

石墨烯溶胶配施化肥对土壤中养分流失的影响

隋祺祺^{1,2}, 焦晨旭¹, 乔俊², 赵建国^{1,2}, 王海雁², 李经纬², 邢宝岩²

(1. 中北大学理学院, 太原 030000; 2. 山西大同大学炭材料研究所, 山西 大同 037000)

摘要: 通过土柱淋溶试验研究了石墨烯溶胶配施化肥后对土壤中养分流失的影响, 以探究石墨烯溶胶的保肥作用。试验共设计5个石墨烯溶胶浓度, 进行4次淋溶, 测定每次淋溶液以及4次淋溶后的土壤的电导率、氮、磷、钾含量。结果表明: (1) 石墨烯溶胶与化肥配施于土壤中后对淋溶液的电导率、氮、磷及钾的含量均有影响, 且添加的石墨烯溶胶浓度越大影响越明显。添加石墨烯溶胶处理后的淋溶液中, 硝态氮、总氮、磷的含量最大可分别降低88.2%, 80.9%和84.7%。(2) 4次淋溶后, 添加石墨烯溶胶处理的土壤中氮、磷、钾的含量及电导率与对照相比均有增加, 其中对总氮、总磷的持留效果最大可提高175.0%和59.3%, 但对铵态氮的持留无明显效果。(3) 石墨烯溶胶对淋洗液和土壤的pH影响不明显。石墨烯溶胶与肥料施入土壤中, 可明显减少土壤中养分的淋溶损失, 对土壤中的养分有明显的持留效果, 具有保肥的作用。

关键词: 石墨烯; 柱淋溶; 养分流失

中图分类号: S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)01-0039-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.01.007

Effect of Combined Application of Graphene Solution and Fertilizer on Soil Nutrient Loss

SUI Qiqi^{1,2}, JIAO Chenxu¹, QIAO Jun², ZHAO Jianguo^{1,2},

WANG Haiyan², LI Jingwei², XING Baoyan²

(1. College of Science, North University of China, Taiyuan 030000;

2. Institute of Carbon Materials, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037000)

Abstract: The effect of graphene solution combined with chemical fertilizer on the soil nutrients loss was studied by soil column leaching test, and the fertilizer retention effect of graphene solution was explored. A total of five graphene solution concentrations were designed, and four times leaching was carried out, the conductivity, nitrogen, phosphorus and potassium contents of each leaching solution and the soil after four times of leaching were determined. The results showed that: (1) Application of graphene solution combined with chemical fertilizer had effect on the conductivity, nitrogen, phosphorus and potassium contents of the leaching solution, and the greater the graphene solution concentration added, the more obvious the effect was. The content of nitrate nitrogen, total nitrogen and phosphorus in the leaching solution treated with graphene solution could be reduced by 88.2%, 80.9% and 84.7%, respectively. (2) After four times of leaching, the content of nitrogen, phosphorus, potassium and the conductivity value in the soil treated with graphene solution increased compared with the control, and the retention effects of total nitrogen and total phosphorus increased by 175.0% and 59.3%, but there was no significant effect on the retention of ammonium nitrogen. (3) The effect of graphene solution on the pH of the eluent and soil was not obvious. The application of graphene solution combined with chemical fertilizer into the soil could significantly reduce the leaching loss of soil nutrients, and had obvious retention effect of the soil nutrients. Graphene solution had the function of fertilizer conservation.

Keywords: graphene; column leaching; nutrient loss

收稿日期: 2018-09-19

资助项目: 山西省石墨烯产业化应用技术协同创新中心项目(晋财教[2017]204号); 山西省石墨烯功能材料工程技术研究中心项目(201705D141034); 山西省人才专项(优秀人才科技创新)(201705D211010); 山西省重点研发计划(工业项目)(201703D121037-2); 大同市应用基础研究项目(2017123)

第一作者: 隋祺祺(1991—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事石墨烯材料研究。E-mail: 2282849921@qq.com

通信作者: 乔俊(1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事环境化学研究。E-mail: qiaojun_nk@163.com

赵建国(1971—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事功能纳米炭材料的制备及应用研究。E-mail: jgzhaoshi@163.com

