

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.03.011

梁舒欣, 耿怡爽, 周春雨, 等. 控释肥养分释放对坡耕地土壤磷钾损失及花生生产量的影响. 土壤, 2023, 55(3): 544–553.

控释肥养分释放对坡耕地土壤磷钾损失及花生生产量的影响^①

梁舒欣, 耿怡爽, 周春雨, 常鹏宇, 孙冬然, 刘前进, 杨修一, 耿计彪*

(山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276005)

摘要: 以沂蒙山区坡耕地花生为研究对象, 探究控释肥养分释放对土壤磷钾流失特征、花生产量及磷钾利用率的影响。试验设 5 个处理, 分别为全量和减量 30% 控释肥(CRF1、CRF2), 全量和减量 30% 普通复合肥(CF1、CF2)及不施肥处理(CK)。结果表明: 控释肥在田间土壤中的释放规律与花生植株磷钾吸收特征曲线相吻合, 配合土壤磷钾供应量, 满足了不同时期花生植株养分需求。等量施肥下, 控释肥处理荚果产量较普通复合肥处理显著增加 5.75%~12.01%, 且减量 30% 控释肥处理较 CF1 增产 3.75%; 控释肥处理中植株磷钾吸收量分别较普通复合肥提高 11.46%~11.78% 和 10.44%~12.38%, 其中 CRF2 磷钾表观利用率最高, 分别为 45.48% 和 51.84%。土壤有效磷和速效钾含量均随土层深度的增加而下降, 普通复合肥处理苗期 0~40 cm 的表层土中有效磷含量高于控释肥处理, 花针期以后趋势相反, 但 40 cm 以下土层中各处理差异不显著; 控释肥处理显著提高了花针期以后 0~60 cm 土层速效钾含量, 各处理不同时期 60~100 cm 土层速效钾差异不显著。前 3 次产流事件中, 控释肥处理显著减少了地表径流水中有效磷和速效钾含量, 各处理后期径流水中水溶性磷和钾含量降低且趋于稳定, 处理间差异不显著。因此, 控释肥能够减少坡耕地土壤有效磷和速效钾的径流和淋溶损失, 提高花生养分利用率和产量, 促进生态农业的可持续发展。

关键词: 控释肥; 坡耕地; 花生产量; 磷钾利用率; 径流损失

中图分类号: S145.6; S565.2 **文献标志码:** A

Effect of Nutrient Release from Controlled-release Fertilizer on Phosphorus and Potassium Losses and Peanut Yield in Slope Field

LIANG Shuxin, GENG Yishuang, ZHOU Chunyu, CHANG Pengyu, SUN Dongran, LIU Qianjin, YANG Xiuyi, GENG Jibiao*
(Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, School of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China)

Abstract: A field experiment was conducted on the slope field in Yimeng Mountain to explore the effects of nutrient release from controlled-release fertilizer on soil phosphorus (P) and potassium (K) losses, peanut yield and P and K use efficiency. Five treatments were set up including controlled-release fertilizer with full and reduced 30% of recommended fertilization rate (CRF1, CRF2), common compound fertilizer with full and reduced 30% of recommended fertilization rate (CF1, CF2), and no fertilization treatment as control (CK). The results show that the release patterns of CRFs are consistent with the absorption characteristics of P and K by peanut plants, and combined with the supply of P and K from soil, which can meet the nutrient requirements of peanut plants in different growth periods. Under the same fertilization rate, CRFs significantly increase peanut pod yields by 5.75%–12.01% than CFs, meanwhile, CRF2 increases peanut pod yield by 3.75% than CF1. Compared with CFs, CRFs increase P and K uptake by peanut plants by 11.46%–11.78% and 10.44%–12.38% respectively, CRF2 has the highest P and K use efficiencies, which reach to 45.48% and 51.84%, respectively. The contents of soil available P and K are decreased with the increase of soil depth, soil available P content in 0–40 cm is higher under CFs than CRFs at seeding stage, but opposite after pegging stage, and no significant difference is found below 40 cm among different treatments. CRF significantly increases soil

①基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022SFGC0305)、国家自然科学基金项目(42007091, 32202601, 42077061)、山东省高等学校青创人才引进计划(水土流失过程与生态调控)、山东省自然科学基金项目(ZR2020QC163)和大学生创新创业训练计划项目(S202110452039)资助。

* 通讯作者(gengjibiao@126.com)

作者简介: 梁舒欣(2002—), 女, 山东日照人, 本科, 主要从事土壤养分管理研究。E-mail: lsx020529@163.com

available K content in 0–60 cm after the pegging stage, but no significant difference is found in soil available K content in 60–100 cm at different stages. In the first three runoff events, CRFs significantly reduce available P and K contents in surface runoff water. Besides, water-soluble P and K contents in runoff water are decreased and tend to be stable at the later stage under all treatments, and no significant difference is found among different treatments. Therefore, CRF can reduce runoff and leaching losses of soil available P and K, improve nutrient use efficiency and peanut yield, and thus promote sustainable development of ecological agriculture.

Key words: Controlled-release fertilizer; Slope field; Peanut yield; Phosphorus and potassium use efficiency; Runoff loss

花生是我国重要的油料作物,施肥中氮肥用量较少,对磷和钾的需求较多^[1-2]。磷是核酸、核蛋白、磷脂等的重要组分,参与花生体内的碳氮代谢过程,对花生根瘤固氮、光合作用、产量和品质形成具有重要作用^[3-4]。合理施磷肥有利于促进根系发育,增强叶片的光合性能,改善植株抗氧化特性,提高磷素利用效率^[5]。施钾可显著提高油料作物的含油率,增加叶面积指数及净光合速率,促进蛋白质的合成与运转^[6-9],改善花生产量和品质^[10-11]。但随集约化高产农业的推广应用,肥料的过量投入,易增加磷钾流失风险,导致地表水体富营养化^[10]。

沂蒙山区是北方土石山区的典型代表,坡耕地分布广泛,也是山东省的重要花生产区。坡耕地土壤抗侵蚀能力弱,保水保肥能力差,极易发生养分流失,导致土壤质量退化和生产力水平下降^[12],随径流损失的养分还加剧区域水体的富营养化^[13]。控释肥可减小肥料对花生结瘤的抑制作用^[2],维持作物生长后期较高土壤养分含量,有利于提高养分的利用效率,减少雨季磷钾的地表径流流失,降低农业面源污染^[14-15]。关于控释肥对花生的生长发育、产量和养分积累的研究已经很多^[2, 15-16],但对控释肥在田间土壤中的释放特征与花生养分吸收匹配程度的研究较少。因此,结合控释肥养分释放与花生养分吸收的相关性分析,研究控释肥对坡地土壤有效磷和速效钾时空迁移、地表径流水中有效磷和速效钾流失特征的影响,以期用新型肥料提高花生产量,减少农业面源污染,挖潜坡地产出率,为生态农业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于山东省临沂市蒙阴县垛庄镇双河峪村,属温带大陆性季风气候,四季分明,作物生长季节的平均温度是 13.8℃,降水集中在 7—9 月,年降水量在 800 mm 以上。土壤类型以棕壤和褐土为主,坡耕地面积广大,夏季集中性降水易造成水土流失。试验土壤含 70.8% 的砂砾、26.1% 的粉粒和 0.7% 的

