

不同前茬作物和施肥水平下麦田土壤不同形态无机磷含量及其对冬小麦磷累积量的贡献

邵云,王岚,王鹏飞,侯盟,安佳慧,赵宇浩

(河南师范大学 生命科学学院,河南 新乡 453007)

摘要:为研究不同前茬作物下土壤无机磷形态的差异及对后茬作物冬小麦磷累积的影响,开展了二因素田间试验,测定了 3 种前茬作物(玉米、大豆、花生)和 2 个磷肥施肥水平(P_2O_5 150 kg/hm², 常规施肥(+F); P_2O_5 0 kg/hm², 限肥(-F))处理下播种前和收获后耕层(0~15 cm)土壤全磷、速效磷以及不同形态无机磷的质量分数,同时测定冬小麦植株磷累积量,运用通径分析法,分析了土壤中不同形态无机磷对冬小麦植株磷累积量的贡献。结果表明:与常规施肥相比,限肥显著降低土壤全磷、速效磷和不同形态无机磷的含量。在常规施肥水平下,玉米前茬处理的土壤速效磷质量分数最高且显著高于其他前茬处理,为 18.61 mg/kg,总无机磷、Fe-P 和 Ca_{10} -P 的质量分数也最高,分别为 592.55 mg/kg、41.97 mg/kg 和 338.77 mg/kg;大豆前茬处理的土壤全磷质量分数最高且显著高于其他前茬处理,为 972.80 mg/kg,Al-P 和 O-P 的含量也在大豆前茬处理的质量分数最高,分别为 43.44 mg/kg 和 64.37 mg/kg;花生前茬处理的土壤 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 的质量分数最高,分别为 27.53 mg/kg 和 94.14 mg/kg,但与玉米前茬和大豆前茬的处理结果差异不显著。在限肥水平下,玉米前茬处理土壤的全磷、速效磷和 O-P 的质量分数最高且显著高于其他前茬处理,分别为 770.47 mg/kg、13.50 mg/kg、58.99 mg/kg;大豆前茬处理土壤 Ca_{10} -P 的质量分数最高且显著高于其他前茬处理,为 320.62 mg/kg,总无机磷、Al-P 和 Fe-P 的质量分数与其他前茬处理差异不显著,分别为 541.96 mg/kg、34.50 mg/kg 和 36.42 mg/kg;花生前茬处理土壤 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 的质量分数最高但与花生前茬处理的差异不显著,分别为 23.04 mg/kg 和 78.78 mg/kg。2 个磷肥水平下冬小麦植株磷累积量均在花生前茬处理下最高,分别为 33.11 kg/hm² 和 25.14 kg/hm²。在常规施肥水平下,花生前茬处理与玉米、大豆前茬处理的差异不显著,而在限肥水平下显著高于玉米、大豆前茬处理。经通径分析,土壤无机磷不同形态对冬小麦植株磷累积量的直接影响(直接通径系数)由大到小为 Ca_2 -P、Al-P、Fe-P、 Ca_8 -P、O-P、 Ca_{10} -P。结合通径系数和相关系数表明, Ca_2 -P 是小麦磷累积的直接来源,其次是 Al-P,而 Fe-P 和 Ca_8 -P 是小麦的缓效磷源,O-P 和 Ca_{10} -P 是小麦比较难以利用的磷源。在 2 种施肥水平下,前茬作物极显著影响全磷、速效磷、和无机磷的含量,进而影响冬小麦的植株磷累积量。

关键词:冬小麦;前茬作物;无机磷形态;磷累积量;通径分析

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2025)01-0023-09

磷对植物生长发育具有重要作用,土壤本身的磷素和人为施入土壤的磷素是植物所需磷素的主要来源。但是大多数土壤自身的供磷能力有限,不能满足作物高产的需求。因此,为了提高粮食产量,农田磷肥投入量不断增加^[1]。磷肥过高的投入造成土壤磷素累积的现象在全球已经非常普遍,在我国的情况尤为严重,90%以上存在于种植领域^[2]。据统计,2017 年我国水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率平均为 37.8%,我国

收稿日期:2023-10-13;修回日期:2023-11-17.

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFD2301500).

作者简介(通信作者):邵云(1973-),女,山东单县人,河南师范大学教授,博士,研究方向为作物生理生态, E-mail: shaoyun73@126.com.

引用本文:邵云,王岚,王鹏飞,等.不同前茬作物和施肥水平下麦田土壤不同形态无机磷含量及其对冬小麦磷累积量的贡献[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):23-31.(Shao Yun,Wang Lan,Wang Pengfei,et al.Content of different fractions of soil inorganic phosphorus and their contributions to phosphorus accumulation in winter wheat with different previous crops and at different fertilizer levels[J].Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2025,53(1):23-31.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2023.10.13.0002.)

化肥利用率仍偏低^[3].过量施用磷肥不仅不会带来作物的持续增产,而且会导致作物产量降低、土壤有害元素积累和土壤理化性质恶化等一系列问题^[4-6].因此,磷养分资源的综合管理是协调作物高产和环境友好的关键,而了解土壤中不同形态磷素含量对于提高土壤磷素的利用率具有重要意义^[7].土壤中的磷素主要以有机态和无机态存在,有机磷需要转化成无机磷(inorganic phosphorus, Pi)后才能被植物吸收利用^[8].根据文献^[9]的 Pi 分级方法,石灰性土壤的 Pi 可分为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 这 6 种形态.不同形态的 Pi 对作物磷素营养有重要作用,但是只有其中的一小部分对作物来说是直接有效的,并且不同形态 Pi 的组成特点以及有效性不尽相同,从而导致土壤供磷能力产生差异^[5,10-11].

