

中国农业科学院 · 农业资源与农业区划研究所

| 科技创新工程系列专著 |



ESTABLISHMENT AND APPLICATION OF
MONITORING TECHNOLOGY ON
NONPOINT POLLUTION FROM ARABLE LAND

农田面源污染监测 方法与实践

| 刘宏斌 邹国元 范先鹏 刘 申 任天志 等 著 |



科学出版社

农田面源污染监测方法与实践

刘宏斌 邹国元 范先鹏 刘 申 任天志等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是在农业部生态环境保护专项、公益性行业(农业)科研专项、国务院第一次全国污染源普查科技重大专项等项目资助下完成的研究成果。全书简要回顾了国内外农田面源污染监测方法的研究进展,着重介绍了以田间渗滤池法为核心的农田地下淋溶面源污染监测技术和以田间径流池为核心的农田地表径流面源污染监测技术,以及适合设施栽培、旱地平原、水田、水旱轮作、坡耕地条件下的农田面源污染监测设施建设及监测技术规范,实地监测过程中各类样品的采集及测试方法,并选取了各省市部分典型农田面源污染国控监测点进行了案例介绍。

本书可供开展农田面源污染研究的环保、土壤、生态、农学等专业技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

农田面源污染监测方法与实践 / 刘宏斌等著. —北京: 科学出版社, 2015.7

ISBN 978-7-03-042045-9

I. ①农… II. ①刘… III. ① 农田污染—面源污染—环境监测—技术方法 IV. ①X53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第225375号

责任编辑: 李秀伟 白 雪 / 责任校对: 郑金红
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015年7月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 370 000

定价: 128.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《农田面源污染监测方法与实践》

著 者 名 单

(按姓氏汉语拼音排序)

艾绍英	安沫平	曹建国	陈 勇	陈安强	陈天云
成振华	董文忠	杜连凤	范先鹏	范修远	方 放
符少怀	傅建伟	甘小泽	谷海红	韩守新	韩允垒
何丙辉	胡万里	黄碧燕	黄东风	黄宏坤	黄晶晶
黄文星	黄玉宾	纪雄辉	贾兰英	江丽华	金海洋
寇建平	雷宝坤	雷秋良	李 斌	李 波	李 峰
李 季	李崇霄	李晋文	李丽霞	李盟军	李书琴
李晓华	李占军	李振森	林超文	林天杰	凌乃规
刘 申	刘东升	刘宏斌	刘晓霞	鲁 耀	栾 剑
罗春燕	马兴旺	马友华	毛妍婷	潘希波	彭 畅
秦 松	秦晓辉	邱 丹	任天志	石润圭	孙世友
孙文涛	孙治旭	谭宏伟	田 涛	田发祥	同延安
王 萍	王红华	王洪涛	王洪媛	王金保	王青立
王衍亮	王玉峰	吴丽琴	吴茂前	武淑霞	习 斌
夏 颖	谢可军	徐昌旭	闫 成	杨 波	杨 军
杨虎德	叶 夏	曾 荣	翟丽梅	张春雨	张富林
张敬锁	张学军	张亦涛	张玉树	赵少婷	郑向群
周 洁	周柳强	周明冬	周优良	邹国元	左 强

序

十八届三中全会公报明确指出划定生态保护红线，建立资源环境承载能力监测预警机制，对水土资源、环境容量超载区域实行限制性措施。该书针对农田面源污染监测构建了系统的监测方法，并在实践中取得良好的效果。全国农田面源污染监测是新时期一项重大的农情调查，是全面掌握我国农田面源污染状况的重要手段。开展农田面源污染源监测是为了了解农业生产与环境污染有关的基本信息，进一步完善农业环境统计方法，建立健全各类重点农业污染源档案和各级污染源信息数据库，为制定农业发展政策提供依据。搞好全国农田面源污染源监测与普查，准确了解面源污染物的排放情况，有利于正确判断农田面源污染形势，科学制定面源污染控制政策和规划；有利于有效实施面源污染控制计划，切实改善农业生产环境质量；有利于助推粮食安全和保障国家环境安全，推进资源节约型、环境友好型农业生产方式的转变。

通过该书所介绍的全国农田面源污染监测方法，建设了具有代表性的全国农田面源污染地表径流与地下淋溶监测点，各级农业环保相关单位进行了规模空前的入户登记、调查、核实，获得了大量农田面源污染第一手调查与监测数据资料，全面掌握了我国主要农区农田面源污染源排放的基本情况。通过分析全国农田面源污染监测数据，能够综合判断我国农田面临的环境形势，切实加强农田面源污染控制，提高农田面源污染防控科学决策水平，推进生态文明、美丽乡村建设，促进经济社会全面、协调、可持续发展。

