

北京森林 BVOCs 排放特征及对区域空气质量的影响

张 蔷^{1,2}, 李令军^{1,2}, 赵文慧^{1,2}, 王新辉^{1,2}, 姜 磊^{1,2}, 刘保献^{1,2}, 李 翔^{3,4*}, 鹿海峰^{1,2} (1.北京市生态环境监测中心, 北京 100048; 2.大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048; 3.北京市生态环境局, 北京 100044; 4.清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 利用林业二类调查蓄积资料,广泛调研植物源挥发性有机物(BVOCs)排放因子的最新研究成果,运用光温影响模型对北京森林 BVOCs 排放特征进行研究,并分析其对区域空气质量的影响.结果显示,2015年北京森林 BVOCs 排放量平均值为 27.97×10^9 g C/a,变化域值范围为 $(9.46 \sim 76.45) \times 10^9$ g C/a,其中异戊二烯、单萜烯和其他 VOCs 贡献率分别为 75.09%、15.62%和 9.29%.不同树种间 BVOCs 排放量差异较大,杨树和栎树是主要的异戊二烯排放源,贡献率分别为 63.16%和 25.92%;油松是主要的单萜烯排放源,贡献率为 40.90%.不同龄级林对 BVOCs 排放的贡献不同,中龄林贡献率最大,占总量的 39.14%.BVOCs 排放呈夏季高、冬季低的特征,春、夏、秋、冬排放量分别占全年的 12.55%、77.48%、9.76%和 0.21%.BVOCs 对 O₃ 生成潜势的贡献量为 240.51×10^9 g,其中异戊二烯占 92.66%,是主要的贡献者;对二次有机气溶胶(SOA)生成潜势的贡献量为 1.73×10^9 g,异戊二烯和单萜烯分别占 24.26%和 75.73%.研究表明,北京森林 BVOCs 排放会导致大气年均 SOA 浓度增加 $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$,O₃ 浓度上升 $9.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$,特别是对夏季 O₃ 污染具有较大贡献.建议城市绿化时应从有助于空气质量改善的角度考虑树种的 VOCs 排放能力.

关键词: 树种蓄积量; 排放清单; 异戊二烯; 臭氧生成潜势; 二次有机气溶胶

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)02-0622-11

Emission characteristics of VOCs from forests and its impact on regional air quality in Beijing. ZHANG Qiang^{1,2}, LI Ling-jun^{1,2}, ZHAO Wen-hui^{1,2}, WANG Xin-hui^{1,2}, JIANG Lei^{1,2}, LIU Bao-xian^{1,2}, LI Xiang^{3,4*}, LU Hai-feng^{1,2} (1.Beijing Municipal Ecological and Environment Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2.Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing 100048, China; 3.Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau, Beijing 100044, China; 4.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2021,41(2): 622~632

Abstract: Emission characteristics of BVOCs from forests and its impact on regional air quality in Beijing were studied by analyzing the volume data of second-class forest resources survey in Beijing and investigating the BVOCs emission factors from relevant literatures. The results showed that the average BVOCs emissions from forest in Beijing were 27.97×10^9 g C/a, with a range of $9.46 \sim 76.45 \times 10^9$ g C/a. The contribution of isoprene, monoterpene and other VOCs (OVOCs) to total BVOCs emissions were 75.09%, 15.62% and 9.29%, respectively. The BVOCs emissions had significant species variation: poplar and quercus were the main species responsible for isoprene emission, contributing 63.16% and 25.92% to the total, respectively; *Pinus tabulaeformis* was the main species responsible for monoterpene emission, contributing 40.90% to the total. Forests of different age-class had different contributions to BVOCs emissions. Half-mature forest was the main emission source and contributed 39.14% to the total BVOCs emission from forests. The seasonal variations of BVOCs emissions were significant, and the emissions in spring, summer, autumn and winter accounted for 12.55%, 77.48%, 9.76% and 0.21% of the annual emissions, respectively. The ozone formation potential of BVOCs was 240.51×10^9 g, of which isoprene was the main contributor accounting for 92.66%. The secondary organic aerosol formation potential of BVOCs was 1.73×10^9 g, and the contributions of isoprene and monoterpene were 24.26% and 75.73%, respectively. This study indicated that BVOCs emissions from forest caused the annual atmospheric ozone concentrations to rise by $9.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and an increase of the annual atmospheric SOA concentrations by $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Especially, BVOCs emissions had relatively high contribution to ozone formation in summer. Therefore, the VOCs emissions capacity of species should be fully considered in urban greening, which would be conducive to improve air quality.

Key words: the volume of tree species; emission inventory; isoprene; ozone formation potential; secondary organic aerosol

近年来,北京市大气污染治理取得显著成效,颗粒物特别是 PM_{2.5} 浓度逐年降低,但夏季臭氧(O₃)污染居高不下,逐渐成为制约空气质量改善的关键因素^[1].O₃ 的产生是挥发性有机物(VOCs)和多种氮氧化物(NO_x)发生光化学反应的结果,同时 VOCs 还是

二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物,对大气中颗粒物的形成具有重要贡献^[2-4].VOCs 按照来源可划分

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0706004)

* 责任作者, 高级工程师, lixiang1978@263.net

为天然源 VOCs(BVOCs)和人为源 VOCs(AVOCs),研究发现全球每年 BVOCs 的排放量约为 1150Tg,占 VOCs 年排放总量的 90%以上,远大于 AVOCs 的排放量^[2].在北京,由于近年来实施了严格的减排措施,如限制车辆使用、实施清洁生产等,AVOCs 排放得到有效控制^[5-6];另一方面,调查显示北京市森林覆盖率逐年上升,从 2006 年的 35.9%增加到 2018 年的 43.5%^[7],BVOCs 的排放量也随之不断增加^[8-9].因此,研究森林植被 BVOCs 的排放特征对制定更加有效的 O₃ 及颗粒物污染控制措施至关重要.

迄今为止,国内外学者针对 VOCs 的天然源清单已经进行了大量研究,从采样方法、分析方法到区域 BVOCs 排放通量的计算都取得很大进展,并建立了不同空间尺度下的 BVOCs 排放模型,如 BEIS、BEIS2、GLOBEIS、G95 和 MEGAN 模型等^[2,10-16].对于北京地区 BVOCs 的研究也取得了一些成果,如王志辉等^[17]和赵静等^[18]测定了北京市多种典型植物的 VOCs 排放速率,谢扬飏等^[19]和 Ghirardo 等^[9]利用园林普查资料估算了北京市园林绿地植被的 VOCs 排放量,Wang 等^[20]和 Ren 等^[21]则分别对全北京植被的 VOCs 排放量进行了估算.但是目前对北京市 BVOCs 排放情况的研究多是通过植被的分布面积资料推算出叶生物量,进而估算植被的排放量,且不同研究之间的结果差异较大(相差 3~10 倍)^[22].已有的研究很少基于树种蓄积量、以具体树种为对象对北京地区森林源 BVOCs 的排放特征进行分析,且在 BVOCs 对区域空气质量的具体影响方面分析不足.因此,本文以北京市森林优势树种蓄积量为基础,通过 Guenther 等提出的光温影响模型^[2,23],模拟各树种的 BVOCs 排放特征,建立北京森林源 BVOCs 排放清单,并探讨 BVOCs 排放的时间变化规律和在不同龄级林分中的分配规律;此外,进一步估算 BVOCs 的 O₃ 和 SOA 生成潜势,并尝试将其对环境空气质量的影响进行量化,为未来评估植被变化可能对空气质量产生的影响以及制定有效的管理措施提供数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北京位于华北平原西北部边缘,地域范围 39°26'~41°04'N,115°25'~117°30'E,面积 1.64×10⁴km².

