

# 太湖地区典型水稻土水力学特征及土壤库容研究

张 勇, 陈效民, 林 洁

(南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095)

**摘 要:** 针对气候变化条件下温度升高对土壤水分产生的影响, 选择太湖地区典型水稻土——乌栅土作为研究对象, 对其土壤的水力学特征及土壤库容进行了研究。结果表明: (1) 影响乌栅土水分特征曲线的主要因素是容重与黏粒含量。饱和条件下和水吸力达到  $1.50 \times 10^6$  Pa 时各土层的含水量(凋萎含水量)变化均表现为: 耕作层 > 犁底层 > 潜育层 > 潜育层。(2) 乌栅土的有效水含量与容重和黏粒含量呈显著负相关关系, 与孔隙度呈显著正相关关系。(3) 在土壤的各种理化性质中, 容重和总孔隙度是影响饱和和导水率的主要因素, 而毛管孔隙度与 pH 值为次要因素。(4) 乌栅土耕作层总库容为 91.48 mm, 有效水库容为 22.02 mm, 滞洪库容为 20.50 mm, 这种土壤具有良好的水分状况, 既能保证太湖地区粮食作物的稳产高产, 又具有一定的蓄水调节功能。

**关键词:** 太湖地区; 典型水稻土; 水力学特征; 土壤水分; 土壤库容

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0064-04

中图分类号: S152.7

## Hydraulic Characteristics and Soil Reservoir Capacity of Typical Paddy Soil in Taihu Lake Region

ZHANG Yong, CHEN Xiao-min, LIN Jie

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** With climate change, temperature increase may affect soil moisture movement and content. Take the typical paddy soil (Wushan soil) as a study case, the water characteristics curves and soil reservoir capacity of Wushan soil were studied. The results were as follows: (1) Main factors affecting the water characteristics curves were bulk density and clay content. Soil water content decreased in following order: plough layer, plowpan, waterlogging-hydromorphic layer, and gley layer under saturated condition and water suction as  $1.50 \times 10^6$  Pa (wilting point). (2) Available water content had significant negative correlation with bulk density and clay content. But it had significant positive correlation with porosity. (3) Bulk density and total porosity were the main factors impacting the saturate hydraulic conductivity while the capillary porosity and pH were the second factors. (4) Total reservoir capacity of Wushan soil in plough layer was 91.48 mm. Available water reservoir capacity was 22.02 mm, and the flood detention reservoir capacity was 20.50 mm. Therefore, this soil had good water status which not only guaranteed high and stable soil productivity, but also had a regulatory function of water storage.

**Keywords:** Taihu Lake region; typical paddy soil; water characteristics; soil water content; soil reservoir capacity

土壤湿度作为气候变化研究中的一个重要的物理量一直受到有关研究的重视, 它的重要性具体表现在它能够通过改变地表的反射率、热容量和向大气输送的感热、潜热等而影响气候变化<sup>[1]</sup>。近 50 a 来, 长江中下游地区气候变化表现为气温存在上升趋势, 降水量增加, 而日照时数显著减少<sup>[2]</sup>。降水和气温对土

壤含水量的影响截然相反, 土壤湿度和气温存在极显著的负相关关系, 与降水量则呈极显著的正相关关系, 前者的相关性随着土层的增加而减少即浅层土壤湿度对气温更敏感, 后者正好相反<sup>[3]</sup>。土壤湿度作为陆地过程研究中的重要参数, 对气候变化起着非常重要的作用, 它的变化会影响土壤本身的热力学性质和

收稿日期: 2011-01-20

修回日期: 2011-03-30

资助项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目“气候变化对农业生产的影响及应对技术研究”(200903003); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 张勇(1986—), 男(汉族), 山西省孝义市人, 硕士研究生, 主要从事于水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: 2010203017@njau.edu.cn。

