

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.271>



# 基于土柱排水实验探讨潜水含水层 给水度的影响因素

孙蓉琳, 何世伟, 黄 康

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430078

**摘 要:** 给水度是重要的水文地质参数之一, 为探讨潜水含水层给水度的影响因素, 设计均质粗砂、均质细砂、上细下粗、上粗下细 4 种土柱的排水实验, 按照一定间距分段降低地下水位, 每段降深设计不同排水时间, 求取不同水位埋深的给水度。当地下水位埋深小于支持毛细水高度, 给水度受地下水位埋深影响显著, 其关系可以用非线性函数来表示。排水时间越长, 给水度越大, 当土柱分段排水时间超过 1 h, 给水度值稳定。0.6~0.9 mm 粒径的粗砂给水度大于 0.2~0.4 mm 的细砂; 当地下水位在土层分界面下 20 cm 时, 上细下粗土柱给水度显著增大, 上粗下细土柱给水度显著减小。给水度的大小与地下水位埋深、排水时间、岩土颗粒和潜水面附近及之上非均质结构等因素有关。

**关键词:** 给水度; 土柱排水; 水位埋深; 排水时间; 非均质; 水文地质学。

中图分类号: P641

文章编号: 1000-2383(2021)05-1840-08

收稿日期: 2020-06-21

## Study on the Influencing Factors of Specific Yield of Unconfined Aquifer Using Laboratory Column Drainage Experiment

Sun Ronglin, He Shiwei, Huang Kang

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

**Abstract:** Specific yield is one of the most important hydrogeological parameters of unconfined aquifer. In order to study the influencing factors of specific yield, the laboratory column drainage experiment was developed to estimate specific yield of homogeneous and stratified heterogeneous sand columns. The groundwater level was decreased according to segmentation of 2 cm or 5 cm and each section kept different drainage times to obtain the specific yield value of different depth to water table. When the depth to water table was within the capillary rise height, the relationship between specific yield and water table depth can be expressed by a nonlinear function. The specific yield value increased with the drainage time and it became constant when the drainage time of each drawdown section was more than one hour. Specific yield value of coarse sand with particle size 0.6–0.9 mm was always larger than that of fine sand with particle size 0.2–0.4 mm. When groundwater level was 20 cm under the layer interface, two different columnar structures of upper-coarse-lower-fine and vice versa exerted distinct impacts on the magnitude of specific yield. For shallow unconfined aquifer, specific yield varied with the initial depth to water table, duration of drainage, soil texture and heterogeneity near the water table.

**Key words:** specific yield; soil column drainage; depth to water table; drainage time; heterogeneity; hydrogeology.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (Nos.41102155, 41772268); 中国地质调查局项目 (No.121201001000150121)。

**作者简介:** 孙蓉琳 (1979–), 女, 副教授, 主要从事水文地质学领域的教学和科研工作。ORCID: 0000-0001-5523-198X。E-mail: sunronglin@cug.edu.cn

**引用格式:** 孙蓉琳, 何世伟, 黄康, 2021. 基于土柱排水实验探讨潜水含水层给水度的影响因素. 地球科学, 46(5):1840–1847.

## 0 引言

给水度是重要的水文地质参数之一.潜水含水层给水度的定义是指当地下水位下降一个单位深度时,在重力作用下单位水平面积岩土柱体释出的水体积(Freeze and Cherry, 1979).在地下水资源均衡计算、潜水位动态预测、农田排水、地下水开发利用、降雨入渗补给和蒸散发计算等方面,给水度的准确与否直接影响到计算与研究成果的可靠性(Shah and Ross, 2009; 郭敏等, 2017; 许旭堂等, 2018; 裴源生等, 2020; 王健等, 2020).

目前求取潜水含水层给水度的方法主要有室内实验和野外试验两种.室内主要基于土柱饱水排水实验求取,野外主要根据抽水试验、土壤剖面水分监测、降雨入渗补给和潜水位动态观测等估算(Seraphin *et al.*, 2018; Worthington *et al.*, 2019).野外抽水试验耗费人力物力,持续时间较短,估算给水度明显小于其他方法所得给水度,因此室内土柱排水实验常被推荐用来求取给水度(Nwankwor *et al.*, 1984; Neuman, 1987; Chen *et al.*, 2010).排水实验砂土中的孔隙渗流通道大小不一,退水过程中不同通道流速不一,会形成减量效应和滞后效应(高云福等, 1990).室内或野外求取给水度时,当水位下降时原先饱水带中岩土空隙中的水,只能释出一部分,有时仅仅释出很小一部分.除去岩土本身颗粒大小、分选、成层状况外,地下水位初始埋深和排水时间等对给水度有显著的影响(张人权等, 2018; Pozdniakov *et al.*, 2019).

