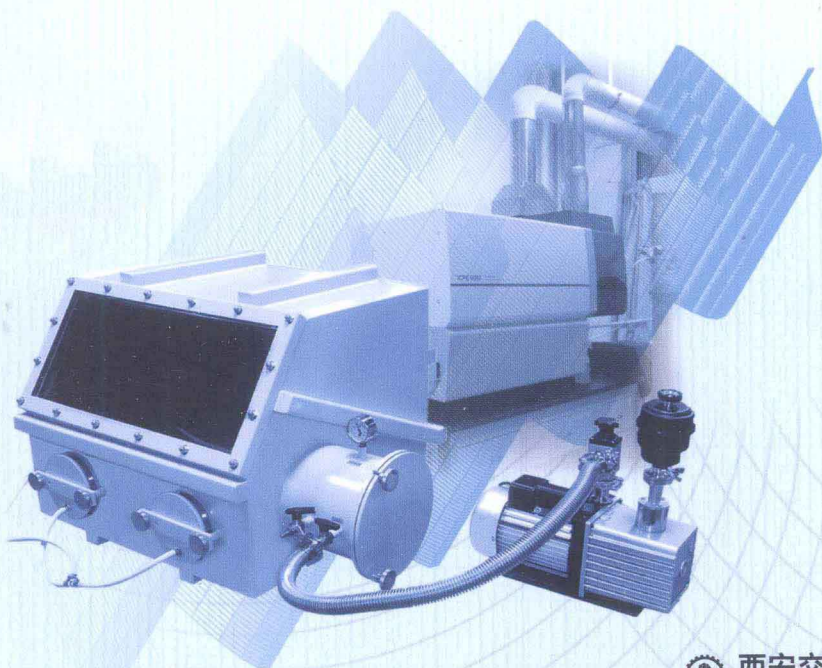




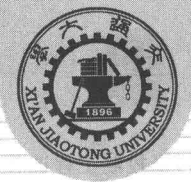
西安交通大学 本科“十二五”规划教材
“985”工程三期重点建设实验系列教材

水污染控制工程实验

主编 王云海 杨树成 梁继东 张 瑜



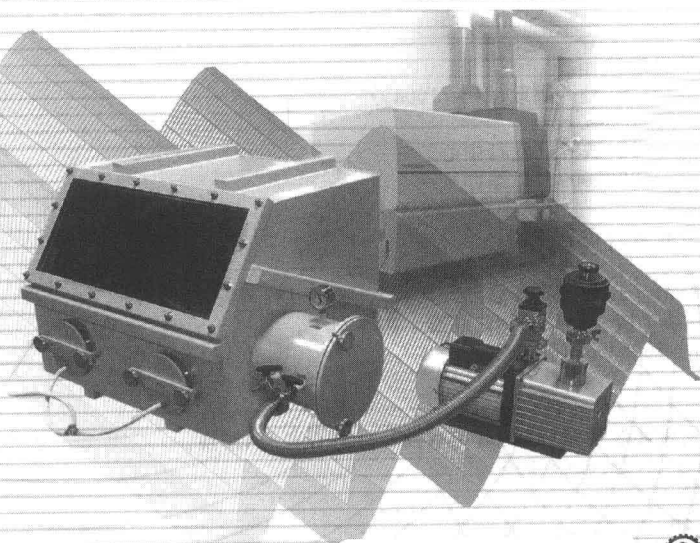
西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 本科 “985” 工

水污染控制工程实验

主编 王云海 杨树成 梁继东 张 瑜



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

“水污染控制工程实验”是环境工程等专业必修课程,是水污染控制工程课程教学的重要组成部分。本书是西安交通大学本科“十二五”规划系列实验教材,教材内容是根据环境工程专业教材编审委员会制定的“水污染控制工程实验教学基本要求”,结合编者在教学科研工作中的体会以及我国水污染控制的实际需要而编写的。

