

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao

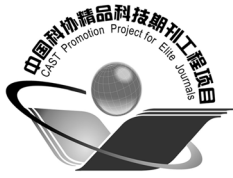


中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

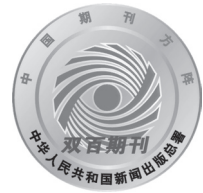
第52卷 第6期

Vol.52 No.6



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

综述与评论

- 耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑…………… 赵彦锋 程道全 陈 杰等 (1197)
 蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展…………… 卢明珠 吕宪国 管 强等 (1209)

研究论文

- 高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素… 杨 帆 黄来明 李德成等 (1226)
 中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性…………… 任圆圆 张学雷 (1237)
 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征…………… 于 洋 赵业婷 常庆瑞 (1251)
 黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演…………… 李 萍 赵庚星 高明秀等 (1262)
 干湿交替对黄土崩解速度的影响…………… 王 健 马 璠 张鹏辉等 (1273)
 晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟…………… 吴奇凡 樊 军 杨晓莉等 (1280)
 旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征…………… 孙丽蓉 王旭刚 徐晓峰等 (1291)
 流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响 …………… 李忠意 徐仁扣 (1301)
 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析 …………… 于 飞 施卫明 (1311)
 太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化 …………… 刘建玲 贾 可 廖文华等 (1325)
 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性…………… 杨 文 周脚根 王美慧等 (1336)
 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征…………… 李红林 贡 璐 朱美玲等 (1345)
 东北平原土壤硒分布特征及影响因素…………… 戴慧敏 宫传东 董 北等 (1356)
 浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究…………… 林维雷 应雨骐 姜培坤等 (1365)
 土壤非多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应…………… 马静静 钱新春 张 伟等 (1374)
 有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究…………… 赵丽娅 李文庆 唐龙翔等 (1383)
 滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应…………… 张体彬 康跃虎 万书勤等 (1392)
 石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应…………… 杨晓玲 丁文魁 马中华等 (1401)
 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究…………… 李杰彪 苏 锐 周志超等 (1412)

研究简报

- 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究 …………… 宋金红 吴景贵 赵欣宇等 (1422)
 陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估…………… 单 燕 李水利 李 茹等 (1430)
 宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用…………… 赵 纯 袁国富 刘 晓等 (1438)

信息

- 《土壤学报》入选“2015期刊数字影响力100强” …………… (1437)

封面图片：滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地（由张体彬提供）

DOI: 10.11766/trxb201503110122

宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用*

赵 纯¹ 袁国富^{2†} 刘 晓² 邵明安² 易小波¹

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要 宇宙射线土壤水分观测系统 (COSMOS) 是一种测量直径达 600 m 以上表层土壤平均含水量的新型土壤水分测量仪器。在黄土高原一片草地植被上测试 COSMOS 仪器测量土壤水分的效果, 并与烘干法及 HydraProbe II 土壤湿度传感器测量结果进行比较。结果表明, COSMOS 测量结果与烘干法结果一致性好; 与 HydraProbe II 点尺度测量结果存在不同时间段的差别, 暗示了黄土高原土壤水分空间变异性及其时间变化。COSMOS 仪器能够很好地测量黄土高原破碎表面观测范围内表层平均土壤含水量, 并为研究土壤含水量的空间变异性提供了潜在工具。

关键词 宇宙射线土壤水分观测系统; 土壤水分; 黄土高原; 草地

中图分类号 S152.7 **文献标识码** A

土壤水分是黄土高原植物生长发育的主要限制因子, 它对土壤侵蚀、水-热-溶质耦合运移以及土壤-植被-大气连续体中的物质迁移过程具有重要的影响^[1-2]。充分认识和把握黄土高原土壤水分状况及动态变化特征对于植被恢复及群落演替具有重要意义。目前, 黄土高原土壤水分常见测定方法有称重法 (烘干法)、中子仪法、基于土壤介电常数测量的 TDR 和 FDR 法^[3-5], 这些测量方法都属于有损点测量方式, 其测量尺度多为小尺度, 空间代表性差, 难以得到土壤含水量在区域分布上的信息^[6]。区域土壤水分的研究主要基于遥感技术^[7], 具有监测范围广、空间分辨率高的特点 (米到数千千米之间)。但只是瞬时值, 无法获得连续数据^[8], 且对地表粗糙度非常敏感、花费大, 这就限制了遥感监测在土壤水分测定中的应用。

