

DOI: 10.5846/stxb201406081184

唐庄生, 安慧, 邓蕾, 上官周平. 荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化. 生态学报 2016, 36(4): 991–1000.

Tang Z S, An H, Deng L, Shang G Z P. Changes in the plant community and soil physical properties during grassland desertification of steppes. Acta Ecologica Sinica 2016, 36(4): 991–1000.

荒漠草原沙漠化植物群落及土壤物理变化

唐庄生¹, 安慧^{2,*}, 邓蕾¹, 上官周平¹

1 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建省部共建教育部重点实验室, 宁夏大学西部生态与生物资源开发联合研究中心, 银川 750021

摘要: 沙漠化是草地退化最严重的形式之一。以空间代替时间的方法, 通过对宁夏中北部荒漠草原沙漠化过程中植物群落特征和土壤物理特性的研究, 探讨草地植物群落与土壤物理特性对沙漠化的响应机制。结果表明: (1) 潜在沙漠化阶段草地以牛枝子、猪毛蒿、中亚白草为优势种, 轻度沙漠化阶段草地以中亚白草、苦豆子为优势种, 中度沙漠化阶段草地以狗尾草、虫实为优势种, 重度沙漠化阶段草地以沙米、赖草、狗尾草为优势种, 极度沙漠化阶段草地以沙米为优势种。(2) 随着沙漠化程度的加剧, 草地植物群落生物量、Shannon–Wiener 指数、丰富度指数、盖度均呈降低趋势, 但轻度沙漠化阶段草地植被生物量比潜在沙漠化增加了 23%。(3) 草地沙漠化导致土壤容重和土壤粗砂粒含量增加, 而土壤水分、土壤细砂粒和粘粉粒含量降低。荒漠草原沙漠化导致了土壤环境和植被明显退化, 草地生产力明显降低。

关键词: 荒漠草原; 沙漠化; 土壤水分; 土壤机械组成; 生物量

Changes in the plant community and soil physical properties during grassland desertification of steppes

TANG Zhuangsheng¹, AN Hui^{2,*}, DENG Lei¹, SHANGGUAN Zhouping¹

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau; Northwest A & F University; Yangling 712100, China

2 Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, United Center for Ecology Research and Bioresource Exploitation in Western China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Characteristics and soil physical properties of plant communities undergoing desertification in steppes located in north central Ningxia, China were studied. The investigation was carried out to probe the responses of plant communities and changes in soil physical properties that occur during desertification of steppes. It was found that the dominant species in steppes with potential for desertification were *Lespedeza potaninii*, *Artemisia scoparia* Walds, and *Pennisetum centrasiatum*. In steppes subjected to only light desertification, *Pennisetum centrasiatum* and *Sophora alopecuroides* were dominant. The species *Utricularia australis* and *Corispermum hyssopifolium* were dominant in steppes experiencing moderate desertification. In steppes subjected to severe desertification, *Agriophyllum squarrosum*, *Aneurolepidium dasystachys* and *Utricularia australis* were dominant, and in steppes with extremely severe desertification *Agriophyllum squarrosum* was dominant. When such grasslands experienced intensifying desertification, their biomass, Shannon–Wiener index, richness index, and ground cover tended to decline. The biomass of grasslands suffering light desertification was 23% higher than that of grasslands with potential for desertification. As desertification proceeded, the soil bulk density and coarse sand content of grasslands increased but their soil moisture and clay–silt content tended to decrease most significantly. The desertification of grasslands caused the soil to form a coarse texture and thus increase its bulk weight, with the consequence that soil moisture and silt

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31260125, 41390463); 科技基础性工作专项资助项目(2014FY210100)

收稿日期: 2014–06–08; 网络出版日期: 2015–07–09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: anhui08@163.com

<http://www.ecologica.cn>

content tended to decrease. As desertification intensified, these changes made the soil more susceptible to erosion, so that, directly or indirectly, the productivity of such grasslands inevitably must decrease. Therefore, the desertification of steppes involves progressively less retention of moisture and fine soil particles, leading to desiccation and erosion of the soil, changes in plant species, and inevitable loss of productivity.

Key Words: desert grassland; desertification; soil moisture; soil mechanical composition; biomass

近年来,由于人类对草地资源的过度利用和受气候变化的影响,造成全球大多数地区草地生态系统呈现出不同方式与程度的退化^[1-2]。沙漠化是草地退化的极端表现形式,也是土地荒漠化的主要形式之一,其发生面积、危害程度已远超出其它类型的土地退化方式^[3]。我国北方沙区退化与沙漠化草地面积达 4389.93 万 hm^2 ,占沙区可利用草地总面积 41.15%,其中,宁夏中北部的草地退化与沙漠化较为严重,退化与沙漠化草地约占草地总面积的 97%,沙漠化草地占可利用草地总面积的 33%^[4]。随着“退耕还林还草”和“封育禁牧”等生态工程的实施,该区荒漠草原总体质量逐渐得到改善^[5-6],但该生态系统具有一定脆弱性,表现出对人类干扰和气候变化的反应敏感且自身稳定性较低。因此,在干旱生境中进行草地植被恢复与重建成为应对未来气候变化的重要内容,成为生态学、草原学与土壤学研究的热点,并受到社会各界的广泛关注。

