

土壤颜色的分光光度计算法*

徐彬彬 戴昌达

(中国科学院南京土壤研究所)

土壤颜色是土壤的重要性状之一,是土壤理化性质的综合反映,也是人眼最初接触到的土壤特征与推断土壤肥沃程度、类别的直观指标。

土壤颜色与土壤组成物质和性状之间的关系,前人已有不少研究报道。关于土壤颜色测定的一些常用方法,最近也有专文详细介绍(曹升赓,1979)。

本文拟讨论如何应用分光光度计测定土壤颜色的基本原理与方法,以及使计算简化的办法。

一、基本原理

人对颜色的视觉曾有过多种解释,但到目前为止三原色学说已为人们所接受,并已成为色度学的计算基础。三原色理论认为,任何一种颜色的光,都可看成由蓝、绿、红三种颜色的光按一定比例配合起来的,这种光进入人眼后,三种颜色的光就分别作用于视网膜上的三种接受器上而产生兴奋。在视神经中这些分别产生的兴奋又混合起来,产生原来彩色光的感觉。彩色光的强度就是红、绿、蓝三种色光的强度之合。

因此,任何物体的颜色均可以用红、绿、蓝三原色的不同强度来表示。1931年国际照明委员会(简称CIE)推荐XYZ测色制(或称CIE表色系统),是目前色度计算中常用的基本测色制。

三色刺激值的计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} X &= \int_{400}^{700} E_{\lambda} r_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} d_{\lambda} \\ Y &= \int_{400}^{700} E_{\lambda} r_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} d_{\lambda} \\ Z &= \int_{400}^{700} E_{\lambda} r_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} d_{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: \bar{x}_{λ} , \bar{y}_{λ} , \bar{z}_{λ} 为各波长上三原色光的刺激值(或称为XYZ系统中等能量白光的三色分布系数);

E_{λ} 为光源的光谱能量分布¹⁾;

r_{λ} 为测试样品在分光光度计测得的光谱反射率(被测物体需求透射色彩时 r_{λ} 改为

* 本文得到曹升赓同志指正,特此致谢。

1) 公式中积分范围,各种文献有所不同,本文采用的是常见的400—700毫微米。

2) 原国际规定测色用标准C光源,近又规定用D光源。

T_λ 即光谱透射率)。

式中 $E_\lambda, \bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ 是已知的, 本文在计算中则未用及。但需要指出的是, 1931年 CIE 表色系统以 2° 视场的混色试验为基础, 故其适用范围仅限于表示 2° 视场的光色。到 1964 年, 又规定了一种 10° 视场的表色系统, 称为 CIE 1964 辅助表色系统, 二者的三色分布系数 $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$ 是不同的。

由于积分在实际使用上不方便, 故通常用求和的方法来计算, 则(1)式改为

$$\left. \begin{aligned} X &= \sum_{400}^{700} E_\lambda r_\lambda \bar{x}_\lambda \Delta\lambda \\ Y &= \sum_{400}^{700} E_\lambda r_\lambda \bar{y}_\lambda \Delta\lambda \\ Z &= \sum_{400}^{700} E_\lambda r_\lambda \bar{z}_\lambda \Delta\lambda \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

