

不同材质保水剂对玉米生长综合效率的 DEA 模型分析

许紫峻^{1,2}, 汪溪远^{1,2}, 师庆东^{1,2}, 陈娇³, 李浩^{1,2}, 徐婉婷^{1,2}, 王伟^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830046)

摘 要:为进一步促进保水剂在干旱区农业生产和生态修复中的合理应用,利用数据包络分析(Data Envelopment Analysis,DEA)模型评价不同材质保水剂施用在干旱区荒漠土壤时对生物生长促进的综合效率,从而确定在该环境中最具效率的保水剂品种。本研究选取 AA-AH,KCE 和 PAA3 种保水剂,首先测试了 3 种保水剂在模拟当地自然环境基本特征条件下的基本特性,其次将它们应用于室内玉米盆栽种植试验,最后在上述试验结果的基础上使用 DEA 模型分析了 3 种不同保水剂在荒漠土壤中对生物生长的促进作用,结果表明:(1) PAA 的耐盐性能较好,而 AA-AH 的环境持久性最好,AA-HA 保水剂的施用对土壤的副作用最小;(2) 3 种保水剂都有显著提高玉米出苗率和土壤持水能力,其中 AA-HA 对增加土壤持水性能的效果最好,PAA 促进玉米株高的效果最好,保水剂浓度的增加并不能显著改善土壤持水性能,但不同保水剂功效在同等浓度下表现也不同,如 KCE 在 20 g/m² 浓度下增加玉米地面生物量的效果最好,而 AA-AH 则在 40 g/m² 下表现最佳。综合评价表明 3 种保水剂在 0.6 g 浓度时玉米生长的综合效率都达到 DEA 有效值,当浓度增加到 1.2 g 时玉米生长的综合效率均下降,降幅为:PAA>KCE>AA-HA,说明 AA-HA 在低浓度使用量下在荒漠土壤环境中使用时效率最佳的。综上所述保水剂在干旱荒漠地区的农业生产和荒漠生态修复方面有很好的应用前景。面对品种繁多的保水剂产品,DEA 模型可以用来分析评价最适合当地应用环境的品种,本研究为提高保水剂对植物生长综合效率及合理选用保水剂提供了理论方法。

关键词:保水剂;DEA 模型;高温反复吸水;综合效率

中图分类号:S482.8

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0160-07

Analysis of Impact of Different Super Absorbent Polymer on Comprehensive Efficiency of Maize Growth Based on the DEA Model

XU Zijun^{1,2}, WANG Xiyuan¹, SHI Qingdong^{1,2}, CHENG Jiao³,

LI Hao^{1,2}, XU Wanting^{1,2}, WANG Wei^{1,2}

(1. College of resources and environmental science, Xinjiang University, Urumqi 830046,

China; 2. Key Laboratory of Xinjiang Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Xinjiang Institute of E-cology and GeographHy, China Academy of Sciences, Urumqi 830046, China)

Abstract: In order to further promote the reasonable application of super absorbent polymer r(SAP) in the agricultural production and ecological restoration in arid areas, using the DEA model, we evaluated the comprehensive efficiency of biological growth when different SAPs were applied to desert soil in arid area to promote biological growth, thus the most efficient SAPs were determined. This study selected three SAPs (AA-AH, KCE and PAA), the basic properties of three SAPs were tested firstly, then SAPs were applied to the experiment of maize planting. The results were analyzed by DEA model. The results are as follows. (1) The salt tolerance of PAA is the best, the environmental persistence of AA-AH is the best, and the side effect of AA-AH ton the soil is the fewest. (2) All three SAPs can significantly improve the sprouting rate of maize and the water retention of soil, the AA-AH has the best effect on the water retention and PAA has the best effect on increasing maize plant height. Higher concentrations of SAPs cannot improve the soil water retention significantly, but different SAPs have different performance in the same concentration, KCE has the