地下水位初始埋深对含水层给水度的影响显著,这主要是与潜水面之上的支持毛细水高度有关.当水位下降后埋深小于毛细饱和带高度,由于毛细力的作用,潜水位下降几乎不能给出水.Duke (1972)和 Nachabe (2002)基于 Brooks and Corey (1964)土壤水分特征曲线模型推导出给水度与地下水位埋深的关系式.雷志栋等(1984)通过解析解和室内土柱排水实验,指出给水度的大小不仅和土壤质地有关,还随地下水位埋深加大而增加.Said *et al.* (2005)推导出一个与土壤含水量有关的多项式方程,利用野外场地连续观测的土壤含水量估计给水度,指出给水度与地下水位埋深有关.王玉红等(2014)通过室内风积砂的排水试验,对比 Duke (1972)、Nachabe (2002)、雷志栋等(1984)和 Said *et al.* (2005)提出的给水度公式,发现雷志栋的公式拟

合较好. Shah and Ross (2009)基于数值模型,研究了在降雨、蒸发和抽水条件下,水位埋深小于2 m的含水层给水度与水位埋深的关系. Fan *et al.* (2014)基于土柱排水试验和野外水位动态求出的给水度,得到给水度与地下水位埋深之间的经验关系. Cheng *et al.* (2015)基于 van Genuchten 土壤水分特征曲线模型推导出稳定状态下给水度与地下水位埋深的关系式,并用土柱排水试验验证了公式的可靠性.

土柱排水实验中,岩土中的排水速度明显滞后于水位下降的速度,排水时间越短,释水越不充分,给水度越小.张蔚榛和蔡美娟(1988)基于数值模拟研究了不同水位下降速度下的给水度,指出在相同降深的情况下,降速越大,给水度越小. Chen *et al.* (2010)基于62个长度为0.19~1.36 m的原状土柱排水实验,指出2 h内50%的水排出,24 h内几乎所有的水排出. Cheng *et al.* (2020)考虑饱和非饱和过程的对流和弥散水流过程,推导出一个给水度与排水时间的关系式,同时考虑岩性、非饱和带初始水分分布等因素.

尽管对潜水含水层给水度的影响因素已经进行了很多研究,但对于给水度与地下水位埋深、排水时间的关系都是独立进行研究,释水机制探讨较少,给出的给水度计算公式适用性还有待评估.同时,目前的给水度研究大多针对均质土柱,对自然界广泛存在的层状非均质缺少深入研究.本文基于室内排水实验,设计不同粒径的均质和层状结构土柱,每组实验设计不同的排水时间,按照一定间距分段降低地下水位,求取不同条件下的土柱给水度,研究地下水位埋深、排水时间和层状结构等对含水层给水度的影响.

## 1 土柱排水实验

### 1.1 实验装置和计算原理

土柱排水实验装置包含土柱和供水排水装置两部分(图1).土柱内径为10 cm,高为150 cm,底部装有多孔板,多孔板下为漏斗,漏斗下部有一个排水口,排水口通过硅胶管与供排水装置的溢水箱底部相连,土柱的饱水和排水都是通过漏斗下部的排水口来实现的.供水排水装置由溢水箱和升降架组成,溢水箱通过钢丝绳与滑轮、转辊相连,转动转辊,溢水箱可以自由升降;升降架上标有刻度,可以记录溢水箱的水面位置.当溢水箱水位高于土柱地下水位时,溢水箱向土柱补水;当溢水箱水位低于

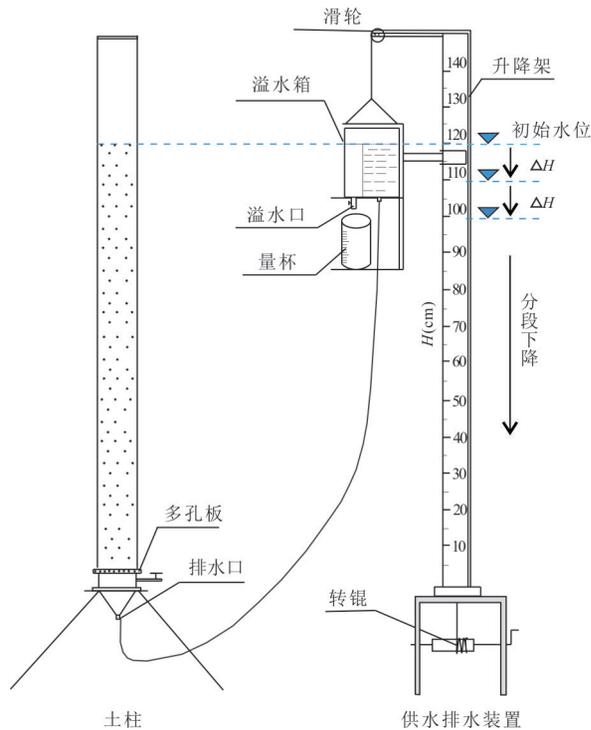


图1 土柱排水实验装置

Fig.1 Sketch of column drainage experiment

土柱地下水位时,土柱向溢水箱排泄,地下水从溢水口流出,可以测量排水体积,计算给水度。

根据给水度的定义,可以选择地下水位任意下降深度  $\Delta H$  计算土柱的给水度,公式为:

$$S_y = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta H}, \quad (1)$$

式中,  $S_y$  为给水度,  $A$  为土柱的横切面积,  $\Delta H$  为地下水位降深,  $\Delta V$  为当地下水位降深为  $\Delta H$  时土柱中释出的水体积。实验初始地下水位在土柱顶面,按照一定间距  $\Delta H$  分段降低地下水位,每段降深排水持续一定时间,由公式(1)可以求出每段降深的给水度。

