

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.06.007

赵彩衣, 王媛媛, 殷小冬, 等. 水肥调控对二月兰和后茬花生养分累积及土壤肥力的影响. 土壤, 2020, 52(6): 1144–1151.

水肥调控对二月兰和后茬花生养分累积及土壤肥力的影响^①

赵彩衣¹, 王媛媛¹, 殷小冬¹, 董青君¹, 朱国梁², 刘满强¹, 李辉信¹, 胡 锋¹, 焦加国^{1*}

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2 泰安市农业科学研究院, 山东泰安 271000)

摘 要: 田间试验条件下, 研究不同水肥处理对二月兰生长及其翻压后后茬花生产量和养分累积的变化。结果表明, 灌溉和施肥可显著促进二月兰生长。在绿肥季, 不论施肥与否, 灌溉处理均可显著提高二月兰的生物量和氮、磷、钾养分含量, NPW(绿肥季施氮磷肥和灌溉)和 CKW 处理(绿肥季不施肥, 只进行灌溉处理)的二月兰生物量和氮、磷、钾养分含量分别比相应的未灌溉处理提高了 66.47%、63.97%、76.95%、32.36%、88.31%、9.80% 和 21.71%、15.56%。二月兰翻压的养分还田量为 91.04 ~ 260.23 kg/hm², 约占花生季化肥总养分的 27.59% ~ 78.86%。与 CF(冬闲处理)相比, 不同施肥和灌溉处理的绿肥翻压均促进了花生产量和养分累积, 及土壤养分含量的提高, 其中以 EN(周年等氮, 主作物减氮)处理的提升效果最明显。周年等养分条件下, 花生季 35.00% 氮肥和/或 42.86% 磷肥前移至绿肥季, 可明显促进绿肥养分还田量的增加, 后茬花生产量不同程度增加(增幅 22.82% ~ 41.18%)。综上, 在适量灌溉和施肥条件下, 二月兰生物量明显增加, 进而促进后茬花生产量增加及养分累积。研究结果可为我国绿肥农田应用及化肥减施提供数据支撑和实践依据。

关键词: 二月兰; 土壤肥力; 花生产量; 养分累积

中图分类号: S553+9 **文献标志码:** A

Effects of Irrigation and Fertilization Regulation on Nutrient Accumulation of *Orychophragmus violaceus* and Succeeding Peanut and Soil Fertility

ZHAO Caiyi¹, WANG Yuanyuan¹, YIN Xiaodong¹, DONG Qingjun¹, ZHU Guoliang², LIU Manqiang¹, LI Huixin¹, HU Feng¹, JIAO Jiaguo^{1*}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2 Taian Academy of Agriculture Sciences, Taian, Shandong 271000, China)

Abstract: The effects of irrigation and fertilization regulation on the growth and nutrient accumulation of *Orychophragmus violaceus*(L.)Schulz and succeeding peanut as well as on soil fertility were studied. The results showed that both irrigation and fertilization significantly promoted the growth of *Orychophragmus violaceus*. In green manure season, irrigation significantly increased the biomass, N, P and K contents of *Orychophragmus violaceus* with or without fertilization. Compared with the treatments without irrigation, NPW treatment (green manure growing season with N, P fertilizer and irrigation) and CKW treatment (green manure growing season with irrigation but without fertilization) increased the biomass, root activity, and contents of N, P and K of *Orychophragmus violaceus* by 66.47% and 63.97%, 76.95% and 32.36%, 88.31% and 9.80%, 21.71% and 15.56%, respectively. The nutrients returned to field from the turned down *Orychophragmus violaceus* was 91.04–260.23 kg/hm², accounting for 27.59%–78.86% of the total nutrients of the applied chemical fertilizers in peanut season. Compared with CF treatment (winter idle), the treatments of green manure growing with fertilization and irrigation promoted the yield and nutrient accumulation of succeeding peanuts, and also increased soil nutrients, among which the effect of EN treatment (same annual nitrogen nutrient condition, main crop nitrogen reduction fertilizer) was most obvious. Under same annual nutrient condition, 35.00% of nitrogen and/or 42.86% of phosphorus fertilization in peanut season transferred forward to the green manure season significantly increased the nutrients returned to field from the turned down green manure and increased peanut yield by 22.82%–41.18%. In summary, appropriate irrigation and fertilization can significantly increase the biomass of *Orychophragmus*

①基金项目: 国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22-G-10)资助。

* 通讯作者(jiaguojiao@njau.edu.cn)

作者简介: 赵彩衣(1994—), 女, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事绿肥的应用研究。E-mail: 2017803176@njau.edu.cn

violaceus, thus can increase the yield and nutrient accumulation of succeeding peanut. The above results can provide data support for the application of green manure and fertilizer reduction in China.

