

基于树种蓄积量的中国森林 VOC 排放估算

张钢锋, 谢绍东*

(北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家联合重点实验室, 北京 100871)

摘要: 以中国森林优势树种为对象, 应用《全国森林资源统计》提供的林分优势树种蓄积量资料和 Guenther 提出的光温影响模型, 估算各优势树种的 VOC 排放量, 建立了中国森林生态系统的 VOC 排放清单, 并探讨了森林源 VOC 在不同时空和不同龄级林分中的分配规律. 结果表明, 中国森林 VOC 总排放量为 8 565.76 Gg, 其中异戊二烯 5 689.38 Gg (66.42%), 单萜烯 1 343.95 Gg (15.69%), 其他 VOC 1 532.43 Gg (17.89%); 不同树种的 VOC 排放量差异较大, 栎类、云杉、马尾松等为主要贡献树种, 贡献率分别为 45.22%、6.34% 和 5.22%; 西南和东北地区为中国森林 VOC 主要排放区域, 云南、四川、黑龙江、吉林、陕西 5 省排放最多, 分别占全国总量的 15.09%、12.58%、10.35%、7.49% 和 7.37%; 森林 VOC 排放存在非常强的季节性变化, 夏季排放量最大, 占全年的 56.66%; 不同龄级林分对 VOC 排放的贡献有所不同, 中龄林贡献最多, 占森林排放总量的 38.84%.

关键词: 森林; 树种; 挥发性有机物; 估算; 排放清单

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2816-07

Estimation of VOC Emission from Forests in China Based on the Volume of Tree Species

ZHANG Gang-feng, XIE Shao-dong

(State Key Joint Laboratory for Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Applying the volume data of dominant trees from statistics on the national forest resources, volatile organic compounds (VOC) emissions of each main tree species in China were estimated based on the light-temperature model put forward by Guenther. China's VOC emission inventory for forest was established, and the space-time and age class distributions of VOC emission were analyzed. The results show that the total VOC emissions from forests in China are 8 565.76 Gg, of which isoprene is 5 689.38 Gg (66.42%), monoterpenes is 1 343.95 Gg (15.69%), and other VOC is 1 532.43 Gg (17.89%). VOC emissions have significant species variation. Quercus is the main species responsible for emission, contributing 45.22% of the total, followed by Picea and Pinus massoniana with 6.34% and 5.22%, respectively. Southwest and Northeast China are the major emission regions. In specific, Yunnan, Sichuan, Heilongjiang, Jilin and Shaanxi are the top five provinces producing the most VOC emissions from forests, and their contributions to the total are 15.09%, 12.58%, 10.35%, 7.49% and 7.37%, respectively. Emissions from these five provinces occupy more than half (52.88%) of the national emissions. Besides, VOC emissions show remarkable seasonal variation. Emissions in summer are the largest, accounting for 56.66% of the annual. Forests of different ages have different emission contribution. Half-mature forests play a key role and contribute 38.84% of the total emission from forests.

Key words: forest; plant species; volatile organic compounds (VOC); estimation; emission inventory

挥发性有机物(VOC)是环境中典型的大气污染物,它对人体健康以及大气的物理、化学性质都有着重要的影响.从全球范围看,天然源 VOC 的排放量远远超过了人为源^[1],对它的研究一直是国内外大气化学和生物科学领域的热点.早在 20 世纪 70~80 年代,欧美等发达国家就认识到天然源 VOC 排放对大气环境的重要影响,并着手调查各类植被的排放情况^[2,3],至今已取得较大进展^[4~8].在中国,该领域的研究工作兴起于 20 世纪 90 年代^[9~13],目前已有国内天然源 VOC 排放情况的报道^[14~17],多是通过植被面积资料推算叶生物量进而估算植被排放总量,很少基于树种蓄积量、以具体树种为对象研究各种树种以及森林的 VOC 排放特征.本研究以中国森林优势树种蓄积量为基础,模拟分析中国大陆各优势

树种的 VOC 排放特征,建立了中国森林生态系统的 VOC 排放清单,并探讨了森林源 VOC 在不同时空和龄级林分中的分配规律.这对进一步研究中国天然源 VOC 对大气环境的影响,以及日后森林树种的合理选择和配置具有重要意义.

