

土壤剖面营养元素运移的模拟研究及其装置*

余存祖¹, 张建丰²

(¹中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100; ²西安理工大学, 西安 710048)

摘 要: 简要论述了土壤营养元素运移、循环研究的概况与主要研究内容, 介绍了土壤剖面养分运移模拟试验装置的构造功能与使用方法, 并对这一研究的发展趋势作了分析。

关键词: 土壤剖面; 养分运移; 模拟装置

中图分类号: S158.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2000)04-0111-06

Study on Nutrient Transportation in Soil Profile by Simulated Equipment and Its Prospect

YU Cun-zu¹, ZHANG Jian-feng²

(¹ Institute of Soil and Water Conservation CAS/MWR, Yangling Shaanxi 712100;

² Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048, PRC)

Abstract: The general study situation about soil nutrient transportation and circulation and the main content were discussed. The simulated equipment's structure, function and operation to study soil nutrient transportation in soil profile was introduced, and the study prospect was also analyzed.

Key words: soil profile; nutrient transportation; simulated equipment

本世纪50年代以前, 自然界的元素运移和循环研究是以其地球化学过程为对象的。60年代后, 由于各种工业和农用化学品的大量使用, 造成环境要素中氮磷的富营养化, 有机物及重金属元素全球性的污染。于是, 在国际科联的倡导下, 开展了碳、氮、硫、磷和重金属元素生物地球化学循环的研究。土壤是人类赖以生存的自然资源和生栖基地, 也是自然生态系统中生物与环境间进行物质和能量交换的枢纽。当前, 在全球对粮食的需求不断增加, 人类生存环境日趋严峻的形势下, 加强对土壤中元素运移和循环的研究, 尤其是营养元素和具两重性的元素(适量时为生命元素, 过量则为污染元素)运移和循环的研究, 无疑是十分必要的。

1 土壤营养元素运移循环研究的概况

针对一个特定的生态环境如农田、森林、高山、

草原等进行土壤养分的生物地球化学循环的研究, 探索土壤养分的流向、分配、积累、转移、归还、输入输出的全过程及平衡状况, 建立生态系统的特定模型, 是本研究领域的基本课题。对干旱、水土流失、沙漠化等灾害性环境下土壤养分循环过程的研究亦可作为一个分支归属本领域。作为全球性关注的问题, 有关各国对上述课题进行了卓有成效的研究^[1~6]。

另一方面, 人们对土壤中养分的化学和生物化学行为, 特别对土壤有机质(C)和N、P、K、S等在土壤中的转化, 包括矿化和有机化、植物吸收、气态损失和水分淋失等过程进行了深入的研究。有人从微观角度研究植物的根际营养, 包括对养分的吸收过程和微生物转化过程, 硝化与反硝化及生物固氮机理, 并认为这是土壤养分循环最重要的内容。近年来, 依靠生物自身优势, 使种质适应土壤逆境条件, 提高土壤养分的生物学活性, 促进养分良性循环的

* 收稿日期: 2000-10-08

本文获中国科学院、水利部黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室新设备研制基金资助和中科院重点项目资助(批准号Z102)。

