祁连山西水林区土壤发生特性及系统分类*

姜 林 李珊珊 耿增超** 张 强 佘 雕 林 云

(西北农林科技大学资源环境学院 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 针对祁连山西水林区分布的4个典型土类(棕钙土、灰褐土、栗钙土及高山草甸土)进行了成土环境调查,通过剖面描述和样品分析明确了其发生特性,并据此检索出了各土类在我国现行土壤系统分类中的归属,为祁连山林区土壤特性的研究和土地资源的调查与评价提供了参考。结果表明:林区各土类土层较浅,具有粗骨性,山地特征明显;有机质累积较强,总体呈现高山草甸土>灰褐土>栗钙土>棕钙土;淋溶强度相对于湿润地区较弱,总体呈现高山草甸土>灰褐土≈栗钙土>棕钙土;风化强度总体较弱,不同土壤类型间差异不大;林区土壤剖面具有2类诊断表层、3类诊断表下层及4类诊断特性;棕钙土属于磐状钙积正常干旱土亚类,灰褐土属于钙积暗沃冷凉淋溶土亚类,栗钙土属于普通简育冷凉淋溶土亚类,高山草甸土属于普通简育湿润均腐土亚类。

关键词 祁连山; 土壤; 发生特性; 系统分类

中图分类号 S155.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)5-1118-09

Genetic characteristics and taxonomic classification of typical soil types in Xishui forest zone of Qilian Mountains, Northwest China. JIANG Lin, LI Shan-shan, GENG Zeng-chao**, ZHANG Qiang, SHE Diao, LIN Yun (*Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1118-1126.

Abstract: An investigation was conducted on the soil-forming environment of four typical soil types (brown calcic soil, grey cinnamon soil, chestnut soil, and alpine meadow soil) in the Xishui Forest Zone of Qilian Mountains, Northwest China. Through profile description and laboratory analysis, the genetic characteristics of the four soil types were studied, and their classification was identified according to the Keys to Chinese Soil Taxonomy, which could provide references for the researches of soil properties and the land resources survey and evaluation in the forest areas of Qilian Mountains. The results showed that most of the sampled soil profiles were shallow, and had obvious gravel/fragmental composition, with the characteristics of mountain soil. The organic carbon content in the four soil profiles was high due to the accumulation of organic matter. The alpine meadow soil had the highest accumulation of organic carbon, followed by grey cinnamon soil, chestnut soil, and brown calcic soil. The intensity of soil leaching was relatively weak, and soil eluviation was in the order of salpine meadow soil > grey cinnamon soil ≈ chestnut soil > brown calcic soil. The physical and chemical weathering of the four soils was weaker, and the weathering degree had less difference among the soil types. The four soils had two diagnostic surface horizons, three diagnostic subsurface horizons, and four types of diagnostic characteristics. In the classification system of Chinese Soil Taxonomy, the brown calcic soil was of Pan-Cal-Orthic Aridisols, grey cinnamon soil was of Cal-Mol-Boric Luvisols, chestnut soil was of Typ-Hap-Boric Luvisols, and alpine meadow soil was of Typ-Hap-Udic Isohumisols.

Key words: Qilian Mountains; soil; genetic characteristics; taxonomic classification.

* 国家科技部科技基础性工作专项"森林土壤资源调查及标本搜集"(2007FY210300)资助。

** 通讯作者 E-mail: gengzengchao@126.com

收稿日期: 2013-01-10 接受日期: 2013-02-06

祁连山林区是中国西北重要的山地生态系统,其土壤资源作为物质基础,对于保证该区水源涵养林的稳定和农牧业的发展具有不可替代的作用(杨全生等, 2008)。林区土壤类型多样,具有典型的垂直分布带谱(陈隆亨和肖洪浪, 2003),但目前针对其发生特性和分类的研究相对较少。刘涤瑕等(1987)对祁连山北坡寺大隆林区的土壤发生类型进行了划分,并阐述了其分布范围和发生特性;还对林区原有山地褐色土和山地黑土进行了深入辨析,重新确定为灰褐土和山地栗钙土(刘涤瑕等, 1993)。中国的土壤系统分类自 20 世纪 80 年代提出以后,在祁连山林区的土壤研究中也得到了应用。胡双熙(1994)依据《中国土壤系统分类(首次方案)》对林区东南段分布的灰钙土、黑垆土等土壤类型所具有的诊断层进行了研究,并进行了土纲的划分。齐善忠等(2003)根据原有土壤普查资料,按照《中国土壤系统分类检索(第三版)》,对河西地区山地土壤的系统分类进行了归纳、概括,但涉及祁连山林区土壤的数据资料相对宽泛,具体研究方法与现行标准还存在差异,因此对于该区具有垂直地带性分布的土壤针对性不强。

定量化、标准化的土壤系统分类是国际土壤分类的总体发展方向,中国的土壤系统分类经过近 30 年的发展,分类系统已经日趋完善,应用范围也在逐渐拓宽,在土壤资源调查和评价、土地资源的合理规划利用等方面将更具有更强的适应性和针对性(张保华和何毓蓉, 2005;龚子同等, 2007)。本文以祁连山北坡西水林区分布的典型山地土壤为对象,对其发生特性进行了研究,并据此明确了各土壤类型在系统分类中的归属,以期为祁连山林区土壤特性的研究和土地资源的调查与评价提供参考。

1　研究地区与研究方法

1.1　研究区概况

研究区域位于甘肃省肃南裕固族自治县马蹄藏族乡,属于祁连山脉北麓中段,地理位置为 100°3′E—100°23′E,38°23′N—38°248′N,面积 72390 hm^2。

林区在地质构造上属于北祁连褶皱带,地层沉积以海相沉积为主,伴有大量的岩浆喷发和侵入。林区母岩受构造运动影响,经历了强烈的变质,地层成因复杂,奠定了土壤形成完备的物质基础。由于断陷、褶皱及流水切割的作用,林区具有山高谷深、峰锐坡陡的地貌景观。海拔介于 2000 ~ 4700 m,高山地带坡度在 40°左右,低山(丘陵)地带坡度在 20° ~ 30°,整体属于浅山区。

