

一种耐盐型保水剂对沙培玉米生长特性的影响*

魏贤^{1,2} 陈瑞环^{2,3} 王萍^{1†} 刘云^{2,3} 姚荣江^{2,3}
王火焰^{2,3} 杨劲松^{2,3} 董元华^{2,3}

(1 兰州交通大学化学与生物工程学院, 兰州 730070)

(2 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 干旱与肥料利用率较低已成为制约我国农业发展的重要因素。以沙子代替土壤, 通过加入自制耐盐保水剂(Salt-tolerant water detaining polymer, SWDP), 进行钾肥淋溶和连续两茬玉米盆栽试验。盆栽试验按 SWDP 投加量设置 4 个处理, 即 SWDP 投加量分别为 0 (空白)、0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子。结果表明, SWDP 的加入有利于降低沙子中钾肥的淋溶损失, 不同处理(SWDP 投加量分别为 0.5 和 1.0 g kg⁻¹ 沙子) 钾肥淋溶累积损失量较空白分别降低了 12.69% 和 47.85%; 不同处理干旱缺水组玉米植株的存活时间较空白分别延长了 12、19 和 30 d; 正常供水组, 第一茬不同处理玉米植株氮素吸收量较空白分别增加了 8.83%、19.63% 和 22.39%, 磷素吸收量分别增加了 29.31%、30.19% 和 52.38%, 钾素吸收量分别增加了 11.61%、18.12% 和 20.27%; 第二茬不同处理玉米植株氮素吸收量较空白分别增加了 55.50%、117.1% 和 143.7%, 磷素吸收量分别增加了 77.12%、161.3% 和 156.5%, 钾素吸收量分别增加了 55.42%、74.13% 和 84.33%。上述结果说明, 在干旱甚至沙漠地区施入 SWDP 能够明显降低土壤养分的流失, 提高土壤含水率和植物对土壤养分的利用效果。

关键词 耐盐保水剂; 沙培; 淋溶损失; 玉米盆栽; 生理特性

中图分类号 S143.8; S152.7⁺5

文献标识码 A

水资源短缺与肥料利用率低已成为制约我国农业可持续发展的两个重要因素。首先, 我国水资源分布不均, 季节与区域差异性较显著, 农业用水效率较低且受旱土地逐年增加^[1]; 其次, 我国化肥施用量大、利用率低的现象普遍存在, 低土壤水分含量导致养分有效性降低, 大量灌溉导致土壤养分淋失^[2-3]。因此, 在现阶段如何同时提高土壤保水效果和肥料利用率显得尤为重要。

保水剂是一类具有较高吸水保水能力的高分子聚合物, 通常能够在短时间内吸收自身重量成百甚至上千倍的去离子水, 并且吸水后水分不易析出, 水分蒸发量降低, 而且可以反复吸水^[4]。当前市场上的保水剂以丙烯酸类和丙烯酰胺类为主, 也有许多学者利用天然高分子材料如淀粉、纤维素、壳聚糖等进行接枝反应合成保水剂^[5-8], 其产品具有较好的保水和持水性能, 展示出了良好的应用潜能和发展前景。目前, 已经有较多文献报道了保水剂施用在

* 国家重点研发计划项目(2016YFC0501309)和公益性行业(农业)科研专项项目(201203013)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC0501309), and the Public Welfare Industry (Agriculture) Research Project of China (No. 201203013)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangp@lztu.edu.cn; 4938438@163.com

作者简介: 魏贤(1991—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事环境材料合成及应用。E-mail: 962302698@qq.com
收稿日期: 2018-02-12; 收到修改稿日期: 2018-06-04; 优先数字出版日期(www.cnki.net):

土壤中所起的作用：研究发现保水剂能够改善土壤理化性质^[9-10]、优化土壤界面环境^[11]、提高土壤微生物活性^[12-13]，常用其进行土壤改良^[14-15]、抗旱保苗^[4,16]、防风固沙^[17]、水土保持^[18-19]等。

然而，传统的保水剂虽然在去离子水中的吸收效率较高，但其耐盐性较差，加之在农业生产中过多地施用化肥造成土壤阳离子含量增加，当保水剂施入土壤时，土壤中大量的阳离子使其吸收效率急剧降低，限制了它在农业方面的应用。在新型保水剂的研发方面，本课题组已有一定的前期研究工作，如以丙烯酸（Acrylic Acid, AA）、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸（2-acrylamide-2-methylpropanesulfonic acid, AMPS）和甲基烯丙基聚氧乙烯醚（Methyl allyl polyethylene ether, HPEG-2400）为单体通过水溶液聚合法制得耐盐型保水剂（Salt-tolerant water detaining polymer, SWDP），该保水剂在去离子水和 1.0% KCl 溶液中的吸收效率分别为 $1\ 787\ \text{g g}^{-1}$ 和 $201\ \text{g g}^{-1}$ ^[20]。本文以沙子代替土壤模拟沙漠地区极端条件，以 SWDP 为研究对象，通过钾肥淋溶试验和改良的霍格兰氏营养液浇注玉米盆栽试验，研究 SWDP 在沙子中的保水保肥效果以及其对不同条件下玉米生长的影响，以期确定 SWDP 对于土壤保水保肥的重要性，同时对 SWDP 在沙子中的持续性作用进行初步研究。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验所用保水剂为前期自制耐盐保水剂（SWDP），白色粉末状，主要成分为丙烯酸（AA）、2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸（AMPS）和甲基烯丙基聚氧乙烯醚（HPEG-2400）^[20]。沙子为市售河沙，购自南京生健全化玻仪器有限公司。塑料淋溶柱规格为高 30 cm、直径 5 cm；塑料花盆规格为高 25 cm、直径 25 cm。钾肥为 KCl（分析纯）；改良的霍格兰氏营养液（自来水配制，省去微量元素）。玉米品种选用郑单 958，该种子具有抗性好、耐干旱、耐高温的特性。

