

DOI: 10.11766/trxb202002070686

姜志文, 韩春兰, 吕秀艳. 火山灰土在土壤系统分类中的提出与修订[J]. 土壤学报, 2021, 58 (3): 578–587.

JIANG Zhiwen, HAN Chunlan, LÜ Xiuyan. Andisols in Soil Taxonomy and Amendment of Its Definition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (3): 578–587.

火山灰土在土壤系统分类中的提出与修订*

姜志文, 韩春兰[†], 吕秀艳

(沈阳农业大学土地与环境学院, 东北地区农业农村部土壤与环境重点实验室, 辽宁省农业资源与环境重点实验室, 沈阳 110866)

摘 要:《中国土壤系统分类检索》(第三版, CST)关于火山灰土的诊断标准还存在一定问题, 需要进一步修订。为此, 整理并比较了《世界土壤资源参比基础》(World Reference Base for Soil Resources, WRB, 1998—2014 版)、美国《土壤系统分类检索》(Keys to Soil Taxonomy, KST)(第 3~12 版, 1987—2012 年)、《中国土壤系统分类检索》(首次方案至第三版, 1991—2001 年)中, 关于火山灰土的描述、诊断标准、分类检索和类型划分的演变历程, 在此基础上提出了 CST 关于火山灰土诊断标准和分类检索的修订建议。

关键词: 中国土壤系统分类检索 (CST); 美国《土壤系统分类检索》(KST); 世界土壤资源参比基础 (WRB); 火山灰土; 火山灰特性

中图分类号: S155.3 文献标志码: A

Andisols in Soil Taxonomy and Amendment of Its Definition

JIANG Zhiwen, HAN Chunlan[†], LÜ Xiuyan

(College Land and Environment, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs in Northeast Area Key Laboratory of Soil and Environment, Liaoning Province Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: There are still some problems with the diagnostic criteria for Andisols in the “Chinese Soil Taxonomy (3rd edition, CST)”, which call for further revision. To this end, evolution courses of the descriptions, diagnostic criteria, classification retrieval, and type division of Andisols in the “World Reference Base for Soil Resources (WRB, 1998—2014 edition)”, the “Keys To Soil Taxonomy (KST, 3th~12th edition, 1987—2012)” and the “Chinese Soil Taxonomy (1st scheme~3rd edition, 1991—2001)” were collated and compared in this paper. On such a basis, amendments were proposed to revise the diagnostic criteria, classification and retrieval of Andisols in CST.

Key words: Chinese Soil Taxonomy(CST); Keys to Soil Taxonomy(KST); World Reference Base for Soil Resources(WRB); Andisols; Andic soil properties

美国农业部 (USDA) 于 1975 年出版了《土壤系统分类》(Soil Taxonomy), 1983 年出版了《土壤系统分类检索》(Keys to Soil Taxonomy, 以下简称 KST), 之后每隔 3~5 年修订一次 KST^[1]。KST

* 国家自然科学基金项目 (41171172) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41171172)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hancly@163.com

作者简介: 姜志文 (1996—), 男, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要从事土壤发生与分类方面的研究。E-mail: jiangzw96@163.com

收稿日期: 2020-02-07; 收到修改稿日期: 2020-06-03; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-09-03

第 3 版 (1987 年) 及其之前的各版中未设置火山灰土土纲, 具有这类性质的土壤多被检索为有机土或灰土, 但该版中提出了火山灰特性 (Andic soil properties)。1980 年成立的火山灰土委员会 (ICOMAND) 经过多年的潜心研究, 于 1988 年提出了将火山灰土作为第 11 个土纲添加到 KST 中的建议^[2]。KST 第 4 版 (1990 年) 首次引入了火山灰土土纲, 其以火山灰特性为诊断标准^[3]。在 KST 第 5、6、8、9 和 10 版中, 火山灰特性均有所修订, 火山灰土的高级分类亦有所增减^[4]。KST 第 11 版 (2010 年) 和第 12 版 (2014 年, 截止目前的最新版) 中, 火山灰土内容均未再变化。

中国于 1984 年开始了土壤系统分类研究^[5-6], 1991 年提出了《中国土壤系统分类 (首次方案)》^[7] (以下简称为“首次方案”), 由于国内对“火山灰特性”缺乏足够的研究, 直接引用了 KST 第 4 版中的表述。关于火山灰土的分类检索, 则在参考 KST 第 4 版的基础上, 根据中国土壤特点和研究资料进行了一定程度的修订。1995 年出版的《中国土壤系统分类 (修订方案)》^[8] (以下简称为“修订方案”), 对火山灰土的诊断标准、土纲的检索标准及高级分类均进行了较大程度的修订^[8]。1999 年出版的《中国土壤系统分类: 理论·方法·实践》^[9]和 2001 年发行的《中国土壤系统分类检索 (第三版)》^[10] (以下简称为 CST), 对火山灰特性进一步进行了修订^[10]。

为了使世界各国土壤分类系统之间能够进行比较, 联合国粮农组织 (FAO) 于 1992 年成立了世界土壤资源参比基础 (World Reference Base for Soil Resources, WRB) ^[11]。1994 年提出了“世界土壤资源参比基础草案”, 1998 年《世界土壤资源参比基础》^[12] (WRB) 面世^[12], 2006 年和 2014 年先后又出版了第二版和第三版。WRB 第一版中提出了与火山灰土相关的诊断层和诊断特性, 在之后的两版中均进行了一定程度的修订^[13]。

CST 中, 火山灰土的诊断标准与 KST 第 7 版相当, 还存在一定的问题, 因此, 在综述 KST 和 WRB 关于火山灰土的诊断标准和分类检索研究进展的基础上, 提出了 CST 中关于火山灰土诊断标准和分类检索的修订建议。