研究,已引起人们的广泛关注^[5]。利用这一过程将大大提高土壤养分的利用率与土壤肥力的持续发展水

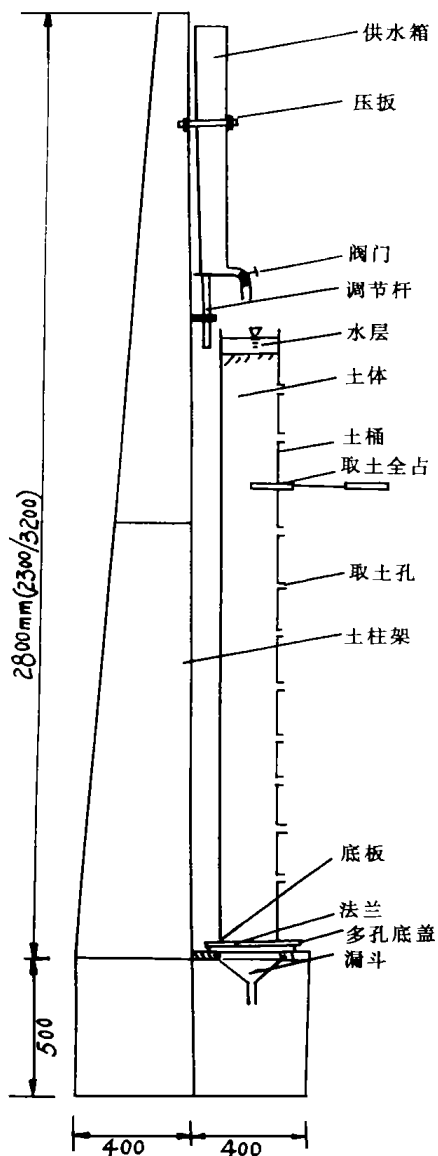


图1 总体结构图

平,节省农业成本,成为养分循环研究的一个创新点。新技术的应用是养分循环研究的又一特色。有人通过同位素如 ^{14}C 、 ^{13}C 、 ^{15}N 、 ^{35}S 、 ^{31}P 和色谱技术,证实了不同有机组分具有不同的降解性和周期性,查明了有机和无机氮肥进入土壤圈的命运,并对根的脱落物和分泌物的影响以及S、P等养分的矿化、有机化过程进行了研究^[6]。不少人运用数学和计算机方法,对农田、森林、草原系统中C和N的循环进行模拟^[7]。Jekinson根据洛桑试验站的长期试验结果和 ^{14}C 获得的资料,建立了该站土壤有机碳含量的变化模型,Megill等也建立了草地土壤中C、N的动态模型。

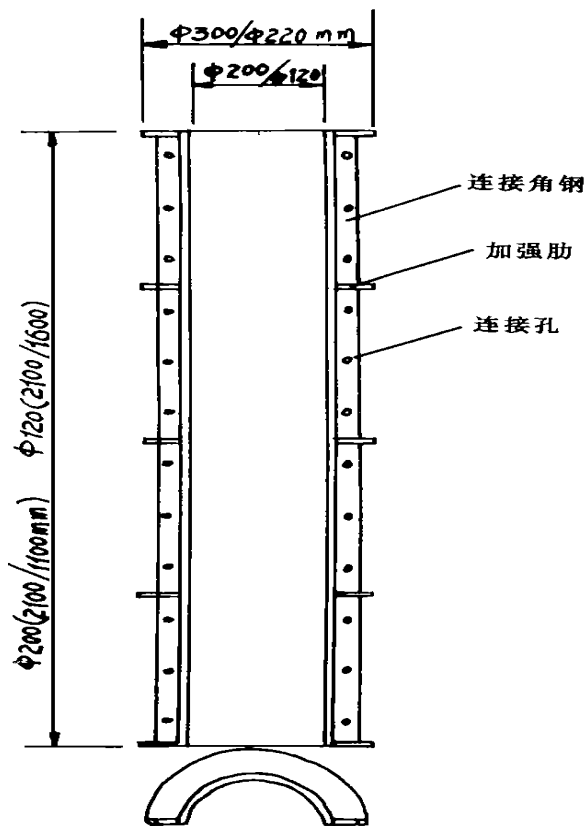


图2 开合式垂直土柱结构图

近20年来,由于环境污染加剧和植物微量养分缺乏症的显现,土壤圈中微量元素的循环过程备受关注。 Zn 、 Mn 、 Cu 、 Fe 、 B 、 Mo 、 Se 、 I 等微量营养元素及 Cd 、 Cr 、 Pb 、 Hg 、 As 、 F 等污染元素在土壤中的含量分布、迁移转化、积累残留与生态环境效应的研究取得很大进展^[2,3,6]。许多人从动力学角度研究元素的形态转化、土壤溶液中金属离子的平衡,它们在固相、液相、根系表面的吸附转化以及金属离子的土壤有机质反应等。还有人通过计算机模拟对土壤溶液中金属离子的形态转化进行预测等等^[5,6]。

以上成果给元素的生物地球化学循环研究增添了新的动力和新的内容。在应用方面,也为制订纠正植物微量养分缺乏症和防治环境污染的措施提供了更为科学的依据。

2 土壤剖面中养分运移试验研究的一些具体内容

土壤剖面中养分运移是土壤养分循环研究的一个重要组成部分,目的在于摸清养分在土壤剖面中运移的方向、形态与状态、速率、数量与能级,与其它元素及介质的关系,它的化学与生物化学机制以及所产生的生态环境效应。以便掌握养分运移对土壤