黏粒,为砂质壤土。土壤硝态氮含量 19.42 mg/kg,铵态氮 12.89 mg/kg,有效磷 14.01 mg/kg,速效钾 55.67 mg/kg,有机质 8.2 g/kg,全氮 0.71 g/kg。

1.2 试验设计

试验于 2021 年 4—8 月进行,采用随机区组设计,设置 5 个处理:①一次基施 120 kg/hm² 控释复合肥(当地习惯施肥量),CRF1;②一次基施减量 30% 的控释复合肥(84 kg/hm²),CRF2;③一次基施 120 kg/hm² 普通复合肥,CF1;④一次基施减量 30% 的普通复合肥 84 kg/hm²,CF2;⑤不施肥,CK;每处理重复 3 次。控释复合肥包膜材料为聚氨酯,N:P₂O₅:K₂O=15:15:15,释放周期约为 3 个月;普通复合肥 N:P₂O₅:K₂O=15:15:15,水溶性强(第一天溶解率 100%)。不同肥料释放周期和释放速率如图 1 所示。

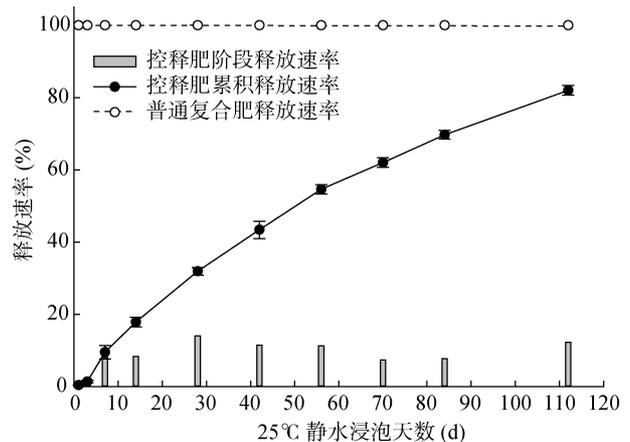


图 1 供试肥料在 25℃ 静水中的释放速率

Fig. 1 Release rates of different fertilizers in water at 25℃

试验小区长 10 m,宽 1.6 m,坡度 12°,每个小区均起垄覆膜,种植两垄,垄高为 10 cm,垄宽为 40 cm。所有肥料均在播种前起垄时一次性条施,花生种苗在肥料一侧 5 cm 处。称量复合肥颗粒 10 g 放入长 12 cm、宽 10 cm 的尼龙网袋中。在播种行一侧 10 cm 处挖一条深 10 cm、宽 14 cm 土沟,在沟底平铺 20 个肥料袋,并使网袋中的肥料颗粒均匀地分布在沟内的土壤上,覆土^[17]。CRF1 和 CF1 处理下每垄施肥量为 0.64 kg,CRF2 和 CF2 处理下每垄施肥量

为 0.45 kg。小区周围用塑料隔板设置围梗，埋入地下 50 cm，出露地表 10 cm，防止小区间水分和养分发生交换。每个小区设置单独的径流池(深 80 cm，长和宽为 60 cm)，在小区与径流池相连处，沿小区宽度方向设置集流槽，每个集流槽均设置“v”型出水口。各小区出水口高度保持一致，在集流槽的下部放置集流桶，用来收集径流水。试验过程中共有 10 次产流事件，每次降雨结束后，收集径流水。

1.3 样品采集与测定方法

2021 年 4 月 26 日播种，在苗期(5 月 23 日，播种后 27 d)、开花下针期(6 月 26 日，播种后 60 d)、结荚期(7 月 24 日，播种后 88 d)和成熟期(8 月 28 日，播种后 123 d)分别取土壤、植株和肥料样品。土壤取样的位置是在花生的行间和株间各打两个点，取 4 个土壤样品，充分混匀，采用四分法取部分土带回实验室，进行测定。在各生育期，以 20 cm 为单位分层采取 0~100 cm 土壤样品，共 5 层样品。在不施肥处理下，植株的养分吸收主要来自土壤，因此把 CK 处理下的植株的磷素或钾素吸收总量作为土壤供磷钾量；普通复合肥施入土壤中迅速溶解于土壤内，难以区分肥料的释放量和土壤的供应量，因此将施肥后的土壤磷钾素供应量视为两者的供应总量；缓控释肥的肥料释放量采用“失重法”测定，在不同生长期挖取播种前铺设在沟底的肥料袋，每次连续取 3 个，带回实验室冲洗干净，烘干至恒重，失去的重量视为控释复合肥在土壤中的释放量，按照施肥量和释放率的乘积计算出控释复合肥在土壤中的供应量。每次采集长势均匀的代表性植株 4 株，分地上和地下两部分，带回实验室后 105 °C 杀青 30 min，然后 65 °C 烘干至恒重。土壤和植株样品采集均在同一垄沟内，另一垄沟留作产量统计。

每个小区收获一垄花生荚果，放在纱网袋中，进行晾晒、自然风干至恒重后用天平称量单株果重、饱果重、百果重和百仁重，然后计算产量。

土壤有效磷测定采用 Olsen 法，速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定^[18]。地表径流中水溶性磷采用钼蓝比色法测定，水溶性钾采用火焰光度法测定。磷(钾)养分吸收量=地上和地下部分磷(钾)含量×植株量；磷(钾)养分当季利用率(%)=(施肥处理植株磷(钾)积累量-不施肥处理植株磷(钾)积累量)/养分投入量×100。

1.4 数据统计处理

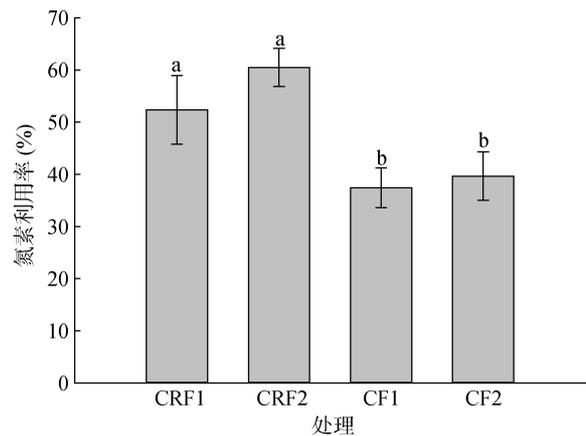
使用 Microsoft Excel 2019 对数据进行预先处理，然后用 SAS 统计软件对数据进行多重比较分析，

