部的石泉县城和云雾山景区作为研究区域。石泉县北依秦岭,南接巴山,空气负离子监测站位于国家气象观测站内(108.259°E, 33.039°N),海拔 482.9 m,周边为绿色草坪,代表城区环境;云雾山景区总面积 5 135 km²,森林覆盖率为 85%,常年云雾缭绕,空气负离子监测站位于景区内(108.314°E,33.183°N),海拔 982.0 m,周边为茂密树木和绿色植被,代表林区环境。

1.2 资料来源与质控

1.2.1 资料来源 2022 年 1 月—2024 年 4 月城区和林区 NAIC 逐分钟数据均采用固定式仪器观测,仪器型号为北京依派伟业公司 EP100 型。气象数据包括同期石泉县逐日平均气温、最高气温、最低气温、降雨量、相对湿度、风速等,资料来源于陕西省气象信息中心,数据经过严格质量控制。春季指 3—5 月,夏季指 6—8 月,秋季指 9—11 月,冬季指 12 月—次年 2 月。

1.2.2 数据质量控制 长期位于野外的观测仪器容易受到外界干扰而出现错误观测值,为了保证数据准确,制定以下质量控制规则:(1)界限值检查。当 NAIC 值大于 50 000 个/cm³、气压大于 1 260 hPa 或小于 750 hPa、小时降雨量大于

200 mm、风速大于 32 m/s 时认定为无效值。(2)将每个观测站 NAIC 样本中位数值值的 5% 和 2 000% 作为下限和上限的参考值,剔除过大或过小的数值。(3)将连续五个观测时次以上观测值不变,或者差值突增或突减 3 倍以上的观测值判定为数据异常。应用上述规则对观测数据进行质量控制后,发现林区(云雾山景区)NAIC 合格率为 90.6%,城区(石泉县城)NAIC 合格率为 91.7%,不合格数据记录主要集中在 11 月和 12 月,判断主要是由于仪器故障引起的。

1.3 研究方法

1.3.1 预报因子筛选 以质量控制后的小时数据为基础,将小时数据统计为日值数据,将日值数据统计为月值数据。利用 SPSS 软件分析各季节 NAIC 与气象要素的偏相关系数,当偏相关系数通过 0.05 显著性水平检验时,确定该因素与 NAIC 相关性显著,可用于构建 NAIC 等级预报模型。假设有 $k(k>2)$ 个变量 $x_1, x_2, \dots, x_k$,则任意两个变量 x_i 和 x_j 的 $g(g \leq k-2)$ 阶样本偏相关系数计算公式如下:

$$R_{ij \cdot l_1 l_2 \dots l_g} = \frac{R_{ij \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}} - R_{i l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}} R_{j l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}}{\sqrt{(1 - R_{i l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}^2)(1 - R_{j l_g \cdot l_1 l_2 \dots l_{g-1}}^2)}} \quad (1)$$

式(1)中, $R_{ij \cdot l_1 l_2 \dots l_g}$ 表示 x_i 和 x_j 的 g 阶偏相关系数,公式右边均为 $g-1$ 阶偏相关系数。

1.3.2 预报模型建立与检验 采用逐步回归法计算不同自变量(气温、降雨量、相对湿度、风速等)与 NAIC 的偏相关系数,按照偏相关系数大小次序将自变量逐个引入方程,对引入方程中的每个自变量的偏相关系数进行统计检验,通过显著性检验的自变量留在回归方程内,通过不断引入和剔除自变量,最终得到最优回归方程;参照《空气负(氧)离子浓度等级》QX/T 380—2017^[25](表 1)对预报结果进行等级划分。

表 1 空气负离子浓度等级划分标准

等级	浓度范围/(个/cm ³)	说明
I	$\geq 1\ 200$	浓度高,空气清新
II	$500 \sim < 1\ 200$	浓度较高,空气较清新
III	$100 \sim < 500$	浓度中,空气一般
IV	$0 \sim < 100$	浓度低,空气不够清新

对于城区和林区,各季节随机选取 95% 样本数用于 NAIC 等级预报模型统计建模,其余 5% 用于模型预报能力检验。模型准确率=模拟结果中某等级出现次数/实际样本中该等级出现次数 $\times 100\%$ 。根据模型历史回算值与观测值之间的差异,以及模型对未参与建模样本的预测能力,综合判断模型的模拟能力。

