

网络出版时间:2018-01-26 10:32

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.05.010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180126.0953.020.html>

## 色季拉山土壤抗蚀性空间差异性分析

聂晓刚<sup>a,b</sup>, 梁博<sup>a,b</sup>, 杨东升<sup>a,b</sup>, 喻武<sup>a,b</sup>, 万丹<sup>a,b</sup>, 方江平<sup>c</sup>

(西藏农牧学院 a 资源与环境学院, b 高寒水土保持研究中心, c 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000)

**[摘要]** 【目的】分析藏东南高寒气候条件下不同海拔土壤抗蚀性的空间差异,为西藏地区水土流失防治提供理论依据。【方法】以色季拉山土壤为研究对象,分析不同海拔和土层土壤抗蚀性指标的变化特征,采用主成分分析和土壤质量指数法,构建色季拉山土壤抗蚀性综合评价模型,并采用该模型对色季拉山 3 200~4 600 m 区域土壤抗蚀性强弱进行研究。【结果】在色季拉山海拔 3 200~4 600 m 区域,除团聚体破坏率、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤体积质量外,其余土壤抗蚀性指标均随海拔升高总体呈先增大后减小再缓慢增大的趋势。以变异系数评价色季拉山不同土层土壤抗蚀性的空间差异,土壤团粒类指标在海拔 4 200~4 600 m 和 3 200~3 600 m 区域的变异系数分别为 23.02%~123.54%和 0.85%~19.58%;土壤基本物理指标的变异系数在海拔 3 600 m 区域出现最大值,而变异系数最小值出现在海拔 4 200~4 600 m 区域;有机胶体类指标即有机质含量的变异系数则在海拔 4 600 m 区域出现最小值,为 17.86%,在海拔 4 200 m 区域出现最大值,为 93.63%。【结论】通过构建土壤抗蚀性综合评价模型,得出色季拉山不同海拔区域土壤综合抗蚀性强弱顺序为 3 600 m>3 800 m>3 400 m>4 400 m>4 000 m>4 600 m>3 200 m>4 200 m。

**[关键词]** 西藏;色季拉山;海拔;土壤抗蚀性;空间差异性;主成分分析

**[中图分类号]** S157.1

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1671-9387(2018)05-0069-08

## Spatial differentiation of soil anti-erodibility in the Sejila Mountain

NIE Xiaogang<sup>a,b</sup>, LIANG Bo<sup>a,b</sup>, YANG Dongsheng<sup>a,b</sup>,

YU Wu<sup>a,b</sup>, WAN Dan<sup>a,b</sup>, FANG Jiangping<sup>c</sup>

(a Institute of Resources and Environment, b Research Center of Soil and Water Conservation in Alpine-cold Region,

c Institute of Plateau Ecology, Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Tibet, Linzhi 860000, China)

**Abstract:** 【Objective】The spatial variations of soil anti-erodibility in alpine-cold region in southeast Tibet were analyzed to provide basis for the prevention and treatment of soil erosion in Tibet. 【Method】The changes of soil anti-erodibility index at different altitudes and layers were analyzed and a comprehensive evaluation model was built using the principal component analysis and soil quality index method. The model was then used to evaluate soil anti-erodibility at the elevation of 3 200—4 600 m in the Sejila Mountain. 【Result】At the altitude of 3 200—4 600 m, except for aggregate destruction rate, non-capillary porosity, capillary and bulk density, other soil anti-erodibility indicators increased first followed by decrease and slow increase. (2) When using variation coefficient to evaluate the spatial differentiation of anti-erodibility in different layers, the variation coefficients of soil aggregate indicator of 4 200—4 600 and 3 200—3 600 were 23.02%—123.54 and 0.85%—19.58%, respectively. The variation coefficients of basic physical indexes

**[收稿日期]** 2017-03-24

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(41461063);西藏自治区科技厅自然科学基金项目(2015ZR-13-36);西藏农牧学院研究生创新计划项目(YJS2017-12)

**[作者简介]** 聂晓刚(1991—),男,陕西宝鸡人,在读硕士,主要从事高寒区土壤抗蚀性评价研究。E-mail:765726793@qq.com

**[通信作者]** 喻武(1981—),男,湖南益阳人,副教授,硕士生导师,主要从事高寒区土壤侵蚀机理及其恢复研究。

E-mail:yuwu4270@126.com

of soil peaked at 3 600 m with the lowest at 4 200—4 600 m. The lowest organic colloid index was 17.86% at 4 600 m and the highest was 93.63% at 4 200 m. 【Conclusion】 Based on the built comprehensive evaluation model, the order of anti-erodibility was 3 600 m > 3 800 m > 3 400 m > 4 400 m > 4 000 m > 4 600 m > 3 200 m > 4 200 m.

