

土壤入渗性能测定方法研究综述

余颖¹, 曾奕^{1,2,3}, 强仁杰¹, 张金田¹, 彭心¹, 常恒¹, 方怒放^{1,2,3}

(1. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 2. 水土保持与荒漠化整治
全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为了解当前土壤入渗性能测定方法的多样性及其发展动态。[方法] 对目前常用的土壤入渗性能测定方法(环刀法、双环法、模拟降雨法、圆盘入渗仪、Hood 入渗仪和点源法)展开系统分析与归纳总结。[结果] 土壤入渗性能测定方法在不同土壤类型和环境条件下的测定结果存在显著差异, 这种差异性可能导致水资源管理决策的偏差。不同测定方法具有不同的适用性和优缺点, 对于不同试验目的和试验对象, 研究者可根据土壤类型、气候情况、人力物力及用水量等试验条件综合考虑, 选择合适的土壤入渗测定方法进行入渗研究。[结论] 系统梳理各类土壤入渗测定方法的基本原理、误差来源、改进措施等, 在此基础上, 重点探讨不同方法之间的对比基准和应用情况, 并从需水量、试验前期准备与入渗面积等维度对各方法进行定性分析。基于上述内容, 进一步展望土壤入渗性能测定方法研究的未来趋势: 1) 完善土壤入渗性能测定方法的比较基准与评价框架; 2) 加强不同土壤条件下多方法的系统适用性比较; 3) 深入解析方法误差来源并提升测定结果稳定性。

关键词: 土壤入渗性能; 环刀法; 双环法; 模拟降雨法; 圆盘入渗仪; Hood 入渗仪; 点源法

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0001-12

Review of Measurement Methods for Soil Infiltration Capacity

Yu Ying¹, Zeng Yi^{1,2,3}, Qiang Renjie¹, Zhang Jintian¹,

Peng Xin¹, Chang Heng¹, Fang Nufang^{1,2,3}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To understand the diversity and recent developments in current methods for measuring soil infiltration capacity. [Methods] A systematic analysis and summary were conducted on the currently common methods for measuring soil infiltration (cutting ring method, ring infiltrometer, simulated rainfall method, disc infiltrometer, Hood infiltrometer, and point source method). [Results] The measurement results of these methods vary significantly across different soil types and environmental conditions. Such variability may introduce biases in water resource management decisions. Moreover, each method has its own applicability, advantages, and limitations. Depending on the research objectives and target conditions, researchers may comprehensively consider factors such as soil type, climate, available resources, and water consumption to select the most suitable infiltration measurement method for their study. [Conclusion] A systematic review was conducted on the fundamental principles, sources of error, and improvement measures of various soil infiltration measurement methods. Building on this foundation, it focuses on comparative benchmarks and application contexts among

收稿日期: 2026-01-27

修回日期: 2026-03-12

录用日期: 2026-03-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-06-27

资助项目: 内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0023); 国家自然科学基金项目(42207405); 陕西省科学技术协会青年人才托举计划项目(20250701)

第一作者: 余颖(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: yuyingying@nwafu.edu.cn

通信作者: 曾奕(1994—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: zengyi@nwafu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

different methods, and provides a qualitative analysis of each method from perspectives such as water demand, pre-experiment preparation, and infiltration area. Based on the above, the article further prospects future research trends in soil infiltration measurement methods: 1) Establishing improved benchmarks and an evaluation framework for soil infiltration measurement methods. 2) Strengthening systematic comparisons of multi-method applicability under diverse soil conditions. 3) Conducting in-depth analysis of error sources to enhance the stability of measurement results.

Keywords: soil infiltration capacity; cutting ring method; double ring method; simulated rainfall method; disc infiltrometer; hood infiltrometer; point source method

Received: 2026-01-27

Revised: 2026-03-12

Accepted: 2026-03-18

Online(www.cnki.net): 2026-06-27

土壤入渗作为土壤水动力学的核心概念之一,是指水分通过土壤表面进入土体形成土壤水的过程,在降水-地表水-土壤水-地下水转化系统中扮演着关键角色^[1]。此过程不仅直接影响土壤水分动态,还与土壤侵蚀过程、农业灌溉管理和生态植被恢复等密切相关。在土壤侵蚀领域,入渗能力与地表径流紧密相关^[2],具体来说,当降雨强度过大时,极易产生超渗产流现象,该现象既提高地表径流的概率和强度,加剧土壤侵蚀过程,也造成降水资源的浪费;在农业领域中,土壤入渗率是灌溉计划制定中的重要指标,入渗能力的大小决定作物根系对土壤水分的获取效率,从而影响作物的生长过程和产量,使最初由经验决策的农业管理转变为由数据支撑的精准智慧农业;在生态修复领域,土壤入渗性能受到植被根系、土壤生物活动、土壤性质及各因素相互作用的影响^[3],提高土壤入渗能力有利于形成“植被-土壤水文”正反馈机制^[4]。为深入理解土壤入渗机制及其与相关研究领域的相互作用关系,先前的研究已经开发出多种土壤入渗测定方法。这些方法能够获取土壤入渗率、入渗量等关键参数,为揭示不同土壤条件下水分渗透行为提供可靠的数据支撑。因此,土壤入渗测定方法的研究具有重要的学术价值和实践意义,它既是实现土地资源可持续管理的重要工具,也为优化灌溉方案、提高水资源利用效率及控制土壤侵蚀等提供科学依据。

常用测定土壤入渗的方法主要包括环刀法^[5]、环式入渗仪^[6-7]、模拟降雨法^[8]、圆盘入渗仪^[9-10]、Hood入渗仪^[11]和点源法等。由于不同方法在供水方式、操作流程和参数计算上存在差异,即使在相近土壤条件下,各方法测定结果及对入渗过程的表征能力也可能并不一致^[12-14]。朱良君等^[15]在黄土区对比了双环法、单环法、圆盘入渗仪及Hood入渗仪测定的人渗过程发现,结果存在明显差异;江凌等^[16]和莫斌等^[17]研究发现,在崩岗区和紫色土区,双环法、环刀

法与点源法在稳定入渗率、平均入渗率、拟合效果及扰动程度等方面也表现出不同特征;Verbist等^[18]则关注石质土壤上不同计算方法对单环与双环法结果的显著影响;Atalar等^[19]的最新研究进一步指出,与模拟降雨法相比,传统双环法可能高估入渗能力且变异性较大。综上所述,土壤入渗测定方法之间并非简单的替代关系,方法本身固有差异可影响入渗结果的获取及解释^[20-21]。

总体来看,现有关于土壤入渗测定方法的比较研究仍以少数方法间的单方面对比为主,尚缺乏面向常用方法的系统归纳与综合评价,尤其在方法差异的形成原因、比较基准、适用条件及应用情况等方面仍缺少统一认识,这在一定程度上限制了不同研究结果之间的横向比较,也增加了特定试验条件下方法选择的困难程度。基于此,本文围绕6种常用土壤入渗性能测定方法,系统梳理其基本原理、技术特点、误差来源与改进情况,归纳不同方法的应用特征及比较依据,并从试验准备、需水量、耗时、扰动程度和适用场景等方面进行综合分析,以期土壤入渗性能研究中的方法选用与结果解释提供参考。

