

环境工程实验



张仁志 张尊举 / 主编

HUANJING GONGCHENG
SHIYAN

普通高等教育“十三五”规划教材

环境工程实验

张仁志 张尊举 主编

中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境工程实验/张仁志, 张尊举主编. —北京: 中国环境出版集团, 2019.2

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5111-3899-6

I. ①环… II. ①张…②张… III. ①环境工程—实验—高等学校—教材 IV. ①X5-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 012310 号

出版人 武德凯
责任编辑 沈建 曹玮
责任校对 任丽
封面设计 彭杉

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2019 年 2 月第 1 版
印 次 2019 年 2 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 25
字 数 512 千字
定 价 49.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

本书编写组

主 编：张仁志 张尊举

编委成员：姚淑霞 孙 蕾 金泥沙 金 伟 郝冬亮

伦海波 董亚荣 王晓娜 赵 育 刘 芳

胡天蓉 戴秋香 王 朦

前 言

《环境工程实验》是在“十二五”职业教育国家规划教材《环境综合实验》的基础上，结合当代本科职业教育的要求和环境工程专业知识技能学习的需要，通过增减项目、补充实验内容而编写的应用教材。

为了更好地满足今后一段时间环境保护高等教育的需求，保证基础理论知识能够联系实际，达到知识、技能、能力的综合培养目的，编写组在编写前对《环境综合实验》以及其他院校相关的实验教材使用情况进行了认真调研，征求了部分师生对现有教材使用的意见和建议，听取了从事环境工程相关专业技术人员的意见，并结合环境科学与工程专业培养方案，对教材进行了多次修改。在此基础上组织教师对主要工艺实验项目进行开发和预实验，完善实验内容和步骤，保证实验可操作性，以促进在有限的实验课时和条件下，获得最佳的教学效果。

实验教材在编写顺序上作了调整，以体现以学生为主体，以工程实验内容学习为重点的学习方法，即学生先预习了解实验设计方法、知道数据处理方法，并参照工艺实验内容，完善工艺实验设计，进行实验和数据处理，在工艺实验的同时复习监测方法。实验内容主要分两大部分，即环境工程工艺实验（包含水、气、声、土壤）和监测实验；在《环境综合实验》的基础上，增加了大气、噪声和土壤污染控制方面的工程实验，删除和修改了部分监测实验。教材更注重综合实验、工艺实验、设计性实验和创新性实验，减少验证性和演示性实验，以便提高学生综合运用知识和解决实际问题能力。例如，本书中的污水处理工艺实验可以将所有的实验联系在一起，便于学生理解对

水污染控制工程的基本原理，培养学生选择和设计水污染处理研究与实验方法的初步能力，培养学生使用实验仪器设备能力与分析、处理实验数据的基本能力。本书还编写了实验设计与创新性实验的基本原则、思路、方法等内容，便于教师指导学生进行创新性实验。

在此，向为本书提供修改意见的老师、同学和工程技术人员一并表示感谢！

由于编者学识和工作经验不足、水平有限，教材中还存在着错误和不妥之处，希望各位老师、同学和读者批评指正，以便在下一版修订完善。

编者

2018年仲夏于北戴河

目 录

绪 论	1
第一节 环境工程实验的意义和教学目的	1
第二节 环境工程实验的教学要求	2
第三节 实验教学考核	3
第一部分 实验设计与创新实验	4
第一节 工艺实验设计基本原理	4
第二节 单因素实验设计	8
第三节 双因素实验设计	11
第四节 正交实验设计	12
第五节 创新实验	30
第二部分 实验数据处理	36
第一节 误差	36
第二节 准确度	39
第三节 精密度	40
第四节 工作曲线中可疑值的检验	41
第五节 有效数字修约及运算规则	42
第六节 实验数据表示方法	45
第三部分 环境工程工艺实验	52
实验一 沉淀实验	52
实验二 混凝沉淀与混凝气浮实验	59
实验三 加压溶气气浮工艺	64
实验四 砂滤工艺	69
实验五 活性污泥法好氧生物处理工艺	73

