

摘要

近些年, 由于人们大量采矿、废气废水的随意排放, 以及使用重金属超标的物品等, 导致重金属污染越来越严重, 直接影响到城市生态环境和人类的生活健康。重金属汞具有高生物累积性、高生物毒性、持久性、二次挥发和再沉降等特性, 汞污染问题已成为研究学者的重点关注内容。尽管汞已成为全球高度关注的污染物, 然而相对于其他重金属污染, 现目前对于植物修复汞污染的研究还很少。本文选取蔷薇科(Rosaceae)蔷薇属(*Rosa L.*)月季(*Rosa maidy*)作为试验材料, 采用人工盆栽模拟的方法, 揭示了月季的光合生理特性, 系统地研究了在不同浓度的重金属汞处理下, 月季的生长和生理生化响应, 探讨月季能否在汞污染的土壤中正常生长, 是否能将土壤中的汞转移到体内, 而不影响月季的最佳观赏价值。本研究不仅能够为汞污染严重地区的生态修复和绿化美化树种选择提供技术支持, 还能为植物修复土壤重金属研究进程提供科学的理论支撑。研究结果如下:

(1) 月季的光合特性

月季的光饱和点(LSP)为 $1166.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光补偿点(LCP)为 $0.00 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 表明其对强光与弱光都具有良好的适应性, 对光的生态适应能力强。月季的 CO_2 补偿点($63 \mu\text{mol}/\text{mol}$)较低, 而 CO_2 饱和点($1749.82 \mu\text{mol}/\text{mol}$)较高, 表明该月季的 CO_2 同化能力强且利用幅度较宽。在光照饱和的条件下, “小女孩”月季的光合速率更大程度上受 CO_2 供应的限制。月季净光合速率日变化呈不对称的双峰曲线, 11:00 出现光合“午休”现象, 这是由气孔限制引起的。气孔导度日变化呈单峰曲线, 胞间 CO_2 浓度呈现“V”型变化趋势, 蒸腾速率呈现单峰曲线趋势。说明该品种对光照要求低, 可栽植的地区比较广泛, 可以作为土壤重金属修复试验的优良材料。

(2) 重金属 Hg 胁迫对月季生长状况的影响

当 Hg 浓度为 $0.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 和 $1.0 \text{ mg}/\text{kg}$ 胁迫时, 即月季处于低浓度 Hg 条件下时, 月季表现出良好的生长状态。与对照组相比, Hg 胁迫对月季的生长指标(株高、根长、鲜重、茎粗、生物量等)均有不同程度的促进作用, 但随着胁迫浓度的升高($\geq 50 \text{ mg}/\text{kg}$), 月季的生长指标(株高、根长、鲜重、茎粗、生物量等)均呈显著下降趋势, 表现出抑制作用。Hg 胁迫对月季的叶长和叶宽发育过程没有显著性的影响。

(3) 重金属 Hg 胁迫对月季生理指标的影响

在低浓度处理下($0.5 \text{ mg}/\text{kg}$ 、 $1.0 \text{ mg}/\text{kg}$), 月季的净光合速率、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量与对照组相比有所增加, 但没有显著性差异。随着胁迫浓度的升高($\geq 50 \text{ mg}/\text{kg}$)和时间的增加, 月季的净光合速率、叶绿素 a 含量、

叶绿素 b 含量和总叶绿素含量与对照组相比显著降低。月季的气孔导度、蒸腾速率随着胁迫时间和浓度的增加(≥ 10 mg/kg)显著性降低, 胞间 CO_2 浓度在高浓度 Hg (≥ 10 mg/kg)胁迫下显著性降低, 说明“气孔限制”是光合作用的限制因素。月季的丙二醛(MDA)含量与相对电导率随着 Hg 的添加 (≥ 10 mg/kg)呈显著性升高, 说明汞浓度(≥ 10 mg/kg)对月季的生理活动有显著性抑制。

(4) 重金属 Hg 胁迫对月季吸收积累和修复能力的影响

随着重金属 Hg 浓度的增加, 月季根部、茎部、叶部的 Hg 含量逐渐增加。在胁迫浓度为 100 mg/kg 时, 月季含有最大 Hg 含量, 且根部 $>$ 茎部 $>$ 叶部。富集系数呈现先增加后降低的变化趋势, 在 Hg 处理浓度为 1.0 mg/kg 时, 月季根、茎、叶各部位的富集系数达到最大, 最大值分别达到 0.668、0.246、0.060。对土壤汞的转移系数分别达到 0.530 和 0.460。随着浓度的增加转运系数降低, 在对照组达到最大值, 且转运系数大于 1。在胁迫浓度为 0.5 mg/kg 和 1.0 mg/kg 时, 对土壤汞的转移系数分别达到 0.530 和 0.460; 根 \rightarrow 茎的转运系数呈下降趋势, 转运系数均小于 1; 茎 \rightarrow 叶的转运系数呈上升趋势, 但转运系数均小于 1。分配系数表明, 随着 Hg 浓度(≥ 0.5 mg/kg)的增加, 月季根部的 Hg 含量呈显著性增加, 茎部和叶部的 Hg 含量呈显著性下降趋势。低浓度下月季的富集系数和转运系数比高浓度胁迫下高, 且重金属主要分布在根系部位, 说明月季可以在低浓度(≤ 1.0 mg/kg)范围内修复土壤重金属 Hg 污染, 且属于低浓度(≤ 1.0 mg/kg)范围内的汞污染修复优势植物。

关键词: 重金属污染; 植物修复; 月季; Hg 胁迫; 转移积累

目 录

目 录	I
摘 要	V
Abstract	VII
第 1 章 绪论	10
1.1 土壤重金属污染情况	10
1.1.1 土壤重金属污染现状	10
1.1.2 土壤重金属污染来源与特点	11
1.1.3 土壤重金属污染的危害	12
1.2 重金属汞的危害	13
1.2.1 重金属汞的理化性质	13
1.2.2 重金属汞的毒性对人体的影响	14
1.2.3 重金属汞对植物生长发育和生理特征的影响	14
1.3 国内外土壤重金属 Hg 污染现状	15
1.4 植物修复土壤重金属技术现状	16
1.4.1 重金属植物修复的分类	16
1.4.2 植物修复重金属示例	17
1.4.3 植物修复汞污染土壤研究进展与前景	17
1.5 选题的依据	19
1.6 研究目的及意义	19
1.7 技术路线	20
第 2 章 月季的光合特性	21
2.1 试验材料与方法	21
2.1.1 供试样品与土壤	21
2.1.2 测定指标与方法	21
2.1.3 数据处理	22
2.2 结果与分析	22

目录

2.2.1 月季的光响应曲线与 CO ₂ 响应曲线分析	22
2.2.2 月季光合日变化分析	24
2.3 讨论.....	27
第 3 章 不同浓度重金属汞胁迫下对月季生长指标的影响	28
3.1 试验材料与方法	28
3.1.1 供试样品与土壤	28
3.1.2 试验处理方法	28
3.1.3 测定项目与方法	28
3.1.4 数据处理	29
3.2 结果与分析	29
3.2.1 Hg 胁迫对月季株高的影响.....	29
3.2.2 Hg 胁迫对月季根长的影响.....	30
4.2.3 Hg 胁迫对月季叶长和叶宽的影响.....	30
3.2.4 Hg 胁迫对月季茎粗的影响.....	31
3.2.5 Hg 胁迫对月季根、茎、叶各部分鲜重的影响.....	31
4.2.6 Hg 胁迫对月季生物量的影响.....	32
3.3 讨论.....	33
第 4 章 不同浓度重金属汞胁迫下对月季生理指标的影响	35
4.1 试验材料与方法	35
4.1.1 供试样品与土壤	35
4.1.2 测定指标与方法	35
4.1.3 数据处理	35
4.2 结果与分析	35
4.2.1 汞胁迫对月季净光合速率的影响	35
4.2.2 Hg 胁迫对月季气孔导度的影响.....	36
4.2.3 Hg 胁迫对月季胞间 CO ₂ 浓度的影响	37
4.2.4 Hg 胁迫对月季蒸腾速率的影响.....	38

目录

4.2.5 Hg 胁迫对月季相对电导率的影响.....	38
4.2.6 Hg 胁迫对月季 MDA 含量的影响.....	39
4.2.7 Hg 胁迫对叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量的影响.....	40
4.3 讨论.....	42
第 5 章 月季对土壤重金属汞的吸收积累和修复能力的研究.....	45
5.1 试验材料与方法.....	45
5.1.1 供试样品与供试土壤.....	45
5.1.2 测定方法与指标.....	45
5.1.3 数据处理.....	45
5.2 结果与分析.....	46
5.2.1 Hg 胁迫月季根、茎、叶部位 Hg 含量情况.....	46
5.2.2 Hg 胁迫下月季各部位对重金属 Hg 的重金属量积累.....	47
5.2.3 Hg 胁迫下月季对重金属 Hg 的富集系数与转运系数的影响.....	48
5.2.4 不同浓度 Hg 胁迫下月季苗对土壤 Hg 的分配系数的影响.....	49
5.3 月季生长指标、生理指标与 Hg 富集能力间 Pearson 相关性分析.....	50
5.4 讨论.....	52
第 6 章 结论与展望.....	54
6.1 主要结论.....	54
6.1.1 月季的光合特性.....	54
6.1.2 重金属 Hg 胁迫对月季生长状况的影响.....	54
6.1.3 重金属 Hg 胁迫对月季生理指标的影响.....	54
6.1.4 重金属 Hg 胁迫对月季吸收积累和修复能力的影响.....	54
6.2 问题与展望.....	55
6.3 创新点.....	55
6.4 研究结果的可行性.....	55
参 考 文 献.....	57
致 谢.....	i

Abstract

In recent years, heavy metal pollution has become increasingly severe due to massive anthropogenic mining, the random discharge of waste gas and wastewater, and the extensive use of items with excessive heavy metals. Heavy metal mercury (Hg) directly affects urban ecological environment and human life and health because of its high bioaccumulation, high biotoxicity, persistence, secondary volatilization and re-sedimentation. The problem of mercury pollution has attracted numbers of researchers' attention. At present, compared with other heavy metal pollution, although mercury has become a highly concerned pollutant around the world, but there are few studies on phytoremediation of mercury pollution. In this paper, we selected the Chinese roses of *Rosa maidy* as the experimental material, and used artificial pot simulation method. Firstly, the photosynthetic physiological characteristics of Chinese rose were revealed. Secondly, the growth and physiological and biochemical responses of Chinese rose under different concentrations of heavy metal mercury were systematically studied. Finally, we discussed whether Chinese rose could grow normally in the soil polluted of mercury. Whether the mercury in the soil could be transferred to the body without affecting the best ornamental value of the Chinese rose were investigated. This study can provide not only technical support for ecological restoration and tree species selection for greening and beautification in areas with serious mercury pollution, but also scientific theoretical basis for the research of phytoremediation of soil heavy metals. Our results show as follows:

(1) Photosynthetic characteristics of *Rosa maidy*

The light saturation point (LSP) and light compensation point (LCP) of *Rosa maidy* are 1166.49 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and 0.00 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, indicating that it has well adaptability to light intensity and good ecological adaptability to light. The CO_2 compensation point (63 $\mu\text{mol}/\text{mol}$) of *Rosa maidy* is low, but the CO_2 saturation point (1749.82 $\mu\text{mol}/\text{mol}$) is high, which indicates that the *Rosa maidy* has strong CO_2 assimilation ability and wide utilization range. Under the condition of light saturation, the photosynthetic rate of *Rosa maidy* is more limited by CO_2 supply. The diurnal variation of net photosynthetic rate of *Rosa maidy* shows an asymmetric bimodal curve, which the photosynthetic "lunch break" occurs at 11:00. This is caused by the stomatal limitation. The diurnal variation of stomatal conductance shows a single-peak curve the intercellular CO_2 concentration and the transpiration rate show a "V" pattern and is single-peak curve trend. These results indicate that the vegetation has low requirements for light and can be planted in a wide

range of areas, which is an excellent material for soil heavy metal remediation experiments.

(2) The effects of different Hg treatments on the growth of *Rosa maidy*

When the Hg concentration was 0.5 mg/kg and 1.0mg/kg, the roses exhibited good growth status, when they exposed low Hg concentration conditions. Compared with the control group, low-concentration Hg stress can promote the growth indexes including plant height, root length, fresh weight, stem diameter, and biomass, etc. of *Rosa maidy* in different degrees. However, with the increase of stress concentration (≥ 50 mg/kg), these growth indexes of *Rosa maidy* show a significant downward trend and inhibitory effect. The Hg stress has no significant effect on the leaf length and width of *Rosa maidy*.

(3) The effects of different Hg treatments on physiological indexes of *Rosa maidy*

Under low concentrations (0.5 mg/kg and 1.0 mg/kg), the net photosynthetic rate, chlorophyll A content, chlorophyll B content and the total chlorophyll content of *Rosa maidy* in experimental group increase compared with the control group, Which are no significant difference. However, with the enhancement of stress concentration (≥ 50 mg/kg) and time, the net photosynthetic rate, chlorophyll A content, chlorophyll B content and the total chlorophyll content of *Rosa maidy* decrease significantly compared with the control group. The stomatal conductance and transpiration rate of *Rosa maidy* decrease dramatically with the increase of stress time and concentration (≥ 10 mg/kg). The intercellular carbon dioxide decrease significantly under the stress of high concentration of Hg (≥ 10 mg/kg), which indicates that stomatal limitation is the limiting factor of photosynthesis. The malondialdehyde(MDA) content and relative conductivity of rose increase significantly with the addition of Hg (≥ 10 mg/kg), Which indicates that mercury concentration (≥ 10 mg/kg) has a significant inhibitory effect on the physiological activity of roses.

(4) The effects of different Hg treatments on the absorption, accumulation and repair ability of *Rosa maidy*.