Key words: *Orychophragmus violaceus*; Soil fertility; Peanut yield; Nutrient accumulation

近年来,我国的化肥施用量高速增长,在促进粮食稳产的同时,也造成耕地质量和肥料利用率下降、农业生态环境退化等问题^[1]。为了确保粮食优质稳产,响应习近平主席“绿水青山就是金山银山”的号召,2016年,农业农村部提出在部分地区探索实行耕地轮作休耕制度试点方案。种植绿肥作为一种传统的休耕措施,在充分利用冬闲耕地、培肥地力、保持水土的同时,还可以提高肥料利用率、农作物产量和品质,改善生态环境^[2-4]。但由于绿肥没有明显的直接经济效益,导致绿肥的水肥管理几乎完全被忽略,大部分的旱地绿肥的种植方式粗放,主要依赖于传统经验。旱地绿肥养分和水分需求规律不清,不仅影响到对主茬作物土壤养分供应和作物需肥格局的协同,从而影响施肥措施的制定,而且长期以来也会影响绿肥的功能潜力、农户种植的积极性及早地可持续农业的发展。

二月兰(*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz)为十字花科,诸葛菜属一年或二年生草本植物,适应性强,耐寒耐旱能力较强,在偏碱性的土壤上也能良好生长^[5]。二月兰作为华东华北地区的传统绿肥,种植翻压可以解决目前农业生产过程中存在的水资源匮乏、“两季不足,一季有余”及冬闲土地不断增加等粮食生产问题。已有的研究表明^[6-9],二月兰翻压还田还可以提高土壤肥力,促进土壤微生物的活动;化肥绿肥配施均能显著提高后茬作物产量,增加地上部总养分量 and 不同器官养分的累积量;在化肥减施的条件下,降低土壤养分残留率,提高肥料利用率。

本试验以山东棕壤为研究对象,基于周年养分等量原则,研究水肥调控措施对绿肥二月兰生长及其翻压后对主作物花生产量和养分累积的影响,以探究适应于旱地绿肥与主作物生产的肥水管理模式,为当地的农业生产实践提供技术指导。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况和供试材料

试验在山东省泰安市农业科学研究院实验基地开展(117°0'27"E, 35°59'55"N),位于泰安市岱岳区,属暖温带大陆性季风气候,年平均气温 12.8 °C, 年均降水量 687.7 mm。土壤类型为棕壤褐土, pH 7.19,

有机质 25.77 g/kg, 全氮 1.40 g/kg, 速效氮 54.32 mg/kg, 全磷 0.74 g/kg, 有效磷 17.24 mg/kg, 速效钾 149.18 mg/kg。

供试花生:山花 106

供试肥料:尿素(CON₂H₄)、粉状过磷酸钙(CaP₂H₄O₈, P₂O₅ 含量为 16%)和硫酸钾(K₂O 含量为 50%)。

1.2 试验设计

试验于 2017 年 10 月布置,设置不同灌溉和施肥处理,共 10 个处理(表 1),种植制度为二月兰和花生轮作。采用大区实验,每个大区规格为 23 m × 15 m,面积约 345 m²。作物花期自然授粉,灌溉处理包括二月兰越冬水和返青水两次浇水,越冬水在 2017 年 12 月 7 日进行,用水量 750 m³/hm²,返青水在 2018 年 4 月 2 日(绿肥返青)浇水,用量 450 m³/hm²。绿肥季和花生季肥料都作为基肥一次性施入,不进行追肥,具体施肥量如表 1。

1.3 样品采集与测定

于 2018 年 4 月 29 日(二月兰盛花期)和 2018 年 9 月 26 日(花生成熟期)分别进行土壤样品和植株样品的采集。采用多点混合采样方法采集耕层土壤(0 ~ 20 cm),每个土壤样品取 5 ~ 6 钻,约 1 kg。土壤样品在室内自然风干,部分过 0.25 mm 筛,用于速效养分和土壤呼吸强度的测定,其余部分过 0.149 mm 筛,用于土壤有机质、全氮、全磷的测定。土壤 pH 采用无 CO₂ 水浸提, pH 计测定;土壤有机质采用外加热重铬酸钾容量法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用 HClO₄-H₂SO₄ 消煮,钼锑抗比色法测定;土壤铵态氮、硝态氮均采用 2 mol/L KCl 浸提,连续流动分析仪测定;土壤有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度法测定^[10]。

土壤基础呼吸(BR)测定:称取相当于 10.0 g 干土的新鲜土壤到 100 ml 盐水瓶中,黑暗室温条件培育 24 h 后通风 4 h。密封后黑暗条件下,培养 24 h。用 10 ml 注射器采集 10 ml 气体,采用气相色谱(AGILENT, USA)测定 CO₂ 浓度。

二月兰植株样品:采用样方法,每个大区随机取 3 个样方(1 m × 1 m),测定其地上部生物量,然后推算至整个大区;从中取 0.5 ~ 1.0 kg 植株样品,进行

杀青(105 °C下烘 0.5 h, 70 °C 烘至恒重)处理后,按常规方法测定其全氮、全磷、全钾的含量。

花生植株样品:采用样方法,每个大区随机取 3

垄,每垄取 2 m 长的规格,称量花生秸秆和果实重量;每个样方选取 2~3 kg 花生果实,确定壳和籽粒比例,按常规方法测定其全氮、全磷、全钾的含量。

表 1 不同灌溉和施肥处理与两季作物施肥量

Table 1 Different irrigation and fertilization treatments and fertilization amounts of two season crops

