

天津农田三种典型冬绿肥的施磷效应

李 顺¹, 张新建^{2#}, 宁晓光², 周国朋³, 常单娜³, 高嵩涓¹, 赵 秋^{2*}, 曹卫东^{3*}

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 天津市农业科学院, 天津 300192;
3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 绿肥是促进土壤培肥、增加作物产量和保障粮食安全的重要途径, 对绿肥生长季施磷效应的研究有助于为华北旱地绿肥应用模式中磷肥的管理与调控提供理论依据。采用盆栽试验, 对天津农田 3 种典型冬绿肥生育期施用不同用量磷肥 (100%P、80%P、60%P、0P), 研究其对绿肥作物生长、土壤性状、土壤健康和施磷效应的影响。结果表明, 毛叶苕子和黑麦草在生育季施用 60%P (P_2O_5 54 kg/hm²)、二月兰施用 80%P (P_2O_5 72 kg/hm²) 有利于绿肥生物量的形成和养分积累。二月兰在 80%P 处理的磷肥偏生产力较 60%P 和 100%P 处理分别显著提高了 25.2% 和 43.1%, 表观损失率显著降低了 19.3% 和 17.4%。相较于 80%P 和 100%P 处理, 毛叶苕子和黑麦草在 60%P 的磷肥偏生产力均有大幅提高, 同时表观损失率显著降低。在 60% 施磷量下, 毛叶苕子和黑麦草的土壤有机碳含量显著提高了 12.9% 和 22.2%, 全氮含量提高了 20.2% 和 27.4%。毛叶苕子和黑麦草在 60%P 处理下的绿肥生长功能指数和土壤功能综合指数均高于其他处理, 提高了土壤健康水平。综上, 在天津农田常见的冬绿肥种植模式下, 毛叶苕子和黑麦草在生长季施用 60% 磷肥, 二月兰施用 80% 磷肥有利于提高绿肥产量和养分积累量, 提高磷肥利用率和土壤健康水平。

关键词: 绿肥生长; 土壤性状; 土壤健康; 施磷效应

绿肥是一种绿色清洁可再生的肥源, 在我国农业绿色发展和耕地地力提升方面具有不可替代的作用^[1]。冬闲期种植绿肥在华北地区农业结构调整和农田集约化生产中意义重大^[2]。毛叶苕子 (*Vicia villosa* Roth)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 和二月兰 [*Orychophragmus violaceus* (L.) O. E. Schulz] 是我国天津地区的典型冬绿肥作物^[3]。由于自身生长特性, 3 种绿肥作物对土壤和后茬主作物影响存在差异。豆科绿肥因其特有的生物固氮作用而被广泛应用, 在小麦-豆科绿肥间作模式下, 箭筈豌豆 (*Vicia sativa* L.) 和毛叶苕子的生物固氮效率分别为 39.2% ~ 42.8% 和 11.4% ~ 60.1%, 分别向小麦提供可吸收氮素 24.7% ~ 31.6% 和 11.4% ~

23.8%^[4]。禾本科作物具有分蘖性强、生物量大的特点, 与豆科绿肥混播后可吸收主作物收获后土壤中残留的氮和磷^[5]。在大豆-冬绿肥轮作系统中, 黑麦草作绿肥结合免耕可改善土壤化学和物理性质, 从而提高土壤健康指数^[6]。十字花科常见绿肥作物有二月兰、油菜 (*Brassica napus* L.) 和肥田萝卜 (*Raphanus sativus* L.) 等, 由于其根系发达且扎根较深, 可有效清除土壤中残留的氮素, 且有助于降低土壤容重, 促进水分运移^[7-8]。

在耕地休闲期种植绿肥能够充分利用光、水、热等资源, 还田后可释放大量养分, 改善土壤结构, 提高土壤肥力, 从而促使作物增产^[9-10]。绿肥的生长主要受环境因子和田间管理措施的综合影响, 其生物量直接影响地面覆盖、土壤残留养分截获和农田养分循环等生态服务功能^[2]。在绿肥生育期保障合理的养分供给水平是充分发挥绿肥作为生物手段进行肥料管理、实现“以小肥换大肥”的基础。

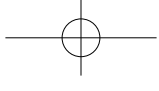
磷是作物生产中最重要矿质养分之一, 然而由于磷素的利用率低, 大量磷肥施入土壤后被转化为缓效态而积累在土壤中。种植绿肥作物会改变土壤磷的结构, 增加不稳定性磷组分的含量, 在活化

收稿日期: 2022-08-29; 录用日期: 2022-10-29

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1700200); 国家现代农业产业技术体系 (绿肥, CARS-22)。

作者简介: 李顺 (1995-), 博士研究生, 主要从事绿肥应用研究。E-mail: 2020203027@stu.njau.edu.cn。张新建 (1983-), 助理研究员, 博士, 主要从事绿肥生产利用和新型肥料研究。E-mail: 15202283186@126.com。张新建为共同第一作者。

通讯作者: 曹卫东, E-mail: caoweidong@caas.cn; 赵秋, E-mail: qiuzhao2008@126.com。



土壤磷和降低磷肥用量方面具有极大潜力^[11]。在绿肥生长季配施适当的磷肥可有效促进绿肥作物对养分的交互吸收和产量增加^[12-13]。目前对绿肥的研究主要集中在绿肥的化肥替代效应及翻压后对土壤环境、主作物产量的影响等方面,而在绿肥生长季的施磷效应研究较少。本文选取天津地区典型冬绿肥作物二月兰、毛叶苕子和黑麦草,研究不同供磷水平对绿肥产量及养分积累量和土壤特性的影响,探究不同绿肥作物的施磷效应及对土壤健康的影响,旨在为绿肥应用模式下磷的科学管理与调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地及试验材料

