

青海东部黄土区林地土壤系统分类及参比^①

陈琳¹, 耿玉清^{1*}, 范秋运¹, 韩湘¹, 师发苗², 郭霞²

(1 北京林业大学林学院森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2 互助土族自治县林业和草原站, 青海海东 810500)

摘要: 为探讨林地土壤形成特征和在中国系统分类中的归属, 以青海东部互助县黄土区 9 个典型林地土壤为研究对象, 基于《中国土壤系统分类检索》(第三版), 鉴定其诊断层和诊断特性, 并将分类结果与中国土壤发生分类、美国土壤系统分类和世界土壤资源参比基础进行参比。结果表明: 研究区林地土壤可归属为石质干润正常新成土、普通筒育干润均腐土、斑纹筒育湿润均腐土、普通钙积干润均腐土、钙积筒育干润锥形土、普通暗沃干润锥形土和普通筒育干润锥形土 7 个亚类。其中, 3 个灰褐土剖面分别归属于中国土壤系统分类的 2 个土纲、2 个亚纲和 2 个土类; 4 个栗钙土剖面分别归属于中国土壤系统分类的 2 个土纲、2 个亚纲和 2 个土类。与其他分类相比, 中国土壤系统分类在设置上充分考虑了腐殖质分布的特征, 更适用于天然林土壤类型的划分, 也可有效减少发生分类中栗钙土同名异土情况。

关键词: 林地土壤; 系统分类; 灰褐土; 栗钙土; 分类参比

中图分类号: S714.4 **文献标志码:** A

Soil Taxonomy and Reference Study of Woodland in Loess Area of the Eastern Region of Qinghai Province

CHEN Lin¹, GENG Yuqing^{1*}, FAN Qiuyun¹, HAN Xiang¹, SHI Famiao², GUO Xia²

(1 Key Laboratory for Forest Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Huzhu Tu Autonomous County Forestry and Grassland Station, Haidong, Qinghai 810500, China)

Abstract: To investigate woodland soil formation characteristics and the classification attribution in the Chinese Soil Taxonomy (CST), 9 woodland soil profiles were selected in Loess Area of the eastern region of Qinghai Province. Based on the principle and methodologies of *Keys to Chinese Soil Taxonomy* (Third Edition), the diagnostic horizons and diagnostic characteristics were identified, and further reference to the Chinese Soil Genetic Classification, USA Soil Taxonomy and World Reference Base for Soil Resources, respectively. The results showed that woodland soils studied were sorted into 7 subgroups including Lithic Ustic-Orthic Primosols, Typic Hapli-Ustic Isohumosols, Mottlic Hapli-Udic Isohumosols, Typic Calci-Ustic Isohumosols, Calcic Hapli-Ustic Cambosols, Typic Molli-Ustic Cambosols and Typic Hapli-Ustic Cambosols. In which 3 Gray-cinnamon soils profiles were classified into 2 orders, 2 suborders and 2 groups; the 4 Castanozems soils profiles were classified into 2 orders, 2 suborders and 2 groups in CST. The distribution characteristics of soil humus horizon are paid attention in CST and more apply to classification of the natural forest soil compared to USA Soil Taxonomy and World Reference Base for Soil Resources, meanwhile, it can also reduce the phenomena of different soils with the same soil name especially for Castanozems.

Key words: Woodland soil; Soil taxonomy; Gray-cinnamon; Castanozems; Reference of soil taxa

土壤分类是土壤调查的基础, 是土壤信息交流的媒介, 也是土壤资源管理和利用的依据。中国土壤发生分类(Genetic soil classification of China, GSCC)是以地理发生为中心思想而建立的, 在全国第二次土壤

普查后作为国标在全国推荐使用^[1], 且也用于 2022 年开始的第三次全国土壤普查。然而随着土壤分类学的发展, 土壤系统分类逐渐成为国际土壤分类的主流, 我国也建立了相应的中国土壤系统分类(Chinese

①基金项目: 青海省财政支农林草改革发展资金新技术推广项目(青林技[2020]17)资助。

* 通信作者(gengyuqing@bjfu.edu.cn)

作者简介: 陈琳(1998—), 女, 山东日照人, 硕士, 主要研究方向为森林土壤。E-mail: chen0809105@163.com

soil taxonomy, CST)^[2]。基于 GSCC 对我国影响深远,且积累了丰富的土壤数据资料,不少学者围绕土壤高级分类单元,针对不同区域土壤^[3-4]以及一些土纲和土类^[5-6]进行了 GSCC 和 CST 的参比研究。然而由于成土环境的复杂性以及土壤特征变化的多样性,至今国际上还未有统一的分类系统。以土壤诊断层和诊断特性为基础的美国土壤系统分类(USA soil taxonomy, ST),极大地影响了世界土壤分类的格局^[7]。世界土壤资源参比基础(World reference base for soil resources, WRB)也以土壤诊断层和诊断特性为基础,充分吸取各国土壤学家的智慧,着眼于世界新的分类系统,使其能在名称上更直观地体现土壤的特征^[8-9]。目前,ST 和 WRB 已成为国际土壤分类的主流,被广泛应用于世界各个国家土壤分类系统之间的参比,成为土壤交流的工具^[10-11]。为促进我国土壤学科对外交流和发展,一些学者开展了 GSCC 与 WRB 和 ST 进行参比的研究^[12-13]。

