

荧光分析法

厦门大学化学系分析化学教研室 编

陈国珍 主编

科学出版社

螢 光 分 析 法

廈門大學化學系分析化學教研室 編

陳 國 珍 主 編

科 學 出 版 社

内 容 简 介

本书对荧光分析法作了较全面的介绍。阐述了荧光分析法的原理, 荧光的发生及其与化学结构的关系, 有关因素对溶液荧光强度的影响; 介绍了荧光计的各个部件及各种类型的荧光计; 对 60 余种元素的荧光分析法和维生素、氨基酸、激素、药物等有机化合物的荧光分析法作了简要的评述, 并对某些比较成熟的分析步骤进行介绍, 供使用时选择。

本书可供分析工作人员及分析专业师生参考。

荧 光 分 析 法

厦门大学化学系分析化学教研室 编

陈 国 珍 主 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1975 年 4 月 第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

1975 年 4 月 第一次印刷 印张: 11 3/8

印数: 0001—11,000 字数: 300,000

统一书号: 143031 · 283

本社书号: 445 · 13—4

定 价: 1.40 元

目 录

第一章 绪言	1
§ 1.1 萤光的概述	1
§ 1.2 光的吸收和发光	3
§ 1.3 萤光分析	7
参考文献	10
第二章 萤光的发生及其与化学结构的关系	12
§ 2.1 萤光发射光谱与萤光的成因	12
§ 2.2 有机化合物的萤光及其与化学结构的关系 ..	16
§ 2.3 无机化合物的萤光	26
§ 2.4 络合物的萤光及其与化学结构的关系	28
参考文献	39
第三章 溶液的萤光强度	43
§ 3.1 萤光强度和溶液浓度的关系	43
§ 3.2 溶剂对于萤光强度的影响	45
§ 3.3 温度对于萤光强度的影响	48
§ 3.4 激发光的照射对于萤光强度的影响	50
§ 3.5 溶液的pH值对于萤光强度的影响	51
参考文献	54
第四章 溶液萤光的熄灭	55
§ 4.1 萤光的熄灭	55
§ 4.2 碰撞熄灭	56
§ 4.3 组成化合物的熄灭	59
§ 4.4 转入三重线级的熄灭	60

§ 4.5	发生电子转移反应的熄灭	62
§ 4.6	荧光物质的自熄灭	63
	参考文献	64
第五章	散射光和拉曼光对于荧光分析的干扰	66
§ 5.1	散射光对于荧光分析的干扰	66
§ 5.2	溶剂的拉曼光及其对荧光光谱的干扰	67
§ 5.3	拉曼光对于荧光分析的干扰	71
	参考文献	72
第六章	荧光计、荧光分光光度计及其校准	73
§ 6.1	光源	73
§ 6.2	滤光片和单色器	76
§ 6.3	探测器	79
§ 6.4	液槽	81
§ 6.5	目测荧光计	82
§ 6.6	光电荧光计	84
§ 6.7	固体试样用的光电荧光计	86
§ 6.8	荧光分光光度计	88
§ 6.9	荧光分光光度计波长的校准	94
§ 6.10	荧光光谱的校准	96
§ 6.11	荧光激发光谱的校准	100
	参考文献	102
第七章	荧光分析方法	103
§ 7.1	工作曲线法	103
§ 7.2	“差示荧光法”	103
§ 7.3	多组分混合物的荧光分析	106
§ 7.4	荧光光谱和吸收光谱的联合使用	113
§ 7.5	荧光分析方法的灵敏度	114
	参考文献	116

