三种草坪草对石油烃污染土壤修复效应的模拟研究

丁 正 梁 晶 方海兰

（ 上海市园林科学规划研究院，上海 200232 ）

摘要：以红壤、黑土、棕壤、灰潮土和黄棕壤5种自制石油烃（TPH）污染土壤为研究对象，设置不同培养时间和TPH浓 度进行了狗牙根、黑麦草、高羊茅对 TPH 的修复模拟实验。研究结果表明:种植草坪后土壤 TPH 的降解率较对照更 高，且生物量较大的高羊茅和黑麦草处理TPH降解率高于生物量较小的狗牙根处理；随着培养时间增加，所有处理 TPH 降解率和降解菌数量呈先增加后降低的趋势， 但低浓度 TPH 污染土壤 TPH 降解率和降解菌数量及植物生物量 高于高浓度TPH污染土壤；土壤TPH降解率与茎鲜重和总鲜重呈极显著正相关，与茎干重和总干重呈显著正相关，但 与根鲜重和根干重无相关性;此外,受土壤C/N、C/P的影响，不同供试土壤TPH的降解率由大到小顺序为黑土 ＞黄 棕壤n灰潮土＞棕壤＞红壤。

关键词:TPH污染土壤;草坪；降解率;降解菌；生物量

SIMULATION STUDY ON REMEDIATION EFFECTS OF THREE KINDS OF

GRASS ON PETROLEUM HYDROCARBON COMTAMINATED SOIL

Ding Zheng Liang Jing Fang Hailan  
( Shanghai Institute of Landscape Gardening，Shanghai 200232 )

**Abstract：** Red soil, black soil, brown soil, calcareous chao soil and yellow-brown soil were selected to artificially prepare petroleum hydrocarbon contaminated soil in this paper， and the effect of bermuda grass， ryegrass and tall fescue on TPH were studied in the condition of different incubation time and different TPH concentration by pot experiment in the laboratory． The results showed that degradation rate of TPH in soil after planting grass were higher than the control, and TPH degradation rate of soil planting tall fescue and ryegrass treatment with higher biomass were higher than bermuda grass treatment with lower biomass． With the increase of incubation time, TPH degradation rate and number of TPH degrading bacteria firstly increased and then decreased, however, they were lower in higher TPH concentration soils． TPH degradation rate were extremely and positively correlated with fresh weight of stem and whole plant, and positively correlated with dry weight of stem and whole plant, but uncorrelated with fresh weight and dry weight of root． Moreover, TPH degradation rate in different TPH contaminated soil followed the order: black soil > yellow-brown soil n calcareous chao soil > brown soil > red soil, which might be ascribed to the different C /N and C /P．

**Keywords**: TPH contaminated soil; grass; degradation rate; degrading bacteria; biomass

**0**引言

石油开采、提炼、储存和运输过程中易造成土壤 石油烃**（** total petroleum hydrocarbon**,**TPH **）** 的 污 染**,**而 且井喷、泄漏、检修及车辆燃烧等也会导致土壤TPH 污染**,**对上海绿地土壤 TPH 调查表明**,**城市绿地土壤 存在不同程度的中 TPH 累积**,**道路绿地土壤 TPH 含 量最高切，TPH已逐渐成为目前环境中广泛存在的

\*上海辰山植物园专项（G102402**）**；上海市人才发展基金（2009044**）**。 收稿日期**:**2015 －11 －24 有机污染物之一**,**被美国 EPA 列为重点监控指标。 相关研究已经表明**［**2**］,**土壤受 TPH 污染后**,**不但可以 堵塞土壤孔隙**,**阻碍植物根系呼吸与吸收**,**导致农作 物减产**［**3-4**］,**而且可以通过植物吸收作用进入植物体 并在植物体内积累**,**间接通过食物链传递进入动物和 人体内**,**产生环境风险和人体健康风险**［**5-6**］,**而未被土 壤吸附的 TPH 还可渗入地下污染地下水**［**7**］**。因此**,** 如何对 TPH 污染土壤进行修复成为一个亟待解决的 环境问题。

近年来**，**由于植物修复具有美化景观、操作简 单及作用时间长等优点而备受关注**［**8-9**］**。其中**，**草 本植物生命力强**，**生长周期短**，**品种多且分布广泛**，** 日渐受到青睐**，**但目前研究多集中在单一草本植物 对土壤污染物的修复研究**［**10**］**。事实上**，**由于不同植 物甚至同一种植物的亚种或变种所产生分泌物及 酶的种类、数量、功效等不同**，**致使其对污染物降解 的影响也不同。因此**，**若能筛选出修复土壤 TPH 的 草坪植物**，**对综合提高城市生态环境质量将具有重 要作用。

鉴于此**，**本文选取红壤、黑土、棕壤、灰潮土和黄 棕壤5 种典型地带性土壤**，**通过自制 TPH 污染土壤 的方法**，**利用 狗牙 根 **(** Cynodon dactylon **)** 、黑麦 草 **(** Lolium perenne**)** 和高羊茅 **(** Festuca arundinacea**)** 3 种 我国城市绿化常用的草坪植物进行室内模拟试验**，**旨 在寻求适宜修复 TPH 污染土壤的草坪种类**，**并探讨 影响 TPH 修复效果的因素。

