

普通高等院校系列规划教材——环境类

PUTONG GAODENG YUANXIAO XILIE GUIHUA JIAOCAI HUANJINGLEI



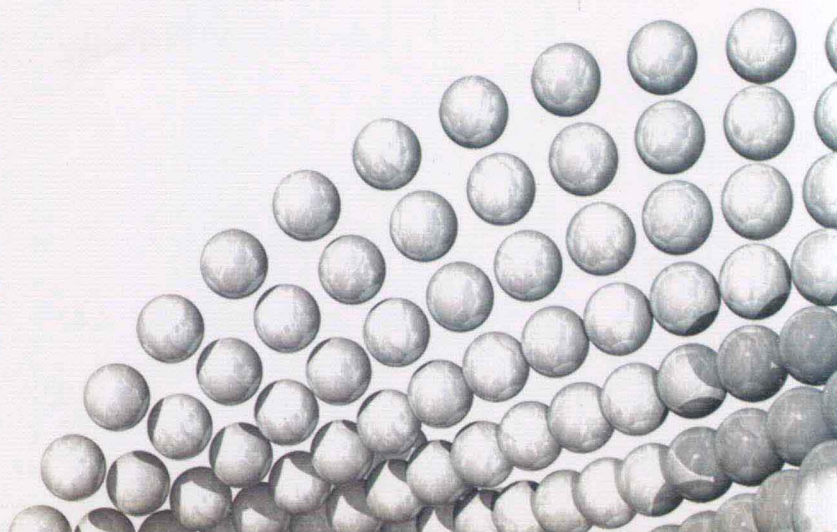
环境科学与工程 综合实验

HUANJING KEXUE YU GONGCHENG
ZONGHE SHIYAN

主 编 ● 朱启红 王书敏 曹优明



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



普通高等院校系列规划教材——环境类

环境科学与工程综合实验

主 编 朱启红 王书敏 曹优明

副主编 夏红霞 李 强 丁武泉

谢云成 宋 力

西南交通大学出版社

内容简介

本书比较全面地阐述了环境科学与工程综合实验技术的基础知识和环境科学与工程专业本科生必须掌握的实验技术。内容分为实验设计与数据分析原理、综合实验、常见实验指标测定方法等。

本书可作为环境科学与工程专业、环境工程专业、环境科学专业、给排水专业的教材,以及环保人员复培训班教材,也可作为在职环境保护人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

环境科学与工程综合实验 / 朱启红, 王书敏, 曹优明主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2013.11
普通高等院校系列规划教材. 环境类
ISBN 978-7-5643-2672-2

I. ①环… II. ①朱… ②王… ③曹… III. ①环境科学-实验-高等学校-教材②环境工程-实验-高等学校-教材 IV. ①X-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第226278号



普通高等院校系列规划教材——环境类

环境科学与工程综合实验

主编 朱启红 王书敏 曹优明

*

责任编辑 牛 君

助理编辑 胡晗欣

特邀编辑 柳堰龙

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区交大路146号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 8

字数: 198千字

2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-2672-2

定价: 20.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

《环境科学与工程综合实验》

编委会

主 编 朱启红 王书敏 曹优明

副主编 夏红霞 李 强 丁武泉 谢云成 宋 力

编 委 孙向卫 蒋山泉 谢朝霞 邓小红

主 审 宋仲容

前 言

随着工业的高速发展以及人们生活水平的提高,社会对环境科学与工程专业的学生的专业技能和创新能力的要求不断提高,如何更大程度地使本专业学生适应行业发展,拓展学生学习空间和实践机会,使之成为环境专业应用型人才,是专业人才培养的重要任务。为此,我们在保证基本理论的系统性和完整性的同时,充分吸收国内外环境领域相关科研成果新观念、新方法、新设备和新经验,编写了本教材。本教材包括三个方面的内容:实验设计与数据分析原理、综合实验、常见实验指标测定方法等。本教材内容力求反映环境科学学科发展和应用型人才培养的需要,提升学生的实践能力、综合应用能力和科技创新能力。

本教材在编写过程中参考了一些从事教学、科研、生产工作的同行撰写的论文、教材、手册,以及部分网络资料,在此表示衷心感谢。

限于编者的水平,书中难免存在不足之处,敬请各位读者批评指正。

编 者

2013年6月

目 录

第一部分 实验设计与数据分析原理

第一章 实验设计原理	1
第一节 科学研究与科学实验	1
第二节 制订实验方案	5
第三节 实验误差及其控制	10
第二章 实验的优化设计	14
第一节 环境实验的优选设计	14
第二节 环境实验的正交设计	25

