

# 重金属对苔藓植物影响的研究进展

王 强

(浙江自然博物馆, 浙江 杭州 310012)

**摘 要:**重金属胁迫危害在自然环境中广泛存在, 重金属污染往往会影响到植物的生长、发育。苔藓植物作为最低等的高等植物对外界环境的变化非常敏感, 目前国内外关于重金属对苔藓植物生长发育的研究不多, 尚处于初级阶段。现就国内外关于铅(Pb)、镉(Cd)和铜(Cu)等重金属对苔藓植物的影响进行综述, 并提出下一步研究的重点, 以期对苔藓植物对重金属环境的适应性和形态生理变化的相关研究奠定基础并提供借鉴。

**关键词:**重金属; 苔藓植物; 综述; 借鉴

**中图分类号:**Q 949.35 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2014)10-0169-05

随着工业社会的发展, 环境污染已经成为日益严重的生态问题, 其中重金属污染就是其中之一。重金属污染已被人们广泛关注, 其具有影响范围广、持续时间长、不易被发现、不可逆性的特点<sup>[1-3]</sup>。土壤中主要的重金属污染物有铜(Cu)、镉(Cd)、铅(Pb)和汞(Hg)等, 这些重金属会严重影响植物的生长发育, 在植物体内积累过多, 会产生毒害使植物体内的新陈代谢发生紊乱, 严重时会造成死亡<sup>[4-5]</sup>。苔藓植物是一种小型绿色植物, 是水生向陆生生活方式的过渡物种, 包括苔纲(Hepaticae)、藓纲(Musci)及角藓纲(Anthotopsida)3个纲, 结构简单, 仅包含茎和叶2部分, 有时只有扁平的叶状体, 没有真正的根和维管束。苔藓植物喜欢阴暗潮湿的环境, 一般

生长在裸露的石壁上, 或潮湿的森林和沼泽地<sup>[6]</sup>。苔藓植物具有较高的表面积与体积比, 并且体表没有蜡质的角质层, 可以从背腹两面积累重金属<sup>[7]</sup>。因此, 对环境污染具有指示作用, 近年来被广泛关注, 现通过对苔藓植物在重金属环境中的形态及生理上变化的综述分析, 以期对苔藓植物在重金属污染中的指示作用提供依据, 为苔藓植物的深入研究和开发铺垫道路。

## 1 苔藓植物对重金属胁迫响应机理

### 1.1 重金属对苔藓植物的危害效应

重金属胁迫对苔藓植物的危害分为直接危害和间接危害2个方面。直接危害主要是指重金属对植物机体本身的直接作用, 由于质膜是机体与外界环境接触的界面, 所以重金属首先直接地影响到细胞质膜的组成、结构、选择透过性以及膜上的生理生化反应<sup>[8-9]</sup>。直接危害主要包括: 水分代谢, 一些重金属可以阻碍植物体

**作者简介:**王强(1973-), 男, 浙江台州人, 硕士, 现主要从事苔藓植物等研究工作。E-mail: ttwangqiang@163.com.

**收稿日期:**2014-01-16

[5] 钱民庄, 刘宝奇. 日本菜葫芦栽培技术[J]. 合作经济与科技, 2002(5): 38.

[6] 石泓, 孙立宽. 甜葫芦生产技术[J]. 中国林副特产, 2008(6): 59-60.

[7] 田秋生. 产业发展问题上的几个误区[J]. 中国流通经济, 2011(4): 43-48.

## Development Situation and Countermeasures on Industry of Liuhe Calabash Gourd

LIN Yan-hui, GAO Wan-li

(Technology College Economic Management Institute, Jilin Agricultural Science, Jilin, Jilin 132101)

**Abstract:** Calabash gourd industry is an emerging industry in the development of Liuhe county, after ten years of development, it has a mature production technology, has reached a certain scale, but some problems still exist in the process of development. Based on Liuhe hoist industry development present situation investigation, its existing problems were analyzed, cultivating good varieties, expanding the scale of planting, promoting calabash gourd planting, processing technology were put forward to establish a new business model and to expand channels of information consultation, etc.