**Key words:** Tibet; Sejila Mountain; altitude; soil anti-erodibility; spatial differentiation; principal component analysis

土壤抗蚀性是结合土壤物理、化学性质和生物酶等多重因素于一体,用以体现土壤抵抗水的分散和悬浮能力的综合性因素指标体系,是评定土壤抗蚀力的重要参数之一<sup>[1]</sup>。土壤抗蚀性的大小除了与土壤理化性质等内在因素有关外,还受植被类型等外部因素的影响<sup>[2]</sup>。气候、地形、植被等的不同,形成了各种类型的土壤及环境条件,导致土壤性质存在明显的差异,称之为土壤空间差异,而研究不同尺度上土壤的空间差异,不但对了解土壤的形成过程、结构和功能具有重要的理论意义<sup>[3]</sup>,而且对了解土壤抗蚀性的空间格局等也具有重要的参考价值。海拔作为高山地区主要的自然环境特征指标,是影响区域光、热、水、气的环境因子之一,并直接影响着生境的气候生态学特征,通过气候环境的改变使土壤物理、化学和生物等性质发生变化,表现为不同的垂直地带土壤的有机质矿化程度、土壤机械组成以及微生物数量<sup>[4]</sup>等的不同,从而进一步影响植物群落结构和类型的演变<sup>[5-6]</sup>,最终引起生态系统功能的改变<sup>[7]</sup>。

青藏高原是世界上中低纬度面积最大的高海拔冻土区<sup>[8-9]</sup>,其能量和水循环对亚洲季风系统的形成和演化具有十分重要的作用<sup>[10]</sup>。近年来,随全球气候变化和人类活动的影响,青藏高原土壤物理过程、水文循环、热量循环等过程变化剧烈<sup>[11]</sup>,生态环境破坏严重,如何加强青藏高原国家生态安全屏障建设,减少水土流失,已成为该地区重要的生态环境热点问题之一<sup>[12]</sup>。色季拉山作为青藏高原东南部典型的山脉体系,其植被、土壤类型沿海拔高度的升高有明显的分布规律,是研究高寒区土壤物质分布特征与植被、土壤、气候响应的天然实验室<sup>[13]</sup>。目前关于土壤抗蚀性的研究主要集中在中低海拔地区,而针对高海拔寒区土壤抗蚀性的研究相对较少。为此,本试验以色季拉山西坡 3 200~4 600 m 海拔土壤为研究对象,借鉴国内外常用的土壤抗蚀性评价指标,分析不同海拔土壤抗蚀性的空间差异特征,以期以色季拉山为代表的藏东南高原山地水土流失的预防治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

色季拉山位于青藏高原东南部的林芝地区(94°28′~94°51′E, 29°21′~29°50′N),海拔 2 200~5 300 m<sup>[13]</sup>,年平均日照时数 1 150 h<sup>[14]</sup>,年均气温 -0.7 °C,极端最低温 -31.6 °C(1991 年 1 月),极端最高温 24 °C(2000 年 7 月);整个山脉呈东北-西南走向,地势西高东低。年降水总量 600~1 000 mm,且约 75%的降水量集中在 5—10 月份<sup>[15]</sup>。随着海拔升高,色季拉山垂直气候带明显,从山脚到山顶分别为山地温带—亚高山寒温带—高山寒带。在气候带影响下,山体植被生长茂盛,类型丰富多样且垂直谱带明显,从山顶到山脚分别为山顶冻原稀疏植被—亚高山寒带灌丛、草甸—亚高山寒温带暗针叶林—山地温带暗针叶林—山地暖温带针阔混交林、松林。山体土壤类型多种多样,垂直分布谱带明显而完整<sup>[16]</sup>。

### 1.2 土壤样品的采集与处理

2016 年 9 月中旬,沿 318 国道采集色季拉山西坡海拔 3 200~4 600 m 土壤土样。按照典型选样方法,每 2 00 m 一个梯度,沿不同海拔梯度分别选取样点,每个样点按照五点法设置,分别采集 0~10, 10~20, 20~30 cm 土层环刀土和原状土,带回实验室用于土壤理化性质测定。各采样点周边基本特征详见表 1。

### 1.3 土壤抗蚀性指标体系

为揭示不同空间土壤抗蚀性的差异及土壤各因子对抗蚀性的影响,本研究采用指标体系法,从土壤的内涵出发,坚持指标灵敏性、独立性和协调性准则<sup>[19-20]</sup>,对色季拉山土壤抗蚀性进行定量评价。本研究共选择 3 类 11 个土壤理化指标作为土壤抗蚀性评价指标。

1) 土壤团粒类指标。包括粒径 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量( $X_1$ )、粒径 > 0.5 mm 水稳性团聚体含量( $X_2$ )、粒径 > 0.25 mm 非水稳性团聚体含量( $X_3$ )、土壤水稳性指数( $X_4$ )、团聚体平均质量直径

( $X_5$ )、团聚体破坏率( $X_6$ )。

水含量( $X_{10}$ )。

2)土壤基本物理类指标。包括非毛管孔隙度

3)有机胶体类指标。有机质含量( $X_{11}$ )。

( $X_7$ )、毛管孔隙度( $X_8$ )、土壤体积质量( $X_9$ )、吸湿

表 1 西藏色季拉山西坡土壤采样点的基本特征

Table 1 Basic characteristics of sampling points in west slope of the Sejila Mountain

