

氮磷配施对黄土高原旱作农业区典型农田土壤 无机磷形态的影响

焦亚鹏¹, 齐鹏^{1,2,3*}, 王晓娇^{1,4}, 姚一铭^{1,5}, 武均^{1,3}, 蔡立群^{1,2,3}, 张仁陟^{1,2,3}

(1 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃兰州 730070; 2 甘肃农业大学甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃兰州 730070; 3 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 甘肃兰州 730070; 4 甘肃农业大学管理学院, 甘肃兰州 730070; 5 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 甘肃兰州 730050)

摘要:【目的】探讨不同氮磷配施条件下土壤无机磷组分转化特征和无机磷组分转化的影响因素, 为陇中黄土高原旱作农业区农田磷素的高效利用及农田养分平衡提供参考。【方法】基于 2017 年布设在陇中黄土高原定西市李家堡镇麻子川村的不同氮磷配施春小麦长期定位试验, 氮 (N)、磷 (P_2O_5) 各设 4 个水平, 分别为 0、75.0、115.0、190.0 kg/hm², 两两正交共 16 个处理。使用顾益初-蒋柏藩法测定收获后耕层 (0—20 cm) 土壤中各形态无机磷组分含量以及环境因子 (土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷、pH、籽粒产量、地上部生物量、磷肥回收利用率、微生物量碳、氮、磷和碱性磷酸酶)。【结果】土壤无机磷组分变化顺序为 $Ca_{10}\text{-P} > Ca_8\text{-P} > O\text{-P} > Fe\text{-P} \approx Al\text{-P} > Ca_2\text{-P}$, 无机磷含量主要以 $Ca\text{-P}$ 为主, $Al\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 3 种形态占无机磷总量的 20% 左右。施磷显著增加土壤各无机磷组分含量, 施氮显著降低除 $O\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 外其它无机磷组分含量, 使 $O\text{-P}$ 显著增加。施氮对各无机磷组分比例变化影响较小, $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 占无机磷总量的比例随着施磷量的增加而增加, $Ca_{10}\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 所占的比例随着施磷量的增加呈下降趋势。 $Fe\text{-P}$ 占无机磷的比例随着施磷量的增加基本无变化。本研究土壤有效磷与 $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 $Al\text{-P}$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与 $Ca_{10}\text{-P}$ 相关性不显著 ($P > 0.05$)。通径分析结果显示, 各形态无机磷对有效磷的直接贡献顺序为 $Ca_2\text{-P} > O\text{-P} > Al\text{-P} > Ca_{10}\text{-P} > Fe\text{-P} > Ca_8\text{-P}$, 在本区 $Ca_2\text{-P}$ 是土壤有效磷的主要磷源, $Ca_8\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 是潜在磷源。施氮显著提高了土壤有机碳、全氮、籽粒产量、地上部生物量及微生物量碳、氮、磷及碱性磷酸酶活性和磷肥回收利用率, 降低了全磷、有效磷、pH。施磷显著提高了全氮、全磷、有效磷、籽粒产量、地上部生物量及微生物量碳、氮、磷及碱性磷酸酶活性, 降低了有机碳。冗余分析结果显示, 土壤有机碳是影响陇中黄土高原旱作春小麦农田耕层土壤无机磷组分变化的关键因子; $Ca_8\text{-P}$ 与全氮、 $Al\text{-P}$ 与磷肥回收利用率、 $O\text{-P}$ 与籽粒产量、 $Fe\text{-P}$ 与地上部生物量和碱性磷酸酶活性以及微生物量氮呈极显著正相关, 土壤有机碳与各无机磷组分均呈负相关。【结论】氮磷配施能够促进土壤磷素的活化, 提高可供植物直接利用的 $Ca_2\text{-P}$ 和具有缓效作用 $Ca_8\text{-P}$ 、 $Al\text{-P}$ 的比例, 降低了土壤中难溶性 $Ca_{10}\text{-P}$ 、 $O\text{-P}$ 的比例, 提升了土壤潜在供磷能力。土壤有机碳是调控该区耕层土壤磷组分转化的关键因子。

关键词: 陇中黄土高原; 氮磷配施; 无机磷组分; 磷素有效性; 环境因子

Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on inorganic phosphorus forms of typical farmland soil in the dry farming area of the Loess Plateau

JIAO Ya-peng¹, QI Peng^{1,2,3*}, WANG Xiao-jiao^{1,4}, YAO Yi-ming^{1,5}, WU Jun^{1,3}, CAI Li-qun^{1,2,3}, ZHANG Ren-zhi^{1,2,3}

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2 Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3 Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-Saving, Lanzhou 730070, China; 4 College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 5 Third Institute Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, China)

收稿日期: 2020-02-15 接受日期: 2020-04-22

基金项目: 甘肃农业大学学科建设基金 (GAU-XKJS-2018-205); 甘肃农业大学盛彤笙基金 (GSAU-STS-1706); 青年研究生导师扶持基金 (GAU-QNDS-201704)。

联系方式: 焦亚鹏 E-mail: jypm1015@163.com; * 通信作者 齐鹏 E-mail: gsauqip@163.com

Abstract: [Objectives] The transformation characteristics of soil inorganic phosphorus forms under different nitrogen and phosphorus application conditions and the factors affecting the conversion of inorganic phosphorus forms were discussed. It provides a reference for the efficient use of phosphorus in farmland and soil nutrient balance in the dry farming area of Longzhong Loess Plateau. **[Methods]** Based on the long-term positioning experiment of different nitrogen and phosphorus combined application of spring wheat set in Mazichuan Village, Lijiabao Town, Dingxi City, Longzhong Loess Plateau in 2017, nitrogen (N) and phosphorus (P_2O_5) were set at 4 levels, respectively, 0, 75.0, 115.0, 190.0 kg/hm², a total of 16 treatments in pairs. Using Gu Yichu-Jiang Bofan method to determine the content of each form of inorganic phosphorus forms in the soil after harvest (0–20 cm), as well as environmental factors (soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, Olsen-P, pH, grain yield, biomass, apparent recovery efficiency of applied phosphorus, microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and alkaline phosphatase). **[Results]** The distribution order of inorganic phosphorus forms in soil is $Ca_{10}\text{-P} > Ca_8\text{-P} > O\text{-P} > Fe\text{-P} \approx Al\text{-P} > Ca_2\text{-P}$. The content of inorganic phosphorus is mainly Ca-P, and the other three forms of Al-P, Fe-P and O-P account for about 20% of the total inorganic phosphorus. Phosphorus application significantly increased the phosphorus content of each inorganic phosphorus form in the soil. Nitrogen application significantly reduced the phosphorus content of other inorganic phosphorus components except O-P and $Ca_8\text{-P}$, and O-P increased significantly. Nitrogen application has little effect on the change of the proportion of each inorganic phosphorus form. The proportion of $Ca_2\text{-P}$ and $Ca_8\text{-P}$ in the total inorganic phosphorus increased with the increase of phosphorus application, and the proportion of $Ca_{10}\text{-P}$ and O-P showed a significant downward trend with the increase of phosphorus application. The proportion of Fe-P in inorganic phosphorus is basically unchanged with the increase of phosphorus application. In this study, soil available phosphorus was significantly positively correlated with $Ca_2\text{-P}$, $Ca_8\text{-P}$, Fe-P, O-P ($P < 0.01$), and significantly positively correlated with Al-P ($P < 0.05$), while correlated with $Ca_{10}\text{-P}$ did not significantly ($P > 0.05$). Path analysis results show that the direct contribution of various forms of inorganic phosphorus to available phosphorus is $Ca_2\text{-P} > O\text{-P} > Al\text{-P} > Ca_{10}\text{-P} > Fe\text{-P} > Ca_8\text{-P}$. In this area, $Ca_2\text{-P}$ is the main source of available phosphorus in the soil, and $Ca_8\text{-P}$ and Fe-P are potential sources of phosphorus. Nitrogen application significantly increased soil organic carbon, total nitrogen, grain yield, biomass, microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass N (MBN), microbial biomass P (MBP), alkaline phosphatase activity (ALP), apparent recovery efficiency of applied phosphorus, and reduced total phosphorus, available phosphorus, and pH. Phosphorus application significantly increased total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus, grain yield, biomass, MBC, MBN, MBP, ALP, and reduced organic carbon. Redundancy analysis results show that soil organic carbon is a key factor affecting the change of soil inorganic phosphorus forms in the farmland layer of spring wheat farmland in the Longzhong Loess Plateau; $Ca_8\text{-P}$ with total nitrogen, Al-P with apparent recovery efficiency of applied phosphorus, O-P with grain yield, Fe-P with biomass, alkaline phosphatase and microbial biomass nitrogen is significantly and positively correlated, and soil organic carbon is negatively correlated with each inorganic phosphorus form. **[Conclusions]** The combined application of nitrogen and phosphorus can promote the activation of soil phosphorus, increase the ratio of $Ca_2\text{-P}$ available for plant direct use and $Ca_8\text{-P}$, Al-P with slow-acting effect, and reduce the insoluble $Ca_{10}\text{-P}$ in soil. The ratio of O-P improves the potential phosphorus supply capacity of the soil. Soil organic carbon is a key factor regulating the conversion of soil phosphorus forms in the plow layer.

