

磷和土霉素对小麦和紫花苜蓿幼苗生长和根系发育的影响

李颖鑫^{1,3}, 张泽坤², 成肖², 苏睿², 常朝², 何红花^{1,2}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;
2.西北农林科技大学资源与环境学院,陕西 杨凌 712100;3.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 采用盆栽试验的方法,研究不同磷添加量(0,20,80 mg/kg)和土霉素添加量(0,40,160 mg/kg)对小麦和紫花苜蓿幼苗生物量及根系发育的影响。结果表明:所有水平土霉素处理中,20,80 mg/kg 磷处理的小麦地上部生物量均比不加磷时高,分别高 22.7%~34.1%,10.0%~30.0%和 9.1%~18.3%。除 160 mg/kg 土霉素加 80 mg/kg 磷的处理外,所有处理的苜蓿根生物量均小于不加磷和土霉素的对照。小麦的根长和根表面积随着土霉素添加量的增加总体上呈减少的趋势。总体来看,施磷显著促进了小麦幼苗地上部的生长,但对苜蓿幼苗生长的影响不显著。土霉素对苜蓿幼苗的根系发育有抑制作用。研究结果可为评价土壤中土霉素残留对作物早期生长的影响和指导合理施用磷肥提供理论依据。

关键词: 磷; 土霉素; 小麦; 紫花苜蓿; 根系发育

中图分类号: X512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)05-0328-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.05.044

Effects of Phosphorus and Oxytetracycline on Seedling Growth and Root Development of Wheat and Alfalfa

LI Yingxin^{1,3}, ZHANG Zekun², CHENG Xiao², SU Rui², CHANG Chao², HE Honghua^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of different levels of phosphorus (P) (0, 20, 80 mg/kg) and oxytetracycline (OTC) (0, 40, 160 mg/kg) on the biomass and root development of wheat and alfalfa seedlings. The results showed that at all OTC levels, the aboveground biomass of wheat in 20 and 80 mg/kg P treatments was greater than that when no P was added, being 22.7%~34.1%, 10.0%~30.0% and 9.1%~18.3% greater. Except for the 160 mg/kg OTC+ 80 mg/kg P treatment, root biomass of alfalfa in all treatments was less than that in the control without OTC and P, being 8.8% less. Root length and surface area of wheat decreased with increasing OTC level. Overall, P application significantly enhanced the aboveground growth of wheat, but had no significant effect on the growth of alfalfa. OTC inhibited root development of alfalfa. The results of the present study can provide a theoretical basis for evaluating the effect of soil OTC residue on seedling growth of crops and instructing proper application of P-fertilizers.

Keywords: phosphorus; oxytetracycline; wheat; alfalfa; root development

磷在植物能量代谢和核酸及膜的生物合成中起着关键作用,是限制植物代谢反应和生长的主要元素之一^[1]。由于磷在土壤中极易被铁铝氧化物和氢氧化物以及钙离子等金属阳离子紧密吸附形成难溶化合物,导致磷的有效性很低,一般难以被作物直接吸收利用^[2-3]。当土壤磷含量有限时,植物往往对磷添加表现出积极的生长反应^[4]。Pang 等^[5]通过温室试验研究了 11 种多年生草本豆科植物生长对 0~384 mg/kg 磷添加范围内的反应发现,紫花苜蓿在磷添加水平为 24 mg/kg 下的总干物质质量最高,当土壤施磷量>24 mg/kg 时,所有植物的总干物质质量保持不变或减少。生长在低磷(5 mg/kg)条件下的小麦总

干物质质量显著小于生长在适磷(30 mg/kg)条件下的小麦干物质质量^[6]。由此可见,适量施加磷肥促进作物的生长,但过量的磷对作物可能具有一定的毒害作用,且不同植物生长的最适磷水平存在差异。根作为水分和养分吸收的主要器官,在土壤磷吸收中起着重要的作用,植物能够通过改变根系形态来适应低磷胁迫^[7]。Pang等^[8]发现,当苜蓿生长在0~384 mg P/kg的河沙中时,随着磷施加量的增加,紫花苜蓿的平均根直径和根长先增大后减小,比根长先减小后缓慢增大。生长在低磷(11 mg/kg)环境中的玉米较高磷环境(205 mg/kg)下有更大的根长和根表面积^[9]。农业磷肥的投入极大地提高了土壤肥力和作物产量,但是也导致了磷在土壤中的大量累积。累积的磷会通过径流流失,造成水土污染,比如地表水富营养化等,会对环境产生巨大的威胁^[10]。合理施用磷肥对环境保护和资源合理利用至关重要。

抗生素被广泛应用于预防或治疗细菌感染^[11]。由于抗生素在通过人和动物肠道时无法完全去除,其残留物最终会通过粪便被排泄到环境中^[12]。用生粪肥作为土壤改良剂和肥料有诸多好处,包括方便、成本低、含氮量高等,应用非常普遍,但也因此导致抗生素在环境中不断累积^[13]。近年来,养殖业使用大量的抗生素作为生长促进剂以及预防性和治疗性兽药,进一步加剧了抗生素在环境中的累积^[14]。抗生素的广泛使用和和环境中的不断累积导致动物体内的微生物越来越多地含有编码抗生素抗性的基因,这些抗性基因随着食物链流转,严重降低了许多用于治疗疾病的抗生素的有效性^[15]。四环素类抗生素,如四环素、土霉素(OTC)和金霉素是畜牧业中最常用的抗生素^[16]。早在2003年,中国的土霉素年产量就已经近10 000 t,占世界当年土霉素总产量的65%^[17]。目前,我国的抗生素滥用情况依然十分严重,已经引发了土壤、水体等一系列环境污染问题,间接威胁到人类的健康^[18]。

