

陕北石油区城市绿化树木枯落叶对油污土壤的修复效应

于 齐¹, 张晓曦², 刘增文^{3,4*}, 王文轩³, 张祯尧³, 王 宁³

(1.西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 4.农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了修复石油污染土壤和资源化利用城市绿化树木枯落叶,采集陕北典型石油污染土壤,施入 19 种常见城市绿化树木枯落叶粉碎样进行为期 120 d 的室内混合分解培养试验,检测不同枯落叶修复土壤化学和生物学性质及降解石油烃的能力,并以主成分分析法进行综合评价。结果表明:对油污土壤性质综合修复效应最好的是苦楝(*Melia azedarach*)和桃树(*Prunus persica*)枯落叶,较好的依次为桑树(*Morus alba*)、国槐(*Sophora japonica*)、垂柳(*Salix babylonica*)、五角枫(*Acer mono Maxim*)和紫叶李(*Prunus cerasifera*)枯落叶,其他树木枯落叶效果不明显,有的甚至起到恶化作用。

关键词:油污土壤修复;城市绿化树木;枯落叶

中图分类号:X74 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)01-0050-08 doi:10.11654/jaes.2015.01.008

Remediation Effects of Urban Greening-Tree Litters on Petroleum-Contaminated Soil in Oil Producing Region of Northern Shaanxi

YU Qi¹, ZHANG Xiao-xi², LIU Zeng-wen^{3,4*}, WANG Wen-xuan³, ZHANG Zhen-yao³, WANG Ning³

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4.Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil contamination by petroleum has become a serious environmental issue in oil-producing areas. Research has showed that organic residue additions could enhance the degradation of petroleum in soils. In a laboratory experiment, the effects of litters from 19 urban greening tree species on chemical and biological properties of petroleum-contaminated soil were evaluated. A petroleum contaminated soil was collected in Northern Shaanxi and incubated with the litters for 120 d. Additions of all foliar litters significantly increased the contents of organic matters, available K and available Zn in the contaminated soil. Most of litters significantly increased the contents of alkaline-soluble N and available Mn and Fe, and enhanced the activities of catalase, sucrose, phosphatase, dehydrogenase, urease and protease. Applying the litters also promoted the growth of fungi and actinomycetes. However, litter applications generally decreased soil pH values but did not increase available P and Cu contents. In the tested 19 litters, only several litters improved bacterial population and polyphenol oxidase activity. Except *Acer mono*, all tree litters accelerated petroleum degradation. Such effect was in order of *Melia azedarach* > *Prunus persica* > *Morus alba* > *Sophora japonica* > *Salix babylonica* > *Acer mono Maxim* > *Prunus cerasifera*. The litters from the rest species had negligible or even negative effects on petroleum degradation.

Keywords: petroleum-contaminated soil; urban greening tree; leaf litter

陕北是我国重要的石油化工基地,然而在石油开采、提炼、储存和运输过程中,石油泄漏和废油废渣抛

撒导致了严重的土壤污染。有研究表明,石油污染物不仅可以通过食物链经植物、动物等对人类健康造成影响,同时会显著恶化土壤的化学和生物学性质,如降低养分有效性、微生物多样性和酶活性等^[1],对土壤生态系统造成严重威胁。因此,如何对油污土壤进行修复成为一个亟待解决的环境问题。国内外对于石油污染土壤的生物修复多集中于筛选具有超吸收和积

收稿日期:2014-07-18

基金项目:国家自然科学基金(31070630);西北农林科技大学大学生创新创业训练计划(2013-2014)

作者简介:于 齐(1989—),女,硕士研究生,主要研究方向为森林生态学。E-mail: zizibujuan1989@sina.cn

* 通信作者:刘增文 E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com

累能力的植物和微生物,以及研究石油污染对植物的生态毒性。有研究^[2]表明,在油污土壤中添加麦秆,可以提高土壤细菌、真菌生物量,对石油烃降解率最高可达75%。程丽娟等^[3]的研究表明野生植物长药八宝对石油污染有较好的耐性并可以降低石油烃含量,闫文德等^[4]的研究表明栎树等4种绿化树种在不同时期可以提高土壤微生物数量,而利用树木枯落叶修复油污土壤的研究尚属少见。同时,大多数研究以石油烃降解率作为衡量修复效果的唯一指标,而忽视了对土壤其他化学和生物学性质的改善。

城市绿化树木每年产生大量枯落叶,且大多通过集中填埋或焚烧处理,既浪费资源又会造成二次污染。事实上,很多树木枯落叶是一种高吸附性物质,不但养分丰富且附有大量的微生物和酶^[5],可能具有吸附和降解石油烃的能力,同时可以补充土壤速效养分、提高油污土壤受抑微生物的数量和酶的活性。基于这种推测,本研究通过采集陕北典型石油污染土壤和常见城市绿化树木枯落叶进行室内混合分解培养试验,综合分析和评价不同树木枯落叶修复油污土壤化学和生物学性质及降解石油烃的能力,为修复石油污染土壤和资源化利用城市绿化树木枯落叶提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 油污土壤和城市绿化树木枯落叶采集