1 土壤入渗测定方法

目前广泛使用的土壤入渗性能指标包括初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率。其中,初始入渗率多指前1 min或前3 min的平均入渗率,该值反映土壤表面对水分的初始接纳能力;稳定入渗率多被定义为连续3次观测值基本一致时的入渗率,用以表征土壤在充分湿润后的持续渗水能力;平均入渗率指达到稳定入渗时的累积入渗量与对应入渗时间的比值,亦指达到稳定入渗时所有过程入渗率的平均值,能够综合反映整个入渗过程的整体性能。为系统获取并准确解析以上3个关键入渗指标,现已提出多种基于不同原理的测定方法。通过比较这些方法对3项核心指标的测定结果,揭示方法本身在土壤入渗性能评价方面的差异。

1.1 环刀法

环刀法最早由于德芬等^[22]提出并应用于中国土壤水分运动研究(图1)。该方法主要通过测定土壤初始入渗率、稳定入渗率等关键水力特性,为土壤水分动态研究提供量化指标。其原理是:在原位土壤中制备环形封闭区域以采取原状土样,并将带土环刀置于水中使土样充分饱和,继而通过在土样上施加一定水压梯度,诱导水分渗流,最终根据达西定律计算单位截面积土体中的水流速度,从而确定土壤的渗透系数。

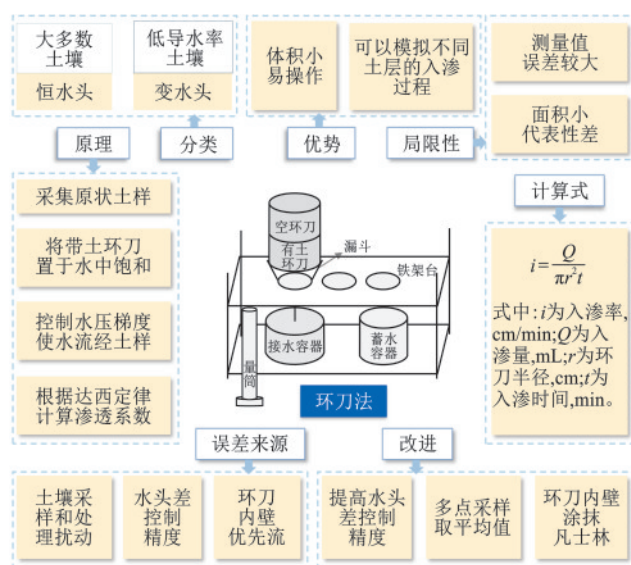


图1 环刀法测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进
Fig.1 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of cutting ring method for soil infiltration rate determination

此方法能够在不同环境条件下有效模拟自然入渗过程,并获取土壤水力特性相关数据^[5,23]。在环刀法的发展历程中,为满足不同质地与水力特性土壤的测定需求,已形成恒水头与变水头2类典型装置。恒水头装置适用于大多数土壤类型,而压力差变化较大的变水头装置则适用于导水率较低的黏质土和泥炭土等特殊土壤类型^[22]。由于环刀法设备小巧、操作便捷,在研究不同土层入渗率空间变异特征方面展现出独特优势^[24]。

环刀法测定结果的可重复性受多种因素制约。土壤采样和处理过程中的扰动效应、环刀规格参数、水头梯度控制精度,以及土壤固有空间变异性均可能影响测量结果的稳定性。其中,通过采样前将石蜡涂抹于环刀内壁以增加土壤与环刀间的结合度,从而有效减小环刀内壁产生的优先流误差。然而,受限于环刀较小的测定面积,在反映研究区整体水力特性时可能存在代表性不足的问题。为了进一步

提高测量精度,建议采用多点多层采样,并对测定结果进行统计平均处理,以此客观表征研究区域土壤水分运动特征。

1.2 环式入渗仪

环式入渗仪包括单环法和双环法。单环法是指通过向置于土壤表面的环内注入一定高度的水层,测量单位面积与单位时间内土壤表面的水分通量,从而计算土壤入渗率。然而,在土壤毛细作用力的驱动下,单环下方土壤会产生侧向水流导致测量结果产生系统误差。针对这一问题,Bouwer^[25]提出了双环法(图2),该方法通过增设外环结构有效控制侧向水流对测定的干扰。其原理是向安置在地表的双环内注水,外环可有效限制侧向渗流与土壤吸力对内环测定的影响,促使内环形成稳定的垂直一维入渗环境^[26],通过记录一定时间内供水装置中的水量变化值来计算土壤入渗率。

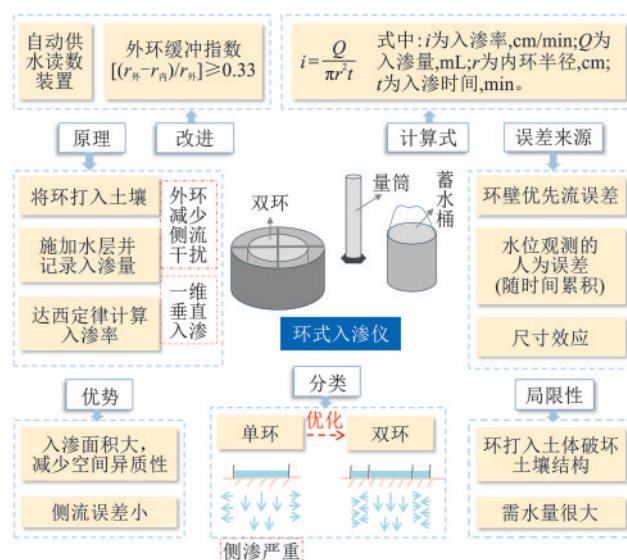


图2 双环法测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进
Fig.2 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of double ring method for soil infiltration rate determination

相较于其他原位测定方法,双环法因其较大的有效入渗面积与高代表性而广受青睐,又从设备设计层面减少侧渗干扰,从而提高测定结果的稳定性。此方法简单易操作,设备成本较低,ASTM D3385^[27]与SL 345—2007^[28]将其列为土壤入渗率标准测定方法,并有多项研究将其测定结果作为其他方法准确性的基准^[6,29-30]。

相关研究^[31]分析表明,双环法仍存在若干技术局限。在设备使用方面,环体打入土壤过程中易形成裂隙,进而产生优先流通道,导致累积入渗量被高估,使入渗速率计算值偏高。在测量结果稳定性方

面,人工计时与液面监测等可能提高观测数据的变异程度,在长时间测定过程中该变异性可显著放大,影响原始数据的可靠性。此外,双环尺寸是影响测定结果的重要参数,其影响机制主要包括2个方面:其一是侧向流效应的尺寸依赖性,主要由外环尺寸控制。Lai等^[32]研究表明,当内外环的缓冲指数(内、外环半径差与外环半径之比) ≥ 0.33 时,能将侧向流误差控制在 $\pm 25\%$ 的可接受范围内。其二是土壤空间异质性引起的尺寸依赖性,主要取决于内环尺寸,通常内环直径增大能增加入渗面积并提高方法代表性(ASTM D3385^[27]标准推荐双环尺寸为内径30.5 cm、外径60.0 cm,SL 345—2007^[28]规程所用双环尺寸为内径25.0 cm、外径50.0 cm)。值得注意的是,随着双环尺寸增大,测定所需水量呈非线性增加,对野外试验条件下水源供给能力提出更高要求,尤其在人烟稀少且交通不便的山区,可能显著增加试验成本与操作难度。因此,双环尺寸需要综合试验目的、现场环境及供水条件等因素进行选择,以确保测定过程的可行性与结果的稳定性。