不同轮作方式对土壤结构及养分的积累有一定影响^[12].研究发现,土壤无机磷形态在轮作土壤中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 增幅最大^[13],玉米秸秆还田与肥料中的有机酸经过一系列反应能够使玉米前茬土壤 Fe-P 的含量高于其他前茬处理^[14],玉米-绿肥轮作比玉米-休闲轮作更能改善土壤理化性质,提高土壤肥力^[15].研究表明,上一茬作物的残茬、秸秆以及根系能够补充耕地土壤的有机质.豆科作物的落叶量大,且豆科作物的根瘤菌有固定空气中氮素的能力,能补充土壤氮素,提高土壤的全氮含量^[16].已有研究表明磷素在土壤中的移动性差,长期过量施肥会导致磷素不断积累,从而提高了磷的容量和强度,进而提高了土壤全磷的含量^[17-18].

目前,已有一些学者对不同土壤类型的无机磷形态进行研究,但在黄淮海平原开展不同前茬作物对耕层土壤无机磷形态及对下茬作物磷累积量的研究较少.本研究以河南省获嘉县高产农田为研究对象,对不同前茬作物下麦田土壤不同形态 Pi 的含量进行测定,并对其与后茬作物冬小麦植株磷累积量的关系进行分析,以期为我国农业生产中,在保证粮食供应总量的前提下,调整磷肥投入、提高磷肥利用效率的轮作模式提供一定的理论支撑.

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年 6 月至 2020 年 6 月在河南省新乡市获嘉县东彰仪村(35.12°N、113.36°E)进行,该区海拔 73.2 m,年平均气温 16.1 °C,年平均降水量 605.7 mm,地势平坦,土壤肥沃.试验区土壤类型为潮土,前茬作物播前土壤基本理化性质:有机质为 29.19 g/kg,全氮(total nitrogen, TN)为 1.46 g/kg,全磷(total phosphorus, TP)为 0.96 g/kg,速效磷(available phosphorus, AP)为 7.96 mg/kg,无机磷(Pi)为 627.73 mg/kg.其中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 为 33.51 mg/kg, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 为 98.78 mg/kg, Al-P 为 47.24 mg/kg, Fe-P 为 48.51 mg/kg, O-P 为 68.38 mg/kg, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为 331.30 mg/kg.

1.2 试验设计

为探讨不同前茬作物对麦田土壤不同形态无机磷含量及冬小麦磷累积量的影响,试验选择新麦 26 为冬小麦供试品种,采取二因素设计,第一个因素为前茬作物(previous crop, PC),分别为玉米前茬(M)、大豆前茬(S)、花生前茬(P).其中,玉米品种为郑单 958,大豆品种为驻豆 19,花生品种为开农 80.第二个因素为磷肥水平(fertilization level, FL),分别为常规施肥(+F, P_2O_5 150 kg/hm²) and 限肥(-F, P_2O_5 0 kg/hm²),其他肥料和常规施肥保持一致.其中,纯氮 240 kg/hm²、 K_2O 90 kg/hm².小区面积为 133 m²,3 次重复.前茬作物秸秆均全量还田,作物的田间管理见表 1.

1.3 样品采集及处理

冬小麦成熟时,采用 5 点法采集 0~15 cm 耕层土样,混匀后自然风干,过 0.25 mm 筛,测定土壤 TP、AP、不同形态 Pi($\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$)含量.同时每区随机选取 30 株冬小麦,取地上部分,105 °C 杀青 0.5 h 后 80 °C 烘干至恒质量,测定植株磷含量,并计算植株磷累积量(PPA).

1.4 测定项目及方法

土壤 TP 和植株 Pi 采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-CuSO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4$ 消煮,用 AA3 连续流动分析仪(德国 SEAL Analytical 公司)测定^[19];土壤 AP 含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[9];土壤 Pi 形态检测采用文献^[20]的方法,并计算总 Pi 含量.

1.5 数据处理

用 Excel 2019 进行试验数据统计分析和作图,采用和 SPSS 22.0 软件进行方差分析(ANOVA)、多重比较(Duncan's 新复极差法)、相关分析和通径分析.

表 1 作物的田间管理
Tab. 1 Field management of crops

管理措施	玉米	大豆	花生	小麦
播种日期	2019-06-11	2019-06-11	2019-06-09	2019-10-13
收获日期	2019-09-25	2019-10-13	2019-10-13	2020-06-01
播种密度/(株·hm ⁻²)	70 000	250 000	330 000	3 750 000
行距/mm	600	400	400	200
株距/mm	250	100	100	13~15(条播)
播深/mm	45	35	35	35

2 结果与分析

2.1 不同前茬作物下土壤 TP、AP 和 Pi 含量的分析

表 2 为前茬作物、施肥水平及二者交互作用对土壤 TP、AP、Pi 及 Pi 的不同形态质量分数影响的方差分析.前茬作物、施肥水平、二者交互作用对土壤 TP 质量分数的影响均达到极显著水平($P < 0.01$).从表 3 可知, M+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理的土壤 TP 质量分数均显著低于本底土壤值,但 S+F 处理与本底土壤之间差异不显著.在常规施肥处理中,土壤 TP 质量分数由大到小表现为 S+F、M+F、P+F, S+F 处理显著高于 M+F 和 P+F 处理;M-F 处理高于 P-F 处理和 S-F 处理,差异均显著.与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 TP 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 17.40%、28.88% 和 9.46%.

