

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23449

## 铅胁迫对地黄生长及光合特性的影响

张艳玲<sup>1</sup>, 邱艳秋<sup>2</sup>, 陈嘉颖<sup>2</sup>, 杨丹丹<sup>2</sup>, 张红瑞<sup>2\*</sup>

(1. 信阳农林学院药学院, 河南 信阳 464000; 2. 河南农业大学农学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 为了阐明铅(Pb)胁迫对地黄生长量及光合特征的影响, 探讨药用植物对重金属胁迫的响应机制, 以‘北京3号’地黄为试验材料, 采用土培盆栽试验, 以自然土壤加水为对照(0 mg·kg<sup>-1</sup>), 设置5个外源Pb浓度(50、100、200、300和400 mg·kg<sup>-1</sup>)处理, 分析不同Pb浓度处理对地黄不同生长时期的生长量、叶片光合色素含量、光合参数和叶绿素荧光参数的影响。结果表明, 高浓度Pb处理抑制了地黄叶片数、叶长、叶宽和叶厚的增长, 光合色素含量和叶绿素荧光参数在整个生育期内随Pb浓度的升高均表现为先升高后降低, 当Pb浓度高于200 mg·kg<sup>-1</sup>时, 电子传递速率、光合量子产量、最大荧光和初始荧光均显著降低; 随Pb浓度的升高, 地黄叶片的净光合速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度在地黄膨大初期至膨大前期逐渐降低, 在膨大中期至收获期则表现为先升高后降低; 蒸腾速率在整个生育期内随Pb浓度的升高呈下降趋势; 地黄的光合特性对Pb的耐受性总体表现为50 mg·kg<sup>-1</sup>处理 > 100 mg·kg<sup>-1</sup>处理 > 0 mg·kg<sup>-1</sup>处理 > 200 mg·kg<sup>-1</sup>处理 > 300 mg·kg<sup>-1</sup>处理 > 400 mg·kg<sup>-1</sup>处理。综上所述, 当Pb浓度低于200 mg·kg<sup>-1</sup>时, 地黄通过吸收光能、增强光合作用对抗Pb胁迫, 当Pb浓度过高时, 地黄光合作用减弱, 对地黄的生长产生显著的抑制作用。研究比较了不同Pb浓度处理对地黄不同生育期生长量及光合特征的影响, 解析了地黄对Pb元素的抗性机制, 以为农田土壤的安全利用及地黄的种植管理提供重要技术参考。

**关键词:** 铅胁迫; 地黄; 生长量; 光合特性

由于工业排放和农业生产的发展, 重金属等不可降解的污染物在土壤中积累, 使中国近20%的现有耕地被严重污染, 对生态环境构成威胁, 而土壤重金属污染及相关问题也引起了科学家们的广泛关注<sup>[1]</sup>。重金属污染可严重影响植物的生长代谢, 且极易在植物体内富集而自身又难以降解, 通过食物链的传递进而危害人体的健康<sup>[2]</sup>。植物体富集的重金属大多是来自土壤中, 已有研究发现, 根及根茎类药材中重金属含量与种植土壤中重金属含量呈正相关<sup>[3]</sup>, 直接影响药材的品质和用药安全。其中, 铅(Pb)是重金属污染的主要元素, 也是污染较为严重的一种<sup>[4]</sup>。Pb被植物根系吸收能显著改变植物的膜结构和渗透平衡, 进而导致叶绿体等重要器官的损伤, 降低其光合速率, 进而对植物的光合作用产生影响<sup>[5]</sup>。

光合作用作为植物物质能量来源的关键代谢过程, 对植物的生长发育进程具有重要作用, 光合速率、光和荧光参数等相关指标的改变可以反应植物光合作用的强弱和胁迫因子对植物的损害程度。目前重金属Pb对人参<sup>[6]</sup>、川芎<sup>[7]</sup>等根及根茎类药用植物光合作用的影响已有研究, 地黄作为根及根茎类中药材, 有关Pb胁迫对其光合作用影响的研究鲜有报道。

地黄为玄参科植物地黄(*Rehmannia glutinosa* Libosch.)的新鲜或干燥块根<sup>[8]</sup>, 具有清热生津, 凉血止血的作用, 始见于《神农本草经》, 是著名的“四大怀药”之一<sup>[9]</sup>, 不仅用于临床, 还用于保健品、食品等, 市场需求量较大。土壤是地黄赖以生存的重要载体, 土壤重金属污染问题将制约地黄的正常生长发育, 甚至对地黄食用性造成巨大威胁<sup>[10]</sup>。因此, 本试验通过研究不同浓度Pb对地黄叶绿素含量、光合特性和叶绿素荧光特性的影响, 探究地黄对Pb的光合响应特征, 以为解析重金属Pb对地黄光合特性的影响机制与农田土地的安全利用及其种植管理提供重要理论基础。

收稿日期: 2023-07-25; 录用日期: 2023-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(31701370); 河南省科技攻关资助项目(242102311288, 242102310532, 242102110272)。

作者简介: 张艳玲(1973-), 副教授, 硕士, 主要从事中药材栽培与中药资源综合利用研究。E-mail: 2009180048@xyafu.edu.cn。

通讯作者: 张红瑞, E-mail: zhanghongrui2003@126.com。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

盆栽试验所需土壤采集于河南农业大学试验田, 试验田前茬撂荒; 供试地黄 (*Rehmannia glutinosa* Libosch.) 品种为‘北京3号’; 所用乙酸铅  $[(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}]$  为国产分析纯。

