

中国不同气候带植被挥发性有机化合物通量与生态系统演替的相关性

李庆军^{1,2}*, Lee F. KLINGER²

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南勐腊 666303;

2. The National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO80307, USA)

摘要: 从群落水平和生态系统演替的角度对中国热带、亚热带和温带生态系统植物挥发性有机化合物(VOC)通量的研究表明,异戊二烯通量呈现出在生态系统演替的早期到中期阶段随着演替的进行而升高,在先锋性灌木和乔木阶段达到高峰,然后又随着演替的发展而逐渐下降的演替格局,而其他 VOC 通量则有随着演替的进行而上升的趋势。生态系统不同演替阶段异戊二烯通量的变化可能与植物获取养分氮有关;根据植物 VOC 释放通量的生态演替格局,可以建立全球陆地生态系统的 VOC 模型,对大气化学过程中的 VOC 时空动态进行很好的模拟。

关键词: 西双版纳;哀牢山;长白山;生态系统演替;挥发性有机化合物通量;异戊二烯

中图分类号: Q948.1

文献标识码: A

文章编号: 0577-7496(2001)10-1065-07

The Correlation Between the Volatile Organic Compound Emissions and the Vegetation Succession of the Ecosystems in Different Climatic Zones of China

LI Qing-Jun^{1,2}*, Lee F. KLINGER²

(1. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Mengla, Yunnan 666303, China;

2. The National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO80307, USA)

Abstract: Isoprene and stored volatile organic compound (VOC) emissions along the succession of ecosystem in tropical, subtropical and temperate areas were characterized using a portable hydrocarbon detector and GC-MS-AED analysis. Isoprene emissions were observed to exhibit an ecological pattern whereby emissions were highest in early to middle successional (developmental) woodland and forest communities, and relatively low in late successional forest and peatland communities. This pattern may result from the ability of isoprene to enhance the availability of nitrogen that is deposited in the strongly nitrogen limited ecosystems. These findings from China along with the similar findings from North America, Puerto Rico, central Amazon, and central Africa point to characteristic growth form structure and VOC chemistry that ecosystems may share globally. This successional pattern would be useful in building a simple ecosystem-based, instead of painstaking species-based, model of VOC emission.

Key words: Xishuangbanna; Ailao mountain; Changbai mountain; ecosystem succession; volatile organic compound flux; isoprene

地球表面的大气层决定着地球上的气候和环境,对地球表面的生物和生命过程具有重大的影响;大气中各种化学成分的组成、含量及其相互转化,直接影响着地球表面的环境状况,其中,大气中某些化学物质(例如酸雨、臭氧)在地球表面的分布,对生物圈具有直接的影响,在一些地区已经成为当地主要的环境问题^[1]。非甲烷碳氢化合物(NMHC)是由地球上的各种生物学和地学过程产生的痕量气体,在大气中的含量虽然很少,但却对某些大气中的化学过程具有决定性的作用。NMHC 的释放量为 1 273

Tg C yr⁻¹(每年 1 273 × 10¹² g C 含量),在人口稠密的城市和工业化地区,人类活动释放的 NMHC 占有不可低估的地位,但就全球而言,绝大多数的 NMHC 是从自然界中释放出来的^[2],其中仅有很少的一部分来自海洋,其余大部分来自陆地生态系统中的植被,特别是木本植物,其挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOC)的排放量占到全球 NMHC 总量的 90%以上(1 150 Tg C yr⁻¹)^[2]。植物 VOC 主要是通过植物的叶面挥发到大气中去的,其成分和结构数以百计,但其中的两类化合物占到一半以上,一

* 收稿日期: 2001-02-23 接受日期: 2001-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(39700019, 40075027 和国际合作项目美-022)资助,同时得到美国国家大气研究中心的资助,该中心由美国国家科学基金会支持。Supported by the National Natural Science Foundation of China (39700019, 40075027 and US-022) and the Scholarly Studies Program of the National Center for Atmospheric Research which is sponsored by the National Science Foundation of America.

* 通讯作者。Author for correspondence. E-mail: <qjlixtbg@bn.yn.cninfo.net>.

类是含有 5 个碳原子的异戊二烯 (isoprene, C_5H_8), 另一类是含有 10 个碳原子的单萜类化合物 (monoterpenes, $C_{10}H_x$), 例如 α -蒎烯 (α -pinene), 这两类挥发性化合物从植物中释放的总量分别达 500 和 125 Tg C yr^{-1} [2,3]。

