

# 草海不同石漠化程度土壤分形特征研究

李翠莲<sup>1,2</sup>, 戴全厚<sup>1</sup>, 姚云<sup>3</sup>

(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; 3. 息烽县水务管理局, 贵州 息烽 551100)

**摘要:**基于土壤粒径分形维数的计算方法,对草海不同石漠化程度土壤颗粒、微团聚体、团聚体粒径分布的分形维数进行了研究。结果表明:石漠化地区土壤颗粒分形维数与土壤粉粒(0.001~0.05 mm)呈极显著负相关( $r=-0.963^{**}$ ,  $P<0.01$ ),与土壤黏粒( $<0.001$  mm)呈极显著正相关( $r=0.995^{**}$ ,  $P<0.01$ );土壤微团聚体主要以 $>0.01$  mm的大粒级微团聚体为主,其分形维数与大粒级( $>0.01$  mm)微团聚体表现出呈极显著的负相关( $r=-0.964^{**}$ ,  $P<0.01$ );土壤风干团聚体 $>5$  mm粒级的含量达到70%以上。湿筛后, $>5$  mm土壤团聚体含量减少,其余粒级有不同程度的增加,其中 $<0.25$  mm的增幅最大。石漠化程度的加剧,使土壤黏粒含量逐渐增多,土壤颗粒、土壤微团聚体分形维数逐渐增大。通过对草海地区石漠化土壤结构特征的研究,可为草海地区石漠化治理、草海湿地的保护提供参考。

**关键词:**草海; 石漠化程度; 分形维数

中图分类号:S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)01-0158-05

## Fractal Features of Soil in the Different Degrees of Stony Desertification in Caohai

LI Cuilian<sup>1</sup>, DAI Quanhou<sup>1</sup>, YAO Yun<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Xifeng Forestry and Afforestation Bureau, Xifeng, Guizhou 551100, China; 3. Xifeng Water Resources Bureau, Xifeng, Guizhou 551100, China)

**Abstract:** Based on the calculation method of soil fractal dimension, the fractal dimension of soil particle, micro-aggregates and water-stable aggregates in different degree of Stony Desertification in Caohai was studied. The results showed that the fractal dimension of particle size distribution was dramatically negatively correlated with soil silt (0.001—0.005 mm) ( $r=-0.963^{**}$ ,  $P<0.01$ ) and significantly positively correlated with soil clay( $<0.001$  mm) ( $r=0.995^{**}$ ,  $P<0.01$ ). Soil micro-aggregates( $>0.01$  mm) was main component of aggregate, its fractal dimension was significantly positively correlated with large size micro-aggregates( $>0.01$  mm) ( $r=-0.964^{**}$ ,  $P<0.01$ ). Air-dried soil aggregate( $>5$  mm) accounts for more than 70% of air-dried soil aggregate composition. Through wet screen processing, air-dried soil aggregate( $>5$  mm) reduced, the other sizes of aggregates increase to some extent, increment of  $<0.25$  mm aggregate significant. In the process of desertification, soil clay content increased, the fractal dimension of soil particles and micro-aggregates fractal dimension increased gradually. This study aims to provide reference for desertification control and wetland protection of Caohai through the study of rocky desertification soil structure characteristics.

**Keywords:** Caohai; degree of stony desertification; fractal dimension

草海湿地是我国一级保护鸟类黑颈鹤的主要越冬栖息地,由水域、沼泽、草甸以及丰富的水生动植物和较高生产力的水生生物群落组成,是一个完整的高原湿地生态系统,其结构和功能完整,是我国亚热带高原湿地生态系统的典型代表。由于受人为活动的影响,

作为国家的一级重要保护湿地<sup>[1]</sup>,草海的生态环境受到严重的威胁。目前,威宁全县石漠化面积占土地总面积的17.53%,其中,轻度石漠化占69.46%,中度石漠化占27.69%,强度石漠化(含极强度)占2.85%<sup>[2]</sup>。石漠化的形成,加大了上游地区的水土流失,大量的地

