

王建生,张杏锋,张学洪,等. 土壤铬污染和腐殖酸对李氏禾生长和光合生理的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):263-267.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.05.062

土壤铬污染和腐殖酸对李氏禾生长和光合生理的影响

王建生^{1,2},张杏锋^{1,2},张学洪^{1,2},吴焱珊^{1,2},冯健飞^{1,2}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室,广西桂林 541004;

2. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心,广西桂林 541004)

摘要:以李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)为例,研究了腐殖酸(humic acid,HA)和铬(Cr)相互作用对李氏禾生长及光合生理的影响。结果表明:在同一 Cr 浓度处理下,李氏禾株高、地上部干质量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量随 HA 浓度的增大呈先增大后减小的趋势。在同一腐殖酸浓度处理下,Cr100、Cr200 的株高、地上部干质量、地下部干质量、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、初始荧光 F_0 、大荧光 F_m 较 Cr0 呈增大的趋势。初始荧光 F_0 、最大荧光 F_m 、表观电子传递速率 E_{TR} 在 HA0 和 HA5 处理下随 Cr 浓度的增加明显增加。而最大光化学效率 F_0/F_m 、光化学淬灭系数(q_p)、非光化学淬灭系数(q_N)在 HA5、HA10 处理下,随 Cr 浓度的增加有所下降。可见,适量 Cr 和腐殖酸能够刺激植物生长,李氏禾在逆境胁迫下具有较强的适应性和耐受性。

关键词:李氏禾;铬污染;腐殖酸;光合生理特征;适应性;耐受性

中图分类号:X53;X173 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)05-0263-05

随着对采矿、制革、冶炼、电镀、污水灌溉等行业的大力发展,进而引起了铅、汞、镉、铬等一大批重金属污染物进入大气、水和土壤,造成了严重的环境污染问题^[1]。而土地作为不可再生资源,是人类生活生存和自然环境发展的基础,所以土壤重金属污染问题普遍引起人们的关注^[2]。铬(Cr)污染

不仅会导致土壤生产能力的下降,而且还可以通过根部的吸收、迁移转化到农作物根茎叶及果实中去,通过食物链进入到人体内,进而危害人的身体健康^[3]。因此,如何有效地将土壤中重金属去除又不污染其他资源是研究重点。植物修复技术被认为是非常理想的污染土壤原位治理技术^[4-5]。李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)属多年生禾本科(Gramineae)草本植物,作为国内首次被发现的 Cr 超富集植物,在土壤 Cr 污染修复和治理上具有重要的利用价值^[6]。

腐殖酸(humic acid,HA)是一种主要由动植物残体通过各种生物和非生物的降解、缩合等作用形成的一种天然有机高分子聚合物^[7-8]。腐殖酸通过与重金属发生络(螯)合、吸附和氧化还原等反应,改变土壤形态和土壤对重金属的吸持力,影响有效性和植物的吸收^[4]。腐殖酸对植物生长具有积

收稿日期:2017-10-21

基金项目:广西科学研究与技术开发项目(编号:桂科转 1599001-1);广西特聘专家专项;广西危险废物处置产业化人才小高地项目。

作者简介:王建生(1990—),男,山东汶上人,硕士研究生,主要从事重金属污染修复。E-mail:wjs_0506@163.com。

通信作者:张杏锋,博士,副教授,主要从事重金属污染治理研究工作。E-mail:zhangxf@glut.edu.cn。

[4]秦景逸,张云,王秀梅,等. 绿肥间作模式对苹果园土壤养分含量的影响[J]. 北方园艺,2016(11):169-172.

[5]王秀领,闫旭东,徐玉鹏. 覆盖大豆绿肥腐解规律及其对土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料,2012(5):57-60.

[6]白小军,冯海萍,张丽娟,等. 种植及翻压绿肥对设施土壤养分及微生物区系的影响[J]. 北方园艺,2014(23):144-147.

[7]Cherr C M, Scholberg J S, Mcsorley R. Green manure approaches to crop production[J]. Agronomy Journal,2006,98(2):302-319.

[8]邓小华,石楠,周米良,等. 不同种类绿肥翻压对植烟土壤理化性状的影响[J]. 烟草科技,2015,48(2):7-10,20.

[9]Talgre L, Laurantingon E, Roostalu H, et al. Phosphorus and potassium release during decomposition of roots and shoots of green manure crops[J]. Biological Agriculture & Horticulture,2014,30(4):264-271.

[10]鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2000:25-114.

[11]Yang H X, Zhou M H, Junliang L I, et al. Decay and nutrient release in grasses, a species suitable for soil conservation in temperate zone orchards[J]. Acta Prataculturae Sinica,2015,24(4):208-213.

