

氮磷配施对苹果幼苗生长、土壤无机磷形态和磷素利用的影响

张鑫, 邢玥, 刘照霞, 吕明露, 朱占玲, 姜远茂, 葛顺峰

(作物生物学国家重点实验室, 山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘要:以矮化苹果砧木 M9T337 幼苗为试材, 设置 4 个氮水平(N 0, 150, 300, 450 mg/kg, 分别以 N0、N1、N2、N3 表示)和 2 个磷水平(P_2O_5 100, 200 mg/kg, 分别以 P1、P2 表示), 研究了氮磷配施对苹果砧木幼苗生长、土壤无机磷形态转化和磷素吸收利用的影响, 以期为果园磷肥高效利用提供参考依据。结果表明, 不同氮磷配施显著影响 M9T337 幼苗生物量及根系形态, 以 N2P2 处理效果最佳, 其次为 N1P2 处理。植株磷素积累量及磷肥利用率分别在 N2P2、N2P1 处理下达到最大值, 同一磷水平下适量增氮可促进幼苗对磷素的吸收, 有效提高植株磷肥利用率。高氮处理(N3P1、N3P2)显著抑制幼苗对土壤磷素的吸收, 不利于砧木幼苗的生长。土壤有效磷(Olsen-P)含量主要受施磷量的影响, 在 N2P2 处理下达到最大, 为 27.86 mg/kg; 土壤碱性磷酸酶活性则在 N2P1 处理下最大, 为 2.12 mg/(g·d)。与单施磷肥相比, 氮磷配施增加土壤中可供植物吸收利用的 Ca_8-P 、Al-P 所占土壤磷库的比例, 降低植物难以吸收利用的 $Ca_{10}-P$ 比例, Ca_2-P 的比例也有所降低; 随施氮量的增加, Ca_8-P 、Al-P 呈现先增加后减小的趋势, 均在 N2P2 处理下达到最大值, $Ca_{10}-P$ 随施氮量的增加呈现逐渐降低的趋势, 而 Fe-P、O-P 含量在不同施氮量下则无明显变化趋势。合理的氮磷配施可通过改变土壤无机磷库组成, 提高土壤磷素有效性, 促进砧木幼苗的生长和对土壤磷素的吸收。

关键词: 苹果; 氮磷配施; 磷素利用; 有效磷; 无机磷组分

中图分类号: S158.5; S661.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0237-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.04.033

Effects of Combined Application of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer on Apple Rootstock Seedling Growth, Soil Inorganic Phosphorus Forms and Phosphorus Utilization

ZHANG Xin, XING Yue, LIU Zhaoxia, LÜ Minglu, ZHU Zhanling, JIANG Yuanmao, GE Shunfeng

(State Key Laboratory of Crop Biology, College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract: Taking the seedlings of the dwarf rootstock M9T337 as the test material, 4 nitrogen (N) levels (N 0, 150, 300, 450 mg/kg, represented by N0, N1, N2, N3, respectively) and 2 phosphorus (P) levels (P_2O_5 100, 200 mg/kg, represented by P1 and P2, respectively) was set up to study the effects of combined application of N and P fertilizer on the growth of apple rootstock seedlings, the transformation of soil inorganic P forms and its absorption and utilization, in order to provide a reference for the efficient use of P fertilizer in orchards. The results showed that different N and P treatments significantly affected the biomass and root morphology of M9T337 seedlings, and N2P2 treatment performed best, followed by N1P2 treatment. P accumulation and P fertilizer utilization efficiency in seedlings reached the maximum under N2P2 and N2P1 treatments, respectively. Under the same P level, appropriate N addition could promote the absorption of P by seedlings and effectively improve the P fertilizer utilization efficiency of plants. High N treatment (N3P1, N3P2) significantly inhibited the uptake of P in soil by seedlings, which was not conducive to the growth of rootstock seedlings. The soil available phosphorus (Olsen-P) content was mainly affected by the amount of P applied, and reached the maximum value of 27.86 mg/kg under N2P2 treatment. The maximum alkaline phosphatase

收稿日期: 2021-01-12

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0200200/08, 2016YFD0201100); 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-27); 山东省泰山学者工程专项(TSPD20181206)

第一作者: 张鑫(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事苹果磷素营养研究。E-mail: 981925843@qq.com

