

干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析

蒋嘉瑜, 刘任涛, 张安宁

(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, 银川 750021)

摘 要:为了探讨干旱与半干旱荒漠草原区灌丛微生境土壤分形维数与理化性质变化特征及对干旱环境的响应规律,选择宁夏盐池和内蒙古乌拉特荒漠草原柠条灌丛为研究对象,以灌丛外裸地为对照,采用野外采样与室内分析方法,开展了灌丛内外微生境土壤分形特征和土壤理化性质的对比研究。结果表明:(1)盐池柠条灌丛显著提高了中砂粒含量,降低了土壤黏粒、含水量、pH 值、全碳含量及土壤碳氮比。乌拉特柠条灌丛显著提高了极细砂粒和细砂粒含量,降低了土壤黏粒含量和土壤分形维数。(2)从乌拉特到盐池,随着降水量增加,柠条灌丛土壤粉粒、含水量、全碳含量及碳氮比增加,而极细砂粒、细砂粒、pH 值降低。(3)土壤黏粒与土壤养分间呈正相关性,土壤粉粒与全碳、碳氮比及含水量间均呈显著正相关性,但极细砂粒与全氮呈显著负相关性,土壤细砂粒与全碳、碳氮比及含水量间呈显著负相关性,土壤中砂粒与土壤含水量、全碳、土壤碳氮比间呈负相关性。(4)土壤分形维数与土壤养分呈正相关,与黏粒含量呈显著正相关,而与极细砂粒、细砂粒含量呈显著负相关。综上,降水分布条件差异导致柠条灌丛内外水分再分配格局、养分空间分布产生较大差异。土壤分形维数可以很好地反映不同荒漠草原类型与不同微生境间土壤性质空间差异性。

关键词:干旱环境;柠条灌丛;土壤分形特征;土壤理化性质;荒漠草原

中图分类号:S153; S152.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0054-08

Comparative Analysis of Soil Fractal Dimension and Soil Physical and Chemical Properties Between *Caragana korshinskii* Shrub Plantations in Arid and Semi-arid Desert Steppe

JIANG Jiayu, LIU Rentao, ZHANG Anning

(Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to explore the change characteristics of soil fractal dimension and physical and chemical properties of the shrub micro-habitat in the arid and semi-arid desert steppe area and its response to arid environment, *Caragana korshinskii* shrub in Yanchi of Ningxia and Urat of Inner Mongolia were selected as the research samples, the bare land was used as a control, field sampling and indoor analysis methods were used to carry out a comparative study of soil fractal characteristics and soil physical and chemical properties of the micro-habitats inside and outside the shrubs. The results showed that: (1) in Yanchi, the content of medium sand significantly increased, but the content of soil clay, moisture, pH value, total carbon, and carbon-to-nitrogen ratio reduced in *Caragana korshinskii* shrubs; in Urat, the content of very fine sand and fine sand significantly increased, but the content of soil clay and fractal dimension reduced in *Caragana korshinskii* shrubs; (2) with the increase of precipitation, the silt content, water content, total carbon and carbon-to-nitrogen ratio increased, while the clay content, fine sand particles, and pH value decreased in *Caragana korshinskii* canopy habitats; (3) there was a positive correlation between soil clay and nutrients, and between soil silt content and total carbon, carbon-to-nitrogen ratio and water content, but there was a negative corre-

收稿日期:2020-08-20

修回日期:2020-09-10

资助项目:国家自然科学基金(41867005,41661054);宁夏青年拔尖人才培养工程项目(RQ0010)

第一作者:蒋嘉瑜(1997—),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为恢复生态学。E-mail:jjy15202695024@163.com

通信作者:刘任涛(1980—),男,河南南阳人,研究员,硕士生导师,主要从事恢复生态相关研究与教学工作。E-mail:nxuli2012@126.com

lation of content of soil very fine sand with total nitrogen, between soil fine sand content and total carbon, carbon-to-nitrogen ratio and water content, and between soil sand content and water content, total soil carbon, and carbon-to-nitrogen ratio; (4) the fractal dimension of soil had a positive correlation with soil nutrients, a significant positive correlation with clay content, and a significant negative correlation with very fine sand and fine sand content. In summary, it was concluded that the differences in precipitation distribution could lead to variations of soil water redistribution and nutrient spatial distributions between *Caragana korshinskii* shrub microhabitats. The soil fractal dimension could be the rational reflection of the spatial differences of soil properties between shrub microhabitats in desertified grassland under different rainfall regimes.

Keywords: arid environment; *Caragana korshinskii*; soil physical and chemical properties; soil fractal dimension; desertified grassland

荒漠草原是介于沙漠与草原之间对环境有强烈反应的敏感区,也是一种较为干旱的草原类型,往往容易受到人类干扰和气候变化的影响而发生退化和沙漠化^[1]。为促进荒漠草原退化生态系统的有效恢复,我国开展了大规模的植树造林活动^[2]。其中,柠条(*Caragana korshinskii*)作为最常见的造林树种之一,其独特的生理生态学特性,不仅对恶劣的生态环境具有较强的适应能力,还为当地畜牧提供了优质的饲草资源,已成为人工林建设与生态恢复的主要植物种之一^[3]。研究表明,在退化土地上种植旱生灌木柠条林,能够促进地表植被和土壤性质变化,以及水分格局的再分配,从而导致柠条灌丛呈现“肥岛”效应^[4],对荒漠草原区的水土保持、草地退化和沙化的治理具有重要生态意义。并且荒漠草原地下水位较深,植物维持生长的水分主要来源于降水,而不同程度的降水,对土壤与植被的水分循环有重要作用。因此,研究干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与土壤理化性质对比分析,对于退化草地生态系统有效恢复及响应气候变化均具有重要意义。

