有色金属工程

第10卷第1期

2 0 2 0年1月

Nonferrous Metals Engineering

**doi：10. 3969/j. issn. 2095**-**1744. 2020. 01. 017**

微生物矿物源土壤修复剂配施效果的研究

肖作义1，白昕冉1，郑春丽1，樊明哲2，许 欣1，杨泽茹1，赵 鑫1

*(I.*内蒙古科技大学能源与环境学院，内蒙古包头*014010；  
2.*包头市市政工程管理局，内蒙古包头*014010)*

摘 要 ：以白刺为试验对象，考察了白云鄂博富钾板岩发酵产物与胶质芽孢杆菌复合制备出的微生物矿物源土壤修复剂性能及 其二者施用量的最优配比。结果表明，通过对不同配比处理下种植的白刺生物学性状及土壤理化性质的分析，发现两种原料添加 的最优配比为土壤与固体发酵产物添加比30 : 1菌液添加量为2. 5 L/m2„此配比下白刺的发芽率、茎长和干鲜重指标达到空白 处理的2. 40.4 35.12 35倍，土壤的含水率、有机质、有效磷和速效钾含量分别提高了 10. 36.1. 30、5. 54.1. 10倍，均达到显著水 平*0*<0. 05)。加入胶质芽抱杆菌菌液后土壤中的稀土元素总量降低了 74 88 mg/kg。可以合理有效地利用白云鄂博富钾板岩， 对尾矿库周边环境治理和污染土壤的修复改良具有重要意义。

关键词：富钾板岩；胶质芽抱杆菌；土壤修复剂；白刺；稀土元素

中图分类号：X53 文献标志码：A 文章编号：2095-1744(2020)01-0120-07

Application Affect of Microbial Mineral Source Soil Remediation Agent

XIAO Zuoyi1 , BAI Xinran1 , ZHENG Chunli1 , FAN Mingzhe2, XU Xin1 ,  
YANG Zeru1, ZHAO Xin1

(1 Inner Mongolia University of Science and Technology , College of Energy and Environment , Baotou ,  
InnerMongolia014010 China；

2. Baotou Municipal Engineering Administration Bureau , Baotou , Inner Mongolia 014010 , China)

**Abstract：**With nitraria as the test object , the properties of the microbial mineral-derived soil remediation agent prepared by the combination of the potassium-rich slates and bacillus colloid from Baiyun Obo and the optimal ratio of the two application rates were studied. The results showed that the optimal ratio of the two raw materials added was soil to solid fermentation product 30 ： 1, and the amount of bacterial liquid was 2 5L/m2 through the analysis o thebiologicalpropertiesandsoilphysical**-**chemicalpropertieso nitrariaunderdi erentratios.Underthisratio， the germination rate，stem length，and dry**-** resh weighto nitrariareached2.40，4.35，and12.35timeso the blanktreatment.Thecontento soil moisture，organic ma**t**er，available phosphorus，and available potassium content increased by 10. 36 , 1. 30 , 5. 54 , and 1. 10 times , respectively , all reached a significant level *(p* V0. 05). Thetotalamountofrareearthelementsinthesoildecreasedby74 88mg/kg after the addition of baci**l** us co**l** oid solution．Thesoilremediationagentcanreasonablyande**f**ectivelyutilizethepotassium**-**richslatesinBaiyun Obo andhasgreatsignificancetothesurroundingenvironmentaltreatmentofthetailingspondsandtheremediationand improvementofthecontaminatedsoil．

**Key words:**potassium-rich slate；bacillus mucilaginosus；soil remediation agent；rare earth element

收稿日期：2019-03-26

基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(018YFC1802900)

Fund : Supported by the 13th Fivwyear National Key R & D Program of China(2018YF(31802900)

作者简介：肖作义(1962 — )男，教授,主要从事水处理控制技术和水资源利用技术的研究。 通信作者：郑春丽(1979-) 女 博士 教授 主要从事矿区生态及污染场地修复的研究。

引用格式：肖作义,白昕冉,郑春丽,等.微生物矿物源土壤修复剂配施效果的研究「门.有色金属工程2020 10(1):120 — 126.

