安全与环境学报  
Journal of Safety and Environment

文章编号:1009-6094( 2019) 03-0985-07  
基于层次分析法的石油污染  
土壤修复植物评价

王 兵1，2，3 ，谢红丽2 ，任宏洋1，2，3 ，李 琋2，3

(1 石油石化污染物控制与处理国家重点实验室，北京102206;  
2 西南石油大学化学化工学院，成都 610500 ;

3 四川省环境保护油气田污染防治与环境  
安全重点实验室，成都 610500)

摘 要 : 为解决石油污染土壤原位修复时出现的修复植物选 取工作量大、耗时长等问题，采用层次分析法和优劣解距离 法建立了一套石油污染土壤修复植物评价体系，结合四川长 宁页岩气井场现状，在使用层次分析法确定了各指标权重的 基础上，利用优劣解距离法对初始备选植物进行排序; 并利 用权重敏感性分析和室内试验校核。结果表明，排序与试验 结果基本一致，该评价体系具有可行性。 关键词:环境工程学;石油污染土壤; 植物修复; 层次分析法;

优劣解距离法

中图分类号: X53 文献标识码: A

DOI: 10. 13637/j． issn．1009-6094. 2019. 03. 036 0引言

21 世纪初**，**基于对能源的需要**，**页岩气这一清 洁能源的开采受到世界各国的高度关注［1］。四川盆 地是我国页岩气储量较多的区域**，**其中**，**长宁-威远 作为国家级示范区**，**在开采过程中**，**产生大量钻井岩 屑、油基泥浆和污泥**，**污染了井场土壤［2-5］。因此**，**页 岩气开采井场污染土壤的修复十分必要。Chekol 等［6］开创性地提出**，**利用超积累植物修复土壤重金 属污染**，**并评估了植物修复的有效性。 然而**，**由于植 物种类的多样性**，**常用的筛选工作主要依据室内试 验和现场勘查结果**，**试验勘查工作量大**，**也很耗时。

基于此**，**本文引入层次分析法建立石油污染土 壤修复植物评价体系**，**并应用于四川长宁页岩气井 场污染土壤修复。 层次分析法**(** AHP**，**Analytic Hier­archy Process**)** 是 1980 年 Sauty 等 7 首次提出的一种 新的定性与定量分析相结合的多目标决策分析方 法**，**并得到了广泛应用［8-10］。 刘良会等［11］运用层次 分析法建立了一个三指标三准则的植物选择模型**，** 应用于人工植被的选择。 季贵斌等［12］以广河高速 公路边坡植被为研究对象**，**运用层次分析法进行混 播植物物种的生态适应性评价**，**为当地边坡植被护 坡方案提供了基础性指导。 此 外**，**优 劣 解 距 离 法 **(** TOPSIS**，**Techniq ue for Order Preference by Similarity to Ideal Solution**)** 作为一种多指标决策分析中常用的 方法之一**，**通过与 AHP 结合**，**可以进一步确定最合 适的策略**，**如危险废物运输公司的评估以及农业生 产中的种植计划［13-14］。 然而**，**将这两种方法联合应 用于石油污染土壤植物修复的研究还鲜有报道。

本文拟采用结合层次分析法和优劣解距离法**，** 对石油污染土壤修复植物进行评价**，**并结合四川长 宁页岩气开采井场实际情况**，**利用所得权重**，**对 13 种备选植物进行排序。 在此基础上**，**通过权重敏感 性分析和室内试验校核**，**计算该石油污染土壤修复 植物各指标权重敏感系数**，**通过与试验结果对比判 断体系可行性**，**以期为石油污染土壤修复植物的选 取提供依据。

1 材料与方法

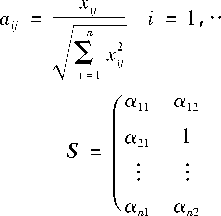
1. 1 研究区域地理自然条件 长宁县地处四川省宜宾市中南部**，**处于 28°15'—

28°48'N和104。44'—105°03'E,位于四川盆地南缘，南 北长约60 km**,**东西宽30 km**,**全县幅员面积 1 000. 2 km2。 长宁县南北两端小**，**中腹较大**，**地势南 高北低，海拔245. 9 -1 408.5 m**；**南部为中低山，中北 部为丘陵。 该地属四川盆地中亚热带湿润性季风气 候**，**温暖湿润**，**无霜期长**，**雨热同季**，**四季分明**，**年平均 气温18. 3 °C，年均降雨量1 141.7 mm,5—10月为雨 季**，** 降水量占全年 81. 7% **，** 主汛期为 7—9 月**，** 占全年 总降雨量的51%*。*日照时数987.6 h,无霜期达357 多 d。 年平均风速为 1.23 m/s**,** 多为西北风和东 北风［15］。