自双环法提出以来,各国学者对其进行多方面的改进。改进重点主要在于对仪器设备的优化以实现自动供水与数据自动采集。王文焰等^[33]结合马氏瓶实现双环自动供水功能,此创新不仅显著缩短测量时间,还提升入渗量测定的准确性;孙权等^[34]进一步引入非接触式电容感应液位传感器,实现内外环水位的自动化观测记录,有效解决传统人工观测存在效率低下和人为误差问题。近期,Abdelmoneim等^[35]基于物联网技术开发出新一代自动化双环渗透仪,不仅实现实时数据计算与远程数据传输,还成功构建土壤入渗数据库,推动相关技术的进一步发展。相比之下,原理层面的改进较少,主要聚焦于提高测定精度。Zhang等^[36]将嵌入环式结构改为表面安置式设计,避免土壤结构扰动造成的优先流误差,从测定机理上提高数据可靠性。然而,现有改进方案在实际应用中面临诸多挑战:1)设备复杂性增加。部分改进装置的使用需要额外的技术支持与维护,增加研究成本。2)缺乏比较标准。由于缺乏统一精度评价标准,难以客观评估新技术的优势。3)适用性限制。某些改进设计仅适用于特定土壤类型或研究场景,在跨区域应用时受到限制。总体而言,现有双环法供水装置存在多项改进措施,但这些技术创新尚未实现规模化应用。针对此现象,亟须系统解析技术转化滞后的深层原因。具体改进方向应聚焦于:研发具有多级流速梯度调节功能的供水装置,实现初始快速入渗阶段的精准供水以满足土壤水量需

求;集成高精度液位传感器与物联网传输技术,构建自动化数据采集系统,消除人为读数误差;采用高强度合金材料制造双环环体,设计合理结构避免环体局部形变,确保设备在草地、林地等复杂下垫面条件下的稳定性且延长装置的使用寿命。

1.3 模拟降雨法

模拟降雨法(图3)是一种通过人工模拟自然降雨过程测定土壤入渗性能的方法。其基本原理是在径流小区内,利用可调控降雨强度的装置向待测土壤表面进行降雨模拟,在每个径流小区的出口下方布置径流收集装置收集并记录降雨-入渗过程中产生的径流。通过持续测定径流量的变化,结合降雨量和时间参数,计算土壤的入渗速率^[14]。该方法广泛应用于土壤水分入渗过程研究中的土柱试验、土槽试验及大田试验。但因其装置体积较大且便携性较差,更适用于室内可控环境下的科学研究。

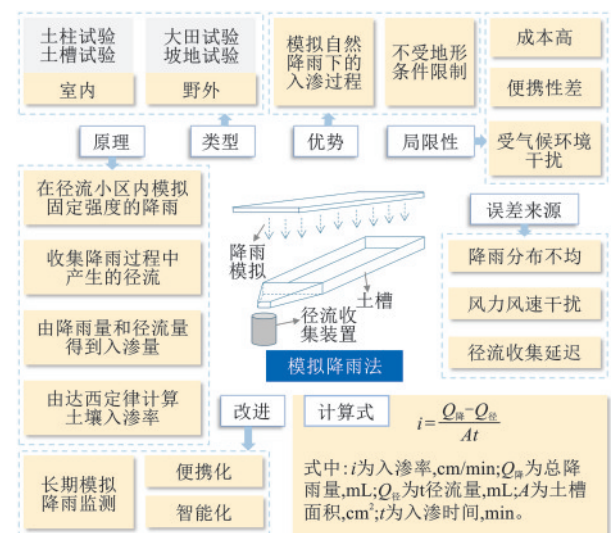


图3 模拟降雨法测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进

Fig.3 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of simulated rainfall method for soil infiltration rate determination

模拟降雨法在测定土壤入渗率方面具有显著优势,能够精确地调控降雨强度、降雨时长以及降雨空间分布格局,有效模拟多种降雨条件下的土壤入渗过程。该方法广泛适用于各种土壤类型及植被覆盖条件,也不受地形复杂性的制约^[37]。然而其空间代表性相对有限,通常在较小规模的试验区域进行,对于较大区域的降雨模拟,设备成本将显著增大。在实践中该方法存在多重误差来源:一是降雨模拟装置的降雨均匀性难以保证,导致某些区域降雨强度与设定值存在差异;二是户外试验中风速和风向等环境因素会进一步干扰降雨分布,影响入渗过程计

算的准确性。这些因素在模拟降雨试验设计时需予以充分考虑和妥善应对。

当前研究趋势聚焦于实现试验过程的自动化、智能化与便携化升级。吕华芳等^[38]在马氏瓶供水模拟降雨法的基础上,提出一种采用可编程逻辑控制器控制的室内降雨入渗监测系统,该系统有效解决供水稳定性和数据采集保存两大难题。目前研究重点已转向智能化监测与便携化设计,但便携性与大尺度监测需求间的矛盾凸显:设备小型化必然导致有效模拟面积缩减,而野外大田试验要求更大的覆盖范围,这对技术改进提出新的挑战。在未来的研究中,仍需建立长期模拟降雨监测站点,结合长期自然降雨观测数据,深入解析不同尺度下土壤入渗特性的时空演变特征,不仅有助于完善监测体系,更为模拟降雨法的精度优化与应用拓展奠定科学基础。

1.4 圆盘入渗仪

圆盘入渗仪(图4)是测定土壤入渗性能的关键仪器,由Perroux等^[39]首次提出。其测定原理在于:通过负压管在土壤表面施加可控压力,使水以半球形饱和区向土壤内部扩散形成三维入渗。当入渗达到稳定状态时,供水速率与土壤入渗率存在特定关系,结合供水速率、圆盘半径和土壤吸附系数等相关参数,即可计算出土壤入渗性能指标^[40]。

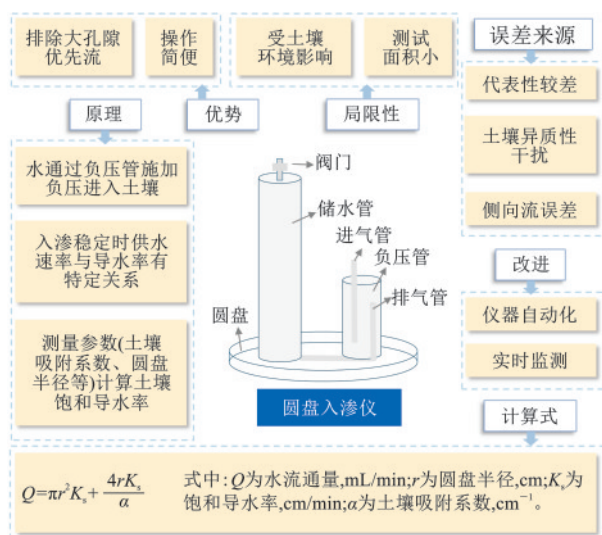


图4 圆盘入渗仪测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进

Fig.4 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of disc infiltrometer for soil infiltration rate determination

相较于其他田间测定方法,圆盘入渗仪具有操作简便、现场实施效率高的优势,在土壤入渗研究中应用广泛。然而,受限于圆盘入渗仪的试验面积,其

测量结果难以全面反映较大范围内的土壤入渗特性,特别是在土壤空间变异性显著的土壤条件下,测量结果的代表性受到明显制约^[41]。

误差分析显示,虽然施加负压可有效排除土壤裂缝和大孔隙的干扰^[42],但这一人为控制手段无法完全模拟实际土壤中的复杂水力条件。土壤非均质性和各向异性会导致水流路径和速度在入渗过程中产生波动,进而影响入渗率的测量^[43]。在土壤过于干燥或存在大量有机质覆盖等特定条件下,入渗过程受到干扰,对测量结果的稳定性产生影响^[9]。

