

有机物料对平邑甜茶根系 ^{32}P 吸收动力学参数的影响

毛志泉¹, 张继祥¹, 胡艳丽¹, 张江红², 王丽琴¹, 束怀瑞¹

(¹山东农业大学园艺学院, 泰安 271018; ²河北农业大学园艺学院, 保定 071001)

摘要: 研究了3种有机物料对平邑甜茶实生苗吸收根、生长根、褐色木质根磷吸收的影响。结果表明, 3类根对磷的吸收均符合离子吸收动力学模型。有机物料的加入均不同程度地提高了 I_{max} , 而 K_{m} 有所降低。不同处理间根系磷吸收动力学参数有差异: 在夏季各类根的 I_{max} 表现为鸡粪处理>羊粪处理>花生秧处理, 秋季为羊粪处理>鸡粪处理>花生秧处理 (K_{m} 值的大小顺序与之相反)。3类根的磷吸收动力学参数差异较大, 吸收根其 I_{max} 是褐色木质根的 7.4~8.7 倍, 生长根是褐色木质根的 4.7~5.8 倍。而褐色木质根的 K_{m} 值是吸收根的 1.1~1.5 倍, 是生长根的 1.0~1.2 倍。说明吸收根和生长根对磷的吸收潜力、与磷的亲合力均大于褐色木质根。夏季根系对磷的最大吸收速率与植株生物量呈极显著正相关, 秋季未达到显著水平 (褐色木质根除外)。

关键词: 平邑甜茶; 有机物料; 根系; ^{32}P ; 吸收动力学参数

The Effects of Organic Materials on Absorption Dynamic Parameter of ^{32}P of *M. hupehensis* Rehd. Root System

MAO Zhi-quan¹, ZHANG Ji-xiang¹, HU Yan-li¹, ZHANG Jiang-hong², WANG Li-qin¹, SHU Huai-rui¹

(¹College of Horticulture, Shandong Agricultural University, Taian 271018;

²College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding 071001)

Abstract: The uptake of phosphorus in three different types of roots system (absorbing roots, growing roots and brown roots) of *M. hupehensis* Rehd. was affected by three kinds of organic materials and was in accordance with Michelis-Menten equation. Treatment with various kinds of organic materials changed the uptake kinetics parameters of ^{32}P to different extent. The addition of organic materials increased I_{max} and decreased K_{m} as compared with the control. The value of I_{max} of three kinds of roots was in the following orders: treatment with chicken manure > sheep manure > peanut straws in summer, and treatment with sheep manure > chicken manure > peanut straws in autumn (value of K_{m} was in the opposite order). I_{max} and K_{m} of the three types of roots were determined and it was found that I_{max} of absorbing roots was 7.4 to 8.7 times that of brown roots, and I_{max} of growing roots 4.7 to 5.8 time as large as that of brown roots. K_{m} of brown roots was 1.1 to 1.5 times and 1.0 to 1.2 times those of absorbing roots and growing roots. This means that the potential P uptake efficiency and affinity in absorbing and growing root was greater than that of brown roots. The I_{max} was positively correlated with plant biomass in summer while showed no great significance in autumn.

Key words: *Malus hupehensis* Rehd.; Organic material; Root system; ^{32}P ; Absorption dynamic parameter

中国农业科研和生产中越来越重视有机物料的使用^[1~3]。有机物料的施入不仅增加了土壤中氮、磷、钾等矿质营养元素的含量和微生物的数量, 也提高了土壤酶活性、生长素和细胞分裂素等激素的活性^[4,5]。果园中合理使用有机物料对优化根系生长环境^[1,6]、增

强树势、提高产量和果实品质具有重要意义。生产中使用的有机物料种类较多, 关于它们对植物根系吸收活力影响的研究主要集中在一年生大田作物^[3,7,8]。多年生果树根系与一年生作物的根系相比有较大差异 (从功能上分为吸收根、生长根、褐色木质根^[9])。

