氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响

钟 心，钟 建，黄占斌

〔中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院，北京 100083〕

摘 要：[目的] 探讨氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响，为揭示土壤水肥保持和重金属污染治理的协调性机制，制定 SAP 应用技术规程等提供参考。[方法] 采用土柱淋溶试验方法，比较添加氮肥和磷肥对 SAP 钝化土壤铅(Pb)、镉(Cd)效果的影响。[结果] 在 Pb，Cd 复合污染土壤中 SAP 用量为 1.0g/kg 时，控氮释磷效果较好，相比无 SAP 的对照处理，Pb 累积淋失量减少 5.1%，Cd 累积淋失量增加 13.6%；氮磷肥添加试验表明，添加氮肥的 SAP 处理 Pb 累积淋失量增加 76.7%，Cd 累积淋失量增加 47.6%，添加磷肥的 SAP 处理 Pb 累积淋失量减少 26.0%，Cd 累积淋失量减少 20.5%；添加复合氮、磷肥的 SAP 处理 Pb 累积淋失量减少 2.3%，Cd 累积淋失量增加 8.3%。[结论] 保水剂具有控氮释磷效应，且对土壤中的 Pb，Cd 有一定钝化作用；氮肥降低 SAP 钝化 Pb，Cd 的效果，而磷肥增强 SAP 钝化 Pb，Cd 的效果；氮、磷肥复合对 SAP 钝化 Pb 的效果影响不显著，但会降低 SAP 钝化 Cd 的效果。

关键词：保水剂；氮肥；磷肥；铅；镉；钝化效应

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2019)02-0088-06 **中图分类号**：X53

文献参数：钟心，钟建，黄占斌. 氮磷肥施用对保水剂钝化土壤重金属铅镉效果的影响[J]. 水土保持通报，2019，39(2)：88-93. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.02.014；Zhong Xin，Zhong Jian，Huang Zhanbin. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizer on passivation of heavy metal Pb and Cd by super absorbent polymer in soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(2)：88-93.

Effects of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer on Passivation of Heavy Metal Pb and Cd by Super Absorbent Polymer in Soil

Zhong Xin，Zhong Jian，Huang Zhanbin

〔*School of Chemical and Environmental Engineering of China University of Mining and Technology(Beijing)*，*Beijing* 100083，*China*〕

Abstract：[Objective] The effects of the adoption of nitrogen and phosphorus fertilizer on the passivation effectiveness of super absorbent polymer(SAP) on heavy metal Pb and Cd in soil are studied in order to reveal the coordination mechanism of moisture and fertilizer conservation and heavy metal pollution control，and provide reference for SAP application rules. [Methods] We adopted the soil column leaching method，testing the impact of nitrogen and phosphorus fertilizer on SAP's passivation effectiveness on Pb and Cd in the contaminated soil. [Results] When SAP dosage was 1.0 g/kg in lead and cadmium contaminated soil，the effect of nitrogen conservation and phosphorus activation synergism was better. Pb accumulative leaching loss amount was reduced by 5.1% compared with comparison group without SAP，and Cd was 13.6% higher than the contrasting group. In the comparison experiment of adding nitrogen and phosphorus fertilizer in the soil，it showed that the accumulative leaching loss of Pb was increased by 76.7% when soil with SAP treatment was added with nitrogen fertilizer，the cumulative leaching loss of Cd increased by 47.6%，and the cumulative leaching loss of Pb was reduced by 26% when adding with phosphate fertilizer，and the cumulative leaching loss of Cd decreased by 20.5%；Besides，the cumulative leaching loss amount of Pb decreased by 2.3% when

收稿日期：2018-08-25 **修回日期**：2018-11-19

资助项目：国家自然科学基金项目“高分子保水剂对土壤水肥保持和重金属固化多重效应的机理研究”(41571303)

第一作者：钟心(1993—)，女(汉族)，山东省烟台市人，硕士研究生，研究方向为土壤污染治理与修复。E-mail：784715812@qq.com。

通讯作者：黄占斌(1961—)，男(汉族)，陕西省武功县人，博士，教授，主要从事植物生理生态、化学节水技术等方面研究。E-mail：zbhuang2003@163.com。

adding nitrogen and phosphate fertilizer compound in the soil treated with SAP, and that of Cd increased by 8.3%. [Conclusion] SAP has the effect of conserving nitrogen and activating phosphorus, and has passivation effect on Pb and Cd in soil; nitrogen fertilizer inhibites SAP's passivation effect on Pb and Cd, and phosphate fertilizer promotes the work. Nitrogen and phosphate fertilizer compound on SAP's passivation impacts on Pb was not significant, and it inhibited the SAP's work on Cd.