植被与土壤的相互关系是生态学研究的重点领域^[7],关于土壤特性和植被特征已开展了大量研究工作。邱开阳^[8]等对毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局的研究表明,土壤水分空间分布沿沙漠化临界区域的变化规律与植物群落物种数基本一致,但与植被盖度、密度的差别较大;Chen 等^[9]对毛乌素沙地东南缘植被的空间异质性进行研究,结果表明,植被盖度和植物群落物种数都具有镶嵌的空间结构和多尺度的空间变异,而以小尺度的空间变异为主;Ferreira 等^[10]对巴西草原的研究指出,依赖于密度的植被特征的空间变异格局与土壤上层 4 m 的植物有效水分的空间变异性非常相似;胡相明^[11]等对黄土丘陵区地形、土壤水分与草地的景观格局的研究指出,海拔对草地群落盖度,坡位、坡向对草地群落的物种丰富度和生物多样性有着重要影响。

上述研究分别从不同角度揭示了植被和土壤在不同生态系统中的相互关系,对理解不同生态学过程对土壤特性、植被结构与功能及其影响因素具有积极作用。但是荒漠草原作为重要的生态系统单元,目前就荒漠草原区植被分布格局与土壤物理特性的协同关系及其变异规律亟待进一步研究。为此,本研究以宁夏中北部盐池县不同沙漠化阶段的草地为对象,以空间代替时间研究草地植物群落特征、土壤物理特性的变化及其相互关系,探讨荒漠草原植被群落结构、生物量及土壤特性对草地沙漠化的响应机理。以期为干旱与半干旱地区荒漠草原的生态恢复与重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区盐池县花马池镇皖记沟村(37°49' N, 107°30' E)(图 1),海拔 1411—1435 m。该区属于中温带半干旱区,年平均气温 8.2 °C,7 月(最热)平均气温 22.4 °C,1 月(最冷)平均气温 -8.7 °C; ≥ 10 °C 的年积温为 2751.7 °C。年均降水量为 280 mm,降雨主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 60% 以上,且年际变率大,年蒸发量 2710 mm。年无霜期为 165 d,风沙天多集中于冬、春季,年平均风速 2.8 m/s,年大风(风速 > 17 m/s)日数为 24.2 d^[12]。

该区属鄂尔多斯台地向黄土高原过渡地带,地势南高北低。地带性土壤主要有黄绵土和灰钙土(淡灰钙土),非地带性土壤主要有风沙土、盐碱土和草甸土等,其中风沙土在中北部分布广泛。土壤质地多为轻壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。该区植被类型有灌丛、草原、草甸、沙地植被和荒漠植被,其中灌丛、草原、沙地植被数量较大,分布也广。研究区土壤为风沙土,植被类型主要包括花棒(*Hedysarum scoparium*),

柠条(*Caragana korshinskii*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)等灌木,主要草本植物有猪毛菜(*Salsola collina*)、山苦菜(*Ixeris chinensis*)、中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*)等。

1.2 样地的选择

由于自然条件差异和人为干扰,不同地貌类型植被经过长期分化和演化,形成了不同的生态系统类型。沙地沙漠化过程主要表现为固定沙丘(地)的活化和流沙扩展,梁地沙漠化过程主要表现为风蚀、水蚀交替作用而造成的土壤流失和地表组成物质粗化,滩地和河谷地的沙漠化过程主要是土壤盐渍化。因此,不同的沙漠化过程也将同时伴随着植物群落类型和特征的一系列演变过程,沙地活化过程总体上表现为固定沙丘(地)一半固定沙丘(地)一半流动沙丘(地)一流动沙丘(地)的动态演化序列。

该区在空间上镶嵌分布着不同沙漠化程度的草地类型,根据植被的指示性及盖度分级标准^[13](表1),在研究区域内选择处于不同沙漠化阶段的潜在沙漠化(CK,未沙漠化草地)、轻度沙漠化(LD,固定沙地)、中度沙漠化(MD,半固定沙地)、重度沙漠化(SD,半流动沙地)和极度沙漠化(VSD,流动沙地)草地作为取样地,以潜在沙漠化(CK)作为对照,每种生境中设置3个50 m×50 m的重复取样区,每个沙漠化取样地间地形与环境条件基本一致。采样点的地理位置如图1所示。

表1 草地沙漠化分级指数

Table 1 The grading index of grassland desertification

沙漠化阶段 Desertified stage	地表景观特征/% Landscape characteristics	植被盖度/% Vegetation cover	地表结皮 Surface crust
潜在沙漠化 CK	流沙面积低于5	>70	地表稳定,被土层和大量结皮覆盖
轻度沙漠化 LD	流沙面积5—20	60—75	20%以上被土层或结皮覆盖
中度沙漠化 MD	流沙面积20—50	45—60	30%—60%生物结皮或土壤
重度沙漠化 SD	流沙面积大于50	10—45	30%覆盖物理结皮和较少生物结皮
极度沙漠化 VSD	地表完全被流沙覆盖	0—10	无结皮或只有少量物理性结皮

