

参赛队员名称：蔡芸彤，李梓楠，杨子玉

中学：北京王府学校

省份：北京

国家/地区：中国

指导老师 1 姓名：张扬

指导老师单位：北京王府学校

指导老师 2 姓名：胡文博

指导老师单位：中国科学院南京土壤研究所

论文题目：北京废弃矿场现状以及治理修复

对策研究—以门头沟区王平矿场为例

北京废弃矿场现状以及治理修复对策研究

—以门头沟区王平矿场为例

作者：蔡芸彤，李梓楠，杨子玉

摘要：植物修复技术是近两年来治理环境污染成本最低，副作用最小的治理方法之一。本文将通过分析北京市门头沟区王平煤矿废弃地的土壤以及环境现状，提出以植物修复为主要技术，改善废弃矿场的生态环境，提高土地质量，回归健康绿色生态，以便于加强北京土壤再利用率以及减少土壤流失量，为促进矿场修复提供新思路。

关键词：植物修复；环境污染；绿色生态；生物修复

Study on the Recent Status of Abandoned Mining Sites in Beijing and the Strategies for Treatment and Remediation

-- Take Wangping Mine in Mentougou District as an example

Abstract:

In recent years, **phytoremediation** has become one of the most cost-effective and least harmful methods for environmental pollution remediation. In here, through the analysis of the soil and environmental conditions of the abandoned Wangping coal mine site in Mentougou District, Beijing, proposes recommendations with **phytoremediation** as the primary method to help improve the ecological environment of the abandoned minefield, enhance soil fertility, and restore a healthy green ecosystem. This approach aims to increase soil reuse rates in Beijing and reduce soil erosion, providing new insights into minefield restoration efforts.

Keywords: phytoremediation; Environmental pollution; Green ecosystem;

Bioremediation

目 录

1. 研究的目的与意义	
1.1 北京地区矿场资源利用现状.....	4
1.2 矿场灾害及周围影响.....	5
1.3 现有理论修复手段.....	6
1.4 部分矿场现状——以王平矿场为例.....	7
2. 研究过程.....	8
3. 结果.....	9
4. 讨论.....	14
5. 植物修复相关技术应用.....	15
6. 引用.....	17
7. 致谢.....	21

引文:

绿色发展是我国近两年在环境, 商业, 工程建筑等方面全面发展的中心主题之一。继习近平提出绿水青山就是金山银山的理念后[1], 全中国都在进一步严格执行环境保护计划。北京作为中国的首都, 更是起到绿色发展的带头作用, 推动进一步生态文明建设。为构建重点领域绿色发展标准体系, 合理有效的利用现有资源, 通过法律等方式限制并强调环境保护以及危险污染物降解的重要性。废弃矿场作为继垃圾场外污染最为严重的环境之一, 废弃矿场的再修复计划也是尤为重要的。

本文通过实地考察北京市部分地区遗留历史著名矿场, 分析其生态环境的修复程度, 选择其一(门头沟区王平煤矿)作为主要研究目标。并通过寻找适合的植物修复方法, 针对矿场废弃地生物多样性低下等问题提出相关建议。结合当地生态促进废弃矿场进一步发展, 作为北京地区绿色发展先行者, 以恢复生态健康为首要目的, 帮助当地恢复新生机。

1. 研究的目的与意义:

1.1 北京地区矿场资源利用现状

作为我国重要的能量来源之一, 我国对于矿场资源的开发利用一直在持续进行。据有效数据统计, 北京市内重点工作区从 2011 年的 3981.84 公顷矿山占地逐年增长到 4190.2 公顷 (2014), 全区总矿业占地高达 6538.56 公顷[2]。尽管北京地区在 2002 年颁布了针对 2008 年北京奥运成功举办的《奥运科技 (2008) 行动规划》[3], 强调绿色节能发展, 全面监测北京空气质量, 提倡新型科技净化工业固体废弃物等。后在 2007 年由北京市园林绿化局提出的《北京市山区关停废弃矿山植被恢复规划(2007—2010 年)》[4], 众多重工产业逐渐搬离北京市区, 但对于整体土壤再利用率并没有得到有效提高的效果, 土地丢失率未来几年内依旧在逐年增高。从 2011 年的 0.5677 下降到 2016 年的 0.0326, 实际不良土壤丢失量远大于目标不良土壤丢失量[5]。2002 年决定强调绿色发展过后, 大多数矿区开始缓慢重新被植被覆盖[6], 但仍有部分地区仍存在没有或少量植被恢复迹象的废弃矿场, 其中以房山区, 门头沟区及密云区最为显著, 例如密云区的高岭镇放马峪煤矿以及门头沟区的王平煤矿。因此针对矿场恢复技术仍需要继续研究以保

证减少相关损失。

1.2 矿场灾害及周围影响

从发现矿产到开采结束, 通过直接以及间接的方式不断对外界造成持续性伤害。直接影响包括对地质层面的伤害, 对土壤, 水体以及空气的污染。间接影响包括对植物, 人体的伤害等。

1) 地质灾害

矿物开采会某种程度上使地质灾害的风险升高[7]。以四川省为例, 四川省矿上灾害类型主要包括了崩塌, 滑坡, 泥石流, 地面塌陷, 矿外塌方等[8], 容易对人身安全产生威胁, 且会造成一定经济损失。为避免此类损害发生, 我国一直存在着相关监督政策, 坚决防范矿山重大事故的发生[9]。此外矿区风险评估一直是开采过程中的重要步骤之一, 尽管部分矿山此类严重地质灾害发生的概率较低[10], 提前预知风险有必要的。

2) 土壤污染

重金属污染可以说是在矿产相关影响中最为严重的。根据部分研究表明, 中国矿产业所导致的重金属污染现象可以说是全国范围的[11]。重金属污染可以导致周边环境的一些列的问题如改变周围土壤理化特性以及土壤中的微生物群落, 直接降低土壤中的营养成分含量, 不利于当地植物生长[12]。其次开采过程中产生的酸性矿井水会通过渗透进入土壤中, 破坏土壤解构, 改变土壤电中性环境[13], 酸性的土壤环境同样会导致土壤营养流失, 减少菌群以及酶活性[14]。

