DOI:10.19789/j.1004-9398.2022.05.012
文献引用:吴婷婷,范思铭,边涛,等.苔藓植物在大气污染监测中的最新应用进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2022,43(5):77-86.
WU T T,FAN S M,BIAN T,et al. Application of bryophytes in monitoring air pollution[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2022,43(5):77-86.

苔藓植物在大气污染监测中的最新应用进展*

吴婷婷[1],范思铭[2],边 涛[1],甘雨晨[1],肖洪兴[1],寇 瑾[1**]

(1.东北师范大学生命科学学院,吉林 长春 130024;2.黑龙江省齐齐哈尔生态环境监测中心,黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要:为了更好地阐释苔藓植物在大气污染监测中的应用价值,本文在系统整理了近十年相关文献的基础上,综述了苔藓植物监测大气污染的原理与方法,重点归纳了其监测优势及应用现状.苔藓植物在大气污染监测研究中常用的方法有生态调查法和症状指示法,研究热点主要集中在重金属、大气沉降和中子活化分析等方面,研究区域主要集中在东部沿海、西南及青藏高原地区.在今后的研究中,应加强指示性苔藓物种的筛选,构建并完善标准化监测指标体系,注重宏观与微观相结合的监测技术研发,合理利用苔藓植物资源,以便更好地实现对大气污染状况的监测与评估.

关键词:苔藓植物;大气污染;指示作用;监测;应用
中图分类号:Q948

Application of bryophytes in monitoring air pollution*

WU Tingting[1], FAN Siming[2], BIAN Tao[1], GAN Yuchen[1], XIAO Hongxing[1], KOU Jin[1**]

(1. College of Life Science, Northeast Normal University, Changchun Jilin 130024; 2. Qiqihar Ecological Environment Monitoring Center of Heilongjiang Province, Qiqihar Heilongjiang 161000)

Abstract: In order to explain the application value of bryophytes in air pollution monitoring preferably, this article reviewed the principles and methods of bryophytes in air pollution monitoring on the basis of systematically collecting the relevant literatures in recent ten years, and summarized its monitoring advantages and applications. The common methods of bryophyte monitoring in air pollution include ecological investigation and symptom indication, the research focuses mainly on heavy metals, atmospheric deposition and neutron activation analysis, etc., and the research areas are mainly concentrated in the eastern coast, southwest and Qinghai-Tibet Plateau. In the future, we should strengthen the selection of indicative bryophytes, construct and perfect the standardized monitoring index system, pay attention to the research and development of monitoring technology combining macro and micro, and make rational use of bryophyte resources, so as to better realize the monitoring and evaluation of air pollution.

Keywords: bryophytes; air pollution; indication function; monitoring; application
CLC: Q948

收稿日期:2021-10-19
* 国家自然科学基金项目(42001045,32060051);深圳市南亚热带植物多样性重点实验室开放课题项目(99203030);国家重点研发计划项目(2016YFC0501107)
** 通信作者:kouj398@nenu.edu.cn

0 引 言

当前环境污染问题日益凸显,由于较强的流动式传播和复杂的污染成分,大气污染成为全球共同关注的热点话题,其减防与潜在风险评估迫在眉睫[1-2].传统的大气污染监测以电化学监测法、红外吸收光谱法(远红外遥感监测技术)和计量法为主,这些方法或多或少存在成本高、耗时长、灵活性差和监测范围局限等缺点,不能如实反映地区长期或稳定的大范围污染现状,较难实现对大气污染物质迁移规律、扩散范围及分布空间的高分辨率可视化研究[3-5].生物有机体监测技术利用生物作为污染物监测基质,通过生物个体、种群及群落与环境污染物之间的响应关系,从生物学角度对大气污染物种类及污染程度进行鉴别与评估,减少了连续取样的繁琐,克服了理化检测的局限性及降低了监测设备维护的高额成本,目前已形成多种完善的监测技术[6-9].苔藓植物叶面占表面积比例大,生理代谢特征独特,阳离子交换位点多,对环境污染物的抗性及吸附力强,其敏感性特征远超绝大多数高等植物[7-8,10],且取材容易,调查与检测方法简便,能够客观揭示大气污染物质的迁移规律及时空变化特征[11-13].长期以来,苔藓植物一直被用作大气污染监测的典型生物学指标[14-15],是世界环境污染及全球变化研究领域公认的污染监测指示物.

1 监测原理与特点

苔藓植物是从水生向陆生过渡的自养型高等植物类群,其营养物质主要成分来源包括基质、雨水、露水以及与大气尘埃撞击产生的沉积物[16-17].除少数属、种外,叶片多为单层细胞,体表无蜡质角质层被覆,可直接吸收外界环境中的离子而无过滤作用,极易对大气环境中的污染因子产生反应,并通过特定的受害病症反映污染物质的类型和大概浓度[17-19].苔藓植物能与环境污染因子发生生物学效应,达到大气污染监测的目的.苔藓植物长期生长在受污染的环境中,其生理及植物体功能性状特征将表现出明显的受损症状,如苔藓植物体内叶绿素的破坏,使叶片细胞破裂,有时甚至会导致植物体严重衰退或消失[20].除此之外,受大气污染物组分变化的影响,苔藓植物的光合作用、生理代谢途径、次生代谢产物以及基因稳定性也将有所改变,出现一系列生物学性状或指示参数的变化,如:死亡率、有性生殖抑制、植物组织可见损伤、叶细胞大小或数量、叶绿素和类胡萝卜素浓度等(表1)[21-25].苔藓植物监测大气污染,以生物学表现为基础,通过苔藓植物伤害症状、植物体内污染物含量和受害种类等不同反应症状,监测多种干扰效应,进而对大气污染状况做出相应判断.

