土壤-根系统养分迁移和吸收的数值模拟

II. 模型验证及参数的敏感性分析

张富仓, 康绍忠, 李志军

(西北农林科技大学教育部旱区农业水土工程重点实验室,陕西杨陵 712100)

[摘 要] 用盆栽试验对玉米幼苗磷吸收进行了分析,并结合土壤和玉米根系磷运移和吸收参数的测定,用 稳态吸收模型进行了计算。结果表明,随着土壤施磷量的增加,玉米幼苗含磷量和吸磷量明显提高;对于同一施磷 水平,随着生长时间的增加,玉米幼苗的吸磷量增加的幅度较快;不同施磷处理玉米幼苗磷吸收的计算值和实测值 均线性相关;养分吸收模型的玉米幼苗磷吸收模拟值与实测值具有很好的一致性,能很好地反映出幼苗吸收磷的 变化趋势。单因素敏感性分析表明,影响作物根系磷吸收因素的大小顺序为*L* > *Cav* > *ro* > *Qc* > *Dc* > *vo* > *rc*;某些参 数的变化可以影响其他一些参数的原有水平;用图型分析法能准确地反映 *ro*, *Dc* , *Imax*, *Cav*, *vo* 和 *rx* 等参数之间的 两维和多维相互关系。

[关键词] 土壤-根系统;养分运移;养分吸收;模型验证;参数敏感性分析

[中图分类号] S154.4 [文献标识码] A

分析和验证土壤-根系统中养分迁移吸收的数 学模型,对于作物生长的诊断和定量施肥有重要意 义。对养分吸收模型,最有效的验证办法是利用生物 盆栽试验定量测定作物在某一生长阶段对养分的吸 收量,然后根据测定的有关土壤和作物养分运移和 吸收参数,用模型定量计算作物的吸收量^[1],并对测 定和计算的结果进行回归分析,以验证模型的准确 性。本研究利用盆栽试验,定量测定了迭土在不同施 磷量条件下,玉米幼苗对磷的吸收量,结合测定土壤 和玉米根系磷运移和吸收参数,用稳态吸收模型进 行了计算^[2],同时对模型的敏感性用单因素,两因素 及多因素方法进行了分析,以期为黄土性土壤作物 的施肥和管理提供依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

2

供试土壤为陕西杨陵的搂土。土样采自表层 0 ~ 20 cm,风干过 2 mm 筛。土壤质地为重轻壤土,有 机质含量 11.8 g/kg,全磷(P $_{20}$ s) 1.36 g/kg,pH 为 8 01。土壤的磷肥处理:向土壤中加入磷肥磷酸二氢 钙(Ca₂(H₂PO₄)₂)(分析纯),分别设施磷量 0,200 和 400 mg/kg 3 个水平,待肥料与土搅拌均匀后,加水 至每种土壤的田间持水量(211 g/kg)。在室内平衡 [文章编号] 1671-9387(2003)01-0015-09

3 周, 以得到较稳定的土壤磷状况, 然后将土样风 干、过 2 mm 湿筛, 按 1. 25 g/cm³ 的装土容重装入 容积为 3 5 L 的培养盆中。在种植玉米前 2 d, 向培 养盆中加水达到土壤的田间持水量, 同时向每个盆 中加入 500 mg KNO 3。

1.2 玉米的生物培养

将玉米种子(掖单 13)漫于沙土中萌发,6 d 后 移栽到培养盆中。移栽前将根系剪至 2 cm,以促使 根系分枝,每个培养盆中移栽 4 棵玉米苗。每个盆重 复 3 次。

培养试验在人工气候室中进行,每天供给日照 10 h,日照强度为 30 000 lx,气候室温度控制为 25

。培养期间,培养盆每天称重,并加水至土壤起始 湿度。为减少土壤表面的蒸发,用塑料薄膜覆盖土壤 表面,同时增设未种作物的培养盆,用于测定土壤的 蒸发。玉米苗收割时间分别为移栽后的第2,5,8, 11,14 和17 天,收割的玉米植株,分别取地上部植 株样和根系样,根系样用冲洗法获取。用称重法测根 系鲜重(W),用网格线性交叉法^[3]测根系长度(L), 根据土壤根系的分布和根系长度计算根长密度L, = L/V(V 为根系占土容积)。收获的植株样品经烘 干(60)后,用湿化学法测定地上部分磷量,并计 算磷吸收量。

