

# 物理的土壤学

灌溉与非灌溉土壤的物理学

[美] S.A.泰勒 著

G.L.阿斯科拉夫特 修订编校

华孟 陈志雄 杨苑璋 叶和才 段孟联 译

华孟 校

农业出版社

# 物理的土壤学

灌溉与非灌溉土壤的物理学

[美] S. A. 泰勒著

G.L. 阿斯科拉夫特修订编校

华 孟 陈志雄 杨范璋 译  
叶和才 段孟联

华 孟校

农业出版社

## 内 容 简 介

本书以目前世界流行而在我国尚未广泛介绍的土壤水能量观点,根据灌溉的需要,从基本原理上,系统地说明了土壤水的能量关系、土壤水运动、土壤水测定以及田间土壤中水的保持和流动。本书还从生态学角度阐述了土壤水与气候和植物的关系,以及土壤水和土壤通气和温度关系。另外,本书还介绍了土壤胶体系统、土壤固体和土壤结构等土壤基模特征。最后,全书以丰产灌溉、不利条件下的灌溉和灌溉方法等实用技术原理结尾。

本书对基本原理阐述清楚,由浅入深,适宜于稍具土壤学基础的农学、林学、水利学和农田水利学、土壤学、植物学、农业气象学和气象学等方面的科研与教学人员、大学生阅读参考。本书也适宜做为大学“土壤物理学”和“土壤学”课程的主要参考书。

本书的前言、序言、第二、三、四、五和十一章由华孟译,第一、七、九、十和十四章由陈志雄译,第八、十二、十三章由杨苑璋译,第十五、十六章和附录由叶和才译,第六章由段孟联译。全书译文由华孟审校。全书图幅由陈志雄、杨苑璋绘制。

### 物 理 的 土 壤 学 灌溉与非灌溉土壤的物理学

〔美〕S. A. 泰勒著

G. L. 阿斯科拉夫特修订编校

华 孟 陈志雄 杨苑璋 译

叶和才 段孟联

华 孟校

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米16开本 23.5印张 550千字

1983年8月第1版 1983年8月北京第1次印刷

印数 1—4,900册

统一书号 16144·2521 定价 2.90元

## 前 言

本书在 S. A. Taylor 去世数年后出版了。本书象征着对他和他在土壤物理学领域中所做贡献的纪念。在他从事专业事业的最初年代中，他就抱有写成本书的理想。他经常谈到需要有这样一本教科书，能包括最新的科学发明和其在土壤—水—植物关系中的应用。

论题的组织 and 论述的途径代表他在土壤物理学领域中的观念。虽然 Taylor 博士主要的事业是水在土壤中的物理学，但他不断探求着联结科学原理与实际的问题。

在犹他州大学，他最初年份的专业活动主要是从事作物根层内水势的测定和控制。我相信，他发表的有关水势对作物生长影响的研究工作，是这个领域中最好的。在这些跨学科的研究中，许多作物生产因素是成几种结合的方式进行研究的。所得资料在指明作物高产和最高效的水利用途径上，曾有显著意义。

Taylor 博士同样精通田间和试验室工作。在试验室工作中，他发展了一些观念，拓宽了我们有关热力学应用到水运动（液相和气相的）的水平。这些研究产生了他最后尽力的工作，寻求蒸发和蒸腾所损失的水与气候之间的关系。

Taylor 是精力充沛、献身于科学的人。他把自己完全贡献给他的科学事业。在犹他州，Taylor 博士和他的学生们，被许多人认为是，理想的学术小组。他们工作的成果是他们一致努力所取得的。许多他的学生们将在本书中发现，他们是讨论中提到的人和实验的参加者。

本书填补了土壤科学领域中一项重大的需要。全世界范围正在增强对水的关注，使得本书以及 Taylor 博士的其余著作，在朝向解决许多土壤水问题的步骤上有重要意义。学生们和专家们一样，应当发现这本著作是通向专门知识的坦途和对未来年份的可靠参考书。

D. W. Thorne

## 序 言

S. A. Taylor博士1949年在康奈尔大学接受博士学位，并在同年被任命为犹他州立大学土壤物理学家。他研究土壤物理学的途径是生态学的；他称他的初级土壤物理学课程为物理的土壤学就包蓄着这样的观点。土壤物理学界中很少著者在那个时候就认识到这样研究途径的价值；所以，Sterling发觉必须准备为自己的观点做许多的说明。他的讲课材料的篇幅成为极其巨量的，在1964年他发行了一本油印版本教材称为灌溉土壤的物理学：土壤—植物—水关系。虽没有序言，Taylor博士在他写的讲稿中指明了自己的研究途径——在本书中所保持的途径。

“研究土壤的物理现象与大气气候、植物生长、土壤性质和人类活动（如灌溉）的关系就称之为物理的土壤学。物理的土壤学或土壤气候学与基础土壤物理学的重要区别在于，前者的着重点是放在物理现象在与其它环境因素相互作用时的效应——生态学的研究途径；而后者的最大着重点是在个别现象的主要效应上。

