

滇西北剑湖双河水库流域不同土地利用类型下土壤理化性质 及其对抗剪性能的影响

王金蕾¹, 陈晨², 杨苑君^{1,*}

(1. 云南农业大学 水利学院 云南昆明 650021; 2. 西南林业大学 生态与环境学院 云南 昆明 6650224)

摘 要:【目的】通过对滇西北剑湖双河水库流域不同土地利用类型下的土壤理化性质和抗剪性能关系的研究, 为研究区域及同类型的水土流失地区治理提供一定的依据和思路。【方法】以云南省大理州剑川县双河水库流域为研究区域, 将研究区草地、林地、耕地和采矿用地 4 种土地利用类型的土壤作为研究对象, 根据当地干湿季节的土壤含水率, 配置了三种实验含水率, 分别对应旱季含水率 15%, 雨季含水率 35%, 和过渡季节的含水率 25%, 并测定土样的理化性质和抗剪性能, 分析不同土地利用类型的理化性质及抗剪性能的差异, 并分析土壤理化性质对抗剪性能的影响。【结果】结果表明: (1) 在 10 种实验选定的土壤理化性质指标中, 有 7 种指标 (分别是 pH、TP、TN、TOC、氮磷比、粉粒和砂粒) 在不同土地利用类型土壤中存在显著性差异, 并且差异主要存在于采矿用地、耕地和其他类型的土壤中。(2) 4 种土地利用类型的抗剪强度均随着土壤含水率的增加而减小, 随着垂直压力的增加而增加; 粘聚力和内摩擦角随着含水率增大基本呈减小趋势。(3) 土壤理化性质和抗剪性能的相关性分析表明, 在 15% 含水率下 pH、粉粒、砂粒与抗剪强度具有显著相关性; 在 25% 和 35% 含水率下, pH 与粘聚力、内摩擦角具有显著相关性。【结论】(1) 人为扰动会对土壤理化性质造成一定的影响。(2) 土壤粒径、含水率、pH 等是与土壤抗剪性能密切相关的理化性质, 其中土壤粒径和含水率对抗剪性能的影响是直接的, 而 pH 会通过影响土壤生物和微生物的生长和生活环境, 从而间接影响土壤的抗剪性能。(3) 在 15% 含水率下, 黏粒和砂粒含量对抗剪性能有显著影响, 而在 25% 和 35% 含水率条件下该影响逐渐减弱, 说明研究区域在干旱条件下, 土壤的物理性能对抗剪性能会产生影响, 含水率增大后, 该影响减弱。

关键词: 土壤抗剪性能; 土壤理化性质; 土地利用类型

Soil Physical and Chemical Properties of Different Land Use Types and Its Influence on Shear Resistance in Jianhu Watershed of Northwestern Yunnan

Abstract: [Objective] Through the study of the relationship between soil physical and chemical properties and shear resistance under different land types, it provides certain basis and ideas for the control of soil and Moisture loss in study area and the management of the similar soil erosion area. [Method] Taking the Jianhu Moistureshed in Jianchuan County, Dali Prefecture, Yunnan Province as a typical study area, the four types of soils in the study area which are grassland, woodland, cultivated land and mining land were used as the research object. According to the local soil moisture content in the dry and wet seasons, three moisture content were configured respectively. Corresponding to 15% moisture content in the dry season, 35% moisture content in the rainy season, and 25% moisture content in the transition season. Soil physical and chemical properties and shear strength were tested in the laboratory. [Results] The results show that 1) 7 out of 10 index of soil physical and chemical properties (they are pH, TP, TN, TOC, nitrogen to phosphorus ratio, silt and sand, respectively) have significant differences among the four types of soil, and the differences mainly exist between mining land, cultivated land and other types of land; 2) the shear strengths of the four land use types decrease with the increasement of soil moisture content, while increase with the increasement of vertical pressure; the cohesion force and internal friction angle basically decrease while moisture content increasing; 3) the correlation between physical and chemical properties and shear strength shows the at 15% moisture content, pH, Silt, and sand are significantly correlated with shear strength; when moisture content increasing, pH is significantly related to cohesion and internal friction angle. [Conclusion] 1) It is proved that external disturbance will have a certain impact on soil physical and chemical properties. 2) According to the correlation analysis of physical and chemical properties, soil particle size, moisture content, pH are the properties closely related to soil shear resistance. Among them, soil particle size and moisture

content are directly affect soil shear property, while soil pH can indirectly affect the soil by affecting the growth and living environment of soil organisms and microorganisms. 3) At 15% moisture content, the content of clay and sand has a significant impact on the shear strength, while under the conditions of 25% and 35% moisture content, the effect gradually weakens, indicating that under drought conditions, soil physical properties will have an impact on the soil shear resistance, and the impact will be weakened when moisture content increases.

Key words: Soil shear resistance; soil physical and chemical properties; land use type

1 引言

水土保持在我国有几千年的悠久历史, 劳动人民在长期的生产实践中创造了许多行之有效的水土保持措施。我国地形复杂, 再加上之前不合理的土地开发利用, 水土流失现象非常严重。水土流失问题一直是我国生态环境保护方面普遍关注的话题, 水土流失严重影响着我国生态环境质量和当地人们生活质量的提高。目前关于土壤理化性质、土壤抗剪强度的研究已经建立了相对完整的体系, 土壤抗剪强度作为一个表征土体力学性质的主要指标, 直接反映了土体在外力作用下发生剪切变形的难易程度(郑子成等, 2014), 即能够反应土壤的稳定性能。现有的研究可以论证出土壤抗剪强度与土壤物理性质存在紧密的联系, 但目前关于土壤抗剪强度的研究多是含水量和容重对其的影响, 少有结合土壤化学性质对土壤抗剪性能影响的研究。本文将通过实验分析云南省大理州双河水库流域不同土地利用类型的土壤理化性质与土壤抗剪性能, 探讨土壤理化性质及其对土壤抗剪性能的影响。

2 国内外研究现状

土壤的理化性质决定土壤的质量好坏, 抗剪性能影响着土体的稳定性, 国内外关于这两方面已有大量的研究。Pasquale Borrelli 等(2013)提出人为因素与土地利用方式的改变是造成土壤理化性质变化的主要原因, 熊康宁等(2012)认为我国西南地区的石漠化现象与过度的农耕导致的土地类型退化有关。此外, 赵筱青等(2012)通过对尾叶桉林区的土壤理化性质的研究发现, 与对照相比桉类林土壤酸性增强; 有机质、TN、水解性氮、有效磷和速效钾含量均显著下降, 说明不同植被下的土壤理化性质会产生明显差别。