1 模型简介

将森林树木排放的 VOC 分为异戊二烯、单萜烯和其他 VOC(包括醇、醛、酮、有机酸、低碳烷烃和烯

收稿日期: 2008-11-25; 修订日期: 2009-01-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A306); 环境保护公益性行业科研专项(200709001)

作者简介: 张钢锋(1983~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: gzfzhang@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: sdxie@pku.edu.cn

烃等) 3 类, 参照 Guenther 等^[1, 18] 提出的光温影响模型按树种类别对其分别进行估算. 具体估算模型见式(1)和式(2).

$$E_{\text{isop}} = \varepsilon \cdot B \cdot Y_t \cdot Y_p$$

(1)

$$E_{\text{mono}}, E_{\text{ovoc}} = \varepsilon \cdot B \cdot Y_t$$

(2)

式中, E_{isop} 为异戊二烯的排放量; E_{mono} 和 E_{ovoc} 分别为单萜烯和其他 VOC 的排放量; ε 为标准条件下[温度为 303 K, 光合有效辐射 (PAR) 为 1000 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$] 各森林树种的 VOC 排放因子, 单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 即平均每 g 叶子干重每 h 排放的 VOC μg 碳数; B 为各树种的叶生物量(干重), 单位为 g; Y_t 和 Y_p 均无量纲, 分别为气温校正因子和光合有效辐射校正因子.

2 参数的确定

2.1 标准排放因子

根据观测部位的不同, VOC(主要是异戊二烯) 排放因子的测定分为 2 种标准. 一种是树叶水平, 另一种是树枝水平, 前者比后者的值高 75% 左右^[19]. 如果在估算时考虑植被冠层详细的辐射强度分布, 需要基于树叶水平的排放因子; 否则需要基于树枝水平的排放因子. 由于目前的森林冠层模型自身存在着较多不确定性^[8], 并且在现实中很难精确模拟冠层效应, 这里不考虑冠层对 VOC 排放的影响.

对于具体树种的 VOC 标准排放因子, 各文献报道值之间通常有较大的离散性. 为了尽可能避免观测过程中的人为误差, 一般在确定某一树种的标准排放因子时, 并非直接赋予其一个确定的值, 而是给出一些离散的排放强度区间(比如: 可忽略、很低、低、中、高等), 每个区间取一代表值, 区间范围为该代表值的 $\pm 50\%$. 然后根据各报道中某树种标准排放因子落入的区间, 用其代表值作为该树种的标准

表 1 中国森林优势树种 VOC 标准排放因子¹⁾/ $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$
Table 1 Biogenic VOC emission potentials of dominant species in China/ $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$

树种类型	国内监测值		文献	国外监测值		文献	本研究取值	
	异戊	单萜		异戊	单萜		异戊	单萜
冷杉	0.1	3	[14]	0.1	3	[2, 8, 19, 24]	0.1	3
云杉	8	3	[14]	8	3	[2, 3, 19, 24]	8	3
铁杉	—	—	—	0.1	0.2	[4, 19, 24, 25]	0.1	0.2
柏木	0.1	1.6	[13, 21]	0.1	0.6	[8]	0.1	1.6
落叶松	0.1	0.6	[14, 22]	0.1	1.6	[8]	0.1	0.6
松属 ²⁾	0.1	3	[14]	0.1	3	[3, 4, 8, 19, 24]	0.1	3
油杉 ³⁾	—	—	—	—	—	—	0.1	3
杉木	0.1	0.1	[17]	—	—	—	0.1	0.1
柳杉	0.1	0.6	[21]	—	—	—	0.1	0.6
水杉 ³⁾	—	—	—	—	—	—	0.1	0.1
水、胡、黄	0.1	0.6	[14]	—	—	—	0.1	0.6
樟树	0.1	0.6	[14]	0.1	0.1	[19, 24, 26]	0.1	0.2
楠木	0.1	0.1	[14]	—	—	—	0.1	0.1
栎类	40	0.2	[11, 14, 21]	40	0.2	[3, 4, 19, 24, 27]	40	0.2
桦木	0.1	0.2	[11, 14, 21]	0.1	0.2	[8, 19, 24, 28]	0.1	0.2
椴树类	0.1	0.1	[11, 14]	—	—	—	0.1	0.1
檫木	—	—	—	0.1	0.1	[4, 19, 24]	0.1	0.1
桉树	40	3	[14]	40	3	[3, 19, 24]	40	3
木麻黄	2	0.1	[17, 21]	40	0.1	[2, 19, 24]	20	0.1
杨树	40	0.1	[13, 14, 22]	40	0.1	[3, 19, 24]	40	0.2
桐类	0.1	0.2	[14, 23]	—	—	—	0.1	0.2

