

土壤重金属胁迫对经济树种的光合响应特征研究

刘建华¹ 朱济友² 姚姜铭³ 李夏榕² 覃国铭⁴ 于强²

(1. 中国社会科学院数量经济与技术经济研究所, 北京 100732; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083;
3. 广西大学林学院, 南宁 530005; 4. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广州 510520)

摘要: 为揭示土壤重金属胁迫对经济树种的光合响应特征及其相关性,选取北京市常见经济树种(核桃树(*Juglansregia* L.)、桃树(*Amygdaluspersica* L.)和李树(*Prunussalicina* Lindl.))作为研究对象,研究了不同土壤重金属(Cr、As、Cu、Pb)含量下的叶绿素相对含量及相关性,分析了3种经济树种对4种常见重金属元素胁迫的抗性机制。结果表明:在不同重金属含量的土壤环境中,由于重金属胁迫的复合影响,植物的叶绿素相对含量存在较显著的差异,说明土壤重金属对植物生长存在明显影响。单因子指数法和内梅罗综合评价法的计算结果表明,试验果园土壤重金属As、Cr元素综合污染等级分别为轻度污染等级和警戒线等级,而Cu、Pb元素处于安全等级。总体来看,单因子污染指数与内梅罗综合污染指数由大到小均为As、Cr、Cu、Pb。3种经济树种的叶绿素相对含量由大到小依次为李树(25.9±6.5)、桃树(24.3±7.1)、核桃树(18.55±4.8)。叶绿素相对含量与4种土壤重金属含量存在显著的负相关关系,这说明重金属胁迫抑制了植物光合作用的途径,从而降低了其光合能力,随着胁迫强度的增大,对叶绿素相对含量的抑制作用越强。3种经济树种中,核桃树对土壤重金属胁迫的抗性较强,李树次之,桃树较差。

关键词: 经济树种; 土壤重金属; 叶绿素相对含量; 风险评估

中图分类号: S66; S155.4⁺6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)09-0211-06 **OSID:** 

Photosynthetic Response Characteristics of Economic Tree Species
to Heavy Metal Stress in Soil

LIU Jianhua¹ ZHU Jiyu² YAO Jiangming³ LI Xiarong² QIN Guoming⁴ YU Qiang²

(1. Institute of Quantitative and Technical Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100732, China
2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
3. College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530005, China
4. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, China)

Abstract: In order to reveal the photosynthetic response characteristics and correlation of economic tree species to heavy metal stress in soil, common economic tree species in Beijing (*Juglansregia* L., *Amygdaluspersica* L., *Prunussalicina* Lindl.) were selected as research objects to study the relative content and correlation of chlorophyll under different heavy metal contents (Cr, As, Cu, Pb) in soil. And the resistance mechanism of three economic tree species to four common heavy metal elements was analyzed. The results showed that in the soil environment with different contents of heavy metals, due to the combined effects of heavy metal stress, the relative contents of chlorophyll in plants were significantly different, which indicated that heavy metals in soil had obvious effects on the growth of plants. According to the calculation results of single factor pollution index method and Nemerow comprehensive pollution index evaluation method, the comprehensive pollution levels of heavy metals As and Cr in the soil of the test orchard were light pollution level and warning level respectively, while Cu and Pb were in safety level. In general, the single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index were As, Cr, Cu and Pb respectively from large to small. The relative chlorophyll content of three economic tree species from large to small were *Prunussalicina* Lindl. (25.9±6.5), *Amygdaluspersica* L. (24.3±

收稿日期: 2019-12-17 修回日期: 2020-01-16

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2018M641218)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(BLX201806)

作者简介: 刘建华(1980—),女,博士后,主要从事水土保持与荒漠化防治研究,E-mail: ljhua678@126.com

通信作者: 于强(1987—),男,讲师,博士,主要从事3S技术在生态环境中的应用研究,E-mail: yuqiang@bjfu.edu.cn

7.1) and *Juglansregia* L. (18.55 ± 4.8). There was a significant negative correlation between the relative content of chlorophyll and the content of heavy metals in four kinds of soils, which indicated that heavy metal stress inhibited the photosynthetic pathway of plants, thus reducing their photosynthetic capacity, and with the increase of stress intensity, the inhibition effect on the relative content of chlorophyll was stronger. Among the three economic tree species, *Juglansregia* L. had stronger resistance to heavy metal stress, *Prunussalicina* Lindl. took the second place and *Amygdaluspersica* L. was poorer.