2 结果与分析

2.1 NAIC 变化特征

林区和城区年均 NAIC 分别为 $1\,780.9$ 个/ cm^3 和 $1\,283.0$ 个/ cm^3 ,对应“Ⅰ级”,均达到空气清新标准。林区 NAIC 夏季($2\,132.9$ 个/ cm^3)>春季($1\,767.5$ 个/ cm^3)>秋季($1\,662.6$ 个/ cm^3)>冬季($1\,560.7$ 个/ cm^3),城区夏季($1\,769.3$ 个/ cm^3)>春季($1\,424.6$ 个/ cm^3)>冬季($1\,021.7$ 个/ cm^3)>秋季(916.3 个/ cm^3);两个地区 NAIC 均表现出夏季最高、春季次之、秋冬季较低的特点,与孟茹等^[23]对汉中象山和千山的研究结果一致。从图 1 可以看出,林区和城区月均 NAIC 呈“单峰”型,峰值时段出现在 6—8 月,分别为 $2\,211.1$ 个/ cm^3 和 $1\,697.6$ 个/ cm^3 ,最小值均出现在 11 月,分别为 $1\,493.6$ 个/ cm^3 和 481.8 个/ cm^3 。NAIC 夏季较高的原因主要有以下几个方面:一是夏季植物生长茂盛,光合作用强,太阳紫外辐射强,空气相对清洁,所以 NAIC 较高^[26];二是夏季充沛降水增加了空气湿度,NAI 与水分子结合^[23],易形成负离子团簇;三是夏季大量雨水对空气污染物有一定的冲刷和淋洗作用,使空气更加洁净,更易于 NAI 的累积^[20,27];另外,夏季降雨时常伴有雷电、大风等天气,可使空气电离产生自由电子。而冬季气候干燥,植物活力弱,干燥环境会加速

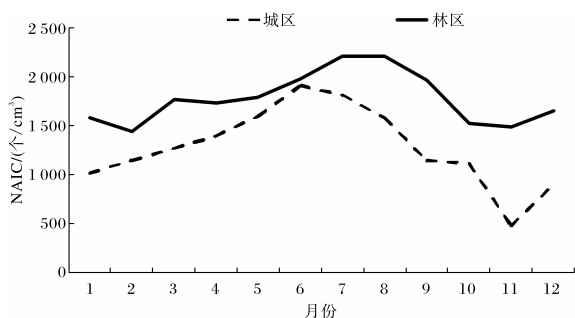


图1 石泉城区和林区 NAIC 月变化

NAI 沉淀^[14],空气污染严重也会增加大气中悬浮颗粒物^[15,22],使 NAIC 减少。

进一步分析发现,林区各月 NAIC 均高于城区,原因可能与植被覆盖度和植被类型不同有关。研究发现针叶林 NAIC 较阔叶林高,复层植物群落比单层植物群落高,乔木高于灌木和草坪,草坪高于裸地^[28]。云雾山多茂密森林,植被类型为针阔叶混合林,以复层植物群落为主,林区内高大乔木光合作用强、蒸腾旺盛,容易产生大量水汽,有利于 NAI 产生;而城区公园以休闲游玩为主,植物群落相对单一,植被覆盖度较林区差,植被类型以阔叶林和草坪为主,所以 NAIC 相对较低。

林区和城区 NAIC 具有明显的日变化特征,均呈“单峰”型分布(图 2),06—08 时最高,林区和城区峰值分别达到 $2\,635.0$ 个/ cm^3 和 $2\,201.0$ 个/ cm^3 ;随后逐渐下降,14 时左右降到最低,最小值分别为 $1\,756.1$ 个/ cm^3 和 $1\,325.2$ 个/ cm^3 ;15 时之后迅速回升,在 06—08 时再次达到高峰。因为日出前相对湿度较高,人类活动较少,空气中污染物少,所以 NAIC 较高;而日出后相对湿度下降,人类活动频繁,污染物浓度增加^[29],所以 NAIC 下降。午后气温达到一天中最大值,植物出现“光合午休”现象^[9],通过光合作用释放的氧气减少,导致 NAIC 降至最低;傍晚随着人类活动减少,空气污染物浓度降低,NAIC 再次迅速升高。