然而, 用三原色刺激值表示颜色在实用上很不方便, 故又引入色度坐标 $x, y,$

z 。

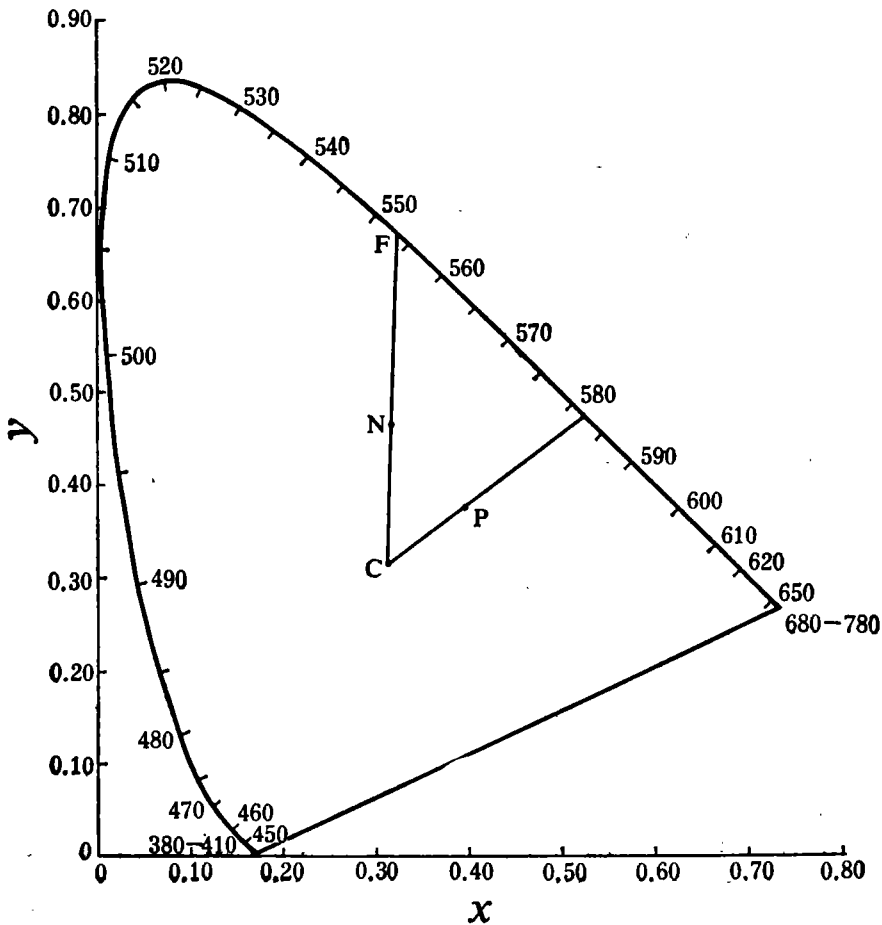


图1 CIE 色度图

并令:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

显然, $x + y + z = 1$

因此只需知道色度坐标中的二个值,即可算出第三个值。引入色度坐标后,就使原来三维坐标才能表示的颜色(即三原色刺激值),简化为二维平面坐标的形式来表示颜色。

以 x 为横坐标, y 为纵坐标,将太阳光谱中不同波长的单色光,根据它们的色度坐标

表 1 XYZ 表色系统中单色光的色度坐标 (复旦大学电光源实验室, 1977)

波 长 (毫微米)	x_1	y_1	z_1	波 长 (毫微米)	x_2	y_2	z_2
400	0.1733	0.0048	0.8219	555	0.3373	0.6589	0.0038
405	0.1730	0.0048	0.8222	560	0.3731	0.6245	0.0024
410	0.1726	0.0048	0.8226	565	0.4087	0.5896	0.0017
415	0.1721	0.0048	0.8231	570	0.4441	0.5547	0.0012
420	0.1714	0.0051	0.8235	575	0.4788	0.5202	0.0010
425	0.1703	0.0058	0.8239	580	0.5125	0.4866	0.0009
430	0.1689	0.0069	0.8242	585	0.5449	0.4544	0.0008
435	0.1669	0.0086	0.8245	590	0.5752	0.4242	0.0006
440	0.1644	0.0109	0.8247	595	0.6029	0.3965	0.0006
445	0.1611	0.0138	0.8251	600	0.6270	0.3725	0.0005
450	0.1566	0.0177	0.8257	605	0.6482	0.3514	0.0004
455	0.1510	0.0227	0.8263	610	0.6658	0.3340	0.0002
460	0.1440	0.0297	0.8263	615	0.6801	0.3197	0.0002
465	0.1355	0.0399	0.8246	620	0.6915	0.3083	0.0002
470	0.1241	0.0578	0.8181	625	0.7001	0.2993	0.0001
475	0.1096	0.0868	0.8036	630	0.7079	0.2920	0.0001
480	0.0913	0.1327	0.7760	635	0.7140	0.2859	0.0001
485	0.0687	0.2007	0.7306	640	0.7190	0.2809	0.0001
490	0.0454	0.2950	0.6596	645	0.7230	0.2770	0.0000
495	0.0235	0.4127	0.5638	650	0.7260	0.2740	0.0000
500	0.0082	0.5384	0.4534	655	0.7283	0.2717	0.0000
505	0.0039	0.6548	0.3413	660	0.7300	0.2700	0.0000
510	0.0139	0.7502	0.2359	665	0.7311	0.2689	0.0000
515	0.0389	0.8120	0.1491	670	0.7320	0.2680	0.0000
520	0.0743	0.8338	0.0919	675	0.7327	0.2673	0.0000
525	0.1142	0.8262	0.0596	680	0.7334	0.2666	0.0000
530	0.1547	0.8059	0.0394	685	0.7340	0.2660	0.0000
535	0.1929	0.7816	0.0255	690	0.7344	0.2656	0.0000
540	0.2296	0.7543	0.0161	695	0.7346	0.2654	0.0000
545	0.2658	0.7243	0.0099	700	0.7347	0.2653	0.0000
550	0.3016	0.6913	0.0061	750	0.7347	0.2653	0.0000

逐一点图时,即得整个 400—700 毫微米光谱色的曲线轨迹图,称为 CIE 色度图(图 1)。

表 1 列入 XYZ 表色系统中单色光的色度坐标。

任何一种颜色的光都可用 x, y 色坐标图来描述。色度图轨迹线上的各点饱和度为 100%,光源 C 点(C 点的色坐标 $x = 0.3101, y = 0.3162$) 的饱和度为 0%。设任意一色光的点为 N 。连接光源 C 点和 N 点,并延长相交于光谱轨迹点 F , F 点所代表的某单色光的波长即为该 N 点色光的主波长, CN/CF 的值为该颜色的饱和度,三原色刺激值中的 Y 值即为亮度值。主波长、饱和度和亮度统称为色度值。