1. 2 层次分析法权重计算理论基础 层次分析法应用于石油污染土壤植物修复时修 复植物选择的基本思路为**:** 首先根据目标和影响因 素构建植物选择评价指标体系**,** 通过专家打分或文 献调研构造判断矩阵**,** 计算出各因素相对理论权重**,** 并对结果进行一致性检验。

1. 2. 1 判断矩阵构造

对一个评价目标Q其评价指标集为B = **{***[[1]](#footnote-2),* b2 **,** …**,** bn **} ,** 构建判断矩阵 **P(** Q-B**)** 。



b

b

**(**1**)**

CI

Amax (P)*\_ n*

CR

CI

RI

**(**8**)**

**,** m**;** j = 1 **,** … **,** n

…ain*、*

… a2n

… 1丿

**(**9**)**

**(**10**)**

**(**12**)**

**(** 13 **)**

**P(** Q － B**)**

式中 爲表示因素*bi*对*bj*的相对重要性(i =1,2**,**…**,** *n；*j =1,2**,**…,n**) ,©**取值通常采用1 ~9标度俵1**)*。***

表 1 层次分析法标度及相对重要性判断

|  |  |
| --- | --- |
| Table 1 Analytic hierarchy process scale and the relative importance of judgement | |
| 标度等级 | 相对重要性判断 |
| 1 | 两者同等重要 |
| 3 | 前者比后者稍微重要 |
| 5 | 前者比后者明显重要 |
| 7 | 前者比后者强烈重要 |
| 9 | 前者比后者极其重要 |
| 2,4,6,8 | 介于相邻奇数之间的情况 |
| 倒数 | 若元素 i 与元素 j 的重要性之比是 bij ,则元素 j |
| 与元素 i 的重要性之比是 bji = 1 /bij |

1. 2. 2 理论权重计算 采用方根法计算判断矩阵的最大特征值 计算判断矩阵每行元素的乘积

M, = n a»j i = 1,2,■■■,, (2**)**

*j=*1

式中Mi为判断矩阵每行元素之和**；**a”为判断矩阵

P 中各元素。对矩阵 **M** 求 n 次方根**，**并进行标准 化**，**求解最大特征根的近似值。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | Wi | 二 MT  i | **(**3**)** |
|  | Wi = | Wi  n | **(**4**)** |
|  |  | X Wi |  |
|  |  | j=1 |  |
|  | ***R*** | = ***PW*** | **(**5**)** |
| A max | =-x彳 | Ri  **—,*,-***1**,,…,** | **(**6**)** |

式中 Wi为判断矩阵每行元素之和的n次方根；**W** 为由元素Wi组成的矩阵**;**Wi为Wi归一化后的对应 元素;***R***为判断矩阵**P**与矩阵**W**的乘积;***R,***为***R***矩 阵中对应元素；n为判断矩阵阶数;A max为判断矩阵 的最大特征根。

1. 2. 3 判断矩阵的一致性检验

计算衡量一个判断矩阵P (n >1阶方阵**)**不一 致程度的指标CI**,**如下。

将CI和平均随机一致性指标RI按下式计算判 断矩阵**P**的随机一致性比率CR。

式中RI为平均随机一致性指标。当CR <0.1时**,** 判断矩阵 ***P*** 具有满意的一致性**，**或者其不一致程度 是可以接受的**；**否则就调整判断矩阵**P,**直到达到满 意的一致性为止。

1. 3 优劣解距离法理论基础

优劣解距离法是一种逼近理想解的排序方法**，** 其基本思路是将初筛所得的备选植物通过打分**，**建 立初始化矩阵**，**经规范化后**，**计算各备选植物得分**，** 并进行排序。

1. 3. 1 初始决策矩阵的规范化

设有m个方案(有限个方案**),**n个目标准则**，**其 初始化决策矩阵为**M,**其中**，M** = (*Xij)m*X”*。*由于各 目标准则的量纲不同**，**采用向量规范化的方法对初 始化决策矩阵进行规范化**,** 按式**(**8**)** 得到规范化决 策矩阵 ***S***。

式中Xj为初始决策矩阵**M**的对应元素;aj为矩阵 **M**中元素经过归一化后所得对应值**;S**为构成的规 范化决策矩阵。

1. 3. 2 备选植物排序计算

根据层次分析法计算所得的权重矩阵 ***W*,** 按式 **(**10**)** 计算加权规范化矩阵 ***Z***。

**Z** =**SW (**11**)**

根据加权规范化决策矩阵**,**得到最优解**(**正理想 解**)** 和最劣解**(**负理想解**) ,** 计算各方案与正负理想 解之间的欧氏距离及综合评价指数**,** 并进行排序 决策。

