吉兰泰盐湖周边不同沙化程度植被群落与土壤养分特征研究

徐 涛[1]，蒙仲举[1]，斯庆毕力格[2]，刘雅婧[1]，吴小龙[1]，郭 彧[1]，通旭芳[1]，万 芳[1]

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院，呼和浩特 010018；2.鄂尔多斯市林业局，内蒙古 鄂尔多斯 017400)

摘要：选取吉兰泰盐湖周边 4 种不同程度的沙化土壤，对其植被群落特征与土壤养分含量进行测定，分析不同沙化程度植被群落特征、土壤养分含量垂直分布特征以及植被群落与土壤养分含量之间的相关性。结果表明：(1)随着沙化程度的加剧，Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数与 Margalef 丰富度指数均不断下降，植被群落结构趋于简单化；(2)随着沙化程度的加剧，土壤有机质与速效养分含量总体呈降低趋势；(3)土壤有机质、速效磷、速效钾均与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著正相关；碱解氮与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关。对不同沙化程度植被群落特征和土壤养分的研究为吉兰泰盐湖区天然植被恢复与重建及盐湖保产、高产提供科学依据。

关键词：吉兰泰盐湖；不同沙化程度；植被群落；土壤养分；相关性

中图分类号：S718.54^{+}2；S152.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2018)04-0095-06

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.015

Vegetation Community and Soil Nutrient Characteristics of the Regions with Different Desertification Degrees Around the Jartai Saline Lake

XU Tao[1], MENG Zhongju[1], Siqingbilige[2], LIU Yajing[1],

WU Xiaolong[1], GUO Yu[1], TONG Xufang[1], WAN Fang[1]

(1. *Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018;

2. *Forestry Bureau in Ordos City, Ordos, Inner Mongolia* 017400)

Abstract: The characteristics of vegetation community and soil nutrient content were measured by 4 different degrees of desertification around the Saline Lake of Jartai. The characteristics of vegetation communities, vertical distribution characteristics of soil nutrient contents and correlation between vegetation communities and soil nutrient contents were analyzed. The results showed that: (1) With the intensification of desertification, Shannon-Wiener diversity index, Simpson dominance index and Margalef richness index decrease, and vegetation community structure tends to be simplified. (2) With the intensification of desertification, the content of soil organic matter and available nutrients decreased in general. (3) Soil organic matter, available phosphorus and available potassium all had significant positive correlations with Shannon-Wiener diversity index, and there was a significant negative correlation between available potassium and Pielou evenness index. There was a significant positive correlation between alkali hydrolyzed nitrogen and Margalef richness index. The study of vegetation characteristics and soil nutrients in different desertification degree provides scientific basis for the restoration and reconstruction of natural vegetation and in Saline Lake area of Jartai and high-yield of Saline Lake.

Keywords: Jartai Saline Lake; different desertification degree; vegetation community; soil nutrients; correlation

植被是土壤—植被系统中十分重要的因素，具有拦蓄降雨、改良土壤、防止侵蚀和改善生态环境等作用[1]。土壤为植被提供生长所需养分的同时，植被反过来保护土壤，防止土壤肥力流失，两者相互制约，相互依存。植被破坏，土壤生态环境也就遭到破坏，还可能造成灾难性的环境变化，而植被的恢复又反作用于土壤，对土壤结构、养分状况进行反馈调节[2]。吉兰泰盐湖位于内蒙古自治区阿拉善盟境内，是我国西北荒漠区重要的盐湖生产基地，盐湖开采量居全国之首[3]。然而，近年来，风沙活动日益加剧，盐湖周边原有植被破坏异常严重，残存的荒漠盐生植被稀疏，盐沼光裸，致使灌丛沙丘向流动沙丘转化[3]。现如今，盐湖面临沙漠侵覆威胁与严重沙害问题，已引起人们的广泛关注。

植被与土壤是生态学研究的重点领域[4]，关于植被特征和土壤特性已开展了大量研究工作。张继义

收稿日期：2018-03-06

资助项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0501003)