土壤中残留的土霉素可以改变植物的根际环境,比如通过影响土壤微生物和酶活性改变土壤的养分有效性,从而间接影响植物生长^[19]。土壤中的土霉素残留物会使微生物活动产生氨和有机酸,导致土壤pH先升高后降低,从而影响土壤中氮磷等养分的分解转化^[20]。土霉素也会显著降低土壤碱性磷酸酶的活性和根鞘酒石酸盐含量,可能会使土壤磷的有效性降低^[21]。一定浓度的土霉素会直接对植物造成毒害作用,抑制根系生长,降低作物生物量,还会对光合作用等生理功能产生不利影响^[22]。安婧等^[23]通过水

培试验发现,土霉素对小麦种子芽长及根长的抑制效应显著。顾国平等^[24]研究表明,低浓度(0.5, 1 mg/L)的土霉素处理能促进水稻根系总长度和根表面积的增加,增强根系活力;但高浓度的土霉素(>5 mg/L)显著降低了水稻根系生物量,对根系活力、叶片叶绿素含量和氧化酶活性有明显的限制作用,使根系的相对质膜透性增加。因此,植物的根系形态的改变可能进一步影响植物对氮磷等养分的吸收,影响植物的生长发育。

黄土高原位于典型的半干旱季风气候区,紫花苜蓿是优势的多年生豆科植物,黄土高原区是我国苜蓿的主产区^[25]。小麦是我国重要的粮食作物之一,黄土高原区也是小麦的主要产区。在黄土高原地区,半干旱气候和碱性钙质土壤限制了磷的有效性和生物利用度,但对于该地区土壤中的土霉素情况并不清楚。目前,关于抗生素对植物的影响方面的研究文章较少,抗生素和磷之间是否存在交互作用从而对植物生长和根系发育产生影响尚不明确。研究兽用抗生素在农业土壤—作物生产系统中的残留及其生理毒害作用对全面了解兽用抗生素环境行为,保障食品安全和人类健康具有重要的意义。因此,本研究通过盆栽试验,研究不同水平的磷肥和土霉素对小麦和苜蓿幼苗生长和根系发育的影响,不仅可为评价土壤土霉素残留对作物早期生长的影响和指导合理施用磷肥提供理论依据,对实际农业生产具有借鉴意义,也可为探讨磷肥施用过多和土壤土霉素残留造成的水、土等一系列环境污染问题积累基础资料,对黄土高原生态环境保护工作的进一步开展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验供试作物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和小麦(*Triticum aestivum* L.),品种分别为“金皇后”和“陕麦139”。

供试土壤为壤土,采自陕西杨陵区(34°19′19″N, 108°03′04″E)壤土撷荒地的表层(0—30 cm),其有机质含量9.33 g/kg,全磷含量0.46 g/kg,全钾含量24.6 g/kg,全氮含量1.07 g/kg,速效磷含量7.18 mg/kg,土霉素含量0.17 mg/kg,田间持水量为23.2%,pH为8.42。

供试的肥料为磷酸二氢钾(KH₂PO₄)、硝酸铵(NH₄NO₃)、氯化钾(KCl)和硫酸钾(K₂SO₄),以上药品均为分析纯。供试的土霉素购自索莱宝生物科技有限公司,纯度>99.9%。

1.2 试验设计

本试验于2020年9月10日至11月4日在中国

科学院水利部水土保持研究所的温室内进行。使用高 18 cm,顶端直径为 10.5 cm,底部直径为 6.8 cm 的花盆作为盆栽容器。每盆装土 1.0 kg,底肥氮添加量(NH_4NO_3)为 240 mg N/kg,钾以 K_2SO_4 和 KCl ($\text{K}_2\text{SO}_4 : \text{KCl} = 1 : 2$,摩尔比)混合物的形式加入 100 mg K/kg。磷设置 3 个浓度梯度,分别为 0,20,80 mg/kg(分别表示为 P_0 、 P_{20} 和 P_{80})。土霉素设置 3 个浓度梯度,分别为 0,40,160 mg/kg(分别表示为 OTC_0 、 OTC_{40} 和 OTC_{160})。试验采用 2 因素 3 水平完全随机区组设计,共 9 个处理,分别表示为 OTC_0-P_0 、 $\text{OTC}_0-\text{P}_{20}$ 、 $\text{OTC}_0-\text{P}_{80}$ 、 $\text{OTC}_{40}-\text{P}_0$ 、 $\text{OTC}_{40}-\text{P}_{20}$ 、 $\text{OTC}_{40}-\text{P}_{80}$ 、 $\text{OTC}_{160}-\text{P}_0$ 、 $\text{OTC}_{160}-\text{P}_{20}$ 和 $\text{OTC}_{160}-\text{P}_{80}$,并以 OTC_0-P_0 为对照。

将小麦种子和紫花苜蓿种子用 30%(v:v) H_2O_2 进行表面消毒 5 min,并用去离子水冲洗多次,在培养皿中潮湿的滤纸上发芽 12 h。每盆播种 10 粒种子,播种深度约 0.5 cm,播种 10 天后定苗 6 株。试验期间,通过称重法每隔 1~2 天补充水分,使土壤水分保持在 60%田间持水量。

