

包膜磷酸二铵配施黄腐酸提高小麦产量 及土壤养分供应强度*

陈琪¹ 刘之广^{1,2†} 张民¹ 李泽丽¹ 曲兆鸣¹ 杨茂峰³ 孙玲丽⁴

(1 土肥资源高效利用国家工程实验室, 山东农业大学资源与环境学院, 泉林黄腐酸肥料工程实验室, 山东泰安 271018)

(2 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, 山东临沂 276700)

(3 山东泉林嘉有肥料有限责任公司, 山东聊城 252800)

(4 众德肥料(平原)有限公司, 山东德州 253100)

摘要 研究包膜磷酸二铵及其配施黄腐酸对小麦产量和土壤养分供应强度的影响, 可为其科学施用提供依据。以磷酸二铵 (P, 150 kg hm⁻² (以 P₂O₅ 计, 下同)、磷酸二铵减磷 20% (P80%, 120 kg hm⁻²) 处理为对照, 通过小麦 (*Triticum aestivum* L) 盆栽试验, 研究了包膜磷酸二铵 (CP) 及其减磷 20% (CP80%)、磷酸二铵配施黄腐酸 (P+FA) 及其减磷 20% 配施黄腐酸 (P80%+FA)、包膜磷酸二铵配施黄腐酸 (CP+FA) 及其减磷 20% 配施黄腐酸 (CP80%+FA) 处理对小麦产量及其构成、各生育期株高、叶绿素相对含量、土壤 pH 及速效养分的影响。结果表明, CP、P+FA、CP+FA 较等磷量 P 处理分别提高小麦产量 7.7%、5.1%、24.0% ($p < 0.05$), 肥料磷素当季利用率分别提高 9.14%、9.74%、17.00 个百分点, 净收益增加 6.3%、1.1%、22.5%; 减磷 20% 时, CP80%、P80%+FA、CP80%+FA 处理较 P 处理分别提高小麦产量 10.6%、7.2% 和 4.8% ($p < 0.05$), 肥料利用率分别提高 19.88%、18.53% 和 11.54 个百分点, CP80%、P80%+FA 处理经济效益显著提高 8.54% 和 10.42%, CP80%+FA 处理收益持平。磷酸二铵包膜及配施黄腐酸均可提高小麦各生育期土壤有效磷含量, 不同施磷处理对土壤中无机氮和速效钾的含量无显著影响, 可满足小麦整个生育期对氮素和钾素的需求。本研究条件下, 包膜磷酸二铵配施黄腐酸有效增加了小麦产量和经济效益、提高了磷肥利用率和土壤养分供应强度, 减磷 20% 依然增产或稳产。

关键词 包膜磷酸二铵; 黄腐酸; 产量; 经济效益; 肥料利用率

中图分类号 S147.5

文献标识码 A

小麦是世界重要的粮食作物之一, 磷对小麦生长发育的作用贯穿于整个生育时期^[1]。因为磷肥在土壤中易被吸附、沉淀及微生物固定, 世界 40% 的土地受缺磷限制^[2]。磷肥的施用改变了农田土壤含磷量和土壤供磷能力^[3], 但磷肥的当季利用率一般为 10%~25%^[4]。冬小麦生育期平均温度较低, 土壤累积磷库活性较差^[5], 提高其磷肥当季利用率, 对于提高冬小麦产量具有重要意义。

肥料颗粒表面包被的物理膜层可有效抑制肥料养分向土壤中的扩散速率, 有效减少因肥料磷素与土壤矿物接触造成的磷素无效化, 从而提高磷素的有效性^[6-7]。控释氮肥已取得了较大的研究进展, 为控释磷肥的研究提供了借鉴。有关报道表明, 土壤中添加黄腐酸亦能够提高磷素有效性, 而且有关腐殖酸类肥料提高肥料利用率已有大量研究^[8-9]。唐晓乐^[10]研究指出, 黄腐酸施入土壤后在一定程度上可刺激土壤微生物

*国家自然科学基金项目 (41571236)、国家重点研发计划项目 (2017YFD0200706) 和山东农业大学泉林黄腐酸肥料工程实验室开放研发基金 (380285) 共同资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571236), the National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFD0200706) and the Open Foundation of Engineering Laboratory for Tranlin Fulvic Acid Based Fertilizer (No. 380285)

†通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuzhiguang8235126@126.com

作者简介: 陈琪 (1993—), 女, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: 15588531978@163.com

收稿日期: 2018-03-20; 收到修改稿日期: 2018-05-16; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

活性,能够在一定程度上对黑土磷素起到活化作用。李志坚等^[11]的研究结果表明,添加腐殖酸制备的增效磷肥,有效提高了磷肥利用率以及小麦产量。

前人研究大多集中于控释尿素及黄腐酸与尿素或其他氮肥配施的研究,然而包膜磷酸二铵及其与黄腐酸配施对小麦生长的协同增效作用鲜有报道。本研究通过小麦盆栽试验,研究了包膜磷酸二铵及其配伍黄腐酸一次性基施对小麦产量及土壤养分供应强度的影响,为提高磷肥利用率及小麦科学施用包膜磷酸二铵和黄腐酸提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 10 月至 2017 年 6 月在山东省泰安市山东农业大学南校区试验站(117°13'E, 36°20'N)进行。供试土壤取自山东农业大学南校区科技创新园试验基地 0~20 cm 耕层土壤,土壤类型为棕壤,在中国土壤系统分类中为普通腐育湿润淋溶土(Typic Hapli-Udic Argosols)。土壤基本理化性质为:有机质 12.10 g kg⁻¹,全氮 0.66 g kg⁻¹,硝态氮 72.45 g kg⁻¹,铵态氮 9.45 g kg⁻¹,全磷 0.32 g kg⁻¹,有效磷 13.50 g kg⁻¹,速效钾 92.32 g kg⁻¹,pH7.83(土水比 1:2.5)。

供试冬小麦品种为“济麦 22”,生育期 239 d,千粒重 40 g。

供试包膜磷酸二铵(N 17.2%, P₂O₅ 44.0%)由土肥资源高效利用国家工程实验室采用小型转鼓包衣工艺制备,膜材为 0.5%石蜡与 5.5%聚氨酯。供试树脂包膜控释尿素(N 43.2%)为金正生态工程集团股份有限公司生产;黄腐酸颗粒(N 2.0%, K₂O 3.0%)由山东泉林嘉有肥料有限责任公司提供;其他肥料为市售普通尿素(N 46.0%)、磷酸二铵(N 18.0%, P₂O₅ 46.0%)和氯化钾(K₂O 60.0%)。

