

表土颜色和气候定性至半定量关系研究*

杨胜利¹ 方小敏¹ 李吉均¹ 安芷生² 陈诗越¹ 福泽仁之³

(¹兰州大学西部环境教育部重点实验室和地理科学系, 兰州 730000; ²中国科学院地球环境研究所黄土

与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075; ³东京都大学地理系, 日本)

摘要 通过中国现代土壤的颜色测定, 发现土壤颜色与成土过程和现代气候因子之间有良好的函数关系。土壤红度和黄度主要与赤铁矿和针铁矿的含量密切相关, 与气候的关系在热带-暖温带湿润区表现最好, 而明度与有机质积累、腐殖质过程和碳酸盐化过程等密切相关, 与气候的关系仅存在于温带湿润-干旱区。土壤的湿度和表面糙度对土壤颜色有较大影响。野外土壤颜色的直接测定有较大误差。同时, 对经典黄土剖面进行的千年尺度和万年尺度颜色气候记录的分析表明, 颜色气候记录在这两个尺度上均可很好地再现亚洲季风和全球气候变化的特征, 并表现出了磁化率在相对湿度较高的地区所不能指示出的成土过程和气候特征。

关键词 土壤颜色 黄土-古土壤 气候变化

将磁化率作为一种气候变化代用指标引进黄土-古土壤地层研究是陆地全球变化研究中的一个划时代的进展^[1,2], 极大地推进了古土壤的快速识别和气候地层学研究, 揭示了 250 Ma 以来可与深海氧同位素全球变化记录相对比的亚洲季风气候变化的历史^[3]。但是, 当我们把研究工作引向黄土高原周边和外围地区, 尤其是湿热和湿冷地区, 或者在黄土高原中央进行细微的土壤气候地层学划分和对黄土下伏红黏土的气候记录进行研究的时候, 我们发现磁化率的应用无论在机理上还是在应用中都产生了很大问题, 磁化率或是不能表达古土壤的存在, 或是仅能表达古土壤的部分气候意义。因此, 寻找一种可快速获取的并可半定量或定量地描述这些地区气候变化和土壤发育的代用指标已成为当务之急。

我们知道, 磁化率在这些地区之所以不适合是因为磁化率的主要贡献者磁铁矿和磁赤铁矿在这些地区要么来源和沉积不稳定, 要么过量的水热和高的相对湿度使这些磁性矿物或是氧化成低磁性的赤铁矿, 或是氧化还原成低磁性的针铁矿或纤铁矿和沼铁矿。赤铁矿、针铁矿、纤铁矿和沼铁矿是自然界最重要的致色矿物和颜料, 赤铁矿使土壤变红, 而针铁矿或纤铁矿和沼铁矿使土壤变黄或变绿和蓝^[4~6], 这使得土壤颜色成为土壤鉴别和分类中最醒目和重要的依据^[7,8]。中国季风区土壤类型及颜色由南向北和由东向西随气候纬向和经向变化而产生有规律的变化就是一个明显的例子。因此, 从理论上可以把土壤颜色作为一种可快速获取的气候代用指标, 而在实际条件上建立起土壤颜色和气候之间的半定量函数关系是可行的。

