植物营养与肥料学报 2017, 23(6): 1631–1641
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.17304
http://www.plantnutrifert.org

水肥调控技术及其功能性肥料研究进展

杜建军，阚玉景，黄帮裕，李永胜，王新爱
（1 仲恺农业工程学院新型肥料研究中心，广东广州 510225；
2 广东省产地环境污染防控工程技术研究中心，广东广州 510225）

摘要: 综述水肥调控的有关技术，以及以高吸水性树脂 (super absorbent polymer，SAP) 为保水、缓/控释材料制备保水型缓/控释肥料的研究进展，为今后此类肥料的开发、应用提供依据。水分和养分是限制我国旱地农业可持续发展的主要因子，以肥调水，以水促肥，充分发挥水肥的协同效应是提高水肥利用率的关键。目前，水肥调控 (耦合) 技术的实施主要通过农艺措施和施肥灌溉技术来完成。近年来，随着 SAP 性能的不断改善和使用的普及，人们对 SAP 在吸水保水的同时，对土壤肥料养分的保持和缓释作用开始给予了重视，以 SAP 为保水、缓释材料的保水型缓/控释肥料的研究成为水肥调控研究的热点。SAP 与一般聚合物不同之处是它具有高度亲水性，聚合物的骨架是一个适度交联的网状结构，进入树脂分子内的养分离子或分子可以以各种结合形式被暂时固定而延缓了养分的释放。土壤中可溶性盐对 SAP 吸水性能有重要影响，但尿素分子影响甚小。保水型缓/控释肥料可通过养分负载、复混或包膜等工艺制备。保水型缓/控释肥料是水肥调控 (耦合) 技术、化学制剂保水节水技术和肥料缓/控释技术的综合运用和物化的载体，兼具吸水、保水和养分缓/控释功能，实现水肥在同一时空条件下的一体化调控，同时提高水分和肥料的利用效率，在农业、林业、环境修复、生态工程等领域具有广阔的应用前景。未来工作是进一步寻求合适的 SAP 制造原料和工艺，降低成本；应用分子设计，改善 SAP 的结构，提高生物降解性，控制盐分的不利影响，提高肥料的吸水、保水和对养分的缓释性能；加强养分释放机理和不同于普通缓/控释肥料评价方法的研究。

关键词: 水肥调控；高吸水性树脂；缓/控释肥料

Research progress on water and fertilizer regulation technology and functional fertilizers

DU Jian-jun, KAN Yu-jing, HUANG Bang-yu, LI Yong-sheng, WANG Xin-ai
(*1 Research Center for New Fertilizers, Zhongkai University of Agricultur and Engineering, Guangzhou 510225, China; 2 Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Agricultural Land Pollution Prevention and Control, Guangzhou 510225, China*)

Abstract: This paper reviewed the relevant technologies of research on water and fertilizer regulation, and the progresses in water retention and slow/controlled release fertilizers (WRSRF) which were made from super absorbent polymer (SAP), and provided basis for development and application of this kind of fertilizers in the future. Water and nutrient are the main factors restricting the dryland sustainable agricultural development in China. Regulating water by fertilizers, and promoting fertilizers by water to fully use the synergy effect of water and fertilizer are the key to improve water and fertilizer use efficiencies. At present, the implementation of water and fertilizer regulation (coupling) technology is mainly completed by agronomic measures and fertigation technology. In recent years, with the improvement and popularization of SAP, besides its effect of water absorption and retention, people have paid more attention to its fuction of nutrients conservation and slow release. Therefore, the research of WRSRF based on SAP has become a hot topic. SAP is different from common polymer

收稿日期： 2017–08–03　　**接受日期：** 2017–09–30
基金项目： 国家自然科学基金（30971867，31172031）；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）资助。
作者简介： 杜建军（1966—），男，陕西商州人，博士，教授，主要从事新型肥料、保水剂和面源污染防控研究。E-mail：dujj@tom.com

in its highly hydrophilic property and moderate crosslinking network structure. Nutrients of ions or molecules in the resin can be temporarily fixed and released later by various combination forms. The soluble salts in soil have important influence on water absorbency of SAP except urea. WRSRFs can be made by using techniques of nutrient loading, compounding and coating. WRSRF is the integrated application and materialized carrier of the technologies of water and fertilizer regulation (coupling), water retaining and water saving by chemical agent, and fertilizer slow/controlled release technology. WRSRF has the functions of water absorbing and retaining, and nutrient release, and realizes the integration of water and fertilizer regulation at the same time and space, improves the use efficiencies of water and fertilizers, and has broad application prospects in agriculture, forestry, environmental restoration, ecological engineering and other fields. The future work is to seek more suitable raw materials and manufacturing processes for SAP to reduce costs; use molecular design to change the structure of SAP, modify its biodegradability, control the adverse effects of salt, and improve the water absorption, water retention and slow release properties of the fertilizer; strengthen the study of nutrient release mechanism and WRSRF evaluation methods, which are different from ordinary slow/controlled release fertilizers.

Key words: water and fertilizer regulation; super absorbent polymer; slow/controlled release fertilizer

水分和养分 (肥料) 是作物生长的基础条件。然而，正是这两个主要因子成为影响我国旱地农业可持续发展的主要因素。

水分方面，我国是一个水资源相对贫乏的国家，人均水资源占有量仅 2039.2 m^3 (按 2015 年统计数据计算)[1]，约为世界人均水资源占有量的 1/4，属用水紧张国家。由于时空分布差异，我国部分地区已经处于严重的水危机状态。同时，我国用水浪费很大，全国人均综合用水量 438 m^3，万元国内生产总值 (2016 年当年价) 用水量 81 m^3[2]。我国又是一个农业大国，农业用水量占到总用水量的 62.4%，每公顷耕地灌溉水用量达到 5700 m^3，农田灌溉水有效利用系数仅 0.542[2]，为发达国家的 60% 左右。随着工农业的迅速发展，水的供需矛盾愈来愈突出，工农业争夺水的矛盾更加尖锐。严酷的现实告诉我们，实施高效节水农业是我国农业可持续发展的必由之路。

节水农业就是在有限的水资源条件下，通过对水资源的合理开发利用，综合运用先进的水利工程技术、农业技术、用水管理技术等措施，充分提高农田灌溉水的利用率和水分生产率，保证农业持续稳定发展[3]。我国对节水农业技术的研究与应用具有悠久的历史，特别是上世纪八十年代以来，通过广大科技工作者的不懈努力，提出了一套适合我国国情的节水农业新技术，这些技术主要包括农业水资源合理开发利用技术、节水灌溉工程技术、农艺节水技术、化学制剂保水节水技术和节水管理技术等。

