

黑麦草生长及根系形态对土壤 Cd, Pb 与石油污染的响应

魏倩¹, 周际海^{1,2}, 程双怀¹, 黄永杰¹, 张杰¹, 周守标¹

(1.安徽师范大学 生命科学学院 安徽省重要生物资源保护与利用研究重点实验室, 安徽 芜湖 241000;

2.南昌工程学院 江西省退化生态系统修复与流域生态水文重点实验室, 江西 南昌 330099)

摘要: [目的] 研究不同污染条件下黑麦草生理指标的动态变化, 为植物修复污染土壤提供初步理论基础。[方法] 通过室内试验模拟不同类型的土壤污染。设置 4 个处理, 未污染土壤+黑麦草(SH)、重金属污染土壤(500 mg/kg Pb²⁺ 和 50 mg/kg Cd²⁺) + 黑麦草(SGH)、石油污染土壤(1 000 mg/kg 石油)+黑麦草(SPH)、石油和重金属复合污染土壤(500 mg/kg Pb²⁺, 50 mg/kg Cd²⁺ 和 1 000 mg/kg 石油)+黑麦草(SPGH), 采用 WINRHIZO 根系分析系统测量根系形态指标, 用分光光度计测量叶片色素指标, 研究不同类型土壤污染对黑麦草生长的影响。[结果] 3 种不同类型的污染土壤均不同程度地刺激了黑麦草根系的生长。与未污染处理相比, 在 20 d 时, 石油重金属复合处理下的黑麦草根系的根长、根表面积、根体积、根直径分别增加了 88.10%, 148.60%, 221.90%, 32.20%。与未污染相比, 随着培养时间的增加各污染处理的地下生物量呈现出先增加后减少的趋势, 地上生物量均低于未污染处理, 且在第 10, 40, 80 d 时, 复合污染处理的地上生物量最小, 较未污染处理分别降低了 34.68%, 45.42%, 58.05%。80 d 时, 重金属污染处理、石油污染处理和石油重金属复合污染处理的黑麦草叶绿素含量显著低于未污染处理, 分别降低了 26.84%, 44.82% 和 47.02%。[结论] 不同污染物都可以促进黑麦草根系形态发育, 降低黑麦草的生物量及色素含量; 石油重金属复合处理对黑麦草的生长影响最大, 石油污染处理次之。基于不同污染物对黑麦草根系形态及生长影响的差异, 在今后植物修复土壤污染过程中, 可添加一些生长调节物质来缓解污染对植物的毒害作用, 提高植物生物量及增强相关生理功能, 提升污染土壤修复效果。

关键词: 黑麦草; 不同类型污染; 根系形态; 生物量; 色素含量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0084-08

中图分类号: S543.6, X173

文献参数: 魏倩, 周际海, 程双怀, 等. 黑麦草生长及根系形态对土壤 Cd, Pb 与石油污染的响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 84-91. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.011; Wei Qian, Zhou Jihai, Cheng Shuanghuai, et al. Response of ryegrass growth and root morphology to soil Cd, Pb and petroleum pollution [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 84-91.

Response of Ryegrass Growth and Root Morphology to Soil Cd, Pb and Petroleum Pollution

Wei Qian¹, Zhou Jihai^{1,2}, Cheng Shuanghuai¹, Huang Yongjie¹, Zhang Jie¹, Zhou Shoubiao¹

(1.College of Life Sciences, Anhui Normal University, Anhui Provincial Key Laboratory of the Conservation and Exploitation of Biological Resources, Wuhu, Anhui 241000, China; 2.Jiangxi Provincial Key Laboratory for Restoration of Degraded Ecosystems & Watershed Ecohydrology, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: [Objective] The dynamic changes of physiological indexes of ryegrass under different pollution conditions were studied, in order to provide a preliminary theoretical basis for phytoremediation of contaminated soil. [Methods] Through indoor simulation of different types of soil pollution, 4 treatments were set up, namely uncontaminated soil + ryegrass (SH) as control, heavy metal contaminated soil (500 mg/kg Pb²⁺,

收稿日期: 2020-11-16

修回日期: 2021-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“食用菌线虫调控细菌群落影响污染土壤石油降解的机理研究”(31460149), “秸秆及其生物质炭还田提升旱地红壤地力的差异与机理研究”(41661065); 江西省教育厅科学技术研究项目重点项目(GJJ180921)

第一作者: 魏倩(1993—), 女(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤污染修复。Email: 18355316883@163.com。

通讯作者: 周际海(1973—), 男(汉族), 安徽省和县人, 博士, 教授, 主要从事环境污染修复、农业废弃物资源化利用及其提升旱地红壤地力的机理及应用、植物种质资源保护及综合利用方面的研究。Email: zhoujihai2006@163.com。

