

荒漠草原表层土壤有机碳粒径组分及碳库管理指数特征

张义凡^{1,2}, 陈林^{2,3}, 张蚌蚌⁴, 李学斌^{2,3}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;
3.宁夏大学生态环境学院,银川 750021;4.西北农林科技大学经济管理学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:以探讨荒漠草原表层土壤粒径分布分形、不同粒径有机碳含量、碳库管理指数特征及其关系为目的,通过野外调查选取宁夏回族自治区盐池县花马池镇荒漠草原柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*) 4 种典型植被作为研究对象,采集典型植被冠下和丛间 2 种生境下表层(0—5 cm)土壤,分析不同植被表层土壤不同粒径有机碳含量、土壤碳库动态变化特征及其相关性。结果表明:(1)4 种典型植被土壤粒径呈“单峰”型分布趋势,土壤颗粒主要集中分布于 2~250 μm 粒径,分形维数(D)为 2.56~2.63,100~500 μm 颗粒含量是植被间差异显著的主要原因。(2)4 种典型植被冠下有机碳含量大于丛间有机碳含量,>250 μm 粗砂粒组分有机碳含量最高,不同粒径组分有机碳含量在灌丛和草本植被间差异显著($p<0.05$)。(3)4 种典型植被土壤 TOC、AOC 含量均表现为冠下大于丛间,TOC 在不同群落间差异显著,灌木群落冠下碳库活度(A)和碳库管理指数(CPMI)相对大于丛间,各指标在不同群落间因生境不同差异较大,表明不同典型植被在碳库循环机制中扮演不同角色,不同程度增强土壤碳汇功能。(4)土壤粒径分形与碳库稳定性关系复杂,2~50 μm 细粉粒是土壤有机碳无机胶体,其含量增多明显提高土壤颗粒与有机碳形成有机—无机胶结体的机会,对维持土壤结构和有机碳库稳定性具有重要意义。研究结果表明适宜的植被恢复措施对维持荒漠草原土壤颗粒及土壤有机碳库稳定性具有一定的参考价值。

关键词: 荒漠草原; 土壤粒径分布分形; 粒径组分有机碳; 碳库管理指数

中图分类号:Q142.3;Q146

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)05-0283-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.05.034

Characteristics of Organic Carbon Particle Size Composition and Carbon Pool Management Index in Surface Soil of Desert Grassland

ZHANG Yifan^{1,2}, CHEN Lin^{2,3}, ZHANG Bangbang⁴, LI Xuebin^{2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100;

2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwest China,

Ministry of Education, Yinchuan 750021;3. School of Ecology and Environment, Ningxia University,

Yinchuan 750021; 4. College of Economics & Management, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To explore the fractal distribution of surface soil particle size, organic carbon content of different particle size and the characteristics of carbon management index as well as their relationship in the desert steppe, 4 kinds of typical communities in Huamachi Town, Yanchi County, Ningxia Hui Autonomous Region, including *Caragana korshinskii*, *Artemisia ordosica*, *Stipa breviflora* and *Agropyron mongolicum*, were selected as the research objects. Using surface soil (0—5 cm) under typical vegetation canopy and intercropping habitats, the dynamic changes and their correlations of organic carbon content of different particle size and soil carbon pool in different vegetation surface soils were analyzed. The results showed that: (1) The distribution of soil particle size of the four kinds of typical communities showed a "single peak" shape, soil particle concentrated in the range of 2~250 μm , the fractal dimension D in the range of 2.56 to 2.63, the content of particle within 100~500 μm was the main reason for significant differences between

收稿日期:2023-04-06

资助项目:宁夏重点研发计划项目(2021BEG02005);国家自然科学基金项目(31960359);第三批宁夏青年科技人才托举工程项目(TJGC2018068);宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(NXYLXK2017B06)

第一作者:张义凡(1991—),女,硕士生,主要从事生态恢复研究。E-mail: zhangyifan@nwfau.edu.cn

通信作者:张义凡(1991—),女,硕士生,主要从事生态恢复研究。E-mail: zhangyifan@nwfau.edu.cn

vegetation types. (2) The organic carbon content under the canopy of four typical vegetation types was greater than that of intercropping habitats, the organic carbon content of thick sand $> 250 \mu\text{m}$ was the highest, the organic carbon content of different particle size components varied significantly between the shrub and herbage vegetation ($p < 0.05$). (3) The soil TOC and AOC contents of the four typical vegetation types were all higher under canopy than those of intercropping habitats. TOC varied significantly among different communities. The carbon pool activity (A) and carbon pool management index (CPMI) under the canopy of shrub communities were relatively higher than those of intercropping habitats. Various indicators varied greatly among different communities due to different habitats, indicating that different typical vegetations played different roles in the carbon pool cycling mechanism, and enhanced soil carbon sink function with different degrees. (4) The relationship between soil particle size fractal and carbon pool stability was complex. Fine silt with $2 \sim 50 \mu\text{m}$ was an inorganic colloid of soil organic carbon. The increasing of its content significantly increased the opportunity for soil particles and organic carbon to form organic-inorganic cement, which was of great significance for maintaining soil structure and the stability of organic carbon pool. The research results indicated that appropriate vegetation restoration measures had certain reference value for maintaining the stability of soil particles and soil organic carbon pools in desert grassland.

