

# 基于数字图像估算不同密度表层土壤含水率

刁万英, 刘刚

(中国农业大学, 北京 100193)

**摘要:**为有效和无损地监测土壤表层含水率,以壤土、红壤和黑壤为研究对象,研究了不同密度下土壤含水率( $\theta$ )的图像信息,包括亮度( $V$ )和饱和度( $S$ ),建立了土壤含水率的估算模型。结果表明,①当壤土密度为 $1\ 400\ \text{kg}/\text{m}^3$ 时,估算模型相关性最好(决定系数( $R^2$ )为0.93,均方根误差( $RMSE$ )是 $0.04\ \text{m}^3/\text{m}^3$ );②当红壤密度为 $1\ 600\ \text{kg}/\text{m}^3$ 时,相关性最好( $R^2$ 为0.93, $RMSE$ 为 $0.03\ \text{m}^3/\text{m}^3$ );③黑壤密度为 $1\ 600\ \text{kg}/\text{m}^3$ 时,相关性最好( $R^2$ 为0.87, $RMSE$ 为 $0.07\ \text{m}^3/\text{m}^3$ )。考虑密度变化时,黏壤土的估算精度最好( $R^2$ 为0.72和 $RMSE$ 为 $0.06\ \text{m}^3/\text{m}^3$ )、其次是壤土( $R^2$ 和 $RMSE$ 为0.70和 $0.07\ \text{m}^3/\text{m}^3$ )和砂质壤土( $R^2$ 为0.60和 $RMSE$ 为 $0.07\ \text{m}^3/\text{m}^3$ )。因此,利用数码相机来估测表层不同密度土壤含水率是可行的。

**关键词:**体积含水率;土壤密度;亮度;饱和度

中图分类号:S152.7

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.04.005

刁万英,刘刚.基于数字图像估算不同密度表层土壤含水率[J].灌溉排水学报,2017,36(4):26-30.

## 0 引言

目前,测量土壤含水率的方法有烘干法、中子仪法、TDR法以及热脉冲探针方法等;随着遥感技术的发展,用遥感技术测量土壤含水率的方法得到广泛应用。随后,数码相机以其低廉的优势也得到应用,不仅可以监测棉花群体叶绿素<sup>[1]</sup>,还能监测谷类作物氮素<sup>[2]</sup>;借助数码相机还能测量树木的胸径<sup>[3]</sup>;反演大豆的叶面积指数<sup>[4]</sup>。研究发现土壤表面灰度值与表层土壤含水率的相关性较高<sup>[5]</sup>。Post等<sup>[6]</sup>研究了在不同质地和颜色的土壤在干湿2种情况下,土壤的反射率与Munsell颜色相关性很好,尤其是与颜色亮度的相关系数达到0.93。Persson<sup>[7]</sup>采用图像技术提取土壤颜色估测表层含水率,结果表明估测细砂和2种自然土的土壤表层含水率效果较好,其相关系数为0.99,均方根误差为 $0.01\sim 0.02\ \text{m}^3/\text{m}^3$ ,但此模型仅适于颜色浅和有机质量较低的土壤;Zhu等<sup>[8]</sup>用数字图像灰度级估测土壤含水率,测量精度较高。

大田中土壤表层的密度易受外界环境影响(如耕作、降雨和人类活动等),变化范围较大。然而,用数字图像技术获得不同土壤密度下土壤含水率的研究较少。兹以不同土壤类型(壤土、红壤和黑壤)、不同密度的土壤含水率为研究对象,用数码相机获取其相应的数字图像信息,即亮度(Value,用来区别颜色明暗的程度)和饱和度(Saturation,颜色的纯度)。建立不同密度下不同土壤含水率的估算模型,并验证估算模型的准确性和普适性,为监测表层土壤含水率提供简单、高效、准确和易操作的测量方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 土壤样品