实验六	活性污泥耗氧速率测定	80
实验七	氧转移速率测定	83
实验八	SBR 处理工艺	87
实验九	塔式生物滤池工艺	94
实验十	生物接触氧化工艺	99
实验十一	生物转盘工艺	104
实验十二	UCT 生物脱氮除磷工艺	109
实验十三	反硝化加碳源实验	113
实验十四	浸入式 MBR 系统工艺	118
实验十五	UASB 高效厌氧生物处理工艺	121
实验十六	厌氧污泥的产甲烷活性测定	127
实验十七	污泥比阻的测定	132
实验十八	超滤工艺	137
实验十九	连续流活性炭吸附工艺	144
实验二十	离子交换工艺	148
实验二十一	芬顿 (Fenton) 试剂氧化降解高分子有机化合物实验	153
实验二十二	加氯消毒工艺	159
实验二十三	紫外消毒工艺	162
实验二十四	水污染源自动在线监测维护与比对实验	165
实验二十五	旋风除尘器性能测定	171
实验二十六	袋式除尘器性能测定	179
实验二十七	静电除尘器除尘实验	184
实验二十八	填料塔吸收 SO ₂ 实验	189
实验二十九	噪声污染控制实验	191
实验三十	土壤修复实验	198
第四部分	监测分析实验	201
实验一	水样采集	201
实验二	pH 的测定	205
实验三	电导率的测定	208
实验四	浊度的测定	211
实验五	残渣的测定	218
实验六	色度的测定	223

实验七 溶解氧的测定	227
实验八 凯氏氮的测定	233
实验九 氨氮的测定	237
实验十 亚硝酸盐氮的测定	243
实验十一 硝酸盐氮的测定	247
实验十二 总氮的测定	251
实验十三 总磷的测定	254
实验十四 余氯的测定	259
实验十五 化学需氧量 (COD _{Cr}) 的测定	266
实验十六 高锰酸盐指数的测定	269
实验十七 生化需氧量 (BOD ₅) 的测定	272
实验十八 化学需氧量 (COD _{Cr}) 在线自动监测实验	281
实验十九 氨氮在线自动监测	285
实验二十 空气中二氧化硫 (SO ₂) 监测	289
实验二十一 空气中氮氧化物 (NO _x) 监测	296
实验二十二 空气中总悬浮颗粒物 (TSP) 监测	302
实验二十三 空气中 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 监测	306
实验二十四 空气中可沉降颗粒物监测	310
实验二十五 区域声环境监测	313
实验二十六 道路交通噪声环境监测	317
实验二十七 工业企业厂界噪声监测	320
实验二十八 建筑施工场界噪声监测	323
实验二十九 社会生活环境噪声的监测	327
实验三十 污水生物处理中生物相的观察	332
附 录	342
附录一 生活饮用水卫生标准 (GB 5749—2006) (摘录)	342
附录二 生活杂用水水质标准 (CJ/T 48—1999) (摘录)	348
附录三 地表水环境质量标准 (GB 3838—2002) (摘录)	349
附录四 地下水质量标准 (GB/T 14848—93) (摘录)	352
附录五 农田灌溉水质标准 (GB 5084—2005) (摘录)	354
附录六 渔业水质标准 (GB 11607—89) (摘录)	356
附录七 污水综合排放标准 (GB 8978—1996) (摘录)	357

附录八 城镇污水处理厂排放标准 (GB 18918—2002) (摘录)	365
附录九 环境空气质量标准 (GB 3095—2012) (摘录)	367
附录十 大气污染物综合排放标准 (GB 16279—1996) (摘录)	369
附录十一 声环境质量标准 (GB 3096—2008) (摘录)	383
附录十二 工业企业厂界噪声标准 (GB 12348—2008) (摘录)	384
附录十三 建筑施工场界噪声限值 (GB 12523—2011) (摘录)	385
参考文献.....	386

绪 论

第一节 环境工程实验的意义和教学目的

一、环境工程实验的意义

实践是检验真理的标准，实验则是提高学生理论联系实际的原始途径。众所周知，环境科学与工程是以实验为基础的学科，学科中的很多理论、应用参数、评价管理方法和工艺工程设计选择等都是通过实验验证获取的。因此，环境工程实验课程是环境类专业大学教育十分重要的环节。

环境工程实验可以使学生理论联系实际，加深对理论知识的理解，促进对专业知识的应用和创新，培养学生观察问题、分析问题和解决问题的能力，同时提高学生综合运用知识的能力、动手和科研的能力、创新能力和就业的能力。对学生后期的毕业设计、学习深造和岗位工作都具有深远的影响。

二、环境工程实验的教学目的

环境工程实验教学的主要目的是帮助学生深入掌握环境工程专业的基础知识以及工程技术的基本实验技能，为今后的学习深造和实习工作奠定基础。

通过工艺性和设计性实验，使学生了解如何进行实验方案的设计，并初步掌握环境实验的研究方法和基本测试技术，运用工艺实验数据进行工程设计，为企业提供咨询和服务。掌握实验数据的整理、分析、处理技术，包括如何收集实验数据，如何正确地分析和归纳实验数据、运用实验成果验证已有的概念和理论等。