1 KST 关于火山灰土的提出与修订

1.1 火山灰特性的提出与修订

1.1.1 火山灰特性的提出 KST 第 3 版 (1987

年) ^[14] 中首次提出火山灰特性 (Andic soil properties), 其被定义为土壤物质满足以下条件之一或多条: (1) <2 mm 的土壤中活性 Al+1/2Fe 含量 (酸性草酸盐浸提态) $\geq 2.0\%$, <2 mm 的土壤水分张力为 33 kPa 时的容重 $\leq 0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 且磷酸盐吸持量 $\geq 85\%$ 。(2) >2 mm 的火山灰物质占整个土壤体积的 60% 或更多, <2 mm 的土壤中活性 Al+1/2Fe 含量 (酸性草酸盐浸提态) $\geq 0.4\%$ 。(3) <2 mm 的土壤中 0.02~2 mm 含量 $\geq 30\%$, 并满足以下条件之一: ① <2 mm 的土壤中活性 Al+1/2Fe 含量 (酸性草酸盐浸提态) $\geq 0.4\%$, 0.02~2 mm 的土壤中火山玻璃含量 $\geq 30\%$; ② <2 mm 的土壤中活性 Al+1/2Fe 含量 (酸性草酸盐浸提态) $\geq 2.0\%$, 0.02~2 mm 的土壤中火山玻璃含量 $\geq 5\%$; ③ <2 mm 的土壤中活性 Al+1/2Fe 含量 (酸性草酸盐浸提态) 处于 0.4%~2.0% 之间时, 0.02~2 mm 的土壤中火山玻璃在 5%~30% 之间的含量成比例关系^[15]。

1.1.2 火山灰特性的修订 火山灰特性提出后, 在 KST 后续的修订版中, 共进行了 6 次不同程度的修订。KST 第 4 版 (1990 年) ^[16] 在定量诊断标准之前增加了限定: “符合火山灰特性的土壤物质有机碳含量必须 <25%”, 删除了第 3 版定量诊断标准的第 2 条, 第 3 条的总述部分除了对粒径及含量的限定描述外, 增加了“磷酸盐吸持量 $\geq 25\%$ ”, 分述的第③点修订为: “在 <2.0 mm 的土壤中, 活性 Al+1/2Fe (酸性草酸盐浸提态) 为 0.4%~2.0%, 且在 0.02~2.0 mm 的土壤中有足够的火山玻璃含量, 当其对活性 Al+1/2Fe (酸性草酸盐浸提态) 含量的百分数作图时, 火山玻璃含量则落在图的阴影范围内”, 并增补了插图^[15]。

第 5 版 (1992 年) ^[17] 将“符合火山灰特性的土壤物质有机碳含量必须 <25%”限定为“质量比”; 将“<2.0 mm 的土壤”修改为“细土部分”; 将“酸性草酸盐”确定为“草酸铵”; 此外只是对文字表述进行了调整, 没有实质意义上的修改。

第 6 版 (1994 年) ^[18] 对火山灰特性的定量诊断标准未进行修订, 但在定量诊断标准之前增加了关于火山灰特性产生的原因、火山灰土包含的范围、火山玻璃的定义及其如何判定等方面的文字描述。新增内容如下: 火山灰特性的形成主要是因为土壤存在着大量的水铝英石、伊毛缟石、水铁矿或铝—腐殖质络合物。火山灰土的概念既包括含有大量

火山玻璃的弱风化土壤,也包括富含短程有序矿物(水铝英石、伊毛缟石、水铁矿等)的较强风化土壤。因此,火山玻璃含量是确定火山灰特性的特征之一。火山玻璃被定义为光学各向同性的透明玻璃或各种颜色的浮石,包括玻璃状聚集体和覆着于其他矿物颗粒表面的玻璃。复合颗粒中必须具有不少于 50% 体积的火山玻璃才能认定为火山玻璃。大多数具有火山灰特性的土壤是矿质土壤,也有有机土壤,但其有机碳含量必须低于 25%。

第 8 版(1998 年)^[19]进一步修订了火山灰特性定量标准之前的描述性文字:火山灰土的性质主要决定于土壤中存在大量的水铝英石、伊毛缟石、水铁矿或铝—腐殖质络合物。最初在 1975 年的 KST 第一版中被称为“无定形”(但被认为含有水铝英石)的这些矿物,一般是由火山碎屑或含有一定量火山玻璃的其他母质风化形成的。虽然火山玻璃是、或曾经是许多火山灰土的常见成分,但它不是鉴定火山灰土土纲的必要条件。

第 9 版(2003 年)^[20]对火山灰特性定量标准的第 2 条进行了深度修改,首次引入定量计算公式,同时也修改了描述火山灰特性的插图,真正实现了火山灰特性诊断的定量化。修订内容为:在细土部分,磷酸盐吸持量 $\geq 25\%$, 0.02~2.0 mm 粒级含量 $\geq 30\%$,且要求:草酸铵浸提 $Al+1/2Fe \geq 0.4\%$ 、火山玻璃含量 $\geq 5\%$ 、草酸铵浸提 $(Al+1/2Fe)(\%) \times 15.625 + \text{火山玻璃含量}(\%) \geq 36.25$ ^[21]。

第 10 版(2006 年)^[22]修订了第 8 版火山灰特性定量标准之前的描述性文字:火山灰特性一般是由火山碎屑或含有一定量火山玻璃的其他母质风化形成的,但没有火山玻璃影响的土壤在冷凉、潮湿的气候条件和大量有机碳作用下,也可以发育为火山灰特性。在本系统分类中,一系列玻璃和富含二氧化硅的玻璃包被矿物被称为火山玻璃。当土壤处于潮湿环境中,这些矿物发生相对溶解,并且进行相当快速的转变。火山灰特性表征的是原始铝—硅酸盐(如:火山玻璃)的风化和转变只进行到形成水铝英石、伊毛缟石和水铁矿等短序矿物,或者是金属—腐殖质络合物的一个过渡阶段。火山灰特性的概念包括富含短序矿物或金属—腐殖质络合物,

或者二者兼有,含或不含火山玻璃(必要特性 2)的中度风化土壤,也包括含有火山玻璃但短序矿物含量不多的弱风化土壤(必要特性 3)。

胶体组分中的水铝英石、伊毛缟石、水铁矿、金属—腐殖质络合物的相对含量,是由草酸铵浸提的铝、铁、硅,以及磷酸盐吸持的实验室分析结果推算出来的。土壤学家可以利用沾染性或者 $1N^{①}NaF$ 浸提液的 pH 作为火山灰特性的野外鉴定指标。火山玻璃含量是计量粗粉砂至砂粒级(0.02~2.0 mm)组分中火山玻璃的百分含量(以颗粒数计)。具有火山灰特性的土壤,一些是矿质土壤,但也有有机碳含量 $<25\%$ 的有机土壤^[22]。