油污土壤采自陕北延安子长县余家坪油田石油污染区,该地区位于黄土高原半干旱丘陵沟壑区,海拔900~1400 m,年均气温8.5~9.5℃,无霜期165~190 d,多年平均降水量约520~550 mm。土壤类型为黄绵土。2012年秋末在采油场附近污染地段,设置10个1 m×1 m的小样方,全部收集0~10 cm土层油污土壤(容重1.261 g·cm⁻³),剔除植物根系、石砾、动物残骸等杂物,充分混合后取足量运回实验室,以鲜土粉碎过5 mm筛,装入密封袋内备用。同时,在当地城区采集常见19种城市绿化树木的枯落叶:法桐(*Platanus hispanica*)、国槐(*Sophora japonica*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、垂柳(*Salix babylonica*)、五角枫(*Acer mono*)、紫叶李(*Prunus cerasifera*)、栎树(*Koelreuteria interfolia*)、梧桐(*Firmiana simplex*)、七叶树(*Aesculus parviflora*)、樱花(*Prunus serrulata*)、苦楝(*Melia azedarach*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、泡桐(*Paulownia fortunei*)、柿树(*Diospyros kaki*)、桃树(*Prunus persica*)、桑树(*Morus alba*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)和文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*),仔细挑拣剔除

病虫害叶、腐烂叶,迅速漂洗后在65℃下烘干至恒重、粉碎过孔径1 mm尼龙筛备用。

1.2 室内混合分解培养

分别称取相当于干土2.5 kg的油污鲜土样,按照干土与枯落叶为100:2的比例将油污土壤和枯落叶充分混合后分装于不透水塑料培养钵中(钵口直径为18 cm,钵体高16 cm),以不加任何枯落叶的原油污土壤为对照,每个枯落叶类型和对照重复3次。在每个培养钵中加一定量的蒸馏水,统一调节土壤湿度为饱和持水量的50%(预先测定土壤的饱和持水量),用塑料薄膜覆盖钵口保湿,并在薄膜上留通气孔4个,然后将培养钵放在室内常温下(20~25℃)进行培养。在培养过程中,每隔1周称量培养钵质量,根据失水情况,揭开钵口用喷水器均匀补充水分,始终调节土壤湿度不变(培养钵质量保持恒定)。恒温恒湿下连续培养120 d,直到肉眼观察不到有明显枯落叶分解残留碎屑为止。

1.3 枯落叶初始养分含量和分解培养后土壤性质测定

枯落叶原始养分含量采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后以常规方法测定。分解培养后的土壤性质测定之前,将土样平摊到干净的瓷盘里,再次仔细捡除个别残留的枯落叶碎屑,预留部分鲜土采用稀释平板法测定微生物,其他土样风干后过孔径1 mm筛保存。碱解N采用碱解扩散法;速效P采用NaHCO₃浸提-钼兰比色法;速效K采用醋酸铵浸提-火焰光度法;有机质采用重铬酸钾容量法;有效Fe、Mn、Cu、Zn含量采用DTPA浸提-原子吸收分光光谱法;土壤pH值采用PHS-2型酸度计测定(水土质量比为2.5:1);石油烃含量采用有机溶剂抽提-重量法;脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法;蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法;过氧化氢酶活性采用KMnO₄滴定法;脱氢酶采用三苯基四唑-氯化物比色法;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法;蛋白酶活性采用茚三酮比色法;多酚氧化酶活性采用邻苯三酚比色法^[6-7]。

1.4 数据处理

应用Microsoft Excel 2010和SPSS 19.0统计软件对试验数据进行统计、方差分析以及主成分分析。

2 结果与分析

2.1 枯落叶对油污土壤化学性质的影响

根据测定,受试的19种枯落叶中,桃树、五角枫枯落叶具有较高的N含量(26.82~31.38 g·kg⁻¹),五角枫、桃树、柽柳、文冠果、山楂、栎树枯落叶具有较高的

P 含量(2.51~2.97 g·kg⁻¹),杜仲、文冠果、紫叶李、苦楝的枯落叶具有较高的 K 含量(12.45~16.93 g·kg⁻¹)。绝大多数树种的枯落叶显著补充了石油污染土壤的速效大量元素,增加了有机质含量(表 1)。19 种城市绿化树种中除法桐、梧桐和七叶树枯落叶对油污土壤碱解 N 含量无显著影响,柿树枯落叶甚至显著降低碱解 N 含量外(降幅为 28.37%),其他树种枯落叶均显著提高了土壤碱解 N 含量,增幅为 11.00%~439.62%,其中五角枫的提高效果最为明显。与此不同,多数城市绿化树种枯落叶对土壤速效 P 的影响不显著,仅有五角枫和桃树显著提高了土壤速效 P 含量,增幅分别为 144.75%和 187.64%。所有树种的枯落叶均显著提高了油污土壤的速效 K 和有机质含量,增幅分别为 2.91%~63.11%和 17.11%~42.48%,其中杜仲对速效 K 含量的提高最显著,而泡桐对有机质含量的提高最显著。

19 个树种中,紫叶李、七叶树、樱花、苦楝、杜仲、泡桐和桃树枯落叶均显著提高了土壤有效 Cu 含量,增幅为 8.25%~46.70%,其中苦楝枯落叶的提高作用最显著;而法桐、银杏、五角枫、栾树、桑树、桤柳、山楂和文冠果枯落叶显著降低了油污土壤的有效 Cu 含量。所有枯落叶均显著提高了油污土壤的有效 Zn 含量,增幅为 143.12%~470.48%,其中苦楝枯落叶的提高效果最显著。除桑树枯落叶对油污土壤有效 Fe 含量影响不显著,七叶树、樱花和桤柳枯落叶甚至显著降低油污土壤的有效 Fe 含量外,其他树种枯落叶均显著提高了油污土壤的有效 Fe 含量,增幅为 12.58%~127.00%,其中桃树枯落叶的提高效果最显著。除银杏、杜仲和山楂枯落叶对油污土壤有效 Mn 含量影响不显著,七叶树和樱花枯落叶甚至显著降低土壤有效 Mn 含量外(降幅分别为 9.29%和 14.40%),其他树种枯落叶均显著提高了土壤的有效 Mn 含量,增幅为 12.57%~47.14%,其中垂柳枯落叶的提高效果最显著。