[12]Zhao N, Zhao H B, Chang W U, et al. Nutrient releases of leguminous green manures in rainfed lands[J]. Plant Nutrition & Fertilizer Science,2011,17(5):1179-1187.

[13]Wang F, Lin C, Qing H I, et al. A study on organic carbon and nutrient releasing characteristics of different *Astragalus sinicus* manure use levels in a single cropping region of subtropical China[J]. Acta Prataculturae Sinica,2012,21(4):319-324.

[14]刘佳,张杰,秦文婧,等. 红壤旱地毛叶苕子不同翻压量下腐解及养分释放特征[J]. 草业学报,2016,25(10):66-76.

[15]杨文叶,王忠,李丹,等. 不同冬绿肥对水稻田土壤有机质及酸碱度的影响[J]. 浙江农业科学,2017,58(2):239-240.

[16]邹恒福,周建南,高玲,等. 不同野生大戟科绿肥对酸性土壤有机质含量的动态影响[J]. 热带作物学报,2014,35(4):678-685.

[17]徐祥玉,王海明,袁家富,等. 不同绿肥对土壤肥力质量及其烟叶产质量的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(13):58-61.

[18]陈晓波,官会林,郭云周,等. 绿肥翻压对烟地红壤微生物及土壤养分的影响[J]. 中国土壤与肥料,2011(4):74-78.

极作用,可以促进植物营养物质吸收,调节植物的生理代谢,提高酶活性,同时还可以增加土壤微生物的总量。闫双堆等研究表明,在土壤中施腐殖酸类物质可以提高土壤中有机结合态汞的含量,使土壤中汞的挥发量有效降低^[9]。腐殖酸可以促进大豆可交换态和碳酸盐形式转移到有机形式,表明大分子腐殖酸可以促进重金属从易分解转化为生物可利用部分^[10]。在香根草中应用腐殖酸,提高了植物的铜摄取量及其在根中的积累量。研究表明,适量的腐殖酸能够促进植物种子的生长,使种子发芽率提高、萌发时间缩短、幼苗长势增加;腐殖酸类物质对植物根系的发育、提高和保持具有明显效果^[11]。腐殖酸对湿生的重金属超富集植物的影响未见报道。本研究以李氏禾为例,研究了在 Cr 和腐殖酸下,李氏禾生长和生理生化指标的变化规律,进一步探究李氏禾耐受性^[12]。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试植物和土壤供试 李氏禾于 2016 年 6 月中旬取自桂林市雁山区水田。盆栽试验用土 2016 年 5 月中旬采自广西桂林市雁山区未受污染的农田。

1.1.2 植物培养与处理 本试验于 2016 年 6 月 20 日在桂林理工大学内进行,采用 2 因素设计进行试验,其中 1 个因素为 Cr 的浓度,设置 2 个 Cr 浓度污染水平,每盆装晾干磨碎土 2.5 kg,按含 0、100、200 mg/kg(分别用 Cr0、Cr100 和 Cr200 表示)、重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)分别加入混匀,重复 3 次;另 1 个因素为腐殖酸浓度,腐殖酸采用 3 个处理、1 个对照,按含 0、5、10、20 mg/kg 腐殖酸(分别用 HA0、HA5、HA10 和 HA20 表示)加入盆中混匀,3 组平行。然后每盆中移栽 8~10 株李氏禾。持续处理 3 个月时间,定期浇水,每次浇水处理一样,保持土壤湿润,试验过程中除了重金属浓度和腐殖酸浓度不同以外,其他条件保持一致。

1.2 测定方法和数据分析

1.2.1 叶绿素含量测定 培养 90 d 后,从每盆中选取 1 株

植株的顶部第 3 张或第 4 张叶片用于测定叶绿素含量,采用 95% 乙醇提取法测定叶绿素含量^[13],用分光光度计在波长 665、649、470 nm 下分别测定吸光度,然后按公式计算各叶绿素含量。

1.2.2 叶绿素荧光参数测定 采用便携式调制叶绿素荧光仪(PAM-2500)于 20:00—24:00 时测定自然条件下李氏禾的叶绿素荧光参数。每盆选取 1 株长势一致的健康植株进行测量,从植物顶端数第 4 张至第 5 张叶片中部进行测量,每隔 20 s 照射饱和脉冲光。测量指标包括光下最大荧光(F_m')、光下最小荧光(F_0')、最小荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、表观光合电子传递速率(E_{tr})、最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(q_p)和非光化学淬灭系数(q_n),所有参数均由仪器自动测得,依次计算出 PS II 潜在活性(F_v/F_0)。

