

冯艳琼, 何彤慧, 吴春燕, 乔斌, 苏芝屯. 银川平原草甸湿地土壤分形特征 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(4): 58-66.

银川平原草甸湿地土壤分形特征

冯艳琼^{1,2}, 何彤慧^{1,2}, 吴春燕^{1,2}, 乔斌³, 苏芝屯^{1,2}

- (1. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏 银川 750021;
2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏 银川 750021;
3. 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810000)

摘要:【目的】探究银川平原草甸湿地土壤的分形特征、粒径分布特点以及它们在土壤垂直剖面上的变化规律, 并对研究区土壤分形维数与植物群落多样性的关系做初步探索。【方法】以银川平原草甸湿地的土壤为研究对象, 利用水分和盐分差异将研究区分为低湿草甸、典型草甸和盐生草甸 3 种生境, 采用粒径质量分布表征土壤的分形特征, 选用 Simpson 物种优势度指数、Shannon-Weiner 物种多样性指数、Margalef 物种丰富度指数和 Pielou 物种均匀度指数作为植物的多样性指数, 进行对比研究。【结果】银川平原草甸湿地土壤以粘粒的微团聚体为主, 分形维数值趋于 2.28~2.84; 3 种草甸湿地的土壤分形维数存在显著差异, 表现为典型草甸 (2.74) > 盐生草甸 (2.72) > 低湿草甸 (2.66); 土壤分形维数与粘粒含量呈极显著正相关, 与极细砂粒和细砂粒含量呈极显著负相关; 土壤垂直剖面上表层粘粒和粉粒含量较高, 深层极细砂粒和细砂粒含量较高, 中砂粒波动较大, 粗砂粒仅出现在表层或深层; 低湿草甸的植物群落物种多样性较高, 多样性指数平均值达 1.15。【结论】银川平原草甸湿地土壤粒径和分形特点受局部地形环境的水文关系影响较明显; 水土过程对植物群落物种多样性产生直接影响, 土壤物理结构对植物群落物种多样性起间接驱动作用, 同时人为因素起着至关重要的作用。

关键词: 草甸湿地; 土壤粒径; 分形维数; 植物多样性

中图分类号: S155.4+7

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X (2019) 04-0058-09

Soil Fractal Characteristics in Meadow Wetlands of Yinchuan Plain

FENG Yanqiong^{1,2}, HE Tonghui^{1,2}, WU Chunyan^{1,2}, QIAO Bin³, SU Zhitun^{1,2}

(1. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem, Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Breeding Base of State Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Qinghai Institute of Meteorological Sciences, Xining 810000, China)

Abstract: 【Objective】The study probed into the fractal characteristics and particle size distribution of soil in the meadow wetland of Yinchuan Plain and their variation in vertical profile of soil, and made a preliminary exploration on the relationship between the fractal dimension of soil and the diversity of plant communities in the study area. 【Method】Taking the soil of meadow wetland in Yinchuan Plain as the research object, the study area was divided into three habitats, i.e. low humidity meadow, typical meadow and halophytic meadow based on the differences of water and salinity. Fractal characteristics of soil were characterized by particle size distribution. Simpson species dominance index, Shannon-Weiner species diversity index, Margalef species richness index and Pielou species evenness index were selected as plant diversity indexes, and a comparative study was carried out. 【Result】The soil of meadow wetland in Yinchuan Plain was dominated

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41361095, 41761102); 宁夏大学研究生创新项目 (2018079)

作者简介: 冯艳琼 (1993—), 女, 在读硕士生, 研究方向为环境生态评价和湿地生态恢复, E-mail: fengyq24@163.com

通信作者: 何彤慧 (1964—), 女, 博士, 教授, 研究方向为生态系统监测评估、环境变化和湿地生态系统恢复,

E-mail: hetonghui@163.com

by clay micro-aggregates, and the fractal dimension values ranged from 2.28 to 2.84. There were significant differences in soil fractal dimensions of three types of meadow wetlands, and the fractal dimension values were showed as: typical meadow (2.74) > halophytic meadow (2.72) > low humidity meadow (2.66). The fractal dimension of soil was positively correlated with clay content and negatively correlated with the content of ultra-fine sand and fine sand. The contents of surface clay and silt were relatively high in the vertical profile of soil while the contents of ultra-fine sand and fine sand were higher in deep layer. The content of medium sand fluctuated greatly, and the coarse sand only appeared in the surface layer or deep layer. The species diversity of plant communities in low humidity meadow was higher and the average diversity index was 1.15. 【 Conclusion 】 Soil particle size and fractal characteristics of meadow wetlands in Yinchuan Plain were obviously affected by the hydrological relation of local topography environment. Soil and water processes had a direct impact on species diversity of plant communities. Soil physical structure played an indirect driving role in species diversity of plant communities, and human factors played a vital role at the same time.

Key words: Yinchuan Plain; meadow wetland; soil fractal dimension; plant diversity

【研究意义】湿地被称之为地球之肾，是地球生物化学循环不可替代的部分。银川平原湿地属于典型的绿洲湿地，不仅是生物多样性的载体，还具有重要的环境调节功能及较高的生产力，其本身还具有很高的景观价值^[1]。银川平原草甸湿地作为典型的湿地类型，是重要的后备土地资源，其土壤特性对该系统的生存和发展起到至关重要的作用。土壤是由不同粒径组成的具有自相似结构和分形特征的多孔介质^[2-4]，因此，对土粒组合比例或土壤质地类型进行量化描述，具有重要的现实意义。与传统的采用土壤粒径的数量分布来描述土壤特性相比，用土壤粒径的质量分布来描述土壤的分形特征，模型更为简便，并能说明分形维数的物理意义。【前人研究进展】已有研究表明，分形维数不仅能反映土壤质地、粒径分布和肥力等，还可以模拟和预测土壤水分特征的综合指标，近年来被广泛应用^[5]，如应用在土地利用^[2, 6-9]、环境指示^[2, 5, 10-11]、土壤质地反映^[12-14]和土壤沙漠化评价^[15-17]。我国对土壤分形维数的研究较晚^[18]，且多集中在不同土地类型方式下的土壤颗粒分形特征和空间变异性以及与土壤养分相关关系^[19]。【本研究切入点】分形维数在湿地土壤结构的研究很少，且将土壤分形维数与植物群落的物种多样性联系在一起的研究少之又少。据统计银川平原湿地总面积达 $2.07 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，生物多样性丰富，生态功能明显，在整个系统中扮演着重要的角色^[20]，研究湿地土壤质地和植物群落多样性有助于深入了解该系统。【拟解决的关键问题】本研究以银川平原草甸湿地作为研究对象，采用 Tyler 等^[21]和杨培岭等^[22]提出的用土壤粒级颗粒质量计算

