

川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性研究

吕宸¹, 宫渊波¹, 车明轩¹, 许蔓菁¹, 康成芳¹, 龚伟¹, 刘韩²

(1.四川农业大学林学院, 成都 611130; 2.四川省甘孜州林业科学研究所, 四川 康定 626001)

摘要:以康定折多山高寒山地灌丛草甸土壤为研究对象,采用野外调查与室内分析相结合的方法,运用主成分分析法对土壤抗蚀性进行综合评价,以期探讨不同海拔和坡向土壤理化性质及抗蚀性差异。结果表明:(1)淋溶层土壤理化性质的变化剧烈程度高于淀积层土壤,且这种变化不受海拔和坡向的影响,不同坡向间土壤的性质差异主要受气候因素主导;(2)土壤各理化性质指标之间以及土壤理化性质与抗蚀性之间有明显的相关性,其中土壤抗蚀性受团聚体含量及稳定性的影响最大;(3)研究区土壤抗蚀性的大小顺序为3 800 m 半阳坡>4 200 m 半阴坡>3 800 m 半阴坡>4 200 m 半阳坡>4 000 m 半阳坡>4 000 m 半阴坡。其中>0.25 mm 风干团聚体含量、团聚体 GMD 值和团聚体分形维数 D 3 个指标为评价该地区土壤抗蚀性的最佳指标。可见,不同海拔和坡向间土壤抗蚀性有明显分异特征,提高土壤团聚体含量及稳定性是加强该区土壤抗蚀性的关键。

关键词: 灌丛草甸; 土壤理化性质; 土壤抗蚀性

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0009-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.002

Study on the Soil Erosion Resistance of Alpine Shrub Meadow in Western Sichuan

LÜ Chen¹, GONG Yuanbo¹, CHE Mingxue¹,

XU Manjing¹, KANG Chengfang¹, GONG Wei¹, LIU Han²

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdou 611130;

2.Ganzi Institute of Forestry and Science, Kangding, Sichuan 626001)

Abstract: The alpine shrub meadow soils in Zheduo Mountain, Kangding, were studied by the combination of field investigation and indoor analysis, and the principal component analysis method was used to comprehensively evaluate the erosion durability of soil, in order to explore the differences of soil physical, chemical properties, and erosion durability of soil under different elevations and slope aspects. The results showed that: (1) The variations of soil physicochemical properties in leaching layer were more severe than that of the sedimentary layer, and this change was not affected by the elevation and slope direction. The difference in soil properties between different slopes aspects was mainly dominated by climatic factors. (2) There were significant correlation among soil physical, chemical properties, and erosion durability of soil, erosion durability of soil was mostly affected by agglomerate content and stability; (3) The erosion durability of soil followed the order: 3 800 m semi-sunny slope>4 200 m semi-shady slope>3 800 m semi-shady slope>4 200 m semi-sunny slope>4 000 m semi-sunny slope>4 000 m semi-shady slope. The three indicators that >0.25 mm air-dried aggregate content, aggregate GMD value, and aggregate fractal dimension D were the best indicators for evaluating soil corrosion resistance in this area. It can be seen that there were obvious differentiation characteristics of soil erosion durability under different elevations and slope aspects. Increasing the content and stability of soil aggregates were the key processes in strengthening erosion durability of soil in this area.

Keywords: shrub meadow; soil physical and chemical properties; soil erosion resistance

收稿日期:2019-09-06

资助项目:四川省科技厅重点项目“川西折多山高寒生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2015FZ0022);四川省高校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目

第一作者:吕宸(1994—),男,在读博士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:lvchen20167243@163.com

通信作者:宫渊波(1957—),男,教授,博士生导师,主要从事退化生态系统恢复与重建研究。E-mail:gyb@sicau.edu.cn

土壤抗蚀性指土壤对水分散和悬移作用的抵抗能力,是评定土壤是否易受侵蚀营力破坏的重要参数之一^[1]。土壤抗蚀性不仅与土粒自身的黏结力和土壤理化性质等因素有关,也受地形、植物群落类型及土地利用类型等外界环境因素的影响^[2-3]。就山地综合体而言,海拔和坡向是地形因子中对土壤抗蚀性影响较为显著的 2 个因子,这主要取决于不同海拔和坡向间水热状况的差异,水热状况的差异也势必影响植物群落结构和类型的演变^[4]。并且无论是水热状况还是植被状况,都与土壤的形成息息相关,这也导致了山地土壤的性质在不同海拔和坡向上呈现出明显的差异,从而造成土壤抗侵蚀能力的差别^[5-6]。目前,有关高寒灌丛草甸土壤抗蚀性评价研究主要从不同土地利用类型或不同植被配置模式等角度着手,而对于不同空间尺度下土壤抗蚀性的差异研究较少,难以满足该地区生态环境建设的需求^[7]。

川西高寒山地位于长江上游和青藏高原东缘,该地区广泛分布的高山灌丛草甸生态系统是高原生态环境的第一道防线,影响着整个长江流域气候和环境的稳定。但由于近年来人为活动和冻融侵蚀作用的影响及高山灌丛草甸自身的极端脆弱性,该地区的灌丛草甸呈现出明显的退化趋势,水土流失情况日益加剧^[8]。同时,该地区受经济条件的制约,水土流失治理和植被恢复工作极难开展,高山灌丛草甸的生态功能与经济功能日趋减弱^[9-10]。因此,本文以川西高寒山地灌丛草甸土壤为研究对象,分析不同海拔和坡向土壤理化性质的空间差异,采用主成分分析法对土壤抗蚀性进行综合评价,以期能为该地区畜牧业的发展及水土流失治理工作提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省康定市折多山(30°00′—30°08′N, 101°44′—101°51′E)。折多山是大渡河及雅砻江流域的交错地带,最高海拔达 4 962 m。折多山是亚寒带季风气候与高原大陆性气候的交揉区,年日照时间 2 000~2 500 h 以上,年平均气温 8 ℃ 以下,年平均降水量 1 600 mm,降水主要集中在 5—9 月。坡面以草本植物为主,低处谷地以木本植物为主,研究区主要土壤种类为山地暗棕壤、山地灰化土和高山草甸土。

1.2 样地设置与样品采集

于 2017 年 7 月在康定县折多山西部进行土壤样品的采集。结合高寒山地的地形因子(海拔和坡向),利用 GPS 获取海拔高度及地理坐标,从海拔 3 800 m 开始,海拔每上升 200 m 设置 1 个海拔梯度,共 3 个海拔梯度,分别为 3 800,4 000,4 200 m。每个海拔梯度分半阴坡和半阳坡 2 个坡向。根据 3 个海拔梯度 2 个坡向共设置了 6 个大样地,考虑到采样所带来的误差,每个大样地选取 3 个 20 m×20 m 的标准样地作为样地重复。

每个样地土壤样品的采集采用五点采样法确定位置,去除表层凋落物,挖掘土壤剖面,根据土壤发生层次分淋溶层(0—20 cm,含腐殖质层)、淀积层(20—40 cm)进行土壤样品采集,取样后将相同土层的土样均匀混合。原状土从土壤剖面取完整土柱,用饭盒盛装,防止破坏其结构。同时根据淋溶层、淀积层的土壤厚度,在每层的中心位置,依垂直方向各采集 1 个土壤环刀带回实验室测定。具体各样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况