1.2.3 生长指标 试验结束后,采用直尺测量植株高度,然后收获植物后用天平测定。将收获的植物样品分为地上、地下 2 个部分,分别用自来水充分冲洗,去除表面上泥土和污物,然后用去离子水冲洗,放入恒温箱在 105 ℃ 下杀青 30 min,最后置于 70 ℃ 的烘箱中烘干至恒质量,测定各部分物质的含量。

1.2.4 数据处理 所得数据应用 SPSS 20.0 统计分析软件分析各处理间的差异显著性,平均值间的比较采用单因素方差分析方法,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 重金属和腐殖酸对李氏禾生长的影响

不同处理下植物株高如表 1 所示,在同一浓度 HA0 和 HA20 处理下,植物株高在 Cr100 和 Cr200 处理下明显高于 Cr0 处理;但是在同一浓度 HA5 和 HA10 处理下,植物株高在 Cr100 和 Cr200 处理下与 Cr0 处理没有显著差异。在同一浓度 Cr100 处理下,李氏禾株高在 HA10 和 HA20 处理明显低于 HA0 处理。可以看出,适量的腐殖酸在清洁土壤和 Cr 污染土壤下可以促进植物株高的生长。

表 1 重金属浓度和腐殖酸含量对李氏禾生长的影响

铬处理	腐殖酸处理 (mg/kg)	株高 (cm)	地上部干质量 (g)	地下部干质量 (g)	根冠比 (%)
Cr0	HA0	67.65 ± 2.61Bab	6.29 ± 2.05Aa	5.16 ± 2.10Aa	82.04
	HA5	79.37 ± 8.48ABa	5.03 ± 0.33Aa	3.44 ± 0.11Aab	68.39
	HA10	63.77 ± 7.60Ab	3.85 ± 0.95Ba	3.22 ± 0.04Aab	83.64
	HA20	61.27 ± 5.68Bb	3.32 ± 1.46Ca	2.20 ± 0.77Bb	66.27
Cr100	HA0	85.50 ± 5.65Aa	9.10 ± 2.27Aa	5.61 ± 1.00Aa	61.65
	HA5	88.90 ± 10.20Aa	8.43 ± 4.25Aa	3.44 ± 1.65Aa	40.81
	HA10	70.00 ± 10.38Ab	6.10 ± 1.18ABa	3.78 ± 2.38Aa	61.97
	HA20	79.60 ± 4.71Aab	7.40 ± 1.78Ba	3.73 ± 0.17Aa	50.40
Cr200	HA0	68.27 ± 3.52Ba	8.71 ± 1.58Aa	4.19 ± 0.99Aa	48.11
	HA5	71.17 ± 12.41Ba	9.59 ± 0.03Aa	2.43 ± 1.07Aa	25.34
	HA10	69.47 ± 5.32Aa	8.52 ± 0.59Aa	3.52 ± 0.94Aa	41.31
	HA20	72.23 ± 3.15ABa	11.90 ± 4.28Aa	4.31 ± 1.60Aa	36.22

注:不同大写字母表示同一 HA 处理下差异显著,不同小写字母表示同一浓度 Cr 处理差异显著($P<0.05$)。下同。

植物地上部干质量是反映环境因素对植物生长的重要指标。从表 1 可以看出,在同一浓度腐殖酸处理时,植物地上部干质量随着 Cr 浓度的增加而增加。在同一 Cr0 处理下,植物地上部干质量在 HA5、HA10 和 HA20 处理下分别比 HA0 处

理下降 20.03%、38.79% 和 47.22%。但是,在同一浓度 Cr200 处理下,HA5 和 HA20 处理下腐殖酸的加入使植物地上部干质量分别比 HA0 增加 10.10% 和 36.62%。可以看出,腐殖酸在清洁土壤和低浓度 Cr 污染时会抑制植物生长,

但在高浓度 Cr 污染时会刺激植物生长。以上结果说明腐殖酸与 Cr 对植物生长具有交互作用,随着土壤浓度不同,其交互作用不同,在低浓度时表现出拮抗作用,在高浓度时表现出协同作用。

植物地下部干质量反映植物根系生长情况。从表 1 可以看出,在同一浓度 HA0 处理下,植物地下部干质量随着 Cr 浓度的增加先增加后减少;而同一浓度 HA10 处理下,植物地下部干质量随 Cr 浓度的增加变化不明显;而在同一浓度 HA20 处理下,植物地下部干质量在 Cr100 和 Cr200 处理下显著高于 Cr0,分别比 Cr0 增加 69.55% 和 95.91%。在同一浓度 Cr0 处理下,腐殖酸的加入明显降低植物地下部干质量,HA5、HA10、HA20 分别比 HA0 下降 33.33%、37.60%、57.36%。而在同一浓度 Cr0、Cr100、Cr200 处理时,除 Cr200 的 HA20 处理外,植物地下部干质量在 HA5、HA10、HA20 下较 HA0 降低。以上结果说明,高浓度 Cr 含量会降低植物地下部根系的生长,而腐殖酸在清洁土壤上抑制植物根系生长。