供试容器为陶土盆,上部直径 30 cm,高 36 cm,盆底铺沙 1 kg,每盆装干土 19 kg。小麦季每盆播种小麦 45 粒(发芽率 98%),出苗后间苗使基本苗均为 36 株盆⁻¹。2016 年 10 月 19 日点种,2017 年 6 月 4 日收获。盆栽试验置于户外,通过自动灌溉装置控制盆栽试验土壤含水率^[12-13]保持在田间持水量的 60%以上^[14],除草、除虫按照常规高产栽培模式进行^[15],整个生育期内各处理管理措施相同。

1.2 试验设计

试验共设 9 个处理,分别为:1)磷空白对照(CK);2)常规施磷处理(P);3)常规施肥减磷 20%(P80%);4)包膜磷酸二铵(CP);5)包膜磷酸二铵减磷 20%(CP80%);6)常规施肥配施黄腐酸(P+FA);7)常规施肥减磷 20%配施黄腐酸(P80%+FA);8)包膜磷酸二铵配施黄腐酸(CP+FA);9)包膜磷酸二铵减磷 20%配施黄腐酸(CP80%+FA)。各处理重复 4 次。全量处理 N-P₂O₅-K₂O 用量按照 225-150-75 kg hm⁻²施入,减磷 20%处理按照 225-120-75 kg hm⁻²,黄腐酸处理黄腐酸用量为 45 kg hm⁻²。盆栽试验所施肥料用量均加倍。为排除包膜磷酸二铵中氮素控释干扰,通过调整树脂包膜控释尿素的用量保持各处理控释氮量占总氮投入的 60%^[16]。按照种肥同播的模式播种,所有肥料掺混后一次性基施。

1.3 样品采集

土壤取样时间分别为:苗期 2016 年 11 月 16 日,返青期 2017 年 3 月 12 日,拔节期 2017 年 4 月 6 日,开花期 2017 年 5 月 5 日,成熟期 2017 年 6 月 4 日。取样方法为在小麦植株间均匀取 2 点,采样深度 0~20 cm,土壤充分混匀后带回实验室。土壤自然风干,研磨,分别过 2 mm 和 0.25 mm 筛后保存待测。

小麦收获时,植株秸秆及小麦籽粒置于烘箱中 105℃杀青 15 min,然后转至 65℃烘箱烘干至恒重,其后称重磨细待测。

1.4 样品测定方法

土壤有效磷含量用 0.5 mol L⁻¹的碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;土壤速效钾含量用 1 mol L⁻¹醋酸铵浸提—火焰光度法测定;土壤 pH 使用去 CO₂水按照水土比 2.5:1 浸提—pH 计测定;植株全磷含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 联合消煮—钼锑抗比色法测定;土壤无机氮含量用 0.01 mol L⁻¹ CaCl₂ 浸提(水土比 10:1),连续流动注射分析仪(SEAL, AA3, 德国)测定浸提液中 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量;植物叶片叶绿素相对含

量采用叶绿素仪 (SPAD-502, Minolta, 日本) 测定。土壤湿度记录采用 EC-5 土壤水分传感器 (S-SMC-M005, Onset HOBO, 美国)、温度传感器 (S-THB-M008, Onset HOBO, 美国) 采集数据, HOBOH21-USB 型数据采集器进行数据及图表分析, 数据记录间隔为 30 min 次⁻¹。包膜磷肥养分释放特征采用 25℃ 静水浸提法^[17]进行测定。

1.5 数据分析

试验数据分析采用 Excel 2016 和 SAS 8.2 软件进行处理和统计分析, 不同处理间采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 采用邓肯法 (Duncan) 进行多重比较检验各处理平均值在 $p < 0.05$ 水平差异显著性。

磷素收获指数 (%) = 籽粒吸磷量 / 植株吸磷量 × 100

磷肥农学利用率 (kg kg^{-1}) = (施磷区籽粒产量 - 不施磷区籽粒产量) / 施磷量

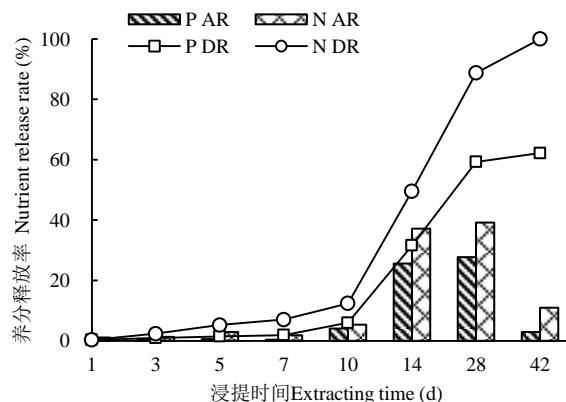
磷肥偏生产力 (kg kg^{-1}) = 施磷区产量 / 施磷量

磷肥利用率 (%) = (施磷处理磷累积量 - 不施磷处理磷累积量) / 施磷量 × 100

2 结果

2.1 包膜磷肥养分释放特征

在 25℃ 静水浸提条件下, 包膜磷酸二铵释放曲线呈反“L”型 (图 1), 磷、氮养分初期释放率 (24 h) 分别为 0.28% 和 1.07%, 满足缓释肥料国家标准^[18]要求。前 10 d 为养分缓慢释放的迟滞期, 此阶段共释放磷素 5.97%、氮素 10.28%; 随后 10~28 d 为养分释放的加速期, 此阶段共释放磷素 53.31%、氮素 76.36%。供试肥料磷、氮养分 42 d 累积释放率分别为 62.21% 和 100.0%, 其中, 磷素释放特性符合缓释肥料国家标准^[18]要求。



注: DR: 培养时段的释放率; AR: 累积释放率; P: 磷; N: 氮 Note: DR: The release rate at different incubation time intervals; AR: Accumulation release rate; P: phosphate; N: nitrogen

图 1 包膜磷酸二铵 25℃ 恒温静水养分释放特征

Fig.1 Nutrient release characteristics of coated diammonium phosphate in static solution at 25℃

2.2 包膜磷肥配施黄腐酸对小麦产量及其构成因素的影响

包膜磷酸二铵与黄腐酸的优化配伍对小麦产量及其构成因素存在不同程度的影响 (表 1)。等磷量条件下, CP 处理较 P 处理增产 7.7% ($p < 0.05$); CP80% 处理较 P 处理增产 7.2% ($p < 0.05$), 然而 P80% 处理较 P 处理减产 9.5% ($p < 0.05$)。此外, 等磷量条件下与 P 处理相比, CP 处理下小麦的千粒重、穗粒数和有效穗数分别提高了 2.8%、6.6% 和 2.7%。等磷量条件下, 较 P 处理, P+FA 处理增产 5.1% ($p < 0.05$), CP+FA 处理增产 24.0%。等磷量条件下, 与 P 处理相比, CP+FA 处理下小麦的千粒重和有效穗数分别提高了 13.2% 和 5.6% ($p < 0.05$)。

