

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2018012505

刘晴, 高鹏, 李成, 等. 泰安市典型生态功能区空气负离子的时空分布及影响因素分析[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 169-176.

LIU Qing, GAO Peng, LI Cheng, et al. Spatial-temporal distribution of negative air ions and its influencing factors in the typical ecological functional zones of Tai'an City[J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(1): 169-176.

泰安市典型生态功能区空气负离子的时空分布及影响因素分析*

刘晴 高鹏** 李成 王荣嘉 孙鉴妮 李肖

(山东农业大学林学院, 国家林业局泰山森林生态站, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点实验室, 泰安, 271018)

摘要 为了探讨城市不同生态功能区空气负离子的时空分布及其影响因素, 选取泰安市典型生态功能区(广场公园区、居民住宅区、城市道路区和工业厂房区), 对其空气正、负离子浓度、可吸入颗粒物(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$)浓度及其主要环境因子(空气温度、相对湿度、风速)进行同步监测, 系统分析评价了各生态功能区空气负离子动态变化特征, 以及与环境因子和可吸入颗粒物的相关性。结果表明: (1) 广场公园区空气负离子浓度日变化呈明显的单峰形式, 居民住宅区、城市道路区和工业厂房区呈双峰形式, 广场公园区的空气负离子浓度最高, 其次是居民住宅区和城市道路区, 工业厂房区最低; (2) 各生态功能区 CI 指数的平均值大小顺序依次为广场公园区>居民住宅区>城市道路区>工业厂房区; (3) 空气负离子日变化浓度趋势与相对湿度变化趋势相似, 与温度、空气正离子、风速变化趋势相反。对空气负离子浓度日变化影响较大的环境因子是相对湿度和温度; (4) 空气负离子和可吸入颗粒物(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$)的日变化趋势相反, 当空气负离子浓度增大时, 可吸入颗粒物浓度减小, 空气负离子和可吸入颗粒物呈显著负相关的关系, 在相关性上 $PM_{10}>PM_{2.5}$ 。

关键词 生态功能区, 空气负离子, 可吸入颗粒物, 影响因素, 泰安市。

Spatial-temporal distribution of negative air ions and its influencing factors in the typical ecological functional zones of Tai'an City

LIU Qing GAO Peng** LI Cheng WANG Rongjia SUN Jianni LI Xiao

(Forestry College of Shandong Agricultural University, Mountain Tai Forest Ecosystem Research Station of State Forestry Administration, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Tai'an, 271018, China)

Abstract: In order to explore the spatial-temporal distribution of negative air ions (NAI) and its influencing factors in different ecological function areas of cities. We simultaneously monitored the concentrations of positive and negative ions in air and inhalable particulate (PM_{10} and $PM_{2.5}$) and the main environmental factors (air temperature, relative humidity and wind speed) in the typical ecological function areas in Tai'an city, which included square park area, residential area, urban road area and industrial workshop area, and analyzed the dynamic change of NAI in each ecological function area and their correlations with the environmental factors and inhalable particulate. The results showed that the daily variation of NAI concentration in the square park area was obviously single peak form, while those of the residential area, urban road area and industrial workshop area

2018 年 1 月 25 日收稿 (Received: January 25, 2018).

* 山东省自然科学基金 (ZR2016CM49) 和山东省林业科技创新项目 (LYCX07-2018-35) 资助。

Supported by the Shandong Provincial Natural Science Foundation, China (ZR2016CM49) and the Shandong Province Forestry Science and Technology Innovation Project (LYCX07-2018-35).

** 通讯联系人, Tel: 0538-8248516, E-mail: gaopengy@163.com

Corresponding author, Tel: 0538-8248516, E-mail: gaopengy@163.com

were dual peak forms. The NAI concentration in the square park area was the highest, followed by the residential area, urban road area and industrial workshop area. The order of the average value of CI index in each ecological function area was square park area> residential area> urban road area> industrial workshop area. The trend of daily variation of NAI concentration was similar to that of relative humidity, and it was opposite to that of temperature, positive air ions and wind speed. The order of environmental factor for influencing the daily variation of NAI concentration was relative humidity> air temperature> wind speed. The trend of daily variation of NAI concentration was opposite to that of inhalable particulate (PM_{10} , $PM_{2.5}$). The inhalable particulate concentration decreased with the increase of NAI concentration. The correlation between the NAI concentration and inhalable particulate concentration was significantly negative, and the degree of the correlation was $PM_{10}>PM_{2.5}$.

Keywords: ecological function areas, negative air ions (NAI), inhalable particulate, influencing factors, Tai'an City.

