

# 土壤水动力学

雷志栋 杨诗秀 谢森传

清华大学出版社

# 土壤水动力学

雷志栋 杨诗秀 谢森传

清华大学出版社

## 内 容 提 要

本书较全面地概括了国内外有关土壤水动力学理论和应用方面的历史和最新成果，其中也包括不少作者近年来的研究工作。书中系统介绍了土壤水的能态——土水势，土壤水分运动的基本原理和基本方程，入渗蒸发条件下土壤水分的运动，土壤-植物-大气连续体，土壤特性的空间变异性，土壤中水、热和溶质的耦合迁移和数值模拟等。

本书适于作农田水利、环境工程、水文地质、土壤物理等专业研究生和大学高年级学生的参考教材，也可作相应专业科研、教学、工程技术人员的参考书。

## 土 壤 水 动 力 学

雷志栋 杨诗秀 谢森传

责任编辑 姚美瑞



清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平振南排版厂排版

北京市京辉印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行



开本：850×1168 1/32 印张：13  $\frac{1}{8}$  字数：350千字

1988年10月第1版 1988年10月第1次印刷

印数：0001~3000

定价：2.80元

ISBN 7-302-00208-8/TV·4(课)

# 前 言

土壤是自然生态环境的一个重要组成部分，它与人类的生活和生产活动有着极密切的关系。土壤的固、液、气三相组成中，土壤水分是最活跃的因素。人们对饱和土壤中水分运动问题的研究有较长的历史，其科学理论的形成始于130年前法国工程师Darcy所进行的实验，经不断发展和完善，形成了现在的地下水动力学。非饱和土壤中的水分问题一直是土壤学研究的重要课题之一。上世纪下半叶以来，人们对非饱和土壤中水分问题的研究主要采用形态学观点，定性地描述或分析土壤中水分的保持和运动。随着科学技术的进步，本世纪初出现了土壤水分的能态观点。经30年代至50年代的发展和逐步完善，加之电子计算机的推广应用和各学科的相互渗透，非饱和土壤水分运动研究发生了由经验到理论、从定性到定量的深刻变化，从而形成相对独立的一个领域——土壤水动力学。土壤水动力学是以土壤中水分的能态为基础，研究非饱和土壤中水分、溶质和热量运移问题的学科。

非饱和土壤中的水分是联系地表水与地下水的纽带，是陆地植物赖以生存的源泉。所以，土壤水动力学的研究对水文、农田水利、水土保持、农业土壤、水文地质、生态与环境等部门都是很需要的。近年来，经济发达国家（如美国、英国、法国、日本、荷兰、澳大利亚等）都十分注意该领域的研究，而处于干旱、半干旱地区的国家尤为重视。我国虽在土壤水分领域开展过很多研究工作，但用数学物理方法定量地研究土壤中水分、溶质和热量的运移问题，尚处于开始阶段。我国大部分地区水资源相

当紧缺，粮食生产对调节农田水分的要求愈来愈高；在生态环境中，污染问题也日趋严重，因此，该领域研究工作的重要性越来越被人们所认识。

由于国内尚未有系统介绍这门学科的著作编辑出版，为此，我们吸收了国内外研究工作中已取得的成就，编就这本书，旨在介绍土壤水动力学的基本内容。为适应国内读者的需要，本书自成系统，力求由浅入深，简明扼要。在内容上，既注意到物理机制和基本理论，又注重实际应用；既照顾到初学者对该领域系统了解的需要，又注意反映新的科研成就及笔者近年来研究工作中的一些体会（书中所列计算及实验资料，凡未注明出处者均为编者已发表或未发表的成果）。全书共分八章：第一、二章介绍土壤水分的能态观点及其所遵循的基本规律；第三、四章分别介绍用解析或半解析法求解土壤水分的入渗与蒸发问题；第五章介绍土壤、植物、大气即SPAC系统中的水分运移和转换；第六章介绍各种土壤水分运动参数的测定方法；第七章介绍土壤水分运动问题的有限差分数值解法；第八章介绍土壤特性空间变异性的概念及其应用。书后附有一部分国内外公开发表的文献目录，对进一步了解本书所涉及的内容有一定参考作用。本书可作为水利、土壤、水文地质等专业的研究生教材或大学本科高年级学生的选修课教材，也可作为相应专业的科研、教学和工程技术人员的参考书。

