

# 土壤发育指数及其在黄土—古土壤序列中的应用\*

李叙勇

(中国科学院自然资源综合考察委员会, 北京 100101)

李保国 石元春

(中国农业大学土壤和水科学系, 北京 100094)

**摘要** 以洛川坡头和兰州九州台黄土剖面为例, 系统地观测和描述了各层黄土与古土壤的形态(包括微形态)特征, 选取了 10 个土壤形态属性以评价古土壤发育状况: 红化作用(颜色彩度和色调)、总质地(质地类型、粘结性和可塑性)、黑化作用(颜色亮度)、微结构(类型、结构性发育程度、孔隙类型和总孔度)、细物质(丰度)、原生碳酸盐(丰度)、黑云母(丰度及蚀变程度)、铁氧化物(丰度)、次生碳酸盐(类型及丰度)和淀积粘粒(干涉色、淀积粘粒特征、胶膜丰度、胶膜厚度)。在此基础上, 建立了土壤发育指数, 并初步讨论了该指数在环境变化研究方面的应用。

**关键词** 土壤发育指数, 土壤形态属性, 黄土—古土壤序列

**中图分类号** S151

黄土—古土壤序列所保存的生物气候长期变迁的记录, 不仅可以与第四纪深海沉积物和极地冰芯所保存的记录相媲美, 而且它们记录的时间更长、更连续, 有很好的古气候周期性和地层旋回性<sup>[1]</sup>, 是“过去的全球变化”研究极好的信息载体。黄土剖面中古土壤的形态属性含有丰富的古环境信息, 是环境变化与恢复和重建气候的重要依据, 如基于古土壤的形态<sup>[2]</sup>和微形态<sup>[3]</sup>观测推断了洛川古土壤发育时期的古环境。但土壤形态属性的描述与表达是比较繁琐的, 尤其是土壤微形态的描述更是如此, 其术语也晦涩难懂, 从而极大地限制了古土壤在古环境研究中的应用。本文以洛川坡头和兰州九州台黄土剖面为例, 介绍了土壤发育指数的建立方法, 用简单的数量方法表达古土壤发育状况, 并初步讨论了在环境变化研究方面的应用。

## 1 研究方法

研究剖面分别位于陕西省洛川县金兆乡坡头村(35°40' N, 109°25' E)和甘肃省兰州市九州台

\* 国家重点基础研究发展规划“我国生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”项目(G1999043400)资助

收稿日期: 1999-10-16; 收到修改稿日期: 2000-02-17

(36° 18' N, 103° 47' E) (以下分别简称为坡头剖面 and 九州台剖面)。遵遁安芷生等<sup>[4]</sup>和陈发虎<sup>[5]</sup>提出的黄土—古土壤序列地层划分原则,对洛川坡头剖面和九州台剖面离石黄土及以上地层(厚度分别为 84.1 m 和 275 m)进行了详细分层,对古土壤发育明显的层段按发生层进行了续分。对所有层次进行详细的野外形态观测与描述,并采集了 187 块土壤薄片制作样品。野外观测的土壤形态指标主要有:层次过渡(形式和表现程度)、门塞尔颜色值(干和湿)、结构(类型和发育程度)、结持性(干和湿)、质地、粘结性、可塑性、碳酸盐(形态和丰度)、粘粒胶膜(丰度、厚度和位置)以及生物活动(根、虫孔隙的大小和丰度)等。

土壤薄片由北京大学地质系磨片室制作,薄片大小为 5 cm × 5 cm,厚约 0.025~0.03 mm。微形态的描述按照文献 [6] 进行,中文名称采用黄瑞采的译法<sup>[7]</sup>。显微观察使用德国 Leica 公司制造的 DMLP 偏光显微镜。观测的主要项目有:微结构(微结构类型、结构性发育程度、孔隙类型、孔隙大小和总孔隙)、细物质 (< 0.01 mm) (丰度和颜色)、原生矿物质(黑云母的丰度和蚀变程度,原生碳酸盐丰度)、铁氧化物(丰度)、有机物质(颜色和丰度)、次生碳酸盐(形态及比例、丰度和侵染方式)和淀积粘粒(干涉色、淀积粘粒特征、胶膜丰度、胶膜厚度)等。

## 2 土壤发育指数的建立

土地评价研究中,常用指数法和土地潜力分级法来评价土壤的生产力或农业潜力。Harden 用这种思想建立了 Harden 指数<sup>[8]</sup>,用来评价土壤发育状况。本研究借鉴 Harden 指数的思想将土壤发育指数定义为:

$$SI = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i / X_{i,max})}{n} \quad (1)$$