就养分 (肥料) 而言，一方面由于水土流失和不合理用地，土壤肥力退化，养分贫瘠；另一方面，投入的养分未能充分发挥作用。研究表明，近 10 年来，由于开展测土配方施肥，肥料利用率有所提高，但三大粮食作物氮肥、磷肥和钾肥利用率也仅分别达到 33%、24% 和 42%[4]。因此，化肥损失不仅是经济问题，更严重的是加剧了温室气体排放、水体富营养化等环境问题。因此，提高养分 (肥料) 的利用率、减少肥料用量、控制污染发生，是探索产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业必需考虑的问题。

从水分和养分 (肥料) 之间的关系来看，水分和养分 (肥料) 又是一对联因互补、互相作用的因子，水、肥之间存在较大的交互作用。因此，同时考虑水、肥两个因子，以“合理施肥，培肥地力，以肥调水，以水促肥，充分发挥水肥的协同效应”为核心内容的水肥调控理论和技术正在成为我国旱地农业和土壤肥料学科研究的热点和重要的发展方向[5–7]。

目前生产水平下，水肥调控技术的实施主要通过农艺措施来完成，需要对土壤水肥状况和作物特性进行大量研究后，实施合理的耕作、灌溉、施肥等措施往往困难较大。近年来，随着灌溉施肥技术的进一步推广，水肥调控的工程措施显现出很好的应用前景[8–11]，但成本较高，投资回报周期长，而且比较适宜规模化生产。另外，随着高吸水性树脂 (super absorbent polymer，SAP) 性能的不断改善和使用的普及，人们对 SAP 在吸水、保水的同时对土壤肥料养分的保持和缓释作用开始给予了重视，以使用保水剂为基础的水肥调控技术和以保水剂为保水、缓释材料的保水型缓/控释肥料的研究成为水肥

调控研究的新热点[12–15]。

本文根据作者多年来的研究实践及国内外研究动态，综述水肥调控的有关理论和技术，以及以SAP 为保水、缓/控释材料制备保水型缓/控释肥料的研究进展，为今后此类肥料的开发、应用提供参考。

1　水肥调控 (耦合) 理论及其技术

我国干旱半干旱地区总面积为 455 万 hm^2，占国土总面积的 47%，这些地区一般年降水量在 300～500 mm，且降水季节集中，多在 7、8、9 三个月，由于降水强度大，水土流失严重，加之粗放经营，我国的旱地往往也是薄地[5]。因此，为了提高旱地农业的生产水平，长期以来人们以水、肥为中心，进行了广泛而深入的研究。经过 30 多年的不断探索，提出了以水、肥为中心的北方旱地农田水肥调控 (耦合) 理论和技术。

大量研究表明，水肥之间相互作用既可能产生正效应，也可能产生负效应。效应的大小及方向既涉及到作物生长时期、两者的用量、组合及平衡，也涉及到养分之间的平衡。适宜的水分供应可以促进土壤养分的矿化和释放[16–18]；土壤养分向根系的迁移[19–20]；进入根部的养分向地上部分运转；改善养分在体内的代谢过程和养分在体内的分布；促进经济产物的形成，提高作物产量，从而提高养分的利用率[21–23]。适宜的养分供应，可以促进根系发育，扩大作物觅取水分的空间[24]；增强根系活性，加强作物对水分的利用[25–26]；提高蒸腾强度，增加净光合产物，降低叶水势，加强水分向地上部分传导[27–28]；减少蒸发，提高蒸腾效率，从而有力地提高水分利用效率[29–31]。因而，水分和养分投入合理、供应协调，就能产生明显的协同和互补效果，表现出大于两种因子效果叠加的增产作用。

所谓水肥调控 (耦合) 技术就是在土壤肥力指标测定的基础上，建立以肥、水、作物产量为核心的耦合模型和技术，合理施肥，培肥地力，以肥调水，以水促肥，充分发挥水肥的协同效应，从而提高作物的抗旱能力和水、肥利用效率，可在不增加施肥量和灌水量的条件下，获得较大的经济效益，并改善生态环境。水肥调控 (耦合) 技术是总结我国北方旱地农田 30 余年研究经验后得出的科学结论，实践表明，在不增加施肥量和灌水量的情况下，肥料利用率可提高 5% 以上，作物增产超过 10%，水分利用效率可提高到 1 mm 水生产 1 kg 粮食，甚至更高[5]。

2　控制释放技术与缓控/释肥料

2.1　控制释放技术

控制释放技术就是在预期的时间内，人工控制药物、农药、肥料等活性物质的释放速率，以维持其在生物体或环境中的有效浓度[32–33]。由于活性物质的释放速率可控，在生物体内或环境中维持有效浓度的时间长，因而可以提高作用效果、减少用量，最大限度地降低其副作用或对环境的影响。控制释放技术近年来在医药、农业、工业等众多领域得到广泛应用[34]。

控制释放技术是通过需要控制释放的活性物质与活性物质的载体 (基材) 有机结合形成的控制释放系统实现的。根据活性物质与基材之间是否发生化学反应，可将控制释放系统分为化学法和物理法两大类。

2.1.1　化学法控制释放系统　化学法控制释放系统是指活性物质与活性物质的载体 (一般为聚合物) 具有某些反应基团，二者发生化学反应后以化学键相连而形成的释放系统。化学法控制释放系统中影响活性物质释放速度的因素主要有活性物质与载体间化学键的性质、聚合物的交联度和聚合度等。化学法控制释放系统主要有 3 种：活性物质与聚合物直接或间接以化学键相连，活性物质单体衍生物间的聚合，活性物质单体间的聚合或与其他单体共聚[32–33]。

2.1.2　物理法控制释放系统　物理法控制释放系统是指活性物质与活性物质的载体之间不发生化学反应，活性物质通过溶解、分散或包裹等物理过程与载体结合，载体对活性物质的释放起阻碍作用[32–33]。物理法控制释放系统中影响活性物质释放速度的因素主要有活性物质与载体间的结合形式、载体的可降解性等。物理法控制释放系统主要有 3 种：均匀型 (活性物质均匀分散或溶解在聚合物中)、贮藏型 (活性物质包埋在高分子膜中形成胶囊) 和凝胶型 (活性物质均匀分散或包埋在凝胶分子中)。

2.2　缓控/释肥料

肥料缓/控释技术就是应用物理法、化学法控制释放系统或生物化学等调控手段，延缓肥料养分在土壤中的释放速率，以减少肥料损失，提高肥料利用率。以缓/控释技术为特征的缓/控释肥是近几年国内外研究的热点[35–38]。

缓/控释肥料可以进一步分为缓释肥料和控释肥料。缓释肥料是指通过养分的化学复合或物理作

用，使化学肥料对作物的有效养分随着时间而缓慢释放[39]。肥料养分在土壤中的释放速率远小于其在土壤中的正常溶解释放速率，但养分释放速率不可控，受肥料本身特性和环境条件影响。控释肥料是按设定的释放率 (%) 和释放期 (d) 来控制养分释放的肥料[40]。其养分释放速率能够达到设定的释放模式，养分释放与作物的需肥规律基本一致。

