

硅酸盐矿物麦饭石对沉水植物苦草 (*Vallisneria spiralis*) 生长的促进效应*

骆 凤^{1,2}, 张 义^{2**}, 韩 帆¹, 刘云利^{2,3}, 王 坚⁴, 孙 坚⁴, 刘子森², 邹羿凌云^{2,3}, 吴振斌^{1,2}

(1: 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070)

(2: 中国科学院水生生物研究所淡水生态和生物技术国家重点实验室, 武汉 430072)

(3: 中国科学院大学, 北京 100049)

(4: 浙江省杭州市西湖水域管理处, 杭州 310002)

摘 要: 沉水植物恢复是富营养化湖泊生态系统重建的关键措施。沉水植物的生长受到很多因素的影响。本文通过考察生长和生理生态指标研究了硅酸盐矿物麦饭石对苦草生长的影响, 为其进一步应用于水生生态修复提供理论依据。结果表明, 麦饭石可以显著促进苦草的生长。添加了麦饭石处理组的苦草的生物量、株高、叶数、根长等生长指标明显高于对照组。且改性麦饭石组优于麦饭石原石组。1 cm 麦饭石处理组的苦草在生长旺盛期时, 其光和色素、根系活力和过氧化氢酶酶活等生理生态指标的活力均较对照组有一定程度的提高, 而丙二醛含量有所降低。检测结果发现麦饭石中含有丰富的植物生长所需的常量和微量元素, 可见麦饭石可进一步应用于富营养化湖泊的生态修复中。

关键词: 麦饭石; 苦草; 生理生态; 促进作用

The effect of silicate mineral maifanite on the growth of submerged macrophytes *Vallisneria spiralis**

LUO Feng^{1,2}, ZHANG Yi^{2**}, HAN Fan¹, LIU Yunli^{2,3}, WANG Jian⁴, SUN Jian⁴, LIU Zisen², ZOU Yilingyun^{2,3} & WU Zhenbin^{1,2}

(1: School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, P.R.China)

(2: State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R.China)

(3: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(4: Hangzhou West Lake Administrative Office, Hangzhou 310002, P.R.China)

Abstract: Restoration of submerged macrophytes is a key step in the reconstruction of eutrophic lake ecosystem. The growth of submerged macrophytes is influenced by many factors. The effects of silicate mineral maifanite supplement on the physiological and ecological process of *Vallisneria spiralis* was investigated in this study, for providing a technical reference for the further application in aquatic ecological restoration. The results showed that maifanite could significantly promote the growth of *V. spiralis*. The biomass, height, leaf numbers, root length of *V. spiralis* in the maifanite-supplemented group were better than those of the control. Moreover, the modified maifanite group performed better than the raw maifanite group. The photosynthetic pigment, root activity and peroxidase (POD) activity of *V. spiralis* in 1 cm maifanite-treated group were better than those of the control to some extent during the vigorous period of plant growth, and the content of malondialdehyde (MDA) is lower than the control group. It was found that maifanite contained abundant constant and trace elements, which are required for the growth of *V. spiralis*. It is concluded that maifanite is beneficial to the growth of *V. spiralis* and can be further applied to ecological restoration of eutrophic lakes.

* 2019-11-27 收稿; 2020-01-01 收修改稿。

国家自然科学基金项目(51709254)、中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-038)联合资助。

** 通信作者; E-mail: zhangyi@ihb.ac.cn.

Keywords: Maifanite; *Vallisneria spiralis*; physiological and ecological process; growth promotion effect

湖泊富营养化是备受关注的全球性环境问题之一^[1],而沉积物中的内源磷在湖泊中磷的动态变化中发挥着重要作用,减少沉积物磷的负荷已经被认为是控制水体富营养化的关键技术之一^[2]. 减少沉积物磷的释放可分为原位技术和异位技术. 底泥疏浚是目前一种可较为彻底去除磷的方法,然而,疏浚可能会破坏湖泊生态系统,增加污染物再悬浮的风险,而且也不具有成本效益^[3]. 近年来,减少沉积物内磷负荷的原位技术越来越受到人们的重视.

水生植被修复是原位生态修复的一种方法,具有良好的生态效益和经济效益. 沉水植物是湖泊生态系统中重要的生产者^[4],在维持水生态系统的平衡、控制藻类、净化水质的方面起着举足轻重的作用,因此将富营养化湖泊恢复为健康的草型湖泊通常需要重建以沉水植物为主的水生植被^[5]. 而湖泊沉积物同时也是影响水下生态系统恢复重建的重要因素,它是水生植物生根和稳定生长的基本条件,同时也为植物提供了大量的生长所必需的养分^[5-6]. 沉积物不同的理化性质常常影响沉水植物的生长与繁殖,而我国许多富营养化湖泊的沉积物并不适合水生植物的生长^[7-11]. 改良湖泊沉积物,促进沉水植物生长,是富营养化湖泊生态恢复过程中的关键,因此应当选择环境友好、地理上可用且经济上可行的有效的原位材料对底质进行改良. 一些天然或改性的矿物是常见的选择,如甘磊等研究了镧改性膨润土对沉积物磷释放的影响,结果表明镧改性膨润土能改变沉积物磷形态,使活性磷转化为稳定的磷形态,从而提高沉积物对磷的滞留能力、降低湖水磷浓度,改善水质^[12].