许多植物在特定的自然条件下能够释放 VOC, 这些化合物不但在生态系统的演替进程中起到关键的作用, 例如缓解热胁迫 [4]、抵御昆虫啃食 [5]、从空气中摄取气态氮以满足生态系统演替早期阶段对氮素的需求 [6] 等。同时, VOC 的释放对于植被上层空气对流层的大气化学过程具有显著的影响, 对周围环境产生明显的反馈作用。VOC 具有极高的化学活性, 能够与大气中的 OH 、 H_2O 等发生复杂的化学反应, 植物中 VOC 释放率及其在大气中的含量控制着大气中的 OH 离子浓度, 从而决定着大气中甲烷 (CH_4) 和 CO 等温室气体的浓度, 而这些气体又影响着大气中的辐射平衡, 进而影响到全球热量和降水的时空分布格局, 对区域乃至全球环境和气候产生强烈影响 [7,8]。另一方面, 大量研究证实 [9-14] VOC 对于近地大气对流层中臭氧的光化学合成具有显著的影响, 而大气对流层中臭氧浓度的上升, 会导致森林衰退、农作物产量下降等严重的生态后果 [15-18]; 大气中的 VOC 还在全球碳循环过程中扮演着重要的角色 [9]。因此, 对大气中生物挥发性化合物 (BVOC)、特别是对各类生态系统中植物释放的 VOC 通量的测定对于成功实行对流层臭氧控制具有重要的意义。

不同的植物类群释放的 VOC 种类和数量不同。例如异戊二烯是一种由植物释放的最丰富的 VOC, 它的释放依赖于充足的光照和较高的温度 [19], 所有主要的植物分类群中都有特定类群能够释放异戊二烯, 如苔藓植物 (特别是泥炭藓属 *Sphagnum*)、蕨类植物 (如满江红属 *Azolla*)、裸子植物 (如云杉属 *Picea*) 和被子植物 (如壳斗科 *Fagaceae*) 等。在被子植物中, 栎属 (*Quercus*)、悬铃木属 (*Platanus*)、杨属 (*Populus*)、鼠李属 (*Rhamnus*)、柳属 (*Salix*) 和桉属 (*Eucalyptus*) 等是典型的异戊二烯释放者, 而槭属 (*Acer*)、柑橘属 (*Citrus*)、木兰属 (*Magnolia*) 等属主要释放萜烯类化合物 [20,21]。通过对植物系统进化及其与释放 VOC 相互关系的研究, Guenther 等 [3] 建立了一个全球 VOC 的释放模型, 对温带生态系统的结构与其大气环境的相互关系做了较好的解释。然而, 这一模型是建立在不同植物类群释放 VOC 的种类和能力的基础上, 需要对大量植物种类进行野外

和实验室测试和分析, 不仅工作量大, 而且由于测试条件 and 环境不同, 所得到的释放量也会有较大的差异。

一些地区的研究表明, VOC 的释放与生态系统类型具有明显的相关性, 与生态系统所处的环境条件密切相关 [6-8,19,22]。进一步的研究还表明, 各类生态系统中植物 VOC 的释放具有与生态系统演替相关的格局 [8,22], 生态系统的早期到中期演替阶段具有较强的释放异戊二烯的能力, 释放异戊二烯较强的植物多是这一演替阶段的主要成分 (如 *Quercus*、*Populus*、*Salix*、*Picea* 等), 而演替后期的植物种类多为萜烯类化合物的释放者 (如 *Pinus*、*Abies*、*Magnolia*、*Taxodium* 等)。演替是生态系统发展的过程, 其结果是群落结构和物种组成不同的植被类型 (不同演替阶段) 的不断更迭。在生态系统的演替过程中, 其生产力、生物量、养分循环和能量流动具有广泛的可预测性 [23-25]。如果 VOC 的释放与生态系统的演替相关联, 那么沿着生态系统的演替序列就能找出 VOC 释放的系统性规律, 利用这一规律建立以生态系统的演替为基础的 VOC 释放模型, 就能够取代烦琐的以种类为基础的 VOC 释放模型。

1 材料和方法

1.1 研究地点及样地的选择

研究地点选择在云南省西双版纳自然保护区勐仑、补蚌; 哀牢山自然保护区徐家坝和吉林省长白山自然保护区, 分别代表热带、亚热带和温带陆地生态系统, 选择代表性的植物群落类型, 沿演替方向设置 10 m 宽的样带, 样带长度视地形及群落演替程度从 70 m 到 100 m 不等, 共 30 条样带, 样带的立地状况见表 2。

1.2 样品采集和分析

野外工作于 1998 年 8 月 6 日至 11 月 8 日先后在长白山、西双版纳和哀牢山进行。记录样带内所有木本植物及优势草本植物, 测定每株乔木的胸径 (DBH)、高度、单位叶面积干重 (SLDW)、群落总叶面积指数 (TLAI) 及乔木层叶面积指数 (TTLAI)、演替状况等群落生态学特征, 同时记录海拔、坡度、坡向、地形及土壤等环境特征, 详细方法见文献 [8,26]。

在所有样带中, 共记录到 443 种植物, 大都是木本植物, 其中西双版纳 8 条样带中共记录了 200 种; 哀牢山 9 条样带中共记录了 147 种; 长白山 13 条样带中共记录到 96 种。利用 580 II 型手持式光电离子探测器 (photoionization detector, PID, 美国 Thermo Environmental Instruments Inc. 公司生产) 测定了 208 种