Key words: economic tree species; heavy metals in soil; relative value of chlorophyll content; risk assessment

0 引言

土壤是生态环境的重要组分,也是地球生物赖以生存的重要自然资源之一。近年来,随着工业、农业生产的迅速发展,农药和化肥的过度使用、采矿活动、工业废水的排放等,使许多重金属及其化学物质进入农田土壤环境,造成了严重的土壤污染,土壤质量每况愈下^[1-2]。研究表明,当环境中的重金属含量超过临界值时,将引起土壤退化等一系列生态问题。土壤中的重金属不仅严重危害农作物的正常生长、降低产量和质量,甚至最终导致植物死亡,而且由于植物对重金属的吸附作用,其将通过食物链进入人体,在人体某些重要器官中积累,会进一步危害人类的健康^[2-6]。因此,土壤重金属污染对农作物的影响已成为研究学者的研究热点之一。

重金属是土壤环境中主要污染物之一。研究表明,土壤环境污染中的重金属一般指 Hg、Cd、Pb、Hg、As、Cu 等生物毒性比较显著的金属元素^[7]。由于土壤环境中的重金属污染具有多元性、隐蔽性、循环性和长期性等特点,因此受到生态学者的广泛关注^[8-9]。近年来,国内外关于重金属污染对植物毒害的影响研究已有较多报道^[10]。经济树种是农业生态系统中的重要组成部分,而土壤是其赖以生存的重要载体,土壤重金属污染问题将制约经济树种正常的生长发育,甚至对其食用安全性造成巨大威胁^[11]。当植物生长在含有重金属污染的土壤环境中时,这些重金属元素或离子对植物的毒害主要表现为抑制生长、叶片病害发生率提高、光合作用降低等方面^[12-14]。其中,重金属污染抑制、破坏植物正常的光合系统运转是其毒害植物的一个重要机制^[13]。叶片中的叶绿素含量是衡量植物光合作用的重要指标,重金属对叶绿素合成的影响必然制约其光合作用的正常进行^[13-14]。尽管重金属污染对植物生长会造成一定的伤害,但在不同的树种间存在较大差异。因此,研究土壤重金属污染对不同经济树种光合生理特性的响应及其相关性,可为农田土地安全利用及经济树种的种植管理提供重要借鉴。

基于此,本文以北京市平谷区 3 种重要经济树

种(核桃树、李树、桃树)为研究对象,随机选取60 个采样点,研究其在不同浓度重金属(Cr、Pb、As、Cu)污染环境下的生理生态响应,探讨植物对 4 种常见重金属元素胁迫的抗性机制,旨在为重金属污染下的植物修复技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集及重金属含量测定

据北京市平谷区统计局 2015 年统计数据显示,平谷区全区耕地面积为 117.30 km²,占全区土地总面积的 12.37%,园地面积为 249.05 km²,占全区土地总面积的 26.27%。选取该区域普遍种植的核桃树、桃树和李树作为研究对象。取样地点位于北京市平谷区,在园区中随机选择 60 个果园样地进行土壤样品采集,其中核桃树(新丰)、桃树(白桃)、李树(脆蜜李)园地各 20 个,树龄为 5~6 年生,密度约为 3 900 株/hm²。由于样地选择位于同一园区,保证了经济树种种植经营和管理的相对一致性。如图 1 所示,在每个园地设置 20 m×20 m 样地,每个样地设置 3 个取样点,以对角线取样法采集表层土样,3 份土壤混合均匀后均分为 3 份,3 个重复。土壤除去石砾、植物根系及其他杂质后,放在通风处自然风干备用。重金属含量测定采用消煮法,采用 ICP-OES7000DV 型电感耦合等离子体发射光谱仪(PE,美国)测定。