分形维数的方法来计算银川平原草甸湿地土壤粒径分形维数，以探究研究区土壤在不同水分和盐分梯度下的分形特征、粒径分布特点以及它们在垂直剖面上的变化规律，并对研究区土壤分形维数与植物群落的物种多样性的关系做了初探，期为评价银川平原湿地的土壤性质提供参考，为研究湿地土壤质地与植物群落物种多样性关系、了解草甸湿地的水土作用和保护草甸湿地资源提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

银川平原地处中国西北地区，是在新生代断陷盆地基础上发育的堆积平原。年均气温为 $8\sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ ，年降水量约为 200 mm ，属于温带大陆性气候，是干旱区半干旱区过渡带。自古以来黄河纵穿其中，为银川平原的湿地提供水源，使其成为干旱地区别具特色的绿洲。草甸湿地是银川平原的典型湿地类型，发育在径流容易汇集的低地和地下水位高的洼地，且因水位的变化，在荒漠草原-沼泽湿地之间不断摆动，土壤性质复杂。

1.2 野外采样

2016年8月选取银川平原湿地生物多样性较高的低湿草甸样地3个、典型草甸样地5个和盐生草甸样地2个，每个样地3次重复，共有30个植物群落样方，大小为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ ，调查植物名称、多度、高度、盖度等。并采用分层采样法取土样，土层深度分别为 $0\sim 10\text{ cm}$ 、 $10\sim 20\text{ cm}$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 、 $30\sim 40\text{ cm}$ 和 $40\sim 50\text{ cm}$ ，带回实验室在自然条件下风干后过 2 mm 筛，以用来剔除石块及枯落物等，过筛后的样品用于测定土壤粒径等指标。

低湿草甸植物种群以芦苇 (*Phragmites australis*)、香蒲 (*Typha orientalis*)、水葫芦苗 (*Halerpestes mbararia*)、水莎草 (*Juncellus serotinus*)、苔草 (*Carex tristachya*)、野大豆 (*Glycine soja*) 为优势种, 以寸草 (*Carex duriuscula*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*)、臭蒿 (*Artemisia hedinii*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、油蒿 (*Artemisia ordosica*)、海三棱蔗草 (*Scirpus mariqueter*)、稗草 (*Echinochloa crusgalli*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、苜蓿 (*Medicago sativa*)、鹅绒藤 (*Cynanchum chinense*)、刺儿菜 (*Cirsium setosum*)、苦苣菜 (*Sonchus oleraceus*)、苈草 (*Arthraxon hispidus*)、牻牛儿苗 (*Erodium stephanianum*)、牛筋草 (*Eleusine indica*)、节节草 (*Equisetum ramosissimum*) 为伴生种, 土壤含水量为 30.61 (± 2.69)%, 含盐量为 0.536 (± 0.060) g/kg。

典型草甸植物种群以碱蓬 (*Suaeda glauca*)、拂子茅 (*Calamagrostis epigios*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 为优势种, 以苈草 (*Arthraxon hispidus*)、水莎草 (*Juncellus serotinus*)、苦苣菜 (*Sonchus oleraceus*)、灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*)、星毛委陵菜 (*Potentilla acaulis*)、水葫芦苗 (*Halerpestes cymbalaria*)、赖草 (*Leymus secalinus*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、扫帚苗 (*Kochia scoparia*)、黄花蒿 (*Artemisia annua*) 为伴生种, 土壤含水量为 21.33 (± 0.77)%, 含盐量为 1.233 (± 0.162) g/kg。

盐生草甸植物种群以碱蓬 (*Suaeda glauca*)、芦苇 (矮生) (*Phragmites australis*) 为优势种, 以拂子茅 (*Calamagrostis epigios*)、苦苣菜 (*Sonchus oleraceus*)、蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)、扫帚苗 (*Kochia scoparia*)、蒺藜 (*Polygonum aviculare*) 为伴生种, 土壤含水量为 16.75 (± 5.53)%, 含盐量为 2.830 (± 0.346) g/kg。

1.3 分析方法

1.3.1 土壤粒径的测定 取风干土样放入 Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪 (英国, 马尔文公司) 取样槽中, Mastersizer3000 激光衍射粒度分析仪可自动测定土壤粒径的体积百分比, 重复性误差 ≤ ± 0.5%, 准确性误差 ≤ ± 1% [23], 可测得粒径分别为粘粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.002 ~ 0.05 mm)、极细砂粒 (0.05 ~ 0.1

mm)、细砂粒 (0.1~0.25 mm)、中砂粒 (0.25~0.5 mm) 和粗砂粒 (0.5~1 mm)。

1.3.2 分形维数计算方法 采用 Tyler 等 [21] 和杨培岭等 [22] 提出的用粒径质量分布表征土壤的分形特征, 即:

$$\left(\frac{\bar{d}_i}{\bar{d}_{max}}\right)^{3-D} = \frac{W(\delta < \bar{d}_i)}{W_0}$$

