

高等院校“十二五”规划教材
GAODENG YUANXIAO SHIERWU GUIHUA JIAOCAI

食品试验设计与分析

SHIPIN SHIYAN SHEJI YU FENXI

主编◎李安平 杨大伟



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

15 ✓
1232 ✓

高等院校“十二五”规划教材
GAODENG YUANXIAO SHIERWU GUIHUA JIAOCAI

食品试验设计与分析

SHIPIN SHIYAN SHEJI YU FENXI

主编◎李安平 杨大伟



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内容提要

《食品试验设计与分析》是根据高等院校食品专业教育改革的需要,结合我国食品工业快速发展的实际情况编写而成的。教材在保持学科知识系统性的前提下,引入学科发展的新知识、新成果,并大量删减理论,代之以翔实的案例吸引读者的学习兴趣。全书主要包括:试验设计与统计分析基础、统计假设检验设计与分析、随机区组试验设计与分析、正交试验设计与分析、回归设计与分析、SPSS 在食品数据分析中的应用等。

图书在版编目(CIP)数据

食品试验设计与分析/李安平 杨大伟 主编. 2 版. —武汉:华中科技大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5609-9000-2

I. ①食… II. ①李… ②杨… III. ①食品检验—试验设计②食品分析 IV. ①TS207

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102651 号

食品试验设计与分析

李安平 杨大伟 主编

策划编辑:王京图

责任编辑:王京图

封面设计:侯建军

责任校对:朱 洁

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武汉喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:北京纬图文化传媒有限公司

印 刷:北京旺鹏印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.5

字 数:350 千字

版 次:2016 年 6 月第 2 版第 1 次印刷

定 价:35.80 元



华中大版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换

全国免费服务热线:400—6679—118,竭诚为您服务

版权所有 侵权必究

编委会

主 编:李安平(中南林业科技大学)

杨大伟(湖南农业大学)

副主编:黄治国(四川理工学院)

万海清(湖南文理学院)

杨 潇(西华大学)

赵慧君(湖北文理学院)

鲁海波(中南林业科技大学)

编 委:王建辉(长沙理工大学)

吴照民(西南科技大学)

巩发永(西昌学院)

王伯华(湖南文理学院)

张海龙(怀化学院)

李安平,1967年生,博士,教授,博导,日本琉球大学访问学者。博士毕业于中南林业科技大学。主要研究方向:①森林食物资源的深度加工与利用;②保健食品;③食品安全与检测。食品科学学术带头人,湖南省食品科学学会理事。长沙市首批食品安全专家。长期从事森林食物资源深度加工与利用、保健食品方面的研究与教学工作。先后主持或主要参与国家、省、部级科研课题20多项。参与研究的科研成果1项获教育部科技进步二等奖,1项获省科技进步三等奖,1项获梁希二等奖,授权专利5项,作为主编或副主编出版专著5部,在国内外重要学术刊物上发表论文50多篇。

杨大伟,1968年生,理学博士,毕业于湖南农业大学,副教授,食品科学硕士导师,湖南省食品科学学会理事,主持参与国家、省市级科研项目6项;获得湖南省科技进步三等奖2项,授权专利1项,主编、参编教材2本,以第一作者发表学术和教改论文三十余篇。

前 言

随着我国国民经济的发展和消费水平的不断提高,在食品消费总量增加的同时,人们对食品花色、种类、档次和结构的要求也不断提高,这就要求食品工作者进行调查研究,调查市场,革新生产工艺,研发新产品。食品调查研究离不开试验,要想把试验做好仅靠专业知识是不够的,还需要能够事先把试验设计好,并且把试验数据分析好,这样才能取得试验的成功。因此,学习和掌握食品试验设计和统计分析方面的知识十分必要。

为了适应我国食品工业的快速发展和高等院校食品专业教育改革的需要,我们编写了这本《食品试验设计与分析》,系统地介绍食品研究的试验设计方法和数据的统计分析方法。

教材在保持学科知识系统性的前提下,引入学科发展的新知识、新成果,并大量删减理论,代之以翔实的案例吸引读者的学习兴趣。全书主要包括:试验设计与统计分析基础、统计假设检验设计与分析、随机区组试验设计与分析、正交试验设计与分析、回归设计与分析、SPSS 在食品数据分析中的应用等。

