

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.

LIU Lu-han, MA Yan, LIU Zhen-hai, et al. Effect of three kinds of environmental materials on soil moisture and fertility conservation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1811–1819.

三种环境材料对土壤水肥保持效应的影响研究

刘陆涵^{1,2}, 马妍^{1*}, 刘振海¹, 彭菲¹, 黄占斌^{1*}

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境学院, 北京 100083; 2.北京首创环境投资有限公司, 北京 100083)

摘要:采用土柱淋溶实验方法,探究了土壤保水剂、腐植酸和沸石对土壤水分保持、控氮释磷的效应,通过过程分析探讨水肥保持增效的机制。试验结果表明:保水剂对土壤水分保持效果最明显,沸石对氮肥保持和磷肥活化效果最好,在一定范围内随添加量增多效果有增强趋势且效果持久;当保水剂添加量为 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤水分淋出量相比CK减少4.4%,腐植酸添加量为 $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,氮素淋出量相比CK减少17.4%,沸石添加量为 $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,磷素淋出量相比CK增加68.0%;沸石添加量为 $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,氮磷肥同步增效最好,相比CK,土壤氮素淋出量减少25.1%,磷素淋出量增多29.2%。研究表明,三种环境材料施用对土壤水肥保持具有明显的增强效果。

关键词:环境材料;保水剂;腐植酸;沸石;土壤水分;控氮释磷

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)09-1811-09 doi:10.11654/jaes.2017-0039

Effect of three kinds of environmental materials on soil moisture and fertility conservation

LIU Lu-han^{1,2}, MA Yan^{1*}, LIU Zhen-hai¹, PENG Fei¹, HUANG Zhan-bin^{1*}

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2.Beijing Capital Environmental Investment Limited, Beijing 100083, China)

Abstract: This study used the soil column leaching method to assess the effects of super absorbent polymer, humic acid, and zeolite on soil moisture retention, nitrogen conservation, and phosphorus activation synergism, and examined the mechanism of water and fertilizer conservation synergism through process analyzing. The results showed that: The super absorbent polymer had the best effect on soil moisture, while zeolite was the most effective for nitrogen conservation and phosphorus activation, and this effect was durable and increased with the amount of zeolite within certain limits. Compared to CK, the addition of $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of super absorbent polymer led to a decreased by 4.4% in the water leaching rate. Similarly, with the addition of $1.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ humic acid, the leaching rate of nitrogen decreased by 17.4%; and with the addition of $12\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of zeolite, the leaching rate of phosphorus increased by 68.0%. Compared to CK, the nitrogen leaching rate decreased by 25.1% and the phosphorus leaching rate increased by 29.2% with the addition of $9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ of zeolite. In conclusion, the application of three environmental materials significantly improved soil water and fertilizer conservation.

Keywords: environmental materials; super absorbent polymer; humic acid; zeolite; soil moisture; nitrogen control and phosphorous release

收稿日期:2017-01-07

作者简介:刘陆涵(1989—),女,河北深州人,主要从事环境材料与土壤修复以及环境治理研究。E-mail:liuluhan@126.com

*通信作者:马妍 E-mail:mayan2202@163.com;黄占斌 E-mail:zbhuang2003@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41571303);三峡后续工作科研课题项目(2015HXKY2-4);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016QH02);北京市自然科学基金项目(8152025)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41571303); Three Gorges Follow-up Work Research Topic(2015HXKY2-4); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2016QH02); The Natural Science Foundation of Beijing, China(8152025)

土壤是生态环境的重要组成部分,也是作物生长所需水分和营养物质的主要来源。氮磷肥施用在我国农业发展中效益明显,但也存在不合理使用性,氮磷是农业面源污染的主要来源。有研究表明^[1-4]:我国氮肥和磷肥当季利用率仅有35%左右和10%~20%,约75%以上的磷滞留在土壤中,不仅增加农业成本,还造成大部分地区土壤酸化。减少水肥在土壤中的流失是提高土壤养分、治理面源污染的主要途径,氮肥增效主要是增加氮素的保持效果,增强缓释效应;磷肥增效主要是增强磷素的可溶性,即减少土壤溶液中钙镁等离子与磷酸根离子的结合。

保水剂是新兴的高吸水性树脂,在农业面源污染治理中广泛应用,发展前景广阔^[5]。研究表明,保水剂不仅改善土壤水分状况、提高作物产量和水分子利用效率,还促进植株对土壤氮磷钾等养分的吸收^[6-14]。保水剂分子遇水膨胀时,可将分散的土壤颗粒结成团块状,同时能够增强土壤持水能力,减少水分和土壤养分的流失,从而提高水肥利用效率。腐植酸是自然环境中广泛存在的一类高分子物质,占土壤和水圈生态体系总有机质的50%~80%^[15],腐植酸本身可作为肥料施入土壤,对铵态氮的保持效果较好^[16-19],还能活化土壤中已存在的被固定的磷肥,进一步提高磷肥利用率^[20]。沸石是以硅氧四面体和铝氧四面体为基本结构单元的硅酸盐矿物,内部为三维空间架状结构,具有很强的吸附性和离子交换性^[21]。大量研究证明^[22-24],将沸石应用在土壤中可以提高肥料利用率,增强土壤保水保肥抗旱的效果,减少养分流失,改善土壤氮素释放和流失状况,提高氮肥利用率,提高作物产量,降低作物生长成本。