式中, \bar{d}_i 为相邻两个筛分粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒的平均直径 ($\zeta_i > d_{i+1}$, $i=1,2,3, \dots$); \bar{d}_{max} 为最大粒级土粒的平均直径, 当 $d > d_{max}$ 时, $W(\zeta > d_{max}) = 0$; $W(\zeta < \bar{d}_i)$ 为土粒直径小于 \bar{d}_i 累积的重量; W_0 为全部粒级土粒的重量和; ζ 为尺码; D 为土壤颗粒的分形维数。对上式取对数得:

$$3-D = \frac{\lg(W_i / W_0)}{\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{max})}$$

分别以 $\lg(\bar{d}_i / \bar{d}_{max})$ 、 $\lg(W_i / W_0)$ 为横坐标、纵坐标绘制线性回归曲线, 得到的直线斜率为 $3-D$, 即可得出分形维数 D 值。

1.3.3 植物多样性选取 采用张琳等 [24] 和屈月雷等 [25] 选用的 Simpson 物种优势度指数、Shannon-Weiner 物种多样性指数、Margalef 物种丰富度指数和 Pielou 物种均匀度指数作为植物的多样性指数。计算公式为:

$$\text{Simpson 指数: } T = 1 - \sum P_i^2$$

$$\text{Shannon-Weiner 指数: } H = - \sum P_i \ln P_i$$

$$\text{Margalef 指数: } R = (S - 1) / \ln N$$

$$\text{Pielou 指数: } E = H / \ln S$$

式中, N 为 i 类植物所在样方的各个种类的相对重要值之和; S 为 i 类植物所在样方的物种总数; P_i 为第 i 种植物的相对重要值, $P_i = (\text{相对高度} + \text{相对盖度}) / 2$ 。

试验数据采用 Excel2010 软件进行处理, 运用 IBM SPSS Statistics 20 软件进行相关性和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤粒径及分形维数

由表 1 可知, 研究区土壤粒级含量表现为: 粘粒 (53.53%) > 极细砂粒 (20.81%) > 粉粒 (15.41%) > 细砂粒 (7.92%) > 中砂粒 (0.57%) > 粗砂粒 (0.49%)。研究区的分形维数值变化范围在 2.23 ~ 2.84 之间, 分形维数在典型草甸、盐生草甸和低湿草甸中分别表现为 2.74、2.72、

表 1 不同生境土壤粒径分布及分形维数
Table 1 Soil particle size distribution and fractal dimension in different habitats

生境类型 Habitat type	土壤粒径分布 Soil particle size distribution (%)						分形维数 Fractal dimension	D_{max}/D_{min}
	粘粒 Clay	粉粒 Silt	极细砂粒 Ultra-fine sand	细砂粒 Fine sand	中砂粒 Medium sand	粗砂粒 Coarse sand		
低湿草甸 Low humidity meadow	57.76 ± 4.72a	15.21 ± 1.27b	16.04 ± 3.12b	10.62 ± 2.51a	0.36 ± 0.10b	0.02 ± 0.01b	2.66 ± 0.03b	2.82/2.28
典型草甸 Typical meadow	59.53 ± 2.87a	18.02 ± 0.86a	17.29 ± 2.04b	4.38 ± 0.67b	0.85 ± 0.16a	0.32 ± 0.17b	2.74 ± 0.01a	2.84/2.56
盐生草甸 Halomorphic meadow	43.31 ± 6.07a	12.99 ± 0.66b	29.10 ± 4.94a	8.77 ± 1.67ab	0.49 ± 0.13ab	1.12 ± 0.87a	2.72 ± 0.01ab	2.78/2.23

注：同列数据后小写英文字母不同者表示差异显著。

Note: The different lowercase letters in the same column represent significant differences.

2.66。3种生境土壤各粒级含量差异显著，低湿草甸细砂粒含量较高，典型草甸的粉粒和中砂粒含量较高，盐生草甸的极细砂粒和粗砂粒含量较高。

2.2 3种生境土壤分形维数与粒级含量的关系

由表 2 可知，研究区 3 种生境土壤分形维数与土壤粘粒含量呈极显著正相关（3 种生境 R^2 依次为 0.945、0.770、0.924），与土壤极细砂粒和细砂粒呈极显著负相关。说明研究区土壤粘粒越多，分形维数越大；土壤极细砂粒和细砂粒越多，分形维数越小。3 种生境土壤分形维数与粉粒的关系表现为：典型草甸呈极显著

负相关（ $R^2=-0.581$ ），盐生草甸呈显著正相关（ $R^2=0.444$ ），低湿草甸无显著相关性（ $R^2=0.128$ ）。3 种生境土壤分形维数与中砂粒的关系表现为：低湿草甸呈极显著负相关（ $R^2=-0.392$ ），典型草甸呈极显著正相关（ $R^2=0.573$ ），盐生草甸无显著相关性（ $R^2=-0.293$ ）。3 种生境土壤分形维数与粗砂粒的关系表现为：盐生草甸呈显著负相关（ $R^2=-0.427$ ），低湿草甸和典型草甸无显著相关性（ R^2 分别为 0.111 和 0.294）。说明土壤粉粒、中砂粒和粗砂粒含量的不同是导致 3 种生境土壤结构存在差异的原因。

表 2 不同生境土壤颗粒分形维数（D）与粒级含量（d）分布回归关系
Table 2 Regression relationship between soil particle fractal dimension (D) and particle size distribution (d) in different habitats