CK表示潜在沙漠化阶段草地;LD表示轻度沙漠化阶段草地;MD表示中度沙漠化阶段草地;SD表示重度沙漠化阶段草地;VSD表示极度沙漠化阶段草地

1.3 实验方法

1.3.1 植被特征调查及生物量

2013年8月在每个50 m×50 m取样区内随机设置30个1 m×1 m小样方,调查植被特征,包括物种数、个体数、高度和盖度等指标。随机选取10个样方,将样方内地面上所有植物剪下,同时收集枯落物(立枯和凋落物)带回实验室,105℃杀青30 min,在65℃下烘干称取植物地上和枯落物生物量。在地上生物量收获后的调查样方内,用直径9 cm根钻收集0—40 cm土层的根系样品,每个小样方内5钻混合,编号后装入自封袋带回实验室,在实验室用0.5 mm筛网冲洗,洗净后的根系105℃杀青30 min,在65℃下烘干称取植物地下生物量。

植物群落α多样性指数选用Shannon-Wiener多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (P_i = n_i / N)$$

均匀度指数选用Pielou指数:

$$E = \left(- \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \right) / \ln S$$

<http://www.ecologica.cn>



图1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location diagram of study area

丰富度指数:

$$R = S$$

式中 S 为物种的种类数 n_i 为第 i 个物种的多度 N 为群落中所有物种的多度之和 P_i 为第 i 物种的多度占有物种的多度之和的比例。

1.3.2 土壤物理特性的测定

用直径 9 cm 根钻收集根系样品的同时采集 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 和 30—40 cm 土壤样品,每个小样方内 5 钻土壤混合而成,装入干燥的铝盒内称其鲜重,进行土壤含水量和机械组成测定。土壤机械组成采用比重计法测定,土壤含水量采用烘干法测定,土壤容重采用环刀法测定。

1.4 数据与分析

采用 SPSS(17.0) 统计分析软件对实验数据进行分析。植被特征和生物量采用 One-Way ANOVA 方法进行单因素方差分析,土壤水分、容重和机械组成采用双因素方差分析,所有数据均采用 LSD 方法进行多重比较,用 Pearson 相关系数进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同沙漠化阶段草地植物多样性和盖度的变化特征

沙漠化对荒漠草原植物群落多样性、均匀度和丰富度影响显著 ($P < 0.05$)。随着草地沙漠化程度的加剧,植物多样性和均匀度呈先增加后降低的趋势(表 2)。从潜在沙漠化阶段(未沙漠化草地)到极度沙漠化阶段(流动沙地),物种多样性 Shannon-Wiener 指数由 1.55 下降到 0.18,物种均匀度指数由 0.50 下降到 0.26。从潜在沙漠化阶段到中度沙漠化阶段(半固定沙地),物种丰富度从 23 降至 13,下降了 77%;从中度沙漠化阶段到极度沙漠化,物种丰富度从 13 降至 2,说明植物物种数随着草地沙漠化程度的增加而下降。

表 2 不同沙漠化阶段草地植被群落特征

Table 2 Community characteristics of grasslands in different desertified stage

沙漠化阶段 Desertified stage	潜在沙漠化 CK	轻度沙漠化 LD	中度沙漠化 MD	重度沙漠化 SD	极度沙漠化 VSD
多样性指数 Shannon-Wiener index	1.55±0.67a	1.08±0.07a	1.50±0.45a	1.29±0.33a	0.18±0.18b
丰富度指数 Richness index	23.0±0.71a	12.0±3.54b	13.0±0.71b	9.0±1.41c	2.0±0.01d
均匀度指数 Evenness index	0.50±0.22ab	0.45±0.03ab	0.59±0.16a	0.59±0.19a	0.26±0.26b
盖度 Coverage/%	74.02±4.50a	71.75±2.90a	57.26±7.54b	43.74±4.99c	6.63±1.64d
优势种 Dominant species	牛枝子 (<i>Lespedeza potaninii</i>), 猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i> Walds), 中亚白草(<i>Pennisetum centrasiaticum</i>)	中亚白草 (<i>Pennisetum centrasiaticum</i>), 苦豆子(<i>Sophora alopecuroides</i>)	狗尾草 (<i>Utricularia australis</i>), 虫实(<i>Corispermum hyssopifolium</i>)	沙米 (<i>Agriophyllum squarrosum</i>) 赖草 (<i>Aneurolepidium dasystachys</i>), 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)	沙米 (<i>Agriophyllum squarrosum</i>)