[作者简介] 张富仓(1962-),男,陕西武功人,副研究员,博士,主要从事土壤-植物系统水分和养分迁移动力学研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

^{* [}收稿日期] 2001-11-30

[[]基金项目] 国家杰出青年基金资助项目(49725102)

1.3 稳态模型中参数的测定和计算方法

在植物养分吸收的稳态模型中包括了土壤和植物的 10 个主要参数, 其测定方法为: 土壤中某种养分 (如 P 或 K) 的有效扩散系数 (D_e) 用冷冻切片法测定^[4]; 土壤养分的缓冲容量 (b) 和土壤溶液初始磷平均浓度 (C_{av}) 采用土壤溶液离心和阴离子交换树脂相结合的方法测定^[5]; 植物根系吸收养分动力学参数 $I_{\text{max}}, K_m, \alpha$ 的测定和计算用离子耗竭法^[5]; 植物的根长 L 和根鲜重W 用盆栽试验测定; 根半径 (r_0) 和根间半径 (r_x) 的计算公式分别为 $r_0 =$

↓ $W/\pi t$ 和 $r_{x}=1/\sqrt{V/\pi t}$,其中,W 为根鲜重(g),L为 根 长, V 为 土 壤 体 积;根 系 吸 水 速 率 $v_0 = V_W/[2\pi r_0(L_{i-} L_0) + t]$,其中, V_W 为生长时期内植 株吸水总量,可通过称重法测定, L_i 和 L_0 分别为 t_i 和 t_0 时刻(初始时刻)的根长,用取土法测定。 $2\pi r_0(L_{i-} L_0) + t$ 为吸水时间内增加的根系表面积; 植物根系的生长速率 $K(L) = (L_{i-} L_0)/t$,根据不同 时间根系的生长量的实测值,回归计算根系的生长 速率。表 1 为盆栽试验中不同施磷水平时玉米幼苗 对磷的吸收参数值。

表1 玉米磷吸收验证中的主要模型参数

Table 1	Parameter	values used	in model	verification	of corn F	absorption
---------	-----------	-------------	----------	--------------	-----------	------------

土壤施磷量/ (mg·kg ⁻¹⁾ P fertiliza- tion level	′ L₀∕am	r _x /am	r0/am	$\frac{v_0}{(\mathrm{nm}\cdot\mathrm{s}^{-1})}$	$\frac{I_{\rm max}}{({\rm pmol}\cdot{\rm m}^{-2}\cdot{\rm s}^{-1})}$	$\frac{K_m}{1} (\operatorname{nmol} \cdot \operatorname{cm}^{-3})$	$C_{av}/$ (µmol·m ⁻³)	$\frac{D e}{(\operatorname{ncm}^2 \cdot s^{-1})}$	Ь	根生长 速率/ (µm·s ⁻¹) Grow th rate of roo t
0	58	0 45	0 04	6 66	0 156	11	0 124	29	60	3 74
200	62	0 45	0 04	6 66	0 176	14	0 194	44	113	4.17
400	71	0 45	0 04	6 66	0 213	19	0 270	48	178	4 47

2 结果与分析

2.1 不同施磷量对玉米生长和养分吸收的影响

表 2 为不同施磷量条件下,玉米植株鲜重(地上 部和地下部)、干重(地上部和地下部)、根长、累计蒸 腾量等的变化情况。 由表 2 可以看出, 随土壤施磷量的增加, 玉米幼 苗地上部的鲜重和干重随生长时间的延长都有较为 明显的增加, 在试验时间内几乎呈线性增加, 而根系 的鲜重和干重在生长初期增加较为缓慢, 随着生长 时间的延长增加渐趋明显。

表 2 不同施磷量对玉米生长和养分吸收的影响

Table 2 Effect of P-fertilization level on grow th and nutrient absorption of corn seedling