第二部分 综合实验

实验一 重金属在植物体系中的迁移转化规律研究	30
实验二 水体底泥对 Cd^{2+} 的吸附与解析	34
实验三 动力学方法测定土-水环境体系表面电荷性质	36
实验四 应用硫酸盐还原菌处理含锌废水	39
实验五 活性炭对不同金属离子的吸附能力比较	44
实验六 聚乙烯醇包埋活性炭微球吸附废水中的铬 (VI)	47
实验七 活性污泥法处理生活污水	49
实验八 生物接触氧化运行实验	51
实验九 应用 SBR 技术脱氮除磷实验	55
实验十 SBBR 法处理垃圾渗滤液	58
实验十一 Fenton 试剂降解甲基橙	62
实验十二 污水混凝工艺对细菌总数的去除	65
实验十三 粉煤灰絮凝剂的制备及其对实验室废水的处理	67
实验十四 厌氧污泥产甲烷活性及影响因素实验	71
实验十五 生物滞留系统对城市暴雨径流溶解性氮的脱除	76
实验十六 水体富营养程度的评价	79
实验十七 湖水中溶解氧含量的日变化及不同水质中溶解氧含量的测定	86
实验十八 内电解法处理含铬废水	89
实验十九 重金属 Cu^{2+} 对鱼类急性毒性实验	92

第三部分 常见实验指标测定方法

实验一 水中铬的测定 96

实验二 水中铅的测定（双硫脲分光光度法） 99

实验三 卫生细菌的检验——细菌总数的测定 102

实验四 植物提取物中铬的测定——石墨炉原子吸收光谱法 104

实验五 植物提取物中铅的测定（石墨炉原子吸收光谱法） 106

实验六 植物提取物中镉的测定（石墨炉原子吸收光谱法） 108

实验七 氨氮的测定 110

实验八 化学需氧量的测定（重铬酸钾法） 113

实验九 生化需氧量的测定 116

参考文献 120

第一部分 实验设计与数据分析原理

第一章 实验设计原理

实验设计与数据分析是数理统计学的一个重要分支。它是以概率论、数理统计及线性代数为理论基础，结合一定的专业知识和实验经验，研究如何经济、合理地安排实验方案以及如何系统、科学地分析处理实验结果的一项科学技术，从而解决了长期以来在实验领域中，传统的实验方法对于多因素实验往往只能被动处理实验数据，而对实验方案的设计以及实验过程的控制显得无能为力这一问题。近代创立和发展起来的实验设计方法，将实验方案的最优化设计与数据处理方法的最优化选择进行有机结合，并将其思想和要求贯穿于实验的全过程，使实验领域发生了深刻的变化，有力地推动了科学研究和生产实践的发展。

第一节 科学研究与科学实验

一、科学研究与科学实验

科学研究一般是指利用科研手段和设备，为了认识客观事物的内在本质和运动规律而进行的调查研究、实验、试制等一系列的活动，为创造发明新产品和新技术提供理论依据。科学研究的基本任务就是探索、认识未知。科学实验是人们为实现预定目的，在人工控制条件下，通过干预和控制科研对象而观察和探索有关规律和机制的一种研究方法，是人类获得知识、检验知识的一种实践形式。

科学实验具有纯化和强化观察对象的功能，并具有可重复性，因此，科学实验被越来越广泛地应用于各行各业，并且在现代科学中占有越来越重要的地位。在现代科学中，人们需要解决的研究课题日益复杂，日益多样，使得科学实验的形式也不断丰富和多样。

二、科学实验的目的

1. 简化和纯化

实验方法可以利用科学仪器和设备所造成的条件，根据研究目的，突出研究对象的主要

因素，排除次要因素、偶然因素以及外界的干扰，使要认识事物的某些属性在特定的状态下显示出来，从而能更准确地认识事物的本质和规律。如 1799 年英国物理学家亨利·戴维把实验仪器保持在水的冰点，排除了实验物品和周围环境的热交换，证明冰融化所需要的热来自于摩擦，否定了当时占统治地位的“热素说”。

2. 强化或弱化

许多事物在常态下并不能充分暴露其本质，但利用实验可以创造出自然界中不可能出现的环境，从而更好地认识研究对象。如 1911 年荷兰科学家昂尼斯把汞的温度降到 0°C 以下时，发现汞的电阻突然消失，变成了所谓的超导体，并由此打开了超导研究的大门。美籍科学家吴健雄让钴-60 处于超低温这一极端状态，成功地验证了弱相互作用下宇称不守恒这一假设。

三、科学实验程序

1. 准备阶段

科学实验过程的第一个阶段，可以叫作实验的准备阶段。

一项科学实验的价值，它的成功或失败，很大程度上取决于科学实验的准备阶段。在这一阶段，人们需要进行四项工作，其中的每项工作，都不能离开理论的运用，不能离开逻辑思维活动。