正理想解**:** z+ = **{** zi+1 **,** zi+2 **,** … **,** z1+n**}**负理想解**:** z－ = **{** zi－1**,** zi－2**,** …**,** z1－n**}**

Di =槡］a \_ z+)2

Di =槡］**(z**j \_ **)**2

Di－

Ci 二于- (14**)**

i D+ + D －

*ii*

式中 *D*i+、*Di*- 分别为各方案距离正理想解和负理 想解的欧式距离;*C*为方案i的综合评价指数。

1. 4 评价体系的建立 利用植物修复石油污染土壤过程中**,**影响植物 修复因素错综复杂**,**主要涉及植物自身生理特性、自 然环境条件和土壤环境因素。 其中**,**植物自身生理 特性主要是植株存活率、种子发芽率、植株生长速率 和植株生物量**,**自然条件主要包括光照强度、水分、 温度**,**土壤环境因素主要指土壤污染情况和土壤肥 力**,**其中石油污染物含量是评价土壤环境质量的重 要指标。 因此**,**依据科学性、系统性、可行性和代表 性的原则**,**选取以下9 个指标作为该石油污染土壤 修复植物评价的指标要素**(**图1**)** 。

石油污染土壤修复植物评价体系&

植物生理特性匸］自然环境条件艮［土壤环境因素刊

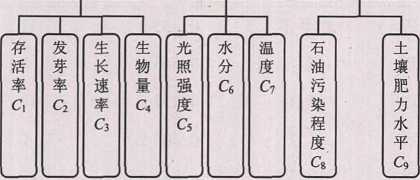


图 1 石油污染土壤修复植物评价体系  
Fig． 1 Plant evaluation system in petroleum  
contaminate soil for phytoremediation

1. 4. 1 植物生理特性 植物修复石油污染土壤过程中**,**其生理特性占 主要作用。 研究表明**,** 不同的植物种子对石油污染 土壤会表现出不同的耐受性**,**其种子发芽率、植株存 活率、植株生长速率及相应的生物量都会受到影响**,** 反之**,**当植株所受污染抑制程度较小时**,**其表现出相 应的修复潜力［16-17］。

1. 4. 2 自然环境条件 植物生长过程中**,**受外界环境的影响较大**,**主要 是光照强度、水文条件和温度。 光是植物生长必需 的资源之一**,**对植物生长、生理生化及形态结构等具 有重要作用［18］。 水分作为植物生长的重要因素之 一**,**在植物生长过程中起到重要作用**,**植物对土壤水 分的利用是限制植物生长的因素之一［19］。 植物生 长除了光照外**,**温度在植物生长过程中也至关重要**,** 表现为植物的生理活动、生化反应**,**都需要在一定的 温度条件下才能进行［20］。

1.4. 3 土壤环境因素

低含油固相综合评价过程中**,**影响植物生长的 主要限制条件是土壤中石油类污染物含量和土壤肥 力水平。 其中**,**土壤中石油烃类污染物是限制种子 发芽和植物生长的重要因素［21］。 研究表明**,**低浓度 土壤石油污染**(**0. 5%**)** 对植物生长具有一定的促进 作用**,**然而**,**随污染物浓度增加**,**对植物生长的抑制 作用也显著增强［22］。 有研究表明**,** 石油污染土壤中 有机质含量与土壤含油率呈正相关关系**,**尤其是当 含油率超过 7% 时**,** 土壤中有机质含量普遍高于 10%［23］。 土壤石油烃污染可能造成土壤中 C、N 比 例的失衡**,** 不利于对污染土壤进行直接的生物 修复［24］。

1. 5 备选植物初筛

结合文献调查法和实地勘测结果**,**在四川页岩 气开采井场污染土壤中初步筛选出适宜的修复植 物。 根据该页岩气井场环境影响评价书、《四川植物 志》和实地勘察f筛选出白茅草(Imperata cylindri- ca**)** 、黄豆**(** Glycine max**(** Linn． **)** Merr． **)** 、黑豆**(** Glycin- emax**(** L． **)** merr**)** 、红豆 **(** Adenanthera pavonina Linn． var． microsperma **)** 、绿豆**(** Vigna radiata **(** Linn． **)** Wil- czek． **)** 、三叶 草 **(** Trifolium repens L**)** 、水花生 **(** Alter- nanthera philoxeroides**)** 、韭菜花**(** Leek**)** 、马 唐 **(** Digitar­ia sanguinalis**)** 、车前 草 **(** Plantago asiatica L． **)** 、肾 蕨 **(** Nephrolepis auriculata **(** L． **)** Trimen**)** 、绿萝**(** Epiprem- num aureum **)** 、高 羊 茅 **(** FestucaelataKengex E． Alexeev**)** 13 种植物。

