

氮添加对黄土高原春小麦耕层土壤 磷组分及植株磷分布的影响

殷小东^{1,2}, 齐鹏^{1,2,3,5}, 焦亚鹏¹, 王晓娇⁴,
张燕江¹, 薛江龙¹, 李华强¹

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学国家重点实验室, 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. 甘肃省畜禽废弃物资源化利用工程研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:以旱作农田春小麦为研究对象, 设置4个氮添加梯度, 分别为0(CK)、75、115、190 kg·hm⁻², 利用顾益初-蒋柏藩法和Bowman-Cole法于2019年和2020年连续测定收获后0~20 cm耕层土壤的无机磷组分和有机磷组分, 综合分析氮添加对土壤磷组分、植株器官磷含量的影响和驱动土壤磷转化的关键因素。结果表明: 氮添加增大了土壤无机磷占全磷的比例, 2019年增幅为1.02%~4.93%、2020年增幅为1.31%~4.92%; 同时也降低了土壤有机磷占全磷的比例, 降幅分别为0.74%~4.92%(2019年)和2.50%~4.92%(2020年)。与对照处理相比, N115处理显著($P<0.05$)降低了缓效和难以吸收利用的磷源, 其中在2019年和2020年无机磷组分Ca₈-P分别降低了8.55%和19.53%, Al-P分别降低了9.26%和12.88%, Fe-P分别降低了10.34%和39.21%, Ca₁₀-P分别降低了2.87%和16.27%; 有机磷组分MROP分别降低了18.18%和16.53%, MLOP分别降低了23.29%和14.59%。氮添加导致土壤有机碳显著提高了2.85%~5.54%(2019年)和8.54%~15.35%(2020年), 但土壤pH值显著降低了0.47%~0.83%和1.85%~2.42%。随着施氮量增加, 籽粒产量、地上部生物量均呈先升高后降低趋势, 变化范围分别为1 890.26~1 961.91、1 886.19~2 263.42 kg·hm⁻²(2019年), 4 726.41~5 905.79、5 283.62~5 755.19 kg·hm⁻²(2020年), 均在N0处理最小, N115处理最大。相关性分析结果表明有效磷与无机磷Ca₂-P呈极显著正相关($P<0.01$), 与有机磷MLOP呈显著正相关($P<0.05$), 与无机磷O-P呈显著负相关($P<0.05$)。因此, 氮添加可能通过增加碱性磷酸酶和微生物量碳、氮、磷的有效性, 降低土壤中缓效和难以吸收利用的磷源—无机磷Al-P、Fe-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P的含量, 促进有机磷MLOP、MROP的矿化, 进而促进黄土高原春小麦耕层土壤有效磷的转化。

关键词: 施氮; 春小麦; 耕层土壤磷组分; 植株磷分布; 黄绵土

中图分类号: S147.5; S512.1⁺2; S158.3 文献标志码: A

Effects of nitrogen addition on soil phosphorus components and plant phosphorus distribution in topsoil of spring wheat in the Loess Plateau

YIN Xiaodong^{1,2}, QI Peng^{1,2,3,5}, JIAO Yapeng¹, WANG Xiaojiao⁴,
ZHANG Yanjiang¹, XUE Jiangleong¹, LI huaqiang¹

(1. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. State Key Laboratory of Arid Habitat Crop Science of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Water-saving Agricultural Engineering Technology Research Gansu Province Center, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 5. Gansu Engineering Research Center for Resource Utilization of Livestock and Poultry Waste, Gansu Province Center, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Taking spring wheat in dry farmland as the research object, four nitrogen addition gradients of 0 (control), 75, 115, 190 kg·hm⁻² were set up in spring wheat of dry farmland. The inorganic phosphorus and or-

收稿日期: 2023-07-11

修回日期: 2023-10-07

基金项目: 甘肃省高校创新基金项目(2020B-135); 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2021-20); 甘肃省自然科学基金(21JR7RA830)

作者简介: 殷小东(1997-), 男, 甘肃定西人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态。E-mail: 15646481490@qq.com

通信作者: 齐鹏(1979-), 男, 甘肃武威人, 博士, 副教授, 主要从事土壤碳氮循环研究。E-mail: gsauqip@163.com

ganophosphate components in 0~20 cm topsoil were determined by Gu Yichu-Jiang Baifan method and Bowman-Cole method for two consecutive years. The effects of nitrogen addition on soil phosphorus content and plant organ phosphorus content and the key factors driving soil phosphorus transformation were analyzed. Nitrogen addition for two consecutive years (2019 - 2020) increased the biological availability of soil phosphorus, increased the proportion of soil inorganic phosphorus to total phosphorus 1.02%~4.93% in 2019, 1.31%~4.92% in 2020, and decreased the proportion of soil organic phosphorus to total phosphorus: 0.74%~4.92% (in 2019), 2.50%~4.92% (in 2020), compared with the control treatment. The N115 treatment significantly ($P<0.05$) reduced the slow and difficult to absorb and utilize phosphorus sources, among them, inorganic phosphorus components in 2019 and 2020 were $\text{Ca}_8\text{-P}$ (8.55%, 19.53%), Al-P (9.26%, 12.88%), Fe-P (10.34%, 39.21%), $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ (2.87%, 16.27%). The contents of MROP in 2019 and 2020 (18.18%, 16.53%) and MLOP (23.29%, 14.59%) were significantly reduced. Nitrogen addition significantly increased soil organic carbon by 2.85% to 5.54% in 2019 and 8.54% to 15.35% in 2020, but significantly decreased soil pH by 0.47% to 0.83% and 1.85% to 2.42%. With the increase of nitrogen application, grain yield and aboveground biomass increased first and then decreased, the range was 1 890.26~1 961.91, 1 886.19~2 263.42 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2019), 4 726.41~5 905.79, 5 283.62~5 755.19 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (2020), which were the smallest in N0 treatment and the largest in N115 treatment. The available phosphorus was positively correlated with inorganic phosphorus $\text{Ca}_2\text{-P}$ ($P<0.01$), positively correlated with organophosphorus MLOP ($P<0.05$), and negatively correlated with inorganic phosphorus O-P ($P<0.05$). The application of nitrogen fertilizer for two consecutive years in the topsoil of spring wheat in the Loess Plateau might mainly through increasing the effectiveness of alkaline phosphatase and microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus, thereby reducing the slow and difficulty level to absorb and utilize phosphorus sources in the soil; inorganic phosphorus Al-P , Fe-P , $\text{Ca}_8\text{-P}$ and $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, promoting the mineralization of organophosphorus MLOP and MROP, and then improving conversion of soil available phosphorus.

