

## 石油污染盐碱土壤生物修复模式研究

王静兰<sup>1</sup>, 汪志荣<sup>2\*</sup>, 冀大选<sup>3</sup> (1. 天津市蓝宇科工贸有限公司, 天津 300384; 2. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384; 3. 天津市环欧半导体材料技术有限公司, 天津 300384)

**摘要** [目的]寻找适宜的石油污染盐碱土壤的野外生物修复模式。[方法]以实验室前期保存和新筛选的石油降解细菌菌群为基础, 制备固体菌肥, 首先在室内条件下研究 C:N:P、菌肥施入量对降解率的影响, 并将菌肥施入量、植物种类、土壤翻耕对野外土壤污染修复效果的影响进行试验研究。[结果]菌肥的降解特性决定了石油污染物的降解效率, 无效的菌肥在室内外试验中都会削减石油污染物的修复效果; 在适宜的土壤 C:N:P 条件下, 新鲜菌肥的施入量增加, 可有效提高石油污染物的降解率。足够的菌肥施入量能够在短期内(10~20 d)发挥高效降解作用。在野外修复模式研究中, 翻耕对扰动盐碱土壤的石油污染修复作用有限, 土著优势植物碱蓬比苜蓿更适于植物-微生物的联合修复。[结论]在野外条件下, 适宜的盐碱土壤石油污染修复模式为碱蓬+10%新鲜菌肥+不翻耕+营养(C:N:P=100:5:3)。

**关键词** 盐碱土壤; 石油污染; 固体菌肥; 石油降解率; 生物修复模式

**中图分类号** S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)21-0049-05

## Study on Bioremediation Mode of Saline Soil Contaminated by Petroleum

WANG Jing-lan<sup>1</sup>, WANG Zhi-rong<sup>2\*</sup>, JI Da-xuan<sup>3</sup> (1. Tianjin Lanyu Science and Technology Industry Trade Co. Ltd., Tianjin 300384; 2. College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384; 3. Tianjin Huanou Semiconductor Material Technology Co. Ltd., Tianjin 300384)

**Abstract** [Objective] To find a suitable bioremediation model for petroleum contaminated saline soil. [Method] Based on the oil-degrading bacteria flora saved by experiment previously and screened freshly, the solid fertilizer was prepared. The effect of C:N:P and the quantity of solid fertilizer on oil-degradation rate and amount of microbe were studied, and the impact of quantity of solid fertilizer applied, kinds of plant, tillage on remediation of contaminated soil in the field were studied by experiment. [Result] Degradation characteristics of fertilizer determined the degradation efficiency of petroleum pollutants, remediation invalid fertilizer will reduce oil pollutants in both indoor and outdoor test. In the soil C:N:P under appropriate conditions, the fresh fertilizer application amount increased, which can effectively improve the degradation of oil pollutants. Enough fertilizer can play a role the degradation in the short term (10-20 d). In the field remediation model, the effect of tillage on the remediation of contaminated saline soil was limited. The indigenous dominant plant *Suaeda glauca* was more suitable for phytoremediation than *Medicago sativa*. [Conclusion] Under field conditions, the appropriate bioremediation mode for saline soil contaminated by oil was *Suaeda glauca* + 10% fresh bacterial fertilizer + no tillage + nutrition (C:N:P=100:5:3).

**Key words** Saline soil; Petroleum contamination; Solid fertilizer; Oil degradation rate; Bioremediation mode

盐碱土壤的石油污染修复较单一的石油污染复杂和困难, 单一的修复措施很难达到理想的效果, 因此在实际污染土壤修复过程中, 寻求适宜的修复模式十分必要。生物修复是目前国际上公认的较有前途的土壤污染修复方法之一<sup>[1-2]</sup>, 相对于物理法和化学法, 生物修复则对石油污染物的降解更为彻底, 且可以避免土壤环境的二次污染, 因此越来越受到人们的重视<sup>[3-4]</sup>。

从石油污染盐碱土壤的生物修复机理来看, 可将生物修复模式归纳为生物强化、生物刺激及二者的组合 3 种模式<sup>[5]</sup>。近年来, 将菌肥用于生物强化修复取得了一定成果<sup>[6]</sup>。固体菌肥中微生物对环境适应能力较强, 可极大地提高土壤修复效果<sup>[7-12]</sup>。Wang 等<sup>[13]</sup>以从大港石油污染土壤筛选的石油降解细菌菌群为基础, 制备固体菌肥并用于轻盐土的修复, 60 d 修复期结束后, 石油降解率达 52.91%。Zhang 等<sup>[14]</sup>以草炭为固体材料, 与 2 种石油降解菌混合制成固体菌肥, 用于修复辽河油田石油污染土壤, 60 d 后石油降解率达到 73.5%。Zhang 等<sup>[15]</sup>研究了土壤生物修复过程中, 菌肥施入量、C:N:P、温度等影响因素在不同阶段的影响顺

