

土壤水分常数与 土壤物理性质研究

TURANG SHUIFENCHANGSHU YU
TURANG WULIXINGZHI YANJIU

迟春明 ● 著



西南交通大学出版社

土壤水分常数与土壤 物理性质研究

迟春明 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

土壤水分常数与土壤物理性质研究 / 迟春明著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2016.7
ISBN 978-7-5643-4791-8

I. ①土... II. ①迟... III. ①土壤水 - 常数 - 研究②
土壤物理性质 - 研究 IV. ①S152

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 157430 号

土壤水分常数与土壤物理性质研究

迟春明 著

责任编辑	张秋霞
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	165 mm× 230 mm
印 张	8.25
字 数	105 千
版 次	2016 年 7 月第 1 版
印 次	2016 年 7 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-4791-8
定 价	32.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

土壤水分常数是土壤学理论研究和农业生产实践中经常使用的参数，具有重要的理论和实际意义。土壤物理性质包含土壤的水分、空气、热量、孔隙状况、结构性、紧实度、机械阻力等多方面的因素。单一的性状指标无法全面描述土壤物理性质的综合状况。但土壤学家一直在努力寻找可以表征土壤物理性质综合状况的简单参数。目前，无限制水分区间（Non-Limiting Water Range, *NLWR*）或最小限制水分区间（Least Limiting Water Range, *LLWR*）土壤物理质量参数(S)是被广泛认可并普遍使用的土壤物理性质参数指标。

本书主要分析并验证了土壤毛管持水量、田间持水量和毛管断裂含水量三个土壤水分常数的理论计算公式（第一章）；验证了三者与土壤水分特征曲线 van Genuchten 模型的理论关系（第二章）；提出并证实了使用饱和持水量、毛管持水量、田间持水量推算土壤水分特征曲线 van Genuchten 模型参数的理论公式（第三章）；对土壤无限制水分区间进行了修正，分析并论证了土壤毛管断裂含水量为土壤无限制水分区间的唯一下限（第四章）；证实了土壤无限制水分区间是调控植物生长发育（第五章）和土壤生物生化过程（第六章）的关键土壤水分阈值区间；提出了使用饱和持水量、毛管持水量、田间持水量等土壤水分常数快速推算 S 的简单方法，分析并证明了 S 分级阈值的物理意义（第七章）；提出了最优土壤容重的观点，并证明了其物理意义，即最优土壤容重对应的土壤无限制水分区间和

通气孔隙度均达到最大值，作物生长状态最佳。最优土壤容重的判断只需建立土壤容重与田间持水量或毛管持水量的回归方程，具有简单快速、费用低廉的特点，在生产实践中具有广阔的应用前景。希望本书的出版能对土壤物理质量和性质的相关研究提供帮助。

本书是国家自然科学基金“基于无限制水分区间的南疆膜下滴灌棉田土壤水分调控机理研究（31371582）”相关研究成果的总结，并得到其资助出版。同时，本书出版还得到国家自然科学基金项目（41561068）和新疆生产建设兵团博士资金项目（2013BB008）的资助，作者在此表示感谢！

因作者水平有限，书中难免存在缺点和疏漏之处，恳请读者批评指正。

著 者
2016 年 3 月

目 录

第一章 土壤水分常数的理论推算公式与验证	1
第一节 毛管持水量的理论计算公式	2
第二节 田间持水量的推算与验证	9
第三节 毛管断裂含水量的理论计算与验证	14
第二章 土壤水分常数与土壤水分特征曲线的关系	20
第一节 毛管持水量与土壤水分特征曲线的关系	20
第二节 田间持水量与土壤水分特征曲线的关系	27
第三节 毛管断裂含水量与土壤水分特征曲线的关系	33
本章小结	43
第三章 土壤水分常数推算土壤水分特征曲线	45
第一节 van Genuchten 模型参数推算	46
第二节 土壤水分特征曲线参数推算的影响因素	55
本章小结	57
第四章 土壤水分常数与土壤无限制水分区间	59
本章小结	73

