

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.019

# 化学调控技术在旱地水肥利用中的应用进展\*

杨培岭 廖人宽 任树梅 李云开

(中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083)

**摘要:** 围绕旱地农业生产中的水肥资源高效利用展开讨论,主要介绍了以3种典型化学调控剂(土壤改良剂PAM、土壤保水剂SAP和蒸腾抑制剂FA)为代表的化学调控技术在旱地农业水肥资源利用方面的调控机制和应用方法,重点对化学调控技术在旱地农业生产中的增强水肥保蓄、提高坡地水土保持、改善作物水肥利用性能及提升作物品质和产量4个重要环节上的应用研究进行了综述,最后提出未来化学调控技术在旱地农业中应用的重点研究方向。

**关键词:** 旱地农业 化学调控技术 水分 肥料 土壤改良剂 土壤保水剂 蒸腾抑制剂

**中图分类号:** S157.2; TQ317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0100-10

## Application of Chemical Regulating Technology for Utilization of Water and Fertilizer in Dry-land Agriculture

Yang Peiling Liao Renkuan Ren Shumei Li Yunkai

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The issue on the theme of efficient utilization of water and fertilizer in dry-land agriculture was discussed. The mechanism of action of three typical chemical agents (soil conditioner—PAM, water retaining agent—SAP, antitranspirant—FA) in regulation of water and fertilizer and its application methods were introduced. Research of chemical regulating technology on four important parts were emphatically reviewed (enhancement of the accumulation of water and fertilizer, improvement of the soil and water conservation, improvement of the utilization of crop to water and fertilizer, increasing of the crop yield and quality) in dry-land agriculture production. Finally, the future important research directions were proposed.

**Key words:** Dry-land agriculture Chemical regulating technology Water Fertilizer Soil conditioner Water retaining agent Antitranspirant

### 引言

旱地农业生产以最大限度地利用水肥资源为目标,主要包括保护性耕作、有限灌溉、遗传改良、化学调控等方面的内容<sup>[1]</sup>,是应对旱区水资源短缺和农业面源污染的重要生产方式。旱地农业区多集中于气候干燥、降雨量少、地表水资源不足的干旱和半干旱区。据估算,全世界干旱半干旱地区现有耕地6亿多公顷,约占世界总耕地面积的42.9%<sup>[2]</sup>,旱地农业生产方式在世界范围内占有举足轻重的地位。

就我国而言,旱地农业区是我国农业生产的重要组成部分,是我国粮油的重要产地,也是林牧业的重要基地,大力发展旱地农业技术对于缓解水资源紧缺和农业面源污染状况以及促进我国农业经济的发展都具有重大的意义。

水分和肥料既是影响旱地农业生产的主要胁迫因子,也是一对联因互补、不可分割的协同作用体,在作物产量和品质形成方面扮演着重要的角色。大量研究表明<sup>[3-5]</sup>,在高效利用水资源的同时,减少化学肥料和农药的盲目施用,降低肥料的淋溶损失和

收稿日期:2013-03-11 修回日期:2013-03-16

\*国家自然科学基金重点资助项目(51239009)和北京市科学技术计划资助项目(pxm2009\_035324\_092070)

作者简介:杨培岭,教授,博士生导师,主要从事水土环境和农业高效节水技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

坡面流失,促进作物对水肥的吸收,提高水肥的利用效率,将水和肥两个因子进行综合控制是减轻干旱胁迫和农业面源污染的根本方法之一,也是旱地农业技术未来发展的研究重点。

化学调控技术正是基于水肥因子调控的一种重要旱地农业技术。它是应用特殊的化学制剂来进行水肥的调控,以土壤和作物为调控对象,调控方式则是将化学制剂直接施用到土壤中或作物上,以提高水肥利用效率为核心目标,在源头上减少水肥的摄入,在过程中减轻水肥的损失,在应用中增强作物对水肥利用的能力,从而达到高效利用水肥资源、减少灌溉和肥料施用、提高作物抗旱性能、减轻农业面源污染的目的,在提高旱地农业系统生产功能的同时减轻因农业生产对生态环境造成的压力。目前已有大量的研究显示<sup>[6-9]</sup>,通过表土改良剂、土壤保水剂、土壤激活剂、植物激素、黄腐酸等化学制剂的合理应用,可以起到有效改善土壤结构、减少水土流失、增加水肥入渗和土壤保蓄能力、降低作物奢侈蒸腾、促进作物生理生长、改善作物品质等效用。

本文以化学调控技术在旱地农业水肥调控的作用机制为出发点,对3种典型化学调控技术的应用方法分别进行阐述,重点围绕化学调控技术在旱地农业生产各个阶段上的应用模式进行综述,最后提出化学调控技术在未来的重点研究方向。

## 1 化学调控技术水肥利用调控机制

化学调控技术对水肥利用的影响效应是通过影响土壤和作物系统中水肥入渗、保蓄和吸收利用等途径来实现的,着重于对水和肥这两种作物关键生长因子的调控,其作用效应的实现在于化学调控制剂(化控制剂)的应用及其自身性质的发挥,本质上来讲是化控制剂的作用机制。目前应用于水肥调控的化控制剂种类较多,综合来看,主要分为3大类型:①土壤结构改良调控类,主要包括表土结构改良剂、土壤激活剂等。②土壤水肥保蓄调控类,主要包括土壤保水剂、保水剂缓释肥等。③作物生理调控类,主要包括作物抗蒸腾剂、植物生长激素等。化学调控技术的作用机制则体现在以3大类型化控制剂为基础的3种主要的调控途径,在此以3种典型的化控制剂作用机制来进行说明。

第一条途径是采用土壤改良剂(Polyacrylamide, PAM)对表层土壤结构进行调节。PAM是一种线型水溶性高分子,一般为白色颗粒态,由多个同样的丙烯酰胺和相关的单体经聚合而形成的,是丙烯酰胺及其衍生物的聚合物统称,在油气工业、纺织工业、农业生产等多方面均有应用。PAM有液体、固体和

乳胶体等多种形式,主要分为阳离子、阴离子、非离子和两性离子型,阴离子型PAM多用于进行农田土壤的改良。

调控作用能固持土壤并减轻表土封闭,促进连通孔隙的形成,增加水肥的入渗,减轻土壤侵蚀,减少溶解态和吸附态养分的流失。一方面,PAM是一种高分子聚合物,其吸水后所形成的凝胶化物质能够吸附分散的土壤颗粒,土壤颗粒不断聚集从而形成更多团聚体结构,而土壤黏粒表面吸附PAM分子后,引起土壤颗粒表面物理-化学条件的变化又减轻了土壤颗粒间的排斥反应,使得形成的土壤团聚体结构更加稳定,团聚体表面的黏结力进一步加强,能够有效减弱降雨对团聚体结构的打击溅蚀力,减轻土壤表面结皮和封闭,促进水肥的入渗;另一方面,PAM分子可以同土壤中的金属离子发生“桥接”作用<sup>[10]</sup>,从而形成更多的连通孔隙,增强了土壤的入渗性能,减轻径流对下游土壤的冲刷,从而减少了溶解态和吸附态养分的流失。

