

# Current Status and Progress of Bidirectional Regulation of Nutrient Slow Release and Accelerated Release

Shikun Li<sup>1</sup>, Zongwen Liao<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Guangdong Runtian Fertilizer Co., Ltd., Xinxing Guangdong

<sup>2</sup>School of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong  
Email: <sup>1</sup>lishikunnn@sohu.com

Received: Sep. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

This paper briefly expounds that the shortage of water resources and the low utilization rate of fertilizer are two important factors that restrict the sustainable development of agriculture in China. The research on slow/controlled release fertilizer, water retaining agent and the compound technology of water retaining agent to fertilizer at home and abroad are emphatically expounded. The advantages of water retaining agent and the prospect and direction of industrialization development of bidirectional control of fertilizer in China are discussed.

## Keywords

Nutrient, Release, Accelerated Release, Bidirectional Regulation, Prospect and Direction

---

# 养分缓释促释的双向调控研究现状和进展

李世坤<sup>1</sup>, 廖宗文<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>广东润田肥业有限公司, 广东 新兴

<sup>2</sup>华南农业大学资源与环境学院, 广东 广州  
Email: <sup>1</sup>lishikunnn@sohu.com

收稿日期: 2019年9月7日; 录用日期: 2019年9月18日; 发布日期: 2019年9月25日

---

\*通讯作者。

## 摘要

本文简要阐述水资源不足和肥料利用率低是制约我国农业可持续发展的两个重要因素。对国内外缓/控释肥研究、保水剂以及保水剂对肥料的复合技术研究进行了重点阐述, 论述了应用保水剂的优点及国内肥料双向调控的产业化发展前景和方向。

## 关键词

养分, 缓释, 促释, 双向调控, 前景和方向

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

联合国粮农组织(FAO)统计表明, 在提高作物单产中, 化肥所起的作用占 40%~60%。但大量研究表明, 发达国家氮肥利用率为 40%~60%, 磷肥为 10%~20%, 钾肥为 50%~60%。我国研究表明, 氮肥当季利用率为 30%~40%, 磷肥为 10%~20%, 钾肥为 35%~50%。每年损失的氮量相当于 1900 多万 t 的尿素, 折合人民币 380 多亿元[1] [2] [3]。

然而, 常规化肥的损失不仅是肥料资源的损失, 更为严重的是损失的肥料已经给我们的生存环境和生态环境造成了不良后果。氮肥以硝酸盐淋失损失和径流损失到地下水和地表水, 造成地下饮用水污染, 进而影响人类健康[4] [5] [6]。磷肥更易引起江河湖海水质富营养化。

因此, 提高肥料利用率、减轻或免除肥料污染, 发展持续、高效农业是各国共同关注的问题。

提高肥料利用率有两大途径: 一是改进施肥技术, 强调因气候、土壤、作物特性不同而采用不同的施肥方法、施肥时间、施肥量等; 二是研制新型肥料, 着眼点是实现对肥料养分释放的调控。缓/控释肥料近年来成为肥料创新研究和技术革新的热点, 得到了世界许多国家普遍重视[7] [8] [9] [10]。

控释肥料是一种同时调控不同元素比例的静态平衡和供肥过程动态平衡的技术载体, 即把平衡施肥的概念主要是动态平衡的概念运用于肥料生产中, 根据作物不同时期的需肥量来调节其养分释放速率的肥料。它是一种调节养分释放速度的新型肥料, 其养分释放速度可以通过物理、化学及生物技术手段来调控, 实现促释或缓释的双向调节, 使肥料中营养元素的供应与作物对养分的需求基本同步, 实现动态平衡[11] [12]。

在农业生产中, 除了肥料是重要的影响因素和投入外, 水分也是农业生产极为关键因素, 正如农谚所曰“有收无收在于水, 收多收少在于肥”。因此, 在农业生产中水分是研究和农田管理中极为关心的因素和措施。

我国就是一个水资源相对贫乏的国家, 人均水资源占有量仅为 2300 m<sup>3</sup>, 约为世界人均水量的 1/4, 被列为世界第 13 个贫水国。单位耕地面积占有水量仅为 19,500 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>, 仅为世界平均的 1/2 (中国农业可持续发展会报告)。我国农业是用水大户, 农业用水占用水总量的 80%, 由于各种因素的制约, 我国农业灌溉水的利用率仅为 40%左右, 仅为发达国家的 40%~50%。在灌溉水的生产效率方面, 我国与发达国家相比差距更大, 目前国际上先进的节水农业技术, 每立方米水生产粮食已超过 2 kg, 而我国不足 1 kg [13] [14]。因此, 发展节水农业不仅是缓解我国水资源紧缺矛盾的重要任务, 也是我国农业社会经济和农业可