苔藓植物对大气污染的指示功能具备可连续性监测、综合性反映和高灵敏性等优势.长期暴露于污染环境中的苔藓植物,受污染物质胁迫,其植物体形态特征、生长状态及植物群落组成和多样性等方面表现出明显的症状反应,所得的监测结果直观可靠,能够较为及时而准确地指示环境污染状况.苔藓植物生长周期长,分化程度低,细胞长势旺盛,茎、枝的先端生长点通常在休眠或死亡后,刺激苔藓植物体下部具有持续或周期性分裂能力的细胞

表1 不同苔藓植物在大气污染监测中的表现[21-25]

苔藓物种(拉丁名)	污染物类型(举例)	症状
真藓(*Bryum argenteum*)、角齿藓(*Ceretodon Purpud*)、短枝高领藓(*Glyphomitrium humillimum*)、垫丛紫萼藓(*Grimmia pulvinata*)、灰藓(*Hypnum cupressiforme*)、日本灰藓(*H.yokohamae var.kusatsuense*)、墙藓(*Tortula muralis*)等	含硫化合物(SO_2、H_2S、SO_3、H_2SO_4和SO_4^{2-})	叶绿素从叶尖开始向下分解直至消失、细胞质壁分离、组织细胞坏死、茎叶体表面呈褐色斑点
湿地匐灯藓(*Plagiomnium acutum*)	含氮化合物(NO、NH_3、NO_2、HNO_3和NO_3^-)	茎叶体表面出现枯斑、组织细胞表面发生黄萎或黑斑病、或出现发育异常
小皱蒴藓(*Aulacomium androgynum*)、黄丝瓜藓(*Pohlia nutans*)以及木灵藓科(Orthotrichaceae)的某些种	碳的氧化物(CO、CO_2),碳氢化合物(C_1~C_5化合物),碳氢氧化合物(醛、酮、过氧乙酰硝酸酯),氟化物和臭氧	细胞发生质壁分离、呼吸率减弱、胡萝卜素增加、叶绿体轻微破坏、叶尖变为褐色或黑褐色、植物呈现缺绿斑点
曲尾藓(*Dicranum scopariunm*)、密叶绢藓(*Entodon compressus*)、塔藓(*Hyloconium splendens*)、匍匐猫尾藓(*Isothecium stoloniferum*)、泽藓(*Philonotis fontana*)、赤茎藓(*Pleurozium shreberi*)、金发藓(*Polytrichum commume*)、桧叶金发藓(*P.juniperinum*)、湿地匐灯藓(*P.acutum*)、白齿泥炭藓(*Sphagnum rigensohnii*)、长叶鳞叶藓(*Taxiphyllum taxirameum*)等	颗粒物(重金属、多环芳烃、H_2SO_4、SO_4^{2-}和NO_3^-)	细胞核分裂出现异常、孢子不能正常萌发或长成短小、甚至畸形原丝体,细胞内叶绿体减少,植物生长畸形

群继续发育,使其终年常青,从而提供有代表性、应用性和季节性的指示与预报[9,22,26].此外,苔藓植物独特的生理适应机制,使其能在高温、高寒、干旱和光线暗淡等其他陆生植物难以生存的极端环境下生存,是典型的先锋植物,也是植物群落演替过程中的先驱植物,分布广泛、种类繁多,适用于多种地理单元的大气污染情况预测,可推荐作为全球大气污染监测与验证的理想材料[18,27-28].苔藓植物兼具观赏性和经济价值,较易用于短期人工栽培和繁殖,便于管理,可实现低成本监测大气污染状况,无需购置及维护仪器.此外,苔藓植物解剖结构简单,拟茎叶体内组织分化不明显,无维管束构造,疏导作用不强,以单细胞或单列细胞的假根固着为主要生存方式,可直接吸收空气中的营养元素及污染物质,富集作用明显[29-30].据报道,在污染程度相近的情况下,苔藓植物每个细胞所受污染的平均浓度要高于其他高等植物,对大气中的硫氧化合物、氮氧化合物等气态污染物以及重金属等均有较强敏感性[31-32].其吸收的污染物质可以通过超热中子活化法(epithermal neutron activation analysis, ENAA)、原子吸收光谱法(atomic absorption spectrometry, AAS)、氢化物原子荧光光谱法(hydride generation-atomic fluorescence spectrometry, HG-AFS)等常规方法进行检测,检测方法直接、简便,一定程度上避免了常规监测在短期内测定所带来的数据波动.

2 污染监测影响因素及方法

大气污染是多种污染物质长期积累与协同作用的结果,具有一定的持久性与复杂性.由于苔藓植物对环境变化具有较强的敏感性,因此,其对大气污染监测功能的发挥可能会受到诸多因素的制约.在监测过程中,不仅需要了解污染物质对苔藓植物体内相关元素含量的影响,还需要清楚苔藓植物体表面结构特征、假根附着基质状况,甚至茎尖长度、植物体表有无附属物等情况,这些都将影响苔藓植物捕获大气中污染物质的能力.本文参考已有研究将主要影响因素归纳为苔藓植物的种类、生长基质和生境状况与大气污染物4个方面.

2.1 苔藓植物种类

不同种类苔藓植物对污染物质的耐受性、吸收能力及敏感程度均不同,从垫状、层状、交织生长、叶状体苔类、到附生种类的敏感度渐次递增,如树干附生的木灵藓科(Orthotrichaceae)对大气污染的反应通常较成片呈垫状生长的金发藓科(Polytrichaceae)及成层生长的塔藓科(Hylocomiaceae)更为敏感[28,33-35].受苔藓植物形态、叶面积、叶片数量和气孔开放度等因素影响,苔藓植物的表面积越大,对颗粒污染物的捕集能力越强;持水能力越强,对大气污染物的吸附能力越强;水分含量越高,对大气污染物的反应敏感性越高[36].选择苔藓植物材料时,还要注意苔藓材料的可获取性及个体大小,以确保监测样品的充足性、空间分布与密度变化的可观测性[37].

2.2 苔藓植物的生长基质

苔藓植物假根所固着的生长基质,会影响苔藓植物的生理特性及其对污染物质的耐受性和吸收能力.不同着生状态的苔藓植物对大气污染的敏感性不同,表现趋势由弱到强分别为石附生藓类、土附生藓类、树附生藓类[38-39];不同生长基质的同一苔藓植物,对大气污染物的耐受和吸收能力也可能存在差异.因此,为了减少和避免由于环境因子干扰而带来的监测数据分析困难,树附生藓类最适宜用来评估大气环境品质状况.