土壤抗剪强度是由土粒间发生相对滑动产生的摩擦力、颗粒间胶结作用、电子间的吸引力所构成, 其中内摩擦角和粘聚力是影响土壤抗剪强度的主要内在因素。王云琦等(2006)认为在重庆缙云山不同土地利用类型下土壤结构对土地抗剪性能具有影响, 其中影响内摩擦角的是土壤机械组成成分维和微团聚体组成成分维, 影响粘聚力的是机械组成成分维。江浩浩等(2009)提出, 在边坡工程中, 不同植被覆盖下, 土壤抗剪强度指标会随着含水率的增加呈现类似先增加后减少的趋势。具体解释为, 王丽等人(2009)的研究: 含水量越小, 土壤的基质吸力就越大, 抗剪强度越大, 反之含水量越大基质吸力就越小, 抗剪强度也越小, 当含水量达到饱和时, 非饱和土与饱和土的抗剪强度逐渐趋和。姚军等(2010)认为含水量、坡度和降雨强度等对黄土区坡耕地表层土壤抗剪强度有综合影响。杨永红等(2006)认为, 植被覆盖具有提高土壤抗剪强度的作用(杨永红等, 2006)。

3 材料与方法

3.1 项目区概况

3.1.1 研究区自然概况

剑湖位于云南省大理州剑川县东南 4.5km 处。喻庆国等(2015)分析发现从 1957~2012 年的 55 年间, 剑湖水域共减少了 203.0 hm², 相比于 1957 年减少了三成, 年均减少 3.69 hm², 引起剑湖水域面积萎缩的原因主要是泥沙的淤积, 追其原因, 是近几十年来剑湖流域开展了伐木伐林、陡坡垦殖、公路修建、采石采砂等人为活动, 致使流域内水土流失问题较为严重, 大量泥沙经入湖河流被输送进入剑湖内, 而后沉积, 导致剑湖水域面积逐年缩小。在四条主要入湖河流中(永丰河、金龙河、格美江和狮河), 以金龙河入户口泥沙淤积最为严重, 经实地勘察, 发现金龙河上流域中的双河水库是水土流失最为严重的区域(张奇等, 2017), 具有作为典型地况的条件, 因此, 将双河水库流域作为本文的研究区域。

3.1.2 现场勘查及取样

双河水库流域土地利用类型丰富多样,除常见的耕地、林地、草地、居民用地外,该流域还以产煤作为主要经济支撑(喻庆国等,2014),因此依据土地利用现状分类(GB/T21010-2017)将土地利用类型分类,选择草地、林地、耕地、采矿用地为本次的四类主要研究土地类型。土壤侵蚀造成的蓄水困难使得在岸坡、湿地、水库等极易发生泥沙堆积(何永彬等,2013;曾海鳌等,2010),考虑流域内位置、坡度、坡向、植被覆盖度及距河流远近等条件进行采样地选取,在整个流域尽量均匀布设采样点(郭进等,2014;常维娜等,2014)。

采样点选择泥沙来源区域,以5点混合采样法,采集各个土地类型下的随机三个样本,除去表层腐殖质层,取0~20 cm的表层土壤,同一土地类型下的样品均混合均匀,取2 kg置于自封袋中,在各区分别采样共计43个样品,其中草地10个,林地21个,耕地10个,采矿用地3个分别标号,带回实验室准备测试。本次实验采集的土壤样品,一分为二,分别用于土壤理化性质指标和抗剪性能指标的测定。

3.1.3 指标测定

土壤粒径用烘干筛分、去除有机质和碳酸盐后加入分散剂,置于超声波清洗仪中测量的方法测定;全氮和全磷用 $\text{H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮法测定;总有机碳用盐酸浸泡(消除有机碳)方法测定;全钾用火焰光度计(FP640)测定。此外,室内土壤直剪试验使用的是SDJ-1等应变控制式电动直剪仪仪器,直剪试验在50kpa、100kpa、150kpa、200kpa四个垂直压力下进行,可以得到土壤的抗剪强度,再根据摩尔库伦定理(公式3-1)计算出土壤的粘聚力和内摩擦角(常松果等,2017)。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3-1)$$

式中:为土的抗剪强度(单位 kPa);

σ 为作用在剪切面上的法向应力(kPa);

φ 为土的内摩擦角($^\circ$);

c 为土的粘聚力(kPa)。

本研究室内直剪试验的土样是现场采土回来后的重塑土,含水量和容重没有还原原状土,而是为了消除容重的影响,统一配置成土壤干密度为 1.2 g/cm^3 的土样,并且根据当地干湿季节的土壤含水率,配置了三种含水率,分别对应旱季含水率15%,雨季含水率35%,和过渡季节的含水率25%。



图 0-1 SDJ-1 等应变控制式电动直剪仪

Fig 3-1 SDJ-1 constant strain control electric direct shear apparatus

3.2 数据处理与分析

本研究涉及到的统计分析方法主要包括:皮尔逊相关分析、单因素方差(ANOVA)分析。数据整理和分析工具为 IBM SPSS Statistics 25、Origin 2018 和 Microsoft Excel 2016。

4 土壤理化性质分析

4.1 各理化性质之间的相关性分析

本研究测定的土壤理化性质指标包括:物理指标主要是粒径指标,包括黏粒($<0.002\text{mm}$)、粉粒 $0.0002\sim 0.02\text{mm}$)、砂粒 ($0.02\sim 2\text{mm}$)、中值粒径(以下简称中径);化学指标 pH、全磷(TP)、全氮(TN)、总有机碳(TOC)、全钾(TK)、氮磷比6项指标。

对所有样地的理化性质指标原始数据标准化后,进行皮尔逊相关性分析,结果如表4-1所示。

Tab 4-1 Pearson correlation coefficients of each physical and chemical index

指标 Index	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	中径 Median diameter	pH	TP	TN	TOC	K
黏粒 Clay	1	0.091	-0.273	-0.087	0.009	-0.144	-0.161	-0.166	0.005
粉粒 Silt		1	-0.983**	-0.287	-0.285	-0.549**	-0.439**	-0.529**	-0.145
砂粒 Sand			1	0.294*	0.273	0.557**	0.454**	0.542**	0.139
中径 Median diameter				1	0.126	0.006	-0.015	-0.007	-0.03
pH					1	0.235	0.136	0.133	-0.103
TP						1	0.662**	0.960**	-0.284
TN							1	0.722**	-0.319*
TOC								1	-0.263
K									1

注：“**” p<0. 01，代表极显著相关；“*” p<0. 05，代表显著相关。

数据分析表明：研究的四种不同土地利用的土壤理化性质指标间存在一定的相关性：

（1）粉粒含量与砂粒含量、TP、TN、TOC 之间具有极显著的负相关性，其中，粉粒与砂粒的负相关性最高，相关系数达-0.983，属于强相关；粉粒与 TP、TN、TOC 之间的相关性属于中相关。

（2）砂粒含量与中径、TP、TN、TOC 具有显著正相关性，其中，砂粒与 TP 的正相关性最高，达 0.557，属于中等正相关；砂粒与 TN、TOC 也是中等正相关关系；砂粒与中径的正相关程度相对较弱。

（3）TP 与 TN、TOC 有极显著的正相关性，且相关性均较强，尤其 TP 与 TOC 呈极强的正相关关系（0.960）。

（4）TN 与 TOC、K 有极显著相关性，其中，TN 与 TOC 之间呈正的强相关，TN 与 K 呈负的弱相关性。

（5）总体上看，在选定的 9 个土壤理化性质指标中，黏粒含量、中径和 pH 与其他指标均没有显著的相关性，即它们是相对独立于其他理化指标的；此外，TOC、TN、TP 与其他理化性质指标的相关性较好，说明受到其他指标的影响较大。