XIAOZuoyi BAIXinran ZHENG Chunli etal．Application E**f**ectof Microbial MineralSourceSoilRemediation Agent[J]．Nonferrous MetalsEngineering 2020 10(1):120-126．

土壤是人类生存的重要载体，为作物提供了养

分的同时也是其根系伸展、固持的重要介质［1］。近 些年来由于土地过度开发及化肥的不合理施用等因 素导致的土地退化、污染事件频发，土壤的修复工作 迫在眉睫。郑春丽等［2］的研究证明利用固体发酵手 段可以释放富钾板岩中的大量及微量元素，其产物 可以显著缩短西红柿种子的休眠期，促进其生长。 本研究通过富钾板岩固体发酵产物与胶质芽孢杆菌 相结合制备的微生物矿物源土壤修复剂可以进一步 溶出富钾板岩中的微量元素［3-5］,提高土壤养分，降 低土壤中稀土元素含量，从而对西北地区盐碱土进 行修复改良。通过对干旱盐碱环境下的先锋植物白 刺的种植［6］,探索到一种富钾板岩发酵产物与微生 物菌剂的较优配比，为进一步形成产品提供了参考。 该微生物矿物源土壤修复剂可为土壤提供植物所需 的微量元素，与市面产品相比多效合一，减轻农业生 产工作负担， 可有效合理地利用白云鄂博矿区固体 废弃物富钾板岩⑺，且制备方法污染小、能耗低,对 尾矿库周边环境恢复和污染土壤的修复具有重要 意义。

1试验材料与方法

1. 1试验材料

1）试验土壤：取自内蒙古科技大学鹿苑种植基

地大棚和包钢尾矿库周边，过420 gm筛子备用。 不同土壤的基本理化性质如表1所示。

表1不同土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of different soils

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Soil type | pH值 | Moisturecontent/  %。 | Organicma**t**er/ ***(g*** • kg—1) | Olsen —玖 P2O5)/  (mg • kg—1) | Olsen-K(K2 O)/  (mg • kg-1) |
| Greenhouse soil | 805±002 | 488±012 | 29. 76士0. 27 | 4195士570 | 7899士480 |
| Tailings soil | 827±003 | 481±031 | 12. 60士0. 14 | 2262士2 64 | 84 54士396 |

2）富钾板岩固体发酵：将富钾板岩矿石磨至粉 末状过74 gm筛子后，与牛粪等常见农产品按一定 比例混合接入EM菌剂置堆发酵35d至腐熟。按 照NY 525 — 2012生物有机肥标准对发酵产物进行

指标检测。 富钾板岩固体发酵产物基本理化性质如 表 2 所示 。

|  |  |
| --- | --- |
|  | 表2 富钾板岩固体发酵产物理化学性质  Table 2 Physical and chemical properties of potassiurr—rich slates solid fermentation products |
| Dispose | Totalnutrient  Moisture content/ Organic matter/ Olsen-K(K2。)/ TCa(CaO)/ TMg(MgO)/ CFU  pH 值 / ' ' g g (N+P2O5+K2O)/  % (g・kg—1) (mg - kg—1) (g・kg—1) (g・kg—1) , 仆 PC/g  (g • kg—1) |
| Potassium—rich  slate fermentation  products | & 5±0. 03 24 6±0. 10 120 士 0 28 84 54±4. 50 37 3士1 51 20. 4士1 29 82. 6士2 47 (5. 75±0. 02)^1011 |

3） 市面购入土壤修复剂：来自山东金耀生物技 术有限公司。灰色粉末状，pH值7 2,有效活菌数*三* 2X1011 个/g。

4） 胶质芽抱杆菌菌液：购自GIMCC，产品编号 GIMCC GIM1. 15。

5） 白刺种子：购自内蒙古呼和浩特市种子站。

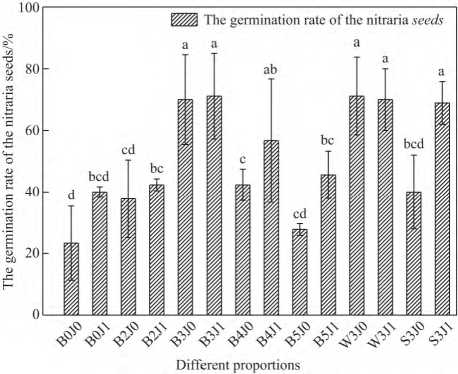
1.2试验设计与方法

盆栽试验之前对白刺种子进行预处理，处理采 用浸泡法，用50 °C的蒸馏水在恒温培养箱中浸泡种 子24 h［3］。将胶质芽抱杆菌种子液于超净工作台接 种至LB液体培养基中，将菌液扩培至5 L,28 C， 200 r/min下培养48 h,OD600值约为1. 3〜1. 4时停 止培养。将扩培好的菌液于4 C、8 000 r/min下离 心8 min,去上清液，用超纯水将沉淀稀释至5 L,放 于4 C 冰箱 备用 。

选用18 cmX18 cm的花盆装入1. 5 kg表3中 设计的配比混合物，为了保证基质的透气性，其中 20 % 土壤用蛭石替代。加菌组每盆加入100 mL准备 好的胶质芽抱杆菌菌液，加入量约为2 5 L/ mz0每盆 播种白刺种子30 粒，播种完成后每三天进行一次轻度 松土。每天保证光照10 h,光照强度约1 000 Lux。每 隔一天浇水一次，每次每盆约为100 mL。每组配比 进行三个平行处理，种植周期为120 d。