主要成分的 VOC 潜在通量,即植物在理想或近于理想的温度和光照条件下 VOC 的释放能力。PID 能够灵敏地探测到总 VOC 排放量并通过光照和遮光的对照探测到植物异戊二烯的排放量,详细方法见文献[8,27]。

为了验证 PID 技术的精确度和可靠性,我们对 63 种优势植物(其中热带 28 种,亚热带 19 种,温带 16 种)进行了封闭采样(enclosure sampling),将采集到的样品带到美国国家大气研究中心(NCAR)利用气相色谱-质谱技术(GC-MS)和原子蒸发探测技术(atomic emission detection, AED)分析包括异戊二烯(isoprene)在内的 C₃ 到 C₁₅的一系列 VOC 的含量,详细方法见文献[8,28]。

1.3 VOC 通量的计算

VOC 的通量表示在理想条件下某植物群落单位土地面积在单位时间内向大气中排放 VOC 的质量,它是通过先计算群落中主要木本植物的叶生物量(TBM),再根据 PID 和 GC-MS-AED 测定的 VOC 释放能力计算出每种植物的 VOC 通量,最后将群落样地中所有主要植物的 VOC 排放量累加并除以样地面积。由于异戊二烯是植物排放的主要 VOC,占总 VOC 量的 40%~60%^[1],故这里将其单独列出;OVOC 是指植物在无损伤状态下排放的除异戊二烯外的其他 VOC;SVOC 是指储存于植物体内,只有在植物受到损伤时才释放的 VOC。详细方法见文献

[8,26]。

2 实验结果

2.1 野外 PID 探测结果与气-质连动-原子挥发探测技术(GC-MS-AED)分析结果的一致性

利用 PID 在野外进行植物 VOC 释放特性的测定具有方便、快捷的优点,但也具有定量性较差的问题。为了检验 PID 测定结果与采样后在实验室利用 GC-MS-AED 分析结果的一致性,我们对 63 种优势植物的野外和室内分析结果进行了比较(表 1),在 23 种释放异戊二烯的植物中,PID 探测出 22 种(96%),而 18 种释放萜烯类化合物的植物都被 PID 检测到(100%);在 40 种非异戊二烯释放者和 37 种非萜烯类化合物释放者中,PID 分别判断出了 37 种(93%)和 37 种(100%)。表明 PID 在用做野外快速测定植物释放 VOC 释放特性上具有很好的定性能力。此外,PID 还能对异戊二烯的释放能力作初步的定量测定,如表 1 所示,在检测出的 22 种异戊二烯释放者中,PID 准确的判断出了其中 21 种的释放量(H 表示强释放者,分析结果为 > 10 μg C · g⁻¹ · h⁻¹;M 表示中度释放者,分析结果为 1 - 10 μg C · g⁻¹ · h⁻¹;L 为弱释放者,分析结果为 < 1 μg C · g⁻¹ · h⁻¹)。然而,PID 在判断萜烯类化合物的释放量时误差较大,18 种释放者中仅定量测出 8 种,其余 10 种中的 9 种都偏高。

表 1 中国不同气候带生态系统不同演替阶段 63 种优势植物 PID 探测结果与 GC-MS-AED 分析结果的比较
Table 1 Comparison of PID method with GC-MS-AED method of determining isoprene and terpene emission potential for 63 species of Chinese plants

Species	Family	Growth form	Emission potential		Measured emissions (μg C · g ⁻¹ · h ⁻¹)	
			Isoprene	Terpene	Isoprene	Terpene
<i>Acer barbinerve</i>	Aceraceae	dbt	N	M	0.00	0.26
<i>A. mono</i>	Aceraceae	dbt	N	M	0.00	0.42
<i>Alangium kurzii</i>	Alangiaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Mangifera indica</i>	Anacardiaceae	ebt	H	N	2.64	-
<i>Rhus chinensis</i>	Anacardiaceae	dbt	L	M	0.18	1.56
<i>Acanthopanax evodiaefolius</i>	Arecaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Cocos nucifera</i>	Arecaceae	ebt	H	N	63.12	-
<i>Mahonia corferta</i>	Berberidaceae	ebs	M	N	4.63	0.00
<i>Betula dahurica</i>	Betulaceae	dbt	N	L	0.00	0.12
<i>B. ermanii</i>	Betulaceae	dbt	N	L	0.00	0.91
<i>B. fruticosa</i>	Betulaceae	dbt	N	L	0.00	1.40
<i>B. platyphylla</i>	Betulaceae	dbt	N	L	0.00	16.52
<i>Dolichandrone stipulata</i>	Bignoniaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Cassia alata</i>	Caesalpiaceae	ebs	N	N	0.00	-
<i>Terminalia bellirica</i>	Combretaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Crypteronia paniculata</i>	Crypteroniaceae	ebt	N	N	0.02	0.00
<i>Shorea wangtanshuea</i>	Dipterocarpaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Ledum palustre</i>	Ericaceae	ebs	N	H	0.00	31.46
<i>Rhododendron irroratum</i>	Ericaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Vaccinium duclouxii</i>	Ericaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>V. uliginosum</i>	Ericaceae	ebs	N	L	0.00	1.13
<i>Euphorbia virosa</i>	Euphorbiaceae	ebs	H	N	159.80	0.00