Keywords: super absorbent polymer; nitrogen fertilizers; phosphate fertilizers; Pb; Cd; passivation

土壤是生态环境的重要组成部分,也是经济社会可持续发展的物质基础。目前我国土壤氮、磷面源污染和铅(Pb)、镉(Cd)等重金属污染并重,主要原因是化肥过量施用。有研究[1-4]表明,我国氮肥和磷肥当季利用率仅约 35%和 10%～20%,约 75%以上的磷滞留在土壤中,这不仅造成农业生产成本增加,更造成区域土壤退化和环境污染,如土壤酸化、土壤结构破坏和生产力下降等。土壤面源污染亦会造成周边地表水体富营养化和地下水污染,以及温室气体增加等[5]。研究[6-8]发现,我国受 Pb,Cd 等重金属污染的耕地面积近 2.00×10^7 hm^2,约占总耕地面积的 1/5,造成粮食减产 1.20×10^7 t,经济损失达 200 亿元。为加强土壤污染防治,国家相关部门制定《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《土壤污染防治行动计划("土十条")》,提倡使用环境材料,逐步改善土壤质量。对于面源污染,环境材料理念得到广泛认可,通过添加环境材料,研发新型肥料和土壤调理剂,控氮释磷,提高氮磷肥利用效率,并促进土壤改良和重金属等污染修复[9]。针对大面积轻中度重金属污染的农田,采用重金属钝化剂修复是低成本、易操作、不破坏土壤原有结构的优良方法[10-12]。保水剂是新兴的高吸水性树脂,在土壤面源污染和重金属污染治理中广泛应用,发展前景广阔[13]。保水剂不仅改善土壤水分状况、提高水分子利用效率和作物产量,还促进植株对土壤氮磷钾等养分的吸收[14-21]。研究表明,保水剂与尿素配合使用,吸氮量和氮肥利用率分别提高 18.7%和 27.1%[22]。研究[10]表明,保水剂是一种带有大量电离性亲水基的三维网状结构高分子化合物,可通过羧基和羟基等的轻度交联形成网络结构,其内部网孔和分子表面及断链出的羧基可以与重金属进行络合,从而钝化土壤中的重金属,抑制作物对重金属的吸收,使玉米对土壤 Pb 吸收减少 50%以上,对 Cd 吸收减少 80%以上,使大豆对 Pb 吸收降低 60%以上,对 Cd 吸收降低 30%以上,保水剂对重金属 Pb,Cd 的钝化与改良土壤 pH,EC,速效氮磷养分等有关[4]。目前,对保水剂的研究主要集中在材料对土壤物化性质的影响方面,如土壤团聚体变化等;在肥料对重金属钝化影响方面,缺乏试验研究,特别是缺乏氮磷肥使用量对保水剂钝化土壤重金属效果的影响研究。籍此,本文通过土柱淋溶试验方法,探讨保水剂对重金属 Pb,Cd 钝化效果及其钝化受氮磷肥的影响,旨在为揭示土壤水肥保持和重金属污染治理的协调性机制,指定 SAP 应用技术规程等提供参考。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试材料:保水剂(SAP),聚丙烯酸盐型,白色晶体颗粒,去离子水吸水为自身重量 350～400 倍,0.25～0.177 mm,北京金元易生态环境产业股份有限公司提供。

供试土壤:北京市北部郊区农田表层土壤(0—20 cm)。土壤 Cd 含量 0.012 mg/kg,Pb 含量 1.16 mg/kg,有机质 5.90 g/kg,pH 值 7.33,EC 值 0.14 ms/cm。经风干、碾碎和剔除杂物后过 2 mm 筛备用。

