

不同类型层状土壤持水能力的研究

任利东^{1,2}, 黄明斌^{2*}, 樊军²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 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)

摘要: 为了了解不同类型层状土柱持水能力, 利用砂土和砂黄土 2 种土壤, 设置 3 种不同厚度分层土柱 (11.25、22.5、45 cm) 和 2 种匀质对照土柱, 测定了土柱自初始饱和条件下的排水过程; 同时利用匀质土柱测定结果标定 2 种土壤水力参数, 通过 Hydrus-1D 模型对不同类型层状土柱排水过程进行模拟分析, 获得了不同类型层状土柱的田间持水量。结果表明, 层状土柱持水能力随着分层厚度的减小而增加, 当分层厚度减小到一定程度时土柱持水能力不再随着分层厚度的减小而增加, 该临界厚度取决于下层粗质土壤对上层细质土的吸力与上层细质土壤进气吸力之间的相对大小。本试验所用 2 种土壤分层临界厚度大约在 5 cm 左右; 土柱失水主要来自下层较粗质地土壤, 由饱和时的 $0.385 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 减小到 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。上层细质土壤含水量随着分层厚度的减小而增加。研究结果可为干旱半干旱地区矿区恢复和污染物填埋提供理论指导。

关键词: 土壤, 水, 模型, 持水能力, 进气值, Hydrus-1D 模型

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.19.013

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-19-0105-07

任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 105—111.

Ren Lidong, Huang Mingbin, Fan Jun. Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 105—111. (in Chinese with English abstract)

0 引言

黄土高原地处干旱半干旱地区, 土壤水分是限制植被恢复的关键因子^[1-2]。层状土壤在自然界广泛存在^[3], 研究表明层状土壤水分运动明显不同于均质土壤, 主要表现为层状土壤分层界面处存在毛管障碍, 降低了土壤水分下渗速率, 提高了上层土壤水分含量。因此层状土壤不仅可以降低污染物的下渗, 而且可以显著提高土壤持水能力^[4-6]。鉴于此, 通过利用层状土壤覆盖来减少污染物下渗和提高植被成活率已被广泛应用到污染物填埋和石油、煤炭等矿区修复当中^[7-9]。

针对层状土壤持水能力的问题, 国内外学者已做了不少研究。王文焰等^[10]利用室内土柱构建上细下粗型分层土壤, 发现下层砂土可明显提高上层黄土持水能力; 赵沛伦^[11]研究了母质两层性对土壤持水性能影响, 发现与均质土壤相比, 上

细下粗分层类型能显著提高上层细质土壤的持水能力; Romano 和 Santini^[12]则对上粗下细型层状土壤持水能力进行研究, 结果表明下层细砂土较低的导水率降低了上层砂土水分再分布速率, 同时提高了土壤持水能力; Zettl 等^[4]在野外通过大量的入渗和排水试验研究表明, 土壤有效持水能力的大小同分层土壤质地差异相关, 且随着土壤质地差异变大而增加。可见, 目前对于层状土壤持水能力的研究大多集中在分层顺序和分层土壤质地差异方面, 而很少考虑层状土壤的分层厚度和分层数量对土壤持水能力的影响。虽然 Huang 等^[13-15]在野外对多层交替分布的层状土壤持水能力做了不少研究, 但由于野外土壤分层类型的不可控性, 不能全面准确地对层状土壤分层厚度和分层数量与土壤持水能力的关系进行比较。因此, 本文利用室内土柱试验, 构建不同分层厚度和不同分层数量的层状土壤, 测定饱和土柱排水过程中土壤含水量和持水量的变化, 分析不同类型层状土壤持水能力差异, 并设置 2 个匀质土柱作为对照。利用 Hydrus-1D 模型模拟不同类型层状土壤排水过程中水分动态变化, 以期揭示不同类型层状土壤持水能力的差异, 为层状土壤应用提供理论指导。

收稿日期: 2013-05-26 修订日期: 2013-08-27

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 91025018、41171186)