第 10 版的火山灰特性定量标准部分表述的更加精炼。土壤具备火山灰特性,必须满足:细土部分有机碳含量 $<25\%$ (质量百分比),且符合以下一条或两条:① 水分张力 33 kPa 时的容重 $\leq 0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,磷酸盐吸持量 $\geq 85\%$, $Al+1/2Fe$ 含量(草酸铵浸提) $\geq 2.0\%$;② 细土部分 0.02~2 mm 粒级含量 $\geq 30\%$,磷酸盐吸持量 $\geq 25\%$, $Al+1/2Fe$ 含量(草酸铵浸提) $\geq 0.4\%$,火山玻璃含量 $\geq 5\%$ ^[15], $(Al+1/2Fe)(\%) \times 15.625 + \text{火山玻璃含量}(\%) \geq 36.25$ ^[21]。

1.2 火山灰土土纲检索标准的提出与修订

火山灰土土纲的检索标准于 KST 第 4 版(1990 年)提出,之后进行过 2 次修订。第 4 版的检索重点在于“具有火山灰特性的土壤累计厚度为 35 cm 或以上”^[16];第 5 版(1992 年)将检索标准的格式进行了较大程度的修订,使检索更方便;第 7 版(1996 年)^[23]在检索条件中增添了“致密接触面”这一特征层。总体描述如下:

其他土壤中,占下列 60%或更厚的土层中有火山灰特性:(1)在无致密接触面、石质或准石质接触面、硬磐层或石化钙积层时,从矿质土表至 60 cm 和具火山灰特性的有机层次顶部至 60 cm,二者取较浅薄者;(2)在有致密接触面、石质或准石质接触面、硬磐层或石化钙积层时,从矿质土表或具火山灰特性的有机层次顶部至致密接触面、石质或准石质接触面、硬磐层或石化钙积层的厚度,二者取较浅薄者^[23]。

1.3 火山灰土高级分类的提出与修订

火山灰土土纲在 KST 第 4 版中编录了 7 个亚纲,

① $1N \triangleq (1\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}) \times \text{离子价数}$ 。

26 个土类, 201 个亚类。其高级分类在以后的各版中进行了多次增删修订, 主要表现为土类和亚类的变化。

第 5 版中编录了 7 个亚纲, 27 个土类, 204 个亚类。潮湿火山灰土亚纲 (Aquands) 下增加了表层潮湿火山灰土土类 (Epiaquands) 和内生潮湿火山灰土土类 (Endoaquands), 删除了弱发育潮湿火山灰土土类 (Haplaquands), 表层潮湿火山灰土土类 (Epiaquands) 下划分为 Petroferric-、Duric-、Histic-、Alic-、Hydric-、Thaptic-、Typic-亚类, 内生潮湿火山灰土土类 (Endoaquands) 下划分为 Lithic-、Petroferric-、Duric-、Histic-、Alic-、Hydric-、Thaptic-、Typic-亚类; 寒性火山灰土亚纲 (Cryands) 的玻璃质寒性火山灰土土类 (Vitricryands) 下增加了 Humic Xeric-和 Humic-亚类, 删除了 Spodic-亚类, 弱发育寒性火山灰土土类 (Haplocryands) 下删除了 Spodic-亚类; 干旱火山灰土亚纲 (Xerands) 的玻璃质干旱火山灰土土类 (Vitrixerands) 下增加了 Alfic Humic-和 Humic-亚类, 删除了 Spodic-、Argixerollic-、Mollic-、Umbric-亚类, 弱发育干旱火山灰土土类 (Haploxerands) 下增加了 Alfic Humic-和 Humic-亚类, 删除了 Ultic Vitric-、Vitric-、Argixerollic-、Mollic-、Umbric-亚类; 玻璃质火山灰土亚纲 (Vitrand) 的干润玻璃质火山灰土土类 (Ustivitrand) 下增加了 Humic-亚类, 删除了 Mollic-和 Umbric-亚类, 湿润玻璃质火山灰土土类 (Udivitrand) 下增加了 Ultic-、Alfic-、Humic-亚类, 删除了 Spodic-亚类; 干润火山灰土亚纲 (Ustands) 的硬磐干润火山灰土土类 (Durustands) 下增加了 Humic-亚类, 删除了 Mollic-和 Umbric-亚类, 弱发育干润火山灰土土类 (Haplustands) 下增加了 Humic-亚类, 删除了 Mollic-和 Umbric-亚类; 湿润火山灰土亚纲 (Udands) 的暗黑湿润火山灰土土类 (Melanudands) 下增加了 Anthraquic-亚类, 弱发育湿润火山灰土土类 (Hapludands) 下增加了 Anthraquic-亚类^[17]。

第 6 版中编录了 7 个亚纲, 27 个土类, 207 个亚类。潮湿火山灰土亚纲 (Aquands) 的暗黑潮湿火山灰土土类 (Melanaquands) 下增加了 Phaptic-亚类, 删除了 Thaptic-亚类; 寒性火山灰土亚纲 (Cryands) 的玻璃质寒性火山灰土土类 (Vitricryands) 下增加了 Ultic-亚类; 干旱火山灰土

亚纲 (Xerands) 的玻璃质干旱火山灰土土类 (Vitrixerands) 下增加了 Ultic-亚类; 干润火山灰土亚纲 (Ustands) 的弱发育干润火山灰土土类 (Haplustands) 下增加了 Ultic-亚类^[18]。

第 7 版中编录了 7 个亚纲, 27 个土类, 208 个亚类。潮湿火山灰土亚纲 (Aquands) 的暗黑潮湿火山灰土土类 (Melanaquands) 下增加了 Thaptic-亚类, 删除了 Phaptic-亚类; 寒性火山灰土亚纲 (Cryands) 的玻璃质寒性火山灰土土类 (Vitricryands) 下增加了 Oxyaquic-亚类^[23]。