best effect on increasing the ground biomass of maize in the concentration of 20 g/m² and AA-AH has the best effect he concentration of 40 g/m². The comprehensive evaluation proved that the comprehensive efficiency of all three SAPs could reach DEA effective value in the concentration of 0.6 g, the growth efficiency of maize all decreased when the concentration of three types of SAPs reached 1.2 g, reduced rate decreased in the order: PAA>KCE>AA-AH. The result shows that AA-AH has the best effect in desert soil under low concentration. Conclusion demonstrated that the SAP has good application prospect in the agricultural production and ecological restoration in arid areas. DEA model can analyze and evaluate the most suitable one from large variety of SAPs, this study provides theoretical basis for increasing the comprehensive efficiency of SAPs on plant growth and the reasonable application of SAPs. The absorption capacity of PAA in deionized water, 0.9% NaCl solution, alkali water, tap water, well water and soil leaching liquor were better than the other two super absorbent polymer. The suction force ratio of three super absorbent polymers decreased with repeated suction increase under 70 celsius system, the repeated suction capacity of AA-AH is the best. The water retention of super absorbent polymers increased with the concentration, the water retention of KCE in the concentration of 0.6 g is the best, and the water retention of AA-AH in the concentration of 1.2 g is the best. the pH of soil increases with the super absorbent polymers concentration, the sequence is KCE>PAA>AA-HA. The germination rate of maize and drought resistance significantly increased ($p<0.05$), which AA-HA super absorbent polymer increased capacity of drought resistant maize ($p<0.05$), but the best three kinds of super absorbent polymers concentration is more than 1.2 g after the drought resistance of maize does not significantly increase at the concentration of 0.6 g ($p>0.05$). The PAA increased maize height more than the other two super absorbent polymers significantly; KCE at the concentration of 0.6 g had the best effect on increasing maize ground biomass, AA-AH at the concentration of 1.2 g had the best effect on increasing maize ground biomass; when the three kinds of super absorbent polymers were at the concentration of 0.6 g, maize growth comprehensive efficiency could achieve the effective value of DEA, when the concentration increased to comprehensive the efficiency of 1.2 g the growth of maize decreased, a decline sequence was: PAA>MP 3005 KCE>AA-HA. This study provides theoretical basis for the research of DEA model in the evaluation of the comprehensive efficiency of super absorbent polymers on plant growth and the reasonable application of super absorbent polymers in arid area.

Keywords: super absorbent polymers; DEA; high temperature repeatedly absorbing water; comprehensive efficiency

新疆地处亚欧大陆中部且深居内陆,受气候的影响降水少而蒸发量大,水资源已成为制约新疆农业发展的限制性因素之一^[1]。保水剂作为一种节水保墒技术在干旱区农业上的应用已经非常广泛,有关保水剂研制和应用的研究日益增多^[2-6]。保水剂又称高吸水性聚合物(Super Absorbent Polymer, SAP),是一种高分子材料。能吸纳本身质量几百甚至上千倍的水,并具有反复吸水的功能^[7]。大量研究表明,保水剂具有抗旱、改善土壤物理性质、提高植物出苗率和促进植物生长等功效^[8-14],已广泛应用于农业生产和生态保护中^[15-20]。目前,有关保水剂吸水特性的研究多集中于不同水质、不同 pH 值和低温等情况的影响^[21-22],但关于高温对保水剂持续吸水性能影响的研究尚不多见,也缺乏有关保水剂投入浓度对植物生长综合效率评价的研究。同时,关于保水剂对植物生长

的研究多集中于保水剂对植物生长某项指标的影响,如田娜等^[23]研究发现旱地宝保水剂对垂盆草的发芽率有促进作用但浓度超过 1.5 g/L 后增长不显著,李兴等^[24]研究表明 PAM-2100 保水剂在 0.05% 浓度下能够明显促进梭梭和白梭梭种子的发芽率,但当浓度为 0.1% 时对种子发芽率没有明显促进作用,蒋雅琴等^[25]研究表明大粒径保水剂浓度超过 0.5% 浓度时对增加幼苗株高、最大叶面积等指标影响不显著,小粒径保水剂浓度超过 1% 时对增加幼苗株高、最大叶面积等指标影响不明显。且不同保水剂促进植物生长的指标和最适浓度的对比效率研究较为缺乏。本文针对这种情况引入 DEA 模型评价不同保水剂之间的对植物的作用效率,为指导保水剂的选择使用提供定量评价方法。

DEA 模型是一种评价决策单元相对有效性的数

据包络分析方法。它能够分析不同决策单元的不同量纲指标之间投入—产出效率的相对关系。例如邓洪波等^[26]利用 DEA 模型对安徽省城市旅游效率进行研究,韦浩华等^[27]运用 DEA 方法对农户的林地经营效率进行测算,许建伟等^[28]采用 DEA 交叉评价模型测算甘肃省 12 个地级市的构建城市效率。DEA 模型已广泛应用于经济学领域的效率比较测算,根据其计算原理,本文将该模型应用于评价不同保水剂对植物生长影响的研究中,讨论保水剂对植物生长的综合效率,有助于保水剂在农业生产中的合理化利用。

