

## 紫花苜蓿对油污土壤的耐胁迫响应及修复效果研究

徐艳, 王曙光\*, 南卡俄吾, 杨建强 (陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西西安, 710075)

**摘要** 近年来,土壤修复研究中植物修复技术以其过程简单、成本低廉和无二次污染等特点受到人们的广泛关注。目前已有不少试验研究表明,紫花苜蓿对石油类有机污染物具有较高的富集作用,是一种很有应用前景的土壤修复植物。通过大量文献调研,基于已有试验研究,综述紫花苜蓿对油污土壤的耐胁迫响应及修复效果研究现状,以期为后期紫花苜蓿石油污染修复研究提供一定借鉴。

**关键词** 紫花苜蓿;石油污染土壤;耐胁迫响应;修复效果

**中图分类号** X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)32-0115-03

## Stress Response and Remediation Effect of Alfalfa to Petroleum-polluted Soil

XU Yan, WANG Shu-guang\*, Namkha Norbu et al (Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd, xi'an, Shaanxi 710075)

**Abstract** Recently, phytoremediation technology has been widely concerned, and it has some advantages such as simple process, low-cost and no secondary pollution. At present, a lot of experimental researches showed that alfalfa could repair the petroleum-polluted soil efficiently. Alfalfa was a kind of soil restoration plant which could be applied widely in future. Through a large number of literature researches and based on the existing experiments, this paper summarized the stress response and remediation effect of alfalfa to petroleum-polluted soil to provide some reference for the later research by alfalfa of petroleum-polluted soil remediation.

**Key words** Alfalfa; Petroleum-polluted soil; Stress response; Remediation effect

石油被誉为“黑金”,是现代社会赖以生存与发展的血液。在石油生产、贮运、炼制加工及使用过程中,常常因事故、不正常操作及检修等原因,造成石油烃类的溢出和排放,对环境(土壤、地表和地下水)造成严重污染<sup>[1]</sup>。近年来,土壤修复研究的主要治理方式有物理修复、化学修复和生物修复。生物修复以其过程简单、成本低廉、无二次污染等特点受到人们的广泛关注。植物修复技术是一种很有潜力的环境修复技术,主要通过适生修复植物吸收、降解和挥发等方式减少石油类有机污染物在土壤中的含量,达到土壤修复的目的<sup>[2]</sup>。目前已有不少试验研究表明,草本植物紫花苜蓿对石油类有机污染物具有较高的修复作用,是一种很有应用前景的土壤修复植物。该研究主要通过大量文献调研,基于已有试验研究综述紫花苜蓿对油污土壤的耐胁迫响应及修复效果,以期为后期紫花苜蓿石油污染修复实践提供一定借鉴。

## 1 紫花苜蓿的特性和生态功能

苜蓿为多年生豆科草本植物,素有“牧草之王”之称,在世界范围内分布广泛<sup>[3]</sup>,原产于小亚细亚、伊朗、外高加索一带,经“丝绸之路”传入我国后,已有2 000多年栽培历史。据有关种植实践证明,紫花苜蓿具有以下生态功能<sup>[4]</sup>:①主根发达,通过机械穿插、根部代谢及产生大量分泌物等方式可有效疏松土壤,改善土壤通气状况、分散特性及团粒结构;耐干旱、耐瘠薄、耐刈割且适应性强;②营养价值高,适口性好,侧根生有大量根瘤,与根系共生的根瘤菌能将空气中的游离氮转化为易被植物利用的氮肥,具固氮作用,是一种改

良土壤、保持水土、改造环境的优良牧草;③可吸收、去除环境中的某些污染物,如石油类有机污染物、铜铅锌等重金属离子。

## 2 植物修复油污土壤的机理

植物修复是依据特定植物对某种环境污染物的吸收、超量积累、降解、固定、转移、挥发及促进根际微生物共存体等特性,修复土壤中有毒重金属、有机物、放射性核素等污染物。有机污染物的修复机理包括直接吸收、根系分泌物降解和挥发<sup>[5-6]</sup>。植物吸收主要是通过植物直接吸收污染物并将其转运蓄积到该植株的地上可收割部分;降解是植物本身及相关微生物和各种酶将有机污染物降解为毒性较弱或非植物毒性的代谢物;挥发是指与植物吸收相互联系,利用本身吸收、积累、挥发而减少土壤中的挥发性污染物<sup>[7-9]</sup>。

