

DOI: 10.5846/stxb202107312077

周寒冰, 包玉, 王志泰. 岩溶地区不同规模城市遗存山体表面空气负离子及其影响因素——以贵阳市为例. 生态学报, 2023, 43(15): 6257-6277.

Zhou H B, Bao Y, Wang Z T. The surface negative air ion concentration and influencing factors of urban remnant mountains of different sizes in karst areas: A case study of Guiyang City. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6257-6277.

岩溶地区不同规模城市遗存山体表面空气负离子及其影响因素 ——以贵阳市为例

周寒冰¹, 包玉^{1,*}, 王志泰^{1,2}

¹ 贵州大学林学院, 贵阳 550025

² 贵州大学风景园林规划设计研究中心, 贵阳 550025

摘要:为探索岩溶地区城市遗存山体(urban remnant mountains, URM)表面空气负离子浓度(negative air ion concentration, NAIC)特征及其影响因素,以贵阳市建成区内 22 座城市遗存山体为研究对象,通过样地调查法分析了城市遗存山体表面空气负离子浓度空间格局特征,运用单因素方差分析 LSD 法、pearson 相关性分析及线性回归分析等方法分析了山体规模大小、山体斑块特征、山体平均植被覆盖度、植物物种多样性、植物群落体积生物量、地表辐射、空气温湿度、人为干扰程度、近红外辐射、短波红外辐射及城市遗存山体周边城市景观格局等因素对城市遗存山体表面空气负离子浓度的影响。结果表明:(1)不同规模城市遗存山体的表面空气负离子浓度表现为中型山体>小型山体>大型山体;空气负离子浓度在城市遗存山体坡向上呈东坡面和北坡面大于西坡面和南坡面的两级格局,同一坡向的不同坡位间无明显差异。(2)空气负离子浓度与山体表面温度极显著负相关,与山体表面空气湿度极显著正相关;植物群落体积生物量对城市遗存山体表面空气负离子浓度影响较大,且小型山体表现最明显;植物物种多样性对山体表面空气负离子浓度影响微弱,其中 Margalef 指数影响最大。(3)大型城市遗存山体表面空气负离子浓度与人为干扰、山体平均海拔、山体斑块形状指数及地表辐射等因素有相关性;中型城市遗存山体人为干扰、山体坡度差和山体斑块形状指数对其表面空气负离子浓度影响明显;小型城市遗存山体表面空气负离子浓度不受山体斑块特征影响。(4)各规模城市遗存山体表面空气负离子浓度受周边环境空间尺度为大型山体周边 300 m 范围内,中小型山体周边 500 m 范围内;周边环境中水域相关指标对大中型城市遗存山体表面空气负离子浓度影响最大,城市遗存山体相关指标对小型城市遗存山体表面空气负离子浓度影响最大。探究岩溶城市遗存山体内外部环境对山体表面空气负离子浓度的影响,有利于丰富喀斯特地区空气负离子研究以及为生态康养和山地旅游规划提供科学借鉴。

关键词:城市遗存山体;空气负离子浓度;影响因素;贵阳市

The surface negative air ion concentration and influencing factors of urban remnant mountains of different sizes in karst areas: A case study of Guiyang City

ZHOU Hanbing¹, BAO Yu^{1,*}, WANG Zhitai^{1,2}

¹ College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

² Landscape Architecture Planning and Design Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract: To explore the characteristics and influencing factors of the surface negative air ion concentration (NAIC) of urban remnant mountains (URMs) in karst areas, 22 URM in the built-up area of Guiyang were taken as the research

基金项目:贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2021]一般 458);贵州省科学技术基金重点项目(黔科合基础[2020]1Z011);国家自然科学基金(32060367)

收稿日期:2021-07-31; **采用日期:**2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ybao@gzu.edu.cn

objects, and the spatial pattern characteristics of the surface NAIC of URMs were analyzed through the method of sample plot survey. In addition, we used one-way ANOVA, Pearson correlation, and multiple linear regression to analyze the effects of mountain size, mountain patch characteristics, average mountain vegetation cover, plant species diversity, plant community volumetric biomass, surface radiation, air temperature, humidity, human disturbance, near-infrared radiation, short wave near-infrared radiation and urban landscape pattern around URMs on the surface NAIC. The results showed that: (1) the order from high to low of surface NAIC of URMs of different sizes was medium URMs, small URMs, and large URMs. There was a two-level pattern in which the surface NAIC of URMs on the eastern and northern slope direction was larger than the western and southern slope, but slope position of same slope direction had no significant relationship with the surface NAIC of URMs. (2) The surface NAIC of URMs were highly significantly negatively correlated with the mountain surface temperature and significantly positively correlated with the mountain surface air humidity. The effect of plant community volume biomass on the surface NAIC of URMs was greater than other influencing factors and was most significant in small URMs. Plant species diversity had a weak effect on the surface NAIC of URMs, with the Margalef index having the greatest effect. (3) The surface NAIC of large URMs had a correlation with human disturbance, average elevation, landscape shape index and surface radiation of URMs. Human disturbance, slope difference and surface radiation of URMs had a significant influence on the surface NAIC of medium URMs. However, patch characteristics of URMs had no significant relationship with the surface NAIC of small URMs. (4) The influence range of the surrounding environment on the surface NAIC of large URMs was 300 m, while for medium URMs and small URMs was 500 m. Watershed-related indicators in the surrounding environment had the greatest influence on the surface NAIC of large URMs and medium URMs, and indicators related to URMs in the surrounding environment had the greatest influence on the surface NAIC of small URMs. Investigating the influence of the external and internal environment on the surface NAIC of URMs in karst areas is conducive to enriching the study of negative air ion in karst areas and providing a scientific reference for ecological recreation and mountain tourism planning.

Key Words: urban remnant mountain; negative air ion concentration; influence factor; Guiyang City

随着工业化和城市化快速发展导致生态环境逐渐恶化,城市生态环境质量越来越受到关注^[1]。空气负离子作为衡量生态环境质量的指标之一,在消减 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 等空气污染物方面有显著效益^[2-3]。另外,相关研究已证实空气负离子浓度对人的身体机能及精神方面有改善、缓解等辅助医疗作用^[4-5]。近年来,空气负离子浓度的空间格局及其影响因素、环境功能以及医疗健康作用等成了生态学和医学的研究热点^[6-7]。

植物对空气负离子深度的影响十分显著^[8-10]。大量的研究报道了植物群落类型^[11]、群落结构^[10]、群落组分与物种多样性^[12]、群落郁闭度等属性特征^[13]与空气负离子浓度之间的相关关系及作用机理。一般来说,植物群落结构越复杂,植被覆盖度越高,其空气负离子浓度则越高^[12-13]。在城市环境中,相关研究主要集中于广场^[14]、城市绿地^[15]、居住地^[16]、公园^[17]、城市森林^[18]等各类休闲空间的空气负离子浓度及其影响因素。研究结果表明空气负离子浓度与绿地类型、绿地规模和植被特征等场地的自然属性有显著关系,也受到光照、气温以及周边其它环境因素和人为干扰因素的影响^[19]。有学者针对一定范围的植株数量进行人为控制实验,以探索植物种植密度对空气负离子浓度的影响,实验表明植株密度在一定范围内对空气负离子浓度有促进作用,但到达临界值后空气负离子浓度趋于稳定^[20]。这些研究对合理规划布局城市园林绿地,以提升和改善城市人居环境质量具有重要的实际意义。

在多山地区,城市扩展过程中大量的自然山体被建设用地割裂和包围,最终形成镶嵌于城市建成区内的城市遗存山体^[21-23]。与一般的城市园林绿地不同,这些城市遗存山体保留了原有自然植被且具有三维景观特征,在规模和植物特征方面优于小块状的城市园林绿地^[23],在城市人工环境中具有重要的生态系统服务功能。已有研究表明城市遗存山体具有显著的社区降温作用^[24-25]。而关于城市遗存山体的空气负离子深度方

面的相关研究鲜见报道。由于城市遗存山体生境的重要的生态系统功能还未被广泛深入的研究,其生态功能价值未被相关部门认识,在建设用地紧张的多山地区,城市遗存山体被建设用地蚕食或侵占的现象仍在发生。因此开展城市遗存山体生态系统服务相关功能的研究不仅具有重要的科学意义,更具有显著的实际意义。

以贵州高原为中心的中国南方岩溶地区,是全球喀斯特发育最典型、最复杂、景观类型最丰富的一个片区,也是面积最大、最集中的生态脆弱区^[26]。快速城市化背景下,大量喀斯特山体被城市建设用地包围,形成“城在山间、山在城中”的城-山镶嵌体景观格局,城市内遗存有大量的喀斯特城市遗存山体^[27-28]。这些城市遗存山体具有良好的本土植物特征,是该地区城市建成环境中重要生态资源,能向城市提供生态系统服务功能^[29]。本研究以典型的多山城市—贵阳市为研究区,以其城市遗存山体为对象,开展城市遗存山体空气负离子浓度的空间格局特征及其影响因素,以期丰富城市遗存山体生态系统服务功能相关理论研究,并为多山城市开展生态康养、山地旅游规划和城市供给侧规划调控提供科学依据。

1 研究区概况

贵阳市位于黔中岩溶区域腹地(26°11′—26°55′N, 106°07′—107°17′E),地处云贵高原黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带,地貌属于以喀斯特孤峰、和峰林为主的岩溶丘原盆地地区^[26]。境内地带性植被为中亚热带湿润性常绿阔叶林,历史上植物资源极为丰富^[30]气候为亚热带湿润温和型气候,夏季平均温度为23.2℃,最高温度平均在25—28℃之间,素有“避暑之都”美称,夏季雨水充沛,约500 mm,平均海拔约1100 m。截至2018年,建成区面积为368.68 km²,其中镶嵌有527座城市遗存山体^[28],城市遗存山体密度达1.4座/km²。本研究以贵阳市建成区为研究区。

2 材料与方法

2.1 样山选择与样地设置

按投影面积将研究区内527座城市遗存山体聚类为大、中、小3类(表1),采用分级随机抽样方式挑选小型城市遗存山体7座,中型7座,大型8座,共计22座样本山体(图1)。每座样本山体按照坡向+坡位组合法设置12个样点(即东、南、西、北4个坡向按山顶、山腰、山脚各设置1个样点)。在ArcGIS10.2软件中确定遗存山体山顶中心位置,以山顶为中心分别向东、南、西、北四个方向延伸,测量各方向垂直投影距离,等间距在坡向山顶、山腰(山顶至山坡坡面的中间位置)和山脚各坡位各设置一个样点,去除在开挖边坡、陡坎等无法到达的样点。各样点设置30 m×30 m样地(表2)对空气负离子浓度、温度、湿度和植物等进行数据观测与调查。

表1 贵阳市中心城区城市遗存山体聚类分析结果

Table 1 Cluster analysis of urban remnant mountains (URMs) in the central urban area of Guiyang

城市遗存山体斑块面积/hm ² URMs area	型号 Type	城市遗存山体城市遗存山体数量/座 Urban remnant mountain	占比/% Proportion
<3	小型山体	195	37.00
3—10	中型山体	221	41.94
>10	大型山体	111	21.06
合计 Total		527	100.00

URMs:城市遗存山体 Urban remnant mountains

2.2 数据收集

2.2.1 空气负离子浓度、温度、湿度、植物物种多样性数据收集

于2020年7月—2020年9月选择晴朗且无风的天气,从中午12点至14点进行观测,每分钟记录一次数据,每样地收集15—20个数据。空气负离子数据采用观测范围为10—1.999×10⁶个负离子/cm³的日本KEC900+II进行收集,测量精度优于±20%,测量高度为距地1.5 m处。温度和湿度数据采用SSN-22E电子温