为体现强基础、重应用和素质教育和创新教育并重的教学目标,本书在编写中力求做到科学性与实用性相统一;突出应用性和实践性,减少理论,安排了大量的例题,做到循序渐进,通俗易懂;在正确阐述基本概念、基本方法的同时,着重于学生分析问题能力的培养;每一种设计方法或分析方法都安排有步骤完整、过程详细的实例予以说明;各章都配备有习题供读者练习。

本书的编写立足于科学性、实用性和简明性,可供从事食品科学与工程、食品质量与安全、生物工程、生物技术等专业作为教材使用,也可作为从事食品研究的科研工作者、研究生的参考书。

本书的出版得到了全国多所院校的大力支持,参与编写工作的老师有:李安平(中南林业科技大学)、杨大伟(湖南农业大学)、黄治国(四川理工学院)、万海清(湖南文理学院)、杨潇(西华大学)、赵慧君(湖北文理学院)、鲁海波(中南林业科技大学)、王建辉(长沙理工大学)、吴照民(西南科技大学)、巩发永(西昌学院)、王伯华(湖南文理学院)、张海龙(怀化学院)。

本书的出版得到了中南林业科技大学食品科学与工程学院的大力支持和资助,在此表示衷心的感谢!在编写过程中,编者参阅了有关文献,在此对文献作者一并致谢!

本书所涉及的学科多、范围广,限于编写人员的水平和经验,书中难免有错漏与不当之处,敬请同行、专家和广大读者批评指正。

——编 者



目 录

第 1 章 试验设计与统计分析基础	1
1.1 试验设计与分析的发展与意义	1
1.1.1 试验设计与分析的目的意义	1
1.1.2 食品科学试验研究的特点与要求	4
1.2 试验设计的基本概念	4
1.2.1 试验指标(Experimental index)	4
1.2.2 试验因素(Experimental factor)	5
1.2.3 因素的水平(Level of factor)	5
1.2.4 确定因素与水平时应注意事项	6
1.2.5 试验处理(Experimental treatment)	6
1.2.6 重复(Replicate)	7
1.2.7 全面试验(Overall experiment)	7
1.2.8 部分实施(Fractional enforcement)	7
1.3 试验设计的基本原则	7
1.3.1 试验设计的三原则	7
1.3.2 试验设计的四原则	9
1.4 试验误差及其来源	12
1.4.1 试验数据结构	12
1.4.2 误差的来源	13
1.4.3 试验误差的分类和控制	14
1.5 试验设计的常用方法	15
1.5.1 单因素试验设计	15
1.5.2 多因素试验设计	16
1.5.3 综合性试验	16
1.6 试验统计的几个基本概念	17
1.6.1 数学期望	17
1.6.2 方差	17
1.6.3 总体和样本	17
1.6.4 统计量	17



第 2 章 统计假设检验设计与分析	21
2.1 统计假设检验的基本原理	22
2.1.1 统计假设检验的意义	22
2.1.2 统计假设检验的基本方法	25
2.1.3 统计假设检验的显著水平	26
2.1.4 统计假设检验的步骤	27
2.1.5 双侧检验与单侧检验	28
2.1.6 统计假设检验中的两类错误	30
2.1.7 显著性检验中应注意的问题	31
2.2 样本平均数的假设检验	33
2.2.1 t 分布	33
2.2.2 单一样本平均数的假设检验	34
2.2.3 两个样本平均数的假设检验	36
2.3 二项百分率的假设检验	41
2.3.1 二项式分布	41
2.3.2 单个样本百分率的假设检验	43
2.3.3 两个样本百分率的显著性检验	45
2.4 总体参数的区间估计	47
2.4.1 总体平均数 μ 的区间估计	47
2.4.2 两个总体平均数差数 $\mu_1 - \mu_2$ 的区间估计	48
2.4.3 二项总体百分率 p 的区间估计	50
2.4.4 两个总体百分率差数 $p_1 - p_2$ 的区间估计	50
第 3 章 随机区组试验设计与分析	53
3.1 完全随机试验设计	53
3.1.1 单因素完全随机设计(对比试验)	53
3.1.2 两因素等重复的完全随机设计	55
3.1.3 单因素完全随机设计结果的方差分析	56
3.2 随机区组试验设计方法	64
3.2.1 试验设计方法	64
3.2.2 试验设计特点	66
3.3 随机区组试验结果的统计分析	67
3.3.1 单因素随机区组试验结果的方差分析	67
3.3.2 双因素随机区组试验结果的方差分析	74



