

Cd、Pb胁迫下湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*) 叶绿素荧光特性研究

李朝阳^{1,2}, 吴昊¹, 田向荣^{1,2}, 李菁^{1,2}, 周羲¹, 杜晓濛²

(1.吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南 吉首 416000; 2.植物资源保护与利用湖南省高校重点实验室, 湖南 吉首 416000)

摘要:采用浸没培养实验研究了不同浓度 Cd(0、1、5、10 mg·L⁻¹)、Pb(0、10、25、50 mg·L⁻¹)单一以及二者低、中、高浓度组合复合处理对湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*)叶绿素荧光以及细胞膜透性的影响。结果表明:(1)湿地甸灯藓 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v'/F_m' 、 ETR 、 $Y(II)$ 的下降程度与 Cd、Pb 胁迫浓度及胁迫时间存在明显的剂量、时间-效应关系;随胁迫时间延长, $Y(NO)$ 总体呈现持续上升的趋势, qN 表现为先升后降, 而 qP 则呈现出先降后升趋势。(2)湿地甸灯藓的叶绿素荧光参数对 Pb、Cd 胁迫的响应存在差异, 单一 Pb 胁迫初期各荧光参数即出现不同程度的下降, 单一 Cd 胁迫下上述参数均在处理第 4 d 才出现明显下降;在胁迫第 1 d, 中、低浓度 Cd、Pb 单一及复合胁迫均引起湿地甸灯藓的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v'/F_m' 增加。(3)Cd、Pb 胁迫均使处理液电导率升高, 升幅大小顺序为 Cd/Pb 复合胁迫 > Cd 胁迫 > Pb 胁迫。表明湿地甸灯藓在 Cd、Pb 胁迫初期可通过应激性增加 PSII 活性中心数来抵御重金属的毒害, 但由于电子传递和热耗散能力较弱, 使 PSII 活性中心受损, 最终导致光合系统损伤;Cd、Pb 复合胁迫对湿地甸灯藓细胞膜的损伤和毒害作用显著强于单一胁迫, Cd 对细胞膜的毒害作用又强于 Pb; F_v/F_o 可作为 Cd、Pb 胁迫的敏感指标。

关键词:湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop); Cd; Pb; 叶绿素荧光特性

中图分类号:X753 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0049-08 doi:10.11654/jaes.2014.01.006

Fluorescent Characteristics of Chlorophylls in *Plagiomnium acutum* Under Cd and Pb Stresses

LI Zhao-yang^{1,2}, WU Hao¹, TIAN Xiang-rong^{1,2}, LI Jing^{1,2}, ZHOU Xi¹, DU Xiao-meng²

(1.College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China; 2.Laboratory of Plant Resources Conservation and Utilization, College of Hunan Province, Jishou 416000, Hunan, China)

Abstract: Plant chlorophyll fluorescence is sensitive to the environmental stresses. In this study, we studied the effects of Cd and Pb alone or in combination on chlorophyll fluorescence and cell membrane permeability of *Plagiomnium acutum* (Lindb.) T. Kop exposed to varied Cd (0, 1, 5, 10 mg·L⁻¹) and Pb (0, 10, 25, 50 mg·L⁻¹) concentrations for 1, 2, 4, 7 and 10 days in hydropnic conditions. High dose and long-time stresses of Cd and Pb caused obvious decreases in maximal photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), ratios of variable fluorescence to initial fluorescence (F_v/F_o), effective photochemical efficiency of PSII (F_v'/F_m'), acyclic electron transfer rate (ETR) and photochemical quantum efficiency [$Y(II)$]. In all treatments under 10 days exposure, quantum yield of non-regulated energy dissipation $Y(NO)$ was continuously increased. Coefficients of nonphotochemical quenching (qN) reached a peak at day 2, whereas those of photochemical quenching (qP) showed a slight decrease from day 1 to day 4 and then a slight increase from day 4 to day 10. At low concentrations, values of F_v/F_m , F_v/F_o and F_v'/F_m' had a transient increase at day 1. Additionally, different responses of *P. acutum* to Pb and Cd were observed during the early period of the treatments. All parameters of chlorophyll fluorescence showed an obvious decrease for Pb at day 1, while for Cd at day 4. The solution conductivity started to increase from day 6 and then reached a peak at day 9. In conclusion, Pb and Cd treatments can dramatically alter chlorophyll fluorescence and the values of F_v/F_o can be used to predict Pb and Cd toxicity to *P. acutum*.

Keywords: *Plagiomnium acutum* (Lindb.) T. Kop; Cd; Pb; chlorophyll fluorescent characters

收稿日期:2013-05-07

基金项目:湖南省研究生科技创新基地项目(201203A);湖南省重点学科建设项目(JSU071312Z01)

作者简介:李朝阳(1969—),女,湖南古丈人,硕士,高级实验师,主要从事植物生理与生物化学研究。E-mail:ligz0000@126.com

矿山开采除了引起土壤污染、水土流失、水体污染等严重环境问题外^[1],其尾矿和矿渣是使矿区土地石(荒)漠化的一个主要原因。生物结皮在尾矿生态系统自然恢复过程中起着重要作用,苔藓植物是生物结皮的优势成分和群落演替过程中的主要先锋物种,也是生物结皮中生物量最大的类群之一^[2]。因此,研究重金属对苔藓植物生长的影响,对修复尾矿生态系统具有十分重要的意义。

