植物营养与肥料学报 1999,5(3):263~272
Plant Nutrition and Fertilizer Science

植物根系吸收磷的机理模型验证研究

姚其华[1] 刘武定[2] 陈明亮[2] 谢振翅[1]
(1 湖北省农业科学院土壤肥料研究所,武汉 430064; 2 华中农业大学资源环境与农业化学系,武汉 430070)

摘要 本文通过不同土壤条件下幼稚苗磷吸收实测值与机理模型预测值的比较,检验了几种养分吸收机理模型对玉米与大豆幼苗磷吸收的预测能力,同时探讨了影响几种养分吸收机理模型预测能力的主要因素。研究结果表明:供试四种机理模型均能较好地反映玉米与大豆幼苗的磷吸收变化情况;四种机理模型中,以建立于解析解基础上的 SC 模型的预测能力最低,两种数值解模型的预测能力相当,而以考虑了根毛作用的 C2 模型的预测能力最强;影响机理模型预测能力的重要因素是土壤供磷与含水量水平、土壤供 N 形态、土壤性质及土壤供 Ca 水平或 pH 值。土壤养分与水分胁迫、土壤质地粘重、土壤施 NH_4^+-N 及酸性土壤施用石灰等条件均会使数值解机理模型的磷吸收预测能力降低,其原因可归结于这几种土壤条件均能诱导或加强幼苗根系吸收磷的某种主动适应机制,而这种机制并未考虑在养分吸收机理模型之中。

关键词 机理模型验证;幼苗磷吸收;玉米与大豆

养分吸收机理过程的定量模拟研究起于 60 年代初 Bouldin[1] 与 Olsen[2] 提出的土壤养分向根扩散式。随后,Nye 和 Spiers[3] 提出了一个同时包含质流和扩散过程的养分向根迁移模型,并在稳态流条件下得到了方程的解析解。70 年代以前有关养分向根迁移及吸收模型的探讨主要是通过对养分离子向单一根的迁移过程的研究进行的,忽视了完整根系中根与根之间的相互作用及其对养分的竞争吸收[4]。随后的有关研究则采用了活性的生长根系材料,并对 Nye 和 Spiers 的养分吸收模拟方程进行了稳态流条件下的解析解及非稳态流条件下的数值解[5~7]。在此基础上,Claassen 和 Barber[8] 发展了一个包括 10 个土壤与植物参数在内的完整植物根系的养分吸收模型。70 年代末以后的有关研究主要是一些旨在提高养分吸收模型预测效果的模型改进,这些模型主要考虑根间养分的竞争吸收[9~15]、根毛的作用[16]、根系分泌物的作用[17]及根际酸化的作用[18,19]。

本文的研究旨在检验供试 4 种养分吸收机理模型对不同土壤与施肥条件下玉米与大豆幼苗磷吸收的预测能力,并探讨影响其预测能力的主要因素,为确定几种机理模型的适用范围、定量评价玉米与大豆根系的磷吸收机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试养分吸收机理模型及其主要异同点

供试四种机理模型的理论基础(土壤养分向根迁移理论及其基本微分方程)和主要假设条件相同,但在模型微分方程的边界条件及其解的方法、根毛作用等方面有所不同(表 1),这表现在四种机理模型的输入参数、计算过程及模拟结果均有一定差别。养分吸收模拟过程中,四种机理模型的时空分隔点数均定在 150。

收稿日期:1998-05-29

表1 供试四种机理模型的主要异同点

Table 1 The different and common points between four selected mechanistic models

模型简称 Models	微分方程求解方法 Solving method of equation	根毛作用 Root-hair effect	输入参数的可变性 Variation of input parameters		运行环境 Software for models
			根间半距离 Half distance between roots	土壤养分缓冲容量 Buffer power of soil nutrient	
SC 模型[14]	解析解	无	变 量	变 量	Qbasic
BC 模型[20]	数值解	无	恒 值	恒 值	MS-Dos
C1 模型[13]	数值解	无	恒 值	变 量	Window
C2 模型[21]	数值解*	有*	恒 值	变 量	Window

* 根毛的养分向根迁移微分方程采用解析解方法

* Analytical solution for the differential equation of nutrient movement to root hairs

1.2 供试植物与土壤

供试植物为玉米(*Zea mays* L.),品种为掖单13(M);大豆(*Glycine max* L. merr.),品种为9508(S)。供试土壤为砂岩母质上发育的两种不同熟化度的棕红壤,分别取自熟化度较高的老旱地耕层(A)与熟化度较低的新垦地耕层(B),其基本理化性质列于表2。

表2 供试土壤的基本理化性质

Table 2 The basic physico chemical properties of selected soils

土壤 Soils	有机质 O.M. (mg/g)	pH (水提)	碱解N Avail. N (μg/g)	Olsen-P (μg/g)	速效K Avail. K (μg/g)	CEC (cmol/kg)	土壤质地 Texture	田间持水量 Field Water Content (cm^3/cm^3)
A	14.80	6.6	89.6	5.44	128.9	8.19	粘壤土	0.42
B	1.25	5.2	7.0	0.90	125.0	19.19	壤质粘土	0.42