生境类型 Habitat type	粒级 Particle size	回归方程 Regression equation	R^2	P
低湿草甸 Low humidity meadow	粘粒	$D = 0.006d + 2.329$	0.945**	0.000
	粉粒	$D = 0.015d + 2.426$	0.128	0.401
	极细砂粒	$D = -0.009d + 2.797$	-0.721**	0.000
	细砂粒	$D = -0.011d + 2.774$	-0.656**	0.000
	中砂粒	$D = -0.048d + 2.676$	-0.392**	0.008
	粗砂粒	$D = 0.280d + 2.654$	0.111	0.466
典型草甸 Typical meadow	粘粒	$D = 0.003d + 2.552$	0.770**	0.000
	粉粒	$D = -0.005d + 2.826$	-0.581**	0.000
	极细砂粒	$D = -0.004d + 2.820$	-0.749**	0.000
	细砂粒	$D = -0.011d + 2.792$	-0.324**	0.005
	中砂粒	$D = 0.022d + 2.728$	0.573**	0.000
	粗砂粒	$D = 0.036d + 2.739$	0.294	0.100
盐生草甸 Halomorphic meadow	粘粒	$D = 0.002d + 2.629$	0.924**	0.000
	粉粒	$D = 0.014d + 2.541$	0.444*	0.014
	极细砂粒	$D = -0.002d + 2.783$	-0.819**	0.000
	细砂粒	$D = -0.007d + 2.781$	-0.699**	0.000
	中砂粒	$D = -0.017d + 2.725$	-0.293	0.117
	粗砂粒	$D = -0.007d + 2.719$	-0.427*	0.019

注：D 为分形维数，d 为粒级的含量；** 表示达 0.01 显著水平，* 表示达 0.05 显著水平。

Note: D represents the fractal dimension, d represents the content of particle size; ** represents significance at 0.01 level and * represents significance at 0.05 level.

2.3 不同生境土壤粒级含量在不同土层上的分布

土壤颗粒在土层垂直方向上的变化显示：低湿草甸中土壤粘粒、粉粒和中砂粒在表层含量较高，细砂粒和极细砂粒深层累积，粗砂粒仅出现在表层；典型草甸中土壤黏粒和粉粒在表层含量

较高，细砂粒、极细砂粒和中砂粒在深层累积，粗砂粒仅出现在深层；盐生草甸中土壤粘粒和粉粒含量无明显变化，极细砂粒和细砂粒深层累积，中砂粒在表层含量较高，粗砂粒仅出现在表层（图1）。