该书内容涵盖了研究组自主研发的以田间渗滤池和田间径流池为核心，适合坡耕地、平原旱地、水旱轮作、水田等不同类型农田的面源污染监测方法、配套设施和装置，首次制定了我国农田面源污染监测设施建设及监测技术规范，并经农业部颁布在全国得到广泛应用。针对现有农田面源污染监测过程中存在的监测方法不统一、监测设施建设成本高、操作难、监测结果无法比对等一系列问题，该书在监测设施建设、监测过程中田间小区的管理、观测记载内容与要求、样品的采集方法和分析测试以及监测过程中的质量控制、监测结果的报告等方面进行了规定，为农田面源污染监测技术体系的形成打下坚实的基础。

该书在农田面源污染监测方法方面做了具有开创性的工作，基本解决了我国农田面源污染原有的监测方法不统一、可操作性差、监测结果难以汇总比较等历史性难题。这是一部对面源污染监测、防治工作指导性很强的著作，推荐相关领域专家、管理人员和技术人员阅读。

王新亮

2014年9月

前 言

随着我国集约化农业的快速发展,不合理的农业生产方式所引起的面源污染问题日益突出,成为我国南方地表水富营养化、北方地下水硝酸盐污染的一个重要原因。长期以来,由于缺乏准确、可行、统一的监测方法和技术规范,一直难以准确把握我国农田面源污染状况、变化特点和主控因素,给有效防治农田面源污染带来了极大困难。2007年,第一次全国污染源普查启动,为了配合农田面源污染测算工作,农业部委托中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,组织全国农科教系统农业环保领域相关单位,建成我国农田面源污染监测网络,全面、系统地监测我国不同区域主要种植模式农田面源污染发生规律,评估我国农田面源污染状况。

本书是我国农田面源污染监测网络创建及运行成果的全面展示,总结了我国自第一次全国污染源普查以来,在农田面源污染监测中所研发和采用的系列方法,介绍了各类方法的应用条件及其在实践中的运行情况。本书既是一本以往工作的总结资料,更是一本指导我们深入开展农田面源污染监测工作的技术指南。本书以著者团队多年研究工作为基础,立足田块尺度面源污染原位监测,从地表径流和地下淋溶两条途径出发,从田间监测设施建设技术规范、监测技术规范、田间记录规范和样品分析测试方法等方面全面介绍了坡耕地、平原旱地、水旱轮作、水田等不同类型的农田的面源污染监测方法,并介绍了我国已经建成并投入运行的部分农田面源污染原位监测试验。

作为一本技术指南类的工具书,本书在以下3个方面具有鲜明的特点。一是以技术规范的形式提出了各类设施建设及监测的技术要求;二是规定了各类样品检测中拟采用的方法及其使用中的注意事项;三是提供了大量的田间面源污染监测设施建设运行案例,为相关工作的开展提供重要的参考。

单就技术规范而论,本书系统地向读者展示了《农田面源污染监测技术规范》等6项规范。其中,《农田面源污染监测技术规范》规定了农田面源污染监测过程中田间监测小区的管理、观测记录、样品采集、样品分析测试、监测质量控制、监测结果报告等基本内容;《农田地下淋溶面源污染监测设施建设技术规范》规定了农田地下淋溶面源污染监测小区的布置、田间渗滤池装置的制作与安装方法等基本要求;《水田地表径流面源污染监测设施建设技术规范》规定了我国水田地表径流面源污染监测小区、径流池及配套设施的建设方法;《水旱轮作农田地表径流面源污染监测设施建设技术规范》规定了我国水旱轮作条件下农田地表径流面源污染监测小区、径流池及配套设施的建设方法;《坡耕地农田径流面源污染监测设施建设技术规范》规定了我国坡耕地农田地表径流面源污染监测小区、径流池及配套设施的建设方法;《平原旱地农田地表径流面源污染监测设施建设技术规范》规定了我国平原旱地农田地表径流面源污染监测小区、径流池及配套设施的建设方法。

以上只是书中部分内容的简单罗列,读者如果带着应用的目的阅读本书,肯定会有更多收获,会发现书中还有更多可圈可点之处,如农田面源污染田间记录本的设计与应用、农田水样收集后的前处理等。总之,本书系统、全面地向读者介绍了容易操作、简单实用的方法。

本书内容共分 5 章：第一章介绍了农田面源污染监测方法的研究进展，包括地表径流监测、地下淋溶监测和壤中流监测；第二章介绍了农田面源污染原位监测方法，本章作为本书的核心内容，系统介绍了《农田面源污染监测技术规范》、《农田地下淋溶面源污染监测设施建设技术规范》等 6 项技术规范；第三章介绍了农田面源污染样品分析测试方法，内容包括水样分析测试方法、土壤样品分析测试方法、植株样品分析测试方法等；第四章介绍了农田面源污染监测田间观测记录方法；第五章介绍了农田面源污染监测实践。本书图文并茂、可读性强、实用价值高。