第二条途径是通过土壤保水剂(Superabsorbent polymer, SAP)自身水肥保蓄、缓释性能及其对根层土壤结构的调控作用来实现。SAP是一种人工合成的具有强吸液能力的功能高分子聚合物材料,一般为白色或淡黄色颗粒态,其独特的分子网络结构和功能特性使其能够快速吸收水分,吸液量可达百倍甚至上千倍,并且具有反复吸水和释水的功能,其在卫生医疗、工业制造、农业生产等方面均有广泛应用。聚丙烯酸、聚乙烯酸、乙酸、聚乙烯、纤维素、淀粉、凹凸棒黏土、石墨烯、瓜尔胶、壳聚糖等有机或无机材料均可作为保水剂的合成材料,而淀粉接枝丙烯酸盐共聚交联物和聚丙烯酰胺类保水剂是较为常用的农用保水剂。

调控作用能反复吸持土壤水肥,减少水肥淋溶渗漏量,并使水肥缓慢释放供作物生长所需,同时还能够作用于根系来提升作物整体生理机能。一方面,SAP是一种三维网络状的高分子聚合物,其分子表面的亲水性功能基团羧基(COO<sup>-</sup>)、羟基(OH<sup>-</sup>)等遇水后会发生电离并与水分子结合成极性氢键,形成的氢键能够增强分子的吸水动力,亲水性基团也可通过静电引力、范德华力、离子交换、离子吸附等机制来增强对养分的吸附作用,而三维网络结构上电离出的正离子游离于网络结构之中使得包裹着网络结构的膜内外之间形成渗透势差,其也促使了外部水分子和养分子通过膜结构进入高分子内部被快速储存起来<sup>[11]</sup>,当外部水分被作物消耗而导致土壤基质吸力升高时,SAP缓慢释放出自身储存的水分和养分到土壤中,供作物吸收利用;另一

方面,SAP在作物根区形成了水肥耦合微域,通过影响根系的分布和发育,提升了根系对水肥的利用效率,进而促进了作物整体的生长。

第三条途径是采用作物抗蒸腾剂黄腐酸(Fulvic acid,FA)对作物生长机能进行调控。FA是腐植酸的一个水可溶级分,一般为黄褐色液态或灰黑色粉末,其分子含有酚羟基、醇羟基等多种基团以及少量的氨基酸、维生素和酶类物质<sup>[12-13]</sup>,可以从煤炭来源的腐植酸中分离获得或直接从泥炭、风化煤中提取,也可以利用生物技术的方法制造,在医疗卫生和染色工业上有一定的应用,但更多应用于农业抗旱和作物生理调节。目前农用抗蒸腾剂FA主要有旱地龙、抗旱剂一号、黄腐酸叶面肥等。

调控作用能够降低作物“奢侈”蒸腾时的叶面气孔开度,抑制水分的蒸腾耗散,同时可以促进作物光合作用,提升作物的生理活性。一方面,施用FA可提高植株体内脱落酸的含量,而脱落酸可以缩小气孔开度,增加气孔阻力,降低叶片蒸腾强度,减少植株体内水分向外散失;另一方面,FA也能提高作物体内抗氧化酶如过氧化物歧化酶、过氧化物酶等的活性<sup>[14]</sup>,增强清除活性氧和氧自由基的能力,从而减轻了膜脂过氧化作用和膜伤害,延缓植株衰老;此外,FA通过侧链上的活性含氧官能团与金属离子或非金属元素形成利于作物吸收的络合物,可以提高作物对生长必需微量元素的吸收和运转能力,促进产量和品质的提高。

## 2 化学调控技术的应用方法

化学调控技术主要是通过化学调控制剂的应用来发挥对水肥的调控作用,在进行化学调控技术的实际应用时,应根据特定的调控目标选取适宜的调控对象,进行针对性强的调控才能发挥最大的效益。下面介绍3种典型的化控制剂在土壤和作物上的应用方法。

### 2.1 PAM的应用方法

PAM剂型和施用浓度对土壤入渗的影响差异较大,既可减轻结皮起到增强土壤入渗率的目的,也可形成“人工结皮”而阻碍溶液和溶质的入渗。PAM可采用干颗粒态拌土或与其他材料(石膏、石灰石等)混合后在地表撒施,也可以将PAM溶于灌溉水后进行浇施和喷施。就坡地而言,应尽量在翻耕、锄草等措施之后和雨季到来之前的这段时间施入地表,施入后应避免大规模的耕作措施,且随着坡度的增加,其施用量应适量增加;就平地而言,应特别注意PAM的施用量,将PAM用量控制在合理的范围内才能起到减轻表土结皮和提高土壤入渗率的目的。

### 2.2 SAP的应用方法

合成材料、粒径等自身因素和温度、pH值、CEC、微生物、根系分泌物等土壤环境或作物生理因素都会对SAP作用性能产生影响。因此,应用时应针对不同的土壤条件和作物类型选取适宜的SAP。SAP的应用方法主要有包衣、蘸根、基质培育、穴施、沟施等。就果树而言,一般选用大粒径SAP,在果树萌芽期施入,施入后需要进行一次充分灌溉再覆土掩埋;就大田作物和蔬菜而言,可选用小粒径SAP用作土壤基质育苗,可使出芽时间提前,并提高种子萌发率,也可以通过穴施方式使用中等粒径的SAP来提高土壤的水肥保蓄能力,持续供给作物。

### 2.3 FA的应用方法

FA的应用可采用叶面喷施和随水浇灌等方式。随水浇灌是将FA按一定浓度比例加入到灌溉水中进行,可以增强根系活性,改良土壤结构;而从抑制作物“奢侈”蒸腾和增强光合作用两方面来说,叶面喷施是较为常用的应用方式,施用时应根据作物类型对FA进行稀释处理,施用浓度应视具体作物而定,在作物关键生育期、关键需水期或严重干旱时进行施用,应选择在无风的时候,在叶面进行均匀喷打,以FA液体布满叶面不滴为宜;另外,也可将FA与酸性农药进行混合喷打,FA能增强农药药效,可以起到减少农药药量的目的。