处理后的数据使用 SigmaPlot 12.5 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理下氮肥的释放与利用率差异

不同施肥处理下氮素利用率存在差异(图 2)，其中 CRF1 的氮素利用率为 52.34%，CRF2 的氮素利用率最高，达到了 60.47%；CF1 和 CF2 的氮素利用率分别为 37.41% 和 39.66%。两个控释肥处理下的氮素利用率高于普通复合肥处理，并且 CRF 处理与 CF 处理存在显著性差异($P<0.05$)。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下同)

图 2 不同处理氮素利用率

Fig. 2 Nitrogen use efficiencies under different fertilization treatments

2.2 控释肥对坡地土壤有效磷含量时空迁移特征的影响

土壤有效磷含量随土层深度的增加逐渐下降，施肥提高不同生育期 0~100 cm 土层有效磷含量(图 3)。不同深度土层中，各处理 0~60 cm 有效磷变化幅度较大，尤其是 0~20 cm 与 20~40 cm 相邻土层的有效磷含量急剧下降，但是 60~100 cm 土壤有效磷含量相对稳定。不同生育期同一土层间有效磷含量在苗期和结荚期高于花针期和成熟期。0~20 cm 土层中，各施肥处理苗期和成熟期的有效磷含量分别为 26.11~33.25 mg/kg 和 21.8~25.94 mg/kg，各处理间无显著差异；花针期时 $\text{CF1}>\text{CRF1}$ ，结荚期时 CRF1 有效磷含量最高，达到 38.75 mg/kg，高于 CF2 。苗期 20~40 cm 土壤中的有效磷含量高于其他时期；花针期和结荚期各处理间无显著差异；成熟期时， CRF1 处理下的有效磷含量最高。40~60 cm 土层中，结荚期 $\text{CRF1}>\text{CF1}$ ，其他生育期不同施肥处理下无显著差异。60 cm 以下土层的有效磷含量较低，且相对稳定，相同生育期内处理间差异不显著。

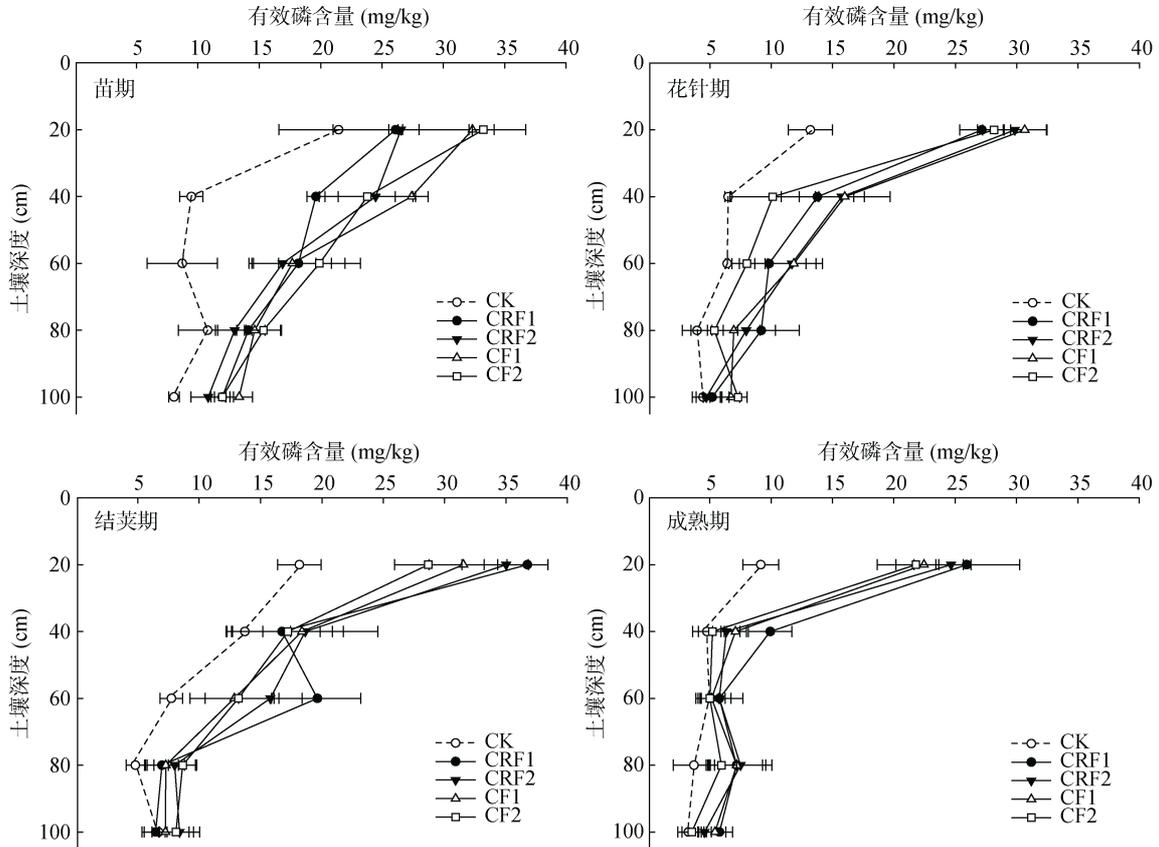


图 3 控释肥对坡耕地土壤有效磷时空变化特征的影响

Fig. 3 Temporal and spatial variation characteristics of soil available P contents in slop fields under different fertilization treatments

2.3 控释肥对坡地土壤速效钾含量时空迁移特征的影响

各生育期 0 ~ 100 cm 土层速效钾含量在不施肥处理下处于最低水平,随着土层深度的增加,速效钾的含量逐渐下降。0 ~ 20 cm 土层中速效钾含量最高,20 ~ 40 cm 土层中速效钾含量迅速下降(图 4)。苗期和花针期 0 ~ 20 cm 土壤中各处理间速效钾含量无显著差异,分别保持在 77.19 ~ 88.07 mg/kg 和 58.62 ~ 63.9 mg/kg; 结荚期表现为 CRF>CF, CRF1 最高,为 88.47 mg/kg, CF2 最低,为 77.56 mg/kg; 成熟期时为 CRF1 最高。20 ~ 40 cm 土层中,苗期时 CF1 和 CF2 处理下的有效磷含量分别为 56.35 mg/kg 和 53.38 mg/kg,显著高于 CRF1 和 CRF2; 花针期各处理之间差异不明显; 结荚期和成熟期,则表现为 CRF>CF。40 ~ 100 cm 土层中,结荚期时 CRF1 在 40 ~ 60 cm 土层中速效钾含量显著高于 CF2; 其他不同生育期间相同深度下各处理间差异不显著,尤其是 60 ~ 100 cm 土层中,各施肥处理与 CK 间差异不显著(除结荚期 CRF1 和 CF2 在 60 ~ 80 cm 土层中速效钾含量显著高于 CK)。