50 mg/kg Cd²⁺) + ryegrass (SGH), petroleum contaminated soil (1 000 mg/kg petroleum) + ryegrass (SPH), petroleum and heavy metals combined contaminated soil (500 mg/kg Pb²⁺, 50 mg/kg Cd²⁺, 1 000 mg/kg petroleum) + ryegrass (SPGH). The root morphological index was measured by WINRHIZO root analysis system, and the pigment index of leaves was measured by spectrophotometer, to explore the influence of different types of soil pollution on the pigment content of ryegrass leaves. [Results] The root growth of ryegrass was stimulated by three different types of contaminated soil to varying degrees. Compared with control, on the 20 th day, the root length, root surface area, root volume, and root diameter of plant roots under the combined treatment of petroleum and heavy metals increased by 88.10%, 148.60%, 221.90%, and 32.20%, respectively. Compared with control, the underground biomass of each polluted treatment showed a trend of increasing firstly and then decreasing with the increase of cultivation time, while the above-ground biomass was always lower than that of control. Moreover, on the 10th, 40th and 80th days, the abovementioned biomass of the combined polluted treatment was the smallest, which significantly decreased by 34.68%, 45.42% and 58.05% compared with that of the control. On the 80 th day, the chlorophyll content of ryegrass in heavy metal contaminated soil, petroleum contaminated soil and petroleum and heavy metals combined contaminated soil was significantly lower than that of control, which decreased by 26.84%, 44.82% and 47.02%, respectively. [Conclusion] Different pollutions could promote the morphological changes of ryegrass root system, and reduce the biomass and pigment contents of ryegrass, among which the combined pollution with petroleum and heavy metals have the greatest influence on the growth of ryegrass, followed by the treatment with petroleum pollution. Based on the difference of physiological response of ryegrass root morphology and growth to different polluted soils, some regulatory substances can be added to alleviate the toxic effect of pollution on plants in the future during the phytoremediation of contaminated soils, increase the biomass of plants and enhance the related physiological functions to improve the efficiency of pollution remediation.

Keywords: ryegrass; different types of pollution; root morphology; biomass; photosynthetic pigment content

科学技术和现代工业的飞速发展,致使人们对石油的需求量越来越高。随着石油开采量的日益上升,在石油开采、运输过程中产生了大量泄漏物和排出物,造成了严重的土壤石油污染。此外,工业生产过程中含重金属的废弃物排放使土壤中的重金属含量增加,同时农业生产过程中化肥及农药的不当使用也会造成土壤污染^[1-2]。石油、重金属导致的土壤污染问题亟待解决。现今对污染土壤的修复主要有 3 类方法,分别为物理修复、化学修复和生物修复。物理修复和化学修复虽然效果明显,但容易造成二次污染,生物修复中的植物修复不仅成本低而且具有良好的生态效应因此获得较多的应用^[3-5]。植物修复是利用某些特殊植物的耐受作用,种植在受污染的土壤中,在其自身生长的过程中利用植物的根系,吸收、富集并移除土壤中的有机和无机污染物^[6-8]。多年生黑麦草(*Lolium perenne*)作为水土保持的先锋植物,其以生长快,根系发达,对外界的胁迫具有较好耐受适应性而被经常用来研究在胁迫条件下的生理响应^[9]。目前,有很多利用植物修复污染土壤的研究。比如,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)在不同浓度重金属污染的土壤中,随着紫花苜蓿的生长,土壤中重金属含量

呈现逐步减少的趋势;红三叶草(*Trifolium pratense*)在修复石油污染土壤的后期生物量增大,土壤中总石油烃含量(TPH)降低。证明植物对重金属污染、石油污染土壤具有修复作用^[10-11]。众所周知,根系在植物生长过程中具有重要作用,其中根系形态特征与植物利用土壤养分的效率密切相关。有研究^[12]表明,车前草在 Cu, Ni 污染条件下,根部重金属的累积量大于叶片,生物量和叶绿素含量减小;也有研究^[13]发现在石油污染土壤中种植牧草,牧草的发芽率和生物量均降低,但土壤中石油的降解率提高。根系的吸收作用能够使土壤中重金属、石油等污染物的含量明显减少^[14-15],这对于土壤污染的研究与修复具有重大意义。虽然利用植物修复污染土壤的研究较多,但是关于植物根系形态及生长变化在污染土壤修复的研究中报道较少。基于此,本研究模拟重金属、石油及重金属—石油复合污染,通过室内盆栽试验,种植黑麦草,分别对不同类型土壤污染下黑麦草的根系形态、生物量及色素含量的变化进行分析,旨在探讨黑麦草在不同类型污染下的生理生化响应,为植物修复单一污染及复合污染土壤提供初步的植物生理生化机理研究。

1 材料与方 法

1.1 材 料

①供试土壤。2019年3月10日在长江南岸冲积地潮土采集土样(南京雨花台区桥板镇)。用取土器取样,取0—20 cm的土壤,装进自封袋中带回实验室,去除砂石及大颗粒物后过2 mm筛,贮存在4℃的冰箱内备用。供试土壤质地为砂质壤土。土壤基本理化性质为:pH值为6.43,有机碳10.87 g/kg,全氮0.89 g/kg,硝态氮27.17 mg/kg,铵态氮5.42 mg/kg,镉0.196 mg/kg,铅为4.52 mg/kg。②供试植物。多年生黑麦草(*Lolium perenne*),黑麦草种子采购自江苏省农科院。③化学试剂。石油来源于中国石化金南油田。PbCl₂,CdCl₂·4H₂O等其他所用试剂均为分析纯,纯度>99.5%。