序, 结果表明, 不同降解时期菌肥施入量始终是降解主要影响因素。Gentili 等<sup>[16]</sup>采用壳质角素和壳聚糖作为载体来固定红球菌属, 进行原油污染海水修复, 发现固定化细菌对海水污染物的去除比游离菌提高了约 30%。笔者以实验室前期保存的石油降解细菌菌群活化后再驯化和在污染区筛选新制备的细菌菌群为基础, 以麦麸和锯末作为固体介质制备固体菌肥, 研究室内条件下的菌肥降解特性, 分析菌肥施入量、C:N:P 对降解率的影响, 然后将室内实验成果应用于野外生物修复模式, 寻找管理容易、简单易行的石油污染盐碱土壤的强化和刺激组合修复模式。

## 1 材料与方法

**1.1 试验材料** 试验用土壤取自大港油田第四采油厂附近土壤, 土壤理化性质分析(表 1)表明, 自然土壤未受石油污染, 为低盐碱土壤, 将其配制成石油浓度为 17 000 mg/kg 的污染土壤。

用于制备菌肥的液体菌剂为天津大港油田石油污染土壤筛选驯化后获得。将驯化后的液体菌剂扩大培养, 以 15% 的接种量分别接入灭菌的固体介质(麸皮和锯末质量比为 1:1)中, 维持 60% 含水率, 37 °C 下培养 3 d。

室内、野外试验均在第 0 天、第 60 天时施入菌肥。首次菌肥是经实验室 4 °C、保存 240 d 的石油降解细菌菌群活化后再驯化制备; 而第 2 次菌肥为筛选驯化后立即制备。固体介质为麸皮和锯末(1:1)。尿素调节土壤 C:N:P。

**基金项目** 天津市应用基础及前沿技术研究计划项目(11JCZDJ25000)。  
**作者简介** 王静兰(1990—), 女, 山东青州人, 硕士研究生, 研究方向: 环境污染治理和土壤修复。\* 通讯作者, 教授, 博士, 从事土壤生态修复研究。  
**收稿日期** 2017-06-28

表1 自然土壤和试验用土壤的理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of soil used in experiment and natural soil

土壤类型 Soil type	有机质 Organic matter %	全氮 Total nitrogen %	全磷 Total phosphorus %	全盐量 Total salt content %	pH	含油量 Total oil content mg/kg
大港油田土壤 Dagang oil field soil	1.220	0.103	0.068	0.328	8.74	0
试验用土壤 Test soil	4.400	0.103	0.068	0.402	8.06	17 000

**1.2 试验方法** 室内试验土壤的 C:N:P 分别为 100:4:3 (原始比例)、100:5:3、100:10:3、100:15:3、100:20:3; 菌肥施入量分别为 0 (CK)、5%、10%、15%。试验在直径 15 cm、高 15 cm 的盆钵中进行, 装土 1.5 kg/盆, 2 个平行, 室温, 土壤水分维持 20% 左右。

野外试验地点为天津理工大学校园草地, 修复试验时间为 6 月 2 日—10 月 23 日。试验花盆中填入 C:N:P 为 100:5:3 的土壤, 装土量为 2 kg/盆。

野外试验共设 4 个方案, 每个方案设 3 个处理, 共 12 个处理, 分别为碱蓬—无菌肥—不翻耕、碱蓬—10% 菌肥—不翻耕、碱蓬—15% 菌肥—不翻耕、碱蓬—无菌肥—翻耕、碱蓬—10% 菌肥—翻耕、碱蓬—15% 菌肥—翻耕、苜蓿—无菌肥—不翻耕、苜蓿—10% 菌肥—不翻耕、苜蓿—15% 菌肥—不翻耕、苜蓿—无菌肥—翻耕、苜蓿—10% 菌肥—翻耕、苜蓿—15% 菌肥—翻耕。修复时间 105 d, 定期采样测定石油含量、植物株高和发芽率。采用三氯甲烷萃取—重量法测定石油含量。

