湘中紫色丘陵区不同植被类型根际与非根际土壤理化特征

戴 齐，廖超林，唐 茹，林清美，向 弘
（湖南农业大学 资源环境学院，湖南 长沙 410128）

摘 要：[目的] 探索湘中紫色丘陵区不同植被类型根际与非根际土壤的理化特征，为湘中地区生态修复提供理论依据。[方法] 以典型抽样方法调查湘中丘陵区草丛(G)、草灌(GS)、灌木(S)和乔灌(AS)4 种典型植被，研究其根际与非根际土壤理化性质的差异，通过典型相关分析揭示根际与非根际土壤理化指标间的耦合关系。[结果] 研究区草丛和灌木根际土壤中细砂粒(0.25～0.05 mm)含量分别显著($p<0.05$)低于乔灌 63.84%和 76.97%；粉粒(0.02～0.002 mm)含量表现为草和灌木分别显著高于乔灌的 38.48%和 37.66%。根际土壤 0.25～0.05 mm 微团聚体含量均表现为乔灌高于其他植被，0.02～0.002 mm 微团聚体含量均表现为灌木高于其他植被。草灌与灌木非根际土壤有机质含量显著($p<0.05$)低于根际土壤 148.05%和 121.92%，灌木和草灌根际土壤有机质含量显著($p<0.05$)高于乔灌土壤 84.28%和 92.08%；草灌根际土壤全氮含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤 83.33%，草灌根际土壤碱解氮含量显著($p<0.05$)高于乔灌土壤 200.83%；不同植被类型根际/非根际土壤磷含量差异不明显，总体来看，同一植被根际土壤全磷含量低于非根际土壤，而有效磷表现为乔灌最低；乔灌根际土壤速效钾含量分别显著($p<0.05$)低于草丛和草灌土壤 125.15%和 137.71%，除草灌外，其余植被类型根际土壤全钾含量均低于非根际土壤。典范相关分析表明土壤有机质和全量养分含量，2～1，1～0.5，0.25～0.05 mm 土粒含量，2～1，1～0.5 mm团聚体 3 组理化性状间相互关系密切。[结论] 改善土壤理化性质，促进湘中丘陵地区生态恢复，应注重协调土壤养分、颗粒组成及团聚体之间的耦合关系。

关键词：植被；根际；土壤
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2017)05-0114-09 **中图分类号**：S151.9

文献参数：戴齐，廖超林，唐茹，等.湘中紫色丘陵区不同植被类型根际与非根际土壤理化特征[J].水土保持通报，2017，37(5)：114-122. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.020；Dai Qi，Liao Chaolin，Tang Ru，et al. Physicochemical characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under different vegetation types in purple soil hilly region of central Hunan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(5)：114-122. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.020

Physicochemical Characteristics of Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils Under Different Vegetation Types in Purple Soil Hilly Region of Central Hu'nan Province

DAI Qi，LIAO Chaolin，TANG Ru，LIN Qingmei，XIANG Hong
(*College of Resources and Environment，Hu'nan Agricultural University，Changsha，Hu'nan* 410128，*China*)

Abstract：[Objective] To explore the physicochemical characteristics of rhizosphere and non-rhizosphere soils under different typical types of vegetation in purple soil hilly region of central Hunan Province，and to provide theoretical basis for ecological restoration. [Methods] The physical and chemical properties of rhizosphere and non-rhizosphere soils from grass(G)，grass-shrub(GS)，shrub(S) and arbor-shrub(AS) were obtained by sampling and experimental analysis to reveal the coupling relationships with regard to the indexes of physical and chemical properties of between rhizosphere and non-rhizosphere soils. [Results] The contents of fine sand(0.25～0.05 mm) in G and S rhizosphere soils were 76.97% and 63.84% lower that of AS ($p<0.05$). Whereas，the silt contents were 38.48% and 37.66% higher. The content of 0.25～0.05 mm microaggregate

收稿日期：2016-12-14 **修回日期**：2017-03-29
资助项目：国家自然科学基金面上项目“长期培肥水稻土微结构特征及对施肥措施改变的响应”(41571211)
第一作者：戴齐(1993—)，男(汉族)，湖南省常德市人，硕士研究生，研究方向为土壤物理与土壤化学。E-mail：641636344@qq.com。
通讯作者：廖超林(1975—)，男(汉族)，湖南省衡南县人，博士，硕士生导师，主要从事土壤物理及水土保持等方面的研究。E-mail：clliao@163.com。

in the AS rhizosphere soil was higher than those of others and the 0.02～0.002 mm microaggregate content of S rhizosphere soil was the highest. The organic matter contents of GS and S in non-rhizosphere soil, were 148.05% and 121.92% ($p<0.05$) lower than the corresponding ones in rhizosphere soil. Organic matter contents in S and GS rhizosphere soils were 84.28% and 92.08% ($p<0.05$) higher that of AS. The total nitrogen content in GS rhizosphere soil was 83.33% higher than that in non-rhizosphere soil. The available nitrogen in GS rhizosphere soil was 200.83% higher ($p<0.05$) than that of AS. Either in rhizosphere soil or in non-rhizosphere soil, phosphorous contents had no significant differences among all types of vegetation. For the same type of vegetation, soil total phosphorous content in rhizosphere soil was lower than that in non-rhizosphere. Soil available phosphorous content in AS was the lowest. In comparison with the ones of G and GS, the available potassium content in AS rhizosphere soil was 125.15% and 137.71% lower($p<0.05$). There were closed relationships among the three groups of soil physicochemical indices, referring to the group of soil organic matter and total nutrient content, the group of 2～1 mm, 1～0.5 mm, 0.25～0.05 mm particles and the group of 2～1 mm,1～0.5 mm aggregates. [Conclusion] The coupled relations among soil nutrient, soil particle and soil aggregates should be applied to improve soil physicochemical properties and accelerate the ecosystem restoration in hilly region of central Hunan Province.