本文以 MP 3 005 KCE 保水剂(以下简称 KCE)与新疆大学化学化工学院研制的 PAA 和 AA-AH 保水剂为研究对象,研究不同保水剂在不同状态下吸水特性的变化趋势和对玉米生长的综合效率,并运用 DEA 模型分析 3 种保水剂在不同投入量下对玉米生长的综合效率的影响。为合理选用不同保水剂在荒漠化治理和农业生产中的应用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤 本试验为促进保水剂在研究区农业生产的合理应用,土壤样品采自新疆大学阜康研究基地(位于新疆昌吉州阜康市滋泥泉子镇,距阜康市东部 46 km 处)的荒漠土壤,该地区年均降水量为 248.4 mm,而年均蒸发量为 1 553.2 mm。供试土壤含水率为 3.65%、pH 值为 9.21、有机质为 5.468 g/kg、全氮为 0.54 g/kg、全磷为 0.599 g/kg。

1.1.2 保水剂 本试验所使用的 3 种保水剂均为市售产品,过 40 目标准筛,选取粒径在 40 目筛下的部分作为试验材料。其中 AA-AH 保水剂为新疆大学化学工程学院生产,化学成分为含有腐植酸的丙烯酸聚合物;PAA 保水剂为新疆大学化学工程学院生产,化学成分为纯丙烯酸聚合物;KCE 保水剂为法国 SNF(爱森)公司生产,化学成分为聚丙烯酸盐和聚丙烯酰胺共聚体。

1.2 试验设计和方法

(1) 保水剂基本性能测试:保水剂吸水倍率的测试^[1,24,29]:用电子天平准确称取各种粉状保水剂 0.1 g (m₁),放入 1 000 ml 的烧杯中,然后加入 500 ml 水溶液,使其静置 4 个小时后,待树脂充分溶胀,用 100 目的尼龙筛网滤沥静置 20 min 去除未吸附的游离水,然后称出吸水凝胶的质量 m,按下式计算出吸水率 Q:

$$Q = \frac{m - m_1}{m_1}$$

保水剂可逆性的测试:称取相同质量 0.1 g 的 3 种

保水剂^[30],放置在 100 目的尼龙滤袋中,然后使其充分浸入去离子水中,待其充分吸水 4 h 后悬挂静止 20 min 除去未吸附的游离水后称其质量,并记录。再放入鼓风干燥箱中进行烘干,温度设置为 70℃,再将烘干后的滤袋继续浸入去离子水中吸水,反复吸水 20 次。

$$\text{吸水力比} = \frac{\text{反复数次的吸水量}}{\text{第一次吸水量}}$$

(2) 室内盆栽植物试验:通过玉米种植试验探究保水剂对土壤和植株的影响,采用花盆($d=19.5$ cm, $h=16.0$ cm)进行种植,保水剂分别按 20 g/m², 40 g/m² 两种浓度梯度进行设置(对应每盆为 0.6 g 和 1.2 g),其中 1 盆不加保水剂作为空白组,将保水剂和土壤及添加剂充分混合,每个花盆中 12 颗玉米种子。由于土壤的碱性过高,每个花盆浇入 1 L 浓度为 0.5 g/L 的硫酸铁溶液。以后每隔五天浇水 500 ml(不再添加硫酸铁),浇水两次后不再浇水,记录植物的生长状况。通过测定玉米种子的出苗率、地面生物量、株高、枯萎天数^[31],土壤含水率和 pH 值^[32-33],分析不同保水剂在不同浓度下对土壤和植株的影响,得出保水剂对哪些指标有更明显作用。

(3) 保水剂 DEA 评价分析:数据包络分析方法^[26]选取决策单位(Decision Making Unit, DMU)多项投入、产出数据,利用数学规划模型求解得到效率边界线的点,构成所谓的数据包络线。凡是落在边界上的 DMU,则被认为具有最有效的投入产出组合,效率值标定为 1,而不在边界上的 DMU 则被认定为无效率,并给予 1 个相对的效率值指标(大于 0 而小于 1)。

1.3 数据处理

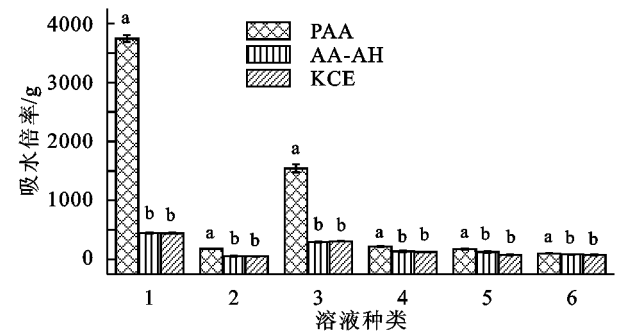
Microsoft Office Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行方差分析和多重比较,Origin 7.5 对数据进行画图处理,Deap 2.1 进行 DEA 模型的处理。