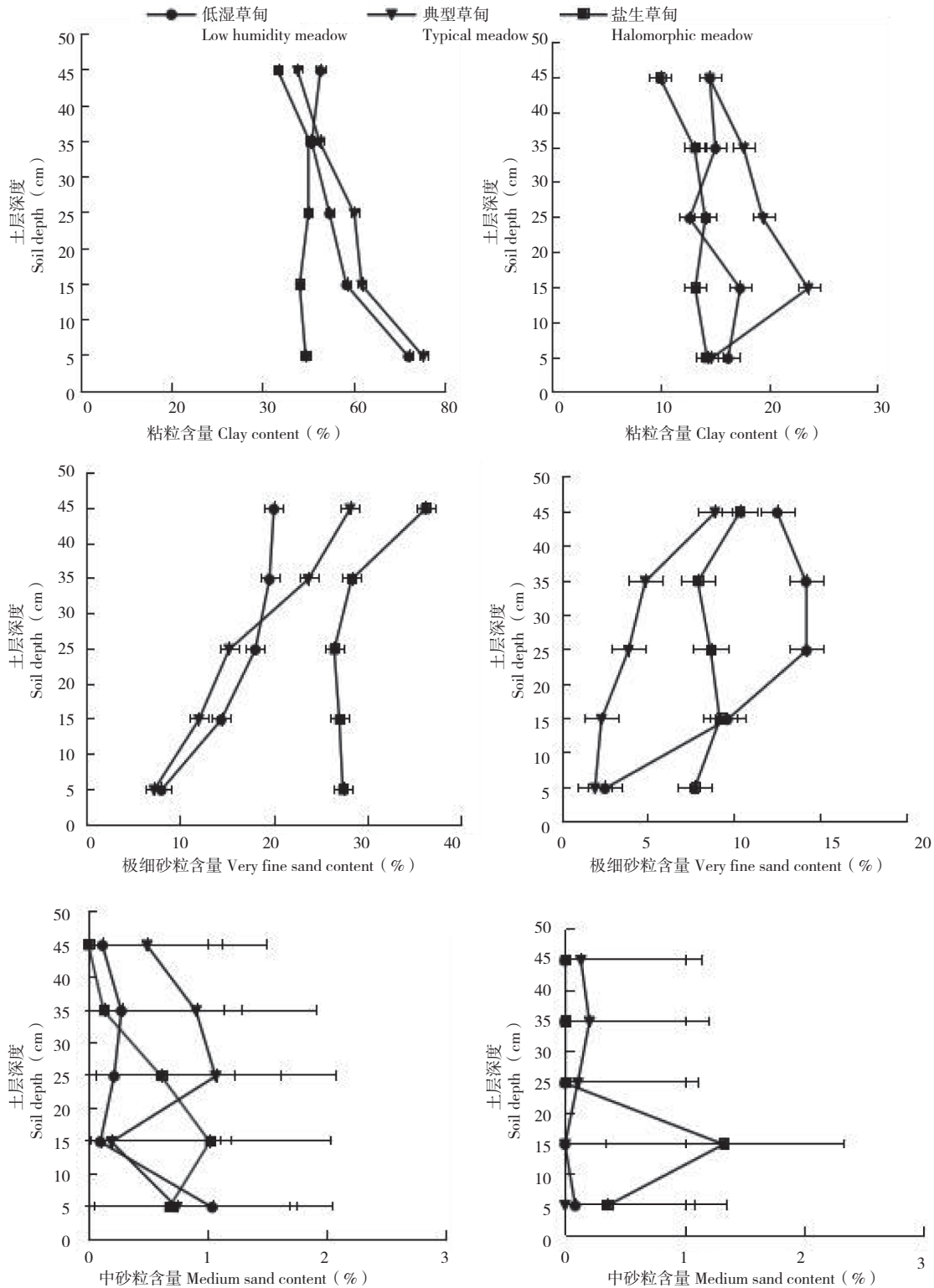


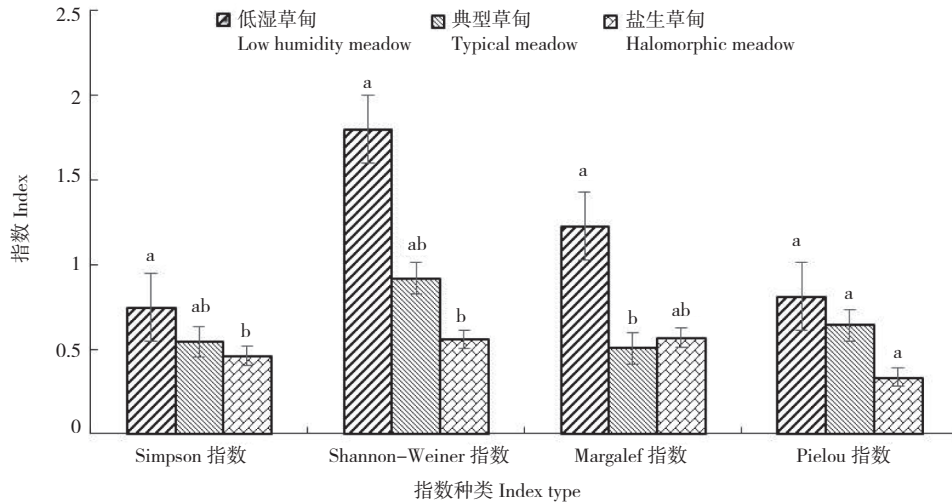
图1 不同生境下的土壤粒级含量在土壤剖面上的变化
 Fig. 1 Changes of soil particle size on soil profiles in different habitats

2.4 不同生境植物群落的多样性与土壤分形维数

如图 2 所示, 4 种多样性指数整体上表现为低湿草甸 > 典型草甸 > 盐生草甸。其中 Simpson 指数和 Shannon-Weiner 指数表现出相同的差异性, 即低湿草甸显著高于盐生草甸, 而与典型草甸

间无显著差异; Margalef 指数表现为低湿草甸显著高于典型草甸, 而与盐生草甸间无显著差异; Pielou 指数在 3 种生境下均无显著差异。

图 3 为研究区土壤分形维数与植物群落的多样性关系, 从 $y=Ax+B$ 、 $y=Ae^{Bx}$ 、 $y=A+B$ 和



同一种指数上小写英文字母不同者表示差异显著

The different lowercase letters in the same index represent significant differences

图 2 不同生境植物群落的多样性指数

Fig. 2 Diversity indexes of plant communities in different habitats

$y=Ax^2+Bx+C$ 中选取 R^2 最佳作为拟合方程, 其中与 Simpson 指数和 Margalef 指数以指数函数拟合 (R^2 分别为 0.105 和 0.238), 呈现出随着土壤分形维数的增大, Simpson 指数和 Margalef 指数有变小的趋势; 与 Shannon-Weiner 指数和 Pielou 指数以多项式函数拟合 (R^2 分别为 0.179 和 0.176),

