

控释肥、普通肥分层施肥对氮磷钾养分迁移的影响

梁海^{1,3}, 陈宝成^{1,2}, 韩惠芳¹, 王少博¹, 王桂伟^{1,2}, 韩哲^{1,2}, 陈剑秋³

(1. 土壤资源高效利用国家工程实验室, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018;
3. 养分资源高效开发与综合利用国家重点实验室, 金正大生态工程集团股份有限公司, 山东 临沭 276000)

摘要: 为了研究不同分层施肥对养分迁移的影响, 通过土柱淋洗试验, 以混施(肥料撒施后翻耕)为对照, 设置不施肥、普通尿素和控释尿素分别与磷钾肥掺混后进行1层(深度5 cm)、2层(5, 10 cm)、3层(5, 10, 15 cm)施肥处理, 研究不同分层施肥处理对养分淋洗总量、肥料养分淋洗率的影响。结果表明, 普通肥分层施肥的无机氮淋洗总量显著低于对照, 其中3层施肥处理最低, 且显著低于其他各处理; 控释肥各分层施肥处理无机氮淋洗量总体低于控释肥混施, 但未达显著水平; 各分层施肥处理对有效磷的总淋洗量无显著影响; 普通肥3层施肥处理速效钾淋洗总量最高, 且显著高于普通肥混施, 而控释肥分层施肥中速效钾淋洗总量也是以3层施肥处理最高, 且显著高于控释肥1层施肥。不同分层施肥对肥料养分淋洗率表现出较大差异, 普通肥混施处理氮淋洗率为9.9%, 普通肥1层、2层、3层处理淋洗率分别为6.31%, 4.91%, 2.70%, 分层施肥各处理淋洗率均显著低于混施处理, 控释肥混施处理淋洗量为3.28%, 控释肥1层、2层、3层处理淋洗率分别为1.48%, 2.00%, 2.63%, 分层施肥处理淋洗率均低于混施处理, 但未达显著水平; 普通肥分层施肥处理磷肥损失率为0.03%~0.05%, 而控释肥分层施肥处理磷肥损失率为0.07%~0.08%, 均未达显著水平; 普通肥分层施肥处理中混施钾肥淋洗率为0.35%, 1层、2层、3层施肥处理淋洗率分别为0.40%, 0.49%, 0.55%, 其中3层处理淋洗率显著高于混施处理, 控释肥混施处理钾肥淋洗量为0.24%, 1层、2层、3层施肥处理淋洗率分别为0.20%, 0.27%, 0.37%, 其中控释肥3层淋洗率显著高于混施处理。各处理pH总体为7.22~8.24, 各次淋洗各处理间pH无显著差异, 各处理电导率随着淋洗的进行出现显著的下降, 第1次淋洗普通肥各处理电导率为7 547.00~9 360.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 控释肥各处理电导率为5 570.00~9 370.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 至第4次则分别下降为1 985.67~2 470.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 与1 804.67~2 576.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。综上, 普通尿素分层施肥无机氮淋洗总量显著低于肥料混施, 以3层施肥最低; 控释尿素各分层施肥无机氮淋洗量总体低于肥料混施, 但差异不显著; 各分层施肥对磷素总淋洗量无显著影响; 普通肥3层施肥速效钾淋洗总量显著高于肥料混施; 随着淋洗次数的增多, 各处理淋溶液电导率均出现显著的下降, pH则不同程度上升。

关键词: 控释肥; 普通肥; 分层施肥; 养分迁移

中图分类号: S146 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2019)04-0154-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2019.04.022

Effects of Controlled Release Fertilizer and Common Fertilizer on NPK Nutrient Transport

LIANG Hai^{1,3}, CHEN Baocheng^{1,2}, HAN Huifang¹,

WANG Shaobo¹, WANG Guiwei^{1,2}, HAN Zhe^{1,2}, CHEN Jianqiu³

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer,

Tai'an, Shandong 271018; 2. College of Resource and Environment, Shandong Agricultural

University, Tai'an, Shandong 271018; 3. State Key Laboratory of Nutrition Resources

Integrated Utilization, Shandong Kingenta Ecological Engineering Co., Ltd., Linshu, Shandong 276000)

Abstract: In order to study the effects of different layered fertilization on nutrient transport, a soil column leaching experiment was conducted. Taking the mixed application (ploughing after fertilizer application) as control, and no fertilizer, common urea and controlled release urea were mixed with phosphorus and potassium fertilizer respectively. A layer (depth 5 cm), two layers (5, 10 cm), three layers (5, 10, 15 cm) were applied to study the total nutrient leaching and fertilizer nutrient leaching rate under different layered

收稿日期: 2019-02-21

资助项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项“水浇地合理耕层构建技术指标研究”(201503117); 国家“十三五”重点研发计划项目“纳米复合包膜缓控释掺混肥料研制与应用”(2017YFD0200705)