3) 水体污染

水体污染主要分为井巷串水污染, 煤矸石淋滤渗污染, 地表水涌入污染以及顶托补给水污染四种。煤炭以及酸性物质会通过以上几种形式进入并污染水体, 进一步导致饮用水以及附近土壤受到污染[15]。根据部分研究表明, 许多煤矿井下产生的废水依旧存在着很大的污染性, 很多指标都达不到我国工业废水的标准排放, 甚至远远超过了标准要求[16]。以污染水体中的 COD 含量为例, 在刘燕平的研究中水体实际 COD 含量是标准含量的六倍之余[17], 严重破坏了原本生态平衡。

4) 废气污染

相比于土壤污染, 气体污染排放并没有得到更多的关注。首先是下采过程中会产生大量 CO_2 , NO_2 等有害气体, 其次在发掘过程中受煤层影响, 大量瓦斯的涌出成为周边环境中的严重隐患。废气污染还包括矿物运输过程中排放的大量温室气体, 以及爆破过程中产生的 PM_{10} , 是固体悬浮物中的主要污染物。[13]

5) 人体健康威胁

污染物会通过土壤, 水体, 空气等媒介进入循环, 对周围的一系列生物造成身体上的伤害。最首要造成污染的原因就是难以降解的重金属所导致的相关疾病。重金属锌, 汞, 铅, 铬等会导致某种程度上提高癌症的风险, 对于不同年龄段的人有着类似但不同程度上的影响[18]。其次, Cd 和 As 的长期慢性累积也会导致人体损伤, 主要表现为对骨骼系统的毒性, 更容易造成功能上以及结构上的损伤[19]。

1.3 现有理论修复手段

不同的研究从多种角度尝试处理矿场所带来的负面影响。例如针对矿场周围土壤重金属污染问题, 当下效率最高, 把不利条件降到最小的主流方案便是植物修复技术。通过超富集植物可以用根部吸收重金属的原理, 重金属在植物体内得到转换, 从高毒性的离子形式转换为低毒性的螯合物, 最终沉淀并累积在细胞壁中[20]。更有研究中提到部分植物可以将重金属离子转化为供自己所用的有机保护性化合物, 提高植物本身的抵抗能力[21]。AMF (丛枝菌根) 的发现更是进一步有效提高了植物对部分重金属的富集能力[22-23]。

其余治理方法还包括物理方法与化学处理等, 此外, 研究人员针对指定地点也提出了相对的对策。以王秀田提出的空气污染防治措施相关建议为例, 对某煤矿企业附近的空气质量起到了可观的效果。 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 在大气中的浓度分别降低了 39.45%和 31.17%[24]。

学术界对矿场也存在着其他看法。例如支持保留矿场遗址以恢复当地经济发展[25], 不人工干预当地环境, 阿巴拉契亚地区利用煤矿废弃地进行风力发电, 保证被破坏土地以另一种形式持续被利用[26]等。从生态保护以及土地资源持续性发展的角度来看, 本文并不支持此类无视污染问题的做法。

1.4 部分矿场现状——以王平矿场为例

王平煤矿位于北京市门头沟区王平镇，于 1952 年建立，隶属于京西矿务局（现京煤集团），是“京西八大矿”之一，开采的主要矿物为优质烟煤以及无烟煤，于 1994 年正式关停。到现在已经有超过八十年的历史，人员搬迁后建筑物并没有完全拆毁，现仍保留一些曾经的痕迹，由于缺乏后续的管理以及重新开发，导致矿场内环境依旧破败，一片荒芜（图 1）。矿场内与矿场外植物生物多样性差异显著，同时表现为物种数量差异以及分布密度差异，种类可参考表 1。



图 1 王平矿场现状图（图片来源：作者拍摄）

表 1 王平矿场内外物种种类对比（表格来源：作者绘制）

矿场内	矿场外
种类 Species	种类 Species
被子植物门 Angiospermae	榆树 <i>Ulmus pumila</i> L.
车前草 <i>Plantago depressa</i> Willd.	构 <i>Broussonetia papyrifera</i> (L.) L'Hér. ex Vent.
胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	黑桑 <i>Morus nigra</i> L.
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Persoon	葡萄叶铁线莲 <i>Clematis vitalba</i>
短舌匹菊 <i>Pyrethrum parthenium</i> (L.) Sm.	菊芋 <i>Helianthus tuberosus</i> L.
	藜 <i>Chenopodium album</i> L.
	野艾蒿 <i>Artemisia lavandulifolia</i> DC.
	黄荆 <i>Vitex negundo</i> L.

2. 研究过程

1) 实验材料与仪器:

过 100 目筛的王平矿场实验土和家用农培营养土; 白花三叶草种子; 恶臭假单胞菌 SHBCC D10470, 黄海芽孢杆菌 CICC10999 和表皮葡萄球菌 ATCC49134, 所使用的培养基配方参考下图 2。实验所用到的仪器为电感耦合等离子体发射光谱仪, 型号: AVIO200, 生产厂家: 铂金埃尔默公司。

图 2 根际促生菌对应培养基配方 (表格来源: 作者绘制) (各培养基具体含量)

恶臭假单胞菌	磷酸氢二钾; 硫酸铵; 氯化钠; 硫酸钠; 酵母提取物; 葡萄糖; 硫酸亚铁; 氯化钙
黄海芽孢杆菌	葡萄糖; 谷氨酸钠; 酵母提取物; 七水硫酸镁; 磷酸氢二钾; 氯化钾
表皮葡萄球菌	胰蛋白胨, 大豆蛋白胨, 葡萄糖, 氯化钠, 磷酸氢二钾

2) 实验方法:

本文通过分别对比王平矿场实验土以及家用农培营养土对白花三叶草的发芽率以及存活率的影响, 帮助分析王平煤矿的土壤成分对环境修复的挑战。

实验一: 发芽率对比 (实验组 2; 实验组 4)