表 1(续) Table 1 (continued)

Species	Family	Growth form	Emission potential		Measured emissions ($\mu\text{g C g}^{-1} \text{h}^{-1}$)	
			Isoprene	Terpene	Isoprene	Terpene
<i>Hevea brasiliensis</i>	Euphorbiaceae	dbt	H	N	0.00	0.00
<i>Mallotus paniculatus</i>	Euphorbiaceae	dbt	L	M	0.25	0.14
<i>Ricinus communis</i>	Euphorbiaceae	ebt	N	N	0.00	-
<i>Maackia amurensis</i>	Fabaceae	dbt	H	N	135.64	0.00
<i>Castanopsis orthacantha</i>	Fagaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Lithocarpus xylocarpus</i>	Fagaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Quercus mongolicus</i>	Fagaceae	dbt	H	N	347.86	0.00
<i>Cratogeomys cochinchinensis</i>	Hypericaceae	dbt	H	N	18.41	0.00
<i>Garcinia cowa</i>	Hypericaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>G. xanthochymus</i>	Hypericaceae	ebt	M	N	2.96	0.00
<i>Illicium micranthum</i>	Illiciaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Melia toosenden</i>	Meliaceae	dbt	N	N	0.00	0.00
<i>Adenanthura pavonina</i>	Mimosaceae	dbt	M	N	5.21	0.00
<i>Albizia lucidior</i>	Mimosaceae	dbt	H	N	26.78	0.00
<i>Broussonetia papyrifera</i>	Moraceae	ebt	M	N	6.16	0.00
<i>Ficus fistulosa</i>	Moraceae	ebt	H	M	207.00	0.72
<i>F. hispida</i>	Moraceae	ebt	H	N	0.00	0.00
<i>F. langkokensis</i>	Moraceae	ebt	H	N	29.66	0.00
<i>Myristica yunnanensis</i>	Myristicaceae	ebt	H	N	37.77	0.00
<i>Milletia leptobotrya</i>	Papilionaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>M. pulchra</i>	Papilionaceae	dbt	H	N	20.80	0.00
<i>Larix olgensis</i>	Pinaceae	dnt	N	M	0.00	3.80
<i>Picea jezoensis</i>	Pinaceae	ent	M	H	7.24	5.17
<i>P. koreana</i>	Pinaceae	ent	M	H	0.00	0.30
<i>Pinus armandi</i>	Pinaceae	ent	N	H	0.00	0.39
<i>P. koraiensis</i>	Pinaceae	ent	N	H	0.00	0.26
<i>P. yunnanensis</i>	Pinaceae	ent	N	H	0.00	0.17
<i>Podocarpus imbricatus</i>	Podocarpaceae	ent	N	N	0.00	0.00
<i>P. macrophylla</i>	Podocarpaceae	ent	N	N	0.00	0.00
<i>Dichotomanthus tristanaecarpa</i>	Rosaceae	ebs	N	N	0.00	0.00
<i>Spiraea japonica</i>	Rosaceae	dbt	N	H	0.00	5.28
<i>Populus koreana</i>	Salicaceae	dbt	H	L	63.12	-
<i>Salix matsudana</i>	Salicaceae	dbt	H	L	63.12	-
<i>S. viminalis</i>	Salicaceae	dbt	H	N	136.50	0.00
<i>Theobroma cacao</i>	Sterculiaceae	ebt	N	N	0.00	-
<i>Symplocos dryophila</i>	Symplocaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Anneslea fragrans</i>	Theaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Schima wallichii</i>	Theaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Microcos nervosa</i>	Tiliaceae	ebt	H	N	32.61	0.00
<i>Celtis tetrandra</i>	Ulmaceae	ebt	N	N	0.00	0.00
<i>Trema orientalis</i>	Ulmaceae	ebt	N	N	0.00	0.00

ebt, evergreen broadleaf tree; ebs, evergreen broadleaf shrub; ent, evergreen needle leaf tree; dbt, deciduous broadleaf tree; dbs, deciduous broadleaf shrub; dnt, deciduous needle leaf tree; H, high emission potential; M, middle emission potential; L, low emission potential; N, no emission detected.