持续发展的重要战略选择。

多年来,我国在旱地农业和节水农业取得了可喜的成就,从理论到技术方面都取得了成功的经验。水肥耦合调控技术就是通过对土壤肥力的测定,建立以水、肥、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”,充分发挥水肥协同效应,从而提高作物抗旱能力和水、肥利用效率,可在不增加施肥量和灌溉水的条件下获得较大的经济效益,并改善生态环境[15]。无论是旱地农业、还是灌溉农业,作物生产都需依赖水肥关系的协调发挥。因此,水肥的协调供应对作物增产起着极大的促进作用。水肥耦合调控技术总结了我国北方旱地农业 20 余年研究经验得出的水肥互作科学结论。

在旱地农业中发展起来的节水保墒技术也是节水农业的重要节水技术,而近年来迅速发展起来的高吸水树脂(Super water absorbent polymer)在农业上的应用,形成了一个重要的化学节水保墒技术。高吸水树脂是能够吸收自身重量百倍至千倍以上水分的高分子聚合物,同时高吸水树脂还能够吸附一定量的养分。国内外研究表明,保水剂和肥料合用能够促进植物对一些养分的吸收[16][17]。保水剂能够起到延缓养分释放的作用[18][19]。这些研究为保水剂和肥料奠定了基础。

## 2. 国内、外研究现状

### 2.1. 国内外缓/控释肥研究现状

缓/控释肥的发展历史可追溯到 20 世纪中期,自从 1948 年美国的 K. G. Clart 等人合了世界上第一个缓释缩合肥料尿素-甲醛后,日本、德国、英国等发达国家也相继开展了缓/控释肥料的研究和应用[20]。目前,美国和日本在控释肥的研究和应用领域均居世界领先地位。以聚合物包膜的控释肥悄然升起并迅速发展。从全球缓/控释肥料生产现状看,已成功实现工业化生产的缓控释肥料品种主要为脲甲醛、草酰胺(化学合成型)、硫衣包膜尿素及聚合物包膜肥料。

中国最早于 20 世纪 70 年代初期开始研究,国内在李庆逵主持下研究了磷矿粉包裹碳酸氢铵,但未能产业化。这以后,又有北京农科院和郑州工业大学等开展了这方面的研究。80 年代广州氮肥厂研制成功涂层尿素并在全国推广,九十年代与华南农业大学合作对磷铵和复合肥进行包膜及混合控释研究,取得中试成功。

80 年代郑州工业大学开发成功包裹型复合肥 Luxecote 及 Luxuriance,90 年代该产品有了较大地发展,产品出口到美国、澳大利亚等国[21]。华南农业大学新肥料资源研究中心利用工农业废弃物和矿物制备包膜和非包膜缓释和促释控释肥料已经进行工厂中试,并取得中试和田间试验成功。

在控释肥应用方面,1989 年以来,控释肥料的消费量平均年递增 4.0%。2000 年美国,西欧和日本控释肥料的消费量达 61.5 万吨。美国、西欧控释肥料的非农业市场占主导地位,大部分控释肥料使用到特种观赏园艺植物;而日本主要消费在蔬菜和水稻上[22]。而我国在蔬菜和草坪等植物上的应用仅限于研究性及示范性[23][24],没有出现大面积的推广使用,原因是价格高,难以被农民接受。

目前缓/控释肥料应用主要在非农业方面,即经济作物和高尔夫球场,主要原因为:一是缓/控释肥料成本高,主要是缓/控释材料价格高;二是缓/控释肥料的控释材料功能单一,仅限于控制养分的释放,如普通树脂和塑料只控制养分的释放时段,不具有附加功能;三是缓/控释肥料在土壤含水量低于田间持水量 35%~40%时,其养分释放受到严重影响,使得肥料效应因土壤水分储备不足而难以发挥,从而制约缓/控释肥料的应用。