收稿日期:2014-04-03

修回日期:2014-04-23

资助项目:国家“十二五”科技支撑计划(2011BAC02B02);国家自然科学基金(41461057);贵州省重大应用基础专项(黔科合JZ字[2014]2002);贵州省喀斯特生态与环境专业学位研究生工作站(贵州省教育厅,2014)

第一作者:李翠莲(1988—),女,贵州清镇人,硕士研究生,主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail:824705508@qq.com

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

表径流携带泥沙进入草海,造成草海泥沙淤积,库容减小。泥沙还携带大量养分进入草海,造成水体富营养化,扰乱整个湿地生态系统。水土流失的加剧,导致原本脆弱的石漠化形势更加严峻。

土壤是由大小、形状各异的土壤颗粒和孔隙组成的结构极不规则的多孔介质,是一种较典型的分形材料,具有统计意义上的自相似性,是具有分形特征的系统<sup>[3-5]</sup>。分维值  $D$  的大小直接表征样本之间的结构性,能较好地表征喀斯特石漠化过程中的土壤物理性质和养分状况以及石漠化的程度,可作为评价喀斯特地区土壤退化的定量指标之一<sup>[6]</sup>。

自分形理论提出以来,国内外对土壤的分形特征有了大量的研究,但其研究方向主要集中在不同植被类型<sup>[7-9]</sup>、植被破坏前后<sup>[10]</sup>及不同土地利用方式<sup>[11]</sup>下的土壤分形特征,而对不同石漠化程度土壤分形特征的研究不多<sup>[6,12-14]</sup>。尤其对草海石漠化地区土壤分形特征的研究几乎是空白。因此,本研究运用分形理论,对草海不同石漠化程度土地的土壤颗粒及团聚体的分形特征进行研究,旨在揭示草海地区石漠化土壤的结构特征,为草海地区石漠化治理和草海湿地的保护提供参考。

表 1 样地基本特征

样地编号	经度	纬度	海拔高度/m	坡向	坡度/(°)	土层厚度/cm	岩石裸露率/%	植被覆盖率/%	石漠化程度
I	104°20'38.7"	26°47'9.7"	2343	西(W)	38	20	60	20	重
II	104°20'35.6"	26°49'14.4"	2321	西南(WS)	28	20	60	20	重
III	104°20'30.9"	26°49'14.1"	2302	西南(WS)	35	30	40	70	中
IV	104°20'35.4"	26°49'8.3"	2301	西南(WS)	40	50	30	60	轻
V	104°20'24"	26°49'21"	2251	西南(WS)	10	50	0	90	无

1.2.2 测定方法 土壤机械组成及微团聚体的测定采用吸管法,土壤团聚体的测定采用干—湿筛法<sup>[16]</sup>。

1.2.3 数据处理与分析 用 Excel 2010 进行数据的处理及图表的绘制、用 Spss 18.0 软件进行数据的统计分析。

### 1.3 土壤分形维数计算方法

分形维数采用杨培岭等<sup>[17]</sup>的方法,计算公式为:

$$\lg \left[ \frac{\omega(r < \bar{d}_i)}{\omega_0} \right] = (3 - D) \lg \left( \frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{\max}} \right)$$

式中: $\bar{d}_{\max}$ ——最大粒径土粒的平均直径; $\bar{d}_i$ ——两筛分粒级的平均粒径; $\omega(r < \bar{d}_i)$ —— $< \bar{d}_i$ 土粒直径的累积重量; $\omega_0$ ——土壤各粒径质量的总和; $D$ ——分形维数。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤颗粒组成及其分形特征

土壤颗粒组成是构成土壤结构体的基本单元。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于贵州省毕节地区威宁彝族回族苗族自治县草海镇,属草海湿地上游集水区。地理坐标为东经 103°36'—104°45',北纬 26°30'—27°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。气候为亚热带季风性湿润气候,年均气温为 10.4℃,冬季寒冷,夏季温凉,日温差大,年温差小。年平均降雨量为 962 mm,且主要集中在 6—9 月,约占全年降水量的 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。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地选择及土样的采集 根据不同石漠化程度(石漠化程度的划分参考彭琴等<sup>[15]</sup>学者的划分方法),在研究区设置 5 个样地(样地特征见表 1),每个样地分别设置 3 个 20 m×20 m 的样方,在样方内按 S 型布设 5 个采样点,用铝盒采集表层(0—20 cm)原状土,用于测定土壤团聚体;用土钻在 5 个采样点钻取 0—20 cm 的土样,带回实验室风干,分别过 1 mm 和 0.25 mm 筛,用于测定土壤机械组成和土壤微团聚体。