林区气候总体属于典型大陆性湿润(山地)草原气候。年均气温 5.4 ℃(最冷月均温 -12.5 ℃、最热月均温 19.6 ℃),年均降水量约为 360 mm,多集中在 5—9 月,年均蒸发量 1488 mm,无霜期 90 ~ 120 d,植物生长期 90 ~ 150 d,生长期短且变化大。

林区山地植被较好,草场大体属草甸草场。林区有植物种类较多,受气候、海拔和坡向的多重影响,具有明显的垂直分异规律。该区域海拔 2000 ~ 2500 m 分布的典型植被带为草类荒漠带,海拔 2500 ~ 2800 m 区域分布的典型植被带为森林草原带,海拔 2800 ~ 3200 m 区域分布的典型植被带为森林灌丛带,海拔 3200 ~ 3500 m 区域分布的典型植被带为亚高山灌丛草甸带,海拔 3500 ~ 4000 m 区域分布的典型植被带为高山草甸带,海拔 4000 ~ 4500 m 区域分布的典型植被带为高山寒漠带,植被相对稀少;海拔 4500 m 区域分布的主要为积雪。

祁连山地区复杂的地形,独特的气候、植被,形成和发育了多种性质的土壤类型。随着海拔的升高,林区气候、植被等主要环境条件呈现出山地地区所特有的垂直地带性。受其影响,林区土壤的分布规律基本符合走廊南山阴坡的土壤垂直带谱(刘建泉等, 2008)。林区主要的成土岩石为石灰岩、砂页岩和砾岩,成土母质主要为残积、坡积物。

1.2　研究方法

1.2.1　样地及剖面设定　在林区内依据栗钙土、灰褐土和高山草甸土 4 种土类的分布,应用典型样地法选定样地。其面积根据环境条件确定为 60 m×30 m,调查各样地的地形和植被组成(样地概况见表 1),分别设置 3 个面积为 20 m×20 m 的样方作为重复。在各样地内选择单个样方制作代表土壤剖面,并根据剖面特征划分其发生层次。

1.2.2　土壤样品的采集、处理及分析　在各样方内采用“S”型布点法确定 5 个样点,按照对应代表土壤剖面的发生层次由下至上逐层采样,最后按层混合作为分析样品。所采集样品经室内风干后,磨细并分别通过孔径为 2、1 和 0.25 mm 的尼龙筛,备用。环刀土壤样品在各样地土壤代表剖面上按照发生层次采集(重复 3 次)。

土壤剖面发生层次的颜色依据 Munsell Soil Color Charts(X-rite, 2000)进行鉴定,同时参照《中国标准土壤色卡》(中国科学院南京土壤研究所和

表1 林区土壤剖面样地概况
Table 1 Site features of tested soil types

土壤类型	母质类型	地理位置	海拔(m)	坡度、坡向	坡位	主要植被种类	盖度
棕钙土	冲积母质	38°35.59′N 100°19.35′E	2297	26°SE(135°)	中坡	甘青锦鸡儿(*Caragana tangutica*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、三穗苔草(*Carex tristachya*)	0.35
灰褐土	残积母质	38°32.88′N 100°17.64′E	2830	25°NE(45°)	上坡	青海云杉(*Picea crassifolia*)、银露梅(*Pltentilla glabra*)、鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)、披针苔草(*Carex lanceolate*)	0.40
栗钙土	坡积母质	38°32.93′N 100°17.74′E	2804	22°W(270°)	中坡	银露梅、甘青针茅(*Stipa przewalskyi*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)、乳白香青(*Anaphalis lactea*)	0.95
高山草甸土	残积母质	38°31.06′N 100°17.31′E	3480	28°SW(225°)	上坡	金露梅(*Potentilla fruticosa*)、鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、三穗苔草	0.95

西安光学精密机械研究所, 1989)对比命名。土壤各项理化指标的测定均采用常规方法(重复3次)。其中,比重的测定采用比重瓶法(中华人民共和国林业局, 1999),机械组成采用吸管法(中华人民共和国林业局, 1999),CEC采用EDTA+NH_4OAc交换-容量法(中国科学院南京土壤研究所, 1978),交换性盐基离子(K^+、Na^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})采用NH_4Cl+C_2H_5OH交换-原子吸收分光光度法(中华人民共和国农业部, 2008),其余各分析指标的测定均依照规定方法进行(中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 1991;1992)。

1.3 数据分析

应用Microsoft Office Excel 2003对实验数据进行统计:采用Dixon检验法消除测定的偏离值,取其算数平均数作为测定值。应用SPSS Statistics 17.0对实验数据进行分析(张文彤, 2004):采用单变量方差分析法(Univariate ANOVA)和最小显著极差法(LSD)分别比较各指标在不同土壤类型和发生层次间的差异性,显著性水平设为$\alpha=0.05$。

1.4 剖面检索方法

检索时,首先依据已知的土壤剖面特征及理化性质确定其所具有的诊断层、诊断特性及诊断现象,然后严格依照系统分类所规定的顺序,根据土壤系统分类检索表进行检索(中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 2001)。

2 结果与分析

2.1 林区土壤的发生特性

2.1.1 林区土壤的剖面特征 由表2可见,除栗钙土外,林区土壤母质层上沿均不足1 m,土层较浅薄,受山区地形影响明显。母质层的石砾含量(16%~76%)较高,粗骨性较强,具有山地坡积、残