加深对环境工程、环境监测等课程所学理论知识的理解；掌握各类水、气、噪声、土壤污染治理系统的操作、管理、维护以及工艺方法和原理，通过实验确定工艺参数，了解各种指标的意义；掌握监测数据的处理方法；掌握常用水质、大气、噪声等环境要素的监测方法；了解常规采样仪器、分析仪器的原理及使用方法。

第二节 环境工程实验的教学要求

一、实验课前预习

为完成好每个实验，学生在课前必须认真阅读实验教材，清楚地了解实验项目的目的要求、实验原理和实验内容，写出简明的预习报告。预习报告包括：实验目的、实验方法、实验步骤、注意事项、可能出现的问题、预期结果和准备向老师提出的问题。准备好实验记录表格，实验之前要将预习报告提交给指导老师。

二、实验设计

对综合性的实验，实验设计是实验研究的重要环节，是获得理想实验结果的基本保障。在实验教学中，宜将此环节的训练放在部分实验项目完成后进行，使学生掌握实验设计的方法。

三、实验操作

学生实验前应仔细检查实验设备、仪器仪表是否完整齐全。实验时要严格按照操作规程认真操作，仔细观察实验现象，精心测定实验数据并详细填写实验记录。实验结束后，要将实验设备和仪器仪表恢复原状，将周围环境整理干净。学生应注意培养自己严谨的科学态度，养成良好的工作和学习习惯。

四、实验数据处理

通过实验取得大量数据以后，必须对数据作科学的整理分析，去伪存真、去粗取精，以得到正确可靠的结论。

五、编写实验报告

将实验结果整理编写成一份实验报告，是实验教学必不可少的组成部分。这一环节的训练可为今后写好科学论文或科研报告打下基础。实验报告应独立完成，须包括下述内容：对实验目的和实验原理的认识、实验装置和方法、实验现象的观察与记录、实验数据处理、结果问题讨论与分析。

对于综合性实验或科研论文，最后还要列出参考文献。

对于分小组完成的实验项目，要提交小组实验报告。在实验过程中和全部实验结束

后,由小组长主持全组总结、讨论、交流经验,完成小组实验报告。其内容应包括:实验计划、实验日志、观测记录、事故分析、失败原因、对计划执行情况的评估、对每个学生的评估、实验收获、技能提高等。小组实验报告是锻炼学生团队精神及合作意识、提高综合素质的一个重要而有效的教学环节。

第三节 实验教学考核

实验教学考核是对教学效果进行评估,保证教学质量,不断改革教学内容与方法的重要手段,也是对学生学习效果、知识掌握程度、能力和素质提高程度评估的重要教学环节。而实验课教学考核与其他理论课不同,应针对实验课教学内容、方法与规律,探索实验课的考核方法。其考核的内容应包括:

- (1) 对理论知识的应用能力;
- (2) 动手能力,对实验现象的观察能力,分析问题、解决问题的能力;
- (3) 工作态度、学习态度、团队合作精神,语言交流能力、提出问题能力;
- (4) 实验方法、实验结果表达是否正确,实验预习报告、实验报告的正确性、完整性。