施入枯落叶不仅改善了油污土壤的养分状况,同时显著改变了土壤的酸碱度,并促进了石油烃污染物的降解。除梧桐、七叶树和杜仲对 pH 无显著影响,垂柳、五角枫和泡桐显著提高油污土壤的 pH 外(增幅为 1.54%~3.81%),其他枯落叶均显著降低了土壤 pH,降幅为 0.94%~4.01%,其中柿树枯落叶的降低效果最显著;除五角枫外,所有枯落叶均显著降低了油污土壤石油烃的含量,降解率可达 34.99%~67.57%,其中梧桐枯落叶降解石油烃的效果最显著。

2.2 枯落叶对油污土壤生物学性质的影响

枯落叶对油污土壤生物学性质也存在显著影响(表 2)。除法桐、紫叶李、樱花、苦楝、桑树和山楂对细菌数量无显著影响,银杏、栾树、七叶树和文冠果枯落叶甚至显著抑制油污土壤细菌生长外(降幅为 82.87%~87.59%),其他树种枯落叶均显著促进了细菌生长,增幅为 76.32%~465.77%,其中国槐枯落叶的促进效果最显著。法桐、国槐、银杏、紫叶李、梧桐、七叶树、樱花、苦楝、泡桐、桑树枯落叶均显著提高了油污土壤放线菌数量,增幅为 181.37%~1 823.67%,其中国槐枯落叶的提高效果最显著。国槐、垂柳、五角枫、栾树、七叶树、桃树、桑树和山楂枯落叶均显著提高了土壤真菌数量,增幅为 1 346.94%~7 525.41%,其中垂柳枯落叶的提高效果最显著。

除银杏、梧桐和桃树枯落叶对油污土壤过氧化氢酶活性无显著影响,垂柳、五角枫和杜仲枯落叶显著抑制过氧化氢酶活性外(降幅为 16.91%~25.16%),其他树种枯落叶均显著提高了过氧化氢酶活性,增幅为 34.92%~98.65%,其中桤柳的提高效果最显著。法桐、国槐、紫叶李、梧桐、苦楝、杜仲、泡桐、柿树和山楂枯落叶均显著抑制了多酚氧化酶活性,降幅为 14.47%~72.77%,仅有栾树枯落叶显著提高了多酚氧化酶活性,增幅为 25.53%。19 种枯落叶中,国槐、垂柳、五角枫、紫叶李、栾树、苦楝、杜仲、泡桐、柿树、桃树、桑树、桤柳枯落叶显著提高蔗糖酶的活性,增幅为 39.96%~153.15%,其中桃树枯落叶的提高效果最显著。除法桐、杜仲和柿树枯落叶对碱性磷酸酶活性无显著影响,银杏和梧桐显著抑制碱性磷酸酶活性外(降幅分别为 13.05%和 21.40%),其他树种均显著提高了碱性磷酸酶活性,增幅为 21.35%~180.37%,其中苦楝枯落叶的提高效果最显著;所有枯落叶均显著提高了油污土壤脲酶和脱氢酶活性,增幅分别为 59.41%~301.34%和 33.75%~551.00%,其中柿树枯落叶对脲酶活性的提高作用最显著,而文冠果枯落叶对脱氢酶的活性提高最显著;法桐、垂柳、五角枫、梧桐、苦楝、泡桐、柿树、桃树、桤柳枯落叶显著提高了蛋白酶的活性,增幅为 31.56%~150.25%,其中苦楝枯落叶的提高作用最为显著。

2.3 枯落叶对油污土壤性质修复效应的综合评价

由于枯落叶对油污土壤各种生物化学性质的影响效果存在方向(改善或恶化)和程度上的差异,仅分析枯落叶对某种土壤性质的影响效应难以客观评价枯落叶对油污土壤的综合修复效应。因此,本研究采

表 1 油污土壤混入城市绿化树木枯落叶分解处理后的化学性质

Table 1 Chemical properties of petroleum contaminated soil after mixed with leaf litters of urban greening trees

枯落叶 Litter	碱解氮 Alkaline N/mg·kg ⁻¹	有效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	有机质 Organic material/g·kg ⁻¹	总石油烃 Total petroleum hydrocarbon/g·kg ⁻¹
法桐	64.17±2.14	54.06±11.02	615.00±5.00*	45.42±0.57*	6.48±0.02*
国槐	76.83±3.58*	41.32±6.33	620.00±30.00*	41.30±0.92*	5.56±0.04*
银杏	70.06±0.31*	40.27±3.85	550.00±0.00*	42.70±0.34*	7.47±0.15*
垂柳	107.34±1.05*	40.68±7.60	685.00±5.00*	39.38±1.58*	7.13±0.45*
五角枫	340.61±1.32*	81.40±3.85*	790.00±0.00*	41.86±3.75*	13.47±3.23
紫叶李	80.91±2.34*	39.13±1.92	760.00±0.00*	39.57±0.51*	6.17±0.13*
栾树	106.29±0.33*	50.44±5.68	645.00±5.00*	38.57±0.70*	5.08±0.66*
梧桐	65.34±2.04	39.30±2.43	530.00±10.00	43.06±1.24*	4.44±0.08*
七叶树	65.57±0.69	38.04±5.71	650.00±0.00*	41.59±1.01*	6.27±0.95*
樱花	89.14±0.32*	47.50±8.07	635.00±5.00*	42.63±0.91*	6.00±0.24*
苦楝	74.79±2.26*	52.79±10.83	725.00±5.00*	38.06±0.64*	5.46±0.72*
杜仲	76.59±0.76*	45.06±5.29	840.00±0.00*	43.99±0.42*	7.49±0.27*
泡桐	76.25±2.02*	37.93±3.23	590.00±0.00*	46.17±1.21*	5.79±0.43*
柿树	45.21±4.71*	56.41±16.88	635.00±5.00*	41.66±1.39*	5.21±0.11*
桃树	198.22±1.55*	95.67±53.01*	740.00±0.00*	37.98±0.58*	6.33±2.45*
桑树	161.82±2.18*	64.98±8.43	775.00±5.00*	37.54±0.90*	6.41±0.15*
桤柳	78.11±1.57*	52.85±1.04	785.00±5.00*	37.95±0.45*	6.00±0.60*
山楂	108.91±1.11*	38.19±5.87	640.00±0.00*	42.91±0.79*	8.9±0.34*
文冠果	79.34±2.00*	42.86±1.52	815.00±5.00*	44.66±0.26*	6.99±0.49*
对照	63.12±1.99	33.26±0.77	515.00±5.00	32.41±0.14	13.69±0.09