### 2.2. 控释肥的缓释与促释的双向控释研究

目前缓/控释肥在国内外已经进行了几十年的研究、生产和应用,但是,大多数产品属于缓释和长效

肥的范畴, 着眼点主要是在缓释方向上, 即把速溶性肥料通过包膜和非包膜的方式来调控养分释放的模式(释放速率和释放时间)与作物吸收养分的规律相一致。控释途径多为包膜型和非包膜型物理控释, 而肥料则多集中在尿素、磷铵等速溶性肥料的控释研究[25], 对钾和枸溶性磷的研究还处于起步阶段。

包膜控释肥主要是通过物理包裹达到养分缓释目的, 而非包膜控释肥则是通过添加阻溶物质、抑制剂以及对养分吸持和其它非包裹机制控制养分的释放。国外包膜肥一般都用人工合成的高分子聚合物作为包膜材料, 养分控释效果较好, 但成本高。华南农业大学新肥料资源研究中心采用工农业废弃物等有机物和经改性后的矿物等新材料以及用常规设备进行包膜, 在降本增效方面取得重要进展。

非包膜控释氮肥可分为化合型和混合型两大类。化合型氮肥均是通过化学合成作用, 其工艺过程需要复杂而昂贵的设备, 因而受到种种约束。混合型非包膜氮肥研究起步较晚, 现在研究较多的是非包膜控释尿素和碳铵等[26]。

养分调控的方向, 除了缓释外, 还有促释, 如磷矿粉、骨粉之类肥料, 释放速度太慢, 需要促进释放, 才能满足作物需求[27]。国外有学者[28]认为控释磷肥包括直接使用的磷矿粉以及烧制磷肥等。国外某些磷矿粉的直接施用已成规模, 摩洛哥磷矿粉直接施用的效果在世界上享有盛誉, 此外, 澳大利亚, 德国, 拉丁美洲的很多地方在适宜的土壤和气候条件下都有磷矿粉的直接施用[29]。而近几年提高磷矿粉直接利用效果的一个研究亮点就是用非金属材料以及工业生产的活性有机废料处理磷矿粉, 用有机、无机活化材料制备的改性磷矿粉在南方酸性土壤上已表现出明显的增产效果[30]。

利用活化剂活化(促释)磷矿粉制备改性磷肥则是直接利用磷矿粉的又一新思路。廖宗文等研制出了改性磷矿粉并从其矿物结构的变化及水溶性磷的增加等方面阐明了增效的机理。魏静等以沸石、膨润土、糠醛渣为活化剂, 研究了不同活化剂在含  $\text{Na}^+$  较高的盐化潮土中对磷矿粉的活化作用, 结果表明沸石产地不同对同一磷矿粉的增效作用不同, 且沸石对磷矿粉的活化作用随土壤性质而异, 膨润土作为活化剂也可促进磷矿粉中磷的释放。膨润土与磷矿粉充分混匀接触, 在一定的水分、温度条件下, 磷矿粉中的  $\text{Ca}^{2+}$  被代换吸附, 充填在膨润土晶层间隙中, 使其周围出现一个低钙的环境, 有利于磷矿粉的溶解。廖宗文等证明了沸石与膨润土对磷矿粉有增效作用[31]。李淑仪等在沙田柚上施用有机活化剂的研究表明, 采用活化技术可使磷矿粉的肥效超过过磷酸钙和钙镁磷肥[32]。

目前国内外对磷矿粉进行活化的研究报道甚少, 在摸索配方和效果方面的初步工作, 已显示出较好的效果, 但对其结构和性能要深入研究, 十一五支撑计划中, 已把促释列为重要技术内容, 这表明促释技术的重要性已受到重视, 成为控释肥研究中的新领域, 今后将有较大的发展。

### 3. 保水剂研究现状和进展

保水剂种类繁多, 可按原料来源、亲水基团的种类、交联方法、制品形态等进行分类。目前国内的保水剂共分为两大类, 一类是丙烯酰胺-丙烯酸盐共聚交联物(聚丙烯酰胺、聚丙烯酸钠、聚丙烯酸钾、聚丙烯酸铵等); 另一类是淀粉接枝丙烯酸盐共聚交联物(淀粉接枝丙烯酸盐) [33]。