方差分析结果显示(表 2),前茬作物、施肥水平和二者交互作用均对土壤 AP 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$).从表 3 可以看出, M+F、S+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理的土壤 AP 质量分数均显著高于本底值.土壤 AP 质量分数在常规施肥水平下由大到小表现为 M+F、P+F、S+F,差异均显著;限肥水平下由大到小表现为 M-F、P-F、S-F,差异均显著.与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 AP 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 27.45%、24.27% 和 39.22%.

经方差分析得知(表 2),施肥水平和二者交互对土壤 Pi 质量分数的影响分别达到极显著水平($P < 0.01$)和显著水平($P < 0.05$).从表 3 可以看出, M+F、S+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理的土壤 Pi 质量分数均显著低于本底土壤.土壤 Pi 质量分数由大到小表现为 M+F、S+F、P+F, M+F 处理的显著高于 P+F 处理;S-F 处理高于 P-F 处理,显著高于 M-F 处理.与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Pi 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 14.11%、7.12% 和 6.99%.

表 2 不同前茬作物和施肥水平对土壤 TP、AP、Pi 及其不同形态质量分数影响的方差分析(F 值)

Tab. 2 Variance analysis of effects of different previous crops and fertilizer levels on content of TP, AP, Pi and its different morphological content(F value)

因素	TP	AP	Pi	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
PC	40.05 **	296.33 **	1.84	13.18 **	8.70 **	5.58 *	0.51	6.67 *	1.68
FL	728.25 **	1 146.25 **	69.62 **	231.73 **	44.00 **	61.21 **	11.07 **	27.42 **	7.95 *
PC×FL	83.85 **	52.41 **	4.74 *	16.57 **	0.73	2.32	0.79	5.65 *	4.69 *

注:PC 表示前茬作物;FL 表示施肥水平;PC×FL 表示前茬作物×施肥水平.*、** 分别表示影响显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$),下同.

表 3 不同前茬作物和施肥水平下土壤 TP、AP、Pi 及其不同形态质量分数

Tab. 3 The percentage of TP, AP, Pi and its different forms in soil under different previous crops and fertilization levels

处理	TP	Pi	AP	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
本底	960.00 a	627.73 a	7.96 f	33.51 a	98.78 a	47.24 a	48.51 a	68.38 a	331.3 ab
M+F	932.82 b	592.55 b	18.61 a	26.87 b	83.95 c	40.66 bc	41.97 b	60.33 bc	338.77 a
S+F	972.80 a	583.53 bc	13.20 c	24.70 c	86.57 bc	43.44 b	38.52 bcd	64.37 ab	325.92 ab
P+F	822.09 c	568.12 c	17.77 b	27.53 b	94.14 ab	37.47 cd	40.58 bc	57.62 c	310.78 bc
M-F	770.47 d	508.93 e	13.50 c	21.11 e	66.26 e	31.97 e	36.14 cd	58.99 c	294.46 c
S-F	691.84 f	541.96 d	10.00 e	22.67 d	75.39 d	34.50 de	36.42 cd	52.36 d	320.62 ab
P-F	744.35 e	528.41 de	10.80 d	23.04 d	78.78 cd	32.95 e	35.08 d	50.62 d	307.95 bc

注: M+F 代表常规施肥的玉米前茬处理, S+F 代表常规施肥的大豆前茬处理, P+F 代表常规施肥的花生前茬处理, M-F 代表限肥的玉米前茬处理, S-F 代表限肥的大豆前茬处理, P-F 代表限肥的花生前茬处理. 表中每一列不同小写字母表示本底土壤及不同处理间差异达到显著($P < 0.05$), 下同.

2.2 不同前茬作物和施肥水平下土壤中不同形态 Pi 的质量分数分析

2.2.1 Ca₂-P 的质量分数

经表 2 方差分析可知, 前茬作物、施肥水平和二者交互对土壤 Ca₂-P 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$). 从表 3 可以看出, M+F、S+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理之间的土壤 Ca₂-P 质量分数与本底土壤的差异均达到显著. 土壤 Ca₂-P 质量分数由大到小表现为 P+F、M+F、S+F. P+F 和 M+F 处理显著高于 S+F 处理, P-F 和 S-F 处理显著高于 M-F 处理. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Ca₂-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 21.43%、8.22% 和 16.31%.

2.2.2 Ca₈-P 的质量分数

分析数据得知, 前茬作物和施肥水平对土壤 Ca₈-P 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$). 从表 3 可以看出, M+F、S+F、M-F、S-F 和 P-F 处理的土壤 Ca₈-P 质量分数均显著高于本底土壤, P+F 处理本底土壤之间差异不显著. 土壤 Ca₈-P 质量分数由大到小表现为 P+F、S+F、M+F. P+F 处理显著高于 M+F 处理; P-F 和 S-F 处理显著高于 M-F 处理. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Ca₈-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 21.07%、12.91% 和 16.31%.

2.2.3 Al-P 的质量分数

Al-P 在土壤无机磷总量中占有重要比例. 由表 2 可知, 施肥水平对土壤 Al-P 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$), 前茬作物对土壤 Al-P 质量分数的影响达到显著水平($P < 0.05$). 从表 3 可以看出, 本底土壤 Al-P 质量分数与 M+F、S+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理之间的差异均达到显著. 土壤 Al-P 质量分数由大到小表现为 S+F、M+F、P+F, S+F 处理显著高于 P+F 处理; S-F 处理高于 P-F 处理高于 M-F 处理, 差异均不显著. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Al-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 21.38%、20.59% 和 12.06%.