本书是在清华大学水资源与农田水利教研组为继续教育进修班编写的《非饱和土壤水运动基本原理》（雷志栋、惠士博、杨诗秀、刘亶仁、谢森传集体编写）、为大学本科生编写的《土壤物理学》（刘亶仁等编）、为研究生编写的《土壤水动力学》（杨诗秀等编）等讲义的基础上修改而成的，由雷志栋主编。第一、五、八章由雷志栋执笔，第二、三、四、七章由杨诗秀执笔，第六章由谢森传执笔。全书经武汉水利电力学院张蔚榛教授审阅。

我们在学习和研究土壤水动力学的过程中，一直得到叶和才

教授、华孟教授（北京农业大学）、萧树铁教授（清华大学）和张蔚榛教授的指导和帮助，在此表示衷心的感谢。

书中缺点错误，恳请读者批评指正。

编者

一九八七年三月 于北京

# 目 录

## 前言

## 第一章 土壤水的能态——土水势

- 1.1 概述 ..... 1
- 1.2 土壤水的形态和能态..... 4
  - 1.2.1 土壤水的数量——土壤含水率 ..... 4
  - 1.2.2 土壤水的形态..... 5
  - 1.2.3 土壤水的能态..... 7
- 1.3 土水势 ..... 8
  - 1.3.1 土水势概念的热力学基础..... 8
  - 1.3.2 土水势的分势.....12
- 1.4 土壤水吸力与土壤水分特征曲线.....18
  - 1.4.1 土壤水吸力.....18
  - 1.4.2 土壤水分特征曲线.....18
  - 1.4.3 土壤水分特征曲线的应用.....22

## 第二章 土壤水动力学基本方程

- 2.1 非饱和和土壤水流动的达西定律.....25
  - 2.1.1 饱和和土壤水流动的达西定律.....25
  - 2.1.2 非饱和和土壤水流动的达西定律.....27
  - 2.1.3 非饱和土壤的导水率.....30
- 2.2 非饱和和土壤水运动基本方程 .....34
  - 2.2.1 质量守恒原理与基本方程的推导.....34
  - 2.2.2 基本方程的各种形式.....37
  - 2.2.3 柱坐标及球坐标系中土壤水分运动的基本方程 .....44
- 2.3 土壤水分运动通量法.....51
  - 2.3.1 零通量面与零通量面法.....52

|       |                 |    |
|-------|-----------------|----|
| 2.3.2 | 表面通量法与定位通量法     | 55 |
| 2.4   | 土壤中溶质的运移及其基本方程  | 57 |
| 2.4.1 | 溶质运移的对流和水动力弥散   | 59 |
| 2.4.2 | 溶质运移的基本方程       | 63 |
| 2.4.3 | 土壤中溶质运移与水分运动的关系 | 66 |
| 2.5   | 土壤中的热流及其基本方程    | 67 |
| 2.5.1 | 土壤的热特性          | 68 |
| 2.5.2 | 土壤中热流的基本方程      | 72 |
| 2.5.3 | 土壤中水热的耦合迁移      | 74 |

### 第三章 土壤水分的入渗

|       |                              |     |
|-------|------------------------------|-----|
| 3.1   | 土壤水分入渗过程概述                   | 77  |
| 3.1.1 | 入渗过程的一般分析                    | 78  |
| 3.1.2 | 地表入渗条件                       | 81  |
| 3.2   | 土壤水分运动线性化方程的入渗解              | 82  |
| 3.3   | Green-Ampt模型与 $\delta$ 函数入渗解 | 86  |
| 3.3.1 | Green-Ampt模型及其入渗分析           | 86  |
| 3.3.2 | $\delta$ 函数的近似解              | 88  |
| 3.3.3 | Green-Ampt模型的入渗关系            | 90  |
| 3.4   | 水平吸渗条件下的Philip解法             | 92  |
| 3.4.1 | 水平吸渗的定解问题与 Boltzmann 变换      | 92  |
| 3.4.2 | 迭代计算方法                       | 94  |
| 3.4.3 | 迭代计算步骤及算例                    | 99  |
| 3.5   | 垂直入渗条件下的Philip解法             | 103 |
| 3.5.1 | 垂直入渗条件下的Philip级数解            | 103 |
| 3.5.2 | 递推求解方法与步骤                    | 107 |
| 3.6   | 入渗条件下的Parlange解法             | 111 |
| 3.6.1 | 第一类边界问题的Parlange解法           | 112 |
| 3.6.2 | 第二类边界问题的Parlange解法           | 114 |
| 3.6.3 | 水平轴对称非饱和流的半解析解               | 117 |
| 3.7   | 入渗公式及讨论                      | 121 |
| 3.7.1 | Green-Ampt入渗公式               | 121 |