试验于2019年9月至2020年5月在天津市农业科学院武清创新基地开展。试验基地位于天津市武清开发区(39°21'N, 117°10'E),海拔3.6 m,属暖温带季风性气候,年均温11.6℃,年均降水量580 mm,无霜期200 d左右。供试土壤采自基地长期未种植生土,土壤类型为潮土,风干后混匀,过5 mm筛备用。供试土壤pH为8.63,有机碳和全氮含量分别为17.41和1.33 g/kg;硝态氮、有效磷、速效钾含量分别为15.78、2.76和305.15 mg/kg。供试绿肥作物品种分别为华北栽培种二月兰、土库曼毛叶苕子和一年生黑麦草。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,设置不同绿肥作物和磷肥施用量两个因素。其中绿肥作物包括二月兰(FO)、毛叶苕子(HV)和黑麦草(RG);磷肥施用量包括常规施肥量(100%P)、80%磷肥(80%P)、60%磷肥(60%P)和不施磷肥(0P),共12个处理,每个处理4个重复。盆的直径为34 cm,深度25 cm,盆栽置于室外,为保证盆栽土壤温度,将盆埋在土壤中。常规施肥量采用主作物推荐施肥量,氮肥(N)、磷肥(P₂O₅)、钾肥(K₂O)分别为270、90、180 kg/hm²。氮肥和磷肥分别为尿素(N 46%)和过磷酸钙(P₂O₅ 12%);钾肥由氯化钾(K₂O 60%)和硫酸钾(K₂O 50%)以K₂O含量按1:1比例混合,均作为底肥一次性全部施入土壤。各处理氮肥和钾肥等量供应,分别为0.480和0.320 g/盆;100%P、80%P、60%P、0P处理的磷肥用量分别为0.160、0.128、0.096和0 g/盆。每盆风干土8 kg,将肥料与土壤混匀

后装盆,二月兰、毛叶苕子和黑麦草的播种量分别为0.1、1.0和0.16 g/盆。于2019年9月25日播种。

1.3 样品采集

于2020年5月2日,在二月兰和毛叶苕子盛花期、黑麦草同期采集地上部植株样品,同时采集土壤样品。植株地上部全盆收获,称鲜重后105℃杀青0.5 h,75℃烘干至恒重,研磨粉碎后用于测定植株养分含量。将盆内全部土壤混匀,去除根系等杂物,采用四分法取土样。部分土样在4℃保存,用于测定硝态氮含量;部分-20℃保存,用于测定土壤微生物量碳、微生物量氮含量以及土壤酶活性;其余土样风干、过筛后测定土壤其他指标。

1.4 测定项目及方法

植株样品采用H₂SO₄-H₂O₂消煮后,通过连续流动分析仪(AA3, SEAL, 德国)测定植株全氮和全磷含量,火焰光度计测定植株全钾含量。土壤有机碳、全氮含量通过元素分析仪(Flash Smart, Thermo Fisher Scientific, 美国)测定。土壤硝态氮用2 mol/L KCl浸提,流动分析仪(SEAL, 德国)测定。有效磷用0.5 mol/L NaHCO₃浸提,钼锑抗比色法测定。土壤速效钾用1 mol/L CH₃COONH₄浸提,火焰光度计测定。土壤微生物量碳、微生物量氮采用氯仿熏蒸法,抽真空后培养24 h,0.5 mol/L K₂SO₄浸提,总有机碳分析仪(TOC-L CPH, 岛津, 日本)测定^[14]。土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法,37℃恒温水浴24 h后,计算每克土中的铵态氮含量;碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法,37℃恒温水浴24 h后,在660 nm处测定吸光值,计算酚的生成量。以上两种酶的活性均按照试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)提供方法培养、提取和计算。

1.5 数据计算

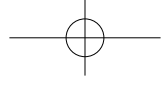
磷肥利用率相关指标计算公式如下^[15-16]:

$$PFP_p (\text{kg/kg}) = GY_p / P_r \quad (1)$$

式中, PFP_p 为磷肥偏生产力(kg/kg); GY_p 为施磷处理的绿肥产量(g/盆); P_r 为化肥纯磷施用量(g/盆)。

$$AR_p (\%) = (CPA_p - CPA_{0p}) / P_r \times 100 \quad (2)$$

式中, AR_p 为磷肥表观回收率(%); CPA_p 为施磷肥后绿肥作物磷素积累量(g/盆); CPA_{0p} 为未施



磷肥绿肥磷素积累量 (g/盆); P_r 为化肥纯磷施用量。

$$AL_p (\text{g/盆}) = P_r + AP_s - (CPA_p + AP_H) \quad (3)$$

式中, AL_p 为磷肥表观损失量 (g/盆); P_r 为化肥纯磷施用量 (g/盆); CPA_p 为施磷肥后绿肥作物磷素积累量 (g/盆); AP_s 为播前土壤有效磷量 (g/盆); AP_H 为收获后土壤有效磷量 (g/盆)。

$$ALR_p (\%) = AL_p / P_r \times 100 \quad (4)$$

式中, ALR_p 为磷肥表观损失率 (%); AL_p 为磷肥表观损失量 (g/盆); P_r 为化肥纯磷施用量 (g/盆)。

参考熊定鹏等^[17]所描述的计算方法, 引用土壤生态系统多功能性来表征土壤健康状况。用绿肥干物质质量、氮、磷、钾养分积累量、土壤硝态氮、有效磷、速效钾、有机碳、全氮、微生物量碳、微生物量氮、脲酶活性、碱性磷酸酶活性共 13 个参数计算土壤健康指数。通过植株相关参数 (绿肥干物质质量, 氮、磷、钾养分积累量) 计算土壤的绿肥生长功能指数, 土壤相关参数 (硝态氮、有效磷、速效钾、有机碳、全氮、微生物量碳、微生物量氮、脲酶活性、碱性磷酸酶活性) 计算土壤性状功能指数, 并对所有参数计算土壤功能综合指数。经过 KS 检验, 所有处理的各参数均服从正态分布 ($P > 0.05$), 因此使用原数据计算。首先计算所有参数的 Z 分数, 公式如下:

$$Z_{ij} = (x_{ij} - \mu_i) / \sigma_j \quad (5)$$

式中, Z_{ij} 表示处理 i 参数 j 的 Z 分数, i 的范围为 1 ~ 12, j 的范围为 1 ~ 13; x_{ij} 表示处理 i 参数 j 的数值; μ_i 为处理 i 的平均值, σ_j 为参数 j 在 12 个处理间的标准差。同一处理对应参数的 Z 分数的平均值即为土壤健康指数。公式如下:

$$SHI_{pi} = \sum_j^4 Z_{ij} / 4 \quad (6)$$

$$SHI_{si} = \sum_j^9 Z_{ij} / 9 \quad (7)$$

$$SHI_{ci} = \sum_j^{13} Z_{ij} / 13 \quad (8)$$

式中, SHI_p , SHI_s 和 SHI_c 分别代表土壤的绿肥生长功能指数、土壤性状功能指数和土壤功能综合指数, 分别通过对应参数的 Z 分数计算; i 的范围为 1 ~ 12, j 在 SHI_p 、 SHI_s 和 SHI_c 中的范围分别为