### 1.2 试验设计

试验于2020年5—11月进行。盆栽试验所用土壤风干后粉碎过筛, 将Pb溶液喷洒至土壤中, 混合均匀。土壤陈化两星期后转入塑料盆中, 依据温县种植区表层土壤均值在  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  [11] 和《土壤环境质量标准》(GB 15618—2018) 中Pb的污染风险管制值, 结合预试验, 设置对照组  $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  及处理组 50、100、200、300 和  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  5个Pb浓度梯度, 3次生物学重复。试验用筒选择上口直径 34.2 cm, 下底直径 18.5 cm, 高度 22.3 cm 的塑料筒, 每筒栽种地黄 1 株, 并将其置于试验田进行培养及后期管理。

### 1.3 测定项目及方法

试验材料分别于8月15日(膨大初期)、9月10日(膨大前期)、9月30日(膨大中期)、10月20日(膨大后期)和11月10日(收获期)共5个时期取样。每次取样选取不同Pb浓度处理下长势一致的9株植株, 用于测定其相关农艺性状、光合色素、光合及荧光特性。

#### 1.3.1 光合色素含量的测定

参考程贵文方法 [12] 稍作改进, 采用分光光度法测定叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。将地黄叶片去掉中脉后剪碎混合, 称取新鲜样品 0.1 g 放入试管中, 加入 10 mL 提取液 (无水乙醇和与丙酮按照 1:1 的体积比配置), 于黑暗条件下浸提至用肉眼可观察到叶片组织完全变白时, 即说明浸提完全, 测量其在 663、645 和 470 nm 下的吸光度, 提取液调零。叶绿素含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 按下列公式计算, 设置 3 次重复, 取均值进行统计分析。

$$\text{叶绿素 a} = (12.72 D_{663} - 2.59 D_{645}) / V / (1000W)$$

$$\text{叶绿素 b} = (22.88 D_{645} - 4.67 D_{663}) / V / (1000W)$$

类胡萝卜素 =  $(1000 D_{470} - 3.27 Ca - 104 Cb) / V / 229 / (1000W)$   
 式中:  $D_{663}$  表示波长 663 nm 处的吸光值;  $D_{645}$  表示波长 645 nm 处的吸光值;  $D_{470}$  表示波长 470 nm 处的吸光值;  $V$  为提取液的体积 (mL);  $W$  为叶片鲜重 (g);  $Ca$  为叶绿素 a 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );  $Cb$  为叶绿素 b 含量 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

#### 1.3.2 叶绿素荧光及光合特性的测定

采用 Handy PEA 连续激发式叶绿素荧光仪测定叶绿素荧光参数。选取生长中心往外数第三轮功能叶片, 避开主叶脉, 进行 30 min 暗适应后进行测定。

选择晴朗天气的上午 09:00—11:00 使用 Li-6400XT 光合仪进行测定, 选取植株从生长中心往外数第三轮的功能叶片, 避开主叶脉选择叶片中间部位进行测定净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度、蒸腾速率, 每个地黄植株测 3 片叶片, 取其平均值用于统计分析。

#### 1.4 数据统计分析方法

采用 Excel 2015 整理原始数据, 使用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析、相关性分析、逐步回归分析和主成分分析, 差异显著性检验采用 LSD 法, 显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ 。图表采用 Excel 2015 和 GraphPad Prism 制作, 采用在线工具 ChiPlot (<https://www.chiplot.online/>) 进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 铅胁迫对地黄地上部农艺性状的影响

由图 1 可见, 在地黄膨大前期叶片数随土壤中 Pb 浓度的增加表现为先升高后降低, 其余各时期地黄叶片数均逐渐减少, 高浓度 Pb ( $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 处理下地黄各生育期的叶片数均下降到最低值, 分别为 10.33、14.00、12.67、11.33 和 12.00 片  $\cdot \text{株}^{-1}$ , 较对照显著 ( $P<0.05$ ) 降低了 63.95%、56.25%、61.22%、66.34% 和 54.43% (图 1A)。在地黄膨大初期最大叶长随土壤中 Pb 浓度的增加逐渐降低, 其余各时期变化均为先升高后降低, 在地黄膨大前期至膨大后期 (9月10日至10月20日) 在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  Pb 处理下叶长达到最大, 分别为 21.00、22.97 和 23.23 cm, 较对照升高了 14.55%、16.19% 和 34.30% (图 1B)。在地黄膨大初期 (8月15日) 最大叶宽随土壤中 Pb 浓度的增加逐渐降低, 其余各时期均表现为先升高后降低, 随生育进程的推进各处理均在地黄膨大中期 (9月30日) 达到最大值, 分别为 8.00、8.57、8.80、7.40、7.13 和 6.50 cm (图 1C)。在地黄膨大初期至膨大中期 (8月15日至9月30日) 叶厚随着土壤中 Pb 浓度的增加呈现为先升高后降低的趋势, 且均在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下达到最大值, 其中在地黄膨大初期至膨大前期 (8月15日至9月10日) 叶厚较对照显著 ( $P<0.05$ ) 升高了 11.21% 和 12.39% (图 1D)。