实际上, 探索土壤颜色定量化及其与致色矿物和环境条件之间的定量关系早在 20 世纪 60

2001-02-21 收稿, 2001-07-18 收修改稿

* 中国科学院“引进国外杰出人才计划”(人教字[2000]05 号)和国家重点基础研究发展规划(G1998040809)以及教育部骨干教师基金资助项目

年代就已开始,主要集中在探索土壤中最常见的致色矿物赤铁矿和针铁矿及有机质与土壤颜色的关系。Scheffer 等人^[9]发现只需 1.7% 的赤铁矿就可使土壤变成红色; Resende^[10]报道当 1% 的赤铁矿加入黄壤中时,黄壤的门氏色调值就从 10YR 变成 5YR; Torrent 等人^[11,12]揭示赤铁矿的含量与红度率(redness rating)或红度指数(redness index)呈线性相关,在人为混合的物质中,相关系数 R^2 达 0.97,对欧洲和巴西土壤, R^2 分别达 0.82 和 0.8; Singh 等人^[6]在研究澳大利亚西南土壤时也获得了相同的结论,两者相关达 $R^2 = 0.69$,并同时发现红度率与铁氧化物含量也呈一定的线性相关,相关系数达 0.64;而 Soileau 等人^[13]则尝试分析了土壤门氏颜色与游离铁氧化物含量之间的关系,发现二者之间不一定有一致的联系,但总体上土壤彩度随游离铁氧化物含量的增加而增加。土壤有机质是导致土壤颜色变暗的最主要因素,研究发现土壤门氏色系的亮度与有机质或有机碳的含量呈线性相关,相关系数随不同地区的土壤发育而变化,最高可高达 0.9 以上^[14,15],并据此关系还发明了一种能在野外快速测定土壤有机质含量的有机质光谱仪^[16,17],而有机质或有机碳的含量与气候密切相关^[18]。20 世纪 80 年代以来陆续创造出了利用光谱进行土壤颜色测量的各种方法和便携式程控土色仪^[19-22],但是,到目前土壤学家对土壤颜色与气候之间的直接定量关系并没有给予足够的重视。在黄土-古土壤气候变化研究中,我们尝试性的利用土壤颜色的有些参数作为气候变化的辅助代用指标,取得了较好的效果^[23-25]。

因此,本文试图利用中国巨大的气候带跨幅和丰富多彩的土壤建立土壤颜色与气候间的函数关系,探讨土壤颜色作为气候变化代用指标的可行性。

1 土壤颜色的表色原理和测量

1.1 门氏表色系统和 CIELAB 表色系统

门赛尔表色系统由 Munsell 于 1905 年首次提出^[26],是为土壤学者所熟悉并广泛使用的一种土壤颜色描述系统。土壤的颜色由 3 个参数,即色调(hue)、亮度(value)和彩度(chroma)所决定^[8],分别用以描述决定颜色类别的主波长、亮度和饱和度或纯度,记为“色调 亮度/彩度”。

CIE 1976(L^* , a^* , b^*)表色系统^[27,28]是当今最重要的颜色次序表达和测量系统之一。它使用 L^* , a^* , b^* 3 个参量描述任何均匀连续的颜色空间。 L^* 代表明度,变化于黑(0)和白(100)之间, a^* 变化于红和绿之间, b^* 变化于黄和蓝之间。因此,某种意义上说, $+a^*$ 描述红色的饱和程度,因其在土壤发生和描述中的重要性,我们不妨称其为红度(redness)。类似地, $+b^*$ 可称为黄度(yellowness), $-b^*$ 称为蓝度(blueness), $-a^*$ 称为绿度(greenness)。CIELAB 的表色原理基于以下前提,即颜色的刺激值(stimulus for colors)是照明光源能谱分布状况、物体反射光谱特征和颜色感应器(测色仪)的光谱响应特征共同作用的结果。CIE 通过规定标准化的照明光源所决定的能谱分布状况和人类观察者,对 3 种主要颜色的光谱响应特征的平均状况。

CIELAB 与门氏表色系可以相互转换,通过数学变换建立起 CIE 坐标体系下的相当于门氏表色系统下的色调、亮度和彩度 3 个颜色描述变量,分别用米制色调角(h_{ab})或米制色调差(ΔH^*_{ab})、米制亮度差(ΔL^*)和米制彩度差(ΔC^*_{ab})表示。

1.2 样品采集和测量

我们从中国地处热带地区的海南岛开始,向北直到山东半岛,然后向西到青藏高原东北边缘地区共采集了 70 多个表层土壤样品,所有样品均采自表层土壤的 B 层。测量使用日本美