第一作者: 梁海(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力资源管理与高效利用研究。E-mail: 516634429@qq.com

通信作者: 陈宝成(1969—), 男, 副教授, 主要从事土壤肥力资源管理与高效利用研究。E-mail: bcch108205@163.com

fertilization treatments. The results showed that the total amount of inorganic nitrogen leaching in the layered application of common fertilizer was significantly lower than the control, and the three-layer fertilization gave the lowest. The leaching of inorganic nitrogen was generally low in all layered fertilization treatments. The application of controlled release fertilizer did not reach a significant level compared with the control. All layered fertilization treatments had no significant effect on the total leaching of available phosphorus. Compared with the mixed application, and the total amount of available potassium leaching under controlled-release fertilizer layered fertilization was also the highest in the three-layer fertilization treatment. Different layered fertilizations showed a great difference in the leaching rate of fertilizer nutrient. The nitrogen leaching rate of common fertilizer application was 9.9%, and the leaching rates of common fertilizer under one layer, two layers and three layers application treatments were 6.31%, 4.91% and 2.7% respectively, the leaching rates of layered fertilization treatments were significantly lower than that of mixed application. The leaching rate of controlled release fertilizer was 3.28%. The leaching rates of one layer, two layers and three layers applications of controlled release fertilizer were 1.48%, 2.00% and 2.63%, respectively, the leaching rate of layered fertilization treatments were lower than that of mixed application, but it did not reach a significant level. The loss rate of phosphate fertilizer treated by layered application of common fertilizer was between 0.03%~0.05%, and 0.07%~0.08% for the layered fertilization treatments, both of which did not reach the significant level. The leaching rate of mixed application of potassium fertilizer in the normal fertilizer layered fertilization treatment was 0.35%, and the leaching rates of one layer, two layers and three layers of fertilization treatments were 0.40%, 0.49% and 0.55%, respectively, among which, the leaching rate of three-layer treatment was significantly higher than the mixed application treatment. The leaching amount of controlled release fertilizer mixed with potassium treatment was 0.24%, and 0.20%, 0.27% and 0.37%, respectively for the one layer, two layers, three layers applicaiton treatments. The leaching rates of controlled release fertilizer under three layers application was significantly higher than that of mixed application. The pH of each treatment varied from 7.22 to 8.24. There was no significant difference in pH among treatments. The electrical conductivity decreased significantly with the leaching for all treatments. The electrical conductivity of the first leaching treatment was the same, i.e., 7 547.00~9 360.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the common fertilizer, and 5 570.00~9 370.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for the controlled release fertilizer. The electrical conductivity decreased to 1 985.67~2 470.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 1 804.67~2 576.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectively at the fourth leaching time. In summary, the total leaching amount of inorganic nitrogen in the common urea layered fertilization was significantly lower than that of the mixed fertilizer, and the three-layer fertilization was the lowest. The inorganic nitrogen leaching amount of the controlled-release urea was lower than that of the mixed fertilizer, but the difference was not significant. The layered application had no significant effect on the total leaching amount of phosphorus; the total leaching amount of available potassium of the common fertilizer three-layer application was significantly higher than that of the mixed fertilizer treatment. With the increase of leaching times, the electrical conductivity of leachate decreased significantly for all treatments, but the pH increased with the different degrees.

Keywords: controlled-release fertilizer; common fertilizer; layed fertilizer; nutrient transport

中国的现代农业正在稳步发展中,化学肥料增加作物产量约 40%~60%,但因其不合理的施用而造成了一系列的资源浪费及环境污染问题。肥料的施用技术在作物的种植过程中起着关键作用,其中肥料的施肥位置直接影响着肥料的利用率。传统施肥模式多为肥料土表撒施与表土混合或进行翻耕,施肥模式普遍存在养分挥发、径流损失、淋洗和固定等情况,造成肥料资源利用率不高和面源污染^[1]。合理的施肥方式可以减少养分损失,提高养分利用率。尿素主

要损失途径包括氨挥发与淋洗等,其中氨挥发可占尿素累积损失量的 60%左右^[2],而当氮肥被深施入土壤时,径流中铵态氮的浓度减少 29%~98%,降低 NH_3 挥发 15%~40%^[3-4],肥料利用率提高 15%~20%^[5];当尿素的施用深度大于 7.5 cm 时, NH_3 挥发可以忽略不计^[6]。磷肥深施比土表撒施径流总磷浓度明显减少^[7],当磷肥施于土下 15—20 cm 时能提高玉米产量及磷的吸收量^[8-9];钾肥深施也可有效提高作物的产量与钾吸收利用^[10]。有研究^[11]表明,肥料