圆盘入渗仪最初由入渗圆盘、带刻度储水管和负压管组成,通过在入渗圆盘处施加负压来测量土壤水力特性^[39]。针对储水管容量小的问题,Kechavarzi等^[44]开发了分离式储水系统;而Moret-Fernández等^[45]则通过引入电磁阀组实现负压管中压力变化的自动化控制,进一步缩短测量时间并提高操作精确性。在未来的研究中,有望进一步优化自动控制系统,实现对入渗过程的实时监测和数据自动采集,从而最大限度降低人为操作误差,推动该技术向更高精度和实用性方向发展。

1.5 Hood入渗仪

Schwärzel等^[46]通过改进圆盘入渗仪,提出测定结果更符合实际情况的Hood入渗仪(图5)。

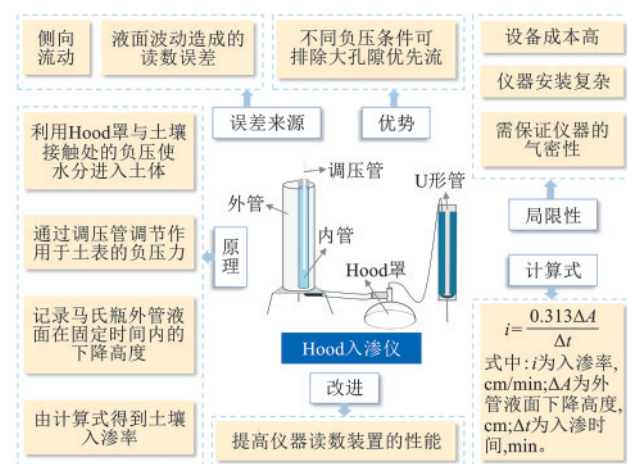


图5 Hood入渗仪测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进

Fig.5 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of Hood infiltrometer for soil infiltration rate determination

Hood入渗仪作为一种新型张力式渗透仪,尤其适用于非饱和土壤导水率的精准测定。目前广泛使用的Hood入渗仪设备主要由德国厂商生产,因而该方法在德国土壤渗透性能研究中应用广泛^[47-48]。其工作原理是在土壤表面放置一个有水填充的倒置半球形Hood罩,通过调节调压管在内管的垂直深度向

Hood罩内施加可控负压,模拟不同水分渗透条件;利用马氏瓶监测固定时间内外管液面高度变化来计算入渗率。负压入渗机制使水分通过毛管力被动渗入土壤,阻止水分进入土壤裂隙、根孔及虫孔中^[49],从而消除大孔隙优先流对测定结果的干扰。

尽管Hood入渗仪在非饱和土壤导水率测定方面具有显著优势,但实际应用中仍需重点关注以下因素。初始土壤含水量的差异会导致导水率测定结果出现显著波动^[50];而土壤表面张力与接触角等物理参数的变化可能干扰导水率测定过程^[51],这些因素需在数据处理分析时进行系统校正。此外,该方法虽能直接读取土壤导水率数值,但缺乏过程数据记录功能,且设备购置成本较高,对操作人员的专业技术水平有较高要求。未来研究应着重优化读数装置,进一步提升测量稳定性和准确性。

1.6 点源法

土壤点源入渗自动测量是一种高效、自动化的土壤水文特性研究方法,最早由雷廷武等^[52]基于人工测量计算湿润面积提出的可实时自动生成土壤入渗率-时间变化曲线的入渗性能自动测量方法(图6)。该研究团队在水量平衡原理和土壤均质性假设基础上,根据土表湿润面积随时间的变化规律,推导出计算土壤入渗性能的数学模型,并结合机器视觉和数字图像处理技术,开发测量硬件与软件,构建一套完整的土壤入渗自动测量系统,并验证此方法在田间坡地的适用性^[53-54]。

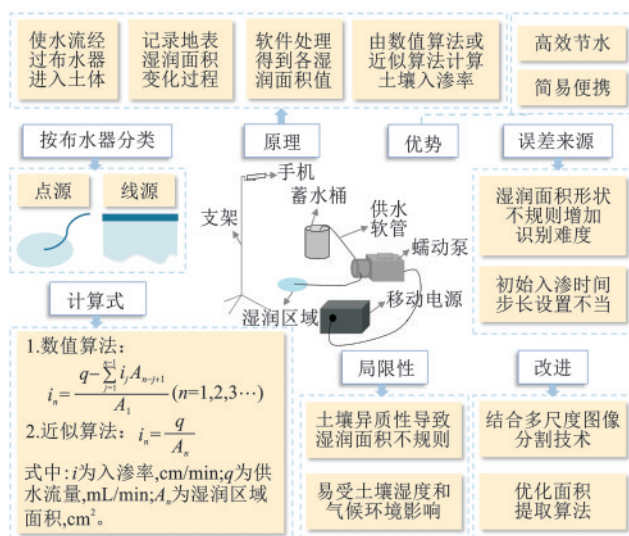


图6 点源法测定土壤入渗的原理、优缺点、误差来源及改进

Fig.6 Principles, advantages and disadvantages, sources of error, and improvement measures of point source method for soil infiltration rate determination

此方法的核心原理在于通过布水器使水流自倾斜土槽上端向下端渗流扩散,在土表形成明显湿润

区域。在恒定流量且供水充足的试验条件下,地表湿润面积随时间的变化过程完全由土壤入渗能力主导。有研究^[55]表明,在0.5~2.0 L/h供水流量范围内,入渗性能不受供水流量变化影响,与土壤体积质量和结构等土壤性状有关。因此,土壤入渗性能动态变化情况可通过湿润面积与时间关系表征,结合数学模型计算获得土壤入渗率。

点源法的实际应用精度与湿润面积的形成和识别紧密相关。首先,该方法理论基础建立在土壤均质性假设之上,此前提条件在室内可控环境中易于实现,但野外自然条件下土壤异质性显著,导致入渗试验形成的湿润面积形态复杂多变,甚至呈现极端不规则几何特征。其次,雨季开展野外入渗试验时,土壤初始含水量高、植被覆盖度大等情况都可导致干湿土边界更模糊,显著增加系统湿润面积识别与计算误差。此外,测量参数设置对测定结果有重要影响,特别是初始入渗阶段的时间步长选择。基于数值算法的点源法依赖初始入渗率计算过程入渗率,当时间步长过大时,初始入渗率的计算偏差将放大后续过程的计算误差,且步长与误差呈正相关关系^[53]。因此,合理划分初始入渗阶段的时间步长是保证测量精度的关键环节,需根据试验条件进行优化设置。

点源法因其高效、节水、便携等优势而备受众多学者推崇。为进一步提高土壤入渗率测量的稳定性,研究者从过程表征、仪器设备与图像识别3个维度对该方法进行改进。在入渗过程表征层面,早期研究多聚焦于单一阶段的入渗特征^[56],对初始入渗和稳定入渗阶段的动态变化关注较少。近年来,研究者开始系统解析点源入渗全过程的3个阶段特征^[57],使后续研究能够更有针对性地提高该方法的测定性能。在仪器设备改进层面,王伟等^[58]提出一种基于红外热成像仪的点源土壤入渗性能自动测量方法,该方法的水量平衡误差可控制在2.0%以内,相较于雷廷武等^[52]基于数字照相机的线源入渗测量方法(误差为6.1%)有显著优化。在湿润图像识别与面积提取方面,梁羽石等^[59]在计算湿润面积时引入人工辅助识别模块,将试验误差值降低0.3%~31.0%,一定程度上提高测定精度;左冲等^[60]进一步优化技术方案,采用智能手机替代传统数字照相机,结合线源入渗法实现土壤入渗率的快速测定,显著提升设备便携性与实用性。近年来,随着人工智能技术和深度学习算法的快速发展,图像分割算法不断进步。未来研究可利用机器学习算法、大数据分析等技术将进一步提高点源法的湿润面积识别能力,增加面积提取精度。基于此,优化点源法的操作