**Key words:** Liuhe county; calabash gourd; industry; problem; countermeasure

内的水分运输,并且可以通过改变气孔阻力使蒸腾强度降低<sup>[10]</sup>。光合作用,重金属进入细胞内会通过改变叶绿体中相关蛋白质的结构和性质,如使类囊体出现空泡和基粒片层消失,从而抑制植物的光合作用<sup>[11]</sup>。呼吸作用,试验证明部分低浓度重金属可以刺激呼吸酶和三羧酸循环,可以增加呼吸强度,而随着浓度的增加,重金属对线粒体和呼吸酶的迫害作用开始凸显,呼吸作用开始下降<sup>[12]</sup>。碳水化合物代谢,如使可溶性糖和可溶性淀粉含量降低<sup>[13]</sup>。核酸代谢,重金属污染会造成细胞核遭到严重破坏,直接影响 DNA 和染色体的形成,并会降低 RNA 和 DNA 的活性<sup>[14]</sup>。植物激素合成,重金属对植物激素的影响主要也是通过对相关合成酶的影响来抑制吲哚乙酸、生长素的合成<sup>[15]</sup>。间接危害主要是指重金属作用于苔藓植物生长地的周围环境,通过影响植物体与环境之间的物质、能量以及信息的交流,间接的对植物体的生长发育产生作用。间接作用主要包括:营养胁迫伤害,很多营养元素具有拮抗和协同的作用,而重金属的进入会造成植物体原有的平衡被打破体内元素失衡,如 Pb 污染会抑制植物对 Zn、Fe 的吸收,严重时造成植物形态发生不可逆的变化<sup>[16-17]</sup>。孢子萌发,重金属胁迫会造成苔藓孢子萌发率下降,萌发后形态发生异常,这主要是由于重金属胁迫下孢子内的淀粉酶和蛋白酶活性受到抑制,孢子萌发所需的能力不足造成的。营养生长和发育,由于苔藓植物的叶片只有一层细胞,对外界环境极为敏感,环境中高浓度的重金属元素会使敏感性苔藓植物体内生化过程发生紊乱,物质和能量的获得降低,生长发育受到抑制<sup>[18]</sup>。

## 1.2 苔藓植物对重金属污染的抗性机理

虽然重金属对苔藓植物的生长是一种不利因素,但依然有不少种类的苔藓能在高浓度的重金属环境中生长、发育、繁殖,完成整个生活史,且成为一些金属矿物的指示植物,如长蒴藓可以在铜矿区生长<sup>[19]</sup>,细叶牛毛藓可以在金矿区生长。表明苔藓植物在长期的进化过程中对相应的金属产生了抗性。苔藓植物对重金属的抗性机制主要有:体表产生屏障阻隔,苔藓植物可以通过在细胞膜表面产生屏障阻隔,限制重金属离子跨膜运输降低体内金属离子的浓度,如匍枝青藓可以在铅浓度为 600 mg/L 的环境下生长,其原因是配子体中皮层组织薄壁细胞的细胞壁在污染环境下对铅形成有效屏障和阻隔,使大部分的铅沉淀在细胞壁中,从而减轻对细胞的毒害<sup>[20]</sup>。避开不利因素,一些苔藓可以通过自我保护机制,不吸收环境中高含量的重金属,使机体免受毒害,这种条件下植物体内的重金属含量一般为正常水平。合成抗性物质,脯氨酸是植物蛋白质的主要组成部分,当植物受到不利因子胁迫时,脯氨酸可作为渗透剂参与植物的渗透调节作用增加植物体的抗逆性,苔藓植

物受到重金属危害时其体内的脯氨酸含量明显升高<sup>[21]</sup>。金属排除和金属积累,将重金属从植物体内排除是一种很好的解毒方式,此外在植物体内富集重金属离子避免其扩散到其它部位也是一种具有高效的避害方式,对金属离子的富集作用正是苔藓植物能够忍耐高金属浓度的重要原因<sup>[22]</sup>。