同行不同字母表示不同沙漠化阶段间在 0.05 水平存在显著性差异

植被覆盖度及其变化是区域生态系统环境变化的重要指示特征。从潜在沙漠化阶段到极度沙漠化阶段,草地植被盖度由 74.02% 下降到 6.63%,且随着草地沙漠化程度的加剧,植被盖度变异性增大。潜在沙漠化阶段草地以牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia* Walds) 和中亚白草(*Pennisetum centrasiaticum*) 为优势种,轻度沙漠化主要以中亚白草和多年生草本豆科植物苦豆子(*Sophora alopecuroides*) 为优势种,中度沙漠化以上的草地则主要以一些耐旱的草本植物为主要优势种。

2.2 不同沙漠化阶段草地植物群落生物量变化特征

不同沙漠化阶段草地植物群落生物量变化显著 ($P < 0.05$) 潜在沙漠化阶段草地植物群落地上生物量、地

下和枯落物生物量均比轻度沙漠化阶段低(表3)。与潜在沙漠化阶段植物群落生物量相比较,中度、重度和极度沙漠化阶段草地植物群落生物量呈显著降低趋势($P < 0.05$),其中,地上生物量分别降低了20.92%、51.29%和94.43%,地下生物量分别降低了62.55%、64.25%和98.39%,枯落物生物量分别降低了38.74%、39.98%和96.74%。而且沙漠化使植物群落地下生物量的变化比地上生物量的变化趋势更加明显。潜在沙漠化阶段草地植被总生物量比轻度沙漠化阶段草地降低了23%,与潜在沙漠化阶段植物群落总生物量相比较,中度、重度和极度沙漠化阶段草地植物群落总生物量分别降低了47%、56%和97%,且随着草地沙漠化程度的加剧,群落生物量变异性逐渐增大。

表3 不同沙漠化阶段草地植物群落生物量变化特征

Table 3 Change of plant community biomass of grasslands in different desertified stage

生物量 Biomass	潜在沙漠化 CK	轻度沙漠化 LD	中度沙漠化 MD	重度沙漠化 SD	极度沙漠化 VSD
地上生物量/(g/m ²) Aboveground biomass	58.33±8.26b	79.41±8.78a	46.13±11.05c	28.41±1.37c	3.25±0.77d
地下生物量/(g/m ²) Belowground biomass	117.37±13.99b	155.58±69.11a	43.96±16.75c	41.96±22.27c	1.89±0.96d
枯落物生物量/(g/m ²) Litter biomass	41.12±2.35b	45.04±3.95a	25.19±2.25c	24.68±0.86c	1.34±1.41d
总生物量/(g/m ²) Total biomass	216.82±19.90b	280.03±73.94a	115.28±30.04c	95.05±22.78c	6.48±0.19d

同行不同字母表示不同沙漠化阶段间在0.05水平存在显著性差异

2.3 不同沙漠化阶段草地土壤水分及其垂直分布特征

随着草地沙漠化程度的加剧,0—40 cm土壤含水量呈逐渐降低的趋势(图2)。轻度、中度、重度和极度沙漠化阶段草地0—40 cm土壤含水量比潜在沙漠化阶段草地分别下降了7.03%、25.27%、28.20%和28.21%。但是中度、重度和极度沙漠化阶段0—40 cm土壤含水量的差异不显著($P > 0.05$)。

随着土层深度的增加,不同沙漠化阶段草地土壤含水量变化均显著增加($P < 0.05$,图2),且随着土层深度的增加土壤含水量呈逐渐增加的趋势。随着草地沙漠化程度的加剧,不同沙漠化阶段草地10—20、20—30和30—40 cm土壤含水量均呈降低趋势,0—10 cm土壤含水量呈先降低后增加趋势,在重度沙漠化阶段达到最小值,极度沙漠化阶段草地0—10 cm土壤含水量比重度沙漠化阶段增加了9.85%,但其差异不显著($P > 0.05$)。

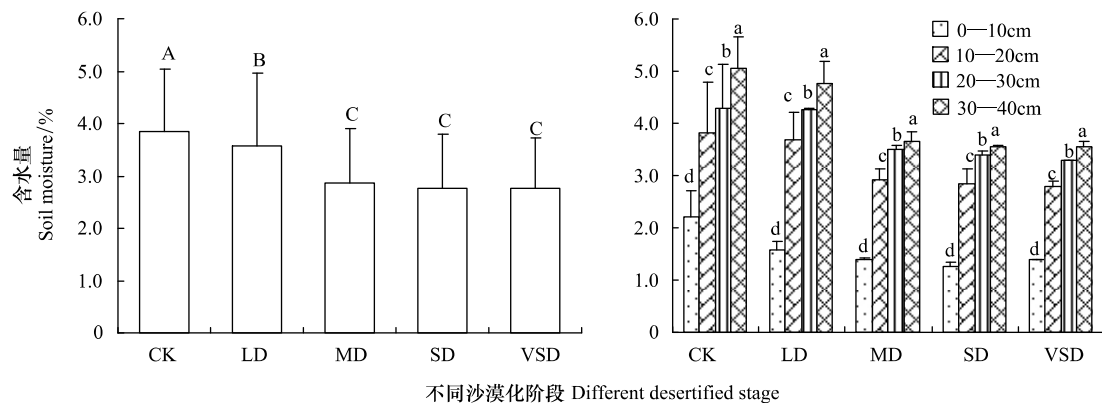


图2 不同沙漠化阶段草地土壤含水量及其垂直分布特征

Fig.2 Changes and vertical distribution of soil moisture in different desertified stage