2.4 控释肥对坡地土壤地表径流中水溶性磷和水溶性钾含量的影响

在花生的生长季节内,随降雨事件共产生了 10 次地表径流,产流时间及水溶性磷含量如表 1 所示。地表径流中水溶性磷含量在前期较高,后期逐渐趋于稳定。前 3 次径流水中的水溶性磷含量受肥料类型及施肥量影响较为显著,但是相同肥料下,施肥量未对水溶性磷含量产生显著影响。6 月 5 日,CF1 和 CF2 径流水中水溶性磷含量最高,均为 0.5 mg/L,显著高于 CRF 处理; 6 月 13 日,CF1 和 CF2 径流水中水溶性磷含量高于 CRF1,但与 CRF2 无显著差异; 6 月 15 日,CRF2 径流水中水溶性磷含量显著低于 CF1 和 CF2,其他处理间无显著差异; 6 月 27 日之后各处理均未表现出显著差异。6 月 15 日至 6 月 30 日径流水中水溶性磷含量逐渐下降,在 7 月 3 日上升,7 月 29 日又急剧下降,随后径流水中水溶性磷含量趋于稳定,保持在 0.15 ~ 0.29 mg/L。

施肥对地表径流水中水溶性钾含量产生显著影响(表 2),大致表现为前期含量高,后期含量低的动态变化态势。前两次地表径流水中,CF1 和 CF2

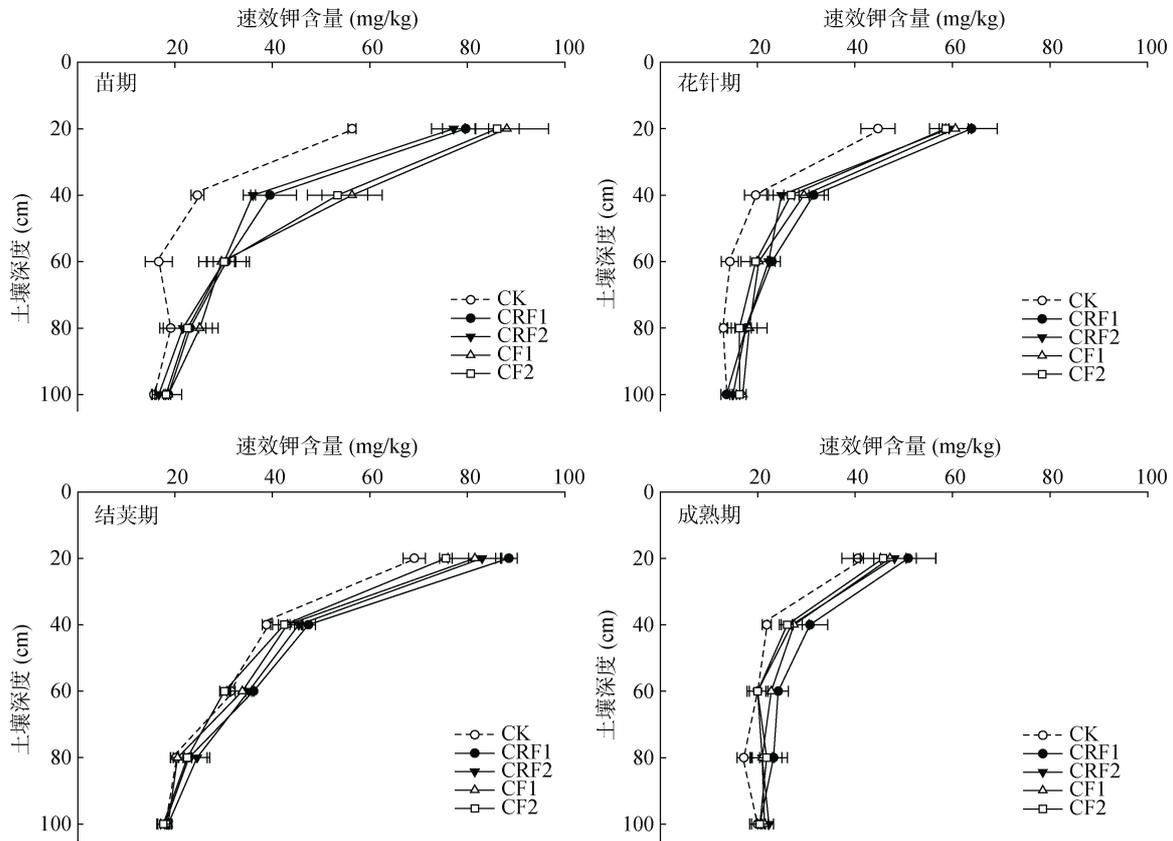


图 4 控释肥对坡耕地土壤速效钾时空变化特征的影响

Fig. 4 Temporal and spatial variation characteristics of soil available K contents in sloped fields under different fertilization treatments

表 1 不同施肥处理地表径流水中水溶性磷含量(mg/L)

Table 1 Available P contents in runoff water under different fertilization treatments

| 处理 | 6月5日 | 6月13日 | 6月15日 | 6月27日 | 6月30日 | 7月3日 | 7月29日 | 8月1日 | 8月5日 | 8月23日 |
|------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CK | 0.18 c | 0.33 b | 0.47 ab | 0.34 a | 0.24 a | 0.40 a | 0.17 a | 0.21 a | 0.16 a | 0.20 a |
| CRF1 | 0.29 bc | 0.39 b | 0.45 ab | 0.36 a | 0.23 a | 0.49 a | 0.22 a | 0.29 a | 0.18 a | 0.22 a |
| CRF2 | 0.34 b | 0.45 ab | 0.42 b | 0.42 a | 0.27 a | 0.41 a | 0.21 a | 0.21 a | 0.19 a | 0.16 a |
| CF1 | 0.50 a | 0.58 a | 0.52 a | 0.38 a | 0.35 a | 0.47 a | 0.23 a | 0.24 a | 0.20 a | 0.19 a |
| CF2 | 0.50 a | 0.56 a | 0.59 a | 0.45 a | 0.32 a | 0.47 a | 0.15 a | 0.26 a | 0.15 a | 0.22 a |

注：同列数据小写字母不同表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下表同。

表 2 不同施肥处理地表径流水中水溶性钾含量(mg/L)

