

# 施用不同有机物料对作物产量及 灌漠土磷组分的影响

冶赓康<sup>1</sup>, 俄胜哲<sup>1,2</sup>, 袁金华<sup>2</sup>, 赵天鑫<sup>1</sup>,  
路港滨<sup>1</sup>, 张鹏<sup>1</sup>, 刘雅娜<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃兰州 730070)

**摘要:**于2011—2022年在甘肃省张掖市开展长期定位试验, 设置无肥对照(CK)、常规施化肥(NP)、70%常规施化肥+牛粪(NF)、70%常规施化肥+沼渣(ZZ)、70%常规施化肥+污泥(WN)、70%常规施化肥+鸡粪(JF)、70%常规施化肥+菌渣(JZ)和70%常规施化肥+猪粪(ZF)共8个处理, 探讨6种不同有机物料代替30%化肥对作物产量及土壤磷组分的影响, 为化肥与有机物料配施提高磷素利用效率提供科学依据。结果表明:WN、JF和ZF处理小麦籽粒产量较NP处理增加7.0%~9.4%;NF、ZZ、WN、JF、ZF处理玉米籽粒产量较NP处理增加4.4%~6.5%。添加有机物料显著影响土壤全磷、有效磷、无机磷组分含量及有效磷、无机磷组分占全磷比例;除沼渣外,其余5种有机物料处理全磷较NP处理增加8.6%~96.5%;6种有机物料处理有效磷含量及其占全磷比例较NP处理增加107.6%~480.1%、78.9%~226.3%,其中ZF和JF增幅最高;ZF处理Ca<sub>2</sub>-P含量最高,较NP处理增加1144.9%,各有机物料处理Ca<sub>2</sub>-P占全磷比例较NP处理增加60%~568%。ZF和JF处理土壤Ca<sub>8</sub>-P含量较NP处理增幅最大,分别增加207.6%和199.1%。JF、JZ和ZF处理Ca<sub>8</sub>-P占全磷比例较NP处理增加29.7%~60.9%;NF、WN、JF和ZF处理Al-P占全磷比例较NP处理增加30.8%~123.1%;WN处理Fe-P占全磷比例较NP处理增加83.6%。综上,有机物料与化肥配施能够达到减施化肥、作物增产的目的,同时能够增加土壤全磷、有效磷、Ca<sub>2</sub>-P、Ca<sub>8</sub>-P、Al-P和Fe-P含量。

**关键词:**有机物料;磷组分;小麦-玉米轮作;长期定位试验;灌漠土

**中图分类号:**S153.6; S158.3 **文献标志码:**A

## Effects of different organic materials returning on crop yield and phosphorus composition in irrigated desert soil

YE Gengkang<sup>1</sup>, E Shengzhe<sup>1,2</sup>, YUAN Jinhua<sup>2</sup>, ZHAO Tianxin<sup>1</sup>,  
LU Gangbin<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>1</sup>, LIU Yana<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Institute of Soil and Fertilizer and Save Water Agriculture, Gansu Academy of  
Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** A long-term positioning experiment was carried out in Zhangye City, Gansu Province from 2011 to 2022. A total of 8 treatments were set up: no fertilizer control (CK), conventional fertilizer application (NP), 70% conventional fertilizer application + cow manure (NF), 70% conventional fertilizer application + biogas residue (ZZ), 70% conventional fertilizer application + sludge (WN), 70% conventional fertilizer application + chicken manure (JF), 70% conventional fertilizer application + bacterial residue (JZ) and 70% conventional fertilizer application + pig manure (ZF). The effects of six types of organic materials, used as substitutes for 30% of the fertilizer, on crop yield and soil phosphorus composition were investigated. This study aims to provide a scientific basis for improving phosphorus utilization efficiency through the combined application of fertilizers and organic materials. The results showed that the grain yield of WN, JF and ZF treatment increased by 7.0%~9.4% compared

with that of the NP treatment. The yield of corn treated with NF, ZZ, WN, JF, and ZF increased by 4.4% to 6.5% compared to that treated with NP. The addition of organic materials significantly affected total phosphorus, available phosphorus, inorganic phosphorus components and the proportion of available phosphorus and inorganic phosphorus components in total phosphorus. Except biogas residue, the total phosphorus of the other 5 organic materials was increased by 8.6%~96.5% compared with that of the NP treatment. Compared with the NP treatment, the content of available phosphorus and its proportion in total phosphorus increased by 107.6%~480.1% and 78.9%~226.3%, respectively, among which ZF and JF had the highest increase. The ZF treatment exhibited the highest  $\text{Ca}_2\text{-P}$ , showing an increase of 1 144.9% compared to the NP treatment. Additionally, the proportion of  $\text{Ca}_2\text{-P}$  in the organic material treatments increased by 60% to 568% relative to the NP treatment. Compared with the NP treatment, the content of  $\text{Ca}_8\text{-P}$  in soil treated with ZF and JF increased by 207.6% and 199.1%, respectively. The proportion of  $\text{Ca}_8\text{-P}$  in JF, JZ and ZF treatment increased by 29.7%~60.9% compared with the NP treatment. The proportion of Al-P in the NF, WN, JF and ZF treatments increased by 30.8%~123.1% compared with the NP treatment. The proportion of Fe-P in the WN treatment increased by 83.6% compared with the NP treatment. In summary, the combined application of organic materials and fertilizer achieved the purpose of reducing fertilizer application and increasing crop yield, and increased the contents of total phosphorus, available phosphorus,  $\text{Ca}_2\text{-P}$ ,  $\text{Ca}_8\text{-P}$ , Al-P and Fe-P in soil.

**Keywords:** organic materials; phosphorus component; wheat-maize rotation; long term positioning test; irrigated desert soil

磷素是作物必需的大量营养元素之一,土壤缺磷会导致作物产量和品质下降。我国每年有 1/3 农田缺磷,施用磷肥是提升土壤供磷能力的主要措施之一,但过量施用磷肥会导致土壤磷素累积,造成水体富营养化等一系列生态环境问题<sup>[1-2]</sup>。土壤磷主要有无机磷和有机磷 2 种化学形态,无机磷是主体,一般占土壤磷库的 60%~80%。磷对植物的有效性取决于磷形态,各形态无机磷与有效磷相关性研究表明,土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 与有效磷的相关性较大, $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和 O-P 与有效磷的相关性较小<sup>[3]</sup>。也有研究认为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  的活性虽然高于 Al-P,但含量低于 Al-P,所以对有效磷的贡献小于 Al-P<sup>[4]</sup>。灌漠土主要分布于我国漠境地区的内陆河流域和黄河流域,占我国国土面积 50% 以上,涉及新疆、甘肃、宁夏、青海、陕西、内蒙、山西及河南等省之部分或大部,但漠土因土壤钙含量较高、有效磷不足而影响作物产量和品质。因此,深入研究长期施肥下该土壤的磷组分及其有效性非常必要。

有机肥料养分齐全,肥效稳而长,同时可为土壤微生物提供碳源,有利于土壤中磷形态转化,改善土壤结构,提高土壤综合生产力。国内外学者对不同有机物料还田效应的大量研究表明,长期施用有机肥和磷肥能够显著提高耕层土壤全磷、无机磷和有机磷总量,施用有机肥可以改变土壤中磷的形态<sup>[2,5]</sup>。有研究认为有机肥能显著增加土壤无机磷

库,但对有机磷库无显著影响。杨莉琳等<sup>[6]</sup>研究发现,磷肥与有机肥混施后,褐土内  $\text{Ca}_2\text{-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量迅速提高,且均高于单施磷肥处理;同时,在相当长的一段时间内降低了磷肥中的磷素向 O-P 的转化率,说明有机肥有助于降低褐土内磷的闭蓄化水平,并能维持较长时间。索炎炎等<sup>[7]</sup>研究发现,磷肥用量过高会抑制土壤磷酸酶活性和花生植株内磷含量的提高;而有机肥与磷肥合理配施不仅能显著提高土壤磷酸酶活性、活性磷组分( $\text{H}_2\text{O-P}$  和  $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ ) 和中等稳定性磷组分( $\text{NaOH-Pi}$  和  $\text{NaOH-Po}$ ) 含量,还能提高花生产量及植株各部位磷含量。