表2 林区土壤剖面形态特征
Table 2 Morphological characteristics of tested soil types

土壤类型	发生层	深度(cm)	石砾(≥2 mm)(%)	干态		润态	
				Munsell	颜色	Munsell	颜色
棕钙土	A	0.3~16	Tr	10YR6/3	浅棕	10YR5/3	棕色
	B	16~38	Tr	10YR7/4	极浅棕	10YR6/4	淡黄棕
	B/C	38~57	22.48	10YR6/4	淡黄棕	10YR5/4	黄棕
	C	>57	75.89	10YR7/4	极浅棕	10YR7/4	极浅棕
灰褐土	A	2~27	Tr	7.5YR5/2	棕色	10YR3/3	暗棕
	A/B	27~53	Tr	7.5YR4/6	深棕	7.5YR5/4	棕色
	B	53~76	Tr	10YR8/4	极浅棕	10YR7/4	极浅棕
	C	>76	29.82	7.5YR6/4	淡棕	7.5YR5/6	深棕
栗钙土	A	0~13	Tr	10YR6/3	棕色	10YR4/4	暗黄棕
	A/B	13~32	Tr	10YR5/4	黄棕	10YR6/6	棕黄
	B	32~65	Tr	7.5YR5/4	棕色	10YR5/4	黄棕
	B/C	65~130	Tr	10YR7/3	极浅棕	10YR6/4	浅黄棕
	C	>130	16.34	2.5YR5/3	红棕	2.5YR4/3	红棕
高山草甸土	A	2~41	Tr	7.5YR5/2	棕色	7.5YR3/2	暗棕
	B	41~82	Tr	7.5YR5/2	棕色	7.5YR3/1	极暗灰
	C	>82	38.41	7.5YR6/4	棕色	7.5YR4/4	棕色

积母质的典型特征。剖面颜色的主色调以棕色为主(2.5~10YR);干态明度介于4~8,润态明度介于3~7;干态彩度介于2~6,润态彩度介于1~6;灰褐土和高山草甸土剖面颜色较深,应缘于其有机质的累积较黏粒等物质强烈所致。

2.1.2　林区土壤剖面的机械组成及结构特征　由表3可见,林区土壤的黏粒含量(107.81~273.75 g·kg^{-1})相对较低,在灰褐土和栗钙土剖面淀积层具有较明显累积;粉粒(85.97~467.34 g·kg^{-1})和砂粒含量(370.20~795.38 g·kg^{-1})相对较高,总体表现为质地较粗;粉黏比(0.72~3.27)相对较高,表明土壤的风化程度较低。林区土壤HCl洗失量(17.17~193.93 g·kg^{-1})差异较大,在高山草甸土剖面上的分布远小于其他土类,表明其他剖面内淋溶作用较弱。林区土壤比重(2.58~2.78 g·cm^{-3})基本随土层加深而增大;容重(0.85~1.45 g·cm^{-3})在灰褐土、高山草甸土剖面上随土层加深逐渐增大,应主要源于其有机质的表聚及植被根系的分割作用;而在栗钙土、棕钙土上逐渐减小,则可能与其剖面下部质地较粗有关;孔隙度(44.46%~69.41%)基本在淀积层达到最大。

2.1.3　林区土壤的有机质和酸碱性特征　由表4可见,林区土壤的有机碳(2.18~50.27 g·kg^{-1})和全氮(0.08~4.26 g·kg^{-1})含量均随剖面加深而减小,有机质表聚作用明显;C/N(9.21~28.71)受到林区气候条件和植被类型的影响变幅较大,但多数<25,故林区土壤的有机质分解相对容易(文启孝等, 1984)。除高山草甸土外,林区土壤的$CaCO_3$含量(76.65~191.11 g·kg^{-1})较高,且随剖面加深逐渐增大,表明林区土壤中大部分具有碳酸盐的累积;水溶性盐分(0.37~1.85 g·kg^{-1})累积较弱,仅在少数土壤剖面层次具有轻度盐化(>1.0 g·kg^{-1})。林区土壤的pH(7.85~9.26)属碱性,并随剖面加深逐渐增大;碱化度(0.19%~5.86%)总体较低,仅在棕钙土母质层表现出碱化(>5%)。

2.1.4　林区土壤的阳离子交换性能　由表5可知,林区土壤基本不含有交换性H^+和Al^{3+};交换性K^+含量(0.10~1.15 cmol·kg^{-1})和交换性1/2Ca^{2+}含量(2.54~14.43 cmol·kg^{-1})均随剖面加深逐渐减小,且后者呈现高山草甸土>灰褐土>栗钙土>棕钙土;除高山草甸土外,交换性Na^+含量(0.04~0.53 cmol·kg^{-1})随剖面加深逐渐增大;交换性1/2Mg^{2+}含量(1.04~5.65 cmol·kg^{-1})在灰褐土中随剖面加深逐渐增大,而在棕钙土和高山草甸土中随剖面加深逐渐减小。交换性盐基离子含量基本呈现Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+>Na^+,即交换性盐基离子的组成主要是1/2Ca^{2+}(37.34%~84.93%)和1/2Mg^{2+}(12.40%~54.46%),K^+和Na^+所占比例(0.75~9.66、0.36%~6.38%)较小。棕钙土、灰褐土和栗钙土交换性盐基离子由浅至深的分布顺序为K^+≈Ca^{2+}>Na^+≈Mg^{2+},符合一般规律(Jobbágy and Jackson, 2001);高山草甸土中4种交换性盐基离子含量均随土层加

表3　林区土壤剖面的机械组成及结构

Table 3　Mechanical composition and structure of tested soil types

土壤类型	发生层	机械组成(g·kg^{-1})			粉黏比	比重	容重	孔隙度	HCl洗失量
		黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.02 mm)	砂粒(0.02~2 mm)		(g·cm^{-3})	(g·cm^{-3})	(%)	(g·kg^{-1})
棕钙土	A	165.85	344.24	489.91	2.08	2.67	1.31	51.11	153.64
	B	175.39	352.26	472.35	2.01	2.66	1.24	53.28	170.56
	B/C	156.09	264.70	579.21	1.70	2.68	1.12	58.34	193.93
	C	111.19	98.98	789.83	0.89	2.68	–	–	106.31
灰褐土	A	121.59	331.57	546.84	2.73	2.65	0.89	66.22	158.57
	A/B	134.86	323.16	541.98	2.40	2.77	0.85	69.41	168.33
	B	173.42	248.94	577.64	1.44	2.75	1.00	63.75	162.50
	C	140.05	294.74	565.22	2.10	2.78	–	–	101.31
栗钙土	A	203.23	302.17	494.60	1.49	2.64	1.10	58.29	143.80
	A/B	265.61	364.19	370.20	1.37	2.64	1.21	54.28	130.96
	B	273.75	291.66	434.59	1.07	2.80	1.07	61.95	99.14
	B/C	107.81	350.74	541.45	3.25	2.73	1.07	60.85	142.52
	C	118.65	85.97	795.38	0.72	2.76	–	–	90.80
高山草甸土	A	142.55	466.28	391.17	3.27	2.58	0.92	64.30	73.45
	B	147.35	467.34	385.31	3.17	2.63	0.92	64.96	31.59
	C	188.70	283.26	528.04	1.50	2.61	1.45	44.46	17.17

