

DOI: 10.20103/j.stxb.202310132211

宗宁, 缪雨珏. 高寒草地沙化过程土壤碳氮储量变化及其驱动机制. 生态学报, 2024, 44(15): 6642-6651.

Zong N, Miao Y J. Changes in soil carbon and nitrogen storage during desertification of alpine grasslands and the driving mechanisms. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6642-6651.

高寒草地沙化过程土壤碳氮储量变化及其驱动机制

宗宁^{1,*}, 缪雨珏^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 沙化问题是影响草原地区生产与牧民生活的重要环境问题。草原作为重要碳库和养分库, 沙化过程可能会对其土壤碳、氮库产生重要影响。为探讨沙化过程对高寒草地土壤碳、氮储量的影响, 采用空间序列代替时间演替的方法研究了藏北高原高寒草地沙化过程中驱动土壤碳、氮储量变化的因素。研究发现: (1) 轻度、中度和重度沙化阶段土壤总碳、全氮储量无变化, 而极重度沙化阶段碳氮流失严重(分别下降 69% 和 55%, $P < 0.05$)。 (2) 群落地上生物量随沙化程度加重逐渐降低, 重度和极重度沙化草地根系生物量显著下降(分别下降 47% 和 99%, $P < 0.05$)。土壤容重、砾石含量随沙化程度加重呈逐渐增加趋势, 而总碳、全氮含量和含水量逐渐下降, 说明沙化过程导致土壤粗粒化和贫瘠化。 (3) 进一步分析发现, 影响土壤总碳储量的因子中排前三位依次是土壤砾石含量、土壤含水量和植物地上生物量, 影响土壤氮储量的因子依次是土壤砾石含量、含水量和土壤微生物丰度。综合这些研究结果, 沙化过程植物群落生产力的改变对土壤碳、氮影响较小, 主要受土壤砾石含量与含水量等因子驱动。沙化过程中土壤碳、氮储量存在转化阈值(重度到极重度沙化阶段), 故潜在沙化高寒草地的早期防护有利于土壤碳汇的维持。

关键词: 沙化草地; 青藏高原; 理化性质; 驱动因子

Changes in soil carbon and nitrogen storage during desertification of alpine grasslands and the driving mechanisms

ZONG Ning^{1,*}, MIAO Yujue^{1,2}

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modelling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Grassland desertification is an important issue in grassland areas. Desertification process not only results in the appearance of wind-sand landscapes on the surface, but also causes a significant reduction in vegetation cover and soil production potential. Grassland as an important carbon and nutrient reservoir, desertification process may also have important impacts on the changes of soil carbon and nitrogen pools. To investigate the influence of soil carbon and nitrogen storage during alpine grassland desertification, this study used spatial sequences instead of temporal succession to investigate the variations of soil carbon and nitrogen storage in different depths and the variation patterns of productivity and soil physicochemical properties during alpine grassland desertification in the northern Xizang plateau. The results showed that: (1) The lightly, moderately and severely deserted grasslands showed no change in soil total carbon and total nitrogen

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFF1304304); 西藏自治区科技计划项目(XZ202101ZD0007G); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202201ZR0026G); 中国科学院西部青年学者项目(2021年)

收稿日期: 2023-10-13; **网络出版日期:** 2024-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zongning@igsrr.ac.cn

storage, while extremely severely deserted grasslands led to sharp carbon and nitrogen loss (69% and 55% decrease, respectively, $P < 0.05$). (2) Above-ground biomass of the community gradually decreased with the aggravation of the degree of desertification, and the root biomass of severe and extremely severe desertification grassland decreased significantly (47% and 99%, respectively, $P < 0.05$). Soil bulk density and gravel content showed gradual increases with the increase of desertification, while total carbon, total nitrogen content and water content gradually decreased, indicating that the desertification process led to coarse-grained and infertile soils. (3) The Shannon diversity index and Chao1 richness index of soil bacteria showed increasing trends with increasing desertification gradient, with significant differences in the severe heavy and heavy desertification gradients, while these two indices of soil fungi did not show significant differences along with the desertification gradient. (4) We used structural equation modeling to explore the factors that drove changes in soil total carbon and nitrogen stocks during desertification process in alpine grasslands. The key factors affecting soil carbon storage were mainly soil physicochemical properties, such as soil gravel ratio, soil water content as well as plant aboveground productivity, while those affecting soil nitrogen storage were soil gravel ratio, water content, and soil microbial richness. In conclusion, the factors affecting soil carbon and nitrogen storage during desertification process in alpine grassland were mainly soil physicochemical properties, while plant community production had less influence. Moreover, soil carbon and nitrogen stocks during the desertification process showed a sharp decrease in the transition from heavy to extremely heavy desertification, so the early protection of potentially desertification alpine grassland is more conducive to the maintenance of soil carbon sinks.

Key Words: desertification grasslands, Xizang plateau, physicochemical properties, driving factors

土地沙化是目前最突出的环境问题之一。沙化是土地荒漠化的一种类型,是发生在干旱半干旱及部分半湿润地区、一种由于风蚀或水蚀引起的土地退化过程^[1]。在此过程中不仅会引起植被覆盖度和土壤生产潜力的显著降低,严重的沙化过程还会导致地表风沙地貌的出现^[1]。干旱半干旱的草原区是沙化易发生的区域,沙化不仅直接威胁草原地区畜牧业的可持续发展和居民的生存环境,还会导致水源涵养功能下降、水土流失加重,导致江河中下游地区的生态环境和经济发展受到严重影响^[2]。土壤碳作为植物凋落物分解的产物,是植物参与土壤养分循环的重要媒介,其含量高低不仅影响土壤质量,还影响草地抗风蚀和水蚀的能力^[3-4]。因此,草地沙化对土壤碳的影响将直接影响青藏高原高寒草地在全球变化过程中所扮演的碳源/碳汇功能。系统研究高寒草地沙化过程驱动土壤碳氮储量变化的机制,不仅为西藏高寒草地生态系统服务功能(生产功能、碳汇功能、水土保持等)的维持和优化提升提供科学指导,还有助于推进“双碳”目标下高原生态文明建设。