处理	施肥设置	绿肥季施肥量(kg/hm ²)		主作物季施肥量(kg/hm ²)		
		N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CF	冬闲	0	0	120	105	105
CK	对照, 绿肥季无任何水肥调控	0	0	120	105	105
N	绿肥季单施氮肥	42	0	120	105	105
EN	周年等氮(主作物减氮)	42	0	78	105	105
P	绿肥季单施磷肥	0	45	120	105	105
EP	周年等磷(主作物减磷)	0	45	120	60	105
NP	绿肥季氮肥和磷肥都施用	42	45	120	105	105
ENP	周年等氮磷(主作物减氮磷)	42	45	78	60	105
CKW	绿肥季不施肥, 进行灌溉处理	0	0	120	105	105
NPW	绿肥季施氮磷肥和灌溉处理	42	45	120	105	105

1.4 参数计算及数据处理

二月兰氮、磷、钾养分累积量(kg/hm²)= 二月兰氮、磷、钾养分含量 × 二月兰生物量。

花生各部分氮、磷、钾养分累积量(kg/hm²)= 花生各部分氮、磷、钾养分含量 × 花生各部分生物量。

采用 Excel 2010 软件对数据进行统计分析和制图。采用单因素(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$), 用 Pearson 法进行相关分析。图表中数据为平均值 ± 标准误。

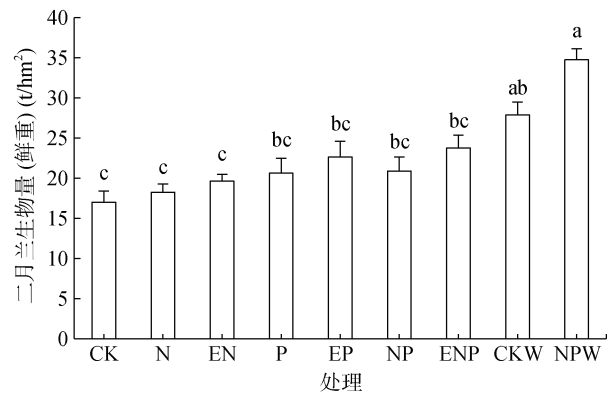
2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对二月兰生长及养分累积的影响

2.1.1 不同水肥处理对二月兰地上部生物量的影响 灌溉可显著促进二月兰地上部生物量的累积, 其中以 NPW 处理的效果最为显著(图 1)。灌溉条件下, 无论施肥与否, 二月兰的地上部生物量均显著增加。NPW 和 CKW 处理的生物量分别较 NP(绿肥季氮肥和磷肥都施用)和 CK 处理(对照, 绿肥季无任何水肥调控)提高了 66.47% 和 63.97%。不同施肥处理中, 以施用磷肥处理的二月兰生物量最大, 较不施肥处理提高了 21.32%~33.09%, 表明施加磷肥对二月兰的生长提升效果较氮肥处理更佳, 但未达到显著水平。

2.1.2 不同水肥处理对二月兰养分含量及养分累积的影响 由表 2 可知, 灌溉处理可显著提高二月兰地上部的氮、磷、钾养分含量, 其中 NPW 和 CKW 处理的氮、磷、钾含量分别较 NP 和 CK 处理提高了

76.95%、32.36%、88.31%、9.80% 和 21.71%、15.56%; 而施肥对二月兰养分含量的影响不显著。



(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 1 不同水肥处理对二月兰生物量的影响(鲜重)

Fig. 1 Biomass of *Orychophragmus violaceus* (fresh weight) under different irrigation and fertilization treatments

由于灌溉处理对二月兰生物量和养分含量的双重促进作用, CKW 处理的养分累积较 CK 处理均显著增加, 氮、磷、钾养分累积量增幅分别为 16.36%、18.46% 和 23.31%。不同水肥处理下的二月兰氮、磷、钾养分还田量, 分别相当于花生季化肥施用量的 24.88%~100.08%、4.57%~15.68%、51.78%~117.79%, 其中氮和钾的养分还田量要远高于磷养分还田量。

2.2 二月兰翻压对花生产量及养分累积的影响

2.2.1 二月兰翻压对花生地上部生物量和产量的影响 由图 2、图 3 可知, 不同水肥处理下的二月兰翻

压后，花生地上部生物量和产量均有不同程度的增加，其中 NPW 处理的花生秸秆生物量以及 N 和 EN 处理的产量提升效果更显著。在灌溉条件下，NPW 处理的花生秸秆生物量较 NP 提高了 25.35%，产量降幅为 4.95%；

CKW 处理的花生秸秆生物量较 CK 处理提高了 17.47%，产量增幅为 15.53%；在施肥条件下，与 CK 处理相比，花生产量(除 P 处理)显著提高，增幅在 21.88%~41.18%，但花生秸秆生物量无显著增加。

表 2 不同水肥处理对二月兰养分含量和养分累积的影响

Table 2 Nutrient contents and accumulation of *Orychophragmus violaceus* under different irrigation and fertilization treatments