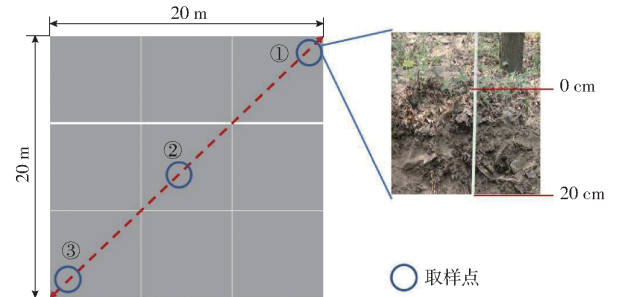


图 1 土壤样品采集方式示意图

Fig. 1 Schematic of soil sample collection method

1.2 叶绿素相对含量测定

叶绿素相对含量可以指示植物本身的状况,是表征植物光合作用的重要指标。于 2019 年 8 月晴朗天气 10:00—12:00,利用 CCM-200 Plus 型手持

式叶绿素仪 (OPTI-Science, 美国) 测定叶绿素相对含量 (CCI 值)。每个样地选择 30 株经济树种, 共计 180 株经济树种, 每株树分东西南北 4 个方位选择 30 片健康、成熟的叶片, 每个叶片样本分上、中、下 3 个部位测定一次, 取平均值为该样本的叶绿素相对含量。叶绿素仪每 10 min 校准一次。

1.3 重金属污染评价

重金属污染评价分析采用单因子指数法, 基于 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》采用二级标准计算 (表 1)。环境质量指数公式为

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中 P_i ——土壤重金属元素 i 的环境质量指数, 即单因子污染指数

C_i ——土壤重金属元素 i 含量 (质量比) 实测值, mg/kg

S_i ——土壤重金属元素 i 含量 (质量比) 标准值, mg/kg

表 1 土壤环境质量标准值

mg/kg					
重金属	一级	二级			三级
	自然背景	pH 值 小于 6.5	pH 值为 6.5 ~ 7.5	pH 值大于 7.5	pH 值 大于 6.5
Cr	90	150	200	250	300
Cu	0	150	200	200	400
As	15	40	30	25	40
Pb	35	250	300	350	500

内梅罗综合评价法同时考虑了单因子指数的平

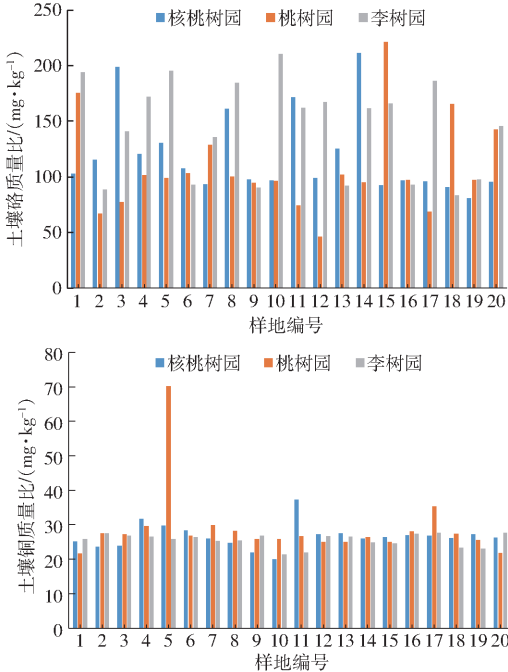


图 2 果园样地土壤 4 种重金属含量分布图

Fig. 2 Distribution diagrams of four kinds of heavy metals in soil of orchard sample plot

均值与最高值 (表 2), 因此采用单因子指数法结合内梅罗综合评价法用于评价土壤重金属元素污染水平, 计算公式为

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中 P_n ——内梅罗综合污染指数

$P_{\max}$ ——土壤污染物中环境质量指数的最大值

P_{ave} ——土壤污染物中环境质量指数的平均值

表 2 土壤内梅罗综合污染指数评价法标准

Assessment standard of Nemerow pollution index for soil quality		
污染等级	P_i	P_n
安全 (I)	0 ~ 0.7	0 ~ 0.7
警戒线 (II)	0.7 ~ 1.0	0.7 ~ 1.0
轻度污染 (III)	1 ~ 2	1 ~ 2
中度污染 (IV)	2 ~ 3	2 ~ 3
重度污染 (V)	> 3	> 3

