

石灰性土壤施磷、铁对柠条生长及根际土壤环境的影响*

陈明昌 马红梅 张 强 程 滨 杨治平 刘 平 李 磊

(山西省土壤环境和养分资源重点实验室, 山西省农业科学院土壤肥料研究所, 太原 030031)

摘 要 采用随机区组和裂区设计, 通过盆栽和根箱模拟试验研究了石灰性土壤, 在水分充足的条件下施磷及磷、铁对柠条生长发育及根际土壤养分有效性的影响。盆栽试验结果表明, 柠条的生物产量随着施磷水平的增加而增加; 在低磷或磷胁迫条件下, 柠条的地上部生长受到抑制, 根冠比增大, 土壤 pH 值迅速降低。根箱模拟试验发现, 不同的铁、磷施肥对比对柠条生物产量的影响不同, 当磷和铁的施用量分别为 P_2O_5 0.15 g kg^{-1} 和 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.03 g kg^{-1} 时能明显提高柠条的生物量。不同铁、磷对比对柠条根际土壤有效磷含量影响的根际范围是 $0 \sim 6 \text{ mm}$ 之间, 在此范围内供试土壤有效磷含量随距离快速下降, 并与根际土壤 pH 值呈反比。柠条对根际土壤 pH 的调控主要受磷水平的影响, 而施铁水平对根际和根外土壤 pH 值的影响比较小。

关键词 柠条; 有效磷; 速效铁; pH; 根际土壤环境

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

柠条 (*Caragana*) 是欧亚草原植被亚区的典型落叶豆科灌木^[1], 属于锦鸡儿植物, 在黄土高原石灰性土壤上具有广泛的分布。由于其根系发达、抗逆性强 (抗旱、抗寒、耐沙埋、耐瘠薄) 等特点^[2,3], 已成为黄土高原地区和农牧交错带生态重建、防风固沙和水土保持的主要造林灌木树种。近年来, 有关柠条的研究报道多集中于群体和个体形态学、生态学、水分资源和经济利用等方面^[4-6], 但对柠条养分吸收和利用的机理, 以及对根际土壤环境的影响还未见报道。据关桂兰等^[7]的报道, 与锦鸡儿共生的根瘤菌具有高固氮活性, 是一种积极有效的“碳库”和“氮源”, 特别是锦鸡儿根瘤菌具有超乎寻常的高吸氢酶活性, 可以避免放氢时能量大量流失, 能适应于缺水少氮的沙地生境。高丽锋等^[8]研究发现, 中间锦鸡儿 (*Caragana intermedia*) 根瘤菌均能分泌 H^+ , 属产酸、快生型根瘤菌, 具

有过氧化氢酶活性。韩蕊莲和晁中彝^[9]报道, 柠条种子中的 Fe 含量可高达 124.0 mg kg^{-1} ; 但据文献(1)报道, 小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 茎叶中的 Fe 含量最高可达到 1480 mg kg^{-1} 。因此, 在山西晋西北地区的石灰性土壤上, 研究不同磷水平、磷铁互作对柠条生长发育以及柠条根际土壤的变化对营造柠条林、发展畜牧业、增加农民收入具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

供试土壤为石灰性褐土, 采自山西省农业科学院土壤肥料研究所试验地, 基本理化性状如表 1 所示。柠条种子来自山西省晋西北地区小叶锦鸡儿 (*Caragana microphyll*) 的人工纯林。

表 1 供试土壤的理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the soil used in the experiment

土层 Depth (cm)	有机质 O.M. (g kg^{-1})	全氮 Total N (g kg^{-1})	EC (mS cm^{-1})	pH	有效磷 Olsen-P (mg kg^{-1})	速效钾 Avail. K (mg kg^{-1})	有效铁 Avail. Fe (mg kg^{-1})
0~20	9.10	0.49	0.27	8.51	6.1	160.1	2.02

* 农业部“948”项目(2004-Z32)“北方干旱半干旱盐碱区生态建设关键技术的引进”的部分研究内容

作者简介: 陈明昌(1959~), 山西省万荣县人, 研究员, 博士生导师。主要从事植物营养、养分资源管理和荒漠化治理等方面研究工作

(1) 陈明昌. 生态建设与水分和养分资源管理. 中国植物营养与肥料学会常务理事扩大会议报告. 2002. 太原

收稿日期: 2004-07-26; 收到修改稿日期: 2005-04-12

1.2 试验设计和处理

1.2.1 盆栽试验 盆栽试验采用单因素随机区组设计。氮肥用量为 $N\ 100\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$, 钾肥的用量为 $K_2O\ 100\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$; 磷肥用量分为 4 个水平, 即: (1) 不施磷肥 (P_0), (2) 施 $P_2O_5\ 25\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (P_1), (3) 施 $P_2O_5\ 50\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (P_2), (4) 施 $P_2O_5\ 100\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (P_3)。试验共 4 个处理, 重复 10 次。