全书内容共分总论、实验和设备三篇,包括绪论、实验设计、误差与实验数据处理、实验水样的采集与保存、基础性实验、应用性实验、开放性实验、实验常用仪器设备及说明等八章。本实验教材适合作为高等院校师生的实验教学和学习参考书,并可供从事环境类学科相关研究、科研工作人员及工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水污染控制工程实验/王云海等主编. —西安:
西安交通大学出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5605-5376-4

I. ①水… II. ①王… III. ①水污染-污染
控制-实验 IV. ①X520.6-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 141819 号

策 划 程光旭 成永红 徐忠锋

书 名 水污染控制工程实验
主 编 王云海 杨树成 梁继东 张 瑜
责任编辑 田 华

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西元盛印务有限公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 11.125 字数 187 千字
版次印次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-5376-4/X·8
定 价 22.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。
订购热线:(029)82665248 (029)82665249
投稿热线:(029)82664954
读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

编审委员会

主 任 冯博琴

委 员 （按姓氏笔画排序）

邓建国 何茂刚 张健保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠锋 黄 辰

Proface 序

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高[2012]4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保各类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

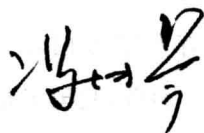
目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,经精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

我很高兴地看到这次立项教材有几个优点：一是覆盖面较宽，能确实解决实验教学的一些问题，系列实验教材涉及全校 12 个学院和一批重要的课程；二是质量有保证，90%的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的，教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师，新教材贴近教学实际；三是按西安交大《2010 版本科培养方案》编写，紧密结合学校当前教学方案，符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后，我要向这些作者表示感谢，对他们的奉献表示敬意，并期望这些书能受到学生欢迎，同时希望作者不断改版，形成精品，为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授
国家级教学名师



2013 年 6 月 1 日

Foreword 前言

《水污染控制工程实验》是环境工程、环境科学和给水排水专业重要的必修课,是水污染控制工程、给水排水工程、工业废水处理等课程的配套教材。通过本课程的学习,可以加深学生对水处理技术基本原理的理解,培养学生设计和组织水处理实验方案的初步能力,提高学生开展水处理实验的一般技能及使用实验仪器、设备的基本能力,提高学生分析实验数据与处理数据的基本能力,同时通过本课程的学习将能有效提高学生动手实践能力和创新思维能力。

本实验教材内容是在参考国内外有关资料并结合编者多年的科研和教学实践的基础上确定的。全书共分总论、实验和设备三篇,包括绪论、实验设计、误差与实验数据处理、实验水样的采集与保存、基础性实验、应用性实验、开放性实验、实验常用仪器设备及说明等八章。为了使教材内容及实验手段更具有先进性和实用性,教材中选用的实验有很多是目前国内外较为先进的水处理工艺和技术。所选用的教学实验装置与设备,既有代表传统水处理工艺的,又有代表近年来国内外热点的新工艺、新技术的。这对提高学生实践动手能力、开拓学生视野并提高创新思维能力具有重要意义。为了使本书内容更系统和完整,使学生易于接受和理解,书中给出了与教学实验密切相关的一些水质分析检测方法和仪器使用说明。本实验教材的第1章绪论由王云海编写,第2、3、4章由梁继东编写,第5章由杨树成和王云海共同编写,第6章由王云海和杨树成共同编写,第7章由王云海和梁继东共同编写,第8章由张瑜编写。

全书由王云海负责统稿,在本书编写过程中,研究生付蓉、刘亚鹏、王白石、房孝文、李相霖、王东琦、杜文静、崔晓敏、江健等协助搜集整理了部分资料。同时本书也参考了大量专家学者的相关文献资料,借鉴引用了部分内容,在此一并表示诚挚的感谢。本教材的编写得到了西安交通大学本科“十二五”规划教材建设资助。

本书适合作为高等院校师生的实验教学和学习参考书,并可供从事环境保护、环境科学、环境工程、给水排水的研究生、科研工作人员及工程设计人员阅读和参考。各单位可根据实际情况选做其中的部分实验项目。