第八章 无机化合物的荧光分析117

§ 8.1 锂、钠、钾的荧光分析	118
§ 8.2 铜、银、金的荧光分析	121
§ 8.3 铍、镁、钙的荧光分析	128
§ 8.4 锌、镉、汞的荧光分析	139
§ 8.5 硼、铝、镓、铟、铊的荧光分析	147
§ 8.6 钪、钇的荧光分析	162
§ 8.7 稀土元素的荧光分析	166
§ 8.8 钍、铀的荧光分析	176
§ 8.9 硅、锗、锡、铅的荧光分析	184
§ 8.10 锆、铪的荧光分析	190
§ 8.11 氮化合物的荧光分析	194
§ 8.12 磷、锑的荧光分析	196
§ 8.13 钒、铌、钽的荧光分析	199
§ 8.14 氧、臭氧、过氧化氢的荧光分析	201
§ 8.15 硫化化合物的荧光分析	204
§ 8.16 硒、碲的荧光分析	207
§ 8.17 铬、钼、钨的荧光分析	210
§ 8.18 氟、氯、溴、碘的荧光分析	213
§ 8.19 锰、铈的荧光分析	216
§ 8.20 铁、钴、镍的荧光分析	217
§ 8.21 钨、钨、铀的荧光分析	221

第九章 有机化合物的荧光分析223

§ 9.1 脂肪族有机化合物的荧光分析	224
§ 9.2 芳香族有机化合物的荧光分析	235
§ 9.3 维生素的荧光分析	245
§ 9.4 氨基酸和蛋白质的荧光分析	256
§ 9.5 胺类化合物的荧光分析	266
§ 9.6 甾族化合物的荧光分析	282

§ 9.7 酶和辅酶的荧光分析	288
§ 9.8 药物、毒物及农药的荧光分析	305
第十章 荧光滴定	322
§ 10.1 荧光滴定及其设备	322
§ 10.2 中和法荧光滴定	324
§ 10.3 氧化还原法荧光滴定	325
§ 10.4 沉淀法荧光滴定	327
§ 10.5 络合法荧光滴定	329
参考文献	334
第十一章 原子荧光分析、磷光分析、化学发光分析	337
§ 11.1 原子荧光分析	337
§ 11.2 磷光分析	341
§ 11.3 化学发光分析	347
参考文献	350
编后记	354

第一章 绪 言

§ 1.1 萤光的概述

当紫外光照射到某些物质的时候，这些物质会发射出各种颜色和不同强度的可见光，而当紫外光停止照射时，这种光线也随之很快地消失，这种光线称为萤光。

在日常生活中，人们经常可以观察到萤光。例如，当我们经过印染厂的周围，可以观察到从厂里排出的含有各种染料的污水在阳光下闪耀着五颜六色的光芒。其实，自古以来，劳动人民在生产和生活的实践中，经常都会观察到某些物质会发生萤光这一自然界客观存在的现象，并且利用萤光来为生产服务。

恩格斯说过：“科学的发生和发展一开始就是由生产决定的。”由于生产的发展，促进了萤光作为自然科学的一个分支不断向前发展。科学技术工作者总结了劳动人民的丰富经验，并通过科学实验对某些物质会发生萤光这一现象的本质有了越来越深入的了解。科学的发展反过来又极大地推动了生产，为萤光在工农业生产和各个技术领域中的应用开辟了更加广阔的天地。

1575 年，Monardes 通过实验观察到 *Lignum Nephriticum*（一种愈疮木）切片的水溶液具有萤光。Boyle（1626—1691）在记载 Monardes 观察到的现象的手稿中，有下列一段文字：“用小刀将 *Lignum Nephriticum* 植物切成薄片，浸渍于清水中，搁置过夜，把清液倾入一洁净玻璃瓶中。……如将玻璃瓶置于窗前阳光中，从窗户与该玻璃瓶之间仔细观察，将看到该溶液呈现极为可爱的天蓝色。……朋友们看到这种现象，无不惊讶。”

