

一种改进的土壤压实模型及试验研究

付晓莉^{1,2}, 邵明安^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 土壤压实现象普遍存在于农业生态系统中。土壤的压实效应不但会给农业生产带来不良的影响, 还可能增加地表径流的产生, 从而加快地表水的污染。为了更好地研究压实土壤中的水分、溶质运移以及压实效应对农业生产及生态与环境的影响, 该文在原有土壤压实模型的基础上提出了一种两参数改进模型, 并以 4 种原状土壤为例, 用离心机法对改进模型进行验证。研究表明: 改进模型能够较好地模拟土壤的压实过程, 且拟合效果好于 L 模型; 虽然改进模型的物理意义和模型精度与 Assouline 的三参数模型相当, 但是参数少、形式简单是改进模型的优势。同时, 改进模型的提出对研究土壤水分特征曲线测定过程中的容重变化特性具有重要的参考价值。

关键词: 压实; 模型; 原状土

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2007)4-0001-05

付晓莉, 邵明安. 一种改进的土壤压实模型及试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 1- 5.

Fu Xiaoli, Shao Ming'an. Improved soil compaction model and experimental study[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 1- 5. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤在一定的压力下会发生板结。尤其是在现代高度发展的农业生态系统中, 由于种植规模的扩大以及机械化生产的发展^[1,2], 土壤板结现象变得越来越普遍。土壤板结不但会使农业生产减产^[3-7], 还可能影响城市土壤的综合质量^[8]。因此, 对土壤压实现象的研究在农业生产及生态与环境建设中意义重大。

现有的大多数模型都是用压力与容重间的关系曲线来定性地描述土壤的压实效应。McNabb 等^[9,10]研究了 Bailey 等(1986)提出的两参数模型在不同的初始容重和初始含水率下的应用情况。Fritton^[11]认为 Bailey 等(1986)提出的三参数模型和 Assouline 等^[12](1997)提出的两参数模型对于曲线形状变化较大的情况不太适用, 因此他提出了以压力加 1($\sigma + 1$) 为自变量的幂函数模型, 该模型虽然克服了不太适用曲线形状变化较大情况的缺点, 但是 Fritton 模型的假设条件是土壤最大的压实容重等于土壤的颗粒比重, 显然这一假设在自然条件下是很难达到的。而且仅以压力为自变量的模型

就可以适用整个压力范围, 所以将压力加 1 作为自变量理由不太充分。基于以上问题, Assouline^[13]在 2002 年对他本人在 1997 年提出的模型进行了修改, 在原有模型的基础上又加了一个参数 形成了三参数模型。这种三参数模型中的最大容重是通过拟合而获得的, 并且对于所研究的几种土壤而言, 拟合出的最大容重均小于土壤的颗粒比重。但是模型的参数较多, 而且形式复杂。吕殿青等^[14](2003)在研究的过程中以整个土壤含水率范围内土壤收缩特征近似线性关系这一假设为理论基础, 并结合 Brooks-Corey 的土壤水分特征曲线模型, 提出了类似 Brooks-Corey 模式的幂函数形式的土壤压实模型。压力为零时的不适用性和前提假设的局限性是该模型的不足之处。Baumgartl 等^[15](2004)对土壤压实模型作了进一步的研究, 即从内力和外力两个方面研究了土壤体积的变化特性, 并以 van Genuchten 土壤水分特征曲线模型为基础, 提出了表征土壤孔隙度随压力变化的经验模型, 但是模型参数较多且比较复杂。

综上所述, 现有的土壤压实模型或者在理论上存在着一定的缺陷或者参数较多、形式复杂。因此, 为了更好地研究压实土壤中的水分、溶质运移以及压实效应对农业生产及生态与环境的影响, 发展一种无论在理论上还是在形式上均具优势的土壤压实模型至关重要。基于此, 本文以吕殿青等(2003)提出的模型为基础, 发展一种新的土壤压实模型, 并以 4 种原状土壤为例, 对新提出的模型进行验证, 以期研究土壤压实过程提供一种新的方法。

收稿日期: 2006-04-06 修订日期: 2006-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371060)

作者简介: 付晓莉(1982-), 女, 辽宁盘锦人, 研究方向为环境土壤物理学。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100

*通讯作者: 邵明安, 研究员, 研究方向为土壤物理学。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: mashao@ms.iswc.ac.cn

1 土壤压实模型

土壤压实模型是用来描述土壤在一定压力作用下容重的变化情况。与以前一些学者相比, Assouline 等(2002)提出的土壤压实模型无论是在物理意义上还是在适用范围上都具有明显的优势。并且通过压力膜法的测定过程验证了该模型的合理性。Assouline 模型的表达式为

$$\frac{\rho - \rho_0}{\rho_{\max} - \rho_0} = [1 - e^{-(\kappa\sigma)^\omega}] \quad \omega > 0 \quad (1)$$