枯落叶 Litter	有效铜 Available Cu/mg·kg ⁻¹	有效锌 Available Zn/mg·kg ⁻¹	有效铁 Available Fe/mg·kg ⁻¹	有效锰 Available Mn/mg·kg ⁻¹	pH
法桐	0.55±0.01*	17.69±0.18*	4.42±0.02*	0.97±0.02*	7.38±0.02*
国槐	0.57±0.00	13.86±0.03*	6.37±0.07*	0.81±0.01*	7.33±0.02*
银杏	0.53±0.00*	18.29±0.27*	7.23±0.02*	0.65±0.00	7.38±0.05*
垂柳	0.58±0.00	18.75±0.23*	6.33±0.04*	1.02±0.03*	7.64±0.01*
五角枫	0.44±0.00*	11.02±0.02*	5.44±0.03*	0.78±0.01*	7.77±0.00*
紫叶李	0.71±0.03*	11.31±0.17*	7.40±0.07*	0.84±0.02*	7.37±0.04*
栾树	0.43±0.00*	15.14±0.21*	8.38±0.06*	0.84±0.03*	7.36±0.06*
梧桐	0.62±0.02	15.23±0.09*	5.22±0.07*	0.91±0.01*	7.52±0.02
七叶树	0.69±0.00*	21.90±0.14*	3.73±0.01*	0.63±0.00*	7.40±0.01
樱花	0.65±0.00*	15.83±0.12*	3.26±0.01*	0.59±0.01*	7.39±0.02*
苦楝	0.88±0.01*	26.34±0.11*	5.10±0.07*	0.82±0.02*	7.39±0.00*
杜仲	0.87±0.01*	25.12±0.13*	5.47±0.06*	0.72±0.01	7.42±0.01
泡桐	0.65±0.01*	12.89±0.01*	7.26±0.12*	0.89±0.02*	7.60±0.06*
柿树	0.61±0.01	18.13±0.16*	5.84±0.07*	0.88±0.01*	7.19±0.08*
桃树	0.67±0.01*	14.22±0.32*	8.92±0.07*	0.94±0.02*	7.21±0.02*
桑树	0.51±0.00*	13.98±0.12*	4.00±0.02	0.80±0.02*	7.24±0.01*
桤柳	0.44±0.01*	11.23±0.07*	3.67±0.04*	0.85±0.04*	7.36±0.02*
山楂	0.43±0.00*	14.12±0.07*	6.85±0.03*	0.73±0.01	7.36±0.02*
文冠果	0.36±0.00*	17.00±0.08*	6.34±0.07*	0.99±0.01*	7.35±0.02*
对照	0.60±0.00	4.62±0.03	3.93±0.00	0.69±0.03	7.49±0.02

注: * 表示处理较对照差异在 0.05 水平上显著。下同。

Note: * means that the measured value of the treatment sample has significant difference with the CK value at the level of $\alpha=0.05$. The same as blow.

表2 油污土壤混入城市绿化树木枯落叶分解处理后的生物学性质

Table 2 Biological properties of petroleum contaminated soil after mixed with leaf litters of urban greening trees