## 2 Pb 对苔藓植物生长发育的影响

铅(Pb)是一种有毒的重金属,可以通过冶炼、农药、煤的燃烧以及工业废弃物释放到环境中<sup>[23]</sup>。Pb 不是植物生长所必需的元素,对植物的生长不具有促进作用<sup>[24]</sup>,当 Pb 进入植物根、茎和叶中后,会影响植物对营养元素的吸收、蒸腾作用、呼吸作用以及光合作用等。Pb<sup>2+</sup> 进入植物体内后,一方面,与蛋白质、核酸和酶等大分子物质结合取代一些蛋白质分子中的金属元素,使其发生变性被破坏,过量的铅甚至会使染色体等遗传基因受到破坏。另一方面,干扰植物体内原有的离子间原有的平衡系统,使正常离子的调节和运输受到障碍<sup>[25-26]</sup>。

### 2.1 Pb 对葫芦藓生长发育的影响

正常状态下葫芦藓的萌发率在 90% 以上,而经过 6~10 mmol/L Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 处理后萌发率下降为 70%~80%,绿丝体和假根生长缓慢;当溶液浓度变为 4~10 mmol/L Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 时萌发率仅为 10%~20%,原丝体形态异常;4~10 mmol/L Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 处理时孢子不能萌发。此外,正常状态下叶绿体为椭圆形,在细胞内分布均匀,而 Pb 处理后叶绿体呈圆形并且数量减少,在原丝体顶端细胞膨大处聚集较多<sup>[27]</sup>。Pb 可以通过内吞作用进入细胞内从而对胞内结构和生理造成危害<sup>[28]</sup>,Song 等<sup>[14]</sup> 研究表明 Pb 胁迫能够使细胞内部分 DNA 序列的重重复度增加,能迫使 DNA 加速合成。

### 2.2 Pb 对弯叶灰藓生长发育的影响

在低浓度 Pb 胁迫弯叶灰藓时,植株不会表现出伤害症状,可以正常生长,但长时间处于低浓度胁迫会使叶片发暗、无光泽<sup>[29]</sup>。当 Pb<sup>2+</sup> 达到高浓度(>10 mg/L)时,弯叶灰藓表现出迫害症状,叶片变黄失绿,光学显微镜下可以观察到叶绿体遭到破坏,数量变少。弯叶灰藓细胞内的超氧化歧化酶(SOD)活性在低浓度的 Pb<sup>2+</sup> 胁迫时略微增强,高浓度 Pb<sup>2+</sup> 胁迫时表现为抑制,Pb<sup>2+</sup> 为 10 mg/L 时达到最大,为对照的 103.3%,而在 100 mg/L 时仅为对照的 96%<sup>[30]</sup>。此外,脯氨酸和丙二醛(MDA)含量随着溶液浓度的增大呈现升高的趋势。随着 Pb<sup>2+</sup> 浓度的升高,弯叶灰藓对 Pb 的积累量先呈直线上升,然后趋于平衡达到饱和状态<sup>[31]</sup>。

### 2.3 Pb 对大羽藓生长发育的影响

魏海英等<sup>[32]</sup> 研究表明,大羽藓在 Pb<sup>2+</sup> 浓度为 0.1 mmol/L 时,由于对金属胁迫的应激反应,叶绿素 a

含量有小幅升高,当  $\text{Pb}^{2+}$  浓度升高后,叶绿素含量明显减少,当浓度为 10 mmol/L 时,叶绿素 a 含量比对照低了 5.3%。此外, $\text{Pb}^{2+}$  胁迫能使细胞内  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的含量降低,从而改变细胞膜的渗透性。孙守琴等<sup>[33]</sup> 研究表明,当  $\text{Pb}^{2+}$  胁迫浓度从 0.00 mmol/L 增至 10.00 mmol/L 时,丙二醛(MDA)含量先增加后降低,MDA 最大值出现在 0.01 mmol/L 时,同时  $\text{H}_2\text{O}_2$  积累量随胁迫浓度的增加逐渐增大。当胁迫  $\text{Pb}^{2+}$  浓度为 10.00 mmol/L 时, $\text{Pb}$  胁迫下大羽藓  $\text{H}_2\text{O}_2$  含量比对照增加了 67.1%。