通信作者: 姜远茂(1964—), 男, 教授, 主要从事果树营养生理和果园土壤肥力研究。E-mail: ymjiang@sdau.edu.cn

葛顺峰(1985—), 男, 副教授, 主要从事土壤碳氮磷循环和果树营养研究。E-mail: geshunfeng210@126.com

activity reached at 2.12 mg/(g · d) under N2P1 treatment. Compared with P applied alone, combined application of N and P increased the proportion of Ca_8 -P and Al-P in the soil P pool that could be absorbed and utilized by plants, and reduced the proportion of Ca_{10} -P that was difficult for plants to absorb and utilize, and the proportion of Ca_2 -P was also reduced. With the increase of N application rates, Ca_8 -P and Al-P showed a trend of firstly increasing and then decreasing, and both reached the maximum under N2P2 treatment. Ca_{10} -P showed a gradually decreasing trend with the increase of N application rates. There was a stable trend of Fe-P and O-P content under different N application rates. Reasonable N and P combination could improve the availability of P in soil by changing the composition of soil inorganic P pool, and promote the growth of rootstock seedlings and the absorption of P in soil.

Keywords: apple; combined application of nitrogen and phosphorus fertilizer; phosphorus utilization; available phosphorus; inorganic phosphorus forms

磷是植物生长发育必需的营养元素,参与植物体内生物大分子合成及物质和能量转化。土壤中的磷以有机态磷和无机态磷的形式存在,无机态磷是土壤磷库的主体,一般占土壤总磷的 60%~80%^[1]。在农业生产中,作物的高产一般需要外部磷素的输入,然而磷与土壤存在多重相互作用,很容易通过吸附和沉淀被固定,施入土壤中的磷肥在当季只有一小部分被植物吸收利用,而 70%~80%的磷肥残留在土壤中,造成土壤磷素积累^[2-3]。与此同时,为追求果实高产,我国果园过量施磷问题普遍存在,果园磷肥投入量远高于国外果园磷肥推荐用量(100~150 kg/hm²)^[4]。化肥不合理施用不仅容易造成矿质资源的浪费,还会增加土壤淋溶损失的风险,造成环境污染。因此,提高土壤养分吸收利用效率,达到化肥减施增效的目的,对促进农业可持续发展具有重要意义。

在石灰性土壤中,无机磷可分为 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、 Ca_{10} -P、Al-P、Fe-P 和 O-P,土壤无机磷库中以 Ca-P 为主,约占无机磷总量的 70%,其中又以 Ca_{10} -P 占绝对优势^[1]。何晓雁^[5]对渭北旱塬土壤研究表明,土壤无机磷组分含量顺序为 Ca_{10} -P > O-P > Ca_8 -P > Al-P > Fe-P > Ca_2 -P;王海龙等^[6]在石灰性潮土的研究表明,施用磷肥可提高 Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 所占无机磷总量的比例;赵靛等^[7]在灰漠土的研究中发现, Ca_2 -P、 Ca_8 -P、Al-P、Fe-P 含量随供磷水平的提高呈现逐渐增加的趋势,以 Ca_2 -P 含量增幅最大。

施用氮肥是提高作物产量的关键措施之一,然而大量施氮不仅容易造成土壤硝酸盐积累,导致土壤质量退化,还会影响作物对其他元素的吸收性能。有研究^[8]发现,氮磷配施可显著提高作物产量,增加植株对土壤磷的吸收,有效提高磷肥利用效率;氮磷配施还可通过改变土壤微生物群落、土壤酶活性、土壤 pH 等影响土壤磷库中各形态磷素间的转化和迁移;Kritzler 等^[9]研究认为,氮素的添加可通过影响土壤

微生物活动,从而促进土壤有机磷向无机磷的矿化作用;焦亚鹏等^[10]研究表明,氮磷配施可促进土壤磷素活化,降低土壤中难溶性磷的比例。

科学合理施肥是提高土壤养分利用效率、改善作物品质的有效措施。目前,对氮磷配施的研究多集中于土壤有效磷和土壤酶方面,而对土壤磷组分的研究较少,本试验以“M9T337”幼苗为试材,通过盆栽试验,研究不同氮磷配施对苹果砧木幼苗生长发育以及土壤无机磷形态转化的影响,以期为果园磷肥高效利用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料与 设计