## 3 化学调控技术在旱地生产上的应用

### 3.1 在增强土壤水肥保蓄方面的应用研究

土壤水肥保蓄是整个旱地农业生产系统中的基础环节。在水肥保蓄方面的化学调控分为3个层面,目前研究主要所涉及到的调控目标、技术方法及效果见表1。水肥保蓄的第一个层面,是要增加水肥进入土体的数量。雨养农业是北方旱区农业的主要生产方式之一,农田土壤易在降雨的打击下形成结皮而造成土壤封闭,降低土壤表层导水率,形成大量地表径流,造成水肥流失。化学调控技术通过PAM来改善表层土壤结构状况,减轻土壤结皮程度并形成更多的连通孔隙,可增强表层土壤的入渗能力。将PAM以溶液态、溶胶态或干粉态施于地表,均能起到增加水肥入渗的作用。Green等<sup>[15]</sup>研究了PAM对土壤封闭情况的作用效应,发现将PAM以液体形态喷施在土壤表面可以减轻土壤封闭程度。陈渠昌等<sup>[16]</sup>将PAM干施在坡面地表并进行人工降雨试验,也发现其能够提高土壤入渗率,减少径流量。于健等<sup>[17]</sup>则综合比较了喷洒PAM溶胶、溶液和干粉3种方式,发现直接使用干粉PAM不仅具有较好效果,且施用方法简单易行,适合在旱作农业区

推广使用。Mamedov 等<sup>[18]</sup>则进一步分析了 PAM 在不同土壤上的应用效果,在对比研究了 16 种土壤样品后发现,土壤团聚体的稳定性越差,PAM 增强团聚体稳定性的能力就越强,PAM 改良土壤结构和团聚体稳定性方面的有效性跟黏粒活性和影响 PAM 吸附的土壤条件等因素有关。同时,应特别注意的是,在以增加水肥入渗为调控目标的技术应用中,要

特别注意 PAM 的用量,因为也有研究表明,当 PAM 的用量过大时,反而会减弱水肥的入渗。研究发现,当 PAM 用量为  $3.0 \text{ g/m}^2$  时,可明显降低土壤入渗率,增加坡地径流量<sup>[16]</sup>,含有  $25 \text{ mg/L}$  浓度 PAM 的去离子水溶液淋溶土壤也会明显降低土壤的稳定导水率,其原因在于未被吸附的 PAM 分子链片段延伸进入了土壤孔隙,导致流速的下降<sup>[19]</sup>。

表 1 增强水肥保蓄的调控目标、技术方法及效果

Tab. 1 Regulation goals, techniques and effects in enhancing the accumulation of water and fertilizer

调控目标	应用方法	作用效果
增加水肥入渗	土表喷施液态 PAM	提高入渗率 $3.0 \sim 5.0$ 倍 <sup>[15]</sup>
	土表喷洒溶胶态 PAM	提高稳定入渗率 $1.0 \sim 2.5$ 倍 <sup>[17]</sup>
	土表喷洒溶胶态 PAM	提高稳定入渗率 $1.7 \sim 2.8$ 倍 <sup>[17]</sup>
	土表喷洒干粉态 PAM	提高稳定入渗率 $0.25 \sim 1.8$ 倍 <sup>[17]</sup>
	与土壤混施	提高团聚体稳定性 $1.01 \sim 3.90$ 倍 <sup>[18]</sup>
保蓄水肥	土表干施 PAM	提高土壤入渗率,减少径流量 <sup>[16]</sup>
	将 SAP 同沙子混合施用	使沙子的持水时间增加 3 倍 <sup>[21]</sup>
	层施 SAP	土壤含水率会增加 $1.1 \sim 1.9$ 倍 <sup>[20]</sup>
	在育苗基质中加入 SAP	降低 80% 基肥氮素用量 <sup>[23]</sup>
缓释水肥	混施复合 SAP	钾淋溶减少 $8.17\% \sim 31.38\%$ <sup>[22]</sup>
	SAP 磷酸缓释肥	磷素可缓释,其利用率得到提升 <sup>[26]</sup>
	尿素缓释型 SAP	含氮 $21.1\%$ ,生物降解性好 <sup>[27]</sup>
	复合 SAP	含氮 $15.13 \text{ mg/g}$ , 钾 $52.05 \text{ mg/g}$ <sup>[29]</sup>
	有机-无机复合 SAP	氮肥利用率提高 1 倍以上 <sup>[28]</sup>
	复合 SAP	磷素提高 $0.23 \sim 2$ 倍 <sup>[31]</sup>

水肥保蓄的第二个层面,是要将水肥蓄持在作物根系层。北方旱区夏季温度较高,土面蒸发强烈,使水分大量散失。砂质壤土的水肥保蓄能力较弱,降雨和灌溉后,入渗的水肥易快速渗漏而进入地下水,导致水肥利用效率降低,且对地下水水质造成影响。化学调控技术则可通过在作物根系层施入 SAP 来降低水分蒸发和水肥渗漏,即通过 SAP 对水肥反复吸持的能力和其对土壤结构的调控效应来增强土壤的热容量和土壤持水能力,使表层土与下层土的水势梯度变陡,降低土壤的导水率,减缓了土面蒸发和水肥淋溶,将水肥尽量保蓄在作物根系层。白文波等<sup>[20]</sup>比较分析了 SAP 作用下土壤水分的入渗率、累积入渗量及湿润锋等的动态变化,发现 SAP 施用后,SAP 层及 SAP 下层土壤含水率会普遍提高。Asghar 等<sup>[21]</sup>研究发现当 SAP 与沙子混合施用时,可提高沙子的持水时间。李世坤等<sup>[22]</sup>则研究了复合 SAP 对水肥淋失的影响,结果表明复合 SAP 能够较对照减少淋出液体积,显著降低氮磷钾的累计淋溶率。司东霞等<sup>[23]</sup>在黄瓜育苗基质中加入控释肥料和 SAP,结果显示在保证植株完成移栽后正常营养生长阶段的发育进程情况下,可减少基肥氮素用量并降低氮素淋溶损失。针对 SAP 施用条件

下的土壤干燥过程中的动力学特征,Bakass 等<sup>[24]</sup>开展了相关研究,结果显示 SAP 的存在减弱了土壤的干旱动力学进程,能够有效地减少水分的流失。而针对 SAP 应用的适宜土壤类型,有研究发现将少量的 SAP 加入到黏粒含量较低的土壤中能提高土壤持水性方面要优于黏粒含量较高的土壤<sup>[25]</sup>。