1 ~ 4、1 ~ 9 和 1 ~ 13。

1.6 统计分析

运用 Excel 2019 和 SPSS 22.0 软件进行数据统计和方差分析, 采用最小显著差异法 ($P < 0.05$) 进行分析比较, 通过 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同供磷水平对绿肥干物质质量和养分积累量的影响

二月兰、毛叶苕子和黑麦草的平均干物质质量分别为 4.74、9.38 和 10.67 g/盆, 均以 80% 施磷水平最高, 较 0P 分别增加了 44.3%、28.9% 和 22.9%, 黑麦草达显著水平 (图 1)。二月兰在 80% 施磷量下的各养分积累量最高, 其中磷和钾的养分积累量显著高于 60% 和 100% 施磷量。相较于 0P 处理, 毛叶苕子的养分积累量在 60%P 和 80%P 有所增加, 在 100%P 降低, 以氮素积累量最为显著。黑麦草的各养分积累量均为 60%P > 80%P > 0P > 100%P, 其中 60%P 的氮、磷养分积累量显著高于 0P 和 100%P (图 1)。此外, 毛叶苕子的氮素积累量较二月兰和黑麦草分别显著增加了 122.16 和 78.85 mg/盆。

由双因素方差分析结果可知, 绿肥作物类型和供磷水平均对养分积累量有显著影响, 二者的交互作用同样显著影响着氮、磷、钾的积累量。供磷水平和绿肥作物类型对其干物质质量的影响达显著水平, 但二者的交互作用并未显著影响绿肥的干物质质量 (图 1)。

2.2 不同供磷水平下种植绿肥对磷肥利用率的影响

二月兰在 80% 施磷量下的磷肥表观回收率显著高于其他供磷水平, 且表观损失率显著低于其他磷水平处理 (表 1)。相较于 100%P 处理, 毛叶苕子在 60%P 下的磷肥偏生产力显著提高, 在 60%P 和 80%P 供应下的磷肥表观回收率显著高于 100%P, 磷肥表观损失率则显著降低了 25.5% 和 18.1%。黑麦草的磷肥偏生产力呈 60%P > 80%P > 100%P 的趋势, 差异达显著水平。在 60%P 处理下, 黑麦草的磷肥表观回收率显著高于 100%P, 表观损失率显著低于其他处理 (表 1)。

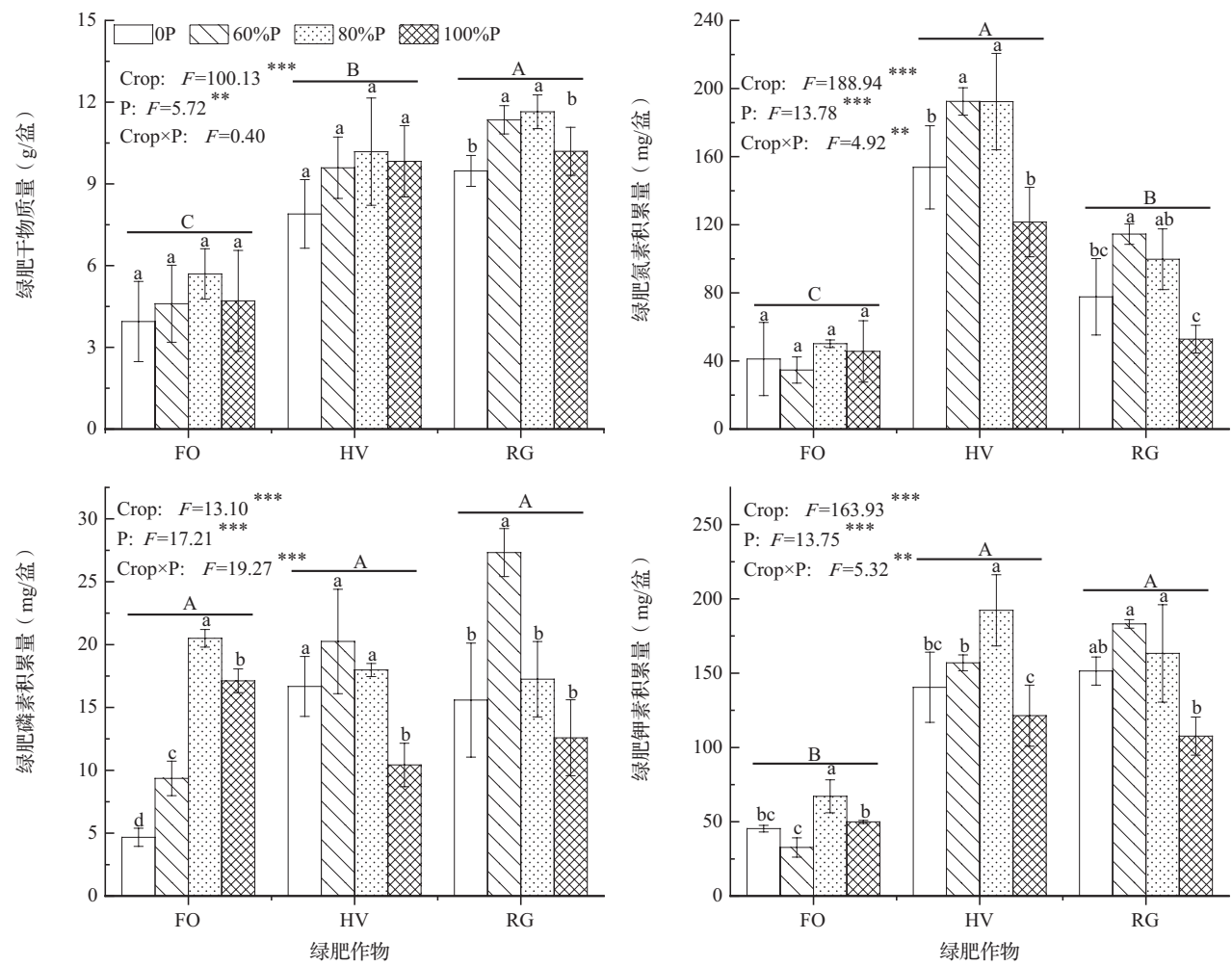


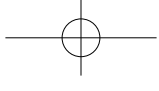
图 1 不同处理的绿肥干物质量及氮、磷、钾养分积累量

注：同一绿肥作物中不同的小写字母代表不同供磷水平下差异显著 ($P<0.05$, $n=4$)，不同大写字母代表不同绿肥作物间差异显著 ($P<0.05$, $n=12$)；Crop 和 P 分别代表不同绿肥作物处理和不同供磷水平处理；*、** 和 *** 分别代表在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。下同。

