

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.030

保水剂吸释水分与养分动力学规律研究

魏琛琛¹ 廖人宽² 王瑜¹ 魏榕¹ 杨凤茹¹ 杨培岭¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 围绕保水剂吸收、释放水分和养分的性质,通过室内试验深入分析了3种粒径规格(0.8~1.6 mm、1.6~3.5 mm、3.5~5.0 mm)的保水剂在不同浓度(0.02、0.04、0.08 mol/L) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 养分溶液中反复吸释水分及养分的动力学规律。结果表明:保水剂吸水初始,吸水速率达到最大,随后逐渐减小并趋于溶胀平衡,吸水倍率与溶液浓度关系由大到小依次为0.02、0.04、0.08 mol/L,与粒径关系由大到小依次为1.6~3.5 mm、3.5~5.0 mm、0.8~1.6 mm,随吸水次数增多而减小。保水剂吸持水分的能力和每小时释水量随转速(土壤吸力)的增大不断减小,释水时保水率与溶液浓度关系由大到小依次为0.02、0.04、0.08 mol/L,与粒径关系由大到小依次为0.8~1.6 mm、3.5~5.0 mm、1.6~3.5 mm,离心次数对其影响不显著。保水剂释水时滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度随转速(土壤吸力)增大整体呈减小趋势,累积释放量与溶液浓度关系由大到小依次为0.08、0.04、0.02 mol/L,与粒径关系由大到小依次为1.6~3.5 mm、3.5~5.0 mm、0.8~1.6 mm,随离心次数增多而减少。相较其他粒径保水剂,1.6~3.5 mm 粒径保水剂在同样条件下吸收、释放较多水的同时,还能释放出更多养分子。

关键词: 保水剂; 粒径; 溶液浓度; 吸水/离心次数; 吸释水分/养分; 动力学规律

中图分类号: S156.2; TQ326.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0275-10

Kinetics Law of Absorption and Release of Water and Nutrients by Super Absorbent Polymers

WEI Chenchen¹ LIAO Renkuan² WANG Yu¹ WEI Rong¹ YANG Fengru¹ YANG Peiling¹

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

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: In agricultural production, the characteristics of water absorption and release of super absorbent polymers (SAP) are generally affected by soil solution and nutrient ions. The study on SAP of absorption and release of water and nutrients was mainly focused on through laboratory tests. These tests were used to investigate the kinetics of repeated absorption and release of water and nutrients in three particle sizes of SAP (0.8~1.6 mm, 1.6~3.5 mm and 3.5~5.0 mm) at different $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ concentrations (0.02 mol/L, 0.04 mol/L and 0.08 mol/L). The results indicated that the water absorption rate of SAP reached the maximum value initially, and then decreased gradually and finally tended to reach the swelling equilibrium state. The water absorbency was decreased with the increase of solution concentration while water absorbency under different particle sizes of SAP ranked as follows: 1.6~3.5 mm, 3.5~5.0 mm and 0.8~1.6 mm. Meanwhile, the water absorbency was decreased with the increase of water absorption times. The ability of SAP to absorb water and the amount of water released per hour were decreased with the increase of rotational speed (soil suction). The water retention rate was decreased with the increase of solution concentration when releasing water, while the water retention rate under different particle sizes of SAP ranked as follows: 0.8~1.6 mm, 3.5~5.0 mm and 1.6~3.5 mm. However, the influence of centrifugation times on water retention rate was not significant. The concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ of the released solution were decreased with the increase of rotational speed (soil suction). The cumulative amounts of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were increased with the

收稿日期: 2018-07-18 修回日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379210)

作者简介: 魏琛琛(1992—),男,博士生,主要从事化学节水与土壤碳氮循环研究,E-mail: weichenchen@cau.edu.cn

通信作者: 杨培岭(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: yangpeiling@126.com

increase of concentration of solution, while the cumulative amounts of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P under different particle sizes of SAP ranked as follows: 1.6 ~ 3.5 mm, 3.5 ~ 5.0 mm and 0.8 ~ 1.6 mm. The cumulative amounts of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P were decreased with the increase of centrifugation times. It can be concluded that the amount of water absorbing, releasing and nutrient releasing at particle size of 1.6 ~ 3.5 mm for SAP were much more than the other treatments.

Key words: super absorbent polymers; particle size; solution concentration; water absorption/centrifugation times; absorption/release water and nutrients; kinetics law

0 引言

在世界范围内,干旱胁迫造成的粮食减产可能超过了其他因素所导致产量损失的总和^[1]。我国旱地面积占全国总土地面积的 52.5%^[2],干旱是制约我国农业可持续发展的一个重要因素。近 10 年来,我国农业用水量均占全国总用水量的 60% 以上^[3],随着我国农业水危机的不断加剧,农业向高产、稳产的方向发展,应大力发展旱地农田节水保水技术,以充分利用有限的降水资源,保证农业生产的可持续发展。应用保水剂是一种有效的措施,可达到改土、节水、增产的目标,尤其在在我国北方旱作农业地区应大力推广。

保水剂是一种吸水能力很强的高分子材料,被誉为“微型水库”,能吸收相当于自身成百上千倍的水分,且能够反复吸水、缓慢地释放,供植物吸收利用,这些特性使保水剂在干旱时能够发挥功效,缓解旱情^[4-7]。在保水剂进行分子成键吸液和溶胀吸液的同时,溶液中的养分离子也会同时进入到其分子结构中被包裹固持,而后随着水分释放及分子网状结构松弛而被缓慢释放,起到了养分离子的缓释效应^[8]。

目前,有关保水剂在农业上的应用主要集中于新品种的研制以及自身物理化学特性与作用效果的研究^[9-11]。吸释水能力作为评判保水剂性能的重要指标,其多集中于对不同粒径、类型的保水剂在不同吸水溶液浓度溶胀特性与恒温状态下保水剂反复吸释水特性研究^[12-13]。已有学者证实,保水剂的粒径、溶液浓度、溶液 pH 值对其吸水能力有重要影响^[12,14-17],但粒径对保水剂吸水性能的影响,不同学者持有不同的观点;对于保水剂释水特性的研究主要关注其在恒温、恒压状态下反复释水的性能,但保水剂被施用于土壤后,更多可能是在土壤吸力的作用下完成释水的过程,目前对于保水剂在释水过程中释放的离子浓度与累积量的变化鲜有报道。因此,研究不同粒径保水剂在不同浓度溶液中反复溶胀吸水、释水时其自身的吸水、保水性能及养分释放能力的变化情况对选取适宜粒径保水剂在田间施用具有一定的研究意义。