1. 6 试验设置

设置室内试验对评价体系筛选结果进行校核**,** 将四川长宁页岩气井场石油污染土壤置于通风阴凉 处风干后**,**过2 mm 筛**,**测得该石油污染土壤含油量 为 2. 0%。 根据评价体系计算筛选结果**,** 购买植株 种子**,**取 1 kg 土壤装盆**(**上口直径为 16. 5 cm**,** 高 14.5 cm**) ,**每盆播种10 粒**,**不同处理设置3 个平行**,** 考察各植株对该石油污染土壤的耐受性。

2 结果及分析

2. 1 指标权重计算及备选植物排序

经层次分析法计算所得各指标权重见表2**,** 结 果表明**,**在该石油污染土壤修复植物评价体系中**,**自 然环境条件 *B*2 所占权重**(**0. 539 6**)** 高于植物生理特 征B**］ (**0. 297 0**)**和土壤环境要素B**3 (**0. 163 4**)***。*其 中，在植物生理特性*B］*层，以存活率*C*所占权重最

高，为0. 467 3 **；**在自然环境条件B2层，水分C6所占 权重最高**(**0. 539 6**) ,** 土壤环境要素 B3 以石油污染 程度所占比重较大**(**0. 750 0**)** 。 整体来看**,** 该评价体 系中以水分 C6 所占权重最大**(**0. 291 2**) ,** 表明在石 油污染土壤修复植物选取过程中**,** 以降雨量为主的 水文条件占主导地位。 与季贵斌等［12］在运用层次 分析法对广河高速公路边坡混播植物物种进行生态 适应性评价时发现耐旱性对护坡植物选择影响最 大、应当重点考虑的结果一致。 另外**,**通过一致性检 验**,**比较该石油污染土壤修复植物评价体系中各成 对比较矩阵的不一致程度，结果表明，准则层(B1 ~ B3**)** 一致性比例为 0. 008 8**,** 指标层各指标一致性比 例最大为 0. 011 6、最小为 0. 000 0**,**均小于0. 1**,**表明 各成对比较矩阵具有满意的一致性**,** 其不一致程度 可以被接受。

| 目标层 | 准则层 | | 指标层 | | 综合权重 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 存活率( C1 ) | 0．467 3 | 0．138 8 |
|  |  |  | 发芽率( C2 ) | 0．095 4 | 0．028 3 |
|  | 植物生理特性( B1 ) | 0．297 0 | 0．277 2 | 0．082 3 |
| 生长速率( C3 ) |
| 石油污染  土壤修复 |  |  | 生物量( C4 ) | 0．160 1 | 0．047 5 |
|  |  | 光照强度( C5 ) | 0．297 0 | 0．160 2 |
| 植物评价 |
| 体系( A) | 自然环境条件( B2 ) | 0．539 6 | 水分( C6 ) | 0．539 6 | 0．291 2 |
|  |  |  | 温度 ( C7 ) | 0．163 4 | 0．088 2 |
|  |  |  | 石油污染程度( C8 ) | 0．750 0 | 0．122 6 |
|  | 土壤环境因素( B3 ) | 0．163 4 |  |  |
|  |  |  | 土壤肥力( C9 ) | 0．250 0 | 0．040 9 |

表 2 石油污染土壤修复植物评价指标权重

Table 2 Weights of evaluation indexes in assessment system for plants in petroleum contaminated soil

表3 经 AHP-TOPSIS 决策的备选植物排序 Table 3 Alternative plants sorted by AHP-TOPSIS decision

依据层次分析法评价体系构建过程**,** 结合四川 长宁页岩气井场实际情况**,** 对 13 种备选植物进行打 分**,**该备选植物排序结果见表3。 经 AHP-TOPSIS 决 策后显示**,**在四川长宁页岩气井场污染土壤的修复 时**,** 水花生可能具有较高的修复潜力。 Andrade 等［25］研究显示**,**水花生对土壤石油污染具有较高的 耐受性**,**在石油污染物质量比为 50 g/kg 和 100 g/kg 的污染土壤中**,** 水花生植株存活率依然能达到 1 00% **,**且对土壤石油污染物表现出较高的修复 潜力。