湿度记录仪获取,湿度精度 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,相对湿度精度 $\pm 3\%$ RH,测量高度为距地 1.5 m 处。

如图 2 所示,于每个样地内设置 10 m $\times$ 10 m 乔木样方 5 个,每个乔木样方内设置 5 个 3 m $\times$ 3 m 灌木样方,1 m $\times$ 1 m 草本样方,对各样方植物物种种类、株数、盖度、高度等数据进行记录^[30]。

2.2.2 城市遗存山体斑块特征及周边缓冲区城市景观格局

基于 2018 年研究区范围 Pleiades 卫星影像图(0.5 m 空间分辨率,含 DEM 高程),提取山体投影面积、山体周长、平均坡度、山体坡度差、山体相对高度、平均海拔等数据;基于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>) Landsat8 OLI 影像,提取植被覆盖度及地表反演温度数据;通过人工目视解译将山体内部景观类型分为林地、园地、草地、耕地及建设用地共五类;以城市遗存山体山脚边缘线为基准,100 m 为步长放置 1000 m 缓冲区,参照《土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2017)》及中国科学院资源环境数据库土地利用分类体系结合研究区土地类型分异情况,将缓冲区景观类型通过人工目视解译分为林地、草地、耕地、建设用地、水域、裸地及城市遗存山体七类。

2.3 数据处理

2.3.1 植物物种多样性及植物群落体积生物量

为了探究山体内部植物多样性对山体表面空气负离子浓度的影响,选择 Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(Jh)及 Simpson 优势度指数(D)表征群落植物物种多样性^[30—31],具体公式如下:

$$R = (S - 1) / \ln N \quad (1)$$

$$H = - \sum P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

$$Jh = H / \ln S \quad (3)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (4)$$

式中, S 为物种总数, N 为物种个体数, P_i 为第 i 个物种在物种个体数中的占比。

为了探究植物群落体积生物量(plant community volume biomass, PCVB)对山体表面空气负离子浓度影响,用以下公式测算了植物群落体积生物量:

$$\text{PCVB} = A_{\text{CW}} \times H \quad (5)$$

式中,PCVB 为群落体积生物量(m^3), A_{CW} 为样方内乔木平均冠幅投影面积(m^2), H 为植物群落结构平均高度(m)。

2.3.2 城市遗存山体斑块形状指数

斑块形状指数主要反映斑块边界形状复杂程度^[32],通过山体投影面积及山体周长可计算城市遗存山体形状指数,计算公式如下:

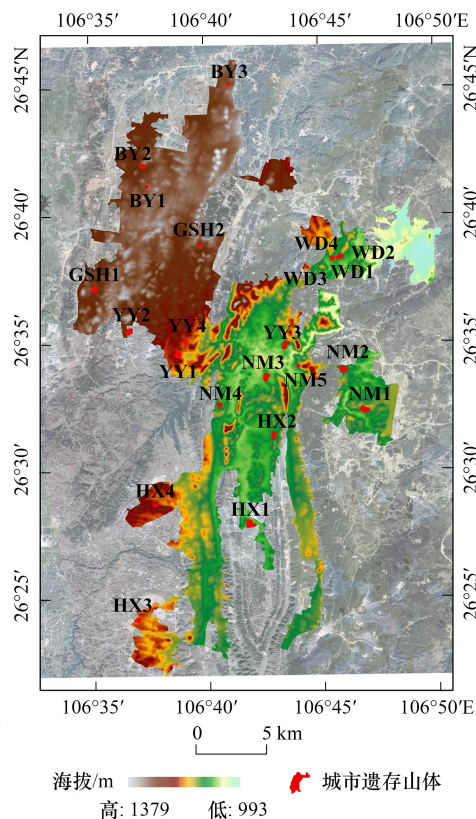


图 1 22 座样山分布位置

Fig.1 Study area and 22 sample URMs distribution

BY1:白云区 1 号城市遗存山体;BY2:白云区 1 号城市遗存山体;BY3:白云区 3 号城市遗存山体;GSH1:观山湖区 1 号城市遗存山体;GSH2:观山湖区 2 号城市遗存山体;YY1:云岩区 1 号城市遗存山体;YY2:云岩区 2 号城市遗存山体;YY3:云岩区 3 号城市遗存山体;YY4:云岩区 4 号城市遗存山体;WD1:乌当区 1 号城市遗存山体;WD2:乌当区 2 号城市遗存山体;WD3:乌当区 3 号城市遗存山体;WD4:乌当区 4 号城市遗存山体;NM1:南明区 1 号城市遗存山体;NM2:南明区 2 号城市遗存山体;NM3:南明区 3 号城市遗存山体;NM4:南明区 4 号城市遗存山体;NM5:南明区 5 号城市遗存山体;HX1:花溪区 1 号城市遗存山体;HX2:花溪区 2 号城市遗存山体;HX3:花溪区 3 号城市遗存山体;HX4:花溪区 4 号城市遗存山体;URMs:城市遗存山体 urban remnant mountains

表 2 城市遗存山体样地设置个数

Table 2 The plot characteristics of each sample URM

城市遗存山体编号 URM number	山体面积 URM area	山体类型 URM type	北 North	东 East	南 South	西 West	小计 Total
YY1	11.23	大型山体	2	3	3	3	11
YY2	10.13	大型山体	3	3	3	3	12
YY3	11.61	大型山体	3	1	3	2	9
HX1	17.4	大型山体	3	3	3	1	10
NM1	13.67	大型山体	3	1	3	2	9
NM2	14.01	大型山体	3	0	3	3	9
NM3	10.19	大型山体	3	3	2	3	11
GSH1	10.52	大型山体	0	2	2	2	6
WD2	4.05	中型山体	3	3	3	3	12
WD4	4.98	中型山体	3	3	3	3	12
BY2	5.87	中型山体	3	3	3	3	12
HX2	8.03	中型山体	3	2	3	2	10
HX3	4.99	中型山体	3	2	3	3	11
NM4	5.72	中型山体	2	3	3	3	11
YY4	4.07	中型山体	3	3	3	2	11
BY1	1.86	小型山体	2	2	2	2	8
BY3	1.46	小型山体	2	2	2	2	8
WD1	2.57	小型山体	2	1	2	2	7
WD3	1.32	小型山体	2	2	2	2	8
GSH2	2.72	小型山体	2	1	2	2	7
NM5	1.85	小型山体	2	0	2	2	6
HX4	2.89	小型山体	2	2	2	2	8

注:BY1:白云区 1 号城市遗存山体;BY2:白云区 1 号城市遗存山体;BY3:白云区 3 号城市遗存山体;GSH1:观山湖区 1 号城市遗存山体;GSH2:观山湖区 2 号城市遗存山体;YY1:云岩区 1 号城市遗存山体;YY2:云岩区 2 号城市遗存山体;YY3:云岩区 3 号城市遗存山体;YY4:云岩区 4 号城市遗存山体;WD1:乌当区 1 号城市遗存山体;WD2:乌当区 2 号城市遗存山体;WD3:乌当区 3 号城市遗存山体;WD4:乌当区 4 号城市遗存山体;NM1:南明区 1 号城市遗存山体;NM2:南明区 2 号城市遗存山体;NM3:南明区 3 号城市遗存山体;NM4:南明区 4 号城市遗存山体;NM5:南明区 5 号城市遗存山体;HX1:花溪区 1 号城市遗存山体;HX2:花溪区 2 号城市遗存山体;HX3:花溪区 3 号城市遗存山体;HX4:花溪区 4 号城市遗存山体

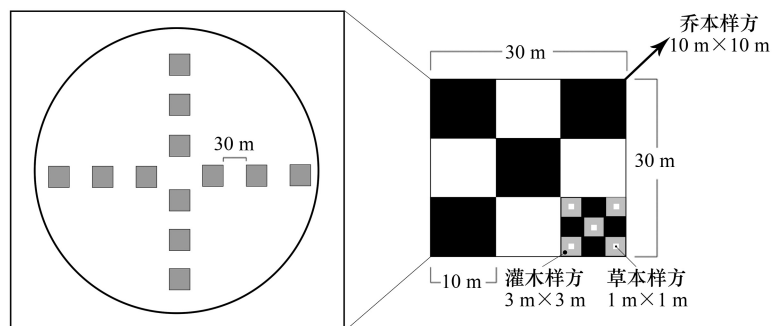


图 2 植物物种多样性样方设置示意图

Fig.2 Sample URM plot setting of plant species diversity

$$\text{Shape} = \frac{0.25PE}{\sqrt{A}} \quad (6)$$

式中, PE 为斑块周长(m), A 为城市遗存山体投影面积(m^2)。

2.3.3 城市遗存山体内部人为干扰程度

人为干扰程度指数能较好反映城市遗存山体受人类活动干扰程度,通过各干扰因子影响因素及其面积占比计算城市遗存山体人为干扰程度 (Human disturbance of urban remnant mountains, HDURM), 计算公式如下^[33]:

$$HDURM = \sum_{i=1}^n S_i \times F_i / A \tag{7}$$

式中, HDURM 为人为干扰强度, S_i 为第 i 种人为干扰的景观类型面积 (m^2), n 为城市遗存山体内部景观类型种类, F_i 为第 i 种人为干扰因子, A 为城市遗存山体投影面积 (m^2)。

根据相关研究成果^[33]、专家意见及研究区情况, 确定如下人为干扰程度 (表 3):

表 3 城市遗存山体各景观类型人为干扰程度
Table 3 Human interference to URMs caused by each landscape type of URMs

景观类型 Landscape type	影响情况 Impact	干扰程度 Interference factor
耕地/园地 Cultivated land/garden plot	多为周边居民在城市遗存山体上开垦耕种的旱地及园地, 对城市遗存山体生态有一定负面影响	0.25
林地 Forestland	城市遗存山体上集中连片的乔灌木林, 是山体主要的植被类型, 基本无人为干扰	0
草地 Grassland	城市遗存山体上的草本植物分布区基本无人为干扰	0
建设用地 Construction land	多为硬质不透水登山园路、建筑物和构筑物, 人为干扰严重	0.85

因各山体人为干扰景观类型不一致, 各景观类型干扰程度越接近 1 表明干扰程度越大, 越接近 0 表示干扰程度越小

2.3.4 城市遗存山体植被覆盖度

植被覆盖度为植被垂直投影面积与地表面积之比, 能量化植被覆盖地面程度^[34]。由归一化植被指数计算得到城市遗存山体植被覆盖度, 以山体平均植被覆盖度 (Vegetation coverage of urban remnant mountains, VCURM) 表征整座山体植被覆盖程度, 计算公式如下^[34—35]:

$$VCURM = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}} \tag{8}$$

式中, NDVI 为单位面积归一化植被指数, $NDVI_{soil}$ 为纯土壤单位面积植被指数, $NDVI_{veg}$ 为纯植被单位面积植被指数, 取城市遗存山体 NDVI5% 与 95% 置信度作为 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的值。

2.3.5 城市遗存山体地表辐射

根据 Landsat8 OLI 影像采用 ENVI5.3 进行辐射定标及大气校正, 得到城市遗存山体近红外辐射 (Near infrared radiation, NIR), 波长 0.85—0.88 μm , 短波红外辐射 (Short wave infrared radiation 1, SWIR1), 波长 1.57—1.65 μm 及短波红外辐射 (Short wave infrared radiation 2, SWIR2), 波长 2.11—2.29 μm , 以山体各辐射平均值表征整座山体地表辐射。