2.2.4 Fe-P 的质量分数

由表 2 分析可知, 施肥水平对土壤 Fe-P 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$). 从表 3 可以看出, 本底土壤 Fe-P 质量分数与 M+F、S+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 各处理之间的差异均达到显著. 常规施肥水平下, 土壤 Fe-P 质量分数由大到小表现为 M+F、P+F、S+F, 差异均不显著; 限肥水平下由大到小为 S-F、M-F、P-F, 差异均不显著. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Fe-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 13.90%、5.44% 和 13.55%.

2.2.5 O-P 的质量分数

经方差分析可得(表 2), 施肥水平对土壤 O-P 质量分数的影响达到极显著水平($P < 0.01$), 前茬作物和二者交互对土壤 O-P 质量分数的影响达到显著水平($P < 0.05$). 从表 3 可以看出, M+F、P+F、M-F、S-F 和 P-F 处理的土壤 O-P 质量分数均显著低于本底土壤, 而 S+F 处理与本底土壤之间差异不显著. 土壤 O-P 质

量分数由大到小表现为 S+F、M+F、P+F, S+F 处理显著高于 P+F 处理; M-F 显著高于 S-F 和 P-F 处理. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 O-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 2.23%、18.66% 和 12.15%.

2.2.6 Ca₁₀-P 的质量分数

经表 2 方差分析可知, 施肥水平与二者交互对土壤 Ca₁₀-P 质量分数的影响达到显著水平 ($P < 0.05$). 从表 3 可以看出, M-F 和 P-F 处理的土壤 Ca₁₀-P 质量分数显著低于本底土壤, 而 M+F、S+F、P+F 和 S-F 处理与本底土壤之间差异均不显著. 土壤 Ca₁₀-P 质量分数由大到小表现为 M+F、S+F、P+F, M+F 处理显著高于 P+F 处理; S-F 处理高于 P-F 处理, 显著高于 M-F 处理. 与常规施肥水平相比, M-F、S-F 和 P-F 处理土壤 Ca₁₀-P 质量分数分别较 M+F、S+F 和 P+F 处理下降了 13.08%、1.63% 和 0.91%.

2.3 不同前茬作物下冬小麦 PPA 变化及其与土壤磷的关系

不同处理的冬小麦 PPA 如表 4 所示. 冬小麦 PPA 在常规施肥下的由大到小表现为 P+F、S+F、M+F, 处理之间差异不显著; 限肥条件下由大到小表现为 P-F、S-F、M-F, P-F 显著大于 S-F 和 M-F 处理. 与常规施肥相比, M-F、S-F、P-F 处理的小麦 PPA 含量分别较 M+F、S+F、P+F 处理下降了 32.23%、37.43% 和 24.07%. 前茬作物对冬小麦 PPA 含量的影响达到显著水平, 限肥极显著降低了冬小麦 PPA 含量, 但二者的交互作用对冬小麦 PPA 的影响不显著. 土壤的 Pi/TP 在常规施肥的处理中, S+F 处理显著高于 M+F 和 P+F 处理, 分别高出 8.84% 和 12.99%. 在限肥处理中, S-F 处理显著高于 M-F 和 P-F 处理, 分别高出 15.66% 和 19.48%. 前茬作物极显著影响了土壤 Pi/TP 的大小, 但施肥水平和二者交互作用对土壤 Pi/TP 的影响不显著. 土壤 AP/Pi 由大到小表现为 M+F、P+F、S+F, M+F 和 P+F 处理显著高于 S+F 处理, 分别高出 38.95% 和 38.27%. M-F 处理高于 P-F 处理高于 S-F 处理, M-F 处理显著高于 P-F 和 S-F 处理, 分别高出 43.81% 和 10.98%. 前茬作物、施肥水平、二者交互作用都极显著影响了土壤 AP/Pi 的大小.

供植物吸收利用的磷都来源于 Pi, 因此分析冬小麦 PPA 与土壤 Pi 的关系: 不同前茬作物处理的 PPA/Pi 在常规施肥水平下由大到小表现为 P+F、S+F、M+F, 三者之间都达到显著水平; 在限肥水平下由大到小表现为 P-F、M-F、S-F, P-F 处理显著高于 M-F 和 S-F 处理, 分别高了 22.98% 和 24.96%. 前茬作物对 PPA/Pi 的影响达到显著水平, 施肥水平对 PPA/Pi 的影响达到极显著水平.