海拔/m Altitude	经纬度 Longitude and latitude	坡度(°) Slope angle	坡向 Slope direction	主要植被类型 Main plant types	植被盖度 Vegetation coverage	土壤类型 Soil type	气候类型 Climate type
3 200	N 29°33'58.23", E 94°32'20.26"	30	东北 NE	人工林芝云杉林 <i>Picea likiangensis</i> var. <i>Linzhiensis</i> plantation	0.80	山地棕壤 Mountain brown soil	山地温带 Mountain temperate zone
3 400	N 29°34'03.33", E 94°33'38.37"	32	东南 SE	川滇高山栎、林芝云杉 <i>Quercus aquifolioides</i> , <i>Picea likiangensis</i> var. <i>Linzhiensis</i>	0.80	山地棕壤 Mountain brown soil	山地温带 Mountain temperate zone
3 600	N 29°33'26.61", E 94°33'31.67"	37	东北 NE	西藏箭竹、林芝云杉 <i>Fargesia macclureana</i> , <i>Picea likiangensis</i> var. <i>Linzhiensis</i>	0.85	山地棕壤 Mountain brown soil	山地温带 Mountain temperate zone
3 800	N 29°33'45.01", E 94°34'13.03"	40	西南 SW	急尖长苞冷杉、林芝云杉 <i>Abies georgei</i> var. <i>Smithii</i> , <i>Picea likiangensis</i> var. <i>Linzhiensis</i>	0.70	山地酸性棕壤 Mountain acid brown soil	亚高山寒温带 Sub-alpine cold temperate zone
4 000	N 29°34'41.61", E 94°35'19.17"	36	西南 SW	急尖长苞冷杉、林芝云杉 <i>Abies georgei</i> var. <i>Smithii</i> , <i>Picea likiangensis</i> var. <i>Linzhiensis</i>	0.65	山地酸性棕壤 Mountain acid brown soil	亚高山寒温带 Sub-alpine cold temperate zone
4 200	N 29°36'40.66", E 94°37'02.76"	27	东南 SE	急尖长苞冷杉、雪层杜鹃 <i>Abies georgei</i> var. <i>Smithii</i> , <i>Rhododendron nivale</i>	0.80	山地淋溶灰化土 Mountain eluviated podzolic soil	亚高山寒温带 Sub-alpine cold temperate zone
4 400	N 29°37'39.66", E 94°38'07.55"	31	西南 SW	散鳞杜鹃、雪层杜鹃 <i>Rhododendron bulu</i> Hutch., <i>Rhododendron nivale</i>	0.85	亚高山灌丛草甸土 Sub-alpine shrub meadow soil	高山寒带 Alpine frigid zone
4 600	N 29°36'08.38", E 94°39'00.27"	30	西南 SW	散鳞杜鹃、扫帚岩须 <i>Rhododendron bulu</i> Hutch., <i>Cassiope fastigiata</i>	0.70	亚高山灌丛草甸土 Sub-alpine shrub meadow soil	高山寒带 Alpine frigid zone

注:研究区根据海拔可分为山地温带(3 200~3 600 m)、亚高山寒温带(3 800~4 200 m)、高山寒带(4 400~4 600 m)<sup>[16-18]</sup>。

Note: According to elevation, the Sejila Mountain can be divided into mountain temperate zone (3 200—3 600 m), subalpine cold temperate zone (3 800—4 200 m) and alpine frigid zone (4 400—4 600 m)<sup>[16-18]</sup>.

1.4 指标测定及计算方法

采用文献[21-22]的方法测定粒径>0.25 mm 水稳性团聚体含量( $X_1$ )、粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量( $X_2$ )、粒径>0.25 mm 非水稳性团聚体含量( $X_3$ )。采用环刀法<sup>[23]</sup>测定非毛管孔隙度( $X_7$ )、毛管孔隙度( $X_8$ )、土壤体积质量( $X_9$ )、吸湿水含量( $X_{10}$ )。采用文献[24]的方法测定有机质含量。

土壤水稳性指数( $X_4$ )采用静水崩解法测定,其计算公式<sup>[25]</sup>为:

$$X_4 = (\sum P_i K_i + P_j) / A$$

式中: $P_i$ 为第*i*分钟内分散的土壤颗粒数; $K_i$ 为第*i*分钟的校正系数; $P_j$ 为10 min内未分散的土壤颗粒数; $A$ 为供试土壤颗粒总数; $i$ 为时间, $i = 1, 2, \dots, 10$  min。

团聚体平均质量直径( $X_5$ )采用邱丽萍等<sup>[26]</sup>方法的测定,其计算公式为:

$$X_5 = \sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i$$

式中: $\bar{X}_i$ 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(%)。

团聚体破坏率( $X_6$ )采用土壤团粒分析法测定,其计算公式<sup>[27]</sup>为:

$$X_6 = (\text{粒径} > 0.25 \text{ mm 团聚体干筛分析值} - \text{粒径} > 0.25 \text{ mm 团聚体湿筛分析值}) / \text{粒径} > 0.25 \text{ mm 团聚体干筛分析值} \times 100\%$$

1.5 数据的处理

以不同土层各抗蚀性指标的平均值和变异系数描述色季拉山不同海拔区域土壤抗蚀性的空间变异性。利用 SPSS 17.0、Origin 9.0 软件和单因素方差(ANOVA)分析进行图形制作和数据处理,利用主成分分析法选取抗蚀性最优指标,最后通过构建评价模型分析比较色季拉山不同海拔区域土壤抗蚀性的变化规律。

## 2 结果与分析

### 2.1 色季拉山不同海拔区域土壤抗蚀性指标的空间分异特征

2.1.1 海拔 3 200~3 600 m 山地温带土壤 由表 2 可以看出,在 6 个土壤团粒类指标中,除团聚体破坏率( $X_6$ )外,其余指标均随着海拔上升总体表现出逐渐增大的趋势,其中在海拔为 3 200~3 400 m 时增