目前,高寒草地沙化过程中土壤碳氮含量的变化已有一些报道。例如,西藏安多县的研究发现,沙漠化过程中高寒草地土壤的理化性质变化显著:从潜在沙化阶段向严重沙化阶段演变过程中,高寒草地土壤抗风蚀与保水性能下降、土壤 pH 值升高;沙化过程中风蚀对土壤颗粒的机械分选明显,使得土壤表层颗粒粗化,垂直剖面内土壤颗粒组成成分增大^[2]。同时,四川省西北部高寒沙质草地的研究发现,植被群落盖度、地上和地下生物量随沙化程度加重而急剧下降,土壤有机碳含量、腐殖质碳组分也呈显著下降趋势^[5]。此外,关于高寒沙化草地氮含量的变化也有一些研究。高寒沙质草地中各种形态氮含量均有显著影响,土壤全氮、碱解氮、铵态氮、硝态氮和微生物量氮均呈现极显著的下降趋势^[6]。同时,土壤微生物作为凋落物降解、转化、储存的重要分解者,群落丰度与多样性组成会显著影响有机碳储量^[7]。但目前关于高寒草地沙化过程土壤碳氮的研究更多集中在土壤表层,对土壤剖面不同层次的研究较少。同时,更多的研究集中在沙化梯度之间土壤碳氮含量的对比,并未对碳氮储量发生快速下降的阈值突变阶段进行识别,这势必影响恢复措施的精准施加。此类研究在青藏高原腹地开展的更是少见,这将直接影响高寒草地在全球变化过程中所发挥的碳源/汇功能。

以高寒、大风和干旱为特征的高原气候,导致高寒生态系统对气候变化极其敏感,生态环境脆弱,这正是草地沙化发生的气候和动力条件。加上高原植被稀疏,使得高寒草原具有发生沙化的潜在物质基础。近几十年来,受气候变化和人类活动的双重影响,西藏成为全国荒漠化最严重的区域之一^[8-9]。第五次全国荒漠化和沙化监测报告显示,西藏全区约有 17.9% 的国土面积呈现沙漠化^[10]。高寒草地是“三生空间”(牧民生活、草原牧草生产、生态安全屏障)存在与发展的基础^[11-12],大面积沙化导致的生态环境恶化不仅威胁着高原畜牧业的发展,也不利于高原地区牧业经济发展和碳汇功能的发挥,更不利于西藏生态安全屏障的建设^[13-14]。本研究选择沙化易发生的高寒草原区,通过在不同沙化阶段设置原位采样试验,探讨(1)沙化过程不同深度土壤总碳、全氮储量的变化趋势,(2)土壤碳氮变化的驱动因子(植物群落生产、土壤理化性质、微生物组成变化等)。本研究可以为高寒沙化草地碳储量变化提供机理解释,也会为青藏高原地区高寒草地碳源汇管理提供一定的理论基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究地点地处藏北羌塘高原腹地,位于西藏自治区那曲市班戈县以北约 5 km 处(31°26' N, 90°02' E),海拔 4678 m。气候干燥度指数(年潜在蒸散量与降雨量的比值)为 6.0—6.3,属于半干旱大陆性高原气候^[15-16]。气候条件严酷,以寒、旱、大风天数多为主要特征。根据当地国家气象站数据观测显示,多年(1965—2017 年)平均气温为-1.2℃,月均温最低出现在 1 月,平均气温为-17.5℃;最高出现在 7 月,平均气温为 14.7℃。多年平均年降雨量为 335 mm,其中 80% 以上出现在 6—9 月^[15,17]。土壤类型为高寒草原土,由于气候因素和发育较晚,本地土壤呈现出活性养分含量低、土层较薄(深度约为 0.3—0.5 m)、缓冲容量较小等特征。植被类型属于典型高寒草原,植被稀疏,植株低矮,以禾本科紫花针茅(*Stipa purpurea*)、杂类草火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)和青藏狗娃花(*Heteropappus bowerii*)等为优势植物^[13,18]。根据我们走访调查和长期观测,近几十年来的过度放牧是引起本地区高寒草地沙化的主要因素。加上高原特殊的大风天气和极端降雨事件,风蚀和水蚀有导致沙化程度加剧的趋势^[15]。

1.2 试验设计

根据国家标准《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标标准》(GB 19377—2003)^[19]提出的分类标准,沙化草地的不同阶段可以根据裸地面积和植被覆盖率相对于原生草地的变化来区分,以此为标准确定了 5 个沙化阶段。由于研究时限的问题,本研究只能采用空间序列代替时间演替的方法来模拟沙化过程。5 个沙化阶段分布在 3 km² 范围内,不同沙化区域呈斑块状分布。这样能保证不同沙化区域之间原始植被一致,便于植物特征和土壤性质的比较。5 个沙化阶段的植物组成和群落盖度见表 1,不同沙化阶段群落组成差异很大。

表 1 不同沙化阶段高寒草地植被群落概况

Table 1 Description of different desertification stages of alpine grasslands

编号 No.	沙化类型 Desertification type	群落盖度 Community cover/%	物种数 Species number	优势植物 Dominant plant species
1	未沙化	64.0±4.90A	8.6±1.35B	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i>)、多裂委陵菜(<i>Potentilla multifida</i>)、微孔草(<i>Microula sikkimensis</i>)
2	轻度沙化	32.8±4.12B	10.0±0.63A	窄叶苔草(<i>Carex montis-everestii</i>)、多裂委陵菜、羊茅(<i>Festuca ovina</i>)
3	中度沙化	22.8±2.99C	4.8±0.75C	紫花针茅、多裂委陵菜、冷地早熟禾(<i>Poa crymophila</i>)
4	重度沙化	15.2±2.04D	4.4±0.49C	紫花针茅、纤秆蒿(<i>Artemisia demissa</i>)、窄叶苔草
5	极重度沙化	10.4±1.96D	2.2±0.20D	微孔草、平卧轴藜(<i>Axyris prostrata</i>)

同一指标下不同字母代表不同沙化阶段存在显著差异($P < 0.05$)