(1) 确立实验目的，也就是明确为什么要进行实验。

例如，迈克尔逊和莫雷关于光的干涉实验，其目的就在于检验当时流行的以太理论是否正确。这个目的的实现，对于推动物理学的发展有着十分重要的作用。确定实验目的的是一个理论逻辑演绎的过程。

(2) 明确指导实验设计的理论。

在确立实验目的之后，并不能马上着手设计实验，而是要先明确以什么理论来指导实验的设计。这种指导性理论，就是启发实验者应采用什么方法并从什么方向上去实现已确立的目的。没有这一步骤，就不能从实验目的过渡到具体的实际设计上去。

例如，恩格斯早就提出生命是通过化学进化的途径产生的。在恩格斯之后，很多科学家都想用实验来检验恩格斯的论断。但在很长一段时间里，人们始终不能进入具体的实验设计。其原因就在于实验设计所依据的指导性理论还不具备，人们还不知从何处着手去设计这种实验。也就是说，在实验目的和具体实验设计之间还缺少一个把两者联系起来的中间环节。

进入 20 世纪后，人们才提出了一个理论：在原始的不同于今天的大气条件下，在漫长的岁月里，非生命物质可以转化为生命。此后，海登又提出了原始大气和原始汤液的概念。这些理论相继提出之后，实验设计就有了依据，有了方向，人们就可以根据这些理论进一步作出逻辑推理。假定我们模拟了原始地球的大气成分，并创造了相应的条件，那么就可以进行模拟原始地球时期使无机物转化为生命所必需的有机物的实验。1953 年米勒的实验就是依据这种指导性理论而进行设计并取得成功的。指导性理论不仅关系到一个实验目的应从何处着手实现的问题，而且还直接影响到实验设计的成效。

(3) 着手实验设计。

马克思说：“蜜蜂建筑蜂房的本领使人间的许多建筑师感到惭愧。但是，最蹩脚的建筑师

从一开始就比最灵巧的蜜蜂高明的地方，是他在用蜂蜡建筑蜂房以前，已经在自己的头脑中把它建成了。劳动过程结束时得到的结果，在这个过程开始时就已经在劳动者的表象中存在着，即已经观念地存在着。”（《马克思恩格斯全集》第23卷，人民出版社1972年版，第202页）这就是说，人们在实际行动之前，要先考虑到自己在未来应如何行动，采取哪些步骤，每步行动可能带来什么结果，假如某些条件突然改变了，将发生什么影响，等等问题。科学实验是人们为了认识自然界而进行的一种变革自然界对象的社会实践活动。人们当然更要在采取具体实验行动之前，先在思维中以观念形态大致完成这个变革的行动过程。哪些干扰因素应设法排除，哪些次要因素要暂时撇开，这一切都应在实验设计中给予考虑。实验设计的任务，就是在实施实验之前，先把这个实验在自己的观念中完成。

当然，在实验设计中还有许多具体的工艺和技术方面的问题。但是贯穿实验设计的一根主线，则是运用一定理论而进行的逻辑推论。相应的工艺和技术问题也只有在一定逻辑思维基础上，才能联结成为一个完整的设计。

（4）实验准备。

人们往往把实验仪器、设备、材料的准备，当做是一种纯物质的活动。其实，每一种仪器都是以某种或某些理论为依据而进行设计和制造的。例如，伽利略、托里拆利等人使用的温度计，就是根据液体和气体的体积与“受热程度”按比例膨胀的假定而制作的。1878年，国际度量衡委员会关于标准温度计的决议则作了如下规定：“温度应当用化学上纯的氢在定容情况下的压力来测量，它在冰的溶解点时的压力为1000毫米水银柱高。”所以，每使用一种仪器，实际上就意味着引进了一些理论。材料的选用也是根据一定的理论进行的。

例如，孟德尔选择豌豆作为实验材料，就是因为豌豆有严格的自花授粉，易于栽培，生长期短，有明显的可区分性状等特点。离开了一定的理论和逻辑思维，实验仪器、设备、材料的准备工作就无法进行。

（5）实施阶段。

科学实验的第二个阶段，可以叫作实验的实施阶段。这个阶段就是实验者操作一定的仪器设备使其作用于实验对象，以取得某种实验效应和数据。仪器设备与实验对象的相互作用是不以人的意志为转移的合乎规律的表现。因此，这个阶段的活动是一种客观的物质活动。作为客观的感性物质活动的实验实施过程正是对人们已有认识的检验，也提供了给人们认识的新事实。

（6）结果处理阶段。

科学实验的第三个阶段，可以叫作实验结果的处理阶段。在这一阶段上，人们对实验结果进行分析。因为尽管人们在实验设计中做了周密考虑，但在实验的实施过程中，仍会有一些事前没估计到的主客观因素影响到实验结果。所谓客观因素主要是指实验仪器设备的偶然变化，实验初始条件、环境条件的偶然变化、实验材料在品种规格上的某些差异，等等。所谓主观因素，主要是指在实验设计时，遗漏了对一些可能产生的系统误差的考虑；在读取数据时，感官上造成的偏差；等等。这些因素造成的影响是混合在一起的。因此，人们就必须对实验最初所呈现出来的结果作出分析，以区分什么是应该消除的误差，什么是实验应有的结果。