表4 林区土壤剖面的有机质和酸碱性特征

Table 4 Organic matter and acid-base characteristics of tested soil types

土壤类型	发生层	有机碳 (g·kg^{-1})	全氮 (g·kg^{-1})	C/N	$CaCO_3$ (g·kg^{-1})	水溶性盐分 (g·kg^{-1})	pH	ESP (%)
棕钙土	A	21.05 aC	1.85 aD	11.43 aB	98.47 cA	0.83 bA	8.49 cA	0.45 dA
	B	13.69 bB	1.43 bB	9.56 aC	141.69 bB	0.79 bAB	8.83 aA	3.16 cB
	B/C	12.22 b	1.35 b	9.21 a	191.11 a	0.92 b	8.69 b	3.83 b
	C	7.30 cA	0.56 cB	13.01 aB	146.54 bA	1.85 aA	8.81 aB	5.86 aA
灰褐土	A	43.45 aB	2.91 aC	15.00 cA	78.16 dB	0.94 aA	7.85 dC	0.48 cA
	A/B	26.11 b	1.34 b	19.66 b	123.01 b	0.89 a	8.13 c	0.86 c
	B	11.75 cBC	0.59 cC	19.72 bA	154.22 aA	1.21 aA	8.54 bC	3.82 aA
	C	10.70 cA	0.38 dC	28.71 aA	103.84 cB	1.15 aB	8.75 aB	2.79 bB
栗钙土	A	41.26 aB	3.78 aB	10.93 cC	76.65 dB	1.10 aA	8.32 dB	0.19 cB
	A/B	23.56 b	2.03 b	11.69 c	120.51 b	0.69 bc	8.35 d	0.53 c
	B	10.30 cC	0.79 cC	12.95 bB	91.04 cC	0.79 abAB	8.73 cB	2.90 bB
	B/C	5.86 d	0.53 d	11.13 c	156.69 a	0.67 bc	9.01 b	4.69 a
	C	2.18 eB	0.08 eD	26.06 aA	78.19 dC	0.37 cC	9.26 aA	1.18 cC
高山草甸土	A	50.27 aA	4.26 aA	11.73 aB	18.35 aC	0.92 aA	7.88 cC	0.53 aA
	B	37.68 bA	3.11 bA	12.17 aBC	16.80 aD	0.62 abB	8.19 bD	0.40 abC
	C	8.44 cA	0.82 cA	10.30 aB	15.86 aD	0.37 bC	8.35 aC	0.28 bD

同一列不同大、小写字母分别表示不同土类、发生层间差异显著($P<0.05$),下同。

表5 林区土壤剖面的阳离子交换性能

Table 5 Soil cation exchange capacity properties of tested soil types

土壤类型	发生层	交换性阳离子(cmol·kg^{-1})							CEC (cmol·kg^{-1})	BSP (%)
		H^+	Al^{3+}	K^+	Na^+	$1/2Ca^{2+}$	$1/2Mg^{2+}$	盐基总量		
棕钙土	A	Tr	Tr	0.81 aB	0.05 bB	6.46 aC	1.04 cC	8.35 aC	10.97 aC	76.27 cA
	B	Tr	Tr	0.39 bA	0.28 aC	4.78 bD	2.22 aC	7.67 bD	8.90 bD	86.25 bA
	B/C	Tr	Tr	0.31 c	0.32 a	3.48 c	2.45 a	6.55 c	8.23 b	79.52 bc
	C	Tr	Tr	0.13 dC	0.28 aB	2.68 dD	1.57 bC	4.67 dD	4.81 cC	97.16 aA
灰褐土	A	Tr	0.15 A	0.67 aC	0.16 bA	14.18 aA	2.38 dB	17.39 aA	34.33 aA	50.64 cB
	A/B	Tr	Tr	0.31 b	0.26 b	14.43 a	3.56 b	18.56 a	30.31 a	61.15 b
	B	Tr	Tr	0.20 cB	0.45 aB	6.28 bC	2.80 cB	9.73 bC	11.66 bC	83.41 aA
	C	Tr	Tr	0.18 cB	0.42 aA	6.44 bB	5.65 aA	12.70 bA	15.17 bA	83.76 aB
栗钙土	A	Tr	Tr	0.82 aB	0.05 bB	9.26 aB	3.07 dA	13.20 aB	25.12 aB	52.60 cB
	A/B	Tr	Tr	0.61 b	0.10 b	8.18 b	2.69 e	11.58 b	18.05 b	64.16 b
	B	Tr	Tr	0.36 cA	0.53 aA	9.10 aB	4.02 aA	14.01 aB	18.40 bB	76.12 aB
	B/C	Tr	Tr	0.13 e	0.43 a	2.54 d	3.70 b	6.80 d	9.25 d	73.52 a
	C	Tr	Tr	0.23 dA	0.14 bC	5.62 cC	3.30 cB	9.29 cC	11.90 cB	78.13 aBC
高山草甸土	A	0.11 a	0.22 aA	1.15 aA	0.20 aA	14.37 aA	3.06 aA	18.78 aA	36.64 aA	51.27 bB
	B	0.18 a	0.07 b	0.12 bC	0.14 aD	13.54 aA	2.53 bBC	16.34 bA	35.60 aA	45.92 bC
	C	Tr	0.04 b	0.10 bC	0.04 bC	9.44bA	1.53 cC	11.12 cB	14.98 bA	74.24 aC