不同土壤粒径含量组合构成不同质地的土壤类型,影响土壤的理化性质,决定土壤的持水性、通透性及保温、保肥能力,进而影响土壤的物理、化学和生物学过程<sup>[13]</sup>。由表 2 可知,IV 号样地的砂粒(1~0.05 mm)含量最高,达 11.59%,其次是 III 号样地,11.03%,I 号样地含量最少,仅为 8.14%;V 号样地的粉粒(0.001~0.005 mm)含量最高,I 号样地最低,粉粒含量从高到低依次是:V 号(49.60%)、IV 号(46.14%)、III 号(44.40%)、II 号(43.47%)、I 号(37.85%);各样地土壤中黏粒( $< 0.001$  mm)的含量大小与粉粒(0.001~0.005 mm)相反,表现为:I 号(54.01%)>II 号(47.78%)>III 号(44.57%)>IV 号(42.27%)>V 号(41.73%);从土壤颗粒的分形维数可看出,I 号样地分形维数最大,为 2.908 4,V 号样地最小,为 2.854 3,II、III、IV 号样地分别为 2.881 8,2.865 5,2.861 5。同时,分形维数呈随着粉粒含量的增加而减小,随着黏粒的增加而增加的规律。通过对各粒径含量与分形维

数进行相关性分析发现:颗粒分形维数与 $<0.001$  mm含量呈极显著的正相关,相关系数为 $0.995^{**}$ ,与 $0.001\sim 0.005$  mm含量呈正相关(未达到显著),与 $0.005\sim 0.01$  mm, $0.01\sim 0.05$  mm, $0.05\sim 1$  mm含量均呈负相关,但仅与 $0.01\sim 0.05$  mm的含量达到显著水平,相关系数为 $-0.957^*$ 。对分形维数与土壤砂粒( $1\sim 0.05$  mm)、粉粒( $0.001\sim 0.5$  mm)、黏粒

( $<0.001$  mm)作线性回归,关系式为 $D_{\text{颗粒}}=2.949\sim 0.008X_{\text{砂粒}}$ ,相关系数为 $0.007$ ; $D_{\text{颗粒}}=3.088\sim 0.005X_{\text{粉粒}}$ ,相关系数为 $-0.963^{**}$ ; $D_{\text{颗粒}}=2.678+0.004X_{\text{黏粒}}$ ,相关系数为 $0.995^{**}$ 。结果表明,土壤颗粒分形维数与土壤粉粒含量呈极显著的负相关关系,与土壤黏粒含量呈极显著的正相关关系,即土壤粘性越重,颗粒分形维数越大。

表2 土壤颗粒组成及其分形维数

样地 编号	土壤颗粒含量/%						分形 维数
	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	
I	3.91	4.22	6.68	7.30	23.87	54.01	2.9084
II	5.95	2.80	11.63	13.26	18.58	47.78	2.8818
III	1.31	9.72	16.48	6.75	21.16	44.57	2.8655
IV	4.68	6.91	14.52	10.40	21.22	42.27	2.8615
V	4.02	4.65	20.01	9.03	20.55	41.73	2.8543