## 1.2 实验土柱设计

本次实验采用两种粒径的河砂:0.2~0.4 mm 的细砂和 0.6~0.9 mm 的粗砂。土柱装样类型有 4 种,

分别为均质粗砂、均质细砂、上粗下细、上细下粗,实验过程中每段降深排水时间设计如表 1。

当岩土中存在细小孔隙时,通过毛细作用,在地下水面以上形成支持毛细水带,支持毛细水带随潜水面变动而变动。毛细水高度受孔隙大小影响,即使是均质介质中的孔隙实际上也是由大小不一的孔隙通道组成的网络,最宽部分称为孔腹,最狭窄部分称为孔喉。细小的孔隙通道毛细上升高度大,宽大的孔隙通道毛细上升高度小。

根据张人权等(2018)所述,对于砂粒,假设颗粒为理想等粒圆球,颗粒直径为  $D$ ,按照较疏松的立方体排列时,孔喉直径  $d=0.414D$ ,孔腹  $d'=0.732D$ ;按照较紧密的四面体排列时,孔喉  $d=0.155D$ 。根据张人权等(2018)给出的毛细上升高度  $h_c$  计算公式:

$$h_c \approx \frac{3}{D'}, \quad (2)$$

式中,  $h_c$  为毛细上升高度 (cm),  $D'$  为毛细管直径 (mm),可以用其孔喉和孔腹直径分别表征砂土中最细和最粗毛细管的直径。按照公式(2)可以近似计算实验土柱中粗砂和细砂的支持毛细水高度(表 2)。

根据表 2 所计算的毛细上升高度确定土柱排水实验过程中的分段退水间距  $\Delta H$ ,当地下水位埋深在毛细饱和带范围内,每 2 cm 下降一次水位;超过毛细饱和带范围,则每 5 cm 降一次水位。地下水面之上最宽大的孔隙通道均被支持毛细水所充满,即为毛细饱和带,其高度记为  $h_{c1}$ ;最细小孔隙的毛细上升高度记为  $h_{c2}$ 。等粒圆球中理论上最宽大的孔隙通道与立方体孔腹接近,最细小的孔隙与四面体孔喉比较接近。实际实验中,土柱中装填砂粒并非等粒圆球,砂粒排列可能介于立方体和四面体之间。根据表 2 立方体孔腹毛细高度,实验中粗砂土柱前 10 cm,细砂土柱前 25 cm,每 2 cm 下降一次水位,之后都是按照 5 cm 的间距分段下降。

表 1 实验土柱结构和排水时间

Table 1 Experimental soil column structure and drainage time

土柱编号	土柱结构	土柱装样长度	分段排水时间设计
1	均质粗砂	120 cm	5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h
2	均质细砂	100 cm	5 min、10 min、20 min、30 min、1 h、2 h、3 h
3	上细下粗	细 65 cm,粗 65 cm	30 min、1 h、2 h、3 h
4	上粗下细	粗 50 cm,细 70 cm	30 min、1 h、2 h、3 h

表 2 实验用砂孔隙大小和相应的毛细上升高度

Table 2 Pore size of experimental sands and capillary rise height

砂粒类型	颗粒大小 (mm)		孔隙大小(mm)			毛细上升高度(cm)		
			立方体孔隙	立方体孔隙	四面体孔隙	立方体孔隙	立方体孔隙	四面体孔隙
细砂	最小	0.2	0.146	0.083	0.031	20.49	36.23	96.77
	最大	0.4	0.293	0.166	0.062	10.25	18.12	48.39
	平均	0.3	0.220	0.124	0.047	13.66	24.15	64.52
粗砂	最小	0.6	0.439	0.248	0.093	6.83	12.08	32.26
	最大	0.9	0.659	0.373	0.140	4.55	8.05	21.51
	平均	0.75	0.549	0.311	0.116	5.46	9.66	25.81

1.3 实验步骤

实验步骤分为 3 步:(1)为土柱装样,采用干砂分层装样,为尽量保证每段压实程度相当,每次称取等量的砂样装入土柱,并压实至相等高度;(2)为土柱饱水,通过溢水箱供水,从土柱底部缓慢进水,进水过程中从土柱侧面的排气口排气,反复饱水排水,最后连续饱水 2 d;(3)为分段排水实验,排水过程中利用带少量气孔的薄膜封住土柱顶部和溢水箱上方,减少蒸发;土柱初始水位控制在砂柱顶部,按照间距  $\Delta H$ ,将溢水箱分段下降,在每一个埋深段停留一定时间,在溢水口测量排水量,计算给水度。

以长 120 cm 的均质粗砂土柱为例,每次水位下降后保持排水时间为 5 min,分 25 段退水,完成一次土柱排水实验共需 125 min. 重复土柱饱水和分段退水实验,依次按照表 1 给出的 7 次不同的排水时间开展,最长分段排水时间为 3 h,完成一次土柱排水实验共需 75 h.

