

溶质在土壤-根系统中的运动

〔英〕 P. H. 奈 P. B. 廷克 著

科学出版社

溶质在土壤-根系统中的 运 动

〔英〕 P. H. 奈 P. B. 廷克 著

夏荣基 周文嘉 译

科 学 出 版 社

1 9 8 5

内 容 简 介

本书详细描绘了植物养分和其它溶质随着植物的吸收而在土壤中的运动。前五章描述根围中溶质运动的基本过程。第一章略述关于这个问题的概念的历史，并用连续性方程作一简单的计算；第二章讨论水分通过土壤输向植物的运动；第三章描述溶质在土壤固相、液相和气相之间是如何分配的；第四章分析溶质在局部的和通过扩散的运动；第五章集中讨论植物根和根对溶质的吸收速率。后三章是将前述的过程应用到愈来愈复杂的系统中，将物质在土壤中运输和植物吸收的研究范围扩大到一种作物或整个植物群落。书中以能量观点和数学处理方法，结合实验验证，对溶质运动和植物吸收的机制进行探讨，对前人的工作也作了比较好的概括。

本书可供土壤、农化、植物生理和大专院校有关专业的科研和教学人员参考。

P. H. Nye P. B. Tinker
**SOLUTE MOVEMENT IN THE
SOIL-ROOT SYSTEM**

Blackwell Scientific Publications, 1977

溶质在土壤-根系统中的运动

〔英〕 P. H. 奈 P. B. 廷克 著

夏荣基 周文嘉 译

责任编辑 洪庆文

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1985年 7 月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1985年 7 月第一次印刷 印张：12 3/8

印数：0001—3,000 字数：274,000

统一书号：13031·2934

本社书号：4292 13—12

定价：2.90 元

译 者 的 话

十九世纪以来，随着农业生产的不断提高和基础科学的迅速发展，人们运用科学知识对植物营养问题开展了愈来愈多的研究。由于研究的日益深入，人们对这个问题的认识亦由静态辨认进入到动态过程的探索；由定性的描述进入到定量的计算；由物质运动的表现现象进入到能量变化的内在联系。通过计算技术的应用，目前已经可以设计某些比较简单的模型，预测土壤中一些成分的动态和根对简单养分的吸收，例如盐分在土壤剖面中的季节性变化等等。

由于植物生活在一个不断变化着的气候环境中，土壤本身又是一个不均一体，土壤生物化学过程瞬息多变，以及植物根系活动无时无刻不在改变其自身的生活环境（包括根围微生物的千变万化），使得土壤养分动态和植物吸收的不少方面，还未彻底弄清楚，许多植物参数仍为经验性的。因此要进行田间生长作物的系统分析，但目前尚难得到满意的结果。

本书力求应用数学方法，以连续性方程为基础，从能量概念出发，对水分、溶质在土壤中和进入植物的运动作定量处理，尤其是应用数学模型的办法去研究植物营养的动态过程，包括土壤和跨越土壤-植物边界的一系列过程。对于比较系统地使物质运动从定性描述进入到量化这点上，本书是有其特色的。

本书第一章至第五章由夏荣基译出，第六章至第八章由周文嘉译出，全书由夏荣基校订。

由于水平所限，错误之处在所难免，敬希读者随时指正。

1978/09

前 言

在本书中，我们详细描绘了植物养分和其它溶质如何随着植物的吸收而在土壤中运动。我们所研究的植物，可以是单独生长的，或者是一种作物、多种作物，或是一个自然群落。它们的根与土壤相互作用的途径，并没有象它们的枝条对大气起的反应那样完全弄清楚了，因为根-土系统既复杂又难以测定。但是，我们的目标是要充分了解根围的各种过程，使我们能够逼真地进行模拟，并预测在自然条件或我们自己的措施变化时的影响。虽然这个目标尚没有达到，我们认为这种方法是正确的，并且具有巨大的潜力。作为一个生态学家，A. R. Clapham (1969) 曾说过：“我们必须向着目标的总方向逐渐前进。重点是了解比目前我们所知道的更多的比较数值。在初期几轮的模型制作中，这个系统的哪些组成可以有把握地忽略不计？”