宇宙射线土壤水分探测仪 COSMOS, 是一种全新的测量大范围平均土壤含水量的观测设备^[9], 其理论水平测量范围为直径约 660 m (海平面上), 垂直测量深度为 12 ~ 76 cm (土壤水分含量

为零时测定深度为 76 cm, 饱和时测定深度约为 12 cm), 弥补了点测定和遥感监测之间的缺口。而且, 观测结果几乎不受土壤化学性质的影响^[9], 仪器的通用性好。近几年, 国外已经对宇宙射线快中子法测定土壤水分有了系统的研究^[10-14], 国内的应用研究才刚刚起步。宇宙射线土壤水分观测系统的测量范围广、深度集中在土壤表层的特点使它适用于根系分布较浅, 生长过程主要利用浅层土壤水分的农田生态系统和草地生态系统水分关系研究。黄土高原在年降雨量小于 400 mm 左右的区域植被以草本群落为主, 但其地形破碎导致土壤水分的空间分布不均^[15]。本文利用 COSMOS 系统对黄土高原六道沟流域一片典型草地植被区域进行了连续观测, 并结合传统烘干法以及土壤水分自动观测仪的测量, 对土壤水分状况及动态变化过程进行对比分析, 目的是评价 COSMOS 土壤水分测量技术在黄土高原破碎下垫面情形和草地植被上的应用特征及潜在价值, 以此为基于 COSMOS 的黄土高原土壤水分含量的观测与研究提供参照依据。

* 国家自然科学基金重大项目 (41390463) 资助

† 通讯作者, E-mail: yuangf@igsnr.ac.cn

作者简介: 赵纯 (1990—), 女, 陕西西安人, 硕士, 主要从事土壤物理学研究。E-mail: 563164508@qq.com

收稿日期: 2015-03-11; 收到修改稿日期: 2015-07-14

1 COSMOS仪器介绍

1.1 仪器组成

一套完整的COSMOS系统通常由一个快中子探测器、一个慢中子探测器、一个分析中子探测器信号的数据处理单元（里面同时装有温度、湿度以及压力传感器用于诊断和校正仪器）、12V蓄电池、接线装置、太阳能电池板以及支架这几部分组成。在数据采集器装有SD卡装置，用于存储数据。通常观测土壤含水量配备一个快中子探测器就足够了，慢中子探测器主要用于辅助分析雪深、生物量等研究用。

1.2 工作原理

宇宙射线是来自外太空的带电高能次原子粒子，这些粒子能与大气层中的原子核发生碰撞并产生二次粒子进入地球的大气层和土壤，这些粒子被称为次级宇宙射线。次级宇宙射线可以如下分类：

（1）高能中子，能量级别为GeV，由初级质子和重原子分裂大气中的原子核生成；（2）快中子，能量级别为1 MeV，由高能中子与原子核碰撞生成，从而产生快中子的“蒸发”；（3）低能热中子（能量级别为0.025 eV）或者超热中子（能量级别>0.5 eV），由快中子与原子核碰撞产生。宇宙射线土壤水分观测系统的工作原理就是通过测量快中子与周围土壤中的原子碰撞过程实现的。由于大多数原子质量远大于中子质量，碰撞中氢原子起主要中和作用。已有研究表明在快中子的中和过程中氢元素的贡献率最大，并随着土壤水分含量的增大而增加^[16]。在实际的观测中，宇宙射线土壤水分观测系统以快中子计数率即单位时间内快中子发生的碰撞次数，单位cph（counts per hour）来表征土壤中氢元素的含量。

1.3 影响测定的因素

宇宙射线土壤水分探测仪能够测定半径约300 m，深度0.1~0.7 m的半圆区域范围内的平均土壤水分含量（图1）。COSMOS的水平观测范围受大气的物理性质（如大气湿度和密度）、化学特征等因素的影响，受土壤水分变化的影响较小。

