

藏东南高寒区尼洋河河谷地带 不同土地利用方式土壤抗蚀性研究^①

万 丹^{1,2}, 何财基³, 王玉民³, 聂晓刚^{1,2}, 喻 武^{1,2}

1. 西藏农牧学院 资源与环境学院, 西藏 林芝 860000; 2. 西藏农牧学院 高寒水土保持研究中心, 西藏 林芝 860000;
3. 中国铁路总公司 拉林铁路建设指挥部, 西藏 林芝 860000

摘要: 土壤抗蚀性是评价土壤侵蚀潜在发生可能性的重要综合性指标, 研究高寒河谷地带不同土地利用方式土壤抗蚀性为土地利用模式优化和资源整合提供理论依据. 本文应用主成分分析法对藏东南高寒区尼洋河流域 5 种不同土地利用方式下的 3 大类、13 个土壤抗蚀性指标进行分析研究. 研究表明: 土壤团粒类指标和有机质能很好地反映土壤抗蚀性, $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体质量分数、 $>0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体质量分数、 $>0.25\text{ mm}$ 非水稳性团聚体质量分数、水稳性指数、平均重量直径、团聚体结构破坏率、有机质 7 个指标对土壤抗蚀性的影响最为明显, 是表现不同土地利用方式土壤抗蚀性的最佳指标. 各抗蚀性指标值基本表现出 $(0\sim15)\text{ cm}>(16\sim30)\text{ cm}$ 规律. 通过建立权重求和模型发现 $0\sim15\text{ cm}$ 表层土壤抗蚀性能远远大于 $16\sim30\text{ cm}$; 最终, 通过叠加法得出不同土地利用类型土壤抗蚀性评价从强到弱顺序为: 灌木林地(SL)、天然林地(NF)、农耕地(CL)、河滩林地(BL)、人工林地(AF).

关键词: 尼洋河河谷; 土地利用方式; 土壤抗蚀性; 主成分分析

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)09-0106-09

土壤抗蚀性是指土壤抵抗水的分散和悬浮的能力^[1]. 土壤物理结构被认为是影响土壤抗蚀性强弱的重要原因^[2]. 而土壤物理性质各指标在空间分布的差异, 不仅受成土母质和气候的空间差异性的影响, 还受到土地利用类型的影响^[3-4]. 不同的土地利用方式使土壤的物理性质产生差异, 进而对土壤的肥力、保水蓄水能力以及抗侵蚀能力造成影响. 目前, 国内外土壤抗蚀性评价主要从以下 3 个方面进行研究: 根据土壤的理化性质来评价土壤抗蚀性; 用统计方法对土壤抗蚀性的研究; 从侵蚀动力学角度对土壤抗蚀性的研究^[5]. 评价土壤抗蚀性能的指标有很多, 常见的主要有土壤有机质质量分数、水稳性团聚体质量分数、平均重量直径等指标^[6].

尼洋河流域作为西藏仅次于“一江两河”中部流域的重点开发区域, 在藏东南社会、经济总格局中占有极为重要的地位. 但近年来, 随着社会经济的快速发展, 研究区工程建设开发频繁, 地表扰动加剧, 土体结构破碎, 加之谷地人口聚集, 过牧和不合理的樵采、垦荒, 使河谷稀疏植被受到一定程度破坏, 部分河谷土地有沙化的迹象, 这导致尼洋河流域生态环境承受了一定压力. 据水利部水土保持监测中心 2005 年水土流失遥感资料和实地调查, 尼洋河流域水土流失面积 $6\,728.73\text{ km}^2$, 占流域土地面积的 38.44% . 水土流失以水力侵蚀和冻融侵蚀为主, 其中冻融侵蚀是主要的水土流失类型, 面积为 $5\,591.42\text{ km}^2$, 占水土流失面积的 83.10% , 且主要分布在尼洋河中下游流域^[7]. 严重的土壤侵蚀, 加上不合理的土地利用方式导致区域

① 收稿日期: 2018-04-05

基金项目: 水利部水土保持植物开发管理中心资助项目(2017-zg-zx-57).

作者简介: 万 丹(1981-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事高寒区土壤侵蚀机理及其恢复研究.

内土壤质量退化, 土地呈现沙化的趋势, 制约区域资源、社会和经济的可持续发展. 同时, 在全球气候变暖的影响下, 尼洋河流域多年冻土向季节性冻土转变, 冻融循环转换剧烈, 土体结构破坏严重, 水土流失加剧, 江河湖泊含沙量大幅提升. 以冻融侵蚀为代表的流域生态环境问题引起了当地各界机构的关注. 因此, 加强区域土壤侵蚀机理的研究对维护高寒区生态平衡和资源的可持续利用的意义极其重要^[8-9]. 目前国内外学者关于青藏高原土壤侵蚀的研究, 大多基于宏观定性的描述, 以土壤侵蚀分布区域、类型等方面的调查研究居多^[10-13], 而鲜有考虑土壤侵蚀影响因素, 开展定性评价的研究. 本文以尼洋河下游 5 种典型土地利用方式下的土壤为研究对象, 开展土壤抗蚀性分析与评价, 以期优化流域土地利用方式和治理冻融侵蚀提供科学理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

尼洋河流域地处西藏东南部, 位于 $29^{\circ}10'N-30^{\circ}30'N, 92^{\circ}10'E-94^{\circ}39'E$ 之间, 气候温暖, 无霜期较长, 热量较丰富, 降水充沛, 垂直气候带显著^[7]. 该流域年平均气温为 $8.6^{\circ}C$, 最热月 7 月平均气温为 $15.6^{\circ}C$, 最冷月 1 月平均气温 $0.2^{\circ}C$, 极端最高气温 $30.2^{\circ}C$, 极端最低气温 $-15.3^{\circ}C$; 年平均降水量为 634.2 mm , 但雨量季节分配不均, 干、湿季明显, 6—9 月降水量占全年的 80% 以上, 蒸发量为 $1\,708.2\text{ mm}$, 相对湿度为 71%, 无霜期为 177 d; 地貌类型主要以高山深谷为主, 由于雨水和冰雪融化补给, 植被盖度较高, 常年性河流较多, 河网密度较大. 从流域下游至上游, 随着海拔上升, 形成一条明显的气候—植被分界线, 即东部为湿润—半湿润森林区, 西部为半干旱的灌丛草原区^[14-15].