目前，美国、西欧、日本、以色列均在大力发展缓/控释肥料，但国外缓/控释肥因价格昂贵主要施用于经济作物和高尔夫球场[41]。近年来，我国缓/控释肥料的研发和应用异军突起，在缓/控释肥料理论研究、包膜技术、肥效评价方法、产业化开发和应用方面均取得突破性进展[42]。我国缓/控释肥料品种主要包括包膜型缓/控释肥料、合成型微溶态缓释肥料、化学抑制型缓效肥料和基质复合与胶结型缓/控释肥料。目前，缓/控释肥使用面不广、发展不快的主要原因是缓/控释材料太贵，缓/控释肥成本太高。因此，寻求和开发较为廉价的缓/控释材料，降低缓/控释肥的制造成本，是今后相当长时间内缓/控释肥研究的重点。而水基聚合树脂和表面反应成膜包膜技术被认为是较为理想的包膜技术[43]。

3 化学制剂保水节水技术与 SAP

化学制剂保水节水技术是合理施用保水剂、抗旱剂、蒸发抑制剂等化学制剂，减少作物生长发育过程中棵间蒸发和过度蒸腾对水分的无效消耗，促进作物根系发育，提高对土壤深层储水的利用，以达到调控农田水分和作物耗水，增强作物的抗旱能力，最终提高水分利用率的目的[3]。

各类化学制剂中，SAP 的使用最为广泛。因其具有超强吸水能力，能吸收并保持自身重量几百倍甚至上千倍的水分。作为一类新型功能性材料，广泛应用于各个行业。农用 SAP 称为保水剂，具有高度溶胀能力，及对土壤结构的改良和对水肥的保持和缓释作用，在国内外逐渐得到广泛应用[44–48]。Benhu 等预言，保水剂将成为继化肥、农药、塑料薄膜之后第四大农用化学品[49]。

3.1 SAP 的性质和分类

SAP 属高分子化合物，它具有一般高分子化合物的特性，如分子量大 (聚合度高)；由分子量不等的同系列高分子组成的混合物；结构复杂，且多种多样，有线型、支链型、体型结构；有光学异构和几何异构；有无定型结构，也有结晶型结构[50–51]。

SAP 种类繁多，一般按照合成原料分为淀粉系 (淀粉接枝、羧甲基化等)，纤维素系 (羧甲基化、接枝等)，合成聚合物系 (包括聚丙烯酸系、聚乙烯醇系等) 等。目前市场上的主流产品为聚丙烯酸–丙烯酰胺，属于化石原料产物，在土壤中具有很好的稳定性，难于被微生物降解[52–54]。为了提高 SAP 的降解性，降低 SAP 的降解周期，以利用天然材料为对象的可降解 SAP 成为近年的研发热点，主要是对天然高分子与丙烯酸、丙烯酰胺接枝或共混，改性天然多糖型、改性天然蛋白质和聚氨基酸型等[55–57]。

3.2 SAP 的稳定性

3.2.1 可溶性盐对 SAP 稳定性的影响 现代高分子化学研究认为，SAP 大多是高分子电解质，其吸水机理可用 Flory-Huggins 的吸水理论模型表达[50, 58]：

$$Q^{5/3} = [(\frac{i}{2V_u S^{1/2}})^2 + \frac{\frac{1}{2} - x_1}{V_1}] \times \frac{1}{V_e/V_0}$$

式中：Q 为吸水倍数；V_e/V_0 为聚合物的交联密度；$(1/2–x_1)/V_1$ 为聚合物对水的亲和力；i/V_u 为聚合物中固定电荷的密度；S 为外部电解质溶液的离子强度。式中第一项表示渗透压，第二项表示与水的亲和力，这两项之和决定吸水能力。可见，SAP 的吸水倍数主要受聚合物结构和外部电解质溶液的离子强度的影响。

聚合物的结构包括聚合物主链上亲水基团的结构和交联密度。亲水基团多样化是提高耐盐性的主要途径，使聚合物不仅具有羧基、磺酸基、磷酸基等离子性亲水基团，还具有羟基、酰胺基等非离子性亲水基团，利用各种基团之间的协同效应可提高 SAP 的耐盐性。聚合物交联密度增加，吸水能力降低，反之则增强。当交联密度很小时，聚合物凝胶从外观上趋向于聚合物溶液，若强度太低，则失去凝胶的特性。

许多 SAP 的溶胀能力和吸水倍率受外界溶液离子强度的影响。和 SAP 在去离子水中溶胀比较，SAP 在高浓度盐溶液中溶胀时，吸水能力显著降低，其主要原因可能是由于聚合物的羧基间形成了能限制膨胀的离子桥。显然，高价离子对 SAP 的吸水能力影响较大。土壤中常见阳离子对高吸水性树脂吸水倍率的降低程度与阳离子在土壤中的代换力排列近似，即 Fe^{3+}、$Al^{3+} > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^{+} > K^{+}$[59]。

3.2.2 微生物和其他环境条件对 SAP 稳定性的影响 在微生物作用下，SAP 主链逐渐断裂，相对分子量逐渐变小，以至最终代谢成甲烷、CO_2 和 H_2O 等。

天然高分子 (如淀粉、纤维素、蛋白质、壳聚糖等) 以及具有易水解的酯键、醚键、氨酯键、酰胺键等含有杂原子的合成高分子容易被微生物降解。影响 SAP 降解的主要因素是 SAP 的结构和外部环境。高分子的形态研究表明，加入少量微生物杀菌剂，聚合物的降解速率可能会进一步降低，而加入氮肥的聚合物较单独加入聚合物更能促进微生物的活动，主要原因是降低了聚合物和肥料周围微环境的碳氮比[60]。显然，土壤微生物对 SAP 的分解特性的影响以及 SAP 在土壤中的残留状况会影响它作为肥料养分载体的使用效果。

温度 (耐热性、耐寒性)、光照 (耐光性)、物理侵蚀等环境条件也都会对 SAP 的稳定性产生影响[50]。

3.3　SAP 对养分的控制释放

SAP 吸水后即变为凝胶，SAP 凝胶分子具有多种活性基团，可与分布其中的药物、农药、肥料等活性物质以化学键相连或做成控制膜来控制这些活性物质的释放。因此，SAP 凝胶控制释放系统兼具化学法控制释放系统和物理法控制释放系统的特点。多年来，SAP 作为载体已成功地应用于制药行业以控制药剂释放速率[61]。SAP 具有膜的作用，活性物质必须通过该膜向周围环境扩散，因此，SAP 同样可用于控制肥料养分的释放[62]。