中国是人口大国,粮食安全关系着国家经济的持续快速增长,切实保障粮食稳定高产是中国农业工作中的重中之重。施用化肥是近代农业维持高产的重要手段之一,为了保证粮食产量,中国已是世界上化肥生产和施用量最多的国家。然而,中国的化肥利用率较低,被作物吸收利用的肥料仅为施入量的 30%~35%,大多数化肥随着径流、渗漏和挥发等途径白白流失,增加粮食生产成本的同时,也带来了环境污染,并最终严重影响农业生产效率和农产品的质量^[1-2]。因此,在保证粮食产量的前提下,如何减少化肥施用量、提高化肥利用率,是促进农业可持续发展亟待解决的问题。

近年来利用碳纳米材料作为添加剂研究其对土壤保肥、肥料利用效率等方面的影响逐渐受到关注^[3]。胡梓超等^[4]研究发现,纳米碳的施加,可有效保持黄土坡面土壤养分含量,降低径流中氮磷钾等养分的流失;梁太波等^[5]研究发现,施用纳米碳后可以显著提高烤烟植株中钾素含量并且能够促进烤烟植株对钾肥的吸收;王小燕等^[6]证实,将纳米碳以 3‰ 的比例添加到尿素中,可显著降低水稻田氮素的径流流失,提高氮肥的利用效率;田艳飞等^[7]研究发现,纳米碳及其复合材料混施可显著提高油菜株高,改善土壤结构,并实现氮素的保肥增效;高荣广等^[8]研究表明,纳米碳可改善桃园的土壤环境,促进桃树对氮、钾等肥料的利用率。多数研究^[4-8]认为,纳米碳等材料具有的大的比表面积可增强土壤对养分离子的持留性,从而能够起到保肥效果并提高植物对化肥的利用率。

石墨烯是一种新型的碳纳米材料,是由碳原子以 sp^2 杂化彼此连接构成的二维结构材料,具有较高的比表面积和优异的导电、导热及力学性能。目前,将石墨烯应用到农业领域的研究还比较有限,多数研究^[9-13]主要关注石墨烯对植物生理、毒理等方面的影响,而对将石墨烯用做化肥添加剂,考察其对土壤养分流失方面的影响还鲜见报道。本研究拟将石墨烯溶胶与传统化肥混合施入土壤中,采用土柱淋溶试验方法考察石墨烯溶胶对土壤中各类养分流失的影响,为石墨烯应用在农业生产活动中提供思路和依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

石墨烯溶胶:石墨烯溶胶由山西大同大学炭材料研究所提供,采用电化学方法制备,石墨烯固含量为 0.5%。

供试土壤:供试土壤为山西北部的砂土,于 2018 年 4 月采于山西大同大学周边农田。土壤自然风干,剔除细根和石块后过 2 mm 筛备用,于当月进行分析并开展试验。供试土样的基本理化性质为:土壤 pH 7.8,有机质含量 3.68 g/kg,碱解氮含量 20.0 mg/

kg,速效钾含量 5.20 mg/kg,有效磷含量 9.10 mg/kg,铵态氮含量 7.06 mg/kg,硝态氮含量 9.14 mg/kg,全氮含量 26.0 mg/kg,全钾含量 16.5 mg/kg,全磷含量 10.3 mg/kg。供试土壤颗粒组成为:黏粒含量 3.7%,粉粒含量 9.8%,砂粒含量 86.5%,土壤类型为砂土,土壤容重 1.43 g/cm³。

1.2 试验方法

1.2.1 试验处理 试验共设 5 个处理,石墨烯溶胶浓度分别为 0,50,100,250,500 mg/L,其中石墨烯溶胶浓度为 0 的处理为对照组,用 CK 表示。将不同浓度的石墨烯溶胶与一定量的传统化肥进行充分溶解混合后,施加到土柱中。施肥量参考一般农田施肥水平^[14],施加的肥料为 0.106 g 尿素(相当于施氮量 240 kg/hm²)和 0.094 g 磷酸二氢钾(相当于施磷量 105 kg/hm²、施钾量 132 kg/hm²)。每个处理设 3 次重复。

1.2.2 土柱装置 土柱淋溶装置设计为 3 个部分,上层为进水系统,中层为土柱,下层为淋溶液接收装置。进水系统由流量可调的进水装置构成;土柱为 PC 质地的透明圆柱体,高 50 cm,内径 5.1 cm,底部用橡胶塞塞住,并在塞子中心上打一个 2 cm 的孔;土柱顶部铺一层厚度 5 mm 的砂石,并在砂石表面垫一层滤纸,起到保护土壤不被淋溶液破坏和防止水分淋溶对表层土壤的扰动作用;土柱内壁用凡士林涂抹以减小边缘效应;土柱底部置有 200 目的尼龙网、滤纸和脱脂棉,以防止土壤在淋溶过程中随水流失。按土壤容重将土样装入柱中,每个土柱的土壤分 4 次装入,每次装填高度约 10 cm,一边填装土壤一边轻敲柱子使土壤分布均匀,将土柱壁边缘的土壤压实,以确保无贴壁水流入渗,尽量减少边缘效应。