湿地匍灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop)隶属于提灯藓科(Mniaceae)匍灯藓属(*Plagiomnium*),也是五倍子蚜虫的主要冬寄主之一,叶卵形或卵圆形,多见于林下土壤、溪沟近旁的土坡或岩石表面的薄土层上,生物量较大。匍灯藓属植物与重金属关系的研究已有一些报道,如尖叶走灯藓(*Plagiomnium cuspidatum*)有较强的吸收和富集重金属能力,但过高浓度的重金属会导致其细胞中毒^[3],尖叶走灯藓 PSII 反应中心的最大光化学效率(F_v/F_m)在重金属胁迫下降低,低浓度重金属胁迫不会引起尖叶走灯藓的光合系统损伤,而高浓度复合重金属胁迫却会造成其光合系统不可逆损伤^[4]。湿地匍灯藓对 Cd、Pb 也有较强的吸收和富集能力,但随 Cd、Pb 浓度增加,湿地匍灯藓叶细胞损伤程度显著加大^[5-6],渗透调节是湿地匍灯藓抵御 Cd、Pb 毒害的主要方式之一。超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)在清除由 Cd 胁迫产生的活性氧自由基过程中起关键作用,但由于过氧化氢酶(CAT)活性的丧失以及蛋白质代谢紊乱,最终导致湿地匍灯藓细胞凋亡^[7],而 POD 和 CAT 活性丧失以及蛋白质变性失活则是湿地匍灯藓 Pb 中毒的主要原因^[8]。比较而言,湿地匍灯藓对 Pb 的敏感性弱于尖叶拟船藓(*Dolichomitriopsis diversiformis*),强于匍枝青藓(*Brachythecium procumbens*)^[9],对 Cd 的敏感性强于尖叶拟船叶藓,弱于匍枝青藓^[6]。以上结果表明,湿地匍灯藓对 Cd、Pb 具有一定的耐性,但对不同重金属胁迫的响应存在较大差异。

叶绿素荧光对各种胁迫因子十分敏感,叶绿素荧光动力学技术可以反映出光合机构在逆境胁迫下的内在变化,因此被越来越多地用于鉴定植物抗逆性的理想指标和技术^[4],被称为测定叶片光合作用快速、无损伤的良好探针^[10]。本文通过浸没培养实验,研究 Cd、Pb 单一及复合胁迫下湿地匍灯藓叶绿素荧光的变化及与环境重金属浓度的关系,为合理进行重金属矿区废弃地和石漠化地区的植被恢复提供光合生理生态方面的理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

湿地匍灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop)采集地点、采集方法及预培养同参考文献[8],用蒸馏水培养 2 d,待其基本恢复正常生长状况时挑选长势一致,长度为 3~5 cm 的藓枝,进行重金属胁迫处理。

1.2 实验设计

本实验共设 10 个处理组,包括 1 个对照组和 9 个处理组。处理组分别为 Cd 单一胁迫的低、中和高浓度组,Pb 单一胁迫的低、中和高浓度组,Cd-Pb 复合胁迫的低、中和高浓度处理组(各处理组浓度设置详见表 1),组成 3 个 2×2 析因设计实验。重金属 Pb 采用 $Pb(NO_3)_2$,Cd 采用 $CdCl_2 \cdot 2.5H_2O$,均为分析纯,每个处理设置 3 个重复。具体实验过程为:每份样品称取 2.0 g 鲜重材料,放入 150 mL 上述重金属浓度处理液中,对照组用去离子水培养,两天更换一次处理液,分别在第 1、2、4、7、10 d 取样,定时测定其叶绿素荧光变化。

表 1 Cd、Pb 单一及复合胁迫的 10 种试验处理

Table 1 Ten treatments of Cd and Pb alone and in combination

处理	编号	浓度/ $mg \cdot L^{-1}$	
		Cd	Pb
对照	CK	0	0
低 Cd 胁迫	Cd(L)	1	0
中 Cd 胁迫	Cd(M)	5	0
高 Cd 胁迫	Cd(H)	10	0
低 Pb 胁迫	Pb(L)	0	10
中 Pb 胁迫	Pb(M)	0	25
高 Pb 胁迫	Pb(H)	0	50
低 Cd-Pb 复合胁迫	Mix(L)	1	10
中 Cd-Pb 复合胁迫	Mix(M)	5	25
高 Cd-Pb 复合胁迫	Mix(H)	10	50

1.3 叶绿素荧光参数的测定

叶绿素荧光参数用调制叶绿素荧光仪 PAM-2500(WALZ,德国)测量。实验前在不同激发光强下测定苔藓植物的最大光化学量子产量(F_v/F_m),得到实验所用的饱和激发光强(PAR)为 $1800 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,再经不同时间的暗适应后,测定 F_v/F_m 的变化,得到实验所使用的充分暗适应时间为 20 min。实际测定时,将数个苔藓的叶片并排排列在暗适应夹中,让叶片完全充满直径 5 mm 的暗适应夹测量孔,将叶片充分暗适应 20 min 后,分别测定 F_v/F_m 、初始荧光产量

(F_o)、最大荧光产量(F_m)、光下初始荧光产量(F_o)、光下最大荧光产量(F_m)、光化学量子效率 $Y(II)$ 、光合电子传递速率($ETR=Y(II) \times PAR \times 0.84 \times 0.5$)、光化学猝灭系数(qP)、非光化学猝灭系数(qN)等叶绿素荧光参数。完成各荧光参数的测定后,取荧光值达到稳定后的数值进行分析。根据以上数据计算:可变荧光($F_v=F_m-F_o$)、PSII 潜在活性(F_v/F_o)、PSII 光能捕获效率($F_v'/F_m'=(F_m'-F_o')/F_m'$)^[11]。

1.4 处理液电导率测定

每次更换处理液的同时,用电导率仪测定溶液的电导率(以各自浓度空白处理液的电导率为各浓度处理液的本底值)。

1.5 数据处理

数据均以平均数 $\pm$ 标准误表示, $n=3$,采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 Cd、Pb 胁迫对湿地甸灯藓叶片 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 F_v'/F_m' 的影响

