

## 基于宇宙射线缪子的土壤含水率监测

姜山<sup>1</sup>, 刘国睿<sup>1</sup>, 刘军涛<sup>1</sup>, 李晓鹏<sup>2</sup>, 钱湘萍<sup>1</sup>, 付治强<sup>1</sup>, 王宝祥<sup>3</sup>, 刘志毅<sup>1\*</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 3. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 100082)

**摘要:** 为了丰富土壤含水率的测量手段, 拓展宇宙射线缪子技术在农业工程领域的应用, 该研究提出了利用宇宙射线缪子监测土壤含水率的方法, 即通过放置在土壤中的缪子探测器测得的宇宙射线缪子计数来反推出土壤含水率。利用蒙特卡罗程序 FLUKA 对不同含水率的土壤建模并进行数值模拟, 得出土壤含水率的探测分辨率, 进一步得到最佳的缪子探测器放置深度。结果表明, 探测半径与探测器放置深度相关, 将探测器放置在地表下方 80 cm 深度处时, 探测半径为 6.2 m, 此时当探测时长为 2 h 时, 对土壤含水率的探测分辨率可以达到  $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 当探测时长达到 8 h 时, 探测分辨率可以达到  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。相较于 60、70、80、100、110、120 cm 等不同深度, 探测器放置在地表下方 90 cm 处时, 在相同探测时长条件下, 土壤含水率的探测分辨精度最高, 达到  $0.038 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。验证试验结果表明, 缪子计数值的变化可以反映出待测物质质量厚度的较小变化。相较于传统的点测量方法和宇宙射线中子法, 该方法的探测范围适中(探测半径为 6~8 m), 且测量结果不易受土壤密度之外的因素影响, 可以作为其他监测技术的重要补充, 具有广阔的应用前景。

**关键词:** 土壤; 水分; 宇宙射线缪子; 蒙特卡罗方法; FLUKA

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.037

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-06-0330-07

姜山, 刘国睿, 刘军涛, 等. 基于宇宙射线缪子的土壤含水率监测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 330-336. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.037 <http://www.tcsae.org>  
Jiang Shan, Liu Guorui, Liu Juntao, et al. Soil moisture monitoring using cosmic ray muons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(6): 330-336. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.06.037 <http://www.tcsae.org>

### 0 引言

土壤含水率的测定结果在农业生产、遗址保护、土木工程建设、地质灾害预警等领域都具有重要的参考价值<sup>[1]</sup>。随着土壤含水率测量技术的发展, 到目前为止已经有数十种方法被提出, 包括烘干称重法、时域反射法(Time Domain Reflectometry, TDR)、频域反射法(Frequency Domain Reflectometry, FDR)、电阻法、电容法、张力计法、射线法、遥感法和探地雷达法等<sup>[2-3]</sup>。

以烘干称重法为代表的传统点测量方法, 多为小尺度探测, 单次测量的范围常在  $1 \text{ m}^2$  以内, 空间代表性较差。遥感方法的探测尺度可以达到平方公里量级, 但一般只能得出地表 5 cm 以内的含水率情况; 且只是飞机或卫星过境时的瞬时值, 无法连续监测。近些年发展出的宇宙射线中子法, 实现了在中等尺度上(半径约 300 m)对土壤的平均含水率进行连续、无损测量<sup>[4-6]</sup>。此方法通过测量经土壤散射到地表的宇宙射线快中子的计数来反推出土壤含水率, 几乎不受到土壤化学性质的影响<sup>[7]</sup>。由于宇宙射线中子的平均能量(1 MeV 左右)较低, 与水

中氢原子核的反应截面大, 此方法的探测范围极易受到土壤含水率自身以及大气水汽和地表植被的影响而不稳定, 有效探测深度的波动范围为 15~83 cm, 较干燥裸土的情况下, 探测半径减少 40%<sup>[8]</sup>, 仪器对宇宙射线快中子的计数结果还需要根据大气气压、空气湿度和太阳活动等因素进行复杂的修正<sup>[5-6]</sup>。

缪子是一种带一个单位电荷(正或负电荷)的基本粒子, 其静止质量为  $105.7 \text{ MeV}/c^2$ , 约为电子的 207 倍<sup>[9]</sup>。虽然缪子与物质的相互作用过程与电子类似, 但辐射能损却小很多, 因而具有更强的穿透性。宇宙射线缪子则是在初级宇宙射线和地球大气层的相互作用过程中产生的, 作为一种天然存在的高能射线源, 近年来被广泛应用于对大型目标物如金字塔、火山的成像中<sup>[10-11]</sup>。在土壤水分探测方面, 2013 年 Tanaka 等<sup>[12]</sup>将宇宙射线缪子探测器放置在山坡排水隧道中, 用以监测隧道上方地下水位的变化情况。试验证实, 探测器上的宇宙射线缪子计数和基于钻孔的地下水位高度数据是有关联的。在宇宙射线缪子的探测过程中, 可使用成本低、易加工、稳定性好的塑料闪烁体作为探测介质<sup>[13]</sup>。

本文提出一种利用平均能量更高(约 3 GeV)的宇宙射线缪子来测量土壤含水率的方法(下称宇宙射线缪子法): 在土壤一定深度处放置一缪子探测器<sup>[14]</sup>, 通过事先标定好的“土壤含水率—宇宙射线缪子计数”变化关系, 即可通过缪子计数值来反推出土壤含水率。本文通

收稿日期: 2021-06-05 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11975115)