测量深度主要取决于土壤中的矿物质、有机质及土壤含水量，并随着其含量的增加而减小。仪器土壤含水量测量深度公式为^[17]：

$$z = \frac{5.8}{\rho_{bd} \times \tau + \theta + 0.0829} \quad (1)$$

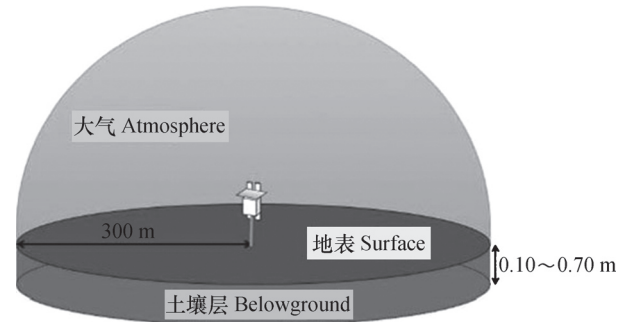


图1 COSMOS仪测量范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the effective measurement scope for a COSMOS instrument

式中， z 为测量深度， ρ_{bd} 为土壤容重， τ 为晶格含水量， θ 为土壤体积含水量。晶格水一般含量较低且具有很好的时间稳定性，对测定深度的影响较小，因此测量深度主要取决于土壤含水量。

根据宇宙射线土壤水分观测系统的工作原理可知测定结果为探测范围内总的含水量，因此其他水源都是影响土壤含水量测定结果的因素，主要包括晶格水（主要来自于矿物质）、有机质、水汽、植被含水量以及地表水。

1.4 计算与仪器标定

COSMOS仪器的标定通常采用Desilets提出的公式^[17]：

$$\theta(N) = \frac{a_0}{(N/N_0) - a_1} - a_2 \quad (2)$$

式中， θ 为土壤含水量（ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ）， N 为快中子计数率（cph）， N_0 理论上定义为在同一参照水平下完全没有中子吸收条件下的中子计数率（cph）。 a_0 、 a_1 、 a_2 分别为拟合参数，分别取值为0.080 8、0.372和0.115，该公式适用于多种土壤质地。

大气压、水蒸气随时间的改变都会影响进入地表的中子浓度，进而影响中子计数率。在干旱半干旱的黄土高原地区，在利用快中子计数率计算土壤含水量时仅考虑大气压的影响，中子计数率的大气压修订公式如下：

$$N = N_{\text{raw}} e^{\beta(P - P_0)} \quad (3)$$

式中， N_{raw} 为原始快中子计数率（仪器测得）， β 为常数0.007 7， P 为仪器测定气压值， P_0 为当地理论气压值，一般取长期气压值的平均值。

N_0 的确定通常采取在仪器监测范围内选取大量点，利用烘干法计算平均土壤含水量，然后把仪器

测量的 N 值和土壤含水量带入式(2)反推 N_0 。其标准的采样点分布为:以仪器为圆心,半径为25、75、175 m的3个同心圆上按 60° 均分为6个方向,共18个点。在每个点0~30 cm内,每5 cm采样,共108个土壤样品获取土壤含水量进行平均。 N_0 受晶格水、植被和土壤有机碳等因素的影响,而这些因素存在明显的时空变异性,因此 N_0 是与特定区域环境有关的标定参数。而上述标定就包含了土壤中的晶格水、植被以及土壤有机碳的影响^[18]。但是,在生物量随季节变化较大的植被中,植被含水量随时间的变化较明显,标定时需考虑植被生物量变化的影响。

2 材料与方法

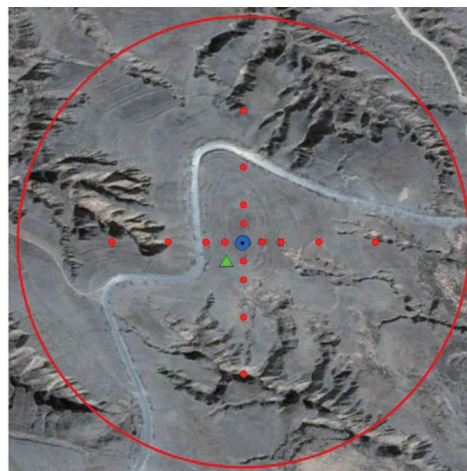
2.1 研究区概况

观测区域选在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站附近的一个山头上,经纬度为 $38^\circ47'36''$ N, $110^\circ22'23''$ E,海拔高度1 256 m,山顶为农田退耕后的荒地,山坡主要为自然植被,有部分退耕荒地。植被类型为草地生态系统,平均覆盖度为72%,但因枯草的存在,地表基本没有裸露土壤。观测区域优势种群为长芒草(*Stipa bungeana*),其次为草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、滨草(*Marram grass*)等。该区域位于神木县以西14 km处的西沟乡六道沟小流域内。六道沟流域面积6.89 km²,年均气温7~9℃,年均降雨437.4 mm,降雨稀少而集中,6—9月可占全年降水量的70%~80%^[19],属于干旱半干旱地区。

