

草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化

王向栋¹, 戴全厚¹, 李翠莲^{1,2}, 严友进¹

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 息烽县林业绿化局, 贵州 息烽 551100)

摘要:以草海流域上游的石漠化区为研究对象,研究不同等级石漠化条件下土壤抗蚀能力的差异,利用空间代替时间的方法,探讨草海上游区石漠化过程中土壤抗蚀性变化规律,为当地石漠化治理和湿地保护提供参考。通过实地调研,采集不同石漠化程度区的土样并进行室内指标测定,利用主成分分析方法选取了10个土壤理化指标对样地土壤抗蚀能力进行评价。结果表明:(1)所选10项理化指标可以较为全面地综合评价不同石漠化程度土壤抗蚀能力,土壤团聚状况、分散率、分散系数、 >0.25 mm水稳性团聚体含量、 >0.5 mm水稳性团聚体含量、结构破坏率、 <0.05 mm粉黏粒含量这7项可以作为评价的优选指标,有机质含量、 <0.001 mm黏粒含量、土壤团聚度这3项指标次之。(2)无石漠化CK样地(2.19) $>$ 轻度石漠化L样地(1.19) $>$ 重度石漠化S₁样地(0.85) $>$ 中度石漠化M样地(-1.35) $>$ 重度石漠化S₂样地(-2.88),其中中度石漠化样地(M)和重度石漠化样地(S₂)为负值,其余均为正值,差异明显。在石漠化过程中土壤抗蚀能力总体呈下降趋势,但是在石漠化发展后期,土壤抗蚀能力反而会有上升的可能。

关键词:土壤学;土壤抗蚀性;主成分分析;石漠化;草海

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)03-0013-06

Variation of Soil Anti-erodibility During Rocky Desertification in Upper Reaches of Caohai

WANG Xiangdong¹, DAI Quanhong¹, LI Cuilian^{1,2}, YAN Youjin¹

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Xifeng Forestry and Afforestation Bureau, Xifeng, Guizhou 551100, China)

Abstract: We analyzed the differences between soil anti-erodibility under different rocky desertification conditions in karst rocky desertification region in upper reaches of Caohai. By using space instead of time, changes of soil anti-erodibility were investigated during rocky desertification in upper reaches of Caohai, aiming to provide reference for desertification control and wetland protection of Caohai. Soil samples from different karst rocky desertification level areas were taken according to field investigation. Soil physicochemical properties were tested in laboratory, and ten of them were selected to evaluate the soil anti-erodibility by principal component analysis with Spass 18.0. The results indicated that: (1) soil anti-erodibility under different rocky desertification conditions could be comprehensive evaluated by 10 indicators; the contents of silt/clay <0.05 mm, reunion situation, dispersion rate, dispersion coefficient, water-stable aggregates >0.25 mm, water-stable aggregates >0.5 mm, structural damage rate were optimal indexes to evaluate soil anti-erodibility, and the indices organic matter, content of clay <0.001 mm, reunion degree came next; (2) the order of anti-soil erosion degrees of different rocky desertification areas obtained by principal component analysis was: sample CK of non rocky desertification(2.19) $>$ sample L of light rocky desertification(1.19) $>$ sample S₁ of intense rocky desertification(0.85) $>$ sample M of moderate rocky desertification(-1.35) $>$ sample S₂ of intense rocky desertification(-2.88), the values of comprehensive anti-erodibility indexes of Sample M and Sample S₂ were negative, others were positive, the differences were obvious. Soil anti-erodibility declined gradually during rocky desertification, but it could also increase in late stage of rocky desertification.

Keywords: pedology; soil anti-erodibility; principal component analysis; karst rocky desertification; Caohai

收稿日期:2016-10-04

修回日期:2016-11-05

资助项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0502604);国家自然科学基金资助项目(41671275,41461057);贵州省应用基础重大专项课题(黔科合JZ字[2014]2002);贵州省重大专项(黔科合重大专项字[2016]3022号)

第一作者:王向栋(1986—),男,河南济源人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:恢复生态学。E-mail:122673435@qq.com

通信作者:戴全厚(1969—),男,陕西长武人,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail:qhdairiver@163.com

脆弱的喀斯特生态地质环境在受到人为长期不合理活动的干扰和破坏后,部分区域水土流失加剧、土壤侵蚀严重,进而植被大量减少、基岩大面积出露、土壤理化性质发生较大变化、土地生产力衰退直至全部丧失,并最终在地表生成类似于荒漠的景观。这类土地退化过程称为石漠化^[1]。其中,土壤侵蚀与地表石漠化之间存在着因果关系,是同一生态退化过程的两个不同阶段。土壤侵蚀是石漠化过程中某一阶段强烈作用的体现,同时会加剧石漠化进程;石漠化则是土壤侵蚀长时间作用的结果^[2]。