1.2 试验设计

本研究进行了钾肥淋溶试验和连续两茬玉米盆栽试验。其中，钾肥淋溶试验参照杜建军等^[21]的“间接土柱淋溶法”，于 2014 年 5 月 4 日至 5 月 30 日在中国科学院南京土壤研究所温室（ $32^{\circ}03'14.40''\text{N}$ ， $118^{\circ}48'0.29''\text{E}$ ）进行。温室内空气相对湿度为 78%，6—8 月日平均气温 36°C ，9—11 月日平均气温为 29°C ，年均日照时数 1 863 h。试验过程中不经特殊光照处理。试验所用沙子用去离子水冲洗并风干过 10 目筛后备用。选取上述淋溶柱 12 个，在淋溶柱下端垫上一层中速定性滤纸。称取 12 份 250 g 风干沙，灌入 12 个淋溶柱作为垫层，人为压实使其达到一定的紧实度（容重为 $1.38\ \text{g cm}^{-3}$ ）。再称取 12 份 250 g 的风干沙，按 SWDP 投加量设置 4 个处理，即 SWDP 投加量分别为 0（空白）、0.5、1.0 和 $2.0\ \text{g kg}^{-1}$ 沙子，每处理设置 3 个重复。在上述 4 个处理的 12 份样品中分别加入 150 mg 的 KCl 混合均匀，依次加至前述有垫层的淋溶柱中。用封口膜将淋溶柱下端出水口封口后，分别缓慢滴加 100 ml 去离子水，室温下密封保存 2 d，确保 SWDP 与水充分接触（出水口下端有液滴产生）。去除出水口封口膜，为防止淋溶过程中产生水分蒸发损失，用带盖输液器分别向 12 个淋溶柱中缓慢滴加 150 ml 去离子水，滴速控制在 $1\ \text{滴 min}^{-1}$ （防止滴速过快引起的水肥淋溶损失），用 250 ml 锥形瓶收集淋溶液。此后每 6 天重复 1 次，共 4 次，分别收集 4 次的淋溶液并定容。

玉米盆栽试验于同年（2014 年）6 月 21 日在中国科学院南京土壤研究所温室内进行，试验分为干旱缺水模拟与正常供水两组，同样以沙子代替土壤，将沙子风干后过 5 目筛。试验玉米先对其进行催芽，后选取芽生长一致的幼苗移至盆中，覆沙厚度约 1~2 cm，每个

试验盆的用沙量为 15 kg (风干沙, 容重控制在 1.38 g cm^{-3})。盆栽试验在控制其他因素(土壤初始含水量、加水量、肥料投加量)不变的情况下, 按 SWDP 投加量设置 4 个处理, 即 SWDP 投加量分别为 0 (空白)、0.5、1.0 和 1.5 g kg^{-1} 沙子, 每处理设置 3 个重复。在玉米生长的整个过程中, 不同时期浇注不同浓度的霍格兰氏营养液, 注意于靠近花盆内壁附近缓慢浇注, 防止侧漏及扰动沙层以暴露玉米根部。出苗期, 为防止灼伤幼苗将 1/5 霍格兰氏营养液配置成 1/1 000 浓度使用, 出苗后, 配置成 1/500 浓度使用。每隔 2 天浇注一次, 每次先浇 200 ml 营养液, 6 h 后再浇 100 ml 自来水。其中, 干旱缺水模拟组, 在出苗后按上述营养液加自来水的方法浇注一个月后停止供应, 两个月后观察幼苗存活状况。正常供水组, 在出苗后按营养液加自来水的方法连续浇注至两个月后(8 月 25 日)收获玉米植株。同时, 为进一步探讨自制保水剂的可持续使用效果, 正常供水组在第一茬玉米盆栽试验结束后, 连续进行第二茬种植(不额外投加保水剂), 试验用种及具体步骤与第一茬相同, 于 8 月 30 日进行种植, 11 月 3 日收获(两茬玉米植株出苗后的生长期均为两个月)。