2 结果与分析

2.1 3 种保水剂基本性能测试结果与分析

2.1.1 3 种保水剂不同溶液中吸水倍率结果与分析 农业生产中保水剂吸取溶液的种类并不单一。选取去离子水、0.9%NaCl 溶液、弱碱性水(pH 值 7.5~8.5),自来水、井水和土壤浸提液(土样与去离子水 1:5 混合,充分震荡后静置 24 h 取上清液)6 种不同溶液,测试 AA-HA、KCE 和 PAA3 种保水剂在 6 种不同溶液中的吸水倍率(图 1)。3 种保水剂在 6 种溶液中的吸水倍率大小均为 PAA>AA-AH>KCE,AA-AH 和 KCE 两种保水剂在 6 种溶液中的吸水倍率相差并不明显($p>0.05$)。0.9%NaCl 溶液中 PAA 保水剂的吸水倍率较其他两种保水剂增加明显,说明 PAA 保水剂的耐盐性

较其他两种保水剂好($p<0.05$)。



注:同组柱形图上不同小写字母表示不同处理下差异达显著水平($p<0.05$)。

图 1 3 种保水剂在不同溶液中的吸水倍率

2.1.2 3 种保水剂吸水力比结果与分析 保水剂混入土壤后,水分充足时(降水、灌溉)会吸水膨胀,干燥时水分慢慢释放,再遇水又会吸水膨胀。在反复吸水、干燥过程中,保水剂的吸水能力逐渐降低。最后在日照、高温、细菌等作用下被分解为无毒物质残留在土壤中^[30]。干旱区高温干燥且日照强烈施用保水剂时应关注其持久性,选取 AA-HA、KCE 和 PAA 3 种保水剂在 70℃下反复干燥、吸水 20 次测试保水剂的持久性(图 2)。试验表明随着吸水和干燥次数的增加 3 种保水剂的吸水力比降低,3 种保水剂均在第一次吸水干燥时吸水力比达到最大值,第 20 次时吸水力比达到最小值。吸水力比降幅为 PAA>KCE>AA-HA,说明 AA-HA 保水剂在干旱高温环境中其吸水能力的耐久性和持续性较其他两种保水剂好。

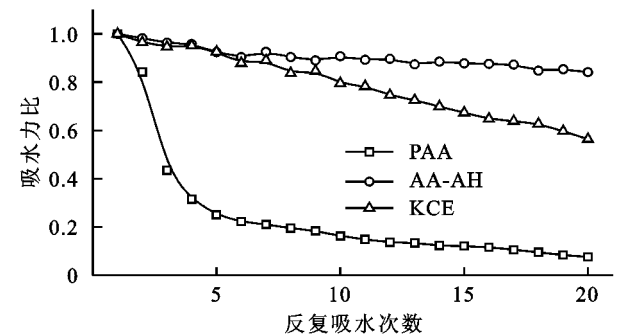


图 2 3 种保水剂吸水力比图

2.2 室内盆栽植物试验

2.2.1 3 种保水剂对土壤含水率和 pH 值影响结果与分析 土壤 pH 值和含水率是土壤的重要属性,它不仅直接影响植物的生长,同时也影响到土壤肥力和其他一些性质^[34]。分别测定玉米在 AA-HA、KCE 和 PAA 3 种保水剂 0.6 g 和 1.2 g 两种浓度作用下 20 d 时土壤 pH 值和含水率(见图 3)。3 种保水剂的加入均使土壤的 pH 值升高,且随着保水剂的浓度增加而升高,影响作用依次为:KCE>PAA>AA-HA, AA-AH 保水剂作用于土壤后 pH 值升高的程度较其他两种保水剂小,因 AA-AH 复合型保水剂中有腐

殖酸的成分起到中和的作用。3 种保水剂的保水性随浓度增加而增加,在 0.6 g 浓度下保水能力大小为:KCE>AA-HA>PAA,在 1.2 g 浓度下则为 AA-HA>KCE>PAA。