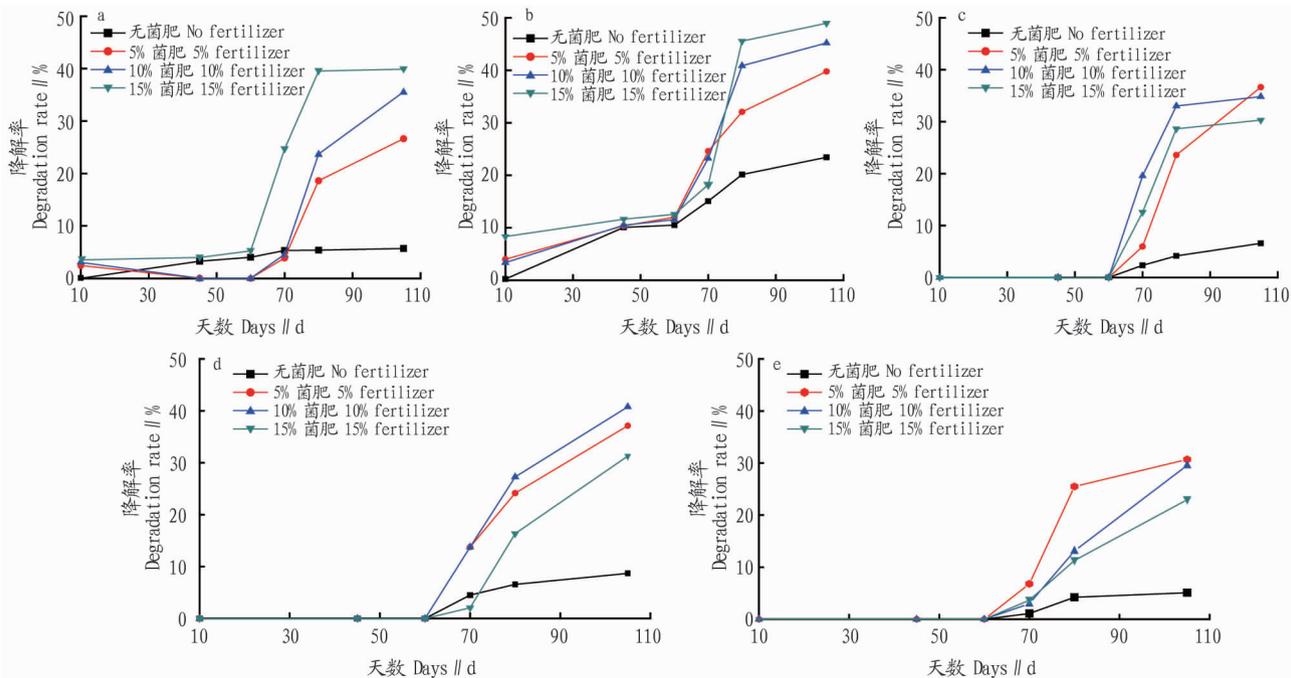
## 2 结果与分析

### 2.1 菌肥降解特性的室内研究

#### 2.1.1 菌肥施入量对土壤石油降解率的影响。在同一

C:N:P, 不同菌肥施入量条件下, 石油降解率均呈现出随着修复时间的延长而逐渐增加的趋势 (图 1)。0~60 d, 随着菌肥施入量增大, 降解率均维持在较低水平。这是由于初期投入的菌肥保存时间过长而失效, 这一阶段主要依靠土著微生物的降解, 但引入的外源菌肥会对土著微生物产生竞争作用, 导致有效降解的微生物并不占主导作用。与无菌肥相比, 由新鲜菌液制成的菌肥对土壤石油的降解作用明显。表现为, 在 60 d 加入由新鲜菌液制成的菌肥后, 初期降解率升幅较大, C:N:P=100:5:3、10% 菌肥施入量条件下 60~80 d 石油降解率由 11.55% 提升至 40.87% (图 1b)。这也表明菌肥微生物在石油污染物修复中起着决定性作用。

不同 C:N:P 比条件下, 菌肥施入量对降解率影响不同。表现为, 低 C:N:P 比 (图 1a、图 1b) 条件, 随着菌肥施入量的增大, 石油降解率增加, 但菌肥施入量达到 10% 后再增加施入量并不能保证降解率得到显著增加; 而较高比例 (图 1c~图 1e) 条件下, 当菌肥施入量达到 10% 后再增加菌肥施入量, 石油降解率呈现出增反降的趋势, 表现为 10% 甚至 5% 的施菌肥量土壤的降解率最大。这说明石油污染土壤的生物修复受到菌肥施入量和 C:N:P 的共同影响。在适宜的 C:N:P 比下, 新添加菌肥微生物能够尽快适应土壤环境并在