2.3 苔藓植物的生境状况

苔藓植物对污染物的抗性及吸收能力,除受自身条件特征影响外,受生境条件影响也较大,如:冠层覆盖度、气象条件、植被类型、污染物含量和接触时间等[14,40].一般而言,暴露在大气污染环境中的时间越长,苔藓植物体内污染物含量越高[25],湿度越大,苔藓植物叶绿素损伤就越严重,暖湿地区的苔藓植物较寒冷干燥地区的苔藓植物的污染耐受能力低[41].侯丹莉等[42]的研究表明,苔藓植物对污染物的吸收累积能力在自身能够承受范围内时,与大气污染物的含量及接触时间成正比.因此,在对苔藓植物体内元素含量进行测定分析时,为降低因暴露时间造成的误差,应尽量采集其顶端部分组织.

2.4 大气污染物

大气污染物不同,苔藓植物的敏感度也会存在差异,如:卷叶藓(*Ulota crispa*)对SO_2敏感,却对氟化物有抗性;黄丝瓜藓(*Pohlia nutans*)、小皱蒴藓(*Aulacomium androgynum*)对大气中的氟化物有较强的抵抗能力;木灵藓科的某些种对大气中的氟化物则比较敏感[27];密叶绢藓(*Entodon compressus*)与细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*)随着大气污染程度的增加,过氧化氢酶活性会呈现出不同的变化格局等[24].

3 污染监测方法

目前,已有较多苔藓植物应用于环境污染监测中的案例,利用就地生长的苔藓,监测大范围、长时间序列的污染状况.同时,在特定区域范围内,还可以在一定时间内,将在某一标准环境下生长的苔藓植物整体或部分移植到污染环境中进行监测,且这种监测方式相对稳定,不易受自然环境的干扰[43].通过对大气污染监测中应用苔藓植物的案例分析,现有污染监测方法主要包括生态调查法、症状指示法、生理生化指示法、植物体污染物含量监测法和生物学实验法5种.

3.1 生态调查法

生态调查法指在不同污染程度环境中,调查苔藓植物种类及生长型,划分不同程度污染地带,达到清晰显示大气污染源及严重污染地区的目的.多力坤·买买提玉素甫等[44]通过对不同城市景观类型的树附生苔藓植物种类调查,将大气污染程度根据大气净度指数法(index of atomospheric purity,IAP)划分为4级,表明苔藓植物的分布可反映大气清洁程度,空气污染程度越低,附着的苔藓植物多样性越高,反之亦然;李登科和高彩华[45]对上海地区苔藓与大气污染相关性研究结论与上述文献基本一致,表明苔藓植物的衰退明显受大气污染的影响;孙秋雨[46]以苔藓植物种类、分布及生长情况为指标,对包头市重工业区大气环境进行监测,表明当SO_2年平均体积分数达到1.7×10^{-8} mL/m^{3}时,苔藓植物不能够继续生存.

3.2 症状指示法

症状指示法指借助苔藓植物的敏感性及耐受性特征,实现对大气污染状况的分析.在存在污染隐患的地区,培养敏感类植物或移植其他地区未污染苔藓,对其受害症状及生长状态进行观察、记录,达到监测污染的目的.通过不同植物群落的差异性反应,对大气污染程度进行评估.刘润等[47]对贵州省织金洞苔藓植物群落进行了调查,表明苔藓植物群落特征能够很好地反映岩溶洞穴内Hg污染的变化趋势,并指出蛇苔(*Conocephalum conicum*)受基质Hg污染影响较大.

3.3 生理生化指示法

生理生化指示法是根据苔藓植物个别种类对污染物质的特异性反应,通过实验观察苔藓植物个体行为、生理生化变化及发育情况,实现对大气污染状况的监测.当大气污染达到一定程度时,植物体的生理生化指标会产生响应,如:叶绿素含量、光合强度和酶活性等.黄钟霆等[24]同期监测了湖南省某市5个点位2个时段的自然暴露的湿地匍灯藓(*Plagiomnium acutum*)的叶绿素、丙二醛、脯氨酸水平与大气中SO_2、NO_2、CO和$PM_{2.5}$污染实况,并进行相关性分析,证实湿地匍灯藓中表征细胞质内渗透调节物质水平脯氨酸可实现对$PM_{2.5}$污染的短期追溯性监测;张银龙等[27]通过对南京市6个不同大气污染梯度下密叶绢藓(*Entodon compressus*)与细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*)的一些生理生化指标的变化,表明大气污染程度与苔藓植物体内的重金属和硫元素含量存在相关性,与苔藓植物体内的总叶绿素含量以及细胞质膜透性呈正相关.

3.4 植物体污染物含量监测法

植物体污染物含量监测法是借助苔藓植物对大气污染物质的吸附作用,通过对积累在植物体内污染物的含量检测与分析,评估大气污染物种类和质量浓度.Manning和Feder[16]研究表明苔藓植物体内重金属元素含量与大气中重金属质量浓度及其沉降速率之间存在显著相关性;张元勋等[48]为探讨苔藓植物监测大气污染的机制,利用同步辐射X射线荧光分析法研究了苔藓植物的叶片及茎干金属离子吸附情况,表明吸附后金属离子分布不均匀的特点,植物微结构和生长发育严重受损,植物对K^+、Ca^{2+}等微量营养元素的正常吸收受到抑制;王亚南等[49]引入多藓种监测和参考苔藓标样技术,利用电感耦合等离子体-原子发射光谱(inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry,ICP-AES)及电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry,ICP-MS)等技术,对洪泽湖地区细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*)中的重金属含量进行分析,确定了适合该地区重金属监测的种间校准因子.

3.5 生物学实验法

生物学实验法是利用分子生物学技术,最大化反映生物多样性及基因型多样性,用以监测大气环境污染对生物种群变化的影响.常用方法包括DNA分子标记法、微核测定法、非预定DNA合成法和姐妹染色体交换率等.陆亚芳[39]对不同大气污染梯度下密叶绢藓(*Entodon compressus*)与细叶小羽藓(*Haplocladium microphyllum*)进行了DNA、RNA含量及水解酶活性测定,由方差分析得知大气污染程度对2种藓类DNA、RNA含量及DNase、RNase活性

均有显著影响,达到 1% 生物显著水平.此外,此方法也被广泛地应用于对环境中存在的致癌、致突变化学物质的检测.