由于编者水平有限,疏漏和不妥之处在所难免。恳请广大读者批评指正。

编者
2013年3月

Contents 目录

第一篇 总论篇

第 1 章 绪论	(002)
第 2 章 实验设计	(004)
第 1 节 实验设计简介	(004)
第 2 节 单因素实验设计	(007)
第 3 节 双因素实验设计	(011)
第 4 节 正交实验设计	(013)
第 3 章 误差及实验数据处理	(020)
第 1 节 误差的基本概念	(020)
第 2 节 实验数据整理	(023)
第 3 节 实验数据的方差分析	(026)
第 4 节 实验数据处理	(032)
第 4 章 实验水样的采集与保存	(039)
第 1 节 水样的采集	(039)
第 2 节 水样的保存	(043)

第二篇 实验篇

第 5 章 基础性实验	(047)
实验一 混凝实验	(047)
实验二 颗粒自由沉淀实验	(053)
实验三 压力溶气气浮实验	(058)
实验四 过滤实验	(062)
实验五 曝气设备充氧性能实验	(068)
实验六 工业污水可生化性检验实验	(074)
实验七 酸性废水中和吹脱实验	(080)
实验八 污泥比阻测定实验	(084)
实验九 膜生物反应器膜污染的观测实验	(091)
实验十 含盐废水离子交换软化实验	(096)

第 6 章 应用性实验	(102)
实验一 Fenton 氧化法处理有机废水实验	(102)
实验二 生物吸附法去除重金属实验.....	(104)
实验三 土地快速渗滤处理城市污水实验.....	(108)
实验四 厌氧污泥产甲烷活性的测定实验.....	(112)
实验五 有机废水臭氧氧化实验.....	(118)
第 7 章 开放性实验	(122)
实验一 光催化氧化处理农药废水实验.....	(122)
实验二 微生物燃料电池技术处理废水同时发电的实验.....	(124)
实验三 环境污染物对厌氧微生物的毒性实验.....	(128)

第三篇 仪器设备篇

第 8 章 实验常用仪器设备及说明	(136)
第 1 节 ESJ210 系列天平使用说明	(136)
第 2 节 便携式 pH 计使用说明	(139)
第 3 节 便携式溶解氧测定仪使用说明.....	(142)
第 4 节 浊度计使用说明.....	(145)
第 5 节 混凝试验搅拌机使用说明.....	(148)
第 6 节 低速离心机使用说明.....	(151)
第 7 节 可见光分光光度计使用说明.....	(156)
第 8 节 COD 快速测定仪使用说明	(157)
第 9 节 BOD 分析仪使用说明	(161)
第 10 节 不锈钢真空手套箱使用说明	(164)
参考文献	(166)

第一篇 总论篇

第1章 绪论

1. 课程的主要内容

水污染控制工程实验技术是对环境类学科本科水污染控制工程、水处理生物学、给排水化学、水处理工程、水力学等相关专业课程中的重要知识点和规律的实践性检验。意在通过基础性的实验操作训练,使学生掌握相关的基本实验技能和简单的仪器、设备及测量工具的原理和使用方法;通过直观观察相关的试验现象、收集相关实验数据并进行数据分析,使学生在实践中加强对专业基础技术知识的准确理解和巩固以及提高学生的动手实践能力和创新思维能力。

为此本实验课程的主要内容包括了着重基础的实验理论知识学习和基础的实验操作技能培养的基础性验证性实验、接近生产和生活实际的应用性实验、涉及新兴的综合的水处理技术的开放性实验以及基础的实验设备和仪器原理及说明等部分。其中验证性基础实验包括了通常的颗粒自由沉淀、混凝、压力溶气气浮、过滤、曝气设备充氧能力、可生化性检验、中和吹脱、污泥比阻测定、膜生物反应器膜污染、离子交换等实验,而应用性实验则包含了高级氧化、生物吸附重金属、土地快速渗滤、厌氧污泥产甲烷活性等实验,开放性实验则结合水污染控制领域的部分最新研究结果开发了光催化处理废水实验、利用废水处理发电的微生物燃料电池技术实验、污染物的生物学毒性实验等,最后将相关的常用的仪器设备原理及说明专门安排一章,一方面为学生学习设备的原理及操作提供参考,另一方面也为同学们课前准备、预习实验提供参考。这些内容均是熟练掌握水污染控制工程相关实验技术和深入研究相关水污染控制原理与技术的重要基础。