北京地势西北高、东南低,整体由西北东三面环山区、东南平原区和中部城市核心区 3 部分组成.北京地区属温带湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,多年平均气温 12.3℃,多年平均降水量 571.9mm 左右.地带性植被为暖温带落叶阔叶林和温带针叶林,主要是以栎属(*Quercus*)和杨属(*Populus*)等落叶阔叶树种占优势的落叶阔叶林,及侧柏(*Platycladus orientalis*)和油松(*Pinus tabulaeformis*)占优势的温性针叶林.截止到 2015 年,北京市森林面积 7449.6km²,森林覆盖率达 41.6%,森林蓄积量 1701.1×10⁴m³.

1.2 研究方法

1.2.1 BVOCs 排放量计算模型 BVOCs 种类繁多,其中异戊二烯和单萜烯由于排放量大、活性强而受到广泛关注^[19,24].本研究将 BVOCs 划分为异戊二烯、单萜烯和其他 VOCs(OVOCs) 3 类,OVOCs 物种主要包括醇、醛、酮、有机酸、低碳烷烃和烯烃等.参照 Guenther 等^[2,23]提出的光温影响模型,按树种分别进行排放量估算.其中,异戊二烯的计算采用叶绿素(CHL)算法,其排放主要受温度和太阳辐射的影响;单萜烯和 OVOCs 的计算采用防御专属组织(DST)算法,其排放主要受温度影响.

CHL 算法:

$$E_{\text{ISOP}} = [\epsilon] [B] [\gamma_P \gamma_T \gamma_S] [\rho] \quad (1)$$

式中: E_{ISOP} 为异戊二烯排放量; ϵ 为标准状态下[温度为 303K,光合有效辐射(PAR)为 1000μmol photon/(m²·s)]该树种的基本排放速率,μg C/(g·h); B 为叶生物量; γ_P 、 γ_T 和 γ_S 为环境校正因子,分别代表光合有效辐射、温度和季节的影响; ρ 为逸出效率,表示排放总量中逸入树冠上方大气中的部分所占比例.

γ_T 的计算公式为:

$$\gamma_T = e^{[C_{T1} (T - T_S) / RT_S T]} / \{1 + e^{[C_{T2} (T - T_M) / RT_S T]}\} \quad (2)$$

式中: T 为当前叶表面温度,K,简单用气温代替; T_S 为标准条件下的叶温,303K; R 为气体平衡常数,8.314J/(K·mol); C_{T1} 、 C_{T2} 、 T_M 为经验常数, $C_{T1} = 95000\text{J/mol}$; $C_{T2} = 230000\text{J/mol}$, $T_M = 314\text{K}$.

γ_P 的计算公式为:

$$\gamma_P = (a C_L Q) / (1 + a^2 Q^2)^{0.5} \quad (3)$$

式中: a 、 C_L 为经验参数,取值分别为 0.0027 和 1.066, Q 为当前光合量子密度[PPFD, μmol/(m²·s)],来源于太阳辐射.

叶龄和叶生物量会随季节发生变化,从而影响 BVOCs 的排放.根据 Staudt 等^[25]的研究,各月季节校正因子 γ_s 的计算公式为:

$$\gamma_s = 1 - \lambda \{1 - \exp[-(M - M_0)^2/n]\}$$
 (4)

式中: M 指月份; M_0 指具有最大排放速率的月份; n 指一年中 BVOCs 进行活跃排放的月数; λ 为年排放速率变化幅度与最大排放速率之比^[26].

DST 算法:

$$E_{TMT}、E_{OVOC} = [\varepsilon] [B] [\gamma_T \gamma_s] [\rho]$$
 (5)

式中: E_{TMT} 和 E_{OVOC} 分别为单萜烯和 OVOC 排放量,其它变量与前述异戊二烯排放公式相同.由于单萜烯和其他 VOCs 排放量仅与温度相关,故仅考虑温度校正因子 γ_T ,计算公式为 $\gamma_T = \exp[\beta(T - T_s)]$,经验系数 β 值为 $0.09K^{-1}$.

1.2.2 O₃ 和 SOA 生成潜势估算模型 本研究通过估算 VOCs 的 O₃ 和 SOA 生成潜势来表征其对大气环境的潜在影响.BVOCs 种类繁多,不同组分间的反应活性差异极大,本文仅对在 BVOCs 中占比较大的异戊二烯和单萜烯进行估算. O₃ 生成潜势 (OFP)代表 VOCs 在最佳反应条件下对 O₃ 生成的最大贡献,采用“增量反应”方法进行计算,即每加入一单位的 VOCs 所形成的 O₃ 量^[27-28].SOA 生成潜势采用“气溶胶生成系数(FAC)”法进行计算^[29].计算公式为:

$$OFP_i = E_i \times MIR_i$$
 (6)

$$SOA_i = E_i \times FAC_i$$
 (7)

式中: OFP_i 为 VOC 组分 i 生成 O₃ 的最大值; E_i 为 VOCs 组分 i 的排放量或浓度; MIR_i 为组分 i 的最大

增量反应活性, MIR 的取值采用 Carter^[30]的研究成果,其中异戊二烯为 10.61g/g,单萜烯为 4.04g/g; SOA_i 为 VOC 组分 i 的二次有机气溶胶生成量; FAC_i 为 VOC 组分 i 的 SOA 生成系数.参考 Grosjean^[31] 的烟雾箱试验,假设 BVOCs 仅与 OH-反应生成 SOA,异戊二烯 FAC 取 0.02,单萜烯 FAC 取 0.3.

在上述计算结果的基础上,利用的一个简化的“箱式”模型^[9,21]来估算 BVOCs 排放对大气质量的影响:

$$C_{Ozone(i)} = OFP_i \times \tau_{BVOCi} / (S \times h)$$
 (8)

$$C_{SOA(i)} = SOA_i \times \tau_{SOA} / (S \times h)$$
 (9)

式中: $C_{Ozone(i)}$ 、 $C_{SOA(i)}$ 分别为 VOC 组分 i 导致的 O₃、SOA 的浓度增量; S 为研究区面积, km²; h 为逆温层的一般高度, 2km^[29]; τ_{BVOCi} 、 τ_{SOA} 分别为 BVOCs 和 SOA 在大气中的寿命^[21].

1.3 参数的确定

1.3.1 标准排放因子 对各物种的排放潜力进行准确测定,是正确估算排放量的重要基础.本文中植物异戊二烯、单萜烯的标准排放因子数据通过文献获取.目前文献报道的排放因子观测结果多为一定域值,且不同研究之间的观测值差异较大^[26].为使排放因子数据尽可能准确,本文广泛收集北京市及周边地区的大量观测结果,并参考张莉等^[26]的方法,取异戊二烯和单萜烯排放速率的最小值、最大值和平均值,分别计算各树种异戊二烯和单萜烯的最小、最大可能排放量和平均排放量.其他 VOC 的标准排放因子采用 Guenther 等^[32]提出的推荐值 1.5μg C/(g·h).各树种的标准排放因子见表 1.