收稿日期: 2005-01-30

基金项目: 山东省科技攻关项目 (991154304) 资助

作者简介: 毛志泉 (1963-), 男, 山东新泰人, 副教授, 博士, 主要从事果树根系与土壤环境关系研究。Tel: 0538-8242364; E-mail: mzhiqian@sda.edu.cn。束怀瑞为通讯作者, Tel: 0538-8242364; E-mail: hrshu@sdan.edu.cn

不同有机物料对多年生木本果树各种功能根磷吸收活力的比较研究鲜见报道。国内研究植物根系磷吸收动力学参数的方法通常用土壤注射法、浓度差计算法结合吸收动力学方程拟合或液闪、塑闪测量放射性活度等求得^[7,9,10],与“茶袋技术”^[11]相比其操作复杂,准确性较差。本试验以苹果栽培中使用的重要砧木——平邑甜茶 (*Malus hupehensis* Rehd.) 为材料,采用“茶袋技术”,更精确地研究鸡粪、羊粪和花生秧 3 种有机物料,对各功能根磷吸收活力的影响,以期对有机物料在果树生产中合理应用提供有益参考。

1 材料与方 法

试验于 2000~2002 年在山东农业大学园艺学院根系实验室进行,供试材料为平邑甜茶实生苗。

1.1 试验设计

以花生秧(粉碎为长 3 mm 左右小段)、鸡粪(压碎、过 2 mm 筛)、羊粪(压碎、过 2 mm 筛)为试验材料。3 类有机物料皆烘干使用。以草炭+蛭石(2:1)为栽培介质,加入有机物料浓度均为 20 kg·m⁻³,进行试验。试验设 4 个处理,分别为不施有机物料(CK)、施鸡粪(T₁)、施羊粪(T₂)、施花生秧(T₃)。每个处理按重量的 0.2% 分别加入的复合肥(N-15、P-15、K-15)。按试验处理分别将栽培基质装入高 25 cm,上直径 27 cm、下直径 21 cm 的陶土盆中,平邑甜茶种子低温层积 50 d,催芽露白后于 2001 年 3 月 15 日播种,待成活后每盆保留 1 株,正常管理。每处理 5 盆,3 次重复。

1.2 取样及测定方法

待平邑甜茶生长至 90 d 左右和 180 d 左右后取根,进行根对磷吸收的测定(分别在 2001 年夏季(6 月 25~27 日)和秋季(9 月 25~26 日)进行。取根时将盆倒扣,用自来水小心冲掉介质,以避免发生伤根现象。洗净后仔细将吸收根、生长根、褐色木质根取下,立即放入 1 mmol·L⁻¹CaSO₄ 和 5 mmol·L⁻¹MES 组成的缓冲液中(缓冲液 pH 值用 KOH 调整至 5.5)保存。

根对磷的吸收,采用离体根“茶袋”技术(tea-bag technique)^[11,12]进行。“茶袋”用双层直径 1 mm×1.5 mm 小孔的尼龙布缝制而成,其内径 3 cm×4 cm,吸收在 25℃ 恒温下进行。将每一种待测根分装在 6 个“茶袋”中,分别用 6 个不同磷浓度的吸收液进行处理,磷的浓度分别为 5、10、50、100、500、1 000 μmol·L⁻¹,以 KH₂PO₄ 作磷的来源。不同浓度的 KH₂PO₄ 溶液分装于 6 个容量为 1 000 ml 的抽滤瓶中,吸收过程中用

CX-800 型空气泵使每个抽滤瓶保持通气状态,每吸收瓶中液体体积为 700 ml,并分别按 0.24 μCi·ml⁻¹ 的强度加入 ³²P。具体操作步骤如下:

(1) 检查抽滤瓶通气状况,即保证每个瓶中有气泡冒出又不太剧烈,在每个反应瓶中加入 ³²P,随后用橡皮塞盖紧抽滤瓶,通气 1 min 以混合液体。停止通气后加入装有根的“茶袋”并加盖,通气 10 min 后停止通气,去掉瓶内液体。