2.3.6 景观类型斑块密度

斑块密度为 100hm²单位面积上景观类型斑块数量的分化程度, 值越大表明破碎化程度越高^[32], 计算公式如下:

$$PD = \frac{n_i}{A_{总}} (10000) (100) \tag{11}$$

式中, n_i 为某类景观斑块数量 (个), $A_{总}$ 为景观类型总面积 (m^2)。

2.3.7 数据统计与分析

运用 EXCEL 软件处理数据; 采用单因素方差分析 (oneway ANOVA) 中的 LSD 法比较样本山体间及山体不同坡向坡位的空气负离子浓度差异 ($P < 0.05$); 运用双变量相关性分析城市遗存山体表面温度、湿度、植物物种多样性、山体斑块特征及 1000 m 缓冲区内各景观要素投影面积与空气负离子浓度之间关系; 运用线性回

归方程拟合植物群落体积生物量与城市遗存山体表面负离子浓度关系;就相关因子和山体表面空气负离子浓度进行多元线性逐步回归分析,用以判断各因素影响空气负离子浓度的重要程度,以上处理均在 SPSS19 中进行。

3 结果与分析

3.1 不同规模城市遗存山体表面空气负离子浓度特征

由图 3 可知,城市遗存山体表面空气负离子浓度在不同规模山体中差别较大,表现为中型山体>小型山体>大型山体,其中中型山体与小型山体的空气负离子相差较小,分别为 (1630 ± 265) 个/ cm^3 和 (1607 ± 228) 个/ cm^3 ,大型仅 (1530 ± 254) 个/ cm^3 。各类型城市遗存山体表面空气负离子浓度在坡向上的空间格局表现为东坡 $\approx$ 北坡>西坡 $\approx$ 南坡;在坡位上无显著差异。

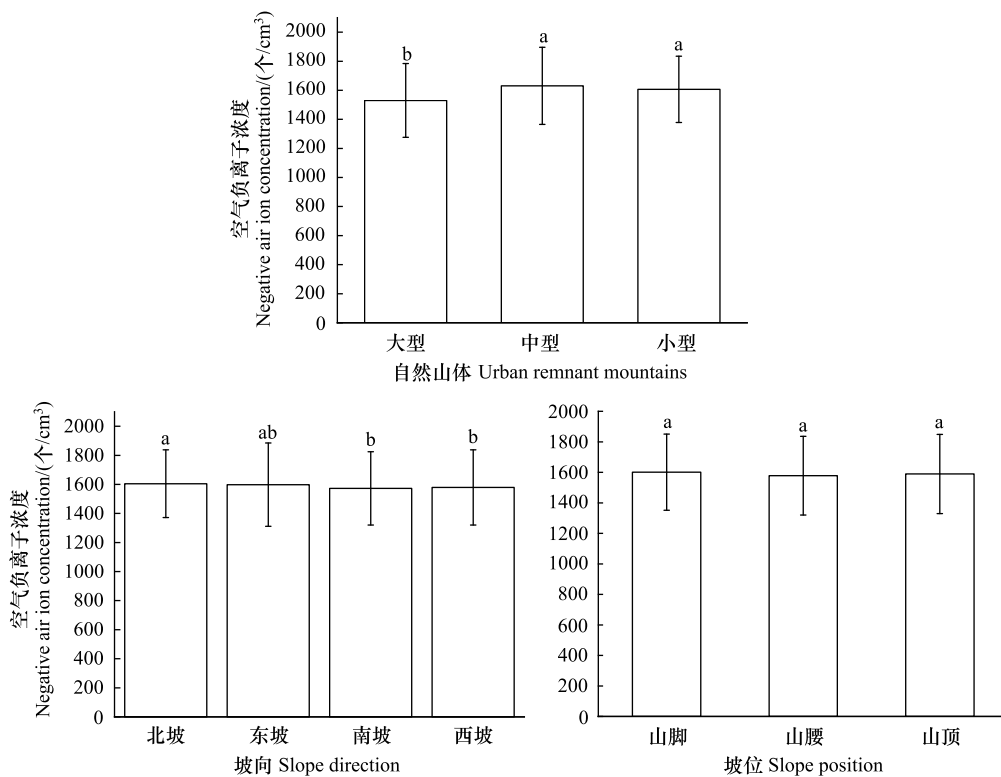


图 3 城市遗存山体表面空气负离子浓度及其空间格局特征

Fig.3 The surface negative air ion concentration (NAIC) of URMs and its spatial pattern characteristics

不同字母表示差异显著,相同字母表示差异不显著($P < 0.05$)

3.2 温湿度对城市遗存山体表面空气负离子浓度的影响

图 4 表明,山体表面温度与城市遗存山体表面空气负离子浓度整体上呈极显著负相关关系,其中, HX2 山体表面温度与其表面空气负离子浓度呈最小负相关 (-0.636), YY4 山体表面温度对其表面空气负离子浓度呈最大负相关 (-0.971)。由图 5 可以看出,山体表面湿度与城市遗存山体表面空气负离子浓度整体呈极显著正相关关系,其中, BY2 山体表面湿度对其表面空气负离子浓度影响最小 (0.577), WD1 山体表面湿度对其表面空气负离子浓度影响最大 (0.972)。

3.3 城市遗存山体植被特征对其表面空气负离子浓度的影响

3.3.1 植物多样性对城市遗存山体表面空气负离子浓度的影响

城市遗存山体植物物种多样性对其表面空气负离子浓度有一定影响,但并非单一关系,不同规模山体的

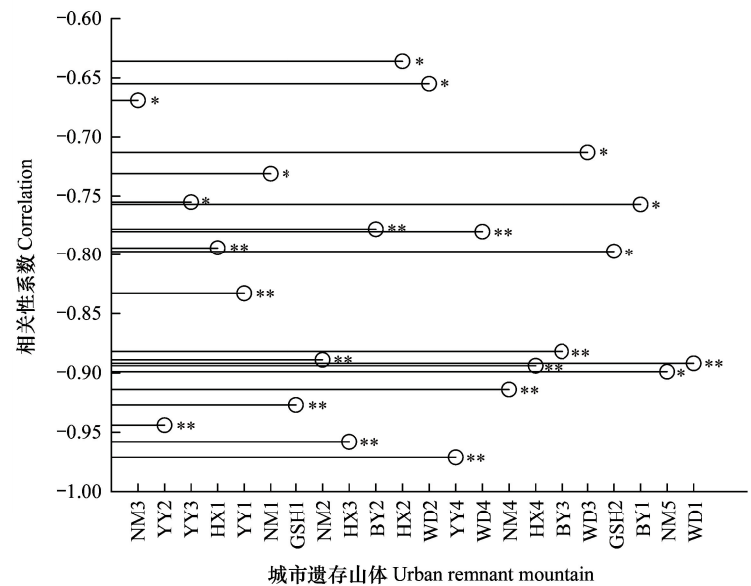


图 4 城市遗存山体表面空气负离子浓度与温度相关性

Fig.4 Correlation between the surface NAIC of URM and its temperature

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

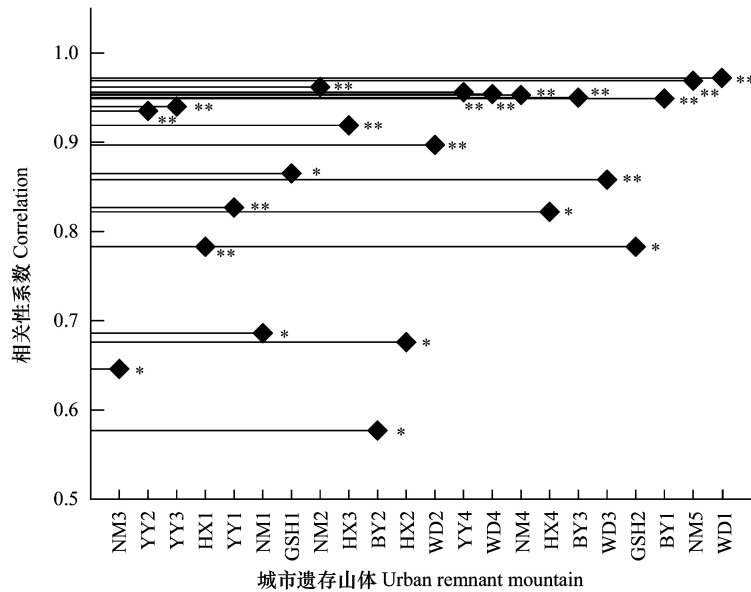


图 5 城市遗存山体表面空气负离子浓度与湿度相关性

Fig.5 Correlation between the surface NAIC of URM and its humidity

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

植物物种多样性对山体表面空气负离子浓度影响存在显著差异(表 4)。其中,Margalef 指数对各类型城市遗存山体表面空气负离子浓度影响最显著,相关性最高达 0.806,说明山体表面空气负离子对植物群落组成的复杂程度具有较高敏感性;Simpson 指数对大型山体表面空气负离子浓度影响较大,但相关关系不一致,对 HX1 影响程度达-0.649,对 NM3 影响程度为 0.696,对中小型山体表面空气负离子浓度无显著影响;Shannon-Wiener 指数对部分大中型山体表面空气负离子浓度有影响,相关关系也不一致,与 HX1 负相关性最高(-0.644),与 NM3 正相关性最高(0.723);Pielou 指数对山体表面空气负离子浓度影响最小,仅 1 座山体与其具有显著相关性,相关系数为-0.676,说明植物分布均匀与否对山体表面空气负离子浓度产生影响较小。

表 4 植物物种多样性与山体表面空气负离子浓度相关性

Table 4 Correlation between the surface NAIC of URM and its plant species diversity

城市遗存山体 URM	类型 Type	Simpson 指数(<i>D</i>) Simpson index	Shannon-Wiener 指数(<i>H'</i>) Shannon-Wiener index	Margalef 指数(<i>R</i>) Margalef index	Pielou 指数(<i>Jh</i>) Pielou index
YY1	大型山体	-0.131	-0.045	0.212	-0.322
YY2	大型山体	0.058	0.336	0.452	0.107
YY3	大型山体	0.354	0.283	0.727 *	0.176
NM1	大型山体	0.263	0.290	0.163	0.212
HX1	大型山体	-0.649 *	-0.644 *	-0.618	-0.676 *
GSH1	大型山体	0.408	0.364	0.224	0.408
NM2	大型山体	0.444	0.634	0.806 **	0.322
NM3	大型山体	0.696 *	0.723 *	0.674 *	0.353
WD2	中型山体	-0.425	-0.499	-0.421	-0.485
WD4	中型山体	0.539	0.531	0.455	0.568
BY2	中型山体	0.425	0.578 *	0.635 *	0.494
HX2	中型山体	0.582	0.636 *	0.573	0.517
HX3	中型山体	0.142	0.260	0.361	0.177
NM4	中型山体	0.292	0.175	-0.268	0.384
YY4	中型山体	0.264	0.190	0.458	0.295
BY1	小型山体	0.579	0.646	0.662	0.478
BY3	小型山体	0.648	0.596	0.276	0.643
WD1	小型山体	-0.249	-0.511	-0.405	-0.269
WD3	小型山体	-0.398	-0.348	-0.273	-0.463
GSH2	小型山体	0.501	0.642	0.777 *	0.281
NM5	小型山体	-0.401	-0.423	0.014	-0.717
HX4	小型山体	-0.657	-0.690	0.210	0.415

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

为进一步探索城市遗存山体表面空气负离子浓度对不同规模城市遗存山体植物物种多样性的响应,对植物物种多样性指数与空气负离子浓度进行线性回归分析,结果表明(图 6),植物物种多样性对山体表面空气负离子浓度均呈微弱影响,各规模城市遗存山体表面空气负离子浓度受到植物物种多样性的线性关系有一定差异。在大型山体及中型山体中 Shannon-Wiener 指数对山体表面空气负离子浓度贡献最大;在小型山体中, Margalef 指数对山体表面空气负离子浓度贡献最大。综合来看,大型城市遗存山体表面空气负离子浓度受植物多样性影响最大,植物物种多样性中 Margalef 指数对城市遗存山体表面空气负离子浓度影响最明显, Pielou 指数影响最小。