能达公司 Minolta CM508i 和 SPAD-250 土色仪, 它们都是基于 CIE 标准制造的, 是目前最流行的分光测色仪之一。样品经烘干并碾磨均匀后, 取 2~3 g 放于白色参照色板上, 压实和压平后, 随机取 3 个区域用土色仪进行测量, 然后平均求得土壤颜色的各个参数值。仪器可测定的 a^* 和 b^* 值均限于 ± 60 之间。

2 土壤颜色与气候的关系

图 1 为中国不同气候带条件下现代土壤颜色的测定结果, 可以看出, 红度 a^* 与年平均温度 (MAT) 和年平均降水量 (MAP) 之间呈良好的指数关系, 即: $MAT = 16.621 \lg a^* - 25.27$, $MAP = 1185.37 \lg a^* - 1672.15$ 。相关系数 R^2 分别达 0.75 和 0.78 (图 1(a), (e))。这一关系表明, 红度在干冷的干旱-半干旱区是不敏感的, 随温度和降水的急剧增加而缓慢增加, 而在暖湿尤其是湿热的亚热带-热带条件下, 温度和降水的较小升高可导致红度的急剧增加 (图 1(a), (e))。由于红度主要受赤铁矿含量的控制, 因此, 这一现象与赤铁矿的形成条件所要求的排水良好的湿热环境 (强氧化环境) 是相一致的。而在干冷的干旱-半干旱区, 赤铁矿的形成受到强烈抑制。

黄度 b^* 与 MAT 和 MAP 之间则表现出良好的线性相关, 用最小二乘法求得: $MAT = 1.18b^* - 12.7$, $MAP = 85.4b^* - 787.29$ 。相关系数比 a^* 略低, 分别为 0.66 和 0.7 (图 1(b), (f))。

米制彩度 C^*_{ab} 与 MAT 和 MAP 表现出更好的线性相关, 即: $MAT = 1.01 C^*_{ab} - 11.62$, $MAP = 70.65 C^*_{ab} - 668.63$ 。相关系数分别高达 0.73 和 0.77 (图 1(c), (g))。

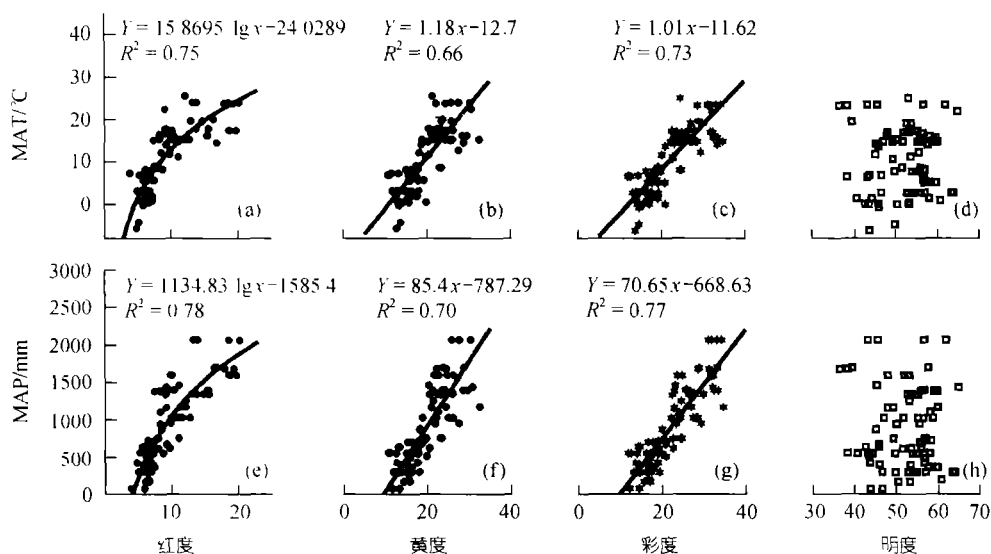


图 1 中国现代土壤颜色与气候间的关系

另外, a^* , b^* 和 C^*_{ab} 与夏季 (7~9 月) 降水量 SR 之间也有较好的关系, 分别为: $SR = 511.59 \times \lg a^* - 608.21$ ($R^2 = 0.62$); $SR = 35.34 \lg b^* - 200.4$ ($R^2 = 0.57$); $SR = 31.47 \lg C^*_{ab} - 193.68$ ($R^2 = 0.63$)。这说明夏季的高温和降水可能是导致土壤发生、致色矿物形成和土壤颜色变化的主要因素之一。