1.3 测定方法

淋溶液中钾素含量采用火焰光度计(FP 640 型火焰光度计, 上海傲谱分析仪器有限公司)法测定; 玉米植株氮素含量采用凯氏定氮法(UV 8100 B 型紫外可见分光光度计, 北京莱伯泰科仪器有限公司)测定, 钾素含量采用火焰光度计法测定, 磷素含量采用钼锑抗比色法测定(700 nm 波长处)^[22]; 并用卷尺、游标卡尺、电子天平和叶面积测量仪分别对玉米植株的株高、茎粗、干重、鲜重和最大叶面积进行测量。

1.4 数据分析

上述试验数据均采用 Microsoft Excel 2007 进行平均值和标准差的计算, 用 R 3.1.2 软件对不同 SWDP 投加量处理下各指标的差异显著性进行了单因素方差分析(One-way ANOVA), 显著性水平为 0.05, 所得结果用 Origin 8.5 进行绘图。

2 结果

2.1 保水剂对钾肥淋溶累积损失的影响

在 SWDP 投加量为 2.0 g kg^{-1} 沙子时, 过于严重的溶胀效应导致淋溶柱堵塞, 无淋溶液滴出。因此, 仅能对 SWDP 投加量为 0.5 g kg^{-1} 沙子和 1.0 g kg^{-1} 沙子时淋溶液中钾素含量进行测定, 每次淋溶液中钾素含量及最终累积量见表 1。在 4 次淋溶结束后, SWDP 投加量为 0.5 g kg^{-1} 沙子和 1.0 g kg^{-1} 沙子的两处理组钾素淋溶累积损失量与空白组相比差异显著 ($p < 0.05$), 每个淋溶柱中钾素含量分别降低了 12.96% 和 47.85%。值得注意的是, 在第二次淋溶时, 当 SWDP 与沙子的质量比为 1.0 g kg^{-1} 时, 淋溶液中的钾素含量反而高于空白处理, 这可能是因为该处理钾素在第一次淋溶时保留得多, 后续淋溶相对较高。

表 1 耐盐保水剂不同投加量下钾素累积淋溶量

Table 1 Cumulative leaching loss of potassium relative to application rate of the salt-tolerant detaining polymers (SWDP)

SWDP 投加量 Addition of SWDP (g kg^{-1})	淋溶液钾含量 Potassium content of leaching solution(mg)				总计 Total (mg)
	(1)	(2)	(3)	(4)	
0	163.3 \pm 1.06a	5.81 \pm 0.08a	4.18 \pm 0.09a	3.97 \pm 0.14a	177.3 \pm 1.23a
0.5	142.6 \pm 3.61b	5.63 \pm 0.07a	3.26 \pm 0.21a	3.33 \pm 0.27a	154.8 \pm 3.21b
1.0	68.61 \pm 11.32c	15.67 \pm 4.48b	4.20 \pm 0.83a	3.99 \pm 0.80a	92.5 \pm 6.09c

注: 表中 SWDP 投加量表示 SWDP 与沙子的质量比; (1)、(2)、(3)、(4)分别表示在 SWDP 不同投加量下, 四次淋溶液中钾素淋溶损失含量测定结果, 表中数据为平均值±标准差; 同列中不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。下同 Note: The application rate of SWDP is expressed as mass ratio of SWDP to sand. (1), (2), (3) and (4) in the table refers to the round of determination of potassium leaching loss with leachate relative to SWDP application rate. The data in the table are means±SD, and the different lowercase letters in the same column represent significant difference at the 0.05 level. The same below

2.2 保水剂对玉米生长状况与形态指标的影响

为研究 SWDP 的加入对玉米植株生长状况与形态指标的影响, 分别进行干旱模拟和正常供水两组盆栽试验。在干旱条件下, 不同 SWDP 加入量玉米植株存活时间如表 2 所示, 可以看出, SWDP 的加入能够显著延长干旱缺水条件下玉米植株的存活时间 ($p < 0.05$)。与不加 SWDP 的空白处理相比较, 当 SWDP 投加量为 0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子时, 玉米植株存活时间分别延长了 12、19 和 30 d。

表 2 保水剂不同投加量对玉米存活时间的影响

Table 2 Effect of addition of SWDP on survival time of the maize relative to application rate (d)

SWDP 投加量 Addition of SWDP (g kg ⁻¹)	0	0.5	1.0	1.5
玉米存活时间 Survival time of the maize (d)	17±1 a	29±2 b	36±2 c	47±2 d

