

青藏高原高寒草原与草甸土壤可蚀性的关键因子

魏宁¹, 于文竹², 安克俭², 魏霞², 赵恒策²

(1.西北农林科技大学 理学院, 陕西 杨陵 712100; 2.兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 探讨青藏高原高寒草原与草甸土壤可蚀性特征差异, 为高寒草原草甸土壤可蚀性研究提供重要参考。[方法] 选取 18 个变化因子作为草原与草甸土壤可蚀性评价的影响因子, 运用主成分分析、逐步回归分析以及通径分析法, 确定高寒草原与草甸土壤可蚀性的主要影响因素, 筛选青藏高原高寒草原与草甸土壤可蚀性的关键因子。[结果] 高寒草原土壤可蚀性主要受土壤粒径与团聚体特征两方面的影响, 高寒草甸土壤可蚀性主要受粒径孔隙分布、有机质、团聚体特征和渗透性能的影响; 高寒草原土壤可蚀性的关键因子为: 粉粒、团聚体平均质量直径 (MWD)、团聚体 > 2 mm 粒级结构体破坏率 ($PAD_{>2}$) 和 > 0.25 mm 粒级结构体破坏率 ($PAD_{>0.25}$), 草甸土壤可蚀性关键因子为: 粉粒、黏粒、 > 1 mm 粒级结构体破坏率 ($PAD_{>1}$) 和饱和导水率。[结论] 草原与草甸土壤主要在颗粒机械组成、有机质含量、含水量等方面表现出较大差异, 草甸土壤状态更适合于植被发育。

关键词: 高寒草原; 高寒草甸; 土壤可蚀性; 主成分分析; 通径分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)03-0087-07

中图分类号: S157

文献参数: 魏宁, 于文竹, 安克俭, 等. 青藏高原高寒草原与草甸土壤可蚀性的关键因子[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 87-93. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.013; Wei Ning, Yu Wenzhu, An Kejian, et al. Key factors of soil erodibility for alpine grassland and meadow in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 87-93.

Key Factors of Soil Erodibility for Alpine Grassland and Meadow in Qinghai-Tibet Plateau

Wei Ning¹, Yu Wenzhu², An Kejian², Wei Xia², Zhao Hengce²

(1. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The differences in soil erodibility between alpine grassland and alpine meadow in the Qinghai-Tibet Plateau were determined, in order to provide important reference for soil erodibility in alpine grassland. [Methods] 18 change factors were selected as potential influencing factors of soil erodibility for grassland and meadow. Principal component analysis, stepwise regression analysis, and path analysis were used to determine the main influencing factors of soil erodibility in order to select the key factors. [Results] The soil erodibility of alpine grassland was mainly affected by soil particle size and aggregate characteristics. Soil erodibility of alpine meadow was mainly affected by particle size and pore distribution, organic matter, aggregate characteristics, and permeability. The key factors of soil erodibility in alpine grassland were as follows: silt, mean weight diameter (MWD), aggregate size > 2 mm processing damage rate ($PAD_{>2}$), and aggregate size > 0.25 mm processing damage rate ($PAD_{>0.25}$). The key factors of soil erodibility in alpine meadow were as follows: silt, clay, aggregates size > 1 mm processing damage rate ($PAD_{>1}$), and soil saturated hydraulic conductivity. [Conclusion] Grassland and meadow soil showed great differences in particle mechanical composition, organic matter content, water content, and so on. The state of meadow soil

收稿日期: 2020-12-16

修回日期: 2021-01-29

资助项目: 兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及兰州大学中央高校基本科研业务费专项基金“全球变暖背景下青藏高原多年冻土区主要下垫面土壤侵蚀过程与侵蚀强度空间分布特征研究”(lzujbky-2018-kb01)。

第一作者: 魏宁(1981—), 女(汉族), 陕西省扶风县人, 硕士, 讲师, 主要从事应用数学与统计学方面的研究。Email: weining@nwfufu.edu.cn。

通讯作者: 魏霞(1980—), 女(汉族), 陕西省扶风县人, 博士后, 副教授, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、水文学及水资源学等方面的研究。Email: weix@lzu.edu.cn。

was more suitable for vegetation development.

Keywords: alpine grassland; alpine meadow; soil erodibility; principal component analysis; path analysis

土壤侵蚀是指土壤及其母质在水力、风力、重力和冻融等外营力作用下被破坏、搬离和沉积的过程,它会破坏土壤环境,降低土壤肥力和质量,造成生态环境恶化等一系列危害,如今土壤侵蚀俨然已成为影响生态环境的世界性灾害问题。土壤可蚀性是定义土壤是否容易遭受侵蚀影响的关键指标^[1],也可以直接判断土壤抵抗侵蚀能力的高低,反映了土壤对外营力剥蚀和搬运的敏感性与易损性^[2],是引起土壤流失的关键所在,也是定量研究土壤侵蚀的基础^[3]。由于土壤可蚀性不是结构简单的定向指标而是复杂的综合性因子^[4],因此受到多种影响因素的共同作用,只针对个别指标展开的土壤可蚀性评价往往较为片面^[5],因而评估土壤可蚀性的影响因素需涵盖全面。