采样点	海拔/m	坡向	坡度/(°)	土壤类型	主要植被
I 号	4200	NE62°	31	高山草甸土	草原杜鹃、隐蕊杜鹃、委陵菜、绵毛水苏、紫菀
II 号		SW234°	14	高山草甸土	草原杜鹃、委陵菜、绵毛水苏
III 号	4000	NE59°	25	高山草甸土	杜鹃、海桐、金露梅、小檗、卷耳、茅莓、长梗蓼
IV 号		SW239°	19	高山草甸土	杜鹃、委陵菜、金露梅、长梗蓼
V 号	3800	NE64°	25	高山草甸土(漂灰化)	杜鹃、高山柏、云杉、冷杉、小檗、高山蔷薇
VI 号		SW241°	39	高山草甸土	高山柏、杜鹃、小檗、委陵菜、狼毒

注:杜鹃(*Rhododendron simsii*),高山柏(*Sabina squamata*),海桐(*Pittosporum tobira*),小檗(*Berberis thunbergii*),隐蕊杜鹃(*Rhododendron intricatum*),草原杜鹃(*Rhododendron telmateium*),委陵菜(*Potentilla chinensis*),紫菀(*Aster tataricus*),金露梅(*Potentilla fruticosa*),卷耳(*Cerastium arvense*),茅莓(*Rubus parvifolius*)高山蔷薇(*Rosa transmorrisonensis*),绵毛水苏(*Stachys lanata*),长梗蓼(*Polygonum calostachyum*),云杉(*Picea asperata*),冷杉(*Abies fabri*),狼毒(*Stellera chamaejasme*)。

1.3 指标测定与计算方法

土壤颗粒组成、微团聚体、土壤容重、土壤孔隙度、土壤持水、土壤大团聚体、土壤有机质及土壤渗透率均采用常规方法测定^[11];抗蚀指数采用静水崩解法测定^[12];其他指标具体计算方法^[13-14]为:

$$MWD=\frac{\sum X_i \times W_i}{W_T}$$

(1)

$$GMD=EXP\left[\frac{\sum W_i \times \lg X_i}{W_T}\right]$$

(2)

$$\left[\frac{X_i}{X_{\max}}\right]^{3-D}=\frac{W_{(\partial < X_i)}}{W_T}$$

(3)

式中: X_i 为任一粒级范围内团聚体的平均直径 (mm); W_T 为供试土壤总质量; W_i 为对应于 X_i 的团聚体质量; $W_{(\partial < X_i)}$ 为小于 X_i 的积累土粒质量; $X_{\max}$ 为最大粒级平均直径 (mm), 用线性回归的方法将 $\lg(W_{(\partial < X_i)}/W_T)$ 设置为纵坐标、 $\lg(X_i/X_{\max})$ 为横坐标作图, 所求得该线性方程的斜率为 $3-D$, 再通过计算就求得土壤分形维数 (D)。

$$\text{PAD}=\frac{\text{干筛}>0.25\text{ mm 团聚体质量}-\text{湿筛}>0.25\text{ mm 团聚体质量}}{\text{干筛}>0.25\text{ mm 团聚体质量}}\times100\%$$

(4)

$$\text{结构性颗粒指数}=\frac{<0.001\text{ mm 黏粒含量}}{0.001-0.05\text{ mm 粉粒含量}}\times100\%$$

(5)

$$\text{抗蚀指数}=\frac{\text{总土粒数}-\text{崩塌土粒数}}{\text{总土粒数}}\times100\%$$

(6)

$$\text{团聚状况}=>0.05\text{ mm 微团聚体分析值}->0.05\text{ mm 机械组成分析值}$$

(7)

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 软件对数据进行统计和分析。采用单因素 (One-way ANVOA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同海拔土壤抗蚀性指标的差异, 独立样本 T 检验 (Independent-Samples T) 比较不同坡向土壤抗蚀性指标的差异, Pearson 检验法进行相关性分析。表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同海拔和坡向土壤基本理化性质

由表 2 可知, 土壤容重在垂直方向均表现为淀积层 $>$ 淋溶层, 其中 4 000 m 半阴坡淀积层达到最大 (1.21 g/cm^3), 4 000 m 半阳坡淋溶层 (0.77 g/cm^3) 最小。土壤总孔隙度的大小总体上表现为土层越深, 其值越小, 4 000 m 半阳坡淋溶层 (66.8%) 土壤总孔隙度最大, 4 000 m 半阴坡淀积层 (49.07%) 最小。

淋溶层土壤的最大持水量皆大于淀积层土壤, 其中土壤最大持水量为 4 000 m 半阳坡淋溶层, 达 $1\,336.00\text{ t/hm}^2$, 最小为 4 000 m 半阴坡淀积层, 为 981.33 t/hm^2 。在相同坡向, 淋溶层土壤最大持水量随海拔的升高先增大后减小, 淀积层土壤最大持水量随海拔的升高先减小后增加, 土壤最大持水量在不同海拔之间差异显著 ($P<0.05$)。除 3 800 m 海拔淋溶层外, 土壤最大持水量均表现为半阴坡 $<$ 半阳坡。

土壤有效涵蓄量最大为 4 000 m 半阳坡淋溶层, 达 390.00 t/hm^2 , 最小为 4 200 m 半阴坡淀积层, 为 90.67 t/hm^2 。土壤有效涵蓄量在不同海拔虽无明显规律, 但均表现出显著差异 ($P<0.05$)。除 4 000 m 海拔淀积层外, 土壤有效涵蓄量均表现为半阴坡 $<$ 半阳坡。除 3 800 m 海拔淀积层外, 土壤有效涵蓄量不同坡向之间均有显著差异 ($P<0.05$)。

不同海拔和坡向土壤的初渗率均大于稳渗率。土壤初渗速率总体表现为淋溶层 $>$ 淀积层。在相同坡向和土层, 土壤初渗速率随海拔高度的增加均表现为先减小后增加。而对不同坡向土壤的初渗速率进行比较, 除 3 800 m 海拔淀积层外, 其余皆表现为半阴坡 $<$ 半阳坡。在相同海拔和坡向条件下, 土壤的稳渗速率均表现为淋溶层 $>$ 淀积层。土壤的稳渗速率波动范围为 $1.65\sim21.49\text{ mm/min}$ 。

不同海拔和坡向淋溶层土壤的抗蚀指数均显著大于淀积层。抗蚀指数最大为 3 800 m 半阳坡淋溶层, 最小为 4 200 m 半阴坡淀积层。淋溶层抗蚀指数在不同海拔间没有明显的规律, 但淀积层抗蚀指数从整体来说表现出随着海拔的升高而降低的趋势。淋溶层半阴坡和半阳坡抗蚀指数的大小没有明显规律, 但淀积层抗蚀指数均表现为半阳坡 $>$ 半阴坡。

