

# 干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响

孙召军<sup>1,2</sup>, 李金山<sup>1\*</sup>, 贾艳辉<sup>1</sup>, 李浩<sup>1</sup>

(1. 中国农业科学院 农田灌溉研究所 河南省节水农业重点实验室, 河南 新乡 453002;

2. 中国农业科学院 研究生院, 北京 100081)

**摘要:**【目的】研究干湿交替对原状土和扰动土土壤干密度(DD)和饱和导水率( $K_s$ )的影响特征。【方法】通过室内试验对不同干湿交替条件下原状土和扰动土的干密度和饱和导水率测定,分析了不同干湿交替过程对土壤干密度和饱和导水率的变化特征及规律的影响。【结果】原状土干密度在1.41~1.89 g/cm<sup>3</sup>之间波动,扰动土干密度在1.47~1.85 g/cm<sup>3</sup>之间波动;原状土在第1次干湿交替后的干密度较原始干密度有大幅上升,随着干湿交替次数的增加逐渐趋于小范围波动,总体变异系数为8%;扰动土总体处于上升趋势,总体变异系数为5%;原状土干密度变化幅度显著大于扰动土( $P<0.05$ )。原状土饱和导水率在0.88~3.22 cm/h之间波动,扰动土饱和导水率在0.21~3.54 cm/h之间波动;原状土在经历不同干湿交替次数后呈上升的趋势,总体变异系数为39%;扰动土在经历不同干湿交替次数后饱和导水率呈现先下降后上升的趋势,总体变异系数为94%;原状土饱和导水率变化幅度显著小于扰动土( $P<0.05$ )。【结论】本试验条件下,土壤经历干湿交替后形成了较多水道,土壤透水性增强;大田翻耕后,表层土壤处于扰动松散状态,干密度较小,饱和导水率较大,而第1次灌水以后,干密度变大,饱和导水率降低,且干密度和饱和导水率在后续的生产过程中趋于稳定状态。

**关键词:** 干湿交替; 土壤干密度; 饱和导水率; 土壤水分特性

中图分类号: S275

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2021635

OSID:



孙召军, 李金山, 贾艳辉, 等. 干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(6): 89-96.

SUN Zhaojun, LI Jinshan, JIA Yanhui, et al. Effects of Wetting-drying Cycles on Bulk Density and Saturated Hydraulic Conductivity of Soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(6): 89-96.

## 0 引言

土壤干密度(Dry density, DD)是土壤的基本物理性质之一,主要反映土壤内部总孔隙体积的变化<sup>[1]</sup>,受母质组成成分、气候变化、人类活动、有机质量、生物作用等的综合影响<sup>[2]</sup>。土壤饱和导水率( $K_s$ )是土壤重要的物理性质之一,研究土壤在饱和状态下的土壤入渗速率可以反映土壤水分运移规律,主要受土壤质地、孔隙度、结构等因素的影响<sup>[3-8]</sup>。土壤粒径组成(Particle size distribution, PSD)是反应土壤结构特征的重要因素之一,对土壤物理力学性质(孔隙比、液塑限、强度和变形等)和水理性质(渗透性、湿陷性和保水性等)有非常大的影响<sup>[9-11]</sup>。

【研究意义】在降雨、灌溉和蒸发的影响下,土壤经历不断吸水和失水的过程。土壤在失水时收缩,进而产生表面裂缝和体积收缩;土壤吸水时膨

胀,土壤体积增大且裂缝消失,含水率越大膨胀越大,严重影响和改变了土壤结构和孔隙分布,进而改变了土壤水分运动规律<sup>[12-14]</sup>。因此,研究不同干湿交替次数对土壤干密度和饱和导水率的影响机理,对提高水资源利用效率、发展节水灌溉以及农业可持续发展具有重要意义。

【研究进展】目前已有较多针对土壤水分运动规律在空间上变异的研究。自然条件下表层土壤因受到干湿交替、土壤裂隙、虫洞和根孔等因素的影响,大孔隙数量较多,土壤入渗能力相对较高;甘淼等<sup>[15]</sup>和祝景彬等<sup>[16]</sup>研究发现浅层土壤较为紧实,土壤干密度较大,但随着土层深度的增加,土壤干密度有减小的趋势。许振欣等<sup>[17]</sup>研究发现随着土壤深度的增加,饱和导水率呈先增加后减少的趋势,且表层土壤(0~10 cm)饱和导水率明显高于底层土壤(10~50 cm);毛娜等<sup>[18]</sup>研究发现20 cm以上的饱和导水率显著高于20~200 cm深度的土壤,干密度与饱和导水率显著负相关;李涛等<sup>[19]</sup>研究发现饱和导水率具有很强的空间变异性,与黏粒、粉粒、砂粒和有机质量具有一定相关性,而与干密度几乎没有空间相关性。胡伟等<sup>[4]</sup>认为尽管原状土和扰动土在干密度上保持一致,但由于原状土含有非均匀

收稿日期: 2021-12-22

基金项目: 中国农业科学院基本科研业务费专项(Y2021YJ07); 农村应急性防洪排涝技术和装备研发; 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(202102110279)

作者简介: 孙召军(1989-),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: sunzj186@163.com

通信作者: 李金山(1972-),男,研究员,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail: lijinsan72@126.com