由于本书编写工作量大、时间有限，加之著者的水平局限性，难免有疏漏错误之处，请广大读者批评指正。

著 者
2015 年 3 月

目 录

序

前言

第一章 农田面源污染监测方法的研究进展	1
第一节 概述	1
第二节 监测方法	2
一、概述	2
二、地表径流监测	4
三、地下淋溶监测	13
四、壤中流监测	22
第三节 研究展望	24
参考文献	24
第二章 农田面源污染原位监测方法	27
第一节 概述	27
第二节 农田面源污染监测技术规范	28
一、范围	28
二、规范性引用文件	28
三、术语和定义	29
四、监测周期	30
五、监测小区与监测设施建设	30
六、农田地表径流/地下淋溶计量与采样	30
七、样品保存	31
八、分析测试	31
九、质量控制	32
十、农田面源污染排放通量的计算	32
第三节 农田地下淋溶面源污染监测设施建设技术规范	32
一、范围	32
二、规范性引用文件	33
三、术语和定义	33
四、田间监测小区建设	33

五、田间渗滤池装置及其安装	35
六、使用与维护	37
第四节 水田地表径流面源污染监测设施建设技术规范	37
一、范围	37
二、规范性引用文件	37
三、术语和定义	37
四、田间监测小区建设	38
五、径流池及配套设施建设	40
六、使用与维护	42
第五节 水旱轮作农田地表径流面源污染监测设施建设技术规范	43
一、范围	43
二、规范性引用文件	43
三、术语和定义	43
四、田间监测小区建设	44
五、径流池及配套设施建设	46
六、使用与维护	49
第六节 坡耕地农田径流面源污染监测设施建设技术规范	49
一、范围	49
二、规范性引用文件	49
三、术语和定义	50
四、田间监测小区建设	50
五、径流池及配套设施建设	52
六、使用与维护	56
第七节 平原旱地农田地表径流面源污染监测设施建设技术规范	56
一、范围	56
二、规范性引用文件	56
三、术语和定义	57
四、田间监测小区建设	57
五、径流池及配套设施建设	58
六、使用与维护	64
第三章 农田面源污染样品分析测试方法	65
第一节 概述	65
第二节 农田面源污染监测水样分析测试	66
一、水样分析测试方法的选择	66

二、水样分析测试前处理及流程	67
三、水样中不同形态氮素的分析测试	67
四、水样中不同形态磷素的分析测试	74
五、水样中 COD 的分析测试	78
六、水样 pH 的测定	80
附：过硫酸钾提纯方法	81
第三节 农田面源污染监测土壤样品分析测试	81
一、土壤样品分析测试方法的选择	81
二、土壤样品分析测试前处理及流程	83
三、土壤有机质的测定	83
四、土壤全氮的测定	85
五、土壤全磷的测定	87
六、土壤全钾的测定	89
七、土壤碱解氮的测定	91
八、土壤有效磷的测定	93
九、土壤速效钾的测定	96
十、鲜土壤样品中有效氮的测定	98
十一、土壤 pH 的测定	100
十二、土壤阳离子交换量的测定	101
十三、土壤电导率的测定	102
第四节 农田面源污染监测植株样品分析测试	104
一、植株样品分析测试方法选择依据	104
二、植株样品全氮的测试分析	104
三、植株样品全磷的分析测试	106
四、植株样品全钾的测试分析	107
参考文献	109
第四章 农田面源污染监测田间观测记录方法	111
第一节 概述	111
第二节 监测地块信息记录及相关表格的填报	113
一、地块信息表及填表说明	113
二、种植季与作物对应表及填表说明	120
三、处理描述表及填表说明	123
四、小区具体处理情况描述表及填表说明	127
五、植株记录表及填表说明	129

六、植株产量记载及植株样品记录表及填表说明	131
七、施肥记录表及填表说明	134
八、农田水情况记载表及填表说明	137
九、土壤样品表及填表说明	143
十、试验进程及操作记录表	149
附表	150
第三节 农田面源污染监测地块及样品编码方法	154
一、监测地块编码	154
二、样品编码基本规则	154
三、基础土壤样品编码	155
四、监测期土壤样品编码	156
五、降雨水样、灌溉水样编码	156
六、地表径流和地下淋溶水样编码	156
七、植株样品编码	157
第五章 农田面源污染监测实践	158
第一节 地下淋溶国控监测点	160
一、重点监测点	160
二、一般监测点	175
第二节 地表径流水田类型国控监测点	188
一、重点监测点	188
二、一般监测点	192
第三节 地表径流水旱轮作类型国控监测点	196
一、重点监测点	196
二、一般监测点	201
第四节 地表径流平原旱地类型国控监测点	205
一、重点监测点	205
二、一般监测点	209
第五节 地表径流坡耕地类型国控监测点	218
一、重点监测点	218
二、一般监测点	228