4.2 不同土地利用类型间理化性质对比

以四种土地利用类型（1 草地、2 林地、3 耕地、4 采矿用地）为自变量，各个土壤理化性质指标分别作为因变量进行单因素方差，在实验选取的 10 个土壤理化性质指标中，有 7 个指标在 4 种土地利用类型之间存在着显著差异，对于存在差异性差异的理化性质指标，进一步用 LSD 分析显著性差异存在于哪几种土地利用类型之间。以下分别从土壤化学性质和物理性质进行分析。

4.2.1 化学性质对比

土壤化学性质指标单因素方差分析结果如表 4-2 所示，说明 6 个土壤化学性质指标中，有 5 个指标在 4 种土地利用类型之间存在着显著差异，分别是：pH、TP、TN、TOC 和氮磷比。对于 5 个存在差异性分析的指标，进一步进行 LSD 分析，结果如表 4-3 所示，TP、TN 和 TOC 含量和 TN/TP 指标的显著性差异存在于采矿用地与其他三类土地利类型之间，pH 值则是在林地和其他三种土地利用类型之间。

表 4-1 土壤化学性质指标单因素方差分析结果
Tab 4-2 ANOVA results of soil chemical properties

方差分析结果 ANOVA results		
指标 index	F	显著性 Significance
pH	4.162	0.011*
TP	57129.993	0.000*
TN	10.973	0.000*
TOC	167.877	0.000*
TK	1.826	0.157
氮磷比	3.566	0.022*

注：“**” p<0.01，代表极显著差异性；“*” p<0.05，代表显著差异性。

表 4-3 土壤化学性质指标多重分析结果

Tab 4-3 LSD results of soil chemical properties

多重比较 Multiple comparisons										
因变量			显著性	因变量			显著性	因变量		显著性
Dependent variable			Significance	Dependent variable			Significance	Dependent variable		Significance
P H	草地			草地				草地		
	Grassl	林地	0.016*	Grassl	林地	0.994	Grassl	林地	0.228	
	and	Woodland		and	Woodland		and	Woodland		
	草地			草地			草地			
	Grassl	耕地	0.939	Grassl	耕地	0.681	Grassl	耕地	0.319	
	and	Cultivated land		and	Cultivated land		and	Cultivated land		
	草地			草地			草地			
	Grassl	采矿用地	0.393	Grassl	采矿用地	0.000**	Grassl	采矿用地	0.207	
	and	Mining land		and	Mining land		and	Mining land		
	林地			林地			林地			
	Woodl	耕地	0.016*	Woodl	耕地	0.633	Woodl	耕地	0.976	
	and	Cultivated land		and	Cultivated land		and	Cultivated land		
林地			林地			林地				
Woodl	采矿用地	0.020*	Woodl	采矿用地	0.000**	Woodl	采矿用地	0.043*		
and	Mining land		and	Mining land		and	Mining land			
耕地			耕地			耕地				
Cultiv	采矿用地	0.427	Cultiv	采矿用地	0.000**	Cultiv	采矿用地	0.059		
ated	Mining land		ated	Mining land		ated	Mining land			
land			land			land				
草地			草地			草地				
Grassl	林地	0.108	Grassl	林地	0.465	Grassl	林地	0.052		
and	Woodland		and	Woodland		and	Woodland			
T	草地		TO	草地		TN/	草地			
P	Grassl	耕地	0.145	C	Grassl	0.609	TP	Grassl	耕地	
	and	Cultivated land		and	Cultivated land		and	Cultivated land	0.371	
	草地	采矿用地	0.000**	草地	采矿用地	0.000**	草地	采矿用地	0.004**	
Grassl	Mining land		Grassl	Mining land		Grassl	Mining land			

and			and			and		
林地	耕地		林地	耕地		林地	耕地	
Woodl	Cultivated land	0.913	Woodl	Cultivated land	0.903	Woodl	Cultivated land	0.372
and			and			and		
林地	采矿用地		林地	采矿用地		林地	采矿用地	
Woodl	Mining land	0.000**	Woodl	Mining land	0.000**	Woodl	Mining land	0.046*
and			and			and		
耕地	采矿用地		耕地	采矿用地		耕地	采矿用地	
Cultiv	Mining land	0.000**	Cultiv	Mining land	0.000**	Cultiv	Mining land	0.019*
ated			ated			ated		
land			land			land		

注：“**” p<0. 01，代表极显著差异性；“*” p<0. 05，代表显著差异性。

4.2.2 直观变化趋势

在单因素方差分析结果的基础上，继续用直方图来直接观察各个土壤理化性质指标在各土地利用类型间的变化趋势。虽然 TK 指标在四种土地利用类型之间不存在显著差异，仍可以通过直方图的方式来对比它们在各土地利用类型间的差别，如图 4-3 所示，可得：

（1）虽然单因素方差分析结果显示 TK 含量在各土地利用类型之间不存在显著差异，但 LSD（表 4-3）结果可知 TK 含量在林地和采矿用地之间存在显著差异；结合图 4-3-a 可看出直观差异，采矿用地的 TK 含量最低，为 13.37（g/kg）；草地次之，为 19.80（g/kg），耕地与林地差别不大。

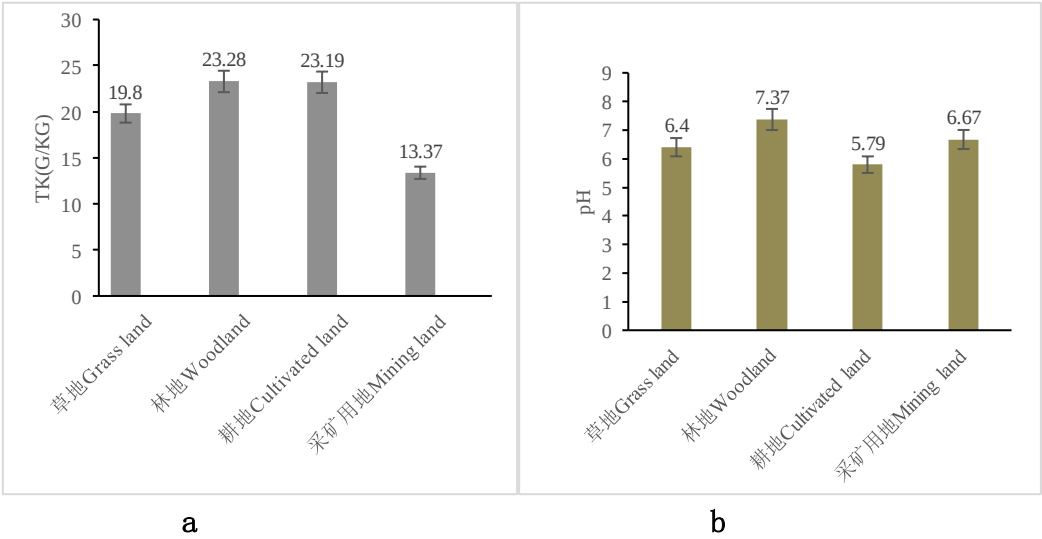
（2）图 4-3-b 显示，林地土壤 pH 值最大（7.37），呈弱碱性；耕地土壤 pH 值最小（5.79），耕地、草地和采矿用地土壤均呈弱酸性，其中，采矿用地最接近中值（6.67）。