在科学实验中，人们变革着客观的物质对象，这就使它和人们的生产活动有相同的方面。因为生产活动作为人们能动地改造客观世界的活动，也是一种变革物质对象的活动。正是由

于这一点，科学实验也和生产活动一样，属于改造客观世界的实践活动的范畴，成为实践的一种基本形式。但是科学实验和生产活动又有区别。

首先，它们的直接目的不同。科学实验的直接目的在于解决一定的科学研究任务。生产活动的直接目的在于提供人们生活 and 再生产所需要的物质财富。

其次，它们产生的结果不同。科学实验产生的结果是人们获得了对事实的认识，是检验一定的理论。而生产活动产生的结果，则是使人们获得了所需要的产品。当然，这种区别不是绝对的，尤其是在现代，科学实验和生产活动已经明显地互相渗透。生产的发展为科学实验提供了前提和条件，科学实验则为发展生产指明了方向、开辟了道路。不仅如此，很多科学实验直接解决生产中的问题，成为生产活动的一部分，而很多生产活动又带有科学实验的性质，它在生产物质产品的同时也解答了某些科学研究的课题。关于科学实验与生产活动的相互关系问题，是科学社会学研究的一个重要课题。

实验法是指经过特别安排，在人为控制下确定事物相互关系的研究方法。实验法是自然科学研究领域最早被人们普遍使用的研究方法之一，是近代自然科学建立的基础，以致国外的学者竟认为，研究（research）就是实验、实验、再实验，反复（re）寻找（search）的过程。达·芬奇、伽利略、牛顿等人都充分利用实验方法做出了巨大的科学成就。

四、科学实验原则

（1）掌握理论。

应熟练掌握与实验课题有关的理论和经验。

实验方法是在人为的控制下对研究对象进行研究的一个过程，所以要精心设计实验方案。在设计实验方案和进行具体实验的过程中，离不开理论的指导和前人经验的积累。实验者只有具备必要的理论知识和实验技能，才能对实验中出现的新事物有敏锐的观察力，当事物表现超出原来的理论框架时，能够及时加以捕捉，并发现其本质。

（2）提出假设。

应事先提出假说或需要检验的观点、理论等。实验在科学研究中主要有两种目的：一是探索 and 发现新现象或新规律；二是检验已有知识或理论的正确性。

1902—1907年，德国化学家费舍尔对蛋白质的化学结论进行深入研究，提出了蛋白质的肽键理论，然后在实验中合成了18个氨基酸的多肽长链，从而验证了其反映蛋白质结构理论的正确性。

（3）精心设计。

应精心设计，严密组织。俗话说，“知己知彼才能百战不殆”。对所要做的实验，必须精心设计，严密组织，做到心中有数，这样才能使成功率更大。根据一定的理论，结合具体的研究对象，可以采取不同的研究方式。如泰勒通过精心设计和严密组织，利用搬运铁块实验、铁砂和煤炭的挖掘实验、金属切削实验等，提出了科学管理的方法。

（4）做好准备。

应选择好实验环境，准备好实验工具。实验环境对于实验的成功与否有很大影响，如在对天体进行观察时，要选择天气很好的时候，才能取得理想的效果。

俗话说，“磨刀不误砍柴工”。实验工具是实验取得成效很关键的一个方面，它的状况决

定着实验能达到的认识水平。如没有高分辨率的光谱设备,就无法认识原子光谱的精细结构。丁肇中正是由于不断把实验的精度提高,最终发现了丁粒子。

(5) 保持状态。

应保持受实验者的常规状态。不论研究对象是自然界中的事物,还是人类自己,为了保证实验结果的客观性,要尽量保持受验者的常规状态。只有在常态下,事物或人所表现出来的才是其真实的情况。在保持正常状态下,通过改善工作条件 and 环境等因素,梅奥通过照明实验、福利实验、电话线圈装配实验、访谈实验等提出了以人为本的管理思想。

(6) 控制因素。

应能有效地控制影响实验的各种因素。在实验过程中,要根据研究目的来尽量控制实验中的各种因素。要突出主要因素,排除次要因素、偶然因素以及外界的干扰,从而能更准确地认识事物的本质规律。伽利略的落体实验、斜面实验和单摆实验都是在突出主要因素、排除次要因素的条件下获得成功的。