第一章 农田面源污染监测方法的研究进展

第一节 概 述

点源污染和面源污染是导致河流、湖泊水质恶化的两大因素,随着点源污染得到较好的控制和管理,面源污染逐渐成为或已成为影响水环境质量的主要污染形式(王晓燕,2003)。面污染源一般来自农业、森林砍伐、矿业、建筑和城市等5个方面,其中以农田面源污染最为普遍和严重。长期以来,农田水土流失严重,不仅使土地土壤肥力下降、生产力降低,而且氮、磷等养分还随水土流失进入江河湖库(Liang et al., 2011; Su et al., 2010),造成了严重的农田面源污染,这也是世界各国水环境持续恶化、水质不断下降、饮用水安全屡受威胁的主要因素。目前,农田氮、磷养分流失进入水体环境已经造成了地表水富营养化、地下水硝酸盐超标、农田生产能力降低、生态环境质量下降等众多问题(Miller, 1992; USEPA, 1995; Boers, 1996; Kronvang et al., 1996; 张维理等, 2004; Perego et al., 2013; Qiu et al., 2011; Nguyen et al., 2013)。

农田面源污染主要是指农田生产活动中的各种污染物如沉淀物、营养物、农药、病菌等,通过径流、淋溶和农田排水等途径,以低浓度、大范围的形式从土壤圈向水圈扩散的污染过程。农田面源污染的形成是一个综合而复杂的过程,包括降雨径流过程、土壤侵蚀过程、地表溶质溶出过程和土壤溶质渗漏过程,这4个过程是相互联系、相互作用的,其发生过程受到土壤、地形、降雨、土地覆盖、人类活动等诸多因素的影响(Sharpley et al., 1993; Sharpley, 1985; Gburek and Sharpley, 1998)。农田生产中往往投入大量化肥、农药和农膜,但农药利用率只有10%-20%,氮、磷、钾肥利用率分别只有33%、24%、42%,土壤中盈余的养分在灌溉或降雨时易随地表径流或地下淋溶进入水体。无灌溉和降雨时,上述污染物广泛而隐蔽地分布在地表土壤中,表现出极强的潜伏性;灌溉或降雨时,大量的污染物随水迁移,但污染物来源分散性强,其地理边界和空间位置也不易识别,并随雨强、雨量和农田管理措施的变化而表现出空间和时间上的异质性;此外,受到土地利用、地形地貌、气象水文等诸多因素的影响,农田面源污染物的排放过程随机而不确定。总之,各种污染物交互影响,导致农田面源污染监测和治理难度极大。

农田面源污染受降雨的影响最大(周俊等,2000),降雨量越大,降雨强度越高,污染物产生量就越大。降雨过程为农田面源污染物的迁移转化提供了原动力。雨滴从空中坠落的过程中,具有一定的能量,当其由空中下落集中砸压土壤颗粒时,由动能转换的力使得土壤颗粒四处飞溅、到处分离,导致土壤颗粒极易被地表径流携带流失,从而发生土壤侵蚀;雨滴的冲击还能使土壤表面变得紧实,下渗量减少,间接导致地表径流的增加(孙庆艳,2008)。土地利用、土壤类型、农田管理等对农田面源污染均有重要影响(Weller et al., 2003; Shigaki et al., 2007; 胡志平等, 2007; 焦少俊等, 2007; Vadas et al., 2008; Hahn et al., 2012),旱地以淋溶为主,水田以径流为主;粗

质土壤养分淋溶风险大,黏质土壤反硝化作用较强,养分淋溶速度很慢、淋失量较小,碱性土壤氨挥发风险大;施肥量越大,污染产生的风险越大,施肥一周内是污染高风险期,速效氮肥流失风险高于有机肥和缓控释肥;农田漫灌,养分淋溶风险大,而节水灌溉不但能够提高水肥利用率,还降低了养分流失的风险。因此,在农田面源污染监测中,应尽可能地涵盖降雨、灌溉、施肥、土地利用、土壤性质、农田管理等多项指标。

我国农田面源污染问题严重,呈逐年增加的趋势。2002年我国农田面源污染首次全面超过工业污染和城市污染,成为最大的环境污染源;2005年全国氮、磷污染负荷中农田面源污染的贡献率超过50%,化学需氧量(COD)污染负荷中农田面源污染贡献率接近40%;2010年《第一次全国污染源普查公报》结果显示,农业源总氮、总磷排放占排放总量的57.2%和67.3%,其中农田氮、磷排放量占农业源的59%和38%。保护水体水质安全、减少农田污染物向水体的迁移势在必行,而只有通过农田面源污染监测,明确其不同条件下的发生规律及发展特征,才能针对性地制定面源污染分区防控策略。但目前,我国对农田面源污染的监测内容尚无具体规定,对监测手段、监测方法也没有标准化规定,从而导致监测结果的不可靠性和区域间监测结果的不可对比性。