分别装 30 杯约厚 3 厘米的实验土以及 30 杯约厚 3 厘米的营养土。土壤完全湿透后每个杯子中放入一粒白花三叶草种子, 一周后分别记录发芽数量。

实验二: 生长量/存活率对比 (实验组 1; 实验组 3; 实验组 5; 实验组 6; 实验组 7)

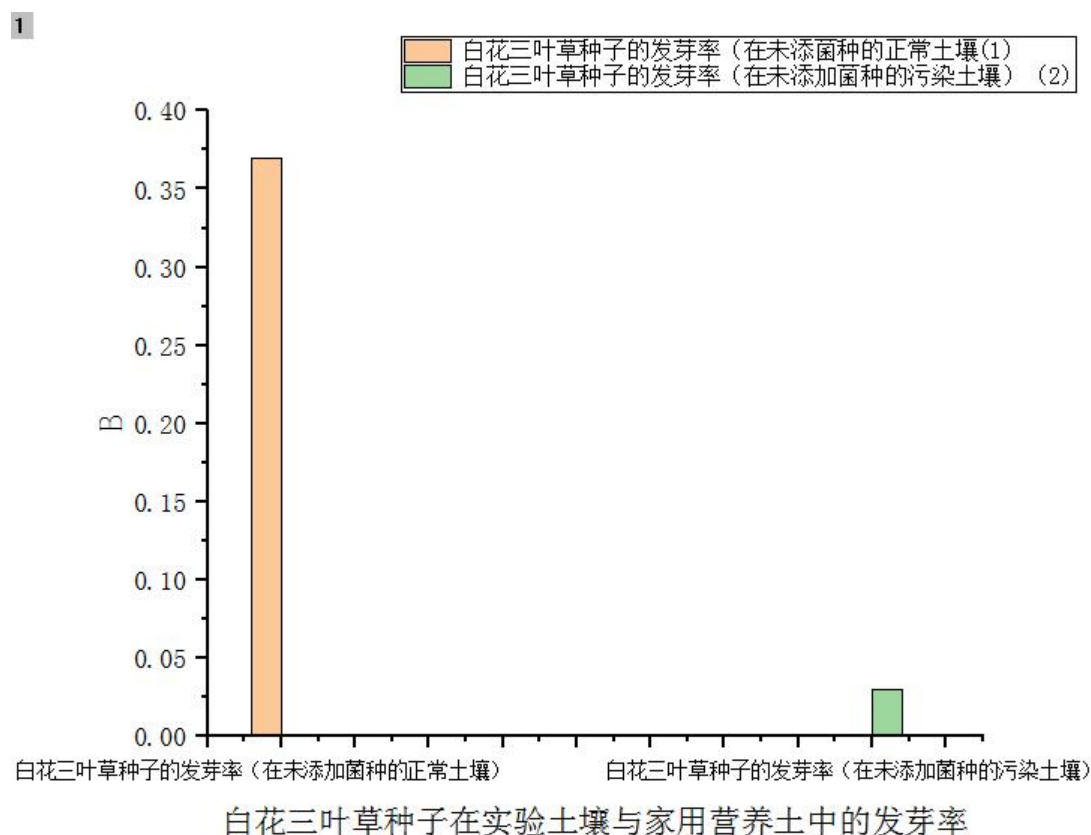
共分为 5 个实验组, 分别是实验组, 对照组, 以及三种不同从枝菌根菌对实验组的影响。分别装 120 杯约厚 5 厘米的实验土以及 30 杯约厚 5 厘米的营养土。挖出提前培养好的在相同环境下生长的白花三叶草秧苗并测量其芽高, 小心种植进每一个单独的杯子中。分别记录过程中的存活率以及 28 天周期后的生长量。同样每个实验组为 30 个样本, 三种从根际促生菌在培养基中放置到摇床上培养 2 天后注射进土壤中, 每个样本注射约 2mL 处于平台期带有活化根际促生菌的培

培养基。

3. 结果

对比七天后发芽率，实验组 4 为实验组，测试王平煤矿土壤对白花三叶草种子发芽率的影响，实验组 2 为对照组。由下图 3 可以看出，实验组与对照组相比有显著的差异性。对照组七日后发芽率为 11/30，九日后发芽率为 18/30；而实验组七日后发芽率为 1/30，其余均无发芽迹象，九日后依旧没有新芽产生，且旧芽枯萎死亡。

图 3 实验土壤与家用营养土中白花三叶草发芽率对比 (图表来源: 作者绘制)



实验组 3, 实验组 5, 实验组 6 以及实验组 7 均为王平矿场土壤实验组, 分别对应空白组, 恶臭假单胞菌组, 黄海芽孢杆菌组以及表皮葡萄球菌组。实验组 1 则是对照组, 使用的是家用种植营养土, 无其他添加。从图 4 中可以看出王平矿场土壤对白花三叶草存活率的显著影响, 从第四天起二者存货量呈显著差异, 并于七月二十二日 (第五日) 全部死亡, 而对照组中仍有十三株存活。基于以上结果, 图 5 则是对比了三种根际促生菌对植物存活率的影响。与对照组相比, 黄海芽孢杆菌以及表皮葡萄球菌对于白花三叶草的存活率并没有显著提高, 但恶臭

假单胞菌组的确延长了部分白花三叶草的存活时间。

图 4 实验土壤与对照土壤对白花三叶草芽苗存活率对比 (图表来源: 作者绘制)