Keywords: nitrogen application; spring wheat; top soil phosphorus components; plant phosphorus distribution; yellow loam soil

磷素作为影响陆地植物生产力的重要营养元素,在农业生态系统中限制着作物的生长^[1]。在土壤中磷素主要以无机态的形式存在,约占全磷含量的 70%~80%,大部分磷被土壤吸附固定转化为缓效态和高稳态积累在土壤中,只有一小部分磷可被植物和微生物吸收利用^[2]。尤其在石灰性土壤中,磷易被黏土矿物或铁、铝、钙等矿质离子固定,其有效性普遍不高^[3]。植物能够利用的磷元素主要来源于土壤,持续的氮输入通过影响与氮密切相关的生物化学过程,进一步影响土壤磷组分和磷水解酶活性。土壤中含磷化合物种类丰富,根据其化学结构,一般可以分为有机磷和无机磷两大类^[4]。根据土壤无机磷的形态及我国石灰性土壤的特点,蒋伯藩和顾益初^[5]提出了石灰性土壤无机磷的分级方法,将石灰性土壤中 Ca-P 、 Fe-P 、 Al-P 和 O-P 进行很好的分离,并将土壤中的钙磷细分为 3 种形态,即 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 。根据土壤有机磷的形态, Bowman 和 Cole^[6]于 1978 年建立了较为完善的有机磷分组体系,将有机磷分为 4 个组分,分别为活性有机磷、中活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机

磷。在农业上通过施加氮肥影响土壤磷组分转化,进而提高作物产量^[7]。在氮限制的生态系统中,氮添加促进了微生物活性,提高微生物对磷的需求,同时促进了磷在不同形态之间的转化^[8]。因此,探究氮添加对土壤磷组分及水解酶活性的影响,揭示二者间的关系,对了解黄土高原地区氮沉降对磷形态的影响,理解磷有效性如何维持作物生长具有重要的理论和实践意义。

由于人为排放的活性氮含量增加,大气氮沉降加剧,这将会导致土壤氮/磷比例失衡,进而影响农业生态系统的养分循环^[9]。大量研究表明,氮沉降对土壤理化性质的影响主要包括改变土壤有机质含量、降低土壤 pH 值等,进而影响土壤磷组分^[10]。据报道,氮添加引起的土壤 pH 值下降会增加有机质对磷的吸附,进而降低生物有效磷的含量^[11]。土壤微生物对磷的吸收和释放对土壤磷的再分配起着至关重要的作用,尤其是有机磷的积累^[12]。植物可以通过刺激土壤微生物对有机磷等组分的转化来获取更多的速效磷^[11]。微生物能产生有机酸、碱性磷酸酶等物质,将中等易分解态的或难分解态的

磷转化为易分解态磷^[13]。相关研究表明:长期高强度氮输入会改变土壤微生物量碳、氮、磷比例,增加土壤碱性磷酸酶活性,从而改变微生物对土壤磷的吸收、固定和转化过程^[8]。除此之外,通过添加额外的氮素可以提升植物的生产力,从而增加植物对有效磷的需求^[7]。因此,进一步明确氮沉降对土壤微生物量碳、氮、磷组分及磷酸酶活性的影响,对理解土壤磷转化的过程具有重要意义。

黄土高原有着四千年以上的农业历史^[14],多年来,由于自然环境变化和人为活动的影响,导致该区土壤“贫磷”状况较为明显。科学合理施肥是改善土壤质量、提高作物产量的有效措施^[15]。目前的研究主要集中在通过测定土壤全磷和有效磷含量来分析氮添加处理对土壤磷的变化特征^[15-16],而对于土壤磷组分之间的变化以及氮添加与磷组分之间影响关系的研究还不够深入。因此,本研究以甘肃黄土高原黄绵土旱作小麦农田为研究对象,探究不同施氮量对春小麦耕层土壤磷组分和地上部分各器官全磷含量的影响,有助于理解氮沉降下贫磷生态系统土壤磷有效性和生产力的维持机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于甘肃省定西市李家堡镇麻子川村(104°44'E, 35°28'N),属陇中黄土高原旱作农业区。试区平均海拔2 000 m,无霜期140 d,年均日照时数2 476.6 h,年均太阳辐射594.7 kJ·cm⁻²,年均气温6.4℃,≥0℃积温2 933.5℃,≥10℃积温2 239.1℃,属中温带半干旱区,多年平均降水391 mm,年蒸发量1 531 mm,80%保证率的年降水量为365 mm,变异系数为24.3%,为典型的雨养农业区。试区土壤为典型的黄绵土,质地均匀、土质绵软。土壤基本理化性质为:pH值8.45,有机碳8.32 g·kg⁻¹,全氮0.86 g·kg⁻¹,全磷0.82 g·kg⁻¹,全钾28.0 g·kg⁻¹,碱解氮51.1 mg·kg⁻¹,速效磷21.2 mg·kg⁻¹,速效钾101 mg·kg⁻¹,0~20 cm土层土壤容重为1.17 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

采用随机完全区组排列,设置4个氮添加梯度,即0(CK, N0)、75(低氮, N75)、115(中氮, N115)、190 kg·hm⁻²(高氮, N190),各处理设3次重复,共计12个小区,各小区面积为27 m²(4.5 m×6 m)。施用氮肥为尿素(含N46%),于播种前作基肥一次性施入,不追肥,不施磷肥和钾肥。前茬作物收获后三耕两耩,供试作物为春小麦(定西40号),于2019年、2020年3月下旬播种,7月下旬收获,播种