1) 异戊:异戊二烯; 单萜: 单萜烯; 2) 包括红松、樟子松、赤松、黑松、油松、华山松、马尾松、云南松、思茅松和高山松; 3) 无观测数据, 且树种蓄积量较少, 油杉的排放因子取同科松属值, 水杉的排放因子取同科杉木属值
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

排放因子. 如果不同报道中的排放因子分别落入多个区间, 则根据落入次数最多的区间来确定. 本研究参照 Guenther 等^[19]的做法, 将各树种基于树枝水平的异戊二烯标准排放因子划分为 5 个档次, 代表值分别为: 0. 1、2、8、20 和 40 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; 将单萜烯的标准排放因子也划分为 5 个档次, 代表值分别为: 0. 1、0. 2、0. 6、1. 6 和 3. 0 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 各树种的标准排放因子见表 1. 确定了各树种的标准排放因子后, 便可根据森林内部树种的组成采用加权平均的方法确定各植被类型(针叶混、阔叶混等)的标准排放因子, 本研究主要参考王勤耕^[20]统计整理的结果(见表 2). 所有树种和植被类型的其他 VOC 标准排放因子, 统一使用 Guenther 等^[19]的推荐值 1. 5 $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$.

表 2 中国森林各植被类型 VOC 标准排放因子/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$
Table 2 Biogenic VOC emission potentials of main forest types in China/ $\mu\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$

植被类型	异戊二烯	单萜烯	其他 VOC
硬阔类	20	0.4	1.5
软阔类	20	0.4	1.5
杂木	16	1.2	1.5
矮林	8	0.6	1.5
针叶混	2	2.6	1.5
针阔混	16	1.2	1.5
阔叶混	20	0.4	1.5

2.2 叶生物量和排放期

在国内已有的植物源 VOC 估算报道中, 研究者多以植被面积数据为基础, 通过对叶生物量密度的确定来换算植被的叶生物量. 本研究则参考方精云等^[29]在分析中国森林植被碳汇时采用的通过植被蓄积量估算生物量的思路, 从各树种蓄积资料出发, 对其叶生物量进行估算, 类似的方法曾被张莉等^[15]用于报道森林异戊二烯的排放. 文中采用的树种蓄积量来源于文献[30]中的“林分各优势树种各龄组面积蓄积统计表”, 具体的叶生物量换算方法见式(3).

$$B = \frac{V \times D_T}{P_T} \cdot P_L \tag{3}$$

式中, B 为树种叶生物量(干重); V 为树种蓄积量; D_T 为树干基本密度(绝干材质量与生材体积的比值); P_T 和 P_L 分别为树干和树叶在乔木层总生物量中所占的比例. 各树种的树干基本密度数据主要来自文献[31, 32], 树干及树叶在乔木层生物量中的比重数据取自罗天祥^[33]的研究结果.

估算森林树种的 VOC 排放时, 还应考虑不同树

种排放周期的影响. 对于常绿树种, 假设它们全年都有 VOC 排放. 对于落叶树种, 因为树木幼嫩叶片通常不排放异戊二烯, 而在出叶后 4 周达到最大排放率^[34]. 本研究取树木展叶盛期为异戊二烯始排期, 叶全变色期为排放停止期. 虽然有研究发现个别落叶树种在发芽初期就有单萜烯和其他 VOC 的排放^[28], 由于中国的落叶优势树种基本上为阔叶类, 而阔叶类树木的单萜烯排放速率相对很低. 因此, 本研究假设落叶树种的单萜烯、其他 VOC 的排放周期与异戊二烯相同. 根据文献[35, 36]等资料, 可以确定各落叶树种在不同地区的 VOC 排放期. 限于篇幅, 本研究在此不给出各树种叶生物量及排放期的具体数据.

2.3 气温校正因子

气温原始数据来源于中国气象科学数据共享服务网中的《中国地面国际交换站气候资料日值数据集》. 利用该资料, 通过文献[37, 38]提出的 WAVE 气温模型, 可以较为准确地模拟出每天各时刻的气温值. 然后便可代入式(4)进行气温校正因子 γ_t 的计算.