1.2.3 淋溶试验 淋溶试验于 2018 年 4—6 月开展,试验在室温条件下进行。淋溶试验开始前,根据预试验得到的结果,将一定量的尿素和磷酸二氢钾充分溶解到 250 mL 浓度不同的石墨烯溶胶中并混合均匀,得到不同处理的肥料与石墨烯溶胶的配施液。由土柱顶部分别将 250 mL 不同处理的配施液缓慢均匀加入到土柱中以饱和土柱,平衡稳定 48 h 后,利用进水系统将蒸馏水均匀淋溶到土柱中,进行淋溶试验。每次淋溶量为 250 mL,折合降雨量为 122.4 mm,历时 2.5 h,每次淋溶完后收集淋溶液并在 24 h 内测定淋溶液中的各项指标。每隔 4 天淋溶 1 次,共淋溶 4 次。4 次淋溶结束后,将土柱中全部土壤取出,经风干,混匀并过 2 mm 筛后,测定土壤中 4 次淋溶之后的各项指标。

1.3 测定指标及方法

淋溶液的 pH、电导率、铵态氮、硝态氮、全氮、磷和钾参考《水和废水监测分析方法》(第 4 版)^[15]中的

相应方法进行测定。淋溶前受试土壤的各项理化参数以及淋溶后土壤的 pH、电导率、铵态氮、硝态氮、全氮、全磷和全钾, 参照《土壤农化分析》^[16] 中的分析方法测定。

1.4 数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2007 软件统计分析, 用 Origin 8.0 软件分析作图, 利用 SPSS 19.0 软件的单因素方差分析 (one-way ANOVA) 进行各处理间的显著性差异分析, 差异显著性检验水平为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 石墨烯溶胶对淋溶液的理化性质影响

2.1.1 石墨烯溶胶对淋溶液电导率和 pH 的影响

由图 1 可知, 随着淋洗次数的增加, 各处理淋溶液的电导率总体呈下降趋势, 这与土壤中易被淋洗出的电解质含量逐渐减少有关。首次淋洗时各处理电导率与对照差异较明显, 随着淋溶试验的进行, 各处理电导率与对照的差异逐渐变小, 在第 4 次淋溶后, 各处理淋溶液的电导率值与对照几乎一致, 说明淋洗 4 次后各处理土柱中易被淋洗的电解质含量已比较接近, 无必要再次进行土柱淋洗试验。对图 1 结果进行分析, 首次淋溶时添加 50, 100, 250, 500 mg/L 石墨烯溶胶的处理, 其淋溶液电导率值与对照相比分别降低 14.6%, 17.0%, 22.2%, 29.3%。这表明添加石墨烯溶胶后的处理能够明显降低淋溶液的电导率, 且随着石墨烯溶胶浓度的增大, 电导率降低也越明显。电导率是反映盐分含量状况的指标^[17], 溶液的电导率越低, 表明溶液中电解质的含量越少。本研究中添加石墨烯溶胶后土柱淋溶液的电导率显著低于对照, 说明石墨烯溶胶能够减少土柱中电解质随淋洗过程的损失。此外, 在整个淋溶试验过程中, 不同处理淋溶液的 pH 无显著性差异, 这可能是由于本试验各处理添加的石墨烯溶胶的量总体较少, 还不足以改变土壤的 pH。

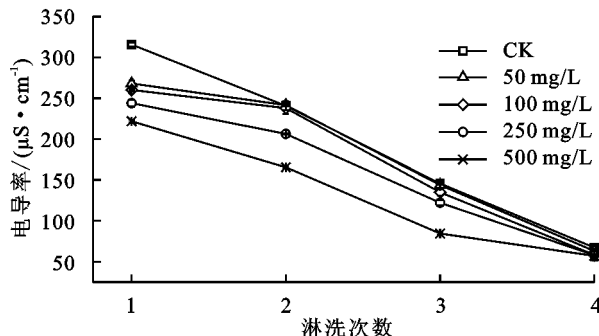


图 1 不同处理土柱淋溶液电导率的变化

2.1.2 石墨烯溶胶对淋溶液氮素的影响 由图 2 可知, 不同处理淋溶液中总氮含量随着淋洗次数的增加呈现先升高再降低的趋势, 这与淋溶液中硝态氮含量变化的结果比较一致, 但与淋溶液中铵态氮含量变化