盆栽试验中土壤基质的不同配比方法如表3 所示。

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 表3盆栽土壤不同配比处理方法 | | | | |
| Table3 | Different proportioning treatment methods for potiing soil | | | |
| Po**t**ingsoil | Serial number |  |  | Treatmentmethod |
| Proportion | | The liquid of bacillus mucilaginosus |
| Greenhousesoil | B0J0  B0J1 | — |  | + |
|  | B2J0 | 20 | 1 | — |
|  | B2J1 | 20 | 1 | + |
|  | B3J0 | 30 | 1 | — |
| Greenhousesoil： | B3J1 | 30 | 1 | + |
| Solidfermentationproduct | B4J0 | 40 | 1 | — |
|  | B4J1 | 40 | 1 | + |
|  | B5J0 | 50 | 1 | — |
|  | B5J1 | 50 | 1 | + |
| Tailingssoil： | W3J0 | 30 | 1 | — |
| Solidfermentationproduct | W3J1 | 30 | 1 | + |
| Greenhousesoil： | S3J0 | 30 | 1 | — |
| Soilremediationagentsin market | S3J1 | 30 | 1 | + |
| Note：" —" meansnoadditionand" +" meansaddition | |  |  |  |
| 1.3 测定项目与方法 |  | 高了30%。 | | 不同配比处理下白刺种子发芽情况 |



分别测定各处理组土壤的pH值、含水率、有机 质、有效磷、速效钾及稀土元素含量；测量120 d内

白刺的发芽率、根茎叶长变化及植株干鲜重等指标。

pH 值的测定采用电位法，含水率的测定采用 电热鼓风干燥箱烘干法，有机质采用干烧法测定，有 效磷采用碳酸氢钠法测定，速效钾的测定采用乙酸 铵提取法，土壤中稀土元素含量测定采用四酸消解 法处理后用ICP-AES测定。在播种后的第30 d记 录其发芽率，并对幼苗适当定株。播种120 d后，测 定不同处理下白刺的根、茎、叶长及植株干鲜重。

测定结果用JMP 9进行分析，绘图软件为 Origin9。

2 结果与讨论

2.1 不同配比处理对白刺种子发芽率的影响 不同配比下白刺种子的发芽率如图1 所示。

由图1 可以看出，尾矿土、大棚土分别和富钾板 岩发酵产物30 : 1配施的处理组无论是否施加胶质 芽抱杆菌都使白刺种子发芽率的提高达到了显著水 平，是空白处理(B0J0)的3倍。富钾板岩发酵产物 的添加可以显著提高白刺种子的发芽率(*0*< 005)，发芽率随着发酵产物添加量的下降呈先升高 后下降的趋势，原因可能是发酵产物的过量添加引 起肥力过高，抑制了白刺种子的发芽，此后白刺发芽 率随着发酵产物添加量减少呈下降趋势。 各不同配 比处理组添加菌液均可使种子发芽率显著提升 *(<0.* 05),与前人〔8—9〕的研究结果相似，其中市面土 壤修复剂处理组配施胶质芽抱杆菌菌液后发芽率提 较优的处理组依次为W3J0〉B3Jl〉B3J0〉W3J1〉

S3J1〉B4J1。

图1 不同配比下白刺种子的发芽率

Fig. 1 Germination rate of the nitraria seeds under  
different proporiioning treatments

2.2 不同配比处理对白刺的生物学性状的影响

221 不同配比处理对白刺生长根、茎、叶长的 影响

由图2可知，在白刺生长至120 d时，各指标长 势最好的是B3J1处理组。在该处理下白刺的根、 茎、叶长分别达到了 9. 5、30和6. 5 cm,达到了空白 处理(B0J0)与单施市面修复剂(S3J0)处理的2〜6 倍，促生效果显著(*(*<005)。 对于市面修复剂来 讲，配施胶质芽抱杆菌后(S3J1)使白刺的根、茎、叶 长增加了1〜125 倍，长势更加优秀。 尾矿土配施 富钾板岩发酵产物与胶质芽抱杆菌的处理(W3J1)使白刺的根、茎、叶长达到了 9、27和6. 5 cm,由此 可见白刺可以在尾矿土壤中根系生长良好， 原因可 能是白刺对不同土壤类型的抗逆性更强［10］，可以考 虑作为先锋植物种植在矿区周边以改善环境， 白 刺 与矿区土壤中各影响元素之间的耦合机制还有待探

究。 不同配比处理下白刺生长根、茎、叶长较优的处

理组依次为 B3J1〉S3J1〉W3J1〉B4J0〉W3J0。

Ditlerent proportions

42086420

LUO/qlMOJS jo sAep oe【JUUC3.sJRItu jo LpsuuloOH

(b)

Stem length of nitraria after 120 days of growth

a

Mil

/a声护be审贰声拭理e 夕

be

Different proportions

UI0、qwo&)Jo SA&P OCT JQye e-ce-n-u jo q&u<uI JetD」

be

■■ Leaf length of nitraria after 120 days of growth

ab abc .