针对目前研究的不足,本文通过室内试验,在离心机模拟土壤吸力条件下,研究 3 种不同粒径保水剂在不同浓度溶液中反复溶胀、离心过程中吸水倍率、离心保水率、释出离子浓度与累积量的变化过程,旨在为选取适宜粒径的保水剂应用于田间提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 4—6 月在中国农业大学水利与土木工程学院土壤物理与农作学实验室进行。采用北京汉力森新技术有限公司生产的保水剂,主要成分为交联聚丙烯酰胺,0.9% NaCl 吸收量小于等于 50 g/g。分别选用 0.8 ~ 1.6 mm、1.6 ~ 3.5 mm 和 3.5 ~ 5.0 mm 3 种粒径。测定保水剂吸水倍率溶液选用磷酸二氢胺($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$),选配溶液浓度分别为 0.02、0.04、0.08 mol/L。试验设置 4 个重复,分别测定不同时刻、不同粒径的保水剂在不同浓度的溶液中反复溶胀的吸水速率、吸水倍率、离心保水率与离心滤液浓度的变化过程。

1.2 测定内容与方法

1.2.1 吸水速率

吸水速率即保水剂累积吸水量曲线的斜率,是评价保水剂应用性能 and 是否快速吸水的一个重要指标。称取 1 g 保水剂 4 份,置于不同浓度的溶液中吸水静置,分别于 1、2、4、8、...、304 min 后在 100 目筛网中滤至无水滴滴出后称量。保水剂在不同时刻的吸水速率计算公式为

$$V_n = (m_{n+1} - m_n) / t_n \quad (1)$$

式中 V_n ——第 n 次取样时保水剂的吸水速率, g/s
 m_{n+1} ——第 $n+1$ 次取样时保水剂凝胶质量, g
 m_n ——第 n 次取样时保水剂凝胶质量, g
 t_n ——两次取样的时间间隔, s

1.2.2 吸水倍率

吸水倍率指保水剂达到吸水饱和时所吸收水的质量与初始保水剂质量的比值。将测定吸水速率后的保水剂继续在溶液中饱和 24 h 后取出,置于 100 目筛网中过滤至无水滴滴出后用电子天平称量(精度 0.01 g),保水剂吸水倍率计算公式^[18]为

$$Q = (m_2 - m_1) / m_1 \quad (2)$$

式中 Q ——吸水倍率, g/g

m_1 ——初始状态的保水剂质量, g

m_2 ——吸水饱和状态的保水剂质量, g

1.2.3 离心保水率

定义某转速离心一定时间后, 保水剂吸水量与其溶胀平衡时吸水量的比值为其离心保水率。称取各处理充分溶胀后的保水剂凝胶放置于离心盒中, 利用 CR22N 型高速离心机, 在 20℃ 恒温下, 分别在 1 000、2 000、…、11 000 r/min 的转速下各离心 1 h 后称量。为与保水剂在农业中实际应用情况结合, 将离心机转速 (r/min) 换算为土壤吸力 (cm)^[19], 计算公式为

$$h = \frac{\rho_w \omega^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2) \quad (3)$$

式中 h ——土壤吸力 (压力水头), cm

ρ_w ——水密度, 取 1 g/cm³

ω ——角速度, rad/s

g ——重力加速度, 取 980 cm/s²

r_1 ——离心机轴心到离心盒中心径向距离, 为 7.1 cm

r_2 ——离心机轴心到离心盒底部径向距离, 为 4.5 cm

设定不同转速对应土壤吸力 (压力水头) 情况如表 1 所示。

表 1 不同离心机转速与土壤吸力对照

Tab.1 Comparison of centrifuge speed and soil suction

转速/ (r·min ⁻¹)	角速度/ (rad·s ⁻¹)	土壤吸力/ cm	压力水头/ MPa
1 000	105	169	0.02
2 000	209	674	0.07
3 000	314	1 517	0.15
4 000	419	2 697	0.27
5 000	523	4 214	0.42
6 000	628	6 069	0.61
7 000	733	8 260	0.83
8 000	837	10 789	1.08
9 000	942	13 655	1.37
10 000	1 047	16 857	1.69
11 000	1 151	20 398	2.04

保水剂某一时刻离心保水率计算公式为^[14]

$$Y = (m_3 - m_1) / (m_2 - m_1) \times 100\% \quad (4)$$

式中 Y ——离心保水率, %

m_3 ——某一转速 (土壤吸力) 离心后保水剂凝胶剩余质量, g

1.2.4 离心滤液浓度

分别收集 1.2.3 节中不同转速下离心滤液, 利用 Alliance Futura 流动分析仪测定滤液中 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 浓度。

1.2.5 反复吸水性

指保水剂吸水—释水—再吸水的反复过程, 通过测量保水剂反复吸水次数与吸水倍率, 能判断其持续有效期、使用次数和作用效果^[20]。本试验考虑保水剂在农业中实际应用条件, 利用离心机模拟土壤吸力从低到高的过程而衡量保水剂反复吸水的性能, 对保水剂进行 3 次反复吸水性能测定, 步骤与 1.2.1 节至 1.2.4 节相同。

1.3 数据分析

所有数据均为 4 次重复测定的平均值, 利用 Excel 2016 整理记录数据, 采用 SigmaPlot 12.5 作图, 采用 SPSS 21.0 进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 吸水倍率

图 1 是不同粒径保水剂在不同浓度溶液中累积吸水量变化情况, 不同粒径保水剂在不同浓度溶液中吸水趋势一致, 在初始时间, 其吸水速率达到最大, 这是因为在初始阶段, 保水剂的三维网状结构中未含有水分, 由于亲水基团的电离, 保水剂内外存在很大的渗透压, 此时保水剂的吸水速率达到峰值。随着越来越多的水分被保水剂吸持, 保水剂内外渗透压逐渐减小, 吸水速率逐渐减慢, 进而逐渐达到溶胀平衡。

由粒径分析可知, 较大粒径保水剂的累积吸水量相对小粒径呈缓慢上升的趋势, 在 304 min 还未完全达到溶胀平衡状态, 溶胀平衡时间随保水剂粒径的增大逐渐延长。在第 1 次吸水 304 min 的反应时间内, 表现出在相同浓度溶液中溶胀时, 小粒径保水剂具有较大的吸水量, 在第 2 次、第 3 次吸水的 304 min 反应时间内则呈现出与第 1 次吸水相反的规律, 这可能是因为后两次保水剂溶胀平衡时间提前, 且大粒径保水剂反复使用性能优于小粒径保水剂, 相对小粒径保水剂更能抵抗水分子的溶解作用^[21]。

由溶液浓度来看, 304 min 内保水剂吸水量随溶液浓度的增加显著减小 ($P < 0.05$)。保水剂离心后再次溶胀之始, 其吸水量依然呈剧烈增大的趋势, 但由于其自身保持有一定量的水分, 故而达到溶胀平衡的时间较第 1 次溶胀更短。