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集及测定

于 2015 年 10 月, 沿尼洋河下游河谷地带, 选择典型的 5 种土地利用方式: 灌木林地 SL、农耕地 CL、河滩林地 BL、天然林地 NF、人工林地 AF(图 1). 采样前先对生境进行全面调查, 具体生境状况如表 1 所示. 在各土地利用方式典型区域, 用 S 型取样, 分别采集 0~15 cm, 16~30 cm 土壤样品 1 kg, 土样采集后用四分法分取一部分, 去除根系、小石块后风干, 过 2 mm 筛, 封好备用, 各土地利用类型平行取样 3 次, 用于测定土壤有机质质量分数. 在采样点用环刀采集原状土, 每层重复取样 3 次, 用于测定土壤容质量、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、饱和含水率, 自然含水率和吸湿水百分比^[16]. 同时取原状土 1kg, 注意剥去土块表面直接与土锹接触已变形的部分, 置于设有缓冲措施的容器盒中, 带回实验室风干, 测定土壤团聚体、水稳性指数等指标. 土壤风干团聚体质量分数测定采用沙维诺夫干筛法; 土壤吸湿水百分比的测定采用烘干法; 水稳性团聚体质量分数采用 Yoder 湿筛法^[17]; 水稳性指数采取静水浸崩法^[18]; 有机质的测定采用重铬酸钾氧化外加热法^[19].

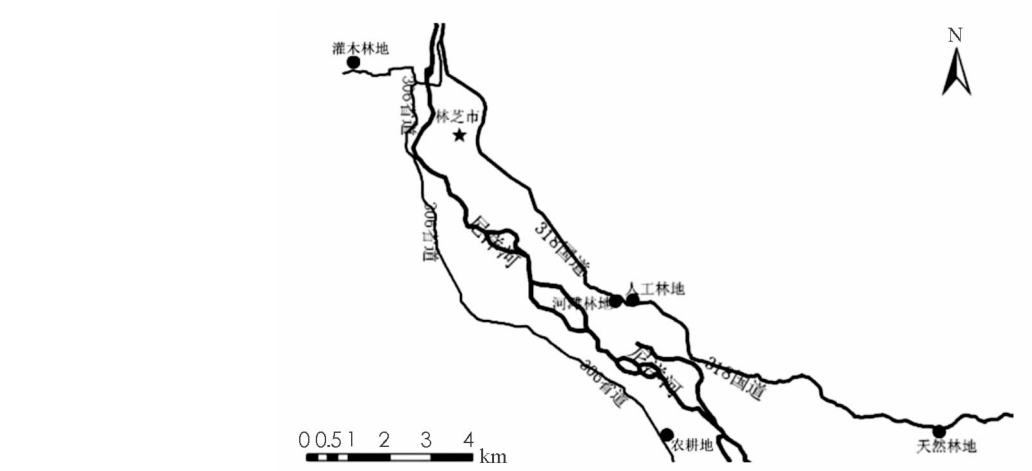


图 1 采样样地示意图

表 1 样地基本情况

土地类型	植被类型	海拔 /m	坡度 /°	坡向	土层深度 /cm	土壤 类型	郁闭度 /盖度	腐殖层 /cm	粘粒百分比 ≤0.002 mm/%	人为 干扰
灌木林地 SL	苔草、白草、 绢毛蔷薇、 川滇高山栎	2 995	6	/	60	暗棕壤	0.7	3	0.71	较强
农耕地 CL	—	2 998	5	/	60	淋溶褐土	/	—	1.40	强
河滩地 BL	沙柳、早熟禾	2 965	3	/	50	潜育土	0.6	2	0.59	较弱
天然林地 NF	川滇高山栎、 紫叶小檗、 高山松、绢 毛蔷薇	3 031	15	NE	110	山地黄棕壤	0.9	5	2.01	微弱
人工林地 AF	高山松	2 988	12	NW	80	黄棕壤	0.4	≤1	1.44	较强

注：苔草(*Carex* spp.)、白草(*Pennisetumcentrasiaticum*)、绢毛蔷薇(*Rosa sericea* Lindl.)、川滇高山栎(*Quercusaqui fo-
lioides* Rehd. et Wils.)、沙柳(*Salix cheilophila*)、早熟禾(*Poaannua* L.)、紫叶小檗(*Berberisthunbergii* var. *atropurpurea*
Chenault)、高山松(*Pinusdensata*)。

1.2.2 土壤抗蚀性指标分类及计算方法

抗蚀性指标选择中，在参考前人研究结果的基础上，根据研究区特点，本研究选择 13 个指标。同时，
为简化土壤抗蚀性评价指标，结合所选指标的属性特征，将抗蚀性指标归为三大类，分别为：土壤团粒类、
土壤基本物理指标类和有机胶体类(表 2)。

表 2 常用土壤抗蚀性指标

土壤团粒类	土壤基本物理指标类	有机胶体类
>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数(X_1)	非毛管孔隙度(X_7)	
>0.5 mm 水稳性团聚体质量分数(X_2)	毛管孔隙度(X_8)	
>0.25 mm 非水稳性土壤团聚体质量分数(X_3)	饱和含水量(X_9)	有机质质量分数(X_{13})
水稳性指数(X_4)	自然含水量(X_{10})	
平均质量直径 MWD(X_5)	土壤容质量(X_{11})	
结构体破坏率(X_6)	吸湿水百分比(X_{12})	