**1** 材料与方法

**1. 1** 土壤样品

供试土壤**:** 红壤采自云南昆明**，**黑土采自黑龙江 佳木斯**，**棕壤采自辽宁沈阳**，**灰潮土和黄棕壤采自上 海。土壤样品室温下风干后**，**过 2 mm 和 0. 149 mm 筛备用。各种土壤的基本理化性质见表1。

表 **1** 供试土壤基本理化性质

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 类别 | 黄棕壤 | 灰潮土 | 红壤 | 黑土 | 棕壤 |
| pH | 6. 61 | 8. 85 | 5. 51 | 6. 47 | 6. 70 |
| 有机质/ (g\*kg\_1**)** | 20. 09 | 13. 64 | 33. 71 | 142. 44 | 72. 76 |
| 全 N/ (g\*kg\_1**)** | 0. 99 | 0. 23 | 1. 57 | 6. 64 | 4. 25 |
| 全 P/(g-kg-1**)** | 0. 12 | 0. 23 | 0. 63 | 0. 48 | 0. 57 |
| 全 K/ (g-kg-1**)** | 9. 53 | 11. 97 | 1. 23 | 10. 62 | 12. 75 |
| C/N | 12. 25 | 12. 44 | 9. 93 | 34. 40 | 11. 77 |
| C/P | 97. 11 | 34. 40 | 31. 04 | 172. 13 | 74. 04 |

供试 TPH 污染土壤的制备**:** 称取一定量过 2 mm 筛的备用土壤**，**加入适量溶入丙酮的原油**，**并将其与 土壤充分混匀**，**待丙酮挥发后**，**放置一个月后备用。 供试 TPH 污染土壤中 TPH 的含量见表 2**，**与展览会 用地土壤环境质量评价标准相比，TPH污染土壤中 TPH 含量约为 A 级标准的 3 倍**(** A 级标准土壤 TPH 目标值为 1 000 mg/kg**) ，** 设为高浓度 TPH 污染土 壤**［**11**］**。此外**，** 为了进行植物对 TPH 污染程度不同的 土壤的修复效果，同时选取灰潮土制备了 TPH含量 为1 594 mg/kg的TPH污染土壤，约为A级标准限值 的 1. 5 倍**，** 设为低浓度 TPH 污染土壤。

表**2** 供试**TPH**污染土壤**TPH**含量 mg/kg

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤类型 | 黄棕壤 | 灰潮土 | 红壤 | 黑土 | 棕壤 |
| TPH 含量 | 2976 | 3320 | 3138 | 2987 | 3003 |

**1. 2** 供试植物 供试植物种子分别为狗牙根**(** Cynodon dactylon**)** 、黑麦 草 **(** Lolium perenne**)** 和高 羊 茅 **(** Festuca arundinacea**) ，** 且 种植前对 3 种植物种子进行的发芽 率实验显示**，** 狗牙根发芽率为**(** 84. 65 ±2.47**)** %**，** 发 芽时间为6 - 7天；黑麦草发芽率为(94. 45 ±

1.79)%，发芽时间为3 - 4天；高羊茅发芽率为 (93. 79 ±2. 39**)**%，发芽时间为3 ~4天。

**1. 3** 植物种植实验

将供试 TPH 污染土壤装入高 15 cm**，** 口径 18 cm 的塑料盆**，** 每盆装土 3 kg。 每种供试土壤草坪种植实 验均设4 个处理**，** 分别为**:** 未种植草坪的对照、种植狗 牙根处理、种植黑麦草处理和种植高羊茅处理**，** 且每 个处理设 4 个重复样。

实验均按每盆100 粒草种进行种植**，** 培养期间采 用称重法控制土壤水分含量**，** 使土壤中的含水率维持

在60% ~70%*。*在培养的第0,30,60,90天，用小型 不锈钢土钻随机钻取8 ~10个孔取混合土样备用。 其中采集的土壤鲜样用于TPH含量及TPH降解菌数 量的测定。 种植实验培养 90 d 后收获草坪植物进行 生物量测定。

**1. 4** 分析方法

土壤 TPH 提取和测定参照 HJ 350—2007**［**11**］，** pH、有机质、全氮、全磷和全钾参照麟林土壤分析方 法》测定**［**12**］**。 植物生物量鲜重采用蒸馏水洗净滤纸 吸干后称重的方法测定**;**植物生物量干重采用105 T 杀青15 min,65 °C烘至恒重后称重的方法测定。

TPH 降解菌作为一群以石油烃作为唯一碳源进 行生物降解的一类微生物**，** 本文采用经典的 MPN 法 测定［13］。

**2** 结果与讨论

**2. 1** 三种草坪对 TPH 的影响

**2. 1. 1** 三种草坪对 TPH 含量及降解率的影响 表3 表征了 3 种草坪植物对供试 TPH 污染土壤

TPH 含量及其降解率的影响**，** 可以看出**:** 虽然 TPH 污 染土壤放置一段时间后**，** 未种植草坪的对照和种植草 坪的处理 TPH 含量均有所降低**，** 但种植草坪的土壤

