文章编号:1674-2869(2026)01-0009-09

高吸水树脂在水土保持和生态修复中的应用研究进展

唐霞霞,余响林*,王仁杰,梁 恩,彭世琼
武汉工程大学化工与制药学院,绿色化工过程教育部重点实验室(武汉工程大学),
湖北 武汉 430205

摘 要:对高吸水树脂在水土保持和生态修复的应用领域的研究进行了综述。介绍了天然类、合成类及共混复合类高吸水树脂在水土保持和生态修复领域的应用,分析和总结了高吸水树脂在土壤修复,水体治理和植被修复中作为土壤改良剂和重金属离子吸附剂的实践,探讨了高吸水树脂应用于水土保持中存在的重复使用性和可降解性等问题及解决方法。最后对高吸水树脂在水土保持和生态修复领域的水土治理效能,利用效率和可再生性等应用进行了展望。为高吸水树脂在水土保持生态建设中的实际应用提供了理论基础和应用实践。

关键词:高吸水树脂;水土保持;园艺;生态修复
中图分类号:TQ322.9 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202501010

Research progress on the application of super-absorbent polymers in soil and water conservation and ecological restoration

TANG Xiaxia, *YU Xianglin**, *WANG Renjie*, *LIANG En*, *PENG Shiqiong*
School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Key Laboratory of Green Chemical Process (Wuhan Institufe of Technolagy), Ministry of Education, Wuhan 430205, China

Abstract: In this paper, we reviewed studies on the application of super-absorbent polymers (SAPs) in soil and water conservation and ecological restoration. It introduced the use of natural, synthetic, and blended/composite SAPs in these fields, and analyzed their role as soil amendments and heavy-metal adsorbents in soil remediation, water treatment, and vegetation restoration. Issues related to reusability and degradability of SAPs in soil and water conservation were discussed along with potential solutions. Prospects were presented regarding effectiveness, utilization efficiency, and renewability of SAPs in these fields. The findings provide a theoretical foundation and practical reference for the application of SAPs in ecological construction for soil and water conservation.

Keywords: super-absorbent polymer; water and soil conservation; horticulture; ecological restoration

随着经济快速发展,生态方面面临着许多挑战。环境污染和水资源的短缺,土壤性状恶化,水中金属离子增多,使得水土问题日益突出,严重影响农林作物生长和生态环境。因此,水土保持和生态修复成了亟待解决的问题,这对我国农林业的发展至关重要[1]。我国现有的在水土保持生态建设中常用的生态修复技术可以概括为自然修复和人为修复两种[2]。自然-人为修复方法可以规避

收稿日期:2025-01-22
基金项目:湖北自然科学创新研究基金(JCZRQT202500124)
作者简介:唐霞霞,硕士研究生。Email:tangxhhha@163.com
***通信作者**:余响林,博士,教授。Email:yxlin2002@163.com
引文格式:唐霞霞,余响林,王仁杰,等.高吸水树脂在水土保持和生态修复中的应用研究进展[J].武汉工程大学学报,2026,48(1):9-17.

自然修复周期长的缺点。在自然-人为修复方法中,用高吸水树脂治理农林业水土问题是有前途的方法之一,不仅可以保水保肥而且可以增加土壤的通透性。高吸水树脂是一种具有弱交联度的三维网状高分子材料[3]。含有羟基、羧基、氨基等亲水基团,吸水保水性能优异,可以吸收自身重量数倍的水[4],不溶于水也不溶于有机溶剂,对光,酸,碱有良好的稳定性[5]。高吸水树脂最早出现在20世纪60年代,是由Fanta等[6]以淀粉和丙烯腈为原料聚合再碱性水解得到。20世纪90年代后,国外的高吸水性树脂制备工艺日趋成熟,应用领域不断拓展。相较于国外,国内对高吸水树脂的研究起步较晚。20世纪80年代,我国开始研究吸水树脂,至今我国的高吸水树脂已发展30多年,取得的成果显著。目前,国内外对应用于水土保持和生态修复的高吸水树脂的研究领域主要在农林业和园艺业中的运用[7],合成作用于水土保持和生态建设的绿色高效经济型高吸水树脂是研究学者的共同追求。本文对高吸水树脂在水土保持和生态修复中的应用进行综述,为高吸水树脂及其应用的深入研究提供参考。

1 高吸水树脂的分类

高吸水树脂可以从不同方面进行分类,按照树脂成分可分为天然类、合成类和复合类,从合成原料不同可分为淀粉类,纤维素类,木质素类,壳聚糖类,蛋白质类,合成类和复合类[8]。