深施还可以有效地避免因肥料与种子太过接近而造成的毒害,避免烧苗,但肥料的施用深度过大时则有可能导致作物在营养临界期也难以吸收到足够的养分,不利于作物的正常生长。分层施肥能保留肥料深施优势,同时解决其可能出现的作物早期养分供应不足的问题,增加小麦产量及提高肥料利用率^[12]。控释尿素因其控释特性而能有效减少氮的损失^[13]。随着农业机械发展及种肥同播技术推广,分层施肥技术在大田开始研究和应用,对普通尿素与控释尿素的分层施肥有过报道^[12,14-15],而控释尿素与普通尿素结合分层施肥技术对氮素的保持效果仍未得到充分的研究,而且对分层施肥的研究关注点主要在作物的增产效果,未对分层施肥后肥料养分的迁移规律进行研究报道。因此本试验主要研究普通尿素、控释尿素与磷钾肥掺混分层施用对其养分在土壤中迁移的影响,以探究分层施肥使作物增产、提高肥料利用率的机理问题,为分层施肥技术的进一步应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验为土柱淋洗试验,于 2018 年在山东农业大

学土肥资源高效利用国家工程实验室进行。装土管为长 55 cm、内径 7.0 cm 的中空 PVC 管,所用土壤为筒育湿润淋溶土(普通棕壤),土质为中壤土,土壤中硝态氮含量 22.91 mg/kg,铵态氮含量 0.85 mg/kg,速效钾含量 30.2 mg/kg,有效磷含量 6.2 mg/kg,全氮含量 0.64 g/kg,有机质含量 4.62 g/kg,pH 6.95(水土比 2.5:1)。土壤过 1 cm 筛,充分混匀,备用。供试肥料为树脂包膜控释尿素(含 N 43%,控释期 3 个月)、普通尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 16%)、氯化钾(含 K₂O 60%)。

1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,每个处理重复 3 次,各处理施肥分层状况见图 1。具体各层次施肥比例见表 1。每个土柱均装土 2 kg,按照施肥层次分层装土,压实,土柱高度约为 35 cm。把土柱及淋洗装置安装好,慢慢浇水浸透土壤,但不产生渗漏,培养 1 天,然后浇水淋洗,每次慢速均匀浇 175 mL 纯水,避免水沿土管内壁快速渗流,每次浇水淋洗时长约为 24 h,盛接淋洗水,测定淋洗液含量。试验共淋洗 4 次,每次间隔时间为 7 天。

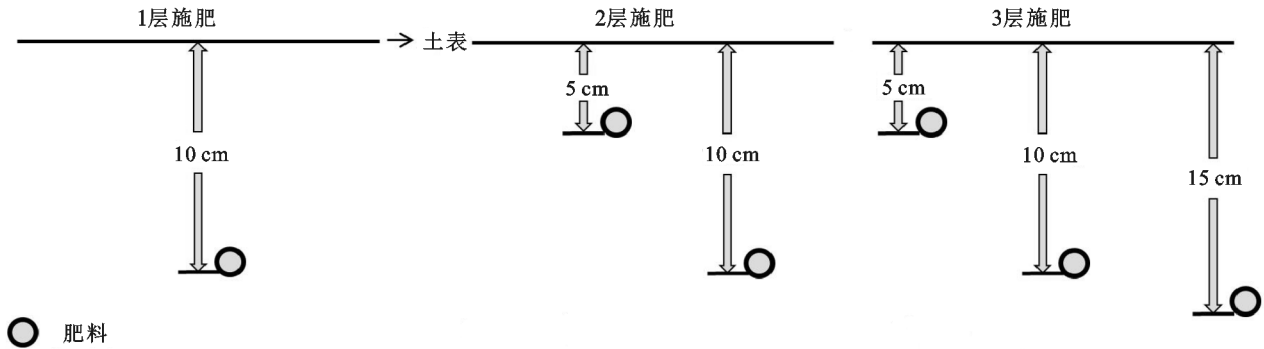


图 1 不同分层施肥处理

表 1 试验施肥处理

处理	施肥说明	单柱施肥量 N—P ₂ O ₅ —K ₂ O/g	施肥深度/cm	施肥比例(基施)/%
CK	不施肥	0—0—0	—	—
CFM	普通肥混施	0.40—0.15—0.15	0—15	100
CF1	普通肥基肥 1 层施肥	0.40—0.15—0.15	10	100
CF2	普通肥基肥 2 层施肥	0.40—0.15—0.15	5	40
			10	60
			5	30
CF3	普通肥基肥 3 层施肥	0.40—0.15—0.15	10	30
			15	40
			5	30
CRM	控释掺混肥混施	0.40—0.15—0.15	0—15	100
CRF1	控释掺混肥基肥 1 层施肥	0.40—0.15—0.15	10	100
CRF2	控释掺混肥基肥 2 层施肥	0.40—0.15—0.15	5	40
			10	60
			5	30
CRF3	控释掺混肥基肥 3 层施肥	0.40—0.15—0.15	10	30
			15	40