2. 学习目的和方法

水污染控制工程实验教学的目的是使学生将学习的水污染控制工程以及水处理等理论联系实际,培养学生观察问题、分析问题和解决问题的能力。具体来说,对本实验课的学习,通过从专业技术基础着手,逐步使学生对水污染控制工程相关理论及技术的认识从感性上升到理性;通过观察和分析实验现象,加深对水处理基本概念、规律和理论的理解与掌握;通过基础性、应用性和开放性的实验操作训练,使学生掌握基本的现代测量、分析技术以及相关的基本水处理实验技能;培养学生分析实验数据、整理实验结果以及编写实验报告的能力;培养实事求是的科学态度和协作配合的团队精神。

为了更好地达成上述学习目的,在本课程的学习上应该根据自身的经验摸索出一套适合自身特点的学习方法。下面建议的学习方法仅供读者学习时参考。

首先,要认真准备实验所需的理论知识,了解相应的实验原理和技术以及仪器设备的原理及基本操作。这样在实验操作时能够做到有的放矢,对实验现象有一定的预见性,不仅能对正常的实验现象及时记录和思考,更容易发现一些非正常的实验现象,进而能够结合理论对实验现象进行深入的分析 and 讨论。

其次,要认真拟定实验计划,结合实验原理、目的和要求,确定实验要测的主要参数,分析此参数的变化范围与动态特性;确定实验过程中的主要影响参数并进行严格控制;根据实验精确度要求,确定对原始数据的测量准确度要求及测量次数;最后确定数据点,进行实验设计并编制实验方案。

第三,认真准备实验的仪器和材料,安排和布置实验场地,搭建实验装置,对实验系统调校以提高系统可靠性,并编制数据记录表。

第四,实验操作要态度认真、细心观察,要按照实验操作指南开展实验,实验小组要团结协作,明确分工,认真观察和记录实验现象,这将为实验结果的讨论奠定基础。也有机会发现一些异常的实验现象,可以引导学生进行更加深入的思考,从而加深理论和实践知识的掌握。

最后,实验报告要实事求是,利用所学理论知识,认真整理、分析实验数据和结果,编制相应的图线和表格,得出相应的实验结论,分析总结实验过程的经验和教训。

3. 学习要求

首先,课前预习。实验课前,学生必须认真预习实验教材内容,明确实验的目的、原理、内容和方法,了解实验仪器设备的构造原理与基本操作。

其次,设计和制定试验方案。实验方案的设计和制定是保证实验能够安全有序顺利实施的基本保证,在正式实验操作之前一定要有完善的实验方案并依据实验方案认真开展实验。实验方案的设计和制定要结合实验室的实际情况,尽量采用能够方便提供的材料和设备,并在实验前将实验所需的材料和设备准备好、调校好。

第三,实验操作要严格按照实验方案 and 操作规程进行,分工协作,做到有条不紊,保证安全,仔细观察和记录实验现象,认真填写实验记录。实验结束后,要将使用过的仪器、设备、材料整理复位,将实验台架及场地打扫干净,养成良好的实验习惯。

最后,依据实验规范认真分析和整理实验数据,编写正式的实验报告。实验报告内容一般应包括报告人的姓名、班级、小组成员及日期,实验名称,简述实验的目的、原理 and 使用的实验仪器、材料以及实验方法,实验数据的整理和分析,对实验结果进行讨论分析,完成实验分析与讨论并得出实验结论。