第二节 监测方法

一、概述

早在19世纪中叶,科学家就注意到了氮素平衡和淋失带来的环境问题,并将用于研究水分平衡的渗滤池技术应用到了氮素淋失研究(Armsby, 1884)。此后100年间,此类研究不断增加,研究的主要内容是对养分淋失量及其形态进行观察,但研究所采用的技术手段并不完善,未深入研究淋洗的剖面特征和动态。20世纪40年代以来,氮肥大量施用造成的严重环境问题凸显出来,引发了70年代以来的氮素问题研究热潮,农田氮素移动逐渐受到科学家的重视, ^{15}N 示踪技术开始应用于土壤的肥料效应研究,这一时期的主要成果是原位土壤溶液采集装置的发展,同时计算机模型开始出现(陈子明, 1996)。经过前期上百年的研究积累,研究方法不断发展,监测技术不断进步,20世纪70年代后,科学界开始关注区域尺度上的养分流失情况,并对影响养分流失的因素和有效控制措施进行了深入研究和模拟,同时多学科交叉合作日益增多,形成了诸多新兴研究领域,面源污染的概念即产生于这一阶段。1976年,美国最早提出了面源污染的概念,并进行了面源污染研究(Peierls et al., 1991; Smith et al., 1987),而中国出现这一概念的时间相对较晚,最早出现在《美国环境咨询委员会关于环境保护的年度报告摘要》中(汪晓沪, 1981)。20世纪80年代初,我国湖泊、水库富营养化调查和河流水质规划是中国面源污染研究的重要开端(鲍全盛和王华东, 1996),这一阶段的研究主要集中在学习国外经验和探讨选择面源污染评价方法上,鉴于该时期我国农田肥料投入量并未显著增加,农田养分的流失监测未作为研究的重点;此后,随着氮肥施用量的不断增加和农田灌溉条件的改善,面源污染问题日益突出,相关研究迅速发展起来,自20世纪90年代起,我国的农田面源污染实地监测也开展起来。

根据污染物的迁移途径,农田面源污染监测可分为地表径流监测、地下淋溶监测、壤中流监测。农田地表径流指借助降雨、灌水或冰雪融水将农田土壤中的氮、磷等水污染物向地表水体径向迁移的过程,该流失途径主要发生在水田(许仙菊, 2007)、水旱轮作耕地(张继宗, 2006)、平原旱作耕地(焦平金, 2013)。农田地下淋溶是借助降雨、灌水或冰雪

融水将农田土壤表面或土体中的氮、磷等水污染物向地下水淋洗的过程,该流失途径主要发生在北方旱地(张春霞等,2013)。壤中流是土壤水在土壤内部的流动,发生在离地面很近的具有孔隙的、透水性相对较弱的土层临时饱和带内,是水分累积达到并超过田间持水量而发生的水平方向上的运动,其汇流速率处于地下径流和地表径流速率之间,山坡、丘陵等存在坡度的农田极易发生壤中流(刘泉等,2012)。

早前的面源污染监测主要针对降雨造成的径流污染,随着研究的深入,面源污染的内涵丰富起来,在借鉴水土保持监测方法的同时,面源污染监测方法不断发展和改进。1917年,美国密苏里农业试验站首先开展了径流小区监测,虽然这一监测是以水土保持观测为目的,但随着农田氮素环境问题的日益严峻,径流小区监测方法开始应用于养分流失监测,并以径流小区方法原理为基础,根据不同的研究目的,发展形成了径流场、径流池等方法。在氮素淋失监测上,渗滤计是较为成熟的监测方法,渗滤装置最初用于水文学研究中蒸发量的测定(蒸渗仪),1850年开始应用于土壤化学研究,命名为渗滤计或排水收集器;最早的渗滤计是依靠重力作用回收土壤孔隙水的重力渗滤计,此时它必须在土壤处于水饱和状态下工作。1961年出现了吸力渗滤计,它由真空泵及与之相连接的采水多孔陶土头组成,利用负压通过陶土头抽汲回收土壤孔隙水,此时可在土壤水不饱和条件下利用吸力采集土壤孔隙水;后来,又增加了一个压力端口,组成“压力/真空渗滤计”,可应用于更深的剖面,探测精度也更高。此后,基于氮素渗滤抽滤原理发展起来的田间原位渗滤计、渗滤池、淋溶盘、田间渗滤池等监测设备及技术不断应用于农田面源污染监测。然而,虽然经过多年积累,面源污染监测方法已有所改进,但大都各自为战,仍缺乏统一的标准。

降雨对面源污染的产生影响最大,通过人工降雨来模拟面源污染的发生过程及污染机制也是面源污染监测的重要内容,模拟降雨器的发明和改进为模拟监测提供了保障。除通过人工模拟降雨来研究农田面源污染发生过程及其特征外,野外实地监测是量化农田面源污染程度的直接方法,常见的野外监测方法有径流小区或径流池技术、土钻取样法、多孔陶瓷杯抽滤技术、养分渗滤池技术、田间排水系统方法、离子交换树脂包技术等。然而,鉴于野外环境的复杂性和实地监测的高成本、长周期,除人工模拟和实地监测外,量化并预测不同情景下面源污染程度的最直接方法是建立模型(表1-1),进行空间和时间序列上的模拟,面源污染模型不仅可以估算面源污染物负荷量,还可以模拟污染物的物理、化学和生物转化过程,对面源污染进行预测分析,因此,以面源污染模型修正及应用为目的的监测研究也越来越受重视(张召喜,2013)。