“本书在于着重说明，土壤物理过程和条件与大气环境和生长着的植物的相互作用；但同时，土壤物理过程也加以讨论以成为了解上述相互作用的基础。因此，这是一本物理的土壤学或土壤气候学的基础书籍，但它也可以当成是土壤物理学的基础教科书。书中所包括的原理是直接朝向人为创造的生态系统，但是这些原理也同样适用于自然的生态系统。

“确定土壤水能量状态的各种简单化的方法，使得土壤物理学家们在订立最高生产的灌溉制度中有了重要的进展，同时即使在湿润地区，灌溉现在也已被认为是作物生产的一个因素。所以，利用现有的土地和水，作物生产可以大大地提高。究竟能有多大进步还在争论之中，但现存的事实表明，在提高生产上适当的水分管理可以与适当的施肥起同样的作用，或者还能超过它的作用。

“物理的土壤学中以往的研究工作（大部分在本书中摘要地说明了）指出，在那些阐明了基础和基本的自然关系的地区，是会帮助农业家们提高生产的。应当研究植物与其整个环境的关系。在所有的植物研究中，应当控制土水势或最少应当测定它。必须想出和发展测定和综合大气变量的方法。保持土粒在一起的各种力和有关土壤结构生成的基本知识是非常需要的。在土壤通气和土壤水条件的关系上还必须做更详尽的工作。植物水势在蒸腾、流通、运输、呼吸和生长上的影响也需要进一步研究。发展灵活的灌溉分配系统、能够以不同的速率和时间长短供给水以满足土壤吸水速率变化特征的需要，还必须进行工程上的研究。

“应当向生产者们在灌溉者们用示范使之熟悉：根据众多的环境生物物理因素影响下的土壤条件和植物需水量，采用最有效的灌溉方法。有些较进步的栽培者们现已使用先进的方法，但大多数仍然使用原始的灌溉方法，这些方法更多地是由机会而不是由设计发展起来的。如果人类要在和平中生存，如以笨拙的和无效率的方式使用土壤和水去限制生产

的发展，那末世界就不能供养人类的生存了。”

Taylor 博士在1965年秋，将他的略加重写的讲课材料提交给W.H. Freeman公司。原稿经过精细的审阅，并在 Taylor 博士最后的疾病之前进行了编辑。由于原稿在出版前需要重写，但在1967年6月 Sterling 去世后，就闲置了起来，直到1969年犹他州立大学当局才指定我对原稿进行了修订。

有几个因素使得修订是必需的，绝大部分是与时间的流逝有关。Sterling 是促进在土壤和植物水上采用势能观点的一位带头人。当他撰写原稿时，他还在企图说服人们使用这个途径，因而在开始时使用旧的并逐渐引导至新的术语。然而，现在势能观点已被普遍接受。所以，我利用它做为标准，简单地联系到过去的途径。原稿中使用的术语和符号也需要统一。

我们对土壤水和其被植物蒸腾的了解已有显著的进展，使得第2、3、7、8和15章部分地陈旧了。因此，这些章全部重写，第15章是由 J.W. Biggar 和 D.R. Nielsen 重写的。此外，书也改为能更正确地反映本书的宽阔领域的名称了。

重写原稿中，我特别关心加入基本知识。Sterling 对他的课题是极为精通的，以致我想他趋向于忘记了所有的人不是生来就具备土壤基础物理性质的基本知识。在他的原稿中，他常是一开始就讨论例外的案例，而没有先建立适用于例外的基础准则。

在重写原稿中，我得到了相当多的帮助和意见。大部分意见已被接受；在某些情况下拒绝了一些建议。没有他们的介入，本书不可能得到改进。无论怎样，本书中发现的错误都应由著者们负责，而不能归于各位审阅者们。

G. L. 阿斯科拉夫特

1971.7.20

犹他州，罗干

# 目 录

前言

序言

<b>第一章 灌溉科学的基础</b> .....	1
1.1 古代美国的灌溉系统 .....	2
1.2 与灌溉有关的土壤问题 .....	3
1.3 灌溉的定义 .....	4
1.4 对水的需要 .....	4
1.5 过剩水 .....	5
1.6 土壤-水-空气系统的本质 .....	6
1.7 植物-土壤-水的关系 .....	7
1.8 术语和单位 .....	9
1.9 水对植物的有效性——一个比拟 .....	13
1.10 植物对水的需要 .....	14
1.11 水势的变化情况 .....	19
1.12 摘要与展望 .....	19
<b>第二章 气候因素</b> .....	21
2.1 气候的影响 .....	21
2.2 太阳辐射能 .....	22
2.3 净辐射 .....	27
2.4 在土壤或植物表面能量的处置 .....	29
2.5 气候因素的摘要 .....	31
<b>第三章 蒸散</b> .....	32
3.1 估算蒸散的需要 .....	32
3.2 估算蒸散的理论方法 .....	33
3.3 估算蒸散的经验性方法 .....	43
3.4 根据潜在蒸散估算真实蒸散 .....	52
3.5 摘要 .....	57
<b>第四章 水的物理性质</b> .....	59
4.1 水的一些分子性质 .....	59
4.2 固-水和水-空气界面 .....	60
4.3 水的其它物理性质 .....	64
<b>第五章 胶体系统</b> .....	67
5.1 胶体系统的本性 .....	67
5.2 影响zeta电位的因素 .....	73
5.3 凝聚作用 .....	74
5.4 非离子吸附 .....	76
5.5 收缩和膨胀 .....	79