土壤抗蚀性是指土壤维持自身结构、避免被水(包括降雨和径流)分散和破坏的能力^[3]。提高土壤抗蚀性是防治水土流失、进行石漠化治理的有效途径之一。目前,大量学者已经对喀斯特地区土壤抗蚀性开展了具体、深入的研究,并对能够表征土壤抗蚀性的土壤理化指标进行了筛选和优化。赵洋毅等^[4]在对4种岩性土壤的抗蚀性进行了研究并指出 >0.25 mm水稳性团聚体、团聚度及土壤中的有机质含量可较好地表征该4种土壤抗蚀性。胡宁等^[5]研究了石漠化山区不同退耕模式下的土壤抗蚀性及其与结构体分形维数关系,并指出在该试验中有机质含量、水稳性指数及 >0.25 mm水稳性团聚体的含量与破坏率等是评价样本土壤抗蚀性的最优指标。陈佳等^[6]选用土壤有机质、 <0.05 mm粉黏粒含量、水稳性团聚体、团聚状况、团聚度、团聚体结构破坏率和分散率等7个指标对喀斯特地区5种不同土地利用模式下的土壤抗蚀性进行了评价,并取得了较好的试验结果。同时,吴鹏等^[7]通过试验验证了分散系数也可以作为评价不同植被类型下土壤抗蚀性的优选指标之一。王佩将等^[8]发现 <0.001 mm黏粒含量可以用作表征喀斯特区不同植被恢复阶段土壤抗蚀性的优选指标。

然而,目前在喀斯特地区对不同土地利用类型或者是植被配置模式下的土壤抗蚀性评价研究比较多,对于石漠化过程中土壤抗蚀性变化研究较少。通过对石漠化过程不同阶段的土壤抗蚀能力进行研究,可以为精准布置治理策略、防治水土流失、修复生态等活动提供理论支持。本文通过对草海上游石漠化区的土壤进行实地取样,室内分析其结构特点及理化特征,研究不同等级石漠化条件下土壤抗蚀能力的差异,利用空间代替时间的方法,探讨草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性的变化规律,为当地石漠化治理和湿地保护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

草海湿地位于我国贵州省威宁县草海镇,是珍稀鸟类黑颈鹤越冬最远、栖息地理位置最东的区域,是

由草甸、沼泽、水域等及具有较高生产力的水生生物群落和丰富的水生动植物组成的完整的高原喀斯特湿地生态系统^[9]。本课题研究区域位于草海湿地东部上游集水区孔山梁子附近,该区域内石漠化发育类型齐全,拥有各种石漠化程度的土壤分布。地理坐标范围为东经 $103^{\circ}36'—104^{\circ}45'$,北纬 $26^{\circ}30'—27^{\circ}25'$,最高海拔2 879 m,最低海拔1 234 m,相对高差1 645 m,平均海拔2 220 m。研究区年均气温为 10.4°C ,冬季寒冷,夏季温凉,日温差大,年温差小,为亚热带湿润季风气候。年平均降雨量为962 mm,6—9月降水量约占全年的89.30%,年均日照时数为1 800 h,无霜期180 d,全年干湿分明,光照充足。

研究区植被以草灌为主,乔木林地较少。主要植物种有藏柏(*Cupressus torulosa* D. Don)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、堆花小檗(*Berberis aggregata* Schneid)、匍匐栒子(*Cotoneaster adpressus* Bois)、贵州金丝桃(*Hypericum kouytchense* Levl)、扁刺峨眉蔷薇(*Rosa omeiensis* f. *pteracantha* Rehd. etwils)、茜草(*Rubia cordifolia* Linn)、地榆(*Sanguisorba officinalis* Linn)、火棘(*Pyracantha fortuneana* Maxim. Li)、灰苞蒿(*Artemisia roxburghiana* Bess)、白酒草(*Conyza japonica* Thunb. Less)、灯心草(*Juncus* Linn)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及土样采集 石漠化过程可划分为初期、中期、后期和末期4个阶段,石漠化程度表现为由无石漠化向轻度、中度直至重度石漠化进行演替^[1]。在本文的研究中,根据项目区内的石漠化情况和植被类型等特征,参考国家林业局行业标准(LY/T1840—2009)^[10],采用网格法在研究区内布置5个 $100\text{ m}\times 100\text{ m}$ 样地,其中,1个轻度(L)石漠化样地、1个中度(M)石漠化样地、2个重度(S_1 , S_2)石漠化样地,并选取1个无石漠化样地(CK)作为参照(样地特征见表1)。具体操作为:每个样地设置3个 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 的样方,每个样方内按S型布设5个采样点,用铝盒采集表层(0—20 cm)原状土;用土钻钻取0—20 cm的土样,带回实验室风干,过筛。

1.2.2 测定方法 土壤有机质含量采用油浴加热重铬酸钾氧化法测定;土壤机械组成及微团聚体利用吸管法分析;土壤团聚体采用干—湿筛法分析^[11]。

1.2.3 指标选取 依据之前的综述成果,本文一共选取10个指标用于评价不同等级石漠化条件下土壤抗蚀性。具体为:(1)有机质含量 X_1 (g/kg);(2) <0.05 mm粉黏粒含量 X_2 (%);(3) <0.001 mm黏粒含量 X_3 (%);(4)土壤团聚状况 X_4 (>0.05 mm