深而降低,由浅至深的分布呈现 $K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$。交换性盐基总量(4.67 ~ 18.78 cmol·kg^{-1})在棕钙土和高山草甸土中随土层加深逐渐减小。林区土壤 CEC (4.81 ~ 36.64 cmol·kg^{-1})随剖面加深逐渐减小,并呈现高山草甸土>灰褐土>栗钙土>棕钙土;BSP (50.64% ~97.16%)较高,均属盐基饱和。

2.1.5 林区土壤的氧化铁特性 由表6可知,林区各土类的游离铁含量(7.82 ~ 17.50 g·kg^{-1})、活性铁含量(0.81 ~ 5.16 g·kg^{-1})和络合铁含量(0.047 ~ 0.925 g·kg^{-1})以及游离度(20.55% ~ 36.99%)、活化度(6.99% ~ 39.19%)和络合度(0.45% ~5.23%)基本均呈现淀积层>淋溶层>母质层;表明土壤剖面淋溶层和淀积层的风化强度高于母质层,且游离铁、活性铁和络合铁的淋溶作用不明显(郭曼等, 2005)。不同土类的游离铁、活性铁和络合铁含量以及游离度、活化度和络合度均表现为:高山草甸土>灰褐土>栗钙土>棕钙土,差异显著,具有随海拔升高逐渐增大的趋势,说明高海拔地区土壤的风化程度较深,这同南方湿热山地土壤的变化规律相反(林丽琴, 2010)。

表 6　供试土壤剖面的氧化铁特征
Table 6　Ferric oxide characteristics of tested soil types

土壤类型	发生层	游离铁 (g·kg^{-1})	活性铁 (g·kg^{-1})	络合铁 (g·kg^{-1})	游离度 (%)	活化度 (%)	络合度 (%)
棕钙土	A	11.42 aC	1.34 bD	0.070 aC	28.39 aB	11.74 dD	0.60 abC
	B	11.23 aC	1.54 aD	0.060 aC	29.25 aB	13.75 bD	0.53 bC
	B/C	9.90 b	1.28 bc	0.047 a	26.93 a	12.97 c	0.45 b
	C	7.82 cC	1.21 cB	0.060 aB	20.55 bC	15.45 aB	0.72 aB
灰褐土	A	12.56 aB	3.42 bB	0.280 aB	29.38 bcB	27.26 bA	2.22 aB
	A/B	13.17 a	5.16 a	0.510 a	30.64 ab	39.19 a	3.81 a
	B	10.45 cD	1.86 cC	Tr	27.96 cB	17.83 cC	Tr
	C	11.64 bB	0.81 dC	Tr	32.41 aA	6.99 dD	Tr
栗钙土	A	11.65 bC	1.97 cC	0.245 bB	28.20 abB	16.92 dC	2.03 bB
	A/B	12.01 b	2.40 b	0.190 b	28.55 ab	20.02 b	1.58 c
	B	13.67 aB	3.99 aB	0.495 aB	30.34 aB	29.16 aA	3.62 aB
	B/C	10.76 c	1.97 c	0.090 c	27.14 b	18.28 c	0.85 d
	C	11.40 bB	0.87 dC	0.060 cB	27.34 bB	7.60 eC	0.53 dB
高山草甸土	A	15.87 bA	3.85 bA	0.660 bA	34.32 aA	24.25 bB	4.15 bA
	B	17.50 aA	4.73 aA	0.925 aA	36.99 aA	27.02 aB	5.23 aA
	C	15.19 bA	2.81 cA	0.425 cA	34.99 aA	18.52 cA	2.79 cA

2.1.6　林区土壤的矿质组成及分子比率　由表 7 可知,林区各土类的矿质组成中主要组分为 Si、Al、Fe。其中,SiO_2的含量(500.40 ~ 618.60 g·kg^{-1})占矿质元素总量的 61.26%;Al_2O_3的含量(139.30 ~ 215.60 g·kg^{-1})占矿质元素总量的 18.37%;Fe_2O_3的含量(36.00 ~ 47.60 g·kg^{-1})平均占到矿质元素总量的 4.71%;三者共占土壤烘干质量的 68.86% ~ 84.67%,平均占矿质元素总量的 84.34%。除栗钙土外,SiO_2及 Al_2O_3含量均随剖面加深而增大,Fe_2O_3含量随剖面加深而减小,差异均显著;不同土类间以高山草甸土的 Si、Al、Fe 含量最高。林区土壤中盐基类元素(K_2O, 19.80 ~ 26.50 g·kg^{-1}; Na_2O, 2.22 ~ 27.00 g·kg^{-1}; CaO, 10.10 ~ 95.30 g·kg^{-1}; MgO, 29.60 ~ 39.10 g·kg^{-1})的含量占土壤烘干质量的 8.9% ~ 17.38%,平均占矿质元素总量的 14.95%。林区土壤的风化作用总体较弱,导致 Sa(4.13 ~ 6.29)、Sf(31.13 ~ 40.35)和 Saf 值(3.67 ~ 5.38)相对较高;不同土类以棕钙土的 Sa、Sf 和 Saf 值最大,应缘于其风化强度较低所致,这与上述研究结果一致。

2.2　林区土壤的诊断层和诊断特性

林区土壤剖面所具有的诊断表层包括以下两类:(1) 暗沃表层。灰褐土和高山草甸土的 A 层厚度分别为 25 cm、39 cm(>25 cm),有机碳含量>6 g·kg^{-1};盐基饱和度>50 %;搓碎润态明度均为 3(<3.5),干态明度均为 5(<5.5),润态彩度分别为 3、2(<3.5),且干、润态明度比 C 层暗了 1 ~ 2 个 Munsell 单位,干、润态彩度比 C 层低了 2 ~ 3 个 Munsell 单位;结构均为粒状;因此二者均具有暗沃表层。(2) 干旱表层。棕钙土地表有多边形裂缝,并具有褐色薄有机结皮;剖面上部水溶性盐分含量<5 g·kg^{-1},碱化度<5%,故无盐积或钠质孔泡结皮层或其下垫的土盐混合层;因此具有干旱表层。