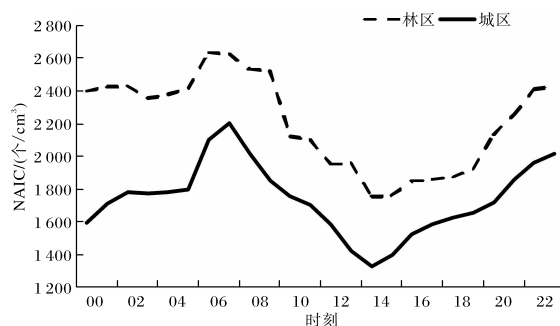


图2 石泉城区和林区 NAIC 日变化

2.2 NAIC 与气象因子的关系

将林区和城区 NAIC 与同期气象因子按照一定数量等级进行分类,分析气象因子变化对 NAIC 的影响。结果发现,有降水日(降雨量 ≥ 0.1 mm)林区和城区 NAIC 高于无降水日(降雨

量为 0.0~0.1 mm)(图 3a 和图 3e),小雨日(降雨量为 0.1~10.0 mm)与无雨日(降雨量为 0.0~0.1 mm)NAIC 差异不显著,但当出现中雨及以上等级降雨(降雨量为 ≥ 10.0 mm)时,NAIC 明显增加,这与谭静等^[13]研究结论基本一致。进一步分析发现,当出现中雨及以上等级降雨时,林

区 NAIC 比无雨日和小雨日分别增加 95.7% 和 85.4%,城区 NAIC 分别增加 27.9% 和 25.2%。分析原因可能是由于中等强度以上降雨产生的充沛水汽条件使 NAI 更容易结合水分子,同时大量的水分子能够吸附空气中的颗粒物,净化空气,使得 NAI 生成速率大大提高。