3.3.1 SAP 控制养分的作用机制　SAP 与一般聚合物的不同之处是它具有高度亲水性。从分子结构上看，SAP 是具有高度亲水性遇水膨胀的聚合物，其特征是具有一个大聚合物的“骨架”并带有如–COOH、–OH、$–NH_2$ 等极性基团[62]。聚合物的骨架又是一个适度交联的网状结构，由于有活性基团的存在，可作为外来离子的配位体，有螯合剂的性质[63]。网状结构可让一些小分子或离子如 $CO(NH_2)_2$、NH_4^+ 和 NO_3^- 扩散进入，进入到 SAP 分子内部的养分离子或分子，可以暂时被溶胀的 SAP“包裹”起来，或被带电基团激活作定向排列，若是阳离子还可以与树脂内部的阳离子发生交换吸附而暂时被固定下来延缓养分的释放[60, 63–64]。所以，SAP 在吸水膨胀的同时，还可以吸持养分分子或离子，防止养分流失，将养分保存在土壤中，对养分供应起到一定的缓释作用。树脂中养分的释放则最终取决于聚合物结构、降解速率和养分盐类的性质[62]。

3.3.2 SAP 控制养分的作用效果　许多不同的 SAP 已被用来控制各种氮肥的养分释放和保持。淀粉接枝聚丙烯酸钾和聚丙烯酰胺共聚物与 NH_4NO_3 配施，用水连续淋溶，发现聚合物处理 85% 的 NH_4^+ 保留在土壤中，而对照仅为 25%，但聚合物对 NO_3^- 几乎没有影响[65]。对乙烯醇-丙烯酸共聚物研究也有类似结果，不仅 NH_4^+ 和 K^+ 的淋失量大大减少，并且可以增加萝卜地上部的生长和对氮、磷和铁的吸收[66]。与单施氮肥比较，聚丙烯酸酯类、聚乙烯醇类、淀粉类 3 类聚合物均可延缓氮养分的扩散和释放速率[67]。聚乙烯醇树脂 (VAMA) 对氮、磷、钾具有较强的吸附能力，吸附的养分中一部分可以较快地解吸转化为有效态，而另一部分则被暂时固定下来成为缓效态，从而起到保肥和延缓肥效的作用[68]。盆栽条件下，即使应用低交联度的聚丙烯酸钠 (PAA)，稀凝胶和水交替灌溉，氮素淋失量减少达 72.0%，水分利用率提高 14.65%，小白菜产量增加 33.2%[69]。中性和两性高聚物能增加土壤对 NH_4^+、NO_3^-、K^+ 和 PO_4^{3-} 的吸附量和抗淋溶作用，并随中性和两性高聚物用量的增大，土壤对 4 种离子的吸附量和抗淋溶作用增加；阴离子型聚合物增加土壤对 NH_4^+ 和 K^+ 吸附量和抗淋溶作用，降低土壤对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的吸附量和抗淋溶作用[70]。

3.4　SAP 与养分的相互作用

SAP 施用于土壤，以前人们只重视保水剂的保水、节水效果和其对土壤物理性质的影响，对保水剂的养分保持、缓释作用重视不够，也很少开展肥料、土壤养分对 SAP 性能和施用效果方面的研究。

化学肥料能显著降低 SAP 的吸水倍率，并随肥料浓度的增加，影响程度更大[71–73]。但不同肥料品种对 SAP 吸水倍率的影响程度不同，常见氮肥、磷肥、钾肥对 SAP 的影响程度以过磷酸钙、磷酸一铵、硫酸钾、氯化铵、硫酸铵、氯化钾、尿素的顺序递减。即使在尿素的饱和溶液中，不同类型的 SAP 仍能保持去离子水中 22.00%～61.99% 的相对吸水倍率，但 0.4%～1.0% 的过磷酸钙溶液却使 SAP 丧失吸水性能。SAP 在水中溶胀时，也吸持溶解在水中的肥料分子或离子，吸持量的大小因 SAP 和肥料种类不同而不同。对于聚丙烯酰胺–丙烯酸盐共聚物，尿素浓度为 60% 时，氮素吸持率高达 52.95%，而碳酸氢铵、硫酸铵、氯化铵浓度为 10%时，氮素吸持率仅分别为 5.50%、9.36% 和 9.64%。可见，中性的尿素分子对 SAP 的影响最小，SAP 对尿素分子的吸持量也最大。进一步研究表明，SAP和尿素配合施用能显著地提高玉米生物学产量、根系干重和水肥利用效率，增加叶片净光合速率、蒸腾速率和气

孔导度。可见，SAP 与尿素配合施用，水肥调控效果最显著。

由于土壤溶液离子组成的复杂性，实际情况可能复杂得多。例如，关于 SAP 在不同铵盐溶液体系 (NH_4Cl、NH_4Cl-KCl、NH_4Cl-$CaCl_2$) 中的吸水和吸附铵离子特征的研究表明，相同离子强度时，NH_4^+-K^+ 共存体系对保水剂吸水倍率的影响小于 NH_4^+、K^+ 单一体系，而 NH_4^+-Ca^{2+} 共存体系对保水剂吸水倍率的影响小于 Ca^{2+} 单一体系而大于 NH_4^+ 单一体系的影响[74]。尽管过磷酸钙对 SAP 吸水倍率影响很大，但土培试验表明，SAP 和磷酸一铵、过磷酸钙分别配合施用均能显著地提高玉米生物学产量、根系干重和水肥利用效率，增加叶片净光合速率和气孔导度，而两种肥料的效果不同[75]。SAP 一般不宜与复合肥配合施用，但与控释复合肥配施，则效果显著[76]。

4 保水型缓/控释肥料与水肥一体化调控

保水型缓/控释肥料就是根据节水农业的水肥调控 (耦合) 理论，以水肥一体化调控为目标，应用现代高分子设计理论制备肥料产品，使肥料同时具有吸水、保水和养分缓释功能，把目前水、肥分离调控和复杂的农艺措施物化到肥料中，实现水肥在同一时空条件下的一体化调控，同时提高水分和肥料的利用效率，促进农业的可持续发展。

SAP 的吸水、保水和养分缓/控释功能可通过物理或化学法控制释放系统实现。可有 3 种途径：SAP 与肥料物理混合，SAP 包覆肥料，SAP 与肥料以化学键结合[62]。因此，按生产工艺，保水型缓/控释肥料可分为载体型、复混型、包膜型等 3 种类型。

4.1 载体型

利用 SAP 包埋或吸收肥料养分而形成的供肥体系。根据养分负载方法不同，又可分为吸附型和束缚型。前者利用合成高分子网状骨架，将养分离子或分子吸附到网络结构中。用作载体肥料的载体材料，其吸附空间必须足够大，同时，吸附进去的养分要能缓慢释放出来。后者主要利用高分子材料先与肥料进行物理混合，然后加交联剂交联成形。根据材料性质，可以直接共混或者通过介质共混[77]。

利用聚酰胺通过束缚法制备的载体尿素，水中溶出时间可达到 30 小时，并可明显减少氮素淋溶[77]。利用棉花秸秆制备半互穿网络缓释尿素，吸水倍率达 1018.4 g/g，淋溶实验表明其 30 天氮素释放 60%，可明显促进棉花种子萌发和植株生长[78]。