With the enhancement of heavy metal Hg concentration, the accumulation of root, stem and leaf of the *Rosa maidy* gradually rised. When the stress concentration was 100mg/kg, the absorption of Hg by the *Rosa maidy* is the largest, while the absorption intensity is root > stem > leaf. The enrichment coefficient first increase and then decrease. When the concentration of Hg treatment was 1.0 mg/kg, the maximum values of enrichment coefficients about the roots, stems, and leaves of roses reach to 0.668, 0.246, and 0.060, respectively. And the transfer coefficient to soil mercury reache 0.530 and

0.460, respectively. With the increase of Hg concentration, the transport coefficient gradually decreases, the maximum is in the control group, the transport coefficient is greater than 1. When the stress concentration was 0.5 mg/kg and 1.0 mg/kg, the transfer coefficient reaches 0.530 and 0.460, respectively. The transport coefficients from root to stem shows a downward trend, while the transport coefficients are all less than 1. The transport coefficients from stem to leaf shows an upward trend, while the transport coefficients are all less than 1. The distribution coefficient shows that with the increase of Hg concentration (≥ 0.5 mg/kg), the Hg content in the root of rose increases significantly, while the Hg content in the stem and leaf decreases significantly. The enrichment coefficient and transport coefficient of *Rosa chinensis* at low concentration are higher than those under high concentration stress. The heavy metals are mainly distributed in the root system, which shows that *Rosa maidy* can remediate soil heavy metal Hg pollution within a low concentration range (≤ 1.0 mg/kg). This concentration and belong to the dominant plant species for mercury pollution remediation with low concentration limits (≤ 1.0 mg/kg).

Key words: Heavy metal pollution; Phytoremediation; *Rosa maidy*; Hg stress; Transfer accumulation

第 1 章 绪论

1.1 土壤重金属污染情况

1.1.1 土壤重金属污染现状

土壤作为自然界物质交换的媒介之一，是土壤生态系统的重要组成，对人类的生产生活以及生命健康方面至关重要^[1]。然而，随着工业经济的高速发展，土壤重金属污染问题也日趋严重^[2]。土壤中的重金属问题是近几十年来最重要的环境问题之一，特别是在工业迅速发展和城市化的发展中国家^[3]。土壤重金属污染是指在人类的生产生活中将重金属排入到土壤中，使得土壤中的重金属含量超过其正常土壤含量值，进一步通过植物的富集作用，危害生态环境和人类的身体健康^[4]。土壤重金属污染的成因主要包括自然因素和人为因素两个方面^[5]。自然原因包括在风的作用下土壤碎屑的迁移和再分布以及高背景值的土壤母岩的水力迁移。人为因素包括采矿、废弃矿区、化肥和农药施用以及污水灌溉等^[6]。

土壤中的重金属污染一般是指由于重金属及其化合物的乱排乱放所造成的环境污染，主要包括污水以及废弃废水的排放、采矿以及使用重金属超标制品等^[7]。总体来说，是由于人为因素导致的环境中重金属含量增加，直至超出环境的正常范围，并直接危害人与动物的健康，导致环境污染问题加剧^[8]。重金属属于无机污染物，它与有机污染物不同。重金属的生物降解是不可能的，且重金属易于与土壤中的某些物质反应形成甲基化合物，甚至形成一些含有毒性的物质，这些化合物与有毒物质在环境中不易被降解^[9]。同时，重金属能够通过富集作用，被植物吸收而进入食物链，进而对人类的生命安全造成巨大的危害^[10]。

根据 2014 年我国环保部门与国土资源部门联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》中的结果显示，我国总体的土壤环境质量状况是不容乐观的，耕地土壤质量不达标，工业和矿业等废弃地环境问题显著^[11]。重金属点位超标率占全国土壤的 16.1%，其中耕地、草地、林地土壤重金属点位超标率分别为 19.4%、10.4%、10.0%，主要是无机型污染物，无机型污染超标点位占全部点位数的 82.8%，只有少数的有机型污染和复合型污染^[12]。污染物主要是镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌和镍等八种无机污染物，且点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%和 4.8%。另外，我国农用地受到的重金属污染比工业用地更严重，分别达到 58.49%、39.53%和 22.64%的农用地 Cd、Zn 和 Pb 的含量超过《农用地土壤污染风险土壤环境质量控制标准》(GB15618-2018)的筛选值^[13]。

1.1.1.1 全国重金属污染现状

陈锐等^[14]研究指出南京的某一退耕农用地的 Cu、Ni、Cd、As、Pb、Hg、Be、Sb、Co 和 V 十项重金属含量的最大值均超过背景值，其中 Cu、Cd、As、Pb 和

Hg 等重金属的最大含量值均超过农用地筛选值, 且这几种重金属的污染程度大于其他重金属。王美华^[15]发现西安浙西某一石煤矿山周边的 Cd、Hg、Cu、As、Zn、Ni、Pb 和 Cr 等 8 种重金属含量值也高于土壤背景值。Meng 等^[16]发现黄土高原小河的灌溉区的土壤重金属铜、汞、镉、铅、锌、镍和砷的平均浓度均高于国家土壤二级环境质量标准, 其中汞和镉是主要的污染元素, 运输、服务业和农业活动是主要的潜在污染源。Hu 等^[17]对西安的风东区土壤的 Hg、Cd、Pb、Cu 等重金属进行分析, 发现交通用地方面对重金属 Pb 的污染影响较大, 工业用地对重金属 Hg 的分布有显著的影响, 建设用地与 Cu 的分布有关, 而 Cd 的分布主要与城市用地和耕地有关, 同时居民点拆迁和弃耕地分别对 Pb 和 Cd 的污染影响较为显著。魏洪斌等^[18]指出 Cd 和 Hg 等重金属是宜兴市的主要污染元素, 其中 Cd 的样本超标率为 10.11%, 高于全国耕地 Cd 的超标率。万自学等^[19]发现长沙的土壤中的 As、Cd、Cu、Hg、Pb、等重金属的含量均值都超过农用地污染风险筛选值。研究发现东北沈阳某工业区的钛、铜、铅、锌、钴、镍、铬和砷的含量均高于其背景值, 该区域的土壤可被视为重金属轻度或部分污染^[20]。

1.1.1.2 四川省重金属污染现状

根据长江流域主要城市生态环境局的公告, 四川省的重金属污染点位超标率为 34.3%^[21]。四川成都平原地区的农用土壤和农作物均受到重金属的危害, 主要是以 Pb、Cd 和 Hg 三种重金属元素为主^[22], 其中蔬菜中有检测出 Cd 含量超标现象, 叶菜类和茄果类 Pb、Cd 含量相对较高^[23]。刘重芄等^[24]发现成都市农业土壤重金属元素,Hg 和 Cd 达到中等生态危害程度,Pb、As、Cu、Zn、Cr 等达到轻微生态危害。沈志远^[25]研究发现四川和云南交界处某地的 As、Cr、V、Zn 等四种重金属元素浓度值均高于四川土壤环境背景值, 且 Cr、V、Zn 三种元素浓度值分别大于四川土壤环境背景值的两到三倍, 说明该地受污染程度较高。在四川攀枝花某地区的 11 家企业周边的表层土壤分析发现该地周围的土壤整体上呈轻度污染, 重金属 Cd、Pb、Cr、As 等在不同的区域出现明显的积累情况, 说明化工、冶炼对土壤环境危害较大^[26]。

1.1.2 土壤重金属污染来源与特点

1.1.2.1 土壤重金属污染来源

土壤重金属污染主要分为两大类, 一是自然原因造成的土壤重金属污染, 二是人为原因造成的重金属污染^[27]。自然原因产生的重金属污染主要有两种, 一是随着大气沉降过程进入土壤的重金属, 在煤等化石燃料的燃烧、能源的开采、交通运输产生的土壤扬尘和汽车尾气以及金属的冶炼等过程中会产生大量的重金属^[28], 大部分的重金属会吸附在气溶胶上, 以气溶胶分子的状态进入大气环境中, 再通过一系列的干沉降、湿沉降等过程进入土壤环境中^[29]。另一种是随着污水进入土壤的重金属, 主要是工业生产产生的废水以及生活污水中产生的重金属通过

不同的方式进入水环境中，水体中的重金属通过浇灌和地表径流的方式进入土壤中，从而造成土壤环境的重金属污染^[30]。人为原因造成的重金属污染包含两类，一类是随着固体废物进入土壤环境的重金属，含有重金属的固体废物在与土壤的长时间接触过程中，通过雨水的淋浴，固废中的重金属随雨水进入周围的土壤环境中；另一类是随着农用物资的使用进入土壤的重金属，主要是化肥和农药的大量使用，造成土壤严重的重金属污染^[31]。

1.1.2.2 土壤重金属污染特点

①我国的土壤重金属污染具有非常显著的地域性分布特点^[32]。经调查分析发现，我国土壤重金属污染情况在我国中部、西部和东部三个部分都存在，且污染情况中部>东部>西部^[33]。众所周知，我国主要的金属矿产地区在我国中部^[8]，在金属的开采过程中，不可避免的会出现重金属泄露情况，从而对当地的周围土壤产生危害，因此我国的相关部门应当重视矿产开采过程的正确操作^[34]。陈文轩等^[35]研究发现我国农田土壤的重金属分布情况在空间特征上表现出较为明显的差异，农田土壤重金属含量南方明显>北方^[36]。且重金属污染情况逐渐由城市的工业源转向农业源、城郊转向农村、土壤转向食物链最后进入人体的发展趋势^[37]。由于重金属污染的地域性特点，其在我国的各个地区污染情况大不相同，但是各大区的老工业附近的农耕土壤受到的重金属危害大于其他农田土壤^[38]，因此需对当地的土壤采取重金属修复措施，否则会对当地居民的生命健康产生一定的危害^[39]。

②无机元素是主要的土壤污染物^[40]。

③传统方法成本高，污染治理困难。在没有人为干预的自然条件下，土壤中的重金属污染很难降解，且对土壤产生的危害是不可逆的^[41]。目前我国重金属污染形态多种多样，污染情况复杂，不同的重金属元素在土壤中可能发生化学反应，从而产生更复杂的污染物^[42]，土壤本身的酸碱度也会不停的发生变化，导致土壤重金属污染形态多种多样且不能完全有效清除^[43]。

1.1.3 土壤重金属污染的危害

1.1.3.1 土壤重金属污染对植物的危害

重金属不仅会造成土壤污染，还会通过土壤影响作物的生长，我国是一个农业大国，植物如果生长不好不仅会影响粮食的产量，同时对粮食的治理也会产生危害，重金属还会通过农作物进入人体，影响人类生命安全^[44]。不同的重金属具有不同的毒性，有些重金属的毒性较大，即使在低剂量污染下，也会对植物产生危害，而有些重金属毒性较小，即使在植物体内积累量达到一定程度，植物也没有明显的副作用或产量下降的情况^[45]。多项研究表明，高浓度重金属污染会影响种子的发芽率^[46]，或者延长种子的发芽时间，造成不出苗的现象^[47]，即使叶片种子出芽，也会出现叶片枯萎和蜷曲的状态^[48]。重金属对植物产生的危害表现如下：

植株矮小、生长缓慢、叶片面积下降、失绿等^[49]；对植物的生理影响主要表现在降低植物光合效率、降低叶绿素含量、细胞膜透性增大等^[50]。重金属的毒性还会使植物的活性氧(ROS)增加，引起植物细胞膜损伤和细胞器的破坏^[51]。而过高浓度的重金属则会导致植株直接死亡。我国种植了许多种类的农作物与蔬菜，其对重金属都有不同程度的耐性与吸收能力，因此对土壤重金属的治理过程迫在眉睫^[49]。

1.1.3.2 重金属污染对人类的危害

重金属及其化合物的化学性质稳定，进入人体后容易在人体中积累，从而对人体的健康产生危害^[52]。越来越多的研究证据表明，人类的许多疾病都与重金属的暴露有关。对人体新陈代谢有不良健康效应的重金属（包括铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、镍(Ni)、锌(Zn)和铬(Cr)），由于其在环境中的持久性和记录在案的潜在健康后果而引起了特别关注^[53]。这些有毒物质可以通过摄入、皮肤接触、通过土壤食物链的饮食、吸入和口服摄入等各种吸收途径危害人类^[54]。重金属是诱发帕金森病发病机制的重要因素^[52]。研究表明人体重金属 Pb 和 Cd 含量增加，被认为与口面部裂(OFC)风险显著相关^[55]。重金属镉的毒性可以分为急性毒性和慢性毒性，急性毒性主要表现为急性胃肠道刺激，慢性镉毒性表现为抑制巨噬细胞的吞噬作用^[56]。重金属镉在人体的积累还会引起尿路结石和肾脏损伤，以及导致脑组织炎症、脑代谢紊乱、高血压、睾丸和卵巢组织出现病理学改变^[57]。重金属铅在人体的积累也会导致急性中毒和慢性中毒，急性中毒通常表现为胃肠道刺激，慢性铅中毒则会导致肾小管重吸收作用减弱、小动脉产生痉挛以及硬化，也会导致升值功能障碍、肝脏肿大、黄疸、肝脏硬化或者肝坏死^[58]。重金属铬进入人体中主要聚集在肝脏、肾脏和肺部部位，同时引起肝组织变性、中央血管和肾小管坏死以及产生肺炎^[59]。六价铬的化合物可以导致 DNA 的结构发生突变，从而产生致癌和遗传效应，遗传效应会影响婴儿的健康成长和智力发育^[60]，同时土壤中存在的六价铬的积累会导致铬离子与植物细胞中的蛋白质结合，从而影响植物的生长发育并导致细胞活性的丧失^[60]。急性砷中毒的临床表现在急性肠胃炎方面，慢性的砷中毒主要影响人体神经系统发生病变四肢末梢多发性神经炎和周围神经炎^[61]。也有研究发现重金属砷在患各种癌症中起着重要作用，包括肺癌、膀胱癌以及皮肤癌^[62]。