1.3 样品采集及测定方法

当植物根系生长到花盆底部时,开始收割。小麦的生长时间为 30 天,苜蓿的生长时间为 55 天。在收获时,分别收集植物地上部和根,将地上部沿土壤表面剪下后装入牛皮纸袋,在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 70 ℃下烘干至恒重,测定地上部的干物质量。将根和土壤分离,尽量保持根系完整。所有根系用自来水冲洗干净后装入自封袋,放在 4 ℃冰箱中保存。将每盆中的根分别用扫描仪(ESPON Perfection V750 Pro)进行扫描,然后将扫描后的图片使用 WinRHIZO 根系分析系统分析根长、根表面积和根直径,再将扫描后的根烘干至恒重,测定根的干物质量。根质量比计算为根干物质量与总植株干物质量之比。比根长为总根长与根干物质量之比。不同直径根长分布的比例为不同直径的根长与总根长之比。

1.4 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理,通过 SPSS 26.0 软件进行双因素方差分析,检验土霉素、磷及其交互作用对所有参数的影响,并对各处理均采用单因子 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 $P<0.05$ 。用 Origin 2018 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 磷和土霉素添加对小麦和苜蓿幼苗生物量的影响

由表 1 可知,加磷对小麦地上部生物量有显著的促进作用($P<0.05$)。在 OTC_0 和 OTC_{40} 处理下,

P_{20} 处理的小麦地上部生物量最高,在 OTC_{40} 处理中 P_{20} 处理相比 P_0 处理显著增加了 30.1%;在 OTC_{160} 处理下,随着磷添加量的增加,地上部生物量呈增加趋势($P<0.05$)。小麦根生物量随着磷添加量的增加均呈下降趋势,在 OTC_0 和 OTC_{160} 处理下, P_{80} 处理相对于 P_0 处理显著下降了 45.2%和 59.7%($P<0.05$)(图 1a)。加磷使小麦根质量比显著降低($P<0.001$),在 OTC_0 、 OTC_{40} 和 OTC_{160} 处理下, P_{20} 和 P_{80} 处理相对于 P_0 处理分别降低了 27.0%~49.2%,33.8%~37.8%,7.9%~60.8%,同时磷和土霉素的交互作用也使小麦的根质量比显著降低($P<0.05$)(表 1)。在所有处理中,土霉素对小麦的生物量和根质量比均无显著影响(表 1)。

表 1 磷、土霉素及其交互作用对不同参数影响的双因素方差分析的统计显著性水平

参数	P	OTC	P×OTC
小麦地上部生物量	0.043	0.318	0.564
小麦根生物量	<0.001	0.569	0.708
小麦根质量比	<0.001	0.700	0.029
小麦根长	0.010	0.240	0.988
小麦根表面积	0.010	0.532	0.848
小麦平均根直径	0.028	0.720	0.405
小麦比根长	0.024	0.752	0.334
苜蓿地上部生物量	0.618	0.805	0.102
苜蓿根生物量	0.770	0.007	0.002
苜蓿根质量比	0.047	0.058	0.353
苜蓿根长	0.754	0.184	0.205
苜蓿根表面积	0.817	0.173	0.099
苜蓿平均根直径	0.244	0.280	0.018
苜蓿比根长	0.842	0.184	0.096

注:P 表示磷对不同参数影响的显著性水平;OTC 表示土霉素对不同参数影响的显著性水平;P×OTC 表示磷和土霉素的交互作用对不同参数影响的显著性水平。

磷和土霉素对苜蓿的地上部生物量均无显著影响(表 1)。磷对苜蓿根生物量的影响并不显著,而土霉素对根生物量有显著的抑制作用($P<0.05$)(表 1),除 $\text{OTC}_{160}-\text{P}_{80}$ 处理外,所有处理的苜蓿根生物量均小于对照(OTC_0-P_0),减小了 8.8%~47.9%(图 1c)。加磷使苜蓿根质量比显著升高($P<0.05$),在 OTC_0 、 OTC_{40} 和 OTC_{160} 处理下, P_{20} 和 P_{80} 处理相对于 P_0 处理分别最高增加了 1.4%~15.4%,15.1%~23.4%,14.3%~27.3%,但土霉素对苜蓿根质量比的影响不显著(表 1)。

2.2 磷和土霉素添加对小麦和苜蓿幼苗根系发育的影响

加磷对小麦根系伸长有显著的抑制作用($P<$

0.05)(表 1)。在 OTC0 和 OTC160 处理下,随着磷添加量的增加,小麦的根长呈显著下降的趋势,分别下降了 2.9%—32.1%和 3.8%~37.5%;在 OTC40 处理下,小麦的根长在 P20 处理下最高,但 P20 处理与 P0 处理差异不显著,P80 处理的根长与 P0 处理相比减少了 25.0%($P<0.05$)(图 2a)。随着磷添加量的增加,小麦的根表面积先增大后减小,但 P0 处理与 P20 处理差异不显著;在 OTC0 和 OTC160 处理

下,P80 处理与 P0 处理差异显著,根表面积分别减小了 34.0%和 46.1%(图 2b)。小麦平均根直径在所有处理下均没有显著差异(图 2c)。在所有土霉素处理下,小麦的比根长总体上随磷添加量的增加呈增加的趋势;在 OTC160 处理中,P80 处理的比根长与 P0 处理相比增加了 66.1%($P<0.05$)。在所有处理中,小麦根长、根表面积和平均根直径均随土霉素添加量的增加总体呈降低趋势,但差异并不显著(表 1)。