不同大写字母表示不同沙漠化阶段间在0.05水平差异显著,不同小写字母表示不同土壤层次间在0.05水平差异显著

2.4 不同沙漠化阶段草地土壤容重与机械组成变化特征

不同沙漠化阶段草地土壤容重和机械组成差异显著 ($P < 0.05$, 图 3, 表 4)。随着草地沙漠化程度的加剧, 轻度、中度、重度和极度沙漠化阶段草地土壤容重比潜在沙漠化草地分别增加了 1.30%、3.58%、4.23% 和 4.68%。潜在、轻度、中度沙漠化阶段草地 0—40 cm 土壤容重均与重度沙漠化和极度沙漠化阶段差异显著 ($P < 0.05$), 而重度和极度沙漠化阶段草地 0—40 cm 土壤容重差异不显著 ($P > 0.05$)。随着草地沙漠化程度的加剧, 轻度、中度、重度和极度沙漠化阶段草地土壤粗砂粒含量比潜在沙漠化阶段草地分别增加了 4.07%、30.85%、35.40% 和 40.36%, 而细砂粒和黏粉粒的含量分别减少了 5.43%、47.10%、54.45%、62.54% 和 20.76%、80.28%、89.27%、94.81% (表 4)。

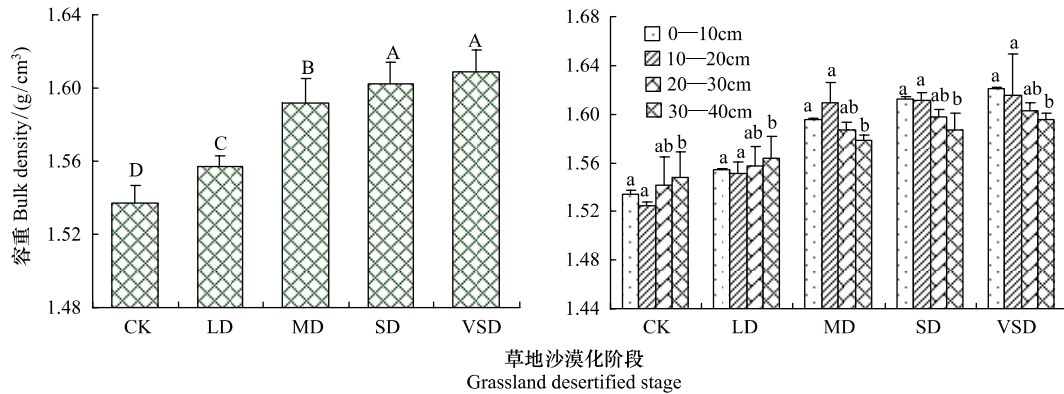


图 3 不同沙漠化阶段草地土壤容重变化及其垂直分布特征

Fig.3 Changes and vertical distribution of soil bulk density in different desertified stage

不同大写字母表示不同沙漠化阶段间在 0.05 水平差异显著, 不同小写字母表示不同土壤层次间在 0.05 水平差异显著

随着土层深度的增加, 不同沙漠化阶段草地土壤容重变化规律不同 (图 3)。潜在沙漠化和轻度沙漠化阶段草地土壤容重随着土层深度的增加呈先降低后增加趋势, 10—20 cm 土壤容重小于其它土层。重度沙漠化和极度沙漠化阶段草地土壤容重随着土层深度的增加呈降低趋势, 30—40 cm 土层土壤容重与其它土层差异显著 ($P < 0.05$)。随着土层深度的增加, 潜在沙漠化、轻度沙漠化阶段草地土壤粗砂粒含量均呈逐渐增加的趋势, 而土壤细砂粒和黏粉粒呈显著降低的趋势 ($P < 0.05$, 表 4), 中度、重度和极度沙漠化阶段草地土壤粗砂粒含量呈先增加后降低趋势, 而土壤细砂粒和黏粉粒呈先降低后增加趋势。

表 4 不同沙漠化阶段草地土壤机械组成的变化

Table 4 Changes of soil particle size distribution in different desertified stage

沙漠化阶段 Desertified stage	土层深度/cm Soil depth	机械组成 Soil particle size/%		
		粗砂粒 (2—0.1mm) Coarse sand	细砂粒 (0.1—0.05mm) Fine sand	黏粉粒 (<0.05mm) Clay+silt
潜在沙漠化 CK	0—10	54.47±1.96Ec	41.14±2.19Aa	4.39±0.25Aa
	10—20	60.35±6.58Eb	36.83±5.81Ab	2.82±0.78Ab
	20—30	64.69±2.61Ea	33.05±2.83Ac	2.26±0.22Ac
	30—40	67.38±4.26Ea	30.52±4.07Ad	2.10±0.19Ac
轻度沙漠化 LD	0—40	61.72±5.64E	35.39±4.63A	2.89±1.04A
	0—10	57.19±1.56Dc	39.73±1.10Aa	3.08±0.47Ba
	10—20	60.83±1.22Db	36.54±0.93Ab	2.62±0.31Bb
	20—30	67.39±1.72Da	30.68±1.56Ac	1.93±0.16Bc
	30—40	71.52±0.81Da	26.94±0.92Ad	1.54±0.11Bc
	0—40	64.23±6.44D	33.47±5.75A	2.29±0.69B