式中 SI 为某一层次的土壤发育指数值,  $X_i$  为该层某个土壤形态属性的赋分值,  $X_{i,max}$  为其可能的最大赋分值,  $n$  为所选指标数。通过上式的处理,可以将所有层次的土壤发育指数值归一化到 0 至 1 的数值范围内,这样就可以用 SI 值来简单地表示各层的土壤发育程度。

一个土壤发育指数值的确定主要有以下几个步骤: (1) 描述土壤形态(包括微形态)特性; (2) 确定评价土壤发育的形态指标体系; (3) 土壤形态(包括微形态)特性数量化; (4) 计算土壤发育指数值。其中,确定评价土壤发育的形态指标体系是关键步骤。在构建土壤发育指标体系时,应注意以下几个问题: 第一,所选土壤形态指标要能反映剖面的土壤发育状况,也就是说这些指标都应和所选剖面的土壤发生及成土环境密切相关。第二,尽量选取微形态指标。这是因为通过土壤微形态观测,不仅能够更加准确地描述大部分土壤形态属性,易于定量,而且能够获得更多的野外调查所不能及的有关土壤发生及成土环境的信息。关于土壤微形态属性指标的选取与赋分规则,已经在另文中作了详细的讨论与分析<sup>[9]</sup>。第三,保留某些野外调查的土壤形态指标是必要的。对于某些土壤形态属性,由于微形态观测空间范围的限制,可能会导致观测结果的代表性差的问题,这时野外调查的结果更能反映实际情况。本研究中保留了颜色、质地类型、粘结性与可塑性几个指标。将颜色属性又分解为红化作用和黑化作用两个指标<sup>[8]</sup>。随着土壤发育的增强,色调变红、彩度变亮的变化称为红化作用;黑化作用是指由于土壤有机质累积而使土壤变暗的作用,它是用门塞尔颜色值中的亮度值来表示的,随亮度值的增加而降低。红化作用和黑化作用

的赋分参照 Harden 的方法<sup>[8]</sup>,但为了排除在低彩度波段有机质染色对彩度值的干扰,将彩度值在 1 至 4 之间赋分的增值减小为 5 分。第四,剔除某些不合理或者重复的指标。由于观测的黄土剖面深厚,下层黄土或古土壤层常常被压实变硬,甚至固结,可能会造成在野外对某些观测结果的一些偏差。如“结构”和“结持性”受压实作用的影响较大,而不能真实反映土壤发生特征,应予剔除。而野外观测的碳酸盐、粘粒胶膜以及生物活动等项目,在微形态观测中都有相应的更为准确的描述,故在确定评价土壤发育的形态指标体系时,也将这些野外观测项目剔除。根据上述原则,参照 Bilzi 和 Ciolkosz<sup>[10]</sup>、Harden<sup>[8]</sup>、Dorrnsoro<sup>[11]</sup>等的方案,确定了评价坡头剖面和九州台剖面古土壤发育的形态指标体系(表 1),表 1 中前 3 个指标是野外观测的土壤形态指标,后 7 个是土壤微形态指标。需要指出的是,在应用到其它剖面时,根据具体情况,可能要增加一些指标,也可能要剔除某些指标。在构建了指标体系之后,对所有层次的土壤形态属性描述按表 1 赋分,然后用公式(1)计算即得到各个层次的土壤发育指数值。

表 1 评价古土壤发育的形态指标体系

Table 1 Morphological indices for evaluation of paleosol development

1. 红化作用 Rubification												
a. 颜色色调	10YR	7.5YR	5YR	b. 颜色彩度	1	2	3	4	5	6	7	8
赋分	10	30	50	赋分	5	10	15	20	30	40	50	60
$X_1 = (\text{色调} + \text{彩度})_{\text{湿}} + (\text{色调} + \text{彩度})_{\text{干}}$												
2. 黑化作用 Melanization												
a. 颜色亮度	1	2	3	4	5	6	7	8				
赋分	80	70	60	50	40	30	20	10				
$X_2 = \text{颜色亮度湿值} + \text{颜色亮度干值}$												
3. 总质地 Total texture												
a. 质地类型	砂土	砂壤土	壤土	粉壤土	粘壤土	粘土						
赋分	10	20	30	40	50	60						
b. 粘结性	不粘	稍粘	粘	很粘	可塑性	不可塑	稍可塑	可塑	强可塑			
赋分	10	20	30	40	赋分	10	20	30	40			
$X_3 = \text{质地类型} + \text{粘结性} + \text{可塑性}$												
4. 微结构 Microstructure												
a. 类型	单粒结构	紧粒结构	囊孔结构、孔道结构	海绵状结构、团聚体结构	裂隙结构、裂缝状结构							
赋分	0	10	20	40								
b. 结构性发育程度	无结构	弱发育	中等发育	强发育								
赋分	0	10	30	50								
c. 孔隙类型	简单堆叠孔隙	复合堆叠孔隙	通道、囊状孔隙	孔洞、面状孔隙								
赋分	0	5	10	20								
d. 总孔度	0%~1%	1%~5%	5%~15%	15%~25%	25%~35%	> 35%						
赋分	0	5	10	20	30	40						
$X_4 = \text{微结构类型} + \text{结构性发育程度} + \text{孔隙类型} + \text{总孔度}$												
5. 细粒物质 Fine material (< 0.01mm)												
a. 丰度	0%~5%	5%~10%	10%~15%	15%~25%	25%~30%	30%~35%	35%~40%	> 40%				
赋分	10	20	30	40	50	60	70	80				