幅最大;团聚体破坏率( $X_6$ )表现为 3 200 m 海拔最大,3 600 m 海拔次之,3 400 m 海拔最小,这可能与研究区人为干扰强度相关。土壤基本物理指标随海拔变化表现复杂,其中非毛管孔隙度( $X_7$ )和毛管孔隙度( $X_8$ )随海拔的增加呈先增后减的趋势;土壤体积质量( $X_9$ )则随海拔增加而逐渐减小,吸湿水含量( $X_{10}$ )随海拔升高逐渐增加。有机胶体类指标有机质含量( $X_{11}$ )则随海拔的升高而逐渐增大。

表 2 西藏色季拉山海拔 3 200~3 600 m 山地温带土壤的抗蚀性

Table 2 Soil-erodibility indexes at 3 200-3 600 m altitude of the Sejila Mountain

海拔/m Altitude	土层/cm Layer	$X_1/\%$	$X_2/\%$	$X_3/\%$	$X_4/\%$	$X_5/\%$	$X_6/\%$	$X_7/\%$	$X_8/\%$	$X_9/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$X_{10}/\%$	$X_{11}/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
3 200	0~10	62.26	51.68	81.93	21.80	2.64	24.01	1.80	44.49	1.17	2.67	89.14
	10~20	83.30	55.30	68.38	18.60	2.22	21.80	2.73	47.70	1.22	2.01	19.29
	20~30	64.68	38.80	67.70	13.60	1.79	14.46	2.50	43.23	1.01	1.67	25.31
	平均值 Mean	70.08	48.59	72.67	18.00	2.22	20.09	2.34	45.14	1.13	2.12	44.58
	变异系数 CV/%	16.43	17.85	11.05	22.96	19.17	24.89	20.67	5.11	9.68	24.02	86.83
3 400	0~10	88.50	70.08	91.89	23.20	2.42	4.04	2.76	51.53	0.77	3.80	66.39
	10~20	86.68	69.18	91.35	15.80	2.14	5.11	2.98	58.01	1.01	4.14	45.10
	20~30	88.60	71.32	92.22	25.80	2.59	3.58	2.32	48.57	0.92	3.10	64.31
	平均值 Mean	87.93	70.19	91.82	21.60	2.38	4.24	2.69	52.70	0.90	3.68	58.60
	变异系数 CV/%	1.23	1.53	0.48	24.02	9.53	18.50	12.51	9.16	13.47	14.41	20.03
3 600	0~10	88.36	78.54	95.23	33.40	3.00	4.02	1.32	39.93	0.39	9.40	280.84
	10~20	87.86	70.94	94.43	22.86	2.17	6.43	1.65	19.12	0.32	6.28	176.94
	20~30	86.90	66.02	91.54	12.80	2.10	8.75	2.21	59.12	0.73	3.67	50.25
	平均值 Mean	87.71	71.83	93.73	23.02	2.42	6.40	1.73	39.39	0.48	6.45	169.34
	变异系数 CV/%	0.85	8.78	2.07	44.75	20.66	36.96	26.06	50.79	45.69	44.48	68.19

2.1.2 海拔 3 800~4 200 m 亚高山寒温带土壤 由表 3 可知,当海拔为 3 800~4 200 m 时,在研究区土壤团粒类指标中,除团聚体破坏率( $X_6$ )随海拔上升呈增加趋势之外,其余指标总体均呈降低趋势。在海拔为 3 800~4 200 m 时,土壤基本物理类指标变化较为复杂,随海拔高度增加,非毛管孔隙度

( $X_7$ )先降后升,毛管孔隙度( $X_8$ )先增后降,二者变化规律相反,这主要与土壤表层植被根系的穿插、切割作用有关;土壤体积质量( $X_9$ )逐渐增加,吸湿水含量( $X_{10}$ )逐渐减小。对有机胶体类指标而言,有机质含量则随海拔上升总体呈减小趋势。

表 3 西藏色季拉山海拔 3 800~4 200 m 亚高山寒温带土壤的抗蚀性

Table 3 Soil-erodibility index at 3 800-4 200 m altitude of the Sejila Mountain

海拔/m Altitude	土层/cm Layer	$X_1/\%$	$X_2/\%$	$X_3/\%$	$X_4/\%$	$X_5/\%$	$X_6/\%$	$X_7/\%$	$X_8/\%$	$X_9/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$X_{10}/\%$	$X_{11}/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
3 800	0~10	88.20	81.68	94.09	27.40	3.50	5.26	2.34	43.70	0.42	6.84	242.95
	10~20	81.12	69.26	86.87	22.00	2.53	6.26	2.61	59.90	0.71	4.56	89.05
	20~30	76.42	60.42	80.66	18.60	2.14	6.62	2.92	50.89	0.77	4.01	62.54
	平均值 Mean	81.91	70.45	87.21	22.67	2.72	6.05	2.62	51.50	0.63	5.14	131.51
	变异系数 CV/%	7.24	15.16	7.71	19.58	25.72	11.65	11.06	15.76	29.55	29.21	74.07
4 000	0~10	68.28	55.04	90.52	18.60	1.46	26.43	2.11	48.06	0.76	4.50	40.17
	10~20	66.60	39.80	73.76	15.40	1.03	7.43	2.24	56.40	1.15	3.78	40.77
	20~30	62.40	37.18	64.50	10.60	0.86	3.25	2.71	51.02	1.15	2.26	17.75
	平均值 Mean	65.76	44.01	76.26	14.87	1.12	12.37	2.35	51.83	1.02	3.51	32.90
	变异系数 CV/%	4.61	21.92	17.29	27.08	27.69	99.87	13.41	8.16	22.08	32.55	39.88
4 200	0~10	80.02	67.06	87.95	17.40	2.88	6.92	2.43	40.28	0.68	3.40	74.89
	10~20	30.14	16.50	71.19	5.00	0.43	45.28	2.08	39.82	1.28	2.06	19.53
	20~30	25.00	10.72	55.08	5.00	0.31	64.88	2.94	43.66	1.30	2.07	13.74
	平均值 Mean	45.05	31.43	71.41	9.13	1.21	39.03	2.48	41.25	1.09	2.51	36.05
	变异系数 CV/%	67.46	98.62	23.02	78.38	120.20	75.54	17.42	5.08	32.42	30.71	93.63