### 3 Cd 对苔藓植物生长发育的影响

自然界中镉(Cd)主要来源有两个,一是来源于成土母质本身,二是来源于工业污染中的废气、废水、废物以及农药残留<sup>[34]</sup>。苔藓植物 Cd 含量较高,一般在 0.65~3.61 mg/kg 之间<sup>[35]</sup>。Cd 作为一种植物的非必需元素,在植物体内积累到一定程度时,就会表现出毒害状态,外部形态上会表现出根系不发达、生长缓慢和叶片失绿等<sup>[36]</sup>;在细胞结构上,高浓度的  $\text{Cd}^{2+}$  还可以使叶绿体基粒垛叠减少,线粒体肿胀、溃解,核膜皱折凹陷并使细胞膜透性增强等变化<sup>[37]</sup>;在生理方面,高浓度  $\text{Cd}^{2+}$  使叶绿体结构和叶绿素的合成受到破坏,并引起光系统Ⅱ捕光叶绿素蛋白质复合物部分解聚和总量减少,表现为叶绿素含量降低,光合作用强度下降<sup>[38]</sup>,还会引起可溶性蛋白质和可溶性糖含量的下降以及脯氨酸含量的急剧增加<sup>[39]</sup>。此外,Cd 胁迫会影响植物对 Zn、Mn 等营养元素的吸收,但其作用原理尚不清楚<sup>[32]</sup>。

#### 3.1 Cd 对弯叶灰藓生长发育的影响

魏海英等<sup>[32]</sup> 研究表明,低浓度  $\text{Cd}^{2+}$  对弯叶灰藓的危害不大,仅边缘植株体失绿变黄( $\text{Cd}^{2+} < 0.1 \text{ mg/L}$ ),随着  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增加,危害症状逐渐从部分失绿变黄(0.1~1.0 mg/L)到大多数失绿变黄(1.0~10 mg/L)直到所有植株体全部失绿变黄( $\text{Cd}^{2+} > 100 \text{ mg/L}$ )。并随着  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增加,叶绿素含量逐渐减少。张敏<sup>[27]</sup> 研究发现,当  $\text{Cd}^{2+}$  浓度小于 1 mg/L 时,弯叶灰藓中可溶性蛋白质的含量与对照没有明显差别,当  $\text{Cd}^{2+}$  浓度达到 100 mg/L 时,可溶性蛋白质含量显著升高,达到 12.73 mg/g FW,比对照高 39.4%。同时低浓度  $\text{Cd}^{2+}$  对超氧化物歧化酶(SOD)活性具有促进作用,而高浓度  $\text{Cd}^{2+}$  对超氧化物歧化酶(SOD)活性表现为明显抑制。

#### 3.2 Cd 对湿地甸灯藓生长发育的影响

李朝阳等<sup>[40]</sup> 研究发现,随着  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的升高,叶片失绿所需要的天数逐渐缩短, $\text{Cd}^{2+}$  浓度为 2 mg/L 时湿地甸灯藓在第 6 天出现变黄失绿症状,而当  $\text{Cd}^{2+}$  浓度达到 50 mg/L 时,在第 4 天就表现出叶片灰绿症状。在不同浓度的 Cd 胁迫处理下,湿地甸灯藓的类胡萝卜素含量在 10~100 mg/L 时表现出与对照的显著性差异,分

别比对照下降了 48.89% 和 68.89%,而低浓度 Cd (1 mg/L)对类胡萝卜素含量的影响不大<sup>[41]</sup>。湿地甸灯藓体内的 MDA 含量随 Cd 胁迫浓度的增加而显著升高。可溶性糖含量、SOD 活性、POD 活性均与  $\text{Cd}^{2+}$  浓度呈显著正相关。同时 Cd 胁迫能引起湿地甸灯藓体内游离脯氨酸含量显著增加,而可溶性蛋白质含量和 CAT 活性则随 Cd 胁迫浓度增加而下降。此外湿地甸灯藓对 Cd 具有很强的富集能力,藓体内的 Cd 含量随着 Cd 胁迫浓度的增加而升高。