青海省在全国第二次土壤普查中积累了丰富的土壤资料^[14]。《中国土系志·青海卷》^[15]的出版,推动了青海省土壤系统分类的研究。然而由于研究条件的限制,对青海地区土壤系统分类的研究,主要集中在耕地和草地中,而对于林地土壤的研究非常缺乏,如《中国土系志·青海卷》^[15]中林地剖面仅 2 个,占土系总数的 1.24%。有限的林地样点不仅难以代表类型多样的林地土壤,也影响了土壤系统分类的广泛应用。青海东部黄土区,西起日月山东麓,东至乌鞘岭,南起拉脊山,北至达坂山,涉及大通河流域、湟水流域和黄河流域^[16]。由于黄土疏松且垂直节理发达,使得该区域水土流失严重,生态环境脆弱。林地承担着涵养水源、保持水土、防风固沙等多种生态功能,在生态环境建设中,全面提高林地资源质量已迫在眉睫。随着天然林保护和退耕还林(草)等生态工程的实施,对林地土壤的研究也提上了议事日程。针

对林地土壤系统分类研究比较薄弱,本研究以林地资源丰富的互助土族自治县为研究区,探讨林地土壤在中国系统分类中的位置,并与不同土壤分类系统进行参比研究,以服务于对外土壤信息的学术交流,也可为中国土壤分类系统的修订和完善提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

青海省互助县地处祁连山南麓,属于典型的次生黄土区,平均海拔 2 530 m,在长期的地质作用下,形成了高山峡谷、低山丘陵、沟谷滩地、黄土和红土丘陵的复杂地貌。该区属典型的大陆性寒温带半干旱气候,年均气温为 5℃,年降水量为 400~550 mm,年均蒸发量为 1 260 mm,林地植被类型丰富,天然次生林植被主要有祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*)、白桦(*Betula platyphylla*)和青海云杉(*Picea crassifolia*),人工林植被主要有青杨(*Populus cathayana*)和油松(*Pinus tabulaeformis*),此外,还有柠条(*Caragana korshinskii*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)等灌丛。2022 年互助县林地面积约 16.7 万 hm²,占土地总面积 49.76%。林地土壤类型主要有栗钙土和灰褐土等。受地质构造的影响,成土母质主要为次生黄土、红土以及岩石风化后的残积、坡积和洪积母质。

1.2 样地确定

结合互助县行政区划图以及历史土壤调查资料,在充分考虑林地植被的典型性、代表性,以及在充分调查的基础上,于 2020 年和 2021 年选择了 9 个典型林地样地,其中,4 个为乔木林地(FL),分别是祁连圆柏林地、青海云杉林地和白桦天然林地以及青杨人工林地,2 个为灌木林地(SL)和 3 个未成林造林地(IFL)。在选定的样地挖掘土壤剖面,并用 GPS 进行定位和记录相关环境信息(表 1)。

表 1 研究区林地土壤剖面基本信息
Table 1 Basic informations of woodland soil profiles studied

| 剖面 | 植被类型 | 地理坐标 | 海拔(m) | 母质 | 土地利用类型 | 小地形 | 土类(发生分类) |
|--------|------|-------------------------------|-------|----------|--------|-----|----------|
| FL-01 | 祁连圆柏 | 36°44'25.55"N, 102°16'55.36"E | 3 175 | 千枚岩风化坡积物 | 乔木林地 | 坡地 | 灰褐土 |
| FL-02 | 青海云杉 | 36°59'34.68"N, 101°51'50.47"E | 2 895 | 冲积-洪积物 | 乔木林地 | 坡地 | 灰褐土 |
| FL-03 | 白桦 | 36°55'29.16"N, 102°04'48.12"E | 2 886 | 次生黄土 | 乔木林地 | 坡地 | 灰褐土 |
| FL-04 | 青杨 | 36°47'51.17"N, 102°03'40.18"E | 2 717 | 新近纪红土 | 乔木林地 | 阶地 | 栗钙土 |
| SL-01 | 金露梅 | 37°01'18.33"N, 102°02'06.73"E | 3 264 | 冲积-洪积物 | 灌木林地 | 谷地 | 草毡土 |
| SL-02 | 柠条 | 36°44'18.05"N, 101°47'18.59"E | 2 642 | 次生黄土 | 灌木林地 | 坡地 | 栗钙土 |
| IFL-01 | 祁连圆柏 | 36°59'46.01"N, 101°58'24.14"E | 2 962 | 次生黄土 | 未成林造林地 | 坡地 | 栗钙土 |
| IFL-02 | 油松 | 36°37'23.21"N, 101°52'31.09"E | 2 286 | 次生黄土 | 未成林造林地 | 坡地 | 栗钙土 |
| IFL-03 | 油松 | 36°36'25.29"N, 102°09'47.41"E | 3 057 | 砂岩风化坡积物 | 未成林造林地 | 坡地 | 石质土 |

1.3 样品采集与测定

在充分踏勘选定的样地上,挖掘宽 1.2 m、深 1.0 ~ 1.5 m 的土壤剖面,经修整后拍照(图 1)。依据《野外土壤描述与采样手册》^[17]划分土壤剖面发生层并采样,同时记录各发生层形态特征。采集的土壤样品,风干后用于物理化学性质的测定。其中,土壤颗粒组成采用吸管法测定, pH 采用电位法测定(土水质量比 1 : 2.5),电导率(EC)采用电导仪测定

(水土质量比 5 : 1),全氮采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定,有机碳采用浓硫酸-重铬酸钾氧化水合热法测定,碳酸钙相当物采用气量法测定,阳离子交换量(CEC)采用乙酸铵-EDTA 交换-蒸馏法测定,交换性盐基采用氯化铵-乙醇交换-原子吸收分光光度计法/火焰光度计法测定,盐基饱和度=(交换性盐基离子总量/阳离子交换量)×100%。具体分析测定方法详见文献[18]。