2.1.3 海拔 4 400~4 600 m 高山寒带土壤 由表 4 可知,当海拔为 4 400~4 600 m 时,在土壤团粒类指标中,随海拔上升,除粒径 >0.25 mm 非水稳性土壤团聚体含量( $X_3$ )、土壤水稳性指数( $X_4$ )和土壤团聚体平均质量直径( $X_5$ )呈降低趋势外,其余指标均

呈增加趋势,这主要与冻融作用有关。土壤基本物理类指标中除土壤体积质量( $X_9$ )随海拔上升呈增加趋势外,其余指标均呈减小趋势。有机质含量随海拔的升高呈递减趋势。

表 4 西藏色季拉山海拔 4 400~4 600 m 高山寒带土壤的抗蚀性  
Table 4 Soil-erodibility index at 4 400-4 600 m altitude of the Sejila Mountain

海拔/m Altitude	土层/cm Layer	$X_1/\%$	$X_2/\%$	$X_3/\%$	$X_4/\%$	$X_5/\%$	$X_6/\%$	$X_7/\%$	$X_8/\%$	$X_9/$ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	$X_{10}/\%$	$X_{11}/$ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
4400	0~10	79.88	71.58	84.69	29.80	3.33	5.02	2.38	46.79	0.79	3.60	84.47
	10~20	66.26	34.98	84.10	22.40	0.74	6.57	2.13	54.52	0.75	3.46	49.78
	20~30	43.22	21.30	70.92	17.00	0.62	48.97	2.07	47.57	0.72	3.48	73.17
	平均值 Mean	63.12	42.62	79.90	23.07	1.56	20.19	2.19	49.63	0.75	3.51	69.14
	变异系数 CV/%	29.36	61.00	9.74	27.86	97.94	123.54	7.50	8.58	4.66	2.16	25.59
4600	0~10	58.42	23.38	87.20	38.00	0.43	33.01	1.91	45.40	0.81	3.50	75.48
	10~20	59.08	53.96	80.84	17.80	2.33	26.92	1.64	34.85	0.85	3.21	63.55
	20~30	74.22	69.56	64.21	5.00	3.15	35.59	2.33	55.41	0.88	3.73	52.66
	平均值 Mean	63.91	48.97	77.42	20.27	1.97	31.84	1.96	45.22	0.85	3.48	63.90
	变异系数 CV/%	13.99	47.97	15.33	82.09	70.83	13.98	17.74	22.74	4.15	7.49	17.86

2.2 色季拉山不同土层土壤抗蚀性指标的空间分布特征

不同土层由于生物、淋溶作用及土壤本身性质的影响,土壤抗蚀性能也存在明显的空间差异。由表 2~4 可以看出,在 0~30 cm 土层,土壤抗蚀性指标随土层深度增加变化规律不明显,且变异系数差异较大,其中土壤团粒类指标粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体含量、粒径 >0.5 mm 水稳性团聚体含量、粒径 >0.25 mm 非水稳性团聚体含量、水稳性指数、团聚体平均质量直径、团聚体破坏率的变异系数分别为 0.85%~67.46%, 1.53%~98.63%, 0.48%~23.02%, 19.58%~82.09%, 9.53%~120.2%和 11.65%~123.54%;土壤物理类指标非毛管孔隙度、毛管孔隙度、土壤体积质量、吸湿水含量的

变异系数分别为 7.50%~26.06%, 5.08%~50.79%, 4.15%~45.69%和 2.16%~44.48%;土壤有机胶体类指标有机质含量的变异系数为 17.86%~93.63%。

2.3 色季拉山土壤抗蚀性最优指标选取及评价模型的建立

2.3.1 最优指标的选取 由于各抗蚀性指标间信息重叠,相互间又有关联,因此采用主成分分析法,在不损失较多信息的基础上以较少主成分来代替原有指标,通过构建土壤抗蚀性评价模型,并计算综合主成分值<sup>[28]</sup>,以评价色季拉山西坡不同海拔高度土壤的抗蚀性能。本研究选取 11 个土壤抗蚀性指标,分别对 0~10, 10~20, 20~30 cm 土层进行主成分分析,结果见表 5。

表 5 西藏色季拉山不同土层土壤抗蚀性指标因子旋转后的荷载和累计方差贡献率

Table 5 Load and cumulative variance contribution rate after factor rotating of soil anti-erodibility index at different soil layers