1.1 天然类高吸水树脂

1.1.1 *淀粉系高吸水树脂* 淀粉系高吸水树脂是出现最早的高吸水树脂。它以天然淀粉为原料,具备天然淀粉的特性。虽然来源广,价格低廉易获得,但结构不稳定,溶解性差,长久存储难度大[9]。所以,在制备淀粉系高吸水树脂前需要对天然淀粉进行改性。常采用接枝共聚法将改性后的淀粉材料掺杂进合成高吸水性树脂体系中,可以在保持材料所固有的优点的同时附加材料新的性能。常用的单体主要包括单烯类,如丙烯酸、丙烯腈、丙烯酸酯、丙烯酰胺等都可以与淀粉接枝共聚。水东莉[10]以淀粉和丙烯酸为原料制备的高吸水树脂用于在不同土壤条件下的菊科植物大丽花培养,通过观察大丽花的枝叶、根茎的变化来验证该高吸水树脂的性能。研究表明,在土壤中加入淀粉基高吸水树脂可以吸收土壤中的水分,增强土壤的保水能力,为保证植物的正常生长提供有利的条件。Zhang等[11]制备了一种低膨胀性的淀粉衍生物基高吸水树脂作为重金属吸附剂,通过对Cr^{3+}、Cu^{2+}、Ni^{2+}和Zn^{2+}的吸附容量测定,得到了增加交联剂的含量可以制备性能优良的高吸水树脂作为重金属吸附剂,这对高吸水树脂在水土保持生态建设的应用上有很大的启发。在肥料利用率方面,Bai等[12]制备了一种木薯淀粉基释磷高吸水性树脂,合成的CST-PRP-SAP具有良好的连续吸水保水性能,并具有促进和缓释磷的功能,提高了肥料的利用率,降低了农林业领域使用肥料的污染率,在农林业和园艺领域有很好的应用前景。

1.1.2 *纤维素系高吸水树脂* 纤维素的来源十分丰富,是世界上蕴藏量第一的天然高分子化合物。在大多数的农业废弃物和木材芦苇中都可提取到。纤维素属于直链大分子结构,含有大量羟基,利用毛细管吸水,有优良的亲水性。具有表面积大,可再生性和抗生物降解性,但在土壤改良方面性能较差[9,13]。纤维素系高吸水树脂一般由纤维素与亲水性单体共聚制得。虞素飞[14]利用废弃秸秆合成了纤维素基高吸水树脂,研究了该纤维素基高吸水树脂作为土壤保水剂在去离子水以及质量分数0.9%氯化钠溶液中的吸水倍率,得到该纤维素基高吸水树脂具有一定的耐盐性,适合在农田中广泛应用。Wang等[15]采用马来酸酐改性聚乙烯蜡与纤维素进行接枝改性,制备了PEW-g-MA/CF复合高吸水树脂,为纤维素基吸油保水剂的合成提供了一条经济有效的途径,在水污染治理领域提供思路。宁峰等[16]利用废弃的竹屑作为原料,以丙烯酸和2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸为单体,添加聚乙烯醇,通过水溶液聚合法制备出可降解纤维素基高吸水树脂,该高吸水树脂45 d自然降解率为28%,并且具有良好的热稳定性和循环利用性,为农林土壤保水及沙漠化治理等方面提供了潜在的应用价值。

1.1.3 *木质素系高吸水树脂* 木质素是地球上储量第二丰富的植物高分子化合物,它是一种结构无定形含芳环的高聚物,在植物中广泛存在,主要功能是营养运输。木质素除具有稳定性,可降解性、可持续性、成本效益高等优点外,还具有大量亲水性基团,即羟基、羰基、甲氧基,作为化学修饰的反应位点[17]。这使得木质素成为合成高吸水树脂的一个很好的候选物。从农业废弃物中提取的木质素制备高吸水树脂是一个重要研究领域,可以最大限度地提高农场净收入和最小化生态足迹。孙东[18]利用木质素、小分子单体、引发剂和硫酸铁为原料可制备木质素基高吸水性树脂。制备

的高吸水性树脂具有良好的吸水、吸盐能力和复水性。研究表明，将该高吸水性树脂与盐碱土壤混合，土壤pH值和含盐量均出现明显降低，对于水土保持生态建设中土壤修复具有重要意义。Adjuik等[19]合成了一种木质素基高吸水树脂，采用悬式水柱、压力板和露点电位仪测定了木质素高吸水树脂改良后的粉壤土和壤质细砂土从饱和到烘干的土壤持水曲线。结果表明，在去离子水中的最大溶胀比为吸水树脂原始质量的2 013%，在自来水中为1 092%，在质量分数0.9% NaCl溶液中为825%，与未添加木质素的高吸水树脂相比，添加木质素的高吸水树脂显著提高了土壤的持水能力。Li等[20]以廉价的聚乙烯醇和甲基纤维素为内涂层材料，以高吸水性树脂聚丙烯酸和聚丙烯酰胺接枝天然生物降解木质素为外涂层材料，制备了双层缓释肥料包膜材料。结果表明，当PVA质量分数为5%、MC添加量为2 g时，内涂层液的各项性能指标均优于其他含量。同时，单层和双层包膜肥料中释放的尿素分子较多，尿素分子的累积释放率分别为92.36%、85.10%。该工作为制备双包膜缓释肥料提供了研究思路，提高了土壤保水性和肥料利用率，降低了过量施肥和肥料渗漏的概率，减少了环境污染。

1.1.4　*蛋白质系高吸水树脂*　蛋白质大分子链中含有羧基、氨基等亲水基团，有较强的亲水性，但其原料获取困难，成本较高，而且降解性差。因此，蛋白质系高吸水树脂的制备一般采用对动植物蛋白进行接枝共聚和交联改性等方法[9]。郭露露[21]用碱溶酸沉法对胡麻饼粕中的蛋白质进行提纯，以提纯后的蛋白质为原料，以AA和DADMAC为共聚单体，采用溶液聚合的方法制备了蛋白质基高吸水树脂。将该高吸水树脂在30 ℃下保温12 h后仍持有84%的保水性能，降解35 d后降解率达到78.1%。研究表明，该高吸水树脂保水性能优异且具有缓释性，可用于农林植物，园艺花卉的种植。Kong等[22]制备的鸡毛蛋白-接枝聚丙烯酸钾-聚乙烯醇半互穿网络高吸水树脂可以使化学结合或物理包埋的肥料化合物在灌溉下从树脂基质释放到周围的土壤中。通过30 d的田间试验，发现添加高吸水树脂能提高土壤的保水能力，为农林业领域的水土治理提供了思路。同时，Kong等[23]还研究了鸡毛蛋白基半互穿网络高吸水树脂对重金属离子的吸附。结果表明，对Ni^{2+}、Cr^{6+}和Pb^{2+}的最大吸附容量分别为170.3、78.55、143.2 mg/g且在第5次循环后，该高吸水树脂的吸附容量至少保留了60%。这说明该蛋白质基高吸水树脂对重金属离子有良好的吸附作用和循环使用性能，可用于治理水土重金属离子污染问题。