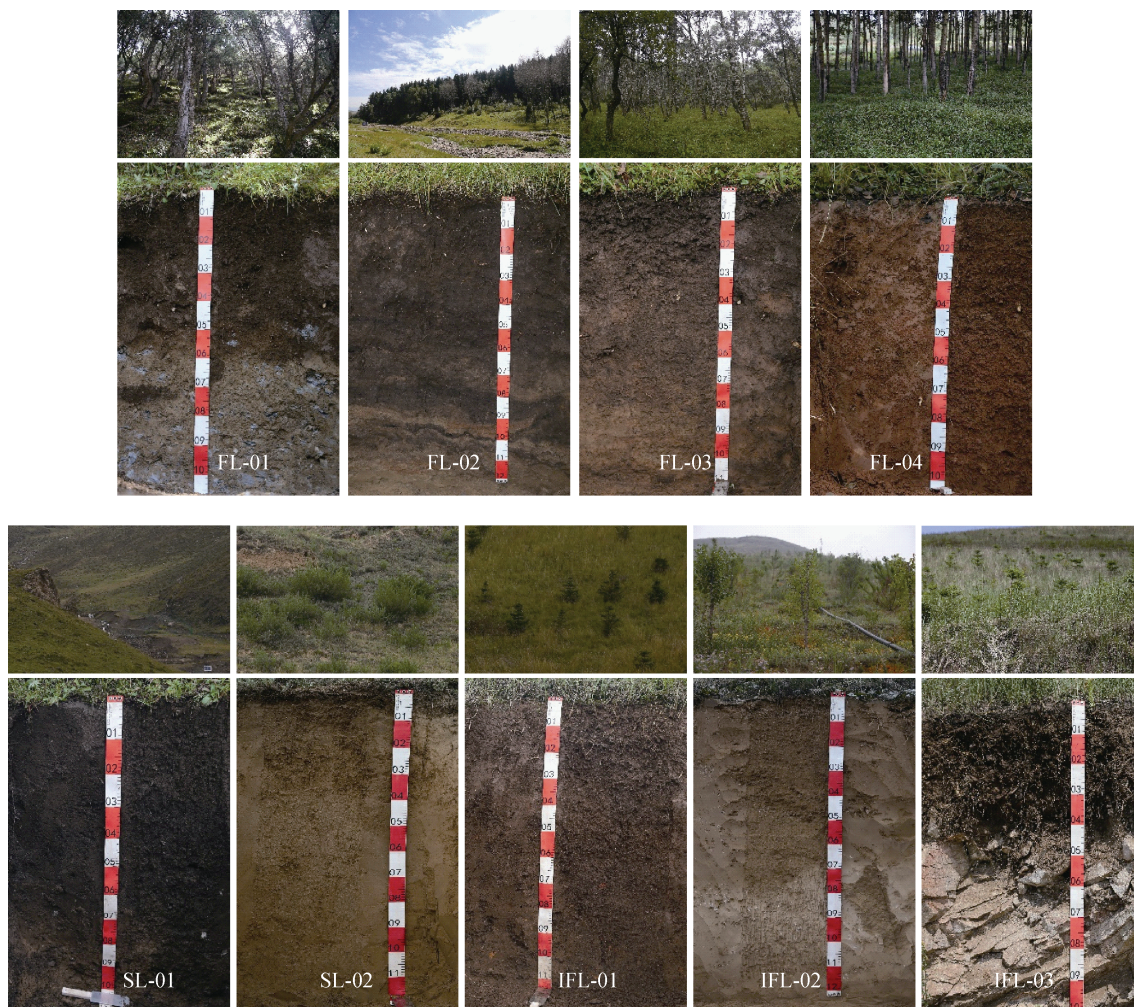


图 1 研究区林地土壤剖面及其景观照

Fig. 1 Landscape and profile images of woodland soil profiles studied

2 结果与分析

2.1 林地土壤剖面不同发生层的形态特征

研究区不同林地土壤剖面的发生层形态特征有一定差异(表 2)。除 FL-04 剖面土壤颜色为 5YR 外,其余剖面均以棕色 10YR 和 7.5YR 为主,干态和润态的明度分别为 3 ~ 6 和 2 ~ 5,而彩度则介于 2 ~ 6 和 2 ~ 4。土壤表层结构以团粒状为主,其他层次以块状或团块状为主。大部分剖面的土壤结持性由表层土壤

松软向下逐渐稍坚硬和坚硬。FL-02 剖面有铁锰斑纹, SL-02、IFL-01 和 IFL-02 剖面有可辨别的次生碳酸盐假菌丝体和粉末。除 FL-02、FL-03 和 SL-01 剖面无石灰反应外,其余剖面通体均有强度不同的石灰反应。

2.2 林地土壤剖面主要理化性质

研究区不同林地土壤剖面的颗粒组成差异明显(表 3)。从土壤颗粒组成来看,不同土壤剖面均以粉砂为主,砂粒含量为 75.49 ~ 812.17 g/kg,而黏粒含

表 2 研究区林地土壤剖面形态特征
Table 2 Morphological characteristics of woodland soil profiles studied