聚丙烯酰胺-聚丙烯酰胺呈白色颗粒晶体状, 主要成分为: 丙烯酰胺 65%~66% + 丙烯酸钾 23%~24% + 水 8%~10% + 交联剂 0.5%~1.0%。在国际上, 法国、德国、日本、美国和比利时等国所生产的保水剂大多属于这类成分的产品。该产品的特点是: 使用周期和寿命较长, 在土壤中的蓄水保墒能力可维持 4 年左右, 但其吸水能力会逐年降低。据黄土区造林试验观察, 使用该类保水剂造林后的当年, 其吸水倍率维持在 100~120 倍, 第二年吸水倍率降低 20%~30%, 第三年降低约 40%~50%, 第四年降低更多。

聚丙烯酸钠-聚丙烯酸钠为白色或浅灰色颗粒状晶体, 主要成分有: 聚丙烯酸钠 88% (其中含钠 24.5%) + 水 8%~10% + 交联剂 0.5%~1.0%。国内生产的保水剂大多是这种成分的产品。其主要特点是: 吸水倍率高, 吸水速度快, 但保水性能只能保持 2 年有效。据造林试验观测, 这类产品的吸水能力和吸



水速率明显高于聚丙烯酰胺产品, 在土壤中如遇充分给水, 0.5~1.0 小时后便迅速吸收自重的 130~140 倍的水分; 但第二年的吸水倍率要降低约 60%左右。由于聚丙烯酸钠会造成土壤中钠离子含量的递增, 林业和农业用保水剂的生产厂家大多改为生产聚丙烯酸钾或聚丙烯酸铵。

淀粉接枝丙烯酸盐 - 淀粉接枝丙烯酸盐为白色或淡黄色颗粒状晶体, 主要成分为: 淀粉 18%~27% + 丙烯酸盐 62%~71% + 水 10% + 交联剂 0.5%~1.0%。这种产品在用于造林地蓄水保墒时, 使用寿命一般只能维持 1 年多的时间, 但吸水倍率和吸水速度等性状极佳。据实验室对黄土浸提液的吸水对比试验, 该类保水剂在遇水后的 15~20 分钟内即可吸收自重 150~160 倍的水分[34]。

超强吸水性树脂的出现是 1961 年美国农业部北方研究所 C. R. Russell 等从淀粉接枝丙烯腈开始研究, 其后 G. F. Fanta 等接着研究。60 年代末至 70 年代, 美国、日本等相继成功地开发了高吸水性树脂。此后, 世界各国对超强吸水剂品种、创造方法、性能和应用领域等方面进行了大量的研究工作, 取得了成果。其中成效最大的是美国和日本。上世纪 80 年代以来, 我国保水剂的研究和开发有了较快的发展, 全国有 50 多个单位进行过保水剂的研制和开发。但是, 我国保水剂研究滞后于日、美等发达国家[35] [36]。

超强吸水剂合成研究的发展推动了其应用研究的开展。1973 年美国 UCC 公司开始应用于农业方面, 如土壤保水, 随后应用于农林园艺中的土壤保水, 苗木培育及移栽运输、种子包衣等方面。日本、法国等也在开展吸水剂的应用研究, 如法国已制造了一种“水合土” [37], 吸水能力达 200 倍, 用于沙漠。我国也在保水剂的农业应用方面进行了许多推广示范[38]。目前, 保水剂材料主要消费在卫生巾, 婴儿一次性尿布及石油开采方面。但是, 由于保水剂有改善土壤物理、化学性质, 提高种子出苗发芽和出苗, 增加作物小苗存活率, 降低灌溉需求次数及提高养分利用率的作用[39], 因此, 保水剂在农业领域应用具有很大的市场潜力。近年来, 人们发现保水剂对肥料养分具有缓释作用[40], 因此, 保水剂和肥料结合为保水剂的应用开辟了新的领域, 也为缓/控释肥料提出了新的控释机制。