表 1 优势树种异戊二烯和单萜烯排放因子
Table 1 Emission factors of isoprene and monoterpenes for dominant species in Beijing

树种	异戊二烯排放因子[μg C/(g·h)]			单萜烯排放因子[μg C/(g·h)]			参考文献
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
油松	0.02	1.16	0.39	1.80	19.00	5.94	[9, 17-18, 33-48]
落叶松	0.10	7.40	3.75	0.20	1.41	0.81	
侧柏	0.00	0.07	0.04	0.01	4.39	1.54	
栎树	1.28	98.90	32.13	0.00	7.80	2.90	
桦木	0.00	2.62	0.54	0.01	2.63	0.85	
刺槐	2.30	49.80	21.60	0.10	2.30	1.29	
杨树	23.30	216.70	73.85	0.02	11.10	1.84	

1.3.2 叶生物量 本文参考方精云等^[49]研究森林植被碳库时采用的由植被蓄积资料推算生物量的

方法,利用各类树种蓄积量对其叶生物量进行估算.具体计算公式如下^[50]:

$$B = V \times D_T / P_T \times P_L \tag{10}$$

式中： B 为叶生物量， g ； V 为树种蓄积量， m^3 ； D_T 为树干密度， 10^6g/m^3 ； P_T 为树干生物量占乔木层总生物量的比例， $\%$ ； P_L 为叶生物量占乔木层总生物量的比例， $\%$ 。

森林蓄积资料来源于北京市第八次森林资源二类调查统计结果，内容包括北京市主要森林类型各林龄级的面积和蓄积量。依照张莉等^[26]提出的方法，将北京市优势树种的树干密度、主要森林类型各

林龄级的 P_T 和 P_L 值分别整理为表 2 和表 3。

表 2 主要树种树干密度(10^6g/m^3)
Table 2 Trunk densities of dominant species

树种	树干密度	树种	树干密度
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.36	桦木 <i>Betula</i>	0.489
落叶松 <i>Larix principis-rupprechtii</i>	0.528	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.652
侧柏 <i>Platycladus orientalis</i>	0.512	杨树 <i>Populus</i>	0.38
柞树 <i>Quercus</i>	0.68	阔叶树	0.514

表 3 各森林类型不同林龄级的 P_L 和 P_T 值($\%$)
Table 3 The P_L and P_T values of different forest types

森林类型	幼龄林		中龄林		近熟林		成熟林		过熟林	
	P_L	P_T	P_L	P_T	P_L	P_T	P_L	P_T	P_L	P_T
油松类	10.48	53.52	8.65	58.63	8.45	59.12	7.55	60.21	5.09	62.08
落叶松类	4.40	59.13	3.19	62.83	3.15	63.69	3.02	63.62	3.02	67.88
柏木类	10.66	57.99	8.81	64.95	8.42	67.00	7.25	69.14	6.37	67.70
山地杨桦林	5.17	54.97	5.31	56.24	4.05	56.47	4.06	56.30	3.87	56.04
杨树、刺槐林	4.44	57.87	4.64	62.62	4.41	60.97	4.43	62.03	4.68	62.20
典型落叶阔叶	4.79	56.07	6.67	50.08	6.30	51.11	4.06	59.10	2.97	58.75

1.3.3 气象数据 本文使用的温度和光合有效辐射的逐小时数据来源于北京城市生态系统研究站。

2 结果与讨论

2.1 北京市 BVOCs 排放清单

表 4 按贡献率排名给出了 2015 年北京市森林优势树种 BVOCs 排放清单。可以看出，北京市森林源 BVOCs 排放总量平均值为 $27.97 \times 10^9 \text{g C/a}$ ，变化域值范围为 $9.46 \sim 76.45 \times 10^9 \text{g C/a}$ 。其中异戊二烯、单萜烯和 OVOCs 平均排放量分别为 21.00、4.37 和 $2.60 \times 10^9 \text{g C/a}$ ，对森林源 BVOCs 总排放量的贡献率分别为 75.09%、15.62% 和 9.29%。

森林源 BVOCs 排放存在非常大的树种差异(表 4)。杨树的 BVOCs 排放量最大，为 $14.68 \times 10^9 \text{g C/a}$ ，占 BVOCs 排放总量的 52.47%；栎树次之，排放量为 $7.20 \times 10^9 \text{g C/a}$ ，贡献率为 25.73%。同时，杨树和栎树也是主要的异戊二烯排放源，对异戊二烯排放的贡献率分别为 63.16% ($13.27 \times 10^9 \text{g C/a}$) 和 25.92% ($5.44 \times 10^9 \text{g C/a}$)。这一方面与北京地区杨树和栎树拥有较大的蓄积量有关；另一方面，杨树与栎树也具有较高的异戊二烯排放速率。对于单萜烯，排放量最大的树种是油松($1.79 \times 10^9 \text{g C/a}$)，贡献

率为 40.90%；其次为栎树($1.16 \times 10^9 \text{g C/a}$)，贡献率为 26.45%。

通过与前人的研究结果对比发现，不同地区之间 BVOCs 各组分所占比例具有较大差异：Guenther 等^[51]在北美地区的研究显示，异戊二烯排放量占 BVOCs 总排放量的 35%；宋媛媛等^[52]对中国东部地区的调查发现异戊二烯、单萜烯和 OVOC 的排放量所占比例分别为 44.9%、31.5% 和 23.6%；刘岩等^[53]对长江三角洲 BVOCs 的研究显示，异戊二烯、单萜烯和 OVOC 分别占总排放量的 37.3%、16.1% 和 46.6%。与上述研究相比，北京地区异戊二烯占 BVOCs 总排放量的比例明显更高，这主要是由于北京地区分布有较多的杨属和栎属植物，二者均属于高异戊二烯排放源，而且叶生物量较大。谢扬颺等^[19]和 Ren 等^[21]对北京地区绿地植被 BVOCs 的研究结果也表明，异戊二烯占总排量的比例分别为 80.3% 和 74.0%，这与本文结果相似。

在过去的十几年间，研究人员使用不同的数据源和算法对北京地区的 BVOCs 排放量进行了估算，结果如图 1 所示。将本文基于树种蓄积量的估算结果与以往的研究进行对比，可以看出本文估算值与 Ren 等^[21]对北京 BVOCs 排放量的估算结果(33Gg

C/a)较为接近,但是要高于 Wang 等^[20]和 Ghirardo 等^[9]对 1998, 2005 和 2010 年 BVOCs 排放量的估算值,低于 Klinger 等^[34]、谢扬颺等^[19]和 Li 等^[54]对 2000, 2001 和 2003 年排放量的估算值.

表 4 北京市森林优势树种 BVOCs 排放清单
Table 4 BVOCs emission inventory of dominant species in Beijing

优势种	异戊二烯			单萜烯			OVOC		BVOCs 总量	
	排放量均值 ($\times 10^9$ g C/a)	平均排放量 ($\times 10^9$ g C/a)	贡献率 (%)	排放量均值 ($\times 10^9$ g C/a)	平均排放量 ($\times 10^9$ g C/a)	贡献率 (%)	排放量 ($\times 10^9$ g C/a)	贡献率 (%)	排放量 ($\times 10^9$ g C/a)	贡献率 (%)
杨树	(4.19, 38.93)	13.27	63.16	(0.01, 4.69)	0.78	17.79	0.63	24.40	14.68	52.47
栎树	(0.22, 16.76)	5.44	25.92	(0.00, 3.11)	1.16	26.45	0.60	23.02	7.20	25.73
油松	(0.00, 0.14)	0.05	0.22	(0.54, 5.72)	1.79	40.90	0.45	17.37	2.29	8.17
阔叶树	(1.76, 1.76)	1.76	8.39	(0.08, 0.08)	0.08	1.90	0.31	11.97	2.16	7.71
侧柏	(0.00, 0.01)	0.01	0.02	(0.00, 1.3)	0.46	10.43	0.44	17.09	0.90	3.23
刺槐	(0.05, 1.01)	0.44	2.08	(0.00, 0.11)	0.06	1.40	0.07	2.75	0.57	2.03
桦木	(0.00, 0.04)	0.01	0.04	(0.00, 0.1)	0.03	0.72	0.06	2.14	0.10	0.34
落叶松	(0.00, 0.07)	0.03	0.17	(0.00, 0.03)	0.02	0.40	0.03	1.26	0.08	0.30
合计	(6.22, 58.71)	21.00	100.00	(0.65, 15.14)	4.37	100.00	2.60	100.00	27.97	100.00