1.2 试验设计

本研究共设置4个处理:①未污染土壤,种植黑麦草(未污染处理,SH);②土壤中添加铅、镉并种植黑麦草(SGH);③土壤中添加石油并种植黑麦草(SPH);④土壤中添加铅、镉及石油并种植黑麦草(SPGH)。土壤污染物浓度设定依据《土壤环境质量—建设用地土壤污染风险管控标准试行》^[16]。考虑到土壤污染的实际问题,石油污染物依据建设用地的筛选值第一类做参考,石油污染物浓度设为1 000 mg/kg干土;铅、镉污染严重,铅、镉的污染浓度依据管控值的第一类用地标准设置,镉为50 mg/kg干土,铅为500 mg/kg干土。石油、重金属污染土壤的制备参考程坤等人的方法^[17]。

盆栽试验:依据试验设计,于2019年3月20日将不同类型污染土壤过2 mm筛后,分装到塑料花盆(高12 cm,上下直径为10 cm和8 cm)中,每盆200 g土壤(干土重),共4个处理,每个处理12盆,放于光照试验台上培养;放置2 d后,播种黑麦草种子。播种前对黑麦草种子进行表面消毒(浸泡在10%的过氧化氢中20 min),消毒后用蒸馏水漂洗3次。每盆播种80粒黑麦草种子,待种子萌发后间苗至50株。植物生长期通过每天称重来保持含水量为田间最大持水量的60%。培养期间保持室内温度25~30℃,每天间歇光照14 h,黑暗10 h,光照强度为4 500~7 300 lx,定期随机更换盆栽的位置以减少试验误差。并于播种后10,20,40和80 d进行破坏性采样。每次采样随机选取每个处理的3盆作为3个重复。

1.3 测定方法

1.3.1 植物根系形态与生物量测定 在培养期的10,20,40,80 d时采样,采样时剪掉塑料花盆,直接用自来水淋洗30 min,淋洗至黑麦草根系无土壤,再充分

清洗干净后用蒸馏水冲洗2~3次,用吸水纸吸干水分,将植物地上部与根部分开,黑麦草根部分采用根系分析系统(WINRHIZO),对根系的根长、根表面积、根直径和根体积等进行扫描分析(扫描图片色彩为黑白,分辨率为12 800×12 800 dpi)。根系分析完成后,对地上部和根部于105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重,分别称量地上部和根部的重量(精确值0.000 1 g)。

1.3.2 色素含量测定 在80 d破坏性采样时,对黑麦草的叶片进行色素含量的测定。用丙酮—乙醇混合(1:1)浸提法^[18]测定光合色素含量,并计算出叶绿素a,叶绿素b,类胡萝卜素及叶绿素a+b的含量。

1.4 数据处理

试验数据采用Microsoft Excel 2010和SPSS 19.0软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),显著性检验用LSD法($p<0.05$);对试验数据进行统计分析并作图。