随着土壤分形维数的增大, Shannon-Weiner 指数和 Pielou 指数呈现出先增大后减少的趋势, 且在分形维数值为 2.6 左右出现峰值。

3 讨论

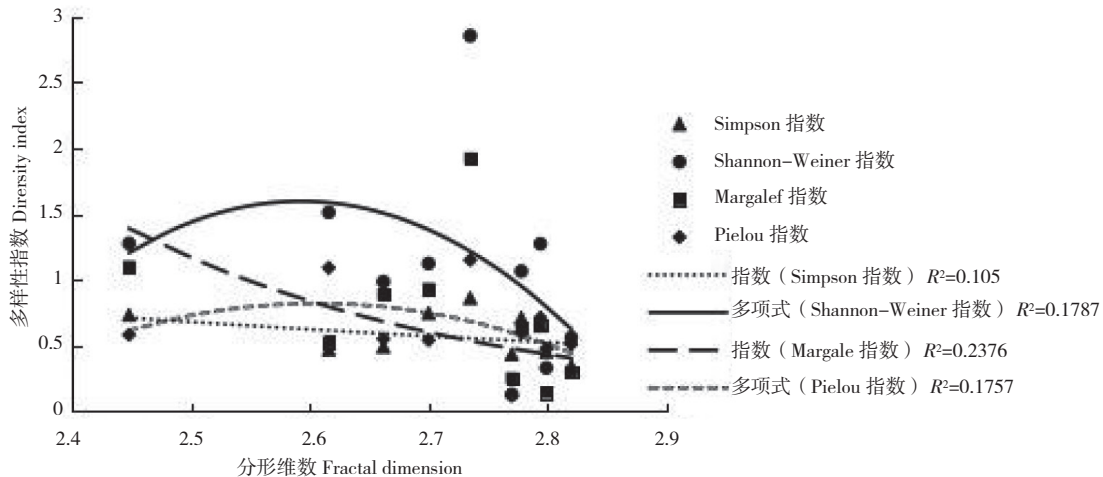


图 3 不同土壤分形维数对应的植物 4 种多样性指数

Fig. 3 4 diversity indexes corresponding to different fractal dimensions of soil

草甸是在适中的水分条件下发育起来的以多年生中生草本植被为主体的典型区域；草甸土是温带区域低洼地上在地下水浸润作用下形成的半水成土壤，主要分布在我国东北平原、内蒙古和西北地区的河谷平原或湖盆地区。在干旱半干旱地区湿地研究中，草甸被视为陆域过湿土壤上的湿地类型。银川平原的草甸湿地植被中，低湿草甸的植物物种较为多样，主要以芦苇、香蒲、水葫芦苗和水莎草等为建群种；典型草甸以碱蓬、拂子茅和芦苇为建群种；盐生草甸中植物物种数较为单一，为碱蓬和矮生芦苇组成的单优群落。银川平原草甸湿地土壤母质主要为河流洪积物，分选型较好，沉积层次明显，沙粘层相间，其分布地段地形较低平，地下水位较高。本研究结果表明，银川平原草甸湿地土壤主要由以粘粒为主的微团聚体构成，中砂粒和粗砂粒的大团聚体占极少部分；其土壤分形维数值趋于 2.28~2.84，处于具有良好结构和肥力状况土壤^[26-27]（分形维数在 2.60~2.80）与砂土类^[26, 28]（分形维数在 1.83~2.64）土壤的分形维数之间，这也表征了草甸湿地土壤母质的泥沙沉积特征。在土壤分形维数粒径组成的关系上，分形维数越大，粘粒含量越高，极细砂粒和细砂粒含量越少，这与相关研究^[2, 8, 29]基本一致。银川平原草甸湿地土壤分形维数的垂直分布特征，显示土壤粘粒和粉粒表层含量较高，极细砂粒和细砂粒深层含量较高，这不仅与草甸土形成中的腐殖化过程、淀积化过程有关，还与草甸发育过程中的河湖水漫淤过程有关。银川平原是黄河洪泛平原，黄河洪水漫滩、引黄灌溉过程中的沟渠引排、尾间汇水、潜水水位升降等，无疑都是草甸湿地发育的影响因素。

研究区草甸湿地主要分布在银川平原沟渠内外边坡与尾间、渠边洼地、蓄洪区、黄河洪泛平原和湖边周围^[30]，其形成受局地地形、水文、人类耕作活动等成土因素的影响较大，具有很强的隐域性，在 3 种生境下其土壤性质表现出差异性。低湿草甸土壤细砂粒含量相对较高，中砂粒表层含量较高，粗砂粒仅在表层出现。因为低湿草甸主要分布在沟边及平原低洼地，排水不良，地下水埋深较浅，且黄河渠道大水漫淤的机会较大，土壤腐殖化较明显，土壤中稍大颗粒物在生草层（土壤平均厚度 18.6 cm）含量比本研究其他两种草甸相对较多。盐生草甸土壤极细砂粒和粗

砂粒含量相对较高，且粗砂粒仅出现在表层。因为盐生草甸主要分布在平原地区的湖滩边缘或干滩地，地下水位高，基本出现地表水漫滩的可能性，以地下水为其补给水源，地下水含盐量较高，在土壤毛管作用下将盐分带至表层，且土壤存在较明显的潜育化过程，使土壤粗化^[31]。而典型草甸土壤粉粒和中砂粒含量较高，分形维数相对较大，且在土壤分形维数和粒径关系上显示：与粉粒含量呈极显著负相关，与中砂粒含量呈极显著正相关；在土层剖面上，中砂粒深层含量较多，粗砂粒仅出现在深层。这是因为典型草甸主要分布在渠边洼地，黄河水和沟渠尾水漫淤的机会较多，沉淀的泥沙较细，粉粒含量相对较多，地表水及地下水侧向双重补给，受地下水周期性升降的影响，土壤性质不稳定，空间异质性较高，土壤粒径分布规律复杂。

本研究得出水分含量较高的低湿草甸植物群落物种多样性较高，与李文娇等^[32]的单一水分的增加有助于植物群落物种多样性的增加的观点，以及张钦弟等^[33]的土壤水分与物种多样性在水分梯度上存在较好的相关性的观点基本一致，说明草甸湿地植物群落物种多样性受水文的直接影响；而土壤物理结构通过影响地表及地下水的再分配，进而对草甸湿地植物群落物种多样性产生了间接影响。值得注意的是整个草甸湿地在土壤分形维数变大的过程中，植物群落的 Simpson 指数和 Margalef 指数有变小的趋势，Shannon-Weiner 指数和 Pielou 指数出现了先增大后减少的规律，且均在土壤分形维数为 2.6 左右出现峰值，结果均与预想的规律相悖。这可能是因为不同物种对不同土壤属性的依赖差异较大^[34]，加之研究区有放牧活动，人为干扰较为严重，对浅根的植物群落的多样性影响较大。持续的人为干扰会降低群落植物多样性^[35]，进而猜想对 Shannon-Weiner 指数和 Pielou 指数的影响出现了波动可能是因为土壤分形维数在 2.6 左右是接受人为干扰对于该两种生物多样性指数影响的最大阈限。

4 结论

银川平原草甸湿地是干旱区典型的湿地类型，其形成受局地地形、水文、人类耕作活动等多重因素影响。银川平原草甸湿地土壤以粘粒的

微团聚体为主,分形维数值趋于 2.28~2.84; 3 种草甸湿地土壤分形维数存在显著差异,表现为典型草甸(2.74) > 盐生草甸(2.72) > 低湿草甸(2.66); 土壤分形维数与粘粒含量呈极显著正相关,与极细砂粒和细砂粒含量呈极显著负相关; 土壤垂直剖面上表层粘粒和粉粒含量较高,深层极细砂粒和细砂粒含量较高,中砂粒波动较大,粗砂粒仅出现在表层或深层; 土壤粒径和分形特点受局部地形环境的水文关系影响较明显。低湿草甸的植物群落物种多样性较高,多样性指数平均值达 1.15; 水土过程对植物群落物种多样性产生直接影响,土壤物理结构对植物群落物种多样性起间接驱动作用,同时人为因素也起着重要的作用。

参考文献 (References) :

