

土柱淋洗实验研究进展及其在土壤有机碳迁移研究中的应用展望

肖佩文^{1,2}, 肖保华^{1,2,*}

(1.中国科学院地球化学研究所,贵阳 550081; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 土壤碳库是陆地生态系统碳循环中重要的源与汇,其小幅的变化都将对大气 CO₂ 含量造成巨大的反馈。全球约有 1 500 Gt 的有机碳储存在土壤中,土壤有机碳的迁移转化一直以来是学者们关注的热点问题。土柱淋洗实验在农业、林业、环境科学等研究领域广泛应用,并在土壤溶质运移模拟、土壤水文性质、重金属和污染物迁移转化等科学研究中取得了大量的研究成果。土柱淋洗实验的设计细节直接关乎实验结果的真实性,存在一些不容忽视的问题,例如大孔隙的数量、优先流的特征等。本文总结了目前国内外土柱淋洗实验研究的现状,讨论了一些土柱淋洗实验设计的常见问题,并在回顾前人土柱淋洗实验研究的基础上,对土柱淋洗实验在研究土壤有机质迁移转化的应用前景做出了展望。

关键词: 土壤有机碳; 土壤柱; 土柱淋洗实验; 实验设计; 综述

中图分类号: S151.9 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2021)01-0106-09 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2020.48.096

土壤碳库是陆地生态系统中碳循环的重要的来源和交换库^[1],土壤中的碳包括无机碳与有机碳^[2]。地球上 1 m 厚的土壤中有有机碳含量约为 1 500 Gt^[3],是陆地生态系统中有机碳的主要载体。土壤中有有机碳的动态变化影响着土壤与大气的碳收支平衡,若土壤中的有机碳发生 10% 的损失,就会导致大气圈中 CO₂ 的浓度上升 1 mg/L^[4-5]。此外,土壤中有有机碳的含量与其迁移转化是衡量土壤生产力的重要指标,影响着土壤肥力和土壤结构的稳定^[6-8],关系到农作物和畜牧业的产量,会影响社会经济的运行,因此土壤有机碳库的变化已成为国内外学者研究的热点之一。

在前人的研究中,土壤有机碳的稳定性主要从三个方面来进行评价:土壤中团聚体的结构及数量、有机质的化学组分和有机质的迁移转化能力^[9],评价过程中使用的分析手段有很多。例如断层射线扫描(CT)技术、红外光谱、¹³C 核磁共振波谱等分析技术可以从微观角度分析土壤中团聚体的结构和有机质的组成情况,另外通过对土壤中的可溶性有机质、土壤微生物量碳和土壤酶类的分析,

也可以从侧面评价土壤有机质稳定性^[10]。建立模拟实验是评价土壤有机稳定性的的重要手段,虽然长期的、大型的野外试验是较为理想的方法,但其中诸如气候、人为活动等不可控的因素太多,并且有时研究目的不适合进行大型和长期的实验,因此学者们设计了许多种类的模拟研究方法,来达到不同的要求,土柱淋洗实验便是其中之一。

几个世纪以来,人们设计了各种各样的土柱淋洗实验^[11],实验的目的包括研究渗滤液通过土壤的速度和数量来构建土壤运输模型^[12-14]、研究土壤污染物的迁移转化规律^[15-18]以及土壤蒸散研究^[19-20]等。不过土柱淋洗实验的基本目的,是利用从野外采集的原状土柱或扰动土壤重新填充的土柱,在不同的外界环境刺激下模拟土壤性质的变化。土柱淋洗实验的主要优势在于:可以较小程度的破坏土壤结构,较好的还原土壤剖面在自然界中的状态;同时柱体的隔离设计大大减小了模拟实验的难度,便于收集实验的淋滤液或者分析实验后的土层剖面样品。本文将回顾土柱淋洗实验的设计与应用历史,并在此基础上对土柱淋洗实验应用在土壤有

收稿日期: 2020-02-11; 改回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41273149、41773147、U1612441); 贵州省科技计划项目(黔科合 SY 字[2011]3109 号); 贵州省科技基金项目(黔科合 J 字[2010]2032 号)。

第一作者简介: 肖佩文(1995-),男,硕士研究生,从事土壤环境科学研究。E-mail: xiaopeiwen@mail.gyig.ac.cn.

* 通讯作者: 肖保华(1970-),男,研究员,从事环境科学研究。E-mail: xiaobaohua@vip.skleg.cn.

机质迁移转化研究中的前景和关键问题进行展望, 以期期望能为科研工作者们在设计和利用土柱淋洗实验的过程中提供部分的参考。

1 土柱淋洗实验的研究现状

大多数早期涉及土柱的研究都是使用的非饱和土柱进行的, 这种非饱和土柱多被称为蒸渗仪^[21]。这些蒸渗仪通常是大型的室外土柱, 土柱的特征是土壤的空隙中同时含有空气和液体, 用来模拟研究土壤含水层或包气带内的土壤。现可查的最早涉及土壤蒸渗仪研究的记录是 1688 年一位法国的学者 De la Hire 的研究^[22]。1796 年英国人 Dalton 也开始了关于土壤蒸渗仪的研究^[13], 并且他被认为是第一个安装和使用蒸渗仪的人, 但他本人承认从 De la Hire 的研究中取得了灵感。Kohnke^[21]编制了一份较为详尽的蒸渗仪研究工作历史和文献目录, 较为清晰的总结了早期工作中蒸渗仪的发展历史(表 1)。早期的蒸渗仪研究工作都不太注重渗滤液的化学组成, 主要是研究土壤渗滤液的数量及速度关系^[23]。20 世纪初, 学者们开始利用土柱来研究土壤孔隙水中溶质的化学性质和迁移转化规律^[24-26]。从 20 世纪 40 年代至今, 人们利用土柱淋洗实验来模拟多孔介质中的流体运动^[27-29], 并将土柱淋洗实验运用于土壤、水文等科学领域, 取得了大量的研究成果^[30-33]。