(2) 将处理后的“茶袋”放入与吸收过程相同浓度的磷酸溶液(不含 ³²P)的抽滤瓶中冲洗,以去掉根系表面吸附的 ³²P,通气 3 min 后停止通气去掉瓶内液体。以此方法共冲洗 3 次。将取出冲洗过 3 次“茶袋”中的根在烘箱中烘干、称重,将每组根分别放入液闪瓶(液闪瓶中加入 2.5 ml 双氧水和 2.5 ml 高氯酸),80℃ 水浴 2 h 至样品呈透明溶液,随后用液闪对 ³²P 计数。

用 Orange-6.1 数学分析软件进行曲线拟合,作磷吸收动力学曲线,求得 I_{max}, K_m 值。

生物量测定:将植株置于烘箱中,在 105~110℃ 下杀青 30 min,80℃ 烘干至恒重,称重。

2 结果与分析

2.1 有机物料对根系磷吸收动力学曲线及吸收动力学参数的影响

各处理平邑甜茶实生苗 3 类根系(吸收根、生长根、褐色木质根)对磷的吸收速率随外液浓度的变化均符合 Michelis-Menten 动力学模型:

$$I = I_{\max} \cdot C / (K_m + C)$$

式中, I 为离子吸收速率, I_{max} 为最大吸收速率, C 为介质离子浓度, K_m 为米氏常数。

不同类型的根其吸收动力学曲线形态差异较大,尤其是当年的白色根(生长根和吸收根)与褐色木质根相差更大(图 1),由吸收动力学曲线可求得 I_{max} 和 K_m。

2.1.1 吸收根 I_{max}、K_m 的变化 较大的 I_{max} 和较小的 K_m 值是植物具有较高吸收能力的标志^[8]。由表 1 看出,夏季(6 月 15 日)不同处理以 T₁ 其 I_{max} 最大,羊粪处理(T₂)居第二,T₁、T₂、T₃ 分别比 CK 提高 11.9%、10.8%、6.9%。K_m 值的大小顺序与之相反(表 2),有机物料的加入增大了 I_{max},而 K_m 值减小。比较同一处理不同季节吸收根的吸收动力学参数发现,秋季(9 月)其 I_{max} 比夏季数值小(T₂ 除外),同一季节不同处理与对照均达到显著或极显著差异。