1.3 样品采集与分析方法

植被群落特征调查与取样在 2017 年生长季开展,在植物生长旺盛期(8 月中旬)进行。采用的取样方法是样方法,样方规格为 0.5 m × 0.5 m。为了更准确估算群落盖度和物种的分盖度,我们用铁丝将样方均分为 25 个 10 cm × 10 cm 的栅格。我们以植物投影到地上的面积占样方内栅格数的数量来确定群落总盖度及物种的分盖度,记录每个样地内出现的植物种和每个物种的盖度,每个阶段重复 5 次。群落调查完成后,分物种、齐地面剪取每个物种的地上部分,并分别置于不同的纸质信封内,同时收集每个样方内的立枯。将剪取后的植物带回实验室置于 65 °C 烘干 48 h 后称重,每个物种的地上生物量为称量后干重的 4 倍。将所有物种的生物量相加,即为群落水平地上生物量。地下生物量的获取采用土柱法,在剪完植物的样方挖取大小为 20 cm × 20 cm 的土柱。土柱按三层挖取,深度分别为 0—10、10—20、20—40 cm。由于高寒草原区土壤深度较浅,一般在 50 cm 以内,而根系一般生长在 30 cm 以内,故我们只挖取 40 cm 以内的土壤进行碳氮含量以及其他理化性质的测定。每层中土壤过 2 mm 筛,将根系和土壤分开。根系带回实验室用清水洗净后将死根和活根分开,挑出活根置于 65 °C 烘干 48 h 至恒重后称重,根据取样面积大小换算为群落地下生物量^[13]。过筛后的土壤进行风干,用球磨仪将样品粉碎过 100 目筛,进行其他理化性质测定。

土壤容重采用环刀法进行测定。土壤含水量代表质量含水量,测定方法采用烘干法。土壤砾石含量通过湿筛法测定,以 >2 mm 的石砾重量与总土壤重量的比值进行计算。土壤总碳、全氮含量测定采用元素分析仪进行。土壤 pH 值采用电位法进行测定,土水比为 1:2.5^[17]。

1.4 土壤微生物群落组成分析

对于土壤微生物样本,从每个地块内随机选择 5 个位置采集土柱并混合均匀,作为一个样品。使用 MO BIO Power 试剂盒(MO Bio Laboratories, Inc., Carlsbad, California, USA)分离、提取土壤中 DNA。使用 515F (5'-GTGCCAGCMGCCGCGGTAA-3') 和 909R (5'-CCCCGYCAATTCMTTTRAGT-3') 两种通用引物扩增细菌 16S rRNA,使用 ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') 和 gITS7F (5'-GTGARTCATCGARTCTTTG-3') 扩增真菌 ITS 基因。扩增、纯化后的 PCR 产物在 TruSeq[®] DNA PCR-Free Sample Preparation Kit (Illumina Inc., USA) 上进行测序。使用 FLASH (V1.2.7) 对每个样品的拼接序列进行拼接。用 Usearch 软件 (v8.0) 检测嵌合序列,得到最终的有效数据^[20]。土壤微生物 α 多样性表征微生物群落组成以及物种分布差异,故本研究土壤微生物群落的丰富度和多样性分别用 Chao1 指数和 Shannon 指数来表征。

1.5 数据计算与统计分析

采用下面公式计算土壤总碳 (STC, g C/m²) 和全氮 (STN, g C/m²) 储量^[4]:

$$STC = \sum D_i \times BD_i \times SOC_i \times S$$

$$STN = \sum D_i \times BD_i \times STN_i \times S$$

式中, D_i 、 BD_i 、 SOC_i 、 STN_i 、 S 、 i 分别代表土层厚度 (cm)、土壤容重 (g/cm³)、土壤总碳含量 (%)、土壤全氮含量 (%)、土壤取样面积 (cm²) 和所取土壤的层数。

文中的统计分析采用 SPSS 24.0 软件。为探讨不同沙化阶段植被群落特征、土壤性质以及土壤碳氮储量是否存在差异,采用单因素方差分析方法。利用线性回归对上述植被群落特征、土壤理化属性与土壤总碳、全氮储量进行拟合分析。结构方程模型被用来评估植物生产和土壤特性对高寒草地沙化过程中土壤总碳、全氮储量的直接和间接影响,使用卡方检验来评估最终模型的准确性。结构方程模型的 P 值应大于 0.05 以及较小的卡方值。在这个过程中,一些不显著的路径被逐渐淘汰,直到模型被优化。结构方程模型分析使用 AMOS 19.0 (Amos Development Corporation, Chicago, IL, USA) 进行。本研究的统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。由于样本量较小和草地异质性较大,文中 $P < 0.1$ 也被认为有生态学意义^[21-22]。文中所有图件的绘制采用 Origin Pro 2017 软件。

2 结果与分析

2.1 群落生物量

随着沙化程度的加重,高寒草地群落地上生物量呈逐渐降低趋势。与未沙化阶段相比,中度、重度和极重度沙化阶段的地上生物量分别显著降低了 61%、72%和 93%。与地上生物量不同步的是,群落地下生物量只有在重度和极重度阶段呈显著降低的趋势,与未沙化草地相比分别降低了 47%和 99%(图 1)。

2.2 土壤总碳、全氮储量

分层来说,表层(0—10 cm)土壤总碳、全氮储量在轻度和中度沙化阶段未呈现显著下降趋势,而重度和极重度沙化阶段显著降低了 21%和 59%(图 2, $P < 0.05$);次表层(10—20 cm)和深层(20—40 cm)土壤总碳储量最大值出现在重度沙化阶段,而极重度沙化阶段显著降低 44%和 59%(图 2, $P < 0.05$)。类似的现象出现在次表层的土壤全氮储量,而深层的土壤全氮储量只有极重度沙化阶段显著降低。土壤剖面(0—40 cm)分析表明,与未沙化草地相比,轻度、中度和重度沙化阶段土壤总碳、全氮储量均无显著变化,而只有极重度沙化阶段分别显著降低了 69%和 55%(图 2, $P < 0.05$)。

2.3 土壤理化性质及其与土壤总碳、全氮储量的关系

随着沙化程度的加重,土壤容重呈现逐渐增加趋势。与未沙化草地相比较,重度和极重度沙化阶段土壤容重分别增加了 16%和 19%(表 2, $P < 0.05$)。土壤总