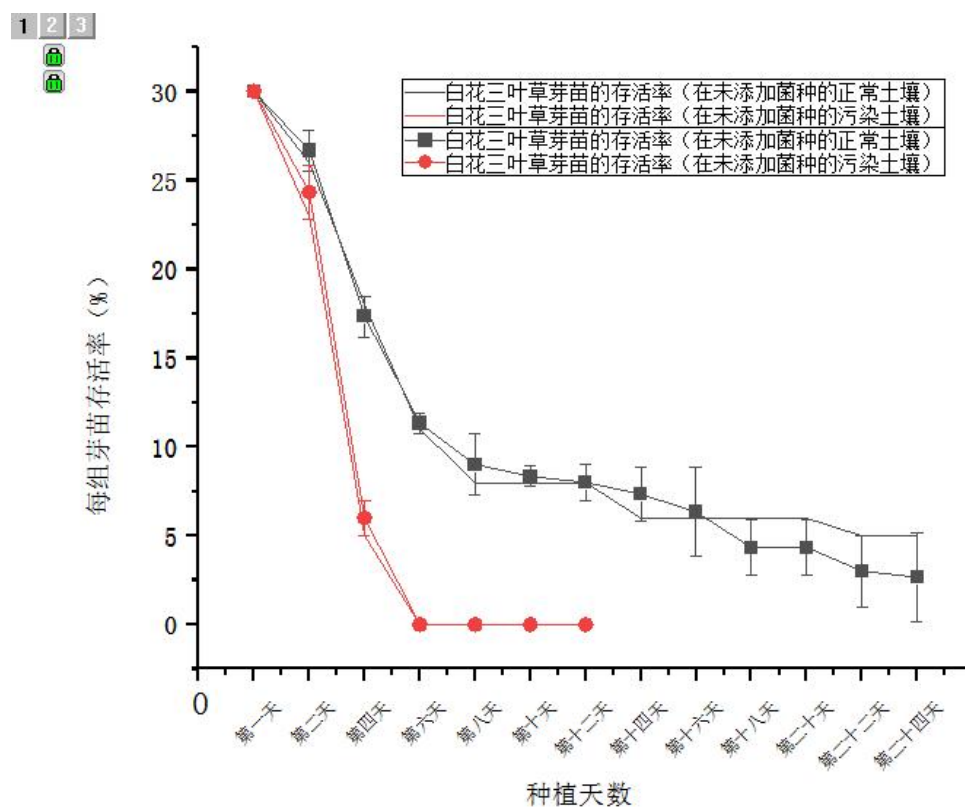
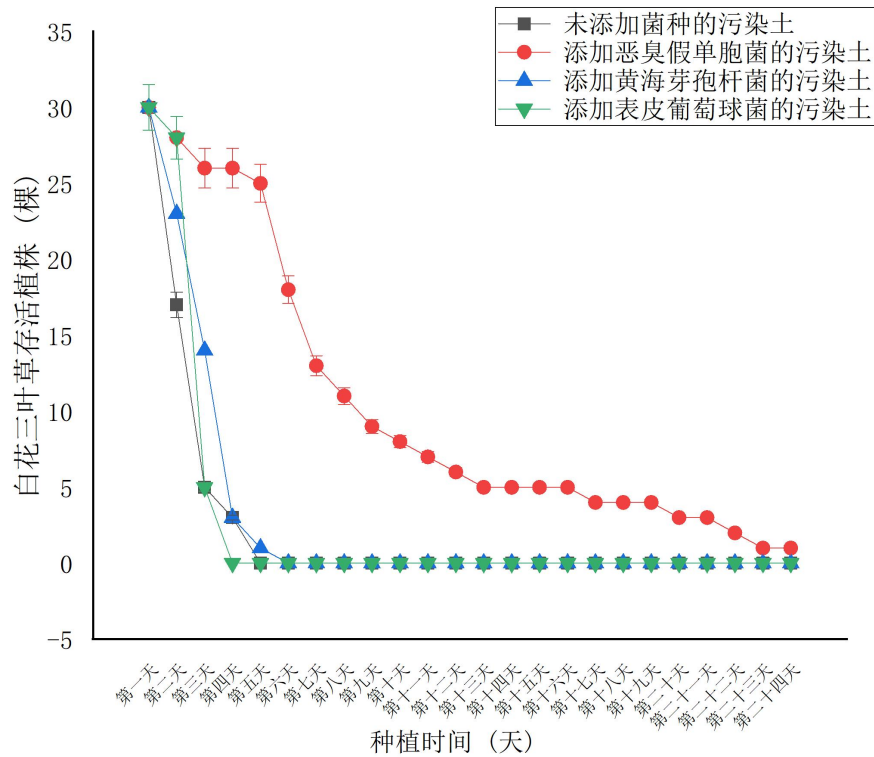


图 5 根际促生菌对白花三叶草芽苗存活率影响 (图表来源: 作者绘制)



结合上列数据以及通过对比恶臭实验组以级家用营养土组（图 6 和表 2），我们可以得出以下结论：王平矿场土壤与正常土壤相比对植物生长状况存在显著影响，恶臭假单胞菌作为根际促生菌可以有效改善移植在王平矿场土壤中白花三叶草幼苗的存活率。正常土壤中的白花三叶草幼苗存活率在第八天开始逐渐趋向稳定，移植到添加恶臭假单胞菌的污染土中的芽苗在第 12 天后开始低于正常土组存活植株数量。