第五章 土壤无限制水分区间与作物生长发育	75
第一节 土壤无限制水分区间下限与植物生理生化过程	75
第二节 土壤无限制水分区间与作物生长发育	79
本章小结	83
第六章 土壤无限制水分区间与土壤生物生化过程	84
本章小结	91
第七章 土壤物理质量参数	92
第一节 土壤物理质量参数推算	93
第二节 土壤物理质量参数分级阈值的物理意义	98
本章小结	107
第八章 最优土壤容重	109
本章小结	116
参考文献	118

第一章 土壤水分常数的理论 推算公式与验证

土壤水分常数是指具有一定物理意义的土壤含水量。常见的土壤水分常数包括饱和持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管断裂含水量、萎蔫系数等，其定义分别为（关连珠，2007）：① 饱和持水量是指土壤所有孔隙都充满水时的土壤含水量；② 毛管持水量是指毛管上升水达到最大时的土壤含水量；③ 田间持水量是指毛管悬着水达到最大时的土壤含水量；④ 毛管断裂含水量是指毛管孔隙中连续运动的水分发生断裂时的土壤含水量；⑤ 萎蔫系数是指植物发生永久萎蔫现象时的土壤含水量。这些水分常数既是土壤水分数量性状相关研究的理论基础，又是农业生产中水分管理的重要依据，具有重要的理论和现实意义。

饱和持水量可以通过理论公式进行计算，一般情况下，非膨胀土壤的饱和持水量计算公式为

$$w_s = \frac{1}{D_b} - \frac{1}{D_p} \quad (1.1)$$

式中， w_s 为土壤质量饱和持水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)； D_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)；

D_p 为土粒密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。毛管持水量、毛管断裂含水量和萎蔫系数无法直接计算。钱胜国 (1985) 提出了田间持水量 (w_{FC}) 的理论计算公式, 为土壤水分常数的理论计算研究奠定了坚实的基础。本章在此基础上, 提出了毛管持水量 (w_{MC}) 和毛管断裂含水量 (w_{RC}) 的理论计算公式, 并进一步简化田间持水量 (w_{FC}) 的理论计算公式, 旨在为相关研究提供借鉴。

第一节 毛管持水量的理论计算公式

一、公式推导

根据钱胜国 (1985) 的观点“ (1) 多孔体土壤颗粒接触处聚积的水达到平衡状态时, 形成一个球形空洞, 近似内切球体; (2) 土壤固相颗粒个数与其相间的孔洞个数近似相等”, 单位质量的土壤其质量含水量可以表示为

$$w = w_{wp} + \frac{w_s \sigma \cos \omega}{\varepsilon g h V_k} \times S_k \quad (1.2)$$

式中, w 为土壤质量含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); w_{wp} 为土壤萎蔫系数 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), 表示有土粒吸着力保持的土壤水分; $\frac{w_s \sigma \cos \omega}{\varepsilon g h V_k}$ 表示土壤孔洞弯月面、毛管水表面张力保持的水分, 其中, w_s 代表土壤饱和持水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), σ 为水的表面张力系数 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-2}$), ω 为土壤孔洞周围固相颗粒的湿润角 ($^\circ$), ε 为形状排列系数 (无水时, 单个孔洞体积与内切球体

积之比，理想的球形颗粒立方体堆积，土粒松排列时为 2.36，紧排列时为 2.57，自然状态的土壤可近似取 2.36， g 为重力加速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)， h 为表征单个孔洞水气界面形成的悬着水所移动的等效的某一毛管圆柱体的水柱高度 (cm)，也可表示为土壤水吸力， V_k 表示单个土壤孔洞的体积 (cm^3)； S_k 为单个土壤孔洞的表面积 (cm^2)。