的孔隙,而扰动土的孔隙分布均匀,即二者大小孔隙的分布不一致,造成二者的饱和导水率测定值不一样;Sandin等<sup>[20]</sup>利用X射线层析技术研究饱和导水率动态变化和土壤结构性孔隙相关关系的过程中发现,土壤饱和导水率与孔隙连通率相关。王力等<sup>[21]</sup>发现土壤渗透性受粒度组成的影响最为直接,二者联系也最为密切。土壤干密度具有明显的空间变异性,且随着土壤深度的增加呈减小趋势,这是由于机械作用和人为活动对表层土壤影响较大,对深层土壤影响较小;饱和导水率的大小受土壤孔隙的影响,干密度越小,土壤松散,孔隙就越多,故饱和导水率与干密度呈显著的负相关关系,但这些研究大多针对土壤水分运动规律在空间上的变异,较少关注在时间上的变异。因此,为了探求土壤水分运动规律在时间和空间上的变异,有必要对不同干湿交替次数下土壤干密度和饱和导水率的变化规律进行研究。

农业生产过程中人类活动、自然环境等影响因素显著改变了土壤孔隙结构的形成和重组,进而影响土壤水分入渗运动参数的变化态势。【切入点】目前,关于土壤水分物理参数在时间上变异的研究较少,使得大田中翻耕、灌溉、降雨、蒸发等对土壤

入渗速率、水运动特征、养分运移规律等认识不够深刻。【拟解决的关键问题】因此,本研究利用原状土和扰动土对比试验,通过室内短时间干湿交替的方法探求土壤水分物理参数在时间上的变异特征,得到土壤入渗特性在作物生育期内经历翻耕、降雨、灌溉和蒸发等过程中的动态变化及规律,以期为田间灌溉的智能化管理和节水模型构建提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

研究区域位于河南省新乡县七里营镇中国农业科学院新乡综合试验基地(E113.5°,N35.9°)。新乡县地处古黄河冲积平原的北翼和太行山前冲洪积扇的南缘地带,海拔70~82 m,属于暖温带大陆性季风气候,年均降水量580 mm,多集中在7—8月,年均蒸发量2 000 mm,年均气温14.1 °C,1月最冷,平均气温0.7 °C,7月最热,平均气温27.1 °C,年均日照时间2 407.7 h,年均无霜期200.5 d。以冬小麦-夏玉米连作为主。试验区土壤主要为粉砂质黏壤土,土壤干密度在0.7 m土层深度内平均值为1.47 g/cm<sup>3</sup>,0~70 cm土层平均田间持水率为26.04%,土壤物理性质见表1<sup>[22]</sup>。

表1 试验田土壤物理性质

Table 1 Physical properties of soil in experimental field

土层深度/cm	土壤粒径所占比例/%			土壤质地 (美国制)	干体质量/ (g·cm <sup>-3</sup> )	田间持水率/%
	黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.05 mm)	砂粒 (0.05~1 mm)			
10~30	7.37	70.68	21.95	砂质黏土	1.56	29.79
30~50	7.96	74.91	17.13	砂质黏土	1.45	27.45
50~70	7.80	81.74	10.46	黏土	1.41	20.87

### 1.2 试验设计和研究方法

#### 1.2.1 供试材料

为保证土样的代表性,选取畦田中间部位作为取样点,按照1.5 m×1.5 m的样方进行取土。原状土取土时,剥离表层10 cm后取样,10~30 cm为第1层,30~50 cm为第2层,50~70 cm为第3层,测定饱和导水率土样利用环刀(体积120 cm<sup>3</sup>,内径61.8 cm,高4 cm)每层取5个样共15个,测定干密度土样利用环刀每层取5个样共15个;扰动土取土时,每层土壤取1袋,风干后碾碎过0.9 mm孔筛,根据每层土壤的干密度和风干后土壤的含水率进行分层装填到环刀内,每层取5个样,共15个。

#### 1.2.2 试验设计

1) 干湿交替共做4次交替,即每组5个中第1个土样不做干湿处理,第2个土样做1次干湿交替,以此类推,原状土和扰动土干湿交替方法相同。均先将土壤在试验室级高纯水中浸水至饱和状态后用

烘箱105 °C烘至恒质量,再将烘干的土泡饱和后烘干,此步骤重复。此试验中所用试验室级高纯水是利用易普易达EPED-X2-10T制备,制备过程中在设备冲洗完成后开始制水,根据操作手册要求纯度值在18 MΩ·cm以上的水可用。具体处理方法见表2。

表2 干湿交替处理方法

Table 2 Dry wet alternate treatment method

土壤类型	土层	编号	交替次数	处理
原状土	第1层/第2层/ 第3层	1#/6#/11#	不做干湿交替	T0
		2#/7#/12#	干湿交替1次	T1
		3#/8#/13#	干湿交替2次	T2
		4#/9#/14#	干湿交替3次	T3
		5#/10#/15#	干湿交替4次	T4
扰动土	第1层/第2层/ 第3层	21#/26#/31#	不做干湿交替	T0
		22#/27#/32#	干湿交替1次	T1
		23#/28#/33#	干湿交替2次	T2
		24#/29#/34#	干湿交替3次	T3
		25#/30#/35#	干湿交替4次	T4

2) 扰动土处理方法。将原状土室内风干，碾碎过 0.9 mm 孔筛，装入密封袋中。装填环刀之前测土壤含水率和原状土初始干密度，扰动土取样部位的初始干密度第 1、第 2、第 3 层分别为 1.53、1.56、1.47 g/cm<sup>3</sup>，装填前的含水率第 1、第 2、第 3 层分别为 1.74%、1.92%、1.93%。每层扰动土的干密度与原状土对应，装土质量增加扰动土含水率。在装入 120 cm<sup>3</sup> 环刀过程中，逐层填土均匀夯实，每层 1 cm 厚，接触面打毛，防止出现明显分层现象。