Keywords: desert grassland; fractal distribution of soil particle size; organic carbon of different particle sizes; carbon pool management index

政府间气候变化专门委员会排放报告^[1]预测,因二氧化碳等温室气体的大量排放,将导致 1990—2100 年地表温度升高 $1.4 \sim 5.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,海平面升高 $0.13 \sim 0.94 \text{ m}$,致使碳循环成为研究焦点。土壤碳库占全球陆地碳库的 $2/3 \sim 3/4$,其较小幅度的变化将对碳循环产生明显影响。荒漠作为碳循环中主要的生态系统之一,其碳库平衡及稳定性对全球碳循环机制影响重大。碳库管理指数(carbon pool management index, CPMI)作为土壤碳库中各组分质量和全面评价土壤有机碳循环过程的指标,表征碳库稳定性、动态平衡及土壤碳循环机制^[2],系统反映土壤总有机碳和活性有机碳含量^[3],其与土壤物质代谢和养分循环过程密切相关^[4-5]。因此,探究土壤 CPMI 对荒漠草原土壤碳库循环机理和生态恢复重建工程评价具有重要的指导意义。

不同土壤粒径分布对土壤有机碳含量、存在形式、运移过程、分解速率及有机碳库稳定性等具有明显的影响^[6]。Lützow 等^[4]研究指出,土壤有机碳转化分解过程中活性有机碳主要分布在粒径 $> 50, < 2 \mu\text{m}$ 土壤颗粒中;何亚婷等^[7]研究指出,粗自由颗粒有机碳占土壤总有机碳含量的 $70.63\% \sim 76.53\%$,是土壤有机碳固存的主要形式,也是未受保护的高活性有机碳,受环境和人为活动影响释放风险较大;郑子潇等^[8]对华北落叶松人工林土壤有机碳和团聚体稳定性研究指出,土壤有机碳主要储存在 $> 2 \text{ mm}$ 粒径团聚体中;樊红柱等^[9]对水稻土研究发现,土壤有机碳积累与 $> 0.25 \text{ mm}$ 团聚体含量存在相关性,活性较高的有机碳主要存在于粗颗粒中。目前,关于团聚体固碳机制的研究主要集

中在土壤有机碳和团聚体稳定性对不同土地利用方式^[10]、不同植被覆盖类型^[11]、不同土壤管理措施^[12]的响应,而对荒漠草原生态系统土壤粒径分布结构对其影响的研究较少。由于宁夏地处干旱半干旱的农牧交错带,生态环境严酷,土壤贫瘠且基质不稳定,属于典型的旱生化荒漠草原,加之风沙危害和超载过牧等自然和人为因素作用,生态系统受到严重威胁。鉴于此,以宁夏东部荒漠草原退化程度不同的 4 种典型植被作为研究对象,探讨不同植被类型下土壤粒径分布分形特征对土壤有机碳库平衡性和稳定性的影响,以为荒漠草原生态系统碳库管理和生态恢复重建策略提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取毛乌素沙地南缘、以盐池县为中心的宁夏中东部荒漠草原区($107^{\circ}01'27'' \sim 107^{\circ}22'28''\text{E}$, $37^{\circ}47'14'' \sim 37^{\circ}57'40''\text{N}$)为研究区。该区为典型的农牧交错带,土壤贫瘠、植被种类少,生态系统脆弱。年均气温为 $7.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,1 月(最冷)平均气温 $-8.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温为 $3\ 536.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年日照时间 $2\ 863.1 \text{ h}$,年均无霜期 165 天,年降水量 $230 \sim 350 \text{ mm}$,65% 以上降水主要集中在 7—9 月,年季降水变化率大,年蒸发量 $2\ 700 \text{ mm}$,气候干旱少雨,以灰钙土、风沙土和盐碱土为主,土壤结构松散,肥力较低。

1.2 采样点设置与样品采集

2015 年 8 月中旬,在地处宁夏盐池县高沙窝镇的草原资源生态监测站附近,选取柠条锦鸡儿、黑沙

蒿、短花针茅和蒙古冰草 4 种典型植被作为研究对象,分别在草本植物(短花针茅和蒙古冰草)、半灌木(黑沙蒿)、灌木(柠条锦鸡儿)带设置 1 m×1 m,2 m×2 m,5 m×5 m 样方,每种植被以“S”形多点采样法选取 9 个采样点,在植株根系生长部位(冠下)和 2 种植株之间裸露带(丛间)采取表层(0—5 cm)土壤样品,并观测记录样地植被状况(表 1)。将土壤样品自

然风干过 2 mm 筛,用于测定土壤 SOC、AOC、TOC 及土壤粒径结构。土壤 PSD(以体积分数计)使用 Mastersizer 3 000(英国)激光粒度仪进行测定,土壤粒径分级采用美国农业部(USDA)分类系统^[10],将粒径分为粗砂(>250 μm)、细砂(50~250 μm)、粉黏粒(<50 μm)3 个等级,并进行不同粒径组分指标测定,各试验测定均设 3 次重复。

表 1 典型植被样地及植被特征

植被类型	植株形态特征			伴生物种
	高度/m	基径/m	冠幅面积/m ²	
柠条锦鸡儿	1.23±0.15	1.08±0.21	3.39±0.65	隐子草(<i>Cleistogenes</i>)、猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i> Waldst)、胡枝子(<i>Lespedeza bicolor</i>)
黑沙蒿	0.51±0.12	0.56±0.08	1.45±0.23	牛心朴子(<i>Cynanchum komarovii</i>)、刺沙蓬(<i>Salsola tragus</i> Linnaeus)、白草(<i>pennisetum flaccidum</i> Grisebach)
短花针茅	0.15±0.08	0.08±0.01	0.06±0.02	胡枝子、猫头刺(<i>Oxytropis aciphylla</i> Ledeb)、刺沙蓬、银灰旋花(<i>Convolvulus ammannii</i> Desr)
蒙古冰草	0.43±0.11	0.06±0.11	0.03±0.65	猫头刺、牛心朴子、胡枝子