根冠比反映植物地下部分与地上部分的相关性,高则根系机能活性强,低则弱。从表 1 可以看出,同一浓度腐殖酸处理下,植物根冠比随着 Cr 浓度的增加而减少;而同一浓度 HA5 处理下明显下降,植物根冠比 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 降低 58.30% 和 66.12%;在同一浓度 Cr0 处理下,植物根冠比随腐殖酸浓度的增加先增大后减少;而在同一浓度 Cr100 和 Cr200 处理下,植物根冠比在 HA5、HA10、HA20 处理下较 HA0 有所下降。可以看出,适量的腐殖酸在清洁土壤中可以促进植物根冠比。腐殖酸在 Cr 污染土壤下却抑制根冠比,腐殖酸和 Cr 表现为协同作用。

2.2 重金属和腐殖酸对李氏禾叶绿素的影响

叶绿素是植物光合作用的主要色素,其含量的高低一定程度上反映植物光合作用能力的强弱,叶片中叶绿素含量低,

其光合作用则弱,对植物的生长不利^[14]。某些金属离子在一定质量分数范围内会对叶绿素的合成具有促进作用。

从表 2 可以看出,在同一浓度 HA0 处理下,植物叶绿素 a 含量在 Cr100 和 Cr200 处理下明显高于 Cr0 处理,分别比 Cr0 处理增加 9.29% 和 19.47%;在同一浓度 HA5、HA20 处理下,植物叶绿素 a 含量在 Cr100 和 Cr200 处理下较 Cr0 有所增加但不显著。在 Cr0 处理下,腐殖酸的加入促进了植物叶绿素 a 的增长,植物叶绿素 a 含量在 HA5、HA10、HA20 处理分别比 HA0 处理增加 16.37%、27.88%、19.91%;在 Cr100 处理下,植物叶绿素 a 含量在 HA5、HA10、HA20 处理下分别比 HA0 处理增加 23.48%、10.93%、12.15%,其中在 HA5 下达到峰值;在 Cr200 处理下,植物叶绿素 a 含量在 HA5、HA10、HA20 处理下分别比 HA0 处理下增加 8.89%、9.26%、8.15%。可以看出腐殖酸无论是在清洁土壤还是 Cr 污染土壤都能够促进植物叶绿素 a 含量的增加。说明适量的 Cr 和腐殖酸对叶绿素含量增加具有一定的促进作用。

从表 2 可以看出,在同一浓度腐殖酸处理下,植物叶绿素 b 含量随着 Cr 浓度的增加而增加;在 HA0 处理下,植物叶绿素 b 含量在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理增加 20.69%、152.87%。在 Cr0 和 Cr100 处理下,腐殖酸的加入明显增加植物叶绿素 b 含量;在 Cr0 处理下,植物叶绿素 b 含量在 HA5、HA10、HA20 处理下分别比 HA0 增加 28.74%、63.22%、44.83%;而在 Cr200 处理下,HA5、HA10 处理下腐殖酸的加入明显增加了植物叶绿素 b 含量,植物叶绿素 b 含量在 HA5、HA10、HA20 处理下分别比 HA0 处理增加 52.73%、43.64%、2.73%,HA5 处理下叶绿素 b 含量达到最大值。由此可以看出,腐殖酸在清洁土壤和 Cr 污染土壤下都能刺激植物叶绿素 b 含量增加。以上结果说明腐殖酸与 Cr 对李氏禾叶绿素 b 含量增加具有协同作用。