目前，世界上的富裕国家对于主要营养元素在重要作物上的效果，已经积累了大量的经验，对于其它元素也知道了梗概。贫困国家在长期停滞之后，亦迅速地得到类似的经验。但是，这种经验是局限在现存的或过去的条件之下，新作物品种和新栽培措施的出现，使得需要进行重复的田间试验，以便对以前的结论重新评价。对一种经济上重要的作物来说，这种需要是能够得到满足的，例如对衣阿华州的玉米，马来西亚的橡胶或东英吉利的糖用甜菜。但更经常的是资源与一系列作物或植物不相适应，或者是土壤、气候和措施的变化多端。举例来说，在英国，商业种植的蔬菜便在二十种以

上，每种蔬菜又有若干个品种。种植蔬菜的土壤很不相同，例如从沃伯恩 (Woburn) 的砂土到芬斯 (Fens) 的泥炭土，年雨量的范围从西部的1500毫米到东部的500毫米，而且季节性变化相当大。除草剂的应用，常常使作物不必种植成行，而采用了新的方式。一年之内，氮肥和磷肥的费用有四倍的变化。在这样的环境之中，怎能不对这些变数可能存在的影响作基本的透析而提出可靠的建议呢？

近年来，不断增加的使人无所措的杀虫剂、杀菌剂、除莠剂、刺激剂、抑制剂、放射性核素、重金属、毒素和各种废弃物，有意地或无意地加入到土壤中，我们必须知道它们对植物的影响，动物吃入后的影响，以及排水水质所受的影响。举例来说，推荐的农药施用率是在不断改变的，对于其结果如何估计？应用田间试验不可能概括所有的各种情况，而模拟可能是获得答案的唯一方法。

这些现象是动态的：土壤溶质移动和植物生长；然而正如我们在引言一章中所述，二者的联系只是近来才弄清楚。因此我们认为说明溶质运动过程是适时的。到目前为止，要将包括溶质通过土壤的运动，和它们被伸展的根系吸收的各个单独过程联系起来，是很困难的，因为数学是很困难或单调乏味，由此必须作出简化的假设。例如，溶质的吸收速率直接和它的浓度成比例，外部变数的变动如降雨，是难以详细地包括在内的。计算机免除了这些障碍，成为组装这个系统各个部分的必不可少的工具。因此，科学家在研究单一的过程时，能够恰当地确信，如果他可以机械地或随机地对这个过程进行定量的描述，则这个过程就很容易合并到一个较大的系统中去。

确定一个系统中的各个过程，并对它们进行定量的作法，有助于我们找出在我们理解上最严重的缺陷，以便提出

准确的问题和在受控制的环境下设计一些试验来解答它们。在我们依靠一些试验来描绘这些过程时，要记住 Fredrick Bawden 爵士的评论：“计算机模型的麻烦是，你灌输你自己的偏见，它们就将之归还给你”（英国广播公司，1972年1月）。所描述的大多数机制，已经用来解决主要营养元素的问题，因为它们在田地中是首要的。但它们与其它溶质（有变化地）有着同等的关系，无论有利或有害的都是如此。

甚至对于各环节的运输过程有着详尽的了解，也需要田间试验和观察。土壤通常都是十分不均一，而植物的行为又太复杂，我们用物理-化学方法不可能得到准确的结果，这一点是 Passioura (1973) 所强调的。但是一个好的模型或理论可以提出问题，并将已被忽略或低估的处理或效果结合起来。它有助于决定是否值得进行新的试验。如果没有它，则几乎任何实验方法都值得一试，计算机对数据的令人惊奇的相互联系能力，显然保证了丰富的原材料供应。即使如此，由于缺乏一个连贯的模型，主要的测定也常被省略了。用了很大花费而得到的许多试验结果，我们不能利用，只是因为很容易作的一项测定，例如根的长度，被忽略了。

此外，看来没有充分认识到，统计技术如多重回归并不能在变量之间产生因果关系。在我们的题目中，这些并不是简单的，例如方程式 7.12，只能从洞察所包括的机制内部并推论而得。

自然生态系统或作物生产的大多数模型，都是很粗糙的，目的是建立起一个框架，以后再详为充实它。我们的方法不同，我们分析小规模的工作，在将它们结合成一个比较复杂的系统以前，常常是一些简化的系统。头五章描述根围中溶质运动的基本过程。第一章略述关于这个题目的概念的