目前,干旱、半干旱区灌丛土壤理化性质及分形特征的变化研究,一直是生态学领域的热点问题。贾晓红等^[5]研究发现,腾格里沙漠沙冬青灌丛中土壤粒径分形维数不仅能表征土壤颗粒大小组成,还能反映土壤质地的均一程度和土壤结构的异质性。代豫杰等^[6]发现乌兰布和沙漠沙冬青、花棒等灌丛下土壤均具有良好的分形特征,具有有效防止表土粗化、促进细颗粒物积累的作用。麦尔哈巴·尼加提等^[7]研究了准噶尔盆地东南缘荒漠的盐生假木贼灌丛林地,发现灌丛下土壤的水分和养分均增加。Wezel等^[8]发现,尼日尔 *Guiera* 灌木林地中的土壤养分积累和土壤肥力有明显的空间变化。陈东^[9]通过对盐池油蒿灌丛土壤理化性质研究分析发现,土壤分形维数与土壤颗粒组成、理化性质之间存在相关关系。而不同于旱环境条件下,由于降水分布条件存在较大差

异,结果将导致柠条灌丛内外水分再分配格局、养分空间分布产生较大差异^[10]。综合分析表明,灌丛对土壤分形维数和土壤理化性质产生深刻影响,土壤分形维数与理化性质可作为评价土壤沙漠化演变的一项综合性定量指标。但是,关于干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛分形维数与土壤理化性质变化特征对比研究,报道较少。关于柠条灌丛微生境土壤分形维数及理化性质分布对干旱环境的响应规律,尚不清楚。

鉴于此,本文以宁夏盐池和内蒙古乌拉特荒漠草原为研究区域,以柠条灌丛为研究对象,开展灌丛内外微生境土壤分形特征和土壤理化性质对比研究,旨在探讨干旱与半干旱荒漠草原区灌丛微生境土壤分形维数与土壤理化性质分布特征及对干旱环境的响应规律,为该区域人工林建设、荒漠化防治及退化草地生态恢复提供依据。

1 研究区概况

研究区位于半干旱区宁夏盐池县和干旱区内蒙古乌拉特后旗。其中,宁夏盐池县荒漠草原(37°49′12.90″N,107°27′30.18″E,平均海拔1 348 m),属于典型温带大陆性季风气候。全年62%以上的降水集中在7—9月。于1973年种植人工柠条林,封育管理27 a^[11]。地表植物主要为柠条、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii* Vass.)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)等。

内蒙古乌拉特后旗荒漠草原(41°26′23.48″N,106°59′0.59″E,平均海拔1 621 m),属于典型的大陆性干旱气候。全年70%以上降水集中在7—8月。于2001年种植人工柠条林,封育管理15 a。地表植物主要为柠条、红砂(*Reaumuria soongorica*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、多根葱(*Allium polyrhizum*)和小针茅(*Stipa klemenzii*)等^[12]。试验研究样地基本气候条件和土壤类型情况见表1^[13-14]和图1。

表 1 研究样地基本气候条件和土壤类型情况

荒漠 草原	干湿 状况	年平均 气温/℃	年降 雨量/mm	年际 蒸散/mm	≥10℃年积温/ (℃·d ⁻¹)	风速/ (m·s ⁻¹)	土壤类型	
							地带性	非地带性
盐池	半干旱区	8.5	281.7	2136	2949	2.8	灰钙土	风沙土
乌拉特	干旱区	5.7	184.5	3447	2500	5.0	灰棕漠土	风沙土

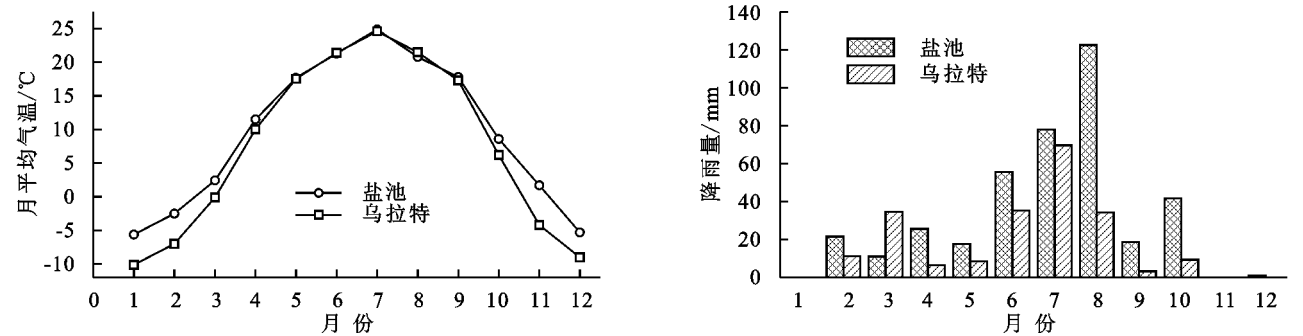


图 1 研究样地 2017 年各月平均降雨量和月气温

2 材料与方法

2.1 试验设计

于 2017 年 9 月,在盐池和乌拉特荒漠草原封育试验研究样地内,分别选择 12 株高度、大小、长势一致的老林龄^[15](林龄>14 a)柠条灌丛作为研究对象。在每株灌丛内外均布设调查样点(为消除灌丛的干扰,灌丛外裸露地需远离灌丛 10 m 以上)。试验共布设 48 个调查样点(2 地区×2 微生境×12 重复)。