#### 4. 保水剂和肥料复合技术研究现状

由于常规肥料水溶性高, 养分释放快, 释放期短, 一次施肥法的肥料养分释放期及强度通常与作物养分吸收期及强度不相吻合, 释放的养分不能及时吸收利用, 肥料养分损失很大, 肥料养分利用率低。分次施肥虽可避免一次施肥法的问题, 改善作物不同生育期肥料养分的供应, 但对于现代化农业来说, 分次施肥繁琐而成木高。近年来研究开发的缓/控释肥料采用各种机制对常规肥料水溶性进行控制, 有效地延缓或控制肥料养分释放, 使肥料养分释放期及强度与作物养分吸收规律基本吻合, 极大地降低肥料养分损失, 提高了肥料养分利用率[8] [41]。然而, 肥料肥效的发挥还取决于土壤水分含量及有效性。研究表明: 水、肥之间存在着交互效应, “以水促肥, 以肥调水”, 是农业重要的水、肥调控技术[42]。农业上“以肥调水”中的“肥”可以通过培肥土壤, 也可以通过施肥来实现对土壤水分的调控利用。然而, 日前的常规肥料和缓/控释肥料不具有吸水保水功能。为了进一步促进肥、水一体化, 提高水肥生产效率, 将保水剂保水功能、控制释放技术通过工艺技术物化于肥料中, 也就是说把肥料作为水肥一体化的技术载体。研究开发保水缓/控释肥料对于节水农业意义重大。

保水剂除了能吸水保水外, 在一定条件下还能够吸附或活化肥料养分。因此, 将保水剂与肥料结合, 用来研制新型缓/控释肥料是肥料创新和发展的新方向。保水剂与肥料混用及互作研究开展的较早, 国外在上世纪 70 年代就保水剂对肥料效应的影响进行过研究[43]。

目前, 保水剂和肥料养分的一体化使用方式为 1) 简单的物理性混合, 例如使聚合物在肥料溶液中成为水合物, 即制备成富营养保水剂溶胶肥[18]; 2) 用聚合物包覆可溶性肥料, 即利用保水剂材料包裹常规肥料, 制成保水剂包膜肥料[44]; 3) 采用化学合成的方法, 使肥料养分成为聚合物分子本身的一个组成部分, 即制成既具有保水功能, 又具有肥料作用的双重功能缓/控释肥料[39]。用保水剂包覆可溶性肥

料颗粒制成保水型缓/控释肥料及化学合成保水型缓/控释肥料已显示出良好的发展前景。

有关肥料与保水剂一体化结合工艺的研究较多研究侧重于将肥料溶液和保水剂混合,使保水剂在肥料溶液中形成水合物,这种肥料保水剂混合体系为黏稠状态。Mikkelsen 等[18]将保水剂加在硝酸铵-尿素溶液中使用。卢其明[45]研究了利用保水剂和无机矿物复合后作用于尿素等肥料,取得了较好的控释效果。

使肥料养分成为保水剂材料分子本身的一个组分的研究报告很少,这种工艺是通过化学合成的方法将养分元素引入到保水剂分子中。从保水剂本身分子构成来看,有的保水剂不含矿质养分,如聚乙烯醇、淀粉接枝聚乙烯醇、聚甲基纤维素等。有的即使含有养分元素,但并不能认为其是有营养效应的养分,如聚丙烯酰胺、淀粉接枝丙烯腈中的氮,即使有效,由于其施用量低,所带入氮素的肥效作用也可能不大。

用保水剂作为肥料的包膜材料,制备保水型缓/控释肥料是一个有研发前景的技术。Abraham 和 Pillai [19]研究了用交联聚丙烯酰胺包裹尿素,醋酸乙烯酯做密封剂的包膜肥料养分控释性能,试验结果表明交联聚丙烯酰胺包膜 + 醋酸乙烯酯密封膜的包膜肥料具有良好的养分缓释性。已有杜建军[44]用尿素颗粒为内核,保水剂材料做外膜,通过物理涂覆制备保水剂包膜尿素具有保水及养分缓释作用。

目前为止,保水控释肥无论包膜与非包膜,均为缓释方向,均为对速溶养分的释放的控制。对于迟效养分如磷矿粉中的 Ca-P 的促进释放,是否可以通过保水剂得以实现?则是很有意义而尚待探索的新途径。

## 5. 复合保水剂产业化发展前景和方向

从保水剂的保肥功能入手,围绕肥料的控释这一中心,把保水剂作为一种控释材料应用,既能保水,又能保肥,既可缓释,又可促释,使之成为水肥一体化调控的载体,为控释技术开拓新方向,又为保水剂开拓新的应用方式和应用领域。

保水剂具有较强的蓄水保肥特性,但由于保水剂成本较高,耐盐性差的特点,使其不能大规模的推广。因此,降低保水剂的生产成本,同时提高保水剂的耐盐性能,在保水的同时,还能够对氮肥(尿素)起到缓释,对磷肥(PR)起到促释的双向调控,从而达到水肥一体化调控的目的。