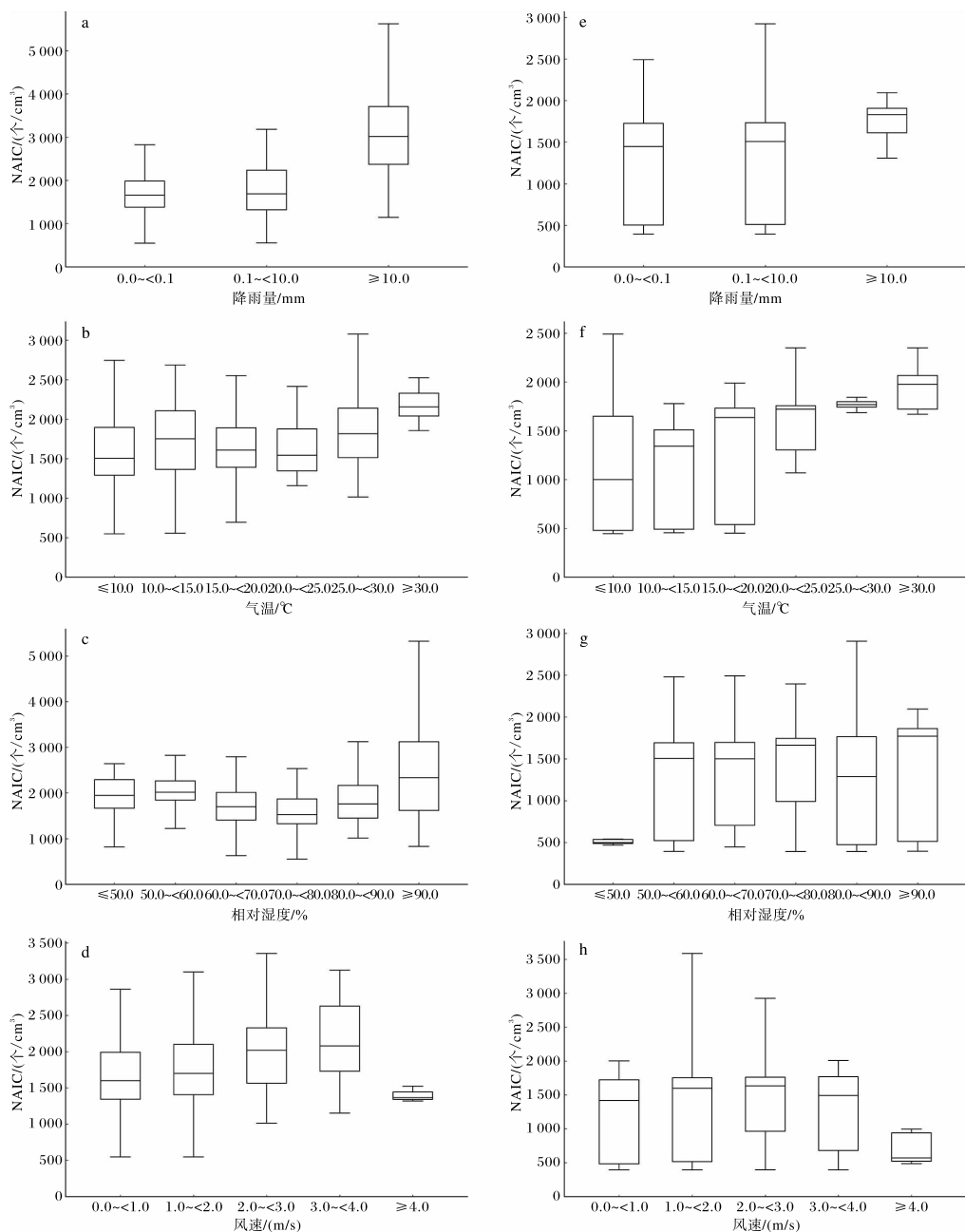


图3 石泉林区和城区 NAIC 与气象因子关系(a、e:降雨量;b、f:气温;c、g:相对湿度;d、h:风速;
a、b、c、d 林区, e、f、g、h 为城区)

NAIC 随气温升高呈增加趋势(图 3b 和图 3f)。在一定范围内,气温越高,树木光合作用越

强,植物尖端放电越强,空气中 NAIC 越高^[27]。不论林区还是城区,NAIC 随相对湿度增加表现

出增加趋势(图 3c 和图 3g)。NAIC 随风速增大表现出增加趋势(图 3d 和图 3h),但当风速大于 4 m/s时,NAIC 明显下降。可能是因为轻微风风速较小时造成的摩擦可促使植物尖端放电产生更多 NAI,也可以促使粒子相互碰撞使 NAIC 升高^[30-31];但当风速较大时,易将区域内 NAI 吹散,使 NAIC 降低^[32]。

考虑到气象要素和 NAIC 均具有明显的季节变化特征,以及各气象要素间可能存在相互影响,故采用偏相关系数对林区和城区各季节 NAIC 与气象因子的相关性进行分析。由表 2 可知,不同季节林区和城区 NAIC 与平均气温均呈正相关,春季偏相关系数(分别为 0.177 和 0.138)通过 0.05 显著性水平检验;春秋季 NAIC 与最高气温、最低气温呈负相关,林区夏季 NAIC 与最高气温相关性(−0.317)通过 0.01 显著性水平检验,

冬季 NAIC 与最高气温相关性(0.182)通过 0.05 显著性水平检验,与最低气温相关性(−0.243)通过 0.05 显著性水平检验。不同季节林区和城区 NAIC 与降雨量均呈正相关(偏相关系数为 0.391~0.638),且通过 0.01 显著性水平检验(除冬季相关性未通过显著性检验),秋季相关性最高(林区和城区分别为 0.606 和 0.638),其次为夏季(林区和城区分别为 0.398 和 0.499),城区 NAIC 与降雨量的相关性略高于林区。进一步分析发现,春夏季 NAIC 与相对湿度呈正相关,秋冬季为负相关,林区春季相关性(偏相关系数为 0.143)通过 0.05 显著性水平检验,城区秋季相关性(偏相关系数为 −0.236)通过 0.05 显著性水平检验。林区 NAIC 与风速春夏季呈正相关,秋冬季呈负相关,城区 NAIC 与风速呈正相关(夏季除外),但相关性未通过显著性检验。