肥力、植物营养、环境质量的影响程度,进而采取调控措施。这方面研究已引起土壤、植物、地理、生态、水利、环境等科学工作者的关注,取得了显著进展。主要研究内容有以下几个方面:

2 1 土壤(肥料)氮淋溶损失研究

土壤剖面中氮素淋溶运移试验有助于查明土壤氮和肥料氮的去向,和以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为主的氮素淋溶损失。这方面试验几乎在全国各主要农业区开展,主要用土柱法、盆钵法或水泥渗滤池在田间实施^[8,9]。南京土壤所在太湖地区试验证明:氮肥施入土壤中,有 40% ~ 50% 被作物利用,20% ~ 40% 残留土壤中,10% ~ 30% 为气态损失,淋溶损失在 10% ~ 15%。国外也有许多例证。M claren 在土柱淋溶试验中,求出不同时间 t 时各种形态氮素的剖面分布。如不考虑土壤对离子的吸附作用,以溶液的下移速率

$f = \epsilon k_0$ (k_0 为溶液加入土柱表面的速率; ϵ 为膨胀系数,它反映溶液在土柱内的流动速率因通路变窄而比土面加入速率增大的程度),则溶液到达柱内深度 x , 所需时间 $t = \frac{x}{\epsilon k_0}$, 微分得 $dt = \frac{1}{\epsilon k_0} dx$, 将此式代入氮素形态转化数学模拟式(式略),即可得到深度与某一形态氮素浓度之间的关系式^[10]。

2 2 土壤—植物系统污染生态研究

土壤—植物系统的污染,根据污染物质的不同可分为多种类型,如重金属、农药、有机废弃物、化肥、污泥矿渣、放射性物质、寄生虫病原菌污染等。国内外在上述各方面都开展了大量的研究工作。其中尤以重金属、化肥和农药,对它们在系统中的吸收分布、转化、迁移、归宿和效应研究较多,取得了较大进展。

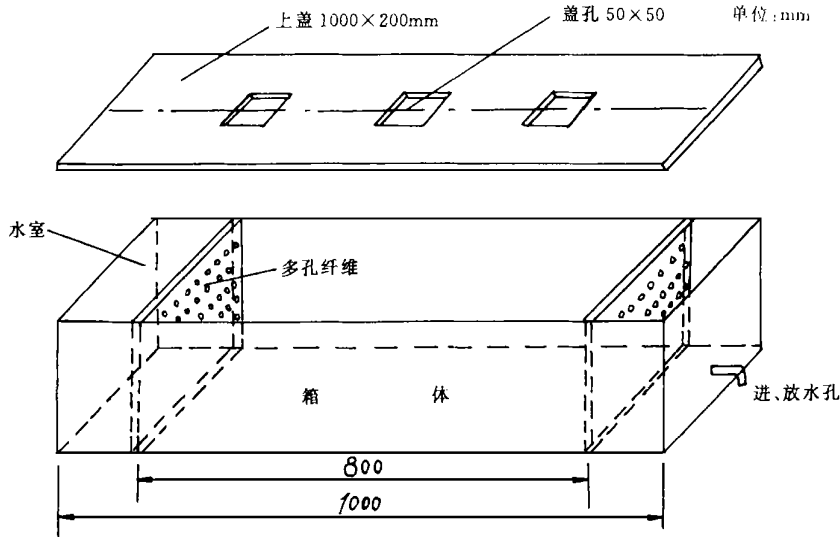


图 3 水平土柱结构图

沈阳应用生态所在沈阳工业污水灌区、北京燕山石化区、天津工业污水灌区、官厅水库区、水体富营养化区等地系统地开展了污染生态的研究,采用野外考察采样,布点试验,设置大型水泥渗滤池、土柱等方法,模拟污水灌溉、化肥施用,观测其对土壤、植物、水体与地下水污染的程度^[11,12]。北京大学地理系等对北京西郊地下水氮污染所作的调查试验^[13],陕西水文地质大队对西安市地下水氮污染的观测试验^[14],所用方法大体与上面相同。有的研究已较深入。简放陵对以淀粉制取柠檬酸后排出的废水灌溉渗滤池内土体,发现土体内的有机 C 和全 N 的动态变化符合一级动力学方程,土壤有机 C 模拟方程为: $dc/dt = 7.256 \times 10^{-3} c$, $r = -0.969^{**}$, 式中 c 为土壤有机 C 含量, t 为时间。土壤全 N 的模拟方程为