水肥保蓄的第三个层面,是要使水肥缓慢释放,持续供给作物生长所需,提升水肥的有效利用效率。研究人员将养分元素加入到 SAP 中制成 SAP 缓释肥也起到了很好的水肥保蓄效果,SAP 缓释肥既具备吸持水分的性能,又能够将复配的养分元素进行缓慢释放,提升养分利用的有效性,可减少外源化肥的施用。Zhan 等<sup>[26]</sup>将磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )与聚乙烯醇(PVA)进行酯化后制成 SAP 磷酸缓释肥。Ni 等<sup>[27]</sup>以乙基纤维素、丙烯酸、丙烯酰胺为原料,混合加入尿素,制成尿素缓释型 SAP。毛小云等<sup>[28]</sup>将矿物和作物养分加入保水剂中制成有机-无机复合 SAP。这些单源肥料复合型 SAP 都能在一定程度上缓释养分,降低肥料的流失,同时提升了作物对肥料的利用率。在多源肥料复配方面,有研究发现,将改性的蔗渣和丙烯酸嵌入磷酸盐岩,并加入氨、磷酸盐和氢

氧化钾作为氮、磷和钾源,结果表明该种保水剂中有效氮、磷、钾养分均具有很好的养分缓释性能<sup>[29]</sup>,而用金属离子、腐殖质、磷酸盐混合制成的复合型 SAP 不溶于水,但可溶于根系分泌的有机酸,这可以使保水剂随着根系的生长缓慢释放磷素供作物生长所需,在将这种保水剂应用于磷缺失的玉米生产上时,结果显示玉米生长得到恢复,与施用水溶性磷肥的效果相当<sup>[30]</sup>。

### 3.2 在提高坡地水土保持方面的应用研究

坡地是北方地区常见的一种地形,而坡地农业

也是北方旱地农业生产方式中较为常见的一种生产方式。水土流失是制约坡地农业发展的关键因素,由于水土流失,造成肥料流失,降低了肥料的利用效率,而由此形成的农业面源污染对下游水体又会造成污染,如何提高坡地水土保持能力、减少坡地水土侵蚀是旱地农业生产系统中的重要环节。坡度、坡长、植被和降雨强度等都是影响坡地水土侵蚀和径流的主要原因,而 PAM 施用量和施用方式的差异则可能起到截然相反的应用效果。调控技术及作用效果见表 2。

表 2 提高坡地水土保持的调控方法及作用效果

Tab. 2 Regulation techniques and effects in improving the soil and water conservation

类型	应用方法	作用效果
PAM 剂型	$1.2 \times 10^7$ 、 $1.5 \times 10^7$ 、 $1.8 \times 10^7$ Da 分子量	分别比对照减少土壤侵蚀 26.3%、52.6%、26.3% <sup>[32]</sup>
	7%、20%、35% 水解度	土壤侵蚀分别为对照的 38.7%、33.8%、36.4% <sup>[32]</sup>
PAM 用量	0.5、1.0 g/m <sup>2</sup>	减少坡面径流 <sup>[34]</sup>
	2.0 g/m <sup>2</sup>	增大坡面径流 <sup>[34]</sup>
	0~2.0 g/m <sup>2</sup>	增加土壤饱和导水率 <sup>[33]</sup>
	>2.0 g/m <sup>2</sup>	减小土壤饱和导水率 <sup>[33]</sup>
PAM 覆盖度	低、中、高覆盖	细沟侵蚀临界坡长分别增加 4.95、10.75、29.40m <sup>[35]</sup>
	80%、60%、40% 覆盖	提高降雨入渗量 17%、14%、6% <sup>[36]</sup>
PAM 配施	PAM 和石膏	能够增强沙土和粉砂壤土的人渗率 4 倍并减少 30% 的土壤侵蚀 <sup>[37]</sup>
	PAM 和石灰石、石膏、沸石、腐殖质	土壤固磷能力由大到小依次为石灰石、腐殖质、石膏、沸石 <sup>[40]</sup>
	PAM 和粉煤灰	有效地抵御 14 m/s 风沙流历时 30 min 的吹蚀 <sup>[39]</sup>

在 PAM 选择方面,其剂型、施用浓度和覆盖度是影响 PAM 作用效应的主要因素,土壤入渗率和径流量对其的响应敏感性很强。PAM 剂型主要在于分子量和水解度的选择,不同的分子量和水解度使 PAM 分子的聚合链长度和电荷密度不同,这跟土壤入渗和侵蚀有直接的关系。于健等<sup>[32]</sup>研究了 3 种分子量和 3 种水解度的 PAM 对土壤侵蚀的影响,发现当 PAM 的分子链可以穿透土壤空隙时,才能对土壤颗粒产生较好的黏结效果,起到固持水土的作用。剂型决定了 PAM 的理化特性,而施用浓度则是其自身性质的累积作用,也对土壤入渗和侵蚀产生直接影响。在进行坡面土壤侵蚀防治时,并不是 PAM 施用浓度越高越好,而应是将浓度控制在一个合理的范围内。韩凤朋等<sup>[33]</sup>的研究表明,在 15° 的剖面小区上,2.0 g/m<sup>2</sup> 的 PAM 施用浓度是增加土壤饱和导水率、减少剖面径流的一个极大值,当用量大于 2.0 g/m<sup>2</sup> 时,将会出现降低饱和导水率而增大径流的效果。Wang 等<sup>[34]</sup>也发现在 5° 坡地小区,当 PAM 施用浓度较小时可以起到减少径流的作用,当浓度较大时,甚至在 2.0 g/m<sup>2</sup> 的施用量时就已经出现增大径流的效果。PAM 覆盖度对于坡面水土保持也有较大的影响,主要体现在对坡面侵蚀临界坡长和土壤入渗率等方面的影响。刘纪根等<sup>[35]</sup>研究发现

PAM 覆盖会使细沟发育的临界坡长增加,PAM 的覆盖度越大,发生细沟侵蚀的临界坡长越长。唐泽军等<sup>[36]</sup>的研究表明,当 PAM 覆盖率为 80% 时,其入渗效果最好,而 PAM 覆盖率为 40% 不能有效地达到增加土壤入渗的目的。由此可见,在应用 PAM 进行调控时,应尽量增大 PAM 的覆盖面积,但施用浓度需要控制在一个合理的范围内,并非越大越好。