表 1 不同处理小麦产量和产量构成因素

Table 1 Yield and yield composition of wheat relative to treatment

处理 Treatment	籽粒实收产量 Grain yield (g pot ⁻¹)	较 P 增产 Increase yield than P treatment (%)	地上部生物量 Aboveground biomass (g pot ⁻¹)	千粒重 1000-grain weight (g)	有效穗数 Number of spikes (p ⁻¹)	穗粒数 Seeds per panicle
CK	78.9f	-20.12	267.6e	47.23b	83.5b	43.5de
P	98.7d	—	273.8ed	49.50ab	85.0b	46.4abcd
P80%	89.4e	-9.48	276.7ed	51.43ab	84.0b	43.6cde
CP	106.3cb	7.70	280.8cd	50.88ab	87.3ab	49.5a
CP80%	105.8cb	7.22	284.3bcd	50.05ab	88.0ab	42.3e
P+FA	103.7c	5.10	293.4ab	47.83b	85.5ab	45.9bcd
P80%+FA	109.1b	10.55	291.9abc	55.08ab	88.0ab	46.9ab
CP+FA	122.4a	24.01	297.0a	56.03a	89.8a	46.8abc
CP80%+FA	103.5c	4.81	288.5abc	52.39ab	85.7ab	49.5a

注: CK: 磷空白对照; P: 常规施磷处理; P80%: 常规施肥减磷 20%处理; CP: 包膜磷酸二铵处理; CP80%: 包膜磷酸二铵减磷 20%处理; P+FA: 常规施肥配施黄腐酸处理; P80%+FA: 常规施肥减磷 20%配施黄腐酸处理; CP+FA: 包膜磷酸二铵配施黄腐酸处理; CP80%+FA: 包膜磷酸二铵减磷 20%配施黄腐酸处理。表内同列数据后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 下同 Note: CK: Control; P: Full-dose (150kg P₂O₅ km⁻²) diammonium phosphate; P80%: Reduced-dose diammonium phosphate (120kg P₂O₅ km⁻²); CP: Coated diammonium phosphate (150kg P₂O₅ km⁻²); CP80%: Reduced-dose coated diammonium phosphate (120kg P₂O₅ km⁻²); P+FA: Full-dose diammonium phosphate plus fulvic acid; P80%+FA: Reduced-dose diammonium phosphate plus fulvic acid; CP+FA: Full-dose coated diammonium phosphate plus fulvic acid; CP80%+FA: Reduced-dose coated diammonium phosphate plus fulvic acid. Means followed by similar lowercase letters within the same column of each item were not significant in difference at 5% level. The same below

2.3 包膜磷肥配施黄腐酸对小麦磷肥当季利用率的影响

肥料利用率主要取决于作物的吸收能力和土壤、肥料供应养分的能力^[19]。等磷条件下, CP、P+FA 处理较 P 处理磷肥当季利用率分别提高了 9.14、9.74 个百分点, 磷肥当季农学利用率增加了 38.2%、25.3%, 磷肥当季偏生产力分别增加了 7.7%、5.1%。减磷 20%时, CP80%、P80%+FA 处理较 P 处理肥料当季利用率分别提高 19.88 和 18.53 个百分点, 磷肥当季农学利用效率分别增加 69.8%、90.7%, 磷肥当季偏生产力分别增加 34.0%、38.3%。等磷和减磷 20%条件下, CP+FA 和 CP80%+FA 处理较 P 处理当季磷肥利用率分别提高 17 和 11.54 个百分点, 较 CP 处理磷肥当季利用率提高 7.86 和 2.40 个百分点。

表 2 不同处理小麦肥料当季利用率

Table 2 Wheat fertilizer use efficiency of the season relative to treatment

处理 Treatment	PUE (%)	△PUE	PAE (kg kg ⁻¹)	PPFP (kg kg ⁻¹)	PHI (%)
CK	—	—	—	—	1.51
P	7.99	—	4.74	23.57	1.63
P80%	15.27	7.28	3.13	26.68	1.59
CP	17.13	9.14	6.55	25.39	1.55
CP80%	27.87	19.88	8.05	31.58	1.42
P+FA	17.73	9.74	5.94	24.77	1.76
P80%+FA	26.52	18.53	9.04	32.59	1.95
CP+FA	24.99	17.00	10.41	29.25	1.84
CP80%+FA	19.53	11.54	7.34	30.87	1.65

注: PUE: 磷肥利用率; △PUE: 较 P 处理提高的磷肥利用率百分点; PAE: 磷肥农学利用效率; PPFP: 磷肥偏生产力; PHI: 磷素收获指数 Note: PUE: Phosphorus use efficiency; △PUE: Percentage points increased over P treatment; PAE: Phosphorus use efficiency of agriculture; PPFP: Partial productivity of Phosphorus fertilizer; PHI: phosphorus harvest index

2.4 包膜磷肥配施黄腐酸对小麦经济效益的影响

包膜磷肥配施黄腐酸处理对小麦经济效益存在不同程度的影响（表 3）。CP、P+FA、CP+FA 处理较等磷 P 处理净收益分别增加 6.3%、1.1%、22.5%；减磷 20%时，CP80%、P80%+FA 处理经济收益较 P 处理分别提高 8.54%和 10.42% ($p<0.05$)，但 CP80%+FA 处理收益与 P 处理持平。

表 3 不同处理小麦经济效益

Table 3 Economic benefit of wheat relative to treatment

处理 Treatment	经济效益 Economic benefits (yuan hm ⁻²)				较 P 增收 Increase income than P (%)
	TI	CNF	LI	NI	
CK	15 829f	2 756	493.5	12 579d	-16.23
P	19 816d	4 306	493.5	15 016c	—
P80%	17 935e	4 012	493.5	13 430d	-10.58
CP	21 330cb	4 868	493.5	15 968c	6.32
CP80%	21 245cb	4 449	493.5	16 303b	8.54
P+FA	20 824c	5 139	493.5	15 191c	1.13
P80%+FA	21 905b	4 823	493.5	16 588b	10.42
CP+FA	24 572a	5 678	493.5	18 400a	22.48
CP80%+FA	20 767c	5 259	493.5	15 015c	-0.06