通信作者: 陈效民(1957—), 江苏省张家港市人, 博士, 教授, 主要从事于水土资源利用与环境方面的研究。E-mail: xmchen@njau.edu.cn。

水文过程,使地表的各种参数发生变化,从而进一步影响气候变化,反之,气候变化又能引起土壤含水量的变化<sup>[1]</sup>。土壤湿度通过控制土壤、植被和大气之间的交换过程在陆地生态系统中起着关键作用。在农业生态系统中,土壤水分可以限制植物的生长。土壤水分的保持和运动是生态环境中水循环的一部分,对自然环境和农业生产有着不可忽视的影响。土壤持水性是土壤储蓄水分最基本的物理性质,也是研究土壤—植物—大气连续体必不可少的资料<sup>[4]</sup>。土壤是一种高度复杂的非饱和介质,其蓄持水分的能力受土壤自身条件及气候条件等多方面的影响<sup>[5]</sup>。同时,土壤具有保持水分和传导水分的能力,这种能力决定于土壤的水力学性质<sup>[6]</sup>。在一定的区域,对于水土流失和溶质运移规律及其预测模型的研究而言,土壤的水力学性质是十分重要的土壤水分参数之一。土壤田间持水量、萎蔫系数和土壤水分特征曲线等都是反映土壤水力学性质的重要因素。本研究选择了太湖地区典型的水稻土——乌栅土,分析了这种土壤的水力

学特征及库容,试图为太湖地区在气候变化条件下土壤水分的有效管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究选择了太湖地区典型的水稻土——乌栅土作为研究对象,该土壤主要由湖积物和长江冲积母质发育而成,土质黏重,上部为壤质黏土,下部为黏壤土。于 2010 年 5 月 15 日,按自然发生层采集土壤样品:耕作层(0—14 cm),犁底层(14—33 cm),潜育层(33—59 cm),潜育层(59—90 cm)。

1.2 土壤基本性质的测定

土壤容重采用环刀法测定;土壤质地采用吸管法测定,质地采用国际制分类;采用 pH 计电位法测定土壤 pH 值;采用常水头法测定饱和导水率,固定水头高度,采用量筒量出水口处一定时间内的渗水量,从而计算饱和导水率;采用压力膜法<sup>[7]</sup>测定土壤水分特征曲线。土壤的基本性质详见表 1。

表 1 供试土壤性质

层 次	深度/ cm	饱和导水率/ (10 <sup>-4</sup> cm · s <sup>-1</sup> )	容重/ (g · cm <sup>-3</sup> )	pH 值	孔隙度/ %	机械组成/(g · kg <sup>-1</sup> )		
						>0.02 mm	0.02~0.002 mm	<0.002 mm
耕作层	0—14	7.04	1.21	7.0	54.34	337.43	386.22	276.35
犁底层	14—33	1.26	1.47	7.2	44.53	278.60	392.62	328.78
潜育层	33—59	1.64	1.52	7.5	42.64	158.72	391.76	449.52
潜育层	59—90	8.62	1.56	7.3	41.13	95.21	472.03	432.76

1.3 土壤库容

通过 3 个基本土壤水分常数,即饱和含水量( $\theta_s$ ),田间持水量( $\theta_f$ ),凋萎含水量( $\theta_w$ )(均为体积含水量),计算在不同状态下的水分库容<sup>[8]</sup>。具体计算方法为:

$$W_t = \frac{\theta_s \times M \times h}{100M} \times 10 = 0.1 \times \theta_s \times h$$

所以:  $W_t = 0.1 \times \theta_s \times h$

$$W_f = 0.1 \times \theta_f \times h$$

$$W_d = 0.1 \times \theta_w \times h$$

$$W_y = W_f - W_d$$

$$W_h = W_t - W_f$$

式中:  $W_t$ ——某土层土壤水库的总库容(mm);  
 $M$ ——面积(cm<sup>2</sup>);  $h$ ——某土层的厚度(cm);  $\theta_s$ ——饱和水量(体积含水量%);  $\theta_f$ ——田间持水量(体积含水量%);  $\theta_w$ ——凋萎含水量(体积含水量%);  $W_f$ ——田间持水量对应的库容,相当于有效库容和死水库容之和;  $W_d$ ——死水库容;  $W_y$ ——有效水库容;  $W_h$ ——滞洪库容。