## 2.2 土壤微团聚体组成及其分形维数

土壤微团聚体是土壤细小颗粒在有机-无机胶结物的作用下相互凝聚和粘结而成的复杂综合体,对土壤中水分和营养元素保贮、释供及转化等方面发挥着重要的作用,影响着土壤肥力水平的高低和土壤结构的改善<sup>[18]</sup>。由表3可以看出,I号样地 $<0.001$  mm微团聚体的含量最高( $21.61\%$ ),V号样地含量最低( $10.13\%$ ),从I号样地到V号样地呈递减趋势。I号样地 $1\sim 0.25$  mm微团聚体含量最低,为 $19.73\%$ ,且与其他样地相差较大,其余样地从大到小依次为:V号样地( $41.34\%$ ) $>$ IV号样地( $34.89\%$ ) $>$ II号样地( $33.75\%$ ) $>$ III号样地( $30.89\%$ )。0.25~0.05 mm微团聚体含量变化范围为 $8.71\%\sim 11.74\%$ ,其中V号样地含量最高,III号样地最低。0.05~0.01 mm微团聚体含量介于 $15.68\%\sim 19.08\%$ 之间,高低顺序依次为I号样地 $>$ III号样地 $>$ V号样地 $>$ IV号样地 $>$ II号样地。0.01~0.005 mm微团聚体含量最少,

只占了 $6.73\%\sim 8.03\%$ ,其中以IV号样地含量最高,I号样地次之,V号样地最低。0.005~0.001 mm微团聚体含量,由高到低依次是:I号样地( $22.27\%$ ) $>$ III号样地( $17.62\%$ ) $>$ IV号样地( $17.37\%$ ) $>$ II号样地( $16.93\%$ ) $>$ V号样地( $12.47\%$ )。陈恩凤等<sup>[19]</sup>认为小于和大于 $0.01$  mm的两类“特征微团聚体”的组成比例,是综合评价土壤肥力的新的有用指标,且 $<0.01$  mm/ $>0.01$  mm微团聚体含量的比值是肥地 $<$ 瘦地。从表3可以得出,V号样地大粒级( $>0.01$  mm)微团聚体含量最高,为 $70.67\%$ ,IV号样地次之,为 $62.92\%$ ,I号样地最低,为 $48.39\%$ ;除I号样地外,其余样地大粒级( $>0.01$  mm)微团聚体含量都大于 $50\%$ (III号样地为 $58.46\%$ ,II号样地为 $60.1\%$ ),说明研究区土壤微团聚体主要以 $>0.01$  mm的大粒级为主。从 $<0.01$  mm/ $>0.01$  mm微团聚体含量的比值来看,I号样地( $1.0665$ ) $>$ III号样地( $0.71057$ ) $>$ II号样地( $0.6639$ ) $>$ IV号样地( $0.5893$ ) $>$ V号样地( $0.4150$ )。

表3 土壤微团聚体组成及其分形维数

样地 编号	土壤微团聚体含量/%						分形 维数
	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	
I	19.73	9.58	19.08	7.73	22.27	21.61	2.7950
II	33.75	10.68	15.68	7.72	16.93	15.25	2.7533
III	30.89	8.71	18.87	7.69	17.62	16.22	2.7535
IV	34.89	10.86	17.17	8.03	17.37	11.68	2.7131
V	41.34	11.74	17.60	6.73	12.47	10.13	2.6976

不同石漠化程度土壤微团聚体分形维数为 $2.6976\sim 2.7950$ ,其大小分别是I号样地( $2.7950$ ) $>$ III号样地( $2.7535$ ) $>$ II号样地( $2.7533$ ) $>$ IV号样地( $2.7131$ ) $>$ V号样地( $2.6976$ )。将分形维数 $D_{\text{微团}}$ 与各粒级团聚体之间进行相关性分析,结果表明

分形维数 $D_{\text{微团}}$ 与 $1\sim 0.25$  mm微团聚体呈显著的负相关( $r=-0.942^*$ , $P<0.05$ ),与 $0.005\sim 0.001$  mm微团聚体呈显著的正相关( $r=0.893^*$ , $P<0.05$ ),与 $<0.001$  mm微团聚体呈极显著的正相关( $r=0.991^{**}$ , $P<0.01$ )。对分形维数 $D_{\text{微团}}$ 与大粒( $>0.01$  mm)微团

聚体作线性回归,关系式为  $D_{微团} = 3.018 \sim 0.005X_{大粒}$ , 相关系数为  $-0.964^{**}$ 。显然,土壤微团聚体较大粒级含量越多,微团聚体分形维数越小。

### 2.3 土壤团聚体组成及其分形维数

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,有保证和协调土壤中的水肥气热,影响土壤酶活性的种类和活性,维持和稳定土壤疏松熟化层的作用,其大、小粒级的组成比例,影响着土壤肥力水平的高低<sup>[20]</sup>。