## 3 石油污染对紫花苜蓿生长指标的影响

就土壤而言,80%以上的落地原油被截留在50 cm以上的表层土壤中,逐渐积累导致土壤结构破坏,对植物生长造成负面影响<sup>[10]</sup>。油污土壤对植物种子发芽和幼苗生长的影响机理可能包括<sup>[11-12]</sup>:①形成油膜包裹种子,使种子处于缺水、缺氧状态,导致萌发率降低;②在植物根系上形成一层石油烃黏膜,阻碍其对营养元素的吸收和呼吸功能,甚至引起根系腐烂,某些有毒组分可直接进入植物体内对植物造成伤害;③破坏土壤结构,使土壤的透水性降低,阻碍植物生长;④幼苗养分失衡和生理脱水。由于土壤碳氮比增加,微生物从土壤中吸收大量氮素来合成体细胞,导致微生物与植物争夺土壤有效氮素,同时土壤颗粒吸附石油烃干扰了营养元素从土壤颗粒进到土壤溶液。

目前,对紫花苜蓿部分生长指标的影响研究主要通过将供试的石油类有机污染物与研究区附近无污染土壤混合,人为设置一定浓度梯度,进行紫花苜蓿盆栽试验(为主)或田间试验研究。在一定试验周期内定期测定不同污染浓度下紫花苜蓿的发芽时间、发芽率、株高、地上和根系干重等基本生

**基金项目** 陕西省土地工程建设集团内部科研项目(DJNY2017-14, DJNY2017-13)。

**作者简介** 徐艳(1989—),女,陕西韩城人,助理工程师,硕士,从事石油地质与污损土地修复方面研究。\*通讯作者,高级经济师,从事土地整治与污损土地修复方面研究。

**收稿日期** 2017-09-06

理指标来初步探索紫花苜蓿对石油污染的耐受性(表1、2)。随着不同地区土壤中原油浓度增大,紫花苜蓿发芽率和株高均受到抑制作用,且株高对石油等有机污染物的反应更为敏感,浓度越大,抑制作用越明显。张松林等<sup>[6]</sup>研究发现,紫花苜蓿种子发芽率与土壤中石油污染质量分数呈指数关系,随着浓度的增加仍具有一定发芽率,主要是由于种子结构具有多种物理和生化防范功能,能够有效阻止有毒物质的进入,因而土壤污染对种子发芽的毒害作用在一定范围内仅表现为部分抑制,只有土壤污染严重时,种子发芽才会完全被抑制。

表1 不同原油浓度下紫花苜蓿的发芽率<sup>[5,12-15]</sup>

Table 1 Germination rate of alfalfa under different crude oil concentrations

| 序号<br>No. | 供试土壤<br>Test soil | 原油浓度 Crude oil concentration//mg/kg |       |        |        |        |        |        |        | %    |
|-----------|-------------------|-------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|           |                   | 0                                   | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 20 000 | 25 000 | 30 000 | 35 000 |      |
| 1         | 延安杨家岭黄绵土          | 80.0                                | 86.7  | 80.0   | —      | 73.3   | —      | —      | —      | 73.3 |
| 2         | 中原油田土壤            | 56.3                                | 54.0  | —      | 50.3   | —      | 45.7   | —      | 41.3   | —    |
| 3         | 华北油田土壤            | 33.3                                | —     | 31.7   | —      | 25.0   | —      | 24.2   | —      | 21.7 |
| 4         | 广州市郊区农村粉壤土        | 93.3                                | 84.0  | 78.3   | 75.0   | —      | 72.0   | —      | —      | —    |