量187.5 kg·hm⁻²,行距20 cm,播深7 cm。

1.3 样品采集及测定

2019年、2020年在春小麦收获后采用“S”型5点取样方法采集0~20 cm耕层土样,混匀并挑除其中动、植物残体,过2 mm筛,风干后备用。于7月25日小麦收获前,每个小区随机选取20株小麦,用去离子水洗净后将籽粒和秸秆分离,105℃烘30 min后于80℃烘干至恒重,称量计算干物质量,粉碎过筛后待测。

全磷采用H₂SO₄-HClO₄酸溶-钼锑抗比色法测定;土壤有效磷(Olsen-P)采用Olsen方法测定;土壤无机磷组分根据顾益初-蒋柏藩法^[5]将无机磷分为6级:Ca₂-P、Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P与Ca₁₀-P;土壤有机磷组分:Bowman-Cole法^[6]按其不同浓度酸碱溶液中的溶解性,将有机磷分为4组:活性有机磷(LOP),中等活性有机磷(MLOP),中稳定性有机磷(MROP),高稳定性有机磷(HROP)。土壤pH值采用土水比1:2.5电位法测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加加热法测定;全氮采用H₂SO₄消煮-凯氏定氮法测定;土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)采用氯仿熏蒸,0.5 mol·L⁻¹K₂SO₄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(MBC)、0.45(MBN);土壤微生物量磷采用氯仿熏蒸,0.5 mol·L⁻¹NaHCO₃浸提(土水比1:20),采用全自动间断化学分析仪(Smartchem H140, Italy)测定,换算系数为0.40^[17];土壤碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[17];采用H₂SO₄-H₂O₂消煮-钼钒黄比色法测定植株各器官磷含量。

1.4 数据处理

用Excel 2016和SPSS 25.0进行试验数据统计分析,采用单因素方差分析检验不同施氮处理各磷组分的显著性。采用Duncan's法检验不同处理平均值在P<0.05水平的显著性差异。采用Pearson相关分析法确定土壤各形态磷与春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量的关系,并用Origin 2021软件完成绘图。

2 结果与分析

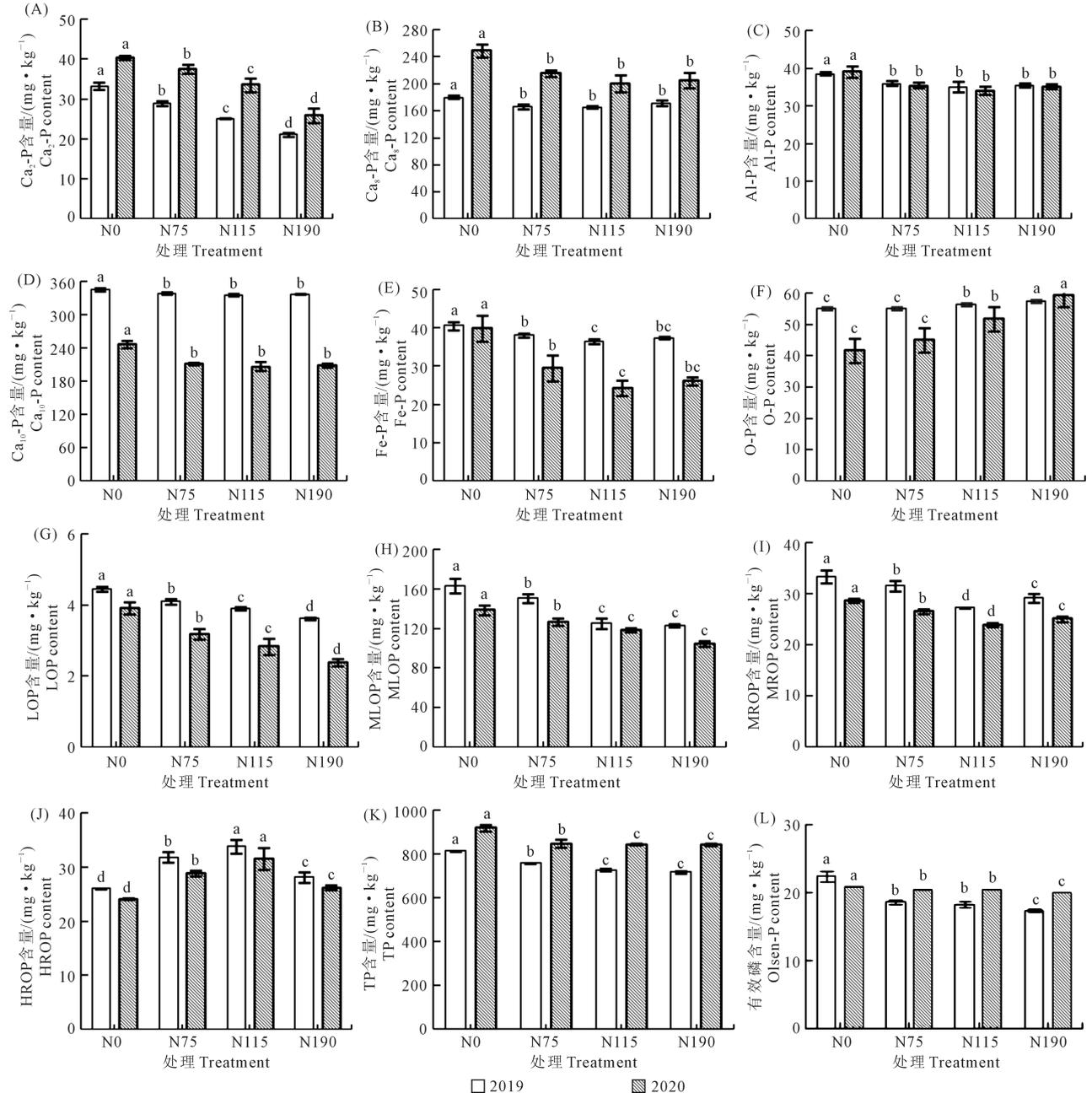
2.1 不同施氮量对土壤各形态磷含量的影响

土壤各形态磷含量在连续两年不同施氮量处理下均有显著差异(P<0.05)(图1)。相较于对照组(N0),连续两年氮添加导致了无机磷O-P和有机磷HROP含量增加,同时使得无机磷Ca₂-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P、Al-P、Fe-P和有机磷MROP、LOP、MLOP