注：TI：总收益；CNF：肥料费；LI：用工费；NI：净收益。按照当前市场均价，小麦 2 409 yuan t⁻¹；尿素 1 624 yuan t⁻¹；控释尿素 2 369 yuan t⁻¹；磷酸二铵 3 045 yuan t⁻¹；包膜磷酸二铵 4 045 yuan t⁻¹；氯化钾 2 537 yuan t⁻¹；黄腐酸颗粒 1 999 yuan t⁻¹ 计算。播种、田间管理、收获等用工费用为 493.5 yuan hm⁻²。其他费用 8 979 yuan hm⁻²，包括灌溉、农药、种子、其他材料 Note: Based on the current mean market price, TI: Total income; CNF: Cost of P fertilizer; LI: Cost of labor; and NI: Net income. Data in the table were calculated based on the current mean market price; Wheat: 2 409 yuan t⁻¹; Controlled-release DAP: 4 045 yuan t⁻¹; DAP: 3 045 yuan t⁻¹; Urea: 1 624 yuan t⁻¹; Controlled-release urea: 2 369 yuan t⁻¹; Potassium chloride: 2 537 yuan t⁻¹; Fulvic acid: 1 999 yuan t⁻¹; Labor cost for seeding, filed management and harvest: 493.5 yuan hm⁻²; and Other costs including those for machinery, irrigation, pesticides, insecticides, seeds, and other materials and expenses: 8 979 yuan hm⁻²

2.5 包膜磷肥配施黄腐酸对土壤养分状况及 pH 的影响

农田土壤中磷的有效性对小麦的优质高产具有重要作用^[5]。磷肥施用改变了农田土壤含磷量和土壤供磷能力^[3]。不同施磷处理对小麦季土壤有效磷含量的影响十分显著，增施磷肥明显提高了土壤有效磷含量（表 4），且从苗期至成熟期可以看出，土壤有效磷含量呈现先增长后降低再稳定的趋势。在小麦需磷临界期（苗期），P+FA、CP+FA 处理较等磷 P 处理土壤有效磷分别增加 16.2%和 40.1%，CP 处理较 P 处理土壤有效磷含量增加 15.0%。减磷 20%条件下，CP80%、P80%+FA、CP80%+FA 处理较 P 处理有效磷含量分别增加 8.7%、26.1%、23.7%。

氮肥在土壤中可被吸收的形态主要为无机态氮，即硝态氮和铵态氮。小麦是偏好硝态氮作物，不同施磷处理对土壤中硝态氮和铵态氮的含量无显著影响，可满足小麦整个生育期对氮素的需求。从小麦苗期至成熟期无机氮含量呈先升高后降低，至成熟期又微升高的趋势。在小麦养分最大效率期（拔节期），包膜磷酸二铵处理和添加黄腐酸处理无机氮含量略高于普通磷酸二铵处理和空白对照处理。在本试验条件下，各处理土壤速效钾含量在整个生育期呈现降低的趋势。在拔节期为小麦吸钾量的最大效率期，各处理之间无显著差异。

土壤 pH 是影响磷素有效性的一个重要因素，同时也是影响磷素在土壤中存在形态的关键因素^[20]。在小麦整个生育期，pH 呈现先降低后升高再降低的趋势。苗期和返青期土壤 pH 在各处理之间差异不显著；拔节期，等磷量条件下，CP、P+FA 和 CP+FA 处理较 P 处理土壤 pH 分别降低了 0.1、0.06 和 0.15 个单位；

开花期和成熟期, 等磷量条件下, 添加黄腐酸后土壤 pH 较不添加黄腐酸处理降低。

表 4 不同处理土壤养分状况

Table 4 Soil available nutrient status relative to treatment

生育期 Growing period	处理 Treatment	pH	有效磷 Available phosphate (mg kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen (mg kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg kg ⁻¹)
苗期 Seedling stage	CK	7.21a	37.5e	110.7a	10.0c	106.4c
	P	7.26a	41.4ed	114.3a	14.1bc	142.6a
	P80%	7.24a	42.1de	115.6a	12.9bc	122.6c
	CP	7.21a	47.6cb	112.1a	16.3ab	125.0b
	CP80%	7.36a	45.0cd	112.4a	15.9ab	121.0b
	P+FA	7.22a	48.1cb	116.1a	13.8ab	133.6b
	P80%+FA	7.31a	52.2b	116.8a	16.3a	131.6b
	CP+FA	7.33a	58.0a	116.8a	20.8a	128.4b
	CP80%+FA	7.33a	51.2b	114.6a	21.3a	128.0b
返青期 Returning green stage	CK	6.98a	37.5c	136.7ab	8.6a	102.9a
	P	7.01a	60.8ab	136.0ab	10.5a	104.5a
	P80%	7.04a	58.5b	133.9a	9.8a	103.6a
	CP	7.03a	57.3b	139.2ab	8.9a	99.5a
	CP80%	7.01a	64.1ab	138.7a	7.9a	98.8a
	P+FA	7.01a	63.7ab	132.0b	9.1a	103.4a
	P80%+FA	7.02a	71.8a	133.5ab	9.7a	98.8a
	CP+FA	6.87b	71.0a	133.4ab	10.9a	99.0a
	CP80%+FA	6.82b	64.3ab	135.3ab	8.3a	99.3a
拔节期 Jointing stage	CK	7.72a	33.3d	22.9a	7.0a	96.3a
	P	7.63ab	44.6c	26.4a	7.6ab	93.4a
	P80%	7.56bcd	42.0c	24.0a	6.5b	90.1a
	CP	7.52cde	41.3c	23.4a	7.8ab	92.4a
	CP80%	7.53bcd	56.6a	29.0a	6.8b	95.6a
	P+FA	7.57bcd	51.0b	26.5a	9.6a	96.3a
	P80%+FA	7.42e	50.3b	23.7a	8.1ab	92.8a
	CP+FA	7.48de	44.9c	25.0a	8.2ab	94.2a
	CP80%+FA	7.62abc	42.5c	26.0a	11.5a	94.8a
开花期 Flowering stage	CK	7.98a	28.6e	10.2c	6.3a	89.1a
	P	7.99a	32.6d	18.3a	5.8ab	86.5a
	P80%	7.96ab	39.4ab	10.9cb	4.8a	83.8a
	CP	7.99a	40.3c	11.5c	5.2ab	82.7a
	CP80%	7.88bcd	42.2d	14.6b	5.8ab	82.6a
	P+FA	7.84cd	41.4bc	11.0cb	4.8a	82.7a
	P80%+FA	7.81d	43.2a	12.2c	5.2a	84.8a
	CP+FA	7.93abc	43.5ab	10.8bc	4.8ab	85.8a
	CP80%+FA	7.91abcd	41.6bc	14.6b	4.1b	84.2a
成熟期 Maturation stage	CK	7.62ab	28.0e	22.8c	3.3a	79.3a
	P	7.70a	48.2b	41.9b	3.2a	79.5a
	P80%	7.51bc	40.3c	36.6cb	3.5a	77.3b

CP	7.64ab	49.4b	79.0a	3.3a	81.1a
CP80%	7.62ab	53.9a	51.0b	3.2a	82.8a
P+FA	7.56abc	43.3c	38.9b	3.8a	78.8b
P80%+FA	7.45c	35.3d	46.0b	3.2a	87.0a
CP+FA	7.43c	43.1c	40.2b	3.3a	84.5a
CP80%+FA	7.23d	37.2d	35.1cb	3.4a	78.9a

