

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

金属矿物反射色的颜色指数

陈 正 陈殿芬 李纯杰

(中国地质科学院矿床地质研究所)

金属矿物的反射色,是金属矿物的重要属性,也是反射偏光显微镜下鉴定这类矿物的主要特征。长期以来,人们一直采用所谓主观的描述法表述金属矿物的反射色。例如:黄铁矿被称为淡黄色或乳色,黄铜矿被称为黄色,铜蓝被称为蓝色,辉铜矿被称为淡蓝色等等。这一表述法的缺点在于:一、没有客观的定量概念,反射色的命名可因人而异;二、多种矿物连生时,人们对反射色的感觉,受到连晶反射色在视觉中的迭加作用,可以发生改变。例如:黄铜矿的黄色,在磁黄铁矿中可变成淡黄绿色,磁铁矿的灰色,在赤铁矿、针铁矿中可变成棕灰色;三、人目也可有不同程度的色盲,以致直接影响人们对颜色的感觉。由于上述原因,就有必要及早改用客观的定量测定法以代替主观的描述法。

色度学是一门比较成熟的学科。自从 1936 年哈台 (A. C. Hardy)^[1] 的选择纵座标法问世以后,利用色度学原理来测量各种涂料、色布、纸张的颜色,成为简便易行的方法。但是,在其后的三十年中,选择纵座标法并未受到矿物工作者的注意。1966 年皮勒 (H. Piller)^[2] 首次介绍应用于显微镜下测定金属矿物的反射色,并测了 13 种矿物。1976 年苏联舒姆斯卡亚 (Н. И. Шумская)^[3] 也应用这一方法发表了 54 种矿物反射色的数值。我们自 1975 年以来,就已进行这一金属矿物反射色的镜下定量测定工作,并已累积了上百种矿物的反射色数值。现将测定方法及测定结果简单介绍于下。

近年来,随着光电技术和自动计算技术的发展,特别是光电倍增管和电子计算机的应用,人们已能更为快速地测定矿物的颜色数据。因此,即便不用选择纵座标法而仍用正规的等距离算法,也是简便易行的。瞻望未来,表述金属矿物的反射色,势将由客观的定量测定法取代旧的主观描述法,而应用色度学原理测定金属矿物的颜色,作为表述颜色特征的光学常数,也将受到人们的重视。

一、应用色度学原理实测金属矿物反射色颜色指数的方法

首先,选择可见光范围内合适波段的干涉滤光器,应用倍增管显微镜测定各波段的反射率。然后在反射率图纸上投入各反射率值,再将各反射率点用平滑曲线连接,即得矿物的反射率色散曲线。这一反射率色散曲线表明,在波长从 400 毫微米到 700 毫微米的可见光范围内,在任何波长上都可以找出这一矿物应有的反射率数值。

其次,确定采用哪一种光源作为观察矿物反射色的施照体。光源一般有 S_A 、 S_B 、 S_C 三种。 S_C 称为平均白昼光,它是日常观察颜色最通用的光源,而反射偏光显微镜于光路中加一蓝色玻璃的情况,也就是尽可能使其与平均白昼光相近似。因此,这一加蓝色玻璃的灯光,就可以作为 S_C 光源看待而应用于下述的计算中。

最后,在测妥矿物反射率色散曲线和确定光源种类以后,即可应用光度学原理对矿物反射色的颜色指数进行计算。按国际上 (C. I. E.) 根据正常人目的感光特点,已制定了人目对红、绿、蓝三色的标准感色灵敏度曲线(又称为混色曲线、配色曲线或三刺激曲线)。曲线见图 1。于是,假定矿物反射率色散函数为 $R_{(\lambda)}$, S_c 光源的光能色散函数为 $S_{C(\lambda)}$, 三感色灵敏度函数分别为 $\bar{X}_{(\lambda)}$ 、 $\bar{Y}_{(\lambda)}$ 、 $\bar{Z}_{(\lambda)}$, 这样,某一定波长 R_{λ} 的 X 刺激值当为 $S_{C\lambda}$ 、 $\bar{X}_{\lambda}$ 、 R_{λ} 三者的乘积。波长由 400 毫微米至 700 毫微米组成的可见光范围的矿物的三刺激值 X 、 Y 、 Z , 如用积分表示,当为

$$X = \int_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{X}_{\lambda}) R_{\lambda} \cdot d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{Y}_{\lambda}) R_{\lambda} \cdot d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{Z}_{\lambda}) R_{\lambda} \cdot d\lambda$$

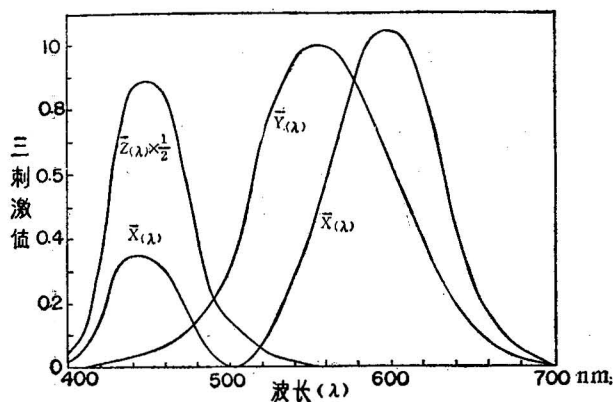


图 1 国际上制定的等能光谱的标准三刺激曲线: $\bar{X}_{\lambda}$ 、 $\bar{Y}_{\lambda}$ 、 $\bar{Z}_{\lambda}$

实际工作中往往将可见光范围分成若干区间,而以每区间的波长的中值,找出该波长的光源值、刺激值与矿物的反射率值,三者相乘,将乘积相加,作为积分的近似值计算。即

$$X = \sum_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{X}_{\lambda}) \cdot R_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$$Y = \sum_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{Y}_{\lambda}) \cdot R_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

$$Z = \sum_{\lambda=400\text{nm}}^{\lambda=700\text{nm}} (S_{C\lambda} \cdot \bar{Z}_{\lambda}) \cdot R_{\lambda} \cdot \Delta\lambda$$

上述的区间可取等值区间,譬如以 10 毫微米为间距,将可见光范围分成 30 个区间进行计算。但是这一方法的计算仍较繁复。为此,哈台提出“选择纵座标法”以代替这一等值纵