F_v/F_m 表征 PSII 反应中心最大光能转化效率, F_v/F_o 则反映 PSII 的潜在活性,而 F_v'/F_m' 反映的是 PSII 有效光化学效率,即 PSII 反应中心光能捕获效率^[12],三者均为反映光化学反应状况的重要参数^[11]。由图 1 可知,三种荧光参数值均随两种重金属浓度增加而降低,呈显著浓度-效应关系。与对照相比,处理第 1 d, Cd(L)、Pb(L) 和 Mix(L) 分别使 F_v/F_m 增加了 1.66%、1.66% 和 5.02%,处理第 2 d 开始逐渐降低,分别降低了 2.79%、2.04% 和 0.80%,从第 4 d 开始, Mix(L) 的下降幅度达到 2.78%,而 Cd(L)、Pb(L) 的 F_v/F_m 值却有所回升,仅分别降低了 0.35% 和 0.76%,但随后的时间里低浓度组所有处理的下降幅度都有所增加,到第 10 d 时,分别降低了 16.32%、18.91% 和 30.97% (图 1A); F_v/F_o 的变化趋势与 F_v/F_m 基本一致,处理第 1 d,与对照相比, Cd(L)、Pb(L) 和 Mix(L) 分别使湿地甸灯藓的 F_v/F_o 值增加了 3.47%、3.51% 和 15.44%,但第 2 d 即分别降低了 8.52%、6.50% 和 3.14%,随后随胁迫时间延长,降低幅度也逐渐增大,到第 10 d 时,降幅分别达到了 36.53%、41.71% 和 57.34% (图 1B); 处理第 1 d 的 F_v'/F_m' 值与对照相比, Cd(L)、Pb(L) 和 Mix(L) 分别增加了 1.30%、1.15% 和 5.04%,同样在第 2 d 出现显著下降,且随胁迫时间延长而持续降低,到胁迫第 10 d 时,降幅分别达到了 16.38%、18.94% 和 30.99% (图 1C)。

比较而言,随胁迫时间延长, Mix(L) 比 Cd(L) 和 Pb(L) 更显著降低湿地甸灯藓的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 F_v'/F_m' 。表明短时间内 Cd(L)、Pb(L) 和 Mix(L) 胁迫引起湿地甸灯藓 PSII 反应中心的最大光能转化效率、反应中心活性数以及有效光化学效率应激性增加,但随胁迫时间延长,毒性逐渐增强,其毒性大小为 Mix(L)

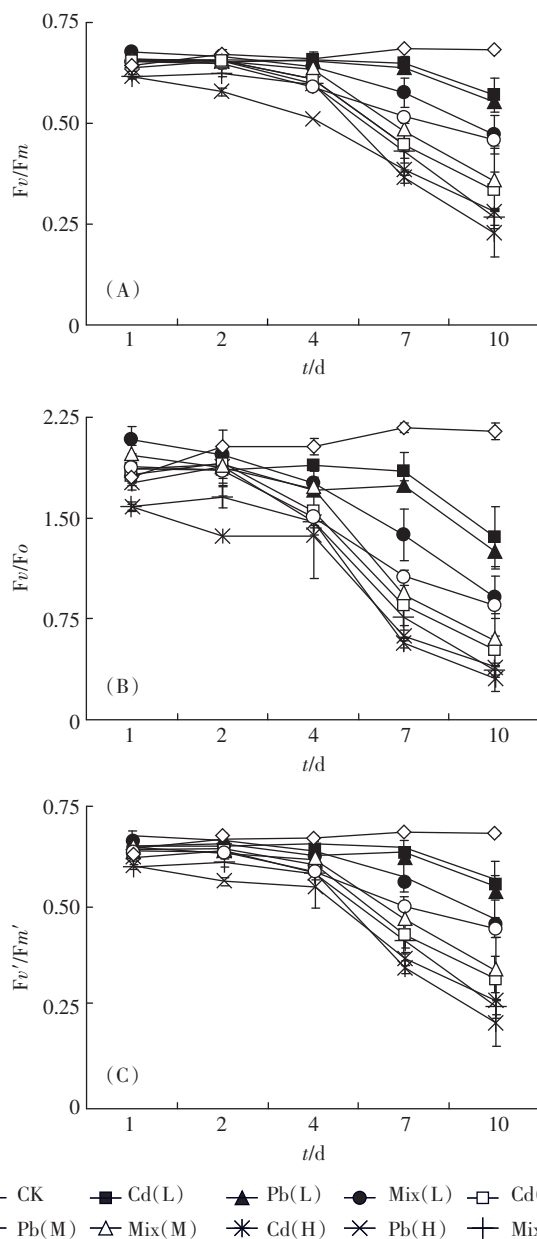


图 1 Cd、Pb 胁迫下湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop) PSII 最大光化学效率 F_v/F_m (A)、PSII 的潜在活性 F_v/F_o (B) 与有效光化学效率 F_v'/F_m' (C) 的变化

Figure 1 Changes in PSII maximal photochemical efficiency F_v/F_m (A), ratio of variable fluorescence to initial fluorescence F_v/F_o (B) and PSII effective photochemical efficiency F_v'/F_m' (C) of *Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop under Cd and Pb stresses

> Pb(L) > Cd(L)。而随胁迫时间的延长, Cd(M)、(H)显示出比 Pb(M)、(H)和 Mix(M)、(H)更强的毒性,均使湿地匍灯藓的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 以及 F_v'/F_m' 降幅达到最大, 处理第 10 d 时, Cd(M)胁迫下各参数的降幅分别达到了 51.05%、75.99% 和 51.07%, Cd(H)胁迫下则分别达到了 66.83%、85.88%、66.85%。三者的毒性大小依次为 Cd(M)、(H) > Mix(M)、(H) > Pb(M)、(H)。Cd、Pb 胁迫显著损伤湿地匍灯藓 PSII 反应中心的活性中心。

