

钱塘江源头主要植被类型土壤抗剪强度研究

张晓勉¹, 张金池², 王云南³, 陈茂青⁴, 岳春雷¹, 田刚⁵, 李世锋³

(1. 浙江省林业科学研究院, 杭州 310023; 2. 南京林业大学 南京 210037; 3. 浙江省水利厅, 杭州 310009;

4. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002; 5. 浙江广川工程咨询有限公司, 杭州 310020)

摘要:对钱塘江源头地区 6 种不同林分类型及 2 个对照类型(茶园、农田)不同土层深度土壤抗剪强度及土壤理化性质和土壤根系特性进行了测定。相关分析结果表明:土壤有机质含量与土壤抗剪强度、土壤粘聚力和内摩擦角呈显著的正相关关系;土壤容重与土壤粘聚力呈显著的正相关关系;粉粒/粘粒与土壤抗剪强度、土壤粘聚力呈显著的负相关关系。抗剪强度与植物根系各指标之间是显著的正相关关系,其中与根体积和根表面积相关性达到极显著水平,与根长和根质量相关性达到显著水平。通过对研究区 8 种植被类型抗剪强度和影响因子聚类分析得出:毛竹林和灌木林土壤抗剪性能最强;马尾松林、针阔混交林、麻栎林和杉木林次之;茶园和农田土壤抗剪性能较弱。建立了不同等级土壤抗剪强度与影响因子的回归模型,精度达 80%~85%。

关键词:土壤抗剪强度;理化性质;根系特性;回归模型;钱塘江源头地区

中图分类号:S157.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0079-06

Research on Soil Shear Strength of the Major Forest Types in Headwaters of Qiantang River

ZHANG Xiaomian¹, ZHANG Jinchi², WANG Yunnan³,

CHEN Maoqing⁴, YUE Chunlei¹, TIAN Gang⁵, LI Shifeng³

(1. Zhejiang Forestry Academy, Hangzhou 310023, China; 2. Nanjing Forest University,

Nanjing 210037, China; 3. Department of Water Resources of Zhejiang Province,

Hangzhou 310009, China; 4. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,

Hangzhou 310002, China; 5. Zhejiang-based Guangchuan Engineering Consulting Co., Ltd, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Soil shear strength, physical and chemical properties and root system traits at different soil layers in 6 forest types and two controls (tea plantation and farmland) were determined in the headwaters of Qiantang River, Zhejiang Province. The relative analysis demonstrated that soil organic matter content had evident positive relation with soil shear strength, cohesion and internal friction angle, soil bulk density had significant relation with cohesion, and ratio of powder to viscosity had negative relation with soil shear strength and cohesion. Soil shear strength had evident positive relation with each root system trait (root length, surface area, volume and weight). Cluster analysis on soil shear strength of 8 tested forest types and influencing factors showed that soil shear strength was the highest in *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* forest and shrub, followed by *Pinus massoniana* plantation, coniferous and broad-leaved mixed forest, *Quercus acutissima* forest and *Cunninghamia lanceolata* forest, and it was the least in tea garden and farmland. The regression models describing the relation between soil shear strength of different forest types and influencing factors were established for different grades of soil shear strength with accuracy of 80%~85%.

Keywords: soil shear strength; physical and chemical properties; root characteristics; regression model; headwaters of Qiantang River

从土壤力学上看,水蚀是雨滴对土粒的溅击剪切作用和径流对土粒的冲刷剪切作用的过程综合,所以土壤的抗剪强度是区域水土流失评价中反映土壤力学特性的重要指标之一^[1]。在土壤侵蚀宏观研究中,土壤作为被侵蚀的对象,是影响土壤侵蚀过程和决定流失量的重要因素,土壤抗剪强度则是最能体现出区域水土流失过程中土壤抵抗径流冲刷剪切能力的“指示指标”^[1]。因此,进行水土流失土壤抗剪强度规律的研究,对于区域和全国水土流失整治的宏观决策(如防止重力侵蚀、增加斜坡稳定性)十分重要。