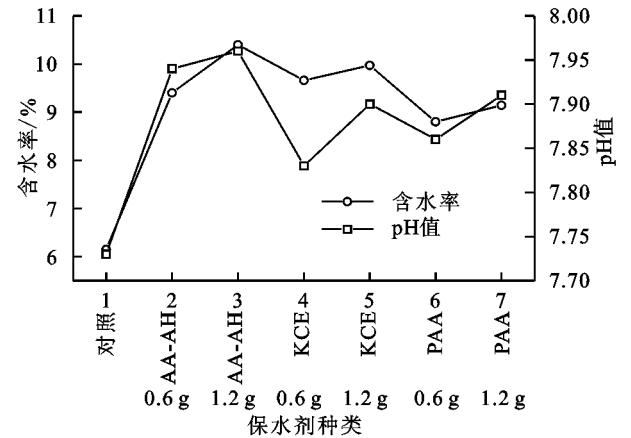


图 3 土壤 pH 值和含水率图

2.2.2 保水剂对玉米出苗率和土壤持水性能结果与分析 干旱地区的年降水量与蒸发量^[1],作物的生长受到极大的挑战,如何增加作物的发芽率和土壤持水性能至关重要,选取 AA-HA、KCE 和 PAA 3 种保水剂并设置 0.6 g 和 1.2 g 两个浓度,测试保水剂对玉米的发芽率和土壤持水性能的影响结果见表 1。

加入保水剂后,玉米的出苗率和枯萎天数较空白组都明显增加($p<0.05$),就发芽率来看加入 3 种保水剂后玉米的发芽率较空白组均增加了 17%,保水剂对增加玉米的发芽率有显著作用($p<0.05$)。AA-HA 保水剂在 0.6 g 浓度下玉米枯萎天数较空白组增加 61.5%;KCE 保水剂增加 7.7%;PAA 保水剂增加 23.1%。AA-HA 保水剂在 1.2 g 浓度时玉米枯萎天数较空白组增加 69.2%;KCE 保水剂增加 11.5%;PAA 保水剂增加 23.1%。保水剂增加土壤持水性能大小为 AA-HA>PAA>KCE,AA-HA 保水剂增加土壤持水性能较其他两种保水剂好,3 种保水剂的浓度超过 1.2 g 后玉米的枯萎天数较 0.6 g 时没有显著增加($p<0.05$)。

表 1 不同浓度保水剂对作物抗旱性影响

保水剂种类	保水剂浓度/g	枯萎天数/d	出苗率/%
空白	0	26a	83a
AA-HA	0.6	42b	100b
	1.2	44b	100b
MP3005 KCE	0.6	28c	100b
	1.2	29c	100b
PAA	0.6	32d	100b
	1.2	33d	100b

注:同列数据不同小写字母表示不同处理下差异达显著水平($p<0.05$)。

2.2.3 保水剂对玉米生长状况影响结果与分析 株

高和地上生物量是描述作物生长状况好坏的重要指标,株高是水分响应的的主要体现,而地上生物量则是描述植株地上干物质量积累的过程^[35]。分别测量玉米种子在 AA-HA、KCE 和 PAA3 种保水剂 0.6 g 和 1.2 g 两种浓度梯度作用下 20 d 时株高(图 4),并测定玉米在枯萎后玉米的地面生物量(图 5)。加入 3 种保水剂后玉米的株高较对照组均有明显增加且随保水剂浓度的增加而增加,保水剂在 0.6 g 浓度下,AA-HA 保水剂处理组较对照组株高增加 11.1%,KCE 保水剂处理组增加 13.9%,PAA 保水剂处理组株高增加 50%。在 1.2 g 浓度下,AA-HA 保水剂处理组较对照组株高增加 44.7%,KCE 保水剂处理组株高增加 53.4%,PAA 保水剂处理组保水剂株高增加 63.2%。PAA 保水剂对玉米株高的促进作用较其他两种保水剂好,促进植株株高生长能力的大小为:PAA>KCE>AA-HA。保水剂施用后玉米的地面生物量较对照组有明显增加,玉米的地面生物量随保水剂的浓度增加而增加,在 0.6 g 浓度下增加玉米地上生物量的大小为:KCE>PAA>AA-HA,在 1.2 g 浓度下增加玉米地上生物量的大小为:AA-HA>KCE>PAA。