### 1.2.3 观测项目与方法

1) 土壤干密度的测定。初始干密度采用环刀法测定，即土样烘箱中 105 °C 烘至恒质量，得到土块质量，除以环刀体积得到土壤初始干密度；干湿交替后的干密度采用蜡封法测定，取土块的一部分在 105 °C 的烘箱中烘干至恒质量后，放入干燥皿中冷却，冷却后在土块系上细绳并称量其质量，将土块放入刚过熔点的蜡液中，土块浸没后立即取出，检查土块周围的蜡膜，若有起泡应用针刺破，再用蜡液补平，再次冷却后称蜡封土块的质量，最后将土块完全浸入到试验室级高纯水中，利用排水法测定土块体积。排水法测定土块体积是将蜡封后的土块冷却后放入试验室级高纯水中，测得其在水中的质量，空气中质量与水中质量的差值，即为常温下蜡封后土块的体积，减去蜡的体积即得到土块的体积。

环刀法测干密度计算式：

$$\rho_d = \frac{m_0}{V}, \quad (1)$$

式中： $\rho_d$  为土的干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $m_0$  为干土质量 (g)； $V$  为环刀的体积 (cm<sup>3</sup>)。

蜡封法测干密度公式：

$$\rho = \frac{m_0}{\frac{m_n - m_{nw}}{\rho_{wT}} + \frac{m_n - m_0}{\rho_n}}, \quad (2)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + 0.01w}, \quad (3)$$

式中： $m_0$  为干土质量 (g)； $m_n$  为试样加蜡质量 (g)； $m_{nw}$  为试样加蜡在水中的质量 (g)； $\rho$  为土的湿密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $\rho_d$  为土的干密度 (g/cm<sup>3</sup>)； $\rho_{wT}$  为纯水在  $T$  °C 时的密度 (g/cm<sup>3</sup>)，准确至 0.01 g/cm<sup>3</sup>； $\rho_n$  为蜡的密度 (g/cm<sup>3</sup>)，准确至 0.01 g/cm<sup>3</sup>； $w$  为含水率 (%)。

2) 饱和导水率的测定。土样在试验室级高纯水中充分饱和后，用定水头法测定饱和导水率，使用马氏瓶供水，利用渗透仪 (TST 55 型) 进行测定，水头高度维持在 15 cm<sup>[23]</sup>。每个土壤样品重复 6 次，每次重复间隔 3 min (即 0.05 h)，取其平均值。

$$K = \frac{QL}{AHT}, \quad (4)$$

式中： $K$  为土壤饱和导水率 (cm/h)； $Q$  为流量，渗透过一定截面积的水量 (cm<sup>3</sup>)； $L$  为饱和土层厚度，渗透经过的距离 (cm)； $A$  为环刀横截面积 (cm<sup>2</sup>)； $H$  为水头差 (cm)； $T$  为渗透过水量  $Q$  时所需时间 (h)。

3) 土壤粒度的测定。将原始土样中的大颗粒进行分散细碎，放置风干后，过 0.9 mm 的孔筛，将土样放入百特公司 BT-401 型超声波循环分散器循环至百特公司 BT-9300HT 型激光粒度分布仪中测定土壤粒度，测量范围 0.1~1 000 μm，循环介质采用试验室级高纯水。为减小试验误差，每个土样测定重复 5 次，取均值。按照美国制分类，黏粒粒径小于 2 μm，粉粒粒径在 2~50 μm 之间，砂粒粒径在 50~1 000 μm 之间。

### 1.3 数据分析

使用 Excel 2019 处理数据，利用 SPSS 23.0 进行变异系数、方差分析和相关性分析，使用 Origin 2019 画图。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒径组成

原状土和扰动土室内干湿交替后粒径组成的统计结果 (表 3) 显示，粒径组成在经历干湿交替后变异系数非常小，总体呈弱变异性，故本文试验暂不考虑干湿交替对粒径组成产生的影响，在后续的试验中会针对该内容进行试验分析论证。其中有部分数据的变异系数变化幅度较大，如原状土第 2 层砂粒占比在经历干湿交替后变异系数达到 18.34%，从总体数据特征分析是因为测验误差引起的。

### 2.2 干湿交替后土壤干密度的变化

图 1 为原状土和扰动土在经历室内干湿交替后的干密度变化。原状土和扰动土室内干湿交替后干密度的统计结果 (表 4) 显示，原状土第 1、第 2、第 3 层干密度均值分别为 1.80、1.67、1.58 g/cm<sup>3</sup>，根据数据分析显示每层均为弱变异性，但是最小值与最大值差异较大；扰动土第 1、第 2、第 3 层干密度均值分别为 1.70、1.66、1.60 g/cm<sup>3</sup>，根据数据分析显示每层均为弱变异性，但是最小值与最大值差异较大。试验表明，原状土干湿交替后的干密度大幅增加，因此认为干湿交替对土壤的孔隙结构影响非常大。

表 3 室内干湿交替后粒径组成的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of particle size composition after indoor dry wet alternation

土壤类型	土层	指标	黏粒 占比/%	粉粒 占比/%	砂粒 占比/%
原状土	第 1 层	最小值	6.39	69.42	22.12
		最大值	6.72	71.16	23.99
		均值	6.53	70.33	23.14
		标准差	0.12	0.61	0.67
		变异系数/%	1.78	0.87	2.89
	第 2 层	最小值	8.52	74.02	10.61
		最大值	9.28	80.84	17.46
		均值	8.94	77.95	13.11
		标准差	0.33	2.32	2.40
		变异系数/%	3.70	2.97	18.34
	第 3 层	最小值	6.25	75.27	15.28
		最大值	7.51	77.21	18.48
均值		6.78	76.15	17.07	
标准差		0.51	0.79	1.30	
变异系数/%		7.53	1.04	7.63	
扰动土	第 1 层	最小值	5.65	67.56	26.42
		最大值	5.70	67.88	26.79
		均值	5.68	67.62	26.70
		标准差	0.02	0.20	0.21
		变异系数/%	0.38	0.29	0.77
	第 2 层	最小值	7.18	76.77	12.61
		最大值	8.14	79.63	15.63
		均值	7.68	77.75	14.58
		标准差	0.31	1.01	1.15
		变异系数/%	4.01	1.29	7.92
	第 3 层	最小值	7.19	79.47	12.39
		最大值	7.77	80.18	13.35
均值		7.39	79.86	12.76	
标准差		0.21	0.27	0.35	
变异系数/%		2.90	0.34	2.74	