| 剖面 | 发生层 | 深度(cm) | 颜色(干) | 颜色(润) | 结构 | 土壤结 持性 | 新生体 | 石灰 反应 |
|--------|-----|----------|------------|--------------|----------|-----------|-------------|----------|
| FL-01 | Oi | +4 ~ 0 | — | — | — | — | — | — |
| | Ah | 0 ~ 22 | 10YR(3/3) | 10YR(3/2) | 团粒状 | 松散 | — | 轻 |
| | Bw1 | 22 ~ 40 | 10YR(3/4) | 10YR(2/2) | 团粒状-小团块状 | 松软 | — | 轻 |
| | Bw2 | 40 ~ 57 | 10YR(3/4) | 10YR(2/2) | 块状 | 松软 | — | 轻 |
| | 2C | 57 ~ 100 | 7.5YR(5/2) | 7.5YR(3/3) | 块状 | 坚硬 | — | 中等 |
| FL-02 | Oi | +5 ~ 0 | — | — | — | — | — | — |
| | Ah1 | 0 ~ 26 | 10YR(4/2) | 10YR(2/2) | 团粒状 | 稍坚硬 | — | 无 |
| | Ah2 | 26 ~ 40 | 10YR(3/3) | 10YR(2/2) | 团粒状-小团块状 | 松软 | — | 无 |
| | Bw1 | 40 ~ 65 | 10YR(3/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松软 | — | 无 |
| | Bw2 | 65 ~ 84 | 10YR(3/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松软 | — | 无 |
| | 2Cr | 84 ~ 113 | 10YR(5/4) | 10YR(3/4) | — | — | 铁锰斑纹 | 无 |
| FL-03 | Oi | +3 ~ 0 | — | — | — | — | — | — |
| | Ah1 | 0 ~ 13 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 团粒状 | 松散 | — | 无 |
| | Ah2 | 13 ~ 26 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 团粒状-小团块状 | 松散 | — | 无 |
| | Bw1 | 26 ~ 42 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松散 | — | 无 |
| | Bw2 | 42 ~ 74 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松软 | — | 无 |
| | C | 74 ~ 105 | 10YR(5/6) | 10YR(3/4) | 块状 | 松软 | — | 无 |
| FL-04 | Ah | 0 ~ 5 | 5YR(4/6) | 5YR(4/4) | 团粒状-小团块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | AB | 5 ~ 14 | 5YR(4/6) | 5YR(4/4) | 块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | Bw1 | 14 ~ 38 | 5YR(4/6) | 5YR(4/4) | 块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | Bw2 | 38 ~ 85 | 5YR(4/6) | 5YR(4/4) | 块状 | 坚硬 | — | 强 |
| | C | 85 ~ 100 | 5YR(4/6) | 5YR(3/4) | 块状 | 坚硬 | — | 强 |
| SL-01 | Ah | 0 ~ 23 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 团粒状 | 松散 | — | 无 |
| | Bw | 23 ~ 66 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松散 | — | 无 |
| | C | 66 ~ 100 | 7.5YR(4/4) | 7.5YR(2.5/3) | 块状 | 松软 | — | 无 |
| SL-02 | Ah1 | 0 ~ 5 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 团粒-小团块状 | 松散 | — | 强 |
| | Ah2 | 5 ~ 32 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 块状 | 坚硬 | — | 强 |
| | Bk | 32 ~ 71 | 10YR(6/4) | 10YR(5/4) | 块状 | 稍坚硬 | 碳酸钙粉末 | 强 |
| | C | 71 ~ 110 | 10YR(6/3) | 10YR(4/3) | 块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| IFL-01 | Ah1 | 0 ~ 25 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 团粒状 | 松软 | — | 强 |
| | Ah2 | 25 ~ 34 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 团粒状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | Bw | 34 ~ 83 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | Bk | 83 ~ 110 | 10YR(5/4) | 10YR(4/3) | 块状 | 坚硬 | 碳酸钙假菌丝 体 | 强 |
| IFL-02 | Ah | 0 ~ 10 | 10YR(6/4) | 10YR(5/4) | 团粒状-小团块状 | 松软 | — | 强 |
| | Bk1 | 10 ~ 46 | 10YR(6/4) | 10YR(5/4) | 小块状 | 稍坚硬 | — | 强 |
| | Bk2 | 46 ~ 80 | 10YR(6/4) | 10YR(5/4) | 小块状 | 坚硬 | 碳酸钙粉末 | 强 |
| | Bk3 | 80 ~ 120 | 10YR(6/4) | 10YR(5/4) | 小块状 | 坚硬 | 碳酸钙粉末 | 强 |
| IFL-03 | Ah1 | 0 ~ 10 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松散 | — | 中等 |
| | Ah2 | 10 ~ 29 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松散 | — | 中等 |
| | C | 29 ~ 45 | 10YR(4/3) | 10YR(2/2) | 块状 | 松散 | — | — |
| | R | >45 | — | — | — | — | — | — |

量为 45.03 ~ 349.32 g/kg。FL-01、FL-03、FL-04 和 IFL-02 剖面,上覆 Ah 层黏粒含量为 95.94、117.67、296.31 和 117.76 g/kg, 占总黏粒含量的 25%~40%, B 层黏粒含量的增量比上覆层均小 20%;其余剖面上覆 Ah 层的黏粒含量为总黏粒含量的 40%~60%, B 层黏粒含量的增量比上覆层均小 8%;且所有剖面野外未观测到黏粒胶膜, 因此供试剖面中均无黏化层。

总体上,不同土壤剖面土壤质地以粉砂壤土为主,除 FL-03 和 IFL-01 剖面外,其他剖面不同土层的质地通体一致。

土壤化学性质的分析结果显示,除 FL-02 和 FL-03 剖面外,其余土壤剖面均 pH>7, 被认定为盐基饱和(表 3)。对 pH<7 的土壤剖面测定后发现,盐基饱和度介于 52.64%~96.83%,也呈盐基饱和状态。

表 3 研究区林地土壤剖面的主要理化性质
Table 3 Major physiochemical properties of woodland soil profiles studied