19 世纪末德国学者 Elster 和英国 Geitell 发现了空气离子的存在,20 世纪初人们肯定了空气离子的生物学意义,空气负离子又称负氧离子,是指获得多余成对电子而带负电荷的氧气离子,它是空气中氧分子结合自由电子而形成的^[1-2].空气负离子含量越高,空气就越清洁舒适.空气负离子具有杀菌、降尘、提高免疫力、调节机能平衡的功效,被誉为“空气维生素和生长素”^[3-6].对人的心理和生理机能产生促进作用^[7],对净化空气,调节小气候,人体保健,防病治病等效果显著,空气负离子含量已经成为评价空气质量、建立负离子吸收区、评价森林植被生态环境效益等的重要依据之一,越来越受到人们的重视^[8-9].目前很多专家学者对空气负离子的研究主要集中于不同林分及植被类型、不同绿地类型、旅游景区、水体上空气负离子浓度的测定和描述^[10-16].城市生态功能区是人们生活居住密集区域,近年来,关于城市不同功能区负空气氧离子变化特征及影响因素更加受到人们的普遍关注.

本文选取泰安市典型生态功能区(广场公园区、居民住宅区、城市道路区和工业厂房区)为研究对象,对其不同功能区空气负离子、可吸入颗粒物(PM_{10} 、 $PM_{2.5}$)浓度变化特征及其主要环境因子(空气温度、相对湿度、风速)进行了定位观测和研究,并探讨了外界环境对负离子浓度的影响,以期为泰安市及其类似城市不同生态功能区空气环境质量的保护、调整与建设提供科学依据.

1 实验部分(Experimental section)

1.1 研究区域选择

本文以泰安市为研究对象,选取广场公园区(天外村和虎山公园)、居民住宅区(东湖小区)、城市道路区(龙潭路立交桥)和工业厂房区(泰安市玻璃厂)等 4 个代表区域,每个区域选择 2—3 个观测点,同一区内的观测点下垫面基本相同.

1.2 观测时间

本研究于 2016 年 4 月 14—23 日挑选晴稳天气相关数据的观测,每天 8:00—18:00,每隔 1 h 观测 1 次.

1.3 观测方法

本研究对广场公园区、居民住宅区、城市道路区和工业厂房区 4 个功能区中监测点的立地空气正、负离子浓度($ion\cdot cm^{-3}$)、气温、相对湿度、风速和可吸入颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})等进行同步定点观测,为保证实验数据的精确度和客观性,所有数据均采用多天测量求平均值的方法.每个监测点进行实验时,仪器高度统一设定为 1.5 m,由于空气正、负离子浓度瞬时变化很大,测量时每个观测点按东西南北 4 个方向瞬间分别读数,取 4 个方向的平均值作为此观测点的正、负离子值.

本研究采用了日本 ANDES 生产的 ITC-201A 型空气负离子测量仪测定空气正、负离子浓度,检测范围:10—1236000 $ion\cdot cm^{-3}$;采用“吸入式电容法”原理进行负离子检测,测量分辨率为 10 $ion\cdot cm^{-3}$.能适

应各种工作环境,在温度-20℃到 60℃和相对湿度 0%—99%之间均能稳定可靠工作.可用于测量室内、户外、森林、瀑布等各种环境的负离子浓度;采用英国产 DUSTMATE 粉尘仪(分辨率:10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)测定可吸入颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10})浓度,检测范围:0—60000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;采用 TES-1362 数字式温湿度测量仪测定气温和相对湿度;采用美国产 Kestrel 2000 手持式风速仪测定风速.

1.4 评价方法

空气负离子含量被列为衡量空气质量好坏的一个重要参数.本研究采用单极系数(q)和安倍空气离子评价系数模型法(CI 法)对空气质量进行评价.

(1)单极系数(q)是指空气中正离子与负离子的比值,即:

$$q=n^{+}/n^{-}$$

(1)

式中, n^{-} 为空气中负离子数; n^{+} 为空气中正离子数.

(2)空气离子评价系数(CI)是指空气中负离子浓度接近自然界空气离子化水平的程度,即:

$$\text{CI}=n^{-}/(1000\times q)$$

(2)

许多学者对不同地方的研究表明,在通常的陆地上 q 值为 1.2 左右,大多数学者认为 q 应等于或小于 1,且负离子超过 1000 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时才能给人以舒适感.空气负离子评价系数 CI 值越大,空气质量越好.空气清洁度等级标准见表 1.