有机物料种类丰富,物质组成差异明显,因此不同有机物料对土壤性质的影响不同。全孝飞等<sup>[8]</sup>研究认为,长期施猪粪可显著增加土壤全磷和有效磷含量。路宇等<sup>[9]</sup>研究表明,秸秆在腐熟过程中部分无机磷转化为有机磷。陶士锋等<sup>[10]</sup>研究发现,提高土壤有机质含量有助于改善磷的生物有效性,抑制和延缓磷的渗漏流失。目前,国内外研究对有机物料还田与土壤磷组分及作物产量的关系仍缺乏系统的论证,对不同有机物料还田的短期研究开展较多,但长期施用不同有机物料与土壤磷组分之间的关系尚无定论。本研究利用 2011 年开始的长期定位试验,在较长时间尺度上研究不同施肥处理条件下作物产量及土壤全磷、有效磷、无机磷组分等指标的演变规律,揭示长期有机培肥对土壤

磷组分的影响,同时分析作物产量稳定性和可持续性,以期与土壤磷组分的关系,以期为西北灌漠土区科学施肥和农业可持续发展提供决策依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验始于 2011 年,在位于河西走廊中部灌区的甘肃省张掖市甘州区甘肃省农业科学院试验场(38°50' N,100°22' E)实施。该地区海拔 1 570 m,干旱少雨,昼夜温差大,日照时间长。年蒸发量 2 048 mm,年平均降水量 127 mm,全年平均气温 7℃左右。年日照时数 2 932~3 085 h,>10℃有效积温 1 837~2 870℃,无霜期 153 d 左右。试验土壤类型为灌漠土,试验开始前耕层(0~20 cm)土壤 pH 值为 8.67,有机碳 9.4 g·kg<sup>-1</sup>,全氮 1.0 g·kg<sup>-1</sup>,全磷 0.82 g·kg<sup>-1</sup>,全钾 22.2 g·kg<sup>-1</sup>,全盐 0.53 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 68.31 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 16.7 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 109.1 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.2 试验设计

试验采取随机区组设计,共 8 个处理,分别为无

肥对照(CK)、常规施化肥(NP)、70%常规施化肥+牛粪(NF)、70%常规施化肥+沼渣(ZZ)、70%常规施化肥+污泥(WN)、70%常规施化肥+鸡粪(JF)、70%常规施化肥+菌渣(JZ)和 70%常规施化肥+猪粪(ZF),3 次重复,小区面积为 30 m<sup>2</sup>(5 m×6 m)。供试作物为小麦(‘陇福 2 号’)和玉米(‘武科 2 号’)。CK 处理不施肥。NP 处理小麦氮肥施用量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施用量为 90 kg·hm<sup>-2</sup>;玉米氮肥施用量为 180 kg·hm<sup>-2</sup>,磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施用量为 120 kg·hm<sup>-2</sup>。不同有机物料处理的化肥用量为 NP 处理的 70%;各有机物料处理的年有机质投入量相等,均为 4 500 kg·hm<sup>-2</sup>,有机物料具体用量随有机质含量而定,有机物料多年养分平均含量及平均施入量见表 1。供试化肥为尿素 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>和磷酸二铵(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>;污泥来源于张掖市甘州区污水处理厂,畜禽粪便来自试验地附近的规模化养殖企业,菌渣和沼渣来源于当地食用菌企业和附近农户。有机物料重金属含量如表 2 所示。

表 1 供试不同有机物料化学性状及其平均施用量

Table 1 Chemical properties and average application rates of different organic materials

有机物料 Organic material	pH	有机质 Organic matter /(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total nitrogen /(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total phosphorus /(g·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total potassium /(g·kg <sup>-1</sup> )	平均施用量 Average input amount /(kg·hm <sup>-2</sup> )
牛粪 Cattle manure	8.26	372.56	17.62	7.01	26.71	13001.17
沼渣 Biogas residue	9.61	397.73	11.31	7.89	29.89	11964.26
污泥 Sludge	7.41	283.66	16.16	11.62	17.66	16893.30
鸡粪 Chicken manure	7.94	284.20	15.20	10.78	28.32	16981.64
菌渣 Mushroom residue	7.90	312.20	6.12	6.41	19.10	14821.77
猪粪 Pig manure	7.88	347.31	19.80	18.65	28.47	13769.17

表 2 供试不同有机物料的重金属含量/(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 2 Heavy metal content of different organic materials

有机物料 Organic material	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb
牛粪 Cattle manure	59.76	31.69	76.72	0.31	18.57
沼渣 Biogas residue	59.34	27.60	66.19	0.19	18.54
鸡粪 Chicken manure	92.46	84.65	319.56	0.28	23.98
菌渣 Mushroom residue	42.25	19.30	44.88	0.17	20.16
猪粪 Pig manure	55.19	401.97	940.58	0.47	21.67
农业行业标准 NY 525-2021	≤150			≤3	≤50
污泥 Sludge	119.45	78.80	251.74	0.58	33.89
国家标准 National standard	<500	<500	<1200	<3	<300

### 1.3 栽培管理措施

试验轮作模式为小麦-小麦-玉米,即 2011—2013 年、2015—2016 年、2018—2019 年和 2021 年种植小麦,2014 年、2017 年和 2020 年种植玉米,一年一熟。小麦于 3 月中下旬播种,播量 750 万粒·hm<sup>-2</sup>,行距 15 cm,7 月收获。玉米于 4 月底播种,密度 8 万株·hm<sup>-2</sup>,行距 50 cm,株距 25 cm,覆全膜,10 月收获。作物收获后翻耕 20 cm,根茬还田,秸秆移除。玉米全生育期灌水 5~6 次,小麦灌水 3~4 次,各处理的灌水量、灌水时间相同,各小区每次灌水 5~6 m<sup>3</sup>,灌溉等田间耕作管理措施与当地大田相同。有机物料自然堆沤 3 个月,其间翻堆 3 次。施用前过 1 cm 筛。有机物料和化肥都作基肥,播前地表撒施,然后翻耕,翻耕深度 20 cm,地表耙平后播种。

## 1.4 样品采集

各生长季作物成熟时,每小区按照“五点取样法”交叉取 5 个样点,每点连根取 1 m<sup>2</sup>的植物样品,混合后自然风干,根、茎、叶分开,脱粒称重,计算籽粒产量。在相应采样点同时采集 0~20 cm 土层土壤样品,并测定该土层土壤容重。5 点采样样品混合后于阴凉通风处风干,全部研磨后过 2 mm 尼龙筛;四分法取一半土样研磨,过 0.3 mm 尼龙筛。2 mm 土壤样品用于测定速效养分含量和土壤 pH 值,0.3 mm 土壤样品用于测定土壤磷组分含量及土壤基本理化性质。测定土壤磷组分的样品于 2021 年 7 月采集。

## 1.5 分析测试方法

采用熔融法测定土壤全磷 (total phosphorus, TP) 含量<sup>[11]</sup>;采用 0.5 mol · L<sup>-1</sup> NaHCO<sub>3</sub> 浸提,钼锑抗比色法测定土壤有效磷 (Olsen-P)<sup>[11]</sup>;采用顾益初等<sup>[12]</sup>方法提取土壤中各形态磷,具体方法为:0.25 mol · L<sup>-1</sup> NaH<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浸提磷酸二钙 (Ca<sub>2</sub>-P), 1 mol · L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>Ac 浸提磷酸八钙 (Ca<sub>8</sub>-P), 0.3 mol · L<sup>-1</sup> 柠檬酸钠-Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>-NaOH 浸提闭蓄态磷 (O-P), 0.5 mol · L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提磷酸十钙 (Ca<sub>10</sub>-P), 0.1 mol · L<sup>-1</sup> NaOH-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 浸提铁磷酸盐 (Fe-P), 0.5 mol · L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>F 浸提铝磷酸盐 (Al-P);使用 pH 计 (水:土=2.5:1) 测定土壤 pH 值。小麦、玉米秸秆和籽粒中磷含量测定采用硫酸-双氧水联合消解-钼锑抗比色法测定<sup>[11]</sup>。

## 1.6 数据计算与处理

1.6.1 数据计算 磷平衡的计算公式为:

$$P_s = P_i - P_{ot} = (P_f + P_m) - P_o \quad (1)$$

式中,  $P_s$  为磷盈余量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $P_i$  为磷总投入量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $P_o$  为作物磷携出量 (kg · hm<sup>-2</sup>), 即作

物秸秆和籽粒中的磷含量;  $P_f$  为化肥磷投入量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $P_m$  为有机肥磷投入量 (kg · hm<sup>-2</sup>)。