近年来,国内外学者们对土壤侵蚀做了大量研究。有研究表明,土壤侵蚀受土壤理化性质的显著影响^[6-8],如土壤容重、机械组成、孔隙度和含水率等变化^[9],会引起土壤结构稳定性发生变化,进而影响土壤可蚀性强度^[10-13]。还有研究表明土壤有机质是土壤中各种物质的胶结剂^[13],可以显著降低土壤可蚀性^[14],并表明相关的生物措施可以有效提高土壤抗冲和抗蚀能力^[15-16]。陈佩岩^[17]、Levy G J 等^[18]、Six J 等^[19]在研究中表明,土壤团聚体的数量、特征可以反映土壤结构的稳定性和可侵蚀能力^[18],土壤团聚体的粒径分布及稳定性也可作为量化土壤可蚀性能力的间接指标,因此土壤团聚体稳定性大小和土壤侵蚀关系密切,可作为侵蚀的有效指示因子^[19]。

青藏高原位于中国西南部高寒地带,是三江源国家级自然保护区的主体部分,也是生态系统最敏感的地区之一,其任何变化对中国乃至亚洲、全球的气候都会产生深远的影响。目前,开展土壤可蚀性的研究区域主要分布于黄土高原地区^[20]及华中水土流失严重的地区,在青藏高原开展的相关研究并不常见,用于评价土壤可蚀性的因子也相对较少,所以导致在青藏高原开展的相关研究存在一定的区域性与局限性。近年来,随气候环境变化,青藏高原地区生态环境问题逐渐凸显,因水土流失导致草地退化的面积逐年增加,高寒草原与高寒草甸作为青藏高原草地的主要植被类型,研究其土壤侵蚀的关键因子对青藏高原草地保护具有重要意义^[21-22]。因此,本文以青藏高原高寒草原与草甸土壤为研究对象,结合野外调查与室内分析,运用主成分分析法从青藏高原高寒土壤可蚀性影响因子中确定土壤侵蚀的主要影响因素,在此基础上对各主成分进行逐步回归分析,剔除不显著与共线性

影响因子,筛选通过显著性检验的影响因子,然后经过通径分析计算来得出各因子与主成分的直接与间接影响,最终明确影响青藏高原草原与草甸表层土壤可蚀性的关键因子^[23],此研究将为青藏高原高寒土壤可蚀性研究提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域地处青藏高原中西部腹地,海拔 4 200~5 300 m,地势绵延起伏,四周由唐古拉山、昆仑山、巴颜格拉山和阿尼玛卿山脉构成新地形框架,被称为“世界第三极”。属于典型高寒半干旱气候,常年气温低于 0℃,空气稀薄,太阳辐射强且水热同期。受水热条件的影响,青藏高原主要植被类型为高寒草原和草甸,其中高寒草原的植被覆盖度较小、植物多样性也相对较少,主要为高寒干草原,草原占草地面积约 23.22%;高寒草甸面积分布广,物种丰富度较高,主要的草地亚类有高寒典型草甸草地、高寒沼泽草甸、高寒草原化草甸,草甸占草地面积约 76.77%^[21]。研究区土壤厚度不大且质地较粗,土粒松散黏度较低,养分贫瘠肥力不高,土地沙化严重,是水土流失的重灾区。

1.2 样品采集

于 2017 年 6 月和 9 月进行野外样品采集,在青藏高原中部沿海拔梯度选取具有植被代表性的采样点,分别选取典型高寒草原样点 20 个、典型高寒草甸样点 11 个,共计 31 个。表 1 介绍了各样点的情况。在每个样地使用环刀采集深度在 0—10 cm 的原状表层土壤,每个采样点设置 3 组重复,并使用土样袋收集土壤 1 kg 左右,用于容重、孔隙度、含水量等土壤孔隙特征的测定及土壤团聚体、土壤粒径分布等其他土壤理化性质的测定。

1.3 试验方法

采用环刀法测定土壤容重^[24],土壤含水量、土壤孔隙度及土壤饱和导水率的测定方法见赵恒策^[23]的研究。采用湿筛法^[25]分别测得各粒级团聚体含量,并由此计算得出各团聚体稳定性指标^[26-27]。采用激光粒度分析仪(型号为 Mastersizer 2000)测定土壤不同等级粒径含量并将土壤粒径等级划分为黏粒($< 2 \mu\text{m}$)、粉粒($2\sim 50 \mu\text{m}$)和砂粒($50\sim 2\ 000 \mu\text{m}$)。而土壤有机质含量则由浓硫酸—重铬酸钾外加热法测定。