为了提高监测的准确性,更好地解释苔藓植物对大气污染的指示作用,可将多种监测方法综合使用.Xiao 等[50]通过稳定同位素含量研究,证实苔藓植物中的 S 和 N 同位素比值与当地煤中的 $\delta^{34}S$ 和湿沉降 NH_4-N 呈显著线性相关,并表明当地的燃煤及动物尸体腐烂所产生的 NH_3 是大气中 S 和 N 的主要来源;孙守琴[21]通过生态指示方法揭示了苔藓植物生态特性与大气污染物质的相关性,利用化学定量分析法比较了不同种类苔藓植物中的重金属含量,利用苔袋生物监测法揭示了监测区域大气污染物的干湿沉降规律和时空分布.

4　应用进展

4.1　研究热点关键词

本文围绕苔藓植物监测或指示大气污染的主题,以 web of science 核心合集数据库作为数据源,通过高级检索,将检索词 air/atmosphere(空气/大气)、instruct(指示)、monitor(监测)、apply/application(应用)、bryophyta(苔藓)和 moss(藓类)添加到检索式中,导出 491 条相关文献题录.利用 Bibexcel 与 Pajek 文献计量软件,绘制出频数 > 5 次的关键词共现图(图 1).显示苔藓植物在大气环境中的研究主要集中在重金属、生物监测及大气污染等方面,苔藓植物在大气污染监测中的研究热点主要集中在重金属、大气沉降、中子活化分析、微量元素和生物富集因子赫尔环境磁学等方面.目前,大多数学者仍倾向于苔藓植物对大气污染、重金属以及气候变化的监测与指示作用的研究.

4.2　研究现状

与国外相比,我国有关苔藓植物在大气污染监测中的应用研究还是相对滞后的.如藓袋法[51-52]是一种通过测定长期暴露于污染环境中藓袋内植物体富集污染物含量的方便灵活、准确高效的监测方法,其监测技术单一,理化监测仍需要依托精密仪器,成本消耗大,不利于持续性监测,且应用体系尚不成熟.遥感监测中的环境因素,如云、雾和雪等,会对影像及分辨率造成很大影响,对小尺度范围监测存在局限;生态学调查法常关注苔藓植物生长情况、分布及可见的受害症状[44-46],多用以指示污染趋势,对苔藓植物的体内观测及研究还不充分.为此,本文补充检索了截至 2021 年 1 月中国知网(CNKI)

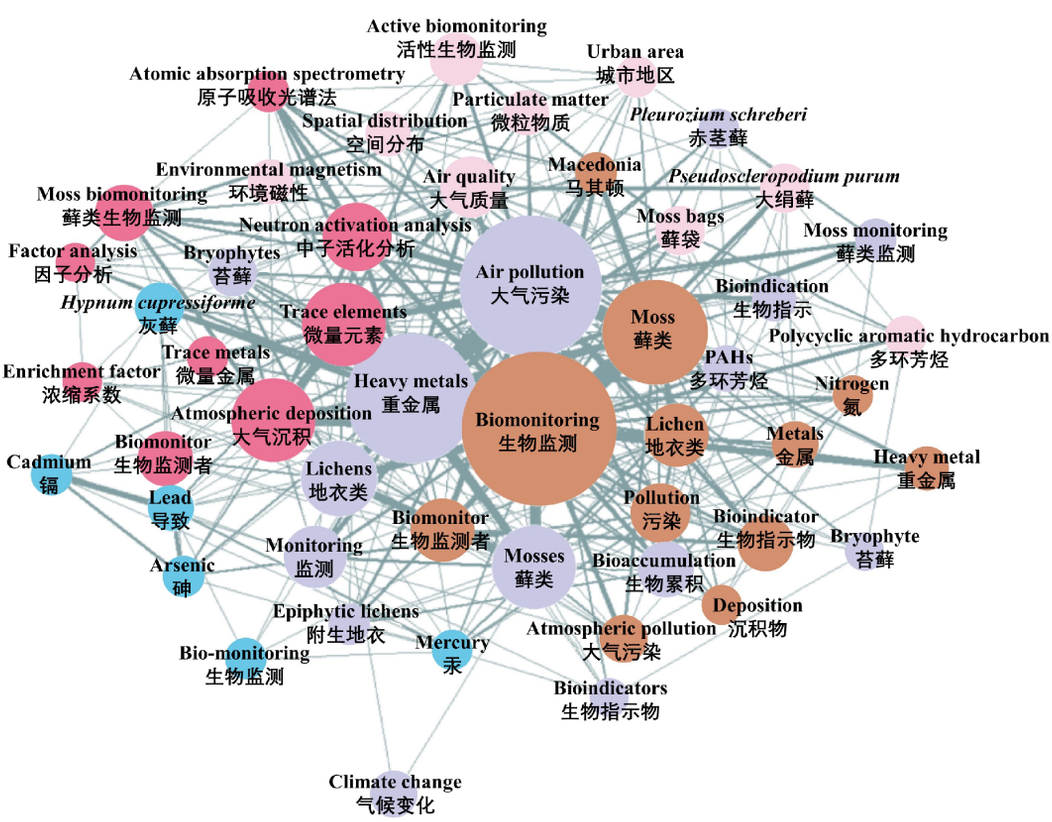


图 1　关键词共现

的相关研究题录173条.发文量对时间变化曲线如图2所示.整体来看,苔藓植物在大气污染监测过程中的应用研究数目在逐年增加,但实际应用案例并不多,且标准化水平较低,尚未进入系统化研究阶段.我国对苔藓植物大气污染监测功能的研究起步较晚,且进展缓慢,在20世纪后期以后,相关研究逐渐展开,并提出了一些较为实用的技术和方法[45].如:2005年,陆亚芳[39]通过DNA分子标记技术、微核测定技术,分析了污染物在苔藓植物体内吸收与转化的机制;2019年,王亚南等[49]提出以遥感资料为基础,生物监测为主,理化监测为辅的综合监测技术应用;张元勋等[48]采用X射线荧光光谱法测定生物探针中的元素含量,并采用正矩阵因子分解(positive matrix facforization,PMF)受体建模方法进行源识别.我国的研究专家还较多关注物种多样性的探索,目前,对于苔藓植物的生态功能的研究仍处于摸索阶段,主要集中在苔藓植物监测无机污染物和污染面积程度较小的有机污染物,苔藓植物伤害机制和生理生化等方面的毒理研究[53-54].