盆栽试验在山西省农业科学院土壤肥料研究所网室进行。试验用盆的规格为 $20\ \text{cm} \times 25\ \text{cm}$ (直径 \times 高) 的塑料盆, 每盆装风干土 $4.5\ \text{kg}$ 。按试验设计先将肥料称好, 用 $200\ \text{ml}$ 的去离子水将肥料溶解后与土充分混匀, 风干后装盆备用。于 5 月 10 日上午播种, 在播种前从每盆中取出 $2\ \text{cm}$ 厚的土, 并浇水至田间持水量的 80% , 待水完全渗透后每盆播种 100 粒种子 (因为小叶锦鸡儿发芽率不高)。播种后将所取土覆于其上, 稍镇压, 并将所有试验盆按区组 (重复) 随机排放于网室内, 用塑料薄膜盖好。5 月 24 日出苗以后, 每盆定植 25 株。在柠条生长期定期定量浇水。从 7 月 24 日开始, 每间隔 $15\ \text{d}$ 采一次植株和土壤样品, 共 5 次, 每次按处理各取 2 盆。采样时, 将每盆内的土和植物一起倒在塑料布上, 轻轻将土敲碎, 以免损失根系。小心除去柠条植株上粘着的土壤, 并用自来水冲洗后, 再用去离子水清洗干净, 分别称根系和地上部的鲜重, 在 105°C 下杀青 $20\ \text{min}$ 之后烘干 (60°C), 称干重, 粉碎供分析测定。土样充分混匀, 用四分法取土 $250\ \text{g}$, 风干后, 研碎、过筛以备测定。测定项目包括植株的含磷量和土壤的 pH、速效磷含量。

1.2.2 根箱模拟试验 试验采用 2 因子 3 水平裂区设计, 其中以磷用量为主处理, 铁用量为副处理。氮和钾肥的用量为 $N\ 100\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 和 $K_2O\ 100\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ 。磷肥用量分为 3 个水平, 即: (1) 不施磷肥 (P_0), (2) 施 $P_2O_5\ 75\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (P_1), (3) 施 $P_2O_5\ 150\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (P_2)。铁肥用量同样设 3 个水平, 即: (1) 不施铁肥 (Fe_0), (2) 施 $FeSO_4 \cdot 7H_2O\ 30\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (Fe_1), (3) 施 $FeSO_4 \cdot 7H_2O\ 60\ \text{mg}\ \text{kg}^{-1}$ (Fe_2)。试验共 9 个处理, 重复 4 次。

实验装置采用 PVC 板加工成的 3 室盆栽系统。以 2 片孔径为 $30\ \mu\text{m}$ 的尼龙网 (不影响土壤溶液在各室之间的运动) 将土壤分为三部分, 中间部分为根系生长室 ($160\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 15\ \text{mm}$ (长 \times 高 \times 厚)), 两边为根系生长外室 ($160\ \text{mm} \times 200\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$), 每个根箱装风干土 $4.5\ \text{kg}$ 。于 5 月 17 日上午

播种, 在播种前从每箱中取出 $3\ \text{mm}$ 厚的土, 浇水至田间持水量的 80% , 待水完全渗透后在根系生长室内播种 10 粒柠条种子, 覆土后稍镇压。出苗后, 每个根箱定植 5 株, 柠条生长期定期定量浇水。出苗 $70\ \text{d}$ 后, 分别收获柠条地上部、地下部。收获地下部柠条根样时, 将根室土壤自上而下慢慢挖出, 仔细挑植物根系, 小心冲洗干净。根室土壤取完后, 抽出尼龙网, 以不同的间距切去土壤外室中根际土及距网膜不同距离的土壤样品。肥料施用、装箱操作和样品的分析测定与盆栽试验相同。

1.3 样品分析方法

土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法—外加热法^[10]; 土壤全氮测定为半微量开氏法^[10]; 土壤有效磷测定为 ASI 浸提, 钼蓝比色法测定^[11]; 土壤速效钾测定为 $1\ \text{mol}\ \text{L}^{-1}\ \text{NH}_4\text{OAc}$ 浸提, 火焰光度法^[12]; 土壤有效铁测定采用 EDTA 浸提^[11] (水土比 $2.5:1$), 原子吸收分光光度法; 土壤 pH 和 EC 测定采用电位法 (水土比 $2.5:1$)^[12] 和电导法 (水土比 $5:1$)^[12]。植株样品全氮的测定采用微量开氏法^[12]; 植物全磷测定采用钒钼黄比色法^[13]; 植物全钾测定为 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ ($10:3$) 消煮, 火焰光度法^[10]。实验数据采用 SAS 统计分析软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 施磷对柠条生长发育和根冠比的影响

不同施磷水平下对柠条地上部和地下部干重的影响如表 2 和表 3 所示。由表 2 可知, 施磷可明显促进柠条地上部分的生长。从 7 月 24 日到 9 月 24 日, 各处理地上部的生物量与对照相比都有不同程度的增加, 其中, P_1 处理增加了 $0.4\% \sim 13.6\%$, P_2 处理增加了 $7.2\% \sim 14.7\%$, P_3 处理增加了 $10.8\% \sim 18.5\%$ 。在所有处理中以 P_3 处理效果最明显。从柠条根系 (地下部分) 生长情况来看 (表 3), 在盆栽试验的前期 (7 月 24 日 ~ 8 月 6 日), 施磷各处理与对照相比根系干重都有不同程度的增加, 并随着磷肥用量的增加而增加。从 8 月 6 日开始, P_1 处理与对照相比根系的干重降低了 9.3% , 出现了负的增加; 到 9 月 6 日施磷各处理的根系干重则分别比对照降低了 9.3% 、 14.8% 和 9.3% 。但随着柠条生长到 9 月 24 日, 施磷各处理的根系干重与对照相比又分别增加了 3.9% 、 4.6% 和 4.2% 。