续表

 $X_5$  = 细粒物质丰度

6. 原生碳酸盐 Primary carbonate

a. 丰度	0	0%~0.5%	0.5%~5%	5%~10%	10%~15%	15%~25%	25%~35%	> 35%
赋分	70	60	50	40	30	20	10	0

 $X_6$  = 原生碳酸盐丰度

7. 黑云母 Biotite

a. 蚀变程度	无	弱	中等	强	b. 丰度	< 2%	2%~5%	> 5%
赋分	0	10	30	50	赋分	30	20	10

 $X_7$  = 黑云母的(蚀变程度 + 丰度)

8. 铁氧化物 Fe(hydr) oxides

a. 丰度	< 2%	2%~5%	> 5%
赋分	0	10	30

 $X_8$  = 铁氧化物的丰度

9. 次生碳酸盐 Secondary carbonate

a. 形态和大小	细针状或胶膜状( $\leq 0.3\text{mm}$ )		粗针状或胶膜状( $0.3\sim 1\text{mm}$ )		复合胶膜状或团块状( $\geq 0.5\text{mm}$ )
赋分	10		20		40
b. 丰度 <sup>1)</sup>	0	0%~5%	5%~10%	10%~20%	> 20%
赋分	0(90)	10(70)	30	50	70

 $X_9$  = 次生碳酸盐的(微形态类型 + 丰度)

10. 淀积粘粒 Illuvial clay

a. 干涉色	< 一级红	= 一级红	> 一级红			
赋分	10	20	30			
b. 淀积粘粒特征	清晰的	扰动的	叠层状的	崩解的	复合层状的	
赋分	10	20	30	40	50	
c. 丰度	0	0%~0.5%	0.5%~2%	2%~5%	5%~10%	> 10%
赋分	0	10	20	30	40	50
d. 胶膜厚度	无	薄( $< 0.05\text{mm}$ )	中等( $0.05\sim 0.2\text{mm}$ )		厚( $0.2\text{mm}$ )	
赋分	0	10	30		50	

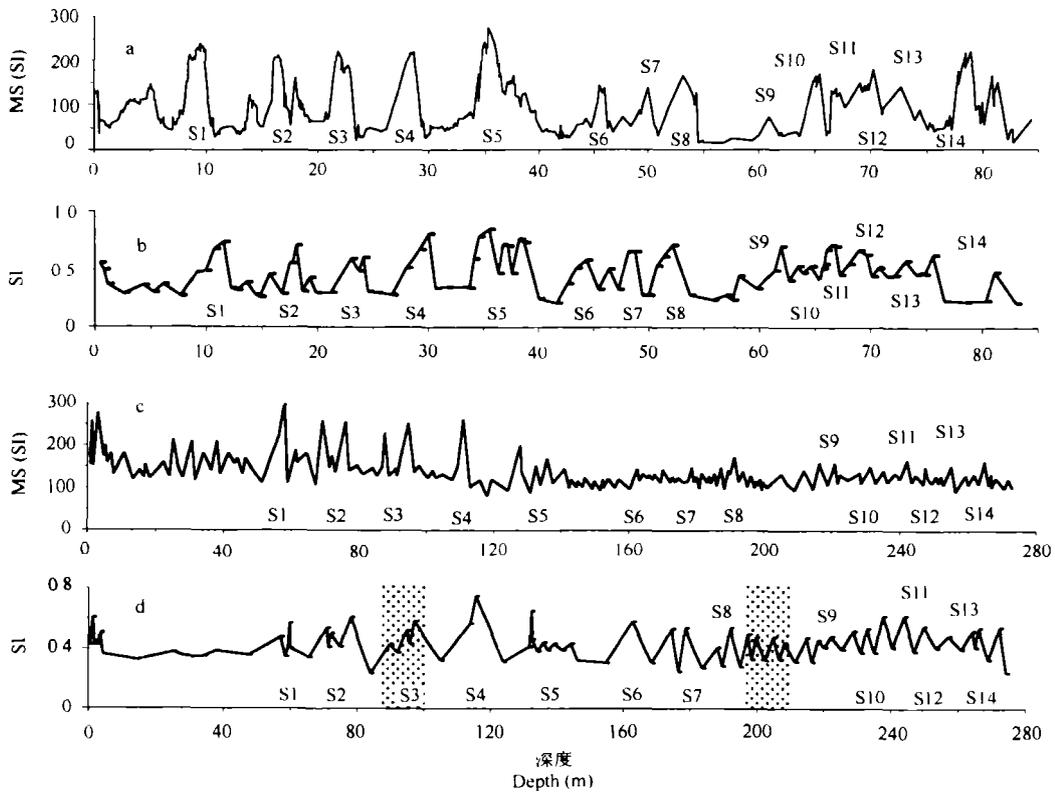
 $X_{10}$  = 淀积粘粒的(干涉色 + 特征 + 丰度 + 胶膜厚度)