续表

沙漠化阶段 Desertified stage	土层深度/cm Soil depth	机械组成 Soil particle size/%		
		粗砂粒 (2—0.1mm) Coarse sand	细砂粒 (0.1—0.05mm) Fine sand	黏粉粒 (<0.05mm) Clay+silt
中度沙漠化 MD	0—10	78.87±1.75Cc	20.40±1.44Ba	0.73±0.33Ca
	10—20	81.26±1.19Cb	18.28±1.34Bb	0.47±0.15Cb
	20—30	81.97±0.65Ca	17.64±0.81Bc	0.39±0.16Cc
	30—40	80.94±1.13Ca	18.54±0.87Bd	0.52±0.26Cc
重度沙漠化 SD	0—40	80.76±1.33C	18.72±1.19B	0.57±0.14C
	0—10	80.40±2.37Bc	19.16±2.16Ca	0.45±0.21Da
	10—20	83.44±2.54Bb	16.25±2.52Cb	0.31±0.03Db
	20—30	85.46±1.51Ba	14.30±1.54Cc	0.23±0.04Dc
极度沙漠化 VSD	30—40	84.99±3.32Ba	14.75±3.33Cd	0.26±0.00Dc
	0—40	83.57±2.28B	16.12±2.19C	0.31±0.10D
	0—10	86.29±0.05Ac	13.52±0.15Da	0.19±0.04Ea
	10—20	87.28±0.47Ab	12.59±0.47Db	0.13±0.01Eb
	20—30	86.27±0.49Aa	13.59±0.47Dc	0.14±0.01Ec
	30—40	86.68±0.21Aa	13.18±0.21Dd	0.15±0.01Ec
	0—40	86.63±0.47A	13.22±0.46D	0.15±0.03E

小写字母表示不同土层间在 0.05 水平上差异性, 大写字母表示不同沙漠化阶段间在 0.05 水平上差异性

2.5 不同沙漠化阶段草地植物群落特征与土壤物理特性的相关性

植物群落特征与土壤物理特性的相关性分析如表 5。其中, 土壤含水量、细砂粒和黏粉粒均与物种丰富度指数、植被盖度、植被地上、地下、枯落物生物量极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤容重和粗砂粒均与物种丰富度指数、植被盖度、植被地上、地下、枯落物生物量、土壤含水量、细砂粒、黏粉粒极显著负相关 ($P < 0.01$)。

3 讨论

草地在沙化演替过程中, 植被结构与功能退化最为直观和敏感。植被特征的变化是沙漠化程度的一种重要指征, 也是沙漠化导致的草地生态系统功能改变的主要测度^[5]。本研究中, 随着草地沙漠化程度的加剧, 群落结构由复杂逐渐趋于简单, 均匀度降低, 植被盖度逐渐减小, 群落优势种种类逐渐趋向单一, 且随着草地沙化程度的发展优良牧草的种类及产量逐渐降低, 原因是在干旱、半干旱的荒漠草原生态系统中, 环境的严酷性决定了该系统的脆弱性和不稳定性, 使其植被成为沙漠化地区最活跃、最重要的生态单元。沙漠化过程中不同沙漠化阶段对应着适合本生境的典型群落类型, 每一群落优势种的作用明显, 不同类型、强度和频度的干扰对植物群落数量和分布格局以及群落的结构和功能都有不同程度的影响^[14-15], 且固定沙丘(地)的活化和流沙扩展, 风蚀、水蚀交替作用而造成的土壤流失和地表组成物质粗化等均影响群落类型和特征的演变过程^[13]。草地植被生产力是草地生态系统结构和功能的综合体现, 是植物生物学特性和外界环境条件共同作用的产物^[16], 草地群落生物量主要受气候变化特别是水分的影响^[17-23], 水分是影响植被生存、生长、发育最关键的因素, 对植被恢复或重建具有决定性作用^[16], 荒漠草原土壤水分含量与草地群落地上、地下、枯落物生物量均显著正相关, 潜在沙漠化草地土壤水分条件相对较好, 适合植被生长, 致使潜在沙漠化草地植被生物量较高, 随着沙漠化程度的加剧, 植物生长所需的水分条件变差, 植物生物量相应减小, 这与 Zhou 和朴起亨等人^[24-25]的研究结果基本一致, 但本研究中轻度沙漠化草地植被生物量比潜在沙漠化高 23%, 可能原因是该区轻度荒漠化草地是以生物量本身较大的苦豆子为优势种植物。