为了进一步说明不同施磷水平对柠条地上部和地下部干重的动态影响,我们对不同测定时期柠条的根冠比进行了比较,结果如图 1 所示。结果发现在盆栽试验的前期(7月24日~8月6日)根冠比在迅速降低,说明在此阶段地上部的生长明显高于根系的生长。在此阶段根冠比是 $P_0 > P_1 > P_2 > P_3$ 。随

着柠条生长发育进程,各处理的根冠比降低幅度逐步减小。到8月24日后,各处理的根冠比开始逐步增加,而且对照处理(P_0)的根冠比明显高于其他处理。由此可知,在低磷条件下,植物可通过减小根半径、提高根冠比、增加根系比表面积等来实现对低磷胁迫的适应^[14,15]。

表 2 不同施磷水平对柠条地上部干重的影响

Table 2 Effects of P application rate on shoots of *caragana*

处理 Treatment	7月24日 24th July		8月6日 6th Aug.		8月24日 24th Aug.		9月6日 6th Sep.		9月24日 24th Sep.	
	干重 Dry wt.	增加量 Increase								
	(g pot ⁻¹)	(%)								
P_0	2.77	-	3.62	-	4.50	-	5.55	-	6.16	-
P_1	2.87	3.6	3.70	3.3	4.52	0.4	5.62	1.3	7.00	13.6
P_2	2.97	7.2	3.90	7.7	5.01	10.1	6.09	9.7	7.07	14.7
P_3	3.18	14.8	4.29	18.5	5.08	11.6	6.15	10.8	7.19	16.7

注:表中地上部干重为两次重复的平均值 The dry weight of shoots in table is an average of two repetitions

表 3 不同施磷水平对柠条地下部干重的影响

Table 3 Effects of P application rate on roots of *caragana*

处理 Treatment	7月24日 24th July		8月6日 6th Aug.		8月24日 24th Aug.		9月6日 6th Sep.		9月24日 24th Sep.	
	干重 Dry wt.	增加量 Increase								
	(g pot ⁻¹)	(%)								
P_0	1.36	-	1.38	-	1.61	-	2.44	-	2.83	-
P_1	1.41	3.7	1.40	1.4	1.46	-9.3	2.21	-9.3	2.94	3.9
P_2	1.44	5.9	1.45	5.1	1.78	10.6	2.08	-14.8	2.96	4.6
P_3	1.47	11.0	1.56	5.8	1.81	12.4	2.21	-9.3	2.95	4.2

注:表中地上部干重为两次重复的平均值 The dry weight of roots in table is an average of two repetitions

2.2 施磷对供试土壤 pH 值和有效磷含量的影响

2.2.1 施磷对供试土壤 pH 值的影响

在盆栽条件下,不同施磷水平对供试土壤 pH 值的影响如图 2 所示。从7月24日到8月24日这一阶段,对照和各施磷处理土壤 pH 值平均降低了 0.12,其中,对照(P_0)降低了 0.13, P_1 、 P_2 和 P_3 则分别降低了 0.18、0.12 和 0.06。但从8月24日开始,除 P_3 处理土壤 pH 值的降低速率较慢外,其他处理土壤 pH 值则急剧下降。试验结果表明,8月24日到9月6日, P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 处理的土壤 pH 值分别降低了 0.44、0.42、0.46 和 0.08;9月6日到9月24日, P_0 、 P_1 、 P_2 和 P_3 处理的土壤 pH 值分别又降低了 0.12、0.13、

0.10 和 0.03。由此不难看出,8月24日是柠条根冠比由降到升的一个转折点,也是土壤 pH 值急剧降低的关键点(见图 1 和图 2)。一方面,植物为了适应低磷(P_1 和 P_2)或磷胁迫(P_0)条件下的生长,根系的有机酸分泌量会较正常供磷(P_3)条件下高^[16,17]。另一方面,锦鸡儿根瘤菌则具有超常的吸氢酶活性,能节省大量放氢反应中损失的能量^[7],生长过程中能主动分泌出大量的 H^+ ^[8]。同时考虑到柠条是豆科植物结根瘤最多的种类之一,1年生柠条出苗 40~50 d 开始结瘤,80~90 d 达到结瘤高峰期^[18]。因此,在供试条件下出苗后 90 d(8月24日),土壤 pH 急剧降低,是磷胁迫下根系分泌有机