保水剂经过 24 h 溶胀平衡后, 不同吸水次数其吸水倍率与溶液浓度的关系幂函数分别表示为 $y_1 = 10.758x_1^{-0.509}$ ($R^2 = 0.9816$); $y_2 = 8.5200x_2^{-0.548}$ ($R^2 = 0.9700$); $y_3 = 6.8340x_3^{-0.584}$ ($R^2 = 0.9661$)。对表 2 进行方差分析可知, 保水剂粒径、溶液浓度和吸水次数均对其吸水倍率有着显著影响 ($P < 0.05$)。进一步进行 Duncan 多重比较 ($P < 0.05$),

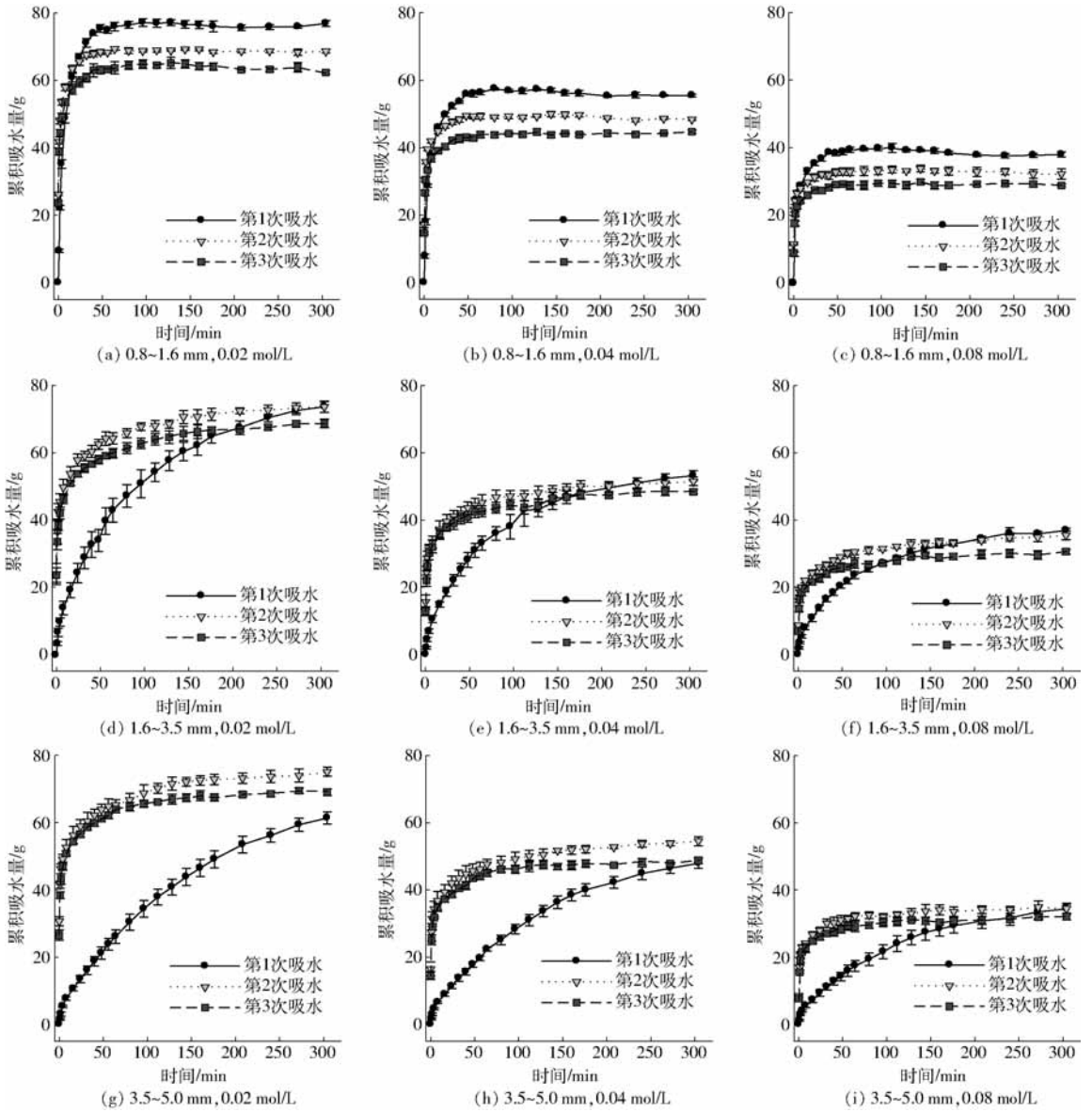


图1 不同粒径保水剂在不同浓度溶液中累积吸水量变化

Fig.1 Changes of water absorption capacity of SAP with different particle sizes in different concentration solutions

表2 保水剂吸水溶胀平衡时的吸水倍率

Tab.2 Water absorbency of SAP during swelling equilibrium

粒径/mm	溶液浓度/(mol·L ⁻¹)	吸水倍率/(g·g ⁻¹)		
		第1次吸水	第2次吸水	第3次吸水
0.8~1.6	0.02	(73.91 ± 0.49) ^{Ac}	(67.50 ± 0.45) ^{Bb}	(62.32 ± 0.58) ^{Cb}
	0.04	(54.18 ± 0.87) ^{Ae}	(46.65 ± 0.79) ^{Bd}	(42.02 ± 0.72) ^{Cd}
	0.08	(36.49 ± 0.28) ^{Ag}	(32.01 ± 0.38) ^{Bf}	(27.06 ± 0.48) ^{Cg}
1.6~3.5	0.02	(81.05 ± 1.07) ^{Aa}	(75.04 ± 1.99) ^{Ba}	(68.82 ± 1.14) ^{Ca}
	0.04	(56.49 ± 1.30) ^{Ad}	(51.60 ± 0.64) ^{Bc}	(47.26 ± 1.42) ^{Cc}
	0.08	(39.88 ± 0.70) ^{Af}	(35.34 ± 0.61) ^{Be}	(31.75 ± 0.71) ^{Ce}
3.5~5.0	0.02	(79.60 ± 0.59) ^{Ab}	(74.98 ± 1.15) ^{Ba}	(69.12 ± 0.51) ^{Ca}
	0.04	(57.56 ± 1.27) ^{Ad}	(52.91 ± 1.50) ^{Bc}	(47.83 ± 0.71) ^{Cc}
	0.08	(39.53 ± 0.71) ^{Af}	(34.36 ± 2.13) ^{Be}	(30.37 ± 0.91) ^{Cf}

注:不同大写字母表示同一行处理间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示同一列处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

保水剂吸水倍率随吸水次数增多、溶液浓度增大呈显著减小趋势;与粒径关系由大到小整体表现为1.6~3.5 mm、3.5~5.0 mm、0.8~1.6 mm,但两种

大粒径之间差异不显著。为了使保水剂吸持更多水分,使用1.6~3.5 mm粒径保水剂较其他粒径吸水效果更优。

2.2 离心保水率

保水剂的保水性能是指其内部的亲水结构和水分子相互作用的强度,也就是保持水分不被离析的能力^[22]。保水剂的吸水和失水特性共同决定了其保水能力^[23]。由图 2 可看出,保水剂吸持水分的能力随转速(土壤吸力)的增大不断减小。随转速(土壤吸力)增加每小时释水量逐渐降低,在 1 000 r/min