试验于 2020 年 4—9 月在山东农业大学园艺实验站进行,供试土壤 pH 7.54,有机质含量 10.76 g/kg,碱解氮含量 52.79 mg/kg,有效磷含量 25.49 mg/kg,速效钾含量 74.83 mg/kg,供试材料为一年生矮化砧木 M9T337 幼苗。

采用盆栽试验,盆高 30 cm,底部直径 25 cm,每盆装土 6 kg。根据课题组研究^[11-12]结果,本试验设置 4 个氮水平(N 0, 150, 300, 450 mg/kg, 分别以 N0、N1、N2、N3 表示)和 2 个磷水平(P_2O_5 100, 200 mg/kg, 分别以 P1、P2 表示),共 8 个处理(另设 1 个不施肥处理用于磷肥利用率的计算),即 N0P1、N0P2、N1P1、N1P2、N2P1、N2P2、N3P1、N3P2,氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 16%)。于 4 月中旬将长至 8 片真叶的幼苗(苗龄 60 天左右)移栽至盆中,每盆 1 株,每个处理 10 盆。施肥于缓苗 1 周后进行。同时钾(以 K_2O 计)按照 200 mg/kg 的标准施入硫酸钾。

于 9 月中旬进行植株及土壤取样,在每个处理中,分别随机选择 3 棵进行土壤取样,用抖土法获取紧密附着在根系上的土壤作为根际土,将土壤收集在自封袋中与植株一并带回,一部分土壤保存于 4℃ 冰箱,一部分在室温下自然风干,过 60 目筛后测定土壤

理化性质。植株样品用水清洗干净,分为根、茎、叶三部分,将样品置于 105 ℃ 的烘箱中杀青 30 min,然后降温至 80 ℃ 直至烘干,称量各部分质量,然后将其粉碎,过 60 目筛后测定各器官磷浓度。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 植株全磷测定 植株磷含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮—钒钼黄比色法测定^[13],用各器官干物质质量与磷含量之积的总和计算植株磷素积累量。

磷肥利用率=(施磷植株吸磷量—不施磷植株吸磷量)/施磷量 $\times 100\%$

1.2.2 根系形态指标和根系活力的测定 样品根系经清水洗净后用透射扫描仪(ESPON Perfection V750)对样品进行扫描,再利用 WinRHIZO(2007 版)根系分析软件进行根系长度、根系表面积和根尖数分析;根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)还原法测定,以单位鲜样质量根系还原的 TTC 量表示。

1.2.3 土壤理化性质测定 土壤有效磷(Olsen—P)采用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提,钼锑抗比色法测定^[13];土壤碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法测定^[14],以 1 g 土壤样品 24 h 释放酚的 mg 数表示;土壤无机磷组分采用鲍士旦^[13]的无机磷分级方法测定。

1.3 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理和图表绘制,用 SPSS 数据处理系统单因素试验统计分析方法进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 氮磷配施对苹果砧木幼苗生物量的影响

由表 1 可知,不同氮磷配施对苹果砧木幼苗生物量影响显著。同一磷水平下,苹果砧木幼苗根系、地上部、整株生物量均随施氮量的增加先增加后减小,在 N2P2 处理下达到最大值,其次为 N1P2 处理,且 2 个处理间差异不显著。N3P1、N3P2 处理的幼苗各部分生物量显著低于其他处理;在 N0、N1、N2 水平下,P2 处理的幼苗整株生物量大于 P1 处理,但在 N3 水平下,施磷量对植株生物量无显著影响,表明 N1、N2 与 P2 配施有利于 M9T337 幼苗生长,而高氮供应对幼苗的生长有抑制作用。

2.2 氮磷配施对苹果砧木幼苗根系形态及根系活力的影响

由表 2 可知,不同氮磷配施对 M9T337 幼苗根系形态及根系活力有不同程度的影响。同一磷水平下,幼苗总根长、总根表面积、根尖数和根系活力均随施氮量的增加先增加而后减小,总根长、总根表面积在 N2P2 处理下达到最大值,其次为 N1P2 处理;根尖数和根系活力分别在 N1P2 和 N1P1 处理下达到

最大值,且在同一氮水平下,P1 处理的根系活力大于 P2 处理;M9T337 幼苗各根系形态指标及根系活力均在 N3P2 处理下最小,与 N3P1 处理差异不显著。表明 N1P2 和 N2P2 处理的 2 个配比有利于幼苗根系形态的塑造,而高氮处理对幼苗根系的生长和根系活力有明显的抑制作用。