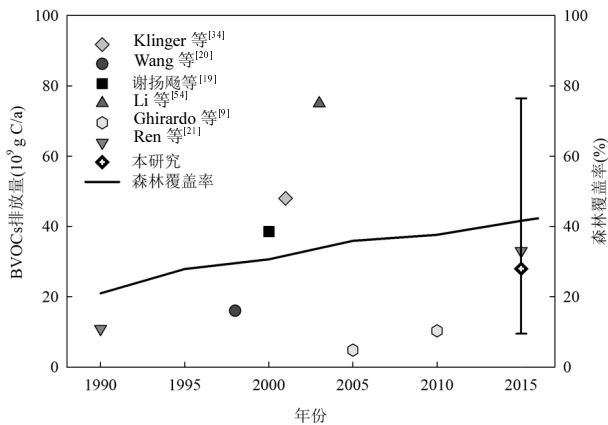


图 1 不同研究北京市 BVOCs 排放量估算值比较
Fig.1 Comparison of BVOCs emissions estimated by this study and previous studies

上述各研究之间估算结果相差较大的原因来自多个方面,如标准排放因子、叶生物量、植被组成、温度和辐射强度等,任何一个模型输入参数的变化都会导致估算结果的差异^[17].已有的研究表明,不同研究中所使用的土地利用数据的不同是导致差异产生的一个主要原因,如 Wang 等^[20]对 1998 年 BVOCs 排放量进行估算所使用的森林面积为 987km²,而 Klinger 等^[34]对 2001 年 BVOCs 估算使用的森林面积为 2671km²,二者相差 2.7 倍,这使得两项研究得到的 BVOCs 年排放值相差 3 倍(分别为 16 和 48Gg C).事实上,从 1990~2015 年北京市的森林覆盖率增加了 20.64%,从 2005~2015 年森林蓄积量上升了 405.8 万 m³,因而森林源 BVOCs 排放量也随之增加^[21].此外,排放因子和生物量的差异也会在

很大程度上影响估算结果. Li 等^[55]、Li 等^[54]的研究使用的排放因子和生物量为全国平均值,这使得二者对北京地区 BVOCs 的估算结果要远高于其它研究^[55];谢扬颺等^[19]和 Ghirardo 等^[9]同样仅计算了城市绿地 BVOCs 的排放,但谢扬颺等的估算结果远高于 Ghirardo 等,这主要也是因为二者所使用的排放因子和叶生物量数据的差异. Ren 等^[21]的研究通过异速生长方程计算叶生物量,估算出北京市 2015 年天然林 BVOCs 排放量为 28Gg,与本文基于森林蓄积量的估算结果基本持平;张倩等^[56]使用传统的基于叶面积指数的方法计算叶生物量,得到 2015 年度北京市 BVOCs 的排放总量为 35Gg,略高于本文结果.

2.2 各龄级优势树种的 BVOCs 贡献

根据树木生长年份可将其划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林.本文对不同龄级森林的 BVOCs 排放情况进行分析,并按排放量高低给出北京市主要森林类型 BVOCs 排放的龄级分配(图 2).可以看出,不同树种各龄级贡献情况有所差异,其中侧柏和刺槐对 BVOCs 排放量贡献最大的是幼龄林;杨树、栎树、桦木、落叶松和阔叶树对 BVOCs 排放量贡献最大的是中龄林;油松贡献率较大的是成熟林和中龄林.此外多数森林类型 5 个龄级均有 BVOCs 排放,但是部分森林因为生长年限短导致过熟林所占比例非常低,如栎树林、油松林、和桦木林等.

整体来看,北京地区中龄林对 BVOCs 排放的贡

献率最大,占排放总量的 39.14%;其次为幼龄林,贡献率为 23.05%;近熟林、成熟林和过熟林的贡献率较小,分别为 15.84%、14.59%和 7.37%(图 3(a)).森林 BVOCs 排放量与叶生物量在不同龄级林分中的分配情况较为一致(图 3),其中近熟林、成熟林和过熟林在 BVOCs 排放量中所占比重略高于其在叶生物量中所占比重,可能是由于这 3 个龄级森林中排放潜力高的树种(本文中为杨树)所占比例相较其它龄级更大导致^[57].

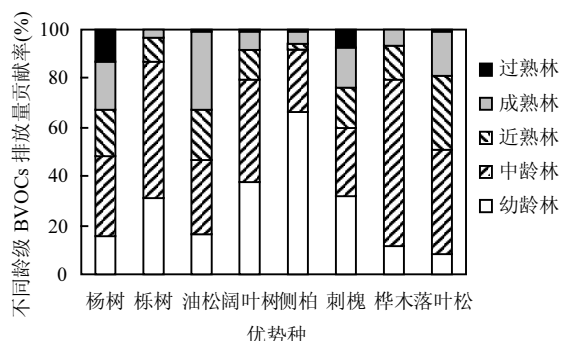
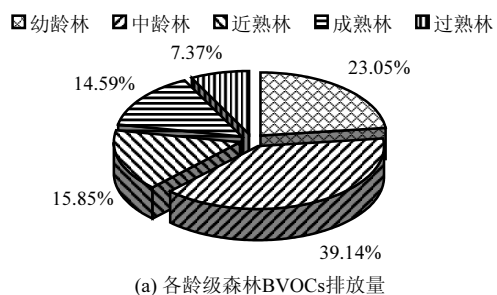
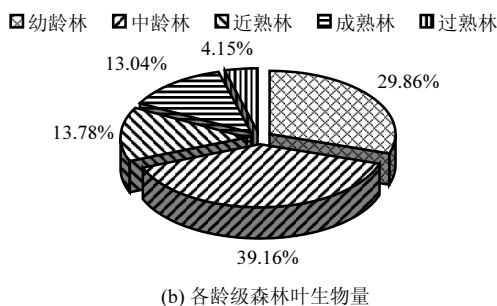


图2 北京市主要森林类型 BVOCs 排放量的龄级分配
Fig.2 Distribution of BVOCs emission among different age-class of main forest types in Beijing



(a) 各龄级森林 BVOCs 排放量



(b) 各龄级森林叶生物量

图3 不同龄级森林 BVOCs 排放量和叶生物量分配情况
Fig.3 Distribution of BVOCs emission and leaf biomass among different age-class forests

2.3 北京市 BVOCs 排放的季节变化

由图 4 可以看出,北京森林源 BVOCs 排放呈现出明显的季节变化特征.在春季,地面温度和光

照强度逐渐上升,植被生长,BVOCs 排放量逐渐增加.但由于树叶仍处于发芽生长阶段,叶面积较小、酶活性也较低,春季排放量仅 3.51×10^9 g C,占全年的 12.55%(表 5).夏季是 BVOCs 排放的主要季节,这一时期温度和太阳辐射达到 1a 中的最大值,树叶也达到成熟期,叶生物量大、酶活性高,各树种的 BVOCs 排放速率也因此增加,排放量达到 21.67×10^9 g C,占全年总排放量的 77.48%.秋季气温逐渐降低,树叶由成熟变为衰老,落叶树种叶片相继脱落,因此秋季 BVOCs 排放量骤减,仅 2.73×10^9 g C,占全年排放总量的 9.76%.冬季气温及光照强度均降至全年最低,仅有部分常绿树种以较低的速率排放 VOCs^[20],排放量 0.06×10^9 g C,只占全年排放总量的 0.21%.