第 4 章 正交试验设计与分析	82
4.1 正交试验设计概述	82
4.1.1 为什么要进行正交试验设计	82
4.1.2 正交拉丁方	83
4.1.3 正交试验设计概念	85
4.2 正交试验设计方法	85
4.2.1 正交表	85
4.2.2 常用正交表的分类及特点	87
4.2.3 正交表的基本性质	88
4.2.4 两列间的交互作用	89
4.2.5 正交试验设计的基本步骤	91
4.3 正交试验的结果分析	96
4.3.1 直观分析法(极差分析法)	96
4.3.2 方差分析法	103
4.3.3 小结	109
4.4 正交试验设计的灵活运用	110
4.4.1 并列法改造混合水平正交	110
4.4.2 拟水平法	111
第 5 章 回归设计与分析	116
5.1 回归分析及相关分析概述	116
5.1.1 函数关系与相关关系	116
5.1.2 相关分析和回归分析	117
5.2 直线回归	118
5.2.1 直线回归方程的建立	118
5.2.2 直线回归的显著性检验	122
5.3 直线相关	125
5.3.1 决定系数和相关系数	125
5.3.2 相关系数的显著性检验	126
5.3.3 相关系数与回归系数的关系	127
5.3.4 应用直线回归与相关的注意事项	127
第 6 章 SPSS 在食品数据分析中的应用	130
6.1 SPSS 软件概述和基本构成	130
6.1.1 SPSS 软件概述	130



6.1.2	SPSS 的启动、主界面和退出	131
6.1.3	SPSS 统计功能概述	132
6.1.4	SPSS 数据的录入	133
6.2	SPSS 在比较均值中的应用	137
6.2.1	单一样本 T 检验	137
6.2.2	独立样本 T 检验	139
6.2.3	配对样本 T 检验	142
6.3	SPSS 在方差分析中的应用	144
6.3.1	One-Way ANOVA(单因素方差分析)	144
6.3.2	General Linear Model(多因素方差分析)	149
附录		156
附录 1	T 值表	156
附录 2	F 值表(方差分析用)	158
附录 3	正态分布的双侧分位数(u_α)表	165
附录 4	Duncan's 新复极差检验 SSR 值表	165
附录 5	随机数字表	167
附录 6	常用正交表	168
参考文献		176



第1章 试验设计与统计分析基础

★ 学习要求

明确食品试验研究的目的意义
深刻理解试验设计和分析的有关基本概念
掌握试验设计的基本原则和要求
了解试验设计的常用方法

1.1 试验设计与分析的发展与意义

1.1.1 试验设计与分析的目的意义

1. 试验设计与分析的发展历程

试验设计与统计分析是在概率论和数理统计的基础上不断完善和发展起来的。试验统计方法最早起源于对农业及生物遗传研究的应用统计方法,故一般称为生物统计学,它是一门数理统计学与生物科学相结合的交叉学科。

试验设计的基本思想是英国统计学家费歇耳(R. A. Fisher)在进行农业田间试验时提出的。他发现在田间试验中环境条件难以严格控制,随机误差不可忽视,故提出对试验方案必须作合理的安排,使试验数据有合适的数学模型,以减轻随机误差的影响,从而提高试验结论的精度和可靠度。这就是试验设计的基本思想。费歇耳在1923年与麦肯齐(W. A. Mackenzie)合作第一次发表了一个试验设计的实例,1926年公布了试验设计的基本思想,1935年出版了他的名著《试验设计》(The Design of Experiment),从此开创了一门新的应用技术学科。在试验设计的发展道路上,大致经历了4个阶段,即传统的方差分析,正交试验设计,信噪比试验设计与产品的三次设计,电脑仿真试验。

20世纪30年代,英国、美国、苏联等国继续对试验设计法进行了研究,并将试验设计法逐步推广到工业生产领域中去,在采矿、冶金、建筑、纺织、机械、医药等行业都有所应用。第二次世界大战期间,英美等国在工业试验中采用试验设计法取得显著效果。

二次大战结束后,日本把试验设计作为管理技术之一从英美引进。1949年,以田口玄一博士为首的一批研究人员,在日本电讯研究所(ECL)研究电话通讯设备的系统质量时发现,在农业生产上应用的试验设计技术,不论是析因设计,还是拉丁方设计等在工业生产中应用时都受到限制。于是,田口玄一等人在实践中努力研究和改进了英国人的试验设计技术,创造了用正交表安排试验的正交试验设计法。1952年,田口玄一在日本东海电报公司,运用 $L_{27}(3^{13})$ 正交表进行试验取得了成功。之后正交试验设计法在日本的工业生产中得到