1.2 重金属汞的危害

1.2.1 重金属汞的理化性质

汞(Hg)及其化合物是最危险的环境污染物之一，具有强致癌、致畸、神经毒性、遗传毒性和生物蓄积效应，对人体和生态系统造成极大危害^[63]。汞(Hg)俗称水银，是唯一在常温常压下呈液态分布的重金属，汞是毒性最大的重金属污染物之一，可通过大气过程向全球输送^[64]，汞主要有三种存在形式：元素汞或水银

(Hg)、无机汞(Hg^+ 和 Hg^{2+})和有机汞（如甲基、乙基和苯基）。无机汞来自元素汞的氧化，而有机衍生物是由水生沉积物和土壤中的微生物对无机汞化合物进行生物甲基化而产生的^[65]。虽然大气沉降主要是无机汞，但甲基汞通常是最令科学家关注的生态毒理学形式^[66]，甲基汞主要是通过硫酸盐还原细菌在湖泊及其流域产生，但也有部分是通过大气沉积作用产生。甲基汞会在食物链中随着生物链逐渐放大，随着营养级的增加，通常占总汞的更大比例^[67]。

1.2.2 重金属汞的毒性对人体的影响

汞是一种神经毒素，会对人类造成多种影响，如记忆丧失、协调能力受损、视力障碍、心血管问题等。它还会影响甲状腺、消化系统、肝脏和皮肤^[68]。重金属汞在环境重无处不在，导致人类长期低水平接触，不同形态的汞会通过不同的影响方式危害人类的免疫系统^[69]。汞毒性对人体的危害首次曝光是在1956年的日本水俣病事件，最早出现的由于工业废水排放污染造成的公害病。有机汞主要对人体的中枢神经系统产生危害，甲基汞主要是破坏DNA，破坏有丝分裂。无机汞主要是对肾脏产生毒性，同时破坏正常的耐受性并诱导自身免疫^[70]。有研究证据表明：单质汞被排泄到小肠，结肠中的生物可以将其转化为甲基汞。甲基汞进一步透过大脑中的生物膜，导致脑细胞解体^[66]。汞中毒脑病的特征主要是四肢麻木、共济失调、视力狭窄和听力出现困难，严重者甚至可以导致心力衰竭死亡^[55]。目前还不彻底了解这种金属是如何渗透到人体的，但是发现汞矿、贻贝、鱼类和金枪鱼是将汞转移到人体的主要来源^[71]。汞还可能导致肾癌（因为肾脏是汞盐可以积累的主要器官之一）、胃癌、胆囊癌和肝癌^[72]。

1.2.3 重金属汞对植物生长发育和生理特征的影响

重金属汞是植物生长发育过程中的非必需元素，当植物遭受到重金属汞胁迫时，植物根系部分是最先受到损害的器官，重金属汞会破坏根系的细胞膜系统和结构，从而严重抑制根际养分的运输，导致根系组织对外界有害物质的屏蔽能力减弱^[73]。目前人们对汞在植物中如何产生毒性的确切机制少有研究，但是由于汞对植物蛋白质和其他生物的巯基残基具有很强的亲和力，从而细胞的完整性和生物活性可能会收到损害^[74]。除此之外，汞还被发现是氧化应激的一种有效诱导剂^[75]。汞可以诱导植物产生活性氧和游离氧自由基，超氧阴离子自由基(O_2^-)、过氧化氢(H_2O_2)或羟基自由基(OH^\cdot)等，活性氧对植物生长产生负面的作用，即减少生物量，并影响植物组织的生化过程，如降低叶绿素水平^[76]。研究发现过量的汞会抑制番茄的根和芽生物量的产生，会降低番茄叶片中的叶绿素含量，对番茄的毒性作用是通过增强活性氧的产生和膜脂过氧来实现的^[75]。即使施用浓度较低，汞也会对植物产生毒性作用，导致生长迟滞、光合作用抑制^[77]、活性氧(ROS)的产生脂膜氧化、DNA和蛋白质损伤^[78]。汞会诱发黄瓜的氧化应激，导致植物损伤

[79]。研究发现低浓度的汞会诱导 POD3、CAT2 和 GPX1 基因转录上调, 增强桉树对汞胁迫的适应性^[80]。植物汞中毒的主要症状是叶片褪绿即叶片变黄, 同时会使植物的根变成棕色, 叶子的数量和根的体积减少, 根冠收到损害, 以及对生理细胞膜透性的改变等^[81]。汞对植物的基因毒性作用主要是导致有丝分裂指数降低和染色体畸变增加, 金属毒性则可能是由于酶的化学失活或者金属与金属结合而导致结构破坏所引起的^[82]

1.3 国内外土壤重金属 Hg 污染现状

相关研究发现, 我国的贵州省由于其当地具有大量的矿产资源, 尤其是 Hg 和 Au, 因此该省是我国受到重金属污染最为严重的省份^[83]。顾会等^[84]研究了贵州省丹寨县兴仁镇某一典型铅锌矿区, 发现该地土壤中重金属 Hg 的含量为贵州省土壤环境背景值的 15.34 倍, 污染程度严重。也有研究表明贵州省的万山汞矿附近的土壤中的 Hg 含量平均值高达了 14.15 mg/kg, 其最高的汞浓度值是国家《土壤环境质量标准》(GB15618—1995) 二级浓度限值的 135 倍^[85]。同时, 我国其他的许多地区也同样遭受着比较严重的汞污染。云南的某一废弃的氯碱厂周围的地下水中较高浓度的汞污染, 该地的汞污染浓度值已经超过《国家地下水质量标准》(GB/T14848—2017) 的标准值, 地表水及其沉积物中的 Hg 含量分别高达 1940 ng/L 和 74.6 mg/kg^[86]。江苏张家港市的一个工业城镇的表层土壤中发现了重金属 Hg, 该地总 Hg 含量为 310~3760 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 在采集的所有土壤样品中有 53% 的样品重金属浓度超过了当地土壤的最大临界值 (1500 $\mu\text{g}/\text{kg}$)^[87]。同时也发现我国内蒙的某处煤田中的汞浓度最高达到了 13967 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 约为当地土壤背景值(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的 1400 倍, 已经成为重金属 Hg 的重点污染源^[88]。浙江嘉兴市的某一电厂周围的农村地区检测到 PM_{2.5} 中的总 Hg 浓度为 116.2~1070.9 pg/m^3 , PM₁₀ 中的总 Hg 浓度为 173.4~1456.8 pg/m^3 ^[89]。

Laura 等^[90]的研究指出, 欧洲西南部某已水泥厂周边土壤中含有大量的重金属汞, 其当地总 Hg 浓度达到 10~144 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。加拿大的某一社区的土壤样品中检测到的总 Hg 含量达到了 1.2~696.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 均高于该地的对照区域^[91]。Gerson 等^[92]发现西非塞内加尔当地的金矿开采地周围的水体沉积物、土壤以及水体中的甲基汞与总汞含量大部分都超过了当地的对照区域和美国环保局的监管标准。Gafur 等^[93]的分析发现, 在印度的尼西亚博恩(Bone)水体中检测到的重金属汞含量达到了 17~2080 $\mu\text{g}/\text{L}$, 其值已经超过了世界卫生组织规定的饮用水安全限值的 1000~10000 倍。由此可见, 重金属 Hg 污染在全球范围内广泛存在, 而人类活动是造成重金属 Hg 污染的主要原因。因此, 寻找高效且便利的重金属汞修复措施已经十分必要与紧迫。

1.4 植物修复土壤重金属技术现状

1.4.1 重金属植物修复的分类

植物修复就是自然界的一种植物对一种重金属或者多种重金属元素具有超富集能力，可以通过植物的根部将土壤中的重金属吸收到植物体内^[94]，并转移到植物的茎、叶、果实中，从而来减少土壤、地下水或其他污染介质中污染物的数量、流动性或者毒性^[95]。它是一种新型的、符合可持续发展的、具有较低成本的、有前景的、由太阳能驱动的、生态环境友好型的技术，通过使用自然生长状态下或者控制条件下的植物品种来进行清除、破坏或者封存重金属，从而达到净化被重金属污染或富集的土壤^[96]。

根据现阶段的研究，发现多种植物对不同类型的重金属具有靶向富集作用，大多数植物常见，易于栽培，价格低廉，在园林植物中常见。因此，在实施园林植物修复土壤重金属污染的同时，还具有美化城市的效果^[97]。

植物修复采取多种方法，如植物提取、根际过滤、根际降解、植物稳定、植物降解和植物挥发等。植物提取主要就是植物将土壤中的重金属向植物的地上部分转移，比如植物的芽、叶、茎、花或者果实等部位。植物提取的潜力主要由两个关键因素决定，即地植物地上部分组织中的重金属浓度和植物生物量^[98]。因此理想的修复土壤重金属植物不仅要具有好的金属耐受性和高效吸收重金属的能力，还要生长迅速，具有一定的经济效益^[99]。同时应该避免选用可食用植物进行重金属的修复，因为重金属可在植物的可食用部位进行生物积累，从而进入食物链，进而对人类的健康产生危害^[100]。目前已经发现几种化学剂用于增强植物提取的过程，用于土壤重金属修复过程，主要包括乙二胺四乙酸(EDTA)、乙二醇四乙酸(EGTA)、十二烷基硫酸钠(SDS)等化学剂，研究发现这些化学改性剂的应用可以显著增加重金属污染土壤的植物提取^[101]。

根际过滤是指植物利用根系吸收、保留以及沉淀作用减少土壤中的重金属，确保能够将这些重金属污染物有效地转移到不同的环境中^[102]。在根系的菌群，根系分泌物、根系 pH 值、根系周转等环境因子对根际过滤起着至关重要的作用^[103]。研究发现丛枝菌根真菌(AMF)几乎能与所有植物结合，能够提高他们的健康性能和以及抵抗环境压力。它们在植物的根部定植，并将菌丝延伸到根际区域，协助植物根部对土壤矿物质养分的吸收和土壤重金属的吸收^[104]。植物的菌根定殖水平越高，重金属在植物地上部分的积累量越高，而在根部的积累量越低，表明丛枝菌根真菌在污染物的转运中起着积极的作用^[105]。

根际降解是指土壤中的有机污染物进行生物降解，从而产生根际微生物，这些微生物分泌出特定的酶，将土壤中严重的重金属污染物降解或者转化为不那么有害的形式^[106]。研究发现污水污泥特别是来自食品行业的污泥，由于其富有大

量的有机物和营养物质，具有施肥特性，能够改善土壤参数，增强阳离子交换能力，使得阳离子在土壤中与植物的结合更强，能够有效吸收土壤中的重金属污染物^[107]。在自然界，土壤中存在许多的微生物，在植物修复过程中，根际细菌不仅可以防止污染物污染土壤的肥力，还可以通过释放出特殊的植物生长激素促进植物的生长，是一种比较高效优良的植物修复方法^[108]。

植物稳定的过程能够有效的减少土壤污染物的转移，能够有效抑制污染物通过地表径流等作用进入地下水，造成水体污染，阻止了生物放大^[109]。目前植物稳定的方法主要是通过吸附、结合以及添加土壤添加剂，如生物固肥、肥料和堆肥等共沉淀来稳定污染物，现目前已经得到了广泛的研究^[110]。

植物降解是指进入植物体内被植物通过各种代谢活动过程后被分解，或者被参与植物代谢活动的酶降解^[111]。参与污染物分解的酶主要有过氧化物酶、硝化还原酶、硝化酶等^[53]。植物降解通过根系部位直接吸收污染物到植物组织中，吸收效率主要取决于土壤的吸收效率、蒸腾速率以及土壤的其他物理性质和化学性质^[112]。

植物挥发是指污染物进入植物，通过植物的气孔，通过植物的蒸腾作用将不同的可挥发性化合物转移到大气环境中^[113]。植物挥发的过程可以分为直接挥发和间接挥发两种。直接挥发植物的茎、叶部位对挥发性有机污染物的挥发，间接挥发是植物根系与土壤之间的相互作用产生的结果^[114]。

1.4.2 植物修复重金属示例

植物修复相对于其他化学和物理技术，所产生的环境影响以及所需的经济成本较低，所以现目前对于植物修复土壤重金属的研究越来越多，但是发现的重金属超富集植物还很少。研究发现红花可以在重金属污染的情况下进行生物量生产，此外，该植物积累重金属并将其转移到空中生物质的能力突出了其在植物提取过程中的潜力^[115]。不同的植物对同一种重金属的吸收效应不同，同一植物对不同的重金属吸收效应也不同，研究发现马齿苋可以减少土壤中的重金属含量，但对金属的吸收量为 $Cu > Zn > Pb > Cd$ ，且其对锌和铜的 BCF 值大于 1，表明该植物使用超积累作为修复金属的机制^[116]。有研究从超富集镉植物龙葵中分离出一种具有重金属耐受性的植物促生菌，发现接种菌株 PGP15 能够克服单独植物修复的局限性^[117]。多项研究都表明工业大麻在各种环境下都会吸收重金属，是一种非常有前途的重金属污染土壤植物修复候选材料^[118]。使用蓝藻物种(*Oscillatoria sp*)进行生物增强以及添加生物炭的马齿苋植物进行土壤重金属修复的能够有效减轻重金属对植物的危害^[119]。增加土壤养分或应用相关微生物作为新的生物接种剂能够提高弗罗里达芒草(*Miscanthus floridulus*)的修复能力^[120]。