水稳性指数： $X_4=(\sum P_i K_i+P_j)/A$ ，式中： X_4 为水稳性指数； P_i 为第 i min 的分散土粒数， K_i 为第
 i min 的校正系数， $i=1, 2, \cdots, 10$ ； P_j 为 10 min 内没有分散的土粒； A 为实验土粒总数；平均质量直径：
 $X_5=\sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$ ， $\bar{X}_i$ 为土壤各粒径团聚体平均直径(mm)； W_i 为土壤各粒径团聚体的质量分数(%)；结构
破坏率： $X_6=>0.25$ mm 团聚体质量分数(干筛—湿筛)/>0.25 mm 干筛团聚体质量分数 $\times 100\%$ ；非毛管
孔隙度： $X_7=(\text{饱和含水率}-\text{毛管持水率})\times \text{土壤容质量}$ ；毛管孔隙度： $X_8=\text{毛管持水率}\times \text{土壤容质量}$ ；饱和
含水率： $X_9=(\text{浸泡后土质量}-\text{烘干土质量})/\text{烘干土质量}\times 100\%$ ；自然含水率： $X_{10}=(\text{烘干前土壤质量}-\text{烘}$
 $\text{干土壤质量})/\text{烘干土壤质量}\times 100\%$ ；土壤容质量： $X_{11}=\text{烘干土质量}/\text{环刀体积}$ ；吸湿水百分比： $X_{12}=(\text{风干}$
 $\text{土质量}-\text{烘干土质量})\times 100/\text{烘干土}\times 100\%$ 。

1.2.3 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 17.0，Origin 9.0 软件对实验数据进行统计分析并作图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤基本物理指标及有机胶体类指标分析

由表 3 可见，5 种土地利用方式土壤基本物理性质除土壤非毛管孔隙度指标外均存在一定差异。其中，
土壤容质量以 AF 为最大(1.56 g/cm³)，其次为 CL(1.44 g/cm³)，NF 最小(1.16 g/cm³)，具体表现为：
AF>CL>BL>SL>NF；非毛管孔隙度 CL 和 NF 较大，分别为 4.41%，4.38%，BL 最小，为 3.52%，具体表
现为：CL>NF>AF>SL>BL。从土壤层次来看，土壤容质量、非毛管孔隙度随土层加深呈增大趋势，而毛管
孔隙度、饱和含水量随土层加深有减小趋势。各土地类型中，BL 表现最为特殊，毛管孔隙度、非毛管孔隙度、

饱和含水率、自然含水率和吸湿水百分比均为(0~15) cm<(16~30) cm, 16~30 cm 土壤粒径较小, 毛管孔隙度达到最大, 为 52.09%, 大于其他土地类型, 同时造成土壤饱和含水量及自然含水量高于其他土地类型. 究其原因, 尼洋河属于季节性山区游荡型河流, 河道天性善徙, 河床冲淤演变交替, 河道主槽摆动不定^[20]. 季节性降水将上游表层土壤冲刷进入河道, 当河床变宽, 流速变缓时, 泥沙逐渐沉积. 而小颗粒土壤受毛管作用和水位变化影响逐渐下移, 砾石等较大颗粒物质沉积在表层, 并且由于该区处于河滩地, 因而导致下层土壤自然含水率以及吸湿水百分比均高于上层, 尤其自然含水率 16~30 cm 土壤中为 0~15 cm 中的 5.2 倍.

有机质质量分数是土壤熟化程度和肥力水平的重要指标, 能改善土壤物理性质, 具有增强土壤抗蚀性的作用. 由表 3 可知, 有机质质量分数土壤类型间差异较大. SL 有机质质量分数最高, 表层有机质质量分数高达 79.23 g/kg, 平均值为 61.97 g/kg. 其中该层平均有机质质量分数分别是 CL,NF,BL,AF 的 1.40, 1.53,1.88 和 7.05 倍. 这是因为 SL 植被盖度良好, 地势平坦, 周围山体地表径流在此缓和, 粘粒物质及有机物质得以沉积, 使得 SL 土壤有机质质量分数最高, CL 保持传统耕作模式, 多施有机肥, 有机质水平略高于 NF. CL 有机质质量分数, 表层 0~15 cm 达到 50.16 g/kg, 16~30 cm 土层有机质达到了 38.15 g/kg. AF 最小, 平均有机质质量分数仅为 8.79 g/kg, 这与 AF 林龄短, 植被单一, 生物量小, 有机质外源物质归还量少有关. 加之, 土壤砂性较强, 蓄水保水能力弱, 枯枝落叶分解较缓慢, 使得 AF 有机质质量分数最小.

表 3 不同土地利用方式下土壤基本物理指标及有机胶体类指标

物理 指标	土层 /cm	非毛管孔隙度 (X_7)/%	毛管孔隙度 (X_8)/%	饱和含水率 (X_9)/%	自然含水率 (X_{10})/%	容质量(X_{11}) /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸湿水百分 比(X_{12})/%	有机质(X_{13}) /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
SL	0~15	3.44±0.11	47.22±2.64	46.20±4.15	24.36±0.16	1.13±0.04	2.48±0.03	79.23±0.66
	16~30	3.91±0.04	45.15±2.15	40.31±2.97	26.94±3.68	1.22±0.04	1.89±0.25	44.71±0.90
	0~30	3.68±0.34	46.19±1.46	43.25±4.16	25.65±1.82	1.18±0.09	2.18±0.42	61.97±1.61
CL	0~15	4.47±0.21	42.83±1.18	33.84±1.17	6.38±0.83	1.40±0.01	1.26±0.13	50.16±6.31
	16~30	4.35±0.30	40.34±1.65	30.32±1.10	8.62±1.71	1.47±0.01	1.27±0.19	38.15±3.00
	0~30	4.41±0.08	41.58±1.76	32.08±2.49	7.50±1.58	1.44±0.05	1.27±0.01	44.16±4.44
BL	0~15	3.46±0.18	38.99±1.05	30.64±2.09	7.09±2.73	1.39±0.07	1.19±0.13	42.02±2.51
	16~30	3.58±0.21	52.09±12.93	52.96±2.89	36.97±3.61	1.12±0.28	2.81±0.37	23.76±1.08
	0~30	3.52±0.08	45.54±9.26	41.80±1.78	22.03±1.13	1.25±0.19	2.00±1.15	32.89±2.12
NF	0~15	4.25±0.18	48.45±1.29	45.71±2.50	26.68±9.12	1.16±0.09	3.57±0.67	54.56±0.45
	16~30	4.51±0.18	49.37±3.39	46.42±6.32	19.06±4.91	1.17±0.08	2.38±0.34	26.39±4.81
	0~30	4.38±0.18	48.91±0.65	46.06±0.50	22.87±5.38	1.16±0.01	2.98±0.84	40.48±2.88
AF	0~15	3.83±0.01	35.75±2.35	25.83±2.83	3.69±0.66	1.54±0.08	2.35±2.33	16.13±0.57
	16~30	4.21±0.03	33.71±2.81	24.01±2.28	3.41±0.81	1.58±0.03	0.87±0.11	1.44±0.26
	0~30	4.02±0.27	34.73±1.44	24.92±1.29	3.55±0.20	1.56±0.03	1.61±1.05	8.79±4.03