2.2 Cd、Pb 胁迫对湿地匍灯藓叶片的 qN 、 qP 和 $Y(NO)$ 的影响

qN 表征的是非光化学猝灭, 是镉胁迫最敏感的指标之一^[13], qP 表征光化学猝灭, 而 $Y(NO)$ 则是光损伤的重要指标^[14]。由图 2 A 可看出, 所有处理组的 qN 在前 4 d 均低于对照, 呈现出倒“V”型走势, 然后随胁迫时间的延长, 均有不同程度的回升, 以 Cd(H)胁迫组升幅最大, 达 155.46%, 其次是 Cd(M)胁迫组, 升幅达 65.50%; 而 Pb(H)以及 Mix(M)、(H)则出现持续降低, 又以 Pb(H)胁迫组降幅最大, 达 79.04%, 其次为 Pb(M)胁迫组, 降幅为 72.27%。对照组的 qP 在整个培养期间, 随培养时间延长呈现出逐渐下降的趋势, 所有处理组在前 4 d 的 qP 均低于对照, 降低大小顺序为 Mix(L) > Pb(L) > Cd(L)、Pb(M) > Mix(M) > Cd(M) 和 Mix(H) > Cd(H) > Pb(H)。第 4 d 之后各处理组的 qP 逐渐高于对照, 又以 Cd(M)处理组升幅最大, 达 5.60% (图 2 B)。各处理组与对照组的 $Y(NO)$ 值在处理前 4 d 均无显著差异, 随时间的延长, 除了低浓度处理各组仍处于较低水平外, 其他处理各组均出现显著上升, 到第 10 d 时, 以 Cd(H)处理组升幅最大, 达 95.08% (图 2 C), 表明湿地匍灯藓的叶片受到了较严重的光损伤, 又以 Cd 的毒性最大。

2.3 Cd、Pb 胁迫对湿地匍灯藓叶片的 ETR 和 $Y(II)$ 的影响

ETR 和 $Y(II)$ 反映了 PSII 反应中心在受胁迫时的电子传递速率和实际光化学量子效率。由图 3 可知, Cd、Pb 胁迫均引起湿地匍灯藓的 ETR (A) 和 $Y(II)$ (B) 降低, 两者下降趋势相似, 其下降程度与处理浓度显著正相关。在胁迫的前 4 d, 中、低浓度处理各组与对照并无显著差异, 而 Pb(H)胁迫使湿地匍灯藓的 ETR 和 $Y(II)$ 显著降低, 降幅分别为 20.65% 和 4.44%; 第 4 d 之后, 随胁迫浓度加大, ETR 和 $Y(II)$ 的降幅均显著增大, 降幅大小依次为 Mix(L) > Pb(L) > Cd(L)、Cd(M) > Mix(M) > Pb(M); 而 Cd(H)胁迫引起湿地匍

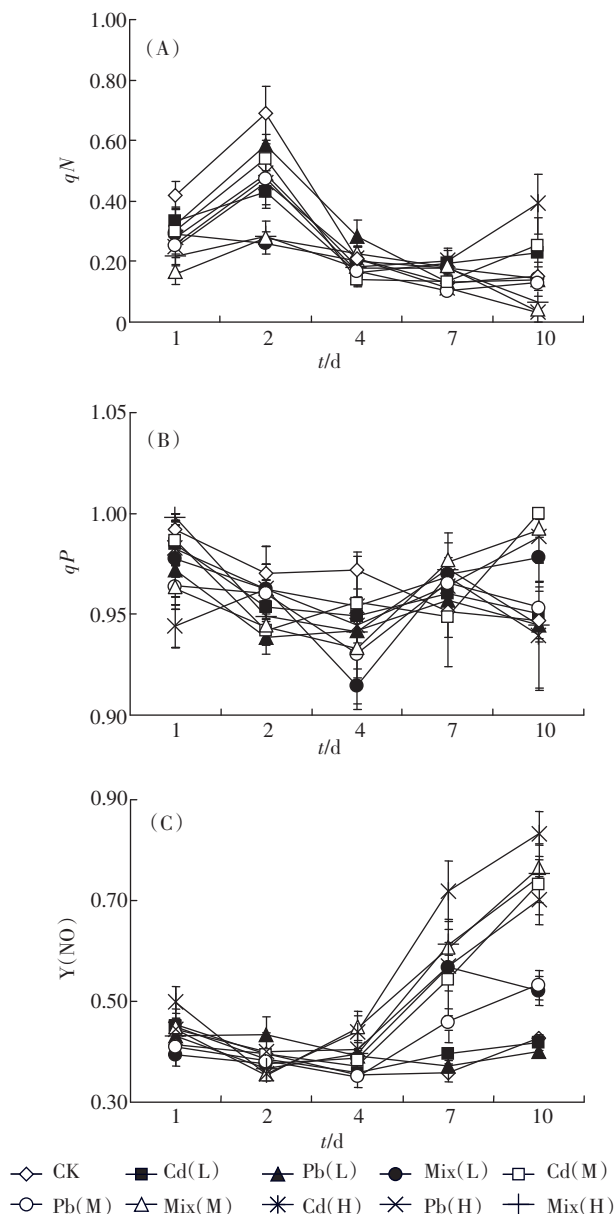


图2 Cd、Pb 胁迫下湿地匍灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.) T. Kop)非光化学猝灭系数 qN (A)、光化学猝灭系数 qP (B) 以及 $Y(NO)$ (C)的变化

Figure 2 Changes in coefficients of nonphotochemical quenching (qN)(A) and photochemical quenching(qP)(B) and quantum yield of non-regulated energy dissipation $Y(NO)$ of *Plagiomnium acutum*(Lindb.) T. Kop under Cd and Pb stresses