2.6 包膜磷肥配施黄腐酸对小麦株高、叶绿素相对含量的影响

从苗期至开花期,各处理小麦植株逐渐增高,从开花期至成熟期小麦基本停止增高(图 2a)。等磷条件下,苗期 CP、P+FA 处理较 P 处理分别增高了 5.4% 和 3.3%;返青期及拔节期各处理间差异不显著;开花期,CP、P+FA、CP+FA 处理较 P 处理分别增高 4.7%、6.0% 和 4.7%。减磷 20% 条件下,各处理与全量磷处理无显著差异。小麦叶片叶绿素相对含量呈现先增高后降低的趋势(图 2b)。返青期,CP 处理较 P 处理叶绿素相对含量增加 8.2%;苗期、拔节期和开花期,各处理间叶绿素相对含量差异不显著。

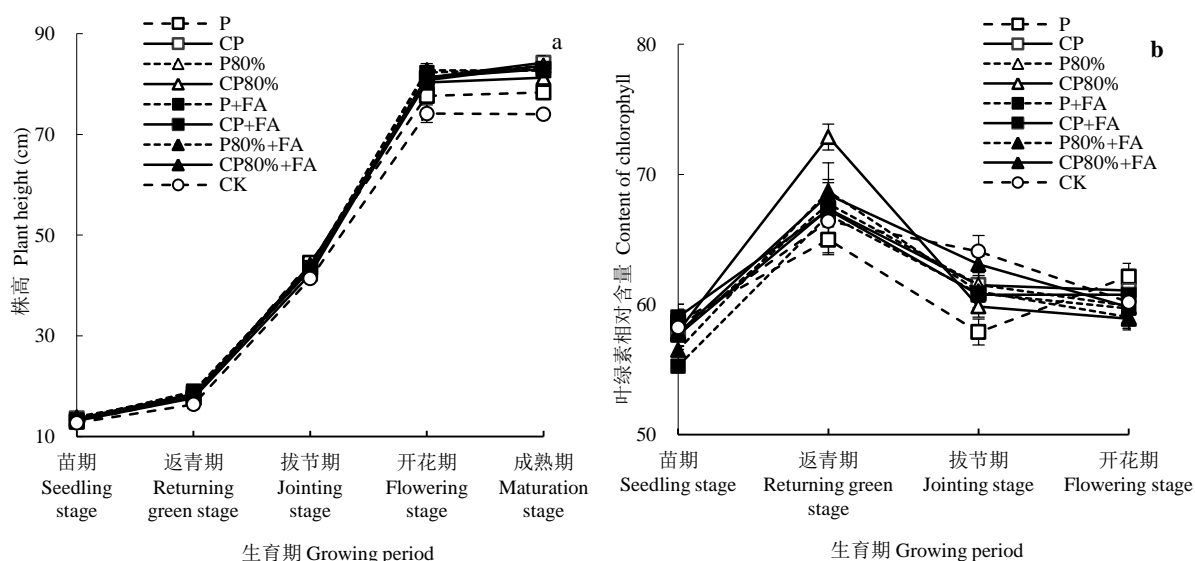


图 2 不同处理小麦株高 (a)、叶片叶绿素相对含量 (b) 变化

Fig.2 Plant height (a) and content of chlorophyll (b) of wheat relative to treatment

3 讨论

3.1 包膜磷酸二铵的养分释放特性

包膜肥料通过在常规化学肥料颗粒外层包衣的方法控制其养分释放,延长养分供应时间,显著提高肥料养分利用率^[21]。包膜肥料施入土壤后,土壤水汽在渗透压的作用下透过膜层,溶解肥料核芯,膜内产生饱和溶液,致使膜内外产生水汽压力差,由此,养分通过膜微孔向外扩散,直至养分释放结束^[22]。本研究供试包膜磷酸二铵的聚氨酯膜材是一种软硬段结构交替构成的嵌段共聚物^[23],具有一定的溶胀性,随着养分释放膜材溶胀度逐渐增大,膜材微孔变大,加快了养分释放,因此,在室内恒温培养条件下表现出反“L”型的养分释放特征(图 1)。然而,相同工艺的聚氨酯包膜尿素则表现出“S”型养分释放特性^[24],这是由于传统磷铵工艺制备的磷酸二铵存在光滑度和圆整度不佳,形状不规整等特点^[25],影响了其流化性能,降低了包膜控释效果。同时,包膜磷酸二铵存在氮、磷养分释放特性差异大的问题(图 1)也限制了其应用。未来就如何改善磷酸二铵颗粒几何空间性质和包膜材料的力学特征并研发适配包膜工艺以提高其养分释放性能尚需进一步探讨。

3.2 包膜磷酸二铵对冬小麦产量和磷肥当季利用率的影响

小麦为磷素养分吸收双峰型作物，磷素养分吸收峰分别为磷临界期（即出苗至越冬前期）和磷素养分最大效率期（即拔节至孕穗期）^[26]。因此，在小麦需磷关键时期供磷具有十分重要的意义。包膜磷酸二铵将核芯与土壤隔离，避免其溶解后磷酸根与土壤中的铁铝氧化物及其水化氧化物、层状铝硅酸盐、碳酸钙等矿物的吸附反应，以及与钙、铁、铝等发生沉淀反应而降低其生物活性，从而提高磷肥利用率。25℃条件下，包膜磷酸二铵在第10~28天期间为养分释放的加速期（图1），而此阶段正好是小麦需磷的第一个高峰，满足磷素临界期养分需求，增加有效分蘖，提高作物产量（表1）。包膜肥料田间实际养分释放特性与室内25℃恒温培养条件有一定的差异，本试验条件下小麦生育期平均气温为10.0℃，变化曲线如图3所示，远低于室内模拟温度，其中，越冬至返青前期平均气温<5℃，植株养分吸收与包膜肥料养分释放均放缓甚至停滞，返青后随着土温回升逐渐加快^[24]，这会延长供试包膜磷酸二铵养分释放期以满足小麦磷素最大效率期的养分需求。本试验条件下，磷酸二铵减磷20%处理，小麦产量较全量磷处理减产9.48%，然而包膜控释磷酸二铵减磷20%较全量磷处理增产7.22%，较不包膜的磷酸二铵减磷20%处理增产16.7%。因此，包膜控释磷肥在减量施用的条件下，显著提高作物产量和当季磷素利用率，是实现磷肥减量增效的有效手段。