表 2 重金属浓度和腐殖酸含量对李氏禾叶绿素的影响

铬处理	腐殖酸处理	叶绿素 a 含量 (mg/g,FW)	叶绿素 b 含量 (mg/g,FW)	叶绿素 a/b	胡萝卜素含量 (mg/g)	总叶绿素含量 (mg/g,FW)
Cr0	HA0	2.26 ± 0.06Bb	0.87 ± 0.03Ba	2.61 ± 0.11Aa	0.51 ± 0.01Aa	3.20 ± 0.06Aa
	HA5	2.63 ± 0.23Aab	1.12 ± 0.21Ba	2.36 ± 0.22Aa	0.56 ± 0.01Aa	3.86 ± 0.46Ba
	HA10	2.89 ± 0.01Aa	1.42 ± 0.24Ba	2.25 ± 0.37Aa	0.51 ± 0.04Aa	3.88 ± 0.99Ba
	HA20	2.71 ± 0.26Aa	1.26 ± 0.31Aa	2.21 ± 0.32Aa	0.51 ± 0.02Aa	4.08 ± 0.60Aa
Cr100	HA0	2.47 ± 0.09ABb	1.05 ± 0.09ABb	2.36 ± 0.16Aa	0.47 ± 0.06Aa	3.61 ± 0.17Aa
	HA5	3.05 ± 0.09Aa	1.87 ± 0.34Ba	1.66 ± 0.27ABa	0.50 ± 0.04Aa	5.07 ± 0.44ABa
	HA10	2.74 ± 0.25Aab	1.65 ± 0.90Ba	1.91 ± 0.69Aa	0.41 ± 0.19ABa	4.52 ± 1.22Ba
	HA20	2.77 ± 0.28Aab	1.78 ± 0.88Aa	1.76 ± 0.60Aa	0.38 ± 0.19Aa	4.71 ± 1.19Aa
Cr200	HA0	2.70 ± 0.57Aa	2.20 ± 0.81Ab	1.90 ± 0.83Aa	0.38 ± 0.17Aa	4.56 ± 1.62Ab
	HA5	2.94 ± 0.18Aa	3.36 ± 0.91Aa	0.92 ± 0.26Bb	0.19 ± 0.01Ba	6.58 ± 0.79Aa
	HA10	2.95 ± 0.11Aa	3.16 ± 0.70Aab	0.98 ± 0.29Bb	0.22 ± 0.26Ba	6.36 ± 0.64Aa
	HA20	2.92 ± 0.13Aa	2.26 ± 0.88Ab	1.45 ± 0.60Aab	0.31 ± 0.22Aa	5.36 ± 1.06Aab

叶绿素 a/b 值反映了植物对光能的利用程度。从表 2 中可以看出,同一浓度腐殖酸处理时,植物叶绿素 a/b 随着 Cr 浓度的增加而降低;而在 HA5 和 HA10 处理下,植物叶绿素 a/b 值随 Cr 浓度的增加明显下降;HA5 处理下,植物叶绿素 a/b 值在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理下降 29.66% 和 61.02%。在同一浓度 Cr 处理下,除 Cr200 HA20 处理,植物叶绿素 a/b 值随腐殖酸浓度的增加而下降;而在 Cr200 处理时,HA5、HA10 处理植物叶绿素 a/b 值较 HA0 处理明显下

降,在 HA5、HA10 和 HA20 处理下分别比 HA0 处理下降 51.58%、48.42% 和 23.68%。由此可以看出,腐殖酸在清洁土壤和 Cr 污染时抑制植物叶绿素 a/b 值,说明腐殖酸和 Cr 对植物叶绿素 a/b 值表现为协同作用。叶绿素 a/b 值的降低,说明其捕获、转化光能的能力下降,同时也可以看出叶绿素 a 受破坏的程度较叶绿素 b 严重。

从表 2 中可以看出,在同一浓度腐殖酸处理下,植物胡萝卜素含量随着 Cr 浓度的增加而降低。在 HA0 处理下,植物

胡萝卜素含量在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理下降 7.84%、25.49%。而在 HA5 和 HA10 处理下,植物胡萝卜素含量随 Cr 浓度增加下降明显,其中在 HA5 处理下,植物胡萝卜素含量在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理下降 10.71% 和 66.07%; 而 HA10 处理下,植物胡萝卜素含量在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理下降 19.61% 和 56.86%。在 Cr100 处理下,植物胡萝卜素含量随腐殖酸浓度的增加先增加后减少;而在 Cr200 处理下,植物胡萝卜素含量随腐殖酸浓度的增加先减少后增加。由此可以看出,腐殖酸处理在低浓度和高浓度 Cr 污染时会降低植物胡萝卜素含量。以上说明腐殖酸和 Cr 对植物胡萝卜素表现为协同作用。

2.3 重金属和腐殖酸对李氏禾叶绿素荧光参数的影响

叶绿素荧光参数能够直接或间接表征逆境中植物光合作用的光合机构、光合电子传递链及暗反应酶活性等生理生化

指标受到的影响^[15]。

F_o 和 F_m 分别指光系统 PS II 反应中心处于完全开放和完全关闭时的荧光产量^[16]。从表 3 可以看出,在 HA5 和 HA20 处理下,植物初始荧光 F_o 和最大荧光 F_m 随着 Cr 浓度增加明显增加;HA5 处理下,植物初始荧光 F_o 在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理增加 46.88% 和 43.75%,而植物最大荧光 F_m 在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理增加 28.57% 和 35.34%;而在 HA20 处理下,植物最大荧光 F_m 在 Cr100 和 Cr200 处理下分别比 Cr0 处理增加 21.88% 和 46.88%。在 Cr0 处理下,HA5、HA10 处理植物初始荧光 F_o 和最大荧光 F_m 随着腐殖酸浓度的增加而逐渐增加;而在 Cr100 和 Cr200 处理下,植物初始荧光 F_o 和最大荧光 F_m 的变化不显著。