在特殊位置观察上述黄色溶液，为什么溶液会呈现蓝色呢？为什么溶液浓度逐渐增大到超过某一数值以后，蓝色光线反而减弱

以至最后消失呢？Boyle 曾对这些问题反复思考，但终未能得到满意的答案。直到 1852 年 Stokes^[1] 考察奎宁和叶绿素的萤光时，用分光计观察到它们的萤光的波长比入射光的波长稍为长些，才判明这种现象是由于这些物质吸收了光线并重新发出不同波长的光线，而不是由于光的漫射作用所引起的。Stokes 称这种光为“萤光”。这一名词系由会发生萤光的矿物萤石推衍而来的。Stokes 还对萤光物质的自熄灭，以及加入第三种物质引起的萤光熄灭（盐酸对硫酸奎宁的萤光的熄灭）等问题进行了广泛的研究。到了 1880 年，Liebeman 提出了最早的关于萤光与化学结构的关系的经验法则。

早期发现的萤光物质绝大多数是无机物。随着有机化学的迅速发展，尔后发现的有机萤光物质越来越多。到了十九世纪末叶，人们不仅知道许多无机物和有机物的溶液具有萤光，而且有些无机物和有机物的蒸气也具有萤光，不仅有可见光萤光，还有紫外光萤光。

二十世纪以来，萤光现象被研究得更多了。例如，1905 年 Wood 发现了共振萤光；1914 年 Frank 和 Hertz 利用电子冲击发光进行定量研究；1922 年 Franck 和 Cario 发现了增感萤光；1924 年 Wawillow 进行了萤光效率的绝对测定；1926 年 Gaviola 进行了萤光寿命的直接测定等等。

最近几十年来，随着化学和物理学的迅速发展，萤光在理论研究方面更有了长足的进展，而其应用已遍及工业、农业、医学、考古学、矿物学各个方面，甚至在舞台艺术上也应用了萤光，日常生活中使用的太阳灯和萤光屏等，已为人们所熟知。

在机械制造工业中，常利用萤光进行各种金属制件的检疵，就是将有机发光物质的溶液涂在需要检查有无裂纹的制件的表面，经过擦拭除去多余的溶液，再用紫外光照射制件，留存在裂纹里的发光物质就能发出萤光，这种方法叫做萤光探伤法^[2]。

在农业上，萤光常被用于检查农副产品的纯度、鉴定种子的生活力、及早发现农副产品的败坏、判断果实成熟的程度以及诊断农

作物的病虫害等^[3]。

一般所谈萤光现象,系指物质吸收紫外光后发出可见光萤光,以及吸收波长较短的可见光后发出波长较长的可见光萤光。但实际上萤光现象并不限于这些情况。有些物质吸收了紫外光后仍然发出波长稍长的紫外光萤光。有些物质则吸收了比紫外光波长短得多的X光后,发出波长比所吸收的X光的波长稍长的X光,这称为X光萤光,并据此建立了X光萤光分析法。此外,有些物质吸收了红外光后发出波长稍长的红外光,这称为红外光萤光。近年来,随着红外光探测器灵敏度的不断提高,红外光萤光分析法已经大量地应用于许多有机物质的结构研究方面。由于篇幅所限,本书仅讨论狭义的萤光现象。

§ 1.2 光的吸收和发光

光具有波和光子二重性质。作为电磁波,光前进时有如海波上下振动,称为“电向量”,此向量的振幅的平方和光的强度成正比例。光的速度、波长及频率的关系可由下式表示:

$$c = \nu \lambda$$

式中 c 为光在真空中的速度,约为 3×10^8 米/秒, ν 为光波的频率, λ 为波长。

可见光在整个电磁波范围内仅占一极小部分,紫外光及红外光所占的部分也很有限。电磁波的整个已知范围约可分为下列6个区(图 1.1):

(1) 分子及原子尺寸区,也即约 14nm (毫微米)以下区。这一区包括宇宙线 (5×10^{-3} nm), γ 射线 (0.0005—0.1nm), X 射线 (0.01—100nm)。