施磷量/ ^{(mg·kg⁻¹⁾ P fertili- zation level}	生长期/d Days after sow ing	植株鲜重/g Seedling fresh weight	植株干重/g Seedling dry w eight	根鲜重/g Root fresh weight	根干重/g Root dry weight	根长/am Root length	<mark>蒸腾量</mark> /g Transpi - rations	植株含磷量/ (mg・g ⁻¹) Concentra- tion of P in seedling	植株吸磷量/ ^(μg・g⁻¹) Seedling Puptake
	2	2 18	0 18	0 72	0 10	120	20 06	1. 133	8 46
	5	2 87	0 24	0 90	0 11	248	62 80	1. 262	12 57
	8	3 65	0 31	1. 22	0 15	316	100 65	1. 329	17.10
0	11	5 26	0 42	1.86	0 23	418	138 39	1. 808	32 36
_	14	6 43	0 55	2 96	0 37	520	173 34	2 607	60 58
	17	7.18	0 72	3 78	0 47	650	215 62	3 119	72 32
	2	2 56	0 22	0.98	0 13	148	19.84	1. 585	11. 21
	5	3 46	0 38	1.13	0 14	256	62 56	1. 826	18 80
200	8	4 12	0 42	1.36	0 16	325	102 32	1. 912	25 91
200	11	5 43	0 53	2 26	0 27	428	137.54	2 437	41.72
	14	6 86	0 69	3 14	0 35	580	172 86	3 446	76 61
	17	7.85	0 84	3 86	0 46	690	213 95	3 826	104 10
	2	3 12	0 25	0 93	0 11	165	18 96	2 323	8 61
400	5	3 75	0 38	1.09	0 16	285	62 34	2 438	19.60
	8	4 86	0 49	1 47	0 20	338	102 98	3 334	38 04
	11	5 85	0 67	2 56	0 33	442	137.79	3 608	43 32
	14	7.73	0 86	3 56	0 44	680	174 13	4 162	83 60
	17	8 67	1.01	4 89	0 60	720	214 74	4 464	116 11

从玉米幼苗根长的变化过程看(表 2),在试验 生长期内,3种施磷处理的玉米幼苗的根长呈较为 明显的线性增长趋势,土壤不施磷及施磷 200 和 400 mg/kg时, 玉米幼苗的根长随时间的变化方程 分别为: L = 33 98 t + 58 85, $R^2 = 0$ 994; L = 36 05 t + 62 05, $R^2 = 0$ 989; L = 38 71 t + 70 64, R^2 = 0 959。 说明根长的生长速率呈线性增长变化,并 且随施磷量的增加,生长速率呈增大的趋势,其根长 的生长速率分别为 33 98,36 05 和38 71 cm /d。

由于试验在植物生长箱中进行, 光照和温度较 为恒定, 因此, 用称重法测定的玉米生长过程中累计 蒸腾量(g)随时间的变化关系表现很稳定, 为典型的 直线关系, 3 种施磷量处理间差异较小, 平均累计蒸 腾量的经验公式为 y= 12 51 t, R²= 0 998 5。根据 玉米的累计蒸腾量随时间的变化, 可计算根系的吸 水速率。

表 2 还表明, 随土壤施磷量的增加, 玉米幼苗含 磷量和吸磷量明显增加, 对于同一施磷水平, 随着生 长时间的增加, 玉米幼苗的吸磷量增加的幅度较快, 这是由于根长的快速增加所致。

2 2 模型验证和参数的敏感性分析

2 2 1 模型验证结果 图 1 为盆栽土培试验时,不同时间及不同施磷条件下,玉米幼苗磷吸收量的实测值(Um)及模型计算值(Uc)的相关结果。从图 1 可以看出,不同处理的玉米幼苗磷吸收量的计算值和 实测值均达到线性相关,回归分析的显著性反映了 模型计算值和实测值的一致性。而线性回归方程 (Uc= aUm)的斜率 a 与 1(Uc= Um)的接近程度表示 了该机制模型的预测能力。图 1 表明,该模型中玉米 幼苗磷吸收量的模拟值与实测值的一致性,很好地 反映了幼苗吸收磷的变化趋势。从实测的磷吸收点 的分布与U_{c=U}m直线的接近程度看,不同处理的 接近程度均很好。



图1 玉米幼苗磷吸收模拟值(U_e)和实测值(U_m)的比较 ▲.不施磷; O 施磷200 mg/kg; *.施磷400 mg/kg; ……..U_e=U_m线 Fig.1 Comparison of the measured (U_m) and simulated (U_e) P uptake of corn seeding