作物磷携出量计算公式为:

$$P_o = W_s \times CP_s + W_g \times CP_g \quad (2)$$

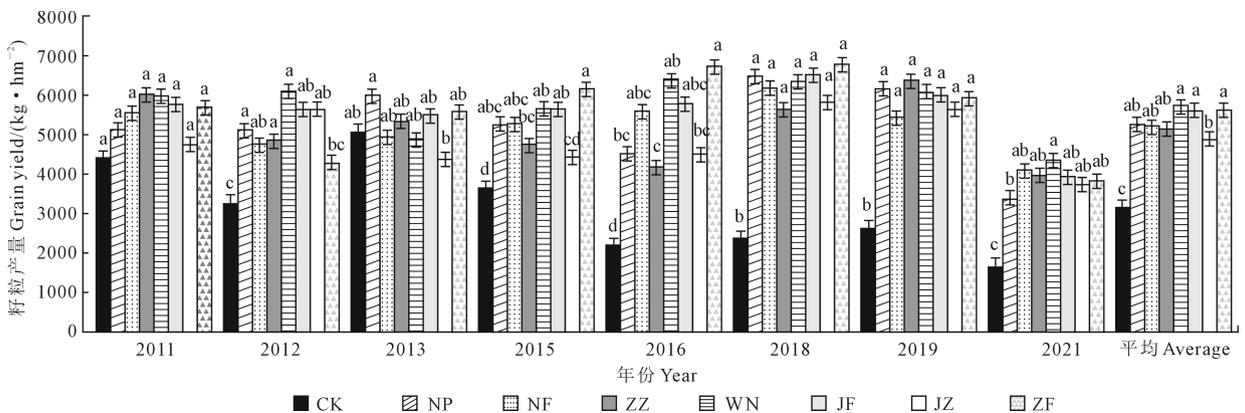
式中,  $W_s$  为作物秸秆产量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $CP_s$  为作物秸秆磷含量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $W_g$  为作物籽粒生物量 (kg · hm<sup>-2</sup>);  $CP_g$  为作物籽粒磷含量 (kg · hm<sup>-2</sup>)。

1.6.2 数据处理 采用 Excel 2016 进行图表绘制,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析、多重比较 (Duncan 法) 和相关性分析,采用 Canoco 5 进行冗余分析 (RDA)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同有机物料处理对作物籽粒产量的影响

不同有机物料对小麦和玉米籽粒产量的影响分别见图 1 和图 2。由于环境因素影响,不同年份间各处理产量并未呈现规律性变化,但随有机物料施用年限的增加,不同有机物料处理间的差异逐渐明显。种植小麦 8 个年份中,除 2013 年 JZ 处理外,其余年份各有机物料及 NP 处理小麦籽粒产量均高于对照;2016 年 ZF 处理籽粒产量较 NP 处理增加显著。由小麦籽粒产量平均值可知,WN、JF 和 ZF 处理小麦产量较 NP 处理分别增加 9.4%、7.0% 和 7.2%;同时,NF、ZZ、WN、JF 和 ZF 处理小麦产量较 JZ 增加显著 (图 1)。3 个种植玉米年份中,玉米产量稳中有升,各有机物料及 NP 处理玉米籽粒产量较 CK 增加显著,但各有机物料处理间差异不显著;由玉米籽粒产量平均值可知,各有机物料处理玉米产量均大于 NP 处理,NF、ZZ、WN、JF 和 ZF 处理玉米产量较 NP 处理增加 4.4%~6.5% (图 2)。



注:不同小写字母表示处理间在  $P < 0.05$  水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the  $P < 0.05$  level. Same as below.

图 1 不同有机物料处理对小麦籽粒产量的影响

Fig.1 Effects of different organic material treatments on wheat grain yield

## 2.2 土壤磷素的投入量和携出量

利用 11 a 土壤磷投入量和作物地上部磷携出量,计算土壤磷素总投入量、总携出量以及玉米、小麦携出量(表 3)。土壤磷投入量是化肥和有机物料中磷元素之和,常规施肥土壤磷总投入量为  $1\ 260\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,6 种有机物料处理较常规施肥明显增加了土壤磷总投入量,其磷投入量是常规施肥的 1.6 倍~3.4 倍,其中 ZF、JF 和 WN 处理磷总投入量明显高于其他有机物料处理。有机物处理磷总携出量较对照显著增加,鸡粪处理磷总携出量较常规施肥显著增加。6 种有机物料处理小麦磷携出量较对照显著增加,污泥和鸡粪处理携出量最高;6 种有机物料处理玉米磷携出量较对照亦显著增加,各处理间差异不显著。作物收获后根茬还田,秸秆移出,计算土壤磷盈余量,其中猪粪处理的盈余量高于其他有机物料处理,其次为鸡粪处理,常规施肥处理的盈余量最低。

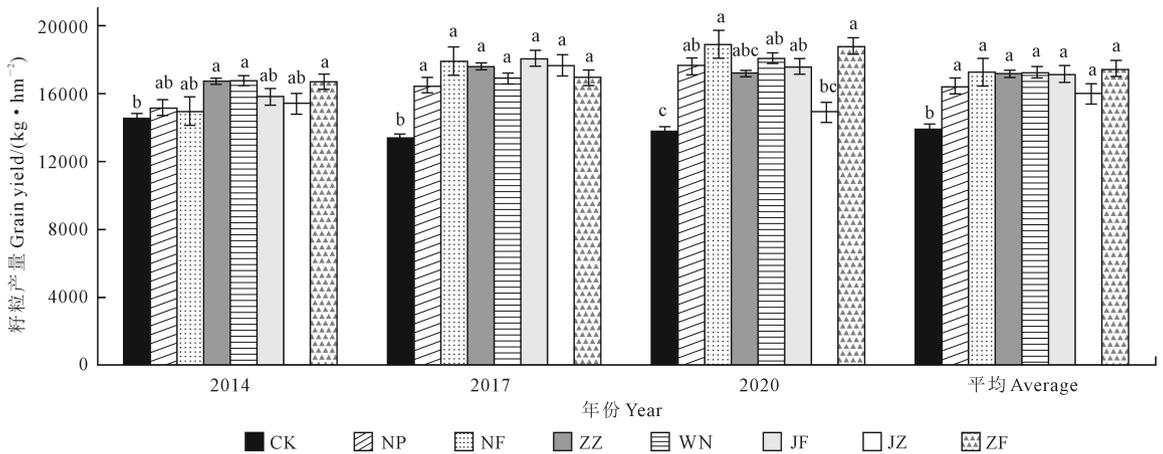


图 2 不同有机物料处理对玉米籽粒产量的影响

Fig.2 Effects of different organic material treatments on corn grain yield

表 3 不同处理土壤磷总投入量和携出量/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 3 Total input and removal amount of soil phosphorus in different treatments

处理 Treatment	总投入 Total input	小麦携出 (8 a) Amount of wheat carried out	玉米携出 (3 a) Amount of corn carried out	总携出 (11 a) Total output	盈余量 Surplus
CK	0.0	195.5d	229.4b	424.9d	-424.9h
NP	1260.0	316.1abc	283.6a	599.7bc	660.3g
NF	2170.3	316.7abc	295.9a	612.6abc	1557.7e
ZZ	2009.9	308.7bc	299.3a	608.0abc	1401.9f
WN	2960.7	348.3a	298.3a	646.7ab	2314.0c
JF	3205.4	353.9a	300.4a	654.3a	2551.1b
JZ	2295.8	290.2c	281.5a	571.6b	1724.2d
ZF	4246.0	343.9ab	303.0a	646.9ab	3599.1a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among different treatments at  $P < 0.05$  level, the same below.