供试肥料:尿素,H_2NCONH_2,优级纯,西陇化工股份有限公司;过磷酸钙 $Ca(H_2PO_4)_2\cdot H_2O$,化学纯,西陇化工股份有限公司。

土柱淋溶装置:主体是定制的有机玻璃柱和玻璃土柱架(图 1)。玻璃柱的内径、外径和高分别为 5,6 和 35 cm。在淋溶柱底部放置两块制有小孔的有机玻璃滤板,滤板之间夹一层 75 μm 的滤布。

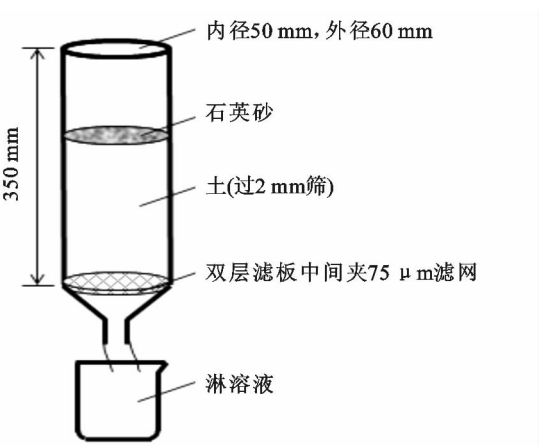


图 1　土柱淋溶模拟试验装置

1.2　试验设计

1.2.1　保水剂用量对土壤氮磷肥保持和重金属铅镉钝化的淋溶效应试验　每个土柱取 500 g 土,重金属 Pb,Cd(Pb 为硝酸铅溶液,600 mg/kg,Cd 为氯化镉

溶液，10 mg/kg，按照《土壤环境质量标准(GB-15618-1995)》和我国农田土壤重金属污染现状[23]确定)，氮、磷肥(尿素 1 g/kg，过磷酸钙 0.75 g/kg)，SAP 施加量设 5 个水平，具体为 0，0.5，1.0，2.0 和 5.0g/kg，分别设为 SAP0(CK)，SAP0.5，SAP1，SAP2 和 SAP5 处理。将 SAP 混匀装入土柱，形成氮、磷肥同时存在下的 Pb，Cd 复合污染土壤。每个处理 3 个平行。

浇水淋溶分两步：第一步，向土柱中加 200 ml 水，以一定速度淋溶，使土壤水分接近饱和持水量，放置老化 1 周；第二步，待土壤水分减少到田间持水量的 50%时，加水至始重，平衡 24 h，再淋溶 200 ml 水，土柱下端用 500 ml 聚乙烯瓶承接淋溶液(24 h)。之后每隔 7 d 淋溶 1 次，共 4 次。

1.2.2 氮磷肥及其复合对保水剂钝化重金属铅、镉影响的淋溶试验 ①单一氮、磷肥对 SAP 钝化重金属的淋溶效应研究：每个土柱取 500 g 土，重金属 Pb(硝酸铅溶液，600 mg/kg)及氮肥(尿素 1 g/kg)、SAP(1 g/kg)，形成氮肥存在下的 Pb 污染土壤。设置 A_1(添加单一 Pb)、A_2(添加单一 Cd)，B_1(SAP+Pb)，B_2(SAP+Cd)，C_1(SAP+N+Pb)，C_2(SAP+N+Cd)，D_1(SAP+P+Pb)，D_2(SAP+P+Cd)8 个处理，每个处理 3 个平行。②氮磷肥复合对 SAP 钝化重金属 Pb，Cd 的淋溶效应研究：设置 A(添加重金属 Pb，Cd)、B(SAP+Pb+Cd)、C(N+P+Pb+Cd)、D(SAP+N+P+Pb+Cd)4 个处理，每个处理 3 个平行。浇水淋溶步骤同上。