目前,对保水剂等环境材料的研究主要集中在材料对土壤物理性状和化学性质的影响方面,如土壤团聚体变化和水分常数变化等;在肥料保持方面,研究多集中于对氮肥的效应,而对磷活化研究性状相对较少。本研究根据已有的研究进展,针对土壤氮磷肥保持增效和水分保持同步开展系列实验。本文为系统研究的第一环节,采用土柱淋溶模拟实验,选取保水剂、腐植酸和沸石,研究单一环境材料对土壤水分和氮磷肥保持增效的影响,探讨对土壤水肥增效机制,期望从根本上减少土壤水肥的淋失,提高水分和氮磷肥利用率,控制并减少面源污染,为开发新型肥料添加剂提供依据,并为环境材料的推广应用奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

环境材料:保水剂,聚丙烯酸钠盐型,白色晶体颗粒,60~80目,北京金元易生态工程技术中心提供;腐植酸,黑色粉状,80~100目,其中黄腐酸16.7%,由内蒙古霍林河煤业集团有限责任公司提供;沸石,乳白色颗粒,60~80目,化学纯,天津市津科精细化工研究所生产。

供试土壤:北京市通州区农田表层土壤。土壤容重 $1.23\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, $0.25\sim 5.00\text{ mm}$ 土壤团聚体占50.6%;土壤碱解氮 $15.75\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效磷 $54.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 $18.91\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC) $6.19\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,电导率(EC) $0.33\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,含水率7.6%,孔隙度50.5%,pH值7.49。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 ,分析纯,广东光华科技股份有限公司;过磷酸钙, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$,化学纯,国药集团化学试剂有限公司。

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、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200目的滤布。每柱装入500 g过2 mm筛后风干土壤和肥料的混合物(肥料混施于土壤,尿素和过磷酸钙添加量分别为 1000 、 $750\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),表面覆盖少量(约40 g,0.5 cm厚)纯净石英砂,加水时起到缓冲作用,防扰乱土层。

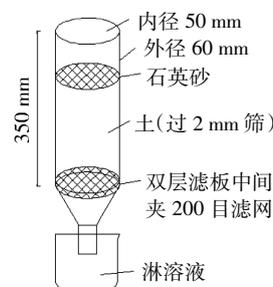


图1 土柱淋溶模拟实验装置

Figure 1 Soil column leaching experiment equipment

1.2 实验设计

采用单因素优选法,分析三种材料对土壤水肥增效机制。每组处理分别添加一种环境材料,每种材料选取5个添加水平,保水剂(A)与腐植酸(B)选取水平相同,分别为土壤干重的0.025%、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%(即0.25、0.5、1.0、1.5、2.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土),沸石(C)分别选取土壤干重的0.15%、0.30%、0.60%、0.90%、1.20%(即1.5、3、6、9、12 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土)。另设CK处理,不添加任何环境材料,只添加肥料(表1)。共16个处理,设3个重复。

表1 土柱淋溶试验设计

Table 1 Soil column leaching experiment design

| 处理 | 空白 | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 |
|-----|----|--------|-------|-------|-------|-------|
| 保水剂 | 0 | 0.025% | 0.05% | 0.10% | 0.15% | 0.20% |
| 腐植酸 | 0 | 0.025% | 0.05% | 0.10% | 0.15% | 0.20% |
| 沸石 | 0 | 0.15% | 0.30% | 0.60% | 0.90% | 1.20% |

1.3 测定指标与方法

土壤水分:淋溶前,加 250 mL 水使土壤水分接近饱和持水量,室温下放置 1 d,使土肥充分混合。首次淋溶加入 250 mL 水,收集 24 h 淋溶液。将淋溶柱放置在室温条件下,自然蒸发,约 7 d 后称重,至土壤含水率降到 50%左右时,进行第 II 次淋溶,每次淋溶过程相同,分别在培养第 2、9、16、23、30、37、44、51 d 时淋溶,并用量筒直接测定淋溶液体积。

淋溶液总氮:采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定(HJ 636-2012 代替 GB 11894-1989)。总磷:采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法测定(GB 11893-1989)。

采用 Origin 8.5 和 SPSS 19.0 进行实验数据处理和统计分析。

2 结果与讨论

2.1 环境材料不同添加水平对土壤水分保持的影响

2.1.1 对淋溶过程的影响分析

淋溶液体积即土壤水分流失量。保水剂组首次淋溶液体积最少,试验处理均比 CK 少;第 II 次淋溶时,试验处理均比 CK 多,保水剂并没表现出保水作用,可能是首次淋溶后土壤水分基本呈饱和状态,保水剂本身的膨胀增大了淋溶土壤整体的孔隙度,使水分更容易淋出;从第 III 次到第 VIII 次淋溶,试验处理均比 CK 少,说明保水剂发挥作用的时间较长久,具有反复吸水的功能(图 2)。

腐植酸组第 I、II 次淋溶液体积与保水剂组具有相同的规律;第 III 次淋溶仅有水平 5 低于 CK,说明腐植酸保水作用的发挥较迟缓;第 IV 到第 VII 次淋溶中,

各水平淋溶液体积变化均不大,均能起到一定保水作用;第 VIII 次淋溶时,淋溶液体积与 CK 无明显差异,说明在淋溶后期,腐植酸保水功能降低。

沸石组首次淋溶保水作用最大;在往后的淋溶过程中,各水平淋溶液体积与 CK 相差不大,尤其第 V 次淋溶后,淋溶液体积较前几次有所上升,虽低于 CK,但各水平之间差距已不明显,说明沸石保水作用主要体现在首次淋溶,且淋溶后期添加水平的变化对淋溶液体积影响很小。

2.1.2 对淋溶液总体积的影响

环境材料对土壤水分保持效果明显,保水剂水分保持效果最优,腐植酸次之,沸石最差。保水剂组水平 5 处理淋溶液总体积最小,减少 4.4%;腐植酸组水平 2 处理最小,减少 1.1%;沸石组水平 5 处理最小,减少 0.9%(图 3)。

