

蕨类植物在生态修复中的应用研究进展

张静, 蔡静如*, 许建新, 刘文竹, 沈彦会, 钱璐璜, 刘建华 (深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东深圳 518040)

摘要 对蕨类植物在重金属污染土壤修复、水体净化和边坡修复的优势和应用进行了阐述, 展望了未来蕨类植物应用于生态修复的前景。

关键词 蕨类植物; 重金属富集植物; 水体净化; 边坡修复

中图分类号 S181; Q914.85 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)04-0069-03

Application Research Progress of Ferns in Ecological Restoration

ZHANG Jing, CAI Jing-ru*, XU Jian-xin et al (Shenzhen Techand Ecology & Environment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518040)

Abstract This article gave a summary of ferns' advantage and application in remediation of heavy metal contaminated soil, water purification and slope restoration, and looked forward the application prospect of ferns in ecological restoration.

Key words Ferns; Heavy metal enrichment plant; Water purification; Slope restoration

近年来, 随着经济的快速发展, 城镇化进程随之加快, 导致城市生态环境遭到破坏, 工业发展、采矿业的兴旺使得裸露坡面逐渐增加, 同时造成了严重的环境污染, 亟需人为干预, 使生态环境良性发展。在生态修复技术中, 植物是重要的生态因子, 通过植物建植不仅有利于裸露坡面复绿、污染物吸收转化与去除, 还可以增加绿量, 有助于生态系统的恢复。蕨类植物种类多, 分布广, 是森林植被中草本层和层间植物的重要组成部分。我国蕨类植物约 2 600 种, 占世界蕨类植物的 21%, 蕨类植物孢子数量大, 生活史较短, 具有很强的环境适应性, 按生态类型可划分为陆生蕨、藤本蕨、附生蕨、石生蕨、水生蕨^[1], 蕨类植物还是环境指示植物^[2-4]。研究表明, 蕨类植物在重金属吸附^[5-6]、水体净化^[7-8]、园林绿化^[9-11]等方面有潜在的应用价值, 是一类优良的抗逆植物, 在生态修复中具有广阔的应用前景。笔者对蕨类在破损生境和污染环境的应用研究进展进行了综述, 以期为进一步发掘蕨类植物在生态修复中的潜力提供参考依据。

1 蕨类植物在重金属污染生态修复中的应用

在重金属污染治理中, 植物修复技术以成本低、对人类和环境扰动小等优点成为治理环境污染的有效手段之一^[12]。调查发现, 许多蕨类植物在矿业废弃地能够自然生长^[13], 铜尾矿废弃地普遍分布有木贼科节节草 (*Equisetum ramosissimum*)、蕨 (*Pteridium aquilinum* Var. *latiusculum*)、蜈蚣草 (*Pteris vittata*) 和井口边草 (*P. multifida*), 且单种优势度较高, 植被覆盖度在 20% 以上^[14], 说明蕨类的繁殖能力强, 对恶劣环境条件有较强耐性。目前, 重金属超富集植物已被报道了 450 余种, 分属于 45 个科^[15-16], 其中有几十种蕨类已被证实为超富集植物和耐性植物, 且多隶属于凤尾蕨科 (Pteridaceae)。

1.1 蜈蚣草在土壤重金属污染修复中的应用 蜈蚣草是首先发现的超富集蕨类植物, 且以富集 As 闻名, 其对 As 的转运系数为 1.00~7.00, As 浓度可达普通植物的数十万倍, 植物羽片中的 As 浓度甚至超过 10 000 mg/kg^[17]。Zheng 等^[18]对蜈蚣草的配子体和愈伤组织的 As 富集能力进行了研究, 结果表明, 配子体和愈伤组织中的 As 富集浓度分别高达 763.3 和 315.4 mg/kg, 说明蜈蚣草的早期繁殖体也具备富集重金属能力。蜈蚣草对 As 的超富集作用依赖于其自身良好的保护机制。研究发现, 蜈蚣草各部位对 As 的积累量从大到小依次为羽片、叶柄、根系, 且羽叶中 78% 的 As 分布在羽片胞液中^[19], 当土壤 As 含量大于 0.5 mg/kg 时, 其会通过老叶脱落而降低毒害^[20]。