1.1.5　*壳聚糖系高吸水树脂*　壳聚糖一般由天然多糖甲壳素部分去乙酰化得到，具有生物相容性和无毒性，但其价格昂贵，限制了其应用。壳聚糖系高吸水树脂吸水保水性能优良，常作金属离子吸附剂[24]。陈嘉恒等[25]制备的壳聚糖基高吸水树脂采用培养基培养方法，考察了黑曲霉和白僵菌利用高吸水树脂中碳源的生长情况，并对高吸水树脂作为未来生物农药白僵菌的载体进行了初步探索。结果表明，其制备的壳聚糖基高吸水树脂具有一定的生物降解性。Babel等[26]研究表明壳聚糖对Hg^{+}、Cd^{2+}、Mn^{2+}、Zn^{2+}等离子均有较好的吸附能力。因此，壳聚糖复合高吸水性树脂可以作为水体中重金属离子的良好吸附剂。Yadav等[27]使用接枝共聚的方法制备了壳聚糖基高吸水树脂，在反应期间保持时间120 min和温度40 ℃恒定。以壳聚糖为母体聚合物，对合成的接枝共聚物的吸水膨胀性、金属离子吸附性、絮凝性和抗生物降解性等理化性能进行了研究。结果表明，所合成的高吸水树脂具有更好的热稳定性，溶胀性，金属离子吸附性和耐生物降解性。在水土保持生态修复中具有良好的应用潜力。

1.2　合成类高吸水树脂

合成类高吸水树脂大致可分为聚丙烯酸类、聚乙烯醇类等，具有吸水保水性能好、成本较低，合成工艺较简单，方便保存等优点。但相较于天然类高吸水树脂，降解性能差。这种高吸水树脂通过水分子与聚合物网络官能团形成多个氢键而吸水，应用广泛，在工业生产中占主导地位。

1.2.1　*聚丙烯酸类*　聚丙烯酸类高吸水树脂因具有生产成本低，吸水倍率高，吸附效率高等优点而被应用于植被修复、金属离子吸附等领域。Jiang等[28]研究了影响聚丙烯酸-丙烯酰胺的高吸水树脂吸水倍率的因素。结果表明，AA与AM的质量比对合成高性能SAP起主导作用，为合成类高吸水树脂的制备提供了理论依据。El-Halah等[29]制备的丙烯酰胺与衣康酸和衣康酸盐衍生的高吸水树脂研究了在不同浓度的水溶液中吸附一些金属离子，如Cu^{2+}、Ni^{2+}、Pb^{2+}、Cd^{2+}和Fe^{3+}。评价了金属离子、离子浓度和水凝胶（hydrogel，HG）组成对所研究的两种HG（AAm/IA和AAm/MEI）的吸附和吸附效率的影响，每个因素均产生显著差异（$P \leqslant 0.05$）。吸附取决于离子的类型，浓度和Hg的类型

和组成的影响。对于每一个系统的所有离子的吸附效率是相似的。对于两种体系，当AAm/IA或AAm与MEI的摩尔比为80∶20时，观察到最大吸附效率。当对单个离子进行吸附时，AAm/MEI HG比AAm/IA更有效。相对于Cu^{2+}、Ni^{2+}、Pb^{2+}、Cd^{2+}的多元素样品，两种Hg均能吸附所有离子，且吸附规律相同，吸附效率从高到低依次为Pb^{2+}、Cu^{2+}、Cd^{2+}、Ni^{2+}。统计分析的结果证明了它在这类研究中的优势。

1.2.2 聚乙烯醇类 聚乙烯醇(polyvinyl alcohol，PVA)具有亲水、无毒等特点，以聚乙烯醇为组分的吸水树脂应用领域广泛。Wu等[30]以木质素为原料，以PVA为基质模板，用环氧氯丙烷做交联剂，得到了吸水倍率为456 g/g的木质素-PVA高吸水树脂，且木质素-PVA高吸水树脂对罗丹明6G、结晶紫和亚甲蓝染料的吸附能力分别高达196、169、179 mg/g。因此，木质素-PVA高吸水树脂在农业土壤保水和种子培养以及染料污染物去除领域具有巨大的潜在应用。Zhuo等[31]以聚乙烯醇为主要材料，通过溶液聚合法制备了PVA/P(AA-AM)高吸水树脂。分析得出树脂中存在大量多孔网络结构且在200 ℃下具有良好的热稳定性和良好的保水性能，在砂质土中加入树脂后，砂质土的保水性得到明显改善，可用于生态修复中的固沙领域。

1.3 共混复合类高吸水树脂

传统高吸水树脂存在吸水速率缓慢，吸水保水性能差，耐盐碱性差等问题。为解决上述问题，在高吸水树脂合成过程中加入无机材料来制备有机-无机复合高吸水树脂，所得到的高吸水树脂不仅具有原来树脂的优良性质，也具有无机材料的性能，使用较多的无机组分有蒙脱土、凹凸棒土、硅藻土等[24,32-33]。