注 变异系数 $\leq 10\%$ 时为弱变异性,  $10\% <$ 变异系数 $< 100\%$ 时为中变异性, 变异系数 $\geq 100\%$ 时为强变异性。

试验表明, 扰动土与原状土的变化趋势相似, 土壤干湿交替后, 干密度大幅增加。原状土和扰动土的干密度在 T1 处理后有了大幅增加, 这是因为干湿交替后土壤孔隙大幅减小; 原状土和扰动土在 T2

表 4 室内干湿交替后干密度的统计特征

Table 4 Statistical characteristics of dry density after indoor dry wet alternation

土壤类型	土层	最小值/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	最大值/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	平均值/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	标准差	变异系数/%
原状土	第 1 层	1.56	1.89	1.80	0.12	7
	第 2 层	1.45	1.80	1.67	0.12	7
	第 3 层	1.41	1.66	1.58	0.09	6
扰动土	第 1 层	1.53	1.85	1.70	0.11	6
	第 2 层	1.56	1.72	1.65	0.05	3
	第 3 层	1.47	1.68	1.60	0.07	5

注 变异系数 $\leq 10\%$ 时为弱变异性,  $10\% <$ 变异系数 $< 100\%$ 时为中变异性, 变异系数 $\geq 100\%$ 时为强变异性。

### 2.3 干湿交替后土壤饱和导水率的变化

图 2 为原状土和扰动土在经历室内干湿交替后的饱和导水率变化。

通过原状土和扰动土室内干湿交替后饱和导水率的统计结果(表 5)显示, 原状土第 1、第 2、第

处理或 T3 处理以后, 呈轻微减小趋势, 这是因为随着干湿交替次数的增加, 部分土壤孔隙遭到破坏, 并形成了新的孔隙结构; 在 T3、T4 处理过程中原状土和扰动土的每层土壤在干湿交替后处在小范围的波动中, 干湿交替次数对土壤孔隙的增加影响逐渐减小, 形成了稳定的孔隙结构, 但第 1 层扰动土在 T3、T4 处理过程中干密度变化较大, 说明干湿交替过程中孔隙收缩力产生的作用效果不稳定。原状土的干密度在 T0 处理时第 1 层最大, 第 2 层次之, 第 3 层最小, 在 T4 处理时干密度也呈现此规律, 说明原状土在干湿交替过程中孔隙收缩力产生的作用效果比较稳定; 扰动土的干密度在 T0 处理时第 2 层最大、第 1 层次之、第 3 层最小, 在 T4 处理时干密度第 1 层最大、第 2 层次之、第 3 层最小, 这说明扰动土由于初始状态中孔隙结构遭到破坏, 在干湿交替过程中孔隙收缩力产生的作用效果不稳定, 随着干湿交替次数的增加, 新形成的孔隙结构逐渐趋于稳定。

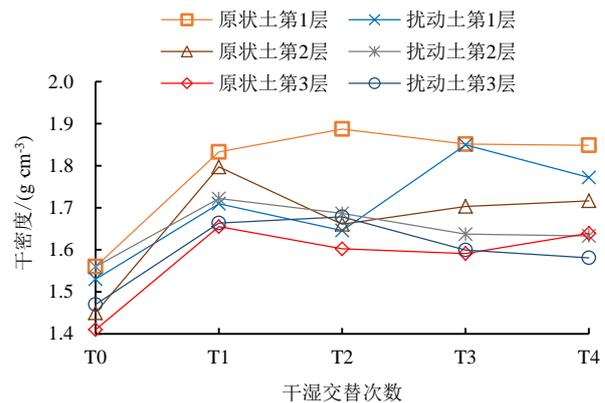


图 1 干湿交替后原状土和扰动土干密度变化趋势

Fig.1 Variation trend of dry density of undisturbed soil and disturbed soil after dry wet alternation

3 层饱和导水率均值分别为 1.94、1.18、1.38 cm/h, 饱和导水率在每层呈中变异性, 说明在经历干湿交替以后土壤饱和导水率均产生了较大的变化, 第 1 层土样中掺杂了作物秸秆等异物且孔隙结构受外界影响较大, 一定程度上影响了水道的形成, 第 2 层