1.3 分析测定项目

1.3.1 玉米与大豆幼苗磷吸收的土培试验及其分析项目 土培试验在光照为10000～15000Lx、温度为28～34℃的生长室中进行。试验共设23个处理:2种旱耕地土壤(A与B),2种作物(M与S),5个土壤施磷水平(P 0、50、150、250、350mg/kg),3个土壤含水量水平(0.20、0.32、0.42cm^3/cm^3),2种土壤供N形态(NO_3^-与NH_4^+—未加任何反硝化抑制剂)及不同土壤供Ca水平。供试因子与水平见表3。每种土壤与植物在3个土壤含水量水平下均设一个不栽培作物的对照,并随机置于各处理之间。试验各处理每天称重并加水一次以维持处理所需的恒定土壤含水量,称重结果用于计算裸间土面蒸发量及植物根系的吸水速率或叶面的蒸腾速率(V_0)。

土壤过2mm筛后,每kg干土按施肥处理要求均匀加入:P 0～350mg、N 150mg(硫酸铵或硝酸钠)及Ca 2400mg;此外各处理均加入下列养分:K 100mg、B 2mg、Zn 5mg、Mo 1mg。经施肥处理后的2kg干土按1.25g/cm^3的土壤容重装入2升的塑料盆中。玉米与大豆种子在湿润的石英砂层中发芽并生长7天后将幼苗根系均剪为一致长度(L_0)的种根,同时,取样分析幼苗在地上部干重与磷含量(U_0)。每盆移栽相同苗数的玉米或大豆,各处理土面上均覆盖一层石英砂。幼苗生长一定时间后(t)和试验结束时分别取地上部植株样与根系样,根系样是采用W·伯姆[22]介绍的根系冲洗技术获得。取样后进行以下有关模型参数的测定与计算:称重法[13]测根系鲜重(Fw);网格线性交叉法[22]测根系长度(L_1);土钻法[22]测根系占土容积

(Vrh)并计算根长密度 $Lv = L_1/Vrh$;显微镜观察法[16,22]测平均根毛半径(Rho)、根毛长度(Lh)及根毛密度(Nh);计算平均根半径 $R_0 = (F_w/\pi \cdot L_1)^{1/2}$;计算平均根间半距离 $R_1 = 1/(\pi Lv)^{1/2}$;计算根系线性伸长速率 $k = (L_1 - L_0)/t$;计算根系吸水速率 $V_0 = Uw/[2\pi R_0(L_1 - L_0) \cdot t]$,其中,Uw 为植株吸水总量;测定幼苗地上部磷量(U_1)及磷增量($Um = U_1 - U_0$);计算根系磷吸收速率 $In = Um(\ln L_1 - \ln L_0)/[(L_1 - L_0)t]$[23]。

1.3.2　修改的吸附法[24]测定土壤磷吸附曲线与养分缓冲容量　将一组不同磷量(Pa)的无机磷在 1:1 土水比下加入土壤中,自然风干数天后,土壤湿润至田间持水量($0.42cm^3/cm^3$)并平衡 48 小时。用滤纸过滤后,采用比色法测定滤液磷浓度(Cli),并由差减法计算土壤磷吸附量($X = \rho Pa - \theta Cli$)。湿润土壤过滤后留下的土壤则采用 ASI 浸提液[25]测定土壤固相吸附的有效磷量(Xa)。

1.3.3　砂培玉米幼苗根系的磷吸收动力学参数测定　为了能得到与土培条件下玉米根系(含根毛)生长及其磷吸收较为接近的状况,采用砂培玉米幼苗设置不同供 N 形态与供磷水平的预处理方法,然后用常规方法测定根系磷吸收的动力学参数。玉米幼苗的砂培试验是在与土培试验完全相同的生长室环境中进行。其预处理混合营养液:NH_4P_0、NO_3P_0、NH_4P 及 NO_3P 分别为含 NH_4^+ 或 NO_3^- 与含 P 或不含 P(P_0)的 1/4 阿夫道宁营养液及 Aron 微量元素营养液。

1.4　根毛均匀分布函数的假设与推导过程

由于土壤理化性质的非均质性,实际土壤中的根毛分布是呈非均匀分布的,其分布函数关系很难采用目前的显微观察与照相法准确地计测出来[16,22]。为此,我们假设玉米与大豆根毛在根面上的分布及其长度都是均匀一致的(图 1),并推道出了根毛呈紧密均匀分布时的近似分布函数。