(7) 仔细观察。

应仔细观察,尽可能得到精确的数据。在科技史上,当某些重大发现公布之后,经常使一些科学家后悔莫及,因为他们也曾见到过类似现象,但由于未加注意而失去了发现的良机。法国的约里奥·居里在用粒子轰击铍时打出了中子,但他没有留心而误认为是 γ 粒子,让它溜走了。后来,查德威克证明了不是 γ 射线而是中子,获得了诺贝尔物理学奖。可见,在科学实验过程中只有仔细观察,才能得到理想的结果。

(8) 反复实验。

应从小到大、反复多次进行实验。一般说来,在做深入的大规模的实验前,先要做一些探索性的试验,先简单后复杂,这样可以为以后的实验工作积累相关的信息和思路。实验要注意其可重复性。只有多次重复,才能表明其成果是可以让大家认可的。1959年美国物理学家韦伯曾宣布,他的实验装置已直接收到了从银河系一天体发出的引力辐射,直接验证了爱因斯坦关于引力波的预言。但是,他的实验在世界上十几个实验室都未能重复,因而也就没有被科学界承认。

(9) 核对结论。

应仔细核对实验后所得出的结论。实验结束后,要对实验中获得的数据作进一步的加工、整理,从中提取出科学事实或某种规律性的理论。在分析过程中,要利用统计分析的方法,借助于计算机等手段来从数据之间的因果关系、起源关系、功能关系、结构关系等多角度、多层次地进行处理。

第二节 制订实验方案

一、实验因素与水平

实验方案是根据实验目的和要求所拟进行比较的一组实验处理(treatment)的总称。进行科学实验时,必须在固定大多数因素的条件下才能研究一个或几个因素的作用,从变动这

一个或几个因子的不同处理中比较鉴别出最佳的一个或几个处理。这里被固定的因子在全实验中保持一致，组成了相对一致的实验条件；被变动并设有待比较的一组处理的因子称为实验因素，简称因素或因子 (factor)，实验因素的量的不同级别或质的不同状态称为水平 (level)。实验因素水平可以是定性的，如供试的不同品种，具有质的区别，称为质量水平；也可以是定量的，如喷施生长素的不同浓度，具有量的差异，称为数量水平。数量水平不同级别间的差异可以等间距，也可以不等间距。所以实验方案是由实验因素与其相应的水平组成的，其中包括有比较的标准水平。

实验方案按其供试因子数的多少可以区分为以下 3 类：

(1) 单因素实验 (single-factor experiment)。单因素实验是指整个实验中只变更、比较一个实验因素的不同水平，其他作为实验条件的因素均严格控制一致的实验。这是一种最基本的、最简单的实验方案。例如在育种实验中，将新育成的若干品种与原有品种进行比较以测定其改良的程度，此时，品种是实验的唯一因素，各育成品种与原有品种即为各个处理水平，在实验过程中，除品种不同外，其他环境条件和栽培管理措施都应严格控制一致。又例如为了明确某一品种的耐肥程度，施肥量就是实验因素，实验中的处理水平就是几种不同的施肥量，品种及其他栽培管理措施都相同。

(2) 多因素实验 (multiple-factor or factorial experiment)。多因素实验是指在同一实验方案中包含 2 个或 2 个以上的实验因素，各个因素都分为不同水平，其他实验条件均应严格控制一致的实验。各因素不同水平的组合称为处理组合 (treatment combination)。处理组合数是各供试因素水平数的乘积。这种实验的目的一般在于明确各实验因素的相对重要性和相互作用，并从中评选出 1 个或几个最优处理组合。如进行甲、乙、丙 3 个品种与高、中、低 3 种施肥量的 2 因素实验，共有甲高、甲中、甲低、乙高、乙中、乙低、丙高、丙中、丙低等 $3 \times 3 = 9$ 个处理组合。这样的实验，除了可以明确 2 个实验因素分别的作用外，还可以检测出 3 个品种对各种施肥量是否有不同反应并从中选出最优处理组合。生物体生长受到许多因素的综合作用，采用多因素实验，有利于探究并明确对生物体生长有关的几个因素的效应及其相互作用，能够较全面地说明问题。多因素实验的效率常高于单因素实验。

(3) 综合性实验 (comprehensive experiment)。这也是一种多因素实验，但与上述多因素实验不同。综合性实验中各因素的各水平不构成平衡的处理组合，而是将若干因素的某些水平结合在一起形成少数几个处理组合。这种实验方案的目的在于探讨一系列供试因素某些处理组合的综合作用，而不在于检测因素的单独效应和相互作用。单因素实验和多因素实验常是分析性的实验；综合性实验则是在对于起主导作用的那些因素及其相互关系已基本清楚的基础上设置的实验。它的处理组合就是一系列经过实践初步证实的优良水平的配套。例如选择一种或几种适合当地条件的综合性丰产技术作为实验处理与当地常规技术作比较，从中选出较优的综合性处理。