2.2 不同土地利用方式下土壤团粒类指标分析

土壤团粒结构是反映土壤特征和评价土壤质量的重要指标之一, 不同土地利用方式对土壤团粒的形成、数量和质量有重要影响^[21-22]. 由表 4 可知, 不同土地利用方式 0~30 cm 土层中, >0.25 mm 非水稳性团聚体存在一定差异, 其中以 SL 最大, 为 85.09%, NF 次之, 为 72.27%, AF 最小, 为 35.05%. 具体表现为 SL>NF>CL>BL>AF, 这说明良好的植被盖度能明显增加土壤中非水稳性团粒含量, 增强土壤团聚体的机械稳定性. CL 受到反复耕作, 团聚体破碎, 人为影响最强, 但>0.25 mm 非水稳性团聚体质量分数并不是最小, 这是因为 CL 处于河漫滩地, 土壤含有较多小粒径砾石, 同时受到人为施加化肥及有机肥的影响, 有机质质量分数增加, 增强团粒胶结能力及机械稳定性, 但受到耕作影响, 团聚体粒径主要集中在 0.5~1 mm 之间, 使得 CL>0.25 mm 非水稳性团聚体增加. 在垂直角度上, 仅 NF,AF>0.25 mm 非水稳性团聚体质量分数表现为(0~15) cm>(16~30) cm. CL,BL,SL 均表现为(16~30) cm>(0~15) cm. 这是因为 CL,BL 浅层次土壤均受到人为耕作和开挖等影响, 对团聚体结构造成一定破坏. 而 SL 由于人为频繁活动的干扰, 土壤受到反复的踩踏、挤压, 使得较深层次土壤变得紧实, 反而有利于该层次土壤团粒结构的形成.

湿筛法得到的是土壤水稳性团聚体, >0.25 mm 水稳性团聚体质量分数对保持土壤结构的稳定性有重要作用^[2]. 由表 4 可知, 不同土地利用方式 0~30 cm 土层>0.25 mm 水稳性团聚体存在一定差异, 其中以

SL 最高为 77.52%，NF 次之为 59.07%，AF 最小仅为 16.41%，具体表现为 SL>NF>CL>BL>AF. 可见，经湿筛后，仅 SL,NF 仍能以>0.25 mm 团聚体为主，而 CL,BL,AF 大团聚体在水力机械破坏下，易破碎，抗水蚀能力较弱。从土壤垂直角度来看，除 SL 外，其余 4 种土地利用方式>0.25 mm 水稳性团聚体均表现为(0~15) cm>(16~30) cm，说明，浅层次土壤在植被根系连结及腐殖层的淋溶作用下，抵抗以水力为主的机械破坏能力增强。这一现象可通过团聚体结构破坏率来反映。团聚体结构破坏率反映土壤团聚体遇水的分散程度，其值越小团聚体稳定性越好^[23]。由表 4 可知，5 种土地利用方式 0~30 cm 土层团聚体结构破坏率以 AF 最大为 53.27%，BL 次之为 52.04%，SL 最小为 8.92%。具体表现为 AF>BL>CL>NF>SL. 在土壤层次上，5 种土地利用方式团聚体破坏率均表现为(16~30) cm>(0~15) cm，这也说明了，良好的植被覆盖率增加土壤植物根系，从而增加土壤团聚体稳定性。但 AF,BL 受到土壤质地影响，两种土地利用方式均属于粉(砂)土，本身具有少量有机质，而砂土在水中本身具有较强的分散作用，因此，通过湿筛，AF,BL 团聚体结构破坏最大。

平均质量直径(MWD_{干筛})作为评价土壤结构的重要指标，团聚体平均直径越大表示团聚度越高，稳定性越强^[24]。由表 4 可知，不同利用方式 0~30 cm 土层 MWD_{干筛}以 SL 最大，土壤团聚度最高，稳定性最好。NF 次之，AF 最小，具体表现为 SL>NF>CL>BL>AF. 这与土壤有机质质量分数有着直接关系(表 3、表 4)，即有机质质量分数越高，土壤团聚度越高，稳定性越好，MWD_{干筛}越高。这一现象，在土壤层次上也有反映。CL,NF,AF 3 种土地利用方式 MWD_{干筛}均表现为(0~15) cm>(16~30) cm，同时也说明，研究区土壤随着深度增加，土壤结构越发不稳定，如果植被破坏，地表裸露，极易产生冲蚀沟。但 SL,BL 受到人为影响，使得较深层次 MWD_{干筛}略低于浅层次土壤。