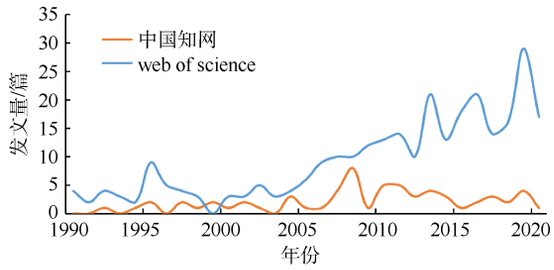
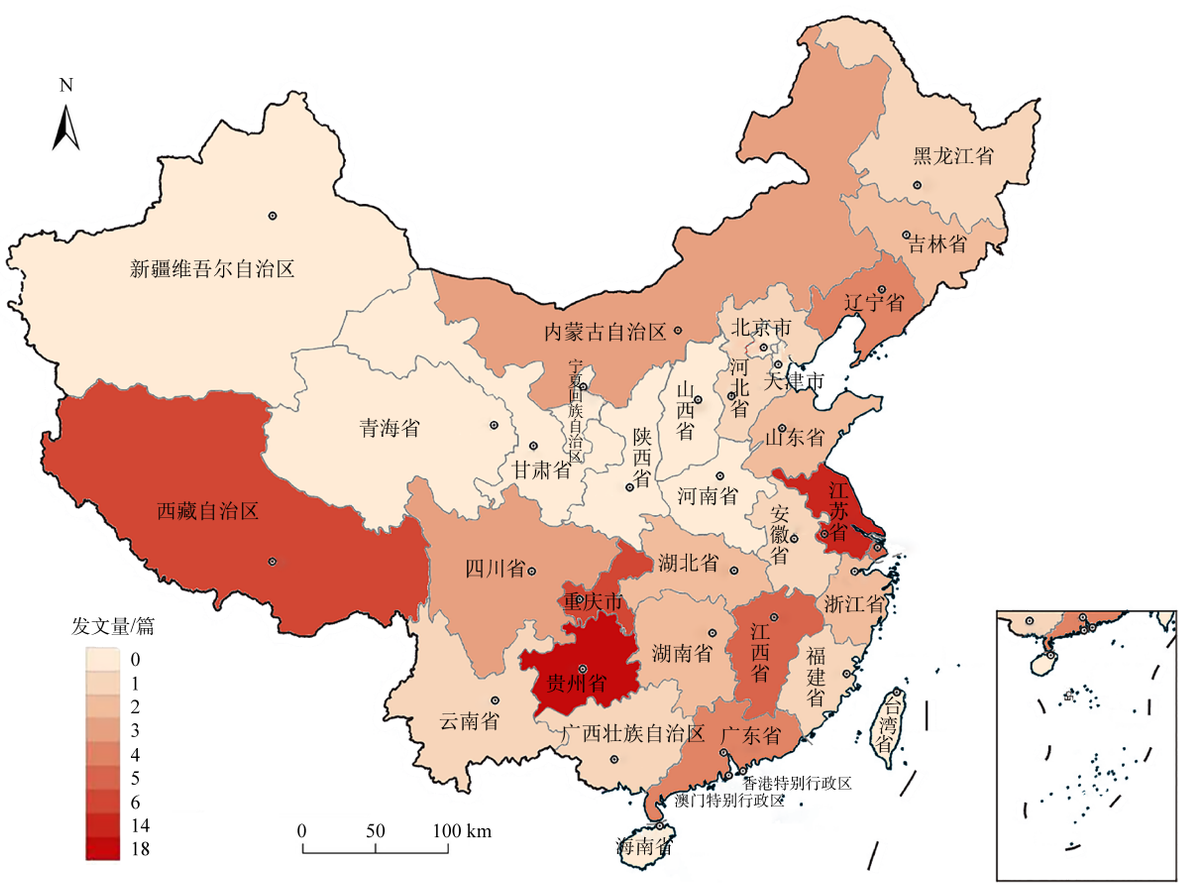


图2　不同数据库发文量随时间变化趋势

4.3　研究地区分布

为进一步了解苔藓植物在我国大气污染监测中的应用情况,利用ArcMap10.5软件,大致绘制了我国苔藓植物生物监测技术应用于大气环境污染的热点研究区域(图3),底图来源于国家基础地理信息中心(https://www.cehui8.com/3S/GIS/20130702/205.html).结果表明,我国苔藓植物监测技术应用主要集中在东部沿海、西南及青藏高原地区,其中,青藏高原地区的研究主要围绕空气中的有机污染物展开[13,30],而东部沿海地区则多针对空气中重金属元素富集特征及迁移污染[55].早期,苔藓生物监测的研



注:底图源于国家基础地理信息中心;审图号为GS(2019)1823号.

图3　我国苔藓植物监测技术应用于大气污染研究的区域分布

究热点主要集中在化学分析技术的自动化和污染区的识别分析上;近年来,逐渐转移到空气中重金属沉降及迁移规律的监测应用[15,25],并在苔藓植物分布与大气品质状况相关性,苔藓植物生物量、污染物含量、受害症状、耐受机制、生理指标与污染程度的关系以及敏感苔藓植物种类筛选[18,27,49]等方面取得了阶段性成果.

4.4 研究进展

早期,苔藓植物在大气污染监测中的应用途径主要以特定苔藓植物的生态变化和元素分析为基础,对大气污染物质的沉积、迁移过程鲜有明确反映.近年来随着多学科融合发展,苔藓植物分子生物及生理生化微观观测与量化分析技术成为研究重点,应用形式上也由传统的苔藓植物的种类、分布及生长情况的观测转变为内在机制与过程及生境间互作机制的研究.苔藓植物体内污染物质迁移与转化机制,以及苔藓植物的生理病变、功能性状变化与不同污染物质的响应关系研究得到更多侧重.