图 6 恶臭假单胞菌组与营养土无菌组存活率对比（图表来源：作者绘制）

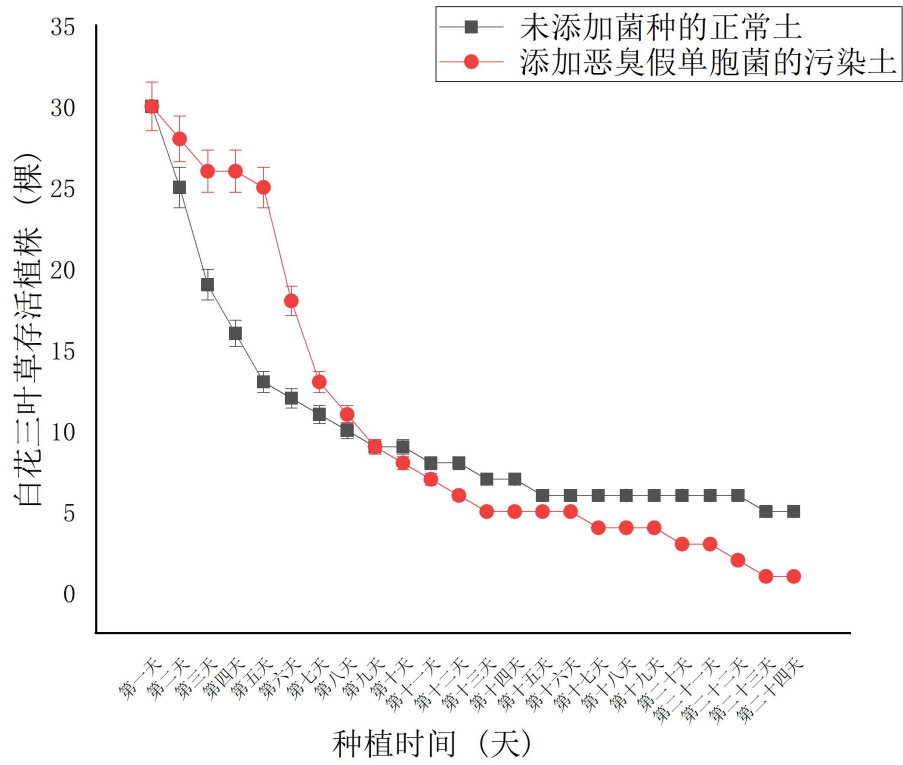


表2 不同实验组与对照组存活率数据 (表格来源: 作者绘制)

	正常土壤, 无菌	污染土壤, 无菌	污染土壤, 恶臭	污染土壤, 黄海	污染土壤, 表皮
7月18日	30	30	/	/	/
7月19日	25	17	/	30	/
7月20日	19	5	30	23	/
7月21日	16	3	28	14	30
7月22日	13	0	26	3	28
7月23日	12	0	26	1	5
7月24日	11	0	25	0	0
7月25日	10	0	18	0	0
7月26日	9	0	13	0	0
7月27日	9	0	11	0	0
7月28日	8	0	9	0	0
7月29日	8	0	8	0	0
7月30日	7	0	7	0	0
7月31日	7	0	6	0	0
8月1日	6	0	5	0	0
8月2日	6	0	5	0	0
8月3日	6	0	5	0	0
8月4日	6	0	5	0	0
8月5日	6	0	4	0	0
8月6日	6	0	4	0	0
8月7日	6	0	4	0	0
8月8日	6	0	3	0	0
8月9日	5	0	3	0	0
8月10日	5	0	2	0	0
8月11日	5	0	1	0	0
8月12日	5	0	1	0	0
8月13日	5	0	1	0	0
8月14日	5	0	1	0	0
8月15日	5	0	1	0	0
8月16日	5	0	1	0	0
8月17日	5	0	0	0	0

根据以上结果本文推测, 实验土壤中可能存在污染源。因此对矿区实验土壤做了重金属含量检测以及土壤理化性质检测, 结果分别对应表 3 以及表 4, 其影响将在讨论部分分析。

表 3 王平煤矿土壤中常见重金属含量测定 (表格来源: 作者绘制)

单位	锌	铅	铜	铬	镉
mg/kg	67.0732	/	10.122	62.6829	/

表 4 王平煤矿土壤理化性质对比 (表格来源: 作者绘制)

	OM	TN	磷	钾	pH
A2C02802-01营养土	52.60%	1.00%	0.78%	2.30%	未检测
王平煤矿土壤	19.33%	0.14%	0.06%	1.66%	7.53

其余王平煤矿土壤理化性质数值: TC 23.3% ; CEC 78.98cmol+/kg ; AK 0.0803% ; AP 1.54% ; 氨态氮 21.61 mg/kg; 硝态氮 9.26mg/kg; 钼 0.0034%;

钙 0.9806%；镁 0.3197%；硫 0.12%（检测数据由北京中化分析研究所提供）。

4. 讨论

根据我国 2018 年发布的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB15618-2018），在 pH 大于 7.5 的条件下（以旱田标准为例，不包括果园），锌含量标准为 300mg/kg，铅含量标准为 170mg/kg，铜含量标准为 100mg/kg，铬含量标准为 250mg/kg，镉含量标准为 0.6mg/kg。与标准相比，王平煤矿废弃土壤中重金属含量均低于国家标准含量，因此并不存在重金属污染的情况。相关研究表明，矿场废弃地存在少量或者不存在重金属污染的情况并不是特殊案例，例如崔龙鹏等人所研究的淮南矿区[27]以及李洋的相关研究[28]。自此看来，重金属污染并不是导致王平煤矿废弃地生物多样性低下的首要原因。

除土壤重金属含量外，土壤结构和营养成分也是影响植物生长的重要因素。通过检测矿土的营养成分和土壤结构（磷，钾，钙，镁，硫，氨态氮，硝态氮），与已有研究数据对比得出，土壤除受到重金属含量影响外，还受到其他因素影响。有机物可以通过改变土壤质地使得土壤更适合植物生长。例如土壤中的有机质含量的增加通常会导致容重和表面板结的减少，以及持水能力、大孔隙度、渗透能力、导水性和团聚性的提高[29]。而王平矿场矿土的 OM 值为 193.30g/kg，远低于营养土中 52.60%的有机物含量。除以上影响外，OM 还可以提高作物产量，通过加强潜在土壤质量和土壤健康，帮助作物适应气候变化[30]。其次，已有研究表明土壤中最佳 pH 值是 5.4，钾最佳含量是 15.6%；Mg 最佳含量是 8.2654% [31] 而王平矿场废弃地矿土检测 pH 值是 7.53，Mg 含量 0.3197%，钾含量是 1.6607%。由数据显示矿土的营养成分极低，且偏碱性，并不适合植物生长。矿土的 CEC 值为 78.79 cmol_c⁺/kg，而有研究表明，土壤中的阳离子交换量降低了稳定土壤中 CH（氢氧化碳氢化合物）的饱和度。如果土壤的 CEC 较高，稳定土壤孔隙溶液中的 CH 可能处于不饱和状态。在这种情况下，任何进一步的阳离子交换都可能会消耗本应用于产生 C-S-H 的 Ca²⁺ 和 OH 离子，实际上减少了土壤中产生的 C-S-H，从而降低了稳定土的强度。[32] 根据部分数据表示，欧洲的 CEC 数值范围为 5.3-78.8cmol_c/kg[33]，而王平煤矿的 CEC 数值已经接近欧洲水平的最高值，存在风险较大，对植物生长造成一定威胁性。