5.6	土壤的吸附	82
5.7	阳离子代换	84
5.8	阴离子代换	87
5.9	负吸附	88
<b>第六章</b>	<b>土壤固体</b>	<b>89</b>
6.1	有机成分	89
6.2	无机成分	90
6.3	比表面积	94
6.4	作用在界面上各种类型的力	100
6.5	土壤矿物的构造	101
<b>第七章</b>	<b>土壤水的能量关系</b>	<b>107</b>
7.1	土水势	107
7.2	水膜的厚度	118
7.3	土壤水的滞后作用	120
7.4	植物水的能量关系	125
<b>第八章</b>	<b>土壤水的运动</b>	<b>129</b>
8.1	稳定状态恒温水流	129
8.2	瞬变状态恒温水流	138
8.3	水向土壤的入渗	149
8.4	土壤中水和其它物质或能的并发运动	156
8.5	稳态的一般流方程式	168
8.6	植物中的水流	170
<b>第九章</b>	<b>土壤水的测定</b>	<b>174</b>
9.1	测定土壤水的理由	174
9.2	含水量	175
9.3	土壤水的能量关系	179
9.4	测定土壤水状态方法的总结	192
9.5	土壤中水流的性质	193
<b>第十章</b>	<b>田间土壤中水的保持与流动</b>	<b>207</b>
10.1	土壤水常数	207
10.2	田间持水量的概念	208
10.3	永久萎蔫点	210
<b>第十一章</b>	<b>土壤结构</b>	<b>216</b>
11.1	土壤结构的定义	216
11.2	土壤结构的表现	220
11.3	土壤结构对植物生长的作用	223
11.4	团粒的形成	226
11.5	团粒形成的机制	229
11.6	水对土壤结构的影响	231
11.7	灌溉水的质量	233
11.8	耕作的影响	234
11.9	土壤物理性质测定	234



<b>第十二章 土壤通气</b> .....	246
12.1 通气对植物生长的影响 .....	246
12.2 通气对土壤矿物的影响 .....	253
12.3 土壤大气的组成 .....	254
12.4 气体通过土壤的运动 .....	255
12.5 孔隙度对通气的影响 .....	258
12.6 土壤通气的测定 .....	260
<b>第十三章 温度</b> .....	274
13.1 生物学系统中的温度 .....	274
13.2 土壤的热性质 .....	279
13.3 热容量和比热 .....	283
13.4 土壤中的热输送 .....	284
13.5 热扩散率和导热率的测定 .....	285
<b>第十四章 丰产灌溉</b> .....	287
14.1 水—肥料的相互作用 .....	287
14.2 作物产量 .....	291
14.3 农田灌溉水的管理 .....	299
14.4 摘要 .....	311
<b>第十五章 不利条件下的灌溉</b> .....	313
15.1 盐土和钠质土的问题与性质 .....	313
15.2 灌溉水质 .....	316
15.3 水质——结合土壤与植物条件的考虑 .....	322
15.4 用最小水量进行灌溉的设计 .....	328
<b>第十六章 灌水方法</b> .....	330
16.1 喷灌灌水法 .....	330
16.2 田面灌水法 .....	333
16.3 地下灌水法 .....	339
16.4 灌水系统技术项目的定值 .....	339
16.5 度量灌溉水 .....	350
<b>附录</b> .....	355
附录A 查用附录B、C与D中各表的一般说明 .....	355
附录B 物理项量的单位与量纲 .....	356
附录C 换算因子 .....	356
附录D 选用的物理常数的数值 .....	360
<b>符号单</b> .....	362

## 第一章 灌溉科学的基础

灌溉的任务是寻找、开发、引导和分配适当的水到土壤中、以补充农作物生产中自然供水的不足，这项工作自古以来就已经开始了。古代输水建筑物和灌溉系统的遗迹证明，在印度、埃及、中国、伊拉克和美国的史前期就已经实行了灌溉。在世界上干旱和半干旱地区的灌溉土地上，有着许多以农作物生产的经济收益为基础的伟大的古代文化。良好的灌溉系统是能根据作物需水，能适时地把足量的优质水输送到田地中，从而使得粮食生产成为可能这个基本目标建立的（图 1.1）。



图 1.1 灌溉能使沙漠变为生产的绿洲。

一些灌溉系统的庞大和复杂性足以证明建筑它们的工程师的能力和技巧。精心设计与结构良好的水坝和水利设施表明，这些系统是根据正确的原理建造的。在古代和现代，在输水到田间这个系统的设计和结构有关的科学，已经得到很大的发展，但把水用于土壤的科学却没有得到发展。工程师的兴趣通常只到农田分布系统的起点为止，以后就听任灌溉者按他们自己的方法把水用于土壤。