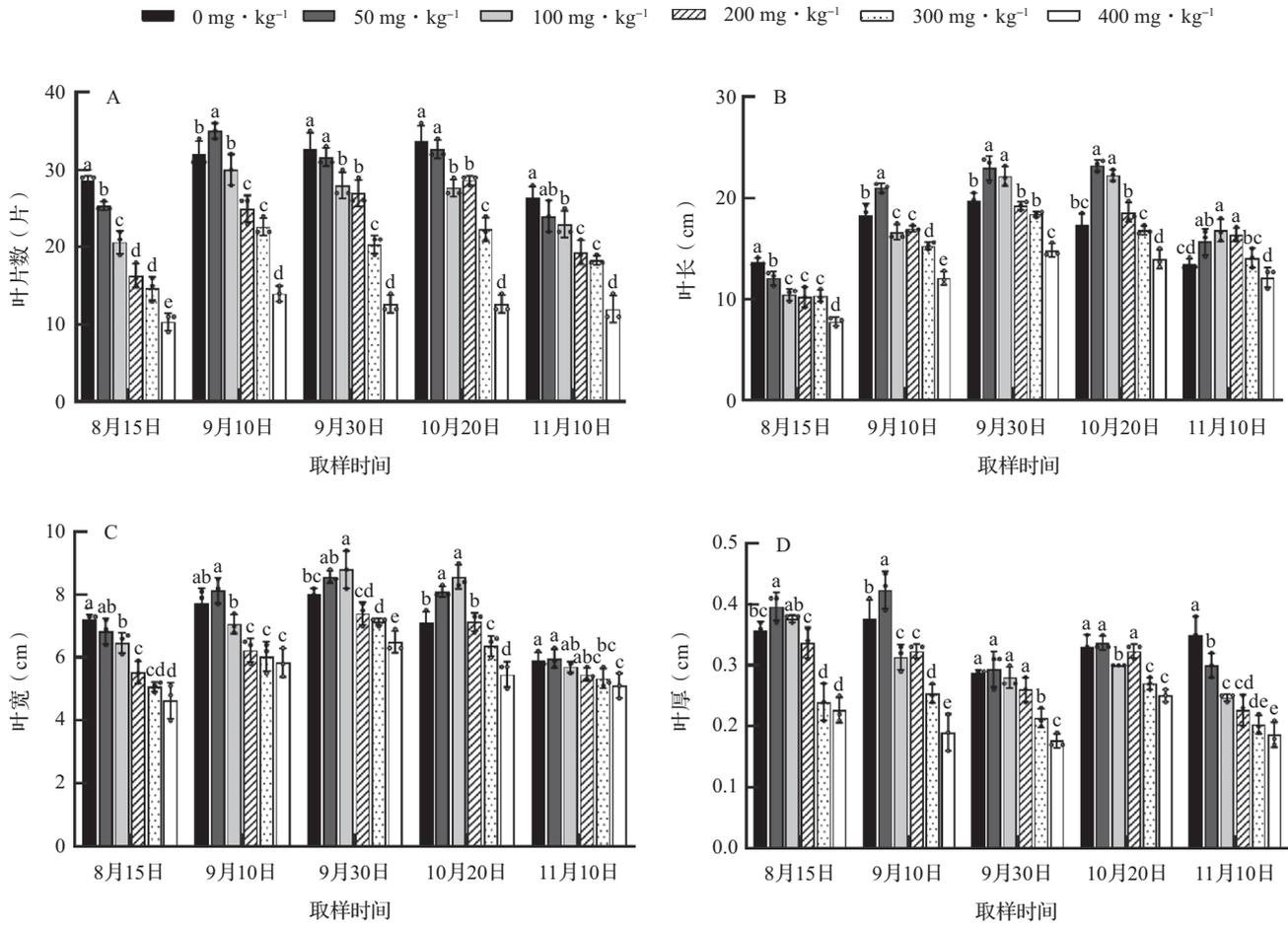


图1 不同铅浓度对地黄地上部农艺性状的影响

注：不同小写字母表示同一取样时间不同铅浓度处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )；下同。

### 2.2 铅胁迫对地黄叶片光合色素含量的影响

由图2可见, 随土壤中Pb浓度的升高, 地黄在整个生育期内的光和色素含量均表现为先升高后降低的趋势, 但不同生育期光合色素含量达最大值的Pb浓度有所不同。在地黄膨大初期(8月15日), 叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和叶绿素总量在  $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下达到最大值, 分别为  $1.24$ 、 $1.25$ 、 $0.56$  和  $2.49 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 较对照分别增加了  $17.03\%$ 、 $22.32\%$ 、 $21.18\%$  和  $17.74\%$ ; 在地黄膨大前期(9月10日)叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和叶绿素总量在  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下达到最大值, 分别较对照增加了  $18.89\%$ 、 $17.18\%$ 、 $31.91\%$  和  $16.59\%$ ; 在地黄膨大后期至收获期(10月20日至11月10日), 光合色素均在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下达到最大值, 叶绿素a含量分别较对照显著 ( $P < 0.05$ ) 增加了  $47.93\%$  和  $62.16\%$ , 叶绿素b含量分别较对照增加了  $43.86\%$  和  $60.89\%$ , 类胡萝卜素含量分别较对照增加了  $40.97\%$  和  $48.79\%$ 。由此可知, 当Pb浓度较低时, 可以促进地黄的生长,

而高浓度Pb会抑制地黄的正常生长, 使其叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和总叶绿素含量下降。

### 2.3 铅胁迫对地黄叶片光合参数的影响

由图3可知, 净光合速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度在地黄膨大初期至膨大前期(8月15日至9月10日)随Pb浓度的升高逐渐降低, 在膨大中期至收获期(9月30日至11月10日)随Pb浓度的升高表现为先升高后降低; 蒸腾速率在整个生育期内随Pb浓度的升高呈下降趋势。在膨大初期(8月15日)和膨大前期(9月10日)气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度随土壤Pb浓度的增加逐渐降低, 且在  $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度处理下达到最大值, 在  $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  浓度下为最小值。在地黄膨大初期(8月15日)蒸腾速率随Pb浓度升高而下降, 在膨大前期至收获期(9月10日至11月10日)随Pb浓度的增加表现为先升高后下降的变化趋势。由此可知, 高浓度Pb处理会显著抑制地黄叶片的净光合速率、气孔导度、胞间  $\text{CO}_2$  浓度及蒸腾速率参数。