在干旱、半干旱地区, 以风蚀为主的土地沙漠化是土壤退化最严重的形式之一^[26]。土壤的退化首先改变土壤的紧实度, 并继而引发土壤水分等其它物理性质的变化^[27]。作为土壤紧实度的敏感指标, 土壤容重则是

表 5 植物群落特征与土壤物理特性的相关性

Table 5 The relationship between vegetation community and soil physical

项目 Item	丰富度指数 Richness index	均匀度指数 Evenness index	盖度 Coverage	地上生物量 Aboveground biomass	地下生物量 Belowground biomass	枯落物生物量 Litter biomass	土壤水分 Soil moisture	土壤容重 Bulk density	粗砂粒 Coarse sand	细砂粒 Fine sand	黏粉粒 Clay+silt
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	0.736 **	0.861 **	0.759 **	0.575 *	0.428	0.685 **	0.429	-0.403	-0.426	0.423	0.444
丰富度指数 Richness index	1	0.369	0.856 **	0.684 **	0.651 **	0.770 **	0.701 **	-0.812 **	-0.836 **	0.834 **	0.840 **
均匀度指数 Evenness index	1	1	0.450	0.311	0.163	0.420	0.142	-0.031	-0.060	0.057	0.088
盖度 Coverage	1	1	1	0.937 **	0.822 **	0.962 **	0.712 **	-0.807 **	-0.849 **	0.851 **	0.810 **
地上生物量 Aboveground biomass	1	1	1	1	0.923 **	0.939 **	0.721 **	-0.734 **	-0.837 **	0.839 **	0.801 **
地下生物量 Belowground biomass	1	1	1	1	1	0.865 **	0.761 **	-0.658 **	-0.834 **	0.831 **	0.851 **
枯落物生物量 Litter biomass	1	1	1	1	1	1	0.805 **	-0.790 **	-0.856 **	0.857 **	0.831 **
土壤水分 Soil moisture	1	1	1	1	1	1	1	-0.791 **	-0.894 **	0.888 **	0.927 **
土壤容重 Bulk density	1	1	1	1	1	1	1	1	0.944 **	-0.948 **	-0.895 **
粗砂粒 Coarse sand	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-1.000 **	-0.982 **
细砂粒 Fine sand	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.978 **
黏粉粒 Clay+silt	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

土壤水分、容重和机械组成表示 0-40 cm 平均值; ** 在 0.01 水平上显著相关; * 在 0.05 水平上显著相关; n=15

表征土壤质量的一个重要参数决定了水、气、热和养分在土壤中的蓄存能力和传输能力^[28-29]。本研究表明土壤容重随着草地沙漠化加剧而增大,土壤粗砂粒与土壤容重极显著正相关,而土壤细砂粒和黏粉粒均与土壤容重极显著负相关,这与赵哈林^[30]等人对呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制的研究结果一致。荒漠草原土壤颗粒结合松散,在草地沙化过程中风蚀能够有选择的吹蚀土壤中的细颗粒使土壤粗化导致土壤容重增大^[31]。本研究中随着草地沙漠化程度的加剧,土壤含水量降低,这与邱开阳^[8]等人对毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局的研究结果一致。土壤中粗砂粒含量和土壤容重的增加使土壤团粒结构丧失、土壤孔隙减小,渗透阻力增大^[32-33]。土壤水分直接影响草地生产力的高低,且含水量较低的土壤容易遭到侵蚀^[34]。因此,草地沙漠化在引起土壤结构遭到破坏的同时使土壤含水量降低,最终导致草地生产力降低。

4 结论

宁夏中北部荒漠草原沙漠化对植物群落特征和土壤物理特性均有一定影响。随着草地沙漠化程度的加剧,植被群落生物量、均匀度、植被盖度降低,群落结构由复杂逐渐趋于简单。草地沙漠化造成土壤粗化使土壤容重增加,导致土壤水分含量随着草地沙漠化程度的增加而减小。因此,荒漠草原沙漠化可使土壤更加沙质化和干旱化,草地生产力明显降低。

参考文献(References):