## 1.1 古代美国的灌溉系统

史前灌溉土地最著名的地区之一是 Arizona 州的盐河谷。这个已经建立了现代灌溉系统的地区有许多古代灌溉渠道的形迹。古代渠道的遗迹（图 1.2）有许多靠近现代的渠道，依然留在 Arizona 州 Mesa 附近盐河的两边<sup>1</sup>。



图 1.2 Arizona 州 Mesa 附近盐河谷中的一条古代灌溉渠道的遗址。

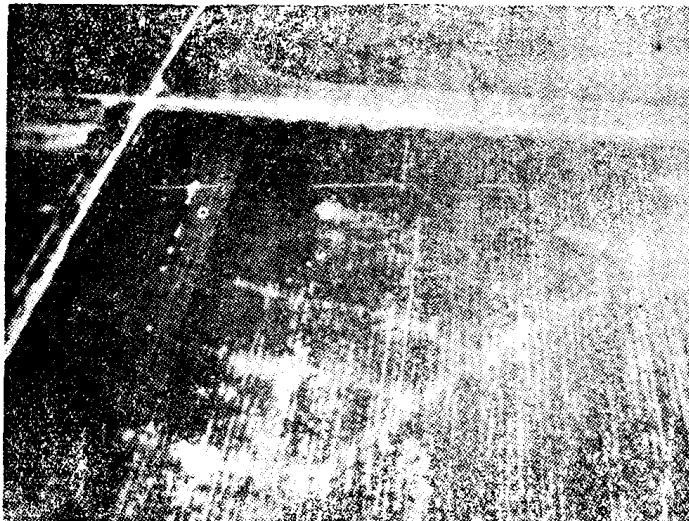


图 1.3 在靠近这块耕地的中部显出淡色的斜行是一个古代的灌溉分水系统 (T. W. Barrett 博士赠)。

<sup>1</sup> Arizona 州 Mesa 的 Frank Midvale 曾给本人指出过几处古代灌溉渠道的遗址，他曾在盐河谷查出约 300 英里这样的渠道。

许多这样的古代的渠道仍然可以在现在已经耕种的苜蓿地、棉花地和大豆地里追寻到(图1.3)。在耕地中它们呈暗色的条带。图1.4表示在一块已经耕深2英尺并经过平整的田地里的一条渠道的轮廓,其明显的差别证明灌溉对土壤物理性质的长期作用。即便是经过多年的现代灌溉农业、包括平整土地、频繁的耕作和大量施肥之后,沿着这些古代渠道生长的作物仍然欠佳。然而 Tempe 的 Arizona 州立大学土壤科学家 T.W.Barrett 已经查明,古老渠道上土壤的交换性

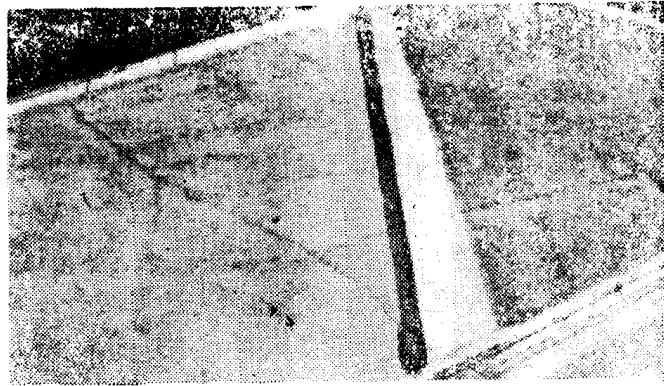


图 1.4 在耕翻过的土地上显出的古代灌溉分水系统的引水渠。这块土地在 Arizona 州 Tempe 附近,已经平整过并耕深2英尺(T.W. Barrett 博士赠)。

钠百分率和 pH 值仅仅略高于渠道邻近的土壤。这两种土壤在性质上最明显的差别是水渗入到古老渠道上的土壤要比邻近的土壤慢得多。结果,贮存在古渠道上土壤中的水便较邻近的土壤少,水分亏缺显现得较快,并表现为限制种植在其上的植物生长。这种不均匀的土壤渗水性是灌溉上普遍的和尚未解决的问题之一。

## 1.2 与灌溉有关的土壤问题

盐河谷的古代痕迹揭露出以灌溉为基础的持久农业的一些主要问题:(1)增加盐度——盐分在土壤中的积累,(2)降低渗透性——由于灌溉水累积了粉粒和盐分,结果使水的入渗速率下降,(3)破坏土壤结构。所有这些都导致降低土壤的生产力。这些问题都是由于缺乏一个对土壤供水的妥善办法而引起的。

有时,问题严重到被迫放弃部分甚至整个灌溉系统。灌溉农业是特别错综复杂的,因为绝大多数非灌溉地区的土壤物理问题在灌溉地区也是存在的,而这些问题的绝大多数在灌溉条件下显得更为尖锐;此外,有许多问题则是灌溉土壤独有的。