(2) 紫外光区。分为近紫外光区及远紫外光区。波长 13.6—400nm。

(3) 可见光区。波长 400—800nm。

(4) 红外光区。波长 800— 4.6×10^5 nm。

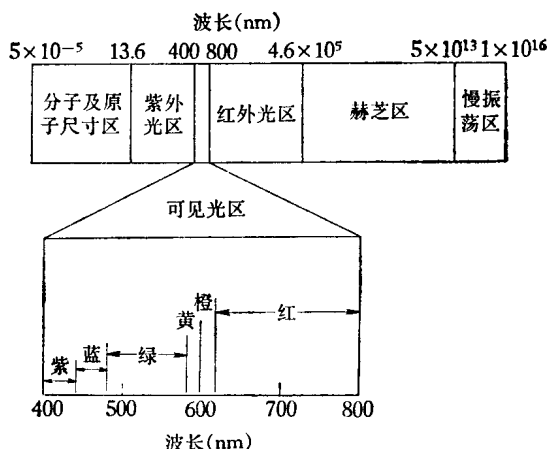


图 1.1 电磁波的分区

(5) 赫芝 (Hertz) 区。波长 $4.6 \times 10^5 \text{nm}—5 \times 10^4 \text{m}$, 包括常用的无线电短波 ($<100 \text{m}$), 中波及长波 ($>1000 \text{m}$)。

(6) 慢振荡区。波长 $5 \times 10^4—1 \times 10^7 \text{m}$ 。

当光线照射于物质时,可能全部被吸收,或部分被吸收,也可能不被吸收。例如,当白光照射于一片黄色玻璃时,白光中的蓝光被吸收,而其他颜色的光透过该玻璃而呈现黄色。白光中的黄光在通过黄色玻璃时不被吸收,是由于黄光的振动频率和该玻璃分子中电子的振动频率不相同的缘故。白光中黄光虽不被黄色玻璃所吸收,但并不意味着黄光和黄色玻璃分子之间没有发生任何作用。实际上,当透过黄色玻璃时黄光的速度被降低了。光在真空中的速度和在某一介质中的速度的比值称为该介质的折射率。物质的折射率是随着光的波长而改变的,所以,白光通过一透明的稜镜时将被分解为不同波长的光而形成了光谱。

透明的微粒在水中的悬浮体对入射白光会发生漫射现象。这是因为固体的折射率和溶液的折射率对于某一波长的光是相等的,但对于其他波长的光则不相等,所以当光线照射于悬浮体时,某一颜色的光可以透过该悬浮体,而其他颜色的光则从该悬浮体

旁边漫射过去。

各种物质的分子具有不同的结构,因而具有它们特殊的频率。当所照射的光线和被照射的物质的分子具有相同频率时,则发生共振现象,即光被该物质的分子所吸收。在该物质的吸收光谱中,将看到在该物质的分子所具有的特征频率的地方出现吸收带。

在吸收光的过程中发生了能量的转移。根据量子说,分子从光线中吸收了细小单位的能量,这些细小单位称为量子。所吸收的能量可由下式表示:

$$E = h\nu = hc\omega = hc/\lambda$$

式中 E 为所吸收的能量, h 为一常数,称为普朗克 (Planck) 常数,其值为 6.62×10^{-27} 尔格/秒, c 为光的速度, ν 为光的频率 (秒⁻¹), λ 为光的波长, ω 为波数,即波长的倒数,或每厘米中波的数目。

分子可具有一系列的能级,各能级之间相差不大。当自某一能级转移至能量较高的其他另一能级时,它吸收了相等于这两个能级之差的能量。在光线照射下,一小部分的分子吸收了能量,跃迁至较高能级而成为激发分子。