注:表中数据均为平均值±标准差。下同。

1.3 研究方法

1.3.1 样品测定方法 土样总有机碳(TOC)采用 K₂Cr₂O₇ 外加热法测定,活性有机碳采用 333 mmol/L K₂MnO₄ 氧化—比色法测定,非活性有机碳(CNA)含量采用总有机碳与活性有机碳差值计算得出。

1.3.2 基于土壤 PSD 的分形维数计算 基于体积 PSD 数据,参考 Tyler 等^[13]方法,采用体积分形模型计算土壤体积分形维数(D),计算公式为:

$$\frac{V(r<R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D}$$

(1)

式中:*r* 为粒径(μm);*R_i* 为粒径划分中第 *i* 级粒径(μm);*V_{(*r*<*R_i*}* 为粒径<*R_i* 的土壤颗粒体积(%);*V_T* 为土壤所有颗粒体积(%);*R_{max}* 为土壤颗粒中最大粒径(μm),本文中 *R_{max}* =3 000 μm;*D* 为分形维数(无量纲)。

1.3.3 土壤碳库管理指数的计算 土壤碳库活度(active degree, *A*)、碳库活度指数(active index, *AI*)及碳库管理指数(CPMI)计算公式为:

$$A = AOC / NOC$$

(2)

$$AI = A / \text{参考 } A$$

(3)

$$CPI = AOC(\text{mg/g}) / \text{参考 } AOC(\text{mg/g})$$

(4)

$$CPMI = CPI \times AI \times 100$$

(5)

1.3.4 数据处理与制图 采用 SPSS 22.0 软件统计分析数据,采用 Excel 2010 软件进行数据整理与绘图。

2 结果与分析

2.1 不同典型植被表层土壤粒径分布分形特征

不同典型植被土壤粒径分布均表现为“单峰”型分布趋势(图 1),粒径<0.01,粒径>500 μm 颗粒所占总体积比例较小,粒径>500 μm 颗粒在柠条锦鸡

儿群落中未出现;土壤颗粒集中在粒径 2~50,50~100 μm,二者所占比例达 63.16%~94.87%,<0.01,1~2,500~1 000,1 000~2 000,2 000~3 000 μm 颗粒总含量所占比例仅为 15%;不同植被之间土壤粒径分布差异较大,最大差异表现为 2~50,100~250,250~500 μm 粒径的颗粒含量,黑沙蒿群落中粒径 250~500 μm 的颗粒含量为 2.3%~4.7%,相对土壤颗粒较大,而草本科蒙古冰草和短花针茅群落 100~250 μm 粒径分布极少,仅占总体积的 1.60%~3.14%。统计结果显示,同一典型植被下,<0.01,500~1 000,1 000~2 000,2 000~3 000 μm 土壤颗粒的标准差低于 0.01~2,2~50,50~100 μm 土壤颗粒的标准差,不同植被类型之间<0.01,1~2,500~1 000,1 000~2 000,2 000~3 000 μm 的土壤颗粒因含量低,变幅小,标准差趋于 0,而 2~50,50~100 μm 土壤颗粒所占比例高,变幅大,标准差为 0.13~7.91。

由图 2 可知,4 种典型植被土壤粒径分形维数(*D*)为 2.56~2.63,同一植被分形维数均表现为丛间大于冠下,柠条锦鸡儿、黑沙蒿、短花针茅和蒙古冰草冠下和丛间分形维数差值分别为-0.02,-0.05,-0.04 和 -0.05;不同植被之间 *D* 差异显著(*p*<0.05),冠下粒径分形维数为柠条锦鸡儿>短花针茅>蒙古冰草>黑沙蒿,丛间分形维数为短花针茅>柠条锦鸡儿>蒙古冰草>黑沙蒿,黑沙蒿分形维数最小,冠下和丛间分别为 2.56 和 2.60,与其他群落之间差异显著(*p*<0.05)。

2.2 不同典型植被表层土壤粒径组分有机碳特征

由表 2 可知,相同植被相同生境下,>250 μm 粗砂有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量较高,

$<50\ \mu\text{m}$ 的粉黏粒碳含量次之, $50\sim 250\ \mu\text{m}$ 的细砂碳含量最小。除蒙古冰草植被外, 其他相同植被各粒径组分有机碳均呈冠下大于丛间, 其中柠条锦鸡儿、黑沙蒿、短花针茅植被冠下 $>250\ \mu\text{m}$ 粒径有机碳分别为丛间各粒径有机碳的 1.81, 2.14, 1.50 倍, 活性有机碳分别为 1.84, 2.68, 1.47 倍。对不同粒径有机碳分析可知, $>250\ \mu\text{m}$ 粗砂有机碳表现为柠条锦鸡儿 $>$ 短花针茅 $>$ 蒙古冰草 $>$ 黑沙蒿, 柠条锦鸡儿有机碳含量高达 $14.18\ \text{mg/g}$, 分别比黑沙蒿、短花针茅和蒙古冰草群落增加 8.73, 3.42, 6.15 mg/g ; 丛间蒙古冰草群落含量最高, 达 $9.51\ \text{mg/g}$, 比柠条锦鸡儿、黑沙蒿

和短花针茅分别增加 1.69, 6.96, 2.32 mg/g 。 $50\sim 250\ \mu\text{m}$ 的细砂中有机碳和活性有机碳含量差异不显著 ($p>0.05$), 且整体较小, 柠条锦鸡儿冠下有机碳含量最高, 蒙古冰草最低, 丛间蒙古冰草有机碳含量最高, 达到 $3.41\ \text{mg/g}$, 灌丛植被冠下活性有机碳含量较高, 与草本植被之间差异显著 ($p<0.05$), 丛间活性有机碳含量为 $0.60\sim 0.74\ \text{mg/g}$, 差异较小且均不显著。 $<50\ \mu\text{m}$ 的粉黏粒中, 黑沙蒿冠下和丛间有机碳含量均最高, 分别为 $18.31, 12.90\ \text{mg/g}$, 比柠条锦鸡儿、短花针茅和蒙古冰草分别增加 7.81, 5.98, 9.49 和 4.54, 2.17, 2.41 mg/g , 且差异显著 ($p<0.05$)。