土壤样品分为壤土、红壤和黑壤。将土样在室内风干,过筛 $2\ \text{mm}$ 后备用。测定土壤粒径、土粒密度和有机质(表1)。设置4个土壤密度:壤土为 $1\ 200$ 、 $1\ 300$ 、 $1\ 400$ 和 $1\ 500\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,红壤和黑壤为 $1\ 300$ 、 $1\ 400$ 、 $1\ 500$ 和 $1\ 600\ \text{kg}/\text{m}^3$ 。每种土壤的水分处理见表2,根据相应土壤含水率,将一定比例水土置于密封袋,混匀,放置 $24\ \text{h}$ 。将上述土壤样品按一定的土壤密度装入铝盒(直径约 $5.5\ \text{cm}$ 和高约 $1\ \text{cm}$ ),并保持土壤样品表面平整。

收稿日期:2016-03-21

基金项目:国家自然科学基金项目(41371231)

作者简介:刁万英(1986-),女,博士研究生,主要从事土壤含水量测量方法的研究。E-mail: diaowanying@126.com

通信作者:刘刚(1972-),男,教授,博士生导师,主要从事土壤物理热特性和土壤含水率测量方法的研究。E-mail: liug@cau.edu.cn

表1 选取土壤样品的特性

土壤类型	黏粒占比/%	粉粒占比/%	砂粒占比/%	土粒密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	有机质量/%
壤土	16.40	40.00	43.60	2.58±0.02	1.09
红壤	37.33	34.67	28.00	2.68±0.09	0.82
黑壤	13.07	13.33	73.60	2.50±0.09	1.72

表2 土壤样品的水分处理

土壤类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	土壤含水率的范围/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-3</sup> )	水分处理
壤土	1 200	0~0.44	9
	1 300	0~0.46	10
	1 400	0~0.34	11
	1 500	0~0.42	11
红壤	1 300	0~0.61	11
	1 400	0~0.50	11
	1 500	0~0.43	11
	1 600	0~0.41	11
黑壤	1 300	0~0.29	8
	1 400	0~0.35	9
	1 500	0~0.37	11
	1 600	0~0.36	11

## 1.2 测定方法

将有土壤样品的铝盒水平放置,用数码相机(佳能 A3 500 IS,传感器类型为 CCD(charge-coupled device,电荷耦合),28 mm 广角镜头)进行拍照,相机镜头垂直于土壤样品,高度为 50 cm;光源为 75 W 的卤素灯(HF2100 Sunnex, Inc.),与土壤样品呈 75°,获得相同密度下表层不同土壤含水率的数字图像。为减少光源分布不均匀而产生的误差,测量时土壤样品旁边水平放置一块标准白板(合肥星月夜光技术应用研究所),进行校正。每个处理 3 次重复,拍照后对土壤样品进行烘干称质量,获得土壤含水率,作为参考值。

## 1.3 图像分析

用 ENVI 4.7 提取不同密度下不同土壤含水率的数字图像的红( $R$ )、绿( $G$ )和蓝( $B$ )值,并用白板进行校正,将校正后的  $R$ 、 $G$  和  $B$ ,通过式(1)和式(2)转化为亮度( $V$ )和饱和度( $S$ )<sup>[9]</sup>,数字图像的统计描述见表 3。根据 Persson<sup>[7]</sup>提出的多元线性方程(3),建立不同密度表层土壤含水率与亮度( $V$ )和饱和度( $S$ )的估算模型。

表3 数字图像亮度和饱和度的统计描述

土壤样品	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	亮度/饱和度	最大值	最小值	平均值
壤土	1 200	$V$	0.90	0.58	0.72±0.08
		$S$	0.74	0.32	0.64±0.09
	1 300	$V$	0.91	0.51	0.71±0.11
		$S$	0.79	0.46	0.68±0.07
	1 400	$V$	0.92	0.45	0.71±0.11
		$S$	0.84	0.34	0.67±0.09
	1 500	$V$	0.91	0.47	0.69±0.13
		$S$	0.81	0.34	0.69±0.08
红壤	1 300	$V$	0.87	0.50	0.72±0.08
		$S$	0.80	0.54	0.71±0.07
	1 400	$V$	0.88	0.56	0.72±0.09
		$S$	0.81	0.62	0.72±0.06
	1 500	$V$	0.95	0.55	0.74±0.11
		$S$	0.88	0.59	0.76±0.09
	1 600	$V$	0.97	0.69	0.81±0.08
		$S$	0.88	0.51	0.75±0.07
黑壤	1 300	$V$	0.73	0.41	0.52±0.09
		$S$	0.75	0.54	0.62±0.06
	1 400	$V$	0.73	0.39	0.53±0.08
		$S$	0.75	0.33	0.60±0.08
	1 500	$V$	0.65	0.27	0.49±0.08
		$S$	0.68	0.30	0.57±0.09
	1 600	$V$	0.70	0.42	0.58±0.06
		$S$	0.66	0.44	0.56±0.05

