DOI :懈魏瀏肪切ijkxxb梆彌檢悯;

第27卷第3期

2007年3月

环境科学学报

Acta Scientiae Circimstantiae

王忠强，刘婷婷,孟宪民，等.2007.泥炭保护紫花苜蓿根系对柴油污染土壤修复的研究[JJ.环境科学学报，27(3)： 421 - 425

W ang Z Q Liu T T Meng X M, *et al* 2007 The protection of peat on alfelfe roots for phytoremediation of diesel fiiel contaminated soil[ J]. Acta Scientiae C ircum stantiae 27(3)： 421 - 425

泥炭保护紫花苜蓿根系对柴油污染土壤修复的研究

王忠强1,2 \刘婷婷\孟宪民\王升忠I,吴良欢2

L东北师范大学泥炭研究所，长春130024

2浙江大学教育部环境修复与生态健康重点实验室，杭州310029

收稿日期：2006- 04^ 04 修回日期：200&1卜29 录用日期：2006- 12- 30

摘要:采用盆栽试验，观察了泥炭保护根系移栽和直播2种栽培方式处理的紫花苜蓿在柴油污染土壤中的生长情况及其对土壤中柴油污染物 的去除情况，探讨了利用泥炭保护根系措施清除土壤柴油污染物的可行性•结果表明，泥炭保护根系处理有利于紫花苜蓿根系形态发育，能促 进根系细菌和真菌的繁殖，并显著提高根区土壤柴油降解率.

关键词:泥炭；紫花苜蓿；根系保护；根系形态;柴油污染土壤;植物修复

文章编号：0253-2468(2007)03- 0421- 05 中图分类号：X53 文献标识码：A

The protection of peat on al&l& roots for phytoranediation of diesel fiiel contem hated soil

WANG Zhongqiang z \ LU Tingting1, MENG Xianmin1, WANG ShengAong1, WU Lianghuan

L Peat Institute ofNorttieastNomalUniversity Changchun 130024

2 Ministry of Education Key Lab of Environmental Remediation and E cosystem Heallh Zhejiang University H ang^iou 310029

**Received** 4 April 200$ **received** in revised fom 29 November 200^ **accepted** 30 December 2006

**Abstract** The grcwti of plant roots and tie rapid propagation of ih izospherc m icrooigan isn s p lay mportant roles on phytoremediation of tie contaminated soil It is an effective mefliod to construct a protection zone around roots suppling a well grewing space for roots and microbial ccmmunity in tie contaminated soil A potted expermentwas conducted to investigate tfie effect on alfelfe gnwlh rootmorphofogy and lhe degradation ofdiesel foelby tvo culture me ftiods transplant after peat protecting roots and direct seeding The results shewed ftiat tie protection of peat on roots in proved lie morphobgical characteristic of roots and tie propagation of riiizosphere microoiganians enhanced lhe rate of tie degradation of diesel fiiel in lie contaminated soil around roots

**Keywords** peat alfel^ root protection rootmorphofogy diesel fiiel contaminated soil phytoremediation

基金项目：东北师范大学青年自然科学基金(No 111494006)；国家自然科学基金项目(No 30370838)

**Supported by** ttie Young Natural Science Foundation ofNortieastNomal University (No 111494006)and lie National Natural Science Foundation of China (No 30370838)

作者简介：王忠强(1973—)，男，讲师(博士研究生)；\*通讯作者(责任作者)，圧mail wangzq027@nenu edu cn

**B iography** WANG Zhongqiang( 1973— ), male lecturer(Ph D Candidate)； **\* Correspondiig audios** 圧mail wangzq027@nenu edu cn

1. 引言(Introduction)

石油的开采、运输、加工和使用的过程中会造 成多种桂类有机污染物向土壤中排放，使土壤物理 化学性质发生改变，并阻碍根系发育，影响植物生 长.更严重的是，石油含有的苯类有机物、多环芳桂 等有毒物质易在植物体内积累而进入食物链，威胁 人类和动物的健康(Ting 1999 Vasudevan 2001 ). 随着石油使用量的增加，石油及其加工品对土壤环

境危害愈加严重，石油污染土壤的修复成为亟待解 决的环境问题.植物修复作为清洁、低成本和生态 安全的污染土壤修复方法已得到广泛认同和重视, 但土壤环境、气候条件和土壤污染物制约植物的生 长，影响植物的修复效率.根系是养分吸收和土壤 污染物最先毒害的器官，根系生长形态不仅影响植 物地上部的生长，也影响根际微生物、根系分泌物、 根际的田和*Eh*的变化，这都显著地影响污染物在 根系的化学过程，进而影响植物对污染物的吸收、

转运和降解（Glick 200$ Chen 2003）.因此，如何为 植物根系进入污染土壤提供保护机制，强化植物根 系有效生长已成为促进植物修复技术发展的关键 问题（Wenzel 1999）.