第一作者：徐涛(1992—)，女，在读硕士研究生，主要从事水土与荒漠化防治研究。E-mail：943347034@qq.com

通信作者：蒙仲举(1980—)，男，副教授，硕士生导师，主要从事水土与荒漠化防治研究。E-mail：mengzhongju@126.com

等[5]研究了科尔沁沙地不同植被恢复阶段群落多样性变化，即随着群落演替的进行，物种多样性、均匀度增加，优势度下降，当演替达到一定程度后，群落趋于稳定；左小安等[6]对科尔沁沙地不同恢复年限退化植被群落组成及其物种多样性变化的研究表明，随着沙丘的固定和封育年限的增加，植被盖度、丰富度和物种多样性均不断增加，优势度逐渐减小；聂素梅等[7]通过野外实地定位观测的方法，对库布齐沙漠植被特征与土壤营养状况进行研究，结果表明，土壤养分与盖度相互影响，相互制约，即土壤养分含量随植被盖度、丰富度的升高而升高；李文斌等[1]通过对陕北风沙区不同植被覆盖下土壤特征变化的研究发现，植被经过的长期积累与演变，土壤中速效磷、速效钾和有机质含量均随着土层深度的增加而降低。

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。但荒漠盐湖区作为重要的生态系统单元，目前就荒漠盐湖区植被分布格局与土壤养分的协同关系及其变异规律亟待进一步研究。因此，本文以吉兰泰盐湖区为研究对象，对该区典型天然植被群落进行调查，并分析其多样性、均匀度、优势度、丰富度及覆盖度等指标，研究不同沙化程度植被群落特征与土壤养分变化，并对两者之间的相关性进行探究，旨在从植被、土壤及其耦合特征的角度了解吉兰泰盐湖区天然植被群落特征的演变及演变过程中与土壤养分的响应机制[8]，以期为该地区植被恢复与重建提供科学依据。

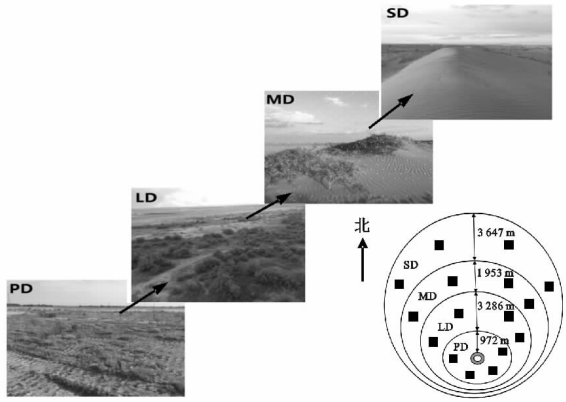
1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古阿拉善盟吉兰泰盐湖区(39°46′59″N，105°37′31″E)，海拔 1 030～1 474 m，坡度2.2°～3.0°；属温带大陆性干旱季风气候，年平均降水量 109.9 mm，且年内分布极度不均，多集中在7—9 月，多年平均蒸发量 3 005.2 mm。该地区风沙活动频繁，主害风为西北风，多年平均扬沙日数＞30 d。常见植被主要以沙生荒漠植被和盐生植被为主，有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula*)、芦苇(*Phragmites australis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙米(*Agriophyllum pungens*)等。该地区盐矿资源十分丰富，开发经济潜在优势较大。

1.2 样地选择与样品采集

由于气候条件恶劣与人为过度樵采放牧，致使盐湖周边同一地貌类型经过长期分化和演变呈现出不同梯度沙化景观，主要以风沙土为主。于 2017 年7—8 月植被生长高峰期，植被调查从盐湖周边开始，按照垂直于盐湖的地形梯度选择典型沙化程度，依次为：PD(潜在沙化)、LD(轻度沙化)、MD(中度沙化)、SD(重度沙化)。4 种沙化程度处于一条直线上，其自然条件也基本相同(图 1)。



注：● 盐湖；■ 样方；PD潜在沙化；LD轻度沙化；MD中度沙化；SD重度沙化。

图 1 沙化程度演替过程及取样位置示意

在上述样地内选取长势均匀的植被群落分别布设 4 个 10 m×10 m 的样方，调查灌木的种类、数量、株高、冠幅和密度等；并在灌木样方内随机设置 3 个 1 m×1 m 草本样方，调查样方内草本植物名称、种类组成、盖度、多度和频度等指标。土壤取样与植被调查同步进行，完成地上植被群落调查后，在相应位置挖取土壤剖面，用环刀分别采集 0—5，5—10，10—20，20—30 cm 层深度的土壤样品，重复 3 次；将所采土壤样品装入土壤密封袋带回实验室风干，然后磨细，分别过 1，0.2 mm 筛后保存，随后进行土壤化学性质分析。根据当地实际情况，参照赵哈林等[9]将样地划分见表 1。