表 1 采样点分布概况

编号	植被类型	经度	纬度	海拔/m	年均降雨/mm	年均温度/℃	编号	植被类型	经度	纬度	海拔/m	年均降雨/mm	年均温度/℃
1	草原	94.05934°E	35.65733°N	4 716	317.47	-6.09	17	草原	91.78939°E	33.09141°N	4 951	387.19	-5.74
2	草原	92.94828°E	34.94271°N	4 551	261.99	-5.94	18	草原	91.66879°E	33.01527°N	5 085	454.81	-7.66
3	草原	92.55338°E	34.3163°N	4 562	296.07	-4.77	19	草原	92.00285°E	33.03556°N	5 143	485.95	-8.21
4	草原	93.90205°E	35.50417°N	4 522	285.86	-4.78	20	草原	94.12437°E	35.71967°N	4 446	423.55	-3.38
5	草原	94.11859°E	35.04989°N	4 502	246.95	-5.35	21	草甸	91.99362°E	33.00811°N	5 117	477.60	-7.62
6	草原	94.42399°E	35.01715°N	4 368	266.00	-3.95	22	草甸	92.33385°E	34.08922°N	4 759	275.62	-6.98
7	草原	94.73147°E	34.93011°N	4 432	285.83	-4.38	23	草甸	93.03881°E	35.15305°N	4 698	323.39	-5.53
8	草原	96.59862°E	33.96722°N	4 663	437.32	-5.03	24	草甸	91.98992°E	33.0171°N	5 123	476.70	-7.83
9	草原	98.43044°E	34.83526°N	4 219	434.16	-2.20	25	草甸	92.90301°E	34.77832°N	4 684	437.32	-5.03
10	草原	99.5028°E	35.48478°N	4 342	680.40	-3.86	26	草甸	96.90505°E	33.77336°N	4 445	423.55	-3.38
11	草原	93.86495°E	35.51631°N	4 605	305.76	-4.35	27	草甸	96.59862°E	33.96722°N	4 663	335.76	-4.47
12	草原	93.63883°E	35.47109°N	4 497	230.02	-5.36	28	草甸	95.99613°E	34.14203°N	4 622	264.80	-6.14
13	草原	93.26879°E	35.29186°N	4 568	304.96	-4.28	29	草甸	92.88467°E	34.71624°N	4 783	339.26	-5.43
14	草原	92.50825°E	34.29485°N	4 582	277.03	-5.48	30	草甸	91.96450°E	33.01139°N	5 052	428.51	-6.80
15	草原	92.27674°E	33.7878°N	4 624	407.49	-5.29	31	草甸	92.03169°E	33.04281°N	5 233	499.93	-8.50
16	草原	91.89498°E	33.32539°N	4 810	340.38	-6.17							

1.4 数据处理

进行相关室内试验得到数据,分别选取了如下指标:容重(X_1)、孔隙度(X_2)、含水量(X_3)、饱和导水率(X_4)、砂粒(X_5)、粉粒(X_6)、黏粒(X_7)、胶粒(X_8)、单重维数 D_v (X_9)、信息维数 D_1 (X_{10})、WSA 百分含量(X_{11})、平均质量直径 MWD(X_{12})、几何平均直径 GMD(X_{13})、团聚体分形维数 D (X_{14})、结构体破坏率 $PAD_{>2}$ (X_{15})、结构体破坏率 $PAD_{>1}$ (X_{16})、结构体破坏率 $PAD_{>0.25}$ (X_{17})、有机质含量(X_{18})这 18 个可蚀性因子,其中 $X_9—X_{17}$ 计算过程见文献[12,13,25,26,28]。

使用 Excel 2016 进行数据处理,而主成分分析、逐步回归分析及通径分析等统计处理由 SPSS 19.0 软件来完成。

2 结果与分析

2.1 高寒草原与草甸表层土壤性质分析

如表 2 所示,草原和草甸土壤 WSA 含量, MWD, GMD 大小关系依次分别为:草原(86.58%)>草甸(85.6%),草原(1.01 mm)<草甸(1.31 mm),草原(0.72 mm)<草甸(0.89 mm);草原与草甸土壤分形维数 D 差异不大,其值分别为 2.40, 2.39。草原土壤 $PAD_{>2}$, $PAD_{>1}$, $PAD_{>0.25}$ 含量为 64.13%, 51.38%, 40.94%, 草甸土壤三者含量分别为:61.18%, 58.69%, 85.6%, 草原土壤 D_v , D_1 分别为 2.46, 0.88, 草甸土壤 D_v , D_1 分别为 2.62, 0.67, 故草甸土壤质地更为紧实,但土壤粒径均匀性低于草原土壤。草原土壤砂粒、粉粒、黏粒、胶粒含量分别为 81.97%, 15.02%, 3.01%,

1.4%, 与草原土壤相比,草甸土壤砂粒含量降低了 39.5%, 粉粒、黏粒、胶粒含量分别提高了 65.20%, 144.21%, 156.41%。

草原土壤容重为 1.53 g/cm³, 草甸土壤容重较草原低 0.52 g/cm³; 草原土壤孔隙度低于草甸土壤; 草原与草甸土壤含水量存在较大差异,以草甸大于草原; 土壤饱和导水率以草甸大于草原。草甸与草原土壤有机质含量存在较大差异,草甸大于草原。草原与草甸可蚀性影响因子除 WSA, D 为空间弱变异性、草甸土壤饱和导水率为高度变异性之外,其余因子 C_v 均处于 10%~100%, 为中等变异性。

2.2 高寒草原表层土壤可蚀性分析

本文所选取的可蚀性因子存在一定的信息重叠即具有相关性,因此采用主成分分析法提取主要成分进行降维。由表 3 可知,高寒草原表层土壤经降维后得到 4 个主成分,其累计贡献值为 86.08%。各主成分主要影响因子见表 3 加粗显示部分的数据。根据表 3 中不同主成分加粗的高信息荷载因子特征,将草原主成分分别命名为: F_1 土壤颗粒机械组成与孔隙特征因子, F_2 大团聚体特征因子, F_3 团聚体结构因子。其中第一主成分的贡献值最大,为 46.54%, 因此将土壤粒径孔隙特征作为草原土壤可蚀性主要影响因素; 而第二主成分和第三主成分的贡献值分别为 19.75%, 12.19%, 且二者均属于团聚体特征, 因此将团聚体特征作为草原土壤可蚀性的次要影响因素; 第四主成分无高信息荷载因子且贡献值及特征值最小, 因此后续忽略不计。