二、计算方法

关于色坐标的实际计算有二种方法。

1. 纵坐标累积法,或称为等间隔波长法。根据公式(2)采用等间隔取波长,波长的间隔可以是 1 毫微米、5 毫微米、10 毫微米等,这种方法计算较烦琐,故常采用选择波长法。

2. 选择波长法。只需将一些在选定波长上的物体的反射率累加起来,最后乘以一定的系数就可迅速求得 X, Y, Z 的值。

选择波长法又可分为 30 点选择法和 10 点选择法。前者适用于反射曲线变化较大,后者适用于反射曲线较平缓。从笔者最近测定的土壤颜色的二百多个算例来看,10 点法完全适用于土壤颜色的计算。

具体的计算方法是:

1. 用分光光度计测得某土壤在 400—700 毫微米范围内的光谱反射曲线。

表 2 V—Y 变换表

V	Y	V	Y	V	Y	V	Y	V	Y	V	Y
0	0	1.7	2.422	3.4	8.471	5.1	20.68	6.8	40.23	8.5	68.40
0.1	0.120	1.8	2.642	3.5	9.003	5.2	21.62	6.9	41.63	8.6	70.37
0.2	0.237	1.9	2.877	3.6	9.557	5.3	22.58	7.0	43.06	8.7	72.38
0.3	0.352	2.0	3.126	3.7	10.134	5.4	23.57	7.1	44.52	8.8	74.44
0.4	0.467	2.1	3.391	3.8	10.734	5.5	24.58	7.2	46.02	8.9	76.53
0.5	0.581	2.2	3.671	3.9	11.356	5.6	25.62	7.3	47.54	9.0	78.66
0.6	0.699	2.3	3.968	4.0	12.00	5.7	26.69	7.4	49.09	9.1	80.84
0.7	0.819	2.4	4.282	4.1	12.66	5.8	27.78	7.5	50.68	9.2	83.07
0.8	0.943	2.5	4.614	4.2	13.35	5.9	28.90	7.6	52.30	9.3	85.33
0.9	1.074	2.6	4.964	4.3	14.07	6.0	30.05	7.7	53.94	9.4	87.65
1.0	1.210	2.7	5.332	4.4	14.81	6.1	31.23	7.8	55.63	9.5	90.01
1.1	1.354	2.8	5.720	4.5	15.57	6.2	32.43	7.9	57.35	9.6	92.42
1.2	1.506	2.9	6.128	4.6	16.37	6.3	33.66	8.0	59.10	9.7	94.88
1.3	1.667	3.0	6.555	4.7	17.18	6.4	34.92	8.1	60.88	9.8	97.39
1.4	1.838	3.1	7.002	4.8	18.02	6.5	36.20	8.2	62.71	9.9	99.95
1.5	2.021	3.2	7.471	4.9	18.88	6.6	37.52	8.3	64.57	10.0	102.57
1.6	2.216	3.3	7.960	5.0	19.77	6.7	38.86	8.4	66.46		