第2章 实验设计

第1节 实验设计简介

004

实验,是根据科学研究的目的,利用专门的仪器与设备,人为地控制或模拟研究对象,使某一些事物(或过程)发生或再现,从而去认识自然现象、性质或规律的系统方法。在实验过程中,研究者可以通过有目的地改变某一过程或系统的输入变量,对输出响应的变化进行观测或识别,评估输入对输出的影响情况,从而得到期望结果需要的因素与水平。

实验设计(design of experiments, DOE)是对实验进行科学合理的安排,以达到最好的实验效果。实验设计是实验过程的依据,是实验数据处理的前提,也是提高科研成果质量的一个重要保证。良好的实验设计,可以有效地缩短实验周期,合理地减少人力物力,最大程度地获得丰富的资料和可靠的结论。实验设计在实验研究中的作用主要表现在以下几方面:①确定实验因素对实验指标影响的大小顺序,找出主要因素;②提高实验研究的效度,即实验结果反映实验因素与实验指标间真实关系的程度;③准确把握最优方案并能预估或控制一定条件下的实验指标值及其波动范围;④正确估计和有效控制、降低实验误差,从而提高实验精度;⑤通过对实验结果的分析,明确进一步研究的方向。

根据不同的实验目的,可以把实验设计划分为五种类型:演示实验、验证实验、比较实验、优化实验和探索实验。其中,优化实验是科研工作中经常采用的形式,能高效率地找出实验问题的最优实验条件,达到提高质量、增加产量、降低成本以及保护环境的目的。按实验因素的数目不同可以划分为单因素优化实验和多因素优化实验;按实验的目的不同可以划分为指标水平优化和稳健性优化;按实验的形式不同可以划分为实物实验和计算实验;按实验的过程不同可以划分为序贯实验设计和整体实验设计。

1.1 实验设计的基本概念

1. 实验指标

衡量实验结果好坏程度的指标称为实验指标,也称为响应变量(response vari-

able)。在实验中一般要先确定一项或几项研究指标,然后考查实验中这些指标值随实验参数的变化情况。例如,在印染废水处理实验中,主要考查出水色度、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD_5)等水质指标;在酸性矿山废水处理实验中,主要考查出水总酸度、重金属及硫酸根离子浓度等指标。当要考查的指标较多的时候,可采用各个指标加权代数和方法构建一个综合指标进行比较,从而实现整体优化。各指标的权重必须遵循一定原则加以确定。当要考查的指标是定性指标时,可采用评分的方式定量化后再进行计算和数据处理。实验效应要通过实验中的观察指标才能显现,因此在确定实验指标时应考虑选择指标是否与研究目的有本质联系,是否易于量化,还要考虑指标的灵敏性、准确性,指标数目也要适当。

2. 因素

实验中可对实验指标产生影响的原因或要素称为因素(factor)。实验设计的一项重要工作就是确定可能影响实验指标的因素,并根据专业知识初步确定因素水平的范围。一般来说,一个实验中影响目标函数的参数会有很多,其中有些参数或由于前人对其做了大量的实验研究而有了足够的了解,或限于实验条件而在实验中不准备研究,通常对这些参数在一批实验中只各取一个固定值。而对另外一些参数则要取几个不同的值分别进行实验以比较其变化对目标函数的影响情况。例如细菌培养条件优化实验中,细菌的生长量与温度、培养基初始 pH 值、摇床转速、碳源、氮源等有关,其中生长量是实验指标,温度、pH 值等均为实验因素。因素一般用大写字母 A, B, C, ... 来表示。在选择实验因素时应注意,因素的数目要适中,太多会增加大量实验次数,造成主次不分;太少会遗漏重要因素,达不到预期目的。

3. 水平

因素在实验中所处的各种状态或条件称为水平(level)。例如上述细菌培养实验中,温度可取 20°C 、 30°C 、 40°C 、 50°C 四个水平, pH 值可取 6、7、8 三个水平等。水平一般用数字 1, 2, 3, ... 来表示。在选择实验因素的水平时应注意,水平的数目要适当,过多不仅加大了处理数,还难以反映各水平间的差异,过少又可能使结果分析不全面。水平的范围及间隔大小要合理,太小的实验范围不易获得比已有条件有显著改善的结果,还可能会把对实验指标有显著影响的因素误认为没有显著影响,因此要尽可能把水平值取在最佳区域或接近最佳区域内部。水平间隔的排列方法一般有等差法、等比法、选优法和随机法等。