注: a. 100:4:3; b. 100:5:3; c. 100:10:3; d. 100:15:3; e. 100:20:3

Note: a. 100:4:3, b. 100:5:3, c. 100:10:3, d. 100:15:3, e. 100:20:3

图1 菌肥施入量对石油降解率的影响

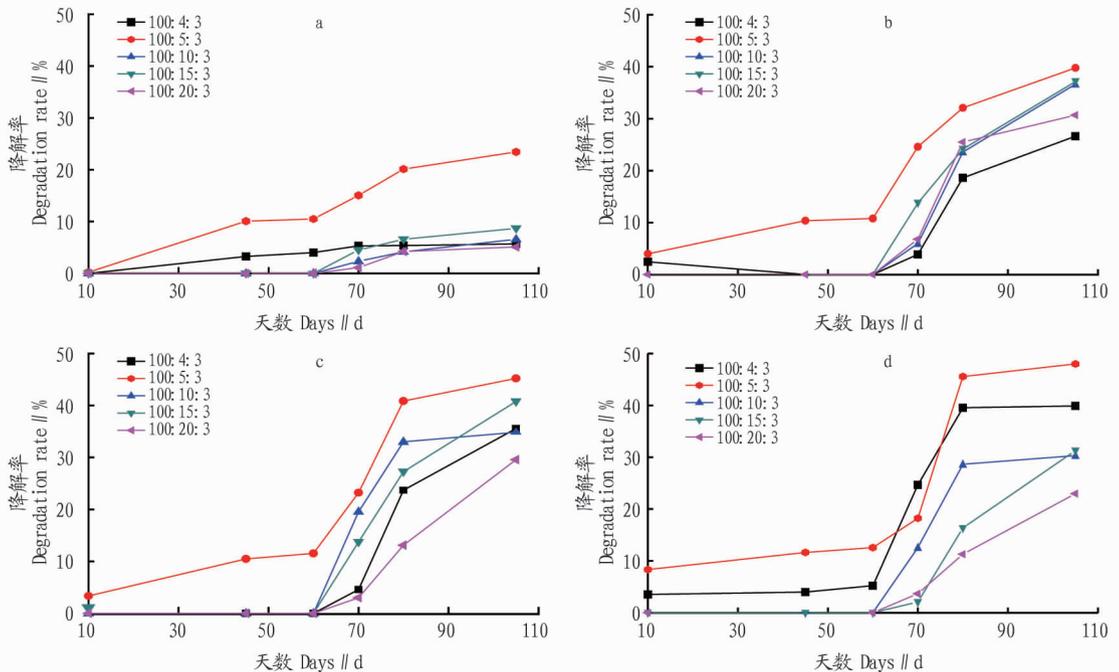
Fig. 1 Effects of fertilizer application amount on petroleum degradation rate

短期内发挥高效降解作用。

**2.1.2 C:N:P 对土壤石油降解率的影响。**从图 2 可见,同一施菌肥量条件下,土壤的石油降解率随着 C:N:P 比的增加呈现先增加后减小的趋势。表现在 10% 菌肥施入量条件下(图 2c),100:5:3 条件下的土壤石油降解率大于 100:4:3 条件下,这是由于 C:N:P 为 100:4:3 时,土壤氮肥含量不足,难以维持降解微生物代谢需求,降解能力减弱;而土壤氮肥过量,

会对降解微生物产生抑制作用,降解率下降。

由此可见,当土壤 C:N:P 满足微生物代谢需求时,菌肥中的微生物才能发挥降解作用。因此,在适宜 C:N:P 下,随着菌肥施入量的增加,降解率才能同步提升。综合室内试验条件,适宜菌肥降解的 C:N:P 为 100:5:3,相应的适宜菌肥施入量为 10%。因此,用于野外修复的 C:N:P 为 100:5:3,菌肥施入量设置为 10%、15%。



注:a. 无菌肥;b. 5% 菌肥;c. 10% 菌肥;d. 15% 菌肥

Note: a. No fertilizer, b. 5% fertilizer, c. 10% fertilizer, d. 15% fertilizer

图 2 C:N:P 对石油降解率的影响

Fig. 2 Effects of C:N:P on petroleum degradation rate

## 2.2 野外生物修复模式研究

**2.2.1 植物生长状况及石油降解率。**由表 2 可知,在含油量为 17 000 mg/kg、含盐量为 0.402% 的土壤中,碱蓬和苜蓿的生长均受到石油和盐碱的双重胁迫作用。表现在碱蓬 - 15% 菌肥 - 不翻耕、苜蓿 - 15% 菌肥 - 不翻耕在 80 d 的发芽率分别为 73.46%、64.42%。由于碱蓬对于石油和盐碱的耐受能力要优于苜蓿,因此碱蓬的生长状况要优于苜蓿。值得注意的是,施入菌肥对碱蓬和苜蓿都有提高发芽率的作用。但菌肥的施入对长势并没有显著的促进作用。碱蓬和苜蓿的发芽率在不菌肥时基本上在 22 d 左右达到最大并稳定,而施入菌肥会使碱蓬发芽期延长约 10 d。菌肥施入量对植株的株高影响不显著。

由图 3 可知,碱蓬和苜蓿对土壤石油降解率的变化规律基本相同(图 3a、图 3b)。在无菌肥施入条件下,修复初期二者降解率的差别并不明显,但在修复后期碱蓬组的降解率要整体高于苜蓿组。这是可能由于前期土壤根系尚不发达,不论是碱蓬还是苜蓿,二者和土著微生物形成的根际效应差别不大,但在修复后期,随着植物根系逐步发育良好,碱蓬作为大港的本土植物,与土著微生物之间的协同作

用更为明显。

有菌肥施入土壤中,在同一条件下,0~60 d 碱蓬和苜蓿组的降解率差别不大,但均明显低于无菌肥组。随着微生物逐渐适应环境,植物根系逐渐发育良好,60 d 后二次施入的菌肥加速了土壤石油的降解,降解率大幅提高。在同一条件下,对比碱蓬和苜蓿的修复效果可看出,碱蓬的修复效果优于苜蓿。这是由于碱蓬的根系生长状况明显优于苜蓿,植物 - 菌肥微生物的协同作用更为突出,因而更有利于菌肥微生物发挥降解作用。