历史，并用连续性方程作一简单的计算，后者构成了大多数定量论述的基础。第二章讨论在足够的深度中水分的运动，以说明它应如何引入溶质运动的模型中。第三章描述溶质在土壤固相、液相和气相之间是如何分配的；第四章是它们在当地运动，特别是通过扩散的运动。第五章集中在植物根和我们从溶液培养所得关于溶质吸收速率的知识，在其后的三章中，这些过程结合到不断增加复杂性的系统中。第六章研究了整株植物根系周围土壤中的复杂变化。第七章叙述了单一整株植物根围内的相互作用，这种论述在第八章加以发展，包括一种作物或植物群落。

我们没有打算用这些方法去研究嫌气土壤，因为它们所引起的问题是十分复杂的，要适当处理这些问题——如果可能的话——将过分地增加这本书的篇幅。

我们假定读者懂得一些土壤科学，而懂得植物生理学较少。我们并不作详尽的评述，而是论述我们所理解的大多数工作。可是在有争论之处，我们比较彻底地讨论其证据。

我们应用了国际制的单位和它的缩写。由于我们所引用的许多结果是使用厘米的，例如扩散系数几乎通常都报道为厘米²/秒，我们规定地用它作为长度的最合适的单位。

主要符号表

符号	定 义	单位
A_L	叶面积	厘米 ²
A_R	根表面积	厘米 ²
C	土壤中可扩散溶质的浓度	摩尔/厘米 ³ 土壤
C_g	在气相中溶质的浓度	摩尔/厘米 ³ 气体
C_l	在液相中溶质的浓度	摩尔/厘米 ³ 液体
C_s	在固相中溶质的浓度	摩尔/厘米 ³ 固体
D	溶质在土壤中的扩散系数	厘米 ² /秒
D^*	溶质在土壤中的分散系数	厘米 ² /秒
D_g, D_l, D_s	溶质在气相、液相和固相中的扩散系数	厘米 ² /秒
D_1^*	溶质的纵向分散系数 (方程式4.22)	厘米 ² /秒
E	净同化率	克/厘米 ² /日
F	溶质的流量	摩尔/厘米 ² /秒
G	Gibbs自由能	焦耳
I	流入 (单位长度根轴的净吸收率)	摩尔/厘米/秒
I_w	单位长度根轴的吸水率	厘米 ³ /厘米/秒
K	导水力 (方程式2.2)	厘米/秒或 厘米 ² /秒/巴
L	根长	厘米
L_A	单位面积土地表面下的根长	厘米/厘米 ²

L_F	每株植物的根长	厘米
L_v	根密度 (单位容积土壤的根长度)	厘米/厘米 ³
LAR	叶面积比率 (A_L/W)	厘米 ² /克
M	分子量	
M_t, M_∞	在时间 t 和 ∞ 时吸收的数量	摩尔
N	当量部分	
p	外压力	巴 (1 巴 = 10^5 帕斯卡 = 10^5 牛顿/米 ²)
R_w	相对生长率 (dW/dt) / W	1/日或1/秒
S	单位吸收率 (每单位鲜根重的吸收率)	摩尔/克/秒
U, U_R, U_S	植物、根、枝条的溶质含量	摩尔
V	体积	厘米 ³
V	单位鲜重的吸收率 (第五章)	摩尔/克/秒
W, W_R, W_S	植物、根、枝条的干重	克或毫克
W_{RF}	根的鲜重	克
X	在干的植物物质中溶质的浓度	摩尔/克
a	根轴的半径	厘米
a_h	根毛的半径	微米
b	土壤的溶质缓冲力 (dC/dC_1)	
f_g, f_l, f_s	气相、液相和固相中的扩散阻抗系数	
k	速率常数	秒/或日/或年
q	水分 (单位作物面积的吸收速率)	厘米 ³ /厘米 ² /秒
r	径向距离	厘米
t	时间	秒或日或年
v	水流	厘米 ³ /厘米/秒

v_g, v_l, v_s	气相、液相和固相的体积部分		
z	离子电荷		
α	根吸收能力 (F/C_{1s})		厘米/秒
$\alpha\alpha$	根的需求系数		厘米 ² /秒
β	气体溶解系数 (C_l/C_g)		
γ	流的参数 (方程式7.5)		
δ	未扰动层次的厚度		微米
θ	按体积计的土壤水分部分		厘米 ³ /厘米 ³
λ	充填系数 (方程式4.22)		
μ	化学位势		焦耳/摩尔
μ_e	电化学位势		焦耳/摩尔
ϕ	水位势 (第二章)	巴 (10^5 帕斯卡)	
ψ	水基模位势 (第二章)	巴 (10^5 帕斯卡)	
	下角标记		
a	在根表面	g	气相
h	根毛	i	起始值
l	液相	s	固相
t	在时间 t 时	w	水