表 3 重金属浓度和腐殖酸含量对李氏禾叶绿素荧光参数的影响

铬处理	腐殖酸处理	初始荧光 (F_o)	最大荧光 (F_m)	最大光化学效率 (F_v/F_m)	光化学淬灭系数 (q_p)	非光化学淬灭 系数(q_N)	表观光合电子传递速率 [E_{TR} , $\mu\text{mol}/(\text{m} \cdot \text{S})$]
Cr0	HA0	0.36 ± 0.08Aab	1.41 ± 0.08Aa	0.75 ± 0.04Aa	0.46 ± 0.09Aa	0.83 ± 0.02Aa	39.20 ± 6.12Ba
	HA5	0.32 ± 0.05Bb	1.33 ± 0.05Ba	0.76 ± 0.020Aa	0.39 ± 0.11Aa	0.80 ± 0.04Aa	36.43 ± 9.28Ba
	HA10	0.47 ± 0.06Aa	1.54 ± 0.06Aa	0.69 ± 0.042Aa	0.45 ± 0.11Aa	0.84 ± 0.04Aa	32.23 ± 7.72Ba
	HA20	0.36 ± 0.11Bab	1.28 ± 0.11Ba	0.73 ± 0.05Aa	0.39 ± 0.04ABa	0.78 ± 0.07ABa	34.06 ± 7.20Ba
Cr100	HA0	0.37 ± 0.08Aa	1.49 ± 0.08Aa	0.75 ± 0.01Aa	0.40 ± 0.02Aa	0.79 ± 0.02Aa	38.26 ± 3.84Ba
	HA5	0.47 ± 0.06Aa	1.71 ± 0.06ABa	0.72 ± 0.06Aa	0.34 ± 0.07Aa	0.79 ± 0.07Aa	30.20 ± 6.82Ba
	HA10	0.43 ± 0.10Aa	1.42 ± 0.10Aa	0.68 ± 0.14Aa	0.43 ± 0.18Aa	0.75 ± 0.03Aa	33.50 ± 4.96Ba
	HA20	0.36 ± 0.07Ba	1.56 ± 0.07ABa	0.77 ± 0.02Aa	0.30 ± 0.04Ba	0.78 ± 0.01Aa	28.37 ± 3.72Ba
Cr200	HA0	0.45 ± 0.07Aa	1.67 ± 0.07Aa	0.72 ± 0.08Aa	0.50 ± 0.05Aa	0.79 ± 0.04Aa	58.05 ± 9.26Aa
	HA5	0.46 ± 0.05Aa	1.80 ± 0.05Aa	0.75 ± 0.05Aa	0.48 ± 0.018Aa	0.76 ± 0.02Aa	55.13 ± 5.32Aab
	HA10	0.39 ± 0.08Aa	1.65 ± 0.08Aa	0.76 ± 0.01Aa	0.42 ± 0.02Aa	0.77 ± 0.02Aa	49.43 ± 3.03Aab
	HA20	0.52 ± 0.05Aa	1.88 ± 0.05Aa	0.72 ± 0.02Aa	0.45 ± 0.03Aa	0.63 ± 0.30Ba	45.53 ± 0.95Ab

F_v/F_m 常被用作表明环境胁迫程度的探针。 F_v/F_m 是 PS II 最大光化学量子产量,开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率,非胁迫条件下该参数的变化较小,一般植物恒定在 0.75~0.85,胁迫条件下该参数明显下降。从表 3 可以看出,在 HA0 处理下,PS II 最大光化学量子效率(F_v/F_m)随 Cr 浓度的升高无显著变化。在 Cr0 和 Cr200 处理下,PS II 最大光化学量子效率(F_v/F_m)随腐殖酸浓度的增加呈先增大后减小的趋势;而 Cr100 处理下,PS II 最大光化学量子效率(F_v/F_m)随腐殖酸浓度的增加先减少后增大。由此可以看出,腐殖酸在清洁土壤下 PS II 最大光化学量子效率(F_v/F_m)降低,说明开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率有所降低;而腐殖酸在高浓度 Cr 污染情况下,PS II 反应中心捕获激发能的效率随着腐殖酸浓度的增加,光合电子链的传递速率得到一定程度的恢复,从而维持正常的暗反应。