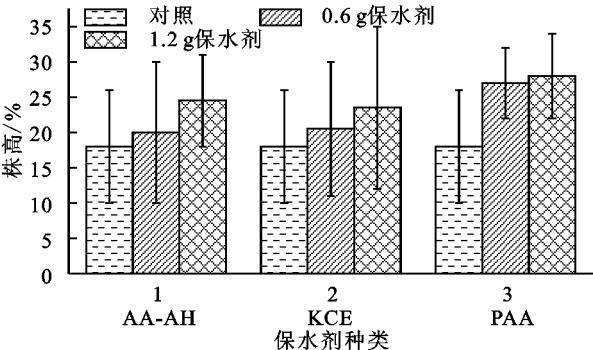


图 4 玉米 20 d 株高

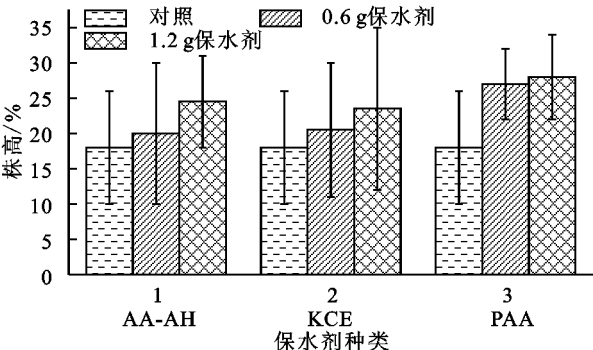


图 5 地面生物量

2.3 DEA 模型结果与分析

以保水剂投入量为投入指标,以出苗率、枯萎天数、地面生物量、株高、土壤含水率和 pH 值为产出指标。利用 Deap2.1 软件对保水剂的投入产出效率进行测算,其测算结果见表 2。根据 DEA 模型,效率值为 1 即表示 DEA 有效,由表 2 中的保水剂投入产出效率可以看出,

AA-HA、KCE 和 PAA 3 种保水剂的投入产出的综合效率值总体上较高。其中保水剂 DEA 综合效率值为 1 的有 0.6 gAA-HA 保水剂、0.6 gKCE 保水剂和 0.6 gPAA 保水剂处于 DEA 有效的状态,另外 3 种保水剂处于 DEA 无效状态,其中 1.2 gPAA 保水剂的综合效率最低为 0.545。在 DEA 模型中,由于综合效率=技术效率×规模效率,因 3 种保水剂的材质不同导致其自身性质不同,遂只考虑 3 种保水剂不同投入量下玉米生长的综合效率,并未考虑 3 种保水剂其自身技术特性,所以从表 2 可以看出主要是保水剂的规模效率影响其综合效率。3 种保水剂在投入 0.6 g 时都达到 DEA 有效状态,但当投入量增加到 1.2 g 时,其综合效率都有不同程度的下降,降幅为 PAA>KCE>AA-HA。发芽率、枯萎天数、地面生物量、株高、土壤含水率和 pH 值 6 个指标虽然随着保水剂的浓度增加而增加,但对玉米生长的总效率却在下降,其中 AA-HA 保水剂的综合效率降幅最小,为 0.244。在农业生产过程中,不仅要关注保水剂会促进作物哪些指标的增长,也要考虑保水剂的综合效率,即投入、产出最优化,有利于资源的合理配置。

表 2 保水剂综合效率

保水剂类型	总效率	技术效率	规模效率
AA-HA 0.6 g	1.000	1.000	1.000
AA-HA 1.2 g	0.756	1.000	0.756
MP3005 KCE 0.6 g	1.000	1.000	1.000
MP3005 KCE1.2 g	0.654	1.000	0.654
PAA 0.6 g	1.000	1.000	1.000
PAA 1.2 g	0.545	1.000	0.545
平均值	0.826	1.000	0.826

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 现代高分子化学研究认为,保水剂大多是高分子电解质,其溶胀力和吸水倍率受溶液中盐类的影响。当保水剂在浓盐溶液中水合时,与它们在无盐溶液中的水合相比,其膨胀能力降低^[2-3],这与 PAA、KCE 和 AA-HA3 种保水剂在 0.9%NaCl 溶液中的吸水倍率较去离子水中的吸水倍率下降的试验结果相符。

(2) 种子萌发期和幼苗期是整个植物生长周期中最重要的阶段,而水分是干旱区最重要的限制因素^[36],试验表明保水剂的加入对玉米的出苗率有明显的提高,表明保水剂的加入有助于提高玉米的出苗率,与李兴、谭国波和王洪君等^[22,24,33]研究发现保水剂有利于植物出苗率的提高的结论相一致;随着保水剂的加入玉米的地面生物量、株高和土壤持水性能都

有一定程度的增加,这与田娜、毛思帅、赵敏和杨浩^[19,23,37-38]等研究结果相符,说明保水剂有促进植物生长的作用。试验表明3种保水剂的加入均会造成土壤 pH 值的升高,且随着浓度的增加而增加,与杨红善和李兴等^[21,39]研究结果一致。

(3) DEA 模型分析结果表明玉米生长的综合效率随保水剂浓度的增大而降低与李兴、田娜、和韩旭等^[23-24,40]研究证明保水剂浓度过高抑制侧根生长、降低根系活力并使幼苗的根冠比都有先增加后降低的趋势的结论相佐证,说明 DEA 模型在评价保水剂对玉米综合效率方面有一定的适用性,目前保水剂的种类繁多但缺乏较好的评价方法,DEA 模型可根据不同地区的不同种植模式,选取适当的指标对保水剂进行评价,即 DEA 模型在评价保水剂对生物效能方面有一定应用性。