#### 3.3 Cd 对多蒴灰藓生长发育的影响

顾艳红<sup>[42]</sup> 通过对解剖结构的观察发现,与正常结构相比  $\text{Cd}^{2+}$  胁迫能使多蒴灰藓茎的皮部薄壁细胞木质化程度加深,并且呈现出不规则排列。并观察到,当  $\text{Cd}^{2+}$  浓度达到 5 mg/L 时,多蒴灰藓叶片失绿,假根开始腐烂,此时叶绿素总量比对照下降了 49.5%。同时过氧化氢酶(CAT)活性、脯氨酸和抗坏血酸(ASA)的含量随  $\text{Cd}^{2+}$  浓度的增大而升高。

### 4 Cu 对苔藓植物生长发育的影响

铜是植物生长发育所需的一种重要微量营养元素,参与很多生理代谢过程,是多酚氧化酶、细胞色素氧化酶、抗坏血酸氧化酶等的组成,但过量的铜也会导致植物体的铜毒害。铜胁迫可对植物产生多方面的影响,如膜脂过氧化作用增强,质膜透性增加,酶活性、可溶性蛋白质和叶绿素含量下降等<sup>[42-43]</sup>,随着铜浓度的增加,组织和细胞加速衰老,植株叶片失绿,生长缓慢,生物量下降<sup>[44]</sup>。

#### 4.1 Cu 对果灰藓生长发育的影响

蔡琪敏等<sup>[45]</sup> 研究观察到,随  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的增加,果灰藓体内 POD 活性先上升后下降,表明在低浓度胁迫下,苔藓植物启动了细胞的防御反应,体内 SOD 和 POD 等保护酶活性发生了应急性的提高,起到了一定的保护作用。但随着毒害的加重,超过了细胞防御系统的保护限度,保护酶活性降低。同时脯氨酸和 MDA 的含量随着  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的增加而升高。叶绿素含量在  $\text{Cu}^{2+}$  低浓度时略有上升, $\text{Cu}^{2+}$  高浓度胁迫时显著下降,其原因可能是在叶绿素合成时, $\text{Cu}^{2+}$  与相关酶作用,抑制叶绿素前体的合成,促进叶绿素分解。

#### 4.2 Cu 对多蒴灰藓生长发育的影响

顾艳红<sup>[42]</sup> 研究观察到, $\text{Cu}^{2+}$  胁迫使多蒴灰藓叶绿素 a 和叶绿素 b 含量大幅度下降,分别比对照减少 60.51% 和 53.79%。高浓度  $\text{Cu}^{2+}$  使藓体内丙二醛(MDA)含量上升,当浓度达到 10 mg/L 时,多蒴灰藓体内 MDA 含量上升至对照的 252.76%。值得注意的是随着  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的升高,多蒴灰藓体内的脯氨酸含量没有和其伴生藓(金发藓、大羽藓等)一样出现先上升后下降的



趋势,而是始终低于对照含量。

## 5 其它重金属对苔藓植物生长发育的影响

除 Pb、Cd 和 Cu 等主要重金属元素对苔藓植物生长发育的影响被广泛研究外,其它重金属对苔藓植物的影响研究文献也有很多,如镍(Ni)、锌(Zn)和铬(Cr)等。

陈林林等<sup>[46]</sup>研究表明,匍灯藓细胞内 POD 活性随着 Ni 离子浓度的增加而显著下降;SOD 活性随着 Ni 离子浓度的增加先增后减,在 Ni 离子浓度为 20 mmol/L 时 SOD 活性最大,比对照增加了 4.34%,在 Ni 离子浓度为 160 mmol/L 时 SOD 活性最小,比对照低了 47.83%。Shaw 等<sup>[47]</sup>发现 Zn 胁迫会引起角齿藓的叶片变小变薄,使其生长速率降低,并会阻碍精子器和颈卵器的形成。陈洋尔<sup>[48]</sup>研究 Cr 对磷叶藓的影响时发现,随着 Cr<sup>6+</sup>浓度的增加,叶绿素 a、叶绿素 b 和可溶性蛋白质含量均呈现一直下降的趋势,Cr<sup>6+</sup>胁迫对 CAT、POD、SOD 3 种酶活性的影响趋势相同,均呈下降趋势,其中 SOD 对 Cr<sup>6+</sup>最敏感下降最明显,其次是 POD 和 CAT。