图 1a 为展开的根面上呈紧密均匀分布的根毛(空心点)及其最大养分耗竭区域(虚线圆),根面上的根毛间半距离为 Rho 时,△ABC 则是边长为 2Rho 的等腰三角形,其面积为 $3^{0.5}Rho^2$。因为△ABC 内三个扇形的面积为 $0.5\pi Rho^2$,所以圆之间的空隙面积为 $(3^{0.5} - 0.5\pi)Rho^2$。半径为 Ro 的单位根段的根表面积为 $2\pi Ro$,则单位根段上 Nh 个根毛养分耗竭区与 2Nh 个圆间孔隙的面积之和等于单位根段的表面积:$\pi NhRho^2 + 2Nh(3^{0.5} - 0.5\pi)Rho = 2\pi R_0$,此式化简可得到根面上的根毛间半距离公式:$Rho = 1.35(Ro/Nh)^{0.5} \cdots (1)$,图 1b 中,由相似三角形的性质可知:$Rh_1/Rho = R/Ro$,将方程(1)中的 Rho 代入此式即可求得离根轴 R 处的根毛间半距离公式:$Rh_1 = 1.35R/(RoNh)^{0.5} \cdots (2)$

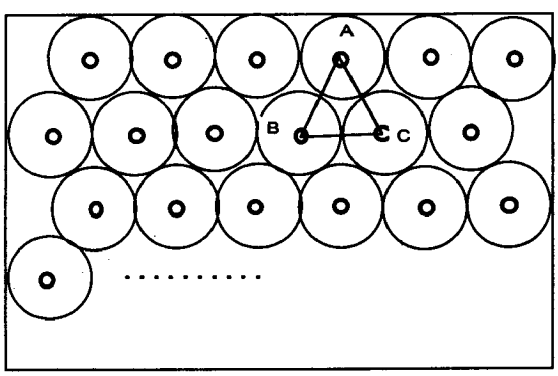

图1a 展开根面上根毛(空心点)的均匀分布
Fig.1a　The uniform distribution of root hair on root surface

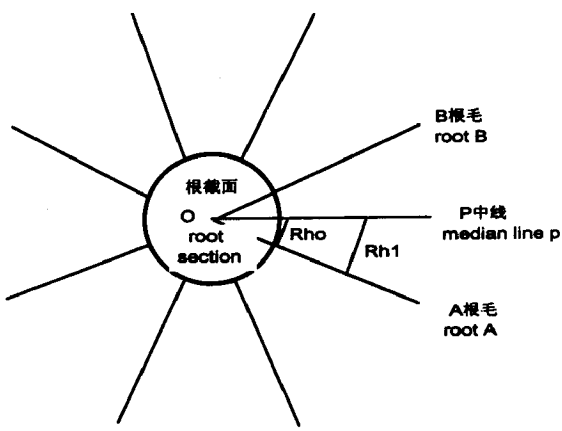

图1b 根截面上根毛的均匀分布
Fig.1b　The uniform distribution of root hair on root section

图 1　根毛在根面及根截面上的均匀分布模式

Fig.1　The uniform and tight distribution mode of root hair on root surface and root section

2 模型基本理论与假设条件

尽管四种供试模型及其假设有所不同,但这些模型都是根据土壤溶质向根迁移的理论来确定养分的向根供应过程,而根系的养分吸收则均是采用米氏动力学方程或其简化方程来描述[14]。四种供试养分吸收模型均涉及了植物根系吸收养分的二个基本过程:一是土壤向根系的养分供应,二是根表处的养分吸收。土壤养分向根辐射流(包括养分的向根扩散和质流)的基本运移方程为[5]:

$$\frac{Cl}{\partial t}=\frac{1}{R}\cdot\frac{\partial d}{\partial R}\left(RDe\frac{\partial Cl}{\partial R}+\frac{Vo\cdot RoCl}{b}\right) \tag{1}$$

式中,Cl 是土壤溶液中的养分浓度,t 是养分吸收时间,R 是自根轴向外的辐射距离,Ro 为根半径,Vo 为根系吸水速率,De 是土壤养分的有效扩散系数,b 是土壤养分缓冲容量。方程(1)需要 1 个初始条件及 2 个边界条件(内边界与外边界条件)才能得到方程解。其初始条件是:t=0;R>Ro;Cl=Cli。Cli 是初始土壤溶液中的养分浓度。方程(1)的内边界条件是由米氏方程[8]来描述:

$$In=\frac{Imax(Clo-Cmin)}{Km+(Clo-Cmin)} \tag{2}$$

式中,In 为根系的养分吸收速率,Clo 为根表处土壤溶液中的养分浓度,Imax 是根系最大养分吸收率,Km 为米氏常数,Cmin 为根净吸收为零时根表溶液中的养分浓度。方程(1)的外边界条件表达为:

$$t>o;\ R=Ro;\ Deb\times\frac{\partial Cl}{\partial R}+VoCl=\frac{Imax(Clo-Cmin)}{Km+(Clo-Cmin)}$$

上述外边界条件表示根表处的养分流等于由米氏动力学方程表达的根系养分吸收速率。当根间不存在养分竞争时,方程(1)的外边界条件为 $t>0;R=R_1;Cl=Cli$。它表示在根间半距离 R_1 处,土壤溶液中的养分浓度始终等于土壤溶液初始养分浓度。当根间存在养分竞争时,则方程(1)的外边界条件变为:$t>0;R=R_1;Deb\cdot\partial Cl/\partial R+VoCl=0$[9]。