在许多研究领域, 都有应用土柱淋洗实验。农业上, 土柱淋洗实验被用来研究营养盐分在作物土壤中的运移以及肥料对土壤有机质的影响, 指示营养物质的迁移转化规律, 评价肥料的功效以及环境

风险^[34-36]。Wang 等^[37]通过淋洗一些直径 10 cm、长 131 cm 的 PVC 土柱, 发现土壤在施加氮肥之后会增加土壤有机碳的浸出。Asuman 等^[38]设计了一种直径 25 cm、长 60 cm 的丙烯酸土柱, 在土柱表层添加了猪粪后使用模拟雨水进行淋洗, 用以研究肥料添加后土壤营养盐和有机碳的通量变化。土壤水文学中也利用土柱实验来研究土壤水分的运移和土壤水分对土壤有机质的浸出的影响, 建立土壤水分运动模型。例如 Artiola 等^[39]设计了一些小型(直径 2.1 cm、长 12.4 cm)的不锈钢土柱, 并用不同水质的灌溉水来淋洗, 研究了水质对土壤碳浸出的影响。土壤环境质量研究中人们可以通过土柱淋洗实验来研究有机污染物、重金属等在土壤中的运移, 揭示潜在的环境效应, 对土壤改良措施进行探究^[18, 32, 40]。土壤污染物在土壤中的迁移转化过程中, 与有机质的相互作用也是人们关注的课题, 例如 Nkedikizza 等^[41]通过用除草剂与 CaCl₂ 的混合液淋洗一些直径 2.5 cm、长 30 cm 的玻璃填充柱, 发现疏水性化合物在通过土壤时发生的不规则吸附与土壤有机质有关; Han 等^[42]设计了几根比较大型(直径 7.5 cm、长 85 cm)的丙烯酸土柱, 研究了土壤施加 CaSO₄ 后淋洗状态下土壤有机碳的质量平衡。

在土壤有机质的相关研究中, 学者们也利用土柱淋洗实验取得了许多的研究成果。从实验的设计上来说, 土柱的构建对模拟真实自然中的土壤剖面有着相当的优势。比如 Wang 等^[43]通过使用模拟雨水淋洗不锈钢土柱来研究不同种植年限的茶园土进行的有机碳淋溶特征, 研究发现, 表层土(0~20 cm)的土壤有机质流失大于下层土壤(20~

表 1 1688~1937 年蒸渗仪发展年表^[21]

Table 1 Chronology of lysimeter development in 1688-1937^[21]

蒸渗仪历史事件	研究人员	研究地点	研究年份
首个蒸渗仪 ^[11]	De la Hire	法国巴黎	1688
首个具有径流装置的蒸渗仪 ^[13]	Dalton	英国曼彻斯特	1796
首次使用蒸渗仪研究土壤化学 ^[45]	Way	英国	1850
首个土块蒸渗仪 ^[46]	Lawes & Gilbert	英国洛桑	1870
美国的首个土块蒸渗仪 ^[47]	Sturtevant	美国马萨诸塞州弗雷明汉	1875
首次大型比较性的蒸渗仪研究 ^[48]	Wollny	德国慕尼黑	1880
首个与排水层自然接触的蒸渗仪 ^[49]	Sanborn	美国密苏里州哥伦比亚市	1888
首个 Ebermayer 型蒸渗仪 ^[50]	Welbel	苏联普洛蒂	1903
首个具有径流装置的土块蒸渗仪 ^[51]	Leather	印度坎普尔	1903
首个具有称重装置的蒸渗仪 ^[52]	Seelhorst	德国哥廷根	1906
首个具有称重装置的土块蒸渗仪 ^[53]	Weaver & Crist	美国内布拉斯加州林肯	1923
美国的首个 Ebermayer 型蒸渗仪 ^[54]	Joffe	美国新布伦瑞克	1929
首个具有自记称重装置的土块式蒸渗仪 ^[55]	Musgrave & Neal	美国俄亥俄州克肖克顿	1936
首个具有张力计装置的蒸渗仪 ^[56]	Garstka	美国爱荷华州克拉琳达	1937