Keywords: vegetation; rhizosphere; soil

植被与土壤是一个相互作用、协调发展的统一体,植被的演替伴随着土壤性状的改变,土壤的分异导致植被的变化,植被的变化影响着土壤的发育[1]。植物根系是植被与土壤的相互作用的重要通道,根系从土壤中摄取水分和养分,同时向土壤分泌大量的低分子有机化合物(如糖类、有机酸、氨基酸、酚类化合物)[2]。同时,这些根系分泌物为根际微生物活动提供丰富碳源,极大改善根际微区环境,对根际土壤性状改良有重要影响[3]。湘中紫色丘陵区是湖南省生态环境最为恶劣的地区之一,也是中国南方极具代表性的生态灾害易发地区。由于紫色土极易水蚀,发育期短,地力差,常处于幼年阶段,加上颜色深、吸热性强,夏季地面温度高,蒸发量大,又因区域性水、热分布等不利环境影响和不合理的开发,致使该区域长期以来植被稀疏,水土流失和季节性旱灾严重[4]。近年来有学者就衡阳紫色丘陵区植被恢复技术、生物多样性或者是单一树种(如中山柏或芦竹或白香草木樨)或者单一模式(草本或草本+乔木)等开展了深入研究。本研究拟选择紫色丘陵典型区不同植被类型根际与非根际土壤理化特性进行研究,以期为改善紫色丘陵区生态环境,恢复植被,水土保持等方面提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于湖南省衡南县谭子山镇工联村,地处衡阳盆地中部(112°21′45″—112°23′31″E 和 26°59′50″—26°55′45″N),地势东、西、南 3 面高,逐渐向中北部倾斜,整个地形为一马蹄形盆地。属中亚热带湿润季风气候区,年平均气温 17.8 ℃。年平均降水量 1 268.8 mm,4—6 月降水量占全年 45%;7—9 月降水量仅占全年 19%;年蒸发量 1 396.1 mm。光、热、水资源比较丰富,季节性干旱显著,是湖南省环境最为恶劣的地区之一。区内广泛分布着紫色砂页岩和由其发育而成的碱性紫色土和少量酸性紫色土,植被稀疏,水土流失严重,部分地区甚至基岩裸露,土地荒芜,呈现红色荒漠化现象[5]。

1.2　样品采集

紫色丘陵区植被自然演替主要分为次生乔灌木林、灌木林、草灌及草丛群落阶段,本研究于 2013 年 11 月运用典型抽样方法对处于主要演替阶段的植物群落进行调查,在土壤母质、坡向与坡度一致,距离< 1 km 范围内,选择 4 种典型植被类型(乔灌、灌木、草灌、草)设置样地(5 m×5 m),同时对样地的主要植物种类进行鉴定,其中乔灌:马尾松(*Pinus massoniana*)、槭树(Maple)、构树(*Broussonetia papyrifera*);灌木:槭树(Maple)、花椒(*Pericarpium zanthoxyli*)、糯米条(*Abelia chinensis*);草灌:狗牙根(*Cynodon dactylon*)、艾草(*Artemisia vulgaris*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、糯米条;草:苜蓿(*Medicago sativa*)、狗牙根等。选取 3 处典型植物集中的位置分别设置面积为 10 m×10 m 的样方,均匀布点。采样点避免设在田边、路边、沟边等特殊地形的部位以及堆过肥料的地方。每种植物按“S”型路线选择 10 株,取其根际与非根际土壤,分别混合,按四分法取一部分土壤。

根际土壤的采集分 2 种方式。第 1 种方法是按

常规森林根际土壤的研究方法[6]；主要采集乔灌及灌木根际与非根际土壤。具体采样方法是在每个样地内选择有代表性树木进行根际土壤混合样品的采集，即在每一树木根基0—50 cm水平范围内，收集0—30 cm厚度土层中根表面上5 mm以内的土壤进行混合，即根际混合土样；在相同区域采集距离根表面10 cm以外土壤的混合样品，即非根际混合土样。第2种方法是按照Riley和Barber的方法[5]：挖取有完整根系的土体(体积大小视根系的范围而定)，先轻轻抖落大块不含根系的土壤，装入袋内混匀，视为非根际土壤；然后用力将根表面(1～4 mm)附着的土壤全部抖落下来，得到根际土壤。将采集的土样混合，密封后带回室内，仔细除去其中可见植物残体及土壤动物，一部分风干，一部分于4 ℃冰箱冷冻保存，分析备用，主要采集草灌及草丛根际与非根际土壤。

1.3 测定项目与方法

土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法测定，全氮采用半微量开氏法测定，碱解氮采用碱解扩散法测定，全磷采用NaOH熔融—钼锑抗比色法，速效磷采用$NaHCO_3$提取—钼锑抗显色—紫外分光光度法测定，全钾采用NaOH熔融—火焰光度法测定，速效钾采用NH_4 OAc浸提—火焰光度法测定[7]。颗粒组成、微团聚体采用吸管法，大团聚体采用干筛法和湿筛法进行测定[8]。

1.4 数据分析

用Excel 2007和DPS7.05软件进行数据数据分析，进行双因素方差分析(ANOVA)，LSD($p<0.05$)比较不同植被类型土壤养分含量和团聚体组成之间的差异。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型根际与非根际土壤有机质含量

从表1可以看出，4种植被根际土壤有机质含量总体表现为：乔灌＜草丛＜灌木＜草灌，乔灌分别显著低于($p<0.05$)灌木和草灌土壤84.28%和92.08%，低于草丛37.96%；各植被类型非根际土壤有机质含量差异不明显，总体表现出从草丛到乔灌交替减少—增加—减少的趋势；同一植被类型根际与非根际土壤间有机质含量均表现出根际高于非根际的现象，其中草灌与灌木根际土壤有机质含量分别显著($p<0.05$)高于对应非根际土壤148.05%和121.92%。

2.2 不同植被类型根际与非根际土壤全氮及碱解氮含量

从表1知，湘中紫色丘陵区不同植被类型根际与非根际土壤全氮含量差异不明显，其中根际土壤整体上表现为：草丛＞草灌＞灌木＞乔灌，非根际土壤表现为：灌木＞草丛＞乔灌＞草灌，草灌根际土壤全氮含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤83.33%。