1.4.3 植物修复汞污染土壤研究进展与前景

研究发现不同的化学促进剂可以促进不同植物对汞的转移和积累的作用, 主要有碘化钾、堆肥、硫酸铵、硫代硫酸铵、亚硫酸钠、硫代硫酸钠、盐酸、硫酸等促进剂^[63]。印度芥菜(*Indian mustard*)可以承受高汞的污染, 在汞浓度为 100 mg/kg 以下的土壤中生长, 能够表现出巨大的植物稳定汞的潜力, 且不会对植物产生明显的有害的影响^[121]。大叶贯众(*Cyrtomium macrophyllum*)被发现是一个很好的汞富集植物, 具有良好的汞积累和转运能力以及抗汞胁迫的能力, 在 200 mg/kg 的汞污染下, 富集系数与转运系数均大于 1^[122]。水生生物凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)在最低汞处理浓度 (1 $\mu\text{g/g}$) 时的生物富集系数 (BCF) 最高^[123], 是一种比较有前景的作为重金属汞的修复植物^[124]。在哥伦比亚最重要的 ASGM 矿区之一的 Alacrán 金矿的附近发现麻风树根部与地上部分的重金属 Hg 含量比周围其他植物高, 这表明麻风树有可能作为一种自然处理方法, 用于净化受 ASGM 影响的热带地区的土壤^[125]。

植物修复技术较于其他修复技术具有修复费用低、环境友好型、适用于大范围的污染治理等^[126], 得到了科学家的广泛关注, 发现了多种用于修复土壤重金属污染的超富集植物, 比如砷超富集植物-蜈蚣草(*Pteris Vittata L*)^[127]; 铜超富集植物-鸭跖草(*Commelina communis*)^[128]; 锌超积累植物--东南景天(*Sedum alfredii H*)^[129]; 镉超积累植物龙葵(*Solanumnigrum L*)^[130]。目前研究的超富集植物只能积累一种特定的元素, 在多种重金属污染场地的适用性有限^[131]。研究发现, 植物与微生物共同合作, 可以有效提高植物吸收土壤重金属的效率^[132], 添加刺激植物生长的细菌、真菌和耐金属微生物也可以大大提高植物对土壤重金属的吸收^[133]。选择有效吸收重金属的植物协同微生物或者添加促进植物生长的细菌、真菌等可以对植物修复结果产生很大的影响^[134]。在特定的重金属胁迫下, 微生物和植物如何协同工作来促进后生生物的健康(由植物和微生物联合产生), 还需要进一步研究^[135]。因此植物修复技术的研究方向并不仅仅只是寻找超富集重金属植物, 更应该寻找出有效吸收重金属的观赏类植物, 协同土壤微生物与细菌真菌等修复土壤, 因为观赏类植物具有绿色、美化、经济等优势, 在修复重金属污染土壤中具有独特的意义^[136]。一个新兴的研究领域和一个具有巨大商业应用潜力的领域是创造具有螯合某些金属和防止这些金属产生危害作用的转基因植物^[137]。通过基因组测序鉴定与金属耐受性相关的基因可能为创造转基因植物提供科学依据, 因此在未来的植物修复技术可能会结合传统育种技术与分子生物学^[138]

1.5 选题的依据

土壤汞污染的面源污染是土壤汞污染的重要特点。近年来, 由于工业的迅速发展, 我国的土壤汞污染也日益严重, 由于重金属汞的累积性、高生物毒性、持久性以及二次挥发和再沉降等特性, 研究高效吸收土壤重金属汞的植物至关重要。

月季是蔷薇科蔷薇属植物, 为常绿、半常绿低矮灌木, 四季均可开花。月季花大, 花径可达 10 cm 以上, 属于观赏性植物中花径较大的种群之一^[139], 可通过扦插培育, 生根快, 生长周期短, 且不会进入食物链对人体健康造成危害。通过知网检索 2018 年~2023 年月季的研究情况, 利用 Citespace 对文献的关键词进行分析, 发现对月季的研究集中在扦插、培育、园林应用以及病虫害的防治等方面。目前对于月季修复土壤重金属的研究很少, 对蔷薇属植物修复重金属的研究显示, 蔷薇属植物对重金属 Pb、Cd、Cu、Cr 都有不同程度的富集与修复能力。曾俊^[140]研究了 Cd、Pb 胁迫对不同月季品种生长和生理生化特性的影响, 在 1 mg/kg 的镉胁迫下, 十种月季对镉表现出不同的耐性。有些月季在低浓度 Cd 处理下生长和光合特性受到不同程度的促进作用。歌林娇红(*Colin Kll*)对 Pb 胁迫环境的适应性较强, 能适应相对较高浓度的 Pb 胁迫, 是较好的耐 Pb 污染的月季品种。李香君^[141]指出不同浓度的铜、镉、铅对玫瑰(*Rose rugosa-cv.*)的生长发育具有重要影响, 发现玫瑰的不同部位对重金属 Cd 的富集系数平均值均在 1 左右(1.091、0.889、0.837), 转运系数的平均值大于 1, 说明该玫瑰对重金属 Cd 有很强的富集与转移能力, 是值得关注的修复 Cd “优势”植物之一。毕诗畦等^[142]研究了“鲁赫”刺蔷薇对铅、镉及其混合胁迫的生理响应, 结果表明不同年份及不同繁殖方式的“鲁赫”刺蔷薇受到了不同程度的毒害, 对重金属 Cd 的修复效果更好。Ramana 等^[143]研究表明玫瑰植株具有较大的耐受性和更强的 Cr 积累能力, 玫瑰植物具有巨大的潜力, 可用于被中等水平铬污染的土壤的植物修复。说明蔷薇科属植物对不同重金属具有一定的耐性与修复能力, 因此本文选用藤本月季“小女孩”为试验材料探究月季对汞的耐性与修复能力。

1.6 研究目的及意义

1.6.1 研究目的

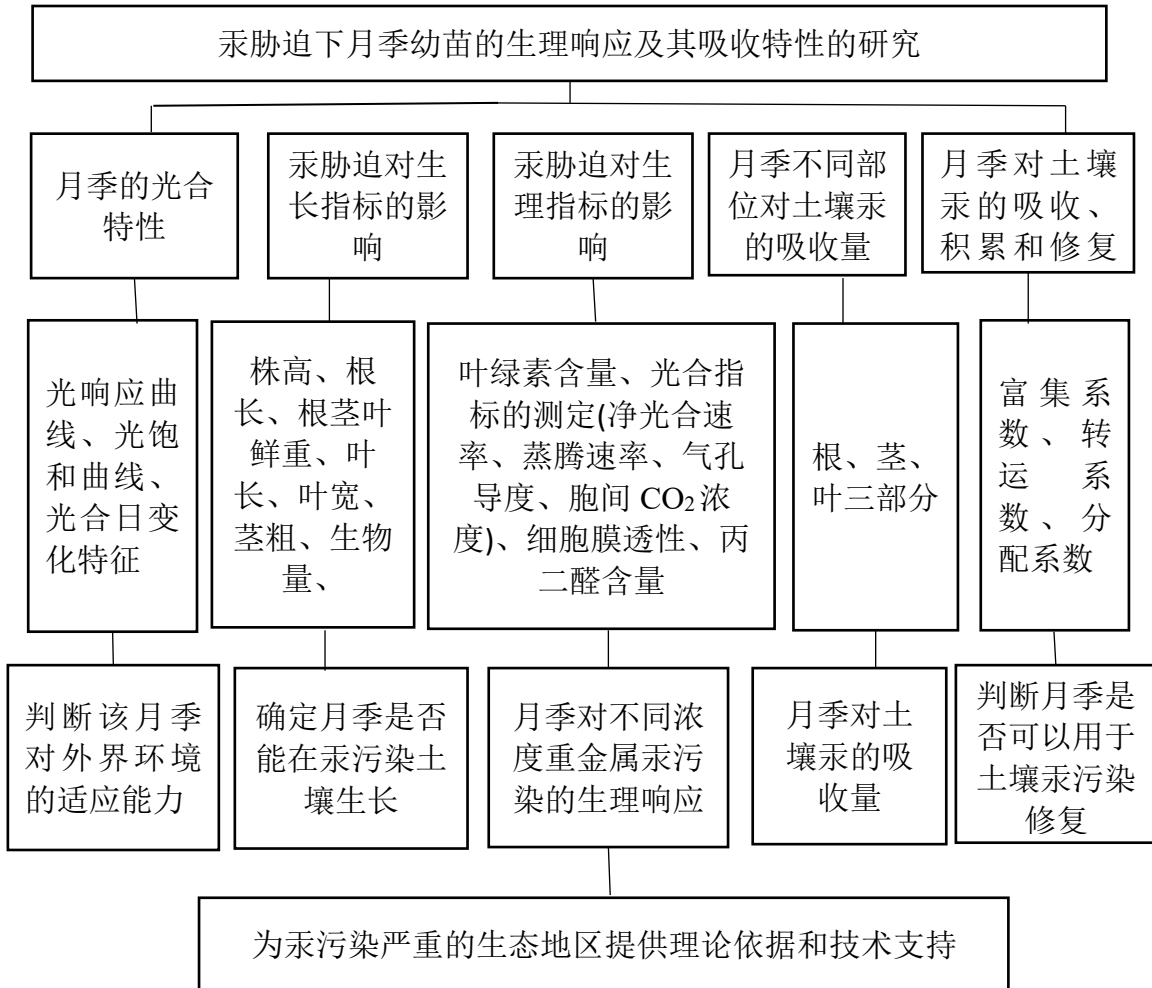
以月季为实验材料, 设置浓度梯度为 0 mg/kg、0.5 mg/kg、1 mg/kg、10 mg/kg、50 mg/kg 及 100 mg/kg 的 HgCl₂ 溶液, 测量不同浓度汞胁迫下月季的生长指标和生理特性的差异, 再通过 ICP-MS 法分别测量月季的不同部位对土壤中汞的吸收量, 分析月季对土壤中汞污染的吸收、积累和修复能力, 判断月季是否可用于土壤汞污染修复。

1.6.2 研究意义

探讨月季能否在汞污染的土壤中正常生长, 是否能将土壤中的汞转移到体内, 而不影响月季的观赏价值, 为汞污染严重地区的生态修复和绿化美化树种选择提

供技术支持，并为植物修复土壤重金属研究进程提供科学的理论依据。

1.7 技术路线



第 2 章 月季的光合特性

光合作用是植物生长发育的基础，决定着植物生产力。研究植物的光合特性对提高植物光合速率和科学育种具有重要的意义^[144]。对植物光合作用产生影响的因素包括生态环境因素和植物自身条件两类，生态环境因素主要包括光照、水分、大气中 CO₂ 浓度、温度、矿质元素；自身因素主要包括叶绿素含量、不同年龄等^[145]。通过对光合光响应曲线的研究来探索光合有效辐射与净光合速率的关系是一种非常重要的手段^[146]。对环境因子响应的重要方法，通过分析光合有效辐射与净光合速率的关系，可以得到光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)、最大净光合速率(Pn_{max})、表观量子效率(AQY)、和暗呼吸速率(Rd)等重要的光合生理参数^[147]。植物光合作用对 CO₂ 响应曲线的研究是植物净光合速率与 CO₂ 之间的关系，可以得到植物的饱和 CO₂ 浓度、光合能力、CO₂ 补偿点、暗呼吸速率(Rd)、等光合参数^[148]。这些参数帮助我们了解植物光合作用的光化学效率，也能够反映植物的生长情况及抗逆性大小^[149]。研究植物的光合日变化是直接反映植物光合日生产能力的重要指标^[150]，光合日变化的各项参数能够反映植物一天随着环境变化进行光合物质积累及生理代谢的能力以及植物对环境因子的适应能力^[151]。因此了解植物的光合生理特性是植物培育过程中的基础性工作，为植物的引种栽培以及开发利用提供参考依据^[152]。本文通过分析月季的光响应曲线、CO₂ 响应曲线以及月季的光合日变化特性，得到月季的饱和光强与饱和 CO₂ 浓度，为下文测定不同浓度 Hg 胁迫下月季的光合特性提供科学的理论依据，以及为月季的栽培提供参考依据。

2.1 试验材料与方法

2.1.1 供试样品与土壤

本试验采用盆栽实验法，选取生长健康、无病虫害、长势基本相同的月季苗，盆栽至直径 23 cm，高 21.5 cm 的盆中，正常浇水处理，待其生长稳定后，测定其光合特性。供试土壤采自西华师范大学实验土，采集表层 0~20 cm 的土壤，去除土壤表面杂质、砂石等异物后，将土壤风干、磨碎后用于月季的盆栽，每盆装土 4.0 kg。

2.1.2 测定指标与方法

光响应曲线：

选取晴朗无风的天气，利用 LI-6400XT 光合仪测定月季在不同光强下的净光合速率(Pn)。光合有效辐射梯度依次设定为 2000、1800、1600、1500、1400、1200、1000、800、600、400、200、150、100、50、20、0 μmol/(m²·s)共 16 个光

强度梯度。选取三株月季，每株选择 2 片叶子进行光合测定，每片叶子重复三次，测定时间控制在 9:00~11:00。

CO₂ 响应曲线：

选取晴朗无风的天气，利用 LI-6400XT 光合仪测定月季在不同 CO₂ 浓度下的净光合速率(Pn)。CO₂ 浓度值设置梯度依次为 2000、1800、1600、1400、1200、1000、800、600、400、300、200、150、100、50 μmol/mol 共 15 个浓度梯度。选取三株月季，每株选择 2 片叶子进行光合测定，每片叶子重复三次，测定时间控制在 9:00~11:00。

光合作用日变化：

选择晴朗无风的天气，利用 LI-6400XT 光合仪测定无重金属处理下月季净光合速率 (Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr) 等生理指标，选取三株月季，每株选择 2 片叶子进行光合测定，每片叶子重复三次，测定时间选取 8:00~18:00，每隔 1h 测定一次。测定时光照强度为自然光强，CO₂ 浓度、温度和湿度均为自然状态。