由土壤团聚体干筛结果可知(表 4),各样地  $>5$  mm 土壤团聚体的含量均在 70% 以上, I 号样地最高,达到了 87.27%, II 号样地最低,为 70.27%,结果表明研究区土壤团聚体以  $>5$  mm 的大粒级团聚体为主。5~2 mm 团聚体的含量次之,各样地间的含量大小顺序为 II 号样地  $>$  IV 号样地  $>$  III 号样地  $>$  I 号样地。2~1 mm, 1~0.5 mm, 0.5~0.25 mm,  $<0.25$  mm 土壤团聚体的含量相对较少,其中 2~1 mm, 1~0.5 mm, 0.5~0.25 mm 土壤团聚体含量最大值均出现在 II 号样地,且 I 号样地 2~1 mm, 1~0.5 mm,  $<0.25$  mm 土壤团聚体含量均最小。土壤团聚体干筛分形维数变化范围为 1.909 3~2.046 0,从大到小依次为 III 号样地(2.046 0)  $>$  V 号样地(2.022 6)  $>$  I 号样地(1.973 9)  $>$  IV 号样地(1.914)  $>$  II 号样地(1.909 3)。

经过湿筛后,  $>5$  mm 土壤团聚体含量急剧下

降,其中减幅最大的是 I 号样地,减少了 86.07%;其次是 V 号样地,减少了 65.37%;IV 号样地减少量最小,也减少了 30.72%。结果表明,在石漠化地区,土壤团聚体抵抗水力分离、崩解的能力比较弱。样地土壤中其他粒级土壤团聚体含量都有不同程度的提高,以  $<0.25$  mm 土壤团聚体含量增幅最大,为 680.20%~3812.28%,各样地含量从大到小依次为: I 号样地(22.30%)  $>$  III 号样地(17.46%)  $>$  II 号样地(11.56%)  $>$  V 号样地(9.76%)  $>$  IV 号样地(7.88%)。

从表中可以看出,各样地土壤水稳性团聚体主要集中在较大粒级, I—IV 号样地  $>2$  mm 水稳性团聚体的含量分别为 37.26%, 60.94%, 68.70%, 71.22%, 58.68%。通过计算得到各样地结构体破坏率,结果为: I 号样地  $>$  III 号样地  $>$  II 号样地  $>$  V 号样地  $>$  IV 号样地。土壤经过湿筛处理后,其团聚体分形维数也有所提高,各土壤水稳性团聚体的分形维数为: III 号样地(2.648 8)  $>$  I 号样地(2.491 4)  $>$  II 号样地(2.374 0)  $>$  IV 号样地(2.317 2)  $>$  V 号样地(2.261 9)。对  $>0.25$  mm 土壤团聚体与团聚体分形维数进行线性回归分析,得到:  $D_{团聚体} = 5.049 \sim 0.031X_{>0.25 \text{ mm}}$ ,  $r = -0.932^{**}$ 。说明土壤团聚体分形维数随土壤团粒结构体含量的增加而减小。

表 4 土壤团聚体组成及其分形维数

样地 编号	测定 方法	各级团聚体含量/%						结构体 破坏率/%	分形 维数
		$>5$ mm	5~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	$<0.25$ mm		
I	干筛	87.27	6.87	2.95	1.65	0.69	0.57	21.85	1.9739
	湿筛	12.16	25.10	11.60	20.38	8.46	22.30		2.4914
II	干筛	70.27	15.77	7.29	3.94	1.64	1.09	10.59	1.9093
	湿筛	37.18	23.76	11.02	11.88	4.60	11.56		2.3740
III	干筛	85.49	7.56	3.53	1.93	0.63	0.86	16.74	2.0460
	湿筛	52.94	15.76	5.32	5.94	2.58	17.46		2.6488
IV	干筛	72.14	15.03	7.00	3.57	1.25	1.01	6.94	1.9140
	湿筛	49.98	21.24	7.76	10.08	3.06	7.88		2.3172
V	干筛	78.08	12.02	4.85	2.83	1.06	1.16	8.70	2.0226
	湿筛	27.04	31.64	12.38	13.90	5.28	9.76		2.2619