PAM 施用方式多样,其作用效果也有较大差异。或将 PAM 溶于水后进行喷施,或将颗粒态 PAM 在地表进行撒施,也可以将颗粒态 PAM 与石膏、腐殖质和粉煤灰等进行联合应用。将 PAM 与石膏进行联合应用能够产生较好的应用效果,一方面可以提高 PAM 改良土壤的作用效果,另一方面则是可以降低应用成本。Yu 等<sup>[37]</sup>将 PAM 和石膏共同施用,有效地提高了降雨入渗率并减轻土壤侵蚀。崔海英等<sup>[38]</sup>则通过野外小区试验,研究 PAM 施用浓度、石膏用量及其混合物对产流、产沙量的影响,发现 PAM 用量为 2 g/m<sup>2</sup> 时,石膏用量大时入渗效果比较好,而在石膏用量为 20 g/m<sup>2</sup> 时,则不能起到增加水分入渗的作用。除石膏以外,石灰石、粉煤灰等材料也可与 PAM 进行联合应用,其在防治风力侵蚀和污染物流失方面均有不错的效果。对 PAM 配施材料的选择应以防治目标为准,将粉煤灰与 PAM

进行喷施来抵御风沙流侵蚀的试验表明,粉煤灰施用率为20%和PAM施用率为0.05%的用量是风蚀防治的最佳用量<sup>[39]</sup>,与石膏、沸石、腐殖质相比,石灰石同PAM配施处理组合对土壤磷吸附能力最强,可减少磷素向水体的释放<sup>[40]</sup>。

### 3.3 在改善作物水肥利用性能方面的应用研究

对作物水肥利用性能的调控关系到作物对水肥资源的利用效率,也关系到作物的最终品质,是量化研究作物生理生长对化学调控技术响应机制的关键所在,是化学调控技术在旱地农业生产系统中进行应用的核心环节。调控技术及作用效果见表3。

化学调控技术可以在作物根系层土壤中施入SAP,通过其反复吸释水肥的特性来形成类似于“小型水库”和“小型营养库”的水肥蓄持带,减少水肥的淋溶渗漏量,提供作物水肥供给充足的环境,从而对根系产生影响,促进作物的生长及对水肥的利用效率。在对棉花的研究中发现,SAP的施用能够加快棉花前期根系生长发育,增强根系活力,使根系在土壤内的分布更为合理<sup>[41]</sup>。在对冬小麦的研究中发现,SAP的施用还能降低冬小麦根系质膜透性和可溶性糖含量,提高根系活力<sup>[42]</sup>。在对夏玉米的研究中发现,SAP的施用减小了玉米根系的总长度和表面积,能增加纤维根系(直径小于0.5 cm)的数目,增强根系对水肥的吸收和运输能力<sup>[43]</sup>。

另外,有大量研究表明,适量配施肥料与SAP共同应用可以得到更好的效果。施入SAP能够促进小麦生长,提高小麦产量与水分利用效率,与肥料

混合施用时,增产效果更加显著<sup>[44]</sup>,将SAP结合氮肥施用,也可以提高不同阶段马铃薯叶片的光合速率,促进产量的形成<sup>[45]</sup>。刘方春等<sup>[46]</sup>发现容器育苗基质中SAP同速效肥料混合施用,可促进白蜡中后期的生长,提高白蜡干物质、氮和钾的快速积累时间和最大积累速率,增加干物质的积累量和总养分吸收量。

SAP与肥料的互作效应较为复杂,有研究认为可能是SAP与土壤中某些与氮素转化的酶相关,或与SAP的合成材料有关。黄震等<sup>[47]</sup>比较3种SAP对土壤水分和2种氮肥(尿素、硝酸铵)的保持效应,发现SAP对土壤脲酶活性有一定影响,其变化与氮素转化有关。宫辛玲等<sup>[48]</sup>研究发现氮肥溶液中的离子强度、SAP聚合物类型以及粒级是影响SAP吸水率的关键因素,SAP释放和吸收氮量高于硝氮量,其释放和吸附氮肥的能力明显受粒级与生产过程中添加的复合成分的影响。然而,有研究发现,并非所有肥料都适宜跟SAP进行复配应用。不同的化学肥料对SAP吸水率的影响程度不同,肥料对SAP的影响程度按尿素、磷酸二氢钾、氯化钾、氯化铵依次递增<sup>[49]</sup>。值得注意的是,当肥料用量过大,特别是高价态离子溶液浓度过大时,会严重影响SAP的吸液性能。Li等<sup>[50]</sup>比较了SAP在不同离子溶液中的溶胀性能并对SAP表面形貌变化特征进行了量化研究,发现高价态阳离子会导致SAP溶胀性能显著降低。Mohammad等<sup>[51]</sup>的研究表明,SAP的溶胀比率随着溶液离子强度的增加而下降。

表3 改善作物水肥利用性能的调控技术及作用效果

Tab.3 Regulation techniques and effects in improving the utilization of crop to water and fertilizer

类型	应用方法	作用效果
SAP 单施	30 ~ 45 kg/hm <sup>2</sup>	棉花产量提高10%,每公顷增加铃数5.7~9.4万个 <sup>[41]</sup>
	60 kg/hm <sup>2</sup>	郑麦9694产量提高47.4% <sup>[42]</sup>
	60 kg/hm <sup>2</sup>	矮麦58产量提高42.5% <sup>[42]</sup>
	22.5、45.0 kg/hm <sup>2</sup>	增加纤维根系数目 <sup>[43]</sup>
SAP 与肥料混施	SAP结合氮肥	延长马铃薯茎叶生育期14~15 d,增加块茎产量75.0%~108.3% <sup>[45]</sup>
	SAP结合肥料	小麦增产10.14%,水分利用效率明显提高 <sup>[44]</sup>
	SAP结合速效肥	氮、磷和钾的总养分吸收量分别增加16.56%、8.25%和12.75% <sup>[46]</sup>

### 3.4 在提升作物品质和产量方面的应用研究

作物的品质和产量形成是作物生长中极为重要的一环,也是整个旱地农业生产系统中的最后一环。实现对品质和产量的调控,是化学调控技术在旱地农业生产上经济效益的体现,也是化学调控技术在旱地农业生产中能够得到大面积推广应用的前提条件。调控目标、技术方法及效果见表4。

化学调控技术在作物品质和产量提升方面主要有两方面效应。一方面是采用SAP可以促进作物

对水分和肥料的利用,增强作物的生长机能,促进干物质的积累。李仙岳等<sup>[52]</sup>研究发现,SAP对杏树果实品质的提高在于其能够提高水分利用效率,其在干旱阶段的效果更加明显。白文波等<sup>[53]</sup>试验表明,SAP增强了水分由根系向茎叶的运输能力,促使干物质由营养器官向生殖器官的分配比增加,从而促进了花根系和蕾铃发育。吴娜等<sup>[54]</sup>发现无论是传统灌溉还是滴灌,施用SAP后均能提高燕麦对矿质元素的利用率并增加其产量。