表 2 石泉城区和林区不同季节 NAIC 与气象因子的偏相关系数

气象因子	林区偏相关系数				城区偏相关系数			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
平均气温	0.177*	0.085	0.047	0.033	0.138*	0.070	0.005	0.031
最高气温	−0.057	−0.317**	−0.118	0.182*	−0.106	0.079	−0.130	0.073
最低气温	−0.002	0.040	−0.024	−0.243*	−0.043	0.037	0.099	−0.018
降雨量	0.391**	0.398**	0.606**	0.049	0.442**	0.499**	0.638**	0.034
相对湿度	0.143*	0.254	−0.063	−0.085	0.102	0.324	−0.236*	−0.016
风速	0.055	0.006	−0.100	−0.178	0.069	−0.077	0.171	0.140

注: * 表示通过 0.05 水平(双尾)检验, ** 表示通过 0.01 水平(双尾)检验。

2.3 预报模型建立与检验

选取日平均气温、日降雨量、日平均风速、日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度等气象因素为预报因子,以 NAIC 为自变量,采用逐步回归

法引入回归效果较好的气象要素,剔除效果较差的要素,得到林区和城区不同季节 NAIC 等级预报模型(表 3)。结果发现林区和城区各季节预报模型均通过了显著性检验。综合考虑模型历史回

表 3 石泉林区和城区不同季节 NAIC 等级预报模型及拟合优度

区域	季节	预测模型	R ²
林区	春	$Y = -15.591H + 59.066R + 2\,768.728$	0.202
	夏	$Y = -168.897T_{\max} + 43.457R + 226.484T_{\text{ave}} + 1\,591.233$	0.584
	秋	$Y = 61.015R - 35.330T_{\max} + 2\,428.444$	0.680
	冬	$Y = -156.283W - 22.780H + 3\,319.088$	0.379
城区	春	$Y = 18.747T_{\min} + 7.593H + 657.256$	0.086
	夏	$Y = 23.060T_{\max} + 1\,022.550$	0.036
	秋	$Y = 3.300R + 4.005H + 1\,426.350$	0.365
	冬	$Y = 113.468R + 875.283$	0.026

注: R 为降雨量, H 为相对湿度, $T_{\min}$ 为最低气温, $T_{\max}$ 为最高气温, T_{ave} 为平均气温, W 为风速; 林区和城区各季节预测模型均通过 t 检验。

算结果和对未参与建模样本的预测情况,对模型的预报能力进行检验。

首先,对比分析不同季节模型回算值与实际观测值的差异(图4),并计算历史回算值与实际观测值之间的相关系数。结果发现,林区和城区在不同季节的NAIC预测模型均具有较好的模拟能力,历史回算值与实际观测值的变化趋势基本一致,夏季和秋季模型模拟能力优于春季和冬季,林区夏季和秋季模型回算值与观测值的相关系数

为0.828和0.885,城区夏季和秋季模型回算值与观测值的相关系数为0.573和0.844。按照空气负离子浓度等级划分标准(表1),对NAIC观测值和模型回算值分别进行等级划分,检验模型对NAIC等级的预报能力。从表4可以看出,NAIC等级越高,模型模拟能力越强,城区四个季节NAIC等级为“Ⅰ级”的预报准确率达到81%以上,“Ⅱ级”和“Ⅲ级”的预报准确率基本在65%~82%和27%~67%。林区NAIC预报模型