如果土粒排列方式如图 1-1 所示，那么， V_k 和 S_k 可采用下列公式进行计算：

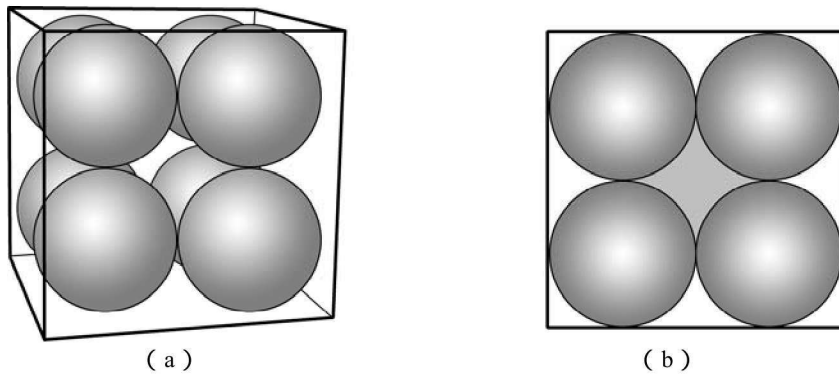


图 1-1 土粒排列示意图

注：本图引自 Mohammad and Vanclooster. Predicting soil moisture characteristic distribution with a simple conceptual model[J]. Vadlse Zone J, 2011.

$$V_k = A \times 2R \quad (1.3)$$

$$S_k = C \times 2R \quad (1.4)$$

式中， A 为单个孔洞的横截面面积，即图 1-1 (b) 中所示部分； C 为横截面的周长[图 1-1 (b)]； R 为土粒半径。 A 和 C 的计算公式为

$$A = 4R^2 - \pi R^2 = 0.8585R^2 \quad (1.5)$$

$$C = 2\pi R \quad (1.6)$$

因此，将式 (1.3) ~ 式 (1.6) 代入式 (1.2) 得：

$$w = w_{wp} + \frac{2\pi w_s \sigma \cos \omega}{0.858 5 \varepsilon g h R} \quad (1.7)$$

根据钱胜国 (1985) 和 A. A. 罗戴 (1964) 的研究结果， hR 的平均值为 0.28。另外，在 20°C 时， $\sigma = 72.75 \text{ g} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $g = 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $\omega = 0^\circ$ ；同时， $\pi = 3.14$ 。将上述取值代入式 (1.7) 得：

$$w = w_{wp} + \frac{1.954 6 w_s}{\varepsilon} \quad (1.8)$$

式 (1.8) 即土壤毛管持水量的理论计算公式。在该公式中， ε 可以直接取 2.36 或根据容重进行取值。一般情况下， ε 随容重的增大而增大。本书给出 ε 随容重变化而取值的经验性公式：

$$\varepsilon = \begin{cases} 2.36 & (D_b < 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ D_b + 1.07 & (1.30 \leq D_b < 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ 2.57 & (D_b \geq 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \end{cases} \quad (1.9)$$

式中， D_b 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。联立式 (1.8) 和式 (1.9) 得：

$$w_{MC} = \begin{cases} w_{wp} + 0.828 2 w_s & (D_b < 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ w_{wp} + \frac{1.954 6}{D_b + 1.07} w_s & (1.30 \leq D_b < 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ w_{wp} + 0.760 6 w_s & (D_b \geq 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \end{cases} \quad (1.10)$$

式 (1.10) 即不同土壤容重情况下土壤毛管持水量的理论计算公式。

萎蔫系数 (w_{wp}) 可以根据土壤质地进行估算，饱和持水量 (w_s) 可以实际测定或根据容重进行计算，但是，在土壤质地较轻的条件下，实测的饱和持水量数值一般会低于通过容重计算得到的数值。因此，为了提高毛管持水量推算的准确性，建议采用实测的饱和持水量数据。

二、公式验证

以轻壤土为例检验毛管持水量理论计算公式推算结果的准确性。土壤容重、饱和持水量、萎蔫系数、实测毛管持水量和计算毛管持水量数据列于表 1-1。毛管持水量实测值与计算值的平均数分别为 $0.3067 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.3169 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，统计分析表明二者间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 1-1 轻壤土土壤水分常数