座标法。选择纵座标法的区间仍为 30, 但其间距是不相等的。哈台使

$$(S_{C\lambda} \cdot \bar{X}_\lambda) \cdot \Delta\lambda, (S_{C\lambda} \cdot \bar{Y}_\lambda) \cdot \Delta\lambda, (S_{C\lambda} \cdot \bar{Z}_\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

三者各等于一常数, 从而定出其 30 条纵座标的间距 (波长数), 因此在计算矿物三刺激值时, 可将这些乘积置于不同间距矿物反射率之和之前, 得下列三式:

$$X = (S_{C\lambda} \cdot \bar{X}_\lambda) \cdot \Delta\lambda \sum_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} R_\lambda$$

$$Y = (S_{C\lambda} \cdot \bar{Y}_\lambda) \cdot \Delta\lambda \sum_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} R_\lambda$$

$$Z = (S_{C\lambda} \cdot \bar{Z}_\lambda) \cdot \Delta\lambda \sum_{\lambda=400nm}^{\lambda=700nm} R_\lambda$$

三式中的 $\Delta\lambda$ 代表不同选择区间而以其中值表示。这一方法将大量乘法改成了加法, 显然要简便得多。国际上公布的 S_C 光源的选择纵座标波长见表 1。

表 1 S_C 光源的选择纵座标波长 (nm)

编 号	属 于 X	属 于 Y	属 于 Z	编 号	属 于 X	属 于 Y	属 于 Z
1	424.4	465.9	414.1	16	585.0	558.5	454.0
2	435.5	489.4	422.2	17	588.7	561.9	455.9
3	443.9	500.4	426.3	18	592.4	565.3	457.9
4	452.1	508.7	429.4	19	596.0	568.9	459.9
5	461.2	515.1	432.0	20	599.6	572.5	462.0
6	474.0	520.6	434.3	21	603.3	576.4	464.1
7	531.2	525.4	436.5	22	607.0	580.5	466.3
8	544.3	529.8	438.6	23	610.9	584.8	468.7
9	552.4	533.9	440.6	24	615.0	589.6	471.4
10	558.7	537.7	442.5	25	619.4	594.8	474.3
11	564.1	541.4	444.4	26	624.2	600.8	477.7
12	568.9	544.9	446.3	27	629.8	607.7	481.8
13	573.2	548.4	448.2	28	636.6	616.1	487.2
14	577.3	551.8	450.1	29	645.9	627.3	495.2
15	581.3	555.1	452.1	30	663.0	647.4	511.2

国际上又规定 S_C 光源分属于 X、Y、Z 的合适因素为: 0.03268, 0.03333, 0.03938。

实际计算可以按上述分属于 X、Y、Z 的选择波长, 根据已作妥的矿物反射率色散曲线, 查出其相应的 30 个反射率值, 分别相加得一和, 再将这和各分别乘以 S_C 光源的相应的合适因素, 即得矿物的三刺激值 X、Y、Z。在求出三刺激值以后, 又以三刺激值相加的和, 分别除三刺激值, 求得色度座标或三系数 x 、 y 、 z 。将 x 、 y 值投入国际上通用的色度图 (见图 2), 即可找出其在色度图中的位置。对照矿物位置与光谱轨迹和 S_C 光源位置 ($x = 0.310$, $y = 0.316$, $z = 0.374$) 的相互关系, 可约略估计出矿物的颜色特征及其浓淡的程度。同时, 三刺激值中的 y 值, 根据三刺激曲线的作图原理, 也就代表矿物在绿光亦即在白光中人目所测的反射率值。因此, 特将其改用 R_{vis} 表示。

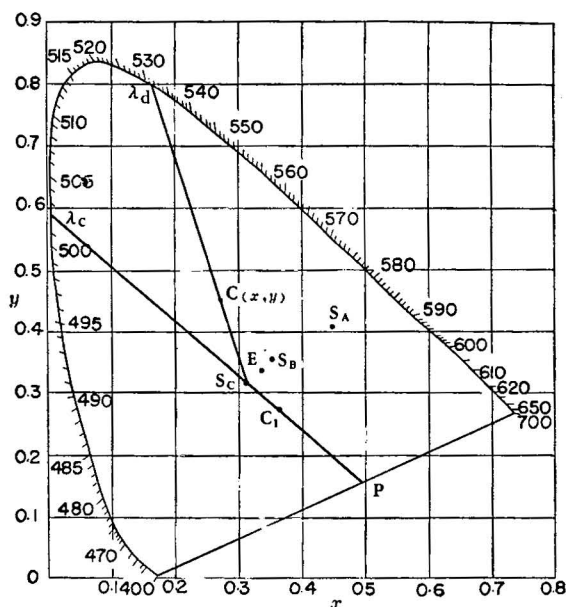


图 2 色度图与光谱轨迹

图中 E 点为等能光源、 S_B 为日光光源、 S_C 为平均白昼光源、 S_A 为钨丝灯光光源的色度坐标。
 C 、 C_1 为其二矿物的色度坐标。

颜色的另一种标记法为将色度坐标 x 、 y 改用主波长 λ_d 和激发纯度 P_e 两个量表示,见图2。前者系自光源点 S_C 至矿物色度坐标点 $C(x, y)$ 连一直线,并延长之与光谱轨迹相交于 λ_d 点, λ_d 点在光谱轨迹上所在的波长位置,即为矿物颜色的主波长或色彩波长。自光源点 S_C 至 C 点的距离与自 S_C 至 λ_d 点全长之比,即为激发纯度 P_e 。此数愈大,愈接近于1,纯度愈高,也愈接近于光谱色;反之,比数愈小,纯度愈低,愈接近于光源点,也即愈接近于纯粹的白色。紫色矿物的色度坐标落在 S_C 点的下方。譬如图中的 C_1 点。作 $S_C C_1$ 的连线并延长之与光谱轨迹相交于 λ_c , 与紫色线相交于 P 。 λ_c 的波长为紫色的补色,为方便计,改用 λ_d 的负值表示。紫色的纯度计算同上。