由淋溶液总体积差异对比分析可知(表 2),环境材料的添加使淋溶液体积显著降低,且在多数水平下达到显著水平。保水剂组水平 1、2 和 3 淋溶液总体积之间不存在显著性差异;腐植酸组各水平所对应淋溶液总体积间差异并不明显,但水平 1、2 和 5 相比 CK 仍有显著差异,且在水平 5 处淋溶液总体积达到最小值;沸石组水平 2、3、4 和 5 淋溶液总体积相比 CK 存在显著性差异。

2.2 环境材料不同添加水平对土壤氮肥增效的影响

2.2.1 对氮素淋出的过程分析

淋洗损失是造成农田氮肥流失的主要原因,试验处理相比 CK 均起到氮素保持作用。首次淋溶时,各处理氮素淋出量差别最大,且保水剂和腐植酸组氮素淋出量在前 3 次淋溶时差异显著,此时土壤中氮素含量随淋溶次数的增加不断减少;第 IV 次淋溶时,保水剂和腐植酸组氮素淋出量已相差不大,沸石组差异明显,均低于 CK;在第 V 次淋溶过后各水平间的差异均不明显,说明沸石对氮素保持的影响最大,且作用持续时间长(图 4)。

2.2.2 对氮素淋出总量的影响

环境材料对土壤氮肥增效明显,沸石对土壤氮增

表 2 不同处理淋溶液体积差异对比性分析(mL)

Table 2 Variance analysis of leaching solution volume of different treatments(mL)

| 处理 | CK | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 |
|-----|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| 保水剂 | 1 745.4±3.6d | 1 704.0±4.0c | 1 705.3±11.9c | 1 700.2±3.1c | 1 686.6±6.9b | 1 668.9±3.6a |
| 腐植酸 | 1 745.4±3.6b | 1 730.0±13.2a | 1 725.7±8.3a | 1 733.1±2.9ab | 1 738.4±5.5ab | 1 729.6±2.4a |
| 沸石 | 1 745.4±3.6d | 1 741.0±4.0cd | 1 739.1±0.9bc | 1 734.1±1.2ab | 1 733.6±2.2ab | 1 729.7±4.2a |