1.3 测定指标与方法

淋溶液 pH 及电导率采用 TE PC700 台式 pH 计/电导率仪(Thermo Fisher,美国)测定;无机氮含量采用 AA3—A001—02E 自动分析仪(SEAL, AA3,德国)测定;有效钾含量采用火焰光度计法测定;磷含量采用钼蓝比色法测定^[16]。

计算淋洗率:淋洗率(%)=(施肥处理淋洗总量—空白淋洗量)/施肥量×100%

1.4 数据处理

试验数据采用 SAS 8.0 与 Excel 2017 软件进行处理、统计分析及作图。

2 结果与分析

2.1 不同分层施肥处理对各次淋溶液 pH 的影响

测定各处理 4 次淋溶液的 pH,结果见表 2。试验各处理淋溶液的 pH 随着淋洗次数的增加呈现不同程度的上升趋势,分析原因是供试土壤为棕壤,随着淋洗的进行,土壤中酸性物质不断被洗出, H⁺ 不断减少。CK 处理的 pH 在第 1 次淋洗时为 7.22,显著低于其他各处理,但在随后的淋洗中,其 pH 上升幅度最大,并高于其他处理。第 1 次淋洗时,普通肥分层施肥各处理 pH 约为 7.89~7.93,控释肥分层施肥各处理为 7.57~7.66,普通肥分层施肥显著高于各控释肥分层施肥处理,而普通肥各分层施肥处理之间、控释肥各分层施肥处理之间差异不显著;随着淋洗次数增加,第 2,3,4 次淋洗,施肥处理间淋溶液 pH 差异有所减少,普通肥各分层施肥之间、控释肥各分层施肥之间以及普通肥处理与控释肥处理之间淋溶液 pH 差异不显著。综合分析结果显示,普通肥或控释肥分层施肥对土壤淋溶液的 pH 没有显著影响。

表 2 不同分层施肥处理下淋溶液 pH

处理	第 1 次淋洗	第 2 次淋洗	第 3 次淋洗	第 4 次淋洗
CK	7.22c	7.92a	8.19a	8.24a
CFM	7.90a	7.89a	7.97b	7.92a
CF1	7.93a	7.55b	7.87bc	7.90a
CF2	7.89a	7.86a	7.84bc	7.93a
CF3	7.91a	7.88a	7.87bc	7.93a
CRM	7.66b	7.91a	7.97b	7.89a
CRF1	7.64b	7.82ab	7.81bc	7.88a
CRF2	7.58b	7.86a	7.85bc	8.02a
CRF3	7.57b	7.83ab	7.93bc	7.99a

注:同列中的平均数值采用邓肯多重比较,数字后相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同。

2.2 不同分层施肥处理对淋溶液电导率的影响

淋溶液电导率大小反映土壤养分离子含量及土壤保肥供肥情况,淋溶液电导率大,土壤中有效养分相对多,大水漫灌或降大雨时淋洗的养分也多。测定各

淋溶液电导率(图 2)表明,总体上随着淋洗次数的增多,各处理淋溶液电导率均出现显著的下降,且下降幅度逐渐减小,第 1 次淋洗普通肥各处理电导率为 7 547.00~9 360.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$,控释肥各处理电导率为 5 570.00~9 370.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$,至第 4 次则分别下降为 1 985.67~2 470.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 与 1 804.67~2 576.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$,其原因是随着淋洗的进行,土壤中淋溶离子越来越少,不同淋溶次数间的差异也越来越小;由于施肥增加了养分,各施肥处理淋溶液电导率都显著高于空白处理,其各次电导率为 5 389.00~780.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$;施肥处理各次淋溶液电导率总体上随分层施肥层数的增加而增加,其中 CF3 处理与 CRF3 处理淋溶液电导率均为最高,分别达到 9 360.00,9 370.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