Key words: Longzhong Loess Plateau; nitrogen and phosphorus combination; inorganic phosphorus forms; phosphorus efficiency; environmental factors

磷素既是作物生长发育必需的也是限制作物优质高产的营养元素之一^[1]。在我国北方石灰性土壤中磷素主要以无机形态存在, 约占土壤全磷含量的

70%~80%^[2-3]。然而, 磷素在施入土壤后大部分被土壤吸附固定转化为缓效态和高稳态积累在土壤中。国内外的研究结果均表明, 磷肥的当季利用率一般

仅为 10%~25%^[4], 有近 75%~90% 的磷积累在土壤中, 形成了一个巨大的潜在磷库, 其数量相当可观, 在造成磷肥巨大浪费的同时也带来了环境风险。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所在, 获取土壤中磷组分信息对于提高土壤磷的利用率具有重要意义^[5]。如何利用积累的养分库达到节省化肥、提高作物产量和减少环境污染, 对促进农业的持续发展具有重要的意义。

利用顾益初-蒋柏藩法^[6]可将石灰性土壤的无机磷按照其对植物有效性的不同而进行分级, 被广泛用于农田、草地、森林和湿地土壤无机磷形态的研究中^[7-10]。海龙^[11]在陇中黄土高原不同耕作方式对磷组分的研究中得出, 土壤无机磷组分含量变化顺序为 $Ca_{10}\text{-P} > Ca_8\text{-P} > O\text{-P} > Fe\text{-P} > Al\text{-P} > Ca_2\text{-P}$, 无机磷组分主要以 $Ca_{10}\text{-P}$ 为主, 约占总无机磷的 50%。王海龙^[12]在山东潮土上的研究结果表明, 施用磷肥可提高 $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 、 $Al\text{-P}$ 、 $Fe\text{-P}$ 占无机磷总量的相对比例, $Ca_2\text{-P}$ 、 $Ca_8\text{-P}$ 是有效磷的主要磷源。影响土壤磷素转化与有效性的因素十分复杂, 主要包括土壤理化性质、环境因子与管理措施等^[7, 12-18]。pH 与土壤无机磷组分含量特别是 $Fe\text{-P}$ 和 $Al\text{-P}$ 的含量呈显著相关。刘旭军等^[19]研究发现, 土壤有机质是影响华北落叶松人工林表层土壤磷组分变化的关键因子。长期施肥, 不仅能促进土壤酸化, 而且还会促进作物根系对磷素的活化与吸收, 导致残存在土壤中的难溶态磷素含量降低^[20]。土壤微生物不仅是土壤活性磷库的重要来源之一, 可以吸收利用土壤中的无机磷, 避免其被土壤吸附固定, 而且土壤微生物分泌的磷酸酶对土壤磷素起到了活化作用, 提高了土壤磷素的有效性^[19]。

长期以来, 由于黄土高原的特殊性质和人类活动的影响^[21], 导致该区土壤中有效磷含量较低, 为了增加磷供应而施入大量化学肥料, 这虽然可以使作物产量增加, 但同时也加大了土壤对磷素的吸附固定, 进而降低磷肥利用效率, 形成恶性循环^[22]。科学合理施肥是改善土壤质量, 提高作物产量的有效措施^[23]。多年来, 有关学者对该区磷素的分级、迁移转化、空间分布及生物有效性等做了一些研究, 但对于不同氮磷配施对农田耕层各形态土壤无机磷影响的研究较少。本研究以甘肃陇中黄土高原旱作小麦农田为研究对象, 通过对土壤各形态无机磷赋存状况及其与环境因素之间关系的研究, 探究氮磷配施对土壤无机磷组分转化及其影响机制, 在实践上为作物生产可持续发展中合理施肥、提高化肥的经济

和生态效益提供理论依据, 为充分挖掘土壤磷素的生产潜力提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区的甘肃省定西市李家堡镇麻子川村 (35°28'N, 104°44'E)。试验区农田土壤为典型的黄绵土, 质地均匀、土质绵软。平均海拔 2000 m, 无霜期 140 天, 年均日照时数 2476.6 h, 年均太阳辐射 594.7 kJ/cm², 年均气温 6.4℃, $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温 2933.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温 2239.1℃, 属中温带半干旱区; 多年平均降水 390.9 mm, 年蒸发量 1531.0 mm, 80% 保证率的年降水量为 365.0 mm, 变异系数为 24.3%, 为典型的雨养农业区。

1.2 试验设计

本试验 2017 年布置在甘肃省安定区李家堡镇麻子川村, 氮 (N)、磷 (P_2O_5) 各设 4 个水平, 分别为 0、75.0、115.0、190.0 kg/hm², 依次记为 N1、N2、N3、N4, P1、P2、P3、P4, 共 16 个处理组合 (表 1), 试验设 3 次重复, 小区面积 27 m² (4.5 m × 6 m), 随机完全区组排列。氮肥为尿素 (N 46%)、磷肥为过磷酸钙 (P_2O_5 12%), 于播种前作基肥一次性施入, 不追肥。播种行长 5 m, 留下 1 m 不播种 (但正常施肥)。前茬作物收获后三耕两耩, 于 2019 年 3 月下旬播种, 7 月下旬收获, 播种量 187.5 kg/hm², 行距 20 cm, 播深 7 cm。试区土壤基本理化性质: pH 8.45、有机碳 8.32 g/kg、全氮 0.86 g/kg、全磷 0.82 g/kg、全钾 28.00 g/kg、碱解氮 51.1 mg/kg、有效磷 21.2

表 1 试验方案

Table 1 Experiment design

处理 Treatment	N	P_2O_5	处理 Treatment	N	P_2O_5
	(kg/hm ²)			(kg/hm ²)	
N1P1	0	0	N1P3	0	115
N2P1	75	0	N2P3	75	115
N3P1	115	0	N3P3	115	115
N4P1	190	0	N4P3	190	115
N1P2	0	75	N1P4	0	190
N2P2	75	75	N2P4	75	190
N3P2	115	75	N3P4	115	190
N4P2	190	75	N4P4	190	190

mg/kg、速效钾 101 mg/kg, 0—200 cm 平均土壤容重 1.17 g/cm³。

1.3 样品采集与分析

于 2019 年 7 月 28 日小麦收获后, 在每个试验小区内采用五点法分别采集各小区 0—20 cm 耕层土样, 充分混匀, 挑除其中的可见根和植物残体, 其中 1000 g 供试土样风干后过 2 mm 筛用于测定土壤全量养分、磷组分等指标; 500 g 供试土样低温 (4℃) 冷藏, 用于测定土壤微生物量、酶活性等指标。于 2019 年 7 月 25 日小麦收获前, 每个小区随机选取 20 株小麦, 带回实验室后用去离子水洗净后将样品籽粒和秸秆分离, 105℃ 烘 30 min, 80℃ 烘干至恒重后称量计算干物重, 粉碎过 0.25 mm 筛后待测, 各小区全区刈割。

土壤 pH 采用土水比 1 : 2.5 电位法测定^[24]; 有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定^[24]; 全氮采用 H₂SO₄ 消煮—凯氏定氮法测定^[24]; 全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 酸溶—钼锑抗比色法测定^[25]; 土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸, 0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提 (土水比 1 : 4), 碳氮联合分析仪 (Jena multi N/C 2100s, Germany) 测定, 换算系数为 0.38、0.45^[26-27]; 土壤微生物量磷采用氯仿熏蒸, 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提 (土水比 1 : 20), 采用全自动间断化学分析仪 (Smart chem H140, Italy) 测定, 换算系数为 0.40^[28]; 土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[27, 29]; 植株各器官磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—钒钼黄比色法^[24]测定; 土壤有效磷 (Olsen-P) 含量采用 Olsen 方法测定^[25]。

磷肥回收利用率 (%) = (施肥作物地上部吸磷量 - 未施肥作物地上部吸磷量) / 磷肥施用量 × 100

土壤无机磷组分按照顾益初-蒋柏藩法 (图 1)^[6, 25], 分为 6 级: Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 与 Ca₁₀-P。

1.4 数据处理

用 Excel 2016 和 SPSS 18.0 进行试验数据统计分析, 使用 SigmaPlot 14.0 作图, 采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 检验各无机磷组分不同氮磷配施处理间的显著性。不同处理间采用 Duncan's 法检验各处理平均值在的差异显著性 ($P < 0.05$)。此外, 用 Canoco 5.0 软件冗余分析 (RDA) 板块分析不同氮磷配施处理土壤无机磷组分和相应环境变量 (化学性质、酶活性和微生物生物量) 之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷配施对土壤无机磷组分的影响

由表 2 可知, 土壤 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P、Ca₁₀-P、总无机磷含量变化范围为 20.13~44.83、165.97~282.48、28.63~44.43、33.06~45.05、55.30~68.38、317.87~345.68、628.45~821.41 mg/kg。土壤无机磷组分含量变化顺序为 Ca₁₀-P > Ca₈-P > O-P > Fe-P ≈ Al-P > Ca₂-P。