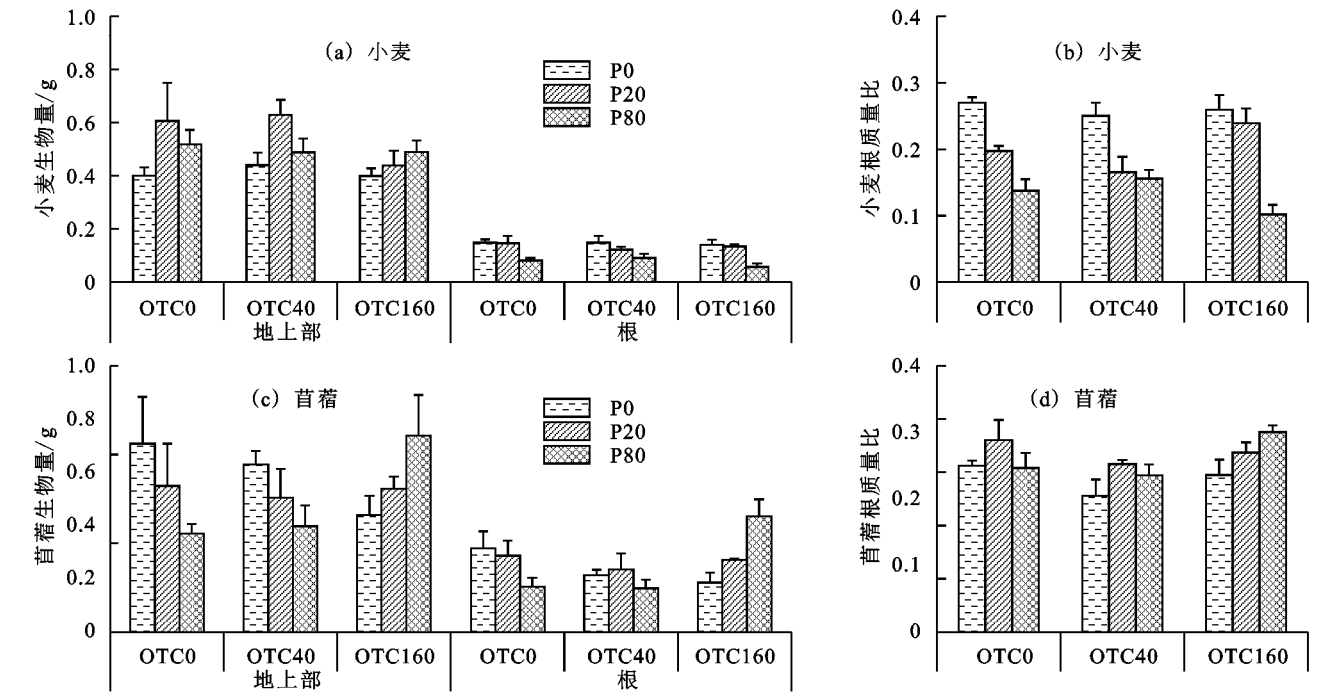


图 1 磷和土霉素添加对小麦和苜蓿生物量和根质量比的影响

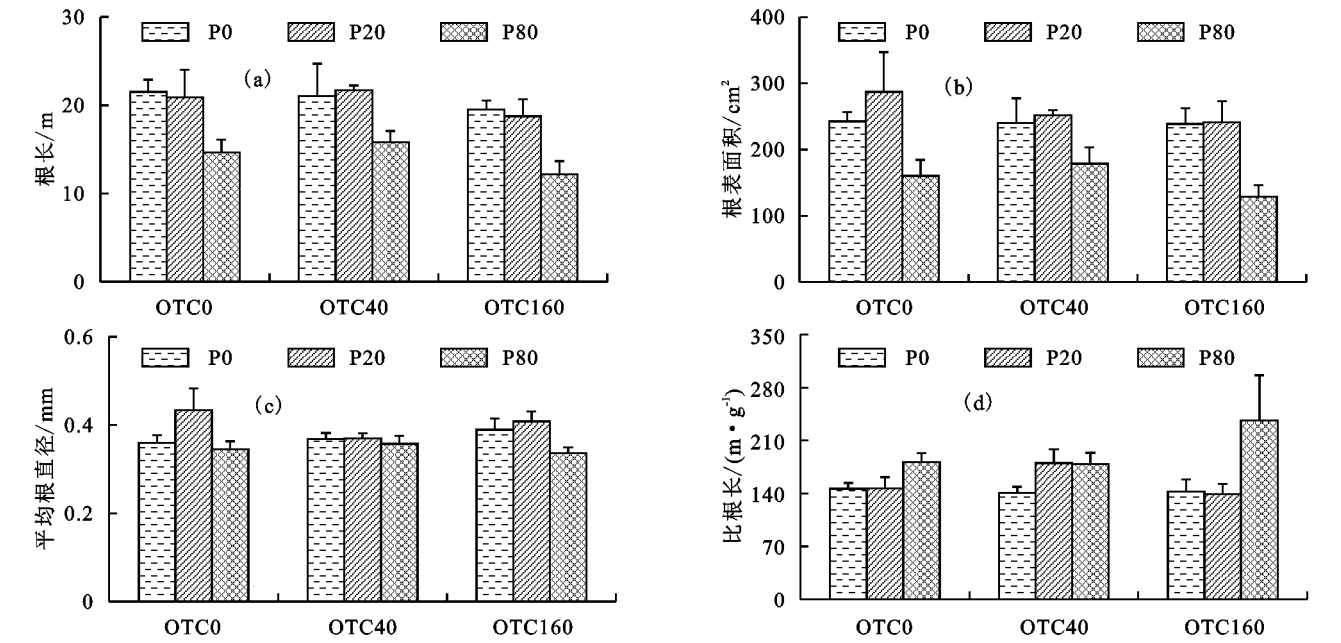


图 2 磷和土霉素添加对小麦根长、根表面积、平均根直径和比根长的影响

在 OTC0 和 OTC40 处理下,苜蓿的根长在 P20 处理下最大,但 P0 与 P20 处理下的根长差异不显著。在 OTC160 处理下,苜蓿的根长随磷添加量增