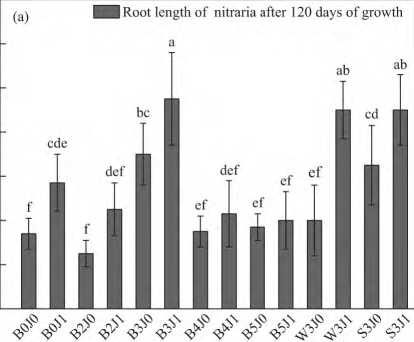
.liiilhiilli

Different proportions

图2 不同配比下种植120天后白刺的根(a)、茎(b)、叶长(c)

Fig. 2 Root (a) , stem (b) and leaf len gths(c) of n itraria un der differ ent proportio n treatm ents after

120 days of planting under different ratios



222 不同配比处理对白刺植株干鲜重的影响

由图3可知，添加富钾板岩发酵产物和胶质芽 抱杆菌菌液都可以显著提高白刺植株各部干鲜重， 且两者交互作用显著（*p*<0. 001）。B3J1处理组白 刺植株各部干鲜重是B3J0处理组的3. 2〜5. 3倍, 是B0J0（空白处理）处理组的9. 15〜14 67倍，该处 理的促生效果显著。 白刺的干鲜重水平随着发酵产 物添加量的减少呈 先 增 加 后 下 降 的 趋 势， 这 与 白 刺 种子发芽率在不同处理组中的变化趋势相同。 添加 了菌液的市面修复剂处理组（S3J1）是未加菌市面修 复剂处理组（S3J0）的1. 9〜2. 4倍，同样说明了胶质 芽抱杆菌的促生效果。 不同配比处理下白刺植株干 鲜重质量较优的处理组依次为B3J1〉S3J1〉B4J1 〉W3J1〉W3J0。

2.3不同配比处理对土壤理化性质的影响

231 不同配比处理对土壤基本理化性质的影响 不同配比处理下盆栽土壤的基本理化性质如表

4 所示 。

由表4 可知，除速效磷指标外，加入富钾板岩发 酵产物、胶质芽抱杆菌菌液以及两者同时施用的交 互作用对土壤理化性质的影响均达到了显著水平 （*P*<0. 05）。

.5

^UUUIlean uotodojdC<DJ 蛍 p Jupun

.2」guJ0 IqbfiQM qsu.5—hp Punojs—Jopun oqH

2 8 4 UOPJOdo-d luQJqyp Jopun .smcjo lqM)-sM qsQ-ylx-IP puno-lbouqF

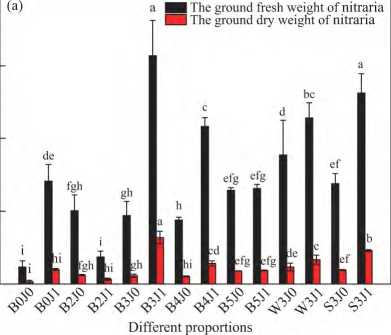
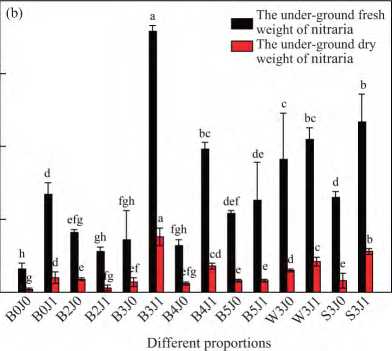


图3不同配比处理下白刺的地上部(a)、地下部(b)干鲜重

Fig. 3 Ground (a) and un der—gro und (b) dry fresh weight of n itraria un der differe nt proportio n treatme nts

表4不同配比处理方法的土壤基本理化性质

Table 4 Basic physicochemical properties of soil treated with different proportions

