

多时间尺度下森林公园负离子变化特征及与温湿度关系研究

朱映辰¹, 谭芳林², 阙翔^{1,6*}, 洪宇³, 潘爱芳⁵, 刘金福^{1,4,6}

(1. 福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省林业科学研究院, 福建 福州 350012; 3. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 4. 福建省高校生态与资源统计重点实验室, 福建 福州 350002; 5. 福州植物园, 福建 福州 350012; 6. 自然资源部东南生态脆弱区监测修复工程技术创新中心, 福建 福州 350001)

摘要:空气负离子(negative air ion, NAI)浓度是衡量空气清洁度的重要指标之一,不同时间尺度下 NAI 浓度的分析结果可能存在差异。从多时间尺度(时、天、月、季、年)视角出发,通过 Mann-Kendall 检验探究福州国家森林公园 2017—2020 年 NAI 浓度的变化趋势,采用小波分析探究 NAI 浓度变化周期性,应用灰色关联厘清多时间尺度下 NAI 浓度与温湿度的关系变化。结果表明,1)NAI 浓度在春夏季变化不显著,秋冬季显著下降。2)NAI 时平均浓度峰值和谷值分别在 4:00 和 11:00,冬春季低且平稳,夏秋季较高且波动强。3)月尺度 NAI 浓度存在 6、11、17、52 个月的主周期,日尺度具有 6、12、18、40 d 的主周期,时尺度存在 12、19、51 h 的主周期,分钟尺度存在 25、40 min 主周期。4)NAI 浓度与温度灰色相关性低于浓度与湿度灰色相关性,二者在时和日尺度上较低,在月和季尺度上较高。研究结果从多时间尺度揭示 NAI 浓度变动特征及其与温湿度关系,并给出高效康养出行时间建议,即在 5、10 月的 6、12、18、24、30 日的 8:00、16:00 进行游园较为适宜。

关键词:多时间尺度;负离子;小波分析;变化特征

中图分类号:S731.3

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0211-08

Variation Characteristics of NAI Concentration and Its Correlation With Temperature and Humidity From Multiple Time Scales in Forest Park

ZHU Ying-chen¹, TAN Fang-lin², QUE Xiang^{1,6*}, HONG Yu³, PAN Ai-fang⁵, LIU Jin-fu^{1,4,6}

(1. College of Computer and Information Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 2. Fujian Academy of Forestry Science, Fuzhou 350012, Fujian, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China; 4. Key Laboratory for Ecology and Resource Statistics of Fujian Province, Fuzhou 350002, Fujian, China; 5. Fuzhou Botanical Garden, Fuzhou 350012, Fujian, China; 6. Technology Innovation Center for Monitoring and Restoration Engineering of Ecological Fragile Zone in Southeast China, Ministry of Natural Resources, Fuzhou 350001, Fujian, China)

Abstract: Negative air ion (NAI) concentration is one of the important indicators to measure air cleanliness. The analysis results of NAI concentration may be different when using different time scales. In perspective of multiple time scales (hour, day, month, season, and year), Mann-kendall (M-K) test was used to explore the trend of NAI concentration from 2017 to 2020 in Fuzhou National Forest Park. The metric of wavelet analysis was employed to explore the periodic variation characteristics of NAI concentration. Besides, grey correlation model was utilized for analyzing the correlations and their variations between NAI

收稿日期:2022-10-05 修回日期:2023-02-21

基金项目:福建省省级科技创新重点项目(2021G02007);中央引导地方科技发展资金项目(2020L3006,2021L3033);福建省科技创新项目资金资助(东南生态修复[2021]4号 KY-090000-04-2021-013);福建省林业科技项目(2022FKJ02,2022FKJ26);福建农林大学科技创新专项基金(KCX21F33A,CXZX2020149C);数字福建环境监测物联网实验室开放课题(202008);福建农林大学乡村振兴服务团队支持计划(11899170152)。

第一作者:朱映辰。研究方向:资源环境统计。E-mail:954616944@qq.com

* **通信作者:**阙翔,博士,副教授,研究生导师。研究方向:空间统计学、地学信息系统。E-mail:quexiang@fafu.edu.cn

concentration and temperature and humidity by different time scales. The results showed that 1) the NAI concentration did not change significantly in spring and summer, but decreased significantly in autumn and winter. 2) The peak and valley values of the mean NAI concentration occurred at 4 and 11 o'clock, respectively. The variation of mean NAI concentration was low and stable in winter and spring, but high and fluctuated in summer and autumn. 3) There were main periods of 6, 11, 17 and 52 months at the scale of month of NAI concentration, 6, 12, 18, and 40 days at the scale of day, 12, 19 and 51 hours at the scale of hour, and 25, 40 minutes at the scale of minute. 4) The grey correlation between NAI concentration and temperature was lower than that between NAI concentration and humidity; both of them were lower at scales of minute and day, and higher at the scales of month and season. This research reveals the variation characteristics of NAI concentration and its relationship with temperature and humidity from multiple time scales, and proposes the travel time for efficient forest health care, that is, at 8:00 and 16:00 on 6th, 12th, 18th, 24th and 30th of May and October, which are more suitable for a park tour.