|  |     |
|--|-----|
| 3.7.2 Philip入渗公式 .....                 | 124 |
| 3.7.3 Smith、Parlange入渗公式 .....         | 126 |
| 3.7.4 КОСТЯКОВ、Horton和Holtan入渗公式 ..... | 130 |

#### 第四章 蒸发条件下土壤水分的运动

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 概述 .....                               | 132 |
| 4.2 定水位条件下均质土壤的稳定蒸发 .....                  | 136 |
| 4.2.1 稳定蒸发条件下土壤含水率及吸力分布 .....              | 136 |
| 4.2.2 定水位下潜水极限蒸发强度 .....                   | 140 |
| 4.2.3 潜水稳定蒸发及其经验公式 .....                   | 141 |
| 4.3 定水位条件下层状土壤的稳定蒸发 .....                  | 146 |
| 4.4 蒸发条件下土壤水分的非稳定运动 .....                  | 151 |
| 4.4.1 表土蒸发强度保持稳定阶段的土壤水分运动求解 .....          | 151 |
| 4.4.2 表土蒸发强度随地表含水率递减阶段土壤<br>水分运动的近似解 ..... | 157 |
| 4.4.3 表土瞬变干时土壤水分运动的求解 .....                | 160 |

#### 第五章 土壤-植物-大气连续体中水流的运动 .....

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.1 概述 .....                 | 168 |
| 5.2 植物细胞水势及植物体中水流 .....      | 170 |
| 5.2.1 植物细胞的构成及其渗透、吸胀作用 ..... | 170 |
| 5.2.2 植物细胞水势 .....           | 171 |
| 5.2.3 细胞-细胞的渗流模型 .....       | 172 |
| 5.2.4 植物体中的水流 .....          | 177 |
| 5.3 土壤根区水流 .....             | 179 |
| 5.3.1 根的构造与吸水作用 .....        | 179 |
| 5.3.2 单根吸水的土壤水分运动模型 .....    | 181 |
| 5.4 腾发量的估算 .....             | 185 |
| 5.4.1 叶的构造与蒸腾 .....          | 185 |
| 5.4.2 估算腾发量的理论方法 .....       | 187 |
| 5.4.3 估算腾发量的经验方法 .....       | 201 |
| 5.4.4 根据潜在腾发量估算实际腾发量 .....   | 204 |
| 5.5 腾发条件下土壤水动力学模拟 .....      | 205 |
| 5.5.1 恒温条件下土壤水分运动的模拟 .....   | 206 |