$dn/dt = -4.7135 \times 10^{-5} n$, $r = -0.869^{*}$, 式中 n 为土壤全 N 含量, t 为时间。上两式表明,加入废水后,土壤有机 C (全 N) 的变化率 dc/dt (dn/dt) 与其含量的一次方成正比^[15]。

2 3 元素迁移的形态特征及其与生物有效性的关系研究

王百群以水分淋灌壤土土体(在塑料土柱内),得出不同形态的氮素迁移性能不同,迁移性与生物有效性有密切的关联,易于迁移形态的氮生物有效性较高^[16]。沙维奇 B. H 等采用了使土体(土柱)中的重金属与碳酸盐、磷酸盐及氢氧化钠形成难溶性沉淀,使其不能进入植物体;或用含有某种配位体的溶液淋洗土体,使配位体与重金属形成易于在土壤中迁移的络合物而排出根层以外,以此减轻重金

属对植物的毒害^[17]。

2.4 元素运移与土壤演化

自 60 年代以来,人们就开始采用排水采集器研究土壤发生及演化机理。巴纳玛洛娃等在列宁格勒地区应用无张力排水采集器收集灰壤及灰化土的土壤溶液,进行灰化过程以及 C、Fe、Al 等在剖面中迁移变化规律的研究^[18]。Singer 等在北美的森林区用排水采集器,收集冷杉林下的土壤溶液,研究土壤中元素的迁移过程及其与土壤演化的关系,并试着建立元素的剖面演化模式,探讨元素在剖面中的移动机理,用数学模型来描述物质在剖面中的移动和植物与土壤间的元素交换规律^[19]。南京土壤所在江西鹰潭试验基地把从华南移来的红壤与砖红壤原状土体,制作大型土柱,强化元素在剖面中的迁移,观测分析元素迁移的特点及其与土壤演化的关系,已取得一批有意义的资料^[5]。

2.5 土壤侵蚀与元素运移

土壤侵蚀加速了土壤圈的物质循环过程,打破了原有的物质循环相对平衡状态。遭受侵蚀的土壤常有贫瘠化、粗粒化甚至岩漠化的倾向,理化性质变劣,肥力退化,土壤剖面中养分的空间分布及淋溶运移特性发生改变。王继增、白红英、陈皓等分别在陕西和山西丘陵区对此作了试验研究,取得了令人注目的结果^[20~23]。

2.6 土壤养分与水分循环的系统分析

土壤养分(肥料)依赖水分而运行,水分还影响养分的形态和生物有效性。水分和养分的合理组合,可取得最大的利用效率。宏观上看,水循环是最基本的生物地球化学循环,它强烈地影响着其它各类物质的循环。对土壤中水分与养分这两大物质的循环规律及其相互关系进行系统分析研究,是一项十分重要和难度较大的工作。早在 1969 年,Bo mann 等就在美国的赫巴德河的一个有林集水区,对该区输入与输出的水分与养分(包括水、泥沙、水溶物质)进行细微的采集测定。通过对各分室元素含量及输入输出量的测定计算,得出整个系统中营养元素循环参数的图件,并提出各分室的养分与水分随时间变化的增减量,这些动态转移均以函数的形式来描述,从而实现了养分与水分循环的模拟^[24]。

关于养分与水分循环的系统分析,中科院南京土壤所赵其国、龚子同等在江苏、江西、湖南、广西、海南岛等地进行了大量的研究工作。他们在江西红壤生态试验站按照系统分析的模式,安装了不同母质上发育土壤的大型原状土柱,通过排水采集器进行物质和能量交换的系统监测,取得参数和建立模

型,从而为预测被控红壤地区养分和水分的循环,规划土壤改良利用,提供了科学的依据^[5,25]。

3 土壤养分运移模拟试验研究的装置与使用

本装置——土壤养分下移扩散装置是中科院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室根据研究工作的特点与需要,提出功能要求,委托西安理工大学水资源研究所研制完成的。该设备是一套可以在恒定供水条件下及在水分再分布的过程中,进行土壤养分下移扩散规律试验研究的装置系统。