2.2 观测方法与数据处理

选择相对平坦的坡顶安装COSMOS观测系统,其中两个中子探测器(快中子探测器和慢中子探测器)距离地面高度约50 cm。COSMOS仪器的观测可以设置测量频率,在本研究中,我们设置为每小时测量一次。野外观测从2014年5月23日开始,因仪器故障在6月29日至7月4日之间数据缺失,其他时间段也有短时间数据丢失情况,但基本不影响数据的连续性。为了更直观地显示土壤水分在一段时间段内的变化趋势,对原始数据进行12 h滑动平均。

本研究采用烘干法测定COSMOS仪器测量范围



图例 Legend
 ● 宇宙射线土壤水分观测系统 COSMOS
 ▲ HydraProbe II 土壤湿度传感器 Soil moisture sensors
 ● 采样点 Sampling site ○ 观测范围 Area under observation

图2 仪器测量区域与烘干法采样点分布位置图

Fig. 2 Area measured with the COSMOS instrument and the distribution of the sampling plots for the soil oven drying method

内的土壤含水量。受黄土高原破碎地形限制,采样点的分布为以COSMOS观测系统为圆心,在距仪器东南西北四个方向25、50、100、175 m处,共选取16个观测采样点(图2),每个观测点30 cm深度范围内每5 cm取样。同时分析这16个点的土壤容重,用这16个点0~30 cm的平均土壤体积含水量代表该仪器测量范围内的表层土壤平均含水量,作为标定仪器所需要的数据并与仪器测量值进行比较。采样的时间分别是5月31日、6月4日、6月6日、7月16日、7月24日、7月30日、8月7日、8月14日、8月21日、9月4日以及9月10日,共11次。

为进一步分析COSMOS仪器的测量数据合理性,本研究还在离COSMOS仪器约30 m处不同深度埋设了HydraProbe II土壤湿度传感器(美国Stevens公司),埋设深度分别为5、10、20、30、50 cm。该仪器从2014年5月25日开始正常采集数据,利用对照的烘干法数据对仪器输出结果进行了校正。

3 结果与讨论

3.1 标定系数 N_0 及时间稳定性

N_0 从定义上看是一个与仪器相关的参数,与环境的变化不相关。然而由于 N_0 的获取通常是通过观

测数据反推获得，与理论上的定义并不一致，其结果通常会受到环境要素变化的影响。根据已有观测数据，我们分析了 N_0 随时间的变化，并分析了不同土壤含水量对 N_0 的可能影响。图3显示了 N_0 的变化及与土壤含水量的关系。在观测期间（2014年5月23—2014年9月10日），土壤体积含水量变化范围为 $0.06 \sim 0.19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ，变化幅度达217%； N_0 值

的变化范围在3 335 ~ 3 566之间，平均值3 460，变化幅度仅6.9%。 N_0 与土壤含水量的相关系数 R^2 为0.014，随时间的变化相关系数为0.088。上述结果表明在实验观测区域，土壤含水量的变化对 N_0 没有显著影响， N_0 在较长时间内具有很好地稳定性，不需要对仪器进行重复标定。本研究采用平均值3 460作为仪器标定值。