## 2.3 不同有机物料处理对土壤全磷和有效磷含量的影响

土壤有效磷含量决定土壤磷素有效性,有效磷含量占全磷含量比例越高,表明活性越高<sup>[13]</sup>。有研究表明土壤全磷与有效磷存在显著正相关关系,土壤有效磷含量的增加能够提高作物产量<sup>[14-15]</sup>。由表 4 可知,NF、WN、JF、JZ 和 ZF 处理土壤全磷含量较 CK 和 NP 处理显著增加,较 CK 增加  $144.5 \sim 1\ 116.6\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增幅为  $13.7\% \sim 105.7\%$ ;较 NP 处理增加了  $95.1 \sim 1\ 067.1\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,增幅为  $8.6\% \sim 96.5\%$ 。6 种有机物料处理土壤有效磷含量及其占全磷比例较 CK 和 NP 处理显著增加,有机物料处理土壤有效磷含量及其占全磷比例较 NP 处理分别增加  $107.6\% \sim 480.1\%$  和  $78.9\% \sim 226.3\%$ 。同时,不同有机物料之间土壤全磷和有效磷及有效磷含量占全磷比例差异显著,JF 和 ZF 处理土壤全磷和有效磷含量最高。

表 4 不同有机物料处理土壤全磷和有效磷含量

Table 4 Effects of different organic material treatments on the contents of total phosphorus and available phosphorus in soil and their proportion to total phosphorus

处理 Treatment	全磷 Total phosphorus /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效磷 Olsen-P /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	有效磷占全磷比例 Ratio of Olsen-P to TP/%
CK	$1056.5 \pm 35.2e$	$10.3 \pm 1.6e$	1.0f
NP	$1106.0 \pm 48.8de$	$21.1 \pm 1.3d$	1.9e
NF	$1345.4 \pm 93.8c$	$83.0 \pm 10.3b$	6.2a
ZZ	$1210.1 \pm 68.2cde$	$46.7 \pm 4.8c$	3.9d
WN	$1772.3 \pm 200.8b$	$84.7 \pm 7.0b$	4.8c
JF	$2173.1 \pm 173.2a$	$117.8 \pm 2.0a$	5.4b
JZ	$1303.8 \pm 55.4c$	$43.8 \pm 6.4c$	3.4d
ZF	$2121.1 \pm 96.0a$	$122.4 \pm 2.1a$	5.8ab

## 2.4 不同有机物料处理对土壤无机磷组分的影响

土壤无机磷组分按活性程度可分为有效磷源 ( $\text{Ca}_2\text{-P}$ )、中等活性磷源 ( $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ )、潜在磷源 ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$ )。整体来看,土壤无机磷含量占全磷比例大小表现为:中等活性磷源 ( $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ ) > 潜在磷源 ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$ ) > 有效磷源 ( $\text{Ca}_2\text{-P}$ )。除 ZZ 外,其余各有机物料处理较 NP 和 CK 显著提升了土壤中的  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  等无机磷组分含量(表 5)。

**2.4.1 不同有机物料处理对土壤有效磷源 ( $\text{Ca}_2\text{-P}$ ) 的影响** 由表 5、表 6 可知,6 种有机物料处理土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量及其占全磷比例较 CK 和 NP 处理显著增加。各有机物料处理间,ZF、JF、WN、NF 处理土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量显著高于 ZZ 和 JZ,其中 ZF 处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量最高,较 CK 和 NP 分别增加 1 862.9% 和 1 144.9%,各有机物料处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量占全磷比例较 CK 和 NP 处理分别增加 328.6%~894.1% 和 60.0%~568.0%。

**2.4.2 不同有机物料处理对土壤中活性磷源 ( $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ ) 的影响** 由表 5 可知,除 ZZ 外,其余 5 种有机物料处理土壤  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量较 CK 和 NP 处理显著增加,其中 ZF 和 JF 处理增幅最大,

较 NP 处理分别增加 207.6%、199.1%。除 ZZ 外,其余 5 种有机物料处理土壤  $\text{Al-P}$  含量较 CK 和 NP 处理显著增加,WN 处理增幅最大,较 NP 处理增加 256.9%。不同有机物料对土壤  $\text{Fe-P}$  含量的影响与  $\text{Al-P}$  明显不同,仅 WN、JF 和 ZF 处理  $\text{Fe-P}$  较 CK 和 NP 处理显著增加,WN 处理增幅最大,较 NP 处理增加 197.7%。从表 6 可以看出,JF、JZ 和 ZF 处理  $\text{Ca}_8\text{-P}$  占全磷比例较 NP 处理显著增加 29.7%~60.9%,JF 和 ZF 处理  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量占全磷比例最高;NF、WN、JF 和 ZF 处理  $\text{Al-P}$  含量占全磷比例较 NP 处理显著增加 30.8%~123.1%,WN 处理  $\text{Al-P}$  含量占全磷比例最高;WN 处理  $\text{Fe-P}$  含量占全磷比例较 NP 处理显著增加 83.6%;6 种有机物料处理中,WN 处理土壤中等活性磷源 ( $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ ) 占全磷比例最高。

**2.4.3 不同有机物料处理对土壤潜在磷源 ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$ ) 的影响** 由表 5 可知,6 种有机物料处理土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$  含量较 CK 和 NP 处理有下降趋势,但差异不显著,各有机物料处理间差异也不显著。各有机物料处理土壤潜在磷源 ( $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 $\text{O-P}$ ) 占全磷比例较 CK 和 NP 处理均降低,ZF 和 JF 处理占比

表 5 不同有机物料处理对无机磷组分的影响 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 5 Effects of different organic material treatments on inorganic phosphorus components

处理 Treatment	有效磷源 Effective phosphorus	中等活性磷源 Moderately active phosphorus			潜在磷源 Potential phosphorus	
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Al-P}$	$\text{Fe-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	$\text{O-P}$
CK	17.5±1.9e	115.0±10.0c	40.5±2.5f	61.2±4.1d	412.5±16.3a	16.5±3.3a
NP	27.6±1.7e	141.9±17.0c	71.9±5.9ef	73.5±7.9d	463.5±10.7a	13.3±0.7a
NF	121.3±15.1c	208.1±38.2b	108.3±20.7d	82.1±5.4cd	409.2±93.5a	15.8±4.3a
ZZ	60.1±1.6d	149.5±7.3c	72.9±4.4ef	73.9±3.1d	407.0±64.8a	16.0±0.8a
WN	114.1±11.3c	244.4±28.7b	256.6±38.0a	218.8±46.4a	442.7±38.6a	13.6±1.3a
JF	261.0±11.6b	424.5±45.4a	215.7±20.4b	133.1±9.3b	442.2±42.6a	16.7±3.3a
JZ	52.7±8.7d	217.2±21.5b	87.4±5.9de	82.1±6.5cd	448.0±6.0a	14.4±1.9a
ZF	344.4±13.2a	436.6±51.0a	180.6±22.3c	109.2±3.0bc	412.8±18.9a	16.4±5.3a

注:  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  和  $\text{O-P}$  分别表示二钙磷、八钙磷、铝磷、铁磷、十钙磷和闭蓄态磷。下同。

Note:  $\text{Ca}_2\text{-P}$ ,  $\text{Ca}_8\text{-P}$ ,  $\text{Al-P}$ ,  $\text{Fe-P}$ ,  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ , and  $\text{O-P}$  represent, calcium diphosphate, calcium octaphosphate, aluminum phosphate, iron phosphate, calcium pentaphosphate, and occluded phosphate, respectively. The same below.

表 6 不同有机物料处理对无机磷组分占全磷比例的影响 / %

Table 6 Effects of different organic material treatments on the proportion of inorganic phosphorus in total phosphorus

处理 Treatment	有效磷源 Effective phosphorus	中等活性磷源 Moderately active phosphorus			潜在磷源 Potential phosphorus	
	$\text{Ca}_2\text{-P}$	$\text{Ca}_8\text{-P}$	$\text{Al-P}$	$\text{Fe-P}$	$\text{Ca}_{10}\text{-P}$	$\text{O-P}$
CK	1.7±0.1g	10.9±0.8e	3.8±0.1e	5.8±0.2b	39.0±1.3ab	1.6±0.3a
NP	2.5±0.3g	12.8±1.3cd	6.5±0.6d	6.7±0.9b	41.9±1.2a	1.2±0.0ab
NF	9.0±0.5c	15.4±1.9bc	8.0±1.0c	6.1±0.5b	30.8±8.6cd	1.2±0.4ab
ZZ	5.0±0.2e	12.4±0.6cd	6.0±0.3d	6.1±0.1b	33.7±6.0bc	1.3±0.1ab
WN	6.4±0.2d	13.8±0.9bcd	14.5±1.3a	12.3±1.6a	25.3±4.8de	0.8±0.0c
JF	12.1±1.1b	19.7±3.4a	9.9±0.8b	6.1±0.9b	20.3±1.0e	0.8±0.1c
JZ	4.0±0.5f	16.6±1.2b	6.7±0.2d	6.3±0.5b	34.4±1.3abc	1.1±0.2bc
ZF	16.2±0.4a	20.6±1.8a	8.5±0.7c	5.2±0.4b	19.5±1.6e	0.8±0.3c