土层/cm Layer	主成分 PCA	指标因子荷载 Load of index factor										累积方差 贡献率/% Cumulative variance contribution rate	
		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$		$X_{11}$
0~10	1	0.796	0.922	0.215	-0.454	0.946	-0.891	0.355	-0.218	-0.335	0.238	0.340	52.08
	2	0.572	0.342	0.924	0.499	0.022	-0.345	-0.160	-0.064	-0.868	0.822	0.663	76.80
	3	0.125	-0.030	-0.047	-0.332	-0.212	-0.054	0.855	0.865	0.167	-0.471	-0.610	88.41
10~20	1	0.573	0.503	0.838	0.734	0.188	-0.848	-0.154	-0.031	-0.842	0.890	0.742	57.15
	2	0.717	0.854	0.253	0.431	0.957	-0.240	0.319	-0.112	-0.218	0.232	0.284	81.21
	3	0.281	0.037	-0.141	0.051	-0.056	-0.420	0.874	0.956	0.445	-0.252	-0.569	90.61
20~30	1	0.885	0.915	0.515	0.069	0.836	-0.714	0.070	0.750	-0.309	0.414	0.148	57.46
	2	0.215	0.279	0.439	0.302	0.262	0.154	-0.715	0.447	-0.864	0.814	0.898	73.52
	3	0.401	0.210	0.644	0.939	0.087	-0.594	-0.116	-0.286	-0.240	-0.060	0.334	86.47

由表 5 可知,不同土层各提炼出 3 个主成分,其累积方差贡献率分别为 88.41%, 90.61% 和 86.47%,信息损失量为 9.39%~13.53%,满足主成分分析的要求。但由于不同土层各指标对主成分贡献大小不同,造成指标评价体系的垂直空间差异。由表 5 可以看出,在 0~10 cm 土层,第 1 主成分中粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量、土壤团聚体平均质量直径、团聚体破坏率的荷载值较大,说明研究区 0~10 cm 土层粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量、土壤团聚体平均质量直径指标值越大,团聚体破坏率越小,抗蚀性越强;第 2 主成分主要解释了粒径>0.25 mm 土壤非水稳性团聚体含量、土壤体积质量、吸湿水含量等信息;第 3 主成分主要解释了非毛管孔隙度、毛管孔隙度信息。在 10~20 cm 土层,第 1 主成分中粒径>0.25 mm 土壤非水稳性团聚体含量、团聚体破坏率、土壤体积质量、吸湿水含量的荷载绝对值较高,说明 10~20 cm 土层粒径>0.25 mm 非水稳性团聚体含量、吸湿水含量越高,团聚体破坏率、土壤体积质量越小,土壤抗蚀性越强;第 2 主成分中,粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量、土壤团聚体平均质量直径等指标的荷载值较大;第 3 主成分主要解释了非毛管孔隙度、毛管孔隙度等信息。在 20~30 cm 土层,第 1 主成分主要解释了粒径>0.25 mm 水稳性团聚体含量、粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量、土壤团聚体平均质量直径等信息,表明 20~30 cm 土层中粒径>0.25 mm 水稳性团聚体含量、粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量、土壤团聚体平均质量直径越大,土壤抗蚀性越强;第 2 主成分主要解释了土壤体积质量、吸湿水含量、有机质含量等信息;第 3 主成分主要解释了土壤水稳性指数的信息。

2.3.2 土壤抗蚀性综合评价模型的构建 以每个主成分对应特征值占所提取主成分总特征值的比重作为权重,得到综合主成分模型为:

$$FQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_i。$$

式中: $W_i$ 、 $F_i$  分别为第  $i$  个因子的权重和隶属度, $n$  为参评因子数<sup>[29]</sup>。

由上述模型最终得到 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤抗蚀性能的评价模型分别为:

$$Y_{0\sim 10} = 0.589Y_1 + 0.280Y_2 + 0.131Y_3,$$

$$Y_{10\sim 20} = 0.631Y_1 + 0.265Y_2 + 0.104Y_3,$$

$$Y_{20\sim 30} = 0.664Y_1 + 0.186Y_2 + 0.150Y_3。$$

式中: $Y_1$ 、 $Y_2$  和  $Y_3$  分别表示不同土层第 1, 2, 3 主成

分值。

据此计算色季拉山不同海拔土壤抗蚀性能的综合主成分值为:

$$Y = Y_{0\sim 10} + Y_{10\sim 20} + Y_{20\sim 30}。$$

通过综合主成分评价模型,可以出色季拉山不同海拔土壤综合抗蚀性强弱顺序为:3 600 m(土壤抗蚀性能的综合主成分值为 1.94,下同)>3 800 m(1.79)>3 400 m(1.59)>4 400 m(-0.24)>4 000 m(-0.50)>4 600 m(-1.01)>3 200 m(-1.33)>4 200 m(-2.23)。

### 3 讨论与结论

不同海拔高度由于气候条件、植被及土壤类型的差异,造成土壤理化性质的不同,从而使其土壤抗蚀性能也具有明显的空间差异。本研究结果表明,在色季拉山西坡海拔 3 200~4 600 m 区域,用于土壤抗蚀性能评价的土壤理化指标中,除土壤体积质量、团聚体破坏率及毛管孔隙度、非毛管孔隙度外,其余土壤抗蚀性指标值总体随海拔上升表现出先增大后减小再缓慢增大的空间分异特征。具体可分为 3 个变化区间,即当海拔为 3 200~3 600 m 时,随海拔升高而增加;当海拔为 3 600~4 200 m 时,随海拔升高而减小;当海拔为 4 200~4 600 m 时,随海拔升高而缓慢增加。