表 2 高寒草原与草甸土壤基本性质分析

因子	草原		草甸	
	均值±标准差	$C_v/\%$	均值±标准差	$C_v/\%$
团聚体 WSA/ $\%$	86.58±4.65	0.050	85.6±7.83	0.09
平均质量直径 MWD/mm	1.01±0.28	0.27	1.31±0.32	0.25
几何平均直径 GMD/mm	0.72±0.16	0.22	0.89±0.24	0.27
分形维数 D	2.40±0.12	0.05	2.39±0.18	0.07
破坏率 $PAD_{>2}/\%$	64.13±24.22	0.38	61.18±20.94	0.34
破坏率 $PAD_{>1}/\%$	51.38±26.07	0.51	58.69±20.79	0.35
破坏率 $PAD_{>0.25}/\%$	40.94±25.35	0.62	85.6±7.83	0.52
单重维数 D_v	2.46±0.18	—	2.62±0.15	—
信息维数 D_1	0.88±0.22	—	0.67±0.24	—
砂粒/ $\%$	81.97±13.79	0.17	49.57±14.87	0.30
粉粒/ $\%$	15.02±12.14	0.81	43.11±13.29	0.31
黏粒/ $\%$	3.01±2.07	0.69	7.35±2.33	0.32
胶粒/ $\%$	1.40±0.98	0.60	3.59±1.11	0.31
容重/($g \cdot cm^{-3}$)	1.54±0.19	0.13	1.02±0.39	0.39
孔隙度/ $\%$	41.88±7.33	0.17	61.69±14.83	0.24
含水量/ $\%$	12.63±11.38	0.90	56.14±44.99	0.80
饱和导水率/($mm \cdot min^{-1}$)	0.79±0.44	0.55	1.01±1.1	1.09
有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	11.53±5.95	0.60	87.59±0.2	0.41

表 3 草原土壤可蚀性影响因子主成分荷载矩阵

影响因子	F_1	F_2	F_3	F_4
容重(X_1)	-0.83	0.21	0.20	-0.16
孔隙度(X_2)	0.83	-0.21	-0.20	0.16
含水量(X_3)	0.66	-0.09	0.54	0.42
饱和导水率(X_4)	-0.60	0.12	-0.32	0.08
砂粒含量(X_5)	-0.95	-0.24	0.14	-0.02
粉粒含量(X_6)	0.95	0.18	-0.13	0.05
黏粒含量(X_7)	0.73	0.54	-0.13	-0.17
胶粒含量(X_8)	0.78	0.51	-0.10	-0.18
单重维数 D_v (X_9)	0.82	0.27	-0.14	-0.25
信息维数 D_1 (X_{10})	-0.83	-0.43	-0.01	-0.13
团聚体 WSA(X_{11})	0.33	-0.68	-0.25	0.45
平均质量直径 MWD(X_{12})	0.55	-0.29	0.72	-0.28
几何平均直径 GMD(X_{13})	0.60	-0.44	0.65	-0.10
分形维数 D (X_{14})	-0.38	0.61	0.31	-0.50
破坏率 $PAD_{>2}$ (X_{15})	-0.35	0.81	-0.15	0.37
破坏率 $PAD_{>1}$ (X_{16})	-0.11	0.79	0.31	0.41
破坏率 $PAD_{>0.25}$ (X_{17})	-0.21	0.39	0.63	0.38
有机质含量(X_{18})	0.90	0.07	-0.16	-0.07
特征根	8.38	3.55	2.19	1.37
贡献值/ $\%$	46.54	19.75	12.19	7.61
累积贡献值/ $\%$	46.54	66.28	78.47	86.08

注:加粗标识为该主成分荷载较高的主要影响因子。下同。

通过主成分分析将可蚀性因子由原来的 18 维降到 4 维,对所有可蚀性影响因子进行逐步回归分析,以完成统计学检验,进而分析评价各个因子对主成分的影响。由表 4 逐步分析结果可知,第一主成分中粉粒(X_6)和 GMD(X_{13})通过检验,二者均增强了该主成分的影响,粉粒对粒径孔隙特征影响作用最大;在

第二主成分中,胶粒含量(X_8), D (X_{14})和 $PAD_{>2}$ (X_{15})此 3 个因子通过检验,并对该主成分起正向作用,其中 $PAD_{>2}$ 对大团聚体特征影响作用最大;而在第三主成分中,孔隙度(X_2),砂粒(X_5), D_v (X_9),MWD(X_{12})和 $PAD_{>0.25}$ (X_{17})通过检验,其中 MWD 和 $PAD_{>0.25}$ 对该主成分起正向作用,其余指标起负向作用,MWD 对团聚体结构影响作用最大;第四主成分中各影响因子均未通过显著性检验。