作者简介: 姜山, 研究方向为核科学与技术。Email: jiangsh20@lzu.edu.cn

\*通信作者: 刘志毅, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向为核技术应用与产业化。Email: zhiyil@lzu.edu.cn

过蒙特卡罗粒子输运程序 FLUKA 对不同含水率的土壤模型进行建模，并模拟宇宙射线缪子在土壤中的运输过程，研究土壤中探测器的缪子计数与探测器上方土壤含水率的关系，以此验证宇宙射线缪子法的可行性。同时根据模拟结果，推导对土壤含水率的探测分辨率和探测时长的关系；多次改变探测器的放置深度进行模拟，得出最佳的探测器放置深度，并进行了相关试验验证。

相较于小尺度的传统点测量技术以及中等尺度的宇宙射线中子法，本方法的优势在于对土壤含水率的探测半径（6~8 m）适中；探测深度固定为缪子探测器在土壤中的放置深度（0.6~1.2 m），测量结果即为有效探测容积内土壤水的算数平均值。使用本方法，可以实现对中小尺度下土壤含水率的连续在线监测，测量结果也比点测量更具有空间代表性。

## 1 基本原理

### 1.1 宇宙射线缪子法物理过程描述

从宇宙空间到达地球的初级宇宙射线中，约 95% 是超高能量的质子。这些质子与地球大气层中的原子核发生相互作用，产生了级联的次级宇宙射线，其中包括缪子<sup>[15]</sup>。到达海平面高度处的宇宙射线缪子，其平均能量在 3 GeV 左右，平均通量约为  $1/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ <sup>[16]</sup>。

缪子在与物质的相互作用中，通过电离激发、韧致辐射、对产生效应和光核反应等过程损失能量；在能量低于 100 GeV 时，电离激发占主导作用<sup>[15]</sup>，如图 1 所示。由 Bethe-Bloch 公式<sup>[17]</sup>可知，电离能量损失率主要取决于靶物质密度。在宇宙射线缪子法监测土壤含水率的过程中，当探测器上方土壤的含水率增加时，土壤的密度随之增加，导致宇宙射线缪子的能量损失增加，到达探测器深度的缪子数目相应减少，此时土壤中的探测器所测量到的缪子计数就会降低。通过对探测器缪子计数随土壤含水率变化关系的刻度，即可由探测器计数反推出土壤含水率，从而达到监测探测器上方平均土壤含水率的目的。

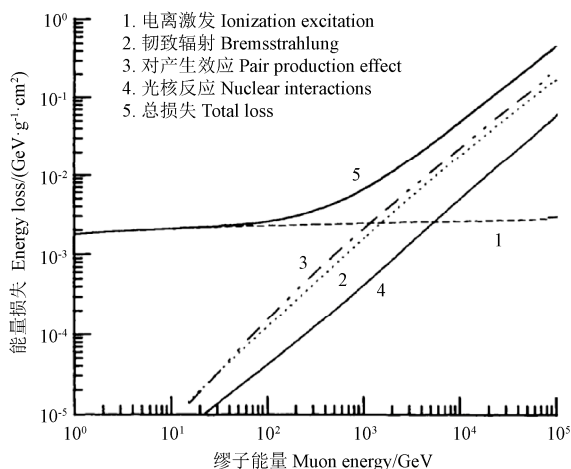


图 1 缪子在标准岩石中的能量损失<sup>[15]</sup>

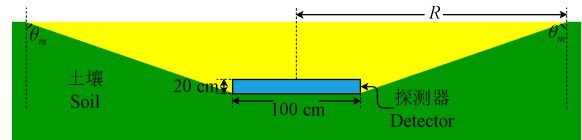
Fig.1 Energy loss of muons in standard rock<sup>[15]</sup>

### 1.2 测量范围

在本文的模拟研究中，使用的宇宙射线缪子数据由

CRY (Cosmic-Ray Shower Generator) 程序<sup>[18]</sup>生成。CRY 程序由劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL) 开发，可以产生 3 个海拔高度 (0、100、2 100 m) 处的宇宙射线粒子数据<sup>[19]</sup>。本研究中使用 CRY 程序产生宇宙射线缪子数据时，设定纬度为 30° (南北纬度无差异)，日期为 2020 年 10 月 1 日。

通过分析 CRY 产生的缪子源的角度分布可知，超过 99.9% 的缪子的天顶角小于 80°。因此在宇宙射线缪子法监测土壤含水率的过程中，可忽略入射角大于 80° 的缪子，即假设此方法的探测范围存在某个半径  $R$ ，此半径外的宇宙射线缪子不会入射到探测器上，如图 2 所示。



注：浅色部分为有效探测容积。 $R$  为探测半径，cm。 $\theta_m=80^\circ$ ，为可探测到的宇宙射线缪子的最大天顶角。

Note: The light part illustrates the effective detection volume.  $R$  is the detection radius.  $\theta_m=80^\circ$ , represents the maximum zenith angle of detectable cosmic ray muons.