麦饭石是一种天然硅酸盐矿物,具有生态友好的特点,在中国有着丰富的资源^[13-15]. 麦饭石具有较大的比表面积和较强的吸附能力,主要是由它的微泡孔和海绵状的形态结构所决定的,且麦饭石中含有铝(Al)、铁(Fe)等元素可通过化学吸附吸附磷^[16-18]. 麦饭石原石的市场价格约为300~400元/t,由于其成本低、性能好,含有氨基酸和微量元素,已被广泛应用于土壤改良中,可作为土壤调理剂,改善土壤理化性能^[19]. 而本研究团队前期已将麦饭石作为沉积物磷修复剂和底质改良剂应用于杭州西湖生态修复工程,取得了较好的效果^[20],研究表明,通过改性处理的麦饭石可进一步提高其对沉积物磷的吸附性能,降低富营养化湖泊磷的负荷. 因此,本文将麦饭石与沉水植物相结合,探讨其对沉水植物生理生态的影响,为麦饭石在原位生态修复领域的进一步应用提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

沉水植物苦草(*Vallisneria spiralis*)采自杭州西湖. 冲洗干净后去除无脊椎食草动物,选择长度为15 cm,根长为3 cm的植株,实验前在实验室中先驯化7 d. 麦饭石购自中国山东省孟阴县康源麦饭石矿厂,粒度为2~4 cm. 将麦饭石在超纯水中洗涤浸泡24 h,采用复合改性方法制备改性麦饭石,改性麦饭石的制备方法如下:将麦饭石原石浸泡在2.5 mol/L的硫酸溶液中6 h后以超纯水洗至中性,而后在400℃高温下煅烧4 h后放至室温待用.

1.2 实验设计

实验在直径60 cm、高度80 cm的聚乙烯桶中进行. 先在桶底铺上6 cm厚的西湖底泥,然后将不同厚度的原始麦饭石(1、3、5、7 cm)覆盖在沉积物表面,设置为M1、M3、M5、M7组,将不同厚度的改性麦饭石(1、3、5、7 cm)覆盖在沉积物表面,设置为MM1、MM3、MM5、MM7组,将没有覆盖麦饭石组的设为对照组M0. 实验期间,水位保持在60 cm. 实验中使用的底泥和水均来自中国杭州西湖. 每个处理组设3个平行,所有数据均表示为平均值.

1.3 实验方法

实验周期为180 d. 每30 d测定1次沉水植物的生长、生理生化指标. 实验时,每个处理组从3个平行桶中各拔取1株植物,即1个处理组共获取3株植物. 其中植物叶片叶绿素采用Lichtenthaler-Arnon法^[21]适当改进;根系活力采用TTC法^[21];叶片丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[22],叶片过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[23].

1.4 数据分析及处理

实验所得数据采用 Excel 2007 软件整理,采用 SPSS 22.0 统计软件进行显著性分析,采用 Origin 9.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 麦饭石对苦草生长指标的影响

苦草的生长指标可以直观地反映植物的生长情况。试验过程中,测定了苦草的株高、叶片数、生物量、根长,并绘制统计数据图。

从图 1 可以看出,苦草的生长随季节而变化。夏季光照强度较大,温度较高,整体条件适宜苦草生长,故 7—8 月,苦草生长旺盛。到 8 月 15 日,苦草生长指数达到最大值。9 月,苦草的生长速度逐渐变慢。在 10 月和 11 月,苦草经历了一个衰退期,这与西湖四季水生植物统计调查结果相一致。

从图 1a 可以看出,原石组铺设厚度为 1 cm 和 3 cm 的 M1、M3 在整个实验周期内株高始终高于对照组 M0,且 M1 组在 7、8、9、10 月显著高于 M0 组($P<0.05$),而铺设厚度超过 3 cm 后,则对照组基本高于原石组, M0 组除了在植物刚种下和实验结束时外,在剩下的月内均显著高于 M7 组($P<0.05$),同时 M1 在整个实验周期内显著高于 M5、M7 组($P<0.05$)。改性组与对照组相比,MM1 组在整个实验过程中始终显著高于 M0、MM5 和 MM7 组($P<0.05$),而 M0 组则高于 MM7 组但差异并不显著。当铺设厚度分别为 1 cm 和 3 cm 时,改性组始终高于原石组。从图 1b 可以看出,除 7 cm 组外,麦饭石组的叶片数均高于对照组,MM1 组和 M1 组叶片数均高于其他组($P<0.05$)。从图 1c 可以看出,与对照组相比,M1、MM1 与 MM3 组生物量始终显著高于对照组 M0($P<0.05$),且 MM1 组显著高于 M1 组($P<0.05$);而 M0 基本是高于 MM7 组,显著高于 M7 组