蜈蚣草对 Pb、Mn 的转移系数分别为 0.66~2.00 与 0.50~2.30, 对 Cd 和 Zn 的转移系数小于 1.00, 对于 Cu 的转移系数大于 1.00^[21], 具有在 Pb-Zn-Cu 复合污染严重的土壤上正常生长的能力^[22]。Kumari 等^[23]在印度穆扎法尔布尔的 Kanti 热力发电站附近发现蜈蚣草的地上部分对 Fe、Cu、Zn、Ni、Al、Cr、Pb、Si、As 的累积量比地下部分高, 各元素的变异系数分别为 As 29.73%、Cu 12.66%、Cd 12.38%、Fe 2.95%、Ni 3.65%、Al 6.85%。由此可见, 利用蜈蚣草修复废弃尾矿污染, 不管是重金属污染治理, 还是土壤监测, 都具有重要的理论意义和实用价值^[18,24]。

1.2 其他蕨类植物对土壤重金属的耐受能力 随着对功能性蕨类植物研究的不断深入, 发现了越来越多的耐受重金属蕨类植物, 如蹄盖蕨属 (*Athyrium*) 植物禾秆蹄盖蕨 (*A. yokoscense*) 已被日本学者证实对 Cu、Zn、Cd 等重金属具有强富集能力^[25], 华东蹄盖蕨 (*A. niponicum*) 具有超富集 Pb 和 As 的能力^[26]; 在富集 Sb 的少数几种植物中, 蜈蚣草^[27]和白玉凤尾蕨 (*P. cretica*)^[26]对高浓度 Sb 表现出极强的耐性, 最高富集浓度分别达 12 000.00 和 6 405.00 mg/kg; 粉叶蕨^[28]和大叶井口边草^[29]对 As 也具有超富集能力, 其地上部 As 含量分别达 2 438.33 和 694.00 mg/kg。另外, 通过对我国广东云浮市重金属污染土壤区域调查发现, 乌毛蕨 (*Blechnum orientale*) 也具有耐受 As 的特性, 可作为污染区植被重建的先锋

基金项目 广东省软科学研究计划项目 (2014B090903015); 铁汉生态院士工作站建设 (2015B090904008); 广东省生态环境建设与保护工程实验室。

作者简介 张静 (1992—), 女, 湖北黄冈人, 助理工程师, 从事抗逆植物筛选与应用研究。* 通讯作者, 高级工程师, 从事抗逆植物筛选与应用研究。

收稿日期 2016-12-13

物种^[30]。密毛蕨(*Petridium revolutum*)能在Cu含量7 554.00 mg/kg的土壤中正常生长,且其叶能蓄积Cu 30.00~567.00 mg/kg,可在铜尾矿修复中加以应用^[31]。在西班牙马德里西北的废弃矿区,研究人员通过选取25种植物[包括节节草、欧洲蕨(*P. aquilinum*)、蹄盖蕨(*A. filix-femina*)3种蕨类植物],对重金属污染的土壤进行处理分析,筛选出5种耐重金属的优势种,欧洲蕨就是其中之一^[32]。

蕨类植物在稀土矿中也表现出很强的耐性和富集能力,目前发现了12种富集稀土蕨类植物,包括芒萁(*Dicranopteris pedata*)、铁芒萁(*D. linearis*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、乌毛蕨、蜈蚣草、蕨、齿牙毛蕨(*Cyclosorus sentatus*)等,其中铁芒萁是目前已知的稀土含量最高的植物,地上部分稀土含量可达3 300 μg/g以上^[33]。

2 蕨类植物在水污染生态修复中的应用

近年来,水污染问题同样是一个世界性难题,一些科学家开始使用水生植物进行水体净化研究。在水生蕨类植物修复方面,主要有槐叶苹属(*Salvinia*)和满江红属(*Azolla*)植物。

槐叶苹(*Salvinia natans*)为多年生根退化型浮水性蕨类,Dhir等^[8,34]通过Freundlich方程拟合吸附和浓度曲线,以及傅里叶变换红外光谱(FTIR)检测槐叶苹生物量的变化,发现槐叶苹可富集Ni、Cr、Fe和Cd。槐叶苹可有效清除废水中的Hg²⁺和Cu²⁺,吸收率最高可达90%^[35-36]。当人厌槐叶苹(*Salvinia molesta*)在0.1 mg/L Cd水中生长时,Cd的最高吸收量达1 290.00 mg/kg,且无明显中毒症状^[4]。