| 剖面 | 发生层 | 黏粒 (g/kg) | 质地 | pH | EC (dS/m) | 有机碳 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | C/N | CaCO ₃ (g/kg) | CEC (cmol/kg) | 盐基总量 (cmol/kg) |
|--------|-----|--------------|-------|------|--------------|---------------|--------------|-------|-----------------------------|------------------|-------------------|
| FL-01 | Ah | 95.94 | 粉砂壤土 | 8.00 | 0.16 | 52.73 | 2.61 | 20.20 | 15.84 | — | — |
| | Bw1 | 98.66 | 粉砂壤土 | 8.21 | 0.17 | 40.85 | 1.93 | 21.17 | 19.31 | — | — |
| | Bw2 | 104.35 | 粉砂壤土 | 8.43 | 0.14 | 23.39 | 1.90 | 12.31 | 27.63 | — | — |
| | 2C | 76.06 | 粉砂壤土 | 8.61 | 0.11 | 5.79 | 1.86 | 3.11 | 63.12 | — | — |
| FL-02 | Ah1 | 125.94 | 粉砂壤土 | 6.18 | 0.10 | 67.79 | 4.16 | 16.29 | 1.30 | 41.60 | 24.31 |
| | Ah2 | 166.01 | 粉砂壤土 | 6.54 | 0.06 | 58.14 | 3.57 | 16.27 | 0.75 | 37.80 | 23.50 |
| | Bw1 | 124.28 | 粉砂壤土 | 6.60 | 0.08 | 38.80 | 3.18 | 12.20 | 1.02 | 34.16 | 22.77 |
| | Bw2 | 118.42 | 粉砂壤土 | 6.07 | 0.09 | 17.82 | 1.66 | 10.73 | 1.26 | 20.84 | 20.18 |
| | 2Cr | 143.84 | 粉砂壤土 | 6.47 | 0.09 | 13.07 | 2.32 | 5.63 | 2.64 | 41.60 | 24.31 |
| FL-03 | Ah1 | 117.67 | 粉砂壤土 | 6.66 | 0.07 | 62.41 | 3.68 | 16.96 | 1.68 | 47.02 | 24.94 |
| | Ah2 | 121.74 | 粉砂壤土 | 6.76 | 0.05 | 57.25 | 3.21 | 17.83 | 1.70 | 46.44 | 24.60 |
| | Bw1 | 140.57 | 粉砂壤土 | 6.99 | 0.05 | 46.24 | 2.79 | 16.56 | 2.83 | 44.70 | 23.53 |
| | Bw2 | 133.25 | 粉砂壤土 | 7.25 | 0.05 | 25.66 | 1.84 | 13.95 | 2.49 | — | — |
| | C | 72.16 | 壤土 | 7.44 | 0.04 | 7.44 | 1.66 | 4.48 | 2.26 | — | — |
| FL-04 | Ah | 296.31 | 黏壤土 | 8.71 | 0.17 | 5.21 | 2.82 | 1.85 | 149.45 | — | — |
| | AB | 336.72 | 黏壤土 | 8.63 | 0.16 | 3.92 | 2.56 | 1.53 | 150.96 | — | — |
| | Bw1 | 330.42 | 黏壤土 | 8.63 | 0.14 | 1.47 | 1.98 | 0.74 | 170.99 | — | — |
| | Bw2 | 342.86 | 黏壤土 | 8.78 | 0.13 | 0.46 | 1.75 | 0.26 | 166.28 | — | — |
| | C | 349.32 | 黏壤土 | 8.75 | 0.14 | 0.41 | 1.73 | 0.24 | 162.32 | — | — |
| SL-01 | Ah | 133.52 | 粉砂壤土 | 7.15 | 0.11 | 31.14 | 1.87 | 16.65 | 1.49 | — | — |
| | Bw | 98.54 | 粉砂壤土 | 7.42 | 0.10 | 21.15 | 1.25 | 16.92 | 1.66 | — | — |
| | C | 81.55 | 粉砂壤土 | 7.75 | 0.04 | 10.21 | 1.10 | 9.28 | 0.54 | — | — |
| SL-02 | Ah1 | 54.81 | 粉砂壤土 | 8.11 | 0.05 | 6.46 | 1.01 | 12.34 | 146.15 | — | — |
| | Ah2 | 45.03 | 粉砂壤土 | 8.07 | 0.15 | 5.39 | 0.63 | 8.56 | 160.36 | — | — |
| | Bk | 58.51 | 砂质壤土 | 8.31 | 0.45 | 2.34 | 0.53 | 4.42 | 151.42 | — | — |
| | C | 56.99 | 粉砂壤土 | 8.53 | 0.39 | 0.31 | 0.52 | 0.60 | 144.65 | — | — |
| IFL-01 | Ah1 | 230.92 | 粉砂黏壤土 | 8.46 | 0.11 | 20.47 | 2.60 | 7.87 | 117.94 | — | — |
| | Ah2 | 186.30 | 粉砂黏壤土 | 8.54 | 0.10 | 15.8 | 2.25 | 7.02 | 120.03 | — | — |
| | Bw | 167.67 | 粉砂黏壤土 | 8.57 | 0.11 | 16.35 | 2.18 | 7.50 | 113.15 | — | — |
| | Bk | 103.69 | 粉砂壤土 | 8.42 | 0.15 | 17.72 | 2.76 | 6.42 | 112.26 | — | — |
| IFL-02 | Ah | 117.76 | 粉砂壤土 | 7.83 | 1.8 | 4.3 | 0.65 | 6.62 | 117.76 | — | — |
| | Bk1 | 136.22 | 粉砂壤土 | 8.03 | 1.85 | 2.27 | 0.50 | 4.54 | 129.64 | — | — |
| | Bk2 | 76.58 | 粉砂壤土 | 8.11 | 2.10 | 1.80 | 0.50 | 3.60 | 130.27 | — | — |
| | Bk3 | 55.49 | 粉砂壤土 | 8.41 | 2.29 | 1.71 | 0.59 | 2.90 | 139.88 | — | — |
| IFL-03 | Ah1 | 129.46 | 粉砂壤土 | 7.90 | 0.05 | 39.91 | 1.41 | 28.30 | 83.48 | — | — |
| | Ah2 | 150.60 | 粉砂壤土 | 7.93 | 0.05 | 32.03 | 1.44 | 22.24 | 86.41 | — | — |

不同土壤剖面的电导率主要在 0.5 dS/m 以下，仅 IFL-02 剖面的电导率超 1 dS/m。不同土壤剖面的有机碳表聚特征较为明显，且含量差异明显，其中，FL-01、FL-02 和 FL-03 剖面地表凋落物积累丰富，表层有机碳含量较高，介于 52.73 ~ 67.79 g/kg。不同土壤剖面全氮含量介于 0.50 ~ 4.16 g/kg，且大部分剖面全氮含量随土层加深而降低。不同土壤剖面 C/N

