

滇中尖山河流域不同土地利用类型土壤抗蚀性

张华渝, 王克勤, 宋娅丽

(西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: 为揭示滇中尖山河小流域不同土地利用类型的侵蚀特性, 以滇中尖山河小流域 4 种不同土地利用类型(坡耕地、裸地、林地、园地)不同土层(0—10, 10—20, 20—30 cm)土壤为研究对象, 通过对土壤抗蚀性 15 个指标的测定与分析, 研究了不同土地利用类型对土壤抗蚀性的影响。结果表明: 不同土地利用类型中坡耕地、裸地 > 5 mm 土壤水稳性团聚体显著低于林地、园地, > 5 mm 水稳性团聚体含量表现为裸地(12.72%)大于坡耕地(8.93%), 且坡耕地 > 0.25 mm 团聚体随土层深度的增加而降低; 土壤团聚体结构破坏率表现为裸地 $>$ 坡耕地 $>$ 林地 $>$ 园地, 土壤有机碳含量与 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量均达到极显著正相关。不同土地利用类型下园地和林地土壤的抗蚀指数、结构系数、团聚度、土壤结构和稳定性、抗分散强度和保水保肥能力最高, 水稳性指数较大, 分散系数最小, 土壤抗蚀性能最强。不同土地利用类型综合抗蚀指数大小顺序为园地(0.823 6) $>$ 林地(0.520 4) $>$ 坡耕地(−0.382 2) $>$ 裸地(−0.961 8)。综上, 实行人工造林能够显著提高原土结构稳定性, 园地和林地 在增加土壤抗蚀性方面有明显优势, 加强人工林建设可作为研究区土壤改良的有效措施。

关键词: 土壤抗蚀性; 主成分分析; 不同土地利用类型; 滇中尖山河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0050-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.008

Soil Erosion Resistance Under Different Land Use Types in Jianshan River Watershed in Middle Yunnan Province

ZHANG Huayu, WANG Kegin, SONG Yali

(College of Ecology and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: In order to reveal the erosion characteristics under different land use types in Jianshan River watershed in central Yunnan Province, the soil in different soil layers (0—10, 10—20 and 20—30 cm) under four different land use types (sloping farmland, bare land, forest land and garden land) was taken as the research object. The effects of different land use types on soil erosion resistance were studied by measuring and analyzing 15 soil erosion resistance indexes. The results showed that the contents of > 5 mm water-stable aggregates in sloping farmland and bare land were significantly lower than those in forestland and garden land. The content of > 5 mm water-stable aggregates in sloping farmland (12.72%) was higher than that in sloping farmland (8.93%), and the contents of > 0.25 mm aggregates in sloping farmland decreased with the increase of soil depth. The structural failure rate of soil aggregates was bare land $>$ sloping farmland $>$ forest land $>$ garden land. The soil organic carbon contents were significantly positively correlated with the contents of > 0.25 mm water stable aggregates. Under different land use types, forest land and garden land had the highest corrosion resistance index, structure coefficient, agglomeration degree, soil structure and stability, dispersive strength, water and fertilizer retention capacity, the larger water stability index, the smallest dispersion coefficient and the strongest corrosion resistance. The order of the comprehensive corrosion resistance index of different land use types was garden land (0.823 6) $>$ forest land (0.520 4) $>$ sloping farmland (−0.382 2) $>$ bare land (−0.961 8). In conclusion, artificial afforestation could significantly improve the structural stability of the original soil, and garden land and forest land had obvious advantages in increasing soil erosion resistance. Strengthening plantation construction could be an effective measure for soil improve-

收稿日期: 2019-03-31

资助项目: 云南省重点研发计划项目(2018BC001); 国家自然科学基金项目(30660037); 云南省应用基础研究青年项目(2016FD044); 云南省高校优势特色重点学科(生态学)建设项目(050005113111)

第一作者: 张华渝(1994—), 女, 重庆人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复研究。E-mail: reneezy@163.com

通信作者: 宋娅丽(1985—), 女, 山西长治人, 博士, 主要从事生态系统功能研究。E-mail: songyali19851205@sina.com

ment in the study area.

Keywords: soil corrosion resistance; principal component analysis; different types of land use; Jianshan river watershed in middle Yunnan Province

水土流失作为各国普遍关注的重大环境问题,造成的土地退化、耕地面积减少、生产力下降以及泥沙的淤积,已成为农业经济发展的主要障碍^[1]。随着水土流失的加剧,土壤有机质减少,肥力下降,土壤结构恶化,耕层变浅,形成恶性循环^[2]。土壤抗蚀性是土壤对侵蚀营力所表现出来的稳定性^[3],是反映土壤抵抗侵蚀能力的重要参数之一,可作为衡量水土流失治理成效的重要指标。土壤抗蚀性不仅受到自然因素包括土壤类型、气候条件、地形等的影响,还受到土地利用类型及土壤管理方式等人为活动的影响^[4]。因此,研究不同土地利用类型土壤抗蚀性强弱,对防治水土流失、调整土壤利用结构及改善土地利用现状具有重要意义。