步骤。在技术融合层面,开发集成数据采集、处理与分析功能的移动端应用程序,实现野外数据实时上传、云计算及可视化反馈。该技术体系通过多源信息融合与流程自动化,可缩短单次测定时间,同时提升复杂地形条件下的适用性。

2 土壤入渗测定方法对比分析

2.1 土壤入渗测定方法对比基准

由于不同土壤入渗测定方法在供水方式、入渗面积、观测对象及参数计算上存在差异,其测定结果往往不能直接进行简单比较。因而,在开展方法比较或评价其测定效果时,首先需要明确对比所依据的评价基准。现有研究中,不同研究者往往根据试验目的、土壤条件及所测定的入渗指标选取不同的比较依据,导致方法间评价结论并不完全一致。总体来看,已有文献中关于土壤入渗测定方法的对比基准主要可归纳为3类:1)以不同方法测定值的绝对大小作为对比基准。此类研究通常直接比较不同方法所得入渗率的大小规律,以判断其测定结果差异。例如,在双环法与环刀法的对比研究中发现,双环法测得入渗率普遍高于环刀法^[61]。2)以测定数据的稳定性或离散程度作为评价依据。当研究者更关注方法结果的重复性与稳定性时,常采用变异系数、离散程度等指标进行比较。李叶鑫等^[62]在排土场渗透性研究中发现,Hood入渗仪的测定值变异程度最小,因而认为其测定效果优于环刀法和双环法。Nesting等^[63]则通过比较平均变异系数得出双环法(9.1%)优于圆盘入渗仪(22.7%)的结论。3)以特定入渗指标或方法优势指标作为对比基准。当研究涉及多个入渗性能指标综合评估时,学者往往结合各方法的特点分别选取关键指标进行评价。例如,朱良君等^[15]在4种方法的比较研究中,分别以双环法测定的稳定入渗率、圆盘入渗仪和双环法测定的累积入渗量为评价基准来评估各方法的测定效果。

综上,现有研究虽然已从不同角度开展方法比较,但由于评价基准并不统一,不同研究之间的结果往往难以直接比较和综合分析。这种比较框架上的差异,是造成不同文献结论不一致的重要原因之一,也表明在土壤入渗测定方法领域仍有必要建立更具可比性的标准化评价体系。

2.2 土壤入渗测定方法应用比较

土壤渗透性是决定入渗测定方法选择的关键因素,不同方法在特定土壤质地和结构条件下各具适用性。环式入渗仪(包括单环法和双环法)更适用于高渗透性土壤^[63],能表现出较为优异的测定效果。在石质土壤入渗率测定方面,双环法凭借对时间成

本和测量精度的综合考量,成为更优选择^[18,29]。圆盘入渗仪和Hood入渗仪均基于负压入渗原理,在非饱和和导水率测定方面具有独特优势。其中,圆盘入渗仪在细质低渗透性土壤中表现出良好的适用性^[15,64],Hood入渗仪在排土场表层土壤入渗及田间大孔隙优先流等特定研究中展现出独特的应用优势^[62,65]。环刀法具有小面积测定、操作简便以及易取样等显著优势,因而更适用于探究垂直方向上不同土层间的水分入渗能力差异^[65-66]。另外,在甘肃黄土区耕地的相关研究中,环刀法同样表现出更优的测定性能^[67]。但该方法在高渗透性土壤的入渗测定应用中存在一定局限性。模拟降雨法适用于坡耕地稳定入渗率的测定,相较于其他方法,其更能适应复杂地形条件^[68]。点源法则在崩岗区 and 紫色土区入渗性能研究中,具有更高的测定精度和更优的拟合效果^[16-17]。该方法通过非侵入式测量设计,在保证地表生物结皮及土壤结构完整性的前提下,能够在短时间内精准测定结皮土壤的水分入渗过程^[69]。其适用性还体现在不同海拔山地的土壤入渗性能研究^[70],以及受机械作用影响的梯田坡耕地土壤研究中^[54],充分体现了该方法的多功能性与广泛适用性。

2.3 土壤入渗测定方法定性比较

前人的研究结果表明,各种方法都有其优势和局限性。在尽可能统一比较前提的基础上,本文对6种土壤入渗测量方法野外应用时的用水量、试验耗时、测量误差、渗漏情况进行归纳比较(表1)。从原理上看,圆盘入渗仪、Hood入渗仪的可调负压入渗和点源法的湿润面积测量技术突破传统积水型入渗的局限^[71-72]。从入渗面积(可体现不同方法的代表性差异)来看,环刀法入渗面积最小,对研究样点或者样区的代表性最差,通常需要多次试验取平均值以减小误差,模拟降雨法和点源法相对不受入渗面积限制,结果代表性较好,其他方法均仅代表小尺度范围的土壤入渗性能。在试验前期准备阶段,搬运试验用水是野外入渗试验的关键环节,其人力需求显著影响着试验效率与进度。模拟降雨法因安装降雨装置并挖掘试验小区,需要最多人力物力和时间消耗;双环法设备简单,但为保证初始入渗阶段的试验效率、连续性 & 数据准确性,最好由2人同时将环体均匀砸入土壤,并多一人协助运水及后续试验工作的开展。相比之下,环刀法和点源法仅需一人就能迅速完成试验准备工作。试验耗时维度上,双环法、环刀法和模拟降雨法耗时为60 min左右,圆盘入渗仪、Hood入渗仪和点源法由于相对自动化能够实现快速测定^[15]。在用水量方面,模拟降雨法需水量最大^[8],

其次是双环法(约为Hood入渗仪的4倍,环刀法的10倍),圆盘入渗仪与Hood入渗仪通过负压调控显著降低用水量,而点源法因供水流量较小实现最低耗水。地表扰动特性显示,双环法和环刀法因物理侵入导致地表破坏严重^[29],而圆盘入渗仪与点源法通过非接触测量几乎不对土壤结构造成扰动^[17],后者基本能够实现零扰动。读数误差方面,除了点源法外,其余5种方法都依赖人工读数,因此均存在一定程度的读数误差,基于图像识别的点源法虽无过程误差,但精度受限于湿润面积的识别和提取。坡地适应性方面,仅模拟降雨法可在原始坡地地形进行

测量,其余各法皆需要在坡地中整平小块土地才得以实现坡面应用。初始入渗率测定能力方面,环刀法、圆盘入渗仪和点源法能有效捕捉初始入渗峰值^[15],双环法和Hood入渗仪在试验过程中,均需要加水至固定水位线才开始计时,加水时间虽短,但仍然无法得知该段时间的真实入渗率值。这对非饱和带水分优先运移具有重要意义。总之,不同方法具有不同的适用性和优缺点,对于不同试验目的和试验对象,研究者可根据土壤类型、气候情况、人力物力及用水量等试验条件综合考虑,选择合适的土壤入渗测定方法进行入渗研究。