表 4 不同处理的冬小麦 PPA 及其与土壤磷含量的关系

Tab. 4 PPA of winter wheat and its relationship with soil phosphorus content under different treatments

处理	PPA/(kg·hm ⁻²)	(Pi/TP)/%	(AP/Pi)/%	(PPA/Pi)/%	处理	PPA/(kg·hm ⁻²)	(Pi/TP)/%	(AP/Pi)/%	(PPA/Pi)/%
M+F	29.11 a	64.23 b	3.14 a	4.92 a	P-F	25.14 a	63.73 b	2.05 a	4.77 a
S+F	33.00 a	72.57 a	2.26 b	5.66 a	F _{PC}	7.00 *	31.51 **	126.58 **	5.78 *
P+F	33.11 a	66.68 b	3.13 b	5.83 a	F _{FL}	92.89 **	0.47	229.38 **	36.86 **
M-F	19.73 b	65.84 b	2.65 a	3.87 b	F _{PC×FL}	1.58	3.10	23.00 **	1.44
S-F	20.65 b	76.15 a	1.84 a	3.81 b					

2.4 土壤中不同形态 Pi 对冬小麦 PPA 的贡献

为了进一步探讨土壤 Pi 不同形态与 PPA 之间的关系, 对土壤不同形态 Pi 质量分数和冬小麦 PPA 进行相关分析和通径分析. 由表 5 可知 Ca₂-P、Ca₈-P 和 Al-P 与 PPA 间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), Fe-P 与 PPA 呈显著正相关 ($P < 0.05$), O-P 和 Ca₁₀-P 与 PPA 不相关, 土壤 Pi 形态对 PPA 的直接影响 (通径系数) 由大到小顺序为: Ca₂-P (X_1 : 0.660)、Al-P (X_3 : 0.497)、Fe-P (X_4 : 0.024)、Ca₈-P (X_2 : -0.006)、O-P (X_5 : -0.064)、Ca₁₀-P (X_6 : -0.286). 其中, PPA 与 Ca₂-P (X_1) 的通径系数和相关系数都最大, 说明它的表现贡献最大且直接贡献也最大, 可见 Ca₂-P 是作物最有效的磷源. 此外, Al-P (X_3) 的相关系数 (0.678 **) 排名第 3, 同时通径系数 (0.497) 仅次于 Ca₂-P, 可见其对小麦植株磷累积的直接贡献居第二位. 而 Ca₈-P (X_2)、Fe-P (X_4)、O-P (X_5) 和 Ca₁₀-P (X_6) 的相关系数依次为 0.763 **、0.568 *、0.403 和 0.311, 但因其通径系数都很小, 甚至为负数, 依次为 -0.006、0.024、-0.064 和 -0.286, 推测它们很可能通过与 Ca₂-P 和 Al-P 的相互作用, 即通过对影响其他形态的 Pi 而对植株磷累积产生间接作用. 进一步计算间接通径系数, 分析发现, Ca₈-P 和

Fe-P 都通过 Ca_2 -P 和 Al-P 对冬小麦的植株磷累积有间接作用,可见 Ca_2 -P 和 Al-P 对植株磷累积的贡献较大,而 Ca_8 -P 和 Fe-P 则可能要通过形态转化才能被地上部吸收并累积,但 O-P 和 Ca_{10} -P 与 PPA 的正相关关系不显著,且其通径系数为负值,所以 O-P 和 Ca_{10} -P 这 2 种形态是植物比较难以利用的磷源。

表 5 土壤不同形态 Pi 含量与冬小麦 PPA 的相关分析和通径分析

Tab. 5 Correlation analysis path analysis between contents of different fractions of soil Pi and PPA of winter wheat

指标	相关系数	通径系数	间接通径系数						总和
			X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	
X_1	0.794 **	0.660		-0.005	0.283	0.014	-0.020	-0.138	0.134
X_2	0.763 **	-0.006	0.542		0.315	0.013	-0.021	-0.080	0.769
X_3	0.678 **	0.497	0.376	-0.004		0.014	-0.040	-0.165	0.181
X_4	0.568 *	0.024	0.377	-0.003	0.289		-0.028	-0.091	0.544
X_5	0.403	-0.064	0.210	0.002	0.312	0.010		-0.067	0.467
X_6	0.311	-0.286	0.318	-0.002	0.287	0.008	-0.015		0.596

注: $X_1 \sim X_6$ 分别表示 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P、O-P、 Ca_{10} -P 的质量分数 $\times 10^{-6}$ 。

3 结论与讨论

3.1 不同施肥水平对土壤 Pi 质量分数的影响

本研究结果表明 TP、不同形态 Pi 和 AP 质量分数在常规施肥水平下比在限肥水平下高,即磷肥施入土壤中,可以提高土壤中的磷素水平,这与文献[21]研究结果一致。土壤中磷素有效性受土壤中铝、铁和钙等影响,土壤中的磷可分为无机磷和有机磷两大类,其中,不同形态磷的有效性不同。研究表明我国的石灰性土壤主要以 Pi 为主^[22],约占土壤 TP 的 70%~90%^[23],土壤 Pi 形态又以 Ca-P 为主,约占 Pi 的 70%^[9]。本研究中供试土壤组成以 Pi 为主,6 种形态 Pi 质量分数由大到小为 Ca_{10} -P、 Ca_8 -P、O-P、Fe-P、Al-P、 Ca_2 -P。限肥显著降低总 Pi 含量,并改变土壤不同形态 Pi 占总 Pi 的比例^[24]。限肥可以改变土壤中活性磷组分和中等稳定性磷组分含量,降低土壤中 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P 和 Fe-P 质量分数^[8]。本研究还发现,玉米前茬、大豆前茬和花生前茬的处理下,限肥的土壤总 Pi 质量分数分别较常规施肥的质量分数下降了 14.11%、7.12% 和 6.99%,差异达到显著水平,并且 6 种形态的无机磷含量都受到施肥水平的显著影响,这与文献[24]的研究结果一致。