作者简介: 任利东 (1987—), 男, 陕西靖边人, 主要从事土壤物理研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。

Email: renld315@163.com

*通信作者: 黄明斌 (1968—), 男, 湖北钟祥人, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文和土壤物理研究。杨凌 西北农林科技大学, 712100。Email: hmbd@nwsuaf.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2012 年 9 月在西北农林科技大学国家重点实验室干旱大厅进行。2 种供试土壤分别采自陕西神木（砂黄土）和陕西靖边（砂土）。土样经过碾压、风干过 2 mm 筛。2 种土壤物理性质如表 1 所示，土壤颗粒组成通过吸管法测定，土壤质地分类遵循国际制分类系统；土壤比重都按 2.65 g/cm^3 计算；土壤饱和导水率采用定水头法测定；水分特征曲线采用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机测定；田间持水量通过水分特征曲线计算得到。李玉山等^[16]研究了黄土高原不同土壤类型田间持水量（田间实测）与吸力（离心机法测得）的关系，发现砂黄土的田间持水量对应的土壤水吸力为

60 kPa，砂土为 10 kPa。

试验共设 5 种处理，每个处理 3 个重复。其中层状土柱处理共 3 种，分层厚度分别为 11.25、22.5 和 45 cm；匀质对照土柱 2 种，主要用来优化水力参数。各处理分别如图 1 所示。

表 1 供试土壤物理性质

Table 1 Physical properties of experimental soils		
	砂黄土 Sandy loess	砂土 Sand
砂粒 Sand/%	82.0	96
粉粒 Silt/%	11.1	2.1
粘粒 Clay/%	6.9	1.9
质地 Texture	砂质壤土 Sandy loam	砂土 Sand
干容重 Bulk density/(g cm^{-3})	1.46	1.63
田间持水量 Field capacity/($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	0.112	0.043

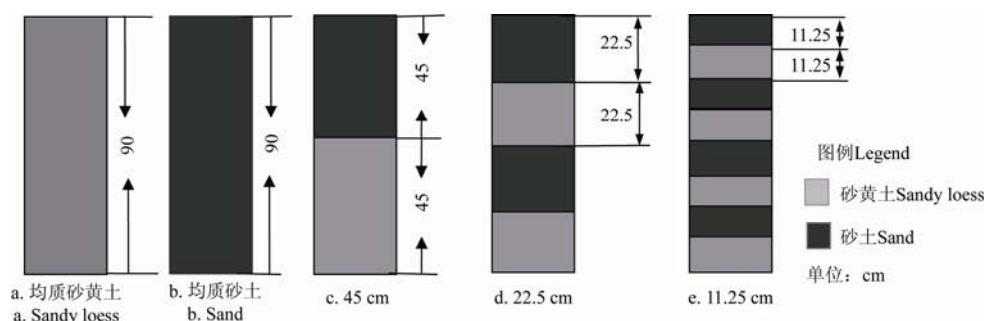


图 1 各处理土壤分层示意图

Fig.1 Schematic diagram of soil capping sequences used in each column

试验采用高 90 cm、内径 23.5 cm 的有机玻璃土柱，底部均匀开孔以保证排水畅通。装土前在土柱底部放置一张开孔为 10 目的铁网和一张定性滤纸。各层土壤按设定的容重均匀装土，分层界面处用毛刷打毛，同时每隔 10 cm 安装一个长 12 cm 的 TDR（时域反射仪，time domain reflect meter）水分探针，用于测定土壤剖面水分含量。

装土结束后，将土柱放入 90 cm 高的水槽饱和 3 d。待土柱完全饱和后，将土柱移出放入另外一个高度为 10 cm 的水槽，在土柱底部维持 2 cm 高的水位，进行排水试验。同时，用朔料薄膜密封土柱上表面，防止土壤蒸发。在排水过程中，分别在 0、1、2、4、8、12、24、48、72 和 96 h 用称重法（最小读数为 10 g）测定整个土柱持水量变化，同时利用 TDR 水分探针在 1、5、24、48、72 和 96 h 测定各土柱的剖面水分含量。排水 96 h 后，各分层土柱持水量的差异性用 LSD 来检验，置信水平为 0.05。