1.3.1 蒙脱土类 蒙脱土是一种多孔网状吸水材料，易发生电离，其元素呈薄片状分布，具有强韧性和表面比率高等特点，从而被用作高吸水树脂的原料。Zhan等[34]采用水溶液聚合法合成了复合高吸水树脂，确定了蒙脱土用量(均为质量分数)40%，单体中和度80%，交联剂用量0.08%，引发剂用量0.15%时，所得复合高吸水树脂具有良好的保水性和耐热性，对于降低产品成本、提高复合材料的综合性能具有重要意义。Zhang等[35]以蒙脱土作为无机原料通过接枝共聚法制得的高吸水树脂有较好的吸水保水性，对重金属离子有较高的吸附性能。Feng等[36]用黄原胶、黄土为无机原料通过溶液聚合法制得有机-无机复合高吸水树脂，并研究了其对废水中重金属离子的吸附性能。结果表明，复合树脂对废水中的重金属离子有较好的吸附性，可广泛应用于废水处理和水土污染等领域。

1.3.2 凹凸棒土类 凹凸棒土是一种表面含有大量活性羟基的链层状硅酸盐矿物，在建筑、生态修复和农业领域中广泛应用。Zang等[37]以芒果种植为例，将制备的聚丙烯酰胺/凹凸棒土复合材料作土壤保水剂，调节土壤中养分的释放。结果表明，在提高芒果果实的产量和环境效益的同时又降低了成本。这对高吸水树脂在农业的保肥保水领域有很大的应用前景。

1.3.3 硅藻土类 硅藻土是一种资源丰富的硅质岩石，主要成分是二氧化硅，有很强的亲水性。具有多孔结构、低密度和高表面积等特点，在多个领域获得普遍应用。Wang等[38]以海藻酸钠、改性硅藻土、丙烯酸和丙烯酰胺为原料，用水相聚合方法开发了一种新型高吸水性聚合物复合材料。通过测试得到，该复合材料具有良好的吸水、保水能力和热稳定性，是一种很有前途的材料，可用于农业、工业和卫生用品。

2 高吸水树脂在水土保持和生态修复中的应用

环境污染导致了可使用的水资源日益减少、土壤性能变差等问题。水土条件作为最重要的生长因素，对农林业和园艺业至关重要，其水土使用资源在全部水土资源利用中占很大比例，若提高农林和园艺业水土利用效率，则对促成水土保持生态建设大有帮助。目前，高吸水树脂在农林业和园艺业水土保持和生态修复中的应用可以从水土保持、生态修复两个方面描述。

2.1 水土保持

防治水土流失，保护自然资源，维护生态平衡是生态建设的重要要求。高吸水树脂作为一种新型吸附功能型材料，作用于农林业和园艺业领域的水土保持生态效益主要通过保水，保肥，固沙等性能来体现。

2.1.1 保水 在保水方面，高吸水树脂常作保水剂，如图1所示。因其有许多亲水基团，所以可吸收大量的水，且在外力作用下，水分也不会丢失。故在土壤中加入一定量的高吸水树脂，可以使土壤中的水含量增加，这不仅可以防止土壤表面水

分蒸发带来的水分损失而且可以延长土壤的含水时间，从而为农林作物和园林植物的生长提供足够的水分。在苗木移植的过程中，高吸水树脂可用作根部保水剂，给移植的苗木根部提供充足的水分，提高苗木的移植率[39]。在种子发芽的过程中，高吸水树脂可用作种子的包衣剂，为种子发芽和生长初期提供了好的生长条件，提高种子发芽率和幼苗成活率[40]。Su 等[41]研究了干旱条件下 5 种保水剂对柠条种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明，保水剂包衣能显著提高种子的发芽率和发芽势，有助于理解和利用高吸水树脂作种子包衣提高植物在干旱条件下的生存。Gubišová 等[42]以小麦和玉米种子为试样，以未用高吸水树脂作用的试样为参照组进行研究。研究发现，用高吸水树脂包衣种子能够更好地发芽和更有效地种植作物。同时，高吸水树脂作种子包衣剂不仅减少了杀真菌剂的浸出，而且不会改变其抑制病原体侵染的有效性。