加而显著增加,P80 处理相比 P0 处理增加了 58.5% ($P<0.05$)(图 3a)。在 OTC0 和 OTC40 处理下,苜蓿的根表面积在 P20 处理下最大,但与 P0 处理差异

并不显著;在 OTC160 处理下,苜蓿的根表面积随着磷添加量的增加呈显著增加的趋势,P80 处理相比 P0 处理增加了 65.3%($P<0.05$)(图 3b)。苜蓿的平

均根直径和比根长在所有处理下均没有显著差异。在所有处理中,磷与土霉素对苜蓿的根长、根表面积、平均根直径和比根长都没有显著影响(表 1)。

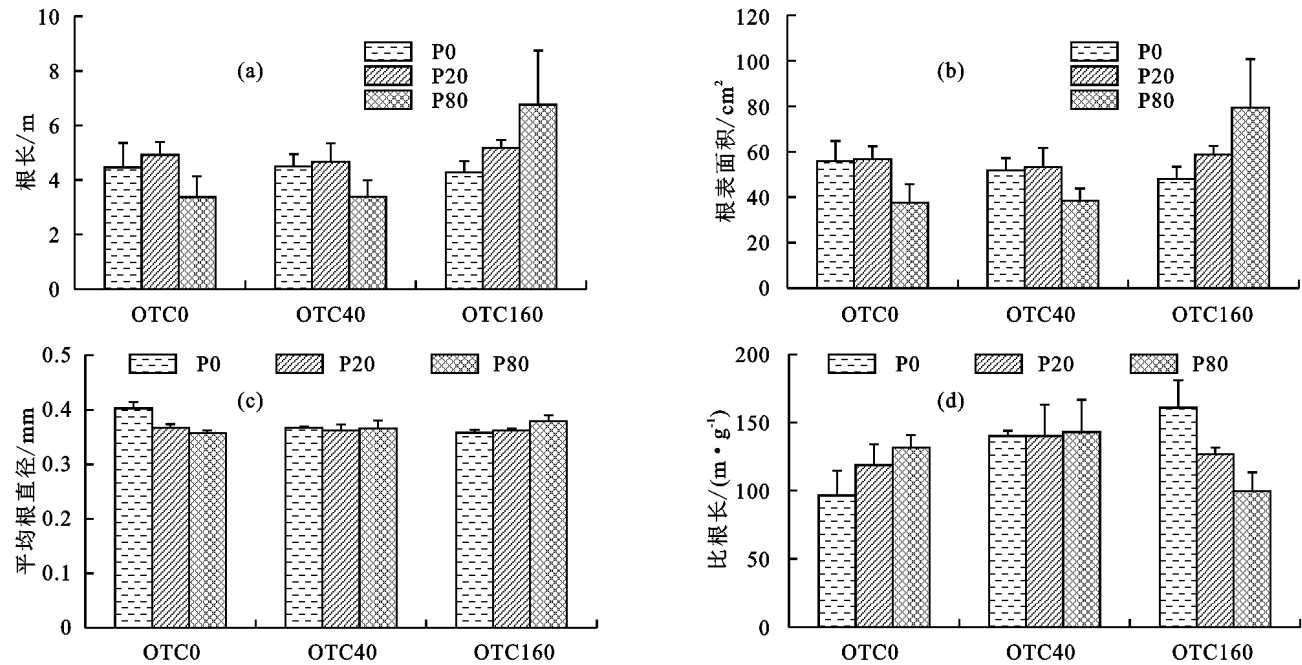


图 3 磷和土霉素添加对苜蓿根长、根表面积、平均根直径和比根长的影响

2.3 磷和土霉素添加对小麦和苜蓿根系不同直径根长分布的影响

由图 4 可知,小麦根直径分级中的根长以 0.05~0.10 mm 范围内的最大。根长分布主要集中在 0.05~0.10,0.15~0.20,0.25~0.30,> 0.45 mm 的直径范围内。在 OTC0 处理下,随着磷添加量的增加,直径在 0.40~0.45,>0.45 mm 范围内的根长比例呈现先增加后减少的趋势,其他直径的根长比例呈现先减少后增加的趋势。在 OTC40 处理下,各直径范围的根长比例在不同磷水平间的差异不显著。在 OTC160

处理中,与 P0 处理相比,P80 处理下 0.05~0.10 mm 直径范围内的根长比例明显增大(图 4a)。

苜蓿根直径分级中的根长以 0.25~0.30 mm 范围内的最大。根长分布主要集中在 0.15~0.20,0.25~0.20,0.35~0.40,> 0.45 mm 的直径范围内。在 OTC0 处理下,磷添加量增加使直径在 0.05~0.1,0.15~0.20 mm 范围内的根长比例升高,使其他直径的根长比例降低。在 OTC160 处理下,直径在 0.05~0.1,0.15~0.20 mm 范围内的根长比例均降低,>0.2 mm 直径范围内的根长比例大体上是升高的(图 4b)。