表1 湘中紫色丘陵区不同植被下土壤养分与有机质状况

类型	植被	土壤养分含量						
		全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	全钾/(g·kg^{-1})	碱解氮/(mg·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})	有机质/(g·kg^{-1})
根际	草丛	0.67±0.19^{ab}	0.62±0.26^{a}	24.21±2.71^{a}	146.32±73.68^{abc}	8.63±3.90^{ab}	130.16±51.61^{ab}	25.62±4.55^{ab}
	草灌	0.88±0.26^{a}	0.27±0.17^{a}	20.59±7.04^{a}	301.49±166.50^{a}	13.23±7.99^{ab}	137.42±31.78^{a}	35.67±13.43^{a}
	灌木	0.58±0.18^{ab}	0.52±0.19^{a}	22.74±7.22^{a}	144.11±57.55^{abc}	6.96±2.84^{ab}	115.36±22.91^{abc}	34.22±8.27^{a}
	乔灌	0.57±0.22^{ab}	0.32±0.23^{a}	17.86±8.07^{a}	100.22±34.30^{c}	4.25±1.94^{b}	57.81±8.67^{cd}	18.57±4.68^{b}
非根际	草丛	0.60±0.10^{ab}	0.64±0.28^{a}	25.20±4.00^{a}	111.77±26.95^{bc}	14.36±6.54^{a}	66.00±47.97^{bcd}	17.32±0.68^{b}
	草灌	0.48±0.14^{b}	0.41±0.20^{a}	20.28±6.02^{a}	81.78±47.24^{c}	10.30±2.22^{ab}	47.12±27.09^{d}	14.38±2.42^{b}
	灌木	0.63±0.14^{ab}	0.63±0.03^{a}	25.44±2.71^{a}	267.64±120.63^{ab}	12.28±3.61^{ab}	52.83±24.37^{cd}	15.42±4.60^{b}
	乔灌	0.57±0.08^{ab}	0.33±0.22^{a}	19.16±7.95^{a}	83.90±13.56^{c}	6.75±2.92^{ab}	32.86±16.38^{d}	13.71±3.27^{b}

注：表中数字为平均值，±标准差，字母为多重比较(LSD)结果，同一列不同字母处理之间达到p为0.05的显著性水平。下同。

湘中紫色丘陵区不同植被类型根际土壤碱解氮含量整体上表现为：草灌＞草丛＞灌木＞乔灌，其中草灌根际土壤碱解氮含量显著($p<0.05$)高于乔灌土壤200.83%；非根际土壤碱解氮含量以灌木最高，分别显著($p<0.05$)高于乔灌土壤219.00%和草灌土壤227.27%；从同一植被类型来看，草灌根际土壤碱解氮含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤268.66%，而灌木根际土壤碱解氮含量低于非根际土壤外，其他根际土壤碱解氮含量均高于非根际土壤。

2.3 不同植被类型根际与非根际土壤全磷及有效磷含量

湘中紫色丘陵区不同植被类型根际/非根际土壤全磷含量差异不明显(表1)，其中根际土壤整体上表现为：草丛＞灌木＞乔灌＞草灌，非根际土壤则表现为：草丛＞灌木＞草灌＞乔灌，从同一植被类型来看，根际土壤全磷含量均低于非根际土壤；不同植被类型根际土壤有效磷含量差异不明显，总体上表现为：草灌＞草丛＞灌木＞乔灌，非根际土壤则表现为：草丛

>灌木>草灌>乔灌,同一植被类型根际土壤与非根际土壤有效磷含量差异也不显著。

2.4　不同植被类型根际与非根际土壤全钾及速效钾含量

湘中紫色丘陵区不同植被类型根际/非根际土壤全钾含量差异不明显,但整体上均表现为草丛>灌木>草灌>乔灌(表 1);同一植被类型除了草灌根际土壤全钾含量高于非根际土壤外,其余植被类型根际土壤全钾含量均低于非根际土壤。根际土壤速效钾含量以乔灌最低,分别显著($p<0.05$)低于草丛和草灌土壤 125.15%和 137.71%,不同植被类型非根际土壤间差异不显著,表现出从草丛到乔灌交替减少—增加的变化特征;灌根际土壤速效钾含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤 191.64%。

2.5　不同植被类型根际与非根际土壤颗粒组成

土壤颗粒分布影响土壤的水力特性、土壤肥力状况,并与土壤侵蚀和退化直接相关,是重要的土壤物理特性之一[9]。不同植被类型根际与非根际土壤颗粒组成存在一定差异(表 2)。在根际土壤中,0.25～0.05 和 0.02～0.002 mm 粒径的土粒含量分别占 21.58%～38.19%和 27.18%～44.18%。根际土壤 0.25～0.05 mm 粒径土粒表现为:乔灌>草灌>草丛>灌木,其中草丛和灌木最低且分别显著($p<0.05$)低于乔灌 63.84%和 76.97%;非根际土壤 0.25～0.05 mm 粒径土粒表现为乔灌和草灌最高,草丛次之,灌木最低;从不同植被类型乔灌根际和非根际土壤 0.25～0.05 mm 粒径土粒含量均高于其它植被,草丛和灌木根际与非根际土壤 0.02～0.002 mm 粒径土粒含量均高于其他植被。从同一植被类型根际与非根际土壤比较来看,乔灌 0.05～0.02 mm 和 0.02～0.002 mm,灌木 0.25～0.05 mm,草灌 0.25～0.05 mm 和 0.05～0.02 mm,草丛 0.5～0.25,0.25～0.05 和 0.02～0.002 mm 粒径土粒含量低于非根际土壤,其他粒径土粒含量相反,但差异均不显著。

表 2　湘中紫色丘陵区不同植被类型土壤颗粒组成　　%

类型	植被	土壤颗粒大小/mm						
		2～1	1～0.5	0.5～0.25	0.25～0.05	0.05～0.02	0.02～0.002	<0.002
根际	草丛	1.23±0.52^{ab}	2.87±1.14^{a}	2.38±1.03^{a}	23.31±0.20^{bc}	13.44±3.67^{a}	44.18±4.43^{a}	12.59±2.18^{a}
	草灌	1.87±0.92^{a}	3.06±1.06^{a}	4.91±1.92^{a}	27.63±5.56^{abc}	14.93±3.74^{a}	34.80±9.62^{ab}	12.81±0.92^{a}
	灌木	0.91±0.10^{ab}	1.91±0.46^{a}	1.61±0.61^{a}	21.58±3.25^{c}	16.39±6.02^{a}	43.60±4.79^{a}	14.00±1.28^{a}
	乔灌	1.23±1.02^{ab}	3.63±2.97^{a}	5.54±4.24^{a}	38.19±11.38^{a}	12.22±5.87^{a}	27.18±7.34^{b}	12.00±2.04^{a}
非根际	草丛	0.58±0.25^{b}	2.21±1.34^{a}	2.83±1.33^{a}	30.08±6.11^{abc}	13.06±4.75^{a}	39.39±9.30^{ab}	11.85±3.44^{a}
	草灌	0.80±0.42^{ab}	2.62±1.16^{a}	3.06±1.99^{a}	36.02±3.62^{ab}	19.59±5.11^{a}	27.33±4.70^{b}	10.59±3.61^{a}
	灌木	0.59±0.15^{b}	1.68±0.79^{a}	1.29±0.35^{a}	26.88±4.46^{abc}	16.38±4.79^{a}	40.27±3.78^{ab}	12.90±0.55^{a}
	乔灌	1.07±0.70^{ab}	2.51±1.31^{a}	2.97±1.94^{a}	37.37±9.37^{a}	16.54±2.60^{a}	30.07±10.84^{ab}	9.47±1.06^{a}