$$V = \max(R, G, B) / 255 \quad V = \max(R, G, B) / 255 \quad V = \max(R, G, B) / 255, \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} & \text{若 } \max(R, G, B) \neq 0 \\ 0 & \text{若 } \max(R, G, B) = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$\theta = a + b \cdot S + c \cdot V. \quad (3)$$

#### 1.4 数据分析

用 SPSS 17.0 将数据分为建模和验证 2 部分, 建模数据约为总数据 2/3, 其余为验证数据, 对所获数据进行回归分析, 用决定系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 (RMSE) 对模型稳定性和预测能力进行检验, 用 Origin 8.0 绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 壤土含水率的估算模型及模型验证

在不同密度的情况下, 建立了壤土不同土壤含水率的估算模型, 均达到极显著性水平 ( $P < 0.01$ ), 其拟合参数见表 4。由表 4 可知, 参数  $b$  的变化范围最小。当壤土的土壤密度为  $1500 \text{ kg/m}^3$  时, 拟合模型的决定系数最低, 其均方根误差最大为  $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , 其次是  $1200 \text{ kg/m}^3$  (RMSE 为  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ) 和  $1300 \text{ kg/m}^3$  (RMSE 为  $0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), 密度为  $1400 \text{ kg/m}^3$  模型拟合的相关性最高 ( $R^2=0.93$ ), 其均方根误差最小 ( $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ), 不同的装填密度会对拟合结果产生影响<sup>[7]</sup>。当土壤含水率小于  $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$  时, 所有密度估算的土壤含水率与实测值相差很大, 偏离 1:1 的程度较大; 而当土壤含水率大于  $0.25 \text{ m}^3/\text{m}^3$  时, 离散程度较小 (图 1(a))。