表 1 6种方法的定性分析
Table 1 Qualitative analysis of six methods

比较指标	环刀法	双环法	模拟降雨法	圆盘入渗仪	Hood入渗仪	点源法
原理	积水型有压入渗	积水型有压入渗	无压入渗接近自然降雨	可调节负压入渗	可调节负压入渗	入渗率与湿润面积紧密相关
入渗面积	半径 2.5 cm	内环半径 15 cm	200 cm×50 cm	半径 5~10 cm	小 Hood 罩半径 8 cm 大 Hood 罩半径 12 cm	不受面积限制
所需人员	1 人	2~3 人	2~3 人	1~2 人	2 人	1 人
前期准备	5~10 min	20~30 min	>30 min	5~10 min	10~15 min	<5 min
入渗耗时	60 min 左右	60~120 min	30~60 min	30 min 左右	30~40 min	10~30 min
用水量	用水量小 (0.2~0.5 L)	用水量很大 (20~40 L)	较大 (50~100 L)	小于双环法	较小 (4~10 L)	小 (0.8~1.0 L)
地表扰动情况	环刀取土时破坏地表	严重扰动地表	雨强大时破坏地表形成结皮	轻微扰动甚至不扰动	基本不扰动,需要湿砂	基本不扰动
读数误差	较小	较大	较小	较小	压力差产生气泡影响读数	无读数误差,但面积提取时有一定误差
渗漏情况	渗漏较小	外环可防止侧渗	—	存在侧渗	侧流较大	—
坡地试验	相对适合室内试验	大坡度不行,小坡度可整平土壤	可以	大坡度不行,小坡度可整平土壤	大坡度不行,小坡度可整平土壤	大坡度不行,小坡度可整平土壤
初始入渗率测定	能	不能	不能	能	不能	能

注:表中内容基于文献分析及野外实测,其中所列数据仅反映特定条件下的相对差异,供研究人员参考,推广至其他土壤条件时需谨慎。
“用水量”定量数据为相应“入渗面积”条件下达到稳定入渗率时的需水量数据,研究者可根据试验目的自行设置“入渗面积”值。

3 结论与展望

本文基于系统的文献梳理与深入分析,对6种常见的土壤入渗性能测定方法进行全面解析,详细阐述各方法的基本原理、潜在误差来源及改进策略,归纳总结各方法的优缺点。基于综合考察,本文进一步剖析6种测定方法的对比基准与应用情况,并从需水量、试验前期准备工作与入渗面积等维度对各方法进行定性分析,以期深化对土壤入渗性能测定方法的全面认知与深入理解。未来研究可聚焦的方面有:

1)完善土壤入渗测定方法的比较基准与评价框架

针对当前缺乏统一比较标准的问题,未来的研究需融合原位观测与室内模拟数据,结合数值模型

和机器学习技术,建立特定入渗方法适用性与关键土壤属性的定量关联关系。基于此,构建一个兼具科学性、客观性与可操作性的土壤入渗测定方法结果标准评价体系至关重要。此体系的建立将实现不同测定方法之间的有效比较与综合分析,提升区域数据可比性,显著提升基于特定方法获取的土壤入渗参数在其他土壤类型和环境条件下的外推适用性与可靠性。

2)加强不同土壤条件下多方法的系统适用性比较

目前,土壤入渗测定方法的适用性研究仍显不足。由于土壤空间异质性影响,不同土壤入渗测定方法在不同质地、结构和水分条件下的测量结果差

异显著。但现有研究多为少数方法的局部对比分析,缺乏面向常用方法的系统归纳与综合评价,导致方法选择经验依赖性强,适用条件尚不明确。因此,未来研究应整合多种入渗测定方法,重点开展其在典型研究区(西北黄土高原区、西南紫色土区、东北黑土区、南方红壤区等)的适用性对比研究,通过多方法系统比较,揭示不同方法间的本质差异及其适用性,为不同区域科学选择入渗测定方法提供理论依据,推动入渗测定方法的规范化应用与结果的可比性提升。

3)深入解析方法误差来源并提升测定结果稳定性

当前,土壤入渗测定方法的结果稳定性受多重因素制约,包括方法原理的假设条件(如均质介质假设)、公式模型的简化处理(如忽略优先流现象)、试验装置的机械误差(如边界条件扰动)及操作过程的人为偏差(如注水速率控制)。这些误差的耦合作用导致不同方法间的测定结果存在显著差异,但现有研究尚未系统量化各因素的影响权重,限制了测定方法的优化与标准化。未来研究应基于多因素控制试验和长期观测数据,解析不同测定方法误差的主要来源及其相互作用机制。在此基础上,基于误差来源分析指导新型测定设备的智能化和标准化改进(如自适应注水控制、多传感器数据融合、点源入渗测量程序开发等)。最终形成具有明确误差边界和适用条件的土壤入渗测定方法体系,为水文模型参数化提供更可靠的数据支撑。

参考文献:

- [1] 胡顺军,陈永宝,朱海.古尔班通古特沙漠南缘融雪水土壤入渗量[J].应用生态学报,2015,26(4):1007-1015.
Hu Shunjun, Chen Yongbao, Zhu Hai. Soil infiltration of snowmelt water in the southern Gurbantunggut Desert, Xinjiang, China[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(4):1007-1015.
- [2] Pan Chengzhong, Ma Lan, Xue Mengjun. Identifying the efficacy of undecomposed litter mulch to mitigate runoff and sediment under simulated rainfall conditions[J].Catena,2025,250:e108719.
- [3] 赵文婷,姜晓晗,李萌萌,等.黄丘区自然植被对暴雨的拦蓄作用:以坊塌小流域为例[J].水科学进展,2023,34(5):731-743.
Zhao Wenting, Jiang Xiaohan, Li Mengmeng, et al. Interception and storage of heavy rainfall by natural vegetations in the loess hilly and gully area[J].Advances in Water Science,2023,34(5):731-743.
- [4] Luan Jinkai, Ma Ning. Responses of seasonal hydrological processes to vegetation change in the Yellow River basin[J].Journal of Hydrology,2025,660:e133449.
- [5] 孙燕,刘建旗,吴建鑫,等.不同生物质材料对盐碱土理化特性及水盐运移特征的影响[J].土壤学报,2026,63(3):718-729.
Sun Yan, Liu Jianqi, Wu Jianxin, et al. Effects of different biomass materials on the physicochemical properties and water-salt transport characteristics of saline-alkali soil[J].Acta Pedologica Sinica,2026,63(3):718-729.
- [6] Liao Yang, Dong Lingbo, Li Ao, et al. Soil physicochemical properties and crusts regulate the soil infiltration capacity after land-use conversions from farmlands in semiarid areas[J].Journal of Hydrology,2023,626:e130283.
- [7] Wang Shuo, Zhang Jianghui, Fang Zheng, et al. Variations in Hotan riverbed permeability and seepage water amount by soil grain size changes from upstream to downstream[J].Scientific Reports,2025,15:e10472.
- [8] Liu H, Lei T W, Zhao J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J].Journal of Hydrology,2011,396(1/2):24-32.
- [9] Zhu Pingzong, Zhang Guanghui, Wang Hongxiao, et al. Soil infiltration properties affected by typical plant communities on steep gully slopes on the Loess Plateau of China[J].Journal of Hydrology,2020,590:e125535.
- [10] Muhammed H H, Anlauf R, Daum D. Estimation of hydraulic properties of growing media from numerical inversion of mini disk infiltrometer data[J].Hydrology, 2025,12(5):e100.
- [11] Kar S K, Patra S, Singh R M, et al. Impact of land use reformation on soil hydraulic properties and recovery potential of conservation tillage in India's North-West Himalayan region[J].Ecohydrology and Hydrobiology, 2023,23(2):290-303.
- [12] Angulo-Jaramillo R, Vandervaere J P, Roulier S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments[J].Soil and Tillage Research,2000,55(1/2):1-29.
- [13] 樊军,邵明安,王全九.田间测定土壤导水率的方法研究进展[J].中国水土保持科学,2006,4(2):114-119.
Fan Jun, Shao Mingan, Wang Quanjiu. Development about methods of soil hydraulic conductivity determination in fields[J].Science of Soil and Water Conservation, 2006,4(2):114-119.
- [14] 宋日权,褚贵新,张瑞喜,等.覆砂对土壤入渗、蒸发和盐分迁移的影响[J].土壤学报,2012,49(2):282-288.
Song Riquan, Chu Guixin, Zhang Ruixi, et al. Effects of sand mulching on soil infiltration, evaporation, and salt distribution[J].Acta Pedologica Sinica,2012,49(2):282-288.
- [15] 朱良君,张光辉,任宗萍.4种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):163-167.

