

高吸水性树脂在农业生产中的应用研究进展

吴淑芳 陈循军* 杜建军 葛建芳 蚁明浩

(仲恺农业工程学院化学化工学院, 广州 510225)

摘 要 我国是一个干旱缺水严重的国家,其中农业耗水量最多,占总耗水量的 70% 以上,如何提高水资源利用率,减少农业耗水量是急需解决的问题。高吸水性树脂的出现,为解决上述问题提供了可能。越来越多的研究发现,高吸水性树脂用于农业生产,不但可以保水保肥,还能促进植物生长。对合成聚合物类、生物质类、有机-无机复合类高吸水性树脂进行了详细介绍,对其在农业生产中的最新应用研究进行概述,并对其在应用中存在的一些问题进行讨论,指出今后重点是对高吸水倍率、高机械强度的生物基吸水树脂的研发。

关键词 高吸水性树脂,保水剂,农业生产

Application of superabsorbent in agriculture

Wu Shufang Chen Xunjun Du Jianjun Ge Jianfang Yi Minghao

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai University of Agricultural and Engineering, Guangzhou 510225)

Abstract Drought and water shortage is serious in our country. While the water consumption in agriculture is the largest, accounting for more than 70% of the total water consumption. How to improve the utilization rate of water resources and reduce agricultural water consumption is an urgent problem to be solved. The emergence of superabsorbent resins has made it possible to solve the above problems. More and more studies have found that the application of superabsorbent resin in agriculture not only can save water and fertilizer, but also can promote plant growth. Synthetic polymers, biomass and organic-inorganic composite superabsorbent were introduced, and the latest research on their application in agriculture was summarized with discussing the existing problems in practical application. And it was pointed out that the focus in the future was on the development of bio-based water-absorbing resins with high water absorbency and high mechanical strength.

Key words super-absorbent resin, aquasorb, agricultural production

我国淡水资源丰富,占全球淡水资源总量的 6%,在世界排名第 6 位,但是人均淡水资源量却较少,只有世界人均水平的 1/4,且我国水资源在时空上分配极不均匀(春夏多,秋冬少;东南多,西北少),导致我国干旱缺水严重。据全国用水消耗的统计数据,农业耗水量最多,占总耗水量的 70% 以上,基于这些现实问题,如何提高水资源利用率,特别是减少农业用水量是急需解决的问题。

上世纪 60 年代,高吸水性树脂(SAP)诞生,它含有强的吸水性基团,如羧基、羟基、酰氨基、磺酸基等,而其本身是微交联的三维网络结构,使得其只能在水中吸水溶胀而不能溶解,它可以吸收并保持超

过自身质量几百倍甚至几千倍的水,具有很强的吸水能力和保水能力^[1]。将 SAP 应用于农业生产,将有望减少农业耗水量,有效提高水资源利用率。因此,笔者首先对高吸水树脂按原料来源进行分类介绍,接着对其在农业生产中最新的应用进展进行概述,并对实际应用中存在问题进行讨论,旨在为以后的应用研究提供有用的信息。

1 SAP 分类

SAP 发展迅速,种类繁多,原料来源丰富。按原料可分为生物质类(淀粉类、纤维素类等)、合成聚合物类和有机-无机复合物类,下面进行逐一概述。

基金项目:国家自然科学基金(31172031);广东省普通高校省级重大科研项目(自然科学)(粤教科函[2015]3 号);广州市科技计划项目产学研协同创新重大专项(201704020187)

作者简介:吴淑芳(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为功能高分子材料。

联系人:陈循军(1976-),男,副教授,主要研究方向为功能高分子材料。

1.1 合成聚合物类

合成聚合物类吸水树脂是由小分子经过聚合交联得到,包括聚乙烯醇类、聚丙烯酸盐类、聚氧化烷烃类、无机聚合物类等。其中,聚丙烯酸盐类因具有原料价廉易得、生产工艺简单、产品质量稳定、长期储存不会腐败等优点,是目前应用最广且研究最多的品种。对聚丙烯酸盐类的研究,一方面集中在树脂改性,如张小磊等^[2]用表面交联促进剂三-(二甲氨基甲基)苯酚(K-54)对 SAP 进行改性,降低了合成树脂中丙烯酸单体(AA)的残留量,提高了 SAP 的热稳定性,增加了 SAP 加压下的吸收量;另一方面是对合成工艺条件的研究^[3-5],如 Ani 等^[3]研究了交联剂 *N,N*-亚甲基双丙烯酰胺(MBA)的用量对吸水树脂吸水能力的影响,发现随着 MBA 用量增加,SAP 吸水能力减弱,Kazemi 等^[4]以半导体硫化镉纳米棒作为光催化引发剂,在阳光或蓝色、绿色 LED 照射下,以 AA、丙烯酰胺(AM)为原料,进行光聚合,合成三维吸水凝胶。

