

石羊河尾间—青土湖水面形成对 土壤分形维数和植被的影响

刘淑娟, 刘世增, 袁宏波, 马剑平, 李发明, 郭树江, 李菁菁

(甘肃省荒漠化防治重点实验室, 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 兰州 730070)

摘要:以石羊河尾间青土湖水面形成区的土壤及植被为研究对象,利用植被及土壤调查取样方法,调查分析了水平距水面 0~450 m,垂直 0—60 cm 土层的土壤粒径及植物多样性。利用分形几何学方法对土壤颗粒的分形特征进行分析,以探讨土壤颗粒分形维数与植被特征间的关系。研究表明:不同土层及不同水面距离的土壤分形维数在 2.10~2.92,平均值为 2.55;呈现随距水面距离增大而波动变小的趋势,0—20 cm 土层在 0~150 m 土壤粒径分形维数呈缓慢增加趋势,在 150 m 处达到最大,随后逐渐降低;而 20—40 cm,40—60 cm 土层在 0~100 m 呈缓慢增加趋势,在 100 m 处达到最大;植物物种多样性变化与土壤分形维数的变化具有较好的对应关系;各多样性指数随水面距离变化趋势一致,在距水面 0~50 m 和 400~450 m 处多样性达到最大。草本的重要值在距水面 200 m 处达到最大,灌木的重要值在距水面 300 m 处达到最大值,草本植物对区域植物多样性影响较大,但灌木植物重要值与土壤特征的变化关系更密切;线性回归分析表明在 0—20 cm,40—60 cm 土层,分形维数与多样性、均匀度和优势度指数呈显著负相关,在干旱沙漠地区,土壤颗粒分形维数也可作为一个反映评价土壤演变程度的综合定量指标。

关键词:土壤分形维数;青土湖;水面形成;植物多样性

中图分类号:S714.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0083-06

Effect of Water Formation on the Vegetation and Soil Particle Fractal Dimension in Qingtu Lake in the Tail-Stream of Shiyang River

LIU Shujuan, LIU Shizeng, YUAN Hongbo, MA Jianping, LI Faming, GUO Shujiang, LI Jingjing

(Gansu Key Laboratory of Desertification Combating, Gansu Minqin

National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Soil and vegetation in water formation in the Tail-streams of Shiyang River—Qingtu Lake were selected as the research object. The plant diversity and soil particle sizes in 0—60 cm soil layers which are 0~450 m away from the water body were analyzed. Using fractal geometry method, fractal characteristics of soil particles were analyzed for the purpose of investigating the relationship between the soil particle fractal dimension and vegetation character. The results showed that in different soil layers and different distances from water body, the fractal dimension ranged from 2.105 7 to 2.918 5, with the average of 2.548; fractal dimension of 0—20 cm soil layer presented slowly increasing trend in the distance range of 0~150 m and reached the maximum at the distance of 150 m, and then decreased; and it showed the slow upward trend in 20—40 cm, 40—60 cm soil layer, and reached a maximum at the distance of 100 m; the trends of the diversity index, evenness and dominance were consistent with the change of distance form the water body; they increased in the 0~50 m away from the water body; the diversity index was the highest in the distance of 400~450 m. The value of the important index of the herb reached the maximum at the distance of 200 m away from the water; the important value of shrub reached a maximum at the distance of about 300 m away from the water body. Linear regression analysis showed that in the 0—20 cm and 40—60 cm soil layers, the fractal dimension, diversity index, evenness and dominance showed the significant negative correlation.

Keywords: soil fractal dimension; Qingtu Lake; water formation; plant diversity

土壤为植被的生存和发展提供了必要物质基础,同时又影响着植物群落结构和功能。生境多样性、光照、土壤结构和土壤养分等影响了群落结构组成和物种的多样性^[1]。物种多样性是群落结构和功能复杂性的度量^[2-5]。近年来,围绕土壤因子与物种多样性间关系,国内外开展了一系列讨论,其中研究较多的是群落植物结构及多样性与养分之间的关系^[6-7]。植物的生长发育与土壤因子关系较为密切,土壤理化性质的不同、土壤母质的好坏,都可能影响群落结构、物种多样性^[8]。土壤作为一种多孔介质,表现出明显的分形特征,有的大量研究表明,分形维数可以较好地作为评价土壤肥力特性和土壤退化程度的量化指标^[9-13]。Gao 等^[14-16]得出土壤分形维数与土地沙漠化程度、养分以及结构状况存在相关关系。还有研究^[17-18]通过土壤颗粒体积分形维数与土壤全氮、有机碳、全磷、速效磷和速效钾有一定的相关关系,证明了土壤团聚体分形维数对土壤肥力存在一定影响,而关于分形维数特征及其与植被关系的研究较少。