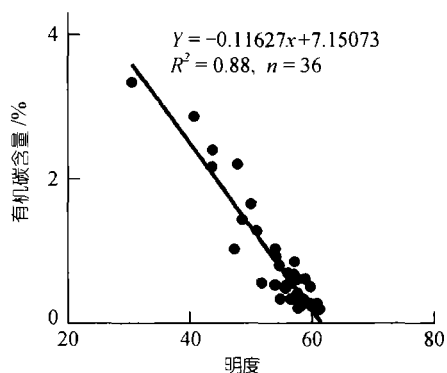


图 2 暖温带中国半湿润区-干旱区土壤明度与土壤有机碳含量的关系

而明度 L^* 与年平均温度和年平均降水量之间在大区域范围的土壤发生群体中没有明显的相关关系(图 1(d), (h)), 但与土壤有机碳含量有显著的线性相关, 据半湿润区至干旱区 36 个土壤剖面的分析得出 $C(\%)$ (土壤有机碳) = $-0.12 L^* + 7.15$, 相关系数高达 0.88(图 2)。

3 土壤颜色的影响因素与颜色气候记录的可靠性

3.1 土壤湿度和表面粗糙度/粒度

由于 CIELAB 颜色系已标准化了照明光源、参照系和测定方法, 土壤颜色就主要决定于土壤反射光谱的特征, 而后者可受到土壤湿度和

样品粗糙度的影响。对相同样品不同湿度条件下土壤颜色的测量表明土壤湿度对土壤明度 L^* 有明显影响, 湿度越大, 明度越小, 从完全干燥的土壤到半湿润的土壤, 明度值一般减小 20~25; 土壤湿度对 b^* 也有一定影响, 而对 a^* 影响最小, 二者均表现为随着土壤湿度增大, a^* 和 b^* 值先是缓慢减小, 至湿度约 25% 以后又缓慢增大, 变化幅度对不同类型的土壤有不同的范围, 但一般多在 2~4(a^* 值)和 5~7(b^* 值)之间。因此, 在实验室必须对土壤样品统一烘干后, 测量土壤干颜色才能反映土壤的真实颜色。

土壤样品表面的粗糙度/粒度和样品的研磨程度对其颜色值有较大的影响, 其中以对土壤明度的影响最明显。总的来说, 土壤表面越粗糙(粒度越粗), 明度有较大减小, 其次为 b^* 值, 而 a^* 值变化不大。当样品研磨至 45 μm 以下, 样品颜色已没有什么变化。因此, 如果像野外磁化率测量一样, 在剖面上对土壤颜色进行直接测量将产生较大的误差, 而必须在实验室将土壤研磨至 45 μm 左右, 再进行颜色测定比较可靠。

3.2 土壤类型

进一步分析发现, 导致红度 a^* 和黄度 b^* 偏离 MAT, MAP 和 SR 关系的土壤主要是偏红的砖红壤和偏黄的黄壤。砖红壤发育于 MAT, MAP 和 SR 都最大的热带地区, 使红度 a^* 值显著增高, 而黄度 b^* 值下降, b^* 值明显偏离关系式; 发育于亚热带地区的黄壤则正好相反, 使黄度 b^* 值显著增高, 而红度 a^* 值下降, a^* 值明显偏离水热关系式(图 1)。因此, 有必要用反映 a^* 和 b^* 共同作用特征的彩度 C_{ab}^* 来矫正这一偏差。这在 C_{ab}^* 与 MAT, MAP 和 SR 有最大相关关系上得到证明(图 1(c), (g))。对于北亚热带和温带的土壤, 水热的逐步增加可导致矿物的逐步分解和富硅铝矿物与铁氧化物形成的相应增加, 可能致使土壤的 a^* 和 b^* 几乎同步增强, 因而与 MAT, MAP 和 SR 的关系表现最好(图 1)。