采用多藓种检测技术对传统藓袋法进行改进[49],交替使用多种苔藓植物进行大范围污染监测[56];同时,优化苔藓材料预处理方法,包括材料种类筛选与活性检验等[51].通过比较不同样品材料的性质影响颗粒物的季节和时空变化情况,对空气污染水平进行重新定位[57],使监测精度提高,监测目标物增加,监测时间跨度与空间范围更广.除此之外,还可利用移植生物探针(地衣和苔藓组成的生物模拟体)的方法,确定大气污染排放源[58,19],实现对空气污染源的不间断地有效监测,但该应用体系尚在研发阶段.因此,目前仍以遥感资料为基础,生物监测为主,理化监测为辅的综合监测技术应用最为广泛[49].已有学者开始利用原生苔藓植物体内元素组成的时空变化,对大气中痕量金属进行评估,准确分析了污染"热点地区"污染物质来源[1],以提供持续不间断的监测,从而了解持续污染带来的影响范围.

此外,传统的苔藓植物体内大气污染物含量的检测以化学分析法为主,偶尔会涉及微波系统消解法、ENAA、AAS和HG-AFS等,存在着顽固或微量污染物质不易被识别的缺点.因此,有研究综合利用多种微量元素检测技术测定目标元素含量,并利用主成分分析对不同污染源进行了识别和表征,进而利用Arcgis软件绘制了因子得分地理分布地图[59],这样不仅可以使监测精度提高,监测效果显著,同时也有助于准确划分大气污染等级;此外,还有研究人员采用ICP-MS定量分析空气污染因子含量,并通过BioMonRo软件生成污染地图和具体报告[60],使空气污染程度及空间分布模式实现可视化;利用地质统计学插值法和层次分析法进行多标准评价,并参考富集因子(enrichment factor,EF)估计结果,确定污染物主要来源[2];采用ICP-AES、AAS、CV AAS、ETAAS法测定大气中微量重金属元素的含量,并用污染负荷指数判断大气污染程度,同时应用因子分析(factor analysis,FA)对元素来源进行鉴定[61-62],进而根据不同时期采集的苔藓植物材料分布特征,有效反映大气中微量金属沉积的空间分布特征和时间变化趋势.

5 存在问题与展望

苔藓植物能够实现对大气污染实时有效的监测,可以识别区域大气污染类型,指示污染物来源、迁移及空间分布规律[63].同时,还可以对特征污染物进行污染程度划分,从而揭示环境污染因子在大气沉降中的变化规律,具有广阔研发前景与应用潜力.但是,大气污染是不同污染物协同作用的结果,要实现对大气污染高效、精准的监测,仍需进一步深入研究探讨.苔藓植物作为大气污染指示植物,在监测应用研究过程中仍存在以下需要解决的问题:

(1)应用于大气污染监测领域的苔藓植物种类较少,且多数研究者尚不能将苔藓植物准确识别到物种水平.我国的热点研究区分布显示,苔藓植物研究的集中区与我国苔藓植物相关研究机构和专家分布区大致吻合.因此,需进一步强化苔藓植物知识普及,提高苔藓植物指示作用与污染物吸附功能在偏远地区的利用率,以实现覆盖全国范围的大气污染监测.当前,苔藓植物的地理分布状况尚不明确,可用以指示全球大气污染的苔藓植物种类需进一步筛选.

(2)苔藓植物监测大气污染方法标准化程度低.苔藓植物监测技术大多数采用藓袋法,该法存在缺乏标准、快捷、稳定的监测技术研发,并且尚未形成统一规格,标准化程度较低.苔藓植物的耐受性、功能性状、基质性质及生境条件密切相关,导致其对大气污染监测的准确性易受干扰、缺乏稳定性.

(3)有关污染物在植物体内的代谢机制研究较少,在监测方法和数据分析上存在局限性,尚未形成合理的量化标准和适用模型.对于苔藓植物功能性状的研究还仅存在于某一区域特定小生境范围

内,对于多尺度(全球性、大区域)大气污染状况的监测应用研究还不够,监测数据的分析仍处在定性描述向定量评价的过渡阶段.大气污染因子以植物体为媒介,富集到植物体或流释到土壤、水环境中,参与物质能量流动与循环,苔藓植物通过不同的群落形态及组合模式、生理和生长形态等功能性状特征差异,指示不同大气污染因子对环境的影响程度.因此,今后有必要加强苔藓植物形态结构特征、生物多样性、生存机制、生理调节机制(光合、呼吸、抗逆性和物质代谢等)、功能性状与大气污染因子间的耦合机制研究,并继续加强苔藓植物分类研究,筛选适宜进行大气污染监测的模式物种.加强苔藓植物监测的内在机制研究,并分析苔藓植物在大气污染背景下的生理代谢过程及生物酶与污染因子关系,通过植物生理或基因组学等调控手段,筛选出指示大气污染的标记特征.因此,如真藓(*Bryum argenteum*)等存在世界广布特征的藓类,应该被更多地思考是否存在用以指示全球环境污染情况的潜力.目前,小立碗藓(*Physcomitrella patens*)、地钱(*Marchantia polymorpha*)等全基因组测序已经完成,小立碗藓是植物分子生物学研究的模式植物,在大气污染监测中是否存在应用价值,是否可以通过转基因的方式将对污染物敏感的苔藓植物基因转移到模式生物的细胞中,形成比较容易且标准化的测试体系,值得被深入探讨.

(4)建议将苔藓植物监测应用于全球大气污染研究中.通过同位素示踪技术研究大气污染物的迁移与循环路径,为大气污染监测提供新的技术和方法,构建系统的标准化监测技术,引入分子生物学、细胞生物学、现代化化学分析以及显微和超微结构观察、生理指标测定等方法,并结合气象学技术、地球物理化学技术等一系列技术手段,从不同角度,全面探讨苔藓植物对大气污染的响应.同时,应用计算机大型运算功能及数学统计方法,建立苔藓植物监测的统一指标和环境因子标准化数字模型,绘制出能够模拟不同尺度包括全球范围的各污染元素彩色分布图,为空气污染、生态环境建设提供有利的大气污染监测材料与先进技术.