4.2 复混型

SAP 与有机肥、基质原料、风化煤等按一定比例复混 (复配)，必要时再通过挤压、圆盘、转鼓等形式造粒。对于无机肥料，为了减少无机肥料对 SAP 吸水性能的影响，可先把 SAP 与尿素、磷肥与钾肥分别混合造粒，然后制成混合型肥料。

风化煤复配型 SAP 在新疆哈密地区的应用表明，当 SAP 用量为每株 100 g 和 200 g 时，葡萄产量分别较对照增加 12.59% 和 25.29%，含糖量分别较对照增加 9.92% 和 6.01%，每公顷分别增收 2812.5 元和 5625.0 元；在葡萄果实膨大期干旱胁迫时 (正常灌水量 75% 的条件下)，分别较对照增产 38.46% 和 66.62%，含糖量均增加 0.78%，每公顷分别增收 9967.5 元和 16605.0 元[79]。在锯木屑混合河沙复合基质中添加 SAP，当 1 L 基质分别加入 1、2、4、8 g SAP 时，与对照相比，基质持水量分别增加 16.35%、34.00%、61.29% 和 135.16%，孔隙状况也得到改善，容重分别降低 3.61%、5.37%、9.42% 和 14.64%[80]。以 SAP 和单质肥料为原料的掺混型节水专用肥与等养分的复合肥比较，辣椒果长、肩径宽、果肉厚、单果重明显增加，产量增加 5.16%；节水 449 m^3/hm^2，相当于 45 mm 降水，节水率 27.7%[69]。

4.3 包膜型

通过一定工艺把 SAP 包覆在肥料表面或把成品细粒状 SAP 通过接枝工艺包覆在肥料表面。包覆工艺主要包括反相聚合工艺、原液聚合工艺等。前者一般要用到有机溶剂，容易造成二次污染，且工艺相对复杂；后者工艺相对简单，但产品分离困难。

He 等[81]、Liang 等[82]、Ghazali 等[83]均以不同材料和工艺成功制备 SAP 包膜肥料，肥料具有较好的养分缓释和保水性能。杜建军等[84–85]以尿素为核芯肥料，改性矿物做内膜，SAP 做外膜，制得复式包膜尿素；Yang 等[86]则以生物基聚氨酯和 SAP 完成尿素内外层包膜；Wu 等[87]以复合肥为核芯肥料，壳聚糖做内膜，SAP 做外膜，制得复式包膜复合肥。复式包膜肥料虽然产品性能有所提高，但二次包膜使肥料成本增加。黄帮裕[88]、尤晶[89]以丙烯酰胺、丙烯酸、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸为主要单体，应用表面共聚或接枝聚合工艺成功制备 SAP 包膜尿素，该树脂膜耐盐、凝胶强度高，含氮量可达 40% 以上，肥料吸水倍率高、缓释性得到进一步提高。采用尿素表面原液聚合工艺，使 SAP 与缓释肥料制造生产

工艺合二为一 (图 1)，大大节约 SAP 和缓释肥料制造和施用成本，改善功能，提高工效。

保水型缓/控释肥料适用于各类植物 (作物)，宜与土壤或基质混合，穴施、沟施、撒施均可，节水 10%～30%，肥料利用率提高 10%～20%，可适当减少施肥量、灌水次数和灌水定额。SAP 或养分含量低的肥料产品，一般穴施用量为土壤质量的 0.1% 左右，根据树体大小，一般每棵 5～100 g，基质用一般为 2 g/L 左右；养分含量高的肥料产品，可按减量化施肥原则，以氮素用量确定肥料用量，减少肥料用量 10%～20%。

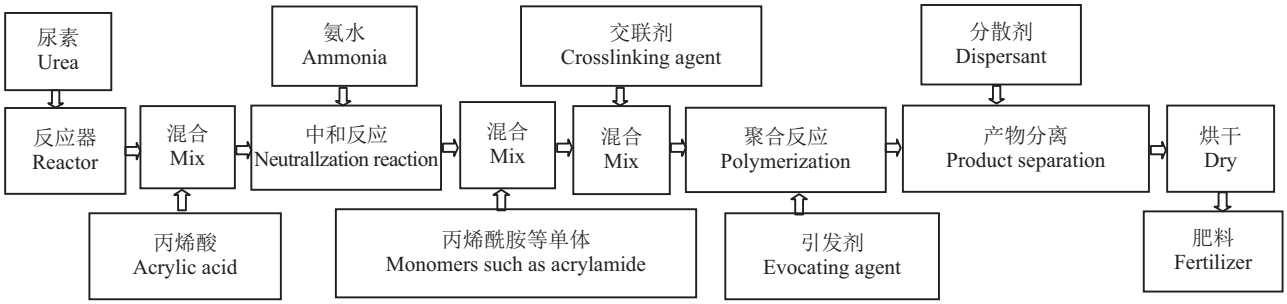

图 1　表面聚合工艺制备丙烯酸系 SAP 包膜尿素流程图

Fig. 1　Preparation flow chart of acrylic-acid-based SAP coated urea by surface polymerization process

5　研究展望

节约水肥资源，提高水肥利用率是农业可持续发展的重要内容，国家已列入社会发展和科技创新的有关计划中，这为节水和节肥技术产品提供了广阔的市场空间。保水型缓/控释肥料是水肥调控 (耦合) 技术、化学制剂保水节水技术和肥料缓/控释技术的综合运用和物化载体，可实现水肥在同一时空条件下的一体化调控，显示出巨大的发展潜力，无论对于我国广大的干旱、半干旱地区，还是南方季节性干旱地区，农业、林业、环境修复、生态工程等领域都具有广阔的应用前景，对于节约水肥资源，增产增收，减少污染，改善生态环境，实现农业的可持续发展都具有重要的意义。

进一步的工作是通过与高分子化学家合作，寻求合适的 SAP 制造原料和制造工艺，降低 SAP 成本；改变 SAP 的结构，优化养分释放模式以适应作物的需要；通过改变 SAP 的组成，提高 SAP 对养分离子的保持力和生物降解速率，控制盐分的不利影响，以获得适宜的养分释放速率；从技术、工艺上优化 SAP、控释材料与单质肥料合理配伍与复配方法；加强养分释放机理和释放动力学等理论研究，指导 SAP 的分子设计；加强不同于普通缓/控释肥料评价方法的研究。通过这几方面的努力，SAP 包膜尿素的成本将进一步降低，肥效将进一步提高[84, 85]。

参 考 文 献：

[1] 中华人民共和国国家统计局. 2015年水资源年度数据[EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01, 2017-08-01.
National Bureau of Staistics of the People's Republic of China. Annual data of the water resources in 2015 [EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01, 2017-08-01.

[2] 中华人民共和国水利部. 2016年水资源公报[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201707/t20170711_955305.html, 2016-07-11.
The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin in 2016[EB/OL]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201707/t20170711_955305.html, 2016-07-11.