3.3.2 植物群落体积生物量对山体表面空气负离子浓度的影响

城市遗存山体表面空气负离子浓度对植物群落体积生物量反馈敏感度依次为:小型山体>大型山体>中型山体。但并不是对所有山体的植物群落体积生物量与其表面空气负离子浓度均有较好拟合程度,如 NM3、WD3 和 GSH2 的表面空气负离子浓度与各自的植物群落体积生物量的拟合程度仅分别为 0.022、0.036 及 0.063(图 7)。多元线性回归结果表明,城市遗存山体植物群落体积生物量与其表面空气负离子浓度拟合程度差别较大,不同规模山体两者之间的线性关系有显著差异(图 8)。

3.4 城市遗存山体斑块特征对其表面空气负离子浓度的影响

由表 5 可知,不同规模城市遗存山体表面的空气负离子浓度对斑块特征响应差异明显,其中大型山体受影响的斑块特征指标最多,小型山体表面空气负离子浓度不受其斑块特征影响。城市遗存山体斑块特征指标中的山体高度、山体斑块面积、平均坡度及山体平均植被覆盖度对各山体表面空气负离子浓度无显著影响。人为干扰对大中型山体表面空气负离子浓度均有显著负面影响,相关系数分别达-0.727 和-0.760;平均海拔

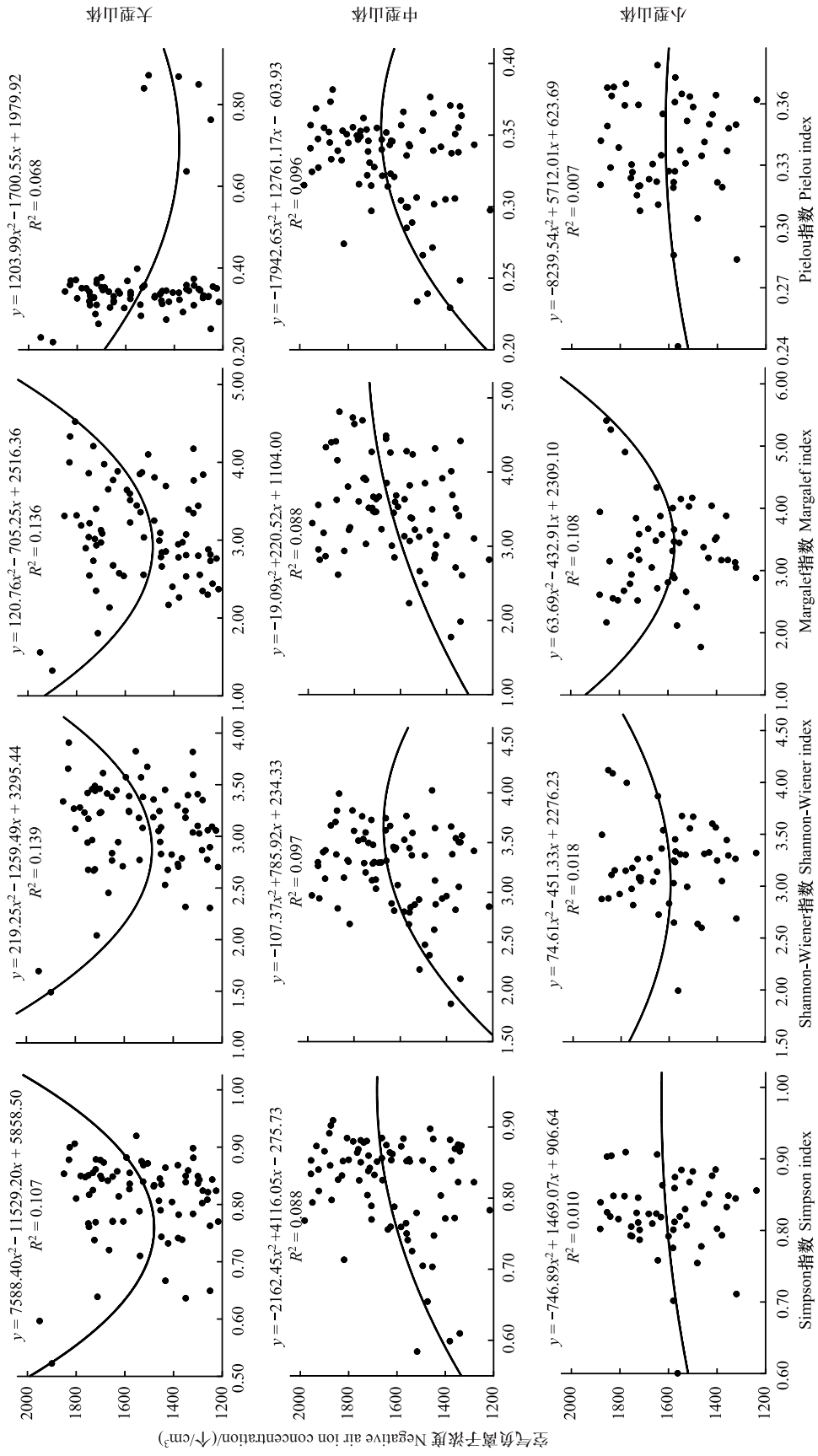


图 6 植物多样性与山体表面空气负离子浓度线性回归分析
Fig.6 Linear regression relationship between the surface NAIC of URMs and its plant species diversity

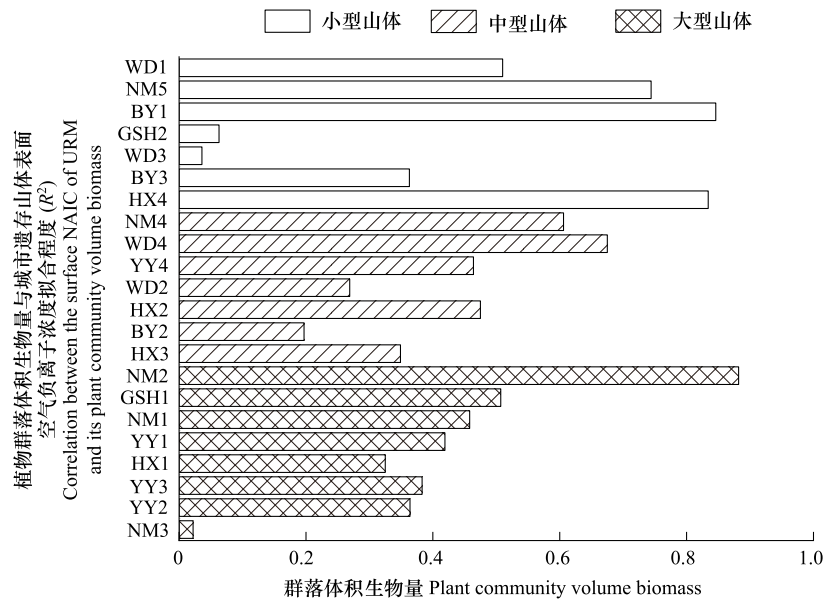
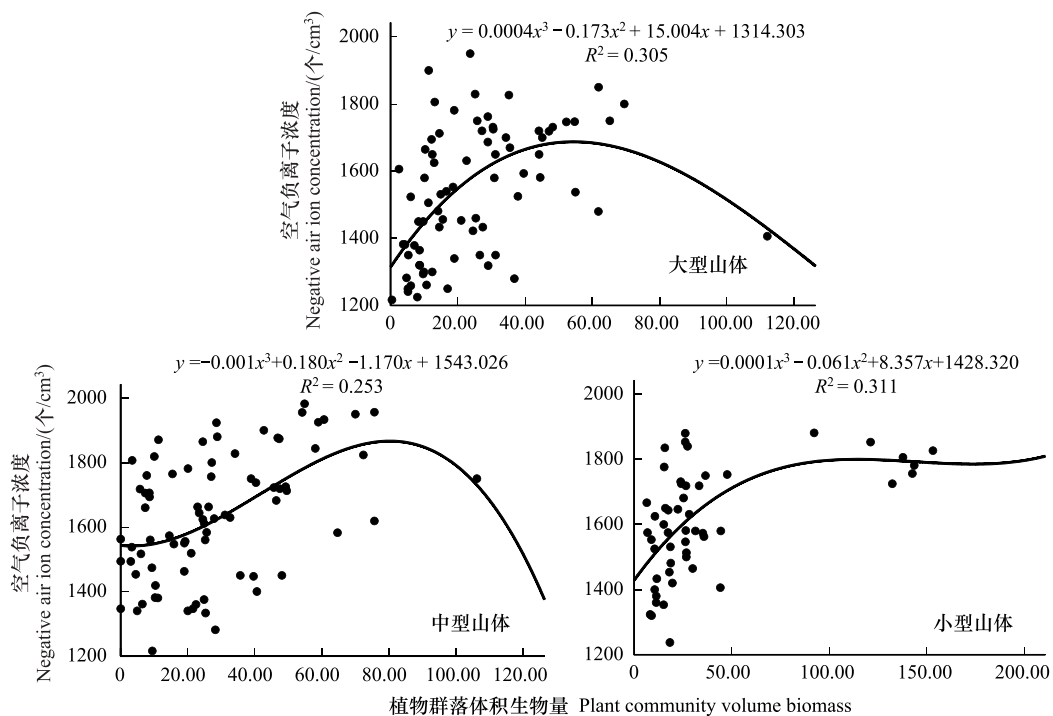
图7 植物群落体积生物量与城市遗存山体表面空气负离子浓度拟合程度(R^2)Fig.7 Correlation between the surface NAIC of URM and its plant community volume biomass (R^2)

图8 植物群落体积生物量与城市遗存山体表面空气负离子浓度线性回归分析

Fig.8 Linear regression relationship between the surface NAIC of URM and its plant community volume biomass

与大型山体表面空气负离子浓度呈显著负相关关系($R = -0.752$);山体坡度差与中型山体表面空气负离子浓度有极显著正相关($R = 0.995, P < 0.01$);山体斑块形状指数与大型山体表面空气负离子浓度呈最大显著正相关($R = 0.916, P < 0.01$),与中型山体空气表面负离子浓度呈最大负相关($R = -0.829$)。NIR 及 SWIR1 与大型山体空气表面负离子浓度呈负相关,相关系数分别为 -0.831 和 -0.855 ,中小型山体相关性不明显。

表 5 城市遗存山体特征与山体表面空气负离子浓度相关性

Table 5 Correlation between the surface NAIC of URMs and its patch characteristics

城市遗存山体类型 URMs type	山体人为 干扰程度 HDURM	山体平 均海拔 AEURM	山体 高度 HURM	山体坡 度差 SDURM	山体平 均坡度 ASURM	山体斑块 形状指数 LSIURM	山体斑 块面积 PAURM	山体植被 覆盖度 VCURM	近红外 辐射 NIR	短波红 外辐射 1 SWIR1	短波红 外辐射 2 SWIR2
大型山体 Large URMs	-0.727 *	-0.752 *	-0.037	0.209	-0.132	0.916 **	0.425	-0.244	-0.831 *	-0.855 **	-0.684
中型山体 Medium URMs	-0.760 *	-0.268	0.598	0.995 **	0.66	-0.829 *	0.037	0.681	0.386	-0.349	-0.652
小型山体 Small URMs	-0.179	-0.562	0.228	0.251	0.201	0.194	0.293	0.057	-0.294	-0.542	-0.644