- [1] 王宏,李晓兵,李霞,王丹丹. 中国北方草原对气候干旱的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 172-182.
- [2] 李晓兵,陈云浩,张云霞,范一大,周涛,谢锋. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254-261.
- [3] 吕子君,卢欣石,辛晓平. 中国北方草原沙化现状与趋势. 草地学报, 2005, 13(S1): 24-27.
- [4] 赵哈林,赵学勇,张铜会,周瑞莲. 沙漠化的生物过程及退化植被的恢复机理. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 李学斌,马琳,杨新国,宋乃平,许冬梅,谢应忠. 荒漠草原典型植物群落枯落物生态水文功能. 生态环境学报, 2011, 20(5): 834-838.
- [6] 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. 草业科学, 2011, 28(6): 1091-1094.
- [7] 陈玉福,董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. 植物生态学报, 2001, 25(3): 265-269.
- [8] 邱开阳,谢应忠,许冬梅,时项锋,齐拓野,刘丽丹,王东清. 毛乌素沙地南缘沙漠化临界区域土壤水分和植被空间格局. 生态学报, 2011, 31(10): 2697-2707.
- [9] Chen Y F, Yu F H, Dong M. Scale-dependent spatial heterogeneity of vegetation in Mu Us sandy land, a semi-arid area of China. *Plant Ecology*, 2002, 162(1): 135-142.
- [10] Ferreira J N, Bustamante M, Garcia-Montiel D C, Caylor K K, Davidson E A. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna. *Oecologia*, 2007, 153(2): 417-430.
- [11] 胡相明,程积民,万惠娥,赵艳云. 黄土丘陵区地形、土壤水分与草地的景观格局. 生态学报, 2006, 26(10): 3276-3285.
- [12] 王兴,宋乃平,杨新国,杨明秀,肖绪培. 放牧扰动下草地植物多样性对土壤因子的响应. 草业学报, 2013, 22(5): 27-36.
- [13] 丁国栋. 区域荒漠化评价中植被的指示性及盖度分级标准研究——以毛乌素沙区为例. 水土保持学报, 2004, 18(1): 158-160.
- [14] 左小安,赵学勇,赵哈林,郭轶瑞,李玉强,赵玉萍. 科尔沁沙地草地退化过程中的物种组成及功能多样性变化特征. 水土保持学报, 2006, 20(1): 181-185.
- [15] 李小双,彭明春,党承林. 植物自然更新研究进展. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2081-2088.
- [16] 王玉辉,周广胜. 内蒙古羊草草原植物群落地上初级生产力时间动态对降水变化的响应. 生态学报, 2004, 24(6): 1140-1145.
- [17] Fang J Y, Piao S L, Zhou L, Zhou L M, He J S, Wei F Y, Myneni R B, Tucker C J, Tan K. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21): 365-370.
- [18] Yang Y H, Fang J Y, Ma W H, Wang W. Relationship between variability in aboveground net primary production and precipitation in global grasslands. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(23): 285-295.
- [19] 方精云,杨元合,马文红,安尼瓦尔·买买提,沈海花. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
- [20] Briggs J M, Knapp A K. Interannual variability in primary production in tallgrass prairie: climate, soil moisture, topographic position, and fire as determinants of aboveground biomass. *American Journal of Botany*, 1995, 82(8): 1024-1030.
- [21] Fang J Y, Piao S L, Tang Z Y, Peng C H, Ji W. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science*, 2001, 293(5536): 1723.

- [22] Knapp A K ,Fay P A ,Blair J M ,Collins S L ,Smith M D ,Carlisle J D ,Harper C W ,Danner B T ,Lett M S ,McCarron J K. Rainfall variability , carbon cycling , and plant species diversity in a mesic grassland. *Science* ,2002 ,298(5601) : 2202–2205.
- [23] Sala O E ,Lauenroth W K ,Burke I. Carbon budgets of temperate grasslands and the effects of global change // Breymer A I ,Hall D O ,Melillo J M , eds. *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. Chichester ,UK: John Wiley & Sons Ltd ,1996.
- [24] Zhou R L ,Li Y Q ,Zhao H L ,Drake S. Desertification effects on C and N content of sandy soils under grassland in Horqin , northern China. *Geoderma* ,2008 ,145(3/4) : 370–375.
- [25] 朴起亨,丁国栋,吴斌,屈志强,万勤琴,朴律镇. 呼伦贝尔沙地植被演替规律研究. *水土保持学报*,2008 ,22(6) : 180–186.
- [26] 苏永中,赵哈林,张铜会,李玉霖. 科尔沁沙地旱作农田土壤退化的过程和特征. *水土保持学报*,2002 ,16(1) : 25–28.
- [27] Kainer K A ,Duryea M L ,Costa de Macedo N ,Williams K. Brazil nut seedling establishment and autecology in extractive reserves of Acre. *Brazil Ecological Application* ,1998 ,8(2) : 3971–410.
- [28] 贾树海,崔学明,李绍良,陈有君,王芳玖. 牧压梯度上土壤物理性质的变化 // 中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站. *草原生态系统研究(第 5 集)*. 北京: 科学出版社,1997: 12–16.
- [29] Acosta-Martínez V ,Reicher Z ,Bischoff M ,Turco R F. The role of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biology and Fertility of Soils* ,1999 ,29(1) : 55–61.
- [30] 赵哈林,周瑞莲,赵学勇,张铜会,王进. 呼伦贝尔沙质草地土壤理化特性的沙漠化演变规律及机制. *草业学报*,2012 ,21(2) : 1–7.
- [31] Dong Z B ,Wang X M ,Liu L Y. Wind erosion in arid and semiarid China: an overview. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2000 ,55(4) : 439–444.
- [32] 马履一,翟明普,王勇. 京西山地棕壤和淋溶褐土饱和和导水率的分析. *林业科学*,1999 ,35(3) : 109–112.
- [33] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响. *自然资源学报*,2003 ,18(5) : 529–535.
- [34] Faraggitaki M A. Desertification by heavy grazing in Greece: the case of Lesvos island. *Journal of Arid Environments* ,1985 ,9: 237–242.