

天津市植被单萜烯排放量估算及时空分布特征

高翔,刘茂辉,徐媛,展先辉,张震*

(天津市环境监测中心,天津 300191)

摘要:基于改进的 GLoBEIS 模型,使用实际观测的小时气象数据和遥感图像解译的土地利用类型数据,对天津市 2013 年植被排放的单萜烯(BTMT)总量进行了估算和时空分布特征分析。结果表明:2013 年天津市 BTMT 排放总量达到 2 877.80 t(以 C 计,下同),排放强度为 $0.25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。BTMT 的排放具有明显的日变化、月变化和季节变化特征:中午高,夜间低;8 月份最高,1 月份最低;夏季排放量最大,冬季排放量最小。其空间特征与土地利用类型密切相关,BTMT 的排放主要分布在林地面积较大的区域,并且在市内 6 区和滨海新区排放量较小。最后,对 BTMT 排放量的估算进行了不确定性分析。

关键词:天津;植被;单萜烯;GLoBEIS;空间特征

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)04-0087-06

Inventory of Biogenic Total Monoterpenes and Temporal and Spatial Characteristics in Tianjin

GAO Xiang, LIU Mao-hui, XU Yuan, ZHAN Xian-hui, ZHANG Zhen*

(Tianjin Environment Monitoring Center, Tianjin 300191, China)

Abstract: Based on the improved GLoBEIS model, the emission of biogenic total monoterpenes (BTMT) as well as temporal and spatial characters in Tianjin in 2013 was investigated by using observed meteorological data and the remote-sensing image interpretation of land use. The annual total emission amount of BTMT in Tianjin was about 2 877.80 t(C) and the emission intensity was $0.25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. The maximum emissions were found in midday, in August and in summer, respectively, while the minimum emissions occurred in night time, in January and in winter, respectively, presenting regular daily, monthly and seasonal variation pattern. The spatial distribution of BTMT emission mainly depended on land use, mostly located in dense forest area. Low emission was usually found in urban district and Binhai region. The uncertainty on the estimation of the BTMT emission of was also analyzed.

Key words: Tianjin; biogenic; total monoterpene; GLoBEIS; spatial characteristic

植被是陆地生态系统的重要组成部分,它在维护生态系统健康^[1]、提供良好居住环境^[2]的同时,也释放造成环境污染的挥发性有机物(VOCs)。挥发性有机物是有机气溶胶和光化学反应产生臭氧的重要前体物,在对流层大气化学中起着非常重要的作用。从来源来分,可分为人为源和天然源(主要是指植被排放)2种,由于植被 VOCs 排放量大、化学活

性强,在大气光化学氧化和全球碳循环过程中具有重要作用,并且在全球尺度上,VOCs 的植被排放远远超过了人为源^[3-5],因此,很多国家和地区都开展了大量植被 VOCs 排放估算的研究工作。其中,单萜烯是排放量最大的两类植被 VOCs 之一^[4]。单萜烯拥有较高的反应活性,能够与大气中的氮氧化物、氢氧根等发生氧化反应^[6],对对流层大气化学反应、

收稿日期:2015-08-26 修回日期:2015-09-25

基金项目:国家科技支撑计划课题(2014BAC23B02);天津市科技计划项目(13ZCZDSF14600);环保部公益行业科研专项(201409014)。

作者简介:高翔,男,高级工程师,研究方向:污染生态学。E-mail:gaoxiang1978@126.com

*通信作者:张震,男,正高级工程师,研究方向:污染生态学。E-mail:water_eco@126.com

局地臭氧的形成、二次有机气溶胶的形成等^[7]方面均有重要的影响,从环境角度来看,单萜烯的量越少越好。因此,对区域植被单萜烯(biogenic total monoterpenes,BTMT)的研究可进一步为探讨植被对大气环境的贡献提供重要依据。