注：在本书中如某一符号另有含义，则加以注明。

目 录

前言	(vii)
第一章 引言	(1)
当前概念的 来源	(1)
1.1 基础	(1)
1.2 现代时期的开始(1940—1960)	(4)
1.3 更广阔的透视	(9)
1.4 连续性方程	(11)
第二章 水分通过土壤至植物的运动	(15)
2.1 水势	(15)
2.2 土壤中水分的转移	(17)
2.3 植物所利用的水分	(25)
2.4 根中的水分运动	(35)
2.5 田间作物的吸收水分	(37)
第三章 土壤中固相、液相和气相间的溶质交 换	(38)
无机离子	(38)
3.1 代换性阳离子——土壤溶液的组成	(38)
3.2 缓冲能力	(47)
3.3 不溶的化合物	(50)
3.4 具有可变电荷的阳离子: 氧化-还原反应	(51)
3.5 阴离子的吸附	(51)
3.6 固体和溶液间离子交换的速度	(58)
3.7 有机质中的矿质化作用和固定作用	(64)
3.8 土壤溶液的组成	(66)
有机溶质	(71)

3.9 有机物的吸着反应	(71)
第四章 土壤中溶质的局部运动	(81)
4.1 扩散	(81)
4.2 在土壤中的扩散	(90)
4.3 溶液中的质流和分散	(103)
4.4 气体的对流和扩散	(106)
4.5 机械运动	(107)
第五章 根系在溶液中的吸收特性	(109)
5.1 根的形态	(109)
5.2 离子吸收机制	(117)
5.3 离子吸收动力学	(124)
5.4 根的界限状况——溶液培养中浓度对整个根 系吸收速率的影响	(132)
5.5 影响根吸收能力 α 的因素	(140)
第六章 土壤中近根表面的溶质运输	(153)
靠近一支单独根的质流和扩散的定量处理	(158)
6.1 根围中扩散的理论	(158)
6.2 在有限的质流下靠近根处扩散的理论的实验 证明	(164)
6.3 具有根毛的根	(173)
6.4 同时进行的扩散和对流	(177)
6.5 土壤水分含量对单一根的溶质吸收作用的 影响	(184)
根际的根变态	(190)
6.6 物理的影响	(191)
6.7 化学的影响	(194)
6.8 微生物的影响	(204)
6.9 结语	(221)
第七章 土壤中单株植物的矿质营养	(222)
引言	(222)

7.1	根系形态的测定	(222)
7.2	影响土壤中根系形式和分布的因素	(232)
7.3	营养吸收和生长的关系	(249)
7.4	单一根系内根的竞争吸收	(259)
7.5	整株植物模型	(279)
7.6	结 论	(286)
第八章	溶质在田间条件下的运动和吸收	(287)
引 言		(287)
8.1	田间根的检出和测定	(288)
8.2	田间根的分布和密度	(289)
8.3	水分传递和作物吸收	(301)
8.4	盐分在剖面中的传递	(304)
8.5	田间作物对养分的吸收	(316)
8.6	植物之间的竞争	(326)
8.7	群生植物吸收养分的理论方面	(332)
8.8	结 论	(341)
参考文献		(343)

第一章 引言

现在公认在一定的生长条件下，根对溶质的吸收，与该溶质在土壤溶液中的浓度和土壤对它的缓冲程度有关。虽然这些表面上简单的概念在一个半世纪以前已经提了出来，只是在最近才解释清楚，足以作为详细了解溶质对生长在土壤中的植物的作用的基础。特别是它们因根与其伴随的微生物的特殊效应而曾显得模糊不清：根不但对溶质浓度的反应有着很大差异，而且是改变了它们近处的土壤性质，对于这些性质我们却是在整个土壤中测定的。因此只是在过去20年左右的时间内，我们才达到Liebig在1840年清楚地给我们写下的目标：“一个合理的农业系统，必须以正确了解植物营养的方法，以及土壤的影响和肥料对它们的作用为基础。”