## 6. 结语

在农业生产中,由于施肥不当和肥料利用率不高等原因,造成一定的经济损失和对环境的污染。同时由于我国水资源缺乏,研制具有集保水、缓释和促释功能的肥料已经被人们所接受,正成为目前市场接受度较高的产品。通过缓释能够有效控制养分释放速度,延长肥效期,满足作物整个生育期对养分的需要;通过促释可以快速释放低品位磷矿中的有效磷含量,最大限度提高肥料利用率,同时可以发挥保水剂的蓄水、保水和节水功能,提高施肥的经济效益、社会效益和环境效益。鉴于农业生产和环境保护的需要及国内外研究现状,从降低成本、易于加工和提高肥效等方面考虑,结合保水剂的功能特性,筛选保水材料,进行肥效释放工艺研究,开发缓释促释双向调控的专用肥料将是今后的研究趋势。

## 参考文献

- [1] 林葆,李家康. 当前我国化肥的若干问题和对策[J]. 磷肥与复肥, 1997, 1997(2): 1-5.
- [2] 李庆逵,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌:江西出版社,1998: 1-5.
- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1-6.
- [4] Keeney, D. (1983) Sources of Nitrate to Ground Water. *CRC Critical Reviews in Environmental Control*, **16**, 257-304. <https://doi.org/10.1080/10643388609381748>
- [5] Hallberg, G.R. (1987) Agricultural Chemicals in Ground Water: Extent and Implications. *America Journal of Alterna-*

- tive Agriculture*, 2, 3-15. <https://doi.org/10.1017/S0889189300001405>
- [6] Kumazawa, K. (2002) Nitrogen Fertilization and for Sustainable Agriculture Nitrate Pollution in Groundwater in Japan: Present Status and Measures for Sustainable Agriculture. *Nutrient Cycling in Agro Ecosystems*, 63, 129-137. <https://doi.org/10.1023/A:1021198721003>
- [7] Shaviv, A. (2000) Advances in Controlled Release of Fertilizers. *Advances in Agronomy*, 71, 1-49. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(01\)71011-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(01)71011-5)
- [8] 何绪生, 李素霞, 李旭辉, 等. 控效肥料的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(2): 97-106.
- [9] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释控制释放肥料专题报告: 第二报, 世界缓释控制释放肥料生产、消费现状[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(4): 5-7.
- [10] 张民, 史衍玺, 杨守祥, 等. 控释和缓释肥的研究现状与进展[J]. 化肥工业, 2001, 28(5): 27-30, 63.
- [11] 廖宗文, 刘可星, 王德汉, 等. 发展中国特色的控释肥[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(4): 71-75.
- [12] 廖宗文, 杜建军, 宋波, 等. 肥料养分控释的技术、机理和质量评价[J]. 土壤通报, 2003, 34(2): 106-110.
- [13] 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: 298-301.
- [14] 李英能. 节水农业新技术[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 344-348.
- [15] 汪德水. 旱地农田肥水协同效应与藕合模式[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 1-44.
- [16] Taylor, K.C. and Halfacre, R.G. (1986) The Effect of Hydrophilic Polymer on Media Water Retention and Nutrient Availability to *Ligustrum lucidum*. *HortScience*, 21, 1159-1161.
- [17] Magalhaes, G.E., Wilcox, F.C., Rodrigues, F.L., et al. (1987) Plant Growth and Nutrient Uptake in Hydrophilic Gel Treated Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18, 1469-1478. <https://doi.org/10.1080/00103628709367911>
- [18] Mikkelsen, R.L., Behel Jr., A.D. and Williams, H.M. (1993) Addition of Gel-Forming-Hydrophilic Polymers to Nitrogen Fertilizer Solutions. *Fertilizer Research*, 36, 55-61. <https://doi.org/10.1007/BF00749948>
- [19] Abraham, J. and Pillai, V.N.R. (1995) N,N'-methylene Bisacrylamide-Crosslinked Polyacrylamide for Controlled Release Urea Fertilizer Formulations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 26, 3231-3241. <https://doi.org/10.1080/00103629509369523>
- [20] 陈强, 崔斌, 张逢星, 等. 缓释肥料的研究与进展[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2000, 20(3): 189-192.
- [21] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告: 第三报, 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展(续)3. 欧洲[J]. 磷肥与复肥, 2001, 16(2): 10-12.
- [22] 许秀成, 李荫萍, 王好斌. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告: 第三报, 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展(续)5. 以色列、印度、埃及等[J]. 磷肥与复肥, 2002, 17(1): 10-12.
- [23] 马军伟, 金福林, 叶静, 等. 水稻多功能控释肥料的施用效果[J]. 浙江农业科学, 2002(4): 184-185.
- [24] 黄云, 廖铁军, 向华辉. 控释氮肥对辣椒的生理效应及利用率研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 414-418.
- [25] 许秀成, 王好斌, 李荫萍. 包裹型缓释/控制释放肥料专题报告: 第三报, 包膜(包裹)型控制释放肥料各国研究进展 1. 美国、加拿大; 2. 日本[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(6): 7-12.
- [26] 尹洪斌, 石元亮. 控释肥料的研究现状与进展[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 422-425.
- [27] 毛小云, 吴平霄, 廖宗文. 几种改性磷肥肥效研究初报[J]. 土壤与环境, 1999, 8(4): 318-320.
- [28] Bolan, N.S., Hedley, M.J. and Loganathan, P. (1993) Preparation Forms and Properties of Controlled-Release Phosphate Fertilizers. *Nutrient Cycling in Agroecosystems (Historical Archive)*, 35, 13-24. <https://doi.org/10.1007/BF00750216>
- [29] Bolland, M.D.A. and Gilkes, R.J. (1991) Evaluation of Two Rock Phosphates and a Calcined Rock Phosphate as Maintenance Fertilizers for Crop-Pasture Rotations in Western Australia. *Nutrient Cycling in Agroeco Systems (Historical Archive)*, 1, 11-24. <https://doi.org/10.1007/BF01048851>
- [30] 郭荣发, 廖宗文, 陈爱珠. 活化磷矿粉在砖红壤上的施用效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(3): 233-235.
- [31] 吴平霄, 廖宗文. 高表面活性矿物——一类新型的控释材料[J]. 磷肥与复肥, 2000, 15(4): 62-63, 70.
- [32] 李淑仪, 廖新荣, 陈碧琛, 等. 沙田柚使用活化处理磷肥的效果研究[J]. 生态科学, 2001, 3(20): 63-69.
- [33] 王斌瑞, 贺康宁, 史常青. 保水剂在造林绿化中的应用[J]. 中国水土保持, 2000(4): 22-23.
- [34] 甘肃省科学技术厅. 退耕还林与林木培育技术[M]. 兰州: 甘肃人民出版社, 2001: 282-283.