1.2 模型介绍

1.2.1 基本方程

垂直土柱排水试验可用描述一维饱和和非饱和土壤水分运动的 Richards 方程来模拟，其表达式如下

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中， t 为时间，hr； θ 为土壤体积含水率， cm^3/cm^3 ； h 为基质势（饱和时为压力水头），cm； z 为垂直距离，cm，向下为负； $K(h)$ 为非饱和导水率，cm/h。土壤基质势、导水率与含水率的关系分别采用 van Genuchten-Mualem (VG-M) 方程来拟合^[17]

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha h|^n \right]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中， S_e 为有效含水率， cm^3/cm^3 ； θ 为体积含水率， cm^3/cm^3 ； θ_r 和 θ_s 分别代表残留含水率和饱和含水率， cm^3/cm^3 ； α ， n 和 m 是 VG 模型参数，其中 $m=1-1/n$ ； K_s 为饱和导水率，cm/h。

1.2.2 初始条件和边界条件

土壤在初始饱和条件下的排水过程，其初始和边界条件是

$$\begin{cases} h(z, t) = 0 & t = 0 & \text{初始条件} \\ -K \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = 0 & z = 0 & \text{上边界条件} \\ h(z, t) = 2 & z = -L & \text{下边界条件} \end{cases} \quad (5)$$

式中， L 为土柱高度（90 cm）。

1.2.3 参数优化

首先，利用实测土壤吸力-土壤体积含水量数据，通过 VG 模型对相关水力学参数进行拟合（ θ_s 采用实测值），然后应用拟合参数模拟不同类型分层土柱的

排水过程，发现模拟结果并不理想（土柱持水量实测值与模拟值相对误差在 3%~19% 之间）。可能的原因包括：1) 装土后土柱内的土壤实际容重与实验室环刀内的土壤容重不一致；2) 用离心机法测土壤水分特征曲线本身存在缺陷，即环刀内的土壤容重随压力增大而增大，在高吸力段存在较大误差。鉴于上述原因，我们采用 Hydrus-1D 模型中 Inverse 模块^[18]，利用 2 个均质土柱不同时刻剖面含水量实测数据对 α 、 n 和 K_s 进行优化。优化后的水力参数如表 2 所示。应用优化后的水力学参数模拟不同类型分层土柱的排水过程，效果明显提高，相对误差降低到 1%~9%。

表 2 土壤水力学参数拟合与优化值

Table 2 Fitted and optimized hydraulic parameters for two materials

参数 Parameter	获取方法 Access method	砂土 Sand	砂黄土 Sandy loess
饱和含水率 $\theta_s/(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	实测 Measured	0.385	0.430
残留含水率 $\theta_r/(\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	拟合 Fitted	0.009	0.075
经验参数 $\alpha/(\text{cm}^{-1})$	拟合 Fitted	0.1582	0.0202
	优化 Optimized	0.0806	0.0160
经验参数 n	拟合 Fitted	1.7786	1.9315
	优化 Optimized	2.6760	1.9876
饱和导水率 $K_s/(\text{cm h}^{-1})$	实测 Measured	133.0	4.0
	优化 Optimized	96.0	3.7