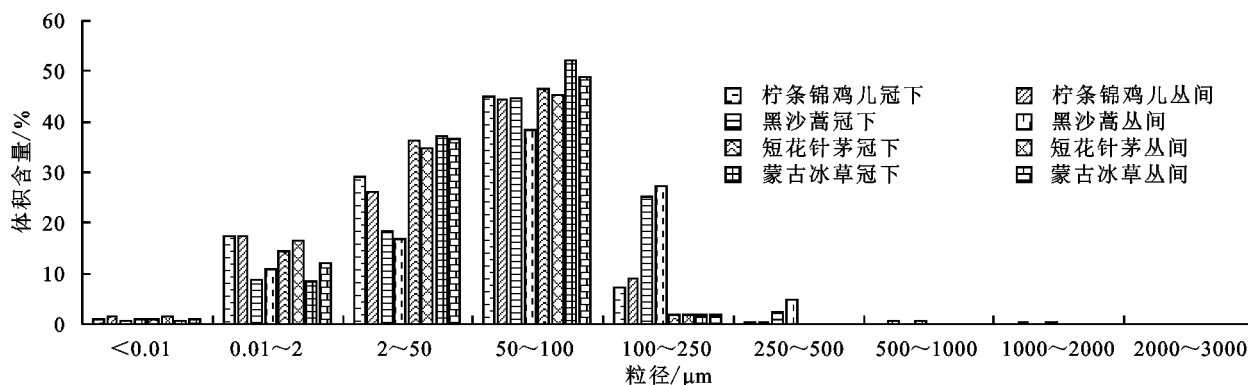
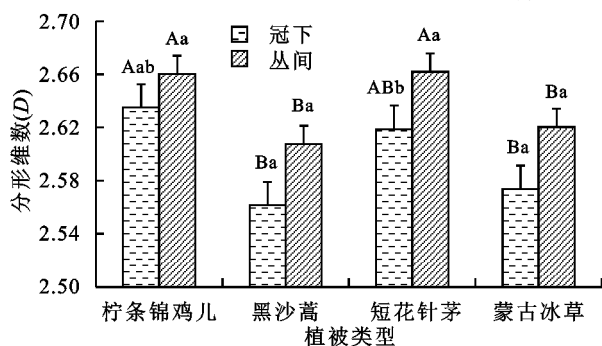


图 1 不同典型植被土壤粒径的体积含量分布



注: 图柱上方不同大写字母表示同一生境不同植被类型间差异显著 ($p<0.05$); 不同小写字母表示同一植被类型不同生境间差异显著 ($p<0.05$). 下同。

图 2 不同典型植被土壤分形维数

2.3 不同典型植被表层土壤有机碳库稳定性特征

从图 3 可以看出, 不同典型植被土壤 TOC、AOC 含量在不同生境下分布规律一致, 均表现为冠下 $>$ 丛间。不同植被间 TOC 含量差异较大, 柠条锦鸡儿和短花针茅植被冠下土壤 TOC 含量分别为 17.11, 16.57 mg/kg , 与黑沙蒿和蒙古冰草之间的差异显著 ($p<0.05$), 丛间短花针茅 TOC 含量最高 (11.56 mg/kg), 与黑沙蒿 (5.39 mg/kg) 之间差异显著 ($p<0.05$); 4 种典型植被土壤 AOC 分布特征与 TOC 相似, 冠下 AOC 含量明显大于丛间, 除蒙古冰草外, 其他 3 种植被冠下和丛间 AOC 含量均差异显著 ($p<0.05$), 黑沙蒿群落冠下和丛间含量最小, 分别为 0.78, 0.31 mg/kg , 与其他植被间差异显著 ($p<0.05$)。

土壤碳库活度 (A) 在不同植被类型间表现出不同的变化趋势, 灌木表现为冠下 $>$ 丛间, 草本植被则相反, 不同植被间 A 表现为蒙古冰草 $>$ 黑沙蒿 $>$ 柠条锦鸡儿 $>$ 短花针茅, 蒙古冰草植被丛间 A 最大 (0.17), 相比柠条锦鸡儿、黑沙蒿和短花针茅分别增加 54.55%, 23.53%, 70.59%, 灌木群落冠下与丛间的差异较大, 柠条锦鸡儿和黑沙蒿冠下比丛间分别增加 83.33%, 116.67%。就碳库管理指数 (CPMI) 而言, 除蒙古冰草外, 其余典型植被冠下土壤 CPMI 相对较高, 柠条锦鸡儿、黑沙蒿和短花针茅植被冠下 CPMI 比丛间分别增加 199.45%, 168.32% 和 22.08%, 但不同生境下变化趋势不同, 冠下 CPMI 在不同群落间表现为柠条锦鸡儿 $>$ 蒙古冰草 $>$ 短花针茅 $>$ 黑沙蒿, 丛间则表现为蒙古冰草 $>$ 短花针茅 $>$ 柠条锦鸡儿 $>$ 黑沙蒿, 表明荒漠草原不同典型植被可显著改善土壤有机质状况和土壤碳库质量, 在碳库循环机制中发挥着不同作用, 可不同程度增强土壤碳汇功能。