注:同行字母相同表示处理间在 0.05 水平上差异不显著。下同。

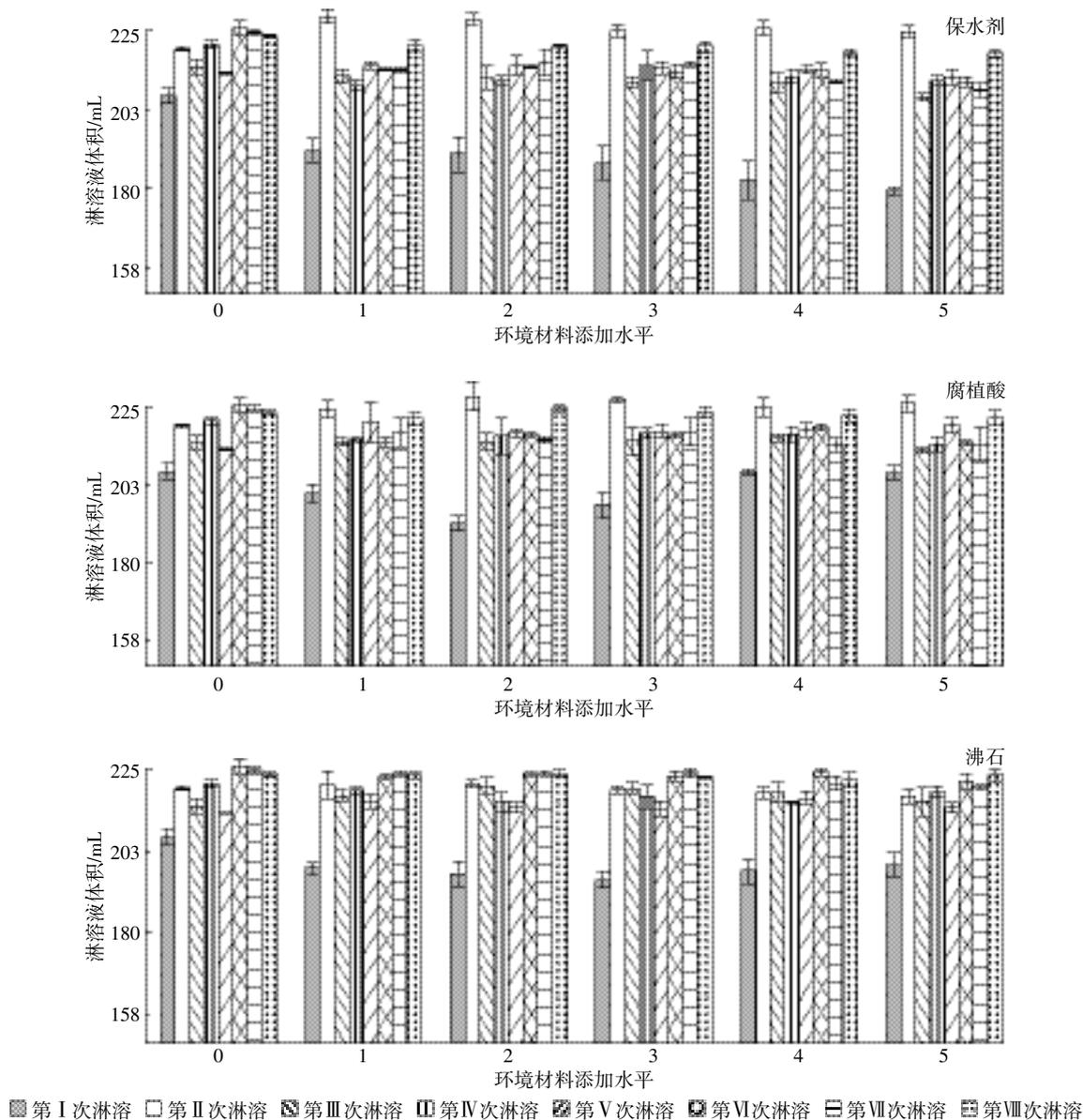


图2 不同环境材料组8次淋溶液体变化

Figure 2 The change of leaching solution volume during eight times of leaching

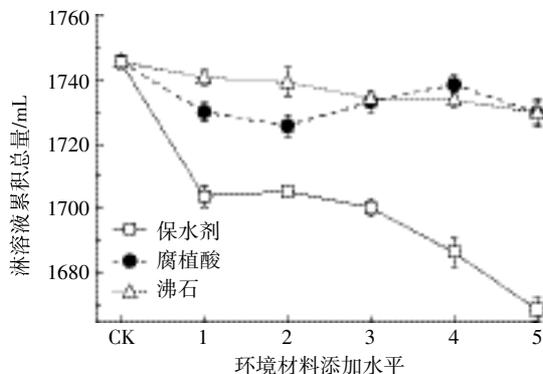


图3 不同环境材料对淋溶液总体积的影响

Figure 3 Effects of different environmental materials on the leaching solution volume

效最优,腐植酸次之,保水剂最差。沸石组水平4氮素淋出总量最少,减少25.1%;腐植酸组水平3的最少,减少17.4%;保水剂组水平2的最少,减少7.6%(图5)。由氮素淋出总量差异对比分析可知(表3),环境材料的添加对土壤氮肥增效有一定的作用,且在多数水平下达到显著性水平。保水剂组水平2、3和4氮素淋出总量相比CK有显著性差异,但5个添加水平间差异不明显;腐植酸组5个水平氮素淋出总量相比CK均有显著性差异,且水平2和3分别与水平1和4有明显差异;沸石组5个水平氮素淋出总量相比CK差异明显,但除水平1与水平4之间有明显差异外,其余3个水平差异不显著。

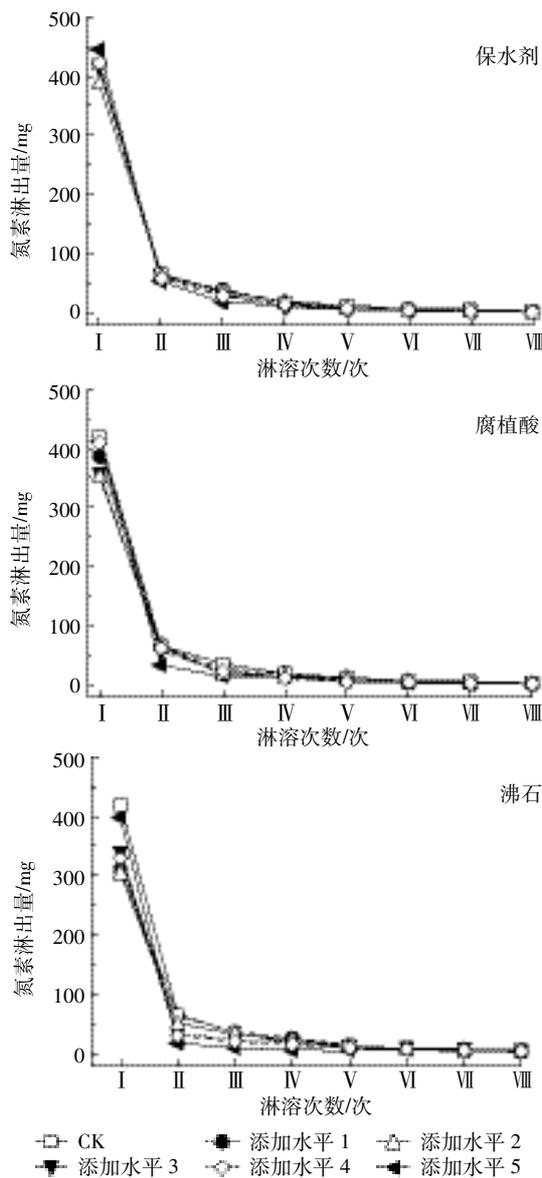


图4 不同环境材料处理对氮素淋出量的影响

Figure 4 The effect of different treatments on nitrogen leaching amount

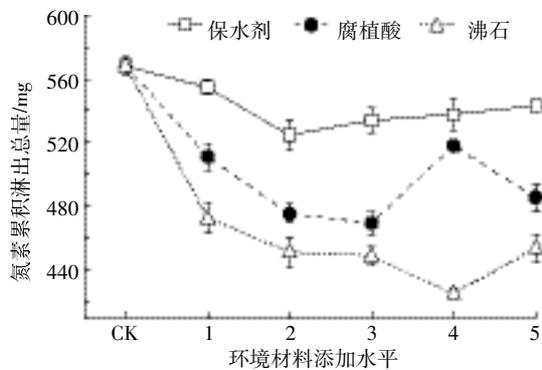


图5 三种环境材料不同水平下氮素累积淋出总量变化

Figure 5 Nitrogen accumulated leaching quantity changes under different levels of three kinds of environmental materials

2.3 环境材料不同添加水平对土壤磷肥活化的影响

2.3.1 对磷素淋出的过程分析

磷肥施入土壤易被固定,只有将磷素存在形式转化为可溶性磷,才有可能被植物利用。图6是三种环境材料不同水平磷素淋出量。在8次淋溶过程中,磷素淋出量并不是逐渐减小,与氮素淋出规律有明显不同。保水剂组磷活化效果最显著的时期为淋溶中后期;腐植酸组主要体现在中期;沸石组前4次淋溶时对磷活化效果比后几次要好,但与保水剂和腐植酸组相比,对磷活化的持久性相对较弱。