## 6 讨论

由于工业和农业的发展,工业废弃物和农药残留物中的重金属在自然界的流动和积累,致使重金属已经成为植物生长不可避免的环境因素。苔藓植物是最为敏感的大气污染指示植物之一,由于苔藓植物不具有真正意义的根和微管组织,其体内富集的重金属元素主要来源于空气和降水中<sup>[49]</sup>,对于污染物的监测具有灵敏、精确和直接的特点。因此,苔藓植物对重金属污染的监测和金属矿的识别鉴定具有重要的意义<sup>[50]</sup>。

国外相关研究众多,而国内这几年刚刚起步,但发展迅速。不同的重金属在不同的浓度范围内对苔藓植物生长发育的影响程度是不同的,经试验测定金属对苔藓植物的毒害强度由大到小依次为 Hg>Pb>Ca>Cd>Cr>Ni>Zn,影响苔藓植物对金属离子的积累和忍耐程度的因素除本身性质外还有风、pH、温度和生长阶段等<sup>[51]</sup>。目前重金属监测已经成为环境保护中的一大热点,苔藓植物凭借其特点,逐渐被研究应用到现实生活中,成为污染监测的工具。土生墙藓生长在煤炭发电厂周围其体内的 Fe、Ni、Cr 和 Pb 含量明显增加<sup>[52]</sup>,并随着距发电厂距离的增加,藓体内的重金属含量呈现阶梯下降的规律。

重金属会影响藓体的生理和生态指数,如光合速率、叶绿体含量、可溶性糖类和脯氨酸等也会呈规律性变化,说明可以利用苔藓这些生理上的规律性变化对环境污染进行监测。从目前的文献看,关于重金属在苔藓体内富集及其对藓体生长发育影响的研究已经比较完全,而利用重金属胁迫下苔藓体内各生理指标与金属浓度变化相关性的数学模型还少有研究,下一步对这方