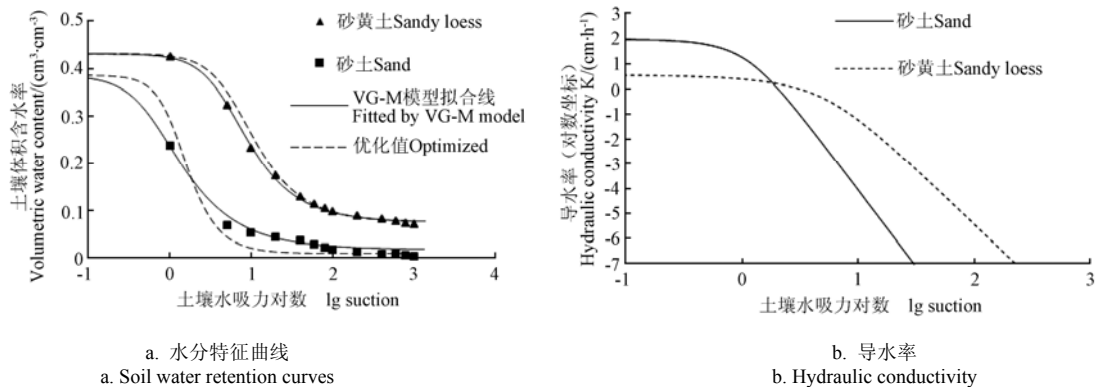


图 2 实测及其通过 VG 模型拟合的两种土壤水分特征曲线和导水率

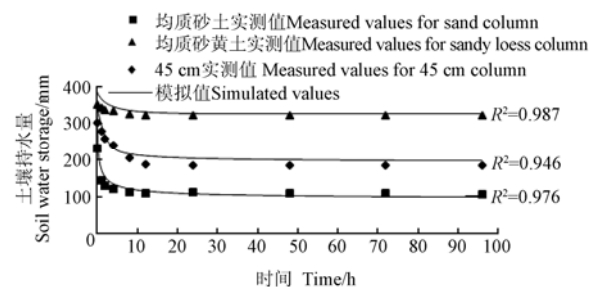
Fig.2 Measured and optimized soil water retention curves for all materials and hydraulic conductivity estimated using optimized van Genuchten (1980) equation parameters

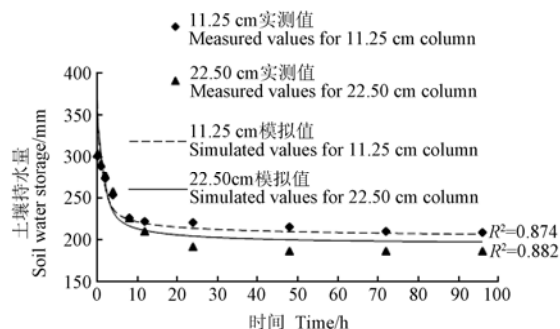
2 结果与讨论

2.1 土柱持水量及其模拟

不同处理土柱实际持水量与时间关系如图 3 所示。由图 3 可以看出，在最初的 8 h 内各处理土柱排水都非常迅速，其中匀质砂土排水最快，匀质砂黄土排水最慢。3 个不同类型的分层土柱中，11.25 cm 类型分层土柱排水速率在整个观测期（96 h）均小于其他 2 个分层处理；而 22.5 和 45 cm 类型的分层土柱排水 24 h 后排水速率趋于一致。匀质砂黄土持水量变化较小，而匀质砂土持水量下降明显。各类型分层土柱持水量在 4 h 之前差异不大，

之后 11.25 cm 类型的分层土柱持水量一直大于其他两个分层处理，而 22.5 和 45 cm 类型的分层土柱总的持水量差别不明显。





b. 11.25 和 22.5 cm 分层土柱持水量变化图
b. Water storage of 11.25 cm and 22.5 cm layered columns
图 3 各分层土柱持水量实测值与模拟值

Fig.3 Measured and simulated water storages with time for all columns

表 3 为排水 96 h 后各处理土柱持水量及模拟值。由表 3 可知, 两均质土柱持水差异明显, 这主要与两种土壤自身性质有关。3 种不同类型分层土柱中, 11.25 cm 类型分层土柱持水量最大 (209 mm), 显著高于其他 2 个类型分层土柱的持水量 (置信水平位 0.05); 22.25 cm 类型的分层土柱与 45 cm 类型的分层土柱持水量差异不显著。