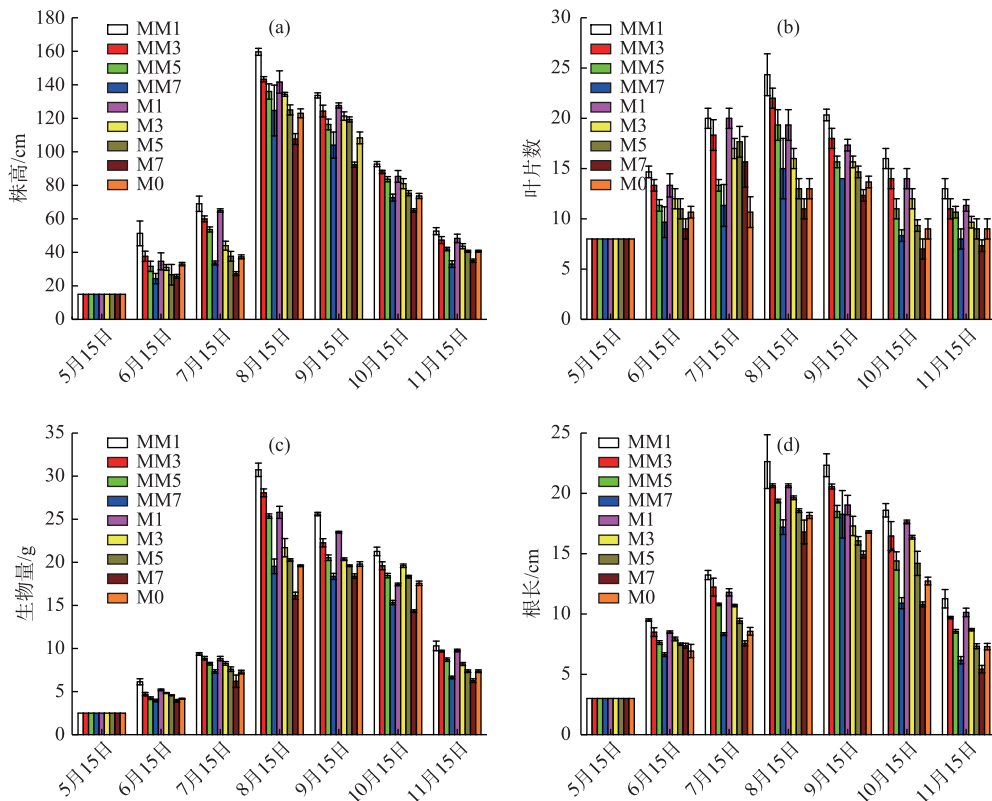


图 1 麦饭石对苦草生长指数的影响(a: 株高,b: 叶片数,c: 生物量,d: 根长)

Fig.1 Effect of maifanite on growth index of *Vallisneria spiralis*
(a: height,b: number of leaves,c: biomass,d: root length)

($P < 0.05$), 且 MM7 组高于 M7 组, 9 月除外。此外无论是改性组还是原石组, 1 cm 和 3 cm 显著高于 5 cm 和 7 cm ($P < 0.05$); 而在铺设厚度相同时, 改性组高于原石组。2018 年 8 月 15 日, MM1 组生物量最高达 30.73 g, 为对照组的 156.8%。从图 1d 可以看出, MM1 组苦草的根长高于其他组, 1 cm 组和 3 cm 组均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 且 MM1 显著高于 M1 ($P < 0.05$), MM3 高于 M3。在 7 月 15 日后, 对照组均高于 7 cm 组; 根长与株高显示出同样的规律, 即当铺设厚度分别为 1 cm 和 3 cm 时, 改性组始终高于原石组。

2.2 麦饭石对苦草生理生化指标的影响

2.2.1 麦饭石对苦草光合色素含量的影响

叶绿素水平可以反映植物光合速率和衰老过程^[24-25]。从图 2 中可以看出, 苦草叶绿素含量在 7 月 15 日、8 月 15 日和 9 月 15 日三个采样日较高, 与旺盛生长期有关, 其中 MM1 组叶绿素 *a* (Chl.*a*)、叶绿素 *b* (Chl.*b*) 和叶绿素总量 (Chl.*a* + Chl.*b*) 含量均高于对照组, 其余组与对照组并没有明显差异。植物叶绿素含量可以反映植物的光合作用水平, 而麦饭石组植物的光合作用明显较强, 在一定程度上可以反映麦饭石组的生长和代谢速度。