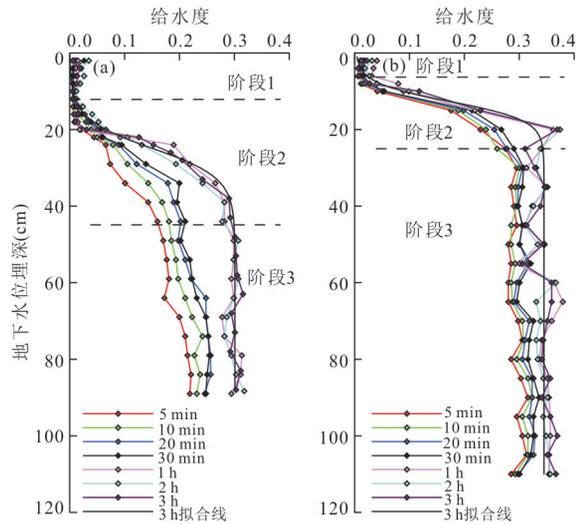


图 2 均质土柱给水度随地下水位埋深和排水时间变化曲线

Fig.2 Specific yield versus depth to water table in homogeneous column for different drainage times

a. 均质细砂; b. 均质粗砂

2 结果分析与讨论

2.1 均质土柱的给水度

图 2 显示了均质粗砂和细砂土柱的给水度随水位埋深和排水时间的变化趋势. 不论粗砂还是细砂, 根据地下水位埋深对给水度大小的影响, 可将排水过程分为 3 个阶段(图 3).

第一阶段: 地下水位埋深小于毛细饱和带高度 ( $D < h_{c1}$ ) (图 3a). 当地下水位下降时, 因为毛细力的作用, 潜水位下降段仍处于完全饱水状态, 几乎不能给出水. 但由于土柱中地下水位下降, 饱和土柱发生弹性释水, 土柱会有少量退水, 所求为潜水含水层的弹性给水度, 数值小且稳定. 实验结果表明, 细砂弹性给水度约为 0.000 5~0.001 0, 粗砂弹性给水度约为 0.006~0.010. 从图 2 可以看出, 当细砂地下水位埋深大于 12 cm, 粗砂地下水位埋深大于 6 cm 时,

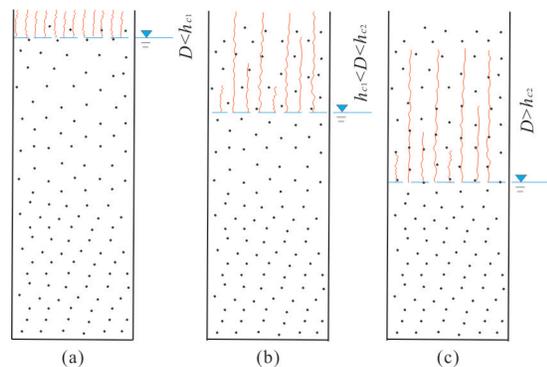


图 3 均质土柱不同地下水位埋深支持毛细水高度的分布

Fig.3 Variations of capillary rise height with depth to water table in homogenous column

a. 第一阶段; b. 第二阶段; c. 第三阶段

给水度开始变大, 表明开始有重力水释出, 由此可以判定细砂、粗砂的毛细饱和带高度  $h_{c1}$  分别约为

12 cm、6 cm,这一高度与表 2 中平均粒径立方体排列孔腹支持的毛细高度相当。

第二阶段:地下水位埋深大于毛细饱和带高度( $h_{c1}$ ),小于最大支持毛细水带高度( $h_{c2}$ )(图 3b)。随着地下水位埋深增加,超过毛细饱和带高度,最大孔隙通道中的水首先在重力作用下释出;当水位埋深继续增加,其他孔隙通道中的重力水释出,给水度逐渐增大。从图 2 可以看出,当细砂水位埋深大于 45 cm,粗砂水位埋深大于 25 cm,给水度大小趋于稳定,由此可以判定细砂、粗砂的最大毛细上升高度  $h_{c2}$  分别为 45 cm、25 cm,这个值介于表 2 中立方体和四面体排列的孔喉所支持的毛细上升高度之间。

第三阶段:地下水位埋深大于最大支持毛细水带高度( $D > h_{c2}$ )(图 3c)。此时土柱排水不受毛细作用影响,当地下水位下降时,潜水含水层中释出的水为支持毛细水带之上孔隙中的重力水,给水度随着水位的下降保持稳定。