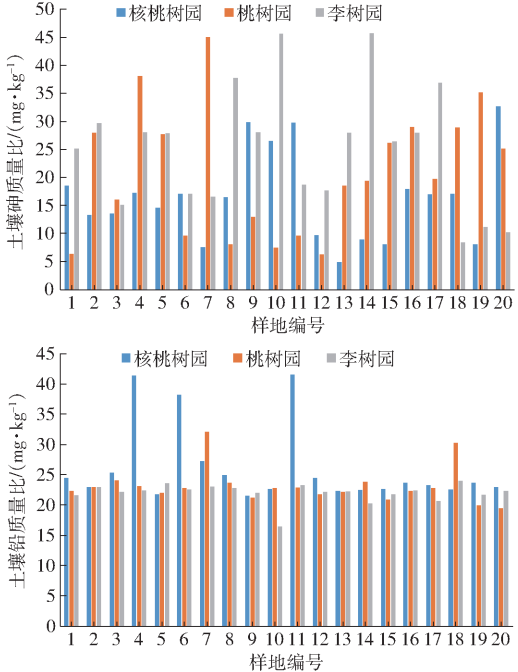
1.4 数据统计分析

采用 SPSS 23.0 和 Excel 2019 分析和处理数据, 并在 Origin Pro8 中制图。

2 结果与分析

2.1 果园土壤重金属含量

研究表明, 由于土壤重金属污染的隐蔽性、累积性和长期性等特点, 大量重金属离子从各个途径进入土壤后较难排出^[15]。铬 (Cr)、砷 (As)、铜 (Cu)、铅 (Pb) 作为生物毒性较显著的重金属元素, 在土地安全利用研究中受到广泛关注和重视。由图 2 可看



出,在不同的样地中土壤重金属含量存在较明显的差异。铬元素质量比范围为 46.23 ~ 221.40 mg/kg,平均值为 141.20 mg/kg;砷元素质量比范围为 4.85 ~ 48.28 mg/kg,平均值为 21.43 mg/kg;铜元素质量比范围为 20.01 ~ 37.27 mg/kg,平均值为 26.32 mg/kg;铅元素质量比范围为 16.40 ~ 41.55 mg/kg,平均值为 24.58 mg/kg。

2.2 土壤环境污染风险评价

果园 4 种重金属元素单因子污染指数及内梅罗综合污染指数计算结果如表 3 所示。结合表 2 的内梅罗综合指数评价标准,重金属元素 Cr、As 两个指数分别处于 0.7 ~ 1、1 ~ 2 范围内,污染等级分别处于警戒线和轻度污染等级,这可能与附近黄金尾矿库矿石滑坡有关。总体来看,Cu、Pb 元素污染指数较低,属于安全等级。

表 3 调查样地重金属污染风险评价结果
Tab.3 Risk assessment results of heavy metal pollution in investigation sample sites

重金属	单因子污染 指数 P_i	内梅罗综合污染 指数 P_n	污染等级
Cr	0.706 0	0.928 4	警戒线
As	0.714 5	1.247 3	轻度污染
Cu	0.131 6	0.164 3	安全
Pb	0.081 9	0.113 5	安全

2.3 不同土壤重金属含量下的经济树种叶绿素相对含量

农用地中的重金属主要来源于大气沉降、农药与化肥的使用及污水排放等,输入土壤后,直接参与了农田生态系统循环,并通过农作物的吸收积累在根系、茎秆、叶片、种子和果实中,严重危害植物正常的生长发育^[16-19]。由图 2、3 可知,在不同重金属含量(Cr、As、Cu、Pb)的土壤环境中,由于重金属胁迫的复合影响,3 种经济树种的叶绿素相对含量存在较显著的差异,这说明了土壤重金属对植物生长存在明显的影响,尤其体现在其光合特性上。由图 4 可知,3 种经济树种的叶绿素相对含量由大到小依次为李树(25.9 ± 6.5)、桃树(24.3 ± 7.1)、核桃树(18.55 ± 4.8)。

2.4 土壤重金属含量与叶绿素相对含量的相关性

研究表明,土壤中的重金属离子通过植物根系吸收后,长期累积在植物体内,从而抑制其生长代谢、光合作用等一系列生长生理活动^[20]。植物的光合作用是保证植物正常生长最重要的生理活动之一,对植物体内的有机质、能量及营养的合成和积累具有重要作用^[21]。如果植物在光合作用环节受到制约,将严重影响和阻碍植物的生长甚至致其死亡。