传统的边坡灾害防治大多采用工程措施护坡,在初期防护效果很好,但随着时间推移,混凝土逐渐老化,钢筋锈蚀加剧,从而导致防护工程的强度降低,防护效果越来越差^[2-5]。植被可通过改变土壤水分情况,利用根系对土壤的穿插、缠绕、网络以及固结作用,增加土壤的抗蚀性、抗冲性以及固定作用,提高土壤的抗剪强度,起到固土护坡的作用。植被在发挥固土护坡作用的同时还发挥改良土壤和改善生态环境的作用。因此植被固土护坡是近年来在国内外比较流行的边坡灾害防治技术,植被恢复被认为是治理水土流失的根本措施^[6-9]。

1 研究区概况

研究区位于钱塘江源头浙江省开化县,坐标为东经 118°23',北纬 29°07',属亚热带季风性气候,年平均气温 16.3℃,年平均降水量 1 762.1 mm,森林覆盖率 79.2%。全县土壤分为五个土类、九个亚类、二十

一个土属、四十五个土种。低山丘陵以红壤土为主,谷地平畈多水稻土。土层厚度薄至中,土壤质地为轻壤至重壤,pH 值平均 7.5^[10]。

2 材料与方法

2.1 样地设置

在研究区内选取马尾松林、针阔混交林(马尾松、木荷、香樟混交)、毛竹林、麻栎林、杉木林、灌木林 6 种具有代表性的生态公益林类型,以当地分布比较广的茶园、农田为对照进行研究。选择能够反映区内植被基本特征,具有代表性的地段,尽量选择坡向一致,坡度、坡位大致相似的地段设置样地,每个类型各设 3 个样地。各样地基本情况见表 1。

2.2 样品采集

在各植被类型样地内选择典型地段(离道路、桥梁、林缘较远,人为干扰较少的地方),设置 20 m×20 m 的标准样地进行调查。在每一种类型的典型地段挖取土壤剖面 2 个,分别在 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm 土层进行取样。细根调查采用土柱法,根系带回室内浸泡清洗后风干,用 WinRHIZO 根系分析系统测定各径级细根根长、根表面积、根体积,再将风干根系置于烘箱 6 h (90℃)烘干后称量,并计算各径级根质量,公式为:径级根质量=各径级根体积/根样总体积×根样总质量。土壤容重采用环刀法测定^[11]。颗粒分析采用甲种比重计法^[11]。有机质测定采用重铬酸钾—硫酸氧化法^[12]。

表 1 样地情况统计

林分类型	毛竹林	马尾松林	麻栎林	灌木林	针阔混交林	杉木林	农田	茶园
起源	人工林	人工林	天然林	天然林	天然林	人工林	—	—
林龄/a	4	6	13	6	20	8	15	12
密度/(株·hm ⁻²)	2676	2653	953	5797	1050	2432	—	16667
平均胸径/cm	8.89	9.6	24.6	3.5	13.2	10.6	—	—
平均树高/m	8.4	7.5	15.3	1.2	10.3	12.6	—	—
郁闭度/盖度	0.6	0.8	0.75	1	0.5	1%	1	0.5
坡度	29°	31°	16°	39°	26°	35°	—	18°
坡位	中下	中下	中下	中	中上	下	—	中
坡向	SE	SE	N	E	SE	W	—	NE

2.3 土壤剪切试验

土样制作按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)^[13]配制相应含水量试样,试样高度为 2 cm,直径为 6.18 cm,试样含水量等级为:30%,35%,40%。

试验所用的剪切仪为 ZJ 型应变控制式直剪仪。直剪试验采用不排水快剪试验方法,速度为 0.8 mm/min,严格按《土工试验方法标准》(GB/

T50123—1999)^[13]进行操作。剪切时用 50,100,150,200 kPa 四种垂直压力,量力环率定系数分别为 1.692,1.892,1.773,1.686。

抗剪强度取剪切位移 4 mm 所对应的剪应力。以抗剪强度为纵坐标,垂直压力为横坐标,绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线,直线的倾角为摩擦角,直线在纵坐标上的截距为粘聚力^[13]。