2.6　不同植被类型根际与非根际土壤微团聚体组成

土壤微团聚体的组成影响土壤养分的吸收与释放,具有保持和调节土壤水、肥及生物活动等多种功能[10]。在根际与非根际土壤中,均表现为 0.25～0.05和 0.02～0.002 mm 粒径的土粒含量较大,其中根际土壤分别占 19.65%～37.04%和 23.28%～35.73%,非根际土壤分别占 21.55%～40.17%和 29.93%～41.86%。但不同植被类型之间土粒含量差异不显著。在根际与非根际土壤 0.25～0.05 mm 粒径土粒中均表现为乔灌最高,灌木最低;而在 0.02～0.002 mm 粒径土粒中则表现为灌木最高,乔灌最低(表 3)。

表 3　湘中紫色丘陵区不同植被类型土壤微团聚体　　%

类型	植被	土壤颗粒大小/mm						
		<0.002	2～1	1～0.5	0.5～0.25	0.25～0.05	0.05～0.02	0.02～0.002
根际	草丛	8.56±6.10^{a}	13.15±3.71^{a}	6.02±2.85^{a}	22.17±5.44^{ab}	9.28±7.32^{a}	35.02±3.45^{abc}	5.79±1.46^{a}
	草灌	6.75±4.57^{a}	10.63±6.08^{a}	6.40±1.74^{a}	29.12±13.05^{ab}	14.13±4.69^{a}	27.55±5.72^{bc}	5.43±0.60^{a}
	灌木	6.47±3.52^{a}	11.37±6.74^{a}	4.82±2.41^{a}	19.65±4.77^{b}	14.94±8.38^{a}	35.73±3.91^{abc}	7.03±1.81^{a}
	乔灌	6.08±5.67^{a}	9.30±6.61^{a}	8.06±3.97^{a}	37.04±12.27^{ab}	11.47±3.86^{a}	23.28±1.75^{c}	4.76±1.29^{a}
非根际	草丛	1.99±1.10^{a}	7.34±4.09^{a}	4.67±2.51^{a}	28.71±5.77^{ab}	9.57±9.32^{a}	39.97±8.16^{ab}	7.75±2.18^{a}
	草灌	2.96±1.91^{a}	7.44±4.41^{a}	3.95±2.48^{a}	32.54±8.68^{ab}	15.07±7.20^{a}	31.51±10.57^{abc}	6.53±0.88^{a}
	灌木	3.34±2.89^{a}	6.16±3.80^{a}	2.63±1.34^{a}	21.55±4.63^{ab}	16.04±8.37^{a}	41.86±5.74^{a}	8.42±2.22^{a}
	乔灌	2.74±1.94^{a}	5.83±3.58^{a}	5.12±2.96^{a}	40.17±13.82^{a}	10.61±3.25^{a}	29.93±8.79^{abc}	5.59±2.47^{a}

2.7 湘中紫色丘陵区典型植被土壤主要养分、颗粒组成、微团聚体的耦合关系

2.7.1 根际土壤主要养分、颗粒组成、微团聚体的典范相关 典范相关分析研究两组变量之间整体的线性相关关系[11]。把湘中紫色丘陵区根际土壤主要养分指标(x_1—x_7)构成第1组变量,颗粒组成(y_1—y_7)和微团聚体(z_1—z_7)分别构成第2,3组变量。用典范相关分析来研究湘中紫色丘陵区典型植被类型根际土壤主要养分、颗粒组成以及微团聚体组成两两之间的关系(表4),并建立典型变量构成(表5)。

前4个特征值的方差贡献率分别达到了70.70%,85.00%和81.50%,基本能反映出绝大部分的变量信息,由此而建立了3组变量两两之间的4对典型变量构成。

表4 湘中紫色丘陵区典型植被类型根际土壤主要养分、颗粒组成、微团聚体的典范相关分析

因 子	典型向量	典范相关系数	特征值	卡方值	df	p	累积贡献率/%
养分与颗粒组成	1	1.000	1.134	0.000	49.000	0.000	8.90
	2	1.000	3.885	216.539	36.000	0.000	39.40
	3	1.000	1.987	96.019	25.000	0.000	55.00
	4	0.986	2.000	22.192	16.000	0.137	70.70
养分与微团聚体	1	1.000	2.45	0.000	49.000	0.000	18.60
	2	1.000	3.48	263.395	36.000	0.000	45.00
	3	1.000	2.79	137.242	25.000	0.000	66.20
	4	0.988	2.48	20.066	16.000	0.217	85.00
微团聚体与颗粒组成	1	1.000	2.96	0.000	49.000	0.000	25.50
	2	1.000	3.72	218.537	36.000	0.000	57.50
	3	1.000	2.43	94.810	25.000	0.000	78.40
	4	0.946	0.36	14.430	16.000	0.567	81.50