光化学淬灭系数(q_p)值反映 PS II 原初电子受体的氧化还原状态和 PS II 开放中心的数量,其值越大,说明 PS II 的电子传递活性越高;(q_p)的下降表明 PS II 反应中心的开放比例和参与 CO₂ 固定的能量减少^[17]。非光化学淬灭系数(q_N)值反映的是 PS II 天线色素吸收的光能不能用于光合电子传递而以热的形式耗散掉的激发能部分,其值代表光合机构的损伤程度。如表 3 所示,同一浓度腐殖酸处理下, q_N 在 Cr100 和 Cr200 处理下较 Cr0 处理略有下降;而在 HA20 处理下, q_p 在 Cr200 处理下较 Cr0 处理明显升高, q_N 在 Cr200 处理下较 Cr0

处理明显下降。在 Cr0 和 Cr100 处理下, q_p 和 q_N 随腐殖酸浓度的增大变化不大;而 Cr200 处理下, q_p 和 q_N 随腐殖酸浓度的增大有所下降但差异不显著。由此可以看出,腐殖酸在清洁土壤和低浓度 Cr 污染时, q_p 和 q_N 变化不大,而在高浓度 Cr 污染土壤情况下, q_p 和 q_N 有所下降,表明叶片吸收光能的光化学反应减弱。

E_{TR} 是反映实际光照度条件下的表观电子传递速率。如表 3 所示,在同一浓度腐殖酸处理下, E_{TR} 随 Cr 浓度的增加先降低后升高。而在同一浓度 Cr 处理下, E_{TR} 随腐殖酸浓度的增加有所降低;尤其在同一浓度 Cr200 处理下, E_{TR} 随腐殖酸浓度的增加显著降低。由此可以看出,在 Cr 污染情况下可以影响光合电子传递速率 E_{TR} ,说明在 Cr 污染土壤下 E_{TR} 具有较高的损伤修复能力;而腐殖酸添加在清洁土壤和 Cr 污染土壤下会降低 E_{TR} ,说明其表观电子传递受阻。

3 讨论

生物量是衡量植物耐性的指标,研究发现,适量的 Cr 能够促进植物的生长。在重金属胁迫下,植物的生物量可以作为评价植物对重金属耐性的临界指标。同时,生物量也可以直接影响重金属污染土壤的植物修复效果。有研究表明,六价铬[Cr(VI)]胁迫对白骨壤幼苗的萌发具有一定的促进作用,而高浓度则产生抑制作用^[18]。本试验发现,在相同 Cr100 处理下李氏禾各项生长指标较 Cr0 明显增加,说明低浓度 Cr

对李氏禾生长有促进作用;腐殖酸在 Cr 污染土壤下,李氏禾的地上部干质量增加,说明低浓度 Cr 和腐殖酸能够促进李氏禾生长,这与适量的腐殖酸能够促进水稻地上部生长发育,表现为株高增加、生物量明显提高,这与对小麦、水稻等的研究^[19]一致。

叶绿素在植物进行光合作用过程中起到接受和转换能量的作用,叶绿素含量与叶片衰老氧化密切相关,其变化必然导致植物光合作用的变化,从而影响植物的生长。叶绿素荧光与光合作用中各个反应过程紧密相连,任何逆境过程对光合作用各过程产生的影响通过体内叶绿素荧光诱导动力学参数变化反映出来^[20]。鲁先文等研究表明,低浓度 Cr 促进小麦叶绿素的合成,高浓度 Cr 则产生毒害^[21]。本试验中植物叶绿素含量随 Cr 含量增加呈现上升趋势,说明在 Cr 的刺激下,促进植物叶绿素的合成,增大了光合作用,影响李氏禾的生长,造成李氏禾的生物量增加,叶绿素含量变化趋势与鲜质量变化趋势相似^[22]。而在清洁土壤和低浓度 Cr 污染土壤下,腐殖酸的加入可以增加叶绿素含量,促进植物叶绿素生长。叶绿素在光合作用中起接受和转换能量的作用,叶绿素 a/b 值的降低说明其捕获和转化光能的能力下降。腐殖酸可以促进镁离子(Mg^{2+})和亚铁离子(Fe^{2+})的吸收,从而促进叶绿素含量增加^[23]。叶绿素荧光变化反映植物光合机构的运转状况,荧光参数 F_v/F_m 的变化表明 PS II 的原始光能转化效率能率^[24]。本试验结果表明,低浓度的 Cr 促进李氏禾 F_v/F_m 值增加,但随着 Cr 浓度的增加,李氏禾 F_v/F_m 值呈下降趋势,这说明李氏禾高浓度 Cr 污染降低了 PS II 反应中心进行的光化学反应的效率。 q_p 和 q_N 反映了叶片对激发能利用情况,在相同 Cr 处理下,低浓度腐殖酸对李氏禾 q_p 和 q_N 影响不大,而在高浓度腐殖酸处理下,李氏禾 q_p 和 q_N 降低,说明植物叶片吸收光能的光化学反应减弱,而过剩光能通过非辐射能量(如热能)途径耗散受阻。