在世界上大部分地区,现代化的灌溉作为一种技术仍在实行之中。在有些地方,灌溉工作者已经改进了灌溉技术而防止了问题的严重发展。结果,稳定性的生产力得到实现,并建立起一种永久性的成功的农业。但是,在许多地区,现存系统的惯性拖延了接受和采用改进的方法与程序,灌溉者经常随意地用水或者不考虑作物的需要或土壤的反应而按固定的时间表用水。不过,随着植物—土壤—水分关系的研究获得的知识愈多,人们已经渐渐地开始注意到土壤和植物的需要了。

良好的灌溉,使土壤水保持在它的下限和上限之间,其下限是不致使植物的生长受到阻碍,其上限则是不致因水分过多而浪费或造成物理上的或生物上的障碍。一个好的灌溉是这样的:它恰好使土壤恢复其亏缺的水分,没有剩余的过量水被排走或冲刷地面;除非是蓄意利用和排掉过量的水来控制或除去盐分。

### 1.3 灌溉的定义

灌溉的定义是供水到已种或将要种上作物的土壤以补充自然降雨的不足，从而提高作物的产量或质量。

灌溉主要在干旱或半干旱地区实行。这些地区的自然降雨通常太少，不足以使作物生长良好；不供给补充的水作物便不可能生长或者严重地限制了它的生长。由于近年来农业的巨大进展，现在大多数湿润地区限制产量的主要因素，和干旱地区一样，在生长季节不是水分不足，就是水分过多。只要有适宜的水供应，灌溉结合排水就是这个问题的实际解决方法。成功的灌溉不仅仅是安装设备和打开水源。要得到高产，必须适时地供给适量的水，如果水分过多时又把它排掉。

### 1.4 对水的需要

如果降水补给到土壤的水、少于土表的蒸发和生长在土壤上植物的蒸腾所损耗的水，则这个地区是缺水的。明显的干旱地区缺水是用不着证明的。但是降雨被认为是充足的地区也会出现缺水，就可能不是普遍都被认识到的了。

如果以这样的方法供水给作物：表面径流和土壤的深层渗漏都防止了，则水的唯一损耗便是蒸发和生物利用。绝大部分生物利用是由于植物的蒸腾作用；比较起来，用于植物生长过程的水是微不足道的。在自然界，如果大量的对流能量是由炎热的、干燥的邻近地区的风带来的话，植物蒸腾的水汽可能超过自由水面的蒸发；在干旱和半干旱地区，这种情况经常发生。

相反，在湿润地区，很少能量对流；结果植物蒸腾的水量从来就不超过与植物温度相同的经常湿润的土壤或自由水面的蒸发量。一个地区的蒸发量永不会超过由该地区的有效能量将水转化为水汽的数量，这个最大值称为潜在蒸发或潜在蒸散（蒸腾 + 蒸发，译注）。

有一些准确地估计潜在蒸发的方法，Calembert(1954)曾在比利时的一些地方使用过这些方法，这些地方处于湿润地区，一般认为有充分的雨量供植物生长。当某一段时间内的潜在蒸发量大于同时段的降雨量时，其差值代表必须由土壤或某些其他途径补给作物的用水量。地面径流和深层渗漏也进一步减少可给的水量，因而增加了对水分的需要。表1.1是Calembert在六个比利时试验站和一个卢森堡试验站测出的平均降雨量和平均潜在蒸发量的差值，虽然比利时全年的总降雨量超过潜在蒸发量，但每个地方在春天和夏天都表明有两个月以上的水分亏缺。

这一亏缺，加上径流和深层渗漏的损耗，或在一个不常有的两次降雨之间的一段长的时间之内，就必须从土壤抽取水分来补给。不论在干旱地区还是湿润地区，如果土壤能够保持所需的水分并且及时满足植物的需要，雨量的不足便不致限制植物的生长；如果土壤不能在适当的时间以适当的速度补给水分，植物的生长便可能受到影响。

在Ardennes地区(St. Hubert与Florennes)，降雨量和蒸发量的差值很小，很可能只在极干旱的季节土壤水才不足；在比利时的其余地区，其差值较大，限制植物生长的土壤水亏缺除了在最湿润的季节之外都可能发生。

表 1.1 比利时和卢森堡七个地区每月以毫米... 为平均降水量与平均潜在蒸发量的差值 (黑体阿拉伯字为每月的英寸数)。负号表示蒸发大于降水(为了表明其关系, 地区从南至北排列)