早在 20 世纪七、八十年代,美欧等发达国家就开始对植被单萜烯的排放进行了大量的研究工作^[8-9]。近年来,国内植被单萜烯排放估算的研究受到越来越多的关注。王新明^[10]等对广州不同地点的单萜烯量进行了分析,结果表明,街道旁的平均值为 $1.9\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,公园、植物园和林地的平均值为 $2.2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,农作物旁的平均值为 $1.5\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,垃圾填埋场的平均为 $4.1\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;吴婷^[7]等对森林凋落叶分解过程中排放单萜烯气体的研究方法、种类、来源、排放量及影响因素进行了综述;白建辉^[11]等将云南热带森林冠层尺度上排放通联的计算方法应用到长白山单萜烯排放通量的计算,同时将相对散射因子改善为易于普遍使用的散射因子,建立了长白山地区冠层尺度上单萜烯排放的经验模式。然而,天津地区植被单萜烯的排放量估算和时空分布特征还未见有相关报道。

每年天津市的土地利用类型、气象条件变化比较小,在数据有限的条件下,即使只对 1 a 的数据进行研究分析,也有助于了解天津市植被单萜烯的排放情况。因此,本研究基于天津市土地利用类型和观测的小时气象数据,在国内城市研究成果的基础上,对天津市 2013 年植被单萜烯的排放情况进行了估算和时空分布特征分析。

1 材料与方法

1.1 研究区域

天津位于华北平原海河五大支流汇流处,东临渤海,北依燕山,土地资源丰富,具体土地利用类型见表 1。植被大致可分为针叶林、针阔叶混交林、落叶阔叶林、灌草丛、草甸、盐生植被、沼泽植被、水生植被、沙生植被、人工林和农田种植植物等 11 种,并且林地主要分布在天津北部山区。研究基于 Lambert 投影,以整个天津市作为研究区域,利用 ArcMAP 建立了 $3\ \text{km}\times 3\ \text{km}$ 的网格,以每个网格的中心点经纬度坐标标识该网络的地理位置,研究区域共包含 1 409 个网格。

1.2 模型原理

本研究采用 GLoBEIS 模型估算天津市植被单萜烯的排放量,该模型已在国内植被 VOCs 排放量估算中得到了成功的应用。闫雁^[12]等使用 GLoBEIS 模型建立了中国植被 VOC 排放清单,郑君瑜

等^[13]使用 GLoBEIS 模型对珠江三角洲植被 VOCs 的排放量及时空分布特征进行了研究,吴莉萍^[14]等使用 GLoBEIS 模型对重庆市主城区植被 VOCs 的排放量进行了估算。GLoBEIS 模型的基本算法参考了 Guenther^[5,15]等提出的方法,估算单萜烯的公式如下:

$$E_{\text{TMT}}=\epsilon\cdot D\cdot \gamma t\cdot \rho \tag{1}$$

式中: E_{TMT} 为单萜烯排放量; ϵ 为标准排放速率; D 为叶生物量密度; γt 为温度影响因子; ρ 为逸出效率。

1.3 参数的确定

1.3.1 土地利用数据 通过卫星遥感解译获得了 2013 年天津市土地利用数据,并依据《土地资源分类系统》,将该地区的土地利用类型划分为水田、旱地、有林地、疏林地、其他林地、高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地、水域、城乡工矿居民用地、未利用土地等 11 类土地利用类型。各土地利用类型面积见表 1。

表 1 天津市土地利用类型面积统计

Table 1 Statistics of land coverage in Tianjin

序号	土地利用类型	面积/km ²
1	水田	460.45
2	旱地	5 044.15
3	有林地	481.89
4	疏林地	10.07
5	其他林地	100.31
6	高覆盖草地	554.26
7	中覆盖草地	39.73
8	低覆盖草地	0.52
9	水域	1 823.48
10	城乡工矿居民用地	2 786.89
11	未利用土地	102.85