1.3 测定指标与方法

淋溶液体积采用量筒测定；淋溶液 EC 值采用电导率仪测定(DDS-307A 型，上海仪电科学仪器股份有限公司)；淋溶液 pH 值采用玻璃电极法测定(pH500 型，美国 CLEAN 公司)；总氮采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定(HJ636-2012 代替 GB11894-1989)；总磷采用过硫酸钾氧化—钼锑抗分光光度法测定(GB11893-1989)；淋溶液重金属含量采用仪器 ICP-MS 测定[24]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 和 Origin 9.0 进行试验数据处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 保水剂用量对土壤水分、氮磷肥保持和铅镉钝化的淋溶效应

2.1.1 淋溶液体积 淋溶液体积即土壤水分流失量如图 2 所示，各处理第 1 次淋溶液体积最小，约占 4 次淋溶总体积的 16.4%～23.7%，这是由于首次淋溶时土壤质地疏松，孔隙较多，吸水保水性较强。随后 3 次淋溶液体积有所增多且各组之间差异不大。$SAP_{0.5}$，SAP_1，SAP_2，SAP_5 淋溶液总体积分别是对照 SAP0(CK)的 99.7%，99.1%，96.4%，91.7%，说明 SAP 对土壤水分保持量随 SAP 添加量的增多而增多，这是因为 SAP 含有大量羧基、羟基和酰胺基等亲水性基团，对水分有较强的吸附能力[4]。

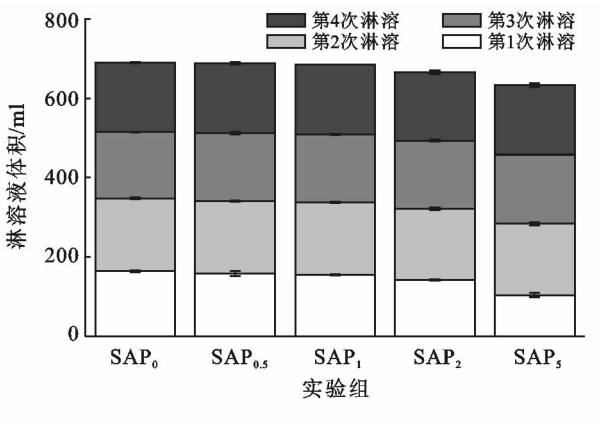


图 2 不同处理各次淋溶液体积

2.1.2 淋溶液氮素、磷素及重金属铅、镉淋失量 表 1—2 为氮素和磷素淋失量随淋溶次数的变化。将氮素和磷素累积淋失量分别与 SAP 添加量建立一元二次回归方程：

氮素累积淋失量回归方程为：

$y=41.23x^2-55.021x+390.11$ ($R^2=0.968\ 1$)

磷素累积淋失量回归方程为：

$y=-1.841\ 8x^2+3.528\ 9x+3.847\ 1$ ($R^2=0.6514$)

当 SAP 添加量为 0.67 g/kg 时氮素累积淋失量最低，0.96 g/kg 时磷素累积淋失量最高，在本试验梯度中，当 SAP 施用量为 SAP1(1.0 g/kg)时降低土壤氮素淋溶量，增加磷素淋溶量的效果最好，即控氮释磷效果。由回归方程知，氮素累积淋失量随 SAP 用量的增加先减后增，这可能是因为 SAP 可以吸持溶解在土壤溶液中的尿素分子和水解产物 NH_4^+，延缓尿素的水解和减少氨挥发损失[1]，而 SAP 的吸附容量有限，达到饱和后会失去缓释效应，且过多的 SAP 易阻碍与氮素的接触。磷素累积淋失量随 SAP 用量的增加先增后减，这是因为磷元素在土壤中易固定，SAP 可以减少水溶性磷肥在土壤中固定，活化土壤中的难溶性磷。

图 3—4 表明，重金属 Pb，Cd 的淋失量随淋溶次数的增加而减少，Pb 累积淋失量各处理组分别是 CK 的 85.6%，94.9%，75.6%和 78.2%。Cd 累积淋失量分别是 CK 的 97.4%，113.6%，124.5%和 137.9%。综合比较发现，在添加氮、磷肥的 Pb，Cd 复合污染土