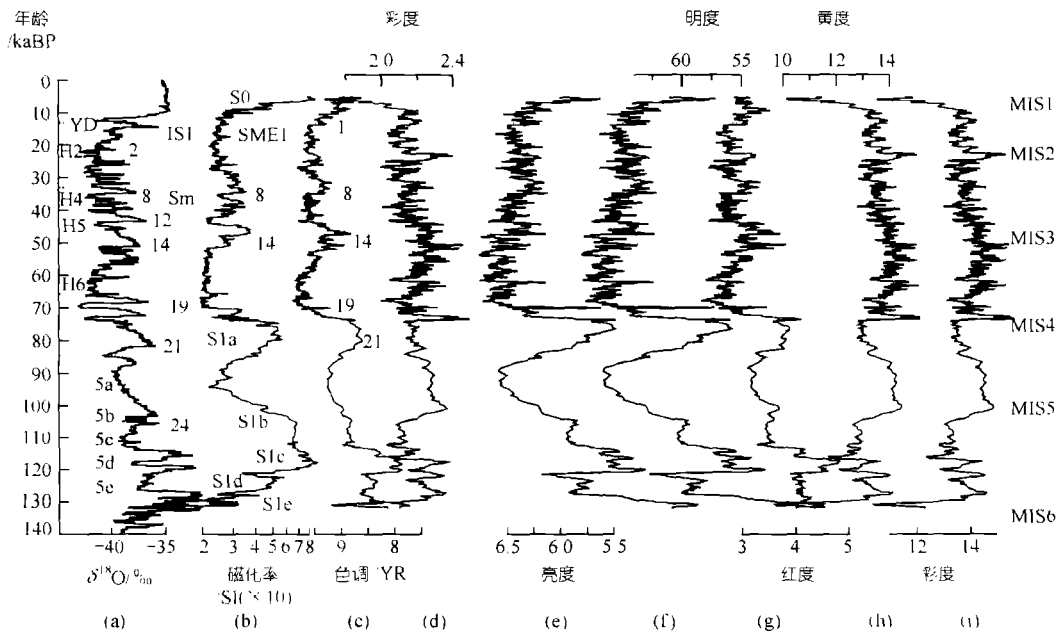
3.3 土壤颜色与气候关系的不确定性

此次工作尽量选取广域性的土壤剖面, 是当地气候条件下形成的典型土壤, 确保其与当地气候处于平衡状态。其测量结果表明土壤颜色与气候的相关性较好, 而在同一地点受其他因素影响的土壤剖面测量的结果则发生较大的偏差。初步分析, 发现可能有 3 个因素对这种偏差产生较大影响: 非广域性的土壤的影响和非气候成因的成土因素影响, 如生物、地形和母质

等; 非成土作用因素, 如土壤退化、侵蚀和人为污染等的影响。因此, 土壤颜色与气候条件并非总是一致的, 只有与气候条件密切相关的广域性成土作用所导致的土壤颜色作为气候变化代用指标才有意义, 而非广域性成土作用所导致的土壤颜色不能用来指示气候的变化。在应用土壤颜色作为气候代用指标的时候, 应该综合考虑多种因素对土壤颜色的影响。