本研究选取的样地地势平坦、地形、植被及土壤类型基本一致,且主要以风沙土为主。其中盐池柠条灌丛平均高度为(1.04±0.07) m,冠幅平均直径为(1.89±0.57) m。乌拉特柠条灌丛平均高度为(0.88±0.05) m,冠幅平均直径为(1.86±0.68) m。

2.2 土壤样品采集与测定

在每个调查样点,利用五点取样法采取混合土样,取样深度 0—10 cm。用铝盒取部分混合新鲜土样用于土壤含水量的测定,剩余混合土样经自然风干后,去除叶、茎、根系、石块等杂物,并按照试验后期要求过筛,用于土壤电导率和 pH 值、全碳和全氮以及土壤粒径组成的测定。

土壤含水量(%)采用烘干称重法测定(105℃,24 h)。土壤 pH 值和电导率(μS/m),则采用 1:5 的土水比浸提后,静置一夜取上清液,分别使用 PHS-3C 酸度计和便携式电导率仪(雷磁 DDSJ-308F)进行测定。土壤全碳(%)和全氮(%)通过元素分析仪(意大利 DK6,UDK140 分析仪)来测定。土壤粒径组成采用 Mastersizer 3000 激光衍射粒度分析仪进行其粒径体积百分含量的测定。本研究根据美国农业部的分类系统对土壤颗粒进行分级:黏粒(<2 μm),粉粒(2~50 μm),极细砂粒(50~100 μm),细砂粒(100~250

μm),中砂粒(250~500 μm),粗砂粒(500~1 000 μm),极粗砂粒(1 000~2 000 μm)^[16]。

本研究选择 Tyler^[17]、杜雅仙^[18]等提出的体积分形模型,对土壤颗粒体积分形维数进行计算,计算公式如下:

$$\lg \frac{V(R < R_n)}{V_n} = (3 - D) \lg \frac{R_n}{R_{\max}} \quad (1)$$

式中:R 为粒径;R_n 为粒径分区中的 n 级粒级;V(R<R_n)为粒径小于 R_n 的土壤颗粒体积百分数;V_n 为土壤中全部粒级的总体积百分数;R_{max} 为土壤颗粒中的平均最大粒径。对某一土壤各级粒径的土壤含量进行整理,并以 lg $\frac{V(R < R_n)}{V_n}$ 为纵坐标,lg $\frac{R_n}{R_{\max}}$ 为横坐标进行线性拟合,得到拟合方程的斜率为(3-D),即可得到土壤分形维数 D。本研究中,R_{max}=2000 μm。

2.3 数据处理与统计分析

应用 SPSS Statistics 25 统计软件进行数据分析。采用配对样本 t 检验分析不同荒漠草原类型、不同微生境间的差异,采用 Pearson 相关系数分析土壤理化性质与分形特征间的相关性。采用双尾检测,显著水平为 p=0.05。图表中数据均为平均值±标准误差。

3 结果与分析

3.1 土壤粒径分布与分形维数

由图 2 可知,盐池和乌拉特荒漠草原柠条灌丛内外土壤粒径分布高峰范围相近,粒径峰值集中分布在 2~100 μm。均呈单峰型,且变化幅度较大,土壤粒径分布的非均匀程度较高。从表 2 可以看出,灌丛微生境土壤中,土壤颗粒组成以黏粒、粉粒和极细砂粒为主,而粗砂粒和极粗砂粒含量所占比例较少,在乌拉特荒漠草原柠条灌丛甚至无土壤极粗砂粒。