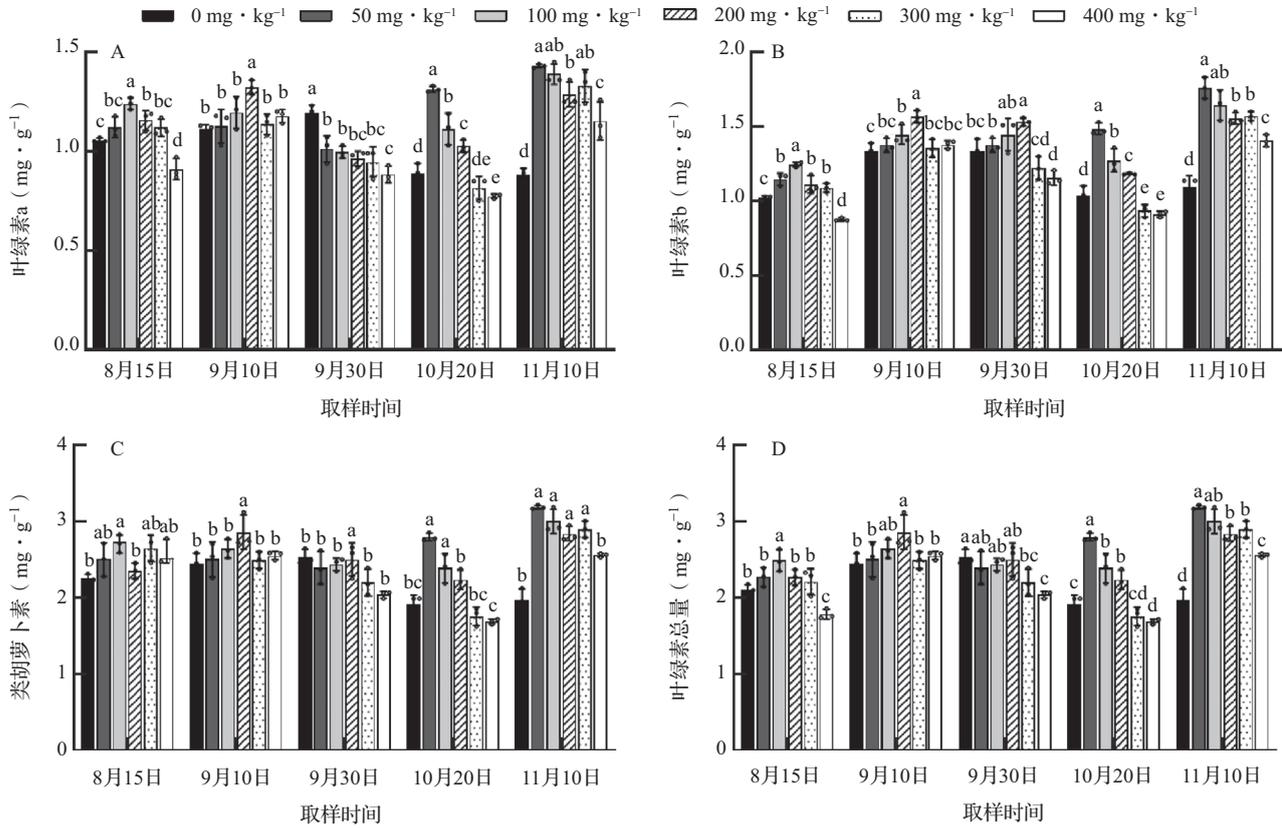


图2 不同铅浓度对地黄光合色素含量的影响

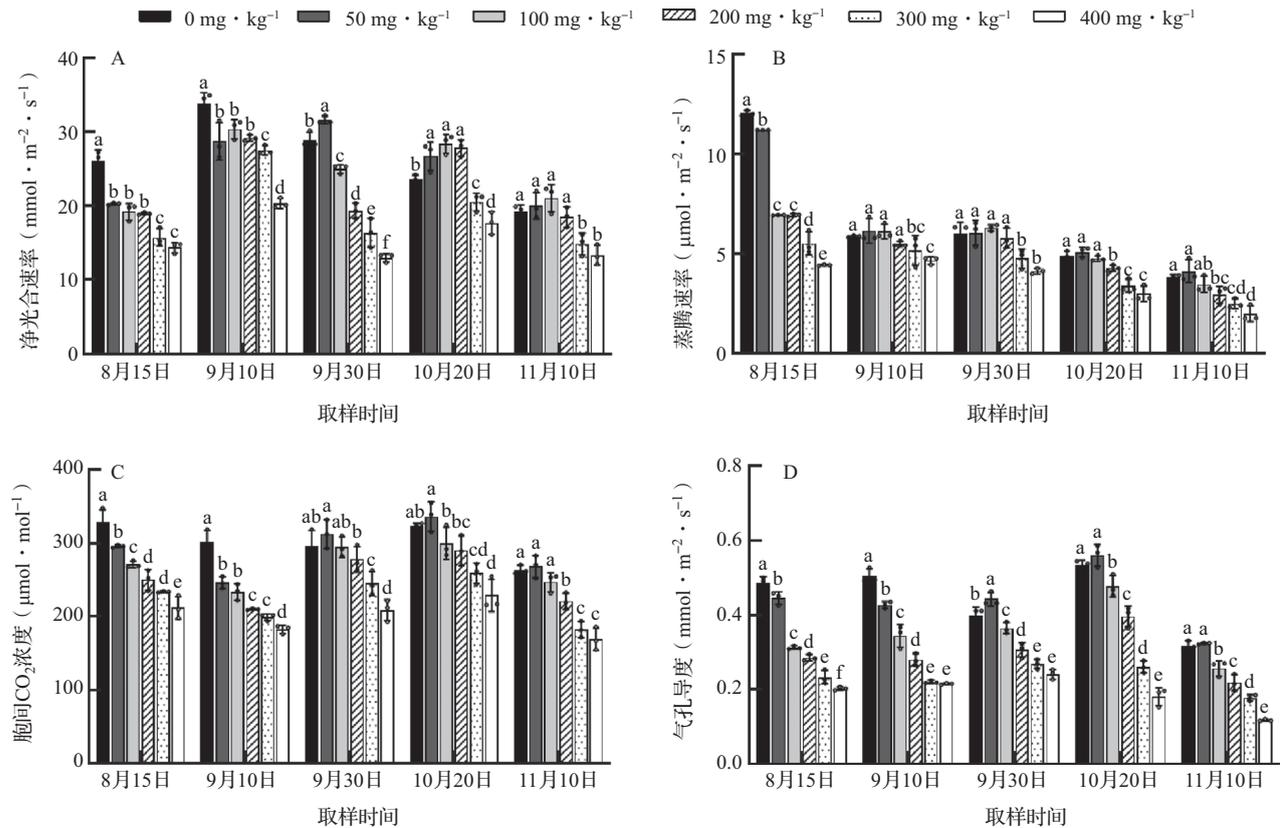


图3 不同铅浓度对地黄光合参数的影响

## 2.4 铅胁迫对地黄叶绿素荧光参数的影响

由图4可知,电子传递速率(ETR)、光合量子产量[Y(II)]、光化学淬灭系数(qP)、非化学淬灭系数(NPQ)、最大荧光(Fm)和初始荧光(Fo)在地黄整个生育期内均表现为低浓度促进、高浓度抑制。qP在地黄整个生育期内随Pb浓度的升高逐渐降低,Pb浓度越高,qP降低幅度越大,且均在高浓度Pb(400 mg·kg<sup>-1</sup>)处理下下降到最低

值,分别较对照降低了30.90%、30.76%、25.15%、51.94%和64.85%;在地黄膨大初期至中期(8月15日至9月30日),ETR、Y(II)、Fm和Fo随Pb浓度的升高呈先升高后降低的趋势,在膨大后期至收获期(10月20日至11月10日)则逐渐降低;在地黄膨大后期至收获期(10月20日至11月10日)NPQ在高浓度Pb(400 