|            |                              |            |
|------------|------------------------------|------------|
| 5.5.2      | 非恒温条件下土壤中水热运移的模拟             | 214        |
| <b>第六章</b> | <b>土壤水分运动参数的测定</b>           | <b>220</b> |
| 6.1        | 概述                           | 220        |
| 6.2        | 土壤水分特征曲线的测定                  | 223        |
| 6.2.1      | 土壤含水率测定方法简述                  | 223        |
| 6.2.2      | 土壤水分特征曲线的测定方法                | 224        |
| 6.3        | 水平土柱吸渗法测定非饱和土壤水扩散率           | 231        |
| 6.3.1      | 测定原理                         | 231        |
| 6.3.2      | 测定方法和算例                      | 232        |
| 6.4        | 非饱和土壤导水率的测定                  | 236        |
| 6.4.1      | 瞬时剖面法                        | 236        |
| 6.4.2      | 垂直下渗通量法                      | 239        |
| 6.4.3      | 垂直土柱稳定蒸发法                    | 241        |
| 6.4.4      | 由已知的水分特征曲线和扩散率计算 $K(\theta)$ | 242        |
| 6.5        | 测定非饱和土壤水分运动参数的出流法            | 242        |
| 6.5.1      | 出流公式                         | 243        |
| 6.5.2      | 忽略多孔板阻抗的 Gardner 方法          | 248        |
| 6.5.3      | 考虑多孔板阻抗的 Rijtema 方法          | 250        |
| 6.5.4      | 渐变变压出流法                      | 253        |
| 6.5.5      | 出流法应用小结                      | 256        |
| 6.6        | 土壤水分运动参数的田间测定                | 257        |
| 6.6.1      | 稳定土壤含水率剖面法                   | 257        |
| 6.6.2      | 田间垂直入渗试验法                    | 258        |
| 6.6.3      | 现场定位观测法                      | 261        |
| <b>第七章</b> | <b>土壤水分运动的数值计算方法</b>         |            |
| 7.1        | 概述                           | 264        |
| 7.2        | 一维土壤水分运动问题的差分解法              | 267        |
| 7.2.1      | 差分概念                         | 267        |
| 7.2.2      | 一维非饱和流动问题的差分方程               | 269        |
| 7.2.3      | 线性化方法与土壤水分运动参数的取值            | 275        |
| 7.2.4      | 数值计算的收敛性和稳定性问题               | 280        |

|                                  |                          |     |
|----------------------------------|--------------------------|-----|
| 7.3                              | 田间土壤水分运动问题的数值模拟          | 282 |
| 7.3.1                            | 田间均质土壤一维非饱和流动问题的数值模拟     | 283 |
| 7.3.2                            | 一维饱和-非饱和土壤水分运动问题的数值模拟    | 290 |
| 7.3.3                            | 二维非饱和土壤水分运动问题的数值模拟       | 299 |
| 7.4                              | 土壤中溶质运移问题的数值模拟           | 304 |
| 7.4.1                            | 一维非饱和土壤中溶质运移的数学模型        | 304 |
| 7.4.2                            | 溶质运移问题的差分方程              | 305 |
| 7.4.3                            | 算例                       | 310 |
| 7.5                              | 冻融条件下土壤中水热耦合运移问题的数值模拟    | 313 |
| 7.5.1                            | 一维土壤水热耦合运移问题的数学模型与差分方程   | 314 |
| 7.5.2                            | 算例                       | 317 |
| <b>第八章 土壤特性空间变异性与土壤水分运动问题的标定</b> |                          |     |
| 8.1                              | 概述                       | 321 |
| 8.2                              | 土壤特性空间变异性的表示与取样数目        | 332 |
| 8.2.1                            | 土壤特性空间变异性的经典统计分析         | 323 |
| 8.2.2                            | 合理取样数目的确定                | 326 |
| 8.3                              | 土壤特性的空间结构与Kriging内插法     | 330 |
| 8.3.1                            | 土壤特性空间分布的自相关分析           | 331 |
| 8.3.2                            | 土壤特性空间分布的半方差分析           | 334 |
| 8.3.3                            | Kriging最优内插法             | 337 |
| 8.4                              | 田间土壤水分特征曲线与导水率的标定        | 341 |
| 8.4.1                            | 土壤水基质势 $\psi_m$ 的标定      | 341 |
| 8.4.2                            | 田间土壤水分特征曲线的标定            | 343 |
| 8.4.3                            | 田间非饱和土壤导水率的标定            | 351 |
| 8.4.4                            | 田间非饱和土壤导水率函数的标定          | 353 |
| 8.5                              | 土壤水分入渗的空间分布              | 360 |
| 8.5.1                            | 土壤水分垂直入渗基本方程的标定与含水率的空间分布 | 360 |
| 8.5.2                            | Philip入渗方程的标定与入渗量的空间分布   | 366 |
| <b>各章主要符号索引</b>                  |                          | 377 |
| <b>参考文献</b>                      |                          | 391 |

# 第一章 土壤水的能态——土水势

## 1.1 概 述

自然界中的水是循环运动的，和人类生活关系最密切的是陆地的水循环，在循环过程中，地表以下的水存储和运移在土壤、岩石孔隙、岩石裂隙或孔洞中。当土壤孔隙没有被水充满，土壤中的水分处于非饱和状态时，我们称该土壤区域为非饱和带（或称包气带），称其中的水分为非饱和土壤水，即一般所指的土壤水。当水充满了土壤的全部孔隙（含有少许不连通的充气孔隙），土壤中的水分处于饱和状态时，该土壤区域称为饱和带（或称饱水带），而称其中的水分为饱和土壤水，即一般所指的地下水。