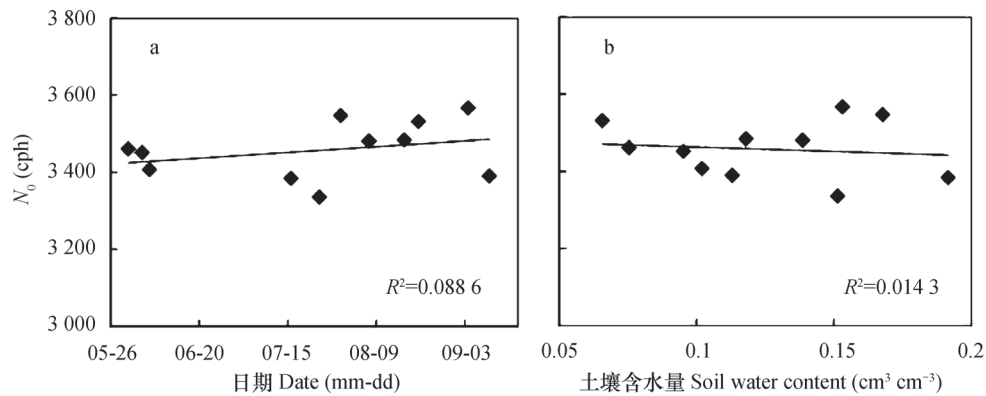


图3 标定系数 N_0 的变化及其与土壤含水量的关系

Fig. 3 Temporal variation of N_0 and its relationship with soil water content

3.2 COSMOS结果与烘干法结果的比较

图4展示了COSMOS仪器测量结果随时间的变化，以及与烘干法结果的比较。COSMOS仪器观测结果显示表层含水量随时间的变化明显，通过与降雨事件对比，发现测量值的变化均能反映降水对土壤含水量的影响。通常30 cm以下的土壤含水量变化并不对降水事件立即响应，因此COSMOS测量结果对降水事件响应明显也暗示该仪器测量的土壤含水量数据反映的是浅层土壤含水量的变化。利用COSMOS方法给出的理论探测深度计算公式计算得到的该仪器在观测期间，其测量深度波动范围到

16.3 ~ 55.22 cm之间，平均测量深度为30.73 cm。

COSMOS测量结果（12 h滑动平均值）与11次烘干法采样分析获得的结果非常接近（图4），统计分析的Nash-Sutcliffe系数高达0.834，表明了COSMOS仪器结果与烘干法结果的一致性，由于烘干法观测采样既有刚降雨时候，也有表层土壤含水量相对低的时候，这个比较结果显示COSMOS很好地测量到了表层土壤含水量的时间变化过程，说明在获取合理的标定系数后，其测量结果具有较高的精度，能代表半径约300 m范围内的表层0 ~ 30 cm平均土壤含水量。进一步对两组数据进行误差分

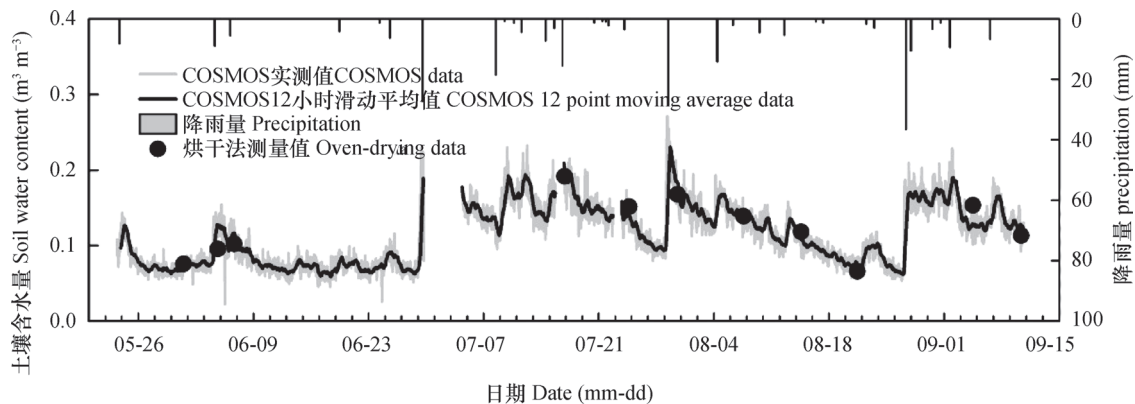


图4 COSMOS仪器测量结果与烘干法结果比较及降水过程的关系

Fig. 4 Comparison between the COSMOS instrument and the oven-drying method in measurement, and their relationships with precipitation

析, 均方根误差 (RMSE) 为 $0.015 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, 显示了COSMOS测定方法的灵敏性和精准性。两种方法测量值之间偶有的差异, 原因之一可能在于仪器测量深度会随土壤水分状况改变, 而烘干法测定的均为土壤表层30 cm深度范围内的含水量, 未来需要深入分析。

另一方面, 观测几乎涵盖草地整个生育期, COSMOS结果与烘干法结果的一致性说明在整个试验阶段观测区域内草地生物量的变化对观测结果没有显著的影响。

3.3 COSMOS结果与HydraProbe II结果的比较

从时间变化趋势看, COSMOS仪测量结果与HydraProbe II传感器测量结果完全一致, 但是两种仪器测量得到的含水量大小有差异, 这种差异体现在两个方面: (1) HydraProbe II测量不同深度的平均含水量与COSMOS仪测量结果之间存在差异, 其中HydraProbe II测量的0~10 cm平均含水量与COSMOS仪测量结果总体最接近(图5a), 0~20 cm平均含水量次之(图5b), 0~30 cm平均含水量与COSMOS测量结果差别较大(图5c);