表2 不同原油浓度下紫花苜蓿的株高<sup>[5,12-15]</sup>

Table 2 Plant height of alfalfa under different crude oil concentrations

| 序号<br>No. | 供试土壤<br>Test soil | 原油浓度 Crude oil concentration//mg/kg |       |        |        |        |        |        |        | cm   |
|-----------|-------------------|-------------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
|           |                   | 0                                   | 5 000 | 10 000 | 15 000 | 20 000 | 25 000 | 30 000 | 35 000 |      |
| 1         | 延安杨家岭黄绵土          | 8.0                                 | 8.2   | 7.5    | —      | 6.8    | —      | —      | —      | 6.1  |
| 2         | 中原油田土壤            | 15.0                                | 13.1  | —      | 10.7   | —      | 8.3    | —      | 6.2    | —    |
| 3         | 华北油田土壤            | 28.0                                | —     | 20.0   | —      | 18.0   | —      | 18.0   | —      | 17.0 |
| 4         | 广州市郊区农村粉壤土        | 33.9                                | 32.0  | 25.0   | 21.0   | —      | 14.2   | —      | —      | —    |

#### 4 紫花苜蓿对石油污染土壤的修复效果研究

目前,大部分试验研究主要通过测定不同浓度石油污染下紫花苜蓿盆栽或田间试验周期内土壤或紫花苜蓿中总石油烃(TPH)、多环芳烃某一组分(菲、芘、苯并[a]芘、三氯联苯等)含量等来定量研究紫花苜蓿对石油污染的修复效果。

**4.1 紫花苜蓿单一修复** 李先梅等<sup>[13]</sup>结合华北油田原油污染实际情况,设置6种污染浓度0、10、20、30、40、60 g/kg,70 d后测定的紫花苜蓿石油烃降解率依次为0、59.00%、19.00%、33.00%、24.25%和10.00%。王丽萍等<sup>[14]</sup>以新疆农业大学试验田灰漠土为供试土壤,克拉玛依采油二厂原油为供试原油,设置原油浓度为0、6、12、34 g/kg,通过盆栽试验测定土壤石油烃降解率依次为0、87.70%、45.75%、21.31%。上述研究表明,当石油浓度超过10%时,紫花苜蓿降解率呈大幅下降,可以看出土壤中石油污染物浓度影响紫花苜蓿的降解率。一般随污染物浓度增大,植物生长发育会受到抑制,发芽率、株高及生物量等有所降低,对石油的去除率也相应降低,且浓度越大,影响越显著<sup>[15-16]</sup>。另外,赵首彩等<sup>[17]</sup>通过紫花苜蓿田间试验表明,紫花苜蓿非常适合修复石油污染土壤,且富集污染物主要位于植株地上部分叶部为主,茎部次之,便于收获、集中处理(表3)。

**4.2 紫花苜蓿-微生物联合修复** 因石油污染物较为复杂,植物单一修复效果有限,因此不少学者选取紫花苜蓿-

另外,植物株高和生物量是修复原油污染度的指示指标,一般认为相同时间内植物生长发育形成的生物量越大,修复效果越好。岳冰冰等<sup>[12]</sup>选取东北林业大学场地0~10 cm表土为供试土壤,选取大庆油田原油为供试原油,对0、2 500、5 000、7 500 mg/kg石油污染梯度下紫花苜蓿的叶片数、生物量、可溶性蛋白、淀粉和叶绿素等进行了测定,结果发现随浓度增加,叶片数和生物量在超过5 000 mg/kg时大幅减小;而可溶性蛋白和淀粉含量先增后减,叶绿素含量增加。可能原因是为了适应石油污染胁迫,紫花苜蓿产生了更多的营养物质以维持正常代谢。

微生物联合修复技术进行试验研究。刘世亮等<sup>[18]</sup>选取中科院南京土壤研究所常熟农业生态试验站潜育水耕人为土作为供试土壤,以苯并芘为石油污染物,苏格兰球囊霉为丛枝菌根真菌展开研究,试验结果如表4,当不种植物时,在相同苯并[a]芘浓度下,接菌与不接菌处理下降解率几乎没有区别,说明在没有寄主植物时,单纯接入菌根真菌并不起作用。而在种植紫花苜蓿后,同一浓度下苯并[a]芘降解率显著增加,且接菌处理后降解率明显高于不接菌处理,说明接菌使紫花苜蓿根际土壤中苯并[a]芘的降解进一步得到了强化。