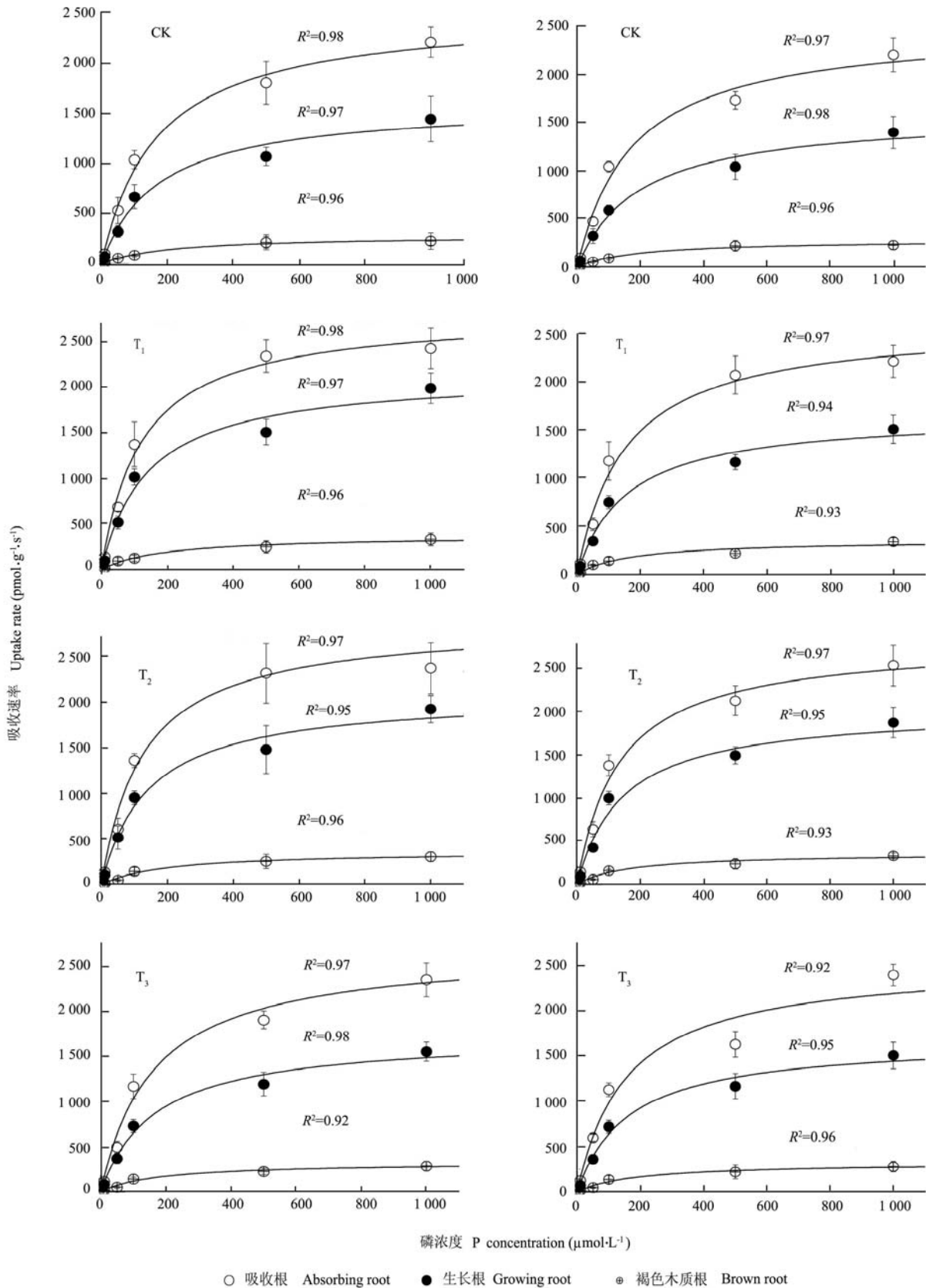


图 1 不同类型根磷吸收动力学曲线 (左为夏季, 右为秋季)

Fig. 1 P uptake kinetic curve of different types roots (Left: in summer, Right: in autumn)

2.1.2 生长根 I_{max} 、 K_m 的变化 表 1 显示, 不同处理生长根在夏季其 I_{max} 仍以 T_1 最大, 比对照(CK)提高了 84.9%, K_m 值则比 CK 降低了 34.4%, 其它处理 I_{max} 和 K_m 数值大小顺序与吸收根基本相同。在季节变化上, 总体表现为夏季的 I_{max} 大于秋季, K_m 值(表 2) 则为秋季大于夏季 (T_2 除外)。

表 1 有机物料对根系磷吸收动力学参数 I_{max} 的影响

Table 1 The effects of organic materials on I_{max} of P of different types of roots

	6 月 June				9 月 September			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
吸收根 Absorbing roots	2 511aA	2 808bB	2 782bB	2 685cB	2 496aA	2 611bB	2 818cB	2 525bB
生长根 Growing roots	1 602aA	2 142bB	2 082bB	1 730cB	1 593aA	1 664bA	2 027cB	1 671bA
褐色木质根 Brown roots	287aA	3 70bB	3 61bB	327cB	288aA	353bB	356bB	324cB

应用 SPSS 统计软件对同类根不同处理间在 0.05(小写字母)和 0.01 (大写字母) 水平上进行了显著性检验。表 2 同

significant difference was tested with SPSS in different treated data of the same type root at the 0.05 (lowercase) and 0.01 (capital) levels. The same as Table 2

表 2 有机物料对根系磷吸收动力学参数 K_m 的影响

Table 2 The effects of organic materials on K_m of P of different types of roots

	6 月 June				9 月 September			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
吸收根 Absorbing roots	166aA	122bB	127bB	160aA	173aA	151bB	132cB	156bB
生长根 Growing roots	172aA	141bB	142bB	165cB	196aA	156bB	144cB	161bB
褐色木质根 Brown roots	199aA	188bB	193cB	180bB	195aA	168bB	165bB	189aA