（3）由上一小节的 ANOVA 分析可知，TP 在四种土地利用类型之间存在显著性差异，且事后两两比较分析的结果也表明采矿用地的 TP 显著区别于其他土地利用类型，结合图 4-3-c 分析，采矿用地的 TP 明显大于其他 3 种土地利用类型，差值可达到 12.07g/kg。

（4）图 4-3-c 显示，采矿用地 TN 含量明显高于其他三种土壤，结果符合上文 ANOVA 和 LSD 分析结果。

（5）上文 ANOVA 和 LSD 分析结果显示 TOC 含量在采矿用地和其他三类土壤间存在显著差别，由图 4-3-e 可知，耕地的 TOC 含量明显大于其他土壤。

（6）上文 ANOVA 和 LSD 分析结果显示氮磷比在采矿用地和其他三类土壤间存在显著差别，由图 4-3-f 可知，采矿用地土壤的氮磷比显著小于其他三类土壤，并且耕地土壤氮磷比明显高于其他三类土壤。



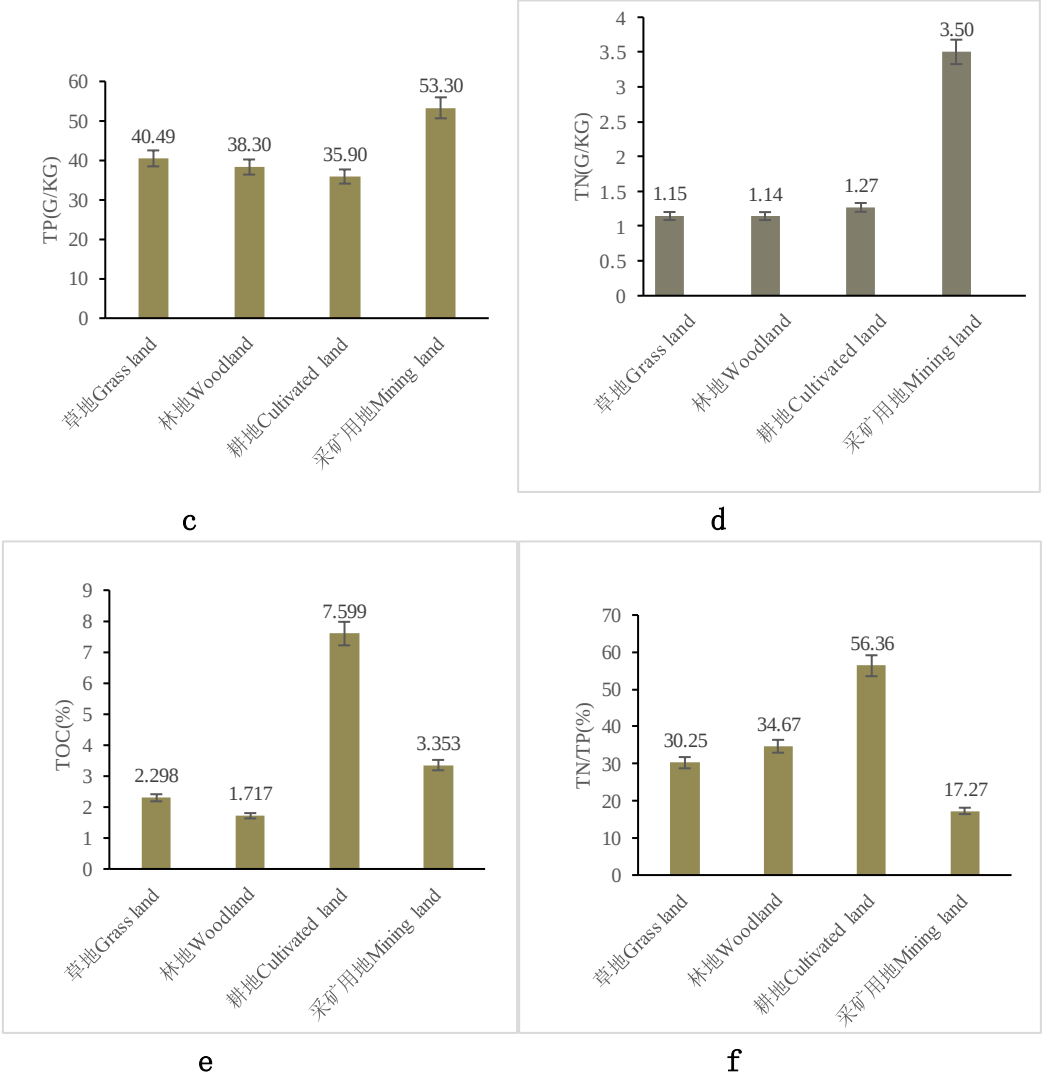


图 4-1 4 种土地利用类型的理化性质指标含量

Fig 4-1 The histograms of physical and chemical properties of the four land use types

4.2.3 物理性质对比

表 4-4 土壤物理性质指标单因素方差分析结果
Tab 4-4 ANOVA results of soil physical properties

方差分析结果 ANOVA results		
指标 index	F	显著性 Significance
黏粒 clay	2.548	0.069
粉粒 silt	6.19	0.001*
砂粒 Sand	6.813	0.001*
中径 Median diameter	1.234	0.309

注：“**” p<0. 01，代表极显著差异性；“*” p<0. 05，代表显著差异性。

表 4-5 土壤物理性质指标多重比较结果
Tab 4-5 LSD results of soil physical properties

多重比较 Multiple comparisons						
因变量 Dependent variable		显著性 Significance	因变量 Dependent variable		显著性 Significance	
黏 粒 Clay	草地 Grassland	林地 Woodland	0. 032*	草地 Grassland	林地 Woodland	0. 467
	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	0. 024*	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	0. 312
	草地 Grassland	采矿用地 Mining land	0. 061	草地 Grassland	采矿用地 Mining land	0. 000**
	林地 Woodland	耕地 Cultivated land	0. 603	林地 Woodland	耕地 Cultivated land	0. 647
	林地 Woodland	采矿用地 Mining land	0. 487	林地 Woodland	采矿用地 Mining land	0. 000**
	耕地 Cultivated land	采矿用地 Mining land	0. 727	耕地 Cultivated land	采矿用地 Mining land	0. 001**
	草地 Grassland	林地 Woodland	0. 783	草地 Grassland	林地 Woodland	0. 990
	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	0. 585	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	0. 121
	草地 Grassland	采矿用地 Mining land	0. 000**	草地 Grassland	采矿用地 Mining land	0. 766
	林地 Woodland	耕地 Cultivated land	0. 719	林地 Woodland	耕地 Cultivated land	0. 075
粉 粒 Silt	林地 Woodland	采矿用地 Mining land	0. 000**	林地 Woodland	采矿用地 Mining land	0. 748
	耕地 Cultivated land	采矿用地 Mining land	0. 001**	耕地 Cultivated land	采矿用地 Mining land	0. 455