表 1 空气清洁度等级标准

Table 1 Air cleanliness class standard

等级 Gread	A	B	C	D	E
空气清洁度 Air cleanliness	最清洁	清洁	中等	允许	临界值
指标 CI Index	>1.00	1.00—0.70	0.69—0.50	0.49—0.30	<0.29

1.5 数据分析

本研究对各观测点的数据采用列表、作曲线图等方式来分析其变化规律、变化范围以及波动性.数据分析主要利用 Excel 2007、SPSS 19.0 等软件进行综合处理.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 不同功能区空气负离子浓度日变化特征

由图 1 可以看出,泰安市不同功能区空气负离子日变化特征差异较大.具体表现在从空气负离子浓度变化趋势上看,广场公园区日变化呈明显的单峰形式,居民住宅区、城市道路区和工业厂房区呈双峰形式.

不同功能区空气负离子浓度的极值大小与极值时间各不相同.在 4 个区中,广场公园区的空气负离子浓度最高,其次是居民住宅区和城市道路区,工业厂房区最低.广场公园区空气负离子浓度最大值出现在中午 12:00 为 1050 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$,最小值出现在下午 17:00 为 477 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$,居民住宅区和城市道路区的空气负离子浓度变化趋势基本相同,最大值出现在上午 10:00,分别为 735 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 815 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$,最小值分别出现在下午 18:00 和中午 13:00,分别为 460 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 388 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$.工业厂房区的空气负离子浓度最大值在中午 12:00 为 543 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$ 最小值在下午 16:00 为 203 $\text{ion}\cdot\text{cm}^{-3}$.

空气负离子浓度与人类的活动方式有很大的关系,由图 1 可以看出,泰安市不同功能区的空气负离子浓度日变化波动程度并不相同,广场公园区早上 9:00—10:00 以及下午 17:00—18:00 锻炼游玩的人较多,人类活动频繁,与此同时,光照强度低,短波紫外线较少,绿色植物光合作用弱,且发生光电效应能力弱,所以空气负离子浓度较低.居民住宅区与城市道路区上午 18:00—9:00 中午 12:00—14:00 以及下午 17:00—18:00 是上下班以及外出购物的高峰期,人流车流量多,汽车尾气排放积尘碳组分^[17]等因素导致空气中的粉尘含量高,容易使空气中的负离子相互碰撞,发生电荷中和,形成中性分子,且这些物质对负离子有吸附作用,变成重离子而沉落,从而降低空气负离子浓度和空气清洁度^[18],而工业厂房区空气负离子浓度峰值出现在中午 12:00,波谷最低值在上午 8:00.上午 8:00—9:00 光照增强,植物光合作

用强,负离子浓度加强,出现小峰值,工厂中午 12:00—13:00 为休息时间,场内机器作业停止,导致污染物排放较少.加之正午太阳光照强,植物光合作用强,人类活动减少,导致空气负离子浓度出现峰值,这与邵海荣、冯鹏飞的观测结果相一致^[19-20].

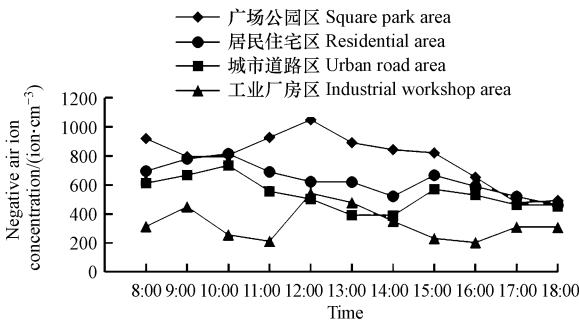


图 1 泰安市不同功能区空气负离子浓度的日变化
Fig.1 Daily variations of negative air ions concentration in different regions of Tai'an City

2.2 不同功能区空气清洁度日变化特征

表 2 结果表明,广场公园区在 8:00 时 CI 指数值最高,空气清洁度等级为最高为 A 级,日平均空气清洁度等级为 C 级,即为中等状态;居民住宅区在 8:00 空气清洁度最高,空气清洁度等级达到了 C 级水平,此后下降,日平均空气清洁度等级为 D 级,城市道路区日平均空气清洁度等级为 D 级,而工业厂房区空气清洁度等级在临界值以下.总体而言,不同功能区 CI 指数在一天中不同时间段存在差异,CI 指数的平均值大小顺序依次为广场公园区>居民住宅区>城市道路区>工业厂房区.