Table 2 Available K contents in runoff water under different fertilization treatments

| 处理 | 6月5日 | 6月13日 | 6月15日 | 6月27日 | 6月30日 | 7月3日 | 7月29日 | 8月1日 | 8月5日 | 8月23日 |
|------|---------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| CK | 1.86 b | 2.76 b | 1.37 a | 1.66 ab | 1.50 b | 1.83 b | 0.27 b | 0.70 a | 0.33 a | 1.01 a |
| CRF1 | 2.30 ab | 4.03 ab | 1.60 a | 1.37 b | 1.57 b | 3.66 a | 0.48 ab | 1.19 a | 0.33 a | 1.31 a |
| CRF2 | 2.20 ab | 3.56 ab | 1.86 a | 1.47 ab | 1.60 b | 3.52 a | 0.51 ab | 1.29 a | 0.76 a | 1.84 a |
| CF1 | 3.20 a | 4.33 a | 1.50 a | 1.80 ab | 2.06 a | 2.76 a | 0.73 a | 0.95 a | 0.39 a | 1.04 a |
| CF2 | 2.86 a | 4.26 a | 1.27 a | 2.60 a | 1.53 b | 2.60 a | 0.61 ab | 1.60 a | 0.73 a | 1.69 a |

的水溶性钾含量显著高于 CK 处理，但是不同施肥类型及施肥量间未产生差异。6月15日，各处理地表径流水中水溶性钾含量为 1.27 ~ 1.86 mg/L。6月27日，CF2 > CRF1，其余处理间无显著差异。6月27日至7月3日，径流水中水溶性钾含量逐渐上升。

7月3日，CRF1 和 CRF2 处理下水溶性钾含量显著高于 CK，但与 CF1 和 CF2 差异不明显。8月1日之后各处理地表径流水中水溶性钾含量未表现出显著差异。

根据径流总量和磷钾含量算得单位面积总的

磷钾流失量,计算出径流流失量占施磷钾肥料总量的比例(表 3)。CRF1 处理下的磷钾流失量占施磷钾肥料总量的比例最低,CF1 处理下的流失量占施肥量的比例高于 CRF1; CF2 处理下的磷流失量占施磷总量的

比例最高,达到 0.06%,钾流失量占施钾总量的比例也最高,达到 0.35%。但从整体上看,各处理单位面积总的磷钾流失量占施磷钾肥料总量的比例并不高,流失率差异不大。

表 3 径流流失量占施磷钾肥料总量的比例
Table 3 Proportions of runoff loss in total amount of phosphorus and potassium fertilizer applied

| 处理 | 磷流失量 (mg) | 磷流失量占施磷总量的比例 (%) | 钾流失量 (mg) | 钾流失量占施钾总量的比例 (%) |
|------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| CRF1 | 74.01 | 0.04 | 446.84 | 0.23 |
| CRF2 | 71.17 | 0.05 | 460.66 | 0.34 |
| CF1 | 86.58 | 0.05 | 456.13 | 0.24 |
| CF2 | 86.38 | 0.06 | 470.86 | 0.35 |

2.5 控释肥养分释放、土壤供应量与花生植株磷钾吸收间的相关关系

由图 5 可知,花生磷素的吸收量随着生育期的进行而逐渐增加,CK 处理在各个时期均处于最低水平。苗期时,磷素吸收量在各处理下含量为 44.82 ~ 47.83 kg/hm²; 花针期时,CRF1 和 CRF2 吸磷量为 69.75 kg/hm² 和 67.86 kg/hm²,高于 CF1(64.28 kg/hm²) 和 CF2(57.72 kg/hm²); 结荚期时,CRF1 处理高于 CF1 和 CF2; 成熟期时,CRF1 吸磷量最高,比 CF1 和

CF2 分别提高 11.46% 和 13.88%,CRF2 比 CF2 增加 11.78%。CRF 在土壤中的磷释放量随生长阶段的增加而增加(图 5A、5B),该释放量配合土壤磷素供应量能够满足不同时期花生植株磷素需求; CF 处理(图 5C、5D)在苗期前肥料供磷量高于植株吸磷量,但是苗期及以后肥料供磷量低于植株吸磷量。

施肥显著提高了各时期花生植株钾素吸收量(图 6),且随时间推移,各处理钾素吸收量呈动态上升趋势。苗期时,CK 处理下的植株钾素吸收量为

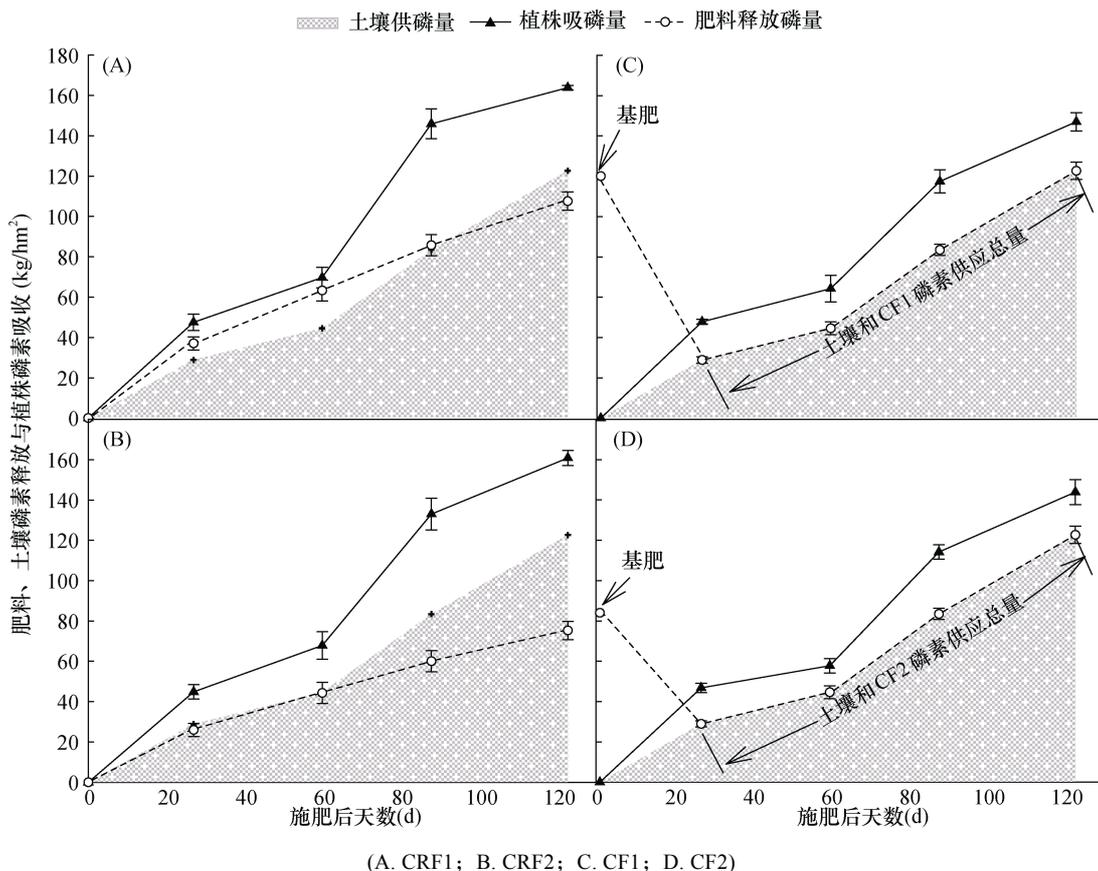


图 5 坡地花生磷素吸收及土壤/肥料磷素供应特征
Fig. 5 Characteristics of P uptake by peanut and P supply from soil and fertilizers in slop field