2 结果与讨论

2.1 供试土壤的水分特征曲线

土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与吸力(基质势)之间的关系曲线,它反映了土壤水分能量与土壤含水量之间的函数关系,因此它是土壤基本水力学特征的重要指标,其受多种因素的影响<sup>[9]</sup>。土壤水分特征曲线实际上反映了土壤水和土壤固体之间相互作用的关系,也反映了土壤颗粒表面吸附力和土壤孔隙吸力对土壤水分的作用。通过土壤水分特征曲线可以对土壤含水量和水吸力进行相互换算。土壤水分特征曲线可以间接地反映不同土壤类型所能保持的水分与充水孔隙、当量孔径和容积的相互关系<sup>[10]</sup>。图 1 为乌栅土土壤剖面 4 个土层土壤的水分特征曲线。从图 1 可以看出随着水吸力的增大,土壤含水量呈逐渐降低趋势,且各个土层的持水性能为:耕作层>犁底层>潜育层>潜育层。当水吸力从 0 增加到  $3.00 \times 10^4$  Pa 时,土壤含水量迅速下降,以后随着水

吸力的增加,土壤含水量缓慢降低。土壤水分在中低吸力段的保持主要依赖于毛管作用和孔隙大小分布。在较高吸力段土壤水分的保持主要依靠细小毛管的强毛管力和土壤颗粒的吸附作用。土壤容重越小,孔隙度越大,毛管含量越丰富,储水空间越多。由表 1 可知,随着供试土壤深度的增加,土壤容重逐渐增大,土壤黏粒含量增大,致使土壤中发育更多的细小孔隙。在相同的水吸力作用下,表土层保持的水分也较底层土壤要多。低水吸力状况下,耕作层的持水量相对较高。饱和条件下和水吸力达到  $1.50 \times 10^6$  Pa 时各层的含水量(凋萎含水量)变化均表现为:耕作层>犁底层>潜育层>潜育层。

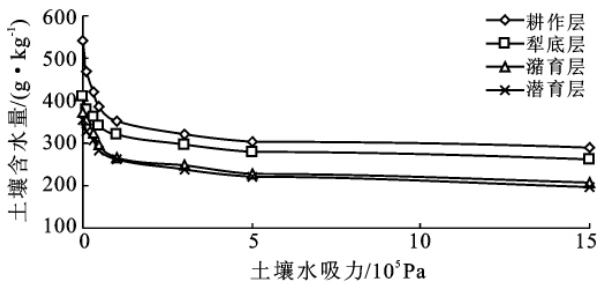


图 1 研究区土壤水分特征曲线

2.2 研究区土壤的水分状况

对植物生长起关键作用的土壤水分特征常数主要有田间持水量,凋萎含水量和有效水含量。有效水

含量是田间持水量和凋萎含水量的差值。由表 2 可知,随着深度的加深,土壤有效含水量逐渐减少。由于耕作层容重较小,毛管含量丰富,田间持水量和凋萎含水量较大,在潜育层和潜育层土壤中,黏粒含量增加,容重增大,总孔隙度和毛管含量减少,土壤中田间持水量和凋萎含水量最小。有效水含量与容重的关系呈显著负相关关系( $y = -306.61x + 757.55, r = 0.9448^*, n = 4$ ),有效水含量与孔隙度呈显著正相关关系( $y = 0.1099x + 10.367, r = 0.9448^*, n = 4$ )。全球正在经历着气候变暖,CO<sub>2</sub> 浓度升高,使中纬度地区降雨和蒸发发生变异,土壤中田间持水量和有效水含量的变化研究可对太湖地区有效地进行水分管理提供科学依据。