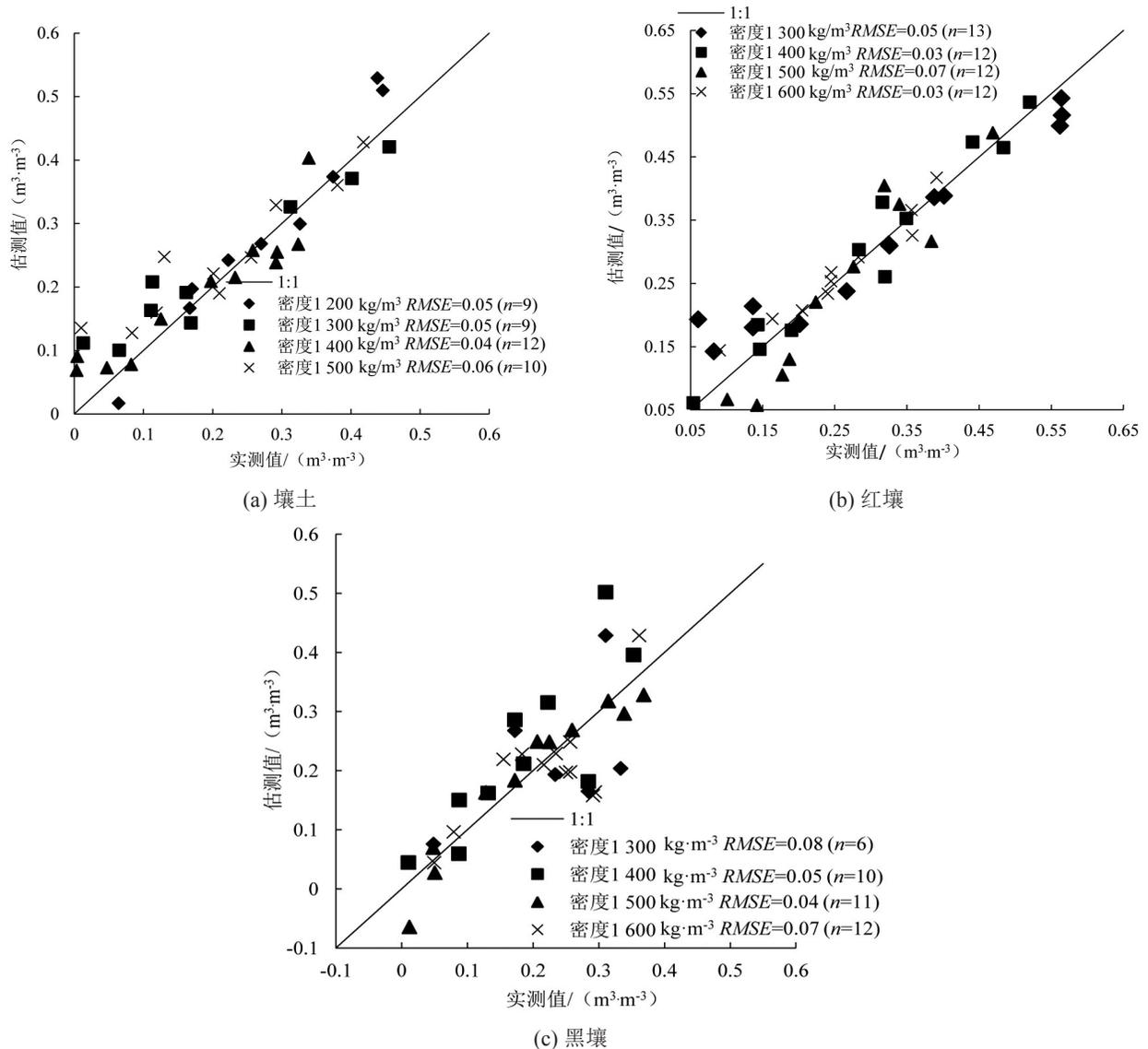


图 1 土壤含水率实测值与估算值的比较

表4 不同土壤密度的拟合参数

土壤类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	样本数
壤土	1 200	1.74	-0.71	-1.54	0.90	18
	1 300	1.48	-1.25	-0.50	0.90	21
	1 400	0.95	-0.82	-0.27	0.93	21
	1 500	0.89	-1.03	0.08	0.83	23
	全部土壤	1.35	-0.67	-0.99	0.70	82
红壤	1 300	2.09	-1.83	-0.63	0.93	20
	1 400	1.79	-1.53	-0.59	0.93	21
	1 500	1.18	-1.10	-0.18	0.96	21
	1 600	1.53	-1.39	-0.25	0.96	21
	全部土壤	1.89	-0.72	-1.50	0.72	89
黑壤	1 300	1.20	-0.58	-1.19	0.80	18
	1 400	1.33	-0.55	-1.41	0.74	17
	1 500	0.88	-1.30	0.03	0.78	22
	1 600	1.19	-1.06	-0.64	0.87	21
	全部土壤	0.93	-0.48	-0.86	0.60	77
全部土壤		0.59	-0.70	-0.15	0.34	249

## 2.2 红壤含水率的估算模型及模型验证

不同密度的红壤不同土壤含水率拟合参数见表4,模型的决定系数均达到极显著性水平( $P < 0.01$ )。由表4可知,参数*c*的变化范围最小。当红壤的密度为1 500 kg/m<sup>3</sup>时,尽管其拟合模型的相关系数最好,但其均方根误差最大(0.07 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),其次是1 300 kg/m<sup>3</sup>( $R^2=0.93$ 和 $RMSE=0.05$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),最后为1 400 kg/m<sup>3</sup>( $R^2=0.93$ 和 $RMSE=0.03$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)和1 600 kg/m<sup>3</sup>( $R^2=0.96$ 和 $RMSE=0.03$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)。当土壤含水率约等于0.23 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>时,所有密度的估算模型能准确地估算表层土壤含水率;当土壤含水率小于或大于0.23 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>时,则估算精度减低即高估或低估(图1(b))。