表 2 泰安市不同功能区空气负离子浓度 CI 法评价结果

Table 2 Assessment results of negative air ion concentration CI method for different functional regions in Tai'an City												
监测时间 Time	广场公园区 Square park area			居民住宅区 Residential area			城市道路区 Urban road area			工业厂房区 Industrial workshop area		
	q	CI	清洁度	q	CI	清洁度	q	CI	清洁度	q	CI	清洁度
8:00	0.87	1.03	A	0.75	0.6	C	0.37	0.49	D	0.36	0.28	E
10:00	1.77	0.79	B	1.04	0.48	D	0.58	0.38	D	0.54	0.26	E
12:00	1.61	0.62	C	0.87	0.46	D	0.53	0.32	D	0.29	0.28	E
14:00	1.36	0.59	C	0.73	0.48	D	0.36	0.28	E	0.37	0.23	E
16:00	1.44	0.52	C	0.70	0.43	D	0.46	0.26	E	0.38	0.24	E
18:00	1.35	0.54	C	0.60	0.42	D	0.57	0.23	E	0.24	0.25	E
平均值	1.40	0.68	C	0.78	0.48	D	0.48	0.33	D	0.36	0.26	E

2.3 空气负离子与环境因子日变化关系分析

由图 2 结果表明,空气负离子日变化浓度趋势与相对湿度变化趋势相似,与温度、空气正离子、风速变化趋势相反.由表 3 可以看出,空气负离子日变化浓度与温度呈显著负相关,与相对湿度呈极显著正相关,与风速呈负相关但显著性不明显,由此可见,对空气负离子浓度日变化影响较大的环境因子是相对湿度和温度.空气负离子与正离子呈相互制约的关系.

空气负离子浓度变化的原因是复杂多样的,但空气负离子的产生主要有为物理性发生和生物性发生 2 类.物理性发生是由于自然界中放射性物质的衰变和重组,瀑布和降雨中水分子破裂的雷纳德效应以及自然界中雷闪等放电作用;生物性发生主要是森林的树冠、枝叶的尖端放电以及绿色植物的光合作用形成的光电效应促使空气电解产生空气负离子^[21].已有研究发现,影响空气负离子浓度的主要环境因子有风速、温度、相对湿度、光子^[22-25].空气负离子存在的主要形式是 $O^{2-}(H_2O)_n$ 、 $OH^-(H_2O)_n$ 和 $CO^{2-}(H_2O)_n$,空气负离子的产生过程是:空气分子或原子被电离时,释放出一个电子,该电子附着在周围分子或原子上,结合一定的水分形成空气负离子,失去电子的形成正离子^[26].由此可以推测,相对湿度是对空气负离子影响最大.本文通过相关性分析得出空气负离子日变化浓度与温度呈负相关,与相对

湿度呈正相关关系,这与推测结果相一致,也和吴楚材和邬昀等的研究结果相一致,但与任晓旭等的研究结果相反^[27-29].黄世成等认为空气负离子浓度与风速相关性不明显,这与本结果相似.但蒙晋佳和王磊等认为风速与空气负离子浓度呈正相关,王淑娟等认为风速与空气负离子浓度呈负相关^[30-33],这些研究结果之所以有明显差异,一方面与分析方法、观测仪器设备有关,另一方面与研究区域环境的差异有关,空气负离子的产生受多种因素的影响,十分复杂,对空气负离子与环境因子的影响方面还需要继续探索.