(2) 两种仪器在不同时间的差异也呈现不同, HydraProbe II 0~10 cm平均含水量在生育期早期土壤含水量整体较低时与COSMOS结果最接近, 而7—8月份降雨量较多的季节, 二者差异较大, 0~30 cm平均含水量在7—8月份降雨较多季节与COSMOS仪结果更接近一些, 但在生育期早期含水量较低和9月份生育期后期的结果差别较大, 0~20 cm平均含水量与COSMOS的时间过程上的差异整体与0~10 cm相近, 但土壤含水量较低的生育期早期差别较大(图5)。尽管HydraProbe II测量的0~10 cm平均含水量整体上与COSMOS结果更接近, 但是考虑到COSMOS结果与烘干法0~30 cm平均值结果基本一致(图4), 0~10 cm HydraProbe II测量结果并不能说明COSMOS仪测量的结果仅代表了0~10cm层次的土壤含水量, 根据COSMOS仪测量的理论深度计算公式获得的计算结果也表明, COSMOS在整个观测期间的测量深度大部分在20 cm至40 cm厚度之间。上述结果表明, COSMOS仪测量结果与HydraProbe II传感器测量结果之间存在时间和空间上的差异性。

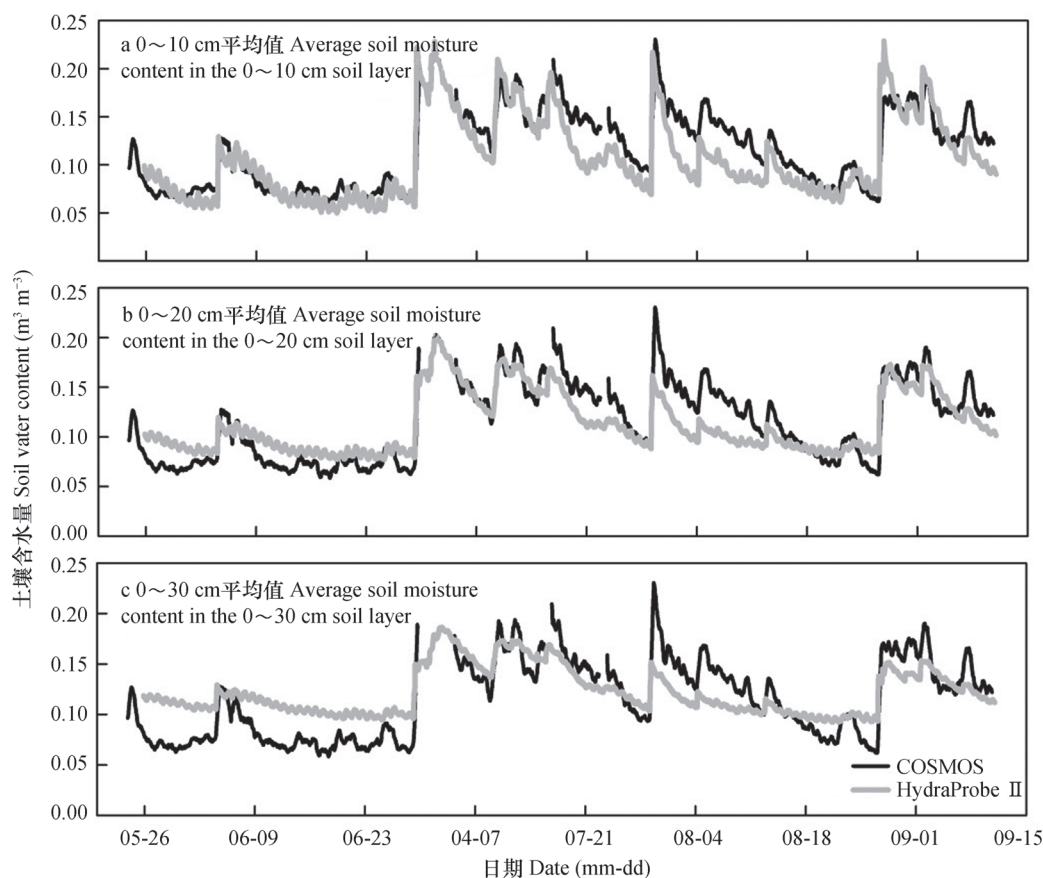


图5 COSMOS测量结果与HydraProbe II传感器不同深度测量结果的比较

Fig. 5 Comparison between the COSMOS instrument and the HydraProbe II sensors in measurement relative to soil depth