2.2 不同植物类群释放 VOC 的种类及释放量

从表 1 的结果可以看出,虽然不同地区不同的植物种类释放 VOC 的种类及数量不同,但 VOC 的释放特性与植物所属的类群有很密切的相关性。从属的水平上看,马鞍树属(*Maackia*)、栎属、羊蹄甲属(*Bauhinia*)、榕属(*Ficus*)、*Populus* 和 *Salix* 等属中的大部分种类具有释放异戊二烯的能力,而且大多数种类都是强释放者(释放通量 $> 10 \mu\text{g C g}^{-1} \text{h}^{-1}$);而槭属(*Acer*)、桦属(*Betula*)、落叶松属(*Larix*)、云杉属(*Picea*)和松属(*Pinus*)等属多为萜烯类化合物释放者。从科的水平上看,漆树科(*Anacardiaceae*) 3/5 (释放种数/测定种数,下同)、棕榈科(*Arecaceae*) 2/2、禾本科(*Gramineae*) 5/5、含羞草科(*Mimosaceae*) 4/

6、桑科(*Moraceae*) 7/11 和杨柳科(*Salicaceae*) 5/5 等科中多数种属为异戊二烯释放者,桦木科(*Betula*) 3/3 和松科(*Pinaceae*) 5/8 中的种类多释放其他萜烯类化合物。从以上分析可以看出,释放异戊二烯的类群多为在生态系统演替早期占优势的类群,演替后期的优势植物类群多为萜烯类化合物的释放者。植物除了释放异戊二烯和萜烯类化合物外,在组织和器官受到物理损伤后,多数植物能够释放出一些储藏性 VOC(SVOC),在所测定的 255 种植物中,有 210 种具有这类储藏性 VOC,其中 1/3 具有很高的释放量。

2.3 不同植被类型的 VOC 通量

表2给出了热带、亚热带和温带生态系统中不

表 2 中国不同气候带植物群落的 VOC 通量
Table 2 Site mean of potential VOC fluxes of plant communities in different climate zone of China

Site	Plant community	Successional stage ¹⁾	Latitude	Longitude	Altitude (m)	TILBM ²⁾ (g·m ⁻²)	Isoprene (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	OVOC ³⁾ (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)
Xishuang-banna (Tropic)	Early primary forest	V	21°5'07"N	101°6'23"E	565	427.20	0.112 3	0.009 6
	Moss forest	VI	21°7'43"N	101°2'14"E	845	377.52	0.134 3	0.046 5
	Depterocarpus forest	V	21°5'11"N	101°6'08"E	820	359.40	0.141 6	0.011 5
	Pometia forest	V	21°7'40"N	101°2'01"E	805	336.73	0.158 0	0.009 4
	Riverside forest	II	21°5'55"N	101°5'17"E	575	180.85	0.163 9	0.007 6
	Secondary Trema forest	II	21°7'57"N	101°6'17"E	915	199.61	0.312 4	0.008 0
	Mid-secondary forest	IV	21°5'11"N	101°6'08"E	590	350.43	0.455 1	0.032 0
	Early-secondary forest	III	21°5'21"N	101°6'14"E	570	340.18	0.584 3	0.006 9
Ailao Mt. (Subt.)	Sphagnum bog	VIII	24°2'49"N	101°1'32"E	2460	423.63	0.061 5	0.000 3
	Mature Lithocarpus forest	V	24°1'41"N	101°1'50"E	2528	514.62	0.089 2	0.020 3
	Heath forest	VI	24°1'41"N	101°1'50"E	2640	940.59	0.141 0	0.006 1
	Old Lithocarpus forest	VII	24°2'14"N	101°0'37"E	2408	444.82	0.145 0	0.003 1
	Moss-Camellia forest	VI	24°1'41"N	101°1'50"E	2490	404.34	0.158 9	0.004 1
	Castanopsis forest	IV	24°2'53"N	101°2'27"E	2515	658.01	0.175 0	0.010 0
	Young Lithocarpus forest	V	24°2'34"N	101°1'39"E	2442	348.57	0.208 6	0.017 8
	Young Populus forest	III	24°2'43"N	101°1'31"E	2395	404.93	0.308 3	0.006 0
	Old Populus forest	II	24°2'32"N	101°1'38"E	2415	430.18	1.126 5	0.002 6
Changbai Mt. (Tem.)	Birch-larch forest	II	42°3'37"N	128°3'52"E	1863	593.50	0.039 7	0.071 7
	Birch forest	III	42°3'16"N	128°3'53"E	1980	306.28	0.078 1	0.019 0
	Larch bog forest	VII	42°8'24"N	128°6'28"E	1200	476.76	0.089 6	0.032 3
	Grassland	I	42°4'12"N	128°6'21"E	705	127.15	0.172 0	0.028 8
	Sphagnum bog	VIII	42°1'50"N	128°5'44"E	1640	643.71	0.262 2	0.025 9
	Birch-spruce forest	IV	42°3'59"N	128°3'54"E	1700	937.55	0.361 1	0.235 5
	Pine-spruce forest	IV	43°8'34"N	128°7'55"E	745	2044.92	0.566 8	0.389 6
	Larch-pine forest	V	42°1'16"N	128°3'16"E	1000	1319.64	0.611 4	0.146 4
	Spruce-larch forest	VI	42°4'22"N	128°3'43"E	1620	1556.48	0.612 4	0.464 0
	Pine-fir forest	V	42°3'32"N	128°0'39"E	1190	709.49	0.616 1	0.054 5
	Birch-poplar forest	III	42°4'16"N	128°5'58"E	700	362.50	0.795 2	0.210 7
	Spruce-fir forest	IV	42°1'37"N	128°3'51"E	900	1624.83	0.845 5	0.568 9
	Oak-pine forest	IV	42°4'16"N	128°5'58"E	705	992.94	2.741 2	0.028 0

1) the successional stages are same was the Figs. 1 - 3; 2) site mean of total leaf biomass; 3) other.