石羊河尾闾—青土湖作为石羊河的终端,是民勤绿洲与两大沙漠(腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠)之间的一个生态屏障,其重要性显而易见。为了区域补偿地下水和改善区域水环境,促进河流系统及区域生态系统恢复,自 2010 年 9 月开始,由政府主导,以渠道输送的形式向青土湖注入生态用水,首次注水 1 290 万 m³。2011 年注水 1 260 万 m³,2013 年注水 2 020 万 m³。生态输水是石羊河下游生态保护与环境整治的主要目的,因此青土湖注水能否起到改善该区域生态环境、推动地方经济的发展是社会各界所关注的一个热点问题。

本文以青土湖生态注水后的植被和土壤作为研究对象,利用 Marlven 激光粒度仪对不同水面距离、不同土层的土壤粒径进行测定,采用土壤分形维数模型分析了土壤分形维数,尝试建立土壤分形维数与植被的关系,确定水面形成后土壤质地状况,以期为输水后的生态效益评价提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

石羊河尾闾—青土湖,位于腾格里沙漠西北缘、甘肃省民勤县东北 70 km 处,属于石羊河干三角洲,地理位置为 39°07′7.3″—39°08′3.2″N,103°37′53.0″—103°38′40.6″E,面积约 40 km²,属于石羊河下游干涸三角洲,海拔高度约为 1 292~1 310 m。该区年平均气

温为 7.8℃,大于 10℃的有效积温 3 248.8℃;年降水量 110 mm 左右,且降水多集中于 7—9 月,占全年降水总量的 73%,蒸发量达 2 600 mm 以上;无霜期 168 d,光照 3 181 h,太阳辐射 630 kJ/cm²;20 世纪初期,青土湖(即现今的“湖区”)水域面积大约 120 km²。50 年代中后期,湖泊开始萎缩,1959 年完全干涸,仅残留有东平湖、野麻湖、叶绿草湖、西硝池和东硝池等盐碱滩地或沼泽性草滩,大部分已被流沙覆盖或垦殖^[19-20]。研究区主要以湖相沉积物的砂土及壤质砂土为主;植被类型为典型的荒漠植被,自然植被整体稀疏,种类较少,研究区的主要植被类型为白刺(*Nitrariatangu torum* Bobr.)和芦苇(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)群落,同时有苏枸杞(*Lycium ruthenicum* Murr.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)为主要伴生灌木;草本植物种类相对较丰富,主要有刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)、驼蹄瓣(*Zygophyllum fabago* L.)、戟叶鹅绒藤(*Cynanchum sibiricum* Willd)、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* L. Moq.)、砂引草(*Messerschmidiasibirica* L.)、碟果虫实(*Corispermum patelliforme*)、砂蓝刺头(*Echinops gmelinii* Turcz.)等。

1.2 调查取样方法

根据试验区地貌特征、植被和土地利用状况,以水面为中心向水面外围延伸设置调查样带,带宽 200 m,在每个样带中以距水面边缘 0 m 开始,每隔 50 m 分别设置植被调查样地,每个样地各设置 1~2 个灌木调查样方、每个灌木样方对应 5~7 个草本样方,共设灌木样方 39 个,草本样方 245 个。乔灌木采用 20 m×20 m 样方,草本用 1 m×1 m 的小样方,分别调查记录植物种名、高度、冠幅及样方内出现的各物种的个体数量。在对应的灌木调查样方中,采用五点取样法,用取土钻分别取土层深(H) $0 < H \leq 20$ cm, $20 \text{ cm} < H \leq 40$ cm, $40 \text{ cm} < H \leq 60$ cm 共 3 个土层的土样,然后将同一样地内同土层土样充分混合后装入封口袋,密封带回实验室,经自然风干后用四分法取一定量样品,挑出石砾及可见凋落物和根系,用静电法去除植物碎片,用玛瑙碾钵碾细过筛后密封干燥保存将所取土样带回室内风干备用。