壤中,随 SAP 用量的增加,Pb 累积淋失量总体呈减少趋势,可能是因为 SAP 通过羟基和羧基等基团的轻度交联形成三维网状结构,内部网孔和分子表面及断链处的羟基可与铅离子络合或螯合,从而吸附和固持铅离子;Cd 的累积淋失量逐渐增多,这是因为 SAP 使土壤有效水储量增加,促进难溶性 Cd 向易溶性 Cd 转化,或者镉离子可在羧基间形成键桥使 SAP 表面分子间的交联密度增加,造成表面收缩,外部的镉离子难以进入 SAP 内部[10]。说明随 SAP 用量的增加,SAP 对 Pb 钝化效果越好,对 Cd 钝化效果不佳,在 Pb,Cd 复合污染土壤中 SAP 施用量为 1.0 g/kg 土时 SAP 的控氮释磷效果最好,此时 Pb 的累积淋失量是 119.44 ug/kg 土,比 CK 累积淋失量减少 5.1%;Cd 的累积淋失量是 11.19 μg/kg 土,比 CK 增多 13.6%。

表 1　不同处理下单位土壤中的氮素累积淋失量　　mg

处 理	不同淋溶次数氮素累积淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
SAP_0	208.65±6.40^b	125.02±5.80^a	32.16±3.96^b	21.27±1.08^c	387.10^b
$SAP_{0.5}$	206.06±2.04^b	105.42±3.20^b	20.11±4.41^c	49.34±2.50^a	380.93^b
SAP_1	213.09±2.69^b	104.20±2.05^b	30.82±3.73^b	22.19±3.33^c	370.30^b
SAP_2	231.95±11.22^a	124.26±1.65^a	62.64±5.46^a	27.14±1.09^b	445.99^a
SAP_5	228.06±10.49^a	130.25±10.87^a	58.30±6.58^a	29.57±2.35^b	446.47^a

注:数据采用平均数和标准差,数字后的字母表示差异性,相同字母表示无显著性差异,不同字母表示有显著性差异。下同。

表 2　不同处理下单位土壤中的磷素累积淋失量　　mg

处理	不同淋溶次数磷素累积淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
SAP_0	1.23±0.02^a	1.56±0.03^a	0.92±0.02^b	0.49±0.02^c	4.20^b
$SAP_{0.5}$	1.24±0.09^a	1.24±0.03^b	1.04±0.01^b	0.69±0.01^b	4.21^b
SAP_1	1.36±0.02^a	1.97±0.03^a	1.84±0.01^a	1.07±0.05^a	6.24^a
SAP_2	0.76±0.02^b	1.01±0.04^c	0.98±0.01^b	0.67±0.01^b	3.42^c
SAP_5	0.63±0.02^c	0.86±0.01^c	0.84±0.03^b	0.13±0.01^d	3.46^c