所有无机磷组分施氮水平和施磷水平的主效应和交互效应的 P 值均小于 0.05, 因此可以认为施氮和施磷及其交互效应均能对无机磷组分产生影响 ($P < 0.05$)。施氮使 Ca₂-P、Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P、总无机磷的含量显著降低。Ca₈-P、总无机磷含量随施氮量的增加先减小后增加然后又降低; Al-P、Fe-P、Ca₁₀-P 含量随施氮量的增加先减小后增加, N3 处理最小, N1 处理最大; Ca₂-P 随施氮量的增加而减小; O-P 随施氮量的增加而增加。除 O-P 外其余各无机磷组分含量均在 N1 处理达到最大。施磷显著增加所有无机磷组分, 除 Al-P 在 P3 处理时最大, 其余无机磷组分含量 P4 处理最大。

由图 2 和图 3 可知, 所有处理土壤无机磷组分

Soil		pH 7.5, 0.25 mol/L NaHCO ₃				
S1	ppt1		pH 4.2, 0.5 mol/L NH ₄ Ac			
	S2	ppt2		pH 8.2, 0.5 mol/L NH ₄ F		
		S3	ppt3		0.1 mol/L NaOH-0.1 mol/L-NaCO ₃	
	S4		ppt4		0.3 mol/L Na ₃ Cit-Na ₂ S ₂ O ₄ -NaOH	
			S5	ppt5		0.5 mol/L H ₂ SO ₄
	S6	ppt6				
Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	

图 1 顾益初-蒋柏藩法无机磷组分浸提步骤

Fig. 1 Gu Yichu-Jiang Baifan's inorganic phosphorus extraction step

[注 (Note): ppt—沉淀 Sediment; Na₃Cit—柠檬酸钠 Sodium citrate]

表 2 不同氮磷配施土壤中无机磷组分含量
Table 2 Contents of inorganic phosphorus fractions in soils under different N and P combination treatments

处理 Treatment	无机磷组分 Inorganic phosphorus forms (mg/kg)						总无机磷 Total inorganic phosphorus
	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	
N1	33.40 a	219.00 a	38.94 a	40.85 a	60.28 c	338.09 a	730.97 a
N2	28.27 b	212.15 b	37.90 b	38.14 b	60.37 c	333.08 b	709.92 b
N3	27.82 b	218.59 a	36.22 c	36.37 c	61.08 b	331.35 b	712.91 b
N4	25.76 c	212.06 b	37.65 b	37.89 b	62.02 a	332.88 b	708.26 b
显著性 Sig.	***	***	***	***	**	**	***
P1	21.47 d	170.83 d	32.31 d	34.92 d	58.08 c	331.03 c	648.63 d
P2	28.07 c	208.48 c	38.53 b	37.90 c	59.66 b	333.38 bc	706.01 c
P3	29.88 b	221.96 b	42.80 a	39.43 b	59.74 b	334.08 b	727.89 b
P4	35.84 a	262.03 a	37.07 c	41.01 a	66.68 a	336.90 a	779.53 a
显著性 Sig.	***	***	***	***	***	*	***
N1P1	22.65 ± 0.89 h	180.39 ± 2.06 h	35.21 ± 0.29 h	34.90 ± 0.52 e	55.30 ± 0.38 g	345.18 ± 3.01 a	673.63 ± 1.41 h
N2P1	21.97 ± 0.59 hi	165.97 ± 3.62 i	36.54 ± 0.02 fgh	33.69 ± 0.21 f	57.47 ± 0.29 f	317.87 ± 2.24 e	633.52 ± 4.99 j
N3P1	21.15 ± 0.03 i	165.97 ± 3.31 i	28.63 ± 0.31 j	33.06 ± 0.90 f	57.67 ± 0.40 f	321.96 ± 4.25 de	628.45 ± 7.00 ij
N4P1	20.13 ± 0.52 j	170.99 ± 4.28 i	28.84 ± 0.27 j	38.00 ± 0.83 d	61.88 ± 0.93 d	339.10 ± 3.19 bc	658.93 ± 7.27 hi
N1P2	30.55 ± 0.30 e	190.30 ± 3.35 g	37.55 ± 0.04 ef	41.07 ± 0.28 c	59.47 ± 0.08 e	345.68 ± 2.85 a	704.62 ± 5.41 g
N2P2	26.51 ± 0.32 f	204.59 ± 2.68 f	37.05 ± 1.25 fg	37.49 ± 0.45 d	57.37 ± 0.50 f	337.58 ± 2.11 bc	700.60 ± 4.77 g
N3P2	30.71 ± 1.01 e	236.12 ± 2.19 d	43.45 ± 1.04 ab	37.64 ± 0.31 d	60.05 ± 0.54 e	325.18 ± 1.94 d	733.15 ± 3.20 de
N4P2	24.50 ± 0.30 g	202.91 ± 4.08 f	36.06 ± 0.53 gh	35.39 ± 0.71 e	61.74 ± 0.81 d	325.07 ± 1.65 d	685.67 ± 6.24 g
N1P3	35.59 ± 0.29 b	222.84 ± 3.69 e	44.43 ± 0.34 a	42.37 ± 0.44 b	59.59 ± 0.33 e	319.40 ± 3.04 e	724.21 ± 7.06 f
N2P3	30.54 ± 0.27 e	209.69 ± 3.73 f	42.25 ± 1.51 bc	40.77 ± 0.31 c	59.57 ± 1.11 e	334.71 ± 4.80 c	717.53 ± 5.62 f
N3P3	27.02 ± 0.32 f	230.98 ± 2.48 de	40.38 ± 1.55 d	37.46 ± 0.44 d	60.35 ± 0.74 e	341.60 ± 2.87 ab	737.79 ± 2.93 def
N4P3	26.35 ± 0.28 f	224.33 ± 11.77 e	44.15 ± 0.45 a	37.11 ± 0.58 d	59.44 ± 1.86 e	340.63 ± 3.84 ab	732.01 ± 17.38 ef
N1P4	44.83 ± 1.32 a	282.48 ± 1.85 a	38.59 ± 0.85 e	45.05 ± 0.71 a	68.38 ± 0.38 a	342.09 ± 3.38 ab	821.41 ± 1.31 a
N2P4	34.07 ± 0.76 c	268.36 ± 5.70 b	35.74 ± 0.89 gh	40.61 ± 0.52 c	67.09 ± 0.84 ab	342.15 ± 4.05 ab	788.02 ± 10.60 b
N3P4	32.41 ± 0.29 d	247.27 ± 4.14 c	32.40 ± 0.34 i	37.30 ± 0.73 d	66.24 ± 1.14 bc	336.66 ± 1.11 bc	752.27 ± 3.99 cd
N4P4	32.06 ± 0.56 d	250.01 ± 4.64 c	41.56 ± 0.58 cd	41.06 ± 0.71 c	65.02 ± 0.38 c	326.72 ± 1.84 d	756.43 ± 5.90 c
显著性 Sig.	***	***	***	***	***	***	***

注 (Note): 表中数值均为平均值 ± 标准差 Data are mean ± SD ($n = 3$); 同列数值后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level; *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

均以 Ca₁₀-P 为主, 约占总量的 50%。施氮量对各形态无机磷组分比例影响较小。施磷肥增加了 Ca₂-P、Ca₈-P 比例, O-P、Ca₁₀-P 比例降低, Al-P 比例先增加后减小, P3 处理最大, P4 处理最小, Fe-P 占比变化不明显。其余各处理 Ca₂-P、Ca₈-P 较 P1 处理分别增加了 20.08%~38.87%、12.12%~27.73%; 其余各处理 O-P、Ca₁₀-P 比例较 P1 处理分别降低了 4.47%~8.34%、

7.48%~15.32%; Al-P 比例 P3 处理较 P1 处理增加 18.07%, P4 处理较 P1 处理降低 4.51%。氮磷配施下, Ca₈-P 和 Ca₁₀-P 变动幅度最大。

2.2 不同氮磷配施对环境因子的影响

2.2.1 对土壤化学性质的影响 由表 3 可知, 土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷含量施氮水平和施磷水平的主效应和交互效应的 P 值均小于 0.05, 因此