表 1 沙化程度划分标准

沙化程度	主要物种	植被盖度/%	地表情况
PD	植被密集分布，以芦苇(*Phragmites australis*)、沙米(*Agriophyllum pungens*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等植被为主	＞60	大量盐结皮，无流沙
LD	优势种为油蒿(*Artemisia ordosica*)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula*)、伴有沙鞭(*Psammochloa villosa*)等多年生草本植物	35～60	大量生物结皮，基本无流沙
MD	有大量白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛分布，伴有芦苇(*Phragmites australis*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)等一年生、多年生草本植物	10～35	以物理结皮为主，流沙面积 30%
SD	植被零星分布，主要植物为沙米(*Agriophyllum pungens*)	＜5	少量物理结皮，地表完全被流沙覆盖

1.3　研究方法

1.3.1　*重要值及群落多样性指数*　(1)重要值计算。

重要值=(相对高度+相对盖度+相对频度+相对多度)/4

(2)物种多样性计算。植被群落多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数进行分析,其计算公式为[10]:

①Shannon-Wiener 多样性指数:$SW=\sum P_i \ln P_i$ $(P_i=N_i/N)$

式中:N_i 为样方中第 i 种植物的重要值;N 为样方植物重要值总和。

②Simpson 优势度指数:$SP=1-\sum P_i^2$

③Margalef 丰富度指数:$R=(S-1)/\ln N$

④Pielou 均匀度指数:$J_{SW}=H/\ln S$

1.3.2　*土壤化学性质的测定*　土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤碱解氮含量采用碱解扩散法测定;土壤速效磷含量采用 $NaHCO_3$ 浸提—紫外分光光度计法测定;土壤速效钾含量采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度计法测定[11]。

1.4　数据与分析

利用 Excel 进行数据初步处理,采用 SPSS 22 软件最小显著差异法(LSD)对各样地植被的各项指标进行显著性检验,植被特征与养分各项指标采用 SAS 9.0 one-way ANOVA 方法进行单因素方差分析,并对其进行 Pearson 相关系数相关性分析,最后利用 Origin 9.2 进行数据作图分析。

2　结果与分析

2.1　不同沙化程度植被多样性及盖度变化特征

由表 2 可知,研究区不同沙化程度 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数与 Margalef 丰富度指数均呈中度沙化>轻度沙化>潜在沙化>重度沙化。从潜在沙化到重度沙化,Shannon-Wiener 多样性指数由 1.37 下降到 0.22,整体下降了 84%;物种丰富度由 1.02 下降到 0.46,下降了 55%。从中度沙化到重度沙化,物种丰富度由 1.22 降至0.46,说明植物物种数随沙化程度的加剧而降低;而均匀度指数随沙化程度的加剧而增大。

表 2　不同沙化程度植被群落特征

沙化程度	多样性指数	优势度指数	丰富度指数	均匀度指数	植被盖度/%	优势种
PD	1.37±0.24a	0.58±0.25a	1.02±0.27a	0.85±0.50a	64.02±3.50a	芦苇(*Phragmites australis*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)
LD	1.42±0.21a	0.66±0.11b	1.38±0.10a	0.89±0.26b	56.75±2.43a	油蒿(*Artemisia ordosica*)、苦马豆(*Sphaerophysasalsula*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)
MD	1.43±0.84a	0.73±0.18a	1.22±0.08a	0.92±0.27a	32.26±6.54b	白刺(*Nitraria tangutorum*)、沙米(*Agriophyllum pungens*)
SD	0.22±0.01b	0.53±0.11ab	0.46±0.11b	1.03±0.42a	4.23±1.52d	沙米(*Agriophyllum pungens*)