2.1.3 数据处理

双曲线修正模型的拟合测试数据在叶子飘开发的光合计算软件中实现。利用 Origin2018 进行绘图。

2.2 结果与分析

2.2.1 月季的光响应曲线与 CO₂ 响应曲线分析

植物的光响应曲线能够得到植物的光饱和点与光补偿点，光饱和点(LSP)和光补偿点(LCP)可以衡量植物对光强的利用能力^[153]，CO₂ 饱和点(CSP)可以衡量植物对 CO₂ 的利用能力。光补偿点越低说明该植物对弱光的利用能力越强；光饱和点是反映植物利用强光能力的指标，光饱和点值越高，说明该植物能够适应较强的光照^[154]。表观量子效率(AQY)是反映事物对光能的利用效率指标，AQY 值越大，表明该植物利用弱光的能力越强^[155]；暗呼吸速率(Rd)于植物的耐弱光性有关，其值越低，越有利于光合产物的积累^[156]。本文选取双曲线修正模型对月季的光合-光响应曲线与光合-CO₂ 响应曲线进行拟合，通过光合-光响应曲线拟合得到月季的最大净光合速率(Pn)为 7.106 μmol/(m²·s)，光饱和点(LSP)为 1166.49 μmol/(m²·s)，光补偿点(LCP)为 0.00 μmol/(m²·s)，表观量子效率(AQY)为 0.0435 mol/mol，暗呼吸速率(Rd)为 0.00 μmol/mol；由光合-光响应曲线可以看出，月季在光合有效辐射 (PAR)1500 μmol/(m²·s)以上时，月季出现明显的光抑制情况。光合-CO₂ 响应曲线拟合得到月季的最大净光合速率(Pn)为 9.494 μmol/(m²·s)，CO₂ 饱和点为 (CSP)1749.82 μmol/mol，CO₂ 补偿点(CCP)为 63 μmol/mol，暗呼吸速率(Rd)为 1.334 μmol/mol，表观量子效率(AQY)为 0.023 mol/mol。

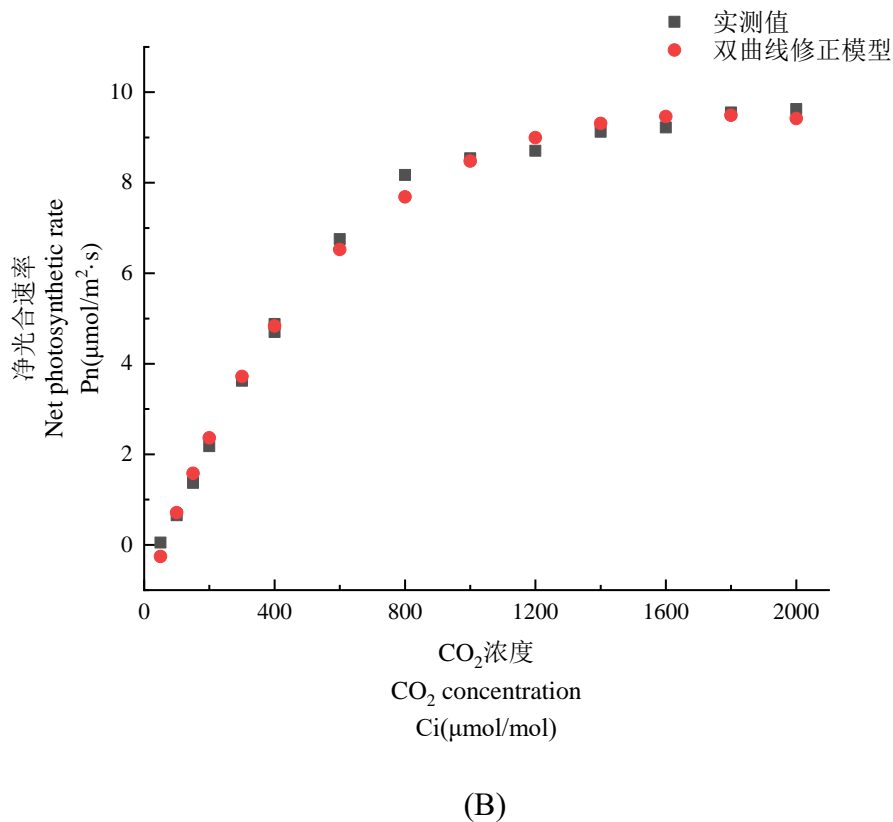
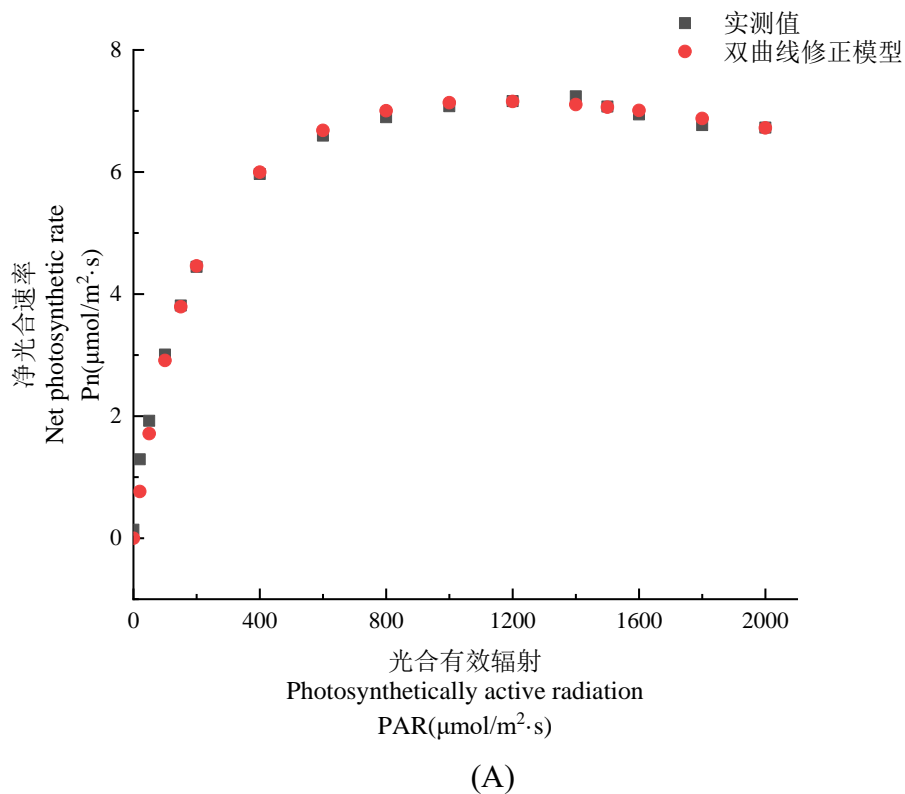


图 2-1 月季的光合-光响应曲线(A)与光合-CO₂ 响应曲线(B)

Fig. 2-1 Photosynthetic light response curve (A) and photosynthetic CO₂ response curve (B) of *Rosa maidu*

2.2.2 月季光合日变化分析

如图 2-2 所示, 利用光合仪对月季的光合指标与外界环境指标进行测定, 得到外界环境与光合指标的日变化图。外界环境的温度、湿度和光强在一天中的规律性变化, 使得植物的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间二氧化碳浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)等光合指标呈现出一定的日变化规律。光合速率是植物光合作用的重要生理指标之一, 能够反映植物进行光合作用能力的强弱。自然条件下外界环境因子的变化都会引起植株光合速率的变化^[157]。由图 2-2(A)可以看出月季的净光合速率日变化呈不对称的双峰曲线, 自 8:00 开始, 净光合速率在随光强的升高快速上升, 在 10:00 时达到一天的最大值, 其值为 $10.52 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。11:00 时, 净光合速率出现第一个谷值($8.17 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$), 月季出现短暂的“光合午休”现象, 12:00 时出现第二个峰值($9.57 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$), 自 12:00 后, 月季的净光合速率逐渐下降, 直至 18:00 下降至全天测量的最低值。

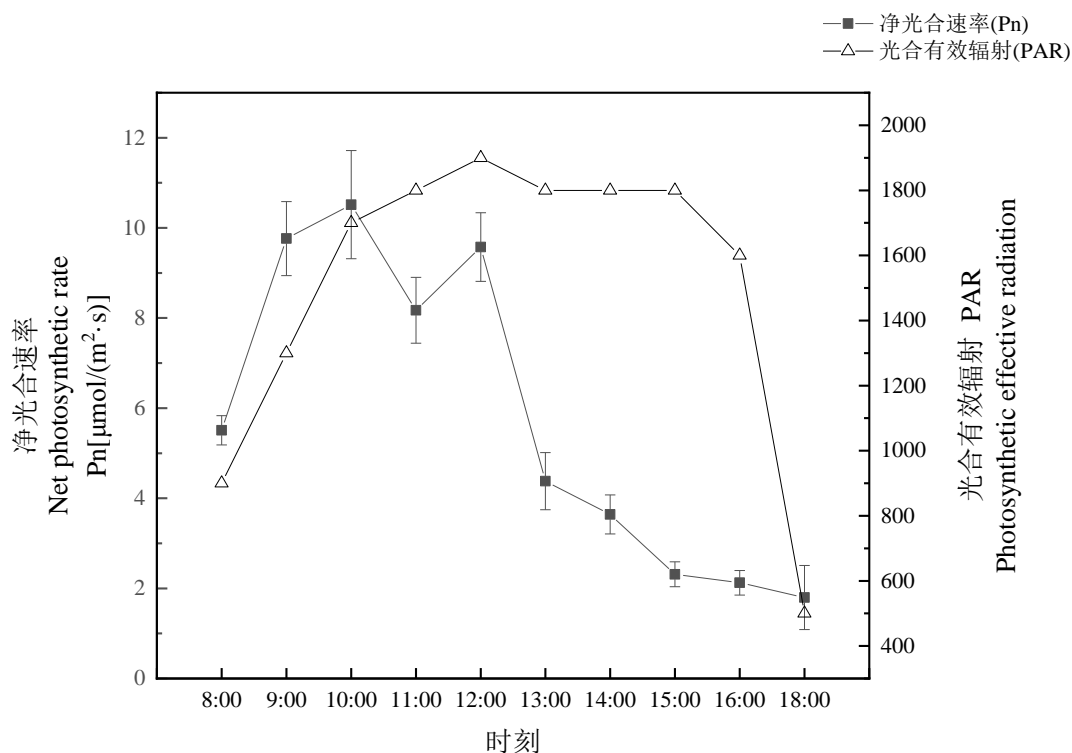


图 2-2(A) 月季净光合速率(Pn)与光合有效辐射(PAR)日变化

Fig. 3-2 (A) Daily variation of net photosynthetic rate (Pn) and photosynthetic effective radiation (PAR) in *Rosa maidi*

水分利用效率(WUE)受植物光合作用合蒸腾作用的直接影响, 是评价植物对环境适应能力的综合指标^[157]。水分利用效率大的植物, 其叶片持水强, 限制叶片水分散失, 从而提高植物的抗逆性^[158]。由图 2-2(B)可以看出, 月季的水分利用

效率呈单峰曲线趋势，在早上 8:00 时的水分利用效率最大，主要是早上温度低，叶片蒸腾作用弱，水分散失少。随着光强和温度的升高，月季叶片蒸腾速率加快，水分利用效率减小^[159]。12:00 时，月季的净光合速率达到第二个峰值，叶片的蒸腾速率较小，使得月季的水分利用效率升高。

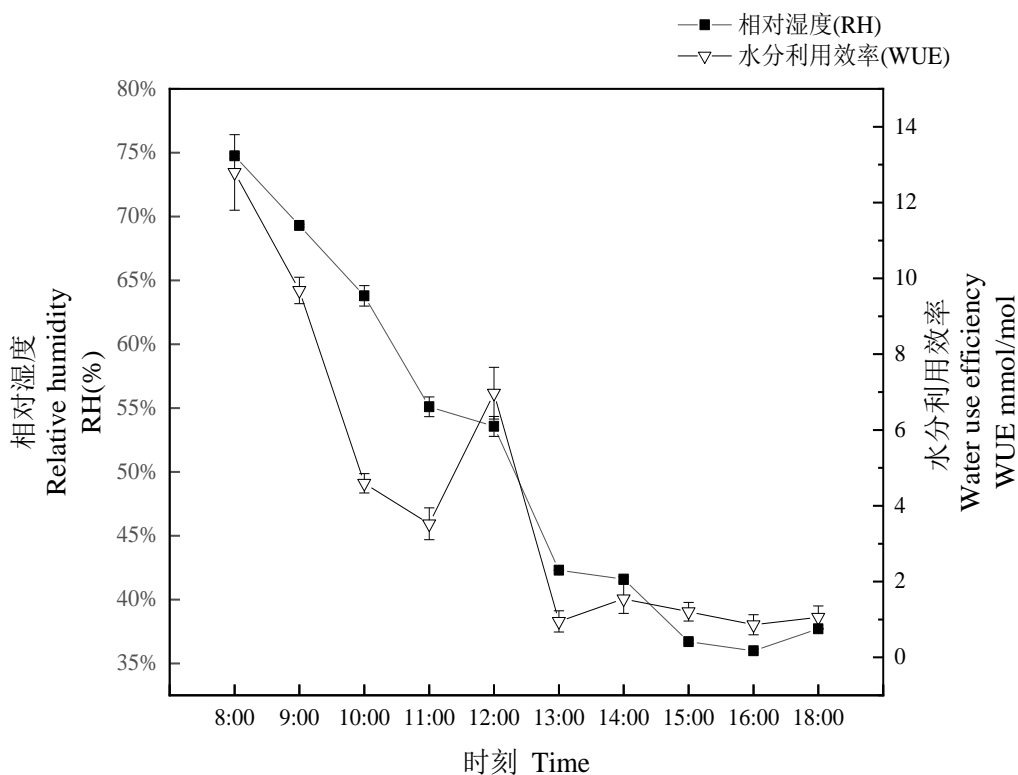


图 2-2(B) 月季相对湿度(RH)与水分利用效率(WUE)日变化

Fig. 2-2(B) Daily variation of relative humidity (RH) and water use efficiency (WUE) in *Rosa maidi*