图 2 探测范围示意图

Fig.2 Schema of detection area

由图 2 可知，到达探测器上的宇宙射线缪子径迹限定在浅色区域内。当这部分土壤的含水率发生变化时，将会影响到探测器上的缪子计数值。因此可以认为，宇宙射线缪子法的有效探测容积，为一个近似倒置圆台形的区域；测得的含水率即此区域内土壤的平均含水率。

因此，宇宙射线缪子法监测土壤含水率时，其探测深度  $h$  (cm) 即为探测器的放置深度，探测半径  $R$  (cm) 可由下式算出：

$$R = (h + 20) \cdot \tan 80^\circ + 50 \quad (1)$$

## 2 研究方法

### 2.1 FLUKA 程序

本文的研究工作的基于蒙特卡罗模拟进行的。蒙特卡罗方法在研究粒子输运方面发挥着重要作用，合理的蒙特卡罗模拟可以为实际试验提供有效的参考信息。FLUKA<sup>[20]</sup> 是一个通用的蒙特卡罗模拟程序，由意大利国家核物理实验室 (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, INFN) 和欧洲核子中心 (Conseil Europeenn pour la Recherche Nucleaire, CERN) 共同维护，用于模拟能量范围从几个 keV (对于中子是热能区) 到数个 GeV 的强子、重离子和电磁辐射等 60 余种不同粒子在任何物质中的相互作用和输运过程。FLUKA 的应用范围主要包括加速器屏蔽设计、剂量沉积、放射治疗、探测器设计和宇宙射线模拟等领域<sup>[21]</sup>。

在蒙特卡罗模拟过程中，模拟程序会产生一系列的随机数来决定单个粒子和物质相互作用时的物理过程，直到其能量耗尽停留在物质中被终止，或穿出感兴趣的空间区域为止。通过对大量粒子行为的抽样模拟，即可得出结果<sup>[22]</sup>。一次完整的 FLUKA 模拟包括初始粒子源选择、几何模型建立、材料设置、探测器布置。在本研究中，使用 CRY 产生的海平面处宇宙射线缪子数据作为

FLUKA 模拟的粒子源。

## 2.2 土壤模型建立

根据刘宏伟等<sup>[23-24]</sup>的研究,在降雨条件下,不同深度土壤的含水率会发生不同程度的改变,而 80 cm 以下土壤的含水率受降雨因素影响较小。据此,在土壤模型中以 80 cm 为分界面将土壤分成上下两层。在模拟中只改变上层土壤的含水率 ( $0.05 \sim 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 间隔  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  取值),下层土壤的含水率则保持在  $0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  不变(假定土壤孔隙度为 0.5,此部分土壤饱和含水),以研究不同土壤含水率对缪子输运过程的影响。

模拟中使用的圆柱形塑料闪烁体探测器,被水平放置在分界面之下。探测器长 100 cm,直径 20 cm,并假定其对宇宙射线缪子的探测效率为 100%。根据式(1)可知,当探测器放置深度为 80 cm 时,宇宙射线缪子法的探测半径约为 620 cm。

在 FLUKA 程序中建立如图 3 所示的模型。其中,缪子源为圆形,半径为 620 cm。上、下层土壤为圆柱形,半径亦为 620 cm,高度均为 80 cm。探测器为圆柱形,长 100 cm,直径 20 cm。土壤物质组分参考 Köhli 等<sup>[8]</sup>在研究宇宙射线中子法时的设定:土壤由固体物质、水和空气组成;其中占土壤总体积 50%的固体物质由  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成,体积分数分别为 75%和 25%。

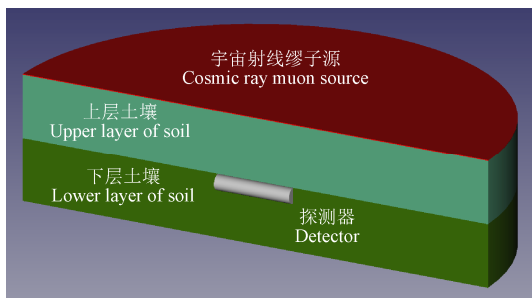


图 3 FLUKA 中的几何模型示意图

Fig.3 Schema of the geometric model in FLUKA

## 2.3 理论计算

在进行 FLUKA 模拟之前,可以先通过理论计算的方式来研究到达探测器深度处的宇宙射线缪子存活率与土壤含水率之间的变化关系。

缪子穿过物质时的能量损失与质量厚度直接相关,每穿过  $100 \text{ g}/\text{cm}^2$  物质的能量损失约为 0.2 GeV,即能量损失率为  $0.2 \text{ GeV}/\text{mwe}$ <sup>[25]</sup> (mwe, 即 meters water equivalent, 为缪子成像领域中质量厚度的常用单位,  $1 \text{ mwe} = 100 \text{ g}/\text{cm}^2$ ); 另一方面, Vanini 等<sup>[26]</sup>的模拟结果表明,宇宙射线缪子在物质中基本沿直线前行。因此在理论计算中作如下假设:宇宙射线缪子在土壤中穿行时的能量损失率恒为  $0.2 \text{ GeV}/\text{mwe}$ ,且其径迹为直线。

因此,对于放置深度  $h = 80 \text{ cm}$  处的探测器,以天顶角  $\theta_z$  入射到探测器上的缪子在土壤中穿行径迹的质量厚度  $O(\theta_z)$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) 为<sup>[25]</sup>

$$O(\theta) = \int \rho \cdot dx = \rho_{\text{soil}} \cdot \frac{h}{\cos \theta} \quad (2)$$

式中  $\rho_{\text{soil}}$  为土壤密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

则这些缪子所需携带的最小能量  $E_{\min}(\theta_z)$  (GeV) 为

$$E_{\min}(\theta) = 0.2O(\theta) + E_0 = \frac{0.16\rho_{\text{soil}}}{\cos \theta} + 0.106 \quad (3)$$