土壤水和地下水的共同特点是水分均存在于多孔介质的孔隙中、并在其中运动。土壤作为一多孔介质是由无数碎散的、形状不规则且排列错综复杂的固体颗粒组成。多孔介质内孔隙的大小、形状与连通性各不相同，极大地影响着其中流体的性质和运动特征。人们曾用过各种模型来模拟多孔介质的构造及其孔隙中流体的流动。例如，将土壤视为小球体的集合，或假想为平行的小扁平体的集合，更多的是将土壤孔隙近似为直径大小不一的一束毛细管。这些模型，特别是毛管模型，可以用来分析土壤中水分运动的某些现象，但由于这些模型都对真实土壤做了过分的简化和近似，其实用价值甚小。目前的趋势不是用微观的方法去研究多孔介质中孔隙的大小、形状和分布以及孔隙空间中流体的流

动特征，而是转向用宏观的方法。

宏观方法是在较大尺度范围内研究多孔介质的孔隙大小及其中水流的平均状况。此时为了求得一定区域内有关几何要素和运动要素的时空分布，必须首先确定多孔介质的物理点或质点的概念。所谓多孔介质在数学点 $P$ 处的物理点，是以 $P$ 点为质心、体积为 $\Delta V_0$ 的体积元（一般取为球体）来表征的。 $\Delta V_0$ 不能太大，否则平均的结果不能代表 $P$ 点的值； $\Delta V_0$ 又不能太小，必须包含有足够数目的孔隙或固体颗粒，这样才能得出有意义的统计平均值。例如，在确定土壤的主要物理特性参数孔隙度 $n$ 时，可取一个以 $P$ 点为质心、体积为 $\Delta V_i$ 的体积元。若在此体积元内，孔隙所占的总体积为 $\Delta V_{vi}$ ，则可确定比值

$$n_i = \Delta V_{vi} / \Delta V_i \quad (1.1)$$

$\Delta V_i$ 值较大时，如果土壤是非均质的，如图1.1所示，随着 $\Delta V_i$ 的减小比值 $n_i$ 将逐渐减小（或增加）。当 $\Delta V_i$ 值减小到某个 $\Delta V^*$ 值以下时， $n_i$ 值随 $\Delta V_i$ 的减小无明显的变化，仅呈现出因 $P$ 点周围孔隙大小的随机分布而引起的微小波动。但在 $\Delta V_i$ 值进一步减小到某一 $\Delta V_0$ 值之后， $n_i$ 值随 $\Delta V_i$ 值的减小将会突然呈现大幅度的波动。当 $\Delta V_i \rightarrow 0$ ，即所取体积元收敛于数学点 $P$ 时， $n_i$ 值变为0或1，视 $P$ 点是处于多孔介质的固相骨架中，还是处于孔隙中。

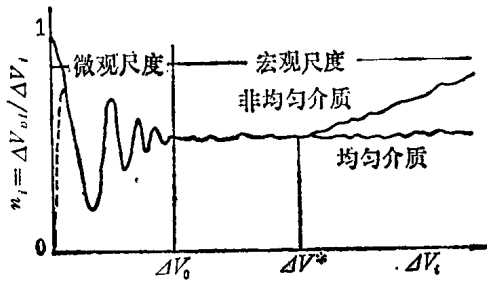


图 1.1 孔隙率 $n_i$ 与体积元 $\Delta V_i$ 关系示意图

因此，存在着一个较单个孔隙或固体颗粒体积为大的体积元

$\Delta V_0$ ，若比值  $n_i(P)$  的极限存在，即

$$n(P) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta V_{vi}(P)}{\Delta V_i} \quad (1.2)$$

则定义以数学点  $P$  为质心，体积为  $\Delta V_0$  的体积元为多孔介质在  $P$  点处的物理点， $n(P)$  为  $P$  点的孔隙率。