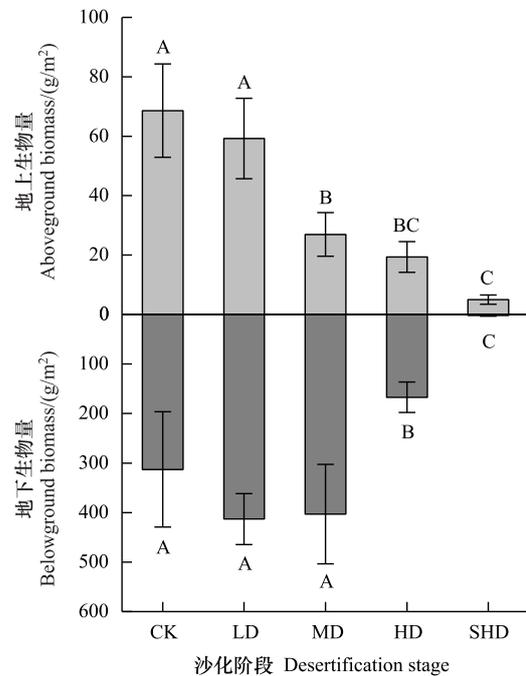


图 1 不同沙化阶段高寒草地群落地上地下生物量的变化

Fig.1 Changes in community aboveground and belowground biomass during the desertification process in alpine grasslands

CK, 未沙化草地; LD, 轻度沙化阶段; MD, 中度沙化阶段; HD, 重度沙化阶段; SHD, 极重度沙化阶段; 不同大写字母代表沙化阶段之间差异显著

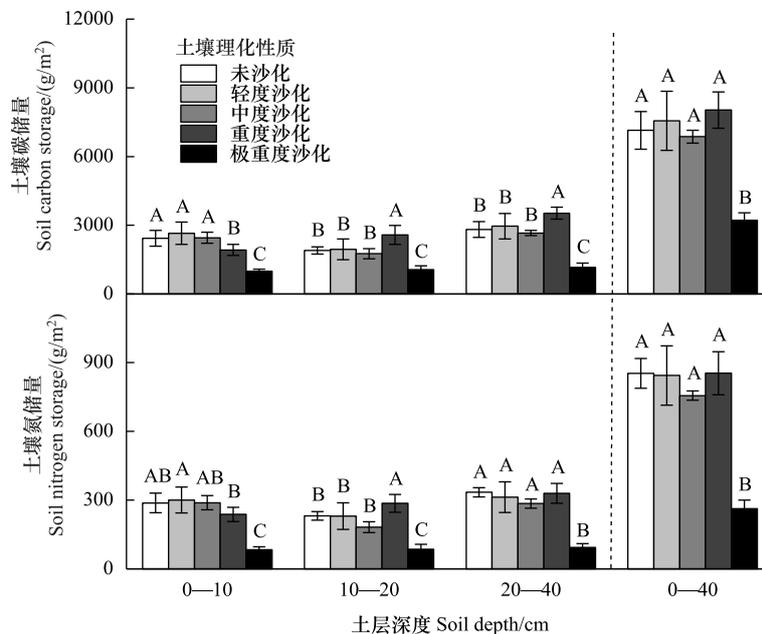


图 2 不同沙化阶段高寒草地土壤总碳、全氮储量的变化

Fig.2 Changes in soil total carbon and nitrogen storage under different desertification stages in alpine grasslands

碳、全氮含量均呈现逐渐降低的趋势。与对照相比,轻度和中度沙化阶段的土壤总碳、全氮含量无显著差异,而重度和极重度沙化阶段土壤总碳含量分别降低了 32% 和 66%,土壤全氮含量分别降低了 29% 和 76% (表 2, $P < 0.05$)。土壤砾石含量也呈增加趋势,但只有在极重度沙化阶段显著提高了 28%。土壤 pH 值在各个沙化阶段之间差异不显著 (表 2, $P > 0.05$)。土壤含水量呈现逐渐下降趋势,中度、重度、极重度沙化阶段分别显著降低了 23%、38% 和 74% (表 2, $P < 0.05$)。

表 2 不同沙化阶段高寒草地土壤性质的变化

Table 2 Changes in soil properties under different desertification stages in alpine grasslands

土壤理化性质 Soil physico-chemical properties	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm^3)	土壤总碳含量 Soil total carbon content/%	土壤全氮含量 Soil total nitrogen content/%	土壤砾石含量 Soil gravel content/%	土壤 pH Soil pH	土壤含水量 Soil water content/%
未沙化 None desertification	1.34±0.088D	1.81±0.20A	0.21±0.025A	39.77±2.36B	7.01±0.12A	10.01±0.64A
轻度沙化 Light desertification	1.47±0.031BC	1.80±0.34A	0.20±0.040A	38.83±3.32B	7.04±0.13A	10.86±1.05A
中度沙化 Moderate desertification	1.42±0.060CD	1.72±0.14A	0.20±0.020A	41.33±5.44B	7.01±0.047A	7.67±0.95B
重度沙化 Heavy desertification	1.56±0.060AB	1.23±0.14B	0.15±0.018B	40.98±2.78B	7.00±0.071A	6.19±2.22B
极重度沙化 Severely heavy desertification	1.61±0.050A	0.62±0.058C	0.052±0.007C	50.71±1.18A	7.02±0.11A	2.60±0.37C

利用回归分析探讨了影响沙化过程高寒草地土壤总碳、全氮储量的因子。在生物因子方面,高寒草地地上、地下生物量与土壤总碳、全氮储量均呈现显著正相关关系 (图 3, $P < 0.05$)。在土壤理化性质方面,各个因子与土壤总碳、全氮储量呈现不同的关系,土壤总碳、全氮储量与砾石含量均呈负相关关系,与含水量均呈正相关关系 (图 3, $P < 0.05$),而与土壤 pH 值均无显著相关关系 (图 3, $P > 0.05$)。