2.3.2 对磷素淋出总量的影响

保水剂、腐植酸和沸石可促进磷肥活化,沸石对土壤磷肥活化效果最优,保水剂次之,腐植酸最小。沸石组水平5磷素淋出总量最多,增加68.0%;保水剂组水平5的最多,增加31.2%;腐植酸组水平2的最多,增加14.4%(图7)。

由磷素淋出总量显著性分析可知(表4),环境材料的添加对土壤磷肥活化有显著作用,且在多数水平下达到显著性水平。保水剂组水平1、2、4和5磷素淋出总量与CK相比差异显著,其中水平5与CK差异最为显著,水平1、2和4之间无显著性差异;腐植酸组水平1和2磷素淋出总量相比CK有显著性差异,其中水平2差异最为明显;沸石组5个添加水平下磷素淋出总量之间差异明显,其中水平4和5相比CK差异显著。

2.4 三种环境材料对土壤氮磷肥同步增效的影响

2.4.1 最优水平下氮素淋溶过程对比

处理对氮素淋出量的影响明显不同,且均是在首次淋溶时氮素淋出量最大,而后随着淋溶次数的增加,氮素淋出量逐渐减小(图8)。首次淋溶时,相比CK,保水剂添加水平2的处理氮素淋出量减少7.6%,腐植酸添加水平3处理减少15.0%,沸石添加水平4处理减少21.0%。

2.4.2 最优水平下磷素淋溶过程对比

保水剂添加水平5和腐植酸添加水平2的处理磷素累积淋出量在前4次差异不明显,在第5次淋溶后逐渐表现出明显差异,说明环境材料对磷素淋溶的促进作用具有持久性。沸石添加水平5的处理8次淋溶过程中磷素累积淋出量均高于其他处理,这种差异主要体现在首次淋溶时,相比CK,磷素淋出量增加126.2%,其次是第3次淋溶时,磷素淋出量增加93.1%,在第8次淋溶时,仅比CK磷素淋出量高出24.3%,呈现出随淋溶次数的增加而减小的趋势

表3 不同处理氮素累积淋出总量的差异对比分析(mL)

Table 3 Variance analysis of nitrogen leaching total amount of different treatments (mL)

| 处理 | CK | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 |
|-----|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 保水剂 | 568.3±24.3b | 554.8±11.4ab | 524.8±4.2a | 534.1±11.3a | 537.8±19.7a | 543.3±14.3ab |
| 腐植酸 | 568.3±24.3c | 511.4±4.6b | 475.6±11.2a | 469.5±19.1a | 518.0±21.2b | 485.9±19.7ab |
| 沸石 | 568.3±24.3c | 472.8±11.1b | 451.6±1.0ab | 449.3±4.7ab | 425.6±13.2a | 454.0±23.3ab |

表4 不同处理磷素累积淋出总量的差异对比分析(mL)

Table 4 Variance analysis of phosphorus leaching total amount of different treatments (mL)

| 处理 | CK | 水平 1 | 水平 2 | 水平 3 | 水平 4 | 水平 5 |
|-----|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 保水剂 | 2 082.5±49.0c | 2 321.3±60.9b | 2 389.1±66.1b | 2 186.1±110.0c | 2 386.0±45.3b | 2 732.4±74.8a |
| 腐植酸 | 2 082.5±49.0c | 2 357.0±76.7ab | 2 382.5±112.9a | 2 126.6±54.3c | 2 211.2±81.9bc | 2 101.4±139.8c |
| 沸石 | 2 082.5±49.0cd | 2 188.7±103.0cd | 2 015.0±109.7d | 2 245.9±58.2c | 2 689.7±155.4b | 3 499.3±93.7a |