因此看来，王平煤矿废弃地生物多样性低下的主要原因是土壤中的营养含量较低以及部分理化性质数值超出了植物生长可接受范围。针对这些问题，提高土壤健康程度对于恢复王平煤矿废弃地的效果应当更为显著。

5. 植物修复技术相关应用

结合讨论部分的数据来看，提升土壤有机质含量，氮，镁，硫，钾，磷等元素的含量是改善土壤健康程度的关键切入口。本文所提倡的植物修复技术主要是依靠引进一些微生物物种来提高废弃矿场内部生物多样性，如从枝菌根菌 (AMF) 以及根际促生菌 (PGPR) 相配合提高植物的存活率并进一步提高土壤中营养含量。

首先生物肥料 (Biofertilizer) 的概念在 2003 年被首次提出[34]，其原理依旧是 PGPR 相关，也就是通过根际促生菌 (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) 和植物相辅相成的关系促进土壤恢复健康。目前看来这种方法对于土壤恢复来说是更为有效的[35]，且相比于传统的施肥提高土壤中特定化学元素的相对含量，生物肥料大大减少了由于肥料随着水资源流入其他淡水水库而导致的富营养化现象的产生。

其次是 AMF (Arbuscular Mycorrhizal Fungi) 也可以有效提高植物生长量，提高土壤中的锌含量以及磷含量调节。因此除 PGPR 外，AMF 也作为生物肥料的选择之一，可以有效帮助大分子以及小分子营养的吸收，提高叶片生长的面积，促进植物光合作用帮助植物生长。其次 AMF 还可以帮助提高植物抵抗外界灾害的能力例如干旱，重金属胁迫以及极度天气等。[36]

对比以上两种研究，AMF 被更广泛的利用在重金属富集等方面，但谈论起和植物的共生作用，相比于真菌，细菌的种类更多也被研究的更多。在 Coban, O. 等人的研究中，将细菌利用于土壤可发挥的作用分为了三大类。一是针对物理意义上土壤问题的改变，例如山体滑坡，干旱，水土流失等。二是化学性质上的改善例如肥力以及土壤酸碱程度。最后则是针对土壤污染[37]。很显然，在本文的研究中利用的是菌类的前两种修复方式。从两方面考虑，首先提高土壤中的有机质含量离不开植物的生长，碳循环保证了植物死亡后被降解，并将有机质存储在土壤结构中。另一方面考量，提高土壤中的化学性质首先离不开固氮菌。由于大

多数植物无法做到凭自己的努力获得空气中的氮源,生物固氮也是氮循环中重要的一步。生物固氮可以分为三类:共生固氮菌(symbiotic nitrogen-fixing bacterium)、自生固氮菌(free-living nitrogen-fixing bacterium)和联合固氮菌(associative nitrogen fixing bacterium)。其中联合固氮菌是我们日常了解最多的固氮方式之一,常见的菌种来源主要包括固氮菌属(*Azotobacter*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)、类芽孢杆菌属(*Paenibacillus*)、克雷伯氏菌属(*Klebsiella*) [38]。其中本文研究的三种菌覆盖了其中之一,也就是假单胞菌属下的恶臭假单胞菌,效果相比于其他两种菌来说效果也是更好。在 Hai Lin 等人的一系列关于白花三叶草对相关重金属富集研究中,也提到了白花三叶草的共生菌[39],但不同菌种之间的真正的实际应用价值还需要进一步的考量。

其次关于植物修复技术,本文依旧需要强调除微生物等其他影响因素包括生物多样性以及植物的种类选取等。首先可以证明的是生物多样性和土壤的健康程度成正相关的关系,也就意味着植物的种类更丰富,数量更多,所带来的修复后的土壤肥力越高,土壤更加健康[40]。针对植物种类的选取,本文提出一下方案,建议从草本植物入手,尤其是豆科草本植物,拥有更好的固氮能力,为后续其他植物种类打下营养基础。推荐的种类主要包括本文研究的白花车轴草(*Trifolium repens* Linn),红车轴草(*Trifolium pratense*) [41]以及紫苜蓿(*Medicago sativa* L.) [42]。除了有效的提高土壤肥力以外,车轴草作为常见的草本植物,也是牧草的首要选择之一。对于当地牛羊饲养产业来说车轴草的种植可以带来更好的促进作用。尤其是白花车轴草可以净化一部分重金属污染,即使王平煤矿废弃地中的重金属含量不在污染范围内,也可以有效避免重金属在家畜体内进一步累积[43]。在有一定土壤营养基础过后,该区域也可以作为当地农民的产业园。废弃地面积足以支撑大范围作物的种植。种植方法建议采用轮作的方式。根据相关研究表明,轮作不仅可以使得产量稳定,更可以提高土壤肥力,进一步加强农民的经济收益[44]。传统作物玉米可以作为轮作物种之一。根据张江伟等人的研究,对于耕层营养养分,包括有机质、全氮、碳解氮、速效钾含量等较普通土壤(对照相应分别提高6.18%-38.99%, 2.68%-12.64%, 6.62%-42.90%与6.39%-40.54% [45],可谓说是效果显著。除农作物的开发,其他植物种类的引进也可以起到缓解土壤压力的作用。例如具有观赏性的薰衣草[46]以及杨树[47],二者对于旅游业或者是作为林木