图 2 显示排水时间对给水度的影响比较大,尤其是在退水的第二、第三阶段。随着排水时间的增加,给水度增大,实验中当分段排水时间大于 1 h,给水度基本稳定。排水时间对粗砂的影响相对较小,对细砂影响较大。不同排水时间的粗砂给水度差异相对较小,稳定给水度为 0.30~0.36;细砂给水度差异较大,稳定给水度为 0.15~0.30。对于细砂的第三阶段,当分段排水时间为 5 min、10 min、20 min、30 min 时,即使水位埋深超过 45 cm(细砂最大支持毛细水高度),给水度仍然随着埋深的增加而变大;当分段排水时间为 1 h、2 h、3 h 时,给水度大小在 45 cm 埋深时就基本稳定。这是因为颗粒越细,孔隙越小,水流的实际流动路径越长,所受阻力越大,越容易产生排水滞后现象,充分释水所需要的时间越长。

综上所述,当地下水位埋深小于支持毛细水高度,给水度的大小受水位埋深影响显著。给水度与地下水埋深的关系可以用非线性函数  $S_y = a/(1 + e^{(WTD-b)/c}) + d$  来表示,其中 WTD 为地下水位埋深, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为拟合参数。图 2 中的黑色实线展示了细砂和粗砂在 3 h 分段排水实验中给水度随水位埋深变化的趋势线,该趋势线与土壤水分特征曲线的翻转形状类似。土柱排水过程中,给水度是饱和含水量与实际含水量的差值,地下水位埋深相当于对饱和砂土施加的负压,水位埋深浅则负压绝对值小,土柱中只有少部分弹性释水;水位埋深大且负压绝对值超过某一临界值,砂土中最大孔隙中的水开始向外排出;水位埋深继续增大则负压绝对值也增大,最小孔隙中的水被排出,此时砂土中的体积含水量为残余含水量,得到的给水度为最大值;当水位埋深继续增大,砂土实际含水量均为残余含水量,给水度趋于最大且保持稳定。

不同排水时间的拟合方程如表 3,相关系数  $R^2$  都大于 0.97。这一拟合式与 Fan(2014)基于土柱排水试验和野外水位动态估算得到的经验关系式一致。公式中的  $a$  反映当水位埋深超过最大支持毛细水高度  $h_{c2}$  后的稳定给水度值,对比不同排水时间的拟合方程,排水时间越长,释水越充分,拟合方程中的  $a$  越大。 $b$  是与毛细上升高度有关的参数,细砂总是大于粗砂。

## 2.2 层状土柱的给水度

上细下粗、上粗下细两种土柱结构的排水实验,分段排水时间选择 30 min、1 h、2 h、3 h。实验结果表明不同层状结构对土层分层界面之下给水度的影响显著不同(图 4)。当潜水位经过土层分界面时,由于土体孔隙大小发生改变,相应的支持毛细水高度分布也会发生变化,影响重力水的释出,从而影响给水度的大小。

表 3 不同排水时间土柱给水度与地下水位埋深的关系

Table 3 Relationship between specific yield and depth to water table for different drainage times

排水时间	细砂拟合式	粗砂拟合式
5 min	$S_y = 0.215/(1 + e^{((WTD-33.7)/(-9.332))}) - 0.008$	$S_y = 0.297/(1 + e^{((WTD-14.63)/(-3.102))}) - 0.004$
10 min	$S_y = 0.233/(1 + e^{((WTD-30.23)/(-8.358))}) - 0.010$	$S_y = 0.301/(1 + e^{((WTD-14.26)/(-8.358))}) - 0.010$
20 min	$S_y = 0.256/(1 + e^{((WTD-29.33)/(-9.22))}) - 0.012$	$S_y = 0.306/(1 + e^{((WTD-14.08)/(-2.786))}) + 0.001$
30 min	$S_y = 0.286/(1 + e^{((WTD-26.44)/(-5.251))}) + 0.003$	$S_y = 0.309/(1 + e^{((WTD-13.63)/(-2.57))}) + 0.003$
1 h	$S_y = 0.288/(1 + e^{((WTD-23.98)/(-2.645))}) + 0.005$	$S_y = 0.312/(1 + e^{((WTD-13.78)/(-2.011))}) + 0.034$
2 h	$S_y = 0.290/(1 + e^{((WTD-26.31)/(-4.446))}) + 0.011$	$S_y = 0.334/(1 + e^{((WTD-14.47)/(-1.973))}) + 0.019$
3 h	$S_y = 0.301/(1 + e^{((WTD-24.89)/(-3.856))}) - 0.000$	$S_y = 0.344/(1 + e^{((WTD-12.65)/(-2.459))}) + 0.002$