Key words: multiple time scale; negative air ion; wavelet analysis; change characteristics

空气负离子(negative air ion, NAI)是带负电荷的单个气体分子和氢离子团的总称^[1],具有改善心肌功能、提高免疫力和促进新陈代谢等多种功能^[2-3],已成为评价空气清新程度和地方生态环境的重要指标^[4-5],备受大众关注。关昶翔等^[6]以日和小时2个时间尺度探讨福州国家森林公园 NAI 浓度变化规律及相关因素,刘佳明等^[7]收集小时和月份 NAI 数据探讨其浓度趋势与环境因子的关系。骆媛媛等^[8]研究发现时间尺度和区域位置变化极大影响 NAI 浓度对温湿度的响应关系,基于单一或较少的时间尺度数据建模可能无法客观反映 NAI 浓度的真实变化特点。张嘉昕和邹嘉南^[9]、余娟^[10]从多个时间尺度开展 NAI 浓度趋势及相关性研究,结果表明 NAI 浓度与湿度相关性一般大于其与温度相关性,但时序数据多可能导致 Pearson 系数偏小局限性^[11];Li 等^[12]也基于时、日、周、月时间尺度探讨武夷山地区 NAI 浓度变化及其影响因素,但其拟合回归方程精度并不太理想,且忽略了 NAI 浓度的周期性、趋势等特征。考虑趋势分析和小波分析等方法常用于气象特征分析^[13]、流域水资源利用^[14]和植被物候预测^[15]等研究领域,可识别 NAI 序列变化规律并提取不同时间状态信息,灰色关联法量化其与环境因子驱动关系^[16-17],为深入探究 NAI 与温湿度变化交互影响的物理机制提供可能。为此,拟结合趋势分析、小波分析、灰色关联方法,综合多时间尺度视角探究 NAI 浓度随时间演变规律及其驱动因素关系,旨在为 NAI 浓度区域预报、决策制定、高效森林康养等方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

福州国家森林公园作为全国十大森林公园之

一,是福州城市森林的主体和城市生态系统的重要组成部分,总面积达 860 hm²^[18]。气温适宜,降雨量、光照充足,植被覆盖完整,拥有本土 1 000 多种植物及外来引进的 1 700 多种树种、高达 226 种竹类以及超过 150 种鸟类^[19-20]。日均 NAI 浓度基本处于 3 000 个/cm³ 及以上,参照相关标准^[21-22],日均浓度已达到 I 级标准,极适合作为森林康养基地。

1.2 数据获取及预处理

森林公园内布置 NAI 浓度测算仪器,采集到 2017 年 9 月 1 日—2020 年 8 月 31 日的分钟数据,及其同步监测的温度、湿度数据。参照负氧离子监测相关标准^[23]和福建省林业科学院制定标准对数据进行预处理:1)将 15 min 内 NAI 浓度 2 次跳变超过 10 000 个/cm³,15 min 内保持 10 000 个/cm³ 设定为异常数据进行剔除;2)对比每个数值与其前后的值,若该值大于前后值的 3 倍或小于 1/3,则剔除;3)剔除超过 3 倍标准差的数据离群点;4)对剔除数据位置进行线性插值。基于 1)–4)点,将数据按照时、日、月、季、年尺度取平均值,其中季节分为春季(3–5 月)、夏季(6–8 月)、秋季(9–11 月)、冬季(12 月—次年 2 月)。

1.3 Mann-Kendall(M-K)检验

Mann-Kendall(M-K)检验是一种非参数统计检验方法,可克服时间序列中变化大、异常值多的缺陷^[24-25],用于分析和检验 NAI 浓度趋势变化,计算第 i 个时间点的检验统计量 S_i

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

式中: i, j 为时间且 $i < j$; n 为样本长度;sgn 为符号函数。

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

计算统计量 Z_{mk}

$$Z_{mk} = \begin{cases} (S-1)/V_{arS}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ (S+1)/V_{arS}, S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

1.4 Morlet 小波分析

Morlet 小波在分辨时间序列尺度方面表现出较强功能性,可识别 NAI 浓度序列的变化频次与周期长度,用于探究其时序周期性以精确预测其未来倾向^[26-27]。其函数表达式为

$$W_f(a,b) = |a| - \frac{1}{2} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \Phi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) \quad (4)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为变换系数; a 为频率参数,表示波动周期性; b 为时间参数,表示波动平移; Φ 为母小波函数; f 为小波频率; Δt 为时间间隔。使用小波方差判断小波周期^[28]

$$V_{ar}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (5)$$

其中, $V_{ar}(a)$ 为小波方差,小波方差随 a 的变化过程即为小波方差图,能反映信号波动能量分布情况。

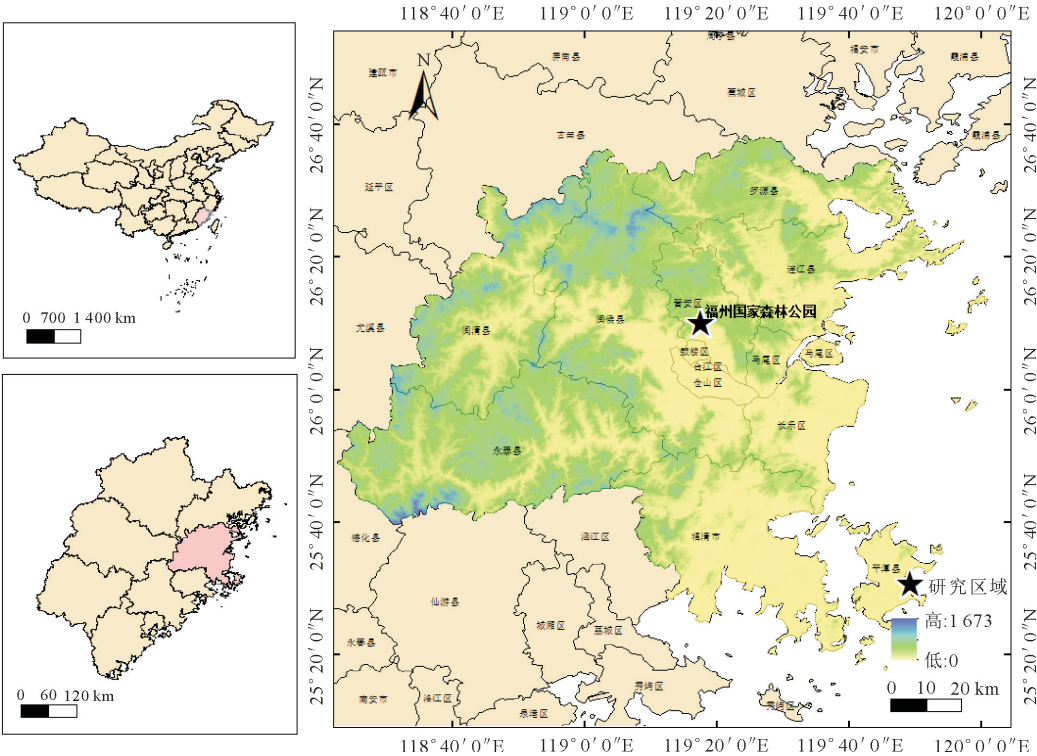


图 1 研究区域位置及高程示意图

Fig. 1 Location and elevation of the study area

1.5 灰色关联法

灰色关联法是衡量系统内相关因素间趋向一致性的方法,可用于探究 NAI 浓度与环境因素的相关关系^[29-30]。灰色关联分析需确定母序列并进行无量纲化处理,计算灰色关联系数并将关联系数降序排列,得到不同因子的灰色关联度