(1) 等差法

等差法是指实验因素水平间隔是等间距的。如温度可采用 30°C 、 40°C 和 50°C 三个水平,各温度水平间距为 10°C 。该法一般适用于实验效应与因素水平呈直线

相关的实验。

(2)等比法

等比法是指实验因素水平间隔是等比的。如微生物培养基中 MgCl_2 浓度的各水平分别为 0.1 g/L、0.2 g/L、0.4 g/L、0.8 g/L，相邻两水平之比为 1:2。该法一般适用于实验效应与因素水平呈对数或指数关系的实验。

(3)选优法

选优法是先选出因素水平的两个端点值 a 、 b ，再以水平范围 $[a, b]$ 的 0.382 和 0.618 的位置为因素水平。如 MgCl_2 浓度实验用选优法确定的因素水平分别为 0 g/L、0.382 g/L、0.618 g/L 和 1 g/L。该法一般适用于实验效应与因素水平呈二次曲线型关系的实验。

(4)随机法

随机法是指因素水平排列是随机的，各水平的数量大小无一定关系。该法一般适用于实验效应与因素水平变化关系不甚明确的情况，在预备实验中常采用。

1.2 实验设计的原则

1. 随机化原则

随机化是指以概率均等的原则，随机地选择接受实验处理的对象或产品。将实验顺序随机化，可使系统误差随机化，从而避免某些规律性的系统误差与实验规律相叠加而造成的对客观规律的歪曲。随机化的另一作用是有益于应用各种统计分析方法，因为许多统计方法都建立在独立样本基础上的。

2. 重复性原则

从统计学的观点看，实验的重复次数越多，实验结果的平均值越接近于真值，可信度也越高。实验设计中的重复性有两种含义，一是指独立重复实验，即在相同的处理条件下对不同样品做多次重复实验；二是指重复测量，即在相同的处理条件下对同一个样品做多次重复实验。前者可以降低由样品间差异而产生的实验误差，后者是为了排除操作方法产生的误差。

3. 对照原则

对照是实验控制的手段之一，目的在于消除无关变量对实验结果的影响。因此除待考查因素变量外，实验组与对照组中的其它条件应尽量相同。实验组和对照组一般是随机决定的，故实验组与对照组两者之差异，则可认定为是来自实验变量的影响，这样的实验结果是可信的。通常有以下几种对照类型。

(1)空白对照

空白对照是指不加处理因素的对象组。此类对照在实验方法研究中经常被采

用,用以评定测量方法的准确度以及观察实验是否处于正常状态等。例如在混凝实验中,用不加混凝剂的原水作为空白对照,与加入混凝剂的水样一起进行混凝实验,实验结束后比较两者浊度的变化,进而说明混凝剂的处理效果。

(2) 自身对照

自身对照是指实验与对照在同一对象上进行,不另设对照组。此类对照的方法简便,以实验处理前的对象状况为对照组,实验处理后的对象变化则为实验组。

(3) 条件对照

条件对照是指虽给对象施以某种实验处理,但这种处理是对照意义的,或不是所要研究的处理因素。此类对照是实验组的反证,例如为了验证某种激素对动物生长发育的效果,在实验组中加入该激素,而在条件对照组中加入该激素的抑制剂,再设置空白对照,通过比较,能更充分地说明其对动物生长的促进作用。

(4) 相互对照

相互对照是指不另设对照组,而是几个实验组之间相互对比,通过对结果的比较分析,来探究某种因素与实验对象的关系。例如考查不同碳源对微生物生长的系列实验中,将各组实验结果进行相互对照,从而分析其对微生物的影响。