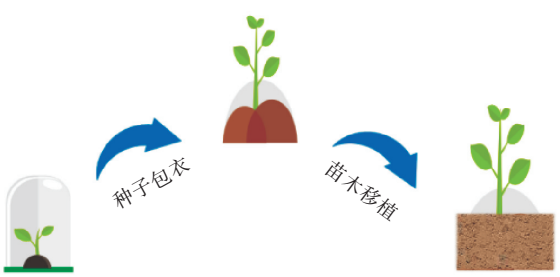

图 1　高吸水树脂用于保水

Fig. 1　Super-absorbent polymers for water retention

2.1.2　保肥　在保肥方面，高吸水性树脂可以与水溶性肥料混合，同时吸收并储存肥料和农药，形成一个“微型水和肥料储存库”，如图 2 所示。在干旱时期缓慢释放水分和养分，提高肥料的利用率，降低肥料的损失率，可节省约 30% 以上的肥料，并减少因肥料泄漏造成的土壤和地下水污染[43]。现有的高吸水树脂与肥料协同作用的方式有 4 种[44]。涂层包膜法，操作复杂且成本高，通过不同类型的涂层涂覆来满足保肥保水的要求。Liang 等[45]制备了复合高吸水树脂的核/壳结构的控释保水氮磷钾复合肥，该产品具有较高的初始溶胀率，不仅具有良好的缓释性能，而且具有优异的保水能力，可有效提高肥料和水资源的利用率。直接混合法简单易行，但存在高吸水树脂与肥料混合不均匀的问题，降低了肥料与高吸水树脂的协同效率。Güneş 等[46]制成的聚丙烯酰胺高吸水树脂与肥料混合后灌溉间隔从 6 d 增加到 11 d，表明该高吸水树脂的加入使土壤含水量明显增高。溶胀吸附法能够减少肥料对高吸水树脂制备过程的影响，但肥料在高吸水树脂中的负载量相对于其他方法来说较少，且制备时间较长。相对于溶胀吸附法，原位包埋法能将更多的肥料负载在高吸水树脂中，提高了保水保肥效率，而且制备所用时间较短，但肥料的存在会对高吸水树脂的制备过程产生不利影响。

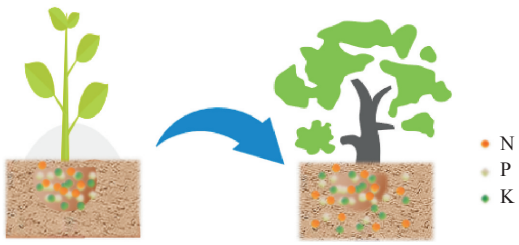

图 2　高吸水树脂用于保肥

Fig. 2　Super-absorbent polymers for fertiliser retention

2.1.3　固沙　在固沙方面，沙粒的主要成分为 SiO_2 且其表面还有少量的 Si—OH、Ca^{2+}、Mg^{2+} 等。高吸水树脂结构中含有大量的亲水基团如羧基（—COOH）、羟基（—OH）等功能基团可与沙粒表面的 Si-OH、Ca^{2+}，Mg^{2+} 等通过交联吸附作用于沙粒，如图 3 所示。因此，高吸水树脂的施用不仅能够将分散的沙土结合成大面积的整体而且可以提高沙土中的水含量，增强沙土的湿润度，有效提高了水土保持能力。这可以促进农林植物的根部生长，加快了植物的健康成长趋势。Ma 等[47]以瓜尔胶，丙烯酸和黄土为原料，用水溶液聚合法制备了瓜尔胶-聚丙烯酸-黄土的有机无机化学固沙剂。通过研究复合材料含量与固沙性能的相关性得出该固沙剂具有良好的热稳定性、冻融稳定性和紫外线老化稳定性，能够承受温度变化和强紫外线辐射。同时，该固沙剂作用后的试样具有良好的保水性能。Dang 等[48]采用溶液共混法制备了以聚丙烯酸-玉米淀粉共混物为基料的化学固沙材料。结果表明，具有良好的固沙性能和良好的吸水和保水性能且固沙率高达 99.5%。



图 3　高吸水树脂用于固沙

Fig. 3　Super-absorbent polymers for sand fixation

2.2　生态修复

生态修复有助于优化生存环境。高吸水树脂

在生态修复领域展现出良好的应用价值，为实现“碳中和”目标提供了重要技术支持。目前，高吸水树脂在生态修复工程中，主要应用于固土、去污、促植被生长等领域。在固土方面，高吸水树脂用作土壤改良剂来增加土壤的蓬松度和通水性，也会作重金属离子吸附剂应用于去污方面。湿地修复和边坡绿化中，高吸水树脂发挥自身独有特性来修复植被。

2.2.1 土壤改良剂 高吸水树脂可以用作土壤改良剂来修复土壤，如图4所示。高吸水树脂混入土壤中，可提高土壤的蓬松度。同时，可在土壤中重复数次释水收缩与吸水膨胀，给土壤造成大量的孔隙，提高了土壤的透气性、透水性，改善了土壤的保温性能和根际环境，同时也增强了根际微生物的活动，加快了根际周围有机矿物质的分解有利于根系吸收，促进了根系和植物的生长发育，改良了土壤基质，防止土壤板结，盐渍化[49]。Malik等[50]制备的高吸水树脂用作土壤改良剂可以保留大量的水，并实现质量分数约95%的水释放。同时，可提高土壤孔隙度(0.26%~6.91%)和持水力(5.68%~17.90%)，减少氮素淋失量达45%。Yang等[51]采用高吸水树脂作为土壤改良剂，监测了不同高吸水树脂用量下玉米生育期内土壤温度、光合速率、叶片蒸腾速率、叶绿素、作物生长指标和产量的变化，并在此基础上分析了高吸水树脂对干旱半干旱土壤的改良机理。结果表明，应用结构调整方案显示出综合效用(土壤水分和温度的重新分布、结构调整方案与植物之间的协同作用)，这表明土壤改良剂发挥了作用，实现了确保旱地系统的社会经济和生态可持续性的最基本目标。李民等[52]制备的土壤改良保水剂，不仅可以复合养分和农药而且还具备无污染、可降解等性能，它的吸水倍率是458 g/g，吸盐水倍率为98 g/g。