3 结果与分析

由库仑抗剪强度公式^[14]：
$$\tau=c+\sigma\text{tg}\varphi$$

式中： τ ——土的抗剪强度(kPa)； c ——土的强度指标之一，称之为土壤粘聚力(kPa)； σ ——作用在剪切面

上的法向应力(垂直压力)(kPa)； φ ——土的强度指标之一，称之为内摩擦角(°)。
可得土壤抗剪强度由摩擦强度 $\sigma\text{tg}\varphi$ 和粘聚力 c 两部分构成。通常认为影响土壤抗剪强度的因素包括含水率、容重、有机质、颗粒组成、根密度等方面^[1,6,15-17]。

表 2 不同林分类型土壤理化性质及抗剪指标统计

林分类型	土层深度	容重/g	有机质/%	粉粒/黏粒/%	内摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	抗剪强度/kPa
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
马尾松林	0—10	1.24	7.11	3.96	5.78	6.97	17.54
	10—20	1.08	5.22	4.13	4.92	2.09	11.04
	20—30	0.91	4.66	4.42	5.64	1.86	10.41
	30—40	0.83	3.56	4.62	4.19	0.86	7.89
茶园	0—10	1.66	3.60	3.55	1.36	5.37	7.57
	10—20	1.08	3.45	3.74	0.78	3.66	4.99
	20—30	1.25	2.52	3.65	1.09	3.33	5.68
	30—40	0.98	2.39	3.84	1.08	2.40	4.34
麻栎林	0—10	1.54	6.69	4.73	8.04	4.20	18.45
	10—20	1.12	5.27	4.88	2.43	2.14	7.26
	20—30	1.05	4.24	5.09	1.77	1.90	5.68
	30—40	0.91	2.12	5.21	1.28	0.61	2.89
针阔混交林	0—10	1.29	7.15	4.08	6.59	4.03	14.83
	10—20	1.14	4.23	4.23	4.03	3.75	11.30
	20—30	0.95	4.10	4.31	3.49	3.53	9.78
	30—40	0.84	2.24	4.50	4.41	0.86	7.64
毛竹林	0—10	1.42	6.73	3.22	6.26	6.50	18.62
	10—20	1.23	3.28	3.55	4.03	6.46	14.64
	20—30	1.18	2.67	3.84	3.22	5.82	10.73
	30—40	1.02	1.68	4.36	2.95	3.28	8.84
农田	0—10	1.67	4.71	2.58	3.35	6.49	12.60
	10—20	1.56	3.30	5.11	3.15	4.34	10.03
	20—30	1.36	2.14	5.20	3.32	1.54	8.39
	30—40	1.17	1.45	5.33	2.41	1.31	5.66
杉木林	0—10	1.34	5.90	3.93	3.85	6.47	12.93
	10—20	1.38	3.97	4.26	4.74	1.21	8.20
	20—30	1.32	3.56	4.39	4.15	0.30	8.20
	30—40	1.23	3.52	4.76	4.88	1.14	8.52
灌木林	0—10	1.05	4.78	3.43	4.71	8.17	17.67
	10—20	1.32	5.37	3.28	8.45	3.33	18.74
	20—30	0.91	2.70	3.79	6.97	2.25	15.60
	30—40	0.86	1.73	3.86	5.43	1.55	12.20

3.1 土壤理化性质对土壤抗剪强度的影响

由材料学相关理论可知,材料的力学性质主要决定于其物质组成和分子结构,土壤是由大量不同粒径的矿物质和极其少量的有机质、无机盐等借助于矿物颗粒间的吸引力、土壤胶体及土壤水分组合而构成的多相体材料,因此矿物颗粒的粒径大小、组成比例等因素对土体的结构和性质影响较大^[7]。有研究表明影响土壤抗剪强度的因素很多,包括容重、含水率、有

机质、土壤质地、颗粒组成等方面的理化性质^[1,12,18]。本文选取容重(X_1)、有机质含量(X_2)、土壤粉粒/粘粒(X_3)作为指标与土壤在含水率为 35%时的内摩擦角(X_4)、粘聚力(X_5)、土壤抗剪强度(100 kPa)(X_6) (表 2),进行相关分析,分析结果见表 3。
由表 3 可以得出,土壤有机质含量与土壤抗剪强度及反映土壤抗剪性能的土壤粘聚力和内摩擦角呈显著的正相关关系;土壤容重与土壤粘聚力呈显著的