1.3 试验方法

利用 Marlven 激光粒度仪进行土壤粒度的测定,粒度分析的粒径范围 0.01~2 000 μm,粒度参数用 Folk 和 Word 的计算公式求出^[21-22]。粒级划分采用 1978 年《中国土壤》中的土壤质地分类方法,细黏粒

(<0.001)、粗黏粒(0.001~0.005 mm)、细粉粒(0.005~0.01 mm)、粗粉粒(0.01~0.05 mm)、细砂粒(0.05~0.25 mm)和粗砂粒(0.25~2.0 mm)。

1.4 数据处理

(1) 分形维数:土壤是具有分形特征的系统,运用分形理论建立土壤颗粒结构的分形模型^[3,13],利用土壤颗粒质量与平均粒径间的关系,计算土壤颗粒的分形维数。公式如下:

$$D=3-\alpha \quad (1)$$

$$\alpha=\frac{\lg(M_r/M_t)}{\lg(r/\delta)} \quad (2)$$

式中: D ——土壤颗粒分形维数; r ——土壤颗粒粒径; M_r ——粒径小于 r 的颗粒总质量(mm); M_t ——土壤样品总质量(g)。

具体应用时,首先由实测粒径及其重量数据计算 $\lg(M_r/M_t)$ 和 $\lg(r/\delta)$ 值,而后以 $\lg(M_r/M_t)$ 为横坐标,以 $\lg(r/\delta)$ 为纵坐标,利用最小二乘法进行直线拟合求得斜率 α ,再利用(1)式求得分形维数为 D 。

(2) 多样性指数:选用应用最广的物种丰富度指数(S)、Shannon-Weiner 指数(H')、Simpson 指数(D)、均匀度指数(J)作为判断群落 α 多样性特征的指标^[23-25](公式略)。

(3) 重要值:采用下面公式计算物种的重要值(IV): $IV=(\text{相对多度}+\text{相对优势度}+\text{相对频度})/3$ 。

所得试验数据用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 统计分析软件进行了方差分析和 LSD 统计分析及作图。

2 结果与分析

2.1 不同水面边缘距离及各层次土壤粒径分布及土壤颗粒分形特征

不同水面边缘距离及不同土层深度粒径范围土

壤颗粒质量含量见表1。不同土层、距水面不同距离均表现为细砂粒含量最多。在0—20 cm 土层0.05~0.25 mm 的细砂粒含量介于57.19%~87.91%,平均值为79.68%;同样在20—40 cm,40—60 cm 土层的细砂粒含量介于56.98%~89.75%,均值小于0—20 cm 土层的粒径含量;在青土湖水面边缘周边细砂粒的含量明显大于其他粒径的含量,由于青土湖属于湖积沙地,因此细砂粒含量较高。其次是粗砂粒和粗粉粒含量,相对于细砂粒含量都较低,分别介于0.57%~28.30%,0.54%~29.72%。

从不同土壤层次来看,0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm 层土壤颗粒分形维数分别在2.370 8~2.879 6,2.359 0~2.750 9,2.105 7~2.918 5,不同土层分形维数差异不显著($p>0.05$)。分形维数与各粒径的重量分布均存在显著正相关($p<0.01$),相关系数在0.896 9~0.994 5。从不同距离来看,0—20 cm 土层在0—150 m 土壤粒径分形维数呈缓慢增加趋势,在150 m 处达到最大2.879 6,随后逐渐降低;而20—40 cm,40—60 cm 土层在0—100 m 呈缓慢增加趋势,在100 m 处达到最大,分别为2.750 9,2.918 5,随后降低,而40—60 cm 土层在300 m 处分形维数也出现一个较高峰值。综合来看,表层土壤(0—20 cm),距离150 m,300 m,是土壤,水面形成对0—20 cm 土层土壤粒径的影响范围在0~150 m,而20—60 cm 土层土壤粒径的影响范围在100 m。