四种供试模型的主要假设是:土壤养分是通过扩散与质流作用向根迁移;土壤均质且各自同性;土壤含水量接近于田间持水量,土壤的向根水流为稳态流且仅向根的辐射方向产生;养分吸收仅在根表的土壤溶液中发生,且根系的养分净吸收与根表溶液养分浓度的关系符合米氏方程;土壤养分的向根迁移及其根系吸收不受根系分泌物及根际微生物的影响;根系的养分吸收动力学参数为常数,它不受根龄或植物年龄的影响。

方程(1)在其初始与边界条件下,通过数值解或解析解法可计算出一定时段下的根表养分离子浓度及单位根长的养分吸收量,然后按"根长增长量×单位根长养分吸收量"即可计算出某一时段下的根系养分吸收量。

3 模型验证的输入参数

模型验证中采用的土壤参数如下:(1)土壤溶液的初始养分浓度(Cli)由土壤养分吸附试验得到的 Pa 与 Cli 的关系曲线查得,未施加石灰的酸性土壤 B 的 Cli 采用原始测定数据;(2)土壤养分缓冲容量与一般有关研究文献中表示的 b 值含义相同,即土壤溶液中养分浓度

变化一个单位时平衡体系中吸附态有效养分的变化量。其值由 Xa 与 Cli 的 Rreundlich 拟合方程(简称 F 式方程)求导得到($b=\theta+\rho Kd$, $Kd=\Delta Xa/\Delta Cli$, ρ 为土壤容重)[26], BC 模型的 b 参数输入采用 Cli 时的初始 b 值;其它三种模型则直接输入 F 式方程的两个经验系数;(3)土壤阻滞因子 f 采用适于粘质土—粉质粘壤土的经验估测式计算得到:$f=0.99\theta-0.17$[27];(4)土壤养分有效扩散系数 $De=D\theta f/b$[28],其中 D 为磷酸根离子在纯水中的扩散速率,25℃时 $D=0.89\times10^{5}cm^2/s$(表 3、4)。

表 3　模型验证中的主要输入参数值

Table 3　The main input parameter values in model verification

试验处理 Treatment	L (cm)	k (10^{-3}·cm/s)	Lv (cm/cm^3)	R_0 (10^{-2}·cm)	R_1 (10^{-2}·cm)	Lh	Rh	Nh 1/cm	Cli (μmol)
(1)S/A－θ_3/Po	3154	3.20	6.44	2.35	22	1.8	0.06	453.6	4.70
(2)S/A－θ_3/P_{50}	3255	3.31	6.64	2.46	22	2.0	0.06	486.4	68.8
(3)S/A－θ_3/P_{150}	3296	3.35	6.73	2.52	22	2.6	0.06	591.0	619
(4)S/A－θ_3/P_{250}	2860	2.90	5.84	2.51	23	2.6	0.06	638.3	1721
(5)S/A－θ_3/P_{350}	3485	3.55	7.11	2.42	21	2.7	0.06	660.3	3373
(6)M/A－θ_3/P_0*	2422	2.80	4.84	2.48	26	4.0	0.04	137.5	4.70
(7)M/A－θ_3/P_0	2534	4.29	7.07	2.41	21	4.0	0.04	115.2	4.70
(8)M/A－θ_3/P_{150}*	3108	3.75	6.22	2.50	23	4.0	0.04	137.5	619
(9)M/A－θ_3/P_{150}	4026	4.91	8.05	2.39	20	4.0	0.04	115.2	619
(10)M/A－θ_3/P_{350}*	3113	3.76	6.23	2.48	23	4.0	0.04	137.5	3373
(11)M/A－θ_3/P_{350}	3563	4.33	7.12	2.40	20	4.0	0.04	115.2	3373
(12)M/B－θ_3/P_0*	5191	6.37	10.38	2.14	17	4.0	0.04	420.7	0.91
(13)M/B－θ_3/P_{50}*	3702	4.50	7.40	2.16	21	4.0	0.04	384.6	4.94
(14)M/B－θ_3/P_{150}*	3934	4.79	7.87	2.20	20	4.0	0.04	387.4	77.3
(15)M/B－θ_3/P_{250}*	3947	4.81	7.89	2.20	20	4.0	0.04	418.4	276
(16)M/B－θ_3/P_{350}*	3647	4.43	7.29	2.21	21	4.0	0.04	429.1	641
(17)M/Bb－θ_3/P_0*	2110	2.50	4.22	2.47	27	4.5	0.035	545.3	1.61
(18)M/Bb－θ_3/P_{150}*	3063	3.70	6.13	2.27	23	4.5	0.035	364.0	92.4
(19)M/Bb－θ_3/P_{350}*	3315	4.02	6.63	2.36	22	4.5	0.035	253.7	696
(20)M/B－θ_1/P_0	3474	5.47	2.10	2.67	39	6.3	0.035	928.6	1.67
(21)M/B－θ_1/P_{50}	3033	4.74	1.84	2.57	41	6.3	0.035	981.2	9.95
(22)M/B－θ_0/P_0	3791	5.99	2.30	2.45	37	5.5	0.035	778.8	1.16
(23)M/B－θ_2/P_{50}	3715	5.86	2.15	2.45	37	5.5	0.035	658.0	6.13