正相关关系而与内摩擦角关系不明显;粉粒/黏粒与土壤抗剪强度和土壤粘聚力呈显著的负相关关系。分析原因为:

有机质含量对土壤抗剪强度的影响一方面是由于大量土壤根系的存在增强了土壤的粘聚力(称为“根粘聚力”)^[6-8];另一方面,有机质含量较高表明了土壤中本身的胶结物质含量比较多,增大了土壤的粘聚力和内摩擦角。

有研究表明土壤容重与内摩擦角之间关系不甚明显,但对原始凝聚力及加固凝聚力有重大影响^[19]。

土壤容重是对土壤物质组成、结构密实程度的综合反映^[15],对于同一土质(土壤的矿物成份、颗粒组成及土壤结构基本一致)在含水率相同的情况下,容重越大,土体的结构就越密实,表明土体中孔隙含量少,土体颗粒间距小,引力大,同时颗粒间的接触面积也相对较大,从而增大了相对滑动时的摩擦力,使土壤粘聚力变大,增大了土体抗剪强度。

粉粒/黏粒反映了土壤的颗粒组成特性,粉粒/黏粒越小,表明土壤质地越粘重,从而使土壤抗剪强度越大,所以粉粒/黏粒与土壤抗剪强度呈负相关关系^[1]。

表 3 各变量之间相关系数矩阵

项目	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆
X ₁	1.000					
X ₂	0.386 *	1.000				
X ₃	-0.247	-0.281	1.000			
X ₄	0.083	0.540 **	-0.201	1.000		
X ₅	0.457 **	0.489 **	-0.635 **	0.116	1.000	
X ₆	0.288	0.654 **	-0.495 **	0.837 **	0.616 **	1.000

注: * $p<0.05$ 水平, ** $p<0.01$, 下表同。

3.2 植物根系对土壤抗剪强度的影响

土壤中的根系与土壤抗剪强度关系密切,有研究表明土壤根系的存在可以增强土壤的抗剪切强度^[14]。为了深入研究根系对土壤抗剪强度的影响,选择根长(X_1),根表面积(X_2),根体积(X_3),根质量(X_4),抗剪强度 X_5 ($\omega=35\%$, $\sigma=100$ kPa)(表 4),运用 SPSS 软件进行相关分析,各变量之间相关矩阵列于表 5。

由表 5 可以看出抗剪强度与根系各指标之间是显著的正相关关系,其中与根体积和根表面积相关性达到极显著水平,与根长和根质量相关性达到显著水平。土壤中的植物根系通过改善土壤的结构性和土壤的理化性质等方面来提高土体的抗剪切性能。

土体中的任何颗粒与根表面接触,无论是以边相接,还是以面相接,较之土粒,根周的表面是以面与土壤接触为主,根面(主要是根表面)总是凹凸不平,加之叉根、根节及根毛(根表皮细胞的突起物,直径约 5~15 μm ,长约 5~10mm)众多,大大增加了根和土之间的接触面积,使两者之间的摩擦力增强,根表面积和根体积可以很好的表达根系的这方面性质^[20]。因此根系的表面积和体积越大,土壤的抗剪强度越强。

另一方面,根系在土壤中穿插、缠绕就如同在土壤中增设了许多微细钢筋,即根系对土壤产生显著的“加筋”作用,使土壤的整体强度增大,有研究表明^[21]直径 0.6 mm 根的抗拉强度可高达 22.32 MPa,约为 I 级钢筋抗拉强度的 10%。土壤根系的根长和根质量这两个指标很好反映了根系的穿插、缠绕特性,

根系越长,根质量越大,这种穿插、缠绕效果就越明显,土壤抗剪强度就越大。另外,根系表面上存在的大量根毛也增加了根系对土体的网络固持作用,根毛的直径和长度要比主根小得多,根毛增加了根土之间的接触,起到固结和缠绕周围土体的作用。土壤中植物根系的这种固持、“加筋”作用使土壤和根系形成了互相依存、共同工作的集合体,即“土壤—根系复合体”。