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \zeta_{i(k)} \quad (6)$$

式中: γ_i 为灰色关联度; $\zeta_{i(k)}$ 为对应因子的灰色关联系数; n 为因子数量。

2 结果与分析

2.1 NAI 浓度时序变化趋势

单日内 NAI 浓度变化较为剧烈,大体呈“双峰单谷”趋势(图 2)。总 NAI 平均浓度为 5 893 个/ cm^3 ,于 11:00 达到最小值,浓度为 4 997 个/ cm^3 ,4

时浓度达到全日最高值 6 554 个/ cm^3 。从不同季节看,NAI 浓度秋季(7 768 个/ cm^3)>夏季(7 718 个/ cm^3)>冬季(4 609 个/ cm^3)>春季(4 391 个/ cm^3)。夏秋季 NAI 浓度波动较为剧烈,大部分时间在 7 000 个/ cm^3 以上,夏季最高和最低点分别在 16:00 和 3:00(10 183 个/ cm^3 和 5 365 个/ cm^3),秋季最高和最低点在 18:00 和 15:00(10 417 个/ cm^3 和 5 815 个/ cm^3);冬春季趋势平稳且接近,全天变化仅为 1 413 个/ cm^3 和 1 568 个/ cm^3 。其原因可能为福建省属亚热带季风型气候,夏季高温多雨,同时受到盆地地形影响,夏天热量积压且不易散发,夏秋季气温普遍较高,植被光合效应较强,因此 NAI 浓度值整体较高,并受到如昼夜变化等因素的影响,波动较大。冬春季冷空气沉积导致植被生产效率不高,其浓度值普遍低于总 NAI 平均浓度且波动不强。

NAI 月均浓度在 5—10 月较高且变化大,其中

6 月和 10 月均出现峰值(分别为 $7\,562$ 个/ cm^3 和 $7\,479$ 个/ cm^3),是比较适合森林康养的月份,而其他月份 NAI 月均浓度较低且变化平稳(图 3)。其中,NAI 浓度在 6—8 月出现骤降,8 月达到浓度低点($5\,406$ 个/ cm^3),考虑到气温较高,超过植被光合作用的最适宜温度,光合速率减缓导致 NAI 浓度下降,与徐勇等^[31]研究结果一致。此外,4—6 月的浓度升高、10—11 月的浓度下降分别对应春、秋季的植被生长与枯萎,符合植物生长季节特征。

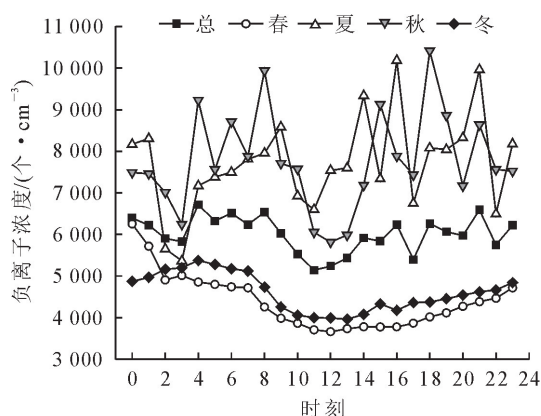


图 2 单日内 NAI 浓度变化

Fig. 2 NAI concentration changes in a single day

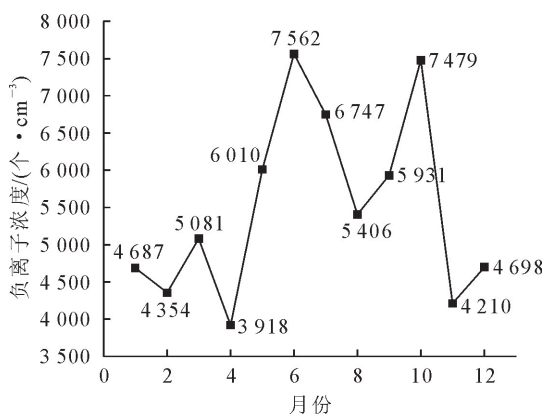


图 3 年内不同月份 NAI 浓度变化

Fig. 3 Changes of NAI concentration in different months

NAI 浓度季度变化符合福建省气候特点,夏季最高($6\,028$ 个/ cm^3),冬季最低($4\,580$ 个/ cm^3),春秋季浓度分别为 $5\,003$ 个/ cm^3 和 $5\,873$ 个/ cm^3 。M-K 检验结果见图 4。由图 4 可知,2017 年秋、2018 年冬、2019 年秋冬和 2020 年夏季 NAI 浓度显著下降;2018 年春、夏、秋、2019 年春、夏、2020 年春无明显的变化趋势,仅有 2017 年冬季显著上升。秋冬季 NAI 浓度大部分显著下降,春夏季趋势一般没有显著变化,表现出季节性特征。

2.2 NAI 浓度周期变化

多时间尺度下 NAI 浓度的 Morlet 小波分析结果见图 5—图 8。在月尺度以 52、17、11、6 个月为主

周期;在研究期尾部截取其最小周期 6 个月(2019 年 3—8 月)进行分析,日尺度存在 40、18、12、6 d 的周期,但春季浓度变化小,因此周期性不显著;时尺度主周期分别为 51、39、12 h,以 51 h 变化较显著;分尺度在 40 min 和 25 min 上存在周期性,以 40 min 变化较为显著。