3.4 土壤颜色气候记录的可靠性

消除上述因素后, 我们选取中国黄土高原西部已详细研究过的黄土-古土壤序列代表性剖面: 临夏北塬剖面 and 川西高原最厚的黄土剖面, 来检验土壤颜色气候记录的可靠性。我们对上述剖面进行详细的颜色测量, 分别获取末次间冰期以来东亚季风区千年尺度和早更新世晚期以来南亚季风区万年尺度颜色气候记录。将颜色记录与各剖面的磁化率气候记录及格陵兰 GRIP 冰芯氧同位素所代表的北半球(高纬)气候变化记录进行对比, 发现颜色气候记录不仅完全指示出了黄土剖面中古土壤的层次, 而且与磁化率气候记录有惊人的相似性, 尤以色调、 a^* 、 C_{ab}^* 和 L^* 记录为最佳(图 3、4)。颜色记录可在千年尺度的细节上与格陵兰气候变化记录相对比, 如格陵兰气候变化记录中的 6 个 Heinrich 极端寒冷事件和主要的 D-O 暖事件, 在颜色气候记录中均有揭示。在末次大间冰段(MIS3)的早期, 冷湿的气候使磁性矿物还原, 土壤磁化率降低, 不能清晰地指示古土壤的存在和发育强度, 而土壤颜色却能清楚地指示古土壤的发育。在万年尺度上, 川西高原黄土-古土壤序列的颜色记录, 不仅揭示出了黄土和古土壤层次及其所代表的冰期-间冰期旋回, 而且还指出了两个极端寒冷气候事件的存在(图 4), 说明在万年尺度上颜色作为气候变化的代用指标也是可行的(图 4)。