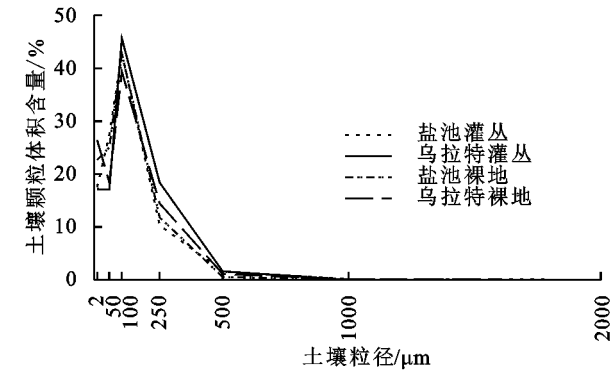


图 2 荒漠草原柠条灌丛微生境土壤粒径分布频率曲线

表 2 土壤颗粒分布特征及其土壤分形维数变化

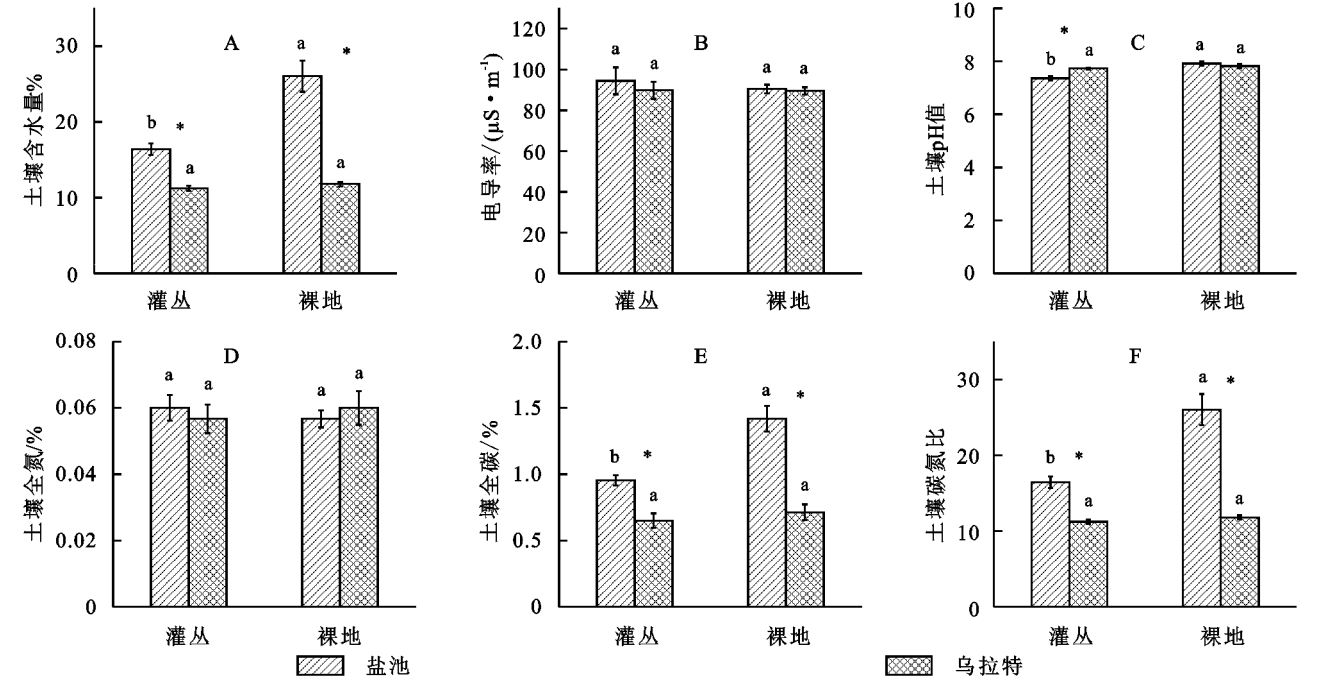
样地	土壤颗粒分布/%							土壤分形 维数
	黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒	
盐池灌丛	17.56±0.56Ab	27.32±0.77Aa	42.84±0.74Ba	10.34±0.63Ba	1.60±0.36Aa	0.18±0.12Aa	0.04±0.03Aa	2.69±0.03Aa
乌拉特灌丛	17.15±0.61Ab	17.11±0.65Ba	45.68±0.61Aa	18.41±0.83Aa	1.63±0.17Aa	0.02±0.01Aa	0Aa	2.66±0.04Ab
盐池裸地	22.73±1.58Aa	25.04±0.87Aa	42.71±1.27Aa	11.82±2.93Ba	0.57±0.20Ab	0.02±0.02Aa	0.01±0.01Aa	2.71±0.04Aa
乌拉特裸地	26.43±1.97Aa	18.46±0.44Ba	39.37±1.45Ab	14.46±0.88Ab	1.11±0.28Aa	0.15±0.11Aa	0.02±0.02Aa	2.75±0.05Aa

注:不同小写字母表示不同微生境之间差异显著,不同大写字母表示不同荒漠草原之间差异显著($p<0.05$)。

同时,无论是灌丛还是裸地,土壤粉粒含量均表现为盐池高于乌拉特,而土壤细砂粒均表现为乌拉特高于盐池。土壤极细砂粒表现为在灌丛中乌拉特显著高于盐池,而在裸地中 2 个类型间则无显著差异($p>0.05$)。但是,灌丛和裸地中土壤分形维数、黏粒、粗砂粒以及极粗砂粒含量均表现为盐池和乌拉特间无显著差异($p>0.05$)。

3.2 土壤理化性质

由图 3A 可知,土壤含水量既受到荒漠草原类型的影响,也受到灌丛微生境变化的影响。在盐池荒漠草原,土壤含水量表现为裸地显著高于灌丛($p<0.05$),而在乌拉特荒漠草原灌丛内外则无显著差异($p>0.05$)。同时,灌丛和裸地微生境土壤含水量均表现为盐池显著高于乌拉特($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示不同微生境之间差异显著,*表示不同荒漠草原之间差异显著($p<0.05$)。

图 3 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤理化性质变化

从图 3B—C 可以看出,土壤电导率受荒漠草原类型和灌丛微生境变化的影响较小。但土壤 pH 值

既受到荒漠草原类型的影响,亦受到微生境变化的影响。在盐池荒漠草原,土壤 pH 值表现为裸地显著高于灌丛($p<0.05$),而在乌拉特荒漠草原灌丛内外微生境间则无显著差异($p>0.05$)。同时,灌丛土壤 pH 值表现为乌拉特显著高于盐池($p<0.05$),而裸地土壤 pH 值在两地间无显著差异($p>0.05$)。

由图 3D—F 可知,土壤全氮受到荒漠草原类型和微生境变化的影响较小($p>0.05$)。土壤全碳含量与碳氮比既受到荒漠草原类型的影响,也受到微生境变化的影响。在盐池荒漠草原,土壤全碳含量与碳氮比表现为裸地显著高于灌丛($p<0.05$),而在乌拉特荒漠草原灌丛内外则无显著差异($p>0.05$)。同时,灌丛和裸地微生境土壤全碳、碳氮比均表现为盐池显著高于乌拉特($p<0.05$)。

3.3 土壤理化性质、土壤粒径分布及分形维数的相关性

3.3.1 土壤粒径分形维数与土壤粒径分布间的相关关系 由图 4 可以看出,盐池和乌拉特荒漠草原土壤分形维数与土壤黏粒、极细砂粒、细砂粒含量均呈二次相关关系。表现为土壤分形维数与土壤黏粒间呈二次显著正相关($R^2_{\text{盐池黏粒}}=0.671, R^2_{\text{乌拉特黏粒}}=0.941, p<0.01$),而与土壤极细砂粒、细砂粒含量间均呈二次显著负相关($R^2_{\text{盐池极细砂粒}}=0.3628, R^2_{\text{乌拉特极细砂粒}}=0.7969, R^2_{\text{盐池细砂粒}}=0.2922, R^2_{\text{乌拉特细砂粒}}=0.7163, p<0.01$)。仅在乌拉特荒漠草原,土壤分形维数与土壤粉粒呈二次显著正相关($R^2_{\text{乌拉特粉粒}}=0.407, p<0.01$),而与中砂粒呈二次负相关($R^2_{\text{乌拉特中砂粒}}=0.2795, p<0.05$)。但是,土壤分形维数与粗砂粒、极粗砂粒间则无相关性($p>0.05$)。