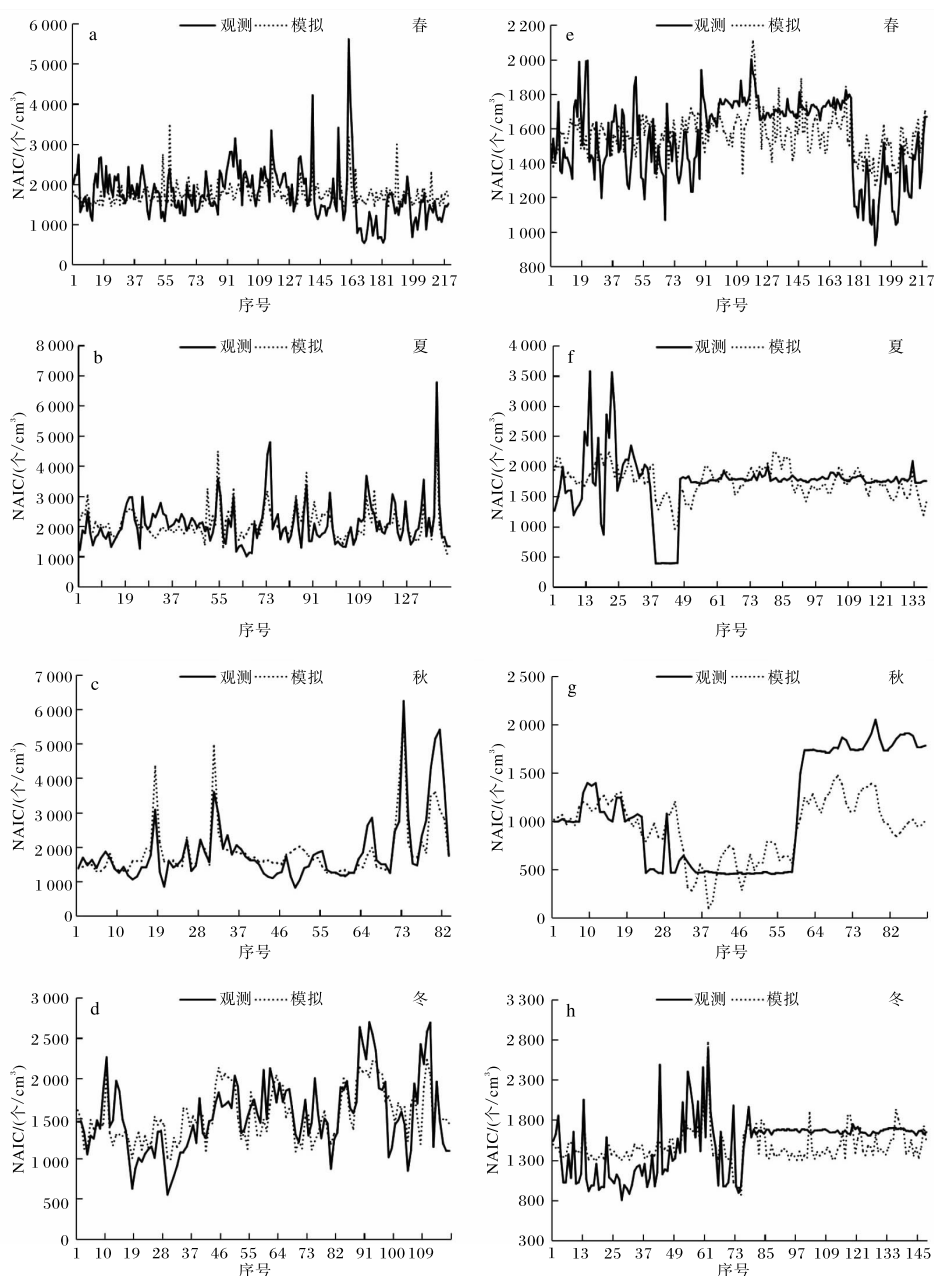


图4 不同季节NAIC等级预报模型的历史回算值与观测值对比(a、b、c、d为林区,e、f、g、h为城区)

的模拟能力强于城区,四个季节中 NAIC 等级为“Ⅰ级”的预报准确率达到 93%以上,“Ⅱ级”的预

报准确率达到 74%以上。

表 4 NAIC 等级预报模型历史回算结果与实际观测对比及预报准确率

地区	时段	实际观测	回算结果			准确率/%
			Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	
城区	春	201(Ⅰ级)	201	0	0	100.0
		18(Ⅱ级)	6	12	0	66.7
	夏	124(Ⅰ级)	123	1	0	99.2
		4(Ⅱ级)	1	3	0	75.0
		9(Ⅲ级)	1	2	6	66.7
	秋	37(Ⅰ级)	30	5	2	81.1
		23(Ⅱ级)	6	15	2	65.2
		30(Ⅲ级)	16	6	8	26.7
	冬	110(Ⅰ级)	109	1	0	99.1
		36(Ⅱ级)	4	32	0	82.1
林区	春	190(Ⅰ级)	190	0	0	100.0
		30(Ⅱ级)	5	25	0	83.3
	夏	139(Ⅰ级)	137	2	0	98.6
		4(Ⅱ级)	0	4	0	100.0
	秋	72(Ⅰ级)	0	72	0	100.0
		11(Ⅱ级)	0	11	0	100.0
	冬	122(Ⅰ级)	114	8	0	93.4
		27(Ⅱ级)	7	20	0	74.0