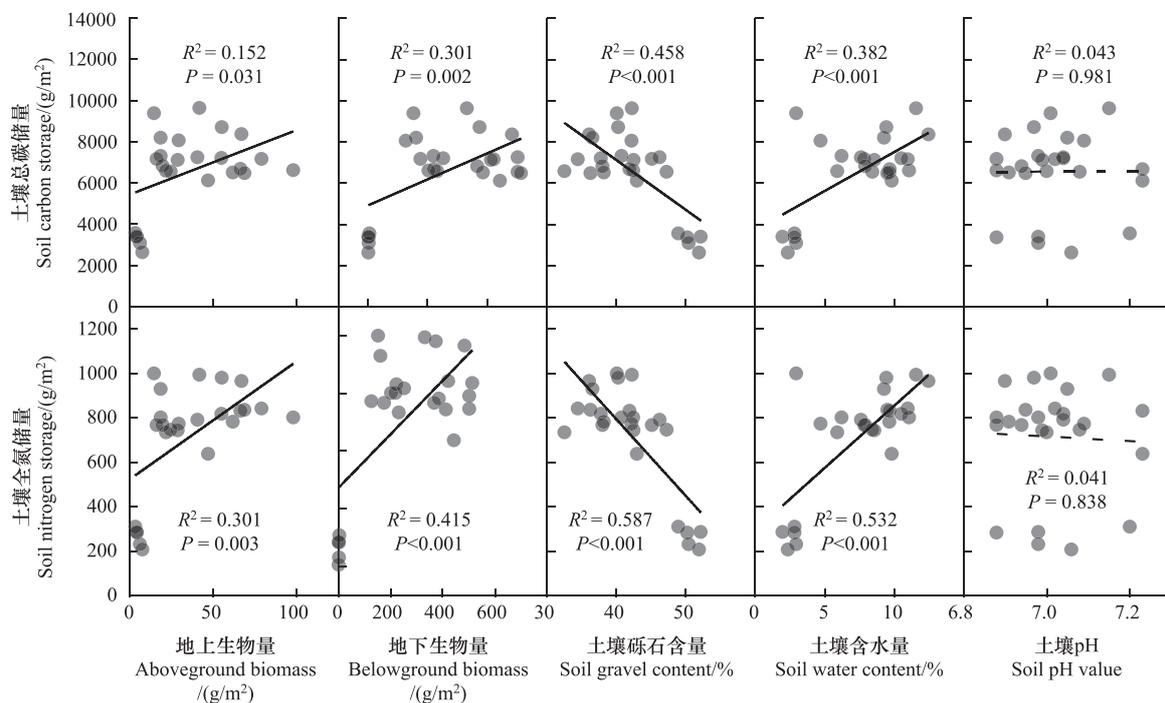


图 3 影响高寒草地沙化过程土壤总碳、全氮储量的因子

Fig.3 Factors affecting soil carbon and nitrogen storage in alpine grasslands

2.4 土壤微生物群落多样性及其与土壤总碳、全氮储量的关系

土壤细菌的 Shannon 多样性指数和 Chao1 丰富度指数随着沙化程度的加重呈上升趋势,在极重度沙化阶段中出现显著差异,而土壤真菌的这两个指数在不同沙化阶段之间无显著差异 (表 3)。

表 3 不同沙化阶段高寒草地土壤细菌和真菌多样性的变化

Table 3 Changes in soil bacteria and fungi diversity during the desertification process in alpine grasslands

沙化阶段 Desertification stage		未沙化 ND	轻度沙化 LD	中度沙化 MD	重度沙化 HD	极重度沙化 SHD
土壤细菌 Soil bacteria	Shannon 多样性指数	10.59±0.22B	10.59±0.13B	10.46±0.23B	10.58±0.50B	11.17±0.17A
	Chao1 丰富度指数	9702.68±215.89B	9498.61±484.56B	9400.85±320.18B	10178.44±1225.11B	11112.26±304.67A
土壤真菌 Soil fungi	Shannon 多样性指数	7.20±0.56A	7.09±0.31A	6.20±1.80A	6.40±0.74A	7.30±0.39A
	Chao1 丰富度指数	1764.14±269.05A	1597.73±130.65A	1697.28±359.91A	1511.68±141.64A	1748.50±216.88A

本研究进一步分析了沙化过程中土壤微生物结构和丰富度对土壤总碳、全氮储量的影响。土壤细菌 Shannon 多样性指数和 Chao1 丰富度指数都与总碳、全氮储量呈负相关,而真菌的多样性和丰富度指数与土壤总碳、全氮储量没有显著相关性(图 4)。这表明,土壤总碳、全氮储量的变化更多受土壤细菌群落结构的影响,而受土壤真菌群落结构的影响较小。

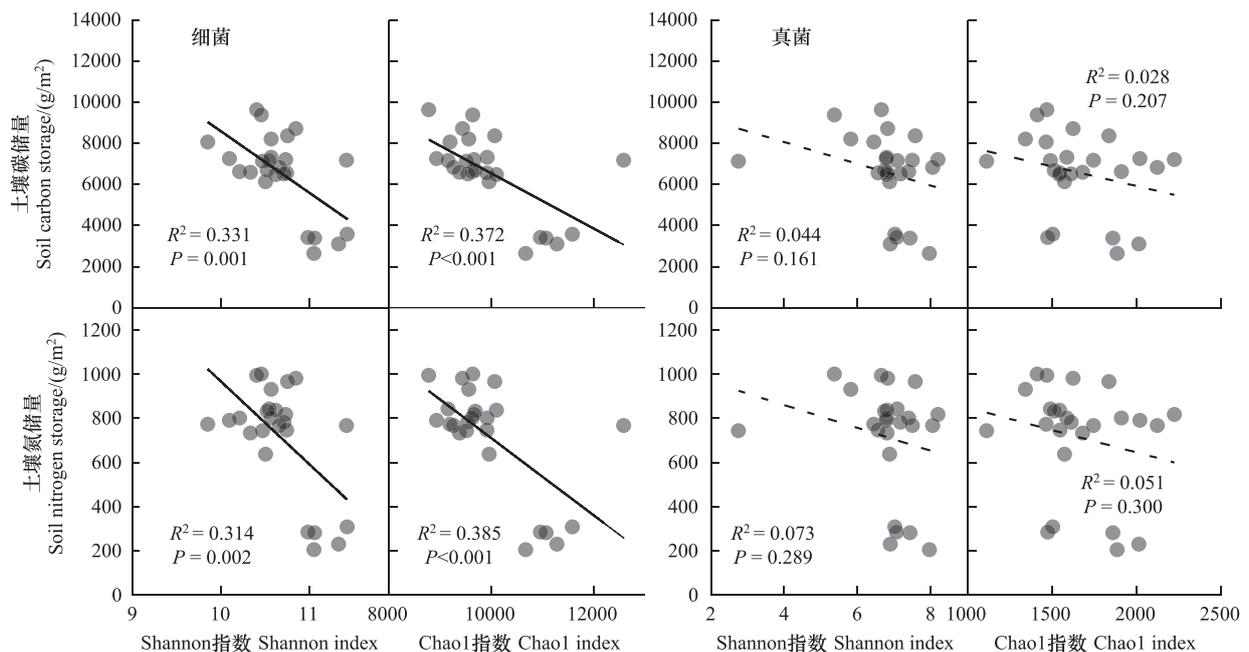


图 4 高寒草地土壤微生物多样性、丰富度与土壤总碳、全氮储量的关系

Fig.4 The correlations between soil microbial diversity, richness and soil carbon, nitrogen storage in alpine grasslands