表5 湘中紫色丘陵区根际土壤主要养分与颗粒组成、微团聚体之间的典型变量构成

因 子	典型变量构成
养分与颗粒组成	$U_1=-0.305x_1-0.205x_2-0.172x_3+0.588x_4-0.092x_5-0.386x_6-0.100x_7$
	$U_2=-0.189x_1+0.442x_2-0.002x_3+0.658x_4+0.204x_5+0.365x_6-0.017x_7$
	$U_3=-0.187x_1+0.826x_2-0.405x_3+0.140x_4+0.041x_5-0.218x_6+0x_7$
	$U_4=-0.515x_1+0.799x_2-0.111x_3-0.100x_4+0.249x_5-0.006x_6+0.012x_7$
	$V_1=0.187y_1+0.248y_2+0.084y_3-0.828y_4+0.087y_5+0.269y_6-0.046y_7$
	$V_2=0.298y_1+0.447y_2-0.196y_3-0.668y_4+0.396y_5+0.044y_6-0.043y_7$
	$V_3=0.374y_1-0.200y_2-0.314y_3-0.824y_4+0.084y_5+0.054y_6+0.022y_7$
	$V_4=0.906y_1-0.332y_2-0.019y_3+0.178y_4+0.090y_5+0.112y_6+0.009y_7$
养分与微团聚体	$U_1=-0.187x_1+0.507x_2+0.278x_3-0.022x_4-0.666x_5+0.045x_6+0.048x_7$
	$U_2=-0.457x_1+0.246x_2+0.491x_3+0.610x_4+0.280x_5-0.029x_6+0.010x_7$
	$U_3=-0.530x_1-0.508x_2+0.603x_3+0.045x_4-0.243x_5+0.032x_6-0.032x_7$
	$U_4=-0.105x_1-0.622x_2+0.707x_3+0.301x_4+0.003x_5+0.022x_6+0.025x_7$
	$N_1=0.118z_1-0.738z_2+0.279z_3-0.200z_4+0.417z_5+0.191z_6-0.025z_7$
	$N_2=-0.118z_1-0.960z_2+0.017z_3-0.092z_4+0.203z_5+0.017z_6+0.003z_7$
	$N_3=0.039z_1-0.609z_2-0.455z_3-0.405z_4+0.218z_5-0.290z_6-0.002z_7$
	$N_4=-0.131z_1+0.345z_2-0.816z_3-0.176z_4+0.310z_5-0.116z_6-0.025z_7$
微团聚体与颗粒组成	$N_1=-0.637z_1+0.216z_2+0.254z_3-0.033z_4+0.145z_5+0.116z_6-0.052z_7$
	$N_2=-0.756z_1-0.075z_2+0.467z_3-0.213z_4+0.104z_5+0.073z_6-0.025z_7$
	$N_3=-0.601z_1-0.646z_2+0.202z_3+0.033z_4+0.381z_5+0.003z_6-0.008z_7$
	$N_4=0.311z_1-0.900z_2-0.110z_3+0.206z_4+0.005z_5-0.009z_6-0.018z_7$
	$V_1=-0.792y_1-0.324y_2+0.078y_3+0.212y_4+0.129y_5+0.100y_6-0.025y_7$
	$V_2=-0.768y_1-0.304y_2+0.335y_3-0.254y_4-0.075y_5+0.087y_6-0.017y_7$
	$V_3=-0.581y_1-0.720y_2-0.012y_3-0.140y_4+0.309y_5-0.007y_6-0.007y_7$
	$V_4=0.382y_1-0.835y_2+0.032y_3+0.000y_4-0.202y_5+0.078y_6+0.017y_7$

注:x_1 为有机质;x_2 为TN;x_3 为TP;x_4 为TK;x_5 为AN;x_6 为AP;x_7 为AK;y_1 为颗粒组成2～1 mm;y_2 为颗粒组成1～0.5 mm;y_3 为颗粒组成0.5～0.25 mm;y_4 为颗粒组成0.25～0.05 mm;y_5 为颗粒组成0.05～0.02 mm;y_6 为颗粒组成0.02～0.002 mm;y_7 为颗粒组成<0.002 mm;z_1 为微团聚体2～1 mm;z_2 为微团聚体1～0.5 mm;z_3 为微团聚体0.5～0.25 mm;z_4 为微团聚体0.25～0.05 mm;z_5 为微团聚体0.05～0.02 mm;z_6 为微团聚体0.02～0.002 mm;z_7 为微团聚体<0.002 mm。下同。

养分因子与颗粒组成因子的第 1,2,3,4 对典型相关系数分别为 1.000,1.000,1.000,0.986,相关系数均较大,且统计检验第 1,2,3 对均达到极显著水平,取前 3 对典型变量来分析两类性质之间的相互关系。

从前 3 组典型变量系数可以看出:土壤主要养分因子中 TK 和 TN 的载荷最高,颗粒组成因子中 0.25～0.05 mm 粒径颗粒的载荷最高,说明研究区根际土壤 TK 和 TN 与 0.25～0.05 mm 粒径土粒的相互影响最大,其中根际土壤 TK,TN 均与 0.25～0.05 mm 粒径土粒含量负相关。

养分因子与微团聚体因子的第 1,2,3 对典型相关系数分别为 1.0,1.0,1.0 且均达到极显著水平,第 1 组典型变量系数主要反映了研究区根际土壤 TN 和 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关,土壤 AN 和 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关。第 2 组典型变量系数主要反映了研究区根际土壤 TP 和 TK 与 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关,土壤有机质含量与 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关。第 3 组典型变量系数主要反映了根际土壤 TP 与 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关,土壤有机质含量与 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关。

微团聚体因子与颗粒组成因子第 1,2,3 对典型相关系数均达到了极显著水平,均为 1.000,第 1 组、第 2 组典型变量系数主要反映了根际土壤 2～1 mm 微团聚体含量与 2～1 mm 颗粒含量呈正相关,第 3 组典型变量系数主要反映了根际土壤 2～1 mm 微团聚体含量与 2～1,1～0.5 mm 颗粒组成呈正相关,土壤 1～0.5 mm 微团聚体含量与 2～1,1～0.5 mm 颗粒组成呈正相关。

2.7.2　非根际土壤主要养分、颗粒组成、微团聚体的典型相关　把湘中紫色丘陵区非根际土壤主要养分指标(x_1-x_7)构成第 1 组变量,颗粒组成(y_1-y_7)和微团聚体(z_1-z_7)分别构成第 2,3 组变量。用典范相关分析来研究湘中紫色丘陵区典型植被类型非根际土壤主要养分、颗粒组成以及微团聚体组成两两之间的关系(表 6),并建立典型变量构成(表 7)。前 4 个特征值的方差贡献率分别达到了 71.20%,85.00%和 84.30%,基本能反映出绝大部分的变量信息,由此而建立了 3 组变量两两之间的 4 对典型变量构成。