表 2 不同海拔和坡向土壤基本理化指标

海拔/m	坡向	土层	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	最大持水量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	初渗速率/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	稳渗速率/ ($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	有效涵蓄量/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)	抗蚀 指数/%	有机质含量/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
4200	半阴坡	淋溶层	$1.05\pm0.04\text{Aa}$	$59.94\pm2.57\text{Aa}$	$1198.67\pm13.60\text{Aa}$	$10.59\pm2.73\text{Aa}$	$4.87\pm2.79\text{Aa}$	$188.67\pm23.91\text{Aa}$	$98.33\pm2.36\text{Aa}$	$45.76\pm2.78\text{Aa}$
		淀积层	$1.19\pm0.03\text{Ab}$	$51.54\pm3.78\text{Aa}$	$1030.67\pm6.18\text{Aa}$	$4.93\pm0.73\text{Aa}$	$2.72\pm0.39\text{Aa}$	$90.67\pm8.38\text{Ab}$	$1.67\pm0.24\text{Aa}$	$27.35\pm1.71\text{Aa}$
	半阳坡	淋溶层	$1.02\pm0.15\text{Aa}$	$60.03\pm4.03\text{ABa}$	$1200.67\pm29.95\text{Aa}$	$33.16\pm6.15\text{Aa}$	$21.49\pm6.69\text{Aa}$	$270.67\pm25.42\text{Ab}$	$96.67\pm4.71\text{Aa}$	$54.91\pm1.18\text{Ab}$
		淀积层	$1.05\pm0.15\text{Aa}$	$55.60\pm2.87\text{Aa}$	$1112.00\pm25.14\text{Ab}$	$7.08\pm3.22\text{Aa}$	$4.10\pm2.50\text{Aa}$	$315.33\pm30.35\text{Aa}$	$38.89\pm3.62\text{Ab}$	$40.98\pm2.03\text{Ab}$
4000	半阴坡	淋溶层	$0.86\pm0.11\text{Aa}$	$65.14\pm2.42\text{Aa}$	$1302.67\pm16.76\text{Ba}$	$8.91\pm2.26\text{Aa}$	$2.98\pm0.43\text{Aa}$	$118.67\pm24.46\text{Ba}$	$96.67\pm2.36\text{Aa}$	$46.85\pm2.24\text{Aa}$
		淀积层	$1.21\pm0.06\text{Ab}$	$49.07\pm2.80\text{Ab}$	$981.33\pm19.96\text{Ba}$	$2.29\pm0.52\text{Aa}$	$1.65\pm0.39\text{Aa}$	$289.33\pm28.39\text{Ba}$	$15.00\pm4.08\text{Ba}$	$20.05\pm2.87\text{Ba}$
	半阳坡	淋溶层	$0.77\pm0.15\text{Aa}$	$66.80\pm2.57\text{Ba}$	$1336.00\pm24.66\text{Ba}$	$13.53\pm1.35\text{Aa}$	$8.63\pm3.95\text{Aa}$	$390.00\pm14.14\text{Bb}$	$73.33\pm3.09\text{Bb}$	$65.44\pm1.82\text{Bb}$
		淀积层	$1.15\pm0.17\text{Aa}$	$52.47\pm5.46\text{Ab}$	$1042.67\pm26.04\text{Ba}$	$7.07\pm1.67\text{Ab}$	$3.81\pm1.24\text{Aa}$	$198.00\pm29.98\text{Bb}$	$33.33\pm4.71\text{Ab}$	$28.97\pm1.04\text{Bb}$
3800	半阴坡	淋溶层	$0.87\pm0.11\text{Aa}$	$63.54\pm4.69\text{Aa}$	$1270.67\pm19.07\text{Ba}$	$16.21\pm6.22\text{Aa}$	$10.52\pm4.47\text{Aa}$	$138.67\pm13.89\text{ABa}$	$83.33\pm4.71\text{Ba}$	$64.16\pm1.94\text{Ba}$
		淀积层	$1.14\pm0.06\text{Ab}$	$51.20\pm2.67\text{Ab}$	$1024.00\pm19.60\text{Aa}$	$17.28\pm5.77\text{Ba}$	$9.89\pm3.57\text{Ba}$	$179.33\pm19.07\text{Ca}$	$78.33\pm2.36\text{Ca}$	$66.92\pm3.15\text{Ca}$
	半阳坡	淋溶层	$0.94\pm0.19\text{Aa}$	$57.80\pm3.75\text{Aa}$	$1156.00\pm9.93\text{Ab}$	$21.16\pm7.34\text{Aa}$	$10.31\pm3.40\text{Aa}$	$347.33\pm28.11\text{Bb}$	$98.33\pm2.36\text{Ab}$	$46.44\pm1.59\text{Ba}$
		淀积层	$1.18\pm0.17\text{Aa}$	$52.27\pm4.14\text{Aa}$	$1045.33\pm26.55\text{Ba}$	$10.69\pm0.76\text{Aa}$	$8.47\pm5.48\text{Aa}$	$204.00\pm23.55\text{Ba}$	$96.67\pm4.71\text{Bb}$	$25.84\pm0.81\text{Bb}$

注: 表中数据为平均值 $\pm$ 标准差; 不同大写字母表示同一坡向和土层不同海拔差异性显著 ($P<0.05$); 不同小写字母表示同一海拔和土层不同坡向差异性显著 ($P<0.05$)。下同。

不同海拔和坡向土壤有机质均表现为淋溶层>淀积层。土壤有机质的波动范围为 20.05~66.92 g/kg。对不同海拔的土壤有机质进行对比,淋溶层土壤有机质含量均表现为随着海拔高度的增加而降低的规律。淀积层土壤有机质含量总体随着海拔高度的增加而增加。对不同坡向的土壤有机质含量进行对比,总体表现为半阴坡<半阳坡。对不同坡向土壤有机质含量进行 *T* 检验,除 3 800 m 海拔淋溶层土壤外,其他海拔和土层土壤在半阴坡和半阳坡之间均表现为显著差异($P<0.05$)。

从表 3 可以看出,土壤砂粒含量为 18.01%~45.68%,粉粒含量为 52.17%~80.15%,土壤黏粒含量为 1.47%~2.95%。土壤砂粒含量在半阳坡表现为随着海拔增加而增大,在半阴坡无明显规律;粉粒含量在半阳坡均表现为随海拔的增加而降低,在半阴坡随海拔变化无明显规律;黏粒含量在半阳坡随海拔升高

呈“V”形变化,在半阴坡无明显规律。在同一海拔同一土层,砂粒含量大小均表现为半阴坡<半阳坡,粉粒含量大小均表现为半阴坡>半阳坡,黏粒含量大小在不同坡向没有明显规律。

在土壤微团聚体中,大粒径(0.05~1 mm)土壤微团聚体占的比例最大,是土壤微团聚体组成的主体,中粒径(0.001~0.05 mm)微团聚体含量次之,小粒径(<0.001 mm)微团聚体含量最小。大粒径(0.05~1 mm)微团聚体含量随着海拔高度的增加均有所降低;中粒径(0.001~0.05 mm)微团聚体含量随海拔的增加而增加;小粒径(<0.001 mm)微团聚体含量随海拔的变化不明显。同一海拔和土层不同坡向间微团聚体含量也有差别,半阴坡大粒径(0.05~1 mm)微团聚体含量均小于半阳坡;中粒径(0.001~0.05 mm)微团聚体含量则表现为半阴坡>半阳坡;小粒径(<0.001 mm)微团聚体含量在不同坡向间变化不明显。