以及 Olsen-P、TP 含量降低 ($P < 0.05$)。有机磷 HROP 的含量随着施氮量的增加呈先增加后减小趋势, N0 处理最小, 中氮 (N115) 处理最大。无机磷 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、Al-P、Fe-P 的含量及有机磷 MROP 的含量随着施氮量的增加先减小后增加, N0 处理最大, N115 处理最小。

连续两年不同施氮量下, 土壤总无机磷和总有机磷占全磷百分比的分布状况见图 2。由图 2 可知, 在所有处理中, 土壤无机磷组分主要以 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 为主, 土壤有机磷组分主要以 MLOP 为主。2019

年、2020 年土壤总无机磷分别占全磷的 73.91% ~ 78.84%、73.96% ~ 78.88%, 土壤总有机磷分别占全磷的 21.16% ~ 26.09%、21.12% ~ 26.04%。氮肥添加增加了总无机磷占全磷的比例, 与 N0 处理相比, N75、N115、N190 处理分别增加了 1.02%、4.19%、4.93% (2019) 和 1.31%、2.42%、4.92% (2020)。此外, 总有机磷占全磷的比例在不同施氮量下降低, 较 N0 处理, N75、N115、N190 各处理分别降低了 4.92%、3.92%、0.74% (2019) 和 4.92%、3.61%、2.50% (2020)。



注: 不同字母表示相同年份处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate a significant difference between treatments in the same year ($P < 0.05$).

图 1 2019 年和 2020 年不同施氮水平下土壤各形态磷含量

Fig. 1 Different forms of soil phosphorus content under different nitrogen application levels in 2019 and 2020

2.2 不同施氮量对春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量的影响

连续两年氮添加对春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量有显著影响($P<0.05$,表 1)。连续两年施氮均能提高茎、叶、籽粒的全磷含量以及籽粒产量和地上部生物量。茎和籽粒全磷含量随着施氮量增加而增加,变化范围分别为 435.93~497.74(2019 年)、353.33~503.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2020 年),3 421.79~3 567.95(2019 年)、2 530.00~3 176.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2020 年);叶全磷随着施氮量的增加先增加后降低,变化范围为 1 235.44~1 540.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (2019 年)和 1 096.67~1 400.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,N0 处理最小,中氮处理(N115)最大;随着施氮量的增加,籽粒产量先增加后减小,变化范围为 1 890.26~1 961.91 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (2019 年)和 1 886.19~2 263.42 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,相较于 N0 处理,2019 年分别提高了 1.87%(N75)、3.80%(N115)、3.25%(N190),2020 年分别提高了

5.63%(N75)、20.00%(N115)、19.49%(N190),N0 处理最小,N115 处理最大。随施氮量的增加,地上部生物量先增加后减小,变化范围分别为 4 726.41~5 905.79(2019 年)、5 283.62~5 755.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (2020 年),与 N0 相比,2019 年 N75、N115、N190 处理分别提高了 16.23%、24.95%、8.42%,2020 年分别提高了 3.21%、8.93%、6.20%,N0 处理最小,N115 处理最大。

2.3 土壤生物学性质及土壤有机碳、pH 值对施氮量的响应

连续两年氮添加对土壤生物学性质及土壤有机碳、pH 值有显著影响($P<0.05$,表 2)。不同水平的氮添加提高了微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、微生物量磷(MBP)、碱性磷酸酶(ALP)、土壤有机碳(SOC)的含量,同时降低了土壤 pH 值。MBC、MBN、MBP、ALP、SOC 的含量随着施氮量的增加先增加后降低,最大值均在 N115 处理,N115 处理

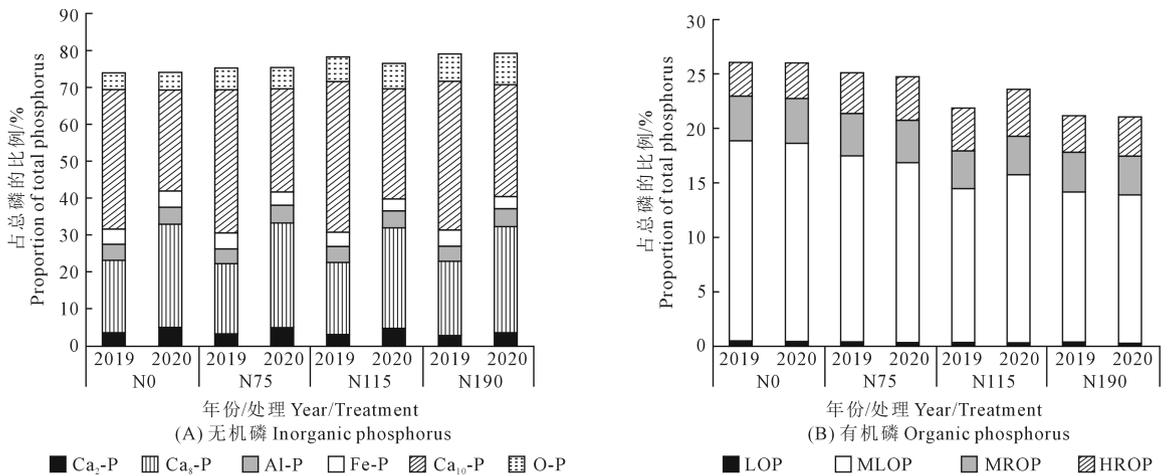


图 2 无机磷总量和有机磷总量占全磷的比例

Fig 2 Total inorganic phosphorus and total organic phosphorus as a proportion of total phosphorus