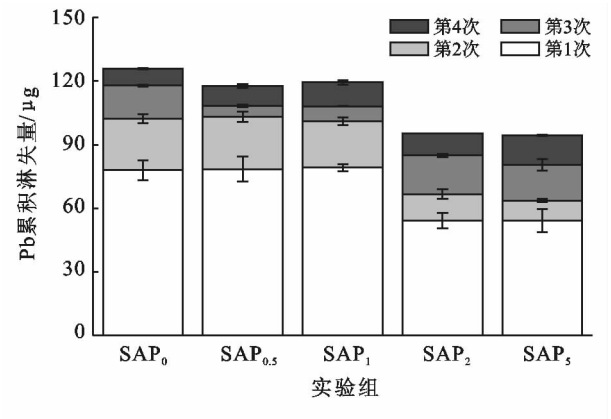


图 3　不同处理下单位土壤的 Pb 淋溶淋失量

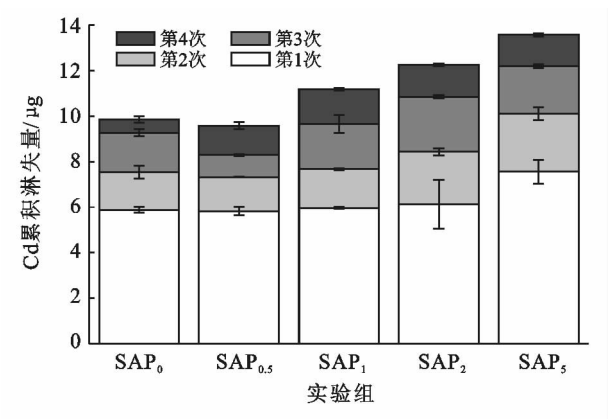


图 4　不同处理下单位土壤的 Cd 淋溶淋失量

2.2　氮、磷肥及其复合对保水剂钝化重金属铅、镉的淋溶效应

2.2.1　氮、磷肥对保水剂钝化重金属铅淋溶效应　氮、磷肥对 SAP 钝化重金属 Pb 污染土壤的淋溶效应(表 3)表明,含 Pb 的 4 个处理中,添加 SAP 的 B_1(SAP+Pb)较对照 A_1(Pb)4 次 Pb 淋出量减小;但添加氮肥的 SAP 处理 C_1(SAP+N+Pb)的 Pb 累积淋失量较对照 A_1(Pb)增加 57.0%,较 B_1(SAP+Pb)增加 76.7%,说明 SAP 对 Pb 的钝化有一定效果,氮肥明显促进 Pb 淋溶,这可能是因为尿素施入土壤后,水解产生的铵在有氧条件下发生硝化作用,使土壤 pH 值降低,土壤中的 Pb 得到活化,或者氮肥添加后,NH_4^+ 竞争占据 SAP 表面的阴离子,替代铅离子。同时发现,D_1(SAP+P+Pb)的 Pb 累积淋失量是 A_1(Pb),B_1(SAP+Pb)的 65.7%和 74.0%,说明磷肥可促进 SAP 对 Pb 的钝化,这可能是因为磷肥施入土壤后,过磷酸钙释放 PO_4^{3-},与土壤中的水溶态 Pb 离子反应生成沉淀,从而降低土壤中 Pb 含量。

2.2.2　氮、磷肥对 SAP 钝化重金属镉淋溶效应　氮、磷肥对 SAP 钝化重金属 Cd 污染土壤的淋溶效应(表 4)表明,添加 SAP 处理的 B_2(SAP+Cd)的 Cd 累积淋失量是对照 A_2(Cd)的 80.8%,但添加氮肥的

SAP 处理 C_2(SAP+N+Cd)的 Cd 累积淋失量较对照 A_2(Cd)增加 19.3%,较 B_2(SAP+Cd)增加 47.6%,说明在 Cd 污染土壤中 SAP 有钝化 Cd 效应。但施用氮肥后,氮肥抑制 SAP 对 Cd 的钝化。同时,添加磷肥的 SAP 处理 D_2(SAP+P+Cd)的 Cd 累积淋失量是 A_2(Cd),B_2(SAP+Cd)的 64.2%和 79.5%,说明磷肥促进 SAP 对 Cd 的钝化,可能是过磷酸钙施入土壤后会提高土壤中交换性钙含量,而钙与镉存在较强的竞争效应,从而影响土壤中 Cd 的活性,另外,在过磷酸钙的生产过程中,受工艺水平影响,含有一定量硫酸钙等含硫化合物,而硫在还原条件下可与 Cd 共沉淀,从而降低土壤 Cd 的活性。

表 3 单一氮、磷处理下单位土壤的 Pb 淋失量 μg

处 理	不同淋溶次数 Pb 淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
A_1(Pb)	30.17±2.81^b	18.89±3.09^b	16.01±1.73^a	18.91±1.62^b	83.98^b
B_1(SAP+Pb)	26.41±3.06^b	15.15±1.72^b	14.54±3.04^a	18.51±1.96^b	74.61^b
C_1(SAP+N+Pb)	49.35±4.28^a	40.63±3.40^a	18.70±4.38^a	23.17±1.93^a	131.85^a
D_1(SAP+P+Pb)	20.66±2.12^c	13.04±3.03^b	9.20±1.15^b	12.31±2.53^c	55.21^c