2 结果与分析

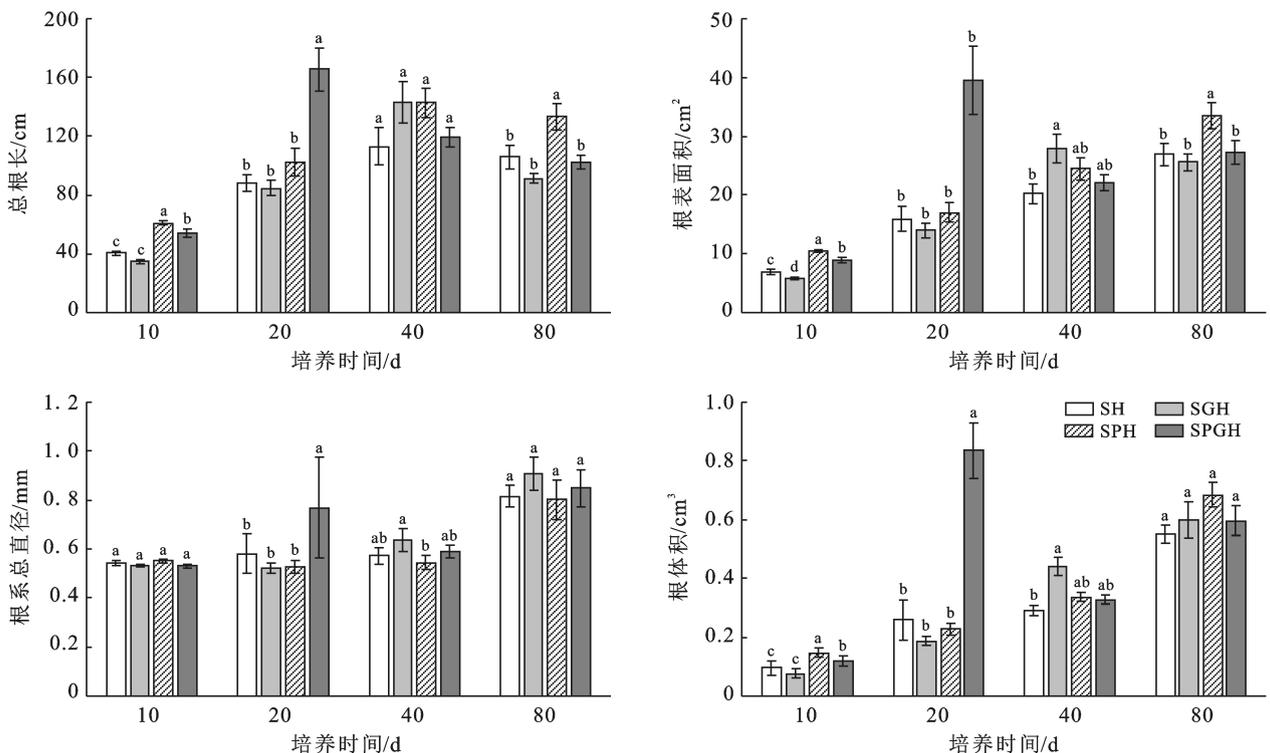
2.1 不同类型土壤污染对黑麦草根系形态的影响

黑麦草生长期,各处理的根系根长呈现增长的趋势,石油污染处理的根系根长一直大于未污染处理,重金属污染处理与未污染处理相比呈现出先减小后增加再减小,石油及重金属复合污染处理与未污染处理相比呈现出先增加后减小(图1)。10 d时,重金属污染处理与未污染处理间无显著差异($p>0.05$),石油污染处理、石油及重金属复合污染与未污染处理间差异显著,石油污染处理、石油及重金属污染处理显著增加了约50.70%,33.50%。20 d时,培养时间增加根系增长,其中石油及重金属复合污染根长显著增加,与未污染处理相比,显著增长了约88.10%,石油及重金属污染物的复合作用促进了黑麦草根系根长的伸长。40 d时,根长在污染条件下增加,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的根长均大于未污染处理,3个污染处理组分别增加了约26.50%,26.20%,5.20%。80 d时,石油污染处理的根系根长显著大于未污染处理,显著增加了约26.20%;其他两个处理的根长低于未污染处理。

黑麦草生长期,未污染处理的根表面积呈现增加的趋势,石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的根系表面积均大于未污染处理;重金属污染处理与未污染处理相比,呈现出先减少后增加再减少的趋势(图1)。10 d时,各污染处理与未污染处理间差异显著($p<0.05$),石油污染处理、石油及重金属复合污染处理显著大于未污染处理,分别显著增加了约52.40%,29.50%,重金属污染显著减少了约16.50%。

20 d 时,石油及重金属复合污染与其他处理间差异显著,与未污染处理相比,显著增加了约 148.60%,约是未污染处理的 1.5 倍,黑麦草的根系表面积在石油及重金属复合污染条件下增加。40 d 时,3 个污染处理均大于未污染处理,而重金属污染处理与未污染处理间差异显著,显著增加了约 37.80%。80 d 时,石油污染处理与各处理间差异显著,且显著大于未污染处理,显著增加了约 24.40%。黑麦草生长期间,各处理的根系体积呈现出增加的趋势,未污染处理的根系体积呈增加的趋势,石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的根系体积一直大于未污染处理,重金属污染处理的根系表面积与未污染处理相比呈现出先减少后增加的趋势(图 1)。10 d 时,石油污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理和重金属污染处理间差异显著,与未污染处理相比,石油污染处理、石油及重金属污染处理显著增加了约 52.50%,24.30%。20 d 时,石油及重金属污染处理与未污染处理间差异显著,显著增加了约 221.90%,是未污染处理的 2.2 倍;而石油污染处理和重金属污染处理均低于未污染处理。40 d 时,重金属污染处理的根系

体积显著增加,大于其他 3 个处理,与未污染处理相比,显著增加了约 51.90%,其他两个污染处理的根系体积也均大于未污染处理。80 d 时,3 个污染处理的根系体积均大于未污染处理,其中石油污染处理组根系体积最大,增长了约 24.30%。黑麦草生长期间,未污染处理的根系直径呈现出增加的趋势,重金属污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理相比,呈现出先减少后增加的趋势,石油污染处理呈现出先增加后减少的趋势(图 1)。10 d 时,各处理间的根系直径间无显著差异,4 个处理间根系直径生长指标大致相同。20 d 时,石油及重金属污染处理的根系直径显著大于其他三组处理;与未污染处理相比,石油及重金属污染处理的根系直径显著增加了约 32.20%,石油污染处理与重金属污染处理减少了约 9.20%和 10.40%。40 d 时,重金属污染处理的根系直径与石油污染处理间差异显著,且重金属污染处理的根系直径大于其他三组处理。80 d 时,各处理间无显著差异,重金属污染处理、石油及重金属复合污染处理大于未污染处理,增加了约 11.34%和 4.0%,石油污染处理小于未污染处理,减少了约 1.80%。



注:SH 表示未污染土壤+黑麦草,SGH 表示重金属污染土壤+黑麦草,SPH 表示石油污染土壤+黑麦草,SPGH 表示石油重金属混合污染土壤+黑麦草;不同小写字母表示同一采样时间内不同处理间存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同类型土壤污染条件下黑麦草根系形态变化

2.2 不同类型土壤污染条件下黑麦草生物量(干重)的变化

随着黑麦草生长时间的增加,各处理的地下生物

量呈现出增加的趋势(表 1)。10 d 时,石油污染处理、石油及重金属复合污染处理均显著大于未污染处理,显著增加了约 73.79%和 89.00%。20 d 时,石油

及重金属复合处理显著大于其他三组处理,与未污染处理相比,显著增加了约 169.37%,石油及重金属复合处理的地下生物量约是未污染处理的 3 倍。40 d 时,各处理间无显著差异,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的地下生物量均小

于未污染处理,分别减少了约 13.43%,12.45%和 2.0%。80 d 时,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的地下生物量均显著小于未污染处理,分别显著减少约了 25.46%,50.76%和 34.69%。