对不同的实验课,单项实验课和综合实验课考核的方法、内容应有所不同。应确定一个量化考核评分指标体系,便于更加客观、公正地对实验课教学进行考核。

第一部分 实验设计与创新实验

第一节 工艺实验设计基本原理

实验设计的目的是选择一种对所研究的特定问题最有效的实验安排，以使用最少的人力、物力和时间获得满足要求的实验结果。从广义来说，包括明确实验目的、确定测定参数、确定需要控制或改变的条件、选择实验方法和测试仪器、确定测量精度要求、实验方案设计和数据处理步骤等。实验设计是实验研究过程的重要环节，通过实验设计可以使我们的实验安排在最有效的范围内，以保证通过较少的实验得到预期的实验结果。例如，在进行生化需氧量（BOD）的测定时，为了能全面地描述废水有机污染的情况，往往需要估计最终生化需氧量（ BOD_u 或 L_u ）和生化反应速率常数 K_1 。完成这一实验需对 BOD 进行大量的、较长时间（约 20 天）的测定，既费时又费钱。此时如有较合理的实验设计，就可能在较短的时间得到比较正确的结果。表 1-1-1 是三种不同的实验设计得到的结果，图 1-1-1、图 1-1-2 是实验得到的 BOD 曲线。从上述图、表中可以看出，30 个测点的一组实验设计是不合适的，它不能给出满意的参数估算值。原因在于 BOD 是一级反应模型，因此，如果要使实验曲线与实测数据拟合得好些，要同时调整 K_1 和 L_u 。由图 1-1-2 可以看出，如果只调整 K_1 ，会使 L_u 值变化很大，但模型对前 30 个数据的拟合情况却无显著差异，也就是说，两组截然不同的参数，其前 30 个点的拟合情况差别不大。可见在这种实验设计条件下，在一定的实验误差范围内，虽然两个实验者所得到的结果都是对的，但结论可能相差很大。20 天 59 次观测的结果虽然好，但需要大量人力与物力。而 20 天 12 次观测的实验安排（图 1-1-1 中第 4 天 6 个点，第 20 天 6 个点）测试次数最少，而其参数估算结果与 59 次观测所得结果相接近。这个例子说明，只要实验设计合理，不必进行大量观测便可得到精确的参数估算值，使实验的工作量显著地减少。如果实验点安排不好（如全部安排在早期），虽然得到的参数估算值高度相关，但实验不能达到预期目的。此外，即使实验观测的次数完全相同，如果实验点的安排不同，所得结果也可能截然不同。因此，正确的实验设计不仅可以节省人力、物力和

时间，并且是得到可信的实验结果的重要保证。

表 1-1-1 三种 BOD 实验设计所得结果

实验安排	参数估算值		参数的均方差
	K_1 / d^{-1}	$L_u / (\text{mg/L})$	
20 天 59 次观测	0.22	101 000	-0.85
30 次观测, 0~5 天	0.19	11 440	-0.998 9
第 4 天 6 次, 第 20 天 6 次	0.22	10 190	-0.63

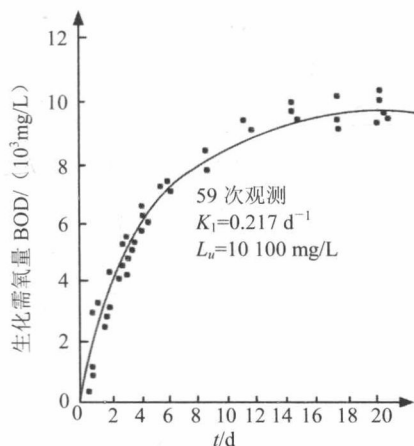


图 1-1-1 20 天 59 次观测的 BOD 曲线

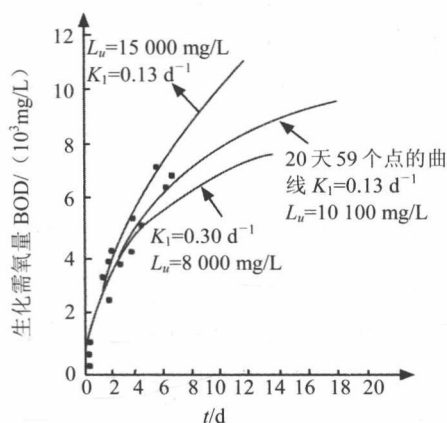


图 1-1-2 5 天 30 次观测的 BOD 曲线

在生产和科学研究中，实验设计方法已得到广泛应用，概括地说，包括以下三个方面的应用。

一、最佳运行参数选择

在生产过程中，人们为了达到优质、高产、低消耗等目的，常需要对有关因素的最佳点进行选择，一般是通过实验来寻找这个最佳点。实验的方法很多，为能迅速地找到最佳点，这就需要通过实验设计，合理安排实验点，才能最迅速地找到最佳点。例如，混凝剂是水污染控制常用的化学药剂，其投加量因具体情况不同而异，因此通常需要多次实验确定最佳投药量，此时便可以通过实验设计来减少实验的工作量。

二、数学模型中的参数估算

在实验前，若通过实验设计合理安排实验点、确定变量及其变化范围等，可以以较短的时间获得较精确的参数。例如，已知 BOD 一级反应模型 $Y=L_u(1-10^{-K_1t})$ ，要估

计 K_1 和 L_u 。由于 $\frac{dy}{dt} \Big|_{t=0} = K_1 L_u$ ，说明在反应的前期参数 K_1 和 L_u 相关性很好。所以如果在 t 靠近 0 的小范围内进行实验，就难以得到正确的 K_1 和 L_u ，因为在此范围内， K_1 的任何偏差都会由于 L_u 的变化而得补偿（图 1-1-2）。因此，只有通过正确的实验设计，把实验安排在较大的时间范围内进行，才能比较精确地获得 K_1 和 L_u 。