**2.2.2 菌肥施入量对降解率的影响。**野外条件下,菌肥施入量对石油降解率的影响与室内条件相似。0~60 d 施入降解能力退化的菌肥后降解率明显小于无菌肥施入条件下的降解率。第 2 次施入新制备的石油降解菌肥(60 d)后,石油降解率在短期内(60~80 d)得以大幅度提升。表现在碱蓬 - 15% 菌肥 - 翻耕的降解率由 12.8% (60 d) 升高至 46.2% (80 d),80 d 后降解率逐渐趋于平缓;同时,不论是种植碱蓬还是苜蓿,降解率均随着菌肥施入量的增加而增加,但施入过量的菌肥降解率并未得到显著的提高。经计算,修复结束后,碱蓬 - 15% 菌肥 - 翻耕条件下降解率仅比碱蓬 - 10% -

翻耕降解率高出4.66%;苜蓿-15%菌肥-翻耕条件下降解率仅比苜蓿-10%菌肥-翻耕降解率高出2.01%(图3)。

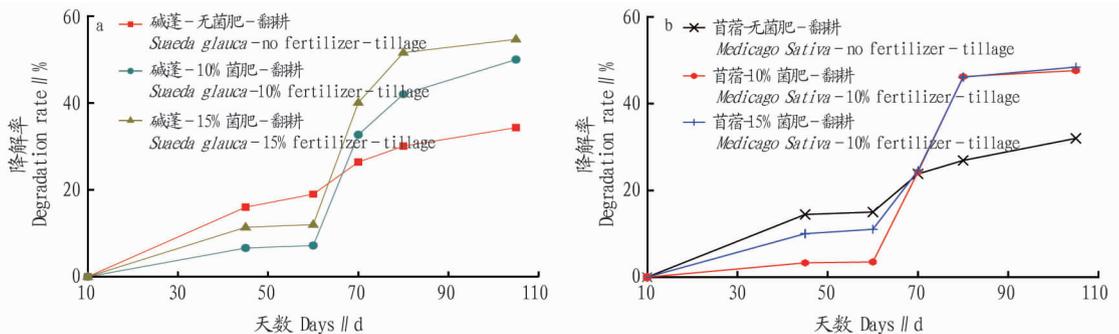
表2 碱蓬、苜蓿发芽率和株高对比

Table 2 Comparison of germination rate and plant height between *Suaeda glauca* and *Medicago sativa*

处理 Treatments	3 d		7 d		12 d		22 d	
	发芽率 Germination percentage %	株高 Plant height mm	发芽率 Germination percentage %	株高 Plant height mm	发芽率 Germination percentage %	株高 Plant height mm	发芽率 Germination percentage %	株高 Plant height mm
碱蓬-无菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -no fertilizer-no tillage	31.54	40.17	40.17	96.62	50.23	106.61	52.60	197.32
碱蓬-10%菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -10% fertilizer-no tillage	35.56	41.80	55.55	86.95	62.93	106.62	69.05	185.93
碱蓬-15%菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -15% fertilizer-no tillage	28.87	39.62	51.14	82.44	62.56	136.04	70.68	192.56
苜蓿-无菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -no fertilizer-no tillage	16.31	3.55	39.25	7.82	46.58	26.48	49.23	53.32
苜蓿-10%菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -10% fertilizer-no tillage	20.00	4.00	52.89	8.75	57.56	21.79	60.56	60.43
苜蓿-15%菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -15% fertilizer-no tillage	16.54	3.45	48.29	7.33	60.00	26.03	64.42	60.79

处理 Treatments	35 d		45 d		60 d		70 d		80 d	
	发芽率 Germination percentage %	株高 Plant height mm								
碱蓬-无菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -no fertilizer-no tillage	52.60	275.58	52.60	312.49	52.60	363.84	52.60	398.55	52.60	428.12
碱蓬-10%菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -10% fertilizer-no tillage	72.89	242.39	72.89	356.14	72.89	397.18	72.89	411.76	72.89	425.98
碱蓬-15%菌肥-不翻耕 <i>Suaeda glauca</i> -15% fertilizer-no tillage	73.46	263.28	73.46	333.54	73.46	389.73	73.46	400.20	73.46	436.45
苜蓿-无菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -no fertilizer-no tillage	60.56	85.57	60.56	92.11	60.56	100.02	60.56	121.70	60.56	132.40
苜蓿-10%菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -10% fertilizer-no tillage	60.56	84.21	60.56	90.29	60.56	116.89	60.56	126.53	60.56	139.07
苜蓿-15%菌肥-不翻耕 <i>Medicago sativa</i> -15% fertilizer-no tillage	64.42	85.79	64.42	91.58	64.42	119.83	64.42	139.11	64.42	143.78