A.Non-P; O.200 mg/kg P; *****.400 mg/kg P; $\cdots U_{e}=U_{m}$ line

2 2 2 养分吸收模型参数的敏感性分析 单因素 参数敏感性分析是在保持其他参数不变的情况下, 计算某一参数初始值变化 0 5~ 1 5 倍时养分吸收 量的变化量。植物、土壤不同,养分吸收模型的参数 值亦不同,敏感性分析中的模拟参数值是取试验条 件下的参数平均值^[6]。表 3 列出了植物磷吸收模型 中主要参数的平均值。

Table 3 Parameter values used in P absorption model					
参数类型 Parameter type	参数 Parameters	单位 U nit	平均值 A verage of param eters	取值范围 Ranges of param eters	
植物根系养分吸收特性参数 Root nutrient uptake parameters	I _{m ax}	$mol/(cm^3 \cdot s)$	2 68 × 10 ⁻¹³	2 $0 \times 10^{-13} \sim 5.6 \times 10^{-12}$	
	K_m	mol/cm^3	1. 60 × 10 ⁻⁸		
	α	cm/s	1. 86 × 10 ⁻⁵		
植物根系形态和生长特征参数 Root morphology and grow th parameters	L	cm	285		
	r 0	cm	3. 50 × 10 ⁻²	$3 \times 10^{-4} \sim 3.5 \times 10^{-2}$	
	<i>r</i> x	cm	2	0 1~ 2 0	
土壤磷供应特征参数 Soil P supply parameters	D e	am^2/s	8 17 × 10 ⁻⁷	1. $0 \times 10^{-9} \sim 2.7 \times 10^{-16}$	
	b		5.84		
	Cav	$mo l/cm^3$	1. 90 × 10 ⁻⁷	$0 \ 0 \sim 2 \ 0 \times 10^{-3}$	
土壤水流特性参数 Soil and water flow _parameters	<i>v</i> 0	cm/s	5. 66 × 10 ⁻⁷	$0 \ 0 \sim 2 \ 0 \times 10^{-6}$	

表 3 植物磷吸收模型主要参数值

图 2 为利用表 3 中的参数平均值,在其他参数 不变的条件下,变化某个参数时植物磷吸收速率的 相对变化量(其中*D a* 和 *b* 的变化以*D ab* 1 个综合参 数表示, *I*max和 *K m* 的变化以α表示)。

从图 2 可以看出, 当其他参数都保持不变时, 预测的磷吸收速率随根长L 和土壤溶液磷平均浓度

7

*C*_{av}的增加而直线上升;增加根半径 r₀ 和根系吸收活 力 α 对预测的磷吸收速率也有较大的影响;当土壤 磷扩散系数*D*_e 或缓冲容量 b 增加时,预测的磷吸收 速率增加缓慢,而当根间半距 r_x 增大时,预测的磷 吸收呈缓慢的降低趋势;在这些参数中, v₀ 对预测 的吸收不敏感。



采用图型分析法(Graphical analysis),在分析 两个或两个以上参数同时变化时的参数敏感性时, 为简化分析将根系磷吸收速率定义为单位根长的吸 收,同时把 $D_{eb}(乘积)$ 作为1个参数来考虑,由于根 系养分吸收活力 α 可以通过 K_m 和 I_{max} 来获得,这样 Yanai 模型中10个主要参数就变为7个。许多研究 者认为^[7], 根间半距离 r_x 及米氏动力学常数 K_m 对 作物磷吸收不甚敏感, 因而在多因素敏感性分析中, 笔者对 r_x 及 K_m 取定值, 即 $r_x = 10$ mm, $K_m = 20$ mmol/m³, 这样, 多因素敏感性分析就只剩下 5 个可 变参数, 即 r_0, C_{av}, v_0, D_{eb} 和 I_{maxo} 而在两因素敏感性 分析中, 考虑到根间半距离 r_x 变化的影响, 这样两 因素参数敏感性分析中有 6 个可变参数, 即 r_0, C_{av} , v_0, D_{eb}, I_{max} 和 r_x (表 4)。

表4 两	因素和多因素敏感性分析	中模型参数的变化
Table 4	Parameter change used	in two-dimensional
an	dmuti ⁻ dimensional sensit	ivity analysis
公 # F	24 /2-	取住共同