表 1 不同处理下苹果砧木幼苗的生物量

单位:g/株

处理	根	地上部	总重
N0P1	2.69 \pm 0.09c	9.18 \pm 0.68c	11.87 \pm 0.61d
N0P2	2.76 \pm 0.10c	10.29 \pm 0.56b	13.05 \pm 0.63c
N1P1	2.94 \pm 0.08b	10.83 \pm 0.84b	13.77 \pm 0.90bc
N1P2	3.28 \pm 0.14a	12.11 \pm 0.49a	15.39 \pm 0.49a
N2P1	3.05 \pm 0.06b	11.17 \pm 0.51b	14.22 \pm 0.46b
N2P2	3.37 \pm 0.13a	12.88 \pm 0.32a	16.25 \pm 0.40a
N3P1	2.32 \pm 0.05d	8.56 \pm 0.18cd	10.88 \pm 0.16e
N3P2	2.19 \pm 0.09d	8.12 \pm 0.10d	10.31 \pm 0.18e

注:表中数据为平均值 \pm 标准差;同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

表 2 不同处理下苹果砧木幼苗的根系形态指标与根系活力

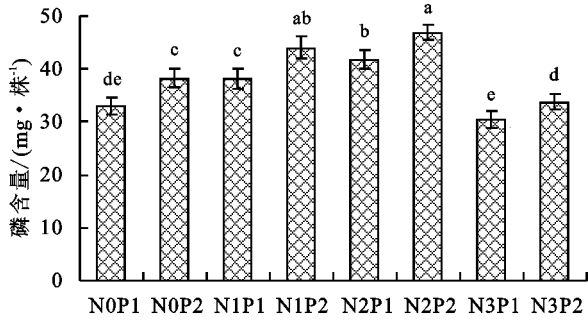
处理	总根长/ cm	总根表 面积/cm ²	根尖数/ 个	根系活力/ ($\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$)
N0P1	1648 \pm 104cd	305 \pm 15c	7501 \pm 560d	37.24 \pm 2.30cd
N0P2	1733 \pm 108c	324 \pm 18c	8765 \pm 402c	35.32 \pm 2.12d
N1P1	1826 \pm 146c	376 \pm 20b	9355 \pm 372c	49.57 \pm 2.88a
N1P2	2217 \pm 150ab	410 \pm 17a	14125 \pm 776a	46.33 \pm 2.51a
N2P1	2040 \pm 100b	365 \pm 13b	12555 \pm 535b	42.41 \pm 1.32b
N2P2	2377 \pm 111a	423 \pm 16a	13417 \pm 678ab	39.57 \pm 1.88bc
N3P1	1486 \pm 76d	266 \pm 13d	7149 \pm 385d	33.76 \pm 2.24de
N3P2	1458 \pm 95d	254 \pm 15d	6538 \pm 390d	31.26 \pm 2.20e

2.3 氮磷配施对苹果砧木幼苗磷素吸收及磷肥利用率的影响

由图 1 可知,不同氮磷配施对苹果砧木 M9T337 幼苗磷素吸收影响显著,幼苗磷素积累量变化范围为 30.45~46.86 mg/株。随施氮量的增加,幼苗植株全磷呈现先增加后减小的趋势,在 N2P2 处理下最大,其次为 N1P2,在 N3P1 处理下最小;同一磷水平下,N1、N2 处理的植株磷素积累量显著高于 N0、N3 处理(且 N3<N0 处理),且同一氮水平下,P2 处理的植株磷素积累量显著大于 P1 处理。说明适量增施氮磷肥可促进植株幼苗对磷素的吸收,施氮过低或过高均不利于植株幼苗对磷素的吸收。

氮磷配施显著影响苹果砧木幼苗磷肥利用率。同一氮水平下,随着施磷量的增加,植株磷肥利用率均显著降低。不同施氮量对植株磷肥利用率也有一定的影响,同一磷水平下,植株磷肥利用率均随施氮量的增加呈现先增加后减小的趋势;P1 水平下植株

磷肥利用率在 N2 处理下最大, P2 水平下植株磷肥利用率在 N1 处理下最大, 2 个磷水平均在 N3 处理



注:不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图 1 不同处理对苹果砧木幼苗磷素积累量和磷肥利用率的影响