由主成分分析可得 3 个主成分,由逐步回归分析筛选出各主成分通过显著性检验的关键因子,通过通径分析计算这些关键因子的相互影响及与主成分的相关作用。分析可知,在第一主成分,即粒径孔隙特征因子中,粉粒含量和 GMD 主要起正向直接影响(表 5)。其中粉粒含量总决定系数为最大值,且荷载系数最高,因此粉粒可作为粒径孔隙特征的主要影响因子。在第二主成分大团聚体特征因子中, D ,胶粒含量与 $PAD_{>2}$ 对影响作用较大,且均起正向直接影响,其中 D 通过 $PAD_{>2}$ 对该主成分有较大的间接正效应,且破坏率 $PAD_{>2}$ 总决定系数与荷载系数均为最大值,因此 $PAD_{>2}$ 可作为大团聚体特征因素的主要影响因子。在第三主成分团聚体结构因子中,通过显著性检验的因子均对该成分影响较大,其中 D_v ,MWD 起正向直接影响,其余为负向,孔隙度、砂粒、 D_v 和 MWD 具有双重效应作用,其中 MWD 与 $PAD_{>0.25}$ 总决定系数最大且荷载系数较高,因此可作为团聚体结构因素的主要影响因子。

表 4 草原土壤可蚀性影响因子主成分逐步回归矩阵

粒径孔隙特征因子 F_1	X_6	X_{13}	大团聚体特征因子 F_2	X_8	X_{14}	X_{15}
回归系数	0.84	0.27	回归系数	0.48	0.34	0.65
$R^2=0.956, F(2, 11)=141.67, p=0.000 1$			$R^2=0.992, F(4, 9)=331.09, p=0.000 1$			
团聚体结构因子 F_3	X_2	X_5	X_9	X_{12}	X_{17}	
回归系数	-0.48	-0.50	-0.54	0.85	0.45	
$R^2=0.991, F(5, 8)=294.75, p=0.000 1$						

注: F 为主成分, “-”表示该指标未通过显著性检验, 未列出因子未通过检验。

表 5 草原土壤关键可蚀性因子通径分析

粒径孔隙特征因子	直接通径系数	间接通径系数				总间接通径系数	总决定系数	
		粉粒		GMD				
粉粒	0.84			0.11	0.11	0.80		
GMD	0.27	0.33			0.33	0.16		
大团聚体特征因子	直接通径系数	间接通径系数			总间接通径系数	总决定系数		
		胶粒	D	$PAD_{>2}$				
胶粒	0.48		0	0.03	0.03	0.25		
D	0.34	0		0.27	0.26	0.21		
$PAD_{>2}$	0.65	0.02	0.14		0.16	0.53		
团聚体结构因子	直接通径系数	间接通径系数				总间接通径系数	总决定系数	
		孔隙度	砂粒	D_v	MWD			$PAD_{>0.25}$
孔隙度	-0.48		0.39	-0.29	0.29	-0.12	0.28	0.09
砂粒	-0.50	0.38		0.44	-0.29	0.10	0.64	-0.07
D_v	-0.54	-0.25	0.41		0.30	-0.05	0.40	0.07
MWD	0.85	-0.17	0.17	-0.19		0.06	-0.13	0.61
$PAD_{>0.25}$	0.45	0.13	-0.12	0.06	0.11		0.18	0.28

注: D_v 为单重维数; MWD 为平均质量直径; $PAD_{>0.25}$ 为团聚体 >0.25 mm 粒维结构破坏率。下同。

2.3 高寒草甸表层土壤可蚀性分析

主成分分析结果可知(表 6), 高寒草甸表层土壤同样得到 4 个主成分因子, 累积贡献值达 88.15%, 表中各主成分中的荷载较高的主要影响因子以加粗字体格式标识。根据表中各主成分加粗的高信息荷载因子特征将草甸主成分分别命名为: F_1 粒径孔隙特征因子、 F_2 土壤稳定因子、 F_3 破坏率因子、 F_4 渗透性能因子。根据各主成分的特征值及贡献值可以确定, 草甸表层土壤可蚀性主要是受到粒径孔隙特征的影响, 其次为土壤结构与团聚体稳定性, 最末为渗透性能相关因素。

由表 7 高寒草甸逐步分析可知, 在第一主成分粒径孔隙特征因子中, 有容重(X_1), 粉粒(X_6), GMD(X_{13})和有机质含量(X_{18})这 4 个因子通过检验, 除容重对该主成分起负向作用外, 其余均起正向作用, 且粉粒这一因子对其影响作用最大; 在第二主成分土壤稳定因子中, 黏粒含量(X_7)与 D (X_{14})通过检验, 二者均对该主成分起正向作用, 且黏粒对土壤稳定特征影响作用最大; 在第三主成分破坏率因子中 D_v (X_9)与 $PAD_{>1}$ (X_{16})通过检验, $PAD_{>1}$ 起正向作用, D_v 起负向作用, $PAD_{>1}$ 对破坏率影响作用最大; 而在第四主成分渗透性能因子中, 分别有饱和导水率(X_4), 信

息维数 D_1 (X_{10})和有机质含量(X_{18})此 3 个因子通过检验, 且三者均对该主成分起正向作用, 这其中, 对渗透性能因子影响作用最大的因子为饱和导水率。