2.4 不同典型植被表层土壤粒径与有机碳库稳定性关系

土壤有机碳碳库活度 (A)、活度指数 (AI) 和碳库管理指数 (CPMI) 与 AOC、不同粒径组分有机碳和分形维数 (D) 之间密切相关 (表 3)。土壤 TOC 与 A 和 AI 呈负相关, 与碳库指数 CPI 和 CPMI 呈正相关, 且与 CPI 相关系数达 0.998, 呈极显著相关 ($p<0.01$); AOC 与 A 和 CPMI 的相关性系数分别为

0.656,0.997,达到显著或极显著水平($p<0.05$, $p<0.01$);粗砂有机碳和细砂有机碳与各指数呈正相关,其中,粗砂有机碳含量与 CPI 和 CPMI 之间相关性显著($p<0.05$, $p<0.01$),其余相关性均不显著($p>0.05$),粉黏粒有机碳与 A 呈正相关,与 CPMI 呈负相关,D 与 A、CPMI 均呈不显著负相关($p>0.05$)。

表 2 不同典型植被表层土壤不同粒径有机碳含量

单位:mg/g

土壤粒径/ μm	植被类型	生境	有机碳	活性有机碳	非活性有机碳
>250	柠条锦鸡儿	冠下	14.18 $\pm$ 3.03Aa	2.61 $\pm$ 0.46ABa	11.57 $\pm$ 2.97Aa
		丛间	7.82 $\pm$ 0.51ABb	1.42 $\pm$ 0.45ABa	6.40 $\pm$ 0.53ABb
	黑沙蒿	冠下	5.45 $\pm$ 0.63Ba	1.50 $\pm$ 0.80Ba	3.95 $\pm$ 1.16Ba
		丛间	2.55 $\pm$ 1.93Ba	0.56 $\pm$ 0.37Ba	1.99 $\pm$ 1.63Ba
	短花针茅	冠下	10.76 $\pm$ 0.37ABa	3.39 $\pm$ 1.54Aa	7.37 $\pm$ 2.16Aba
		丛间	7.19 $\pm$ 1.93Aba	2.30 $\pm$ 0.69Aa	4.89 $\pm$ 2.23Aba
	蒙古冰草	冠下	8.03 $\pm$ 0.41Ba	1.68 $\pm$ 0.43Ba	6.35 $\pm$ 0.37Ba
		丛间	9.51 $\pm$ 0.36Aa	2.15 $\pm$ 1.02Aa	7.36 $\pm$ 2.74Aa
50~250	柠条锦鸡儿	冠下	4.72 $\pm$ 0.69Aa	0.92 $\pm$ 0.16Aa	3.81 $\pm$ 0.54Aa
		丛间	3.09 $\pm$ 0.76Ab	0.66 $\pm$ 0.13Ab	2.43 $\pm$ 0.89Ab
	黑沙蒿	冠下	3.73 $\pm$ 0.69Ba	0.99 $\pm$ 0.23Aa	2.74 $\pm$ 0.54Ba
		丛间	3.34 $\pm$ 0.69Aa	0.63 $\pm$ 0.14Ab	2.71 $\pm$ 0.68Aa
	短花针茅	冠下	3.12 $\pm$ 0.54Ba	0.61 $\pm$ 0.08Ba	2.51 $\pm$ 0.56Ba
		丛间	2.95 $\pm$ 0.43Aa	0.74 $\pm$ 0.07Aa	2.21 $\pm$ 0.41Aa
	蒙古冰草	冠下	2.78 $\pm$ 0.36Ba	0.54 $\pm$ 0.06Ba	2.24 $\pm$ 0.32Ba
		丛间	3.41 $\pm$ 0.50Aa	0.60 $\pm$ 0.22Aa	2.81 $\pm$ 0.39Aa
<50	柠条锦鸡儿	冠下	10.50 $\pm$ 0.09Ca	1.22 $\pm$ 0.11Ca	9.28 $\pm$ 0.10Ba
		丛间	8.36 $\pm$ 0.11Cb	1.36 $\pm$ 0.11Ba	7.00 $\pm$ 0.22Cb
	黑沙蒿	冠下	18.31 $\pm$ 1.67Aa	3.81 $\pm$ 0.43Aa	14.51 $\pm$ 1.26Aa
		丛间	12.90 $\pm$ 1.01Ab	2.19 $\pm$ 0.17Ab	10.71 $\pm$ 0.85Ab
	短花针茅	冠下	12.51 $\pm$ 1.49Ba	2.75 $\pm$ 0.02Ba	9.76 $\pm$ 1.51Ba
		丛间	10.73 $\pm$ 0.94Ba	1.87 $\pm$ 0.07Ab	8.86 $\pm$ 1.01Ba
	蒙古冰草	冠下	8.82 $\pm$ 1.16Ca	1.38 $\pm$ 0.29Cb	7.43 $\pm$ 0.87Ca
		丛间	10.49 $\pm$ 1.09Ba	2.08 $\pm$ 0.37Aa	8.41 $\pm$ 1.24BCa

注:同列不同大写字母表示同一生境不同植被类型间差异显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示同一植被类型不同生境间差异显著($p<0.05$)。