[3] 山仑, 陈国良. 黄土高原旱地农业的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Shan L, Chen G L. The theory and practice of the dry farming on the loess plateau [M]. Beijing: Science Press, 1993.

[4] 农业部种植业管理司. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知［EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm, 2015-03-18.
Planting Industry Management Department, Ministry of Agriculture. Announcement of the programme of zero growth in fertilizer use by 2020 and the programme of zero growth in pesticides use by 2020 by the Ministry of Agriculture [EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/ t20150318_4444765.htm, 2015-03-18.

[5] 李生秀. 中国旱地农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
Li S X. Dryland agriculture in China [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2004.

[6] 马强, 宇万太, 沈善敏, 张璐. 旱地农田水肥效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 665–673.
Ma Q, Yu W T, Shen S M, Zhang L. Research advances in water-

fertilizer effect on dryland farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 665–673.

[7] 于亚军, 李军, 贾志宽, 等. 旱作农田水肥耦合研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 220–224.
Yu Y J, Li J, Jia Z K, *et al*. Research progress of water and fertilizer coupling on dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(3): 220–224.

[8] Ebrahimian H, Mohammad R, Playán K E. Surface fertigation: A review gaps and needs[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(3): 820–837.

[9] Meyer-Aurich A, Gandorfer M, Trost B, *et al*. Risk efficiency of irrigation to cereals in northeast Germany with respect to nitrogen fertilizer[J]. Agricultural Systems, 2016, 149: 132–138.

[10] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与展望[J]. 中国农业信息, 2015, 173(4): 14–19.
Gao X Z, Du S, Zhong Y H, *et al*. The status and outlook for integrated management of water and fertilizer[J]. China Agriculture Information, 2015, 173(4): 14–19.

[11] 白由路. 植物营养与肥料研究的回顾与展望[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3477–3492.
Bai Y L. Review on research in plant nutrition and fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3477–3492.

[12] Shavit U, Reiss M, Shaviv A. Wetting mechanisms of gel-based controlled-release fertilizers[J]. Journal of Controlled Release, 2003, 88(1): 71–83.

[13] 赵秉强, 张福锁, 廖宗文, 等. 我国新型肥料发展战略研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(5): 536–545.
Zhao B Q, Zhang F S, Liao Z W, *et al*. Research on development strategies of fertilizer in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(5): 536–545.

[14] 杨培岭, 廖人宽, 任树梅, 等. 化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 100–109.
Yang P L, Liao R K, Ren S M, *et al*. Application of chemical regulating technology for utilization of water and fertilizer in dry-land agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 100–109.

[15] 鲍先扬, Amjad Ali, 乔冬玲, 等. 高分子材料在控缓释化肥中的应用与发展前景[J]. 高分子学报, 2015, (9): 1010–1019.
Bao X Y, Amjad A, Qiao D L, *et al*. Application of polymer materials in developing slow /control release fertilizer[J]. Acta Polymerica Sinica, 2015, (9): 1010–1019.

[16] 李生秀, 巨晓棠, 王喜庆, 等. 水分对土壤养分矿化的影响[A]. 汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 1–5.
Li S X, Ju X T, Wang X Q, *et al*. The effects of water on the mineralization of soil nutrients[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 1–5.

[17] 杜建军, 李生秀, 李世清, 等. 不同肥水条件对旱地土壤供氮能力的影响[J]. 西北农业大学学报, 1998, 26(6): 1–5.
Du J J, Li S X, Li S Q, *et al*. The effects of different fertilizer and water conditions on N-supplying capacities in dryland soil[J]. The Journal of Northwest Agricultural University, 1998, 26(6): 1–5.

[18] 江春玉, 李忠佩, 崔萌, 车玉萍. 水分状况对红壤水稻土中有机物料碳分解和分布的影响[J]. 土壤学报, 2014, (2): 325–334.
Jiang C Y, Li Z P, Cui M, CheY P. Effects of soil moisture regime on decomposition of organic material and distribution of organic material-derived carbon in paddy red soil in subtropical China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, (2): 325–334.

[19] 李生秀, 高亚军, 王喜庆, 等. 水分对土壤养分迁移的影响[A]. 汪德水.旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 6–11.
Li S X, Gao Y J, Wang X Q, *et al*. The effects of water on nutrient movement[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 6–11.

[20] Pole V, Feldmane D, Ruisa S, Butac M. The effect of some soil properties on nutrient movement in sour cherry (*Prunus cerasus*) leaves[J]. Acta Horticulturae, 2017, (1150): 289–294.

[21] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 水分对作物吸收养分的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 56–60.
Li S X, Li S Q, Gao Y J, *et al*. The effects of water on nutrient uptake [A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dry-land [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 56–60.

[22] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 水分对产品结构和氮素在体内各部分分布的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 61–69.
Li S Q, Li S Q, Gao Y J, *et al*. The effects of water on product structure and N distrbution[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 61–69.

[23] 张雨新, 张富仓, 邹海洋, 等. 生育期水分调控对甘肃河西地区滴灌春小麦氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 597–605.
Zhang Y X, Zhang F C, Zou H Y, *et al*. Effects of soil water regulation at different growing stages on nitrogen uptake and utilization of spring wheat in the Hexi Region, Gansu Province[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3): 597–605.

[24] 杜建军, 田霄鸿, 王朝辉, 等. 根系吸收水分和养分的作用以及以肥促根的效应[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 106–110.
Du J J, Tian X H, Wang Z H, *et al*. The function of plant roots in uptake of water and nutrients and the effect of fertilization on root growth [A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 106–110.

[25] 杜建军, 王朝辉, 田霄鸿, 等. 施肥对作物吸收、转运、利用土壤水分的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 182–186.
Du J J, Wang Z H, Tian X H, *et al*. Effects of fertilization on crop uptake, transfer and utilization of water[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 182–186.

[26] 宋海星, 李生秀. 水、氮供应和土壤空间所引起的根系生理特性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 6–11.
Song H X, Li S X. Changes of root physiological characteristics resulting from supply of water, nitrogen and root-growing space in soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(1): 6–11.

[27] 杜建军, 王朝辉, 田霄鸿, 等. 氮素营养对水分胁迫下冬小麦光合效率的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 145–149.
Du J J, Wang Z H, Tian X H, *et al*. Effects of N nutrition and water supply on winter wheat photosynthetic efficiency[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 145–149.

[28] 王景燕, 龚伟, 包秀兰, 等. 水肥耦合对汉源花椒幼苗叶片光合作用的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(5): 1321–1330.
Wang J Y, Gong W, Bao X L, *et al*. Coupling effects of water and fertilizer on diurnal variation of photosynthesis of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim ‘hanyuan’ seedling leaf[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(5): 1321–1330.

[29] 李世清, 王喜庆, 高亚军, 等. 施肥对提高作物蒸腾, 减少蒸发的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 187–190.
Li S Q, Wang X Q, Gao Y J, *et al*. Effects of fertilization on increase of transpiration and reduction of evaporation[A]. Wang D S. The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 187–190.