1.3.2 叶面积指数、叶生物量密度和排放因子 研究主要依据 Guenther^[15]等、Asner^[16]等的研究成果,同时查阅相关文献^[17],估算天津市各类型植被的叶面积指数(见表 2)。

对于叶生物量密度,虽然不同地点各有不同,但相同土地利用类型下,各地方的叶生物量密度十分接近,因此,借鉴吴莉萍^[14]等对叶生物量密度数据的获取方法,研究使用的叶生物量密度主要来自其他学者的研究成果。有林地、疏林地、其他林地等 3 类的叶生物量密度采用冯宗炜^[18]等对我国 47 种典型森林的实测值;高覆盖草地、中覆盖草地、低覆盖草地、水田、旱地等 5 类土地利用类型的叶生物量密度采用方精云^[19]等对我国各种草地、灌木、农作物的生物量的实测研究结果;水域、城乡工矿居民用地、未利用土地等 3 类土地利用类型的叶生物量密

度主要参考全国^[20]、北京市^[21]、珠江三角洲地区^[22]和重庆市^[14]的研究结果(见表 2)。

对于植被类型的 VOCs 标准排放因子,通常采用分档方法处理^[23]以保证取值的合理性,即在计算过程中,先以通过文献获得的国内部分树种的 VOCs 标准排放因子和世界各地各种植物的 VOCs 标准排放因子实测值为基础,根据天津市森林资源调查中各植被类型植物所占比例进行加权平均,然后将加权平均值与 VOCs 标准排放因子的分档值进行比较,取数值最接近的分档值为该植被类型的 VOCs 标准排放因子。对单萜烯的排放分为 0.1、0.2、0.65、1.5、3.0 $\mu\text{gC} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 等 5 档取值;对有林地 VOCs 排放,一律取 1.5 $\mu\text{gC} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。排放系数则由 LMD 和排放因子来估算(见表 2)。

表 2 叶面积指数、叶生物量密度和排放系数的设置			
Table 2 Assignment of LAI,LMD and emission factors			
土地利用	LAI	LMD /($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	单萜烯 /($\mu\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}$)
水田	4.0	500	50.00
旱地	4.0	740	74.00
有林地	5.0	785	1 177.50
疏林地	4.0	31	3.10
其他林地	5.0	650	422.50
高覆盖草地	2.5	105	21.00
中覆盖草地	2.0	95	14.25
低覆盖草地	2.0	90	9.00
水域	0.0	0	3.10
城乡工矿居民	2.0	31	3.10
未利用土地	1.3	31	3.10

1.3.4 气象数据 把大气环境温度假设为叶温,模型中光合有效辐射(PAR)数据通过云量信息模拟得到。温度、湿度、风速等小时气象数据来源于 2013 年天津市气象观测站。

2 结果与分析

2.1 天津市植被单萜烯排放量

利用 GLoBEIS 模型估算出 2013 年天津市植被单萜烯的排放量,从输出结果中可以看出 2013 年天津市植被单萜烯全年排放总量为 2 877.80 t,排放强度为 $0.25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,从 1—12 月,各个月份的贡献率依次为:1.25%、1.56%、3.19%、5.31%、11.60%、14.87%、18.62%、20.25%、11.43%、6.62%、3.42%、1.88%,8 月份贡献率最高,1 月份最低。

2.2 植被单萜烯排放时间分布特征

图 1 是植被单萜烯在每月 15 日的排放量变化情况,由图 1 中可以看出,各个月份的单萜烯均表现出了相似的日变化特征:从 8:00 开始,单萜烯的排

放量开始增大,直至中午达到最大,随后排放量逐渐减小,直至 20:00 又恢复平稳。这主要是因为,单萜烯的排放受到温度的影响比较大,温度高时排放量大,温度低时排放量小。夜间温度变化平稳,白天温度先升高后降低,因此,夜间单萜烯的排放趋于平稳,白天单萜烯的排放先增大后减小。