- [1] 罗玲玲, 钟艳霞, 李小宇. 银川平原天然湖泊湿地生态系统水质净化能力探究 [J]. 生态经济, 2014, 30(9): 177-179, 184.
LUO L L, ZHONG Y X, LI X Y. Exploration of ability of ecosystem for water purification in natural wetlands of Yinchuan Plain [J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(9):177-179, 184.
- [2] 胡云锋, 刘纪远, 庄大方, 曹红霞, 闫慧敏. 不同土地利用/土地覆盖下土壤粒径分布的分维特征 [J]. 土壤学报, 2005, 42(2): 336-339.
HU Y F, LIU J Y, ZHUANG D F, CAO H X, YAN H M. Fractal Dimension of soil particle size distribution under different land use/land coverage [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(2): 336-339.
- [3] 李保国. 分形理论在土壤科学中的应用及其展望 [J]. 土壤学进展, 1994, 22(1): 1-10.
LI B G. Application and prospect of fractal theory in soil science [J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(1):1-10.
- [4] 鲁植雄, 张维强, 潘君拯. 分形理论及其在农业土壤中的应用 [J]. 土壤学进展, 1994, 22(5): 40-45.
LU Z X, ZHANG W Q, PAN J Z. Fractal theory and its application in agricultural soil [J]. *Progress in Soil Science*, 1994, 22(5):40-45.
- [5] SU Y Z, ZHAO H L, ZHAO W Z, TONG H Z. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification [J]. *Geoderma*, 2004, 31(9):43-49.
- [6] 邢瑶丽, 赵志忠, 李燕, 赵泽阳, 李沁枚. 不同土地利用方式土壤团聚体有机碳分布特征——以海南省定安县为例 [J]. 广东农业科学, 2018, 45(10): 74-81. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.10.012.
XING Y L, ZHAO Z Z, LI Y, ZHAO Z Y, LI Q M. Organic carbon change and distribution of soil aggregates under different land use—Taking example of Dingan county, Hainan province [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(10):74-81. doi: 10.16768/j.issn.1004-874X.2018.10.012.
- [7] 赵明月, 赵文武, 刘源鑫. 不同尺度下土壤粒径分布特征及其影响因素——以黄土丘陵沟壑区为例 [J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4625-4632.
ZHAO M Y, ZHAO W W, LIU Y X. Comparative analysis of soil particle size distribution and its influence factors in different scales: a case study in the Loess Hilly-gully area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4625-4632.
- [8] 张俊华, 李国栋, 南忠仁. 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3745-3753.
ZHANG J H, LI G D, NAN Z R. Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe river [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(12):3745-3753.
- [9] 赵光辉, 苏芳莉, 李海福, 李一鸣. 辽河干流上游流域土地利用对土壤颗粒分形维数影响 [J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1622-1627.
ZHAO G H, SU F L, LI H F, LI Y M. Effects of land use on fractal dimension of soil particles in the upper reaches of the Liaohe River Watershed [J]. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(6):1622-1627.
- [10] 李毅, 李敏, 曹伟. 农田土壤颗粒尺寸分布分维及颗粒体积分数的空间变异性 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 94-102.
LI Y, LI M, CAO W. Spatial variability of fractal dimension for soil particle size distribution and particle volume percentage in farmland [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1): 94-102.
- [11] 陈林, 杨新国, 宋乃平, 王磊. 风沙区不同种植年限首茬土壤团聚体组成分形特征研究 [J]. 中国水土保持, 2014(10): 54-57. doi: 10.14123/j.cnki.swcc.2014.10.052.
CHEN L, YANG X G, SONG N P, WANG L. Fractal features of soil particle size distribution in *Alfalfa* grassland with different planting years of sandy area [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2014(10):54-57, 71. doi: 10.14123/j.cnki.swcc.2014.10.052.
- [12] 吴承祯, 洪伟. 不同经营模式土壤团聚体结构的分形特征研究 [J]. 土壤学报, 1999(2): 162-167.
WU C Z, HONG W. Study on fractal features of soil aggregate structure under different management patterns [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999(2):162-167.
- [13] ARYA L M, PARIS J F. A physical empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle size distribution and bulk density [J]. *Physical Review Letters*, 1985, 54(12):1325-1328.
- [14] PERFECT E, KAY B D. Applications of fractals in soil and tillage research: review [J]. *Soil & Tillage Research*, 1995, 36(1/2):1-20.
- [15] 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.
SU Y Z, ZHAO H L. Fractal features of soil particle size distribution in the desertification process of the farmland in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 71-74.
- [16] 高君亮, 李玉宝, 虞毅, 迟悦春, 高永. 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.
GAO J L, LI Y B, YU Y, CHI Y C, GAO Y. Soil fractal characters under different land use patterns of mu us sandy land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2010, 17(6): 220-223.
- [17] 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.
JIA X H, LI X R, LI Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area [J]. *Geographical Research*, 2007, 26(3): 518-525.
- [18] 热依拉·木民, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 阿依加马力·克然木, 王文娟. 基于分形维数的不同林龄新疆杨对土壤理化特性的影响分析 [J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 313-319. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.02.08.
REVILA M, UMUT H, TAVIERJIANG A, AVIJAMALI K, WANG W J. Influence of different aged populus alba var. pyramidalis on soil