气孔是绿色植物与外界环境进行气体交换的重要通道，气孔导度表示植物气孔张开的程度^[160]。由图 2-2(C)可知，月季的气孔导度日变化呈单峰曲线，在 10:00 之前呈上升趋势，在 10:00 达到一天的最大值(0.178 mol/(m²·s))，表明其在 10 点的时候通过气孔进行物质交换的频率较大，之后呈下降趋势。由图可知，胞间 CO₂ 浓度呈现“V”型变化趋势。10:00 之前，随着叶片气孔的张开，月季的胞间 CO₂ 浓度逐渐上升，在 12:00 时出现最低值(141.956 μmol/mol)，出现“午休”现象。蒸腾作用反映了植物吸收、运输水分和矿质元素能力的强弱^[161]。由图 2-2 (D)可知，月季的蒸腾速率呈现单峰曲线趋势，在 8:00~11:00，月季的蒸腾速率随着气孔的张开逐渐升高，在 13:00 时月季叶片气孔完全打开，蒸腾上升，蒸腾耗水量达到最大值(3.70 mmolH₂O/(m²·s))。

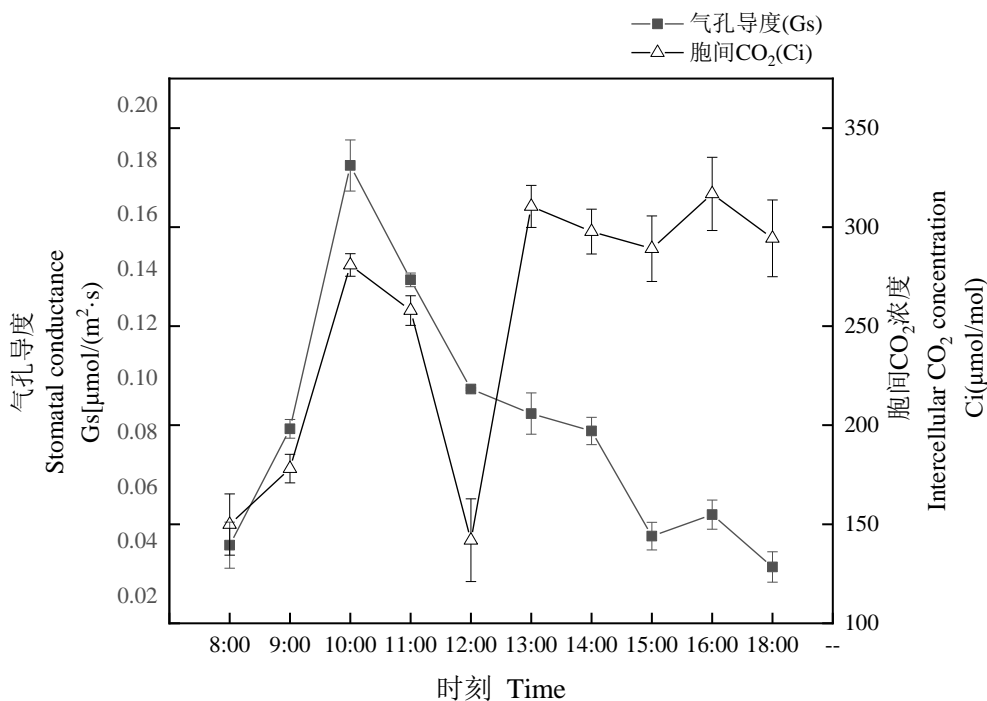


图 2-2(C) 月季气孔导度(Gs)与胞间 CO_2 浓度(Ci)日变化

Fig. 2-2(C) Daily variation of stomatal conductance (Gs) and intercellular CO_2 concentration (Ci) in *Rosa maidy*

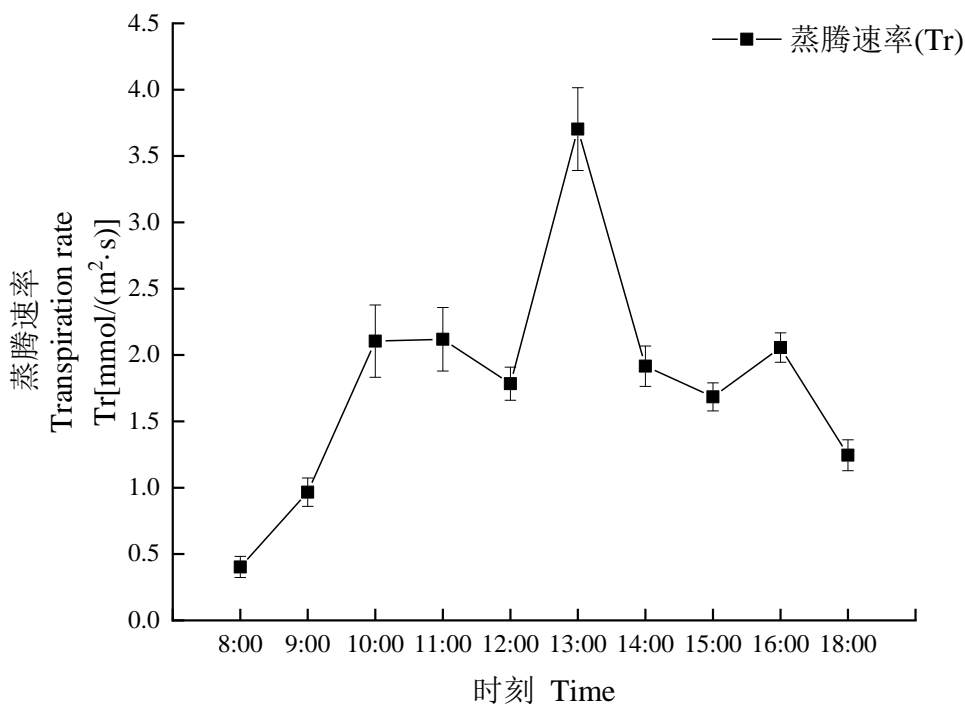


图 2-2(D) 月季蒸腾速率(Tr)日变化

Fig. 2-2(D) Daily variation of transpiration rate (Tr) in *Rosa maidy*

2.3 讨论

光合作用是植物最基本的功能，对植物的生长发育具有重要意义，而光照强度是最直接影响植物光合作用强弱的因素^[162]，因此光饱和点(LSP)及光补偿点(LCP)的高低能够反映植物对强光照的适应能力，具有高 LSP、低 LCP 的植物以及低 Rd 的植物，对光的生态适应能力强^[163]。本试验月季的光饱和点(LSP)为 1166.49 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，光补偿点(LCP)为 0.00 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，暗呼吸速率(Rd)为 0.00 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ，说明该月季对强光与弱光都具有良好的适应性，且在对有机物的消耗少。不同品种的月季对光照的适应能力不同，贾伟峰的研究表明“藤本樱霞”和“欢笑格鲁吉亚”表现出高 LSP、低 LCP 和低 Rd，而“安吉拉”、“艾拉绒球”和“紫色天际线”则表现出低 LSP 高 LCP 高 AQY，表明该类品种适应于遮阴环境^[164]。CO₂ 响应曲线及其特征参数能够反映植物对 CO₂ 的利用能力。CO₂ 补偿点(CCP)低的植物通常具有较高的净光合速率和产物，CO₂ 饱和点(CSP)表示植物对低浓度 CO₂ 的利用能力^[165]。本试验月季的 CCP(63 $\mu\text{mol}/\text{mol}$)较低，而 CSP(1749.82 $\mu\text{mol}/\text{mol}$)较高，表明该月季的 CO₂ 同化能力强且利用幅度较宽。通过对光响应曲线与 CO₂ 响应曲线的分析，发现该月季在饱和 CO₂ 浓度时的净光合速率(Pn)较饱和光强时的 Pn 高，这说明月季在光照饱和的条件下，其光合速率更大程度上受 CO₂ 供应的限制。

在自然光照下，植物的光合作用日变化主要有三种类型，单峰型、双峰型和不规则曲线^[166]。本试验月季的净光合速率日变化呈双峰曲线，在 10:00 和 12:00 达到峰值，11:00 时出现谷值，即光合“午休”现象。研究表明，多种植物都会出现光合“午休”现象，该现象是植物在进化过程中产生的生理现象，有利于植物对逆境的适应^[167]。植物光合“午休”出现的原因分为气孔因素与非气孔因素^[168]。当胞间 CO₂ 浓度与气孔导度同时下降时，“午休”现象主要是由气孔限制引起^[169]的。由图 4-2 可知，“小女孩”月季的净光合速率、气孔导度与胞间 CO₂ 浓度同时降低，说明该月季的光合“午休”现象是气孔限制引起的。植物的光合作用受到多种因素的限制，如光照、相对湿度、温度和 CO₂ 浓度等生态因子以及气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、叶片水势和水蒸气压亏缺等生理因子^[170]。由图 4-2 可知，12:00 后月季的净光合速率在高光强下呈下降趋势，而胞间 CO₂ 浓度呈上升趋势，说明湿度是影响影响植物光合作用的因素。

通过对月季光合指标的测定结果发现，该品种月季对光照的适应能力强，对 CO₂ 的同化能力强，说明该品种月季对环境的适应能力强，能够作为土壤重金属修复的优良材料。

第3章 不同浓度重金属汞胁迫下对月季生长指标的影响

用植物修复土壤重金属污染是目前大家公认的绿色修复技术，且受到了不同国家研究人员的关注，同时越来越多的植物也在被研究是否可以用来不同土壤重金属修复。株高、根长、生物量作为植物的生长指标，可以用来判断植物对逆境的耐受性。在受到重金属胁迫下，植物的生长会受到一定的影响，最直观的表现就是生长缓慢、植株矮小、叶片蜷缩等情况，从而导致生物量降低^[171]，而根系直接接触重金属，根系的变化会先于地上部分发生变化，因此根长能够反映出植物对重金属胁迫的危害程度^[172]。

本文通过人工盆栽试验模拟土壤重金属 Hg 污染，来研究在不同浓度的汞污染胁迫下月季的生长情况以及各项生长指标的差异，旨在为汞污染严重地区的生态修复和绿化美化树种选择提供技术支持，并为植物修复土壤重金属研究进程提供科学的理论依据。

3.1 试验材料与方法

3.1.1 供试样品与土壤

本试验采用盆栽实验法，选取生长健康、无病虫害、长势基本相同的月季苗，盆栽至直径 23cm，高 21.5cm 的盆中，正常浇水处理，待其生长稳定后，株高为 12~15cm 时，开始重金属汞胁迫实验。所有处理随机摆放，并且定期相互更换位置，以减少环境的影响。供试土壤同 3.1.1。

3.1.2 试验处理方法

配制所需的不同浓度 HgCl₂ 溶液，离月季根部 2cm，用 20 ml 医用注射器将溶液缓缓注入土壤中，根据盆中土壤水分情况，每隔 2~5 天浇水一次。试验重金属浓度梯度如表 4-1 所示。

表 4-1 试验因素与处理水平

Table 4-1 Experimental factors and treatment levels

处理(treatments)	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Hg 浓度(mg/kg)	CK	0.5	1	10	50	100

试验以不添加 Hg(0 mg/kg)作为对照，具体处理见表 4-1。每个处理植株 24 株，设置 3 次重复，共 144 株。

3.1.3 测定项目与方法

所有指标在重金属胁迫后第 30 天测，待其各指标有显著性差异时测量，之后每 7 天测定一次，共计 4 次。

株高：株高能直观反映植物的受胁迫程度。采用卷钢尺自月季茎粗至最长叶尖的位置，其读数即为株高。

根长：采用直尺法从月季根部至根尖测量月季主根的长度。

叶长、叶宽：用游标卡尺测量，叶宽测量叶片中间最宽处，叶长从叶根至叶尖测量。

茎粗：为根茎结合处的位置进行测量，用游标卡尺取东西、南北测定的平均值。

鲜重：将整株月季从土壤中取出，用自来水将根系冲洗干净，洗净后用吸水纸将表面的水分吸干，将月季分成根、茎、叶三部分，用电子天平称重。

生物量：将整株月季从土壤中取出，用自来水将根系冲洗干净，洗净后用吸水纸将表面的水分吸干，将月季分为根、茎、叶三部分，分别用大号的信封袋装好，然后在 105 °C 下杀青 30 min，80 °C 下烘干至恒重，用电子天平称量干重，生物量以干重计。

3.1.4 数据处理

运用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行统计分析。采用单因素分析方法(One-way ANOVN)和 Duncan 多重比较进行显著性分析，用字母进行标记，显著性水平为 0.05。

3.2 结果与分析

3.2.1 Hg 胁迫对月季株高的影响

表 3-2 汞胁迫对月季株高的影响

Table 3-2 Effects of different Hg treatments on the height of *Rosa maidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	株高 Height (cm)			
	30d	37d	44d	51d
ck	36.00±3.40a	37.03±1.34a	39.63±3.49a	39.50±0.87a
0.5	32.53±2.73ab	38.43±0.86a	38.53±2.87a	38.90±3.94a
1	32.63±1.21ab	34.57±1.14a	34.53±0.84a	33.47±0.49a
10	25.90±1.46bc	27.23±0.47b	28.23±0.93b	28.87±1.51b
50	21.73±0.84c	25.00±0.31bc	27.70±1.07b	27.10±1.63b
100	19.37±0.59c	20.73±2.37c	23.97±0.80c	23.53±0.57c

注：表中数据不同小写字母为差异达到显著水平($p \leq 0.05$)，下同。

Note: Different lowercase letters in the table represent significant differences ($p \leq 0.05$), the same below