表 1-1 目前广泛应用的面源污染模型

模型名称	空间尺度	时间步长	时间尺度	模型主要结构	主要监测指标
ANSWERS	流域	暴雨期 60 s 非暴雨期 1 天	长期连续	降雨初损、入渗和蒸发; 溅蚀、冲刷和沉积; 氮、磷的复杂污染物平衡	氮、磷
AGNPS	流域	1 天	长期连续	SCS 水文模型; USLE	农药、氮、磷和 COD
CREAMS	田块	1 天	长期连续	SCS 水文模型; Green-Ampt 入渗模型	氮、磷和农药等
HSPF	流域	1 min 到 1 天	长期连续	斯坦福水文模型; 雨滴溅蚀、径流冲刷和沉积; 氮、磷和农药等复杂污染物平衡	氮、磷、COD、生化需氧量(BOD)和农药等
GLEAMS	田块	1 天	长期连续	SCS 水文模型; USLE; 复杂的氮、磷循环	氮、磷和农药等
EPIC	田块	1 天	长期连续	SCS 水文模型; MUSLE; 复杂污染物平衡	氮、磷和农药等
SWAT	流域	1 天	长期连续	SCS 水文模型; MUSLE; 复杂污染物平衡	氮、磷和农药等

注: USLE 为通用土壤流失方程; MUSLE 为修正通用土壤流失方程

二、地表径流监测

(一) 人工模拟

随着降雨机制研究的深入,人工模拟降雨器能够根据研究需要,模拟出各种类型的降雨情况,从而在人为控制条件下模拟各种自然状态下的面源污染发生过程。我国将人工模拟降雨应用于科学研究是从研究黄土高原水土流失开始的(刘昌明等,1965),其后在其他地区也进行了尝试,但都只限于总量的分析(傅伯杰等,1998;陈皓和章申,1991),后来逐渐延伸到对农田养分迁移的分析研究,与野外监测针对的自然降雨径流事件不同,人工模拟地表径流的重点在于模拟不同的降雨事件,该系统一般包括模拟降雨器系统和径流发生采集系统两大部分,不同学者根据具体研究条件可采用不同规格的设备。无论是简易的人工模拟降雨径流装置,还是设备改进之后的大型模拟降雨径流系统,其组成是相似的,主要有供水系统、喷水系统、径流发生系统、径流水采集系统、径流测量系统。人工模拟降雨器主要用于面源污染机制和模型的研究,虽然模拟监测研究方法不断改进,但室内与大田实际状况仍相差甚远,因而研究结果在应用上仍有一定的局限性。模拟降雨器的工作原理是利用喷灌自吸泵将水以不同流速送到装有特制弹性压片的喷体,有压水流在弹性压片的作用下形成薄厚不等的连续水舌,水舌射向空中时受到空气的阻力形成大小不同的雨滴,在这样一个连续的系統内,施加不同的供水压力就形成不同厚度的水舌,进而形成从小到大的雨量。降雨落入径流发生采集系统后,根据不同雨量、雨强,发生不同程度的径流事件,利用径流水采集系统收集径流泥沙,进而测定径流量,并分析径流水组成成分。

20世纪30年代开始,美国广泛采用人工模拟降雨研究农田土壤养分入渗、坡面产流和土壤侵蚀(Mutehler and Hermsmeier, 1965; Moldenhauer, 1979)。1958年,美国科学家首先研制了槽式人工模拟降雨机,并被应用于与土壤侵蚀相关的科学研究(Meyer and McCune, 1958)。1979年,改进后的槽式人工模拟降雨机性能更好,运行更稳定,在美国众多土壤侵蚀实验室都有装备(Foster et al., 1979)。20世纪90年代以来,对槽式人工模拟降雨机做进一步改进后,用聚氯乙烯(PVC)管替代了原槽式降雨机的回水水槽,增加了可加长的降雨机支架(Blanquies et al., 2003),降低了降雨机的重量,但增加了降雨机安装的难度,水压调节和降雨机调试的难度都相应增加,此后,以此为基础,模拟降雨机不断改进,应用更加广泛。