正常供水条件下, 不同 SWDP 投加量两茬玉米植株株高、茎粗、干重、鲜重及最大叶面积结果见表 3。经计算发现, 第一茬中, 不同 SWDP 投加量处理玉米植株株高、干重和鲜重均有显著差异 ($p < 0.05$), 相对于空白处理, 当 SWDP 投加量为 0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子时, 玉米植株株高分别增加了 21.53%、35.90%和 70.70%, 干重分别增加了 26.13%、26.60%和 31.30%, 鲜重分别增加了 16.42%、17.16%和 20.30%, 而对于玉米植株最大叶面积而言, 在第一茬中 SWDP 投加量为 1.0 g kg⁻¹ 沙子的处理达到最大值, 显著大于其他处理($p < 0.05$); 此外, 不同 SWDP 投加量的处理对于第一茬玉米植株的茎粗影响不显著 ($p > 0.05$)。第二茬中, 不同 SWDP 投加量的处理玉米植株株高、茎粗、干重、鲜重和最大叶面积均有显著差异 ($p < 0.05$), 相对于空白处理, 当 SWDP 投加量为 0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子时, 玉米植株株高分别增加了 74.27%、101.2%和 110.8%, 茎粗分别增加了 37.84%、39.90%和 46.58%, 干重分别增加了 86.92%、113.9%和 122.0%, 鲜重分别增加了 121.1%、164.5%和 216.4%, 最大叶面积分别增加了 19.84%、44.08%和 46.17%。值得注意的是, SWDP 的加入对于玉米植株各形态指标的影响, 相比较于第一茬, 在第二茬中更加明显, 这可能与保水剂的性能有关, 当保水剂加入土壤时, 其作用最大化需要一定的老化时间。

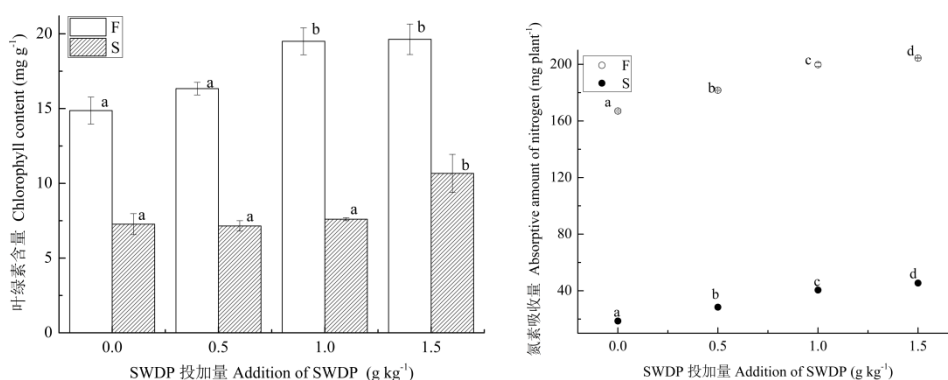
表 3 保水剂不同投加量对两茬玉米生长与形态指标的影响

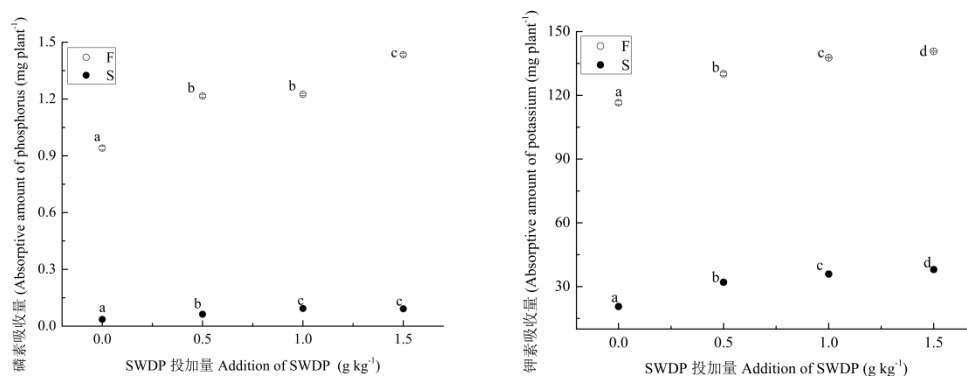
Table 3 Effects of addition of SWDP on growth and morphological indexes of the two seasons of maize relative to application rate

项目 Item	SWDP 投加量 Addition of SWDP (g kg ⁻¹)	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	干重 Dry weight (g)	鲜重 Fresh weight (g)	最大叶面积 Maximum leaf area (cm ²)
第一茬玉米 First cropping of maize	0	63.17±3.75 a	10.60±0.80a	10.64±0.50a	670.0±14.14a	476.5±33.52a
	0.5	76.77±5.30b	11.27±1.26a	13.42±0.24b	780.0±49.67b	608.9±59.45b
	1.0	85.85±4.15c	12.45±0.11a	13.47±0.33b	785.0±4.08b	541.7±20.85a
	1.5	107.5±2.27d	12.61±0.77a	13.97±1.18c	806.0±41.10b	540.8±50.14a
第二茬玉米 Second cropping of maize	0	27.83±0.85a	5.84±0.49a	4.13±0.34a	18.33±4.03a	257.6±27.63a
	0.5	48.50±2.50b	8.05±0.05b	7.72±0.28b	40.50±0.41b	308.7±8.82b
	1.0	56.00±1.00b	8.17±0.06b	8.80±1.77c	48.50±7.76b	371.1±0.95b
	1.5	58.67±3.86b	8.56±0.23b	9.17±0.28c	58.00±4.08b	376.5±6.25b