2.1.4 不同类型根 I_{max} 、 K_m 的差异 吸收根、生长根和褐色木质根的最大吸收速率有较大差异(表 3), 表现为吸收根>生长根>褐色木质根, 夏季吸收根的 I_{max} 是褐色木质根的 7.6~8.7 倍(秋季为 7.4~8.6 倍), 生长根是褐色木质根的 5.3~5.8 倍(秋季为 4.7~5.7 倍)。其原因可能与不同类型根所具有的主要功能不同所致。吸收根吸收营养元素的作用较强, 生长根扩展作用更大, 而褐色木质根功能主要表现为贮藏和运输^[9]。

不同类型根 K_m 值不同, 基本规律是褐色木质根>生长根>吸收根, 夏季褐色木质根的 K_m 比吸收根高出 13%~54% (秋季高出 11%~25%), 而生长根的

2.1.3 褐色木质根 I_{max} 、 K_m 的变化 不同有机物料处理, 褐色木质根对磷的最大吸收速率和 K_m 值也有较大差异, 有机物料的加入增大了 I_{max} 的数值, 夏季 T_1 比 CK 增加了 28.9%。 T_2 和 T_3 分别增加了 25.8% 和 13.9%, 与对照相比, 均达到了极显著差异(表 1、表 2)。

K_m 值与吸收根相比差别不大(表 4)。

2.2 根系磷最大吸收速率与生物量的关系

由图 2 看出, 夏季 3 类根系的最大吸收速率 I_{max} 与植株的生物量皆呈极显著正相关, 二者以褐色木质根的相关系数最大, 为 $R^2=0.99$ 。吸收根、生长根的 I_{max} 与生物量的相关系数相差不大, R^2 分别为 0.93 和 0.92。

秋季 3 类根的 I_{max} 与植株的生物量亦呈正相关, 但与夏季相比, 除褐色木质根外, 其相关系数明显减小, 而褐色木质根的最大吸收速率与植株生物量的相关性在夏秋两季表现了较稳定的特性。

表 3 不同类型根 I_{max} 的相对差异

Table 3 The relative difference of I_{max} among different types of roots

	6 月 June				9 月 September			
	CK	T_1	T_2	T_3	CK	T_1	T_2	T_3
吸收根 Absorbing roots	870	760	770	820	860	740	790	780
生长根 Growing roots	560	580	580	530	550	470	570	520
褐色木质根 Brown roots	100	100	100	100	100	100	100	100

以褐色木质根最大吸收速率为 100, 吸收根、生长根为其相对值

The I_{max} of brown roots is 100, the others are relative values of 100

表 4 不同类型根 Km 值的相对差异

Table 4 The relative difference of Km among different types of roots

	6 月 June				9 月 September			
	CK	T ₁	T ₂	T ₃	CK	T ₁	T ₂	T ₃
吸收根 Absorbing roots	100	100	100	100	100	100	100	100
生长根 Growing roots	105	116	112	103	113	103	109	103
褐色木质根 Brown roots	120	154	152	113	113	111	125	121