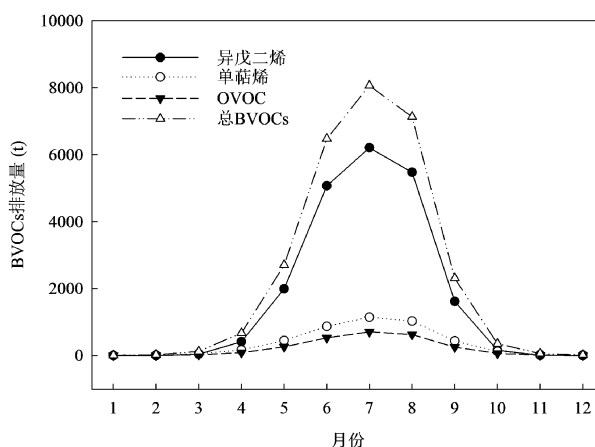


图4 不同月份北京森林源 BVOCs 排放量
Fig.4 Monthly BVOCs emissions of forest in Beijing

本研究分析的 3 类 BVOCs 中,在不同季节排放量相差最大的是异戊二烯.异戊二烯对 BVOCs 总排放量的贡献从 1~7 月呈上升趋势,从 7~12 月呈下降趋势,夏季占总排放量的 77.30%,而冬季仅占 5.27%(表 5),说明异戊二烯排放受季节变化的影响要高于其他 2 类.原因主要有两方面,一是根据 Guenther 等^[2,23]的研究,异戊二烯属于叶绿体排放类型,其排放量受温度和太阳辐射的双重影响;而单萜烯和 OVOCs 为防御专属组织排放类型,其排放主要受温度影响,因此随季节变化的波动要小于异戊二烯.二是异戊二烯主要来源于落叶阔叶林,其排放量随着树叶的春生、夏长、秋衰、冬落而表现出巨大的季节差异;而单萜烯主要来源于针叶林,树叶一年四季保持常绿,全年均有排放.

表 5 北京森林源 BVOCs 各季节排放量及比重
Table 5 Seasonal variation of BVOCs emissions and proportions from forest in Beijing

季节	指标	异戊二烯	单萜烯	OVOC	BVOCs 总量
春季(3~5 月)	排放量(10^9 g C)	2.46	0.68	0.38	3.51
	贡献率(%)	70.01	19.28	10.71	
夏季(6~8 月)	排放量(10^9 g C)	16.75	3.05	1.87	21.67
	贡献率(%)	77.30	14.08	8.62	
秋季(9~11 月)	排放量(10^9 g C)	1.79	0.60	0.34	2.73
	贡献率(%)	65.60	22.04	12.35	
冬季(12~2 月)	排放量(10^9 g C)	0.00	0.04	0.02	0.06
	贡献率(%)	5.27	66.77	27.97	

2.4 北京市 BVOCs 排放的日变化

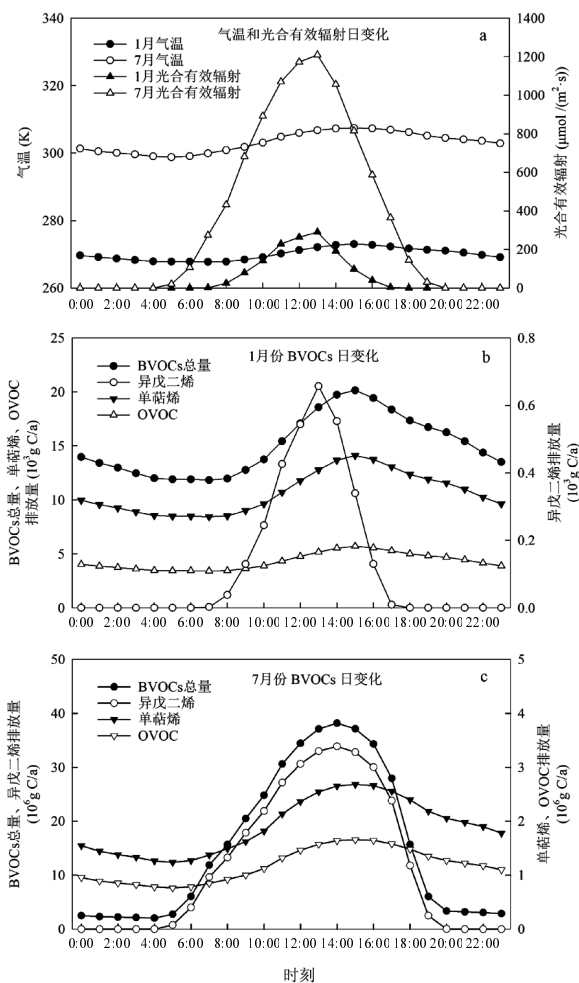


图 5 北京地区 1 月和 7 月气温、光合有效辐射和 BVOCs 排放日变化规律

Fig.5 Diurnal variation of air temperature, photosynthetic active radiation and BVOCs emissions in January and July

如图 5 所示,异戊二烯的排放量随温度和太阳辐射强度的变化而改变,由于夜晚无光照,因此排放仅出现在白天,表现为明显的单峰曲线(图 5(b),(c)).1 月份异戊二烯的排放时间在 07:00~17:00,上午随着

温度和辐射强度的增加,排放量持续上升,在中午 13:00 达到排放峰值,之后开始下降;7 月份光照时间长,异戊二烯的排放时间在 04:00~20:00,排放峰值出现在 14:00 点前后.

单萜烯和 OVOC 的排放主要受温度的影响,全天均有排放(图 5(b),(c)).单萜烯和 OVOC 呈现出相似的日变化规律:1 月份的最低排放值出现在 07:00,因为此时温度最低,之后随着白天温度的回升排放量逐渐增加,并在 15:00 左右达到排放峰值;7 月份的最低排放值出现在 05:00,最大排放值出现在 14:00~16:00.冬季和夏季排放的日变化趋势整体相似,但最低排放值出现的时间不同,这主要是由于冬夏季日最低温出现的时间不同导致.此外,本文显示异戊二烯排放的日变化幅度远大于单萜烯和 OVOC,这一特点在 Chang 等^[58]对杭州地区的研究和 Li 等^[55]对全国范围的研究中也有体现,说明异戊二烯更易受到环境因子的影响,对太阳辐射具有较高的敏感性.

2.5 O₃ 和 SOA 生成潜势及其对空气质量的影响

北京森林源 BVOCs 对 OFP 的总贡献量为 240.51×10^9 g,其中异戊二烯的 OFP 贡献量为 222.86×10^9 g,占总量的 92.66%,是主要的贡献者;单萜烯的 OFP 贡献量为 17.65×10^9 g,占总量的 7.34%(表 6).森林源 BVOCs 对 SOA 生成潜势的总贡献量为 1.73×10^9 g,其中异戊二烯和单萜烯的贡献量分别为 0.42×10^9 g 和 1.31×10^9 g,分别占 SOA 生成总量的 24.26%和 75.73%,单萜烯是主要的贡献者.各主要森林类型的 O₃ 和 SOA 生成潜势具体见表 6, O₃ 生成潜势最大的树种为杨树, SOA 生成潜势较大的树种为杨树、栎树和油松.