二、金属矿物反射色的颜色指数

现将我们用莱资厂 MPV-1 型光电倍增管显微镜测定的 103 种较常见金属矿物的颜色指数列于表 2, 以供参考。

矿物反射率色散曲线利用下列 10 个波长单色光的干涉滤光器测定, 即 405 毫微米、436 毫微米、480 毫微米、526 毫微米、546 毫微米、589 毫微米、644 毫微米、656 毫微米、664 毫微米、700 毫微米。每一单色光的半宽度除 644 毫微米者为 17 毫微米外, 其余为 7—15 毫微米。单色光滤光器的间距较稀, 但一般矿物已经够用, 只对少数反射率变化较大的矿物, 例如铜蓝、黄铜矿等可能少了一些。今后在 546 毫微米与 589 毫微米之间, 和 589 毫微米与 644 毫微米之间, 似以再增加一个波长为宜。

颜色指数完全采用皮勒的方式表示, 即每一矿物列出 R_{vis} 、 x 、 y 、 λ_d 、 P_e 等五个数

表 2 金属矿物反射色的颜色指数 (光源 S_C)

编 号	矿 物 及 其 方 位	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e
1	自然锌	74.1	0.312	0.320	560	0.015
2	自然铋	70.6	0.310	0.318	551	0.006
3	水银	69.3	0.311	0.317	565	0.004
4	铂	69.4	0.320	0.326	577	0.053
	铂	69.4	0.319	0.326	577	0.053
5	自然金	66.0	0.377	0.386	578	0.370
	自然金(脉金)	65.3	0.394	0.387	580	0.417
6	自然铊	61.5	0.321	0.323	584	0.049
7	铁铂矿	64.3	0.320	0.324	580	0.049
	铁铂矿	63.4	0.320	0.325	578	0.051
8	铋铋矿	61.4	0.304	0.312	482	0.027
9	镍纹石	60.3	0.317	0.323	576	0.038
10	铋铋铂钨矿	58.9	0.323	0.318	600	0.041
11	副斜方砷镍矿 R'_γ	58.7	0.305	0.311	480	0.024
	R'_α	55.6	0.308	0.315	490	0.009
12	白铁矿 R'_γ	56.9	0.313	0.329	560	0.043
	R'_α	51.4	0.313	0.327	573	0.049
13	锥纹石	57.1	0.312	0.317	580	0.008
14	承铂矿	60.0	0.313	0.321	570	0.024
15	针镍矿 R'_s	57.6	0.335	0.358	571	0.180
	R'_ω	50.4	0.327	0.337	574	0.104
	针镍矿 R'_s	55.1	0.340	0.353	575	0.183
	R'_ω	50.0	0.330	0.340	575	0.119
16	斜方砷铁矿 R'_γ	55.4	0.311	0.317	572	0.008
	R'_α	55.5	0.304	0.310	479	0.026
	斜方砷铁矿 R'_γ	53.1	0.311	0.320	564	0.015
	R'_α	52.8	0.303	0.311	479	0.029
17	自然铜*	63.3	0.367	0.343	588	0.223
18	砷铂矿	55.0	0.308	0.315	485	0.008
19	红砷镍矿 R'_ω	50.5	0.335	0.334	581	0.115
	R'_s	47.5	0.342	0.338	583	0.148
	红砷镍矿 R'_ω	51.4	0.329	0.328	584	0.085
	R'_s	49.5	0.335	0.331	585	0.109
20	黄铁矿{111}*	54.3	0.328	0.342	573	0.120
21	毒砂 R'_γ	53.0	0.303	0.310	481	0.032
	R'_α	52.5	0.315	0.323	572	0.030
	毒砂 R'_γ	54.1	0.305	0.314	487	0.021
	R'_α	51.0	0.319	0.319	528	0.025
22	斜方砷钴矿 R'_γ	53.8	0.309	0.314	480	0.006
	R'_α	51.3	0.306	0.312	478	0.017
23	铁硫砷钴矿 R'_γ	54.0	0.313	0.320	573	0.019
	R'_α	49.6	0.313	0.321	572	0.021
24	方钴矿*	53.8	0.308	0.314	482	0.013
25	钴镍黄铁矿	53.7	0.330	0.336	577	0.110
26	待定矿物 R'_γ	52.4	0.308	0.319	507	0.008
	(Pb, As, Bi, S) R'_α	46.0	0.308	0.314	480	0.009

(续 表 2)

编 号	矿 物 及 其 方 位	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e	
27	辉钴矿	51.5	0.321	0.322	586	0.044	
28	辉砷镍(钴)矿	50.2	0.313	0.318	576	0.014	
29	自然砷	R'_γ	49.0	0.308	0.314	482	0.007
		R'_α	47.6	0.309	0.314	472	0.005
30	砷铜矿	48.3	0.336	0.322	596	0.088	
31	辉铋矿	R_γ	46.5	0.297	0.307	482	0.056
		R_β	41.4	0.301	0.310	483	0.042
		R_α	30.9	0.306	0.317	497	0.012
32	辉砷镍铋矿	50.1	0.285	0.337	502	0.084	
33	辉铁镍矿*	45.5	0.312	0.317	578	0.008	
34	镍黄铁矿*	44.5	0.338	0.345	577	0.156	
	镍黄铁矿	45.2	0.336	0.343	577	0.145	
35	辉铋矿	R_γ	46.6	0.294	0.305	482	0.069
		R_β	41.3	0.304	0.307	471	0.034
		R_α	37.0	0.302	0.314	489	0.032
36	黄铜矿	45.9	0.346	0.365	574	0.226	
	黄铜矿	42.4	0.350	0.367	575	0.243	
37	砷硫铋铅矿	R'_γ	45.5	0.302	0.310	480	0.035
		R'_α	37.3	0.305	0.312	479	0.028
	砷硫铋铅矿	R'_γ	40.2	0.304	0.313	479	0.029
		R'_α	37.7	0.304	0.311	479	0.029
		R'_α	40.9	0.304	0.311	480	0.027
38	辉铋铅矿	R'_γ	44.6	0.300	0.309	482	0.044
		R'_α	40.9	0.304	0.311	480	0.027
39	硫钴矿	44.4	0.318	0.323	578	0.044	
40	硫铜钴矿	43.1	0.316	0.321	580	0.031	
41	硅铁矿(Fe_2Si)*	42.5	0.312	0.318	577	0.012	
42	磁黄铁矿	R'_ϵ	42.7	0.327	0.333	577	0.093
		R_ω	35.9	0.329	0.333	579	0.097
43	脆硫铋铅矿	R'_γ	41.6	0.302	0.311	484	0.035
		R'_α	39.3	0.303	0.312	484	0.030
	脆硫铋铅矿	R'_γ	41.6	0.298	0.307	481	0.055
		R'_α	35.9	0.305	0.313	485	0.021
44	硫钨矿	41.0	0.301	0.306	476	0.048	
45	方铅矿*	40.8	0.302	0.306	474	0.040	
	方铅矿	41.3	0.302	0.306	473	0.041	
	方铅矿*	40.3	0.302	0.305	473	0.042	
46	紫硫镍矿	41.0	0.325	0.329	579	0.074	
47	软锰矿	R'_γ	39.3	0.302	0.311	484	0.034
		R'_α	33.4	0.302	0.309	480	0.031
48	方黄铜矿	R_γ	39.3	0.335	0.347	574	0.152
		R_β	37.2	0.338	0.347	576	0.156
	方黄铜矿	R_γ	38.6	0.337	0.349	575	0.163
		R_β	36.4	0.341	0.342	580	0.155
49	陨硫铁	R'_ϵ	37.9	0.330	0.332	582	0.100
	陨硫铁	R'_ϵ	38.5	0.329	0.333	579	0.100
		R_ω	33.9	0.333	0.334	582	0.110