黄土高原不平坦且破碎的下垫面可能是导致两种仪器测量结果复杂差异性的原因。多个研究表明, 黄土高原的这种地貌特征导致土壤水分在坡面上的分布存在明显差异^[20-21]。在本研究中, COSMOS仪测量的是直径范围超过600 m的较大空间范围的表层平均土壤含水量, 而HydraProbe II测量的是坡顶一个点的土壤含水量。因为黄土高原土壤含水量在坡面尺度的空间差异性明显, HydraProbe II测量结果并不能代表直径600 m范围的平均土壤含水量, 上述两种仪器测量结果的差异性正好反映了黄土高原土壤含水量的空间变异性。另一方面, 两种仪器观测结果的差异性随时间并非一直都存在, 这个结果可能暗示了黄土高原土壤含水量的空间变异性是随时间发生变化的, 土壤水分空间变异性的程度在不同季节可能是不一致的。COSMOS仪器观测结果与点尺度观测结果的这种复杂差异性可能为COSMOS仪器分析黄土高原土壤含水量的空间变异性及其时间稳定性提供一个新的途径和手段, 值得为此开展进一步的探索。

4 结 论

COSMOS仪器标定系数 N_0 具有很好的时间稳定性, 仪器在较长的时间内不需要重复标定; COSMOS仪器能够很好地测量黄土高原草地植被半径约300 m圆形区域内0~30 cm表层土壤的平均含水量; COSMOS测量结果与在点上的土壤含水量测量结果的差异性比较为分析和量化黄土高原破碎地表的土壤含水量的空间变异性提供了新的途径。

致 谢 本研究野外实验观测工作得到中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站的大力支持, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 王云强, 张兴昌, 从伟, 等. 黄土区不同土地利用方式坡面土壤含水率的空间变异性研究. 农业工程学报, 2006, 22 (12): 65—71. Wang Y Q, Zhang X C, Cong W, et al. Spatial variability of soil moisture on slope-land under different land uses on the Loess Plateau (In Chinese). Transactions of CSAE, 2006, 22 (12): 65—71
- [2] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述. 水科学进展, 1999, 10 (3): 311—318. Lei Z D, Hu H P, Yang S X. A review of soil water research (In Chinese). Advances in Water Science, 1999, 10 (3): 311—318
- [3] 陆晓民, 盛伟, 杨吉. 模拟酸雨下氯化镧处理对小麦发芽及幼苗生长的影响. 核农学报, 2008, 22 (6): 851—855. Lu X M, Sheng W, Yang J. Effects of LaCl₃ treatment on wheat seed germination and seedling growth under simulated acid rain condition (In Chinese). Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2008, 22 (6): 851—855
- [4] 周青, 曾庆玲, 黄晓华, 等. 三类抗性种子萌发对酸雨胁迫响应. 生态学报, 2004, 24 (9): 2030—2035. Zhou Q, Zeng Q L, Huang X H, et al. Effects of acid rain on seed germination of various acid-fast plant (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24 (9): 2030—2035
- [5] 王丽红, 黄晓华, 周青. 水稻、小麦和油菜种子萌发POD与CAT对酸雨胁迫的响应. 环境科学, 2005, 26 (6): 123—125. Wang L H, Huang X H, Zhou Q. Response of POD and CAT during seeds of rice, wheat and rape germination on acid rain stress (In Chinese). Environmental Science, 2005, 26 (6): 123—125
- [6] Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observations: A review. Vadose Zone Journal, 2008, 7 (1): 358—389
- [7] Njoku E G, Entekhabi D. Passive microwave remote sensing of soil moisture. Journal of Hydrology, 1996, 184: 101—129
- [8] 焦其顺, 朱忠礼, 刘绍民, 等. 宇宙射线快中子法在农田土壤水分测量中的研究与应用. 地球科学进展, 2013, 28 (10): 1136—1143. Jiao Q S, Zhu Z L, Liu S M, et al. Research and application of cosmic-ray fast neutron method to measure soil moisture in the field (In Chinese). Advances in Earth Science, 2013, 28 (10): 1136—1143
- [9] Zreda M, Desilets D, Ferré T P A, et al. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (21): L21402
- [10] Franz T E, Zreda M, Rosolem R, et al. A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17 (2): 453—460
- [11] Franz T E, Zreda M, Ferré T P A, et al. Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. Water Resources Research, 2012, 48: W08515
- [12] Shuttleworth J, Rosolem R, Zreda M, et al. The