对于可见光,每一个吸收光的分子所吸收的能量约为 3×10^{-12} 尔格(红光)至 5×10^{-12} 尔格(紫光),约相当于 40—70 千卡/克分子。波长为 200nm 的紫外光,其能量值为 140 千卡/克分子。吸收可见光及近紫外光,将使分子中的一个电子被激发至较高能级;吸收远紫外光将使一个电子远离该分子。因此,在可见光区及紫外光区的吸收带相应于电子的频率。红外光的能量值约为 5 千卡/克分子,其吸收带相应于分子的振动作用,即分子中原子核的相互振动作用。至于远红外光,其能量值小于 1 千卡/克分子,在远红外光区的吸收带相应于分子的转动作用。对于可见光或紫外光的吸收,除电子的跃迁外,同时还伴随着分子的振动和转动作用。

在光线照射下吸收能量而跃迁至较高能级的激发分子并不久安于位。在很短暂的时间内(约 10^{-8} 秒),它们首先因撞击而以热的形式损失掉一部分能量,从所处的激发能级下降至第一电子激发态的最低振动能级,然后再由这一能级下降至基态的任何振动

能级。在后一过程中，激发分子以光的形式放出它们所吸收的能量，所发出的光称为荧光。因发生荧光时所发出的能量比从入射光所吸收的能量略小些，所以荧光的波长比入射光的波长稍为长些。在荧光分析中，常采用汞弧灯或氙弧灯为光源，以在近紫外光区及可见光区的射线为激发光，所发生的荧光多在可见光区。

如激发分子在下降至第一激发态的最低振动能级后，并不直接由此降落到基态的任何振动能级，而转入亚稳的三重线级，在这里逗留的时间较长(有时长达 1 秒以上)，然后再由这里降落到基态的任何振动能级。从三重线级降落到基态所发出的光称为磷光。因激发分子在三重线级所逗留的时间稍为长些，所以有时候在入射光光源关闭之后，还可以看到磷光的存在。至于荧光则因激发分子在很短暂的时间内便下降到基态，所以在入射光光源关闭之后立即消逝。

如入射光的频率太低，不足以使分子中电子跃迁到电子激发态，但仍能被该分子所吸收，而把电子激发至基态中其他较高的振动能级。因为没有发生电子的跃迁，所以被激发的电子将在很短促的时间内(约 10^{-12} 秒)返回原来能级，而在各种不同方向放出和激发光同样波长的光。所放出的光称为瑞利散射光。散射光的强度是和它的波长的四次方成反比例的，因此，蓝光的散射光比红光的散射光约强 5 倍。在溶液中被激发至电子激发态的分子的数目不多，但被激发至振动能级而发生瑞利散射光的分子很多，而且溶剂和许多溶质的分子都会发生散射作用，所以散射作用在荧光分析中有一定的影响。

除瑞利散射光外，还有一种散射光，称为拉曼光(参阅 § 5.2)。当分子吸收了光，它们的电子被激发至基态中的其他较高的振动能级后，在很短促的时间内(约 10^{-12} 秒)返回到比原来稍高或稍低的能级，所发出的能量略异于所吸收的能量，因此，所发生的散射光的波长也略异于激发光的波长，这种散射光称为拉曼光。

荧光的波长大于激发光的波长，这是它和瑞利散射光相异之处。荧光和拉曼光的波长都比激发光长，但它们之间并不难于辨

别。因拉曼光的强度很低,常不及荧光强度的千分之一,且荧光具有一定的波峰,而拉曼光并没有一定的波长。拉曼光虽没有一定的波长,但它和激发光之间存在着一定的频率差值。这一频率差值是各种不同的分子结构的特性,而和激发光的能量无关,这就是拉曼光之所以用于分子结构研究的原因。

在溶液中拉曼光比瑞利散射光弱得多,但溶剂所发生的拉曼光的波长常和溶液中荧光物质所发生的荧光的波长靠近。因此,拉曼光对于荧光分析的干扰作用,亦须给以一定的注意。

荧光和磷光都是一种发光,它们都是物质分子吸收了光能而成为激发分子,然后由激发态降落至基态所发出的光。其差别在于激发分子由激发态降落至基态所经过的途径不同,由激发至发光的时间长短也不一样,因而区分为荧光和磷光。除了吸收光能可使分子激发而发光外,吸收热能、电能和化学能也能够引起分子激发而发光。通过化学反应使分子激发而发生的光称为化学发光。利用化学发光进行分析工作称为化学发光分析。化学发光分析、荧光分析和磷光分析统称为发光分析。