TPH 降解率大于对照**，** 且达到了极显著差异水平 (p <0.01**)**。其中，黄棕壤、灰潮土、红壤、黑土和棕 壤种植草坪后较对照组降解率分别增加了 6. 31% -

11.80% >3.43% - 11.40% >8.47% - 16.12% >3.31% - 10. 27%和& 07% ~19. 72%。这可能是由于TPH污 染土壤碳源增加**,**土壤中降解 TPH 土著微生物增多**,** 促使了土壤中污染物 TPH 的降解。如 Atlasrm 研究 认为**［**14**］,**正常环境条件下**,**烃降解菌一般只占微生物 总数的 1%**,**当污染物 TPH 进入环境后**,**烃降解菌占 微生物总数的比例可提高至10%**;** Song 等**［**15**］**更发现 污染物 TPH 能使其降解菌的比例超过90%。可见**,** 土壤 TPH 含量在一定范围内时**,**土壤自身具有降解 TPH 的能力。但由于土著微生物的生长比较缓慢、且 数量有限**,**土壤自身降解 TPH 的能力有限**［**16**］,**而种 植植物后可增加土壤TPH降解菌的数量。Chekol 等**［**17**］**的研究表明**,**所有种植植物的处理组**,**4 个月后 土壤中 PCBs 的生物降解性能均显著高于未种植物 的对照**,**这也是本研究种植草坪后土壤 TPH 降解率 增加的主要原因之一。但不同草坪对不同土壤的 TPH 影响不同**,**黄棕壤、红壤、黑土和棕壤中 TPH 降 解率顺序为高羊茅 > 黑麦草 > 狗牙根**;** 灰潮土 TPH 降解率顺序为黑麦草 >高羊茅 >狗牙根**;** 且配对 t 检 验表明高羊茅和黑麦草对 TPH 的降解率显著高于狗 牙根**(** t > t0. 05**)** 。

表 **3** 种植草坪植物后土壤 **TPH** 的降解情况

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 土样  类型 | 处理组 | 土壤初始TPH含收获草坪后土壤 TPH | | 降解率 /% |
| 量 / (mg'kg-1) | 含量 / (mg'kg-1) |
| 黄棕壤 | 对照 | 2 976 | 2 307 ±59. 62 | 22. 47 ±2. 00 |
|  | 狗牙根 |  | 2 119 ±36. 75 | 28. 78 ±1. 23 |
|  | 黑麦草 |  | 2 019 ±42. 15 | 32.15 ±1.42 |
|  | 高羊茅 |  | 1 956 ±35. 41 | 34. 27 ±1. 19 |
| 灰潮土 | 对照 | 3 320 | 2 588 ± 35. 85 | 22. 03 ±1. 08 |
|  | 狗牙根 |  | 2 475 ±35. 05 | 25. 46 ±1. 06 |
|  | 黑麦草 |  | 2 210 ±41. 99 | 33. 43 ±1. 26 |
|  | 高羊茅 |  | 2 414 ±36. 98 | 27. 29 ±1. 11 |
| 红壤 | 对照 | 3 138 | 2 891 ±67. 79 | 7. 88 ±2. 16 |
|  | 狗牙根 |  | 2 787 ± 65. 82 | 11.19 ±2.10 |
|  | 黑麦草 |  | 2 676 ± 65. 22 | 14.73 ±2.08 |
|  | 高羊茅 |  | 2 569 ± 36. 97 | 18. 15 ± 1. 18 |
| 黑土 | 对照 | 2 987 | 1 896 ±22. 71 | 36. 52 ±0. 76 |
|  | 狗牙根 |  | 1 643 ±52. 91 | 44. 99 ±1. 77 |
|  | 黑麦草 |  | 1 532 ± 37. 41 | 48. 69 ±1. 25 |
|  | 高羊茅 |  | 1 415 ±55. 69 | 52. 63 ±1. 86 |
| 棕壤 | 对照 | 3 003 | 2 674 ± 37. 87 | 10.95 ±1.24 |
|  | 狗牙根 |  | 2 432 ±36. 92 | 19.03 ±1.23 |
|  | 黑麦草 |  | 2 307 ±49. 55 | 23.17 ±1.65 |
|  | 高羊茅 |  | 2 082 ±48. 62 | 30. 67 ±1. 62 |

注:TPH降解率=*(*土壤初始TPH含量-收获草坪后土壤TPH含 量**)** /土壤初始 TPH 含量。

此外，种植3种草坪后,TPH的降解率大小均依 次为黑土 >黄棕壤〜灰潮土 >棕壤 > 红壤，除黄棕壤 和灰潮土 TPH 降解率差异不显著外**,** 其他土壤 TPH 降解率差异均达到了极显著水平(*p* <0- 01**),**这说明 土壤理化性质也是影响土壤 TPH 降解的主要因子之 一。通过供试土壤TPH降解率与pH、有机质、全N、 全P、全K、C/N及C/P的相关性分析(表4**),**可以看 出**,** 土壤 TPH 降解率与土壤 C/N 和 C/P 具有显著相 关性**(** r > r0.01**) ,** 这说明虽然土壤中 C、N、P、K 等营养 可在一定程度上影响微生物新陈代谢和繁殖**,** 但营养 元素之间的平衡是对微生物活性影响更大的因 素**［**18-19**］**。因为土壤被 TPH 污染后**,** 土壤可为植物生 长和微生物繁殖提供的 C 源增加**,** 而由土壤提供的 N、P、K 等营养则没有改变**［**20**］,** 这就导致土壤 C/N 和 C/P 失衡**,** 微生物活性不同**,**5 种供试土壤 TPH 降解 率也不同 。