面的研究应该逐渐增强,注意在试验中交叉学科的应用,使苔藓对重金属的监测数学模型化,通过苔藓的变化更加精确地计算出污染程度。

## 参考文献

- [1] Yadav S K. Heavy metals toxicity in plants;an overview on the role of glutathione and phytochelatins in heavy metal stress tolerance of plants[J]. South African Journal of Botany,2010,76(2):167-179.
- [2] 李秀珍,李彬. 重金属对植物生长发育及品质的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(14):5742-5746.
- [3] 江行玉,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理[J]. 应用与环境生物学报,2001,7(1):92-99.
- [4] 陶玲,任璐,祝广华,等. 重金属对植物种子萌发的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报,2007,26(增刊):52-57.
- [5] 李锋民,熊治廷,王狄,等. 铜铁铅单一及复合污染对铜草幼苗生长的影响[J]. 农业环境保护,2001,20(2):71-73.
- [6] Gimingham C H, Birse E M. Ecological studies on growth-form in bryophytes:I. Correlations between growth-form and habitat[J]. The Journal of Ecology,1957:533-545.
- [7] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [8] Meers E, van Slycken S, Adriaenssens K, et al. The use of bio-energy crops (*Zea mays*) for 'phytoattenuation' of heavy metals on moderately contaminated soils: A field experiment[J]. Chemosphere,2010,78(1):35-41.
- [9] Hattab S, Dridi B, Chouba L, et al. Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress[J]. Journal of Environmental Sciences,2009,21(11):1552-1556.
- [10] Luque-Garcia J L, Cabezas-Sanchez P, Camara C. Proteomics as a tool for examining the toxicity of heavy metals[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry,2011,30(5):703-716.
- [11] Sharma S S, Dietz K J. The significance of amino acids and amino acid-derived molecules in plant responses and adaptation to heavy metal stress[J]. Journal of Experimental Botany,2006,57(4):711-726.
- [12] Dräger D B, Desbrosses-Fonrouge A G, Krach C, et al. Two genes encoding Arabidopsis halleri MTP1 metal transport proteins co-segregate with zinc tolerance and account for high MTP1 transcript levels[J]. The Plant Journal,2004,39(3):425-439.
- [13] Mills R F, Krijger G C, Baccarini P J, et al. Functional expression of AtHMA4, a P1B-type ATPase of the Zn/Co/Cd/Pb subclass[J]. The Plant Journal,2003,35(2):164-176.
- [14] Song W Y, Sohn E J, Martinoia E, et al. Engineering tolerance and accumulation of lead and cadmium in transgenic plants[J]. Nature Biotechnology,2003,21(8):914-919.
- [15] Coombes A J, Lepp N W, Phipps D A. The effect of copper on IAA-oxidase activity in root tissue of barley (*Hordeum vulgare*. cv Zephyr)[J]. Zeitschrift fuer Pflanzenphysiologie,1976,80(3):236-242.
- [16] Jiang W S, Liu D H, Xu P. Cd-induced system of defence in the garlic root meristematic cells[J]. Biologia Plantarum,2009,53(2):369-372.
- [17] He L L, Jiao Y M, Wang L H, et al. Advance in study of Pb,Zn,Cu and Cd hyperaccumulators[J]. Environmental Science and Technology,2009,32(11):120-123.
- [18] Fernández J Á, Aboal J R, Real C, et al. A new moss biomonitoring method for detecting sources of small scale pollution[J]. Atmospheric Environment,2007,41(10):2098-2110.
- [19] 黄文琥,张朝晖. 贵州烂泥沟金矿 5 种苔藓植物的生物地球化学研究及生物探矿潜力分析[J]. 黄金,2006,12(27):12-15.