2. 2 权重敏感性分析及试验校核 以该石油污染土壤修复植物评价体系中各指标 作为不确定因素**,** 包括植物生理特性**(**存活率、发芽 率、生长速率和生物量**)** 、自然环境条件**(**光照强度、 水分和温度**)** 及土壤环境要素**(**石油污染程度和土

AHP － TOPSIS

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 编号 | 备选植物 | 得分 | 排序 |
| P1 | 白茅草 | 0．403 3 | 11 |
| P2 | 黄豆 | 0．563 0 | 7 |
| P3 | 黑豆 | 0．231 2 | 13 |
| P4 | 红豆 | 0．503 2 | 8 |
| P5 | 绿豆 | 0．565 9 | 6 |
| P6 | 三叶草 | 0．659 4 | 2 |
| P7 | 水花生 | 0．675 6 | 1 |
| P8 | 韭菜花 | 0．465 7 | 9 |
| P9 | 马唐 | 0．633 4 | 3 |
| P10 | 车前草 | 0．571 2 | 5 |
| P11 | 肾蕨 | 0．427 8 | 10 |
| P12 | 绿萝 | 0．370 0 | 12 |
| P13 | 高羊茅 | 0．581 4 | 4 |

壤肥力水平**) ,**以备选植物作为现有方案集**,** 构建决 策矩阵**,**并判断方案排序对权重变化的敏感性**,** 计算 所得该指标体系中权重变化的临界值和敏感性系数 见表4。 根据表4 可以看出**,**在该石油污染土壤修复 植物评价体系中**,** 以植物生理特性 B1 最为敏感**,** 其 敏感性系数达 0. 106 9**;**其次是自然环境条件 B2**,** 为 0. 096 9**;**最后是土壤环境因素 B3**,** 敏感性系数仅为 0. 060 2。 各指标层中除光照强度对权重变化的敏 感性较高外**,**其余指标对权重变化的敏感性与其本身权重大小相应**，** 表明该评价体系经层次分析法确 定的权重是合理的**，**通过该敏感性分析**，**能够验证层 次分析法确定的权重在石油污染土壤修复植物选取 时的合理可靠性［26］。

经初筛所得备选植物用于修复四川长宁页岩气 井场石油污染土壤**，**经室内盆栽试验**(**表5**)** 结果表 明，修复60 d后，仅水花生(P7**)**、肾蕨(P11**)**和高羊 茅(P13**)**3种植物能够正常生长，其余植株均表现出 长势不佳乃至死亡的症状。与经AHP-TOPSIS决策

所得排序结果比较**，** 耐受性较强的水花生位居决策 排序前列。 且经研究表明**，**水花生具有较高的耐受 性**，**可以用于四川长宁页岩气井场石油污染土壤修 复。 陈小兵［27］从南京长期受石油污染区域生长的 水花生和野蒜中分离出36 株植物内生菌**，**经平皿促 生试验筛选出具有菲污染修复功能的菌株**，**经修复 试验表明**，**该植物内生菌与植物联合修复多环芳烃 的效率较单独作用时好**，**此时**，**菌株在植物体内存活 时间也较长。 因此**，** 经权重敏感性分析和试验表 明**,**该评价体系植物的选取对于石油污染土壤修复 具有一定的可行性。

表 4 石油污染土壤修复植物评价体系指标临界值及相应敏感系数

| 目标层 | 准则层 | | | 指标层 | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 指标 | 临界值 | 敏感性系数 | 指标 | 临界值 | 敏感性系数 |
|  |  |  |  | 存活率( *C*1 ) | 4． 622 9 | 0． 216 3 |
|  |  |  |  | 发芽率( *C*2 ) | 91． 709 | 0． 010 9 |
|  | 植物生理特性( *B*1 ) | 9．357 8 | 0．106 9 | 8．334 1 | 0． 120 0 |
| 生长速率( *C*3 ) |
| 石油污染土  壤修复植物 |  |  |  | 生物量( *C*4 ) | 11．583 9 | 0． 086 3 |
|  |  |  | 光照强度( *C*5 ) | 11．5401 | 0． 086 7 |
| 评价体系 |  |  |  |  |  |
| ( *A* ) | 自然环境条件( *B*2) | 10． 323 9 | 0． 096 9 | 水分( *C*6 ) | 13．5592 | 0．073 8 |
|  |  |  |  | 温度 ( *C* 7 ) | 43． 660 6 | 0． 022 9 |
|  | 土壤环境因素( *B*3) |  |  | 石油污染程度( *C*8) | 76．234 4 | 0．013 1 |
|  | 16． 603 1 | 0． 060 2 |  |  |
|  |  |  | 土壤肥力( *C*9 ) | 100． 000 0 | 0． 010 0 |