“土壤—根系复合体”的提出对土壤抗剪强度的研究有重大影响,因为由于根系的“加筋”锚固作用,使土壤抗剪强度、粘结力和内摩擦角都有了不同的意义。当复合体受剪力作用时,不仅产生土粒与土粒之间的摩擦作用,同时还产生土粒和根系之间的摩擦作用,这对复合体来讲,都属于内摩擦力,故 φ 值可理解为“土壤—根系复合体”的综合摩擦角,比单纯的土粒摩擦力有较大增强。同样 c 值不仅包括土粒与土粒之间的凝聚力,同时还包括土粒和根系之间的凝聚力,以及由土粒的剪应力传递给根系而引起的根系剪应力或锚固力。当锚固力大于根系剪应力时以根系剪应力为主,反之以锚固力为主,故 c 值可理解为“土壤—根系复合体”的凝聚力与根系剪应力或锚固力之和,其中根系的抗剪力或锚固力是 c 值的重要组成部分^[21]。由此可以看出“土壤—根系复合体”对土壤的抗剪强度有很大的增强作用。

根系的存在对土壤的理化性质也有一定的改善作用。土壤中的根系提高了土壤的容重,根系在生长过程中对四周土体产生的轴向压力以及对根周土壤

的膨压,使根系四周的土体容重增大,根和土之间的接触更加紧密,增大了根和土体之间的摩擦力;根系在生长过程中会分泌一些化学物质,主要包括低分子

分泌物如有机酸、糖类、氨基酸和高分子分泌物如黏胶、外酶等,这些物质与土壤发生化学反应,有利于土壤颗粒的胶结,提高了土壤的粘聚力^[6]。

表 4 不同林分类型根系特性与抗剪强度统计

林分类型	土层深度	总根长 X_1/cm	总表面积 X_2/cm^2	总体积 X_3/cm^3	总根重 X_4/g	抗剪强度 X_5/kPa
马尾松林	0—10	345.93	48.18	0.58	0.29	17.54
	10—20	669.83	100.66	1.41	0.80	11.04
	20—30	368.21	66.63	1.12	0.89	10.41
	30—40	50.62	11.09	0.21	0.07	7.89
茶园	0—10	8186.81	373.92	1.39	0.62	7.57
	10—20	880.55	61.78	0.35	0.07	4.99
	20—30	1149.17	134.14	1.39	0.17	5.68
	30—40	615.47	75.05	0.73	0.03	4.34
麻栎林	0—10	487.54	67.46	0.78	0.38	18.45
	10—20	574.26	87.81	1.19	1.17	7.26
	20—30	783.97	140.74	2.51	2.38	5.68
	30—40	120.13	17.78	0.30	0.22	2.89
针阔混交林	0—10	6102.44	679.93	6.95	3.41	14.83
	10—20	1584.26	200.06	2.06	0.48	11.30
	20—30	896.47	100.08	0.92	0.38	9.78
	30—40	312.25	38.43	0.45	0.22	7.64
毛竹林	0—10	3286.63	390.27	4.06	2.63	18.62
	10—20	3720.90	454.18	4.68	3.46	14.64
	20—30	2284.32	312.61	3.54	2.59	10.73
	30—40	739.92	68.89	0.53	0.82	8.84
农田	0—10	1782.92	200.04	1.83	0.09	12.60
	10—20	643.71	68.79	0.59	0.04	10.03
	20—30	494.30	60.53	0.59	0.05	8.39
	30—40	249.20	34.73	0.39	0.01	5.66
杉木林	0—10	1072.65	161.04	1.93	0.76	12.93
	10—20	2072.10	332.28	4.46	1.84	8.20
	20—30	676.26	120.03	1.94	1.36	8.20
	30—40	122.31	19.43	0.27	0.12	8.52
灌木林	0—10	5966.20	650.07	5.86	1.73	17.67
	10—20	2089.47	247.53	2.85	3.12	18.74
	20—30	3143.42	438.14	5.79	10.91	15.60
	30—40	2395.66	313.50	4.93	4.70	12.20