mg·kg<sup>-1</sup>)处理下较对照分别降低了58.17%、67.25%。

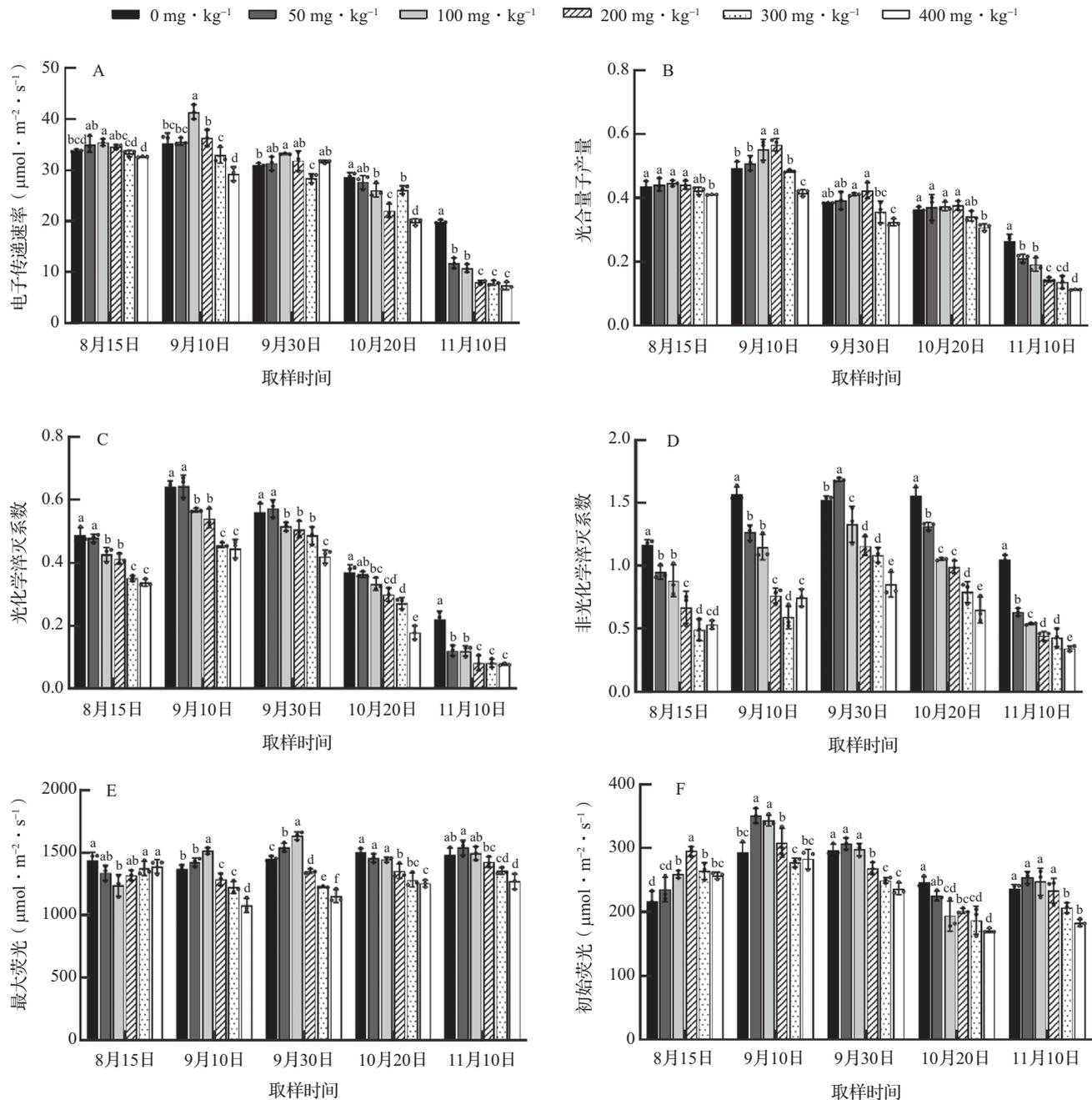


图4 不同铅浓度对地黄叶绿素荧光参数的影响

2.5 各指标间相关性分析

由图 5 可知, 叶绿素 a 与叶绿素 b、叶绿素总量达到极显著正相关, 相关系数分别为 0.99 和 1.00; 净光合速率与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、最大荧光和初始荧光达到极显著正相关, 相关系数分别为 0.93、0.96 和 0.98; 气孔导度与蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、Y ( II ) 和 Fm 均达到极显著正相关, 相关系数分别为 0.99、0.98、0.92 和 0.95; 蒸