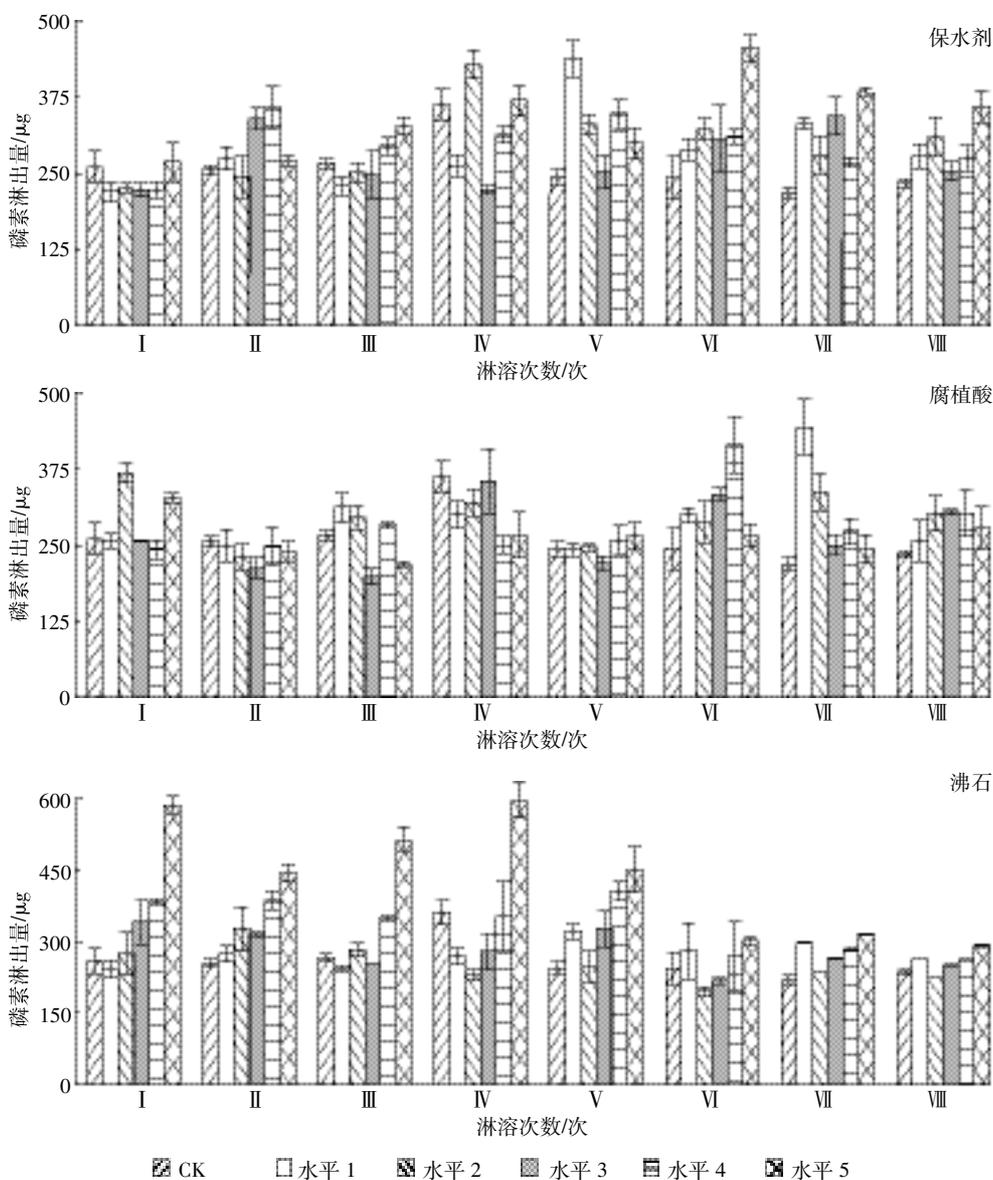


图6 不同环境材料处理对磷素淋出量的影响

Figure 6 The effect of different treatments on phosphorus leaching amount

(图9)。

通过对各组曲线进行线性拟合,磷素累积淋出量与淋溶次数的相关性均达到98%以上,CK处理磷素累积淋出量与淋溶次数之间相关方程为 $y=276.0x+139.1$ ($R^2=0.984$);保水剂添加水平5、腐植酸添加水

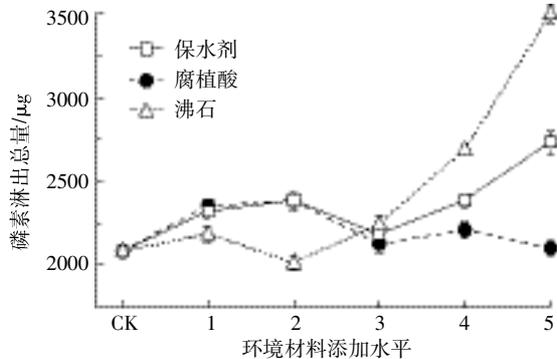


图7 三种环境材料不同水平下磷素淋出总量变化

Figure 7 The change of phosphorus leaching amount under different added levels of three kinds of environmental materials

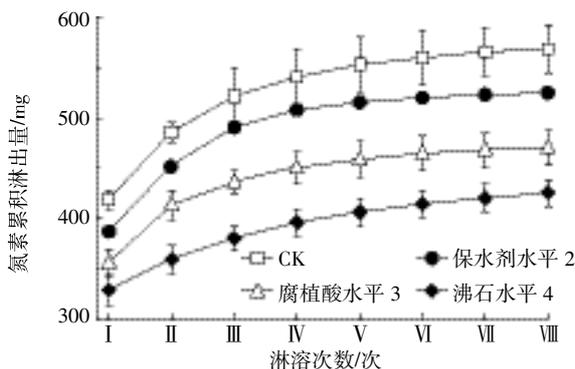


图8 三种环境材料氮增效最优水平淋溶过程对比

Figure 8 Comparison of the nitrogen leaching process of the optimal levels of three kinds of environmental materials

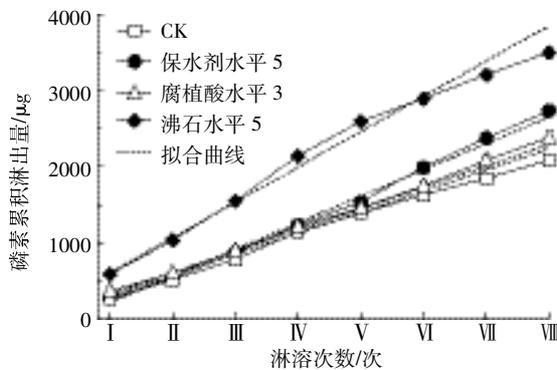


图9 三种环境材料磷活化最优水平淋溶过程对比

Figure 9 Comparison of the phosphorus leaching process of the optimal levels of three kinds of environmental materials

平2和沸石添加水平5处理的磷素淋出量与淋溶次数之间的相关方程分别为 $y=348.0x-128.5$ ($R^2=0.995$), $y=280.3x-50.1$ ($R^2=0.991$), $y=464.7x+139.1$ ($R^2=0.987$), 均与CK的98.4%水平相当。这说明环境材料的添加并不影响磷素的淋出规律,8次淋溶过程中解磷过程一直持续。相关方程中,沸石添加水平5处理的 $k=465$,保水剂添加水平5处理的 $k=348$,说明随着淋溶次数的增加沸石水平5处理的磷素累积淋出量变化快、增量,间接说明沸石对磷活化作用显著。

2.4.3 三种环境材料对土壤氮增效和磷活化的分析

将氮素淋出总量和磷素淋出总量分别与材料添加量建立一元二次回归方程(图10),按照回归分析结果,通过函数最优解方法处理,得到三种材料在氮增效和磷活化效果最佳的添加量。