枯落叶 Litter	细菌 Bacteria/ $\times 10^8$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$	放线菌 Actinomycetes/ $\times 10^5$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$	真菌 Fungi/ $\times 10^2$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$	过氧化氢酶 Catalase/ mL $\cdot$ g $^{-1}$	多酚氧化酶 Polyphenoloxidase/ mg $\cdot$ g $^{-1}$
法桐	107.77 $\pm$ 30.23	22.03 $\pm$ 3.75*	0.16 $\pm$ 0.04	9.58 $\pm$ 0.40*	0.01 $\pm$ 0.00*
国槐	426.40 $\pm$ 35.74*	137.35 $\pm$ 12.95*	10.66 $\pm$ 1.48*	9.97 $\pm$ 0.48*	0.01 $\pm$ 0.00*
银杏	9.35 $\pm$ 3.55*	26.84 $\pm$ 8.12*	0.81 $\pm$ 0.81	6.48 $\pm$ 0.31	0.02 $\pm$ 0.00
垂柳	162.95 $\pm$ 19.62*	14.92 $\pm$ 2.13	30.25 $\pm$ 1.21*	5.54 $\pm$ 0.26*	0.03 $\pm$ 0.00
五角枫	191.95 $\pm$ 32.85*	7.47 $\pm$ 0.39	6.69 $\pm$ 0.79*	5.26 $\pm$ 0.23*	0.03 $\pm$ 0.00
紫叶李	67.51 $\pm$ 8.52	22.77 $\pm$ 1.47*	1.22 $\pm$ 0.00	10.43 $\pm$ 0.29*	0.01 $\pm$ 0.00*
栎树	10.42 $\pm$ 1.10*	13.33 $\pm$ 0.83	19.58 $\pm$ 2.20*	12.21 $\pm$ 0.28*	0.03 $\pm$ 0.00*
梧桐	243.61 $\pm$ 30.90*	20.97 $\pm$ 1.07*	4.03 $\pm$ 1.07	5.84 $\pm$ 0.71	0.01 $\pm$ 0.00*
七叶树	12.18 $\pm$ 1.68*	29.82 $\pm$ 4.01*	7.14 $\pm$ 2.34*	9.94 $\pm$ 0.05*	0.02 $\pm$ 0.00
樱花	31.57 $\pm$ 6.04	41.41 $\pm$ 4.83*	2.87 $\pm$ 0.41	8.99 $\pm$ 0.10*	0.03 $\pm$ 0.00
苦楝	26.97 $\pm$ 3.25	53.15 $\pm$ 0.79*	3.97 $\pm$ 1.43	9.34 $\pm$ 0.03*	0.02 $\pm$ 0.00*
杜仲	229.09 $\pm$ 17.07*	2.02 $\pm$ 1.45	0.40 $\pm$ 0.40	4.99 $\pm$ 0.13*	0.02 $\pm$ 0.00*
泡桐	386.33 $\pm$ 38.79*	31.31 $\pm$ 2.47*	4.07 $\pm$ 0.81	10.34 $\pm$ 0.55*	0.01 $\pm$ 0.00*
柿树	132.88 $\pm$ 36.91	2.78 $\pm$ 0.79	0.40 $\pm$ 0.40	9.02 $\pm$ 0.38*	0.01 $\pm$ 0.00*
桃树	172.95 $\pm$ 20.63*	1.59 $\pm$ 0.40	15.07 $\pm$ 5.06*	6.95 $\pm$ 0.17	0.02 $\pm$ 0.00
桑树	15.99 $\pm$ 1.88	20.09 $\pm$ 4.99*	5.74 $\pm$ 1.08*	11.57 $\pm$ 0.32*	0.03 $\pm$ 0.00
怪柳	236.16 $\pm$ 30.06*	17.63 $\pm$ 1.08	3.28 $\pm$ 0.41	13.24 $\pm$ 0.03*	0.02 $\pm$ 0.00
山楂	34.80 $\pm$ 7.80	11.20 $\pm$ 0.40	7.20 $\pm$ 2.50*	9.66 $\pm$ 0.10*	0.01 $\pm$ 0.00*
文冠果	12.91 $\pm$ 2.13*	6.86 $\pm$ 1.07	0.40 $\pm$ 0.40	12.35 $\pm$ 0.04*	0.02 $\pm$ 0.00
对照	75.37 $\pm$ 10.49	7.14 $\pm$ 1.37	0.40 $\pm$ 0.40	6.66 $\pm$ 0.11	0.02 $\pm$ 0.00

枯落叶 Litter	蔗糖酶 Sucrase/ mg $\cdot$ g $^{-1}$	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase/mg $\cdot$ 100g $^{-1}$	脲酶 Urease/ mg $\cdot$ g $^{-1}$	脱氢酶 Dehydrogenase/ mg $\cdot$ g $^{-1}$	蛋白酶 Protease/ mg $\cdot$ g $^{-1}$
法桐	35.65 $\pm$ 0.66	0.22 $\pm$ 0.01	0.12 $\pm$ 0.00*	0.10 $\pm$ 0.00*	4.42 $\pm$ 0.47*
国槐	42.58 $\pm$ 3.28*	0.36 $\pm$ 0.00*	0.12 $\pm$ 0.00*	0.13 $\pm$ 0.02*	3.24 $\pm$ 0.34
银杏	22.94 $\pm$ 0.36*	0.17 $\pm$ 0.01*	0.11 $\pm$ 0.01*	0.18 $\pm$ 0.02*	2.76 $\pm$ 0.14
垂柳	56.57 $\pm$ 2.87*	0.28 $\pm$ 0.01*	0.09 $\pm$ 0.00*	0.10 $\pm$ 0.00*	4.61 $\pm$ 0.40*
五角枫	41.86 $\pm$ 0.75*	0.31 $\pm$ 0.00*	0.06 $\pm$ 0.00*	0.09 $\pm$ 0.00*	5.37 $\pm$ 0.14*
紫叶李	53.21 $\pm$ 0.96*	0.34 $\pm$ 0.00*	0.11 $\pm$ 0.00*	0.13 $\pm$ 0.02*	2.63 $\pm$ 0.02
栎树	39.13 $\pm$ 8.31*	0.26 $\pm$ 0.01*	0.10 $\pm$ 0.00*	0.12 $\pm$ 0.01*	2.07 $\pm$ 0.14
梧桐	34.42 $\pm$ 0.69	0.16 $\pm$ 0.00*	0.13 $\pm$ 0.01*	0.05 $\pm$ 0.00	4.05 $\pm$ 0.12*
七叶树	29.10 $\pm$ 1.77	0.32 $\pm$ 0.01*	0.12 $\pm$ 0.00*	0.17 $\pm$ 0.02*	2.37 $\pm$ 0.00
樱花	30.32 $\pm$ 0.63	0.30 $\pm$ 0.01*	0.10 $\pm$ 0.00*	0.12 $\pm$ 0.00*	2.91 $\pm$ 0.05
苦楝	62.03 $\pm$ 2.00*	0.55 $\pm$ 0.02*	0.10 $\pm$ 0.00*	0.16 $\pm$ 0.01*	6.16 $\pm$ 0.09*
杜仲	45.50 $\pm$ 2.30*	0.18 $\pm$ 0.00	0.08 $\pm$ 0.00*	0.09 $\pm$ 0.00*	1.61 $\pm$ 0.14*
泡桐	41.76 $\pm$ 0.75*	0.31 $\pm$ 0.01*	0.12 $\pm$ 0.00*	0.07 $\pm$ 0.01*	4.50 $\pm$ 0.33*
柿树	40.58 $\pm$ 1.26*	0.21 $\pm$ 0.01	0.15 $\pm$ 0.00*	0.08 $\pm$ 0.00*	4.42 $\pm$ 0.03*
桃树	76.22 $\pm$ 0.98*	0.46 $\pm$ 0.00*	0.12 $\pm$ 0.00	0.07 $\pm$ 0.01	5.00 $\pm$ 0.45*
桑树	50.71 $\pm$ 0.67*	0.35 $\pm$ 0.00*	0.11 $\pm$ 0.00*	0.25 $\pm$ 0.01*	3.24 $\pm$ 0.16
怪柳	43.76 $\pm$ 1.47*	0.25 $\pm$ 0.01*	0.14 $\pm$ 0.00*	0.18 $\pm$ 0.00*	3.68 $\pm$ 0.03*
山楂	27.61 $\pm$ 0.57	0.24 $\pm$ 0.00*	0.11 $\pm$ 0.00*	0.16 $\pm$ 0.00*	2.28 $\pm$ 0.31
文冠果	29.10 $\pm$ 1.77	0.33 $\pm$ 0.01*	0.13 $\pm$ 0.00*	0.26 $\pm$ 0.01*	2.57 $\pm$ 0.39
对照	30.11 $\pm$ 0.72	0.20 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.01	0.04 $\pm$ 0.00	2.46 $\pm$ 0.47