表 1 不同土壤污染条件下黑麦草地下生物量、地上生物量和总生物量的变化

生物量 (mg/株)	培养时间/ d	处理			
		SH	SGH	SPH	SPGH
地下生物量	10	2.21±0.44 ^c	2.67±0.04 ^{bc}	3.84±0.27 ^{ab}	4.18±0.63 ^a
	20	2.22±0.37 ^b	3.01±0.67 ^b	3.16±0.24 ^b	5.98±1.18 ^a
	40	7.47±1.02 ^a	6.46±0.80 ^a	6.54±0.83 ^a	7.32±0.38 ^a
	80	14.05±0.61 ^a	10.47±0.92 ^b	6.91±0.66 ^c	9.17±0.54 ^{bc}
地上生物量	10	3.22±0.29 ^a	2.13±0.20 ^b	2.39±0.25 ^b	2.10±0.17 ^b
	20	8.64±1.15 ^a	7.71±0.95 ^a	4.78±0.13 ^a	4.47±1.93 ^a
	40	12.25±0.49 ^a	6.94±0.73 ^b	8.82±1.23 ^b	6.68±0.65 ^b
	80	15.70±0.52 ^a	11.29±0.74 ^b	9.5±1.63 ^{bc}	6.59±0.30 ^c
总生物量	10	5.43±0.52 ^a	4.8±0.20 ^a	6.23±0.43 ^a	6.28±0.70 ^a
	20	10.86±1.41 ^a	10.72±1.61 ^a	7.95±0.26 ^a	10.45±1.29 ^a
	40	19.72±1.48 ^a	13.41±1.46 ^b	15.36±1.82 ^{ab}	14.01±0.30 ^b
	80	29.76±0.22 ^a	21.77±1.33 ^b	16.41±1.85 ^c	15.77±0.70 ^c

注:不同小写字母表示同一采样时间内不同处理间存在显著差异($p < 0.05$)。

随着黑麦草生长时间的增加,各处理的地上生物量呈现出增加的趋势,且不同污染类型处理的地上生物量均小于未污染处理(表 1)。10 d 时,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理间的地上生物量均显著低于未污染处理,分别显著减少了约 33.85%,25.78%和 34.68%;生长前 10 d,各处理的地上生物量表现为:SH > SPH > SPGH > SGH。20 d 时,未污染处理与重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理间无显著差异,但重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的地上生物量均低于未污染处理,分别减少了约 10.79%,44.64%和 20.89%。40 d 时,各处理间的地上生物量差异显著,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理相比分别显著减少了约 43.29%,27.97%和 45.42%。80 d 时,各处理间的地上生物量差异显著,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理相比分别显著减少了约 28.08%,39.51%和 58.02%。在生长的 20 d 后,各处理的地上生物量表现为:SH > SGH > SPH > SPGH。由表 1 可以看出,各处理的黑麦草的总生物量随生长时间的变化呈现增加的趋势。10 d 时,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的黑麦草总生物量与未污染处理间无显著差异,各处理间总生物

量表现为:SPGH > SPH > SH > SGH。20 d 时,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的总生物量与未污染处理间无显著差异,各处理间总生物量表现为:SGH > SH > SPGH > SPH。40 d 时,重金属污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理间差异显著,与未污染处理相比,重金属污染处理、石油及重金属复合污染处理的总生物量分别显著降低了约 31.98%和 28.96%。80 d 时,重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理与未污染处理相比分别显著减少了约 26.85%,44.84%和 47.00%,各处理的总生物量表现为:SH > SGH > SPH > SPGH。

2.3 不同类型土壤污染条件下黑麦草叶片色素含量的变化

图 2 显示的是不同类型土壤污染条件下黑麦草叶绿素及其他色素含量的变化。由图 2 可知,各处理的叶绿素 a,叶绿素 b,类胡萝卜素及叶绿素 a+b 的含量均低于未污染处理。与未污染处理相比,石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的叶绿素 a 含量分别显著减少了约 41.22%和 37.09%,重金属污染处理减少了约 10.54%。重金属污染处理、石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的叶绿素 b 含量与未污染处理相比,分别减少了约 16.46%,34.52%和 44.56%,其中石油及重金属复合污染处理与未污染

处理间差异显著,石油及重金属复合污染对黑麦草叶绿素 b 含量的影响最大。石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的类胡萝卜素含量与未污染处理相比,分别显著减少了约 43.97%和 46.72%。石油污染处理、石油及重金属复合污染处理的叶绿素 a+b 含

量与未污染处理相比,分别显著减少了约 39.16%和 39.22%,且石油污染处理和石油及重金属复合污染处理间无显著差异。本研究发现石油及重金属复合污染对类胡萝卜素和叶绿素 a+b 影响最大,石油污染处理次之。