处理	养分含量(g/kg)			养分累积(kg/hm ²)		
	N	P	K	N	P	K
CK	19.78 ± 0.92 bc	2.55 ± 0.09 c	23.63 ± 1.51 bc	45.15 ± 6.86 cde	5.89 ± 1.54 c	54.36 ± 11.86 c
N	13.40 ± 0.72 d	1.90 ± 0.04 ef	21.88 ± 0.31 cd	36.28 ± 5.42 de	5.10 ± 0.56 c	59.18 ± 5.41 c
EN	11.23 ± 0.18 e	1.80 ± 0.07 f	21.20 ± 0.31 d	29.86 ± 3.72 e	4.80 ± 0.73 c	56.37 ± 6.54 c
P	17.90 ± 0.86 c	2.20 ± 0.04 d	21.00 ± 0.41 d	51.05 ± 16.63 cde	6.22 ± 1.44 c	58.96 ± 13.20 c
EP	19.20 ± 0.73 bc	2.73 ± 0.03 bc	25.33 ± 0.22 b	55.56 ± 9.19 cd	7.84 ± 0.79 bc	73.00 ± 8.02 bc
NP	15.08 ± 0.94 d	1.93 ± 0.09 ef	22.45 ± 0.10 cd	43.78 ± 6.08 cde	5.54 ± 0.59 c	65.34 ± 6.68 c
ENP	21.03 ± 0.49 b	2.00 ± 0.04 e	22.68 ± 0.86 cd	66.07 ± 8.03 c	6.33 ± 0.47 c	71.35 ± 10.04 c
CKW	26.18 ± 0.26 a	2.80 ± 0.06 b	27.30 ± 0.58 a	92.66 ± 7.72 b	9.78 ± 1.07 b	96.37 ± 5.33 b
NPW	26.68 ± 0.66 a	3.63 ± 0.09 a	27.33 ± 0.03 a	120.09 ± 14.12 a	16.46 ± 2.80 a	123.68 ± 17.85 a

注：表中同列小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著水平，下同。

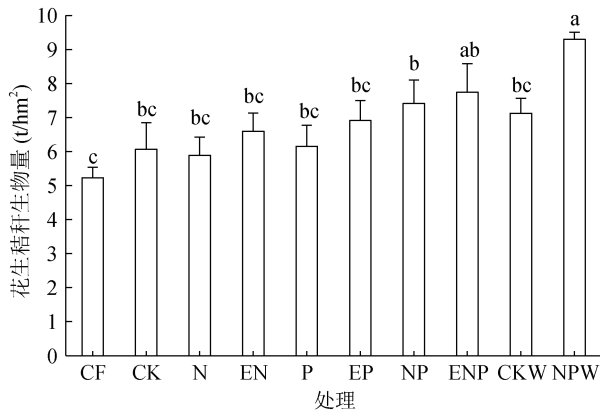


图 2 不同水肥处理二月兰翻压后对花生地上部生物量(干重)的影响

Fig. 2 Above-ground biomass of peanuts (dry weight) after *Orychophragmus violaceus* turned down under different irrigation and fertilization treatments

花生季部分肥料前移至绿肥季后，绿肥生物量显著增加，其翻压后花生产量不同程度提高，增幅为 22.82%~41.18%；较相应的全量化肥处理相比，EN(周年等氮，主作物减氮)、EP 处理(周年等磷，主作物减磷)的花生产量显著增加，增幅为 11.51%~15.83%；而 ENP 处理(周年等氮磷，主作物减氮磷)的花生产量降低了 6.51%，但无显著差异。

2.2.2 二月兰翻压对花生各部分养分含量及养分累积的影响 在花生季，不同水肥处理条件下的二月兰翻压均不同程度提升了花生的各部分养分含量，但提升效果不显著(表 3)。相对于 NP 处理，NPW 处理花生叶的氮含量，仁的钾含量和根的氮、钾含量均显

著增加，而其他器官的养分含量则有不同程度的降低，但未达到显著差异水平。二月兰施肥处理中，周年等养分处理对玉米各器官的养分含量作用效果不同，但与相应的全量化肥处理相比未达显著作用。

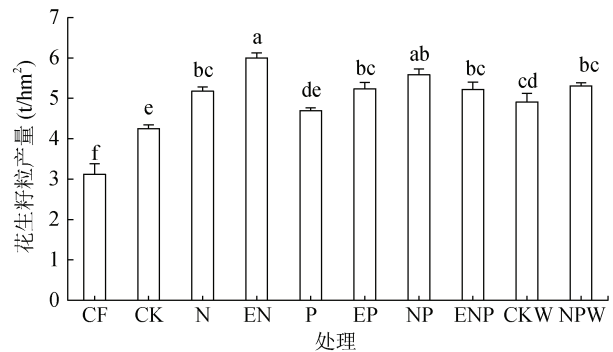


图 3 不同水肥处理二月兰翻压后对花生产量(干重)的影响

Fig. 3 Peanut yields (dry weight) after *Orychophragmus violaceus* turned down under different irrigation and fertilization treatments

由图 4 可知，与 CF(冬闲)处理相比，绿肥翻压处理的花生植株的养分累积量均不同程度增加，增幅为 40.42%~96.79%，其中 NP 和 NPW 处理增幅最高，分别为 96.58% 和 96.79%。不同施肥条件下，二月兰灌溉处理对花生季养分累积的作用效果有所差异，相对于 NP 处理，NPW 处理的花生氮累积量增加了 9.72 kg/hm²，磷、钾累积量降低了 5.28 kg/hm² 和 3.81 kg/hm²；而 CKW 处理花生的氮、磷、钾累积量较 CK 处理分别提高了 66.93、4.86 和 38.02 kg/hm²。

表 3 不同水肥处理二月兰翻压后对花生各部分养分含量的影响(g/kg)