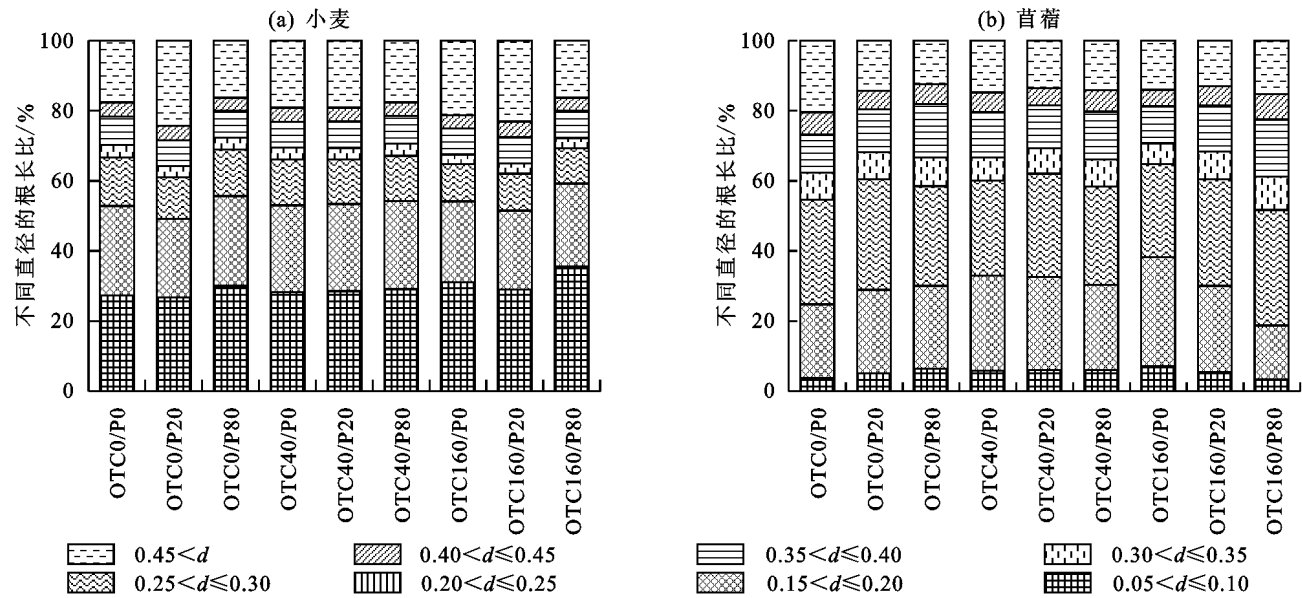


图 4 磷和土霉素添加对小麦和苜蓿根系不同直径根长分布比例的影响

3 讨论

本研究表明,磷对小麦和苜蓿幼苗生长有促进作用,土霉素对幼苗生长有显著的抑制作用,且土霉素对根生长的抑制作用大于地上部,这可能与根是植株和土壤的直接接触部分有关,因此抗生素更易对根细胞产生影响^[26-27]。Kong等^[27]研究也发现,土霉素对苜蓿茎和根的生长抑制率分别高达61%和85%,这与本研究结果相似。本研究表明,磷对小麦地上部生物量影响显著,大体上表现为促进作用,但对苜蓿的生物量影响不显著,土霉素则抑制了苜蓿的根生物量。这可能是因为每种植物对不同水平的磷和抗生素的反应都不相同。He等^[28]研究发现,当紫花苜蓿生长在0,5,10,20,40,80,160 mg P/kg的土壤中时,20 mg P/kg的磷水平是紫花苜蓿生长的最适磷水平。Guan等^[29]通过盆栽试验设置0,44,109 mg P/kg等3个磷水平,结果发现,小麦生长的最适土壤磷水平为44 mg P/kg。崔馨等^[30]研究表明,土霉素浓度为1 mg/L时对生菜根部生物量表现出抑制作用。鲍陈燕等^[31]发现,当土霉素浓度超过200 $\mu\text{g/L}$ 时,水芹根系生物量呈现下降趋势。

每种植物都有适合其生长的氮磷比,低于或高于适宜的比例,植物的生长都会受到限制^[32]。本试验中,磷对苜蓿生长的促进作用并不显著。范富等^[33]研究表明,随氮肥施用量的增加,紫花苜蓿的产量降低,可能是由于高水平的土壤氮添加导致土壤氮磷比较高,从而限制了植物生长对磷添加的响应。Yang等^[34]研究发现,随着添加量的增加,土霉素对细菌、放线菌以及酶活性的抑制作用越大,当土霉素添加量为10 mg/kg时,酶活性与不添加土霉素的处理相比下降了41.3%,当土霉素添加量超过30 mg/kg时,酶活性与不添加土霉素的处理相比下降了64.3%~80.8%。Zhang等^[35]研究表明,向土壤中添加土霉素会直接抑制硝化细菌等的活性,导致土壤中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 向 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的转化减少,可能会导致土壤中氮的有效性降低。本试验中,当OTC添加量为160 mg/kg时,随着磷的添加量增加,小麦和苜蓿地上部生物量都逐渐增加,这可能是由于土霉素含量太高,抑制了与氮转化有关的微生物活性,从而使土壤氮的影响减小,磷的促进作用得以显现。