介于 0.24 ~ 28.30。各剖面碳酸钙含量差异较大，其中 FL-04、SL-02、IFL-01 和 IFL-02 剖面碳酸钙含量较高，均超过 100 g/kg，且底层含量显著高于表层。

2.3 林地土壤诊断层及诊断特性的鉴定

根据《中国土壤系统分类检索》(第三版)^[2]，结合野外调查及分析结果，对研究区林地土壤特征进行检索，明确土壤所具有的诊断层和诊断特性，结果见表 4。

表 4 研究区林地土壤剖面诊断层和诊断特性
Table 4 Diagnostic horizons and diagnostic characteristics of woodland soil profiles studied

| 剖面 | 诊断层 | | | | 诊断特性 | | | | | | |
|--------|----------|----------|-----|-----|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----|
| | 暗沃表 层 | 淡薄表 层 | 雏形层 | 钙积层 | 岩性特征 | 石质接 触面 | 土壤水 分状况 | 土壤温 度状况 | 氧化还 原特征 | 均腐殖 质特征 | 石灰性 |
| FL-01 | √ | | √ | | 北方红土 岩性 | | 半干润 | 冷性 | | | √ |
| FL-02 | √ | | √ | | | | 半干润 | 冷性 | | √ | |
| FL-03 | √ | | √ | | | | 半干润 | 冷性 | | √ | |
| FL-04 | | √ | √ | | | | 半干润 | 冷性 | | | √ |
| SL-01 | √ | | √ | | | | 潮湿 | 冷性 | √ | √ | |
| SL-02 | | √ | √ | √ | | | 半干润 | 冷性 | | | √ |
| IFL-01 | √ | | √ | √ | | | 半干润 | 冷性 | | √ | √ |
| IFL-02 | | √ | √ | √ | | | 半干润 | 冷性 | | √ | √ |
| IFL-03 | √ | | | | | √ | 半干润 | 冷性 | | | √ |

研究区林地土壤诊断层包括 4 个：①暗沃表层，FL-01、FL-02、FL-03、SL-01 和 IFL-01 剖面的 Ah 层厚度均大于 18 或 25 cm，润态明度为 2 ~ 4，干态明度为 3 ~ 5，润态彩度为 2 ~ 3，并且干、润态明度比 C 层低 1 个 Munsell 单位，干、润态彩度比 C 层低 2 个 Munsell 单位，有机碳含量均大于 6 g/kg，盐基饱和，均为团粒状，故为暗沃表层；②淡薄表层，FL-04、SL-02 和 IFL-02 剖面的 Ah 层有机碳含量小于 6 g/kg，为淡薄表层；③雏形层，除 IFL-03 剖面未见 B 层外，其余剖面均满足 B 层大于 10 cm，质地较细且无特殊土层的条件，符合雏形层的定义；④钙积层，SL-02 剖面的 Bk 层(32 ~ 71 cm)厚度大于 15 cm 且未胶结成钙磐，碳酸钙相当物含量大于 150 g/kg，并且可辨认的次生碳酸盐按体积计大于 5%，IFL-01 剖面的 Bk 层和 IFL-02 剖面的 Bk1、Bk2 和 Bk3 层，均能辨认出碳酸钙新生体，因此上述 3 个剖面具有钙积层。

诊断特性包括 6 类：①岩性特征，FL-04 剖面残留古红土母质，具有北方红土岩性特征；②石质接触面，IFL-03 剖面下部为基岩，坚硬难以挖开，具有石质接触面特征；③土壤水分状况，SL-01 剖面位于河谷地带，由于常年性的流水，使得土壤下层水分饱和，且土体润态彩度 ≤ 2，具有氧化还原特征，故为

潮湿土壤水分状况，而其余剖面地处坡地，根据《中国土系志·青海卷》^[15]、青海气候区划各级指标^[19]和 Penman 经验公式，均为半干润土壤水分状况；④土壤温度状况，根据纬度和海拔数据，计算各样点 50 cm 深度的土温^[20]，介于 6.0 ~ 8.9 °C，计算各样点 40 cm 深度的土温^[21]，介于 3.8 ~ 7.5 °C，而 40 cm 和 50 cm 深度土温的最大差距 ≤ 0.4 °C^[22]，因此，研究区不同林地土壤剖面均为冷性土壤温度状况；⑤氧化还原特征，SL-01 剖面土壤水分饱和，剖面虽然无斑纹，但土体的润态彩度 ≤ 2，具有氧化还原特征；⑥均腐殖质特性，除 FL-01、SL-02 和 IFL-03 剖面外，其余剖面的 Rh 值均小于 0.4，并且土体上部无有机现象且 C/N < 17，具有均腐殖质特性；⑦石灰性，除 FL-02、FL-03 和 SL-01 剖面碳酸钙含量小于 10 g/kg，其余剖面的碳酸钙含量均高于 10 g/kg 且有石灰反应，符合石灰性的诊断特性。

2.4 林地土壤在 CST 中的归属与参比

依据成土因素中的生物气候条件，结合土壤性状，将研究区低海拔“浅山”地带旱生草原植被以及人工林下的土壤归属为栗钙土，而在高海拔“脑山”地带发育于天然次生林下的土壤归属为灰褐土，随海拔高度增加，植被类型为亚高山灌丛草甸，其下发育的土壤归属为草毡土。因此，研究区 9 个林地土壤的