表 6　湘中紫色丘陵区典型植被类型非根际土壤主要养分、颗粒组成、微团聚体的典范相关分析

因 子	典型向量	典范相关系数	特征值	卡方值	df	p	累积贡献率/%
养分与颗粒组成	1	1.000	1.13	0.000	49.000	0.000	8.90
	2	1.000	3.89	216.539	36.000	0.000	39.40
	3	1.000	1.99	96.019	25.000	0.000	55.00
	4	0.986	2.06	22.192	16.000	0.137	71.20
养分与微团聚体	1	1.000	2.37	0.000	49.000	0.000	18.60
	2	1.000	3.36	263.395	36.000	0.000	45.00
	3	1.000	2.70	137.242	25.000	0.000	66.20
	4	0.988	2.39	20.066	16.000	0.217	85.00
微团聚体与颗粒组成	1	1.000	3.83	0.000	49.000	0.000	30.10
	2	1.000	4.01	220.964	36.000	0.000	61.60
	3	1.000	2.32	94.811	25.000	0.000	79.80
	4	0.946	0.57	14.430	16.000	0.567	84.30

非根际土壤养分因子与颗粒组成因子第 1,2,3 对典型相关系数均达到了极显著水平,均为 1.000,第 1 组、第 2 组典型变量系数主要反映了非根际土壤 TK 含量与 0.25～0.05 mm 颗粒组成呈负相关,第 3 组典型变量系数主要反映了非根际土壤 TN 含量与 0.25～0.05 mm 颗粒组成呈正相关。

养分因子与微团聚体因子的第 1,2,3 对典型相关系数分别为 1.0,1.0,1.0 且均达到极显著水平,第 1 组典型变量系数主要反映了研究区非根际土壤 AN 和 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关。第 2 组典型变量系数主要反映了非根际土壤 TK 与 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关。第 3 组典型变量系数主要反映了根际土壤 TP 与 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关。

微团聚体与颗粒组成因子第 1,2,3 对典型相关系数均达到极显著水平,均为 1.0;第 1 组,第 2 组典型变量系数主要反映根际土壤 2～1 mm 微团聚体含量与 2～1 mm 颗粒组成呈正相关;第 3 组典型变量系数主要反映根际土壤 2～1 mm 微团聚体含量与 2～1,1～0.5 mm 颗粒组成呈正相关,土壤 1～0.5 mm 微团聚体含量与 2～1,1～0.5 mm 颗粒组成呈正相关。

表 7 湘中紫色丘陵区非根际土壤主要养分与颗粒组成、微团聚体之间的典型变量构成

因 子	典型变量构成
养分与颗粒组成	$U_1=-0.305x_1-0.205x_2-0.172x_3+0.597x_4-0.099x_5-0.550x_6-0.409x_7$
	$U_2=-0.189x_1+0.442x_2-0.002x_3+0.668x_4+0.218x_5+0.520x_6-0.071x_7$
	$U_3=-0.187x_1+0.826x_2-0.405x_3+0.142x_4+0.044x_5-0.311x_6+0x_7$
	$U_4=-0.515x_1+0.799x_2-0.111x_3-0.101x_4+0.267x_5-0.009x_6+0.048x_7$
	$V_1=0.187y_1+0.248y_2+0.084y_3-0.840y_4+0.093y_5+0.383y_6-0.189y_7$
	$V_2=0.298y_1+0.447y_2-0.196y_3-0.678y_4+0.424y_5+0.063y_6-0.174y_7$
	$V_3=0.374y_1-0.200y_2-0.314y_3-0.836y_4+0.090y_5+0.077y_6+0.091y_7$
	$V_4=0.906y_1-0.332y_2-0.019y_3+0.181y_4+0.096y_5+0.159y_6+0.038y_7$
养分与微团聚体	$U_1=-0.187x_1+0.507x_2+0.278x_3-0.022x_4-0.771x_5+0.068x_6+0.177x_7$
	$U_2=-0.457x_1+0.246x_2+0.491x_3+0.618x_4+0.324x_5-0.044x_6+0.038x_7$
	$U_3=-0.530x_1-0.508x_2+0.603x_3+0.045x_4-0.281x_5+0.047x_6-0.117x_7$
	$U_4=-0.105x_1-0.622x_2+0.707x_3+0.304x_4+0.003x_5+0.032x_6+0.093x_7$
	$N_1=0.118z_1-0.738z_2+0.279z_3-0.203z_4+0.483z_5+0.286z_6-0.090z_7$
	$N_2=-0.118z_1-0.960z_2+0.017z_3-0.093z_4+0.235z_5+0.025z_6+0.012z_7$
	$N_3=0.039z_1-0.609z_2-0.455z_3-0.410z_4+0.252z_5-0.434z_6-0.008z_7$
	$N_4=-0.131z_1+0.345z_2-0.816z_3-0.178z_4+0.359z_5-0.174z_6-0.090z_7$
微团聚体与颗粒组成	$N_1=-0.637z_1+0.216z_2+0.255z_3+0.035z_4+0.59z_5-0.416z_6+0.533z_7$
	$N_2=-0.755z_1-0.075z_2+0.467z_3-0.244z_4+0.114z_5-0.261z_6+0.254z_7$
	$N_3=-0.600z_1-0.646z_2+0.202z_3+0.035z_4+0.417z_5-0.010z_6+0.079z_7$
	$N_4=0.311z_1-0.900z_2-0.110z_3+0.217z_4+0.005z_5+0.032z_6+0.179z_7$
	$V_1=-0.792y_1-0.325y_2+0.078y_3+0.224y_4+0.142y_5-0.358y_6+0.251y_7$
	$V_2=-0.768y_1-0.304y_2+0.335y_3-0.269y_4-0.083y_5-0.312y_6+0.172y_7$
	$V_3=-0.581y_1-0.721y_2-0.012y_3-0.148y_4+0.339y_5+0.026y_6+0.074y_7$
	$V_4=0.383y_1-0.835y_2+0.031y_3+0.000y_4-0.221y_5-0.279y_6-0.169y_7$

3 讨论与结论

(1) 不同植被类型根际与非根际土壤颗粒组成。土壤颗粒组成影响土壤水分和养分的分布、迁移及利用,是重要的土壤物理特性之一[12]。湘中丘陵区不同植被类型间的非根际土壤及同种植被类型的根际与非根际土壤间,各粒径土粒含量差异均不显著,不同植被类型间根际土壤颗粒组成除细砂粒(0.25～0.05 mm)和粉粒(0.02～0.002 mm)外,其他粒径土粒含量间差异均不显著,其中细砂粒含量表现为草丛和灌木分别显著($p<0.05$)低于乔灌 63.84%和 76.97%,说明乔灌根际对 0.25～0.05 mm 土壤颗粒具有富集作用;而粉粒含量表现为乔灌分别显著低于草丛和和灌木的 38.48%和 37.66%,表明相对其他植被类型,乔灌植被导致土壤粉粒含量降低。这可能是因为乔灌地表年枯落物较多,每年有大量有机质输入土壤,土壤腐殖质累积,加之根系发育及分泌粘液,促使了土壤颗粒的形成。