图 2 为植被单萜烯各个月份的排放量及其贡献率,可以看出,随着月份的增加,单萜烯的排放量逐渐增大,而且在 5 月份显著增大,直至 8 月份达到最大,随后逐渐减小,并且在 9 月份显著减小。

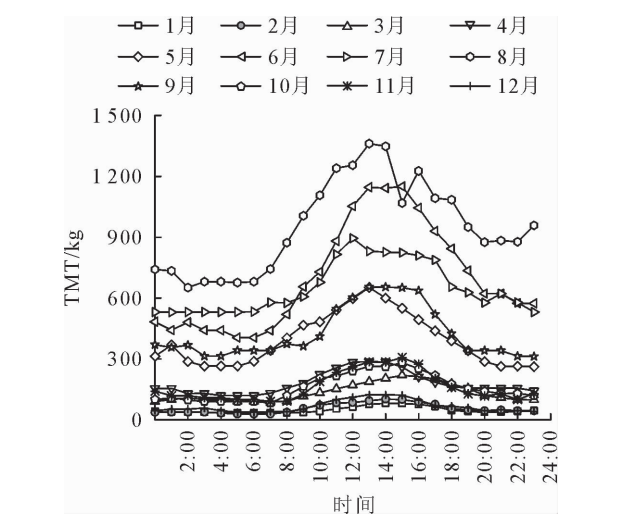


图 1 植被单萜烯每月 15 日排放量随时间的变化
Fig. 1 BTMT emission in the fifth day of each month

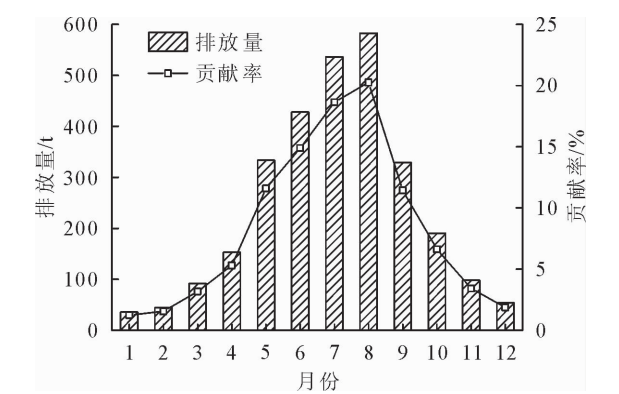


图 2 植被单萜烯各月排放量及贡献率
Fig. 2 Monthly emission and percentage of BTMT

从整个月份的排放量来看,8 月份排放量最大,达到 582.61 t,贡献率为 20.25%,1 月份排放量最小,为 35.89 t,贡献率为 1.25%。这主要是因为,8 月份温度较高,排放量较大;而在 5 月份,温度有了显著升高,在 9 月份,温度显著下降,从而致使单萜烯的排放显著增加和降低;在 1 月份辐射和温度都较低,单萜烯的排放也达到了最低。

图 3 为植被单萜烯每季度的排放量及其贡献率,可以看出,春季和秋季的排放量相当,分别为 578.35、618.05 t,贡献率分别为 20.10%、21.48%;

夏季排放量最大,达到 1 546. 55 t,贡献率占到 53. 74%;冬季排放量最小,为 134. 86 t,贡献率为 4. 69%。这主要是因为夏季的温度和辐射远远高于冬季。

2.3 植被单萜烯排放空间分布特征

图 4 是 2013 年天津市植被单萜烯各季节排放量的空间分布图,从春夏秋三幅图中可以看出,与其他空间区域相比,单萜烯在滨海新区和市内 6 区排放较少,在蓟县北部山区、宝坻区北部以及静海西南部分布较多,这主要是因为在这些分布量较多的地方有茂密的林地;春季和秋季空间分布相似,而夏季