- Zhu Liangjun, Zhang Guanghui, Ren Zongping. Comparing four methods for soil infiltration measurement[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 163-167.
- [16] 江凌, 黄炎和, 林金石, 等. 3种入渗测定方法在崩岗不同土层的应用比较[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 127-131.
Jiang Ling, Huang Yanhe, Lin Jinshi, et al. Comparing three methods for soil infiltration measurement in different soil layers of collapsing hill [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(4): 127-131.
- [17] 莫斌, 陈晓燕, 刘涛, 等. 紫色土丘陵区土壤入渗及其测定方法研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 116-121.
Mo Bin, Chen Xiaoyan, Liu Tao, et al. Study on soil infiltration and its determination methods in purple hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 116-121.
- [18] Verbist K, Torfs S, Cornelis W M, et al. Comparison of single- and double-ring infiltrometer methods on stony soils [J]. Vadose Zone Journal, 2010, 9(2): 462-475.
- [19] Atalar F, Leite P A M, Wilcox B P. A comparison of three methodologies for determining soil infiltration capacity in thicketed oak woodlands and adjacent grasslands [J]. Water, 2025, 17(4): e518.
- [20] 安迪, 彭旭东, 戴全厚, 等. 石漠化区岩-土与非岩-土界面土壤孔隙变异及入渗对干湿变化的响应[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 139-149.
An Di, Peng Xudong, Dai Quanhong, et al. Response of soil pore variation and infiltration to dry-wet changes at rock-soil and non-rock-soil interface in rocky desertification areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(11): 139-149.
- [21] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. 水科学进展, 2016, 27(5): 662-669.
Li Xueyin, Li Zhaoxia, Wang Tianwei, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 662-669.
- [22] 于德芬, 徐富安. 介绍一种土壤饱和导水率测定仪[J]. 土壤, 1990, 22(2): 103-106.
Yu Defen, Xu Fuan. Introduction of a soil saturated hydraulic conductivity tester [J]. Soils, 1990, 22(2): 103-106.
- [23] Ren Xiuzi, Chai Xiaohong, Qu Yuanyuan, et al. Restoration of grassland improves soil infiltration capacity in water-wind erosion crisscross region of China's Loess Plateau [J]. Land, 2023, 12(8): e1485.
- [24] Shi Shiling, Zhao Feiyan, Ren Xiaomeng, et al. Soil infiltration properties are affected by typical plant communities in a semi-arid desert grassland in China [J]. Water, 2022, 14(20): e3301.
- [25] Bouwer H. Intake rate; Cylinder infiltrometer [M]. Klute Arnold. Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 1986: 825-844.
- [26] 刘学浩, 黄长生, 黎义勇, 等. 基于压力自动化采集的宽量程双环入渗设备研发[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(增刊2): 149-158.
Liu Xuehao, Huang Changsheng, Li Yiyong, et al. Development of a wide-ranging automatic double ring infiltrometer based on vacuum pressure [J]. Resources Environment and Engineering, 2020, 34(S2): 149-158.
- [27] ASTM International. Standard test method for infiltration rate of soils in field using double-ring infiltrometer [M]. West Conshohocken: ASTM International, 2009.
- [28] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程注水试验规程: SL 345—2007 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water injection test for water resources and hydropower engineering: SL 345—2007 [S]. Beijing, China Water Resources and Hydropower Press, 2007.
- [29] Walsh E, McDonnell K P. The influence of measurement methodology on soil infiltration rate [J]. International Journal of Soil Science, 2012, 7(4): 168-176.
- [30] Cui Zeng, Huang Ze, Wang Yubin, et al. Soil water deficit was effectively alleviated by higher water infiltration after the short-term forestland-to-farmland conversion in semi-arid area [J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: e127893.
- [31] Zhang Jing, Lei Tingwu, Chen Tianqin. Impact of preferential and lateral flows of water on single-ring measured infiltration process and its analysis [J]. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(4): 859-869.
- [32] Lai Jianbin, Ren Li. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(6): 1667-1675.
- [33] 王文焰, 张建丰. 田间土壤入渗试验装置的研究[J]. 水土保持学报, 1991(4): 38-44.
Wang Wenyan, Zhang Jianfeng. Research on field soil water penetration testing device [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1991(4): 38-44.
- [34] 孙权, 张建丰, 张杰, 等. 自动双环入渗仪设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 318-324.
Sun Quan, Zhang Jianfeng, Zhang Jie, et al. Design and experiment of automatic double-ring infiltrometer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 318-324.
- [35] Abdelmoneim A A, Daccache A, Khadra R, et al. Internet of Things (IoT) for double ring infiltrometer automation [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: e106324.