2.4 氮磷配施对苹果砧木幼苗根际土壤有效磷及磷酸酶的影响

由图 2 可知,不同氮磷配施处理下的土壤有效磷含量变化范围为 23.77~27.86 mg/kg,在 N2P2 处理下最大, N0P1 处理下最小。各施氮水平下, P2 处理的土壤有效磷含量显著大于 P1 处理;同一磷水平下,与 N0 处理相比, N1、N2、N3 处理的有效磷有所增加,但在不同施氮水平间差异较小。

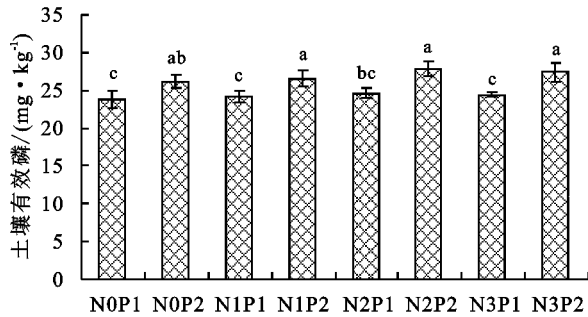


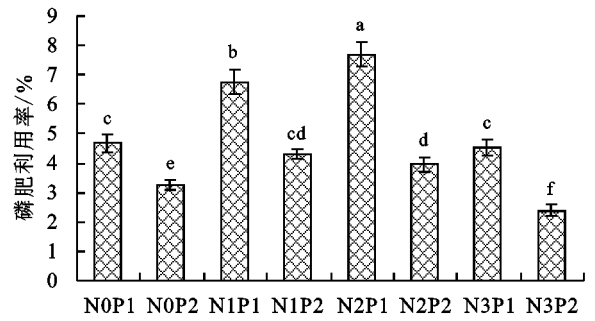
图 2 不同处理对苹果砧木幼苗根际土壤有效磷和碱性磷酸酶的影响

2.5 氮磷配施对苹果砧木幼苗根际土壤无机磷组分的影响

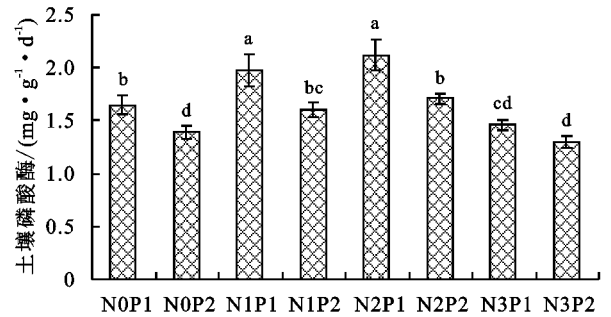
由表 3 可知, M9T337 幼苗根际土壤中各无机磷组分含量大小为 $Ca_{10}-P > Ca_8-P > O-P > Al-P > Fe-P > Ca_2-P$, 随施磷量的增加, 土壤中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 含量呈增加趋势, 其中以 Ca_2-P 增幅最大。

同一磷水平下, 与 N0 处理相比, N1、N2、N3 处理增加土壤中 Ca_8-P 和 $Al-P$ 含量, 降低 Ca_2-P

下最小。同一磷水平下适量增施氮肥可有效提高植株磷肥利用率。



土壤碱性磷酸酶活性变化范围为 1.30~2.12 mg/(g·d), 同一磷水平下, 随施氮量的增加, 磷酸酶活性先升高而后降低, N1、N2 处理的磷酸酶活性显著大于 N0 处理, 而 N3 处理则低于 N0 处理; 在 N0、N1、N2 水平下, P1 处理的碱性磷酸酶活性显著高于 P2 处理。由此可见, N1P1、N2P1 对提高土壤碱性磷酸酶活性最为有利, 少量供磷可促进土壤磷酸酶活性的提高, 而高量供氮对土壤磷酸酶活性有抑制作用。



和 $Ca_{10}-P$ 含量; 随施氮量的增加, 土壤中 Ca_2-P 含量呈先降低后升高的趋势, 在 N0P2 处理下最大, 达到 23.19 mg/kg; Ca_8-P 和 $Al-P$ 含量随施氮量的增加先升高后降低, 均在 N2P2 处理下达到最大值, 分别为 166.31, 68.31 mg/kg; $Ca_{10}-P$ 随施氮量的增加呈现逐渐降低的趋势, 在 N0P2 处理下最大, 在 N3P1 处理下最小; 土壤中 $Fe-P$ 、 $O-P$ 含量在不同施氮量下无明显变化趋势。