干容重  $\gamma_c$  是土壤的另一主要物理特性参数，同理可定义为，

$$\gamma_c(P) = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta M_{si}(P)}{\Delta V_i} \quad (1.3)$$

其中， $\Delta M_{si}(P)$  是土壤中以  $P$  点为质心，体积为  $\Delta V_i$  的空间中所含有的固相物质的质量。当土壤固相物质的密度  $\rho_s$  值不变时，由孔隙率和干容重定义的体积元  $\Delta V_0$  是相同的。显然，在任意点  $P$  处下式成立，

$$n = 1 - \gamma_c / \rho_s \quad (1.4)$$

上述物理点概念的确立，意味着孔隙率  $n$ 、干容重  $\gamma_c$  等土壤的物理特性参数是位置  $P$  的连续函数，这样，实际的多孔介质便被处理为假想的连续介质。这显然会给分析研究工作带来极大的方便。

与介质的这种处理相对应，宏观研究的方法又用假想的、水满全部空间的连续水流来替代在孔隙中流动的真实水流。并把充流的各流动要素也定义在物理点  $P$  上。例如，取表征物理点  $P$  的体积元为一个长为  $L_0$ ，断面积为  $\Delta A_0$  的柱体，即  $\Delta V_0 = \Delta A_0 \cdot L_0$ ，定义该点沿轴向的流速  $v$  为

$$v = \lim_{\Delta V_i \rightarrow \Delta V_0} \frac{1}{\Delta A_i} \int_{\Delta A_i} u \, dA_i \quad (1.5)$$

式中， $\Delta A_{vi}$  为多孔介质中横断面面积  $\Delta A_i$  上孔隙所占的面积， $u$  为孔隙内流体质点沿轴方向的实际流速， $v$  为假想的连续水流的流速，常称为渗透流速或达西流速。上式是根据假想的连续水流通过某一断面  $\Delta A_i$  的流量与真实水流通过  $\Delta A_{vi}$  断面的流量相等而写出的。若以  $u_{cp}$  表示孔隙中真实水流的平均流速，则根据上面对该体积元的定义，可得出渗透流速  $v$  和孔隙平均流速的关系为

$$v = nu_{ep} \quad (1.6)$$

当多孔介质中的孔隙水流被假想的连续水流替代后，流速及通量等运动要素和导水率等运动参数均可视为位置 $P(x, y, z)$ 的连续函数。这样，便可将连续水流的许多研究方法应用于多孔介质中流体的研究。

最后应该指出，用宏观方法分析多孔介质的孔隙特征，研究水流在孔隙中的流动，并不意味着在微观尺度上多孔介质的孔隙大小、形状及分布对多孔介质中流体的流动没有影响。恰恰相反，在宏观尺度上确定的连续分布的多孔介质的几何要素、运动要素和有关参数，本质上正是由其微观特征确定的。

## 1.2 土壤水的形态和能态

### 1.2.1 土壤水的数量——土壤含水率

作为多孔介质的土壤，是由矿物质和有机质构成其固相骨架，水（或水溶液）和空气充填其中孔隙的三相体。土壤中所含水量的多少，是由三相体中水分所占的相对比例表示的，称之为含水率（习惯上称为含水量），常有以下几种表示方法。

#### 1. 体积含水率 $\theta_v$

体积含水率 $\theta_v$ 是土壤中水分占有的体积和土壤总体积的比值。对于土壤中任一点 $P$ （物理点）处体积含水率 $\theta_v$ 的定义为

$$\theta_v = \Delta V_w / \Delta V_0 \quad (1.7)$$

其中， $\Delta V_w$ 为 $P$ 点处体积元 $\Delta V_0$ 内水分占有的体积。实际测定土壤含水率时，被测土壤的体积或仪器感应的体积应比体积元 $\Delta V_0$ 为大。

#### 2. 重量含水率 $\theta_g$

重量含水率 $\theta_g$ 是土壤中水分的重量和相应固相物质重量的比值。以 $\Delta G_s$ 和 $\Delta G_w$ 分别表示体积元 $\Delta V_0$ 内的固相物质和水分的重量，则

$$\theta_g = \Delta G_w / \Delta G_s \quad (1.8)$$

### 3. 饱和度 $w$

饱和度 $w$ 是体积元 $\Delta V_c$ 内水的体积 $\Delta V_w$ 与孔隙体积 $\Delta V_v$ 的比值,表示孔隙被水充满的程度,即

$$w = \Delta V_w / \Delta V_v \quad (1.9)$$

体积含水率、重量含水率和饱和度按定义可用比值也可用百分数表示.三者间可以换算:

$$\theta_v = \theta_g \gamma_c / \rho_w \quad (1.10)$$

$$w = \theta_v / n \quad (1.11)$$

式中, $\rho_w$ 为水的密度.