其次,利用未参与建模的样本对模型预报能力进行检验(表 5)。结果发现模型对林区 NAIC 等级的预报能力强于城区:林区 NAIC 等级为“Ⅰ级”的预报准确率达到 100%,“Ⅱ级”预报准确率达到 75%以上;城区 NAIC 等级为“Ⅰ级”的预报准确率达到 71%以上,“Ⅱ级”和“Ⅲ级”预报准确率为 70%以上。

综合来看,城区和林区不同季节 NAIC 等级预报模型整体效果较好,NAIC 等级越高,预测越精准;但因城区环境复杂(建筑、交通、雾霾等因素),模型对其预报能力弱于林区。需要注意的是,受限于当前样本量不足,模型预报准确率可能存在波动,下一步可通过扩大样本数量提升模型的准确率和稳定性。

3 结论和讨论

(1)林区和城区 NAIC 均达到空气清新标准,林区高于城区。NAIC 具有明显的季节变化特征,夏季最高,春季次之,秋冬季较低;一年中 6—8 月最高,11 月最低;日尺度上 NAIC 呈“单峰”型分布,06—08 时最高,14 时左右最低,15 时之后迅速回升,次日 06—08 时再次达到高峰。

(2)NAIC 与平均气温呈正相关,与降雨量呈极显著正相关(冬季未通过显著性检验),当出现中雨及以上等级降雨时,NAIC 明显增加,比无雨日分别增加 95.7%(林区)和 27.9%(城区)。NAIC 与相对湿度在春夏季为正相关,秋冬季为负相关。林区 NAIC 与风速在春夏季为正相关,秋冬季为负相关,城区 NAIC 与风速为正相关(夏季除外)。

表 5 NAIC 等级预报模型对未参与建模样本的预报能力检验

地区	时段	实际观测	模拟结果			准确率/%
			I 级	Ⅱ 级	Ⅲ 级	
城区	春	11(I 级)	11	0	0	100.0
	夏	7(I 级)	5	2	0	71.4
		4(Ⅱ 级)	1	3	0	75.0
	秋	1(I 级)	1	0	0	100.0
		4(Ⅱ 级)	1	3	0	75.0
		10(Ⅲ 级)	1	2	7	70.0
	冬	7(Ⅱ 级)	2	5	0	71.4
林区	春	10(I 级)	10	0	0	100.0
	夏	1(Ⅱ 级)	0	1	0	100.0
		7(I 级)	7	0	0	100.0
		3(Ⅱ 级)	0	3	0	100.0
	秋	5(I 级)	5	0	0	100.0
	冬	3(I 级)	3	0	0	100.0
		4(Ⅱ 级)	1	3	0	75.0

(3)选取对 NAIC 变化有显著影响的气象因子作为预报因子,采用逐步回归法建立城区和林区不同季节 NAIC 等级预报模型。模型历史回算值与观测值的相关性夏秋季高于冬春季,夏秋季林区预报模型历史回算值与观测值相关系数为 0.828~0.885,城区为 0.573~0.844。NAIC 等级越高,模型模拟能力越强。利用模型对未参与建模的样本进行预测,发现不同季节林区和城区 NAIC 等级预报准确率可达 70%以上。NAIC 等级预测模型的建立实现了以城区公园和云雾山景区为代表的城区和林区环境下 NAIC 的定量化等级预报,可在一定程度上丰富生态旅游服务产品,提高生态康养气象服务水平。

(4)由于研究区域环境的复杂性,本文以气象因素为预报因子对 NAIC 等级预报开展了分析,预报模型的建立需要大量的数据样本,本研究获得的模型回归参数仍需结合后续样本数据的积累进一步优化调整。

参考文献:

[1] 彭巍,李明文,王慧,等. 空气负离子国内外研究进

展及其在森林康养方面的积极作用综述[J]. 温带林业研究,2020,3(3):11-14.