转速下(土壤吸力为 0.02 MPa)离心 1 h 能够释出较多的水分,在 2 000 ~ 11 000 r/min 转速(土壤吸力为 0.07 ~ 2.04 MPa)下释水速率较 1 000 r/min(土壤吸力为 0.02 MPa)明显降低。对累积释水量进行方差分析和多重比较($P < 0.05$)发现,其随溶液浓度、离心次数增加显著降低;在粒径方面由大到小依次为 1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm、0.8 ~ 1.6 mm。

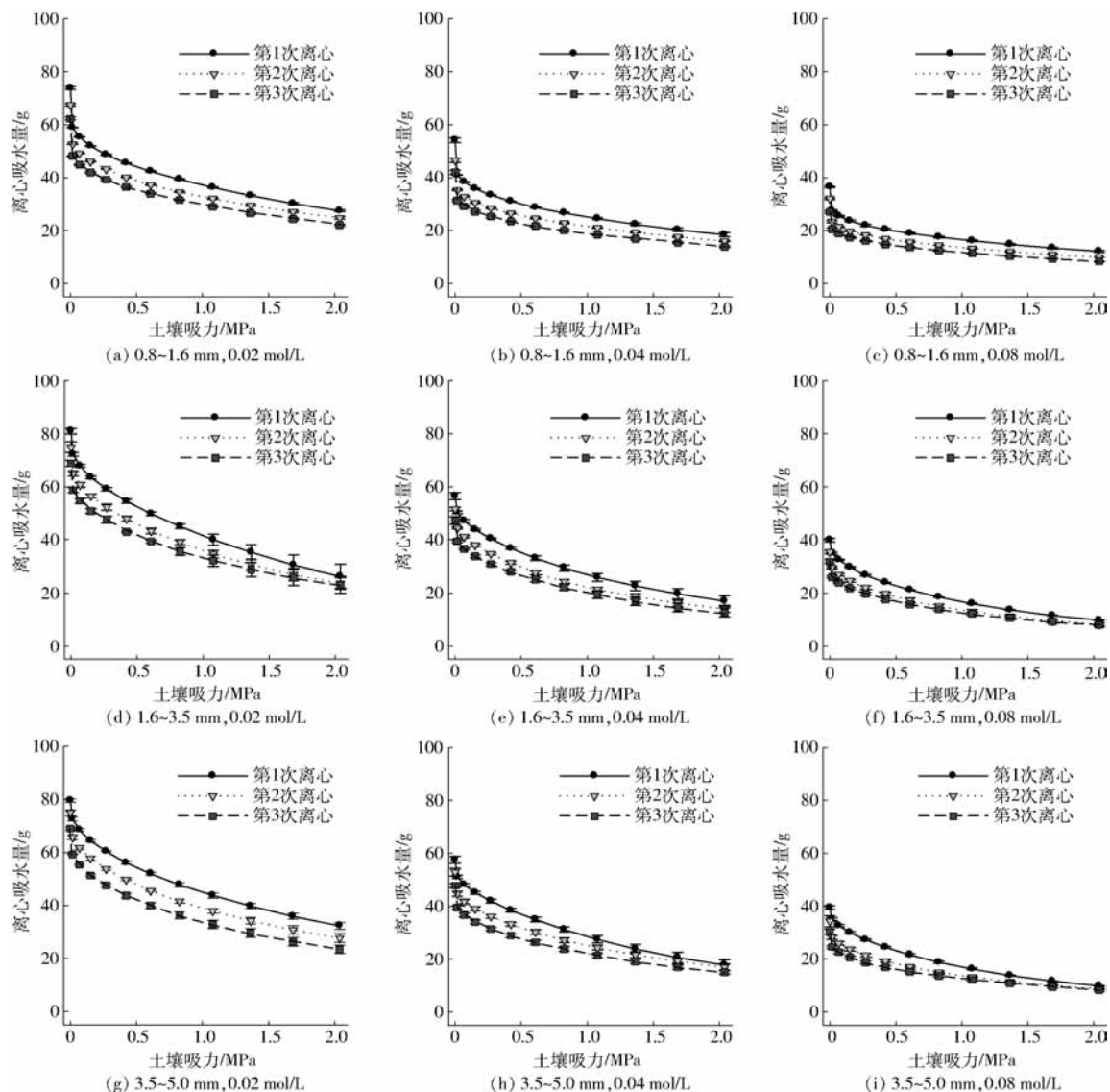


图 2 不同粒径保水剂在不同浓度溶液中溶胀平衡后离心过程中吸水量变化

Fig. 2 Changes of centrifugal water absorption of SAP with different particle sizes in different concentration solutions

对保水剂每次离心后最终离心保水率(表 3)进行方差及 Duncan 多重比较($P < 0.05$)分析可知:保水剂粒径、溶液浓度对其离心保水率有显著影响,保水率在粒径方面由大到小整体表现为 0.8 ~ 1.6 mm、3.5 ~ 5.0 mm、1.6 ~ 3.5 mm,在浓度方面由大到小依次为 0.02、0.04、0.08 mol/L,与离心次数并未表现出显著差异。结合释水量变化规律,1.6 ~ 3.5 mm 保水剂相较于其他两种粒径释水效果更优。

2.3 离心滤液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化

由图 3(图中 S1、S2、S3 分别代表 0.8 ~

1.6 mm、1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm 粒径的保水剂;C1、C2、C3 分别代表 0.02、0.04、0.08 mol/L 的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶液;F1、F2、F3 分别代表第 1 次、第 2 次、第 3 次溶胀后离心过程)可看出,保水剂离心释水滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度与其吸水溶液浓度呈比例增长,且随着转速(土壤吸力)的增大,离心滤液浓度呈逐渐减小的趋势。低转速(土壤吸力)下保水剂离心滤液的浓度相对较大,这说明在低转速(土壤吸力)条件下,保水剂能够释放更多的养分离子,在转速(土壤吸力)逐渐增大时,保水剂