参数	单位	取值范围		
Parameter	Unit	Range		
r 0	mm	0 03~ 0 4		
r_x	mm	2~ 30		
<i>v</i> 0	m/s	$1 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-7}$		
C_{av}	mmol/m ³	1~ 1000		
$D_{e}b$	m^2/s	1 × 10 ⁻¹¹ ~ 3 × 10 ⁻⁹		
Imax	$mmo1/(m^2 \cdot s)$	$1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-4}$		

在两因素敏感性分析中,分析了 I_{max} 和 C_{av} , v_0 和 C_{av} , v_0 和 D_{eb} 以及 r_x 和 C_{av} 之间在磷吸收量计算 中的相互作用,图 3 (a), (b), (c)和(d)分别为磷吸 收速率随 I_{max} 和 C_{av} , v_0 和 C_{av} , v_0 和 D_{eb} 以及 r_x 和 C_{av} 的变化情况。



图 3(a) 表明, 植物磷吸收速率随土壤溶液磷平 均浓度 Car 的增加而增加,但这种增加程度在高浓度 时受米氏动力学参数 Imax 的限制而增加得较为缓 慢,特别是在 Imax 取值较低时尤为明显。图 3(b)表 明,根半径对磷吸收速率的影响受土壤溶液磷平均 浓度 C_{av} 的影响较大,表现为高 C_{av} 比低 C_{av} 影响的程 度大,也就是说,在 Imax不作为一个限制条件时,当 C_{av} 较低时,即使增加根半径,磷吸收速率也不会有 较大的增加。图3(c)表明,当根表磷浓度较低,同时 Imax不作为一个限制因子时,控制磷从土壤向根表的 迁移参数 vo 和 D 。成为限制根系吸收磷的重要因 子,当土壤中磷的 D_{eb} 值较低时,土壤水流速率 v_0 对磷吸收的影响就变得十分重要,也就是说,此时扩 散作用提供较少数量的磷, 增加 🗤 可提高质流磷的 数量。图 3(d) 为根间半距离 r_x 和 C_{ax} 的变化对磷吸 收的影响,对同 $-C_{av}$,当 r_x 较小时(即较大的根长 密度 $L_{y}, r_{x} = 1/\sqrt{\pi L_{y}}, 单位根长中磷的吸收速率增$ 加、因此增加土壤中根长密度将有助于磷的吸收。

用表 4 进行多因素敏感性分析时, 5 个可变参数中除 n₀ 分为 3 个水平(代表 3 种不同植物)外, 其他 4 个参数在其变化范围内均等分成 5 个水平。

图 4 为 r₀, *D*_eb, v₀ 取值一定时, 磷吸收率随 *C*_{av} 及 *I*max 的变化情况, 每个图中的每条线表示在给定 的 *I*max, r₀, *D*_eb 和 v₀ 时, 磷吸收率随 *C*_{av}的变化趋势, 笔者把 75 个图分成 3 组(每组 25 个图), 每 1 组内 的 r₀ 取值是不变的, 每 1 组内的某一列代表 1 个确 定的 *D*_eb 值, 而从上而下 v₀ 逐渐增加; 每 1 组的某 1 行代表 1 个确定的 v₀ 值, *D*_eb 值从左至右逐渐增加。

图 4 的 3 组图均表明, *C*_{av}对磷吸收率有高度敏 感性, 这一点与单因素参数敏感性分析的结果是一 致的。然而, 在 *C*_{av}取值较高时, 吸收率随 *C*_{av}的增幅 减少(斜率减小), 即 *C*_{av}对磷吸收率的敏感性降低, 这一点仅采用单因素参数敏感性分析是难以发现 的, 因为<u>d *U* sst</u>对 *C*_{av}的依赖程度取决于图形的变化, 而不是一个点的变化。

比较每个坐标图中的 5 条线可以发现, 当 Imax 越大时, 根系磷吸收率对 Cav就越敏感; 当 Imax 很小时, 根系磷吸收率接近于 Imax, 增加 Cav对根系没有 大的影响,这反映了 Cav与 Imax 的相互依赖关系。