同植物群落的异戊二烯和其它 VOC(OVOC) 的通量, 以及储藏性 VOC(SVOC) 的含量。演替序列 1 - 8 分别代表生态系统演替由初期到末期的不同阶段。结果表明, 尽管不同气候带由于植物种类和环境条件的不同, 同一演替序列的不同群落类型的 VOC 通量在绝对数值上差别较大, 但在同一气候带内处于演替序列初期(I, II) 和后期(V, VI, VII) 末期(VIII) 的植物群落, 其异戊二烯的通量较低, 而处于演替早期(III) 和中期(IV) 先锋林和次生林阶段的群落, 其异戊二烯通量明显较高。VOC 通量最高的植物群落西双版纳热带生态系统为以先锋树种窄序崖豆藤(*Millettia leptobotrya*) 为优势的热带次生林早期, 在哀牢山亚热带生态系统中为次生小叶杨(*Populus bonati*) 成熟林, 在长白山温带生态系统中为次生性的蒙古栎-阔叶红松(*Quercus mongolicus*-*Pinus koraiensis*) 群落, 分别为 (0.584 3 ±0.256 2), (1.126 9 ±0.463 2) 和 (2.741 2 ±0.823 1) mg·m⁻²·h⁻¹; OVOC

的通量在数值上很低, 但在演替后期的植物群落中相对较高; SVOC 的含量则没有显著的规律。

2.4 植物群落 VOC 通量的生态系统演替格局

演替是生态系统的重要特征之一, 是生态系统的结构和功能随着时间的改变而发生的改变。生态系统的演替是定向、有序的, 是一个生态系统类型(或阶段) 代替另一个生态系统类型(或阶段) 的过程, 在陆地生态系统中表现为一种植物群落取代另一种植物群落的过程, 最终建立一种稳定的顶极状态^[24]。如果在足够长的演替时间内没有任何干扰, 陆地生态系统的演替将始于种类和结构较简单的草地阶段, 最后归结于种类和结构较为简单的泥炭沼泽^[29]。将表 2 中同一气候带的不同植物群落按照生态系统演替序列进行综合排列后得到图 1~3 的 VOC 通量变化趋势图, 结果显示不论是在热带、亚热带还是在温带陆地生态系统中, 植物群落的异戊二烯通量在生态系统演替早期随着演替的发展而升

高,在先锋木本植物群落阶段达到最高,然后又随着演替的深入而下降,在热带生态系统中,最高值出现在先锋林阶段,次生林也保持着较高的异戊二烯通量;在亚热带生态系统中则是次生林最高,先锋林次之;而在温带生态系统中,次生林阶段的异戊二烯通量则远远高于其他各个阶段。OVOC 则随着演替的发展而具有上升的趋势。这一 VOC 的释放格局与 Klinger 等^[8]在非洲以及 Martin 和 Guenther^[7]在北美的对不同生态系统的不同演替阶段植物 VOC 通量变化的研究结果相一致。

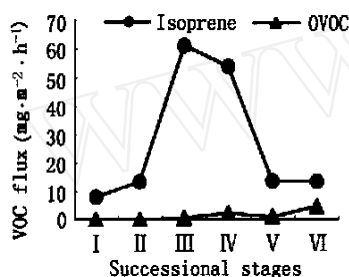


图1. 西双版纳热带生态系统不同演替阶段挥发性有机化合物(VOC)通量的变化。

Fig.1. The volatile organic compound (VOC) flux of different successional stages in Xishuangbanna tropical ecosystem.

OVOC, other VOC.

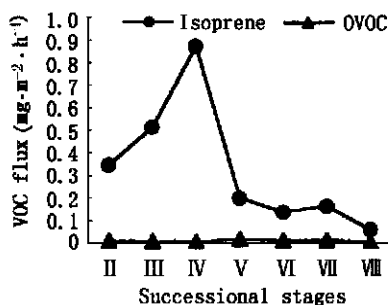


图2. 哀牢山亚热带生态系统不同演替阶段挥发性有机化合物(VOC)通量的变化。

Fig.2. The volatile organic compound (VOC) flux of different successional stages in Ailao Mt. subtropical ecosystems.

OVOC, other VOC.

