

根际养分状况数学模拟研究的进展

宣 家 祥

(中国科学院南京土壤研究所)

土壤养分有效性的核心问题是土壤中养分离子向根的迁移,而离子向根迁移则是由于植物根吸收水分和养分产生的梯度所引起。所以要确定根际的养分状况必须将这二方面结合起来进行动态的研究。土壤化学测定仅考虑土体中元素的浓度,显然不能反映实际过程的全貌。数学模拟方法则不同,它可以将养分迁移过程与植物的吸收放在一起处理,在因果关系的基础上模拟这些过程的动态相互作用,而且在模型得到验证后可通过灵敏度分析,对包含在模型中的因素的相对重要性作出估价。当模型的计算值与实际不符时则可通过对结果的原因分析得到新的实验假说和获得对土—根系统新的认识。因此机理性数学模型已成为根际养分状况研究中的一个有效工具。而这些模型在实际工作中应用所获得的成功又使它倍受重视,成为当今根际研究中的一个重要分支。本文仅就近年来机理性模型的建立,参数及其测定和实际应用等方面的进展作一概要介绍。

一、机理性模型的建立

建模就是将我们认定的能作定量描述的因子包含在合理简化的方程中。由于离子向根迁移可用扩散加质流之和来描述:

$$F = -DeA(dC_s/dr) + V_0 C_1$$

式中: F 为每单位时间抵达根表面的离子数量; De 为有效扩散系数; r 为径向距离; A 为扩散的横截面积; C_s 为与土壤溶液中离子浓度(C_1)相平衡的在固相的离子浓度; V_0 为向根的水流速度。

植物的养分吸收与根表浓度的定量关系可体现在内边界上,故可用连续方程来计算根际养分的亏缺剖面和植物的吸收。Nye和Tinke与Barber的专著已分别总结了这方面的工作^[1,2]。近二十几年来,机理模型的发展主要是在Nye和Marriott(1969)提出的计算根际养分分布的偏微分方程的基础上加以扩展^[3]。目的是使模型易于进行实验验证与增加模型中的重要因子,从而提高模型的预报能力和精度。如, Claassen和Barber鉴于实测根表浓度的困难,将此模型扩充为由通量和根长计算植物养分的总吸收量,使验证易于进行^[4]。Cushman在外边界上包括了相邻根间对养分的竞争,考虑了根系密度的影响^[5]。近年来为提高预报能力,在内边界上采用非线性边界条件,允许吸收速度和土壤溶液的关系,遵循修正的 Michaelis—Menten吸收动力学方程^[6]:

$$I_n = I_{max}(C_1 - C_{min}) / (K_m + C_1 - C_{min})$$

(式中: I_n 为养分的净吸收速率; I_{max} 为最大吸收速率; K_m 为最大吸收速率之半时的溶液养分浓度与 C_{min} 之差; C_{min} 为 $I_n = 0$ 时溶液中的养分浓度)

以及将根毛的影响(I_n)包括在养分向根迁移的连续性方程中〔7〕:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r D_e \partial C_1}{\partial r} + \frac{V_0 r_0 C_1}{b} \right) - \frac{I_{nh}}{b}$$

(式中: r_0 为根的半径; b 为土壤固相养分对溶液养分的缓冲力; I_{nh} 为根毛的净吸收速率)。此外也在模型中考虑了单位根长所利用的土壤容积随根长增加而变化以及对吸收所产生的影响〔8〕。有的还包括了根毛的影响,从而使该模型能解释多种植物对P、K吸收的差别〔9〕。我们建立了在内边界上采用非线性边界条件,外边界上考虑根间竞争的机理性模型,用以预测植物对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收〔10〕。总之近年来建立的若干土壤养分吸收模型其依据的原理并无不同,区别在于模型的成分,即包括的重要因子的多少与根系生长函数(公式)选择的不同。除以上所述迁移—吸收模型之外,近年来Nye和他的同事还在柱坐标和直角坐标系下建立了迁移—化学反应模型,用以研究铁向水稻根的扩散和氧化作用以及根分泌的 H^+ 和 HCO_3^- 对根际的酸化和碱化,定量地处理根际土壤pH的变化等〔11,12〕。