的情况不同。这是由于在本研究中, 硝态氮的流失占总氮流失的绝大部分 (约 70%~80%), 而铵态氮流失的比例较小 (约 5%)。土壤氮素流失过程中, 硝态氮占绝大多数的情况, 其他研究^[18] 也有报道。淋溶液中硝态氮的含量出现升高的现象, 主要原因是当尿素施入土壤中后, 由于砂质土壤通气透气性好, 硝化作用强, 所以一段时间后, 部分铵态氮由硝化作用转化为硝态氮, 从而造成土壤中硝态氮含量升高^[19-21]。在整个淋洗过程中, 添加石墨烯溶胶的各组处理, 其淋溶液中总氮与硝态氮的含量显著低于对照, 且石墨烯溶胶浓度越高, 现象越明显。特别在第 3 次淋洗后, 各处理 (石墨烯溶胶含量依次为 50, 100, 250, 500 mg/L) 淋溶液中总氮的含量与对照相比, 分别减少 16.2%, 50.3%, 76.7%, 80.9%; 硝态氮含量则分别减少 29.4%, 60.5%, 79.8%, 88.2%。这表明土壤中加入石墨烯溶胶可显著降低总氮和硝态氮的淋溶损失, 且随着石墨烯溶胶用量的增加, 淋溶损失也越小。

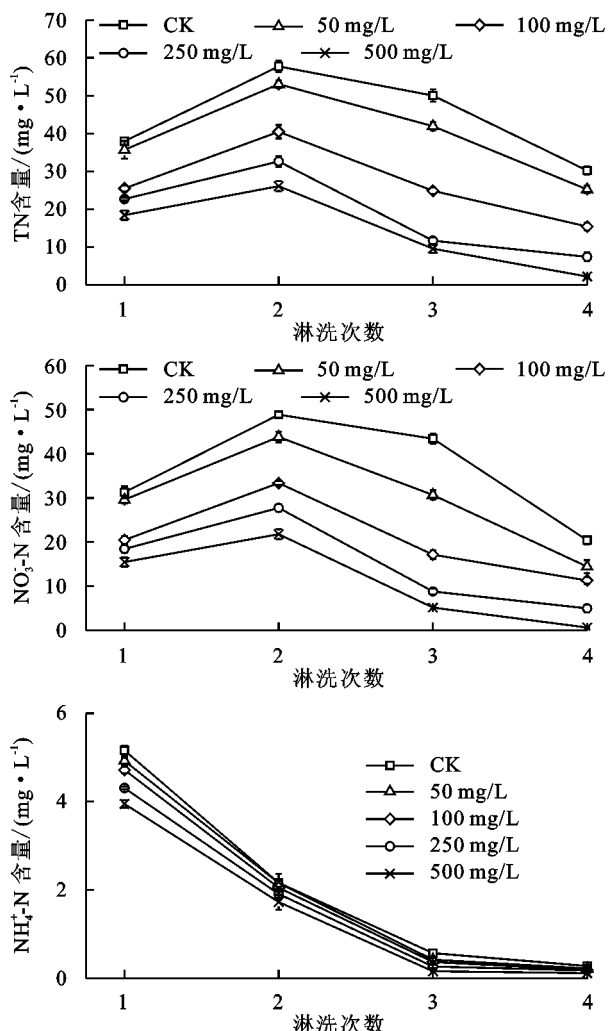


图 2 不同处理土柱淋溶液氮素含量的变化

有研究^[22-23] 表明, 在土壤中加入纳米碳或生物炭等物质, 可加强土壤对氮素等养分的持留作用, 原因是纳米碳和生物炭的比表面积大, 对土壤中的 NO_3^-