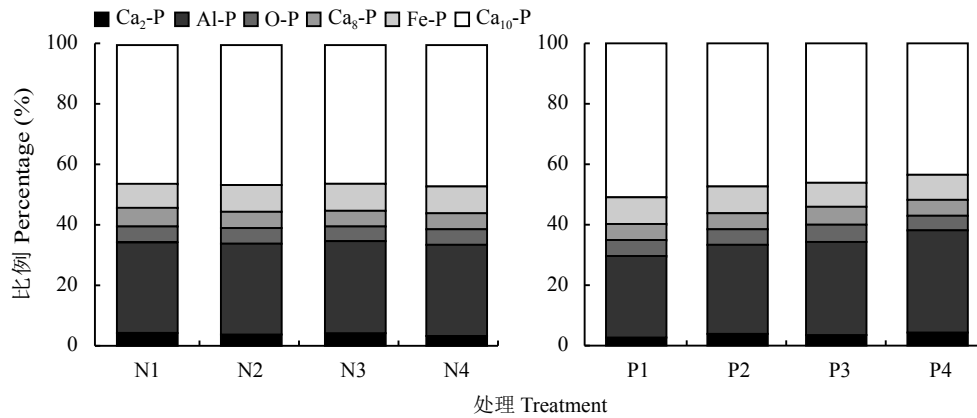


图2 不同水平氮、磷处理土壤中无机磷组分的百分比

Fig. 2 Percentage of each inorganic P fraction in soils applied with different levels of N and P

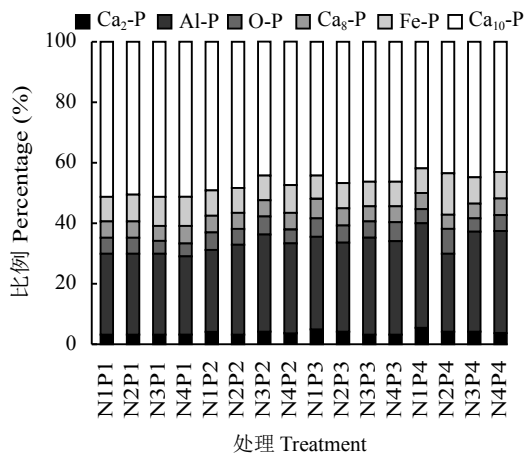


图3 氮磷配施土壤中无机磷组分的百分比

Fig. 3 Percentage of each inorganic P fraction in soils applied with different N and P combination

可以认为施氮和施磷及其交互效应均能对土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷含量产生影响 ($P < 0.05$)。土壤 pH 主效应差异显著 ($P < 0.05$)，交互效应差异不显著。不同处理的土壤有机碳含量居于 8.78~10.11 g/kg，随着施氮量的增加土壤有机碳含量先增加后减小，N3 处理最大，随施磷量的增加先减小后增加，P3 处理最小；全氮含量为 0.80~1.15 g/kg，随着施氮、磷量的增加而增加；全磷含量为 844.72~1038.55 mg/kg，随施氮量的增加而减小，随施磷量的增加而增加；有效磷含量为 13.15~28.87 mg/kg，变化趋势与全磷一致。pH 为 8.31~8.49，施氮显著降低了 pH ($P < 0.05$)。

2.2.2 对陇中旱作春小麦产量的影响 由表 4 可知，地上部生物量、磷肥回收利用率不同施氮磷水平的主效应和交互效应的 P 值均小于 0.05，因此可以认为氮磷水平及其交互效应均能对地上部生物

量、磷肥回收利用率产生影响 ($P < 0.001$)。籽粒产量主效应差异显著 ($P < 0.05$)，交互效应差异不显著。籽粒产量变化范围为 1815.4~2076.2 kg/hm²，随施氮量的增加先增加后减小，N3 处理最大，N1 处理最小，随施磷量的增加而增加；地上部生物量在 4726.4~7428.9 kg/hm² 变动，随施氮磷量的增加先增加后减小，且均在 N3 处理达到最大；磷肥回收利用率在 6.00%~68.96%，各施磷处理为 P3 > P2 > P4。地上部生物量、磷肥回收利用率均为 N3P3 处理最高。

2.2.3 对土壤微生物学特性的影响 由表 4 可知，土壤微生物量碳、氮、磷及碱性磷酸酶活性的不同氮磷水平的主效应和交互效应的 P 值均小于 0.05，因此可以认为氮磷水平及其交互效应均能对土壤微生物量碳、氮、磷及碱性磷酸酶活性产生影响 ($P < 0.01$)。微生物量碳含量和碱性磷酸酶活性变化范围分别为 227.6~305.5 mg/kg DW、phenol 1.1~1.8 mg/(g·24 h) DW，均随施氮量的增加先增加后减小，N3 处理最大，均随施磷量的增加先增加后减小，P3 处理最大；微生物量氮、磷含量分别在 27.6~41.4 mg/kg DW、4.6~21.1 mg/kg DW 变动，均随施氮量的增加先增加后减小，N3 处理最大，均随施磷量的增加而增加。

2.3 不同氮磷配施对土壤无机磷组分有效性的影响

在土壤磷循环中，不同组分无机磷和有效磷之间处于动态平衡，它们之间存在一定程度的相互影响和制约。本研究土壤有效磷与 Ca₂-P、Ca₈-P、Fe-P、O-P 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，与 Al-P 呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与 Ca₁₀-P 相关性不显著 ($P > 0.05$)。有效磷与 Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P 和

表 3 不同氮磷处理下土壤化学性质
Table 3 Chemical properties of soil under different N and P combination treatments

处理 Treatment	SOC (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (mg/kg)	Olsen-P (mg/kg)	pH
N1	9.29 c	0.88 c	942.00 a	22.10 a	8.46 a
N2	9.57 a	0.96 b	911.60 b	18.77 b	8.42 b
N3	9.64 a	0.98 b	904.80 c	18.25 b	8.41 b
N4	9.47 b	1.04 a	902.56 c	17.36 c	8.41 b
显著性 Sig.	***	***	***	***	*
P1	9.93 a	0.90 c	853.49 d	14.33 d	8.44 a
P2	9.53 b	0.95 b	883.10 c	17.78 c	8.43 a
P3	9.24 c	0.99 a	931.92 b	20.52 b	8.46 a
P4	9.26 c	1.02 a	992.45 a	23.87 a	8.38 b
显著性 Sig.	***	***	***	***	***
N1P1	9.85 ± 0.03 bc	0.80 ± 0.002 g	860.52 ± 1.12 h	15.40 ± 0.89 ij	8.48
N2P1	9.96 ± 0.39 ab	0.89 ± 0.013 f	851.82 ± 2.31 ij	14.58 ± 0.66 j	8.44
N3P1	10.11 ± 0.07 a	0.91 ± 0.158 ef	856.91 ± 1.93 hi	14.16 ± 0.21 jk	8.43
N4P1	9.83 ± 0.05 bc	0.99 ± 0.029 bcd	844.72 ± 1.86 j	13.15 ± 1.44 k	8.41
N1P2	9.37 ± 0.02 fgh	0.90 ± 0.056 ef	894.20 ± 12.06 f	19.93 ± 0.20 de	8.45
N2P2	9.59 ± 0.03 de	0.93 ± 0.030 def	892.23 ± 10.27 f	16.22 ± 0.60 hi	8.42
N3P2	9.74 ± 0.03 cd	0.97 ± 0.045 cde	875.94 ± 2.99 g	17.62 ± 0.01 fgh	8.38
N4P2	9.43 ± 0.01 efg	1.01 ± 0.007 bcd	870.01 ± 3.23 g	17.34 ± 0.78 gh	8.45
N1P3	9.17 ± 0.02 h	0.87 ± 0.032 fg	974.74 ± 2.72 c	24.19 ± 0.37 b	8.49
N2P3	9.23 ± 0.01 gh	0.97 ± 0.013 cde	917.79 ± 8.16 de	20.58 ± 0.13 d	8.45
N3P3	9.30 ± 0.14 gh	0.98 ± 0.022 cd	911.54 ± 5.64 e	18.99 ± 0.64 ef	8.43
N4P3	9.25 ± 0.08 gh	1.15 ± 0.049 a	923.61 ± 4.51 d	18.30 ± 2.17 fg	8.45
N1P4	8.78 ± 0.05 i	0.95 ± 0.004 def	1038.55 ± 4.98 a	28.87 ± 0.54 a	8.42
N2P4	9.51 ± 0.06 ef	1.06 ± 0.008 b	984.54 ± 3.14 b	23.72 ± 0.28 b	8.39
N3P4	9.40 ± 0.02 efg	1.04 ± 0.013 bc	974.83 ± 2.18 c	22.23 ± 0.73 c	8.39
N4P4	9.36 ± 0.05 fgh	1.03 ± 0.012 bc	971.90 ± 3.89 c	20.66 ± 0.19 d	8.31
显著性 Sig.	***	*	***	***	ns

注 (Note): SOC—土壤有机碳 Soil organic carbon; 表中数值均为平均值 ± 标准差 Data are mean ± SD ($n = 3$); 同列数据后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level; *— $P < 0.05$; ***— $P < 0.001$; ns—不显著 Not significant.