1.2 生物质类

合成聚合物类吸水树脂的吸水性能良好,在农业生产中有着广泛的应用,但是它很难被生物降解,容易污染土壤,使土壤板结。同时,合成类吸水树脂原料来源于石油下游产品,不可再生。随着环保意识的增强,人们努力寻找可降解的吸水材料。而生物基 SAP 是以生物质为原料(如淀粉、纤维素、蛋白质等),通过改性或与传统 SAP 相结合而制成的复合吸水材料,这一类吸水树脂的原料来源广泛、成本低廉、有利于废物资源化且环境友好,并且生物基吸水材料可生物降解,其吸水性能对盐类敏感性很低,因此,将生物基 SAP 应用于农业生产中表现出很大的潜力^[6],而在这方面的研究也很多。

以淀粉为主要原料合成的 SAP,不仅可以达到较高的吸水倍率,且其重复使用效果很好。Meng 等^[7]采用自由基聚合法制备了淀粉基大孔 SAP(St-MP SAP),该 SAP 在蒸馏水和 NaCl 水溶液中吸水倍率分别达到 1878g/g 和 119g/g。Liu 等^[8]提出了一步法合成淀粉/PAA 吸水树脂,不但明显简化合成步骤、减少用水量以及减少废物的排放,且该 SAP 在纯水中重复使用 2704 次、在 0.9%(w/v,质量体积比)NaCl 中重复使用 100 次,仍能吸收与自身质量相等的水分。

以纤维素为主要原料合成 SAP 也有报道。用反相悬浮聚合制备的羧甲基纤维素钠(CMC)/丙烯酸接枝共聚 SAP,与 PAA(Na)相比具有更好

的降解性,并且在限量供水条件下,可用于移植幼苗和种花^[9-10]。Fernando 等^[11]发现通过添加不同的交联剂,如环氧氯丙烷或二甘醇,可以显著提高纤维素基 SAP 的耐湿性。

此外,还有以蛋白为主要原料制备生物技术 SAP^[12-13]。Cuadri 等^[13]以大豆蛋白为原料,琥珀酐作为酰化剂,制备酰化蛋白质,并将其与甘油混合,注塑成型得到 SAP。

除了上述提到的以自然界 3 大碳源为主要原料制备生物基 SAP,也有报道以柠檬酸^[14]、植物胶^[15]、壳聚糖^[16]等天然产物为原料制备 SAP。如 Ye 等^[15]使用氯化钙将角叉菜胶与藻酸钠交联制备复合 SAP,该复合材料在 5min 内达到吸液平衡,其最大吸盐率为 13.1g/g。也有直接以天然植物为基体^[17-19]合成 SAP。如 Jamaludin 等^[17]用溶液聚合法合成油棕空果串-接枝聚丙烯酰胺吸水树脂(OPEFB-g-PAAm SAPC),该吸水树脂降解性能好,并能提高土壤保水性能,促进辣椒的生长。

1.3 有机-无机复合类

虽然传统的 SAP 吸水能力很强,但是凝胶的强度(机械性能)不好,耐盐性以及反复溶胀能力较差,这些缺点限制了 SAP 在农业生产中的应用。而无机纳米材料具有优异的稳定性,较大的比表面积,因此,通过交联、共混等方式将无机纳米材料加入有机 SAP 进行改性,可以明显改善吸水材料的综合性能^[20-22],提高稳定性、机械性能、耐盐性等。张太亮等^[20]用水溶液聚合法制备聚丙烯酸/丙烯酰胺/烯丙基聚氧乙烯醚/纳米 SiO₂ 复合 SAP,该树脂稳定性好,在温度 40~60℃、pH 6~8 时,吸水倍率变化不明显,且其保水性能优异,室温下保存 15d 后,其保水率高达 83.2%。Pathak 等^[21]通过向 CMC 和淀粉中加入 SiO₂ 纳米颗粒混合成 SAP,该树脂在重复 3 次吸水实验后仍然保留了 35%的保水能力。