参 考 文 献

[1] KAPUSTA P, STANEK M, SZAREK-ŁUKASZEWSKA G, et al. Long-term moss monitoring of atmospheric deposition near a large steel works reveals the growing importance of local non-industrial sources of pollution[J]. Chemosphere, 2019, 230: 29-39.

[2] ÁVILA-PÉREZ P, ORTIZ-OLIVEROS H B, ZARAZÚA-ORTEGA G, et al. Determining of risk areas due to exposure to heavy metals in the Toluca Valley using epiphytic mosses as a biomonitor [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 241: 138-148.

[3] CHEN Y E, CUI J M, YANG J C, et al. Biomonitoring heavy metal contaminations by moss visible parameters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 296: 201-209.

[4] 曹阿翔.贵州万山汞矿区石生苔藓植物总汞和甲基汞分布特征及生物指示意义[D].贵阳:贵州师范大学,2017.

[5] 周晓丽.利用细叶小羽藓监测大气重金属及氮沉降的研究[D].南京:南京林业大学,2019.

[6] 娄玉霞.苔藓植物对重金属污染的响应机理和生物指示的研究[D].上海:上海师范大学,2013.

[7] PARMAR T K, RAWTANI D, AGRAWAL Y K. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution[J]. Frontiers in Life Science, 2016, 9: 110-118.

[8] JIANG Y B, FAN M, HU R G, et al. Mosses are better than leaves of vascular plants in monitoring atmospheric heavy metal pollution in urban areas [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(6): 1105.

[9] MAHAPATRA B, DHAL N K, DASH A K, et al. Perspective of mitigating atmospheric heavy metal pollution: using mosses as biomonitoring and indicator organism [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(29): 29620-29638.

[10] 蒙文萍,戴全厚,冉景丞.苔藓植物岩溶作用研究进展[J].植物生态学报,2019,43(5):396-407.

[11] ABOAL J R, FERNÁNDEZ J A, BOQUETE T, et al. Is it possible to estimate atmospheric deposition of heavy metals by analysis of terrestrial mosses? [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408: 6291-6297.

[12] WU L Q, FU S M, WANG X H, et al. Mapping of atmospheric heavy metal deposition in Guangzhou city, southern China using archived bryophytes [J]. Environmental Pollution, 2020, 265(Pt B): 114998.

[13] LIU H W, SHAO J J, YU B, et al. Mercury isotopic compositions of mosses, conifer needles, and surface soils: implications for mercury distribution and sources in shergyla mountain, Tibetan plateau[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 172(5): 225-231.

[14] GIORDANO S, ADAMO P, SPAGNUOLO V, et al. Accumulation of airborne trace elements in mosses,

lichens and synthetic materials exposed at urban monitoring stations: towards a harmonisation of the moss-bag technique[J]. Chemosphere, 2013, 90(2): 292-299.

[15] 刘伟才,罗晶,姬瑞华.苔藓植物大灰藓对大气中重金属元素的生态监测[J].环境监测管理与技术,2020,32(3):44-47+67.

[16] MANNING W J, FEDER W A. Biomonitoring air pollutants with plants[M]. London: Applied Science Publishers,1980:1-110.

[17] BARGAGLI R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review[J]. Science of the Total Environment,2016,572:216-231.

[18] 刘俊华,朱灵红.苔藓植物在大气污染监测中的应用[J].湖北农业科学,2010,49(11):2906-2908.

[19] ZHONG Q Q, DU J Z, PUIGCORBÉ V, et al. Accumulation of natural and anthropogenic radionuclides in body profiles of Bryidae, a subgroup of mosses [J]. Environmental Science and Pollution Research,2019,26(27):27872-27887.

[20] 龚双姣,马陶武,李菁,等.镉胁迫下三种藓类植物的细胞伤害及光合色素含量的变化[J].应用生态学报,2010,21(10):2671-2676.

[21] 孙守琴.苔藓对重金属的吸附特性及其在大气监测中的应用[D].重庆:西南农业大学,2005.

[22] KROMMER V, ZECHMEISTER H G, RODER I, et al. Monitoring atmospheric pollutants in the biosphere reserve Wienerwald by a combined approach of biomonitoring methods and technical measurements[J]. Chemosphere,2007,67(10):1956-1966.

[23] BARKAN V S, LYANGUZOVA I V. Concentration of heavy metals in dominant moss species as an indicator of aerial technogenic load [J]. Russian Journal of Ecology,2018,49(2):128-134.

[24] 黄钟霆,杨保华,陈剑虹,等.湿地匍灯藓监测大气污染的初步研究[J].青海环境,2018,28(4):157-160+175.

[25] 张转玲,林绍霞,谢双,等.利用苔藓植物监测分析贵州草海的重金属大气沉降特征[J].广西植物,2020,40(11):1540-1550.

[26] FOAN L, DOMERCQ M, BERMEJO R, et al. Mosses as an integrating tool for monitoring PAH atmospheric deposition: comparison with total deposition and evaluation of bioconcentration factors. A year-long case-study[J]. Chemosphere,2015,119:452-458.

[27] 张银龙,陆亚芳,王亚超.大气污染梯度下树木附生苔藓植物生理生化指标的变化[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006(5):5-9.

[28] ALLAJBEU S, QARRI F, MARKU E, et al. Contamination scale of atmospheric deposition for assessing air quality in albania evaluated from most toxic heavy metal and moss biomonitoring [J]. Air Quality, Atmosphere & Health,2017,10:587-599.

[29] ZECHMEISTER H G, HOHENWALLNER D, RISS A, et al. Estimation of element deposition derived from road traffic sources by using mosses[J]. Environmental Pollution,2005,138(2):238-249.

[30] ZHU N L, SCHRAMM K W, WANG T, et al. Lichen, moss and soil in resolving the occurrence of semi-volatile organic compounds on the southeastern Tibetan Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2015,518/519:328-336.

[31] BERISHA S, SKUDNIK M, VILHAR U, et al. Trace elements and nitrogen content in naturally growing moss *Hypnum cupressiforme* in urban and peri-urban forests of the municipality of Ljubljana (Slovenia) [J]. Environmental Science and Pollution Research,2017,24(5):4517-4527.