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关; HDURM: 山体人为干扰程度 Human disturbance of urban remnant mountains; AEURM: 山体平均海拔 Average elevation of urban remnant mountains; HURM: 山体高度 Height of urban remnant mountains; SDURM: 山体坡度差 Slope difference of urban remnant mountains; ASURM: 山体平均坡度 Average slope of urban remnant mountains; LSIURM: 山体斑块形状指数 Landscape Shape Index of urban remnant mountains; PAURM: 山体斑块面积 Patch area of urban remnant mountains; VCURM: 山体植被覆盖度 Vegetation coverage of urban remnant mountains; NIR: 近红外辐射 Near infrared radiation; SWIR1: 短波红外辐射 1 Short wave infrared radiation 1; SWIR2: 短波红外辐射 2 Short wave infrared radiation 2

3.5 城市遗存山体表面空气负离子浓度的主要影响因素

为探究不同规模山体表面空气负离子浓度主要影响因素, 将各影响因素作为自变量, 山体表面空气负离子浓度为因变量, 进行多元线性逐步回归分析。结果表明(表 6), 不同规模城市遗存山体表面空气负离子浓度受到的因素影响差异明显。大型山体的表面温度、山体斑块形状指数及植物群落体积生物量等指标与其表面空气负离子浓度拟合较好, 其中山体斑块形状指数与空气负离子浓度拟合度最高 ($R^2 = 0.813$); 中型山体的表面温度、Margalef 指数、植物群落体积生物量及山体坡度差与其表面空气负离子浓度拟合较好, 其中拟合度最高的是山体坡度差 ($R^2 = 0.988$); 小型山体表面空气负离子浓度与其表面温度、湿度、Simpson 指数及植物群落体积生物量有较好的拟合关系, 拟合系数 $R^2 = 0.714$ 。

表 6 城市遗存山体影响因素与山体表面空气负离子浓度多元逐步线性回归方程

Table 6 Multifactor linear stepwise regression equation between the surface NAIC of URMs and its influence factors

山体类型 URMs type	影响因素 Influence factors	多元线性逐步回归方程 Multiple linear stepwise regression equation	R^2
大型山体 Large URMs	温度(T)、湿度(RH)、植物多样性指数(R 、 D 、 H' 、 Jh)、群落体积生物量(PCVB)	$Y = -30.541T + 2544.645$	0.406
	城市遗存山体特征(HDURM、AEURM、HURM、SDURM、ASURM、LSIURM、PAURM、VCURM、NIR、SWNIR1、SWNIR2)	$Y = 636.858LSIURM + 738.862$	0.813
	所有因素	$Y = 11.781PCVB + 1242.532$	0.490
中型山体 Medium URMs	温度(T)、湿度(RH)、植物多样性指数(R 、 D 、 H' 、 Jh)、群落体积生物量(PCVB)	$Y = -18.151T + 77.607R + 3.419PCVB + 1858.316$	0.326
	城市遗存山体特征(HDURM、AEURM、HURM、SDURM、ASURM、LSIURM、PAURM、VCURM、NIR、SWNIR1、SWNIR2)	$Y = 32.729SDURM + 1106.393$	0.988
	所有因素	/	/
小型山体 Small URMs	温度(T)、湿度(RH)、植物多样性指数(R 、 D 、 H' 、 Jh)、群落体积生物量(PCVB)	$Y = 50.436D + 6.274RH + 1.367PCVB - 65.368T + 2923.182$	0.714
	城市遗存山体特征(HDURM、AEURM、HURM、SDURM、ASURM、LSIURM、PAURM、VCURM、NIR、SWNIR1、SWNIR2)	/	/
	所有因素	/	/

T : 温度 Temperature; RH : 湿度 Relative humidity; R : Margalef 指数 Margalef index; D : Simpson 指数 Simpson index; H' : Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index; Jh : Pielou 指数 Pielou index

3.6 城市遗存山体周边缓冲区景观格局对山体表面空气负离子浓度的影响

3.6.1 周边缓冲区景观格局对城市遗存山体整体表面空气负离子浓度的影响

由图 9 可以看出, 不同规模城市遗存山体表面空气负离子浓度均受周边景观格局影响, 且在 1000 m 缓冲

区内有较大差异。缓冲区内林地、水域、建设用地及城市遗存山体相关指标对各规模城市遗存山体表面空气负离子浓度有显著影响,影响最显著的是水域斑块密度。在空间尺度上,城市遗存山体表面空气负离子浓度对周边缓冲区景观格局响应有所不同。林地斑块密度及建设用地面积分别在 100 m 和 200 m 的缓冲区尺度

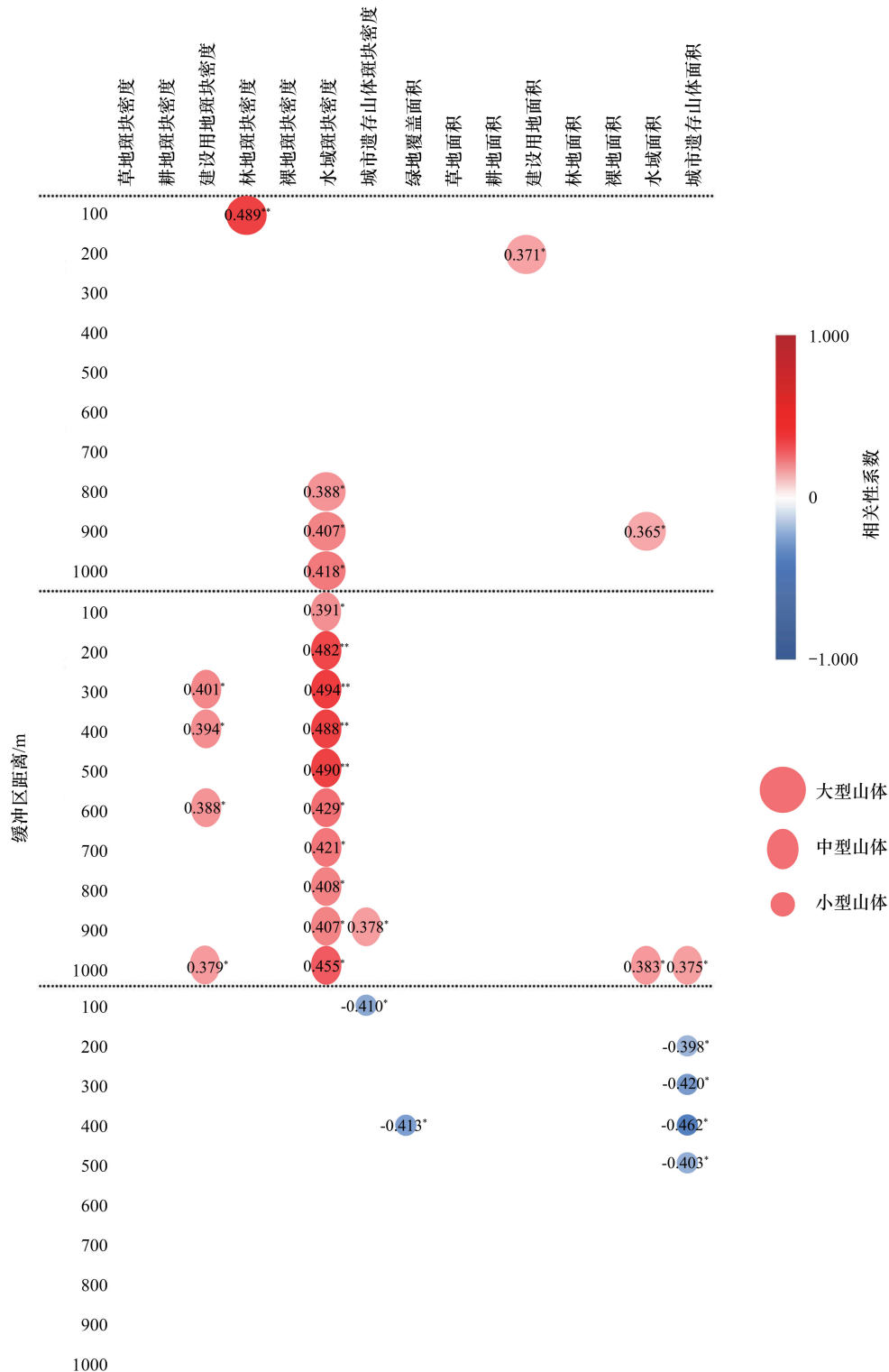


图9 城市遗存山体 1000 m 内缓冲区周边景观格局与山体表面空气负离子浓度相关性

Fig.9 Correlation between the surface NAIC of URMs and its landscape patterns around buffer zones within 1000 m

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

上对大型城市遗存山体表面空气负离子浓度有较显著积极作用;水域斑块密度和面积在 800—1000 m 的缓冲区尺度对大型山体表面空气负离子浓度有较大影响。就中型城市遗存山体而言,水域斑块密度在 0—1000 m 内均与其表面空气负离子浓度有显著正相关,在 300 m 时出现峰值;建设用地斑块密度、城市遗存山体斑块密度、水域面积及城市遗存山体面积指标对其表面空气负离子浓度均表现出不同尺度效应;小型城市遗存山体缓冲区 100—500 m 内的其它城市遗存山体相关指标及 400 m 内绿地覆盖面积对其表面空气负离子浓度有负面影响作用,其它景观类型无明显相关关系。

对山体表面空气负离子浓度有显著作用的缓冲区相关因子进行多元线性回归分析(图 10),各规模城市遗存山体表面空气负离子浓度对缓冲区相关因子的响应距离具有差异性。大型城市遗存山体周边缓冲区景观格局对其表面空气负离子浓度影响的尺度效应呈 U 型状态,影响最明显的尺度为 100 m ($R^2 = 0.239$);中型城市遗存山体周边缓冲区景观格局对其表面空气负离子浓度影响的尺度效应呈不规则波动变化,900 m 前波动较小,900 m 后影响急剧增大,于 1000 m 处呈最大拟合关系 ($R^2 = 0.650$);小型山体周边缓冲区景观格局对其表面空气负离子浓度影响明显的范围为 0—500 m,500 m 后无显著影响 ($R^2 = 0.323$)。为探究城市遗存山体表面空气负离子浓度受周边缓冲区内景观格局影响规律,以距离上出现的明显第一拐点为影响最佳范围,大型山体受影响范围为 0—300 m,中型山体受影响范围为 0—500 m,小型山体受影响范围为 0—500 m。

3.6.2 周边缓冲区景观格局对城市遗存山体局部空气负离子浓度的影响

由图 11 可以看出城市遗存山体不同坡位局部空气负离子浓度受缓冲区景观格局影响程度有所差异。缓冲区内草地、林地、水域、城市遗存山体、建设用地及耕地相关指标对山体局部空气负离子浓度均有显著影响,水域相关指标对大中型山体不同坡位空气负离子有最多正面影响,耕地相关指标与小型山体山顶处空气负离子浓度呈负相关关系。

大型山体不同坡位空气负离子浓度受周边缓冲区景观格局影响的空间尺度各有差异。1000 m 缓冲区尺度上水域斑块密度与山脚处空气负离子浓度有最大正相关;山腰处空气负离子浓度与草地斑块密度在 800 m 缓冲区尺度呈最大正相关;山顶处空气负离子浓度与水域斑块密度在 1000 m 缓冲区尺度上有最大相关性。

中型山体的山脚、山腰处空气负离子浓度与缓冲区景观格局特征在 0—1000 m 尺度范围均有显著影响。其中,在山脚处,700 m 缓冲区水域面积与其表面空气负离子浓度呈显著正相关 ($R = 0.549, P < 0.01$);在山腰处,与 200 m 缓冲区内水域斑块密度与其表面空气负离子浓度呈最大正相关关系 ($R = 0.504, P < 0.01$);山顶处空气负离子浓度除 100 m 缓冲区尺度外,其余尺度上与缓冲区建设用地斑块密度及水域斑块密度均呈显著相关关系,其中 300 m 处建设用地斑块密度对山体表面空气负离子浓度有最大促进作用。