以吸收根的米氏常数为 100，生长根、褐色木质根为其相对值

The Km of absorbing roots is 100, the others are relative values of 100

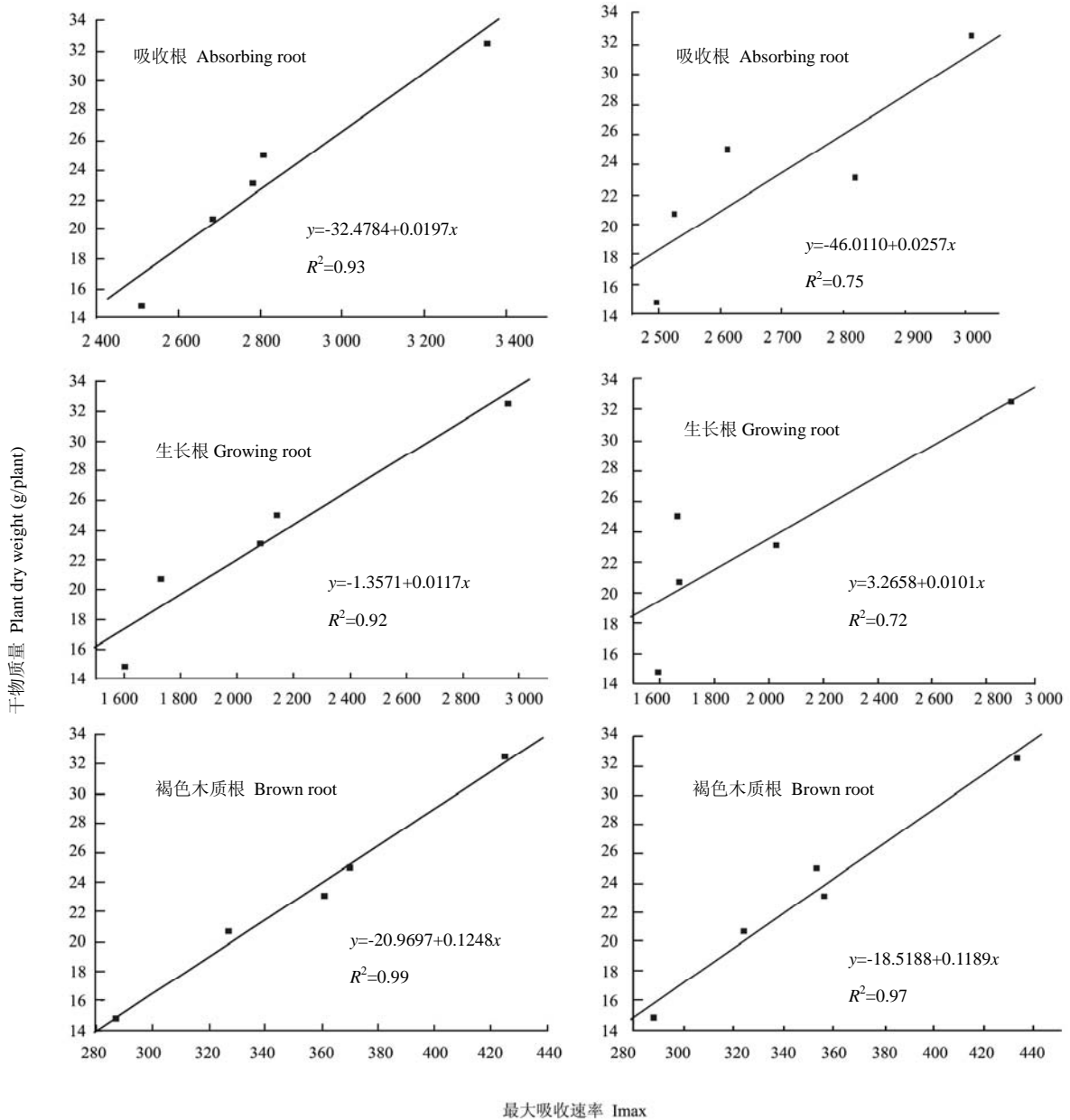


图 2 根系最大吸收速率与生物量的关系 (左: 夏季, 右: 秋季)

Fig. 2 The relationship between Imax of root system and plant biomass (Left: in summer, Right: in autumn)

3 讨论

有机物料的施入均提高了根系的磷吸收活力,表明有机物料对磷的吸收有促进作用。这与有机物料可增加介质中氮、磷、钾含量,提高土壤酶活性^[5]和其它生理活性物质^[4]有关。事实上由于这些原因,有机物料的加入都增强了根系的呼吸强度^[13],也提高了根对磷的吸收活力,这与已有的研究结果^[7]相一致。

不同种类的有机物料对根系磷吸收活力影响有差异,可能与它们各自的特性有关。本试验前期研究^[13]表明,不同有机物料分解速度不同,鸡粪和花生秧分解较快,培养1个月花生秧失重40%,鸡粪有25%被分解,而羊粪分解率只有10%;至6个月后花生秧、鸡粪和羊粪的分解率分别为67%、44%和34%,羊粪表现出分解速度较慢的特性。从不同处理主要养分周年变化看,鸡粪处理(T_1)与羊粪处理(T_2)相比,碱解氮、有效磷和有效钾含量均表现前期(7月前) $T_1 > T_2$,后期 $T_1 < T_2$,这种变化规律与有机物料分解速率和不同处理中根系的磷吸收活力表现了较强的一致性。因此,不同类型的有机物料在不同时期对根系吸收磷的促进作用不同,分解速度快的类型如鸡粪主要在前期发挥较大作用,对于羊粪这类缓效有机物料,施入当年后期其作用更明显,甚至在第二、第三年仍有效果,生产中应注意合理配合使用。