- [20] 娄玉霞. 苔藓植物对重金属污染的响应机理和生物指标的研究[D]. 上海:上海师范大学,2013.
- [21] Gür N, Topdemir A. Effects of heavy metals(Cd,Cu,Pb,Hg) on pollen germination and tube growth of quince (*Cydonia oblonga* M.) and plum (*Prunus domestica* L.)[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2005, 14(1): 36-39.
- [22] Panda S K, Choudhury S. Changes in nitrate reductase activity and oxidative stress response in the moss *Polytrichum commune* subjected to chromium, copper and zinc phytotoxicity [J]. Brazilian Journal of Plant Physiology, 2005, 17(2):191-197.
- [23] Dix H M. Environmental Pollution[M]. New York: Wiley, 1981.
- [24] 张红萍. 铅对植物的毒害及植物对铅的抵抗机制[J]. 农业装备技术, 2007, 3(33):23-24.
- [25] Pålsson A M B. Toxicity of heavy metals (Zn,Cu,Cd,Pb) to vascular plants[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, 47(3-4):287-319.
- [26] Wang B, Liu C Q, Wu Y. Effect of heavy metals on the activity of external carbonic anhydrase of microalga *Chlamydomonas reinhardtii* and microalgae from karst lakes[J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2005, 74(2):227-233.
- [27] 张敏. Pb、Cd 污染胁迫对四种苔藓植物生长发育的影响[D]. 南京:南京林业大学,2005.
- [28] Krzesłowska M, Lenartowska M, Samardakiewicz S, et al. Lead deposited in the cell wall of *Funaria hygrometrica* protonemata is not stable-A remobilization can occur [J]. Environmental pollution, 2010, 158(1): 325-338.
- [29] Bassi P, Basile A, Stefanini A, et al. Effects of lead on the nuclear repetitive DNA of the moss *Funaria hygrometrica* (Bryophyta)[J]. Protoplasma, 1995, 188(1-2):104-108.
- [30] 徐燕云, 吴晓梅, 沈秋仙, 等. 铅胁迫对大灰藓几种生理指标的影响[J]. 武汉植物研究, 2010, 28(5):606-611.
- [31] 魏海英, 方炎明, 尹增芳. Pb、Cd 单一及复合污染对弯叶灰藓某些生理特性的影响[J]. 广西植物, 2013, 23(1):69-72.
- [32] 魏海英, 方炎明, 尹增芳. 铅和镉污染对大羽藓生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5):982-984.
- [33] 孙守琴, 何明, 曹同, 等. Pb、Ni 胁迫对大羽藓抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(4):937-942.
- [34] 许嘉林, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京:中国环境科学出版社,1995:24-36.
- [35] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京:中国环境科学出版社,1993:299-302.
- [36] 张义贤. 重金属对大麦毒性的研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(2): 199-204.
- [37] 马文丽, 金小弟, 王转花. 镉处理对乌麦种子萌发幼苗生长及抗氧化酶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1):55-59, 38.
- [38] Aleksandra N S, Iwona L, Ryszard C, et al. Activity of selected enzymes in soil loaded with varied levels of heavy metals[J]. Acta Agrophysica, 2006, 8(3):713-725.
- [39] 洪仁远, 蒲长辉. 镉对小麦幼苗的生长和生理生化反应的影响[J]. 华北农学报, 1991, 6(3):70-75.
- [40] 李朝阳, 陈玲, 吴昊, 等. 湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*)的防御机制对镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1665-1671.
- [41] 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.
- [42] 顾艳红. Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 污染胁迫对多蒴灰藓(*Hypnum fertile* sendth)的毒性效应研究[D]. 杭州:浙江师范大学,2008.
- [43] Branquinho C, Brown D H, Catarino F. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence[J]. Environ Exp Bot, 1997, 38:165-179.
- [44] 黄永杰, 杨红飞, 杨集辉, 等. 铜胁迫对水花生生长及活性氧代谢的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6):1112-1116.
- [45] 蔡琪敏, 陈洁, 张志祥, 等. 铜胁迫对两种苔藓植物生理生化的影响[J]. 浙江林业科技, 2008, 6(28):24-27.
- [46] 陈林林, 吴玉环, 王月平, 等. Ni、Pb、Cd 复合胁迫对甸灯藓生理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 4(27):228-223.
- [47] Shaw J E, Jules S, Beer S C. Effects of met als on growth morphology and reproduction of *Ceratodon purpureus* [J]. Bryologist, 1991, 94(3): 270-279.
- [48] 陈洋尔. 苔藓植物中重金属含量的测定以及重金属胁迫对苔藓生理指标的影响[D]. 成都:四川大学,2006.
- [49] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 苔藓植物与环境重金属污染监测[J]. 生态学杂志, 2006, 25(2):201-206.
- [50] Pott U, Turpin D H. Changes in atmospheric trace element deposition in the Fraser Valley, BC, Canada from 1960 to 1993 measured by moss monitoring with *Isothecium stoloniferum*[J]. Canadian Journal of Botany, 1996, 74(8):1345-1353.
- [51] 方炎明, 魏勇, 张晓平, 等. 苔藓生物监测大气重金属污染研究进展[J]. 南京林业大学学报, 2000, 24(5):64-68.
- [52] Meenks J L D, Tuba Z, Csintalan Z. Eco-physiological responses of *Tortula ruralis* upon transplantation around a power plant in west Hungary [J]. J Hattori Bot Lab, 1991, 69:21-35.

## Advance in the Effects of Heavy Metals on Bryophytes

WANG Qiang

(Zhejiang Museum of Natural History, Hangzhou, Zhejiang 310012)

**Abstract:** Heavy metal stress harm is widespread in the natural environment, and heavy metal pollution must take some negative effect on the growth and development of plant. Bryophytes as a minimum higher plants, are very sensitive to the change of the external environment. Researches of heavy metals on the growth and development of bryophyte in domestic and overseas is not much, which is in the primary stage. In this paper, mang researches of Pb, Cd, Cu and other heavy metals on moss were summarized, and the emphasis of further research was illuminated. For learning bryophyte was how to adapt to the characteristics of the environment of heavy metals, and this paper would be the foundation of physiological changes of related research, sets and provides the reference for correlational research.

**Key words:** heavy metals; bryophytes; review; reference