2.3 土壤性质对饱和和导水率的影响

饱和导水率( $K_s$ )是定量分析土壤水分入渗和地表产流等过程重要的水力学参数。供试土壤的饱和和导水率分别为:耕作层( $7.04 \times 10^{-4}$  cm/s),犁底层( $1.26 \times 10^{-4}$  cm/s),潜育层( $1.64 \times 10^{-4}$  cm/s),潜育层( $8.62 \times 10^{-4}$  cm/s)。耕作层质地疏松,孔隙度大,透水性好,故饱和和导水率较大;由于受到耕作的影响,犁底层比较紧实,孔隙度小,透水性差。在潜育层和潜育层由于黏粒含量大,孔隙度小,透水性差,但是在潜育层中含有较多的螺壳,使饱和和导水率比潜育层大。影响土壤饱和和导水率的因素主要有容重,孔隙度,pH 值和质地等。表 3 为各因素对土壤饱和和导水率的主成分分析结果。

表 2 研究区土壤水分状况

层 次	深度/cm	饱和含水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	田间持水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	凋萎含水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效含水量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
耕作层	0—14	540.51	419.49	289.44	130.05
犁底层	14—33	412.03	361.40	261.51	99.89
潜育层	33—59	372.84	323.78	207.41	116.37
潜育层	59—90	354.65	307.08	198.73	108.35

表 3 各主成分中影响因素负荷表

主成分	特征值	贡献率/ %	容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	总孔隙度/ %	毛管孔隙度/ %	pH 值	黏粒含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	粉砂粒含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	砂粒含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )
1	5.434	77.628	0.983	-0.983	-0.026	0.460	0.704	0.966	0.857
2	1.287	18.382	0.175	-0.175	-0.990	0.786	0.670	0.213	0.509

表 3 为供试土壤基本性质经过极大正交旋转后得到的因子矩阵,反映了理化性质不同范畴内的主导因素。第一主成分范畴的特征值是 5.434,占全部方差的 77.628%,因此第一主成分起了很大的作用,第一主成分可解释土壤理化性质之间 77.628% 的状况,其中容重、总孔隙度和粉砂粒含量为最主要的影响因素,是土壤孔性的综合指标。第二主成分范畴的

特征值是 1.287,占全部方差的 18.382%,所以第二主成分起一定的作用,其中毛管孔隙度、pH 值和黏粒含量为主导因素。通过对土壤饱和和导水率主成分分析,第一主成分和第二主成分占全部方差的 96.009%,即可对饱和和导水率 96.009% 的影响因素加以解释,综合反映了土壤理化性质的相互关系和主导因素。在土壤的各个理化性质中,容重和总孔隙度为影响饱

和导水率的主导因素,其它如毛管孔度和 pH 值为次要因素。

2.4 供试土壤的水分库容分析

土壤总库容是指土壤剖面中总孔隙的容积部分,由剖面中各土层的总孔隙度换算,加权而得<sup>[11]</sup>。由表 4 可知,土壤耕作层总库容最小为 91.48 mm,潜育层和潜育层土壤总库容为 147.01 和 171.19 mm,均明显高于耕作层的总库容。田间持水量库容是指能保持土壤水分的最大容量,分别占总库容的 77.59%, 64.56%, 46.75% 和 39.17%。有效水库容可以为作物生长直接提供水分,分别占总库容的 31.02%, 27.70%, 35.91% 和 35.51%,而且在不同层次之间有效水库容没有明显差异。从有效水库容可以看出