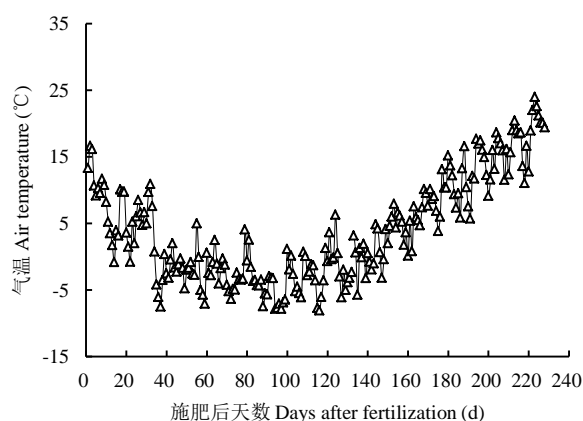


图3 小麦季气温变化曲线

Fig.3 Air temperature variation curve in the wheat season

3.3 添加黄腐酸对冬小麦产量和磷肥当季利用率的影响

黄腐酸是一类由脂肪族和芳香族结构聚合而成的高分子混合物，具有一定的增产、提质作用^[27]。李捷等^[28]研究认为，黄腐酸可促进小麦根系生长，增加穗重、单穗籽粒重和收获指数；李绪行等^[29]研究认为施用黄腐酸可显著提高小麦幼苗的保水能力。本试验条件下，磷酸二铵配施黄腐酸较单施磷肥处理提高了小麦产量5.1% ($p < 0.05$)，提高磷肥利用率9.74个百分点，关键时期有效磷提升了16.2%，原因可能是黄腐酸含氧功能团较多，主要包括羧基、酚羟基等，可通过阳离子交换、螯合、络合和吸附等方式活化土壤中的磷，形成可被植物吸收的FA-磷酸盐络合物^[30-32]，同时有助于土壤腐殖物质—黏土矿物复合体和土壤团聚体形成，减少磷的固定，从而增加土壤有效磷含量，提高了磷肥利用率。施用黄腐酸可补充土壤腐殖质，增加土壤持水量，改善土壤团粒结构，降低土壤容重，改善植株根际透气性。供试黄腐酸采用磺化工艺从植物废料中提取^[33]，组成较复杂，除了芳香族羧基羧酸外，还有一定数量的水溶性碳水化合物、氨基酸、蛋白质、糖酸类物质，具有一定的促生作用，可提高作物根系密度，增加小分子有机酸分泌量，从而活化根际土壤磷库。

3.4 包膜磷酸二铵配施黄腐酸的协同增效机制

包膜磷酸二铵配施黄腐酸处理较包膜磷酸二铵和磷酸二铵配施黄腐酸处理分别增产 15.2% 和 18.0%。显著性检验结果表明, 磷酸二铵包膜或配施黄腐酸以及二者配伍施用对小麦产量的影响均达到极显著水平 ($p < 0.01$), 且包膜的作用大于磷酸二铵添加黄腐酸的作用, 也大于两者的配施作用; 减量 20% 条件下, 包膜磷酸二铵配施黄腐酸对小麦产量的影响仍达到极显著水平, 两者交互作用 > 配施黄腐酸作用 > 包膜作用 (表 5)。本研究中 120、150 kg hm⁻² (以 P₂O₅ 计) 施磷水平下, 包膜磷酸二铵与黄腐酸配施均表现出极显著的协同作用, 可能是包膜肥料在土壤中的释放主要受温度和含水率的影响, 黄腐酸具有较高的比表面积和亲水基团, 改善了土壤结构和孔隙状况, 提高了土壤蓄水保墒能力, 降低了耕层土壤昼夜温差, 提高了包膜磷酸二铵的养分释放性能^[34]。低磷量处理配施黄腐酸增产效果更明显, 可能是由于低磷条件可诱导小麦根系形态结构优化^[35]。由于盆栽试验的局限性, 包膜磷酸二铵与黄腐酸的农学效应和协同增效机制需在田间进一步探讨和验证。

表 5 包膜磷酸二铵配施黄腐酸对产量的影响及显著性检验

Table 5 Effects of application of coated diammonium phosphate with fulvic on yield (g pot⁻¹) and significant test

处理 Treatment	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 225-150-75 kg hm ⁻²	N-P ₂ O ₅ -K ₂ O 225-150-75 kg hm ⁻²
磷肥类型 Types of phosphorus fertilizer		
P0	101.2b	99.2b
P1	114.3a	104.7a
黄腐酸施用量 Dosage of fulvic acid		
FA0	102.5b	97.6b
FA1	113.1a	106.3a
显著性检验 (<i>p</i> 值) Significance test (<i>p</i> values)		
P	0.0003	0.0112
FA	0.0001	0.0011
P×FA	0.0085	0.0003

注: P0: 不包膜; P1: 包膜; FA0: 不施用黄腐酸; FA1: 施用黄腐酸。同列中不同字母表示差异达 5% 显著水平 Note: P0: Not coated; P1: Coated; FA0: Not fulvic acid applied; FA1: Fulvic acid applied. Different letters in the same column indicate significant difference at 5% level

4 结论

供试包膜磷酸二铵养分释放呈反“L”型, 磷、氮养分释放规律存在较大差异, 磷、氮养分 42 d 累积释放率分别为 62.21% 和 100.0%。施用包膜磷酸二铵或添加黄腐酸均可达到增产增收提高磷肥利用率的目的, 且减磷 20% 均可实现稳产或增产效果; 此外, 包膜磷酸二铵配施黄腐酸处理较包膜磷酸二铵和磷酸二铵配施黄腐酸处理显著增产 15.2% 和 18.0%, 表现出协同增效作用, 为实现减肥增效提供了理论依据。磷酸二铵包膜及配施黄腐酸可显著提高小麦各生育期土壤有效磷含量, 有效提高了小麦磷素临界期和磷肥最大效率期的土壤磷素供应强度, 满足小麦关键生育期的养分需求。然而盆栽试验具有一定局限性, 仍需田间长期试验验证。

参考文献

- [1] 阳显斌. 小麦磷高效利用品种筛选及其生理特征研究. 成都: 四川农业大学, 2011
Yang X B. Study on screening for P-efficient wheat cultivar and relevant physiological characteristics (In Chinese). Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2011
- [2] Zhu J, Li M, Whelan M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 2017, 612: 522-537
- [3] 王经纬, 王艳玲, 姚怡, 等. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1240-1250
Wang J W, Wang Y L, Yao Y, et al. Effects of long-term fertilization on phosphorus retention and release of soil aggregates in