1965年,中国科学院地理研究所最早研制了轻便的人工模拟降雨器(刘昌明等, 1965),降雨面积 $0.5\sim 3.0\text{ m}^2$,降雨方式是用带有许多小喷头的活动喷管喷洒,降雨强度 $0.03\sim 5\text{ mm/min}$,不同的模拟降雨强度由仪器供水装置的稳压箱水头和阀门的开启来控制,雨滴直径的大小依采用的降雨强度由每组不同孔径的喷头进行选配与调节;此后,模拟降雨器不断改进,性能不断改善,模拟效果得以提高(表1-2)。黄毅和曹忠杰(1997)通过多次筛选试验,研制出单喷头变雨强模拟降雨装置,该装置采用侧喷式模拟侵蚀降雨,具有体积小、重量轻、能耗低、移动方便、易操作、计算简便、性能可靠等特点,适用于水土流失监测和水土保持效益研究。刘素媛等(1998)经过5年研究、5年应用和3万个数据率定研制成功的SB-YZCP(野外移动、组合、侧向、喷洒式)人工降雨模拟装置,其降雨喷头由6种不同孔径(7 mm、9 mm、11 mm、13 mm、15 mm、17 mm)的喷嘴和碎流板组成,喷嘴出流由6支供水管分别供水,不同孔径的喷头可组成任意组合的降雨机组降雨,出

水流量和时间由车内的自控装置、仪表监测控制,雨滴高度 11 m;塔架由 5 层金属钢架组成,第四层设平台以调整喷头。康玲玲等(1999)设计的人工降雨模拟装置,采用双向对喷式降雨方式,降雨过程由计算机系统自动控制,可控制降雨强度在 0.650-2.667 mm/min,降雨量控制在 60 mm,降雨历时在 22.5-92.3 min。陈文亮和唐克丽(2000)研制的 SR 型人工降雨装置是一种多喷头、多单元组合式的间歇降雨装置,由降雨喷头、座架、驱动机构、动力系统、供水系统组成(图 1-1)。该装置喷头出水孔径较大,其雨滴直径大小分布与天然降雨相似,喷头处辅以使喷头往返摆动的机械装置,可增加喷头的散水面积和均匀度,可将降雨强度控制在实用的雨强范围内,是一种较理想的人工模拟降雨装置;该降雨装置采用美国 V-80100 型喷头,间歇下喷方式,孔径 6.4 mm,喷头处压力一般为 0.2-1 kg/cm²,降雨高度 2.4 m,供水压力在 0.2-2 kg/cm² 时,所测定雨滴直径为 0.1-3 mm,个别超过 4 mm。黄满湘等(2001)从加拿大引进的人工模拟降雨设备,采用美国 SPRACO 锥形喷头,该喷头由一套 4.75 m 高的独立竖管、90 cm 长的延伸管、连接在延伸管末端的向下喷嘴以及确保装置稳定的三脚架和几条拉线构成,水滴以一定的初速度向下喷,可在相对较低的降落高度下模拟天然降雨。目前中国科学院水利部水土保持研究所建有人工模拟降雨大厅(图 1-2),有效降雨面积 1260 m²,可模拟小雨到暴雨的各种降雨,与自然降雨非常相似,降雨过程由计算机自动控制进行,地面由各种可变坡度的液压升降钢槽、不同的小流域地形模型形成不同的地形地貌,对于了解水土流失过程、生态环境变化具有很强的科普教育意义,而且非常形象直观(郑粉莉和赵军,2004)。该系统采用下喷式降雨和侧喷式降雨两种系统,下喷式降雨系统由日本引进,降雨高度 18 m,降雨强度变化范围为 30-350 mm/h;侧喷式降雨系统由中科院水保所自主研制,降雨高度 16 m,降雨强度变化范围为 40-260 mm/h,满足所有降雨雨滴达到终点速度,降雨均匀度大于 80%,最大持续降雨时间 12 h,降雨区由两个独立的降雨试验区组成,可以组合降雨,单个试验区有效降雨面积 27 m×18 m,总面积 2×27 m×18 m。

表 1-2 我国降雨器的主要技术性能(高小梅等,2000)

研制单位	降雨面积/m ²	降雨形式	落差/m	雨强范围/(mm/h)	雨强控制	使用时间
中科院地理所水文室	24	喷嘴水平往复运动	4	12-204	调节总流量	1976 年
山西省水土保持科学研究所	35	静止喷嘴侧喷	10	24-264	改变喷嘴数量	1987 年
中国铁道科学研究院西南研究所	170	网状管路 2700 个喷嘴	5	20-200	调节总流量	1979 年
山西省水土保持科学研究所	6.25	喷嘴静止下喷	4.6	25-38	改变喷水压力	1988 年

利用模拟降雨器进行野外径流模拟时,往往需要动力输出和大型运输设备,不便于携带,移动性差,组合、装卸非常不便,降雨强度等指标需要在现场率定,试验操作复杂,试验成果获取及后期处理周期长、工作量大,使用受到较大限制(吴普特和高建恩,2006)。为使各个不同试验现场(原状土、扰动土)水土保持科学试验达到准确、快速、方便、全自动一体化,急需一种快速现场降雨侵蚀试验及结果测量综合试验平台装置,基于此,2008 年,长江科学院水土保持研究所研发了水土流失移动实验室(图 1-3),克服了野外水土流失监测设备移动性差,装配控制复杂,试验费时、费力的缺点。这是一种车载可移动、自带电源、自带供水和循环系统的装置,装备了全自动调控摇摆下喷式降雨器和便携式水土流失自动监测系统,将载重卡车经过改装,使其成为移动水土流失实验室的移动动力系统,支持机械的液压动力及现场电源的自由选择,为降雨器及控制仪器设备提供电力保障,从而方便移动于