发生学分类(GSCC)可归属为灰褐土、栗钙土、草毡土和石质土 4 个土类。依据中国土壤系统分类(CST)的检索方法,按照表 4 的诊断层和诊断特性按序检索,确立了研究区林地土壤在 CST 中的高级分类单元名称,结果见表 5,研究区 9 个林地典型土壤剖面,分别属于 3 个土纲、4 个亚纲、6 个土类和 7 个亚类。发生分类的土类和系统分类的土类呈现一对多的关系。如,发生分类的灰褐土土类对应系统分类的简育干润均腐土和暗沃干润锥形土土类;栗钙土土类对应

系统分类的简育干润均腐土和简育干润锥形土土类。CST 的设立,参考了美国土壤系统分类(ST)的原理、检索过程和命名方式,故二者在名称上有所相似。世界土壤资源参比基础(WRB)采用二级单元进行命名,并辅以修饰词突出土壤的特性,其名称更简洁直观。但在土壤类型的划分中,三者各自的侧重点有所不同。将同一土壤分别与不同的分类系统参比,可更好地表达土壤的特性。按 ST 和 WRB 的分类标准,对研究区林地土壤进行检索命名并参比,结果如表 5 所示。

表 5 研究区林地土壤在中国土壤系统分类及其他土壤分类系统中的归属与参比
Table 5 Reference between Chinese Soil Taxonomy and other soil classification systems of studied woodland soils

| 剖面 | 中国土壤系统分类 | 中国土壤发生分类 | 美国土壤系统分类 | 世界土壤资源参比基础 |
|--------|-----------|----------|----------|----------------------|
| | CST | GSCC | ST | WRB |
| | 亚类 | 土类 | 土类 | 二级单元 |
| SL-01 | 斑纹简育湿润均腐土 | 草毡土 | 弱发育湿润软土 | 简育黑土(壤质) |
| FL-02 | 普通简育干润均腐土 | 灰褐土 | 弱发育半干润软土 | 简育黑土(壤质) |
| FL-03 | 普通简育干润均腐土 | 灰褐土 | 弱发育半干润软土 | 简育黑土(壤质) |
| IFL-01 | 普通钙积干润均腐土 | 栗钙土 | 钙积半干润软土 | 石灰性黑土(壤质) |
| FL-01 | 普通暗沃干润锥形土 | 灰褐土 | 弱发育半干润软土 | 石灰性黑土(壤质) |
| FL-04 | 普通简育干润锥形土 | 栗钙土 | 简育半干润始成土 | 石灰性锥形土(壤质、淡色) |
| SL-02 | 钙积简育干润锥形土 | 栗钙土 | 钙积半干润始成土 | 钙质黑钙土(壤质) |
| IFL-02 | 钙积简育干润锥形土 | 栗钙土 | 钙积半干润始成土 | 石灰性锥形土(壤质、淡色) |
| IFL-03 | 石质干润正常新成土 | 石质土 | 干润正常新成土 | 石灰性粗骨薄层疏松岩性土(壤质,腐殖质) |

3 讨论

3.1 林地土壤发生特性和 GSCC 与 CST 的参比

按照土壤发生分类,研究区山地森林植被下发育的土壤,即 FL-01、FL-02 和 FL-03 土壤归属为灰褐土。依据野外调查和数据分析,3 个剖面均有明显的腐殖质积累过程,且有机质含量随土层深度的增加而减少。其中,FL-02 和 FL-03 剖面积累了较厚的腐殖质且无陡减现象,在 CST 中被参比为均腐土纲,简育干润均腐土土类,而 FL-01 剖面因不具有规定的腐殖质特性,被划为锥形土纲。也有研究将灰褐土参比为锥形土纲和均腐土纲内的土类^[4,15,23]。因此,灰褐土在进行系统分类参比时,不能仅考虑腐殖质积累的条件而参比到均腐土纲,还应在土类一级中注意腐殖质积累特性的表达。

栗钙土是半干旱早草灌植被下发育的土壤,也是青海东部干旱区草原植被下的主要类型,目前已成为研究区主要的人工造林地。本研究中的 FL-04、SL-02、IFL-01 和 IFL-02 土壤均属于栗钙土,其主要成土特征是发育于次生黄土母质,剖面有碳酸钙聚积,且有强石灰反应。但不同剖面具有不同的特征:FL-04 土

壤发育于新近纪红土,剖面还保留有部分母质特征;SL-02 土壤剖面钙积过程明显,且在 30 cm 以下有钙积层出现;IFL-01 土壤所处海拔较高,植被较茂盛,有腐殖质累积过程;IFL-02 土壤剖面底部有明显的碳酸钙粉末,剖面发育程度较弱。根据不同剖面特征,本研究将其分别归属为 CST 中的简育干润锥形土和钙积干润均腐土,分属于 2 个土纲。在已有的研究中,栗钙土大多被参比为 CST 中的锥形土纲内土类,但因成土环境的雨热同期和易受旱特性,也被参比为干旱土、淋溶土和均腐土等土纲内的土类^[4,24-25]。由此来看,土壤系统分类的应用,使土壤类型更为科学严谨,有效减少了发生分类中同名异土情况的发生。

发育于黄土母质的土壤,在成土因素影响较弱的情况下,可出现黄土和黄土状沉积物岩性特征,已有的文献中也有该岩性特征的描述^[15,24,26]。但本研究区的土壤大多发育于次生黄土母质,均含有一定量的黏粒。在林地植物积累的有机物质以及有机物质的淋洗作用下,改变着黄土母质的颜色、结构以及碳酸钙含量特征,因此,研究区林地土壤不具备黄土和黄土状沉积物岩性特征^[27]。为了更突出地反映发育于黄土和黄土状母质土壤的特征,应该对黄土和黄土状沉积