(续 表 2)

编 号	矿 物 及 其 方 位	R_{vis}	x	y	λ_d	P_s	
50	螺状硫银矿	R'_γ	37.0	0.305	0.313	483	0.021
		R'_α	33.9	0.306	0.313	483	0.021
51	辉铜矿	R'_γ	36.5	0.310	0.319	553	0.008
		R'_α	33.0	0.311	0.317	569	0.006
52	辉钼矿	R_ω	37.4	0.297	0.298	472	0.071
		R_s	18.9	0.302	0.306	475	0.040
53	硫铁镍矿		36.6	0.318	0.320	588	0.033
			35.3	0.318	0.319	591	0.029
54	辉铋锡铅矿	R'_γ	34.5	0.304	0.311	482	0.027
		R'_α	33.5	0.304	0.313	485	0.025
55	深红银矿	R_ω	31.8	0.293	0.303	481	0.081
		R'_s	29.0	0.291	0.301	481	0.086
56	硫砷铜矿	R'_γ	30.4	0.304	0.309	476	0.032
		R'_α	24.9	0.310	0.314	-546	0.006
57	砷硫钒铜矿		30.1	0.322	0.334	572	0.082
58	砷黝铜矿*		29.7	0.304	0.314	488	0.027
59	银黝铜矿		29.9	0.320	0.331	572	0.069
60	镜铁矿	R_ω	29.3	0.298	0.304	480	0.059
		R_s	26.4	0.298	0.306	481	0.056
61	黝铜矿*		28.8	0.306	0.314	488	0.017
			27.8	0.304	0.315	490	0.021
62	伊达矿	R'_s	27.3	0.326	0.351	568	0.137
		R_ω	19.3	0.350	0.329	593	0.141
63	黄锡矿	R'_s	27.1	0.315	0.326	569	0.044
		R_ω	25.3	0.317	0.327	570	0.050
64	辰砂	R'_s	26.1	0.301	0.307	479	0.043
		R_ω	23.3	0.301	0.305	475	0.048
65	赤铜矿		25.9	0.289	0.295	479	0.099
66	均质硒铜矿		24.7	0.289	0.314	490	0.083
67	红碲矿	R'_γ	25.3	0.301	0.303	472	0.052
		R'_α	28.3	0.302	0.305	473	0.041
68	硬锰矿	R'_γ	24.5	0.294	0.302	480	0.066
		R'_α	19.1	0.296	0.303	480	0.074
69	雌黄	R'_γ	24.6	0.295	0.298	475	0.074
		R'_α	20.7	0.291	0.297	478	0.100
70	黑辰砂		23.9	0.329	0.293	-554	0.053
71	金红石	R'_s	23.0	0.304	0.310	480	0.030
		R_ω	20.2	0.301	0.307	478	0.043
	金红石	R'_s	23.6	0.303	0.308	475	0.035
		R_ω	20.9	0.300	0.306	478	0.049
72	戴氏赤铜矿	R_ω	23.4	0.314	0.321	572	0.024
		R'_s	19.6	0.314	0.320	577	0.021
73	含锰锌尖晶石		20.8	0.305	0.312	481	0.023
74	黑硫银锡矿		23.3	0.301	0.308	481	0.043
75	硫锰矿		22.8	0.303	0.308	477	0.034
76	蓝辉铜矿		21.0	0.286	0.297	480	0.110

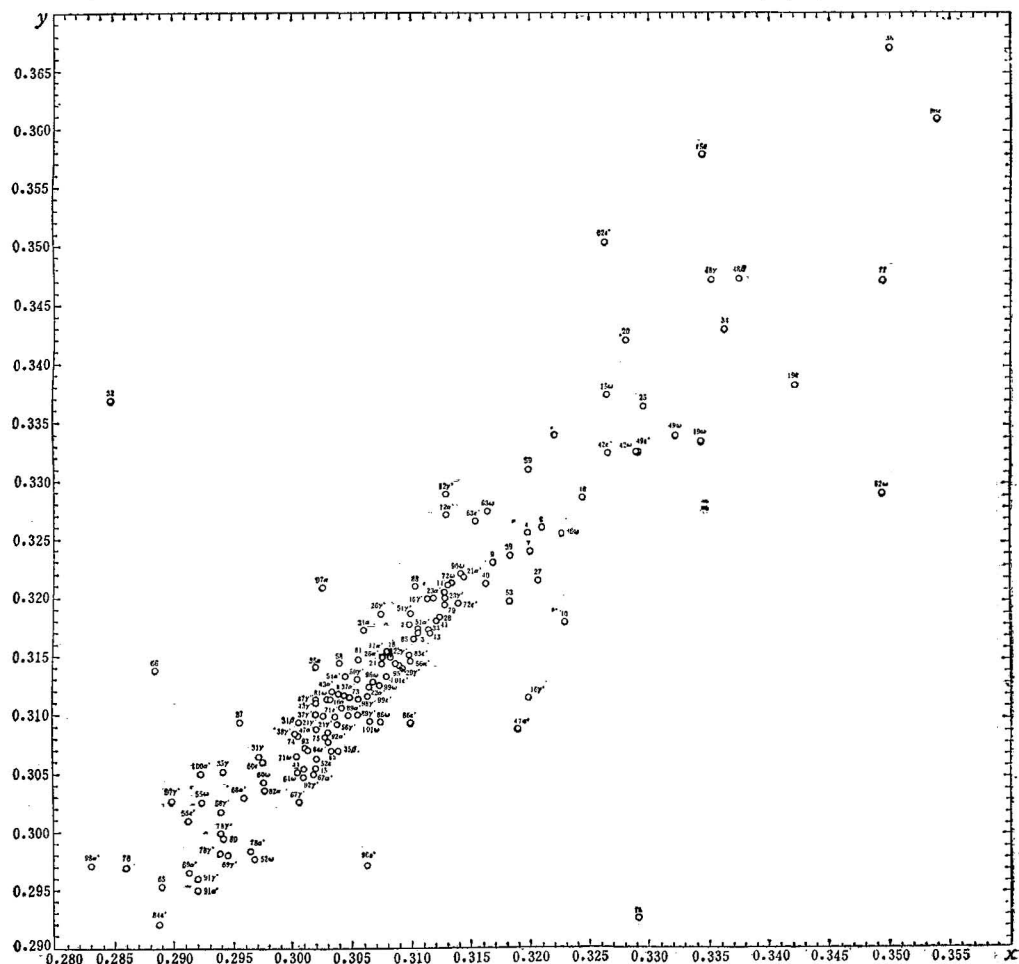
(续 表 2)