受外界因素影响较第 1 层小，较第 3 层大且土样中杂物较少密实程度介于第 1 层和第 3 层，第 3 层土样受外界因素影响较小且无杂物密实程度高，所以第 1 层和第 3 层的饱和导水率相比第 2 层要低一些；扰动土第 1、第 2、第 3 层饱和导水率均值分别为 0.87、0.31、2.17 cm/h，饱和导水率在每层呈中变异性，说明土壤扰动后在经历泡水、烘干过程重组了土壤孔隙结构分布格局，填充时第 2 层干密度最大、第 1 层次之、第 3 层最小，第 2 层干密度最大且杂物较第 1 层少，土壤密实程度较高，第 1 层干密度较第 2 层小但杂物较多对孔隙结构的重组影响较大，第 3 层干密度最小且杂物最少故变异系数介于第 1、第 2 层之间，说明扰动状态下的土壤密实度越高土壤孔隙结构重组影响就越小，由于扰动土的结构遭到彻底破坏，装填时形成了新的结构，重组后的孔隙结构在经历干湿交替后的变化较原状土小。趋势图显示，原状土随着干湿交替次数的增加，第 1、第 2、第 3 层土壤的饱和导水率均有上升的趋势，这是因为在干湿交替过程中土壤孔隙率发生了变化，造成部分孔隙产生破坏，但上升速度有所差异，这与干密度和孔隙结构有关系；第 1 层土壤的饱和导水率在 T3 处理时急速上升，T4 处理后饱和导水率又急速下降；第 2 层土壤的饱和导水率在 T3 处理时有上升，T4 处理后饱和导水率缓慢下降；第 3 层土壤的饱和导水率处于波动状态，总体有上升趋势，T4 后饱和导水率最大。

扰动土第 1 层和第 3 层的试验数据显示，T0 处理饱和导水率均大于干湿交替后的土壤；第 2 层土壤中，T0 处理饱和导水率只高于 T1、T2 处理的土壤，但是差值不大。所有的数据显示，T1 处理后土壤的饱和导水率急速下降，随着干湿交替次数的增加，饱和导水率逐渐增大，这是因为 T1 处理后土壤孔隙率大幅减小对土壤孔隙结构产生了较大的影响，干湿交替对土壤结构的影响是先收缩后逐渐膨胀。不同干湿交替次数后，泡水后土体呈不同程度的膨胀。不同干湿交替后饱和导水率的变化趋势非常明显，呈先下降后上升的趋势，在第 2 层中由于干密度最大，饱和导水率变化很小，规律依然明显。

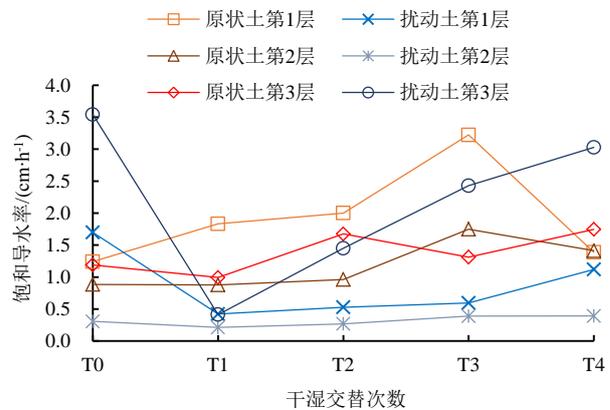


图 2 干湿交替后原状土和扰动土饱和导水率变化趋势

Fig.2 Variation trend of hydraulic conductivity of undisturbed soil and disturbed soil after dry wet alternation

表 5 室内干湿交替后饱和导水率的统计特征

Table 5 Statistical characteristics of saturated hydraulic conductivity after indoor dry wet alternation

土壤种类	土层	最小值/ (cm·h <sup>-1</sup> )	最大值/ (cm·h <sup>-1</sup> )	平均值/ (cm·h <sup>-1</sup> )	标准差	变异系数/%
原状土	第 1 层	1.24	3.22	1.94	0.70	36
	第 2 层	0.88	1.75	1.18	0.35	30
	第 3 层	0.99	1.75	1.38	0.29	21
扰动土	第 1 层	0.42	1.70	0.87	0.48	55
	第 2 层	0.21	0.39	0.31	0.07	22
	第 3 层	0.41	3.54	2.17	1.12	52

注 变异系数≤10%时为弱变异性，10%<变异系数<100%时为中变异性，变异系数≥100%时为强变异性；由于饱和导水率较小，为了更加清晰的显示变化规律，本文以厘米/小时 (cm/h) 为计算单位。

### 3 讨论

#### 3.1 干湿交替对土壤干密度的影响

原状土和扰动土的干密度均值逐层递减且第 1 层最高，这是由于农业生产活动中，机械作用和人类活动使土壤压实，导致干密度较大，鞠忻倪等<sup>[24]</sup>的研究成果与之相似。干密度均值之所以逐层降低，还因为在干湿交替过程中土壤表现出吸水土体膨胀、失水土体收缩的现象，且干湿交替在一定程度上加剧了土体的变形各向异性，土壤的裂隙会随干湿交替次数的增加而逐渐增大<sup>[25]</sup>。在干湿交替过程中，干密度呈快速增加和缓慢增加 2 个阶段，最终趋于

稳定状态<sup>[26-28]</sup>，这可能是由于土壤吸水到失水的过程中，水分子对土粒产生压力，使土粒变得紧实，减少了土壤孔隙<sup>[29-31]</sup>。本文结合以往研究中土壤干密度在时间和空间上的变异性，以原状土和扰动土对比，在时空尺度上开展研究，原状土和扰动土室内干湿交替后，原状土第 1、第 2、第 3 层干密度分别在 1.56~1.89、1.45~1.80、1.41~1.66 g/cm<sup>3</sup> 之间波动，变异系数分别是 7%、7%、6%，这是由于受机械作用和人类活动的作用，土壤表层在一定程度上被压实，随着土层深度的增加受影响的程度越来越小；扰动土第 1、第 2、第 3 层干密度分别在 1.53~1.85、1.56~1.72、1.47~1.68 g/cm<sup>3</sup> 之间波动，

变异系数分别是 6%、3%、5%，这是由于表层土壤含有植物根茎以及土壤颗粒成分组成的影响，扰动土的干密度均值也是逐层递减趋势。原状土干密度变化幅度显著大于扰动土 ( $P < 0.05$ )，说明土壤经过扰动破坏后，土壤干密度结构产生重组，并且翻耕后机械作用和人类活动对土壤的干密度影响较大。