2.5 驱动土壤碳氮储量变化的因子

本研究利用结构方程模型探讨了驱动高寒草地沙化过程土壤总碳、全氮储量变化的因子。沙化阶段对土壤砾石含量有显著正效应(图 5, $P < 0.001$),对群落地上生物量和土壤含水量有显著负效应(图 5, $P < 0.001$),而对地上生物量和微生物丰度无显著影响(图 5, $P > 0.05$)。进一步分析发现,影响土壤总碳、全氮储量的因子主要是土壤理化性质,而植物群落地上与地下生产均无显著影响。影响土壤总碳储量的因子主要是土壤砾石含量和土壤微生物丰度(图 5, $P < 0.01$),土壤含水量也有微弱影响(图 5, $P < 0.1$)。从总效应来看,影响土壤总碳储量的因子中排前三位的依次是土壤砾石含量($R^2 = 0.514$)、土壤水分含量($R^2 = 0.469$)和植物地上生物量($R^2 = 0.347$;图 6),而影响土壤全氮储量的因子中排前三位的依次是土壤砾石含量($R^2 = 0.528$)、土壤水分含量($R^2 = 0.455$)和土壤微生物丰度($R^2 = 0.225$;图 6)。由此可见,高寒草地沙化过程影响土壤总碳、全氮储量的因子主要是砾石含量和土壤含水量等土壤因子,而植物输入对土壤总碳、全氮储量的影响较小。

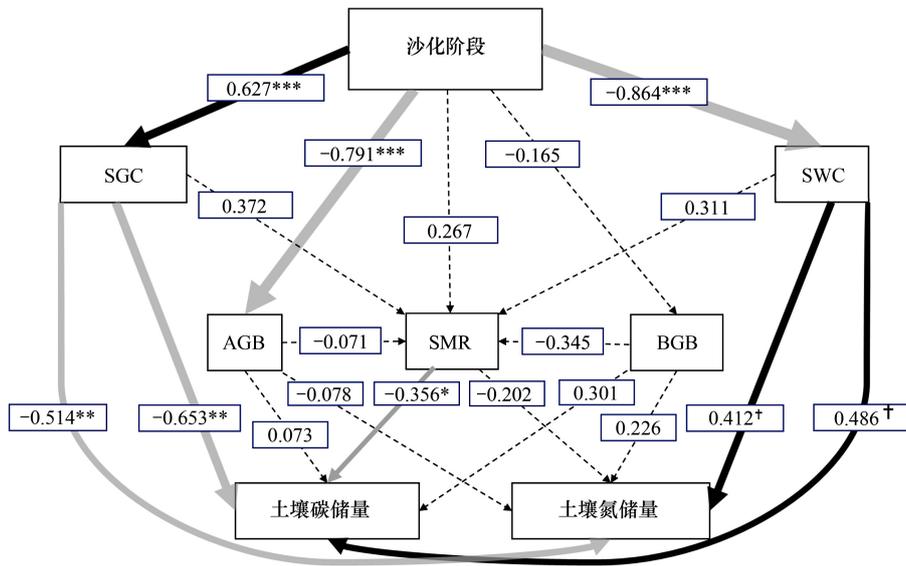


图 5 影响高寒草地沙化过程土壤总碳、全氮储量的因子

Fig.5 Factors affecting soil carbon and nitrogen storage during the desertification process in alpine grasslands

$\chi^2 = 7.533, df = 3, P = 0.105$; †: $P < 0.1$; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; 黑色实线代表正效应, 浅灰色实线代表负效应, 虚线代表无显著相关性; SWC: 土壤含水量; SGC: 土壤砾石含量; AGB: 地上生物量; BGB: 地下生物量; SMR: 土壤微生物丰富度

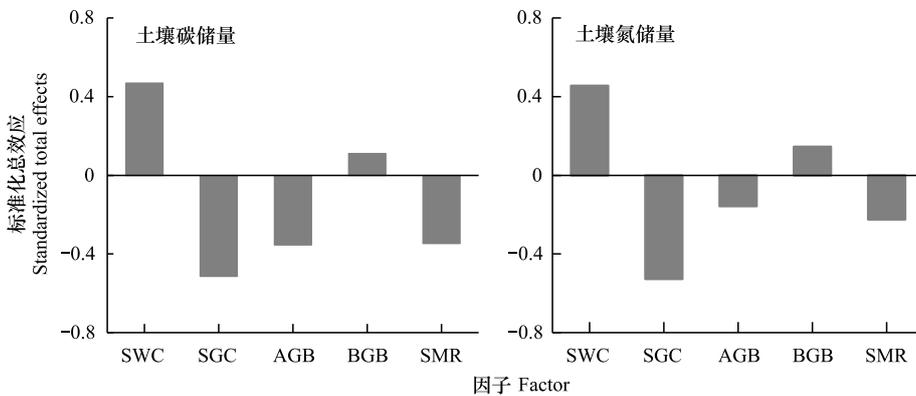


图 6 高寒草地沙化过程中不同变量对土壤总碳和全氮储量的标准化总效应

Fig.6 Standardized total effects of different variables on soil carbon and nitrogen storage during the desertification process in alpine grasslands