编 号	矿 物 及 其 方 位	R_{vis}	x	y	λ_d	P_s
77	斑铜矿	23.4	0.349	0.346	581	0.188
	斑铜矿	22.1	0.349	0.344	582	0.182
78	雄黄 R'_γ	21.4	0.294	0.298	476	0.078
	R'_α	19.6	0.297	0.298	474	0.072
79	方铁矿	21.0	0.313	0.320	574	0.019
	方铁矿	20.8	0.312	0.317	578	0.008
80	磁赤铁矿-I	18.0	0.303	0.317	474	0.035
	磁赤铁矿-II	20.3	0.294	0.300	478	0.091
81	黑锰矿 R_ω	19.0	0.303	0.311	482	0.030
	R'_s	16.4	0.303	0.308	475	0.036
	黑锰矿 R_ω	19.3	0.298	0.307	481	0.054
	R'_s	17.1	0.306	0.311	475	0.020
	黑锰矿 R_ω	20.3	0.305	0.312	481	0.023
	R'_s	16.5	0.303	0.310	480	0.032
82	褐锰矿 R'_γ	20.2	0.301	0.307	479	0.045
	R'_α	19.1	0.298	0.304	479	0.058
83	石炭 R_ω	20.2	0.323	0.325	581	0.062
	R'_s	8.53	0.310	0.315	-557	0.003
84	铜蓝 R'_s	19.0	0.289	0.292	474	0.105
	R_ω	7.62	0.245	0.264	481	0.293
85	磁铁矿*	20.4	0.310	0.316	558	0.002
86	钛铁矿 R_ω	19.5	0.307	0.310	-567	0.020
	R'_s	17.0	0.310	0.309	-553	0.022
87	硫锑矿	19.4	0.296	0.310	485	0.061
88	黑钨铁锰矿	17.4	0.310	0.321	552	0.014
89	黑钨矿 R'_γ	17.2	0.306	0.310	474	0.023
	R'_α	15.3	0.305	0.310	476	0.025
90	墨铜矿 R'_s	16.5	0.354	0.361	578	0.242
	R_ω	10.8	0.314	0.322	571	0.030
91	针铁矿	14.9	0.294	0.300	478	0.076
	针铁矿 R'_γ	16.2	0.292	0.296	476	0.088
	R'_α	14.6	0.292	0.295	475	0.089
92	彩铅钨矿 R'_γ	17.2	0.301	0.305	474	0.045
	R'_α	15.6	0.303	0.308	477	0.034
93	闪锌矿*	16.7	0.301	0.307	479	0.041
	闪锌矿*	16.3	0.301	0.308	480	0.042
	闪锌矿*	16.6	0.302	0.307	477	0.042
94	红硒铜矿 R'_s	15.1	0.286	0.289	475	0.116
	R_ω	12.3	0.301	0.251	-558	0.245
95	铬铁矿*	10.3	0.303	0.310	480	0.034
	铬铁矿*	12.6	0.303	0.309	480	0.033
	铬铁矿	14.4	0.309	0.314	473	0.013
96	锡石 R'_s	11.7	0.306	0.297	-560	0.068
	R_ω	11.1	0.307	0.313	480	0.014
	锡石 R'_s	12.0	0.307	0.280	-555	0.106
	R_ω	10.7	0.308	0.314	480	0.009

(续 表 2)

编 号	矿 物 及 其 方 位		R_{vis}	x	y	λ_d	P_g
97	硼镁铁矿	R'_γ	12.1	0.303	0.321	501	0.024
		R'_α	8.31	0.290	0.303	483	0.088
98	Sn-硼镁铁矿	R'_γ	11.4	0.306	0.311	478	0.022
		R'_α	7.27	0.288	0.297	480	0.101
99	白钨矿	R'_ϵ	10.2	0.306	0.312	476	0.018
		R_ω	9.85	0.307	0.313	476	0.015
100	黑柱石	R'_γ	9.17	0.304	0.309	478	0.031
		R'_α	7.18	0.292	0.305	482	0.080
101	菱铁矿	R_ω	9.14	0.306	0.309	478	0.031
		R'_ϵ	5.64	0.308	0.313	475	0.012
102	锌尖晶石		8.1	0.306	0.321	510	0.014
103	银(镀膜)		95.5	0.313	0.320	573	0.020

注: 上列各矿物的数值, 注有*号的由李纯杰同志测定, 其余全部由陈殿芬同志测定。

图 3 金属矿物在色度图中的分布 (S_c 光源)

注: 矿物编号见表2, 图中位置按小数点下第四位计算数字定位, 未经四舍五入。

字。 x 、 y 和 λ_d 、 P_e 代表两套系统的基本数字,前者便于投图,后者便于领会颜色特点及其浓度,二者可以互相补充。至于 R_{vis} 即刺激值 Y ,系代表人目的视觉反射率值。