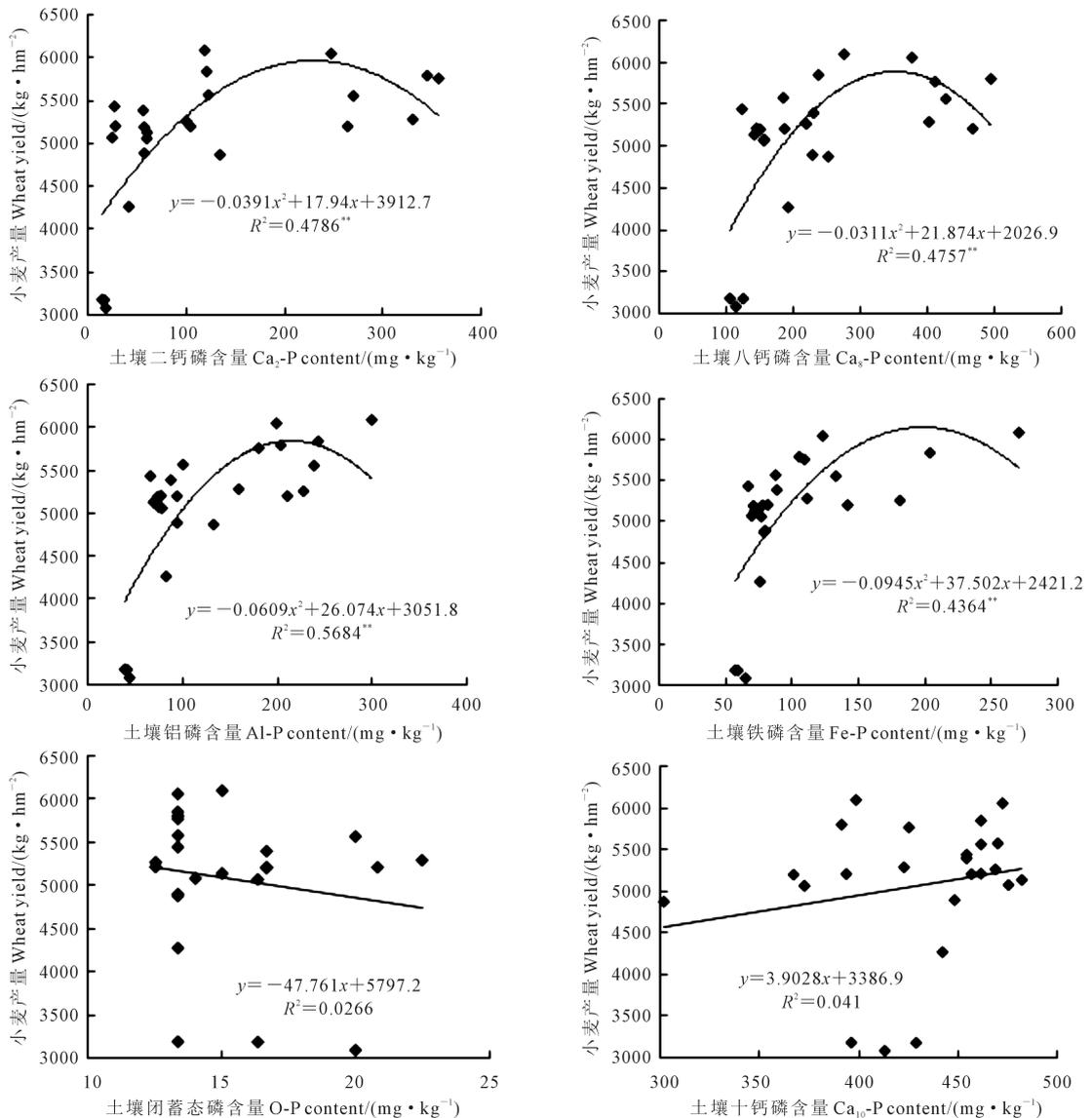
最小;NF、ZZ、WN、JF 和 ZF 处理土壤  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量占全磷比例较 NP 处理显著降低 19.6%~114.9%,ZF、JF 和 WN 处理  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  含量占全磷比例最低;WN、JF 和 ZF 处理土壤 O-P 含量占全磷比例较 NP 处理显著降低 33.3%。

### 2.5 不同土壤无机磷组分与作物产量的关系

为探讨作物产量与土壤磷组分的关系,将小麦、玉米籽粒产量与不同土壤磷组分含量做回归方程和相关性分析。由图 3 和图 4 可知, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$  和 Al-P 与小麦、玉米产量二次曲线方程显著相关, $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量分别为  $229.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $233.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小麦、玉米产量达到最大,分别为  $5970.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $17920.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $\text{Ca}_8\text{-P}$  含量分别为  $351.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $346.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小麦、玉米产

量达到最大,分别为  $5873.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $17756.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;当 Al-P 含量分别为  $214.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $192.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小麦、玉米产量达到最大,分别为  $5842.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $17767.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。Fe-P 与小麦产量显著相关,当 Fe-P 含量为  $198.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,小麦产量达到最大,为  $6141.8 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。O-P 与  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  与小麦、玉米产量相关性不显著。

为进一步探讨各磷组分对作物产量的影响,以小麦和玉米产量为响应变量, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P、O-P、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  为解释变量进行冗余分析(RDA)。如图 5 所示,用箭头表示环境因子,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头与原点的连线长度代表着某个环境因子与作物产量分布间相关程度,连线越长,说明相关性越



注: \* 和 \*\* 分别表示在  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  水平上显著相关,下同。

Note: \* and \*\* respectively indicate significant correlation at the  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$  levels, the same below.