表 3 土壤颗粒组成与微团聚体组成状况

海拔/m	坡向	土层	组成状况	颗粒粒径/%			结构性	团聚状况/
				1~0.05 mm	0.05~0.001 mm	<0.001 mm	颗粒指数/%	(g·kg ⁻¹)
4200	半阴坡	淋溶层	微团聚体	62.36±4.68Aa	36.58±4.32Aa	1.07±0.09Aa	3.58±0.09Aa	43.81±1.98Aa
			机械组成	18.55±1.49Aa	78.64±1.51Aa	2.81±0.02Aa		
		淀积层	微团聚体	49.61±3.96Aa	48.76±3.89Aa	1.64±0.08Aa	3.79±0.14Aa	30.55±1.10Aa
			机械组成	19.06±3.53Aa	77.99±3.50Aa	2.95±0.06Aa		
	半阳坡	淋溶层	微团聚体	74.44±1.95Aa	24.57±1.99Aa	0.99±0.06ABa	4.01±0.28Aa	37.23±4.17Aa
			机械组成	37.22±2.49Ab	60.36±2.27Ab	2.43±0.25Aa		
		淀积层	微团聚体	66.40±3.65Ab	32.17±3.81Ab	1.43±0.17Aa	4.19±0.52Aa	20.71±4.00Ab
			机械组成	45.68±3.15Ab	52.17±3.64Ab	2.14±0.51Aa		
4000	半阴坡	淋溶层	微团聚体	61.69±1.93Aa	37.52±1.94Aa	0.79±0.03Ba	2.30±0.08Ba	43.68±1.74Aa
			机械组成	18.01±2.77Aa	80.15±2.67Aa	1.85±0.11Ba		
		淀积层	微团聚体	56.41±4.55Aa	42.51±4.54Aa	1.08±0.01Ba	2.25±0.22Ba	32.06±1.60Aa
			机械组成	24.35±2.95Aa	73.99±2.99Aa	1.66±0.13Ba		
	半阳坡	淋溶层	微团聚体	76.09±3.40Ab	23.00±3.47Ab	0.91±0.14Aa	3.93±0.42Ab	39.43±3.47Ba
			机械组成	36.66±8.18Ab	60.98±8.09Ab	2.36±0.12Ab		
		淀积层	微团聚体	69.92±4.36Aa	28.74±3.43Aa	1.34±0.25Aa	3.14±0.24Ab	35.64±3.74Ba
			机械组成	34.28±6.14Ba	63.71±5.85Ba	2.01±0.31Aa		
3800	半阴坡	淋溶层	微团聚体	66.69±3.36Aa	32.14±3.32Aa	1.17±0.04Aa	2.12±0.22Ba	37.71±2.79Ba
			机械组成	28.99±4.61Ba	69.55±4.59Ba	1.47±0.14Ca		
		淀积层	微团聚体	77.74±4.94Ba	20.90±2.94Ba	1.36±0.06Ca	2.96±0.43Ba	45.56±2.41Ba
			机械组成	25.51±4.69Aa	72.59±4.55Aa	1.90±0.15Ba		
	半阳坡	淋溶层	微团聚体	82.19±2.01Ab	16.60±2.06Ab	1.21±0.11Ba	4.48±0.40Ab	47.60±2.50Cb
			机械组成	34.59±2.66Aa	62.62±2.75Aa	2.79±0.15Ab		
		淀积层	微团聚体	79.64±3.27Aa	19.11±3.13Aa	1.25±0.15Aa	3.54±0.55Aa	48.52±0.37Ca
			机械组成	31.13±3.21Ba	66.54±3.44Ba	2.33±0.23Aa		

除半阴坡的淋溶层外,土壤结构性颗粒指数均随着海拔的升高先减小后增加。在同一海拔和土层,半阳坡结构性颗粒指数均大于半阴坡。团聚状况除半阴坡淋溶层外,均随海拔高度的增加而降低。不同

坡向间团聚状况没有表现出明显的较为统一的趋势。3 800 m 半阴坡的团聚状况分别与 4 000,4 200 m 呈显著差异($P<0.05$),半阳坡的团聚状况在不同海拔间均呈显著差异($P<0.05$)。

2.2 不同海拔和坡向土壤团聚体组成及稳定性特征

从表 4 可以看出,不管是风干团聚体还是水稳性团聚体,大粒径(>2 mm)、>0.25 mm 团聚体和>0.5 mm 团聚体含量总体表现为淋溶层>淀积层。而中粒径

(0.25~2 mm)和小粒径(<0.25 mm)土壤风干团聚体含量、小粒径(<0.25 mm)水稳性团聚体含量基本呈现为淋溶层<淀积层。中粒径(0.25~2 mm)水稳性团聚体含量在土层之间变化不明显。