明度值 2

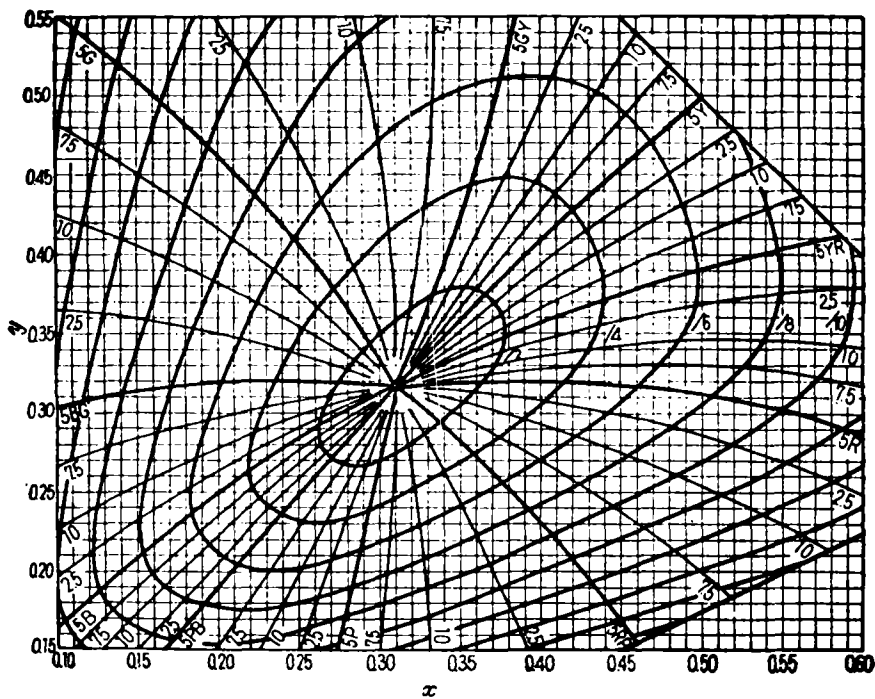


图 2 明度值等于 2 时的色度变换图

明度值 3

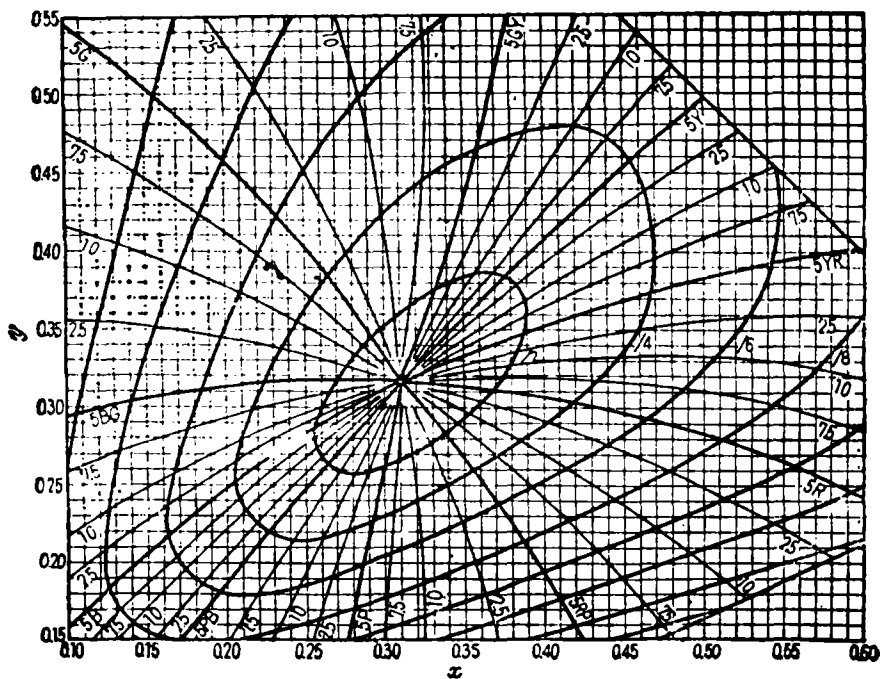


图 3 明度值等于 3 时的色度变换图

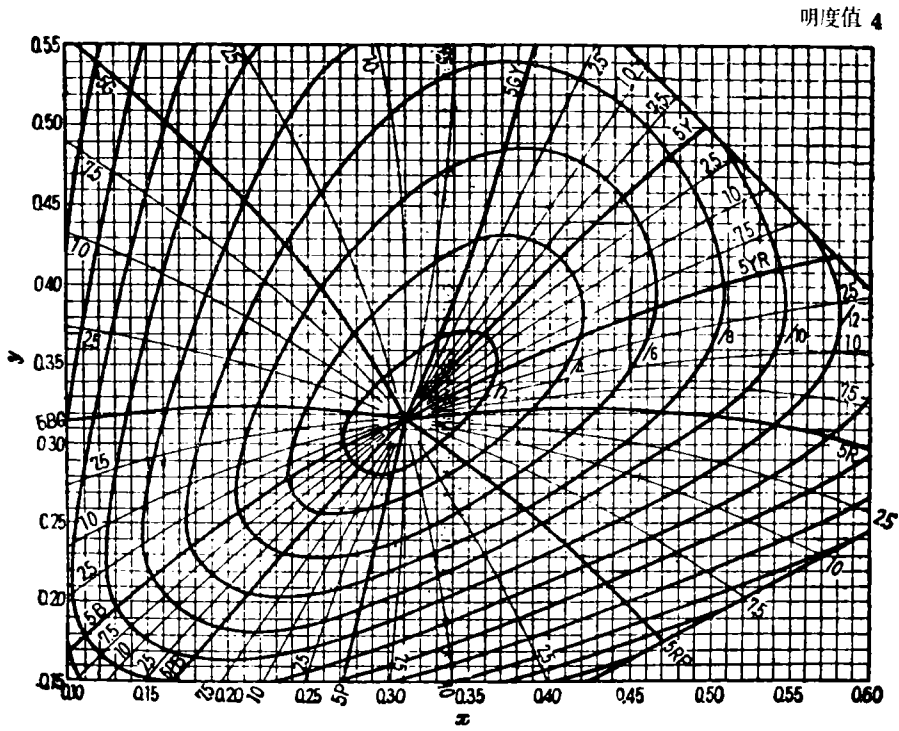


图 4 明度值等于 4 时的色度变换图

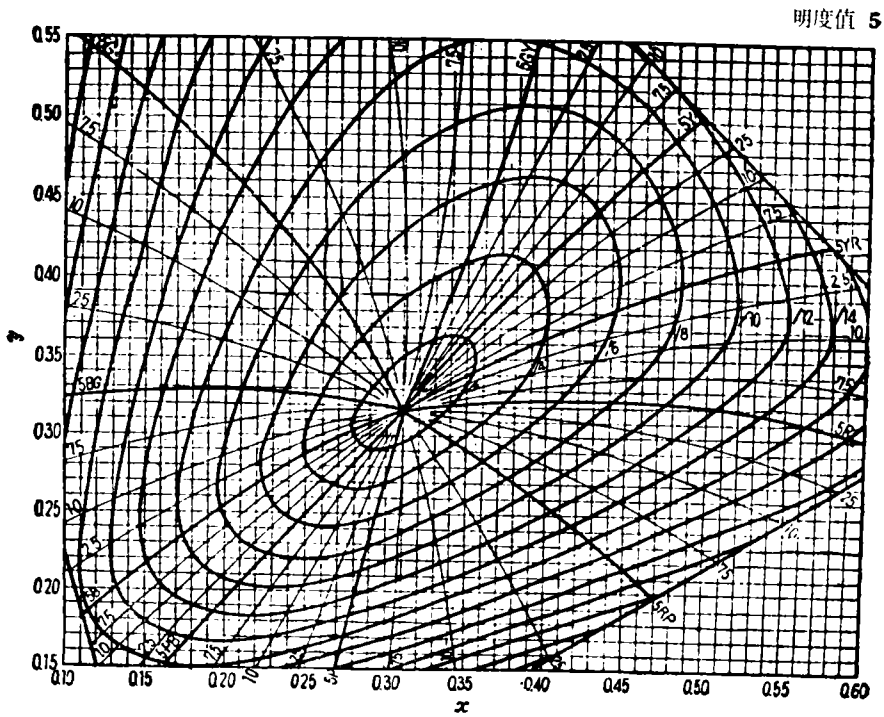


图 5 明度值等于 5 时的色度变换图

明度值 6

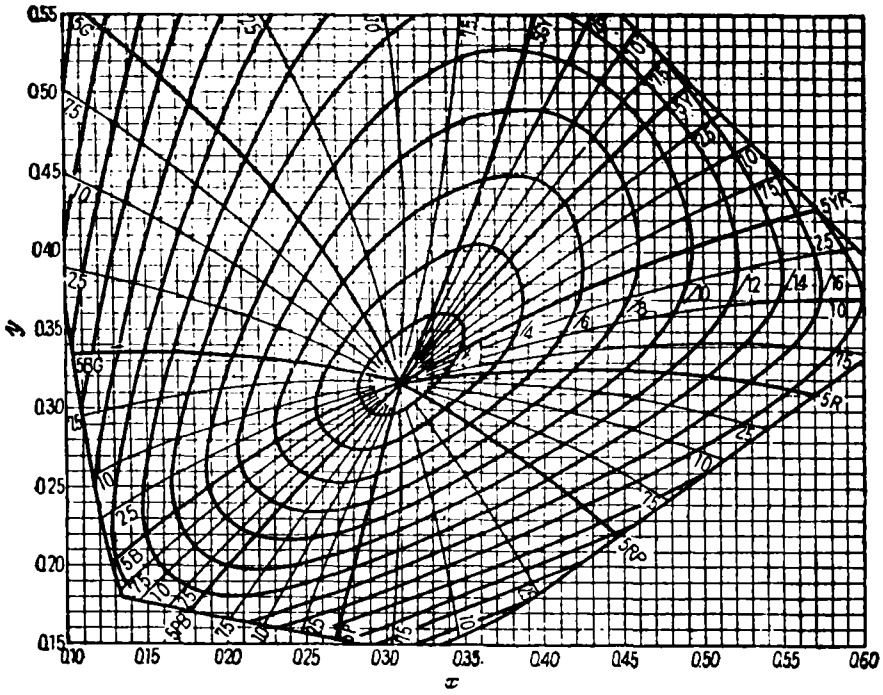


图 6 明度值等于 6 时的色度变换图

明度值 7

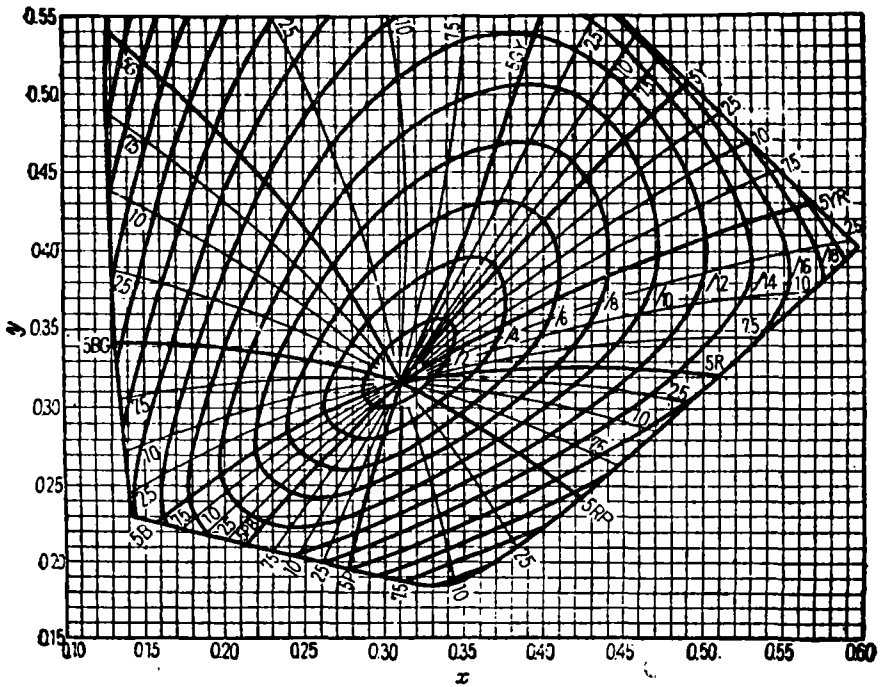


图 7 明度值等于 7 时的色度变换图

2. 从反射曲线图上读取选定波长上的光谱反射率。
3. 分别累计对应于 X, Y, Z 的反射率。
4. 将累计的反射率总和又分别乘以 X, Y, Z 的系数, 即得该土壤颜色的三色刺激值 X, Y, Z 。