表 1 不同处理的磷肥利用率

绿肥作物	处理	偏生产力 (kg/kg)		表观回收率 (%)		表观损失率 (%)	
FO	60%P	80.88 ± 5.06ab	B	13.95 ± 0.03c	A	84.71 ± 7.10a	A
	80%P	101.28 ± 11.13a		28.31 ± 1.25a		68.36 ± 8.69b	
	100%P	70.79 ± 0.71b		17.82 ± 1.35b		82.79 ± 8.13a	
HV	60%P	228.85 ± 26.84a	A	16.38 ± 6.58a	AB	71.86 ± 5.65b	A
	80%P	182.21 ± 35.25ab		2.34 ± 0.90b		76.37 ± 6.48b	
	100%P	140.71 ± 18.70b		-7.53 ± 0.61c		90.22 ± 7.76a	
RG	60%P	270.84 ± 12.43a	A	28.00 ± 4.56a	B	53.12 ± 3.97b	A
	80%P	208.41 ± 11.06b		12.30 ± 5.36ab		77.58 ± 1.44a	
	100%P	145.96 ± 12.61c		-6.66 ± 1.92b		78.87 ± 1.33a	
Crop		83.76 ^{***}		10.41 ^{**}		4.18 [*]	
P		31.29 ^{***}		13.06 ^{***}		9.44 ^{**}	
Crop × P		6.22 ^{**}		5.95 ^{**}		6.69 ^{**}	

注：同一绿肥作物中不同的小写字母代表不同供磷水平下差异显著 ($P<0.05$, $n=3$)，不同大写字母代表不同绿肥作物间差异显著 ($P<0.05$, $n=9$)；Crop 和 P 分别代表不同绿肥作物处理和不同供磷水平处理；*、** 和 *** 分别代表在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平上差异显著。下同。



2.3 不同供磷水平下种植绿肥对土壤性状的影响

相较于 0P 处理,不同绿肥作物在磷供应下的土壤有机碳含量均有所提高,其中毛叶苕子在 60%P 和 80%P 下分别显著增加了 12.9% 和 12.1%,黑麦草在 3 个施磷水平下显著增加了 13.0% ~ 22.2%。绿肥配施磷肥后,土壤全氮含量同样呈增加趋势,二月兰、毛叶苕子和黑麦草在 60%P 下的土壤全氮含量较 0P 处理分别显著提高了 9.6%、20.2% 和 27.4% (表 2)。毛叶苕子在 80%P 和 100%P 下显著降低了土壤 pH。二月兰和黑麦草在施磷条件下的土壤硝态氮含量均有所降低,而毛叶苕子却呈增加趋势,尤其是在 60%P 处理,较 0P 增加了 137.3%。磷肥的供应提高了土壤有效磷的含量,其中二月兰在不同施磷水平较 0P 显著增加了 55.2% ~ 71.4%,毛叶苕子和黑麦草分别在 80%P

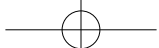
和 100%P 达到最高值。对于土壤速效钾,二月兰 +80%P、毛叶苕子 +60%P、黑麦草 +80%P 和黑麦草 +100%P 均有显著增加,而毛叶苕子 +80%P 和黑麦草 +60%P 较 0P 显著降低 (表 2)。在不同绿肥作物间,毛叶苕子的土壤硝态氮含量显著高于其他绿肥作物,黑麦草的速效钾含量显著低于其他绿肥作物。

根据双因素方差分析,施磷量显著影响了有机碳和养分含量,对 pH 影响不显著;而绿肥作物对有机碳、硝态氮和速效钾含量存在显著影响。二者的交互作用显著影响了土壤有机碳、pH、硝态氮和速效钾。

二月兰的微生物量碳含量随施磷量的增加而提高,其中 80%P 和 100%P 显著高于 60%P 和 0P。毛叶苕子在 60%P 下微生物量碳含量最高,较

表 2 不同处理的土壤 pH 和有机碳、养分含量

绿肥作物	处理	有机碳 (g/kg)		全氮 (g/kg)		pH		硝态氮 (mg/kg)		有效磷 (mg/kg)		速效钾 (mg/kg)	
FO	0P	14.84 ± 0.17a	A	1.15 ± 0.08b	A	8.48 ± 0.21a	A	8.08 ± 0.70a	B	2.59 ± 0.23b	A	293.76 ± 3.06b	A
	60%P	14.98 ± 0.86a		1.26 ± 0.04a		8.56 ± 0.06a		6.91 ± 0.01b		4.02 ± 0.67a		302.94 ± 6.12b	
	80%P	14.40 ± 0.21a		1.19 ± 0.04ab		8.68 ± 0.07a		7.11 ± 0.25b		4.44 ± 0.71a		331.50 ± 10.75a	
	100%P	15.06 ± 0.77a		1.14 ± 0.04b		8.67 ± 0.03a		6.15 ± 0.62b		4.18 ± 0.84a		298.86 ± 6.37b	
HV	0P	14.53 ± 0.26b	A	1.14 ± 0.04b	A	8.68 ± 0.03a	A	7.43 ± 0.53b	A	2.84 ± 0.07b	A	312.12 ± 4.33b	A
	60%P	16.41 ± 0.71a		1.37 ± 0.08a		8.67 ± 0.06ab		17.63 ± 1.97a		3.29 ± 0.59b		342.72 ± 4.33a	
	80%P	16.29 ± 0.70a		1.23 ± 0.14ab		8.60 ± 0.03bc		7.53 ± 1.27b		4.23 ± 0.62a		287.64 ± 4.33c	
	100%P	15.10 ± 0.61b		1.22 ± 0.10ab		8.55 ± 0.07c		8.68 ± 0.61b		3.45 ± 0.35ab		312.12 ± 8.65b	
RG	0P	13.49 ± 0.19b	A	1.06 ± 0.04c	A	8.64 ± 0.09a	A	2.28 ± 0.25ab	C	2.77 ± 0.17c	A	277.44 ± 4.67b	B
	60%P	16.49 ± 1.01a		1.35 ± 0.07a		8.67 ± 0.08a		2.90 ± 0.51a		2.98 ± 0.19c		263.16 ± 3.06c	
	80%P	15.25 ± 0.79a		1.20 ± 0.05b		8.68 ± 0.04a		1.47 ± 0.24bc		3.68 ± 0.43b		293.76 ± 9.01a	
	100%P	15.99 ± 0.90a		1.26 ± 0.09ab		8.57 ± 0.08a		1.05 ± 0.09c		4.49 ± 0.22a		300.65 ± 7.23a	
F 值													
Crop		4.10*		2.31		0.20		169.06***		2.10		61.95***	
P		9.21***		16.59***		1.77		23.13***		15.82***		3.76*	
Crop × P		3.52**		1.68		3.20*		25.41***		2.15		27.29***	