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Serialnumber | Moisturecontent／% | Organicma**t**er／% | pH值 | Olsen-P/(mg **•** kg—1**)** | Olsen-K/(mg **•** kg—1**)** |
| B0J0 | 0 49士0 01h | 2 97士0 04de | 804士0 03bcd | 41 65士1 95h | 79 3士4 09i |
| B0J1 | 0 71士0 01efgh | 313士0 33de | 7 85士0 04i | 49 8士8 16gh | 145 68士2 60d |
| B2J0 | 1 01士0 03ef | 4 82士0 36ab | 802士0 03cde | 133 57士3 77cd | 170 1士1 25b |
| B2J1 | 4 16士0 06c | 5 64士0 34a | 7 8 士 0. 03j | 121 98士16 3de | 186 56士5. 01a |
| B3J0 | 0 92士0 11efg | 4 08士0 25bcd | 7 98士0 03fg | 191 69士30 86b | 160. 74士3. 27bc |
| B3J1 | 5 57士0 12a | 5 62士1 25a | 7 93士0 02h | 25202士32 98a | 172 08士4 71b |
| B4J0 | 0 92士0 08efg | 4 07士0 09bcd | 8 01士0 02cdef | 187 05士19 64b | 108. 98士1 98g |
| B4J1 | 4 59士0. 19b | 4 44士0 11bc | 8士0 02defg | 192 89士39 53b | 154 48士2 19cd |
| B5J0 | 0 9士0 1efg | 3 49士0 06cde | & 03士0. 01b | 82 81士17 16fg | 99 46士2 46g |
| B5J1 | 3 28士0 37d | 3 5士0 1cde | 8士0 01efg | 8857士15 31ef | 128 28士6 44e |
| W3J0 | 0 6士0 03gh | 2 48士0 11e | 8 3士0 02a | 68 27士14 61fgh | 115 04士7 43ef |
| W3J1 | 0 66士0 05fgh | 2 47士0 12e | 8 05士0 01bc | 102 21士8 09def | 127 36士3 03e |
| S3J0 | 1 08士0 12e | 2 55士0 19e | 8士0 04efg | 73 22士17 84bc | 74 3士4 77i |
| S3J1 | 5 24士0 19a | 3 34士0 24cde | 797士0 02g | 165 15士23 49fgh | 95 76士7 07gh |
| B | \*\*\* | \*\*\* | \*\*\* | \*\*\* | \*\*\* |
| J | \*\*\* | \* | \*\*\* | NS | \*\*\* |
| B\*J | \*\*\* | \* | \*\*\* | NS | \*\*\* |

Note**:** 1. The data in the table are the average values (*九*=3**) ；** 2. Levels that are not linked by the same letter is significantly different ； 3. B**,** J**,**

and B\* J respectively represent the significant effect of the interaction of potassium-rich slate fermentation product, bacillus mucilaginosus, and simultaneous application of the two on the physical and chemical properties of the soil ； \* , \* \* , and \*\* \* represent the significant

correlation between the parameter at *(*<0. 05**,** *p<S0* 01**,** and *(*<0. 001 **；** NS means no significant correlation.

对含水率而言，B3J1处理对土壤含水率的提升 最为显著，达到了空白处理（B0J0）的11. 36倍，除 B3J1 外其余处理的含水率均显著低于市面修复剂 与菌液的配施（S3J1**）。**尾矿土处理组（W3）中含水 率的提升效果不显著**。** 含水率随着发酵产物添加量 的减少先升高后降低**，**有效磷含量的变化趋势与含 水率相同**，**发酵产物的过量或过少添加都不利于两 者增加**。** B3J1 处理土壤中的有效磷含量最高**，**达到 了 B0J0的5. 74倍**。**在加入等量发酵产物的情况 下，B3组的有效磷增幅最高，达到50.7%**。**尾矿土 处理组（W3）有效磷增幅显著，W3J0与W3J1处理 对于尾矿原土中有效磷含量的增幅分别达到202% 与382%**。**

在土壤pH值方面**，**单独配施发酵产物或与菌 液复 合配 施 都可 以 极显 著 降 低 土 壤 pH 值 （*p*<0. 001**），**土壤pH值随着发酵产物添加量的减 少先降低后升高**，**土壤pH值最低的处理是B2J1。 加菌处理组的pH均低于无菌组，由此可以看出添 加胶质芽抱杆菌菌液可以在一定程度上降低土壤 pH值，这一点与杨榕等研究结果相符[11]0

不同处理组土壤的有机质和速效钾呈相同变化 趋势**，**即随着发酵产物添加量的减少而降低**，**添加发

酵产物和菌液都可以显著增加土壤中的有机质和速 效钾（*p*<0. 05）,原因是发酵产物中含有丰富的有 机质和速效钾含量，添加到土壤中可以增加两指标 的含量。另一个原因可能是胶质芽孢杆菌的解钾性 质，胶质芽孢杆菌生长代谢时产生的酶、荚膜多糖及 有机酸类物质可以破坏富钾板岩晶格结构，释放出 矿石中的钾元素供植物吸收利用［7］。对于有机质而 言，B2J1处理中的有机质最高，为56 4 g/kg,达到了 土壤养分分级一级标准［12］（有机质含量〉40 g/kg）, 其余发酵产物与菌液配施的处理组均达到了土壤养