三、竞争模型的筛选

当可以用几种形式来描述某一过程的数学模型时，常需要通过实验来确定哪一种是比较恰当的模型，此时也需要通过实验设计来保证实验提供可靠的信息，以便正确地进行模型筛选。例如，判断某化学反应是按 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 进行，还是按 $A \rightarrow B \rightleftharpoons C$ 进行时，要做许多实验。根据这两种反应动力学特征，B 的浓度与时间 t 的关系分别为图 1-1-3 所示的两条曲线。从图中可以看出，要区分表示这两种不同反应机理的数学模型，应该观测反应后期 B 的浓度变化，在均匀的时间间隔内进行实验是没有必要的。如果把实验安排在前期，用所得到的数据进行鉴别，则无法达到筛选模型的目的。这个例子说明，实验设计对于模型筛选是十分重要的，如果实验点位置选取得不好，即使实验数据很多，数据很精确，也达不到预期的实验目的。相反，选择适当的实验点位置后，即使测试精度稍差些，或者数据少一些，也能达到实验目的。

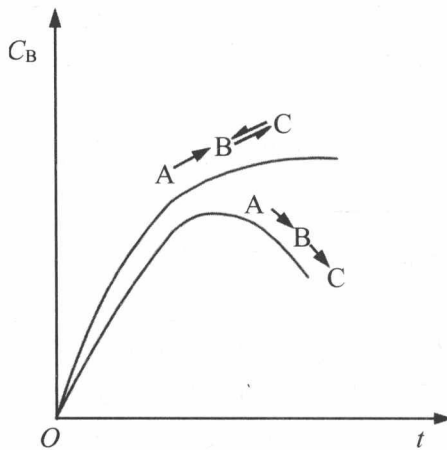


图 1-1-3 C_B 与 t 的关系

实验设计的方法很多，有单因素实验设计、双因素实验设计、正交实验设计、析因分析实验设计、序贯实验设计等。各种实验设计方法和出发点不同，因此，在进行实验设计时，应根据研究对象的具体情况决定采用哪一种方法。

在生活过程和科学研究中，对实验指标有影响的条件，通常称为因素。有一类因素，

在实验中可以人为地加以调节和控制,叫作可控因素。例如,混凝实验中的投药量和 pH 是可以人为控制的,属于可控因素。另一类因素,由于技术、设备和自然条件的限制,暂时还不能人为控制,叫作不可控因素。例如,气温、风对沉淀率的影响都是不可控因素。实验方案设计一般只适用于可控因素。本书中提到的因素,凡没有特别说明的都是指可控因素。在实验中,影响因素通常不止一个,但往往不是对所有的因素都加以考察。有的因素在长期实验中已经比较清楚,可暂时不考察,固定在某一状态上,只考察一个因素,这种考察一个因素的实验,叫作单因素实验;考察两个因素的实验称双因素实验;考察两个以上因素实验称多因素实验。

在实验设计中用来衡量实验效果好坏所采用的标准称为实验指标,或简称指标。例如,在进行地面水的混凝实验时,为了确定最佳投药量和最佳 pH,选定浑浊度作为评定比较各次实验效果好坏的标准,即浊度是混凝实验的指标。

进行实验方案设计的步骤如下:

1. 明确实验目的、确定实验指标。研究对象需要解决的问题,一般不止一个。例如,在进行混凝效果的研究时,要解决的问题有最佳投药量问题、最佳 pH 问题和水流速度梯度问题。不可能通过一次实验把所有这些问题都解决,因此,实验前应首先确定这次实验的目的究竟是解决哪一个或者哪几个主要问题,然后确定相应的实验指标。

2. 挑选因素。在明确实验目的和确定实验指标后,要分析研究影响实验指标的因素。从所有的影响因素中排除那些影响不大,或者已经掌握的因素,让它们固定在某一状态上;挑选那些对实验指标可能有较大影响的因素来进行考察。例如,在进行 BOD 模型的参数估计时,影响因素有温度、菌种数、硝化作用及时间等。通常是把温度和菌种数控制在一定状态上,并排除硝化作用的干扰,只通过考察 BOD 随时间的变化来估计参数。

3. 选定实验设计方法。因素选定后,可根据研究对象的具体情况决定选用哪一种实验设计方法。例如,对于单因素问题,应选用单因素实验设计法;3 个以上因素的问题,可以用正交实验设计法;若要进行模型筛选或确定已知模型的参数估计,可采用序贯实验设计法。

4. 实验安排。上述问题都解决后,便可以进行实验点位置安排,开展具体的实验工作。

下面我们仅介绍单因素实验设计、双因素实验设计及正交实验设计法的部分基本方法,原理部分可根据需要参阅有关书籍。