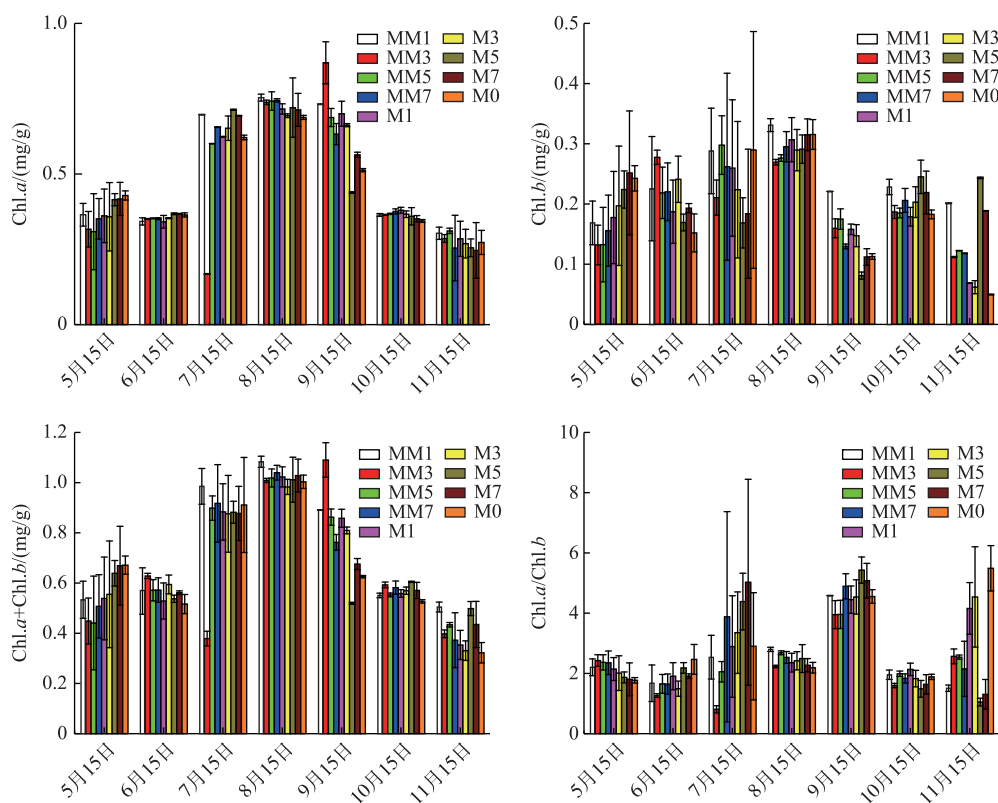


图 2 麦饭石对苦草叶绿素含量的影响

Fig.2 Effect of maifanite on chlorophyll content of *Vallisneria spiralis*

2.2.2 麦饭石对苦草可溶性蛋白含量的影响

蛋白质是生物体结构和功能中最重要的基本物质之一, 也是植物细胞中最丰富的生物大分子^[26]。在受到胁迫条件下, 植物细胞可能会产生一系列的物质 (如可溶性蛋白), 通过自我调节来减少外界环境的破坏。

苦草叶片可溶性蛋白含量与植物抗逆性表达一致。图 3a 为麦饭石对苦草叶片蛋白质含量的影响。当刚种下时, 为了适应外界环境的变化, 各组均产生大量的可溶性蛋白, 经过适应期后, 可溶性蛋白含量下降至正常水平。到 10 月份时, 外界环境中的光照强度、水体温度都有所下降, 因此可溶性蛋白含量有所提高, 其中 M1 组和 MM1 组苦草可溶性蛋白含量均高于其他组, 且 MM1 组叶片的蛋白质含量显著高于对照组 M0 和 5 cm、7 cm 的处理组 ($P < 0.05$), 说明 MM1 组对生长环境变化的抵抗能力最强。初步得出一定量的麦饭石

可以提高苦草的抗性。

2.2.3 麦饭石对苦草丙二醛含量和过氧化物酶活的影响 丙二醛(MDA)是膜脂过氧化最重要的产物之一,它的产生会增加膜的损伤,因此通过测定它在植物体内的含量可以反映在植物的膜系统受损程度以及植物的抗性^[27-28]。而过氧化物酶(POD)是植物叶片衰老过程中产生的一种抗氧化酶,是植物抗衰老过程中产生的重要物质,能清除植物体内过量的氧自由基^[29-30],从而可以减轻植物所受到的伤害。植物刚种下去时,各组间的MDA含量与POD酶活并没有显著的差异(图3b,c)。植物体内MDA含量在植物衰败期9月15日至11月15日上升,表明植物细胞膜质过氧化水平加深,这符合苦草的生长规律(图3b)。衰败过程中,在9、11月铺设厚度为1 cm和3 cm组MDA含量显著低于对照组M0($P<0.05$),虽然10月各处理组MDA含量均高于M0组,但1 cm和3 cm组的POD酶活显著高于M0($P<0.05$) (图3c),由此可以推断,与其他组相比,麦饭石铺设厚度为1 cm和3 cm时可以提高植物的抗性,且改性组优于原石组。

2.2.4 麦饭石对苦草根系活力的影响 根系活力可以反映植物根系的生长^[31]。从图3d可以看出,麦饭石组苦草根活力基本高于对照组。在实验前期6月15日至7月15日期间,M5组苦草根活力显著高于其他组,这是因为在初期种下去时,M5组根系活力就显著高于其他组($P<0.05$),而其他各组之间并没有显著性差异。到了中期植物生长旺盛时,MM1组在8月15日至9月15日期间,根系活力显著高于对照组M0以及铺设厚度为5 cm和7 cm的处理组($P<0.05$),同时优于M1组。在实验后期植物衰败,各组根系活力均有明显下降,1 cm、3 cm组优于5 cm、7 cm组,但差异并不显著。结合生物量、叶长等指标,推断适当的麦饭石厚度可以促进根的伸长。结合氧化酶活性可以看出,MM1组苦草的衰败明显延迟。