第 8 版中编录了 7 个亚纲, 29 个土类, 196 个亚类。潮湿火山灰土亚纲 (Aquands) 的寒性潮湿火山灰土土类 (Cryaquands) 下删除了 Pergelic-亚类, 暗黑潮湿火山灰土土类 (Melanaquands) 下增加了 Pachic-亚类, 表层潮湿火山灰土土类 (Epiaquands) 下删除了 Petroferric-亚类, 内生潮湿火山灰土土类 (Endoaquands) 下删除了 Petroferric-亚类; 寒性火山灰土亚纲 (Cryands) 下增加了硬磐寒性火山灰土土类 (Duricryands), 删除了永冻寒性火山灰土土类 (Gelicyands), 硬磐寒性火山灰土土类 (Duricryands) 下划分为 Aquic-和 Typic-亚类, 暗黑寒性火山灰土土类 (Melanocryands) 下删除了 Alic-亚类, 黄腐寒性火山灰土土类 (Fulvicryands) 下增加了 Pachic-亚类; 干旱火山灰土亚纲 (Torrand) 下增加了硬磐干旱火山灰土土类 (Duritorrand) 和弱发育干旱火山灰土土类 (Haplotorrand), 硬磐干旱火山灰土土类 (Duritorrand) 下划分为 Petrocalcic-、Vitric-、Typic-亚类, 弱发育干旱火山灰土土类 (Haplotorrand) 下划分为 Lithic-、Duric-、Calcic-、Typic-亚类, 玻璃质干旱火山灰土土类 (Vitritorrand) 下删除了 Petrocalcic-亚类; 湿润火山灰土亚纲 (Udands) 的薄层湿润火山灰土土类 (Placudands) 下删除了 Acrudoxic Hydric-、Eutric Vitric-、Vitric-、Hydric Pachic-、Pachic-、Thaptic-、Eutric-亚类, 硬磐湿润火山灰土土类 (Durudands) 下增加了 Hydric-和 Pachic-亚类, 删除了 Hydric Pachic-、Thaptic-亚类, 暗黑湿润火山灰土土类 (Melanudands) 下增加了 Eutric-亚类, 删除了 Alic Aquic-、Alic Pachic-、Alic Thaptic-、Alic-、Eutric Vitric-、Eutric Hydric-亚类, 黄腐湿润火山灰土土类 (Fulvudands) 下增加了 Eutric Lithic-、Ultic-亚类, 删除了 Hydric Lithic-、Alic-、Acrudoxic Hydric-

Acrudoxic Ultic-、Hydric Pachic-、Hydric Thaptic-亚类,弱发育湿润火山灰土土类(Hapludands)下删除了Petroferric-亚类^[19]。

第9版中编录了8个亚纲,31个土类,211个亚类。火山灰土土纲下增加了永冻火山灰土亚纲(Gelands),其下仅有玻璃质永冻火山灰土土类(Vitrigelands),下设Humic-和Typic-亚类;潮湿火山灰土亚纲(Aquands)下增加了永冻潮湿火山灰土土类(Gelaquands),其下划分为Histic-、Thaptic-、Typic-亚类;寒性火山灰土亚纲(Cryands)的硬磐寒性火山灰土土类(Duricryands)下增加了Eutric-亚类,黄腐寒性火山灰土土类(Fulvicryands)下增加了Eutric Pachic-和Eutric-亚类,玻璃质寒性火山灰土土类(Vitricryands)下增加了Spodic-亚类,弱发育寒性火山灰土土类(Haplocryands)下增加了Eutric Oxyaquic-和Spodic-亚类;玻璃质火山灰土亚纲(Vitrands)的湿润玻璃质火山灰土土类(Udivitrands)下增加了Oxyaquic-亚类;湿润火山灰土亚纲(Udands)的硬磐湿润火山灰土土类(Durudands)下增加了Eutric-亚类,黄腐湿润火山灰土土类(Fulvudands)下增加了Oxyaquic-亚类,弱发育湿润火山灰土土类(Hapludands)下增加了Oxyaquic-亚类^[20]。

第10版中编录了8个亚纲,31个土类,213个亚类。寒性火山灰土亚纲(Cryands)的硬磐寒性火山灰土土类(Duricryands)下增加了Eutric Oxyaquic-和Oxyaquic-亚类^[22]。

第11版中编录了8个亚纲,31个土类,218个亚类。潮湿火山灰土亚纲(Aquands)的寒性潮湿火山灰土土类(Cryaquands)下增加了Turbic-亚类;永冻火山灰土亚纲(Gelands)的玻璃质永冻火山灰土土类(Vitrigelands)下增加了Turbic-亚类;寒性火山灰土亚纲(Cryands)的黄腐寒性火山灰土土类(Fulvicryands)下增加了Folistic-亚类,玻璃质寒性火山灰土土类(Vitricryands)下增加了Folistic-亚类,弱发育寒性火山灰土土类(Haplocryands)下增加了Folistic-亚类^[24]。第12版^[25]与第11版相同。

2 WRB关于火山灰土的提出与修订

2.1 火山灰土诊断标准的提出与修订

WRB 第一版(1998年)^[26]中火山灰土的诊断

标准包括3个诊断层和1个诊断物质,诊断层为火山灰土层、火山灰暗黑层和玻璃质层,诊断物质为火山碎屑土壤物质。在第二版(2006年)^[27]中,火山灰土层和玻璃质层修订为火山灰特性和玻璃质特性。诊断层和诊断特性的定义及定量诊断标准也进行了修改,其中火山灰暗黑层修订了诊断标准之前的描述性文字;火山灰特性增加了有机-金属络合物作为特征,重新表述了高持水特征,大幅修改了诊断特性并补充说明了部分额外特性;玻璃质特性在描述中增加了“短序矿物”,并扩展了诊断标准包含的内容;火山碎屑物质则完全修改了诊断标准。在第三版(2014年)^[28]中,重点修改了各定量诊断标准,诊断层、诊断特性和诊断物质描述如下:

2.1.1 火山灰暗黑层 (1)一般描述。火山灰暗黑层是表层或接近地表的一层厚厚的黑色土层,与短序矿物(一般是水铝英石)或有机-铝复合物密切相关。容重低,含有大量的腐殖质且富里酸与胡敏酸之比低于暗黄层。(2)诊断标准。火山灰暗黑层具有:①火山灰特性;②芒塞尔润态明度和彩度 ≤ 2 ;③黑色素指数 < 1.7 ;④暗黑层累计厚度 ≥ 30 cm,其间的“非暗黑”物质层厚度 ≤ 10 cm;⑤各部分有机碳含量 $\geq 4\%$,所有部分加权平均值 $\geq 6\%$ ^[28]。

2.1.2 火山灰特性 (1)一般描述。火山灰特性主要是由火山碎屑沉积物中度风化产生的。短序矿物和/或有机-金属复合物的存在是火山灰特性的特征。这些矿物和复合物通常是火山碎屑沉积物风化序列的一部分(火山碎屑土壤物质>玻璃质特性>火山灰特性)。然而,在寒温带潮湿气候条件下,富硅酸盐的非火山碎屑物质也可以形成由有机-金属复合物导致的火山灰特性。

火山灰特性可以在表土层或次表层出现,通常表现为成层性。具有火山灰特性的大多数表土层中含有大量有机质($\geq 5\%$),土壤颜色通常很深(芒塞尔润态明度和彩度 ≤ 3),有蓬松的宏观结构,在某些地方有涂污结持性。容重低,通常是粉砂壤土或更细的质地。富含有机质的火山灰表土层可能很厚,在一些土壤中厚度 ≥ 50 cm。火山灰次表层通常颜色较浅。

火山灰土层可能具有不同的特征,这取决于作用于土壤物质的主要风化过程的类型。它可能表现出触变性,即土壤物质在压力下或通过摩擦,塑性固体发生液化,再返回固体状态。在常湿气候条件

下,富含腐殖质的火山灰土层可能含有超过烘干又复湿土壤样品 2 倍的水分含量(高持水特征)。

已经发现火山灰特性的两种主要类型,一种是水铝英石,伊毛缟石和类似矿物质占主导地位的硅质型,另一种是铝的有机酸络合物占主导地位的铝质型。硅质火山灰特性具有强酸性至中性土壤反应且土壤颜色较浅,铝质火山灰特性则具有极强酸性至酸性土壤反应且土壤颜色偏深。(2) 诊断标准。火山灰特性要求:① $Al_{ox} + 1/2Fe_{ox}$ (草酸铵浸提 $Al + 1/2Fe$) $\geq 2\%$;②土壤容重 $\leq 0.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;③磷酸盐吸持量 $\geq 85\%$ ^[28]。

2.1.3 玻璃质特性 (1) 一般描述。玻璃质特性适用于含有火山玻璃和其他源自火山喷发物的原生矿物并含有数量有限的短序矿物或有机—金属络合物的土层。(2) 诊断标准。玻璃质特性要求:①粒径 $0.02\sim 2\text{ mm}$ 的火山玻璃、玻璃态聚合物和其他玻璃包被的原生矿物的颗粒含量 $\geq 5\%$ (以颗粒数计);② $Al_{ox} + 1/2Fe_{ox}$ (草酸铵浸提 $Al + 1/2Fe$) $\geq 0.4\%$;③磷酸盐吸持量 $\geq 25\%$ ^[28]。

2.1.4 火山碎屑物质 (1) 一般描述。火山碎屑物质由火山碎屑,即火山喷发产生的松散、未风化或微风化的火成碎屑(包括火山灰、火山渣、火山砾、浮石、类浮石状多孔火山碎屑物、火山块和火山弹)组成,或由火山碎屑沉积物,即已经被搬运并与其他来源的物质混合的火山碎屑(包括火山碎屑黄土、火山碎屑风成砂土和火山冲积土)组成。(2) 诊断标准。火山碎屑物质要求:①粒径 $0.02\sim 2\text{ mm}$ 火山玻璃、玻璃态聚合物和玻璃包被的原生矿物的颗粒含量 $\geq 30\%$ (以颗粒数计);②无火山灰特性或玻璃质特性^[28]。

2.2 火山灰土土类检索标准的提出与修订

WRB 第一版(1998 年)中火山灰土土类的检索标准,将“地表 200 cm 以内,在漂白层、有机层、暗色表层、淡色层或厚度 $<50\text{ cm}$ 的人为层之下有灰化淀积层”^[26]的土壤认定为火山灰土;第二版(2006 年)提出火山灰土需要具有“火山灰特性”或“玻璃质特性”^[27],列出了较详细的检索标准,且提出几项特征层,使得判断更为方便;第三版(2014 年)增加了 1 项特征层,修改了检索标准的语序并将一些限定词更改为数学符号,使语言简洁流畅。火山灰土的检索标准如下:

其他土壤中,(1) ≥ 1 层具有火山灰特性或玻

璃质特性,在距地表 $\leq 100\text{ cm}$ 范围内,从距地表 $\leq 25\text{ cm}$ 开始,累积厚度 $\geq 30\text{ cm}$;或从地表 $>25\text{ cm}$ 开始到 $\leq 50\text{ cm}$ 之间,有连续岩石层、技术土壤物质层、胶结层或硬化层,则累积厚度 $\geq$ 土壤总厚度的 60% ;(2) 无黏化层、铁铝层、石化聚铁网纹层、底栖层、聚铁网纹层或灰化层,除非埋藏深度距矿物质土表 $>50\text{ cm}$ ^[28]。

2.3 火山灰土分类单元的提出与修订

WRB 对土类的划分只设定了二级分类单元。火山灰土是一级单元,其下设多个二级单元,命名规则是在火山灰土前加限定词。火山灰土的二级单元在每次修订中均有所增减和变化,第一版(1998 年)提出了 25 种主要特性限定类型;第二版(2006 年)将主要特性限定类型减少为 18 种,调整、增补补充特性限定类型 20 种;第三版(2014 年)将部分二级分类单元合并或列为互替,部分进行了增补删改,具体如下:

14 种主要特性限定类型:铝质/硅质(Aluandic/Silandic)火山灰土、玻璃质(Vitric)火山灰土、薄层(Leptic)火山灰土、潜育化/水耕(Hydragric/Anthraquic)火山灰土、潜育(Gleyic)火山灰土、渍水(Hydric)火山灰土、落叶/有机(Folic/Histic)火山灰土、暗黑/松软/暗色(Chernic/Mollic /Umbric)火山灰土、石化硅胶结/硅胶结(Petroduric/Duric)火山灰土、石膏(Gypsic)火山灰土、钙积(Calcic)火山灰土、粗骨(Skeletal)火山灰土、饱和硅质(Eutrosilic)火山灰土、不饱和/饱和(Dystic/Eutric)火山灰土。

26 种补充特性限定类型:氧化(Acroxic)火山灰土、原生暗色(Protoandic)火山灰土、砂质/黏质/壤质/泥沙质(Arenic/Clayic/Loamic/Siltic)火山灰土、耕作(Aric)火山灰土、堆积(Colluvic)火山灰土、白云质/石灰质(Dolomitic/Calcaric)火山灰土、排水(Drainic)火山灰土、冲积(Fluvic)火山灰土、脆磐(Fragic)火山灰土、暗黄/暗黑(Fulvic/Melanic)火山灰土、永冻(Gelic)火山灰土、高腐殖质(Hyperhumic)火山灰土、暗薄(Nechic)火山灰土、新成(Novic)火山灰土、融渍(Oxyaquic)火山灰土、薄层铁磐(Placic)火山灰土、还原性(Reductic)火山灰土、铁铝(Sideralic)火山灰土、钠质(Sodic)火山灰土、原生灰化(Protospodic)火山灰土、技术(Technic)火山灰土、原生火山碎

屑 (Prototephric) 火山灰土、触变性 (Thixotropic) 火山灰土、毒性 (Toxic) 火山灰土、搬运 (Transportic) 火山灰土和冻搅 (Turbic) 火山灰土^[28]。

3 CST 关于火山灰土的提出与修订

3.1 火山灰特性及其定量标准的提出与修订

“首次方案”提出火山灰土中交换性复合体以非晶物质占优势,主要是水铝英石、伊毛缟石和水硅铁石,伴有铝—腐殖质络合物^[8],早于美国 KST 第 5 版。对火山灰特性的诊断标准更侧重于物理性质,如颜色较深、壤质、结持松散、粘结性差、可塑性小、15 巴持水量与黏粒含量的比率 >1.0 、水分张力为 1/3 巴时细土部分容重 $\leq 0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、差热分析显示低温吸热等,但也提出了一定的化学性质,如有机碳含量 $>0.6\%$ 、pH 8.2 时每 100 g 黏粒的阳离子交换量 >150 毫克当量、或在土壤黏粒含量足以使 15 巴持水量 $\geq 20\%$ 时,将 1 g 土壤置于 50 mg 1N NaF 溶液中制成的悬液 pH >9.2 (2 min 后测定),并将火山灰特性细分为:火山灰质、火山渣质和玻璃质,以直径 $\geq 2 \text{ mm}$ 部分的含量按体积计大于或小于 35%,是否具有涂污结持等特点来区分^[7]。

“修订方案”对诊断标准进行了大幅度修订,去除了多数限定性的物理性质,仅保留了容重,但标准也有变化;新增了细土部分草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 的值,磷酸盐吸持量及火山玻璃含量作为诊断标准^[8]。

CST 检索修订了诊断标准,将“火山玻璃含量为 5%~30%”修改为“足够的火山玻璃含量”,并对 0.02~2.0 mm 粒级中火山玻璃含量与细土中草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 含量作图。CST 检索中的火山灰土诊断标准与 KST 第 7 版^[19] (1996 年) 大致相当,描述如下:

土壤中火山灰、火山渣或其他火山碎屑物占全土重量的 60%或更高,矿物组成中以水铝英石、伊毛缟石、水硅铁石等短序矿物占优势,伴有铝—腐殖质络合物的特性。除有机碳含量必须 $< 250 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外,还应具有下列之一或两个条件: (1) 细土部分的草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe} \geq 2.0\%$, 水分张力为 33 kPa 时的容重 $\leq 0.90 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 磷酸盐吸持 $\geq 85\%$; (2) 细土部分的磷酸盐吸持 $\geq 25\%$, 0.02~2.0 mm 粒级的含量 $\geq 300 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且满足: 草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe} \geq 0.40\%$, 0.02~2.0 mm 粒级中火山玻璃含量

$\geq 30\%$; 或草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe} \geq 2.0\%$, 0.02~2.0 mm 粒级中火山玻璃含量 $\geq 5\%$; 或草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 为 0.4%~2.0%, 0.02~2.0 mm 粒级中有足够的火山玻璃含量,当其与细土中草酸铵浸提 $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 含量作图时,火山玻璃含量则落在图中阴影范围内^[10]。

3.2 火山灰土土纲检索标准的提出与修订

“首次方案”引自 KST 第 4 版,对火山灰土土纲的检索同样提出了“连续厚度 $\geq 35 \text{ cm}$ 的全部亚层均有火山灰特性,”但增加了“累计厚度 $\geq 40 \text{ cm}$ ”这一条件,而且提出了“石质或准石质接触面”作为特征层,并根据中国土壤特点提出了“无与灰化淀积层有关的漂白层或其残迹”^[8]。“修订方案”精简了检索标准并修订了格式;CST 检索未进行修订,其描述程度处于 KST 第 4 版和第 5 版之间,具体如下:

其他土壤中占下列 60%或更厚的土层中有火山灰特性: (1) 若无石质或准石质接触面时,则在矿质土表至 60 cm 或具火山灰特性的有机层次顶部至 60 cm,两者取其较浅薄者;或 (2) 若有石质或准石质接触面时,则在矿质土表或具火山灰特性的有机层次顶部至浅于 60 cm 的石质或准石质接触面之间,两者取其较浅薄者^[10]。

3.3 火山灰土高级分类的提出与修订

火山灰土是“首次方案”中唯一未确认划分亚纲和只设 1 个土类的土纲,土类名称及其检索标准与土纲相同,其下划分为普通火山灰土、不饱和火山灰土和玻璃质火山灰土 3 个亚类^[8]。“修订方案”进行了大幅度修订,在火山灰土土纲下划分了寒冻火山灰土 (Cryic Andosols)、玻璃火山灰土 (Vitric Andosols) 和湿润火山灰土 (Udic Andosols) 3 个亚纲,进一步划分为 5 个土类,18 个亚类^[9]。CST 将寒冻火山灰土亚纲修改为寒性火山灰土亚纲,其下增设了寒冻寒性火山灰土土类,进一步增设了普通寒冻寒性火山灰土亚类。至此,火山灰土土纲增加至 3 个亚纲,6 个土类,19 个亚类^[10]。