用综合主成分分析法(CPCA)对枯落叶分解后土壤的18种生物化学性质指标较对照的提高率以及石油烃的降解率进行综合分析(由于不能通过pH判断土壤性质的恶化或改善,没有考虑pH指标)。通过SPSS19.0软件计算,共提取特征值大于1的主成分6个,以每个主成分特征值占6个主成分特征值之和的比例作为该主成分的权重系数,得到下述综合主成分计算公式:

$$F=0.282F_1+0.202F_2+0.173F_3+0.149F_4+0.102F_5+0.092F_6$$

式中: F 为枯落叶对油污土壤性质修复效应的综合主成分值($F>1$ 表明整体上有修复作用,反之则表明整体上具有恶化作用); F_1 主要反映枯落叶对碱解N、速效P和K、有机质含量以及蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性的修复效应; F_2 主要反映枯落叶对有效Cu含量、多酚氧化酶、蔗糖酶、脱氢酶和蛋白酶活性以及细菌数量的修复效应; F_3 主要反映枯落叶对有机质含量、过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶和脱氢酶活性的修复效应,以及对石油烃的降解能力; F_4 主要反映枯落叶对有效Cu、Zn和Mn含量的修复效应; F_5 和 F_6 则分别反映枯落叶对真菌和放线菌数量的提高效应。

根据综合主成分分析结果(表3),19种树种中,苦楝和桃树枯落叶对油污土壤的生物化学性质的修复作用最佳,其次为桑树、国槐、垂柳和五角枫枯落叶,紫叶李枯落叶再次,桤柳枯落叶对油污土壤生化性质的修复作用不明显;而银杏枯落叶总体上明显恶化了油污土壤的生物化学性质,其次为山楂、文冠果、梧桐和法桐枯落叶,七叶树、樱花和栎树的恶化作用较为轻微。

3 讨论

石油污染会显著降低土壤中速效养分的含量^[8],本研究则表明,多数城市绿化树种的枯落叶均对油污土壤大量和微量元素养分以及有机质含量具有显著

的提升作用。这与王国保等^[9]的研究结果一致,这可能是由于枯落叶含有较为丰富的养分,分解过程中释放的养分元素可迅速补充土壤中亏损的速效养分。刘五星等^[10]的研究表明有机残体的加入可增加油污土壤N、P营养物含量。然而本研究表明,枯落叶对油污土壤速效P和碱解N含量的补充作用明显差于其对速效K的补充效果,可能是由于K在植物体内以离子态形式存在,易于释放。而石油污染显著增加了土壤有机C的含量,土壤C/N和C/P均显著提高^[11],因此微生物在分解石油和枯落叶过程中需要固定大量的N和P以完成必要的生命活动,从而影响上述两种元素的整体释放。根据测定,多数枯落叶对油污土壤中速效P的改良效果均较差,表明在本试验条件下,石油烃降解过程对P的需求可能更大。本研究中多数枯落叶增加了土壤中有效态微量元素的含量,可能与土壤中较高的有机质含量有关^[12]。土壤微生物在降解石油烃过程中会产生羧酸类中间产物,可能会使pH呈降低趋势^[13],而由于受土壤pH降低影响(表2),土壤OH⁻减少,对金属离子的吸持和固定作用减弱,微量元素以有效态存在的含量所占比例大。部分枯落叶降低了有效Cu、Fe、Mn含量,可能是由于枯落叶本身及其形成的腐殖质对微量元素产生显著吸附或“钝化”作用,降低了其有效性^[9,14]。