水稳性指数是通过测定土壤团聚体在静水中的分散速度来比较土壤抗蚀性能的大小^[25]。不同土地利用方式间，水稳性指数的大小顺序依次为 SL>NF>BL>CL>AF，其中，灌木林地 SL 水稳性指数最高，为 27.12%，其次为 NF，为 26.81%，再次为 BL，为 20.52%，AF 最小为 11.62%。究其原因，灌木林地 SL 常年受到人为活动，土壤表层较为紧实，且在雨季，周围山体地表径流在此缓和，粘粒物质及有机物质得以沉积，使得 SL 土壤有机质质量分数最高(表 3)。加之，草本植物强大且密集根系网络，对土壤团粒结构起到较好的粘结能力，从而使水稳性指数增强，团聚度增大，团聚体结构破坏率降低，抗蚀性增强。在土壤层次上，除 AF 外，水稳性指数均表现为(0~15) cm>(16~30) cm，这表明，浅层次土壤往往受到腐殖层、草本植物根系及有机质等胶结物质作用，抗蚀性能优于深层次土壤，因此，在生产活动中，应尽量避免对表土层的扰动。

表 4 不同土地利用方式下土壤团粒类指标

物理指标	土层/cm	>0.25 水稳性团聚体质量分数/%(X_1)	>0.5 mm 水稳性团聚体质量分数/%(X_2)	>0.25 mm 非水稳性团聚体质量分数/%(X_3)	水稳性指数/%(X_4)	平均质量直径(X_5)	结构体破坏率/%(X_6)
SL	0~15	75.70±0.34	63.11±1.97	82.57±4.30	30.78±0.31	2.45±0.34	8.40±1.55
	16~30	79.33±1.33	72.08±0.15	87.62±2.47	23.47±7.26	2.66±0.25	9.43±1.03
	0~30	77.52±2.43	67.60±3.26	85.09±2.49	27.12±5.17	2.55±0.18	8.92±0.81
CL	0~15	45.53±0.39	38.58±0.60	58.05±4.63	22.57±3.06	1.28±0.04	20.70±1.03
	16~30	35.70±1.74	25.35±1.31	60.48±4.62	10.12±2.76	0.52±0.02	40.35±5.64
	0~30	40.62±1.78	31.97±2.24	59.26±3.32	16.35±8.80	0.90±0.22	30.52±7.26
BL	0~15	23.95±2.11	13.62±0.41	35.92±2.06	24.89±5.56	0.63±0.10	31.54±2.24
	16~30	20.99±0.42	14.68±1.52	73.92±0.60	16.15±3.26	1.15±0.75	72.54±0.34
	0~30	22.47±4.89	14.15±3.03	54.92±11.70	20.52±6.18	0.89±0.34	52.04±7.65
NF	0~15	67.43±0.69	57.99±2.01	75.35±0.59	35.35±4.22	2.22±0.18	10.50±0.74
	16~30	50.70±4.23	45.20±4.86	69.18±2.19	18.27±5.27	1.86±0.13	26.79±0.87
	0~30	59.07±2.18	51.60±2.97	72.27±1.67	26.81±12.08	2.04±0.14	18.65±1.59
AF	0~15	21.65±1.11	15.26±0.88	38.09±0.49	9.37±0.46	0.89±0.15	43.02±1.42
	16~30	11.17±1.67	6.57±0.29	32.01±2.65	13.86±0.28	0.56±0.13	63.53±0.50
	0~30	16.41±3.14	10.92±0.19	35.05±2.31	11.62±3.18	0.73±0.12	53.27±3.94

注：0~30 cm 表示对 0~15 cm 和 16~30 cm 土层各抗蚀性指标进行平均，用以描述整体层面上的土壤抗蚀性值，下同。

2.3 不同土地利用类型各土层土壤抗蚀性主成分分析

用于衡量土壤抗蚀性的指标体系尽管比较全面, 却繁冗复杂, 有些指标间信息重叠, 但相互间具有一定的关联性^[26], 因此, 选择采用主成分分析法, 统计各指标对于土壤抗蚀性的贡献值, 能够在尽可能多地保存原有初级指标所存储信息的基础上, 选用较少的复合指标代替原有的初级指标, 以确定不同土地利用方式土壤抗蚀性的关键影响因子和最佳评价标准^[27]. 本文对上述 13 个指标在不同土层间进行主成分分析, 以揭示各指标对土壤垂直层面上抗蚀性的贡献, 结果如表 5 所示.

表 5 抗蚀性指标 PCA 分析

土层 /cm	主成分 PCA	因子指标荷载													特征 根	累计方 差贡 献率
		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		
0~15	Y ₁	0.842	0.806	0.813	0.358	0.831	-0.736	0.894	0.427	0.421	0.032	-0.356	0.178	0.717	5.213	40.098
	Y ₂	0.469	0.438	0.441	0.708	0.363	-0.432	0.323	0.836	0.850	0.374	-0.878	-0.114	0.533	4.394	73.900
	Y ₃	0.229	0.328	0.249	0.058	0.373	-0.135	-0.071	0.216	0.093	0.528	-0.025	0.867	-0.098	1.484	85.315
16~30	Y ₁	0.946	0.952	0.552	0.657	0.938	-0.943	0.211	0.112	0.132	0.074	-0.212	0.036	0.617	4.815	37.041
	Y ₂	0.098	0.146	0.185	0.423	0.227	-0.092	0.922	0.838	0.905	0.416	-0.877	0.655	-0.133	4.064	68.303
	Y ₃	0.290	0.253	0.763	0.197	-0.018	-0.040	-0.222	0.431	0.241	0.683	-0.317	0.689	0.432	2.506	87.578
0~30	Y ₁	0.933	0.918	0.687	0.688	0.748	-0.849	0.123	0.313	0.282	0.146	-0.296	-0.010	0.767	4.700	36.157
	Y ₂	0.235	0.202	0.224	0.463	0.306	-0.241	0.658	0.872	0.919	0.165	-0.916	0.049	0.41	3.588	63.758
	Y ₃	0.239	0.303	0.548	-0.085	0.299	0.072	0.514	0.285	0.205	0.681	-0.195	0.862	-0.194	2.221	80.845