二、模型的参数及其测定

较有效的土壤养分吸收模型所需的参数包括植物根系吸收特征,土壤养分供应特征、根和根毛形态以及水流量等参数。各种模型不尽相同,如 Claassen 等的模型有11个参数,而 Itoh 等的模型含有15个参数。各个参数在模型中的重要性也不一样。灵敏度分析表明,在土壤参数中,土壤溶液的初始浓度(C_{i1})最重要,其次是有效扩散系数 D_e ;对于植物参数,最大内流量(I_{max})最重要,继之是根的半径(r_0)和 K_m (米氏参数),所以这些参数的准确测定关系到模型预报精度的高低。近年的研究表明,在水培试验中测得的植物吸收动力学参数, I_{max} 、 K_m 和 C_{min} 不是一个常数。它随着根龄,介质的pH和竞争离子,植物的养分含量和所采用的测定方法等因素而不同〔13-15〕。所以水培条件下测得的这些参数应用于土培时,尤其是在田间条件下还存在不少问题。如何在土培条件下测定这些参数仍是一个未曾解决的问题〔16〕。近年来对此作了有益的尝试〔17,18〕。对土壤传输性参数,例如对 K^+ 的有效扩散系数(D_e)的测定大多采用离子交换膜法,由以下公式算出:

$$D_e = M t^2 \cdot \pi / 4 C_0^2 \cdot t$$

式中 $M t$ 为在时间 t 内进入单位面积离子交换膜中 K^+ 离子的总量(mg/cm^2); C_0 ,可扩散性离子的总浓度, π 为常数3.1416。但近年来已认识到可扩散离子总浓度并非速效性钾的总含量(C_0),而是速效钾减去最低钾的含量(ΔC)。土壤中磷的 D_e 的测定仍存在问题,因为采用P同位素法仅测得 P^{32} 的自扩散系数。为此提出了双扩散池法测定P的总扩散,从而计算P的平均有效扩散系数 \bar{D}_e 〔19〕:

$$\bar{D}_e = M t^2 \cdot \pi / A (C_2 - C_1) t$$

式中, $M t$ 为在时间 t 内已扩散的P量; A 为扩散的横截面; C_1 和 C_2 分别为1、2两半扩散池中用 4mol/LHCl 提取的P的浓度; t 为时间(秒)。

三、应用

数学模型的最大长处是,当模型经验证后能进行“计算实验”,借以阐明尚无法测定的一些根际过程和相互作用。以下是近年来应用的一些实例。

(一)土壤容重对大豆钾素吸收影响的模拟

由于实验不能区分增大土壤容重影响根系生长和钾的吸收速度何者更为重要,曾用考虑根间竞争的数学模型研究了这个问题。结果表明,土壤容重对减少根的生长较其增加钾的吸收速度的影响更大,所以钾的吸收随土壤容重的增加而降低〔20〕。

(二)研究钾的有效性和土壤水分的关系

土壤水分含量对钾的亏缺剖面的形状有显著的影响,低含水量时产生窄的亏缺曲线和陡的浓度梯度〔21〕。因此,同样土壤含钾量时钾的吸收速度决定于土壤水分含量。

(三)估量土壤pH对根系吸收磷的影响

以往的工作表明,土壤溶液中P的浓度和根系生长是决定磷吸收的主要因子,因此用模型计算磷的吸收,通常都假定pH对P的吸收没有影响。最近的研究中发现,在pH6.7以上时必须考虑P的形态对 I_{max} 的影响,即需要假定 HPO_4^{2-} 的吸收速度仅为 $H_2PO_4^-$ 的1/10时,计算值与实测值才能在整个pH范围内相吻合〔22〕。

(四)油菜根系分泌物对磷矿粉中磷的活化

不少试验证实,油菜作物由于缺P引起根分泌有机酸而导致根际酸化,因而能增加磷矿粉的溶解度。Hoffland用考虑根间竞争、根毛的影响但不包括根系分泌物活化作用的模拟模型进行这方面的研究。由差减法计算,即根据生长在施磷矿粉的基质中油菜实际吸收的P量减去模型计算的P量则为油菜从磷矿粉中释放的P量。计算结果表明,油菜发芽后18天所吸收的总磷量中的94%来自有机酸分泌物增加磷矿粉的溶解度而活化的磷〔23〕。

(五)磷肥品种对磷吸收影响的模拟

因为模型能精确预报磷的吸收,所以Barber应用模型估量磷肥品种对磷吸收的影响。结果表明,模型不仅能预测不同磷肥的相对吸收,而且能说明各种磷肥差别的原因,主要是由于它们对pH影响的不同〔24〕。