5. 依公式(3)计算色坐标 x, y 。
6. 根据计算的色坐标在色度图上点图(在没有现成的色度图时, 要依表 1 数据自己作色度图)。
7. 从色度图上求得该土壤颜色的色度值。

当前在国外土壤学界普遍采用门赛尔表色制(曹升赓, 1979)。

将 CIE 表色制转换到门赛尔表色制的方法(山田 裕, 1972)是先从 $V-Y$ 值表中, 根据 CIE 表色系统的亮度值 Y , 找到相对应的门赛尔表色系的明度 V (Value)。然后根据 V 值来选择色度变换图(图 2—7), 换算求得色调度 H 和彩度 C 。具体换算法见算例。

三、算例(以 C 光源计算)

测试土壤为红壤(浙江省金华县), 采样深度 0—15 厘米, 风干土研磨过 20 孔筛, 在苏制 $C\Phi-10$ 分光光度计上测试的光谱反射曲线列于图 8。

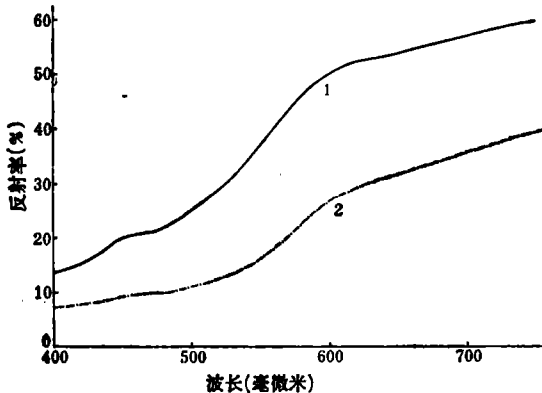


图 8 红壤光谱反射曲线

- 1—浙江省金华县(0—15 厘米)
- 2—江西省南昌(0—20 厘米)