式中  $E_0 = 0.106 \text{ GeV}$ , 为缪子的静止质量。

根据 2.2 节的土壤组分设置得到不同含水率下的土壤密度,将土壤密度代入式(3),即可得出不同土壤含水率下以天顶角  $\theta_z$  入射到探测器上的缪子的最小能量。再根据  $E_{\min}(\theta_z)$  对 CRY 产生的缪子能谱数据进行筛选,得出能量高于  $E_{\min}(\theta_z)$  的缪子比率,即不同土壤含水率  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) 下,到达土壤中缪子探测器处的宇宙射线缪子相较于地面处的存活率  $p_{\text{survival}}$ 。对此数据进行线性拟合,结果如式(4)。

$$p_{\text{survival}}(\theta) = -0.04488\theta + 0.93711 \quad (4)$$

线性拟合参数调整后  $R^2$  为 0.9986。由式(4)可知,当土壤含水率增加时,到达土壤 80 cm 深度处的宇宙射线缪子存活率将线性地降低,即探测到的缪子数目会线性地减少。此结果可以作为一种理论估算结果与蒙特卡罗计算结果相互验证。

## 3 结果与分析

### 3.1 探测分辨率

基于 2.2 节建立的模型对上层土壤含水率进行蒙特卡罗模拟,使用 FLUKA 程序中 USRBDX 选项记录入射到探测器区域的缪子数,计算结果归一到 1 个初始入射缪子的贡献,记作  $p_{\text{fluka}}$ ,结果如图 4 所示。

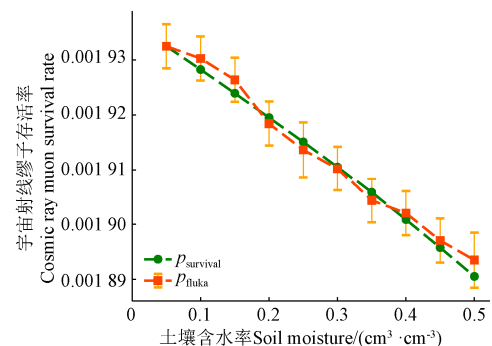


图 4 FLUKA 计算结果 ( $p_{\text{fluka}}$ ) 和归一后的存活率 ( $p_{\text{survival}}$ )

Fig.4 FLUKA calculation result ( $p_{\text{fluka}}$ ) and scaled survival rate ( $p_{\text{survival}}$ )

对 2.3 节理论计算得到的存活率  $p$  进行数值归一,使得在含水率为  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  时的  $p_{\text{survival}}$  与 FLUKA 计算的  $p_{\text{fluka}}$  值相等。对这两组数据分别进行线性拟合,可得  $p$  与上层土壤含水率  $\theta$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) 的关系为

$$p(\theta) = b - a \cdot \theta \quad (5)$$

其中拟合参数  $a$ 、 $b$  见表 1。

表 1 FLUKA 计算结果和归一化存活率的拟合参数  $a$ 、 $b$   
Table 1 Fitting parameters  $a$ ,  $b$  of FLUKA calculation results and scaled survival rate

数据 Data	参数 $a$ Parameter $a$	参数 $b$ Parameter $b$	调整后 $R^2$ Adjusted $R^2$
$p_{\text{survival}}$	9.281E-05	1.940E-03	0.9986
$p_{\text{fluka}}$	9.096E-05	1.940E-03	0.9896

由表 1 可知，理论计算得出的缪子存活率  $p_{\text{survival}}$  与 FLUKA 计算结果非常接近，验证了两种计算方法结果的一致性。

假定地面处的缪子通量  $\Phi = 1/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ ，探测时长  $t(\text{h})$ ，上层土壤含水率为  $\theta (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ，此时探测敏感半径  $r = 6.2 \text{ m}$ ，探测面积  $s = \pi r^2$ ，则  $t$  时间内入射到探测面积上的总缪子数  $N_t$  为

$$N_t = \Phi \cdot s \cdot t \quad (6)$$

探测到的缪子数  $N_d$  为

$$N_d = p(\theta) \cdot N_t \quad (7)$$

式中  $p(\theta)$  为 FLUKA 计算结果。

定义对土壤含水率的探测分辨率为  $f(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ ，则当探测器上方的土壤含水率变化了  $f$  后，若探测器的缪子计数差异能够反映出此变化（在核测量中，探测器计数  $N$  的统计误差  $\sigma_N = \sqrt{N}^{[17]}$ ），则有

$$N_d(\theta) - N_d(\theta + f) \geq \sqrt{N_d(\theta)} + \sqrt{N_d(\theta + f)} \quad (8)$$

式 (8) 取等号时，可解得

$$f = \frac{2\sqrt{\Phi \cdot s \cdot t(b - a \cdot \theta)} - 1}{a \cdot \Phi \cdot s \cdot t} \quad (9)$$

代入表 1 中 FLUKA 数据 ( $P_{\text{fluka}}$ ) 的拟合参数，可以得出探测分辨率  $f$  与探测时长  $t$  的关系如下：

$$f = \frac{0.024 \ 63 \sqrt{(21.33 - \theta)t} - 0.000 \ 152}{t} \quad (10)$$

在式 (10) 中，分别取含水率  $\theta$  为 0.1、0.3、0.5  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  作图，结果如图 5。由图 5 可知，土壤含水率对探测分辨率的影响可以忽略。探测时长达到 2 h 时，探测器上方的土壤含水率探测分辨率达到 0.1  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ；探测时长达到 8 h 时，分辨率达到 0.05  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。探测时长超过 8 h 后，单纯增加探测时长不会明显提升探测分辨率。