乌栅土水分状况良好,能够满足作物生长所需的水分,保证研究区作物的稳产、高产。但是由于土壤深层的质地黏重,长期处于氧化还原的环境中,饱和导水率低,水分不容易通过毛管到达耕层供作物生长。不同层次中的死水库容均高于有效水库容,但是不能被作物利用。土壤具有容纳水分的能力,潜育层和潜育层的滞洪库容分别为 78.28 和 104.15 mm。由于土壤饱和导水率较小,在潜育层和潜育层滞洪库容对防洪减灾的作用不大,土壤耕作层滞洪库容为 20.50 mm,犁底层为 40.78 mm,具有一定的水分储蓄和调节功能,气候变化引起的降雨和干旱对土壤水分的异常变化,科学地利用土壤库容,防旱、涝灾害方面有着极其重要的意义<sup>[12]</sup>。

表 4 研究区乌栅土水分库容

土 层	深度/cm	厚度/cm	总库容/ mm	田间持水量 库容/mm	死水库容/ mm	有效水库容/ mm	滞洪库容/ mm
耕作层	0—14	14	91.48	70.98	48.96	22.02	20.50
犁底层	14—33	19	115.07	74.29	53.71	20.58	40.78
潜育层	33—59	26	147.01	68.73	44.05	24.68	78.28
潜育层	59—90	31	171.19	67.05	43.24	23.81	104.15

3 结 论

(1) 影响太湖地区典型水稻土——乌栅土水分特征曲线的主要因素是容重和黏粒含量。低水吸力状况下,耕作层的持水量相对较高。饱和条件下和水吸力达到  $1.50 \times 10^6$  Pa 时各层的含水量(凋萎含水量)变化均表现为:耕作层>犁底层>潜育层>潜育层。

(2) 乌栅土中有效水含量与容重和黏粒呈显著负相关,与孔隙度呈显著正相关。

(3) 在土壤的各种理化性质中,容重和总孔隙度为影响饱和导水率的主导因素,其它如毛管孔度和 pH 值为次要因素。

(4) 乌栅土表层总库容达到 91.48 mm,有效水库容为 22.02 mm,滞洪库容为 20.50 mm,乌栅土有良好的水分状况,可以保证太湖地区粮食作物的高产稳产。气候变化引起的降雨和干旱对土壤水分的异常变化研究,在防旱、涝灾害方面具有重要意义。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 马柱国,魏和林,符凉斌,等. 土壤湿度与气候变化关系的进展与研究[J]. 地球科学与进展, 1999, 14(3):299-305.  
[2] 潘根兴. 气候变化对中国农业生产的影响[M]. 北京:中国农业出版社,2010:35-36.

[3] 马柱国,曾燕,邱新法,等. 中国东部区域土壤湿度的变化及其气候变化率的关系[J]. 气象学报, 2000, 58(3): 278-287.  
[4] 张保华,何毓蓉,程根伟. 贡嘎山东坡林地土壤低吸力段持水特性及其影响因素分析[J]. 西部林业科学, 2006, 35(1):49-51.  
[5] 张小泉,张清华,毕树峰. 太行山北部中山幼林地土壤水分的研究[J]. 林业科学, 1994, 30(3):193-200.  
[6] Carter V. Environmental Gradients Boundaries and Buffers; An Over View[M]. Florida: Crc. Press, 1996: 9-10.  
[7] 吴华山,陈效民,叶民标. 太湖地区主要水稻土水力特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 181-183.  
[8] 姚贤良. 华中丘陵红壤的水分问题Ⅱ: 旱地红壤的水分状况[J]. 土壤学报, 1998, 35(1):16-24.  
[9] 杨永兴. 三江平原沼泽形成和发育的若干问题探讨[C]//黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京:科学出版社, 1988.  
[10] Rieu M, Sposito G. Fragmentation, soil porosity and soil water properties 1: Theory[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55:1231-1238.  
[11] 姚贤良. 红壤水问题及其管理[J]. 土壤学报, 1996, 33(1):13-20.  
[12] 熊亚兰,魏朝富. 坡面土壤水分特征的空间变异及其水库贮量[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):136-139.