式中 ρ ——土壤容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_{\max} ——土壤可以被压实的最大容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; κ ——拟合参数, MPa; ω ——拟合参数; ρ_0 ——压力为零时的容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; σ ——压力, MPa。

虽然 Assouline 等(2002)模型的物理意义明确, 但参数多、形式复杂。吕殿青等(2003)提出的土壤压实幂函数模型不但形式简单, 还具有一定的理论基础, 其数学表达式为

$$\frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s - \rho_{bs}} = A' h^{-\beta'} \quad (2)$$

式中 ρ_b ——土壤容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_{bs} ——饱和容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_s ——土壤的颗粒比重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; h ——土壤水吸力(MPa, 离心机法压实的原理是将土壤水吸力的大小在数值上等于所施加的外力, 因此, 本文以下统一用压力表示); A', β' ——经验常数。该模型认为在整个供压范围内土壤收缩特性近似线性关系, 显然这一假设与实际情况有一定的差异。同时, 从数学分析的角度来看, 该模型也将土壤可压实的最大容重等同于土壤的颗粒比重, 与实际情况有差异。另外, 在压力为零时该模型不适用。

因此, 为了更好地研究土壤容重随压力的变化特性, 需要一种精确度高、形式简单的土壤压实模型。本研

究以公式(2)为基础, 更合理地用 ρ_{\max} 代替 ρ_s 。同时采用 $1 + \sigma^n$ 的形式克服公式(2)在压力为零时的不适用性, 并在等式的右端只设定一个经验参数, 提出了一种改进的土壤压实经验模型, 其具体形式如下

$$\frac{\rho_{\max} - \rho}{\rho_{\max} - \rho_0} = \frac{1}{(1 + \sigma^n)} \quad (3)$$

式中 ρ ——土壤容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_{\max} ——土壤可以被压实的最大容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; n ——经验参数; ρ_0 ——压力为零时的容重, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; σ ——压力, MPa。改进后的模型满足当压力为零时 $\rho = \rho_0$ 的边界条件, 并且 ρ_{\max} 是通过拟合获得的, 具有一定的物理意义。

2 材料与方法

以黄土高原地区典型的地带性土壤黄绵土、黑垆土和塬土以及湖南桃源地区的红壤为供试土壤, 基本物理特性见表1。颗粒分析仪器是英国马尔文公司生产的 MS2000 激光分析粒度仪, 测定结果为体积百分比, 结果采用国际制分级标准。用颗粒比重瓶法测定土壤的颗粒比重, 用环刀法确定容重, 饱和和质量含水率由烘干法获得。用尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的环刀取田间原状土, 取土层为 $20 \sim 40 \text{ cm}$ 。

本试验用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机对原状土壤进行压实, 测定温度为 20°C 。首先将环刀中的原状土取出一部分, 将土壤体积控制在 $5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$ 左右, 防止土壤饱和膨胀溢出环刀。然后将土壤饱和 24 h , 用游标卡尺测定饱和容重后放到离心机中, 按照设定的压力进行旋转, 待离心机旋转停止时, 取出离心盒, 用游标卡尺测定环刀中土层厚度并以此确定该压力下的土壤容重。离心压力范围是 $0 \sim 1 \text{ MPa}$, 压力从小到大依次进行。每种土壤设置 4 次重复, 文中的数据是 4 次重复的平均值。

本文用 SigmaPlot 软件进行公式拟合和统计分析。

表 1 供试土壤的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of experimental soil

| 土壤 | 质地 | 粉粒含量/% | 黏粒含量/% | 容重/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 颗粒比重/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 饱和和质量含水率/ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|-----|-------|--------|--------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| 黄绵土 | 粉质壤土 | 94.09 | 5.91 | 1.25 | 2.63 | 0.38 |
| 黑垆土 | 粉质黏壤土 | 82.87 | 15.94 | 1.39 | 2.63 | 0.34 |
| 塬土 | 粉质黏土 | 72.56 | 26.54 | 1.48 | 2.59 | 0.30 |
| 红壤 | 粉质黏土 | 65.50 | 28.40 | 1.47 | 2.58 | 0.30 |