本研究结果表明,在色季拉山西坡海拔 3 200~3 600 m 区域,土壤抗蚀性随海拔的升高而增加,这与廖超林等<sup>[30]</sup>的研究结果相一致,主要由于该海拔区间水热条件充足,植被类型丰富,随海拔上升人为扰动减少,植被根系的缠绕、固结对土壤的改良作用明显。而在海拔 3 600~4 200 m 区域,随海拔的升高土壤抗蚀性能逐渐减弱,这主要与不同研究区间气候、土壤及植被类型等的差异较大有关。研究区地处青藏高原东南部,区内随着海拔增高,气候从亚高山寒温带向高山寒带过渡,急尖长苞冷杉、林芝云杉等针叶物种所占比例增多,在低温潮湿条件下,随着表层枯落物分解,有机酸增多,腐殖质、铁铝氧化物淋溶作用增强,形成氧化硅相对富集的灰化层,导致土壤结构稳定性降低,抗蚀性能减弱。当海拔为 4 200~4 600 m 时,随海拔增加土壤抗蚀性总体增大,而这与干冷气候条件下土壤微生物活动受到限制及表层土壤有机质分解缓慢而积累较易有关。苟小林等<sup>[31]</sup>的研究发现,季节性冻融会促进土壤可溶性有机碳的淋溶,在非生长季节最高淋溶输入量可达 7.30 kg/hm<sup>2</sup>,从而对深层土壤理化性质有明显

改良,土壤结构稳定性、抗蚀性能增强。

本研究中,比较色季拉山土壤抗蚀性指标的空间变异系数可以发现,在海拔 3 400~3 800 m 区域,土壤团粒类指标的变异系数相对较低,而在海拔 3 600 m 区域土壤基本物理类指标的变异系数相对较高;在海拔 4 200~4 600 m 区域,土层间土壤团粒类指标变异系数较高,而土壤基本物理类指标的变异系数却相对较小;有机胶体类指标有机质含量的变异系数则分别在海拔 4 600 和 4 200 m 处出现最小值和最大值。

主成分分析发现,色季拉山不同土层间描述土壤抗蚀性的最优指标存在较大差异,在 0~10 cm 土层,以土壤团聚体平均质量直径、团聚体破坏率和粒径>0.5 mm 水稳性团聚体含量 3 个指标表现最好;在 10~20 cm 土层,土壤吸湿水含量、体积质量和粒径>0.25 mm 非水稳性土壤团聚体含量 3 个指标具有较强的代表性;在 20~30 cm 土层,粒径>0.25 mm 水稳性团聚体含量、粒径>0.5 mm 水稳性土壤团聚体含量、团聚体平均质量直径 3 个指标表现出较好的评价性能。

本研究构建了色季拉山不同海拔区域土壤抗蚀性综合评价模型,由其可得不同海拔高度下土壤抗蚀性由强到弱依次表现为 3 600 m>3 800 m>3 400 m>4 400 m>4 000 m>4 600 m>3 200 m>4 200 m。

#### [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] Cotler H, Ortega-Larrocea M P. Effects of land use on soil erosion in a tropical dry forest ecosystem, Chamela watershed, Mexico [J]. *Catena*, 2006, 65(2): 107-117.

[3] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 945-950.  
Wang Z Q, Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 945-950.

[4] Biederbeck V O, Curtin D, Bouman O T, et al. Soil microbial and biochemical properties after ten years of fertilization with urea and anhydrous ammonia [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, 76(1): 7-14.

[5] 黄建辉. 物种多样性的空间格局及其形成机制初探 [J]. *生物多样性*, 1994, 48(2): 103-107.  
Huang J H. The spatial pattern of species diversity and its

forming mechanism [J]. *Biodiversity Science*, 1994, 48(2): 103-107.