近年来,针对不同土地利用类型土壤抗蚀性的研究多运用一些抗蚀指标和计算来表示抗蚀性的大小,但对其抗蚀性的评价指标未达成一致。选取的抗蚀性指标包括土壤理化性质、团聚体、微团聚体特征,植物根系、抗蚀指数等^[5-7]。其中,土壤抗蚀指数、水稳性指数、团聚度、结构系数等反映了土壤抗崩塌能力、团聚能力,与抗蚀性成正比;而分散系数表示土壤的分散性,其值越高,表明土壤结构水稳性越低,与抗蚀性成反比^[8];有机碳作为土壤水稳性团粒的主要胶结剂,不仅能促进团粒结构的形成,还会增加土壤的透水性 and 通气性等,增强团聚体稳定性,有效地降低了土壤侵蚀以及养分损失,从而提高了土壤的抗蚀性^[9]。以上这些指标均可以用来衡量抗蚀性的大小。而抗蚀性的评价方法也各不相同。姜爱国等^[10]使用主成分分析法对南京紫金山灵谷寺的不同林地土壤进行抗蚀性分析;聂晓刚等^[4]通过构建土壤抗蚀性综合评价模型对色季拉山 3 200~4 600 m 区域抗蚀性大小进行研究;赵锦梅等^[11]使用灰色关联度对不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性进行研究。

尖山河小流域土地利用类型多变,且在雨季土壤侵蚀较为严重。因此,本研究选择滇中尖山河小流域坡耕地、裸地、林地、园地 4 种不同土地利用类型,利用多种抗蚀性指标以及主成分分析法选取>0.25 mm 团聚体、>0.25 mm 水稳性团聚体、结构破坏率、抗蚀指数、水稳性指数、分散系数、结构系数、分散率、团聚度、有机碳含量、易氧化有机碳含量、微生物量有机碳含量、可溶性有机碳含量、颗粒有机碳含量、轻组分有机碳含量 15 个指标来研究不同土地利用类型土壤抗蚀性强弱,分析其抗蚀性特征,旨在深入了解不

同土地利用类型土壤抗蚀性大小规律及影响因素,以期为该流域水土保持、合理种植及改善土地利用现状提供科学依据及理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处玉溪市澄江县西南部,位于北纬 24°32′00″—24°37′38″,东经 102°47′21″—102°52′02″;最高海拔在流域北部,为 2 347.4 m,最低海拔在尖山河入抚仙湖的入口处,为 1 722.0 m,相对高差 625.4 m。小流域多年平均降水量 1 050 mm,雨季为 5 月下旬至 10 月下旬,降雨量占全年总降水量的 75%,旱季为 11 月上旬至翌年 5 月中旬,降雨量占全年降水量的 25%。流域内的土壤主要为红紫泥土和红壤。研究区内耕地面积 1 174.6 hm²,占总面积的 33.2%,坡耕地 347.1 hm²,坡耕地占总耕地面积的 29.6%;林地面积 1 697.5 hm²,占总面积的 47.9%,其中有林地 413.4 hm²,灌木林地 339.8 hm²,人工林地 941.0 hm²;经果林 3.3 hm²;荒山荒坡面积 545.8 hm²,占总面积的 15.4%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设与样品的采集 根据滇中尖山河小流域特点,于 2017 年 9 月选取研究区内具有代表性的坡耕地、裸地、林地、园地 4 种土地利用类型分别布设面积为 20 m×20 m 的标准样地。其样地基本情况见表 1。每种土地利用方式分别设置 3 个重复样地(样地面积为 20 m×20 m),每个样地相距 50~100 m,在样地中随机设置 5 个采样点。用挖剖面法在各采样点按 0—10,10—20,20—30 cm 分层取样,并用四分法取出足够的样品,除去砾石跟根系土样带回实验室后去杂、过 2 mm 钢筛后置于通风、阴凉、干燥的室内风干,磨细并过筛。

1.2.2 测定方法 土壤粒径组成采用 Malvern 激光粒度仪测定;土壤团聚体采用干筛法和湿筛法测定;微团聚体使用吸管法^[12]测定;土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法^[13]测定,土壤微生物有机碳采用氯仿熏蒸法、易氧化有机碳采用高锰酸钾氧化—比色法测定,土壤可溶性有机碳采用水浸提法,土壤颗粒有机碳采用化学手段(六偏磷酸钠为分散剂)振荡分散的方法,土壤轻组有机碳采用对土壤进行分散的方法^[14]测定。

水稳性指数采用崩解法^[15]测定。

抗蚀指数=(总土粒数-崩塌土粒数)/总土粒数×100%

水稳性指数 $K = (\sum P_i K_i + P_j) / A$ 数; K_i 为第 i min 的校正系数; P_j 为 10 min 内没有分散的土粒数; A 为试验的总土粒数^[15]。

式中: $i = 1, 2, 3, \dots, 10$; P_i 为第 i min 分散的土粒

表 1 不同土地利用类型样地基本特征

土地利用类型	土壤类型	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向/ (°)	树高/ m	郁闭度	草本层 覆盖度/%	植被 类型
坡耕地	红壤	1939	16.52	东北坡 15			20~30	玉米 ⁽¹⁾ 、豌豆 ⁽²⁾ 、烤烟 ⁽³⁾
裸地	红壤	1936	17.82	东北坡 15			<5	鬼针草 ⁽⁴⁾
林地	红壤	1958	18.58	东北坡 15	9.0	0.85	48	云南松 ⁽⁵⁾
园地(坡改梯)	红壤	1983	20.84	东南坡 15	5.5	0.60	60~70	杨梅 ⁽⁶⁾

注:(1)*Zea mays* L.; (2)*Pisum sativum* L.; (3)*Nicotiana tabacum* L.; (4)*Bidens pilosa* L.; (5)*Pinus yunnanensis*; (6)*Myrica rubra* (Lour.) S. et Zucc.

