

# ECH<sub>2</sub>O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的可靠性

何修道<sup>1</sup>, 王立<sup>1</sup>, 党宏忠<sup>2</sup>, 韩辉<sup>3</sup>, 吕文强<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学 林学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091; 3. 辽宁省固沙造林研究所, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** [目的] 对 ECH<sub>2</sub>O EC-5 土壤水分传感器测定科尔沁沙地土壤含水率的可靠性进行验证。[方法] 以烘干法测定数据为基准值, 采用回归分析方法建立 ECH<sub>2</sub>O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的校正方程, 并用独立的样本进行验证。[结果] ECH<sub>2</sub>O EC-5 水分传感器测定值与烘干法测定值之间具有很好的线性回归关系 ( $R^2=0.96$ ), 呈显著正相关 ( $p<0.01$ ); 验证结果显示, ECH<sub>2</sub>O EC-5 土壤水分传感器测定值经回归方程校正后与基准值之间的均方根误差 (RMSE)、相对均方根误差 (RRMSE) 分别为 0.38% 和 6.29%。[结论] ECH<sub>2</sub>O EC-5 土壤水分传感器测定的沙地土壤水分值准确度较高, 具有很高的可靠性。

**关键词:** EC-5 水分传感器; 沙地土壤水分; 校正

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)04-0068-04

中图分类号: S152.7

**文献参数:** 何修道, 王立, 党宏忠, 等. ECH<sub>2</sub>O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的可靠性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 68-71. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.012

## Reliability of ECH<sub>2</sub>O EC-5 Sensor in Measuring Sandy Soil Water Content

HE Xiudao<sup>1</sup>, WANG Li<sup>1</sup>, DANG Hongzhong<sup>2</sup>, HAN Hui<sup>3</sup>, LÜ Wenqiang<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730030, China;

2. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

3. Liaoning Province Sand-fixation and Afforestation Research Institute, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** [Objective] The soil water content in Horqin sandy land was measured by ECH<sub>2</sub>O EC-5 sensor to validate the reliability of the sensor. [Methods] Values obtained by weighting method was compared with the ones of ECH<sub>2</sub>O EC-5 sensor measurement, and calibrated with regression analysis. [Results] The equation of water correction between the values of weighting method and the ones of sensor measurement for the sandy land was a linear function ( $R^2=0.96$ ,  $p<0.01$ ). The validation results showed that the root mean square error (RMSE) and relative root mean square error (RRMSE) between the soil water contents predicted by regression equation and the contrast standard values were 0.38%, 6.29%, respectively. [Conclusion] Soil water contents measured by ECH<sub>2</sub>O EC-5 sensor for sandy land were accurate and reliable.

**Keywords:** EC-5 sensor; soil water content of sandy soil; correction

土壤水分是土壤的重要物理参数之一, 对于植物的生长具有重要的意义<sup>[1]</sup>。沙地土壤由于具有特殊的结构与组成, 其含水率往往较低, 因此, 水分是制约沙地植被正常生长的一个重要因素<sup>[2]</sup>, 所以合理采用科学手段以准确测定沙地土壤含水率对恢复沙地植被和提高沙地农业产量具有重要意义。随着科技的不断进步, 测定土壤含水率的手段逐渐实现自动化监

测, 保证了从时间、空间上对水分变化实现实时、动态的监测<sup>[3-4]</sup>, 从而节约时间和人力。但是, 先进方法的可靠性与适用范围如何, 需要得到验证。

目前测量土壤含水率的方法除了烘干法外, 常见的还有时域反射仪法, 即 TDR 法, 中子仪法和 ECH<sub>2</sub>O 水分传感器法等。TDR 法是用一对平行棒或金属线作为导体, 土壤作为电介质, 一对棒起波导

收稿日期: 2015-09-01

修回日期: 2015-09-25

资助项目: 国家自然科学基金发展计划 (973) 项目“沙区土壤水分时空分布格局与区域分异规律” (2013CB429901)

第一作者: 何修道 (1988—), 男 (汉族), 甘肃省张掖市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。E-mail: xiudaoh@ sina.com。

通讯作者: 王立 (1963—), 男 (汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治、土壤侵蚀、抗旱植物研究工作。E-mail: wangli@gsau.edu.cn。