40 cm) ,同时茶园土的种植年限越高,有机质的流失率越低。同时可以通过对土层剖面上的碳迁移行为的分析,研究土壤中的有机碳来源。Uselman等^[44]通过淋洗布置有¹⁴C标记的根系与叶片凋落物有机碳的土柱,研究了土壤有机碳的贡献来源,发现叶片凋落物可能是土壤沉积层中有机碳的主要来源,而深层土壤中的有机碳主要来自与植物根系。在以往文献报道的土柱淋洗实验的利用方式中,研究人员多关注的是农业土壤中营养元素的运移规律,或者是土壤改良措施的应用和环境效应,针对土壤剖面有机碳库的特征和演化的研究较少。学者们多采用的是通过对比淋洗前后的淋出液或土柱填料,分析相应的有机质洗脱行为,是一种比较宏观且相对孤立的分析过程,对于淋洗过程中洗脱有机质特征的动态变化,相关的研究报道还比较少。

2 土柱淋洗实验的设计关键及存在的问题

土柱淋洗实验该怎样应用于土壤有机质的迁移研究,取决于相应的实验目的和正确的实验设计。三个世纪以来,学者们围绕着不同的科学问题设计出了各式各样土柱,文献中报道的一些小型的柱子直径为1 cm、高1.4 cm^[57],大型的土柱直径可达2 m、高5 m^[58]。土柱的设计有时直接影响实验结果的好坏,下面将结合前人研究中的经验,回顾一些土柱淋洗实验的设计的同时,提出一些土柱设计过程中应关注的问题。

2.1 土柱淋洗实验柱体设计

从土柱体的设计上来说,前人的文献报道主要分为两种类型:填充土柱与原状土柱。填充土柱是使用野外采集的扰动土壤重新回填进刚性柱体容器中并且压实后得到的。这一类土柱的充填方式会对土柱中溶质的运移有显著的影响^[59]。前人的研究中,最常见的填充方法是干式或湿式填充^[60-63],即直接使用过筛的土壤,干燥状态下或润湿后填充进土柱并压实。其它的充填方法包括泥浆充填^[64]、多次湿润-干燥循环充填^[65]等,这些填充方式的主要目的是尽可能地压实土柱减少土柱中的孔隙,排除柱中空气。填充土柱的优点是大孔隙较少,且柱体更为均匀。填充土柱的问题在于,由于是二次填充得到,与自然界中真实的土柱有所

差异,因此利用方式有一定的局限性。

原状土柱是通过一定的方法,从野外土层中直接采集土柱体得到的。采集原状土柱的方法大致分为两类:第一种是使用一些中空的刚性柱体壳,例如钢瓶^[66-67]、有机玻璃柱^[68]或者PVC管^[69-71]等在压力或者旋转下打入土壤中再取出得到。另一种原状土柱的采样方法是在采样区土层中挖掘出土柱,然后使用钢板或塑料板等将土柱包裹起来得到土柱^[72-73]。这种土柱内部的土壤结构并没有被破坏,更接近采样区自然条件下的土壤状况。原状土柱的主要问题是柱体内部空隙的存在,有可能导致优先流的出现,同时在采样的过程中有可能会发生物理碰撞,从而造成土柱的破裂和侧壁流的出现^[74-75]。

前人对于填充土柱与原状土柱的利用,大多是模拟自然界土层包气带-饱和带的水土状况,并且据此可按土柱的含水状况将土柱分为饱和、非饱和和土柱。对于饱和土柱来说,关键问题是如何使土柱充分饱和,因为土柱中的气泡可以影响溶质在土柱中的通过,从而影响实验结果。对于非饱和土柱来说,如何避免土柱中出现土壤优先水流是设计非饱和土柱的关键问题。土壤优先水流是指由土柱中大孔隙传导的非平衡的管道流^[76],能导致土壤水流的快速流失,而不能与土壤充分作用,从而影响实验结果^[77-78]。

2.2 土柱淋洗实验中柱体材料的选择

土柱柱体材料的选择包括PVC、不锈钢、有机玻璃和混凝土等^[15, 68, 70-71, 79]。对于柱体材料的选择,首先应考虑的问题是材料结构的壁厚、长宽等强度因素,以及材料的成本、安装便捷性以及透明度。不锈钢材料可以被设计成不同的规格尺寸,可以满足一些特定的实验要求,且价格相对低廉、强度也较高,因此对于设计较大型的土柱,不锈钢或者混凝土材料比较适合。聚乙烯、聚四氟乙烯等塑料材料具有方便、经济的优点,但它们的硬度较钢材相对柔软,因此在考虑使用这些材料作土柱时应注意壁厚的选择,且这类型材料不适合用于大型的土柱。另外,柱体材料是否会影响实验溶质和造成实验误差,是一个重要的问题。

对于有机物来说,由于其复杂的物理化学性质,部分塑料、粘合剂和橡胶会对其有吸附作用^[80],并且陶瓷材料也对有机质存在吸附作用^[81],因此在

进行有机质类的研究时,土柱的材料应尽量避免选择塑料、橡胶和陶瓷材料。对于土壤中的营养盐来说,金属氢氧化物对磷酸盐有吸附性^[82],而有机玻璃和聚四氟乙烯等不会吸附磷酸盐^[80],因此对于磷酸盐的研究,柱体材料最好选择有机玻璃或聚四氟乙烯。重金属对金属氢氧化物存在吸附,同时材料含有与研究溶质相同的金属元素时,也会影响实验的结果,因此陶瓷、不锈钢等材料不适合用于重金属的研究,应尽量选择聚乙烯或聚四氟乙烯。