灯藓的 ETR 和 $Y(II)$ 几乎呈直线下降, 到第 10 d 时, 降幅达到最大, 分别为 69.66% 和 67.04%, 表明 Cd、Pb 胁迫均可抑制湿地匍灯藓的电子传递, 导致光量子产量显著降低, 又以 Cd 毒性最强。

2.4 Cd、Pb 胁迫下处理液电导率变化

由图 4 可看出, 随胁迫浓度增加, 处理液的电导

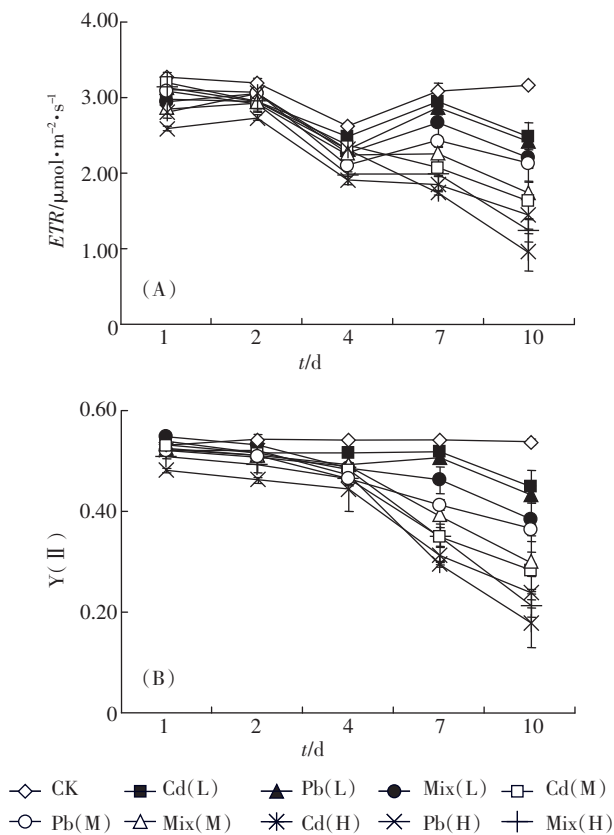


图 3 Cd、Pb 胁迫下湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*(Lindb.) T. Kop) 光合传递速率 ETR(A) 和 PSII 实际光化学量子产量 Y(II)(B) 的变化

Figure 3 Time course of the acyclic electron transfer rate(ETR) (A) and photochemical quantum efficiency[Y(II)](B) of *Plagiomnium acutum*(Lindb.)T. Kop under Cd and Pb stresses

率也逐渐增加。Cd 胁迫的前 4 d, 各浓度处理液电导率与对照组的变化趋势一致, 但均高于对照值, 各浓度处理值之间则无明显差异($P>0.05$), 后随胁迫时间延长而显著上升, 到第 9 d 时, 与对照相比, 各浓度处理组的电导率分别上升了 103%(L)、495%(M) 和 739%(H)。Pb 胁迫前 2 d, 处理液电导率随浓度增加而降低, 随后随 Pb 胁迫浓度和胁迫时间增加而持续上升, 在第 9 d 时均达到最大, 与对照相比, 分别上升了 76%(L)、291%(M) 和 418%(H)。与 Cd 胁迫不同的是, 高浓度 Pb 处理在第 4 d 时处理液电导率就显著上升。此外, 随复合处理胁迫时间延长, 电导率值逐渐上升, 其上升程度与复合胁迫浓度显著相关, 同样在胁迫第 9 d 时达到最大, 与对照相比, 分别上升了 156%(L)、747%(M) 和 1333%(H), 电导率大小依次为 Mix>Cd>Pb。上述结果表明, 对细胞膜损伤程度最大的是复合胁迫, 其次为单一 Cd 胁迫, 相对而言, 单

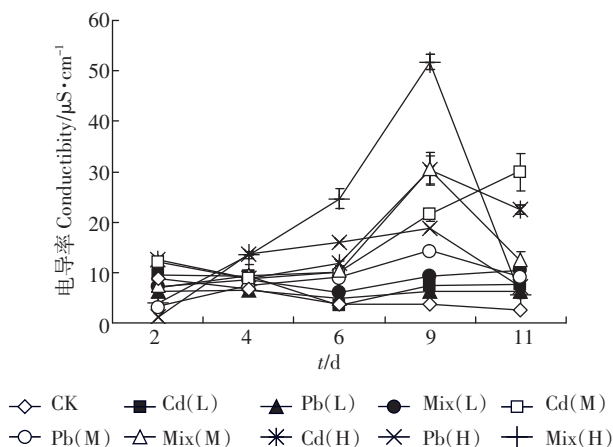


图 4 Cd、Pb 胁迫下处理液的电导率变化

Figure 4 Changes in the conductivity of culture solution under Cd and Pb stresses