表3 最终离心保水率试验结果

Tab.3 Test results of final centrifugal water retention rate

粒径/mm	溶液浓度/(mol·L ⁻¹)	离心保水率/%		
		第1次离心	第2次离心	第3次离心
0.8~1.6	0.02	(37.15 ± 0.28) ^{Aab}	(36.78 ± 0.72) ^{Aa}	(35.45 ± 0.93) ^{Ba}
	0.04	(34.09 ± 1.51) ^{Abc}	(34.32 ± 0.87) ^{Aab}	(33.04 ± 0.66) ^{Aab}
	0.08	(33.31 ± 1.08) ^{Ac}	(30.91 ± 0.47) ^{Bc}	(30.92 ± 0.98) ^{Bb}
1.6~3.5	0.02	(32.48 ± 5.67) ^{Ac}	(31.56 ± 3.55) ^{Abc}	(33.68 ± 4.67) ^{Aab}
	0.04	(30.12 ± 2.79) ^{Ac}	(27.32 ± 2.13) ^{Ad}	(26.89 ± 2.94) ^{Ac}
	0.08	(24.59 ± 0.30) ^{Ad}	(23.31 ± 0.99) ^{Ac}	(25.20 ± 1.75) ^{Ac}
3.5~5.0	0.02	(40.66 ± 1.83) ^{Aa}	(37.07 ± 2.56) ^{Ba}	(34.05 ± 2.25) ^{Bab}
	0.04	(30.84 ± 2.94) ^{Ac}	(32.09 ± 2.40) ^{Abc}	(31.60 ± 1.34) ^{Ab}
	0.08	(25.07 ± 0.29) ^{Bd}	(25.67 ± 1.32) ^{Bde}	(27.52 ± 1.26) ^{Ac}

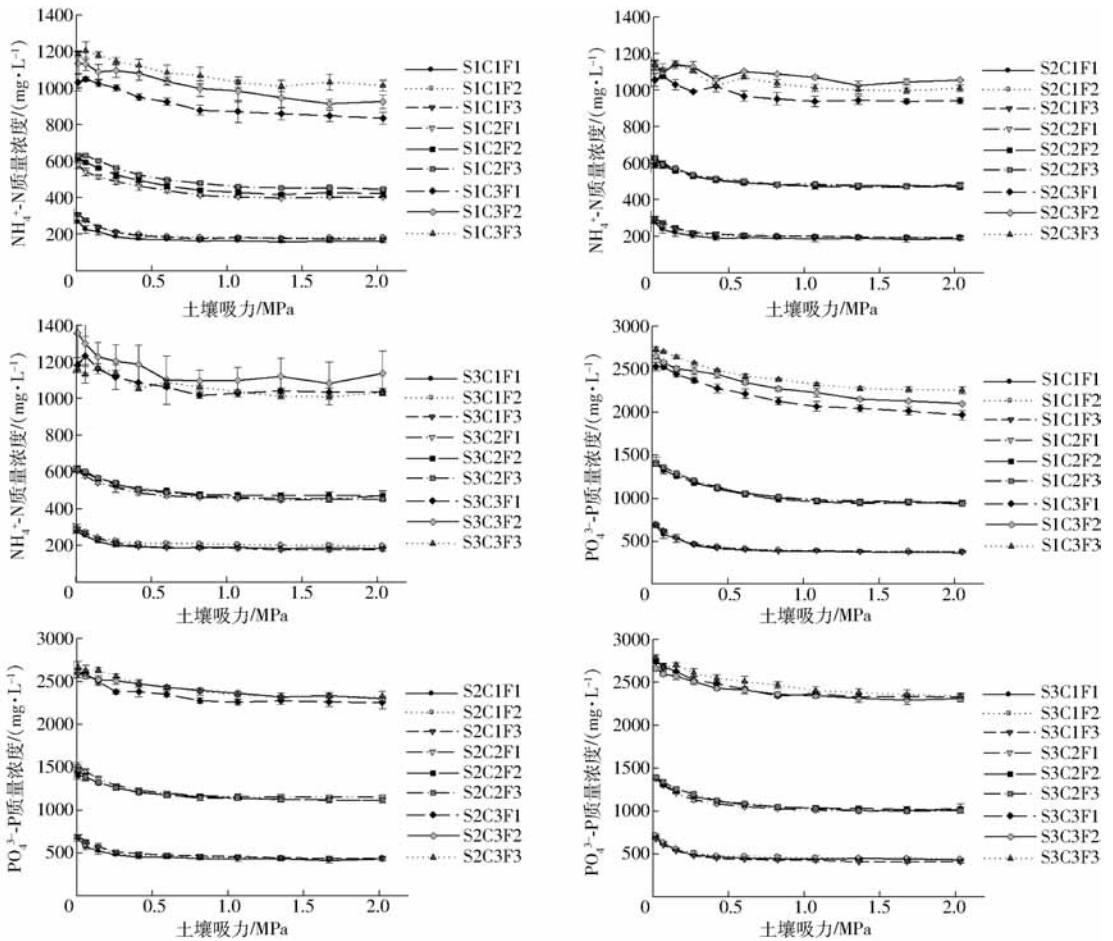


图3 保水剂离心滤液 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 质量浓度变化情况

Fig.3 Changes of NH₄⁺-N and PO₄³⁻-P concentrations in centrifugal filtrate of SAP

释放离子浓度呈下降趋势。

对离心过程滤液平均离子浓度进行方差分析发现,保水剂粒径、溶液浓度与离心次数均对其有显著影响($P < 0.05$)。进一步通过 Duncan 多重比较($P < 0.05$)可知;离心滤液中 NH₄⁺-N 浓度随粒径与吸水溶液浓度增加显著增加;与离心次数关系由大到小整体表现为第2次离心、第3次离心、第1次离心,但后两次离心过程差异不显著。离心滤液中 PO₄³⁻-P 浓度随吸水溶液浓度增加显著增加,与粒径关系由

大到小整体表现为 1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm、0.8 ~ 1.6 mm,但两种大粒径之间差异不显著;与离心次数关系由大到小整体表现为第3次离心、第2次离心、第1次离心,但前两次离心过程差异不显著。

表4反映了保水剂离心滤液 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 总累积量变化情况,结合方差分析,保水剂粒径、吸水溶液浓度与离心次数均会对离心滤液中 NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 总累积量产生显著影响($P < 0.05$)。由

Duncan 多重比较 ($P < 0.05$) 进一步可知, 离心滤液中 NH_4^+ -N 总累积量随保水剂吸水溶液浓度的增加显著增加; 在粒径方面由大到小整体表现为 1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm、0.8 ~ 1.6 mm, 但两种较大粒径之间差异不显著; 在离心次数方面由大到小整体表现为第 1 次离心、第 2 次离心、第 3 次离心, 但前

两次离心之间差异不显著。离心滤液中 PO_4^{3-} -P 总累积量随吸水溶液浓度增加显著增加, 随离心次数增加显著减少; 在粒径方面由大到小表现为 1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm、0.8 ~ 1.6 mm。综上所述, 1.6 ~ 3.5 mm 粒径保水剂较其他两种粒径而言在同样条件下能够释放更多养分离子。

表 4 保水剂离心滤液 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 总累积量变化

Tab. 4 Changes of cumulative amounts of NH_4^+ -N and PO_4^{3-} -P in centrifuged filtrate of SAP