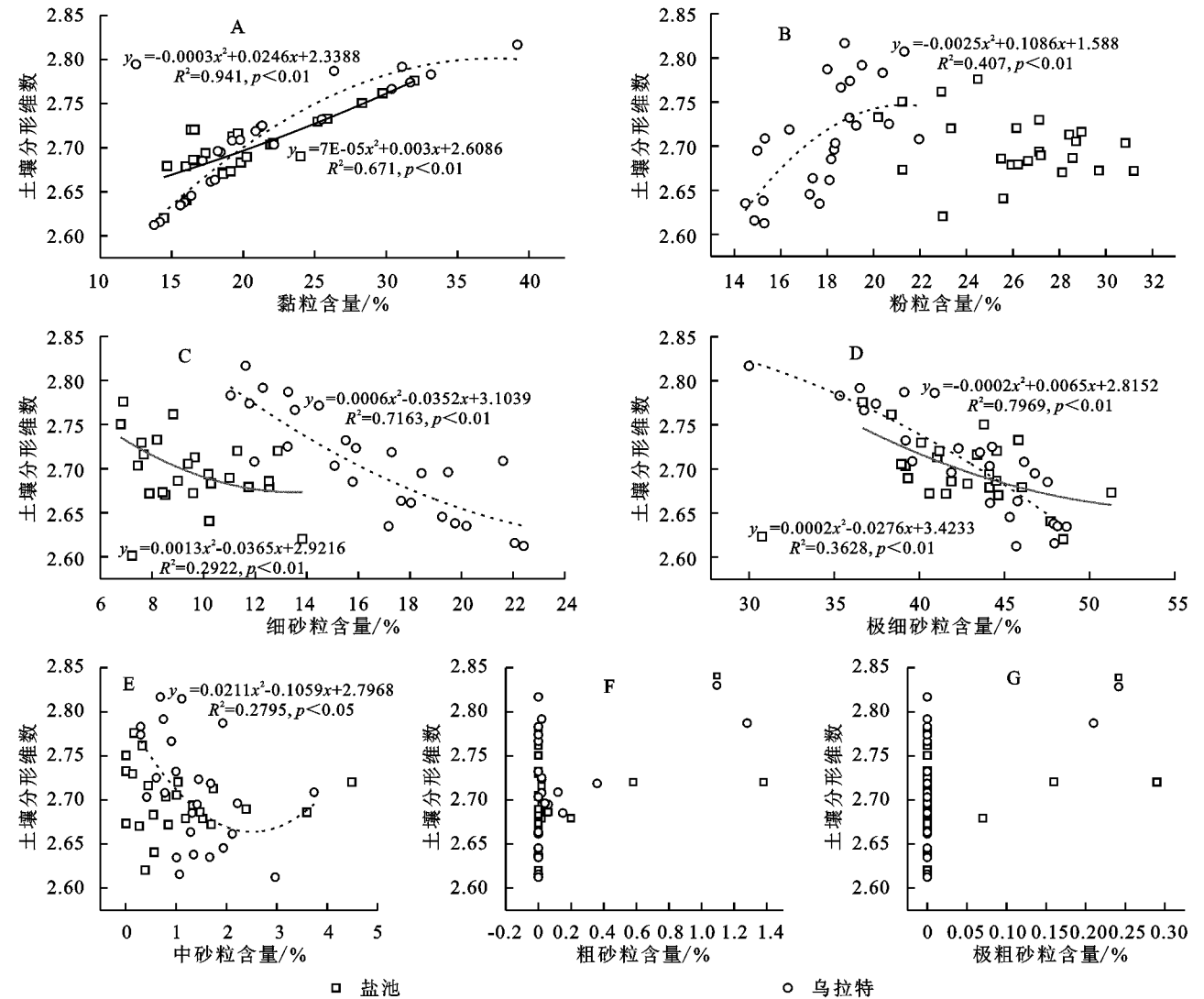


图 4 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤粒径分形维数与土壤粒径分布相关性

3.3.2 土壤粒径分布、土壤分形维数与土壤理化性质之间的相关关系 由表 3 可知,土壤黏粒含量与土壤全氮含量间呈正相关性($p<0.05$),而与土壤全碳间呈显著正相关性($p<0.01$)。土壤粉粒含量与土壤

全碳、碳氮比及含水量间均呈显著正相关性($p<0.01$)。土壤极细砂粒含量仅与土壤全氮呈显著负相关性($p<0.01$)。土壤细砂粒含量与土壤全碳、碳氮比及含水量间呈显著负相关性($p<0.01$)。土壤中砂

粒含量与土壤碳氮比、含水量间呈负相关性($p < 0.05$),与土壤全碳间呈显著负相关性($p < 0.01$)。土壤粗砂粒和极粗砂粒含量与土壤性质指标间均无相

关性($p > 0.05$)。土壤分形维数与土壤全氮、全碳含量呈正相关性($p < 0.05$),而与土壤碳氮比、含水量、pH 值以及电导率含量间均无相关性($p > 0.05$)。