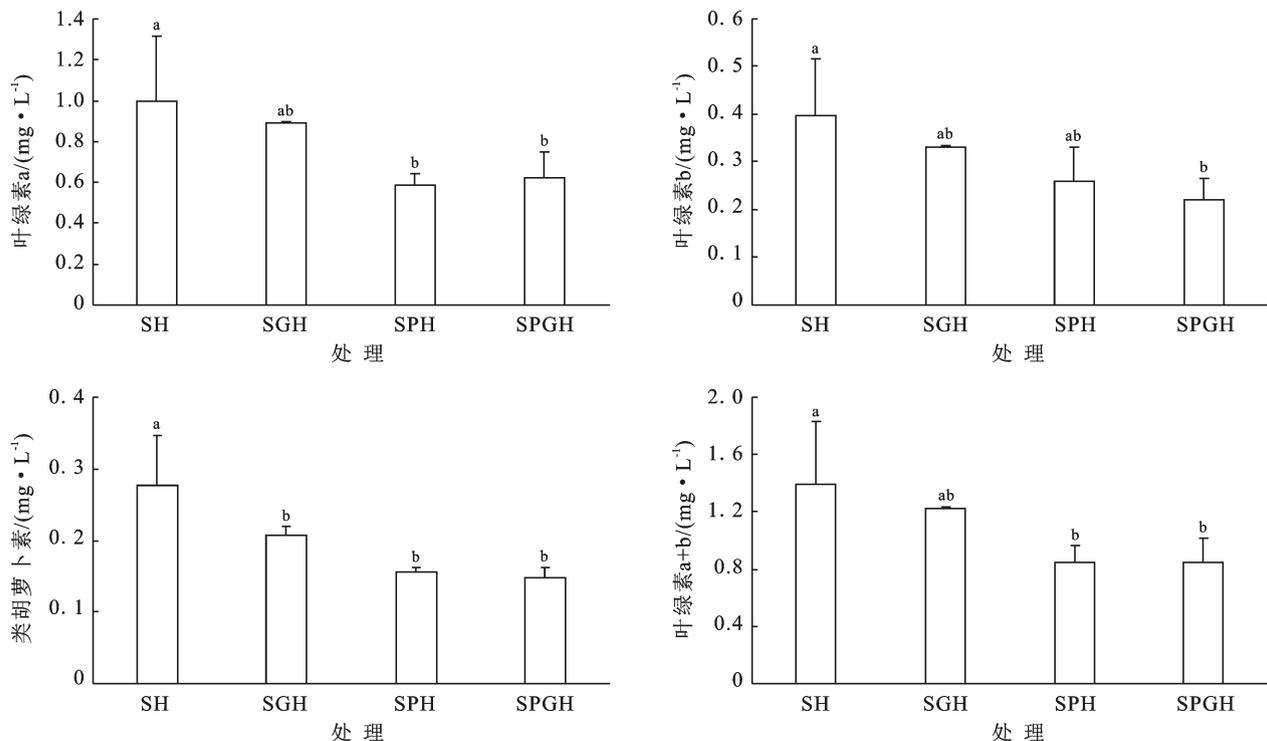


图 2 不同土壤污染条件下黑麦草叶绿素及色素含量的变化情况

2.4 黑麦草根系、生物量及叶片色素含量间相关性

表 2 为黑麦草根系各指标、生物量、叶片色素含量的相关性。由表 2 可知,黑麦草根系根长与叶绿素 b 含量呈极显著负相关($p < 0.01$),与叶绿素 a、类胡萝卜素、叶绿素总和呈显著负相关($p < 0.05$),根系表面积与根系体积呈极显著正相关($p < 0.01$),与根系直径呈显著正相关($p < 0.05$),根系直径与根系体积

呈极显著正相关($p < 0.01$);黑麦草地上生物量与类胡萝卜素呈显著正相关,地下生物量与总生物量呈显著正相关($p < 0.05$);叶绿素 a 与叶绿素 b 含量呈显著正相关($p < 0.05$),与类胡萝卜素、叶绿素总量呈极显著正相关($p < 0.01$);叶绿素 b 与类胡萝卜素、叶绿素总量呈极显著正相关,类胡萝卜素与叶绿素总量呈极显著正相关($p < 0.01$)。

表 2 黑麦草根系各指标、生物量、叶片色素含量间的相关性

项目	根长	根表面积	根直径	根体积	地上生物量	地下生物量	总生物量	叶绿素 a	叶绿素 b	类胡萝卜素	叶绿素总和
根长	1	0.447	-0.217	0.167	-0.410	0.454	0.162	-0.716*	-0.861**	-0.789*	-0.782*
根表面积		1	0.771*	0.956**	-0.168	-0.034	-0.146	0.142	-0.018	0.005	0.090
根直径			1	0.919**	0.168	-0.314	-0.190	0.685	0.595	0.592	0.668
根体积				1	-0.070	-0.160	-0.202	0.391	0.264	0.255	0.357
地上生物量					1	-0.298	0.388	0.550	0.480	0.749*	0.596
地下生物量						1	0.765*	-0.326	-0.478	-0.494	-0.404
总生物量							1	0.059	-0.138	0.029	0.012
叶绿素 a								1	0.817*	0.922**	0.909**
叶绿素 b									1	0.904**	0.959**
类胡萝卜素										1	0.954**
叶绿素总和											1