迅速推广,获得极大的经济效益。例如日本电讯研究所研制“线形弹簧继电器”,运用正交试验设计技术,对数 10 个特性值和 2000 多个变量进行研究,经过 7 年努力取得了成功,制造出比美国更先进的产品。这一产品本身只有几美元,但研究成果给该所带来几十亿美元的利益。几年之后,他们的竞争对手美国西方电器公司(Western Electric)不得不停产,转而向日本引进这种先进的继电器。今天,正交试验技术已成为日本企业界人士、工程技术人员、研究人员和管理人员所必须掌握的一种通用技术,成为日本工程师们共同语言的一部分。

信噪比试验设计和产品的三次设计是田口玄一博士分别于 1957 年和 1978 年首先提出的。信噪比试验设计和产品的三次设计把正交设计、方差分析与产品的质量、价格相联系,开辟了更为重要、更为广泛的应用领域,获得了巨大的经济效益。日本二次大战后工业生产飞跃发展的原因之一,就是在各工业领域里普遍推广应用正交试验设计与产品的三次设计。例如新日本电气公司生产的彩色电视机稳压电源进行三次设计后,每件产品因质量的改进可增加经济效益 6700 日元,以年产量 100 万件计,可增加 67 亿日元的收益。日本电子产品能打进美国市场,畅销世界各国的秘诀之一就在于运用正交试验设计和产品的三次设计这个得力工具。日本把试验设计誉为“国宝”是有一定道理的。

当美国人清醒地认识到战后日本经济飞速发展的秘诀之一就是在工业领域里普遍推广应用了正交试验设计和产品的三次设计之后,其便于 1983 年成立了专门的机构 AST 在美国推广田口玄一的这种方法。例如贝尔公司的集成电路,使用前成品合格率不到 20%,用正交表安排设计后,使合格率提高到 80%,轰动了整个美洲。

随着系统工程和高科技的发展,计算机仿真技术试验成为统计试验设计的一个崭新的方向,要求“充满空间”(space filling)的试验设计方法。计算机仿真就是借助高速、大存储量数字计算机及相关技术,对复杂真实系统的运行过程或状态进行数字化模拟的技术。计算机仿真(模拟)早期称为蒙特卡罗方法,是一门利用随机数试验求解随机问题的方法。计算机仿真是用计算机科学和技术的成果建立被仿真的系统的模型,并在某些试验条件下对模型进行动态试验的一门综合性技术。它具有高效、安全、受环境条件的约束较少、可改变时间比例尺等优点,已成为分析、设计、运行、评价、培训系统(尤其是复杂系统)的重要工具。根据仿真过程中所采用计算机类型的不同,计算机仿真大致经历了模拟机仿真、模拟—数字混合机仿真和数字机仿真三个大的阶段。为了建立一个有效的仿真系统,一般都要经历建立模型、仿真试验、数据处理、分析验证等步骤。

我国从 20 世纪 50 年代后期,在著名统计学家许宝禄教授引导下进入试验设计领域,同时在正交试验设计方面也取得了一定的成果。据统计,上海机电一局所属 30 多个工厂在 100 多项课题中,攻克技术关键 18 项,取得 2000 多万元的经济效益。在 20 世纪 70 年代末,几乎同时出现了两个最有影响的方法:拉丁超立方体抽样(Latin Hypercube Sampling)和均匀设计(uniform design)。拉丁超立方体抽样是 M. D. McKay, R. J. Beckman 和 W. L. Conover 于 1979 年在国际权威刊物 *Technometrics* 上首次提出的。均匀设计则是由中国科学院院士王元和方开泰研究员于 1978 年提出的,目的是解决导弹弹道系统的指挥仪设计问



题。该问题是一个5因素的试验,但每个因素的水平个数均超过10个,而试验次数又要求不超过50。20多年来,均匀设计的理论迅速发展,应用十分广泛,得到了国际统计界的极大关注。然而,在我国大多数工厂、企业、公司,对试验设计技术的应用还不是很普遍。如何设计、制造出质量高、价格低廉、性质稳定、可靠性高的产品,是对工程技术人员挑战。面对这一挑战,一个行之有效的方法就是在产品的设计、制造、销售过程中运用先进的试验设计技术。

2. 试验设计与分析的目的与意义

食品研究离不开试验,要想把试验做好仅靠专业知识是不够的,还需要能够事先把试验设计好,并且把试验数据分析好。

在食品生产和科学研究中,为了革新生产工艺,开发新产品,寻求优质、高产、低消耗的方法,经常要进行各种项目的试验研究。试验研究包括项目的试验设计、试验的实施、数据的收集和整理、数据的统计分析和结论等步骤。项目试验设计是否合理是影响项目研究成功的最关键一环,同时也是提高试验效率的重要保证。因此,如何安排试验,如何对试验结果进行科学的分析,既是食品生产工作者及科研工作者经常遇到的现实问题,又是食品专业学生必须具备的基本功。那么,什么叫试验设计呢?