当受到环境胁迫时,许多植物会进行一些生理调节,以获得更接近最佳生长所需的氮磷比的磷和氮^[36]。本研究中P0和P20处理下小麦的根质量比、总根长以及根表面积都大于最高施磷量。除了

OTC160处理,其他OTC水平下P0和P20处理下苜蓿的根质量比、总根长以及根表面积总体上都大于P80处理。与生长在高磷环境中的植物相比,生长在低磷环境中的植物通常具有更高的根质量比,更高的细根比例,更大的根长和根表面积,以及更多的根毛,这有利于植物在低磷环境中吸收有限的磷^[37]。Hu等^[38]研究了水培试验下的油菜在高磷(1000 $\mu\text{mol/L}$)处理和低磷(5 $\mu\text{mol/L}$)胁迫下的根系形态发现,油菜在低磷胁迫下表现出高的根质量比和更大的根长。李振松等^[39]通过水培试验研究敖汉和维多利亚紫花苜蓿在正常磷(500 $\mu\text{mol/L}$ KH_2PO_4)处理和低磷(5 $\mu\text{mol/L}$ KH_2PO_4)胁迫下的根系形态,结果发现,2种紫花苜蓿在低磷处理下的总根长、根表面积均大于正常磷处理。有研究^[40]表明,在缺磷(不加磷)情况下,大麦的平均根直径是减小的,这与本研究的研究结果并不一致。在本研究中,苜蓿和小麦的平均根直径随着磷施加量的增加均没有显著变化,这与Zobel等^[40]的结果一致,表明根直径的减小并不是对低磷环境的普遍反应。Li等^[41]采用水培法研究了土霉素对小麦根系形态特征的影响发现,小麦的根系数量、根系总长度、根系总表面积和根系总体积均随着土霉素浓度的增加而显著减少。张晶等^[42]也发现,小麦根长抑制率与土霉素浓度呈线性正相关。在本研究中,小麦的试验结果充分体现了土霉素对根系的抑制作用。

在本研究中,土霉素可能主要通过影响土壤中的微生物群落和活性而影响土壤中的氮磷等营养元素的转化,进而影响植物对氮磷等元素的吸收,最终对植物生长和根系发育造成影响,但具体影响机制还需要进一步研究。

4 结论

(1)施磷显著促进了小麦地上部的生长,但对苜蓿的生长影响不显著。所有OTC处理中,P20和P80处理的小麦地上部生物量均高于P0处理,高了9.1%~34.1%。

(2)总体来看,土霉素抑制了苜蓿的根系发育。除OTC160—P80处理外,所有处理的苜蓿根生物量均小于不加磷和土霉素的对照。小麦的根长、根表面积和平均根直径均随土霉素添加量的增加总体上呈现减少或减小的趋势。研究磷肥的合理利用和兽用抗生素在农业土壤—作物生产系统中的残留及其生理毒害作用对保障农业生产、防治水土污染和确保生态环境可持续发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Zhang J J, Yan X B, Su F L, et al. Long-term N and P additions alter the scaling of plant nitrogen to phosphorus in a Tibetan alpine meadow[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 440-448.
- [2] Cui H Y, Sun W, Delgado-Baquerizo M, et al. Phosphorus addition regulates the responses of soil multifunctionality to nitrogen over-fertilization in a temperate grassland[J]. Plant and Soil, 2020, DOI: 10.1007/s11104-020-04620-2.
- [3] Zhang L, Fan J Q, Ding X D, et al. Hyphosphere interactions between an arbuscular mycorrhizal fungus and a phosphate solubilizing bacterium promote phytate mineralization in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 74: 177-183.
- [4] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [5] Pang J Y, Mark T, Matthew D D, et al. Variation in seedling growth of 11 perennial legumes in response to phosphorus supply[J]. Plant and Soil, 2010, 328: 133-143.
- [6] Kenedy E E, Etesami M. Shoot and root biomass, phosphorus and nitrogen uptake of spring wheat grown in low phosphorus and moisture content conditions in a pot experiment[J]. Journal of Plant Nutrition, 2018, 41(17): 1-8.
- [7] Fan J W, Du Y L, Turner N C, et al. Changes in root morphology and physiology to limited phosphorus and moisture in a locally-selected cultivar and an introduced cultivar of *Medicago sativa* L. growing in alkaline soil[J]. Plant and Soil, 2015, 392: 215-226.
- [8] Pang J Y, Ryan M H, Tibbett M, et al. Variation in morphological and physiological parameters in herbaceous perennial legumes in response to phosphorus supply[J]. Plant and Soil, 2010, 331: 241-255.
- [9] 唐宏亮, 马领然, 张春潮, 等. 水分和磷对苗期玉米根系形态和磷吸收的耦合效应[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(5): 582-589.
- [10] Xue Y F, Xia H Y, Christie P, et al. Crop acquisition of phosphorus, iron and zinc from soil in cereal/legume intercropping systems: A critical review[J]. Annals of Botany, 2016, 117(3): 363-377.
- [11] Alberio B, Tadeo J L, Escario M, et al. Persistence and availability of veterinary antibiotics in soil and soil-manure systems[J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1562-1570.
- [12] Chiesa L, Maria N, Francesco A, et al. Determination of veterinary antibiotics in bovine urine by liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Chemistry, 2015, 185: 7-15.
- [13] Giroto F, Cossu R. Animal waste: Opportunities and challenges [M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2017: 1-13.
- [14] Cao R K, Wang J, Ben W W, et al. The profile of antibiotic resistance genes in pig manure composting shaped by composting stage: Mesophilic-thermophilic and cooling-maturation stages[J]. Chemosphere, 2020, 250: e126181.
- [15] Duan M L, Zhang Y H, Zhou B B, et al. Changes in antibiotic resistance genes and mobile genetic elements during cattle manure composting after inoculation with *Bacillus subtilis* [J]. Bioresource Technology, 2019, 292: e122011.
- [16] Chen Z Q, Wang Y, Wen Q X. Effects of chlortetracycline on the fate of multi-antibiotic resistance genes and the microbial community during swine manure composting[J]. Environmental Pollution, 2017, 237: 977-987.
- [17] 陈苏, 陈宁, 晁雷, 等. 土霉素、铜复合污染土壤的植物-微生物联合修复实验研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9): 1554-1559.
- [18] 熊方永, 蔡云枫, 张英, 等. 气泡富集-高效液相色谱法测定地表水样中微量土霉素[J]. 色谱, 2018, 36(7): 665-669.
- [19] Bruce J R, Paul K S L, Michael M. Emerging chemicals of concern: Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 59: 457-465.
- [20] Chen G X, He W W, Wang Y, et al. Effect of different oxytetracycline addition methods on its degradation behavior in soil[J]. Science of the Total Environment, 2014, 479/480: 241-246.
- [21] Zhang Z K, Su R, Chang C, et al. Effects of oxytetracycline on plant growth, phosphorus uptake, and carboxylates in the rhizosheath of alfalfa[J]. Plant and Soil, 2021, 461(1/2): 501-515.
- [22] Pan M, Chu L M. Phytotoxicity of veterinary antibiotics to seed germination and root elongation of crops[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126: 228-237.
- [23] 安婧, 周启星, 刘维涛. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 3022-3027.