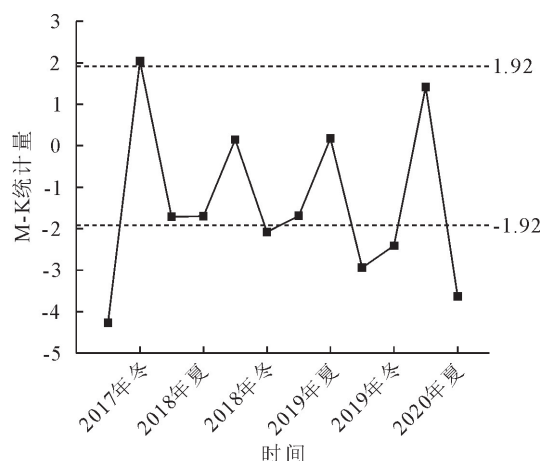


图 4 NAI 浓度的季节趋势显著性

Fig. 4 Significance of seasonal trend of NAI concentration

2.3 NAI 浓度与温湿度变化关系

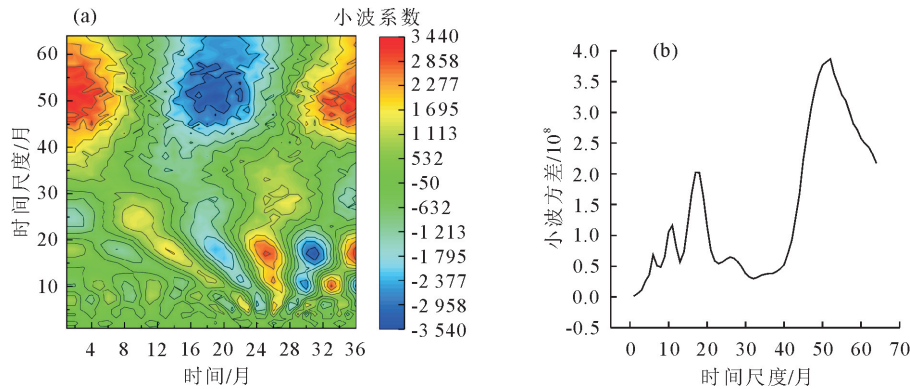
月均温度变化总体趋势呈现“倒 V 形”,具有明显的季节性特点(图 9),1 月为全年最低气温(12.5 $^{\circ}\text{C}$),7 月达到最高(29.9 $^{\circ}\text{C}$)。NAI 浓度与月均温度的整体灰色关联系数为 0.959,8 月之前总体呈上升趋势,但在 2、4 月和 7 月有明显下降趋势,分别为 0.54、0.83 和 0.86。8—12 月温度与 NAI 浓度相关性高且平稳,其中 12 月 NAI 浓度变化小,但灰色关联度为全年最高(0.98)。

月均湿度有明显的波动性。春季湿度波动较小,总体维持较高水平,6—11 月波动加剧并于 10 月达到全年最低值(72%)。NAI 浓度与湿度的整体灰色关联系数为 0.963,单年内与温度、浓度相关性趋势相似但变化更小,2 月和 7 月分别为关联度最低点(0.77)和次低点(0.85)。

多时间尺度上 NAI 浓度与温湿度都存在较为显著的关联性,呈先下降、后上升的趋势,但其对温度响应程度较湿度低(图 10)。相关性均在时尺度最大(分别为 0.81 和 0.87),即浓度受短时间环境骤变影响大;分别在月、季尺度达到最低值(分别为 0.65 和 0.70),在年时间尺度上回升,形成“倒 U 形”趋势,表明浓度受季节变化影响相对小。

3 讨论

福州国家森林公园 NAI 单日浓度总体呈“U 形”趋势,在 12:00 左右存在极小值,其与赵怡宁等^[32]和王一荃等^[33]等结论相似,其可能的原因是



(a)波系数实部等值线图;(b)小波方差。下同。

图 5 月尺度 NAI 浓度小波系数实部等值线图与小波方差

Fig. 5 Real part contour map of wavelet coefficients and wavelet variance of NAI concentration at scale of month

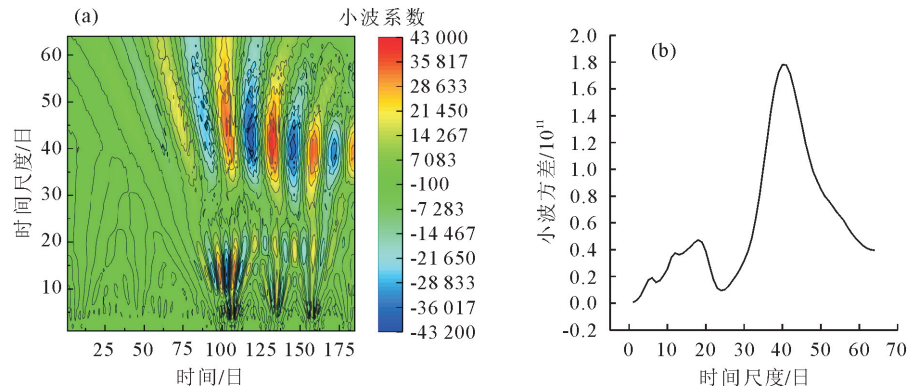


图 6 日尺度 NAI 浓度小波系数实部等值线图与小波方差

Fig. 6 Real part contour map of wavelet coefficients and wavelet variance of NAI concentration at scale of day