可能与本地段较多的生长植被数量有关。本区域风力强劲、风沙活动剧烈,水面的形成不仅降低砂粒的风蚀,而且水面可阻截更多过境的黏粉粒,并使其在水面及水面周边聚集,导致细粒物质成分增加,且粗细砂粒含量降低,分形维数相应升高。而超过一定距离,水面的截存作用减小,分形维数相应降低了。

表1 不同土层深度和水面边缘不同距离的土壤粒径分布及其分形维数

土壤深度/cm	水面边缘距离/m	土壤粒径分布/mm						分形维数	相关系数
		<0.001 细黏粒	0.001~0.005 黏粒	0.005~0.01 细粉粒	0.01~0.05 粗粉粒	0.05~0.25 细砂粒	0.25~2 粗砂粒		
0—20	0	0.24	1.96	0.86	1.85	87.91	7.18	2.4640	0.9655
	50	0.77	3.42	2.70	6.95	81.23	4.93	2.6498	0.9148
	100	1.05	4.35	2.93	7.82	78.85	5.00	2.6915	0.9689
	150	1.94	7.53	5.91	25.25	57.19	2.18	2.8796	0.9649
	200	0.55	2.63	1.54	2.81	82.18	10.29	2.5284	0.9908
	250	0.67	2.74	1.96	5.88	77.02	11.72	2.5353	0.9456
	300	0.88	2.69	2.13	5.61	80.53	8.15	2.421	0.9129
	350	0.40	1.96	1.36	3.24	84.69	8.36	2.4982	0.9012
	400	0.40	2.03	1.70	4.99	78.08	12.79	2.4616	0.9006
	450	0.15	1.70	0.95	2.39	83.77	11.05	2.3708	0.9796

续表 1

土壤深度/cm	水面边缘距离/m	土壤粒径分布/mm						分形维数	相关系数
		<0.001	0.001~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	0.05~0.25	0.25~2		
		细黏粒	黏粒	细粉粒	粗粉粒	细砂粒	粗砂粒		
20—40	0	0.96	3.45	1.87	2.89	61.10	29.72	2.5043	0.9346
	50	1.11	4.16	2.74	9.58	75.23	7.18	2.6557	0.9673
	100	1.48	5.63	4.08	14.91	69.27	4.62	2.7509	0.9865
	150	2.34	8.40	6.42	28.30	54.00	0.54	2.6732	0.9357
	200	0.25	2.02	1.12	2.09	81.39	13.14	2.414	0.9734
	250	0.30	1.68	1.93	6.08	80.40	9.60	2.4536	0.9709
	300	0.53	2.38	1.13	3.32	82.98	9.67	2.359	0.9086
	350	0.43	2.23	1.41	3.20	83.73	8.99	2.5064	0.8999
	400	0.49	2.45	1.81	4.52	82.26	8.47	2.5318	0.9906
	450	0.37	2.30	1.35	2.89	85.66	7.43	2.5138	0.9701
40—60	0	0.00	1.10	0.80	1.89	75.50	20.72	2.2701	0.9644
	50	1.05	4.93	3.33	7.32	76.16	7.21	2.6662	0.9516
	100	1.94	6.29	4.44	18.72	67.40	1.21	2.9185	0.9243
	150	1.99	7.60	5.74	22.26	56.17	6.23	2.7770	0.9945
	200	0.38	2.20	1.15	2.15	83.41	10.71	2.4770	0.9137
	250	0.65	2.89	1.47	2.56	85.74	6.68	2.5904	0.9736
	300	1.71	6.93	5.69	24.76	57.45	3.46	2.8157	0.9636
	350	0.42	1.94	1.20	3.01	85.80	7.64	2.5086	0.9759
	400	0.31	2.00	1.37	3.37	81.50	11.45	2.4479	0.9709
	450	0.00	0.40	0.20	0.57	87.39	11.43	2.1057	0.8969