图4 高吸水树脂做土壤改良剂

Fig. 4 Super-absorbent polymers as soil conditioners

2.2.2 水土重金属离子吸附剂 高吸水树脂对重金属离子的吸附能力很强，常用作重金属离子吸附剂，如图5所示。谢建军等[53]用溶液聚合法合成了对重金属离子吸附性好的高吸水树脂。研究了该高吸水树脂在相同温度条件$Pb(NO_3)_2$，$Ca(NO_3)_2$，$Zn(NO_3)_2$中的溶液浓度、吸附速率。结果表明，该高吸水树脂对不同金属离子的吸附率随溶液浓度增加而增高，对3种重金属离子的吸附率从高到低依次为Pb^{2+}、Cu^{2+}、Zn^{2+}，可以得出该高吸水树脂能有效去除水土中上述重金属离子。Nair等[54]以壳聚糖和碱木质素为原料，制备了不同配比的壳聚糖-碱木质素复合材料。通过对复合材料进行详细的表面表征，阐明了活性吸附位点主要是氨基和羟基，吸附机理是质子化氨基和羟基与染料和铬酸根阴离子的静电相互作用，且与壳聚糖基复合材料相比，复合高吸水树脂吸附剂的总成本可以显著降低。胡鹏等[55]以秸秆、高岭土为原料用水溶液聚合法制备的复合高吸水树脂对含有Pb^{2+}模拟废水进行了吸附性能研究。通过验证，在最佳条件下该高吸水树脂对Pb^{2+}的去除率达88.57%且吸附Pb^{2+}后的复合高吸水树脂经处理后可循环使用。

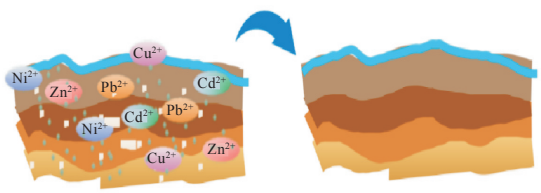

图5 高吸水树脂做重金属离子吸附剂

Fig. 5 Super-absorbent polymers as heavy metal ion adsorbent

2.2.3 植被修复 高吸水树脂因其优异性能在植被修复领域也常发挥作用，如图6所示。实现植被修复需要健康的水土环境，高吸水树脂作为保水剂和土壤改良剂有助于构建好的水土条件，提供植被需要的养分，促进植被的生长。Yang等[56]采用具有保水功能的高吸水性树脂对岩质边坡进行保水处理。将保水剂按质量分数0.15%、0.3%和0.45%三个水平与桑迪壤土混合。通过吸水和喷雾试验，研究了保水剂处理土壤的饱和含水量、蒸发速率和保水能力，测定了保水剂处理土壤的种子发芽率和植株存活率。在桑迪中添加保水剂后，土壤持水能力显著提高。保水剂处理的土壤种子萌发率显著高于对照，水分胁迫下禾本科植物和木本植物的存活时间延长。质量分数0.3%保水剂处理是岩质陡坡桑迪土改良的最佳选择。研究表明，保水剂具有良好的保水性能，能有效促进植物对水分的吸收和利用，在岩质边坡生态工程中具有广阔的应用前景。针对榆林矿区植被修复问题，聂兴信等[57]通过研究丙烯酸吸水树脂对植物存活率和成长状况的影响得出：丙烯酸吸水

树脂的吸水倍率为763.4 g/g，添加该吸水树脂后土壤含水率的下降幅度变小且植物的成活率有所提高。同时，通过对重金属离子含量的测定表明土壤质量得到改善。



图6　高吸水树脂用于植被修复

Fig. 6　Super-absorbent polymers for vegetation restoration

3　存在问题及其解决措施

社会高速发展加快了水土保持生态建设的进程，对应用于水土保持领域的高吸水树脂要求越来越高。目前，高吸水树脂长期效应性不确定问题影响了其应用范围的拓展，针对高吸水树脂应用存在的主要问题，总结了相应的解决措施：

（1）高吸水树脂反复使用性能需要提高。为真正起到吸水保水和保肥的作用，高吸水树脂须具备多次使用性。高吸水树脂的吸液倍数和循环使用性既矛盾又统一，高吸水保水倍率的高吸水树脂往往交联度小，从而循环使用性低。因此，如何让吸液保液倍数和循环使用性两者协同作用需要进一步探讨。为此，需要优化高吸水树脂生产工艺[58]。

（2）高吸水树脂可降解性需要改善。开发应用于水土保持生态建设的绿色高吸水树脂，即无污染可自然降解型高吸水树脂，响应绿色发展理念。结合原料选择和合成方法，在生物质基材料上接枝或交联氨基酸类高吸水材料或其他可生物降解的高吸水材料来制备效益最大化高吸水树脂作用于水土保持[40]。

（3）需解决理论吸水保水倍率高，实际使用效果差的问题。吸水保水倍率是测验高吸水树脂重要的性能之一。目前，大多数高吸水树脂是在纯水中测得其吸水保水倍率，也有用氯化钠等盐溶液测其对高吸水树脂的吸水保水性能的影响。但在实际使用中，常用水源多为自来水，土壤水或地下水，其中除了盐外，还有重金属离子等对高吸水树脂吸水保水性能都有影响。因此，为更好地将高吸水树脂应用于水土保持生态建设中，需要将高吸水树脂实验室研究联系实际应用领域，开发作用于水土保持和生态修复的综合型高吸水树脂[59]。

4　总结与展望

本文综述了高吸水树脂在水土保持和生态建设中的应用研究进展。总结了高吸水树脂在农林业水土保持和生态修复中的应用领域，展现了高吸水树脂因其特性运用于农林业中保水、保肥、固沙、土壤改良、重金属离子吸附和边坡植被修复等领域的显著应用价值，为拓展高吸水树脂在水土治理领域的应用提供了理论依据。目前，高吸水树脂应用于水土保持和生态建设在我国的研究还处于发展阶段，在未来的研究和发展中需要充分挖掘高吸水树脂的水土治理效能，提高利用效率和可再生性，加快成果转化，加速水土保持和生态修复建设的进程，进而造福全人类。

参考文献

[1] 李玉斌. 农业生态修复技术在水土保持中的运用思考[J]. 河南农业，2023(20)：62-64.