Table 3 Nutrient contents in different peanut organs after *Orychophragmus violaceus* turned down under different irrigation and fertilization treatments

处理	叶			壳		
	N	P	K	N	P	K
CF	14.97 ± 0.15 b	1.33 ± 0.09 cd	13.80 ± 0.29 e	10.00 ± 0.46 ab	0.60 ± 0.06 ab	5.33 ± 0.27 ab
CK	14.00 ± 0.93 b	1.33 ± 0.07 cd	18.60 ± 0.26 bc	11.13 ± 1.45 ab	0.77 ± 0.13 ab	6.30 ± 0.60 ab
N	14.60 ± 0.25 b	1.30 ± 0.10 d	16.20 ± 0.76 cde	12.37 ± 0.49 a	0.70 ± 0.01 ab	5.60 ± 0.17 ab
EN	15.27 ± 0.52 b	1.27 ± 0.03 d	14.57 ± 0.44 de	9.50 ± 0.95 ab	0.60 ± 0.06 ab	5.57 ± 0.52 ab
P	15.30 ± 0.96 b	1.47 ± 0.09 bcd	14.80 ± 2.00 de	10.37 ± 1.87 ab	0.77 ± 0.17 ab	4.93 ± 0.30 b
EP	15.93 ± 0.09 ab	1.97 ± 0.20 a	17.30 ± 0.78 bcd	9.57 ± 0.75 ab	0.53 ± 0.03 ab	6.07 ± 0.20 ab
NP	14.57 ± 0.49 b	1.70 ± 0.23 abc	25.93 ± 0.78 a	10.53 ± 0.47 ab	0.67 ± 0.09 ab	6.87 ± 0.52 ab
ENP	14.23 ± 0.09 b	1.80 ± 0.06 ab	20.67 ± 0.95 b	8.90 ± 0.4 b	0.70 ± 0.12 ab	4.33 ± 2.24 b
CKW	14.73 ± 0.68 b	1.10 ± 0.01 d	20.57 ± 0.65 b	9.50 ± 0.23 ab	0.50 ± 0.01 b	4.93 ± 0.44 b
NPW	17.43 ± 0.72 a	1.33 ± 0.09 cd	18.67 ± 1.85 bc	12.40 ± 0.58 a	0.80 ± 0.01 a	7.80 ± 0.64 a

处理	仁			根		
	N	P	K	N	P	K
CF	29.33 ± 0.32 b	3.43 ± 0.03 b	8.47 ± 0.85 ab	10.23 ± 0.03 ab	0.87 ± 0.13 ab	10.70 ± 0.35 b
CK	32.67 ± 0.38 ab	3.80 ± 0.06 ab	8.63 ± 0.13 ab	10.97 ± 0.64 ab	0.93 ± 0.09 ab	11.90 ± 0.29 b
N	31.10 ± 0.78 ab	3.47 ± 0.19 b	9.03 ± 0.22 ab	11.30 ± 0.87 ab	0.73 ± 0.27 b	14.37 ± 0.03 ab
EN	30.63 ± 0.50 ab	3.50 ± 0.17 ab	9.07 ± 0.20 ab	10.67 ± 0.50 ab	0.97 ± 0.09 ab	11.10 ± 0.35 b
P	33.30 ± 1.70 a	3.80 ± 0.21 ab	8.40 ± 0.21 ab	10.30 ± 0.85 ab	1.07 ± 0.13 ab	11.30 ± 0.75 b
EP	32.80 ± 1.99 ab	3.70 ± 0.15 ab	8.97 ± 0.28 ab	9.37 ± 0.58 b	1.30 ± 0.38 ab	14.20 ± 0.51 ab
NP	33.80 ± 0.21 a	3.90 ± 0.06 ab	9.13 ± 0.15 ab	9.47 ± 0.26 b	1.13 ± 0.33 ab	10.73 ± 5.42 b
ENP	31.00 ± 0.52 ab	2.60 ± 0.17 c	5.87 ± 2.94 b	11.53 ± 1.26 ab	1.43 ± 0.03 a	19.57 ± 0.90 a
CKW	32.53 ± 0.84 ab	3.67 ± 0.15 ab	9.33 ± 0.12 ab	10.53 ± 0.09 ab	0.83 ± 0.03 ab	15.50 ± 1.25 ab
NPW	33.57 ± 1.41 a	3.97 ± 0.12 a	10.07 ± 1.22 a	12.70 ± 1.21 a	1.23 ± 0.09 ab	16.37 ± 1.41 ab