2.2 水面形成后植被变化特征

从图 1 可以看出,多样性指数,均匀度和优势度变化趋势相同,在 0~50 m 升高后在 100 m 降到最低值而后再升高,随后均处于小范围的波动状态,变化不大,在距水面 450 m 处多样性达到最高,而均匀度和优势度总体变化不大。由于土壤属于湖积盐土,且地下水位低,地表植被稀少,植物群落主要是白刺群落,伴生有苏枸杞、盐爪爪、沙蒿、五星蒿、骆驼蹄瓣等。在距水面 100 m 处受到水的溶解推移作用,盐分增加作用,研究区灌木很少,物种多样性变化主要受草本数量变化的影响,生长在土壤表层的草本减少,导致多样性指数降低。

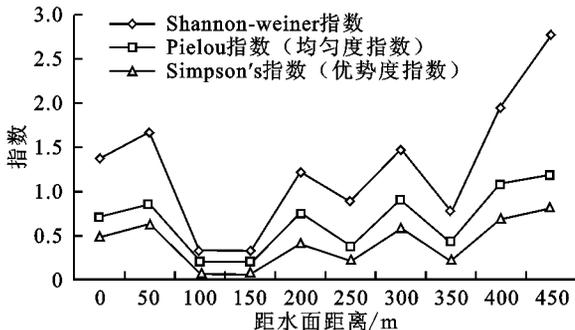


图 1 距水面不同距离物种多样性指数

从图 2 可以看出,草本的重要值在 0.70~1.22,在距水面 0~200 m 逐渐增大,在 200 m 处达到最大,随后逐渐降低;灌木的重要值在 0.42~1.11,在

距水面 100 m 处出现一个峰值,随后降低在距水面 300 m 处达到最大值。由于距水面较近,虽然土壤水分增加了,但又受到水溶推移和强烈的蒸发引起土壤表层盐渍化,近水面植被影响较大,因此直到在距水面 200 m 处草本重要值最大。由于湖积盐土,受到盐分影响,植被种类较少,丰富度仅在 5~10,变化不大,趋势不明显,在距水面 450 m 处最大。

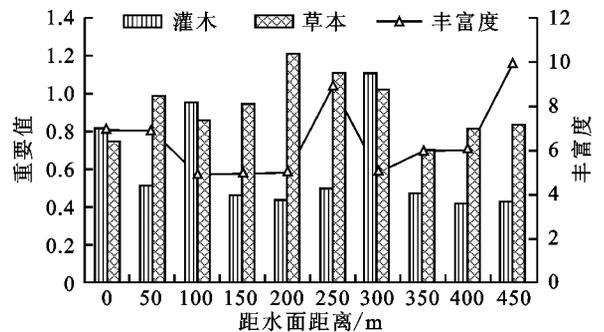


图 2 距水面不同距离的重要值和丰富度

2.3 分形维数与植被的关系

对植被多样性、均匀度、优势度指数、草本和灌木重要值和分形维数进行线性回归分析。由表 2 可知在 0—20 cm 土层,分形维数与多样性、均匀度和优势度指数呈显著负相关,相关系数 r 在 $-0.721 \sim -0.691$,而在 20—40 cm 土层各植被指标与分维系数并无相关性,在 40—60 cm 土层只有多样性指数与分形维数呈

显著负相关。水面形成后对该区域的草本影响较大,草本植被根系主要分布在0—20 cm土层,由于受到水溶推移和强烈的蒸发引起土壤表层盐渍化,表层土壤中盐分增加明显,盐分升高导致植被数量减少,多样性降低,因此出现分维系数与多样性呈负相关的情况。

3 结论与讨论

(1) 石羊河尾间—青土湖输水区域土壤0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm层次土壤颗粒分形维数差异不显著($p>0.05$)。分形维数与各粒径的重量分布均存在显著正相关($p<0.01$)。距水面不同距离土壤分形维数变化趋势较一致,在0~50 m范围,各层土壤分形维数均较小;在50~450 m范围,均呈现随距水面距离增大而波动变小的趋势,但其峰值变化略有差异。150 m, 300 m是0—20 cm表层土壤分形维数的峰值点,而100 m, 400是