表3 紫花苜蓿各部位对石油污染物去除率和富集率<sup>[19]</sup>

Table 3 Removal rates and enrichment rates of oil pollutants in different parts of alfalfa

| 紫花苜蓿部位<br>Parts of alfalfa | 石油污染物去除率<br>Removal rates<br>of oil pollutants | 石油污染物富集率<br>Enrichment rates of<br>oil pollutants |
|----------------------------|--|---|
| 叶部 Leaf                    | 35.10~93.86                                    | 33.47~86.16                                       |
| 茎部 Stem                    | 6.07~21.95                                     | 5.78~20.15  |
| 根部 Root                    | 0.85~10.69                                     | 0.76~9.82   |

孙向辉等<sup>[19]</sup>研究PCB28(2,4,4-三氯联苯)胁迫下接种根瘤菌(野生型、突变株)对紫花苜蓿吸收转运PCB28及抗PCB28污染能力的影响。研究发现接种根瘤菌有助于缓解PCB28对植物生长的抑制作用,促进其吸收转运,同时,接

种野生型根瘤菌可有效增强紫花苜蓿的固氮能力,有效吸收利用氮素,提高其各部位生物量和对 PCB28 的吸收富集量。

表 4 不同试验处理下紫花苜蓿对苯并[a]芘的降解率<sup>[17]</sup>

| 处理组<br>Treatment                      | 苯并[a]芘浓度<br>B[a]P concentration//mg/kg |      |       |
|---------------------------------------|--|------|-------|
|                                       | 1                                      | 100  | 1 000 |
|                                       | %                                      |      |       |
| 空白组 Control                           | 55.0                                   | 53.0 | 34.0  |
| 微生物 Microorganism                     | 54.0                                   | 53.0 | 33.0  |
| 紫花苜蓿 Alfalfa                          | 76.0                                   | 78.0 | 53.0  |
| 紫花苜蓿 + 微生物<br>Alfalfa + Microorganism | 86.2                                   | 86.6 | 57.0  |

4.3 施肥 - 紫花苜蓿联合修复 张松林等<sup>[6]</sup>以西北师范大学校园清洁区土壤为供试土壤,以塔里木盆地原油为供试原油,施加底肥后进行人工石油污染土壤植物修复田间试验发现,土壤石油污染尽管存在一定程度的自然降解,但是紫花苜蓿的植物修复作用依然很显著;种植紫花苜蓿对石油污染土壤具有很好的修复效果,且施肥有助于促进紫花苜蓿对土壤中石油污染物的去除<sup>[20]</sup>(表 5)。

表 5 不同试验处理下紫花苜蓿对石油的降解率<sup>[6]</sup>

| 处理组<br>Treatment               | 原油浓度 Crude oil<br>concentration//mg/kg |       |       |
|--------------------------------|--|-------|-------|
|                                | 772                                    | 2 315 | 3 858 |
|                                | %                                      |       |       |
| 空白组 Control                    | 21.4                                   | 54.2  | 45.6  |
| 微生物 Microorganism              | 94.0                                   | 91.7  | 91.1  |
| 紫花苜蓿 + 施肥 Alfalfa + Fertilizer | 95.1                                   | 96.1  | 95.3  |

## 5 问题与展望

大量文献调研发现,目前对紫花苜蓿部分生长指标的影响及修复效果主要通过将供试的石油类有机污染物与研究区附近无污染土壤混合,人为设置一定浓度梯度,以盆栽试验为主。如何将初步试验成果进一步规模化应用到工程实践中,还需进一步展开研究。

石油主要是由各种烃类组成的复杂混合物,组分包括饱和烃、芳香烃和非烃类化合物,各组分解先后顺序为饱和烃 > 环烷芳香烃 > 多环芳烃 > 非烃类化合物<sup>[21]</sup>。目前,大部分研究以紫花苜蓿对总石油烃降解率为主,而对石油中各组分的降解率研究较少,尤其是紫花苜蓿对土壤中难以降解的多环芳烃类污染物的修复效果如何需要进一步展开研究。