此外,也有用贮水深度(一定厚度土层中,所含水量折算成的水层深度)或用所占田间持水量的百分数表示土壤中所含水分多少的.使用体积含水率 $\theta_v$ 便于直接进行水量平衡计算,故本书以后除特加说明外,所述含水率均指体积含水率,且用符号 $\theta$ 表示.

#### 1.2.2 土壤水的形态

天然条件下土壤各点的含水率因位置和时间而异.为了区分不同含水率土壤的水分所具有的不同特性,本世纪以来,许多从事土壤水研究的学者,把土壤中所含水分按其特征区分为若干类型,即对土壤里的水分进行形态分类.

土壤水形态分类方法有多种,但都大同小异,有些只是名称不同而已.所有分类方法的共同之处在于都是按土壤中水分存在的形态和土壤中水分所承受的作用力的性质及大小来分类的.土壤中水分所承受的作用力常概括为吸附力、吸着力、毛管力和重力.存在于土壤中的液态水常可区分为以下四种形态.

##### 1. 吸湿水

单位体积的土壤具有的土壤颗粒表面积很大,因而具有很强的吸附力,能将周围环境中的水汽分子吸附于自身表面.这种束缚在土粒表面的水分称为吸湿水.当土粒周围的水汽饱和时,土壤吸湿水量最大,此时相应的含水率称为最大吸湿量或吸湿系数.据文献介绍,土壤颗粒对水分子的吸附力,最里层可达10000~20000



atm( $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$ )，最外层也约有 $31\text{atm}$ 。

## 2. 薄膜水

当吸湿水达最大数量后，土粒已无足够力量吸附空气中活动力较强的水汽分子，只能吸持周围环境中处于液态的水分子。由这种吸着力吸持的水分使吸湿水外面的水膜逐渐加厚，形成连续的水膜，故称为薄膜水。薄膜水达到最大值时的土壤含水率称为最大分子持水量，此时，最外层水分子所受吸着力约为 $6.25\text{atm}$ 。

## 3. 毛管水

土壤颗粒间细小的孔隙可视为毛管。毛管中水气界面为一弯月面，弯月面下的液态水因表面张力作用而承受吸持力，该力又称毛管力。土壤中薄膜水达最大值后，多余的水分便由毛管力吸持在土壤的细小孔隙中，称为毛管水。

天然条件下，地下水在毛管力的作用下将沿土壤中的细小孔隙上升，由此而保持在毛管孔隙中的水分称为毛管上升水。当地下水位埋藏很深时，毛管上升水远远不能到达表层土壤，此时降雨或灌溉后由毛管力保持在上层土壤细小孔隙中的水分称为毛管悬着水。毛管悬着水量达最大值时的土壤含水率称为田间持水量，此时的毛管力约为 $0.1\sim 0.3\text{atm}$ 。

## 4. 重力水

毛管力随着毛管直径的增大而减小，当土壤孔隙直径足够大时，毛管作用便十分微弱，习惯上称土壤中这种较大直径的孔隙为非毛管孔隙。若土壤的含水量超过了土壤的田间持水量，多余的水分不能为毛管力所吸持，在重力作用下将沿非毛管孔隙下渗，这部分土壤水分称为重力水。当土壤中的孔隙全部为水所充满时，土壤的含水率称为饱和含水率或全蓄水量。

上述最大吸湿量、最大分子持水量、田间持水量和全蓄水量，是将土壤水的数量和形态联系起来特征含水量，称为水分常数。另一个在农业生产中有重要意义的水分常数是凋萎系数。当土壤中的薄膜水所受土壤介质的吸着力约为 $15\text{atm}$ 时，土壤中的水分便不能为植物根系所吸收，致使植物发生永久性凋萎，因而又