酸和根瘤菌分泌 H^+ 共同作用的结果。

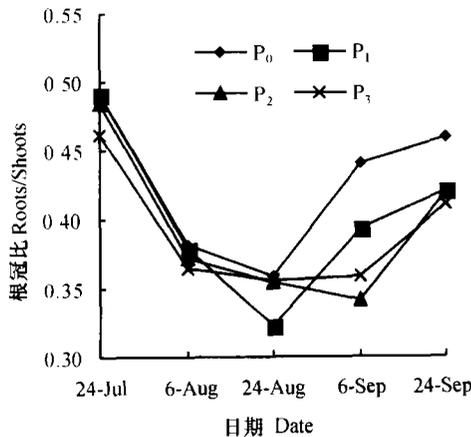


图1 施磷对柠条根冠比的影响

Fig.1 Effects of P application on the ratio of roots and shoots of *caragana*

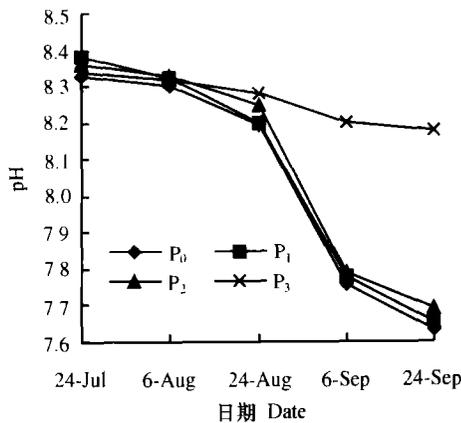


图2 施磷对供试土壤 pH 的影响

Fig.2 Effects of P application on pH of soil used in the experiment

2.2.2 施磷对供试土壤有效磷含量的影响 供试条件下土壤有效磷的含量随施磷水平的增加而增加,结果如图3所示。在整个试验阶段不施磷处理 (P_0) 土壤有效磷的含量维持在一个相对低的、较平稳的水平,这一结果表明柠条在低磷胁迫环境下,可通过调节根冠比(图1)和降低土壤 pH 值(图2)活化石灰性土壤中难溶性磷来满足其生长发育对磷营养的需要,使土壤有效磷维持于一个相对稳定的水平。这正是锦鸡儿植物不同于禾本科和其他豆科植物的一个显著特点,在养分贫瘠 ($Olsen-P < 2.0 \text{ mg kg}^{-1}$) 和持水性能极差的沙质土壤上能良好生长,尤其是苗期植株的耐低磷能力较强^[19]。李香真等^[20]的研究结果表明,小叶锦鸡儿灌丛在退化草场

恢复过程中具有独特的有益作用,其“营养效应”或“肥岛效应”有利于禾本科牧草的恢复,它不同于其他灌木侵入草地,改变土壤水分和养分状况,而导致草地沙漠化。

对 P_1 和 P_2 处理而言,土壤有效磷的含量的变化与对照处理的情况则不同。从7月24日开始,土壤有效磷含量在逐步提高,到8月24日达到了最大值,随着柠条生长发育进程土壤有效磷含量回落到一个较低水平(9月6日,见图3)。这一变化过程与柠条根冠比和土壤 pH 值的变化非常吻合。陆文龙等人^[21]的研究发现,在石灰性土壤上磷的活化作用与土壤中有有效磷的含量呈显著正相关,施磷土壤有机酸活化磷的数量明显大于不施磷土壤。在整个试验期内 P_3 处理土壤的有效磷含量是随柠条的生长发育而在逐步降低的。到9月6日其土壤有效磷含量达到了最低点,9月24日又回升到一个相对较高的水平。相对于9月6日而言,其他处理土壤有效磷含量在9月24日同样都有不同程度的提高。

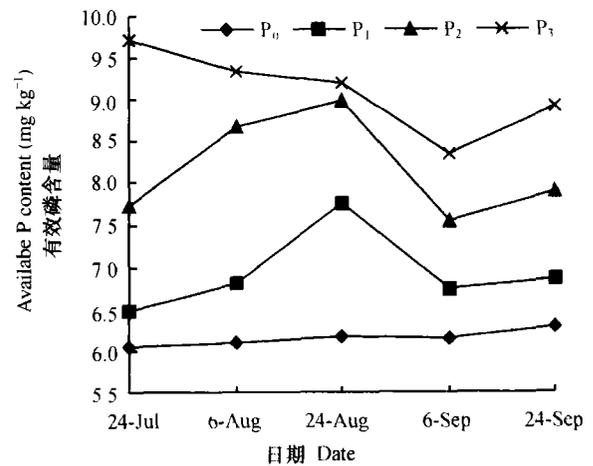


图3 施磷对供试土壤有效磷含量的影响

Fig.3 Effects of P application on available P content of soil used in the experiment

2.3 施磷对柠条地上部和地下部磷含量的影响

表4给出的是不同施磷水平下柠条地上部和地下部磷含量的测定结果。由表4可知,在不同生育阶段柠条地上部和地下部磷含量均随磷肥用量的增加而增加。 P_1 和 P_2 处理与对照间的差异往往受柠条生长发育阶段的影响,表现则不完全一致。比较7月24日和8月6日的测定结果会发现,各处理地上部磷含量平均增加了 1.115 mg kg^{-1} ,根系(地下部)的磷含量没有增加反而平均降低了

0.9 mg kg⁻¹。此阶段不论是对照还是各施磷处理土壤中的磷含量均能满足柠条的生长需要,地上部(冠部)生长明显高于根系(见图 1),从而导致冠部磷素吸收速率增加以满足地上部的生长需要^[22]。从 8 月 24 日的测定结果来看,各处理根系的平均磷含量比 8 月 6 日的测定结果增加了 1 倍,从 2.2mg kg⁻¹提高到 4.4 mg kg⁻¹。对比图 1、图 2 和图 3 的结果发现,从 8 月 24 日始,根系生长相对增加,施磷处理土壤的 pH 和有效磷含量降低。根系活性的增加,可能导致根系吸收能力的增强,因而

大量的磷素在根系积聚而没有及时转移到地上部分。9 月 6 日与 8 月 24 日两次测定结果比较,各处理根系磷含量增加幅度非常小,平均只有 0.15 mg kg⁻¹。到 9 月 24 日,地上和地下部分的磷含量开始下降。分析其原因,可能存在着以下两种可能:(1)与对照相比,施磷处理地上部干重增加明显高于生长前期,地下部干重增加由负变为正,生物量的增加导致了所谓的“稀释效应”;(2)根系积聚的磷素开始向地上部转移。但确切原因还需要试验的进一步论证。