表 3 不同处理下苹果砧木幼苗根际土壤中无机磷组分含量

单位: mg/kg

处理	Ca_2-P	Ca_8-P	$Al-P$	$Fe-P$	$O-P$	$Ca_{10}-P$
N0P1	19.65±0.57c	121.76±4.26e	56.87±1.14e	43.32±1.41d	72.56±1.47bc	259.16±3.35ab
N0P2	23.19±0.80a	149.58±8.16bc	61.70±1.41cd	47.21±1.62bc	73.79±2.79abc	261.23±4.05a
N1P1	16.30±0.67e	127.42±3.63de	57.46±1.27e	45.32±1.14cd	70.84±1.85c	255.63±1.35b
N1P2	17.71±0.37d	145.80±3.89c	63.59±1.08bc	49.09±0.89b	71.58±1.70bc	254.74±3.11bc
N2P1	15.23±0.27f	142.27±5.72c	63.35±1.81bc	40.37±1.24e	72.32±1.13bc	247.97±1.53d
N2P2	19.36±0.53c	166.31±5.02a	68.31±2.01a	53.22±1.97a	76.74±1.53a	254.15±2.65bc
N3P1	17.12±0.62de	132.37±3.27d	59.23±1.87de	40.25±1.08e	73.54±2.25abc	247.38±2.55d
N3P2	20.77±0.47b	157.59±3.19b	65.83±1.59ab	46.38±1.02c	74.77±0.74ab	249.73±4.05cd

由图 3 可知,各处理土壤中均以 $Ca_{10}-P$ 所占比重最大,占无机磷总量的 39.83%~48.15%,其次为 Ca_8-P 、 Ca_2-P 所占无机磷总量比例最小,三者共占无机磷总量的 68.85%~70.37%;同一氮水平下,P2 处理的土壤中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 所占无机磷总量的比例大于 P1 处理,而 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 的比例小于 P1 处理;同一磷水平下,与 N0 相比,N1、N2、N3 处理增加土壤中 Ca_8-P 、 $Al-P$ 所占无机磷总量的比例,降低 $Ca_{10}-P$ 所占比例, Ca_2-P 比例也有所降低。

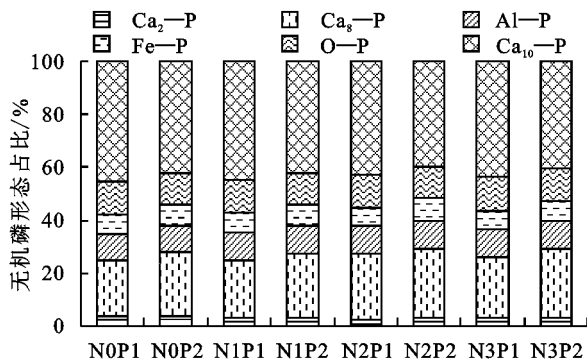


图 3 不同处理下土壤中各无机磷组分所占比例

3 讨论

氮和磷是植物生长必需的营养元素,氮肥和磷肥的合理施用是植物正常生长的重要保障,也是提高肥料利用率的有效措施。有研究^[15]表明,氮磷配施不仅有利于作物地上部的生长,还可以促进作物根系的发育。陈磊等^[8]研究发现,氮磷配施促进小麦对土壤磷素的吸收,有效提高肥料利用率,从而提高小麦产量。从本试验结果来看,N1、N2 与 P2 配施显著增加 M9T337 幼苗根系总根长、总根表面积以及根尖数,提高植株对土壤磷素的吸收,促进幼苗的生长。根系是植物吸收养分的主要器官,根系形态与养分吸收能力密切相关。土壤中养分含量的变化通过调节根系的生长及其生理反应,进而影响地上部的生长^[16]。因此,N1、N2 与 P2 配施可能是通过促进幼苗根系的生长,增加根系与土壤的接触面积,同时土壤养分的增加,提高根系对养分的吸收能力,从而增加植株磷素积累量以及幼苗根系与地上部生物量。而施氮量过高则不利于根系形态的建成,对幼苗的生长有一定的抑制作用,彭玲等^[17]研究认为,高氮通过降低苹果幼苗根系中 IAA 含量并提高 Z+ZR 含量,从而抑制苹果幼苗根系的生长。在同一磷水平下,植株生物量以及磷素积累量随施氮量的增加呈现先增加后减小的趋势,均在 N3 处理下达到最小值。同一磷水平下,适量增施氮肥,可有效提高磷肥利用率,这与施氮促进植株生长以及对磷素的吸收有关。同一氮水平下,P1 处理的植株磷肥利用率均大于 P2 处理,说明少量施磷有利于提高磷肥利用率,减少磷肥损失,但