物岩性特征进行修改^[28]。如果将干态明度更改为 ≥ 6 , 干态彩度更改为 ≥ 3 , 则 IFL-02 土壤剖面具有黄土和黄土状沉积物岩性特征。

3.2 林地土壤 CST 与 ST、WRB 的参比

本研究所涉及天然林土壤 FL-01 和 FL-02, 具有暗色富含腐殖质的土层, CST、ST 和 WRB 中均设有对应的诊断层, 然而不同分类系统的设置有所不同。如, CST 设置有暗沃表层, 仅对同时具有均腐殖质特性的土壤, 才将其归属为“表达腐殖质含量丰富”的均腐土纲, 而不满足均腐殖质特性的土壤, 则归于其他土纲, 并在相应的土类单元中设立“暗沃”修饰词, 以在土壤名称中表达腐殖质含量高的属性。因此, 本研究中 FL-01 和 FL-02 土壤被参比为暗沃干润锥形土和筒育干润均腐土。ST 设有专门的松软表层, 将其归入软土土纲。FL-01 和 FL-02 土壤, 按 ST 分类系统被参比为弱发育半干润软土。WRB 中设有暗色层的诊断标准, 当土壤没有其他特征土层和诊断特性时, 按检索顺序将其检索为黑土单元。FL-01 和 FL-02 土壤, 在 WRB 中被参比为黑土单元的石灰性黑土和筒育黑土。ST 和 WRB 划分此类土壤时, 未考虑腐殖质含量的垂直分异特征。由此可见, CST 的设置充分考虑了腐殖质分布的特征, 更适用于天然林土壤类型的划分。

4 结论

对青海东部互助县黄土区的 9 个典型林地土壤的研究表明, 其诊断层包括暗沃表层、淡薄表层、锥形层和钙积层, 诊断特性包括冷性土壤温度状况、半干润和潮湿土壤水分状况、北方红土岩性特性、石质接触面、氧化还原特征、均腐殖质特性和石灰性, 在 CST 高级单元中被划分为 3 个土纲、4 个亚纲、6 个土类和 7 个亚类。其中, 3 个灰褐土剖面分别归属于 CST 中的 2 个土纲、2 个亚纲和 2 个土类; 4 个栗钙土剖面分别归属于 2 个土纲、2 个亚纲和 2 个土类。与其他分类系统相比, CST 充分考虑了腐殖质分布的特征, 对天然林土壤类型的研究更具有针对性, 也可有效减少发生分类中栗钙土的同名异土情况。

参考文献:

- [1] 张维理, 徐爱国, 张认连, 等. 土壤分类研究回顾与中国土壤分类系统的修编[J]. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3214–3230.
- [2] 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]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.

- [3] 赵刚刚, 张东坡, 袁大刚, 等. 岷江上游杂谷脑河谷土壤发生特征与系统分类研究[J]. 土壤, 2022, 54(4): 865–872.
- [4] 姜林, 李珊珊, 耿增超, 等. 祁连山西水林区土壤发生特性及系统分类[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1118–1126.
- [5] 欧锦琼, 卢瑛, 胡丹心, 等. 广西岩溶地区水稻土发生特性及其在中国土壤系统分类中的归属[J]. 土壤, 2023, 55(6): 1336–1346.
- [6] 李松, 慈恩, 连茂山, 等. 水耕条件下两类富钙母岩发育土壤的系统分类归属及成因探讨[J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 678–687.
- [7] Soil Survey Staff, USDA, NRCS. Keys to soil taxonomy[M]. Washington: United States Government Printing Office, 2014.
- [8] IUSS working group WRB. World reference base for soil resources[M]. Rome: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Report No.106. FAO, 2014.
- [9] Schad P. World reference base for soil resources—Its fourth edition and its history[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2023, 186(2): 151–163.
- [10] Kyebogola S, Burras L C, Miller B A, et al. Comparing Uganda's indigenous soil classification system with World Reference Base and USDA Soil Taxonomy to predict soil productivity[J]. Geoderma Regional, 2020, 22: e00296.
- [11] Sorokin A, Owens P, Láng V, et al. “Black soils” in the Russian soil classification system, the US soil taxonomy and the WRB: Quantitative correlation and implications for pedodiversity assessment[J]. CATENA, 2021, 196: 104824.
- [12] Shi X Z, Yu D S, Xu S X, et al. Cross-reference for relating Genetic Soil Classification of China with WRB at different scales[J]. Geoderma, 2010, 155(3/4): 344–350.
- [13] Hao S H, Wu K N, Li L, et al. Revised proposed classifications for typical anthropogenic soils in China[J]. Land, 2023, 12(11): 1974.
- [14] 青海省农业资源区划办公室. 青海土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [15] 李德成, 赵霞, 张甘霖著. 中国土系志·青海卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [16] 李珍, 曾永年, 单纬东, 等. 青海东北部黄土分布规律与特征[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 1991, 7(4): 51–56.
- [17] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [18] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [19] 周秉荣, 胡爱军, 陈国茜, 等. 青海省农牧业气候资源

- 综合区划及评价[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 191–198.
- [20] 冯学民, 蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 489–491.
- [21] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的空间预测研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 1–8.
- [22] 韩春兰, 余无忌, 刘金宝, 等. 中国年均地温的估算方法研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(2): 354–366.
- [23] 曲潇琳, 龙怀玉, 曹祥会, 等. 宁夏山地土壤的发育规律及系统分类研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 65–77.
- [24] 张甘霖, 赵玉国, 李德成. 中国土系志 • 甘肃卷[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [25] 郭梦, 吴克宁, 鞠兵, 等. 新疆天山南麓土壤系统分类研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 588–598.
- [26] 曲潇琳, 龙怀玉, 谢平, 等. 宁夏中部地区典型灰钙土的发育特性及系统分类研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 75–87.
- [27] 张凤荣. 中国土系志 • 北京天津卷[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [28] 常庆瑞, 安韶山, 闫湘, 等. 对系统分类有关诊断指标的认识与讨论[J]. 土壤通报, 2003, 34(3): 161–164.