土壤容重/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	饱和持水量	萎蔫系数	毛管持水量	
			实测值	计算值
			$\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	
1.1	0.387 5	0.05	0.363 4	0.370 9
1.2	0.353 3	0.05	0.332 7	0.342 6
1.3	0.324 6	0.05	0.310 6	0.317 7
1.4	0.302 8	0.05	0.273 5	0.289 6
1.5	0.281 2	0.05	0.253 1	0.263 9

另外，将毛管持水量的实测值与计算值进行线性回归分析。两者间的线性关系如图 1-2 所示。线性回归方程为 $Y=1.0322X$ ($R^2=0.9878$)。式中， Y 为计算值， X 为实测值。理论上，如果计算值与实测值完全相等，那么方程斜率应该为 1，决定系数 R^2 应该等于 1。本例中，线性回归方程斜率为 1.032 2， $R^2=0.9878$ 。这表明毛管持水量的计算值与实测值非常接近。因此，毛管持水量的理论计算公式是正确的。

另外，黑土、草甸土、草甸黑钙土、盐化草甸土和白浆土的数据（常征和徐海铁，2009）分析也表明，使用毛管持水量计算公式

推算毛管持水量是可行的。如表 1-2 所示, 5 种类型土壤其毛管持水量实测值的平均值分别为 0.305 3、0.357 6、0.360 4、0.360 2 和 0.339 6 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 毛管持水量计算值的平均值分别为 0.314 6、0.378 8、0.384 7、0.379 7 和 0.342 7 $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。统计分析表明, 毛管持水量实测值平均值与其计算值平均值间差异不显著 ($P > 0.05$), 可以认为二者是相等的。这证明本节推导的毛管持水量理论计算公式是正确的。