1.3 数据统计与分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对数据进行数据处理和图表分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验不同土地利用类型或不同土层下土壤理化性质、有机碳组分、土壤抗蚀性指标的差异性,并运用主成分分析,综合评价不同土地利用类型下土壤抗蚀性强弱。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用类型土壤抗蚀性影响因素

2.1.1 土壤机械组成及微团聚体 由表 2 可知,土壤机械组成差异较大,0—10 cm 土层以粗粉粒(0.05~

0.01 mm)和物理性黏粒(<0.01 mm)为主,坡耕地、裸地、林地和园地 0—10 cm 土层粗粉粒和物理性黏粒分别占 43.57%和 36.49%、54.86%和 25.74%、40.92%和 31.95%、44.41%和 35.14%。10—20 cm 土层均以粗粉粒最高,坡耕地和裸地粗砂粒分别比物理性黏粒高 1.14%和 12.45%,林地、园地均以物理性黏粒次之。20—30 cm 土层均以粗粉粒(0.05~0.01 mm)和物理性黏粒(<0.01 mm)为主。不同土地利用类型<0.001 mm 黏粒占比最低,仅为 0.42%~2.60%。不同土地利用类型下微团聚体组成中多以 1~0.05 mm 颗粒为主,最低占 30.83%,最高占 93.24%。

表 2 不同土地利用类型下土壤机械组成和微团聚体组成

土地利用类型	土层深度/cm	机械组成/%				微团聚体/%			
		1~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.01 mm	0.01~0.001 mm	1~0.05 mm	0.05~0.01 mm	<0.01 mm	0.01~0.001 mm
坡耕地	0—10	19.9348	43.5723	36.4929	34.8730	1.6199	40.7865	14.4143	0.9932
	10—20	31.5418	38.0609	30.3974	29.4474	0.9499	63.0208	18.1586	0.6142
	20—30	17.9408	56.0283	26.0309	25.3333	0.6976	37.0607	14.9408	0.4601
裸地	0—10	19.4015	54.8581	25.7404	25.0061	0.7343	30.8275	19.5767	0.4628
	10—20	33.2308	45.9885	20.7807	20.2807	0.5000	60.8411	20.1948	0.3256
	20—30	18.9284	61.7314	19.3402	18.9180	0.4222	33.3563	18.3376	0.2855
林地	0—10	27.1353	40.9164	31.9483	30.3470	1.6013	92.3377	5.1005	0.4717
	10—20	20.6811	48.9512	30.3677	29.1159	1.2517	49.3687	19.9147	0.3957
	20—30	26.7503	45.9245	27.3251	26.1923	1.1329	69.4212	18.1866	0.3645
园地	0—10	20.4521	44.4062	35.1417	32.5214	2.6203	93.2438	6.2590	0.7905
	10—20	24.3402	43.8904	31.7694	29.7647	2.0047	79.4831	15.7009	0.7453
	20—30	26.7222	43.0079	30.2699	28.4916	1.7783	53.2330	19.4878	0.6821

2.1.2 土壤团聚体及结构破坏率 表 3 中湿筛结果用于分析土壤水稳性团聚体,干筛数据用于分析结构破坏率与>0.25 mm 团聚体^[16]。由表 4 可知,坡耕地土壤水稳性团聚体以 5~2,2~1 mm 为主,裸地、林地及园地以>5,5~2 mm 为主。0—10 cm 土层不同土地利用类型土壤>0.25 mm 水稳性团聚体林地最高,占 87.38%;林地、园地与裸地之间均达差异显著($p<0.05$)。其中 10—20,20—30 cm 土层均为园地最高,分别占 93.29%和 93.13%。林地、园地与裸地之间均差异性显著($p<0.05$)。土壤>0.25 mm 水稳性团聚体整体表现为园地>林地>坡耕地>裸地。

其中,>5 mm 水稳性团聚体坡耕地、裸地显著低于林地、园地。坡耕地>0.25 mm 团聚体随土层深度加深而降低,由土壤结构破坏率可以看出,裸地的土壤团聚体结构破坏率最高,与其他土地利用类型差异显著($p<0.05$);坡耕地与其他土地利用类型结构破坏率亦差异显著($p<0.05$),显著大于林地、园地,而林地、园地之间差异不显著($p>0.05$)。

2.1.3 土壤有机碳及有机碳组分 由表 4 可知,不同土地利用类型下土壤有机碳(SOC)、微生物有机碳(MBC)、易氧化有机碳(EOC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、轻组分有机碳(LFC)整

体均表现为园地>林地>坡耕地>裸地。不同土地利用类型 SOC、MBC、EOC、DOC、POC、LFC 整体上随着土层深度的增加而逐渐降低,且主要分布在 0—20 cm 土层,在 20—30 cm 土层含量较低。