试验设计(design of experiments, DOE)就是研究如何科学有效地安排试验并分析试验数据的学科。一个好的试验设计可以用少量的试验次数就能获得最有效的试验信息。

试验设计是在试验开始之前,根据某项研究的目的和要求,制订试验研究进程计划和具体的试验实施方案。试验设计的主要内容是研究如何合理地安排试验、取得数据,然后进行综合的科学分析,从而达到尽快获得最优方案的目的。

如果试验安排得合理,就能用较少的试验次数,在较短的时间内达到预期的试验目的;反之,试验次数过多,其结果还往往不能令人满意。试验次数过多,不仅浪费大量的人力和物力,有时还会由于时间拖得过长,使试验条件发生变化而导致试验失败。因此,如何合理地安排试验方案是值得研究的一个重要课题。试验设计的目的在于能用比较经济的人力、物力和时间,得到较为可靠的结果,准确地控制误差并估计误差的大小,还可使多种试验因素包括在很少的试验之中,达到高效的目的。

试验设计和试验结果的统计分析是密切相关的,只有按照科学的统计设计方法得到的试验数据才能进行科学的统计分析,得到客观有效的分析结论。反之,一大堆不符合统计学原理的数据可能是毫无意义的。因此对试验工作者而言,关键是用科学的方法设计好试验,获得符合统计学原理且科学有效的数据和结论。

3. 试验设计应注意的问题

(1)试验目的是否明确。没有明确的目的,就谈不上科学周密的设计。未经设计的试验是无用的试验。对课题缺乏深刻的认识,就难以明确试验的目的。而明确目的的有效方法就是不断追问“为什么”,亦即不断沿着“原因何在”的疑问思路,一追到底。

(2)试验设计方案是否合理。进行每一个试验都要有整体观念、系统思想,要把其当作

“整体”的“零件”，要考虑到组装的需要。宁愿将已经设计的试验不予实施，也不能将未经设计或不符合整体设计要求的试验匆忙“上马”。为试验而做试验，毫无意义。

(3) 试验管理是否严格。试验设计就是对整个试验进行科学管理。要有严格按照设计进行试验的习惯，把试验全过程置于严格管理状态之下。试验管理的重点是控制条件、规范操作和准确地获取数据。

(4) 试验数据是否准确可靠。收集、记录试验数据要坚持实事求是，不要有意无意地让数据染上主观色彩，对于本质上具有“意外”意义的数据非但不能舍弃，相反更需要加以详细记录，以便分析。

1.1.2 食品科学试验研究的特点与要求

食品科学研究中的试验与其他试验相比有其独特性，主要表现在以下几个方面：

1. 原料来源具有广泛性

食品加工所用原料来源广泛，可以分为植物性原料、动物性原料和微生物性原料等。植物性原料又可以分为粮食、果品、蔬菜、野生植物等；动物性原料又可以分为畜禽、水产、野生动物、特种水产养殖等。不同产地的原料在成分含量及加工特性方面也存在一定的差异。因此，不同的原料对食品加工提出了不同的要求，因而给不同产品的加工和保鲜带来困难。

2. 加工工艺的多样性

由于作为食品加工的原料可以分为几十类，上千种，因而体现了食品加工工艺的多样性。比如有的产品加工要求保持原料原有的色泽和风味，而有的产品又要求掩盖原来的色泽和风味；有些初级产品加工只需要简单的烘干或晒干，而有的产品加工则需要均质、发酵、超滤乃至纳米技术等。如辣椒，可以直接晒干成干辣椒或制成辣椒粉，也可以经发酵制成剁辣椒。