3 讨论

研究结果发现,土壤总碳、全氮储量在不同深度有不同的变化规律,这与植物根系分布等密切相关。从研究的土壤深度(0—40 cm)来看,土壤总碳、全氮储量只有在极重度沙化阶段分别显著降低了 69%和 55%,而轻度、中度和重度沙化阶段均无显著变化。作为凋落物和根系死亡后的分解产物,土壤有机质是植物与土壤连接的媒介和重要载体,土壤有机质的多寡不仅影响草地的生产力,还影响植物与土壤微生物的关系以及土壤水分保持和抗风蚀的能力^[3]。故沙化草地土壤碳库储量锐减严重威胁着草地生态系统的物质、能量平衡以及信息交流^[23],以及面对全球变化所扮演的碳源/汇角色^[4]。同时,我们发现本研究的结果与只研究表层土壤的结果并不一致:有研究发现表层土壤有机碳和可利用养分损失最严重的阶段是原始草地向轻度沙化草

地转变的阶段^[2],而本研究发现土壤中碳氮损失最显著的阶段是中度到重度转变阶段^[17]。故研究表明,表层土壤的变化固然重要,但全土壤剖面的研究更能真实反映整个土壤的变化,未来应加强不同深度土壤性质的研究。

本研究结果表明,群落地下生物量并未呈现与地上一致的规律,最大的地下生物量出现在在中度沙化阶段(图 1)。这说明沙化过程中高寒草地植物地上与地下生态过程的变化呈现不同步性。在轻度沙化阶段,由于土壤水分和养分的降低,植物更倾向于通过将更多的光合产物分配到地下来获取满足植物生长发育的资源需求;而随着沙化程度的进一步加重,重度沙化阶段植物地上与地下生产力均呈现急剧下降的现象。这说明此时的草地生态系统已经急剧恶化,地下生产力的分配不能满足植物资源获取的需求。土壤碳氮储量在极重度沙化阶段中呈现急剧下降状态(图 2),这与地上和地下生物量的异步性变化规律基本一致。这说明沙化过程植被地上部分与土壤性质的变化也呈现不同步性,土壤性质的变化滞后于地上植被的变化,这与我们之前的分析一致:草地沙化过程中植被群落特征的阈值变化发生在轻度到中度沙化阶段,土壤理化性质和微生物的阈值变化发生在中度到重度沙化阶段^[17]。从生态阈值的估算来看,植物群落特征变化对草地沙化的响应先于土壤理化性质和土壤微生物,植物反应比土壤更加敏感^[24],因此植物群落特征变化可能是确定草地沙化程度的首选指标,也进一步验证了沙化草地的早期防治至关重要这一结论。然而,本研究采用空间序列代替时间演替的方法,未能区分过去几十年土壤碳氮储量的变化。草地沙化是一个长期的过程,由于缺乏不同草地沙化前土壤碳氮储量的本底数据,只能假设过去几十年气候变化对草地碳氮贮量影响较小,不会对实验结果产生重要影响。

进一步分析发现,驱动高寒草地沙化过程中土壤碳氮储量变化的关键因子是土壤理化性质,而植被变化的影响较小。一般来说,植被通过改变土壤有机质输入的数量和质量,同时影响土壤水分、温度、pH 值和通气性等理化性质而影响有机质分解,这其中的关键是对土壤微生物群落结构的影响过程^[25-27]。半干旱地区的植物可以影响土壤温度、保持土壤湿度,并为土壤微生物提供它们所需的底物和能量^[28]。例如,干旱和半干旱地区的植物可以降低土壤温度,植物根系分泌物和死根为土壤微生物提供丰富的能量^[29]。因此,植物主要是通过其对土壤性质、基质供应、土壤微生物多样性等改变间接影响土壤碳氮储量,这就解释了为什么生物量对土壤的影响低于土壤性质的影响。此外,土壤微生物群落结构和组成随着植被类型和生长条件而发生变化^[15,30-31]。研究发现,沙化过程对土壤真菌多样性和丰富度均无显著影响,由于真菌本身的丝状结构等特性,能使真菌比细菌对环境环境因子的变化具有更强的抵抗力,在极端环境下具有更强的适应性^[32]。然而,土壤细菌多样性和丰富度随着沙化阶段而显著提高,这说明沙化过程改变的土壤微生物主要是土壤细菌群落。前期的研究发现,土壤细菌优势群落丰度的降低有利于多样性的增加,细菌多样性和丰富度的增加能加快土壤有机质的分解转化过程,这在细菌多样性和丰富度与土壤碳和氮储量负相关关系中得到进一步印证。总体而言,本文的研究结论可为不同沙化阶段高寒草地碳氮储量的变化提供对比,但并未能深入揭示高寒草地沙化过程的碳固持机理,这在未来研究工作中需要加强。

4 结论与展望

本研究在半干旱高寒草原区利用空间序列代替时间演替的方法选择 5 种沙化阶段作为研究对象,系统研究了藏北高原高寒草地沙化过程中不同深层土壤碳氮储量的变化以及生产力、土壤理化性质的变异规律。我们的研究发现,沙化过程存在土壤碳氮储量急剧下降的阈值阶段,极重度沙化会导致高寒草地碳氮的严重流失,故潜在沙化高寒草地的早期防护更有利于土壤碳汇的维持。相较植物生产的影响,土壤水分降低和砾石含量增加等过程对高寒草地碳氮流失起更重要的影响。鉴于沙化草地在我国青藏高原高寒草地地区的大量分布,沙化导致的土壤碳氮变化应引起大家的广泛关注。从另一个方面来说,积极实施沙化草地修复措施可以极大提高高寒草地碳氮储量,对区域乃至全球碳汇具有重要意义,这有利于我国“双碳”目标的实现。

参考文献 (References):