(1) 对于异戊二烯

$$\gamma_t = \exp[C_{T1}(T - T_s)/RT_sT] / \{ 1 + \exp[C_{T2}(T - T_M)/RT_sT] \} \tag{4}$$

式中, T 为当前叶表面温度, 单位为 K. 由于缺乏叶温观测资料, 同时考虑到叶温和气温的差别不是很大, 本研究用气温代替叶温; T_s 为标准条件下的叶温(303 K); R 为气体平衡常数(8. 314 $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$); C_{T1} 、 C_{T2} 、 T_M 均为经验常数, 分别取 95 000 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 、230 000 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 314 K.

(2) 对于单萜烯

$$\gamma_t = \exp[\beta(T - T_s)] \tag{5}$$

式中, β 为经验参数(0. 09 K^{-1}); T_s 为标准条件下的叶温(303 K).

2.4 光合有效辐射校正因子

光合有效辐射(PAR)系指能被绿色植物用来进行光合作用那部分太阳辐射. 本研究利用中国气象科学数据共享服务网提供的《中国辐射日值数据集》资料对各时刻的 PAR 进行模拟, 具体方法参考文献[39, 40], 然后代入式(6)进行光合有效辐射校正因子 γ_p 的计算.

$$\gamma_p = (aC_LQ)/(1 + a^2Q^2)^{0.5} \tag{6}$$

式中, Q 为光合有效量子密度, 来自 PAR 模拟结果, 单位为 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$; a 和 C_L 为经验常数, 取值分

别为0.002 7和 1.066.

3 结果与讨论

3.1 各优势树种 VOC 排放清单

表 3 按贡献率排名给出了中国森林优势树种 VOC 排放清单. 可以看出, 森林源 VOC 排放存在着非常大的树种差异. 栎类的贡献最大, 其 VOC 排放量占整个森林的 45.22%, 而其对异戊二烯的贡献率则达到了 61.74%. 这一方面与栎类拥有较大的叶生物量有关, 其叶生物量总计 91.5 Tg, 占整个森

林叶生物量的 24.18%; 另一方面, 栎类也拥有较高的异戊二烯排放潜力. 云杉和马尾松也是森林 VOC 排放的主要贡献树种, 贡献率分别为 6.34% 和 5.22%. 其中, 马尾松排放的单萜烯量最大, 占整个森林单萜烯排放量的 21.99%, 这也主要归功于马尾松巨大的树种蓄积量. 和以上几个树种相比, 虽然落叶松、桦木、杉木的叶生物量也很大, 分别占整个森林树木叶生物量的 6.85%, 8.33% 和 5.27%, 但由于这 3 个树种的 VOC 排放潜力都比较小, 且落叶松、桦木的排放期较短, 因此它们的贡献率普遍不高.