由表 3-2 中数据可以得出不同浓度、不同时间汞胁迫对月季幼苗株高的影响。可以看出随着汞胁迫时间的增加，月季苗的株高也逐渐增长，但在胁迫后的第 30~51 天(d)内，月季幼苗的生长速度在逐渐减慢，在浓度为 10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 的重金属汞胁迫下，月季的株高较对照组有显著性差异，在第 51d 时月季株高分别为对照组的 73.09%、68.61%、59.57%。在 100 mg/kg 的汞胁迫下，胁迫时间 30d、37d、44d、51d 的月季株高分别是对照的 53.81%、55.98%、60.48%、59.57%。在浓度为 0.5 mg/kg、1.0 mg/kg 的重金属汞胁迫下，月季苗的株高相较于

对照组没有显著性差异。但在高浓度的重金属 Hg 胁迫下，与月季苗的生长受到一定的限值，但对其观赏价值没有的影响。

3.2.2 Hg 胁迫对月季根长的影响

表 3-3 汞胁迫对月季根长的影响

Table 3-3 Effects of different Hg treatments on the root length of *Rosa moidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	根长 Root length (cm)			
	30d	37d	44d	51d
ck	21.33±1.96a	22.83±2.00ab	24.6±0.93a	24.9±2.39a
0.5	19.47±2.92a	26.23±4.80a	22.17±2.25a	22.6±1.06a
1	18.67±1.29a	21.97±2.52ab	22.23±0.96a	22.57±2.28a
10	14.43±0.64b	16.70±0.70bc	16.77±1.97b	16.37±0.62b
50	14.57±2.30b	16.03±0.84bc	16.60±1.42b	16.47±0.35b
100	12.30±0.36c	12.07±0.20c	13.57±0.83b	13.93±1.07b

月季根长对重金属 Hg 的响应机制与株高相似，在 0.5 mg/kg 与 1.0 mg/kg 处理下，月季根长与对照组相比没有显著性差异，说明月季在土壤 1.0mg/kg 重金属汞污染限值下，能够正常生长，且不影响月季的最佳观赏性状。在胁迫第 51 天时，浓度为 10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 胁迫下的月季根长较对照组有显著性差异，分别是对照的 65.74%、66.14%、55.94%。在浓度为 100 mg/kg 胁迫的第 30d、37d、44d、51d 月季根长分别是对照的 57.67%、52.87%、55.16%、55.94%。

说明在高浓度汞胁迫下月季的生长受到一定的抑制，但月季没有出现死亡现象，且不影响月季的观赏性质，在低浓度 Hg 处理下，月季能正常生长，且不影响月季的最佳观赏价值。

4.2.3 Hg 胁迫对月季叶长和叶宽的影响

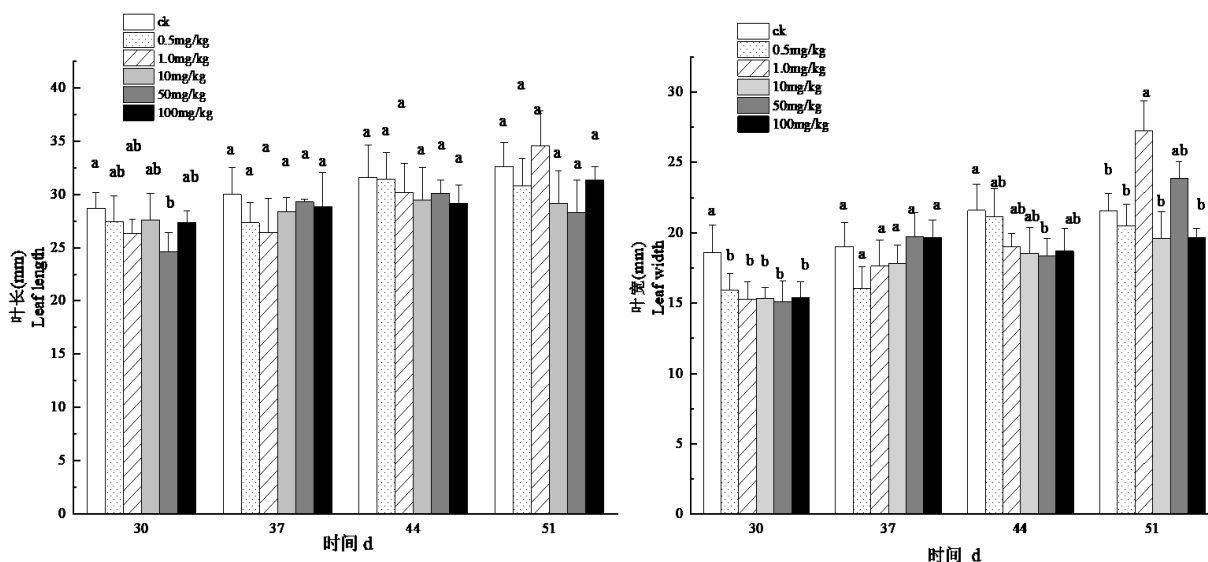


图 3-1 汞胁迫对月季叶长和叶宽的影响

Fig.3-1 Effects of different Hg treatments on the leaf length and width of *Rosa moidy*

如图 3-1 所示, 不同浓度 Hg 胁迫对月季叶长和叶宽的影响。由图可以看出, 随着重金属 Hg 的胁迫, 月季的叶长和叶宽有轻微的抑制作用, 但是与对照组相比没有显著性差异。

3.2.4 Hg 胁迫对月季茎粗的影响

表 3-4 Hg 胁迫对月季茎粗的影响

Table 3-4 Effects of different Hg treatments on stem diameter of *Rosa maidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	茎粗 Stem diameter (mm)			
	30d	37d	44d	51d
ck	2.86±0.71a	3.15±1.12a	4.12±0.54a	4.66±0.43a
0.5	2.96±0.49a	3.14±0.73a	4.80±0.81b	4.10±0.54ab
1	2.76±0.64a	3.22±1.34a	4.00±0.65b	4.22±0.56b
10	2.67±0.61a	3.08±1.06a	3.95±0.15b	4.10±0.54b
50	2.49±0.19a	2.82±0.62a	3.74±0.51bc	3.94±0.57b
100	2.38±0.35a	2.75±0.83a	3.30±0.39c	3.85±0.36b

由表 3-4 可知, 不同浓度 Hg 胁迫对月季茎粗的影响, 在汞胁迫的第 30d 和第 37d 时, 不同浓度重金属汞胁迫对月季的茎粗没有显著性差异, 在处理的第 44d 和 51d 时, 在 100 mg/kg 的汞胁迫下, 月季茎粗较对照组有显著性差异, 分别是对照组的 80.1%、82.72%。可见在浓度为 100 mg/kg 以下的汞胁迫, 对月季的茎粗没有明显的影响, 随着时间增加, 高浓度的汞胁迫对月季茎粗的影响越显著。

3.2.5 Hg 胁迫对月季根、茎、叶各部分鲜重的影响

表 3-5 Hg 胁迫对月季根部位鲜重的影响

Table 3-5 Effects of different Hg treatments on fresh weight at root of *Rosa maidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	根 Root (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	2.781±0.307a	3.018±0.172a	3.114±0.246a	4.637±1.362a
0.5	2.561±0.379ab	2.538±0.675ab	3.336±1.486a	3.815±1.750ab
1	2.081±0.314b	2.484±0.184ab	2.745±0.439a	3.812±1.719ab
10	1.396±0.123c	2.102±0.135bc	2.265±0.700ab	1.935±0.513bc
50	1.371±0.500c	1.811±0.300c	1.340±0.116b	1.647±0.759bc
100	1.170±0.381c	1.526±0.046c	1.275±0.041b	1.204±0.526c

表 3-6 Hg 胁迫对月季茎部位鲜重的影响

Table 3-6 Effects of different Hg treatments on fresh weight at stem of *Rosa maidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	茎 Stem (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	2.948±0.407a	4.044±0.173a	4.151±0.038a	4.174±0.993a
0.5	3.179±0.348a	3.804±0.572a	4.166±0.848a	3.759±1.118a
1	2.889±0.618a	3.091±0.100b	3.373±0.561ab	3.744±0.025a
10	2.715±0.409ab	2.189±0.421c	3.219±0.202ab	3.076±0.145ab
50	2.124±0.325b	1.988±0.186c	2.903±0.948b	3.217±0.549ab
100	1.982±0.139b	1.949±0.460c	2.560±0.193b	2.418±0.317b

表 3-7 Hg 胁迫对月季叶部位鲜重的影响

Table 3-7 Effects of different Hg treatments on fresh weight at leaf of *Rosa maidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	叶 Leaf (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	4.539±0.403a	4.532±0.747a	5.266±0.007a	6.702±0.413a
0.5	4.538±1.284a	3.511±0.089b	5.309±0.607a	5.340±0.453b
1	3.399±0.280ab	3.464±0.002b	4.483±0.990ab	4.838±0.233bc
10	2.878±0.800b	3.214±0.087b	3.599±0.638bc	4.010±0.317cd
50	2.590±0.509b	3.276±0.044b	3.208±0.452c	3.898±1.094cd
100	2.216±0.605b	2.308±0.399c	2.965±0.283c	3.510±0.384d

不同时间、不同浓度汞胁迫对月季幼苗的根、茎、叶部位鲜重的影响如表 3-5、3-6、3-7 所示，由表可知，在胁迫的第 30d、37d、44d、55d 时，在低浓度 0.5 mg/kg、1.0 mg/kg 的 Hg 胁迫下月季苗的根、茎、叶各部位与对照组相比较没有显著性差异。在汞浓度为 50 mg/kg、100 mg/kg 的处理下，月季幼苗各部分的鲜重较对照组均有显著性差异，在胁迫的第 51d，胁迫浓度为 50 mg/kg 处理时，月季的根、茎、叶各部位分别是对照组的 35.56%、77.07%、58.08%，胁迫浓度为 100 mg/kg 处理时，月季的根、茎、叶各部位分别是对照组的 25.97%、57.93%、52.37%。可以得出高浓度重金属汞胁迫对月季幼苗的根系鲜重影响较大，主要是由于 Hg 胁迫主要与月季的根部直接接触，植物的根系部分时重金属的主要富集部位，所以根系受重金属的危害相较于茎、叶部位较大。

4.2.6 Hg 胁迫对月季生物量的影响

生物量是反映植物生长好坏的最直观的表现，植物的生物量大小规律反映反映植物是否能在重金属土壤污染的情况下正常生长。由表 3-8、3-9、3-10 可知，不同浓度、不同时间重金属 Hg 处理对月季各部位生物量的影响。月季根、茎、叶各部位随着处理时间的增加，各部位的生物量也随之增加。在重金属 Hg 胁迫的第 30d 至第 51d，0 mg/kg、0.5 mg/kg、1 mg/kg、10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 不同浓度处理下，月季的根部位生物量分别增加 107.80%、52.22%、29.85%、68.57%、9.26%、21.71%，说明随着胁迫时间的增加，月季根部位的生物量也随之增加，但高浓度处理下的增长速度较慢。在 Hg 胁迫处理的第 51d，在 Hg 浓度为 10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 时，月季的根、茎、叶三部分的生物量与对照试验相比较都有显著性差异，根部位生物量分别是对照组的 37.73%、23.27%、23.62%；茎部位的生物量分别是对照组的 78.48%、77.03%、48.95%。叶部位的生物量是对照组的 55.63%、56.82%、48.09%。可以看出高浓度 Hg 胁迫下对月季根部位的生物量影响较大，主要是由于 Hg 胁迫主要与月季的根部直接接触，植物的根系部分时重金属的主要富集部位，所以根系受重金属的危害相较于茎、叶部位较大。

表 3-8 Hg 胁迫对月季根部生物量的影响

Table 4-8 Effects of different Hg treatments on biomass at the root of *Rosa moidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	根 Root (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	1.245±0.103a	1.379±0.046a	1.393±0.165a	2.587±0.605a
0.5	1.128±0.076a	1.142±0.232ab	1.876±0.447ab	1.717±0.450ab
1	1.072±0.117a	1.121±0.061ab	1.651±0.157ab	1.392±0.371bc
10	0.579±0.040b	0.936±0.047bc	1.071±0.121bc	0.976±0.171bc
50	0.551±0.140b	0.794±0.088bc	0.683±0.012c	0.602±0.138bc
100	0.502±0.127b	0.661±0.044c	0.683±0.011c	0.611±0.142c

表 3-9 Hg 胁迫对月季茎部生物量的影响

Table 4-9 Effects of different Hg treatments on biomass at the stem of *Rosa moidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	茎 Stem (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	1.424±0.188ab	2.322±0.251a	1.983±0.041a	2.421±0.365a
0.5	1.628±0.026a	2.141±0.246a	2.189±0.233a	2.156±0.452a
1	1.345±0.218ab	1.484±0.137b	1.645±0.215ab	2.188±0.010a
10	1.334±0.142ab	1.020±0.179c	1.559±0.054ab	1.900±0.030ab
50	1.165±0.060bc	0.928±0.068c	1.527±0.355ab	1.865±0.269ab
100	0.852±0.023c	0.976±0.161c	1.257±0.056b	1.185±0.214b

表 3-10 Hg 胁迫对月季叶部生物量的影响

Table 4-10 Effects of different Hg treatments on biomass at the leaf of *Rosa moidy*

Hg 处理浓度 Hg concentration(mg/kg)	叶 Leaf (g)			
	30d	37d	44d	51d
ck	1.916±0.270a	1.714±0.151a	2.185±0.058a	3.358±0.176a
0.5	1.739±0.161a	1.120±0.043ab	2.228±0.167a	2.310±0.025ab
1	1.213±0.027b	1.482±0.106c	1.739±0.216b	2.951±0.623bc
10	1.025±0.157bc	1.283±0.014bc	1.440±0.160bc	1.868±0.103c
50	0.886±0.057c	1.367±0.080bc	1.273±0.100c	1.908±0.327c
100	0.854±0.113c	0.787±0.133d	1.236±0.077c	1.615±0.071c