§ 1.3 荧 光 分 析

利用某些物质被紫外光照射后所发生的、能够反映出该物质特性的荧光,以进行该物质的定性分析或定量分析,称为荧光分析。

荧光分析发展至今日,已被广泛地应用在工业、农业、医药、卫生和科学研究各个领域。可以用荧光分析鉴定和测定的无机物、有机物、生物物质、药物等的数目与日俱增。荧光分析法越来越成为分析化学工作者所必须掌握的一种重要分析方法。

荧光定性分析,常采用直接比较法,即将试样与已知物质并列于紫外光之下,根据它们所发出的荧光的性质、颜色和强度,来鉴定它们是否含有同一荧光物质。这种鉴定法不限定于固体试样,也可用于液体试样,也可将试样和已知物质在数种不同溶剂中配

成各种不同浓度和不同酸度的溶液而加以比较。

有些物质本身并不发生荧光,但在加入某一试剂之后,两者发生反应而形成一种能够发生荧光的产物,由产物的荧光的性质、颜色和强度可以鉴别该物质。相反地,某些物质本身会发生荧光,但经某一试剂处理之后,荧光即行消逝。该物质所发生的荧光的性质以及经试剂处理后荧光消失的情况,均可作为该物质定性分析的依据。

荧光定量分析,最简单的方法是标准系列法,即先将已知的荧光物质配成不同含量的标准系列,然后让试样溶液和标准系列一同置于紫外光之下,由荧光强度求出其近似含量。

最常采用的荧光定量分析法是工作曲线法,即先将已知的荧光物质配成不同含量的标准溶液,置于荧光计中测量荧光强度,以荧光强度读数对着标准溶液的浓度绘制工作曲线。在完全相同的条件下测定试样溶液的荧光强度,然后由荧光强度和工作曲线求出试样溶液的含量。

早在十九世纪,地质工作者就常采用荧光法进行矿石鉴定。据文献报导,可用荧光法鉴定的矿石约达百种以上^[4]。此后,荧光分析用于无机化合物和有机化合物的鉴定和测定的范围越来越广。根据我们对现有文献进行普查的不完全统计,可用荧光分析法测定的元素达六十余种,占自然界存在的元素的三分之二以上;可用荧光分析法测定的有机化合物为数更多,至少在数百种以上,它们大致可分为以下几个类型:脂肪族化合物、芳香族化合物、氨基酸和蛋白质、胺类、维生素、甾族化合物、酶和辅酶、药物、毒物、农药等等。

在工业上,荧光分析可应用于空气和水中各种痕量污染物的测定,聚合物薄膜和橡胶制品中抗氧剂和其他添加剂的测定,天然纤维和合成纤维所吸附的染料和增亮剂的测定,以及燃料油和润滑油的芳香特性的测定等等。