表 1 氮添加对春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量的影响

Table 1 Effects of nitrogen addition on organ phosphorus content, aboveground biomass and yield of spring wheat

年份 Year	处理 Treatment	茎全磷 Stem phosphorus $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	叶全磷 Leaf phosphorus $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	籽粒全磷 Grain phosphorus $\text{/(mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$	籽粒产量 Grain yield $\text{/(kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{)}$	地上部生物量 Aboveground biomass $\text{/(kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{)}$
2019	N0	435.93±7.16c	1235.44±52.74d	3421.79±21.85b	1890.26±6.21b	4726.41±94.13d
	N75	463.16±6.69b	1332.41±10.12c	3431.79±48.61b	1925.59±11.10ab	5493.34±6.63b
	N115	492.49±3.91a	1540.90±31.23a	3453.96±14.20b	1961.91±6.33a	5905.79±45.30a
	N190	497.74±1.35a	1471.99±17.23b	3567.95±25.46a	1951.63±5.12a	5124.35±167.51c
2020	N0	353.33±0.03c	1096.67±0.04c	2530.00±0.11b	1886.19±88.43b	5283.62±97.96d
	N75	426.67±0.04b	1256.67±0.09b	2556.67±0.21b	1992.35±81.93ab	5453.48±44.63c
	N115	496.67±0.04a	1400.00±0.06a	2646.67±0.20b	2263.42±36.44a	5755.19±41.77a
	N190	503.33±0.03a	1393.33±0.07a	3176.67±0.21a	2253.82±38.19a	5611.45±9.71b

注:表中数值均为平均值±标准差;同列数值后不同字母表示相同年份处理间差异显著($P<0.05$),下同。茎全磷、叶全磷、籽粒全磷所表示的是器官全磷含量。

Note: All values in the table are mean ± standard deviation. Different letters after the same column value indicate significant differences among treatments($P<0.05$) in the same year, the same below. The total phosphorus contents in stems, leaves and grains represent the total phosphorus contents in organs.

下较 N0 处理 MBC 含量分别提高了 9.66% (2019 年) 和 14.36% (2020 年); MBN 含量分别提高了 15.59% 和 24.33%; MBP 含量分别提高了 43.78% 和 37.92%; ALP 含量分别提高了 23.94% 和 25.94%; SOC 含量分别提高了 5.54% 和 15.35%。随氮浓度的增加, 土壤 pH 值呈显著下降的趋势 ($P < 0.05$), N190 处理下比 N0 处理分别降低 0.83% (2019 年) 和 2.42% (2020 年)。

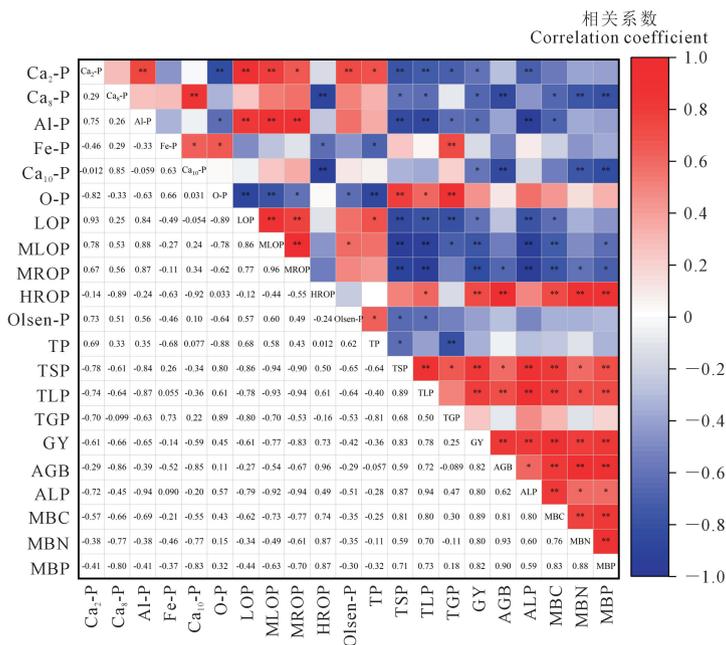
2.4 土壤各形态磷与春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量的关系

相关分析结果 (图 3) 表明: Olsen-P 含量与无机磷 Ca_2 -P 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与有机

磷 MLOP 含量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与无机磷 O-P 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); 碱性磷酸酶活性与茎全磷、叶全磷、籽粒产量呈极显著正相关 ($P < 0.05$), 与无机磷 Ca_2 -P、Al-P, 有机磷 LOP、MLOP、MROP 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与地上部生物量呈显著正相关 ($P < 0.05$); 微生物量磷与有机磷 HROP、茎全磷、叶全磷、籽粒产量、AGB (地上部生物量)、MBC (微生物量碳) 的含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与无机磷 Ca_8 -P、 Ca_{10} -P 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与 ALP 活性呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与有机磷 MLOP、MROP 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。

表 2 氮添加对土壤生物学性质及土壤有机碳、pH 值的影响
Table 2 Effects of nitrogen addition on soil biological properties, soil organic carbon and pH