注:结构体破坏率=( $>0.25$  mm 风干团聚体 -  $>0.25$  mm 水稳性团聚体)/ $>0.25$  mm 风干团聚体  $\times 100\%$ 。

### 2.4 不同石漠化等级土壤分形维数

从表 5 可知,不同石漠化程度土壤各分形维数均表现出  $D_{颗粒} > D_{微团} > D_{湿筛} > D_{干筛}$ ,且  $D_{颗粒}$  与  $D_{微团}$  的最大值都出现在重度石漠化土壤中,无石漠化样地土壤  $D_{颗粒}$ 、 $D_{微团}$  值最小。对土壤颗粒组成分形维数  $D_{颗粒}$  和土壤微团聚体分形维数  $D_{微团}$  作相关性分析后,发现土壤颗粒组成分形维数与土壤微团聚体分形维数呈显著的正相关关系,相关系数为 0.922\*。土壤颗粒组成分形维数从 I—V 号样地逐渐减小,即随石漠化等级的增加而增大。分形维数越大,土壤粘性

越重,土壤通透性就越差。相比无石漠化地,石漠化样地的土壤颗粒组成分形维数都较大,说明石漠化发展过程中,土壤有向重粘性质地发展的趋势。有研究认为随着石漠化的发展,土壤物理性黏粒(粒径  $<0.01$  mm)含量逐渐增加,物理性砂粒(粒径  $>0.01$  mm)含量逐渐减少,土壤向粘质化、紧密化发展<sup>[13]</sup>。同时,土壤微团聚体分形维数曲线表现出先下降再上升后下降的趋势,但从石漠化程度来看,土壤微团聚体分形维数总体上是随石漠化程度的降低而下降;各石漠化等级土壤风干团聚体经过湿筛处理后,出现分形

维数升高的现象。就土壤风干团聚体分形维数而言,最高值出现在中度石漠化样地,其次是无石漠化样地,但它在石漠化发展过程中的变化规律并不明显。湿筛后,土壤团聚体分形维数曲线与风干土壤团聚体分形维数曲线相似,只有无石漠化样地的团聚体分形维数从风干时的第二,变成了湿筛处理后的最低值。

表5 不同石漠化程度土壤分形维数

样地编号	$D_{\text{颗粒}}$	$D_{\text{微团}}$	$D_{\text{干筛}}$	$D_{\text{湿筛}}$
I(重)	2.9084	2.7950	1.9739	2.4914
II(重)	2.8818	2.7533	1.9093	2.3740
III(中)	2.8655	2.7535	2.0460	2.6488
IV(轻)	2.8615	2.7131	1.9140	2.3172
V(无)	2.8543	2.6976	2.0226	2.2619

### 3 结论与讨论

(1) 石漠化地区土壤颗粒分形维数为 2.854 5~2.908 4,且土壤颗粒分形维数与土壤粉粒含量呈极显著负相关( $r = -0.963^{**}$ ,  $P < 0.01$ )、与黏粒呈极显著的正相关关系( $r = 0.995^{**}$ ,  $P < 0.01$ )。这与许多学者的研究结果类似,都认为分形维数的大小主要是由粒级较细的颗粒含量所决定<sup>[21]</sup>。土壤微团聚体主要以 $>0.01$  mm的大粒级微团聚体为主,同时对土壤微团聚体分形维数与大粒( $>0.01$  mm)微团聚体含量做线性回归之后相关性显著。各样地土壤风干团聚体 $>5$  mm粒级的含量均在70%以上,经过湿筛处理, $>5$  mm土壤团聚体含量大量的减少,而其他粒级土壤团聚体都有不同程度的提高,其中 $<0.25$  mm土壤团聚体含量增加最明显。造成这种现象的原因可能是土粒间、微结构间的胶结力较小<sup>[22]</sup>,胶结物含量较少。土壤团聚体抵抗水流崩解、分散的能力往往表征土壤抵抗水流侵蚀的能力,因此研究区一旦遇到径流,就很容易发生土壤侵蚀,造成水土流失。