表 4 单一氮、磷处理下单位土壤的 Cd 淋失量 μg

处 理	不同淋溶次数 Cd 淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
A_2(Cd)	5.07±0.60^a	2.04±0.18^a	0.87±0.11^c	2.02±0.23^a	10.00^a
B_2(SAP+Cd)	4.64±0.58^a	1.21±0.29^b	1.60±0.07^b	0.63±0.12^b	8.08^a
C_2(SAP+N+Cd)	5.48±0.38^a	2.95±0.09^a	2.68±0.20^a	0.82±0.09^b	11.93^a
D_2(SAP+P+Cd)	3.80±0.50^b	1.27±0.12^b	1.06±0.16^c	0.29±0.06^c	6.42^b

2.2.3 氮磷肥复合对 SAP 钝化重金属铅、镉的淋溶效应 表 5—6 为氮、磷肥复合对 SAP 钝化重金属 Pb,Cd 污染土壤的淋溶效应。其中 B(SAP+Pb+Cd),C(N+P+Pb+Cd),D(SAP+N+P+Pb+Cd)处理中 Pb 累积淋失量是 A(Pb+Cd)的 86.5%,75.8%和 84.6%,说明 SAP 和氮、磷肥复合在 Pb,Cd 复合污染土壤中对 Pb 有一定的钝化作用;D(SAP+N+P+Pb+Cd)的 Pb 累积淋失量比 B(SAP+Pb+Cd)少 2.3%,说明氮磷肥的施用对 SAP 钝化 Pb,Cd 复合污染土壤中 Pb 的影响不显著。B(SAP+Pb+Cd),C(N+P+Pb+Cd),D(SAP+N+P+Pb+Cd)第一次淋溶 Cd 淋失量是 A(Pb+Cd)的 89.6%,125.2%和 121.4%,说明 SAP 在开始阶段对 Pb,Cd 复合污染土壤中的 Cd 有钝化作用,但氮磷肥添加会降低钝化效果;B(SAP+Pb+Cd),C(N+P+Pb+Cd),D(SAP+N+P+Pb+Cd)的 Cd 累积淋失量是 A(Pb+Cd)的 112.2%,122.4%和 121.5%,也说明氮磷肥降低 SAP 对 Pb,Cd 复合污染土壤中 Cd 的钝化效果。

表 5 氮磷复合处理下单位土壤的 Pb 淋失量 μg

处 理	不同淋溶次数 Pb 淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
A(Pb+Cd)	86.27±3.83^a	37.72±4.68^a	30.43±7.00^a	11.66±4.64^a	166.08^a
B(SAP+Pb+Cd)	76.51±6.94^b	27.91±7.46^b	28.99±2.18^a	10.30±3.06^a	143.71^b
C(N+P+Pb+Cd)	78.00±4.73^b	24.26±2.11^b	15.63±0.35^b	7.93±0.32^b	125.82^b
D(SAP+N+P+Pb+Cd)	79.11±1.62^b	23.03±1.75^b	26.99±0.22^a	11.34±1.08^a	140.47^b

表 6 氮磷复合处理下单位土壤的 Cd 淋失量 μg

处 理	不同淋溶次数 Cd 淋失量				
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	累积淋失量
A(Pb+Cd)	5.76±0.66^b	1.76±0.38^b	1.98±0.14^a	0.74±0.09^b	10.24^b
B(SAP+Pb+Cd)	5.16±0.22^b	3.79±0.13^a	0.82±0.07^b	1.72±0.09^a	11.49^a
C(N+P+Pb+Cd)	7.21±0.62^a	4.16±0.56^a	0.87±0.07^b	0.29±0.07^c	12.53^a
D(SAP+N+P+Pb+Cd)	6.99±0.12^a	4.19±0.55^a	0.49±0.07^c	0.77±0.01^b	12.44^a

3　结 论

(1) 土柱淋溶模拟试验表明，保水剂(SAP)施用可降低土壤淋溶液中铅、镉含量，即对土壤中的铅、镉有一定钝化作用，这是因为 SAP 含有的羧基、羟基等官能团可以与重金属发生络合，吸附和固持重金属离子；同时保水剂(SAP)具有降低土壤氮素淋溶量，增加磷素淋溶量的效应，即控氮释磷效应，原因是 SAP 可以吸持溶解在土壤溶液中的尿素分子和水解产物 NH_4^+，延缓尿素的水解和减少氨挥发损失，同时减少水溶性磷肥在土壤中固定，活化土壤中的难溶性磷[1,10]，本试验梯度中 SAP 用量为 1.0 g/kg 时，控氮释磷效果最好。