由图 3 和表 3 模拟值与实测值的对比可以看出, 利用两均质土柱优化后的水力学参数可以较好的模拟不同类型分层土柱排水过程。但同时我们发现模拟值与实测值也存在一定偏离, 特别是分层土柱的差异相对较大, 这主要是由于分层土柱排气不畅影响土壤排水过程。李援农和费良军^[19]及孙美等^[20]已证实当土壤内部排气不畅时, 容易导致模拟值

与实测值之间存在差异。

表 3 排水 96 h 后各重复土柱持水量及其模拟值

Table 3 Soil water storages at 96 hours of drainage for the soil columns from each experimental replication and simulation

处理 Treatment	实测值/Laboratory measurements/mm				模拟值 Simulated /mm
	重复1	重复2	重复3	平均值 Average	
均质砂黄土 Sandy loess	320	322	321	321	326
均质砂土 Sand	118	107	96	107	97
11.25 cm	209	207	210	209a	206
22.5 cm	187	182	188	186b	197
45 cm	184	185	181	183b	198

注: 同列不同字母表示差异显著, 相同字母表示差异不显著 ($P < 0.05$)。
Note: Values with the same letter are not significantly different at the 5% probability level, and are significantly different with different letters.

2.2 土柱剖面含水量变化

图 4 为排水 96 h 时各土柱土壤剖面水分变化图。由图 4 可知, 均质砂黄土, 土壤剖面水分变化很小, 表层含水量从饱和时的 $0.43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 减小到 $0.34 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; 均质砂土剖面水分变化较大, 由饱和时的 $0.385 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 减小到 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

3 种不同类型的分层土柱剖面含水量在土壤分界面处发生剧烈变化。层状土柱失水主要来自砂土, 砂黄土排水十分有限。3 种不同类型的分层土柱中, 位于砂土上层的砂黄土含水量在 11.25 cm 类型的分层土柱中最高。Zettl 等^[9]在野外研究分层土壤水分变化时发现类似的现象, 这是由于分层界面存在毛管障碍限制砂黄土排水引起的。22.5 和 45 cm 类型分层土柱中砂黄土含水量差异不明显。