另一方面是叶面喷施 FA 不仅可以抑制作物“奢侈”蒸腾提升水分利用效率,还可以起到叶面有机肥的目的,促进作物的生长和产量的提高<sup>[55-56]</sup>。更为重要的是,FA 还可以增强作物抗逆防病能力,不仅改善了果实外观,还提升了果实的品质。师长海等<sup>[57]</sup>研究结果表明,喷施成膜型植物抗蒸腾剂(PFA)可以有效地维持旗叶的水分生理环境,抑制

活性氧的产生,维持细胞膜的完整性,从而维持较高光合速率,同时有效降低蒸腾速率。李茂松等<sup>[58]</sup>发现 FA 能提高春玉米硝酸还原酶活性和游离脯氨酸含量,降低蒸腾强度并促进玉米生长。此外,FA 与农药混用时还可以起到增强农药药效的作用,在减少农药浓度和用量的情况下也能起到很好的除害效果,其对作物果实品质的提高也有很大帮助。

表 4 提升作物品质和产量调控目标、技术方法及效果

Tab. 4 Regulation goals, techniques and effects in increasing the crop yield and quality

调控目标	应用方法	作用效果
促进作物水肥利用性能	SAP 200 g/棵	土壤含水率提高 21.53%,果实品质提高 <sup>[52]</sup>
	SAP 90 kg/hm <sup>2</sup>	棉花单株铃数和单铃质量增加 8.1%~14.1%和 3.1%~4.6% <sup>[53]</sup>
	SAP 60 kg/hm <sup>2</sup>	有利于裸燕麦大多数品质性状的提高以及矿质元素的吸收利用 <sup>[54]</sup>
	FA 400 倍液	苹果增产可达 4.88%~7.32%,平均单果质量增加 4.2%~8.4% <sup>[55]</sup>
增强作物抗逆防病能力	FA 480 倍液	较对照显著提高叶绿素 a 含量达 24% <sup>[56]</sup>
	成膜型 FA	抑制活性氧的产生,保证氧自由基清除系统的正常运行 <sup>[57]</sup>
	新型 FA	提高硝酸还原酶活性,春玉米增产 5.37%~29.58% <sup>[58]</sup>

#### 4 化学调控技术未来研究重点

目前,化学调控技术在旱地水肥资源高效利用方面主要偏重于田间尺度的应用模式研究,在化控制剂的施用方法和施用量方面有较多的成果,在摸清化控制剂作用机制方面也有一定的深度。但是,化学调控技术的集成应用模式和环境影响效应方面的研究还很缺乏,在模拟模型构建方面的报道也很少,在未来还需要从以下几个方面来继续深入研究:①对化学调控技术作用机制进行深入研究,对 FA 局部喷施后对作物整体生理生长功能的调控机制,对 SAP、PAM 施入土壤后土壤孔隙的发育规律,SAP 水肥吸持性能与根系生长发育的互作机制及其对整体水肥利用效率调控等进行探索。②对化学调控技术应用条件下模拟模型的构建进行系统研究,应对 SAP 反复吸水、释水的功能特性导致土壤容重、导水率等物理参数的变化规律及基于非刚性土壤的溶质

运移方程建立进行探索,如何对动态变化的参数进行定量化表征则是建模的关键。③对化学调控技术田间应用模式进行集成和综合研究,对面向节水、防污的化学协同调控模式及其对水分和养分的协同调控机制进行深入分析,对与协同调控模式配套的农艺措施和灌溉施肥制度也应进行研究。④对化学调控技术大尺度应用下的环境影响效应及评价指标体系进行深入研究,化控制剂本身也是一种化学制剂,它的应用也可能会对水土环境造成不利影响,特别是在流域等大尺度范围上应用时,其环境问题的产生及相应的评价指标体系也是今后研究的一个重要方向。⑤对新型化控材料及研制工艺应加大开发力度,化控制剂的作用性能是化学调控技术的根本,SAP 缓释肥产品、环保型 PAM 制剂等新型高效环保化控制剂是今后研究的重点,如何在保证化控制剂作用效果的同时减少成本也是促进化学调控技术发展的一个重要研究方向。

#### 参 考 文 献

- 1 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(7): 848~855.  
Shan Lun. Development trend of dryland farming technologies[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(7): 848~855. (in Chinese)
- 2 张义丰, 王又丰, 刘录祥, 等. 中国北方旱地农业研究进展与思考[J]. 地理研究, 2002, 21(3): 305~312.  
Zhang Yifeng, Wang Youfeng, Liu Luxiang, et al. Research progress on arid-land agriculture in northern China[J]. Geographical Research, 2002, 21(3): 305~312. (in Chinese)
- 3 马强, 宇万太, 沈善敏, 等. 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 Qiang, Yu Wantai, Shen Shanmin, et al. Research advances in water-fertilizer effect on dry land farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(3): 665~673. (in Chinese)
- 4 李英能. 北方缺水地区半旱地农业有限补灌模式探讨[J]. 中国工程科学, 2012, 14(3): 41~45.  
Li Yingneng. Probe into semi-dryland agriculture limited supplemental irrigation model in the water deficit areas of north China[J]. Engineering Science, 2012, 14(3): 41~45. (in Chinese)