表 3 不同土地利用类型下土壤团聚体及结构破坏率

土地利用类型	土层深度/cm	方法	土壤团聚体含量/%						结构破坏率/%
			>5 mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm	
坡耕地	0—10	湿筛	6.37Ac	28.02Aabc	22.49Aa	12.15Aa	16.49Aab	85.53Aa	11.86Aa
		干筛	53.64Aa	29.04Aa	6.05Aa	6.64Aa	1.67Aa	97.04Aa	
	10—20	湿筛	12.67Bc	28.03Aab	16.74ABab	10.86Aa	9.26Bac	77.56ABab	20.14Aa
		干筛	59.96Ba	26.32Ba	4.74Aa	4.57Aa	1.53Aa	97.12Aa	
	20—30	湿筛	7.76ABb	30.35Aa	13.28Bab	11.51Ab	8.22Ba	71.12Bb	25.59Aa
		干筛	53.69Aa	30.47Aa	5.67Aa	4.41Aa	1.33Aa	95.58Aa	
裸地	0—10	湿筛	14.00Ac	16.97Ab	1.86Ab	1.54Ac	6.32Aa	40.69Ab	58.35Ab
		干筛	70.13Ab	14.36Ab	8.44Aa	2.35Ab	2.43Aa	97.71Aa	
	10—20	湿筛	13.92Ac	18.68Ab	2.22Ab	1.58Ac	6.41Aa	42.80Ab	54.47Ab
		干筛	66.35Aa	16.9Ab	8.00Ab	2.29Ab	0.45Bb	94.00Aa	
	20—30	湿筛	10.25Ab	25.1Aab	4.41Bb	2.14Ac	5.70Aab	47.60Ac	47.68Aa
		干筛	55.91Ba	21.68Bb	9.16Ab	3.43Aa	0.80Ba	90.98Ba	
林地	0—10	湿筛	71.50Ab	10.07Ac	1.83Ab	3.11Ab	0.86Ab	87.38Aa	8.40Aa
		干筛	77.60Ab	10.25Ab	2.62Ab	3.44Ab	1.49Aa	95.39Aa	
	10—20	湿筛	53.43Bb	22.72ABa	4.69Ba	6.91Bb	1.93Bb	89.69Aa	8.53Aa
		干筛	73.89Ab	16.09Bb	3.04Aa	3.38Aa	1.64Aa	98.05Aa	
	20—30	湿筛	16.94Cb	14.8Bb	8.49Ca	22.54Ca	7.05Ca	69.81Bb	5.97Aa
		干筛	37.51Bb	22.89Cb	4.43Aa	5.89Ba	3.52Bb	74.24Bb	
园地	0—10	湿筛	50.13Aa	24.62Aa	3.40Ab	5.59Ab	1.53Aab	85.27Aa	12.37Aa
		干筛	54.35Aa	25.41Aa	7.70Aa	7.50Aa	2.34Aa	97.31Aa	
	10—20	湿筛	71.15Ba	13.03Bab	3.57Aab	3.66Ac	1.87Abc	93.29Ba	0.86Ba
		干筛	75.00Bb	9.41Bc	4.58Aa	3.90Ba	1.21Ba	94.10Ba	
	20—30	湿筛	65.36Ba	18.91Bab	2.98Ab	3.57Ac	2.32Bb	93.13Ba	5.16ABa
		干筛	75.50Bc	16.00Cc	2.64Bc	2.30Bb	1.75ABa	98.20Aa	

注:表中不同大写字母表示同一土地利用类型不同土层差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一土层不同土地利用类型间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 4 不同土地利用类型下土壤有机碳及其组分

土地利用类型	土层深度/cm	SOC/(g·kg ⁻¹)	EOC/(g·kg ⁻¹)	MBC/(mg·kg ⁻¹)	DOC/(mg·kg ⁻¹)	POC/(g·kg ⁻¹)	LFC/(g·kg ⁻¹)
坡耕地	0—10	8.88	1.36	308.37	92.72	4.26	1.82
	10—20	8.85	1.35	272.42	71.46	3.50	1.66
	20—30	8.66	1.12	264.40	68.70	3.31	1.30
裸地	0—10	6.24	0.66	273.08	86.81	2.93	1.89
	10—20	5.57	0.56	240.35	60.47	2.39	1.42
	20—30	5.31	0.40	210.05	55.58	2.35	0.92
林地	0—10	18.13	3.87	526.03	125.24	10.48	4.93
	10—20	10.83	2.16	373.43	103.37	4.10	2.19
	20—30	8.47	2.09	353.22	99.28	2.39	1.44
园地	0—10	22.14	4.33	571.50	130.20	12.95	5.02
	10—20	12.43	3.08	519.41	106.14	6.04	2.15
	20—30	11.10	2.79	415.80	98.95	4.88	1.53

由表 5 可知,坡耕地、园地土壤>0.25 mm 水稳性团聚体与有机碳及其组分呈极显著正相关,即有机碳含量越高,土壤水稳性团聚体含量越大,土壤抗蚀性越强。不同土地利用类型 SOC 平均含量表现为园

地(15.22 g/kg) > 林地(12.47 g/kg) > 坡耕地(8.80 g/kg) > 裸地(5.71 g/kg); >0.25 mm 水稳性团聚体平均占比为: 园地(90.56%) > 林地(82.29%) > 坡耕地(78.07%) > 裸地(43.70%); 林地、园地中 >5mm 水稳性团聚体同样与 SOC 及其组分呈极显著正相关, >5

mm 水稳性团聚平均占比为: 园地(62.21%) > 林地(47.29%) > 裸地(12.72%) > 坡耕地(8.93%)。由以上不同土地利用类型 SOC、各有机碳组分及水稳性团聚体指标, 表明园地土壤抗蚀性最强, 林地次之, 坡耕地和裸地最小。

表 5 土壤有机碳及其组分与水稳性团聚体相关关系

指标	SOC	EOC	MBC	DOC	POC	LFC
>0.25 mm 水稳性团聚体	0.637**	0.744**	0.702**	0.670**	0.519**	0.398*
>5 mm 水稳性团聚体	0.692**	0.826**	0.854**	0.745**	0.639**	0.577**