表 6 北京市森林源 BVOCs 的 O₃ 和 SOA 生成潜势
Table 6 Ozone and SOA formation potential of BVOCs from forest in Beijing

排放源	O ₃ 生成潜势($\times 10^9$ g)		SOA 生成潜势($\times 10^6$ g)	
	异戊二烯	单萜烯	异戊二烯	单萜烯
杨树	140.76	3.14	265.33	233.26
栎树	57.76	4.67	108.88	346.74
油松	0.50	7.22	0.94	536.13
阔叶树	18.70	0.34	35.26	24.88
侧柏	0.05	1.84	0.09	136.70
刺槐	4.63	0.25	8.73	18.40
桦木	0.09	0.13	0.17	9.47
落叶松	0.37	0.07	0.69	5.29
合计	222.86	17.65	420.09	1310.87

运用“箱式”模型的估算结果显示,森林源 BVOCs 对夏季 O_3 污染具有显著贡献(图 6(a)). BVOCs 排放会导致全市范围内大气年均 O_3 浓度上升 $9.01\mu\text{g}/\text{m}^3$,由于 BVOCs 排放具有明显的季节动态,其引起的 O_3 浓度增加也表现出明显的季节变化.从图 6(a)中可以看出,在排放量最高的 7 月份, BVOCs 排放导致 O_3 浓度上升了 $31.30\mu\text{g}/\text{m}^3$,占环境中 O_3 浓度的 17.7%.在其他的研究中,也发现夏季 BVOCs 对 O_3 形成具有相对较高的贡献率,如 Li 等^[59]对长江三角洲的研究和 Ren 等^[21]对北京城区的研

究发现,在夏季, BVOCs 排放贡献了大气 O_3 浓度的 19%~30%.此外,虽然相关的研究表明北京地区 AVOCs 的排放量是 BVOCs 的 6~16 倍,但是 AVOCs 的 OFP 只有 BVOCs 的 3~8 倍^[22],这说明 BVOCs 具有更高的反应活性,因此其对 O_3 污染的贡献不容忽视^[60].除此以外, BVOCs 排放还会造成全市大气年均 SOA 浓度增加 $0.94\mu\text{g}/\text{m}^3$,占 2015 年北京市年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的 1.2%.图 6(b)显示, BVOCs 对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的贡献相对较低,这与前人的研究结果一致^[9,21].

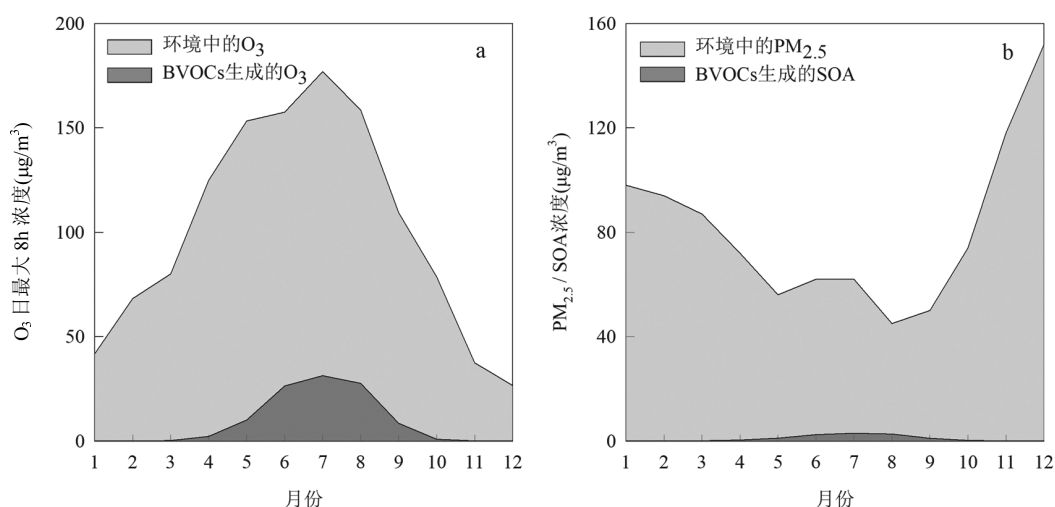


图 6 BVOCs 排放对环境 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的贡献

Fig.6 The contribution of BVOCs emissions to ambient ozone and $\text{PM}_{2.5}$ pollution

近年来北京市大力开展绿色生态空间建设,森林覆盖率逐年上升,同时采取了一系列措施严格控制人为源 VOCs 的排放^[61-62],因而植物源 VOCs 对大气质量产生的影响日渐突出.由于每种 BVOCs 的反应速率和途径不同,其对 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 形成的影响也存在差异.一般来说,异戊二烯排放量高的树种对 O_3 污染的贡献较大,而单萜烯排放量高的树种对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的促进作用较强^[63].在北京市主要的绿化树种中,异戊二烯排放潜力最高的是杨树,其次是栎树和国槐等,强单萜烯排放树种主要是油松,调整优化树种组成也许是控制 BVOCs 排放最可行的途径之一. Ren 等^[21]的研究结果显示,通过采取主动管理措施(如改变树种组成等),到 2050 年可以减少 61%的 BVOCs 排放和 50%的由 BVOCs 引起的健康损害.因此,未来进行景观规划及城市绿化时,应充分考虑树种的 VOCs 排放能力,这将有助于改善环境空气

质量并减少对人体健康的损害.

2.6 不确定性分析

在本文估算过程中,森林 BVOCs 排放量及其对区域空气质量影响的不确定性主要来自以下几个方面.

环境校正因子.在计算温度影响因子时,本研究使用环境空气温度代替叶表面温度.由于叶片温度通常高于气温,尤其在阔叶树中这一现象更为明显,因此森林源 BVOCs 排放量可能会被低估^[64].此外,光合有效辐射在森林冠层内部的传输过程中会出现衰减,因此位于冠层下方叶片的光合有效辐射影响因子较上方叶片会偏低^[23].

叶生物量的计算.由于目前对植被叶生物量的直接调查较少,本文中叶生物量由树种蓄积量、树干密度、树叶和树干与乔木层生物量比重等植物学参数推算所得,在用资料反推的过程中必然存在一定

误差,这些参数的准确度也会影响叶生物量的估算结果。

BVOCs 对区域空气质量的影响.在估算 BVOCs 对空气质量的影响时,使用了一个简化的“箱式”模型,这个模型假设 BVOCs 的排放只对箱内的空气质量产生影响.但事实上, O_3 及其前体物等会随着空气的流动被输送到下风向地区^[65],导致估算结果存在误差。

3 结论

3.1 基于树种蓄积量的北京市森林源 BVOCs 排放量平均值为 $27.97 \times 10^9 \text{ g C/a}$,变化域值范围为 $9.46 \sim 76.45 \times 10^9 \text{ g C/a}$,其中异戊二烯、单萜烯和 OVOCs 平均排放量分别为 21.00 、 4.37 和 $2.60 \times 10^9 \text{ g C/a}$,分别占排放总量的 75.09% 、 15.62% 和 9.29% 。不同树种间 BVOCs 排放量差异较大,杨树和栎树是主要的异戊二烯排放源,贡献率分别为 63.16% 和 25.92% ,油松是主要的单萜烯排放源,贡献率为 40.90% 。将多项研究进行对比发现,基于森林蓄积量估算的 BVOCs 排放量与其它研究方法的结果可以较好地匹配。

3.2 北京森林源 BVOCs 排放呈现明显的季节变化,排放量夏季(77.48%) > 春季(12.55%) > 秋季(9.76%) > 冬季(0.21%),仅 7 月份排放量就占全年的 28.83% 。异戊二烯、单萜烯和 OVOC 呈现不同的日变化规律:异戊二烯受温度和太阳辐射的影响,仅白天排放,日变化幅度大,峰值出现在 $13:00 \sim 14:00$ 时;单萜烯和 OVOC 排放主要受温度影响,昼夜均有排放,日变化相对平缓,峰值出现在 $15:00$ 时前后。

3.3 森林源 BVOCs 对 O_3 生成潜势的贡献量为 $240.51 \times 10^9 \text{ g}$,其中异戊二烯的贡献量为 $222.86 \times 10^9 \text{ g}$,占总量的 92.66% ,是主要的贡献者; BVOCs 对 SOA 生成潜势的总贡献量为 $1.73 \times 10^9 \text{ g}$,异戊二烯和单萜烯的贡献量分别为 $0.42 \times 10^9 \text{ g}$ 和 $1.31 \times 10^9 \text{ g}$,分别占总量的 24.26% 和 75.73% 。BVOCs 排放会导致全市范围内大气年均 O_3 浓度上升 $9.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, SOA 浓度增加 $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。BVOCs 对夏季 O_3 污染具有显著贡献,未来应通过优化树种组成等管理措施减少 BVOCs 排放,以改善环境空气质量。

参考文献:

[1] 中国环境监测总站.全国城市空气质量报告, 2013~2019 [EB/OL].