- upland red soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1240-1250
- [4] 胡蔼堂. 植物营养学 (下册). 北京: 中国农业大学出版社, 2003
Hu A T. *Plant nutrition (Volume Two) (In Chinese)*. Beijing: China Agricultural University Press, 2003
- [5] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268
Wang Y Z, Chen X, Shi Y. Phosphorus availability in cropland soils of China and related affecting factors (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 260-268
- [6] 杨建浩, 韩晓日, 刘勇涛, 等. 我国磷资源和磷肥施用中存在的问题及对策. *辽宁农业科学*, 2011(6): 36-40
Yang J H, Han X R, Liu Y T, et al. Problems and countermeasures on phosphorous resource and phosphate fertilizer use in China (In Chinese). *Liaoning Agricultural Sciences*, 2011(6): 36-40
- [7] Liu Z G, Li Y C, Zhang S, et al. Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96: 217-224
- [8] 周爽, 其力莫格, 谭钧, 等. 腐植酸提高土壤氮磷钾养分利用效率的机制. *腐植酸*, 2015(2): 1-8
Zhou S, Qilimoge, Tan J, et al. Strategies in efficient utilization of soil NPK nutrients with humic acid amendments (In Chinese). *Humic Acid*, 2015(2): 1-8
- [9] 李春越, 党廷辉, 王万忠, 等. 腐殖酸对农田土壤磷素吸附行为的影响研究. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 77-82
Li C Y, Dang T H, Wang W Z, et al. Influence of humic acid on the adsorption behavior of phosphorus in agricultural soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 77-82
- [10] 唐晓乐. 外源物质对低温条件下黑土磷素活化效应及机理研究. 南京: 南京农业大学, 2012
Tang X L. The phosphorus activation in black soil at low temperature by exogenous activators and its possible mechanisms (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012
- [11] 李志坚, 林治安, 赵秉强, 等. 增效磷肥对冬小麦产量和磷素利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1329-1336.
Li Z J, Lin Z A, Zhao B Q, et al. Effects of value-added phosphate fertilizers on yield and phosphorus utilization of winter wheat (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1329-1336
- [12] 刘秀珍, 郑德聪, 马骏, 等. 精确灌溉与施肥自动化管理系统的研制与实现. *水土保持学报*, 2006, 20(5): 197-200
Liu X Z, Zheng D C, Ma J, et al. Accurate to irrigate and apply fertilizer automatic research of administrative system and realize (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5): 197-200
- [13] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析. *农业工程学报*, 2013, 29(15): 72-82
Sun S, Yang X G, Li K N, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(15): 72-82
- [14] 刘之广, 张民, 耿计彪, 等. 一种用于作物盆栽试验的自动灌溉与水分监控装置: CA104663373B. 2017
Liu Z G, Zhang M, Geng J B, et al. An automatic irrigation and moisture monitoring device for crop pot experiment: CA104663373B (In Chinese). 2017
- [15] 皇凡宇, 王桂兰, 张慎举, 等. 小麦超高产栽培农艺农机配套技术规程. *农业科技通讯*, 2016(12): 169-171
Huang F Y, Wang G L, Zhang S J, et al. Technical specification for super high yield cultivation of wheat with agronomic machinery (In Chinese). *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2016(12): 169-171
- [16] Zheng W, Zhang M, Liu Z, et al. Combining controlled-release urea and normal urea to improve the nitrogen use efficiency and yield under wheat-maize double cropping system. *Field Crops Research*, 2016, 197: 52-62
- [17] 颜晓, 张民, 魏宗强, 等. 控释尿素养分速测及在田间土壤中氮素释放率研究. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 167-171
Yan X, Zhang M, Wei Z Q, et al. Fast measurement for nutrition release rate of controlled release urea and study of its nitrogen

- release rate in the field (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 167-171
- [18]刘刚, 万连步, 张民, 等. 缓释肥料: GB/T 23348—2009. 北京: 中国标准出版社, 2009
Liu G, Wan L B, Zhang M, et al. Slow release fertilizer: GB/T 23348—2009 (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2009
- [19]林国林, 云鹏, 陈磊, 等. 小麦季磷肥施用对后作玉米的效果及土壤中无机磷形态转化的影响. 土壤通报, 2011, 42(3): 676-680
Lin G L, Yun P, Chen L, et al. Residual effects of phosphate fertilizer applied to winter wheat on following maize and transformation of phosphate fractions in soil (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 676-680
- [20]梁冰, 郑泽, 姜利国, 等. 不同 pH 值对磷矿废石磷素浸出特性影响的实验研究. 地球与环境, 2015, 43(3): 363-368
Liang B, Zheng Z, Jiang L G, et al. Effects of different pH on phosphorus leaching characteristics of shukongping phosphate waste rock (In Chinese). Earth and Environment, 2015, 43(3): 363-368
- [21]张民, 杨越超, 宋付朋, 等. 包膜控释肥料研究与产业化开发. 化肥工业, 2005, 32(2): 7-13
Zhang M, Yang Y C, Song F P, et al. Study and industrialized development of coated controlled release fertilizers (In Chinese). Chemical Fertilizer Industry, 2005, 32(2): 7-13
- [22]段路路. 缓控释肥料养分释放机理及评价方法研究. 山东泰安: 山东农业大学, 2009
Duan L L. Mechanism and evaluation of nutrient release of slow and controlled-release fertilizers (In Chinese). Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2009
- [23]刘宁. 聚氨酯弹性体阻尼性能的研究. 北京: 北京化工大学, 2013
Liu N. Studies on damping properties of elastomers based on polyurethane (In Chinese). Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013
- [24]张民, 陈宝成, 李成亮, 等. 控释肥养分释放与作物养分吸收同步性研究. 成都: 全国磷复肥行业年会, 2015
Zhang M, Chen B C, Li C L, et al. Study on synchronism between nutrient release of controlled-release fertilizer and nutrient uptake of crops. Chengdu: The National Annual Conference of Phosphatic Compound Fertilizer, 2015
- [25]周学克, 念吉红. 云峰分公司磷酸二铵生产工艺特点. 磷肥与复肥, 2012, 27(5): 24-28
Zhou X K, Nian J H. Process characteristics of DAP production in Yunfeng Branch Company (In Chinese). Phosphate & Compound Fertilizer, 2012, 27(5): 24-28
- [26]姜宗庆, 封超年, 黄联联, 等. 施磷量对小麦物质生产及吸磷特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 628-634
Jiang Z Q, Feng C N, Huang L L, et al. Effects of phosphorus application on dry matter production and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2006, 12(5): 628-634
- [27]李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 641-648
Li J, Yuan L, Zhao B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3): 641-648
- [28]李捷, 李凤民, 刘洪升. 黄腐酸拌种对春小麦产量和水分利用效率的影响. 应用生态学报, 2000, 11(5): 727-730
Li J, Li F M, Liu H S. Effect of Mixing seed with fulvic acid on spring wheat yield and its water use efficiency (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(5): 727-730
- [29]李绪行, 殷蔚蕙, 邵莉楣, 等. 黄腐酸增强小麦抗旱能力的生理生化机制初探. 植物学报, 1992, 9(2): 44-46
Li X X, Yin W Y, Shao L M, et al. Preliminary investigation of physiological and biochemical mechanisms on drought-resistance of wheat enhanced by leaf-spraying fulvic acid (In Chinese). Chinese Bulletin of Botany, 1992, 9(2): 44-46
- [30]王斌, 马兴旺, 许咏梅, 等. 腐植酸对灰漠土棉田土壤无机磷形态的影响. 新疆农业科学, 2007, 44(3): 312-317