从图 8 曲线 1 可见, 由于该土壤剖面位于红壤地区的低洼地, 水份条件较好, 土壤中游离氧化铁的水化度较高, 有机质含量低, 故比一般红壤(见图 8 曲线 2) 的土色偏黄, 致使曲线从黄光波段开始迅速变陡, 在 450 毫微米和 600 毫微米处的凸起异常明显¹⁾。

(一) 用 10 点法计算

10 点法的 X 系数 0.09806, Y 系数 0.10000, Z 系数 0.11814。将此系数乘以表 3 中对应的反射率总和分别得:

$$X = 40.51, Y = 38.74, Z = 23.38$$

依(3)式求得色坐标

$$x = 0.395, y = 0.377。$$

依此色坐标在色度图点图得 P 点(见图 1)。由色度图求得色度值: 主波长 582 毫微米, 饱和度 39.0%, 亮度 38.7%。根据亮度 (Y) 值, 由表 2 查得其对应的门赛尔明度值 (V) 为 6.7。在门赛尔明度值等于 6 和 7 的二张色度变换图上(图 6, 7), 依上已求得的色坐标分别点图, 并分别求得色调度 (Hue) 和彩度 (Chroma)。在明度值为 6 的变换图中读得 8.7 YR6/4.4; 在明度值为 7 的变换图中读得 8.0 YR7/5.1。然后用内插法按比例求