3.2 不同前茬作物对土壤 Pi 形态及冬小麦植株磷累积贡献的影响

不同前茬作物能够影响冬小麦土壤中 Pi 不同形态含量的变化。不同前茬作物对土壤理化性质的改变,造成对磷素吸收、转移、累积的差异^[25]。有长期定位试验结果表明,土壤中无机磷总量的增加,主要来自 Ca-P、Al-P、Fe-P 的累积^[26]。本研究结果发现,常规施肥水平下,土壤的总 Pi、 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P 含量在花生前茬处理下的含量优于玉米前茬和花生前茬的处理,这可能是由于不同的前茬作物可以通过对土壤结构的影响,不同程度影响土壤中无机磷养分的含量及形态,尤其能够增加土壤的 Ca_2 -P 和 Ca_8 -P,以此改善土壤的肥力。土壤 Fe-P 的含量在玉米前茬处理下达到最高,玉米秸秆还田与肥料中的有机酸活化了土壤中的 Fe-P,使其在还原条件下被还原成可溶性的磷酸亚铁,亚铁离子可迅速氧化成氧化铁,使得玉米前茬处理下 Fe-P 的含量高于其他前茬作物^[14]。本研究还发现,在限肥水平的 3 种前茬作物处理下,玉米前茬处理下的土壤 O-P 质量分数比常规施肥的下降幅度最小, Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 和 Ca_{10} -P 质量分数与其他前茬相比下降幅度较大。大豆前茬下的土壤总 Pi 质量分数占 TP 的比例最高,达到 76.16%,土壤 Al-P、Fe-P 和 Ca_{10} -P 质量分数最高, Ca_2 -P、 Ca_8 -P 和 Fe-P 质量分数与其他前茬相比下降幅度最小。大豆前茬处理的 Pi 占 TP 的比例高,但 AP 质量分数不高,说明大豆前茬的潜在有效磷库大。关于这方面报道较少,有待进一步研究。

无机磷是石灰性土壤磷素的主要组成部分,不同形态的无机磷对作物的贡献存在很大差异,土壤微生物、理化性质、气候及人类活动等条件都会引起不同形态磷之间的转化,导致土壤无机磷的组成不同,从而改变土壤对作物的供磷能力^[8]。本文通径分析研究结果显示土壤 Pi 不同形态对 PPA 的直接影响由大到小为: Ca_2 -P、Al-P、Fe-P、 Ca_8 -P、O-P、 Ca_{10} -P。 Ca_2 -P 对小麦 PPA 的通径系数最大,相关系数最大,表明 Ca_2 -P 是小

麦吸磷的直接来源,它可被作物直接吸收利用,其他形态的 Pi 可通过转化为该形态而被吸收利用。Al-P 的直接通径系数次之,相关系数第三,说明 Al-P 对 PPA 也有直接作用。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Fe-P 、 O-P 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的通径系数很小(除 Fe-P 外均为负),但相关系数依次为 0.763^{**}、0.568^{*}、0.403、0.311,结合间接通径系数推测它们都是通过与 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Al-P 的相互作用,对 PPA 有间接正向作用的结果。 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 是小麦的缓效磷源, O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是小麦比较难以利用的磷源。

本研究中花生前茬处理的磷向地上部转移累积量多,在限肥水平下表现更突出,其中土壤 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 含量最高,可能是由于花生前茬处理的 Fe-P 和 O-P 在向 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 转化。有研究表明,花生作为豆科作物,对磷肥需求较高,施磷肥能够促进花生的生物固氮活动,其根系分泌物对后茬小麦生长具有正向促进作用^[27],因而在提高花生生产量的同时,对后茬粮食作物的增产仍有显著作用^[28]。不同前茬作物对后茬冬小麦的生长也有不同作用。本研究表明施肥水平下,大豆前茬能够有效地提高后茬小麦的产量。磷在土壤中的移动性弱,易固定,有效性低,基本没有挥发和淋溶的损失,所以土壤中磷的盈亏主要由磷肥的施用和作物的消耗所决定^[23]。适量施用磷肥可使冬小麦以较高的累积速率,较早地达到养分累积速率的最高值^[28]。因此,在黄淮海平原南部一年两熟区域,与单一的玉米-小麦种植模式相比,适当采用大豆-小麦和花生-小麦模式交替种植,在一定程度上可促进土壤 Pi 向冬小麦植株磷累积,提高磷素的生物有效性,并可适当调整磷肥施入,从而提高磷肥利用效率,减少该区域农业生产环境的污染。