[2] 彭琳玉,许方岳,王立夫,等. 九连山国家森林公园负氧离子浓度时空变化及影响要素研究[J]. 西北林学院学报,2020,35(5):233-239.

[3] STAVROVSKAIA I G, SIROTA T V, SAAKIAN I R, et al. Optimization of energy dependent processes in mitochondria from rat liver and brain after inhalation of negative air ions [J]. Bipofizika, 1998, 43(5):766-771.

[4] BOWERS B, FLORY R, AMETEPE J, et al. Controlled trial evaluation of exposure duration to negative air ions for the treatment of seasonal affective disorder [J]. Psychiatry Research, 2017, 259: 7-14.

[5] 马志福,谭芳,韞娟. 空气负氧离子浓度参数在旅游度假区规划中的重要作用[J]. 科学中国人,2003(3):48-49.

[6] 骆媛媛,李明文,王慧,等. 五大连池风景区空气负氧离子浓度的变化规律[J]. 温带林业研究,2019,2(4):37-40.

[7] 姚益平,郁珍艳,李正泉,等. 浙江省空气负氧离子浓度分布特征[J]. 气象科技,2019,47(6):1006-1013.

- [8] 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.
- [9] 张晓辉,付桂琴,刘瑜珊,等. 承德北部空气负氧离子浓度特征及预报模型[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024,18(4):125-132.
- [10] 冯晓钰,张云惠,王智楷,等. 金华市不同区域负氧离子浓度特征与气象环境因素相关分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2024,18(3):150-157.
- [11] 黎勋,魏建军,王玮. 广西负氧离子浓度的变化特征分析[J]. 气象研究与应用, 2019, 40(3):98-101.
- [12] 卢振礼,杨成芳,崔广暑,等. 雷雨天气对负氧离子浓度的影响[J]. 气象科技, 2021,49(2):284-290.
- [13] 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.
- [14] 李少宁,李媛,鲁绍伟,等. 北京西山国家森林公园中空气负离子浓度与气象因子的相关性研究[J]. 生态环境学报, 2021,30(3):541-547.
- [15] 刘燕,王业成,王让会,等. 南京浦口区大气负离子的时空特征及其与气象条件的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2017,26(5):706-712.
- [16] 李巧云,李高飞,廖菊阳,等. 湖南省森林植物园空气负氧离子浓度特征及影响要素研究[J]. 湖南林业科技, 2019,46(1):18-23.
- [17] 任晓旭,陈勤娟,董建华,等. 杭州城区空气负离子特征及其与气象因子的关系[J]. 环境保护科学, 2016,42(3):109-112.
- [18] 赵蕾,吴坤梯,陈明. 海南省主要景区负氧离子浓度分布及预报方程研究[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(29):189-191.
- [19] 施光耀,桑玉强,张劲松,等. 自然状态下栓皮栎人工林空气负离子浓度与相对湿度的关系[J]. 中国农业气象, 2021,42(1):24-33.
- [20] 时聪,鲁绍伟,赵娜,等. 北京城市森林空气负离子浓度对温度的响应[J]. 生态学杂志, 2023,42(6):1365-1372.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 空气负(氧)离子浓度等级:QX/T 380—2017[S].
- [26] 周德平,佟维华,温日红,等. 闫山国家级森林公园负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.
- [27] 李爱博,赵雄伟,李春友,等. 基于控制试验的植株数量及空气温湿度与负离子的关系[J]. 应用生态学报, 2019,30(7):2211-2217.
- [28] 李哲. 对不同林分中空气负氧离子含量变化规律的研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2017.
- [29] 林巧美,陈裕强,陈璟,等. 揭阳市空气污染特征及气象条件分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(3):76-79.
- [30] 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.
- [31] 穆丹,梁英辉. 佳木斯绿地空气负离子浓度及其与气象因子的关系[J]. 应用生态学报, 2009, 20(8):2038-2041.
- [32] 常艾,刘敏,李常陵. 探讨空气负离子浓度与气象条件的关系[J]. 北京农业, 2015(6):116-117.