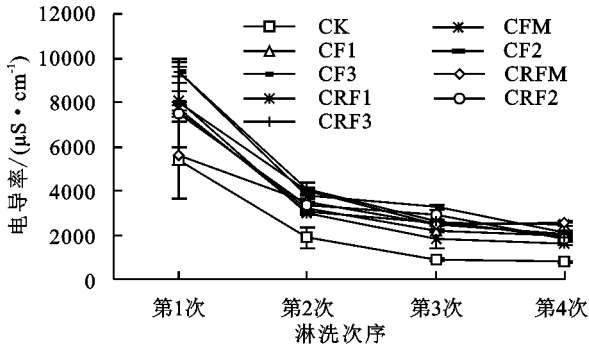


图 2 不同施肥处理对各次淋溶液电导率的影响

2.3 不同分层施肥处理对氮素养分淋洗量的影响

测定每一次淋溶液氮素养分淋洗量和 4 次氮累计淋洗量(图 3)显示,第 1 次淋洗 CFM 处理无机氮淋洗量为 52.57 mg,显著高于其他处理,其中淋洗量最少的为普通肥 3 层施肥处理(CF3),仅为 25.92 mg,显著低于其他处理,随时间推移和淋洗次数的增加,各处理每次氮素淋洗量及处理间的差别呈减小趋势,从第 2 次淋洗开始,各处理无机氮淋洗量快速降低,其中第 2 次淋洗时除 CF3 处理为 5.52 mg 外,普通肥各施肥处理淋洗量均高于 6 mg,随后的 2 次淋洗中也均以 CF3 处理淋洗量为最低,分别为 1.23, 0.87 mg。普通肥各处理每次氮素淋洗量和累计淋洗量基本规律为全层混施(CFM)>1 层施肥(CF1)>2 层施肥(CF2)>3 层施肥(CF3);控释肥各处理第 1 次氮淋洗量差异较显著,其中 CRF1 淋洗量为 22.43 mg,而其他处理淋洗量为 25~27 mg,其他 3 次淋洗量差异均不显著。CFM 处理的累计淋洗量最高(图 4),为 35.86 mg,CRF1、CRF2 与 CFR3 累积淋洗量分别为 27.82,30.74,33.21 mg,各处理间无显著差异。总体上,控释肥处理氮淋洗量低于普通肥,差异达显著或不显著水平,其中 CF3 处理氮淋洗量与控释肥各处理相近。综合氮素养分淋洗量结果,氮肥分 2 层或 3 层能减少养分损洗,其中控释肥淋洗量小于普通肥。

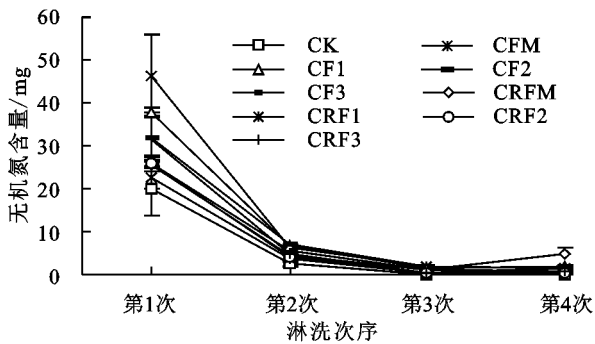
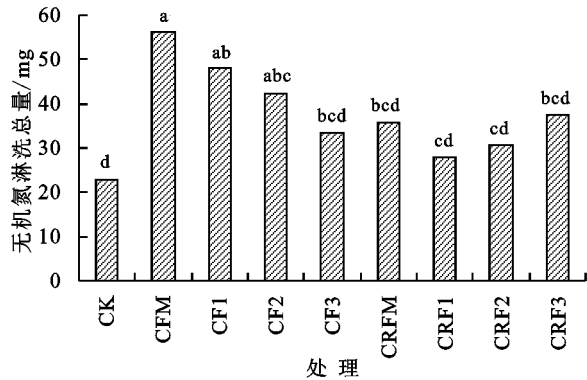


图 3 不同施肥处理各次无机氮淋洗量



注：不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 4 不同施肥处理无机氮累计淋洗量

2.4 不同分层施肥处理对磷素养分淋洗量的影响

不同分层施肥处理对各次淋洗有效磷淋洗量的影响较弱,且各处理第 1 次淋磷洗量显著高于其他时间的淋洗量,第 2~4 次各处理淋洗量较低(图 5)。由于没有施用磷肥,处理 CK 第 1 次淋洗中磷的淋洗量显著低于其他处理,各施肥处理第 1 次淋洗的有效磷含量为 0.08~0.1 mg,且各处理间差异不显著;第 2~4 次各处理淋洗量明显减少,约为 0.02~0.03 mg,各处理间差异不显著。把每个处理的 4 次磷淋洗量相加得出磷的累计淋洗量(图 6),结果显示施肥处理磷的累计淋洗量显著高于不施用磷肥的 CK 处理,各施用磷肥处理的磷淋洗累积量为 0.12~0.17 mg,差异不显著。由此可见,不同分层施肥对有效磷的淋洗无显著影响。