### 3.2 干湿交替对土壤饱和导水率的影响

原状土第 1 层的饱和导水率均值最高，这是由于表层经历翻耕、机械和人为作用，对土壤结构产生了一定的破坏，连通孔隙较多；扰动土第 1 层的饱和导水率均值低于第 3 层，这是由于扰动破坏后重新装填重组了土壤的孔隙结构。原状土第 1、第 2、第 3 层饱和导水率均值呈先下降后上升趋势，这是因为干湿交替后土壤中失去抗拉强度的裂隙会有所闭合，加之土体内部密实度已经增大，所以水分渗流阻碍增强，渗透性质相应减弱；随着干湿交替次数的增加，土体中存在的纵横向裂隙在干湿交替作用下产生了连通效应，成为新的水分渗流通道，饱和导水率呈增加趋势<sup>[32]</sup>。针对水分渗漏通道问题，已有研究中表明土壤中有有机质量和矿物质量对非毛细渗流通道的形成存在一定的影响<sup>[33]</sup>，这是因为土壤水力传导度与土壤质地、土壤孔隙结构、含水率和基质势存在相关关系<sup>[34]</sup>，土壤中有有机质量越多团粒结构越多且稳定性越好<sup>[35]</sup>，所以有机质量高的土壤入渗能力也大，本文试验没有对有机质、矿物指标等测定，是因为本研究是针对土壤水分物理参数作为重点研究对象，在后续的试验中会补充有机质、矿物指标等的测定内容。扰动土第 1、第 2、第 3 层饱和导水率均值也呈先下降后上升趋势，但第 3 层饱和导水率最大，这是由于干湿交替会影响黏粒、粉粒、砂粒的悬浮和迁移，而扰动条件下的颗粒迁移较原状土更活跃，巫尚蔚等<sup>[36]</sup>认为粉粒量的增加弱化了原有的强力链。从团聚体形成角度上来说，原状土和扰动土在经历了干湿交替后饱和导水率呈现相似的规律，是因为干湿交替对团聚体形成初期产生非常大的影响，土体的密实程度大幅提高，随着干湿交替次数的增加而逐渐平稳<sup>[37]</sup>。研究表明，在干湿交替 1~2 次促进大团聚体的形成<sup>[38]</sup>，土体在失水时，团聚体粒径减小；在吸水时，团聚体粒径增大<sup>[39-40]</sup>。所以在首次干湿交替时，土体形成了新的团粒结构，导致土壤密实度迅速增加，饱和导水率迅速下降，随后逐渐上升并趋于稳定（图 2）。原状土第 1、第 2、第 3 层饱和导水率分别在 1.24~3.22、0.88~1.75、0.99~1.75 cm/h 之间变化，变异系数分别是 36%、30%、21%；扰动土第 1、第 2、第 3 层饱和导水率分别在 0.42~1.70、0.21~0.39、

0.41~3.54 cm/h 之间变化，变异系数分别是 55%、22%、52%。原状土饱和导水率变化幅度显著小于扰动土 ( $P < 0.05$ )，这是因为干湿交替对土壤孔隙结构进行了破坏重组，加之土壤颗粒组成的影响，形成了先下降后上升的趋势；扰动土饱和导水率低于原状土，是与土壤团聚体的形成有关，扰动土在经历破坏后形成了新的团粒结构，土壤密实程度大于原状土。

## 4 结论

1) 不同干湿交替次数下，原状土和扰动土的干密度整体变化规律基本一致，均上升后趋于稳定。原状土和扰动土干密度总体变异系数分别为 8%、5%，原状土干密度变化幅度显著大于扰动土 ( $P < 0.05$ )。

2) 不同干湿交替次数下，原状土的孔隙结构产生了变化，使饱和导水率增大，干湿交替过程中连通孔隙增多。原状土和扰动土饱和导水率总体变异系数分别为 39%、94%，原状土饱和导水率变化幅度显著小于扰动土 ( $P < 0.05$ )。

3) 扰动土在干湿交替后重组的孔隙结构，由均匀分布变成了定向分布，并且借助土壤收缩形成了大孔隙，扰动后土壤的密实度降低，水道较多。

### 参考文献:

- [1] ALAOUI A, LIPIEC J, GERKE H H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 115/116: 1-15.
- [2] HU W, SHAO M A, SI B C. Seasonal changes in surface bulk density and saturated hydraulic conductivity of natural landscapes[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(6): 820-830.
- [3] SAUER T J, CLOTHIER B E, DANIEL T C. Surface measurements of the hydraulic properties of a tilled and untilled soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 1990, 15(4): 359-369.
- [4] 胡伟, 邵明安, 王全九, 等. 取样尺寸对土壤饱和导水率测定结果的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 1 040-1 043.  
HU Wei, SHAO Ming'an, WANG Qianjiu, et al. Effects of sampling size on measurements of soil saturated hydraulic conductivity[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(6): 1 040-1 043.
- [5] 王子龙, 赵勇钢, 赵世伟, 等. 退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(6): 1 254-1 262.  
WANG Zilong, ZHAO Yonggang, ZHAO Shiwei, et al. Study on soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in typical grassland of farmland conversion[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1 254-1 262.
- [6] 黄婉霞, 邓羽松, 谢福倩, 等. 花岗岩崩岗不同部位土壤饱和导水率特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(7): 2 431-2 440.  
HUANG Wanxia, DENG Yulong, XIE Fuqian, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity on different positions and their controlling factors of granite collapsing gullies[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(7): 2 431-2 440.
- [7] 张瑜, 冯绍元, 苏童, 等. 不同耕作方式下新复垦区春玉米试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8): 64-70.  
ZHANG Yu, FENG Shaoyuan, SU Tong, et al. Impact of different