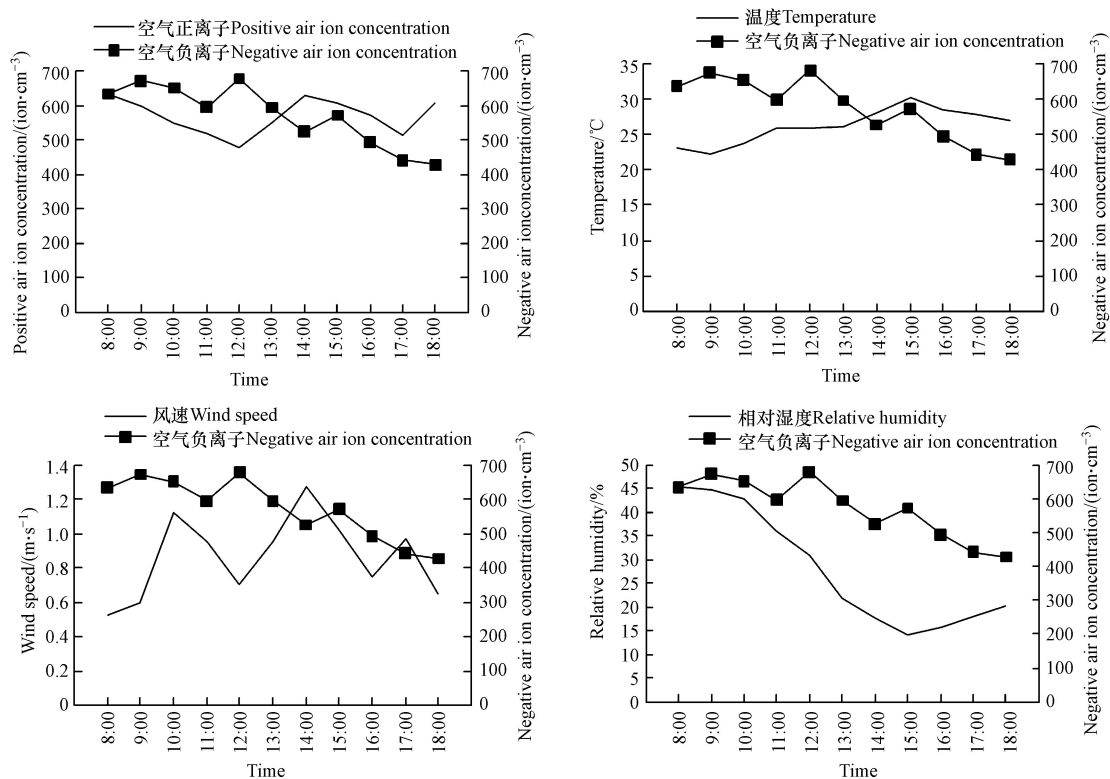


图2 泰安市空气负离子与环境因子的日变化关系

Fig.2 Relationship between negative air ions and environmental factors in Tai'an City

表3 泰安市空气负离子与环境因子的相关性

Table 3 Correlation between negative air ions and environmental factors in Tai'an City

		空气负离子 Negative air ion	空气正离子 Positive air ion	温度 Temperature	风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
空气负离子	Pearson 相关性	1	-0.150	-0.669 *	-0.163	0.748 **
	显著性(双侧)		0.660	0.024	0.632	0.008
空气正离子	Pearson 相关性	-0.150	1	-0.058	-0.088	-0.011
	显著性(双侧)	0.660		0.865	0.797	0.973
温度	Pearson 相关性	-0.669 *	-0.058	1	0.454	-0.941 **
	显著性(双侧)	0.024	0.865		0.161	0.000
风速	Pearson 相关性	-0.163	-0.088	0.454	1	-0.386
	显著性(双侧)	0.632	0.797	0.161		0.240
相对湿度	Pearson 相关性	0.748 **	-0.011	-0.941 **	-0.386	1
	显著性(双侧)	0.008	0.973	0.000	0.240	

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关.

* Significance was tested at $P<0.05$; ** Significance was tested at $P<0.01$.

总之,在城市建设中应多增加绿地面积和人工湖面积,适当采取道路洒水降尘等增加空气相对湿度的措施,从而为空气负离子产生创造有利的条件,达到改善泰安市空气环境质量的目标.

2.4 空气负离子与可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})日变化关系分析

由图 3 可以看出,空气负离子和可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})的日变化趋势相反,空气负离子整体呈下降趋势,可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})整体呈上升趋势,当空气负离子浓度增大时,可吸入颗粒物浓度减小,空气负离子浓度减小时,可吸入颗粒物浓度增大.PM_{2.5}浓度整体波动较大,在 15:00 出现了最小值为 66 μg·m⁻³,15:00—17:00 急速上升,在 17:00 时出现了最大值 159 μg·m⁻³.而 PM₁₀浓度相对来说比较平缓,17:00 出现了最大值为 395 μg·m⁻³,最小值出现在 12:00 为 283.35 μg·m⁻³.表 4 表明了空气负离子和可吸入颗粒物呈显著负相关的关系,在相关性上 PM₁₀>PM_{2.5}.

空气负离子与可吸入颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)变化趋势相反呈负相关,这与王薇的观测结果相一致^[34].负离子和正离子浓度之间存在着相互制约的关系,当正离子浓度增大时,由于被捕获的负离子数增多,导致负离子浓度相应减少.因此,大气可吸入颗粒物浓度通过影响空气正、负离子浓度比来影响空气清洁度^[35].尽管空气负离子浓度与大气细颗粒物浓度呈负相关关系,并不一定表示空气负离子可以去除大气污染.大气污染物主要由阳离子细颗粒物构成,与大气中高浓度的空气负离子结合而沉降,可以抵消一部分空气污染;或者说,只有在空气污染很弱、PM_{2.5}浓度很低时(空气中正离子与负离子的比值: $q=n^+/n^-$ 小于 1),即使空气负离子被抵消一部分,依然可以存在很高浓度的空气负离子^[36].所以,只有真正的解决以及控制空气污染,才能从根本上提高空气质量.