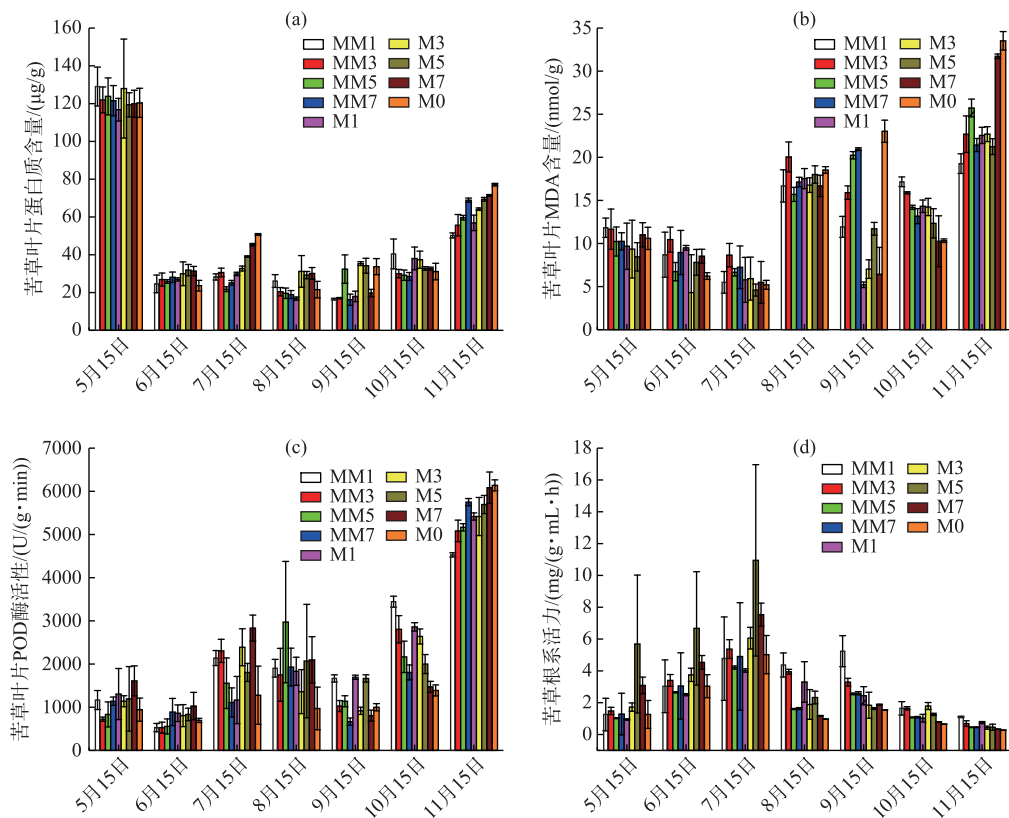


图3 麦饭石对苦草叶片可溶性蛋白含量(a)、丙二醛含量(MDA)(b)、过氧化物酶(POD)活性(c)和根系活力(d)的影响

Fig.3 Effect of maifanite on protein content (a),MDA content(b), POD activity(c) and root vitality(d) in leaves of *Vallisneria spiralis*

3 讨论

3.1 麦饭石性状分析

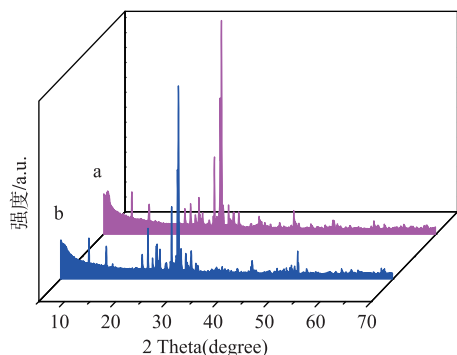


图4 麦饭石原石(a)和改性麦饭石(b)
XRD图

Fig.4 XRD patterns of raw maifanite (a)
and modified maifanite (b)

植物在生长过程中,需要从外部吸收许多元素来合成所需要的营养物质,其中钙、镁、磷和其他主要元素,以及铁、锰、锌等微量元素是植物合成酶、维生素和生长激素的重要组成部分^[32]. 这些常量和微量元素主要来自土壤,通过根系吸收和运输到植物体内. 本研究团队对实验所用麦饭石原石和改性麦饭石的成分检测结果如表1,麦饭石原石和改性麦饭石的主要成分都是无机的硅铝酸盐^[33-34],而且麦饭石中还含有Mg、Zn、Ti、Mn、Fe等沉水植物生长所需常量和微量元素,这些元素主要以无机盐的形式存在. 由表1还可以看出通过改性处理使麦饭石中SiO₂含量明显增加,MgO和P₂O₅含量显著降低($P < 0.05$). 通过X射线衍射(XRD)分析,可以看出麦饭石原石和改性麦饭石的晶体结构和性质. XRD分析(图4)表明,经过改性处理后,与原石相比,改性麦饭石的主要峰强度无明显变化. 经改性处理后,也无明显的金属氧化物峰出现,表明改性处理后的麦饭

石结构保持完整,金属氧化物在麦饭石表面分布良好. 另一方面,改性处理后一些峰消失或减弱,这可能是由于改性处理后杂质的减少所导致的. 为了比较麦饭石原石与改性麦饭石形态的不同,进行了SEM分析如图5. 可以看出,改性麦饭石的形态由于改性处理而发生明显改变. 麦饭石原石表面光滑,观察到很少的孔. 而与原石相比,改性麦饭石则表面较为粗糙,得到了更多的孔,表面形成了具有不规则形状的孔道的多孔结构. 此外,在改性麦饭石中出现更多的薄片,这些变化提高了麦饭石的反应活性,使其具有更高的吸附能力,上述信息揭示了改性处理可以提高麦饭石的沉积物磷吸附能力^[35]. 因此利用麦饭石对沉积物进行改良以及探讨其对沉水植物生理生态的影响具有重要的意义.