微团聚体分析值 $>0.05\text{ mm}$ 土壤机械组成分析值) $\times 100\%$;(5)团聚度 $X_5=\text{团聚状况}/>0.05\text{ mm}$ 微团聚体分析值 $\times 100\%$;(6)分散率 $X_6=<0.05\text{ mm}$ 微团聚体分析值/ $<0.05\text{ mm}$ 机械组成分析值 $\times 100\%$;(7)分散系数 $X_7=<0.001\text{ mm}$ 微团聚体分析值/ $<0.001\text{ mm}$ 机械组成分析值 $\times 100\%$;(8) $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量 $X_8(\%)$;(9) $>0.5\text{ mm}$

水稳性团聚体含量 $X_9(\%)$;(10)结构破坏率 $X_{10}=>0.25\text{ mm}$ 团聚体分析值(干筛—湿筛)/ $>0.25\text{ mm}$ 团聚体干筛分析值 $\times 100\%$ 。
1.2.4 数据处理与分析 本文使用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理及图表绘制、利用 SPSS 18.0 软件进行数据的主成分分析。差异显著性检验均采用 LSD 法,显著性水平均为 $\alpha=0.05$ 。

表 1 样地基本特征

| 样地 编号 | 经度 E | 纬度 N | 海拔/ m | 坡向 | 坡度/ (°) | 土层 厚度/cm | 植被 类型 | 岩石 裸露率/% | 植被 覆盖率/% | 石漠化 程度 |
|----------------|--------------|------------|----------|----|------------|-------------|----------|-------------|-------------|-----------|
| CK | 104°20′24.2″ | 6°49′21.4″ | 2251 | 西南 | 10 | 50 | 乔木型 | 0 | 90 | 无 |
| L | 104°20′35.4″ | 26°49′8.3″ | 2301 | 西南 | 40 | 50 | 乔木—灌木型 | 30 | 60 | 轻 |
| M | 104°20′30.9″ | 6°49′14.1″ | 2302 | 西南 | 35 | 30 | 灌木型 | 40 | 70 | 中 |
| S ₁ | 104°20′35.6″ | 6°49′14.4″ | 2321 | 西南 | 28 | 20 | 灌木—草丛型 | 60 | 20 | 重 |
| S ₂ | 104°20′38.7″ | 26°47′9.7″ | 2343 | 西 | 38 | 20 | 草丛型 | 60 | 20 | 重 |

2 结果与分析

2.1 有机质含量

土壤有机质含量可用于评价土壤质量与土地生产力。有机质含量的增加不仅能够促进土壤的供肥、保肥能力的增强,提高土壤养分的有效性,可以进一步加快土壤团粒结构的形成,增强土壤的透水性、通气性,提升土壤的缓冲性等^[12]。因此,部分学者将有机质含量作为研究土壤抗蚀性的一个重要指标^[4-8]。

本试验测得的不同等级石漠化程度的有机质含量为:S₁(76.19 g/kg) $>$ L(74.70 g/kg) $>$ CK(68.27 g/kg) $>$ S(52.44 g/kg) $>$ M(48.48 g/kg),如图 1 所示。轻度石漠化 L 样地与重度石漠化 S₁ 样地有机质含量差异不显著,其他样地间差异显著($p<0.05$)。有机质含量在不同石漠化程度土壤中没有明显表现出一定的变化规律。这是因为土壤是一个物质循环的系统,有机质含量的变化会受到其他养分或条件的影响与制约。

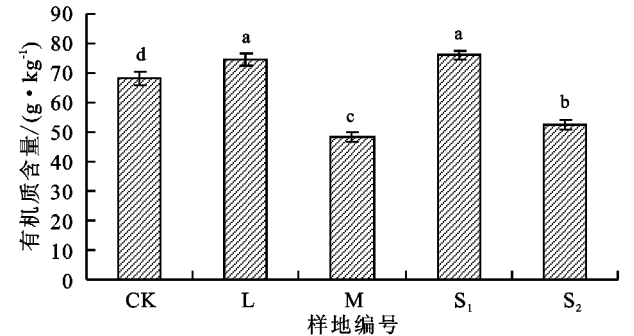


图 1 不同石漠化样地的有机质含量

2.2 土壤颗粒特征

土壤颗粒是土壤结构体的重要组成部分,不仅可以与土壤的孔隙度、透水性和蓄水能力等共同作用来影响土壤中的气体流动、养分水分循环的状况,还可

以用于解释土壤的受侵蚀程度^[13]。

土壤中的砂粒含量多,土壤的下渗能力强;黏粒($<0.001\text{ mm}$)含量高,土壤的吸收和持水能力好。因此 $<0.001\text{ mm}$ 土壤黏粒含量可以用作评价土壤抗蚀性指标之一^[8]。由表 2 看出,不同石漠化程度的 $<0.001\text{ mm}$ 土壤黏粒含量变化为 $S_2(54.01\%)>S_1(47.78\%)>M(44.57\%)>L(42.27\%)>CK(41.73\%)$ 。 $<0.001\text{ mm}$ 土壤黏粒含量在不同石漠化程度的土壤中呈规律性变化,石漠化程度越高,土壤黏粒含量越大。这可能是在石漠化演替过程中,由于地表根系固土能力减弱,表层松散的砂粒和粉粒流失,使抗蚀能力好的黏粒得以留存,土壤开始有黏质化趋势。