[32] 陈璇,刘祥龙,唐婷.苔藓植物响应重金属胁迫的研究进展[J].生物技术通报,2020,36(10):191-199.

[33] 付兰,张朝晖.贵州省新路卡林型金矿区苔藓植物多样性及重金属污染监测[J].植物研究,2012,32(5):636-640.

[34] MAZUR Z, RADZIEMSKA M, MACZUGA O, et al. Heavy metal concentrations in soil and moss(*pleurozium schreberi*) near railroad lines in Olsztyn (poland) [J]. Fresenius Environmental Bulletin,2013,22(4):955-961.

[35] WANG S Q, ZHANG Z H, WANG Z H. Bryophyte communities as biomonitors of environmental factors in the Goujiang karst bauxite, southwestern China [J]. Science of the Total Environment,2015,538:270-278.

[36] 孙守琴,王定勇.苔藓植物对大气污染指示作用的研究进展[J].四川环境,2004(5):31-35.

[37] CAPOZZI F, ADAMO P, PALMA A D, et al. *Sphagnum palustre* clone vs native *Pseudoscleropodium purum*: a first trial in the field to validate the future of the moss bag technique[J]. Environmental Pollution, 2017, 225: 323-328.

[38] 吴鹏程.苔藓植物生物学[M].北京:科学出版社,1998.

[39] 陆亚芳.大气污染梯度下树木附生苔藓植物体内生理生化指标的变化[D].南京:南京林业大学,2005.

[40] FERNÁNDEZ J A, BOQUETE M T, CARBALLEIRA A, et al. A critical review of protocols for moss biomonitoring of atmospheric deposition: sampling and sample preparation [J]. Science of the Total Environment,2015,517:132-150.

[41] SUCHAROVA J, SUCHARA I. Atmospheric deposition

levels of chosen elements in the Czech Republic determined in the framework of the international Bryomonitoring Program 1995[J]. Science of the Total Environment,1998,223:37-52.

[42] 侯丹莉,路洋,尚博,等.大气污染的植物监测研究进展[J].化工科技,2012,20(4):79-82.

[43] 李丹丹,杨军,宋玉玲,等.应用苔藓植物监测水体污染:研究、应用与展望[J].广西植物,2021,41(10):1719-1729.

[44] 多力坤·买买提玉素甫,艾尔肯·买买提吐尔逊,莎吾丽·卡哈夫.大气污染监测与评价常用指示植物及其典型症状[J].生物学通报,2005(7):15-16.

[45] 李登科,高彩华.上海地区的苔藓与大气污染[J].植物杂志,1981(4):6.

[46] 孙秋雨.利用苔藓(紫花苜蓿)对大气污染(SO_2)指示作用研究:对包头市重工业环境进行监测[J].科技信息,2010(1):399-400.

[47] 刘润,张朝晖,申家琛,等.岩溶洞穴苔藓群落特征及其对重金属污染的指示意义:以贵州织金洞为例[J].生物多样性,2018,26(12):1277-1288.

[48] 张元勋,曹同,IIDA A,等.同步辐射X荧光分析用于苔藓植物监视大气污染的初步研究[J].核技术,2007(9):730-734.

[49] 王亚南,胡荣,周晓丽,等.多藓种监测大气重金属污染方法改进[J].环境科学学报,2019,39(5):1464-1473.

[50] XIAO H Y, TANG C G, XIAO H W, et al. Tissue S/N ratios and stable isotopes ($\delta^{34}S$ and $\delta^{15}N$) of epilithic mosses (*Haplocladium microphyllum*) for showing air pollution in urban cities in Southern China [J]. Environmental Pollution,2010,158(5):1726-1732.

[51] 李卓远,李丹丹,吴继明.应用藓袋法监测大气氟污染的方法-以上海市为例[J].环境研究与监测,2020,33(1):16-22.

[52] 陈勤,方炎明,颜赟,等.泰州市区重金属污染的藓袋法与路尘法评价研究[J].环境科学,2014,35(5):1901-1908.

[53] 王爱霞.南京市空气重金属污染的藓类和树木监测[D].南京:南京林业大学,2010.

[54] 龚伟,王之明,李海英,等.浅谈苔藓植物在大气环境监测中的应用[J].环境研究与监测,2017,30(2):27-29.

[55] 姜苹红,罗远玲,彭克俭,等.苔藓植物运用于大气重金属污染监测的研究进展[J].环境污染与防治,2015,37(7):82-87.

[56] COWDEN P, AHERNE J. Interspecies comparison of three moss species (*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, and *Isothecium stoloniferum*) as biomonitors of trace element deposition [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2019,191(4):220.

[57] SALO H, MÄKINEN J. Comparison of traditional moss bags and synthetic fabric bags in magnetic monitoring of urban air pollution[J]. Ecological Indicators,2019,104:559-566.

[58] OLISE F S, OGUNDELE L T, OLAJIRE M A, et al. Biomonitoring of environmental pollution in the vicinity of iron and steel smelters in southwestern Nigeria using transplanted lichens and mosses [J]. Environmental Monitoring and Assessment,2019,191(11):691.

[59] VERGEL K, ZINICOVSCAIA I, YUSHIN N, et al. Heavy metal atmospheric deposition study in Moscow Region, Russia [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology,2019,103(3):435-440.

[60] ȘTEFĂNUȚ S, ÖLLERER K, MANOLE A, et al. National environmental quality assessment and monitoring of atmospheric heavy metal pollution - a moss bag approach [J]. Journal of Environmental Management,2019,248:109224.

[61] LAZO P, STAFILOV T, QARRI F, et al. Spatial distribution and temporal trend of airborne trace metal deposition in Albania studied by moss biomonitoring[J]. Ecological Indicators,2019,101:1007-1017.

[62] FLORA Q, PRANVERA L, SHANIKO A, et al. The evaluation of air quality in Albania by moss biomonitoring and metals atmospheric deposition [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology,2019,76(4):554-571.

[63] LAZO P, STEINNES E, QARRI F, et al. Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: a hotspot of heavy metal contamination in Europe[J]. Chemosphere,2018,190:337-349.

(责任编辑:王 媛)