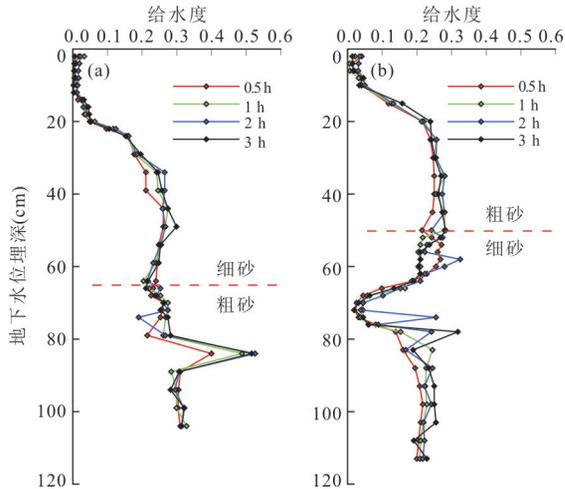


图4 层状土柱给水度随地下水位埋深和排水时间变化曲线

Fig.4 Specific yield versus depth to water table in stratified heterogeneous column for different drainage times

a. 上细下粗土柱; b. 上粗下细土柱

2.2.1 上细下粗结构

对于上细下粗的土柱,土层界面之上有可能形成悬挂毛细水.当潜水位在土层分界面及以上时,给水度随着地下水位埋深的变化,和相应均质细砂土柱中的变化趋势一致(图4a和图5a).当潜水位在土层分界面下6 cm以内时,虽然地下水位在粗砂中,但弯液面仍然在细砂中,此时毛细力的大小取决于弯液面所在处的孔隙直径,因此支持毛细水高度仍与细砂一致(图5b).当潜水位下降到分界面以下6 cm处,即将超过粗砂的进气值6 cm,毛细水本应该在界面处部分断裂,但是由于土层分界面附近上细下粗砂样的混合导致孔隙减小,界面处介质孔隙所能支持的毛细高度大于粗砂和细砂,没有进气条件,土层分界面之下为毛细饱和带.潜水位继续下降,毛细饱和带高度变大(图5c).

然而,当潜水位从土层分界面以下15 cm下降至20 cm时(图4a中埋深80~85 cm处),不同的排水时间都显示在这个深度给水度突然大幅增加至0.4~0.52,说明此时形成了进气条件,界面以下粗砂中的毛细水高度骤然减小,粗砂中的毛细水和细砂中的毛细水大部分断裂,给水度显著增大.当潜水位继续下降,细砂和粗砂的毛细水全面断裂,细砂中保留部分高度的悬挂毛细水,此时分段排水为粗砂中的退水,其稳定给水度约为0.32,大于上层细砂的稳定给水度(图5d).

2.2.2 上粗下细结构

对于上粗下细的土柱,当潜

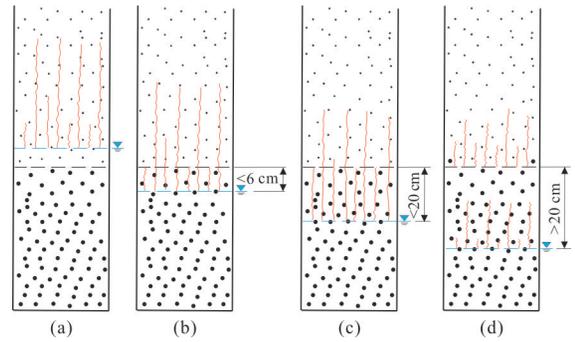


图5 上细下粗土柱中不同地下水位埋深的支持毛细水高度

Fig.5 Variations of capillary rise height with depth to water table in upper-fine-lower-coarse column

a. 水位在土层分界面之上; b. 水位距离分界面小于6 cm; c. 水位距离分界面小于20 cm; d. 水位距离分界面大于20 cm

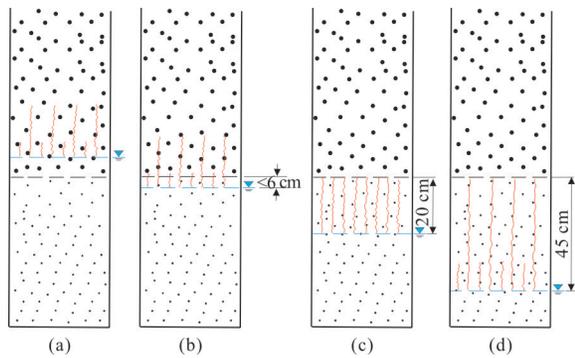


图6 上粗下细土柱中不同地下水位埋深的支持毛细水高度

Fig.6 Variations of capillary rise height with depth to water table in upper-coarse-lower-fine column

a. 水位在土层分界面之上; b. 水位距离分界面小于6 cm; c. 水位距离分界面约20 cm; d. 水位距离分界面大于45 cm

水位在土层分界面及以上时,给水度随着地下水位埋深的变化,和相应均质粗砂土柱中的变化趋势一致(图4b和图6a).当潜水位在土层分界面下6 cm以内时,潜水面所支持的毛细水高度仍然和上层粗砂一致,为6~25 cm,此时所得仍然是上层土柱粗砂的给水度(图6b).