泥炭作为沼泽中死亡植物残体长期积累转化 形成的有机矿产资源，其有机质含量高、疏松多孔、 通气透水性好，并含有氨基酸、腐殖酸和氮磷钾等 多种养分,对植物生长有生理刺激作用，是优良的 植物、微生物生长载体和土壤改良剂（张则有， 2000）.以泥炭介入植物儀生物-污染物的根圈区 域，形成一个有利于根系生长和微生物繁殖的泥炭 保护小环境，为植物进入污染土壤提供了一个生长 缓冲区，减轻或避免植物直接进入污染土壤而受到 伤害，从而提高植物在污染环境的适应能力和污染 修复效果.本文研究在泥炭保护的条件下，紫花苜 蓿在污染土壤中的生长、根系形态、根系微生物和 柴油污染物去除等情况，探讨利用泥炭强化和保护 根系消除土壤柴油污染物的可行性，为有机物污染 土壤的修复提供新方法和思路.

1. 材料和方法（Materials andmetfiods）

2 1供试材料

供试土壤:采自杭州市某菜地0〜20on的表层 土，自然风干后过2mm筛.基本理化性质：有机质含 量 L 34%，全氮 720 mg kg「全磷 550 mg kg" \ 全 钾 380 mg *kg\* pH 值 6 3（水土比 2 5 1）.按 5% （质量比）的比例，将20嗓油加入风干的土壤后混 合均匀，放置10d后进行盆栽试验.

供试泥炭:泥炭采自吉林省辽源市东丰县仁合 乡.基本理化性质：泥炭类型为裸露草本泥炭;黄褐 色;干容重为Q 34g <m匕粗灰分为50 92%；有机 质含量为43 25%；腐殖酸含量为22 75%；屮值为 6 2（水土比2 5 1）；全氮1240 mg kg匕全磷700 mg kg-\全钾820 mg kg-1.泥炭风干脱水，经粉碎 机粉碎（纤维长度大于2mm占75%以上）,与珍珠 岩按4 1（体积比）混合均匀后装入宽为5cm高为 5（m的方形塑料钵中，每钵泥炭基质质量为20g含 包膜控释肥料Q 2g（美国scotts公司，20- 10-20）.每 钵育苗1株，在根尖露出泥炭后一起移栽至污染土 壤中种植，使泥炭在根系形成一个块状体，以达到 泥炭保护根系的目的.

供试植物：紫花苜蓿，产自东北师范大学草地 研究所.

2 2试验处理

采用（25anX20an）塑料盆，每盆装柴油污染土 6kg试验处理：1为对照（无植物种植）；2为苜蓿直 播；3为苜蓿泥炭育苗移栽（泥炭保护）；每处理重复 6次.于2005年7月16日同时在泥炭钵和污染土 壤中播种9 15d后将泥炭钵移栽至污染土壤中，每盆 留苗1株，60d后采收并进行土壤、植物和污染物分 析.盆栽土壤施肥量：1kg 土施，普通复合肥（IS 1S 15）0 5kg 土壤湿度保持在田间持水量的60%.试 验布置在浙江大学华家池校区温室.

1. 3分析测试

取泥炭块体外部根系所附带的土壤抖落部分， 混合均匀，按四分法取样，重复3次,空白和直播处 理也取相对应的位置的土壤，土壤微生物测定采用 稀释平板法培养计数法测定，细菌培养为牛肉膏蛋 白月东培养基，放线菌为高氏一号培养基，真菌为马 丁氏培养基（许光辉,1986）； 土壤中柴油含量测定 采用重量法（谢重阁，1987）.泥炭腐殖酸含量采用 焦磷酸钠碱溶液抽提容量法测定，灰分采用灼烧法 测定，有机质、全氮、全磷、全钾和容重同土壤常规 分析方法测定（中国科学院山西煤炭化学研究所， 199■鲁如坤，2000）；根系形态采用全自动根系扫 描仪测定，使用 WinRHK）（Regent Instiunents Inc） 软件分析;采用SIATISTCA 5. 5统计软件进行数据 处理和分析.