管的作用,电磁波信号在土壤中以平面波传导,经传输线一端返到 TDR 接收器,分析传导速度和振幅变化,根据速度与介电常数的关系、介电常数与体积含水量之间的函数关系而得出土壤含水率<sup>[5]</sup>。该仪器价格较贵,且在盐碱地使用过程中其测量精度较低,需进行标定<sup>[6]</sup>。中子仪法测定水分就是通过测定慢中子云的密度与水分子间的函数关系来确定土壤中的水分含量<sup>[5]</sup>。利用中子仪测定土壤水分含量,不必采土样,不破坏土壤结构,并可定点连续监测,从而得到该样点土壤水分动态运动规律,且无滞后现象<sup>[7]</sup>,但室内外曲线差异较大<sup>[8]</sup>,且田间不同的土壤物理性质,如容重不同、土壤质地不同都会造成曲线较大的移动<sup>[5]</sup>,表层测量困难,深度分辨不够准确,也存在一定的潜在辐射危害<sup>[5,7]</sup>。ECH<sub>2</sub>O 土壤水分传感器(decagon devices inc. Pullman, WA)是传感器测量土壤水分的一种,是美国 Decagon 公司根据 Topp<sup>[9]</sup>等提出的土壤含水率与土壤介电常数之间存在着确定性的单值多项式关系这一原理研制出的一种土壤水分监测器。其 EC-5 型水分传感器是通过改进 EC-20 和 EC-10 型水分传感器而来的一种新型传感器,该传感器发射频率为 70 MHz 的方形波,以测量探针周围土壤的介电常数,并通过数据采集器计算程序将所测得的介电常数转换为土壤体积含水量,具有持续监测土壤水分变化的优点,数据记录间隔时间最小 1 s,并且能最低限度的受到温度、盐分、电介质等因素对测量结果的干扰,能即时反应土壤水分状况<sup>[10]</sup>,并且可以同时监测多层次土壤水分含量变化情况,ECH<sub>2</sub>O 土壤水分传感器因而能得到广泛应用<sup>[11-12]</sup>。目前,ECH<sub>2</sub>O 土壤水分传感器已广泛运用于土壤水

分的实时监测中,但是在野外条件下,特别是针对不同类型土壤下测定的可靠性还需取得广泛的验证<sup>[13]</sup>。目前,WU Bo 等<sup>[14]</sup>在毛乌素沙地的研究表明 EC-5 测定沙地土壤水分含量具有较好的可靠性,并建立了校正方程,该校正方程在其它沙地如科尔沁沙地(土壤质地、结构有差异)是否具有足够的可靠性仍亟待验证,因此,本研究在野外取样以烘干法测得结果作为标准,建立 EC-5 水分传感器测定沙地土壤水分的回归方程,并采取独立的样本进行方程精度的检验,并把校正结果与前人研究结果相比较,较系统地分析了 EC-5 水分传感器在测定沙地土壤含水率时的可靠性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于科尔沁沙地南缘的辽宁省章古台镇,地理位置处于北纬 42°43',东经 122°22',平均海拔高度 226.5 m,属北温带亚湿润气候区,春季干旱多偏南风,年平均气温为 5.7 °C,年降水量为 475 mm,年蒸发量 1 200~1 450 mm,生长期为 150 d 左右。采样地点分 3 处,其中在三家子工区附近选取两个点,其地上植被建群种分别为樟子松(*Pinus sylvestris*)和赤松(*Pinus densiflora*),在后坨子区选择一个点,其地上植被群种为油松(*Pinus tabulaeformis*)。该地区 20 世纪 50 年代初为流动沙地,通过人工种植樟子松、赤松、油松林进行治理,逐渐形成具有一定规模的人工林。土壤类型为风沙土,在地下约 2 m 以下具有不同程度的埋藏古土分布。试验林地情况详见表 1。

表 1 林分及林地主要植被类型

林地类型	林龄/ a	平均 胸径/cm	平均 树高/m	林分密度/ (株·hm <sup>-2</sup> )	林地主要植物类型
樟子松	36	18.42	9.88	290	黄囊苔草、隐子草、小黄蒿、狗尾草、野艾蒿、苦苣菜、莛菜、碱草、狭叶米口袋
赤松	36	19.93	10.39	420	马齿苋、隐子草、小黄蒿、狭叶米口袋、黄囊苔草、碱草、灰绿藜、牻牛儿苗、冰草
油松	55	20.84	10.25	600	轴藜、灰绿藜、狗尾草、铁苋菜、东北莛菜、鸡眼草、狭叶米口袋、隐子草