0P处理显著提高了90.7%。毛叶苕子和黑麦草在60%P下的微生物量氮含量显著高于0P处理。此外,施磷量、绿肥作物及二者的交互作用都对微生物量碳、微生物量氮存在显著影响(图2)。

二月兰在80%P下的碱性磷酸酶活性显著高于其他处理,在60%P下则显著低于0P。毛叶苕子的土壤碱性磷酸酶活性为100%P>0P>60%P>80%P,各供磷水平间差异显著。黑麦草在100%P下的碱

性磷酸酶活性较0P显著提高了5.2%,但在60%和80%P下显著低于0P处理(图3)。磷肥的施用降低了土壤脲酶的活性,其中毛叶苕子和黑麦草在各施磷水平下较0P处理均显著降低。虽然绿肥作物未对土壤脲酶和碱性磷酸酶产生显著影响,但供磷水平以及二者的交互作用却显著影响了土壤脲酶和碱性磷酸酶活性(图3)。

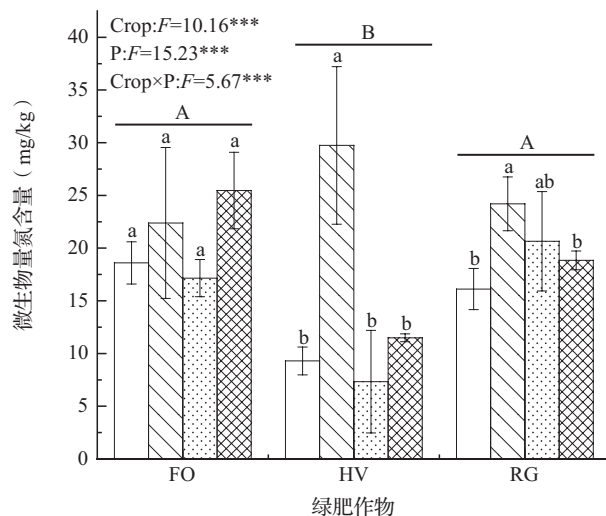
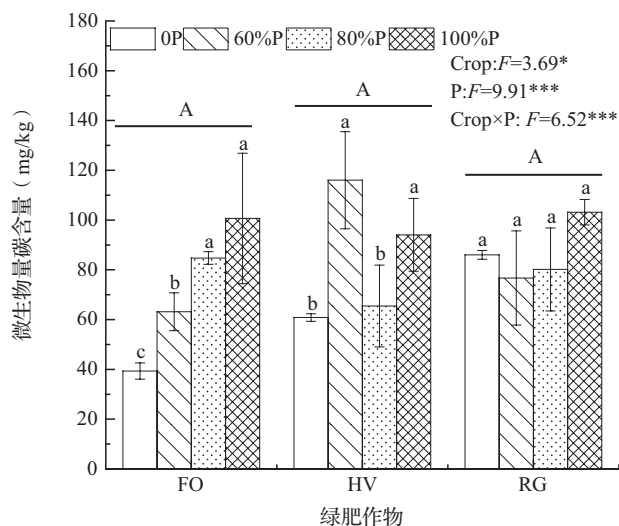


图2 不同处理的土壤微生物量碳、微生物量氮含量

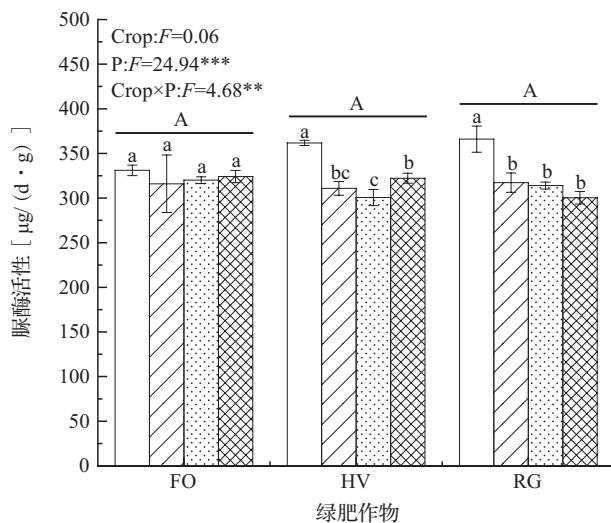
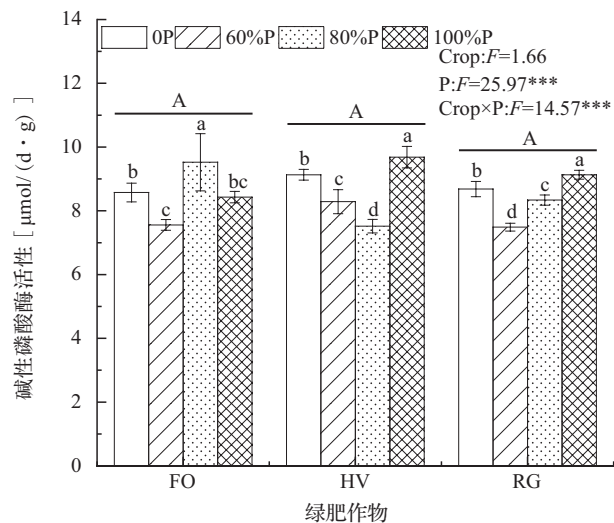


图3 不同处理的土壤胞外酶活性

2.4 不同供磷水平下种植绿肥对土壤健康的影响

土壤功能综合指数、绿肥生长功能指数和土壤性状功能指数最高值的处理分别为毛叶苕子+60%P(0.96)、黑麦草+60%P(8.46)和毛叶苕子+100%P(1.27)(图4)。毛叶苕子和黑麦草在0P、60%P和80%P处理下的绿肥生长功能指数均