(2) 不同石漠化程度土壤各分形维数均表现出 $D_{\text{颗粒}} > D_{\text{微团}} > D_{\text{湿筛}} > D_{\text{干筛}}$ ,且土壤颗粒组成分形维数与土壤微团聚体分形维数相关性显著。从石漠化演化过程来看,土壤颗粒组成分形维数与土壤微团聚体分形维数都有随石漠化等级的减小而逐渐降低的趋势。这是由于在石漠化的水蚀区土壤的侵蚀程度越大,其重量分形维数就越小,这与陈子玉<sup>[23]</sup>等学者对南方水蚀区土壤颗粒分形的研究结果相似。同时也表明对于石漠化过程中土壤团聚体分形特征来说,土壤干、湿筛分形维数变化相似,但随石漠化程度的变化规律并不明显。

(3) 随着石漠化程度增强,土壤颗粒分形维数增加,土壤黏粒含量表现出增加的趋势。出现这一现象

的原因可能是由于受人为因素的影响,石漠化的加剧造成植被覆盖率下降、植物群落从高级到低级演替的结果,同时植物根系对土壤的穿插和网络固结作用,可以改变土壤的通透性和力学性质,使颗粒组成和理化性质发生变化<sup>[23]</sup>。有研究表明,石漠化地区土壤物理性黏粒与植被覆盖率有显著的相关性<sup>[24]</sup>。因此,应基于不同程度石漠化土壤分形特征的研究,探究研究区石漠化综合治理模式,从根本上改善土壤结构,提高土壤抗侵蚀能力,为研究区的石漠化治理提供重要依据。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 耿继斌. 石漠化现状与对策研究: 以威宁县为例[J]. 林业建设, 2011(4): 27-31.
- [3] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等. 喀斯特植被恢复过程中的土壤分形特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 178-182, 230.
- [4] 张治伟,傅瓦利,朱章雄,等. 石灰岩区土壤分形特征及其与土壤性质的关系[J]. 土壤, 2009, 9(41): 90-96.
- [5] 胡宁,傅瓦利,马志敏,等. 岩溶石漠化山地不同退耕还林模式土壤抗侵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] 龙健,李娟,邓启琼,等. 贵州喀斯特山区石漠化土壤理化性质及分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(4): 635-639.
- [7] 张昌胜,刘国彬,薛莲,等. 不同沙生植被土壤微团聚体分形特征及抗蚀性[J]. 水土保持通报, 2012, 32(2): 1-6.
- [8] 刘霞,姚孝友,张光灿,等. 沂蒙山林区不同植物群落下土壤颗粒分形与孔隙结构特征[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 31-37.
- [9] 何毓蓉,廖超林,张保华,等. 长江上游人工林与天然林土壤结构质量及保水抗蚀性研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 1-4.
- [10] 丁文峰,丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6): 700-706.
- [11] 李民义,张建军,王春香,等. 晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 125-130.
- [12] 卢红梅,王世杰. 喀斯特石漠化过程中土壤的物理性质变化[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8): 3621-3625, 3644.
- [13] 罗绪强,王世杰,张桂玲,等. 喀斯特石漠化过程中土壤颗粒组成的空间分异特征[J]. 中国农学通报, 2003, 25(12): 227-233.
- [14] 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究[J]. 山地农业生物学报, 2003, 22(3): 204-207.

外,都存在显著差异( $P < 0.05$ );都是夏季多,冬季少,受水温显著影响。但浮游植物数量是夏季各点差异最大,冬季各点差异最小;而浮游植物生物量是夏季各点差异最小,1号与2号样点之间无显著差异( $P = 0.304$ ),秋季各点差异最大。与邹红菊<sup>[4]</sup>研究结果“同一采样点浮游植物的生物量在不同季节有显著性差异( $P < 0.05$ ),但采样点间无显著性差异( $P > 0.05$ )”不同,原因有待于进一步研究。