Table 4 Criterion level index critical value and corresponding sensitivity factor

| 编号 | 植株 | 生长状况 | | | | | | | |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 6d | 9d | 12 d | 15 d | 30 d | 39 d | 60 d | 结束时 |
| P1 | 白茅草 | ++ | + | + | + | + | - | - | 枯萎 |
| P2 | 黄豆 | ++ | ++ | ++ | + | + | + | - | 枯萎 |
| P3 | 黑豆 | - | - | - | - | - | - | - | 死亡 |
| P4 | 红豆 | ++ | ++ | ++ | + | - | - | - | 死亡 |
| P5 | 绿豆 | ++ | ++ | ++ | + | - | - | - | 死亡 |
| P6 | 三叶草 | ++ | + | + | - | - | - | - | 死亡 |
| P7 | 水花生 | ++ | ++ | ++ | + | + | + | + | 生长 |
| P8 | 韭菜花 | ++ | + | + | + | + | - | - | 枯萎 |
| P9 | 马唐 | ++ | + | + | - | - | - | - | 死亡 |
| P10 | 车前草 | ++ | ++ | + | - | - | - | - | 死亡 |
| P11 | 肾蕨 | ++ | ++ | ++ | + | + | + | + | 生长 |
| P12 | 绿萝 | ++ | ++ | + | + | + | + | - | 生长 |
| P13 | 高羊茅 | +++ | ++ | ++ | + | + | + | + | 生长 |

表 5 室内试验植物生长概况

Table 5 Survey of indoor potted plants growth

注: + + + 表示植株生长长势较好; + +表示植株生长长势稍好，部分表现出生长胁迫; +表示植株生长长势良好，有新叶或株高生长的趋

势; - 表示植株长势较差，濒临死亡或已经死亡

3结论

1**）** 在四川长宁页岩气开采区域石油污染土壤植 物修复中**,**采用层次分析法构建修复植物评价体系**,** 结合优劣解距离法对备选植物进行排序**,** 减少室内 修复试验所需时间。

2**）** 运用层次分析法和优劣解距离法进行了综合 评价**,**通过权重敏感性分析和室内试验的校核**,** 表明 水花生可以作为四川长宁页岩气井场的修复植物**,** 也表明该评价体系具有可行性**,** 可以为四川长宁石 油污染土壤的修复植物选取提供参考。

References （参考文献）：

1. SAYED M A,Al-MUNTASHERI G A,LIANG F． Devel­opment of shale reservoirs: knowledge gained from devel­opments in North America[J]． Journal of Petroleum Sci­ence and Engineering,2017 ,157 : 164 -186.
2. ZHOU Z E,FANF W K,SONG D,et al． Discussion about environmental impact assessment of shale gas development[J]． Meteorological and Environmental Re- search,2016 （ 5 ） : 54-58.
3. WANG C Q,LIN X Y,ZHANG C,et al． Environmental security control of resource utilization of shale gas' drilling cuttings containing heavy metals [J]． Environmental Sci­ence ＆ Pollution Research, 2017 , 24 （ 27 ） : 21973-21983.
4. MORITZ A,HELIE J F,PINTI D L,et al． Methane baseline concentrations and sources in shallow aquifers from the shale gas-prone region of the St． Lawrence low­lands （ Quebec,Canada） [J]． Environmental Science ＆ Technology,2015,49（ 7） : 4765-4771.
5. WANG Bing（ 王兵） ,LI Zhenzhen（ 李珍珍） ,LI Xi（ 李 琋 ） ,et al． On the contamination features and their rela­tionship with the physicochemical properties of petroleum hydrocarbon polluted soils in the shale-gas fields [J]． Journal of Safety and Environment （ 安全与 环境 学 报） , 2018,18（ 4） : 1598-1604．
6. CHEKOL T,VOUGH L R,CHANEY R L ． Plant-soil- contaminant specificity affects phytoremediation of organic contaminants[J]． International Journal of Phytoremedi- ation,2002,4（ 1） : 17-26．
7. SAATY T L． A Scaling method for priorities in hierarchical structures[J]． Journal of Mathematical Psychology ,1977 （ 15 ） : 234-281．
8. BHUSHAN N． Strategic decision making: applying the

analytic hierarchy process [M]/ / RAI K． IPA-concepts and applications in engineering ． London: Springer-Veriag, 2004: 41-44. http: / /www． doc88. com /p-