$<0.05\text{ mm}$ 土壤黏粉粒含量属于无机黏粒类指标。研究发现,一般情况下土壤抗蚀性随无机胶体含量增大而变强,因此, $<0.05\text{ mm}$ 土壤黏粉粒含量可以用作评价土壤抗蚀能力的指标之一^[6]。不同等级石漠化程度的 $<0.05\text{ mm}$ 土壤黏粉粒含量变化为 $S_2(91.86\%)>CK(91.32\%)>S_1(91.25\%)>M(88.96\%)>L(88.41\%)$,变化规律不明显,这可能是土壤中粉粒($0.05\sim 0.001\text{ mm}$)含量变化作用的结果(表 2)。

团聚状况用来表示土壤颗粒团聚程度,一些试验证明土壤抗蚀性会随着其值的增大变强。团聚度以 $>0.05\text{ mm}$ 微团聚体分析值占土壤相应粒级的百分比来表示,团聚度越大则土壤抗蚀性越强^[7]。不同石漠化程度的团聚状况变化为 $CK(44.41\%)>S_1(35.68\%)>L(34.16\%)>M(28.57\%)>S_2(21.18\%)$;不同石漠化程度的团聚度变化为 $CK(83.67\%)>S_1(80.31\%)>L(74.67\%)>S_2(72.26\%)>M(72.15\%)$ (表 2)。无石漠化 CK 样地团聚状况、团聚度均为最大,显示了

其土壤具有较好的抗侵蚀能力。而发生了石漠化的样地,其团聚状况、团聚度变化无规律,说明石漠化的发生与土壤侵蚀的发展并不同步。

分散率和分散系数均将分析值中低于某个规定粒级的颗粒,视作完全分离的颗粒,用这样颗粒微团

聚体与机械组成的对比值来表示土壤抗蚀性,分散率和分散系数越大,土壤抗蚀性越弱^[7]。不同石漠化程度样地的分散率和分散系数都以重度石漠化 S₂ 样地为最大,无石漠化 CK 样地为最小,轻度、中度及重度 S₁ 石漠化样地变化规律不明显。

表 2 不同石漠化程度土壤颗粒状况

| 样地编号 | | 土壤颗粒/% | | | | | | 团聚 | 团聚度/ | 分散率/ | 分散 |
|----------------|------|-----------|--------------|--------------|---------------|----------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1~0.25 mm | 0.25~0.05 mm | 0.05~0.01 mm | 0.01~0.005 mm | 0.005~0.001 mm | <0.001 mm | 状况/% | % | % | 系数/% |
| CK | 机械组成 | 4.02 | 4.65 | 20.01 | 9.03 | 20.55 | 41.73 | 44.41 | 83.67 | 51.39 | 24.28 |
| | 微团聚体 | 41.34 | 11.74 | 17.6 | 6.73 | 12.47 | 10.13 | | | | |
| L | 机械组成 | 4.68 | 6.91 | 14.52 | 10.40 | 21.22 | 42.27 | 34.16 | 74.67 | 61.36 | 27.63 |
| | 微团聚体 | 34.89 | 10.86 | 17.17 | 8.03 | 17.37 | 11.68 | | | | |
| M | 机械组成 | 1.31 | 9.72 | 16.48 | 6.75 | 21.16 | 44.57 | 28.57 | 72.15 | 67.90 | 36.39 |
| | 微团聚体 | 30.89 | 8.71 | 18.87 | 7.69 | 17.62 | 16.22 | | | | |
| S ₁ | 机械组成 | 5.95 | 2.80 | 11.63 | 13.26 | 18.58 | 47.78 | 35.68 | 80.31 | 60.91 | 31.92 |
| | 微团聚体 | 33.75 | 10.68 | 15.68 | 7.72 | 16.93 | 15.25 | | | | |
| S ₂ | 机械组成 | 3.91 | 4.22 | 6.68 | 7.30 | 23.87 | 54.01 | 21.18 | 72.26 | 76.95 | 40.01 |
| | 微团聚体 | 19.73 | 9.58 | 19.08 | 7.73 | 22.27 | 21.61 | | | | |

2.3 土壤的团聚性能

土壤水稳性团聚体是由土壤有机质胶结而成的团粒结构。该类团聚体可以改善土壤结构,而且被水浸湿后不易被分散,具有较高的稳定性。因此,土壤水稳性团聚体含量可以作为抗蚀性评价的良好指标^[14]。由表 3 看出,不同石漠化程度>0.25 mm 水稳性团聚体含量为:L(92.12%)>CK(90.24%)>S₁

(88.44%)>M(82.54%)>S₂(77.70%);不同石漠化程度>0.5 mm 水稳性团聚体含量为:L(89.06%)>CK(84.96%)>S₁(83.84%)>M(79.96%)>S₂(69.24%)。各样地结构体破坏率为:S₂(21.85%)>M(16.74%)>S₁(10.59%)>CK 号(8.70%)>L(6.94%)。总体结果表明,随石漠化程度的加大,结构体破坏率增高。