表5 分分级二级标准（有机质含量30〜40 g/kg）。单独施 用市面土壤修复剂的处理组的有机质含量比B0J0 下降了4 3g/kg, 配施菌液后又升高了 7 9g/kg。 尾矿土处理组（W3）,加入发酵产物或与菌液配施的 有机质变化不显著,但与尾矿土原土相比含量升高 了1 倍。

不同配比处理组土壤的稀土元素含量

232 配施富钾板岩固体发酵产物与胶质芽孢杆 菌种植白刺对土壤中稀土元素含量的影响 不同配比处理下盆栽组土壤的稀土元素含量如 表 5 所示 。

Table 5 Con tents of main rare earth elements in soil treatme nt with differe nt proportio ns /(mg • kg\_ 1)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Potassium 一 rich | | | B0J0 | B0J1 | B3J0 | B3J1 | Tailingssoil | W3J0 | W3J1 |
| Contentofrare earthelement | slatefermentation product | Greenhousesoil |
| La | 588±16.78 | 56.5±0.98d | 56±0.7d | 37.6±0.67g | 53.4±1.2e | 44.4±0.88f | 68.3±1.7b | 85.9±2.31a | 62.2±1.14c |
| Ce | 985±22.95 | 105±2.1d | 101±1.7e | 69.8±1.51g | 99.4±1.89e | 84.7±1.46f | 125±2.22b | 158±2.6a | 112±2.51b |
| Pr | 103±6.12 | 12.4±0.25cd | 11.9±0.11d | 8.62±0.12f | 12±0.14d | 10.3±0.21e | 14.5±0.45b | 18.1±0.5a | 13.1±0.9c |
| Nd | 335±9.84 | 45.4±1.31b | 42.4±0.27c | 32.6±0.99e | 43.3±1.34c | 39±1.45d | 21.5±0.89f | 63.2±1.24a | 46.5±1.67b |
| Sm | 55.9±2.83 | 6.65±0.14bc | 6.4±0.1c | 4.97±0.2d | 6.6±0.41bc | 5.66±0.78bc | 7.8±1.12b | 9.3±0.99a | 6.88±1.15bc |
| Eu | 5.02±0.48 | 1.28±0.04bc | 1.33±0.05bc | 1.03±0.07d | 1.21±0.06c | 1.22±0.09c | 1.42±0.11ab | 1.55±0.14a | 1.38±0.11b |
| Gd | 23.8±3.93 | 5.6±0.11cd | 5.37±0.09de | 4.41±0.15f | 5.63±0.18cd | 5.11±0.24e | 6.63±0.25b | 7.78±0.2a | 5.94±0.3c |
| Tb | 1.85±0.55 | 0.87±0.02cd | 0.84±0.05de | 0.71±0.01f | 0.87±0.06cd | 0.77±0.09e | 1.02±0.08b | 1.14±0.07a | 0.94±0.02bc |
| Dy | 6.42±0.22 | 6.42±0.19a | 4.32±0.12de | 3.59±0.1f | 4.33±0.2de | 3.93±0.4ef | 4.97±0.67bc | 5.42±0.28b | 4.55±0.24cd |
| Ho | 0.619±0.08 | 0.62±0.01d | 0.85±0.01b | 0.67±0.01d | 0.84±0.02b | 0.75±0.02c | 0.93±0.04a | 0.98±0.05a | 0.85±0.06b |
| Er | 2.26±0.1 | 2.26±0.05d | 2.56±0.06c | 1.9±0.05e | 2.5±0.07c | 2.21±0.05d | 2.77±0.06b | 2.96±0.09a | 2.48±0.04c |
| Tm | 0.172±0.02 | 0.17±0.01e | 0.47±0.01ab | 0.34±0.02d | 0.44±0.01bc | 0.36±0.01d | 0.47±0.03ab | 0.5±0.05a | 0.42±0.02c |
| Yb | 3.81±0.51 | 2.54±0.04d | 2.76±0.05bc | 2.1±0.03e | 2.6±0.05d | 2.2±0.05e | 2.87±0.07b | 3.05±0.11a | 2.65±0.08cd |
| Lu | 0.119±0.02 | 0.4±0.02ab | 0.42±0.05ab | 0.3±0.03c | 0.38±0.06b | 0.31±0.05c | 0.42±0.01ab | 0.46±0.01a | 0.38±0.01b |
| Y | 15.2±1.93 | 21.7±0.13c | 21.7±0.09c | 16.9±0.25e | 22.5±0.33c | 18.8±1.51d | 25.8±2.02b | 27.6±0.17a | 21.9±0.19c |
| Sc | 12.2±1.99 | 10.1±0.07bc | 10.5±0.15bc | 8.4±0.2d | 9.98±0.3bc | 8.54±0.6cd | 11.1±0.97a | 11.2±0.74ab | 10.1±0.86bc |
| Totalrare | 2138.37 | 277.91 | 268.82 | 193.94 | 265.98 | 228.26 | 295.5 | 397.14 | 292.27 |
| earthelements | ±68.35 | ±5.47c | ±3.61c | ±4.41e | ±6.32c | ±7.89d | ±10.69b | ±9.55a | ±9.3b |