4 讨 论

4.1 KST 关于火山灰特性限定的提出与修订

最初,KST 对火山灰特性仅有定量标准,在第 4 版中增加了“符合火山灰特性的土壤物质,有机碳含量必须 $< 25\%$ ”^[16]这一限定,并在之后的几个

版本中增加了其他限定。这是因为大多数火山灰土形成于火山碎屑物之上，但部分土壤具有较高的有机碳含量和无定形黏土矿物，水铝英石中的铝趋于固定和积累有机质，即使由草酸盐提取出高含量铝和铁的有机物质组成的土壤，也多是火山灰土而不是有机土。为了避免修改矿质土壤物质和有机土壤物质的定义，只有将火山灰土定义为：既能由矿质土壤物质组成又能由有机土壤物质组成，但有机碳含量不得超过 25%^[4]。

4.2 不同分类系统的火山灰特性的比较

KST 关于火山灰土的诊断标准是火山灰特性，经过多次修订，于 2006 年（第 10 版）提出了计算公式，使定量标准更直观。自 2006 年至第 12 版，未进行过再修订。目前，该诊断特性的描述相对简洁明确，方便应用。

WRB 的诊断标准较多，共由 3 个诊断特性——“火山灰暗黑层”、“火山灰特性”和“玻璃质特性”和 1 个诊断物质——“火山碎屑物质”组成，但综观其内容描述，与 KST 的诊断标准——火山灰特性相近，只是部分定量标准有所不同，尤其是没有定量的计算公式，未完全实现定量。

CST 中，火山灰土的诊断标准与 KST 第 7 版相当，缺乏对具有火山灰特性的土壤的表征的定性描述，对具有火山灰特性的土壤的诊断标准不够精准，文字表述“矿物组成中以水铝英石、伊毛缟石、水硅铁石等短序矿物占优势”不正确；未给出明确的定量计算公式，且语言表述较繁杂，其插图也不能正确表达火山灰特性与 $Al + 1/2Fe$ 含量和火山玻璃含量的关系，实践中难以应用。

4.3 不同分类系统的火山灰土分类检索的比较

KST 和 WRB 关于火山灰土的检索标准相差较大。KST 的检索范围只到 60 cm，而 WRB 的检索范围在 100 cm 以内，二者规定的符合诊断标准的土层的累计厚度亦不同。CST 中火山灰土的检索标准类似于 KST 第 5 版。

KST 和 WRB 的分类层级不同。KST 包括高级分类和基层分类共 6 个级别，其中高级分类设了 4 个级别，划分出了 7 个亚纲，26 个土类，201 个亚类。而 WRB 只设了 2 个级别。比较而言，KST 分类更加系统化，土壤类型也更加丰富。CST 采用 KST 方法对火山灰土进行高级分类，由于研究程度较低，土壤类型还比较匮乏，设置了 3 个亚纲，6 个土类，

19 个亚类，远低于 KST。

4.4 关于火山灰特性诊断标准的修订建议

建议将现行的 CST 中关于火山灰特性的诊断标准^[10]修订为：

火山灰特性一般是由火山碎屑或含有一定量火山玻璃的其他母质风化形成的，但无火山玻璃影响的土壤在冷凉、潮湿的气候条件和大量有机碳作用下，也可以发育为火山灰特性。火山玻璃包括一系列纯玻璃和包被着晶质矿物的玻璃。当土壤处于潮湿环境中，这些玻璃质矿物发生相对溶解，并且进行相当快速的转变。火山灰特性表征的是原始铝—硅酸盐（如：火山玻璃）的风化和转变只进行到形成水铝英石、伊毛缟石和水铁矿等短序矿物，或者是金属—腐殖质络合物的一个过渡阶段。火山灰特性的概念包括富含短序矿物或（和）金属—腐殖质络合物，含或不含火山玻璃的中度风化土壤；也包括含有火山玻璃，但短序矿物含量不高的弱风化土壤。

具有火山灰特性的土壤，可以是矿质土壤，也可以是有机碳含量 < 25% 的有机土壤。野外可以利用黏染性（土壤具有黏手的性质）或者 1 N NaF 浸提液的 pH 进行粗略鉴定。精确鉴定需要测定水铝英石、伊毛缟石、水铁矿、金属—腐殖质络合物和火山玻璃的相对含量。水铝英石、伊毛缟石、水铁矿、金属—腐殖质络合物的相对含量，由胶体组分中被草酸铵浸提的铝、铁、硅，以及磷酸盐吸持的实验室分析结果推算获得。火山玻璃含量通过计量粗粉粒至砂粒级（0.02~2.00 mm）组分中火山玻璃的百分含量（以颗粒数计）得到。

具有火山灰特性的土壤必须满足：细土部分有机碳含量 < 25%（质量百分比），且符合以下一条或两条：① 水分张力 33 kPa 时的容重 $\leq 0.90 \text{ g cm}^{-3}$ ，磷酸盐吸持量 $\geq 85\%$ ， $Al + 1/2Fe$ 含量（草酸铵浸提） $\geq 2.0\%$ ；② 细土部分 0.02~2.00 mm 粒级含量 $\geq 30\%$ ，磷酸盐吸持量 $\geq 25\%$ ， $Al + 1/2Fe$ 含量（草酸铵浸提） $\geq 0.4\%$ ，火山玻璃含量 $\geq 5\%$ ， $(Al + 1/2Fe) (\%) \times 15.625 + \text{火山玻璃含量} (\%) \geq 36.25$ 。