### 1.2 研究方法

为了在田间取得土壤含水率变化较大范围内的数据,于 2015 年 5 月 14—20 日,6 月 29—7 月 6 日两个时间段内,分别在樟子松、赤松、油松林各随机选取样点,用小铲铲去表层 0.8 m×0.8 m 范围约 10 cm 厚的土层,垂直插入 EC-5 土壤水分传感器(传感器与北京雨根公司生产的 RR-7120 型数采器、电脑已连接),待稳定 10 min 后记录数据,以此方法分别测量

各样点土壤水分,每个样点重复测量 3 次,记录输出电压值与输出体积含水量;同时在探针附近用铝盒取土样,重复 3 次,带回室内称量后放入 105 °C 烘箱中烘干至质量恒定(12 h),以测定土壤含水率,共测得 188 对水分数据。在樟子松林、赤松林、油松林地各取 3 个土样,用 100 cm<sup>3</sup> 环刀在各林地样点取土样并按照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤水分—物理性质的测定(LY/T1215-1999)》测定土壤容重

( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、土壤毛管孔隙度(%)、非毛管孔隙度(%)等指标。于 7 月 29 日至 8 月 3 日在各样点区域再次进行测定,对先期建议的回归方程进行验证。用 Excel, SPSS 20.0 对测得的水分数据进行统计分析和绘图。

## 2 结果分析

### 2.1 林地土壤物理性质

根据已有的研究结果<sup>[15]</sup>,林地固定风沙土土壤粒径主要集中在 0.5~0.05 mm 范围内,占总量的 76.23%,按照我国土壤质地分级系统,沙砾含量( $\geq 0.05$  mm)为 77.8%,粉粒含量( $<0.05$  mm)为 22.2%,土壤质地较粗,同时有机质含量较低,仅为 0.38%。测定结果表明(表 2),在樟子松、赤松、油松林中,赤松林

地的最大持水量、毛管持水量、田间持水量和毛管孔隙度在 3 种类型林地中均为最大,最大持水量分别比樟子松、油松林的高出 5.99,13.41 g/kg;毛管持水量分别高出 1.59,16.37 g/kg;田间持水量分别高出 2.34,12.67 g/kg,毛管孔隙度分别高出 0.23%,2.37%。可以看出在以上几项指标中,油松林地是三者中最小的,但是其非毛管孔隙度却是最大的(7.21%),分别比樟子松(6.12%)、赤松(6.78%)高了 1.09%和 0.43%,这可能是由于油松林地同其他林地相比,土壤质地较粗造成的。对樟子松、赤松、油松林地土壤水分物理性质进行方差分析发现,各林地最大持水量、毛管持水量、田间持水量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和土壤容重之间没有显著性差异( $p>0.05$ )。

表 2 樟子松、赤松、油松林地土壤物理性质

林地类型	最大持水量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	毛管持水量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	田间持水量/ ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	总孔隙度/ %	土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
樟子松	282.52±13.22 <sup>a</sup>	242.43±11.43 <sup>a</sup>	227.64±13.69 <sup>a</sup>	36.81±1.75 <sup>a</sup>	6.12±0.39 <sup>a</sup>	42.93±1.49 <sup>a</sup>	1.53±0.02 <sup>a</sup>
赤松	288.51±11.86 <sup>a</sup>	244.02±11.86 <sup>a</sup>	229.98±11.99 <sup>a</sup>	37.04±1.40 <sup>a</sup>	6.78±0.24 <sup>a</sup>	43.82±1.32 <sup>a</sup>	1.53±0.02 <sup>a</sup>
油松	275.1±15.56 <sup>a</sup>	227.65±12.81 <sup>a</sup>	217.31±12.25 <sup>a</sup>	34.67±1.40 <sup>a</sup>	7.21±0.50 <sup>a</sup>	41.88±1.75 <sup>a</sup>	1.53±0.02 <sup>a</sup>