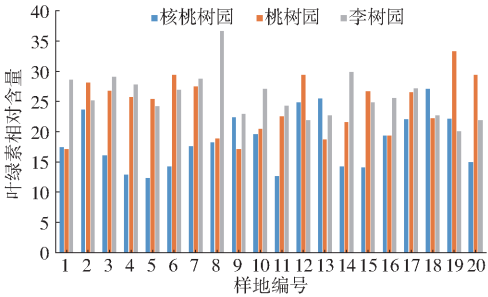


图 3 不同土壤重金属含量环境下 3 种经济树种的叶绿素相对含量

Fig.3 Relative contents of chlorophyll of three economic tree species in different soil heavy metal content environments

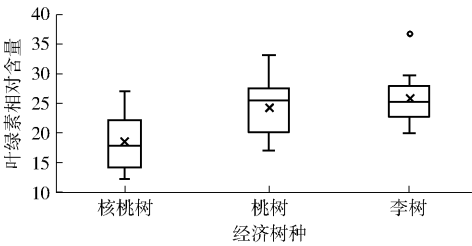


图 4 不同经济树种叶绿素相对含量

Fig.4 Relative chlorophyll content of different economic tree species

而叶绿素是高等植物进行光合作用必不可少的绿色色素,常用于表征光合能力及水平^[21]。由 4 种土壤重金属含量与 3 种经济树种叶绿素相对含量的回归关系可知(图 5),植物的叶绿素相对含量与 4 种土壤重金属含量存在显著的负相关关系,这说明重金属胁迫抑制了植物光合作用的途径,从而降低了其光合能力,且随着胁迫强度的增大,对叶绿素相对含量的抑制作用越强。

对土壤重金属含量与叶绿素相对含量的 Pearson 相关分析可知(表 4),土壤重金属含量与 3 种经济树种叶绿素相对含量均呈负相关关系。在 4 种不同重金属元素胁迫下,3 种经济树种的叶绿素相对含量都不同程度地下降。根据图 5 斜率来看,土壤重金属复合影响程度在不同经济树种中敏感性强度由大到小依次为李树、桃树、核桃树。其中,铬元素对 3 种经济树种叶绿素相对含量的影响程度由大到小依次为桃树、李树、核桃树;砷元素对 3 种经济树种叶绿素相对含量的影响程度由大到小依次为李树、核桃树、桃树;铜和铅元素对 3 种经济树种叶绿素相对含量的影响程度由大到小依次为李树、桃树、核桃树。由此说明,3 种经济树种中,核桃树对土壤重金属胁迫的抗性较强,李树次之,桃树较差。