本试验表明,3类根对磷的吸收动力学参数不同,吸收根其最大吸收速率高的原因可从两方面解释:一是它具有较强的呼吸作用。因相同质量的吸收根、生长根以吸收根根尖数量最大,它是生长根根尖数量的26~30倍^[13],而根尖是初生根呼吸强度最旺盛的区域^[14],较大的呼吸强度反过来又促进了根系对离子的吸收;二是具有较大的表面积。吸收表面积的大小是衡量根系吸收能力强弱的重要指标之一^[15],相同质量的吸收根、生长根以吸收根的表面积最大。褐色木质根无论在活细胞数量或吸收表面积上都远小于吸收根,因此,吸收能力最小。

褐色木质根与白色根(吸收根和生长根)相比,尽管其单位质量的吸收量小,但就整株根系而言褐色木质根重量所占比重较大,对矿质元素的吸收总量并不小。此外,褐色木质根对土壤环境有较强的适应性,其功能的发挥相对稳定,因此,它在吸收矿质营养元素方面的作用不可忽视。

从本试验结果看,夏季根对磷最大吸收速率其数值大小与植株生物量呈极显著正相关,秋季各类根的

I_{max} 与生物量相关系数较小(褐色木质根除外),这与植株在周年实际生长发育的进程基本吻合。

另外,本研究的目的在于把有机物料作为一个整体因素,探讨不同类型的有机物料对平邑甜茶实生苗根系磷吸收活力的影响,由于各类有机物料在养分含量、分解速率^[11,16]、微生物种类和数量、生理活性物质等方面存在着较大的差异,因此,究竟哪些(个)因子起主导作用,尚需进一步深入研究。

4 结论

吸收根、生长根和褐色木质根对磷的吸收皆符合Michelis-Menten动力学模型: $I = I_{max} \cdot C / (K_m + C)$;平邑甜茶栽培介质中加入鸡粪、羊粪和花生秧均改变了根系对磷的吸收动力学参数(提高 I_{max} ,降低 K_m),夏季3类根的 I_{max} 表现为鸡粪处理>羊粪处理>花生秧处理,秋季为羊粪处理>鸡粪处理>花生秧处理;吸收根、生长根和褐色木质根对磷的吸收动力学参数差异较大,其中吸收根 I_{max} 最大、 K_m 值最小,褐色木质根 I_{max} 最小、 K_m 值最大;根系对磷的最大吸收速率与植株生物量有相关性(夏季可达极显著正相关,秋季未达到显著水平)。

References

- [1] 詹其厚,袁朝良,张效朴. 有机物料对砂姜黑土的改良效应及其机制. 土壤学报, 2003, 40(3): 420-425.
Zhan Q H, Yuan C L, Zhang X P. Ameliorative effect and mechanism of organic materials on Vertisol. *Acta Petologica Sinica*, 2003, 40(30): 420-425. (in Chinese)
- [2] 巨晓棠,刘学军,张福锁. 尿素配施有机物料时土壤不同氮素形态的动态及利用. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 52-56.
Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Dynamics of various nitrogen forms in soil and nitrogen utilization under application urea and different organic materials. *Journal of China Agricultural University*, 2002, 7(3): 52-56. (in Chinese)
- [3] 李冰,王昌全,李廷轩,张锡洲,余剑东. 不同有机物料对小麦氮素利用和土壤肥力的影响. 中国农学通报, 2004, 20(2): 123-125.
Li B, Wang C Q, Li T X, Zhang X Z, Yu J D. Effect of different organic materials on the N utilization of wheat and the soil fertility. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(2): 123-125. (in Chinese)
- [4] 李秀菊,董淑富,刘用生,束怀瑞. 使用不同量有机肥的盆栽苹果土壤中生长素及细胞分裂素分析. 植物生理学通讯, 1998, 34