注:a. 碱蓬组;b. 苜蓿组

Note:a. *Suaeda glauca* group. b. *Medicago sativa* group

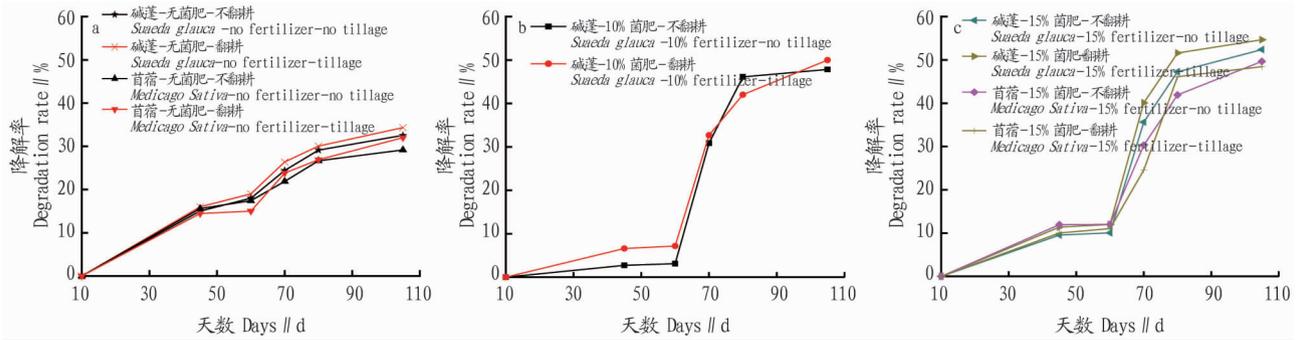
图3 种植碱蓬和苜蓿条件下菌肥施入量对石油降解率的影响

Fig. 3 Effects of fertilizer application amount on petroleum degradation rate under condition of planting *Suaeda glauca* and *Medicago sativa*

**2.2.3 翻耕对降解率的影响。**图4显示,在不同菌肥施入量条件下,翻耕对石油降解率的促进作用有限。修复结束后,碱蓬在无菌肥施入条件下,翻耕仅将降解率提高了1.8个百分点,碱蓬在10%菌肥施入条件下,翻耕仅将降解率提高约3.0个百分点,15%菌肥下仅将降解率提高约2.0个百分点。

**2.2.4 室内、野外生物修复效果对比分析。**从图5可以看

出,0~60 d不论是室内条件还是野外条件降解率呈相同的变化趋势,均随着修复时间的延长呈现缓慢增加的趋势。这说明土著微生物对土壤石油均有一定程度的降解。对比整个修复期间室内、野外同一条件的石油降解率不难发现,在野外条件下,植物的根系效应可以有效地提高石油降解率。105 d无菌肥施入时,野外条件比室内条件的降解率高出近10%,分别为23.44%和32.54%(图5a)。在有菌肥(10%、



注:a. 无菌肥;b. 10% 菌肥;c. 15% 菌肥

Note:a. No fertilizer, b. 10% fertilizer, c. 15% fertilizer

图4 不同菌肥施入量下翻耕对石油降解率的影响

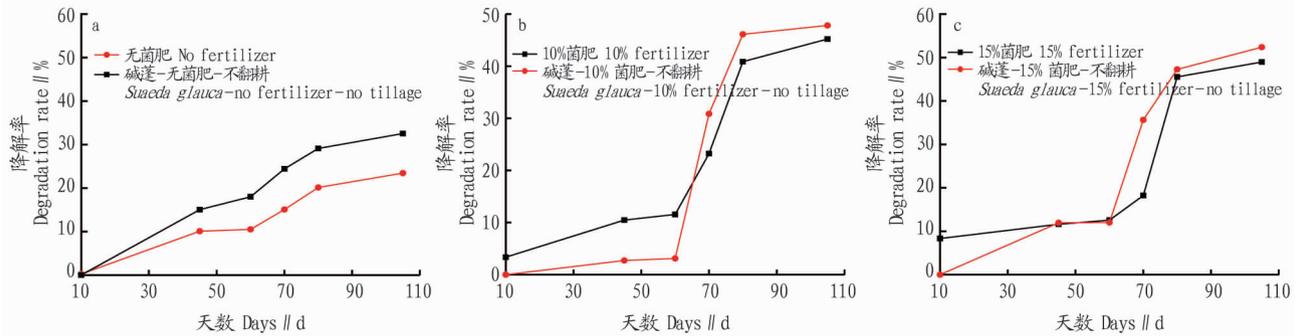
Fig. 4 Effects of plow on petroleum degradation rate under different fertilizer application amount

15%) 施入条件下, 0~60 d 从降解率来看, 野外种植植物的条件并未呈现出优势。这是由于一方面此时植物根系发育尚不成熟, 二是由于初次投入的无效菌肥抑制了土著微生物降解作用的发挥, 因此植物的根际效应并未呈现出优势。

60~105 d 施入新鲜菌肥后, 野外条件的降解率要高于室内。修复 105 d, 10% 菌肥条件下室内、野外的降解率分别为 45.21%、47.83% (图 5b), 15% 菌肥降解率分别为 48.97%、52.39% (图 5c)。这也表明土壤修复过程中, 有效