(2) 在铅、镉单一及复合污染土壤中，增施氮肥会降低 SAP 对土壤铅、镉的钝化效果，增施磷肥会增强 SAP 对土壤铅、镉的钝化效果。因为氮肥在土壤中水解产生的铵在有氧条件下发生硝化作用，降低土壤 pH 值，活化重金属，而磷肥可与重金属离子发生离子交换，从而钝化重金属。

(3) 在铅、镉复合污染土壤中，氮、磷肥复合对 SAP 钝化铅的效果影响不显著，但降低 SAP 钝化镉的效果。

[参 考 文 献]

[1] 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[J]. 农业环境科学学报，2007，26(4)：1296-1301.

[2] 晏维金，亢宇，章申，等. 磷在土壤中的解吸动力学[J]. 中国环境科学，2000，20(2)：97-101.

[3] 高阳俊，张乃明. 施用磷肥对环境的影响讨论[J]. 中国农学通报，2003，19(6)：162-165.

[4] 黄占斌，孙在金. 环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J]. 中国生态农业学报，2013，21(1)：88-95.

[5] 刘童祎，张杰. 浅析农业面源污染的类型及危害[J]. 农村经济与科技，2016，27(10)：6-9.

[6] 赵其国，黄国勤，钱海燕. 生态农业与食品安全[J]. 土壤学报，2007，44(6)：1127-1134.

[7] 韦朝阳，陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报，2001，21(7)：1196-1203.

[8] 蔡美芳，李开明，谢丹平，等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术，2014，37(120)：223-230.

[9] 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[J]. 农业环境科学学报，2017，36(9)：1811-1819.

[10] 秦端端，姚粉霞，陈亚军，等. 保水剂对土壤重金属镉形态及生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报，2016，35(12)：2327-2333.

[11] Guo Guanlin, Zhou Qixing, Lene Q Ma. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: A review [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 116(1/3): 513-528.

[12] 樊霆，叶文玲，陈海燕，等. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]，生态环境学报，2013，22(10)：1727-1736.

[13] 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.

[14] Chaves M M, Santos T P, Souza C R, et al. Deficit irrigation in grapevine improves water-use efficiency while controlling vigour and production quality[J]. Annals of Applied Biology, 2007, 150(2): 237-252.

[15] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant[J]. Functional Plant Biology, 2003, 30(3): 239-264.

[16] 张扬，赵世伟，梁向锋，等. 保水剂对宁南山区马铃薯产量及土壤水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究，2009，27(3)：27-32.

[17] 张朝巍，董博，郭天文，等. 施肥与保水剂对半干旱区马铃薯增产效应的研究[J]. 干旱地区农业研究，2011，29(6)：152-156.

[18] 闫永利，于健，魏占民，等. 土壤特性对保水剂持水性能的影响[J]. 土壤通报，2012，43(5)：1111-1115.

[19] Yazdani F, Allahdadi I, Akbari G A. Impact of super absorbent polymer on yield and growth analysis of soybean(*Glycine max* L) under drought stress condition [J]. Pakistan Journal of Biological Sciences PJBS, 2007, 10(23): 4190-4196.

[20] 刘殿红，黄占斌，董莉. 保水剂施用方式对马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究，2007，25(4)：105-108.

[21] 侯贤清，李荣，韩清芳，等. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报，2012，28(3)：94-100.

[22] 李嘉竹，黄占斌，陈威，等. 环境功能材料对半干旱地区土壤水肥利用效率的协同效应[J]. 水土保持学报，2012，26(1)：232-236.

[23] 宣斌，王济，段志斌，等. 农田土壤重金属污染现状及修复技术应用研究进展[J]. 环境保护前沿，2017(1)：26-34.

[24] 彭丽成，黄占斌，石宇，等. 不同环境材料对 Pb，Cd 污染土壤的淋溶效应[J]. 环境科学学报，2011，31(5)：1033-1038.