表**4** 土壤 **TPH** 降解率与土壤性质相关性分析

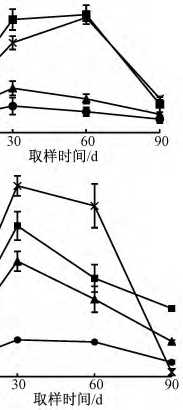
|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| pH | 有机质 | 全N | 全P | 全钾 | C/N | C/P |
| 0. 184 | 0. 700 | 0. 623 | 0. 294 | 0. 542 | 0. 901 \* | 0. 905 \* |

注**:** ＊＊为极显著相关**;** \* 为显著相关。

**2. 1. 2** 三种草坪对 TPH 降解菌的影响

众所周知**,** 根际微生物对土壤 TPH 的降解作用 是植物修复土壤 TPH 的主要方式之一**,** 因此**,** TPH 降 解菌数量常被用来直观反映其对 TPH 降解能力。5 种供试土壤种植不同草坪植物后 0**,** 30**,** 60**,** 90 d 内 TPH 降解菌数量变化见图1。可以发现**:** 除对照处理 TPH 降解菌处理变化较小以外**,** 所有种植草坪的处理 TPH降解菌数量的变化趋势较相似，即均表现为0 ~ 30天期间，TPH降解菌数量逐渐增加**；**30 ~60天期 间**,** TPH 降解菌数量基本处于稳定状态**;**60 ~90 天期 间**,** 土壤 TPH 降解菌数量快速下降。这可能一方面 由于土壤污染物 TPH 为微生物提供了丰富的碳源**,** 导致微生物大量繁殖**,** 另一方面种植草坪植物后**,** 植 物根系为微生物创造了适宜的生存环境**,**刺激根区微 生物的活性**［**21-22**］,** 因此 0 ~30 天期间 TPH 降解菌数 量表现为迅速增加的趋势**；**而30 ~60 天时**,** 植物与微 生物的生长繁殖可能达到了现有环境所能容许的最 大值**,** 因此 TPH 降解菌的数量也保持相对稳定**；**但到 60 ~90 天时**,** 由于微生物消耗了部分污染物 TPH 及 土壤有机质、N、P、K等营养，不能满足微生物需要**,** 从而导致 TPH 降解菌数量减少。这与于齐等的研究 结果相一致**,** 认为微生物在分解石油过程中需要固定 大量的 N 和 P 来完成其必要的生命活动**［**23**］**。

但就黄棕壤、红壤、黑土和棕壤而言**,**种植高羊茅

—•—对照；一▲—狗牙根；一■—黑麦早；一X —咼羊矛。

潢 -么：•

30252015105 030252015105 io fl卜 bflmx)誠報W雜塗 HdH(-HH-d.fmx)、\*緊W雀逾 HdH

30 60 90

取样时间/d

«■ - ■.// 505050505 O 44332211

(+14u.nmx)、\*報w^^Hdl

-O

0 5 0 5 0 5 0 5 0 5

5443 322 11

(44H-&11亠907)、\*隸齟^塗 Hdi (+14u.nmx)、\*報W離潼 Hdi

壤 // / 棕• • /y

5 0 5 0 5

7 6 4 3 1

30 60 90

取样时间/d

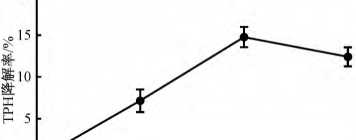
30 60 90

取样时间/d

图 1 降解菌数量随培养时间的变化

的处理 TPH 降解菌数量最大**，** 且明显大于其他处理**;** 而灰潮土在种植黑麦草的处理中 TPH 降解菌数量最 多**，** 这与上述 TPH 降解率的结果相一致**，** 这也可以进 一步从对棕壤种植高羊茅后土壤 TPH 降解率的监测 结果中得知**（** 图 2**） ，** 土壤中污染物 TPH 的降解率在 0 ~30 d 和 30 ~60 d 呈增加趋势**，**而到60 ~90 d 时呈 下降趋势**，** 这与 TPH 降解菌数量的变化规律相符 可见**，** 种植草坪植物后**，** 土壤 TPH 降解菌数量增加是 导致 TPH 降解率较大的主要因子之一。