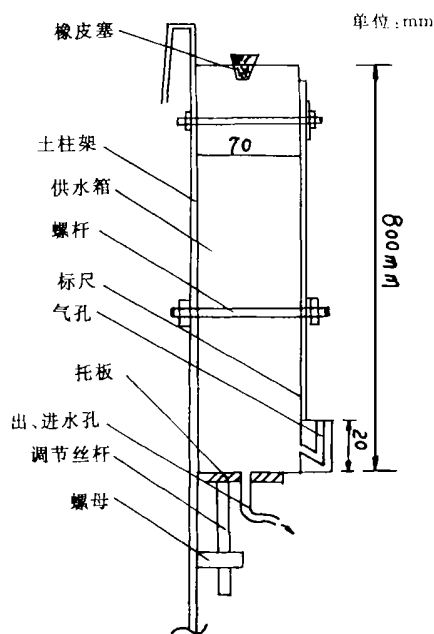


图4 供水箱结构图

3.1 装置系统的结构与功能

试验装置由土柱体、供水系统、土柱架及辅助设备四部分组成,总体结构如图1所示。

3.1.1 土柱体 土柱体分为3种,即完整型垂直土柱、开合式垂直土柱和水平土柱。

(1)完整型垂直土柱主要用于养分在土壤中的下移试验,直径有200mm和120mm两种,高度有2100mm、1600mm和1100mm三种。材料为PVC塑料管,也有一些为有机玻璃管制成。后者透明度好,可以目视管内水分移动及根系分布情况。在土柱周围设4列取土(取水)孔,各列孔位上下错开,全土柱设孔间距为100mm。按一定的时段取样测定,可获得养分水分在垂直方向上的分布状况及其变化过程。不取样时,孔位用橡皮塞塞住。土柱底部配有PVC塑料质或有机玻璃质的多孔底盘,上衬垫