33.35 kg/hm², 各施肥处理钾素吸收量为 50.32 ~ 54.53 kg/hm²; 花针期时, CRF1 和 CRF2 钾素吸收量高于 CF 处理, 分别为 77.89 kg/hm² 和 76.16 kg/hm², 并与 CF2 处理差异显著。结荚期时 CRF>CF, 且 CRF2 比 CF2 显著增加 16.31%。成熟期, 钾素吸收量最大值和最小值分别出现在 CRF1 和 CF2 两个处理, 分别为 192.64 kg/hm² 和 166.27 kg/hm²。在等量施肥处理下, CRF 比 CF 钾素吸收量增加 10.44%~12.38%。

CF 处理下苗期前钾素供应量高于植株吸收量, 但是苗期以后钾素供应量低于植株吸钾量(图 6C、6D)。CRF 处理下的钾素释放缓慢, 更好地吻合植株钾素吸收量(图 6A、6B)。

2.6 控释肥对坡地花生磷钾利用率及荚果产量的影响

不同施肥处理对磷素和钾素表观利用率均产生显著差异(图 7), 其中 CRF2 的磷素利用率最高, 达

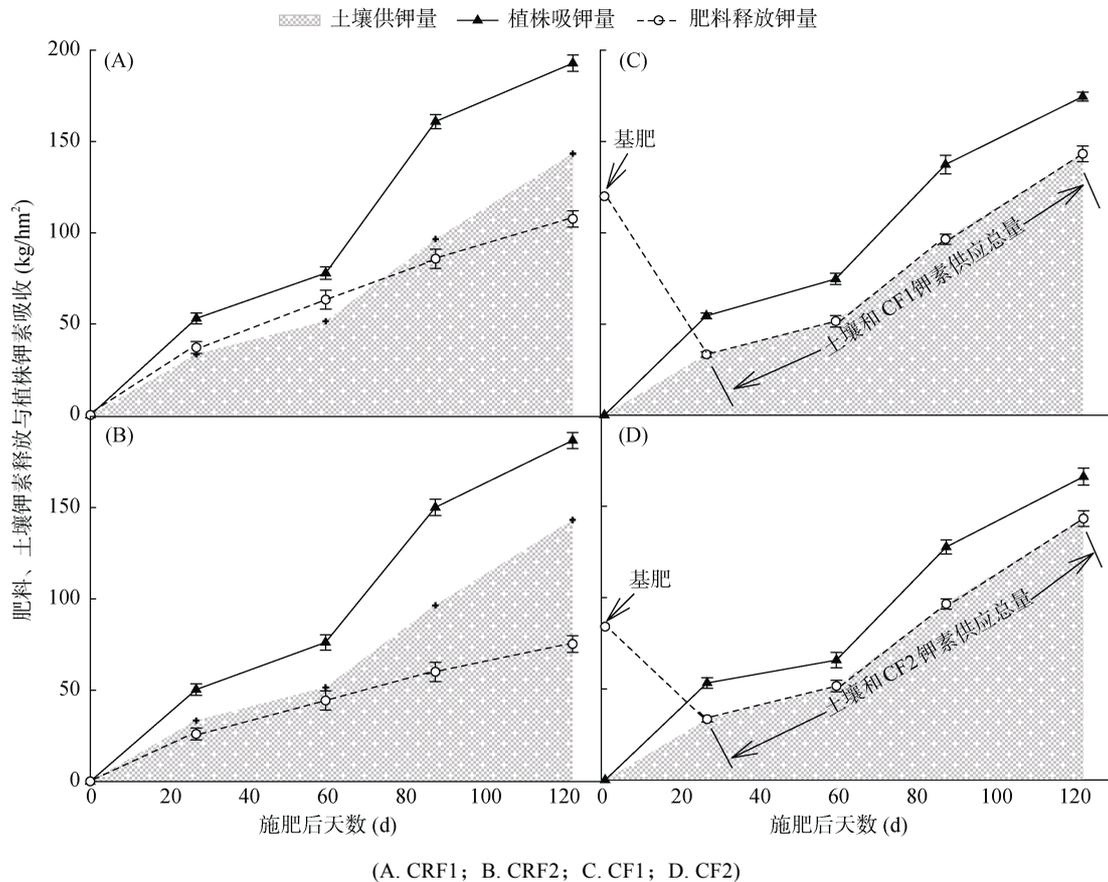


图 6 坡地花生钾素吸收及土壤/肥料钾素供应特征

Fig. 6 Characteristics of K uptake by peanut and K supply from soil and fertilizers in slop field

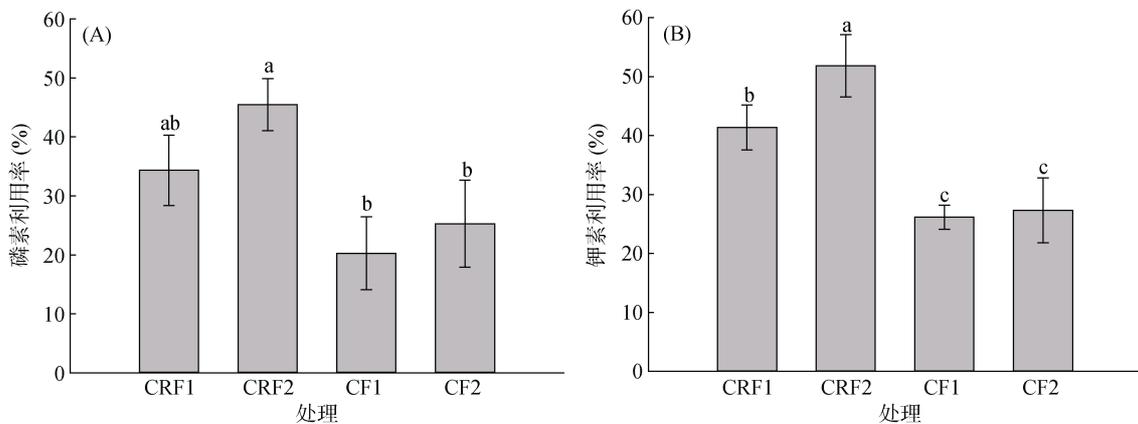


图 7 不同处理花生磷素(A)和钾素(B)表观利用率

Fig. 7 Apparent use efficiencies of P (A) and K (B) of peanut under different fertilization treatments