满江红(*Azolla imbricata*)为水田或池塘1年生小型浮水草本植物,据报道,满江红、小叶满江红(*A. microphylla*)和蕨状满江红(*A. filiculoides*)具有很强的吸收Cr的能力,生物富集系数分别为528、4 617和2 997,组织中重金属含量分别达到9 125、14 931、12 383 μg/g^[37]。在印度Singrauli工业区,研究人员在当地存在重金属污染的池塘和河流中发现*A. pin-nata* R. Br(印度特有种),对该物种进行Hg、Cr胁迫试验发现,处理13 d后,培养液中Hg含量下降了70%~94%,在3 mg/L含重金属的培养液中,满江红中Cr含量可达310~740 mg/kg^[38]。此外,蕨状满江红能够从水中吸收大量的氮和磷^[39],因此,满江红可以作为水体净化的理想植物材料。

3 蕨类植物在边坡生态修复中的应用潜力

3.1 蕨类植物的抗性

3.1.1 耐旱性。边坡生境立地条件通常较恶劣,特别是水分流失过快,不利于植物的正常生长,因此植物的抗旱性显得尤为重要。蕨类植物中有不少种类属于阳生蕨或半阳性蕨,如芒萁、肾蕨(*Nephrolepis cordifolia*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)、乌毛蕨等,可在直射阳光的空旷区域生长,其中芒萁呈现丛生状,是酸性土的指示植物,常成为草坡中的优势种类;肾蕨和乌毛蕨则散生于草坡中^[40]。

蕨类植物与种子植物相比抗旱力较弱,许多学者对蕨类植物的抗旱性进行了研究,结果表明,井栏边草干旱处理第20天仍未出现萎蔫,红盖鳞毛蕨(*Dryopteris erythrosora*)和阔鳞毛蕨(*D. championii*)能够忍受干旱17 d^[41],华南分布广

泛的肾蕨、线羽凤尾蕨(*P. linearis*)和华南毛蕨(*C. parasiticus*)在断水10 d的情况下才表现出萎蔫症状,说明也具有较强的耐旱能力^[42]。研究指出,有些蕨类植物能够主动采取干旱规避方式适应环境变化,当叶片水分含量达到不利情况前气孔即已经完全关闭,以确保长时间干旱条件下保持水分平衡^[43]。

3.1.2 耐阴性。蕨类植物是耐阴植物中具有代表性的一个类群,其耐阴性强,许多种类可在弱光照条件下正常生长,有良好的林下地被植物^[40]。蕨类资源调查中,阴性蕨类与耐阴蕨类在草丛、灌丛、次生林和原生林蕨类植物中所占比例分别为33.30%、36.36%、91.67%和100%^[44]。可见,阴性蕨类或耐阴蕨类具有较强的生态适应性,但多分布在具有一定郁闭度的植被环境中。

许多学者通过测定不同光照条件下各蕨类的生长表现、光合作用及相关生理指标等发现,蜈蚣草、棕鳞耳蕨(*Polystichum polyblepharum*)、红盖鳞毛蕨、齿缘瘤足蕨(*Plagiogyria dentimarginata*)、金毛狗(*Cibotium barometz*)和狗脊蕨具有较强的耐阴能力,可在低于14.14%光强的环境中良好生长,井栏边草、福建观音座莲(*Angiopteris fokiensis*)、峨嵋凤丫蕨(*Coniogramme emeiensis*)、狭翅铁角蕨(*Asplenium wrightii*)适合在28%光强下生长^[45];肾蕨最佳生长光照条件为5%~28%^[46]。张建新等^[47]通过收集整理文献数据,计算蕨类植物的表型可塑性指数(PPI)指出,华南毛蕨、肾蕨和狼尾蕨(*Davallia mariesii*)的可塑性程度较高,对光照的生态适应幅度较宽。因此,多数蕨类植物拥有其他植物无法比拟的耐阴性。目前,边坡修复通常采用草本植物作为早期植物群落的主体,但是先锋草种在后期常面临退化的问题,而大部分蕨类植物在乔灌成型后仍能适应低光照环境,可作为边坡植物群落多层次构建的重要类群。城市建设中存在大量林阴地、荒坡和贫瘠地等,蕨类植物可作为林下植物或常年不见阳光的北面坡种植,发挥有效的绿化补充职能^[48]。