3 讨论

Cr、As、Cu、Pb 是土壤环境中常见的重金属污染

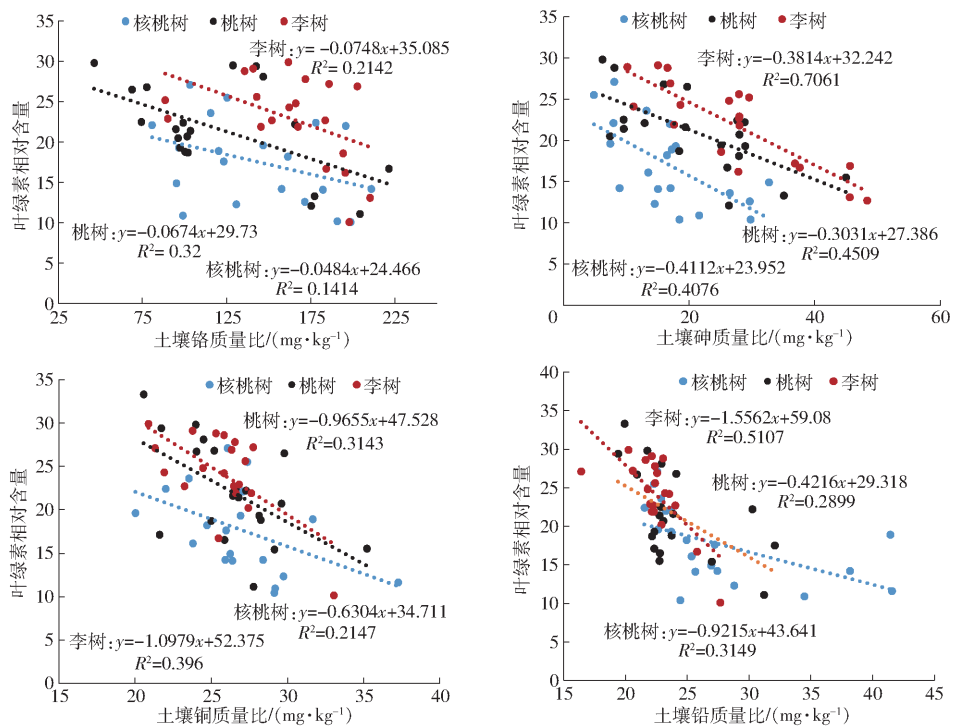


图 5 土壤重金属含量与叶绿素相对含量的关系

Fig. 5 Relationship between soil heavy metal content and chlorophyll relative content

表 4 3 种经济树种叶绿素相对含量与土壤重金属含量的 Pearson 相关系数

Tab. 4 Pearson correlation coefficient between relative chlorophyll content of three economic tree species and soil heavy metal content

重金属	核桃树	桃树	李树
Cr	-0.376 1	-0.565 7 *	-0.462 8 *
As	-0.638 5 *	-0.671 5 *	-0.840 3 *
Cu	-0.463 3 *	-0.560 6 *	-0.629 3 *
Pb	-0.538 4 *	-0.561 1 *	-0.714 6 *

注：* 表示在 0.05 水平上达到显著水平。

元素,当重金属进入土壤后被植物吸收,会对其生长造成一定的毒害作用。叶绿素是植物光合作用正常运转必不可少的色素之一,表征了植物的光合能力,甚至影响植物正常的新陈代谢水平,对植物生长至关重要^[20]。本研究以北京市平谷区 3 种重要经济树种(核桃树、李树、桃树)为研究对象,随机选取 60 个采样点研究其在不同重金属(Cr、Pb、As、Cu)含量污染环境下的生理生态响应。

60 个果园样点的土壤重金属元素含量存在较大差异。由单因子污染指数和内梅罗综合污染指数的计算结果发现,土壤重金属 Cr 元素与 As 元素综合污染等级分别处于警戒线等级和轻度污染等级,Cu、Pb 元素处于安全等级。总体来看,两个污染指数由大到小依次为 As、Cr、Cu、Pb。不同果园中,土壤重金属污染程度存在明显差异,这可能与化肥、农药的施用及周边黄金尾矿库矿土流失有关。

土壤重金属胁迫对北京市 3 种主要经济树种的光合作用具有显著的抑制作用,且抑制效应与重金属含量(胁迫程度)呈正向相关。当土壤重金属胁迫程度增强时,3 种经济树种的叶绿素相对含量均显著下降,这将大大削弱其光合作用。尽管重金属胁迫对植物叶绿素相对含量具有显著的影响,但其影响程度在不同的树种中存在较大差异。基于光合特性分析,土壤重金属胁迫的耐受性由大到小依次为核桃树、李树、桃树。叶绿素相对含量还能很好地表征植物叶片的“绿色程度”,重金属胁迫下经济树种叶片绿色程度降低可能与其内部叶绿素相对含量的降低有关,重金属胁迫抑制了叶片中叶绿素的合成或破坏已经合成的叶绿素,进而导致叶片“失绿”^[20-21]。因此,在今后的经济树种种植过程中,可以根据其对土壤重金属胁迫的能力及特征进行合理管理。

4 结论

- (1) 试验果园中土壤重金属 Cr、As 元素综合污染等级分别处于警戒线等级和轻度污染等级,Cu、Pb 元素处于安全等级。总体来看,单因子污染指数与内梅罗综合污染指数由大到小依次为 As、Cr、Cu、Pb。
- (2) 土壤重金属胁迫对 3 种主要经济树种的光合特性具有显著的抑制作用,且抑制效应与重金属含量(胁迫程度)呈正相关。