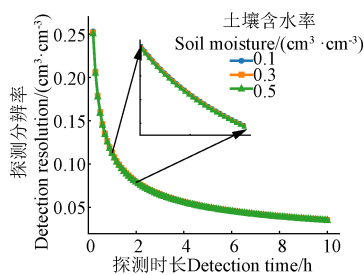


图 5 探测器放置深度为 80 cm 时的探测分辨率与探测时长  
Fig.5 Detection resolution and detection time at a detector placement depth of 80 cm

### 3.2 探测器放置深度

基于前述的模拟模型，改变探测器的放置深度，将其设定为土壤表面下方 60、70、80、90、100、110、120 cm 处，并根据式 (1) 选取相应的模型半径；同时每个深度下对上层土壤含水率从 0.1  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  变化到 0.5  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ （间隔 0.1  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  取值）的情况进行模拟。对探测器放置在不同深度时的 FLUKA 模拟数据照式 (4) 进行拟合，如表 2。

表 2 不同深度下的拟合参数  $a$ 、 $b$   
Table 2 Fitting parameters  $a$ ,  $b$  at different depth

探测器放置深度 Placement depth of the detector/cm	模型半径 Radius of the model/m	参数 $a$ Parameter $a$	参数 $b$ Parameter $b$
60	5.0	1.071E-04	0.003 08
70	5.6	1.096E-04	0.002 42
80	6.2	0.902E-04	0.001 94
90	6.8	0.796E-04	0.001 58
100	7.4	0.565E-04	0.001 32
110	7.9	0.518E-04	0.001 14
120	8.5	0.371E-04	0.000 99

将以上数据代入式 (9)，取  $\theta = 0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ （由 3.1 可知  $\theta$  的变化对  $f$  基本无影响），可以得出不同探测器放置深度下的探测分辨率  $f$  与探测时长  $t$  的变化关系。

$$f = \frac{k\sqrt{t} - c}{t} \quad (11)$$

其中参数  $k$ 、 $c$  如表 3 所示。

表 3 不同深度下的参数  $k$ 、 $c$   
Table 3 Parameter  $k$ ,  $c$  at different depth

参数 Parameter	深度 Depth/cm						
	60	70	80	90	100	110	120
$k$	0.150 2	0.116 0	0.114 0	0.106 2	0.125 8	0.119 3	0.144 6
$c$	1.98E-04	1.54E-04	1.53E-04	1.44E-04	1.71E-04	1.64E-04	1.98E-04

由此可得不同探测时长下的探测分辨率随探测器放置深度的变化关系，见图 6。当探测器放置在 70、80 或 90 cm 深度处时，对探测器上方土壤含水率的探测分辨率差别不大：均可在探测 2 h 时，使得对探测器上方土壤含水率的探测分辨率达到 0.1  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  以下；增加探测时长至 6 h 时，均可达到 0.05  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  以下。相比之下，探测器放置在 90 cm 深度处时，探测分辨率最小为 0.038  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。

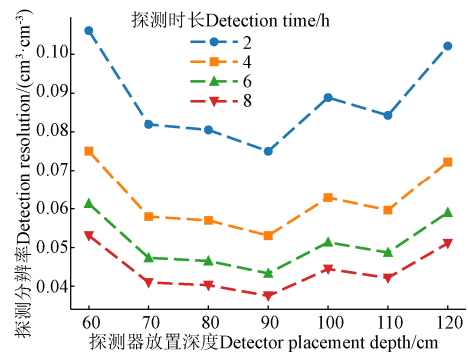


图 6 不同探测时长下的探测分辨率与探测器放置深度  
Fig.6 Detection resolution and detector placement depth under different detecting time

在目前的模拟模型中，将地表下的土壤简化为两层土壤，并不能充分反映土壤水分分布的真实情况。探测器也只简化为一个圆柱体，并未对其电子学部分和探测效率做进一步的设计和研究。计算探测分辨率时，仅考虑了探测器计数本身带来的统计误差。因而在实际应用中，此方法的探测精度与上述模拟结果之间可能会存在一定差距。

### 4 试验验证

根据 3.2 节的模拟结果, 探测器在土壤中的最佳放置深度为 90 cm, 此时若其上方土壤的密度变化达到 0.1 g/cm<sup>3</sup>, 则相当于质量厚度改变 9 g/cm<sup>2</sup>。据此开展试验, 通过测定进入和穿出待测物体的宇宙射线缪子数目, 以验证能否通过宇宙射线缪子计数的相对变化来反映出待测物的质量厚度为 9 g/cm<sup>2</sup> 时的变化。

验证试验装置示意图如图 7 所示: 在木箱中装入一定高度的水, 木箱上下两侧共放置 3 层缪子探测器, 数据采集系统记录同时穿过两层探测器 B0 和 B1 的缪子事件数目, 记作  $N_{in}$ ; 以及同时穿过三层探测器 B0、B1 和 B2 的缪子事件数目, 记为  $N_{out}$ 。当木箱内水体的高度升高, 即待测物的质量厚度增加时, 从水体出射的缪子数目会相应减少。