19

比较每组图中每 1 行的 5 个坐标图, 可以发现 植物对磷的吸收量随 *D*_{eb} 变化而变化的快慢。当 *D*_{eb} 取值较小时, 植物磷吸收量是很小的, 植物的磷 吸收量主要受土壤养分向根的迁移速率或土壤养分 供应能力的影响, 而不受根系养分吸收力的影响。此 时, 根系养分吸收能力远未达到饱和, M ichaelish-M enten 方程的条件还不具备。因此, 为了使根系养 分吸收能力达到近饱和状态, 就必须通过施肥等手 段增加 *C*_{av}值。从图 4 还可以发现, 当土壤养分供应 参数 *D*_{eb} 较大时, 即使在 *I*_{max} 取值较高的情况下, 磷 吸收率对 *I*_{max}的敏感性也很强。进一步分析还可发 现, *I*_{max}, *D*_{eb} 及 *C*_{av} 之间的三维相互关系: 若*D*_{eb} 取 值较高, 则随着 *C*_{av}的增加, 植物磷吸收对 *I*_{max}的敏 感性增强。

从每组图的每 1 列可以看出, 在 vo 取值低时植物磷吸收较少, 尤其是在 D eb 取值较低时, vo 对植物磷的吸收速率影响极大(较强地制约着磷的吸收过程), 这说明 vo 与 D eb 间存在一定关系。另外, 每 1 列的 5 个坐标图也很直观地反映了 vo, Cav及 Imax 3 个参数间的三维关系, 在 vo 较低时, 植物磷吸收对 Cav及 Imax均不敏感; 而 vo 较高时, 在 Cav增加的情况下, 植物磷吸收对 Imax则极为敏感。

比较每 1 组图, 发现 vo, Cav, D eb 及 Imax 4 个参数的相互关系为: 在 vo 与 D eb 取值都很小情况下, Imax 及 Cav均表现不敏感, 而在 vo, D eb 及 Imax 取值都 较大的情况下, Cav表现极为敏感。

比较 3 组坐标图, 在 I_{max} 和 D_{eb} 取值均较高的 情况下, 植物磷吸收量随 C_{av} 的变化呈 S 形曲线, 这 就是上述所讨论的 I_{max} , C_{av} 及 D_{eb} 的相互关系。 然 而, 当 r_0 取值变化时, 就会影响到 I_{max} , C_{av} 和 D_{eb} 三 者之间的相互关系, 当 $r_0 = 0$ 03 mm, 在 D_{eb} 取值较 大的情况下, S 形曲线很明显; 但当 $r_0 = 0.4$ mm 时, D_{eb} 取值只有大于 7. 2 × 10⁻¹⁰ m²/s 时, S 形曲线才 显现出来; 而当 r_0 取值较小($r_0 = 0.03$ mm), v_0 取值 也较小时, 参数 I_{max} 随 C_{av} 值的增大而对磷吸收表现 出一定的敏感性; 但当 r_0 取值达到0.4 mm 时, 参数 I_{max} 和 C_{av} 对磷吸收均表现不敏感。这反映了 r_0, D_{eb} , I_{max}, C_{av} 及 v_0 5 个参数之间的多维相互关系。



Fig.4b Muti-parameter sensitivity with r=0.15 mm

000 1 1 000 1000 1 000 1 000 $D_{b}=3.0\times10^{-7}\,\mathrm{m^{2}/s}$ 100 8 8 8 100 10 2 2 2 2 1.0 0.8 0.6 0.4 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0 0.8 0.6 0.4 0.2 0 1.0 0.8 0.4 0.2 0 1.0 0.8 0.4 0.4 0 0.1 0 000 T 1000 80 1 1 000 1 000 11 L 6 $D_{b}=7.2 \times 10^{-4} \text{m}^{2}/\text{s}$ 100 001 100 001 801 2 2 2 2 2 1.0 0.8 0.4 0.2 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 1.0 0.8 0.6 0.4 1.0 0.8 0.4 0.4 0 0 0 0 0 000 1 1 000 000 1 1 000 000 1 图4br=0.15 mm 时多参数敏感性分析 $D_{p}b=1.7 \times 10^{-n} \text{m}^{3}/\text{s}$ 8 100 100 100 30 (^{c_} (mmol • m⁻¹) 9 2 2 2 2 0.6 0.4 0.2 01 08 0.6 04 0.2 0.6 0.4 0.6 0.4 0.2 0.6 0.1 0.8 0.2 0.8 0.8 0.8 0.4 0.2 0 0 0.1 0 2 2 0 ¢ 000 1 1 000 1 00 1 000 000 1 ļ 1111 Duna ya $D_{c}b=4.2\times10^{-11} \text{ m}^{2}/\text{s}$ <u>10</u> 100 100 100 100 2 2 2 2 2 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 1.0 0.8 0.4 0.2 1.0 0.8 0.6 0.4 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 1.0 0.8 0.4 0.2 0 0 0 0 0 1 000 1 000 1 000 000 1 000 (-s• $D_{\rm b} = 1 \ 0 \times 10^{-11} \ {\rm m}^2/{\rm s}$ 31.6 31.6 ----3.1 3.2 10 100 8 8 8 ____ (nmol • m_ 2 2 2 2 2 $U_{e\pi}^{(n)}$ (mmol · m⁻¹ · d⁻¹) 0.6 0.4 0.2 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.6 0.1 0.8 0 0 1.0 0.8 0.40.2 • 1:0 0.8 0.6 0.4 0.2 0