(5) 标准对照

生物的某些生理、生化项目设置有相应的标准,标准对照是将观察测定的实验数值与现有的标准值相比较,以确定其正常与否的方法。

4. 区组控制原则

区组控制又称局部控制或分层控制,是用来提高实验精确度的一种方法,用以减少或消除一些可能影响实验响应,但并不是实验者感兴趣的因子带来的变异。区组控制按照一定标准将实验对象分组,将不同的实验条件均匀化,从而使差异较小的区组内的系统误差减小。例如在考查氮肥对作物产量影响的实验中,将不同类型的地块分成几个区组,在区组内进行实验可有效降低由于地块不同对结果产生的影响,与不分组的随机实验相比可以大大提高结果的精确性。

第2节 单因素实验设计

实验中只有一个影响因素,或虽有多多个影响因素,但在安排实验时只考虑一个对指标影响最大的因素,其它因素尽量保持不变的实验,即为单因素实验。在生产和科学实验中,人们为了达到优质、高产、低耗的目的,需要对有关因素的最佳点进行选择,有关这些最佳点选择的问题被称为优选问题。而利用数学原理,合理地安排实验点,减少实验次数,从而迅速找到最佳点的一类科学方法被称为优选法。单因素优选法的实验设计包括均分法、对分法、黄金分割法、分数法等。

2.1 均分法

均分法是在实验范围内,根据精度要求和实际情况,均匀地安排实验点,在每个实验点上进行实验并相互比较以求得最优点的方法。在对目标函数的性质没有全面掌握的情况下,均分法是最常用的方法,可以作为了解目标函数的前期工作,同时可以确定有效的实验范围。均分法的优点是得到的实验结果可靠、合理,适用于各种实验目的,缺点是实验次数较多,工作量较大,不经济。

2.2 对分法

对分法也被称为等分法、平分法,也是一种简单方便、广泛应用的方法。对分法总是在实验范围 $[a, b]$ 的中点 $x_1 = (a+b)/2$ 上安排实验,根据实验结果判断下一步的实验范围,并在新范围的中点进行实验。如结果显示 x_1 取大了,则去掉大于 x_1 的一半,第二次实验范围为 $[a, x_1]$,实验点在其中点 $x_2 = (a+x_1)/2$ 上。重复以上过程,每次实验就可以把查找的目标范围减小一半,这样通过7次实验就可以将目标范围缩小到实验范围的1%之内,10次实验就可以将目标范围缩小到实验范围的1‰之内。对分法的优点是每次实验能去掉实验范围的50%,取点方便,实验次数大大减少。缺点是适用范围较窄,要根据上一次实验结果得到下一次实验范围。

2.3 黄金分割法

黄金分割法也称为0.618法,适用于实验指标或目标函数是单峰函数的情况,即在实验范围内只有一个最优点,且距最优点越远的实验结果越差。具体步骤是每次在实验范围内选取两个对称点做实验,这两个点(记为 x_1, x_2)分别位于实验范围 $[a, b]$ 的0.382和0.618的位置。其中:

$$x_1 = a + 0.382(b-a)$$

$$x_2 = a + 0.618(b-a)$$

对应的实验结果记为 y_1, y_2 。如果 y_1 优于 y_2 ,则 x_1 是好点,把实验范围 $[x_2, b]$ 划去,新的实验范围是 $[a, x_2]$,再重新进行黄金分割,选取两个对称点(记为 x_3, x_4),其中:

$$x_3 = a + 0.382(x_2 - a) = a + 0.618 \times 0.382(b-a) = a + 0.236(b-a) = a + x_2 - x_1$$

$$x_4 = a + 0.618(x_2 - a) = a + 0.618 \times 0.618(b-a) = a + 0.382(b-a) = x_1$$

重复以上步骤,直到找到满意的、符合要求的实验结果和最佳点。同理,如果 y_2 优于 y_1 ,则 x_2 是好点,新的实验范围是 $[x_1, b]$;如果 y_1 与 y_2 效果一样,则去掉两