玻璃丝和滤纸, 下接漏斗使土壤阻留在土柱中。

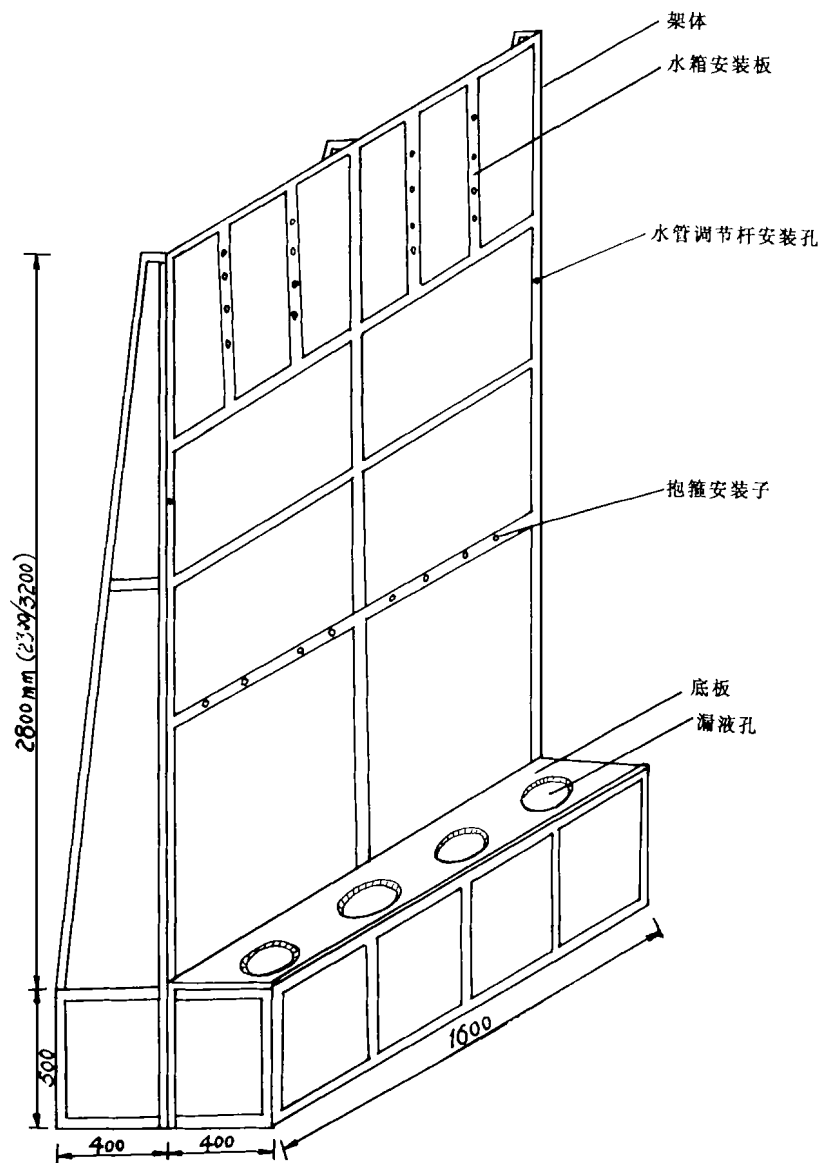


图 5 土柱架结构图

(2) 开合式垂直土柱。该土柱是两个半圆形 PVC 塑料管依靠螺栓连接成一个土柱整体。开合式垂直土柱的主要功能是, 在养分下移试验结束后(或在试验的某一时刻)拧开连接螺栓, 打开土筒, 得到一个完整的土柱标本, 可进行放射性自显影测定, 或分段测定其养分浓度, 以获得养分在土柱高度上的准确分布。该土柱直径有 200 mm 和 120 mm 两种, 高度有 2 100、1 600 和 1 100 mm 三种, 其结构见图 2。

(3) 水平土柱。该土柱主要用来测定土壤养分的扩散规律。其结构为 200 mm × 200 mm × 1 000 mm 的长方体, 用有机玻璃制成。在其两端距端头 100 mm 位置上各设有一个多孔插板, 以利注入水和渗

滤出水。上部盖板上开有 3 个 50 mm × 50 mm 的方孔, 以便作物植株的生长。土筒外有角钢筋加固。结构见图 3。

3.1.2 供水装置系统 该装置主要功能是为试验土柱提供定时定量的供水条件, 保证养分运移试验按设定条件进行。供水系统采用改进的马里奥·特容器装置, 以有机玻璃制成, 其截面积为 50 cm², 容量为 4 000 ml, 标尺读数精度为 0.5 mm, 最小刻度为 1 mm。供水马氏瓶以每两个做在一起, 成为一个连接水箱。为保证供水箱的安全和稳定并使水箱高度得到一定的调节, 在水箱下部设有托板和调节丝杠。调节丝杠的长度为 200 mm, 直径为 20 mm, 丝距为 6 mm。供水箱的结构如图 4 所示。

3.1.3 土柱架 土柱架用角钢制成,宽 800 mm,长 1 600 mm,有 2 300,2 800 和 3 200 mm 三种高度,以适应不同高度土柱的安装。土柱架下部的底板上开有 4 个圆孔,上置土柱的多孔底盘使之与土柱联结,下接盛渗滤液的漏斗。土柱站立在土柱架后,用土柱抱箍、环形铁板和螺杆,把土柱与土柱架固定,保证土柱不发生倾斜。土柱架上端安装马氏供水箱。土柱架的结构见图 5。

3.1.4 辅助设备 辅助设备有装土盒、夯土器和取土钻。装土盒使用目的是为了提高装土质量,因土料由土柱顶部向底部倾倒时,易产生自动筛分造成装土不均匀。装土盒的结构是采用一个高 100 mm 直径稍小于土柱内径的圆柱形短管,在短管底部安装一个活门,活门是由提绳和活门插销控制,当把装有土料的装土盒放入土柱底部时,提起活门插销,活门打开,土料即进入土柱,消除了装土时土料的自动筛分,使装土质量明显提高。

夯土器是用来将倒入土柱中的松散土体夯实到设计的容重。为消除平板夯土器使用时经常出现的夯实节理现象,设计了齿形底板式夯土器,其底部为三角形的针齿,操作时,三角齿破坏了与夯土器底部紧接的那一层致密土层,使其松散,减轻了夯实节理。

取土钻是用来从土体不同高度的取样孔内取出土样,进行养分和水分测定。取土钻用黄铜制成,直径 22 mm,取土槽长度为 80 mm。

3.2 操作规程

3.2.1 以完整形垂直土柱为例

(1) 制备土柱。按照实验目的,选择相应直径、长度之土柱。先将土柱与多孔底盘联结好(底盘上置玻璃丝及滤纸),土柱周围孔径用橡皮塞塞住,装土,按照试验方案以一定容重夯实,土壤按试验要求进行处理。土面离土柱顶端 100 mm,便于淋水。