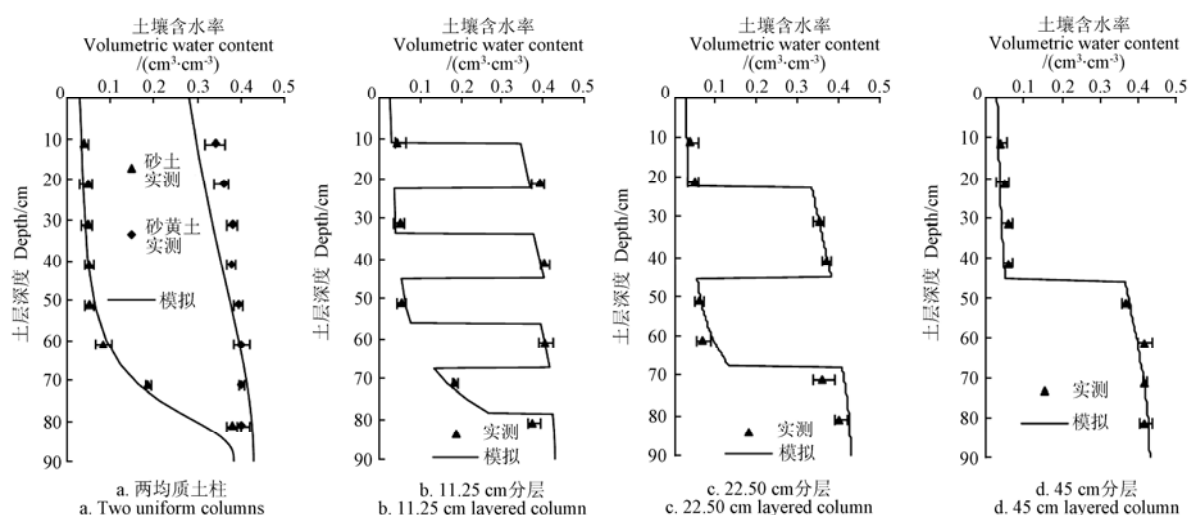


图 4 各分层土柱剖面含水量实测值与模拟值

Fig.4 Measured and simulated water content profiles for all columns

从图 4 可以看出, 各土柱剖面水分模拟值与实测值具有较好的一致性。但由于砂黄土容重较小, 加之试验所用土柱较高, 土柱在饱和过程中有略微下沉, 从而导致容重发生变化, 造成均质砂黄土水

剖面模拟值与实测值出现差异。11.25 cm 类型分层土柱最下层实测值与模拟值也存在差异, 这可能是由于最下一层 TDR 探针位于 2 种土壤分层界面处, 与砂土距离较小, 导致实测结果偏小。

2.3 分层厚度对土柱持水量的影响

田间持水量是土壤毛管悬着水达到最大时土壤所能保持的水分，但土壤达到最大毛管悬着水时的标准并不统一。Veihmeyer 和 Hendrickson^[21]以排水速率为指标来判断土壤田间持水量。他们定义自由排水的土壤，当排水速率明显下降，并小到可以忽略时所对应的土壤含水量称为田间持水量。但他们并未对最终排水速率定量化，这导致在实际应用过程中只能依靠经验来判断。Hillel 等^[4]定义匀质土壤自由排水 2~3 d 后对应的土壤含水量为田间持水量，但该定义可能不适用于层状土壤；Meyer 和 Gee^[22]认为土壤达到田间持水量时，土壤下界面自由排水速率大致在 0.001 到 0.1 cm/d 之间。Navin 等^[23]利用 Hydrus-1D 模型模拟了不同质地土壤的田间持水量，他们得出大部分土壤当自由排水速率为 0.01 cm/d 时对应的含水量与田间持水量最为接近。

本研究采用 Navin 等^[23]的方法计算田间持水量，即土柱下边界自由排水速率为 0.01 cm/d 时对应的含水量。鉴于本研究排水过程中下界面设置了 2 cm 高度的水位，不能满足自由排水条件。因此，利用优化后的水力参数模拟不同类型的分层土柱（45、22.5 和 11.25 cm）自由排水过程，当排水速率等于 0.01 cm/d 时的土壤含水量为田间持水量。

由表 4 可知，45、22.5 和 11.25 cm 3 个分层类型土柱持水量随着分层厚度的减小而增加，然而由此难以判断出土柱持水量随分层厚度变化的临界点。为了探索土柱分层厚度与持水量变化的临界点，我们利用优化后的水力参数通过 Hydrus-1D 模型，增加模拟分析了 9、5、2.5 和 1 cm 4 个分层类型土柱持水变化情况，结果如图 5 所示。由图 5 可知，随着分层厚度的减小，土柱持水量增加，当分层厚度减小到大约 5 cm 左右时土柱持水量不再随着分层厚度的减小而增加。这一临界厚度决定于两种质地土壤的进气值差异。这是因为当土柱达到田间持水量时下层砂土对上层砂黄土的吸力（大约在 5 kPa 左右）与上层砂黄土中的净水压小于砂黄土进气值（5.5 kPa）时，上层砂黄土将处于饱和状态；而一旦超出砂黄土进气值，上层砂黄土便开始失水。

表 4 下边界排水速率为 0.01 cm/d 时各个土柱持水量
Table 4 Water storage in each column when the drainage rate reaches 0.01 cm/d