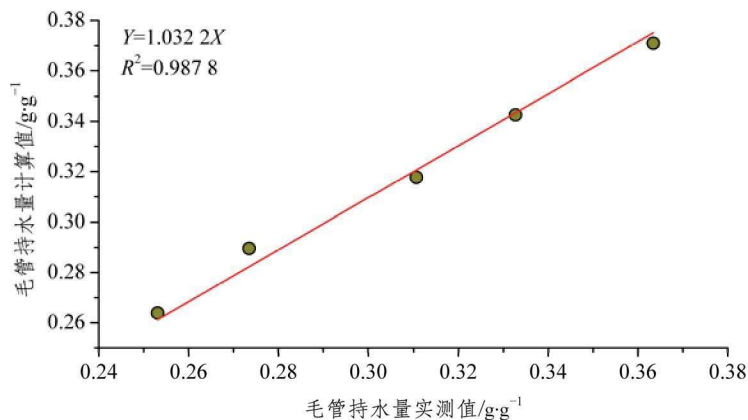


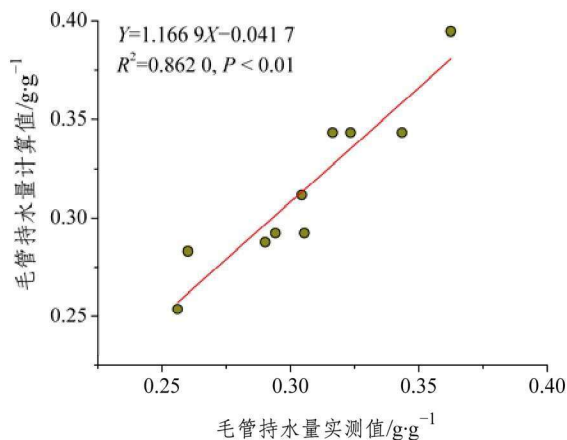
图 1-2 轻壤土毛管持水量计算值与实测值的关系

表 1-2 土壤容重和土壤水分常数

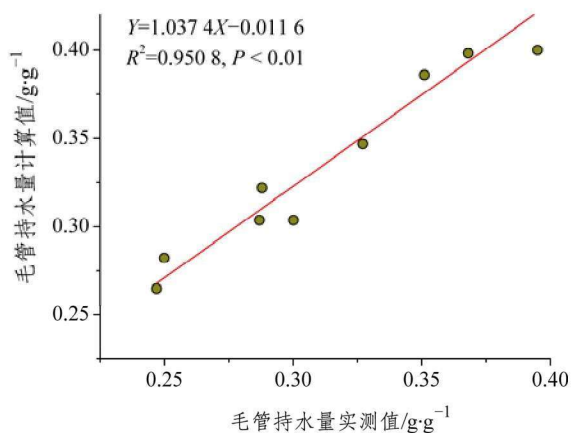
土壤类型	土壤容重/ g· cm ⁻³	饱和	萎 蔫	毛管持水量	毛管持水量	<i>N</i>
		持水量	系数	实测值	计算值	
		g· g ⁻¹				
黑土	1.41	0.334 1	0.05	0.305 3	0.314 6	10
草甸土	1.39	0.348 3	0.075	0.357 6	0.378 8	10
草甸黑钙土	1.29	0.405 2	0.06	0.360 4	0.384 7	5
盐化草甸土	1.31	0.399 2	0.065	0.360 2	0.379 7	5
白浆土	1.33	0.375 9	0.035	0.339 6	0.342 7	5