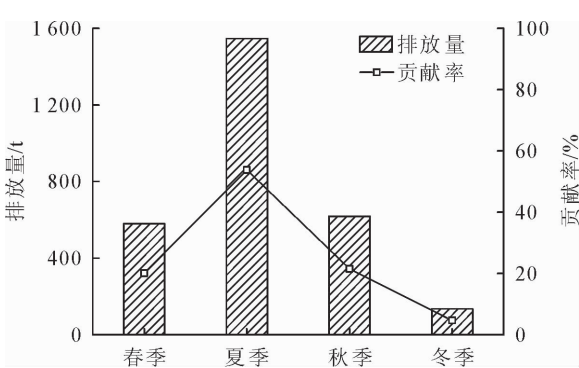


图 3 植被单萜烯每季度排放量及其贡献率

Fig. 3 Seasonal emission and percentage of BTMT

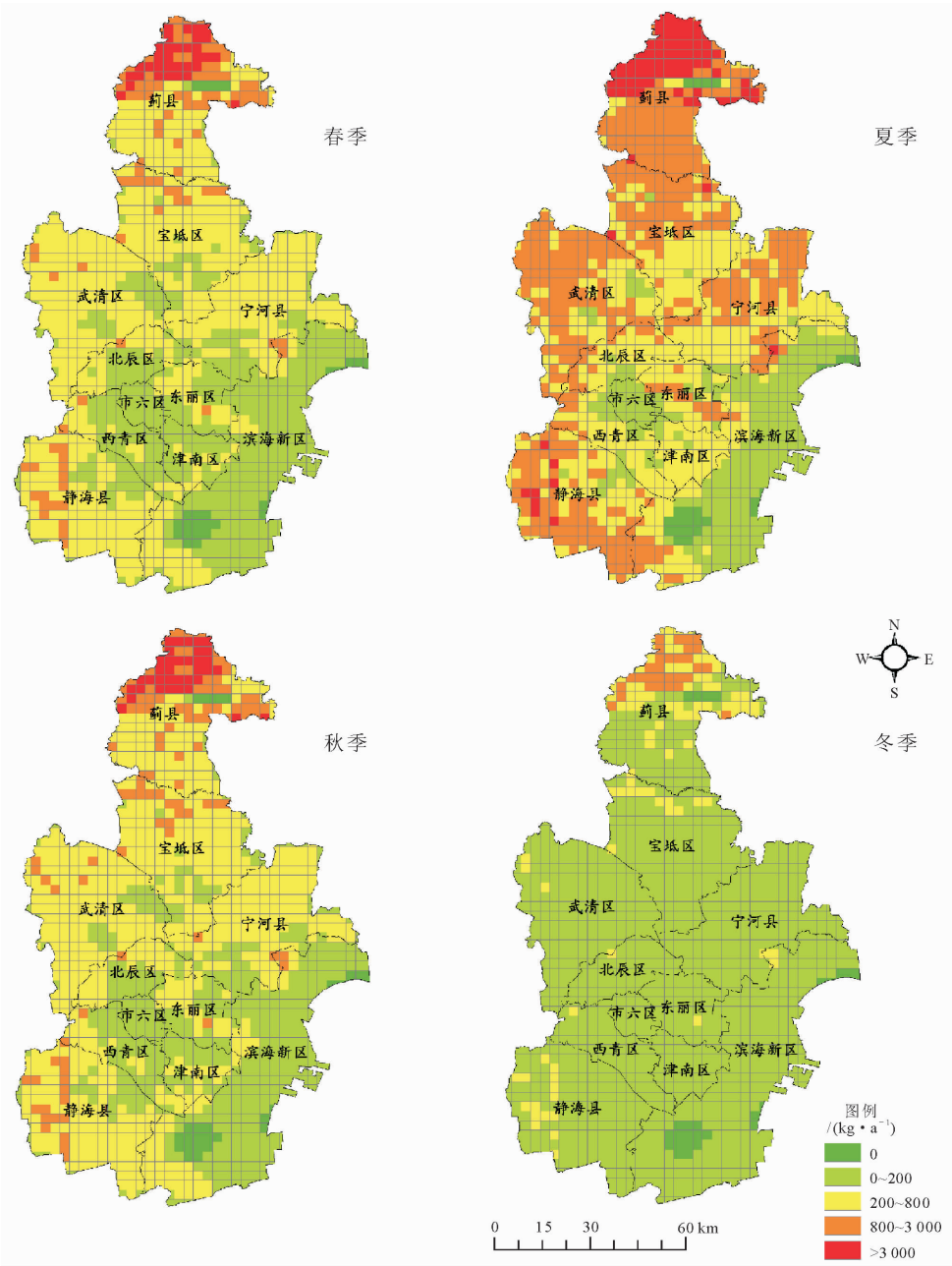


图 4 天津市植被单萜烯各季节排放量空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of BTMT emission in each season in Tianjin

和冬季的空间分布具有非常显著的差异,这主要是因为春季和秋季各气象条件相似,而夏季和冬季的气象条件相差较大;与春季相比,夏季各区域单萜烯的排放均有增加,冬季各区域的单萜烯的排放均有减小。由此可见,单萜烯的空间分布受到土地利用类型和气象条件的双重影响。

3 结论与讨论

3.1 结论

2013 年天津市植被单萜烯排放总量为 2 877. 80 t,排放强度为 $0.25\text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

天津市植被单萜烯排放具有显著的日变化、月变化和季节变化特征:在中午排放高,夜间排放量低;8 月份排放量达到最大,1 月份达到最小;夏季排放量最大,冬季排放量最小。

天津市植被单萜烯排放的空间分布特征为:在蓟县北部山区排放量较大,在市内 6 区和滨海新区排放量较小。

3.2 讨论