2.3 土柱淋洗实验流动方式的选择

在土柱淋洗实验中针对不同的实验目的,研究者们往往会选择不同的淋洗液的流动方式。比较常见的淋洗方式为自然重力流淋洗和泵动力下的模拟流淋洗。自然重力流淋洗是指在实验设计好土柱之后将淋洗液按一定量连续施加或悬滴到土柱上方,让土壤淋洗液在重力作用下缓缓沿土柱向下浸溶的淋洗方式,这种淋洗方式常见于土壤盐分的浸出^[79]、重金属和有机污染物的吸附解析^[57]或淋洗液对土壤性质的影响^[33]研究中。由于其更接近自然状态雨水对土壤的淋溶,在实验模拟的真实性上有所优势,但值得注意的是淋洗液在施加到土壤表面之后的蒸散作用和淋洗液向下浸溶过程中的优先流问题往往是影响实验结果的关键。对于淋洗液的蒸散作用,可采取密闭土柱的方式进行淋洗实验。

另一种常见的流动方式是泵动力下的模拟流,是指在构建好实验用的土柱之后,使用蠕动泵按一定的速率向土柱输送淋洗液的淋洗方式,这种淋洗方式常见于土壤水文性质^[83]、土壤有机质的浸出^[40]和有机污染物、肥料等的溶解迁移转化^[16]研究中。由于利用蠕动泵的关系,根据实验目的的不同可以设计竖直向下、向上或是水平的淋洗流动方向。这种淋洗方式优势在于实验过程中的淋洗速率可以保持稳定,同时淋洗液的性质也几乎不会发生变化,但土柱优先流以及土体中的空气还是有可能影响实验过程中淋洗液与土壤的充分作用,进而影响实验结果。

2.4 土柱淋洗实验中数据分析装置

根据不同的实验目的,实验数据的获取与监测装置也有所差异。有时为研究土柱自上而下各层级土壤与溶质相互作用关系,人们会选择侵入式检测仪器^[84],最常见的做法是在土柱柱体侧壁设置几

个一定间距的孔,并将检测器放入土壤。其中检测器包括氧化还原探针^[85]、氧传感器^[86]和压力传感器等,研究者可以在淋洗实验中获得土壤柱体垂直方向不同深度的氧化还原电位、氧通量、土柱各层级分压、土壤水流量等数据。但侵入式检测器的安装通常比较费时费力,甚至有时安装过程中会有大孔隙产生等的风险。此外,在非饱和土柱的研究中,侵入式检测器有时需要借助外部压力,才能检测土柱中孔隙水的实验参数,有可能会向柱中引入空气进而影响实验结果。

更多情况下,人们是根据实验目的设置好特殊的土柱后,研究其土柱淋滤液中有机质的性质、土柱中的优先流或是实验后土柱各层剖面界面特征^[18, 87-89]。对于这类分析,侵入式装置不适用,常用的分析手段包括X射线技术^[90]和核磁共振成像^[91]等。例如Mawodza等^[92]为研究植物根系和土壤水分的分布所使用的中子计算机断层扫描技术(NCT),就是一种非侵入式的高分辨率的分析手段;Di等^[93]为分析逐级提取的胡敏酸样品的光谱学特征,使用了傅里叶变换红外光谱(FTIR)和紫外可见光谱(UV-Vis)对其进行表征。随着现代分析技术的不断发展,土柱淋洗实验可结合的分析检测手段也渐渐多样。

3 土柱淋洗实验在土壤有机碳迁移演化研究中的应用展望

切合实验目的是正确运用土柱淋洗实验的基础,对于土壤有机质的迁移演化研究来说,土柱淋洗实验是研究土壤中有机质稳定续存的有力手段之一。前人的研究发现,影响土壤有机碳库稳定性的因素主要是两个方面:人为活动和自然因素的影响^[94]。人为活动影响主要在于人们对土地利用方式和土地的管理措施。过度的土地开垦和放牧一方面会导致表层土壤中团聚体的结构被破坏,使许多土壤有机质暴露出来而被分解,降低土壤中的有机碳含量。另一方面会使土壤中的碳素更多的被作物和牲畜吸收,土壤中的有机碳含量也会因此下降。自然因素主要在于降雨、气候和植被覆盖类型。植被类型关系到土壤有机碳的输入,枯枝落叶和土壤中的残根都是良好的有机碳来源。而降雨和气温会影响有机质的迁移和转化,有研究表明陆地土壤中的有机碳密度一般随降雨量的增加而增

加^[95]。这些因素对土壤有机质迁移演化过程的影响,都可以通过土柱淋洗实验来进行模拟,并结合不同的分析表征手段,获得相应的实验数据。研究者们可以根据自身的研究需要设计不同类型的土柱,并结合一些前人研究中的设计经验,来提高实验结果的真实性。