3.2 结论

(1) 3种保水剂在去离子水、0.9%NaCl 溶液、弱碱性水、自来水、井水和土壤水中的吸水能力均表现为 PAA>AA-AH>KCE;PAA 耐盐性较其他两种保水剂好($p<0.05$);3种保水剂在 70℃ 高温下进行反复吸水,随着反复次数的增加3种保水剂的吸水力比均开始下降,其降幅为 PAA>KCE>AA-AH,考虑干旱区的气候条件等因素可以选择 AA-AH 保水剂;保水剂有利于保持土壤水分,抑制水分的蒸发,并随保水剂浓度的增加而增加,在 0.6 g 浓度下保水能力大小为:KCE>AA-HA>PAA,在 1.2 g 浓度时则为 AA-HA>KCE>PAA,施用3种保水剂均会造成土壤的 pH 值随着保水剂浓度的增加而升高,其增幅大小为:KCE>PAA>AA-HA,说明 AA-HA 保水剂的施用对土壤的副作用最小。

(2) 玉米的出苗率、枯萎天数随着保水剂的浓度增加而增加,其中保水剂增加土壤持水性能的大小为:AA-HA>PAA>KCE,说明 AA-HA 保水剂增加土壤持水性能最好,但当3种保水剂浓度为 1.2 g 时其枯萎天数没有明显增加($p<0.05$);增加玉米株高的大小为:PAA>KCE>AA-HA,说明 PAA 保水剂对增加玉米株高有明显作用;3种保水剂在 0.6 g 浓度下增加玉米地面生物量的大小为:KCE>PAA>AA-HA,在 1.2 g 浓度下增加玉米地面生物量的大小为:AA-HA>KCE>PAA,综合来看 AA-HA 保水剂对增加玉米生物量作用更好。

(3) 通过 DEA 模型分析得出,3种保水剂的投入量为 0.6 g 时其综合效率都达到 DEA 有效值和资源合理利用的最优状态,保水剂浓度为 1.2 g 时,3种保水剂的综合效率的降幅为:PAA>KCE>AA-HA,其中 AA-

HA 保水剂综合效率下降的最少,在农业生产中保水剂并非施用越多越好,保水剂的其综合效率随用量增加而降低,在确定保水剂的用量时应考虑综合效率高的浓度,达到资源合理利用的较优状态。

参考文献:

- [1] 徐婉婷,韩舒,师庆东.不同保水剂在干旱环境下的基本性能对比研究[J].节水灌溉,2015(8):38-41.
- [2] 邹新禧.超强吸水剂[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [3] 崔英德,黎新明,尹国强.绿色高吸水树脂[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [4] 庄文化,冯浩,吴普特.高分子保水剂农业应用研究进展[J].农业工程学报,2007,23(6):265-270.
- [5] Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management[J]. Advances in Agronomy, 2007,92:75-162.
- [6] Sadeghi M, Hosseinzadeh H. Swelling Behaviour of a Novel Protein-Based Super Absorbent Hydrogel Composed of Poly(methacrylic Acid) and Collagen[J]. Asian Journal of Chemistry, 2010,22(9):6734.
- [7] 廖佳丽,徐福利,赵世伟.不同保水剂对宁南山区马铃薯生长发育和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(1):238-242.
- [8] 黄占斌,张国桢.保水剂特性测定及其在农业中的应用[J].农业工程学报,2002,18(1):22-26.
- [9] 杨永辉,吴普特,武继承,等.保水剂对冬小麦不同生育阶段土壤水分及利用的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):19-26.
- [10] Nge T T, Hori N, Takemura A, et al. Swelling behavior of chitosan/poly(acrylic acid) complex[J]. Journal of applied Polymer Science, 2004,92(5):2930-2940.
- [11] Helalia A M, Letey J. Cationic polymer effects on infiltration rates with a rainfall simulator[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988,52(1):247-250.
- [12] Terry R E, Nelson S D. Effects of polyacrylamide and irrigation method on soil physical properties[J]. Soil Science, 1986,141(5):317-320.
- [13] Silberbush M, Adar E, De Malach Y. Use of an hydrophilic polymer to improve water storage and availability to crops grown in sand dunes II. Cabbage irrigated by sprinkling with different water salinities[J]. Agricultural Water Management, 1993,23(4):315-327.
- [14] Woodhouse J, Johnson M S. Effect of superabsorbent polymers on survival and growth of crop seedlings[J]. Agricultural Water Management, 1991,20(1):63-70.
- [15] 谢伯承,薛绪掌,王纪华,等.保水剂对土壤持水性状的影响[J].水土保持通报,2003,23(6):44-46.
- [16] 韦兰英,袁维圆,焦继飞,等.紫花苜蓿和菊苣比叶面积和光合特性对不同用量保水剂的响应[J].生态学报,2009,29(12):6772-6778.