地 区	一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月	九月	十月	十一月	十二月
Luxembourg	57	62	14	10	-39	-51	-43	39	32	65	45	96
	2.2	2.4	0.6	0.4	-1.5	-2.0	-1.7	1.5	1.3	2.6	1.8	3.8
St.Hubert	100	88	40	33	-5	23	-21	32	40	40	130	110
	3.9	3.5	1.6	1.3	-0.2	0.9	-0.8	1.3	1.6	1.6	5.1	4.3
Florennes	70	76	31	12	11	-20	-36	8	56	23	105	86
	2.8	3.0	1.2	0.5	0.4	-0.8	-1.4	0.3	2.2	0.9	4.1	3.4
Gembloux	62	55	26	-1	-10	-50	-28	-17	32	17	95	74
	2.4	2.2	1.0	-0.04	-0.4	-2.0	-1.1	-0.7	1.3	0.7	3.7	2.9
Uccle	57	62	14	10	-39	-51	-43	39	32	65	45	96
	2.2	2.4	0.6	0.4	-1.5	-2.0	-1.7	1.5	1.3	2.6	1.8	3.8
Melsbroek	48	45	17	5	-11	-67	-37	-15	116	13	65	72
	1.9	1.8	0.7	0.2	-0.4	-2.6	-1.5	-0.6	4.6	0.5	2.6	2.8
Coxyde	46	46	7	-13	-23	-50	-45	-17	20	48	78	58
	1.8	1.8	0.3	-0.5	-0.9	-2.0	-1.8	-0.7	0.8	1.9	3.1	2.3

来源: 资料引自Calembert, 1954。

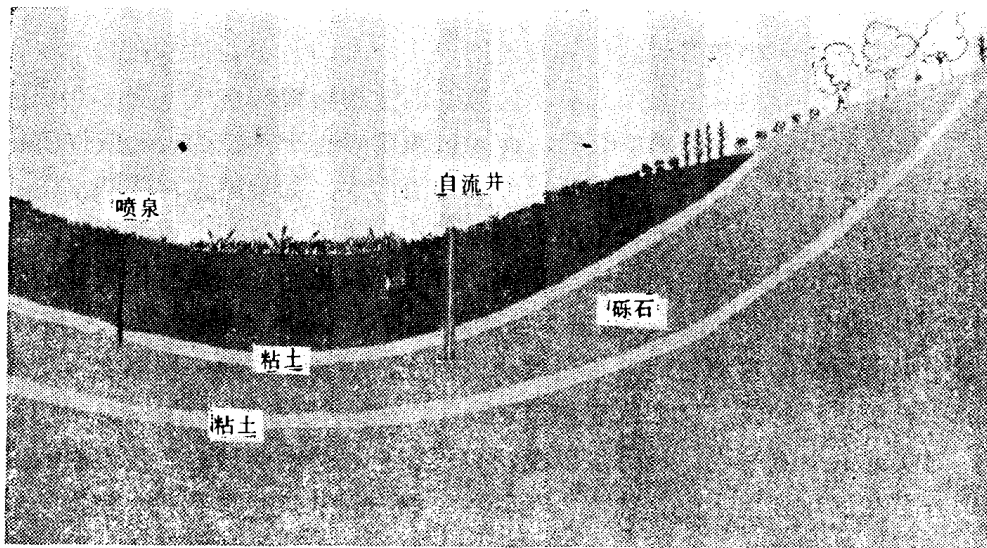


图 1.5 高地用水超过蒸散时水便会渗漏到地下水中并抬高低地的地下水位; 溶解有盐分的向上运动的水在靠近土壤表面处蒸发使盐分残留在表土中。这样便产生了盐化和排水不畅的问题。

## 1.5 过剩水

径流或深层渗漏, 可能单独或同时发生, 当降雨或灌水超过土壤所能保持的水量时, 或者当降雨或灌水的速率超过水入渗到土壤的速率时, 水便可能积集在低地和洼地。在干旱或半干旱地区, 随着水分的蒸发并留下残余的固体, 低地便积累起盐分; 在湿润或灌溉地区, 这些洼地可能变为湖泊、沼泽、浅滩或湿地 (图 1.5)。在这些湿地上作物生长是要

受到阻碍的，或者只能种植某些耐水的作物，这已经是一般的常识了。

作物生长受到限制的程度取决于积水的程度，某些积水地区是不能改良的，但有许多地区通过排水可能使之生产。排水沟的间距和有效程度取决于许多因素，但土壤的性状和性质是头等重要的。过量水对植物生长的影响与土壤的其他物理条件有密切关系，例如维持生物活动的空气补给，土壤的紧实度和结构等。

只要不低估排水问题的重要性，我们便把注意力引导到土壤、水分、生物系统之间的基本的相互作用以及影响植物需要的气象因素的问题上来。因此我们只能间接地讨论排水这样的问题。有关灌溉和排水的标准工程教科书中，排水问题通常是充分地讨论的 (Israelsen 和 Hansen, 1962; Luthin, 1957)。



图 1.6 土壤横切面图解，显示出土粒（暗色部分）、水膜和水楔（浅色部分）和空气（白色部分）。

## 1.6 土壤-水-空气系统的本质

土壤是由许多不同大小和形状的固体颗粒所组成，其间散布着许多孔隙，在孔隙中，因水的补给量不同，能够相互消长地充有不同数量的土壤溶液和空气（图 1.6）。排水良好的农业土壤，较大的孔隙中是充满空气的，而水以膜状存在于土粒的表面或以楔状存在于两粒或两粒以上的土粒集合的地方。灌溉或降雨补给的水，如果超过水膜和水楔的数量，通常会造成不良的后果，例如从土壤中淋失养分或抬高地下水位和造成渍水。