二、实验指标与效应

用于衡量实验效果的指示性状称为实验指标 (experimental indicator)。一个实验中可以选用单指标，也可以选用多指标，这是由专业知识对实验的要求确定的。例如农作物品种比较实验中，衡量品种的优劣、适用或不适用，围绕育种目标需要考察生育期 (早熟性)、丰产

性、抗病性、抗虫性、耐逆性等多种指标。当然一般田间实验中最主要的常常是产量这个指标。各种专业领域的研究对象不同，实验指标各异。例如研究杀虫剂的作用时，实验指标不仅要看防治后植物受害程度的反应，还要看昆虫群体及其生育对杀虫剂的反应。在设计实验时要合理地选用实验指标，它决定了观测记载的工作量。过简则难以全面准确地评价实验结果，功亏一篑；过繁琐又增加许多不必要的浪费。实验指标较多时还要分清主次，以便抓住主要方面。

实验因素对实验指标所起的增加或减少的作用称为实验效应(experimental effect)。例如，某水稻品种施肥量实验，每亩施氮 10 kg，亩产量为 350 kg；每亩施氮 15 kg，亩产量为 450 kg。则在每亩施氮 10 kg 的基础上增施 5 kg 的效应即为 $450 - 350 = 100$ (kg/亩)。这一实验属单因素实验，在同一因素内两种水平间实验指标的相差属简单效应 (simple effect)。在多因素实验中，不但可以了解各供试因素的简单效应，还可以了解各因素的平均效应和因素间的交互作用。表 1.1.1 为某豆科植物施用氮 (N)、磷 (P) 的 $2 \times 2 = 4$ 种处理组合 (N_1P_1 , N_1P_2 , N_2P_1 , N_2P_2) 实验结果的假定数据，用以说明各种效应。

(1) 一个因素的水平相同，另一因素不同水平间的产量差异仍属简单效应。如表 1.1.1 II 中 $18 - 10 = 8$ 就是同一 N_1 水平时 P_2 与 P_1 间的简单效应； $28 - 16 = 12$ 为在同一 N_2 水平时 P_2 与 P_1 间的简单效应； $16 - 10 = 6$ 为同一 P_1 水平时 N_2 与 N_1 间的简单效应； $28 - 18 = 10$ 为同一 P_2 水平时 N_2 与 N_1 间的简单效应。

(2) 一个因素内各简单效应的平均数称为平均效应，亦称主要效应 (main effect)，简称主效。如表 1.1.1 II 中 N 的主效为 $(6 + 10) / 2 = 8$ ，这个值也是二个氮肥水平平均数的差数，即 $22 - 14 = 8$ ；P 的主效为 $(8 + 12) / 2 = 10$ ，也是二个磷肥水平平均数的差数，即 $23 - 13 = 10$ 。

(3) 两个因素简单效应间的平均差异称为交互作用效应 (interaction effect)，简称互作。它反映一个因素的各水平在另一因素的不同水平中反应不一致的现象。将表 1.1.1 以图 1.1.1 表示，可以明确看到，I 中的二直线平行，反应一致，表现没有互作。交互作用的具体计算为 $(8 - 8) / 2 = 0$ ，或 $(6 - 6) / 2 = 0$ 。图 1.1.1 II 中 $P_2 - P_1$ 在 N_2 时比在 N_1 时增产幅度大，直线上升快，表现有互作，交互作用为 $(12 - 8) / 2 = 2$ ，或为 $(10 - 6) / 2 = 2$ ，这种互作称为正互作。图 1.1.1 III 和 IV 中， $P_2 - P_1$ 在 N_2 时比在 N_1 时增产幅度表现减少或大大减产，直线上升缓慢，甚至下落成交叉状，这是有负互作。III 中的交互作用为 $(4 - 8) / 2 = - 2$ ，IV 中为 $(- 2 - 8) / 2 = - 5$ 。

表 1.1.1 2×2 实验数据 (解释各种效应)

实验	因素	N				
		水平	N_1	N_2	平均	$N_2 - N_1$
I	P	P_1	10	16	13	6
		P_2	18	24	21	6
		平均	14	20		6
		$P_2 - P_1$	8	8	8	0, $0/2 = 0$
II	P	水平	N_1	N_2	平均	$N_2 - N_1$
		P_1	10	16	13	6
		P_2	18	28	23	10

续表 1.1.1

实验	因素	N				
		平均	14	22		8
		$P_2 - P_1$	8	12	10	4, $4/2 = 2$
Ⅲ	P	水平	N_1	N_2	平均	$N_2 - N_1$
		P_1	10	16	13	6
		P_2	18	20	19	2
		平均	14	18		4
		$P_2 - P_1$	8	4	6	-4, $-4/2 = -2$
Ⅳ	P	水平	N_1	N_2	平均	$N_2 - N_1$
		P_1	10	16	13	6
		P_2	18	14	16	-4
		平均	14	15		1
		$P_2 - P_1$	8	-2	3	-10, $-10/2 = -5$