有较强的吸附作用。本研究结果发现,石墨烯溶胶可降低土壤中总氮和硝态氮的淋溶损失,其原因也可能是石墨烯具有大的比表面积,其吸附性导致了硝态氮在土壤中的持留性得到增强。从图 2 可以看出,与总氮和硝态氮含量变化趋势不同,淋溶液中铵态氮含量随着淋溶次数增加而迅速降低,这与杨放等^[24]的研究结果一致。各处理淋溶液中铵态氮的含量迅速降低除了与淋洗作用有关外,也与土壤中部分铵态氮由于硝化反应转化为硝态氮有关。总体上,添加石墨烯溶胶的各处理对铵态氮的淋溶损失降低程度比硝态氮弱,表现在首次淋洗各处理(石墨烯溶胶含量依次为 50,100,250,500 mg/L)与对照的淋溶液中铵态氮含量略有差异,铵态氮淋溶损失分别减少 4.6%,8.5%,16.5%,23.5%,而随后的 2~4 次淋溶液中各处理与对照铵态氮的含量差别不大。有研究^[21,23-24]表明,在土壤中添加生物炭或纳米碳对于铵态氮的持留影响并不大。本研究中,石墨烯溶胶对铵态氮的持留作用比硝态氮差,其原因可能是土壤胶体本身带负电荷,对

带正电荷的 NH_4^+ 吸附作用要比带负电荷的 NO_3^- 强^[25],土壤中的铵态氮不易被淋溶流失,石墨烯溶胶添加到土壤后,其对养分的持留能力在容易流失的硝态氮上体现较为明显,而对不易流失的铵态氮则体现的不太突出;另一方面由于发生硝化作用使得铵态氮被消耗,所以土壤中铵态氮含量减少,石墨烯溶胶对其作用并不明显。

2.1.3 石墨烯溶胶对淋溶液磷和钾的影响 从图 3 可以看出,随着淋溶次数增加淋溶液中磷的含量逐渐降低,之后趋于稳定。首次淋洗后,各处理淋溶液中磷含量的差异比较明显;之后数次淋洗过程中,各处理淋溶液中磷的含量差别不大。与对照相比,石墨烯溶胶添加量分别为 50,100,250,500 mg/L 时,首次得到的淋溶液中磷的流失分别减少了 49.4%,66.6%,74.9%,84.7%。这表明添加石墨烯溶胶可明显增强土壤对磷的持留作用,且随着石墨烯溶胶浓度的增大,持留效果越明显,胡梓超等^[4]在研究纳米碳对黄土坡面养分流失的影响时也得到类似的结果。

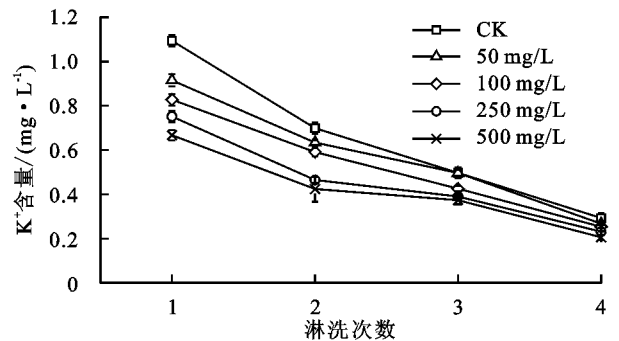
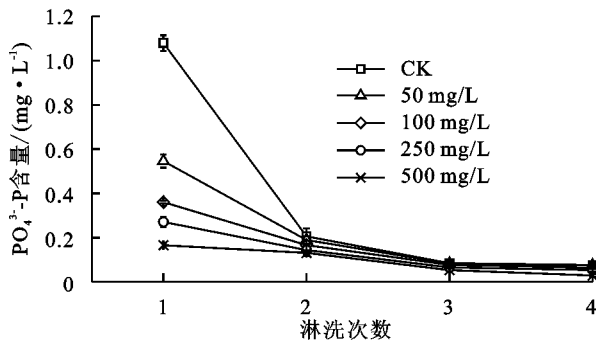


图 3 不同处理土柱淋溶液磷和钾含量的变化

在淋洗过程中,淋溶液中钾的含量随着淋溶次数的增加而逐渐降低,这与淋溶液中 EC 得到的结果相一致。进一步分析可以发现,在淋洗初期,与对照相比,添加石墨烯溶胶 50,100,250,500 mg/L 以后,对钾的流失损失分别减少 16.3%,24.3%,31.3%,39.0%,差异显著,这与淋溶液中铵态氮得到的结果略有不同,是因为铵态氮会发生硝化作用。这表明添加石墨烯溶胶后可减少钾的流失,对土壤中的可溶性钾有明显持留作用,而且随着石墨烯溶胶浓度的增加,减少钾淋洗流失的效果越好,这与胡梓超等^[4]研究结果相一致。