如果将全部与水接触的表面铺成一片平面、可以计算出，165 克有代表性的农业土壤 (Millville 粉质壤土) 的表面足以覆盖 1 公顷的面积 (10,000 米<sup>2</sup>或约 2.5 英亩)。如果将田间最湿时土壤所保持的水均匀地散布在这个表面上，它便会形成一层厚约  $3.5 \times 10^{-9}$  米 (1 微米的 3.5 千倍) 的膜。这个厚度相当于约 12 个分子厚的膜或 12 个分子层 (参见 4.1 节)。但是，对实际的土壤来说，许多水以楔状积聚在土粒接触的地方，使水膜的厚度小于假定其均匀分布在固体表面上的计算值。活着的植物必须从这些薄膜和水楔上吸取所有它们所需的水分。要做到这一点，它们必须克服把水保持在土壤中的吸着力、粘结力和渗透力。随着水膜变薄，保持水的力迅速增加，要移去再多一点水便愈加困难。直至大约还有 4 至 5 个水分子层时，土壤对水的吸引力变得如此之大，以致植物不能再得到足够的水来满足它们的需要。

植物不能再得到足够的水来维持其生长的水膜厚度，对所有土壤来说大致是相同的，但此时的含水量 (单位质量的干土保持水的质量) 在不同的土壤之间却有很大的差别，因为它们的比表面积有很大的不同。当生长在一定的土壤上的指示植物萎蔫而放在湿润的容器中也不再恢复时，此时的土壤就认为是达到了永久萎蔫点。达到永久萎蔫点时仍留在土壤中的水的百分率称为这个土壤的永久萎蔫百分率。

达到永久萎蔫点时土壤保持水量的范围由比表面积小的粗砂质土的百分之一至二、

到粘质土的百分之二十五至三十甚至更高。由于这个巨大的差别，所以没有有效的方法来表示植物对水分的需要与土壤含水量的关系，而植物对水的需要与从土壤中移去单位水量所需要作的功的关系却已经建立起来了。我们现在将更详细地考察某些植物-土壤-水的关系。

## 1.7 植物-土壤-水的关系

水被植物体的溶液和胶体所引起的渗透力和吸附力保持在植物的细胞和组织中。植物细胞(图1.7)是由下列各项所组成:(1)有点硬的、但有弹性膨胀能力的细胞壁,(2)水能自由通过的、但溶质受到阻止或受到限制的原生质膜,和(3)充满含有大量溶质的、也可能含有大量胶体的细胞汁的内液胞。因为原生质膜允许水自由通过,但阻止或限制溶液通过,所以称为是差别透性的。

细胞汁中溶质和胶体物质的浓度降低了细胞中水的活性,因此在细胞内产生一种对水的吸引力,如果细胞膜外有自由水,它便会以比溶质向外扩散快很多的速度进入细胞内。植物细胞吸收纯、自由状态的水的能力说明它有作功的势能。如果细胞对水的吸力是因胞液的溶质浓度而引起的,它就称为**溶质势**。如果吸力是由细胞的胶体物质或膜内的原生质胶体引起的,它就称为**基模势**。溶质势和基模势之和有时也称为渗透势,但因其双重用途,我们避免使用“渗透”一词,而称它为**组成势**(参见7.4节)。由于细胞的吸水作用而伴随着产生的压力(膨压,TP)称为**压力势**,因为它是由压力造成的、迫使水流出细胞之外的势。

当水移入细胞内时,细胞的体积增加,原生质便迫使具有弹性的细胞壁膨胀起来。但是细胞膨胀得愈大,作用于细胞内的水的压力也愈大,随着细胞内压力势的增加,水进入细胞的趋势便下降。当压力势在数量上与溶质势及基模势之和相等但符号相反时(图1.8),这些势的总和便为零,进入细胞的水的净流量也就为零。溶质势( $\psi_s$ )、基模势( $\psi_m$ )与压力势( $\psi_p$ )之和称为**水势**( $\psi_w$ ),见图1.9。

水势 $\psi_w$ 是早些时候称为扩散压差DPD(细胞对水的吸力)这一名称的负值。当两个接触的细胞具有水势(或DPD)差时,水便会从水势较高(DPD较低)的细胞流入水势较低(DPD较高)的细胞。

这些势能的理论已经充分地建立起来了,并已经证明它适用于说明植物体的水分状态和通过植物体的水分运动。我们在第7.4节将更详细地讨论植物的水势,在第8.4节里则有更多的植物中的水分运动的资料。植物-水关系更全面的讨论可参阅Kozlowski(1968)和Slatyer(1967)的著作。