1) 当原生碳酸盐丰度小于 5% 时, 次生碳酸盐丰度的赋分计高分值(括号中的值)

### 3 土壤发育指数的应用

作为替代性气候指标,磁化率曲线已广泛地应用于黄土—古土壤序列的研究中,但其物理意义并不十分明确,还存在一些争议<sup>[12]</sup>。土壤发育指数建立在土壤发生学的理论基础之上,具有了明确的环境意义:它是气候、生物、母质、地形和土壤发育年龄等成土因素综合作用结果的数量表达。因此,土壤发育指数指示了土壤发育的强弱程度,土壤发育指数曲线则是环境变化的反映。总的来看,古土壤层的土壤发育指数值高于黄土层,在土壤发育指数曲线上表现为明显的峰,与磁化率曲线有较好的对应关系(图 1)。

鉴别古土壤是利用黄土—古土壤序列研究气候与环境变化的重要手段。但在野外识别古土壤有一定困难,尤其是识别弱发育的古土壤极其困难。本研究尝试用土壤发育指



a, b和c, d分别是坡头剖面和九州台剖面的磁化率与土壤发育指数曲线

图1 土壤发育指数(SI)与磁化率(MS)的对比

Fig.1 Comparson between soil morphological index (SI) and magnetic susceptibility (MS)

数来鉴别古土壤取得了令人满意的结果。具体方法是:用  $t$  检验的方法,在通过  $\alpha = 0.01$  水平检验的前提下,找出  $t$  值最大时土壤发育指数值划分的界限,从而获得识别古土壤的

表2 识别古土壤、弱古土壤和黄土的土壤发育指数值范围

Table 2 Ranges of soil development index values for identifying paleosol, weak-paleosol and loess

地层 Strata	坡头剖面 Potou section		九州台剖面 Jiu Zhoutai section		
	指数值 Index values	样本数 Samples	指数值 Index values	样本数 Samples	
全新世 和	古土壤	>0.50	3	>0.40	4
	弱古土壤	0.36~0.50	2	0.35~0.40	3
马兰黄土	黄土	<0.36	3	<0.35	7
离石黄土	古土壤	>0.46	13	>0.42	13
	弱古土壤	0.39~0.46	3		0
下部	黄土	<0.39	15	<0.42	9
离石黄土	古土壤	>0.54	25	>0.48	20
	弱古土壤	0.49~0.54	7	0.40~0.48	7
下部	黄土	<0.49	28	<0.40	25

指数值区间范围。对于本研究的两个剖面,考虑到全新世黄土和马兰黄土、离石黄土上部以及离石黄土下部三段中古土壤的发育差异较大,因此将两个剖面都划分为上述三段,在每段内将土壤发育指数值按从高到低的顺序又分为古土壤、弱古土壤和黄土三组,对每两组之间进行  $t$  检验,计算  $t$  值,然后按指数值重新分组计算  $t$  值,如此反复,直至找出具有最大  $t$  值的土壤指数值分组方案,据此方案得到了鉴别古土壤、弱古土壤和黄土的土壤发育指数值范围(表 2)。