表 3 不同石漠化程度土壤团聚体含量

| 样地编号 | 处理 | 各级团聚体含量/% | | | | | | 结构体破坏率/% |
|----------------|----|-----------|--------|--------|----------|-------------|----------|----------|
| | | >5 mm | 5~2 mm | 2~1 mm | 1~0.5 mm | 0.5~0.25 mm | <0.25 mm | |
| CK | 干筛 | 78.08 | 12.02 | 4.85 | 2.83 | 1.06 | 1.16 | 8.70 |
| | 湿筛 | 27.04 | 31.64 | 12.38 | 13.90 | 5.28 | 9.76 | |
| L | 干筛 | 72.14 | 15.03 | 7.00 | 3.57 | 1.25 | 1.01 | 6.94 |
| | 湿筛 | 49.98 | 21.24 | 7.76 | 10.08 | 3.06 | 7.88 | |
| M | 干筛 | 85.49 | 7.56 | 3.53 | 1.93 | 0.63 | 0.86 | 16.74 |
| | 湿筛 | 52.94 | 15.76 | 5.32 | 5.94 | 2.58 | 17.46 | |
| S ₁ | 干筛 | 70.27 | 15.77 | 7.29 | 3.94 | 1.64 | 1.09 | 10.59 |
| | 湿筛 | 37.18 | 23.76 | 11.02 | 11.88 | 4.60 | 11.56 | |
| S ₂ | 干筛 | 87.27 | 6.87 | 2.95 | 1.65 | 0.69 | 0.57 | 21.85 |
| | 湿筛 | 12.16 | 25.10 | 11.60 | 20.38 | 8.46 | 22.30 | |

2.4 不同石漠化程度土壤抗蚀性综合评价

为了进一步了解不同石漠化程度的土壤综合抗蚀性能以及各抗蚀性因子对土壤抗蚀性的贡献,选取前文叙述的有机质含量、颗粒特征、团聚性能三类共计 10 个与土壤

抗蚀性密切的指标,考虑到各指标间的信息重叠和相互关联,对其采用主成分分析法。这样可以较少的公因子代替原有指标,并尽可能保留原有指标的信息量,以最佳评价指标综合评价不同石漠化程度土壤抗蚀性的强弱。

表 4 不同石漠化程度的土壤抗蚀性指标

| 样地编号 | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₅ | X ₆ | X ₇ | X ₈ | X ₉ | X ₁₀ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| CK | 68.27 | 91.32 | 41.73 | 44.41 | 83.67 | 51.39 | 24.28 | 90.24 | 84.96 | 8.70 |
| L | 74.70 | 88.41 | 42.27 | 34.16 | 74.67 | 61.36 | 27.63 | 92.12 | 89.06 | 6.94 |
| M | 48.48 | 88.96 | 44.57 | 28.57 | 72.15 | 67.90 | 36.39 | 82.54 | 79.96 | 16.74 |
| S ₁ | 76.19 | 91.25 | 47.78 | 35.68 | 80.31 | 60.91 | 31.92 | 88.44 | 83.84 | 10.59 |
| S ₂ | 52.44 | 91.86 | 54.01 | 21.18 | 72.26 | 76.95 | 40.01 | 77.70 | 69.24 | 21.85 |

在选取的 10 个指标中,有机质含量、 $<0.05\text{ mm}$ 粉黏粒含量、 $<0.001\text{ mm}$ 黏粒含量、土壤团聚状况、团聚度、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、 $>0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量这 7 项指标在主成分分析时为正指标,即其数值越大,表征土壤的抗蚀能力越强;而分散率、分散系数、结构破坏率为逆指标,即其数值越大,表征土壤的抗蚀能力越弱。在利用主成分法分析时,将其作为逆指标进行处理,可有效提高模型效率。

对与评价目标成正比、成反比的指标分别采用规格化公式进行处理^[15]。

表 5 规格化处理后土壤抗蚀性指标

| 样地编号 | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 | Y_5 | Y_6 | Y_7 | Y_8 | Y_9 | Y_{10} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| CK | 0.71 | 0.84 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 0.87 | 0.79 | 0.88 |
| L | 0.95 | 0.00 | 0.04 | 0.56 | 0.22 | 0.61 | 0.79 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| M | 0.00 | 0.16 | 0.23 | 0.32 | 0.00 | 0.35 | 0.23 | 0.34 | 0.54 | 0.34 |
| S_1 | 1.00 | 0.82 | 0.49 | 0.62 | 0.71 | 0.63 | 0.51 | 0.74 | 0.74 | 0.76 |
| S_2 | 0.14 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

通过计算协方差矩阵的特征值与特征向量,并根据特征值计算贡献率。主成分 1 的贡献率为 75.53%,主成分 2 的贡献率为 17.48%,累计贡献率达 93.01%,基本上保留了 10 个抗蚀性指标的绝大部分信息,因此选取这 2 个主成分作为评价不同石漠化程度土壤抗蚀性主成分分析的依据,见表 6。本文所选的 10 个指标贡献率均较大,能够较好地评价不同石漠化程度