分层厚度 Layering thickness/cm	土柱持水量 Soil water storage/mm
45	68
22.5	97
11.25	112

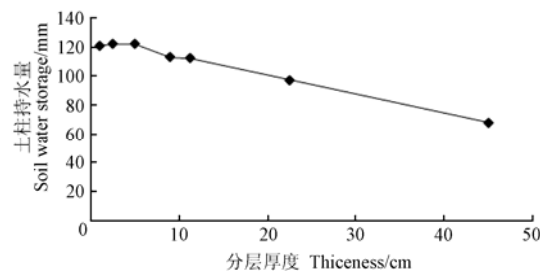


图 5 分层厚度与持水量的关系

Fig.5 Relationship between layering thickness and soil water storage

3 结 论

本研究利用砂土和砂黄土 2 种质地的土壤构建 3 种不同类型分层土柱和两均质对照土柱，测定了土柱自初始饱和条件排水过程中持水量的变化与剖面含水量的变化特征，同时利用 Hydrus-1D 模型对其上述排水过程进行了模拟，得出如下结论：

1) 层状土壤持水能力随着分层厚度的减小而增加，当分层厚度降低到一临界厚度后土壤持水能力不再增加。该临界厚度取决于下层粗质土壤对上层细质土的吸力与上层细质土壤进气吸力之间的关系。本试验所用 2 种土壤分层临界厚度大约在 5 cm 左右。

2) 土柱失水主要来自较粗质地土壤，本试验砂土由饱和时的 $0.385 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 减小到 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。2 种土壤分层界面处存在毛管障碍限制上层土壤排水，砂黄土含水量随着分层厚度的减小而增加。

层状土壤覆盖在矿区恢复、污染物填埋等领域有广泛应用，增加覆盖土层数量可提高整个覆盖层的持水能力，但实际应用时要考虑经济效益与可操作性。

[参 考 文 献]

- [1] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性[J]. 水科学进展, 2012, 23(3): 310—316.
Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Liu Zhipeng. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(3): 310—316. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡良军, 邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1045—1048.
Hu Liangjun, Shao Ming'an. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology. 2002,

- 13(8): 1045 — 1048. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吴先余. 土壤地理学[M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 1990.
- [4] Hillel D. Redistribution of Water in Soil, in Environmental Soil Physics[M]. Academic, San Diego, Calif, 1998: 449—470.
- [5] Macyk T M, Faught R L, Price R C. Evaluation of long-term changes in reconstructed soils at the operations of Syncrude Canada Ltd[C]// Alberta Research Council, 2004.
- [6] Si B C, Dyck M, Parkin G. Flow and transport in layered soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 127—132.
- [7] Aubertin M, Bussiere B, and Chapuis R P, et al. Construction of experimental cells with covers on acid producing tailings[C]// Proceedings of the 49th Annual Canadian Geotechnical Conference, St. John's, Newfoundland, 1996: 655—662.
- [8] Bussiere B, Aubertin M, Chapuis R P. The behavior of inclined covers used as oxygen barriers[J]. Can, Geotech, 2003, 40(3): 512—435.
- [9] Zettl J D, Barbour S L, Huang M, et al. Influence of textural laying on field capacity of coarse soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 133—147.
- [10] 王文焰, 张建丰, 汪志荣, 等. 砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(1): 105—110.
- Wang Wenyan, Zhang Jianfeng, Wang Zhirong, et al. Experiment and study on water-tightness and infiltration reduction of sand layer in loess soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(1): 105—110. (in Chinese with English abstract)
- [11] 赵沛伦. 母质的两层性对土壤持水性能的影响[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1985, 2: 30—46.
- Zhao Peilun. The effect of double-layer of parent material on water-holding capacity of soils[J]. Memoir of the Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica, 1985, 2: 30—46. (in Chinese with English abstract)
- [12] Romano N, Santini A, In J H Dane and G C Topp (ed.)Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical methods[M]. Madison: WI.2002. 3.3.3 Field.. SSSA Book series 5, 721—738.
- [13] Huang Mingbin, Barbour S L, Elshorbagy A, et al. Water availability and forest growth in coarse textured soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 199—210.
- [14] Huang Mingbin, Lee Barbour S, Amin Elshorbagy, et al. Infiltration and drainage processes in multi-layered coarse soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(2): 169—183.
- [15] Huang Mingbin, Julie D Zettl, S Lee Barbour, et al. The impact of soil moisture availability on forest growth indices for variably layered coarse-textured soils[J]. Ecohydrology, 2013, 6(2): 214—227.
- [16] 李玉山, 韩仕峰, 汪正华. 黄土高原土壤水分性质及其分区[J]. 水土保持研究, 1985(2): 1—17.
- Li Yushan, Han Shifeng, Wang Zhenghua. Soil water properties and its zoning in the Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1985(2): 1—17. (in Chinese with English abstract)
- [17] van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892—898.
- [18] Simunek J, Sejna M, Saito H, et al. The HYDRUS Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variable-saturated Media (Version 4.15)[M]. Riverside, CA, University of California, 2012.
- [19] 李援农, 费良军. 土壤空气压力影响下的非饱和入渗格林-安姆特模型[J]. 水利学报, 2005, 36(6): 733—736.
- Li Yuannong, Fei Liangjun. Green-Ampt model for unsaturated infiltration affected by air pressure entrapped insoil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(6): 733—736. (in Chinese with English abstract)
- [20] 孙美, 毛晓敏, 陈剑, 等. 夹砂层状土条件下渠道渗漏的室内试验和数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 33—38.
- Sun Mei, Mao Xiaomin, Chen Jian, et al. Laboratory experiment and simulation on canal seepage through sand interlayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 33—38. (in Chinese with English abstract)
- [21] Veihmeyer F J, Hendrickson A H. The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils[J]. Soil Science, 1931, 32(3): 181—193.
- [22] Meyer P D, Gee G. Flux-based estimation of field capacity[J]. Geotech Geoenviron Eng, 1999, 125(7): 595—599.
- [23] Navin K C, Twarakavi, Masaru Sakai, et al. An objective analysis of the dynamic nature of field capacity[J]. Water Resources Research, 2009, 45(10): 1—9.