3572312895306. html．

1. SAATY T L． Theory and applications of the analytic net­work process : decision making with benefits,opportuni- ties ,costs,and risks[M]/ / VARGAS L G． Economic , political ,social and technological : applications with bene­fits, opportunities , costs and risks． Commonwealth of Pennsylvania,USA: RWS Publication,2005 : 193-204.
2. SAATY T L． Decision making with the analytic hierarchy process[J]． International Journal of Services Sciences , 2008,1（ 1） : 83-98.
3. LIU Lianghui（ 刘良会 ） ,WANG Shoucheng （ 王守城 ） ． Application of analytic hierarchy process on the choice of planted forest [J]． Journal of Agricultural Mechanization Research（ 农机化研究） ,2008,8: 184-186．
4. JI Guibin （ 季 贵斌） ,LIANG Li （ 梁 力） ,ZHAO Ying （ 赵颖 ） ． Evaluation for the ecological adaptability of the mixed vegetation group of highway slopes[J]． Journal of Safety and Environment（ 安全与环境学报） ,2016 ,16 （ 6） : 360-365．
5. GUMUS A T． Evaluation of hazardous waste transporta­tion firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology [J]． Expert Systems with Applications, 2009,36（ 2） : 4067-4074.
6. SEYEDMOHAMMADI J,SARMADIAN F,JAFARZA- DEH A A,et al． Application of SAW ,TOPSIS and fuzz­y TOPSIS models in cultivation priority planning for maize, rapeseed and soybean crops [J]． Geoderma, 2017,310: 178-190.
7. LIU Lina（ 刘丽娜） ,SHI Junnan （ 石军南） ,CAO Mingyong （ 曹 明 勇 ） ． Study on the bxtraction of forest vegetation types based on GF-1 remote sensing image [J]． Central South Forest Inventory and Planning（ 中南 林业调查规划） ,2015,34（ 4） : 27-31
8. LIU Jichao （ 刘继朝） ,ZHANG Yanping （ 张燕平） , ZOU Shuzeng（ 邹树增） ． Effects of oil-contaminated soil on the germination and growth of plant seedling[J]． Bul­letin of Soil and Water Conservation（ 水 土保 持通 报） , 2009（ 3） : 123-126．
9. JU Shijie（ 鞠世杰） ,LIU Hao（ 刘昊） ,ZHENG Jian（ 郑 剑 ） ． Effect of petroleum pollution on seed germination and early growth of several plants[J]． Journal of North­ern Agriculture（ 北方农业学报） ,2016 ,44 （ 6 ） : 59-62．
10. WANG Yi（ 王艺） ,WEI Xiaoli（ 韦小丽） ． Advance on the effects of different light environments on growth, physiological biochemistry and morphostructure of plant [J]． Journal of Mountain Agriculture and Biology （ 山地 农业生物学报） ,2010,29（ 4） : 353-359．
11. LIANG Huiping（ 梁惠萍 ） ． Effect of soil water stress on growth and physiological-biochemical characteristics of Aquilaria sinensis seedling （ 土壤水分对珍贵树种土沉 香幼苗生长及生理特性的影响） [D]． Nanning: Guangxi University,2013 ．
12. LI Bingyang （ 李兵 阳） ,YAN Jingjing （ 颜 晶晶） ,WEI Zhikun（ 韦志坤 ） ． Effect of temperature on seed germi­nation characteristics of alstonia scholaris[J]． Agricul­tural Research and Application （ 农业研究与应用） , 2016（ 5） : 8-11．
13. ADAM G， DUNCAN H． Influence of diesel fuel on seed germination[J]． *Environmental Pollution*， 2002 ， 120 (2) : 363-370.
14. HUANG Jian( 黄建) ， TIAN Changyan( 田长彦) ， BIAN Weiguo(卞卫国). Response of growth of four halophyte species in oil-contaminated soil J . *Arid, Zone Research* ( 干旱区研究) ， 2014， 31 ( 1 ) : 100-104.
15. JIA Jianli( 贾建丽) ， LIU Ying( 刘莹) ， LI Guanghe( 李 广贺) . Contamination characteristics and its relationship with physicochemical properties of oil polluted soils in oilfields of China[J]. *Journal of the Chemical Industry and Engineering Society of China* ( 化工 学 报) ， 2009， 60( 3) : 726-732.
16. WANG Chuanyuan ( 王传远) ， YANG Cuiyun( 杨翠 云) ， SUN Zhigao( 孙志高) . Contamination characteris­tics and its relationship with physico-chemical properties of oil polluted soils in the Yellow River Delta Swamp [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*( 水土保持 学报)， 2010， 24(2): 214-217.
17. ANDRADE W L B， MARANHO L T. Phytoremediation of petroleum contaminated soil using *Alternanthera phi- loxeroides* ( Mart. ) Griseb[J]. *IV Solabiaa Latin Ameri­can Congress*， 2015， 11 : 8-13.
18. ZHAO Xiaojuan( 赵小娟) ， YE Yun( 叶云) ， ZHOU Jinhao( 周 晋 皓) ， et al. Comprehensive evaluation of cultivated land quality and sensitivity analysis of index weight in hilly region of Pearl River Delta[J]. *Transac­tions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* ( 农业工程学报) ， 2017， 33( 8) : 226-235.
19. CHEN Xiaobing ( 陈 小 兵 ) . *Isolation and screening of plant endophytic bacteria and plant bacteria combined-re­mediation of PAHs in soil*( 植物内生细菌的分离筛选及 其与植物联合修复土壤多环芳烃的研究) [D]. Nan­jing: Nanjing Agricultural University， 2007.