表 6 基于土壤抗蚀性的主成分分析

| 主成分 | 各项指标因子载荷 | | | | | | | | | | 特征根 | 累计 贡献率/% |
|-------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|-------|-------------|
| | Y_1 | Y_2 | Y_3 | Y_4 | Y_5 | Y_6 | Y_7 | Y_8 | Y_9 | Y_{10} | | |
| F_1 | 0.802 | -0.258 | -0.853 | 0.943 | 0.754 | 0.959 | 0.970 | 0.978 | 0.938 | 0.979 | 7.553 | 75.527 |
| F_2 | 0.184 | 0.965 | 0.394 | 0.239 | 0.640 | 0.185 | 0.065 | -0.119 | -0.311 | -0.104 | 1.748 | 93.004 |

对表 6 中初始因子载荷矩阵中的两列数据进行转化后可以得到相应的特征向量,将得到的特征向量与标准化后的数据相乘,然后就可以得出主成分表达式,从而分别求得所有土壤样品分别在 F_1 、 F_2 个主成分上的得分。根据主成分计算公式,可得到 2 个主成分与原 10 项指标的线性组合公式。

$$F_1 = 0.292ZY_1 - 0.094ZY_2 - 0.310ZY_3 + 0.343ZY_4 + 0.274ZY_5 + 0.349ZY_6 + 0.353ZY_7 + 0.356ZY_8 + 0.341ZY_9 + 0.356ZY_{10}$$
$$F_2 = 0.139ZY_1 + 0.730ZY_2 + 0.298ZY_3 + 0.181ZY_4 + 0.484ZY_5 + 0.140ZY_6 + 0.049ZY_7 - 0.090ZY_8 - 0.235ZY_9 - 0.079ZY_{10} \quad (3)$$

式中: F_1 为第一主成分; F_2 为第二主成分; $ZY_{(i=1-10)}$ 为表 6 中经过标准化处理后的各项理化指标。

将标准化数据代入公式(3),可得到不同组成成分得分。再根据 $F = 0.7553F_1 + 0.1748F_2$,从而求得

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i(x_{ij})}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (1)$$

$$y_{ij} = \frac{\max_i(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_i(x_{ij}) - \min_i(x_{ij})} \quad (2)$$

式中: y_{ij} 为处理后的指标值; x_{ij} 为表 4 中的指标值; $\min_i(x_{ij})$ 为表 4 中不同石漠化程度指标中的最小值, $\max_i(x_{ij})$ 为表 4 中不同石漠化程度指标中的最大值。

经线性变换后各指标都与评价目标成正比,都为正指标,消除了逆指标的影响。指标特征值转化为 0~1 之间的相对隶属度,消除了量纲的影响,也没有改变指标间的相关性。

的土壤抗蚀能力。对分散率、分散系数、结构破坏率这 3 项逆指标进行处理后,在主成分 1 表现为正值,贡献率也较大。第一主成分中的土壤团聚状况、分散率、分散系数、 $>0.25\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、 $>0.5\text{ mm}$ 水稳性团聚体含量、结构破坏率这 6 项指标第二主成分中的 $<0.05\text{ mm}$ 粉黏粒含量指标因子载荷均超过 0.9,可以作为此次评价的优选指标。

综合得分 F 。在土壤抗蚀性的评价中,综合指数与土壤抗蚀性呈正相关关系。综合指数是评价指标标准化的结果,其正负只表示相对大小,不表示实际意义。评价值为负,并不代表土壤抗蚀性是负的,只表明土壤抗蚀性水平低于平均水平;评价值为正,则表明土壤抗蚀性高于平均水平^[8]。计算结果见表 7。

表 7 不同石漠化程度的土壤抗蚀性综合指数

| 样地 编号 | 主成分 F_1 | 主成分 F_2 | 综合主成 分值 F | 综合 排名 |
|----------|--------------|--------------|----------------|----------|
| CK | 2.67 | 0.98 | 2.19 | 1 |
| L | 1.93 | -1.55 | 1.19 | 2 |
| M | -1.48 | -1.31 | -1.35 | 4 |
| S_1 | 0.91 | 0.92 | 0.85 | 3 |
| S_2 | -4.04 | 0.96 | -2.88 | 5 |

从表 7 可以看出,不同石漠化程度土壤抗蚀性综合指数由强到弱排序为:无石漠化 CK 样地(2.19)>轻度石漠化 L 样地(1.19)>重度石漠化 S_1 样地

(0.85) > 中度石漠化 M 样地 (-1.35) > 重度石漠化 S₂ 样地 (-2.88), 其中中度石漠化 M 样地和重度石漠化 S₂ 样地为负值, 其余均为正值, 差异明显。