Pb 胁迫对湿地甸灯藓细胞膜的损伤程度最轻。

3 讨论

光合作用是植物体内重要的代谢过程, 众多实验表明, 重金属胁迫均能抑制植物的光合作用, 且与胁迫程度显著相关^[12,15-16], 主要表现在破坏叶绿体结构, 降低光合色素含量及 F_v/F_m 比值下降等。对于苔藓植物来说, Cd、Cu、Zn 和 Pb 复合胁迫下, 水藓(*Fontinalis antipyretica*)^[17] 和尖叶走灯藓(*Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. Kop.)^[4] 的 F_v/F_m 降低幅度与环境重金属浓度呈正相关, 而高浓度 Cd^{2+} ($50\sim100\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) 不仅导致大灰藓(*Hypnum plumaeforme* Will.) 的 PSII 反应中心降解, 同时使反应中心吸收的光能用于电子传递的量子产额也大幅降低^[18]。另外, 对镉胁迫下浮萍的叶绿素荧光变化研究结果表明, 镉对 PSII 活性有较强的毒害, 可降低 PSII 的原初光能捕获能力和电子传输能力, 对此认为是镉影响了水裂解端的电子流所致^[19]。本实验结果显示, 胁迫初期, Cd、Pb 均会引起湿地甸灯藓 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 F_v'/F_m' 以及 Y(II) 应激性增加, 但随胁迫时间延长逐渐下降。然而, 其下降程度和出现下降的时间各不相同, 单一 Pb 胁迫使湿地甸灯藓上述参数在处理第 2 d 即出现明显降低, 而单一 Cd 胁迫下上述比值在处理第 4 d 才出现明显下降, 与 Cd 胁迫下大灰藓 F_v/F_m 变化趋势相同^[18], 又以 F_v/F_o 的降幅更大。这可能是由于 Cd 是一种非氧化还原金属, 而藓类缺乏对 Cd 的代谢调节^[20], 使 Cd 可通过膜上的离子通道进入湿地甸灯藓体内并累积, 引起体内代谢紊乱产生大量活性氧, 导致湿地甸灯藓的防御系统崩溃^[8], F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 F_v/F_o 、ETR 以及 Y(II) 的

降低很可能是活性氧累积破坏 PSII 反应中心的结果。在高浓度 Pb 胁迫下,湿地甸灯藓的上述荧光参数在第 1 d 即出现明显降低,第 2 d 单一 Pb 处理均使各参数出现不同程度的降低,其变化趋势同样与大灰藓的一致,说明 Pb 对湿地甸灯藓光合作用反应中心造成了直接的损伤。这可能是由于 Pb 可竞争性抑制放氧复合体中 23 KD 蛋白上 Ca^{2+} 和 Cl^- 结合位点^[21],从而阻止了电子从 PSII 向 PSI 的传递所致^[12],表明在胁迫初期,湿地甸灯藓可通过增加 PSII 反应中心数量来抵御重金属毒害,但长时间胁迫下,反应中心数量显著减少,导致湿地甸灯藓的光合活性下降。此外,荧光参数对不同重金属元素胁迫的响应存在差异,对 Pb 更敏感。Cd、Pb 对湿地甸灯藓的 PSII 潜在活性中心损伤较严重,Cd 的毒性强于 Pb,与上述研究结果一致。

qN 反映了 PSII 光能的非辐射性热耗散能力,表达光合机构的损伤程度^[22]。本实验中,所有处理组在胁迫前 4 d 的 qN 均低于对照,表明湿地甸灯藓的光辐射和光耗散能力大幅增加,这一结果也与李伶等^[19]的结果一致。 $Y(\text{NO})$ 也是光损伤的指标之一,它反映了植物通过其他形式减少进入光化学途径的能量比例^[23]。本研究表明,随胁迫时间延长,Cd、Pb 单一及复合胁迫均使湿地甸灯藓的 $Y(\text{NO})$ 显著增加,表明湿地甸灯藓的电子传递过程严重受影响,已不能将吸收的光能完全消耗掉,光合机构受损伤程度加大。

植物细胞外渗液的电导率可作为植物细胞膜透性的变化及损伤的生理指标之一^[24]。大麦幼苗叶的相对电导率随重金属浓度增加而持续增加,对此认为是由于 Cd 易于运输迁移,而 Pb 则很难发生迁移所致^[25]。张利红等^[26]则认为 Cd 对小麦细胞膜损伤是由于细胞膜质过氧化所造成的。本实验结果显示,Cd、Pb 单一及复合胁迫均使湿地甸灯藓培养液的电导率增大,表明 Cd、Pb 单一和复合胁迫均对湿地甸灯藓的细胞膜造成了严重损伤,与上述研究结果基本一致。不同的是,Cd 胁迫初期对湿地甸灯藓细胞膜的伤害并不明显,只是在处理第 4 d 培养液电导率才突然出现增加,与前期研究结果^[8]相结合,推测认为是由于细胞膜质过氧化所致,故支持张利红等的观点。而 Pb 在胁迫初期对湿地甸灯藓的细胞膜就表现出轻微的损伤,表明这种作用仍是直接的,很可能是由于 Pb 能与细胞膜蛋白的-SH 或磷酸分子层的磷脂脂类物质反应,从而改变了膜蛋白的磷脂结构^[27]所致。

复合污染体系中污染物对生物的联合作用与诸

多因素有关,如污染物的种类与浓度组合、胁迫方式与时间长短等^[28]。本研究显示,在实验浓度范围内,与对照相比,胁迫第 1 d, Mix(L) 和 Mix(M) 均使湿地甸灯藓叶片的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、 F_v'/F_m' 、 ETR 和 $Y(\text{II})$ 应激性增加,随后随胁迫时间的延长而逐渐降低, Mix(H) 胁迫对湿地甸灯藓上述指标的损伤程度显著高于中、低浓度复合胁迫,但在处理后期损伤程度呈现出 $\text{Cd}(\text{H}) > \text{Mix}(\text{H}) > \text{Pb}(\text{H})$ 趋势。2×2 析因分析结果表明,复合胁迫早期及 Mix(L) 胁迫下,两种重金属污染物之间不存在联合作用,随着胁迫时间的延长, Mix(M) 和 Mix(H) 胁迫均表现为相互拮抗的联合作用,说明 Cd、Pb 复合胁迫对湿地甸灯藓叶绿素荧光参数的联合作用与胁迫浓度及胁迫时间有关。这与有关研究的结果有所不同,朱宇林等发现 Cd、Pb 复合胁迫对银杏的叶绿素荧光具有协同作用^[29],而马陶武等研究则发现 Cd、Pb 复合胁迫对铜锈环棱螺的 SOD 活性存在拮抗作用,对 MT 则具有协同作用^[27]。这种差异说明 Cd、Pb 复合胁迫对叶绿素荧光的联合作用还与实验生物的种类以及所测定的指标等因素有关,也表明 Cd、Pb 复合胁迫对湿地甸灯藓叶绿素荧光参数的影响要比单一胁迫复杂得多,很可能与各自作用的生化机制有关。