林区土壤剖面所具有的诊断表下层包括以下三类:(1) 黏化层。灰褐土 B 层、栗钙土 A/B 层中无其他原因导致的黏粒含量相对增高的特征;且由于淋移淀积,分别比上覆淋溶层的总黏粒含量增加了 3.86%(绝对增量)、31%(相对增量);厚度均>15 cm,大于上覆土层的 1/10;结构为粒状、核状和块状,不具有碱积层的结构特征;ESP 均<30%,不具有钠质特性;因此二者均具有黏化层。(2) 钙积层。灰褐土 B 层、栗钙土 B/C 层厚度均>15 cm;未胶结或硬结成钙磐;前者 $CaCO_3$相当物含量比下垫土层高 50.38 g·kg^{-1}(>50 g·kg^{-1}),后者 $CaCO_3$相当物含量比上覆土层高 65.65 g·kg^{-1},比下垫土层高 78.50 g·kg^{-1},均大于 50 g·kg^{-1};因此二者均具有钙积层。(3) 钙磐。棕钙土 B 层、B/C 层的厚度均>10 cm;$CaCO_3$相当物含量与厚度的乘积分别为 3117.18、3631.09(>2000);且干时铁铲难以插入,土块在水中很难消散;因此具有钙磐。

表7 供试土壤剖面的矿质组成特征

Table 7 Chemical composition characteristics of tested soil types

土壤类型	发生层	SiO_2 ($g \cdot kg^{-1}$)	Al_2O_3 ($g \cdot kg^{-1}$)	Fe_2O_3 ($g \cdot kg^{-1}$)	K_2O ($g \cdot kg^{-1}$)	Na_2O ($g \cdot kg^{-1}$)	CaO ($g \cdot kg^{-1}$)	MgO ($g \cdot kg^{-1}$)	TiO_2 ($g \cdot kg^{-1}$)	MnO ($g \cdot kg^{-1}$)	Sa	Sf	Saf
棕钙土	A	540.00 bB	149.50 abAB	40.40 aB	22.70 abA	18.20 bA	63.00 cAB	39.10 aA	5.50 aA	0.82 aA	6.14 aA	35.70 aA	5.23 aA
	B	532.10 bcB	146.40 abB	38.90 aB	22.00 bAB	18.10 bA	77.40 bB	36.70 aA	5.21 aB	0.78 aA	6.17 aA	36.77 aA	5.28 aA
	B/C	515.90 c	139.30 b	37.10 a	21.90 b	20.90 b	95.30 a	35.70 a	4.87 a	0.68 a	6.29 a	37.27 a	5.38 a
	C	574.40 aB	158.70 aC	38.20 aAB	25.80 aA	27.00 aA	57.30 cA	34.40 aA	4.81 aB	0.69 aAB	6.17 aA	40.35 aA	5.35 aA
灰褐土	A	500.40 cC	145.40 bB	42.80 aAB	21.70 aA	15.30 aA	55.20 cB	30.60 aB	5.55 aA	0.80 aA	5.85 aA	31.13 bB	4.93 aA
	A/B	508.10 c	149.90 b	43.00 a	20.80 a	15.30 a	77.10 b	29.60 a	5.60 a	0.73 a	5.76 a	31.42 b	4.87 a
	B	521.00 bB	148.60 bB	37.50 bB	20.90 aB	17.60 aA	89.30 aA	34.00 aAB	5.13 aB	0.68 aA	5.96 aAB	37.08 aA	5.13 aAB
	C	537.00 aC	198.60 aAB	36.00 bB	22.90 aAB	17.90 aB	49.30 cA	34.30 aA	4.83 aB	0.39 aAB	4.59 bC	39.79 aA	4.12 bB
栗钙土	A	534.10 bB	153.00 bcAB	41.30 abAB	22.00 abA	16.70 abA	65.30 bA	31.90 aAB	5.41 aA	0.77 aA	5.93 aA	34.39 aAB	5.05 aA
	A/B	520.80 bc	150.60 c	42.10 ab	22.50 ab	15.60 b	50.00 c	33.20 a	5.47 a	0.85 a	5.88 a	32.90 a	4.99 a
	B	559.00 aA	164.00 bA	45.10 aAB	23.10 aAB	19.20 aA	50.20 cC	32.30 aAB	5.99 aA	0.76 aA	5.79 aB	32.98 aA	4.92 aBC
	B/C	514.60 c	148.30 c	39.80 b	21.30 ab	16.40 b	93.50 a	36.80 a	5.36 a	0.82 a	5.90 a	34.51 a	5.03 a
	C	524.10 bcC	215.60 aA	41.80 abAB	19.80 bB	2.22 cC	49.80 cA	35.70 aA	6.38 aA	0.33 bB	4.13 bD	33.46 aB	3.67 bC
高山草甸土	A	552.50 bA	160.50 bA	46.30 aA	25.10 aA	17.60 aA	17.90 aC	29.90 aB	6.06 aA	0.94 aA	5.85 aA	31.78 bB	4.94 aA
	B	557.80 bA	171.60 abA	47.60 aA	25.00 aA	19.00 aA	17.40 aD	30.50 aB	6.19 aA	0.96 aA	5.52 bC	31.35 bA	4.69 aC
	C	618.60 aA	184.50 aB	43.60 aA	26.50 aA	19.90 aB	10.10 bB	32.50 aA	6.02 aA	0.77 aA	5.69 abB	37.88 aAB	4.95 aA