此外,Mulins曾用数学模型模拟了污染土壤中植物对Cd、Zn的吸收,实测值与计算值也相当的吻合〔25〕。

总之,经过二十几年不少土壤学家的努力,确实机理性数学模型已能对根际土壤中的养分分布和植物的吸收作出合理的预测,证实了对土—根系统现有认识的可靠性。其预报精度亦日益提高,它的实际应用也已可能。尽管如此,机理性模型能否作为一种常规方法成功地应用于很广泛的土壤供应和植物需求的条件,与较长的植物生长期,尤其是在田间条件下应用,看来仍有待于实际的检验。特别是在植物吸收参数的测定和某些过程的定量化方面还要做不少的工作,所以详细了解影响土壤养分有效性的众多因子及其相互作用仍是十分重要的。

参 考 文 献

- 〔1〕 Nye, P. H. et al., Solute movement in the soil-root System. Studies in Ecology, Vol. 4, Bluckwell, Oxford, (1979).
- 〔2〕 Barber, S. A., Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach, John Wiley and Sons, New York, 1984.
- 〔3〕 Nye, P. H. et al., Plant and Soil, 30: 459—472, 1969.
- 〔4〕 Claassen, N. et al., Agron. J., 68: 961—964, 1976.
- 〔5〕 Cushman, J. H., Soil Sci. Soc. Am. J., 43: 1078—1090, 1979.
- 〔6〕 Claassen, N. et al., Plant and Soil, 95: 209—220, 1986.
- 〔7〕 Itoh, S. et al., plant and Soil, 70: 403—413, 1983.
- 〔8〕 Hoffland, E. et al., Plant and Soil, 124: 149—159, 1990.
- 〔9〕 Fochse, D. et al., Plant and Soil (submitted) 1990.

- [10] Xuan Jia-xiang et al., *Pedosphere*, 1: 97—108, 1991.
- [11] Kirk, G. J. D. et al., *Transactions XIV. Congress of international Soil Sci.*, Vol. II: 153—157, 1990.
- [12] Nye, P. H. *Adv. Plant Nutr.* 2: 129—153, 1986.
- [13] Junk, A. et al., *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149: 411—427, 1986.
- [14] Junk, A. et al., *Plant and Soil*, 124: 175—182, 1990.
- [15] Mullins, G. L. et al., *J. Plant Nutr.* 12: 485—496, 1989.
- [16] Seward, P. et al., *Plant and Soil*, 124: 303—307, 1990.
- [17] Seeling, B. et al., *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 153: 301—303, 1990.
- [18] 宜家祥, 钾离子向稻根迁移的数学模型, *土壤学报*, 19: 296—303, 1982.
- [19] Kaselowsky, J. et al., *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 153: 81—91, 1990.
- [20] Silberbush, M. et al., *Comm. Soil Sci. and Plant Anal.*, 14: 286—296, 1986.
- [21] Kuchenbuch, R. et al., *Plant and Soil*, 95: 221—231, 1986.
- [22] Barber, S. A. et al., *Plant and Soil*, 124: 183—186, 1990.
- [23] Hoffland, E. et al., *Transactions XIV. Congress of the international Soil Sci.*, Vol. II: 170—175, 1990.
- [24] Barber, S. A. et al., *Transactions XIV. Congress of the international Soil Sci.*, Vol. II: 136—140, 1990.
- [25] Mullins, G. L. et al., *Soil Sci. Soc. An. J.*, 50: 1245—1259, 1986.

.....

(上接第285页)

- [3] Sharpley, A. N. et al., *Root extraction of nutrients associated with long-term soil management*, *Adv. Soil Sci.*, 19, 151—200, 1992.
- [4] 莫淑勋等, 猪粪、紫云英、稻草分解过程中氮磷转化的初步研究, *土壤通报*, NO.5, 21~25, 1976.

.....

(上接第303页)

- [7] Tarafdar, J. C., *Aust. J. Soil Res.*, 19: 181—184, 1981.
- [8] Tarafdar, J. C., Chhonkar, P. K., *Z. pflanzernaehr. Bodenk.* 141: 347—351, 1978.
- [9] Haussling, M., Marschner, H., *Biol. Fertil. Soils.* 8: 128—133, 1989.
- [10] Amann, C., *Z. pflanzernaehr. Bodenk.* 152: 181—189, 1989.
- [11] Chhorkar, P. K., *J. of the Indian Society of Soil Sci.*, 32: 266—272, 1984.
- [12] Dodd, J. C., Burton, C. C., Burns, R. G., Jeffries, P., *New Phytologist.* 107: 163—172, 1987.