[30] 高亚军, 王喜庆, 杜建军, 等. 施肥对提高水分利用效率的影响[A]. 汪德水. 旱地农田肥水关系原理与调控技术[C]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. 191–194.
Gao Y J, Wang X Q, Du J J, *et al*. Effects of fertilization on water use efficiency [A]. Wang D S.The principles and regulation techniques of water and fertilizer on dryland [C]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995. 191–194.

[31] 张燕青, 刘文兆. 不同施肥处理下麦田水分利用过程及其效率特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(5): 133–138.
Zhang Y Q, Liu W Z. Characteristics of water utilization process and efficiency under different fertilization treatments in a wheat field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 133–138.

[32] 吴礼光, 刘茉娥, 朱长乐, 潘祖仁. 控制释放技术[J]. 应用化学, 1994, 11(3): 1–10.
Wu L G, Liu M E, Zhu C L, Pan Z R. Techniques of controlled drug release[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 1994, 11(3): 1–10.

[33] 冯文来, 赵平. 控制释放技术发展及展望[J]. 化学工业与工程, 1996, 13(1): 49–53.
Feng W L, Zhao P. Development and prospect of controlled release technology[J]. Chemical Industry and Engineering, 1996, 13(1): 49–53.

[34] 李文明, 秦兴民, 李青阳, 等. 控制释放技术及其在农药中的应用[J]. 农药, 2014, 53(6): 394–398.
Li W M, Qin X M, Li Q Y. The controlled-release technology and its application in pesticides[J]. Agrochemicals, 2014, 53(6): 394–398.

[35] Chien S H, Prochnow L I, Cantarella H. Recent development of fertilizer production and use to improve nutrient efficiency and minimize environment impacts[J]. Advances in Agronomy, 2009, 102: 267–322.

[36] Azeem B, Kushaari K, Man Z B, *et al*. Review on materials and methods to produce controlled release coated urea fertilizer[J]. Journal of Controlled Release, 2014, 181(1): 11–21.

[37] González M E, Cea M, Medina J, *et al*. Evaluation of biodegradable polymers as encapsulating agents for the development of a urea controlled-release fertilizer using biochar as support material[J]. Science of the Total Environment, 2015, 505: 446–453.

[38] 胡树文. 缓/控释肥料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
Hu S W. Slow and controlled releasing fertilizers [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

[39] GB/T 23348-2009, 缓释肥料[S].
GB/T 23348-2009, Slow-release fertilizers[S].

[40] HG/T 4215-2011, 控释肥料[S].
HG/T 4215-2011, Controlled-release fertilizers[S].

[41] Sempeho S I, Kim H T, Mubofu E, *et al*. Meticulous overview on the controlled release fertilizers[J]. Advances in Chemistry, 2014, 1–16.

[42] 赵秉强. 新型肥料[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
Zhao B Q. New fertilizers [M]. Beijing: Science Press, 2013.

[43] 樊小林, 刘芳, 廖照源, 等. 我国控释肥料研究的现状和展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 463–473.
Fan X L, Liu F, Liao Z Y, *et al*. The status and outlook for the study of controlled-release fertilizers in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 463–473.

[44] ShenY Z, Zhao C, Zhou J M, *et al*. Application of waterborn acrylic emulsions in coated controlled release fertilizer using reacted layer technology[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(1): 309–314.

[45] Xie L H, Liu M Z, Ni B L, *et al*. Slow-release nitrogen and boron fertilizer from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 167(1): 342–348.

[46] 廖人宽, 杨培岭, 任树梅. 高吸水树脂保水剂提高肥效及减少农业面源污染[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 1–10.
Liao R K, Yang P L, Ren S M. Review on super absorbent polymer application for improving fertilizer efficiency and controlling agricultural non-point source pollutions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(17): 1–10.

[47] 黄占斌, 孙朋成, 钟建, 陈雨菲. 高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 125–131.
Huang Z B, Sun P C, Zhong J, Chen Y F. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 125–131.

[48] 马征, 姚海燕, 张柏松, 等. 保水剂对粘质潮土团聚体分布、稳定性及玉米养分积累的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 221–226.
Ma Z, Yao H Y, Zhang B S, *et al*. Effects of different kinds of super absorbent polymers on distribution and stability of clay soil aggregates and nutrient accumulation by maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 221–226.

[49] Benhur M, Keren R. Polymer effects on water infiltration and soil

aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(2): 565–570.

[50] 邹新禧. 超强吸水剂 (第 2 版) [M].北京: 化学工业出版社, 2002.
Zou X X. Superabsorbent polymer (Second Edition)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.

[51] 崔英德, 黎新明, 尹国强, 等. 绿色高吸水树脂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
Cui Y D, Li X M, Yin G Q, *et al*. Green superabsorbent polymers[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[52] Wilske B, Bai M, Lindenstruth B, *et al*. Biodegradability of a polyacrylate superabsorbent in agricultural soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(16): 9453–9460.

[53] Hùttermann A, Orikiriza L J B, Agaba H. Application of super-absorbent polymers for improving the ecological chemistry of degraded or polluted lands[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2009, 37(7): 517–526.

[54] Holliman P J, Clark J A, Williamson J C, Jones D L. Model and field studies of the degradation of cross-linked polyacrylamide gels used during the revegetation of slate waste[J]. Science of the Total Environment, 2005, 336(1–3): 13–24.

[55] 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(1): 463–468.

[56] Xie L H, Liu M Z, Ni B L, *et al*. New environment-friendly use of wheat straw in slow-release fertilizer formulations with the function of superabsorbent[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2012, 51(10): 3855–3862.

[57] Phang Y N, Chee S Y, Lee C O, *et al*. Thermal and microbial degradation of alginate-based superabsorbent polymer[J]. Polymer Degradation and Stability, 2011, 96(9): 1653–1661.

[58] Flory P J. Principles of polymer chemistry [M]. New York: Cornell University Press, 1980.

[59] 苟春林, 曲东, 杜建军. 不同价态离子对保水剂吸水倍率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (2): 52–55.
Gou C L, Qu D, Du J J. Effects of ions on water absorbent rate of water retaining agent[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009, (2): 52–55.

[60] Mikkelsen R L. Using hydrophilic polymers to control nutrient release[J]. Fertilizer Research, 1994, 38: 53–59.

[61] Buchholz F, Graham A T. Modern superabsorbent polymer technology [M]. New York: Wiley-VCH, 1998.

[62] Shaviv A, Mikkelsen R L. Slow release fertilizers for a safer environment maintaining high agronomic use efficiency[J]. Fertilizer Research, 1993, 35(1): 1–12.

[63] 王惠忠, 张书香, 王华年. 交联聚丙烯酸钠吸水剂应用性能研究[J]. 化学世界, 1996, (1): 19–21.
Wang H Z, Zhang S X, Wang H N. Study on applied properties of cross-linking poly (sodium acrylate) water-absorbing agent[J]. Chemical World, 1996, (1): 19–21.