1. 结果（Results）

3 1泥炭保护根系对苜蓿在柴油污染土壤中生长 的影响

从表1可以看出，在柴油污染土壤中，以直播和 泥炭保护根系移栽2种方式种植的紫花苜蓿生长有 显著差异.其中泥炭保护根系处理的株高、地上部 鲜重比直播处理提高了 40 9%. 141 3%,直播处理 的苜蓿植株相对矮小，生长缓慢；而紫花苜蓿的地 下部生长在泥炭保护条件下，主根长和根系鲜重明 显高于直播处理，分别提高了 45 9%和211 8%,直 播处理的根系受柴油污染物的毒害作用较为明显. 上述现象基本说明泥炭在植物根部的存在有助于 紫花苜蓿在柴油污染土壤中的生长和生物量的 提高.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 表**1**不同处理对紫花苜蓿生长的影响 | | | |
| Table 1 | Effect of different treatnents on alfelfe grcwfli | | |
| 处理  Trcatnent | 株高 | 地上部鲜重 | 主根长 | 根鲜重 |
| Shoot height | Above ground fresh weight | Main root lengfli | Root fresh weight |
| /( an- plant-1 ) | /(g plant-1 ) | /(cm- plant-1 ) | /(g plant-1 ) |
| 直播 | 43. 1 +7 lb | *9.* 67+3. 21b | 13. 5 土L 3b | 2 03 +Q 95b |
| 泥炭保护 | 6Q 7 +8 5a | 23 33 ±4 21a | 19. 7 +1 5a | 6 33 +1 53a |

注：数据之间的显著性差异用Dancan检验*,P<d* 05同一列的数据上标的字母不同表示处理间有显著差异，字母相同表示处理间无显著 差异，下同.(The difference treats were tested by Oneway AVONA numbers which on ftie same line folkwed by different letters were significant^ different atP<Q 05 ftie same as follcws).

3 2泥炭保护根系对苜蓿在柴油污染土壤中根系 形态的影响

紫花苜蓿根型为直根和侧根组成.从表2可以看 出,泥炭保护根系措施对紫花苜蓿的根系形态有明显 的影响.泥炭保护处理与直播处理相比较总根长、根 系体积、根表面积、根平均直径、根尖数和侧根数达到 显著差异;泥炭处理的总根长、根表面积、根系体积、 根尖数和侧根数分别是直播处理的1 77倍、3 35倍、 6 22倍、1 53倍和2 77倍.表3显示了各处理不同直 径根系的长度分布情况.从表3可以看出，不论何种 处理，紫花苜蓿都以直径DWO lmn的根系长度为 主，占总根长的60%〜70%,泥炭保护处理对直径D <0 7mm的各级别根系长度有显著影响，约为相应各 同级别直播处理的根系长度的2倍;在0 7mm<D C 0 9mm的根系直径范围，泥炭保护与直播处理对 根系长度影响差别不大，而对直径*D>9mm*的根系长 度，直播处理明显高于泥炭保护处理.这进一步表明 泥炭介入根系，对根系形态有显著的影响，有利于直 径较小(XQ 1mm)的细根发育，使泥炭保护处理的 根尖数和根表面积等形态指标显著高于直播种植的 处理，而这些形态指标的增加将有助于根系接触和降 解污染物.