表 4 不同施磷水平对柠条地上部和地下部磷含量的影响

Table 4 Effects of P application rate on P contents of shoots and roots of caragana

处理 Treatment	7 月 24 日 24th July		8 月 6 日 6th Aug.		8 月 24 日 24th Aug.		9 月 6 日 6th Sep.		9 月 24 日 24th Sep.	
	地上部 Shoots	地下部 Roots								
	(mg kg ⁻¹)									
P ₀	2.65	2.00	4.26	2.00	4.75	4.20	5.10	4.20	4.10	3.25
P ₁	3.45	3.05	4.70	2.15	4.85	4.35	5.25	4.40	4.35	3.45
P ₂	3.75	3.20	4.75	2.20	5.30	4.45	5.45	4.75	4.65	3.75
P ₃	4.45	4.15	5.05	2.45	5.55	4.60	5.70	4.85	4.95	4.05

注:表中地上部干重为两次重复的平均值 The dry weight of shoots in table is an average of two repetitions

2.4 磷和铁配合施用对柠条生物量的影响

根箱模拟试验条件下的磷、铁配合施用对柠条生物量的影响如图 4 所示。从试验结果来看,总的趋势是柠条的生物量随磷施用量的增加而增加,但在不同施磷条件下,柠条的生物量随铁施用量的变化幅度则不完全一致。对 P₀ 和 P₂ 处理而言,随着

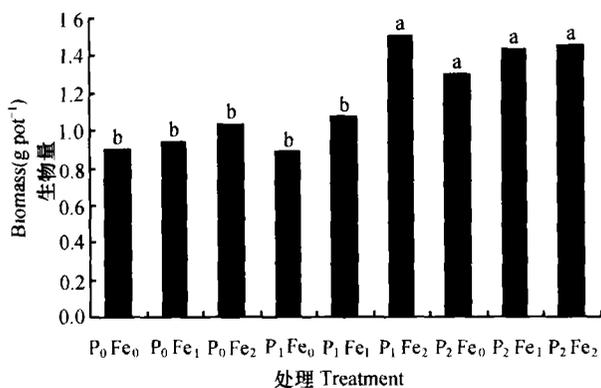


图 4 根箱试验条件下磷铁配合施用对柠条生物量的影响

Fig. 4 Effects of combined application of P and Fe on biomass of caragana in the rhizosphere experiment

铁肥用量的增加柠条生物量增加的幅度比较小,但在低磷(P₁)条件下,柠条生物量随着铁肥用量增加的幅度较大。在所有的处理中,P₁Fe₂ 处理柠条的生物量最高,达到了 1.51g pot⁻¹,比 P₁Fe₁ 处理增加了 40.6%,远高于其他施磷主处理中生物量随铁水平增加的幅度。Duncan's 多重比较结果表明,P₁Fe₂、P₂Fe₀、P₂Fe₁ 和 P₂Fe₂ 处理与 P₀Fe₀、P₀Fe₁、P₀Fe₂、P₁Fe₀、P₁Fe₁ 处理间存在着显著的差异,但它们各自间的差异并没有达到显著水平。F 检验结果表明,P 和 Fe 的 F 值分别为 12.61 和 12.17,达到了极显著水平,而 P×Fe 的 F 值为 1.39,没有达到显著水平,说明磷和铁之间不存在着明显的交互作用。

2.5 磷和铁配合施用对根际土壤和土体 pH 值的影响

由前面讨论可知,低磷或磷胁迫条件下,柠条根系会通过分泌有机酸降低土壤 pH 来实现对磷胁迫环境的适应;同时与柠条共生的根瘤菌可以主动分泌 H⁺ 降低根际土壤的 pH 值,这一论点可由图 5 得到进一步确证。不论施磷或不施磷主处理中,根系生长室内的土壤 pH 明显低于根室外土壤,且随距离的增加而增加。对比图 5 不难看出,在距根系生

长室 9 mm 以内 P_0Fe_0 处理的土壤 pH 值降低速度明显高于 P_1Fe_0 和 P_2Fe_0 处理,说明柠条对根际土壤 pH 的调控主要受磷水平的影响,而施铁水平对根际