3.2.1 排放量与分布特征 对于植被单萜烯的排放量,表 3 是珠江三角洲、重庆以及本研究中的植被单萜烯排放量的对比表,由表 3 可知,植被单萜烯排放量大小关系为:珠江三角洲>重庆>本研究,这是因为单萜烯主要是林地排放的,三者的林地面积大小关系为:珠江三角洲>重庆>本研究,这与植被单萜烯排放量的大小关系相一致。因此,林地面积越大,植被单萜烯的排放量越大。这一点,在上述单萜烯空间分布中也得到了证实。同时,在郑君瑜^[22]等对珠江三角洲的研究结果中也说明,针叶林比较密集的地方,单萜烯的排放通量也较大。

表 3 植被单萜烯排放量
Table 3 The emission of BTMT

研究区域	林地面积/m ²	排放量/(t·a ⁻¹)
珠江三角洲 ^[22]	17 488. 00	89 000. 00
重庆 ^[14]	1 389. 73	10 500. 00
本研究	592. 27	2 877. 80

对于植被单萜烯的时间分布特征,从上述分析中可以看出,单日变化特征为:中午排放量高,夜间排放量低,这一点与白建辉^[11]等研究结果相一致;月变化特征为:8 月份排放量高,1 月份排放量低,这一点与吴莉萍^[14]等研究结果相一致;季节变化特征为:夏季排放量高,冬季排放量低,这一点与郑君瑜^[22]等研究结果相一致。这主要是因为,植被单萜烯的排放主要受到温度的影响^[24]。单萜烯在植被中的合成是通过甲羟戊酸(MVA)途径由乙酰辅酶 A 合成异戊烯基焦磷酸(IPP)和 3,3-二甲基丙烯基

二磷酸(DMAPP),IPP 或 DMAPP 在异戊烯转移酶催化下形成焦磷酸牛儿酯(GPP),然后再在单萜环化酶的作用下产生单萜烯。在这个形成主要受到温度的影响,因为温度可以影响到单萜烯的挥发性和排放阻力。