## 2.3 黑壤含水率的估算模型及模型验证

不同密度的黑壤不同土壤含水率拟合参数见表4,估算模型决定系数均达到极显著性水平( $P < 0.01$ )。从图1(c)可知,当黑壤的密度为1 300 kg/m<sup>3</sup>时,其拟合相关系数较低,均方根误差也是最大(0.08 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),其次是1 400 kg/m<sup>3</sup>( $RMSE=0.07$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)和1 500 kg/m<sup>3</sup>( $RMSE=0.04$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),最后是1 600 kg/m<sup>3</sup>,拟合的相关系数最高,均方根误差最小为0.07 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。

## 2.4 3种土壤的土壤含水率估算模型及验证

本研究建立了不同土壤类型、不同土壤密度和不同土壤含水率的估算模型,拟合参数见表4。由表4可知,在考虑密度的情况下,3种土壤的决定系数均达到极显著性水平( $P < 0.01$ ),尤其是红壤的估算模型相关性最好, $R^2$ 为0.72,其次为壤土(0.70),最后为黑壤(0.60)。比较实测值与估算值的差异,红壤均方根误差最小( $RMSE=0.06$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),壤土和黑壤的 $RMSE$ 为0.07 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>。从图2还可得出,当土壤含水率小于0.35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>时,图2中点的离散程度较小,说明模型的估算精确度较高,而当土壤含水率大于0.35 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>时,图2中点的离散程度较之前偏大,表明模型估算精度降低,主要是受表面水膜的影响。当土壤含水率接近饱和含水率时,土壤表面的水膜有一定的反射作用<sup>[7,10]</sup>。

用*V*和*S*估算土壤表层土壤含水率,每种土壤的相关性均达到极显著性水平( $P < 0.01$ ),其中红壤的相关性最好, $R^2$ 均达0.93以上,壤土的 $R^2$ 均超过0.83,黑壤的 $R^2$ 均大于0.80。主要原因是红壤的土壤颗粒中黏粒量比较大(37.33%),土壤颗粒之间易形成小的土壤孔隙度,这样就能吸收更多水分,使其表面的水膜较少,减少了表层水膜的反射。相比之下,壤土的粉粒和砂粒量较大,均超过40%,黑壤的砂粒量为73.60%,易导致土壤形成大孔隙,在干土中随着大孔隙的增加,反射率降低<sup>[11]</sup>;表层土壤的孔隙度增大,表层水膜也增加。土壤水分先填充土壤颗粒之间的小孔隙,等小孔隙填满之后,再填充土壤颗粒之间的大孔隙<sup>[10]</sup>。与红壤相比,壤土和黑壤的黏粒所占比例较小(表1),导致它们吸收水分的能力比红壤的弱;所以当土壤含水率接近饱和时,土壤表层会形成水膜,影响图像获取的质量,进而导致估算模型的参数拟合的结果比红壤的拟合效果差。考虑到野外土壤类型多样性和土壤

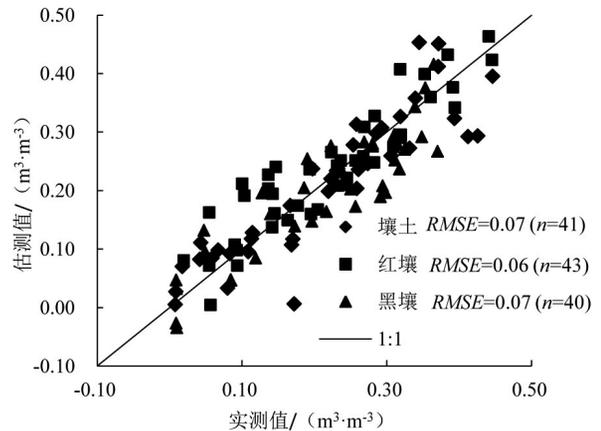


图2 土壤含水率实测值与估测值关系

密度易变性,将3种土壤统一建模,模型的相关性到达了极显著性水平,因土壤质地和不同土壤密度的影响,导致其均方根误差较大( $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ),超出了可接受的范围。故得出的土壤含水率估算模型只适用于某种特征土壤。