当前概念的来源

1.1 基础

John Russell (1937) 曾充分描述了直到本世纪开始为止这个时期的土壤和植物的关系的历史概念。虽然Jethro Tull在1731年不能肯定硝石、水、气、火或土就是植物的食料，但John Woodward (1699) 却在早30年以前，似已抓住了由于蒸腾水流而造成溶质流向着根系这一主要概念了，当时是将绿薄荷栽培在简单的“养分”培养液中，他写道：“现已证明，在雨水、泉水和河水中含有相当数量的（陆地）

物质；进入植物内部的最大部分流体并不是停留在那里，而是通过它们的孔隙排到空气中：一大部分的陆地物质与水混合并随水进入植物，由于水中或多或少含有那类物质，植物便或多或少地按比例增长；由此我们可以合理地推论，构成植物的是土而不是水。到1804年，de Saussure指出，根是有选择性的，能以不同的比率吸收水中的盐类而排斥另一些盐类，因而后者在根外溶液中变得更浓。de Saussure用挤压法分离出了土壤溶液。但早在1866年，Schloesing便已用经洋红染色的水置换土壤孔隙中的溶液并收集起来，这个方法仍然是最简便的。Whitney和Cameron (1903) 进一步发展了土壤溶液是植物养分的主要来源的概念。

Forrester和Giles (1971) 记述了关于溶质-固体吸附研究的一段令人神往的历史。土壤从溶液吸附物质的能力——因而使场院的水和其它带色的水变清和没有气味——已久为人所知晓，但是关于土壤缓冲作用的清晰的叙述，则引自Gazzeri (1823)：“壤土，特别是粘土，保持着进入土壤的可溶性物质，并保留着它们以便逐渐将它们供应给植物，以适应植物的需要”。Lambruschini (1830) 写道：“营养液体和一个处理得很好的土壤的组成，依靠一种特别的吸引力，参加到一种特殊的结合中。这种结合并不是弱得足以使营养成分很容易丧失和使植物过于迅速地将它们消耗；也不是结合得很强，生长的植物的生命活动可以逐渐克服它。”这类概念成为1845—1852年间Huxtable、Thompson和特别是Way (1850, 1852) 所作的试验的先驱，由此而确立了“盐基代换”的要义。

与此同时，Daubeny (1846) 考虑了土壤全磷中那一部分是对植物有效的，断言其活性部分是溶解在饱和以二氧化碳的水中的那部分。正如Larsen (1967) 所指出的，Daubeny

认为“如果要土壤磷的研究结果有意义，则土壤必须尽量保持化学上的完整……。在其后的世纪中，他的原理被大大地违反了，而只是在最近的时期中它才得到恢复。”

这些关于土壤溶液和其缓冲性的概念，不得和其它概念进行斗争，这些概念认为植物的养分吸收能力，决定于它们根系中汁液的总酸度 (Dyer, 1894)；它和根分泌的二氧化碳形成碳酸，可使“容易有效”矿物中的一部分养分变为有效 (Czapek, 1896)。

值得注意的是，在这个世纪的前四十年，除了了解土壤粘粒的代换化学和结构以外，在这方面没有真正的新发展。农业化学家和植物生理学家们互相之间似乎很少通消息。前者专心于找出一种能萃取土壤中的“有效”养分的适当萃出剂，第一个例子是Dyer的1%柠檬酸 (1894)，随后的许多人都是基于要找出“有效”部分。在这个时期中，研究土壤养分问题的主要方法是田间试验，藉助于 R. A. Fisher (1925) 所发展的强有力的统计学方法，进行设计和解译。在与实践的关系上，这种方法是十分成功的，并成为现代施肥法的基础。然而为了科学的目的，它是被过分强调了，因为它使得农业化学家满足于肥料反应和化学萃出液之间的相关和回归，因而妨碍了寻求其结果的更根本和详尽的解释。

同时，植物生理学家避开了象土壤这样复杂的基质而喜好养分培养液，建立了“必需的”营养元素，并测定了影响盐分吸收的主要代谢系数。不幸的是，他们的试验通常都是在比土壤溶液的浓度高得很多的浓度下进行的，因此他们工作的定量方面，常常和土壤条件相差太远。在这个时期中，加利福尼亚工作者们 (Hoagland, 1944) 在试图跨越土壤和营养液栽培植物之间的鸿沟方面，是个例外，可能是因为在他们的土壤中盐分浓度非常之高。