- COsmic-ray soil moisture Interaction Code (COSMIC) for use of data assimilation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17 (8): 3205—3217
- [13] Rosolem R, Shuttleworth J, Zreda M, et al. The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14 (5): 1659—1671
- [14] Trenton E F, Zreda M, Ferre T P A, et al. An assessment of the effect of horizontal soil moisture heterogeneity on the area-average measurement of cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 2013, 49 (10): 1—9
- [15] 王云强, 邵明安, 刘志鹏. 黄土高原区域尺度土壤水分空间变异性. *水科学进展*, 2012, 23 (3): 310—316. Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P. Spatial variability of soil moisture at a regional scale in the Loess Plateau (in Chinese). *Advances in Water Science*, 2012, 23 (3): 310—316
- [16] Zreda M, Shuttleworth W J, Xeng X, et al. COSMOS: The COsmic-ray soil moisture observing system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16 (11): 4079—4099
- [17] Desilets D, Zreda M, Ferre T P A. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 2010, 46: W11505
- [18] Charisman B, Zreda M. Quantifying mesoscale soil moisture with the cosmic-ray rover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17 (12): 5097—5108
- [19] 王云强, 张兴昌, 朱元骏, 等. 次降雨后不同时段坡地表层土壤水分和容重的空间变异特征. *水土保持学报*, 2011, 25 (5): 242—246. Wang Y Q, Zhang X C, Zhu Y J, et al. Spatial variability of surface soil moisture and bulk density in a slope-land at different stages after a rainfall (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (5): 242—246
- [20] Hu W, Tallon L K, Si B C. Evaluation of time stability indices for soil water storage upscaling. *Journal of Hydrology*, 2012, 475: 229—241
- [21] Jia X X, Shao M A, Wei X R, et al. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Journal of Hydrology*, 2013, 498: 254—264

APPLICATION OF COSMIC-RAY METHOD TO SOIL MOISTURE MEASUREMENT OF GRASSLAND IN THE LOESS PLATEAU

Zhao Chun¹ Yuan Guofu^{2†} Liu Xiao² Shao Mingan² Yi Xiaobo¹

(1 College of Natural Resources and Environments, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract Cosmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS) is a newly-developed cosmic-ray instrument for measuring average surface soil moisture content over an area with more than 600 m in diameter. A field test was conducted of using this instrument to measure surface soil moisture content in a tract of grassland in the Loess Plateau, and comparison was made of the results of the field test with the results of the oven-drying method, and of the point scale measurement with the HydraProbe II sensors. It was found that the measurements using the COSMOS method were well in agreement with those using the oven-drying method, but differed from those using HydraProbe II sensors in some time spans, suggesting that soil moisture content in the Loess Plateau was subject to spatio-temporal variability. The COSMOS instrument offers an effective approach to measurement of area-average surface soil moisture content in the Loess Plateau with fragmented surface, and a potential tool for studying spatial variability of soil moisture content in the Loess Plateau.

Key words COSMOS; Soil moisture; Loess Plateau; Grassland

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system..... Zhao Yanfeng, Cheng Daoquan, Chen Jie, et al. (1207)
 Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)

Research Articles

- Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine region Yang Fan, Huang Laiming, Li Decheng, et al. (1235)
 Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties typical of Central and East China Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
 Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
 Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta Li Ping, Zhao Gengxing, Gao Mingxiu, et al. (1271)
 Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1278)
 Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
 Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
 Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
 Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
 Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period of 1978–2008 Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
 Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China Yang Wen, Zhou Jiaogen, Wang Meihui, et al. (1343)
 Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
 Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
 Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
 Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on *Eisenia fetida* Ma Jingjing, Qian Xinchun, Zhang Wei, et al. (1381)
 Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
 Ameliorative effect of cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric solonetz Zhang Tibin, Kang Yaohu, Wan Shuqin, et al. (1399)
 Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches of Shiyang River Basin Yang Xiaoling, Ding Wenkui, Ma Zhonghua, et al. (1410)
 Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive waste disposal Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)

Research Notes

- Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data Song Jinhong, Wu Jinggui, Zhao Xinyu, et al. (1429)
 Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
 Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)

Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping *Lycium barbarum* L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008
电话：025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717
电话：010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156