Ca₁₀-P 含量之间的相关系数分别为 0.974、0.863、0.445、0.860、0.720 和 0.248。

土壤各形态的无机磷之间处于一个动态平衡。简单相关分析无法完全了解土壤各组分磷对有效磷的贡献大小。为此采用通径分析研究各形态土壤无机磷对有效磷的贡献。通径分析可以说明不同无机磷形态对土壤有效磷具有直接影响, 还是该形态通过影响其他形态的无机磷对有效磷产生间接影响。

比较土壤各形态无机磷组分对有效磷的通径系数 (表 5) 可看出, 各形态无机磷对有效磷直接贡献顺序为: Ca₂-P (1.0060) > O-P (0.2175) > Al-P (0.1143) > Ca₁₀-P (0.0757) > Fe-P (-0.1135) > Ca₈-P (-0.1781)。Ca₂-P 对有效磷的直接通径系数最大, 说明其与有效磷的相关程度最高, 表明 Ca₂-P 是作物最有效的磷源。Ca₂-P、Al-P、O-P、Ca₁₀-P 对有效磷具有正向直接效应, 虽然 Al-P、O-P 与有效磷呈显著正相关, 但直接效

表 4 氮磷配施陇中旱作春小麦产量及土壤微生物学特性
 Table 4 Yield of spring wheat and soil microbiological indices affected by different N and P combination in Longzhong dryland area

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield (kg/hm ²)	地上部生物量 Aboveground biomass (kg/hm ²)	RE _p (%)	MBC (mg/kg)	MBN (mg/kg)	MBP (mg/kg)	ALP [mg/ (g·24 h)]
N1	1890.6 b	4979.1 d		235.2 c	31.3 c	7.6 c	1.2 c
N2	1925.6 ab	5828.4 b		242.4 bc	33.5 b	12.7 a	1.5 c
N3	1961.9 a	6151.3 a		256.4 a	34.4 a	13.3 a	1.5 a
N4	1951.6 a	5627.1 c		247.2 ab	33.6 b	11.7 b	1.4 b
显著性 Sig.	*	***		**	***	***	***
P1	1846.3 c	5233.3 c		237.1 c	30.1 c	9.0 d	1.2 c
P2	1896.2 b	5311.4 c	30.60 b	248.6 b	31.4 b	9.8 c	1.3 a
P3	1928.0 b	6117.7 a	33.53 a	262.3 a	35.2 a	11.3 b	1.5 a
P4	2058.9 a	5923.5 b	16.74 c	233.2 c	35.9 a	15.2 a	1.4 b
显著性 Sig.	***	***	***	***	***	***	***
N1P1	1815.4 a	4726.4 ± 94.1 g		241.3 ± 22.6 c	28.9 ± 0.2 f	4.6 ± 0.6 g	1.1 ± 0.01 f
N2P1	1849.1 a	5526.7 ± 48.0 de		239.0 ± 18.4 c	31.6 ± 0.9 de	9.1 ± 0.9 f	1.1 ± 0.04 f
N3P1	1893.0 a	5422.5 ± 424.5 de		237.0 ± 1.2 c	32.5 ± 1.1 cd	11.4 ± 0.5 de	1.4 ± 0.02 bc
N4P1	1827.8 a	5257.7 ± 397.6 ef		231.1 ± 8.6 c	27.6 ± 1.2 f	10.8 ± 0.8 de	1.3 ± 0.03 cd
N1P2	1868.9 a	4810.8 ± 111.7 g	9.43 ± 2.75 f	233.6 ± 4.6 c	30.8 ± 0.8 e	5.3 ± 1.1 g	1.1 ± 0.02 ef
N2P2	1912.9 a	5378.1 ± 107.0 de	32.74 ± 4.27 c	236.4 ± 14.0 c	32.9 ± 0.2 cd	10.1 ± 0.7 ef	1.5 ± 0.05 b
N3P2	1930.6 a	5559.1 ± 113.1 de	38.26 ± 2.28 b	251.6 ± 22.7 bc	30.5 ± 0.3 e	11.0 ± 0.7 de	1.3 ± 0.02 d
N4P2	1872.4 a	5497.5 ± 136.7 de	41.97 ± 4.46 b	272.8 ± 8.7 b	31.6 ± 1.3 de	13.1 ± 0.7 c	1.3 ± 0.04 de
N1P3	1845.8 a	4920.2 ± 68.2 fg	9.90 ± 0.81 f	238.2 ± 19.5 c	33.7 ± 1.2 c	10.0 ± 0.2 ef	1.3 ± 0.05 d
N2P3	1878.1 a	6599.0 ± 360.9 b	29.93 ± 1.50 cd	250.6 ± 7.5 bc	36.6 ± 0.2 b	10.6 ± 0.6 de	1.8 ± 0.08 a
N3P3	1947.9 a	7428.9 ± 418.4 a	68.96 ± 2.45 a	305.5 ± 3.5 a	33.2 ± 0.5 c	13.4 ± 0.4 c	1.8 ± 0.12 a
N4P3	2040.1 a	5522.7 ± 165.9 de	25.34 ± 4.02 de	255.1 ± 24.2 bc	37.4 ± 0.6 b	11.2 ± 1.0 de	1.3 ± 0.13 cd
N1P4	2030.9 a	5459.0 ± 206.4 de	6.00 ± 2.77 f	227.6 ± 9.2 c	31.7 ± 0.3 de	10.7 ± 0.6 de	1.3 ± 0.09 cd
N2P4	2062.2 a	5809.7 ± 92.1 d	7.76 ± 2.45 f	243.8 ± 5.1 c	32.9 ± 1.2 cd	21.1 ± 1.3 a	1.4 ± 0.15 bc
N3P4	2076.2 a	6194.6 ± 81.6 c	28.37 ± 1.35 cde	231.7 ± 4.4 c	41.4 ± 1.3 a	17.5 ± 0.4 b	1.5 ± 0.04 b
N4P4	2066.2 a	6230.6 ± 160.7 bc	24.84 ± 0.73 e	229.6 ± 10.4 c	37.8 ± 1.3 b	11.7 ± 1.1 d	1.5 ± 0.11 b
显著性 Sig.	ns	***	***	***	***	***	***

注 (Note): 表中数值均为平均值 ± 标准差 Data are mean ± SD ($n = 3$); RE_p—磷肥回收利用率 Apparent recovery efficiency of applied phosphorus; MBC—微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN—微生物量氮 Microbial biomass N; MBP—微生物量磷 Microbial biomass P; ALP—碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity 同列数值后不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different letters indicate significant difference among treatments at the 0.05 level. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$; ns—不显著 Not significant.

应较小, 而 Ca₂-P 对它们的间接途径系数较大, 表明 Ca₂-P 通过影响其他形态的无机磷对有效磷产生间接作用。Fe-P、Ca₈-P 对有效磷具有负向直接效应, 但是 Fe-P、Ca₈-P 与有效磷的相关系数为正, 这主要是受 Ca₂-P、Al-P、O-P、Ca₁₀-P 的间接影响, 表明这

些无机磷组分通过影响其他形态的无机磷对有效磷产生间接作用。在对有效磷的影响上, 各形态无机磷对有效磷的间接效应影响着各形态无机磷与有效磷最终的相关关系。Ca₂-P 不仅直接效应高, 还通过间接作用影响其余 5 种形态无机磷, 进而导致其余

表 5 土壤中各形态无机磷对土壤有效磷的通路分析

Table 5 Path analysis of various forms of inorganic phosphorus in soil on soil available phosphorus

因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	r_{yi}	P_{yi}	$r_{y,P_{yi}}$	间接通路系数 Indirect impact path coefficient					
					→Ca ₂ -P	→Ca ₈ -P	→Al-P	→Fe-P	→O-P	→Ca ₁₀ -P
Olsen-P	Ca ₂ -P	0.9736	1.0060	0.9795	-0.1543	0.0537	-0.1001	0.1519	0.0163	-0.0325
	Ca ₈ -P	0.8631	-0.1781	-0.1537	0.8718	0.0510	-0.0799	0.1783	0.0200	1.0412
	Al-P	0.4451	0.1143	0.0509	0.4729	-0.0794	-0.0551	-0.0032	-0.0044	0.3308
	Fe-P	0.8605	-0.1135	-0.0977	0.8870	-0.1253	0.0555	0.1318	0.0250	0.9740
	O-P	0.7199	0.2175	0.1566	0.7025	-0.1460	-0.0017	-0.0688	0.0163	0.5024
	Ca ₁₀ -P	0.2480	0.0757	0.0188	0.2167	-0.0470	-0.0067	-0.0375	0.0468	0.1723

注 (Note): r_{yi} —相关系数 Correlation coefficient; P_{yi} —直接通路系数 Direct impact; $r_{y,P_{yi}}$ —变量对 R^2 的总贡献 Contribution of variables to R^2 .