粒径/mm	溶液浓度/ ($\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	NH_4^+ -N 总累积量/mg			PO_4^{3-} -P 总累积量/mg		
		第 1 次离心	第 2 次离心	第 3 次离心	第 1 次离心	第 2 次离心	第 3 次离心
0.8 ~ 1.6	0.02	(9.73 ± 0.16) ^{Bg}	(10.30 ± 0.17) ^{Ae}	(9.72 ± 0.39) ^{Bh}	(23.65 ± 0.22) ^{Af}	(22.88 ± 0.30) ^{Bh}	(21.43 ± 0.74) ^{Ch}
	0.04	(17.88 ± 0.52) ^{Ae}	(16.43 ± 0.62) ^{Bd}	(15.85 ± 0.38) ^{Bf}	(43.38 ± 1.13) ^{Ad}	(36.78 ± 1.23) ^{Bf}	(34.15 ± 0.95) ^{Cf}
	0.08	(23.64 ± 0.50) ^{Ae}	(23.73 ± 0.79) ^{Ab}	(21.13 ± 0.57) ^{Bc}	(56.91 ± 1.35) ^{Ab}	(54.57 ± 1.48) ^{Bc}	(47.68 ± 1.39) ^{Cc}
1.6 ~ 3.5	0.02	(11.54 ± 1.01) ^{Af}	(11.72 ± 0.57) ^{Ae}	(10.77 ± 0.94) ^{Ag}	(26.89 ± 2.59) ^{Ae}	(26.38 ± 1.42) ^{Ag}	(24.59 ± 2.00) ^{Ag}
	0.04	(20.79 ± 0.23) ^{Ad}	(19.63 ± 0.49) ^{Bc}	(18.69 ± 0.69) ^{Cd}	(50.35 ± 0.98) ^{Ae}	(46.71 ± 1.08) ^{Bd}	(43.69 ± 1.76) ^{Cd}
	0.08	(29.93 ± 0.62) ^{Ab}	(29.72 ± 0.37) ^{Aa}	(25.54 ± 0.37) ^{Ba}	(72.26 ± 1.95) ^{Aa}	(67.13 ± 0.96) ^{Ba}	(59.70 ± 1.15) ^{Ca}
3.5 ~ 5.0	0.02	(9.85 ± 0.47) ^{Ag}	(10.98 ± 0.87) ^{Ae}	(10.06 ± 0.63) ^{Agh}	(23.89 ± 1.12) ^{Af}	(25.09 ± 1.75) ^{Agh}	(22.92 ± 1.02) ^{Agh}
	0.04	(20.05 ± 0.75) ^{Ad}	(19.09 ± 1.02) ^{Ae}	(17.34 ± 0.40) ^{Be}	(44.73 ± 1.09) ^{Ad}	(41.99 ± 2.04) ^{Be}	(38.77 ± 1.02) ^{Ce}
	0.08	(32.46 ± 0.90) ^{Aa}	(30.83 ± 4.09) ^{Aa}	(24.22 ± 0.88) ^{Bb}	(73.92 ± 1.85) ^{Aa}	(63.56 ± 5.18) ^{Bb}	(57.04 ± 2.52) ^{Cb}

3 讨论

在农业中合理施用保水剂, 能够起到节水、增产、提高土壤养分有效性的作用。保水剂具有吸水速率快, 吸水倍数大的特点, 其主要通过吸水和溶胀 (主要方式) 两种方式保水; 又由于其良好的释水性能, 可以直接为作物长时间供水^[24]。本文选用了 3 种不同粒径的保水剂, 研究其在不同浓度 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶液中反复吸释水分与养分的动力学规律。结果表明, 保水剂吸水速率在初始吸水阶段达到峰值, 溶胀平衡时间随粒径增大而延长。这是因为保水剂粒径越小, 与溶液接触的表面积越大, 溶液能够更快地进入到其三维网状结构中。

吸水倍率是判断保水剂吸水性能的一个重要指标。本研究表明, 保水剂吸水倍率随溶液浓度增加显著减小 ($P < 0.05$), 且存在显著的幂函数关系, 这与大多数学者的研究结果类似^[12, 25-26]。分析原因是因为试验采用的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 是一种强电解质, 在水中溶解电离后, 使保水剂内部的渗透压降低, 进而使其吸水能力降低^[12]。

而关于保水剂粒径对其吸水倍率影响的说法不一。李兴等^[27]研究表明, 保水剂粒径越大, 吸水倍率越小。而张建刚等^[16]认为, 粒径对保水剂吸水倍率影响不大。宫辛玲等^[28]研究发现, 粉末状保水剂吸水倍率远小于颗粒状保水剂。本研究表明, 1.6 ~ 3.5 mm 和 3.5 ~ 5.0 mm 粒径保水剂较 0.8 ~ 1.6 mm 粒径保水剂吸水倍率显著增加 ($P < 0.05$), 但两种较

大粒径保水剂吸水倍率差异并不显著 ($P > 0.05$)。这种现象可能是因为小粒径保水剂在粉碎时由于剪切应力导致交联不完全或其交联结构遭到了较大的破坏, 聚合物溶解度增大造成的^[29]。

保水剂的保水性能是反映水分能否被保水剂储存并释放供植物生长的重要指标^[22]。目前大多数研究主要关注了保水剂在恒温、定转速和低转速条件下的释水规律。张璐等^[22]在模拟自然蒸发状态下发现, 同一保水剂的失水速率随时间逐渐减小。龚磊等^[30]研究了保水剂溶胀后在转速为 1 500 ~ 3 500 r/min 和 40℃ 恒温条件下的保水性能, 发现保水率随转速增加、恒温时间的增长而减少, 且单位时间释水量逐渐减少。本研究利用离心机不同转速模拟土壤吸力由小到大的变化过程, 研究了保水剂释水量的变化情况, 得到了同样的结论。这是因为在低转速离心时, 保水剂优先释放自由水; 随着高转速吸力变大, 保水剂颗粒表面出现膜层, 逐渐释放结合水^[21]。YU 等^[31]通过将不同粒径保水剂与土壤混合溶胀 15 min 后再在 60℃ 恒温蒸发 10 h 后发现, 由于小颗粒保水剂粘结后具有较小的比表面积, 从而在颗粒表面之间形成较小的水力梯度, 失水率相对大粒径保水剂更小, 这与本研究得到的结论类似。同时, 本研究与杨静静等^[32]得出的结论相同, 即保水剂释水量 (速率) 随溶液浓度的增大而降低。

保水剂能够通过包裹、络合等方式将溶于水中的养分离子固定并缓慢释放^[8]。已有研究表明, 经通氮活化制成的缓释型保水剂, 在蒸馏水中 28 d 后

累积释放氮素占 71.50%^[33]。王新爱等^[12]指出,保水剂吸水同时能够大量吸附溶解于水中的 NH_4^+ , 并与其浓度呈直线比例增加。张富仓等^[34]研究表明,土壤中加入保水剂饱和,并在不同转速离心后,离心滤液中 NO_3^- -N 浓度随土壤吸力(转速)增大而降低,表明 NO_3^- -N 持留特性受到土壤吸力的控制。本研究表明,保水剂释放养分离子浓度随土壤吸力(转速)增大而降低,释放氮磷浓度与总累积量与其吸水溶液离子浓度呈正相关关系,两种大粒径保水剂较小粒径保水剂释放离子浓度与总累积量显著增加。