(3)土壤重金属胁迫对植物叶绿素相对含量具有显著的影响,其影响程度在不同的树种中存在较大差异。其中,以核桃树对土壤重金属胁迫的抗性较强,李树次之,桃树较差。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] MITHÖFER A, SCHULZE B, BOLAND W. Biotic and heavy metal stress response in plants: evidence for common signals[J]. *Febs Letters*, 2004, 566(1–3):1–5.
- [4] SCHÜTZENDÜBEL A. Plant responses to abiotic stresses: heavy metal-induced oxidative stress and protection by mycorrhization[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(372):1351–1365.
- [5] ZHANG C, YANG K, WANG M, et al. A new vegetation heavy metal pollution index for detecting the pollution degree of different varieties of maize under copper stress[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(5):469–477.
- [6] JASKULAK M, RORAT A, GROBELAK A, et al. Antioxidative enzymes and expression of *rbcl* gene as tools to monitor heavy metal-related stress in plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 218:71–78.
- [7] GRUNTMAN M, ANDERS C, MOHILEY A, et al. Clonal integration and heavy-metal stress: responses of plants with contrasting evolutionary backgrounds[J]. *Evolutionary Ecology*, 2017, 31(3):305–316.
- [8] SOUDEK P, URSU M, PETROVÁ Š, et al. Improving crop tolerance to heavy metal stress by polyamine application[J]. *Food Chemistry*, 2016, 213:223–229.
- [9] ZUKAL J, PIKULA J, BANDOUCHOVA H. Bats as bioindicators of heavy metal pollution: history and prospect[J]. *Mammalian Biology*, 2015, 80(3):220–227.
- [10] GÁLUŠOVÁ T, L'UBOMÍR R, MÉSZÁROS P, et al. Variable responses of soybean chitinases to arsenic and cadmium stress at the whole plant level[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 76(2):147–155.
- [11] HU Z, XIE Y, JIN G, et al. Growth responses of two tall fescue cultivars to Pb stress and their metal accumulation characteristics[J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(3):563–572.
- [12] SILVA N D G D, CHOLEWA E, RYSER P. Effects of combined drought and heavy metal stresses on Xylem structure and hydraulic conductivity in red maple (*Acer rubrum* L.)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(16):5957–5966.
- [13] KOTRBA P, NAJMANOVA J, MACEK T, et al. Genetically modified plants in phytoremediation of heavy metal and metalloids soil and sediment pollution[J]. *Biotechnology Advances*, 2009, 27(6):799–810.
- [14] KANG S M, RADHAKRISHNAN R, YOU Y H, et al. *Enterobacter asburiae* KE17 association regulates physiological changes and mitigates the toxic effects of heavy metals in soybean[J]. *Plant Biology*, 2015, 17(5):1013–1022.
- [15] 肖武,隋涛,王鑫,等.巢湖流域典型农田土壤重金属污染评价与地理探测分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7):144–152. XIAO Wu, SUI Tao, WANG Xin, et al. Assessment and geographical detection of heavy metal pollution in typical farmland soil in Chaohu lake basin[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7):144–152. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180718&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.018. (in Chinese)
- [16] 李想,江雪昕,高红菊.太湖流域土壤重金属污染评价与来源分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊):247–253. LI Xiang, JIANG Xuexin, GAO Hongju. Pollution assessment and source analysis of soil heavy metals in Taihu lake basin[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Suppl.):247–253. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s038&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.038. (in Chinese)
- [17] BAYCU G, TOLUNAY D, OZDEN H, et al. Ecophysiological and seasonal variations in Cd, Pb, Zn, and Ni concentrations in the leaves of urban deciduous trees in Istanbul[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(3):545–554.
- [18] 庞妍,同延安,梁连友,等.污灌农田土壤-作物体系重金属污染评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1):148–154. PANG Yan, TONG Yan'an, LIANG Lianyou, et al. Assessment of heavy metal pollution in soil–crop system on sewage irrigated farmland[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1):148–154. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150122&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.022. (in Chinese)
- [19] KOO S Y, CHO K S. Interaction between plants and rhizobacteria in phytoremediation of heavy metal-contaminated soil[J]. *Korean Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2006, 34(2):83–93.
- [20] NOCITO F F, LANCILLI C, CREMA B, et al. Heavy metal stress and sulfate uptake in maize roots[J]. *Plant Physiology*, 2006, 141(3):1138–1148.
- [21] GRATÃO P L, POLLE A, LEA P J, et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier[J]. *Functional Plant Biology*, 2005, 32(6):481–494.