3.2 蕨类植物在边坡修复中的应用 关于蕨类植物在边坡修复中的应用极少,张玉昌等^[49]申请的一项专利“一种裸露岩体坡面低养护的植物护坡方法”中有提及,其采用蕨类孢子和其他植物种子向岩质坡面客土喷播,使坡面较快复绿,且维持较好的生态修复效果。在蕨类植物中,芒萁作为山坡地被的优势种,其广布于我国长江流域以南,喜阳、喜酸、耐旱、耐瘠薄,是保持水土的优势种^[50]。但芒萁从孢子萌发成原丝体、原叶体等再形成植株大约需要2年的时间^[51],且其养护条件严苛,极大限制了芒萁的应用。邓恢等^[52]在强度水土流失区采用铁芒萁和类芦(*Neyraudia reynaudiana*)混合种植发现,类芦可迅速覆盖地表,同时形成遮阴环境,不仅有利于铁芒萁原叶体生长,还实现了其根系在土壤空间分布上的互补,增强了水土保持功能。彭丹等^[53]对湖北神宜公路路域蕨类植物资源进行了调查,并将多种蕨类植物移栽至公路沿线,试验证实,蜈蚣草、贯众(*Cyrtomium fortunei*)、变异鳞毛蕨(*D. varia*)和狭叶凤尾蕨(*P. henryi*)成活率高,具有较好的观赏价值,适宜作为公路边坡绿化植物。说明蕨类植物建

植需要注意与速生种进行搭配,与孢子喷播相比,通过移栽建植可有效缩短成苗时间,提高成活率,提升边坡植被群落的层次和景观。

4 蕨类植物在生态修复中的应用展望

4.1 超富集植物资源开发 目前 As 的超富集植物中许多都属于蕨类植物^[54],研究发现,蜈蚣草具有编码亚硝酸转运蛋白的基因 *ACR3*,其在孢子体根系和配子体中的表达受 As 的上调作用,定位于液泡膜上,而该基因在被子植物中缺失^[55],可见蕨类植物在 As 污染修复中具有“先天”优势。Sundaram 等^[56]研究发现,蜈蚣草中 *PvGRX5* 基因的表达能促进对 As 的超富集,导入拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*) 后能够促使拟南芥叶片富集 As,因此,通过定向改变基因表达,能培育出更多的超富集植物。

4.2 边坡蕨建植技术攻关 许多蕨类植物可在自然边坡中定植并扩散,相比其他草本地被,其多为常绿种,在冬季仍能保持绿色景观,同时其自我繁殖能力强,耐阴性强,当乔灌层形成时,仍能在林下良好生长,不易退化,是填补林下植被空缺的最佳选择。但是蕨类植物的孢子发育时间过长,养护条件苛刻,孢子喷播技术仍难以突破,而通过移栽种植可较快实现蕨类在边坡上的定植。因此,发掘优良的边坡蕨,研究其在边坡的建植模式和工艺,并通过育苗技术解决工程所需苗源,有利于营建多层次、具有良好水土保持功能且景观效果的边坡群落。

参考文献

[1] 梅英漫,丁炳阳,朱圣潮. 凤阳山自然保护区蕨类植物资源及其园林绿化应用[J]. 浙江林业科技,2004,24(3):59-62.

[2] GUPTA M. Ferns and environmental pollution: A review [J]. Indian Fern J,1991,8(1/2):41-51.

[3] HO Y B,TAI K M. Potential use of a roadside fern (*Pteris vittata*) to bio-monitor Pb and other aerial metal deposition[J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology,1985,35(1):430-438.

[4] GUPTA M,DEVI S. Uptake and toxicity of cadmium in aquatic ferns[J]. Journal of environmental biology,1995,16(2):131-136.

[5] 李影,陈明林. 节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报,2010,30(21):5949-5957.

[6] FENG R W,WANG X L,WELI C Y, et al. The accumulation and subcellular distribution of arsenic and antimony in four fern plants[J]. International journal of phytoremediation,2015,17(4):348-354.

[7] 徐勤松,计汪栋,杨海燕,等. 镉在槐叶苹叶片中的蓄积及其生态毒理学分析[J]. 生态学报,2009,29(6):3019-3027.

[8] DHIR B,SHARMILA P,PARDHA S P, et al. Physiological and antioxidant responses of *Salvinia natans* exposed to chromium-rich wastewater[J]. Ecotoxicology and environmental safety,2009,72(6):1790-1797.