表1 麦饭石原石和改性麦饭石的主要化学成分(%)

Tab.1 The main chemical compositions of raw maifanite and modified maifanite

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO ₂
麦饭石原石	61.38	16.26	5.16	5.08	3.18	1.82	1.74	0.36	0.22	0.032
改性麦饭石	62.44	15.91	5.31	4.41	2.88	1.54	1.80	0.39	0.17	0.039

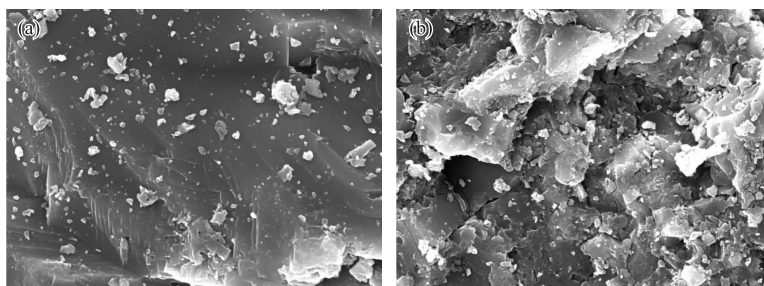


图5 麦饭石原石(a)和改性麦饭石(b)SEM图

Fig.5 SEM patterns of raw maifanite (a) and modified maifanite (b)

3.2 麦饭石对沉水植物生长的影响分析

基质对沉水植物的生长影响较大,麦饭石的固定作用可能促进沉水植物在有机质含量较高的基质中生根生长,这在本研究中得到验证,铺设厚度为 1 cm 和 3 cm 处理组的苦草其株高、根长、叶片数和生物量等生长指标均显著高于只有底泥的对照组($P<0.05$),且改性组优于原石组。此外,通过对麦饭石的性状分析可知其富含常量和微量元素,可以为植物生长提供必要的营养。Mg 是多种酶的辅因子,是植物叶绿素和维生素的重要组成部分;Zn 是电子传递的重要辅酶因子,与植物叶绿体和线粒体的形成密切相关;Zn 可以促进蛋白质的合成,促进植物生殖器官的发育,提高植物对高温、高盐、霜冻和干旱的抵抗力;Fe 直接参与电子传递、氧化应激、固氮和激素合成^[36-37];从叶绿素指标可以看出,在植物生长旺盛期,1 cm 组的光合作用较强。且改性麦饭石较原石具有更多的孔结构,可为根际微生物提供更好的繁殖条件。研究表明,某些根际微生物可以促进植物根系的生长发育^[38],这在本实验中也得到了验证,在植物生长旺盛期,MM1 组根系活力显著高于 M0 组($P<0.05$),同时优于 M1 组。通过分析可知当麦饭石铺设厚度超过 3 cm 时,无论是原石组还是改性组各项指标较对照组均无优势。由于麦饭石层较厚,会影响其溶出量,增加了植物茎底生长压力,在一定程度上抑制了植物根系的氧气分泌和苦草的生长。且较厚的覆盖层可能造成氧化还原电位降低,厌氧环境和硫化物的积累。铺设厚度越深,氧化还原电位的降低越大,对植物的危害也越大^[39]。从可溶性蛋白、POD、MDA 等生理生态指标也可以得出该结果。但麦饭石促进沉水植物苦草生长的具体机理还有待进一步研究和探讨。

4 结论

研究结果表明,改性 MM1 组的生物量、高度、叶片数和根长等生长指标明显优于其他组($P<0.05$),改性麦饭石组优于麦饭石原石组($P<0.05$)。且在植物生长旺盛期,1 cm、3 cm 麦饭石处理组的光和色素、根系活力和 POD 酶活等生理生态指标的活力均较对照组有一定程度的提高,而 MDA 含量有所降低。前期通过对麦饭石原石和改性麦饭石的性状分析可知,改性后麦饭石表面更加粗糙,孔径增大,层间距增大,比表面积明显增加,具有更多的孔结构,对沉积物磷具有更优的吸附效果。其中麦饭石的覆盖厚度是影响苦草生长的关键因素,研究发现最佳铺盖厚度为 1 cm。通过对麦饭石的成分进行分析发现,麦饭石中含有丰富的苦草生长所必需的常量和微量元素。麦饭石可有效促进沉水植物苦草的生长,可进一步应用于富营养化湖泊沉积物的生态修复工程中。