- 5 郝树荣, 郑姬, 冯远周, 等. 水稻拔节期水氮互作的后效性影响研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 92~96.  
Hao Shurong, Zheng Ji, Feng Yuanzhou, et al. After effects of water-nitrogen interaction on rice at jointing stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 92~96. (in Chinese)
- 6 Liu J H, Wang W B, Wang A Q, et al. Synthesis, characterization, and swelling behaviors of chitosan-g-poly (acrylic acid)/poly (vinyl alcohol) semi-IPN super absorbent hydrogels[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22(5): 627~634.
- 7 杨永辉, 吴普特, 武继承, 等. 复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 116~123.  
Yang Yonghui, Wu Pute, Wu Jicheng, et al. Response of photosynthetic parameters of winter wheat before and after re-watering to different rates of water-retaining agent[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 116~123. (in Chinese)
- 8 李茂松, 李森, 张述义, 等. 灌浆期喷施新型 FA 抗蒸腾剂对冬小麦的生理调节作用研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(4): 703~708.  
Li Maosong, Li Sen, Zhang Shuyi, et al. Physiological effect of new FA antitranspirant on winter wheat at ear filling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(4): 703~708. (in Chinese)
- 9 王永敏, 李俊颖, 王定勇, 等. PAM 对潮土水稳性团聚体的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 297~299.  
Wang Yongmin, Li Junying, Wang Dingyong, et al. Effect of PAM on soil water stable aggregates in alluvial soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 297~299. (in Chinese)
- 10 Laird D A. Bonding between polyacrylamide and clay mineral surfaces[J]. Soil Science, 1997, 162(11): 826~832.
- 11 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 Renkuan, Yang Peiling, Ren Shumei. 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. (in Chinese)
- 12 Peuravuori J, Žbáňková P, Pihlaja K. Aspects of structural features in lignite and lignite humic acids[J]. Fuel Processing Technology, 2006, 87(9): 829~839.
- 13 Abbt Braun G, Lankes U, Frimmel F H. Structural characterization of aquatic humic substances, the need for a multiple method approach[J]. Aquatic Science, 2004, 66(2): 151~153.
- 14 Anjum S A, Wang L, Farooq M, et al. Fulvic acid application improves the maize performance under well-watered and drought conditions[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2011, 197(6): 409~417.
- 15 Green V S, Stott D E, Norton L D, et al. Polyacrylamide molecular weight and charge effects on infiltration under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1786~1791.
- 16 陈渠昌, 雷廷武, 李瑞平, 等. PAM 对坡地降雨径流入渗和水力侵蚀的影响研究[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1290~1296.  
Chen Quchang, Lei Tingwu, Li Ruiping, et al. The impacts of PAM on runoff/infiltration and water erosion from slope lands[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1290~1296. (in Chinese)
- 17 于健, 雷廷武, Shainberg I, 等. 不同 PAM 施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 38~44.  
Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Effects of different application methods of polyacrylamide (PAM) on soil infiltration and erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(7): 38~44. (in Chinese)
- 18 Mamedov A I, Wagner, L E, Huang C, et al. Polyacrylamide effects on aggregate and structure stability of soils with different clay mineralogy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(5): 1720~1732.
- 19 Shainberg I, Goldstein D, Mamedov A I, et al. Granular and dissolved polyacrylamide effects on hydraulic conductivity of a fine sand and a silt loam[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(3): 1090~1098.
- 20 白文波, 宋吉青, 李茂松, 等. 保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 18~23.  
Bai Wenbo, Song Jiqing, Li Maosong, et al. Effect of super absorbent polymer on vertical infiltration characteristics of soil water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 18~23. (in Chinese)
- 21 Asghar A, Samad Y A, Hashaikeh R. Cellulose/PEO blends with enhanced water absorption and retention functionality[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125(3): 2121~2127.
- 22 李世坤, 毛小云, 廖宗文, 等. 复合保水剂的水肥调控模拟及其肥效研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 112~116.  
Li Shikun, Mao Xiaoyun, Liao Zongwen, et al. Study on water-fertilizer controlling effect and efficiency of complex super absorbent polymers in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 112~116. (in Chinese)
- 23 司东霞, 曹一平, 陈清, 等. 黄瓜生育前期的根际水氮调控[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 87~91.  
Si Dongxia, Cao Yiping, Chen Qing, et al. Rhizosphere water and nitrogen regulation in early growth stage of cucumber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(6): 87~91. (in Chinese)
- 24 Bakass M, Mokhlisse A, Lallemand M. Absorption and desorption of liquid water by a super absorbent polymer: effect of polymer in the drying of the soil and the quality of certain plants[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 83(2): 234~243.
- 25 Yu J, Shainberg I, Yan Y L, et al. Superabsorbents and semiarid soil properties affecting water absorption[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6): 2305~2313.

- 26 Zhan F L, Liu M Z, Guo M Y, et al. Preparation of super absorbent polymer with slow-release phosphate fertilizer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(5): 3 417 ~ 3 421.
- 27 Ni B L, Liu M Z, Lü S Y, et al. Multifunctional slow-release urea fertilizer from ethylcellulose and super absorbent coated formulations[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3): 892 ~ 898.
- 28 毛小云, 李世坤, 廖宗文, 等. 有机-无机复合保水肥料的保水保肥效果研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 45 ~ 48. Mao Xiaoyun, Li Shikun, Liao Zongwen, et al. Water and fertilizer retaining effects of organic-inorganic composite water-retained fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 45 ~ 48. (in Chinese)
- 29 Zhong K, Zheng X L, Mao X Y, et al. Sugarcane bagasse derivative-based super absorbent containing phosphate rock with water-fertilizer integration[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(2): 820 ~ 826.
- 30 Erro J, Zamarreño A M, Garcia-Mina J M, et al. Comparison of different phosphorus-fertiliser matrices to induce the recovery of phosphorus-deficient maize plants [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(6): 927 ~ 934.
- 31 岳征文, 王百田, 王红柳, 等. 复合营养长效保肥保水剂应用及其缓释节肥效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 56 ~ 62. Yue Zhengwen, Wang Baitian, Wang Hongliu, et al. Application of nutrient and super absorbent polymer compound and effect of fertilizer slow-release[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(8): 56 ~ 62. (in Chinese)
- 32 于健, 雷廷武, Shainberg I, 等. PAM 特性对砂壤土入渗及土壤侵蚀的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 21 ~ 27. Yu Jian, Lei Tingwu, Shainberg I, et al. Effects of molecular weight and degree of hydrolysis of PAM on infiltration and erosion of sandy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 21 ~ 27. (in Chinese)
- 33 韩凤朋, 郑纪勇, 李占斌, 等. PAM 对土壤物理性状以及水分分布的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 70 ~ 74. Han Fengpeng, Zheng Jiyong, Li Zhanbin, et al. Effect of PAM on soil physical properties and water distribution [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4): 70 ~ 74. (in Chinese)
- 34 Wang A P, Li F H, Yang S M. Effect of polyacrylamide application on runoff, erosion, and soil nutrient loss under simulated rainfall[J]. Pedosphere, 2011, 21(5): 628 ~ 638.
- 35 刘纪根, 雷廷武, 蔡强国, 等. 施加聚丙烯酰胺后坡长对侵蚀产沙过程的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 57 ~ 61. Liu Jigen, Lei Tingwu, Cai Qiangguo. Experimental study on impacts of slope length treated with polyacrylamide on sediment yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(1): 57 ~ 61. (in Chinese)
- 36 唐泽军, 雷廷武, 赵小勇, 等. PAM 改善黄土水土环境及对玉米生长影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 216 ~ 219. Tang Zejun, Lei Tingwu, Zhao Xiaoyong, et al. Impacts of polyacrylamide application on soil water status of loess and the growth of corn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(4): 216 ~ 219. (in Chinese)
- 37 Yu J, Lei T W, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 630 ~ 636.
- 38 崔海英, 任树梅, 杨培岭, 等. PAM 和石膏对坡地水分入渗及土壤流失的影响[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(4): 53 ~ 55. Cui Haiying, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Effects of polyacrylamide and gypsum on rainfall infiltration and soil erosion of slope land[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(4): 53 ~ 55. (in Chinese)
- 39 杨凯, 唐泽军, 赵智, 等. 粉煤灰和聚丙烯酰胺固沙效果的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 54 ~ 59. Yang Kai, Tang Zejun, Zhao Zhi, et al. Wind tunnel experimental study on sand-fixing effect of fly ash and polyacrylamide[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 54 ~ 59. (in Chinese)
- 40 江韬, 邓丽莉, 魏世强, 等. 聚丙烯酰胺与强化剂联用对土-水界面磷素迁移的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 473 ~ 482. Jiang Tao, Deng Lili, Wei Shiqiang, et al. Effect of combined application of polyacrylamide and enhancers on phosphorus mobilization on soil-water interface in purple soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 473 ~ 482. (in Chinese)
- 41 张翠翠, 刘松涛, 郭书荣, 等. 保水剂对土壤和棉花根系生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 487 ~ 490. Zhang Cuicui, Liu Songtao, Guo Shurong, et al. Effect of water retaining agent on soil and growth and development of cotton root [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 487 ~ 490. (in Chinese)
- 42 杨永辉, 武继承, 吴普特, 等. 保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 73 ~ 78. Yang Yonghui, Wu Jicheng, Wu Pute, et al. Effects of different application rates of water-retaining agent on root physiological characteristics of winter wheat at its different growth stages[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 73 ~ 78. (in Chinese)
- 43 Zhou B, Liao R K, Li Y K, et al. Water-absorption characteristics of organic-inorganic composite super absorbent polymers and its effect on summer maize root growth[J]. Journal of Applied Polymer Science. 2012, 126(2): 423 ~ 435.
- 44 庄文化, 吴普特, 冯浩, 等. 土壤中施用聚丙烯酸钠保水剂对冬小麦生长及产量影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 37 ~ 41. Zhuang Wenhua, Wu Pute, Feng Hao, et al. Effects of super absorbent polymer of sodium polyacrylate used in soil on the growth and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(5): 37 ~ 41. (in Chinese)