4 结论

(1) 湿地甸灯藓对 Cd 及低浓度的 Cd、Pb 复合胁迫有一定的耐受能力,可耐受 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度的 Pb,在胁迫初期可通过应激性增加 PSII 活性中心数来抵御重金属的毒害,但由于电子传递和热耗散能力较弱,使 PSII 活性中心受损,最终导致光合系统损伤。

(2) Cd 对湿地甸灯藓膜系统和光合系统的损伤是由氧化压力所致的间接损伤,而 Pb 对湿地甸灯藓的膜系统和光合作用反应中心造成了直接伤害;对湿地甸灯藓细胞膜的毒性大小依次为 Cd、Pb 复合胁迫 $> \text{Cd} > \text{Pb}$ 。

(3) Cd、Pb 联合作用聚合物除与重金属离子种类、浓度及作用时间有关外,还与实验生物种类及所测定的指标等因素有关。

(4) F_v/F_o 可作为 Cd、Pb 单一及复合胁迫的敏感指标。

参考文献:

- [1] 李怀永,胡凌志.北京市采金矿山对生态环境的影响[J].城市地质,2006,1(1):37-40.
LI Huai-yong, HU Ling-zhi. The impacts of gold mines on the ecoenvi-

- ronment of Beijing[J]. *Urban Geology*, 2006, 1(1): 37–40.
- [2] 郑云普, 赵建成, 张丙昌, 等. 荒漠生物结皮中藻类和苔藓植物研究进展[J]. *植物学报*, 2009, 44(3): 371–378.
- ZHENG Yun-pu, ZHAO Jian-cheng, ZHANG Bing-chang, et al. Advances on ecological studies of algae and mosses in biological soil crust[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2009, 44(3): 371–378.
- [3] Maevskaya S M, Kardash A R, Demkiv O T. Absorption of cadmium and lead ions by gametophyte of the moss *Plagiomnium undulatum*[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(6): 820–824.
- [4] 衣艳君, 李芳柏, 刘家尧. 尖叶走灯藓(*Plagiomnium cuspidatum*)叶绿素荧光对复合重金属胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5437–5444.
- YI Yan-jun, LI Fang-bai, LIU Jia-yao. Physiological response of chlorophyll fluorescence in moss *Plagiomnium cuspidatum* to mixture heavy metal solution[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5437–5444.
- [5] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 等. 铅胁迫对3种藓类植物细胞伤害及光合色素含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2009, 29(8): 1630–1636.
- GONG Shuang-jiao, MA Tao-wu, JIANG Ye-fang, et al. Leaf cell damage and change of photosynthetic pigment contents induced by lead stress in three species of mosses[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2009, 29(8): 1630–1636.
- [6] 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.
- GONG Shuang-jiao, MA Tao-wu, LI Jing, et al. Leaf cell damage and changes in photosynthetic pigment contents of three moss species under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(10): 2671–2676.
- [7] 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.
- LI Zhao-yang, CHEN Ling, WU Hao, et al. Response of defense mechanisms in *Plagiomnium acutum* under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1665–1671.
- [8] 李朝阳, 陈玲, 马陶武, 等. 湿地甸灯藓(*Plagiomnium acutum*)对Pb胁迫的生物标志物响应[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 292–298.
- LI Zhao-yang, CHEN Ling, MA Tao-wu, et al. Biomarker responses of *Plagiomnium acutum* to lead stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 292–298.
- [9] 龚双姣, 马陶武, 姜业芳, 等. 铅胁迫对3种藓类植物抗氧化酶活性的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(10): 2035–2040.
- GONG Shuang-jiao, MA Tao-wu, JING Ye-fang, et al. Effects of Pb stress on the activities of antioxidant enzymes in three mosses species[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, 27(10): 2035–2040.
- [10] 张光飞, 段仲昭, 罗晓娟, 等. 2种苔藓的叶绿素荧光特性及耐受性对Pb²⁺浓度的响应[J]. *环境污染与治理*, 2011, 33(1): 36–40.
- ZHANG Guang-fei, DUAN Zhong-zhao, LUO Xiao-juan, et al. Response of tolerance and chlorophyll fluorescence characteristics of two bryophyte species to Pb²⁺ concentration[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, 33(1): 36–40.
- [11] 秦建桥, 夏北成, 赵鹏. 五节芒不同种群对Cd污染胁迫的光合生理响应[J]. *生态学报*, 2010, 30(2): 288–299.
- QIN Jian-qiao, XIA Bei-cheng, ZHAO Peng. Photosynthetic physiological response of two *Miscanthus floridulus* populations to Cd stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 288–299.
- [12] 姚广, 高辉远, 王未来, 等. 铅胁迫对玉米幼苗叶片光系统功能及光合作用的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1162–1169.
- YAO Guang, GAO Hui-yuan, WANG Wei-wei, et al. The effects of Pb-stress on functions of photosystems and photosynthetic rate in maize seedling leaves[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1162–1169.
- [13] Joshi M K, Mohanty P. Chlorophyll a fluorescence as a probe of heavy metal ion toxicity in plants/Papageorgiou G C. Chlorophyll Fluorescence: A Signature of Photosynthesis Advances in Photosynthesis and Respiration. Springer, Dordrecht, 2004: 637–661.
- [14] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 16(14): 444–448.
- ZHANG Shou-ren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(14): 444–448.
- [15] 万雪琴, 张帆, 夏新莉, 等. 镉处理对杨树光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(6): 73–78.
- WAN Xue-qin, ZHANG Fan, XIA Xin-li, et al. Effects of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of solution-cultured poplar plants[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, 44(6): 73–78.
- [16] Kalaji H M, Loboda T. Photosystem II of barley seedlings under cadmium and lead stress[J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, 53(12): 511–516.
- [17] Rau S, Miersch J, Neumann D. Biochemical responses of the aquatic moss *Fontinalis antipyretica* to Cd, Cu, Pb and Zn determined by chlorophyll fluorescence and protein levels[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 59(3): 299–306.
- [18] 籍霞, 张晓鸥, 周甜甜, 等. 重金属Cd、Pb胁迫对大灰藓 *Hypnum plumaeforme* Will. 叶绿素荧光参数的影响[J]. *曲阜师范大学学报*, 2010, 36(3): 95–98.
- JI Xia, ZHANG Xiao-ou, ZHOU Tian-tian, et al. Effect of heavy metal Pb, Cd stress on chlorophyll fluorescence parameters in moss *Hypnum plumaeforme* Will.[J]. *Journal of Qufu Normal University(Natural Science)*, 2010, 36(3): 95–98.
- [19] 李伶, 袁琳, 宋丽娜, 等. 镉对浮萍叶绿素荧光参数的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 1062–1068.
- LI Ling, YUAN Lin, SONG Li-na, et al. Effects of cadmium stress on chlorophyll fluorescence parameters of *Lemna minor* L.[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 1062–1068.
- [20] Pérez-Llamazares A, Aboal J R, Carballeira A, et al. Cellular location of K, Na, Cd and Zn in the moss *Pseudoscleropodium purum* in an extensive survey[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409: 1198–1204.
- [21] Rashid A, Camm E I, Ekramoddoullah K M. Molecular mechanism of action of Pb²⁺ and Zn²⁺ on water oxidizing complex of photosystem II[J]. *FEBS Lett*, 1994, 350: 296–298.
- [22] 刘克贞, 李志博, 林海荣, 等. 北疆棉花叶绿素荧光猝灭特性对渗透