- Wang B, Ma X W, Xu Y M, et al. Effects of humic acids on inorganic phosphorus forms in gray desert soil and soil of cotton field (In Chinese). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2007, 44(3): 312-317
- [31] Sinha M K. Organo-metallic phosphates: IV. The solvent action of fulvic acid on insoluble phosphates. *Plant & Soil*, 1972, 37(3): 457-467
- [32] Weir C C, Soper R J. Interaction of phosphates with ferric organic complexes. *Canadian Journal of Soil Science*, 1963, 43(2): 393-399
- [33] 刘荣乐, 周长青, 李洪法, 等. 一种碱法和亚铵法混合草浆黑液、碱法和亚铵法混合浓缩草浆黑液及其制备方法: CN 101172731 A. 2008
- Liu R L, Zhou C Q, Li H F, et al. Preparation of blend or concentrated black liquid from straw pulp based on alkali and ammonia sulfite methods: CN 101172731 A (In Chinese). 2008
- [34] 王苓, 张民, 刘之广, 等. 不同土壤水吸力对控释尿素养分释放特征的影响, *土壤学报*, 2017, 54(2): 435-444
- Wang L, Zhang M, Liu Z G, et al. Influence of soil water suction on nutrient release characteristic of controlled-release urea (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 435-444
- [35] 邵继锋, 陈荣府, 董晓英, 等. 不同磷水平对红壤溶液中锰、铝、镁和钙浓度变化以及小麦生长的影响. *土壤*, 2016, 48(1): 36-41
- Shao J F, Chen R F, Dong X Y, et al. Effects of different phosphorus rates on variations of Mn, Al, Mg and Ca concentrations in soil solution and wheat growth in acid red soil (In Chinese). *Soils*, 2016, 48(1): 36-41

Effects of Application of Coated Diammonium Phosphate in Combination with Fulvic Acid Improving Wheat Yield and Soil Nutrient Supply Intensity

CHEN Qi¹ LIU Zhiguang^{1,2*} ZHANG Min¹ LI Zeli¹ QU Zhaoming¹ YANG Maofeng³ SUN Lingli⁴

(1 National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Recourses and Environment, Engineering Laboratory for Tranlin Fulvic Acid Based Fertilizer, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China)

(2 State Key Laboratory of Nutrition Resources Integrated Utilization, Kingenta Ecological Engineering Group Co., Linshu, Shandong 276700, China)

(3 Shandong Quanlin Jiayou Fertilizer Limited Liability Company, Liaocheng, Shandong 252800, China)

(4 Zhongde Fertilizer (Pingyuan) Co. Ltd, De'zhou, Shandong 253100, China)

Abstract 【Objective】 Phosphorus is one of the most important nutrients for plant growth, and increasing application of P fertilizer has been an effective way to improve crop yield. However, plant available phosphorus is always relatively low in soil, because more often than not a large portion of phosphorus is bound to or reacted with iron and aluminum oxides/hydroxides. To solve the problem, one option is to insulate phosphate from soil by coating phosphorus fertilizer with polymer material. Fulvic acid (FA) is considered to be an effective conditioner for better phosphorus use efficiency, because owing to its specific physicochemical properties, it is ready to get complexed with metal ion, which in turn releases desorbed phosphorus in soil. However, so far little has been reported on coating diammonium phosphate and applying FA as its amendment. This paper addresses effects of coated diammonium phosphate (CP) in combination with lignin-based FA on wheat (*Triticum aestivum* L.) yield and soil nutrient supply intensity, in an attempt to provide a scientific basis for proper usage of P fertilizer. 【Method】 A pot experiment was carried out to explore effects of combined application of CP and FA on wheat yield, yield composition, chlorophyll content, plant height, SPAD, soil pH, and phosphorus use efficiency. The experiment was designed to have eight

treatments, i.e. Treatment P (application of diammonium phosphate (DP) at 150 kg hm⁻² P₂O₅), Treatment P80% (application of DP at 120 kg hm⁻² P₂O₅, 80% of the rate of Treatment P), Treatment CP (application of coated DP at 150 kg hm⁻² P₂O₅), Treatment CP80% (application of coated DP at 120 kg hm⁻² P₂O₅, 80% of the rate of Treatment CP), Treatment P+FA (application of DP at 150 kg hm⁻² P₂O₅ plus FA), Treatment P80%+FA (application of DP at 120 kg hm⁻² P₂O₅ plus FA), Treatment CP+FA (application of coated DP at 150 kg hm⁻² P₂O₅ plus FA), and Treatment CP80%+FA (application of coated DP at 120 kg hm⁻² P₂O₅ plus FA), of which the first two were set as control. 【Result】 Results show that wheat yields in treatments P+FA, CP and CP+FA increased significantly by 7.7%, 5.1% and 24.0%, phosphorus use efficiency by 9.14%, 9.74% and 17.00%, respectively, and economic benefit by 6.3%, 1.1% and 22.5%, respectively, as compared Treatment P, whereas wheat yield in P80%+FA, CP80% and CP80%+FA increased by 10.6%, 7.2% and 4.8%, and phosphorus use efficiency by 19.88%, 18.53% and 11.54% as compared with Treatment P80%. However, economic benefit increased by 8.9% and 10.5% in Treatment P80%+FA and Treatment CP, but decreased by 1.10% in Treatment CP+FA. Both of CP and FA improved soil available phosphorus during the whole wheat growth period. At the seedling stage when phosphorus was critical to wheat, soil available phosphorus increased by 16.9%~24.0% and 21.6%~40.1% in Treatments of P+FA and CP+FA and by 15.0% in Treatment CP as compared with Treatment P, whereas it increased by 8.7%, 26.1% and 23.7%, respectively, in Treatments P80%+FA, CP80% and CP80%+FA as compared with Treatment P80%. 【Conclusion】 All the findings in this experiment demonstrate that application of CP in combination with FA as basal could significantly raise soil available phosphorus supply intensity at the critical period of wheat, and consequently improve wheat yield, phosphorus use efficiency and economic benefit as a result of their synergistic interaction. This practice has a great potential for large-scale extension to satisfy the increasing demand for controlled-release fertilizers because it is cost-effective and environmentally friendly. However, due to certain limitation of the pot experiment, a long-term field experiment and further studies should be done to explore synergistic interaction and mechanism of the application of CP and FA increasing yield and phosphorus use efficiency.

Key words Coated diammonium phosphate; Fulvic acid; Yield; Economic benefit; Fertilizer use efficiency

(责任编辑: 陈荣府)