表 3 灌丛微生境土壤理化性质与土壤粒径、土壤分形维数之间的相关系数

土壤理化性质	黏粒	粉粒	极细砂粒	细砂粒	中砂粒	粗砂粒	极粗砂粒	土壤分形维数
全氮	0.365 *	0.198	-0.377 **	-0.277	-0.279	-0.081	-0.066	0.330 *
全碳	0.389 **	0.513 **	-0.208	-0.780 **	-0.446 **	-0.145	-0.089	0.340 *
碳氮比	0.211	0.419 **	0.021	-0.678 **	-0.363 *	-0.123	-0.067	0.168
含水量	0.084	0.740 **	-0.020	-0.833 **	-0.359 *	-0.038	0.053	0.130
pH 值	0.230	-0.220	-0.039	0.040	-0.251	-0.112	-0.130	0.085
电导率	0.037	0.112	-0.027	-0.122	-0.072	-0.127	-0.148	0.062

注: * 代表 $p < 0.05$; ** 代表 $p < 0.01$ 。

4 讨论

4.1 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛对土壤粒径组成与分形维数的影响

土壤粒径分布是反映土壤结构和土壤发育程度的指标之一,也是影响土壤水力特性、土壤侵蚀以及土壤退化的重要土壤物理特性之一^[19]。本研究中,盐池和乌拉特荒漠草原柠条灌丛内外土壤粒径含量分布高峰范围相近,且 2 个研究区土壤颗粒组成以极细砂粒为主,黏粒和粉粒次之(表 2)。这主要是由于荒漠草原区环境条件恶劣,土地和植被退化,风蚀作用导致土壤黏粉粒迁移损失,极细砂粒含量增加^[20]。在盐池和乌拉特荒漠草原,土壤黏粒含量均表现为裸地显著高于灌丛,但在盐池荒漠草原土壤中砂粒表现为灌丛下显著高于裸地,在乌拉特荒漠草原灌丛下土壤极细砂粒和细砂粒表现为灌丛下显著高于裸地,这与灌丛“沃岛”效应^[4]呈现的结果相悖。分析原因可能是研究区柠条灌丛发生老化而导致其局部拦截风沙流的能力降低,导致风蚀作用增强而使得灌丛下土壤黏粒减少而细砂粒和中砂粒增加^[21-22]。同时,灌丛内外微生境土壤粉粒含量均表现为盐池高于乌拉特,而土壤细砂粒均表现为乌拉特高于盐池,主要原因在于乌拉特荒漠草原年降雨量低且多风,风蚀与土壤堆积极不稳定,导致土壤表层粉粒流失,细砂粒含量上升^[23]。由此可见,人工柠条林土壤颗粒组成变化是由多种因素决定的,而降水分布会影响土壤颗粒组成。

在盐池荒漠草原,土壤分形维数表现为灌丛内外无显著差异,但在乌拉特荒漠草原,土壤分形维数则表现为灌丛下低于裸地,这与文星跃等^[24]关于岷江上游河谷草本灌木植被下土壤分形维数变化的研究结果不一致。一方面说明在盐池柠条灌丛对土壤分形维数的影响较小,土壤分形维数主要还是与土壤本身的物理基质有关^[25]。同时也说明较为干旱的乌拉特,降雨量偏少,风蚀强度大,导致其细颗粒物物质减

少,粗颗粒物物质增多,土壤结构松散,故土壤分形维数降低^[26]。无论灌丛内外,盐池与乌拉特荒漠草原土壤分形维数均无显著差异。分析原因可能是荒漠草原的土壤类型主要以风沙土为主,土壤母质以风积物为主(表 1),土壤质地相对均一,而土壤分形维数主要与成土母质特征和沉积环境有关^[18],从而导致盐池和乌拉特荒漠草原土壤分形维数无显著差异性。

本文的研究结果表明,荒漠草原土壤分形维数与土壤黏粒含量呈显著的正相关关系,与土壤极细砂粒、细砂粒含量呈显著负相关关系,说明土壤黏粒含量可以指示土壤分形维数的大小,这与罗清虎等^[27]的研究结果一致。而土壤分形维数与粗砂粒、极粗砂粒间则无相关性。这与吕圣桥等^[28]在黄河三角洲的研究结果相似,说明土壤分形维数并不是对所有土壤粒级的土壤颗粒含量变化都有明显反应。另外,乌拉特荒漠草原土壤分形维数与土壤粉粒呈显著正相关关系,与中砂粒呈负相关关系。总而言之,土壤颗粒组成的分形维数随着土壤质地变细而增大,随砂粒含量的增加而变小。

4.2 干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛对土壤理化性质的影响

水分是影响荒漠草原土壤及植被生长的重要因素,灌丛对降水的响应以及土壤中水分的运移和分配均受到土壤结构和功能的影响^[29]。本研究,盐池荒漠草原的土壤含水量表现为裸地高于柠条灌丛,主要是由于多年生柠条根系庞大,有明显的主根和发达的多层侧根组成,入土较深,使得根系在垂直方向和水平方向覆盖面增大,利于吸收不同深度的水分,在其根部生长过程中与土壤发生强烈的相互作用而形成大孔隙,降雨过程中,水分到达地表后通过大孔隙通道迅速渗入并贮存于深层土壤,且研究区蒸腾作用强烈,使灌丛表层土壤水分含量较低,因此,极易造成植物冠幅内外水分异质性分布^[30]。而乌拉特荒漠草原不同微生境土壤含水量无显著差异,可能是由于乌拉特风沙较