- tillage on dynamics of soil moisture and nutrient and the growth of spring maize in newly reclaimed land[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8): 64-70.
- [8] 陈姣, 吴凤平, 王辉, 等. 生物炭对南方红壤和水稻土水力学特性的影响分析[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(9): 73-80.  
CHEN Jiao, WU Fengping, WANG Hui, et al. The effects of biochar amendment on hydraulic properties of red and paddy soils in Southern China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 73-80.
- [9] 赵茜. 冻融循环与干湿交替对黄土渗透各向异性及空间分异性的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
ZHAO Qian. Investigation on the influence of freezing-thawing cycle and drying-wetting alternation on the permeability anisotropy and spatial variability of loess[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [10] 冯连昌, 郑晏武. 中国湿陷性黄土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1982.  
FENG Lianchang, ZHENG Yanwu. Collapsible loess in China[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1982.
- [11] 唐大雄. 工程岩土学[M]. 北京: 地质出版社, 1987.  
TANG Daxiong. Ock and soil engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [12] CABIDOCHÉ Y M, RUY S. Field shrinkage curves of a swelling clay soil: Analysis of multiple structural swelling and shrinkage phases in the prisms of a Vertisol[J]. *Soil Research*, 2001, 39(1): 143.
- [13] 黄传琴. 干湿交替过程中土壤胀缩特征的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.  
HUANG Chuanqin. Experimental study on soil shrinking and swelling characteristics during the alternative drying and wetting processes[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008.
- [14] CRESCIMANNO G, PROVENZANO G. Soil shrinkage characteristic curve in clay soils: Measurement and prediction[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(1): 25-32.
- [15] 甘淼, 贾玉华, 李同川, 等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 315-324.  
GAN Miao, JIA Yuhua, LI Tongchuan, et al. Variation of soil bulk density, saturated hydraulic conductivity and soil moisture content in a slope-gully unit on the northern loess plateau[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(2): 315-324.
- [16] 祝景彬, 贺慧丹, 李红琴, 等. 牧压梯度下高寒草甸土壤容重及持水能力的变化特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(5): 66-71.  
ZHU Jingbin, HE Huidan, LI Hongqin, et al. Characteristics of soil bulk density and soil water-holding capacity in alpine meadow under grazing gradients[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5): 66-71.
- [17] 许振欣, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带典型人工林土壤饱和导水率特征及其影响因素研究[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(4): 100-107.  
XU Zhenxin, DENG Yulong, LIN Liwen, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical plantations in South Subtropical Zone[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(4): 100-107.
- [18] 毛娜, 黄来明, 邵明安. 黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 381-389.  
MAO Na, HUANG Laiming, SHAO Ming'an. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region[J]. *Soils*, 2019, 51(2): 381-389.
- [19] 李涛, 李晓琳, 郝新梅, 等. 应用土壤质地预测干旱区葡萄园土壤饱和导水率空间分布[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 84-92.  
LI Tao, LI Xiaolin, HAO Xinmei, et al. Predicting spatial distribution of soil saturated hydraulic conductivity by soil texture on vineyard in arid region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(9): 84-92.
- [20] SANDIN M, KOESTEL J, JARVIS N, et al. Post-tillage evolution of structural pore space and saturated and near-saturated hydraulic conductivity in a clay loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 161-168.
- [21] 王力, 李喜安, 何军, 等. 不同黏粒含量对黄土渗透系数影响的试验研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 95-101.  
WANG Li, LI Xi'an, HE Jun, et al. Experimental study on permeability coefficient of loess with different clay content[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 95-101.
- [22] 庞婕, 韩其晟, 周爽, 等. 水气互作对温室番茄生长、产量和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(1): 87-94.  
PANG Jie, HAN Qisheng, ZHOU Shuang, et al. The integrative effects of irrigation and aeration on growth and water use efficiency of greenhouse tomato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(1): 87-94.
- [23] 王翔翔, 程志龙, 苏光辰, 等. 测定时间对淮北平原砂姜黑土饱和导水率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(12): 136-141.  
WANG Xiangxiang, CHENG Zhilong, SU Guangchen, et al. Saturated soil hydraulic conductivity is not constant but varies with the time it is measured [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(12): 136-141.
- [24] 鞠忻倪, 贾玉华, 甘淼, 等. 黄土沟壑区不同地形部位土壤大孔隙特征研究[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1 098-1 107.  
JU Xinni, JIA Yuhua, GAN Miao, et al. Characteristics of soil macropores in the gully area of loess plateau as affected by terrain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1 098-1 107.
- [25] 苏立君, 赵茜, 刘华, 等. 干湿交替过程中原状黄土的胀缩变形特性及裂隙形态演化规律[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2021, 54(3): 255-267.  
SU Lijun, ZHAO Qian, LIU Hua, et al. Swelling and shrinkage behaviors and evolution law of crack morphology of undisturbed loess during wetting-drying cycles[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54(3): 255-267.
- [26] 张猛. 干湿交替过程中土壤容重、水分特征曲线和热特性的动态变化特征[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.  
ZHANG Meng. The dynamics of soil bulk density, water retention curve and thermal properties under wetting and drying cycles[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [27] 马璠, 王健, 张鹏辉, 等. 干湿交替处理对土壤抗冲性的影响试验研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(35): 178-184.  
MA Fan, WANG Jian, ZHANG Penghui, et al. Effects of dry-wet alternation treatment on anti-scourability of soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(35): 178-184.
- [28] 张鹏辉. 土壤干湿交替中抗侵蚀能力的变化及坡面细沟发育敏感性的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
ZHANG Penghui. The study on the effect of the soil erosion resistance in soil alternate drying-wetting and to the sensitivity of the rill evolution[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [29] 张素, 熊东红, 校亮, 等. 干湿交替对土壤性质影响的研究[J]. *土壤通报*, 2017, 48(3): 762-768.  
ZHANG Su, XIONG Donghong, XIAO Liang, et al. Influence of dry-wet cycling on soil properties[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(3): 762-768.
- [30] 茹豪, 张建军, 李玉婷, 等. 黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 176-182.  
RU Hao, ZHANG Jianjun, LI Yuting, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4): 176-182.
- [31] 秦伟, 左长清, 晏清洪, 等. 红壤裸露坡地次降雨土壤侵蚀规律[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(2): 124-132.  
QIN Wei, ZUO Changqing, YAN Qinghong, et al. Regularity of individual rainfall soil erosion in bare slope land of red soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 124-132.