保水剂组氮素淋出总量回归方程为 $y=26.63x^2-61.92x+564.4$ ($R^2=0.713$),磷素淋出总量回归方程为 $y=0.145x^2-0.063x+2.221$ ($R^2=0.682$)。当添加量为 $1.168 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时氮磷肥同步增效最好,在5个水平中,水平3即添加量为 $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,氮磷肥同步增效最好,相比CK,氮素淋出量减少6.0%,磷素淋出量增多5.0%。腐植酸组氮素淋出总量回归方程为 $y=49.54x^2-120.7x+547.9$ ($R^2=0.541$),磷素淋出总量回归方程为 $y=-0.128x^2+0.196x+2.200$ ($R^2=0.290$)。当添加量为 $1.217 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时氮磷肥同步增效最好,在5个水平中,水平3即添加量为 $1.00 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,氮磷肥同步增效最好,相比CK,氮素淋出量减少17.2%,磷素淋出量增多2.1%。沸石组氮素淋出总量回归方程 $y=2.078x^2-32.02x+544.0$ ($R^2=0.831$),磷素淋出总量回归方程为 $y=0.015x^2-0.079x+2.150$ ($R^2=0.986$)。当添加量为 $7.741 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时氮磷肥同步增效最好,在5个水平中,水平4即添加量为 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,氮磷肥同步增效最好,相比CK,氮素淋出量减少25.1%,磷素淋出量增多29.2%。

综合来看,沸石对土壤氮磷肥同步增效最佳,其水平4土壤氮磷肥同步增效最好。

3 结论

(1)通过显著性分析,三种环境材料在所取大部分水平下对土壤水分保持、氮肥增效和磷肥活化均有显著性差异,表明环境材料施用对土壤水肥增效明显。

(2)保水剂的水分保持效果优于沸石和腐植酸,且随着添加量增多水分保持效果有增强的趋势;腐植酸的水分保持效果与添加量没有明显的相关作用,在

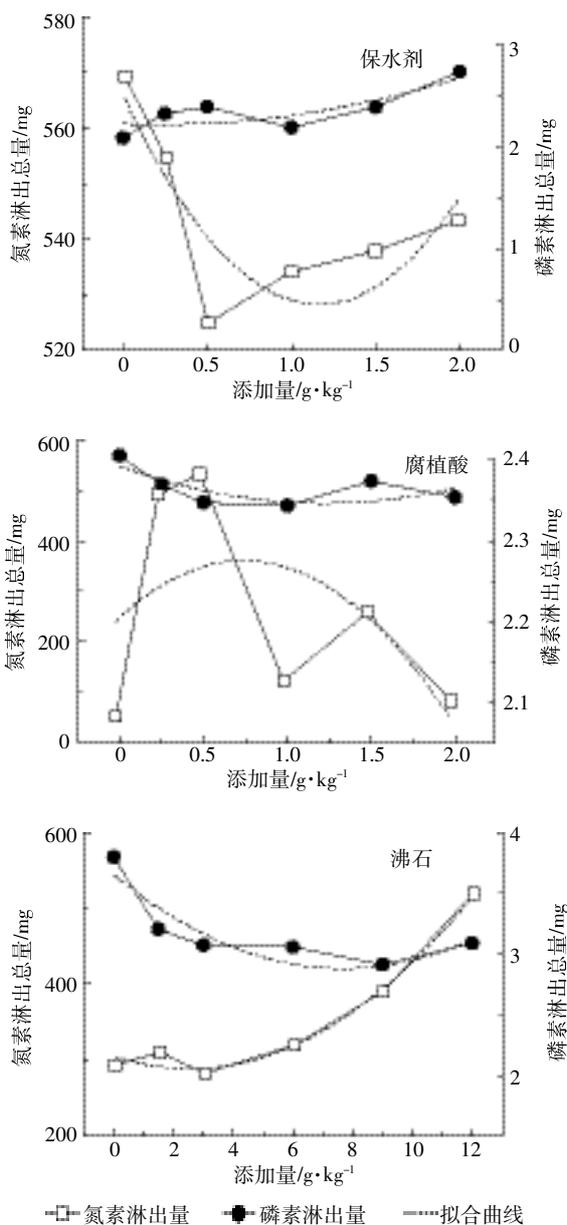


图 10 三种环境材料对氮磷肥同步增效的分析

Figure 10 Analysis of synchronous efficiency of three kinds of environmental materials on nitrogen and phosphorus fertilizer

水平 2 效果最好。

(3)沸石对氮肥保持和磷肥活化效果最好,且效果持久,在一定范围内添加量越多,效果越好;当沸石添加量为 $9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤氮磷肥同步增效最好,相比 CK, 氮素淋出量减少 25.1%, 磷素淋出量增多 29.2%。

参考文献:

[1] 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.
YAN Wei-jin, KANG Yu, ZHANG Shen, et al. The desorption kinetics

of phosphorus from calcareous soil in China[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(2):97-101.

[2] 尹飞虎, 康金花, 黄子蔚, 等. 棉花滴灌随水施滴灌专用肥中磷素的移动和利用率的 ^{32}P 研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14(6):199-204.

YIN Fei-hu, KANG Jin-hua, HUANG Zi-yu, et al. Distribution and use efficiency of phosphorus from trickle irrigation on fertilizer specific fertigated of trickle irrigated cotton via ^{32}P tracing technique[J]. *Acta Agricul-ture Boreali-Occidentalis Sinica*, 2005, 14(6):199-204.

[3] 过度施用磷肥已使我国大部分土壤富磷严重[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012(9):2.

Phosphorus-rich seriousness of over-application of phosphate fertilizer in the most of China[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2012(9):2.

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

GAO Yang-jun, ZHANG Nai-ming. Studying on the influence of phosphorus fertilizer on environment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(6):162-165.