保水剂的反复吸水性是衡量其是否能够持久使用的标准。目前对于保水剂反复吸释水特性的研究大都是在对其吸水、释水特性研究的基础上进行的。本研究表明,保水剂吸水倍率、累积释水量随吸水次数增多显著减小($P < 0.05$),经 3 次反复吸释溶液后,离心滤液中氮(磷)平均浓度较第 1 次离心显著增大($P < 0.05$),可能是因为保水剂在反复吸释水过程中破坏了其三维网状结构,使其变得疏松,对水分与离子的束缚能力下降^[21]。但由于释水量随离心次数增加显著减小($P < 0.05$),导致氮(磷)总累积量较前两次离心显著减小($P < 0.05$)。

本文供试的 3 种不同粒径保水剂,从不同浓度溶液反复溶胀离心过程中的吸水、释水和养分性能综合来看,粒径为 1.6 ~ 3.5 mm 的保水剂效果最

优,这与杨静静等^[32]得出的粒径为 1.6 ~ 2.8 mm 的中颗粒保水剂吸水、反复吸水及释水性能最优的结论一致。

4 结论

(1) 保水剂粒径、溶液浓度和吸水次数均对其吸水倍率有着显著影响;吸水倍率随溶液浓度的增大和吸水次数的增多显著减小,与粒径关系由大到小表现为 1.6 ~ 3.5 mm、3.5 ~ 5.0 mm、0.8 ~ 1.6 mm。在吸水初始,保水剂吸水速率达到最大,随后逐渐减小并趋于溶胀平衡。且保水剂离心后再次溶胀时,初始吸水速率依然剧烈增加。

(2) 保水剂吸持水分的能力和每小时释水量随转速(土壤吸力)的增大不断减小;保水率在粒径方面由大到小表现为 0.8 ~ 1.6 mm、3.5 ~ 5.0 mm、1.6 ~ 3.5 mm,在溶液浓度方面由大到小表现为 0.02、0.04、0.08 mol/L,离心次数未对其产生显著性影响。

(3) 保水剂释水时滤液中 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 的浓度整体随转速(土壤吸力)增大而呈减小的趋势;养分离子累积释放量表现出随溶液浓度增加而增加、随离心次数增加而减少的趋势;粒径为 1.6 ~ 3.5 mm 的保水剂在相同溶液浓度、相同离心次数下大多能够释放出较多 NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P。

参 考 文 献

- [1] TURNER N C, KRAMER P J. Adaptation of plants to water and high temperature stress[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [2] 山仑,邓西平,康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002, 33(9):27-31.
SHAN Lun, DENG Xiping, KANG Shaozhong. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9):27-31. (in Chinese)
- [3] 水利部. 中国水资源公报[J]. 北京:中国水利水电出版社,2008-2016.
- [4] 李云开,杨培岭,刘洪禄. 保水剂农业应用及其效应研究进展[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2):182-187.
LI Yunkai, YANG Peiling, LIU Honglu. Review on super absorbent polymers application in agriculture and its effects[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2):182-187. (in Chinese)
- [5] LIAO R K, YANG P L, ZHU Y H, et al. Modeling soil water flow and quantification of root water extraction from different soil layers under multi-chemicals application in dry land field[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 75-86.
- [6] LIAO R K, REN S M, YANG P L. Multi-chemical regulation technology applied to dryland maize (*Zea Mays* L.) production in Northern China[J]. Transactions of the ASABE, 2015, 58(6):1535-1546.
- [7] LIAO R K, YANG P L, YU H L, et al. Establishing and validating a root water uptake model under the effects of superabsorbent polymers[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(5):1478-1488.
- [8] 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 CSAE, 2012, 28(17):1-10. (in Chinese)
- [9] 王宇欣,王越,王平智. 玉米秸秆沼渣土壤保水剂制备与性能表征[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):199-206. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160626&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.026.
WANG Yuxin, WANG Yue, WANG Pingzhi. Synthesis and characterization of corn straw residue water retention agent[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6):199-206. (in Chinese)
- [10] 井大炜,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/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):146-154. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160520&journal_id=jcsam. DOI:

- 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.020.
- JING Dawei, XING Shangjun, LIU Fangchun, et al. Effect of application methods of super absorbent polymers on micro-ecological environment in rhizosphere soil of *platycladus orientalis*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(5):146-154. (in Chinese)
- [11] DEVINE D M, HIGGINBOTHAM C L. Synthesis and characterisation of chemically crosslinked N-vinyl pyrrolidinone (NVP) based hydrogels[J]. European Polymer Journal,2005,41(6):1272-1279.
- [12] 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 Xin'ai, LI Yongsheng, DU Jianjun, et al. Water and ammonium adsorption characteristics of water retaining agent in different solutions of ammonium salt[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(7):117-123. (in Chinese)
- [13] 郑易安,杨逵,王爱勤. PAA-AM/SH/MMT 多功能保水剂的溶胀和保水性能研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(4): 435-439.
- ZHENG Yian, YANG Kui, WANG Aiqin. Studies on swelling behaviors and water absorbency of poly (acrylic acid-coacrylamide)/sodium humate/montmorillonite multifunctional superabsorbent composite [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(4):435-439. (in Chinese)
- [14] 张运超,蒋进,宋春武,等. 4 种剂型保水剂吸水和保水特性研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6):99-103.
- ZHANG Yunchao, JIANG Jin, SONG Chunwu, et al. Water absorbency and retention of 4 kinds of absorbent polymers[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(6):99-103. (in Chinese)
- [15] 王金磊,王爱勤. 聚乙烯醇/聚丙烯酸/羟基磷灰石复合高吸水性树脂的制备及溶胀行为[J]. 高分子材料科学与工程, 2010, 26(6):138-140.
- WANG Jinlei, WANG Aiqin. Synthesis and swelling behavior of poly (vinyl alcohol)/poly (acrylic acid)/hydroxyapatite superabsorbent composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2010, 26(6):138-140. (in Chinese)
- [16] 张建刚,汪勇,汪有科,等. 10 种保水剂基本特性对比研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(2):208-212.
- ZHANG Jiangan, WANG Yong, WANG Youke, et al. Comparative analysis of basic properties of 10 super absorbent polymers[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(2):208-212. (in Chinese)
- [17] 陈静,李恋卿,郑金伟,等. 生物质炭保水剂的吸水保水性能研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6):232-237.
- CHEN Jing, LI Lianqing, ZHENG Jinwei, et al. Research on water retention capacity of water-retaining agent of PAM-biochar [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6):232-237. (in Chinese)
- [18] 刘亚琦,黄占斌,林杉,等. 10 种农用保水剂基本性能的比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6):147-151.
- LIU Yaqi, HUANG Zhanbin, LIN Shan, et al. Comparative study on fundamental properties of ten kinds of super absorbent polymers[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6):147-151. (in Chinese)
- [19] 邢旭光,赵文刚,马孝义,等. 土壤水分特征曲线测定过程中土壤收缩特性研究[J]. 水利学报,2015, 46(10):1181-1188.
- XING Xuguang, ZHAO Wengang, MA Xiaoyi, et al. Study on soil shrinkage characteristics during soil water characteristic curve measurement[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(10):1181-1188. (in Chinese)
- [20] 刘瑞凤,张俊平,王爱勤. PAM-atta 复合保水剂的保水性能及影响因素研究[J]. 农业工程学报,2005, 21(9):47-50.
- LIU Ruifeng, ZHANG Junping, WANG Aiqin. Water absorbency and its influence factor of PAM-atta superabsorbent composite[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(9):47-50. (in Chinese)
- [21] 林雄财. 保水剂吸水特征机理及其对土壤水分运动过程的影响[D]. 北京:中国农业大学,2008.
- LIN Xiongcai. The water-absorbing principle of superabsorbent polymer and its effect on the soil water movement[D]. Beijing: China Agricultural University,2008. (in Chinese)
- [22] 张璐,孙向阳,田赞,等. 复合保水剂吸水保水性能及其应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15):87-93.
- ZHANG Lu, SUN Xiangyang, TIAN Yun, et al. Properties and application of composite water retaining agent [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(15):87-93. (in Chinese)
- [23] 曹远博,王百田,魏婷婷,等. 2 种型号保水剂的特性及其应用研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4):283-288.
- CAO Yuanbo, WANG Baitian, WEI Tingting, et al. The properties of two kinds of super absorbent polymer and its application [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4):283-288. (in Chinese)
- [24] 黄占斌,孙朋成,钟建,等. 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 Zhanbin, SUN Pengcheng, ZHONG Jian, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1):125-131. (in Chinese)
- [25] LI J Z L, HUANG Z B, FENG Y Y, et al. Interactive effects of super absorbent polymer and nitrate nitrogen[J]. Advanced Materials Research, 2012, 598(10):323-327.
- [26] 王晓佳,王百田,李德宁,等. 聚丙烯酰胺高吸树脂与重金属离子的相互作用[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(3):81-88.
- WANG Xiaojia, WANG Baitian, LI Dening, et al. Interaction between polyacrylamide super absorbent polymers and heavy metal ions[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(3):81-88. (in Chinese)
- [27] 李兴,蒋进,宋春武,等. 不同粒径保水剂吸水特性及其对土壤物理性能的影响[J]. 干旱区研究,2012, 29(4):609-614.