- [6] Begon M, Harper J L, Townsend C R. *Ecology: individuals populations and communities* [M]. 2nd ed. Boston: Blackwell Scientific Publications, 2000.
- [7] 黄建辉, 白永飞, 韩兴国. 物种多样性与生态系统功能: 影响机制及有关假说 [J]. *生物多样性*, 2001, 9(1): 1-7.  
Huang J H, Bai Y F, Han X G. Effects of species diversity on ecosystem functioning: mechanisms and hypotheses [J]. *Biodiversity Science*, 2001, 9(1): 1-7.
- [8] 杨梅学, 姚檀栋, 何元庆. 青藏高原土壤水热分布特征及冻融过程在季节转换中的作用 [J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 553-558.  
Yang M X, Yao C D, He Q Y. The role of soil moisture-energy distribution and melting-freezing processes on seasonal shift in Tibetan plateau [J]. *Mountain Research*, 2002, 20(5): 553-558.
- [9] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q, et al. *China's permafrost* [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [10] 赵勇, 钱永甫. 青藏高原地表热力异常与我国江淮地区夏季降水的关系 [J]. *大气科学*, 2007, 31(1): 145-154.  
Zhao Y, Qian Y F. Relationships between the surface thermal anomalies in the Tibetan plateau and the rainfall in the Jianghuai area in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(1): 145-154.
- [11] 范继辉, 鲁旭阳, 王小丹. 藏北高寒草地土壤冻融循环过程及水热分布特征 [J]. *山地学报*, 2014, 32(4): 385-392.  
Fan J H, Lu X Y, Wang X D. The freezing-thawing processes and soil moisture-energy distribution in permafrost active layer, northern Tibet [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(4): 385-392.
- [12] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设 [J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.  
Sun H L, Zhen D, Yao C D, et al. Protection and construction of the national ecological security [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(1): 3-12.
- [13] 刘合满, 曹丽花, 张华, 等. 色季拉山山地酸性棕壤土壤氮素的分布特征 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 126-129.  
Liu H M, Cao L H, Zhang H, et al. Distribution characteristics of soil nitrogen in mountain acid brownsoil in Sejila Mountain, Tibet [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(10): 126-129.
- [14] 李为虎, 杨小林, 马和平. 色季拉山植物群落物种多样性研究 [J]. *西南林学院学报*, 2008, 28(5): 3-6.  
Li W H, Yang X L, Ma H P. Species diversity of sejila mountain forest plant community [J]. *Journal of Southwest Forestry College*, 2008, 28(5): 3-6.
- [15] 何建清, 张格杰, 张新军, 等. 西藏色季拉山土壤放线菌的区系 [J]. *山地学报*, 2008, 26(4): 503-508.  
He J Q, Zhang G J, Zhang X J, et al. Study on actinomycetes distribution of Serkyimla Mountain in Tibet [J]. *Journal of*

- Mountain Science, 2008, 26(4): 503-508.
- [16] 方江平. 西藏色季拉山土壤的性状与垂直分布 [J]. 山地学报, 1997(4): 228-233.  
Fang J P. Properties and vertical distribution of soil on Shergyl Mountain in Xizang [J]. Mountain Research, 1997(4): 228-233.
- [17] 张启翔. 中国观赏植物种质资源 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.  
Zhang Q X. China ornamental plant germplasm resources [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.
- [18] 柴勇, 樊国盛, 李乡旺, 等. 西藏色季拉山种子植物垂直带谱的划分与分布特点研究 [J]. 广西植物, 2004, 24(2): 107-112.  
Chai Y, Fan S G, Li X W, et al. Study on vertical distributional belts and their floristic characters of seed plants from Shegyla Mountains of Xizang(Tibet), China [J]. Guihaia, 2004, 24(2): 107-112.
- [19] 中国林业科学研究院林业研究所. 中国森林土壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.  
Forestry Science Research Institute of Forestry Research Institute of China. China's forest soil [M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [20] 水利水电部农村水利水土保持司. 水土保持实验规范 [S]. 北京: 水利水电部, 1988.  
Department of Water Resources and Hydropower Rural Water Conservancy Department of Soil and Water Conservation. Soil and water conservation experiment specification [S]. Beijing: The Ministry of Water Resources and Hydropower, 1988.
- [21] 刘国彬. 黄土高原土壤抗冲性研究及有关问题 [J]. 水土保持研究, 1997(S1): 91-101.  
Liu G B. Soil anti-scourability research and its perspectives in Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997(S1): 91-101.
- [22] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.  
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and section describes [M]. Beijing: China Standard Press, 1996.
- [23] 中国林业科学研究院林业研究所森林土壤研究实验室. LY/T 1215—1999 森林土壤水分-物理性质的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.  
China institute of forestry science research institute of forestry forest soil research laboratory. LY/T 1215—1999 Determination of forest soil water Physical properties [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1999.
- [24] 中国农学会. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
Chinese Association of Agricultural Science Societies. Soil agricultural chemical analysis methods [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000.
- [25] 史晓梅, 史东梅, 文卓立. 紫色土丘陵区不同土地利用类型土壤抗蚀性特征研究 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 63-66.  
Shi X M, Shi D M, Wen Z L. Study on soil anti-erodibility of different land utilization types in purple soil hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 63-66.
- [26] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布 [J]. 生态学报, 2006, 26(2): 364-372.  
Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after longterm fertilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(2): 364-372.
- [27] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降水径流的污染来源与排放特征研究进展 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 288-294.  
Li L Q, Yin C Q, He Q C, et al. Progress in research on the sources and characterization of urban rainfall runoff [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 288-294.
- [28] 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.  
Bai X M, Han Y Z, Guo H Q. Study on soil anti-erodibility of different vegetation restoration types in Guandi Mountain [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 79-84.
- [29] 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.  
Huang T, Yue X J, Ge X Z, et al. Effects of exogenous spermidine on photosynthesis of tomato seedlings under drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 141-147.
- [30] 廖超林, 何毓蓉, 徐佩. 泥石流源地土壤团聚体抗蚀特征研究: 以蒋家沟为例 [J]. 地球与环境, 2005, 33(4): 65-69.  
Liao C L, He Y R, Xu P. A Study on antierodibility of soil aggregates in debris flow source: a case study in Jiangjiagou [J]. Earth and Environment, 2005, 33(4): 65-69.
- [31] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响 [J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 201-210.  
Gou X L, Wu F Z, Yang W Q, et al. Effect of changes in seasonal freeze-thaw pattern on DOC loss from leaching in the alpine forest soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 201-210.