图 3 土壤无机磷组分与小麦产量关系

Fig.3 Relationship between soil inorganic phosphorus components and wheat yield

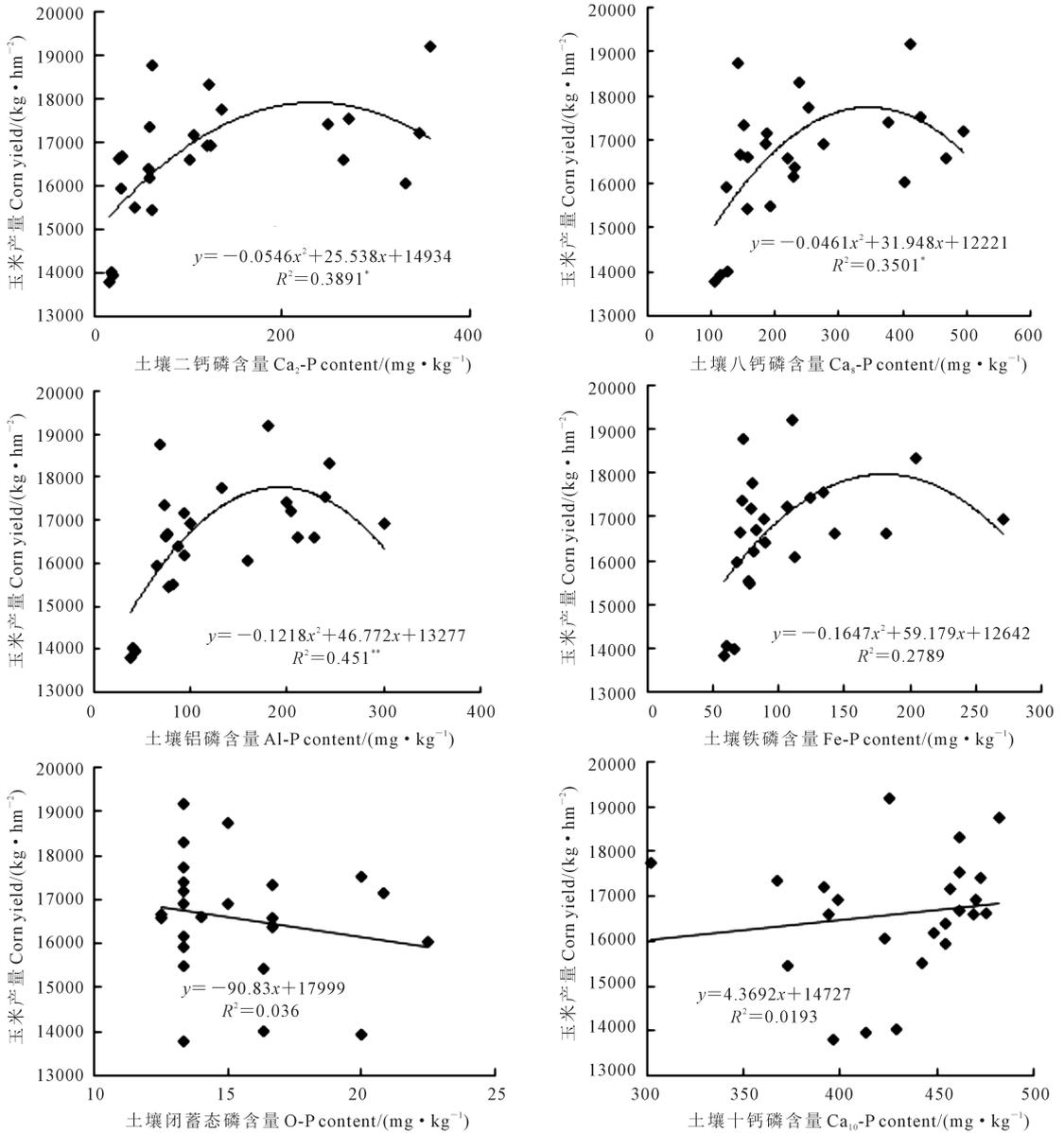


图 4 土壤无机磷组分与玉米产量关系

Fig.4 Relationship between soil inorganic phosphorus components and corn yield

大,反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高;反之越低。小麦和玉米产量易受到 Al-P、Fe-P、Ca<sub>8</sub>-P、Ca<sub>2</sub>-P 影响,其中 Al-P 与作物产量相关性极显著( $P=0.002^{**}$ )。

### 2.6 土壤有效磷与各无机磷组分间的关系

对各无机磷组分与有效磷做线性回归方程和相关性分析(图 6),可以看出,有效磷与各无机磷组分的决定系数( $R^2$ )表现为 Ca<sub>2</sub>-P( $0.8576^{**}$ )>Ca<sub>8</sub>-P( $0.8242^{**}$ )>Al-P( $0.6561^{**}$ )>Fe-P( $0.2891^{**}$ )>Ca<sub>10</sub>-P( $0.0134$ )>O-P( $0.013$ ),其中有效磷含量与 Ca<sub>2</sub>-P 含量相关性最为显著( $Y = 0.3328x + 24.67$ )。结合 RDA 分析图(图 7)可知,有效磷含量随 Ca<sub>2</sub>-P、

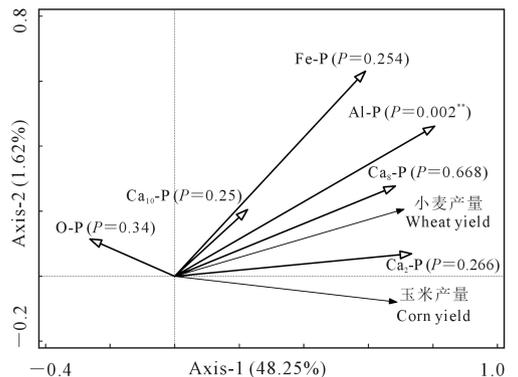


图 5 作物产量与土壤无机磷组分 RDA 排序图

Fig.5 RDA sequence diagram of crop yield and soil inorganic phosphorus components

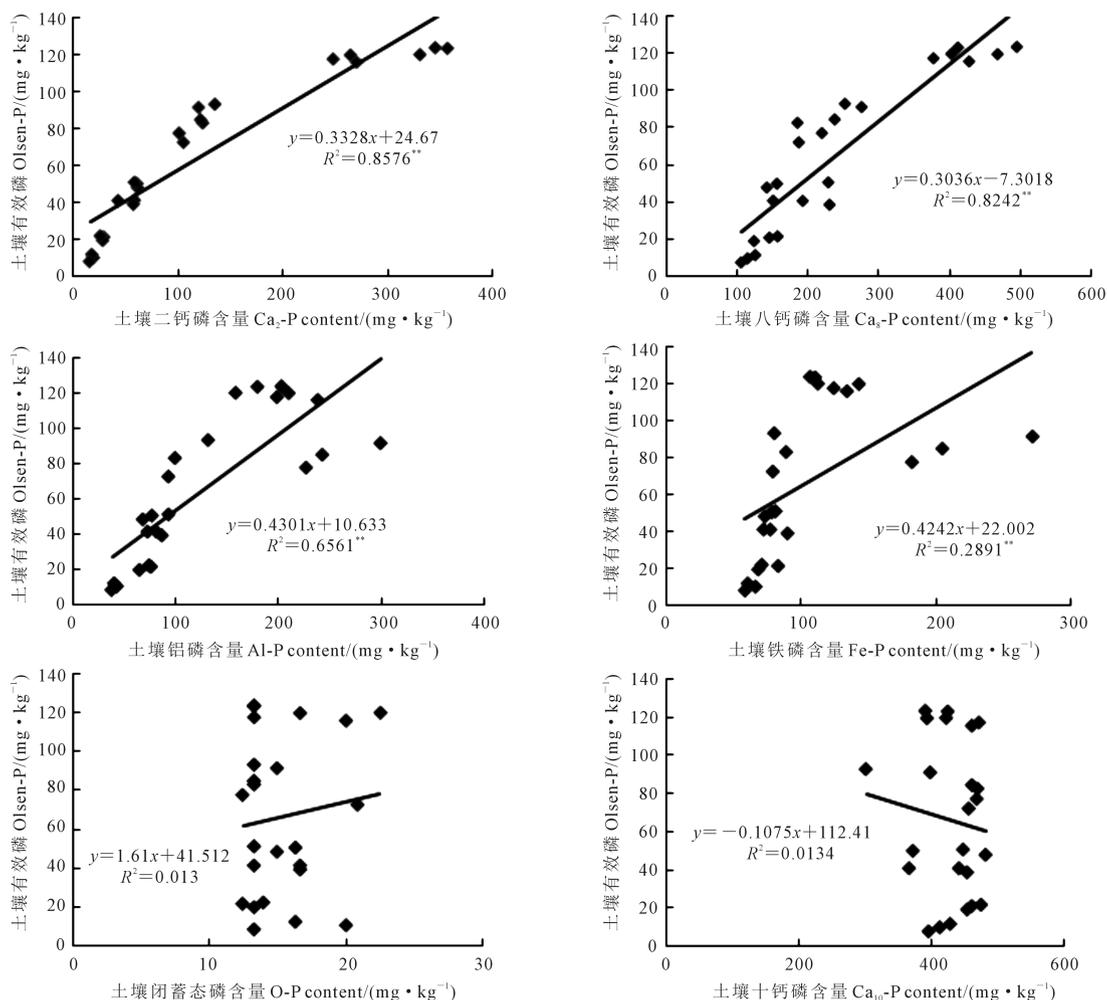


图 6 土壤有效磷与各无机磷组分关系

Fig.6 Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus components

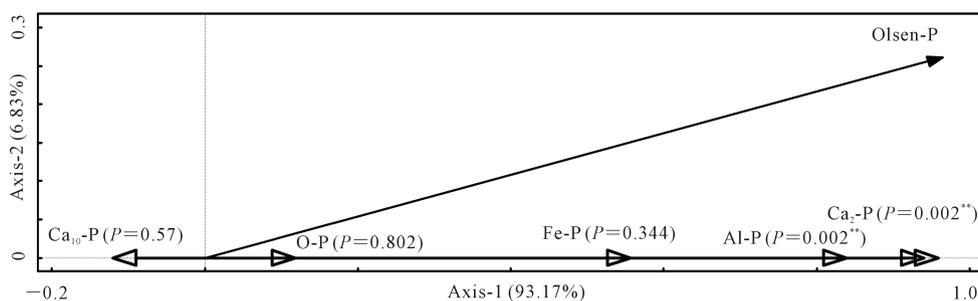


图 7 土壤有效磷含量与无机磷组分 RDA 排序图

Fig.7 RDA sequence diagram of soil available phosphorus content and inorganic phosphorus components

Ca<sub>8</sub>-P、Al-P、Fe-P 含量的增加而增加,其中 Ca<sub>2</sub>-P ( $P=0.002^{**}$ ) 和 Al-P ( $P=0.002^{**}$ ) 与有效磷相关性最为显著。有效磷含量与 O-P、Ca<sub>10</sub>-P 无显著的相关关系。