(2) 不同植被类型根际与非根际土壤微团聚体。土壤微团聚体的组成直接影响土壤持水和养分的贮存与释放,良好的微团聚体组成除了具有良好的土壤肥力外,还具有良好的抗侵蚀功能。研究表明,随着植被的生长,植被根系生长存在差异,导致了不同植被类型根际与非根际土壤微团聚体组成的差异。研究区无论是根际还是非根际土壤,除 0.25～0.05 mm 和 0.02～0.002 mm 微团聚体含量外,其他粒径微团聚体含量差异均不显著。不同植被类型根际与非根际土壤 0.25～0.05 mm 微团聚体均表现为乔灌高于其他植被,0.02～0.002 mm 微团聚体含量均表现为灌木高于其他植被。这说明在湘中紫色丘陵区植被恢复过程中,灌木和乔灌对于土壤微团聚体的改善作用优于草和草灌。这是由于灌木和乔灌地表年枯落物增加了地表土壤有机质来源,使得土壤颗粒之间有机胶结作用增强[9],且灌木与乔灌较之草和草灌地下根系更发达,其根系分布较浅且根须发达[13],大多分布在土壤表层,根在土壤中的穿透和扎伸能力增强,使土壤结构相对松散、通透性好[14]、土壤结构得到改善。

(3) 不同植被类型根际与非根际土壤有机质及养分。土壤有机质被认为是土壤质量的一个重要的指示指标,它是土壤养分的源与库,并能改善土壤的物理和化学性状[15],研究区乔灌根际土壤有机质含量显著($p<0.05$)低于灌木和草灌土壤 84.28%和 92.08%,该区乔灌主要为马尾松和槭树等常绿针叶

或阔叶林,而灌木主要为花椒、糯米条等落叶林,其枯枝落叶及其有机物腐解进入土壤的量相对较大,同时,湘中丘陵区乔灌林下多为裸露地,土壤侵蚀严重,导致灌木土壤有机质含量显著高于乔灌,同理,草灌土壤高于灌木。植物在生长过程中吸收的养分主要来自根周围即根际,根际微区的养分状况很大程度上决定了植物的生长状况[16]。研究区同一植被类型根际与非根际土壤间有机质含量均表现出根际>非根际的现象,其中草灌与灌木非根际土壤有机质含量显著($p<0.05$)低于根际土壤 148.05%和 121.92%,说明紫色丘陵区不同植被类型根际对土壤有机质具有富集作用[17],同时,不同植被类型间根际对土壤有机质富集作用存在差异,草灌与灌木富集作用明显。研究区根际土壤各主要养分指标均高于非根际土壤,尤其以全氮和碱解氮最为明显,草灌根际土壤碱解氮含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤268.66%,全氮含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤 83.33%,说明紫色丘陵区不同植被类型根际土壤对养分有一定的富集作用,其中草灌根际对土壤全氮及碱解氮有显著的富集作用明显,且与有机质变化规律一致,根际对土壤 TN 和 AN 富集作用明显,可能与根际与植物生长过程中枯落物、根系、根毛及根表皮分解有关[18]。湘中紫色丘陵区不同植被类型土壤全磷含量差异不明显,与苏永中等[19]研究结果相似,表明紫色丘陵区不同植被类型根际对土壤全磷含量影响不大。研究区有效磷除草灌外,其他植被根际土壤有效磷含量均低于非根际土壤,这可能是由于土壤中磷的移动能力很低,由于植物的吸收,根际土壤有效磷含量出现亏缺。而草灌根际土壤有效磷含量较非根际土壤高,说明有效磷在草灌根际出现一定的富集现象,这可能是因为根系分泌物、根际磷酸酶、根际微生物的活动、菌根等因素导致草灌根际磷有效性的提高[20]。湘中不同植被类型土壤全钾含量差异不明显。研究区不同植被类型根际土壤速效钾含量均高于非根际土壤,其中草灌根际土壤速效钾含量显著($p<0.05$)高于非根际土壤 191.64%,说明草灌根际对速效钾有明显的富集作用,根际土壤速效钾含量以乔灌最低,分别显著($p<0.05$)低于草和草灌土壤 125.15%和 137.71%,说明不同植被根际对速效钾的富集作用程度不同。

(4) 不同植被类型根际与非根际土壤颗粒、微团聚体及养分之间的耦合关系。湘中紫色丘陵区生态退化严重,近年来随着植被恢复,水土保持工作及各种环保政策的落实,紫色丘陵区生态系统正在逐渐恢复。植被恢复后,地表枯落物和地下根系增多,从而增加了土壤中天然有机质来源,促使土壤中团聚体的形成,另外植被冠层与地表覆盖物能有效减少降雨和地表径流对土壤的冲刷与破坏作用。而土壤中有机质的增加以及团聚体含量的变化又对植被恢复产生重要的影响。紫色丘陵区不同植被类型根际和非根际土壤养分、颗粒组成及微团聚体的相关性表现不同。根际土壤养分与颗粒组成间表现为全钾、全氮均与 0.25～0.05 mm 土粒含量负相关;土壤养分与微团聚体间表现为全氮、全磷和全钾与 1～0.5 mm 微团聚体含量分别呈负相关,碱解氮和土壤有机质含量与 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关;土壤微团聚体和颗粒组成间表现为土壤 2～1 和 1～0.5 mm 微团聚体含量分别与 2～1,1～0.5 mm 颗粒组成呈正相关。非根际土壤养分与颗粒组成间表现为全氮和全钾含量分别与 0.25～0.05 mm 颗粒组成呈正、负相关;土壤养分与微团聚体间表现为碱解氮和 1～0.5 mm 微团聚体含量正相关,而土壤 TK 和 TP 与 1～0.5 mm 微团聚体含量负相关;土壤微团聚体和颗粒组成间的相关性与根际土壤一致。比较根际土壤与非根际土壤间的养分、颗粒组成和微团聚体的相关性,发现根际与非根际土壤养分中的全钾与全氮均与 0.25～0.05 mm 土粒含量关系密切,但全氮与 0.25～0.05 mm 土粒含量在根际与非根际土壤中分别表现为负和正的相关关系;就土壤养分与微团聚体的关系来说,根际与非根际土壤全钾和全磷均与 1～0.5 mm 微团聚体含量分别呈负相关,而 AN 相反,此外,根际土壤也表现为有机质和 TN 分别与 1～0.5 mm 微团聚体含量呈正、负相关;紫色丘陵区根际与非根际土壤间微团聚体含量的相关性不存在差异均。因此,紫色丘陵区根际土壤中的全钾和全氮、全磷、碱解氮及土壤有机质,2～1,1～0.5,0.25～0.05 mm 颗粒组成及 2～1 和 1～0.5 mm 微团聚体含量关系密切且相互影响;而非根际土壤的除有机质外,关系密切的指标均与根际土壤一致。说明为了改善衡阳紫色丘陵区土壤性状,开展植被恢复与生态环境建设,应注重调控土壤有机质与全量养分含量,合理 2～1,1～0.5,0.25～0.05 mm 颗粒组成,促进土壤 2～1 和 1～0.5 mm 团聚体的形成,以实现该区的土壤质量的改善,生态环境的改良。