注:带 * 标记的处理土壤供 NH_4^+,其它无此标记的处理土壤供 NO_3^-;土壤容积含水量 θ_1、θ_2、θ_3 分别为 0.2, 0.32 和 0.42cm^3/cm^3;Bb 为未施石灰的酸性 B 土壤;处理代号中 P 的数字下标为施磷量(mg/kg)(下同)

Note: The treatment with the mark * is supplied with NH_4^+, and that without this mark is supplied with NO_3^-; soil water content θ_1、θ_2、θ_3 is 0.2、0.32 and 0.42cm^3/cm^3 respectively; Bb represents the acid B soil with no limestone application; the figure next to P is applied P rate (mg/kg) (same as following)

模型验证中采用的根系形态参数有:初始根长 L_0 与收获时根长 L;根系线性伸长速率

k;根长密度 Lv;平均根半径 R_0;平均根间半距离 R_1。C2 模型的根毛分布—即相邻根毛间半距离 Rh_1 的分布函数系由表 3 中的根毛分布参数确定的(表 3、4)。

玉米根系吸收磷的动力学参数 Imax 与 Km 采用不同供 N 形态与供磷条件下砂培玉米幼苗的测定值,其 Cmin 值则参考 Schenk[29]对 17 天龄 5 个玉米品种的测定结果,选用其平均值 Cmin = 0.34μmol。有关研究文献中报道的不同大豆品种的磷吸收动力学参数相差较小,本文选用了 Silberbush[30]测定的 7 个大豆品种磷吸收动力学参数的平均值:Imax = 0.5pmol/(cm^2·s),Km = 4.5μmol,Cmin = 0.2μmol。

表 4 模型验证中的其它输入参数值

Table 4 The other parameter values in model verification

处理组 Treatment Groups	t (10^5s)	Lo (cm)	Vo (10^{-6}cm/s)	f	b 的 F 式方程 F-Equations for b Values
S/A − θ_3	9.684	51	2.8	0.246	$Xa = 2.77Cli^{0.365}$
M/A − θ_3	7.956	120	7.3	0.246	$Xa = 2.77Cli^{0.365}$
M/B − θ_3	7.956	120	5.8	0.246	$Xa = 4.54Cli^{0.451}$
M/B − θ_2	6.048	168	2.7	0.147	$Xa = 4.01Cli^{0.451}$
M/B − θ_1	6.048	168	1.2	0.028	$Xa = 3.24Cli^{0.451}$

注:处理组包括不同施 P 水平与供 N 形态的各处理,Xa 与 Cli 的单位均为 μmol/cm^3

Note: the treatment group inchude all treatments with different P levels and N forms applied

4 结果与讨论

养分吸收过程的计算机模拟与分析结果看出,四种机理模型的幼苗磷吸收模拟值(Usc、Ubc、C1、C2)与实测值(Um)的相关系数均达极显著水平,表明四种机理模型的模拟值均能较好地反映幼苗吸收磷的变化趋势(图 2)。从线性回归方程与 Uc = Um 直线的接近程度上看,建立于解析解基础上的 SC 模型的预测能力最低;BC 模型与 C1 模型的预测能力相当;而考虑了根毛作用的 C2 模型的预测能力最强,其磷吸收预测的线性回归方程与 Uc = Um 直线最接近。

从图 2 中的分析结果还可以看出,在低 Um 值范围内,四种机理模型的磷吸收预测值均有偏低的趋势,这可能与不同 Cli 水平下机理模型的预测能力有关。为了进一步确认这一点,我们将幼苗磷吸收模拟值按各处理土壤的 Cli 大小分成了 Cli < 10μmol 和 Cli > 60μmol 的两组结果,并对这两组模型计算结果进行了统计与相关分析。结果表明,Cli < 10μmol 时,四种机理模型的磷吸收预测值均明显偏低,其平均相对误差均在 60% 以上;与低 Cli 范围内的模型预测情况相比,四种机理模型在高 Cli 范围内的预测能力明显增强。这反映在解析解模型 SC 的平均相对误差降低 11%,其它三种数值解模型的平均相对误差均降低 40% 以上(表 5)。

四种机理模型中,BC 模型与 C1 模型的磷吸收预测值最为接近(Ubc = 0.270 + 1.027Uc1,r = 0.9990**,n = 23),这是因为这两种数值解模型存在的差异最小(表 1)。SC 模型与 BC 或 C1 模型在幼苗磷吸收预测能力上的差异,说明了解析解模型在微分方程求解及养分吸收模拟过程上存在较大的误差,而 C2 模型与 BC 或 C1 模型在幼稚苗磷吸收预测能力上的差异反映了根毛对磷吸收具有重要作用(表 5)。此外,数值解模型的磷吸收预测值普遍偏低(图 2b、2c、2d),这预示着玉米和大豆根系存在着机理模型中没有考虑的磷摄取