到 45.48%，显著高于 CF1(20.28%)和 CF2(25.28%)，但是 CRF1、CF1 和 CF2 处理间无显著差异。CRF2 的钾素利用率为 51.84%，显著高于 CRF1，且两个控释肥处理的钾素利用率均显著高于普通复合肥处理，同等施肥水平下控释肥钾素利用率提高了 58.09% ~ 89.63%。

对照处理花生荚果产量仅为 3 881.1 kg/hm²，显著低于施肥处理(图 8)。等量施肥条件下控释肥处理荚果产量高于普通复合肥处理，CRF1 产量最高，达到 4 821.4 kg/hm²，较 CF1 和 CF2 显著增加 12.01% 和 13.71%；CRF2 较 CF1 和 CF2 增加 3.75% 和 5.75%，但是 CRF2、CF1 和 CF2 处理间差异不显著。

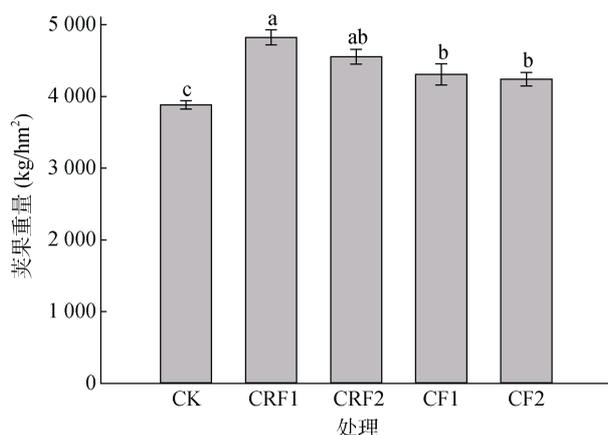


图 8 不同处理花生荚果产量

Fig. 8 Peanut pod yields under different treatments

3 讨论

3.1 控释肥对坡地土壤有效磷和速效钾时空迁移变化的影响

施肥可提高不同土层养分含量,改善土壤的水热状况,影响地上作物生长和产量^[19]。本研究发现普通肥料养分释放较快,维持时间短^[20];控释肥延长了养分释放周期,释放的速率能与作物吸收养分的规律相吻合,增加中后期养分的吸收积累^[21]。控释肥随着花生植株对养分的需求逐渐释放,克服普通复合肥前期供应过量,后期供应不足的缺点^[22-23]。作物根系主要生长在 0 ~ 60 cm,各处理随着土壤深度的增加,养分含量降低且相对稳定,控释肥使更多养分固定在 0 ~ 40 或 0 ~ 60 cm 土壤中,控释肥的磷钾能更多留在上层,降低深层次的养分含量,减少了淋溶损失和对地下水的影响^[24]。这说明控释肥能使多余的养分保存在中上层土壤中,增加土壤的肥力,改善土壤理化性质^[25]。

试验中同一土层间,苗期和结荚期的有效磷含量高于花针期和成熟期,控释复合肥和普通复合肥施用后水解出速效养分,融于土壤中,导致苗期土壤有效磷含量高;结荚期时根系增重,根瘤增生,固氮活动达到高峰,固氮过程引起微生物的一些变化,而微生物分泌的次生代谢物质等也影响解磷菌的活性^[26],进而影响磷的吸附和解吸,使土壤中磷含量上升。0 ~ 20 cm 土层结荚期各处理的速效钾都显著高于花针期是因为植株生长影响土壤微生物群落结构,对钾素形态和平衡产生反馈调节,影响钾的吸附和解析,使土壤中矿物钾转变为速效钾,增加植物可吸收钾量,增加中后期上层土中的钾素含量;同时还与肥料的释放速率和养分吸收高峰提前有关,花生养分大多是在花针期与结荚期间吸收的,钾的吸收高峰在播种后 45 d 左右,处于花针期,所以花针期时花生吸收速效钾较多,进入结荚期以后钾不再积累,所以土层中结荚期各处理的速效钾含量都显著高于花针期。

3.2 控释肥对坡地土壤水溶性有效磷和速效钾径流损失的影响

地表径流是坡耕地养分流失的主要途径,径流和泥沙携带大量面源污染物质,导致水体富营养化,制约经济社会的可持续发展^[27]。研究表明在坡耕地上施用控释肥可以减缓养分流失,提高肥料的吸收和利用效率^[28],促进花生植株生长,提高产量。影响坡耕地磷钾流失的主要因素有降雨特征、立地条件、植被覆盖、耕作措施等^[29]。在本研究中,普通复合肥处理增加前 3 次径流中养分的损失,主要是由于前期普通复合肥释放养分比较快,而花生对养分的需求比较少,吸收量小,未被吸收的养分随降水流失;后期地表径流中养分降低且稳定,由于随着花生生长影响地表覆盖度^[30],对雨水具有消能截留作用,降低地表径流流速,减少地表径流输出^[31]。7 月 3 日磷含量上升的原因可能是温度升高,促进了土壤中磷的活化^[32]。通过计算单位面积总的流失量占所施磷钾肥料总量的比例(表 3),发现所占比例并不高,流失率差异不大,说明即使在这种保水保肥性差的砂壤土条件下,肥料只要不撒施,进行一定深度的条施,地表径流中的磷钾损失率仍然不高。

3.3 控释肥对坡地花生磷钾吸收及产量的影响

在花生生长前期,控释复合肥养分释放较少,花生更多地吸收利用土壤中的养分,在保证养分供应、满足花生对磷钾需求^[33]的同时减少了土壤中磷钾的损失。随着生育期的进行,花生对磷钾的吸收量逐渐增加,但是普通复合肥前期养分供应高于植株吸收

量,后期养分供应不足,易造成肥料“脱靶”。控释肥根据作物对养分的需要使养分释放与作物养分吸收相同步,从而提高了花生产量^[34]。

研究表明,控释肥处理能提高花生光合速率和干物质积累量,提高不同坡度下花生荚果产量^[16, 32]。本研究发现,CRF1产量最高,达到4 821.4 kg/hm²,较CF显著增加12.01%和13.71%,等量施肥条件下控释肥处理荚果产量高于普通复合肥处理,与前人的研究结果^[34]一致。CRF2处理下磷和钾利用率分别为45.48%和51.84%,比CRF1高,充分说明减量施肥能够提高肥料利用率,降低径流损失^[35]。