表 4 不同海拔和坡向土壤团聚体组成

海拔/m	坡向	土层	测定方法	团聚体粒径/%					
				>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm 总和	>0.5 mm 总和
4200	半阴坡	淋溶层	湿筛	9.80±0.48Aa	18.02±2.06ABa	18.45±2.41Aa	17.75±1.31Aa	64.02±2.03Aa	46.27±4.69Aa
			干筛	27.50±1.54Aa	23.82±1.29Aa	17.27±1.14Aa	15.3±1.28ABa	83.89±2.02Aa	68.59±1.53Aa
		淀积层	湿筛	8.49±1.76Aa	10.00±0.56Aa	14.85±1.98Aa	18.96±3.45Aa	53.30±1.76Aa	34.34±0.94Aa
			干筛	18.85±0.64Aa	22.59±3.79Aa	17.77±2.4Aa	18.94±1.35Aa	78.14±4.39Aa	59.20±5.63Aa
	半阳坡	淋溶层	湿筛	6.77±1.68Ab	21.36±0.61Aa	25.45±0.99Ab	23.08±1.69Ab	76.67±1.33Ab	53.58±1.08Aa
			干筛	9.73±2.85Ab	22.27±0.85Aa	24.88±0.86Ab	24.20±1.59Aa	81.08±5.27Aa	56.88±2.87Ab
		淀积层	湿筛	0.91±0.14Ab	22.12±1.83ABb	23.24±1.46Aa	22.78±1.03ABa	68.71±2.43Ab	46.27±2.66ABb
			干筛	2.54±0.31Ab	23.86±2.40Aa	22.72±3.58Ab	24.29±1.2ABb	73.41±3.84Aa	49.12±5.85Aa
4000	半阴坡	淋溶层	湿筛	4.38±0.61Aa	12.68±1.50Aa	15.36±2.28Aa	19.35±1.18Aa	51.78±2.62Ba	32.42±3.77Ba
			干筛	22.24±2.13Aa	15.12±1.75Ba	12.04±4.30Aa	17.74±1.59ABa	67.15±5.01Ba	49.40±4.35Ba
		淀积层	湿筛	1.45±0.10Ba	14.72±2.45Aa	15.11±2.03Aa	16.78±2.21Aa	48.06±3.41Aa	31.29±4.55Aa
			干筛	7.72±2.74Ba	15.93±2.81Aa	14.21±2.30Aa	18.28±2.83Aa	56.19±5.53Ba	37.87±2.74Ba
	半阳坡	淋溶层	湿筛	11.38±1.64Bb	19.72±2.06Ab	18.89±1.31Ba	20.61±1.17Aa	70.60±1.11Bb	49.99±2.25ABb
			干筛	18.90±3.19Ba	18.75±3.12Aa	17.49±2.58Ba	21.17±1.08Aa	76.31±2.08Aa	55.13±3.09Aa
		淀积层	湿筛	0.76±0.07Ab	18.26±0.51Aa	22.69±3.54Aa	25.4±0.62Ab	67.10±3.60Ab	41.70±4.10Aa
			干筛	4.41±0.48Aa	21.06±1.69Aa	21.40±3.03Aa	26.33±0.97Ab	73.20±1.48Ab	46.87±5.07Aa
3800	半阴坡	淋溶层	湿筛	21.06±0.31Aa	21.13±0.34Ba	17.88±1.27Aa	13.98±1.33Aa	74.06±2.35Ca	60.08±1.29Ca
			干筛	35.86±3.14Ba	19.67±3.77ABa	15.14±3.87Aa	13.7±0.81Ba	84.37±0.17Aa	70.67±6.44Aa
		淀积层	湿筛	12.73±2.21Ca	19.05±1.31Ba	17.04±1.42Aa	15.65±2.89Aa	64.47±3.44Ba	48.82±2.54Ba
			干筛	17.95±1.74Aa	19.80±1.47Aa	16.64±4.96Aa	16.94±3.01Aa	71.32±3.52Aa	54.38±7.41Aa
	半阳坡	淋溶层	湿筛	11.84±1.53Bb	18.23±1.77Aa	18.05±1.32Ba	20.22±1.97Aa	68.34±2.57Ba	48.12±2.03Ab
			干筛	19.99±1.81Bb	17.71±0.6Aa	16.92±1.36Ba	21.24±2.13Aba	75.19±5.44Aa	54.62±1.95Ab
		淀积层	湿筛	7.96±0.08Bb	22.73±2.16Ba	21.61±0.76Aa	20.59±1.80Ba	72.89±2.06Ab	52.30±2.74Ba
			干筛	16.76±1.60Ba	24.11±1.25Ab	20.80±0.78Aa	21.43±1.72Ba	83.10±3.21Bb	61.67±3.05Ba

>0.25 mm 风干团聚体含量为 56.19%~84.37%,>0.25 mm 水稳性团聚体含量为 48.06%~76.67%;>0.5 mm风干团聚体含量为 37.87%~70.67%,>0.5 mm 水稳性团聚体含量为 31.29%~60.08%。>0.5 mm 风干团聚体和水稳性团聚体含量总体随着海拔增加先减少后增加。土壤大粒径(>2 mm)风干团聚体、水稳性团聚体和小粒径水稳性团聚体(<0.25 mm)含量在不同坡向间表现为半阴坡>半阳坡;>0.5 mm 水稳性团聚体、中粒径(0.25~2 mm)风干团聚体和水稳性团聚体含量基本呈现出半阴坡<半阳坡;小粒径(<0.25 mm)土壤风干团聚体含量没有一致的规律性。大粒径(>2 mm)水稳性团聚体在不同坡向间均呈显著差异($P<0.05$),小粒径(<0.25 mm)和>0.25 mm 水稳性团聚体除 3 800 m 海拔淋溶层外,其余坡向间均呈显著差异($P<0.05$)。

由表 5 可知,风干团聚体和水稳性团聚体 MWD 和 GMD 均表现为淋溶层>淀积层。风干团聚体和水稳性团聚体分形维数 D 表现为淋溶层<淀积层。半阴坡风

干团聚体 MWD 和 GMD 随着海拔的增加均表现出先减小后增加的规律,半阳坡风干团聚体 MWD 和 GMD 均表现出随着海拔的增加而减小的规律;分形维数 D 在不同海拔没有明显的大小变化规律。风干团聚体 MWD 在不同坡向总体表现为半阴坡>半阳坡的特征,GMD 和 D 没有明显的规律性。

半阳坡淋溶层团聚体破坏率均小于淀积层,而半阴坡不同土层间团聚体破坏率没有明显规律。团聚体破坏率最大为 4 200 m 半阴坡淀积层,最小为 4 200 m 半阳坡淋溶层。从团聚体破坏率在海拔梯度间的变化情况来看,半阴坡团聚体破坏率随着海拔高度的增加均有所增加,半阳坡团聚体破坏率随着海拔的增高而降低。除 3 800 m 海拔淀积层外,半阴坡团聚体破坏率均大于半阳坡。经过 T 检验分析,发现除 3 800 m 海拔淋溶层外,半阴坡和半阳坡之间团聚体破坏率均呈显著差异($P<0.05$)。

2.3 不同海拔和坡向土壤抗蚀性综合特征

抗蚀性需要结合多项土壤性质指标来进行综合

评价,且不同地区,由于环境的差异,在指标的选取上地区间的差异性也很大,所以没有一套普遍适用的评价指标体系。由于土壤抗蚀性主要体现在表层土壤,针对川西高寒山地灌丛草甸土壤,在排除了相关性极高的指标后,选用 18 个与土壤抗蚀性密切相关的指标:<0.001 mm 黏粒含量(X_1)、结构性颗粒指数(X_2)、有机质(X_3)、抗蚀指数(X_4)、>0.25 mm 风干

团聚体含量(X_5)、>0.25 mm 水稳性团聚体含量(X_6)、>0.5 mm 水稳性团聚体含量(X_7)、水稳性团聚体 MWD(X_8)、水稳性团聚体 GMD(X_9)、水稳性团聚体 D(X_{10})、团聚体破坏率(X_{11})、团聚状况(X_{12})、容重(X_{13})、总孔隙度(X_{14})、最大持水量(X_{15})、稳渗速率(X_{16})、初渗速率(X_{17})、有效拦蓄量(X_{18})进行主成分分析。