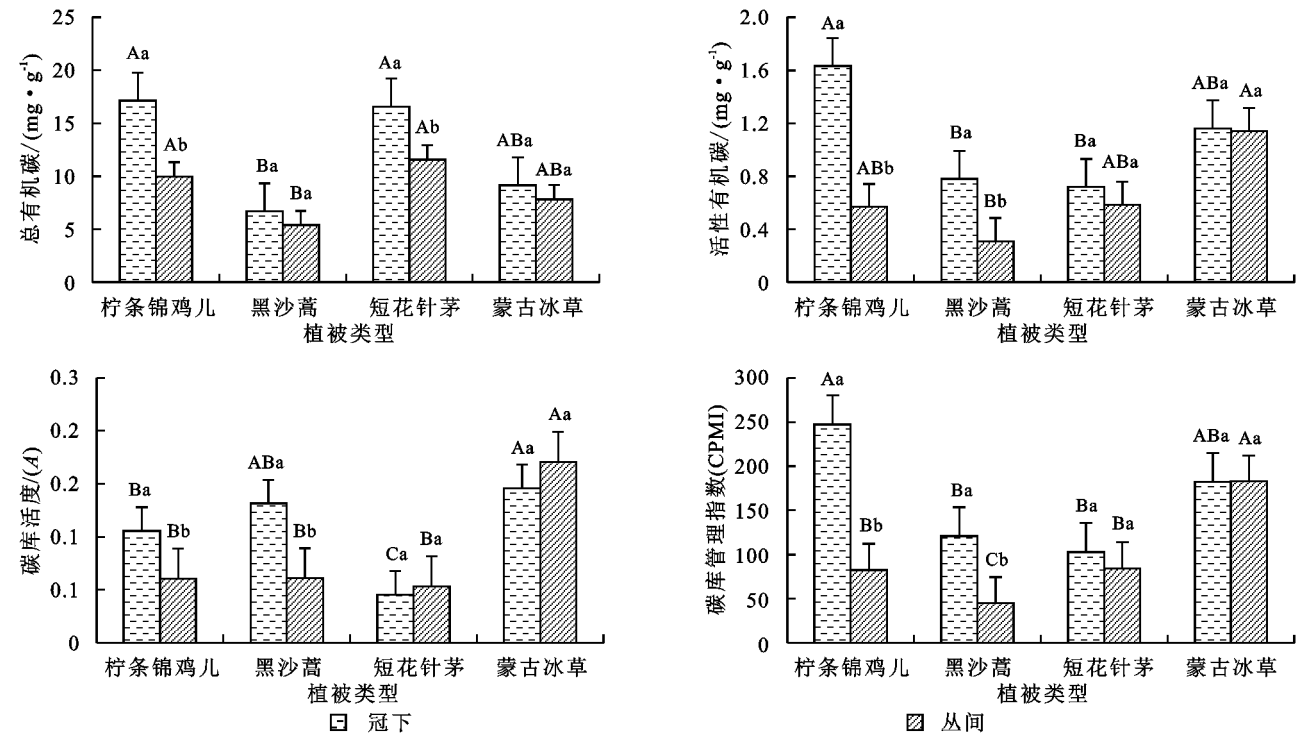


图 3 4 种典型植被土壤有机碳及碳库管理指数特征

表 3 不同典型植被表层土壤有机碳与碳库稳定性的相关系数

相关指标	有机碳 (TOC)	活性有机碳 (AOC)	粗砂有机碳	细砂有机碳	粉黏粒有机碳	分形维数 (D)
碳库活度(A)	-0.294	0.656 *	0.189	0.212	0.045	-0.573
活度指数(AI)	-0.344	0.615	0.138	0.184	0.071	-0.578
碳库指数(CPI)	0.998 **	0.455	0.851 **	0.337	-0.252	0.423
碳库管理指数(CPMI)	0.413	0.997 **	0.771 *	0.586	-0.228	-0.164

注: * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。下同。

为进一步表明土壤有机碳及碳库管理指数(CPMI)与土壤粒径组分之间的相关机理,对土壤碳库指标与土壤粒径组成进行相关性分析。由表 4 可知,所有有机碳库稳定性指标与 500~1 000,1 000~2 000,2 000~3 000 μm 颗粒含量的相关性一致,且相关系数相近;分形维数(D)与<50,>500 μm 土壤颗粒含量呈正相关,且与<0.01,0.01~2 μm 颗粒含量呈极显著相关($p<0.01$),粗砂有机碳与>100 μm 土壤颗粒呈负相关,与 100~250,250~500 μm 呈显著相关($p<0.05$),细砂有机

碳和粉黏粒有机碳与<100,>500 μm 颗粒呈负相关,与 100~250,250~500 μm 呈显著正相关($p<0.05$),TOC、AOC 与<100 μm 颗粒含量呈正相关,与>100 μm 颗粒含量整体呈负相关,TOC 与 0.01~2 μm 颗粒含量相关显著($p<0.05$),相关系数为 0.661;A 和 AI 与土壤粒径正相关出现在 2~50,50~100 μm 范围内,正负相关均未达到显著($p>0.05$),CPMI 与>100 μm 颗粒含量正负相关,与 1 000~2 000,2 000~3 000 μm 相关性显著($p<0.05$)。

表 4 不同典型植被表层土壤有机碳库稳定性与土壤粒径的相关系数

指标	<0.01 μm	0.01~2 μm	2~50 μm	50~100 μm	100~250 μm	250~500 μm	500~1000 μm	1000~2000 μm	2000~3000 μm
分形维数(D)	0.974 **	0.924 **	0.251	-0.227	-0.420	-0.356	0.234	0.234	0.246
粗砂有机碳	0.168	0.529	0.596	0.469	-0.680 *	-0.739 *	-0.555	-0.575	-0.564
细砂有机碳	-0.131	0.255	-0.326	-0.263	0.249	0.132 *	-0.122	-0.168	-0.171
粉黏粒有机碳	-0.556	-0.464	-0.591	-0.359	0.688 *	0.547 *	-0.138	-0.142	-0.154
TOC	0.289	0.661 *	0.491	0.197	-0.578	-0.596	-0.416	-0.436	-0.428
AOC	-0.222	0.073	0.417	0.573	-0.441	-0.514	-0.602	-0.632 *	-0.627 *
A	-0.565	-0.562	0.199	0.617	-0.114	-0.189	-0.471	-0.473	-0.474
AI	-0.558	-0.581	0.174	0.603	-0.088	-0.168	-0.461	-0.461	-0.462
CPI	0.297	0.66 *	0.507	0.213	-0.592	-0.618	-0.448	-0.466	-0.458
CPMI	-0.253	0.020	0.414	0.593	-0.429	-0.500	-0.603	-0.630 *	-0.627 *