林区土壤剖面所具有的诊断特性包括以下3类:(1)土壤温度状况和水分状况。林区年平均气温随海拔升高的降低速率平均为0.58 ℃ · 100 m^{-1},年平均降水量随海拔升高的增加速率平均为18.6 mm · 100 m^{-1}(王金叶等, 2001),年平均蒸发量随海拔升高的降低速率平均为55.56 mm · 100 m^{-1}(康尔泗, 2004),据此可得各土壤剖面的主要气象数据;进一步采用年均气温估算(冯学民和蔡德利, 2004)土壤温度状况,采用研究区域的年干燥度(中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 2001)判定土壤水分状况。由表8可见,棕钙土、灰褐土和栗钙土的年平均土壤温度<8 ℃,夏季平均土壤温度>8 ℃,因此三者具有冷性土壤温度状况。高山草甸土的年平均土壤温度≤0 ℃,但并非常年如此,因此具有寒冻土壤温度状况。灰褐土、栗钙土的年干燥度介于1~3.5,因此具有半干润土壤水分状况;高山草甸土的年干燥度<1,但并非每月如此,因此具有湿润土壤水分状况。棕钙土区域处于林区边缘,植被稀少,与林区条件差异过大,因此应用《中国年干燥度分布图》(龚子同等, 2007)确定该处年干燥度>3.5,具有干旱土壤水分状况。(2)盐基饱和度。高山草甸土A层盐基饱和度>50%,属于盐基饱和。(3)均腐殖质特性。高山草甸土土表至20 cm与土表至100 cm的腐殖质储量比(Rh)为0.27(<0.4);剖面上部无有机现象,且各发生层有机质的C/N比均<17;因此具有均腐殖质特性。

2.3 林区土壤的系统分类归属

根据林区土壤所具有的上述诊断表层、诊断表下层和诊断特性(表9),依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》(中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 2001)对其进行了检索,按照土纲、亚纲、土类和亚类四级分类单元划分其归属。林区4种土壤类型分属3个土纲、3个亚纲,4个土类,

表8 林区土壤温度和水分状况

Table 8 Temperature and moisture regimes of tested soil types

项目	位置	海拔 (m)	年平均气温 (℃)	夏季平均气温(℃)	年平均降水量 (mm)	年平均蒸发量 (mm)	年平均土壤温度 (℃)	夏季平均土壤温度 (℃)	年干燥度
气象站	N 38°34′01″ E100°17′18″	2570	0.60	13.43	354.30	1048.60	–	–	–
棕钙土	–	–	2.18	14.85	–	–	4.98	17.03	>3.5
灰褐土	–	–	−0.91	12.08	402.66	904.14	2.04	14.39	1.57
栗钙土	–	–	−0.76	12.21	397.82	918.59	2.18	14.52	1.62
高山草甸土	–	–	−4.68	8.70	523.56	543.00	−1.55	11.17	0.73

表 9　林区土壤诊断层及诊断特性
Table 9　Diagnostic horizon and diagnostic characteristics of tested soil types

土壤类型	诊断表层	诊断表下层	诊断特性			
			土壤水分状况	土壤温度状况	均腐殖质特性	盐基饱和度
棕钙土	干旱表层	钙磐	干旱	冷性	–	–
灰褐土	暗沃表层	黏化层、钙积层	半干润	冷性	–	–
栗钙土	–	黏化层	半干润	冷性	–	–
高山草甸土	暗沃表层	–	湿润	寒冻	√	√

表 10　林区土壤系统分类及发生分类归属
Table 10　Genetic classification and taxonomy of tested soil types

分类单元	棕钙土	灰褐土	栗钙土	高山草甸土
土纲	G 干旱土 (干旱土)	L 淋溶土 (半淋溶土)	L 淋溶土 (钙层土)	J 均腐土 (高山土)
亚纲	G2 正常干旱土 (干温干旱土)	L1 冷凉淋溶土 (半湿温半淋溶土)	L1 冷凉淋溶土 (半干温钙层土)	J3 湿润均腐土 (湿寒高山土)
土类	G2.1 钙积正常干旱土 (棕钙土)	L1.2 暗沃冷凉淋溶土 (灰褐土)	L1.3 简育冷凉淋溶土 (栗钙土)	J3.3 简育湿润均腐土 (高山草甸土/草毡土)
亚类	G2.1.3 磐状钙积正常干旱土 (淡棕钙土)	L1.2.2 钙积暗沃冷凉淋溶土 (石灰性灰褐土)	L1.3.6 普通简育冷凉淋溶土 (暗栗钙土)	J3.3.2 普通简育湿润均腐土 (高山草原草甸土/薄草毡土)

4 个亚类;其中,棕钙土属于干旱土土纲的正常干旱土亚纲,分属于钙积正常干旱土土类中的磐状钙积正常干旱土亚类;灰褐土和栗钙土均属于淋溶土纲的冷凉淋溶土亚纲,前者属于暗沃冷凉淋溶土土类中的钙积暗沃冷凉淋溶土亚类,后者则属于简育冷凉淋溶土中的普通简育冷凉淋溶土亚类;高山草甸土属于湿润均腐土土纲的湿润均腐土亚纲,分属于简育湿润均腐土土类的普通简育湿润均腐土亚类(表 10)。

中国的土壤系统分类是以发生学理论为指导的(龚子同等, 2007),因此发生分类与系统分类之间存在一定基础的参比关系(龚子同等, 2002)。相较于代表性土壤类型的参比(陈志诚等, 2004),林区四类土壤中仅有棕钙土符合规律;而在其他研究中,灰褐土也符合其参比规律(于东升等, 2006)。这符合发生分类和系统分类的典型特征,即前者中心概念明确,对边界定义模糊,而后者具有标准化和定量化。

3　讨　论

对于山地森林土壤,地貌、气候和植被作为重要的成土因素,对其发生和分布具有最为直接的影响效应(张万儒等, 1984)。由地质外营力所形成的特殊地貌导致山地土壤存在着侵蚀性和薄层性(张凤荣,2002),且其成土母岩呈弱风化状态。林区土壤较浅薄,具有明显的粗骨性特征。剖面黏粒含量较低,而粉黏比较高;游离铁含量及游离度较低,硅铝率、硅铁率和硅铝铁率均较高;表明林区土壤风化强度总体较弱,且不同土壤类型间差异不大。

林区受大陆性气候影响,土壤淋溶作用相对较弱。除高山草甸土外,均具有较高的碳酸盐含量且分布较浅;并达到盐基饱和;pH 值均较高(碱性),且与 BSP 随剖面加深而降低;总体淋溶作用强度呈高山草甸土>灰褐土≈栗钙土>棕钙土。植被是成土过程中最重要的生物因素,是土壤有机质的首要来源。林区土壤受有机质表聚影响,随剖面加深,颜色(棕色)逐渐变浅,结构由粒状向核、块状转变,有机碳、全氮、活性铁、络合铁含量及交换性盐基离子总量、CEC 等均逐渐减小。在海拔等因素的间接影响下,林区土壤有机质累积强度与植被、气候的变化规律相适应,基本表现高山草甸土>灰褐土>栗钙土>棕钙土。