Chinese)

- 45 俞满源, 黄占斌, 方锋, 等. 保水剂、氮肥及其交互作用对马铃薯生长和产量的效应[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(3): 15~19.  
Yu Manyuan, Huang Zhanbin, Fang Feng, et al. Response of aquasorb, fertilizer and their interaction to growth and yield of potato[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(3): 15~19. (in Chinese)
- 46 刘方春, 马海林, 马丙尧, 等. 容器基质育苗中保水剂对白蜡生长及养分和干物质积累的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 62~68.  
Liu Fangchun, Ma Hailin, Ma Bingyao, et al. Effect of super absorbent polymer on container seedling growth of fraxinus chinensis and the nutrient and dry matter accumulation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(9): 62~68. (in Chinese)
- 47 黄震, 黄占斌, 李文颖, 等. 不同保水剂对土壤水分和氮素保持的比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 245~249.  
Huang Zhen, Huang Zhanbin, Li Wenying, et al. Effect of different super absorbent polymers on soil moisture and soil nitrogen holding capacity[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 245~249. (in Chinese)
- 48 宫辛玲, 刘作新, 尹光华, 等. 土壤保水剂与氮肥的互作效应研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 50~54.  
Gong Xinling, Liu Zuoxin, Yin Guanghua, et al. Interactive effects of super absorbent polymer and nitrogenous fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(1): 50~54. (in Chinese)
- 49 张富仓, 李继成, 雷艳, 等. 保水剂对土壤保水持肥特性的影响研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(1): 120~128.  
Zhang Fucang, Li Jicheng, Lei Yan, et al. Effects of super absorbent polymer on retention properties of soil water and nutrient [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(1): 120~128. (in Chinese)
- 50 Li Y K, Xu T W, Ouyang Z Y, et al. Micromorphology of macromolecular super absorbent polymer and its fractal characteristics [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113(6): 3 510~3 519.
- 51 Mohammad S, Hossein H. Synthesis of starch-poly (sodium acrylate-co-acrylamide) super absorbent hydrogel with salt and pH-responsiveness properties as a drug delivery system[J]. Journal of Bioactive and Compatible Polymers, 2008, 23(4): 381~404.
- 52 李仙岳, 杨培岭, 任树梅, 等. 高含砾土壤中保水剂对杏树蒸腾及果实品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 78~81.  
Li Xianyue, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Effects of super absorbent polymer on transpiration and fruit quality of apricot in soil with high gravel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 78~81. (in Chinese)
- 53 白文波, 王春艳, 李茂松, 等. 不同灌溉条件下保水剂对新疆棉花生长及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 69~76.  
Bai Wenbo, Wang Chunyan, Li Maosong, et al. Effects of super absorbent polymer on growth and yield of cotton under different irrigation conditions in Xinjiang Uyghur Autonomous Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(10): 69~76. (in Chinese)
- 54 吴娜, 赵宝平, 曾昭海, 等. 两种灌溉方式下保水剂用量对裸燕麦产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(8): 1 552~1 557.  
Wu Na, Zhao Baoping, Zeng Zhaohai, et al. Effects of super absorbent polymer application rate on yield and quality of naked oat (*Avena nuda* L.) in two irrigation systems[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(8): 1 552~1 557. (in Chinese)
- 55 韩玉国, 任树梅, 李云开, 等. 黄腐酸 FA 旱地龙在苹果节水生产中的应用效果研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 93~97.  
Han Yuguo, Ren Shumei, Li Yunkai, et al. Experimental study on effect of FA Handilong on water saving and production of apple tree in the rural areas in Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 93~97. (in Chinese)
- 56 周莉娜, 孙丽蓉, 毛晖, 等. 黄腐酸抗旱营养剂对小麦和玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 154~158.  
Zhou Li'na, Sun Lirong, Mao Hui, et al. Effects of drought-resistant fulvic acid liquid fertilizer on wheat and maize growth[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 154~158. (in Chinese)
- 57 师长海, 孔少华, 翟红梅, 等. 喷施抗蒸腾剂对冬小麦旗叶蒸腾效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1 091~1 095.  
Shi Changhai, Kong Shaohua, Zhai Hongmei, et al. Effect of plant film-forming anti-transpirant on transpiration efficiency of winter wheat flag-leaf[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2011, 19(5): 1 091~1 095. (in Chinese)
- 58 李茂松, 李森, 张述义, 等. 一种新型 FA 抗蒸腾剂对春玉米生理调节作用的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(11): 1 266~1 271.  
Li Maosong, Li sen, Zhang Shuyi, et al. Physiological effect of a new FA antitranspirant on maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(11): 1 266~1 271. (in Chinese)