20 r

图 2 棕壤种植高羊茅后土壤 TPH 降解率随时间的变化

**O'**

90

30 60

取样时间/h

**2. 1. 3** 不同 TPH 污染土壤对草坪生物量的影响 相关研究表明**，** 植物的生物量越大**，** 对污染物的 吸收利用越多**，**修复效果越好**，** 因此植物生物量是判 断植物是否适合用作修复植物的条件之一**［**24**］**。 表 5 为供试 TPH 污染土壤收获3 种草坪植物后茎和根的 干重鲜重**，** 可知**，** 所有供试土壤 3 种草坪干重鲜重顺 序为高羊茅 >黑麦草 >狗牙根。进行各草坪生物量 与供试土壤 TPH 降解率的相关性分析也表明**（** 表 6**） ，** 土壤 TPH 降解率与茎鲜重和总鲜重呈极显著正 相关**，** 与茎干重和总干重呈显著正相关**，** 但与根鲜重 和根干重无相关性。 这与彭胜巍等的研究结果相似**，** 即污染物降解率主要与根比表面积有关**，**而不是根重 量**，** 因为较大的根比表面积**，** 能够为微生物提供更大 的生存空间**［**25**］，**也能与污染土壤有更多的接触**，** 从而 更有利于污染土壤的修复。 由于草坪为须根植物**，** 根 系发达且量大**，**与土壤污染物 TPH 接触面较大**，** 使得 TPH 降解率增加。

**2. 2** 三种草坪对不同 TPH 浓度污染土壤 TPH 降解 的影响

**2. 2. 1** 三种草坪对 TPH 含量及降解率的影响 为了进一步研究不同草坪对TPH污染土壤中

TPH 降解的影响**，** 本文进行了 3 种草坪对不同 TPH 浓度污染灰潮土中 TPH 降解影响的研究**（** 图 3**） ，** 发 现高、低 TPH 浓度污染土壤中 TPH 变化一致**（** 表3**） ，** 各处理 TPH 降解率的顺序为黑麦草 > 高羊茅 > 狗牙 根 >对照。 比较不同 TPH 浓度污染土壤中 TPH 降解 率可以发现**，** 所有处理低浓度 TPH 污染土壤 TPH 降 解率高于高浓度 TPH 污染土壤。 配对 T 检验显示**，** 高、低 TPH 浓度污染土壤种植草坪处理 TPH 降解率 差异达到了极显著水平**（** t < t0.01**） ，**对照差异达到了显

表 **5** 不同处理下草坪植物生物量

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 土壤 | 草坪 | 根鲜重 | 茎鲜重 | 总鲜重 | 根干重 | 茎干重 | 总干重 |
| 黄棕壤 | 高羊茅 | 3. 25 ±0. 67 | 4.07 ±0. 25 | 7. 33 ±0. 92 | 0. 82 ±0. 05 | 1.22±0.06 | 2. 04 ±0. 11 |
|  | 黑麦草 | 2. 36 ±0. 40 | 3.12 ±0. 23 | 5. 47 ±0. 62 | 0. 52 ±0. 09 | 0. 92 ±0. 05 | 1.44 ±0.13 |
|  | 狗牙根 | — | — | — | — | — | — |
| 灰潮土 | 高羊茅 | 2. 68 ±0. 39 | 4.55 ±0. 43 | 7. 23 ±0. 82 | 0. 61 ±0. 06 | 1.05 ±0.07 | 1.66 ±0.13 |
|  | 黑麦草 | 2. 19 ±0. 41 | 3.30 ±0. 32 | 5. 49 ±0. 72 | 0. 41 ±0. 04 | 0. 81 ±0. 07 | 1.22±0.11 |
|  | 狗牙根 | — | — | — | — | — | — |
| 红壤 | 高羊茅 | 3. 88 ±0. 30 | 2.70 ±0. 54 | 6. 58 ±0. 84 | 0. 74 ±0. 05 | 0. 94 ±0. 07 | 1.67 ±0.12 |
|  | 黑麦草 | 2.17 ±0.32 | 1.56 ±0.35 | 3. 73 ±0. 67 | 0. 39 ±0. 08 | 0. 52 ±0. 23 | 0. 91 ±0. 31 |
|  | 狗牙根 | — | — | — | — | — | — |
| 黑土 | 高羊茅 | 5. 87 ±0. 34 | 8.15 ±0.61 | 14.02±0.95 | 1.25 ±0.05 | 2. 04 ±0. 21 | 3. 29 ±0. 26 |
|  | 黑麦草 | 3. 88 ±0. 45 | 7.11 ±0. 23 | 10.98 ±0.68 | 0. 60 ±0. 14 | 1.39 ±0.10 | 1.99 ±0.24 |
|  | 狗牙根 | — | — | — | — | — | — |
| 棕壤 | 高羊茅 | 1. 90 ±0. 39 | 0.95 ±0. 03 | 2. 84 ±0. 42 | 0. 39 ±0. 10 | 0. 45 ±0. 10 | 0. 84 ±0. 19 |
|  | 黑麦草 | 1. 39 ±0. 21 | 0.53 ±0. 03 | 1.92±0.24 | 0. 27 ±0. 10 | 0. 21 ±0. 05 | 0. 48 ±0. 15 |
|  | 狗牙根 | — | — | — | — | — | — |