3.2.2 不确定性分析 在本研究的植被单萜烯排放的估算中,不确定性主要来源于以下 3 个方面:排放因子:研究所使用的排放因子,主要参考了国内外文献,基于天津市本地植物的排放因子更是鲜有报道,因此,在研究过程中,排放因子可能会导致结果的不确定性;叶生物量密度:研究中所使用的叶生物量密度同样是参考了国内外文献,缺乏相应的天津本地的实测数据,在使用过程中,可能会对结果产生一定的影响;土地利用类型:通过遥感解译出来的土地利用类型,由于解译的误差,也会对结果造成一定的不确定性。

3.2.3 单萜烯引起光化学污染的防范 植被排放单萜烯是自我保护的一种措施,在享受植被带来的各种益处的同时,还应该注意防范植被排放单萜烯所带来的光化学污染。基于以上分析和讨论,在以下时间或地点要注意防范植被单萜烯引起的光化学污染:每天的中午;夏季,尤其是在 8 月份;林地面积较大的区域。

参考文献:

[1] 麻坤,赵鹏祥,季菲菲,等. 基于植被指数的秦岭森林健康评价方法研究[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):145-150.
MA K, ZHAO P X, JI F F, *et al.* Forest health assessment method in Qinling mountains based on the vegetation indices [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(6): 145-150. (in Chinese)

[2] 杨静怡,赵平,马履一. 北京居民居住绿化环境喜好特征与生态价值观调查研究[J]. 西北林学院学报,2015,30(4):271-276.
YANG J Y, ZHAO P, MA L Y. Preference traits to the residential greening environment of inhabitants and public eco-value[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4): 271-276. (in Chinese)

[3] GUENTHER A, ZIMMERMAN P R, HARLEY P C. Isoprene and monoterpene emission rate variability: model evaluations and sensitivity analyses[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98: 12609-12617.

[4] GUENTHER A, HEWITT C N, ERICKSON D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 8873-8892.

[5] GUENTHER A, GERON C, PIERCE T, *et al.* Natural emissions of non-methane volatile organic compounds, carbon monoxide, and oxides of nitrogen from north American [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 2205-2230.

[6] CALOGIROU A, LARSEN B R, KOTZIAS D. Gas-phase terpene oxidation products: a review[J]. Atmospheric Environ-

ment,1999,33(9):1423-1439.

[7] 吴婷,夏传俊,赵娟. 森林凋落叶分解过程中单萜烯排放研究进展[J]. 地球科学进展,2012,27(7):717-724.

WU T,XIA C J,ZHAO J. Review on emission of monoterpenes during the decomposition of leaves litter forest ecosystem [J]. Advances in Earth Science,2012,27(7):717-724. (in Chinese)

[8] EVANS R,TINGEY D,GUMPERTZ M,*et al.* Estimates of isoprene and monoterpene emission rates in plants [J]. Bot. Gaz. ,1982,143(3):304-310.

[9] ANASTASI C,HOPKINSON L,SIMPSON V J. Natural hydrocarbon emissions in the United-Kingdom [J]. Atmospheric Environment,1991,25(7):1403-1408.

[10] 王新明,盛国英,傅家谟,等. 广州大气中非活体植物释放单萜烯的特征及成因初探[J]. 科学通报,1998,43(19):2118-2121.

[11] 白建辉,GUENTHER ALEX,TURNIPSEED ANDREW. 长白山温带森林单萜烯排放模拟[J]. 环境科学学报,2012,32(9):2236-2244.

BAI J H,GUENTHER A,TURNIPSEED A. Simulation of monoterpene emission in a temperate forest on Changbai Mountain [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2236-2244. (in Chinese)

[12] 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):110-114.

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):110-114. (in Chinese)

[13] ZHENG J Y,ZHENG Z Y,YU Y F,*et al.* Temporal, spatial characteristics and uncertainty of biogenic VOC emissions in the Pearl River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment,2010,44:1960-1969.