(2) 安装土柱。装好土的土柱抬上土柱架,底盘对接上已装漏斗的圆孔,旋紧螺丝予以固定,用环形铁板和抱箍、螺杆,将土柱与土柱架固定。

(3) 安装供水箱。将供水箱固定在土柱架的水箱安装板上。

(4) 装水和供水。把供水箱装上水,调节供水箱高度,使出水量和出水速率符合试验要求(事先需进行试验),然后使出水孔的皮管置于土柱的土面。开启出水孔,即开始供水。土柱下端的漏斗下接三角瓶,以盛接土柱之渗滤液。土柱上可以种植作物。

3.2.2 开合式垂直土柱 其操作规程与上述完整型垂直土柱相同。惟在装土前应先将两个半圆 PVC 塑

料管用连接螺栓包紧密封,防止漏水。待试验结束或在试验的某一阶段,松开连接螺栓,露出整段土体。

3.2.3 水平土柱 于长方形箱体装土,装土方法同上。装土后,加盖,于左侧水室以供水箱供水,于右侧收集渗滤液。如播种作物,植株可以从盖孔长出,并可从盖孔取样分析。

3.3 安装使用和保管的注意事项

(1) 安装时,各部件必须联结紧密,防止松动不稳,防止漏水漏土。

(2) 所有塑料和有机玻璃部件,在移动、安装和使用过程中,均需轻拿轻放。

(3) 当有机玻璃出现碎裂时,可使用三氯甲烷作为修复剂;塑料原件有损坏时,使用 PVC 胶粘剂或塑料焊接方法进行修理。

(4) 对于可能出现漏水的接合部,应用橡胶垫或抹凡士林预防。

(5) 供水箱加水时,要尽量加到满刻度位置。这样易形成稳定的工作状态。

(6) 试验结束后,要及时去土放水,清洗土柱管、水箱及有关部件,以免霉变、干结,损坏部件。装置长期不用时,宜避光保存,以减缓材料的老化。

3.4 总体评价

本装置研制完成后,经过调试,证明整件性能好,达到预期设计的技术指标和试验要求。1993 年秋,经专家组评审,认为该装置具有科学性、实用性和一定的先进性,予以通过。使用本装置进行氮素在土壤剖面中运移的试验研究,取得了一批重要的实验数据,使土壤剖面氮素运移研究领域,获得了新的进展。

4 土壤营养元素运移循环研究的发展趋势

当代土壤学发展前沿已进入到全球物质循环的研究阶段。1986 年,国际科学联合会制订了国际地圈—生物圈的研究计划。这一计划的宗旨是研究整个地球系统中,包括物理、化学和生物学过程的相互反应与变化,从而提高对地球环境的认识能力,加强资源环境的改善与管理。这一研究计划将是当前最重要的研究课题之一。土壤圈作为地圈—生物圈系统的一个重要组成部分,今后物质运移循环的研究内容应包括:地圈—生物圈与土壤圈物质循环的相互联系;土壤资源的动态及其承载能力;土壤圈中 C、N、S、P 循环及其效应;土壤圈及其环境的养分与

(下转第 134 页)

验;水土保持林(草)体系配置、混交林型、林相结构与密度试验;营林(草)技术试验等。不断解决有关东川林草措施的各种造林(种草)技术问题,寻求东川林草措施最佳模式,推动东川水土保持可持续发展。

2.2.3 政府行为和各单位相结合 水土保持林草措施有别于一般为某一单一经济或观赏为目标而进行的绿化造林工作,它是结合国土整治与土地的合理利用,以及发展山区经济开发和改善生态环境为目标,达到稳、保、用之目的。具有公益性明显,影响范围较广的特点,因此,需要政府部门协调解决各部门之间的关系及水土保持投资问题,动员或鼓励社会各界多方筹措资金,引导和扶持私人购买荒山治

理荒山,充分发挥社会各界的积极作用,使林草措施得到持续发展,扩大森林资源,防治水土流失。

3 结 语

东川植被遭受严重破坏是导致水土流失严重的根本原因,恢复森林植被是整治东川水土流失的有力决策;东川严重的水土流失,造就了东川特殊的造林立地环境条件,林草措施是实现森林植被恢复及根治流失的根本措施;探索东川林草措施实施的新方法、新途径、最佳模式等,是东川水土保持工作的重要部分,对根治东川水土流失具有深远意义。

(上接第116页)