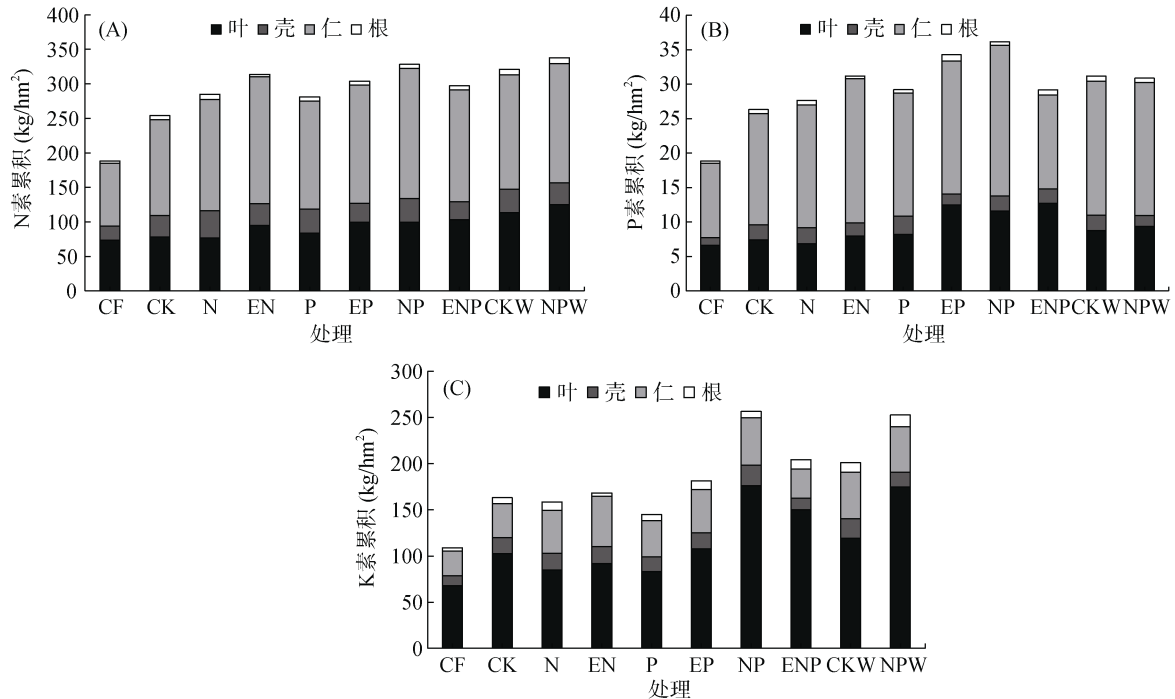


图 4 不同水肥处理二月兰翻压后氮(A)、磷(B)、钾(C)养分在花生不同器官中的累积

Fig.4 Accumulation of nitrogen (A), phosphorus (B) and potassium (C) in different peanut organs after *Orychophragmus violaceus* turned down under different irrigation and fertilization treatments

不同施肥处理的氮、磷累积量较 CK 处理的增幅为 10.72%~29.18% 和 5.08%~37.38%，其中以二月兰季氮磷配施处理(NP)和周年等氮磷处理(ENP)的增幅最大。与 CKW 相比，NPW 处理的氮、钾累积量分别增加了 5.27% 和 23.64%，而磷累积量降低了 0.97%。较相应的全量化肥处理，ENP 处理的花生总养分累积降低 14.51%，而 EN、EP 处理的花生总养分累积则增加了 8.89%~14.10%，但无显著差异。对于养分在花生不同器官的分布而言，氮、磷、钾元素主要在花生仁和花生叶中累积，花生仁分别占

48.57%~58.57%、46.63%~67.19% 和 15.48%~32.28%，花生叶占比分别为 26.89%~39.12%、24.83%~43.56% 和 53.51%~73.41%。

2.3 二月兰翻压对花生季土壤肥力的影响

由表 4 可知，与 CF 处理相比，二月兰翻压显著增加了花生收获季的土壤有机质、全氮、全磷含量，增幅分别为 4.26%~13.94%、2.55%~10.88% 和 21.12%~72.68%，其中 NPW 处理的提升效果显著，其土壤有机质、全氮、全磷和速效钾较 CF 处理分别增加了 8.33%、6.48%、72.68% 和 40.50%。

表 4 不同水肥处理二月兰翻压还田后对土壤养分含量的影响(花生收获期)

Table 4 Soil nutrient contents (peanut harvest period) after *Orychophragmus violaceus* turned down under different irrigation and fertilization treatments