- [36] Zhang Jing, Li Shaopeng. Surface-positioned double-ring to improve traditional infiltrometer for measuring soil infiltration[J]. *Soil Research*, 2020, 58(3):e314.
- [37] 朱彤, 张科利, 马芊红, 等. 喀斯特地区块石出露坡面入渗特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):118-123.
- Zhu Tong, Zhang Keli, Ma Qianhong, et al. Infiltration characteristics of boulder outcropping slope in karst area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 118-123.
- [38] 吕华芳, 杨汉波, 丛振涛, 等. 基于PLC控制的室内降雨入渗自动测定系统[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9):144-149.
- Lü Huafang, Yang Hanbo, Cong Zhentao, et al. Indoor automatic measurement system for rainfall infiltration based on PLC[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9):144-149.
- [39] Perroux K M, White I. Designs for disc permeameters [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52 (5):1205-1215.
- [40] Qu Yuanyuan, Wu Qinxuan, Khan F U, et al. The impact of root systems on soil macropore abundance and soil infiltration capacity[J]. *Plant and Soil*, 2025, 513(1): 1197-1214.
- [41] 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源[J]. *水科学进展*, 2013, 24(3):340-348.
- He Dan, Ma Donghao, Zhang Xizhou, et al. Regularity of spatial variability of soil infiltration and its variation sources [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3):340-348.
- [42] 文慧, 倪世民, 冯舒悦, 等. 赣南崩岗的发育阶段及部位对土壤水力性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35 (24):136-143.
- Wen Hui, Ni Shimin, Feng Shuyue, et al. Effects of developmental stages and parts of collapsing gully on soil hydraulic properties in southern Jiangxi[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(24):136-143.
- [43] 许明祥, 刘国彬, 卜崇峰, 等. 圆盘入渗仪法测定不同利用方式土壤渗透性试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(4):54-58.
- Xu Mingxiang, Liu Guobin, Bu Chongfeng, et al. Experimental study on soil infiltration characteristics using disc permeameter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(4):54-58.
- [44] Kechavarzi C, Špongrová K, Dresser M, et al. Laboratory and field testing of an automated tension infiltrometer [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 104(2):266-277.
- [45] Moret-Fernández D, González C, Lampurlanés J, et al. An automated disc infiltrometer for infiltration rate measurements using a microflowmeter[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(2):240-245.
- [46] Schwärzel K, Punzel J. Hood infiltrometer: A new type of tension infiltrometer [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5):1438-1447.
- [47] Julich S, Kreiselmeier J, Scheibler S, et al. Hydraulic properties of forest soils with stagnic conditions[J]. *For-ests*, 2021, 12(8):e1113.
- [48] Leimer S, Berner D, Birkhofer K, et al. Land-use intensity and biodiversity effects on infiltration capacity and hydraulic conductivity of grassland soils in southern Germany[J]. *Ecohydrology*, 2021, 14(6):e2301.
- [49] 周宾, 胡树文. 不同种稻年限对苏打盐碱土孔隙和入渗性能的影响[J]. *土壤学报*, 2023, 60(1):99-105.
- Zhou Bin, Hu Shuwen. Effect of different rice planting years on pore and infiltration properties of soda saline-alkali soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1):99-105.
- [50] Matula S, Miháliková M, Lufinková J, et al. The role of the initial soil water content in the determination of unsaturated soil hydraulic conductivity using a tension infiltrometer [J]. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61 (11):515-521.
- [51] Buczek U, Bens O, Hüttl R F. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (6):1998-2007.
- [52] 雷廷武, 刘汗, 毛丽丽, 等. 土壤入渗性能实时自动测量系统: CN101105489A[P]. 2008-01-16.
- Lei Tingwu, Liu Han, Mao Lili, et al. Real-time automatic measurement system for soil infiltration performance: CN101105489A[P]. 2008-01-16.
- [53] 雷廷武, 毛丽丽, 李鑫, 等. 土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(1):1-5.
- Lei Tingwu, Mao Lili, Li Xin, et al. Method for measuring soil infiltrability with linear run-on of water[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(1):1-5.
- [54] Wang Zhuoxiao, Yang Daming, Peng Xin, et al. Mechanical terracing regulates soil physicochemical properties and infiltration processes in the loess hilly region of China [J]. *Land Degradation and Development*, 2024, 35 (9):3181-3190.
- [55] 孙蓓, 马玉莹, 雷廷武, 等. 农地耕层与犁底层土壤入渗性能的连续测量方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4):118-124.
- Sun Bei, Ma Yuying, Lei Tingwu, et al. Method for continuously measuring soil infiltrability of plow-cultivated layer and hardpan in farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29 (4):118-124.
- [56] 王全九, 来剑斌. 利用自由点源入渗法测定土壤导水参数的室内试验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(3):191-192.
- Wang Quanju, Lai Jianbin. Indoor experiment on measurement of soil hydraulic parameter using the method

- without restrict point-source infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3):191-192.
- [57] Wang Dong, Liu Chun, Yang Yongsheng, et al. Clipping decreases plant cover, litter mass, and water infiltration rate in soil across six plant community sites in a semi-arid grassland[J]. Science of the Total Environment, 2023, 861:e160692.
- [58] 王伟,程晓磊,庄晓晖,等.基于红外视觉的点源土壤入渗性能自动测量方法改进[J].农业工程学报,2023,39(22):85-93.
Wang Wei, Cheng Xiaolei, Zhuang Xiaohui, et al. Method improvement for soil infiltrability measurement based on surface wetted area evolution of the point source infiltration monitored by infrared vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22):85-93.
- [59] 梁羽石,夏卫生,丁浩东,等.土壤点源入渗测量仪在山坡林地应用中的改进[J].排灌机械工程学报,2019,37(7):625-631.
Liang Yushi, Xia Weisheng, Ding Haodong, et al. Improvement of soil point source infiltration gauge in hill-side forest land application[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2019, 37(7):625-631.
- [60] 左冲,颜小飞,林昱槟,等.基于线性源法与图像处理的土壤饱和导水率快速测量方法[J].农业工程学报,2022,38(7):110-116.
Zuo Chong, Yan Xiaofei, Lin Yubin, et al. Rapid measurement of soil saturated hydraulic conductivity using linear source inflow method and image processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(7):110-116.
- [61] 陈娟,陈林,宋乃平,等.荒漠草原灰钙土土壤入渗特征及测定方法比较[J].节水灌溉,2019(5):21-26.
Chen Juan, Chen Lin, Song Naiping, et al. Soil infiltration characteristics and determination methods comparison of sierozem in desert steppe[J]. Water Saving Irrigation, 2019(5):21-26.
- [62] 李叶鑫,吕刚,王道涵,等.用3种测定方法分析排土场复垦区的表层土壤的饱和导水率[J].中国水土保持科学,2019,17(5):65-74.
Li Yexin, Lv Gang, Wang Daohan, et al. Analyzing the saturated hydraulic conductivity of surface soil in a dump by three measuring methods[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(5):65-74.
- [63] Nestingen R, Asleson B C, Gulliver J S, et al. Laboratory comparison of field infiltrometers[J]. Journal of Sustainable Water in the Built Environment, 2018, 4(3):e04018005.
- [64] Reynolds W D, Bowman B T, Brunke R R, et al. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(2):478-484.
- [65] 蒋小金.典型黑土耕地土壤优先流特征研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.
Jiang Xiaojin. The study of preferential flow characteristics in typical black cultivated soil[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [66] 柴亚凡,王恩姮,陈祥伟.未经干扰黑土的土壤贮水能力及水分入渗特征[J].水土保持学报,2007,21(3):158-161.
Chai Yafan, Wang Enheng, Chen Xiangwei. Water storage capacity and permeability of undisturbed typical black soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(3):158-161.
- [67] 费璐畅.用双环法和单环土柱法测定黄土地表土壤入渗的对比分析[J].中国水土保持,2020(8):47-50.
Fei Luyang. Comparative analysis of double ring method and single ring soil column method in measuring soil infiltration on loess surface[J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(8):47-50.
- [68] Vlček L, Šípek V, Zeliková N, et al. Water retention and infiltration affected by conventional and conservation tillage on a maize plot; rainfall simulator and infiltrometer comparison study[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271:e107800.
- [69] 张子辉,赵允格,谷康民,等.线源入流法在生物结皮渗透性研究中的应用[J].水土保持学报,2020,34(1):128-134.
Zhang Zihui, Zhao Yunge, Gu Kangmin, et al. Application of line source infiltration method in the study of biological soil crust permeability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(1):128-134.
- [70] 刘瑞,夏卫生,梁羽石,等.湖南省衡山不同海拔高度土壤的入渗特征[J].水土保持通报,2019,39(4):82-88.
Liu Rui, Xia Weisheng, Liang Yushi, et al. Soil infiltration characteristics at different altitudes in Hengshan Mountains of Hunan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4):82-88.
- [71] 吴发启,赵西宁,崔卫芳.坡耕地土壤水分入渗测试方法对比研究[J].水土保持通报,2003,23(3):39-41.
Wu Faqi, Zhao Xining, Cui Weifang. Comparative study on determining methods of soil infiltration of slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(3):39-41.
- [72] Svetina J, Prestor J, Šraj M. Infiltration measurements during dry conditions in an urban park in Ljubljana, Slovenia[J]. Water, 2023, 15(20):e3635.