2.3 保水剂对玉米叶绿素含量及 N、P、K 吸收量的影响

分别对正常供水条件下两茬玉米的叶绿素含量及 N、P、K 吸收量进行测定。结果表明，不同 SWDP 投加量处理下，两茬玉米植株的 N、P、K 吸收量差异显著 ($p < 0.05$)，各处理中玉米植株 N、P、K 吸收量随 SWDP 投加量的增加呈现出递增的趋势。与空白处理相比，当 SWDP 投加量为 0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子时，第一茬玉米植株氮素吸收量分别增加了 8.83%、19.63% 和 22.39%，磷素吸收量分别增加了 29.31%、30.19% 和 52.38%，钾素吸收量分别增加了 11.61%、18.12% 和 20.72%。第二茬玉米植株氮素吸收量分别增加了 55.50%、117.1% 和 143.7%，磷素吸收量分别增加了 77.12%、161.3% 和 156.5%，钾素吸收量分别增加了 55.42%、74.13% 和 84.33%。同时，SWDP 的加入对于两茬玉米叶片叶绿素含量也有一定的提高作用，当 SWDP 投加量为 0.5、1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子时，第一茬玉米叶片叶绿素含量分别增加了 9.89%、31.23% 和 32.13%，其中，1.0 和 1.5 g kg⁻¹ 沙子的两处理相对于空白差异显著 ($p < 0.05$)，第二茬玉米叶片叶绿素含量仅有在 SWDP 投加量为 1.5 g kg⁻¹ 沙子时，显著高于其他处理 ($p < 0.05$)，相对空白处理，其含量增加了 46.78% (图 1)。





注: F: 第一茬玉米植株, S: 第二茬玉米植株, 不同字母表示差异显著情况 ($p < 0.01$)。Note: F stands for the first cropping of maize, S for the second cropping of maize, and different lowercase letters mean significant differences at the 0.05 level

图 1 保水剂不同投加量下两茬玉米植株叶绿素含量及 N、P、K 吸收量变化趋势

Fig. 1 Effects of SWDP on contents of chlorophyll and absorptive amount of N, P and K in the two seasons of maize relative to application rate

3 讨论

保水剂加入土壤时,不仅能够降低土壤中可溶性养分的淋溶损失,而且能够稳定土壤结构、降低土壤容重和促进土壤团聚体的形成^[23]。本研究中将保水剂 SWDP 加入沙子中进行钾肥淋溶试验时发现,SWDP 的加入能够明显抑制沙子中钾肥的淋溶损失,且随其加入量的增加效果越发明显(表 1),当 SWDP 加入量过高时甚至出现堵塞出水口的现象。这是因为加入沙子中的 SWDP 遇水时,在其自身溶胀增大的同时能够将沙子粘合结成团块状,使得沙子的透水性降低,减少了沙子中的水分流失。同时,SWDP 分子能够通过离子交换与表面吸附作用对肥料中的 K^+ 进行吸附,将 K^+ 与沙子包裹在其中,进而使得钾素的流失降低^[23-24]。

将保水剂 SWDP 加入沙子中进行盆栽试验时发现,SWDP 的加入不仅能够延长干旱缺水条件下玉米植株的存活时间,而且能够显著提高正常供水条件下玉米植株株高、茎粗、干鲜重和最大叶面积等,这是因为保水剂的加入能够有效降低沙子中水肥的蒸发和淋溶损失,使得植物生长时拥有更好的土壤环境与充足的水肥供应,进而增加植株根系活力、叶面厚度、气孔数量和内部导管大小等^[25-27]。

N、P、K 是玉米植株生长发育的必需养分,其含量的高低直接关系到玉米植株能否正常生长。为提高植物对土壤肥料的利用效率,有学者^[23]在土壤中加入多种保水剂进行土壤保水保肥试验,发现钠盐型保水剂(聚丙烯酸钠类,凹凸棒与聚丙烯酸钠的交联物)能够显著提高植物对土壤氮肥的利用效率,但是对于钾肥而言,效果却不太明显,其原因可能是由于 Na^+ 和 K^+ 的电性电量相同,理化性质相近,对 K^+ 的吸持能力弱。而本研究中发现,SWDP 的加入对于玉米植株 N、P、K 含量均有明显的促进作用。虽然同属于钠盐型保水剂,但是 SWDP 具有耐盐性的优势,能够吸收大量的盐溶液^[20],使得土壤保水保肥效果增强。SWDP 分子加入沙子时,自身吸水溶胀后将大量的无机离子和养分包裹在其中,同时通过静电引力、范德华力、离子交换力、螯合等机制增强了对养分的吸附作用,使得植物生长所需的水溶性养分能够保留在保水剂分子中,待植物生长发育需要时缓慢释放,以达到提高植株 N、P、K 含量的效果^[23,28]。