3. 加工质量控制的重要性

民以食为天，食以安为要。食品质量安全是重于一切的大事。因此，食品加工过程中质量一定要管控好。食品加工的质量控制体现在以下几个方面：

(1) 对加工过程中各个工序的控制，以保证加工过程的安全和产品加工质量的稳定；

(2) 对各种在市场流通的产品质量监督和检测，保证各种产品的质量稳定并防止假冒伪劣产品，维护消费者的合法权益；

(3) 对食品的安全进行监督保证，以防止食品在加工过程中化学物质超标或不合理使用，或者某些对人体健康有害的物质超过规定的标准。

鉴于以上食品加工中的特点，我们在进行食品科学试验和生产实践中，就应该特别注意对试验的合理设计和科学安排，注意试验过程的正确运转，保证试验结果的可靠性和准确性，并进行科学正确的统计分析，以便于正确揭示事物的本质，得出科学的结论。

1.2 试验设计的基本概念

1.2.1 试验指标 (Experimental index)

在试验设计中，根据试验的目的而选定的用来衡量或考核试验效果的质量特性称为试



验指标。试验指标可以是数量指标、质量指标、成本指标和效率指标等。

试验指标可分为定量指标和定性指标两类。能用数量表示的指标称为定量指标或数量指标;如食品的糖度、酸度、pH 值、提汁率、糖化率、吸光度、合格率等。食品的理化指标及由理化指标计算得到的特征值多为定量指标。不能用数量表示的指标称为定性指标,如色泽、风味、口感、手感等。食品的感官指标多为定性指标。在试验设计中,为了便于试验结果的分析统计,常把定性指标进行量化,转化为定量指标。食品的感官指标可用评分的方法分成不同等级以代替很好、较好、较差、很差等定性描述方式。例如对某批饮料的口感进行评价,就可根据品评者的感受分别对某一具体产品给予评分(评分可按百分制或者十分制,如 95 分、71 分等)。

在试验设计中,根据试验目的的不同,可以用一个试验指标,也可以同时用 2 个或 2 个以上的试验指标。前者称为单指标试验,后者称为多指标试验。例如在研究增稠剂种类、pH 值和杀菌条件对豆奶稳定性的影响时,可只选用豆奶的稳定性作为试验指标;在研究不同吸附剂去除甜橙汁中苦味物质的效果时,就可同时选用苦味物质的去除率、维生素 C 的损失率、可溶性固性物质损失率作为试验指标,然后综合考虑确定哪种吸附剂最合适。

1.2.2 试验因素(Experimental factor)

试验中,凡对试验指标可能产生影响的原因或要素,都称为因素,也称因子。如酱油质量受原料、曲种、发酵时间、发酵温度、制曲方式、及发酵工艺等诸方面的影响,这些都是影响酱油质量的因素。它们有的是连续变化的定量因素,有的是离散状态的定性因素。

由于客观条件的限制,一次试验中不可能将每个因素都考虑进去。我们把试验中所研究的影响试验指标的因素称为试验因素,通常用大写字母 A, B, C……表示。把除试验因素外其他所有对试验指标有影响的因素称为条件因素。考察一个试验因素的试验叫单因素试验,考察两个试验因素的试验叫双因素试验,考察 3 个或 3 个以上试验因素的试验叫多因素试验。如在研究增稠剂用量、pH 值和杀菌温度对豆奶稳定性的影响时,增稠剂、pH 值和杀菌温度就是试验因素。除此 3 个因素外的其他所有影响豆奶稳定性的因素都是条件因素,如豆奶均质的压力,均质的次数,豆奶的比例等均被视为条件因素。

1.2.3 因素的水平(Level of factor)

在试验中,为考察试验因素对试验指标的影响情况,要使试验因素处于不同的状态。我们把试验因素所处的各种状态称为因素水平,简称水平。如在酸奶发酵试验中,要考察发酵温度对乳酸菌繁殖的影响,分别选择了 38℃、39℃、40℃、41℃ 等 4 个水平。在此试验中,乳酸菌的繁殖数量是试验指标,发酵温度是试验因素,38℃、39℃、40℃ 和 41℃ 为因素的 4 个不同水平。

如果试验因素用 A、B、C、D 等字母表示,那么各因素不同水平则通常用表示因素的字母右下角标 1, 2, 3, … 来表示。如前述发酵温度用 A 表示,因素 A 的第一、第二、第三和第四水平可依次用 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 表示。因素的水平,有的可用具体数值表示,如时间、温度、试剂或原料的用量等,但也有的无法用具体数字表示,对于此类因素水平可直接用它的具体种类



或型号表示,如食品添加剂的不同种类、设备的不同型号、原料的不同品种、工艺的不同操作方法等均为此类。

1.2.4 确定因素与水平时应注意事项

在一个试验中如何确定其中的试验因素和因素的水平数呢?一般而言,确定试验因素与水平应以专业知识技术为背景,根据试验要求力求试验规模较小,但一些要考察关键的因素都安排进去,并应注意以下几点。