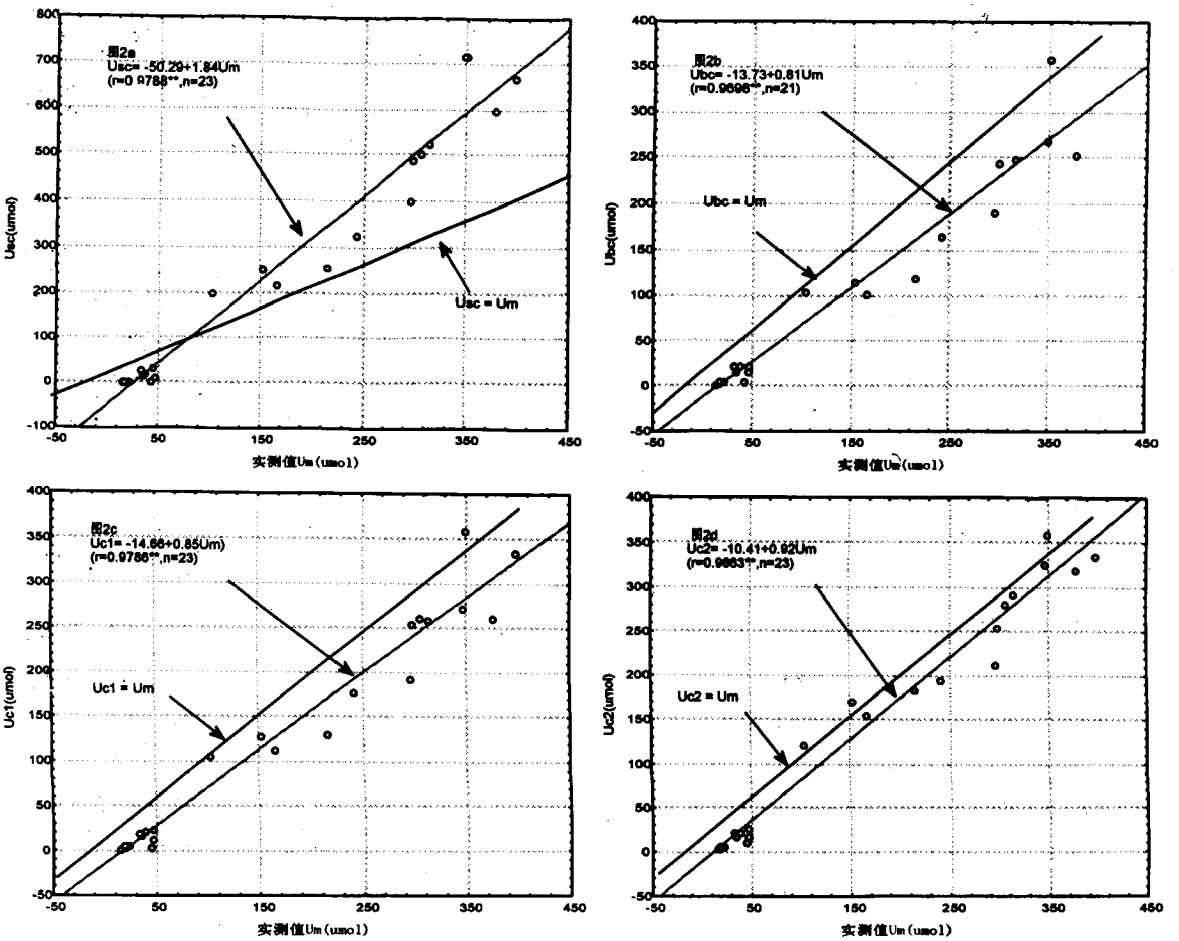

图 2　幼苗磷吸收的机理模型预测值与实测值(Um)比较

Fig.2　The comparision of measured and model-caculated P absorbed by seedlings

机制,而且低Cli范围内的机理模型预测值明显偏低的现象表明了这种磷摄取机制在磷胁迫时表现尤为重要(表 5)。

表 5　两种 Cli 水平下四种机理模型的磷吸收预测能力比较

Table 5　The comparison of predicting ability of selected machanistic models between two Cli levels

模 型	Cli<10μmol(n=10)		Cli>60μmol(n=11～13)	
Models	Uc=A+BUm(r 值, r-Value)	RE±SE	Uc=A+BUm(r 值, r-Value)	RE±SE
SC	Usc=−7.91+0.58Um(0.59)	0.74±0.32	Usc=−77.66+1.93Um(0.93**)	0.63±0.27
BC	Ubc=−3.45+0.49Um(0.70*)	0.65±0.21	Ubc=−17.51+0.83Um(0.89**)	0.24±0.14
C1	Ucl=−3.11+0.46Um(0.67*)	0.67±0.20	Ucl=−11.29+0.84Um(0.92**)	0.21±0.11
C2	Uc2=−3.88+0.55Um(0.82*)	0.61±0.17	Uc2=26.70+0.80Um(0.89**)	0.13±0.07