由表 5 可知, 0~15 cm 土层第一主成分 Y₁ 贡献最大的是非毛管孔隙度(X₇)、>0.25 mm 水稳性团聚体(X₁)、MWD_{干筛}(X₅)、>0.25 mm 非水稳性团聚体(X₃)、>0.5 mm 水稳性团聚体, 因子负荷均在 0.80 以上. 其次为团聚体结构破坏率(X₆)及有机质(X₁₃), 因此第一主成分 Y₁ 可命名为土壤团粒及有机胶体因子. Y₂ 则主要解释了土壤水稳性指数(X₄)、毛管孔隙(X₈)、饱和含水量(X₉)、土壤容质量(X₁₁)3 种土壤基本物理性质及 1 个团粒类指标, 因此对第二主成分可命名为土壤基本物理因子. Y₃ 主要解释了自然含水率(X₁₀)和吸湿水百分比(X₁₂), 则对第三主成分可命名为土壤自然水分性状因子. 从主成分分析结果来看, Y₁ 对土壤抗蚀性贡献率最大为 40.098%, 因此, 对于西藏尼洋河谷浅层次土壤抗蚀性的评价可用土壤团粒结构及有机质等指标进行评价. 而 Y₃ 贡献率仅为 11.415%, 其对 0~15 cm 土层土壤抗蚀性能影响相对较小.

16~30 cm 土层第一主成分 Y₁ 贡献最大的是>0.5 mm 水稳性团聚体(X₂)、>0.25 mm 水稳性团聚体(X₁)、团聚体机构破坏率(X₆)、MWD_{干筛}(X₅), 其次为有机质(X₁₃)、水稳性指数(X₄)、>0.25 mm 非水稳性团聚体(X₃), 因此, 对第一主成分仍可命名土壤团粒及有机胶体因子. 第二主成分主要解释了非毛管孔隙度(X₇)、饱和含水量(X₉)、毛管孔隙度(X₈)、土壤容质量(X₁₁). 对其命名为土壤基本物理因子. Y₃ 仍主要解释了土壤自然含水率(X₁₀), 土壤吸湿水百分比(X₁₂), 且仍以第三主成分 Y₃ 贡献率最低, 对土壤抗蚀性影响最弱.

通过对不同土层各指标求取均值, 0~30 cm 为整体对各土地类型进行分析, 第一主成分 Y₁ 仍主要解释了土壤团聚体类及有机质等指标(X₁, X₂, X₃, X₄, X₅, X₆, X₁₃), 贡献率为 36.157%. 第二主成分 Y₂ 仍然主要反映了土壤基本物理性状类指标(X₇, X₈, X₉, X₁₁), 贡献率为 27.602%. 第三主成分 Y₃ 仍主要解释了土壤自然水分性状因子(X₁₀, X₁₂), 但贡献率仅为 17.087%.

根据原指标对主成分的贡献率大小, 确定表征研究区域不同土地利用方式下土壤抗蚀性的优化指标, 在研究区不同层次土壤, 均以土壤团聚体类及有机胶体类指标贡献率最高, 土壤基本物理性状指标次之. 总体上, 在西藏尼洋河河谷地带利用>0.25 mm 水稳性团聚体质量分数、>0.5 mm 水稳性团聚体质量分数、>0.25 mm 非水稳性团聚体质量分数、水稳性指数、平均重量直径、团聚体结构破坏率、有机质这 7 个指标能够更好地进行土壤抗蚀性评价, 即团聚体质量分数越高, 平均重量直径越大, 水稳性指数越强, 有机质质量分数越高, 结构破坏率越小, 土壤抗蚀性就越强. 对以上第二主成分而言, 其方差贡献率均仅次于第一主成分, 表明一定程度上, 某些土壤基本物理性状也能作为研究区土壤抗蚀性的评价指标.

2.4 主成分分析表达式

根据主成分分析结果,可得到成分得分系数矩阵,进而得到不同土层第一、第二、第三主成分的函数表达式,然后将数据标准化,代入函数式,就可计算出第一、第二、第三主成分值.得出不同土层主成分分析方程如表 6 所示.

表 6 不同土层各主成分分析表达式

土层/cm	主成分 PCA	主成分表达式
0~15	Y_1	$Y_1 = -0.194X_1 + 0.168X_2 + 0.186X_3 - 0.153X_4 + 0.198X_5 - 0.174X_6 + 0.394X_7 - 0.126X_8 - 0.110X_9 - 0.213X_{10} + 0.138X_{11} - 0.041X_{12} + 0.174X_{13}$
	Y_2	$Y_2 = -0.055X_1 - 0.061X_2 - 0.060X_3 + 0.340X_4 - 0.109X_5 + 0.035X_6 - 0.242X_7 + 0.275X_8 + 0.287X_9 + 0.166X_{10} - 0.326X_{11} - 0.142X_{12} + 0.029X_{13}$
	Y_3	$Y_3 = 0.023X_1 + 0.115X_2 + 0.046X_3 - 0.042X_4 + 0.151X_5 + 0.035X_6 - 0.233X_7 + 0.081X_8 - 0.023X_9 + 0.434X_{10} + 0.069X_{11} + 0.708X_{12} - 0.233X_{13}$
16~30	Y_1	$Y_1 = -0.209X_1 + 0.215X_2 + 0.025X_3 + 0.132X_4 + 0.250X_5 - 0.248X_6 + 0.057X_7 - 0.069X_8 - 0.036X_9 - 0.102X_{10} + 0.025X_{11} - 0.122X_{12} + 0.075X_{13}$
	Y_2	$Y_2 = -0.058X_1 - 0.035X_2 - 0.102X_3 + 0.079X_4 + 0.044X_5 + 0.013X_6 + 0.341X_7 + 0.194X_8 + 0.251X_9 + 0.008X_{10} - 0.225X_{11} + 0.088X_{12} - 0.186X_{13}$
	Y_3	$Y_3 = 0.014X_1 - 0.018X_2 + 0.353X_3 - 0.059X_4 - 0.200X_5 + 0.139X_6 - 0.343X_7 + 0.093X_8 - 0.040X_9 + 0.335X_{10} + 0.000X_{11} + 0.300X_{12} + 0.321X_{13}$
0~30	Y_1	$Y_1 = 0.264X_1 + 0.262X_2 + 0.157X_3 + 0.061X_4 + 0.176X_5 - 0.254X_6 - 0.099X_7 - 0.113X_8 - 0.129X_9 - 0.033X_{10} + 0.123X_{11} - 0.074X_{12} + 0.192X_{13}$
	Y_2	$Y_2 = -0.137X_1 - 0.158X_2 - 0.126X_3 + 0.200X_4 - 0.066X_5 + 0.072X_6 + 0.127X_7 + 0.317X_8 + 0.359X_9 - 0.045X_{10} - 0.356X_{11} - 0.090X_{12} + 0.048X_{13}$
	Y_3	$Y_3 = 0.038X_1 + 0.079X_2 + 0.229X_3 - 0.178X_4 + 0.074X_5 + 0.131X_6 + 0.217X_7 + 0.020X_8 - 0.029X_9 + 0.349X_{10} + 0.035X_{11} + 0.476X_{12} - 0.217X_{13}$