腾速率与胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、Fm 和 Fo 达到极显著正相关, 相关系数分别为 0.99、0.98 和 0.93; ETR 与 Y ( II )、qP、NPQ 均达到极显著正相关, 相关系数分别为 0.95、1.00 和 1.00。所有单项指标间都存在或大或小的相关性, 使反映的信息发生重叠, 简单相关分析较难准确评价地黄对铅的耐受性, 进行耐受性综合评价更具有可比性和准确性。

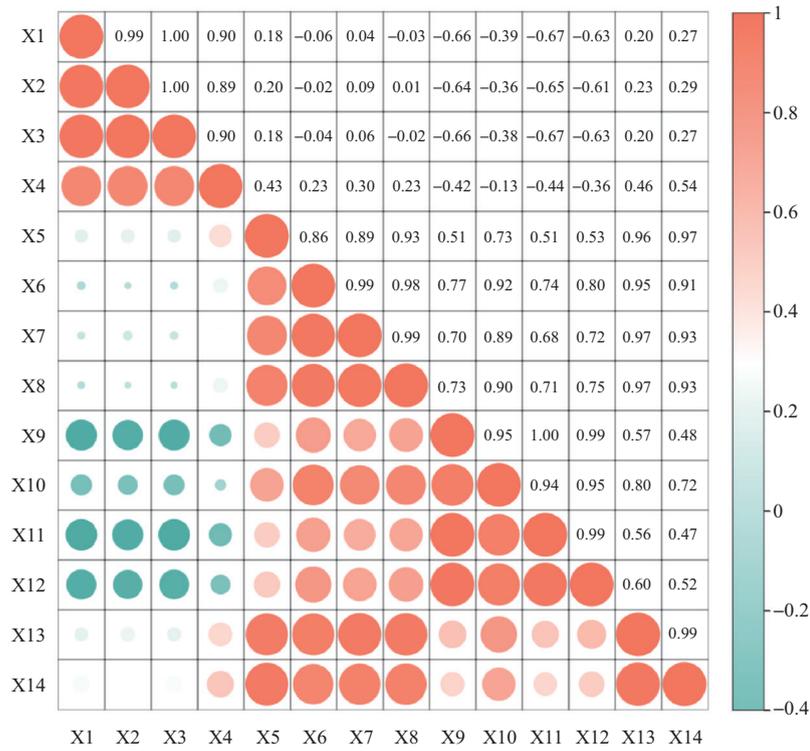


图 5 各指标间相关性分析

注: X<sub>1</sub> ~ X<sub>14</sub> 依次为叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量、类胡萝卜素、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、电子传递速率、光合量子产量、光化学淬灭系数、非化学淬灭系数、最大荧光、初始荧光。下同。

由表 1 和表 2 可知, 运用主成分法对各指标进一步分析, 可以把原来的 14 个单项指标转化成 2 个综合指标, 这两个综合指标的累积贡献率分别为 54.537% 和 42.328%, 总贡献率为 96.864%, 说明这两个综合指标可以概况 14 个指标所包含的 96.864% 的信息<sup>[13]</sup>。通过对地黄各生长生理指标进行隶属函数综合分析, 以综合评价其对 Pb 的耐受性, 用综合评价值作为标准来判别地黄对各浓度 Pb 的耐受性强弱。地黄在光合特性方面对 6 种浓度 Pb 的耐受性顺序为 50 mg · kg<sup>-1</sup> 处理 >100 mg · kg<sup>-1</sup> 处理 >0 mg · kg<sup>-1</sup> 处理 >200 mg · kg<sup>-1</sup> 处理 >300 mg · kg<sup>-1</sup> 处理 >400 mg · kg<sup>-1</sup> 处理。

表 1 各综合指标的系数及贡献率

指标	综合指标 (1)	综合指标 (2)
X1	-0.103	0.389
X2	-0.092	0.392
X3	0.001	0.392
X4	-0.101	0.390
X5	0.323	-0.181
X6	0.356	-0.055
X7	0.320	-0.055
X8	0.320	-0.187
X9	0.328	-0.166
X10	0.318	0.195
X11	0.300	0.195
X12	-0.177	-0.371
X13	0.339	0.131
X14	0.348	0.091
累计贡献率 (%)	54.537	42.328

表 2 各浓度综合指标值、隶属函数值和综合评价值

铅浓度 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\mu(1)$	$\mu(2)$	R1	R2	综合评价值	排序结果
0	0.746	0.524	0.420	0.229	0.649	3
50	1.000	0.949	0.563	0.415	1.000	1
100	0.876	1.000	0.493	0.437	0.908	2
200	0.596	0.597	0.336	0.261	0.596	4
300	0.310	0.300	0.174	0.131	0.306	5
400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	6