表 5 不同海拔和坡向土壤团聚体稳定性特征

海拔/m	坡向	土层	测定方法	MWD	GMD	D	团聚体破坏率/%
4200	半阴坡	淋溶层	湿筛	1.11±0.25Aa	0.73±0.04Aa	2.50±0.03Aa	23.64±1.17Aa
			干筛	1.93±0.14ABa	0.97±0.01ABa	2.16±0.02Aa	
		淀积层	湿筛	0.95±0.14Aa	0.66±0.11ABa	2.61±0.11Aa	32.41±3.09Aa
			干筛	1.52±0.10Aa	0.85±0.08Aa	2.23±0.03Aa	
	半阳坡	淋溶层	湿筛	1.03±0.29Aa	0.78±0.07Aa	2.42±0.07Aa	5.50±0.98Ab
			干筛	1.15±0.22Ab	0.81±0.07Aa	2.23±0.05Aa	
		淀积层	湿筛	0.67±0.13Ab	0.70±0.07Aa	2.50±0.10Aa	6.62±1.60ABb
			干筛	0.76±0.16Ab	0.71±0.09Aa	2.30±0.10Aa	
4000	半阴坡	淋溶层	湿筛	0.70±0.26Aa	0.62±0.04Aa	2.63±0.04Ba	22.79±1.73Aa
			干筛	1.49±0.37Aa	0.76±0.13Aa	2.33±0.08Ba	
		淀积层	湿筛	0.55±0.08Ba	0.59±0.03Aa	2.65±0.05Aa	14.88±1.46Ba
			干筛	0.77±0.03Ba	0.60±0.03Aa	2.44±0.04Aa	
	半阳坡	淋溶层	湿筛	1.23±0.31Ab	0.78±0.04Ab	2.45±0.03Aa	7.43±2.15ABb
			干筛	1.47±0.10Aa	0.83±0.02Aa	2.25±0.02Aa	
		淀积层	湿筛	0.63±0.12Aa	0.68±0.06Aa	2.53±0.08Aa	8.37±0.40Ab
			干筛	0.79±0.14Aa	0.71±0.08Aa	2.31±0.09Aa	
3800	半阴坡	淋溶层	湿筛	1.80±0.23Ba	0.90±0.09Ba	2.36±0.04Ca	12.22±2.60Ba
			干筛	2.41±0.18Ba	1.05±0.11Ba	2.15±0.02Aa	
		淀积层	湿筛	1.28±0.23Aa	0.79±0.06Ba	2.48±0.19Aa	11.27±1.96Ba
			干筛	1.34±0.05Ca	0.81±0.21Aa	2.28±0.17Aa	
	半阳坡	淋溶层	湿筛	1.23±0.17Ab	0.77±0.11Aa	2.47±0.10Aa	9.35±1.15Aa
			干筛	1.47±0.32Ab	0.83±0.09Aa	2.25±0.07Aa	
		淀积层	湿筛	1.09±0.14Ba	0.78±0.07Aa	2.43±0.06Aa	12.37±2.68Bb
			干筛	1.32±0.15Ba	0.87±0.05Aa	2.18±0.04Aa	

从表 6 可以看出,前 4 个主成分特征根值分别为 7.111,5.688,2.542 和 1.813,4 个主成分的累积方差贡献率为 95.298%,信息量仅损失 4.702%,说明符合主成分分析的要求。

表 6 总方差解释

主成份	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差	累积方差	合计	方差	累积方差
		百分比/%	贡献率/%		百分比/%	贡献率/%
1	7.111	39.504	39.504	7.111	39.504	39.504
2	5.688	31.601	71.105	5.688	31.601	71.105
3	2.542	14.121	85.226	2.542	14.121	85.226
4	1.813	10.073	95.298	1.813	10.073	95.298

从表 7 可以看出,对主成分 1 贡献最大的指标为 >0.5 mm 水稳性团聚体含量(X_7),其次依次为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(X_6)、稳渗速率(X_{16})、初渗速率(X_{17})、有机质(X_3)、>0.25 mm 风干团聚体含量(X_5)、抗蚀指数(X_4)、结构性颗粒指数(X_2);对主

成分 2 贡献率最大的指标为容重(X_{13}),其次为团聚体破坏率(X_{11})、水稳性团聚体 MWD(X_8)、水稳性团聚体 GMD(X_9)、<0.001 mm 黏粒含量(X_1)。第 3 主成分中结构性颗粒指数(X_2)贡献最大,其次为 <0.001 mm 黏粒含量(X_1)和有效拦蓄量(X_{18})等;第 4 主成分中总孔隙度(X_{14})贡献率最大。

根据主成分的特征根值,考虑初始因子荷载系数,可以得到 4 个主成分的函数表达式,具体为:

$$\begin{aligned} Z_1 = & 0.068X_1 + 0.210X_2 + 0.326X_3 + 0.262X_4 + \\ & 0.294X_5 + 0.359X_6 + 0.366X_7 + 0.075X_8 + \\ & 0.207X_9 - 0.273X_{10} - 0.228X_{11} + 0.068X_{12} - \\ & 0.052X_{13} - 0.022X_{14} - 0.022X_{15} + 0.337X_{16} + \\ & 0.338X_{17} + 0.126X_{18} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_2 = & 0.245X_1 + 0.046X_2 - 0.120X_3 + 0.064X_4 + \\ & 0.191X_5 - 0.101X_6 - 0.027X_7 + 0.309X_8 + \\ & 0.290X_9 - 0.254X_{10} + 0.320X_{11} + 0.189X_{12} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &0.364X_{13}-0.356X_{14}-0.358X_{15}-0.110X_{16}- \\ &0.088X_{17}-0.284X_{18} \\ Z_3= &0.465X_1+0.506X_2-0.242X_3-0.144X_4+ \\ &0.125X_5+0.065X_6-0.125X_7-0.371X_8- \\ &0.202X_9-0.017X_{10}+0.004X_{11}-0.261X_{12}+ \\ &0.228X_{13}-0.070X_{14}-0.074X_{15}+0.026X_{16}+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &0.021X_{17}+0.319X_{18} \\ Z_4= &0.116X_1+0.042X_2+0.084X_3-0.491X_4+ \\ &0.265X_5+0.052X_6+0.053X_7+0.192X_8+ \\ &0.244X_9-0.224X_{10}+0.160X_{11}-0.398X_{12}- \\ &0.054X_{13}+0.361X_{14}+0.359X_{15}-0.062X_{16}- \\ &0.091X_{17}-0.236X_{18} \end{aligned}$$

表 7 成分矩阵

抗蚀性指标	成分				抗蚀性指标	成分			
	1	2	3	4		1	2	3	4
X_1	0.181	0.585	0.741	0.156	X_{10}	-0.729	-0.605	-0.027	-0.301
X_2	0.561	0.109	0.807	0.057	X_{11}	-0.607	0.763	0.006	0.216
X_3	0.870	-0.286	-0.386	0.113	X_{12}	0.180	0.451	-0.416	-0.536
X_4	0.698	0.153	-0.229	-0.661	X_{13}	-0.139	0.869	0.364	-0.073
X_5	0.784	0.456	0.200	0.357	X_{14}	-0.058	-0.850	-0.112	0.486
X_6	0.958	-0.242	0.104	0.070	X_{15}	-0.058	-0.855	-0.118	0.484
X_7	0.975	-0.065	-0.199	0.071	X_{16}	0.899	-0.263	0.042	-0.083
X_8	0.199	0.737	-0.591	0.258	X_{17}	0.901	-0.211	0.033	-0.122
X_9	0.553	0.692	-0.322	0.328	X_{18}	0.335	-0.678	0.509	-0.318