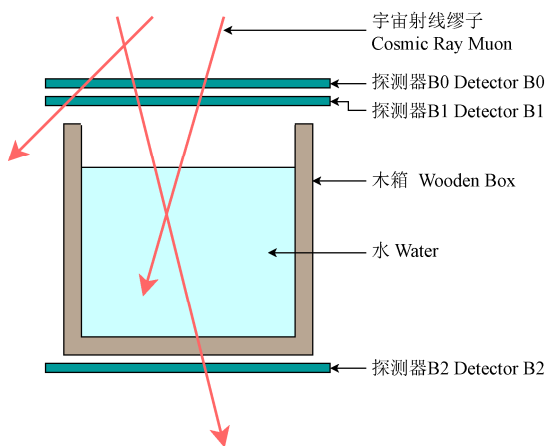


图 7 试验装置示意图

Fig.7 Schematic drawing of experiment setup

由于不同时刻进入到探测器系统的宇宙射线缪子数目存在一定波动, 因此定义缪子通过率  $p_{pass}$  (缪子计数的相对变化) 来反映探测区域内水体厚度变化对出射缪子事件数目的影响。

$$p_{pass} = \frac{N_{out}}{N_{in}} \quad (12)$$

考虑缪子事件数的统计误差, 缪子通过率  $p_{pass}$  的统计误差  $\sigma_{p_{pass}}$  计算如下:

$$\sigma_{p_{pass}} = \frac{N_{out}}{N_{in}} \left[ \left( \frac{\sigma_{N_{out}}}{N_{out}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{N_{in}}}{N_{in}} \right)^2 \right]^{1/2} = \frac{N_{out}}{N_{in}} \left( \frac{1}{N_{out}} + \frac{1}{N_{in}} \right)^{1/2} \quad (13)$$

试验装置如图 8 所示, 每层缪子探测器的灵敏探测面积为 48 cm×48 cm, 木箱的容积为 40 cm×40 cm×38 cm。单层探测器由 32 根三棱柱形塑料闪烁体平铺组成。当宇宙射线缪子进入闪烁体时, 会产生次级电子, 使闪烁体分子电离和激发, 退激时发出大量光子, 经过光电转换模块和后端电路转化为一组电压信号输出<sup>[17]</sup>。本探测器和其数据采集系统详细信息可参阅文献[27]。

基于上述方法和装置进行 2 次测量。在每次测量中, 将木箱中的水位以 9 cm 为间隔, 从 0 逐步增加至 36 cm,

每个水位下的测量时长均为 10 h。测量数据处理结果如表 4 所示。

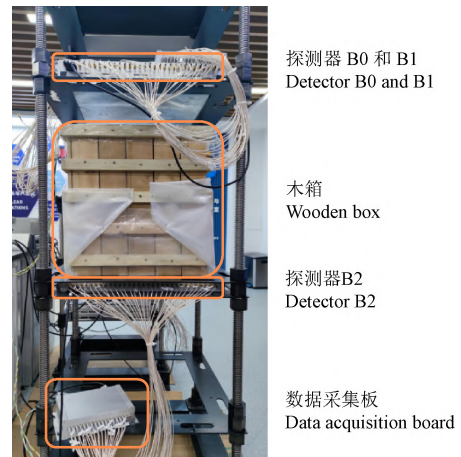


图 8 试验装置实物图

Fig.8 Photograph of experiment setup

表 4 不同水位下的宇宙射线缪子事件数目

测量 Measurement	数据 Data	水位 Water level/cm				
		0	9	18	27	36
1	入射事件数	719 770	709 931	721 542	710 996	713 054
	出射事件数	125 672	122 340	123 057	119 987	119 066
2	入射事件数	726 422	707 155	722 998	715 306	715 404
	出射事件数	126 416	122 016	123 211	120 884	119 788

根据式 (12) ~ (13) 计算得出不同水位下的缪子通过率  $p_{pass}$  及其统计误差。将水体高度换算为质量厚度, 结果如图 9 所示。

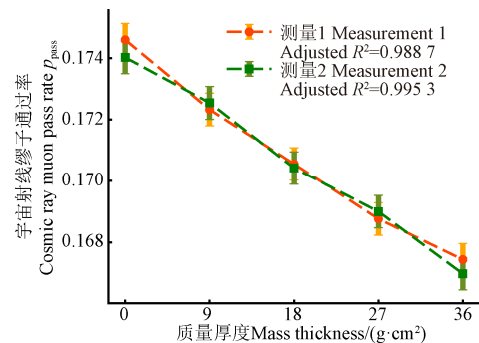


图 9 不同质量厚度下的宇宙射线缪子通过率

Fig.9 Cosmic ray muon pass rate under different mass thickness

结果表明, 穿过木箱中水体的宇宙射线缪子的通过率 (计数值的相对变化) 与水的质量厚度呈线性负相关关系。基于容积为 40 cm×40 cm×38 cm 的探测区域, 10 h 的宇宙射线缪子计数的相对变化可以分辨出待测物 (水) 质量厚度为 9 g/cm<sup>2</sup> 的变化, 即约等效于 90 cm 厚的土壤密度改变 0.1 g/cm<sup>3</sup> 时的变化。因此本试验从原理上证实了利用宇宙射线缪子计数来监测土壤含水率的可行性。