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

2.2 不同土地利用类型土壤抗蚀性变化特征

由表 6 可知, 0—10 cm 土层, 不同土地利用类型之间土壤抗蚀指数均差异性显著($p < 0.05$), 10—20, 20—30 cm 土层土壤抗蚀性除了林地和园地之间以及坡耕地和裸地之间差异不显著($p > 0.05$), 其他土地利用类型间差异显著($p < 0.05$)。不同土层土壤抗蚀指数大小均表现为林地 > 园地 > 坡耕地 > 裸地, 4 种土地利用类型抗蚀性指数在各土层之间差异均不显著($p > 0.05$)。0—10 cm 土层土壤水稳性指数大小表现为林地(0.80) > 园地(0.77) > 坡耕地(0.65) > 裸地(0.60), 不同土地利用类型之间土壤水稳性指数差异

不显著($p > 0.05$), 但不同土地利用类型均为土壤表层 0—10 cm 的土壤水稳性指数最高。0—10, 10—20, 20—30 cm 土层土壤分散系数高低依次均为裸地 > 坡耕地 > 园地 > 林地。不同土地利用类型除了坡耕地以外, 各土层之间土壤分散系数差异不显著, 随着土层深度的增加, 土壤分散系数均有增大的趋势。总体来看, 裸地土壤分散系数最大。0—10, 10—20, 20—30 cm 土层土壤结构系数高低依次均为林地 > 园地 > 坡耕地 > 裸地。不同土层团聚度大小均表现为园地 > 林地 > 坡耕地 > 裸地, 园地土壤团聚度显著高于其他土地利用类型, 裸地土壤团聚度最小。

表 6 不同土地利用类型下土壤抗蚀性分析

土地利用类型	土层深度/cm	抗蚀指数/%	水稳性指数	分散系数/%	结构系数/%	团聚度/%
坡耕地	0—10	35.36Ac	0.65Ab	61.37Bb	38.63Ab	49.74Ac
	10—20	32.58Ab	0.61Ac	64.59Ab	35.41Bb	50.77Aa
	20—30	32.14Ab	0.62Aa	65.85Ac	34.15Bc	51.95Ac
裸地	0—10	26.40Ad	0.60Ab	63.09Ab	36.91Ab	44.11Ad
	10—20	25.95Ab	0.60Ac	64.81Ab	35.19Ab	41.58Aab
	20—30	25.67Ab	0.63Aa	66.72Ac	33.28Ac	39.63Ac
林地	0—10	55.93Aa	0.80Aa	29.08Aa	70.92Aa	67.94Aa
	10—20	50.27ABa	0.82Aa	31.33Aa	68.67Aa	60.66ABa
	20—30	45.78Ba	0.71Aa	32.21Aa	67.79Aa	61.48Ba
园地	0—10	46.45Ab	0.77Aa	30.30Aa	69.70Aa	66.01Ab
	10—20	42.83Aa	0.72Ab	37.93Aa	62.07Aa	67.26Ab
	20—30	44.65Aa	0.72Aa	38.62Ab	61.38Ab	63.86Ab

2.3 不同土地利用类型抗蚀性指标主成分分析

用于主成分分析的指标为: >0.25 mm 团聚体、>0.25 mm 水稳性团聚体、结构破坏率、抗蚀指数、水稳性指数、分散系数、结构系数、分散率、团聚度、有机碳含量、易氧化有机碳含量、微生物量有机碳含量、可溶性有机碳含量、颗粒有机碳、轻组分有机碳, 共 15 个指标分别记为 $X_i (i = 1, 2, 3, \dots, 15)$ 。由表 7 可知, 表征抗蚀性的指标体系建立较全面, 其中大多指标之间存在比较强的相关性, 说明各指标存在信息上的重叠。而主成分分析法恰恰能够避免这一弊端, 真实反映抗蚀性的强弱。

主成分分析中, 主成分个数提取原则为主成分对

应的特征值大于 1 的前 m 个主成分。特征值在某种程度上可以被看成是表示主成分影响力度大小的指标, 如果特征值小于 1, 说明该主成分的解释力度还不如直接引入一个原变量的平均解释力度大, 因此, 一般可以用特征值大于 1 作为纳入标准。土壤抗蚀性指标分析的总方差分析结果见表 8。第 1 主成分的方差贡献率最大(45.52%), 对土壤抗蚀性的影响明显; 第 2 主成分的方差贡献率次之(38.53%), 对土壤抗蚀性的影响程度较小; 第 3 主成分的方差贡献率最小(9.06%), 对土壤抗蚀性的影响最小。前 3 个主成分其累积方差贡献率为 93.11%, 这说明用前 3 个

主成分作为综合评价指标来反映和评价土壤抗蚀性的信息可靠性在 93.11%以上,且前 3 个主成分的特征值均高于 1,达到了主成分分析要求。因此,前 3 个主成分能反映该区域不同土地利用类型下土壤抗蚀性的变异信息,可用所提取的 3 个主成分来衡量土壤抗蚀性的强弱。

表 7 主成分分析指标

土地利用类型	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
坡耕地	96.58	78.07	19.20	33.36	0.63	63.94	36.06	68.22	50.82	8.80	1.28	281.73	77.62	3.69	1.59
裸地	94.23	43.70	53.50	26.01	0.61	64.87	35.13	75.56	41.77	5.71	0.54	241.16	67.62	2.56	1.41
林地	89.23	82.29	7.63	50.66	0.78	30.87	69.13	38.70	63.36	12.47	2.71	417.56	109.30	5.65	2.85
园地	96.54	90.56	6.13	44.64	0.74	35.62	64.38	33.14	65.71	15.22	3.40	502.24	111.77	7.96	2.90