5 种形态无机磷与有效磷间的相关系数也很高。由逐步回归分析可知, 土壤有效磷与各形态无机磷组分的逐步回归方程: Olsen-P = 0.638×Ca₂-P + 0.744, 其中方程 $r=0.970$, $P<0.01$, 达到显著水平, 逐步回归是有意义的。因此, Ca₂-P 是该区土壤有效磷的主要磷源。

2.4 环境因子与土壤无机磷组分之间的关系

冗余分析 (RDA) 结果 (图 4) 显示, 环境因子 (土壤基本化学性质、小麦产量、微生物特性) 对无机磷组分的解释率为 87.4%, 第一轴解释率为 73.97%, 第二轴解释率为 7.42%。从图 4 还可以看出, Ca₈-P 与全氮、Al-P 与磷肥回收利用率、O-P 与

籽粒产量、Fe-P 与地上部生物量和碱性磷酸酶活性以及微生物量氮呈极显著正相关, 有机碳与各无机磷组分均呈负相关。有机碳是影响无机磷组分变化的最重要因子, 对方差的解释率为 58.9%。环境变量对无机磷组分方差解释率大小顺序为有机碳 > 籽粒产量 > 全氮 > 微生物量磷 > 微生物量碳 > 微生物量氮 > 磷肥回收利用率 > 地上部生物量 > pH > 碱性磷酸酶活性。

3 讨论

3.1 不同氮磷配施对土壤无机磷组分的影响

近年来国内学者采用顾益初-蒋柏藩无机磷分级的方法对土壤的磷素状况等方面做了大量的研究, 结果表明我国北方石灰性土壤的无机磷含量主要以 Ca-P 为主, 平均占无机磷总量的 80%, 其中又以 Ca₁₀-P 占绝对优势, Ca₈-P 次之, Ca₂-P 含量最低, 仅为无机磷总量的 2% 左右, 其他 3 种形态 Al-P、Fe-P、O-P 占无机磷总量的 20% 左右^[30-31]。土壤中磷组分之间相互影响、制约, 植物有效磷的多少取决于土壤无机磷组分的分布状况和转化方式。本研究中, 土壤无机磷组分含量变化顺序为 Ca₁₀-P > Ca₈-P > O-P > Fe-P ≈ Al-P > Ca₂-P, 海龙^[11]在本文相同研究区春小麦耕作方式及轮作磷素形态研究中也得出相似结果。本研究中, 施磷显著提高了总无机磷的含量。这与很多研究^[32]结果相似。施氮显著降低了总无机磷的含量, 有研究^[33]表明, 总无机磷与土壤全磷含量显著正相关, 肥料的投入与土壤总磷库和无机磷磷库的增加显著相关。武均^[34]通过研究不同施氮量对陇中黄土高原旱作农田土壤理化性质的影响得出, 随施氮量的增加土壤全磷含量降低。这可能是随着

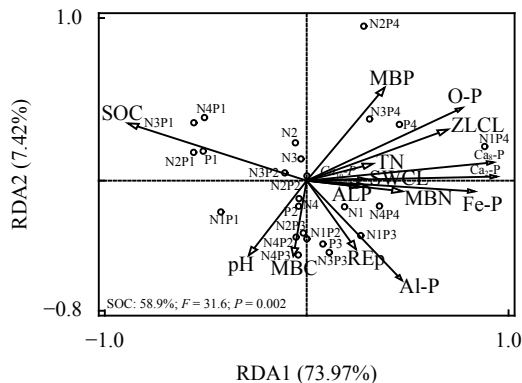


图 4 环境因子与土壤无机磷组分的冗余分析

Fig. 4 Redundant analysis of environmental factors and soil inorganic phosphorus forms

[注 (Note): SOC—有机碳 Soil organic carbon; TN—全氮 Total N; MBC—微生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN—微生物量氮 Microbial biomass N; MBP—微生物量磷 Microbial biomass P; ALP—碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity; REp—磷肥回收利用率 Apparent recovery efficiency of applied phosphorus; ZLCL—籽粒产量 Grain yield; SWCL—地上部生物量 Aboveground biomass.]

施氮量的增加作物产量增加, 而施磷量相同时作物吸收的磷素增多, 因而导致全磷含量降低。

有关施氮对土壤无机磷组分影响的研究较少, 张富仓等^[35]施氮对塿土无机磷组分的影响研究结果表明, 施氮显著降低除 O-P、Ca₈-P 以外的无机磷组分, 对 O-P 含量无显著影响。这与本研究结果相似, 但本研究中 O-P 无机磷含量随施氮量的增加而增加。可能是不同的施肥管理措施、试验的年限、取样方式与研究区域等影响土壤无机磷的分配与转化。本研究中, 施磷显著增加了各无机磷组分含量。大多数学者在我国北方研究表明, 施用磷肥增加土壤无机磷库^[2, 12, 30, 36], 本试验结果与此结果相似。这说明施用磷肥是提高土壤总磷库、无机磷库的有效手段。本研究中, 施氮量对各无机磷组分比例影响较小。Ca₂-P、Ca₈-P 占无机磷总量的比例随着施磷量的增加而增加, Ca₁₀-P、O-P 所占的比例随着施磷量的增加呈显著下降趋势。Fe-P 占无机磷的比例随着施磷量的增加基本无变化, 这与王海龙^[12]在山东潮土上的研究结果相似。Al-P 随施磷量的增加先增加后减小。这可能与本地区的土壤性质及环境因素等有关。显然, 长期施磷肥主要通过提高可供植物直接利用的 Ca₂-P 和具有缓效作用 Ca₈-P、Al-P 的比例, 降低土壤中难溶性 Ca₁₀-P、O-P 的比例使土壤有效磷的含量增加, 从而提升了土壤潜在供磷能力^[30, 37-38]。

沈仁芳等^[3]在石灰性土壤无机磷形态及生物有效性的研究中表明, Ca₂-P 无机磷酸盐最有效, 也是作物吸收磷素营养的主要来源; Ca₈-P、Al-P 和 Fe-P 为缓效磷源; 而 Ca₁₀-P 和 O-P 则只是一种潜在磷源。本研究结果显示, 在陇中黄土高原旱作农业区 Ca₂-P 是土壤有效磷的主要磷源, Ca₈-P、Fe-P 是潜在磷源, 这与前人研究结果相似。

3.2 不同氮磷配施对环境因子的影响

本研究中, 不同氮磷配施对土壤理化性质产生显著影响。土壤有机碳随施氮量的增加先增加后减小, 随施磷量的增加而减小。武均^[34]在黄土高原对不同施氮量春小麦农田的研究发现, 施氮显著提高有机碳含量, 且随施氮量增加先增加后减小。这可能是由于施肥影响作物生长, 导致其消耗大量有机碳, 但土壤中并没有大量的碳源作为补充, 长期的消耗导致有机碳含量降低。本研究表明氮磷配施土壤全氮显著增加, 且随施肥量的增加而增加, 这与郝亚辉^[39]的研究结果类似。可能是由于随着施肥量的增加土壤中微生物的活性增加, 土壤中硝化细菌所

占的比例增加, 大大推进了土壤中的硝化作用, 这需要更多的碳素来提供能量, 因此土壤中有机物质的分解速度加快, 从而使全氮含量增大^[39]。本研究中, 施磷显著增加了土壤有效磷和全磷含量。这是由于在向土壤施加磷肥时, 土壤中所含的磷素增加, 虽然一大部分的磷肥会经过转化变成不能被植物所吸收利用的难溶解的磷形态, 但也会有一小部分的磷素本身具有有效性, 易溶或者微溶于土壤包含的溶液中, 这一部分就会被种植的作物直接利用。本研究中, 施氮与施磷的结果相反, 这可能是由于随着施氮量的增加, 作物产量增加, 而施磷量相同时, 作物吸收的磷素越多, 土壤全磷含量则越低。本研究的结论与武均^[34]、郝亚辉^[39]的研究结果一致。有研究认为施氮磷都能使土壤 pH 降低^[40]; 但也有研究表明施氮和氮磷配施显著降低土壤 pH, 而施磷对土壤 pH 没有显著影响^[39, 41]。本研究中, 施氮显著降低了土壤 pH。这可能是因为长期过量施用的氮肥, 经过土壤微生物的硝化作用产生了硝酸盐致使土壤酸化。

本研究中, 施氮显著提高了陇中黄土高原旱作春小麦的籽粒产量、地上部生物量, 且均在 N3 处理时达到最大。戴健^[42]研究发现施用氮肥可提高作物生物量、产量, 且二者均与施氮量呈显著的抛物线关系, 但过量施氮对增产没有显著效果甚至降低产量^[43-44]。本研究结果表明, 施磷显著提高了春小麦籽粒产量、地上部生物量、磷肥回收利用率, 且地上部生物量、磷肥回收利用率均在 P3 处理达到最大。有研究^[42, 45]发现, 施磷可促进作物根系生长, 增加对土壤水分、养分的利用, 提高作物的光合作用能力, 从而增加产量, 但施磷过量时, 小麦生长发育也会受到抑制^[46-47]。施磷量低时, 根系竞争力较强, 且较低的磷肥用量对土壤原有磷的激发效应较高, 因此磷肥利用率较高^[48-49]。陇中黄土高原旱作农业区磷肥利用率低, 主要是由于该区多为石灰性土壤, 施入磷肥后, 自由态磷易被土壤固定, 转化为缓效态和难溶态磷酸盐, 70%~80% 的磷以 Ca 的结合态存在, 也有部分以 Fe-P 和 Al-P 的形式存在, 且随着施磷量增加, 固定态磷增加, 导致磷肥的利用率降低^[50-51]。