土壤物理学家也曾经牢固地建立起同样有用的理论来说明土壤水的保持和运动。水是被界面张力、吸附力和土壤中的离子保持在土壤中的。当把土壤放在一片能透过水和溶质

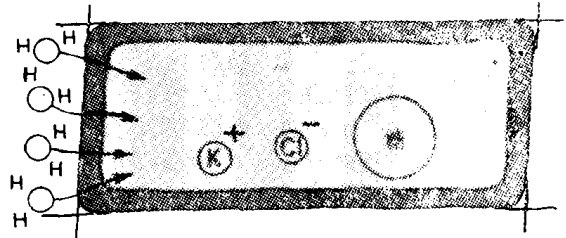


图1.7 示有半硬性细胞壁、半透性原生质膜和含有溶质(盐和糖)的液胞的植物细胞图。水分子可以自由地通过原生质膜,但溶质通过时受到阻碍,结果,水因溶质浓度高而移入细胞,这样便增加了细胞内部的压力,一直到增加的压力(它要水流出细胞)与溶质的作用(它要水流入细胞)达到平衡为止。之后,便不再有水的净流量。



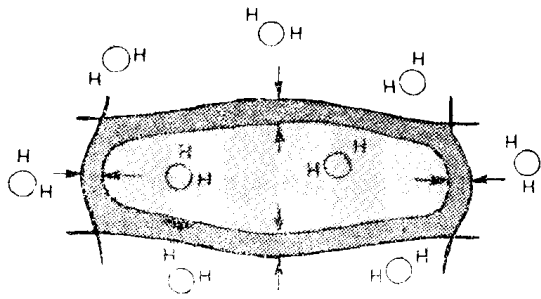


图 1.8 一个完全膨胀的植物细胞图解。压力势（它趋向使水流出细胞）在数量上等于加起来的溶质势和基模势（它趋向使水流入细胞）；因此，不再有水的转移。

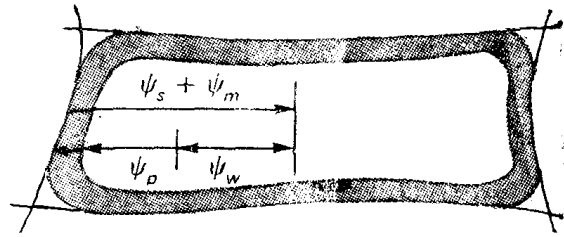


图 1.9 水势( $\psi_w$ )是溶质势( $\psi_s$ )、基模势( $\psi_m$ )与压力势( $\psi_p$ )之和。

但不能透过固体颗粒和空气的薄膜上,并把纯水放在薄膜的另一侧时,这个系统在某些方面便与植物细胞相似,水就有通过薄膜移入土壤中的趋势(图 1.10)。水分运动也可因土壤一侧的压力增加而受阻。土壤基模通过薄膜吸水的趋势称为基模势;对土壤基模所施压力使水通过薄膜从土壤流回去的趋势称为压力势。如果压力势 $\psi_p$ 在数量上与基模势 $\psi_m$ 相等,便没

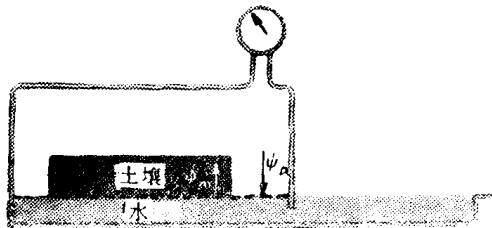


图 1.10 当土壤通过一能透水但不能透过土壤和空气的薄膜与水接触时,土壤有一个对水的吸引力, $\psi_m$ ;但是,装着土壤的室内有足够的压力阻止水进入,即,当 $\psi_p = \psi_m$ 时,水势 $\psi_w$ 为零,故没有水流动。

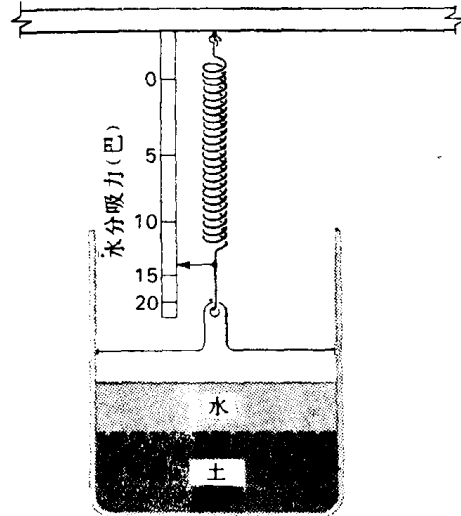


图1.11 土壤水吸力必然是作用于单位面积水上的拉力,它阻止水通过一片能透过水、但不能透过土壤和空气的薄膜进入土壤,因此,它在数量上与水势相等,但符号相反。它通常用压力单位测量(1巴=10<sup>6</sup>达因/厘米<sup>2</sup>,1大气压=1.013巴),因为水的密度为1克/厘米<sup>3</sup>,故1焦耳/公斤的势能等于1厘巴(0.01巴)的压力(或当量吸力)。