为正值,明显高于其他处理;在60%供磷量下,毛叶苕子和黑麦草的土壤性状功能综合指数同样均为正值。黑麦草+80%P处理的各指数分别为0.51、1.56和0.04,而二月兰在不同施磷水平下的所有指数均为负值(图4)。

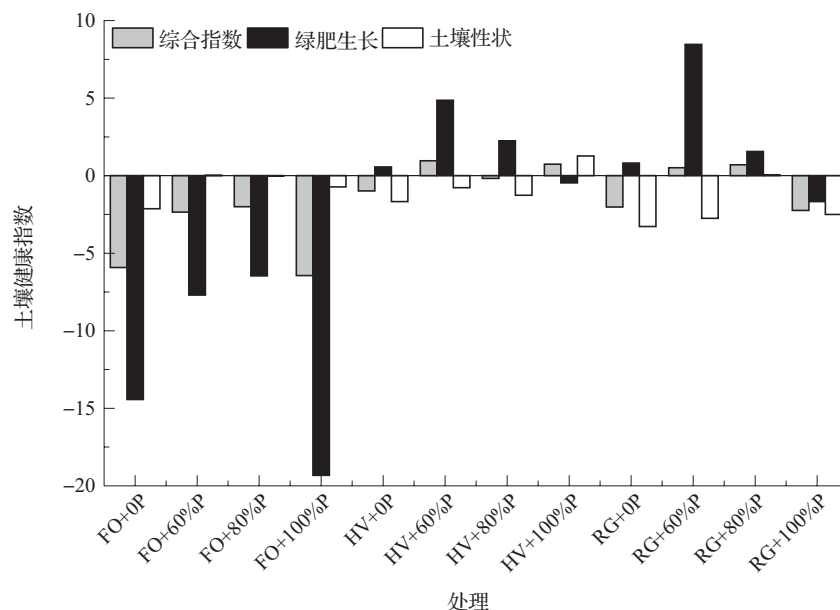
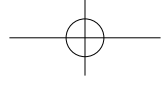


图4 不同处理的土壤健康指数

3 讨论

以二月兰、毛叶苕子和黑麦草为代表的十字花科、豆科和禾本科绿肥已逐渐成为华北地区的主要绿肥作物，多应用于春玉米轮作系统中^[3, 18]。禾本科作物的养分吸收能力较强，分蘖多，因此生物量一般较大^[19]。在本研究中，黑麦草在不同供磷水平下的平均干物质量均高于毛叶苕子和二月兰。虽然毛叶苕子的干物质量低于黑麦草，但其氮素的积累量较黑麦草却显著提高了91.5%，这与豆科绿肥特有的固氮能力密切相关。相关研究表明，在豆科绿肥轮作系统中，苜蓿和三叶草从大气中固定的氮素量为38 ~ 67 kg/hm²，后茬作物地上部分有71% ~ 96%的氮素来自生物固氮^[20]。磷素参与水分吸收与转运、光合作用和根冠生长等过程，对植株的代谢活性和氮素利用效率影响深远^[12]。有研究表明，在低磷条件下，作物产量随有效磷含量的增加而增加，当土壤有效磷含量达到某一水平时，作物产量不再随施磷量的增加而明显提高^[21-23]。本研究中，毛叶苕子和黑麦草在生育期配施60%磷量有助于植株养分积累和产量形成，二月兰在80%供磷量下有利于其生长发育和养分积累，而3种绿肥作物在100%供磷条件下的植株养分积累均受到明显抑制，与上述研究结果一致，可能是因为过多磷肥的投入降低了土壤的氮磷比，影响植株对土壤氮素的吸收，从而限制了绿肥的生长。

氮磷添加可以改变土壤团聚体结构，提高土壤固碳能力^[24]。本文中，相较于不施磷处理，毛叶苕子和黑麦草其余供磷水平下土壤有机碳和全氮含量均显著提高，在60%P处理下达到最高。这可能是由于一方面磷肥的供应显著增加了绿肥产量和凋落物数量；另一方面，氮、磷元素的耦合作用增加了绿肥根系生物量和分泌物数量，进而提高土壤有机氮和全氮含量^[25]。土壤微生物量碳、微生物量氮含量与上述土壤有机碳和全氮的规律一致，说明在60%施磷量下，氮和磷的耦合效果最佳，通过影响根系生物量和分泌物为微生物生长提供了充足的碳源，进而促进了微生物的活动和数量。种植绿肥作物可吸收土壤中的矿质氮来降低氮素淋失风险，是解决土壤氮损失的有效方案之一^[26-28]。本研究中，种植3种绿肥作物均吸了土壤中的硝态氮，但土壤氮残留程度各不相同。毛叶苕子处理的硝态氮含量平均为10.32 mg/kg，而黑麦草处理的仅为1.88 mg/kg，说明黑麦草在生长过程中更多的依赖于土壤中的氮素供给，而毛叶苕子因生物固氮作用可以在一定程度自养。于天一等^[29]研究表明，在一定范围内，豆科作物的根瘤数、鲜重和固氮量随施磷量的增加而增加，使作物对土壤和肥料氮的依赖降低。本研究中，毛叶苕子施用60%磷肥处理的土壤硝态氮含量达到了17.63 mg/kg，说明适当施用磷肥，种植毛叶苕子不仅不会消耗土壤中的硝态氮，还会为土壤提供一定量的氮素。有研究表明，在低磷条件下，



植株的根系构型会发生相应的改变,增加与土壤的接触面积,从而提高对磷素的吸收^[30];缺磷土壤还会促进油菜、肥田萝卜和鹰嘴豆等绿肥作物分泌苹果酸、柠檬酸、酒石酸、延胡索酸等有机酸来活化土壤中的磷^[31-32]。本研究中,土壤基础有效磷含量为 2.76 mg/kg,属极低水平^[33],在无磷肥和 60% 磷处理下,种植绿肥后土壤有效磷含量平均仅为 2.67 和 3.52 mg/kg,这可能与绿肥作物的根系构型与活动有关。对于磷肥利用率,二月兰在 80%P 和毛叶苕子、黑麦草在 60%P 条件下表现出较高的磷肥偏生产力和表观回收率,同时降低了磷肥的损失,促进了磷肥的高效利用。而在过量磷肥施用量(100%P)下,绿肥的磷肥利用率明显下降。磷肥在施入土壤后,除被当季作物吸收利用外,残留在土壤中的磷素会对后茬作物生长发育产生影响^[34]。土壤有效磷与土壤有机质含量存在显著关系,有机质含量较高的土壤对累计磷素的活化能力普遍较高^[35]。在适量施磷量下,绿肥翻压后不仅会降低磷肥的损失量,同时提高土壤的有机质含量,从而促进绿肥与主作物轮作模式的磷肥利用率的提高。