- <http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlzkgb/index.shtml>.
- [2] Guenther A, Hewitt C, Erickson D, et al. A global-model of natural volatile organic-compound emission [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1995,100(5):8873–8892.
- [3] Shao M, Lu S H, Liu Y, et al. Volatile organic compounds measured in summer in Beijing and their role in ground-level ozone formation [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009,114(D2):13.
- [4] Mochizuki T, Miyazaki Y, Ono K, et al. Emissions of biogenic volatile organic compounds and subsequent formation of secondary organic aerosols in a Larix kaempferi forest [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015,15(20):12029–12041.
- [5] Wang M, Shao M, Chen W, et al. Trends of non-methane hydrocarbons (NMHC) emissions in Beijing during 2002~2013 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015,15(3):1489–1502.
- [6] Li J, Wu R, Li Y, et al. Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016,557(1):531–541.
- [7] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队.北京统计年鉴 2019 [EB/OL]. <http://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2019-tjn/zk/indexch.htm>. Beijing Municipal Bureau Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Beijing. Beijing Statistical Yearbook 2019 [EB/OL]. <http://nj.tjj.beijing.gov.cn/nj/main/2019-tjn/zk/indexch.htm>.
- [8] Fu Y, Liao H. Impacts of land use and land cover changes on biogenic emissions of volatile organic compounds in China from the late 1980s to the mid-2000s: implications for tropospheric ozone and secondary organic aerosol [J]. *Tellus: Series B*, 2014,66:24987.doi:10.3402/tellusb.v66.24987.
- [9] Ghirardo A, Xie J, Zheng X, et al. Urban stress-induced biogenic VOC emissions and SOA-forming potentials in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016,16(5):2901–2920.
- [10] Pierce T E, Waldru P S. PC-BEIS: a personal-computer version of the biogenic emissions inventory system [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1991,41(7):937–941.
- [11] Pierce T, Geroh C, Bender L, et al. Influence of increased isoprene emissions on regional ozone modeling [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998,103(D19):25611–25629.
- [12] Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6(11):3181–3210.
- [13] 谢军飞,李延明.植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展 [J]. *环境科学*, 2013,34(12):4779–4786.
- Xie J F, Li Y M. Research advances on volatile organic compounds emission inventory of plants [J]. *Environmental Science*, 2013,34(12): 4779–4786.
- [14] 李玲玉, Alex B G,顾达萨,等.典型树种挥发性有机物(VOCs)排放成分谱及排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2019,39(12):4966–4973.
- Li L Y, Alex B G, Gu D S, et al. Biogenic emission profile of volatile organic compounds from poplar, sweetgum, and pine trees [J]. *China Environmental Science*, 2019,39(12):4966–4973.
- [15] 闫 雁,王志辉,白郁华,等.中国植被 VOC 排放清单的建立 [J]. *中国环境科学*, 2005,25(1):111–115.
- Yan Y, Wang Z H, Bai Y H, et al. Establishment of vegetation VOC

- emission inventory in China [J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(1):111-115.
- [16] 毛红梅,张凯山,第宝锋.四川省天然源 VOCs 排放量的估算和时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(5):1289-1296.
- Mao H M, Zhang K S, Di B F. Studies on estimates of biogenic VOC emission and its temporal and spatial distribution in Sichuan [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(5):1289-1296.
- [17] 王志辉,张树宇,陆思华,等.北京地区植物 VOCs 排放速率的测定 [J]. *环境科学*, 2003,24(2):7-12.
- Wang Z H, Zhang S Y, Lu S H, et al. Screenings of 23 plant species in Beijing for volatile organic compound emissions [J]. *Environmental Science*, 2003,24(2):7-12.
- [18] 赵 静,白郁华,王志辉,等.我国植物 VOCs 排放速率的研究 [J]. *中国环境科学*, 2004,24(6):654-657.
- Zhao J, Bai Y H, Wang Z H, et al. Studies on the emission rates of plants VOCs in China [J]. *China Environmental Science*, 2004,24(6):654-657.
- [19] 谢扬飏,邵 敏,陆思华,等.北京市园林绿地植被挥发性有机物排放的估算 [J]. *中国环境科学*, 2007,27(4):498-502.
- Xie Y Y, Shao M, Lu S H, et al. The estimation of volatile organic compounds emission from landscape plants in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2007,27(4):498-502.
- [20] Wang Z H, Bai Y H, Zhang S Y. A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2003,37(27):3771-3782.
- [21] Ren Y, Qu Z, Du Y, et al. Air quality and health effects of biogenic volatile organic compounds emissions from urban green spaces and the mitigation strategies [J]. *Environmental Pollution*, 2017,230:849-861.
- [22] Mo Z, Shao M, Wang W, et al. Evaluation of biogenic isoprene emissions and their contribution to ozone formation by ground-based measurements in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,627:1485-1494.
- [23] Guenther A, Baugh B, Brasseur G, et al. Isoprene emission estimates and uncertainties for the central African EXPRESSO study domain [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999,104(D23):30625-30639.
- [24] Benjamin M T, Winer A M. Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs [J]. *Atmospheric Environment*, 1998,32:53-68.
- [25] Staudt M, Bertin N, Frenzel B, et al. Seasonal variation in amount and composition of monoterpenes emitted by young *Pinus pinea* trees - Implications for emission modeling [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2000,35(1):77-99.
- [26] 张 莉,王效科,欧阳志云,等.中国森林生态系统的异戊二烯排放研究 [J]. *环境科学*, 2003,24(1):8-15.
- Zhang L, Wang X K, Ooyang Z Y, et al. Estimation of isoprene emission from forest ecosystems in China [J]. *Environmental Science*, 2003,24(1):8-15.
- [27] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994,44(7):881-899.
- [28] Zheng J Y, Shao M, Che W W, et al. Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(22):8580-8586.
- [29] Mentel T F, Kleist E, Andres S, et al. Secondary aerosol formation from stress-induced biogenic emissions and possible climate feedbacks [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013,13(17):8755-8770.
- [30] Carter W P L. Reactivity estimates for selected consumer product compounds [R]. California: Center for Environmental Research and Technology, College of Engineering, University of California, February 19,2008.
- [31] Grosjean D. In situ organic aerosol formation during a smog episode: Estimated production and chemical functionality [J]. *Atmospheric Environment, Part A, General Topics*, 1992,26(6):953-963.
- [32] Guenther A, Zimmerman P, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emission rate estimates for U.S. woodland and landscapes [J]. *Atmospheric Environment*, 1994,28(6):1197-1210.
- [33] 赵美萍,邵 敏,白郁华,等.我国几种典型树种非甲烷烃类的排放特征 [J]. *环境化学*, 1996,15(1):69-75.
- Zhao M P, Shao M, Bai Y H, et al. Study on NMHC emission characteristics of several typical trees in China [J]. *Environmental Chemistry*, 1996,15(1):69-75.
- [34] Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, et al. Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002,107(D21):1-21.
- [35] 陈 颖,李德文,史 奕,等.沈阳地区典型绿化树种生物源挥发性有机物的排放速率 [J]. *东北林业大学学报*, 2009,(3):49-51.
- Chen Y, Li D W, Shi Y, et al. Emission rate of biogenic volatile organic compounds from urban trees in Shenyang, China [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009,(3):49-51.
- [36] 吕 迪.陕西森林植被 BVOCs 排放特征研究 [D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2016.
- Yang D. Estimation of BVOCs emission from forests in Shaanxi [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
- [37] 樊 冲.河北省森林植物源挥发性有机物排放量研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2019.
- Fan C. Study on biogenic volatile organic compounds emission from forest plants in Hebei province [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [38] 桂 丽.西安市挥发性有机物排放量估算及其臭氧生成潜势研究 [D]. 西安:西北大学, 2019.
- Gui L. Estimation of volatile organic organic compounds emissions and ozone formation potential in Xi'an city [D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [39] Tani A, Kawawata Y. Isoprene emission from the major native *Quercus* spp. in Japan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008,42(19):4540-4550.
- [40] Yaman B, Aydin Y M, Koca H, et al. Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from various endemic tree species in Turkey [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015,15(1):341-356.
- [41] 张福珠,苗 鸿,鲁 纯.落叶阔叶林释放异戊二烯的研究 [J]. *环境科学*, 1994,1:1-5.
- Zhang F Z, Miao H, Lu C. Emission of isoprene from deciduous forest [J]. *Environmental Science*, 1994,01:1-5.
- [42] Tiwary A, Namdeo A, Fuentes J, et al. Systems scale assessment of