注：“**” p<0. 01，代表极显著差异性；“*” p<0. 05，代表显著差异性。

单因素方差分析结果表明（表 4-4），在 4 种物理性质中，粉粒、砂粒含量在各类型土壤间存在显著差异性。又由多重比较结果（表 4-5）来看，粉粒的显著差异性主要存在于草地与采矿用地、林地与采矿用地、耕地与采矿用地的两两比较中；砂粒的显著性差异主要存在于采矿用地与其他三种土壤类型的两两比较中。

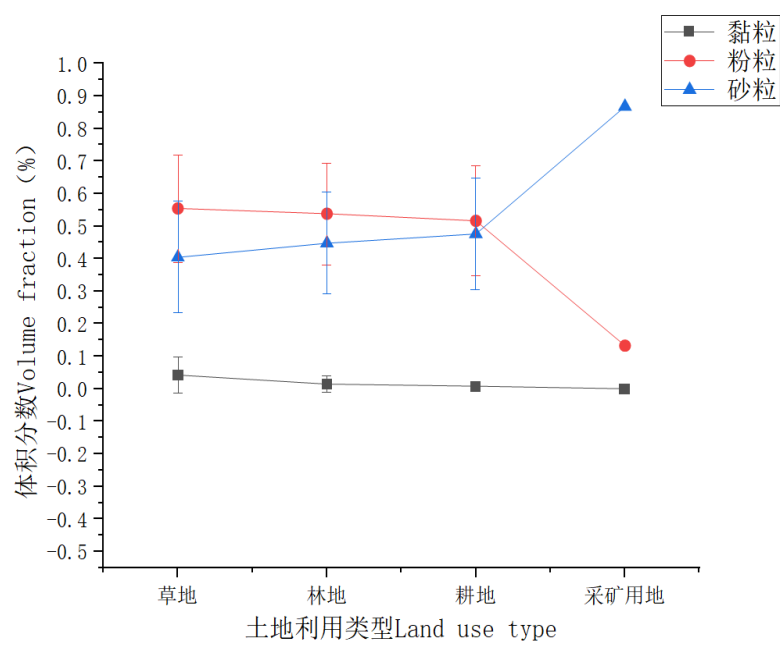


图 0-2 四种土地利用类型的粒径平均体积分数

Fig 4-2 Average particle size volume fraction of four land use types

在黏粒、粉粒、砂粒三种粒径指标中，黏粒占比越大，表明土壤的颗粒越细，土壤密度越大，土壤孔隙越小；当砂粒含量越大时土壤颗粒则越大，土壤的密度越小，孔隙则越大。

由图 4-2 可以看出，草地中各粒径体积分数分别为粉粒（55.43%±16.66%）>砂粒（40.37%±17.30%）>黏粒（4.20%±5.70%）；林地中各粒径体积分数为粉粒（53.80%±15.71%）>砂粒（44.75%±15.83%）>黏粒（1.45%±2.53%）；耕地中各粒径体积分数分别为粉粒（51.62%±16.96%）>砂粒（47.60%±17.33%）>黏粒（0.78%±1.22%）；采矿用地中各粒径体积分数分别为砂粒（86.73%±0%）>粉粒（13.27%±0%）>黏粒（0%±0%）

四种土地利用类型中草地的黏粒体积分数最大，林地、耕地次之，而采矿用地为零；砂粒体积分数中采矿用地最大，耕地、林地次之，而草地最小。由此我们不难看出四种土地利用类型中土壤颗粒是由细到粗、土壤孔隙由小到大、土壤由紧到松的程度是：草地→林地→耕地→采矿用地。

5 不同土地利用类型的土壤抗剪性能

土壤抗剪试验的控制指标有：含水率 3 个（15%，25%，35%），垂直压力 4 个（50kpa，100kpa，150kpa，200kpa）。

土壤抗剪性能通过 4 个垂直压力下的抗剪强度、粘聚力、内摩擦角共 6 个指标来表征。为了探索不同土地利用类型的土壤间是否存在抗剪性能的显著差异，以 4 个土地利用类型为自变量，6 个抗剪性能表征指标作为因变量，分别对 3 个含水率组做单因素方差分析。

表 5-1 不同土地利用类型的抗剪性能单因素方差分析结果

Tab 5-1 ANOVA results of soil shear properties of 4 land use types

指标 Index	15%含水率 15% moisture content	25%含水 25% moisture content	35%含水率 35% moisture content
	显著性 Significance	显著性 Significance	显著性 Significance
内摩擦角 Internal friction angle	0.510	0.244	0.214

粘聚力			
Cohesion	0.307	0.196	0.066
50kpa 垂压下抗剪强度			
Shear strength under 50kpa vertical pressure	0.723	0.674	0.119
100kpa 垂压下抗剪强度			
Shear strength under 100kpa vertical pressure	0.631	0.964	0.366
150kpa 垂压下抗剪强度			
Shear strength under 150kpa vertical pressure	0.972	0.327	0.211
200kpa 垂压下抗剪强度			
Shear strength under 200kpa vertical pressure	0.821	0.202	0.256

通过表 5-1 可以看出，在 3 组含水率条件下，6 个抗剪强度指标在 4 种土地利用类型之间均没有显著差异。接下来从直方图上直观地看它们在不同土地利用类型之间的差异趋势。

5. 1 含水率和垂直压力对抗剪强度的影响

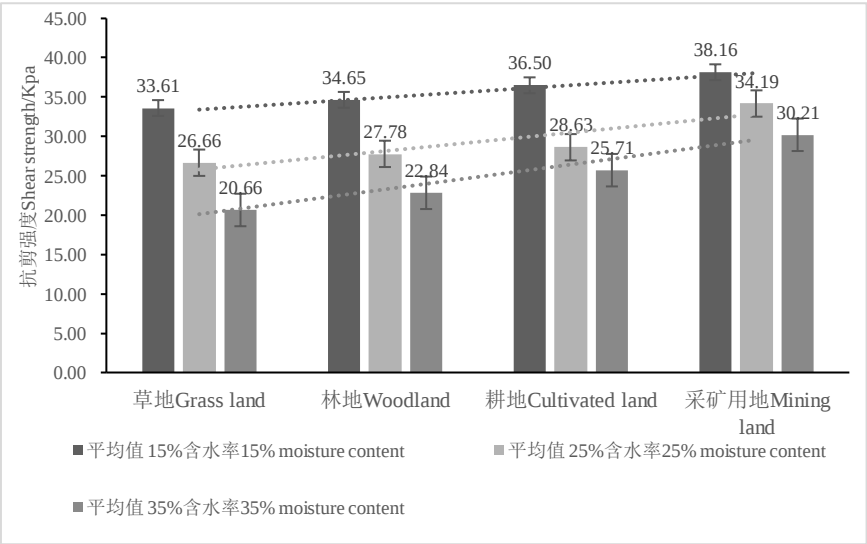


图 0-2 50kpa垂直压力不同含水率下土地类型抗剪强度

Fig 5-1 Shear strength of 4 land use types under different moisture content at 50kpa vertical pressure