注:  $\mu(1)$ 、 $\mu(2)$  为综合指标值, R1、R2 为隶属函数值。

### 3 讨论

#### 3.1 铅胁迫抑制地黄光合色素含量的积累

叶绿素是植物进行光合作用中吸收光的主要色素, 叶绿素含量的高低直接影响植物光合作用能力的强弱, 决定其新陈代谢能否正常进行<sup>[13]</sup>。重金属胁迫会破坏光合过程的完整性, 进一步影响植物的光合作用<sup>[14]</sup>, 通过叶绿素含量的变化可以反映重金属对植物的损害程度。本研究结果表明, 叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素含量在地黄整个生育期内随土壤中 Pb 浓度的升高均表现为先升高后降低。这与在不同 Pb 浓度胁迫下活血丹叶片叶绿素含量呈先增后减的变化趋势相一致, 且低浓度 Pb 处理可促进其生长, 而高浓度 Pb 则抑制生长<sup>[15]</sup>; 薛文秀等<sup>[16]</sup>研究表明, 低浓度 Pb 可以增强叶绿体的酶活性, 从而促进植物体内叶绿素的合成, 高浓度 Pb 可加速植物体内叶绿素的分解, 这与本研究结果相符。Pb 胁迫下之所以会降低植物中叶绿素含量, 是由于 Pb 元素影响了植物光合作用的进程, 光合产物的输出减少, 从而破坏叶绿体的结构, 导致叶绿素合成减少<sup>[17]</sup>。

#### 3.2 铅胁迫抑制地黄叶片光合参数

当植物受到 Pb 毒害时, 光合过程会受到一定程度的破坏, 影响光合产物和其供能, 从而抑制植物的生长<sup>[18-19]</sup>。净光合速率可直接体现光和系统的功能, 是判断植物光和系统正常与否的主要指标, 而气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度是评价气孔限制作用的重要指标, 二者以相同的方向变化时, 又可作为判断植物光合作用下降的主要依据<sup>[20-21]</sup>。本研究表明, 地黄对 Pb 胁迫有一定的耐受性, 当 Pb 浓度超过了地黄的耐受范围就会抑制其光合作用的正常进行。在地黄膨大初期叶片的蒸腾速率随 Pb 浓度的升高则逐渐降低, 而膨大前期至收获期呈现为

先升高后降低的变化趋势, 这与在活血丹中的研究结果类似, 当 Pb 浓度较低时, 活血丹叶片的蒸腾速率升高的幅度较小, 超过一定浓度其叶片的蒸腾速率就显著降低<sup>[15]</sup>。从地黄不同生育期叶片的气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度变化来看, 在高浓度 Pb 胁迫下气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度显著降低, 且与同时期的净光合速率变化趋势一致, 由此可见, Pb 胁迫对地黄叶片光合能力的抑制作用可能是气孔限制引起的。

#### 3.3 铅胁迫对地黄叶绿素荧光参数及生长的影响

叶绿素荧光动力学参数能够较好地反映植物体内光合作用的信息, 全面反映植物叶片光合作用中能量的吸收和消耗, 较为完整地描述植物光合生理的动态变化过程<sup>[22-23]</sup>。余国源<sup>[24]</sup>研究表明 Pb 处理可降低伞房决明光合电子的传递速率, 高浓度 Pb 胁迫下  $F_m$ 、 $qP$  和  $NPQ$  值显著下降, 而  $F_o$  值则显著上升, 本研究也得到了类似结果, 在地黄生育后期 ETR 随着 Pb 浓度的升高逐渐降低, 表明其光合电子的传递速率降低, 从而降低了其净光合速率。 $F_m$  在高浓度 Pb 处理下 ( $>300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 显著降低, 表明地黄产生了光抑制现象, 且高浓度 Pb 胁迫下对地黄光系统 II 的潜在活性有一定的破坏作用。 $qP$  是由光合作用引起的荧光淬灭, 反映植物光合活性的高低;  $NPQ$  则是由热耗散引起的荧光淬灭, 反映光保护能力的强弱。Pb 浓度大于  $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时, 地黄各生育期  $qP$  和  $NPQ$  值的变化趋势一致, 均是降低的, 表明在 Pb 胁迫下地黄的光和系统被破坏, 其光合活性降低、光保护能力较弱。本研究发现, 在地黄膨大初期  $F_o$  值均显著高于对照, 地黄膨大前期至收获期高浓度 Pb 处理 ( $>300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 下则显著低于对照, 这与余国源<sup>[24]</sup>的研究结果相反, 可能是地黄在不同生育期对 Pb 的耐受能力强弱存在差异。

植物对重金属的耐受性是一种多因素共同作用

的复杂机制,在不同生育时期可通过相应指标的一系列反应来表示。本研究表明,随着Pb处理时间的延长,地黄的光合系统造成了不可逆的损伤,导致光合速率的降低,进而影响地黄的生长。在 $0 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的Pb处理下,地黄通过吸收光能,增强光合作用对抗Pb胁迫的能力,而高浓度( $>100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的Pb处理对地黄的生长产生显著的抑制作用,在细胞膜脂氧化和气孔限制的影响下,地黄光合作用减弱,生长受到一定的伤害。

#### 4 结论

在地黄整个生育期内,随着Pb浓度的升高,叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和叶绿素总含量均表现为先升高后降低。ETR、Y(II)、NPQ、Fm和Fo均表现为低浓度促进、高浓度抑制,其中ETR和Y(II)在地黄生育后期随着Pb浓度的升高逐渐降低,qP在整个生育期内逐渐降低,Pb浓度越大,降低幅度越大。地黄在6种Pb浓度处理下,其光合特性的耐受性强弱为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理 $>400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理,当超过一定浓度时地黄对光合特性的耐受性逐渐降低。