3 讨论

(1) 在喀斯特地区草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化规律的研究课题中, 通过主成分法对本文选取的 10 个土壤理化指标进行综合分析, 试验结果表明这 10 个指标对土壤抗蚀能力的评价均具有较大贡献, 并且, 这 10 个指标的联合使用能全面地评价不同石漠化程度土壤的抗蚀能力。章明奎等^[16]对浙江丘陵地区土壤抗蚀性研究时发现, 由凝灰岩、变质岩和花岗岩等发育的土壤中有机质含量较高时, 其抗蚀性较好; 当有机质含量下降时, 其抗蚀性也随之发生较为明显的下降。在本课题研究中出现了不同石漠化程度土壤中有机质分布不规律、有机质的分布与土壤抗蚀性综合指数变化并不相符的现象。张伟等^[17]发现在喀斯特地区岩石裸露率高、石漠化严重的地方, 裸露岩石会被侵蚀、养分物质会在岩隙和石槽土壤中沉积, 造成有机质含量反而变大。在本文中, 石漠化严重的 S₁ 号样地有机质含量最高, 从而认定其土壤抗蚀能力最强, 是值得商榷的。因此, 在喀斯特地区不能采用单指标对土壤抗蚀性研究, 需采用多指标进行综合评价。

(2) 一般而言, 黏粒含量高的土壤, 颗粒细微、粒间孔隙小、固体相比表面积大, 其吸附能力强, 持水和保水能力好。王佩将等^[8]将 <0.001 mm 黏粒含量作为评价土壤抗蚀性的优选指标。本文的试验结果也可以说明这一点。但是黏粒含量高的土壤下渗能力弱, 蓄水能力差, 过多还易板结, 氮等养分迁移速度缓慢, 不利于植物根系对水和养分的吸收利用^[18]。通过主成分分析, <0.05 mm 黏粉粒含量指标比 <0.001 mm 黏粒含量在此次评价中优势更为明显。因此, 粉粒及砂粒含量能否作为评价土壤抗蚀能力的指标, 黏粒含量在评价土壤抗蚀性的临界条件等, 都需要进一步研究证实。

(3) 石漠化演替过程的研究一般需要较长的时间, 常需几代人的相继努力。通过时空互代法对不同石漠化程度样地土壤的抗蚀能力差异进行评价, 来探讨石漠化过程中不同阶段的土壤抗蚀能力变化, 能够有效地缩短研究周期, 取得不错的效果。本文通过对土壤抗蚀性综合指数分析, 在石漠化过程中土壤的抗蚀能力是逐渐下降的, 这也符合一般认识规律。但却也存在着在石漠化发展后期, 土壤的抗蚀能力反而上升的可能。这可能是因为喀斯特山区, 岩石破碎、土层较薄, 土壤分布不连续呈斑状。在石漠化演替过程中, 土壤面积缩小、土层变薄、岩石裸露, 土壤逐渐

分布于石土面、石沟、石坑中, 甚至分布于岩石裂隙及石槽中^[19], 反而不易流失。盛茂银等^[20]认为随着石漠化程度加深, 裸露岩石聚集效应会逐渐加强, 汇集大气沉降养分和岩溶产物, 增加了土壤养分和有机物的输入, 使得土壤的理化性质先退化, 后发生改善, 土壤理化性质的改善也有可能提高了土壤的抗蚀能力。

4 结论

(1) 本文所选 10 项理化指标可以较为全面地综合评价不同石漠化程度土壤抗蚀能力, 土壤团聚状况、分散率、分散系数、>0.25 mm 水稳性团聚体含量、>0.5 mm 水稳性团聚体含量、结构破坏率、<0.05 mm 粉黏粒含量这 7 项可以作为评价的优选指标, 有机质含量、<0.001 mm 黏粒含量、土壤团聚度这 3 项指标次之。

(2) 不同石漠化程度土壤抗蚀性综合指数由强到弱排序为: 无石漠化 CK 样地 (2.19) > 轻度石漠化 L 样地 (1.19) > 重度石漠化 S₁ 样地 (0.85) > 中度石漠化 M 样地 (-1.35) > 重度石漠化 S₂ 样地 (-2.88), 其中中度石漠化 M 样地和重度石漠化 S₂ 样地为负值, 其余均为正值, 差异明显。这表明在石漠化过程中土壤的抗蚀能力总体呈下降趋势, 但也存在着在石漠化发展后期, 土壤的抗蚀能力反而上升的可能。

参考文献:

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 贺祥, 熊康宁, 陈洪云. 喀斯特石漠化地区不同治理措施下的土壤抗蚀性研究: 以贵州毕节石桥小流域为例[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 34(4): 133-139.
- [3] 郭培才, 张振中. 黄土区土壤抗蚀性预报及评价方法研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 48-51, 58.
- [4] 赵洋毅, 周运超, 段旭. 黔中喀斯特地区不同岩性土壤的抗蚀抗冲性研究[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(29): 9311-9313, 9317.
- [5] 胡宁, 傅瓦利, 马志敏, 等. 岩溶石漠化山地不同退耕模式土壤抗蚀性及其与结构体分形关系研究[J]. 中国岩溶, 2008, 27(2): 115-121.
- [6] 陈佳, 陈洪松, 冯腾, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用类型土壤抗蚀性研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(1): 105-110.
- [7] 吴鹏, 朱军, 崔迎春, 等. 黔中杠寨小流域不同植被类型土壤抗蚀性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(8): 64-70.
- [8] 王佩将, 戴全厚, 丁贵杰, 等. 退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 806-815.
- [9] 齐建文, 李矿明, 黎育成, 等. 贵州草海湿地现状与生态恢复对策[J]. 中南林业调查规划, 2012, 31(2): 39-40, 56.