注:各土层间 Y_1, Y_2, Y_3 以及 X_i 代表意义不同,不能进行简单运算.

2.5 土壤综合质量评价

根据所提取出来的三大主成分的特征值和旋转后的各因子载荷矩阵进行相关计算,可以得到不同土地利用方式下不同土层土壤抗蚀性的综合表达式:

$$Y_{0\sim 15} = 0.470Y_1 + 0.396Y_2 + 0.134Y_3$$
$$Y_{16\sim 30} = 0.423Y_1 + 0.357Y_2 + 0.220Y_3$$

最后通过叠加,得出土壤抗蚀性综合主成分模型 $F=Y_{0\sim 15}+Y_{16\sim 30}$,对不同土地利用类型通过利用排序法进行评价,评价结果如表 7 所示:

表 7 土壤抗蚀性综合质量评价

主成分模型	SL	CL	BL	NF	AF
$Y_{0\sim 15}$	5.310	3.301	2.708	3.768	1.066
$Y_{16\sim 30}$	1.798	1.336	0.861	1.109	-0.010
F	7.108	4.638	3.569	4.877	1.057
排序	1	3	4	2	5

由表 7 可见, $Y_{0\sim 15}$ 和 $Y_{16\sim 30}$ 表现出较大的差异性,对不同土地利用类型 $Y_{0\sim 15}$ 加权求和模型进行运算,SL 最大,AF 最小,分别为 5.310,1.066,两者变幅达 4.244. $Y_{16\sim 30}$,仍以 SL 最大,AF 最小,但变幅较小,为 1.808. 因此,可以看出随土壤层次增加,不同土地利用方式土壤抗蚀性能整体减小.这与多数学者的研究结果一致^[28-29].通过 F 与 $F_{0\sim 30}$ 相互验证,发现两者最终的评价结果相同,即 $SL>NF>CL>BL>AF$,其中,CL 虽有频繁扰动,但人为有机肥的输入,避免了土壤团粒结构进一步破碎,因此使其抗蚀性水平在 5 种土地利用方式中居中.SL 在一定程度受到人为休闲活动的影响,对土壤进行挤压,使得土壤变得紧实,容质量增大,孔隙度减小.但其具有较好的植被覆盖度,加之,其所处地理位置,能够较好地接收周

围山体径流冲刷的有机物质,因此,团粒结构良好,抗蚀性能最强。NF受人为影响较小,植被的枯枝落叶能够回还土壤,使有机质质量分数有所增高,改善土壤结构,提升土壤的通透性,增强土壤入渗,减弱地表冲刷,有效防止水土流失,但其土壤团聚体结构破坏率未能达到SL水平,因此抗蚀性能仅次于SL。BL、AF均受到较强的人为扰动,如放牧、工程开挖等,植被盖度较差,有机质质量分数低,土壤团粒结构较弱,抗蚀性能均较低。

3 结 论

1) 研究结果表明,不同土地利用类型0~15 cm层次土壤抗蚀性能优于16~30 cm,土壤抗蚀性分析结果表明,虽然林地能有效改善土壤结构,但不同土地利用类型下的土壤结构整体不佳,结构破坏率数值较大,水稳性较差,土壤结构易破坏,难恢复,很容易产生水土流失。因此结论提示在尼洋河谷进行生产生活时,应特别注意地表植被的保护,防止随意扰动地表,加剧水土流失。

2) 通过对不同土地利用方式间3大类,13个抗蚀性指标进行主成分分析,各土层间土壤抗蚀性能贡献率均达到80%以上,信息损失量不足20%。 >0.25 mm水稳性团聚体质量分数、 >0.5 mm水稳性团聚体质量分数、 >0.25 mm非水稳性团聚体质量分数、水稳性指数、平均重量直径、团聚体结构破坏率、有机质7个指标占的比例最大,是表现不同土地利用方式土壤抗蚀性的最佳指标,特别是有机质质量分数能够改善土壤结构,提高土壤抗蚀性能。藏东南高寒区尼洋河河谷地带,土壤结构十分脆弱,恢复过程相对缓慢。因此,不管何种土地利用类型,首先要注重有机质的恢复与提升;其次要尽可能减少对地表的扰动,防止土体结构破碎。