Assessment for phytoremediation plant growth in petroleum contaminated soil via analytic hierarchy process

WANG Bing1，2，3 ， XIE Hong-li2， REN Hong-yang1，2，3 ， LI Xi2，3

( 1 State Key Laboratory of Petroleum and Petrochemical Pollu­tion Control and Treatment， Beijing 102206， China; 2 School of Chemistry and Chemical Engineering， Southwest Petroleum Uni- versity， Chengdu 610500， China; 3 Environmental Protection Oil and Gas Fields in Sichuan Province Key Laboratory of Pollu­tion Control and Environmental Safety， Chengdu 610500， Chi­na)

Abstract: The present paper intends to introduce and construct a plant evaluation system for petroleum-contaminated soil through an analytic hierarchy process ( AHP) and the technology for the order preference in combination with the current situation of changing shale gas operation to the ideal solution ( TOPSIS) in Sichuan through simulation. And， it is of course of extremely great significance and a vital step to evaluate the suitability of the plants for the current field and make the spoilt plants to get sur­vived and succeed in phytoremediation strategy. For such a re­search goal， 2 multiple decision analysis methods have to be in­troduced to address this issue effectively and reduce the workload and time consumption through an experiment or/and an *in-situ* trial. The said comprehensive evaluation system with 3 criteria and 9 indexes has to be established by AHP， including the plants physiological features ( *B*1 ) ， the natural environment conditions ( *B*2 ) and the soil environmental factor ( *B*3 ) . Specifically speaking， the evaluation system should include the survival rate ( *C*1 ) ， the germination rate( *C*2 ) ， the growth rate( *C*3) ， the bio- mass( *C*4 ) ， the light intensity( *C*5) ， the moisture( *C*6 ) ， the tem- perature( *C*7 ) ， the petroleum hydrocarbons( *C*8 ) and the soil's fertility( *C*9 ) . Through the necessary evaluation， the said com­prehensive system can be calibrated through the weight sensitivity analysis and a pot experiment to provide a theoretical basis for the phytoremediation processing. And， then， through the field inspection and literature review， it would be possible for us to screen out 13 plants to be the recovered plants in transforming the shale-gas field in Sichuan before the decision-making. And， then， through calculation， the results indicate that of all the above mentioned 9 indicators， the weight of the survival rate， the moisture and the petroleum hydrocarbons in the corresponding criteria turn out to be higher than the other indicators， with the weight of moisture being the greatest among all the said 9 factors. And， apart from that， the sensitivity coefficient of all the other indicators proves to be consistent with its weight according to the weight sensitivity analysis system， except for the light intensity. And， furthermore， the weights of the evaluation system have also been proven to be reasonable in accordance with the AHP stand­ard. Hence， through ranking of the 13 sorts of plants surviving situation， the *Alternanthera philoxeroides* proves to be the greatest surviving potential in the phytoremediation strategy. In addition， in comparison with the decision-making order， the pot experi­ment we have done in this paper also confirms that *Alternanthera philoxeroides* tends to be highly tolerant with the petroleum-con­taminated soil in Sichuan shale-gas transformation fields， which comes out consistent with the order of our decision-making. Thus， it can be seen that the evaluation system we have adopted turns out feasible for the plant growing of the phytoremediation process in the petroleum-contaminated poor soils.

Key words: environmental engineering; petroleum-contaminated soil; phytoremediation; AHP; TOPSIS

CLC number: X53 Document code: A Article ID: 1009-6094( 2019) 03-0985-07

1. 收稿日期: 2018-10-17

   作者简介：王兵，教授，从事油气田环境保护研究,wangb @ swpu． edu． cn。

   基金项目： 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开

   发项目(2016D-5006 -08)；四川省科技计划 项目( 15ZC1322) [↑](#footnote-ref-2)