3 结果与分析

在测定的过程中随着压力的增大及土壤含水率的减少, 土壤容重逐渐增大。对于存在预压密效应的土壤而言, 土壤的压实曲线类似于“S”型。由于离心机法测

定时通常将压力间隔设定得较大, 加上离心力作用对土壤近饱和段的影响较大, 使土壤的压实曲线在低吸力段没有表现出一个平缓的过渡段, 呈单调递增形式, 图1中的点图代表实测点。Assouline 等(2002)用压力膜法对土壤的压实过程进行了研究, 表明采用公式(1)对土

壤压实过程进行模拟具有一定的优越性。吕殿青等 (2003) 的研究结果表明等式(2) (以下简称 L 模型) 可以较好地模拟离心机法压实过程中扰动土壤容重随压力的变化趋势。但还没有研究将这两种模型应用到离心

机法压实原状土壤的过程中去。现用上述两种模型对 4 种原状土壤的实测数据进行拟合, 其拟合曲线和回归分析结果分别见图 1 和表 2。

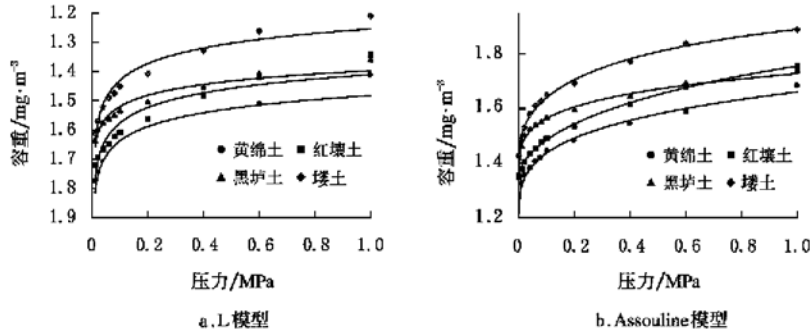


图 1 两种模型对 4 种土壤的拟合曲线

Fig. 1 Fitting curves of two models for four types of soil

表 2 两种模型对 4 种土壤的拟合结果

Table 2 Fitting results of two models for four types of soil

| 土壤 | L 模型 | | | | Assouline 模型 | | | | |
|-----|-------|----------|--------|-------|--------------|----------|----------|--------|-------|
| | A' | β' | R | SEE | ρ_{max} | κ | ω | R | SEE |
| 黄绵土 | 0.705 | 0.062 | 0.959* | 0.034 | 2.838 | 0.033 | 0.321 | 0.997* | 0.013 |
| 黑垆土 | 0.722 | 0.054 | 0.974* | 0.021 | 2.359 | 0.078 | 0.291 | 0.997* | 0.008 |
| 瘠土 | 0.640 | 0.092 | 0.977* | 0.029 | 2.087 | 1.482 | 0.492 | 0.998* | 0.010 |
| 红壤 | 0.726 | 0.074 | 0.953* | 0.040 | 2.170 | 0.519 | 0.584 | 0.999* | 0.006 |

注: SEE 表示估计标准差, R 表示相关系数, * 表示 $p = 0.05$ 的显著水平。

从表 2 中可以看出, 两种模型对 4 种土壤的拟合效果较好, 相应的相关系数均大于 0.95, 统计结果达到 $p = 0.05$ 的显著水平。说明 L 模型和 Assouline 模型都适用于描述原状土壤在用离心机压实过程中容重随压力的变化情况。但是正如前面所述, Assouline 模型参数多, 形式复杂, 而 L 模型在压力为零时不适用。

鉴于 L 模型的不足之处, 对其进行改进得到了一种新的土壤压实模型, 即等式(3)。改进的模型适用于整个压力变化范围, 而且没有将 ρ_{max} 等同于土壤的颗粒比重。图 2 和表 3 分别为改进模型对 4 种原状土的拟合曲线和拟合结果。表 3 中拟合的相关系数 R 均大于 0.99, 统计结果达到 $p = 0.05$ 的显著水平。说明改进模型能够很好地模拟离心机压实过程中土壤容重的变化情况。与 L 模型相比, 改进模型的 R 值大、 SEE 值小, 且在整个压力的变化范围内均适用。所以, 具有相同参数个数的改进模型要比 L 模型更适用于描述本研究中容重的变化过程。从整体上看, Assouline 模型的 SEE 值略小于改进模型, 但差异不大。除了黄绵土外, Assouline 模型拟合的 ρ_{max} 值均小于各种土壤的颗粒比重, 接近实际情况。改进模型对每种土壤拟合出的 ρ_{max} 值均小于土壤

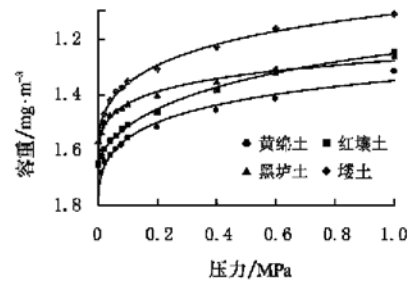


图 2 改进模型对 4 种土壤的拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves of improved model for four types of soil