4 结论

李氏禾在低浓度 Cr 污染土壤下可以较好地生长。同时在 Cr 污染土壤下,李氏禾各部位干质量随腐殖酸浓度增高呈升高趋势。在 200 mg/kg Cr 污染土壤下,李氏禾没有表现出明显的毒害作用,腐殖酸的加入也能提高李氏禾地上部干质量。在清洁土壤和 Cr 污染土壤中,腐殖酸能够促进李氏禾叶绿素含量的,随腐殖酸浓度增高而升高。低浓度 Cr 和腐殖酸促进李氏禾光合生理的影响,并未出现抑制现象。

参考文献:

- [1] 邢艳帅,乔冬梅,朱桂芬,等. 土壤重金属污染及植物修复技术研究进展[J]. 中国农学通报,2014,30(17):218-224.
- [2] 申嘉澍,冯宇佳,王倩倩,等. 土壤重金属污染现状及其植物修复研究进展[J]. 绿色科技,2015,(12):226-227,229.
- [3] 郭修平. “土十条”与土壤污染治理[J]. 中华环境,2016,32(8):5.
- [4] 郭凌,卜玉山,张曼,等. 煤基腐殖酸对外源砷胁迫下玉米生长及生理性状的影响[J]. 环境工程学报,2014,8(2):758-766.
- [5] Zhang X, Gao B, Xia H. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of bana grass and vetiver grass[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106:179-187.
- [6] 张学洪,罗亚平,黄海涛,等. 一种新发现的湿生铬超积累植物—李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)[J]. 生态学报,2006,26(3):950-953.
- [7] 丁文川,田秀美,王定勇,等. 腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI)的影响机制研究[J]. 环境科学,2012,33(11):3847-3853.
- [8] 钟铜生. 土壤腐殖酸性质及其化学传感器的研究[D]. 长沙:湖南大学,2009.
- [9] 闫双堆,卜玉山,刘利军,等. 不同腐殖酸物质对土壤中汞的固定作用及植物吸收的影响[J]. 环境科学学报,2007,27(1):101-105.
- [10] Wang Q, Li Z, Cheng S, et al. Effects of humic acids on phytoextraction of Cu and Cd from sediment by *Elodea nuttallii*[J]. Chemosphere, 2010, 78(5):604-608.
- [11] Vargas C, Pérez-Esteban J, Escolástico C, et al. Phytoremediation of Cu and Zn by vetiver grass in mine soils amended with humic acids[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2016, 23(13):13521-13530.
- [12] 张杏锋,田超,高波. 能源植物皇草对重金属的耐性及修复潜力[J]. 环境工程学报,2017,11(5):3204-3213.
- [13] 陈全胜,唐宁,张边江,等. Cr(6+)对空心莲子草光合生理特性的影响[J]. 湖北农业科学,2015,54(21):5310-5312,5317.
- [14] 余顺慧,方荣美,唐洁,等. 铬污染对延胡索生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(10):236-239.
- [15] 邵云,王文斐,李学梅,等. 三种有机物料对铬污染土壤理化性质及小麦生长发育特征的影响[J]. 麦类作物学报,2016,36(6):779-788.
- [16] 罗小玲,李淑仪,蓝佩玲,等. 硅酸盐及腐植酸对 Cr-Pb 污染土壤中小白菜的生长和生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):224-230.
- [17] 鲁艳,李新荣,何明珠,等. 重金属对盐生草光合生理生长特性的影响[J]. 西北植物学报,2011,31(2):370-376.
- [18] 万永吉. 重金属 Cr(VI)对红树植物白骨壤幼苗生长及生理生态效应的研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.
- [19] 侯明,张兴龙,路畅,等. V(V)、Cr(VI)单一和复合胁迫对小麦幼苗生长和生理特性的影响[J]. 环境化学,2012,31(7):1016-1022.
- [20] 钱永强,周晓星,韩蕾,等. Cd^{2+} 胁迫对银芽柳 PS II 叶绿素荧光光响应曲线的影响[J]. 生态学报,2011,31(20):6134-6142.
- [21] 鲁先文,余林,宋小龙,等. 重金属铬对小麦叶绿素合成的影响[J]. 安徽农学通报,2007,13(14):101-102.
- [22] 周武,袁志辉,刘敏超. 重金属 Cr(VI)和 Ni 对旱伞草富集能力及其生理生化指标的影响[J]. 环境工程学报,2015,9(1):171-176.
- [23] 陈玉玲. 腐植酸对植物生理活动的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(1):64-72.
- [24] 王碧霞,肖娟,冯旭,等. 铬胁迫对菰草雌雄植株光合生理特性的不同影响[J]. 草业学报,2016,25(7):131-139.