[9] 田英翠,杨柳青. 蕨类植物及其在园林中的应用[J]. 北方园艺,2006(5):133-134.

[10] 苟燕妮,雷江丽. 蕨类植物园林应用及其开发利用潜质研讨[J]. 南方园艺,2011,22(3):33-34.

[11] 黄红春. 野生蕨类植物的引种技术及 10 种宜作地被的蕨类植物[J]. 西部林业科学,2004,33(3):80-84.

[12] 郑洁敏,唐世荣,陈子元,等. 蕨类植物对无机污染物的吸收[J]. 核农学报,2005,19(2):155-159.

[13] 田胜尼,孙庆业,王铮峰,等. 铜尾矿废弃地定居植物及基理理化性质的变化[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(1):88-93.

[14] 褚磊,于小丽,李影,等. 矿业废弃地中耐重金属蕨类植物的研究进展[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2007,30(5):588-592.

[15] PRASAD M N V,FREITAS H,FRAENZLE S, et al. Knowledge explosion in phytotechnologies for environmental solutions[J]. Environmental pollution,2010,158(1):18-23.

[16] SEBASTIAN A,PRASAD M N V. Cadmium minimization in rice: A review[J]. Agronomy for sustainable development,2014,34(1):155-173.

[17] MA L Q,KOMAR K M,TU C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic [J]. Nature,2001,409(6820):579.

[18] ZHENG Y Q,XU W Z,HE Z Y, et al. Plant regeneration of the arsenic Hyperaccumulator *Pteris vittata* L. from spores and identification of its tolerance and accumulation of arsenic and copper [J]. Acta physiologiae plantarum,2008,30(2):249-255.

[19] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报,2002,47(3):207-210.

[20] TU C,MA L Q. Effects of arsenic concentrations and forms on arsenic uptake by the hyperaccumulator ladder brake[J]. Journal of environmental quality,2002,31(2):641-647.

[21] 何志坚,薛鸿. 蜈蚣草野外复合污染条件下镉等重金属富集量的测定[J]. 绵阳师范学院学报,2011,30(11):130-134.

[22] 安志装,陈同斌,雷梅,等. 蜈蚣草耐铅、铜、锌毒性和修复能力的研究[J]. 生态学报,2003,23(12):2594-2598.

[23] KUMARI A,LAL B,PAKADE Y B, et al. Assessment of bioaccumulation of heavy metal by *Pteris vittata* L. growing in the vicinity of fly ash[J]. International journal of phytoremediation,2011,13(8):779-787.

[24] 刘足根,杨国华,杨帆,等. 赣南钨矿区土壤重金属含量与植物富集特征[J]. 生态学报,2008,27(8):1345-1350.

[25] NISHIZONO H,ICHIKAWA H,SUZIKI S, et al. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. Plant and soil,1987,101(1):15-20.

[26] 贾恒. 华东蹄盖蕨对铅和砷胁迫的生理响应与抗逆性[D]. 南京:南京林业大学,2010.

[27] TISARUM R,LESSL J T,DONG X, et al. Antimony uptake, efflux and speciation in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. Environmental pollution,2014,186:110-114.

[28] 徐卫红,KACHENKO A G,SINGH B. 砷超积累植物粉叶蕨及其对砷的吸收富集研究[J]. 水土保持学报,2009,23(2):173-177.

[29] 韦朝阳,陈同斌,黄泽春,等. 大叶井口边草:一种新发现的富集种的植物[J]. 生态学报,2002,22(5):777-778.

[30] 刘晓双,亦如瀚,吴锦标,等. 硫酸厂废水污染区土壤和植物中重金属分布特征的研究:以云浮市某硫酸厂为例[J]. 安徽农业科学,2009,37(29):14319-14320.

[31] 郑洁敏,楼丽萍,王世恒,等. 一种新发现的铜积累植物:密毛蕨[J]. 应用生态学报,2006,17(3):507-511.

[32] MORENO-JIMÉNEZ E,PEÑALOSA J M,MANZANO R, et al. Heavy metals distribution in soils surrounding an abandoned mine in NW Madrid (Spain) and their transference to wild flora[J]. Journal of hazardous materials,2008,162(2/3):854-859.

[33] 李凡庆,毛振伟,朱育新,等. 铁芒萁植物体中稀土元素含量分布的研究[J]. 稀土,1992,13(5):16-19.