[参 考 文 献]

[1] 杨宁,邹冬生,杨满元,等.衡阳紫色土丘陵坡地植被不同恢复阶段土壤理化特征分析[J].农业现代研究,2012,33(6):757-761.

[2] Majdi H, Persson H. Effects of ammonium sulphate application on the chemistry of bulk soil, rhizosphere, fine-roots and fine-root distribution in a *Picea abies*(L.)

Karst stand[J]. Plant And Soil, 1995,168-169(1):151-160.
[3] 张福锁,曹一平. 根际动态过程与植物营养[J]. 土壤学报,1992,29(3):239-250.
[4] 廖超林,傅灵艺,盛浩,等. 紫色丘陵区旱地撂荒自然恢复提高土壤蓄水性能[J]. 农业工程学报,2014,30(21):111-119.
[5] Riley D, Barber S A. Bocarbonate accumulation and pH changes at the soybean root soil interface[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969,33:905-908.
[6] 詹媛媛,薛梓瑜,任伟,等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征[J]. 生态学报,2009,29(1):59-66.
[7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2005.
[8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤物理分析[M]. 北京:科学出版社,1978.
[9] 周虎,吕贻忠,杨志臣,等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(9):1973-1979.
[10] 张超,刘国彬,薛萚,宋籽霖,张昌胜. 黄土丘陵区不同植被类型根际土壤微团聚体及颗粒分形特征[J]. 中国农业科学,2011,44(3):507-515.
[11] 杜虎,彭晚霞,宋同清,等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. 植物生态学报,2013,37(3):197-208.
[12] 沈慧,姜凤崎,杜晓军,等. 水土保持林土壤肥力及评价指标[J]. 水土保持学报,2000,14(2):60-65.
[13] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等. 黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J]. 西安理工大学学报,2009,25(4):377-382.
[14] 周萍,刘国彬,侯喜禄. 黄土丘陵区不同恢复年限草地土壤微团粒分形特征[J]. 草地学报,2008,16(4):396-402.
[15] 刘金福,洪伟. 不同起源格氏栲林地的土壤分形特征[J]. 山地学报,2001,19(6):565-569.
[16] 叶存旺,翟巧绒,郭梓娟,等. 沙棘—侧柏混交林土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(5):1-6.
[17] 侯杰,叶功富,张立华. 林木根际土壤研究进展[J]. 防护林科技,2006(1):30-33.
[18] 吉艳芝,冯万忠,陈立新,等. 落叶松混交林根际与非根际土壤养分、微生物和酶活性特征[J]. 生态环境 2008,17(1):339-343.
[19] 苏永中,赵哈林,张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报,2002,13(7):802-806.
[20] 薛梓瑜,周志宇,詹媛媛,等. 干旱荒漠区旱生灌木根际土壤磷变化特征[J]. 生态学报 2010,30(2):0341-0349.

(上接第 113 页)

[参 考 文 献]

[1] Skempton A W. Long-term stability of clay slopes[J]. Geotechnique, 1964,14(2):157-168.
[2] 田斌,戴会超,王世梅. 滑带土结构强度特征及其强度参数取值研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(17):2887-2892.
[3] 谭文辉,任奋华,苗胜军. 峰值强度与残余强度对边坡加固的影响研究[J]. 岩土力学,2007,28(S1):616-618.
[4] Bishop A W, Green G E, Garga V K, et al. A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength[J]. Geotechnique, 1971,21(4):273-328.
[5] Townsend F C, Gilbert P A. Tests to measure residual strengths of some clay shales[J]. Geotechnique. 1973,23(2):267-271.
[6] 任惠芳. 浅析滑坡土的残余强度[J]. 青海地质,1995(2):70-74.
[7] 戴福初,王思敬,李焯芬. 香港大屿山残坡积土的残余强度试验研究[J]. 工程地质学报,1998,6(3):223-229.
[8] 孙涛,洪勇,栾茂田,等. 采用环剪仪对超固结黏土抗剪强度特性的研究[J]. 岩土力学,2009,30(7):2000-2004.
[9] 张昆,郭菊彬. 滑带土残余强度参数试验研究[J]. 铁道工程学报,2007,24(8):13-15.
[10] 周平根. 滑带土强度参数的估算方法[J]. 水文地质工程地质,1998(6):30-32.
[11] 杨有莲,朱俊高,余挺,等. 土与结构接触面力学特性环剪试验研究[J]. 岩土力学,2009,(11):3256-3260.
[12] 洪勇,孙涛,栾茂田,等. 土工环剪仪的开发及其应用研究现状[J]. 岩土力学,2009,30(3):628-634.
[13] 吴迪,简文彬,徐超. 残积土抗剪强度的环剪试验研究[J]. 岩土力学,2011,32(7):2045-2050.
[14] 廖建民,吴益平,欧光照,等. 采用环剪仪对滑带土抗剪强度特性的研究[J]. 武汉理工大学学报,2013,35(10):92-95.
[15] 王顺,项伟,崔德山,等. 不同环剪方式下滑带土残余强度试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(10):2967-2972.
[16] Bishop A W. Progressive failure with special reference to the mechanism eausing it[C]// Proceedings of the Geotechnieal Conference on the Shear Strength of Natural Soils and Pocks. Oslo: Norwegian Geothchnical Institute, 1967:142-150.