1. 水平宜取三水平为宜

这是因为因素取三水平时,试验结果分析的效应图分布多数呈二次函数,二次函数有利于呈现试验结果的趋势。如果因素取两水平,试验结果的效应图分布则是线性的,只能得到因素水平的效果趋向,很难区分最佳区段,这对整个试验分析是不利的。

在充分发挥专业技术实践经验的前提下确定因素水平,就可能将水平取在最佳区域中或接近最佳区域,按这样的因素水平做试验的效率就会较高;当对所研究的因素水平知之甚少时,可能所选取因素水平不在最佳区域附近,则需要把水平区间拉开,尽可能使最佳区间包含在拉开的水平区间内。然后通过1~2次试验逐渐缩小水平区,求出其最佳条件。当认为所求出的最佳条件可靠性不太满意时,还可以进一步试验验证,通过寻找和计算,求出二次函数的最大值。

2. 因素水平选取最好按等间隔原则

选取因素水平时最好按等间隔原则,这样便于效应曲线的计算分析。水平的间隔宽度由技术水平、技术知识范围所决定。水平的等间隔一般是取算术等间隔值。在某些特殊场合下也可以取对数等间隔值。由于技术上的限制,在取等间隔区间时可能有差值,设计时可以把这个差值尽可能取得小一些,一般不超过20%的间隔值。例如在果酒发酵试验中,发酵温度的选择就可采用等间隔,如20℃、22℃、24℃和26℃等四个水平,它们之间的间隔均为2℃。

3. 水平是具体的

所谓水平是具体的,指的是水平应该是可以直接控制的,并且水平的变化要能直接影响因素的特性值,并连带产生不同程度的变化。例如,贮藏温度变化对果实的呼吸作用有很大影响,为了研究不同温度条件对果实呼吸作用的影响程度,可以将贮藏温度设定为0℃、4℃、8℃等3个水平,不同的贮藏温度会让果实具有不同的呼吸强度,这就是一种具体的水平。

1.2.5 试验处理(Experimental treatment)

试验处理,简称处理,是指事先设计好的试验方案实施在试验单位上的一种具体措施。在单因素试验中,试验的一个水平就是一个处理。在多因素试验中,由于因素和水平较多,可以形成若干个水平组合,每个水平组合就是一个处理。例如,研究酱油酿造过程中前期蛋白质分解阶段3种不同温度【42℃(A_1)、43℃(A_2)、44℃(A_3)】和2种酿造酱油的微生物配比【米曲霉(B_1)、酵母菌(B_2)】对酱油质量的影响,可形成 A_1B_1 , A_1B_2 , A_2B_1 , A_2B_2 , A_3B_1 , A_3B_2 等6个水平组合,处理的多少等于参加试验各因素水平的乘积,如3因素3水平试验共有 $3 \times 3 \times 3 = 27$ 个处理。



1.2.6 重复 (Replicate)

在一个试验中,将一个处理实施在2个或2个以上的试验单位上称为重复。一个处理实施的试验单位数称为处理的重复数,或者说某个水平组合重复 n 次试验,这个处理的重复数就是 n 。例如,测定某种品牌桔子中维生素C的含量,分别从3个桔子中取样测定,每个桔子的维生素C的含量均测定了一次,共测定了3次,即重复了3次。

1.2.7 全面试验 (Overall experiment)

在试验设计中,为了获得全面试验信息,正确地判断试验因素及其各级交互作用对试验指标的影响,对所选取的试验因素的所有水平组合全部实施一次以上的试验称全面试验。全面试验的优点是能够获得全面的试验信息,无一遗漏,各因素及各级交互作用对试验指标的影响剖析得比较清楚,因此又称为全面析因试验(factorial experiments)。但是,当试验因素和水平较多时,试验处理的数目会急剧增加,因而试验次数也会急剧增加。当试验还要设置重复时,试验规模就非常庞大,以至在实际中难以实施。如3因素试验,每个因素取3个水平时,全面试验就有27个试验处理。倘若试验有4个因素,每个因素取4个水平,则有 $4^4=256$ 个试验处理。这么大规模的试验在实践中要迅速完成是很难的。因此,全面试验是有局限性的,它只适用于因素和水平数目均不太多的试验。

1.2.8 部分实施 (Fractional enforcement)