的降解微生物是土壤石油降解的主要动力, 在降解微生物发挥作用的前提下, 再施以适当的生物刺激 (例如温度、光照、植物) 才能进一步强化微生物的降解作用。退化的菌肥严重影响土著微生物的降解作用的发挥, 也弱化生物刺激手段的刺激能力。

与室内结果相似的是, 在一定的土壤营养条件下, 菌肥施入量达到一定量后进一步增加施入量对石油降解率的影响有限。



注:a. 无菌肥;b. 10% 菌肥;c. 15% 菌肥

Note:a. No fertilizer, b. 10% fertilizer, c. 15% fertilizer

图5 不同菌肥施入量下室内外修复效果对比

Fig. 5 Comparison of restorative effect between indoor and field under different solid fertilizer condition

### 3 结论

(1) 菌肥微生物的特性是石油污染盐碱土壤生物修复的决定性因素。长期保存的菌肥或菌液制备的菌肥都会退化, 严重影响土壤修复效果, 不宜使用; 有效的降解微生物才是土壤石油降解的主要动力, 起着强化作用, 而植物是辅助的刺激作用。

(2) C:N:P 是影响土壤生物修复的重要因素, 在适宜的 C:N:P 条件下, 随着菌肥施入量的增加, 石油降解率增加。该研究中石油污染盐碱土壤修复适宜 C:N:P 为 100:5:3, 适宜菌肥施入量为 10%。

(3) 野外生物修复模式研究表明, 扰动土壤条件下翻耕对降解的作用有限。

(4) 相同条件下, 作为土著耐盐碱植物碱蓬, 在降解率和生长状况均优于苜蓿。

(5) 石油 17 000 mg/kg、含盐量 4 000 mg/kg 土壤, 野外最适宜修复模式为植物-微生物联合强化与营养刺激模式, 具体措施为 C:N:P 为 100:5:3 + 种植碱蓬 + 10% 新鲜耐盐碱菌肥 + 不翻耕。

### 参考文献

- [1] AGAMUTHUA P, ABIOYEA O P, AZIZ A A. Phytoremediation of soil contaminated with used lubricating oil using *Jatropha curcas* [J]. Journal of hazardous materials, 2010, 179(1/2/3): 891-894.
- [2] JIA J P. The study on properties of microbiology and effect of bioremediation in petroleum-contaminated soil [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [3] GU C H, CHEN G Z. The study on ecological research conditions of biodegradation in petroleum-contaminated soil [J]. Ecological sciences, 2000, 19(4): 67-72.
- [4] LIU W X, LUO Y M, TENG Y, et al. Research advances in bioremediation of petroleum-contaminated soil [J]. Soil, 2006, 38(5): 634-639.

(下转第 69 页)

由表 4 可知,狐尾藻中的蛋白质含量(21.65%)比苜蓿的蛋白质含量(19.10%)还高 2.55 个百分点,粗脂肪含量比玉米低近 1.00 百分点。水葫芦作为净水明星也一度被用作污水治理的湿地植物,但由于水葫芦在净水效率、打捞以及营养价值方面均不及狐尾藻,且存在一定的生态入侵,致使目前对水葫芦的利用不多。从营养价值角度来看,水葫芦的粗蛋白、粗纤维、粗脂肪、磷的含量均远远不及狐尾藻的含量,因此在资源化利用方面,狐尾藻更具优势。狐尾藻与常用饲料原料相比,其粗蛋白含量比玉米、米糠、麦麸分别高 13.15、8.85、7.35 百分点;粗脂肪含量比米糠、麦麸分别高 0.36、0.46 百分点。粗纤维含量较高是狐尾藻营养成分中较突出的特点,因此它也常被用作草食家畜的饵料,也是解决怀孕母猪便秘的好“药材”。

表 4 几种常用饲料原料常规营养成分比较

Table 4 Comparison Nutrition ingredients of Several common feed %

名称 Name	粗蛋白 Crude protein	粗纤维 Crude fiber	粗脂肪 Crude fat	磷 Phosphorus
狐尾藻 <i>Myriophyllum</i>	21.65	32.64	4.36	0.36
水葫芦 <i>Eichhornia crassipes</i>	0.72	1.30	0.12	—
苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	19.10	22.70	2.30	0.51
玉米 <i>Zea mays</i>	8.50	2.60	5.30	0.25
米糠 Rice bran	12.80	6.80	4.00	0.93
麦麸 Wheat bran	14.30	6.50	3.90	0.92

(上接第 53 页)