3 结 论

1) 不同施磷处理时, 玉米幼苗磷吸收量的计算 值和实测值均达到线性相关, 该模型中玉米幼苗磷 吸收量的模拟值与实测值具有很好的一致性, 真实 地反映了玉米幼苗吸收磷的变化趋势。相对比较可 以看出, 随着土壤施磷量的增加, 模型的磷吸收预测 值有偏高的趋势, 这可能与不同 *Cav*水平下模型的预

测能力有关。

2) 单因素敏感性分析表明, 作物根系磷吸收的 影响因素的大小顺序为 $L > C_{av} > r_0 > 0 > D_{eb} > v_0 > r_x$ 。由于某些参数的变化可以影响其他一些的参数 原有水平, 用图型分析法对模型中两因素和多因素 的敏感性进行分析, 能准确地反映 $r_0, D_{eb}, I_{max}, C_{av}, v_0$ 和 r_x 等参数之间的多维相互关系。

[参考文献]

- [1] Barber S A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach [M]. New York: John W iley & Sons, 1984
- [2] 张富仓,康绍忠,李志军,土壤-根系统养分迁移和吸收的数值模拟 I. 植物根系吸收养分的稳态模型[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2002,30(6):7-10
- [3] Zobel R W. Root morphology and development [J]. J Plant Nutr, 1992, 15: 677-684.
- [4] Nye P H, Tinker P B. Solute movement in the soil-root system [M]. Oxford, England: Blackwell Scientific Publishers, 1977.
- [5] 张富仓 土壤-根系统养分迁移机制及其数值模拟[D] 陕西杨陵: 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 2001.
- [6] Yanai R D. A steady-state model of nutrient up take model accounting for new ly grow th roots [J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58: 1562-1571.
- [7] W illiam s M, Yanai R D. Multi-dimensional sensitivity analysis and ecological implications of a nutrient uptake model[J]. Plant and Soil, 1996, 180: 311- 324

Numerical simulation of nutrient transfer and absorption in soil-root system

II. M athematical model verification and the sensitivity analyses of the parameters

ZHANG Fu-cang, KANG Shao-zhong, L I Zhi-jun

(Key Laboratory of A gricultural Soil and W ater Engineering in A rid and Son iarid A reas, N orthwest Sci⁻Tech University of A griculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract Experiments with pots were conducted for corn seedling P absorption, combining with survey of P transfer and uptake absorption parameter of soil and corn This paper calculated P uptake by the steady-state model The results show that: there was an obvious increase of corn seedling P content and absorption P quantity with quantity increase of P fertilization application in soil; for the same P application level, corn seedling P absorption quantity increase is rapid with the increase of grow th time; a linear relation was obtained with measured and calculated P uptake in different soil P application treatments, consistency that corn seedling absorbed and calculated P uptake can reflect well plant P absorption change tendency; Single factor sensitivity analysis show s, the size order that affects crop absorption P factors is L> C_{av} > r_0 > α > D_{cb} > v_0 > r_x ; M ethod of Graphical analysis can reflect two dimensional and multidimensional mutual relations between r_0 , D_{cb} , I_{max} , C_{av} , v_0 and r_x etc

Key words: soil-root system; nutrient up take; model verification; parameter sensitivity analysis