3) 对不同土地利用类型0~15 cm,16~30 cm土层抗蚀性指标建立权重求和模型,建立整体评价模型为 $F=Y_{0\sim 15}+Y_{16\sim 30}$ 。再以0~30 cm土层为整体建立权重求和模型 $F_{0\sim 30}$ 对 F 进行验证,最终得出不同土地利用类型土壤抗蚀性评价强弱顺序为:SL>NF>CL>BL>AF。因此在尼洋河河谷土地利用过程中,应特别注意有林地的保护,在必要时,人为投入有机质外源物质,提高土地的自我恢复能力。

参考文献:

- [1] LEE J H, BANG K W, KETCHUM L H, et al. First Flush Analysis of Urban Storm Runoff [J]. Science of the Total Environment, 2002, 293(1-3): 163-175.
- [2] 聂晓刚,梁博,喻武,等.藏中半干旱地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J].西北林学院学报,2018,33(2): 43-47.
- [3] HEUVELINK G B M, WEBSTER R. Modelling Soil Variation: Past, Present and Future [J]. Geoderma, 2001, 100(3-4): 269-301.
- [4] 郑子成,杨玉梅,李廷轩.不同退耕模式下土壤抗蚀性差异及其评价模型[J].农业工程学报,2011,27(10): 199-205.
- [5] 丁文峰,李占斌.土壤抗蚀性的研究动态[J].水土保持科技情报,2001(1): 36-39.
- [6] 张振国,黄建成,焦菊英,等.安塞黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落土壤抗蚀性分析[J].水土保持研究,2008,15(1): 28-31.
- [7] 张昕川,刘纪根,张平仓.尼洋河流域水土流失综合治理措施探讨[J].人民长江,2013,44(19): 85-87.
- [8] 岳广阳,赵林,王志伟,等.多年冻土区高寒草甸根系分布与活动层温度变化特征的关系[J].冰川冻土,2015,37(5): 1381-1387.
- [9] 岳广阳,赵林,赵拥华,等.青藏高原西大滩多年冻土活动层土壤性状与地表植被的关系[J].冰川冻土,2013,35(3): 565-573.
- [10] 王小丹,钟祥浩,范建容.西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J].地理学报,2004,59(2): 183-188.
- [11] 罗利芳,张科利,孔亚平,等.青藏高原地区水土流失时空分异特征[J].水土保持学报,2004,18(1): 58-62.
- [12] 冯君园,蔡强国,李朝霞,等.高海拔寒区融水侵蚀研究进展[J].水土保持研究,2015,22(3): 331-335.
- [13] 刘淑珍,刘海军,钟祥浩,等.青藏高原土壤侵蚀评价体系及监测方法[J].山地学报,2009,27(1): 76-81.
- [14] 西藏林芝地区环保局.巴结湿地现状调查及建立地区级生态功能保护区的初步设想[R].林芝:2002:1-3.
- [15] 中国科学院青藏高原综合科学考察队.西藏森林[M].北京:科学出版社,1985:325-326.
- [16] 张万儒.森林土壤分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999:22-24.
- [17] 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.

[18] 史晓梅. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008.

[19] 水利水电部农村水利水土保持司. 水土保持试验规范: SD239-87 [S]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 85.

[20] 赖永辉. 尼洋河主流改道成因及防治措施研究 [J]. 人民珠江, 2014(6): 5-8.

[21] 刘 晶, 田耀武, 张巧明. 豫西黄土丘陵区不同土地利用方式土壤团聚体有机碳含量及其矿化特征 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 255-261.

[22] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.

[23] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱一农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 122-128.

[24] 陈正发, 史东梅, 谢均强, 等. 紫色土旱坡地土壤团聚体稳定性特征对侵蚀过程的影响 [J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2721-2729.

[25] 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.

[26] 黄 婷, 岳西杰, 葛玺祖, 等. 基于主成分分析的黄土沟壑区土壤肥力质量评价——以长武县耕地土壤为例 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 141-147.

[27] 邱陆畅. 浙江省瓯江流域源头区林地土壤抗蚀特性及影响因素研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[28] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 等. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 187-193, 199.

[29] 李民义, 张建军, 王春香, 等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130, 137.

Soil Anti-erodibility of Different Land-Use Modes in Niyang River Watershed of Alpine Region in Southeastern Tibet

WAN Dan^{1,2}, HE Cai-ji³,
WANG Yu-ming³, NIE Xiao-gang^{1,2}, YU Wu^{1,2}

1. Department of Resources and Environment, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi Tibet 860000, China;
2. Research Center of Soil and Water Conservation in Alpine-Cold Region, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Linzhi Tibet 860000, China;
3. China Railway Head Office Lalin Railway Construction Headquarters, Linzhi Tibet 860000, China

Abstract: Soil anti-erodibility is an important comprehensive indicator to evaluate the potential probability of soil erosion. It will provide a theoretical basis to study soil anti-erodibility of different land-use in river valley region of alpine for optimizing land-use models and integrating resources. In this study, 13 indexes about soil anti-erodibility have been analyzed by principal component analysis, which belonged to three major categories in five different land-use patterns in Niyang Watershed of Alpine Region in Southeastern Tibet. The results show that indexes of soil aggregate class and organic matter could reSLect soil anti-erodibility. Seven indexes of >0.25mm water stable aggregate content, >0.5mm water stable aggregate content, >0.25mm non-water stable aggregate content, water stability index, average weight diameter, aggregate structure failure rate, and organic matter had the most obvious inSLuence on soil anti-erodibility, and they were the best indicators which reSLected soil anti-erodibility in different land-use ways. The index values of soil anti-erodibility show the orderliness that the values in the layer from 0 to 15 cm were larger than those in the layer from 15 to 30 cm. It was found by establishing the weight sum model that the soil anti-erodibility of the surface layer from 0 to 15 cm was much greater than that of the layer from 15 to 30 cm. Finally, the descending order of soil anti-erodibility of different land-use types was concluded: Fallow land>Natural woodland>Cultivated Land>Riverbank woodland>Artificial forest land.

Key words: Niyang River watershed; land-use modes; soil anti-erodibility; principal component analysis

责任编辑 包 颖