3 讨论

3.1 不同植被土壤粒径分布分形特征

土壤粒径分形是从结构层次、团聚体颗粒组成等成土过程和母质来源方面反映土壤物理性状的重要指标之一^[7]。分形维数(D)是通过土壤物理性状表征土壤质地条件、团聚体数量、大小及均匀度,在植被恢复状况、土地利用变化、人类干扰程度及土壤结构受水位波动等研究中通常被用以解释等环境因子影响^[14]。贾晓红等^[15]对干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征的研究指出,土壤大粒径颗粒含量越多,D 越小。本研究中,4 种典型植被的粒径分布集中在 2~50,50~100 μm ,究其原因是该研究区主要以风沙土和灰钙土为主,土壤类型差异较大,与赵盼盼等^[16]在荒漠草原的研究结果一致。不同典型植被间土壤粒径分布差异显著($p<0.05$),由于不同典型植被分布格局差异较大,对土壤微环境影响增大^[17],相对于其他植被,黑沙蒿因其植被呈伞状丛生、分枝

多而密集,有效降低地表风速,固定细粒物质减轻风蚀作用,具有较强的固沙阻沙能力,在荒漠草原中可作为生态屏障;同时,还可拦截大气中的粉尘物质,使之在障内堆积,增加粗砂粒和黏粒的分布,对土壤粒径分布影响明显,与许婷婷等^[18]对不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征的研究结果一致。

3.2 不同植被土壤活性有机碳及碳库稳定性特征

土壤活性有机碳具有易分解、易氧化、移动快等特点,其储量占土壤碳库的比例较小,但对外界变化响应敏感,能直接参与土壤生物转化过程^[19]。本研究中,4 种典型植被土壤 TOC 与 AOC 呈正相关,与 Chen 等^[20]对华南成熟森林有机碳组分的研究结果一致,说明土壤 AOC 可用作反映碳循环、土壤肥力和土壤健康评价的生物学指标^[21]。本研究中,柠条锦鸡儿植被有机碳含量较高,且各植被冠下 TOC 和 AOC 含量相对更高,主要受植被输入的影响。不同植被向土壤输送凋落物及根系分泌物,直接或间接影

响 TOC 和 AOC 的组分及含量。有研究^[22]表明,退耕还林相比退耕还草能够积累更多土壤有机碳,也间接验证灌木比草本植被输入凋落物和细根更多。

通过土壤碳库活度(A)计算得来的 CPMI 是反映土壤质量和肥力状况的生物学指标。蒲玉琳等^[23]研究指出,CPMI 与土壤质量呈正相关。本研究中,4种植被冠下 CPMI 显著大于丛间,冠下植被生长过程中通过根系活动和有机物输入,促进土壤养分循环,提高土壤碳汇功能。唐海明等^[24]研究认为,冬季枯落物输入补偿有机质含量,显著影响土壤 CPMI,与本研究结果一致。不同典型植被间 CPMI 差异显著,柠条锦鸡儿和蒙古冰草冠下 CPMI 远大于其他植被,主要原因在于柠条锦鸡儿属豆科植物,有利于土壤微生物的积累,间接促进土壤有机碳的储存^[25]。已有研究^[26]认为,微生物群落驱动土壤有机质积累,土壤微生物多样性可反映土壤碳库活度及土壤有机碳转化和降解过程。

3.3 不同典型植被土壤粒径分布与碳库稳定性关系

土壤有机质大部分以胶结体形式存在于土壤团聚体中,团聚体因土壤粒径大小影响组分有机碳稳定性和生态功能。除柠条锦鸡儿,其他植被粉黏粒土壤有机碳和活性有机碳含量较高,粗砂粒有机碳次之,细砂粒有机碳和活性有机碳含量较低,与徐文静等^[27]研究结果一致。因为粉黏粒是土壤有机碳有机无机结合的主要载体^[28],导致微团聚体中土壤有机碳含量显著增高,在土壤有机碳库的固持和碳库稳定性中发挥重要作用。柠条锦鸡儿粗砂粒有机碳含量最高,因为粗砂粒有机碳大部分为未分解的大颗粒微生物和动植物残体,受土地利用变化和土地管理措施影响较大,与周萍^[29]对南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究结果相似,其认为存在于粗团聚体中的有机碳活性较高,能作为土壤有机碳周转变化的敏感指标。本研究中,冠下不同粒径组分有机碳含量和活性有机碳含量均高于丛间,主要原因在于植物生长过程中,分泌物、凋落物、残体等有机质的输入显著提高土壤有机碳含量和周转速率^[30]。有研究^[31]指出,动植物可直接通过引导、混合土壤中的有机和无机成分形成相对稳定的土壤团聚体,并通过在黄土的剖面重新分配有机碳,进而促进碳的封存;Yang 等^[32]研究认为,黄土高原森林区土壤有机碳含量随团聚体粒级的增大而增大,或先增大再减小;成毅等^[33]认为,根系有机碳的 11%形成粒径 500~2 000 μm 的粗颗粒有机碳,16%形成粒径为 53~500 μm 的细颗粒有机碳。

4 结论

(1)荒漠草原土壤粒径分布呈“单峰”型,2~250

μm 粒径含量最大,体积占总量的 63.16%~94.87%;土壤分形维数(D)为 2.56~2.63,不同植被间差异显著($p<0.05$),其差异主要由粒径 100~500 μm 颗粒含量差异所致。