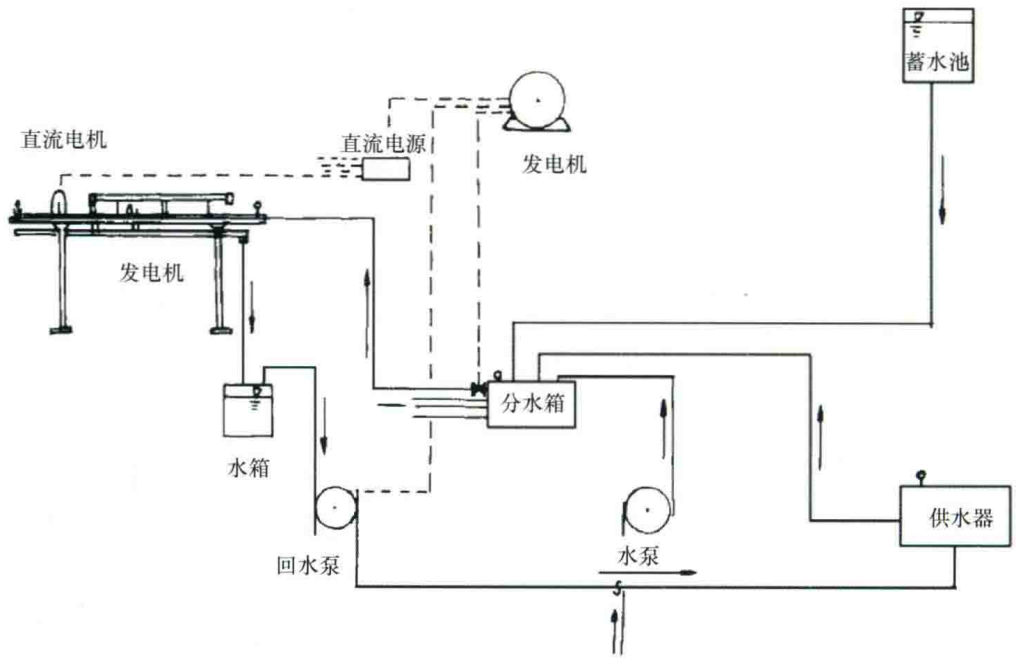


图 1-1 人工模拟降雨装置工作图（陈文亮和唐克丽，2000）

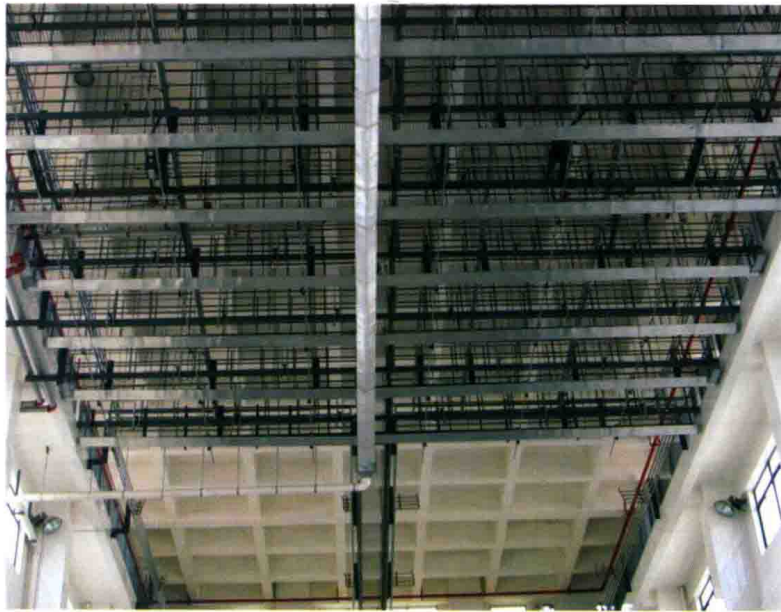


图 1-2 人工模拟降雨大厅（郑粉莉和赵军，2004）

各种不同的野外试验场地，保证系统能够实现在不同地形地貌条件下的全天候监测。

利用模拟降雨器，配合径流发生采集装置，可模拟、监测径流发生发展过程，径流发生采集装置有多种形式，包括塑料嵌套水桶、径流土槽、原状径流小区等。简易径流采集装置可由双层塑料水桶嵌套组成（张鸿睿，2012），将带出水口的防雨罩罩于两桶之间，使内桶的水可以在模拟降雨时及时流出，并避免降雨落入外桶；外桶口径 40 cm，高度 25 cm，用