[34] DHIR B,NASIM S A,SHARMILA P, et al. Heavy metal removal potential of dried *Salvinia biomass* [J]. International journal of phytoremediation,2010,12(2):133-141.

[35] SEN A K,MONDAL N G. *Salvinia natans* - as the scavenger of Hg(II) [J]. Water, air, and soil pollution,1987,34(4):439-446.

[36] SEN A K,MONDAL N G. Removal and uptake of copper(II) by *Salvinia natans* from waste water [J]. Water, air, and soil pollution,1990,49(1):1-6.

[37] ARORA A,SAXENA S,SHARMA D K. Tolerance and phyto accumulation of chromium by three *Azolla* species [J]. World journal of microbiology and biotechnology,2006,22(2):97-100.

[38] RAI P K. Phytoremediation of Hg and Cd from industrial effluents using an aquatic free floating macrophyte *Azolla pinnata* [J]. International journal of phytoremediation,2008,10(5):430-439.

[39] FORNI C,CHEN J,TANCIONI L, et al. Evaluation of the fern *Azolla* for growth,nitrogen and phosphorus removal from wastewater [J]. Water research,2001,35(6):1592-1598.

[40] 黄军雄. 广东野生蕨类状况及应用探讨[J]. 绿色科技,2012(10):85-86.

[41] 黄超群. 南京市几种蕨类植物孢子繁殖及抗旱性研究[D]. 南京:南京林业大学,2006.

[42] 钱璐璐,雷江丽,庄雪影. 3 种草本蕨类植物耐旱性研究[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):22-27.

[43] ZHANG Q,CHEN J W,LI B G, et al. The effect of drought on photosynthesis in two epiphytic and two terrestrial tropical fern species [J]. Photosynthetica,2009,47(1):128-132.

改良,总体物理性质较好,土质属壤土,孔隙度分布与植物生长相适应,而热带花果馆由于新建成,土壤生态系统未完善,土质以砂质土居多,孔隙度总体较低。

2015 年对热带花果馆土壤物理性质进行调查,结果显示,容重为 $1.21 \sim 1.35 \text{ g/cm}^3$,满足绿化种植土的要求;非毛管孔隙度(NCP)为 $1.29\% \sim 2.21\%$,与园林绿化种植 $5.00\% \sim 25.00\%$ 的要求相差甚远,毛管孔隙度(CP)在 $21.80\% \sim 28.33\%$,NCP/CP 仅为 0.07,与理想的 NCP/CP 为 1.00 相差甚远。表层土壤的含水量在 $10.45\% \sim 14.13\%$,仅为饱和含水量的 33.33% 左右,说明采样时土壤的含水量较低。

对比 2011、2015 年的土壤物理性质可以发现,热带花果馆建成 5 年后,土壤容重增加了 16.50% ,总孔隙度降低了 33.00% ,主要是非毛管孔隙度由原来的 17.30% 降至 1.90% ,毛管孔隙度并未发生明显变化。而导致土壤孔隙度和容重变化的主要原因是非毛管孔隙度的减少,而非毛管孔隙度反映了土壤滞留和下渗水发挥水源涵养的能力,决定土壤通气透水性的强弱,可见热带花果馆的通气透水性严重减弱。土壤孔隙度决定土壤保水功能,研究表明有机质与孔隙度呈显著正相关^[10],有机质的减少会导致土壤颗粒缺乏有机质的胶结,引起土壤大团聚体破坏及产生更小可移动的颗粒,而细小颗粒会阻塞土壤孔隙,使土壤孔隙度下降和容重增加。纵观温室近年来的有机质情况,有机质含量一直处于缺乏水平,是非毛管孔隙度减少和容重增加的一个重要原因。

3 结论与讨论

该研究表明,热带花果馆在建馆时土壤物理性质(尤其是容重、孔隙度)较好,但有机质含量较低,土壤酸性或强酸性,盐分较高。随着展馆的运营,土壤有逐年酸化的迹象,土

壤盐分增加,有机质含量偏低,但水解氮和有效磷含量增加,有效锌含量增加,有效锰、有效铜、有效铁含量略减少;容重增加,总孔隙度和非毛管孔隙度减少,土壤物理性质有严重下滑迹象。新建展览温室运营 5 年来,有机质含量未明显增加,水解氮和有效磷含量的增加可能与温室施用速效肥料相关,但水解氮和有效磷含量的增加可能会对植物造成伤害。