1) 徐彬彬等: 土壤光谱特性的初步研究。(资料)

表 3 在选定波长上的反射率*

序 号	X 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)	Y 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)	Z 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)
1	435.5	18.0	489.4	23.0	422.2	15.5
2	461.2	20.7	515.2	28.0	432.0	17.1
3	544.3	35.0	529.8	31.3	438.6	18.4
4	564.1	41.3	541.4	34.0	444.4	19.4
5	577.4	45.0	551.8	37.5	450.1	20.0
6	588.7	47.8	561.9	40.5	455.9	20.4
7	599.6	49.7	572.5	44.0	462.0	20.6
8	610.9	50.8	584.8	47.2	468.8	21.0
9	624.2	51.8	600.8	49.9	477.7	21.5
10	645.9	53.0	627.2	52.0	495.2	24.0
	Σ	413.1		387.4		197.9

* 本表中 X, Y, Z 的选定波长值引自黄德琦同志资料(1977)。

表 4 在选定波长上的反射率*

序 号	X 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)	Y 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)	Z 的选定波长 (毫微米)	r_1 (%)
1	423.7	15.7	469.7	21.0	410.4	14.2
2	436.5	18.0	493.1	23.4	419.6	15.1
3	446.8	19.8	504.6	26.0	424.1	15.7
4	457.7	20.5	512.1	27.4	427.4	16.2
5	472.1	21.0	518.0	28.4	430.1	16.7
6	531.6	31.3	522.9	29.3	432.5	17.2
7	544.9	35.2	527.4	30.3	434.8	17.6
8	553.4	37.7	531.6	31.3	437.0	18.0
9	560.0	40.0	535.5	32.4	439.1	18.4
10	565.5	41.4	539.3	33.5	441.1	18.7
11	570.4	43.4	543.1	34.6	443.1	19.2
12	574.8	44.6	546.7	35.7	445.1	19.4
13	578.9	45.6	550.3	37.0	447.1	19.8
14	582.8	46.5	553.9	38.2	449.1	20.0
15	586.4	47.3	557.4	39.2	451.1	20.2
16	589.9	48.0	561.0	40.3	453.2	20.3
17	593.4	48.4	564.6	41.4	455.2	20.4
18	596.7	49.3	568.3	42.6	457.2	20.5
19	600.1	49.6	572.0	43.8	459.3	20.6
20	603.5	50.3	575.9	44.8	461.5	20.7
21	606.9	50.5	579.9	46.0	463.7	20.7
22	610.4	50.7	584.1	46.9	466.0	20.8
23	614.0	51.3	588.5	47.8	468.5	20.9
24	617.9	51.5	593.3	48.5	471.3	21.0
25	622.1	51.6	598.5	49.5	474.3	21.2
26	626.7	52.0	604.3	50.2	477.9	21.5
27	632.2	52.4	611.0	50.8	482.4	21.9
28	638.8	52.6	619.1	51.6	488.2	22.6
29	648.0	53.2	629.9	52.4	496.9	24.5
30	665.4	54.3	649.7	53.4	513.7	27.6
	Σ	1273.7		1177.7		591.6

* 本表中 X, Y, Z 的选定波长值引自复旦大学电光源实验室资料(1977)。

得该土壤门赛尔表色法的读数为 8.5YR6.7/4.9。此读数表示该土壤的颜色介于黄色 (Y) 和红色 (R) 之间, 稍偏黄, 属于橙色。6.7 的明度值和 4.9 的彩度值均高于一般红壤的数值 (一般红壤的明度平均值为 5.4, 彩度平均值为 4.1), 这显示着该土壤有机质和其它染黑物质 (如氧化锰等) 的含量均很少, 使土壤色泽淡而鲜艳。

(二) 用 30 点法计算

30 点法的 X 系数 0.03269, Y 系数 0.03333, Z 系数 0.03938。

如法求得 $X = 41.64$, $Y = 39.25$, $Z = 23.30$, $x = 0.400$, $y = 0.377$ 。

将 30 点法求得的色坐标与 10 点法求得的色坐标相比较, y 完全一样, x 仅相差 0.005, 结果极为相近。因此我们认为作为计算土壤颜色, 采用 10 点法完全可以, 这方法能节省计算工作量。

四、进一步简化计算法的尝试

最近, 国内野外分光光度计已正式投产使用, 这为在野外直接使用分光光度计精确测定土壤颜色创造了有利条件。为了适应野外测色的需要, 拟将上述的计算改为预制表格备查阅, 以进一步简化计算。初步研究, 认为可从以下二步来简化。