2.2 淋溶后各处理土壤的理化性质变化

2.2.1 淋溶后土壤的电导率和 pH 由图 4 可知,与对照相比,石墨烯溶胶处理后土壤的电导率有显著提高,且提高的幅度随石墨烯溶胶浓度的增加而增大。各处理土壤的电导率显著高于对照,说明各处理土壤中可溶性离子的含量显著增加,即经过 4 次淋洗后土壤中保留的离子含量得到显著提高。各处理淋溶后土壤的 pH 与对照相比相差不大,这与前文提到

的各处理淋溶液 pH 相差不大的结果相一致,说明本研究中石墨烯溶胶的添加量不会对土壤的 pH 造成较大改变。

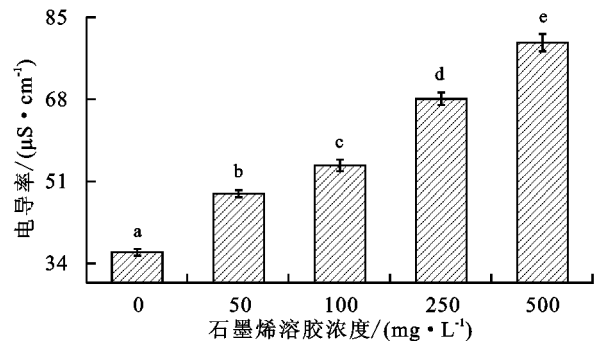


图 4 不同处理淋溶后土壤变化电导率

2.2.2 淋溶后土壤中氮素含量的变化 由图 5 可知,添加石墨烯溶胶的各处理,经 4 次淋溶后,土壤中总氮含量明显高于对照;石墨烯溶胶用量越高,土壤中保留的总氮含量也越高。淋溶后各处理土壤中硝态氮的保留情况与总氮的情况较为一致,而各处理土壤中铵态氮的保留情况与对照无显著性差异。淋溶

后土壤中氮素养分的保留情况与前文淋溶液中氮素养分含量研究结果相互印证,这进一步说明添加石墨烯溶胶可增强土壤对氮素养分的持留能力,尤其可增强对硝态氮的持留。

土壤中总氮的含量变化趋势与硝态氮含量变化趋势一致,而与铵态氮含量变化不一致,这说明在土壤对氮素的持留方面,土壤对硝态氮的持留占主要部分,而对铵态氮的持留只占一小部分,这与淋溶液中得到的结果相一致。另外,与对照组相比,添加 50, 100, 250, 500 mg/L 的石墨烯溶胶以后,土壤中总氮和硝态氮含量分别提高 62.5%, 100%, 131.2%, 175% 和 24.2%, 38.3%, 54.2%, 91.9%, 差异性显著,而土壤中铵态氮含量分别提高 1.3%, 1.5%, 2.6%, 4.9%, 与对照相比没有显著性差异。这说明加入石墨烯溶胶以后明显加强了土壤对硝态氮和总氮的持留能力,这与梁太波等^[26]、邓霞^[27]的研究结果一致,而对铵态氮的持留作用并不明显。

2.2.3 淋溶后土壤中全磷和全钾含量的变化 由图 6 可知,添加石墨烯溶胶的各处理(石墨烯溶胶用量分别为 50, 100, 250, 500 mg/L),经 4 次淋洗后土壤中全磷的含量显著高于对照,分别提高了 16.5%, 31.9%, 45.1%, 59.3%。这与前文淋溶液得到的结果相一致,表明石墨烯溶胶可抑制土壤中磷养分的流失,从而使磷能够更多地保留在土壤中,丁倩等^[28]也得到了类似的研究结果。添加石墨烯溶胶也可增强土壤对钾养分的持留能力,与对照相比,添加石墨烯溶胶的各处理经淋溶后,土壤中全钾含量分别提高了 13.5%, 23.7%, 34.6%, 55.1%, 这说明石墨烯溶胶添加后可增强土壤对钾的持留。可见,大比表面积