在科学研究方面,荧光分析法为研究三重线级、测定电荷转移的机理、测量大分子的体积以及研究蛋白质结合作用机理等方面

提供了一个有效的方法。

在测定低含量试样或试样中微量杂质的各种分析方法中，流行最广的首推比色法和分光光度法。荧光分析虽比不上这两种方法的广泛应用，但灵敏度一般可超过它们百倍至千倍。在比色法和分光光度法中，一部分入射光被试样溶液所吸收，由透过溶液的透射光的强度和入射光的强度的比值(透射率)或它的倒数的对数(吸光值)来测定试样溶液中吸光物质的含量。吸光值的大小决定于溶液的浓度，光程的长度，以及该吸光物质的克分子吸光系数，几乎和入射光的强度无关。荧光分析系由试样溶液所发生的荧光的强度来测定试样溶液中荧光物质的含量，荧光分析的灵敏度不仅和溶液的浓度有关，而且和紫外光的照射强度及光度计的灵敏度有关。对于光敏物质所允许的照明强度虽有所限制，但光度计的灵敏度却可以大为增加，因此，荧光分析的灵敏度一般都高过比色法和分光光度法。比色法及分光光度法的灵敏度通常在千万分之几，而荧光分析的灵敏度常达亿分之几，甚至有低至千亿分之几的^[5]。如果荧光分析法与纸上色层法或薄膜色层法等方法结合进行，还可能达到更高的灵敏度。

荧光分析的另一优点是选择性高。这主要是指有机化合物的分析而言。因为凡是会发生荧光的物质，首先必须会吸收一定频率的光，而会吸收光的物质却不一定会发生荧光，况且对于某一给定波长的激发光，会发生荧光的一些物质发出的荧光的波长也不尽相同，因而只要控制激发光和荧光单色器的波长，便不难得到选择性良好的方法。至于金属离子的荧光分析法的选择性并不高，这是由于许多种金属离子常与同一有机试剂组成结构相近的络合物，而这些络合物所发生的荧光的波长又极为靠近的缘故。

除灵敏度和选择性高外，方法快捷，重现性好，取样容易，试样需要量少等等，也是荧光法的优点。

当然，荧光分析法也有它的不足之处。这主要是指它比起其他方法来说，应用范围还不够广泛，因为有许多物质本身不会发生荧光，而要加入何种试剂才能达到荧光分析的目的，还需要广泛地

研究。此外,对于萤光的发生和化合物结构的关系,还需要人们更加深入地研究。应该指出,近年来随着萤光分析方法的迅速发展,它的应用范围已经有了很大的扩充。今日的萤光分析法,已经使每一个领域的研究者和工作者考虑如何更好地掌握它来为生产和科学研究工作服务。

总之,分析方法的种类繁多,有的灵敏度高,有的准确性大,有的专一性强,有的精密度好,有的方法简便,仪器简单,试样和试剂用量少,等等,可谓各有千秋,但是没有一种方法是尽善尽美,凌驾于其他各种方法之上的。对于各种不同的分析方法,我们应该采取马克思主义辩证分析的方法,一分为二地既看到每种方法的优点,也看到它的缺点,而撷取其长处,改进其缺点,使这些分析方法能更好地为祖国社会主义建设服务。

毛主席教导我们:“人的正确思想,只能从社会实践中来,只能从社会的生产斗争、阶级斗争和科学实验这三项实践中来。”随着三大革命运动的向前发展,我们将会掌握更多更好的萤光分析方法,使它在祖国社会主义建设事业中发挥更大的作用。

参 考 文 献

- [1] G. Stokes, *Phil. Trans., Roy. Soc. London*, **143**, 463 (1852).
- [2] 奥列斯托夫著,孙一唐译,“冷光”,科学技术出版社,1959.
- [3] 朱鹤健,科学画报,6月号,208,1963.
- [4] J. DeMent, “*Handbook of Fluorescence, Gems, and Minerals*”, Minealogist Publishing Co., Portland, Ore., 1949.
- [5] J. H. Carpenter, *Public Works*, **91**, 6,110 (1960).

一 般 参 考 文 献

- R. J. Bartholomew, *Spectrofluorimetry and its Application to Chemical Analysis. Rev. Pure and Appl. Chem.*, **8**, 265 (1958).
- E. J. Bowen, F. Wokes, “*Fluorescence of Solutions*”, Longmans, London, 1593.
- E. N. Harvey, “*A History of Luminescence*”, American Philosophical Society, Philadelphia, 1957.
- M. A. Константиновой-Шлезингер, «Люминесцентный анализ», Государственное Издательство физико-математической Литературы, Москва, 1961.