- [17] 宫丽丹,殷振华. 保水剂在农业生产上的应用研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 174-177.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [21] 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.
- [22] 王洪君,陈宝玉,梁烜赫,等. 保水剂吸水特性及对玉米苗期生长的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(5): 96-99.
- [23] 田娜,张蕾,江海东. 保水剂对垂盆草建植和生理代谢的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(2): 120-123.
- [24] 李兴,蒋进,宋春武,等. 保水剂对梭梭(*Haloxylon ammodendron*),白梭梭(*Haloxylon persicum*)种子萌发及幼苗根系的影响[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 797-801.
- [25] 蒋雅琴,李文嘉,康德贤,等. 不同保水剂对果菜类蔬菜育苗的影响[J]. 中国蔬菜, 2014(6): 40-43.
- [26] 邓洪波,陆林. 基于 DEA 模型的安徽省城市旅游效率研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 313-323.
- [27] 韦浩华,高岚. 基于 DEA 模型的农户林地经营效率分析:来自广东和江西的调研数据[J]. 中南林业科技大学学报:社会科学版, 2016, 10(1): 88-93.
- [28] 许建伟,许新宇,陈兴鹏,等. 基于 DEA 交叉模型的甘肃省城市效率评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 618-624.
- [29] 田玉川,李国玉,司马义,等. 丙烯酸—腐植酸复合吸水树脂的合成与性能[J]. 石油化工, 2012(8): 948-953.
- [30] 李景生,黄韵珠. 土壤保水剂的吸水保水性能研究动态[J]. 中国沙漠, 1996, 16(1): 86-91.
- [31] 郭树芳,安文明,张文俊,师庆东. 乌鲁木齐煤田灭火区混土种植基质配比试验研究[J]. 环境科学与技术, 2013(2): 80-85.
- [32] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京:科学出版社, 1978.
- [33] 谭国波,边少锋,马虹,等. 保水剂对玉米出苗率及土壤水分的影响[J]. 吉林农业科学, 2005, 30(5): 26-27.
- [34] Hwang S N, Chang T Y. Using data envelopment analysis to measure hotel managerial efficiency change in Taiwan[J]. Tourism Management, 2003, 24(4): 357-369.
- [35] 崔娜,张玉龙,白丽萍. 不同粒径保水剂对土壤物理性质和番茄苗期生长的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 127-130.
- [36] 宋杰,田长彦,张立运,等. NaCl 对囊果碱蓬,梭梭和白梭梭种子及初期幼苗的影响[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 543-547.
- [37] 赵敏,高会东,崔彦宏. 保水剂对夏玉米生长发育和产量的影响[J]. 玉米科学, 2006, 14(6): 125-126.
- [38] 杨浩. 保水剂对黄绵土,褐土及沙土物理特性影响研究[D]. 北京林业大学, 2011.
- [39] 杨红善,刘瑞凤,张俊平,等. PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 38-41.
- [40] 韩旭,赵瑞,陈俊琴,等. 添加不同浓度保水剂的育苗块对黄瓜幼苗生长发育及其质量的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(4): 209-211.



(上接第 159 页)

- [19] 李远富,薛波,邓域才. 铁路选线设计方案多目标决策模糊优选模型及应用研究[J]. 西南交通大学学报, 2000, 35(5): 465-470.
- [20] 何丹,金凤君,周璟. 基于 Logistic-CA-Markov 的土地利用景观格局变化:以京津冀都市圈为例[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 903-910.
- [21] 程锋,石英,朱德举. 耕地入选基本农田决策模型研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 50-53.
- [22] 胡雪丽,徐凌,张树深. 基于 CA-Markov 模型和多目标优化的大连市土地利用格局[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1652-1660.
- [23] Kityuttachai K, Tripathi N K, Tipdecho T, et al. CA-Markov analysis of constrained coastal urban growth modeling: Hua Hin seaside city, Thailand[J]. Sustainability, 2013, 5(4): 1480-1500.
- [24] 姜广辉,张凤荣,陈军伟,等. 基于 Logistic 回归模型的北京山区农村居民点变化的驱动力分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 81-87.