保水剂的耐盐性与高成本是限制其推广应用的关键因素。目前市售保水剂的耐盐性普

遍较低, 它们仅能吸收自身重量几十倍的生理盐水^[29], 而本研究自制的保水剂在 1.0% KCl 溶液中的吸收效率可达 201 g g^{-1} ^[20]。有研究表明^[30], 以聚丙烯酸盐为聚合主体, 向其中引入非离子型大单体丙烯酰胺, 通过加入螯合剂制备交联型高吸水树脂, 能够有效提高保水剂的耐盐性, 其产品生理盐水中的吸收效率可达 190 g g^{-1} , 但是在聚合过程中所使用的丙烯酰胺与螯合剂纯度要求高, 其成本较高。有研究表明^[31-32], 利用小麦秸秆接枝丙烯酸和荞麦淀粉接枝丙烯酸制备的保水剂, 生产成本大大降低, 但是其在生理盐水中的吸收效率会明显下降; 因此, 在保水剂的研发方面始终很难做到高耐盐与低成本二者兼顾。目前市售保水剂在生理盐水中的吸收效率约为 $50\text{—}100 \text{ g g}^{-1}$, 产品均价约为每千克 20 元, 而本研究中所使用的保水剂不仅耐盐性高, 且其制造成本相对较低 (每千克造价仅为 7 元左右)。

现阶段, 尚未发现有关保水剂施入土壤后持续利用效果的研究。本研究中, 为进一步探讨 SWDP 的可持续使用效果, 正常供水组在第一茬玉米盆栽试验结束后, 连续进行第二茬种植 (不额外投加保水剂), 对第二茬玉米植株的株高、茎粗、干重、鲜重、最大叶面积、叶绿素含量和 N、P、K 吸收量进行测定, 发现相比第一茬玉米植株, SWDP 的加入对于玉米植株生长发育的促进作用在第二茬中更加明显。产生这种现象的原因尚不明确, 可能是因为 SWDP 施入土壤后需要一定的老化时间其作用才能达到最大化。目前, 本研究进行了简单的前期玉米盆栽试验, 并未对其整个生育期及产量影响进行测定, 尚需进行大田试验进一步研究。

4 结 论

本研究在纯沙基质中加入保水剂 SWDP, 能够显著提高沙子的保水保肥作用, 促进玉米植株的生长发育; 即使在缺水的条件下, 保水剂的加入也能够延长植株的存活时间。因此, 在中国干旱漏水漏肥的砂质土壤中此类保水剂对植物正常生长和发育有积极作用, 本研究可为 SWDP 在干旱地区尤其在荒漠化治理中的应用提供依据。

参 考 文 献

- [1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1—11
Luo X W, Liao J, Hu L, et al. Improving agriculture mechanization level to promote agricultural sustainable development (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agriculture Engineering, 2016, 32(1): 1—11
- [2] 陈金, 赵斌, 衣淑娟, 等. 我国变量施肥技术研究现状与发展对策. 农机化研究, 2017, 39(10): 1—6
Chen J, Zhao B, Yi S J, et al. Research on present situation and the development countermeasures of variable rate fertilization technology in China (In Chinese). Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(10): 1—6
- [3] 李佳岭, 李龙保, 廖宗文, 等. 保水剂施用层次对草坪生长及土壤水肥的影响. 草业学报, 2014, 23(4): 61—67
Li J L, Li L B, Liao Z W, et al. The effect of different super absorbent polymer applying layer on turf growth and soil water and fertility (In Chinese). Acta Praculturae Sinica, 2014, 23(4): 61—67
- [4] 张艳丽, 于彩霞, 李立军, 等. 施用保水剂对谷子抗旱保苗及产量的影响. 中国农学通报, 2014, 30(18): 238—244
Zhang Y L, Yu C X, Li L J, et al. Effect of super absorbent polymer to drought resistance, seedling and yield of millet (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(18): 238—244