(1) 表 5 分别是 X, Z 系数 1—9 倍的值。根据表 5 计算三色系数 X, Y, Z 可使原多位数乘法简化为普通的加法。

表 5 1—9 倍 X, Z 系数值

倍 数	X 系数	Z 系数
1	0.09806	0.11814
2	0.19612	0.23628
3	0.29418	0.35442
4	0.39224	0.47256
5	0.49030	0.59070
6	0.58836	0.70884
7	0.68642	0.82698
8	0.78448	0.94512
9	0.88254	1.06326

现举例说明表 5 的用法: 在上述算例中已求得对应 X 的反射率累加值为 413.1。可把此值改写成 $400 + 10 + 3 + 0.1$ 。那末根据表 5, 再考虑到它的位数, 即可得:

$$\begin{array}{r}
 39.224 \\
 0.9806 \\
 X = 400 + 10 + 3 + 0.1 \\
 + 0.00981 \\
 \hline
 405.0859
 \end{array}$$

同理可以依表 5 求 Z 值。

在实际运算过程中取至小数后三位即可。

由于 Y 的系数为0.10000,显然只需将对应于 Y 的反射率累计值缩小10倍即为 Y 的数值,故无需制表。

(2)表6列出了不同的 $X+Y+Z$ 和 $X(Y)$ 之比(此比值即为色坐标 x, y)。表中仅例举了部份数值,读者需要可如法计算预制。

表6 色坐标 x, y 查阅表

$X(Y)$ $x(y)$ $X+Y+Z$	38	39	40	41
					
102.4		0.371	0.381	0.391	0.400	
102.5		0.371	0.380	0.390	0.400	
102.6		0.370	0.380	0.390	0.400	
102.7		0.370	0.380	0.389	0.399	
.....						

表6的具体用法:在上例中已求得 X, Y, Z 分别为40.5, 38.7, 23.4(取小数后一位)

则 $X+Y+Z=102.6$ 。

由表6查得在 $X+Y+Z=102.6$ 时,

$$X=40, x=0.390; X=41, x=0.400。$$

$$Y=38, y=0.370; Y=39, y=0.380。$$

然后,依比例内插求得 $X=40.5, x=0.395; Y=38.7, y=0.377$ 。

结果和前面计算所得一样。

实际上,这种预制表格简化计算查阅的方法不仅适用于野外测色,室内也可使用。

五、结 语

由上述可知,应用分光光度计测定土壤颜色比常用的方法客观而准确。其中10点计算法和为了进一步简化计算过程而设计的预制表格查阅算法均适用于室内外测定土壤颜色。

这种方法可用于深入研究土壤颜色和土壤中各种物质之间的关系,尤其可以方便地进行单因子抽取试验;在土壤普查中,它能精确地测定自制土壤色卡的色坐标;特别在近代遥感技术中,色度学已成为它的物理学基础之一,地物的色坐标已是自动分类识别中的重要因子。因此,这种测定土壤颜色的方法将得到更广泛的应用。

这种方法除测定土壤颜色外,还能用于测定其它物体或彩色图象的颜色(包括透明或

半透明的液体)。

今后随着附有电子计算机的分光光度计的引进和应用,许多繁复的计算将以机器代替,从而使这种测定土壤或其它物体颜色的方法更为简便、快速。

参 考 文 献

- 山田 裕, 1972: 土壤の色, 土壤物理測定法, 第 401—415 页, 东京株式会社, 養賢堂发行。
 复旦大学电光源实验室, 1977: 电光源原理, 上海人民出版社。
 黄德琦, 1976: 色与测色(一), 计量与标准化, 第 1 期, 43—53 页。
 黄德琦, 1977: 色与测色(二), 计量与标准化, 第 4 期, 28—58 页。
 曹升庚, 1979: 土壤颜色的测定和描述——门赛尔土壤比色卡的应用。《土壤分类及土壤地理论文集》, 浙江人民出版社。
 熊毅, 1937: 土壤颜色之研究, 地质评论, 2 卷 1 期。
 Wright, W. D., 1969: The Measurement of Colour, ADAM. Hilger LTD. LONDON。
 Карманов И. И., 1974: Спектральная Отражающая Способность и Цвет Почв, как Показатели их Свойств. Москва, "Колос".

COMPUTATION OF SOIL COLOR BY REFLECTO-SPECTROMETER ANALYSIS

Xu Bin-bin and Dai Chang-da

(Nanjing Institute of Soil Science, Academia Sinica)

Summary

Composition of soil color is determined by scanning with a reflecto-spectrometer in the visible range. The computation of XYZ color system is based on the data obtained as percentage of reflection at different wavelength. The x , y values given in the color coordinate of the XYZ system are again converted into standard color according to the Munsell's system.

In order to eliminate the tedious procedures of calculation, the present writers have suggested two tables of "1—9 times XZ coefficient" and " x , y color coordination". By consulting these two tables, it is feasible to denominate the soil colors directly from their spectrometric readings both in the laboratory and in the field. Examples for the method of the denomination of soil color are illustrated in present report.