3 结论

从风蚀和水蚀动力的空间分布上看,毛乌素沙地南部、库布奇沙地东部、洪善达克沙地以及科尔沁沙地所处地带,其降雨侵蚀力大于1 000,而风蚀气候因子指数在50以上,这些地区植被覆盖度低,由于风蚀为水蚀提供了充足的物质基础,导致侵蚀模数较大,成为黄河、海河和辽河的泥沙主要来源地之一。因此,在这些地区,应该风水蚀兼治,降低侵蚀模数,减少入河泥沙。

(1) 中国北方多年平均侵蚀性降雨量为269.01 mm,占多年平均降雨总量的52%,降雨侵蚀力平均值为1 652.90 (MJ·mm)/(hm²·h·a)。风蚀气候因子指数平均值为70.12。降雨侵蚀力在空间分布上呈中等程度变异,而风蚀气候因子指数为强变异。

(2) 降雨侵蚀力具有强烈的空间相关性,而风蚀气候因子指数具有中等的空间相关性。风蚀气候因子指数总体表现为北方高南方低,中部高,东西较低,而降雨侵蚀力的空间分布从东南向西北呈递减趋势。

(3) 风蚀气候因子指数最大值出现最多的月份为4月(64.18%),降雨侵蚀力最大值出现最多的月份为7月,具有明显的非同步性。风蚀气候因子指数的年内分布较为均匀,而降雨侵蚀力的年内分布极不均匀。

参考文献:

- [1] 景可,陈永宗.我国土壤侵蚀与地理环境的关系[J].地理研究,1990,9(2):29-38.
- [2] 李锐.中国水土流失基础研究的机遇与挑战[J].自然杂志,2008,30(1):6-11.
- [3] 宋阳,刘连友,严平.风水复合侵蚀研究述评[J].地理学

报,2006,61(1):77-88.

- [4] 海春兴,史培军,刘宝元,等.风水两相侵蚀研究现状及我国今后风水蚀的主要研究内容[J].水土保持学报,2002,16(2):50-52.
- [5] 李秋艳,蔡强国,方海燕.风水复合侵蚀与生态恢复研究进展[J].地理科学进展,2010,29(1):65-72.
- [6] 张平仓,唐克丽.六道沟流域有效水蚀风蚀能量及其特征研究[J].水土保持学报,1997,3(2):32-40.
- [7] 高学田,唐克丽.风蚀水蚀交错带侵蚀能量特征[J].水土保持通报,1996,16(3):27-31.
- [8] 张庆印,樊军,张晓萍.水蚀对风蚀影响的室内模拟试验[J].水土保持学报,2012,26(2):75-79.
- [9] 杨岩岩,刘连友,曹恒武.沙漠—黄土过渡带风水复合侵蚀营力特征:以靖边县为例[J].干旱区研究,2012,29(4):692-698.
- [10] 谢云,刘宝元.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [11] 高海东,李占斌,李鹏,等.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究[J].地理学报,2015,70(9):1503-1515.
- [12] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962,17(4):162-165.
- [13] 杨兴华,何清,李红军,等.塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J].中国沙漠,2012,32(4):990-995.
- [14] 王金南,逯元堂,周劲松,等.基于GDP的中国资源环境基尼系数分析[J].中国环境科学,2006,26(1):111-115.
- [15] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.

(上接第18页)

- [10] 中华人民共和国国家林业局. LY/T1840—2009. 喀斯特石漠化地区植被恢复技术规程[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [11] 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.
- [12] 沈慧,姜凤岐,杜晓军,等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报,2000,11(3):345-348.
- [13] 刘淑娟,张伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因[J]. 应用生态学报,2010,21(9):2249-2256.
- [14] 史东梅,吕刚,蒋光毅,等. 马尾松林地土壤物理性质变化及抗蚀性研究[J]. 水土保持学报,2005,19(6):35-39.
- [15] 汪天祥,许士国,韩成伟. 改进主成分分析法在南淝河水水质评价中的应用[J]. 水电能源科学,2012,30(10):

33-36.

- [16] 章明奎,韩常灿. 浙江省丘陵土壤的抗蚀性[J]. 浙江农业学报,2000,12(1):25-30.
- [17] 张伟,陈洪松,王克林,等. 种植方式和裸岩率对喀斯特洼地土壤养分空间分异特征的影响[J]. 应用生态学报,2007,18(7):1459-1463.
- [18] 王小彬,蔡典雄,张志田,等. 土壤颗粒大小对水、肥保持和运移的影响[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(1):64-68.
- [19] 周运超,王世杰,卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境,2010,38(1):1-7.
- [20] 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质[J]. 生态学报,2015,35(2):434-448.