同时,向 SAP 中加入一些特殊纳米材料,还能赋予其特殊的性能。如 Wei 等^[23]将 AA 和硝酸银的溶液通过紫外光照射制备纳米 Ag 复合水凝胶,该复合水凝胶抗菌性能优异,能抗金黄色葡萄球菌、白色念珠菌、大肠杆菌等。

2 SAP 在农业生产中的应用

SAP 吸水、持水以及保肥能力优秀,因此在农业生产中有着重要的应用。通常把农用 SAP 称为保水剂。下面主要介绍保水剂在增加土壤持水量、改良土壤、促进植物生长、提高肥效和环保防污方面

的最新应用研究。

2.1 增加土壤持水量

利用保水剂处理土壤,可以增大土壤的持水量,并使土壤在较长时间保持较高的水分含量,使作物可利用的有效水分含量增多,更能抵御干旱缺水的环境^[24-26]。黄慧青等^[24]研究了 3 种保水剂不同用量(0、10、20、30g/m²)对干旱胁迫下土壤含水量的影响,发现土壤含水量随着保水剂用量的增多而增加,当这 3 种保水剂用量为 30g/m² 时,土壤含水量与不使用保水剂的土壤相比,分别增加了 103.31%、95.76%和 78.51%。庞海颖等^[26]探讨了持续干旱下施用不同浓度(0.2%、0.3%和 0.4%)的保水剂对仁用杏生理特性的影响发现,施用保水剂不但有利于提高土壤含水量,而且能有效减缓叶片水分散失的速度,提高叶片相对含水量,缓解渗透调节物质的上升,提高抗氧化酶活性,减小细胞受损程度,提高仁用杏的抗旱性。

2.2 改良土壤

利用保水剂处理土壤,可显著提高土壤细菌、真菌的数量和种类,增加土壤微生物碳、氮的含量,改良土壤,促进植物生长^[27-28]。井大炜等^[27]用保水剂-尿素凝胶(SUG)处理用来种植侧柏裸根苗的土壤,发现 SUG 处理能提高根际土壤中各种酶的活性、微生物平均吸光度(AWCD)、丰富度指数和均匀度指数,并促进侧柏地径和株高的生长。

保水剂的合理使用,可稳定土壤(随着保水剂施加量的增加,土壤中水稳定团聚体的比率、土壤的膨胀率以及孔隙度均有所提高,土壤密度有所下降),减少土壤漏水及表面蒸发,促进植被恢复及土地的开发利用^[29-32]。Cao 等^[31]对 SAP 处理过的土壤进行人工降雨(强度为 40mm/h,时间 0.5h),发现 SAP 处理可以延长径流时间(21.5%~102.7%),减少地表径流量(24.6%~60.6%),减轻水土流失。彭韬等^[32]发现白云岩坡地土壤的生物量随着保水剂加入比例的提高而提高,当保水剂的加入比例为 0.5%时,总生物量与不加保水剂相比,增加了 51.2%;当保水剂的加入比例提高到 1%时,总生物量增加了 111.2%。

众所周知,尾矿土壤十分贫瘠,其含水量较低,保水保肥性较差,植物在尾矿土壤上难以生长。用保水剂处理尾矿土壤,可以增加土壤的总孔隙率,提高土壤的含水量,有利于尾矿土壤复垦^[33-35]。李想等^[34]研究发现,与单施保水剂或单施有机肥相比,有机肥与保水剂配合施加处理唐山铁尾矿土壤,更

有利于植物生长。张俊英等^[35]将保水剂黑金子和旱露植宝分别以 3 种质量比的用量(0.4%、0.6%及 0.8%)处理铁尾矿并进行香葱复垦发现,这两种保水剂的使用均有效提高了铁尾矿的含水率和总孔隙率,且香葱复垦 30d 后,香葱根系干重与对照(不加保水剂)相比有所增加,用量为 0.4%时最优,黑金子保水剂处理下香葱根系干重增加 30.00%,旱露植宝处理下的根系干重增加 17.94%。

2.3 促进植物生长

保水剂的使用在植物的整个生长期都起到促进作用。首先,它的使用能促进种子萌芽^[36-37]。程晓彬^[37]研究发现,在干旱条件下,保水剂的使用有利于提高青稞出苗率,施用保水剂的青稞出苗率与对照(不施用保水剂)相比,高 9.65%~15.60%;出苗指数与对照相比,高 2.29%~7.04%。但是在不同的土壤使用,其促进萌芽效果是不同的。倪芳等^[38]研究发现,在不同基质的土壤中添加保水剂,均可提高土壤总含水量和黑麦草种子发芽率,但影响效果有所区别,在混合土中使用效果最好,其次是营养土,最后是黄土。