注:同列数据后小写字母表示  $p<0.05$  条件下的显著性。

### 2.2 林地土壤水分校正

分别在樟子松、赤松、油松林地用 EC-5 水分传感器、烘干法进行土壤水分测定,共取得数据 188 对,对 EC-5 水分传感器输出土壤水分值与烘干法实测土壤水分值进行回归分析,以校正水分传感器输出值。发现二者具有较好的线性相关性,线性方程为:

$$y=0.9677x+0.2634 \quad (R^2=0.96) \quad (1)$$

式中: $y$ ——校正后土壤水分含量(%); $x$ ——EC-5 水分传感器输出土壤水分值(%)。

方程拟合较好,能解释 96%以上相关数据;根据皮尔逊相关系数  $r=0.98$ ,说明用两种方法所测结果达到高度相关;另一方面,经显著性检验,校正方程显著性水平达到显著相关( $p<0.01$ )。因此,校正后的土壤水分值能很好地反映用烘干法测定科尔沁沙地林地土壤水分实测值,校正后的水分值较为准确,这也直接说明用 EC-5 型土壤水分传感器测定沙地林地土壤水分的结果是可信的。

为保证拟合方程校正后的土壤含水率与 EC-5 土壤水分传感器输出水分值的可靠性,于 7 月 29 日至 8 月 3 日内再次进行试验,并利用校正方程对所测土壤水分进行校正,并将校正后的土壤水分值与烘干法测得的实测值进行相关性分析,由分析结果可知,经校正方程校正后的土壤水分值与烘干法实测值之间相关性显著,该校正方程校正后的土壤水分值具有较高

的准确性和稳定性。

对所测土壤水分校正前和校正后的土壤水分传感器输出水分值分别与烘干法测定土壤水分值做绝对误差( $D$ )、相对误差(RD)、均方根误差(RMSE)和相对均方根误差(RRMSE)计算,计算结果详见表 3。经计算,校正前、后土壤水分传感器输出水分值与烘干法所测土壤水分值的绝对误差范围分别为-1.10%~1.0%和-0.92%~1.03%,相对误差范围分别为-33.82%~22.5%和-27.64%~18.85%,均方根误差分别为 0.41%和 0.38%,相对均方根误差分别为 6.75%和 6.29%。从以上结果来看,以烘干法所测得的实测土壤水分值为标准,校正前、后的土壤水分输出值与实测土壤水分值的误差变化范围较为接近,校正后土壤水分输出值的均方根误差和相对均方根误差比校正前略低。同时,经单因素方差分析,结果表明校正前后水分传感器输出值与烘干法实测值之间差异不显著( $p>0.05$ ),说明水分传感器输出结果较为稳定,水分传感器所测得的结果是真实可靠的。

表 3 EC-5 输出土壤水分值校正前、后与烘干法测定土壤水分值的关系 %

土壤水分	绝对误差变化	相对误差变化	均方根误差	相对均方根误差
校正前	-1.10~1.0	-33.82~22.5	0.41	6.75
校正后	-0.92~1.03	-27.64~18.85	0.38	6.29

WU Bo<sup>[14]</sup>在毛乌素沙地对 EC-5 土壤水分探头所测土壤水分值进行了相关校正试验<sup>[14]</sup>,得到了校正方程:

$$y = 0.1516 \sim 1.501 \times 10^{-3} \text{ mV} + 3.218 \times 10^{-6} \text{ mV}^2$$

$$(R^2 = 0.95) \quad (2)$$

式中: $y$ ——土壤含水率%;  $\text{mV}$ ——EC-5 传感器输出电压值。

该校正方程在毛乌素沙地土壤水分研究中起到了重要作用。现将本次试验所测所有电压值带入公式(2),并将所得土壤水分值与经公式(1)校正后的水分值进行方差分析,结果表明,毛乌素沙地土壤水分校正方程校正后的水分值分别与本试验的校正水分值差异性显著( $p < 0.05$ )(图 1),校正土壤水分值变化范围分别为 2.01%~24.05%和 1.81%~21.39%。公式(1)校正的水分值与烘干法实测值差异不明显( $p > 0.05$ ),说明为准确研究土壤水分变化,在用 EC-5 水分传感器研究沙地土壤水分过程中,应对传感器做相应的水分校正,以达到准确研究沙地土壤水分变化的目的。