为保证热带花果馆植物的正常生长,必须对土壤进行改良:可施加有机改良材料,如绿化植物废弃物堆肥或者其他有机肥,既可以增加土壤有机质含量,改善土壤物理性质,也可吸附土壤中的盐分,减少盐分对植物伤害的同时可防止土壤酸化,同时确保改良材料有效锌、有效锰、有效铜、有效铁的含量。养护中,尝试施用生理碱性肥,以减轻温室土壤酸化的程度。

参考文献

- [1] 杨庆华,黄卫昌,胡永红. 上海辰山植物园展览温室的特色与创新[J]. 上海建设科技,2011(2):22-23,27.
- [2] 胡永红,黄卫昌. 展览温室的发展及其在上海的现状[J]. 上海建设科技,2001(3):29-30.
- [3] 卫辰,汪艳平. 展览温室景观植物的配置:以上海辰山植物园热带花果馆为例[J]. 现代农业科技,2016(15):154-160.
- [4] 胡永红,黄卫昌. 展览温室与观赏植物[M]. 北京:中国林业出版社,2005:2.
- [5] 黄卫昌,胡永红. 上海植物园展览温室室内布展设计及植物选择[J]. 上海建设科技,2000(1):25-26.
- [6] 王博文,陈立新. 土壤质量评价方法评述[J]. 中国水土保持科学,2006,4(2):120-126.
- [7] 项建光,方海兰,杨意,等. 上海典型新建绿地的土壤质量评价[J]. 土壤,2004,36(4):424-429.
- [8] 王辛芝,张甘霖,俞元春,等. 南京城市土壤 pH 和养分的空间分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(4):69-72.
- [9] 张华,张甘霖. 土壤质量指标和评价方法[J]. 土壤,2001,33(6):326-330.
- [10] 张波,史正军,张朝,等. 深圳城市绿地土壤孔隙状况与水分特征研究[J]. 中国农学通报,2012,28(4):299-304.
- [11] 林夏馨. 芒萁的生长发育规律及人工繁殖技术[J]. 福建水土保持,2004,16(2):60-62.
- [12] 邓恢,张梓萍,赵永建,等. 种植类芦后林地芒萁生长变化的分析[J]. 福建水土保持,2004,16(1):55-57.
- [13] 彭丹,叶慧海,邵社刚,等. 湖北神宜公路乡土绿化蕨类植物调查与遴选[J]. 公路交通科技(应用技术版),2010(10):353-356.
- [14] 杨桂英. 蕨类植物修复重金属污染的应用研究进展[J]. 江苏农业科学,2016,45(5):10-14.
- [15] INDRIOLO E, NA G, ELLIS D, et al. A vacuolar arsenite transporter necessary for arsenic tolerance in the arsenic hyperaccumulating fern *Pteris vittata* is missing in flowering plants[J]. The plant cell, 2010, 22(6):2045-2057.
- [16] SUNDARAM S, WU S, MA L Q, et al. Expression of a *Pteris vittata* glutaredoxin PvGRX5 in transgenic *Arabidopsis thaliana* increases plant arsenic tolerance and decreases arsenic accumulation in the leaves[J]. Plant cell & environment, 2009, 32(7):851-858.

(上接第 71 页)

- [44] 严岳鸿,易绮斐,黄忠良,等. 广东古兜山自然保护区蕨类植物多样性对植被不同演替阶段的生态响应[J]. 生物多样性,2004,12(3):339-347.
- [45] 徐冰,金水虎,丁炳扬. 耐阴蕨类植物的筛选和园林应用[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2006,32(3):329-333.
- [46] 崔秋芳,先旭东,石章锁. 肾蕨的耐荫性及园林应用研究[J]. 现代农业科技,2007(19):24-25.
- [47] 张建新,方依秋,丁彦芬,等. 蕨类植物的叶绿素、光合参数与耐荫性[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2011,37(4):413-420.
- [48] 苟燕妮,雷江丽. 蕨类植物园林应用及其开发利用潜质探讨[J]. 南方园艺,2011,22(3):32-34.
- [49] 张玉昌,张强,刘水,等. 一种裸露岩体坡面低养护的植物护坡方法:ZL 200610061899.3[P]. 2007-01-31.
- [50] 谢丹. 铁芒萁应用于高速公路边坡生态防护的研究[D]. 广州:中山大学,2006:16-17.