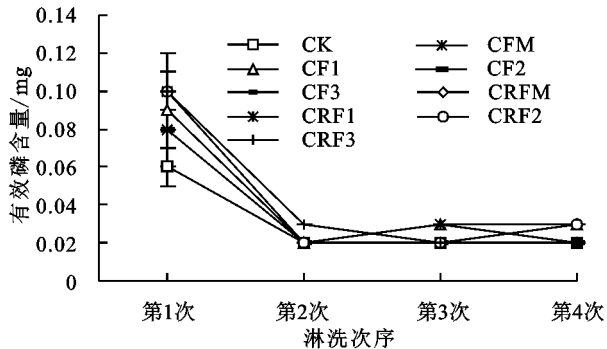


图 5 不同施肥处理各次有效磷淋洗量

2.5 不同分层施肥处理对钾素养分淋洗量的影响

测定不同处理钾素淋洗随淋洗次数变化情况(图

7)显示,不同施肥层次影响土壤钾素淋洗,无论是普通肥还是控释肥,每次淋洗均为多层施肥处理产生较多的钾素淋洗;另外,各处理速效钾淋洗量随淋洗次数不同存在差异,呈现先升高又降低再小幅升高的趋势,第 1 次淋洗时各处理间速效钾淋洗量相近,为 0.08~0.11 mg,各处理无显著差异;第 2 次淋洗普通肥各处理速效钾淋洗量为 0.38~0.4 mg,控释肥处理钾淋洗量最高为 CRF3 处理,为 0.31 mg,普通肥处理均显著高于控释肥处理,造成此结果的原因是普通肥氮素释放转化快,形成铵态氮浓度高,经阳离子交换作用,高浓度铵态氮交换下较多的钾离子进入土壤溶液,易产生淋洗;第 3,4 次淋洗普通肥各处理速效钾淋洗量略高于控释肥处理,但未达显著水平。根据各次钾素淋洗量计算各处理钾素总淋洗量(图 8)显示,随着施肥层数的增加,速效钾的淋洗总量呈增加趋势,普通肥分层施肥中 CF3 处理的速效钾淋洗总量最高,为 1.17 mg,显著高于 CFM 处理,而控释肥分层施肥中 CRF3 处理速效钾的淋洗总量为 0.95 mg,显著高于 CRF1 处理。

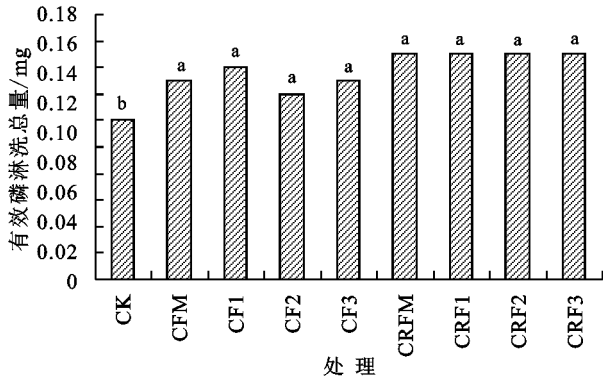


图 6 不同施肥处理有效磷累计淋洗量

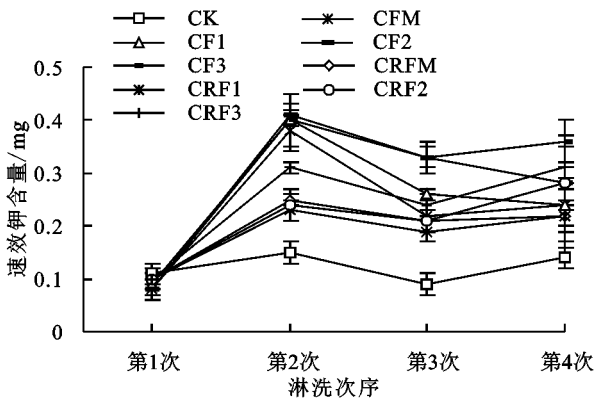


图 7 不同施肥处理各次速效钾淋洗量

2.6 不同分层施肥处理对养分淋洗率的影响

根据各处理的养分淋洗总量计算肥料养分淋洗率,从表 3 可以看出,普通尿素的淋洗率受分层施肥影响较大,其中混施处理 CFM 普通尿素淋洗率为 9.9%,显著高于各分层施肥处理,并且随着分层施肥层数的增加,普通尿素的淋洗率下降,其中 CF3 处理淋洗率仅

为 2.70%，显著低于 CF1 处理。控释尿素各处理间的淋洗率差异不显著，但分层施肥总体的淋洗率低于混施处理 CRFM；各处理的磷肥淋洗率无显著差异，分层施肥对磷肥的淋洗无显著影响；普通肥各处理钾肥淋洗率总体上高于控释肥各处理，在普通肥分层施肥处理中，CF3 的钾肥淋洗率显著高于 CFM，控释肥分层施肥处理中则是 CRF3 的钾肥淋洗率显著高于 CRF1，原因可能是普通肥和控释肥释放氮素形成铵态氮的速度不同，对土壤钾产生的阳离子交换不同，使得钾素淋洗量不同。