表 3 改进模型对 4 种土壤的拟合结果

Table 3 Fitting results of improved model for four types of soil

| 土壤 | ρ_{max} | n | R | SEE |
|-----|--------------|-------|--------|-------|
| 黄绵土 | 2.107 | 0.427 | 0.993* | 0.017 |
| 黑垆土 | 2.101 | 0.377 | 0.996* | 0.011 |
| 瘠土 | 2.355 | 0.522 | 0.998* | 0.009 |
| 红壤 | 2.145 | 0.690 | 0.999* | 0.007 |

注: SEE 表示估计标准差, R 表示相关系数, * 表示 $p = 0.05$ 的显著水平。

的颗粒比重,与实际情况相符。所以,无论从统计结果还是从模型参数的物理意义上看,改进模型与 Assouline 模型差别不大。但是,在模型拟合效果相当的情况下,应用过程中通常选择参数较少的模型。从这点上看,两参数的改进模型要优越于三参数的 Assouline 模型。

不同土壤在压实过程中表现出不同的规律性,这一规律性可以用容重和压力的增量比来描述,即 $d\rho/d\sigma$ 。Assouline^[13]将公式(1)进行了如下转换

$$d\rho/d\sigma = \kappa\omega(\kappa\sigma)^{\omega-1}(\rho_{\max} - \rho_0)[e^{-(\kappa\sigma)^\omega}] \quad (5)$$

式中 $d\rho/d\sigma$ ——容重和压力的增量比, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$;其余的参数意义同公式(1)。在此基础上认为参数 ω 的大小能够表明土壤预压密效应的强弱。当 $\omega < 1$ 时土壤的预压密效应弱,此时 $d\rho/d\sigma$ 以类似于指数函数的形式单调递减;当 $\omega > 1$ 时土壤的预压密效应强,在低压力时 $d\rho/d\sigma$ 增加的很快,达到最大值后又几乎以直线的形式递减; $\omega = 1$ 的情况只适用于个别的土壤。由表 2 可知,Assouline 模型拟合出的 ω 值均小于 1,即用 Assouline 模型对离心机法测定结果的分析表明,这 4 种土壤的预压密效应均弱。从图 3a 中可以看出 4 种土壤

的 $d\rho/d\sigma$ 以类似于指数函数的形式单调递减,这再次说明 Assouline 模型可以用来描述离心机法测定过程中土壤的压实过程。为了证明改进模型在理论上与 Assouline 模型的一致性,现对公式(3)求导

$$d\rho/d\sigma = n(\rho_{\max} - \rho_0)\sigma^{n-1}(1 + \sigma^n)^{-2} \quad (6)$$

式中 $d\rho/d\sigma$ ——容重和压力的增量比, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{MPa}^{-1}$;其余的参数意义同公式(3)。然后,对上式作图(见图 3b)。从图 3b 可知,由改进模型得到的 $d\rho/d\sigma$ 图也呈指数函数形式单调递减,这与由 Assouline 模型得出的结论是一致的。而根据 Assouline 等^[13]的研究,壤土 Nahal Oz 的预压密效应弱,另外的两种粉质壤土 Gleneg 和 Rayne 的预压密效应强。本研究采用的壤土和红壤的质地均比粉质壤土黏重,但无论用改进模型还是 Assouline 模型都没表现出较强的预压密效应。研究结果再次表明离心机法测定时可能不利于预压密效应的表现。那么,在离心机法研究过程中,Assouline 模型能够表现出预压密效应的这一优势就无法体现出来,效果等价于改进模型。