### 3 讨论

#### 3.1 施用有机物料对作物产量的影响

国内学者通过总结英国 Rothamsted 试验站、美国 Morrow 试验站等众多国外长期肥料定位试验后

发现,化学肥料和有机肥对作物持续增产均具有良好的效果<sup>[16-18]</sup>。盖霞普等<sup>[19]</sup>研究结果表明,配施有机肥和秸秆还田均能提高小麦和玉米产量,施肥 11 a 后配施有机肥处理小麦产量较常规施肥处理提高 18.6%,玉米产量较常规施肥处理提高 39.0%。Hua 等<sup>[20]</sup>通过 31 a 的长期定位试验发现,配施猪粪、秸秆还田处理较常规施肥 (NPK) 小麦产量分别提高 11.5% 和 8.0%。本研究也发现,有机物料的添加较常规施肥增加了小麦和玉米籽粒产

量,这是由于有机物料与化肥配施有利于提高土壤速效养分含量,调控土壤与化肥养分的释放强度和速率,在作物各生育阶段持续均衡稳定的供给养分,从而促进作物生长,提高产量<sup>[21]</sup>。本试验中,不同有机物料对作物产量的影响有所不同,污泥、猪粪与化肥配施增产效果最好,可能是由于不同有机物料所含养分比例不同,长期施用不同有机物料使土壤肥力出现差异。

### 3.2 施用有机物料对土壤磷组分的影响

本研究表明,施用有机物料可增加土壤全磷、有效磷及各磷组分含量,提高土壤肥力,这与前人研究结果一致<sup>[22]</sup>。张旺运<sup>[23]</sup>研究表明,施用有机肥可以显著提高深层土壤全磷含量;有机肥与氮磷肥配施后土壤有效磷含量显著增加。本研究也发现,有机物料与化肥配施土壤全磷和有效磷较常规施肥分别提高  $104.1 \sim 1\ 067\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $22.7 \sim 101.3\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤有效磷占全磷比例增加  $78.9\% \sim 226.3\%$ 。这是由于有机物料自身含有较多磷素,施入土壤后一部分被植物吸收,一部分以缓效态累积在土壤中,从而使土壤全磷含量增加。有机物料与化肥配施增加土壤有效磷含量、提升土壤肥力的效果优于单施化肥,其中猪粪和鸡粪能显著提高土壤全磷、有效磷、有效磷源含量,土壤磷素投入、携出量及盈余分析结果显示猪粪和鸡粪处理盈余量高于其他有机物处理,也印证了上述结果<sup>[24-25]</sup>,主要原因是猪和鸡属于非反刍动物,无法产生植酸酶,对作物及饲料中添加的有机磷利用率低,故其粪便中磷含量明显高于牛和羊等反刍动物的粪便<sup>[26]</sup>。

灌漠土土壤一般以无机磷为主,无机磷组分中  $\text{Ca-P}$  占绝对优势,而且  $\text{Ca-P}$  种类多,有效性也各不相同。其中,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  属于有效磷源,是对植物有效性最高的无机磷组分;  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  是缓效磷源,而  $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  则是潜在磷源。本研究中,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  与有效磷相关性最高,说明  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是主要的有效磷来源之一,这与前人研究结果一致<sup>[27]</sup>。添加有机物料后,土壤各磷组分均有所增加,这是由于有机物料本身带有的一定量的磷素,加之有机肥有活化土壤 P、减缓 P 吸附固定的效果<sup>[28]</sup>,但不同磷组分增加幅度不同,其中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  增加幅度最高,  $\text{O-P}$  最低,这说明施用有机肥主要提高了土壤有效性磷源含量,而对植物难以利用的潜在磷源的影响相对较小,  $\text{Ca}_2\text{-P}$  增幅较大是因为有机肥在释放过程中会产生有机酸,有利于其他形态的磷向  $\text{Ca}_2\text{-P}$  转

化<sup>[29]</sup>。刘建玲等<sup>[30]</sup>研究也发现,长期施用有机肥和化肥较单施化学磷肥提高了施入磷素转化为  $\text{Ca}_2\text{-P}$  的比重,减少了其转化为  $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  的比重,从而减少了对土壤磷素的固定。不同有机物料与化肥配施对各磷组分含量及其占全磷比例的影响不尽相同。本研究中,猪粪、鸡粪与化肥配施处理土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量及其占全磷比例较常规施肥显著增加,原因是猪粪和鸡粪本身含有的有效磷源较多,故对有效磷源含量的提高优于其他处理。污泥与化肥配施  $\text{Al-P}$  和  $\text{Fe-P}$  含量及其占全磷比例优于其他有机物料处理,可能是因为污泥中的磷主要是以正磷酸盐的形式存在,多与  $\text{Fe}$ 、 $\text{Al}$  等金属离子结合<sup>[31]</sup>。

### 3.3 磷组分与作物产量的关系

本研究通过相关性分析发现,小麦和玉米产量易受到  $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_2\text{-P}$  影响,其中  $\text{Al-P}$  与作物产量相关性极显著 ( $P=0.002^{**}$ ),可见增加  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  含量或降低  $\text{O-P}$  含量有利于作物增产。 $\text{Ca}_2\text{-P}$  是作物吸收的主要有效磷来源,可在一定程度上影响作物产量;这与杨艳菊等<sup>[32]</sup>的研究结果一致,即长期定位施肥条件下,无机磷组分中  $\text{Ca}_2\text{-P}$  是栗褐土土壤有效磷的主要来源。 $\text{Fe-P}$  和  $\text{Ca}_8\text{-P}$  对土壤有效磷库起重要调节作用;  $\text{Al-P}$  是一种相当有效的磷源,在供磷上有一定意义,对作物产量也有很大影响<sup>[33]</sup>。 $\text{O-P}$  和  $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  在短时间内不易被作物吸收,故其对作物产量影响较小。冯固等<sup>[34]</sup>研究结果表明,5 种形态无机磷对玉米的有效性影响表现为  $\text{Ca}_2\text{-P} > \text{Al-P} > \text{Ca}_8\text{-P} > \text{Fe-P} > \text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。本研究中,  $\text{Al-P}$  对小麦和玉米产量最具有有效性。

## 4 结 论

1) 配施有机物料可以保持小麦-玉米轮作体系产量的稳定性和可持续性,达到减施化肥、保证作物稳产的目的。配施污泥、鸡粪和猪粪处理的小麦产量较常规施肥处理分别增加 9.4%、7.0% 和 7.2%,牛粪、沼渣、污泥、鸡粪和猪粪处理玉米籽粒产量较常规施肥处理增加 4.4%~6.5%。

2) 配施有机物料能够增加土壤全磷、有效磷及有效磷占全磷的比例。有机物料处理土壤全磷、有效磷含量及有效磷占全磷比例较常规施肥处理分别增加 8.6%~96.5%、107.6%~480.1% 和 78.9%~226.3%。鸡粪和猪粪较其他有机物料土壤全磷和

有效磷含量最高。

3) 配施有机物料能够增加土壤  $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  含量及各磷组分占全磷的比例。猪粪处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  含量最高,较常规施化肥增加 1 144.9%,各有机物料处理  $\text{Ca}_2\text{-P}$  占全磷比例较常规施化肥处理增加 60.0%~568.0%。污泥处理土壤中有效磷源( $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$ )占全磷比例最高。同时, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$  与有效磷相关性极显著。

4) 无机磷组分中, $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Al-P}$ 、 $\text{Fe-P}$  是影响作物产量的主要磷形态,其中  $\text{Al-P}$  与作物产量相关性极显著( $P=0.002^{**}$ )。 $\text{O-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$  不易被作物吸收利用,对作物产量影响不大,可作为潜在磷源。

#### 参考文献:

[1] 姜波,林咸永,章永松.杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2008,34(2):207-213.  
JIANG B, LIN X Y, ZHANG Y S. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences), 2008, 34(2): 207-213.

[2] MCDOWELL R W, CONDRON L M, STEWART I. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(5): 707-715.

[3] 孙桂芳,金继运,石元亮.土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J].中国土壤与肥料,2011,(2):1-9.  
SUN G F, JIN J Y, SHI Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2011, (2): 1-9.

[4] 王道中,郭熙盛,刘枫,等.长期施肥对砂姜黑土无机磷形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(3):601-606.  
WANG D Z, GUO X S, LIU F, et al. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus fractions in lime concretion black soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(3): 601-606.