表*2*不同处理对紫花苜蓿根系形态的影响

Table 2 Effect different treatnents on mot morphological characteristic of alfelfe

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理  Treatnent | 总根长  Total root lengfli /( an- plant-1 ) | 根表面积  Root surfece area /( an2- plant-1 ) | 平均直径  Average root diameter him | 根系体积  Root vo hue  /( an3- plant-1 ) | 根尖数  Root tips | 侧根数  Folks |
| 直播 | 713. 5 +378 0b | 103 9+7L 0b | Q 39+Q 07b | 1 21 *土Q* 90b | 15112 d^98b | 12505 +7548b |
| 泥炭保护 | 1265. 3 +15Q 0a | 348 1士116 0a | 1. 03 土Q 42a | 7 53 土4 23a | 23192 +1770a | 34628 +4569a |

表**3**不同处理对不同直径紫花苜蓿根系长度分布的影响

Table 3 Root lengfli distribution of root dianeter classes of alfelfe under different treatnents an

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理 | 0mm<D | Q 1mm VD | Q 2mm VD | Q 3mm<D | Q 4mm VD | Q 5mm< *D* | Q 6mm VD | Q 7mm<D | Q 8mm<D |  |
| Treatnent | W Q 1mm | W Q 2mm | W Q 3mm | W Q 4mm | W Q 5mm | W Q 6mm | WQ 7mm | W Q 8mm | W Q 9mm |  |
| 直播 | 481 05 | 61 24 | 53 55 | 33 63 | 11 82 | 2& 58 | & 66 | 3. 40 | 5. 48 | 26 07 |
| 泥炭保护 | 814 71 | 121 58 | 134 51 | 81 45 | 23 71 | 54 33 | 15. 87 | 3. 19 | 8 18 | 7 71 |

注:D 表示根系直径(单位 mm) (D is root dianeter unit mm)

| Table 4 E flfect of different treatnents on soilm icrobe under different treatnents | | | |
| --- | --- | --- | --- |
| 处理  Treatnent | 细菌 /( cfo g-1 )  Bacterial | 真菌 /( cfii )  Fungi | 放线菌/(cfo g-1)  Actincmycete |
| 对照 | (16 60+7 97)X10% | (4 19+2 31)X10% | (8 66 +1. 05)X103a |
| 直播 | (35. 78 +5. 60)X10% | (14 30+6 86 )X10北 | (14 37 ±2 23)X10% |
| 泥炭保护 | (IQ 35 +2 39)X106a | (5. 00+1 20)X 104a | (13 07 05)X103a |

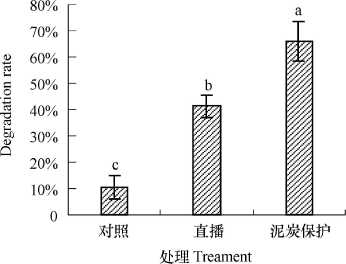
表**4**不同处理对土壤微生物的影响

3 3泥炭保护根系对柴油污染土壤微生物的影响 利用传统的平板计数法初步检验了泥炭保护 根系处理、直播处理和不种植植物处理的柴油污染 土壤的微生物的变化情况.从表2可以看出，种植苜

蓿处理的土壤中的细菌和真菌数量明显高于不种 植苜蓿的土壤，而泥炭保护根系处理的细菌和真菌 数量最多，与直播处理和对照(无植物种植)相比呈 显著性差异;而各处理的放线菌数量差异不显著.

3 4泥炭保护根系对根区土壤中柴油降解的影响

在一定时间内土壤石油污染物的降解量是衡 量修复技术可行性的重要指标，而植物对石油污染 物的降解作用主要体现在根区土壤的污染物的去 除程度.从图1可以看出，在60d的试验期内，不同 处理的根区污染土壤柴油降解率有显著差异，不种 植植物的处理(对照)仅为1Q 6%,苜蓿直播为 41.3%,而泥炭保护苜蓿根系处理的柴油降解率高 达66 1%；在60d的苜蓿生长期后，泥炭保护处理 相对于直播和对照处理，使柴油降解率提高了 24.8%和55 5%.可以看出，泥炭保护根系对植物 生物量、根系形态和土壤微生物的有益影响有助于 根区土壤柴油的降解.



图**1**不同处理对石油降解的影响

Fig 1 E fifect of different treatnents on diesel oil degradation rate

of soil

1. 讨论(Discussion)