注: * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 讨论与结论

一般认为,植物根系的变化,是判断植物自身生长的一个重要指标。本研究通过黑麦草根系的根长、根表面积、根直径和根体积来探究重金属污染、石油污染、石油及重金属复合污染对植物生长的影响。随着生长时间的增加,各处理的黑麦草植株根系变化趋势大致相同。20 d 时,石油及重金属复合污染处理各个根系指标均大于其他处理,主要是由于石油特殊的物理性质—疏水性,导致石油污染物进入土壤后,在根系的土壤中形成乳浊液^[19-20],不利于根系吸收水分,抑制了植物根系对养分的吸收。在石油污染物的胁迫作用下,黑麦草根系为了吸收营养物质而促进了根系的伸长、增生,最终使石油污染处理的根系生长大于其他处理。石油、重金属单一污染处理的黑麦草根系变化与石油及重金属复合污染条件下的变化不完全相同,是因为石油、重金属污染性质存在差异,对黑麦草根系形态的影响也会出现不同。整体来看,石油重金属复合污染大于未污染处理,根系各指标在生长前期大于未污染处理,在生长后期,与未污染处理间差异减小。由于污染物的胁迫作用,影响了黑麦草对营养物质和水分的吸收,黑麦草为了维持生长,导致根系出现代偿性增生,使黑麦草的根系根长、根系表面积、根系直径、根系体积增加,促进对营养物质的吸收,以维持黑麦草的生长。有研究发现蚕豆(*Vicia faba*)、续断菊(*Sonchus asper*)等耐受植物根系在重金属胁迫下根系根长减小,根系表面积增大^[21-24]。这与我们的研究有些不同,主要是不同的植物本身的生长特性,以及对污染物的敏感度不同造成的。本研究发现,石油污染与重金属污染对黑麦草根系的差异较大,石油及重金属复合污染与石油污染对黑麦草根系的影响也不同,是因为石油和重金属污染的性质不同,对黑麦草生长的影响也就出现差异,同时石油还会影响黑麦草根系对土壤水分的吸收,进而对黑麦草的生长影响更大。

植物生物量的变化也是判断植物生长情况的一个重要指标。植物在石油和重金属胁迫作用下,生长会受到抑制,使其生物量下降^[25-26]。本研究发现,在黑麦草生长前期,由于石油及重金属的胁迫作用,阻碍了黑麦草对营养物质的吸收,植物根系在胁迫作用下代偿性增生,促使黑麦草地下生物量增加;黑麦草生长后期,由于胁迫时间增加,阻碍了营养物质的吸收与运输,导致黑麦草的生长逐渐减弱,黑麦草的生长受到抑制,地下生物量降低。在整个培养期内,3 个污染处理的地上生物量均低于未污染处理,主要可归

因为根系对营养物质的吸收降低,抑制了根系向地上部分运输营养物质,限制了黑麦草地上部的正常生长,使地上生物量减少^[27]。随着时间增加,污染土壤的黑麦草总生物量小于未污染处理,可归因为重金属污染、石油污染及石油—重金属复合污染的毒害作用抑制了黑麦草根对水分及其他营养物质的吸收与运输而使植物的生长减弱,导致黑麦草生物量减少。

植物叶绿素含量的变化,是反映植物生长的一个重要因素。叶绿素含量的多少可以间接反映出植物受胁迫的程度^[28]。本研究表明,重金属污染、石油污染、石油及重金属复合污染处理的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量及叶绿素 a+b 含量均显著低于未污染处理,说明重金属、石油及其复合污染都影响植物色素的合成,这和前人的研究结果一致^[29-30]。有研究表明,在重金属胁迫下,叶绿素的含量先上升后下降^[31],也有研究显示在镉含量增加的情况下,植物体内的光合色素含量减少^[25]。本研究发现,在各污染处理条件下的黑麦草叶绿素及其他色素含量均降低,可归因为重金属污染处理可使叶绿素合成过程中的金属离子形态发生变化,影响叶绿素的合成,使叶绿素含量减少^[32-33]。石油污染处理的黑麦草的叶绿素含量小于重金属污染处理的叶绿素含量,可能是由于石油的疏水性,使黑麦草根系吸水困难,吸收水分减少而导致叶绿素的合成减弱,色素合成量降低。本研究发现,单一污染会使黑麦草的叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、类胡萝卜素含量及叶绿素 a+b 含量降低,石油与重金属复合污染存在协同作用,进一步加剧了对黑麦草的胁迫作用,从而影响了黑麦草的叶绿素的合成,使色素含量降低。黑麦草根系根长与色素含量间呈显著负相关(表 2),表明污染胁迫增加了根系的根长,但污染胁迫还是影响了黑麦草对营养物质的吸收,导致色素的合成减少。黑麦草类胡萝卜素含量与地上生物量呈显著正相关,各色素含量间也存在显著正相关,表明在不同污染物胁迫影响下,黑麦草各生长指标间也存在着相互影响。

综上所述,本研究发现石油、重金属及石油—重金属复合污染处理促进了黑麦草根系的根长、根表面积、根体积、根直径的增加。污染条件下黑麦草地下部生物量增长速度在培养期内呈现先快后慢的趋势,对地上部分生物量的增加起到抑制作用,同时使黑麦草叶片的色素含量降低。总体来看,石油—重金属复合污染对黑麦草的根系形态、生长影响最显著,石油污染次之,重金属污染最小。基于此,可通过监测黑麦草的生物量及色素含量来推测土壤是否污染,也可在污染土壤修复过程中,针对不同污染类型,采取相

应措施,如添加调理剂、施用营养素等来缓解污染物对植物的胁迫,调节植物的生长,促进植物对土壤污染的修复能力,为植物修复污染土壤提供了新的视角。

[参 考 文 献]