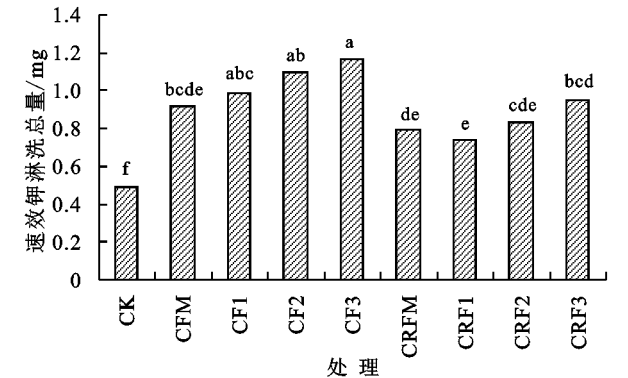


图 8 不同施肥处理速效钾累计淋洗量

表 3 不同分层施肥处理下肥料养分淋洗率

单位：%			
处理	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	—	—	—
CFM	9.90a	0.04a	0.35bcd
CF1	6.31b	0.05a	0.40abc
CF2	4.91bc	0.03a	0.49ab
CF3	2.70cd	0.04a	0.55a
CRFM	3.28cd	0.07a	0.24cd
CRF1	1.48d	0.08a	0.2d
CRF2	2.00d	0.08a	0.27cd
CRF3	2.62cd	0.07a	0.37bc

3 讨论

施肥位置和深度影响氮磷钾养分迁移、保持及作物根系的吸收，影响其有效性^[17-19]，进而对土壤环境产生不同的影响^[20]。在本试验中，普通肥、控释肥分层施肥各处理无机氮总淋洗量均低于混施处理，达显著和不显著水平，显示分层施肥可以减少速效氮的淋洗损失。相关研究^[21]也表明，氮肥分层施用使得肥料在土层中的空间分布更加合理，从而增加其利用率，这是由于分层施肥使肥料在不同深度土层分布，相较于深施，分层施肥既可减少氮素的径流与挥发，又因肥料由浅而深分布，土壤对氮素的截留效果增强，使得氮素被入渗水向更深土层淋溶的量减少。磷素在土壤中的移动性较弱，施入土壤后在 7 天与 28

天的移动距离仅为 8~14 mm，施入的磷主要被固定在邻近施肥点 2 mm 范围的土体内^[22]。本试验结果表明，分层施肥对磷的淋洗没有显著影响。钾肥施入土壤后，K⁺ 吸附在土壤颗粒表面，使钾的移动性和有效性降低，但施入的钾肥被固定的相对较少，大部分仍以有效态存在^[23]，本试验中速效钾淋洗总量与无机氮淋洗总量相反，原因可能是 NH₄⁺ 的存在与 K⁺ 竞争固定位点^[24]，进一步减少土壤对 K⁺ 的固定，增加其移动性，从而增加其被淋溶的风险^[25]。本试验中钾肥与氮肥共同施用，在试验期间普通尿素释放的 NH₄⁺ 相较于控释肥释放更多，因此速效钾的淋洗总量控释肥分层施肥各处理低于普通肥各处理，各处理均表现出与无机氮淋洗总量相反的规律。

电导率表示土壤淋溶液中各离子总量，可作为反映肥料养分淋洗的指标。土壤淋溶液的电导率与其可溶性离子之间的关系为正相关^[26]，在实际生产中可作为土壤离子参数指标，判断其对植物生长阈值的限制^[27]。本试验结果发现，肥料施用层数增加时，淋溶液中的电导率随着出现上升，控释肥与普通肥处理均以 3 层施肥最高，其原因为 3 层施肥处理有部分肥料施肥深度大，与淋洗管底部距离小，淋溶过程中被土壤吸附的路程短，被土壤吸附的离子也相应较少。另外，控释肥处理的淋溶液电导率总体上小于普通肥处理，原因为控释肥中的控释氮养分释放缓慢，减少养分淋溶损失。本试验中各处理土壤淋溶液的 pH 随着淋洗的进行，整体出现上升，这与肥料的施用种类有关，本试验所施用的肥料为氯化钾、过磷酸钙、普通尿素及控释尿素等，氯化钾与过磷酸钙均为生理酸性肥料，尿素转化的铵根离子也可致酸，造成 pH 的下降^[28-29]，随着淋洗的进行，土壤中酸性物质不断被淋失，导致淋溶液中的 pH 随淋洗的进行而出现上升的现象。

4 结论

普通尿素、控释尿素分层施肥处理无机氮淋洗总量不同程度低于混施处理，其中普通尿素以 5、10、15 cm 3 层施肥处理最低，控释尿素各分层施肥处理无机氮淋洗量之间未达显著水平；各分层施肥处理对有效磷的总淋洗量无显著影响；与混施相比，分层施肥不同程度提高土壤速效钾淋洗量；随着淋洗次数的增多，各处理淋溶液电导率均出现显著下降，而各处理淋溶液 pH 则呈现不同程度的上升趋势。

参考文献：

[1] Zeng S C, Zhiyao S U, Chen B G, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from orchard soils in South China as affected by fertilization depths and rates[J].