土壤酶活性反映了土壤中的营养元素和底物的可用性,外源添加氮、磷等会影响土壤中的养分循环和微生物群落结构^[36]。本研究中,施磷肥处理的土壤脲酶活性显著低于无磷肥处理,可能是因为磷肥供应显著提高了土壤全氮含量,缓解了土壤的氮限制,而无磷肥处理由于氮含量降低,刺激绿肥根系和土壤微生物分泌更多的脲酶以提高从土壤中吸收氮的能力^[37]。不同施磷水平还在一定程度降低了磷酸酶的活性。由于外源磷的投入降低了微生物与作物对磷的竞争,微生物减少了作为诱导酶的磷酸酶合成的能量投入,导致土壤微生物和植物减少了磷酸酶的分泌量^[38]。

土壤健康是指土壤生态系统为了维持动、植物的生产力、改善空气和水的质量、促进植物生长和动物健康而发挥重要生命系统的能力,是提高土壤生态系统基础服务和供应健康食物的保障,直接影响着人类的健康发展^[39-40]。在我国农业绿色发展的大背景下,对土壤健康的评价除了重视粮食作物生产外,还应综合考虑由土壤物理、化学和生物学共同决定的土壤生态系统服务功能^[41]。本研究结果表明,种植毛叶苕子和黑麦草在 0P、60%P 和 80%P 水平下的绿肥生长功能指数明显高于其他处

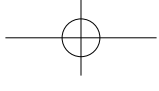
理,但土壤性状功能指数却未显著提高。土壤的各功能间存在着相互制衡的关系,例如植株的生产力与抗胁迫能力往往呈负相关的关系,即土壤对二者的功能基本不可能同时优化^[42]。本文中,绿肥需要依靠土壤的养分供给来维持生长,因此在提高绿肥生长功能的同时,并不能提高土壤性状功能。从土壤健康综合指数来看,毛叶苕子 60%P 和 100%P 水平以及黑麦草在 60%P 和 80%P 水平下均是因绿肥生长指数或土壤性状指数中某一项的突出贡献而中和了另一项的负影响,从而使得土壤健康综合指数升高。

4 结论

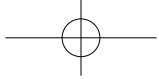
在绿肥生长季,毛叶苕子和黑麦草配施 60%P 以及二月兰配施 80%P 促进了绿肥的生长及养分积累,但在 100%P 下 3 种绿肥作物的生长均受到抑制。绿肥生长季配施 60% 磷肥显著提高了土壤有机碳、全氮、微生物量碳和微生物量氮的含量。二月兰在 80%P 和毛叶苕子、黑麦草在 60%P 条件下的磷肥利用率显著高于其他供磷水平。综合绿肥生长和土壤特性,黑麦草配施 60% 和 80% 磷肥以及毛叶苕子配施 60% 和 100% 磷肥均有利于土壤健康指数的提高。综上,二月兰在生育季施用 80% 磷肥(P_2O_5 72 kg/hm²)、毛叶苕子和黑麦草在生育季施用 60% 磷肥(P_2O_5 54 kg/hm²)是促进绿肥产量形成和养分积累、提高磷肥利用率和改善土壤质量的有效管理措施。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 赵秋,高贤彪,宁晓光,等. 华北地区几种冬闲覆盖作物碳氮蓄积及其对土壤理化性质的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(4): 750-753.
- [4] 刘蕊,常单娜,高嵩涓,等. 西北小麦与豆科绿肥间作体系箭筈豌豆和毛叶苕子生物固氮效率及氮素转移特性[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(12): 2184-2194.
- [5] 蹇述莲,李书鑫,刘胜群,等. 覆盖作物及其作用的研究进展[J]. 作物学报,2022,48(1): 1-14.
- [6] Heppy S W, Yingting G, Peiran L, et al. A cover crop and no-tillage system for enhancing soil health by increasing soil organic