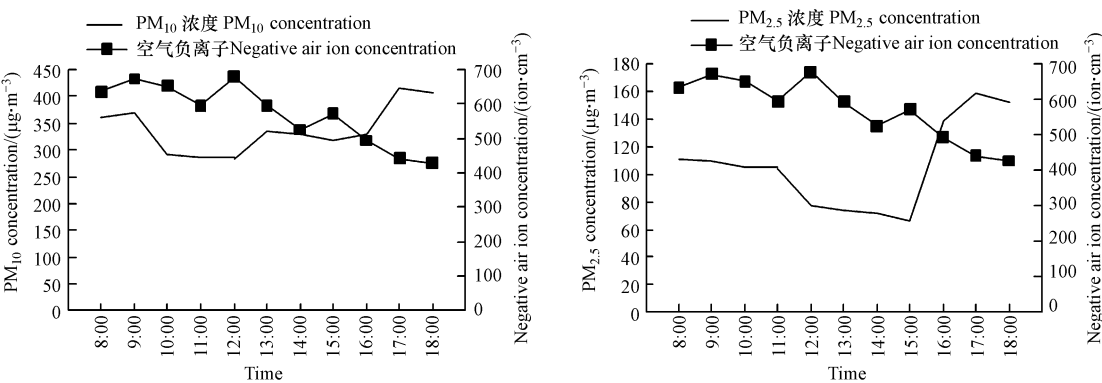


图 3 泰安市空气负离子与可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})浓度的日变化关系

Fig.3 Daily variation of negative air ions with the concentration of particulate matter (PM₁₀,PM_{2.5})

表 4 泰安市空气负离子与可吸入颗粒物(PM₁₀、PM_{2.5})的相关性

Table 4 Correlation between negative air ions and particulate matter (PM₁₀,PM_{2.5}) in Tai'an City

		空气负离子 Negative air ion	PM ₁₀	PM _{2.5}
空气负离子	Pearson 相关性	1	-0.630 *	-0.611 *
	显著性(双侧)		0.038	0.046
PM ₁₀	Pearson 相关性	-0.630 *	1	0.713 *
	显著性(双侧)	0.038		0.014
PM _{2.5}	Pearson 相关性	-0.611 *	0.713 *	1
	显著性(双侧)	0.046	0.014	

* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

* Significance was tested at $P<0.05$.

3 结论(Conclusion)

泰安市不同功能区空气负离子日变化特征差异较大.从空气负离子浓度变化趋势上看,广场公园区日变化呈明显的单峰形式,居民住宅区、城市道路区和工业厂房区呈双峰形式.

各生态功能区 CI 指数的平均值大小顺序依次为广场公园区>居民住宅区>城市道路区>工业厂

房区。

泰安市对空气负离子浓度日变化影响较大的环境因子是相对湿度和温度;空气负离子和可吸入颗粒物呈显著负相关的关系。

参考文献 (References)