年份 Year	处理 Treatment	微生物量碳 Microbial biomass carbon /(mg · kg ⁻¹)	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen /(mg · kg ⁻¹)	微生物量磷 Microbial biomass phosphorus /(mg · kg ⁻¹)	碱性磷酸酶活性 Alkaline phosphatase activity /(mg · g ⁻¹ · d ⁻¹)	有机碳 Soil organic carbon /(g · kg ⁻¹)	pH
2019	N0	231.10±8.60c	31.61±1.19c	7.55±0.56c	1.08±0.01c	9.55±0.03c	8.48±0.01a
	N75	242.36±3.32b	35.61±0.93b	12.12±0.90a	1.11±0.04c	9.97±0.12a	8.44±0.02b
	N115	255.82±2.94a	37.45±1.12a	13.43±0.49a	1.42±0.02a	10.11±0.07a	8.43±0.02b
	N190	246.33±2.96ab	33.87±0.22b	10.78±0.78b	1.33±0.03b	9.83±0.056b	8.41±0.04b
2020	N0	208.67±10.50c	45.15±3.61c	15.03±1.02c	1.57±0.038c	7.39±0.33c	8.67±0.14a
	N75	227.00±5.29b	53.25±2.65b	23.17±1.27a	1.63±0.03c	8.67±0.23a	8.51±0.01b
	N115	243.67±2.52a	59.67±3.06a	24.21±1.87a	2.12±0.02a	8.73±0.40a	8.47±0.02b
	N190	235.00±5.57ab	54.65±2.01b	19.58±0.27b	1.70±0.23b	8.08±0.08b	8.46±0.02b



注: 图中 Olsen-P、TP、TSP、TLP、TGP、GY、AGB、ALP、MBC、MBN、MBP 分别表示土壤有效磷、土壤全磷、茎全磷、叶全磷、籽粒全磷、籽粒产量、地上部生物量、碱性磷酸酶、微生物量碳、微生物量氮、微生物量磷。* 和 ** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平差异显著。

Note: In the figure, Olsen-P, TP, TSP, TLP, TGP, GY, AGB, ALP, MBC, MBN, and MBP are respectively represent soil available phosphorus, soil total phosphorus, stem total phosphorus, leaf total phosphorus, grain total phosphorus, grain yield, above ground biomass, alkaline phosphatase, microbial carbon, microbial nitrogen, and microbial phosphorus. * and ** represent significant differences at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively.

图 3 土壤各形态磷与春小麦各器官磷含量和地上部生物量及产量的 Person 相关分析

Fig.3 Person correlation analysis between soil phosphorus forms and organ phosphorus content, aboveground biomass and yield of spring wheat

3 讨论

3.1 氮添加对土壤磷组分的影响

本研究区无机磷占土壤全磷的 73.91%~78.84% (2019年)、73.96%~78.88% (2020年),随着施氮量的增加,该占比呈增加趋势,表明研究区土壤磷主要以无机磷为主,这与前人的研究结果一致^[18]。研究表明^[19]氮添加对小麦根-土界面磷迁移的影响中,不同氮肥处理显著降低了除 O-P 以外的无机磷组分,没有对 O-P 的耗竭产生明显的影响。江晶等^[20]对长期单施氮肥的耕层土壤研究结果表明,氮添加显著降低了除 O-P 以外的无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 含量。本研究发现,氮添加降低了无机磷 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、 Fe-P 含量,无机磷 O-P 含量随着施氮量的增加而增加。这与江晶等^[20]研究结果相似,不同的是本研究中 O-P 无机磷含量变化是随施氮量增加而增加,这可能是由于试验年限、施肥管理措施与研究区域的不同,导致了无机磷组分的转化与分配不同。当前针对施氮对土壤有机磷组分影响的研究结论并不一致,慕韩锋^[21]通过黄土旱坡长期定位试验发现,不同梯度的氮施入对土壤有机磷 LOP、MLOP、MROP 的含量影响不显著。而刘津等^[22]研究发现,单施氮肥显著降低了黄土旱塬农田土壤有机磷 LOP、MLOP、MROP 的含量。本研究结果表明氮添加降低了有机磷 LOP、MLOP、MROP 的含量,这可能是由于施氮促进了作物对磷素的需求,影响了土壤微生物的活性,进而影响了有机磷组分的转化与分配。有研究表明单施氮肥显著增加了有机磷 HROP 的含量^[22],本研究中,施氮增加了有机磷 HROP 的含量,这与刘津等^[22]研究结果一致。本研究发现不同梯度的氮添加会显著降低土壤中的有效磷含量。这可能是因为植物需要更多的磷养分来满足其生长需求,因此加速了对土壤中有效磷的吸收,导致土壤中的有效磷含量降低。张丽娜等^[23]针对氮沉降对木荷马尾松混交林土壤有效磷的研究结果表明,氮添加可以降低土壤有效磷的含量,同时增加植物叶片中的磷含量。相关性分析表明土壤有效磷与无机磷 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 呈极显著正相关,表明氮添加下土壤中的有效磷主要来自活化的无机磷 $\text{Ca}_2\text{-P}$,这与李若楠等^[24]研究结果一致,氮添加刺激植物的初级生产力 and 地上部生物量,另一方面还可以增加微生物活性,两者都需要从土壤中吸收有效磷来维持自身生长。综上可知,长期的氮肥输入主要是通过降低缓效和难以吸收利用的无机磷 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 、 Al-P 、

Fe-P 和有机磷 MLOP、MROP,从而增加土壤的潜在供磷能力^[25]。

3.2 氮添加下微生物对磷转化的贡献

土壤无机磷和有机磷都是植物可以吸收利用的重要磷源,它们之间可以相互转化,微生物在土壤磷的转化过程中起着重要作用^[26]。相关研究表明^[27]低施氮量刺激微生物生长,然而当添加的氮量超过饱和点时,会对微生物生长产生抑制效应。本研究结果表明氮添加增加了 MBC、MBN、MBP 的含量,不同的是本研究中并没有发现氮添加对微生物生长表现出抑制作用,这可能是由于研究区域不同所导致的,这与 Deng 等^[27]的研究结果相似。微生物可以通过分泌 ACP 或 ALP 促进磷的矿化来获取磷。有研究发现^[28]磷酸酶中含有较高的氮含量,并且在其参与的反应过程中需要大量的氮,因此氮添加可以显著增加土壤磷酸酶的产量和活性,从而提高磷的生物有效性。本研究选取的试验地为石灰性土壤,由 ALP 主导土壤磷的矿化过程。氮添加改变了土壤中氮素的含量和有效性,打破了微生物代谢底物的氮磷平衡,这导致微生物对磷的需求增加,进而促使微生物分泌更多与磷有关的转化酶,以加速稳定性磷的活化和有机磷的矿化,从而提高磷素的生物有效性^[29],由此导致了 ALP 的活性随着施氮量的增加而增加。研究表明^[30]氮添加下土壤微生物与稳定态磷存在显著负相关关系,说明微生物促进了稳定磷向有效磷的转化。本研究中,ALP、MBP 与无机磷 Al-P 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$,有机磷 MLOP、MROP 呈显著负相关关系进一步证实了以上观点。