表 6 草甸土壤可蚀性影响因子主成分荷载矩阵

影响因子	F_1	F_2	F_3	F_4
容重(X_1)	-0.90	0.17	0.10	-0.28
孔隙度(X_2)	0.90	-0.17	-0.10	0.28
含水量(X_3)	0.87	-0.22	0.15	0.23
饱和导水率(X_4)	-0.17	0.35	-0.47	0.74
砂粒含量(X_5)	-0.85	-0.44	-0.09	0.12
粉粒含量(X_6)	0.87	0.35	0.13	-0.13
黏粒含量(X_7)	0.47	0.84	-0.17	-0.01
胶粒含量(X_8)	0.47	0.82	-0.20	-0.02
单重维数 D_v (X_9)	0.51	0.80	-0.23	0.01
信息维数 D_1 (X_{10})	-0.82	-0.28	-0.02	0.32
团聚体 WSA(X_{11})	0.61	-0.58	-0.43	-0.03
平均质量直径 MWD(X_{12})	0.83	-0.30	-0.13	-0.25
几何平均直径 GMD(X_{13})	0.84	-0.39	-0.18	-0.19
分形维数 D (X_{14})	-0.68	0.56	0.26	0.03
破坏率 $PAD_{>2}$ (X_{15})	-0.14	0.08	0.67	0.07
破坏率 $PAD_{>1}$ (X_{16})	0.29	0.24	0.85	0.05
破坏率 $PAD_{>0.25}$ (X_{17})	0.47	-0.15	0.77	0.18
有机质含量(X_{18})	0.81	-0.28	0.31	0.27
特征根	8.52	3.68	2.57	1.10
贡献值/%	47.31	20.45	14.3	6.09
累积贡献值/%	47.31	67.77	82.07	88.15

表 7 草甸土壤可蚀性影响因子主成分逐步回归矩阵

粒径孔隙特征因子 F_1	X_1	X_6	X_{13}	X_{18}	土壤稳定因子 F_2	X_7	X_{14}
回归系数	-0.24	0.44	0.32	0.14	回归系数	0.81	0.51
$R^2=0.986, F(4, 15)=331.15, p=0.000 1$					$R^2=0.962, F(2, 17)=243.99, p=0.0001$		
破坏率因子 F_3	X_9	X_{16}	渗透性能因子 F_4		X_4	X_{10}	X_{18}
回归系数	-0.39	0.92	回归系数		0.75	0.47	0.66
$R^2=0.856, F(2, 17)=57.43, p=0.000 1$			$R^2=0.854, F(3, 16)=38.04, p=0.000 1$				

注: F 为主成分, 未通过检验因子未列出。

由高寒草甸关键可蚀性因子的通径分析可得(表 8), 第一主成分中, 容重对该主成分起负向直接影响, 粉粒、有机质与 GMD 则起正向直接影响。其中粉粒直接影响最大、总决定系数最高, 且对其余三项均有较大的间接效应, 粉粒可作为粒径孔隙特征因素的主要影响因子。第二主成分中, 黏粒和分形维数 D 直接作用最大, 均起正向直接影响, 且二者相互作用并无显著效应, 其中黏粒总决定系数及荷载系数最大, 因此黏粒因子可作为土壤稳定性特征的主要影响因子。在第三主成分中, $PAD_{>1}$ 和单重维数 D_v 对该主

成分具有较大直接影响, 其中 $PAD_{>1}$ 起正向作用, D_v 起负向影响。 D_v 通过 $PAD_{>1}$ 对该主成分有一定的间接正效应, 且 $PAD_{>1}$ 总决定系数及荷载系数均最大, 因此 $PAD_{>1}$ 因子可作为破坏率特征的主要影响因子。而在第四主成分中, 饱和导水率、有机质和信息维数 D_1 对该主成分起较大的正向直接影响。其中 D_1 , 有机质均通过导水率对该主成分有较大的间接效应, 且饱和导水率总决定系数以及荷载系数均为最大, 因此导水率因子可作为渗透性能因子的主要影响因子。

表 8 草甸关键土壤可蚀性因子通径分析

粒径孔隙特征因子	直接通径系数	间接通径系数				总间接通径系数	总决定系数
		容重	粉粒	GMD	有机质		
容重	-0.24		-0.30	-0.25	-0.11	-0.66	0.22
粉粒	0.44	0.06		0.18	0.09	0.33	0.34
GMD	0.32	-0.16	0.25		0.09	0.18	0.16
有机质	0.14	0.00	0.28	0.21		0.49	0.09
土壤稳定因子	直接通径系数	黏粒		D		总间接通径系数	总决定系数
黏粒	0.81			0.03		0.03	0.68
D	0.51	0.04				0.04	0.29
破坏率因子	直接通径系数	D_v		$PAD_{>1}$		总间接通径系数	总决定系数
D_v	-0.39			0.16		0.16	0.09
$PAD_{>1}$	0.92	-0.07				-0.07	0.78
渗透性能因子	直接通径系数	导水率	D_1	有机质		总间接通径系数	总决定系数
导水率	0.75		0.12	-0.13		-0.01	0.55
D_1	0.47	0.19		-0.34		-0.15	0.15
有机质	0.66	-0.15	-0.24			-0.40	0.17

注: GMD 为几何平均直径; D 为分形维数; D_1 为信息维数; $PAD_{>1}$ 为团聚体 >1 mm 粒级结构破坏率。

3 讨论

由分析可知, 在不同植被类型覆盖下, 土壤可蚀性的主要影响因素及主要表征因子存在差异。由主成分分析可知, 高寒草原与草甸土壤可蚀性影响因子首要均为粒径孔隙特征因子, 这是由于土壤侵蚀直接反映于土壤颗粒组成的变化, 影响土壤质地的粗细程度^[11-12]。