小型山体局部空气负离子浓度受周边缓冲区景观格局特征影响较小,山脚处仅与 700 m 缓冲区耕地斑块密度相关;山顶处空气负离子浓度仅与 500—600 m 内城市遗存山体斑块密度及 900 m 内耕地面积有相关关系,其余尺度上无显著相关性,其中,500 m 缓冲区内城市遗存山体斑块密度对其有最大正相关关系,900 m 缓冲区耕地面积与其呈显著负相关。

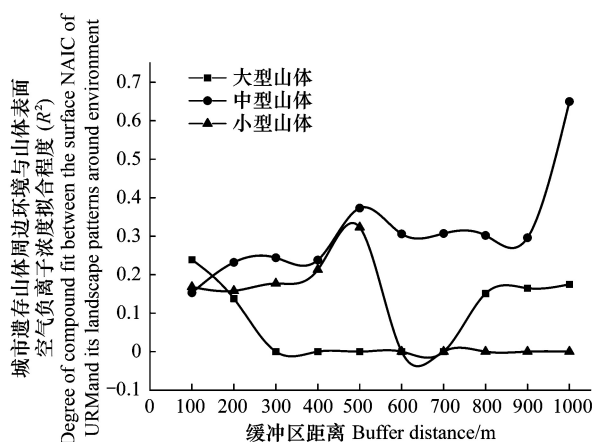


图 10 城市遗存山体 1000 m 内缓冲区周边景观格局与山体表面空气负离子浓度复合拟合程度

Fig. 10 Degree of compound fit between the surface NAIC of URMs and its landscape patterns around buffer zones within 1000 m

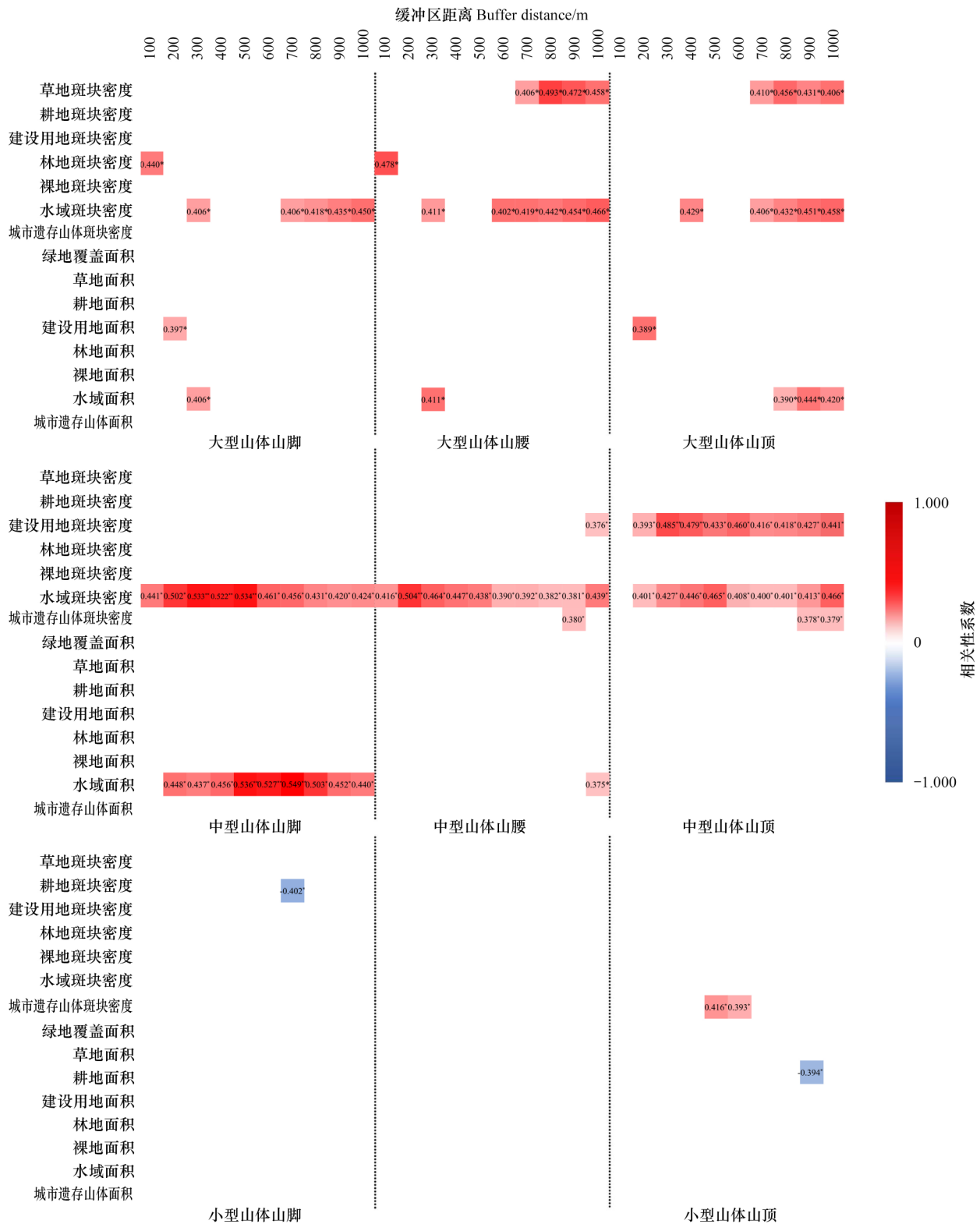


图 11 城市遗存山体不同坡位 1000 m 内缓冲区周边景观特征与山体表面空气负离子浓度相关性

Fig.11 Correlation between the surface NAIC of URM and its landscape pattern landscape patterns around buffer zones within 1000 m at different slope position

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

根据多元回归分析对对各尺度上缓冲区影响因子进行复合效应分析,结果如图 12 所示。大型城市遗存山体不同坡位空气负离子浓度受缓冲区景观格局特征影响随着尺度增大呈剧烈波动状态,且山顶山腰影响程度最大值出现在 800 m 处;山脚处呈 W 状波动,且复合效应最大影响距离为 300 m。中型城市遗存山体各坡位处空气负离子浓度受影响程度在距离上呈波动状态,山顶处受距离影响变化较剧烈,500 m 内景观格局特征复合效应最大($R^2=0.351$),山腰及山脚处受影响波动幅度较小,山腰处受 200 m 内景观格局特征复合影响最大, $R^2=0.254$,山脚处在 700 m 处受到影响最大($R^2=0.302$)。小型山体山脚处空气负离子浓度受景观格局特征复合效应在空间尺度上表现为做倒 V 波动趋势,山脚仅在 700 m 处受影响;山顶呈倒 W 波动趋势,在 500 m 有最大复合效应($R^2=0.178$)。以复合效应在空间尺度上出现的明显第一拐点为影响最佳范围,大型山体山脚受影响范围为 0—300 m,山腰和山顶受影响范围均为 0—200 m;中型山体山脚受影响范围为 0—300 m,山腰受影响范围为 0—200 m,山顶受影响范围为 0—500 m;小型山体山脚受影响范围为 0—700 m,山顶受影响范围为 0—500 m。

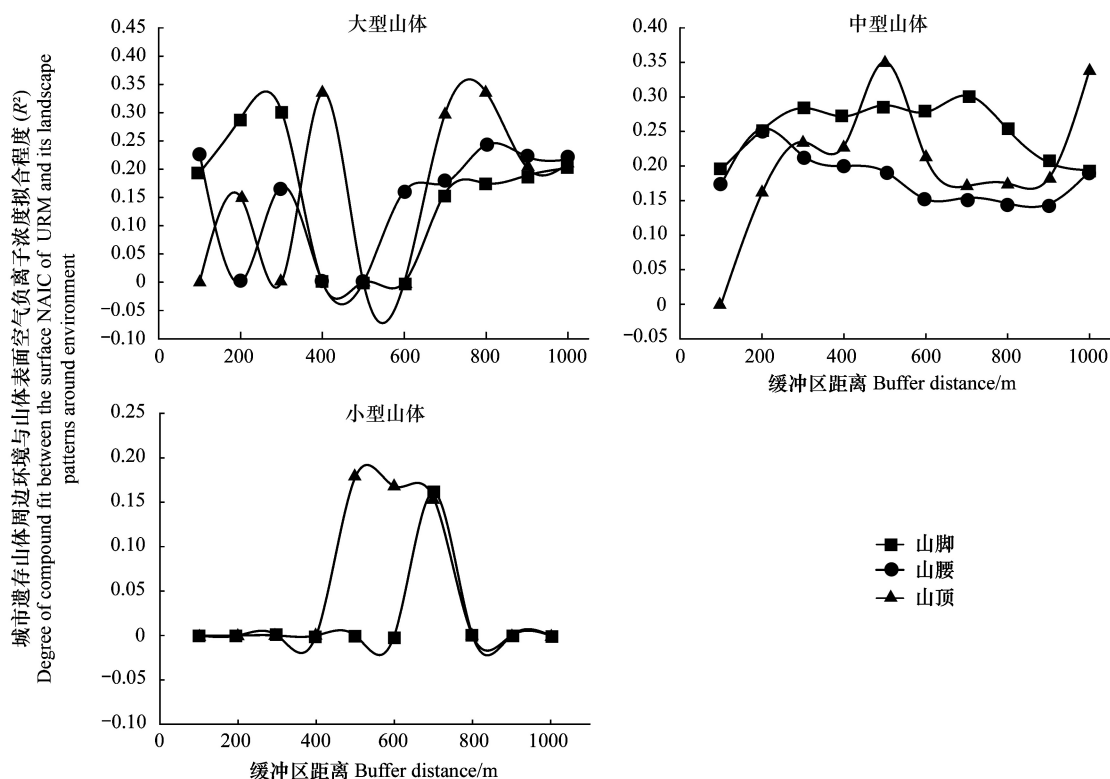


图 12 城市遗存山体不同位置 1000 m 内缓冲区周边景观格局与山体表面空气负离子浓度复合拟合程度

Fig.12 Degree of compound fit between the surface NAIC of URMs and its landscape patterns around buffer zones within 1000 m

4 讨论

4.1 城市遗存山体表面空气负离子浓度空间格局特征及其与山体特征关系

不同规模城市遗存山体表面负离子浓度具有差异性。通过山体斑块面积与山体表面空气负离子浓度的相关性可以看出(表 5),山体斑块的投影面积大小,并不是决定空气负离子浓度高低的重要因素,但在各规模山体间及坡向上体现出的差异性可能与植物郁闭度及人为干扰程度有关。由表 7 样方群落组成和现状可知,中型和小型山体内部农用地远小于大型山体;坡向上人为干扰痕迹表现为南坡>西坡>东坡>北坡,与坡向上空气负离子浓度规律有一定拟合趋势;另外,坡向主要决定着光照条件,一般情况下南坡和西坡光照条件优于北坡和东坡,而光照又会引起温度的差别,这也是山体表面空气负氧离子浓度在北坡和东坡高于南坡和西坡