其次,保水剂的使用能壮苗。王越等^[39]发现,微晶纤维素保水剂和秸秆沼渣保水剂的使用都能促进黄瓜幼苗生长,当微晶纤维素保水剂的施用量为 0.3%时,日均干质量增长量可达(0.0154±0.0009)g/d,壮苗指数达 0.4892±0.0762;当秸秆沼渣保水剂的施用量为 0.3%时,日均干质量增长量可达(0.0156±0.0004)g/d,壮苗指数达 0.5089±0.0985。

再次,保水剂使用除了能促进种子萌芽、壮苗外,还能促进植物生长,提高产量^[27,40-42]。陈芳泉等^[40]研究发现,保水剂的施用量对烟草光合特性影响很大,适量的保水剂可以显著提高其光合作用能力,增加烟草产量。

最后,保水剂的使用还能促进植物在逆盐环境下的生长。牛舒琪等^[43]研究发现,保水剂与枯草芽孢杆菌 GB03 结合能显著减少地上部 Na⁺ 积累,增加 K⁺ 积累,从而使土壤 K⁺/Na⁺ 提高,促进小花碱茅幼苗在盐逆境下生长。

保水剂使用虽然可以促进植物生长,但并不是用量越多越好^[44-45]。有研究把保水剂加入无土基质对芹菜进行育苗,发现当 SAP 添加量超过 4%后,观察到幼苗的根系生长变差,对养分的吸收量减少,抑制幼苗的生长^[46]。

2.4 提高肥效

SAP 具有吸收和保蓄水肥的作用,其分子表面能够进行吸附和离子交换。因此,用吸水性树脂将肥料包裹或者络合其中,可以有效地减少肥料的淋溶损失,使肥料缓慢释放,达到提高肥料利用率的目的。

王兴刚等^[46]制备了两种薄膜肥料,一种用聚乙烯醇/甲基纤维素(PVA/MC)对尿素和聚磷酸铵进行单层包膜,另一种是用 PVA/MC 和魔芋葡甘露聚糖-g-聚[N-(2-羟丙基)甲基丙烯酸酰胺-co-2-丙烯酸酰胺-2-甲基丙烷磺酸]对尿素和聚磷酸铵进行双层包膜,研究发现,与不包膜的肥料相比,单层包膜的肥料氮素由原来 5d 内就达到释放平衡变为在 30d 内总释放量为 95.2%,而磷素在 30d 内总释放量由原来的 91.4%降低到 81.5%;双层包膜的肥料,氮素和磷素在 30d 内累积释放量降低更多,分别为 89.4%和 76.2%,包膜肥料显示出优良的缓释性能。Qiao 等^[47]也得出同样的结果,证实包膜肥料具有缓释性能。

2.5 环保防污

SAP 除了用来吸水保水外,还可以用来吸附重金属,由于其对重金属有强的吸附作用,近年来常用来修复被重金属污染的土壤,它可以吸附土壤里的镉、铅、砷等,使植物体内的重金属积累减少^[48-50]。Moghadam^[50]发现,利用保水剂处理砷污染土壤后,可以减少砷在小麦芽和根中的积累。秦端端等^[48]用保水剂处理镉污染土壤,发现 60d 后,经过保水剂处理的镉污染土壤的镉含量与原来相比至少下降 20%,且减少的镉绝大部分是被保水剂所吸附。

3 结语与展望

由于保水剂吸水、保水、保肥能力优越,在干旱、半干旱地区有着重要应用,随着保水剂在农业生产中应用的推广,其存在的问题也慢慢显现出来:首先,保水剂理论吸水倍率高,而实际应用效果并不理想,特别是在高盐碱地区;其次,保水剂重复使用的效果不理想,循环利用较困难;最后,吸水材料的安全性研究不够,就使用最多的合成类吸水材料来说,它难以生物降解,容易在土壤中积累而污染土壤,使土壤板结,而残留的单体、低分子量聚合物和溶剂等,如果没有得到有效处理,不但会污染环境,且会使植物枯萎和损害人体健康^[51]。针对这些问题,笔者认为,生物基 SAP 的研发将会很好地解决这些问题,正如前文所提到的生物基 SAP 具有吸水性能对盐碱环境不敏感、可生物降解、不污染环境等。但是

生物基 SAP 也有缺点,如吸水倍率并不是很高、强度欠佳、吸水后容易破碎等。因此,未来的研究重点应该放在提高生物基 SAP 性能方面,研发出高吸水倍率、高机械强度的生物基吸水树脂,使其更好地应用于农业生产。