20—40 cm, 40—60 cm层次土壤分形维数的峰值点。区域土壤粒度及其分形维数的这种变化规律主要受风沙活动、植被分布、水面形成等4方面因素的影响,水面的形成使水面边缘风速较大,风速对水面外围0~100 m距离表层土壤的吹蚀作用较强,同时由于受地表植被影响及风沙流能量减小,土壤分形维数逐渐增大;在400~450 m距离上,由于接近流动沙丘,风沙覆盖相对较厚,且相对海拔变高,风沙活动强烈,土壤粗砂含量较多,分形维数较小。而植被随沿水面的径层分布规律则使距水面50~400 m距离的表层土壤分形维数波动变化明显,而下层土壤分形维数的变化主要受土壤原始沉积特征的影响。土壤分形维数可以反映植被恢复过程中土壤质地的变化程度^[9],而本研究中的这种变化说明在干旱沙漠地区,土壤颗粒分形维数也可作为一个反映评价土壤演变程度的综合定量指标。

表2 分形维数D与植物群落 α 多样性的线性关系

土壤深度/cm	植被指数	回归方程	相关系数	显著水平
0—20	Shannon-Weiner	$y=2.737-0.146x$	-0.721	0.019
	Pielou	$y=2.765-0.318x$	-0.738	0.015
	Simpson's	$y=2.722-0.400x$	-0.691	0.027
	草本重要值	$y=2.582-0.052x$	-0.087	0.812
	灌木重要值	$y=2.419-0.142x$	0.153	0.673
20—40	Shannon-Weiner	$y=2.614-0.061x$	-0.369	0.293
	Pielou	$y=2.646-0.162x$	-0.465	0.175
	Simpson's	$y=2.614-0.180x$	-0.384	0.272
	草本重要值	$y=2.550-0.022x$	-0.045	0.902
	灌木重要值	$y=2.760-0.241x$	-0.322	0.364
40—60	Shannon-Weiner	$y=2.865-0.241x$	-0.717	0.020
	Pielou	$y=2.853-0.436x$	-0.611	0.061
	Simpson's	$y=2.804-0.573x$	-0.598	0.068
	草本重要值	$y=2.269-0.471x$	-0.475	0.165
	灌木重要值	$y=2.135+0.456x$	0.297	0.404

注: y 为分形维数, x 为植被指数。

(2) 物种多样性不仅能够度量群落的组成结构和功能的复杂性,也能指示环境状况。植物群落的分布格局是不同尺度上各种环境因子如气候、土壤、地形等综合作用的结果。在青土湖沙漠化发展过程中,生境的改变对某一阶段群落的形成具有重要影响。本研究区域范围内的气候、海拔变化不大,各样地的环境背景条件相对一致,植物群落分布格局更多的受土壤、水面形成及风沙活动的影响。研究区域植物物种多样性随水面距离呈波动变化,这种波动变化与土壤分形维数的变化具有较好的对应关系,土壤的分布形成了植被特定的圈层分布格局,而植被的圈层分布又影响了土壤特征如粒度、分形维数的变化。0~50 m, 400~450 m两个地段是物种多样性较高,同时是土

壤分形维数较低地段,这主要与水面边缘区域及区域外围风沙活动强烈有关。通过重要值分析发现,草本在距水面0~200 m逐渐增大,在200 m处达到最大,随后逐渐降低;灌木的重要值在距水面100 m处出现一个峰值,随后降低。在距水面300 m处达到最大值,草本植物对区域植物多样性影响较大,但灌木植物重要值与土壤特征的变化关系更密切。研究区域的植物以耐盐碱物种为主,土壤盐分含量在上层积累多,盐碱是这些植物生长的主要胁迫因子,因此它们的变化对该区植被物种多样性变化的反映程度较大,有研究表明盐分梯度不仅引起多样性的变化,而且是植物群落分布和演替的重要影响因素^[2]。