注: RE=(Uc−Um)/Um, SE 为 RE 的标准误差值　SE is the standard deviation of RE

为了进一步讨论除 Cli 外的其它几种供试因子对三类机理模型预测能力的影响情况,玉米与大豆的磷吸收模拟值按几种供试因子进行了分组与统计分析。其结果(表 6)表明,玉米的供 N 形态(a 与 b 处理组)对三类模型的磷吸收预测能力均有一定影响。植物种类对

SC模型的磷吸收预测能力影响最大,其次是C1模型,而对C2模型的影响很小;土壤性质(a与d处理组)及土壤供Ca水平或pH值(d与e处理组)对SC模型的磷吸收预测能力影响甚微,而对两类数值解模型的影响较大。不同土壤含水量下四种机理模型的RE值变化情况表明(图3),施磷与未施磷土壤条件下,四种机理模型的磷吸收预测能力均以田间土壤持水量时表现最强,随土壤含水量水平的降低,机理模型的预测能力则均有所下降。

表6 不同条件下三类机理模型的磷吸收预测能力比较

Table 6 The comparison of predicting ability of three kinds of models under different conditions

处理组 Treatment Groups	实测值Um Measured Values	SC模型,SC Model		C1模型,C1 Model		C2模型,C2 Model	
		Uc	RE	Uc	RE	Uc	RE
(a)A/M−θ_3*	212.3	333.8	0.64	177.8	0.27	184.2	0.25
(b)A/M−θ_3	261.1	468.7	0.73	238.7	0.20	238.7	0.19
(c)A/S−θ_3	133.0	177.7	0.34	92.8	0.31	124.8	0.21
(d)B/M−θ_3*	231.2	333.1	0.65	153.8	0.47	179.1	0.38
(e)Bb/M−θ_3*	191.1	283.1	0.66	147.4	0.38	164.4	0.31

注:各数据均为3个处理(P_0、P_{150}和P_{350})的平均数

Note: Every Value is the average of three treatments(P_0、P_{150} and P_{350})

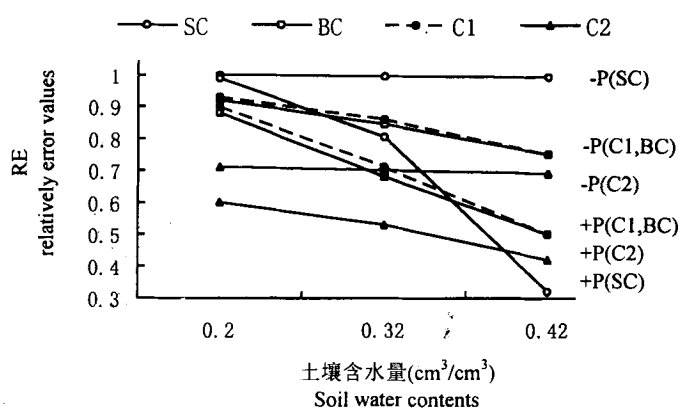

图3 不同土壤含水量下四种机理模型预测幼苗磷吸收的相对误差值

Fig.3 The relatively error values predicting P uptake of seedlings by four machenistic models under different soil water contents

因此除土壤供磷水平(Cli)外,影响机理模型预测能力的重要因素还有土壤含水量水平、土壤性质及土壤供N形态与供Ca水平。土壤养分与水分胁迫、土壤质地粘重、土壤施NH_4^+-N及酸性土壤供Ca等条件均会使(数值解)机理模型的磷吸收预测能力降低,其原因可能归于这几种条件均能诱导或加强幼苗根系吸收磷的某种主动适应机制,而这种机制并

未考虑在(数值解)机理模型之中。

参 考 文 献

1 Bouldin DR. Mathematical description of diffusion processes in the soil-plant system. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1961, 25: 476～480.

2 Olsen SR, Kemper WD and Jackson RD. Phosphate diffusion to plant roots. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1962, 26:222～227.

3 Nye PH and Spiers JA. Simultaneuous diffusion and mass flow to plant roots. In: Trans. Int. Congr. Soil Sci. 8 th., 1964, 535～542.

4 姚其华. 根系养分吸收模型的研究与应用进展. 土壤通报, 1998, 29(2):91～94.

5 Nye PH and Marriott FHC. A theoretical study of the distribution of substances around roots resulting from simultaneous diffusion and mass flow. Plant Soil, 1969, 30:459～472.

6 Baldwin JP, Nye PH and Tinker PB. Uptake of solutes by multiple root systems from soil Ⅲ. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil. Plant Soil, 1973, 38:621～635.

7 Brewster JL, Bhat KKS and Nye PH. The possibility of predicting solute uptake and plant growth response from independently measured soil and plant characteristics Ⅲ. The growth and uptake of onions in a soil fertilized to different initial levels of phosphate and a comparison of the results with model predictions. Plant Soil, 1976, 42:198～226.

8 Claassen N and Barber SA. Simulation model for nutrient uptake from soil by a growing root system. Agron. J., 1976, 68: 961～964.