### 3 结论

在特定土壤密度下,每种土壤的含水率估算模型均达到了极显著性水平( $P < 0.01$ ),其中估算红壤的含水率精度最好( $R^2$ 均超过0.93,均方根误差最大为 $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )。若考虑土壤密度变化时,其中红壤的估算模型最好( $R^2=0.72$ 和 $RMSE=0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ),壤土( $R^2=0.70$ 和 $RMSE=0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )和黑壤( $R^2=0.60$ 和 $RMSE=0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ )。用数码相机可以快速地、有效地获取表层土壤含水率,为大面积测量不同土壤密度的表层土壤含水率提供支持,与其他的测量方法相比,此方法减少了测量时间与资金,还能与遥感影像相结合,实现表层土壤含水率大面积地监测。

兹初步研究了不同土壤密度和土壤含水率的估算模型;因受土壤质地的影响导致估算模型的普适性较差。大田中表层土壤密度易受耕作、降雨和人类活动等影响,土壤密度变化范围较大;而研究中设置的土壤密度范围变化较小。该模型与数字图像的红( $R$ )、绿( $G$ )和蓝( $B$ )相关,若在大田中应用,所采集的数字图像易受植被影响,进而影响土壤含水率测量精度。故下一步研究应考虑更多的土壤密度,以及如何减少由植被引起的测量误差。

#### 参考文献:

- [1] 王方永,李少昆,王克如,等. 基于机器视觉的棉花群体叶绿素监测[J]. 作物学报, 2007, 33(12):2 041-2 046.
- [2] LI Y, CHEN D, WALKER C N, et al. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera[J]. Field Crops Research, 2010, 118(3):221-227.
- [3] 黄晓东,冯仲科. 基于数码相机的样木胸径获取方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 266-272.
- [4] 高林,杨贵军,王宝山,等. 基于无人机遥感影像的大豆叶面积指数反演研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 868-876.
- [5] 毛天旭,朱元骏,邵明安. 土壤表面灰度值与表层土壤含水量关系研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 245-248.
- [6] POST D F, FIMBRES A, MATTHIAS A D, et al. Predicting soil albedo from soil color and spectral reflectance data [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(3):1 027-1 034.
- [7] PERSSON M. Estimating surface soil moisture from soil color using image analysis [J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4):1 119-1 122.
- [8] ZHU Y J, WANG Y Q, SHAO M A, et al. Estimating soil water content from surface digital image gray level measurements under visible spectrum[J]. Canada Journal Soil Science, 2011, 91(1):69-76.
- [9] HANBURYA. The taming of the hue, saturation and brightnesscolourspace[C]//Wildenauer H, Kropatsch (ed.) W, Bad Aussee: Austria, 7th Computer Vision Winter Workshop, 2002.
- [10] WHALLEY W R, LEEDS-HARRISON P B. Estimation of soil status using near infrared reflectance [J]. Hydrological Processes, 1991, 5(3):321-327.
- [11] BOTTCHEK K, GLASSER C, MOONEY S J. Examining the relationship between soil structure and soil reflectance using soil pore structure characteristics obtained from image analysis [J]. Remote Sensing Letters, 2012, 3(7):557-565.

## Estimating Water Content in Soils of Different Bulk Densities Using Digital Image

DIAO Wanying, LIU Gang

(China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Taking loam, red and black soils as examples, we investigated the impact of bulk density on accuracy of the soil water content estimated using digital images such as their brightness and saturation. The results show that for the less dense loam at bulk density of  $1\ 400 \text{ kg}/\text{m}^3$ , the correlation coefficient ( $R^2$ ) between image information and water content is 0.93 with a root mean square error ( $RMSE$ ) of  $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . The correlation for the red soil at bulk density of  $1\ 600 \text{ kg}/\text{m}^3$  is similar with a  $R^2$  of 0.93 and  $RMSE$  of  $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . The  $R^2$  and  $RMSE$  for the densest black soil at bulk density of  $1\ 600 \text{ kg}/\text{m}^3$  are 0.87 and  $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$  respectively. Considering the change in soil bulk density, the  $R^2$  and  $RMSE$  in the models established for the red soil are  $R^2=0.72$  and  $RMSE=0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , for the loam are  $R^2=0.70$  and  $RMSE=0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ , and for the black soil are  $R^2=0.60$  and  $RMSE=0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . It is hence feasible to estimate soil surface water content using on digital camera.

**Key words:** volumetric water content; soil bulk density; value; saturation

责任编辑:白芳芳