正确的土柱淋洗实验设计能最大程度保证实验结果的真实有效,对于实验设计过程中的关键问题,应尽可能的采取灵活的方法降低实验误差。在土柱柱体的构建上,原状土柱采自原生土壤剖面,所以更适合实际工程类的研究;填充土柱则更适合对土壤性质的研究中使用。针对原状土柱中的侧壁流问题,处理方法主要包括在柱体内表面安装垫圈、使侧壁粗糙^[96]和使用特定的橡胶膜将土柱包裹^[97]等,目的是增加流体与土壤的接触,限制优先流。并且原状土柱的采样过程中应尽量避免柱体的物理碰撞,以免土柱破坏产生孔隙。为尽可能的减少填充土柱中的大孔隙问题,建议采用干-湿交替压实的填充方式,以少量(视柱体大小而定)、多次的过程进行填充,同时每进行下一层的土壤填充时破坏上一层的压实面,以保证各填充层之间的水力连接和减少土柱内大孔隙的数量。土柱的饱和方式应考虑到实验目的的需要,饱和土柱更适用于模拟水土界面中饱和带的有机质迁移转化情况,而非饱和土柱则适合用于模拟包气带的水土作用。针对土柱饱和的问题,建议采用柱体由下至上的方式进行饱和后,静置一段时间在进行后续实验。这样可以借助重力作用排除土柱中的空气,使柱体尽可能饱和。实验土柱柱体材料的选择问题上,应尽量避免使用陶瓷、塑料以及橡胶材质,因为这些材料会对有机质产生吸附进而影响实验结果。至于

土柱淋洗方式、淋洗过程中有机质的监测手段,还需结合具体的实验目的来进行选择。

在有机质淋洗实验的数据处理方面,近年来随着计算机科技的发展,数值分析、数学模型等也被运用于土柱淋洗实验的数据分析中^[98]。例如温焕君就通过设计室内土柱出流实验,利用 Hydrus-1D 软件对溶质运移状况和水分入渗的时空变化进行模拟,得到了相关的模型参数^[99]。高海鹰等^[100]通过 LEACHM 模型,模拟了土壤中的铵态氮与硝态氮在土柱实验中的浓度变化过程。Elovich 动力学模型以及双常数方程在土壤化学动力学研究中的应用也比较广泛,可用于描述土壤中磷素的吸附解吸过程^[101]。在土壤有机质迁移演化研究中,数值模拟手段可以在统计学方法上弥补一些实验方面的不足,获得更全面的实验数据,从动态过程去评价土壤有机质的迁移过程。此外,通过结合多种的分析手段,如荧光光谱、紫外光谱、核磁共振、断层射线扫描技术等,可获取的数据也有多种,比如氧化还原电位、碳通量、淋出液中有有机质的光谱数据等,因而有多种的数据处理方法来表征淋洗过程中的有机质的变化。土柱淋洗实验设计上的灵活性,使得其可以从多个角度去描述有机质在洗脱过程中的特征变化,从实际意义上反应在水流侵蚀下土壤的养分的流失和结构的破坏,指示土壤的退化过程。

由于实验土柱的可控可调,并且可以结合多种的检测手段,土柱淋洗实验可以成为许多不同研究的有力手段。对于土壤有机碳的迁移转化研究,土柱淋洗实验具有很大的潜力,学者们可以利用它简化对实验变量的控制。在未来土壤有机质的来源和转化研究中,土柱淋洗实验也可以提供较好的实验数据。

参 考 文 献

- [1] 汪业勤,赵士洞,牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志,1999(5): 29-35.
- [2] 宋春雨,张兴义,刘晓冰,等. 土壤有机质对土壤肥力与作物生产力的影响[J]. 农业系统科学与综合研究,2008,24(3): 357-362.
- [3] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(1): 2-3.
- [4] 张旭辉,李恋卿,潘根兴. 不同轮作制度对淮北白浆土团聚体及其有机碳的积累与分布的影响[J]. 生态学杂志,2001,20(2): 16-19.
- [5] Lal R. World soils and the greenhouse effect[J]. Global Change Newsletter, 1999, 37(1): 4-5.
- [6] Watson R T, Noble I R, Bolin B, et al. Land use, land-use change, and forestry: A special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2000: 105-123.
- [7] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [8] 李正才. 土地利用变化对土壤有机碳的影响[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006.
- [9] 杨慧,梁影,徐觉明,等. 岩溶区钙与土壤有机碳关系的研究进展[J]. 广西科学,2018,25(5): 505-514.