- [1] 夏廉博.人类生物气象学[M].北京:气象出版社,1986:137-151,228-237.
XIA L B. Human biology aerography[M]. Beijing: Weather Publishing Company, 1986: 137-151, 228-237 (in Chinese).
- [2] 林忠宁.空气负离子在卫生保健中的作用[J].生态科学,1999,18(2):87-90.
LIN Z N. The effect of air ions on hygiene[J]. Ecology Science, 1999, 18(2): 87-90 (in Chinese).
- [3] DANIELL W, CAMP J, HORSTMAN S. Trail of a negative ion generator device in remediating problems related to indoor quality[J]. Oecup Med. 1991, 33(6): 681-687.
- [4] 倪军,徐琼,石登荣,等.城市绿地空气负离子相关研究——以上海公园为例[J].中国城市林业,2004,2(3):30-33.
NI J, XU Q, SHI D R, et al. The correlative study on air anions in city greenbelt; as a case of the parks in Shanghai[J]. Chin Urban Forestry, 2004, 2(3): 30-33 (in Chinese).
- [5] 吴志萍,王成,许积年,等.六种城市绿地内夏季空气负离子与颗粒物[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(12):2153-2157.
WU Z P, WANG C, XU J N, et al. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007, 47(12): 2153-2157 (in Chinese).
- [6] 吴明作,王江彦,李小伟,等.郑州市公园绿地春季空气质量评价[J].西南林业大学学报,2011,31(3):22-26.
WU M Z, WANG J Y, LI X W, et al. Study on air quality in park green-spaces of Zhengzhou city in the spring season[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2011, 31(3): 22-26 (in Chinese).
- [7] PINO O, RAGIONE F L. There's something in the Air; Empirical evidence for the effects of negative air ions (NAI) on psychophysiological state and performance [J]. Science and Education Publishing, 2013, 1(4): 48-53.
- [8] TIKHONOV V P, TSVETKOV V D, LITVINOVA E G, et al. Generation of negative air ions by plants upon pulsed electrical stimulation applied to soil[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(3): 414-419.
- [9] YAN X J, WANG H R, HOU Z Y, et al. Spatial analysis of the ecological effects of negative air ions in urban vegetated areas: A case study in Maiji, China [J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2015, 14(3): 636-645.
- [10] 汤秋娜,邢海莹,张冬有.北极村樟子松与落叶松林区空气负离子浓度及其与气象因子的关系[J].中国农学通报,2017,33(13):107-111.
TANG Q Y, XING H Y, ZHANG D Y. Aero-anion Concentration and its relationship with meteorological factors; scotch pine and larch in arctic village[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(13): 107-111 (in Chinese).
- [11] 王月容,段敏杰,刘晶.北京市北小河公园绿地生态保健功能效应[J].科学技术与工程,2017,17(18):31-40.
WANG Y R, DUAN M J, LIU J. The ecological health function effects of green spaces of Beixiaohe Park in Beijing[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 31-40 (in Chinese).
- [12] 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.
DENG L, LIAO C H, LI X M, et al. Review on researches on negative air ion concentration distribution and correlation with meteorological elements in mountain tourist areas[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(5): 882-888 (in Chinese).
- [13] 杨照,杨扬,甄伟.小五台山自然保护区空气负离子浓度日变化规律研究[J].现代园艺,2017(11):29-31.
YANG Z, YANG Y, ZHEN W. Study on diurnal variation of air anion concentration in Xiaowutai mountain nature reserve[J]. Modern Gardening, 2017(11): 29-31 (in Chinese).
- [14] 刘和俊,夏尚光,丁增发,等.九华山风景区空气负离子水平分析与评价[J].中国城市林业,2012,10(5):14-17.
LIU H J, XIA S G, DING Z F, et al. Analysis and evaluation on aero-anion concentration in Jiuhua Mountain[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2012, 10(5): 14-17 (in Chinese).
- [15] 于泽西,单晟焯,张冬有.太阳岛景区水体空气负离子浓度的分析与评价[J].农学报,2017,7(12):52-57.
YU Z X, SHAN S Y, ZHANG D Y. Analysis and evaluation of negative air ions concentration in sun island scenic spot[J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(12): 52-57 (in Chinese).
- [16] 卫淑芸,刘文霞,吴明作,等.河南省不同生境空气负离子空间变化特征[J].城市环境与城市生态,2016,29(3):31-36,41.
WEI S Y, LIU W X, WU M Z, et al. Spatial variation of negative air ion concentration in different biotopes in Henan Province[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2016, 29(3): 31-36 (in Chinese).
- [17] 周盼,秦伟,郭硕,等.石家庄冬季道路积尘 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 碳组分污染特征分析[J].环境化学,2018,37(1):123-129.
ZHOU P, QIN W, GUO S, et al. Pollution characteristics of carbonaceous components in PM_{2.5} and PM₁₀ of paved road dust in Shijiazhuang during winter[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(1): 123-129 (in Chinese).
- [18] 梁英辉,穆丹.佳木斯不同生态功能区空气负离子水平研究[J].安徽农业科学,2010,38(4):1915-1916.
LIANG Y H, MU D. Study on air negative ions concentration in different ecological functional zones of Jiamusi[J]. Journal of Anhui Agriculture, 2010, 38(4): 1915-1916 (in Chinese).
- [19] 邵海荣,贺庆棠,阎海平,等.北京地区空气负离子浓度时空变化特征的研究[J].北京林业大学学报,2005,27(3):35-39.
SHAO H R, HE Q T, YAN H P, et al. Spatio-temporal changes of negative air ion concentrations in Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(3): 35-39 (in Chinese).