以 50kpa 垂直压力为例，不同含水率下土地类型抗剪强度直方图（图 5-1）显示，一方面，随着含水率增加，抗剪强度减小趋势明显；另一方面，在 3 组含水率下，4 种土地利用类型抗剪强度从大到小的顺序均为采矿用地>耕地>林地>草地。

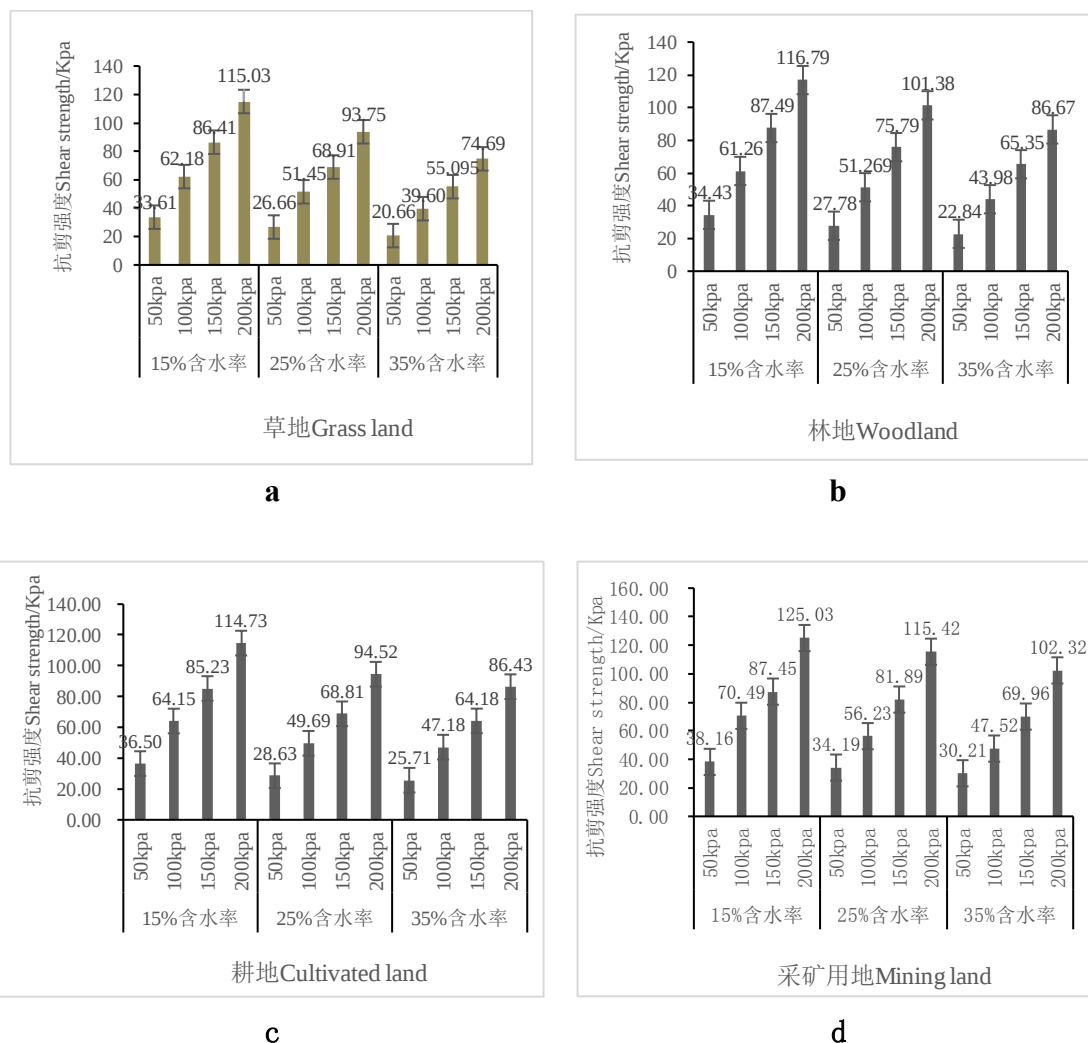


图 5-2 不同含水率下 4 种土地利用类型的土壤抗剪强度

Fig 5-2 Soil shear strength of 4 types of land use under different Moisture content

如图 5-2 所示, 3 组含水率下, 每个土地利用类型的土壤抗剪强度均是随着垂直压力的增大而增大。此外, 和图 5-1 一样可以看出, 在相同的垂直压力和含水量的情况下, 采矿用地的抗剪强度是 4 种土地类型中最大的。

5.2 含水率和垂直压力对粘聚力的影响

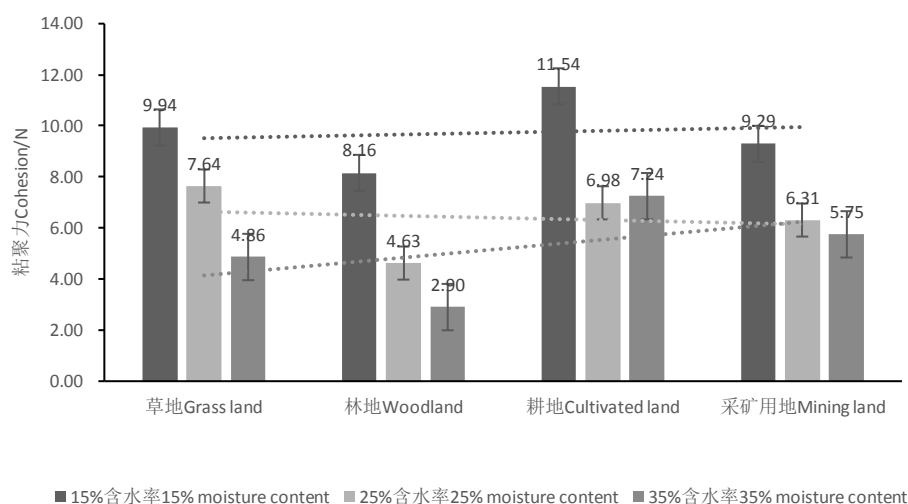


图 5-3 50kpa 垂直压力不同含水率下的土壤粘聚力

Fig 5-3 Cohesion of 4 land use types under different moisture content

以 50kpa 垂直压力为例, 不同含水率下土地类型土壤粘聚力直方图 (图 5-3) 显示, 当 15% 含水率时, 粘聚力从大到小为耕地>草地>采矿用地>林地; 在 25% 含水率下, 粘聚力从大到小为草地>耕地>采矿用地>林地; 在 35% 含水率下, 粘聚力从大到小为耕地>采矿用地>草地>林地。其中, 草地、林地、采矿用地的粘聚力变化趋势是随含水量的增加呈梯度减少, 而耕地土壤的粘聚力随着含水量的增大先减小后又少量增大。此外, 4 种类型中耕地在不同含水量下粘聚力均值较大, 究其原因可能是耕地土壤含水率受人为干扰较大, 所测出的数值与土壤原本的含水率有所偏差, 且耕地经常进行翻动, 破坏了土层结构, 有土壤板结情况。