Note: 1. The data in lhe table are lhe average values ***(n=3) ；*** 2. Levels not linked by lhe same letters are significantly different.

由表5可知，种植过白刺的大棚土 （B0J0）与大 棚土原土相比，稀土元素总量降低了 9. 1 mg/kg,说 明土壤中有微量稀土元素被白刺生长吸收利用。 加 入胶质芽抱杆菌菌液后（B0J1） 土壤中的稀土元素 含量较B0J0处理降低了 74 88 mg/kg,达到了显著 水平（*p*<0. 05）,可能是胶质芽抱杆菌对稀土元素 进行了吸附作用。 郑春丽等［13］研究了一株与胶质 芽抱杆菌功能相似的巨大芽抱杆菌对La3+和Ce3+ 的吸附率分别达到29 2％、30 2％。 加入富钾板岩 发酵产物 之后 （B3J0） 土壤中 的 稀 土元素 含量 与 B0J0 处理无显著差异，但加入的富钾板岩中含有一 定含量的稀土元素［14］，两种处理稀土元素含量数值 相差不大的原因可能是一定量的稀土元素被白刺生 长吸收利用。 稀土元素对植物的生长有着低促高抑 的效果，适量稀土元素的添加 可以促进植物的 生 长「15〕。B3J1处理土壤中的稀土元素含量较B3J0 下降了3772 mg/kg。 W3J0 处理较原尾矿土稀土 元素含量增加了 101. 64 mg/kg，加入菌液的处理 （W3J1）又使稀土元素含量下降到尾矿原土的水平。

3 结论

1） 加入富钾板岩发酵产物、胶质芽抱杆菌菌液以 及两者同时施用的交互作用对土壤中的含水率、有机 质和速效钾含量的提高作用显著（*p*<0. 05）,单施富 钾板岩发酵产物对土壤有效磷含量提高作用效果显 著（*p*<0. 05）,土壤pH值有降低但变化幅度不大。

2） 加入胶质芽抱杆菌可以使土壤中的稀土元素 总量降低，单独施用胶质芽抱杆菌可以使土壤中稀 土元素总量降低74. 88 mg/kg,下降比例为 269％。 利用富钾板岩发酵产物与胶质芽抱杆菌制 备成的微生物矿物土壤修复剂可以在增加土壤养分 的同时，修复稀土污染。

3） 通过对白刺的种植，富钾板岩发酵产物与胶 质芽抱杆菌菌液的最优施用配比为土壤与固体发酵 产物添加比30 : 1,菌液添加量2. 5 L/m2。在此处 理下，土壤的含水率、有机质、有效磷和速效钾含量 较空白 处理提高了 10 36、090、505 和 120 倍, pH 值 下 降 了 011, 土 壤 中 稀 土 元 素 总 量 降 低 3772 mgkg, 下降比例 为 1357％。 白 刺的 发芽 率、茎长和干鲜重指标达到空白处理的3、6、10 倍。 该施用配比的修复效果在本试验中略优于购买到的 土壤修复剂,为新产品的形成提供了重要参考。

参考文献：

1. 韩 玲,刘志 恒,宁昱铭,等．矿区土壤重金属污染遥感 反演研究进展[J].矿产保护与利用，2019(1)： 109-117.

HAN Ling, LIU Zhiheng, NING Yuming, et al.

Research progress on remote sensing inversion of soil heavy metal pollution in mining areas [J]. Mineral Protection and Utilization, 2019(1)109—117.