同时也要保证作物生长所需磷量。

植株的生长和养分吸收不仅与作物根系形态有关,而且受土壤磷含量的影响。有研究^[18-19]表明,施氮可通过提高土壤有效磷含量,从而提高植物对土壤磷素的吸收利用效率。本试验中,在 N0、N1、N2 水平下,植株磷素积累量和土壤有效磷含量变化趋势一致,均随施氮量的增加呈现逐渐增加的趋势;在 N3 水平下,土壤有效磷含量较高,但由于高氮对根系的抑制效果,导致幼苗磷素积累量大幅降低。随施磷量的增加,土壤中易溶态磷含量显著增加,提高土壤磷素的有效性。同一磷水平下,与 N0 相比,施氮增加土壤有效磷含量,这可能与根系以及微生物分泌物有关,李银等^[20]研究认为,施氮可以通过影响磷酸酶的分泌量,促进土壤释放更多的磷酸盐,从而提高土壤有效磷含量。此外,氮素还可以通过调节土壤磷酸酶的活性,促进土壤中有机磷的矿化,从而影响土壤磷素有效性^[21-22]。本试验中,同一磷水平下,与 N0 相比,N1、N2 处理显著提高土壤碱性磷酸酶活性,可能是由于施用氮肥后促进土壤中含磷化合物的水解,诱导土壤微生物及植物根系磷酸酶的生成,从而提高土壤碱性磷酸酶活性^[23];而 N3 处理则降低土壤碱性磷酸酶活性,说明氮水平过高对碱性磷酸酶活性有一定的抑制作用,这与梁路等^[24]、夏雪等^[25]研究结果一致。同一氮水平下,随施磷量的增加,土壤碱性磷酸酶活性显著降低,这可能与施磷提高土壤有效磷含量,增加土壤中磷酸盐离子,对磷酸酶活性有一定的抑制作用有关,而低磷条件可通过诱导土壤磷酸酶的合成,从而缓解土壤供磷不足。

土壤中不同无机磷组分的有效性差异很大, Ca_2-P 易被作物吸收,是作物的有效磷源, Ca_8-P 、 $Al-P$ 和 $Fe-P$ 有效性低于 Ca_2-P ,部分可被作物吸收,可作为作物的缓效磷源,而 $Ca_{10}-P$ 和 $O-P$ 难以被作物吸收利用,被视为作物的潜在性磷源^[26-27]。虽然 Ca_2-P 有效性较高,但在土壤中含量过低,植物利用的无机磷主要来源于缓效磷源(Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$)。焦亚鹏等^[10]对黄土高原土壤磷组分研究发现,氮磷配施可通过提高土壤无机磷库中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 的比例,降低 $O-P$ 和 $Ca_{10}-P$ 的比例,从而增加土壤磷素有效性。土壤磷素形态决定土壤磷素有效性,因此对土壤无机磷组分进一步分析表明,不同氮磷配施对土壤无机磷库组成影响显著,土壤中 Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 含量与有效磷含量变化趋势一致。随着施磷量的增加,土壤中 Ca_2-P 、 Ca_8-P 、 $Al-P$ 、 $Fe-P$ 含量呈现逐渐增加的趋势,以 Ca_2-P 增幅最大,这与赵靛等^[7]、王海龙等^[6]的研究结果一致。土壤中 $O-P$ 、 $Ca_{10}-P$ 含量在不同施磷