4 结论

控释肥在土壤中的养分释放与花生植株对养分的吸收特征相吻合,配合土壤磷钾供应量,满足花生不同时期对养分的需求。控释肥处理下花生增产效果显著,较普通复合肥处理增加5.75%~12.01%;控释肥处理下的养分保持在0~60 cm土层中,减少了淋溶损失;前期地表径流中有效磷和速效钾的含量减少;植株吸磷钾量分别提高11.46%~11.78%和10.44%~12.38%,其中减量30%控释肥处理磷钾利用率最高,分别为45.48%和51.84%。因此,减量施用控释肥可提高肥料利用率、减少环境污染,具有显著的生态和经济效应。

参考文献:

- [1] 吴正锋,王才斌,杜连涛,等.山东省不同生态区花生生产量及产量性状稳定性分析[J].中国生态农业学报,2008,16(6):1439-1443.
- [2] 张玉树,丁洪,卢春生,等.控释肥料对花生产量、品质以及养分利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(4):700-706.
- [3] 路亚,李晓亮,于天一,等.持绿和早衰花生品种根系形态、叶片生理及产量对叶面喷施磷肥的响应[J].植物营养与肥料学报,2020,26(3):532-540.
- [4] Robles-Aguilar A A, Pang J Y, Postma J A, et al. The effect of pH on morphological and physiological root traits of *Lupinus angustifolius* treated with struvite as a recycled phosphorus source[J]. Plant and Soil, 2019, 434(1): 65-78.
- [5] 郑亚萍,王春晓,郑祖林,等.磷对花生根系形态特征的影响[J].中国油料作物学报,2019,41(4):622-628.
- [6] Tränkner M, Tavakol E, Jákl B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection[J]. Physiologia Plantarum, 2018, 163(3): 414-431.
- [7] Erel R, Ben-Gal A, Dag A, et al. Sodium replacement of potassium in physiological processes of olive trees (var. *Barnea*) as affected by drought[J]. Tree Physiology, 2014,

- 34(10): 1102-1117.
- [8] 刘娜,谢畅,高世杰,等.不同钾水平对花生光合特性及产量的影响[J].中国油料作物学报,2021,43(5):883-890.
- [9] 许小伟,樊剑波,陈晏,等.不同有机无机肥配施比例对红壤旱地花生产量、土壤速效养分和生物学性质的影响[J].生态学报,2014,34(18):5182-5190.
- [10] 郑亚萍,信彩云,王才斌,等.磷肥对花生根系形态、生理特性及产量的影响[J].植物生态学报,2013,37(8):777-785.
- [11] 谷贺贺,李静,张洋洋,等.钾肥与我国主要作物品质关系的整合分析[J].植物营养与肥料学报,2020,26(10):1749-1757.
- [12] 单桂梅,张春平,刘霞,等.沂蒙山区小流域坡耕地土壤颗粒结构与养分退化特征[J].中国水土保持科学,2013,11(5):76-82.
- [13] 程鹏,廖超林,肖其亮,等.横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J].农业环境科学学报,2022,41(5):1036-1046.
- [14] 王艳华,邱现奎,胡国庆,等.控释肥对坡地农田地表径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):10-14.
- [15] 郭峰,初长江,王才斌,等.控释肥料对不同品种花生(*Arachis hypogaea* L.)叶片生理的影响[J].土壤通报,2012,43(5):1227-1231.
- [16] 王艳华,董元杰,邱现奎,等.控释肥对坡耕地花生生理特性、产量及品质的影响[J].作物学报,2010,36(11):1974-1980.
- [17] Geng J B, Yang X Y, Huo X Q, et al. Determination of the best controlled-release potassium chloride and fulvic acid rates for an optimum cotton yield and soil available potassium[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 562335.
- [18] 郑学博,樊剑波,周静,等.沼液化肥配施对红壤旱地土壤养分和花生产量的影响[J].土壤学报,2016,53(3):675-684.
- [19] 刘兆新,刘妍,刘婷如,等.控释复合肥对麦套花生光合系统II性能及产量和品质的调控效应[J].作物学报,2017,43(11):1667-1676.
- [20] 丁红,张智猛,戴良香,等.水氮互作对花生根系生长及产量的影响[J].中国农业科学,2015,48(5):872-881.
- [21] 严磊,吴田乡,赵素雅,等.雨强及播栽方式对太湖地区麦田径流氮磷流失的影响[J].土壤,2022,54(2):358-364.
- [22] 石宁,李彦,张英鹏,等.控释肥对小麦/玉米农田土壤硝态氮累积和迁移的影响[J].中国农业科学,2018,51(20):3920-3927.
- [23] 胡斌,李絮花,闫童,等.控释氮肥对土体中无机氮淋溶分布及夏玉米产量的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):110-114.
- [24] 李强,许明祥,齐治军,等.长期施用化肥对黄土丘陵区坡地土壤物理性质的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):103-109.
- [25] 闫建梅,何丙辉,田太强.不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):4027-4035.
- [26] 杨紫杭,张林,冯固.土壤微生物在枸溶性及聚合态磷肥活化利用中的作用[J].植物营养与肥料学报,2022,

- 28(4): 654–663.
- [27] Ji P T, Li X L, Peng Y J, et al. Effect of polyaspartic acid and different dosages of controlled-release fertilizers on nitrogen uptake, utilization, and yield of maize cultivars[J]. *Bioengineered*, 2021, 12(1): 527–539.
- [28] 李建华, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区不同植被模式下坡耕花生地垄间水土流失与磷素输出[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(12): 3347–3354.
- [29] 任美, 唐翔宇, 耿春女, 等. 生物质炭对坡耕地紫色土中抗生素吸附-解吸及迁移的影响[J]. *土壤*, 2020, 52(5): 978–986.
- [30] 褚军, 金梅娟, 佟思纯, 等. 杨麦间作系统枯落物持水能力对地表径流氮流失的影响[J]. *生态科学*, 2020, 39(6): 127–136.
- [31] 孙天然, 王若楠, 孙占祥, 等. 辽西风沙半干旱区氮肥减施对花生干物质积累和产量的影响[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(4): 676–682.
- [32] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(5): 859–870.
- [33] 耿计彪, 张民, 马强, 等. 控释氮肥对棉花叶片生理特性和产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 267–271.
- [34] 成艳红, 武琳, 钟义军, 等. 控释肥对稻草覆盖红壤花生产量及土壤有效氮平衡的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 306–313.
- [35] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤 N₂O 排放的影响——以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. *生态学报*, 2017, 37(22): 7624–7635.