由于污染土壤生长环境的制约，植物的生长速 度和生物量都受到严重影响，而植物是否能有效地 生长是污染土壤植物修复的关键之一.植物根系是 植物与土壤污染物接触的直接器官，是植物和污染 物相互作用的桥梁，土壤污染物的存在影响着植物 根系发育和根系形态，而根系的根长、根表面积和 根体积等形态指标变化，也影响着污染土壤植物修 复的效率(Nicole 200,魏树和,2005 ). Gillian等 (2002)的研究表明，紫花苜蓿通过种子直播进入柴 油污染土壤，会受到柴油隔绝空气和水分的影响， 抑制种子萌发和影响苜蓿的后期生长;而泥炭保护 根系处理是利用泥炭育苗移栽措施达到保护根系 的目的,可避免或减轻苜蓿从种子萌发到成长过程 中直接受到污染物质的危害，从而提高了苜蓿对柴 油污染物胁迫的忍耐性.微生物对石油污染物的降 解和矿化作用被认为是石油污染土壤修复的主要 途径(Schnoor 1995),而由植物根系和土壤微生物 组成的根际圈是植物修复污染土壤的重要区域.调 节该区域的生物生长条件和生长行为成为石油污 染土壤植物修复的关键.目前，植物与微生物在根 系的有效结合去除石油污染物是土壤修复重要的 发展方向之一 (Maria 2002 Lin 2004).泥炭的pH 值一般在5. 5〜6 5具有酸碱缓冲能力，含碳量 50%〜60%,含氮量为Q 8%〜3 5%,是适宜微生 物繁殖的载体(柴岫，1990).以泥炭和植物根系形 成一个易于外源微生物生长的空间，可能是污染物 的外源降解菌在污染土壤定殖和发挥作用的可行 方法.Jennifer等(2005 )利用多年生黑麦草和紫花 苜蓿结合改变石油污染土壤中的根系微生物群落， 结果显示，对柴油污染物降解有明显的促进作用； 而Marja(2002)等发现豆科植物对土壤石油污染物 的清除效率明显好于非豆科植物.Johnson等 (2004)利用泥炭为生长载体，在黑麦草和白翘摇根 部接种 PAHs降解菌 *Rhizobium legion inosarum bv* 劝&加联合去除土壤中的PAH$将微生物修复和植 物修复结合降解土壤有机污染物进行了初步研究， 取得一定的效果.

传统的物理和化学修复技术由于存在工程成 本高、二次污染等弊端在实际应用中受到限制，以 植物修复和微生物修复为主的生物修复技术被认 为是较有前途的土壤修复技术(宋玉芳，2004).结 合微生物和植物修复优点的修复技术是一个重要 的研究方向，而利用根系形态、根系分泌物促进和 发挥微生物作用而实现植物和微生物联合修复污 染土壤成为可能(Gao 2005 ).本研究表明，利用泥 炭具有的促进植物生长、改变根系形态、增加土壤 肥力、稳定土壤结构、能为土壤微生物活动提供碳 源和养分等特点，以植物根系作为修复核心，形成 一个植物-泥炭-微生物联合修复系统，实现有机物 质、微生物和植物联合修复和改良石油污染土壤， 可以达到改善植物根系小环境修复污染土壤大环 境的目的.这是一个值得进一步研究的土壤修复 技术.

1. 结论(Conclusions)
2. 通过泥炭保护根系育苗移栽的措施可以显 著促进紫花苜蓿在柴油污染土壤中的生长，促进根 系形态的发育，提高紫花苜蓿进入柴油污染土壤的 适应能力.
3. 泥炭介入根圈区域后，对根系土壤微生物的 繁殖有促进作用，而对于泥炭对专一降解菌的繁殖 动态影响和土壤微生物多样性的影响还需进一步 利用先进方法进行检测分析.
4. 将泥炭与紫花苜蓿结合起来修复柴油污染 土壤的方法能显著提高根区土壤柴油的降解率.

**References**

ChenY X He Y Luo Y M. 2003 Physiobgical mechanisn of plant roots exposed to cadmium [ J]. Chcmosphee 50： 789— 793 ChaiX 199Q Peatland [M]. Beijing Geobgical Press 90— 116 ( in Chinese)

Johnson D L Maguire K *I* Anderson D R 2004 Enhanced dissq)ation of ch ly sene in planted soil iie mpactofa ihizobial Inoculum [ J]. Soil B io logy & B iochem istiy 36： 3 3— 3 8

Gao Y 3 Zhu L Z 2005 Phytoremediation for phenantfirene and pyrene con tan mated soils [ J]. Journal ofEnvironmental Sciences 17(1)： 14—18