- [1] 庄国泰.我国土壤污染现状与防控策略[J].中国科学院院刊,2015,30(S1):46-52.
- [2] 石扬,陈沅江.我国污染土壤生物修复技术研究现状及发展展望[J].世界科技研究与发展,2017,39(1):24-32.
- [3] Awadh S M, Al-Hamdani J A J M Z. Urban geochemistry assessment using pollution indices: A case study of urban soil in Kirkuk, Iraq [J]. Environmental Geology, 2019,78(20):1-12.
- [4] 周际海,黄荣霞,樊后保,等.污染土壤修复技术研究进展[J].水土保持研究,2016,23(3):366-372.
- [5] 惠云芳,王鸿飞.石油污染土壤的生物修复研究进展[J].西北农业学报,2018,27(4):451-458.
- [6] Rehman M Z U, Rizwan M, Ali S, et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by using *Solanum nigrum*: A review [J]. Ecotoxicol Environ. Saf., 2017,143:236-248.
- [7] 张金.石油污染土壤修复植物根际修复潜力评价研究[D].辽宁 沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [8] 敬路准,陈晓明,肖伟,等.黑麦草修复重金属污染土壤与废水及富集植物的微生物降解[J].环境工程学报,2019,13(6):1449-1456.
- [9] 马博英.多年生黑麦草的逆境生理研究进展[J].生物学杂志,2011,27(2):58-61.
- [10] 申圆圆.土壤中石油污染物行为特征及植物根际修复研究[D].陕西 西安:长安大学,2012.
- [11] 李希铭,宋桂龙.镉胁迫对紫花苜蓿吸收特征及根系形态影响[J].草业学报,2016,25(2):178-186.
- [12] 刘丽杰,刘凯,孙玉婷,等.车前草对重金属铜和镍的积累及生理响应[J].甘肃农业大学学报,2020,55(5):171-179.
- [13] 郭军权.牧草植物对黄土丘陵区农田石油污染土壤的修复研究[J].陕西农业科学,2020,66(5):78-81.
- [14] 张茂,徐彦红,席溢,等.铅、锌、镉胁迫对多年生黑麦草生长及生理生化特性的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(3):41-50.
- [15] 郑丽,樊剑波,何园球,等.不同供磷水平对旱作条件下水稻生长、根系形态和养分吸收的影响[J].土壤,2015,47(4):664-669.
- [16] 生态环境部. GB36600-2018 土壤环境质量—建设用地土壤污染风险管控标准(试行)[M].北京:中国标准出版社,2018.
- [17] 程坤,周际海,金志农,等.土壤微生物活性对石油原油、铅镉及其复合污染的响应[J].环境科学学报,2017,37(5):1976-1982.
- [18] 施海涛.植物逆境生理学试验指导[M].北京:科学出版社,2016.
- [19] 魏样.石油污染对土壤性状的影响及植物修复效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [20] 张莹,张玲,刘泓,等.柳树 6 个无性系在铜尾矿砂中的生长及耐受性差异[J].林业科学研究,2017,30(6):936-945.
- [21] 李博,袁兴超,湛方栋,等.异质 Cd 胁迫对蚕豆和富集植物续断菊根系生长的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(1):62-70.
- [22] 李建彬,陈永华,汤春芳,等.泥炭土改良铅锌矿渣下植物修复效果研究[J].中南林业科技大学学报,2019,39(2):93-100.
- [23] Deng Xiao, Yang Yang, Zeng Hongyuan, et al. Variations in iron plaque, root morphology and metal bio-availability response to seedling establishment methods and their impacts on Cd and Pb accumulation and translocation in rice(*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020,384:1-6.
- [24] 王吉秀,李祖然,李博,等.间作植物根系对 Pb 斑块胁迫适应机制[J].农业环境科学学报,2019,38(12):2738-2748.
- [25] 胡容平,李欣欣,林立金,等.混种龙葵对番茄和茄子生理生化特性及镉含量的影响[J].中国农学通报,2019,35(26):57-63.
- [26] 谭建波,陈兴,郭先华,等.续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd, Pb 分配特征[J].生态环境学报,2015,24(4):700-707.
- [27] 韩航,陈顺钰,薛凌云,等.铅胁迫对金丝草生长及生理生化的影响[J].草业学报,2018,27(4):131-138.
- [28] 张刚,翁悦,李德香,等.铜胁迫对黑麦草种子萌发及幼苗生理生态的影响[J].东北师大学报(自然科学版),2019,51(1):119-124.
- [29] 唐探,姜永雷,张瑛,等.铅、镉胁迫对云南樟幼苗叶绿素荧光特性的影响[J].湖北农业科学,2015,11(54):2655-2658.
- [30] Qin Xiaoming, Nie Zhaoju, Liu Hongen, et al. Influence of selenium on root morphology and photosynthetic characteristics of winter wheat under cadmium stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2018, 150:232-239.
- [31] 陈佳月,姜洪进,解静芳,等.模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗生理状况的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(6):575-582.
- [32] 刘长浩.柳枝稷的耐镉性及其对镉的形态生理响应[D].江苏 南京:南京农业大学,2016.
- [33] 王琳.石油污染对修复植物紫茉莉与黑麦草根际效应的影响[D].辽宁 沈阳:沈阳农业大学,2018.