大,土壤表层风蚀作用较大,植被覆盖度低,使该地的土壤保水能力差,土壤含水量低,导致灌丛内外土壤含水量无显著差异性^[31]。此外,本研究中,盐池荒漠草原灌丛和裸地的土壤含水量均高于乌拉特荒漠草原,这与乌拉特荒漠草原更为稀少的降雨量密切相关,这与索立柱等^[32]在黄土高原的研究结果一致。

本文的研究结果显示土壤电导率不受荒漠草原类型和微生境的影响。一方面,这可能与两个研究区的土壤母质和土壤类型(风沙土)相似有关;另一方面,是由于研究区风沙较大,天气条件恶劣,枯落物在地表层的积累量小,枯落物中的可溶性盐的沉积较小。因此,使当地土壤电导率变化不大^[33]。进而说明降水分布和灌丛微生境对于土壤电导率影响微弱,但具体原因还需进一步研究。

土壤酸碱度是土壤重要的化学性质之一。本研究结果显示,在盐池荒漠草原,土壤 pH 值表现为裸地显著高于灌丛,可能是由于土壤微生物与灌丛根系有机酸的分泌间的相互作用,导致土壤 pH 值降低,这与牛西午等^[34]的研究结果相似。通过比较干旱与半干旱荒漠草原区内同种微生境的土壤 pH 值,发现裸地土壤 pH 值在两地间无显著差异,这是由于研究区降水量小,蒸发量大,土壤淋溶作用弱,土壤呈弱碱性,且荒漠草原生物化学循环缓慢,短期内降水对土壤 pH 值影响较小^[25]。而灌丛下土壤 pH 值则表现为乌拉特高于盐池,可能是由于盐池降雨量高于乌拉特,且柠条根系的细根分布较多,根系有机酸的分泌物对 pH 值的影响更大,这与雷泽勇等^[35]在辽宁章古台地区对不同林龄的樟子松林土壤的相关研究结果相似。

土壤养分是土壤肥力的重要基础,而由于灌丛的生长发育、灌丛下枯落物的积累以及土壤颗粒组成变化,可能导致土壤全氮和全碳含量的变化^[36]。本研究结果显示在盐池荒漠草原,土壤全碳含量表现为裸地显著高于灌丛。这是由于多年生柠条灌丛随生物量的增大所需的养分元素更多,土壤中的养分为满足其生长需要,从而导致土壤养分资源库的枯竭,这与牛西午等^[34]认为柠条在达到一定树龄后,会出现灌丛土壤部分营养元素的亏损的研究结果相一致。在乌拉特荒漠草原,土壤全碳含量在灌丛内外无显著差异。原因可能是乌拉特荒漠草原自身土壤条件比较贫瘠,本身的碳储量含量低,碳循环较慢,处于灌丛内外的碳素平衡,在一定时间内很难受到降水分布与微生境变化的影响^[37]。同时研究发现,灌丛和裸地土壤全碳含量均表现为盐池显著高于乌拉特,这与刘佳楠等^[36]在沙地柠条灌丛枯落物对土壤质量影响的结果相似。分析原因主要是由于盐池降雨量较高,柠条长势相对较好,枯落物的积累

量大,导致有机质等养分元素在土壤表层积累。本研究结果显示,土壤全氮含量既不受荒漠草原类型的影响,亦不受土壤微生境的影响,这与牛西午等^[34]在晋西北人工柠条林土壤理化性质的研究结果不一致,其原因是由于土壤母质与土壤的缓冲性能,导致土壤氮素含量在短期内很难改变,使研究区土壤处于氮素循环平衡的状态^[38]。土壤碳氮比与土壤全碳变化规律一致,是反映土壤质量程度和有机质组成的重要指标,也反映了土壤碳与氮的平衡关系^[38]。

本研究通过对土壤理化性质和土壤粒径分布、土壤分形维数之间的相关性综合分析发现,土壤黏粉粒含量与土壤养分含量间呈正相关关系,而土壤砂粒含量(50~500 μm)与土壤养分间呈负相关关系。桑巴叶等^[39]的研究表明土壤养分含量主要与土壤细颗粒含量有关,且土壤粉粒是与有机质胶结的主要无机胶体,对土壤结构的稳定性起着至关重要的作用。这也在一定程度上反映了土壤肥力和土壤颗粒的大小关系,即土壤细颗粒物质的含量更能反映土壤质量水平。另外,土壤粉粒与土壤含水量呈显著正相关关系,而细砂粒、中砂粒与土壤含水量呈负相关关系,这与仓木拉等^[19]的研究结果相似。也进一步说明土壤细颗粒物质越多,对土壤的保水能力越强。因此,土壤含水量与土壤结构及土壤粒径分布有着极为密切的联系。土壤粒径各粒级间与土壤 pH 值均无相关性,主要原因是由于 2 个研究区的非地带性土壤均为风沙土,土壤中盐分主要为中性盐,而中性盐对 pH 值的影响较小^[25]。除此之外,土壤分形维数仅与土壤全碳、土壤全氮呈正相关性。并且,土壤黏粉粒含量与土壤分形维数呈正相关(表 3),土壤中细颗粒含量增多有利于土壤养分的积累,说明在一定程度上,土壤分形维数可以作为评价土壤肥力水平的定量指标。但土壤分形维数与含水量、pH 值间均无相关性,这与罗雅曦等^[25]的研究结果一致。说明土壤的颗粒大小不是土壤含水量与 pH 值的主要影响因素。土壤分形维数与电导率含量无相关性,这与杜雅仙^[18]和吕圣桥^[28]等的结果不一致。分析原因可能与研究区的自然状况和恶劣的区域环境相关,使盐碱程度受土壤颗粒组成影响不大。