- [1] 费凯, 胡玉福, 舒向阳, 肖海华, 杨泽鹏, 何剑锋. 若尔盖高寒草地沙化对土壤活性有机碳组分的影响. 水土保持学报, 2016, 30(5): 327-330, 336.
- [2] 韩光中, 屈建军, 俎瑞平. 安多县沙漠化过程中土壤理化性质的演变特征. 土壤通报, 2014, 45(5): 1032-1037.
- [3] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 长期封育对不同类群草地碳贮量及其固持速率的影响. 生态学报, 2011, 31(15): 4270-4276.
- [4] 何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞. 内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力. 生态学报, 2012, 32(3): 844-851.
- [5] Hu Y F, Jiang S L, Yuan S, Deng L J, Xiao H H, Shu X Y, Chen G D, Xia J G. Changes in soil organic carbon and its active fractions in different desertification stages of alpine-cold grassland in the eastern Qinghai-Tibet Plateau. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(9): 348.
- [6] 蒋双龙, 胡玉福, 蒲琴, 舒向阳, 袁毓铭, 余倩. 川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征. 生态学报, 2016, 36(15): 4644-4653.
- [7] Zong N, Fu G. Variations in species and function diversity of soil fungal community along a desertification gradient in an alpine steppe. Ecological Indicators, 2021, 131: 108197.
- [8] 魏兴璇, 李森, 杨萍, 董玉祥, 张春来. 藏北高山嵩草草甸植被和多样性在沙漠化过程中的变化. 中国沙漠, 2007, 27(5): 750-757.
- [9] 王兮之, 李森, 何巧如, 魏兴璇. 西藏沙漠化土地退化程度动态分析及评价. 中国水土保持, 2009(7): 25-28.
- [10] 国家林业局. 第五次中国荒漠化和沙化状况公报. 北京: 国家林业局, 2015.
- [11] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [12] Wang Y, Lv W, Xue K, Wang S, Zhang L, Hu R, Zeng H, Xu X, Li Y, Jiang L, Hao Y, Du J, Sun J, Dorji T, Piao S, Wang C, Luo C, Zhang Z, Chang X, Zhang M, Hu Y, Wu T, Wang J, Li B, Liu P, Zhou Y, Wang A, Dong S, Zhang X, Gao Q, Zhou H, Shen M, Wilkes A, Miede G, Zhao X, Niu H. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. Nature Reviews Earth and Environment, 2022, 3(10): 668-683.
- [13] 宗宁, 石培礼, 朱军涛. 高寒草地沙化过程植物群落构成及生态位特征变化. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1561-1570.
- [14] 何芳兰, 金红喜, 王锁民, 韩生慧, 曾荣, 马俊梅. 沙化对玛曲高寒草甸土壤微生物数量及土壤酶活性的影响. 生态学报, 2016, 36(18): 5876-5883.
- [15] Zong N, Shi P L. Soil properties rather than plant production strongly impact soil bacterial community diversity along a desertification gradient on the Tibetan Plateau. Grassland Science, 2020, 66(4): 197-206.
- [16] Dong J F, Wang S P, Niu H S, Cui X Y, Li L F, Pang Z, Zhou S T, Wang K. Responses of soil microbes and their interactions with plant community after nitrogen and phosphorus addition in a Tibetan alpine steppe. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2236-2247.
- [17] 宗宁, 石培礼, 孙建. 高寒草地沙化过程植被与土壤特征变化的生态阈值估算. 干旱区研究, 2020, 37(6): 1580-1589.
- [18] Dong J F, Cui X Y, Wang S P, Wang F, Pang Z, Xu N, Zhao G Q, Wang S P. Changes in biomass and quality of alpine steppe in response to N & P fertilization in the Tibetan Plateau. PLoS One, 2016, 11(5): e0156146.
- [19] 苏大学, 张自和, 陈佐忠, 胡兴宗. GB19377-2003 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标标准. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [20] Li X Z, Rui J P, Mao Y J, Yannarell A, Mackie R. Dynamics of the bacterial community structure in the rhizosphere of a maize cultivar. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 68: 392-401.
- [21] Zhou J Z, Xue K, Xie J P, Deng Y, Wu L Y, Cheng X L, Fei S F, Deng S P, He Z L, Van Nostrand J D, Luo Y Q. Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming. Nature Climate Change, 2012, 2: 106-110.
- [22] Yuan X, Qin W K, Xu H, Zhang Z H, Zhou H K, Zhu B. Sensitivity of soil carbon dynamics to nitrogen and phosphorus enrichment in an alpine meadow. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 150: 107984.
- [23] 舒向阳, 胡玉福, 蒋双龙, 马畅, 李一丁, 蒲琴, 王倩. 川西北沙化草地植被群落、土壤有机碳及微生物特征. 草业学报, 2016, 25(4): 45-54.
- [24] 丁勇, 牛建明, 杨持. 北方草地退化沙化趋势、成因与可持续发展研究——以内蒙古多伦县为例. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 580-586.
- [25] Qi D H, Wieneke X, Tao J P, Zhou X, Desilva U. Soil pH is the primary factor correlating with soil microbiome in Karst rocky desertification regions in the Wushan County, Chongqing, China. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 1027.
- [26] 孙良杰, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 何亚婷, 刘欣超, 贾军强, 曹丛丛. 全球变化对草地土壤微生物群落多样性的影响研究进展. 地理科学进展, 2012, 31(12), 1715-1723.
- [27] Zhou L H, Li H, Shen H H, Xu Y P, Wang Y H, Xing A J, Fang J Y. Shrub-encroachment induced alterations in input chemistry and soil microbial community affect topsoil organic carbon in an Inner Mongolian grassland. Biogeochemistry, 2017, 136(3): 311-324.
- [28] Wang K, He X L, Xie L L, Zhao L L. Arbuscular mycorrhizal fungal community structure and diversity are affected by host plant species and soil depth in the Mu Us Desert, Northwest China. Arid Land Research and Management, 2018, 32(2): 198-211.
- [29] 谢龙莲, 陈秋波, 王真辉, 刘小香. 环境变化对土壤微生物的影响. 热带农业科学, 2004, 24(3): 39-47.
- [30] Li H, Xu Z W, Yan Q Y, Yang S, Van Nostrand J D, Wang Z R, He Z L, Zhou J Z, Jiang Y, Deng Y. Soil microbial beta-diversity is linked with compositional variation in aboveground plant biomass in a semi-arid grassland. Plant and Soil, 2018, 423(1): 465-480.
- [31] Wang S K, Zuo X A, Zhao X Y, Awada T, Luo Y Q, Li Y Q, Qu H. Dominant plant species shape soil bacterial community in semiarid sandy land of Northern China. Ecology and Evolution, 2018, 8(3): 1693-1704.
- [32] Manzoni S, Schimel J P, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. Ecology, 2012, 93(4): 930-938.