(2)同一植被类型下,不同粒径组分有机碳含量均表现为冠下>丛间;同一植被同一生境下,>250 μm 粗砂粒各组分有机碳含量最高,<50 μm 粉黏粒碳含量次之,50~250 μm 细砂碳含量最小;有机碳含量在灌丛和草本植被间差异显著($p<0.05$)。

(3)土壤 TOC、AOC 含量在 4 种典型植被不同生境下均呈现为冠下>丛间,不同植被间 TOC 差异较大,黑沙蒿植被土壤碳库活度(A)表现为冠下>丛间,蒙古冰草相反;除蒙古冰草的其他植被,冠下 CPMI 相对较高,不同植被间差异显著,说明不同植被类型均影响土壤有机碳含量,显著改善土壤有机质状况和土壤碳库质量。

(4)土壤粒径分布分形与碳库稳定关系复杂,A 与 D 呈负相关,2~50 μm 细粉粒是有机碳主要的无机胶体,其含量增多可明显提高土壤颗粒与有机碳形成有机-无机胶结体的机会,对维持土壤结构及有机碳库的稳定性发挥重要作用。由此说明,采取适宜的植被恢复措施对维持荒漠草原土壤颗粒均质及土壤有机碳库稳定性有必要意义。

参考文献:

- [1] 张义凡,陈林,李学斌,等.不同荒漠草原植被根际与非根际土壤养分及碳库管理指数特征[J].草业学报,2017,26(8):24-34.
- [2] Wang Q K, Zhong M C, Wang S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 27(1): 91-97.
- [3] Duan Z F, Fu W L, Zhen X J, et al. Effects of land use on soil organic carbon fractions and its distribution in Karst [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(2): 109-114.
- [4] Lützow M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions: A review [J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(4): 426-445.
- [5] Bin M. Changes of soil active organic carbon under different land use types in karst area [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1224-1230.
- [6] 王洪杰,李宪文,史学正,等.不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J].水土保持学

- 报,2003,17(2):44-50.
- [7] 何亚婷,何友均,王鹏,等.不同经营模式对蒙古栎林土壤有机碳组分的长效性影响[J].生态环境学报,2023,32(1):11-17.
- [8] 郑子潇,王丹阳,胡保安,等.华北落叶松人工林土壤有机碳和团聚体稳定性对间伐的响应[J].生态学杂志,2023,42(4):780-787.
- [9] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等.长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1473-1480.
- [10] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.
- [11] 王富华,吕盛,黄容,等.缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J].环境科学,2019,40(3):1504-1511.
- [12] 王冰,周扬,张秋良.兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J].生态学杂志,2021,40(6):1618-1628.
- [13] 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.
- [14] 李学斌,张义凡,陈林,等.荒漠草原典型群落土壤粒径和养分的分布特征及其关系研究[J].西北植物学报,2017,37(8):1635-1644.
- [15] 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.
- [16] 赵盼盼,李国旗,邵文山,等.封育对荒漠草原苦豆子群落土壤粒径分形特征的影响[J].西北植物学报,2017,37(6):1234-1241.
- [17] Brocca L, Tullo T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J].Journal of Hydrology,2012,422/423:63-75.
- [18] 许婷婷,董智,李红丽,等.不同设障年限沙丘土壤粒径和有机碳分布特征[J].环境科学研究,2014,27(6):628-634.
- [19] Bastida F, Barberá G G, García C, et al. Influence of orientation vegetation and season soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions[J].Applied Soil Ecology,2008,38(1):62-70.
- [20] Chen X M, Zhang D Q, Liang G H, et al. Effects of precipitation on soil organic carbon fractions in three subtropical forests in southern China [J]. Journal of Plant Ecology,2016,9(1):10-19.
- [21] 刘士丹,卢敬坤,胡宁,等.温度和水分对黑土有机碳矿化的影响[J].吉林农业大学学报,2020,42(5):552-560.
- [22] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage [J].Nature Communications,2015,6:e6707.
- [23] 蒲玉琳,叶春,张世熔,等.若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J].生态学报,2017,37(2):367-377.
- [24] 唐海明,程凯凯,肖小平,等.不同冬季覆盖作物对双季稻田土壤有机碳的影响[J].应用生态学报,2017,28(2):465-473.
- [25] Moore J M, Klose S, Tabatabai M A. Soil microbial biomass carbon and nitrogen as affected by cropping systems[J].Biology and Fertility of Soils,2000,31(3/4):200-210.
- [26] Shah F, Nicolás C, Bentzer J, et al. Ectomycorrhizal fungi decompose soil organic matter using oxidative mechanisms adapted from saprotrophic ancestors[J]. The New Phytologist,2016,209(4):1705-1719.
- [27] 徐文静,丛耀辉,张玉玲,等.黑土区水稻土水稳性团聚体有机碳及其颗粒有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2016,30(4):210-215.
- [28] Huang S, Rui W Y, Peng X X, et al. Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2010,86(1):153-160.
- [29] 周萍.南方典型稻田土壤有机碳固定机制研究:基于长期试验及跨地域统计分析[D].南京:南京农业大学,2009.
- [30] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.
- [31] Guan J H, Deng L, Zhang J G, et al. Soil organic carbon density and its driving factors in forest ecosystems across a northwestern province in China[J].Geoderma,2019,352(15):1-12.
- [32] Yang Y, Li T, Wang Y Q, et al. Linkage between soil ectoenzyme stoichiometry ratios and microbial diversity following the conversion of cropland into grassland[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2021,314:e107418.
- [33] 成毅,安韶山,李国辉,等.宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(2):261-266.