土壤微生物学性状可以反映土壤质量与土壤肥力的演变趋势, 并作为评价土壤健康的重要指标之一。本研究中, 施氮显著增加微生物量碳、氮、磷含量和碱性磷酸酶活性, 均在 N3 处理达到最大。施氮对作物生长的正向影响加速了土壤有机质降解, 从而生成足够多的碳源、氮源, 满足土壤微生物的

生长繁殖需求, 微生物可利用的土壤养分增多, 同化进程增强从而使微生物量提高^[52-53]。杨馨逸等^[54]研究表明, 施用适量的氮肥能够显著提高土壤微生物量碳氮, 过量施氮则会降低土壤微生物量碳氮。施肥显著增加微生物量磷含量, 这可能由于本研究土壤样品在小麦成熟时采集, 土壤中的磷素可能已经被作物消耗致使土壤中缺乏有效的磷素, 当向土壤中施加磷肥时, 有效磷的含量随之增加, 而微生物就会随之得到更多可以直接利用的磷, 吸收并在其体内将磷同化结合, 最终造成微生物量磷含量的增大^[39]。适量施肥可以改善土壤微环境, 进而加快土壤中养分循环, 最终提高土壤碱性磷酸酶活性^[55]。夏雪等^[56]在黄土高原地区的试验研究结果表明, 碱性磷酸酶活性以 60 kg/hm² 氮肥处理最高。这表明, 施用适量氮肥对酶活性的提高比较有利, 而氮肥用量较低或者过量施用氮肥并不一定能取得较为理想的酶激活效果^[29, 57]。

3.3 环境因子与土壤无机磷组分之间的关系

RDA 结果显示, 有机碳是影响陇中黄土高原旱作春小麦农田耕层土壤无机磷组分变化的关键因子。土壤腐殖酸对于铁、铝离子具有较高的亲和力, 与土壤中的磷素竞争吸附位点, 从而降低对磷的吸附, 阻止磷素形成沉淀, 增加了土壤磷素的有效性^[58], 且土壤有机碳为土壤微生物生活提供了充足的能量, 促进了微生物对土壤有机磷的矿化^[59]。本研究中, Fe-P 与碱性磷酸酶活性、微生物量氮极显著正相关。在农田生态系统中, 土壤磷素的转化是由物理化学过程和微生物过程共同作用的结果。土壤微生物一方面作为土壤活性磷库的重要来源之一, 其吸收利用土壤中的无机磷, 避免被土壤吸附固定^[19]。另一方面, 土壤微生物分泌的磷酸酶对土壤磷素起到了活化作用^[9]。pH 对土壤磷素化学形态及含量有重要的控制作用, 其影响程度的高低与土壤本身含有的离子和矿物的浓度相关, 主要包括与磷酸根离子竞争络合以及与吸附位点的阴离子和磷酸根离子结合的 Fe、Al 和 Mn 等金属离子^[60]。

4 结论

氮磷配施能够促进土壤磷素的活化, 提高可供植物直接利用的 Ca₂-P 和具有缓效作用 Ca₈-P、Al-P 的比例, 降低土壤中难溶性 Ca₁₀-P、O-P 的比例, 提高了土壤供磷潜力。Ca₂-P 是土壤有效磷的主要磷源, 土壤有机碳是调控陇中黄土高原旱作春小麦农

田耕层土壤磷组分转化的关键因子。

参 考 文 献:

- [1] 张森, 赵书岗, 耿丽平, 等. 缺磷对不同作物根系形态及体内养分浓度的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2013, 19(3): 577-585.
Zhang M, Zhao S G, Gen L P, *et al.* Effects of phosphorus deficiency on root morphology and nutrients concentrations of different crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(3): 577-585.
- [2] 孙倩倩, 王正银, 赵欢, 等. 定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2539-2549.
Sun Q Q, Wang Z Y, Zhao H, *et al.* Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2539-2549.
- [3] 沈仁芳, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷的形态分布及其有效性[J]. *土壤学报*, 1992, 29(1): 80-86.
Shen R F, Jiang B F. Distribution and availability of inorganic phosphorus in calcareous soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(1): 80-86.
- [4] 吴萍萍, 刘金剑, 周毅, 等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2008, 14(2): 277-283.
Wu P P, Liu J J, Zhou Y, *et al.* Effect of long-term different fertilization system on fertilizer utilization of rice fields in red soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008, 14(2): 277-283.
- [5] 余海英, 李廷轩, 张树金, 等. 温室栽培条件下土壤无机磷组分的累积、迁移特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(5): 956-962.
Yu H Y, Li T X, Zhang S J, *et al.* Accumulation and migration characteristics of inorganic phosphorus components of soil under greenhouse cultivation conditions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(5): 956-962.
- [6] 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 of determination of inorganic phosphorus classification in lime soil[J]. *Soils*, 1990, 22(2): 101-102, 110.
- [7] 宋书会. 磷肥减施及覆膜条件下黑土磷素供应特征与转化机制[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2019.
Song S H. Phosphorus supply and transformation in mollisol under reduced phosphate rate and plastic film mulching[D]. Beijing: PhD Dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [8] 毛璐, 宋春, 徐敏, 等. 栽培模式及施肥对玉米和大豆根际土壤磷素有效性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(12): 1502-1510.
Mao L, Song C, Xu M, *et al.* Effects of cropping patterns and fertilization on rhizosphere soil phosphorus availability of maize/soybean relay intercropping system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(12): 1502-1510.
- [9] 何晓雁, 郝明德, 李丽霞, 等. 黄土高原轮作系统苜蓿土壤磷素变化特征[J]. *草地学报*, 2014, 22(5): 1056-1062.
He X Y, Hao M D, Li L X, *et al.* Changes of soil phosphorus in alfalfa rotation system in the Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(5): 1056-1062.
- [10] 刘文静, 张平究, 董国政, 等. 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2654-2662.
Liu W J, Zhang P J, Dong G Z, *et al.* Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in Caizi

- lake, Anhui Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2654–2662.
- [11] 海龙. 耕作方式及轮作对土壤磷素形态影响的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2006.
- Hai L. Study on the effect of farming methods and rotation on soil phosphorus fractions[D]. Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2006.
- [12] 王海龙. 多年定位试验条件下不同施磷水平对土壤磷形态和生物有效性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学博士学位论文, 2019.
- Wang H L. Effects of different phosphate fertilizer application rates on soil phosphorus fractions and bioavailability under long-term experiment[D]. Tai'an: PhD Dissertation of Shandong Agricultural University, 2019.
- [13] Abdala D B, Da Silva I R, Vergüt L, *et al.* Long-term manure application effects on phosphorus speciation, kinetics and distribution in highly weathered agricultural soils[J]. *Chemosphere*, 2015, 119(1): 504–514.
- [14] Chen L, Chao Z, Duan W. Temporal variations in phosphorus fractions and phosphatase activities in rhizosphere and bulk soil during the development of *Larix olgensis* plantations[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2015, 179(1): 67–77.
- [15] De Campos M, Antonangelo J A, Alleoni L R F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 156(1): 110–118.
- [16] 杨毅, 赵文婷. 不同施肥制度对北方石灰性土壤无机磷形态影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(7): 28–33.
- Yang Y, Zhao W T. Influence of inorganic phosphorus forms on calcareous soil under different fertilization systems in northern China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(7): 28–33.
- [17] Valadares R V, Cantarutti R B, Mattiello E M, *et al.* Agronomic effectiveness of rock phosphate combined with nitrogen sources in spot application: a pot experiment[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2017, 180(5): 585–593.
- [18] Zhou Q P, Biswas D K, Ma B L. Comparisons among cultivars of wheat, hulless and hulled oats: dry matter, N and P accumulation and partitioning as affected by N supply[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2013, 176(6): 929–941.
- [19] 刘旭军, 程小琴, 田慧霞, 等. 间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7686–7696.
- Liu X J, Chen X Q, Tian H X, *et al.* Effect of inter-cutting and falling material treatment on the soil phosphorus morphology of the plant-age pine forest in north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7686–7696.
- [20] 王伯仁, 徐明岗, 文石林. 长期施肥对红壤磷组分及活性酸的影响[J]. *中国农学通报*, 2007, 23(3): 254–259.
- Wang B R, Xu M G, Wen S L. The effect of long-term fertilizer application on phosphorus in red upland soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(3): 254–259.
- [21] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 4–11.
- Yang W Z, Shao M A. Soil moisture in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2000. 4–11.
- [22] 李孝良, 于群英, 陈如梅. 土壤有机磷形态的生物有效性研究[J]. *土壤通报*, 2003, 34(2): 98–101.
- Li X L, Yu Q Y, Chen R M. Bio-availability of different forms of soil organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(2): 98–101.
- [23] 陈磊, 郝明德, 张少民. 黄土高原长期施肥对小麦产量及肥料利用率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2006, 26(5): 101–105.
- Chen L, Hao M D, Zhang S M. Effect of long-term application of fertilizer on wheat yield and fertilizer use efficiency in Loess Plateau[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006, 26(5): 101–105.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [25] 鲁如坤. 土壤农化分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000.
- Lu R K. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [26] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1985, 17(6): 837–842.
- [27] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- Lin X G. Principles and methods of soil microbiology research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [28] 吴金水, 肖和艾, 陈桂秋, 等. 旱地土壤微生物磷测定方法研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(1): 70–78.
- Wu J S, Xiao H A, Chen G Q, *et al.* Study on determination method of microbial phosphorus in dry soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 70–78.
- [29] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- Guan S Y. Soil enzymes and research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [30] 李若楠, 王政培, Batbayar J, 等. 等有机质壤土有效磷和无机磷形态的关系[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(21): 3852–3865.
- Li R N, Wang Z P, Batbayar J, *et al.* Relationship between soil available phosphorus and inorganic phosphorus forms under equivalent organic matter condition in a tier soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(21): 3852–3865.
- [31] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 790–794.
- Xie L H, Lü J L, Zhang Y P, *et al.* Influence of long-term fertilization on phosphorus fertility of calcareous soil II. Inorganic and organic phosphorus[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(5): 790–794.
- [32] 张立花. 施肥对小麦玉米轮作磷营养的影响[D]. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文, 2013.
- Zhang L H. Effect of phosphorus on wheat/maize rotation phosphorus nutrition[D]. Zhengzhou: MS Thesis of Henan Agricultural University, 2013.
- [33] 金欣, 姚珊, Batbayar J, 等. 冬小麦-夏休闲体系作物产量和土壤磷形态对长期施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1660–1671.
- Jin X, Yao S, Batbayar J, *et al.* The response of crop yield and soil