当潜水位埋深在层状土分界面以下大于6 cm时,由于细砂的支持毛细水带高度大于粗砂,水位继续下降,土柱中的支持毛细水带开始变长,上部粗砂中的部分重力水转化为细砂中的支持毛细水,分段给水度偏小.当潜水位下降到分界面以下12 cm处,即将超过细砂的进气值12 cm,大孔隙中的重力水应该释出,然而由于土层分界面附近上粗下细砂样的混合导致孔隙减小,界面处介质孔隙所

能支持的毛细高度大于细砂,没有进气条件,分界面之下仍为毛细饱和带.潜水位继续下降,毛细饱和带高度继续变大,给水度减小.当潜水位下降至层状土分界面以下 20~25 cm 时(图 6c),分界面之下的细砂土柱全部为毛细水充满,上部粗砂的重力水全部转换为毛细水,退水量几乎为零,此时图 4b 中地下水位埋深 70~75 cm 处的给水度约为 0.01,几乎与粗砂的弹性给水度相当.

当潜水位继续下降,水位至土层分界面的距离超过分界面孔隙所能支持的毛细饱和带高度,越来越多的重力水开始释出,给水度又开始增大.当地下水位下降至 95 cm(分界面以下 45 cm),超过细砂的最大支持毛细水高度,给水度稳定在 0.20~0.25,略小于均质细砂的稳定给水度(图 6d).

### 3 结论

基于均质和层状结构土柱的排水试验,本文研究了地下水位埋深、排水时间、粒径和层状结构对潜水含水层给水度的影响,详细分析了不同土柱排水过程中的退水机制和毛细高度的变化,结论如下:

(1)当地下水位埋深小于最大毛细上升高度,给水度随着水位埋深的增加而逐渐增大;当地下水位埋深大于最大毛细上升高度,给水度达到最大,并保持稳定.给水度与地下水位埋深的关系可以用非线性函数来表示,拟合曲线形状与土壤水分特征曲线相似.当地下水位初始埋深在地表或小于毛细饱和带高度,只有少量弹性释水,给水度很小.均质土柱细砂的弹性给水度约为 0.000 5~0.001,支持毛细水带高度约为 12~45 cm;粗砂的弹性给水度约为 0.006~0.010,支持毛细水带高度约为 6~25 cm.

(2)给水度受排水时间影响较大,排水时间越长,给水度越大;实验中当降深为 2~5 cm 时,排水时间为 1 h,释水充分,给水度趋于最大的稳定值.相比粗砂,排水时间对细砂影响更大.实验中不同退水时间的粗砂稳定给水度为 0.30~0.36;细砂稳定给水度为 0.15~0.30.

(3)不同类型的层状土柱对土层分界面之下给水度的影响不同.当地下水位在土层分界面以下 20 cm,上细下粗土柱给水度突然增大为 0.40~0.52,上粗下细土柱给水度减小为 0.01,究其原因是在土柱中毛细水带高度发生了变化.

层状非均质土释水机制相当复杂,自然界中层状结构的组合比较多,论文仅考虑了两种层状

结构,非均质结构对给水度的影响还有待进一步研究.未来的实验增加负压计和含水率的原位监测,可以得到更量化的结果.

### References

- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University, Fort Collins.
- Chen, X.H., Song, J.X., Wang, W.K., 2010. Spatial Variability of Specific Yield and Vertical Hydraulic Conductivity in a Highly Permeable Alluvial Aquifer. *Journal of Hydrology*, 388:379–388. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.017>
- Cheng, D.H., Wang, Y.H., Duan, J.B., et al., 2015. A New Analytical Expression for Ultimate Specific Yield and Shallow Groundwater Drainage. *Hydrological Processes*, 29: 1905–1911. <https://doi.org/10.1002/hyp.10306>
- Cheng, D.W., Wang, W.K., Zhan, H.B., et al., 2020. Quantification of Transient Specific Yield Considering Unsaturated-Saturated Flow. *Journal of Hydrology*, 580: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124043>
- Duke, H.R., 1972. Capillary Properties of Soils-Influence upon Specific Yield. *Transactions of the ASAE*, 15(4): 688–691. <https://doi.org/10.13031/2013.37986>
- Fan, J.L., Oestergaard, K.T., Guyot, A., et al., 2014. Estimating Groundwater Recharge and Evapotranspiration from Water Table Fluctuations under Three Vegetation Covers in a Coastal Sandy Aquifer of Subtropical Australia. *Journal of Hydrology*, 519:1120–1129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.039>
- Freeze, R.A., Cherry, J.A., 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Gao, Y.F., Liang, D.W., Ren, S.C., 1990. A New Method of Determining the Specific Yield of Layered Soils in Shallow Layer under Surface. *Earth Sciences*, 15(2): 196–202 (in Chinese with English abstract).
- Guo, M., Wan, J.W., Jiang, F., et al., 2017. Estimating Unconfined Aquifer Parameters Based on Groundwater Tidal Effect. *Earth Science*, 42(1):155–160 (in Chinese with English abstract).
- Lei, Z.D., Xie, S.C., Yang, S.X., et al., 1984. The Preliminary Investigation of the Specific Yield. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2(5):10–17 (in Chinese with English abstract).
- Nachabe, M.H., 2002. Analytical Expressions for Transient Specific Yield and Shallow Water Table Drainage. *Water Resources Research*, 38(10):1193–1198. <https://doi.org/10.1029/2001WR001193>