Study on water retention capacity for drained soils with different textural layering

Ren Lidong^{1,2}, Huang Mingbin^{2*}, Fan Jun²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The impact of textural layering on water retention capacity was evaluated through three different layer thicknesses soils (11.25, 22.5 and 45 cm), and two homogeneous soils (sand and sandy loess) as control in 90 cm long columns. The soil columns were completely saturated and then drained with a positive pressure of 2 cm at the bottoms of the soil columns. The changes of water storage with time were measured by weighing the columns and by measuring the soil water content profiles using TDR probes, respectively, at 1, 5, 24, 48, 72 and 96 hours of drainage. The hydraulic properties of the sand and sandy loess were measured in the laboratory and also optimized using numerical simulations for the two homogeneous soil columns. Comparing the measured hydraulic parameters with the optimized ones, we found that the optimized parameters could decrease the maximum relative error from 19% to 9%. These optimized properties were then used to simulate the drainage process of deep profiles in more typical field conditions. The results showed that: 1) The laboratory observations and simulations all confirm that the amount of water retention decreases as the thickness of the layers increased. When the combined pressure caused by the suction of the underlying coarser layer plus the hydrostatic pressure within the finer sandy loess layer exceeds the air entry value (AVE) of the finer sandy loess, the amount of the water retention capacity does not increase with decreasing thickness of layer in the textural soil. In this study, we found the minimum thickness of the fine sandy loess is about 5 cm; 2) The water content within the finer textural layers decreased only slightly from saturation, with almost all of the water loss occurring from the coarser textural layers. This phenomenon can be found in the water content profile. The water content profiles in all layered soil columns showed distinct breaks at the layer interfaces, and the water content of coarser layers decreased from saturated to only $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Though the water content of finer sandy loess layers changed little, it also can be found that the water content of finer soil increased with the decreasing thickness. The results of this research can provide some recommendations for mine reclamation in arid and semiarid regions.

Key words: soils, water, models, water capacity, air entry value (AVE), Hydrus-1D

(责任编辑: 曾懿婷)