注**:** 本实验选用的为矮型狗牙根**,**生物量较小**,**测定误差较大**,**因此此处未列狗牙根生物量**,**但均远远小于较高羊茅和黑麦草的生物量。

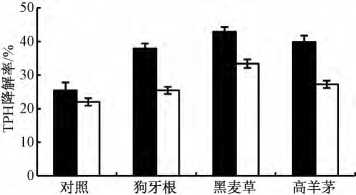


表 **6 TPH** 降解率与生物量的相关性

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 根鲜重 | 茎鲜重 总鲜重 根干重 | 茎干重 | 总干重 |
| 0. 609 | 0. 827 ＊＊ 0. 777 ＊＊ 0. 560 | 0. 761 \* | 0. 705 \* |

注**:** ＊＊极显著相关**；** \* 显著相关。

著水平**(** t < t0.05**)** 。这可能与 TPH 含量高时不仅可为 微生物生长提供所需的碳源和能源**［**26**］,** 而且可对微 生物产生毒害作用有关**［**18**,**27**］**。

—■—低 TPH 浓度处理**；** —□—高 TPH 浓度处理。  
图 3 不同 TPH 浓度土壤中 TPH 降解率

**2. 2. 2** 三种草坪对 TPH 降解菌的影响

图4为不同TPH浓度污染土壤培养0,30,60,90天 后 TPH 降解菌数量的变化**,** 与高浓度 TPH 土壤相似**,** 低浓度 TPH 土壤 TPH 降解菌的数量也呈先增加后降 低的趋势**,** 且种植草坪植物的所有处理高浓度 TPH 污染土壤中的降解菌数量低于低浓度 TPH 土壤**,** 这 也进一步证明高浓度 TPH 污染物对土壤中有降解 TPH 能力的微生物产生了抑制作用**［**18**,**27**］**。

**2. 2. 3** TPH 浓度污染土壤对坪植物生物量的影响 就不同 TPH 浓度污染土壤种植草坪后其生物 量而言**(** 见表 7**) ,** 高浓度 TPH 污染土壤种植黑麦草 后**,** 其根鲜重、茎鲜重、总鲜重、 根干重、 茎干重、 总 干重各种生物量均显著**(** p < 0. 05**)** 小于低浓度 TPH 污染土壤中的生物量**；**高浓度 TPH 土壤除高羊茅茎 鲜重显著**(** p < 0. 05**)** 小于低浓度 TPH 土壤外**,** 根鲜 重、茎鲜重、总鲜重、根干重、 茎干重、总干重均极显 著**(** p <0. 01**)** 小于低浓度 TPH 土壤。可见**,** 高浓度 TPH 抑制植物生长**,** 影响植物生物量是 TPH 降解率 低的原因之一。

表 **7** 不同处理下各类土壤中植物的生物量

植物

黑麦草

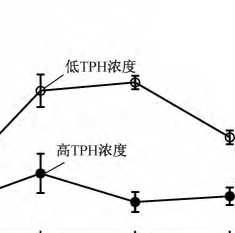
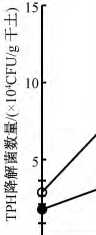
高羊茅

|  | 根鲜重 | 茎鲜重 | 总鲜重 | 根干重 | 茎干重 | 总干重 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 低 TPH | 4. 11 ±0. 27a | 5. 49 ±0. 78a | 9. 60 ±1. 05a | 0. 83 ±0. 10a | 1.48 ±0.16a | 2. 31 ±0. 26a |
| 高 TPH | 2. 19 ±0. 41b | 3. 30 ±0. 32b | 5. 49 ±0. 72b | 0. 41 ±0. 04b | 0. 81 ±0. 07b | 1.22±0.11b |
| 低 TPH | 5. 21 ±0. 68A | 7. 33 ±0. 72a | 12.54 ±1.40A | 1.17 ±0.11A | 1.85 ±0.12A | 3. 02 ±0. 23A |
| 高 TPH | 2. 68 ±0. 39B | 4. 55 ±0. 43b | 7. 23 ±0. 82B | 0. 61 ±0. 06B | 1.05 ±0.07B | 1.66 ±0.13B |

注**:**1**)** 大写字母表示极显著差异**；** 小写字母表示显著差异。2**)** 狗牙根的生物量较小**,**基本未测出**,**数据未列出来。

**3**结论

1. 种植草坪后土壤中 TPH 的降解率高于对照**,** 高羊茅和黑麦草处理土壤 TPH 降解率高于狗牙根。
2. 土壤TPH的降解率顺序为黑土 >黄棕壤〜灰 潮土 > 棕壤 > 红壤**,** 且 C/N、C/P 是导致 TPH 降解率 不同的主要原因之一。
3. 所有处理 TPH 降解菌数量变化趋势相似**,** 均 呈0 ~30 天快速增加**,**30 ~60 天处于稳定**,**60 ~90 天 下降的趋势**,** 且 TPH 降解率与 TPH 降解菌数量变化 规律一致。