参考文献

- [1] 卢炜,睦晓,刘静,等.高吸水性树脂的应用现状[J].产业与科技论坛,2016,15(23):63-64.
- [2] 张小磊,李磊,王文彬,等.三-(二甲胺基甲基)苯酚改性高吸水性树脂的制备与性能[J].高分子材料科学与工程,2016,32(5):139-143.
- [3] Ani N C, Jamari S S, Yaacob W S N W. Effect of cross-linker concentration on the synthesis and swelling behaviour of superabsorbent polymers (SAP) using graft polymerization techniques[J]. Key Engineering Materials, 2017, 719: 62-66.
- [4] Kazemi F, Mohamadnia Z, Kaboudin B, et al. Synthesis, characterization and swelling behavior investigation of hydrogel based on AAm and AA using CdS nanorods as photocatalyst initiator under different irradiations [J]. Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry, 2016, 330(1): 102-109.
- [5] Li J, Zhang K, Zhang M, et al. Fabrication of a fast-swelling superabsorbent resin by inverse suspension polymerization [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 135(15): 46142-46150.
- [6] Fekete T, Borsa J, Takács E, et al. Synthesis and characterization of superabsorbent hydrogels based on hydroxyethylcellulose and acrylic acid [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 166: 300-308.
- [7] Meng Y, Ye L. Synthesis and swelling property of the starch-based macroporous superabsorbent [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(21): 44855-44865.
- [8] Liu T G, Wang Y T, Guo J, et al. One-step synthesis of corn starch urea based acrylate superabsorbents [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(32): 45175-45185.
- [9] Klinpituksa P, Kosaiyakanon P, Potthast A. Superabsorbent polymer based on sodium carboxymethyl cellulose grafted polyacrylic acid by inverse suspension polymerization [J]. International Journal of Polymer Science, 2017(9): 1-6.
- [10] Guan H, Li J, Zhang B, et al. Synthesis, properties, and humidity resistance enhancement of biodegradable cellulose-containing superabsorbent polymer [J]. Journal of Polymers, 2017, 2017: 1-8.
- [11] Fernando T N, Ariadurai S A, Disanayaka C K, et al. Development of radiation grafted super absorbent polymers for agricultural applications [J]. Energy Procedia, 2017, 127: 163-177.
- [12] 刘佳. 羽毛蛋白基半互穿网络高吸水性树脂的制备及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [13] Cuadri A A, Romero A, Bengoechea C, et al. Natural superabsorbent plastic materials based on a functionalized soy protein [J]. Polymer Testing, 2016, 58: 126-134.
- [14] Kim H J, Koo J M, Kim S H, et al. Synthesis of super absorb-