- Pedosphere, 2008, 18(1): 45-53.
- [2] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: a laboratory comparison[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(2): 310-315.
 - [3] Sommer S G, Schjoerring J K, Denmead O T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops [J]. Advances in Agronomy, 2004, 82(3): 557-622.
 - [4] Liu T Q, Fan D J, Zhang X X, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China [J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80-90.
 - [5] Rochette P, Angers D A, Chantigny M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635-1642.
 - [6] 郭建勋. 化肥机械深施与传统施肥和人工施肥对比[J]. 农业工程, 2013, 3(1): 26-27.
 - [7] 张永清, 李华, 苗果园. 施肥深度对春小麦根系分布及后期衰老的影响[J]. 土壤, 2006, 38(1): 112-114.
 - [8] Borges R, Mallarino A P, Antonio P. Deep banding phosphorus and potassium fertilizers for corn managed with ridge tillage [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(2): 376-384.
 - [9] Schwab G J, Whitney D A, Kilgore G L, et al. Tillage and phosphorus management effects on crop production in soils with phosphorus stratification [J]. Agronomy Journal, 2006, 98(3): 430-435.
 - [10] Borges R, Mallarino A P. Broadcast and deep-band placement of phosphorus and potassium for soybean managed with ridge tillage [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1920-1927.
 - [11] Zhang X K, Rengel Z. Temporal dynamics of gradients of phosphorus, ammonium, pH, and electrical conductivity between a diammonium phosphate band and wheat roots [J]. Crop and Pasture Science, 2002, 53(53): 985-992.
 - [12] 梁海, 陈宝成, 韩惠芳, 等. 普通肥、控释掺混肥分层施肥对小麦生长的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 240-245.
 - [13] Yang Y C, Zhang M, Zheng L, et al. Controlled release urea improved nitrogen use efficiency, yield, and quality of wheat [J]. Agronomy Journal, 2011, 103(2): 479-485.
 - [14] 吴景贵, 任成礼, 代静玉, 等. 玉米一次性分层施肥技术研究[J]. 土壤肥料, 1995, 1(1): 29-32.
 - [15] 邹忠君, 孙艳华. 玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J]. 农学学报, 2011, 1(6): 6-9.
 - [16] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
 - [17] 李亚男, 左华, 宁海丽, 等. 农业非点源污染氮磷流失风险评估研究 [C]. 中国环境科学学会. 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集, 厦门, 2017.
 - [18] Lin X, Zhou W, Zhu D, et al. Nitrogen accumulation, remobilization and partitioning in rice (*Oryza sativa* L.) under an improved irrigation practice [J]. Field Crops Research, 2006, 96(2): 448-454.
 - [19] Kapoor V, Singh U, Patil S K, et al. Rice growth, grain yield, and floodwater nutrient dynamics as affected by nutrient placement method and rate [J]. Agronomy Journal, 2008, 100(3): 526-536.
 - [20] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土地氮素淋溶特征的研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 63-66.
 - [21] 夏光利, 毕军, 史桂芳, 等. 分层施肥对冬小麦产量及氮素效应的影响研究 [J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 72-74.
 - [22] 杜振宇, 王清华, 周健民, 等. 磷在潮土肥际微域中的迁移和转化 [J]. 土壤学报, 2012, 49(4): 725-730.
 - [23] 杜振宇, 周健民, 王火焰, 等. 钾在潮土肥际微域中的迁移与转化 [J]. 水土保持学报, 2009, 23(2): 202-205.
 - [24] 杜振宇, 周健民, 王火焰, 等. NH_4^+ 对 K^+ 在土壤肥际微域中迁移和转化的影响 [J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 492-498.
 - [25] 董艳红, 王火焰, 周健民, 等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究 [J]. 土壤, 2014, 46(2): 225-231.
 - [26] 孙启祥, 张建锋, Makeschin F. 不同土地利用方式土壤化学性状与酶学指标分析 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 98-101.
 - [27] 赵勇, 李民赞, 张俊宁. 冬小麦土壤电导率与其产量相关性 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(增刊 2): 34-37.
 - [28] 毛伟, 李文西, 高晖, 等. 扬州市耕地土壤 pH 值 30 年演变及其驱动因子 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 883-893.
 - [29] 王长松, 陈莉萍, 孔祥英, 等. 仪征市 30 多年来土壤 pH 值时空变化趋势及原因分析 [J]. 江苏农业科学, 2007(3): 223-224.