中国山地土壤资源丰富,历来是林牧业等产业的重要基地,未来针对性的改良、利用将更加频繁,准确而详实的土壤资源调查和评价是其必然前提,因而加强对山地土壤系统分类研究十分重要。本研究中,供试土壤具有两类诊断表层(暗沃表层和干旱表层),3 类诊断表下层(黏化层、钙积层和钙磐)和 4 类诊断特性(土壤水分状况、土壤温度状况、均腐殖质特性及盐基饱和度);分属 3 个土纲、3 个亚纲、4 个土类和 4 个亚类。由于条件所限,在研究范围和深度上尚有待于进一步提高,尤其是对于该区域土壤的基层(土族、土系)分类尚未加以涉及,限

制了研究的应用价值。

此外,土壤系统分类的诊断依据(诊断层和诊断特性及诊断现象)在应用于山地土壤的过程中,受制于山地土壤的特征(如粗骨性)和基础环境资料的缺失存在较多限制(向师庆等, 1992),如本研究中所采用的温度和水分指标均为估算值,对反映复杂地貌、海拔及植被条件下的实际气象条件尚存在一定差距。因此,及时对现有指标体系进行改进将有利于土壤系统分类的进一步发展和应用。

致谢 本研究得到了甘肃省祁连山水源涵养林研究院刘贤德、敬文茂和王顺利的大力支持!

参考文献

陈隆亨, 肖洪浪. 2003. 河西山地土壤及其利用. 北京: 海洋出版社.

陈志诚, 龚子同, 张甘霖, 等. 2004. 不同尺度的中国土壤系统分类参比. 土壤, **36**(6): 584-595.

冯学民, 蔡德利. 2004. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究. 土壤学报, **41**(3): 489-491.

郭 曼, 安韶山, 常庆瑞, 等. 2005. 宁南宽谷丘陵区土壤矿质元素与氧化铁的特征. 水土保持研究, **12**(3): 38-40.

龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 2002. 以中国土壤系统分类为基础的土壤参比. 土壤通报, **33**(1): 1-5.

龚子同, 张甘霖, 陈志诚. 2007. 土壤发生与系统分类. 北京: 科学出版社.

胡双熙. 1994. 祁连山东段山地土壤性质及垂直分布规律. 地理科学, **14**(1): 38-48.

康尔泗, 李 新, 张济世, 等. 2004. 甘肃河西地区内陆河流域荒漠化的水资源问题. 冰川冻土, **26**(6): 657-667.

刘涤瑕, 李卫忠, 曹定贵, 等. 1987. 寺大隆林区土壤发生类型和合理利用刍议. 甘肃林业科技, (2): 1-11.

刘涤瑕, 行胜志, 曹定贵. 1993. 祁连山北坡林区两个土壤类型的辨析. 西北林学院学报, **8**(3): 1-7.

刘建泉, 杨全生, 汪有奎. 2008. 甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告. 兰州: 甘肃科学技术出版社.

林丽琴. 2010. 武夷山土壤氧化铁垂直分布及其成因分析. 湖南农业科学, (17):70-71, 75.

齐善忠, 肖洪浪, 罗 芳. 2003. 甘肃河西山地土壤系统分类. 山地学报, **21**(6): 763-774.

王金叶, 常学向, 葛双兰, 等. 2001. 祁连山(北坡)水热状况与植被垂直分布. 西北林学院学报, **16**(增刊): 1-3.

文启孝, 杜丽娟, 张晓华. 1984. 土壤有机质研究法. 北京: 农业出版社.

向师庆, 聂立水, 张凤荣. 1992. 北京中山地区非石灰性土壤发生分类的研究. 北京林业大学学报, **14**(1): 27-33.

于东升, 史学正, 王洪杰, 等. 2006. 发生分类半淋溶土在中国土壤系统分类中的归属特征. 应用生态学报, **17**(1): 60-64.

杨全生, 刘建泉, 汪有奎. 2008. 甘肃祁连山国家级自然保护区综合科学考察报告. 兰州:甘肃科学技术出版社.

张保华, 何毓蓉. 2005. 中国土壤系统分类及其应用研究进展. 山东农业科学, (4): 76-78.

张凤荣. 2002. 土壤地理学. 北京: 中国农业出版社.

张万儒, 刘寿坡, 李贻铨, 等. 1984. 我国山地森林土壤资源及其合理利用. 资源科学, (4): 9-18.

张文彤. 2004. SPSS 统计分析高级教程. 北京: 高等教育出版社.

中国科学院南京土壤研究所. 1978. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社.

中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 1991. 中国土壤系统分类用土壤实验室分析项目及方法规范. 南京: 东南大学出版社.

中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 1992. 中国土壤系统分类土壤物理和化学方法补充. 北京: 科学出版社.

中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组. 2001. 中国土壤系统分类(第3版). 合肥: 中国科学技术大学出版社.

中国科学院南京土壤研究所, 西安光学精密机械研究所. 1989. 中国标准土壤色卡. 南京: 南京出版社.

中华人民共和国林业局. 1999. 中华人民共和国林业行业标准(森林土壤分析方法). 北京: 中国标准出版社.

中华人民共和国农业部. 2008. NY/T 1615-2008 石灰性土壤交换性盐基及盐基总量的测定 (中华人民共和国农业行业标准). 北京: 中国农业出版社.

Jobbágy EG, Jackson RB. 2001. The distribution of soil nutrients with depth: Global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, **53**: 51-77.

X-rite. 2000. Munsell Soil Color Charts. Grand Rapids: Munsell Color.

作者简介 姜 林,男,1987年生,硕士研究生,研究方向为土壤化学。E-mail: jianglinlm@nwsuaf.edu.cn

责任编辑 张 敏