[64] Zhao Y, Su H J, Fang L, Tan T W. Superabsorbent hydrogels from poly(aspartic acid) with salt, temperature and pH-responsiveness properties[J]. Polymer, 2005, 46(14): 5368–5376.

[65] Henderson J C, Hensley D L. Ammonium and nitrate retention by hydrophilic gel[J]. Horticultural Science, 1985, (20): 667–668.

[66] Magalhaes G E, Wilcox F C, Rodrigues F L, *et al*. Plant growth and nutrient uptake in hydrophilic gel treated soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1987, 18(12): 1469–1478.

[67] Smith J D, Harrison H C. Evaluation of polymers for controlled-release properties when incorporated with nitrogen fertilizer solutions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1991, 22(5–6): 559–573.

[68] 何腾兵, 杨开琼, 张俊, 潘云峰. VAMA对土壤供肥保肥性能影响的研究[J]. 土壤通报, 1997, 28(6): 257–260.
He T B, Yang K Q, Zhang J, Pan Y F. Effects of VAMA nutrition supplying and preserving on fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1997, 28(6): 257–260.

[69] 杜建军, 廖宗文, 冯新, 等. 高吸水性树脂在赤红壤及砖红壤上的保水保肥效果研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 137–140.
Du J J, Liao Z W, Feng X, *et al*. Study on effect of high water absorbent resin on fertilizer and water conservation in latosol red soil and latosol[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 137–140.

[70] 龙明杰, 张宏伟, 谢芳, 曾繁森. 高聚物土壤结构改良剂的研究Ⅱ.高聚物对土壤肥料的作用[J]. 土壤肥料, 2000, (5): 13–18.
Long M J, Zhang H W, Xie F, Zeng F S. Studies on polymeric soil structure amendments Ⅱ. Effect of polymeric on soil and fertilizer[J]. Soil and Fertilizer, 2000, (5): 13–18.

[71] 杜建军, 王新爱, 廖宗文, 等. 不同肥料对高吸水性树脂吸水倍率的影响及养分吸持研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 27–31.
Du J J, Wang X A, Liao Z W, *et al*. Effects of chemical fertilizers on water absorbent rate of super absorbent polymers and their adsorption and fixation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 27–31.

[72] 苟春林, 王新爱, 李永胜, 等. 保水剂与氮肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 中国农业科学, 2011, 44(19): 4015–4021.
Gou C L, Wang X A, Li Y S, *et al*. Interaction between water retaining agent and nitrogen fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(19): 4015–4021.

[73] 苟春林, 杜建军, 曲东. 不同磷、钾肥对保水剂吸水、保肥性能的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (3): 52–56.
Gou C L, Du J J, Qu D. Effects of phosphate and potassium fertilizers on water absorbent and nutrients holding ability of water retaining agent[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008, (3): 52–56.

[74] 王新爱, 李永胜, 杜建军, 等. 保水剂在不同铵盐溶液体系中的吸水和吸附铵离子特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 117–123.
Wang X A, Li Y S, Du J J, *et al*. Water and ammonium adsorption characteristics of water retaining agent in different solutions of ammonium salt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(7): 117–123.

[75] 李永胜, 苟春林, 杜建军, 等. 保水剂与磷肥的相互影响及节水保肥效果[J]. 水土保持研究, 2014, 44(6): 4015–4021.
Li Y S, Gou C L, Du J J, *et al*. Interaction between water retaining agent and phosphorus fertilizers and the effect of water and fertilizer conservation[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 44(6): 4015–4021.

[76] 赵晨浩, 张民, 刘之广, 等. 控释复合肥配施保水剂的盆栽月季节水保肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 175–182.
Zhao C H, Zhang M, Liu Z G, *et al*. Effects of saving water and fertilizer conservation for potted Chinese rose using controlled-release compound fertilizers combined with water retention agent[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 175–182.

[77] 杜昌文, 周健民, 王火焰. 高分子载体控释尿素的研制[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 969–972.
Du C W, Zhou J M, Wang H Y. Urea with carriers of high molecule materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6): 969–972.

[78] Wen P, Wu Z, He Y, *et al*. Microwave-assisted synthesis of a semi-interpenetrating slow-release nitrogen fertilizer with water absorbency from cotton stalks[J]. Acs Sustainable Chemistry and Engineering, 2016, 4(12): 6572–6579.

[79] 杜建军, 崔英德, 尹国强. 保水剂在新疆葡萄、大枣上的应用研究与经济效益分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 385–390.
Du J J, Cui Y D, Yin G Q. Study on the application of water retaining agent to grape and Chinese date and analysis of the economic benefits in Xinjiang[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(1): 385–390.

[80] 谢勇, 杜建军, 李永胜, 等. 保水剂对基质栽培菜心生长及水分利用效率的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 228–230, 233.
Xie Y, Du J J, Li Y S, *et al*. Effects of water retaining agent on growth and water use efficiency of Chinese cabbage under substrate culture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 228–230, 233.

[81] He X S, Liao Z W, Huang P Z, *et al*. Characteristics and performance of novel water-absorbent slow release nitrogen fertilizers[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(3): 338–346.

[82] 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.

[83] Ghazali S, Jamar S, Noordin N, Tan K M. Properties of controlled-release-water-retention fertilizer coated with carbonaceous-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbent polymer[J]. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2017, 8(2): 141–147.

[84] 杜建军, 廖宗文, 王新爱, 等. 高吸水性树脂包膜尿素的结构特征及养分控/缓释性能[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1447–1455.
Du J J, Liao Z W, Wang X A, *et al*. Structure and nutrient controlled/slow release characteristics of super absorbent polymer coated urea[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(7): 1447–1455.

[85] 杜建军, 廖宗文, 王新爱, 等. 高吸水性树脂包膜尿素的水肥一体化调控效果研究[J]. 农业工程学报, 2007, 230(6): 71–77.
Du J J, Liao Z W, Wang X A, *et al*. Effects of integral regulation and control of super absorbent polymer coated urea on water and fertilizer use efficiencies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 230(6): 71–77.

[86] Yang Y C, Tong Z H, Geng Y Q, *et al*. Biobased polymer composites derived from corn stover and feather meals as double-coating materials for controlled-release and water-retention urea fertilizers[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(34): 8166–8174.

[87] Wu L, Liu M Z, Liang R. Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(3): 547–554.

[88] 黄帮裕. 基于表面聚合机制的保水型缓释尿素制备及其及性能研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院硕士学位论文, 2011.
Huang B Y. Studies on preparation and properties of water-retention and slow-release urea by surface polymerization [D]. Guangzhou: MS Thesis of Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2011.

[89] 尤晶. 高吸水性树脂包膜尿素的制备及性能研究[D]. 海口: 海南大学硕士学位论文, 2013.
You J. Studies on preparation and properties of super absorbent polymer coated urea [D]. Haikou: MS Thesis of Hainan University, 2013.