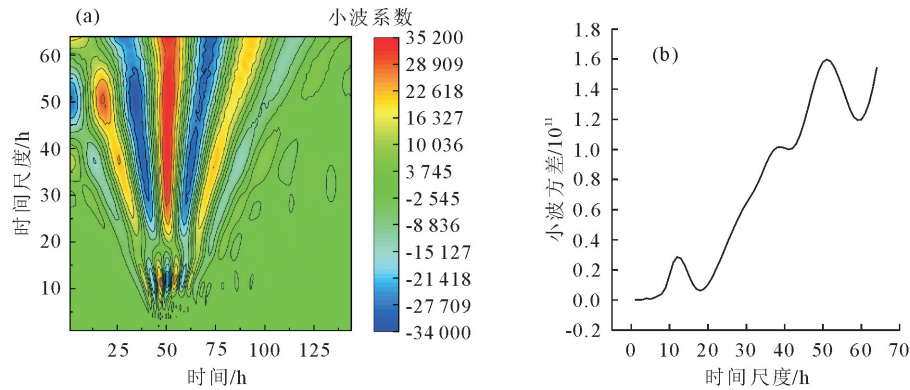


图 7 时尺度 NAI 浓度小波系数实部等值线图与小波方差

Fig. 7 Real part contour map of wavelet coefficients and wavelet variance of NAI concentration at scale of hour

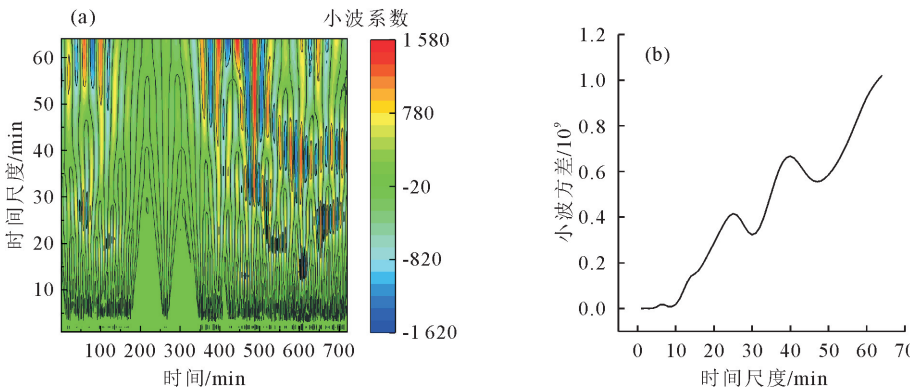


图 8 分尺度 NAI 浓度小波系数实部等值线图与小波方差

Fig. 8 Real part contour map of wavelet coefficients and wavelet variance of NAI concentration at scale of minute

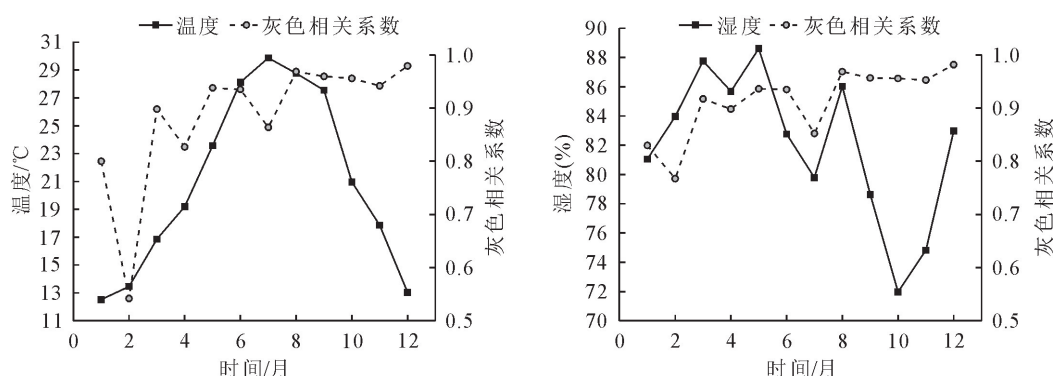


图9 温湿度月变化及其与NAI浓度的灰色相关性

Fig. 9 Monthly temperature and humidity variation and its grey correlation with NAI concentration

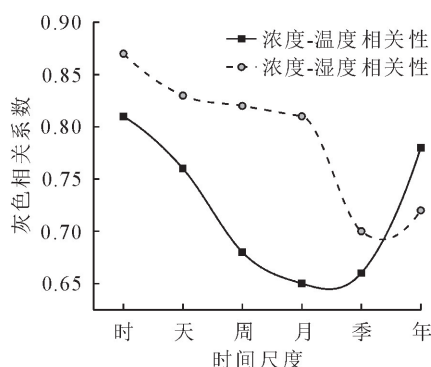


图10 多时间尺度NAI浓度与温湿度灰色相关性

Fig. 10 Grey correlation between NAI concentration and temperature and humidity at multiple time scales

中午植被受到气温等影响,温度过高导致植被气孔关闭,进入“午休”状态^[34],浓度达到低点。从季节看,福州国家森林公园的NAI浓度秋高春低的特征与陈步峰等^[4]、陶宝先等^[35]得到的广州帽峰山和南京森林区域夏高冬低结果不同,可能与研究区地形、气候条件和植被覆盖及类型等有关,帽峰山和南京森林区为丘陵地形,不具备积蓄热量的地理条件,但福州地处盆地,热量不易扩散。此外,福州国家森林公园又以热带亚热带植被为主,适宜温度为21.0~28.1℃,与福州市的秋季气温较为接近^[36];公园内植被覆盖密集,冬季容易受到枯落物和树冠层的影响,温度和长波辐射得以保存^[37],因此冬季浓度高于春季。

NAI浓度与湿度相关性大于其与温度相关性,与陈梓茹等^[38]和朱宾宾等^[39]结论吻合。二者在2、4、7月和11月出现凹点,其中7月凹点可能是气温超过了植物适宜温度(园内最高气温达到33.8℃),植被生理变化变缓,气温对浓度影响减弱造成。2、4月和11月出现凹点可能受气候或植被状态改变影响。多时间尺度下温度、湿度与NAI相关性研究表明在时尺度下NAI浓度受环境骤变影响程度较高,