参 考 文 献

- [1] 吉庆凯,王栋,杨文宝,等.长期施磷对玉米-小麦轮作系统作物产量和磷素吸收及土壤磷积累的影响[J].应用生态学报,2021,32(7):2469-2476.
JI Q K, WANG D, YANG W B, et al. Effects of long-term phosphorus application on crop yield, phosphorus absorption, and soil phosphorus accumulation in maize-wheat rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2469-2476.
- [2] MACDONALD G K, BENNETT E M, POTTER P A, et al. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(7): 3086-3091.
- [3] 冯尚善,崔荣政,王臣.我国新型肥料产业发展现状及展望[J].磷肥与复肥,2020,35(10):1-3.
FENG S S, CUI R Z, WANG C. Development status and prospect of new-type fertilizer industry in China[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020, 35(10): 1-3.
- [4] 杨一,储德韧.肥料大国的国际标准化之路[J].质量与标准化,2018(11):41-42.
YANG Y, CHU D R. The road of international standardization for fertilizer power countries[J]. Quality and Standardization, 2018(11): 41-42.
- [5] 李汉常,谭歆,李宗浩,等.施磷量和灌溉方式对水稻磷素吸收利用的影响[J].灌溉排水学报,2021,40(6):45-52.
LI H C, TAN X, LI Z H, et al. Irrigation and phosphorus fertilization combine to affect uptake and utilization of phosphorus by rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 45-52.
- [6] 赵倩,姜鸿明,孙美芝,等.山东省区试小麦产量与产量构成因素的相关和通径分析[J].中国农学通报,2011,27(7):42-45.
ZHAO Q, JIANG H M, SUN M Z, et al. Correlation and path analysis of yield components of winter wheat varieties with high yield potential cultured in regional trials of Shandong Province[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(7): 42-45.
- [7] 齐鹏,王晓娇,焦亚鹏,等.施磷对陇中黄土高原春小麦耕层土壤磷组分及有效性的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(5):99-106.
QI P, WANG X J, JIAO Y P, et al. Effects of phosphorus application on phosphorus composition and availability of spring wheat topsoil on the Loess Plateau of Longzhong[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(5): 99-106.
- [8] BAI J H, YE X F, JIA J, et al. Phosphorus sorption-desorption and effects of temperature, pH and salinity on phosphorus sorption in marsh soils from coastal wetlands with different flooding conditions[J]. Chemosphere, 2017, 188: 677-688.
- [9] 蒋柏藩,顾益初.石灰性土壤无机磷分级体系的研究[J].中国农业科学,1989,22(3):58-66.
JIANG B F, GU Y C. A suggested fractionation scheme of inorganic phosphorus in calcareous soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1989, 22(3): 58-66.
- [10] 韩晓飞,谢德体,高明,等.紫色土减磷配施有机肥的磷肥效应与磷素动态变化[J].水土保持学报,2016,30(6):207-213.
HAN X F, XIE D T, GAO M, et al. Effect of reduced phosphorus fertilizer combining organic fertilizers and phosphorus dynamics changes in purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 207-213.
- [11] ESCUDEY M, GALINDO G, JUANE F, et al. Chemical forms of phosphorus of volcanic ash derived soils in Chile[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32(5/6): 601-616.
- [12] 刘盛林,孙泽强,董晓霞,等.黄河三角洲盐渍化农田不同轮作方式对土壤理化性质和小麦产量的影响[J].山东农业科学,2020,52(11):

60-64.

LIU S L, SUN Z Q, DONG X X, et al. Effects of different crop rotation systems on soil chemical and physical characteristics and wheat yield in salinity croplands of the Yellow River Delta[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2020, 52(11): 60-64.

- [13] 马艳梅. 长期轮作连作对不同作物土壤磷组分的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(7): 355-358.

MA Y M. Effects of Long-term Crop rotation and Continuous Cropping on Phosphorus forms in Different Crop Soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(7): 355-358.

- [14] 陆文龙, 康春莉, 宋晓娟, 等. 秸秆改良土壤对磷的淋溶能力及其在不同团聚体中垂直分布的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(5): 115-118.

LU W L, KANG C L, SONG X J, et al. Effects of soil improved by straw on leaching ability of phosphorus and vertical distribution in different soil aggregates[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(5): 115-118.

- [15] 官会林, 段庆钟, 沈有信. 不同轮作方式下高原山地红壤肥力变化特征[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(5): 116-121.

GUAN H L, DUAN Q Z, SHEN Y X. Effects of different rotation systems on variation in soil fertility in upland red soil of Yunnan Plateau[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2008, 30(5): 116-121.

- [16] 曹敏建. 耕作学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.

- [17] 王晓军, 孙玉琴, 杨军学, 等. 长期轮作与施肥对马铃薯土壤养分和产量的影响[J]. 中国瓜菜, 2021, 34(3): 42-46.

WANG X J, SUN Y Q, YANG J X, et al. Effects of long-term rotation and fertilization on soil nutrient and yield of potato[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(3): 42-46.

- [18] 张立花, 张辉, 黄玉芳, 等. 施磷对玉米吸磷量、产量和土壤磷含量的影响及其相关性[J]. 中国生态农业学报, 2013(7): 801-809.

ZHANG L H, ZHANG H, HUANG Y F. Effect of phosphorus application on soil available phosphorus and maize phosphorus uptake and yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013(7): 801-809.

- [19] 张黛静, 胡晓, 马建辉, 等. 耕作和培肥对豫中区小麦-玉米轮作系统土壤氮平衡和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1753-1760.

ZHANG D J, HU X, MA J H, et al. Effects of tillage and fertility on soil nitrogen balance and greenhouse gas emissions of wheat-maize rotation system in Central Henan Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1753-1760.

- [20] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, 22(2): 101-102.

- [21] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响[J]. 西北农业大学学报, 1995(3): 51-54.

LYU J L, LIU W G, WANG X D, et al. Effect of long term fertilization on inorganic-P form composition in soil[J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 1995(3): 51-54.

- [22] 刘建玲, 张福锁. 小麦-玉米轮作长期肥料定位试验中土壤磷库的变化 I. 磷肥产量效应及土壤总磷库、无机磷库的变化[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 360-364.

LIU J L, ZHANG F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation I. Crop yield effect of fertilizer P and dynamics of soil total P and inorganic P[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 360-364.

- [23] DOU Z, RAMBERG C, TOTH J, et al. Phosphorus speciation and sorption-desorption characteristics in heavily manured soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 93-101.

- [24] 覃潇敏, 农玉琴, 骆妍妃, 等. 施磷量对玉米-大豆间作根际红壤无机磷形态及磷吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(4): 9-16.