表 3 中国森林优势树种 VOC 排放清单

Table 3 VOC emission inventory of dominant species in China

树种或 植被类型	异戊二烯		单萜烯		其他 VOC		总 VOC	
	排放量/ $Gg \cdot a^{-1}$	贡献率/%	排放量/ $Gg \cdot a^{-1}$	贡献率/%	排放量/ $Gg \cdot a^{-1}$	贡献率/%	排放量/ $Gg \cdot a^{-1}$	贡献率/%
栎类	3 512.90	61.74	42.42	3.16	318.14	20.76	3 873.46	45.22
硬阔类	583.45	10.26	27.52	2.05	103.19	6.73	714.16	8.34
云杉	215.22	3.78	218.76	16.28	109.38	7.14	543.36	6.34
阔叶混	399.34	7.02	18.23	1.36	68.36	4.46	485.92	5.67
马尾松	3.90	0.07	295.56	21.99	147.78	9.64	447.24	5.22
冷杉	3.11	0.05	268.72	19.99	134.36	8.77	406.19	4.74
杨树	322.25	5.66	1.80	0.13	27.04	1.76	351.09	4.10
杂木	212.27	3.73	37.95	2.82	47.44	3.10	297.67	3.48
软阔类	243.00	4.27	11.45	0.85	42.72	2.79	297.17	3.47
云南松	1.28	0.02	111.40	8.29	55.70	3.63	168.37	1.97
杉木	3.84	0.07	9.65	0.72	144.70	9.44	158.19	1.85
针阔混	100.88	1.77	17.47	1.30	21.84	1.42	140.18	1.64
桦木	2.24	0.04	10.64	0.79	79.80	5.21	92.69	1.08
落叶松	1.79	0.03	24.61	1.83	61.53	4.02	87.93	1.03
高山松	0.67	0.01	57.79	4.30	28.89	1.89	87.35	1.02
桉树	55.64	0.98	10.21	0.76	5.11	0.33	70.95	0.83
柏木	0.66	0.01	29.97	2.23	28.10	1.83	58.73	0.69
针叶混	9.35	0.16	30.17	2.24	17.40	1.14	56.92	0.66
油松	0.50	0.01	37.14	2.76	18.57	1.21	56.22	0.66
思茅松	0.29	0.01	25.65	1.91	12.83	0.84	38.77	0.45
红松	0.22	0.00	16.59	1.23	8.30	0.54	25.11	0.29
樟子松	0.17	0.00	13.16	0.98	6.58	0.43	19.91	0.23
木麻黄	14.72	0.26	0.18	0.01	2.67	0.17	17.57	0.21
华山松	0.14	0.00	11.29	0.84	5.64	0.37	17.07	0.20
铁杉	0.23	0.00	1.33	0.10	9.96	0.65	11.52	0.13
水、胡、黄	0.20	0.00	2.67	0.20	6.67	0.44	9.53	0.11
椴树类	0.19	0.00	0.43	0.03	6.50	0.42	7.12	0.08
油杉	0.05	0.00	4.27	0.32	2.13	0.14	6.45	0.08
黑松	0.05	0.00	4.03	0.30	2.02	0.13	6.11	0.07
柳杉	0.07	0.00	1.20	0.09	3.01	0.20	4.28	0.05
楠木	0.05	0.00	0.14	0.01	2.15	0.14	2.35	0.03
赤松	0.02	0.00	1.10	0.08	0.55	0.04	1.67	0.02
桐类	0.03	0.00	0.15	0.01	1.14	0.07	1.32	0.02
樟树	0.02	0.00	0.11	0.01	0.83	0.05	0.96	0.01
矮林	0.59	0.01	0.10	0.01	0.25	0.02	0.94	0.01
水杉	0.02	0.00	0.06	0.00	0.84	0.06	0.92	0.01
檫木	0.01	0.00	0.02	0.00	0.31	0.02	0.34	0.00
总计	5 689.38	100.00	1 343.95	100.00	1 532.43	100.00	8 565.76	100.00

3.2 森林 VOC 排放的空间分布

图 1 给出了中国各省份的森林 VOC 排放量. 从中可见, 我国森林 VOC 排放主要集中在西南和东北地区. 从 3 类 VOC 的排放总量来看, 云南省的贡献率最高, 占全国总量的 15.09%, 其次是四川、黑龙江、吉林和陕西, 贡献率分别为 12.58%、10.35%、7.49%和 7.37%. 异戊二烯的分配格局和总 VOC 基

本一致, 其中四川的排放量相对于其他 4 省有所降低. 从单萜烯的排放量看, 四川则最多, 其次是云南、西藏、黑龙江和广西, 福建的排放量也很大. 这主要和以上省份拥有较大面积的针叶林有关. 由于采用的植被蓄积资料中没有包含重庆市和台湾省的数据, 因此未能估算两地的森林 VOC 排放量.

3.3 森林 VOC 排放的季节变化

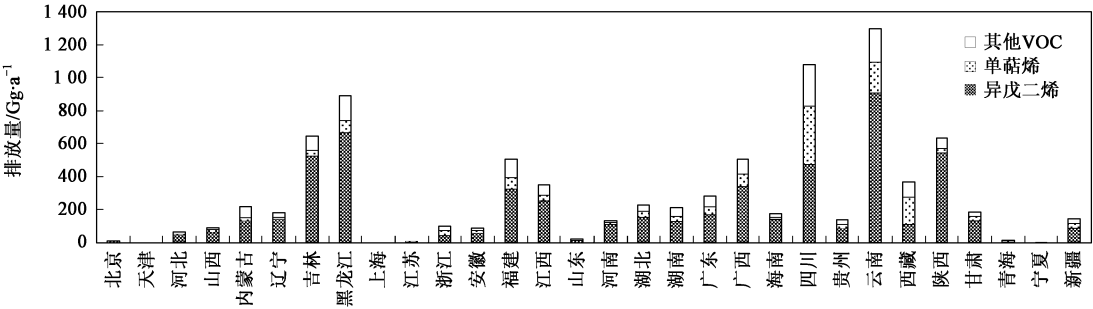


图 1 中国各省份森林 VOC 排放量
Fig. 1 VOC emissions of forest from various provinces in China