图 3 为放大的部分色度图。凡已测矿物除自然金、自然铜、铜蓝、红硒铜矿等四矿物外,均已投入图内。

三、讨 论

(一) 从色度图内(图3)可以看出常见矿物在色度图中的分布概况以及颜色近似矿物色度上的差别程度。又从表 2 内也可看出颜色近似矿物在主波长 λ_d 和纯度 P_e 上所反映的颜色和浓度的差别程度,显然这种差别是更易于领会的。倘二标本为同一均质矿物,或同一非均质矿物的同一光性方位,则 R_{vis} 虽然可以有些差别(可以由抛光程度和其他条件引起),但 x 、 y 、 λ_d 、 P_e 四个数值往往比较一致,差数极小。所以,这一用色度测量数字综合反映矿物反射率和反射色的方法,无可置疑比以往的文字描述法较为科学。它当有利于今后利用反射率和反射色二者描述和鉴定矿物的工作。

(二) 所测 103 种矿物的色度座标在色度图中的分布并非漫无规律而多集中于某一范围以内: 1. 矿物色度座标多集中于光源座标附近。除自然金、自然铜、黄铜矿、红硒铜矿、铜蓝等几种反射色特显著的矿物以外,所有其他矿物的激发浓度或纯度都小于 0.2。它说明矿物反射色的浓度是很淡的,一般都是以白色为主而稍带有各种不同色调而已。2. 矿物色度座标多以光源座标为中心向东北—西南方向分布。3. 以 (0.325, 0.360)、(0.350, 0.360)、(0.350, 0.335)、(0.305, 0.290)、(0.280, 0.290)、(0.280, 0.315) 等六点所圈的一向东北—西南方向延长的六边形,凡已测矿物除自然金、自然铜、黄铜矿、铜蓝(ω)、红硒铜矿等少数矿物外,所有矿物都落在这一长六边形的范围以内。这说明金属矿物的反射色,多为不同浓度的黄色或蓝色,而带鲜明红绿色调的矿物则不多。

(三) 根据矿物色度座标所导出的主波长 λ_d , 应当是代表矿物反射色的波长。但是实际上二者并非完全一致,而是有所偏离。据纽豪 (S. M. Newhall) 等人研究^[4], 除 572 毫微米与—560 毫微米二主波长外,其他主波长都有偏离。大于 572 毫微米者实际色感波长要比主波长偏大,小于 572 毫微米者要比主波长偏小。至于—560 毫微米的部分则情况刚巧相反。由此可知,矿物颜色的主波长并不能完全反映矿物真正颜色的感觉。主波长与实际颜色感觉之间只能进行约略对比,而不是完全符合的。

(四) 关于误差问题。金属矿物颜色指数的误差有二: 一为视觉反射率 R_{vis} 的误差,一为色度误差。后者具体为 x 、 y 、 λ_d 、 P_e 的误差。

视觉反射率 R_{vis} 由反射率色散值与 $\bar{Y}(\lambda)$ 曲线相应点的乘积相加而成,其误差决定于反射率的测量误差。按人目分辨光度能力的公认值为相对误差 2%,设矿物实际反射率平均值为 a ,则误差为 $0.02a$ 。这一误差为允许误差。它说明倘误差在这一数值以内,看不出光度上的变化;倘超过这一数值,人目就能分辨成为两种不同的光度。

色度误差有二: 一为光谱色误差。根据拉特等人^[5]试验,人目辨色能力显然与颜色种类或波长本身有关,其中以 460—640 毫微米波段为最灵敏,允许误差为 1—3 毫微米,愈向两端外则辨色能力愈为迟钝,允许误差迅速增加。但是,金属矿物的反射色无一属于光谱色,而为属于围绕于光源点周围而尤其是向东北—西南方向延长的很淡的颜色。关于

这类色度误差曾由马克亚当 (MacAdam) 用辨色椭圆图表示 (见图 4)。色度图中各处不同椭圆表示为 x 、 y 值的允许误差范围, 超出范围人目就能分辨成不同的颜色。按金属矿物多密集分布于 (0.4, 0.4) 与 (0.3, 0.3) 的座标范围以内。由图可约略估计, 前区的辨色界限值即允许误差 $\Delta x = 0.0015$, $\Delta y = 0.003$, 后区 $\Delta x = 0.001$, $\Delta y = 0.0015$ 。

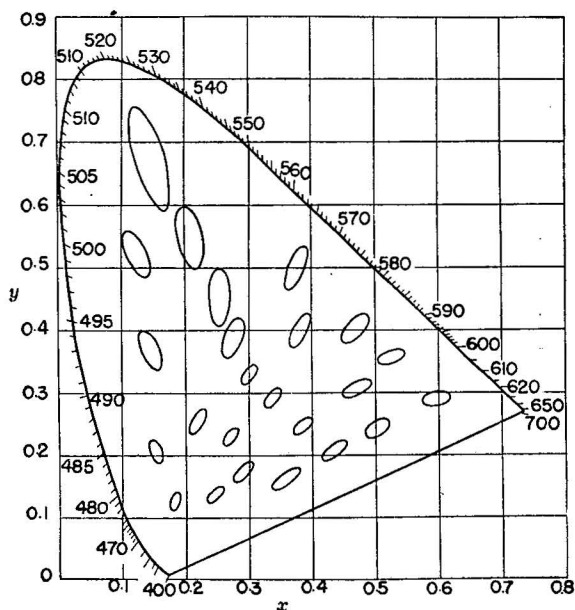


图 4 马克亚当 (MacAdam) 椭圆辨色图
每一椭圆放大 10 倍。

λ_d 的误差仍然不决定于主波长的实测值而决定于矿物色度座标所在点的辨色椭圆的大小。可自光源点至矿物座标点的辨色椭圆作一切线和另一条自光源点到圆心作连线, 将二线延长之与光谱轨迹相交, 则二点间的波长数即为 λ_d 的允许误差。由图估计可知, 色度图中矿物密集区上述二点间的平均波长差数为 1 毫微米, 这就可作为矿物 λ_d 的平均允许误差。