处理	pH	有机质(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	铵态氮(mg/kg)	硝态氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)	呼吸强度(CO ₂ -C, mg/(g·h))
CF	6.60 ± 0.16 ab	25.90 ± 1.87 b	1.44 ± 0.05 c	0.65 ± 0.07 c	3.16 ± 0.57 b	12.29 ± 0.04 bc	22.36 ± 0.48 abc	153.81 ± 1.54 c	0.91 ± 0.25 c
CK	6.45 ± 0.21 b	27.98 ± 1.69 ab	1.48 ± 0.02 bc	0.78 ± 0.06 bc	3.19 ± 0.77 b	13.81 ± 1.10 ab	22.88 ± 0.53 abc	146.83 ± 0.04 c	1.26 ± 0.05 ab
N	6.57 ± 0.14 ab	27.17 ± 0.49 ab	1.55 ± 0.01 abc	0.89 ± 0.05 b	3.16 ± 0.67 b	14.85 ± 1.56 a	20.84 ± 1.84 bcd	150.46 ± 15.13 c	1.41 ± 0.13 a
EN	6.82 ± 0.05 ab	27.23 ± 0.66 ab	1.56 ± 0.05 ab	0.85 ± 0.02 b	3.90 ± 1.40 ab	11.34 ± 0.11 c	13.01 ± 0.53 e	149.83 ± 10.40 c	1.28 ± 0.07 ab
P	6.58 ± 0.39 ab	27.00 ± 1.65 ab	1.56 ± 0.09 ab	0.83 ± 0.02 b	4.92 ± 0.76 a	13.76 ± 1.88 ab	17.63 ± 2.45 d	148.68 ± 11.85 c	1.31 ± 0.22 ab
EP	6.63 ± 0.42 ab	29.21 ± 2.00 a	1.55 ± 0.01 abc	0.83 ± 0.06 b	2.65 ± 0.76 b	11.71 ± 1.04 c	24.13 ± 3.73 ab	175.97 ± 14.94 c	1.32 ± 0.16 ab
NP	6.93 ± 0.05 a	29.51 ± 1.27 a	1.55 ± 0.02 abc	0.87 ± 0.10 b	2.73 ± 0.88 b	12.11 ± 0.09 bc	22.30 ± 0.05 abc	209.98 ± 13.22 ab	1.37 ± 0.03 a
ENP	6.61 ± 0.29 ab	29.20 ± 0.44 a	1.60 ± 0.04 a	0.82 ± 0.12 b	3.48 ± 1.57 ab	14.56 ± 0.95 a	26.20 ± 3.80 a	221.21 ± 33.05 a	1.31 ± 0.07 ab
CKW	6.96 ± 0.18 a	28.08 ± 1.03 ab	1.49 ± 0.08 abc	0.86 ± 0.21 b	2.39 ± 0.60 b	14.55 ± 0.37 a	19.37 ± 2.19 cd	180.05 ± 32.11 bc	1.07 ± 0.15 bc
NPW	6.93 ± 0.10 a	28.06 ± 1.12 ab	1.53 ± 0.11 abc	1.12 ± 0.05 a	2.16 ± 0.10 b	12.09 ± 1.34 bc	22.69 ± 2.18 abc	216.11 ± 3.33 a	1.29 ± 0.07 ab

NPW 和 CKW 处理与相应的 NP 和 CK 处理相比，土壤的养分含量变化均未达到显著水平。与 CK 相比，施肥处理的土壤全氮、全磷、速效钾含量分别提高了 0.07~0.12 g/kg、0.04~0.10 g/kg、1.86~74.39 mg/kg。与全量化肥处理相比，周年等养分处理的土壤速效氮含量有降低趋势，对其他养分含量的影响不显著。

由表 4 可知，相比于 CF 处理，二月兰翻压显著提升了土壤呼吸强度，以 N 处理(绿肥季单施氮肥)和 NP 处理的提升效果最佳，分别提高了 54.39% 和 49.64%。与 CK 相比，施肥处理对土壤呼吸强度的提升为 1.32%~11.61%。

3 讨论

3.1 不同水肥处理对二月兰生长的影响

本研究中，灌溉显著提高了二月兰的生物量和养分含量及养分累积量，这与前人的研究结果一致^[11]。灌溉和施肥处理均能够促进二月兰的生长，提高其对养分的吸收，是由于在一定灌溉条件下，二月兰的根系活力、根长和根尖数有了显著的提升，通过代谢活动使细胞内溶质主动减少，从而升高细胞渗透势，使

植物可从外界环境中持续吸收养分，提高作物的养分吸收量，从而在一定施肥范围内，植株的生物量及养分含量随着施肥量的增加而增加^[12]。在无灌溉条件下，植株的根表面积、根平均直径有了一定的提升，提高植株对土壤养分的吸收利用，促进植株的养分累积。这与前人对水肥耦合的研究结果基本一致^[13-14]。

3.2 不同水肥处理二月兰翻压对主作物花生的影响

二月兰翻压后，花生的地上部生物量、产量、养分含量及养分累积量均显著增加。这主要是翻压绿肥为土壤补充了大量的碳源、氮源、磷源、钾源以及部分的微量元素，促进了花生苗期的生长，而且翻压二月兰可以使后茬作物在生长后期仍维持较高的氮、磷、钾累积速率，延长后茬作物对氮、磷的吸收高峰，从而提高了花生的产量^[15]。此外，绿肥和化肥的有机无机配合改善了土壤的理化性状，提高了土壤养分含量和土壤中微生物量，协调了作物的养分需求，提高了土壤的生产潜力和水肥条件，进一步提升了花生的产量^[16-17]。高菊生等^[18]和荣勤雷等^[19]通过试验得出，绿肥与双季稻轮作种植或与化肥配施后，可显著提高水稻产量和土壤的养分含量。

施肥处理(除 P 处理外)对花生产量的增幅为 21.88% ~ 41.18%，这表明在绿肥季施肥可显著提高后茬作物的产量。这是由于施肥提高了绿肥的养分累积、提高了后续作物可利用的养分含量，进而提高作物产量。在周年等养分条件下，将花生季的部分肥料前移至绿肥季，花生产量不仅没有降低，还有小幅增加，这主要是由于施肥对于二月兰生长的提升作用大，翻压后土壤生产潜力明显提高，进而促进主作物花生的生长。另从花生的养分利用率来看，周年等养分处理的花生养分累积较 CK 处理无显著差异，说明该处理的肥料利用率也有了提升。这表明将绿肥纳入花生轮作体系，不仅可以减少化肥施用量，还可以提高花生产量，更重要的是提高花生的养分累积量及养分利用率，实现以小肥换大肥的目的。