该影响随时间尺度增大而降低,与冯燕珠^[40]结果相似,不过本研究中NAI浓度在年尺度下与温度相关性高于与湿度相关性,可能与林内积温效应表现出长期的影响有关^[41];福州国家森林公园背靠八一水库,同时园内环境受植被蒸腾作用影响^[42],湿度长时间维持较高水平,对浓度变化影响小。

小波分析表明NAI浓度在长时间尺度(月、日)和短时间尺度(时、分尺度)分别具有相似趋势,但两者差异较大。随着时间尺度缩短,NAI浓度变动更剧烈并表现出更为相近的趋势^[8],日尺度相比月尺度第一、二主周期更为接近,时、分尺度同理。长时间尺度第一主周期较长,第二主周期都为20d左右,具有较为稳定的周期分布;短时间尺度浓度变化较大,周期分布散乱,小波方差仍处于上升趋势;造成浓度周期性长短时间尺度差异的原因可能为昼夜影响(时尺度最小周期为12h)。此外,不同时间尺度周期间存在循环规律:40min约为12h(时尺度最小周期)、6d(日尺度最小周期)、6个月(月尺度最小周期)的周期,结合图1和图2可在不同时间尺度上精确获得福州国家森林公园最佳游玩时间。

本研究的NAI浓度分析可为市民或旅客到福州国家森林公园高效康养提供一定的理论参考。然而,因监测数据质量、预处理方式等不同,本文仍存在一些不足:1)未考虑气象因子与NAI浓度关系存在空间异质性的情形;2)与其他Pearson相关研究相比^[7,12,43],选取的灰色相关性值更大,如何更科学地测度和评价NAI浓度与其温度、湿度之间关系仍需研究。3)考虑到监测仪器等差异,按照1.2节标准预处理NAI浓度数据,可能会影响分析结果可靠性,需进一步探讨。

4 结论

福州国家森林公园内NAI单日浓度冬春季低且变化平稳,夏秋季高且波动强,为受到福州市地形

和气候影响;M-K 检验结果同样显示,浓度在大部分秋冬季显著下降,在冬春季变化不显著;二者表现出明显的季节特征。

NAI 浓度与温湿度的多时间尺度灰色关联分析表明其与湿度相关性略高于与温度相关性,7 月福州气温过高,相关性较低,2、4、11 月为气候或植被生长、枯萎导致相关性下降;但在年尺度上温度相关性大于湿度相关性,原因为积温长趋势浓度对影响更大。

多时间尺度小波分析表明,长时间尺度(月、日尺度)和短时间尺度(时、分尺度)周期性分别具有相似性,二者差异原因为季节气候;尺度下降时,浓度变动更剧烈,主周期间距缩短。结合 NAI 多时间尺度小波分析与时序变化,考虑在 6、10 月的 6、12、18、24、30 日的 8:00、16:00 游玩较好。

参考文献:

- [1] 章志攀,俞益武,孟明浩,等. 旅游环境中空气负离子的研究进展[J]. 浙江林学院学报, 2006, 23(1): 103-108.
ZHANG Z P, YU Y W, MENG M H, *et al.* Progresses of aeroanion in tourism environments[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2006, 23(1): 103-108. (in Chinese)
- [2] 赵亚红,徐翠霞,马玲,等. 3 种常绿树挥发物成分对空气负离子及微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 654-663.
ZHAO Y H, XU C X, MA L, *et al.* Effects of volatile components of three evergreen plants on air anion and microorganism[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020, 37(4): 654-663. (in Chinese)
- [3] 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.
PENG W, LI M W, WANG H, *et al.* A review of the research progress of negative air ion at home and abroad and its positive role in forest health[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2020, 3(3): 11-14. (in Chinese)
- [4] 陈步峰,肖以华,王莘仪,等. 广州帽峰山林区空气负离子和气象因素全年时尺度变化及关系[J]. 生态环境学报, 2020, 29(11): 2240-2250.
CHEN B F, XIAO Y H, WANG X Y, *et al.* Changes and relationships in hourly scales throughout the year for the negative air ion and meteorological factors in Maofeng Mountain forest areas, Guangzhou[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(11): 2240-2250. (in Chinese)
- [5] 林宜鸿,何中声,杨素慧,等. 永泰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.
LIN Y H, HE Z S, YANG S H, *et al.* Spatial heterogeneity of summer air negative oxygen ion in Yongtai county[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 82-88. (in Chinese)
- [6] 关昶翔,许新宇,林双毅,等. 福州国家森林公园空气负氧离子浓度变化特征与影响因素[J/OL]. (2022-06-06) [2022-09-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5061.S.20220602.1910.004.html>.
- [7] 刘佳明,刘君,李镜玉. 古田会址旅游景区空气负离子浓度变化特征与气象因素分析[J]. 防护林科技, 2019, 189(6): 45-47, 92.
LIU J M, LIU J, LI J Y. Characteristics of concentration changes of negative air ion and analysis of meteorological factors of tourism scenic spot in Gutian Meeting Site[J]. Protection Forest Science and Technology, 2019, 189(6): 45-47, 92. (in Chinese)
- [8] 骆媛媛,李明文,王慧,等. 五大连池风景区空气负离子浓度的变化规律[J]. 温带林业研究, 2019, 2(4): 37-40.
LUO Y Y, LI M W, WANG H, *et al.* Variations of air anion concentration in Wudalianchi scenic spot[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2019, 2(4): 37-40. (in Chinese)
- [9] 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.
ZHANG J X, ZOU J N. Response relationships between air anion concentration and meteorological factors in Dagangshan of Jiangxi Province[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2021, 44(1): 51-57. (in Chinese)
- [10] 余娟. 龙打岩洞空气负离子时空分布特征及影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021: 16-31.
- [11] 姜高霞,王文剑. 时序数据曲线排齐的相关性分析方法[J]. 软件学报, 2014, 25(9): 2002-2017.
JIANG G X, WANG W J. A correlation analysis in curve registration of time series[J]. Journal of Software, 2014, 25(9): 2002-2017. (in Chinese)
- [12] LI C, XIE Z, CHEN B, *et al.* Distributions of different time scales of negative air ion concentration in mount Wuyi National Park[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(9): 5037.
- [13] 敬文茂,任小凤,赵维俊. 1965—2018 年祁连山北麓及其附近地区气温与降水变化的时空格局[J]. 高原气象, 2022, 41(4): 876-886.
JING W M, REN X F, ZHAO W J. Variations of spatio-temporal pattern of temperature and precipitation in northern parts of the Qilian Mountains and the nearby regions from 1965 to 2018[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(4): 876-886. (in Chinese)
- [14] CHONG K L, LAI S H, El-Shafie A. A wavelet transform based method for river stream flow time series frequency analysis and assessment in tropical environment[J]. Water Resources Management, 2019, 33(6): 2015-2032.
- [15] 程鹏,孔祥伟,罗汉,等. 近 60 a 以来祁连山中上部气候变化及其径流响应研究[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1192-1201.
CHENG P, KONG X W, LUO H, *et al.* Climate change and its runoff response in the middle section of the Qilian Mountains in the past 60 years[J]. Arid Land Geography,