5 参考文献

- [1] Qin BQ, Gao G, Zhu GW *et al.* Lake eutrophication and its ecosystem response. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(10): 855-864. [秦伯强, 高光, 朱广伟等. 湖泊富营养化及其生态系统响应. 科学通报, 2013, **58**(10): 855-864.]
- [2] Huser BJ, Futter M, Lee JT *et al.* In-lake measures for phosphorus control: the most feasible and cost-effective solution for long-term management of water quality in urban lakes. *Water Research*, 2016, **97**: 142-152.
- [3] Yu JH, Fan CH, Zhong JC *et al.* Evaluation of in situ simulated dredging to reduce internal nitrogen flux across the sediment-water interface in Lake Taihu, China. *Environmental Pollution*, 2016, **214**.
- [3] Wang H, Pang Y, Liu SB *et al.* Research progression influencing of environmental factors on the growth of submer sedmacrophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **28**(8): 3958-3968. [王华, 逢勇, 刘申宝. 沉水植物生长影响因子研究进展. 生态学报, 2018, **28**(8): 3958-3968.]
- [4] Moss B. Engineering and biological approaches to the restoration for eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components. *Hydrobiologia*, 1990, **200/201**: 367-377.
- [5] Barko JW, Gunnison DG, Carpenter SR. Sediment interactions with submerged macrophytes growth and community dynamics. *Aquat Bot*, 1991, **41**: 41-65.
- [6] Xie YH, An SQ, Yao X *et al.* Short-time response in root morphology of *Vallisneria natans* to sediment type and water column nutrient. *Aquat Bot*, 2005, **81**: 85-96.
- [7] Hao BB, Wu HP, Shi Q *et al.* Stoichiometric characteristics of submerged macrophytes in ten lakes of Yunnan plateau. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 539-544. DOI: 10.18307/2013.0411. [郝贝贝, 吴昊平, 史俏等. 云南高原 10 个湖泊沉水

- 植物的碳、氮、磷化学计量学特征. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 539-544.]
- [8] Su HJ, Wu Y, Xia WL *et al.* Community level stoichiometric characteristics of submerged macrophytes and their influencing factors in the mid-lower Yangtze lakes. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 430-438. DOI: 10.18307/2017.0219. [苏豪杰, 吴耀, 夏午来等. 长江中下游湖泊群落水平下沉水植物碳、氮、磷化学计量特征及其影响因素. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 430-438.]
- [9] Liu YC, Yu JL, Chen L *et al.* Changes of submerged macrophyte community structure and water quality in the process of ecosystem restoration of a shallow eutrophic lake. *Ecological Science*, 2008, **27**(5): 376-379.
- [10] Qin BQ, Yang LY, Chen FZ *et al.* Lake eutrophication mechanism and control technology and its application. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(16): 1857-1866. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.]
- [11] Cheng XY, Li SJ. Eutrophication evolution process and characteristics of typical lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(7): 848-855. [成小英, 李世杰. 长江中下游典型湖泊富营养化演变过程及其特征分析. 科学通报, 2006, **51**(7): 848-855.]
- [12] Gan L, Zhong P, Liu ZW *et al.* Effects of Lanthanum modified bentonite on the water phosphorus concentration and sediment phosphorus form in a shallow eutrophic lake. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1219-1228. DOI: 10.18307/2019.0517. [甘磊, 钟萍, 刘正文等. 镧改性膨润土对浅水湖泊水体磷浓度和沉积物磷形态的影响. 湖泊科学, 2019, **31**(5): 1219-1228.]
- [13] Feng GH. Research on chinese medical stone resources and development. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2001, (2): 14-15. [冯光化. 中国麦饭石资源与开发研究. 矿物岩石地球化学通报, 2001, (2): 14-15.]
- [14] Gao GH. Synthesis of nanocomposites of silver nano particles with medical stone and carbon nanotubes for their antibacterial applications. *Materials Express*, 2012, **2**(2): 85-87.
- [15] Li J, Zhang PY, Gao Y *et al.* Overview of Maifanshi: Its physi-chemical properties and nutritious function in drinking water. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(10): 63-66. [李娟, 张盼月, 高英. 麦饭石的理化性能及其在水质优化中的应用. 环境科学与技术, 2008, **31**(10): 63-66.]
- [16] Xia CB. Study on a dsorption kinetics of Pb^{2+} by medical stone. *Environmental Chemistry*, 2000, **19**(5): 436-440. [夏畅斌. 麦饭石对 Pb^{2+} 离子吸附动力学研究. 环境化学, 2000, **19**(5): 436-440.]
- [17] Sun RJ, Hou F, Geng KY *et al.* Effect of maifan stone particle movement pattern on Cr desorption property. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(5): 1-5. [孙荣江, 侯峰, 耿坤宇等. 麦饭石颗粒运动方式对 Cr 脱附性能的影响研究. 环境科学与技术, 2018, **41**(5): 1-5.]
- [18] Wang SB, Ning P, Qu GF *et al.* Experimental study on phosphorus removal in water by modified maifan stone. *New Chemical Materials*, 2017, **45**(12): 137-144. [王诗博, 宁平, 瞿广飞等. 改性麦饭石吸附除磷性能研究. 化工新型材料, 2017, **45**(12): 137-144.]
- [19] Zhang ZH. Studies on the effect of maifan stone as one kind of soil conditioners on horticultural crop [Dissertation]. Xi'an; Northwest A&F University, 2012: 37-56. [张振华. 麦饭石作为土壤调理剂在不同作物上的应用效果研究 [学位论文]. 西安: 西北农林科技大学, 2012: 37-56.]
- [20] Liu ZS, Zhang Y, Han F *et al.* Investigation on the adsorption of phosphorus in all fractions from sediment by modified maifanite. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 15619.
- [21] Wellburn AR, Lichtenthaler HK. Formulae and program to determine total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents//Advances in photosynthesis research. Netherlands: Springer, 1984.
- [22] Li HS ed. Principles and techniques of plant physiological and biochemical tests. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-263. [李合生. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-263.]
- [23] Heath RL, Packer L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry & Biophysics*, 1968, **125**(1): 189-198.
- [24] Yang XS, Chen GX, Wei XD *et al.* Enhanced antioxidant protection at the early stages of leaf expansion in ginkgo under natural environmental conditions. *Biologia Plantarum*, 2011, **56**(1): 181-186.
- [25] Zhang T, Wang ML, Zhang XJ *et al.* Effects of top-dressing on senescence characteristics and yield of peanut at different periods. *Journal of Peanut Science*, 2018, **47**(3): 26-31. [张甜, 王铭伦, 张晓军等. 不同时期追肥对花生叶片衰老特性及产量的影响. 花生学报, 2018, **47**(3): 26-31.]