(2) 相关分析看出,鹤地水库浮游植物数量和生物量的主要环境影响因子是水温、透明度和全磷,说明水库主要是氮污染。这个结论与许多研究相同<sup>[4]</sup>。但为什么不同的水库影响浮游植物数量和生物量的主要环境因子不同,尤其是营养元素(TN, TP等)和pH,结论相差很大,有正相关有是负相关。磷则是水库藻类生长速率的限制因子,丰水期极度缺乏<sup>[2]</sup>。鹤地水库营养元素中,总磷与浮游植物的生物量和数量有正显著相关( $r = 0.692, 0.680, P < 0.05, n = 12$ );氨氮与浮游植物的生物量和数量有负显著相关( $r = -0.628, -0.645, P < 0.05, n = 12$ );硝态氮、总氮是负相关,但影响不显著。原因有待进一步探讨。

#### 参考文献:

[1] 黎红秋. 鹤地水库富营养化综合评价与分布特征研究[D]. 武汉:武汉大学,2004.

[2] 林桂花,韩博平. 鹤地水库浮游生物与富营养化特征分析[J]. 生态科学,2002,21(3):208-212.

[3] 邱小琮,赵红雪,孙晓雪. 宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究[J]. 环境科学,2012,33(7):2261-2271.

[4] 邹红菊,胡韧,韩博平. 鹤地水库浮游植物群落的结构与动态[J]. 热带亚热带植物学报,2010,18(2):196-202.

[5] 金相灿,屠清瑛,章宗涉,等. 湖泊富营养化调查规范

[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990.

[6] 胡鸿钧,魏印心. 中国淡水藻类:系统、分类及生态[M]. 北京:科学出版社,2006.

[7] 徐兴华,陈椽,宁爱丽,等. 阿哈水库浮游植物数量与环境因子的关系[J]. 安徽农业科学,2012,40(10):6106-6109.

[8] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[9] 林少君,贺立静,黄沛生,等. 浮游植物中叶绿素a提取方法的比较与改进[J]. 生态科学,2005,24(1):9-11.

[10] 陈菊芳,齐雨藻,徐宁,等. 大亚湾澳头水域浮游植物群落结构及周年数量动态[J]. 水生生物学报,2006,30(3):311-317.

[11] Katherine R M, Rochelle G L, Mike C, et al. Phosphorus availability, phytoplankton community dynamics, and taxon-specific phosphorus status in the Gulf of Aqaba, Red sea[J]. Limnol Oceanogr, 2007, 52(2): 873-885.

[12] Temponeras M, Kristiansen J, Moustaka-Gouni M. Seasonal variation in phytoplankton composition and physical-chemical features of the shallow Lake Doirani, Macedonia, Greece [J]. Hydrobiologia, 2000, 424 (1/3):109-122.

[13] 杨广利. 洪泽湖富营养化状态调查及防治技术研究初探[D]. 青岛:中国海洋大学,2003.

[14] Vadas P A, Kleinman P J, SharpleY A N, et al. Relating soil phosphorus to dissolved phosphorus in runoff: a single extraction coefficient for water quality modeling [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(2):572-580.

[15] 陈科. 鹤地水库富营养化状况分析与防治对策[J]. 水利科技与经济,2009,15(3):214-216.

(上接第 162 页)

[15] 彭琴,林昌虎,何腾斌. 贵州省喀斯特山区不同石漠化等级土壤粒级特征[J]. 水土保持通报,2007,27(2):29-32.

[16] 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.

[17] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.

[18] 储小院,王玉杰,刘楠,等. 重庆缙云山典型林分林地土壤微团聚体特征分析[J]. 土壤通报,2009,40(6):1240-1244.

[19] 陈恩凤,周礼恺,武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报,1994,31(1):18-25.

[20] 王清奎,汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报,2005,36(3):415-421.

[21] 高君亮,李玉宝,虞毅,等. 毛乌素沙地不同土地利用类型土壤分形特征[J]. 水土保持研究,2010,17(6):220-223.

[22] 杨智,兰雪,戴全厚,等. 黔中地区不同岩性土壤抗冲抗蚀性研究进展[J]. 水土保持研究,2010,17(4):6-9.

[23] 陈子玉,顾祝军. 南方水蚀区不同侵蚀程度土壤粒径分形研究[J]. 水土保持研究,2013,20(4):13-17.

[24] 王贤,张洪江,程金花,等. 重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J]. 水土保持学报,2011,25(3):154-159.