注：表中数据引自常征和徐海铁《应用数学在土壤毛管持水量计算中的应用》，2009。

另外，黑土和草甸土毛管持水量实测值与计算值的线性回归分析见图 1-3，草甸黑钙土、盐化草甸土和白浆土毛管持水量实测值与计算值的线性回归分析见图 1-4。



(a) 黑土



(b) 草甸土

图 1-3 黑土和草甸土毛管持水量实测值与计算值关系

注：图中数据引自常征和徐海铁《应用数学在土壤毛管持水量计算中的应用》，2009。

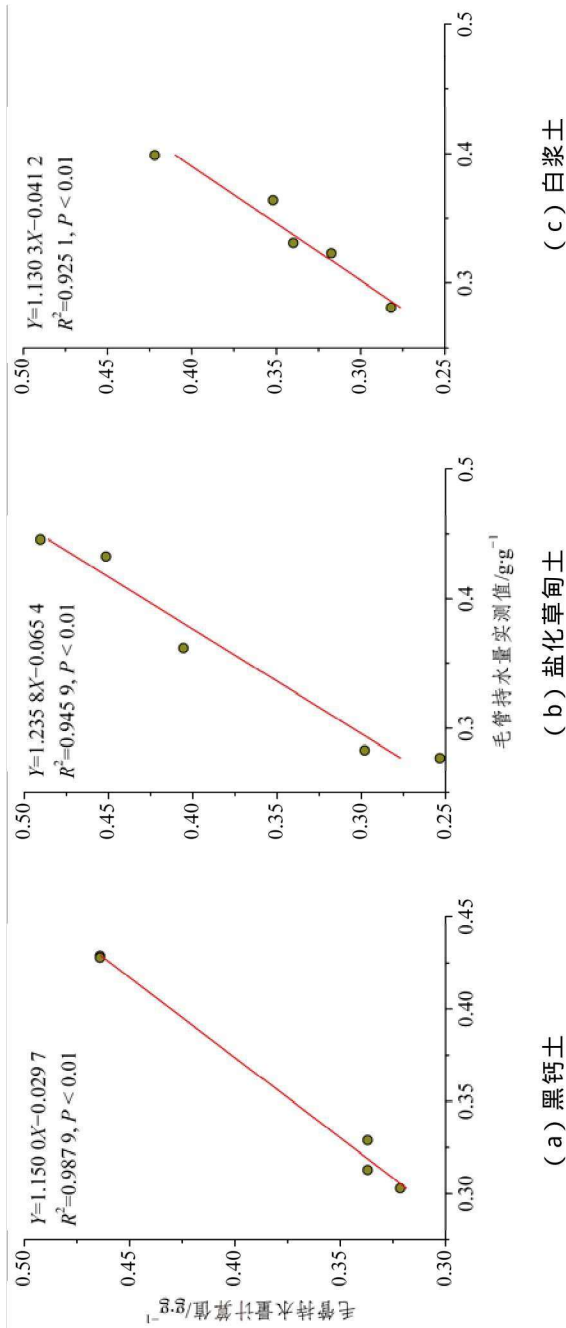


图 1-4 黑钙土、盐化草甸土和白浆土毛管持水量实测值与计算值关系

注：图中数据引自常征和徐海铁《应用数学在土壤毛管持水量计算中的应用》，2009。

此外,5 种类型土壤的毛管持水量计算值与实测值间 $Y=kX$ 型线性回归方程列于表 1-3。不难发现,其斜率非常接近 1.0, $R^2>0.86$ 。这进一步证明本节推导的毛管持水量理论计算公式是正确的。

表 1-3 5 种类型土壤毛管持水量计算值与实测值线性回归结果

土壤类型	方程	R^2	P
黑土	$Y=1.031\ 8X$	0.865 6	<0.01
草甸土	$Y=1.072\ 5X$	0.955 1	<0.01
草甸黑钙土	$Y=1.069\ 4X$	0.986 0	<0.01
盐化草甸土	$Y=1.061\ 1X$	0.939 5	<0.01
白浆土	$Y=1.010\ 7X$	0.933 1	<0.01

第二节 田间持水量的推算与验证

一、理论推导

根据式 (1.2) 所示,单位质量的土壤其质量含水量可以表示为

$$w = w_{wp} + \frac{w_s \sigma \cos \omega}{\varepsilon g h V_k} \times S_k \quad (1.2)$$

式中, w 为土壤质量含水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); w_{wp} 为土壤萎蔫系数 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); w_s 为土壤饱和持水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); σ 为水的表面张力系数 ($\text{g} \cdot \text{s}^{-2}$); ω 为土壤孔洞周围固相颗粒的湿润角 ($^\circ$); ε 为形状排列系数; g 为重力加速度 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$); h 为土壤水吸力 (cm); V_k 表示单个土壤孔

洞的体积 (cm^3); S_k 为单个土壤孔洞的表面积 (cm^2)。

如果土壤孔洞为球形, 则 V_k 和 S_k 的计算公式为

$$V_k = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (1.11)$$

$$S_k = 4\pi r^2 \quad (1.12)$$

式中, r 为土壤孔洞的半径 (cm)。将式 (1.11) 和式 (1.12) 代入式 (1.2) 得:

$$w = w_{wp} + \frac{3w_s \sigma \cos \omega}{\varepsilon g h r} \quad (1.13)$$

在 20°C 时, 土壤水吸力与土壤孔洞半径的关系为

$$h = \frac{0.149}{r} \quad (1.14)$$

联合式 (1.13) 和式 (1.14) 得:

$$w = w_{wp} + \frac{3w_s \sigma \cos \omega}{0.149 \varepsilon g} \quad (1.15)$$

将 $\sigma = 72.75 \text{ g} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $g = 981 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $\omega = 0^\circ$ 代入式 (1.15) 得:

$$w_{FC} = w_{wp} + \frac{1.4931}{\varepsilon} w_s \quad (1.16)$$

式中, w_{FC} 即土壤田间持水量 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。

联立式 (1.16) 和式 (1.9), 可得:

$$w_{FC} = \begin{cases} w_{wp} + 0.6327 w_s & (D_b < 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ w_{wp} + \frac{1.4931}{D_b + 1.07} w_s & (1.30 \leq D_b < 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \\ w_{wp} + 0.5810 w_s & (D_b \geq 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}) \end{cases} \quad (1.17)$$

式 (1.17) 即不同土壤容重情况下土壤毛管持水量的理论计算公式。