[2] 何钦茂. 生态修复在水土保持生态建设中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术，2016(6)：00273.

[3] 曹寒，马香玲，李洁，等. 水土保持生态修复研究进展[J]. 价值工程，2023，42(5)：163-165.

[4] 邹新禧. 超强吸水剂[M]. 2版. 北京：化学工业出版社，2002.

[5] MIKE CHUNG T C. Functional polyolefins for energy applications [J]. Macromolecules，2013，46(17)：6671-6698.

[6] FANTA G F，BURR R C，DOANE W M. Graft polymerization of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropanesulfonic acid onto starch [J]. Journal of Applied Polymer Science，1979，24(9)：2015-2023.

[7] CASTELLINI M，DIACONO M，GATTULLO C E，et al. Sustainable agriculture and soil conservation [J]. Applied Sciences，2021，11(9)：4146.

[8] MA X F，WEN G H. Development history and synthesis of super-absorbent polymers：a review [J]. Journal of Polymer Research，2020，27(6)：136.

[9] 吴海霞，图力古日，马晓丽. 可再生天然原料绿色高吸水树脂的研究和发展[J]. 化工设计通讯，2016，42(4)：155-155，169.

[10] 水东莉. 淀粉类高吸水性树脂在农业中的应用研究[J]. 南方农机，2022，53(15)：143-145.

[11] ZHANG M，YANG P，LAN G H，et al. High crosslinked sodium carboxyl methylstarch-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) resin for heavy metal adsorption：its characteristics and mechanisms [J].

Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(31): 38617−38630.

[12] BAI W B, JI B Y, FAN L R, et al. Preparation and characterization of a novel cassava starch-based phosphorus releasing super-absorbent polymer, and optimization of the performance of water absorption and phosphorus release [J]. Polymers, 2023, 15(5): 1233.

[13] SARKAR N, GHOSH S K, BANNERJEE S, et al. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview [J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 19−27.

[14] 虞素飞. 一种纤维素改性土壤保水剂的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2013.

[15] WANG C, ZHOU L, MA C, et al. Synthesis of cellulose based super absorbent and its excellent oil-water separation properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(13): 51858.

[16] 宁峰, 亢敏霞, 马长坡, 等. 利用竹屑制备可降解纤维素基高吸水树脂[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(5): 26−33.

[17] 赵建兵, 赵欣, 降林华, 等. 木质素基丙烯酸系吸水性树脂研究进展[J]. 中国科技论文在线, 2008, 3(9): 625−637.

[18] 孙东. 基于木质素-Fe^{3+}氧化还原对构建高吸水性树脂[J]. 热带农业工程, 2023, 47(1): 35−38.

[19] ADJUIK T A, NOKES S E, MONTROSS M, et al. Alkali lignin-based hydrogel: synthesis, characterization, and impact on soil water retention from near saturation to dryness [J]. Journal of the ASABE, 2023, 66(1): 85−98.

[20] LI H, WANG N, ZHANG L, et al. Engineering and slow-release properties of lignin-based double-layer coated fertilizer [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2023, 34(6): 2029−2043.

[21] 郭露露. 胡麻饼粕基高吸水树脂的制备及应用研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.

[22] KONG W J, LI Q, LI X D, et al. A biodegradable biomass-based polymeric composite for slow release and water retention [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230: 190−198.

[23] KONG W J, LI Q, LIU J, et al. Adsorption behavior and mechanism of heavy metal ions by chicken feather protein-based semi-interpenetrating polymer networks super absorbent resin [J]. RSC Advances, 2016, 6(86): 83234−83243.

[24] 张春晓, 葛玮健. 壳聚糖基高吸水性树脂的研究进展[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2021, 35(3): 73−77.

[25] 陈嘉恒, 吴国杰, 廖宗祺, 等. 壳聚糖-聚乙烯醇-丙烯酸高吸水树脂的生物降解性能研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2013, 26(4): 20−24.

[26] BABEL S, KURNIAWAN T A. Low-cost adsorbents for heavy metals uptake from contaminated water: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2003, 97(1/2/3): 219−243.

[27] YADAV M, SAND A, BEHARI K. Synthesis and properties of a water soluble graft (chitosan-g-2-acrylamidoglycolic acid) copolymer [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 50(5): 1306−1314.

[28] JIANG J Q, ZHAO S. Acrylic superabsorbents: a meticulous investigation on copolymer composition and modification [J]. Iranian Polymer Journal, 2014, 23(5): 405−414.

[29] EL-HALAH A, MACHADO D, GONZÁLEZ N, et al. Use of super absorbent hydrogels derivative from acrylamide with itaconic acid and itaconates to remove metal ions from aqueous solutions [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(4): 46999.

[30] WU L J, HUANG S Q, ZHENG J, et al. Synthesis and characterization of biomass lignin-based PVA super-absorbent hydrogel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 140: 538−545.

[31] ZHUO Y G, LIU J, YANG F, et al. Preparation and characterization of PVA/P(AA-AM) super absorbent polymer [J]. Integrated Ferroelectrics, 2017, 179(1): 166−172.