由图 2 可以看出, 中国森林 VOC 排放呈明显的季节性变化. 从 1~ 7 月, 3 类 VOC 排放量均不断增加, 7 月达到最大值, 之后逐月减少. 夏季是森林 VOC 排放最主要的季节, 6、7、8 这 3 个月的 VOC 排放总量占全年的 56.66%; 对于异戊二烯, 该比例则高达 61.06%. 这一现象与 Simon 等^[41] 对法国森林生态系统的研究结果非常一致, 主要是由于植物源 VOC 排放受光温控制造成的. 夏季的气温和太阳辐射相对于其他季节要高很多, 各树种 VOC 排放速率也因此增大. 此外, 植物的物候期也是影响 VOC 排放季节性变化的重要原因, 一般森林植物于春季吐芽, 夏季生长成熟, 秋季凋零, 这也在一定程度上促使了 VOC 排放季节性变化的形成.

情况做了分析, 结果见图 3. 可以看出, 在中国森林系统中, 中龄林对 VOC 排放的贡献最大, 占排放总量的 38.84%, 其次是近熟林, 占 18.05%. 森林 VOC 释放量与叶生物量在不同龄级林分中的分配状况比较一致. 其中, 幼龄林、中龄林和近熟林在 VOC 排放量中所占的比重稍微大于其在叶生物量中比重, 这可能是由于这 3 个龄级的林分中高排放潜力树种的比例相对于其它龄级较大而造成的.

3.5 相关研究结果比较

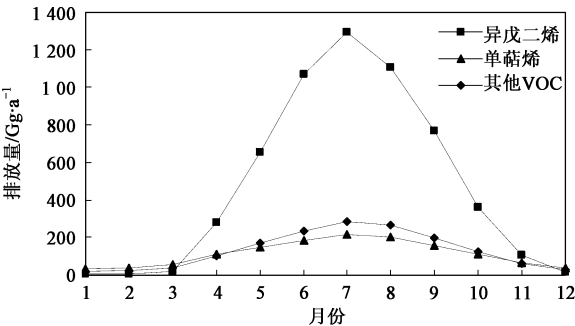


图 2 不同月份中国森林 VOC 排放量
Fig. 2 Monthly VOC emissions of forest in China

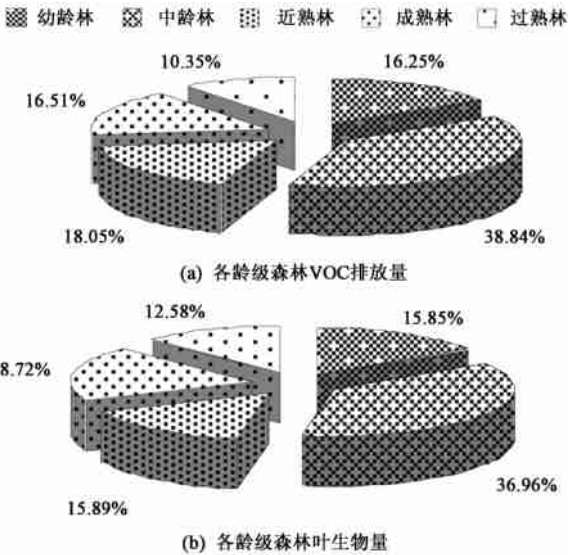


图 3 不同龄级林分 VOC 排放量和
叶生物量分配情况

Fig. 3 Distribution of leaf biomass and VOC emissions
between different age-class forests

3.4 各龄级森林的 VOC 贡献情况

本研究对中国森林不同龄级林分的 VOC 排放

从文中各树种 VOC 排放清单的汇总结果可知, 中国森林 VOC 年排放总量为 8.57 Tg, 其中异戊二烯 5.69 Tg、单萜烯 1.34 Tg、其他 VOC 1.53 Tg. 表 4 将该结果和已有相关研究结果做了对比. 可以看出, 本研究中其他 VOC 的排放量明显小于对照组的结果. 这主要是因为他们 在估算过程中均考虑了草原、农作物等植被类型的排放, 而这些植被主要释放其他 VOC^[16]. 异戊二烯、单萜烯的排放量总体上与王勤耕^[20] 的估算比较一致, 而与 Klinger 等^[14]、闫雁等^[16] 的结果有一定差别. 这一方面可能是由于选用的植被数据、气象数据等基础资料有所不同, 并且本研究只针对森林排放做了估算; 另一方面, 估算方法的差异尤其是叶生物量推算方式的不同也是一个重要原因.