量间变化不大,可能是由于土壤中 O—P、Ca₁₀—P 形态稳定,而施肥时间较短,O—P 和 Ca₁₀—P 需要长时间转化才能形成。施氮可通过改变植物对磷素的吸收以及改变土壤理化性质和微生物活动,从而影响土壤磷素的转化^[28]。本试验中,同一磷水平下,与 N0 相比,N1、N2、N3 处理增加土壤中 Ca₈—P、Al—P 含量和所占无机磷总量的比例,降低 Ca₁₀—P 含量和所占无机磷总量的比例,Ca₂—P 含量也有所降低。一方面可能是由于施用氮肥降低土壤 pH,氮肥水解产生 NH₄⁺ 将土壤胶体表面吸附的 Ca²⁺ 交换下来,同磷酸根离子生成沉淀而降低 Ca₂—P 含量,同时提高土壤中 Ca₈—P 含量^[29];另一方面,植物根系分泌物(有机酸、磷酸酶)的活化作用在一定程度上可促进土壤中难溶性磷向有效性较高的磷素形态转化。

4 结论

(1)N1、N2 与 P2 配比(N 150~300 mg/kg、P₂O₅ 200 mg/kg)有利于苹果矮化砧木 M9T337 幼苗的生长及根系的发育,可促进植株对土壤磷素的吸收。

(2)合理的氮磷配施可增加土壤中可供植物吸收利用的缓效磷源 Ca₈—P、Al—P 所占土壤磷库的比例,降低植物难以吸收利用的潜在性磷源 Ca₁₀—P 的比例,提高土壤磷素有效性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Hinsinger P, Brauman A, Devau N, et al. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? [J/OL]. *Plant and Soil*, 2011, 348 (1/2). <http://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y>.
- [3] 鲁如坤.土壤磷素水平和水体环境保护[J].磷肥与复肥,2003(1):4-8.
- [4] 朱占玲,夏营,刘晶晶,等.山东省苹果园磷素投入调查及磷环境负荷风险分析[J].园艺学报,2017,44(1):97-105.
- [5] 何晓雁.渭北旱塬农田土壤磷素的变化特征[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [6] 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.
- [7] 赵靛,侯振安,柴颖,等.长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):236-242.
- [8] 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.
- [9] Kritzler U H, Johnson D. Mineralisation of carbon and plant uptake of phosphorus from microbially-derived organic matter in response to 19 years simulated nitrogen deposition[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(S1/2):311-319.
- [10] 焦亚鹏,齐鹏,王晓娇,等.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[J].植物营养与肥料学报,2020,26(8):1459-1472.
- [11] 姜远茂,张宏彦,张福锁.北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践[M].北京:中国农业大学出版社,2007.
- [12] 王海宁,葛顺峰,姜远茂,等.施氮水平对五种苹果砧木生长以及氮素吸收、分配和利用特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(5):1262-1268.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [15] 王兵,刘文兆,党廷辉,等.长期施肥条件下旱作农田土壤水分剖面分布特征[J].植物营养与肥料学报,2007,13(3):411-416.
- [16] 米国华,陈范骏,张福锁.作物养分高效的生理基础与遗传改良[M].北京:中国农业大学出版社,2012.
- [17] 彭玲,于波,陈倩,等.不同供氮方式下苹果矮化砧 M9T337 幼苗生长及内源激素的响应[J].植物生理学报,2018,54(2):305-315.
- [18] Dodd R J, Mcdowell R W, Condrón L M. Manipulation of fertiliser regimes in phosphorus enriched soils can reduce phosphorus loss to leachate through an increase in pasture and microbial biomass production[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2014, 185:65-76.
- [19] 郭瑀,李廷轩,张锡洲.施氮提高矿山生态型水蓼富集土壤磷能力研究[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1313-1320.
- [20] 李银,曾曙才,黄文娟.模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响[J].应用生态学报,2011,22(3):631-636.
- [21] 陈美领,陈浩,毛庆功,等.氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J].生态学报,2016,36(16):4965-4976.
- [22] 张震.草地植物与土壤磷库对施肥和围封的响应[D].重庆:西南大学,2016.
- [23] 樊军,郝明德.长期施用化肥对黑垆土酶活性影响[J].土壤肥料,2003(5):34-37.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 向万胜,黄敏,李学垣.土壤磷素的化学组分及其植物有效性[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):663-670.
- [27] Condrón L M, Newman S. Revisiting the fundamentals of phosphorus fractionation of sediments and soils[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11(5):830-840.
- [28] Chen H, Chen M L, Li D J, et al. Responses of soil phosphorus availability to nitrogen addition in a legume and a non-legume plantation[J]. *Geoderma*, 2018, 322:12-18.
- [29] 苏同庆,王火焰,周建民.氮对磷在潮土中迁移与转化的影响[J].中国土壤与肥料,2020(2):24-30,55.