- ent polymer using citric acid as a bio-based monomer[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 144: 128-136.
- [15] Ye Z, Tang M, Hong X, et al. Sustainable composite super absorbents made from polysaccharides[J]. *Materials Letters*, 2016, 183: 394-396.
- [16] Chen Y, Zhang Y, Wang F, et al. Preparation of porous carboxymethyl chitosan grafted poly (acrylic acid) superabsorbent by solvent precipitation and its application as a hemostatic wound dressing[J]. *Materials Science & Engineering C*, 2016, 63: 18-29.
- [17] Jamaludin S, Hashim S. The degradability and possible agricultural application of oil palm empty fruit bunch based superabsorbent polymer composites[A]. *International Conference on Civil, Biological and Environmental Engineering*[C]. Istanbul: 2014, 86-90.
- [18] 苏小育. 椰糠粉基高吸水材料的制备及其性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [19] 许晓辉. 废弃沙棘枝条基高吸水性复合材料的制备及应用[D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [20] 张太亮, 范开鑫, 刘婉琴, 等. P(AA/AM/APEG)/纳米二氧化硅复合高吸水树脂的合成及性能[J]. *精细化工*, 2017, 34(2): 145-151.
- [21] Pathak V M, Kumar N. Dataset on the superabsorbent hydrogel synthesis with SiO₂ nanoparticle and role in water restoration capability of agriculture soil[J]. *Data in Brief*, 2017, 13(10): 291-294.
- [22] Zakaria M E T, Jamari S S, Ling Y Y, et al. Synthesis of superabsorbent polymer via inverse suspension method: effect of carbon filler[A]. *5th International Conference on Nano-materials and Materials Engineering*[C]. IOP, 2017.
- [23] Wei Y S, Chen K S, Wu L T. In situ synthesis of high swell ratio polyacrylic acid/silver nanocomposite hydrogels and their antimicrobial properties[J]. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2016, 164: 17-25.
- [24] 黄慧青, 周林涛, 安劲颖, 等. 保水剂对海滨雀稗抗旱性的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(8): 1828-1833.
- [25] 岑睿, 屈忠义, 于健, 等. 保水剂对半干旱区砂壤土水分运动的影响试验研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(2): 122-127.
- [26] 庞海颖, 牛东伟, 李彦慧. 施用保水剂对仁用杏抗旱生理特性的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2017, 40(4): 43-49.
- [27] 井大伟, 邢尚军, 刘方春, 等. 保水剂施用方式对侧柏根际微生态环境的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 146-154.
- [28] 马海林, 刘方春, 马丙尧, 等. 保水剂对侧柏容器苗根际土壤微生物种群结构及干旱适应能力的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(1): 43-48.
- [29] 许紫峻, 韩舒, 师庆东. 不同保水剂对土壤物理性质影响的探究[J]. *节水灌溉*, 2016(10): 10-14.
- [30] Gales D C, Trincă L C, Cazacu A, et al. Effects of a hydrogel on the cambic chernozem soil's hydrophysic indicators and plant morphophysiological parameters[J]. *Geoderma*, 2016, 267: 102-111.
- [31] Cao Y, Wang B, Guo H, et al. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 270-279.
- [32] 彭韬, 邢学刚, 蔡先立, 等. 保水剂与活性炭改良白云岩石漠化坡地土壤促进植物生长的盆栽试验研究[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 525-532.
- [33] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 554-562.
- [34] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配合施加对铁尾矿基质下植物生长的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(3): 44-50.
- [35] 张俊英, 许永利, 李富平. 2 种保水剂在铁尾矿植物复垦中的应用[J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(2): 143-147.
- [36] 杨杰, 曹昀, 王秀文, 等. 保水剂对高羊茅种子萌发及幼苗生理的影响[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 351-356.
- [37] 程晓彬. 保水剂对青稞苗期生长的影响[J]. *现代农业科技*, 2017(8): 9-10.
- [38] 倪芳, 蔡卫兵, 蒲双双, 等. 保水剂对土壤含水量及黑麦草种子萌发的影响[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(27): 52-54.
- [39] 王越, 王宇欣, 时光营. 纤维素保水剂对基质特性和黄瓜幼苗生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(1): 162-169.
- [40] 陈芳泉, 邵惠芳, 贾国涛, 等. 保水剂对烟草光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 157-163.
- [41] 杜清福, 商丽丽, 韩俊杰, 等. 保水剂对温室栽培甘薯前期生长及产量的影响[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(2): 81-84.
- [42] Chehab H, Tekaya M, Mechri B, et al. Effect of the Super Absorbent Polymer Stockosorb® on leaf turgor pressure, tree performance and oil quality of olive trees cv. Chemlali grown under field conditions in an arid region of Tunisia[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 192: 221-231.
- [43] 牛舒琪, 何傲蕾, 丁新宇, 等. 枯草芽孢杆菌 GB03 与保水剂互作对小花碱茅生长和耐盐性的影响[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(3): 285-292.
- [44] 于茜, 姜小堂, 盛伟, 等. 保水剂对基质保水性和芹菜幼苗生长的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(10): 208-210.
- [45] 谭飞理, 瞿明普, 黎海利. 保水剂对臭椿盆栽幼苗生长及光合特性的影响[J]. *北方园艺*, 2017(10): 74-79.
- [46] 王兴刚, 秦静雯, 吕少瑜, 等. 基于魔芋葡甘露聚糖的双层包膜多功能缓释复合肥料的制备及其性能研究[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(1): 182-184.
- [47] Qiao D, Liu H, Yu L, et al. Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 147: 146-154.
- [48] 秦端端, 姚粉霞, 陈亚军, 等. 保水剂对土壤重金属镉形态及生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2327-2333.
- [49] 胡伟, 秦端端, 李玉和, 等. 添加保水剂和栽种黑麦草对土壤不同形态铅转化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1771-1777.
- [50] Moghadam H R T. Super absorbent polymer mitigates deleterious effects of arsenic in wheat[J]. *Rhizosphere*, 2016, 3(1): 40-43.
- [51] 李源纯, 汪宇浩. 高吸水性树脂的特点结构与应用[J]. *化工管理*, 2015(24): 89.