表 4 中国植物源 VOC 排放定量研究结果/Tg·a⁻¹

Table 4 Quantitative results of vegetation VOC emissions in China/Tg·a⁻¹

异戊二烯	单萜烯	其他 VOC	文献
5.69	1.34	1.53	本研究
6.7	1.8	3.9	[20] ¹⁾
4.1	3.5	13	[14] ¹⁾
4.85	3.29	8.94	[16] ¹⁾

1) 包含草原、农作物等其他植被排放量

4 不确定性分析

在本研究估算过程中, VOC 排放量的不确定性主要来自以下 3 个方面.

(1) 各树种标准排放因子的不确定性 所有树种的标准排放因子均来自于国内外相关研究的观测结果. 由于采样技术、样本数量等条件的不同, 各观测结果间的离散性较大, 本研究参考 Guenther 等^[19] 的方法做了归类处理.

(2) 叶生物量推算的不确定性 叶生物量由树种蓄积量推算所得, 推算过程中采用的树干密度, 树干、树叶与乔木层比重等数据主要来自国内相关研究结果, 这些数据的可靠性也在一定程度上影响了本研究的估算结果.

(3) 环境校正因子的不确定性 各时刻气温值和光合有效辐射值均由气象观测资料模拟所得, 和实际气象环境可能有所差异.

5 结论

中国森林 VOC 排放总量为 8565.76 Gg, 其中异戊二烯 5689.38 Gg (66.42%), 单萜烯 1343.95 Gg (15.69%), 其他 VOC 1532.43 Gg (17.89%). 就具体

树种来看, 栎类排放最多, 占整个森林排放量的 45.22%, 云杉和马尾松次之, 分别占森林排放总量的 6.34% 和 5.22%; 就区域分布来看, 中国森林 VOC 排放主要集中在西南和东北地区, 云南、四川、黑龙江、吉林、陕西等省份的贡献率最高, 分别为 15.09%、12.58%、10.35%、7.49% 和 7.37%; 就季节变化来看, 夏季是一年中 VOC 排放最活跃的时期, 6、7、8 这 3 个月的 VOC 排放总量占全年的 5.66%; 就不同龄级林分的分配来看, 目前中龄林的 VOC 排放量最大, 贡献率为 38.84%, 这和叶生物量在不同龄级的分配情况较为一致.

致谢: 本研究采用的气象数据由中国气象科学数据共享服务网提供, 在此表示感谢.

参考文献:

[1] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, *et al.* A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *J Geophys Res*, 1995, **100**(D5): 8873-8892.

[2] Zimmernan P. Testing of hydrocarbon emissions from vegetation, leaf litter and aquatic surfaces, and development of a method for compiling biogenic emission inventories [R]. Washington: US Environmental Protection Agency, 1979.

[3] 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.

[4] Lamb B, Guenther A, Gay D, *et al.* A national inventory of biogenic hydrocarbon emissions[J]. *Atmos Environ*, 1987, **21**(8): 1695-1705.

[5] Anastasi C, Hopkinson L, Simpson V J. Natural hydrocarbon emissions in the United-Kingdom[J]. *Atmos Environ Part A-Gen*, 1991, **25**(7): 1403-1408.

[6] Fehsenfeld F, Calvert J, Fall R, *et al.* Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry[J]. *Global Biogeochem Cy*, 1992, **6**(4): 389-430.

[7] Lamb B, Gay D, Westberg H, *et al.* A biogenic hydrocarbon emission inventory for the USA using a simple forest canopy model [J]. *Atmos Environ Part A-Gen*, 1993, **27**(11): 1673-1690.

[8] Simpson D, Winiwarter W, Borjesson G, *et al.* Inventorying emissions from nature in Europe[J]. *J Geophys Res*, 1999, **104**(D7): 8113-8152.

[9] 白郁华, 李金龙, 张宝祥, 等. 北京地区林木、植被排放碳氢化合物的定性监测[J]. *环境科学研究*, 1994, **7**(2): 48-54.