表 7 城市遗存山体内部群落组成及现状

Table 7 Community composition and present situation within URM

大型山体 Large URMs	坡向 Slope direction	群落组成 Community composition	现状 Present situation	中型山体 Medium URMs	坡向 Slope direction	群落组成 Community composition	现状 Present situation	小型山体 Small URMs	坡向 Slope direction	群落组成 Community composition	现状 Present situation
NM3	北	常绿落叶阔叶	建筑残骸+农用地	BY2	北	常绿落叶阔叶	农用地	BY1	北	针叶阔叶混交	建设用地
	东	针叶阔叶混交			东	常绿落叶阔叶			东	针叶阔叶混交	
	南	常绿落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶	
	西	常绿落叶阔叶			西	常绿落叶阔叶			西	针叶阔叶混交	
NM2	北	常绿落叶阔叶	农用地	YY4	北	常绿落叶阔叶	农用地	NM5	北	针叶阔叶混交	农用地
	南	针叶阔叶混交			东	落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶	
	西	落叶阔叶			南	针叶阔叶混交			西	针叶阔叶混交	
	东	常绿落叶阔叶			北	针叶阔叶混交			东	常绿落叶阔叶	
GSH1	南	常绿落叶阔叶	修建道路	WD2	南	针叶阔叶混交	农用地	WD3	西	常绿落叶阔叶	农用地
	西	常绿落叶阔叶			北	针叶阔叶混交			北	针叶阔叶混交	
	北	常绿落叶阔叶			东	针叶阔叶混交			东	针叶阔叶混交	
	东	常绿落叶阔叶			南	针叶阔叶混交			南	针叶阔叶混交	
YY3	南	常绿落叶阔叶	修建道路	HX2	南	针叶阔叶混交	农用地	BY3	西	针叶阔叶混交	建筑残骸
	西	常绿落叶阔叶			北	针叶阔叶混交			北	常绿落叶阔叶	
	东	常绿落叶阔叶			东	针叶阔叶混交			东	常绿落叶阔叶	
	西	常绿落叶阔叶			南	针叶阔叶混交			南	常绿落叶阔叶	
YY2	北	常绿落叶阔叶	农用地	HX3	北	常绿落叶阔叶	农用地	GSH2	北	针叶阔叶混交	建筑残骸
	东	落叶阔叶			东	常绿落叶阔叶			东	常绿落叶阔叶	
	南	常绿落叶阔叶			南	针叶阔叶混交			南	常绿落叶阔叶	
	西	落叶阔叶			西	针叶阔叶混交			西	常绿落叶阔叶	
HX1	北	落叶阔叶	农用地	WD4	北	常绿落叶阔叶	农用地	WD1	北	针叶阔叶混交	建筑残骸
	东	常绿阔叶			东	常绿落叶阔叶			东	针叶阔叶混交	
	南	针叶阔叶混交			南	常绿落叶阔叶			南	针叶阔叶混交	
	西	常绿阔叶			西	常绿落叶阔叶			西	针叶阔叶混交	
NM1	北	针叶阔叶混交	护坡	NM4	北	常绿落叶阔叶	护坡	HX4	北	常绿落叶阔叶	建设用地
	东	针叶阔叶混交			东	常绿落叶阔叶			东	常绿落叶阔叶	
	南	针叶阔叶混交			南	常绿落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶	
	西	针叶阔叶混交			西	常绿落叶阔叶			西	常绿落叶阔叶	
YY1	北	常绿落叶阔叶	农用地		北	常绿落叶阔叶	农用地		北	常绿落叶阔叶	农用地
	东	常绿落叶阔叶			东	常绿落叶阔叶			东	常绿落叶阔叶	
	南	常绿落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶			南	常绿落叶阔叶	
	西	常绿落叶阔叶			西	常绿落叶阔叶			西	常绿落叶阔叶	

的主要原因。坡位因受城市遗存山体整体环境影响,因此在位置上并不具有明显差异。部分山体表面空气负离子平均浓度低于 1400 个/cm^3 ,是由于山体内存在建筑残骸遗留、道路修建及大量人为开垦为耕地情况,这些地方的植物郁闭度大多小于 20%,说明植物及空间是否开敞对空气负离子浓度十分重要^[15,36]。坡位上空气负离子浓度差异不大可能还与研究区的城市遗存山体的相对高度有关,黔中喀斯特地区山体体量普遍较小,绝大多数以小山丘状孤立存在,导致坡位上的差异不明显;山体景观格局特征中的相对高度与城市遗存山体表面空气负离子浓度无显著相关性,这也证明了这个原因的可能性。

研究结果表明各山体表面负离子浓度受山体特征影响有较大差异。大型城市遗存山体体量相对较大,平均海拔与坡度差较大,但平均坡度较小,边缘坡度较缓使得人为干扰影响较大,因此内部空气负离子浓度循环缓慢,空气负离子浓度随之减少^[37],这可能与喀斯特多山城市的规划以及山体本身的岩石裸露及资源禀赋有关^[38]。中型山体坡度差与山体表面空气负离子浓度呈极显著正相关,可能是因为中型山体坡度适中,适宜乔木类等高大植物生长。大型山体边缘形状越复杂,对其空气负离子浓度越有利,可能是因为山体边界与其他景观类型形成边缘效应,对山体植物多样性有促进作用^[39],从而促进了山体表面空气负离子的聚集;但中型山体边缘形状越复杂,对其表面空气负离子产生抑制作用越强,可能与山体规模有关,中小型山体边缘形状越复杂,其内部核心面积就会越小,从而抵消了边缘效应产生的促进作用。

植被覆盖度对山体空气负离子浓度影响不大,这与赵艳佩等在上海市新浜水源涵养林和延中绿地中的相关研究一致^[13],但与 Niu 等在沈阳东陵公园研究结果不一致^[40],原因可能是由于各山体间平均植被覆盖度相差较小,因此无显著相关性。上述研究结果也可以看出城市遗存山体表面空气负离子浓度受影响的因素较多,相互之间的作用机制更为复杂,可能其他因素影响更大,掩盖了植被覆盖度对山体表面空气负离子浓度的影响,但相关机制还需深入研究。地表辐射因受温度影响^[41],因此与大型山体呈显著负相关。

4.2 城市遗存山体表面空气负离子浓度的影响因素

城市遗存山体表面空气负离子浓度均受山体表面温度影响,可能是因为负离子的产生机制与水合反应有关^[42],而温度升高则导致空气中的水分子蒸发。其次,温度升高对植物的光合作用有一定抑制作用,使得植物释放氧气减少,从而影响空气负离子浓度的发生^[43]。此外,温度还对空气尘埃的扩散、颗粒物碰撞有协助作用^[44],因此温度升高,空气负离子浓度降低。也有学者提出空气负离子浓度在夏季与温度呈正相关关系^[16,45],其原因在于,在晴天无尘的环境下温度升高反而会促使负离子浓度上升^[46]。这与本研究结果不同,在本研究中,温度与山体表面负离子浓度相关系数在-0.636 至-0.971 之间,这表明温度将与其他影响因子耦合产生协同效应^[46],说明研究对象的差异也会使得温度形成的影响程度有所不同。

植物群落体积生物量对不同规模山体表面空气负离子浓度均有影响,此结果可能是小型山体上的乔木层平均树高(8.67 m)普遍比大型山体(6.70 m)和中型山体的乔木层(7.12 m)高大;但通过平均冠幅来看,中型山体乔木最大(4.34 m),其次是小型山体(4.18 m),大型山体最小(4.10 m),而植物群落体积生物量大小依次为:小型山体>大型山体>中型山体,说明群落冠幅与平均树高对空气负离子浓度产生直接或间接影响,植物冠幅越大,郁闭度越高,从而对空气质量的影响越大^[19]。也有研究表明,空气负离子浓度与树高呈负相关^[47],与林分郁闭度无相关性^[48],以上结果与本研究发现的乔木树高对空气负离子浓度有间接正相关影响不同,这可能与观测的植物群落成分组成差异较大有关^[49]。

在潮湿环境及稳定状态下,湿度对空气中多种离子反应过程有促进作用^[49]。夏季山体表面空气湿度与各类城市遗存山体表面空气负离子浓度均有极显著正相关,但根据多元逐步线性回归结果来看,仅小型山体受其影响,大中型山体与湿度无明显拟合线性关系,说明对于城市遗存山体表面空气负离子浓度而言,湿度只是协同影响因子之一,这可能与空气湿度含量^[50]、测定时距物体放电电极的距离^[51]、地理位置^[45]以及空气中污染物含量^[52]等产生的综合效应有关。

植物多样性对山体空气负离子浓度的影响大多呈正相关或无明显效应,但与 HX1 有显著负相关,这可能是由于该山体树种的年龄较大^[53],且周边污染物较多,对植物产生一定负面影响,因此产生空气负离子能力

较弱。有研究表明,植物多样性指数与空气负离子浓度没有显著促进作用^[12],这与本研究得出中型及小型山体分别受 Margalef 指数及 Simpson 指数影响结果不一致,研究结果间有所差异的原因可能是自然与人文耦合的地域复杂性。

周边环境与水域相关的指标对大中型山体整体及局部的表面空气负离子浓度均有较大影响力,这与其他学者得出结论一致^[54],这可能是由于水域周围产生的空气负离子具有更长寿命^[55],从而与山体中负离子形成交互反应,提升了山体表面的空气负离子浓度。建设用地面积及其离散程度对大中型山体表面空气负离子浓度有积极作用,可能是因为建设用地中的构筑物高度与山体形成一定遮荫面积,从而导致温度降低,对空气负离子浓度产生有促进作用,但人为活动在建设用地中所带来的气体污染物等,容易吸附空气负离子,产生离子沉降^[56],因此建设用地分化程度越大对山体空气负离子浓度越有益。林地相关指标与大型山体空气负离子浓度呈正相关,可能是因为林地的空气负离子浓度比建设用地、草地、裸地、耕地等景观类型高^[23],气流的运动能激发空气负离子^[16],植物对尘埃等有截滞作用^[4],所以对其空气负离子浓度有一定促进作用。城市遗存山体相关指标与小型山体表面空气负离子浓度呈负相关可能是小型山体体量较小,而其周围分布的遗存山体体量较大,负离子浓度更易向体量较大的山体扩散,但其中的影响机制尚未可知,还需今后进行深入研究。

从缓冲区景观格局特征对城市遗存山体表面空气负离子浓度的复合影响程度的空间尺度效应来看,大型山体表面空气负离子浓度对周边 300 m 范围影响较为敏感,中型山体周边 500 m 范围内景观类型对其空气负离子浓度作用较规律,小型山体周边 500 m 内景观类型对负离子浓度影响值得关注。由相关性结果来看,水域、林地、草地及建设用地在空间上分化程度越高,水域面积越大对空气负离子浓度越有利。城市景观格局对城市遗存山体表面空气负离子的尺度效应对于合理保护和科学利用城市遗存山体资源、合理布局城市园林绿地都具有一定的参考意义。

针对城市遗存山体表面空气负离子浓度分布格局特征及其影响因素的分析结果,建议加强城市遗存山体保护,对于复垦和退化的植物,宜种植乡土速生乔木树种,增加植被郁闭度,以便在短期内形成冠幅广、树高高、群落体积生物量大的密林地,连接植被斑块形成生态廊道,营造植被空间,有助于提升城市遗存山体的生态效益。总体而言,孤立的小型城市遗存山体(100 m 缓冲区内无其余山体)最适宜作为山体生态康养场所进行开发利用。针对城市遗存山体周边环境的影响因素及其作用尺度,应在山体周边缓冲区范围内合理布置城市绿地,增加林地、草地及水域,减少山体外围裸地面积,控制建设用地面积及建设密度,转化耕地为复合型植被林地,以便提升山体内空气负离子浓度,优化空气质量,从而为居民提供更好的生态福祉。