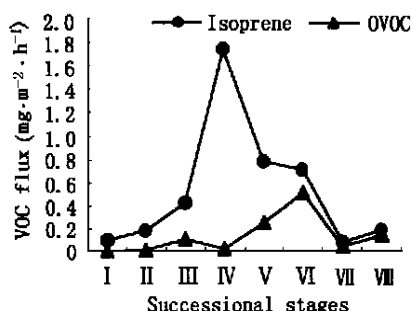


图3. 长白山温带生态系统不同演替阶段挥发性有机化合物(VOC)通量的变化。

Fig.3. The volatile organic compound (VOC) flux of different successional stages in Changbai Mt. temperate ecosystems.

OVOC, other VOC.

3 讨论

植物释放 VOC 的种类和数量与植物的分类系统有一定的相关性^[21],根据这一相关性, Guenther 等^[3]建立了一个全球 VOC 的释放模型,对全球尺度上的 VOC 通量作了估算。然而,这一模型是建立在以温带植物为主进行的物种水平上 VOC 通量的测定基础上的,对于种类组成较温带丰富得多的热带和亚热带地区,已测定过 VOC 通量的植物种类仅占所有种类中的很小一部分,运用这一模型需要进行大量的物种水平上的通量测定。如果 VOC 的释放与生态系统的演替相关联,那么沿着生态系统的演替序列就能找出 VOC 释放的系统性规律,利用这一规律建立以生态系统的演替为基础的 VOC 释放模型,就能够取代烦琐的以种类测定为基础的 VOC 释放模型^[8]。

对于植物释放 VOC 的生物学和生态学机制目前还不完全清楚,有的认为植物释放异戊二烯是为了缓解热胁迫^[4],也有的认为是为了植物 VOC 能抵御昆虫对植物的啃食^[5]。Langenheim^[6]研究认为植物排放的异戊二烯对于植物本身的反馈作用在于在大气化学过程中与土壤硝化作用中释放的一氧化氮(NO)反应,产生植物能够吸收利用的 NO₂ 等氮化合物。根据本研究及其他在生态系统尺度上的研究显示的 VOC 释放格局,可以假定生态系统演替早期和中期的先锋群落和次生群落阶段 VOC 通量的加大是为了从空气中摄取气态氮以满足生态系统演替早期阶段对氮素的需求,因为不论在热带、亚热带,还是在温带,生态系统演替的早期和中期,由于先锋和次生成分生长迅速,氮都是植物群落发展的限制因子;而在演替后期和末期,由于土壤和生物体内累积了大量的有机质,营养元素的循环利用降低了限制因子的作用^[30,31]。这一假设还需要在更广泛的地区和生态系统中对 VOC 释放机制和通量进行研究来加以证实。

致谢: 感谢长白山森林生态站代力民研究员、邹春静、王晓春、杨丽楹、许浩和刘庆伟等同志;西双版纳植物园王洪高级工程师、夏永梅副研究员、唐建维副研究员、张光明和哀牢山生态站杨国平在野外工作和物种鉴定方面给予的大力帮助,王永峰硕士生帮助查对植物名称;感谢 NCAR James Greenberg 博士协助分析气体样品。

参考文献:

[1] Brasseur G, Atlas E, Erickson D, Fried A, Greenberg J,

- Guenther A, Harley P, Holland E, Klinger L, Ridley B, Tyndall G. Trace gas exchanges and biogeochemical cycles. Brasseur G, Orlando J, Tyndall G. Atmospheric Chemistry and Global Change. Oxford: Oxford University Press, 1999. 159 - 208.
- [2] Singh H B, Zimmerman P R. Atmospheric distribution and sources of nonmethane hydrocarbons. Nriagu J O. Gaseous Pollutants: Characterization and Cycling. New York: John Wiley and Sons, 1992.
- [3] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, Fall R, Geron C, Graedel T, Harley P, Klinger L, Lerdau M, McKay W A, Pierce T, Scholes B, Steinbrecher R, Tallamraju R, Taylor J, Zimmerman P. A global model of natural volatile organic compound emissions. *J Geophys Res*, 1995, **100**:8873 - 8892.
- [4] Sharkey T D, Singsaas E L. Why plants emit isoprene? *Nature*, 1995, **374**:769.
- [5] Paré P W, Tumlinson J H. Plant volatiles as a defense against insect herbivores. *Plant Physiol*, 1999, **121**:325 - 332.
- [6] Langenheim J H. Higher plant terpenoids: A phyto-centric overview of their ecological roles. *J Chem Ecol*, 1994, **20**:1223 - 1280.
- [7] Martin P H, Guenther A. Insights into the dynamics of forest succession and non-methane hydrocarbon trace gas emissions. *J Biogeogr*, 1995, **22**:493 - 499.
- [8] Klinger L, Greenberg J, Guenther A, Tyndall G, Zimmerman P, M' Bangui M, Moutsambot É-M, Kenfack D. Patterns in volatile organic compound emissions along a savanna-rainforest gradient in central Africa. *J Geophys Res*, 1998, **103**:1443 - 1454.
- [9] Fehsenfeld F, Calvert J, Fall R, Goldan P, Guenther A, Hewitt C, Lamb B, Liu S, Trainer M, Westberg H, Zimmerman P. Emissions of volatile organic compounds from vegetation and the implications for atmospheric chemistry. *Global Biogeochem Cycles*, 1992, **6**:389 - 430.
- [10] Liu S, Ridley B. Tropospheric ozone. Brasseur G, Orlando J, Tyndall G. Atmospheric Chemistry and Global Change. Oxford: Oxford University Press, 1999. 465 - 486.
- [11] McKeen S A, Hsieh E-Y, Liu S C. A study of the dependence of rural ozone on ozone precursors in the Eastern United States. *J Geophys Res*, 1991, **96**:15377 - 15394.
- [12] Lin X, Melo O T, Hastie D R, Shepson P B, Niki H, Bottenheim J W. A case study of ozone production in a rural area of central Ontario. *Atmos Environ*, 1992, **26A**:311 - 324.
- [13] Roselle S J, Pierce T E, Schere K L. The sensitivity of regional ozone modeling to biogenic hydrocarbons. *J Geophys Res*, 1991, **96**:7371 - 7394.
- [14] Roselle S J. Effects of biogenic emission uncertainties on regional photochemical modeling of control strategies. *Atmos Environ*, 1994, **28**:1757 - 1772.
- [15] Manning W J, Krupa S M. Experimental methodology for studying the effects of ozone on crops and trees. Lefohn A S. Surface Level Ozone Exposure and Their Effects on Vegetation. Chelsea: Lewis Publishers, 1992. 93 - 156.
- [16] Chappelka A H, Chevone B I. Tree responses to ozone. Lefohn A S. Surface Level Ozone Exposure and Their Effects on Vegetation. Chelsea: Lewis Publishers, 1992. 271 - 324.
- [17] Runeckles M C, Chevone B I. Crop responses to ozone. Lefohn A S. Surface Level Ozone Exposure and Their Effects on Vegetation. Chelsea: Lewis Publishers, 1992. 189 - 270.
- [18] Herstein U, Grunhage L, Jager H-J. Assessment of past, present, and future impacts of ozone and carbon dioxide on crop yields. *Atmos Environ*, 1995, **29**:2031 - 2039.
- [19] Monson R K, Lerdau M T, Sharkey T D, Schimel D S, Fall R. Biological aspects of construction volatile organic compound emission inventories. *Atmos Environ*, 1995, **29**:2989 - 3002.
- [20] Guenther A, Zimmerman P, Wildermuth M. Natural volatile organic compound emissions rate estimates for U. S. woodland landscapes. *Atmos Environ*, 1994, **28**:1197 - 1210.
- [21] Benjamin M T, Sudol M, Bloch L, Winer A M. Low-emitting urban forests: a taxonomic methodology for assigning isoprene and monoterpene emission rates. *Atmos Environ*, 1996, **30**:1437 - 1452.
- [22] Klinger L F, Zimmerman P R, Greenberg J P, Heidt L E, Guenther A B. Carbon trace gas fluxes along a successional gradient in the Hudson Bay lowland. *J Geophys Res*, 1994, **99**:1469 - 1494.
- [23] Margalef R. On certain unifying principles of ecology. *Amer Nat*, 1963, **97**:357 - 374.
- [24] Odum E P. Ecology and Our Endangered Life Support System. Sunderland: Sinauer Assoc. 1993.
- [25] Klinger L F. The myth of the classic hydrosere model of bog succession. *Arct Alp Res*, 1996, **28**:1 - 9.
- [26] Helmig D, Klinger L, Guenther A, Vierling L, Geron C, Zimmerman P. Biogenic volatile organic compound emissions (BVOCs) II. Landscape flux potentials from three continental sites in the U. S. *Chemosphere*, 1999, **38**:2189 - 2204.
- [27] Guenther A, Zimmerman P, Klinger L, Greenberg J, Ennis C, Davis K, Pollock W, Westberg H, Allwine E, Geron C. Estimates of regional natural volatile organic compound fluxes from enclosure and ambient measurements. *J Geophys Res*, 1996, **101**:1345 - 1359.
- [28] Helmig D, Klinger L, Guenther A, Vierling L, Geron C, Zimmerman P. Biogenic volatile organic compound emissions (BVOCs) I. Identifications from three continental sites in the U. S. *Chemosphere*, 1999, **38**:2163 - 2187.
- [29] Klinger L F, Elias S A, Behan-Pelletier V M, Williams N E. The bog climax hypothesis: fossil arthropod and stratigraphic evidence in peat sections from southeast Alaska, USA. *Holarctic Ecology*, 1990, **13**:72 - 80.
- [30] Vitousek P M, Matson P A, van Cleve K. Nitrogen availability and nitrification during succession: primary, secondary, and old-field seres. *Plant Soil*, 1989, **115**:229 - 239.
- [31] Tamm C O. Nitrogen in Terrestrial Ecosystems. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

(责任编辑：崔金钟)