- [10] 周虎,彭新华,张中彬,等. 基于同步辐射微 CT 研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报,2011,12(1): 343-347.
- [11] De la Hire P. Sur l'origine des rivières[M]. L'Academie Royale des Sciences, Paris, 1703: 18-26.
- [12] Butler A P, Chen J, Agüero A, et al. Performance assessment studies of models for water flow and radionuclide transport in vegetated soils using lysimeter data[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 1998, 42(2): 271-288.
- [13] Dalton J. Experiments and observations to determine whether the quantity of rain and dew is equal to the quantity of water carried off by the rivers and raised by evaporation[J]. Manchester Literary and Philosophical Society, 1802, 5(1): 360-372.
- [14] Klein M, Martin M, Dust M, et al. Validation of the pesticide leaching model PELMO using lysimeter studies performed for registration[J]. Chemosphere, 1997, 35(11): 2563-2587.
- [15] De Jonge H, De Jonge L W, Blicher B W, et al. Transport of Di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) applied with sewage sludge to undisturbed and repacked soil columns[J]. Journal of Environment Quality, 2002, 31(6): 1963-1971.
- [16] Dontsova K M, Yost S L, Simunek J, et al. Dissolution and transport of TNT, RDX, and composition B in saturated soil columns[J]. Journal of Environment Quality, 2006, 35(6): 20-43.
- [17] 孙涛,陆扣萍,王海龙. 不同淋洗剂和淋洗条件下重金属污染土壤淋洗修复研究进展[J]. 浙江农林大学学报,2015,32(1): 140-149.
- [18] 魏建辉,管仪庆,夏冬梅,等. 模拟农药莠去津在原状土柱中的运移研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(8): 4118-4120.
- [19] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(1): 109-120.
- [20] Sahoo D C, Madhu M, Khola O P S. Estimation of evapotranspiration and crop co-efficient of carrot (*Daucus carota*) for water management using weighing lysimeter[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2011, 79(12): 968-971.
- [21] Kohnke H, Dreibelbis F R, Davidson J M. A survey and discussion of lysimeters and a bibliography on their construction and performance[M]. Miscellaneous Publication, United States Department of Agriculture, 1940: 5-19.
- [22] De la Hire P. Remarques sur l'eau de la pluie, sur l'origin des fontaines; avec quelques particularites sur la construction des citernes[J]. Memoires De Mathematique Et De Physique, 1720, 26(2): 56-59.
- [23] Lawes J B, Gilbert J H, Warrington R. On the amount and composition of the rain and drainage water collected at Rothamsted. Clowes, London [J]. Journal of the Royal Agricultural Society, Second Series, 1882, 19(4): 50-71.
- [24] Schreiner O, Failyer G H. The absorption of phosphates by soils[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1905, 10(4): 239-263.
- [25] Burgess P S. The soil solution, extracted by lipman's direct-pressure method, compared with 1:5 water extracts[J]. Soil Science, 1922, 14(3): 191-216.
- [26] Parker W F. Method of studying the concentration and composition of the soil solution[J]. Soil Science, 1921, 12(3): 209-232.
- [27] Kirkham D, Feng C L. Some tests of the diffusion theory, and laws of capillary flow, in soils[J]. Soil Science, 1949, 67(1): 29-40.
- [28] Fireman M. Permeability measurements on disturbed soil samples[J]. Soil Science, 1944, 58(5): 337-354.
- [29] Chrestiansen J E. Effect of entrapped air upon the permeability of soils[J]. Soil Science, 1944, 58(5): 355-366.
- [30] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F, et al. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models[J]. Journal of Geophysical Research, 1994, 99(7): 14415-14428.
- [31] 王焱,姬兰柱,李秋荣,等. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响[J]. 应用生态学报,2003,14(8): 1234-1238.
- [32] 于童,徐绍辉,林青. 不同初始氧化还原条件下土壤中重金属的运移研究 I. 单一 Cd、Cu、Zn 的土柱实验[J]. 土壤学报,2012,49(4): 688-697.
- [33] Haberhauer G, Temmel B, Gerzabek M H. Influence of dissolved humic substances on the leaching of MCPA in a soil column experiment[J]. Chemosphere, 2002, 46(4): 495-499.
- [34] 石建初,左强. 不同灌溉处理条件下苗期冬小麦土柱中的硝态氮运移模拟[J]. 灌溉排水学报,2009,28(5): 1-6.
- [35] 石建初,王数,左强. 基于根氮质量密度分布模拟土壤-冬小麦系统中的水分运移[J]. 南京大学学报(自然科学版),2011,47(3): 308-317.
- [36] 朱向明,左强,石建初. 反求根系吸磷速率方法的检验及其在苗期冬小麦土柱实验中的应用[J]. 土壤学报,2010,47(5): 913-922.
- [37] Wang F L, Alva A K. Transport of soluble organic and inorganic carbon in sandy soils under nitrogen fertilization[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1999, 79(2): 303-310.
- [38] Asuman B Y, Ángel F C, Mermut A, et al. Organic carbon fluxes using column leaching experiments in soil treated with pig slurry in SE Spain [J]. Arid Land Research and Management, 2019(1): 13-16.
- [39] Artiola J F, Walworth J L. Irrigation water quality effects on soil carbon fractionation and organic carbon dissolution and leaching in a semiarid calcareous soil[J]. Soil Science, 2009, 174(7): 365-371.
- [40] 崔凯,李宝元,李兴斯. 非饱和土中镉离子迁移规律的实验研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑),2003(6): 725-731.