QIN X M, NONG Y Q, LUO Y F, et al. Effects of different phosphorus rates on inorganic phosphorus forms in rhizosphere red soil and phosphorus uptake in maize and soybean intercropping[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(4): 9-16.

- [25] 海龙. 耕作方式及轮作对土壤磷素形态影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.

- [26] 王海龙, 张民, 刘之广, 等. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤无机磷分级的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 318-324.

WANG H L, ZHANG M, LIU Z G, et al. Effects of different phosphorus application levels on the inorganic phosphorus fraction under multi-year location experiment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 318-324.

- [27] 张早立, 范合琴, 李永珍, 等. 花生和玉米前茬根系分泌物对冬小麦幼苗生长及抗旱性的影响[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 361-367.

ZHANG Z L, FAN H Q, LI Y Z, et al. Effects of root exudates from peanut and maize on growth and drought resistance of winter wheat seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2020, 54(3): 361-367.

- [28] 孙彦浩, 郭瑞廉, 曲新民, 等. 花生的磷素营养与磷肥施用的研究[J]. 土壤肥料, 1979(3): 26-29.

SUN Y H, GUO R L, QU X M, et al. Study on phosphorus nutrition and application of phosphorus fertilizer in peanut[J]. Soil and Fertilizers, 1979(3): 26-29.

Content of different fractions of soil inorganic phosphorus and their contributions to phosphorus accumulation in winter wheat with different previous crops and at different fertilizer levels

Shao Yun, Wang Lan, Wang Pengfei, Hou Meng, An Jiahui, Zhao Yuhao

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to confirm the influence of different fractions of soil inorganic phosphorus and the effect on phosphorus accumulation of winter wheat after different preceding crops, a two-factor field experiment was conducted to determine the total phosphorus, the available phosphorus and different forms of inorganic phosphorus contents in the topsoil(0-15 cm) before sowing and after harvesting, with three previous crops(maize, soybeans, and peanuts) at two fertilizer levels(P_2O_5 150 kg/hm² phosphate fertilizer(+F) and P_2O_5 0 kg/hm² phosphate fertilizer(-F)). Meanwhile, the phosphorus accumulation of winter wheat plants in mature period was measured, and the contribution of different fractions of inorganic phosphorus in soil to the accumulation of phosphorus of winter wheat plants was analyzed through path analysis. The results showed that the content of total phosphorus, available phosphorus and the different fractions of inorganic phosphorus in soil were significantly reduced in 0 kg/hm² phosphate fertilizer treatment than that in 150 kg/hm² phosphate fertilizer treatment. On one hand, at the conventional phosphate fertilizer level, the AP content in the preceding maize treatment was highest and significantly higher than others, being 18.61 mg/kg, and the content of the Pi, Fe-P and Ca₁₀-P in soil in the preceding maize treatment were all the highest one in the three previous crops treatments, being 592.55 mg/kg, 41.97 mg/kg and 338.77 mg/kg, respectively. The content of the TP was highest and significantly higher than others, being 972.80 mg/kg, and the content of the Al-P and O-P in soil in the preceding soybean treatment were the highest in the three previous crops treatments, being 43.44 mg/kg and 64.37 mg/kg, severally. The content of Ca₂-P and Ca₈-P in soil in the preceding previous peanut treatment were the highest one in the three previous crops treatments, being 27.53 mg/kg and 94.14 mg/kg, but there was no significant difference in the treatment compared with the previous maize and soybean crops. On the other hand, In 0 kg/hm² phosphate fertilizer, the content of the TP, AP and O-P in soil in the preceding maize treatment were the highest one in the three previous crops treatments and significantly higher than others, being 770.47 mg/kg, 13.50 mg/kg and 58.99 mg/kg, respectively. The content of Pi, Al-P, Fe-P and Ca₁₀-P in soil in the preceding soybean treatment were 541.96 mg/kg, 34.50 mg/kg, 36.42 mg/kg and 320.62 mg/kg, and the Ca₁₀-P content was significantly higher than other crops treatments, respectively. The content of Ca₂-P and Ca₈-P in soil in the preceding peanut treatment were the highest one in the three previous crops treatments, being 23.04 mg/kg and 78.78 mg/kg, respectively. And the phosphorus accumulation of winter wheat plants in the preceding peanut treatment was all the highest one at the two phosphate fertilizer levels, which was 33.11 kg/hm² and 25.14 kg/hm². At the conventional fertilization level, there was no significant difference between the peanut previous treatment and previous treatments of maize and soybean, but under the 0 kg/hm² phosphorus fertilizer level, that peanut previous treatment was significantly higher than the previous treatments of maize and soybean. In addition, the order to direct contribution(showed as the path coefficients) of different fractions of soil inorganic phosphorous on the accumulation of phosphorus of winter wheat plants form the highest to the lowest was as Ca₂-P, Al-P, Fe-P, Ca₈-P, O-P, Ca₁₀-P. And Ca₂-P in soil was the direct source to phosphorus accumulation of wheat plants, Al-P came second, and Fe-P and Ca₈-P in soil were the slow-released phosphorus sources to wheat plants, while O-P and Ca₁₀-P in soil were difficult to be utilized by wheat plants. At different fertilization levels, the previous crop significantly affected the content of TP, AP and Ca₂-P, thereby affecting the phosphorus accumulation in winter wheat plants.

Keywords: winter wheat; preceding crops; inorganic phosphorous fractions; phosphorous accumulation; path analysis