- [5] Fekete T, Borsa J, Takács E, et al. Synthesis of carboxymethylcellulose/acrylic acid hydrogels with superabsorbent properties by radiation-initiated crosslinking. *Radiation Physics and Chemistry*, 2016, 124: 135—139
- [6] Essawy H A, Ghazy M B M, El-Hai F A, et al. Superabsorbent hydrogels via graft polymerization of acrylic acid from chitosan-cellulose hybrid and their potential in controlled release of soil nutrients. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 89: 144—151
- [7] Diao M, Li Q, Xiao H, et al. Synthesis and adsorption properties of superabsorbent hydrogel and peanut hull composite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, 2(3): 1558—1567
- [8] Wu F, Zhang Y, Liu L, et al. Synthesis and characterization of a novel cellulose-g-poly (acrylic acid-co-acrylamide) superabsorbent composite based on flax yarn waste. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 87(4): 2519—2525
- [9] 邢学刚, 彭韬, 王世杰, 等. 白云岩石漠化坡地土壤改良盆栽试验研究报道—以种植黑麦草为例. *地球与环境*, 2017, 45(2): 229—235
Xing X G, Peng T, Wang S J, et al. Agent and activated carbon as soil amendments on dolomite slopes—A case study of perennial ryegrass (In Chinese). *Earth and Environment*, 2017, 45(2): 229—235
- [10] Bai W, Zhang H, Liu B, et al. Effects of super - absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles. *Soil Use and Management*, 2010, 26(3): 253-260
- [11] 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. *农业工程学报*, 2016, 32(1): 125—131
Huang Z B, Sun P C, Zhong J, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management(In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1): 125—131
- [12] 王琰, 井大炜, 付修勇, 等. 保水剂施用量对杨树苗土壤物理性状与微生物活性的影响. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 53—58
Wang Y, Jing D W, Fu X Y, et al. Effects of application amount of super-absorbent polymer on soil physical characteristics and microbial activity under poplar seedlings (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(3): 53—58
- [13] 刘洋, 史薪钰, 陈梦华, 等. 不同保水措施对退化干旱山地新植核桃园土壤养分和微生物的影响. *水土保持通报*, 2015, 35(4): 218—222
Liu Y, Shi X Y, Chen M H, et al. Effects of different water conservation measures on soil nutrients and microorganisms in newly planted walnut orchard in degraded drought mountain land (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(4): 218—222
- [14] 彭韬, 邢学刚, 蔡先立, 等. 保水剂与活性炭改良白云岩石漠化坡地土壤促进植物生长的盆栽试验研究. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 525—532
Peng T, Xing X G, Cai X L, et al. Pot experiment research on the effects of water retaining agent and activated carbon as soil amendments for plant growing on dolomitic rocky desertification slopes (In Chinese). *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 525—532
- [15] 李想, 张宝娟, 李继泉, 等. 保水剂与有机肥配施对铁尾矿理化性质的改良作用. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 554—562
Li X, Zhang B J, Li J Q, et al. Effects of combined application of water retention agent and organic fertilizer on physico-chemical properties of iron tailings (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(2): 554—562
- [16] Chen X, Huang L, Mao X Y, et al. A comparative study of the cellular microscopic characteristics and mechanisms of maize seedling damage from superabsorbent polymers. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 274—282

- [17] Yang L, Yang Y, Chen Z, et al. Influence of super absorbent polymer on soil water retention, seed germination and plant survivals for rocky slopes eco-engineering. *Ecological Engineering*, 2014, 62: 27—32
- [18] Liu J, Shi B, Lu Y, et al. Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(3): 589—595
- [19] Guilherme M R, Aouada F A, Fajardo A R, et al. Superabsorbent hydrogels based on polysaccharides for application in agriculture as soil conditioner and nutrient carrier: A review. *European Polymer Journal*, 2015, 72: 365—385
- [20] 陈瑞环, 王萍, 刘云, 等. 耐盐保水剂的合成及其性能. *化工进展*, 2015, 34(6): 1750—1754
Chen R H, Wang P, Liu Y, et al. Synthesis and performance of anti-salt water retention agent (In Chinese). *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(6): 1750—1754
- [21] 杜建军, 苟春林, 崔英德, 等. 保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1296—1301
Du J J, Gou C L, Cui Y D, et al. Effects of water retaining agent on ammonia volatilization and nutrient leaching loss from N, P and K fertilizer (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1296—1301
- [22] 鲁如坤. *土壤农业化学分析方法*. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000: 296—336
Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 296—336
- [23] 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. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 221—226
Ma Z, Yao H Y, Zhang B S, et al. Effect of different kinds of super absorbent polymers on distribution and stability of clay soil aggregates and nutrient accumulation by maize (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 221—226
- [24] 刘陆涵, 马妍, 刘振海, 等. 三种环境材料对土壤水肥保持效应的影响研究. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1811—1819
Liu L H, Ma Y, Liu Z H, et al. Effect of three kinds of environmental materials on soil moisture and fertility conservation (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1811—1819
- [25] 马海林, 刘方春, 马丙尧, 等. 保水剂对侧柏容器苗根际土壤微生物种群结构及干旱适应能力的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(1): 43—48
Ma H L, Liu F C, Ma B Y, et al. Effects of super-absorbent polymer on the microbial community structure in rhizosphere soil and drought resistance of *platycladus orientalis* container seedlings (In Chinese). *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2016, 22(1): 43—48
- [26] 李继成, 张富仓, 孙亚联, 等. 施肥条件下保水剂对土壤蒸发和土壤团聚性状的影响. *水土保持通报*, 2008, 28(4): 48—53, 89
Li J C, Zhang F C, Sun Y L, et al. Effect of super absorbent polymer on characteristics of soil evaporation and soil aggregation under different fertilizer treatments (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(4): 48—53, 89
- [27] 王帅, 姚凯, 陈殿元, 等. 腐殖酸保水剂用量对白浆土养分及玉米产量性状的影响研究. *玉米科学*, 2018, 26(1): 149-153
Wang S, Yao K, Chen D Y, et al. Properties of corn yield and albic soil nutrient affected by the fertilizing amount of water-retaining agent derived from humic acid (In Chinese). *Journal of Maize Science*, 2018, 26(1): 149-153
- [28] 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. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(1): 120—128