注: X_1 为 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体(%); X_2 为 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体(%); X_3 为结构破坏率(%); X_4 为抗蚀指数(%); X_5 为水稳性指数(%); X_6 为分散系数(%); X_7 为结构系数(%); X_8 为分散率(%); X_9 为团聚度(%); X_{10} 为有机碳含量(g/kg); X_{11} 为易氧化有机碳含量(g/kg); X_{12} 为微生物量有机碳含量(mg/kg); X_{13} 为可溶性有机碳含量(mg/kg); X_{14} 为颗粒有机碳(g/kg); X_{15} 为轻组分有机碳(g/kg)。下同。

表 8 土壤抗蚀性指标分析的总方差分析结果

主成分	特征根	贡献率/%	累积贡献率/%
1	6.83	45.52	45.52
2	5.78	38.53	84.05
3	1.36	9.06	93.11

经主成分方差分析后,各主成分的初始因子载荷系数距离与原始值未拉开,表达的实际意义无明显差异。因此,采用最大方差旋转法(Varimax)进一步进行分析(表 9),以提取最适合表征土壤抗蚀性的指标。通过上述分析结果以及主成分的贡献率可以得知表征该区域不同土地利用类型下土壤抗蚀性的最适指标分别为分散率、有机碳含量、颗粒有机碳含量、轻组分有机碳含量、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体、结构破坏率、抗蚀指数、 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体。

根据主成分分析的结果,不仅给出了不同土地利用类型抗蚀性主成分模型,还得出变量与因子之间的相关系数,这些相关系数构成因子结构,根据因子结

构,计算出各个样本的主成分得分(表 10)。

表 9 土壤抗蚀性主成分分析旋转后的因子载荷矩阵

抗蚀性指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3
X_1	0.121	-0.047	0.967
X_2	0.238	0.906	0.262
X_3	-0.207	-0.933	0.037
X_4	0.507	0.817	-0.132
X_5	0.528	0.752	-0.08
X_6	-0.562	-0.732	0.288
X_7	0.562	0.732	-0.288
X_8	-0.845	-0.352	0.204
X_9	0.755	0.546	-0.153
X_{10}	0.877	0.421	0.161
X_{11}	0.771	0.617	0.020
X_{12}	0.780	0.576	0.030
X_{13}	0.727	0.605	-0.009
X_{14}	0.927	0.261	0.226
X_{15}	0.949	0.185	0.142

表 10 主成分得分系数

主成分	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}
1	-0.027	-0.234	0.228	-0.065	-0.039	0.001	-0.001	-0.227	0.123	0.183	0.090	0.106	0.079	0.249	0.291
2	0.067	0.376	-0.360	0.194	0.163	-0.115	0.115	0.145	-0.018	-0.075	0.033	0.012	0.038	-0.157	-0.211
3	0.731	0.301	-0.076	-0.040	-0.010	0.177	-0.177	0.189	-0.115	0.100	0.027	0.028	0.007	0.124	0.047

根据成分得分矩阵可以得到第 1,2,3 主成分的线性表达式:

$$0.115X_9 + 0.1X_{10} + 0.027X_{11} + 0.028X_{12} + 0.007X_{13} + 0.124X_{14} + 0.047X_{15}$$

$$\begin{aligned} F_1 &= -0.207X_1 - 0.234X_2 + 0.228X_3 - 0.065X_4 - 0.039X_5 + 0.001X_6 - 0.001X_7 - 0.227X_8 + 0.123X_9 + 0.183X_{10} + 0.09X_{11} + 0.106X_{12} + 0.079X_{13} + 0.249X_{14} + 0.291X_{15} \\ F_2 &= 0.067X_1 + 0.376X_2 - 0.36X_3 + 0.194X_4 + 0.163X_5 - 0.115X_6 + 0.115X_7 + 0.145X_8 - 0.018X_9 - 0.075X_{10} + 0.033X_{11} + 0.012X_{12} + 0.038X_{13} - 0.157X_{14} - 0.211X_{15} \\ F_3 &= 0.731X_1 + 0.301X_2 - 0.076X_3 - 0.04X_4 - 0.01X_5 + 0.177X_6 - 0.177X_7 + 0.189X_8 - \end{aligned}$$

由表 8 可知,第 1,2,3 主成分的累积方差贡献率达到 93.11%,第 1,2,3 主成分贡献率分别为 45.52%,38.53%,9.06%,因此,第 1,2,3 主成分占 3 个主成分之和的权重分别为 48.89%,41.38%,9.73%。综合评价抗蚀性的计算公式为:

$$F_{\text{综}} = 0.4889F_1 + 0.4138F_2 + 0.0973F_3$$

通过线性加权求和得到综合评价指标来分析不同土地利用类型抗蚀性的大小,其值越大,土壤抗蚀性越强。通过计算可以得出不同土地利用类型下土壤的综合抗蚀指数(表 11),不同土地利用类型土壤抗蚀性综合指数从大到小依次为园地 $>$ 林地 $>$ 坡耕