[10] 李金龙, 白郁华, 胡建信, 等. 油松排放萜烯类化合物浓度的日变化及排放速率的研究[J]. *中国环境科学*, 1994, **14**(3): 165-169.

[11] 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, **15**(1): 1-5.

[12] 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, **14**(2): 118-123.

[13] 赵美萍, 邵敏, 白郁华, 等. 我国几种典型树种非甲烷烷烃类的排放特征[J]. *环境化学*, 1996, **15**(1): 69-75.

- [14] Klinger L F, Li Q J, Guenther A B, *et al.* Assessment of volatile organic compound emissions from ecosystems of China[J]. *J Geophys Res*, 2002, **107**(D21): 1-21.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Wang Q G, Han Z W, Wang T J, *et al.* An estimate of biogenic emissions of volatile organic compounds during summer time in China[J]. *Environ Sci Pollut R*, 2007, **14**(1): 69-75.
- [18] Guenther A. Seasonal and spatial variations in natural volatile organic compound emissions[J]. *Ecol Appl*, 1997, **7**(1): 34-35.
- [19] Guenther A, Zimmeman P, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emission rate estimates for the U. S. woodland landscapes[J]. *Atmos Environ*, 1994, **28**(6): 1197-1210.
- [20] 王勤耕. 中国 VOC 和 NO_x 陆地生态源及其对流层氧化影响的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2001.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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, **18**(1): 21-27.
- [24] Geron C, Guenther A, Pierce T. An improved model for estimating emissions of volatile organic compounds from forests in the eastern United States[J]. *J Geophys Res*, 1994, **99**(D6): 12773-12792.
- [25] Lamb B, Westberg H, Allwine G. Biogenic hydrocarbon emissions from deciduous and coniferous trees in the United States[J]. *J Geophys Res*, 1985, **90**(ND1): 2380-2390.
- [26] Kesselmeier J, Staudt M. Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology[J]. *J Atmos Chem*, 1999, **33**(1): 23-88.
- [27] Arey J, Winer A, Atkinson R, *et al.* Terpenes emitted from agricultural species found in California's central valley[J]. *J Geophys Res*, 1991, **96**(D): 9339-9336.
- [28] Hakola H, Rinne J, Laurila T. The hydrocarbon emission rates of tea-leaved willow (*Salix phylicifolia*), silver birch (*Betula pendula*) and European aspen (*Populus tremula*)[J]. *Atmos Environ*, 1998, **32**(10): 1825-1833.
- [29] 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.
- [30] 中华人民共和国林业部. 全国森林资源统计(1994-1998)[R]. 北京: 1999.
- [31] 中国林业科学研究院木材工业研究所. 中国主要树种的木材物理力学性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1982.
- [32] 王效科. 中国森林生态系统的生物量、碳贮量和生物质燃烧释放的含碳气体[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 1996.
- [33] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 1996.
- [34] Goldstein A H, Goulden M L, Munger J W, *et al.* Seasonal course of isoprene emissions from a midlatitude deciduous forest[J]. *J Geophys Res*, 1998, **103**(23): 31045-31056.
- [35] 张福春, 王德辉, 丘宝剑. 中国农业物候图集[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [36] 中国科学院地理研究所. 中国动植物观测年报(1-11)[M]. 北京: 科学出版社, 1965-1992.
- [37] De Wit C T, Goudriaan J, Van Laar H H. SOYMOD I: A dynamic simulator of soybean growth and development[J]. *T Asae*, 1978, **18**(5): 963-968.
- [38] Reicosky D C, Winkelman L J, Baker J M, *et al.* Accuracy of hourly air temperatures calculated from daily minima and maxima[J]. *Agr Forest Meteorol*, 1989, **46**(3): 193-209.
- [39] 刘建栋, 傅抱璞, 林振山. 利用三次样条函数模拟光合有效辐射日变化的研究[J]. *南京大学学报(地学专辑)*, 1996, **32**: 51-55.
- [40] 刘建栋, 金之庆. 光合有效辐射日变化过程的数值模拟[J]. *江苏农业学报*, 1999, **15**(3): 136-140.
- [41] Simon V, Luchetta L, Torres L. Estimating the emission of volatile organic compounds (VOC) from the French forest ecosystem[J]. *Atmos Environ*, 2001, **35**(1): 115-126.