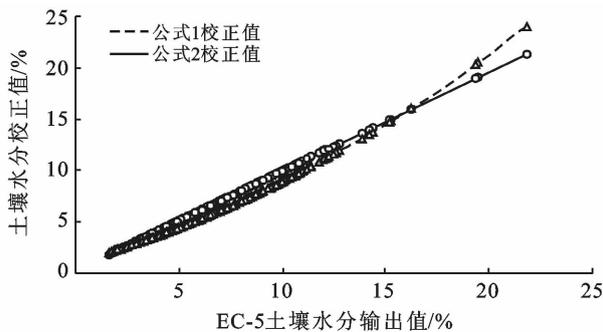


图 1 不同校正方程校正结果对比

### 3 讨论

以烘干法为基准,对 EC-5 土壤水分传感器进行野外校正试验。试验结果表明,EC-5 土壤水分传感器输出土壤水分值与烘干法测定水分值之间有显著线性相关关系,对毛乌素沙地土壤水分相关研究也表明二者呈线性关系<sup>[11,16]</sup>。有关研究<sup>[12,17]</sup>表明,温度对 EC-5 土壤水分传感器测量结果影响并不明显,土壤温度从 3 ℃缓慢变化到 38 ℃,土壤水分传感器输出值仅增长了 1%<sup>[17]</sup>;研究人员在毛乌素沙地土壤水分的研究结果表明日间空气温度波动范围为在 41 ℃左右时,10 cm 深度表层土壤水分测定结果比烘干法实测值大 0.005 3 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>,随着深度增加,温度影响逐渐减小,温度对测定结果影响可忽略<sup>[14]</sup>。但是对表层土壤(5 cm)的水分与热量的研究却表明,随着土壤温度

的变化,土壤水分与其呈显著相关关系<sup>[18]</sup>,所以针对温度对 EC-5 水分传感器测定结果的影响还需做进一步研究。本研究由于是在密度较大的乔木林地,所以地温变化对测定结果的影响可以忽略不计。

在野外条件下测定土壤水分状况,应根据实地情况考虑环境因素对 EC-5 土壤水分传感器测定过程的影响,选取关键因素对 EC-5 土壤水分传感器做出校正,忽略影响较小的因子,以便对不同条件下的测量精度做出正确估计。单就本次试验来看,在试验过程中忽略温度对测定结果的影响,EC-5 土壤水分传感器输出结果同烘干法实测土壤水分值呈显著相关关系,说明该土壤水分传感器输出值能正确反映土壤水分实测值,测得结果真实可靠,温度对该水分传感器测定结果影响不大。此次试验所得沙地土壤水分校正方程能准确估算土壤含水率,结果可靠。

### 4 结论

通过对沙地樟子松、赤松、油松林地采用 EC-5 土壤水分传感器、烘干法以测定沙地土壤含水率,经回归分析发现二者所测结果具有一元线性相关性( $R^2 = 0.96$ ),二者具有显著线性相关性( $p < 0.01$ ),说明校正方程模拟结果良好,EC-5 水分传感器测定结果较为稳定。传感器输出水分值与烘干法测得实测土壤水分值相差不大,经校正方程校正后,有 96% 以上的数据接近土壤含水率实测值。通过运用毛乌素沙地土壤水分校正方程与本文所得校正方程的对比分析,发现经两种校正方程校正后的水分值之间差异显著。因此,不同研究地区的土壤水分校正方程不能应用于所有研究地区,应针对不同的研究区对 EC-5 土壤水分传感器进行相应的水分校正试验,建立相应的水分校正方程,才能对研究区域进行准确的土壤水分含量变化研究,为沙地土壤水分研究提供理论依据。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 伍永秋,刘宝元,Erikvanden E,等.黄土高原土壤水分的自动监测:TDR 系统及其应用[J].水土保持学报,2001,15(2):108-111.
- [2] 蒋进,王雪芹,雷加强.古尔班通古特沙漠工程防护体系内土壤水分变化规律[J].水土保持学报,2003,17(3):74-77.
- [3] 郭卫华,李波,张新时,等.FDR 系统在土壤水分连续动态监测中的应用[J].干旱区研究,2003,20(4):247-251.
- [4] 李晓娟,曾德超.TDR 在监测土壤水分动态变化中的应用[J].计算机与农业,1999(4):14-15.