- [32] 赵茜, 杨金熹, 赵晋萍. 冻融和干湿循环对原状黄土渗透系数的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 119-126.  
ZHAO Qian, YANG Jinxi, ZHAO Jinping. Experimental study on permeability of undisturbed loess under freezing-thawing and drying-wetting cycling conditions[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 119-126.
- [33] 乔照华. 土壤有机质含量与土壤物理性能参数的相关性分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(2): 3-4.  
QIAO Zhaohua. Analysis of interrelation between organic matter content and soil physical property parameters[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008(2): 3-4.
- [34] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.  
LEI Zhidong, YANG Shixiu, XIE Senchuan. Soil water dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [35] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
HUANG Changyong. Soil science[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [36] 巫尚蔚, 杨春和, 张超, 等. 粉粒含量对尾矿力学特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(8): 2 007-2 017.  
WU Shangwei, YANG Chunhe, ZHANG Chao, et al. The effects of silt content on the mechanical properties of tailings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(8): 2 007-2 017.
- [37] BIRCH H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. Plant and Soil, 1958, 10(1): 9-31.
- [38] DENEK K, SIX J, BOSSUYT H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(12/13): 1 599-1 611.
- [39] 刘艳, 马茂华, 吴胜军, 等. 干湿交替下土壤团聚体稳定性研究进展与展望[J]. 土壤, 2018, 50(5): 853-865.  
LIU Yan, MA Maohua, WU Shengjun, et al. Soil aggregates as affected by wetting-drying cycle: A review[J]. Soils, 2018, 50(5): 853-865.
- [40] 刘艳. 干湿交替条件下土壤团聚特性及其与植物地上生产力的关系[D]. 重庆: 中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2018.  
LIU Yan. Under the environmental condition of wetting and drying cycles: Edaphic aggregate characteristics and their relationships with floral above-ground productivity[D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2018.

## Effects of Wetting-drying Cycles on Bulk Density and Saturated Hydraulic Conductivity of Soils

SUN Zhaojun<sup>1,2</sup>, LI Jinshan<sup>1\*</sup>, JIA Yanhui<sup>1</sup>, LI Hao<sup>1</sup>

(1. Farmland Irrigation Research Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Henan Key Laboratory of Water-saving Agriculture, Xinxiang 453002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** **【Objective】** Changes in density and hydraulic conductivity of soil not only modulate subsurface hydrological processes but also affect root growth and root uptake of water and nutrients from soil. Understanding the mechanisms underlying their changes is thus critical to mitigating flooding and improving bioavailability of soil water. In this paper we studied how wetting-drying cycles often seen in the field change bulk density and saturated hydraulic conductivity of the soil. **【Method】** Intact (mimicking zero-tillage) and disturbed (mimicking tillage) soil samples were taken from a cropped field. They were then subject to wetting-drying at different frequencies. During and at the end of the wetting-drying cycle experiment, we measured bulk density and saturated hydraulic conductivity of each soil sample. **【Result】** Bulk density of the intact and disturbed soil samples varied in the range of 1.41~1.89 g/cm<sup>3</sup> and 1.47~1.85 g/cm<sup>3</sup> respectively. The bulk density of intact soils after the first wetting-drying cycle increased significantly followed by slight fluctuations in other wetting-drying cycles, with an average coefficient of variation 8%. In contrast, bulk density of the disturbed soils increased with the increase in wetting-drying cycles, with an average coefficient of variation 5%. Overall, the wetting-drying cycles affected the bulk density of intact soils more significantly than the disturbed soils ( $P<0.05$ ). The saturated hydraulic conductivity of the intact and disturbed soils varied in the range of 0.88~3.22 cm/h and 0.21~3.54 cm/h, respectively. The saturated hydraulic conductivity of the intact soils increased with the increase in wetting-drying cycles, with an average coefficient of variation 39%. In contrast, the hydraulic conductivity of the disturbed soil decreased first followed by a decline with the increase in wetting-drying cycles, with an average coefficient of variation 94%. Wetting-drying cycles affected the hydraulic conductivity of the disturbed soils more significantly than the intact soils ( $P<0.05$ ). **【Conclusion】** Wetting-drying cycles resulted in cracks thereby reducing the bulk density and increasing saturated hydraulic conductivity of the soils. The effects, however, depend on tillage. Overall, wetting-drying cycles affect the bulk density of zero-tillage soil and saturated hydraulic conductivity of tilled soil more significantly.

**Key words:** wetting-drying cycles; bulk density; saturated hydraulic conductivity; soil moisture characteristics

责任编辑: 白芳芳