地>裸地;土壤抗蚀性大小排序为园地>林地>坡耕地>裸地。

表 11 不同利用类型土壤抗蚀性综合指数					
土地利用类型	第 1 主成分 F_1	第 2 主成分 F_2	第 3 主成分 F_3	综合主成分值 $F_{综}$	排名
坡耕地	-0.8335	0.0944	0.9040	-0.2805	3
裸地	-0.6386	-1.1142	-0.1787	-0.7906	4
林地	0.4929	0.5875	-1.3338	0.3543	2
园地	0.9792	0.4322	0.6084	0.7168	1

3 讨论

本研究中,坡耕地、裸地中>5 mm 土壤水稳性团聚体显著低于林地、园地,这说明林地和园地土壤团聚体水稳性最优,结构体破坏率低;而受人为活动干扰最大的坡耕地和裸地土壤团聚体水稳性较差,结构体破坏率高。这与谢贤健^[17]以农耕地作为对照,研究不同巨桉人工林的土壤水稳性团聚体的研究结果一致。坡耕地>0.25 mm 团聚体随土层深度加深而降低,这与丁文斌等^[18]研究重庆合川和云南楚雄紫色土坡耕地大团聚体含量的结果一致,可能是由于坡耕地受人为耕作及其他活动的影响,团聚体遭到破坏,加之土壤贫瘠,过度依赖化肥以补充作物生长所需营养,有机碳含量较低,稳定性较差,土壤质量退化严重。因此,坡耕地在耕作时,应增施有机肥,改善土壤结构,并减少人为耕作扰动程度。裸地的土壤团聚体结构破坏率最高,是由于其植被覆盖度较小,受季节性强降雨影响,表层土壤受溅蚀和径流冲刷作用,地表径流流失严重,发生土壤侵蚀的可能性较高,土壤的保肥能力显著减弱,土壤抗蚀性较差。这与胡尧等^[9]研究岷江流域不同土地利用方式下撂荒地土壤团聚体的结果不同,这可能是由于其试验所选取的撂荒地是为减少人为干扰,自然恢复多年后的试验地,撂荒提高了其土壤有机质含量,提高了其抗侵蚀能力。

土壤有机质是土壤水稳性团聚体的有机胶结剂,通过影响土壤团聚体的形成间接影响土壤抗蚀性^[19]。土壤有机碳组分与水稳性团聚体相关分析表明,土壤有机质含量与>0.25 mm 水稳性团聚体含量和均达到极显著正相关。本研究中不同有机碳组分含量大小均表现为园地>林地>坡耕地>裸地,与土壤水稳性团聚体趋势表现一致。这是由于园地和林地的植物种类丰富,覆盖度高,凋落物量较多,分解速度较快,能有效促进土壤有机碳的增加,从而促进水稳性团聚体的形成,改善土壤结构,使土壤不易受到水力破坏;林地有机碳含量小于园地是由于该流域林地林龄较小,植被单一,生物量小,有机质外源物质归还量较小;而坡耕地保持传统耕作模式,施用化肥和农家肥,土壤有机碳及其

组分含量均高于裸地,其土壤抗蚀性高于裸地。而>5 mm 水稳性团聚体含量表现为裸地(12.72%)大于坡耕地(8.93%),这与孙丽芳^[20]研究黄土高原植被恢复下土壤水稳性团聚体分布的结果一致。

总体来说,滇中尖山河小流域不同土地利用类型下园地土壤的抗蚀指数、结构系数和团聚度最高,水稳性指数较大,分散系数最小,土壤结构和稳定性最好,抗分散强度和保水保肥能力最强,土壤抗蚀性能最强。这与前人^[21-22]研究不同土地利用类型抗蚀性结果一致。其原因是园地(杨梅园)土壤地上大量杨梅以及枯枝落叶在微生物的降解作用下分解、转换之后重新进入土壤^[23],提高了土壤的有机质含量,有助于土壤中大粒级水稳性团聚体的形成,增强了固持土壤能力和抗崩塌能力。林地土壤抗蚀性次之,由于林地不受人为扰动,且土壤结构适宜微生物生长,因此土壤中活性有机碳含量较高,以及地下林木根系的周转等,均有助于土壤水稳性团聚体的形成;坡耕地显著小于园地、林地土壤抗蚀性,其原因是当地种植的农作物处于幼苗期,坡耕地大部分表土裸露,植被覆盖度较低,人类活动对耕地的反复践踏以及种植农作物(玉米、烤烟、豌豆)多次翻耕使得地表黏结力逐渐下降,易遭受降雨径流冲刷侵蚀,养分随土壤细颗粒流失,农作物秸秆难以还田,耕地腐殖质和有机质缺乏,土壤团聚体结构和稳定性较差,导致土壤侵蚀性能减弱;裸地土壤抗蚀性最小,原因可能是裸地上人类活动密集,加之植被覆盖率低(<5%),草本稀疏,土壤机械组成发生了显著变化,故土壤分散系数高,土壤抗蚀性能弱,抗蚀指数很小,土壤抗蚀性能低。

本研究运用主成分分析法,通过降维,以新建立得到的少量主成分代替原本的多项评价指标能较好地衡量尖山河小流域不同土地利用类型的土壤抗蚀性能及规律。不同土地利用类型土壤抗蚀性综合指数从大到小排序为园地>林地>坡耕地>裸地,说明以水稳性团聚体为基础的指标,能较好地衡量土壤抗蚀性,水稳性团聚体含量越高,结构破坏率越小,水稳性指数越高,则土壤抗蚀性能越强。也说明园地土壤抗蚀性最强,林地和坡耕地次之,裸地最弱。综上,增加团聚体的含量是增强土壤抗蚀性,有效控制水土流失的重要方式。4 种土地利用类型中,园地和林地土壤抗蚀性最高,说明实行人工造林能够显著提高原土结构稳定性,园地和林地 在增加土壤抗蚀性方面有明显优势。因此,加强人工林建设可以作为研究区土壤改良的有效措施。同时,建议该区林地加强人为管护强度,以提高其群落整体生态效应;建议该区坡耕地