(3) 从土壤分维数与多样性关系来看,0—20 cm

土层,分形维数与多样性、均匀度和优势度指数呈显著负相关,而在20—40 cm土层各植被指标与分维系数相关性不明显,在40—60 cm土层只有多样性指数与分形维数呈显著负相关。本研究中,由于水面形成对草本植物影响较大,草本植被根系主要分布在0—20 cm土层,并且受到水溶推移和强烈的蒸发引起土壤表层盐渍化,表层土壤中盐分增加明显,盐分升高导致植被数量减少,多样性降低,因此出现分维系数与多样性呈负相关的状态。左小安^[8]研究也表明土壤颗粒与物种多样性指数的灰关联度的排序表明他们与物种多样性之间的相关性相对较远。

参考文献:

- [1] 杨丽霞,陈少锋,安娟娟,等. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究[J]. 草地学报,2014,22(2):291-298.
- [2] 周伶,上官铁梁,郭东罡,等. 晋·陕·宁·蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应[J]. 生态学报,2012,32(1):111-122.
- [3] 杨勇,宋向阳,刘爱军,等. 内蒙古典型草原物种多样性的空间尺度效应及其分形分析[J]. 草地学报,2012,20(3):444-449.
- [4] 张晶晶,王蕾,许冬梅. 荒漠草原自然恢复中植物群落组成及物种多样性[J]. 草业科学,2011,28(6):1091-1094.
- [5] 黄忠良,孔国辉,何道泉. 鼎湖山植物群落多样性的研究[J]. 生态学报,2000,20(2):193-198.
- [6] 赵新风,徐海量,张鹏,等. 养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(2):167-177.
- [7] 杨玉海,陈亚宁,李卫红. 新疆塔里木河下游土壤特性及其对物种多样性的影响[J]. 生态学报,2008,28(2):602-611.
- [8] 左小安,赵学勇,赵哈林,等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 环境科学,2007,28(5):945-951.
- [9] 贾晓红,李新荣,李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究,2007,26(3):518-525.
- [10] 宫阿都,何毓蓉. 金沙江干热河谷区退化土壤结构的分形特征研究[J]. 水土保持学报,2001,15(3):112-115.
- [11] 苏永中,赵哈林. 科尔沁沙地农田沙漠化演变中土壤颗粒分形特征[J]. 生态学报,2004,24(1):71-74.
- [12] 王丽,刘霞,张光灿,等. 鲁中山区采取不同生态修复措施时的土壤粒径分形与孔隙结构特征[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):73-80.
- [13] 丁文峰,丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团聚结构分形特征[J]. 地理研究,2002,21(6):700-706.
- [14] Gao G L, Ding G D, Wu B, et al. Fractal scaling of particle size distribution and relationships with topsoil properties affected by biological soil crusts[J]. PloS ONE,2014,9(2):e88559.
- [15] Liu Y Y, Gong Y M, Wang X, et al. Volume fractal dimension of soil particles and relationships with soil physical-chemical properties and plant species diversity in an alpine grassland under different disturbance degrees[J]. Journal of Arid Land,2013,5(4):480-487.
- [16] 郑子成,何淑勤,王永东,等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报,2010,24(3):170-174.
- [17] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. 农业工程学报,2009,25(9):74-78.
- [18] 伏耀龙,张兴昌,王金贵. 岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J]. 农业工程学报,2012,28(5):120-125.
- [19] 赵强,王乃昂,程弘毅,等. 青土湖沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 干旱区地理,2003,26(1):1-5.
- [20] 王乃昂,李吉均,曹继秀,等. 青土湖近6000年来沉积气候记录研究:兼论四五世纪气候回暖[J]. 地理科学,1999,19(2):119-124.
- [21] Rieu M. and Garrison S. Fractal Fragmentation, Soil Porosity, and Soil Water Properties; I. Theory[J]. Soil Science Society of America Journal,1991,55(5):1231-1238.
- [22] 胡云锋,刘纪远,庄大方,等. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分形特征[J]. 土壤学报,2005,42(2):336-339.
- [23] 李博,杨持,林鹏. 生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [24] 马克平. 生物群落多样性的测度方法. I: α 多样性的测度方法(上) [J]. 生物多样性,1994,2(3):162-168.
- [25] 李振基,刘初钿,杨志伟,等. 武夷山自然保护区郁闭稳定甜槠林与人为干扰甜槠林物种多样性比较[J]. 植物生态学报,2000,24(1):64-68.