5.3 含水率和垂直压力对内摩擦角的影响

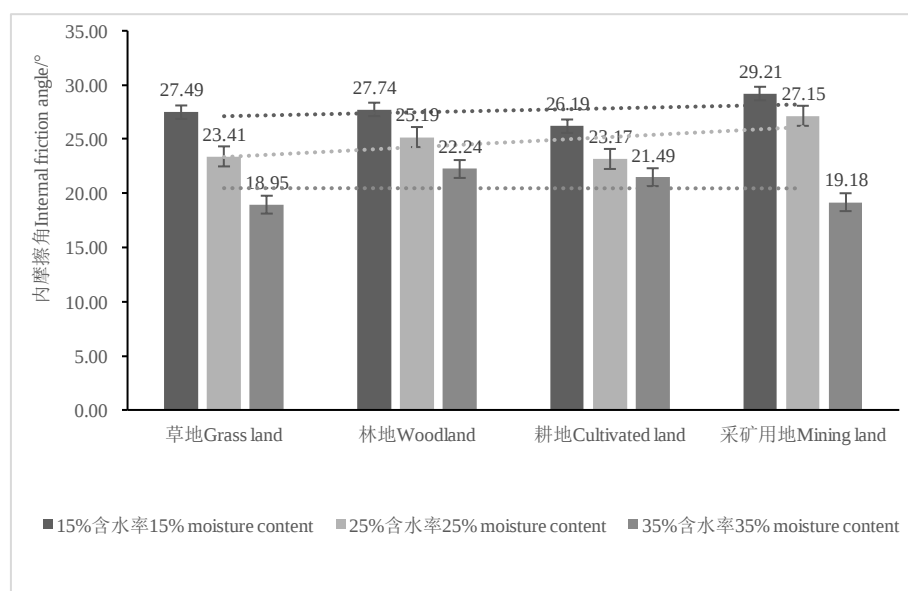


图 5-4 50kpa 垂直压力不同含水率下内摩擦角

Fig 5-4 Internal friction angle of 4 land use types under different moisture content

以 50kpa 垂直压力为例, 不同含水率下土地类型土壤内摩擦角直方图 (图 5-4) 显示, 在 15% 和 25% 含水率下, 内摩擦角从大到小为采矿用地>林地>草地>耕地; 在 35% 含水率下, 内摩擦角从大到小为林地>

耕地>采矿用地>草地。同抗剪强度类似，内摩擦角也是随含水率的增大呈梯度减少，4种土地类型中采矿用地的内摩擦角平均值最大，最大值与最小值的差也最大。分析原因是采矿用地所含的较大的砂粒使测量的内摩擦角较大，同时，砂粒中较大的孔隙也会因为含水量的上升而减少相互间的摩擦，表现为采矿用地内摩擦角受含水率变化的影响最大。

6 土壤理化性质和抗剪性能的关系

6.1 结果分析

表 6-1、6-2、6-3 是对土壤理化性质指标和土壤抗剪性能指标进行皮尔逊相关分析的结果，说明本研究选择的理化性质指标和研究区域 4 种土地利用类型的土壤抗剪性能指标的相关性较弱，仅有：

(1) 15%含水率组 150kpa 垂压下的抗剪强度与粉粒和砂粒含量有显著相关，且相关程度较弱，具体来说，粉粒含量越大，抗剪强度越大，而砂粒含量越大，抗剪强度越弱，这一结论和前人的研究结果相同（Xiong 等，2003；王云琦等，2006；江浩浩等，2009；王丽等，2009）。

(2) 此外，pH 和 15%、25%和 35%土壤含水率下的粘聚力呈极显著的中等程度正相关，与 25%和 35%含水率下的内摩擦角呈极显著的负相关。在 4 种土地利用类型中，并没有极端的酸碱性情况，但 pH 值对土壤抗剪性能的影响是最大的，分析原因可能是土壤酸碱性除了会影响植物生长外，还会影响土壤的微生物环境，而土壤微生物活动会对土壤结构乃至土壤稳定性产生影响。

表 6-1 15%含水率下抗剪性能和理化性质的相关分析结果

Tab 6-1 Correlation analysis between shear and physicochemical properties under 15% moisture content

指标 Index	内摩擦角	粘聚力 Cohesion	50kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 50kpa vertical pressure	100kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 100kpa vertical pressure	150kpa 垂压下抗 剪强度 Shear strength under 150kpa vertical pressure	200kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 200kpa vertical pressure
	Internal friction angle					
黏粒 Clay	-0.080	0.151	0.159	0.103	0.085	0.143
粉粒 Silt	0.184	0.018	0.233	0.129	0.331*	0.184
砂粒 Sand	-0.163	-0.045	-0.254	-0.144	-0.335*	-0.204
中径 Median diameter	-0.185	0.073	-0.093	-0.075	-0.209	-0.177
pH	0.014	0.472**	0.262	0.225	-0.025	0.070
TP	0.159	-0.010	0.061	0.159	0.018	0.135
TN	0.125	-0.064	0.070	0.043	0.035	0.125
TOC	0.141	-0.098	-0.006	0.088	-0.028	0.093
K	-0.014	-0.142	-0.041	-0.066	-0.029	-0.016
TN/TP	-0.070	-0.029	-0.059	-0.096	-0.070	-0.044

表 6-2 25%含水率下抗剪性能和理化性质的相关分析结果

Tab 6-2 Correlation analysis between shear and physicochemical properties under 25% moisture content

指标 Index	内摩擦角	粘聚力 Cohesion	50kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 50kpa vertical pressure	100kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 100kpa vertical pressure	150kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 150kpa vertical pressure	200kpa 垂压下抗剪 强度 Shear strength under 200kpa vertical pressure
	Internal friction angle					
黏粒 Clay	-0.040	0.187	0.103	0.039	-0.013	0.011
粉粒 Silt	-0.062	-0.015	-0.058	0.029	-0.008	-0.090
砂粒 Sand	0.067	-0.020	0.037	-0.036	0.010	0.085

中径 Median diameter	-0.013	-0.067	0.027	-0.048	-0.027	-0.025
pH	0.100*	0.410**	0.051	0.112	-0.176	-0.103
TP	0.207	0.078	0.142	0.030	0.112	0.239
TN	0.250	-0.022	0.173	0.079	0.143	0.274
TOC	0.183	0.017	0.106	-0.013	0.080	0.209
TK	0.018	-0.057	0.096	0.026	0.097	0.053
氮磷比	-0.076	-0.005	-0.015	-0.036	-0.087	-0.064

注 a: “**”p<0.01, 代表极显著相关; b: “*”p<0.05, 代表显著相关。

表 6-3 35%含水率下抗剪性能和理化性质的相关分析结果

Tab 6-3 Correlation analysis between shear and physicochemical properties under 35% moisture content