应科学施用有机肥,提高土壤结构稳定性,增强其水源涵养和水土保持功能。这样不仅可减少流域水土流失和面源污染,同时也是改善土壤质量、恢复土壤肥力以及实现该区域植被恢复重建的根本保障。

4 结 论

(1)林地、园地土壤团聚体水稳性最优,结构破坏率低,坡耕地和裸地团聚体水稳性较差,结构体破坏率高。坡耕地>0.25 mm 团聚体随土层深度加深而降低。土壤有机质含量与>0.25 mm 水稳性团聚体含量和均达到极显著正相关。不同有机碳组分大小均表现为园地>林地>坡耕地>裸地。

(2)园地土壤的抗蚀指数、结构系数和团聚度最高,水稳性指数较大,分散系数最小,土壤结构和稳定性最好,抗分散强度和保水保肥能力最强,土壤抗蚀性能最强。林地土壤抗蚀性次之,坡耕地显著小于园地、林地土壤抗蚀性,裸地土壤抗蚀性最小。

(3)不同土地利用类型土壤抗蚀性综合指数从大到小排序为园地>林地>坡耕地>裸地,说明以水稳性团聚体为基础的指标,能较好地衡量土壤抗蚀性,水稳性团聚体含量越高,结构破坏率越小,水稳性指数越高,则土壤抗蚀性能越强。也说明园地土壤抗蚀性最强,林地和坡耕地次之,裸地最弱。

(4)增加团聚体的含量是增强土壤抗蚀性,有效控制水土流失的重要方式。实行人工造林能够显著提高原土结构稳定性,加强人工林建设可以作为研究区土壤改良的有效措施。同时,建议该区林地加强人为管护强度,科学施用有机肥,以提高其群落整体生态效应及土壤结构稳定性,增强其水源涵养和水土保持功能。

参考文献:

- [1] 吕振宇,牛灵安,郝晋珉,等.中国农业生态环境面临的问题与改善对策[J].中国农学通报,2009,25(4):218-224.
- [2] 谢立亚,舒乔生.沙棘林退化对土壤性质及水土流失的影响[J].水土保持通报,2014,34(3):19-23.
- [3] 王景燕,胡庭兴,龚伟,等.川南地区不同退耕地对土壤抗蚀性的影响[J].中国水土保持,2010(12):30-33,73.
- [4] 聂晓刚,梁博,杨东升,等.色季拉山土壤抗蚀性空间差异性分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(5):69-76.
- [5] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.
- [6] 余晓章,魏鹏,范川,等.两种巨桉人工林地土壤抗蚀性的比较研究[J].水土保持通报,2015,35(2):58-63.
- [7] 吕刚,魏忠平,高英旭,等.不同土地利用类型植物根系与土壤抗蚀性关系研究[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):111-115.
- [8] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.
- [9] 胡尧,李懿,侯雨乐.不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J].水土保持研究,2018,25(4):22-29.
- [10] 姜爱国,万福绪,胡菲.南京紫金山灵谷寺不同林地土壤抗蚀性研究[J].水土保持研究,2018,25(1):12-16.
- [11] 赵锦梅,徐长林,马瑞,等.东祁连山不同高寒灌丛草地土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2016,30(5):119-123.
- [12] 储小院,王玉杰,刘楠,等.重庆缙云山典型林分林地土壤微团聚体特征分析[J].土壤通报,2009,40(6):1240-1244.
- [13] 双龙,妮萨娜,杜江,等.重铬酸钾氧化-外加热法测定化探土壤样品中有机碳含量[J].安徽化工,2016,42(4):110-112.
- [14] 胡慧蓉,马焕成,罗承德,等.森林土壤有机碳分组及其测定方法[J].土壤通报,2010,41(4):1018-1024.
- [15] 何淑勤,宫渊波,郑子成,等.不同植被类型条件下土壤抗蚀性变化特征及其影响因素[J].水土保持学报,2013,27(5):17-22.
- [16] 江仁涛,李富程,沈淦涛.川西北高寒草地退化对土壤团聚体组成及稳定性的影响[J].水土保持研究,2018,25(4):36-42.
- [17] 谢贤健.不同巨桉人工林对土壤水稳性团聚体及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):211-225.
- [18] 丁文斌,蒋平,史东梅,等.紫色土坡耕地耕层蓄水保土及耕性特征研究[J].水土保持学报,2016,30(6):24-29,37.
- [19] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等.黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J].林业科学,2013,49(9):102-106.
- [20] 孙丽芳.黄土高原植被恢复对土壤碳、氮储量及水稳性团聚体分布的影响[D].北京:中国农业科学院,2007.
- [21] 杨玉梅.不同土地利用方式下土壤抗蚀与抗冲性研究[D].成都:四川农业大学,2010.
- [22] 何淑勤.岷江上游山地森林—干旱河谷交错带土壤抗蚀力研究[D].成都:四川农业大学,2011.
- [23] 黄先飞,周运超,张珍明.喀斯特石漠化区不同土地利用方式下土壤有机碳分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):215-221.