- LI Xing, JIANG Jin, SONG Chunwu, et al. Water absorbent capacity of super absorbent polymer with different granularities and its effect on soil physical properties[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(4):609-614. (in Chinese)
- [28] 宫辛玲,高军侠,尹光华,等. 四种不同类型土壤保水剂保水性能的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(4):652-656.
GONG Xinling, GAO Junxia, YIN Guanghua, et al. Water conservation performance of four types of super absorbent polymer [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(4):652-656. (in Chinese)
- [29] 邹新禧. 超强吸水剂[M]. 2版. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [30] 龚磊,连延超,吴时宇,等. 柚皮粉复合农用保水剂的合成及其吸水保水性能研究[J]. *化工新型材料*, 2017(6):261-263.
GONG Lei, LIAN Yanchao, WU Shiyu, et al. Synthesis and property of pomelo peel powder-based composite superabsorbent for agriculture[J]. *New Chemical Materials*, 2017(6):261-263. (in Chinese)
- [31] YU J, SHI J G, MA X, et al. Superabsorbent polymer properties and concentration effects on water retention under drying conditions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2017, 81:889-901.
- [32] 杨静静,王秀峰,魏珉,等. 保水剂吸水、释水及吸肥特性研究[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(5):696-700.
YANG Jingjing, WANG Xiufeng, WEI Min, et al. Study on characteristics of absorption, release and fertilizer absorption of water retaining agent[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2016, 47(5):696-700. (in Chinese)
- [33] 牛育华,骆筱,延小雨,等. HA/AA-UREA缓释保水剂的制备[J]. *精细化工*, 2018,35(2):194-200.
NIU Yuhua, LUO Xiao, YAN Xiaoyu, et al. Preparation of HA/AA-UREA slow released superabsorbent resin[J]. *Fine Chemicals*, 2018,35(2):194-200. (in Chinese)
- [34] 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)

~~~~~

(上接第 274 页)

- [25] 王唯道,刘小军,田永超,等. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(22):7053-7060.  
WANG Weixiao, LIU Xiaojun, TIAN Yongchao, et al. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22):7053-7060. (in Chinese)
- [26] 方荣杰,李远华,张明炷. 非充分灌溉条件下水稻根系生长发育特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 1996(8):11-14.  
FANG Rongjie, LI Yuanhua, ZHANG Mingzhu. Study on growing features of rice roots under water deficit irrigation conditions [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 1996(8):11-14. (in Chinese)
- [27] 王振昌,郭相平,杨静晗,等. 旱涝交替胁迫对水稻干物质生产分配及倒伏性状的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(24):114-123.  
WANG Zhenchang, GUO Xiangping, YANG Jinghan, et al. Effect of alternate flooding and drought stress on biomass production, distribution and lodging characteristic of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(24):114-123. (in Chinese)
- [28] RAMESH K, CHANDRASEKARAN B, BALASUBRAMANIAN T N, et al. Chlorophyll dynamics in rice (*Oryza sativa*) before and after flowering based on SPAD (chlorophyll) meter monitoring and its relation with grain yield[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2002, 188(2):102-105.
- [29] 张大龙,张中典,李建明. 环境因子对温室甜瓜蒸腾的驱动和调控效应研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11):137-144. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20151119&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151119&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.019.  
ZHANG Dalong, ZHANG Zhongdian, LI Jianming. Co-ordination of environmental factors in driving and regulating transpiration rate of greenhouse grown muskmelon[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):137-144. (in Chinese)
- [30] 孟军,陈温福,徐正进,等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J]. *沈阳农业大学学报*, 2001, 32(4):247-249.  
MENG Jun, CHEN Wenfu, XU Zhengjin, et al. Study on photosynthetic rate and chlorophyll content[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2001, 32(4):247-249. (in Chinese)
- [31] 刘彦卓,黄农荣,陈钊明,等. 高产水稻光合速率的变化[J]. *热带亚热带植物学报*, 1999,7(增刊1):49-53.  
LIU Yanzhuo, HUANG Nongrong, CHEN Zhaoming, et al. Variation of photosynthetic rate in high-yielding rices[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1999,7(Supp.1):49-53. (in Chinese)
- [32] LUO H H, ZHANG Y L, ZHANG W F. Effects of water stress and rewatering on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch[J]. *Photosynthetica*, 2016, 54(1):65-73.