- (3): 183-185.
- Li X J, Dong S F, Liu Y S, Shu H R. Determination of Indole-3-Acetic acid and cytokinins in the soil with different organic manure for pot-cultured apple. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34 (3): 183-185. (in Chinese)
- [5] 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 in the rhizosphere of apple seedlings. *Acta Petologica Sinica*, 1999, 36 (3): 428-432. (in Chinese)
- [6] 陈欣, 史奕, 鲁彩艳, 王国宏. 有机物料及无机氮对耕地黑土团聚体水稳性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 284-287.
- Chen X, Shi E, Lu C Y, Wang G H. Effect of organic materials and inorganic N on water stability of aggregates in cultivated black soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3): 284-287. (in Chinese)
- [7] 周炎, 罗安程. 有机肥处理对小麦根系生长、活力和磷吸收的影响. *植物营养与肥料学报*, 1997, 3(3): 243-248.
- Zhou Y, Luo A C. Effect of organic manure on phosphorus absorption and root activities of wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1997, 3(3): 243-248. (in Chinese)
- [8] 王志芬, 范仲学, 张风云, 王未名, 陈建爱, 闫树林, 周舫. 鸡粪对高产冬小麦根系活力和光合性能的影响. *核农学报*, 2003, 17(5): 379-382.
- Wang Z F, Fan Z X, Zhang F Y, Wang W M, Chen J A, Yan S L, Zhou F. Physiological effects of chicken manure on yield forming of winter wheat. *Acta Agriculture Nucleatae Sinica*, 2003, 17(5): 379-382. (in Chinese)
- [9] 束怀瑞, 罗新书, 吴光林, 周恩, 李正之, 顾曼如. 果树栽培生理学. 北京: 农业出版社, 1993: 163-164.
- Shu H R, Luo X S, Wu G L, Zhou E, Li Z Z, Gu M R. *Fruit Farming Physiology*. Beijing: Agriculture Press, 1993: 163-164. (in Chinese)
- [10] 王志芬, 陈学留, 余美炎, 王同燕, 任凤山, 徐兵. 冬小麦群体根系 ^{32}P 吸收活力与群体光合速率关系的研究. *作物学报*, 1999, 25(4): 458-465.
- Wang Z F, Chen L X, Yu M Y, Wang T Y, Ren F S, Xu B. Study on the relationship between ^{32}P absorption vigour of root population and canopy apparent photosynthetic rate in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 1999, 25(4): 458-465. (in Chinese)
- [11] Bouma T J, Yanai R D, Elkin A D, Hartmond U, Flores-Alva D E, Eissenstat D M. Estimating age-dependent costs and benefits of roots with contrasting life span: comparing apples and oranges. *New Phytologist*, 2001, 150: 685-695.
- [12] Epstein. Significance and technique of short-term experiments on solute absorption by plant tissue. *Plant and Cell Physiology*, 1963, 4: 79-84.
- [13] 毛志泉, 王丽琴, 沈向, 束怀瑞, 邹岩梅. 有机物料对平邑甜茶实生苗根系呼吸强度的影响. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 171-175.
- Mao Z Q, Wang L Q, Shen X, Shu H R, Zou Y M. Effect of organic materials on respiration intensity of annual *Malus Hupehensis* Rehd. root system. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 171-175. (in Chinese)
- [14] 潘瑞炽. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Pan R Z. *Plant Physiology*. Beijing: China Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 曾骧. 果树生理学. 北京: 北京农业大学出版社, 1992: 296-297.
- Zeng X. *Fruit Tree Physiology*. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1992: 296-297. (in Chinese)
- [16] 张丽娟, 刘树庆, 李彦慧, 姚金萍. 栗钙土有机物料的腐解特性及土壤有机质调控. *土壤通报*, 2001, 32 (5): 201-205.
- Zhang L J, Liu S Q, Li Y H, Yao J P. Decomposition characteristic of organic materials in kastanozems and control of soil organic matter. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(5): 201-205. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)