和根外土壤 pH 值的影响比较小。三个不同施磷水平下土壤 pH 值随施铁水平和距离的增加其曲线的变化趋势是基本一致的。

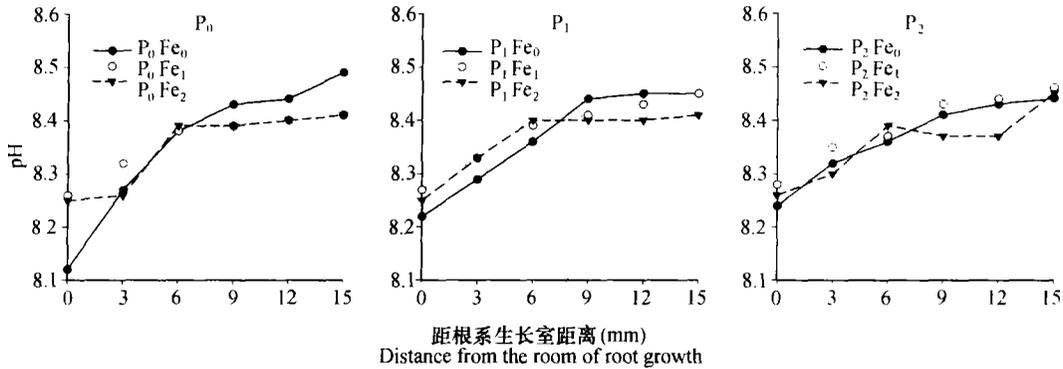


图 5 不同施磷、铁水平对土壤根际 pH 的影响

Fig.5 Effects of P and Fe application on soil pH in rhiosphere

2.6 磷和铁配合施用对根际土壤和土体有效磷含量的影响

图 6 给出的是不同施磷、铁水平下根际土壤和根外土壤有效磷含量的变化。试验结果表明,土壤有效磷含量随施磷量的增加而增加。不论是施磷、铁处理还是对照处理,距根系生长室 0~6 mm 的土壤速效磷含量呈下降趋势,且降低速率较快;6~9 mm 的土壤速效磷含量的变化不大,9~15 mm 又逐渐升高。同时,0~6 mm 范围内主处理 P_0 土壤有效磷含量降低较缓慢, P_1 降低次之,而 P_2 则最快。从每个主处理内来看, Fe_0 处理土壤有效磷降低速率最慢, Fe_1 次之,而 Fe_2 降低的最快。也就是说,在 0~6 mm 根际范围内磷和铁肥用量愈高土壤有效磷的降低速率愈大,而 9~15 mm 范围内的情况则恰恰相反。试验结果表明,在供试条件下柠条根际有效磷没有出现明显的亏缺区 (P_0),反而施磷处理(P_1 和 P_2)根际出现了有效磷含量的富集。此结论与其他研究者在作物和果树上研究结果不一致^[23,24]。曹一平和崔健宇^[25]对油菜根际磷

有效性研究发现,在有效磷含量较充足和较缺的石灰性土壤上,油菜根际 0~2 mm 范围内会出现明显的 Olsen-P 亏缺区,而有效磷极缺的土壤,则不存在亏缺区。据 Jones 等^[26]的研究结果,在有机酸活化土壤磷的作用中, H^+ 的贡献占 25%~40%,其作用大于有机酸阴离子。因此,与柠条共生的根瘤菌高吸氢酶活性和分泌的 H^+ 可能为根际有效磷富集起着主导性作用。大量研究也已证明,磷铁之间存在着十分复杂的相互作用,是受遗传基因控制的一种适应性反应,可以通过多种途径来实现^[27]。虽然其反应机制目前还不清楚,但 Brown 等^[28]在高粱上的研究发现,铁效率越高,磷效率越低。如前所述,小叶锦鸡儿植物幼苗对缺磷并不敏感^[19],在瘠薄的土壤上体内可以积累较高的铁浓度^[9],属铁高效植物。因此,根际 pH 降低提高了有效磷的含量,施铁又限制了柠条对磷的吸收,从而造成有效磷在根际的富集和施铁能提高根际有效磷的含量。这一结论在柠条上能否成立,需要进一步的试验和验证。

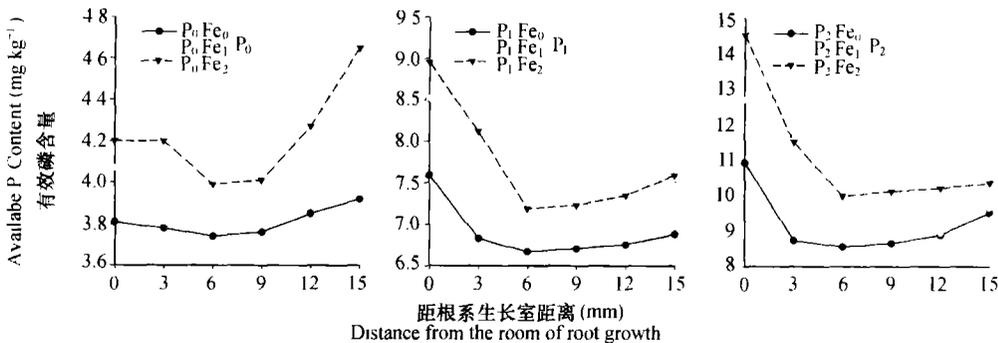


图 6 不同施磷、铁水平对土壤根际有效磷含量的影响

Fig.6 Effects of P and Fe application on available P of the rhiosphere

3 结 论

1) 施磷能明显促进柠条地上部分的生长。研究表明,整个试验期内柠条地上部干重随施磷量的增加而增加。不同施磷处理对柠条根系干重影响较为复杂。与不施磷处理相比,试验前期和后期各施磷处理根系干重为正增加,而中期则出现了负增加。在低磷条件下,柠条可通过提高根冠比来实现对低磷胁迫的适应。

2) 不同施磷水平对供试土壤 pH 值的影响是不同的。研究表明,柠条根冠比由降到升的转折点与不施磷(P_0)或低磷处理(P_1 和 P_2)土壤 pH 值急剧降低的时间点是一致的。在磷胁迫或低磷条件下,供试土壤 pH 值降低主要是柠条根系有机酸分泌和共生根瘤 H^+ 分泌共同作用的结果,其协同效应对供试土壤 pH 值的影响远要大于其单独的作用。

3) 根箱模拟试验结果表明,磷、铁配合施用对柠条生物量的影响是比较复杂的,供试条件下磷铁之间的相互作用主要受磷施用水平的制约。在所有的处理中, P_1Fe_2 处理柠条的生物量最高,达到了 1.51 g pot^{-1} ,远高于其他处理。