[5] 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 Zhan-bin, SUN Peng-cheng, ZHONG Jian, et al. Application of super absorbent polymer in water and fertilizer conversation of soil and pollution management[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(1):125-131.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 张杨, 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.

ZHANG Yang, ZHAO Shi-wei, LIANG Xiang-feng, et al. Effects of super absorbent on growth of potato and soil water utilization in the mountain area of southern Ningxia[J]. *Agricultural Research the Arid Areas*, 2009, 27(3):27-32.

[9] 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.

ZHANG Chao-wei, DONG Bo, GUO Tian-wen, et al. Effects of fertilization and water retaining agent on yield of potato[J]. *Agricultural Research the Arid Areas*, 2011, 29(6):152-156.

[10] 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.

YAN Yong-li, YU Jian, WEI Zhan-min, et al. Effect of soil properties on water holding capacity of aquasorb[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(5):1111-1115.

[11] 闫永利, 于健, 魏占民, 等. 土壤特性对保水剂吸水性能的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7):76-79.

YAN Yong-li, YU Jian, WEI Zhan-min, et al. Effects of soil properties on water absorption of super absorbent polymers[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(7):76-79.

- [12] Yazdani F, Allahdadi I, Akbari G A. Impact of superabsorbent polymer on yield and growth analysis of soybean (*Glycine max* L.) under drought stress condition[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences: PJS*, 2007, 10(23):4190-4196.
- [13] 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.
LIU Dian-hong, HUANG Zhan-bin, DONG Li. Effects of water retaining agent on yield and water use efficiency of potato in semi-arid area [J]. *Agricultural Research the Arid Areas*, 2007, 25(4):105-108.
- [14] 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.
HOU Xian-qing, LI Rong, HAN Qing-fang, et al. Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3):94-100.
- [15] 牛育华, 李仲谨, 郝明德, 等. 有机阳离子插层蒙脱土改性脲醛树脂的制备与性能研究[J]. 应用化工, 2008, 37(3):233-235.
NIU Yu-hua, LI Zhong-jin, HAO Ming-de, et al. Preparation and properties of UF resin modified with nanometer organophilic montmorillonite[J]. *Applied Chemical Industry*, 2008, 37(3):233-235.
- [16] 冯园园, 黄占斌, 陈宇, 等. 环境材料对土壤水氮保持的效应研究[C]//中国江苏南京, 农业环境与生态安全——第五届全国农业环境科学学术研讨会, 2013:342-346.
FENG Yuan-yuan, HUANG Zhan-bin, CHEN Yu, et al. Effect of environment materials on soil, moisture and the nitrogen conservation in simulation experiment[C]//Nanjing Jiangsu Province China, Agriculture Environment and Ecological Security-The Fifth National Symposium on Agricultural Environmental Science, 2013:342-346.
- [17] 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.
LI Jia-zhu, HUANG Zhan-bin, CHEN Wei, et al. Synergistic effects of environment functional materials to water & fertilizer use efficiency in semi-arid region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1):232-236.
- [18] 王曰鑫, 栗丽. 腐植酸对化学肥料的增效作用研究[J]. 腐植酸, 2007(2):22-27.
WANG Yue-xin, LI Li. Study on the synergetic effect of humic acid on chemical fertilizer[J]. *Humic Acid*, 2007(2):22-27.
- [19] 李嘉竹, 王晓茜, 黄占斌, 等. 环境材料对土壤氮肥的淋溶效应研究[C]//中国内蒙古呼和浩特, 十一五农业环境研究回顾与展望——第四届全国农业环境科学学术研讨会, 2011:140-145.
LI Jia-zhu, WANG Xiao-qian, HUANG Zhan-bin, et al. Study on leaching effects of soil nitrogen to different environmental materials[C]//Huhehaote Neimenggu China Review and Prospect of Agricultural Environment in the Eleventh Five-Year & Fourth National Agricultural Environmental Science Symposium, 2011:140-145.
- [20] 王曰鑫, 秦慧娟. 腐植酸的增氮解磷促钾作用[J]. 腐植酸, 2008(4):27-32.
WANG Yue-xin, QIN Hui-juan. Function of humic acid to control the release of nitrogen and potassium and to activate phosphorus[J]. *Humic Acid*, 2008(4):27-32.
- [21] 游少鸿, 佟小薇, 朱义年. 天然沸石对氨氮的吸附作用及其影响因素[J]. 水资源保护, 2010, 26(1):70-74.
YOU Shao-hong, TONG Xiao-wei, ZHU Yi-nian. Experimental study on ammonium adsorption onto natural stellerite and its factors[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(1):70-74.
- [22] 辛小桂, 黄占斌, 朱元骏. 水分胁迫条件下几种化学材料对玉米幼苗抗旱性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(1):54-57.
XIN Xiao-gui, HUANG Zhan-bin, ZHU Yuan-jun. Effects of several chemical materials on drought resistance of maize seedlings under water stress[J]. *Agricultural Research the Arid Areas*, 2004, 22(1):54-57.
- [23] 李长洪, 李华兴, 张新明. 天然沸石对土壤及养分有效性的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2):163-165.
LI Zhang-hong, LI Hua-xing, ZHANG Xin-ming. Effects of natural zeolite on soil properties and nutrient efficiency[J]. *Soil and Environmental Science*, 2000, 9(2):163-165.
- [24] 刘崇敏, 黄益宗, 于方明, 等. 改性沸石对土壤铅、锌赋存形态的影响[J]. 环境工程学报, 2014, 8(2):767-774.
LIU Chong-min, HUANG Yi-zong, YU Fang-ming, et al. Effects of modified zeolite on fractionation of Pb and Zn in contaminated soil[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(2):767-774.