9 Cushman JH. An analytical solution to solute transport near root surfaces for low initial concentration Ⅰ. Equations development. Soil Sci. Soc. Am. J., 1979a, 43:1089～1092.

10 Cushman JH. An analytical solution to solute transport near root surface for low initial concentration Ⅱ. Applications. Soil Sci. Soc. Am. J., 1979b, 43:1090～1095.

11 Cushman JH. Completion of the list of analytical solutions for nutrient transport to roots Ⅰ. Exact linear models. Water Resour. Res., 1980, 16:891～896.

12 Cushman JH. Nutrient transport inside and outside the root-rhizosphere: generalized model. Soil Sci., 1984, 138:164～179.

13 Claassen N, Syring KM and Jungk A. Verification of a mathemetical model by simulating potassium uptake from soil. Plant and Soil, 1986, 95:209～220.

14 Smethurst PJ and Comerfrd NB. Simulation nutrient uptake by single or competing and contrasting root systems. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57:1361～1367.

15 Yanai RD. A steady-state model of nutrient uptake accounting for newly grown roots. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1582～1591.

16 Itoh S and Barber SA. A numerical solution of whole plant nutrient uptake for soil-root systems with root hairs. Plant Soil, 1983, 70:403～413.

17 Nye PH. On estimating the uptake of nutrients solubilized near roots or other surfaces. J. Soil Sci., 1984, 35:439～466.

18 Nye PH. Changes in pH across the rhizoshere induced by roots. Plant Soil, 1981, 61:7～26.

19 Nye PH. pH changes and phosphate solubilization near roots: An example of coupled diffusion processes. In: Krat DM (ed.), Roots, nutrient and water influx, and plant growth, ASA Spec. Publ., 49, ASA CSSA, and SSSA, Madision, WI, 1984, 89～100.

20 Barber SA and Cushman JH. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: Iskandar K(ed.), Modeling waste water renovation-land treatment, Wiley-interscience, New York, 1981, 382～409.

21 Claassen N. Die autnahme von nahrastoffen aus dem doden durch die hohere pflanze als ergebnis von verfugbarkeit und anergnungsvermogen. Severin-Verlag, Gottingen, Germany, 1990, 176.

22 W. 伯姆著(薛德榕,谭协麟译). 根系研究法. 北京:科学出版社, 1985, 152～186.

23 Williams RF. The effects of P supply on the rates of intake of P and N and upon certain aspects of P metabolism in grami-

neous plants. Aust. J. Sci. Res., 1948, 1:333～361.

24 Khasawneh FE and Copeland JP. Cotton root growth and uptake of nutrients: Relation of phosphorus uptake to quantity, intensity, and buffering capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1973, 37:250～274.

25 加拿大钾磷研究所北京办事处主编. 土壤养分系统研究法. 北京: 中国农业出版社, 1992, 42～44.

26 Van Rees KCJ, Comerford NB and Rao PSC. Defining soil buffer power: Implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990a, 54:1505～1507.

27 Barraclough PB and Tinker PB. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils Ⅰ. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water bulk density. J. Soil Sci., 1981, 32:225～236.

28 Nye PH. Diffusion of ions and uncharged solutes in soils and soil clays. Advan. In Agron., 1979, 31:225～272.

29 Schenk MK and Barber SA. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. Plant Soil, 1980, 54:65～76.

30 Silberbush M and Barber SA. Phosphorus and potassium uptake of field-grown soybean cultivars predicted by a simulation model. Soil Sci. Soc. Am. J., 1984, 48:592～596.

STUDY ON THE VERIFICATION OF MECHANISTIC MODELS OF NUTRIENT(P) UPTAKE BY PLANT ROOT SYSTEM

Yao Qihua[1] Liu Wuding[2] Chen Mingliang[2] Xie Zhenchi[1]

(1 *Soil and Fertilizer Inst., Hubei AAS, Wuhan* 430064; 2 *Dept. of Resour. Envir. And Agrochem., Huazhong Agric. Univ., Wuhan* 430070)

Abstract By comparing the measured and model-calculated P absorbed by seedlings, this paper dealt with the predicting ability and its influencing factors of selected mechanistic models of nutrient uptake by both maize and soybean seedlings. The results showed that: (a) All of the three kinds of selected models can reflect the changing trend of P uptake by seedlings of maize and soybean; (b) Among the three selected models, the predicting ability of SC Model is the poorest and that of C2 Model including the effect of root hairs is the strongest; (c) The important factors influencing models' predicting ability are soil nutrient and water levels, soil N forms supplied soil properties and soil Ca levels or pH value; (d) The soil conditions that with P and water stress, clay texture, applied NH_4^+-N and applied limestone in acid soil can make it become poor for the mechanistic model based on numeric solution to predict P uptake, and this is because that the above soil conditions can induce or strengthen the other actively adaptive mechanism of seedlings' root system to intake P which has no been considered in the models.

Key words Verification of Mechanistic Models; P uptake by Seedlings; Maize and Soybean