指标 Index	内摩擦角 Internal friction angle	粘聚力 Cohesion	50kpa 垂压下抗	100kpa 垂压下抗	150kpa 垂压下抗	200kpa 垂压下抗
			剪强度 Shear	剪强度 Shear	剪强度 Shear	剪强度 Shear
			strength under	strength under	strength under	strength under
			50kpa vertical pressure	100kpa vertical pressure	150kpa vertical pressure	200kpa vertical pressure
黏粒 Clay	-0.120	-0.151	-0.117	-0.227	-0.114	-0.178
粉粒 Silt	-0.125	-0.018	-0.275	-0.204	-0.235	-0.224
砂粒 Sand	0.142	0.045	0.287	0.239	0.248	0.249
中径 Median diameter	-0.087	-0.024	-0.050	-0.086	-0.077	-0.066
pH	-0.360*	0.393**	-0.012	-0.097	-0.245	-0.259
TP	-0.103	0.098	0.241	0.006	0.083	0.090
TN	0.054	0.006	0.238	0.081	0.162	0.176
TOC	-0.054	0.070	0.255	0.030	0.107	0.124
TK	0.148	0.085	0.111	0.163	0.160	0.142
氮磷比	0.068	-0.081	-0.116	0.013	-0.077	-0.015

注: “**” p<0. 01, 代表极显著相关; “*” p<0. 05, 代表显著相关。

7 讨论与结论

(1) 通过比较不同土壤类型理化性质可知, 本研究测定的 10 种土壤理化性质中, 有 7 种 (分别是粉粒、砂粒、pH、TP、TN、TOC 和氮磷比) 在 4 个土地利用类型中存在显著性差异, 并且差异主要存在于采矿用地、耕地和其他类型的土壤。主要原因是由于两类土壤中受到较多的人为扰动, 造成土壤中各项元素的变化较大。

(2) 比较四种土地利用类型的抗剪性能指标, 发现采矿用地的抗剪性能并不如预期中小于其他土地利用类型, 甚至有的指标还强于其他土壤, 究其原因, 采矿用地的原位土壤结构较为松散, 在室内直剪试验中, 为了消除土壤干密度的影响, 因此我们将所有样品的干密度控制为 1.2 g/cm³, 因此使得其实验样品比实际情况紧实很多, 而土壤干密度对土壤的抗剪性能影响很大 (常松果等, 2017; Shun 等, 2018), 从而增大了它的抗剪强度。同样, 耕地土壤也存在类似的情况。

(3) 林地和草地土壤相比较, 由于林木根系结构更复杂、扎根更深, 林木环境下的生物多样性更加丰富, 因此林地土壤的抗剪性能要优于草地土壤。因此, 总体上看, 林地土壤的抗剪性能要优于草地土壤。

(4) 在 15%含水率下, 黏粒和砂粒含量对抗剪强度有显著影响, 而在 25%和 35%含水率条件下该影响均不存在, 说明研究区域在干旱条件下, 土壤的物理性能对土壤抗剪强度及粘聚力、内摩擦角会产生影响, 在土壤含水率增大后, 该影响减弱。这一观点与前人相同 (江浩浩等, 2009), 且我们猜想, 含水率增

大到一个临界值后,土壤物理性质又会对抗剪性能产生影响,这一临界值有待继续研究(Han等,2014)。

(5) pH 值在三个含水率条件下都会对土壤粘聚力产生影响,分析其原因,土壤酸碱度会通过影响土壤生物和微生物的生长和生活环境,从而间接影响土壤的抗剪性能。

参 考 文 献

- Pasquale Borrelli, David A. Robinson, Larissa R. Fleischer, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017, 8(1):2013.
- Han H Z, Jin S W, Sheng L G, et al. Land use and topographic position control soil organic C and N accumulation in eroded hilly watershed of the Loess Plateau[J]. Catena, 2014, 120:64-72
- Kimoto A, Nearing MA, Shipitalo MJ, et al. Multi - year tracking of sediment sources in a small agricultural watershed using rare earth elements[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2006, 31(14): 1763-1774.
- Shun C Q, Sai K. Vanapalli. Simulating hydraulic and mechanical responses of unsaturated expansive soil slope to rain-fall: Case study [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6):05018002.
- Xiong C R, Liu B C, Zhang J S, et al. Relation between shear strength parameters and physical state variables of remolded unsaturated cohesive soil[J]. China Railway Engineering, 2003.
- Zhao LongShan, Liang XinLan, Wu FaQi. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 400-409.
- 曾海鳌, 吴敬禄. 太湖洩东流域陆地侵蚀与入湖物质通量的定量关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 707-713.
- 常松果, 红壤坡耕地耕层土壤抗剪强度及影响因素响应特征[D]. 重庆. 西南大学. 2017
- 常维娜, 周慧平, 高燕. 基于复合指纹法的九乡河小流域泥沙来源解析[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 106-110.
- 郭进, 文安邦, 严冬春等. 复合指纹识别技术定量示踪流域泥沙来源[J]. 农业工程学报, 2014, 30(2): 94-104.
- 何永彬, 张信宝, 贺秀斌. 利用 ^{137}Cs 示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33 (1): 246-250.
- 江浩浩, 董希斌, 王海飙. 边坡土壤含水率对不同植被土壤抗剪强度的影响[J]. 森林工程, 2009, 25(3): 77-80.
- 姜娜, 邵明安. 黄土高原小流域不同坡地利用方式的水土流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 36-41.
- 李开萍, 刘子琦, 李渊, 等. 贵州毕节地区不同石漠化程度土壤理化性质特征 [J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):205—210.
- 王丽, 梁鸿. 含水率对粉质粘土抗剪强度的影响研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(1): 170-174, 195.
- 王云琦, 王玉杰, 张洪江, 等. 重庆缙云山不同土地利用类型土壤结构对土壤抗剪性能的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 40-45.
- 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题 [J]. 地理学报, 2012, 67(7):878—888.
- 闫胜军, 郭青霞, 闫瑞, 等. 不同土地利用类型下水土流失特征及雨强关系分析[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 45-49.
- 杨永红, 刘淑珍, 王成华. 土壤含水量和植被对浅层崩坡土体抗剪强度的影响[J]. 灾害学, 2006, 21(2): 5-54.
- 姚军, 吴发启, 宋娟丽, 等. 黄土高原沟壑区坡耕地表层土壤抗剪强度影响因素分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 236-239.
- 喻庆国, 李昊民, 董跃宇, 等. 1957~2012 年滇西北剑湖景观演变特征及驱动因子研究[J]. 西部林业科学, 2014, 43(02):1-12.
- 喻庆国, 卢双珍, 曹顺伟, 董跃宇, 李昊民, 刘朝蓬, 石明, 袁磊. 滇西北4个高原湖泊演变特征及其驱动因子[J]. 西部林业科学, 2015, 44(01):1-8.
- 张奇, 喻庆国, 王胜龙, 朱云轩, 李丽萍, 危锋, 王行, 朱金鑫. 滇西北剑湖沉积物磷形态、空间分布及释放贡献[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10):3792-3803.
- 赵筱青, 和春兰, 许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. 生态环境学报, 2012(11):1810-1816.
- 郑子成, 张锡洲, 李廷轩, 等. 玉米生长期土壤抗剪强度变化特征及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (5):125-130.