部分实施也叫部分试验。在全面试验中,由于试验因素和水平数增多会使处理数急剧增加,以致难以实施。此外,当试验因素及其水平数较多时,即使全面试验能够实施,也并不是一个经济有效的方法。因此,在实际试验研究中,常采用部分实施方法,即从全部试验处理中选取部分有代表性的处理进行试验。例如正交试验设计和均匀设计就是部分实施的试验。部分实施可使试验规模大为缩小。如3因素3水平共有27个处理,全面试验需进行27次,而用 $L_9(3^4)$ 正交表安排正交试验只需9次,仅为全面试验的1/3。再如一个4因素5水平试验,全面试验至少需进行 $5^4=625$ 次试验,而用 $U_5(5^4)$ 均匀设计表安排试验,仅需5次试验。

1.3 试验设计的基本原则

在试验设计中,为了尽量减少试验误差,就必须严格控制试验干扰。所谓试验干扰,是指那些可能对试验结果产生影响,但是在试验中未加以考察,也未加以精确控制的条件因素。例如,试验材料的不均匀,仪器设备和试验操作人员的不同,试验周围环境、气候、时间的差异与变化等。这些干扰的影响是随机的,有些是事先无法估计,试验过程中无法控制的。为了保证试验结果的精确度,各种试验组合处理必须在基本均匀一致的条件因素下进行,应尽量控制或消除试验干扰的影响,这样的试验结果才具有可比性。

1.3.1 试验设计的三原则

在进行试验设计时必须严格遵循试验设计的3个基本原则——重复、随机化、局部控制。

1. 重复原则

所谓重复,是指在试验中每种处理至少进行2次以上。重复试验是估计和减小随机误差的基本手段。

由于随机误差是客观存在和不可避免的,若某试验条件下只进行1次试验,则无法从1次试验结果估计随机误差的大小。只有在同一条件下重复试验,才能利用同一条件下取得的多个数据的差异,把随机误差估计出来。由于随机误差有大有小,时正时负,随着试验次数的增加,正负相互抵偿,随机误差平均值趋于零。因此,多次重复试验的平均值的随机误差比单次试验值的随机误差小。

一般地讲,重复次数越多越好。但随着重复次数的增加,不仅试验费用几乎成倍增加,而且整个试验所占用的时间、空间范围也会增大,因而试验材料、环境、仪器设备、操作等试验条件的差异,也必然随之加大,进而引起的试验误差反而会增大。为了避免此问题,需要在遵循下面讲的“局部控制原则”的前提下进行重复试验。重复次数太多,有时效果并不好。重复试验的目的是估计和减小随机误差。

2. 随机化原则

所谓随机化原则,就是在试验中,每一个处理及每一个重复都有同等的机会被安排在某一特定的空间和时间环境中,以消除某些处理或其重复可能占有的“优势”或“劣势”,保证试验条件在空间和时间上的均匀性。

随机化可有效排除非试验因素的干扰,从而可正确、无偏地估计试验误差,并可保证试验数据的独立性和随机性,以满足统计分析的基本要求。随机化通常采用抽签、摸牌、查随机数表等方法来实现。

3. 局部控制

局部控制是指在试验时采取一定的技术措施方法减少非试验因素对试验结果的影响。

实施一项试验,总是希望试验条件(除试验因素以外的所有其他条件)基本上保持一致。这样得到的试验结果才可以直接看成试验因素对试验指标的影响情况,因素的不同水平之间才具有可比性。反之,如果除了试验因素外,试验条件也同时发生变化,就会引入系统误差。这时就不能确定试验指标的变化究竟是由于试验因素引起的,还是由于试验条件的变化引起的,这就干扰了对试验结果的分析。那么如何使试验条件基本保持一致呢?

我们知道任何一项试验,都是在一定的时空范围内进行的,而不同时空范围内的试验条件是有差异的。试验次数越多,所占的时空范围就越大,试验条件之间的差异也就越大。反之,试验时空范围越小,试验条件就越均匀一致。如果我们把一项试验的时空范围划为几个小的范围——区组,使得每个区组内试验条件尽可能均匀一致,每个区组内各项处理的试验顺序随机安排。这样,每个区组内的试验误差减小,区组间试验条件的差异虽较大,但可用适当的统计方法来处理。这种安排试验的方法称为局部控制,也称局部管理。

实施局部控制时,区组如何划分,应根据具体情况确定。如果日期(时间)变动会影响试验结果,就可以把试验日期(时间)划分为区组;如果试验空间会影响试验结果,可把空间划