- [5] WANG J L. Study on bioremediation mode of saline soil contaminated by petroleum[D]. Tianjin: Tianjin University of technology, 2014.
- [6] SU D, LI P J, JU J L, et al. Remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons in non-fluid medium with immobilized microorganism technique[J]. Chinese journal of applied ecology, 2006, 17(8): 1530 - 1534.
- [7] SU D, LI P J, WANG X, et al. Biodegradation of benzo[a]pyrene in soil by immobilized fungus[J]. Environmental engineering science, 2008, 25(8): 1181 - 1188.
- [8] KUYUKINA M S, IVSHINA I B, KAMENSKIKH T N, et al. Survival of cryogel-immobilized *Rhodococcus* strains in crude oil-contaminated soil and their impact on biodegradation efficiency[J]. International biodeterioration & biodegradation, 2013, 84: 118 - 125.
- [9] WANG Z Y, XU Y, WANG Y H, et al. Biodegradation of crude oil in contaminated soils by free and immobilized microorganisms[J]. Pedosphere, 2012, 22(5): 717 - 725.
- [10] MOHAMMADI A, NASERNEJAD B. Enzymatic degradation of anthracene by the white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on sugarcane bagasse[J]. Journal of hazardous materials, 2009, 161(1): 534 - 537.

### 3 小结

该研究结果表明,利用狐尾藻治理畜禽养殖废水效率高,是一种较理想的治污模式。狐尾藻中各营养物质含量较为丰富,特别是蛋白质含量较高,作为饲料原材料有很大的利用价值。此外,由于新鲜狐尾藻水分含量过高,作为规模化畜禽养殖的饲料原料,必须解决贮存问题。一般将狐尾藻干燥后碾制成粉,或者通过应用微生物工程和采用固体发酵技术,改善狐尾藻的水分含量,开发出以狐尾藻为原料、营养价值高、口味佳的微生物饲料产品。如何降低狐尾藻的含水率,对其进行一定的物化或生化预处理,再进行微生物消化,提高狐尾藻的能源转化率也是今后研究方向。

### 参考文献

- [1] 厉金炳,徐小燕,袁金钱,等. 利用狐尾藻综合治理规模养殖场污水的原理及效果分析[J]. 浙江畜牧兽医, 2014, 39(5): 72 - 73.
- [2] 国家环保局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200 - 285.
- [3] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 3 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 49 - 80.
- [4] 黄伟,苏子峰,韩亚平,等. 水葫芦营养成分及矿物质含量研究[J]. 饲料博览, 2011(7): 44 - 46.
- [5] 程志斌,宋任彬,张红兵,等. 水葫芦渣常规营养成分及矿物质含量分析[J]. 饲料研究, 2011(11): 80 - 82.
- [6] 张宏福. 动物营养参数与饲养标准[M]. 2 版. 中国农业出版社, 2010: 20 - 37.
- [11] LEBEAU T, BAGOT D, JÉZÉQUEL K, et al. Cadmium biosorption by free and immobilised microorganisms cultivated in a liquid soil extract medium: Effects of Cd, pH and techniques of culture[J]. Science of the total environment, 2002, 291(1/2/3): 73 - 83.
- [12] WANG X, LI P J, SONG S Z, et al. Immobilization of introduced bacteria and degradation of pyrene and benzo(α) pyrene in soil by immobilized bacteria[J]. Ecological sciences, 2006, 17(11): 2226 - 2228.
- [13] WANG Z R, ZHU X Y, WANG W L, et al. Study on the preparation and application of the petroleum-degrading solid fertilizer[J]. Journal of anhui agricultural sciences, 2014, 42(6): 1810 - 1812.
- [14] ZHANG R L, LI X G, HUANG G Q. An applied research on the on-site bioremediation of contaminated soil in oil field by solid bacterial reagent s [J]. Shanghai environmental sciences, 2009, 28(3): 97 - 100.
- [15] ZHANG X X, BAI J J, XU N N, et al. Study on influencing factors of immobilized microorganisms for remedying oil-contaminated soil[J]. Chinese journal of environmental engineering, 2013, 7(3): 1157 - 1162.
- [16] GENTILI A R, CUBITTO M A, FERRERO M, et al. Bioremediation of crude oil polluted seawater by a hydrocarbon-degrading bacterial strain immobilized on chitin and chitosan flakes[J]. International biodeterioration & biodegradation, 2006, 57(4): 222 - 228.

## 科技论文写作规范——缩略语

采用国际上惯用的缩略语。如名词术语 DNA(脱氧核糖核酸)、RNA(核糖核酸)、ATP(三磷酸腺苷)、ABA(脱落酸)、ADP(二磷酸腺苷)、CK(对照)、CV(变异系数)、CMS(细胞质雄性不育性)、IAA(吲哚乙酸)、LD(致死剂量)、NAR(净同化率)、PMC(花粉母细胞)、LAI(叶面积指数)、LSD(最小显著差)、RGR(相对增长率)、单位名缩略语 IRRI(国际水稻研究所)、FAO(联合国粮农组织)等。对于文中有些需要临时写成缩写的词(如表及图中由于篇幅关系以及文中经常出现的词而写起来又很长时),则可取各主要词首字母写成缩写,但需在第一次出现处写出全称,表及图中则用注解形式在下方注明,以便读者理解。