因素间的交互作用只有在多因素实验中才能反映出来。互作显著与否关系到主效的实用性。若交互作用不显著，则各因素的效应可以累加，主效就代表了各个简单效应。在正互作时，从各因素的最佳水平推论最优组合，估计值要偏低些，但仍有应用价值。若为负互作，则根据互作的大小程度而有不同情况。Ⅲ中由单增施氮（ N_2P_1 ）及单增施磷（ N_1P_2 ）来估计氮、磷肥皆增施（ N_2P_2 ）的效果会估计过高，但 N_2P_2 还是最优组合，还有一定的应用价值。而Ⅳ中 N_2P_2 反而减产，如从各因素的最佳水平推论最优组合将得出错误的结论。

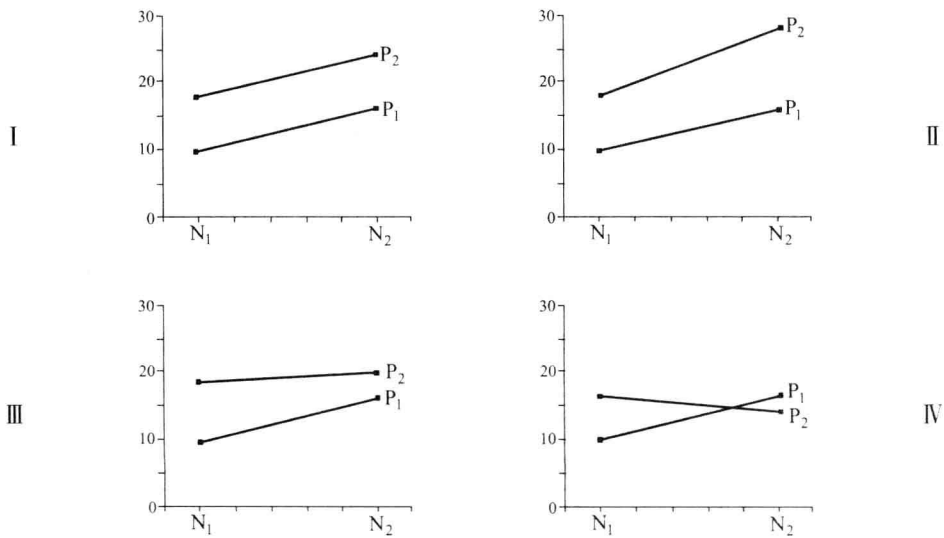


图 1.1.1 2×2 实验图示（解释交互作用）

两个因素间的互作称为一级互作（first order interaction）。一级互作易于理解，实际意义明确。三个因素间的互作称为二级互作（second order interaction），依此类推。二级以上的高级互作较难理解，实际意义不大，一般不予考察。

三、制订实验方案的要点

拟订一个正确有效的实验方案，以下几方面供参考：

(1) 拟订实验方案前应通过回顾以往研究的进展、调查交流、文献探索等明确实验的目的，形成对所研究主题及其外延的设想，使待拟订的实验方案能针对主题确切而有效地解决问题。

(2) 根据实验目的确定供试因素及其水平。供试因素一般不宜过多，应该抓住 1~2 个或少数几个主要因素解决关键性问题。每因素的水平数目也不宜过多，且各水平间距要适当，使各水平能有明确区分，并把最佳水平范围包括在内。例如通过喷施矮壮素以控制某种植物生长，其浓度实验设置 50×10^{-6} 、 100×10^{-6} 、 150×10^{-6} 、 200×10^{-6} 、 250×10^{-6} 等 5 个水平，其间距为 50×10^{-6} 。若间距缩小至 10×10^{-6} 便须增加许多处理，若处理数不多，参试浓度的范围窄，会遗漏最佳水平范围，而且由于水平间差距过小，其效应因受误差干扰而不易有规律性地显示出来。如果涉及实验因素多，一时难以取舍，或者对各因素最佳水平的可能范围难以作出估计，这时可以将实验分为两阶段进行，即先做单因素的预备实验，通过拉大幅度进行初步观察，然后根据预备实验结果再精细选取因素和水平进行正规实验。预备实验常采用较多的处理数，较少或不设重复；正规实验则精选因素和水平，设置较多的重复。为不使实验规模过大而失控，实验方案原则上应力求简单，单因素实验可解决的就一定采用多因素实验。

(3) 实验方案中应包括有对照水平或处理，简称对照 (check, 符号 CK)。品种比较实验中常统一规定同一生态区域内使用的标准 (对照) 种，以便作为各实验单位共同的比较标准。