- [41] Nkedikizza P, Brusseau M L, Rao P S C, et al. Nonequilibrium sorption during displacement of hydrophobic organic chemicals and calcium-45 through soil columns with aqueous and mixed solvents[J]. *Environmental Science & Technology*, 1989, 23(7): 814-820.
- [42] Han Y S, Tokunaga T K. Calculating carbon mass balance from unsaturated soil columns treated with CaSO₄-minerals: Test of soil carbon sequestration[J]. *Chemosphere*, 2014, 117(1): 87-93.
- [43] Wang Y D, Yang C L, Xu G F, et al. Leaching characteristics of soil organic carbon in tea plantations at different planting ages[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, 43(2): 176-181.
- [44] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Contribution of root vs. leaf litter to dissolved organic carbon leaching through soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1555-1563.
- [45] Way J T. On the power of soils to absorb manure[J]. *Journal of the Royal Agricultural Society of England*, 1850, 11(1): 313-379.
- [46] Lawes J B, Gilbert J H. Our climate and our wheat crops[J]. *Journal of the Royal Agricultural Society, Second Series*, 1880, 16(2): 195-210.
- [47] Sturtevant E L. Waushakum farm contributions, lysimeters or differential rain gauges, a new Lysimeter, another lysimeter[J]. *Farmer Science*, 1878, 3(1): 17-18.
- [48] Wollny E. Hydrometeore, beobachtungen über die einsickerung und verdampfung des bodenwassers sollen in das system der agrarmeteorologie einbezogen werden; dabei sind jedoch lysimeter keineswegs in Anwendung Zu Bringen[J]. *Agriculture-Physics*, 1881, 4(1): 292-301.
- [49] Sanborn J W. A new lysimeter[J]. *Journal of the Royal Agricultural Society*, 1889, 10(1): 54-59.
- [50] Welbel B. Zoocheneia sostova lezometricheskikh vod e memeralezatsia pochvenavo azota[J]. *Zhur Opytn Agron*, 1903(4): 285-307.
- [51] Leather J W. Drainage[J]. *Agriculture Resist*, 1907(9): 40-41.
- [52] Seelhorst C V. Mitteil lungenvom landwirtschaft lichen versuchs feldesder universität göttingen[J]. *Journal of the Landwirtschaft*, 1906, 54(1): 316-342.
- [53] Waver J E, Crist J W. Direct measurement of water loss from vegetation without disturbing the normal structure of the soil[J]. *Ecology*, 1923, 5(1): 153-170.
- [54] Joffe J S. A new type of lysimeter at the New Jersey agricultural experiment station[J]. *Science*, 1929, 70(1806): 147-148.
- [55] Musgrave G W, Neal O R. Rainfall and relative losses in various forms[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1937, 18(2): 349-355.
- [56] Garstka W U. Design of the automatic recording in-place lysimeters near Coshocton, Ohio[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1938, 2(C): 555-559.
- [57] Voegelin A, Barmettler K, Kretschmar R. Heavy metal release from contaminated soils: Comparison of column leaching and batch extraction results[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32(3): 865-875.
- [58] Mali N, Urbanc J, Leis A. Tracing of water movement through the unsaturated zone of a coarse gravel aquifer by means of dye and deuterated water[J]. *Environmental Geology*, 2007, 51(8): 1401-1412.
- [59] Bromly M, Hinz C, Aylmore L A G. Relation of dispersivity to properties of homogeneous saturated repacked soil columns[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 293-301.
- [60] Hrapovic L, Sleep B E, Major D J, et al. Laboratory study of treatment of trichloroethene by chemical oxidation followed by bioremediation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(8): 2888-2897.
- [61] Yongkoo S, Lee L S. Coupled effects of treated effluent irrigation and wetting - drying cycles on transport of triazines through unsaturated soil columns[J]. *Journal of Environment Quality*, 2001, 30(5): 1644-1652.
- [62] 李丹丹, 郝秀珍, 周东美. 柠檬酸土柱淋洗法去除污染土壤中 Cr 的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(10): 1999-2004.
- [63] 可欣, 张昀, 李培军, 等. 利用酒石酸土柱淋洗法修复重金属污染土壤[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2009, 26(3): 240-245.
- [64] Sentenac P, Lynch R J, Bolton M D. Measurement of a side-wall boundary effect in soil columns using fibre-optics sensing[J]. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2001, 1(4): 35-41.
- [65] Corwin D L. Evaluation of a simple lysimeter-design modification to minimize sidewall flow[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2000, 42(1): 35-49.
- [66] Moyer J W, Saporito L S, Janke R R. Design, construction, and installation of an intact soil core lysimeter[J]. *Agronomy journal*, 1996, 88(2): 253-256.
- [67] 智永明, 韩继伟, 邓超, 等. 基于原状土柱土壤水分传感器率定方法的研究[J]. *水文*, 2016, 36(4): 48-52.
- [68] 张步迪, 林青, 徐绍辉. 磺胺嘧啶在原状土柱中的运移特征及模拟[J]. *土壤学报*, 2018, 55(4): 879-888.
- [69] Bégin L, Fortin J, Caron J. Evaluation of the fluoride retardation factor in unsaturated and undisturbed soil columns[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(6): 1635-1646.
- [70] 赵长盛, 胡承孝, 黄魏, 等. 利用原状土柱研究华中地区菜地土壤氮素的矿化规律[J]. *土壤通报*, 2012, 43(4): 883-889.
- [71] 张静, 王德建, 王灿. 用原状土柱研究太湖地区稻麦轮作农田养分淋溶量[J]. *土壤*, 2008, 40(4): 591-595.