### 5 结论

本研究首次提出了利用宇宙射线缪子监测土壤含水

率的方法, 使用理论估算和蒙特卡罗方法分别进行了验证, 初步证实了此方法的可行性。本方法的探测范围(半径6~8 m)适中, 大于传统点测量手段, 而小于宇宙射线中子法, 且测量结果只和土壤密度相关, 可以实现连续测量。通过 FLUKA 程序模拟宇宙射线缪子在土壤中的运输过程, 发现土壤中 80 cm 深度处探测器的缪子的计数与其上方的土壤含水率呈很强的线性负相关关系。通过对此关系的准确刻度, 就可以通过探测器的缪子计数反推出探测器上方土壤的含水率。进一步得出了探测器对其上方土壤含水率的探测分辨率随探测时长的变化关系: 当探测时长达到 2 h 时, 对土壤含水率的探测分辨率可以达到  $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 当探测时长达到 8 h 时, 分辨率可以达到  $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。此外, 确定了最佳的探测器放置深度为 90 cm, 此时在相同探测时长的条件下, 对土壤含水率的探测分辨精度最高, 为  $0.038 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。同时验证试验表明, 宇宙射线缪子计数值的相对变化可以分辨出等效于 90 cm 厚土壤的密度发生  $0.1 \text{ g}/\text{cm}^3$  的变化。

此方法的优势有以下三点:

1) 有效探测范围适中, 且可以根据测量需求相应变化。本方法的测量结果为一个近似倒置圆台形土壤区域内的平均含水率。由于宇宙射线缪子能量较高、穿透性强的特点, 本方法对土壤含水率的探测半径(6~8 m)和探测深度(80~110 cm)都大于传统的点测量(烘干称重、介电常数、射线法等), 而又小于宇宙射线中子法, 可以实现定点、原位、连续测量, 在特定的应用场景下会比传统方法更具优势。由于探测范围取决于探测器的放置深度, 因此可以灵活调整探测器的放置深度, 以满足不同的测量需求。

2) 测量量(缪子计数)仅受土壤密度影响。本方法核心在于通过测量宇宙射线缪子计数变化来得出土壤密度的变化, 从而间接计算出土壤含水率。在同一个测量地点, 1 种土壤密度值对应 1 个宇宙射线缪子的计数值; 只有当土壤含水率变化时, 引起土壤密度的改变, 才会影响到缪子的计数值。在实际测量中, 布置好探测器后, 可以先通过点测量采样方法, 获得多组实测数据来拟合出“土壤含水率—缪子计数值”刻度曲线, 再进行连续监测。进行含水率的相对变化监测时不需要此刻度过程。土壤密度之外的其他参数, 如渗透率、孔隙度、组成成份等, 不会影响宇宙射线缪子的计数, 因此这些参数不会影响本方法测出的土壤含水率。

3) 不存在人工放射性危害。本方法中使用的是宇宙射线中的次级粒子, 缪子天然存在, 不会对使用者和周围环境带来额外的辐射影响, 是一种绿色的核技术应用。

此方法的缺陷在于宇宙射线缪子的通量较低, 且存在一定的波动。短时间内到达探测器上的缪子数目会有较大的统计误差, 若获得具有良好统计性的测量结果需要以增加探测时长为代价。另外, 受大气环境等因素影响, 到达地表的宇宙射线缪子在不同时段内会有波动。建议在实际测量中, 在待测土壤上方放置一个和主探测设备相同的参考探测器, 以监测进入土壤前的宇宙射线缪子通量, 从而得到缪子计数的相对变化, 以消除土壤

以外的因素对含水率测量结果的干扰。

综合来看, 尽管本方法存在一些不足, 但利用宇宙射线缪子监测土壤含水率具有其独特的优势。本研究在数值模拟和原理验证试验层面展示了此方法的可行性, 对进一步的试验验证和深入应用具有指导意义。

#### [参 考 文 献]

- [1] 孙满利, 付菲, 沈云霞. 土的含水率测定方法综述[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2019, 49(2): 219-229.  
Sun Manli, Fu Fei, Shen Yunxia. Review on soil moisture content measurement methods[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 219-229. (in Chinese with English abstract)
- [2] 郭焘, 于红博. 土壤含水量测定方法综述[J]. 内蒙古科技与经济, 2018(3): 66-67.  
Guo Tao, Yu Hongbo. Methods of determination of soil water content[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2018(3): 66-67. (in Chinese with English abstract)
- [3] 常丹, 李旭, 刘建坤, 等. 土体含水率测量方法研究进展及比较[J]. 工程勘察, 2014, 42(9): 17-22, 35.  
Chang Dan, Li Xu, Liu Jiankun, et al. Study progress and comparison of soil moisture content measurement methods[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(9): 17-22, 35. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1136-1143.  
Jiao Qishun, Zhu Zhongli, Liu Shaomin, et al. Research and application of cosmic-ray fast neutron method to measure soil moisture in the field[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1136-1143. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵原, 李晓鹏, 纪景纯, 等. 宇宙射线中子法在土壤水分监测研究中的应用进展[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 545-553.  
Zhao Yuan, Li Xiaopeng, Ji Jingchun, et al. Advances in soil moisture monitoring using cosmic ray neutron probe method[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 545-553. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张杰, 刘刚, 李保国, 等.  $^3\text{He}$  管中子土壤水分测量装置提高测量精度[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 90-97.  
Zhang Jie, Liu Gang, Li Baoguo, Li Guitong.  $^3\text{He}$  tube neutron moisture measurement device improving measuring accuracy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(2): 90-97. (in Chinese with English abstract)
- [7] Zreda M, Desilets D, Ferré T P A, et al. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons[J]. Geophysical research letters, 2008, 35(21): L21402.
- [8] Köhli M, Schrön M, Zreda M, et al. Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons[J]. Water Resources Research, 2015, 51(7): 5772-5790.
- [9] Nagamine K. Introductory muon science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [10] Morishima K, Kuno M, Nishio A, et al. Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons[J]. Nature, 2017, 552(7685): 386-390.
- [11] Oláh L, Tanaka H K M, Ohminato T, et al. High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-13.
- [12] Tanaka H K M, Sannomiya A. Development and operation of a muon detection system under extremely high humidity environment for monitoring underground water table[J].

- Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 2013, 2(1): 29-34.
- [13] Procureur S. Muon imaging: Principles, technologies and applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 878: 169-179.
- [14] Tanaka H K M, Aichi M, Bozza C, et al. First results of undersea muography with the Tokyo-Bay seafloor hyper-kilometric submarine deep detector MAGMA- HKMSDD collaboration[J]. Scientific Reports, 2021(11): 19485.
- [15] Grieder P. Cosmic rays at Earth[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001.
- [16] Zyla P A, Barnett R M, Beringer J, et al. Review of particle physics[J]. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020 (8): 083C01ss.
- [17] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社. 1997.
- [18] Hagmann C, Lange D, Verbeke J, et al. Cosmic-ray shower library (CRY)[J]. Lawrence Livermore National Laboratory document, 2012, 3: UCRL-TM-229453.
- [19] Hagmann C, Lange D, Wright D. Cosmic-ray shower generator (CRY) for Monte Carlo transport codes[C]. //2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record. Honolulu: IEEE, 2007.
- [20] Ferrari A, Sala P R, Fasso A, et al. FLUKA: A multi-particle transport code[M]. Geneva: CERN, European Organization for Nuclear Research, 2005.
- [21] Battistoni G, Cerutti F, Fasso A, et al. The FLUKA code: Description and benchmarking[J]. AIP Conference proceedings, 2007, 896(1): 31-49.
- [22] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社. 1996.
- [23] 刘宏伟, 余钟波, 崔广柏. 湿润地区土壤水分对降雨的响应模式研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 822-829. Liu Hongwei, Yu Zhongbo, Cui Guangbo. Pattern of soil moisture responding to precipitation in humid area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 822-829. (in Chinese with English abstract)
- [24] 孙媛, 董晓华, 郭梁锋, 等. 不同降雨条件下土壤水运动及再分布模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(S2): 74-80. Sun Yuan, Dong Xiaohua, Guo Liangfeng, et al. Simulation of soil water movement and redistribution under varying rainfall intensity conditions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(S2): 74-80. (in Chinese with English abstract)
- [25] Bonechi L, D'Alessandro R, Giammanco A. Atmospheric muons as an imaging tool[J]. Reviews in Physics, 2020, 5: 100038.
- [26] Vanini S, Calvini P, Checchia P, et al. Muography of different structures using muon scattering and absorption algorithms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2019, 377(2137): 20180051.
- [27] Luo X, Wang Q, Qin K, et al. Development and commissioning of a compact Cosmic Ray Muon imaging prototype[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2022, 1033: 166720.

## Soil moisture monitoring using cosmic ray muons

Jiang Shan<sup>1</sup>, Liu Guorui<sup>1</sup>, Liu Juntao<sup>1</sup>, Li Xiaopeng<sup>2</sup>, Qian Xiangping<sup>1</sup>, Fu Zhiqiang<sup>1</sup>, Wang Baoxiang<sup>3</sup>, Liu Zhiyi<sup>1\*</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100082, China)

**Abstract:** Cosmic ray neutron flux measurements have emerged for the soil water content in many fields in recent years. According to the count of the cosmic ray neutrons above the ground scattered by the soil, the detection depth is very sensitive to the soil water content, atmospheric pressure, and hydrogen-containing substances on the surface. In this study, a novel approach was proposed to monitor the soil moisture using cosmic ray muons with a higher average energy (about 3GeV). The water content of the soil was inferred from the muon count of the detector. The depth of detection was improved to minimize the influence of surface environmental factors on the measurement, compared with the cosmic ray fast neutron. A CRY program was used to generate the energy and angular distributions of cosmic ray muons at sea level. A Monte-Carlo program (FLUKA) was selected to construct the soil model with the different moisture. The transportation process of cosmic ray muons in soil was simulated to determine the relationship between the muon count of the detector in the soil and the average water content of the soil above the detector. The soil was equally divided into the upper and lower layers with a total thickness of 80 cm in the model. The moisture of the upper layer of soil varied from 0.05 to 0.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, while the water content of the lower layer was maintained at 0.5 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. The variation of the upper layer's moisture was simulated with the FLUKA program. The results showed that the count of the detector was a linear function of the soil water content. The detection resolution of the soil moisture was inversely proportional to the square root of detecting time, which reached 0.1 and 0.05 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, when the detection time was 2 and 8 h, respectively, particularly with the placement depth of the detector of 80 cm. Furthermore, the situations of the water content of the upper soil varied from 0.1 to 0.5 with the placement depth of the detector (from 60 to 120 cm), and the sensitive radius of the soil model (from 5 to 8.5 m) were simulated with FLUKA, indicating that the detection resolution also varied in the detection time at various placement depths. The highest resolution accuracy (0.038 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) of soil water content was achieved at the placement depth of 90 cm under the same duration. Another identical detector was required on the soil surface to monitor the cosmic ray muon flux reaching the surface in practical measurements, in order to correct for the effect of atmospheric factors on the muon count of the detector placed in the soil. Correspondingly, an experiment was performed which suggested that the muon event count can be an indicator of the mass thickness, and the soil density. In summary, the cosmic ray muons can be widely expected to monitor the soil moisture with a moderate and flexible detection range without radioactive hazards.

**Keywords:** soils; moisture; cosmic ray muon; Monte Carlo method; FLUKA