- phosphorus form to long-term fertilization in winter wheat-summer leisure system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1660–1671.
- [34] 武均. 不同管理措施下陇中黄土高原旱作农田土壤生态化学计量学特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学博士学位论文, 2018.
Wu J. Study on soil ecological stoichiometry under different soil management practices in dry farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province[D]. Lanzhou: PhD Dissertation of Gansu Agricultural University, 2018.
- [35] 张富仓, 康绍忠, 李志军. 施氮对小麦根-土界面磷迁移及根际磷素组分变化特征的影响[J]. *土壤学报*, 2003, 40(4): 635–639.
Zhang F C, Kang S Z, Li Z J. Effect of application of nitrogen fertilizer on phosphorus trans location and changes of inorganic phosphorus fractions at soil-root interface of wheat[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 635–639.
- [36] 张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 不同磷效率小麦对磷的吸收及根际土壤磷组分特征差异[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3083–3092.
Zhang X Z, Yang X B, Li T X, *et al.* Characteristics of phosphorus uptake and phosphorus fractions in the rhizosphere among different phosphorus efficiency wheat cultivars[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(15): 3083–3092.
- [37] 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.
- [38] 张英鹏, 陈清, 李彦, 等. 不同磷水平对山东褐土耕层无机磷形态及磷有效性的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 245–248.
Zhang Y P, Chen Q, Li Y, *et al.* Effect of phosphorus levels on form and bioavailability of inorganic P in plough layer of cinnamon soil in Shandong Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 245–248.
- [39] 郝亚辉. 长期氮磷添加对黄土旱塬农田土壤碳氮磷及细菌特征的影响[D]. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文, 2017.
Hao Y H. Effects of long-term nitrogen and phosphorus addition on soil carbon, nitrogen and phosphorus and bacterial characteristics in the Loess Plateau[D]. Xi'an: MS Thesis of Shanxi Normal University, 2017.
- [40] 施瑶, 王忠强, 张心昱, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原土壤微生物群落结构的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(17): 4943–4949.
Shi Y, Wang Z Q, Zhang X Y, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community composition in temperate typical grassland in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4943–4949.
- [41] 苏渝钦, 刘何铭, 郑泽梅, 等. 氮磷添加对中亚热带常绿阔叶林土壤有效氮和 pH 值的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2279–2285.
Su Y Q, Liu H M, Zhen Z M, *et al.* Effects of N and P addition on soil available nitrogen and pH in a subtropical forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9): 2279–2285.
- [42] 戴健. 旱地冬小麦产量、养分利用及土壤硝态氮对长期施用氮磷肥和降水的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2016.
Dai J. Responses of winter wheat yield, nutrient utilization and nitrate in soil to long term nitrogen and phosphorus fertilization and precipitation on dryland[D]. Yangling: PhD Dissertation of Northwest A&F University, 2016.
- [43] Zhao S C, Qiu S J, Cao C Y, *et al.* Responses of soil properties, microbial community and crop yields to various rates of nitrogen fertilization in a wheat-maize cropping system in north-central China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2014, 194(1): 29–37.
- [44] 张少民, 郝明德, 陈磊. 黄土高原长期施肥对小麦产量及土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 85–89.
Zhang S M, Hao M D, Chen L. Effects of long-term fertilization on yield of wheat and soil fertility in dry-land of Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(6): 85–89.
- [45] 关军锋, 李广敏. 施磷对限水灌溉小麦根冠及产量的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(4): 108–111.
Guan J F, Li G M. Effects of P application on root-top characteristics and yield of wheat under water-limited condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(4): 108–111.
- [46] 梁银丽, 康绍忠. 限量灌水和磷营养对冬小麦产量及水分利用的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1997, 11(1): 62–68.
Liang Y L, Kang S Z. Effect of irrigating-limited and phosphorus supplied on yield and water use of winter wheat[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 11(1): 62–68.
- [47] 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[J]. *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[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5): 628–634.
- [48] 邢丹, 李淑文, 夏博, 等. 磷肥施用对冬小麦产量及土壤氮素利用的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 437–442.
Xing D, Li S W, Xia B, *et al.* Effects of phosphorus fertilization on yield of winter wheat and utilization of soil nitrogen[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 437–442.
- [49] Hao M D, Fan J, Wang Q J, *et al.* Wheat grain yield and yield stability in a long-term fertilization experiment on the Loess Plateau[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 257–264.
- [50] 李廷亮, 谢英荷, 洪坚平, 等. 施磷水平对晋南旱地冬小麦产量及磷素利用的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(6): 658–665.
Li T L, Xie Y H, Hong J P, *et al.* Effects of phosphorus application rates on winter wheat yield and phosphorus use efficiency in drylands of South Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 658–665.
- [51] Bahl G S, Pasricha N S. Efficiency of P utilization by pigeonpea and wheat grown in a rotation[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(3): 225–229.
- [52] 周娅. 旱作玉米农田土壤酶活性及微生物量碳氮对施氮、覆膜与大气 CO₂ 浓度升高的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2019.
Zhou Y. Effects of nitrogen fertilization, film mulching and elevated CO₂ on soil enzyme activities and microbial biomass carbon and nitrogen in a spring maize field, Loess Plateau[D]. Yangling: MS

- Thesis of Northwest A&F University, 2019.
- [53] 朱利霞, 岳善超, 沈玉芳, 等. 施氮和覆膜对旱作春玉米农田土壤微生物量和土壤酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 130–136.
- Zhu L X, Yue S C, Shen Y F, *et al.* Effects of nitrogen fertilization and film mulching on soil microbial biomass and enzyme activity of spring maize in semi-arid cropland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(1): 130–136.
- [54] 杨馨逸, 刘小虎, 韩晓日, 等. 不同品种小麦下土壤微生物量和可溶性有机物对不同施氮量的响应[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(7): 1315–1324.
- Yang X Y, Liu X H, Han X R, *et al.* Responses of soil microbial biomass and soluble organic matter to different application rates of N: A comparison between Liaochun10 and Liaochun18[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1315–1324.
- [55] 郭天财, 宋晓, 马冬云, 等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 110–114.
- Guo T C, Song X, Ma D Y, *et al.* Effects of nitrogen application rate on soil enzyme activities in wheat rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 110–114.
- [56] 夏雪, 谷洁, 车升国, 等. 施氮水平对壤土微生物群落和酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(8): 1618–1627.
- Xia X, Gu J, Che S G, *et al.* Effects of nitrogen application rates on microbial community and enzyme activities in Lou Soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(8): 1618–1627.
- [57] 梁路, 马臣, 张然, 等. 有机无机肥配施提高旱地麦田土壤养分有效性及酶活性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 544–554.
- Liang L, Ma C, Zhang R, *et al.* Improvement of soil nutrient availability and enzyme activities in rainfed wheat field by combined application of organic and inorganic fertilizers[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4): 544–554.
- [58] 陈立新, 杨承栋. 落叶松人工林土壤磷形态、磷酸酶活性演变与林木生长关系的研究[J]. *林业科学*, 2004, 40(3): 12–18.
- Chen L X, Yang C D. The succession of various types of phosphorus, phosphatase activity, and the relationship with the tree growth in larch plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(3): 12–18.
- [59] Spohn M, Kuzyakov Y. Phosphorus mineralization can be driven by microbial need for carbon[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 61(1): 69–75.
- [60] 詹书侠. 中亚热带丘陵红壤区森林演替典型阶段土壤磷分级与有效性[D]. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2008.
- Zhan S X. Phosphorus fractionation and availability at typical stages of forest succession under hilly red soil in mid-subtropical region[D]. Nanchang: MS Thesis of Nanchang University, 2008.