- [24] 顾国平,章明奎.兽药土霉素对水稻幼苗根系及部分生理特性的影响[J].浙江农业学报,2016,28(2):190-194.
- [25] Fan J W, Du Y L, Wang B R, et al. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment[J].Field Crops Research,2016,198:247-257.
- [26] 彭琪,何红花,张兴昌.低磷环境下接种丛枝菌根真菌促进紫花苜蓿生长和磷素吸收的机理[J].植物营养与肥料学报,2021,27(2):293-300.
- [27] Kong W D, Zhu Y G, Liang Y C, et al. Uptake of oxytetracycline and its phytotoxicity to alfalfa[J].Environmental Pollution, 2007,147:187-193.
- [28] He H H, Peng Q, Wang X, Fan C B, et al. Growth, morphological and physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa*) to phosphorus supply in two alkaline soils[J].Plant and Soil,2017,416:565-584.
- [29] Guan Y, Qiao Z, Du J Y, et al. Root carbon consumption and grain yield of spring wheat in response to phosphorus supply under two water regimes[J].Journal of Integrative Agriculture,2016,15:1595-1601.
- [30] 崔馨,乔显亮,韩成伟,等.生菜对土霉素的吸收及其植物毒性[J].农业环境科学学报,2008,27(3):1038-1042.
- [31] 鲍陈燕,顾国平,章明奎.兽用抗生素胁迫对水芹生长及其抗生素积累的影响[J].土壤通报,2016,47(1):164-172.
- [32] 范陈斌,武苗苗,苏睿,等.砒砂岩改良风沙土对 2 种引进植物生长和氮磷营养的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):228-234,239.
- [33] 范富,徐寿军,张庆国,等.氮、磷、钾肥配施对紫花苜蓿产量及营养物质含量的影响[J].中国土壤与肥料,2011(2):51-56.
- [34] Yang Q X, Zhang J, Zhu K F, et al. Influence of oxytetracycline on the structure and activity of microbial community in wheat rhizosphere soil[J].Journal of Environmental Sciences,2009,21:954-959.
- [35] Zhang X, Li S Z, Cheng W T, et al. Oxytetracycline stress reconstruct the core microbial community related to nitrogen transformation during composting [J].Bioresource Technology, 2020,319:e124142.
- [36] 贾培龙,安韶山,李程程,等.黄土高原森林带土壤养分和微生物量及其生态化学计量变化特征[J].水土保持学报,2020,34(1):315-321.
- [37] Suriyagoda L D B, Ryan M H, Renton M, et al. Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: A meta-analysis[J].Advances in Agronomy,2014,124:143-200.
- [38] Hu Y F, Ye X S, Shi L, et al. Genotypic differences in root morphology and phosphorus uptake kinetics in *Brassica napus* under low phosphorus supply[J].Journal of Plant Nutrition,2010,33:889-901.
- [39] 李振松,栗振义,张绮芯,等.敖汉和维多利亚紫花苜蓿对低磷环境应激机制的比较[J].草业学报,2019,28(1):50-59.
- [40] Zobel R W, Alloush G A, Belesky D P. Differential root morphology response to no versus high phosphorus, in three hydroponically grown forage chicory cultivars [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 57:201-208.
- [41] Li Z J, Xie X Y, Song Y L, et al. Genotypic differences in responses of wheat (*Triticum durum* L.) roots to oxytetracycline [M]. Berlin Heidelberg: Springer,2010.
- [42] 张晶,杨清香.土霉素暴露对水培小麦生长及根际微生物的影响[J].湖北农业科学,2015,54(8):1832-1835.