种植紫花苜蓿对石油污染土壤具有很好的修复效果,且

已有部分研究表明,紫花苜蓿 - 微生物联合修复、施肥 - 紫花苜蓿联合修复、紫花苜蓿与其他修复植物混种等对油污土壤的修复效果更好,因此,后期可大量展开以紫花苜蓿为主要修复植物的多种方式(微生物、施肥、混种等)的联合修复研究。

综上所述,紫花苜蓿对不同地区不同浓度的石油污染土壤都具有较好的修复效果,是进行植物修复研究的优选物种。在进行试验研究中,需要尽可能结合研究区石油污染土壤的实际情况,建立最适合该区域的植物修复技术体系,以达到最佳的试验效果。

## 参考文献

- [1] 刘继朝. 中原油田石油污染土壤生物修复技术研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
- [2] 李先梅, 肖易, 吴芸紫, 等. 石油污染土壤植物修复技术研究及展望[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(2): 529 - 531.
- [3] 邹亚丽, 王廷璞, 林燕飞. 黄土高原主要土壤污染物对紫花苜蓿的影响[J]. 饲料工业, 2010, 31(18): 61 - 64.
- [4] 范兆乾. AtATM3 和 CYP2E1 基因增强转基因紫花苜蓿抗重金属和有机物能力研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013.
- [5] 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 等. 6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1125 - 1130.
- [6] 张松林, 董庆士, 周喜滨, 等. 人为石油污染土壤紫花苜蓿田间修复试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 47 - 50.
- [7] 唐景春. 石油污染土壤生态修复技术与原理[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1 - 3.
- [8] 张麟君, 李凯荣, 张晓阳. 陕北黄土高原不同植物对石油污染物的吸收与积累[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(8): 110 - 116.
- [9] 山宝琴, 屈萌萌, 李皎, 等. 丛枝菌根真菌与植物共生修复陕北石油污染土壤[J]. 草业学报, 2016, 25(7): 87 - 94.
- [10] 彭胜巍. 石油污染土壤的花卉植物修复研究[D]. 天津: 南开大学, 2009.
- [11] 时腾飞, 刘增文, 田楠, 等. 黄土区石油污染对土壤及豆科灌草植物的潜在影响[J]. 草地学报, 2013, 21(2): 295 - 300.
- [12] 岳冰冰, 李鑫, 任芳菲, 等. 石油污染对紫花苜蓿部分生理指标的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(2): 236 - 239.
- [13] 李先梅, 肖易, 吴芸紫, 等. 华北油田石油污染土壤的修复植物筛选[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 14 - 18.
- [14] 王丽萍, 朱新萍, 董双快, 等. 苏丹草与紫花苜蓿对新疆原油污染土壤的响应[J]. 土壤修复, 2015, 34(11): 145 - 148.
- [15] 时腾飞. 陕北黄土区石油污染对土壤和豆科灌草植物的影响及修复[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [16] 祁迎春, 王建, 王宏, 等. 陕北 7 种杂草种子对石油污染的耐受性研究[J]. 环境科技, 2014, 27(3): 5 - 9.
- [17] 赵首彩, 张松林, 董庆士. 紫花苜蓿修复石油污染土壤试验效果影响[J]. 农村经济与科技, 2012, 23(7): 173 - 174.
- [18] 刘世亮, 骆永明, 丁克强, 等. 苯并[a]芘污染土壤的丛枝菌根真菌强化植物修复作用研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 336 - 340.
- [19] 孙向辉, 腾应, 骆永明. 接种根瘤菌对紫花苜蓿吸收转运三氯联苯 PCB28 及抗 PCB28 污染能力的影响[J]. 河南农业科学, 2014, 43(3): 65 - 69.
- [20] 曹生宪. 几种植物对菲、芘污染土壤的修复效应与机制分析[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [21] 万甜甜. 土壤中多环芳烃纵向迁移及生物降解过程的分异作用研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.

(上接第 114 页)

- [13] 薛菁芳, 高艳梅, 汪景宽, 等. 土壤微生物量碳氮作为土壤肥力指标的探讨[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 247 - 250.
- [14] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 116 - 121.
- [15] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物

量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469 - 472.

- [16] 吕殿青, 张树兰, 杨学云. 外加碳、氮对黄绵土有机质矿化与激发效应的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(3): 423 - 429.
- [17] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469 - 472.