5 结论

城市遗存山体作为多山城市建成环境中重要的生态资源,其对调节周边社区空气质量发挥着重要的作用。本研究对岩溶地区多山城市中不同规模城市遗存山体表面空气负离子浓度及其影响因素进行了初步探索,结果表明城市遗存山体表面空气负离子浓度与山体规模并不成线性正比例关系,而表现为中型山体>小型山体>大型山体;空气负离子浓度在山体坡向上的空间格局表现为东坡≈北坡>西坡≈南坡,坡位上无明显差异。温度及植物群落体积生物量对大中小型城市遗存山体空气负离子浓度均有影响;城市遗存山体斑块指数与大型山体表面空气负离子浓度呈线性关系,Margalef 指数及山体坡度差对中型山体表面空气负离子浓度有影响,小型山体表面空气负离子浓度对湿度及 Simpson 指数有一定响应。城市遗存山体周边的城市景观中对城市遗存山体表面空气负离子浓度具有显著积极作用的是水域,其它景观类型的影响在不同规模山体间具有差异性,在影响的空间尺度上大型山体为周边 300 m 范围,中小型山体为 500 m 范围。城市遗存山体表面空气负离子浓度是评价其调节空气质量生态系统服务功能的重要指标,是多山城市遗存山体在生态康养和休闲旅游规划的依据。本研究表明城市遗存山体表面空气负离子浓度及其空间格局具有复杂性,其影响因素多元且规律不一致,相互之间可能还存在着权衡与协同效应,后期还需要大量的观测数据进行深入分析,才有可能揭示其影响机制,为科学合理开发利用城市遗存山体提供理论依据。

参考文献(References):

- [1] 黄莘绒, 管卫华, 陈明星, 胡昊宇. 长三角城市群城镇化与生态环境质量优化研究. 地理科学, 2021, 41(1): 64-73.
- [2] Nadali A, Arfaenia H, Asadgol Z, Fahiminia M. Indoor and outdoor concentration of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal. Environmental Pollutants and Bioavailability, 2020, 32(1): 47-55.
- [3] Zhang C Y, Wu Z N, Li Z H, Li H F, Lin J M. Inhibition effect of negative air ions on adsorption between volatile organic compounds and environmental particulate matter. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2020, 36(18): 5078-5083.
- [4] Jiang S Y, Ma A L, Ramachandran S. Negative air ions and their effects on human health and air quality improvement. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(10): 2966.
- [5] Chu C H, Chen S R, Wu C H, Cheng Y C, Cho Y M, Chang Y K. The effects of negative air ions on cognitive function: an event-related potential (ERP) study. International Journal of Biometeorology, 2019, 63(10): 1309-1317.
- [6] Kim M, Jeong G J, Hong J Y, Park K Y, Lee M K, Seo S J. Negative air ions alleviate particulate matter-induced inflammation and oxidative stress in the human keratinocyte cell line HaCaT. Annals of Dermatology, 2021, 33(2): 116-121.
- [7] Liu W, Huang J, Lin Y, Cai C R, Zhao Y, Teng Y B, Mo J H, Xue L J, Liu L, Xu W, Guo X B, Zhang Y P, Zhang J J. Negative ions offset cardiorespiratory benefits of $PM_{2.5}$ reduction from residential use of negative ion air purifiers. Indoor Air, 2021, 31(1): 220-228.
- [8] 刘双芳, 张维康, 韩静波, 王兵, 牛香. 不同植被结构对空气质量的调控功能. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1602-1609.
- [9] 闫俊文, 刘庭凤. 城市风景园林植物多样性及空气净化效应研究. 北方园艺, 2018(17): 110-114.
- [10] 杨畅, 王月容, 汤志颖, 王茜, 段敏杰, 漆良华. 不同群落结构风景游憩林生态保健效应——以北京西山国家森林公园为例. 生态学报, 2022, 42(16): 6499-6513.
- [11] 冯燕珠, 陈旭, 高欢欢, 郭傲, 郑国华. 公园不同植物配置群落空气负离子变化特征. 福建农业学报, 2019, 34(1): 95-103.
- [12] 潘剑彬, 李佳妮, 李树华, 董丽, 王云才. 城市绿地植物群落与空气负离子空间分异特征相关关系研究——以北京奥林匹克森林公园为例. 中国园林, 2022, 38(6): 57-62.
- [13] 赵艳佩, 熊丽君, 王敏, 石登荣, 邱是涵. 上海市生态用地属性与空气负离子浓度的关联性. 安全与环境学报, 2015, 15(4): 322-328.
- [14] 黄向华, 王健, 曾宏达, 陈光水, 钟美芳. 城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1761-1768.
- [15] 朱春阳, 李树华, 李晓艳. 城市带状绿地郁闭度对空气负离子浓度、含菌量的影响. 中国园林, 2012, 28(9): 72-77.
- [16] 王薇, 陈明, 夏斯涵. 高密度城市住区绿地空气负离子浓度分布特征及其与微气候关系. 生态环境学报, 2020, 29(7): 1367-1376.
- [17] Luo L H, Sun W, Han Y J, Zhang W W, Liu C J, Yin S. Importance evaluation based on random forest algorithms: insights into the relationship between negative air ions variability and environmental factors in urban green spaces. Atmosphere, 2020, 11(7): 706.
- [18] 李少宁, 赵旭, 王君怡, 鲁绍伟, 赵娜, 徐晓天. 北京西山国家森林公园空气负离子与 NO_x 浓度动态特征分析. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1654-1661.
- [19] 王薇, 余庄. 中国城市环境中空气负离子研究进展. 生态环境学报, 2013, 22(4): 705-711.
- [20] 李爱博, 赵雄伟, 李春友, 周本智, 杨振亚, 周佩佩, 赵亚敏. 基于控制试验的植株数量及空气温湿度与负离子的关系. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2211-2217.
- [21] 汤娜, 王志泰. 黔中城市喀斯特山体遗存植物群落公园化利用响应. 生态学报, 2021, 41(8): 3033-3052.
- [22] Luo Q Y, Bao Y, Wang Z T, Chen X T. Potential recreation service efficiency of urban remnant mountain wilderness: a case study of Yunyan District of Guiyang City, China. Ecological Indicators, 2022, 141: 109081.
- [23] Zeng M L, Bao Y, Wang Z T, Huang Z S, Chen X T, Wei W F, Lin X, Li Q. Patch three-dimensional effect for plant species diversity of urban remnant mountain in multi-mountain city. Ecological Indicators, 2022, 140: 108996.
- [24] Chen X T, Wang Z T, Bao Y. Cool Island effects of urban remnant natural mountains for cooling communities: a case study of Guiyang, China. Sustainable Cities and Society, 2021, 71: 102983.
- [25] 陈信同. 黔中山地城市自然山体微气候调节效应研究——以贵阳市为例[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [26] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. 山地学报, 2015, 33(6): 641-648.
- [27] 向杏信, 黄宗胜, 王志泰. 喀斯特多山城市空间形态结构与植物群落物种多样性的耦合关系——以安顺市为例. 生态学报, 2021, 41(2): 575-587.
- [28] 邢龙, 王志泰, 涂燕茹. 黔中喀斯特城市遗存自然山体景观格局时空演变——以安顺市为例. 生态学报, 2021, 41(4): 1291-1302.
- [29] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 苏维词, 曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. 地球与环境, 2015, 43(3): 269-278.
- [30] 金振洲. 植物社会学理论与方法. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] Shumi G, Rodrigues P, Hanspach J, Härdtle W, Hylander K, Senbeta F, Fischer J, Schultner J. Woody plant species diversity as a predictor of

- ecosystem services in a social-ecological system of southwestern Ethiopia. *Landscape Ecology*, 2021, 36(2): 373-391.
- [32] 郭建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [33] 田鹏, 李加林, 姜忆湄, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清, 童晨, 周子靖, 邵姝遥. 海湾景观生态脆弱性及其对人类活动的响应——以东海区为例. *生态学报*, 2019, 39(4): 1463-1474.
- [34] 赵琳琳, 张锐, 刘焱序, 朱西存. GF1-WFV 与 Landsat8-OLI 对植被信息的提取差异研究. *生态学报*, 2020, 40(10): 3495-3506.
- [35] 王晓蕾, 石守海. 基于 GEE 的黄河流域植被时空变化及其地形效应研究. *地球信息科学学报*, 2022, 24(6): 1087-1098.
- [36] Wang H, Wang B, Niu X, Song Q F, Li M W, Luo Y Y, Liang L D, Du P F, Peng W. Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at different spatio-temporal scales. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01008.
- [37] Wang R, Chen Q, Wang D X. Effects of altitude, plant communities, and canopies on the thermal comfort, negative air ions, and airborne particles of mountain forests in summer. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3882.
- [38] 高红艳, 刁承泰. 试论喀斯特地貌对城市发展建设的影响——以喀斯特山区城市贵阳为例. *中国岩溶*, 2010, 29(1): 81-86.
- [39] 田超, 杨新兵, 刘阳. 边缘效应及其对森林生态系统影响的研究进展. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2184-2192.
- [40] Niu X, Li Y, Li M N, Zhang T, Meng H, Zhang Z, Wang B, Zhang W K. Understanding vegetation structures in green spaces to regulate atmospheric particulate matter and negative air ions. *Atmospheric Pollution Research*, 2022, 13(9): 101534.
- [41] 顾志荣, 马天翔, 孙岚萍, 马霞, 吴国泰, 许爱霞, 葛斌. 沙生药用植物锁阳根际土壤近红外光谱及其与产地环境因子的关系. *时珍国医国药*, 2020, 31(4): 935-938.
- [42] Skalny J D, Mikoviny T, Matejcek S, Mason N J. An analysis of mass spectrometric study of negative ions extracted from negative corona discharge in air. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2004, 233(1/2/3): 317-324.
- [43] Tammet H, Hörrak U, Laakso L, Kulmala M. Factors of air ion balance in a coniferous forest according to measurements in Hyytiälä, Finland. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11): 3377-3390.
- [44] 何永晴, 赵玉成, 冯蜀青. 西宁市逆温特征及其与空气污染物浓度的相关分析. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 608-613.
- [45] 马荣, 王志高, 黄玉洁, 朱锦茹, 詹小豪, 江波. 午潮山国家森林公园秋季空气负离子浓度及影响因素. *森林与环境学报*, 2021, 41(1): 26-34.
- [46] 崔虎亮, 李仲昊, 曹如姬. 太岳山区不同森林康养村落空气负离子浓度及气象因素的关系. *西部林业科学*, 2022, 51(2): 27-34.
- [47] Luts A, Salm J. Chemical composition of small atmospheric ions near the ground. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(D5): 10781.
- [48] 周斌, 余树全, 张超, 伊力塔. 不同树种林分对空气负离子浓度的影响. *浙江农林大学学报*, 2011, 28(2): 200-206.
- [49] Nagato K, Matsui Y, Miyata T, Yamauchi T. An analysis of the evolution of negative ions produced by a *Corona* ionizer in air. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2006, 248(3): 142-147.
- [50] 施光耀, 桑玉强, 张劲松, 孟平, 蔡露露, 裴松义. 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. *中国农业气象*, 2021, 42(1): 24-33.
- [51] Wu C C, Lee G W M, Yang S, Yu K P, Lou C L. Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air. *Science of the Total Environment*, 2006, 370(1): 245-253.
- [52] 王非, 李冰, 周蕴薇. 城市森林公园空气负离子浓度与气象因子的相关性. *东北林业大学学报*, 2016, 44(2): 18-20, 38.
- [53] 程程, 周威, 王晓冰, 刘建军. 不同树龄国槐光合特性和抗氧化酶活性比较研究. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 7-13.
- [54] 刘端, 白志强, 韩燕梁. 喀纳斯国家级森林公园景区夏秋季空气负离子浓度变化特征. *西北林学院学报*, 2015, 30(3): 253-257.
- [55] Yamada R, Yanoma S, Akaike M, Tsuburaya A, Sugimasa Y, Takemiya S, Motohashi H, Rino Y, Takanashi Y, Imada T. Water-generated negative air ions activate NK cell and inhibit carcinogenesis in mice. *Cancer Letters*, 2006, 239(2): 190-197.
- [56] Pacifico F, Folberth G A, Sitch S, Haywood J M, Rizzo L V, Malavelle F F, Artaxo P. Biomass burning related ozone damage on vegetation over the Amazon forest: a model sensitivity study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(5): 2791-2804.