本研究表明高寒草原土壤可蚀性主要影响因子分别是: 粉粒, $PAD_{>2}$, MWD 和 $PAD_{>0.25}$; 高寒草甸

土壤可蚀性主要影响因子为粉粒、黏粒、 $PAD_{>1}$ 和饱和导水率。二者主要影响因子不同, 这可能是由于草原、草甸植被状态不同, 导致两种草地土壤理化性质、土壤结构存在差异^[26], 在对于抵抗风蚀、水蚀时的抵抗能力也不尽相同。这些基础土壤指标影响因子可大体代表不同土壤面对外营力及内部作用时的抗冲性及抗蚀性。高寒草甸植被因植被覆盖较多, 植被根系的缓冲、固土作用减少土壤侵蚀, 枯枝落叶增加土壤有机质含量, 相应土壤有机质黏性等均大于高寒草原, 因此可知, 草甸土壤可蚀性受到有机质的显著影

响,而草原土壤则受其影响较小,这与徐燕等^[12]、吴媛媛等^[20]、彭新华等^[26]在研究中的结论一致,土壤有机质含量多少会不同程度地影响土壤可蚀性大小。刘目兴等^[29]在研究中表明土壤入渗受到土壤质地、地表植被的深刻影响,草甸土壤根须及腐殖质较多、有机质含量丰富,而草原土壤腐殖质含量较少,因此造成导水效应不同^[10,21],其土壤渗透性能对土壤侵蚀的响应作用也存在差异,草甸土壤侵蚀受到渗透性能的辅助影响,而草原土壤侵蚀几乎不受渗透性能影响;受海拔影响,草原与草甸气候存在差异。草原平均海拔 4 609 m,草甸平均海拔高出草原 225 m,高寒草原、草甸地区年均降水量分别为 356.46,389.31 mm,年均气温分别为 -5.11,-6.16 °C,降水较多,气温较低可以使得草甸土壤团聚体的形成与稳定性能强于草原土壤。相关研究表明^[27,30],土壤团聚体作为基本结构单元在一定程度上影响着土壤颗粒的数量及分布,而土壤颗粒又是土壤最基本的物理性质之一,因此土壤侵蚀受到土壤颗粒的影响最大、团聚体影响次之,故草原及草甸土壤均受到土壤颗粒及团聚体的影响作用。

4 结论

本文通过对青藏高原草地的两种主要下垫面土壤的性质的分析,草原与草甸土壤主要在颗粒机械组成、有机质含量、含水量等方面表现出较大差异,草甸土壤状态更适合于植被发育。通过对草原、草甸土壤可蚀性因子的主成分分析、逐步回归分析、通径分析得出两种下垫面 4 种关键影响因子。①草原:粉粒、 $PAD_{>2}$, MWD 和 $PAD_{>0.25}$; ②草甸:粉粒、黏粒、 $PAD_{>1}$ 和饱和导水率。青藏高原草地地区可介于此筹划展开水土保持工作。

致谢:感谢中科院寒旱所何晓波老师和吴晓东老师在野外取样过程中给予的大力帮助,感谢贺燕同学在室内土壤理化性质分析过程中给予的大力帮助!

[参 考 文 献]

[1] 翟子宁,苏备.土壤可蚀性研究进展[J].土壤通报,2016,47(1):253-256.

[2] 黄晓强,赵云杰,信忠保,等.北京山区典型土地利用方式对土壤理化性质及可蚀性的影响[J].水土保持研究,2015,22(1):5-10.

[3] 姜小三,潘剑君,杨林章,等.土壤可蚀性 K 值的计算和 K 值图的制作方法研究:以南京市方便水库小流域为例[J].土壤,2004,36(2):177-180.

[4] 李英,林圣玉,张龙,等.鄱阳湖生态经济区坡耕地表土抗

蚀性评价[J].中国水土保持,2016(7):48-51.