不会比重采样前的原始数据有实质性的提高。特别是对于在实践中希望利用重采样方法派生出的所谓的“高分辨率”的DEM的做法是不可行的。

**致谢:**对在本研究中基础数据获取的过程中,陕西测绘局国家第一航测遥感院的王伟丽、王小燕、王劲、薛争光等同志提供的帮助和支持,表示衷心的感谢。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈楠,王钦敏. 基于地形因子信息量的数字高程模型分辨率的选择:以黄土高原的研究为例[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2009,34(6):692-695.
- [2] 陈燕,汤国安,齐清文. 不同空间尺度DEM坡度转换图谱分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2004,25(1):79-82.
- [3] 邓仕虎,杨勤科. DEM采样间隔对地形描述精度的影响研究[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(2):23-26.
- [4] 吴险峰,刘昌明,王中根. 栅格DEM的水平分辨率对流域特征的影响分析[J]. 自然资源学报,2003,18(02):148-154.
- [5] 张勇,陈良富,柳钦火,等. 日照时间的地形影响与空间尺度效应[J]. 遥感学报,2005,9(5):521-530.
- [6] Usery E L, Finn M P, Scheidt D J, et al. Geospatial data resampling and resolution effects on watershed modeling: A case study using the agricultural non-point source pollution model[J]. Journal of Geographical Systems, 2004,6(3):289-306.
- [7] Dixon B, Earls J. Resample or not? Effects of resolution of DEMs in watershed modeling [J]. Hydrological Processes, 2009,23(12):1714-1724.
- [8] 陈永刚,汤国安,祝士杰. DEM重采样误差空间分布格局及差异性分析[J]. 中国矿业大学学报,2011,40(4):653-659.
- [9] 苟卫涛,李学清,王秀霞,等. 规则格网DEM格网点位移重采样方法探讨[J]. 测绘标准化,2012,28(3):28-29.
- [10] 王宇,白天路. 重采样方法对DEM地形表达的影响分析[J]. 工程勘察,2013(3):67-70.
- [11] Tao Yang, Tang Guoan, Jia Yini, et al. Research on Optimal Analysis Window Size and Resampling Method According to DEM Analysis Scale[C]// International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing. IEEE Computer Society, 2008:369-372.
- [12] 国家测绘局. GB/T7931-2008 1:500,1:1000,1:2000地形图航空摄影测量外业规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [13] 国家测绘局. GB/T7930-2008 1:500,1:1000,1:2000地形图航空摄影测量内业规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [14] 国家测绘局. CH/T9008.2-2010基础地理信息成果1:500,1:1000,1:2000数字高程模型[S]. 北京:测绘出版社,2010.
- [15] 张祖勋. 影象灰度内插的研究[J]. 测绘学报,1983,12(3):178-188.
- [16] 张军红,吴波,杨文斌,等. 半干旱沙地3种土壤水分测定方法对比研究[J]. 水土保持通报,2012,32(2):147-149.
- [17] 张军红,吴波,杨文斌等. 不同演替阶段油蒿群落土壤水分特征分析[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1597-1603.
- [18] Sakaki T, Limsuwat A, Smits K M, et al. Empirical two-point $\alpha$ -mixing model for calibrating the ECH<sub>2</sub>O EC-5 soil moisture sensor in sands [J]. Water Resources Research, 2008,44(4):1-8.
- [19] Wu Bo, Han Haiyan, He Ji, et al. Field-Specific Calibration and Evaluation of ECH<sub>2</sub>O EC-5 Sensor for Sandy Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(1):70-78.
- [20] 焦树仁. 彰武沙地改良与利用研究[M]. 辽宁:辽宁大学出版社,2012.
- [21] 崔利强,吴波,杨文斌,等. 毛乌素沙地东南缘不同植被盖度下土壤水分特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(2):177-182.
- [22] Parsons L R, Bandaranayake W M. Performance of a new capacitance soil moisture probe in a sandy soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009,73(4):1378-1385.
- [23] 姚小英,王澄海,蒲金涌,等. 甘肃黄土高原地区土壤水热特征分析研究[J]. 土壤通报,2006,37(4):66-67.

(上接第71页)

- [5] 时新玲,王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电,2003(10):84-86.
- [6] 高国治,张斌,张桃林,等. 时域反射法(TDR)测定红壤含水量的精度[J]. 土壤,1998,30(1):48-50.
- [7] 陈洪松,邵明安. 中子仪的标定及其在坡地土壤水分测量中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(2):68-71.
- [8] 马孝义,熊运章,王庆玺,等. 智能化田间土壤水分测定仪的研制[J]. 水土保持通报,1995,15(1):32-38.
- [9] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines [J]. Water Resources Research, 1980,16(3):574-582.
- [10] Devices D. Operator's manual for Models EC-20, EC-10, and EC-5. Version2.2[M]. Pullman, W A: Decagon Devices, 2006.