- [35] 吴德瑜. 保水剂与农业[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1991: 1-3.
- [36] 杜太生, 康绍忠, 魏华. 保水剂在节水农业中的应用研究现状与展望[J]. 农业现代化研究, 2000, 21(5): 317-320.
- [37] 王晗生, 王青宁. 保水剂农用抗旱增效研究现状[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 38-45.
- [38] 高德玉, RB-海曼, B-托马斯, 等. 聚丙烯酰胺/蒙脱土复合材料结构研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2005, 21(4): 201-204.
- [39] Mikkelsen, R.L. (1994) Using Hydrophilic Polymers to Control Nutrient Release. *Fertilizer Research*, **38**, 53-59.  
<https://doi.org/10.1007/BF00750062>
- [40] Jacob, J. and Lawlor, D.W. (1993) In Vivo Photosynthetic Electron Transport Does Not Limit Photosynthetic Capacity in Phosphate-Deficient Sun Flower and Maize Leaves. *Plant, Cell and Environment*, **16**, 785-795.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00500.x>
- [41] 何绪生, 黄培钊, 廖宗文, 等. 保水缓释氮肥水分状态与吸持特性研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 10-15.
- [42] 李生秀, 李世清, 高亚军, 等. 施用氮肥对提高旱地作物利用土壤水分的作用机理和效果[J]. 干旱地区农业研究, 1994, 12(1): 38-46.
- [43] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥藕合模型[J]. 中国工程科学, 2002, 4(9): 69-74.
- [44] 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.
- [45] 卢其明. 聚合物/膨润土复合材料的研制及其水肥调控性能研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南农业大学, 2004: 50-55.