- [72] 张莲香, 张会芹, 孟繁琪, 等. 提高原状土质量的措施[J]. 地下水, 2013, 35(2): 87-88.
- [73] 李英年. 祁连山冷龙岭南麓垂直带植被移地试验中鹅绒委陵菜克隆生长特征[J]. 西北植物学报, 2009, 29(10): 2070-2075.
- [74] Takamatsu T, Koshikawa M, Watanabe M, et al. Design of a meso scale indoor lysimeter for undisturbed soil to investigate the behaviour of solutes in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 329-334.
- [75] 马建华, Econo K. 原状土柱取样的玻璃纤维包装法[J]. 农业新技术新方法译丛, 1994, 36(3): 33-34.
- [76] White R. Transport of chloride and non-diffusible solutes through soil[J]. *Irrigation Science*, 1985, 6(1): 3-10.
- [77] Isensee A, Helling C, Gish T, et al. Groundwater residues of atrazine, alachlor, and cyanazine under no-tillage practices[J]. *Chemosphere*, 1988, 17(1): 165-174.
- [78] 倪余文, 区自清. 土壤优先水流及污染物优先迁移的研究进展[J]. 土壤与环境, 2000, 9(1): 60-63.
- [79] Aronsson P G, Bergström L F. Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 21(3): 155-164.
- [80] Weiermüller L, Siemens J, Deurer M, et al. In situ soil water extraction: A review[J]. *Journal of Environment Quality*, 2007, 36(6): 1735-1748.
- [81] 赵雷. 超声强化臭氧/蜂窝陶瓷催化氧化去除水中有机物的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [82] 谢发之, 汪雪春, 杨佩佩, 等. 纯相钙铝层状双氢氧化物对磷的吸附特性[J]. 应用化学, 2016, 33(4): 473-480.
- [83] Baskaran S, Bolan N S, Rahman A, et al. Effect of exogenous carbon on the sorption and movement of atrazine and 2,4-D by soils[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1996, 34(4): 609-622.
- [84] Zhao M, Chen X, Shi Y, et al. Phosphorus vertical migration in aquatic brown soil and light chernozem under different phosphorous application rate: A soil column leaching experiment[J]. *Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology*, 2009, 82(1): 85-89.
- [85] Nay M, Snozzi M, Zehnder A J B. Behavior of chemical contaminants under controlled Redox conditions in an artificial sequential soil column system and in batch cultures[J]. *Biodegradation*, 1999, 10(6): 405-414.
- [86] Ouangrawa M, Molson J, Aubertin M, et al. Reactive transport modelling of mine tailings columns with capillarity-induced high water saturation for preventing sulfide oxidation[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(7): 1312-1323.
- [87] Twardowski M S, Boss E, Sullivan J M, et al. Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 89(4): 69-88.
- [88] 石健, 张彦, 邹开云, 等. 氯萘菊酯在土柱淋滤实验中的迁移行为[J]. 安徽农学通报, 2013(19): 24-26.
- [89] Zand A D, Grathwohl P, Nabibidhendi G, et al. Determination of leaching behaviour of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil by column leaching test[J]. *Waste Management & Research*, 2010, 28(10): 913-920.
- [90] 陆安祥, 王纪华, 潘立刚, 等. 便携式 X 射线荧光光谱测定土壤中 Cr, Cu, Zn, Pb 和 As 的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(10): 2848-2852.
- [91] 窦森. 核磁共振波谱在土壤有机质研究中的应用[J]. 土壤通报, 1988(5): 237-239.
- [92] Mawodza T, Burca G, Casson S, et al. Wheat root system architecture and soil moisture distribution in an aggregated soil using neutron computed tomography[J]. *Geoderma*, 2020, 359(1): 7-10.
- [93] Di X Y, Xiao B H, Dong H, et al. Implication of different humic acid fractions in soils under karst rocky desertification[J]. *Catena*, 2019, 174(1): 308-315.
- [94] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
- [95] Trunbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchanges between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature[J]. *Science*, 1996, 272(19): 393-396.
- [96] Smajstrla A G. A field lysimeter system for crop water use and water stress studies in humid regions[J]. *Proceedings*, 1985, 44(1): 53-59.
- [97] Charbeneau R, Sherif S. Groundwater hydraulics and pollutant transport[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2002, 55(2): 38-39.
- [98] 尚熲廷, 冯杰, 丁荣浩, 等. 土壤大孔隙饱和和导水率的数值模拟及实验研究[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 15-19.
- [99] 温焕君. 重金属 Cd 在层状土壤中的运移特征及数值模拟[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [100] 高海鹰, 黄丽江, 张奇, 等. 不同降雨强度对农田土壤氮素淋失的影响及 LEACHM 模型验证[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1346-1352.
- [101] 张增强, 孟昭福, 张一平. 对 Elovich 方程的再认识[J]. 土壤通报, 2000(5): 17-18

Research Progress of Soil Column Leaching Experiment and Its Application Prospect in Soil Organic Carbon Migration

XIAO Peiwen^{1 2}, XIAO Baohua^{1 2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil carbon pool is an important source and sink in the carbon cycle of terrestrial ecosystem, and its small change will cause huge feedback to atmospheric CO₂ content. About 1 500 Gt of organic carbon is stored in soil all over the world. The migration and transformation of soil organic carbon has been a hot topic for scholars. Soil column leaching experiment is widely used in agriculture, forestry, environmental science and other research fields, and has made a lot of achievements in solute transport simulation, soil hydrological properties, heavy metals and pollutant migration and transformation. The design details of the soil column leaching experiment are directly related to the authenticity of the experimental results. This paper summarized the present situation of soil column leaching experiment at home and abroad, discussed some common problems in the soil column leaching experiment design. Finally, the prospect of the application of soil column leaching experiment in the study of soil organic matter migration and transformation is put forward based on the review of previous researches.

Key words: soil organic carbon; soil column; soil column experiment; experimental design; review