3.3 不同水肥处理二月兰翻压后对土壤肥力的影响

二月兰翻压还田后，花生季土壤肥力有了一定的提升，这主要是绿肥的翻压补充了大量的能源物质，增加了土壤的碳、氮、氧、磷、钾含量，使得后茬作物对土壤原有养分的依存率降低，对土壤养分的吸收量下降。另外，二月兰翻压还田后，在保持水土的同时，减少了养分的淋溶流失，使得土壤肥力较未翻压绿肥有了一定的提升^[20-21]。另外，由于绿肥的翻压可以改变土壤原有的区域生态环境，提高区域酶活性和微生物丰度及土壤呼吸强度，为土壤肥力的提升提供了生物学基础^[22-26]。刘佳等^[6]和叶协峰等^[27]田间试验表明，翻压绿肥能够明显提高土壤酶活性和土壤肥力水平，且在一定范围内随着翻压量的增加，对土壤各项指标的影响更加显著。本研究中，二月兰翻压对土壤的肥力提升不够显著，可能是由于二月兰翻压刚进行一年，绿肥翻压对土壤肥力影响的累积效应暂时还没有表现出来。

4 结论

1) 绿肥季的灌溉和施肥均可显著促进二月兰生物量及养分累积量。与冬闲处理相比，不同水肥处理条件下的绿肥翻压均可促进后茬花生生长及土壤肥力的改善，其中周平等(主作物减氮)处理对花生产量的增幅达到了 41.18%。

2) 在周年等养分条件下，将花生季的 35.00% 氮肥和/或 42.86% 磷肥前移至绿肥季，由于绿肥养分累积作用，花生产量增幅 22.82% ~ 41.18%。

因此，在农业生产过程中，完全可将主作物季的肥料适量前移到绿肥季，并加以适当灌溉，可以明显

促进绿肥生长，进而促进后茬主作物产量增加，提高肥料利用率。将绿肥纳入作物的轮作体系，不仅有利于提高产量和养分累积，而且可以减少化肥用量。

参考文献:

- [1] 黄国勤, 赵其国. 中国典型地区轮作休耕模式与发展策略[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 283-292.
- [2] 曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1450-1461.
- [3] 杜威, 王紫泉, 和文祥, 等. 豆科绿肥对渭北旱塬土壤养分及生态化学计量学特征影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 999-1008.
- [4] 侯建伟, 段玉, 张君, 等. 内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用[J]. 土壤, 2018, 50(1): 79-85.
- [5] 焦彬. 中国绿肥[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [6] 刘佳, 张杰, 徐昌旭, 等. 二月兰不同翻压量对土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 123-127.
- [7] 赵秋, 高贤彪, 宁晓光, 等. 华北地区春玉米-冬绿肥轮作对碳、氮蓄积和土壤养分以及微生物的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 1005-1011.
- [8] 杨璐, 曹卫东, 白金顺, 等. 种植翻压二月兰配施化肥对春玉米养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(4): 799-807.
- [9] Bai J S, Cao W D, Xiong J, et al. Integrated application of February Orchid (*Orychophragmus violaceus*) as green manure with chemical fertilizer for improving grain yield and reducing nitrogen losses in spring maize system in Northern China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(12): 2490-2499.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] Xing D K, Wu Y Y, Fu W G, et al. Regulated deficit irrigation scheduling of *orychophragmus violaceus* based on photosynthetic physiological response traits[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(6): 1860.
- [12] 白金顺, 曹卫东, 曾闹华, 等. 不同供氮量对二月兰产量、土壤无机氮残留及氮平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3206-3212.
- [13] Chukalla A D, Krol M S, Hoekstra A Y. Grey water footprint reduction in irrigated crop production: effect of nitrogen application rate, nitrogen form, tillage practice and irrigation strategy[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 22(6): 3245-3259.
- [14] Karyoti A, Bartzialis D, Sakellariou-Makrantonaki M, et al. Effects of irrigation and green manure on corn (*Zea mays* L.) biomass and grain yield[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2018(ahead): 0.
- [15] Zhang D B, Yao P W, Zhao N, et al. Responses of winter wheat production to green manure and nitrogen fertilizer on the loess plateau[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 361-374.

- [16] Lan Y, Huang G, Yang B, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(13): 146–152.
- [17] Hong X, Ma C, Gao J S, et al. Effects of different green manure treatments on soil apparent N and P balance under a 34-year double-rice cropping system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 73–80.
- [18] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(16): 4542–4548.
- [19] 荣勤雷, 梁国庆, 周卫, 等. 不同有机肥对黄泥田土壤培肥效果及土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1168–1177.
- [20] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北灌漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(1): 220–225.
- [21] Liu W, Hussain S, Wu L S, et al. Greenhouse gas emissions, soil quality, and crop productivity from a mono-rice cultivation system as influenced by fallow season straw management[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(1): 315–328.
- [22] Zhang X X, Zhang R J, Gao J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104:208–217.
- [23] 杨曾平, 高菊生, 郑圣先, 等. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(4): 576–583.
- [24] 侣国涵, 赵书军, 王瑞, 等. 连年翻压绿肥对植烟土壤物理及生物性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 905–912.
- [25] 张明发, 田峰, 王兴祥, 等. 翻压不同绿肥品种对植烟土壤肥力及酶活性的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 903–908.
- [26] 高嵩涓, 曹卫东, 白金顺, 等. 长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 902–910.
- [27] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 445–454.