- physicochemical properties based on fractal dimension [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(2):313–319. doi: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.02.08.
- [19] 孙改清, 李素英, 赵园园, 王冉, 任丽娟, 常英, 王继伟. 锡林浩特土壤颗粒分形特征与草原植物生物量的相关性研究 [J]. *资源科学*, 2016, 38 (6) : 1065–1074.
- SONG G Q, LI S Y, ZHAO Y Y, WANG R, REN L J, CHANG Y, WANG J W. Correlation between fractal characteristics of soil particles and biomass of steppe plants in Xilinhot [J]. *Resources Science*, 2016, 38(6):1065–1074.
- [20] 夏贵菊, 何彤慧, 于骥, 吴春燕, 赵永全. 银川平原草甸湿地盐土及其盐分分布特征 [J]. *土壤*, 2016, 48(4) : 785–792. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2016.04.024.
- XIA G J, HE T H, YU J, WU C Y, ZHAO Y Q. Salt profile distributions of meadow wetland in yinchuan Plain [J]. *Soils*, 2016, 48(4):785–792. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2016.04.024.
- [21] TYLER S W, WHEATCRAFT S W. Fractal scaling of soil particle size distributions: Analysis and limitations [J]. *Soil Sci. Soc. Am*, 1992, 56 (2) : 362–369.
- [22] 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 (20) : 1896–1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal characteristics of soil characterized by Weight Distribution of Particle Size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993(20):1896–1899.
- [23] 阎欣, 安慧. 宁夏荒漠草原沙漠化过程中土壤粒径分形特征 [J]. *应用生态学报*, 2017, 28 (10) : 3243–3250. doi: 10.13287/j.1001–9332.201710.024.
- YAN X, AN H. Fractal features of soil particle size in the process of desertification in desert grassland of Ningxia [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(10) : 3243 — 3250. doi: 10.13287/j.1001–9332.201710.024.
- [24] 张琳, 刘文, 梁红. 粤东北稀土矿场不同立地条件植物多样性研究 [J]. *广东农业科学*, 2016, 43 (10) : 82–88. doi: 10.16768/j.issn.1004–874X.2016.10.015.
- ZHANG L, LIU W, LIANG H. Plant diversity under different site conditions of rare earth mine in northeastern Guangdong [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2016, 43(10):82–88. doi: 10.16768/j.issn.1004–874X.2016.10.015.
- [25] 屈月雷, 令志强, 王晨, 彭尔瑞. 云南省石葵河不同海拔梯度的植物多样性分析 [J]. *广东农业科学*, 2018, 45 (9) : 79–83. doi: 10.16768/j.issn.1004–874X.2018.09.013.
- QU Y J, LING Z Q, WANG C, PENG E R. Plant diversity analysis of different altitudinal gradients in Shikuihe river, Yunnan province [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2018, 45(9):79–83. doi: 10.16768/j.issn.1004–874X.2018.09.013.
- [26] 李德成, 张桃林. 中国土壤颗粒组成的分形特征研究 [J]. *土壤与环境*, 2000 (4) : 263–265.
- LI D C, ZHANG T L. Fractal features of particle size distribution of soils in China [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000(4):263–265.
- [27] 张季如, 朱瑞庚, 祝文化. 用粒径的数量分布表征的土壤分形特征 [J]. *水利学报*, 2004 (4) : 67–71, 79. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2004.04.012.
- ZHANG J R, ZHU R G, ZHU W H. Field experimental study of contaminant transport in sewage irrigation and treatment system [J]. *Shui Li Xue Bao*, 2004(4):67–71, 79. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2004.04.012.
- [28] 黄冠华, 詹卫华. 土壤颗粒的分形特征及其应用 [J]. *土壤学报*, 2002 (4) : 490–497.
- HUANG G H, ZHAN W H. Fractal perty of soil particle size distribution and its application [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002(4):490–497.
- [29] 刘志强, 高吉喜, 田美荣, 栗忠飞, 王亚萍, 童明坤. 生态修复区植物群落土壤粒径的分维特征 [J]. *生态学杂志*, 2017, 36 (2) : 303–308. doi: 10.13292/j.1000–4890.201702.030.
- LIU Z Q, GAO J X, TIAN M R, LI Z F, WANG Y P, TONG M K. Fractal dimension characteristics of soil particle size under different plant communities in ecological restoration area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017,36(2): 303–308. doi: 10.13292/j.1000–4890.201702.030.
- [30] 何彤慧. 银川平原不同类型湿地的历史演变 [J]. *人民黄河*, 2016, 38 (4) : 54–58.
- HE T H. Historical evolution of the different wetlands types in the Yinchuan Plain [J]. *Yellow River*, 2016, 38(4):54–58.
- [31] 王燕, 赵哈林, 董治宝, 赵学勇, 潘成臣. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤环境的演变过程 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23 (11) : 1744–1751. doi: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2014.11.003.
- WANG Y, ZHAO H L, DONG Z B, ZHAO X Y, PAN C C. Change of Soil physico–chemical characteristics in farmland salinization in Arid Oasis [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11):1744–1751. doi: 10.16258/j.cnki.1674–5906.2014.11.003.
- [32] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 修伟明, 张贵龙, 皇甫超河, 杨殿林. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35 (19) : 6460–6469.
- LI W J, LIU H M, ZHAO J N, XIU W M, ZHANG G L, HUANG PU C H, YANG D L. Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the Stipa baicalensis Steppe, Inner Mongolia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6460–6469.
- [33] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 杨磊. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局 [J]. *自然资源报*, 2018, 33 (8) : 1351–1362.
- ZHANG Q D, WEI W, CHEN L X, YANG L. Spatial variation of soil moisture and species diversity patterns along a Precipitation Gradient in the Grasslands of the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(8):1351–1362.
- [34] 冯雷. 古尔班通古特沙漠土壤理化性质的空间变异及对植物多样性的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2015.
- FENG L. Spatial characteristics of soil chemical and physical property influenced distribution of plant diversity in Gurbantunggut Desert [D]. Shihezi: Shihezi University, 2015.
- [35] 罗奕爽, 何杰, 郑绍伟, 黎燕琼, 彭培好. 人为干扰对物种多样性和生态因子的影响分析 [J]. *四川林业科技*, 2017, 38 (5) : 23–27. doi: 10.16779/j.cnki.1003–5508.2017.05.005.
- LUO Y S, HE J, ZHENG S W, LI Y Q, PENG P H. Analysis of the Influence of Human Disturbance on Species Diversity and Ecological Factors [J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2017, 38(5):23–27. doi: 10.16779/j.cnki.1003–5508.2017.05.005.

(责任编辑 杨贤智)