3.3 氮添加对春小麦各器官磷含量及产量的影响

氮肥添加后,春小麦不同器官磷含量有着明显的变化,当植物面临磷限制时,部分植物具备将自身磷组分进行重新分配的能力^[29]。一般情况下,氮肥添加可以促进植物对磷的吸收。张富仓等^[19]研究施氮对春小麦的生长状况与磷素吸收量的试验表明,随着施用铵态氮肥料量的增加,小麦植株的全磷含量有明显的增加。王雅芝^[31]通过对陇中旱作土壤不同施氮水平下春小麦不同器官全磷含量的研究表明,氮肥添加显著增加了春小麦茎秆、叶片、籽粒的全磷含量。本研究表明春小麦茎秆、叶片、籽粒的全磷含量随着施氮量的增加而增加,这与王雅芝^[31]的研究结论基本一致。土壤速效磷被认为能用于反映土壤微生物和植物对磷素需求的有效指标。李慧杰等^[32]在施用氮肥对黄土丘陵区山地红枣林土壤肥力的研究中发现施用氮肥提高了土壤速效磷的含量。然而,赵欣然等^[33]在氮添加

对樟子松人工磷土壤理化性质的研究中发现单一的氮添加显著降低了土壤速效磷含量。本研究发现,土壤速效磷的含量随着施氮浓度的增加而降低,这可能是氮添加降低了土壤 pH 值,使土壤有效磷含量降低,这与赵欣然等研究结果^[33]一致。氮添加增加土壤微生物群落向土壤输入的有机质,并引起土壤有机碳含量的升高,这在林文泉等^[34]的研究中已经得到证实,本研究也得出了这一结论。此外,郝雯悦^[35]在宁夏大学试验农场春小麦的研究中发现施氮肥能够显著提高籽粒产量。本试验与前人结论基本一致,且籽粒产量随施氮浓度的增加而增加。就本试验而言,氮添加促进了春小麦对磷的吸收,从而增加了各器官全磷的含量,进而提高了春小麦的产量。

4 结 论

稳定性磷组分是研究区土壤磷库的主要组成部分,且随着氮素添加量提高,土壤总无机磷占全磷比例升高,同时总有机磷占全磷比例降低,氮添加降低了土壤中缓效和难以吸收利用的磷源:无机磷 Al-P、Fe-P、Ca₈-P、Ca₁₀-P,促进了有机磷 MLOP、MROP 向无机磷的矿化,说明土壤中添加氮可以促进磷素的活化。氮添加增加了土壤有机碳、微生物量碳、氮、磷含量和碱性磷酸酶活性,降低了土壤 pH 值。茎秆、叶片、籽粒的全磷含量、籽粒产量和地上部生物量在不同氮添加处理下均增加。相关性分析结果表明有效磷与无机磷 Ca₂-P 呈极显著($P < 0.01$)正相关,与有机磷 MLOP 呈显著($P < 0.05$)正相关,与无机磷 O-P 呈显著($P < 0.05$)负相关。

参 考 文 献:

- [1] 曾泉鑫, 曾晓敏, 林开森, 等. 亚热带毛竹林土壤磷组分和微生物对施氮的响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 753-760.
ZENG Q X, ZENG X M, LIN K M, et al. Responses of soil phosphorus fractions and microorganisms to nitrogen application in a subtropical *Phyllostachys pubescens* forest[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 753-760.
- [2] SHEN J B, YUAN L X, ZHANG J L, et al. Phosphorus dynamics: from soil to plant[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 997-1005.
- [3] 卢志红, 魏宗强, 杨敏琪, 等. 有机物料添加磷素释放动态与土壤磷组分响应[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1582-1591.
LU Z H, WEI Z Q, YANG M Q, et al. Phosphorus release dynamics of organic amendments and soil phosphorus fractions response[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis (Natural Sciences Edition), 2022, 44(6): 1582-1591.
- [4] 刘津. 养分输入对黄土旱塬农田土壤磷素组分及其微生物的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- LIU J. Effects of nutrient input on phosphorus components and microorganisms of soil in loess upland farmland[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.
- [5] 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, (2): 101-102, 110.
GU Y C, JIANG B F. Method for determining the classification of inorganic phosphorus in calcareous soils[J]. Soils, 1990, (2): 101-102, 110.
- [6] Bowman R A, Cole C V. Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO₃ extraction[J]. Soil Science, 1978, 125(1): 49-54.
- [7] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 205-218.
LV C Q, TIAN H Q, HUANG Y. Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 205-218.
- [8] ZEGLIN L H, STURSOVA M, SINSABAUGH R L, et al. Microbial responses to nitrogen addition in three contrasting grassland ecosystems[J]. Oecologia, 2007, 154(2): 349-359.
- [9] PENUELAS J, JANSSENS I A, CIAIS P, et al. Anthropogenic global shifts in biospheric N and P concentrations and ratios and their impacts on biodiversity, ecosystem productivity, food security, and human health[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 1962-1985.
- [10] ZAK D R, FREEDMAN Z B, UPCHURCH R A, et al. Anthropogenic N deposition increases soil organic matter accumulation without altering its biochemical composition[J]. Global Change Biology, 2017, 23(2): 933-944.
- [11] 曾泉鑫. 氮添加对亚热带毛竹林土壤磷组分的影响及其微生物机理[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
ZENG Q X. Influences of nitrogen addition on soil phosphorus fractions and their mechanisms microorganisms in a subtropical *Phyllostachys pubescens* forest [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2020.
- [12] SPOHN M, WIDDIG M. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 113: 53-59.
- [13] GE C M, ZHU L X, WANG J. Effects of phosphorus application in different soil layers on soil phosphorus fractions and the root of *Platycodon grandiflorum*[J]. Journal of Plant Nutrition, 2022, 45(3): 380-388.
- [14] 杨文稼, 肖庆红, 王仕稳, 等. 黄土高原旱作麦田深层土壤水利用与小麦产量及产量稳定性的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 41-48.
YANG W J, XIAO Q H, WANG S W, et al. Relationship between water use of subsoil and wheat yield and yield stability in dryland wheat on the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 41-48.
- [15] 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.
- [16] 唐文雪, 马忠明, 王景才, 等. 施磷量对旱地全膜双垄沟播玉米产量土壤速效磷和磷肥利用率影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 69-73.