- 胁迫的响应[J]. 新疆农业科学, 2007, 44(1):42-46.
- LIU Ke-zhen, LI Zhi-bo, LIN Hai-rong, et al. Response of Chlorophyll fluorescence quenching characteristics to osmotic stress on leaves of cotton in Northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(1):42-46.
- [23] 刘爱荣, 陈双臣, 王森博, 等. 高温胁迫对番茄幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(5):145-148.
- LIU Ai-rong, CHEN Shuang-chen, WANG Miao-bo, et al. Effects of heat stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters in tomato seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(5):145-148.
- [24] 王友保, 刘登义. Cu、As 及其复合污染对小麦生理生态指标的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5):773-776.
- WANG You-bao, LIU Deng-yi. Effect of Cu, As and their combination pollution on eco-physiological index of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5):773-776.
- [25] 张义贤, 李晓科. 镉、铅及其复合污染对大麦幼苗部分生理指标的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(1):43-46, 53.
- ZHANG Yi-xian, LI Xiao-ke. Effects of Cd, Pb and their combined pollution on physiological indexes in leaf of the *Hordeum vulgare* seedling[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(1):43-46, 53.
- [26] 张红利, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4):458-460.
- ZHANG Hong-li, LI Pei-jun, LI Xue-mei, et al. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4):458-460.
- [27] 姚 婧, 陈雪梅, 王友保. Pb 污染土壤对高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2008, 26(1):61-65.
- YAO Jing, CHEN Xue-mei, WANG Bao-you. Effects of soils contaminated by lead on germination and seedling growth of *Festuca arundinacea* L.[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science)*, 2008, 26(1):61-65.
- [28] 马陶武, 朱 程, 周 科, 等. Cd-Pb 单一及复合污染沉积物对铜锈环棱螺肝胰脏 SOD 和 MT 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):30-37.
- MA Tao-wu, ZHU Cheng, ZHOU Ke, et al. Effects of Cd, Pb and combined contaminated sediments on hepatopancreatic SOD and MT in *Bellamyia aeruginosa*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):30-37.
- [29] 朱宇林, 曹福亮, 汪贵斌, 等. Cd、Pb 胁迫对银杏光合特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(1):47-50.
- ZHU Yu-lin, CAO Fu-liang, WANG Gui-bin, et al. Effects of Cd single and combined stress on chlorophyll content and photosynthetic characteristics of *Ginkgo*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(1):47-50.



流域生态水文过程模拟与预测

本书主要介绍了研究背景、意义及国内外研究进展;研究流域概况及生态水文关系统计分析;植被生态与作物生长观测实验成果;分布式流域水文模型构建与验证;分布式陆地植被生态模型构建与验证;分布式作物生长模型构建与验证;植被与作物生态水文历史演变规律分析;未来气候变化下的生态水文预测;水土保持措施对黄土高原生态水文影响研究;主要的研究成果总结与未来研究展望。

※ 书号:9787122173218

※ 定 价:68.0 元

※ 开本:16

※ 出版日期:2013 年 9 月



水环境中微量推进剂化学发光检测技术

本书介绍了推进剂的种类,水环境中推进剂污染的危害、来源及检测方法,化学发光基本原理、基本类型,常见的化学发光体系以及化学发光检测技术发展趋势;重点介绍作者多年来在水环境中微量推进剂分析检测的研究成果。本书既有基本理论,又有实际应用,可供与推进剂相关的环境监测、化学发光研究的高等学校学生和从事化学发光分析的科技人员和分析工作者使用,也可作为高等学校教学参考书。

※ 书号:9787122169396

※ 定 价:68.0 元

※ 开本:16

※ 出版日期:2013 年 9 月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社

天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系。联系电话:010-64519525