- Zhang F C, Li J C, Lei Y, et al. Effects of super absorbent polymer on retention properties of soil water and nutrient (In Chinese). *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(1): 120—128
- [29] 黄麟, 叶建仁, 盛江梅, 等. 6种保水剂吸水保水性能的比较. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2007, 31(2): 101-104
- Huang L, Ye J R, Sheng J M, et al. Comparative analysis of water absorption and retention to six super absorbent polymers(In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2007, 31(2): 101-104
- [30] 陈日清, 储富祥, 金立维, 等. 一种耐盐保水剂的制备及其性能研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(2): 33-37
- Chen R Q, Chu F X, Jin L W, et al. Study on preparation and properties of salt tolerant acrylic acid absorbent resin (In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2006, 30(2): 33-37
- [31] 张慧瑛, 樊丹阳, 卢妹妹, 等. 利用小麦秸秆制备的保水剂性能研究. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 193-198
- Zhang H Y, Fan D Y, Lu M M, et al. Synthesis and water-holding performance of water retaining agent made from wheat straw (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(2): 193-198
- [32] 李云仙, 郑志锋, 刘祥义, 等. 荞麦淀粉保水剂的制备工艺优化及性能研究. *应用化工*, 2016, 45(5): 850-853
- Li Y X, Zheng Z F, Liu X Y, et al. Study on preparation and water retention property of buckwheat starch water retaining agent (In Chinese). *Applied Chemical Industry*, 2016, 45(5): 850-853

Effect of a Salt-tolerant Type of Water-retaining Polymer on Growth Characteristics of Maize in the Sand

WEI Xian^{1,2} CHEN Ruihuan^{2,3} WANG Ping^{1†} LIU Yun^{2,3} YAO Rongjiang^{2,3} WANG Huoyan^{2,3} YANG Jinsong^{2,3} DONG Yuanhua^{2,3}

(1 School of Chemical & Biological Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

(2 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】 Water and nutrients are essential elements plants need for growth. So it is very important to improve soil moisture regime and crop fertilizer utilization efficiency in agricultural production. The purpose of this study is to investigate effects of a home-made salt-tolerant water retaining polymer on leaching loss of potassium and growth of maize, and determine roles of the polymer in water retention and soil nutrient conservation in sand, in an attempt to provide certain technical support for application of the polymer in the arid area. 【Method】 In this study, a pot experiment was carried out using sand instead of soil to explore effects of the polymer on leaching of potassium fertilizer and growth of maize of two consecutive seasons. The part for leaching of potassium was designed to have four treatments, in terms of application rate of the polymer, i.e. 0 g kg⁻¹ (blank), 0.5 g kg⁻¹, 1.0 g kg⁻¹ and 2.0 g kg⁻¹, and the part for maize growth also had four treatments

in terms of application rate of the polymer, too, i.e. 0 g kg⁻¹ (blank), 0.5 g kg⁻¹, 1.0 g kg⁻¹ and 1.5 g kg⁻¹. At the same time, all the treatments were subjected two levels of soil water content separately, that is normal and drought. The second crop of maize was planted after the harvest of the first in the normal group. Content of potassium in leachate from each pot was determined and plant height, stem diameter, dry weight, fresh weight, maximum leaf area and absorptive amount of N, P and K of the maize were measured. **【Result】** All the findings of the experiment demonstrate that the polymer helps reduce leaching loss of potassium fertilizer in sandy soil. Comparing with the control, the treatment amended with 0.5 g kg⁻¹ or 1.0 g kg⁻¹ polymer was 12.96% or 47.85%, respectively, lower in potassium leaching loss. In the treatment amended with 0.5 g kg⁻¹, 1.0 g kg⁻¹ and 1.5 g kg⁻¹, the crop survived 12 days, 19 days and 30 days longer, respectively, in the drought group, and the crop of the first harvest was 8.83%, 19.63% and 22.39%, respectively, higher in N absorptive amount, 29.31%, 30.19% and 52.38% higher in P absorptive amount and 11.61%, 18.12% and 20.72% in K absorptive amount, and the crop of the second harvest was 55.50%, 117.1% and 143.7%, higher in N absorptive amount, 77.12%, 161.3% and 156.5% higher in P absorptive amount and 55.42%, 74.13% and 84.33% higher in K absorptive amount, respectively. **【Conclusion】** All the findings in this experiment demonstrate that application of the home-made salt-tolerant water detaining polymers in arid and even desert areas could significantly reduce nutrient loss and improve soil water regime.

Key words Salt-tolerant water detaining polymer; Sand cultivation; Leaching loss; Pot culture of maize; Physiological characteristics

(责任编辑: 陈荣府)