5 结论

(1) 半干旱区更有利于灌丛和裸地土壤细颗粒含量的积累。随着降水量的增加,柠条灌丛微生境的粉粒含量、含水量、土壤全碳及碳氮比增加,而极细砂粒、细砂粒、土壤 pH 值降低。说明降水量分布对灌丛的土壤分形维数及理化性质具有调控作用。

(2) 土壤分形维数能更好地反映不同荒漠草原类型与不同微生物间土壤的空间差异性,且并不是对所有土壤粒级有明显反应,主要是受到土壤黏、粉粒含量的大小影响。但对微生物变化与降水分布反应不明显。

(3) 研究表明,不同干旱环境条件下,由于降水分布条件存在较大差异,结果将导致柠条灌丛内外水分再分配格局、养分空间分布产生较大差异。

参考文献:

- [1] 白高娃,包翔.不同放牧方式对半荒漠草原土壤理化性质的影响[J].内蒙古民族大学学报:自然科学版,2013,28(3):296-298
- [2] 于瑞鑫,王磊,杨新国,等.平茬柠条的土壤水分动态及生理特征[J].生态学报,2019,39(19):7249-7257.
- [3] Li J, Okin G S, Alvarez L, et al. Effects of wind erosion on the soil nutrient heterogeneity in two desert grassland communities[J]. Biogeochemistry, 2008, 88(1):73-88.
- [4] 刘任涛,柴永青,徐坤,等.荒漠草原区柠条人工固沙林生长过程中地表植被—土壤的变化[J].应用生态学报,2012,23(11):2955-2960.
- [5] 贾晓红,李新荣,张景光,等.沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J].生态学报,2006,26(9):2827-2833.
- [6] 代豫杰,李锦荣,郭建英,等.乌兰布和沙漠不同灌丛土壤颗粒多重分形特征及其与有机碳分布的关系[J].环境科学研究,2017,30(7):1069-1078.
- [7] 麦尔哈巴·尼加提,戴岳,师庆东,等.准噶尔盆地东南缘荒漠灌丛盐生假木贼周围土壤理化性质研究[J].灌溉排水学报,2019,38(7):38-44.
- [8] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agroecosystems in semi-arid Niger[J]. Journal of Arid Environments, 2000,44(4):383-398.
- [9] 陈东.油蒿灌丛沙堆形态特征及其不同演化阶段土壤理化性质分析[D].北京:北京林业大学,2015.
- [10] 刘凯.荒漠草原人工柠条林土壤水分动态及其对降水脉动的响应[D].银川:宁夏大学,2013.
- [11] 杨志敏.放牧、封育对沙地灌丛内外节肢动物群落的影响[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2017.
- [12] 赵生龙,左小安,张铜会,等.乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应[J].干旱区研究,2020,37(1):168-177.
- [13] 杨强,郑西楠,何立恒.基于 HadCM3 模式的我国主要气候区划界线时空预测研究[J].干旱区地理,2017,40(1):17-25.
- [14] 耿庆玲.西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D].北京:中国科学院研究生院,2014.
- [15] 程积民,万惠娥,王静,等.半干旱区柠条生长与土壤水分消耗过程研究[J].林业科学,2005,41(2):37-41.
- [16] 常海涛,赵娟,刘佳楠,等.退耕还林与还草对土壤理化性质及分形特征的影响:以宁夏荒漠草原为例[J].草业学报,2019,28(7):14-25.
- [17] Tyler S W, Wheatcraft S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992,56(2):362-369.
- [18] 杜雅仙,樊瑾,李诗瑶,等.荒漠草原不同植被微斑块土壤粒径分布分形特征与养分的关系[J].应用生态学报,2019,30(11):3716-3724.
- [19] 仓木拉,木兰,王晓栋,等.西藏锦鸡儿群落表层土壤粒径空间分布特征及其与土壤水分相关性分析[J].家畜生态学报,2014,35(9):23-27.
- [20] 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.
- [21] 杨新国,赵伟,陈林,等.荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征[J].生态环境学报,2015,24(4):590-594.
- [22] Liu R, Zhu F, Song N, et al. Seasonal distribution and diversity of ground arthropods in microhabitats following a shrub plantation age sequence in desertified steppe[J]. Plos One, 2013, 8(10):DOI:10.1371/journal.pone.0077962.
- [23] 郭威星.乌拉特中旗荒漠草原优势灌丛地上生物量分析及预测模型[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.
- [24] 文星跃,黄成敏,黄凤琴,等.岷江上游河谷土壤粒径分形维数及其影响因素[J].华南师范大学学报:自然科学版,2011(1):80-86.
- [25] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.
- [26] 任雪.北疆绿洲—荒漠过渡带灌木“肥岛”效应特征及其环境学意义研究[D].新疆石河子:石河子大学,2008.
- [27] 罗清虎,吴建召,崔羽,等.洪涝灾害干扰下受损自然恢复林地土壤基本性状及分形维数特征[J].应用与环境生物学报,2019,25(1):29-37.
- [28] 吕圣桥,高鹏,耿广坡,等.黄河三角洲滩地土壤颗粒分形特征及其与土壤有机质的关系[J].水土保持学报,2011,25(6):134-138.
- [29] 徐荣,张玉发,潘占兵,等.不同柠条密度在退化草地恢复过程中对土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):172-175.
- [30] 赵亚楠,于露,周玉蓉,等.宁夏东部荒漠草原灌丛引入对土壤水分动态及亏缺的影响[J].生态学报,2020,40(4):1305-1315.
- [31] 毕力格.乌拉特中旗苜蓿种植现状和效益研究[D].北京:中国农业科学院,2009.
- [32] 索立柱,黄明斌,段良霞,等.黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素[J].生态学报,2017,37(6):2045-2053.