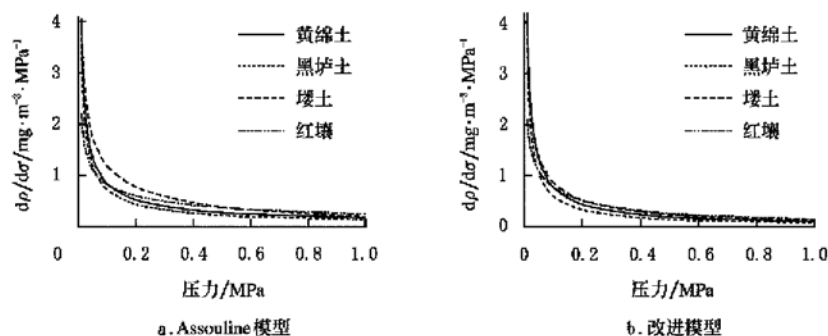


图 3 两种模型对于 4 种土壤的 $d\rho/d\sigma$ 曲线比较

Fig. 3 Comparison of $d\rho/d\sigma$ curves of two models for four types of soil

4 结论

目前,已有的研究多采用压力膜法对土壤进行压实,但此种方法耗时长,工作量大,并且存在着容重测定复杂的缺陷。在不需要预压密效应信息的情况下,例如为了获得土壤水分特征曲线测定过程中容重变化特性,简单快捷的离心机法具有一定的可取性与优越性。吕殿青等(2003)年提出的土壤压实模型虽然也能较好地模拟离心机法压实过程中容重随吸力的变化情况,但这种模型的假设条件是在整个供压范围内土壤收缩特性近似线性关系,与实际情况有一定的差异。并且这种模型在压力为零时不适用,具有一定的局限性。本文在此基础上提出的两参数改进模型能够满足压力为零时 $\rho = \rho_0$ 的边界条件,并且 ρ_{\min} 的拟合值均小于土壤的颗粒比

重,具有一定的物理意义。与同是两参数的 L 模型相比改进模型的拟合效果更好。与 Assouline 提出的三参数模型相比,改进模型在精度和物理意义上与其相当,并且在离心机法研究过程中,对土壤的预压密效应表现能力相似,但改进模型参数少、形式简单,具有一定的优势。改进模型的提出将为土壤的压实特性及其土壤的水力学特性研究提供一定的基础。

[参考文献]

- [1] 陈建,石军锋,李云伍.中国西南地区农业机械化现状及发展战略[J].农业工程学报,2003,19(5):1-6.
- [2] 何勇,张勤,Alan Hansen,等.精细农业机械化作物生产计算机集成技术(英)[J].农业工程学报,2006,22(11):152-159.

- [3] 李汝莘,高焕文,苏元升.土壤容重和含水量对耕作阻力的影响[J].农业工程学报,1998,14(1):81-85.
- [4] 贺明荣,王振林.土壤紧实度变化对小麦籽粒产量和品质的影响[J].西北植物学报,2004,24(4):649-654.
- [5] 迟仁立,左淑珍,夏平,等.不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J].农业工程学报,2001,17(6):39-43.
- [6] 刘晚苟,山仑,邓西平.不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J].西北植物学报,2002,22(4):831-838.
- [7] 刘晚苟,山仑.不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响[J].应用生态学报,2003,14(11):1906-1910.
- [8] 杨金玲,张甘霖,赵玉国,等.土壤压实指标在城市土壤评价中的应用与比较[J].农业工程学报,2005,21(5):51-55.
- [9] McNabb D H, Boersma L. Evaluation of the relationship between compressibility and shear strength of Andisols [J]. Soil Sci Soc Am J, 1993, 57: 923- 929.
- [10] McNabb D H, Boersma L. Nonlinear model for compressibility of partly saturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 333- 341.
- [11] Fritton D D. An improved empirical equation for uniaxial soil compression for a wide range of applied stresses [J]. Soil Sci Soc Am J, 2001, 65: 678- 684.
- [12] Assouline S, Tavares-Filho J, Tessier D. Effect of soil compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling [J]. Soil Sci Soc Am J, 1997, 61: 390- 398.
- [13] Assouline S. Modeling Soil Compaction under Uniaxial Compression [J]. Soil Sci Soc Am J, 2002, 66: 1784- 1787.
- [14] 吕殿青,邵明安,王全九.土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法[J].水利学报,2003,34(3):110-114,119.
- [15] Baumgartl Th, Köck B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models [J]. Soil Sci Soc Am J, 2004, 68: 57- 65.

Improved soil compaction model and experimental study

Fu Xiaoli^{1,2}, Shao Ming'an^{1,2*}

(1. Northwest Agriculture and Forestry University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Soil compaction occurs in agricultural ecosystems commonly. The effect of soil compaction not only has negative effect for agriculture but also could increase the potential pollution of surface water. In order to clarify the movement of soil water and solution in compacted soil and the impact of compaction on agricultural production and eco-environment, an improved model with two parameters was proposed, which relies on an existed soil compaction model. Four undisturbed soils were used in centrifugal procedural to test the improved model. Results show that the improved model fits the data better, and the performances of improved model are better than that of the L model. Although there is no remarkable difference in the theories and performances between improved model and Assouline model, fewer parameters and simple representation are the advantages of the improved model. Meanwhile, the improved model will provide important reference to the study on bulk density changes during soil water characteristic measurement.

Key words: compaction; model; undisturbed soil