表 5 根系特性与抗剪强度相关分析

项目	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
X_1	1.000				
X_2	0.882**	1.000			
X_3	0.688**	0.936**	1.000		
X_4	0.389*	0.6**	0.748**	1.000	
X_5	0.376*	0.536**	0.538**	0.424*	1.000

3.3 不同植被类型土壤抗剪切性能评价

选择容重(X_1)等 10 个指标(表 6),对研究区 8 种植被进行聚类分析以评价研究区不同林分类型土壤抗剪切性能的强弱,聚类结果见图 1。

综合对 10 个指标的分析可以看出,毛竹林和灌木林划为同一类型,属于抗剪性能最强的一类。马尾

松林、针阔混交林、麻栎林和杉木林归为一类,属于抗剪性能较强的一类。茶园和农田归为一类,属于抗剪性能较弱的一类。分析其原因为:毛竹林根系极为丰富,竹鞭竹根盘根错结,对土壤的网络固持作用最强。灌木林根系也极为发达,特别是小于 1 mm 的根系极多,对土壤的加筋作用很强。马尾松林、针阔混交林、麻栎林和杉木林为当地的主要生态公益林类型,这些林分土壤中植物根系丰富,无论根表面积、根体积等根系特性都很好,根系在土壤中的锚固“加筋”作用很明显,所以抗剪强度较好。农田和茶园为人为经营,但当地土壤总体比较贫瘠,农田 20 cm 以下土壤中石砾含量就很大,茶园中由于人为除草等因素使土壤中根系含量不是很大,所以农田茶园归为较弱类。

表 6 相关指标统计

林分类型	容重 X_1/g	有机质 $X_2/\%$	粉粒/黏粒 $X_3/\%$	总根长 X_4/cm	总表面积 X_5/cm^2	总体积 X_6/cm^3	总根重 X_7/g	内摩擦角 $X_8/(\text{°})$	粘聚力 X_9/kPa	抗剪强度 X_{10}/kPa
马尾松林	1.02	5.14	4.13	358.65	56.64	0.83	0.51	5.13	2.94	11.72
茶园	1.24	2.99	3.70	2708.00	161.22	0.96	0.22	1.08	3.69	5.64
麻栎林	1.15	4.58	4.93	491.48	78.44	1.19	1.04	3.38	2.21	8.57
针阔混交林	1.05	4.43	4.25	2223.85	254.62	2.59	1.12	4.63	3.04	10.89
毛竹林	1.21	3.59	3.64	2507.94	306.49	3.20	2.38	4.11	5.51	13.21
农田	1.44	2.90	4.63	792.53	91.02	0.85	0.04	3.06	3.42	9.17
杉木林	1.32	4.24	4.33	985.83	158.19	2.15	1.02	4.40	2.28	9.47
灌木林	1.03	3.64	3.77	3398.69	412.31	4.86	5.12	6.39	3.83	16.05

为了深入研究不同林分类型土壤抗剪强度与土壤理化性质和根系特性的关系,以土壤抗剪强度为因变量 Y ,容重 X_1 ,有机质含量 X_2 ,粉粒/黏粒 X_3 ,根长 X_4 ,根表面积 X_5 ,根体积 X_6 ,根质量 X_7 为自变量,应用 SPSS 统计软件进行多元回归分析,得到开化县不同等级土壤抗剪强度与影响因子的回归模型:

最强类:毛竹林、灌木林

$$Y = -20.779X_1 + 1.313X_2 - 33.018X_3 - 3.53e^{-3}X_4 + 4.515e^{-2}X_5 - 3.22X_6 + 0.262X_7 + 69.436 \quad (R^2 = 0.99)$$

较强类:马尾松林、杉木林、麻栎林、针阔混交林

$$Y = 4.558X_1 + 2.231X_2 - 1.505X_3 + 1.427e^{-2}X_4 - 0.228X_5 + 12.399X_6 - 6.393X_7 - 1.564 \quad (R^2 = 0.922)$$

较弱类:农田、茶园

$$Y = 10.651X_1 + 0.188X_2 - 0.113X_3 + 6.131e^{-4}X_4 + 0.652X_6 - 15.826X_7 - 6.793 \quad (R^2 = 0.989)$$