1. 郑春丽,陈敏洁,袁浩容,等．采用固体发酵与微生物浸

出相结合利用白云鄂博富钾板岩的方法[J].河南师范 大学学报(自然科学版), 2015,43(4)：94一99．

ZHENG Chunli, CHEN Minjie, YUAN Haorong, et al. Applicationofpotassiumrichslabsinbayanobobysolid fermentation and microbial leaching [J]．Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 201543(4)：94一99．

1. 李甘雨，林 海，董颖博，等．胶质芽抱杆菌释放矿物元素 效果及机理研究进展[J].金属矿山,2017(1)： 113-11 &

LI Ganyu, LIN Hai, DONG Yingbo, et al. Research progressonthee**f**ectand mechanism of mineralelement releasebybaci**l**usgliosporum[J]．Metal Mines，2017(1)： 113-118．

1. YANG X, LI Y, LU A , et al. Effect of Bacillus mucilaginosus D4B1 on the structure and soil­conservation-related properties of montmori**l**onite[J]． AppliedClayScience，2015，119：141-145．
2. LIU W，XU X ，WU X，et al．Decomposition of silicate minerals by Bacillus mucilaginosusin liquid culture [ J ]. EnvironmentalGeochemistry ＆ Health，2006，28(1/2)： 133-140．
3. 孙海群，田新靓．不同处理方法对2 种白刺种子萌发的 影响[].种子，2013, 32(9)： 75-78

SUN Haiqun， TIAN Xinliang E**f**ects of di**f**erent treatments on the germination of two kinds of Nitraria seeds[J]．Seed，2013 32(9)：75-78．

1. 郭聪祥，刘 云．白云铁矿上盘富钾板岩物质组成及综 合利用[].包钢科技，2016,42(4)1-4.

GUO Congxiang, LIU Yun . Composition and comprehensive utilization of potassium-rich slates in upper plate of baiyun iron mine[J] BaotouIron ＆Steel

Technology,2016,42(4)：1-4

1. 李青梅,陆秀君,马 里,等 胶质芽抱杆菌菌剂对四种蔬

菜种子发芽及幼苗生长的影响[].北方园艺，2017(1)： 10-13

LI Qingmei, LU Xiujun, MA Li, et al. Effect of Bacillus mucilaginosus agents on four species vegetable seeds germinationandseedlinggrowth[J] TheNorthGarden， 2017(1)： 10-13

1. 张宇羽，蔡 艳，王昌全，等 苗床添加胶质芽抱杆菌菌 肥对2种烟草幼苗生长和养分吸收的影响[].土壤通 报，201546(3)：676-681

ZHANG Yuyu，CAIYan，WANG Changquan，etal E**f**ect ofBaci**l**us mucilaginosusfertilizeron growth and nutrients absorptionoftwotobaccoseedlingsinseedbed [J] Chinese JournalofSoilScience，2015，46(3)： 676-681

1. 张富强 盐胁迫对柴达木盆地唐古拉白刺生理特性的 影响研究[].林业调查规划，2017,42(3)13-16.

ZHANG Fuqiang. Effects of salt stress on physiological characteristicsofnitrariatangutoruminqaidam basin [J] ForestInventoryandPlanning，2017，42(3)：13-16

1. 杨 榕，李博文，刘 微 胶质芽抱杆菌对印度芥菜富 集土壤 Cd 及土 壤 pH 的影响 [J] 环境科学学报， 201333(6)：1648-1654

YANG Rong，LIBowen，LIU Wei E**f**ectsofBaci**l**us mucilaginosus on soil pH and Cd accumulation by Brassica juncea [J] Acta Scientiae Circumstantiae， 201333(6)：1648-1654

1. 代 静，司万童，赵雪波，等 稀土尾矿库复合污染对周 边土壤肥力的影响[].江苏农业科学，2017,45 (20)： 299-303

DAIJing，SIWantong，ZHAO Xuebo，etal E**f**ectsof combinedpo**l**utionofrareearthtailingspondsonsoil fertilityinsurroundingareas[J] Jiangsu Agricultural Science，201745(20)：299-303

1. 郑春丽，王亚琴，陈敏洁，等 巨大芽抱杆菌与稀土离子 的相互作用研究[].稀土，2016,37(1)： 132-136.

ZHENG Chunli，WANG Yaqin，CHEN Minjie，etal Interactionsbetweenbaci**l**usmegateriumandrareearth ions [J] ChineseRareEarths, 2016,37(1)：132-136

1. 史美玲,屈 茹 白云鄂博矿产资源概况及开发利用设

想[].科技信息，2012(27)： 45-46.

SHI Meiling, QU Ru Generalsituation of mineral resourcesinbayanoboandtentativeplanofexploitation andutilization [J] Science ＆Technology Information, 2012(27)： 45-46

1. 任晓晓, 周 青 稀土元素对植物矿质代谢的影响与机 理[].土壤通报，2009, 40(2)： 451-455.

REN Xiaoxiao, ZHOU Qing E**f**ects of rare earth elementson mineral metabolismin plant [J] Chinese JournalofSoilScience, 2009, 40(2)： 451-455