4) 柠条对根际土壤 pH 的调控主要受磷水平的影响,而施铁水平对根际和根外土壤 pH 值的影响比较小。研究表明,在供试条件下 P_0 处理柠条根际有效磷没有出现明显的亏缺区, P_1 和 P_2 处理根际则出现了有效磷的富集。此结论与他在其他作物上的研究结果不一致^[23-25],这与柠条能适应贫瘠和干旱的荒漠生境的遗传特点有关。

参 考 文 献

- [1] 周道玮. 锦鸡儿属植物分布研究. 植物研究, 1996, 16(4): 428~435. Zhou D W. Studies on the distribution of *Caragana Fabr.* Plant (In Chinese). Plant Research, 1996, 16(4): 428~435
- [2] 牛西午. 柠条的栽培与利用. 太原:山西科学教育出版社, 1988. Niu X W. Cultivation and Utilization of *Caragana* (In Chinese). Taiyuan: Shanxi Science and Education Press, 1988
- [3] 朱春云, 赵越, 刘霞, 等. 锦鸡儿等旱生树种抗旱性生理的研究. 干旱区研究, 1996, 3(1): 59~73. Zhu C Y, Zhao Y, Liu X, et al. Studies on the drought-resistant physiology of Xerophytes such as *Caragana Fabr.* (In Chinese). Arid Zone Research, 1996, 3(1): 59~73
- [4] 苏永中, 赵哈林, 张铜会, 等. 科尔沁沙地不同年代小叶锦鸡儿人工林植物群落特征及其土壤特性. 植物生态学报, 2004, 28(1): 93~100. Su Y Z, Zhao H L, Zhang T H, et al. Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of *Caragana microphylla* in Horqin sandy land (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(1): 93~100
- [5] 马成仓, 高玉葆, 王金龙, 等. 内蒙古高原甘蒙锦鸡儿光合作用和水分代谢的生态适应性研究. 植物生态学报, 2004, 28(3): 305~311. Ma C C, Gao Y B, Wang J L, et al. Ecological adaptation of *Caragana opulens* on the Inner Mongolia plateau: Photosynthesis and water metabolism (In Chinese). Acta Phytocologica Sinica, 2004, 28(3): 305~311
- [6] 曹成有, 蒋德明, 骆永明, 等. 小叶锦鸡儿防风固沙林稳定性研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1178~1186. Cao C Y, Jiang D M, Luo Y M, et al. Stability of *Caragana microphylla* plantation for wind protection and sanfixation (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1178~1186
- [7] 关桂兰, 王卫卫, 杨玉锁. 新疆干旱地区固氮生物资源. 北京: 科学出版社, 1991. Guan G L, Wang W W, Yang Y S. Nitrogen Fixation Biological Resource in Xinjiang Arid Region (In Chinese). Beijing: Science Press, 1991
- [8] 高丽锋, 邓馨, 王洪新, 等. 毛乌素沙地中间锦鸡儿根瘤菌的多样性及其抗逆性. 应用生态学报, 2004, 15(1): 44~48. Gao L F, Deng X, Wang H X, et al. Diversity and resistance of rhizobia isolated from *Caragana intermedia* in Maowusu sandland (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(1): 44~48
- [9] 韩蕊莲, 晁中彝. 柠条种子营养成分测定分析. 西北植物学报, 1996, 16(6): 95~97. Han R L, Chao Z Y. Determination and analysis on the nutrition composition of *Caragana microphylla* seed (In Chinese). Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 1996, 16(6): 95~97
- [10] 南京农业大学主编. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 1981. Nanjing Agricultural University, ed. Agrochemical Soil Analysis (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1981
- [11] 加拿大钾磷研究所北京办事处. 土壤养分状况系统研究法. 北京: 中国农业出版社, 1992. Beijing Office of PPL/PPIC. Systematic Approach for Determining Soil Nutrient Status (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Press, 1992
- [12] 鲁如坤编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学出版社, 2000. Lu R K, ed. Methods of Agrochemical Soil Analysis (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science Press, 2000
- [13] 何振立, 朱祖祥, 袁可能, 等. 土壤对磷的吸持及土壤供磷指标之间的关系. 土壤学报, 1988, 25(4): 397~403. He Z L, Zhu Z X, Yuan K N, et al. Potential phosphate sorptivity value from langmuir equation and its application for phosphate fertilizer recommendation (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(4): 397~403
- [14] 李海波, 夏铭, 吴平. 低磷胁迫对水稻苗期侧根生长及养分吸收的影响. 植物学报, 2001, 43(11): 1154~1160. Li H B, Xia M, Wu P. Effect of phosphorus deficiency tree on rice lateral root growth and nutrient absorption (In Chinese). Acta Botanica Sinica, 2001, 43(11): 1154~1160
- [15] 沈宏, 施卫明, 王校常, 等. 不同作物对低磷胁迫的适应机理研究. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 172~177. Shen H, Shi W M, Wang X C, et al. Study on adaptation mechanisms of dif-