P_e 也大致决定于矿物色度座标所在点辨色椭圆的长半径的长度。这一长度与自光源点至光谱轨迹的长度之比约为 1:50, 即允许误差约为 0.02 左右。

确定了上述各项的允许误差范围以后, 就可以实际的误差数与其对比, 了解所有各项误差是否没有超出允许误差的范围而达到精度的要求。为此, 我们在所测的 103 矿物中, 凡是同一矿物而有两次或两次以上不同标本所测的数据, 以及皮勒文中的数据, 只要是同一矿物或同一矿物的同一方向, 其数据理应可以对比的, 统统摘录列于表 3, 计算其前述各项的误差值。由表的最后一项统计可知, 凡 $\Delta R_{vis}/R_{vis}$ 、 Δx 、 Δy 、 $\Delta \lambda_d$ 、 ΔP_e 等各项的实际平均误差数, 都没有超出上述允许误差范围, 它说明这一方法是符合精度要求的。

(五) 颜色分级。根据我们的实际经验, 矿物的反射色以分为三级为宜, 分得过细没有实际意义。例如黄色矿物中可将黄铜矿称为黄色, 黄铁矿称为淡黄色, 自然银称为微黄色; 蓝色矿物中则铜蓝称为蓝色, 红银矿类称为淡蓝色, 辉铜矿称为微蓝色等等。倘将每

表 3 金属矿物反射色颜色指数的平均误差

矿 物	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e	ΔR_{vis}	$\frac{\Delta R_{vis}}{R_{vis}}$	Δx	Δy	$\Delta \lambda_d$	ΔP_e
1. 铂	69.4	0.320	0.326	577	0.053						
铂	69.4	0.320	0.326	577	0.053						
平 均	69.4	0.320	0.326	577	0.053	0.0	0.000	0.000	0.000	0	0
2. 自然金	66.0	0.377	0.386	578	0.370						
自然金	65.3	0.394	0.384	580	0.417						
平 均	65.7	0.385	0.387	579	0.393	0.4	0.006	0.009	0.001	1	0.023
3. 铁铂矿	64.3	0.320	0.324	580	0.049						
铁铂矿	63.4	0.320	0.325	578	0.051						
平 均	63.9	0.320	0.325	579	0.050	0.4	0.006	0.000	0.001	1	0.001
4. 黄铁矿*	54.3	0.328	0.342	573	0.010						
黄铁矿 (Schorer)	53.4	0.331	0.343	574	0.130						
平 均	53.8	0.330	0.343	573	0.125	0.4	0.007	0.001	0.004	0	0.005
5. 针镍矿	50.4	0.327	0.337	574	0.104						
针镍矿	49.9	0.330	0.340	575	0.119						
平 均	50.1	0.328	0.339	575	0.112	0.2	0.005	0.002	0.001	1	0.008
6. 红砷镍矿	50.5	0.335	0.334	581	0.115						
红砷镍矿	51.4	0.329	0.328	584	0.085						
平 均	51.0	0.331	0.331	583	0.100	0.5	0.009	0.003	0.003	2	0.015
7. 辉锑矿	46.5	0.297	0.307	482	0.056						
辉锑矿 R_T (Simpson)	47.4	0.297	0.307	481	0.060						
辉锑矿 R_T (Knosp)	47.4	0.293	0.302	480	0.078						
平 均	47.1	0.296	0.305	481	0.065	0.4	0.004	0.002	0.002	1	0.010
8. 辉锑矿 R_β	41.4	0.301	0.310	483	0.042						
辉锑矿 R_β (Simpson)	41.4	0.302	0.309	479	0.040						
辉锑矿 R_β (Knosp)	41.2	0.299	0.306	479	0.052						
平 均	41.3	0.300	0.308	480	0.045	0.1	0.002	0.001	0.002	1.8	0.005
9. 辉锑矿 R_α	30.9	0.306	0.317	497	0.012						
辉锑矿 R_α (Simpson)	30.8	0.306	0.317	494	0.013						
平 均	30.8	0.306	0.311	496	0.013	0.1	0.016	0.000	0.006	2	0.000
10. 镍黄铁矿	45.2	0.336	0.343	577	0.145						
镍黄铁矿*	44.5	0.338	0.345	577	0.156						
平 均	44.9	0.337	0.344	577	0.150	0.4	0.008	0.001	0.001	0	0.006
11. 黄铜矿	45.9	0.346	0.365	574	0.226						
黄铜矿	42.4	0.350	0.367	575	0.243						
平 均	44.1	0.348	0.366	575	0.234	1.8	0.040	0.002	0.001	1	0.008
12. 磁黄铁矿 R_ω	35.9	0.329	0.333	579	0.097						
磁黄铁矿 R_ω (Gehlen Piller)	34.5	0.327	0.330	581	0.081						
磁黄铁矿 R_ω (Simpson)	35.0	0.327	0.331	580	0.083						
平 均	35.1	0.328	0.331	580	0.087	0.3	0.009	0.001	0.001	1	0.006

(续 表 3)