[5] 安迪,杨令,王冠达,等.磷在土壤中的固定机制和磷肥的高效利用[J].化工进展,2013,(8):1967-1973.  
AN D, YANG L, WANG G D, et al. Mechanisms of phosphorus fixation in soils and efficient utilization of phosphate fertilizer[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, (8): 1967-1973.

[6] 杨莉琳,李金海.磷肥在褐土中的动态转化及施用有机肥的影响[J].河北农业大学学报,2001,24(1):21-23.  
YANG L L, LI J H. Study on the transformation of applied P and the effect of manure on it in cinnamon soil[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2001, 24(1): 21-23.

[7] 索炎炎,张翔,司贤宗,等.磷肥与有机肥配施对土壤-花生系统磷素及花生产量的影响[J].中国油料作物学报,2018,40(1):119-126.  
SUO Y Y, ZHANG X, SI X Z, et al. Effect of combined application of phosphorus and organic fertilizer on phosphorus contents in peanut-soil

system and pod yield of peanut[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(1): 119-126.

[8] 全孝飞,颜晓元,王书伟,等.长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(7):1406-1415.  
QUAN X F, YAN X Y, WANG S W, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(7): 1406-1415.

[9] 路宇,郎朗,李任丰,等.不同有机质对盆栽辣椒生长的影响[J].腐植酸,2020,(5):49-51.  
LU Y, LANG L, LI R F, et al. Effects of different organic matter on the growth of potted pepper[J]. Humic Acid, 2020, (5): 49-51.

[10] 陶士锋,徐晓峰,寇太记.土壤有机质对有效磷及水提取磷含量的影响[J].中国生态农业学报,2012,20(8):1054-1058.  
TAO S F, XU X F, KOU T J. Effect of soil organic matter on the contents of available and water-extracted phosphorus[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(8): 1054-1058.

[11] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:76-83.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 76-83.

[12] 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):101-102,110.  
GU Y C, JIANG B F. Method for determination of inorganic phosphorus classification in calcareous soils[J]. Soils, 1990, 22(2): 101-102, 110.

[13] 沈开勤,刘倩,杨国涛,等.减量施磷对土壤磷库组成及解磷微生物的影响[J].中国农业科学,2023,56(15):2941-2953.  
SHEN K Q, LIU Q, YANG G T, et al. Effects of phosphorus reduction on soil phosphorus pool composition and phosphorus solubilizing microorganisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(15): 2941-2953.

[14] 关鑫鑫,王传宇,李翠兰,等.青藏高原不同类型草地土壤磷素分布及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(5):351-359.  
GUAN X X, WANG C Y, LI C L, et al. Soil phosphorus distribution and its influencing factors in different grassland types on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5): 351-359.

[15] MUSSARAT M, ALI H, MUHAMMAD D, et al. Comparing the phosphorus use efficiency of pre-treated (organically) rock phosphate with soluble P fertilizers in maize under calcareous soils[J]. PeerJ, 2021, 9: e11452.

[16] 沈善敏.国外的长期肥料试验(一)[J].土壤通报,1984,(2):85-91.  
SHEN S M. Long term fertilizer experiments abroad (Part 1)[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, (2): 85-91.

[17] 沈善敏.国外的长期肥料试验(二)[J].土壤通报,1984,(3):134-138.  
SHEN S M. Long term fertilizer experiments abroad (Part 2)[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, (3): 134-138.

[18] 沈善敏.国外的长期肥料试验(三)[J].土壤通报,1984,(4):184-185.  
SHEN S M. Long term fertilizer experiments abroad (Part 3)[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1984, (4): 184-185.

[19] 盖霞普,刘宏斌,杨波,等.不同施肥年限下作物产量及土壤碳氮库容对增施有机物料响应[J].中国农业科学,2019,52(4):

- 676-689.
- GE X P, LIU H B, YANG B, et al. Responses of crop yields, soil carbon and nitrogen stocks to additional application of organic materials in different fertilization years [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(4): 676-689.
- [20] HUA K, WANG D, GUO Z. Effects of long-term application of various organic amendments on soil particulate organic matter storage and chemical stabilisation of vertisol soil [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2018, 68(6): 505-514.
- [21] 康国栋, 魏家星, 邬梦成, 等. 有机物料施用对旱地红壤作物产量和有机质活性组分的影响 [J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1084-1091.
- KANG G D, WEI J X, WU M C, et al. Effects of organic material application on crop yield and active organic components in upland red soil [J]. *Soils*, 2017, 49(6): 1084-1091.
- [22] 江晶, 张仁陟, 索东让. 长期施肥对河西灌漠土无机磷形态的影响 [J]. *土壤通报*, 2010, 41(4): 783-787.
- JIANG J, ZHANG R Z, SUO D R. Effects of long-term fertilization on inorganic phosphorus forms in irrigated desert soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(4): 783-787.
- [23] 张旺运. 旱作梯田不同施肥方式下土壤质量与作物产量动态研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- ZHANG W Y. Dynamic study of soil quality and crop yield under different fertilization methods in dry terraced fields [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [24] 张祺, 孙万春, 俞巧钢, 等. 长期施用有机肥对稻田土壤理化性状的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2022, 63(7): 1441-1444, 1448.
- ZHANG Q, SUN W C, YU Q G, et al. The effect of long-term application of organic fertilizer on the physicochemical properties of paddy soil [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2022, 63(7): 1441-1444, 1448.
- [25] SMITH F A, SMITH S E. What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonisation of many economically important crop plants? [J]. *Plant and soil*, 2011, 348(1): 63-79.
- [26] 严正娟, 陈硕, 王敏锋, 等. 不同动物粪肥的磷素形态特征及有效性分析 [J]. *农业资源与环境学报*, 2015, (1): 33-41.
- YAN Z J, CHEN S, WANG M F, et al. Characteristics and availability of different forms of phosphorus in animal manures [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, (1): 33-41.
- [27] 宋佳明, 蔡红光, 张秀芝, 等. 施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响 [J]. *吉林农业大学学报*, 2019, 41(6): 707-712.
- SONG J M, CAI H G, ZHANG X Z, et al. Characteristics and availability of different forms of phosphorus in animal manures [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2019, 41(6): 707-712.
- [28] 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响 [J]. *土壤学报*, 1993, 30(4): 443-446.
- ZHOU G Y, YAN L X. Effects of long-term application of fertilizers on soil phosphorus morphology and transformation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1993, 30(4): 443-446.
- [29] 张建军, 党翼, 赵刚, 等. 不同用量有机肥对陇东旱塬黑垆土磷素形态转化及有效性的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016, (2): 32-38.
- ZHANG J J, DANG Y, ZHAO G, et al. Effect of different amount organic manure on soil phosphorus forms transformation and its availability in calcic kastanozems in eastern Gansu [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2016, (2): 32-38.
- [30] 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 II. 土壤 Olsen-P 及各形态无机磷的动态变化 [J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 365-368.
- LIU J L, ZHANG F S. Dynamics of soil P pool in a long-term fertilizing experiment of wheat-maize rotation II. Dynamics of soil Olsen-P and inorganic P [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(3): 365-368.
- [31] 赵刚, 唐建国, 徐竟成. 污水处理厂污泥稳定化过程中磷的迁移转化及资源化价值 [J]. *给水排水*, 2022, 48(11): 44-50.
- ZHAO G, TANG J G, XU J C. The phosphorus migration, transformation and resource value in the process of sludge stabilization in wastewater treatment plant [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022, 48(11): 44-50.
- [32] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施用不同肥料对栗褐土有机磷组分的影响 [J]. *土壤*, 2013, 45(3): 426-429.
- YANG Y J, WANG G L, ZHANG H P, et al. Effects of long-term different fertilization on organic phosphorus forms in cinnamon soil [J]. *Soils*, 2013, 45(3): 426-429.
- [33] SONG K, XUE Y, ZHENG X Q, et al. Effects of the continuous use of organic manure and chemical fertilizer on soil inorganic phosphorus fractions in calcareous soil [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1164.
- [34] 冯固, 杨茂秋, 白灯莎, 等. 用<sup>(32)P</sup>示踪法研究石灰性土壤中磷素的形态及有效性变化 [J]. *土壤学报*, 1996, 33(3): 301-307.
- FENG G, YANG M Q, BAI D S, et al. Study on changes in fractions and availability of phosphorus in calcareous soil by <sup>(32)P</sup> tracer method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(3): 301-307.