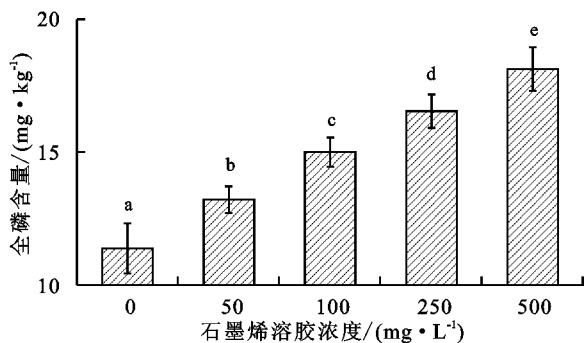


图 6 不同处理淋溶后土壤磷和钾含量的变化

3 结论

(1) 土壤中添加石墨烯溶胶可减少总氮、硝态氮、磷和钾等养分的淋溶损失,且石墨烯溶胶添加量越大,效果越明显。各处理淋溶液中铵态氮、磷和钾的含量在首次淋洗后与对照相比差异显著;添加 500 mg/L 石墨烯溶胶处理的土柱,淋溶液中铵态氮、磷和钾的含量与对照相比分别降低了 23.5%, 84.7% 和 39.0%;各处理淋溶液中硝态氮和总氮的含量在

的石墨烯材料添加到土壤中,由于石墨烯的吸附作用,可增强土壤对磷、钾等营养元素的持留性,减少其随灌溉、降雨等的径流损失。

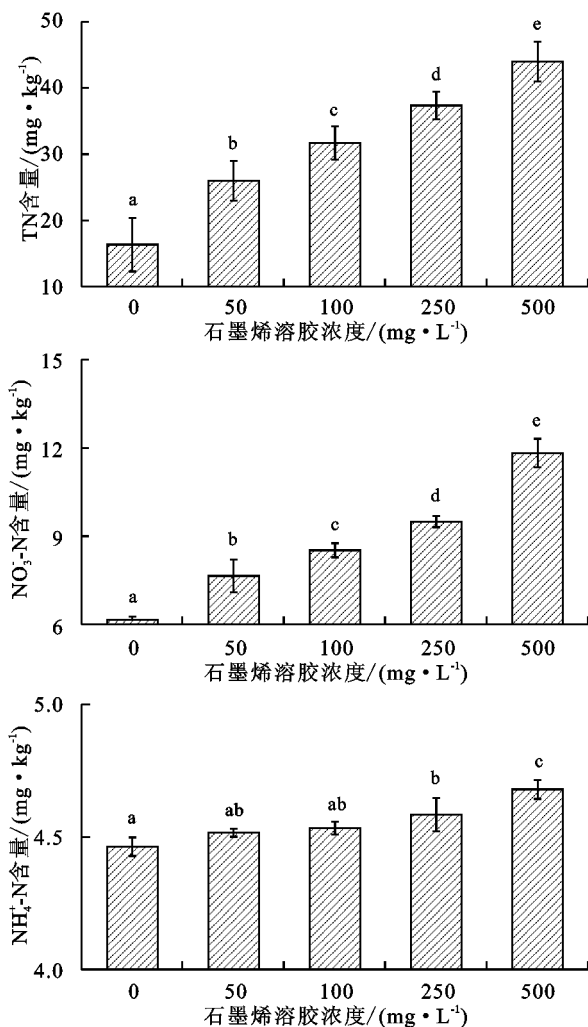
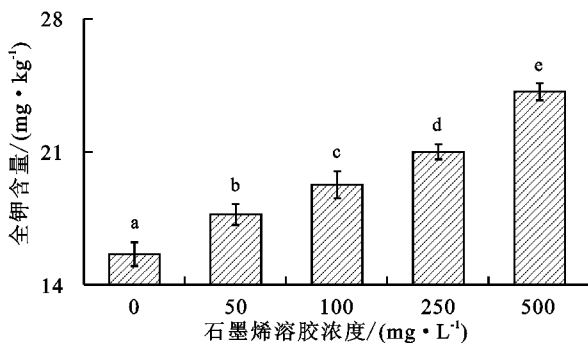


图 5 不同处理淋溶后土壤氮素含量的变化



第 3 次淋洗后与对照相比差异显著;添加 500 mg/L 石墨烯溶胶处理的土柱,淋溶液中硝态氮和总氮含量比对照相比降低了 88.2% 和 80.9%。所有处理淋溶液的 pH 无显著差异。

(2) 添加石墨烯溶胶处理的土壤经过 4 次淋洗后,土壤的电导率、硝态氮、总氮、全磷和全钾等含量显著高于对照,且石墨烯溶胶添加量越大,差异越明显。添加 500 mg/L 石墨烯溶胶处理的土柱,4 次淋