取样时间/d  
d

30 60

取样时间/d a

90

(出\*母S90X)、\*報齟琏塗HdH

20

0 5 0 5

2 11

(+1H-母£14907)、\*報植雀逊 HdH

| 0 | 30 60 |
| --- | --- |
|  | 取样时间**/d** |
|  | **C** |
| 25 r |  |

低TPH浓度

高TPH浓度

0 30 60

取样时间/d

25 r t

2015105

0 30 60

a—对照；b—狗牙根；c—黑麦草;

图 4 不同 TPH 浓度土壤中 TPH

1. 土壤 TPH 降解率与茎鲜重和总鲜重呈极显著 正相关**，**与茎干重和总干重呈显著正相关**，**但与根鲜 重和根干重无显著相关性。

d—高羊茅。

降解菌数量

1. 在室内90 天培养期间**，**低浓度 TPH 污染土壤 TPH降解率、TPH降解菌数量和草坪生物量高于高 浓度 TPH 污染土壤**，**可能与高浓度 TPH 污染物易对 土壤微生物和植物产生抑制作用有关。因此 TPH 污 染土壤的治理应尽早**，**且应防治结合。

参考文献

1 **]** 丁正**，**梁晶**，**郝冠军**，**等． 上海城市绿地土壤中石油烃化合物 的分布特征 J . 土壤**，**2014**,** 46(5): 901-907.

1. 万春黎**，** 杨雪**，** 杜茂安**，** 等． 石油污染土壤中细菌群落结构特 征J .石油学报.石油加工**，**2010**,** 26(6): 928-933.
2. 宋玉芳**，** 周启星**，** 宋雪英**，** 等. 石油污灌土壤污染物的残留与 生态毒理J .生态学杂志**，**2004**,** 23 (5): 61-66.
3. 吕志萍**，** 程龙飞. 石油污染土壤中石油含量对玉米的影响 **[**J**]**. 油气田环境保护**，** 2001**，** 11**(**1**):** 36-37.

5 **]** Franco M A**，** Vi5as L**，** Soriano J A**，** et al. Spatial distribution and ecotoxicity of petroleum hydrocarbons in sediments from the Galicia continental shelf **(** NW Spain **)** after the Prestige oil spill**[**J**]**. Marine Pollution Bulletin**，** 2006**，** 53**(**5 /7**) :** 260-271.

6**]** 曹云者**，** 施烈焰**，** 李丽和**，** 等. 石油烃污染场地环境风险评价 与风险管理J -生态毒理学报**，**2007**,** 2(3): 265272.

[7**]** 孙铁珩**，**周启星**，**李培军.污染生态学M -北京：科学出版

社**，** 2001 **，** 298 -308.

1. **]** Schnoor J L**，** Licht L A**，** Mccutcheon S C. Phytoremediation of

organic and nutrient contaminants **[**J**]**. Environmental Science Technology**，** 1995**，** 29**(**2**):** 318-323.

1. **]** Fan S X **，** Li P J**，** Gong Z Q **，** et al. Promotion of pyrene

degradation in rhizosphere of alfalfa **(** Medicago sativa L. **) [**J**]**. Chemosphere**，** 2008**，** 71**(**8**):** 1593-1598.

1. 孙铁珩，宋玉芳，许华夏**，**等•植物法生物修复PAHs和矿物油 污染土壤的调控研究J -应用生态学报**，**1999**,** 10(2) : 225- 229.
2. HJ 350—2007展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行**)**S -

12 庞鸿宾.森林土壤分析方法**[**M**]**.北京：中国标准出版社**，**

1988**，** 75-77**，** 87-90**，** 95-98**，** 105-108**，** 114-115.

1. Wrenn B A**，** Venosa A D. Selective enumeration of aromatic and aliphatic hydrocarbon degrading bacteria by a most-probable­number procedure**[**J**]**. Canadian Journal of Microbiology**，** 1996**，** 42**(**3**) :** 252-258.

14 Atlas R M. Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation **[**J**]**. Marine Pollution Bulletin**，** 1995**，** 31**:** 178-182.

1. Song H G**，** Bartha R. Effects of jet fuel on the microbial community of soil**[**J**]**. Applied and Environmental Microbiology**，** 1990**，** 56**:** 646-651.
2. 徐金兰**，** 黄廷林**，** 唐智新**，** 等. 高效石油降解菌的筛选及石油 污染土壤生物修复特性的研究J**]**-环境科学学报**，**2007**,** 27 **(**4**) :** 622-628.
3. Chekol T**，** Vough L R. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils**:** The rhizosphere effect**[**J**]**. Environment International**，** 2004**，** 30**(**6**) :** 799-804.

( 下转第 **982** 页 )

combined pollution of Cd and NH4+ on Hydrilla verticillata and Myriophyllum spicatum**[**J**]**． Environmental Sciences**,**2006**,**27 **(** 10**) :** 1974-1978.

1. Sooksawat N **,**Meetam M **,**Kruatrachue M **,**et al． Phytoremediation potential of charophytes **:** Bioaccumulation and toxicity studies of cadmium **,**lead and zinc **[**J**]**． Journal of Environmental Sciences **,** 2013 **,**25 **(** 3 **) :** 596-604.
2. Agunbiade F O**,** Olu-Owolabi B I **,** Adebowale K O． Phytoremediation potential of Eichornia crassipes in metal- contaminated coastal water**[**J**]**． Bioresour Technol**,**2009**,**100 **(** 19**) :** 4521-4526.
3. 周守标**,**王春景**,**杨海军**,**等． 菰和菖蒲对重金属的胁迫反应及 其富集能力J ■生态学报**，**2007**,** 27(1) : 281-287.