枯落叶加入油污土壤后细菌受到的影响较为多样化,而放线菌和真菌的数量均不受显著影响或者显著增加。这可能是由于石油进入土壤后,其毒性胁迫造成对其抗性较弱的微生物类群生长受抑,一定程度上使微生物的数量和多样性下降^[15],其中细菌受到的影响较真菌更为显著^[16]。而枯落叶加入后,随着石油烃有害物质的降解和土壤养分状况的恢复,微生物种类和数量及其多样性也逐渐恢复正常。同时,真菌在石油烃降解和枯落叶分解、养分释放中均具有重要作用^[17-18],枯落叶的加入可能刺激了真菌的生长,因而也促进了石油烃的分解。此外,由于不同树种枯落叶可

表3 城市绿化树木枯落叶对油污土壤性质修复效应的综合主成分值

Table 3 Comprehensive principal component values of urban greening tree-litters remedying petroleum contaminated soil

枯落叶 Litter	CPCA-value F	枯落叶 Litter	CPCA-value F	枯落叶 Litter	CPCA-value F	枯落叶 Litter	CPCA-value F
法桐	-0.513 7	紫叶李	0.235 1	苦楝	1.809 9	桑树	0.536 0
国槐	0.498 7	栎树	-0.319 3	杜仲	-0.278 1	桤柳	0.059 3
银杏	-1.140 6	梧桐	-0.671 3	泡桐	-0.200 7	山楂	-0.996 4
垂柳	0.490 7	七叶树	-0.368 5	柿树	-0.287 1	文冠果	-0.720 6
五角枫	0.469 0	樱花	-0.319 7	桃树	1.717 2		

注:CPCA为综合主成分分析。

Note: CPCA indicates comprehensive principal component analysis.

能含有某些特定的次生代谢物质,这些代谢物对不同微生物具有各异的化感作用^[19],这必将增加微生物数量变化在油污土壤修复过程中的复杂程度。

土壤酶在石油烃降解和枯落叶分解过程中均发挥着重要作用,同时其活性也受到后两者的反馈影响。本研究表明,多数枯落叶均显著提高了过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、碱性磷酸酶、脱氢酶和蛋白酶的活性,而显著抑制了多酚氧化酶的活性。这可能是由于枯落叶释放的养分促进了微生物的生长,加速了石油烃的降解从而降低了其对酶活性的抑制,因为研究^[20]表明石油污染物的存在将显著抑制土壤中脲酶的活性。同时,污染持续一段时间后,微生物和酶对石油毒性产生一定程度的适应,而石油烃本身提供了丰富的碳源^[21],使得微生物活性提高,酶活性随之上升。此外,枯落叶提供了大量的石油烃共代谢底物,这也刺激了对石油烃降解过程具有重要意义的过氧化氢酶和脱氢酶^[22]的活性。

不同枯落叶对土壤生物化学性质的影响存在显著差异,可能是由于其养分元素以及化感物质的种类和含量存在差异。由于石油污染微生物的活性在受到石油生物毒性胁迫的情况下往往同时受到 N、P 养分含量的限制,枯落叶释放的速效养分可能恢复受损的微生物活性。而由于不同养分含量的枯落叶加入土壤后,对土壤中亏损养分的补偿效果受到其养分含量、释放速率等多方面的影响,可能导致枯落叶对土壤微生物数量和活性的恢复作用呈现多样性的结果^[23],从而导致石油烃降解能力的差异。土壤中的脱氢酶等氧化还原酶类是参与石油烃降解的重要酶^[24],而这些降解酶的活性也受到微生物活性和土壤养分的控制,例如木质素降解酶(木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶等)对于石油烃分解具有重要作用^[17],其活性则受到 N 含量的影响^[24]。故而枯落叶性质的差异同时也将影响酶对石油烃的降解过程。此外,枯落叶分解将引起复杂的土壤生物化学过程,多种因素间往往存在相互作用,例如土壤氮、钾含量与土壤过氧化氢酶、脲酶、多酚氧化酶显著相关^[25],这些相互作用必然影响不同枯落叶对土壤生物化学性质的改良效应以及对石油烃的降解能力,其具体机理尚有待研究。

4 结论

绝大部分城市绿化树种枯落叶对油污土壤亏损的速效大量和微量养分(速效 P 除外)具有显著补充作用,增加了其有机质含量,显著改变了其酸碱度,并

促进了石油烃污染物的降解。多数枯落叶提高了油污土壤的过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶、脱氢酶、碱性磷酸酶和蛋白酶活性,但降低了多酚氧化酶活性。多数枯落叶促进了放线菌和真菌的生长,但不同枯落叶对细菌生长的影响存在较大差异。本文 19 种树木枯落叶中,对油污土壤性质综合修复效应最好的是苦楝和桃树枯落叶,较好的依次为桑树、国槐、垂柳、五角枫和紫叶李枯落叶,其他树木枯落叶效果不明显,有的甚至起到恶化作用。

参考文献:

- [1] 蔺 昕,李培军,台培东,等.石油污染土壤植物-微生物修复研究进展[J].生态学报,2006,25(1):93-100.
LIN Xin, LI Pei-jun, TAI Pei-dong, et al. Research progress in phyto-microbial remediation of petroleum-contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1):93-100.
- [2] 张 坤,徐圆圆,花秀夫,等.麦秸强化微生物降解石油烃及场地试验[J].环境科学,2009,30(1):237-241.
ZHANG Kun, XU Yuan-yuan, HUA Xiu-fu, et al. Process fundamentals and field demonstration of wheat straw enhanced biodegradation of petroleum[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):237-241.
- [3] 程立娟,周启星.野生观赏植物长药八宝对石油烃污染土壤的修复研究[J].环境科学学报,2014,34(4):980-986.
CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing. Phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soils using a wild ornamental plant *Hylotelephium spectabile* (Boreau) H. Ohba[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4):980-986.
- [4] 闫文德,梁小翠,郑 威,等.4 种绿化树种盆栽土壤微生物对柴油污染响应及对 PAHs 的修复[J].生态学报,2012,32(7):2279-2287.
YAN Wen-de, LIANG Xiao-cui, ZHENG Wei, et al. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using four greening tree species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(7):2279-2287.
- [5] Liu E K, Yan C R, Mei X R, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on soil chemical and biological properties in Northwest China[J]. *Geoderma*, 2010, 158(3):173-180.
- [6] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学出版社,1999.
LU Ru-kun. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [7] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1989.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and its study methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1989.
- [8] 张晓阳,李凯荣,张麟君.陕北石油污染对土壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2013,20(3):32-38.
ZHANG Xiao-yang, LI Kai-rong, ZHANG Lin-jun. Effect of petroleum contamination on physical and chemical properties of soils in oilfield of Northern Shaanxi[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3):32-38.