洗后土壤中硝态氮、总氮、全磷、全钾的含量与对照相比分别提高了 91.9%, 175%, 59.3% 和 55.1%; 石墨烯溶胶的添加对土壤的铵态氮及 pH 的影响不大。

(3) 石墨烯作为一种碳纳米材料, 具有较大的比表面积, 对养分离子有较强的吸附作用, 能够增强土壤对养分的持留作用, 减少养分随灌溉、降水等的淋溶损失。在土壤中添加少量石墨烯可达到保肥的效果, 为石墨烯在农业生产的应用开辟新的途径。

参考文献:

- [1] 韩晓光. 不同尿素添加纳米碳对大豆生长、氮素吸收及产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [2] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学报, 2007, 24(6): 687-694.
- [3] 刘秀伟, 袁琳, 罗迎娣, 等. 纳米肥料制备研究进展[J]. 河南化工, 2017, 34(10): 7-11.
- [4] 胡梓超, 周蓓蓓, 王全九. 模拟降雨条件下纳米碳对黄土地面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 1-6, 12.
- [5] 梁太波, 蔡宪杰, 过伟民, 等. 纳米碳用量对烤烟生长发育和钾素吸收积累的影响[J]. 烟草科技, 2011, 49(11): 1-7.
- [6] 王小燕, 王焱, 田小海, 等. 纳米碳增效尿素对水稻田面水氮素流失及氮肥利用率的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 106-111.
- [7] 田艳飞, 黄占斌, 刘丹, 等. 纳米碳及其复合材料对油菜生长和土壤氮素保持效应的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3339-3345.
- [8] 高荣广, 赵鑫, 高晓兰, 等. 纳米碳对桃园土壤肥力及植株养分吸收的影响[J]. 落叶果树, 2018, 50(3): 11-14.
- [9] Liu S, Wei H, Li Z, et al. Effects of graphene on germination and seedling morphology in rice [J]. Journal of Nanoscience & Nanotechnology, 2015, 15(4): 2695-2701.
- [10] Zhang M, Gao B, Chen J, et al. Effect of graphene on seed germination and seedling growth [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2015, 17(2): e78.
- [11] Anjum N A, Singh N, Singh M K, et al. Single-bilayer graphene oxide sheet tolerance and glutathione redox system significance assessment in faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. Journal of Nanoparticle Research, 2013, 15(7): e1770.
- [12] Anjum N A, Singh N, Singh M K, et al. Single-bilayer graphene oxide sheet impacts and underlying potential mechanism assessment in germinating faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2014, 472(4): 834-841.
- [13] 乔俊, 赵建国, 解谦, 等. 纳米炭材料对作物生长影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 162-170.
- [14] 惠锦卓, 张爱平, 刘汝亮, 等. 添加生物炭对灌溉土壤养分含量和氮素淋失的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(2): 156-161.
- [15] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [17] 张国斌, 张晶, 刘赵帆, 等. 肥料组合对青花菜养分含量及土壤理化性状的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(4): 69-75.
- [18] 叶照金, 廖敏, 黄宇, 等. 不同施肥管理模式对集雨区苗木地径流氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 30-37.
- [19] 蔡祖聪, 赵维. 土地利用方式对湿润亚热带土壤硝化作用的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(5): 795-801.
- [20] 罗照霞, 杨志奇, 马忠明, 等. 不同农作措施对黄绵土坡耕地地表径流养分流失及玉米产量的影响[J]. 中国水土保持, 2015(7): 34-36.
- [21] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 旱地土壤施用生物炭减少土壤氮损失及提高氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(6): 54-61.
- [22] 胡梓超, 周蓓蓓, 陈晓鹏, 等. 纳米碳对关中地区土壤水分养分和小麦生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 1-9.
- [23] 周志红, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对土壤氮素淋失的抑制作用[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 278-284.
- [24] 杨放, 李心清, 邢英, 等. 生物炭对盐碱土氮淋溶的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 972-977.
- [25] 潘忠成, 袁溪, 李敏. 降雨强度和坡度对土壤氮素流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 9-13.
- [26] 梁太波, 赵振杰, 王宝林, 等. 纳米碳溶胶对碱性土壤 pH 和养分含量的影响[J]. 土壤, 2017, 49(5): 958-962.
- [27] 邓霞. 湿地植物生物炭的制备及其对土壤氮素生物有效性的影响[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [28] 丁倩, 周蓓蓓, 吕金榜, 等. 植被覆盖条件下纳米碳对黄土坡面养分流失调控的试验研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 35-40.