[14] 吴莉萍,翟崇治,周志恩,等. 重庆市主城区挥发性有机物天然源排放量估算及分布特征研究[J]. 三峡环境与生态,2013,35(4):12-15.

WU L P,ZHAI C Z,ZHOU Z E,*et al.* Research on the emission estimation and distribution characteristics of biogenic VOCs from natural sources in urban Chongqing [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges,2013,35(4):12-15. (in Chinese)

[15] GUENTHER A,BAUGH B. Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain[J]. Journal of Geophysical Research,1999,104(23):30625-30639.

[16] ASNER G P,SCURLOCK J O,HICKE J A. Global synthesis of leaf area index observations;implications for ecological and remote sensing studies[J]. Global Ecology and Biogeography, 2003,12(3):191-205.

[17] 杨晓菲,鲁绍伟,饶良懿,等. 中国森林生态系统碳储量及其影响因素研究进展[J],西北林学院学报,2011,26(3):73-78.

YANG X F,LU S W,RAO L Y,*et al.* Advances in the researches of carbon storage of forest ecology and related factors in China [J]. Journal of Northwest Forestry University,2011,26(3):73-78. (in Chinese)

[18] 冯宗炜,王效科,吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力[M]. 北京:科学出版社,1999.

[19] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统的碳库[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996:109-128.

[20] 胡永涛,张远航,谢绍东,等. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. 环境科学,2001,22(6):1-6.

HU Y T,ZHANG Y H,XIE S D,*et al.* Development of biogenic VOC emissions inventory with high temporal and spatial resolution[J]. Environmental Science, 2001, 22(6): 1-6. (in Chinese)

[21] WANG Z H,BAI Y H,ZHANG S Y. A biogenic volatile organic compounds emission inventory for Beijing[J]. Atmospheric Environment,2003,37:3771-3782.

[22] 郑君瑜,郑卓云,王兆礼,等. 珠江三角洲天然源 VOCs 排放量估算及时空分布特征[J]. 中国环境科学,2009,29(4):345-350

ZHENG J Y,ZHENG Z Y,WANG Z L,*et al.* Biogenic VOCs emission inventory and its temporal and spatial characteristics in the Pearl River Delta area[J]. China Environmental Science,2009,29(4):345-350. (in Chinese)

[23] GUENTHER A B,HEWITT C N,ERICKSON D,*et al.* A global-model of natural volatile organic compound emissions [J]. Journal of Geophysical Research,1995(5):8873-8892.

[24] 王永峰,李庆军. 陆地生态系统植物挥发性有机化合物的排放及其生态学功能研究进展[J]. 植物生态学报,2005,29(3):487-496.

WANG Y F,LI Q J. BVOCs emitted from plants of terrestrial ecosystems and their ecological functions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2005,29(3):487-496. (in Chinese)

(上接第 32 页)

[20] 季志平,苏印全,贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征[J]. 西北林学院学报,2006,21(6):54-57.

JI Z P,SU Y Q,HE L. Vertical distribution characteristic of soil organic carbon of plantation in Hilly Loess region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(6): 54-57. (in Chinese)

[21] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报,2010,30(23):6581-6590.

[22] 张立华,陈小兵. 盐碱地怪柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报,2015,26(3):653-658.

[23] 任雪,诸贵新,宋日权,等. 准噶尔盆地南苑绿洲-荒漠过渡带梭梭“肥岛”效应特征[J]. 土壤通报,2010,41(1):72-76.

REN X,ZHU G X,SONG R Q,*et al.* The characteristics of “Fertile Island” on *Haloxylon ammodendron* at an oasis-desert ecotone in the south edge of Junggar Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science,2010,41(1):72-76. (in Chinese)

[24] 刘任涛,杨新国,宋乃平,等. 荒漠草原区固沙人工柠条林生长过程中土壤性质演变规律[J]. 水土保持学报,2012,26(4):108-112.