与根据野外调查、磁化率和粒度分析等综合手段对古土壤的鉴别结果<sup>[4,5]</sup>相比,用土壤发育指数的鉴别结果是:对坡头剖面的古土壤、弱古土壤和黄土层的识别分别有 90.9%、87.8% 和 90.2% 与之相符,九州台剖面分别为 88.2%、71.3% 和 85.6%。结果不一致的主要集中于发育在复合古土壤或黄土层中的弱古土壤,而这些弱古土壤层在土壤发育指数曲线上又明显表现为若干个次一级的峰(图 1)。例如,根据土壤发育指数曲线,我们认为九州台剖面的  $S_3$  古土壤是由 3 个古土壤层构成的复合古土壤,而  $S_8$  和  $S_9$  之间的黄土层中则发育有 4 个弱古土壤层。这些弱古土壤层在土壤发育指数曲线上的表现较磁化率曲线更为明显,分辨率更高。因此,结合对土壤发育指数曲线的分析,能够较为准确的鉴别出黄土剖面中发育的古土壤和弱古土壤。在其他一些层次,如  $S_5 \sim S_6$  之间、 $S_1$  以上等层次,磁化率曲线表现为较高的分辨率,这可能与这些层次中含铁矿物质的含量多少等因素有关。

## 4 结 论

1. 在系统地观测和描述土壤形态(包括微形态)特征的基础上,构建了土壤发育指数,从而能够用简单的数量方法来表达和评价古土壤的发育状况。
2. 土壤发育指数是气候、生物、母质、地形和土壤发育年龄等成土因素综合作用结果的数量表达。应用于黄土—古土壤序列研究中,能够反映过去的环境变化。
3. 运用土壤发育指数能够较为准确地识别黄土剖面中的古土壤。

致 谢 安芷生、郭正堂、陈发虎和鹿化熠等先生给予指导和帮助,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

1. 刘东生等编. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985
2. 安芷生, 魏兰英. 离石黄土中的第五层古土壤及其古气候意义. 土壤学报, 1980, 17: 1~10
3. Bronger A. Loess buried paleosols welded paleosols pedocomplexes towards a global quaternary pedostratigraphy and paleoclimatic history. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(Supp.): 1~7
4. 安芷生, Kukla G U, 刘东生. 洛川黄土地层学. 第四纪研究, 1989, (2): 155~168
5. 陈发虎, 张维信等著. 甘青地区的黄土地层学与第四纪冰川问题. 北京: 科学出版社, 1993, 16~24
6. Bullock P, Fedoroff N, Jongerius A et al. Handbook for Soil Thin Section Description. Albrington: Waine Research Publications, 1985
7. 黄瑞采编著. 土壤微形态学——发展及应用. 北京: 高等教育出版社, 1991
8. Harden J W. A quantitative index of soil development from field descriptions: examples from a chronosequence in central California. Geoderma, 1982, 28: 1~28

9. 李叙勇, 李保国, 刘焕龙. 土壤微形态发育指数的研究: I. 建模. 中国农业大学学报, 1998, 3 (增刊): 67~70
10. Bilzi A F, Ciolkosz E J. A field morphology rating scale for evaluating pedological development. Soil Science, 1977, 124:45~48
11. Dorronsoro C. Micromorphological index for the evaluation of soil evolution in central Spain. Geoderma, 1994, 61:237~250
12. Kukla G, An Z S. Loess stratigraphy in central China. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1989, 6:191~219

## A SOIL DEVELOPMENT INDEX AND ITS APPLICATION TO LOESS-PALEOSOL SEQUENCES

Li Xu-yong

(Commission for Integrated Survey of Natural Resources, CAS, Beijing 100101)

Li Bao-guo Shi Yuan-chun

(Department of Soil and Water, China Agricultural University, Beijing 100094)

### Summary

A soil development index was developed to quantitatively measure the degree of paleosol development. This index combined paleopedogenic features with ten soil macro- and micro- morphological properties from morphological descriptions of Potou and Jiu Zhoutai loess sections in the Loess Plateau of China. Description of the micromorphological properties was based on 187 thin sections. These ten morphological properties are: rubification (color hue and chroma), total texture (texture type, stickiness and plasticity), melanization (color value), microstructure (type, grade of pedality, total porosity and void types), fine material (abundance), primary carbonate (abundance), biotite (abundance and degree of alteration), Fe(hydr)oxides (abundance), secondary carbonate (micromorphology type and abundance) and illuvial clay (interference colors, lamination features, abundance and thickness of clay film). Future study may reject some of these properties and add others. The index was preliminarily tried to the field of paleoenvironmental research. The index works well with the loess-paleosol sequences, successfully identifying paleosols and weak-paleosols from a loess-paleosol sequence.

**Key words** Loess-paleosol sequence, Soil development index, Soil morphological properties