- matter in soybean cultivation [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 205 (1): 1-14.
- [7] Miriam F G, Victoria J A, Dean G B, et al. Brassica cover crop effects on nitrogen availability and oat and corn yield [J]. Agronomy Journal, 2016, 108 (1): 151-161.
- [8] Cristina A, Susana S, Antonio P, et al. Brassica species as winter cover crops in sustainable agricultural systems in southern Spain [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2009, 33 (6): 619-635.
- [9] 冯静琪, 曹卫东, 高嵩涓, 等. 稻草及氮调控对紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 生长和土壤性状的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (10): 1858-1869.
- [10] 李文广, 杨晓晓, 黄春国, 等. 饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响 [J]. 中国农业科学, 2019, 52 (15): 2664-2677.
- [11] 王安远. 种植绿肥结合磷肥减施对小麦生长和土壤性质的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [12] 于铁峰, 刘晓静, 郝凤. 施用磷肥对紫花苜蓿营养价值 and 氮磷利用效率的影响 [J]. 草业学报, 2018, 27 (3): 154-163.
- [13] 苏伟, 鲁剑巍, 刘威, 等. 氮磷钾肥用量对紫云英产量效应的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2009, 17 (6): 1094-1098.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 张奇茹, 谢英荷, 李廷亮, 等. 有机肥替代化肥对旱地小麦产量和养分利用效率的影响及其经济环境效应 [J]. 中国农业科学, 2020, 53 (23): 4866-4878.
- [16] 加武斌. 施肥措施对晋南旱塬小麦产量及水肥利用的影响 [D]. 晋中: 山西农业大学, 2017.
- [17] 熊定鹏, 赵广帅, 武建双, 等. 羌塘高寒草地物种多样性与生态系统多功能关系格局 [J]. 生态学报, 2016, 36 (11): 3362-3371.
- [18] 魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 覆盖作物翻压对华北平原春玉米产量和土壤养分的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2020(1): 172-178.
- [19] 杨滨娟, 黄国勤, 王超, 等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (10): 1209-1216.
- [20] Camille A, Marie H J, Bruno M, et al. Contribution of relay intercropping with legume cover crops on nitrogen dynamics in organic grain systems [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 98 (1): 1-14.
- [21] Colomb P B, Debaeke P, Jouany C, et al. Phosphorus management in low input stockless cropping systems: crop and soil responses to contrasting P regimes in a 36-year experiment in southern France [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 26 (2): 154-165.
- [22] Poulton P R, Johnston A E, White R P. Plant - available soil phosphorus. Part I: the response of winter wheat and spring barley to Olsen P on a silty clay loam [J]. Soil Use & Management, 2013, 29 (1): 4-11.
- [23] 刘文兰, 师尚礼, 田福平, 等. 紫花苜蓿生物量空间层次分布与叶片 C、N、P 化学计量特征对 P 添加的响应 [J]. 草地学报, 2017, 25 (2): 322-329.
- [24] 凌小莉, 史宝库, 崔海莹, 等. 氮磷添加对松嫩草地土壤团聚体结构及其碳含量的影响 [J]. 中国草地学报, 2021, 43 (2): 54-63.
- [25] Loretta T, Anna N, Gianni G, et al. Can mineral and organic fertilization help sequester carbon dioxide in cropland? [J]. European Journal of Agronomy, 2008, 29 (1): 1-20.
- [26] Malinda S T, Stephanie S, John L, et al. Management of manure nitrogen using cover crops [J]. Agronomy Journal, 2015, 107 (4): 1595-1607.
- [27] Snapp S S, Swinton S M, Labarta R, et al. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches [J]. Agronomy Journal, 2005, 97 (1): 322-332.
- [28] Montserrat S, José C, Dolores Q, et al. Winter cover crops affect monoculture maize yield and nitrogen leaching under irrigated mediterranean conditions [J]. Agronomy Journal, 2010, 102 (6): 1700-1709.
- [29] 于天一, 李晓亮, 路亚, 等. 磷对花生氮素吸收和利用的影响 [J]. 作物学报, 2019, 45 (6): 912-921.
- [30] George T S, Fransson A M, Hammond J P, et al. Phosphorus nutrition rhizosphere processes, plant response and adaptations [M] // Bunemann E K, Oberson A, Fossard E. Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling. New York: Springer, 2011: 245-271.
- [31] 涂书新, 孙锦荷, 郭智芬, 等. 植物根系分泌物与根际营养关系评述 [J]. 生态环境学报, 2000, 9 (1): 64-67.
- [32] 陆文龙, 曹一平, 张福锁. 根分泌的有机酸对土壤磷和微量元素活化作用 [J]. 应用生态学报, 1999, 10 (3): 124-127.
- [33] 王东, 牛劭斌, 许华森, 等. 华北平原山药主产区土壤肥力和养分平衡现状及环境风险评价 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (8): 2818-2828.
- [34] Rubæk G H, Kristensen K, Olesen S E, et al. Phosphorus accumulation and spatial distribution in agricultural soils in Denmark [J]. Geoderma, 2013, 209-210 (11): 241-250.
- [35] 张微微, 周怀平, 黄绍敏, 等. 长期不同施肥模式下碱性土有效磷对磷盈亏的响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27 (2): 263-274.
- [36] Xi Y C, Jan M. Atmospheric deposition of nitrogen at five subtropical forested sites in south China [J]. Science of the Total Environment, 2007, 378 (3): 317-330.
- [37] 余汉基, 薛立. 森林土壤酶活性对氮沉降的响应 [J]. 世界林业研究, 2018, 31 (1): 7-12.
- [38] Matthew P W, Mary A A, Gary M L, et al. The phosphorus status of northern hardwoods differs by species but is unaffected



- by nitrogen fertilization [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 97 (2-3): 159-181.
- [39] 张俊伶, 张江周, 申建波, 等. 土壤健康与农业绿色发展: 机遇与对策[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (4): 783-796.
- [40] 司绍诚, 吴宇澄, 李远, 等. 耕地和草地土壤健康研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6): 625-642.
- [41] 张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (6): 603-616.
- [42] Erika S Z, Jae R P, Kristin B H, et al. Sustaining multiple ecosystem functions in grassland communities requires higher biodiversity [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107 (4): 1443-1446.

Effects of phosphorus application on three typical winter green manures in Tianjin farmland

LI Shun¹, ZHANG Xin-jian^{2#}, NING Xiao-guang², ZHOU Guo-peng³, CHANG Dan-na³, GAO Song-juan¹, ZHAO Qiu^{2*}, CAO Wei-dong^{3*} (1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing Jiangsu 210095; 2. Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300192; 3. Key Laboratory of State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The application of green manure was a critical way to promote soil fertility, increase crop yield and ensure food security. The research on the effects of phosphorus fertilizers application in green manure growing season would help to provide a theoretical basis for the management and regulation of phosphorus fertilizer in the application mode of green manure in dryland of North China. The pot experiment was conducted to study the effects of different phosphorus application rates (100%P, 80%P, 60%P, 0P) on the plant growth, soil properties, soil health and phosphorus application effects of different green manure crops. The result showed that the application of 60% phosphate fertilizer for Hairy Vetch, Ryegrass and 80% phosphate fertilizer for February Orchid during the growing season was beneficial to the formation of green manure biomass and nutrient accumulation. For the February Orchid, the partial factor productivity of phosphorus fertilizer at 80%P treatment was significantly increased by 25.2% and 43.1% compared with that of 60%P and 100%P treatments, and the apparent loss rate of phosphate fertilizer was significantly reduced by 19.3% and 17.4%. For the Hairy Vetch and Ryegrass, the partial factor productivities of phosphorus fertilizer at 60%P were significantly improved, and the apparent loss rates of phosphate fertilizer was significantly reduced, compared with those of 80%P and 100%P treatments. Under 60% phosphorus application rate, the soil organic carbon and total nitrogen content of Hairy Vetch and Ryegrass were significantly higher than those of non-phosphate fertilizer treatment, organic carbon increased by 12.9% and 22.2%, and total nitrogen increased by 20.2% and 27.4%, respectively. The green manure growth function index and soil function comprehensive index of Hairy Vetch and Ryegrass at 60%P were higher than other treatments, which improved the soil health level. In conclusion, under the common winter green manure planting pattern in Tianjin farmland, the application of 60% phosphate fertilizer to Hairy Vetch and Ryegrass and 80% to February Orchid during the growing season were beneficial to increase the yield of green manure and the accumulation of nutrients, as well as the utilization rate of phosphate fertilizer and the level of soil health.

Key words: green manure growth; soil properties; soil health; effects of phosphorus application