- the sustainability implications of emerging green initiatives [J]. *Environmental Pollution*, 2013,183:213–223.
- [43] 王效科,牟玉静,欧阳志云,等.太湖流域主要植物异戊二烯排放研究 [J]. *植物学通报*, 2002,2:224–230.
- Wang X K, Mu Y J, Ouyang Z Y, et al. Study on emission of isoprene from major plants living in Taihu basin [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2002,2:224–230.
- [44] Aydin Y M, Yaman B, Koca H, et al. Biogenic volatile organic compound (BVOC) emissions from forested areas in Turkey: Determination of specific emission rates for thirty-one tree species [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,490:239–253.
- [45] Prendez M, Carvajal V, Corada K, et al. Biogenic volatile organic compounds from the urban forest of the Metropolitan Region, Chile [J]. *Environmental pollution*, 2013,183:143–150.
- [46] Noe S M, Penuelas J, Niinemets U. Monoterpene emissions from ornamental trees in urban areas: a case study of Barcelona, Spain [J]. *Plant Biology*, 2008,10(1):163–169.
- [47] 牟玉静,宋文质,张晓山,等.落叶阔叶树异戊二烯排放研究 [J]. *环境化学*, 1999,1:21–27.
- Mu Y J, Song W Z, Zhang X S, et al. Study on emissions of isoprene from deciduous and broadleaf trees [J]. *Environmental Chemistry*, 1999,1:21–27.
- [48] 白郁华,李金龙,夏 羽,等.杨树排放碳氢化合物的相关因素 [J]. *环境化学*, 1995,2:118–123.
- Bai Y H, Li J L, Xia Y, et al. Relative factor of hydrocarbons emission from popular tree [J]. *Environmental Chemistry*, 1995,2:118–123.
- [49] 方精云,陈安平.中国森林植被碳库的动态变化及其意义 [J]. *植物学报*, 2001,43(9):967–973.
- Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance [J]. *Bulletin of Botany*, 2001,43(9):967–973.
- [50] 张 莉.中国森林生态系统异戊二烯排放研究 [D]. 南京:南京气象学院, 2002.
- Zhang L. Isoprene emission from forest ecosystem in China [D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2002.
- [51] Guenther A, Geron C, Pierce T, et al. Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from North America [J]. *Atmospheric Environment*, 2000,34(12–14):2205–2230.
- [52] 宋媛媛,张艳燕,王勤耕,等.基于遥感资料的中国东部地区植被 VOCs 排放强度研究 [J]. *环境科学学报*, 2012,32(9):2216–2227.
- Song Y Y, Zhang Y Y, Wang Q G, et al. Estimation of biogenic VOCs emissions in Eastern China based on remote sensing data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012,32(9):2216–2227.
- [53] 刘 岩,李 莉,安静宇,等.长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布 [J]. *环境科学*, 2018,39(2):608–617.
- Liu Y, Li L, An J Y, et al. Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014 [J]. *Environmental Science*, 2018,39(2):608–617.
- [54] Li L Y, Xie S D. Historical variations of biogenic volatile organic compound emission inventories in China, 1981–2003 [J]. *Atmospheric environment*, 2014,95:185–196.
- [55] Li L Y, Chen Y, Xie S D. Spatio-temporal variation of biogenic volatile organic compounds emissions in China [J]. *Environmental pollution*, 2013,182:157–168.
- [56] 张 倩,李洪远.城市绿地对大气环境的潜在负面效应 [J]. *景观设计*, 2019,(2):4–11.
- Zhang Q, Li H Y. Potential Negative Effects of Urban Green Space on the Atmospheric Environment [J]. *Landscape Design*, 2019,(2):4–11.
- [57] 张钢锋,谢绍东.基于树种蓄积量的中国森林 VOC 排放估算 [J]. *环境科学*, 2009,30(10):2816–2822.
- Zhang G F, Xie S D. Estimation of VOC emission from forests in China based on the volume of tree species [J]. *Environmental Science*, 2009,30(10):2816–2822.
- [58] Chang J, Ren Y, Shi Y, et al. An inventory of biogenic volatile organic compounds for a subtropical urban-rural complex [J]. *Atmospheric Environment*, 2012,56:115–123.
- [59] Li L, An J Y, Shi Y Y, et al. Source apportionment of surface ozone in the Yangtze River Delta, China in the summer of 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016,144:194–207.
- [60] Harrison S P, Morfopoulos C, Dani K G S, et al. Volatile isoprenoid emissions from plastid to planet [J]. *New Phytologist*, 2013,197(1):49–57.
- [61] 徐 敬,马建中.北京地区有机物种人为源排放量及 O₃ 生成潜势估算 [J]. *中国科学:化学*, 2013,43(1):104–115.
- Xu J, Ma J Z. Estimation of anthropogenic emissions and ozone formation potential of speciated VOCs in Beijing area [J]. *Scientia Sinica: Chimica*, 2013,43(1):104–115.
- [62] 龚 芳.我国人为源 VOCs 排放清单及行业排放特征分析 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
- Gong F. Anthropogenic volatile organic compounds emission inventory and characteristics [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013.
- [63] Arneeth A, Harrison S P, Zaehle S, et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system [J]. *Nature Geoscience*, 2010,3(8):525–532.
- [64] Leuzinger S, Koerner C. Tree species diversity affects canopy leaf temperatures in a mature temperate forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007,146(1/2):29–37.
- [65] Xu J, Ma J Z, Zhang X L, et al. Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011,11(23):12241–12252.

作者简介: 张 蕾(1992–),女,山东聊城人,工程师,博士,主要从事生态遥感、植被-大气相互作用、植物化学计量等方面的研究。