同时，将原插图^[10]修订为图 1。

5 结 论

将 CST 与国际上先进的土壤分类体系进行比较，发现 CST 关于火山灰土的诊断标准——火山灰

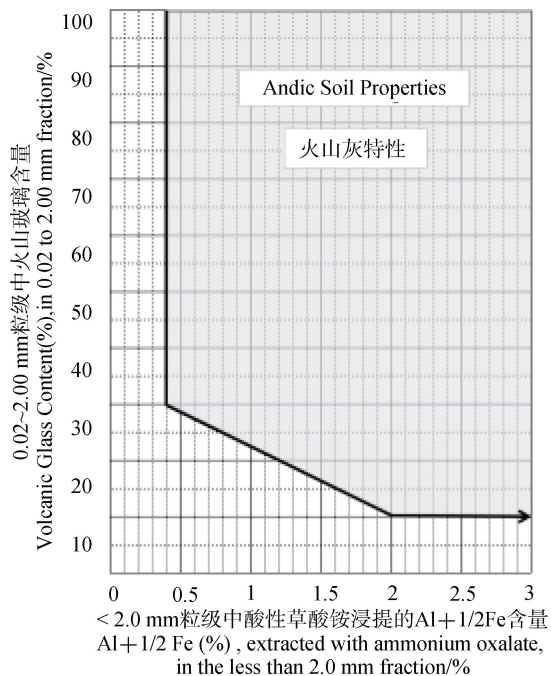


图 1 火山灰特性与 $\text{Al} + 1/2\text{Fe}$ 含量和火山玻璃含量的关系图

Fig. 1 Relationships of Andic soil properties with acid-oxalate-extractable aluminum +1/2 acid-oxalate-extractable iron and volcanic glass content

特性的界定和描述还存在一定的问题, 表现为: 诊断标准描述不够严谨; 语言表述不够简洁, 个别表述不当; 插图不能正确表达文字所表述的含义。导致该诊断标准在实践中难以应用。因此, 建议对 CST 中的火山灰特性进行修订。

参考文献 (References)

- [1] Soil Survey Staff. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys, 2nd ed. USDA/NRCS, Agriculture Handbook No. 436. Washington, D C, 1999
- [2] Xi C F. The formation and development of soil classification in the United States and Soil Taxonomy[J]. Progress in Soil Science, 1986, 14 (6): 1—8. [席承藩. 美国土壤分类与土壤系统分类的形成与发展[J]. 土壤学进展, 1986, 14 (6): 1—8.]
- [3] Cao S G. The progress of amendment to Soil Taxonomy[J]. Progress in Soil Science, 1993, 21 (6): 7—13. [曹升庚. 美国土壤系统分类修订进展[J]. 土壤学进展, 1993, 21 (6): 7—13.]
- [4] Witty J, Eswaran H, Luo G B. The development of American Soil Taxonomy[J]. Progress in Soil Science, 1991, 19 (6): 40—43. [Witty J, Eswaran H, 骆国保. 美国土壤系统分类的发展[J]. 土壤学进展, 1991, 19 (6): 40—43.]
- [5] Soil Geography and Soil Classification Committee of China Soil Science Society. Provisional Draft for China Soil Classification[M]. Hangzhou: Zhejiang People's Press, 1979. [中国土壤学会土壤地理及土壤分类专业委员会. 中国土壤分类暂行草案 (1978) [M]. 杭州: 浙江人民出版社, 1979.]
- [6] Office of National Soil Survey. Soils of China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 1246. [全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1246.]
- [7] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy (1st scheme) [M]. Beijing: Science Press, 1991. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类 (首次方案) [M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [8] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. Keys to Chinese Soil Taxonomy (Revised proposal) [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technique Press, 1995. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类 (修订方案) [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995.]
- [9] Gong Z T. Chinese soil system classification: Theory, method and practice[M]. Beijing: Science Press, 1999. [龚子同. 中国土壤系统分类: 理论·方法·实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999.]
- [10] Chinese Soil Taxonomy Research Group, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Cooperative Research Group on Chinese Soil Taxonomy. The Retrieval System for China Soil Classification[M]. 3rd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001. [中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 第 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.]
- [11] Gong Z T. The establishment of World Reference Base for Soil Resources (WRB) and its soil classification[J]. Progress in Soil Science, 1995, 23 (5): 21—27. [龚子同. 世界土壤资源参比基础 (WRB) 的创立及其土壤分类[J]. 土壤学进展, 1995, 23 (5): 21—27.]
- [12] Gong Z T, Chen Z C, Zhang G L. World Reference Base for Soil Resources (WRB): Establishment and Development[J]. Soils, 2003, 35 (4): 271—278. [龚子同, 陈志诚, 张甘霖. 世界土壤资源参比基础 (WRB): 建立和发展[J]. 土壤, 2003, 35 (4): 271—278.]
- [13] Schad P. Technosols in the World Reference Base for Soil Resources—History and definitions[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2018, 64 (2): 138—144.

- [14] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 3th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1987.
- [15] Gu X Y. Properties and taxonomy of soils developed from volcanic ejecta in Changbai mountains[D]. Shenyang Agricultural University, 2013. [顾欣燕. 长白山山脉火山喷出物发育土壤特性及系统分类研究[D]. 沈阳农业大学, 2013.]
- [16] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 4th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1990.
- [17] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 5th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1992.
- [18] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 6th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1994.
- [19] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 8th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1998.
- [20] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 9th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 2003.
- [21] Yuan D G, Zhang G L.Updating of soil taxonomy[J]. Soils, 2005, 37 (2): 136—139. [袁大刚, 张甘霖.美国土壤系统分类最新修订[J].土壤, 2005, 37 (2): 136—139.]
- [22] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 10th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 2006.
- [23] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 7th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 1996.
- [24] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M].11th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 2010.
- [25] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 12th ed. Soil Survey Staff. USDA/NRCS. Washington, DC, 2014.
- [26] FAO. World reference base for soil resources , by ISSS-ISRIC-FAO[M]. World Soil Resources Reports No. 84, FAO, Rome. 1998.
- [27] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2006[M]. Prepared by Micheli E, Schad P, Spaargaren O. 128. World Soil Resources Reports No. 103, FAO, Rome. 2006.
- [28] IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2014, update 2015[M]. Prepared by Schad P, van Huyssteen C, Micheli E. 192. World Soil Resources Reports No. 106, FAO, Rome. 2015.

(责任编辑：檀满枝)