- [9] 王国保,刘增文,张晓曦,等.陕北石油区牧草秸秆对油污土壤生物化学性质的修复效应[J].草地学报,2013,21(6):1101-1108.
WANG Guo-bao, LIU Zeng-wen, ZHANG Xiao-xi, et al. Remediation effects of forage straws on the biochemical properties of petroleum-contaminated soil in the oil zone of Northern Shaanxi[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(6): 1101-1108.
- [10] 刘五星,骆永明,滕 应,等.石油污染土壤的生态风险评价和生物修复Ⅱ.石油污染土壤的理化性质和微生物生态变化研究[J].土壤学报,2007,44(5):848-853.
LIU Wu-xing, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Eco-risk assessment and bioremediation of petroleum contaminated soilⅡ. Changes in physico-chemical properties and microbial ecology of petroleum contaminated soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 848-853.
- [11] 王小雨,冯 江,王 静.莫莫格湿地油田开采区土壤石油烃污染及对土壤性质的影响[J].环境科学,2009,30(8):2394-2401.
WANG Xiao-yu, FENG Jiang, WANG Jing. Petroleum hydrocarbon contamination and impact on soil characteristics from oilfield momoge wetland[J]. *Enironmental Science*, 2009, 30(8): 2394-2401.
- [12] 魏孝荣,邵明安.黄土沟壑区小流域不同地形下土壤微量元素分布特征[J].环境科学,2009,30(9):2741-2746.
WEI Xiao-rong, SHAO Ming-an. Distribution of micronutrients in soils as affected by landforms in a loessial gully watershed[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(9): 2741-2746.
- [13] Dell'Anno A, Beolchini F, Gabellini M, et al. Bioremediation of petroleum hydrocarbons in anoxic marine sediments: Consequences on the speciation of heavy metals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(12): 1808-1814.
- [14] 吴炳孙,吴 敏,韦家少,等.橡胶人工林地土壤腐殖质组成与有效态微量元素含量的研究[J].热带农业科学,2009,29(3):4-9.
WU Bing-sun, WU Min, WEI Jia-shao, et al. Relationships between soil humus composition and available microelement content in rubber plantation[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2009, 29(3): 4-9.
- [15] Thavamani P, Malik S, Beer M, et al. Microbial activity and diversity in long-term mixed contaminated soils with respect to polyaromatic hydrocarbons and heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 99: 10-17.
- [16] Qasemian L, Guiral D, Ziarelli F, et al. Effects of anthracene on microbial activities and organic matter decomposition in a *Pinus halepensis* litter from a Mediterranean coastal area[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 148-154.
- [17] Wang C P, Sun H W, Li J M, et al. Enzyme activities during degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* in soils[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(6): 733-738.
- [18] Qasemian L, Guiral D, Belghazi M, et al. Identification of various lac-cases induced by anthracene and contribution to its degradation in a Mediterranean coastal pine litter[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(10): 1321-1328.
- [19] 吕 可,潘开文,王进闯,等.花椒叶浸提液对土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2006,17(9):1649-1654.
LÜ Ke, PAN Kai-wen, WANG Jin-chuang, et al. Effects of *Zanthoxylum bungeanum* leaf extract on soil microbe quantity and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1649-1654.
- [20] 李 慧,陈冠雄,杨 涛,等.沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J].应用生态学报,2005,16(7):1355-1359.
LI Hui, CHEN Guan-xiong, YANG Tao, et al. Impacts of petroleum-containing wastewater irrigation on microbial population and enzyme activities in paddy soil of Shenfu irrigation area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1355-1359.
- [21] Serrano A, Tejada M, Gallego M, et al. Evaluation of soil biological activity after a diesel fuel spill[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(13): 4056-4061.
- [22] 吴伟林,张秀霞,单宝来,等.不同处置方式对石油污染土壤理化性质和生物学特性的影响[J].石油学报(石油加工),2010,26(5):831-834.
WU Wei-lin, ZHANG Xiu-xia, SHAN Bao-lai, et al. Effect of different treatment methods on the physicochemical and biochemical properties of an oil polluted soil[J]. *Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section)*, 2010, 26(5): 831-834.
- [23] Mi C H, Liu Z W, Li Q, et al. Effect of litter decomposition on soil polarization in three typical planted pure coniferous forests in Loess Plateau, China[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2013, 15: 687-693.
- [24] Berg B, McLaugherty C. Plant litter[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [25] 熊明彪,田应兵,雷孝章,等.小麦生长期内土壤养分与土壤酶活性变化及其相关性研究[J].水土保持学报,2003,14(4):27-30.
XIONG Ming-biao, TIAN Ying-bing, LEI Xiao-zhang, et al. Dynamics of soil nutrition and soil enzyme activity and their relationships during wheat growth[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 14(4): 27-30.