在重金属 Hg 胁迫处理的第 37d、第 44d、第 51d 时, 月季根、茎、叶三部分在 Hg 处理浓度为 10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 时的生物量与对照组相比也有显著性差异。在 1.0 mg/kg 的重金属 Hg 胁迫下, 月季根、茎、叶各部位的生物量与对照相比没有显著性变化。

3.3 讨论

重金属元素对于植物的生长有必需重金属和非必需重金属之分, 比如 Fe、Cu、Zn 是植物和动物所必需的微量营养素, 当这些重金属的吸收量超过植物需要量就会导致植物毒害作用^[173]。Fe、Cu、Zn 在每克植物干重中的含量范围分别为 140 μg/g、4.15 μg/g、8~100 μg/g, 而重金属汞不是植物生长所必需的元素, 且在每克植物干重中的含量范围为 0.005~0.2 μg/g^[174]。

当植物受到重金属胁迫时, 植株会出现生长缓慢、植株矮小、产量降低根系

生长受到抑制、生物量降低的现象^[175]，当重金属浓度过高时，植物甚至会出现死亡情况^[176]。相关研究表明，低浓度的重金属汞处理下不会对蜈蚣草的生长产生明显的影响，而当重金属 Hg 浓度为 1.0 $\mu\text{mol/L}$ 时，Hg 对蜈蚣草的抑制作用开始加强^[177]。本研究结果也表示在低浓度的 Hg 处理下，重金属 Hg 对月季的生长指标没有显著性影响，在高浓度时，对月季的生长产生抑制作用。高大翔^[178]等研究发现，汞胁迫水稻后，低浓度处理对株高增长有促进作用，高浓度处理则显著降低株高，汞浓度的增加对株高抑制作用越来越明显。尚宏芹研究表明桔梗幼苗的根长和株高随着重金属 Cd 和 Hg 浓度的增加而降低，且对植物根长的抑制作用大于株高的抑制作用^[179]。

不同时间、不同浓度的 Hg 胁迫对月季的株高、根长、茎粗、各部位鲜重以及生物量均有不同程度的影响，随着重金属 Hg 胁迫浓度($\geq 50 \text{ mg/kg}$)的升高，月季的株高、根长、茎粗、根、茎、叶鲜重均呈现高浓度抑制，被重金属污染后的土壤，植物的生长状况会受到一定程度的影响。

第 4 章 不同浓度重金属汞胁迫下对月季生理指标的影响

光合作用是植物生长发育的基础，也是作物产量和品质形成的关键因素^[180]。叶绿素作为植物叶片的重要光合色素，是植物进行光合作用的物质基础，叶绿素的含量高低决定了植物光合作用能力的强弱，最终影响植物的生长^[144]。丙二醛作为细胞膜脂过氧化反应的产物，在植物遭受逆境胁迫时，起到细胞膜受损程度的指示作用^[181]。月季苗对土壤重金属 Hg 的修复文献尚未查询到，本文通过研究在不同浓度 Hg 胁迫下月季的光合特性、叶绿素含量、MDA 含量以及细胞膜透性的变化，解释土壤 Hg 污染对植物的作用规律，来评价月季苗对 Hg 污染胁迫的耐性，为月季修复土壤重金属 Hg 污染提供重大参考意义。

4.1 试验材料与方法

4.1.1 供试样品与土壤

同 3.1.1。

4.1.2 测定指标与方法

光合指标的测定：

在晴朗无风的天气下，利用 LI-6400XT 光合仪对月季的各项光合指标进行测定。不同浓度 Hg 处理的月季各选择 3 株，每株选择生长情况相似且方向一致的叶片进行测定，每片叶子测定 3 次。测定时间为上午 9:00~11:00。第三章测出月季的光饱和点(LSP)为 $1166.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，为了避免月季出现光抑制的情况，设定统一光合有效辐射 $1000 \mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ， CO_2 浓度值设置 $400 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。

测定指标：净光合速率 $\text{Pn}(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 、胞间 CO_2 浓度 $\text{Ci}(\mu\text{mol}/\text{mol})$ 、气孔导度 $\text{Gs}(\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 、蒸腾速率 $\text{Tr}(\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 。

叶绿素含量的测定：无水乙醇浸提法^[182]。

细胞膜透性的测定：浸泡法^[183]

丙二醛(MDA)含量的测定：双波长硫代巴比妥酸法^[79]。

4.1.3 数据处理

运用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行统计分析。采用单因素分析方法(One-way ANOVN)和 Duncan 多重比较进行显著性分析，用字母进行标记，显著性水平为 0.05。用 Origin2018 进行绘图。

4.2 结果与分析

4.2.1 汞胁迫对月季净光合速率的影响

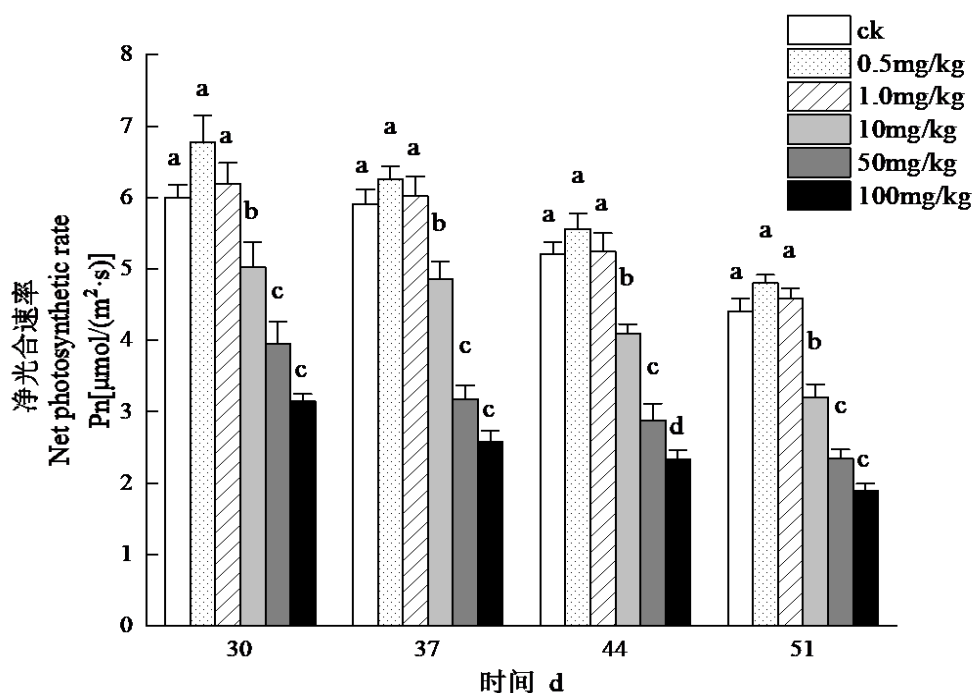


图 4-1 Hg 胁迫对月季净光合速率的影响

Fig. 4-1 Effects of different Hg treatments on net photosynthetic rate of *Rosa maidi*

植物的生长发育过程离不开光合作用，光合作用是大部分植物的关键生理过程，同时因为是植物合成产物和取得能量的根本途径。由图 4-1 可知，不同浓度不同时间的重金属 Hg 胁迫下，月季的净光合速率的变化趋势。在低浓度 0.5 mg/kg、1.0 mg/kg 的 Hg 胁迫下，对月季的净光合速率有轻微的促进作用，但与对照组相比没有显著性影响。在浓度达到 100 mg/kg 时，月季的净光合速率受到的抑制最大，不同时间的处理下均与对照组有显著性差异。随着胁迫时间的增加，月季的净光合速率也逐渐降低，在胁迫第 51d 时，各处理浓度的净光合速率均达到最低。

4.2.2 Hg 胁迫对月季气孔导度的影响

不同浓度重金属汞对月季气孔导度的影响如图所示，不同时间不同浓度处理下月季的气孔导度随着 Hg 浓度和胁迫时间的增加逐渐降低。在 100 mg/kg Hg 胁迫时达到最低值。在处理的第 30d 时，低浓度(0.5 mg/kg、1.0 mg/kg)Hg 胁迫下的月季气孔导度与对照组相比没有显著性的差异，随着胁迫时间的增加，低浓度处理下月季的气孔导度降低，与对照组相比具有显著性差异。在胁迫浓度为 10 mg/kg、50 mg/kg、100 mg/kg 时，月季的气孔导度值与对照组相比均具有显著性差异。说明汞离子促进月季叶片气孔关闭，导致气孔不能顺利地外界进行水分、气体以及二氧化碳的交换，进而影响月季的生长。

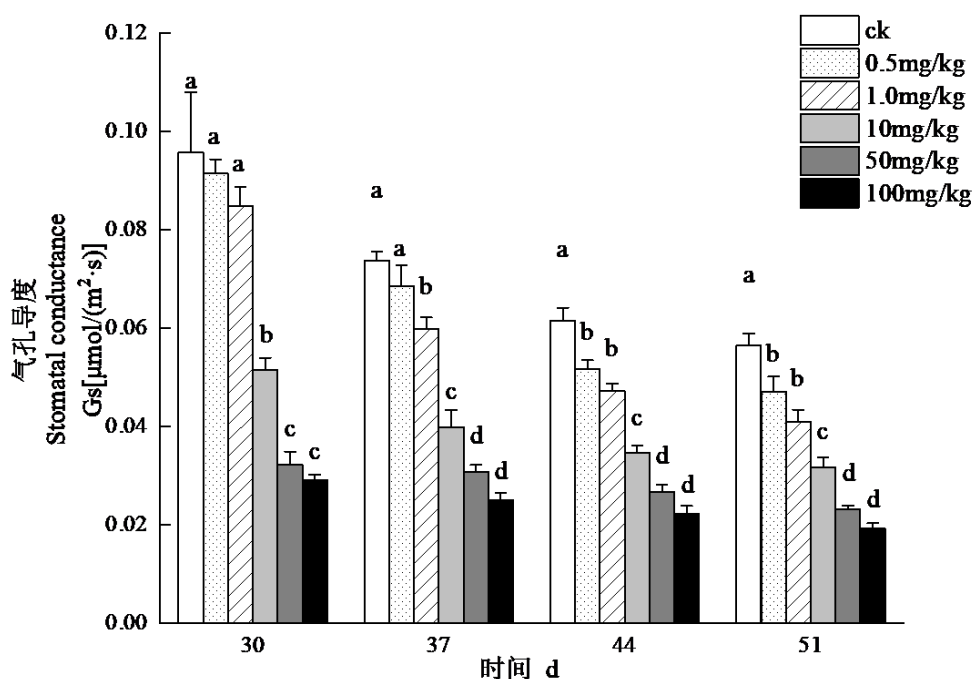


图 4-2 Hg 胁迫对月季气孔导度的影响

Fig. 4-2 Effects of different Hg treatments on stomatal gsuctance of *Rosa maidy*

4.2.3 Hg 胁迫对月季胞间 CO₂ 浓度的影响

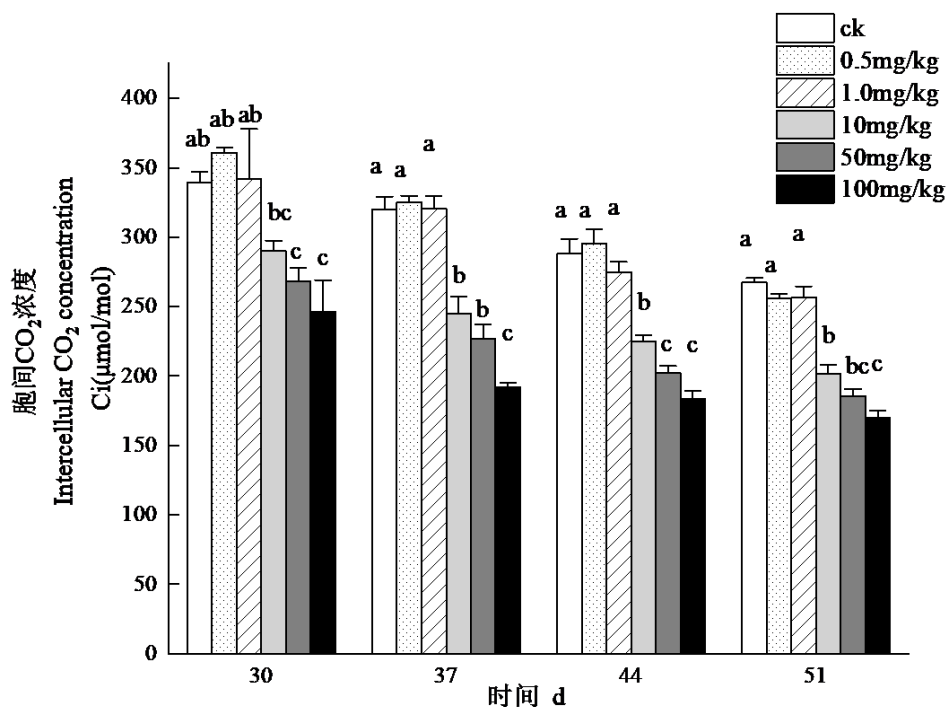


图 4-3 Hg 胁迫对月季胞间 CO₂ 浓度的影响

Fig. 4-3 Effects of different Hg treatments on intercellular CO₂ concentration of *Rosa maidy*

在不同 Hg 浓度处理下，月季的胞间 CO₂ 响应机制如图 4-3 所示，在不同浓度不同时间 Hg 胁迫下月季的胞间 CO₂ 浓度(Ci)的变化整体呈下降趋势，在重金属 Hg

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/266032054033010101>