17 Rahman M A**,** Hasegawa H. Aquatic arsenic： Phytoremediation using floating macrophytes**[**J**]**． Chemosphere**,** 2011 **,** 83**(**5**) :** 633­646.

1. Ramila C D P**,** Leiva E D**,** Bonilla C A**,** et al. Boron accumulation in Puccinellia frigida**,** an extremely tolerant and promising species for boron phytoremediation **[** J**]**. Journal of Geochemical Exploration**,** 2015**,** 150**:**25-34.
2. Li C**,** Wang Q H**,** Xiao B**,** et al. Phytoremediation potential of switchgrass **(** Panicum virgatum L. **)** for Cr-polluted soil **[**J**]**. IEEE**,** 2011**(**3**):**1731-1734.
3. 刘璐**,** 闫浩**,** 夏文彤**,** 等. 镉对铜绿微囊藻和斜生栅藻的毒性效

应J .中国环境科学**，**2014(2): 478484.

1. 施翔**，**东益泰，吴天林，等.7个柳树无性系在Cu/Zn污染土壤

中的生长及对Cu/Zn的吸收J .中国环境科学**，**2010(12): 1683-1689.

1. Bech J**,** Duran P**,** Roca N**,** et al. Accumulation of Pb and Zn in Bidens triplinervia and Senecio sp. spontaneous species from mine spoils in Peru and their potential use in phytoremediation**[**J**]** . Journal of Geochemical Exploration**,** 2012**,** 123**:** 109-113.
2. Norouznia H**,** Hamidian A H. Phytoremediation efficiency of pondweed **(** Potamogeton crispus**)** in removing heavy metals **(** Cu**,** Cr**,** Pb**,** As and Cd **)** from water of Anzali wetland **[**J**]** . International Journal of Aquatic Biology**,** 2014**,** 2**(**4**)** .
3. Lee J H. An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control**[**J**]** . Biotechnology and Bioprocess Engineering**,** 2013**,** 18**(**3**) :** 431-439.
4. Cheraghi M**,** Lorestani B**,** Yousefi N. Introduction of

Hyperaccumulator Plants with Phytoremediation Potential of a Lead­Zinc Mine in Iran**[**J**]** . Proceedings of World Academy of Science Engineering ＆ Technology**,** 2011 **,** 77**:** 163.

第一作者:林海**(**1966－**),**男**,**博士**,**教授**,** 博士生导师**,**主要从事矿山 环境保护、矿物环境材料和水处理技术研究。linhai@ ces. ustb. edu. cn 通信作者:董颖博**,**女**,**副教授**,**主要从事矿山环境保护、矿物环境材料 和水处理技术研究。 ybdong@ ustb. edu. cn

( 上接第 **975** 页)

1. 刘五星**,** 骆永明**,** 滕应**,** 等. 石油污染土壤的生物修复研究进 展 J - 土壤**，**2006**,** 38 (5): 634-639.
2. 余冬梅**,** 骆永明**,** 刘五星**,** 等. 堆肥法处理含油污泥的研究 **[**J**]** . 土壤学报**,** 2009**,** 46**(**6**):** 1019-1025.
3. Xu J G**,** Johnson R L. Nitrogen dynamics in soils with different hydrocarbon contents planted to barley and field pea**[**J**]** . Canadian Journal of Soil Science**,** 1997**,** 77**:** 453-458.
4. 周启星**，**孔繁翔**，**朱琳.生态毒理学M -北京：科学出版社**，** 2004**,** 353-386.

22 周启星**，**宋玉芳.植物修复的技术内涵与展望J -安全与环

境学报**,** 2001**,** l**(**3**):** 48-53.

1. 于齐**,** 张晓曦**,** 刘增文**,** 等. 陕北石油区城市绿化树木枯落叶 对油污土壤的修复效应J**]**.农业环境科学学报**，**2015**,** 34 **(**1**):** 50-57.
2. Shimp J F**,** Tracy J C**,** Davis L C**,** et al. Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials**[**J**]**. Critical Review in Environmental Science Technology**,** 1993**,** 23**:** 41-47.
3. 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**,** 26.

1. Guo H**,** Yao J**,** Cai M M**,** et al. Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers**,** metabolic activity and urease activity **[**J**]** . Chemosphere**,** 2012**,** 87**(**11**):** 1273-1280.
2. Banat I M. Characterization of biosurfactants and their use in pollution removal-state of the art **[**J**]** . Acta Biotechnological**,** 1995**,** 15**:** 251-267.

第一作者:丁正**(**1987 －**),**男**,**硕士**,**主要从事土壤污染评价与修复研 究。 dingzheng\_321@ 163. com

通信作者: 梁晶**(**1981 －**),**女**,**硕士**,**高级工程师**,**主要从事土壤污染 评价与修复研究。 liangjing336@ 163. com