- [5] Wang Bin, Zheng Fenli, Romkens M J M, et al. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences [J]. *Geomorphology*, 2013,187:1-10.
- [6] 李鹏,李占斌,郑郁.不同土地利用方式对干热河谷地区土壤可蚀性的影响[J].水土保持研究,2011,18(4):16-19.
- [7] 朱乐红,唐科明,李豪,等.土壤理化性质对土壤侵蚀影响研究综述[J].现代农业科技,2018(14):189-191.
- [8] 徐燕,龙健.贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2005,19(1):157-159,175.
- [9] 刘小梅,吕殿青.土壤容重对红壤坡地降雨侵蚀和入渗的影响[J].长沙大学学报,2013,27(2):13-15,18.
- [10] 张玉斌,郑粉莉.近地表土壤水分条件对坡面土壤侵蚀过程的影响[J].中国水土保持科学,2007,5(2):5-10,17.
- [11] 张向炎,史学正,于东升,等.前期土壤含水量对红壤坡面产流产沙特性的影响[J].水科学进展,2010,21(1):23-29.
- [12] 龚杰,罗麟,周海燕.前期土壤含水量对坡面产流产沙起始时间的影响[J].人民长江,2011,42(9):102-104.
- [13] 殷庆元,王章文,谭琼,等.金沙江干热河谷坡改梯及生物地埂对土壤可蚀性的影响[J].水土保持学报,2015,29(1):41-47.
- [14] 杨文利,朱平宗,程洪,等.马尾松人工林地浅沟表层土壤颗粒的空间分布特征[J].水土保持学报,2018,32(4):158-162.
- [15] Sun Caili, Liu Guobin, Xue Sha. Natural succession of grassland on the Loess Plateau of China affects multifractal characteristics of soil particle-size distribution and soil nutrients [J]. *Ecological Research*, 2016, 31(6):891-902.
- [16] 仲亚婷,张文太,李建贵,等.用人工模拟降雨研究不同土壤类型的产沙特征[J].安徽农业大学学报,2017,44(3):465-470.
- [17] 陈佩岩.不同雨型下坡面侵蚀过程及其与土壤可蚀性定量关系[D].北京:北京林业大学,2019.
- [18] Levy G J, Miller W P. Aggregate stabilities of some southeastern US soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997,61(4):1176-1182.
- [19] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004,79(1):7-31.
- [20] 吴媛媛,杨明义,张风宝,等.添加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].土壤学报,2016,53(1):81-92.
- [21] 王根绪,丁永建,王建,等.近 15 年来长江黄河源区的土地覆被变化[J].地理学报,2004,59(2):163-173.

- [20] Li Zhongqin, Gao Wenhua, Zhang mingjun, et al. Variations in suspended and dissolved matter fluxes from glacial and non-glacial catchments during a melt season at Urumqi River, eastern Tianshan, Central Asia [J]. *Catena*, 2012, 95: 42-49.
- [21] 古力那尔·吐尔松, 拜合提亚尔·吐尔松. 天山南坡卡拉苏河水文特性分析[J]. *水利科技与经济*, 2014, 20(5): 54-55.
- [22] 张凡, 史晓楠, 曾辰, 等. 青藏高原河流输沙量变化与响应[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1274-1284.
- [23] 贺冬强. 新疆皮山河水沙特征分析[J]. *地下水*, 2011, 33(2): 184-186.
- [24] 李明正. 新疆三屯河流域水文特性分析[J]. *内蒙古水利*, 2013(4): 28-29.
- [25] Wulf H, Bookhagen B, Scherler D. Climatic and geologic controls on suspended sediment flux in the Sutlej River Valley, Western Himalaya [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(7): 2193-2217.
- [26] 文金凤. 浅析玛纳斯河近年来悬移质泥沙量变化原因[J]. *新疆农垦科技*, 2011, 34(1): 55-56.
- [27] 朱利民. 八音沟河水文特性分析[J]. *新疆水利*, 2010(3): 15-17.
- [28] 温守远. 玉龙喀什河水沙关系特征初探[J]. *水利科技与经济*, 2013, 19(5): 76-77.
- [29] Jha P K, Subramanian V, Sitasawad R. Chemical and sediment mass transfer in the Yamuna River: A tributary of the Ganges system [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 104(1/2/3/4): 237-246.
- [30] Haritashya U K, Singh P, Kumar N, et al. Suspended sediment from the Gangotri Glacier: Quantification, variability and associations with discharge and air temperature [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 321(1/2/3/4): 116-130.
- [31] Hinderer M, Kastowski M, Kamelger A, et al. River loads and modern denudation of the Alps: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 118: 11-44.
- [32] 姚盼. 青藏高原冰川侵蚀对地形的影响及其控制因素研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学 2020.
- [33] Lu Xixi, Zhang Shurong, Xu Jianchu. Climate change and sediment flux from the Roof of the world [J]. *Earth Surface Process and Land forms*, 2010, 35(6): 732-735.
- [34] Amerson B E, Montgomery D R, Meyer G. Relative size of fluvial and glaciated valleys in Central Idaho [J]. *Geomorphology*, 2007, 93(3/4): 537-547.
- [35] Michéle K, Bernard H, Eric R, et al. Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics [J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 2015, 526(7571): 100-103.
- [36] Huang Zhe, Lin Binliang, Sun Jian, et al. Suspended sediment transport responses to increasing human activities in a high-altitude river: A case study in a typical sub-catchment of the Yarlung Tsangpo River [J]. *Water*, 2020, 12(4): 952-968.

(上接第 93 页)

- [22] 杜际增, 王根绪, 李元寿. 近 45 年长江黄河源区高寒草地退化特征及成因分析[J]. *草业学报*, 2015, 24(6): 5-15.
- [23] 赵恒策. 青海省江河源区草地土壤可蚀性关键因子研究[D]. 甘肃 兰州: 兰州大学, 2019.
- [24] 郑纪勇, 邵明安, 张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 53-56.
- [25] 郭军玲, 王虹艳, 卢升高. 亚热带土壤团聚体测定方法的比较研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(3): 542-546.
- [26] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [27] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 66-70, 82.
- [28] 贺强, 崔保山, 胡乔木, 等. 水深环境梯度下怪柳种群分布格局的分形分析[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(5): 70-73.
- [29] 刘目兴, 聂艳, 于婧. 不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J]. *生态学报*, 2012, 32(3): 871-878.
- [30] 郭伟, 史志华, 陈利顶, 等. 红壤表土团聚体粒径对坡面侵蚀过程的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(6): 2516-2522.