- TANG W X, MA Z M, WANG J C, et al. Effects of phosphorus rate on maize yield, soil available phosphorus and phosphorus use efficiency by double-bed and furrow-sowing with full plastic film mulching in semi-arid field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 69-73.
- [17] 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. Measurement of microbial biomass-P in upland soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(1): 70-78.
- [18] 苏少华, 刘合满, 董丽娜, 等. 黄土丘陵区不同生长年限刺槐林土壤无机磷的变化规律[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(3): 171-175.
- SU S H, LIU H M, DONG L N, et al. Changes of inorganic phosphorus in the soils covered with *Robinia pseudoacacia* with different growing period of in the loess hilly area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(3): 171-175.
- [19] 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 translocation and changes of inorganic phosphorus fractions at soil-root interface of wheat[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 635-639.
- [20] 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.
- [21] 慕韩锋. 黄土旱塬长期定位施肥对土壤磷素分级、空间分布及有效性的影响[D]. 西安: 西北大学, 2008.
- MU H F. Effects of long-term fertilization on the spatial distribution, availability and transformation of soil phosphorus in loess plateau[D]. Xi'an: NorthWest University, 2008.
- [22] 刘津, 李春越, 邢亚薇, 等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤有机磷组分及小麦产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(1): 157-164.
- LIU J, LI C Y, XING Y W, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic phosphorus fractions and wheat yield in farmland of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(1): 157-164.
- [23] 张丽娜, 洪伟, 吴承祯, 等. 氮沉降对木荷马尾松混交林土壤有效磷的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(11): 71-73.
- ZHANG L N, HONG W, WU C Z, et al. Impacts of nitrogen deposition on soil available phosphorus in *Schima superba* and *Pinus massoniana* mixed forest[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(11): 71-73.
- [24] 李若楠, 王政培, JAVKHLAN B, 等. 等有机质瘠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, JAVKHLAN B, 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.
- [25] 齐鹏, 王晓娇, 焦亚鹏, 等. 施磷对陇中黄土高原春小麦耕层土壤磷组分及有效性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(5): 99-106.
- QI P, WANG X J, JIAO Y P, et al. Effects of phosphorus application on phosphorus composition and availability of spring wheat topsoil on the Loess Plateau of Longzhong[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(5): 99-106.
- [26] 蔡银美, 赵庆霞, 张成富. 低磷下植物根系分泌物对土壤磷转化的影响研究进展[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(2): 79-86.
- CAI Y M, ZHAO Q X, ZHANG C F. Effect of plant root exudates on soil phosphorus transformation under low phosphorus; a review[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(2): 79-86.
- [27] DENG Q, HUI D F, DENNIS S, et al. Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition; a meta-analysis[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(6): 713-728.
- [28] HOULTON B Z, WANG Y P, VITOUSEK P M, et al. A unifying framework for dinitrogen fixation in the terrestrial biosphere[J]. *Nature*, 2008, 454(7202): 327-330.
- [29] 卢笑玥, 朱运, 李江文, 等. 氮添加对黄土丘陵区草地土壤磷组分的影响[J/OL]. *生态学杂志*: 1-9. (2023-05-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230509.1040.012.html>.
- LU X Y, ZHU Y, LI J W, et al. Effects of nitrogen addition on soil phosphorus composition in grassland in loess hilly region[J/OL]. *Chinese Journal of Ecology*: 1-9. (2023-05-09). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1148.Q.20230509.1040.012.html>.
- [30] CHEN J, VAN GROENIGEN K J, HUNGATE B A, et al. Long-term nitrogen loading alleviates phosphorus limitation in terrestrial ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(9): 5077-5086.
- [31] 王雅芝. 氮磷肥对陇中旱作土壤-植物生态化学计量特征的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- WANG Y Z. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on soil-plant ecological stoichiometric characteristics of farmland in the Longzhong Loess Plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [32] 李慧杰, 徐福利, 林云, 等. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 53-59.
- LI H J, XU F L, LIN Y, et al. Effects of N, P and K fertilization on soil enzyme activities and soil fertility in mintanejujube forest of hilly loess region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 53-59.
- [33] 赵欣然, 赵琼, 王巍巍, 等. 氮添加及凋落物管理对樟子松人工林土壤理化性质的影响[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(10): 2699-2706.
- ZHAO X R, ZHAO Q, WANG W W, et al. Effect of nitrogen addition and litter manipulation on soil physicochemical properties of a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(10): 2699-2706.
- [34] 林文泉, 高伟, 叶功富, 等. 南亚热带海岸沙地不同林分凋落物量及养分归还[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 225-231.
- LIN W Q, GAO W, YE G F, et al. Litter nutrient return of different plantations in a coastal sand dune of southern subtropical region[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, 39(3): 225-231.
- [35] 郝雯悦. 化肥连续减施对春小麦生长、产量及品质的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
- HAO W Y. Effects of continuous reduction of chemical fertilizer on growth, yield and quality of spring wheat[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.