本研究解析了不同浓度Pb处理对地黄不同生育期内生长指标及光合特性的影响,表明Pb胁迫对地黄的生长具有明显的抑制作用,该研究仅从生理方面解析了地黄对Pb胁迫响应的关系,仍需更系统地探究铅胁迫对地黄中有效成分的影响,这也将为深入探讨地黄对重金属胁迫的应答机制提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Alkorta I, Hernández-Allica J, Becerril J M, et al. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic [J]. *Reviews in Environmental Science Biotechnology*, 2014, 3: 71-90.
- [2] Feleffel M N, Mirdad Z M. Hazard and effects of pollution by lead on vegetable crops [J]. *Journal of Agricultural & Environmental Ethics*, 2013, 26: 547-567.
- [3] 李子唯. 三七对重金属镉的富集效应及其生理机制研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [4] 樊霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (10): 1727-1736.
- [5] 何冰, 何计兴, 何新华, 等. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (6): 1263-1268.
- [6] 梁尧, 姜晓莉, 杨粉团, 等. 重金属铅胁迫对人参光合特征与皂苷含量的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2014, 39 (16): 3054-3059.
- [7] 李笑媛. 镉铅复合胁迫对中药川芎生长特性的影响 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [8] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [9] 郑文杰. 地黄本草文化研究 [D]. 济南: 山东中医药大学, 2020.
- [10] 张宇虹. 重金属铬( $\text{Cr}^{6+}$ )胁迫对地黄幼苗生长影响的研究 [J]. *环保科技*, 2016, 22 (4): 9-13.
- [11] 成芬, 冯爱云. 怀山药及其种植区土壤中重金属污染分析 [J]. *湖北农业科学*, 2011, 50 (20): 4152-4155.
- [12] 程贵文, 龚洪恩, 颜送宝, 等. 油茶叶绿素提取方法的比较研究 [J]. *湖北林业科技*, 2017, 46 (6): 11-13, 58.
- [13] 丁富功, 侯泽豪, 卢奕霏, 等. 小麦不同组织器官叶绿素测定方法的比较研究 [J]. *东北农业科学*, 2022, 47 (5): 111-115.
- [14] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24 (12): 1507-1512.
- [15] 陈一博, 李享, 宋红. 铅胁迫对活血丹光合特性的影响 [J]. *经济林研究*, 2019, 37 (4): 155-162.
- [16] 薛文秀, 尚晓硕, 蒋艺, 等. 铅胁迫对垂柳生长和光合生理特性的影响 [J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 40 (3): 28-32.
- [17] 李瑞莉. 长毛月见草对Cd、Pb、Cu胁迫的生理生态响应 [D]. 沈阳: 沈阳大学, 2018.
- [18] 李嘉敏. 铅胁迫对矮牵牛生理特性的影响 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2021.
- [19] 杨红兰, 冯守富, 慕光杉, 等. 铅胁迫对青檀幼苗生理生态的影响 [J]. *植物学研究*, 2018, 7 (1): 54-59.
- [20] Tang L, Ying R R, Jiang D, et al. Impaired leaf  $\text{CO}_2$  diffusion mediates Cd-induced inhibition of photosynthesis in the Zn/Cd hyperaccumulator *picris divaricata* [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2013, 73: 70-76.
- [21] 李林玉, 黄群策, 张书良, 等. 低能氮离子束与UV-B增强对水稻光合及蒸腾速率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2013, 29 (15): 136-144.
- [22] Hauck M, Paul A, Gross S, et al. Manganese toxicity in epiphytic lichens: chlorophyll degradation and interaction with iron and phosphorus [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 49 (2): 181-191.
- [23] Lysenko E A, Klaus A A, Pshybytko N L, et al. Cadmium accumulation in chloroplasts and its impact on chloroplastic processes in barley and maize [J]. *Photosynthesis Research*, 2014, 125 (1): 1-13.
- [24] 余国源. 伞房决明对土壤重金属Pb、Cd、Zn胁迫的生理响应研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.

**Effect of Pb stress on growth and photosynthetic characteristics in *Rehmannia glutinosa***

ZHANG Yan-ling<sup>1</sup>, QIU Yan-qiu<sup>2</sup>, CHEN Jia-ying<sup>2</sup>, YANG Dan-dan<sup>2</sup>, ZHANG Hong-rui<sup>2\*</sup> (1. College of Pharmacy, Xinyang Agricultural and Forestry University, Xinyang Henan 464000 2. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450046)

**Abstract:** To clarify the effects of lead (Pb) stress on the growth and photosynthetic characteristics of *Rehmannia glutinosa*, and to explore the response mechanism of medicinal plants to heavy metal stress, a pot experiment was conducted using 'Beijing No.3' as the experimental material to investigate growth mass leaf photosynthetic pigment content, photosynthetic parameters and chlorophyll fluorescence parameters as influenced by five exogenous Pb concentration (50, 100, 200, 300, 400 mg · kg<sup>-1</sup>). Soil without added Pb was used as the control (0 mg · kg<sup>-1</sup>). The results showed that high concentration of Pb treatment inhibited the growth of leaf number, leaf length, leaf width and leaf thickness of *R. glutinosa*. The photosynthetic pigment content and chlorophyll fluorescence parameters increased first and then decreased with the increase of Pb concentration during the whole growth period. Electron transport rate, photosynthetic quantum yield, maximum fluorescence and initial fluorescence were significantly decreased. With the increase of Pb concentration, the net photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular CO<sub>2</sub> concentration of *R. glutinosa* leaves gradually decreased from the initial stage of *R. glutinosa* expansion to the early stage of *R. glutinosa* expansion, and increased first and then decreased from the middle stage to the harvest stage. The transpiration rate decreased with the increase of Pb concentration during the whole growth period. The tolerance of photosynthetic characteristics of *R. glutinosa* to Pb was 50 mg · kg<sup>-1</sup> treatment > 100 mg · kg<sup>-1</sup> treatment > 0 mg · kg<sup>-1</sup> treatment > 200 mg · kg<sup>-1</sup> treatment > 300 mg · kg<sup>-1</sup> treatment > 400 mg · kg<sup>-1</sup> treatment. This study compared the effects of different Pb concentrations on the growth and photosynthetic characteristics of *R. glutinosa* in different growth stages, and analyzed the resistance mechanism of *R. glutinosa* to Pb, in order to provide an important technical reference for the safe use of farmland soil and the planting management of *R. glutinosa*.

**Key words:** Pb stress; *Rehmannia glutinosa*; biomass; photosynthetic characteristics