(4) 实验方案中应注意比较处理间的唯一差异原则，以便正确地解析出实验因素的效应。例如根外喷施磷肥的实验方案中如果设喷磷 (A) 与不喷磷 (B) 两个处理，则两者间的差异含有磷的作用，也有水的作用，这时磷和水的作用混杂在一起解析不出来，若加进喷水 (C) 的处理，则磷和水的作用可分别从 A 与 C 及 B 与 C 的比较中解析出来，因而可进一步明确磷和水的相对重要性。

(5) 拟订实验方案时必须正确处理实验因素及实验条件间的关系。一个实验中只有供试因素的水平在变动，其他因素都保持一致，固定在某一个水平上。根据交互作用的概念，在一种条件下某实验因子的最优水平，换了一种条件，便可能不再是最优水平；反之亦然。这在品种实验中最明显。例如在生产上大面积推广的扬麦 1 号小麦品种、农垦 58 号水稻品种，在品比实验甚至区域实验阶段都没有显示出它们突出的优越性，而是在生产上应用后，倒过来使主管部门重新认识其潜力而得到广泛推广的。这说明在某种实验条件下限制了其潜力的表现，而在另一种实验条件下则激发了其潜力的表现。因而在拟订实验方案时必须做好实验条件的安排，绝对不要以为强调了实验条件的一致性就可以获得正确的实验结果。例如品种比较实验时要安排好密度、肥料水平等一系列实验条件，使之具有代表性和典型性。由于单因子实验时实验条件必然有局限性，可以考虑将某些与实验因素可能有互作 (特别负互作) 的条件作为实验因素一起进行多因素实验，或者同一单因素实验在多种条件下分别进行实验。

(6) 多因素实验提供了比单因素实验更多的效应估计，具有单因素实验无可比拟的优越性。但当实验因素增多时，处理组合数迅速增加，要对全部处理组合进行全面实验 (称全面实施) 规模过大，往往难以实施，因而以往多因素实验的应用常受到限制。解决这一难题的

方法就是利用本书后文将介绍的正交实验法，通过抽取部分处理组合（称部分实施）用以代表全部处理组合以缩小实验规模。这种方法牺牲了高级交互作用效应的估计，但仍能估计出因素的简单效应、主要效应和低级交互作用效应，因而促进了多因素实验的应用。

第三节 实验误差及其控制

一、实验数据的误差和精确性

通过实验的观察或测定，获得实验数据，这是推论实验结果的依据。然而研究工作者获得的实验数据往往是含有误差的。例如测定一个大豆品种南农 88-48 的蛋白质含量，取一个样品（specimen）测得结果为 42.35%，再取一个样品测得结果为 41.98%，两者是同一品种的豆粒，理论上应相等，但实际不等，如果再继续取样品测定，所获的数据均可能各不相等，这表明实验数据确有误差。通常将每次所取样品测定的结果称为一个观察值（observation），以 y 表示。理论上这批大豆种子的蛋白质含量有一个理论值或真值，以 μ 表示，则 $y = \mu + \varepsilon$ ，即观察值 = 真值 + 误差，每一观察值都有一误差 $\varepsilon = y - \mu$ ，可正，可负。

若上述大豆种子是在冷库中保存的，另有一部分是在常温下保存的，也取样品测定其蛋白质含量，其结果为 41.20%，40.80%，…同样，每一观察值均包含有误差。但比较冷库的种子和常温的种子，在常温条件下长期保存后，其蛋白质含量有所降低。照理两者都是同一品种、同一田块里收获来的种子，其蛋白质含量应相同。但实际不同，有误差，这种误差是能追溯其原因的。因而对同一块田里同一品种种子蛋白质含量的测定，观察值间存在变异，这种变异可归结为两种情况，一种是完全偶然性的，找不出确切原因的，称为偶然性误差（spontaneous error）或随机误差（random error）；另一种是有一定原因的，称为偏差（bias）或系统误差（systematic error）。若以上例中冷库保存的大豆种子为比较的标准，其种子蛋白质含量的观察值可表示为

$$y_A = \mu + \varepsilon_A \tag{1.1.1}$$

在常温下保存的大豆种子蛋白质含量的观察值可表示为

$$y_B = \mu + \alpha_B + \varepsilon_B \tag{1.1.2}$$

式中 μ —— 南农 88-48 大豆品种蛋白质含量的真值（理论值）；

ε_A 、 ε_B —— 每一样品观察值的随机误差；

α_B —— 室温保存下（可能由于呼吸作用）导致的偏差或系统误差。

两种保存方法下蛋白质含量的差数：

$$y_B - y_A = \alpha_B + (\varepsilon_B - \varepsilon_A) \tag{1.1.3}$$

包含了系统偏差和随机误差两个部分。

实验数据的优劣是相对于实验误差而言的。系统误差使数据偏离了其理论真值；偶然误差使数据相互分散。因而系统误差（ α_B 值）影响了数据的准确性，准确性是指观测值与其理