- 2020,43(5):1192-1201. (in Chinese)
- [16] 林津,洪宇,林志玮,等. 福建泉州湾河口湿地时空动态及其驱动机理[J]. 北京林业大学学报,2021,43(6):75-82.
LIN J, HONG Y, LIN Z W, *et al.* Spatiotemporal dynamics and its driving mechanism of the Quanzhou Bay Estuary Wetland, Fujian Province of Eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(6): 75-82. (in Chinese)
- [17] 何萍,李矜霄,付永梅,等. 滇中城市降水特征及其成因分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2019,55(4):626-634.
HE P, LI J X, FU Y M, *et al.* An analysis of precipitation characteristics and its causes in central Yunnan city[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(4): 626-634. (in Chinese)
- [18] 刘群阅,林毅伟,潘明慧,等. 福州国家森林公园功能评价研究[J]. 林业资源管理,2017(3):69-74.
LIU Q Y, LIN Y W, PAN M H, *et al.* The function perception evaluation of Fuzhou National Forest Park[J]. Forest Resources Management, 2017(3): 69-74. (in Chinese)
- [19] 李房英,朱哲民,周璐,等. 基于多元回归模型的城郊森林公园绿色锻炼空间吸引力研究[J]. 西北林学院学报,2020,35(6):288-295.
LI F Y, ZHU Z M, ZHOU L, *et al.* Attraction of green exercise space in suburban forest park based on multiple regression model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 288-295. (in Chinese)
- [20] 阙晨曦,池梦薇,陈铸,等. 福州国家森林公园景观格局变迁及驱动力分析[J]. 西北林学院学报,2017,32(6):169-177.
QUE C X, CHI M W, CHEN Z, *et al.* Landscape pattern changes and driving force analysis of Fuzhou National Forest Park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6): 169-177. (in Chinese)
- [21] 石强,钟林生,吴楚材. 森林环境中空气负离子浓度分级标准[J]. 中国环境科学,2002,22(4):33-36.
SHI Q, ZHONG L S, WU C C. Grades standard of aeroanion concentration in forest surroundings[J]. China Environmental Science, 2002, 22(4): 33-36. (in Chinese)
- [22] 国家林业和草原局. 森林康养基地质量评定:LY/T 2934—2018[S]. 北京:国家林业和草原局调查规划设计院,2018:6.
- [23] 国家林业和草原局. 空气负(氧)离子浓度观测技术规范:LY/T 2586—2016[S]. 北京:国家林业和草原局调查规划设计院,2016:11.
- [24] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [25] 佑承,刘蛟,张越关,等. 长江源区降水变化的时空分布规律分析[J]. 水资源研究,2020,9(3):335-343.
YOU C, LIU J, ZHANG Y G, *et al.* An analysis of spatiotemporal distribution of precipitation changes in the source region of the Yangtze River[J]. Journal of Water Resources Research, 2020, 9(3): 335-343. (in Chinese)
- [26] LIN J, QU L. Feature extractions based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 135-148.
- [27] 谢智博,穆兴民,高鹏,等. 基于 R/S 和 Morlet 小波分析的北洛河上游径流变化特征[J]. 水土保持研究,2022,29(2):139-144.
XIE Z B, MU X M, GAO P, *et al.* Variation characteristics of runoff in the upper reaches of Beiluo River based on R/S and Morlet wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2): 139-144. (in Chinese)
- [28] 焦鸿渤,叶清,彭琳玉,等. 江西省森林冰冻灾害风险时空特征[J]. 西北林学院学报,2021,36(3):158-167.
JIAO H B, YE Q, PENG L Y, *et al.* Spatial-temporal characteristics of forest freezing disasters in Jiangxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 158-167. (in Chinese)
- [29] 谭学瑞,邓聚龙,灰色关联分析:多因素统计分析新方法[J]. 统计研究,1995,65(3):46-48.
- [30] 湛社霞,匡耀求,阮柱. 基于灰色关联度的粤港澳大湾区空气质量影响因素分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2018,58(8):761-767.
ZHAN S X, KUANG Y Q, RUAN Z. Factors impacting the regional air quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area: a study based on grey correlation analysis[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2018, 58(8): 761-767. (in Chinese)
- [31] 徐勇,奚砚涛. 江苏省植被覆盖动态变化及其与气候因子的关系[J]. 水土保持通报,2015,35(4):195-201.
XU Y, XI Y T. Changes of vegetation coverage in Jiangsu Province and its relation with climate factors[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(4): 195-201. (in Chinese)
- [32] 赵伯宁,史常青,许荡飞,等. 崇礼区典型林分空气负离子浓度及影响因素[J]. 林业科学研究,2018,31(3):127-135.
ZHAO Y N, SHI C Q, XU D F, *et al.* Variations in negative air ion concentration associated with different vegetation types and influencing factors in Chongli district[J]. Forest Research, 2018, 31(3): 127-135. (in Chinese)
- [33] 王一荃,周璋,李意德,等. 不同热带森林空气负离子浓度评价研究[J]. 生态环境学报,2021,30(5):898-906.
WANG Y Q, ZHOU Z, LI Y D, *et al.* The spatial-temporal patterns and influencing factors of negative air ion in tropical forests, Hainan, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(5): 898-906. (in Chinese)
- [34] 许大全. 光合作用的“午睡”现象[J]. 植物生理学报,1997,33(6):466-467.
- [35] 陶宝先,张金池. 南京地区主要森林类型空气负离子变化特征[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(2):147-150.
TAO B X, ZHANG J C. A preliminary study of the variation of air anion in different forest stands in Nanjing city[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2012, 36(2): 147-150. (in Chinese)
- [36] 宁平. 华南地区乡土景观植物环境适宜性及空间布局[D]. 广州:广州大学,2012:59-62.
- [37] 何宁,林明丽,赵红云,等. 湘潭负氧离子浓度变化与气象要素的相关分析[J]. 贵州气象,2016,40(2):65-69.
HE N, LIN M L, ZHAO H Y, *et al.* Fluctuations of negative oxygen ion concentration and its influence of meteorological elements in Xiangtan[J]. Journal of Guizhou Meteorology, 2016, 40(2): 65-69. (in Chinese)