依据 Z_i 的贡献率,可建立综合抗蚀指数表达式,具体为:

$$Z_{总}=0.415Z_1+0.332Z_2+0.148Z_3+0.106Z_4$$

从表 8 可以看出,该地区土壤抗蚀性的大小顺序为 3 800 m 半阳坡>4 200 m 半阴坡>3 800 m 半阴坡>4 200 m 半阳坡>4 000 m 半阳坡>4 000 m 半阴坡。3 个海拔梯度土壤抗蚀性最大为 3 800 m,其次为 4 200 m,最小为 4 000 m。在相同海拔、不同坡向的土壤抗蚀性没有统一的变化特征,3 800、4 000 m 海拔土壤抗蚀性表现为半阳坡大于半阴坡,而 4 200 m 海拔土壤抗蚀性则是半阴坡大于半阳坡。

表 8 土壤抗蚀性综合得分排名

海拔/m	坡向	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	$Z_{总}$	排名
4200	半阴坡	-1.314	3.720	0.943	1.437	0.982	2
	半阳坡	1.820	-2.033	1.687	0.217	0.353	4
4000	半阴坡	-4.642	-0.909	-0.563	-1.133	-2.432	6
	半阳坡	-0.089	-2.656	0.234	1.061	-0.772	5
3800	半阴坡	1.985	0.304	-2.874	0.492	0.552	3
	半阳坡	2.240	1.575	0.574	-2.073	1.317	1

2.4 土壤抗蚀性与抗蚀指标的相关关系

对土壤抗蚀性指标与土壤抗蚀性综合得分进行相关分析(表 9),可以发现:>0.25 mm 风干团聚体含量与土壤抗蚀性综合得分呈极显著正相关($r=0.96^{**}$),水稳性团聚体 GMD 值与土壤抗蚀性综合得分呈显著正相关($r=0.81^{*}$),说明>0.25 mm 团聚体含量和水稳性团聚体 GMD 值越高,土壤团聚体稳定性越强,土壤的抗蚀性能也越好。水稳性团聚体分形维数 D 与土壤抗蚀性综合得分呈极显著负相关($r=-0.96^{**}$),说明分形维数 D 的值越高,土壤抗蚀性能越弱。除此之外,>0.5 mm 水稳性团聚体含量、>0.25 mm 风干团

聚体含量、<0.001 mm 黏粒含量、结构性颗粒指数和有机质含量等均与土壤抗蚀性呈正相关关系。

综上所述,可知该地区土壤抗蚀性影响最大的是团聚体类指标,对土壤抗蚀性的强弱起到决定性的作用,>0.25 mm 风干团聚体含量、水稳性团聚体 GMD 值和水稳性团聚体分形维数 D 3 个指标为评价该地区土壤抗蚀性的最佳指标。

3 讨论

坡向与海拔通过对太阳辐射和降水的分配,影响着植被在山地中的分布,以及土壤理化性质的差异,从而导致土壤抗蚀性在坡向和海拔上有极强的异质性^[15]。本研究中,土壤容重在垂直方向表现为淀积层>淋溶层,有机质、初渗速率、稳渗速率、总孔隙度和最大持水量则表现为淋溶层>淀积层,这与尼加提·乃合买提等^[16]和王洁等^[17]的研究结果相似。主要原因可能是表层土壤与植物直接接触的一层,这层土壤中的动植物及微生物活动均高于深层土壤,有机质含量较高,土壤也较为疏松,土壤具备良好的孔性结构更有利于水分的贮藏和下渗^[18]。土壤的物理性质之间、土壤的物理性质与有机质之间存在明显的相关关系,这与何方永等^[19]和高强伟等^[20]的研究结果相似。

本研究中,淋溶层土壤有机质含量随着海拔高度的增加而降低,而淀积层没有统一的规律。一方面的原因是有机质含量随着枯落物的数量进行波动,另一方面则是高海拔地区的水热状况相对抑制了土壤动物及微生物的活动,而这些因素均没有显著影响淀积层的有机质含量,这与刘颖等^[21]的研究结果相似。半阴坡土壤有机质、最大含水量和有效涵养量基本小于半阳坡,总孔隙度在 4 000 m 半阳坡处最大,这也

符合植被在阴阳坡的分布特征^[22]。此外高海拔地区的土壤性质除了受植被分布影响外,还受气候的影响较大,半阳坡由于其冷热交替作用强烈,因此相较半

阴坡其土壤可能具有更为疏松的结构^[23]。而在这些因素的共同作用下,也使得高海拔地区的土壤性质具有极强的异质性。

表 9 土壤抗蚀指标及其与土壤抗蚀性综合指数之间的相关性

项目	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}	X_{16}	X_{17}	X_{18}
X_1	1.00																	
X_2	0.80	1.00																
X_3	-0.28	0.15	1.00															
X_4	-0.06	0.18	0.58	1.00														
X_5	0.64	0.69	0.52	0.33	1.00													
X_6	0.14	0.61	0.87 *	0.56	0.70	1.00												
X_7	0.00	0.38	0.95 * *	0.67	0.72	0.93 * *	1.00											
X_8	0.08	-0.27	0.22	0.22	0.47	-0.03	0.28	1.00										
X_9	0.33	0.15	0.45	0.35	0.81	0.36	0.58	0.90 *	1.00									
X_{10}	-0.58	-0.53	-0.49	-0.40	-0.97 * *	-0.58	-0.69	-0.66	-0.92 * *	1.00								
X_{11}	0.36	-0.25	-0.73	-0.45	-0.06	-0.76	-0.63	0.49	0.26	-0.08	1.00							
X_{12}	0.03	-0.14	0.13	0.64	0.13	0.03	0.19	0.50	0.41	-0.29	0.09	1.00						
X_{13}	0.68	0.27	-0.52	0.00	0.31	-0.34	-0.27	0.37	0.37	-0.38	0.75	0.09	1.00					
X_{14}	-0.48	-0.17	0.29	-0.47	-0.27	0.19	0.06	-0.44	-0.42	0.40	-0.52	-0.52	-0.85 *	1.00				
X_{15}	-0.49	-0.18	0.30	-0.47	-0.27	0.19	0.06	-0.44	-0.42	0.40	-0.52	-0.54	-0.85 *	1.00 * *	1.00			
X_{16}	-0.05	0.46	0.83 *	0.64	0.53	0.90 *	0.88 *	-0.07	0.25	-0.44	-0.75	-0.12	-0.23	0.07	0.08	1.00		
X_{17}	-0.04	0.45	0.81 *	0.67	0.54	0.88 *	0.88 *	-0.04	0.28	-0.46	-0.72	-0.08	-0.18	0.01	0.02	0.99 * *	1.00	
X_{18}	0.05	0.54	0.26	0.22	-0.03	0.54	0.25	-0.81	-0.54	0.22	-0.80	-0.14	-0.50	0.39	0.38	0.44	0.41	1.00
$Z_{总}$	0.62	0.65	0.48	0.54	0.96 * *	0.65	0.71	0.51	0.81 *	-0.96 * *	-0.03	0.28	0.44	-0.50	-0.50	0.57	0.59	-0.07