[32] 孙培涛, 费俊豪, 王成, 等. 高吸盐水率和加压吸收率的有机-无机复合SAP[J]. 塑料工业, 2023, 51(1): 30−35.

[33] 王贺, 崔允祚, 闫国松, 等. 淀粉系、纤维素系、共混与复合系高吸水性树脂的研究与应用[J]. 吉林农业科技学院学报, 2018, 27(4): 38−40.

[34] ZHAN X Y, WANG F, LI X W, et al. Synthesis of montmorillonite/acrylic acid/acrylamide tricopolymer and its super absorbent properties [J]. Polymers and Polymer Composites, 2014, 22(5): 489−494.

[35] ZHANG S, GUAN Y, FU G Q, et al. Organic/inorganic superabsorbent hydrogels based on xylan and montmorillonite [J]. Journal of Nanomaterials, 2014, 2014(1): 675035.

[36] FENG E K, MA G F, WU Y J, et al. Preparation and properties of organic-inorganic composite superabsorbent based on xanthan gum and loess [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 111: 463−468.

[37] ZANG X P, YUN T Y, WANG L X, et al. Water-retaining agent as a sustainable agricultural technique to enhance mango (mangifera indica L.) productivity in tropical soils [J]. Agronomy, 2024, 14(3): 530.

[38] WANG Y Q, FU E F, SAGHIR S, et al. Novel superabsorbent polymer composite embedded with sodium alginate and diatomite for excellent water absorbency, water retention capacity, and high thermal stability [J]. Journal of Molecular Structure, 2024, 1300: 137244.
[39] 顾宝岗. 高吸水树脂在园林中的应用[J]. 中国花卉盆景, 2008(7): 30.
[40] 孙宾宾. 高吸水树脂在种植业领域的应用与发展趋势[J]. 科技与企业, 2013(20): 338.
[41] SU L Q, LI J G, XUE H, et al. Super absorbent polymer seed coatings promote seed germination and seedling growth of Caragana korshinskii in drought [J]. Journal of Zhejiang University: Science B, 2017, 18(8): 696-706.
[42] GUBIŠOVÁ M, HUDCOVICOVÁ M, MATUŠINSKÝ P, et al. Superabsorbent polymer seed coating reduces leaching of fungicide but does not alter their effectiveness in suppressing pathogen infestation [J]. Polymers, 2022, 14(1): 76.
[43] 刘自菊. 保水剂在苹果栽培中的应用技术[J]. 甘肃科技, 2012, 28(10): 145-146.
[44] 王赫, 李晶晶, 魏宏亮, 等. 水凝胶在缓/控释肥料中应用的研究进展[J]. 轻工学报, 2017, 32(6): 43-55.
[45] LIANG R, LIU M Z, WU L. Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention [J]. Reactive and Functional Polymers, 2007, 67(9): 769-779.
[46] GÜNEŞ A, KITIR N, TURAN M, et al. Evaluation of effects of water-saving superabsorbent polymer on corn (Zea mays L.) yield and phosphorus fertilizer efficiency [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2016, 40: 365-378.
[47] MA G F, FENG E K, RAN F T, et al. Preparation and sand-fixing property of a novel and eco-friendly organic-inorganic composite [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2015, 54(7): 703-710.
[48] DANG X G, CHEN H, SHAN Z H. Preparation and characterization of poly (acrylic acid) —corn starch blend for use as chemical sand-fixing materials [J]. Materials Research Express, 2017, 4(7): 075506.
[49] 姜海燕. 土壤改良剂在农业生产中的应用[J]. 现代化农业, 2011(6): 17-19.
[50] MALIK S, CHAUDHARY K, MALIK A, et al. Superabsorbent polymers as a soil amendment for increasing agriculture production with reducing water losses under water stress condition [J]. Polymers, 2023, 15(1): 161.
[51] YANG F, CEN R, FENG W Y, et al. Effects of super-absorbent polymer on soil remediation and crop growth in arid and semi-arid areas[J]. Sustainability, 2020, 12(18): 7825.
[52] 李民, 颜朝霞. 新型多功能天然型复合型生物土壤改良保水剂的研制[J]. 甘肃科技纵横, 2018, 47(10): 34-37.
[53] 谢建军, 刘赛. 聚2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸高吸水性树脂等温吸附重金属离子[J]. 化学工程, 2008, 36(5): 5-8.
[54] NAIR V, PANIGRAHY A, VINU R. Development of novel chitosan-lignin composites for adsorption of dyes and metal ions from wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 254: 491-502.
[55] 胡鹏, 贺龙强, 李艳梅, 等. 玉米秸秆复合高吸水树脂的制备及对Pb^{2+}的吸附研究[J]. 化工新型材料, 2024, 52(4): 223-227, 232.
[56] YANG L X, YANG Y, CHEN Z, et al. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering [J]. Ecological Engineering, 2014, 62: 27-32.
[57] 聂兴信, 付小艳, 程平, 等. 污泥丙烯酸吸水树脂性能试验及在榆林矿区植被恢复中的应用[J]. 地质灾害与环境保护, 2022, 33(1): 114-120.
[58] 李绵瑱, 李传俊, 蒋玉仁. 超吸水树脂的发展难点及解决与发展趋势[J]. 广州化工, 2013, 41(13): 45-46, 85.
[59] 宋莉芳, 徐楚彭, 赵丽轲, 等. 高吸水树脂在公路工程土壤修复中的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(6): 206-211.

本文编辑：张　瑞