缓解周围环境压力都是不错的经济型作物,可以有效改善土壤质量的同时促进当地经济体发展。

Reference

- [1] 习近平在首个全国生态日之际作出重要指示强调: 全社会行动起来做绿水青山就是金山银山理念的积极传播者和模范践行者 (no date) 习近平在首个全国生态日之际作出重要指示强调: 全社会行动起来做绿水青山就是金山银山理念的积极传播者和模范践行者—中国政府网. Available at: https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6898387.htm (Accessed: 10 September 2023).
- [2] 芦飞.(2017).北京地区矿产资源开发状况遥感监测与分析(硕士学位论文,中国地质大学(北京)).
<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbname=CMFD201801&filename=1017136091.nh>
- [3] 中华人民共和国科学技术部 - <http://www.most.gov.cn/>. Available at: <https://most.gov.cn/ztl/kjay/aykxjdjh/> (Accessed: 08 September 2023).
- [4] 北京市山区关停废弃矿山植被恢复规划正式出台 . Available at: https://www.gov.cn/govweb/gzdt/2007-04/06/content_574114.htm (Accessed: 08 September 2023).
- Li, Y., Chiu, Y. H., & Lin, T. Y. (2019). Coal production efficiency and land destruction in China's coal mining industry. *Resources Policy*, 63, 101449.
- [5] Li, Y., Chiu, Y., & Lin, T.-Y. (2019). Coal production efficiency and land destruction in China's coal mining industry. *Resources Policy*, 63, 101449. doi:10.1016/j.resourpol.2019.101449
- [6] Yue Han, Yinghai Ke, Lijuan Zhu, Hui Feng, Qun Zhang, Zhao Sun & Lin Zhu (2021) Tracking vegetation degradation and recovery in multiple mining areas in Beijing, China, based on time-series Landsat imagery, *GIScience & Remote Sensing*, 58:8, 1477-1496, DOI: 10.1080/15481603.2021.1996319
- [7] Chang, M. et al. (2022) 'Risk assessment of multi-disaster in mining area of Guizhou, China' , *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 78, p. 103128. doi:10.1016/j.ijdr.2022.103128.
- [8] 王上辅.(2006). 矿山环境保护与治理控制指标研究(硕士学位论文,四川大学).<https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbname=CMFD2007&filename=2006188933.nh>
- [9] 北京市山区关停废弃矿山植被恢复规划正式出台 . Available at: https://www.gov.cn/govweb/gzdt/2007-04/06/content_574114.htm (Accessed: 08 September 2023).
- [10] 李金海 & 张国祯.(2009).北京山区关停废弃矿山地质灾害危险性评估研究——以密云

县高岭镇放马峪铬矿场为例..(eds.)全国水土保持生态修复学术研讨会论文集(pp.81-91)..

- [11] Liu, X., Bai, Z., Shi, H., Zhou, W., & Liu, X. (2019). Heavy metal pollution of soils from coal mines in China. *Natural Hazards*. doi:10.1007/s11069-019-03771-5
- [12] 李洋.(2023).煤矿区重金属污染的危害及其治理技术分析. *山西化工*(02),245-246. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2023.02.100.
- [13] 陈光平 & 魏焕奇.(2022).煤矿井工开采导致的环境污染问题与治理分析. *清洗世界*(08),146-148.
- [14] Upadhyay, N., Verma, S., Pratap Singh, A., Devi, S., Vishwakarma, K., Kumar, N., ... & Sharma, S. (2016). Soil ecophysiological and microbiological indices of soil health: a study of coal mining site in Sonbhadra, Uttar Pradesh. *Journal of soil science and plant nutrition*, 16(3), 778-800.
- [15] 刘富平.(2022).煤矿开采区域中水污染现状及防治措施分析. *山西化工*(03),309-310+320. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2022.03.127.
- [16] 王秀田.(2022).煤矿井下废水的污染分析及治理措施研究. *山西化工*(01),231-233. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2022.01.089.
- [17] 刘燕平.(2023).煤矿水污染现状及其治理工艺的优化. *山西化工*(02),192-193+202. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2023.02.079.
- [18] Jiang, H.-H., Cai, L.-M., Wen, H.-H., Hu, G.-C., Chen, L.-G., & Luo, J. (2019). An integrated approach to quantifying ecological and human health risks from different sources of soil heavy metals. *Science of The Total Environment*, 134466. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.134466
- [19] Amuno, S., Shekh, K., Kodzhahinchev, V., Niyogi, S., & Al Kaissi, A. (2021). Skeletal pathology and bone mineral density changes in wild muskrats (*Ondatra zibethicus*) and red squirrels (*Tamiasciurus hudsonicus*) inhabiting arsenic polluted areas of Yellowknife, Northwest Territories (Canada): A radiographic densitometry study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111721. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.111721
- [20] 张文博,王彩虹 & 刘艳萍.(2020).重金属富集植物的超积累机理研究进展. *云南化工*(12),9-11.
- [21] Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting?. *Plant science*, 180(2), 169-181.
- [22] Cabral, L., Soares, C. R. F. S., Giachini, A. J., & Siqueira, J. O. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of contaminated areas by trace elements: mechanisms and major benefits

- of their applications. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 31, 1655–1664.
- [23] Khan, M. U., Sessitsch, A., Harris, M., Fatima, K., Imran, A., Arslan, M., ... & Afzal, M. (2015). Cr-resistant rhizo- and endophytic bacteria associated with *Prosopis juliflora* and their potential as phytoremediation enhancing agents in metal-degraded soils. *Frontiers in Plant Science*, 5, 755.
- [24] 王秀田.(2021). 煤矿环境中空气污染及防治措施分析. *山西化工* (06),212-214. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2021.06.77.
- [25] 丁伟. 英国煤矿遗址问题研究[D].陕西师范大学,2011.
- [26] 葛书红. 煤矿废弃地景观再生规划与设计策略研究[D].北京林业大学,2015.
- [27] 崔龙鹏,白建峰,史永红,颜事龙,黄文辉,唐修义.(2004). 采矿活动对煤矿区土壤中重金属污染研究. *土壤学报*(06),896-904.
- [28] 李洋.(2023). 煤矿区重金属污染的危害及其治理技术分析. *山西化工* (02),245-246. doi:10.16525/j.cnki.cn14-1109/tq.2023.02.100.
- [29] Haynes, R. J., & Naidu, R. (1998). Nutrient Cycling in Agroecosystems, 51(2), 123 – 137. doi:10.1023/a:1009738307837
- [30] Lal, R. (2020). Soil organic matter content and crop yield. *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), 27A – 32A. doi:10.2489/jswc.75.2.27a
- [31] Moreira, A., & Fageria, N. K. (2010). Liming influence on soil chemical properties, nutritional status and yield of alfalfa grown in acid soil. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 34(4), 1231 – 1239. doi:10.1590/s0100-06832010000400022
- [32] Yu, H., Huang, X., Ning, J., Zhu, B., & Cheng, Y. (2014). Effect of cation exchange capacity of soil on stabilized soil strength. *Soils and Foundations*, 54(6), 1236 – 1240. doi:10.1016/j.sandf.2014.11.016
- [33] Oorts, K., Smolders, E., Lanno, R., & Chowdhury, M. J. (2021). Bioavailability and Ecotoxicity of Lead in Soil: Implications for Setting Ecological Soil Quality Standards. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(7), 1948 – 1961. doi:10.1002/etc.5051
- [34] Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and soil*, 255, 571–586.
- [35] Iteima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbere, O. J. (2018). Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A review.
- [36] Bhantana, P., Rana, M. S., Sun, X. C., Moussa, M. G., Saleem, M. H., Syaifudin, M., ... & Hu, C.