矿 物	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e	ΔR_{vis}	$\frac{\Delta R_{vis}}{R_{vis}}$	Δx	Δy	$\Delta \lambda_d$	ΔP_e
13. 方铅矿	40.8	0.302	0.306	474	0.040						
方铅矿	41.3	0.302	0.306	473	0.041						
方铅矿*	40.3	0.302	0.305	473	0.042						
方铅矿 (Knosp)	44.2	0.299	0.301	470	0.060						
平 均	41.7	0.301	0.304	474	0.046	1.3	0.031	0.001	0.002	0	0.007
14. 方黄铜矿 R_v	39.3	0.335	0.342	574	0.151						
方黄铜矿 R_v	38.6	0.337	0.349	575	0.163						
平 均	39.0	0.336	0.348	575	0.157	0.3	0.008	0.001	0.001	1	0.057
15. 方黄铜矿 R_θ	37.2	0.338	0.347	576	0.156						
方黄铜矿 R_θ	36.4	0.341	0.342	580	0.155						
平 均	36.8	0.340	0.345	578	0.157	0.4	0.012	0.002	0.003	2	0.000
16. 硫铁镍矿	36.6	0.318	0.320	588	0.033						
硫铁镍矿	35.3	0.318	0.319	591	0.029						
平 均	35.9	0.318	0.319	590	0.031	0.2	0.004	0	0.001	2	0.002
17. 黝铜矿*	28.8	0.306	0.315	488	0.017						
黝铜矿*	27.8	0.304	0.316	490	0.021						
平 均	28.3	0.305	0.315	489	0.019	0	0.001	0.001	0.000	1	0.002
18. 镜铁矿 R_∞	29.3	0.298	0.304	480	0.059						
镜铁矿 R_∞ (Gehlen Piller)	29.6	0.299	0.309	484	0.046						
平 均	29.5	0.298	0.307	482	0.053	0.1	0.005	0.001	0.002	2	0.007
19. 镜铁矿 R_ϵ	26.4	0.298	0.306	481	0.056						
镜铁矿 R_ϵ (Gehlen Piller)	25.9	0.298	0.307	482	0.055						
平 均	26.2	0.298	0.317	482	0.056	0.3	0.011	0.000	0.001	1	0.001
20. 金红石 R_∞	20.2	0.301	0.307	478	0.043						
金红石 R_∞	20.9	0.300	0.306	478	0.049						
平 均	20.5	0.301	0.301	478	0.046	0.4	0.002	0.000	0.001	0	0.003
21. 斑铜矿	23.4	0.349	0.346	581	0.188						
斑铜矿	22.1	0.349	0.344	582	0.182						
平 均	22.7	0.349	0.345	582	0.185	0.7	0.029	0.000	0.001	1	0.002
22. 方铁矿	21.0	0.313	0.320	574	0.019						
方铁矿	20.8	0.312	0.317	578	0.008						
平 均	20.9	0.312	0.318	576	0.013	0.1	0.005	0.001	0.001	2	0.003
23. 黑锰矿 R_∞	19.0	0.303	0.311	482	0.030						
黑锰矿 R_∞	19.3	0.298	0.307	481	0.054						
黑锰矿 R_∞	20.3	0.305	0.312	481	0.023						
平 均	19.6	0.302	0.310	481	0.036	0.5	0.026	0.003	0.002	1	0.012
24. 钛铁矿 R_∞	19.5	0.307	0.310	-567	0.020						
钛铁矿 R_∞ (Gehlen Piller)	20.2	0.308	0.312	-567	0.013						
平 均	19.9	0.308	0.311	-567	0.016	0.3	0.017	0.000	0.001	0	0.004

(续 表 3)

矿 物	R_{vis}	x	y	λ_d	P_e	ΔR_{vis}	$\frac{\Delta R_{vis}}{R_{vis}}$	Δx	Δy	$\Delta \lambda_d$	ΔP_e
25. 闪锌矿*	16.9	0.301	0.307	479	0.041						
闪锌矿*	16.6	0.301	0.308	480	0.041						
闪锌矿*	16.6	0.302	0.307	477	0.042						
平 均	16.7	0.301	0.307	479	0.041	0.1	0.006	0.000	0.000	1	0.000
26. 红硒铜矿 R_{∞}	12.3	0.301	0.251	-558	0.245						
红硒铜矿 R_{∞} (Gehlen Piller)	13.7	0.295	0.272	-564	0.150						
平 均	13.0	0.298	0.262	561	0.198	0.7	0.054	0.003	0.010	3	0.048
27. 铬铁矿*	10.3	0.303	0.310	480	0.034						
铬铁矿*	12.6	0.303	0.309	480	0.033						
铬铁矿	14.4	0.309	0.314	473	0.013						
平 均	12.7	0.305	0.311	478	0.027	1.3	0.108	0.003	0.002	3	0.009
28. 锡石 R_{∞}	11.1	0.307	0.313	480	0.014						
锡石 R_{∞}	10.7	0.308	0.314	480	0.009						
平 均	10.9	0.307	0.313	480	0.011	0.2	0.019	0.001	0.001	0	0.003
总平均(除自然金、铬铁矿外的 26 种矿物)						0.013	0.001	0.002	0.002	1	0.007

注: 表中凡未注明国外作者的矿物, 凡有*者由李纯杰同志测定, 其余全由陈殿芬同志测定。

类矿物颜色的深度或浓度分级与激发纯度 P_e 简单对照, 可以发现大致有如下的相互关系。

1. $P_e < 0.00x$ 不论主波长是哪一种波长, 反射色一律为白色, 其微弱的色彩不足为人目感觉出来。
2. $0.01 < P_e < 0.05$ 一般为微带色调的矿物。
3. $0.05 < P_e < 0.10$ 一般为浅色或淡色矿物。
4. $P_e > 0.1$ 或 0.2 一般为明显有色矿物。

以上 P_e 的变化范围, 可暂时作为日常工作中鉴别颜色浓度的标准。

参 考 文 献

- [1] Hardy, A. C., 1936, Handbook of colorimetry.
- [2] Piller, H., 1966, Color measurements in ore microscopy. Mineral. Deposita, 1, 175—192, 1966.
- [3] Шумская, Н. И. 1976, Цветовые коэффициенты в диагностике рудных минералов. Зап. Всесоюз. минер. об-ва Вып. 3 с. 387—392.
- [4] Newhall, S. M., Nickerson, D. and Judd, D. B., 1943, J. Opt. Soc. Am., 33, p. 385.
- [5] Wright, W. D. and Pitt, F. H. G., 1934, Proc. Phys. Soc. 46, p. 459.

COLOR INDEX OF THE REFLECTION COLOR OF ORE MINERALS

Chen Zheng Chen Dianfen Li Chunjie

*(Institute of Mineral Deposits of Chinese Academy
of Geological Sciences)*

Abstract

This article deals with the method of color measurement and the results of 103 minerals surveyed. The process of measurement is after the projection proposed by H. piller, i.e. first to determine the reflectivities at certain selected wavelengths with which the reflectivity dispersion curve is drawn, and then to calculate the color indices on the Hardy's selected ordinates with Se as light source.

Every mineral is specified with five numbers, namely: R_{vis} , x , y , λ_d , P_e . Occasionally more than one set of color indices are calculated from different specimens for comparison. By means of 10 interference filters, the reflectivities are measured with 10 wavelengths: 405 nm, 436 nm, 480 nm, 526 nm, 546 nm, 589 nm, 644 nm, 656 nm, 644 nm, and 700 nm. For certain minerals of pronounced variation in the curves the intervals of monochromatic light are probably too large.

In the last part of this article the authors discuss the distribution character of the common ore minerals in the chromatic chart, the error of measurement and the problem of classification of color gradation in practical work.

It is very much desired that in the description of the reflection color of ore minerals, the objective method of measurement will replace the subjective one in the near future because of its reliability and high accuracy.