经过对各林分类型实测值和理论估计值误差分析,其精度达 80%~85%,平均误差率为 15%~20%。

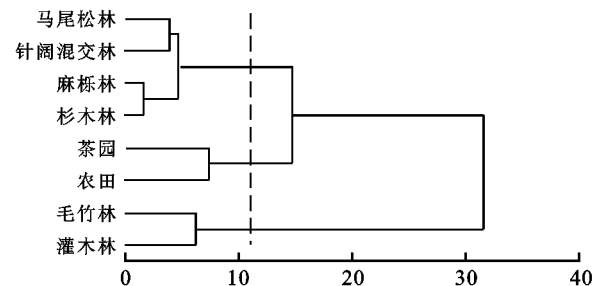


图 1 Ward 法得到的聚类图

4 结论

(1) 土壤理化性质对抗剪强度有重要影响,土壤有机质含量与土壤抗剪强度及反映土壤抗剪性能的土壤粘聚力和内摩擦角呈显著的正相关关系,土壤容重与土壤粘聚力呈显著的正相关关系而与内摩擦角关系不明显,粉粒/黏粒与土壤抗剪强度和土壤粘聚

力呈显著的负相关关系。

(2) 植物对土壤抗剪强度有重要影响,植物根系对土壤有明显的“加筋”作用,根系与土壤构成“土壤—根系复合体”有效的增强了土壤抗侵蚀能力。植物根系各指标与土壤抗剪强度之间有显著的正相关关系,其中根体积和根表面积与土壤抗剪强度相关性达到极显著水平,根长和根质量与土壤抗剪强度相关性达到显著水平。

(3) 对研究区 8 种植被类型土壤抗剪切性能进行聚类分析可得:毛竹林和灌木林归为一个类,属于土壤抗剪性能最强的一类。马尾松林、针阔混交林、麻栎林和杉木林归为一类,属于土壤抗剪性能较强的一类。茶园和农田归为一类,属于土壤抗剪性能较弱的一类。按聚类结果对不同植被类型土壤抗剪强度进行回归分析,建立了开化县不同等级土壤抗剪强度与影响因子的回归模型。

参考文献:

[1] 张爱国,李锐,杨勤科.中国水蚀土壤抗剪强度研究[J].水土保持通报,2001,21(3):5-9.
[2] 周德培,张俊云.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
[3] 崇婧,李徐生,杨达源,等.镇江市边坡地质灾害及防治对策[J].灾害学,2002,17(1):20-25.
[4] 候东奇,罗启先.水库型滑坡综合灾情评价模型研究[J].灾害学,2005,20(1):26-30.
[5] 李同录,赵剑丽,李萍,等.川藏公路 102 滑坡群 2# 滑坡发育特征及稳定性分析[J].灾害学,2003,18(4):40-45.
[6] 杨永红,刘淑珍,王成华.土壤含水量和植被对浅层滑坡土体抗剪强度的影响[J].水土保持研究,2006,21(2):50-54.
[7] 毛珞,孟广涛,周跃.植物根系对土壤侵蚀控制机理的研究[J].水土保持研究,2006,13(2):241-243.
[8] 李鹏,李占斌,郑良勇.植被保持水土有效性研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):76-80.

度。基于石油产业对城市建设的带动作用,从加大城市基础设施投入、加强城市功能建设、改善城市生态环境等方面实现大庆市城市经济、社会、生态三者协调可持续发展。城市土地利用绩效评价的研究涉及很多方面,有些指标存在量化处理上的困难,如土地政策、土地利用行为、土地利用规划等因素,接下来研究应综合考虑这些因素,以便深入了解城市土地利用变化的特征和城市土地利用的综合效应,为更好地指导土地利用行为提供政策建议。

参考文献:

- [1] Ferguson B K, Friday R. Ecological performance standards for land development[J]. Biological Conservation, 1983,26(3):193-213.
- [2] Pauleit S, Duhme F. Assessing the environmental performance of land cover types for urban planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2000,52(1):1-20.
- [3] 周峰,濮励杰,彭补拙. 苏锡常地区土地利用变化及其绩效分析[J]. 自然资源学报,2006,21(3):392-400.
- [4] 陈士银,周飞,杨小雄,等. 区域土地利用绩效及可持续性评价[J]. 国土资源科技管理,2008,25(5):1-5.
- [5] 李佳,雷国平,崔明哲,等. 基于三角模型的矿业城市土地利用可持续性评价[J]. 水土保持研究,2012,19(5):196-201.
- [6] 马国强. 城市土地出让制度绩效分析[J]. 城市开发,2003(7):35-37.
- [7] 瞿忠琼,濮励杰. 城市土地供给制度绩效评价指标体系研究:以南京市为例[J]. 中国土地科学,2006,20(1):45-49.
- [8] 任奎,周生路,姚俊,等. 南京市土地征用制度实施绩效评价研究初探[J]. 农业技术经济,2008(1):72-78.
- [9] 罗栋,张根寿,王海军. 基于集约评价的城市土地利用投入与产出分析:以武汉市为例[J]. 水土保持研究,2010,17(6):153-157.
- [10] 韦亚平,赵民,汪劲柏. 紧凑城市发展与土地利用绩效的测度:“屠能—阿隆索”模型的扩展与应用[J]. 城市规划学刊,2008(3):32-40.
- [11] 刘红萍. 城市用地扩张控制过程的绩效研究[J]. 统计与决策,2008(10):47-48.
- [12] 吴一洲,吴次芳,罗文斌. 浙江省县级单元建成区用地绩效评价及其地域差异研究[J]. 自然资源学报,2010,25(2):330-340.
- [13] 吴一洲,吴次芳,罗文斌,等. 浙江省城市土地利用绩效的空间格局及其机理研究[J]. 中国土地科学,2009,23(10):41-46.
- [14] 李灿,张凤荣,朱泰峰,等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. 农业工程学报,2013,29(5):217-227.
- [15] 潘竟虎,郑凤娟. 甘肃省县域土地利用绩效的空间差异测度及其机理研究[J]. 西北师范大学学报:自然科学版,2011,47(1):87-92.
- [16] 陈士银,周飞,吴雪彪. 基于绩效模型的区域土地利用可持续性评价[J]. 农业工程学报,2009,25(6):249-253.
- [17] 张文雅,宋戈. 哈尔滨市耕地利用效益特征分析[J]. 水土保持研究,2009,16(6):79-83.
- [18] 胡永宏. 对 TOPSIS 法用于综合评价的改进[J]. 数学的实践与认识,2002,32(4):572-575.
- [19] 邱根胜,邹水木,刘日华. 多指标决策 TOPSIS 法的一种改进[J]. 南昌航空工业学院学报,2006,19(3):1-3.
- [20] 李新举,方玉东,田素锋,等. 黄河三角洲垦利县可持续土地利用障碍因素分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):71-75.

(上接第84页)

- [9] 王彦丽. 不同植被恢复措施下剖面根系与 SOC 的分布特征[J]. 水土保持研究,2013,20(6):20-23.
- [10] 黄进,张晓勉,张金池. 开化生态公益林主要森林类型水土保持功能综合评价[J]. 水土保持研究,2010,17(3):87-91.
- [11] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1978.
- [12] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京:农业出版社,1988.
- [13] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准[S]. 中国计划出版社,GB/T50123—1999,1999.
- [14] 胡建民,左长清. 关于江西省水尘土流失动态监测的构想[J]. 水土保持通报,2002,22(1):51-53.
- [15] 范兴科,蒋定生,赵合理. 黄土高原浅层原状土抗剪强度浅析[J]. 水土保持学报,1997,11(4):69-75.
- [16] 侍倩. 土工试验与测试技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [17] 陈仲颐,周景星,王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社,1992.
- [18] 张晓明,王玉杰,夏一平,等. 重庆缙云山典型植被原状土抗剪强度的灰色关联度分析与评价[J]. 水土保持研究,2007,14(2):145-147.
- [19] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [20] 王治国,张云龙,刘徐师,等. 林业生态工程学[M]. 北京:中国林业出版社,2000.
- [21] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等. 土壤—草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(2):31-38.