- [20] 冯鹏飞,于新文,张旭.北京地区不同植被类型空气负离子浓度及其影响因素分析[J].生态环境学报,2015,24(5):818-824.
FENG P F, YU X W, ZHANG X. Variations in negative air ion concentrations associated with different vegetation types and influencing factors in Beijing [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(5): 818-824(in Chinese).
- [21] 单晟烨,齐超,张冬有.漠河针叶林空气负离子浓度日变化特征研究[J].中国农学通报,2015,31(25):13-18.
SHAN S Y, QI C, ZHANG D Y. Daily variation of negative air ions concentration in the coniferous forest in mohe county [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 13-18(in Chinese).
- [22] 叶彩华,王晓云,郭文利.空气中负离子浓度与气象条件关系初探[J].气象科技,2000,28(4):51-52.
YE C H, WANG X Y, GUO W L. Relationship between concentration of negative air ions and meteorological conditions [J]. Meteorological Science and Technology, 2000, 28(4): 51-52(in Chinese).
- [23] 石强,舒惠芳,钟林生,等.森林游憩区空气负离子评价研究[J].林业科学,2004,40(1):36-40.
SHI Q, SHU H F, ZHONG L S, et al. Research on evaluation of the aeroanion in forestry recreational areas [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(1): 36-40(in Chinese).
- [24] LIANG H, CHEN X S, YIN J G. The spatial-temporal pattern and influencing factors of negative air ions in urban forests, Shanghai, China [J]. Journal of Forestry Research, 2014, 25(4): 847-856.
- [25] WANG J, LI S. 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.
- [26] 韦朝领,王敬涛,蒋跃林,等.合肥市不同生态功能区空气负离子浓度分布特征及其与气象因子的关系[J].应用生态学报,2006,17(11):2158-2162.
WEI C L, WANG J T, JIANG Y L, et al. Air negative charge ion concentration and its relationships with meteorological factors in different ecological functional zones of Hefei City [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2158-2162(in Chinese).
- [27] 吴楚材,郑群明,钟林生,等.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.
WU C C, ZHENG Q M, ZHONG L S, et al. A Study of the aero-anion concentration in forest recreation area [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(5): 75-81(in Chinese).
- [28] 邬响.湖北省空气负离子浓度时空分布特征及其与气象要素的关系[J].气象水文海洋仪器,2016,33(4):68-72.
WU Y. Spatial and temporal variation characteristics of air negative ions concentration study in Hubei Province and its relationship with meteorological elements [J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument, 2016, 33(4): 68-72(in Chinese).
- [29] 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):109-112,124.
REN X X, CHEN Q J, DONG J H, et al. Characteristics of negative air ions and their relationship with meteorological factors in the inhabited areas of Hangzhou City [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(03): 109-112, 124(in Chinese).
- [30] 黄世成,徐春阳,周嘉陵.城市森林空气负离子浓度与气象环境关系的通径分析[J].气象,2012,38(11):1417-1422.
HUANG S C, XU C Y, ZHOU J L. Path analysis on negative air ion concentration and the meteorological environment in urban and forest zones [J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(11): 1417-1422(in Chinese).
- [31] 蒙晋佳,张燕.广西部分景点地面上空气负离子浓度的分布规律[J].环境科学研究,2004,17(3):25-27.
MENG J J, ZHANG Y. The distribution of air anion concentration above ground at some scenic sites in Guangxi [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, (03): 25-27(in Chinese).
- [32] 王磊,万欣,黄利斌,等.南京城郊森林空气负离子动态变化研究[J].江苏林业科技,2016,43(6):24-28,55.
WANG L, WAN X, HUANG L B, et al. Dynamic study on the negative air ions of urban outskirts' forest in Nanjing [J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2016, 43(6): 24-28, 55(in Chinese).
- [33] 王淑娟,俞益武,王芳,等.临安市不同功能区空气负离子日变化特征及其与环境因子的关联分析[J].浙江林业科技,2008,28(4):33-38.
WANG S J, YU Y W, WANG F, et al. Diurnal changes of air anions and its relation with environmental factors in different functional zones of Linan City [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2008, 28(4): 33-38(in Chinese).
- [34] 王薇,陈明.城市绿地空气负离子和PM_{2.5}浓度分布特征及其与微气候关系——以合肥天鹅湖为例[J].生态环境学报,2016,25(9):1499-1507.
WANG W, CHEN M. Distribution characteristics of negative air ion and PM_{2.5} and their relationships with the microclimate in different urban greenlands—case study of Hefei Swan Lake [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(9): 1499-1507(in Chinese).
- [35] 陈佳瀛,宋永昌,陶康华,等.上海城市绿地空气负离子研究[J].生态环境,2006,15(5):1024-1028.
CHEN J Y, SONG Y C, TAO K H, et al. Study on the air anions of the urban greenery patches in Shanghai [J]. 2006, 15(5): 1024-1028(in Chinese).
- [36] 曹建新,张宝贵,张友杰.海滨、森林环境中空气负离子分布特征及其与环境因子的关系[J].生态环境学报,2017,26(8):1375-1383.
CAO J X, ZHANG B G, ZHANG Y J. Characteristics of air anion distribution in beach and forest environment and the correlation between air anion and the environmental factors [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(8): 1375-1383(in Chinese).