- org/10.1029/2001WR001071.
- Neuman, S.P., 1987. On Methods of Determining Specific Yield. *Groundwater*, 25(6):679–684. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1987.tb02208.x>
- Nwankwor, G.I., Cherry, J.A., Gilliam, R.W., 1984. A Comparative Study of Specific Yield Determinations for a Shallow Sand Aquifer. *Groundwater*, 22(6): 764–772. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1984.tb01445.x>
- Pei, Y.S., Li, X.D., Zhao, Y., et al., 2020. Research on Vertical Recharge and Specific Yield of Unconfined Aquifer at a Typical Area of North China Plain with a Deep Groundwater Table. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 18(1):176–193 (in Chinese and English abstract).
- Pozdniakov, S. P., Wang, P., Likhov, V. A., 2019. An Approximate Model for Predicting the Specific Yield under Periodic Water Table Oscillations. *Water Resources Research*, 55: 6185–6197. <https://doi.org/10.1029/2019WR025053>
- Said, A., Nachabe, M., Ross, M., 2005. Methodology for Estimating Specific Yield in Shallow Water Environment Using Continuous Soil Moisture Data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(6): 533–538. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:6\(533\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:6(533))
- Seraphin, P., Gonçalves, J., Vallet-Coulomb, C., et al., 2018. Multi-Approach Assessment of the Spatial Distribution of the Specific Yield: Application to the Crau Plain Aquifer, France. *Hydrogeology Journal*, 26(4): 1221–1238.
- Shah, N., Ross, M., 2009. Variability in Specific Yield under Shallow Water Table Conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(12):1290–1298. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000121](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000121)
- Wang, J., Liang, X., Jin, M.G., et al., 2020. Evaluation of Phreatic Evaporation in Manas River Basin Plain by Bromine Tracing Method. *Earth Science*, 45(3):1050–1060 (in Chinese with English abstracts).
- Wang, Y.H., Chen, D.H., Duan, J.B., 2014. Experimental Study of Relationship between Specific Yield and Buried Depth of Shallow Groundwater. *Yangtze River*, 45(5): 60–64 (in Chinese with English abstract).
- Worthington, S.R.H., Foley, A.E., Soley, R.W.N., 2019, Transient Characteristics of Effective Porosity and Specific Yield in Bedrock Aquifers, *Journal of Hydrology*, 578: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124129>
- Xu, X.T., Jian, W.B., Wu, N.S., et al., 2018. Unsaturated Seepage Characteristics of Slope under Rainfall Infiltration. *Earth Science*, 43(3): 922–932 (in Chinese with English abstracts).
- Zhang, R.Q., Liang, X., Jin, M.G., et al., 2018. Fundamentals of Hydrogeology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, W.Z., Cai, M.J., 1988. Experimental Study of Drainable Porosity of Loamy Soils and Its Numerical Simulation. *Journal of the Wuhan Institute of Hydraulic and Electric Engineering*, 2: 1–11 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 高云福,梁定伟,任书才,1990.确定浅部层状土给水度的一种新方法.地球科学,15(2):196–202.
- 郭敏,万军伟,江峰,等,2017.用地下水潮汐效应确定潜水含水层水文地质参数.地球科学,42(1):155–160.
- 雷志栋,谢森传,杨诗秀,等,1984.土壤给水度的初步研究.水利学报,2(5):10–17.
- 裴源生,李旭东,赵勇,等,2020.华北典型地下水大深埋区潜水层垂向补给特征及其给水度.南水北调与水利科技,18(1):176–193.
- 王健,梁杏,靳孟贵,等,2020.运用溴离子示踪法评价玛纳斯河流域平原区潜水蒸发.地球科学,45(3):1051–1060.
- 王玉红,程东会,段吉波,2014.浅层地下水给水度与水位埋深关系的试验研究.人民长江,45(5):60–64.
- 许旭堂,简文彬,吴能森,等,2018.降雨入渗影响下边坡中的非饱和渗流特性.地球科学,43(3):922–932.
- 张人权,梁杏,靳孟贵,等,2018.水文地质学基础.北京:地质出版社.
- 张蔚榛,蔡美娟,1988.均质壤土给水度的室内试验和数值模拟.武汉水利电力学院学报,2:1–11.