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关；* * 表示在 0.01 水平上显著相关。

本研究中,无论是风干团聚体还是水稳性团聚体,>2,>0.25,>0.5 mm 团聚体组成指标均随着有机质的变化而变化,导致土壤抗蚀性在坡向和海拔间产生差异。团聚体的含量和稳定性与抗蚀性综合值及土壤物理性质指标有较好的相关性,良好的土壤团聚状况使土壤具有较好的通气透水性,既保证植被的生长,又间接促进团聚体的形成,达到改善土壤状况、提高抗蚀性的目的^[24]。因此,针对该地区退化严重的高山灌丛草甸,分区域的保护和营造灌草植被是增加土壤有机质、改善土壤性质和提高土壤抗蚀性的关键。

本研究结果发现,受成土母质和气候等因素影响,研究区土壤均表现为粉粒含量最高,砂粒含量次之,黏粒含量最少,土壤向粗骨化方向发展,土壤物理性质变差,极易发生水土流失^[25]。半阳坡土壤的砂粒、粉粒和黏粒含量随海拔高度呈现出明显的规律,在半阴坡则没有明显规律,这可能是由于半阳坡土壤颗粒组成受气候因素的主导,半阳坡强烈的冷热交替作用下土壤颗粒组成随海拔有明显的分异特征,而半阴坡土壤则受多重因素的共同影响,没有表现出明显的垂直分异特征。

本研究发现,该地区土壤抗蚀性的大小顺序为:3 800 m 半阳坡>4 200 m 半阴坡>3 800 m 半阴坡>4 200 m 半阳坡>4 000 m 半阳坡>4 000 m 半阴坡。对土壤抗蚀性指标与土壤抗蚀性综合得分进行相关分析,得出>0.25 mm 风干团聚体含量、水稳性团聚体 GMD 值和水稳性团聚体分形维数 D 为评价该地区土壤抗蚀性的最佳指标,这与赵锦梅等^[26]的研究结果相似,但与陈爱民等^[27]的结果相异,这可能是由于研究区的差别,土壤类型和环境等也有较大的差别,使得抗蚀性的最佳评价指标不同。

4 结 论

(1)研究区土壤的理化性质存在极强的空间异质性,其中淋溶层和淀积层土壤之间理化性质的差异最为明显,坡向和海拔因子对土壤理化性质及抗蚀性的影响主要作用于淋溶层。

(2)通过对不同海拔和坡向土壤的 18 个抗蚀性指标进行主成分分析,最终得出研究区土壤抗蚀性最大为3 800 m 半阳坡,最小为 4 000 m 半阴坡。该地区土壤抗蚀性综合评价模型为: $Z_{总}=0.415Z_1+0.332Z_2+0.148Z_3+0.106Z_4$ 。其中,>0.25 mm 风干团聚体含量、水稳性团聚体 GMD 值和水稳性团聚体分形维数 D 为评价川西高寒山地灌丛草甸土壤抗蚀性的最佳指标。

(3)研究区土壤受成土母质、气候和人为等因素影响,使土壤向粗骨化方向发展,水土流失加剧。该区土壤抗蚀性受团聚体含量及稳定性的影响最大,建议当地适度放牧,保护自然植被,以此提高土壤团聚体含量及稳定性,加强土壤抗蚀性,改善当地生态环境。

参考文献:

- [1] Chen J, He B, Wang X, et al. The effects of Herba Andrographitis hedgerows on soil erodibility and fractal features on sloping cropland in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(10): 7063-7070.
- [2] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报, 2017, 31(1): 97-102.
- [3] 万丹,何财基,王玉民,等.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[J].西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 106-114.
- [4] Zhang B P, Wu H Z, Xiao F, et al. Integration of data on Chinese mountains into a digital altitudinal belt system[J]. Mountain Research and Development, 2006, 26(2): 163-171.
- [5] 牛钰杰,周建伟,杨思维,等.坡向和海拔对高寒草甸山体土壤水热和植物分布格局的定量分解[J].应用生态学报, 2017, 28(5): 1489-1497.
- [6] 李向富,刘目兴,易军,等.三峡山地不同垂直带土层的水文功能及其影响因子[J].长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1809-1818.
- [7] 马志鹏,范茂攀,陈小强,等.间作模式下作物根系与坡耕地红壤抗蚀性的关系[J].水土保持学报, 2016, 30(4): 68-73.
- [8] 崔鹏,王道杰,范建容,等.长江上游及西南诸河区水土流失现状与综合治理对策[J].中国水土保持科学, 2008, 6(1): 43-50.
- [9] 李鑫博,吴小辉,李绪佳,等.四川省土壤侵蚀敏感性评价及其空间分布特征[J].四川林业科技, 2014, 35(5): 29-36.
- [10] 徐梦佳,刘冬,葛峰,等.长江经济带典型生态脆弱区生态修复和保护现状及对策研究[J].环境保护, 2017, 45(16): 50-53.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社, 1999: 106-288.
- [12] 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.
- [13] 罗兰花,王翠红,谢红霞,等.大围山花岗岩风化物发育土壤抗蚀性垂直分异[J].水土保持研究, 2018, 25(1): 62-65.
- [14] 代文才,高明,王子芳,等.紫色丘陵区不同土地利用方式土壤剖面微团聚体组成及分形特征[J].水土保持学报, 2016, 30(6): 259-264.
- [15] 牛钰杰,周建伟,杨思维,等.基于地形因素的高寒草甸土壤温湿度和物种多样性与初级生产力关系研究[J].生态学报, 2017, 37(24): 8314-8325.
- [16] 尼加提·乃合买提,艾克拜尔·伊拉洪,张文太,等.海拔和坡向对伊犁河谷草地土壤理化性质的影响[J].安徽农业科学, 2018, 46(19): 129-136.
- [17] 王洁,贾文雄,赵珍,等.祁连山北坡草甸草原地上生物量与土壤理化性质的关系[J].水土保持研究, 2017, 24(1): 36-42.
- [18] 朱美壮,王根绪,肖瑶,等.青藏高原多年冻土区高寒草甸土壤水分入渗变化研究[J].冰川冻土, 2017, 39(6): 1316-1325.
- [19] 何方永,何飞,吴宗达,等.岷江冷杉原始林土壤物理性质的海拔梯度变化[J].西北师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(5): 92-98.
- [20] 高宏伟,代斌,罗承德,等.蜀南竹海毛竹林土壤物理性质空间异质性[J].生态学报, 2016, 36(8): 2255-2263.
- [21] 刘颖,宫渊波,李瑶,等.川西高寒灌丛草地不同海拔梯度土壤化学计量特征[J].四川农业大学学报, 2018, 36(2): 167-174.
- [22] 李小英,段争虎,陈小红,等.黄土高原西部人工灌木林土壤水分分布规律[J].干旱区研究, 2014, 31(1): 38-43.
- [23] 肖东辉,冯文杰,张泽.冻融循环作用下黄土孔隙率变化规律[J].冰川冻土, 2014, 36(4): 907-912.
- [24] 闫思宇,王景燕,龚伟,等.川南山地林分变化对土壤物理性质和抗蚀性的影响[J].长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1112-1120.
- [25] Nagy L, Grabherr G. The biology of alpine habitats [M]. Oxford: Oxford University Press, 2010.
- [26] 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.
- [27] 陈爱民,严思维,林勇明,等.地震灾区生态治理初期土壤抗蚀性特征:以汶川地震典型区为例[J].山地学报, 2018, 36(1): 74-82.