水分平衡;土壤圈中金属元素的土壤化学和土壤胶体表面化学;营养元素的空间分布及农、林、牧业生态系统的营养元素平衡等。应用本装置将有助于补

充和推进土壤营养元素运移规律的研究,包括探求不同水分条件下土壤养分运移及其有效性的研究,这对指导旱地农业具有科学的和实际的意义。

参考文献

- 1 张福珠,等. 怀柔山地油松氮、磷、硫生物地球化学循环研究[J]. 环境科学学报, 1991, 11(2): 131~ 141
- 2 窦贴俭,等. 南迦巴峰地区微量元素景观地球化学迁移特征[J]. 地理科学, 1987, 7(2): 111~ 119
- 3 余存祖,等. 土壤生态系统养分循环与平衡的研究[C]. 土地资源及生产力研究, 北京: 科技文献出版社, 1991, 162~ 168
- 4 Lole D. W. et al. Symposium on primary and mineral cycling in natural ecosystem [M]. Drono Univ maine Press 1967
- 5 薛世遼,等. 土壤圈物质循环的研究现状及其发展趋势[J]. 土壤学进展, 1989, (5): 8~ 14
- 6 庄亚辉. 元素循环研究的趋向[J]. 环境科学学报, 1991, 11(2): 129~ 130
- 7 康德梦,等. 中国环境中氮循环的动态模式[J]. 环境科学学报, 1991, 11(2): 142~ 156
- 8 周祖澄. 固体氮肥施入旱田土壤中去向的研究[J]. 环境科学, 1985, 6(6): 2~ 7
- 9 张福珠,等. 应用¹⁵N 研究土壤—植物系统中氮素淋失动态[J]. 环境科学, 1984, 5(1): 21~ 24
- 10 M claren A. D. Comment on Kinetics of nitrification and biomass of nitrifiers in a Soil Column[J]. S. S. S. S. S. S. AA. Proc, 1975, (39): 597~ 598
- 11 高拯民主编. 土壤—植物系统污染生态研究[M]. 北京: 中国科技出版社, 1986
- 12 高拯民,等. 京津渤地区污灌与土壤—植物系统硝态氮的淋失动态模拟实验研究[J]. 生态学杂志, 1984, (2): 1~ 7
- 13 江德爱,等. 对圆明园农业区地下水氮污染状况的调查与探讨[J]. 环境科学, 1984, 5(4): 27~ 31
- 14 董发开. 西安市地下水氮污染状况的调查与探讨[J]. 环境科学, 1984, 5(2): 35~ 38
- 15 简放陵. 高浓度工业废水有机物在土壤中的动态变化及其预测研究[J]. 农业环境保护, 1995, 14(2): 72~ 74
- 16 王百群,等. 水分淋洗下土壤各形态氮在剖面中的分布与移动[J]. 水土保持研究, 1994, (5): 6~ 11
- 17 沙维奇,等. 锌及其它重金属元素在土壤中迁移性的调控[J]. 环境科学学报, 1993, 13(3): 14~ 19
- 18 Ponomareva V. V. Lysimeter observation on the leaching of element in podzolic Soils[J]. In Congr Soil sci 1968
- 19 Singe M. In Situ study of prdzolization on Tephra and bedrock[J]. S. S. S. A. J. 1978, (42): 105~ 111
- 20 王继增,等. 侵蚀条件下黄绵土氮素流失规律的研究[J]. 中科院. 水利部水土保持研究所集刊, 1990, (12): 95~ 103
- 21 白红英,等. 坡地土壤侵蚀与养分流失过程的研究[J]. 水土保持通报, 1991, 11(3): 14~ 19
- 22 陈皓,等. 黄土地区氮磷流失的模拟研究[J]. 地理科学, 1991, 11(2): 142~ 146
- 23 王全九等. 黄土坡面溶质随径流迁移的对流质量传递模型[J]. 水土保持研究, 1994, (5): 12~ 15
- 24 Bomann. The watershed ecosystem concept in natural resource managements[M]. Academic phess Inc New york: 1969
- 25 龚子同,等. 土壤地球化学的进展和应用[J]. 北京: 科学出版社, 1989

致谢: 参与模拟装置研制或给予指导的尚有王文焰、高岩、彭琳、王全九、汤怀安、赵宝玺、王百群、范桦、汪志荣和曹宣业等同志。