- ferent crops to low phosphorus stress (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(2):172 ~ 177
- [16] 王美丽, 严小龙. 大豆根形态和根分泌物特性与磷效率. *华南农业大学学报*, 2001, 22(3):1 ~ 4. Wang M L, Yan X L. Characteristics on root morphology and root exudation of soybean in relation to phosphorus efficiency (In Chinese). *Journal of South China Agricultural University*, 2001, 22(3):1 ~ 4
- [17] 刘洪升, 宋秋华, 李凤民. 根分泌物对根际矿物营养及根际微生物的效应. *西北植物学报*, 2002, 22(3):693 ~ 702. Liu H S, Song Q H, Li F M. The roles of root exudation on rhizosphere nutrient and rhizosphere microorganisms (In Chinese). *Acta Bot Boreal -Occident. Sin.*, 2002, 22(3):693 ~ 702
- [18] 牛西午, 史清亮, 张强, 等. 山西锦鸡儿根瘤菌资源分布与生态学研究. *西北植物学报*, 2003, 23(6):921 ~ 925. Niu X W, Shi Q L, Zhang Q, *et al.* Study of resources distribution and ecology of *Rhizobium* sp (*Caragana*) in Shanxi Province (In Chinese) *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2003, 23(6):921 ~ 925
- [19] 牛西午, 丁玉川, 徐强, 等. 营养液不同磷浓度对柠条苗期植株生长发育的影响. *西北植物学报*, 2003, 23(4):622 ~ 627. Niu X W, Ding Y C, Xu Q, *et al.* Effects of different phosphorus concentration on *Caragana microphylla* seedling growth and development (In Chinese). *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*, 2003, 23(4):622 ~ 627
- [20] 李香真, 张淑敏, 邢雪荣. 小叶锦鸡儿灌丛引起的植物生物量和土壤化学元素含量的空间变异. *草业学报*, 2002, 11(1):24 ~ 30. Li X Z, Zhang S M, Xing X R. Spatial variation of plant biomass and soil chemical element contents induced by *Caragana microphylla* (In Chinese) *Acta Prataculturae Sinica*, 2002, 11(1):24 ~ 30
- [21] 陆文龙, 王敬国, 曹一平, 等. 低分子量有机酸对土壤磷释放动力学的影响. *土壤学报*, 1998, 35(4):493 ~ 500. Lu W L, Wang J G, Cao Y P, *et al.* Kinetics of phosphorus release from soils, as affected by organic acids with low-molecular-weight (In Chinese) *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4):493 ~ 500
- [22] 童学军, 卢永根, 严小龙. 广东大豆地方种质磷效率特性研究: 不同大豆基因型冠部、根部磷效率特性差异及其与植株磷效率特性的关系. *中国油料作物学报*, 2000, 22(4):48 ~ 53. Tong X J, Lu Y G, Yan X L. Studies on the characteristics of phosphorus efficiency of native soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) germplasm: Differences in characteristics of phosphorus efficiency of shoot and root among soybean genotypes and correlation analysis (In Chinese). *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2000, 22(4):48 ~ 53
- [23] 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. *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 (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):635 ~ 639
- [24] 姚胜蕊, 束怀瑞. 有机物料对苹果根际营养元素动态及土壤酶活性的影响. *土壤学报*, 1999, 36(3):428 ~ 432. Yao S R, Shu H R. Study on the effect of organic materials on mineral nutrients and enzymes of in the rhizosphere of apple seedlings (In Chinese) *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3):428 ~ 432
- [25] 曹一平, 催健宇. 石灰性土壤中油菜根际磷的化学动态及生物有效性. *植物营养与肥料学报*, 1994, 1(1):49 ~ 54. Cao Y P, Cui J Y. Phosphorus dynamic and biological availability in rhizosphere of rape seedlings grown on calcareous soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1994, 1(1):49 ~ 54
- [26] Jones D L, Peter R Darrah. Role of root derived organic acids in the mobilization of nutrients from the rhizosphere. *Plant and Soil*, 1994, 166:247 ~ 256
- [27] 邱慧珍, 张福锁. 不同磷效率小麦对低铁胁迫的基因型差异. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(4):361 ~ 366. Qiu H Z, Zhang F S. Genotypic difference in response to deficiency of winter wheat with different phosphorus efficiency (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(4):361 ~ 366
- [28] Brown J C, Jones W E. Phosphorus efficiency as related to iron inefficiency in sorghum. *Agron J*, 1975, 67:468 ~ 472

EFFECTS OF P AND Fe APPLICATION ON GROWTH OF CARAGANA AND RHIZOSPHERIC ENVIRONMENT IN CALCAREOUS SOILS

Chen Mingchang Ma Hongmei Zhang Qiang Cheng Bin Yang Zhiping Liu Ping Li Lei

(The Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources of Shanxi, Institute of Soil Science and Fertilizer, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract Pot and root-box experiment of randomized block and split block design were conducted for determining effects of P application and combined application of P and Fe^{2+} on growth of *caragana* and its rhizospheric environment in calcareous soils with sufficient water supply. Results of the pot experiment show that *caragana* biomass increased with P application rate. Under the stress of low P or P deficiency, shoot growth of *caragana* was restricted, the ratio of root/shoot increased and soil pH decreased rapidly. The root-box experiment demonstrates that effect of combined application of P and Fe^{2+} on *caragana* biomass varied with the ratio. When the P and Fe^{2+} application rate was P_2O_5 0.15 g kg^{-1} and $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.03 g kg^{-1} , respectively, an evident increase in *caragana* biomass was observed over other treatments. The effect of combined application of P and Fe^{2+} on available P in the rhizosphere (0 ~ 6 mm) decreased rapidly with increasing distance, and was just in reverse on soil pH. Results show that soil pH in the rhizosphere was mainly controlled by P application rate, and the application rate of Fe did not have much effect on soil pH in the rhizosphere or the root zone.

Key words *Caragana*; Available phosphorus; Available iron; pH; Rhizospheric environment