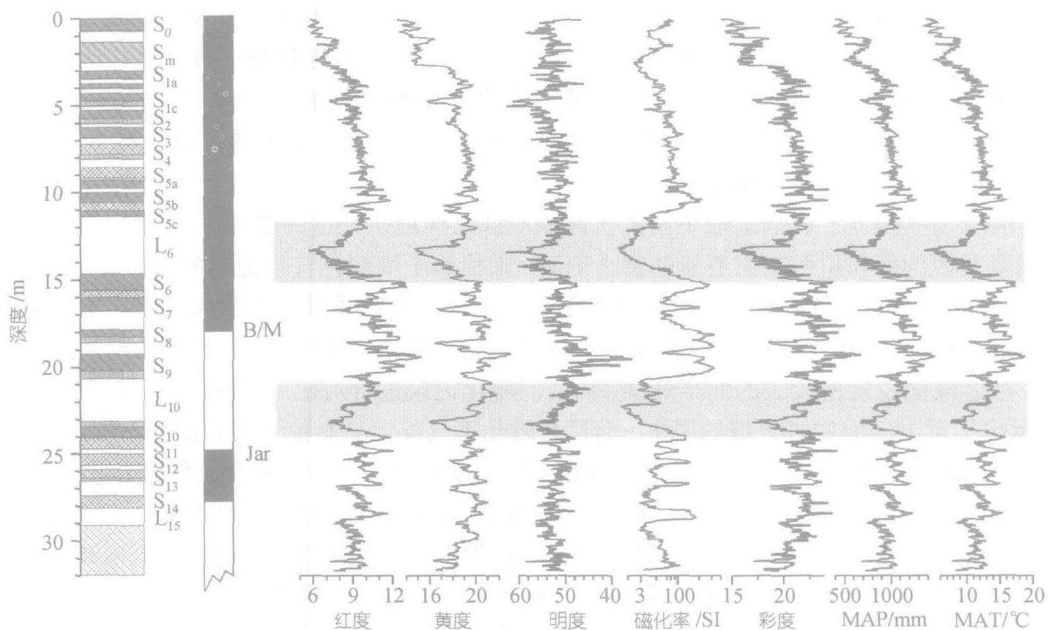


图 4 青藏高原东部甘孜剖面黄土-古土壤颜色气候记录

参 考 文 献

- 1 Heller F, Liu T S. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature*, 1982, 300: 431~433
- 2 Heller F, Liu T S. Magnetism of Chinese loess deposits. *Geophys J R Astr Soc*, 1984, 77: 125~141
- 3 刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
- 4 Schwertmann U. Transformation of hematite to goethite in soils. *Nature*, 1971, 232: 624~625
- 5 Bigham J M, Golden D C. Iron oxide mineralogy of well-drained Ultisols and Oxisols. 2. Influence on color, surface area, and phosphate retention. *Soil Sic Soc Am J*. 1978, 42: 825~830
- 6 Singh B, Gilkes R J. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of south-western Australia. *J Soil Sci*, 1992, 43: 77~98
- 7 Soil Survey Staff. *Soil Taxonomy—A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys*. USDA Handbook Number 436. Washington D C: US Government Printing Office, 1975
- 8 曹升庚. 土壤颜色的测定和描述——门赛尔土壤比色卡的应用. 见: 土壤分类及土壤地理论文集. 北京: 科学出版社, 1985
- 9 Scheffer F, Welte E. Zur Frage der Eisenoxidhydrate im Boden. *Chem Erde*, 1958, 19: 51~64
- 10 Resende M. Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the central plateau Brazil. Ph D thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1976
- 11 Torrent J, Schwertmann U. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. *Geoderma*, 1980, 23: 191~208
- 12 Torrent J, Schwertmann U. Quantitative relationships between soil color and hematite content. *Soil Sci*, 1983, 136: 354~358
- 13 Soileau J M, McCracken R J. Free iron and coloration in certain well-drained Coastal Plain soils in relation to their other properties and classification. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1967, 31: 248~255
- 14 Shields J A, Paul E A. Spectrophotometric measurement of soil color and its relationship to moisture and organic matter. *Can J Soil Sci*. 1968, 48: 271~280

- 15 Fernandez R N, Schulze D G. Color, organic matter, and pesticide adsorption relationships in a soil landscape. *Soil Sci Soc Am J*, 1988, 52: 1023~1026
- 16 Krishnan P, Butler B J, Hummel J. Close-range sensing of soil organic matter. *Trans ASAE*, 1981, 24: 306~311
- 17 Griffiths C L. Electronic sensing of soil organic matter. *Trans ASAE*, 1985, 28: 703~705
- 18 Sims Z R, Nielsen G A. Division S-5——Soil genesis, morphology, and classification: Organic carbon in Montana soils as related to clay content and climate. *Soil Sci Soc Am J*, 1986, 50: 1269~1271
- 19 Melville M D, Atkinson G A. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *J Soil Sci*, 1985, 36: 495~512
- 20 Fernandez R N, Schulze D G. Calculation of soil color from reflectance spectra. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51: 1277~1282
- 21 Deaton B C, Balsam W L. Visible spectroscopy——A rapid method for determining hematite and goethite concentration in geological materials. *J Sediment Petrol*, 1991, 61: 628~632
- 22 Ewing R P, Horton R. Discriminating dyes in soil with color image analysis. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63: 18~24
- 23 Oi K, Fukusawa H, Iwata S, et al. Last 2.4 Ma changes of monsoon and westerly activities in the East Asia, detected by clay mineral composition in loess-paleosol sequences at the inland area of China and deep-sea sediments of the Japan Sea. *J Geogr*, 1997, 106: 249~259
- 24 Fang X M, Ono Y, Fukusawa H, et al. Asian summer monsoon instability during the past 60,000 years: Magnetic susceptibility and pedogenic evidence from the Chinese western Loess Plateau. *Earth Planet Sci Lett*, 1999, 168: 219~232
- 25 Yang S L, Chen S Y. Soil color: A new sensitive indicator for climatic change. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(Supp): 1: 282~285
- 26 Munsell A H. *A Color Notation*. Boston, 1905
- 27 CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. Recommendations on Uniform Color Spaces, Color-Difference Equations, and Psychometric Color Terms. Supplement No. 2 to Publication CIE No. 15(E-1.3.1)1971/(TC-1.3)1978. Paris: Bureau Central de la CIE, 1978
- 28 Robertson A R. The CIE 1976 color-difference formulae. *Color Research and Application*, 1977, 2: 7~11