Gillian A Hany D. 2002 Influence of diesel fiiel on seed gemination

[J]. Environmental Pollution 120： 363— 370

Glick B R 2003 Phytoremediation： syneigistic use of plants and bacteria to clean up tie environment [ J]. Bio techno bgical Advances 21： 383— 393

Jennifer LK, John NIC Hung L *et al* 2005 The effects of perennial lyegrass and alialfe on microbial abundance and diversity in petroleum contaminated soil [ J]. Environmental Pollution 133： 245—465

Lin X LiP J Zhou Q X 2004 M icrobial changes in ihizospheric soils contaminated wifli petoleum hydrocaibons after biorcmediation [J]. Journal ofEnvironnental Sciences 16( 6)： 987 990

Lu R K 1999 Ana^ticalMeftiods for SoilAgrochcm istiy [M]. Beijing

China Agriculture Press 110— 336 ( in Chinese)

Maria T Thanas G R Angela S 2002 Bacterial rhizosphere populations of black poplar and heibal plants to be used for phytoremediation of diesel fiiel [ J]. SoilBiobgy & B iochem istiy 34 1883- 1892

M arja R T Pich tel J JaakkoA P. 2002 Phytoremediation of subarctic soil contaminated witti diesel £iel [ J]. Bio re source Techno bgy 84 221— 228

N icoleM, Rainer S K, Camen I 2005. Phy to ran ed iation in ttie topics influence ofheavy crude oil on rootmorphobgical characteristics of graminoids [ *J].* Environmenta 1Polhtion 13& 86—91

Song YE Song X Y Zhang W, *et al* 2004 Issues concerned witi lhe bio remediation of con tan mated soils [ J]. Environmental Science

25(2)： 129-133

Schnoor J L lichtL A Mccutcheon S G *etal* 1995 Phytoronediation of organic and nutrient contaminants [ J]. Environment Science Technobgy 29(7)： 318-323

Institute of ShanXi Coal Chemistry CAS 1995. Ana^ticalMeftiods for Humic acid Products and its Raw Material [ J]. Humic Acid 4 7— 24 ( in Chinese)

Ting Y B Hu H L Tan H M 1999 Bioremediation of petroleum hydrocaibons in soilm icrocoans [ J]. Resource and Enviromiental B io techno bgy 2： 197— 218

V asudevan H Raja ran P 2001 Bioremed iation of oil sludge contam mated soil [ J]. Environment International 26： 409一 411

Wei S H, Zhuo Q X Zhang K, *et al* 2003 Roles of riiizosphere in remediation of contaminated soils and itsmechanians [ J]. App lied Ecobgy 14(1)： 143- 147 ( in Chinese)

WenzelW W. 1999 Manipulating ihizosphere chemistiy to controlmetal and oiganic contaminant availability and mp lication to phytorcmediation [A]. /Second international Confercnce on

Contaminants in lie Environment in flie Australasian PacifieRegion [C]. New Delhi India 105— 106

Xie C G. 1987 Anafytical Meiiods for Petroleum con tan inant in environment [M]. Beijing China Environmental Science Press 70— 80 ( in Chinese)

XuGH, ZhengH Y 1986 Ana^ticalMefliods for SoilM icrobe [M]. Beijing China Agriculture Press 102一 110 ( in Chinese)

Zhang Z Y 200Q Devefopment and U tilization of Peat Resource [M]. Changchun： Jinlin Science and Technobgy Press 38— 80 ( in Chinese)

中文参考文献：

柴岫.199Q泥炭地学[M].北京：地质出版社，90-116

鲁如坤.200Q 土壤农化分析法[M].北京：中国农业科技出版社， 110—336

宋玉芳，宋雪英，张薇，等.2004污染土壤生物修复中存在问题的 探讨[J]・环境科学，25(2)： 129-133

魏树和，周启星，张凯松，等.2003.根际圈在污染土壤修复重的作 用与机理分析[J].应用生态学报，14(1)： 143-147

谢重阁.1987.环境中石油污染物的分析技术[M].北京：中国环 境科学出版社，70- 80

许光辉，郑洪元.1986 土壤微生物分析方法手册[M].北京：农业 出版社，102—110

张则有.200Q泥炭资源开发与利用[M].长春：吉林科学技术出 版社，38-80

中国科学院山西煤炭化学研究所.1995.腐殖酸类产品及其原料的 分析方法汇编[J]・腐殖酸，4 7—24