- X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi and its major role in plant growth, zinc nutrition, phosphorous regulation and phytoremediation. *Symbiosis*, 84, 19-37.
- [37] Coban, O., De Deyn, G. B., & van der Ploeg, M. (2022). Soil microbiota as game-changers in restoration of degraded lands. *Science*, 375(6584), abe0725.
- [38] 荆晓姝,丁燕,韩晓梅,王哲 & 高德艳.(2021).联合固氮菌的合成生物学研究进展. *微生物学报*(10),3026-3034. doi:10.13343/j.cnki.wsb.20200796.
- [39] Lin, H., Liu, C., Li, B., & Dong, Y. (2021). *Trifolium repens* L. regulated phytoremediation of heavy metal contaminated soil by promoting soil enzyme activities and beneficial rhizosphere associated microorganisms. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123829.
- [40] Furey, G. N., & Tilman, D. (2021). Plant biodiversity and the regeneration of soil fertility. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(49), e2111321118.
- [41] McKenna, P., Cannon, N., Conway, J., & Dooley, J. (2018). The use of red clover (*Trifolium pratense*) in soil fertility-building: A Review. *Field Crops Research*, 221, 38-49.
- [42] 邵泽强,刘书奇,勾千冬等.施氮和种植模式对玉米/紫花苜蓿间作体系中作物产量、吸氮量和根系形态的影响[J/OL].*东北农业科学*:1-9[2023-09-13].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1376.S.20221226.1755.006.html>.
- [43] Sotiriou, V., Michas, G., Xiong, L., Drosos, M., Vlachostergios, D., Papadaki, M., ... & Giannakopoulos, E. (2023). Effects of heavy metal ions on white clover (*Trifolium repens* L.) growth in Cd, Pb and Zn contaminated soils using zeolite. *Soil Science and Environment*, 2(1).
- [44] Li, X. F., Wang, Z. G., Bao, X. G., Sun, J. H., Yang, S. C., Wang, P., ... & Li, L. (2021). Long-term increased grain yield and soil fertility from intercropping. *Nature Sustainability*, 4(11), 943-950.
- [45] 张江伟,李慧,柴晓甜等.玉米深松分层施肥和小麦限水灌溉对土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J].*水土保持学报*,2022,36(06):346-355.DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.042.
- [46] 董静,韩建超,张聪等.一种基于薰衣草的煤矿矸石区菌根辅助生态修复方法[P].山西:CN107568012A,2018-01-12.
- [47] 闻晨晨.杨—药间作及施肥对杨树生长和土壤性质的影响[D].南京林业大学,2016.

致谢页

首先要感谢学校的支持以及老师的配合，支持我们完成了力所能及范围内的实验研究。我们从 2022 年开始筹备相关课题研究，抱着青少年想为附近社区做出一份努力的热情，由蔡芸彤（以我代称）和李梓楠同学敲定了大致研究方向——重金属污染相关问题。我们的研究地点也从北京昌平区附近的垃圾场转变到平谷地区的垃圾场再到密云，门头沟等地区的废弃矿场。在研究过程中我们实地考察了当地污染情况，尽管无法立即做相关检测，通过判断生物多样性等方法也可以大致了解相关情况，最后将地点敲定于门头沟区王平镇废弃矿场。其中由于北京王府学校并没有相关设备帮助我们完成重金属检测项目，还要感谢李林浩老师帮助我们联系了中科光吸研究所的郭晗预定相关检测项目。后来杨子玉同学的加入帮助我们更好的分配我们的时间，更是和我一起实地考察了矿场，以及完成土壤样本采集的工作。后来的实验过程中主要由李梓楠同学负责记录实验数据，杨子玉同学由于需要做手术等原因主要负责了少量的中文文献的搜索以及数据分析，我则是负责其余工作包括时间规划，分配任务，英文文献的搜索以及最后的撰写以及修改。但我们在实验等过程中可能依旧存在不规范，不够严谨等细节性问题，在这里表示真诚的歉意。在相关数据检测中我们尽量避免了一些外界因素导致的偏移性例如挖土用的铁铲等工具中可能含有少量金属微量元素等，其次在土壤采集过程中也可能由于矿场内部废弃地本身土壤分布不均匀等现象。尽管在后续操作过程中对土壤进行进一步过筛以及混匀，无法避免会产生一定偏差。最后我们通过自己的努力完成了以上的结果。在选题之初，我们也曾迷茫，因为对于高中生来说在近乎没有研究经验的情况下想要独自完成一个研究项目是十分困难的，感谢张杨老师，也是我们三个人的 AP 生物老师，对我们的研究方向表示了浓厚的兴趣并且在资料的搜集上提供了关键性的建议。我们之所以可以打开研究思路，还要归功于张杨老师的指点。同样我们还要感谢南京土壤研究所的胡文博老师，尽管我们最终的研究报告可能和开始的构思有一定偏差，但胡文博老师提供了我们最重要的关于菌群的相关操作技巧，线上答疑帮助我们解决了实验上的部分问题。在整个研究过程中我们还向不少人寻得了帮助，是为密云县高岭镇放马峪为我们指路的大妈，是在王平矿场帮我们搬东西甚至为我们带了水和食物的货拉拉司机师傅，也包括北京王府学校的其他老师。再次，郑重的感谢以上

的所有人，张扬老师，胡文博老师以及李林浩老师以及一些甚至不知道名字的热心人士，在研究过程中给我们提供的帮助。