- [26] Passaia G, Margis-Pinheiro M. Glutathione peroxidases as redox sensor proteins in plant cells. *Plant Science*, 2015, **234**.
- [27] Chen SY. Injury of membrane lipid peroxidation to plant cell. *Plant Physiology Communication*, 1991, (2): 84-90. [陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害. 植物生理学通讯, 1991, (2): 84-90.]
- [28] Li M, Wang GX. Effect of drought stress on activities of cell defense enzymes and lipid peroxidation in *Glycyrrhiza uralensis* Seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, (4): 503-507. [李明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响. 生态学报, 2002, (4): 503-507.]
- [29] Gao XJ, Gao JF, Feng BL *et al.* Leaf senescence of different mung bean varieties during their late growth. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2007, **27**(5): 947-953. [高小井, 高金锋, 冯佰利等. 不同绿豆品种生育后期叶片衰老的研究. 西北植物学报, 2007, **27**(5): 947-953.]
- [30] Mu YX, Zhang JP, Mu LH *et al.* Effects of different sowing densities on leaf senescence and yield of buckwheat plants. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, **46**(1): 40-42. [母养秀, 张久盘, 穆兰海等. 不同播种密度对荞麦植株叶片衰老及产量的影响. 江苏农业科学, 2018, **46**(1): 40-42.]
- [31] Jin HY, Li J, Zhu Y *et al.* Effect of soil conditioner on root vigor and carbon metabolism characteristics of rhizosphere soil microorganisms in flue-cured tobacco. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, (1): 158-165. [靳辉勇, 黎娟, 朱益等. 土壤调理剂对烤烟根系活力及根际土壤微生物碳代谢特征的影响. 核农学报, 2019, (1): 158-165.]
- [32] Liu S, Wu ZC, Zhao YR *et al.* Effects of selenium on the uptake and transport of trace elements by cadmium-stressed flowering Chinese cabbage. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(3): 431-439. [刘帅, 吴志超, 赵亚荣等. 外源硒对镉胁迫下菜心 Fe、Mn、Cu、Zn 吸收与转运的影响. 农业环境科学学报, 2018, **37**(3): 431-439.]
- [33] Zhou JT, Linghu WS. Characteristics and applied research progress of medical stone. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, **39**(13): 72-80. [周佳甜, 令狐文生. 麦饭石的特性及其应用研究进展. 广东化工, 2012, **39**(13): 72-80.]
- [34] Qi SY, Wang DP, Zhao YD *et al.* Research on the adsorption and photocatalytic mechanism of medical stone/ZnO composite. *Journal of Functional Materials*, 2018, **49**(8): 8014-8020. [亓淑艳, 王德朋, 赵亚栋等. 麦饭石/ZnO 复合材料的吸附及光催化机制研究. 功能材料, 2018, **49**(8): 8014-8020.]
- [35] Liu ZS, Zhang Y, Han F *et al.* Investigation on the adsorption of phosphorus in all fractions from sediment by modified maifanite. *Scientific Reports*, 2018, **8**: 15619.
- [36] Dalcorsio G, Manara A, Furini A. An overview of heavy metal challenge in plants: From roots to shoots. *Metallomics*, 2013, **5**(9): 1117-1132.
- [37] Karin H, Weih M, Eriksson J *et al.* Influence of nitrogen supply on macro- and micronutrient accumulation during growth of winter wheat. *Field Crops Research*, 2017, **213**: 118-129.
- [38] Urakawa H, Dettmar DL, Thomas S. The uniqueness and biogeochemical cycling of plant root microbial communities in a floating treatment wetland. *Ecological Engineering*, 2017, **108**.
- [39] Bastiaan G, van Zuidam, Maaik M *et al.* Relationship between redox potential and the emergence of three submerged macrophytes. *Aquatic Botany*, 2014, **113**.