- dex[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(17):3413-3425.
- [19] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8):3907-3925.
- [20] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, *et al.* The shuttle radar topography mission[J]. Reviews of geophysics, 2007, 45(2).
- [21] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324):1379-1389.
- [22] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于 Sen+Mann-Kendall 的北京植被变化趋势分析[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(5):13-17.
- WANG D L, LIU W P, HUANG X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(5):13-17. (in Chinese)
- [23] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24):7798-7806.
- YUAN L H, JIANG W G, SHEN W M, *et al.* The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River basin from 2000 to 2010 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7798-7806. (in Chinese)
- [24] 易扬, 胡昕利, 史明昌, 等. 基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2021, 41(19):7796-7807.
- YI Y, HU X L, SHI M C, *et al.* Vegetation dynamics and its relationship with climate factors in the middle reaches of the Yangtze River based on MODIS NDVI[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19):7796-7807. (in Chinese)
- [25] 马明德, 马学娟, 谢应忠, 等. 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析[J]. 生态学报, 2014, 34(3):682-689.
- MA M D, MA X J, XIE Y Z, *et al.* Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: partial least-squares regression (PLS) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3):682-689. (in Chinese)
- [26] 田潇然, 王锦, 余哲修. 丽江坝区植被覆盖度时空变化驱动力研究[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3):180-190.
- TIAN X R, WANG J, YU Z X. Assessment of driving forces contributing to fractional vegetation cover spatio-temporal variation in Lijiang dam area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3):180-190. (in Chinese)
- [27] JONG R D, VERBESSELT J, SCHAEPMAN M E, *et al.* Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change[J]. Global Change Biology, 2012, 18(2):642-655.
- [28] LI S, SUN Z, TAN M, *et al.* Effects of rural-urban migration on vegetation greenness in fragile areas: a case study of Inner Mongolia in China[J]. Geogr. Sci. 2016, 26, 313-324.
- [29] 杜雨潇, 闫佳博, 卜元坤, 等. 陕北黄土高原林草景观破碎化时空演变特征分析[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(3):155-161, 198.
- DU Y X, YAN J B, BU Y K, *et al.* Spatiotemporal pattern evolution of forest and grass landscape fragmentation in the Loess Plateau of Northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(3):155-161, 198. (in Chinese)
- [30] ONEILL R V, KRUMMEL J R, GARDNER R H, *et al.* Indices of landscape pattern[J]. Landscape Ecology, 1988, 1(3):153-162.
- [31] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 等. 景观指数之间的相关分析[J]. 生态学报, 2005(10):2764-2775.
- BU R C, HU Y M, CHANG Y, *et al.* A correlation analysis on landscape metrics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005(10):2764-2775. (in Chinese)
- [32] 王小娜, 田金炎, 李小娟, 等. Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J]. 遥感学报, 2022, 26(2):299-309.
- WANG X N, TIAN J Y, LI X J, *et al.* Benefits of Google Earth Engine in remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2):299-309. (in Chinese)

(上接第 218 页)

- [38] 陈梓茹, 杨小可, 傅伟聪, 等. 龙岩国家森林公园冬季负离子浓度变化特征[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(6):1119-1126.
- CHEN Z R, YANG X K, FU W C, *et al.* The variation characteristics of anion concentration in Longyan National Forest Park in winter[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(6):1119-1126. (in Chinese)
- [39] 朱宾宾, 孙双红, 王立军, 等. 呼伦贝尔沙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, 79.
- ZHU B B, SUN S H, WANG L J, *et al.* Negative oxygen ion concentration and influencing factors in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest in Hulunbeier sandy land[J]. 2021, 36(4):55-59, 79. (in Chinese)
- [40] 冯燕珠. 公园不同植物配置群落空气负离子变化特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018:75-77.
- [41] 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.
- SHI G Y, SANG Y Q, ZHANG J S, *et al.* Relationships between negative air ion and relative humidity in *Quercus variabilis* plantation under natural conditions[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(1):24-33. (in Chinese)
- [42] 王晓红, 黄艳, 于宏影, 等. 大兴安岭地区森林内外主要气象因子对比研究[J]. 温带林业研究, 2019, 2(3):58-62.
- WANG X H, HUANG Y, YU H Y, *et al.* Comparisons of main meteorological factors inside and outside forests in Great Xing'an Mountains[J]. Journal of Temperate Forestry Research, 2019, 2(3):58-62. (in Chinese)
- [43] 季玉凯. 棋盘山风景区空气负离子分布与变化规律的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007:30-31.