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同字母表示不同沙化程度间在 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。从潜在沙化、轻度沙化、中度沙化到重度沙化,植被覆盖度均不断下降,由 64.02%下降至 4.23%,且重度沙化均与各沙化程度植被覆盖度差异显著($P<0.05$)。潜在沙化程度优势种为芦苇(*Phragmites australis*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*),轻度沙化优势种为油蒿(*Artemisia ordosica*)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*),随着沙化程度的加剧,具有耐旱、喜盐碱、抗风蚀、耐高温、耐瘠薄的荒漠植被白刺,沙米代替原有的建群种而成为新的先锋植物。

2.2　不同沙化程度土壤养分变化及垂直分布特征

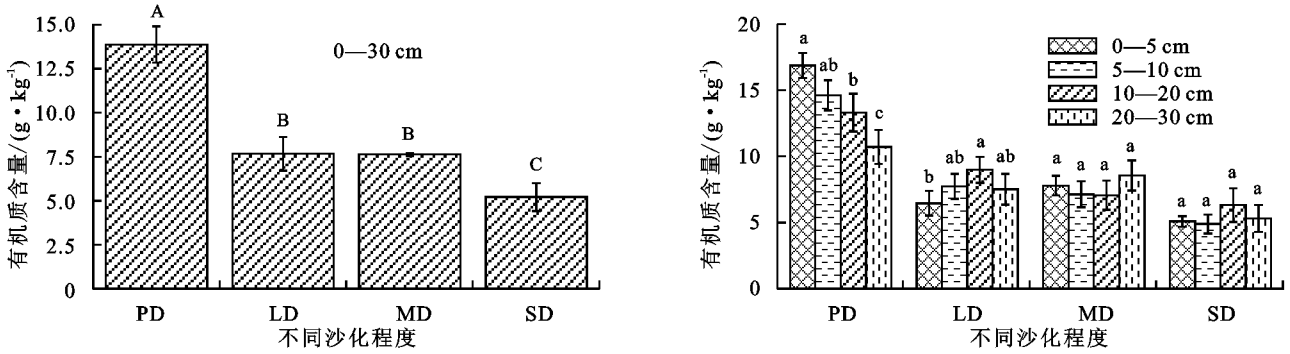
2.2.1　*有机质含量变化*　土壤有机质是植物养分循环的中心,也是土壤微生物必不可少的能源,有机质的积累与分解和土壤的可持续利用密切相关,有机质含量的多少,将反映土壤肥力水平的高低[12]。不同沙化程度 0—30 cm 土壤有机质含量均不断下降,轻度、中度、重度沙化土壤有机质含量比潜在沙化程度分别下降了 44.74%,45.03%和 62.46%,其中,轻度沙化与中度沙化土壤有机质含量差异不显著(图 2)。

从整个剖面来看,随着土层深度的增加,各沙化程度土壤有机质含量变化规律有所不同。潜在沙化土壤有机质含量随土层深度的增加而降低,且有机质含量在 0—5,10—20,20—30 cm 差异显著($P<0.05$);轻度沙化土壤有机质含量随土层的增加呈先增加后降低趋势,而中度沙化土壤有机质含量变化与之相反;重度沙化各土层有机质含量均小于其他沙化程度各土层含量,且重度沙化各土层间有机质含量差异不显著。

2.2.2　*碱解氮含量变化*　植被从土壤中摄取养分以氮素含量为主,而碱解氮含量的高低是土壤氮素供应状况与氮素释放速率的良好体现[13]。从图 3 可以看出,各沙化程度下 0—30 cm 层土壤碱解氮含量在轻

度沙化程度最高(6.94 mg/kg),潜在沙化程度最低(3.42 mg/kg),且两者之间差异显著($P<0.05$)。从轻度沙化到重度沙化,0—30 cm 层土壤碱解氮含量均不断下降。

从整个剖面来看,潜在沙化各土层碱解氮含量随着土层深度的增加而降低,轻度沙化各土层碱解氮含量随着土层深度的增加而增加。中度、重度沙化程度碱解氮含量均表现为 0—20 cm 减少,20—30 cm 增加。



注:不同大写字母表示不同沙化程度间在 0.05 水平差异显著,不同小字母表示不同土壤层次间在 0.05 水平差异显著,误差棒为平均值的标准误。下同。

图 2 不同沙化程度土壤有机质含量及其垂直分布特征

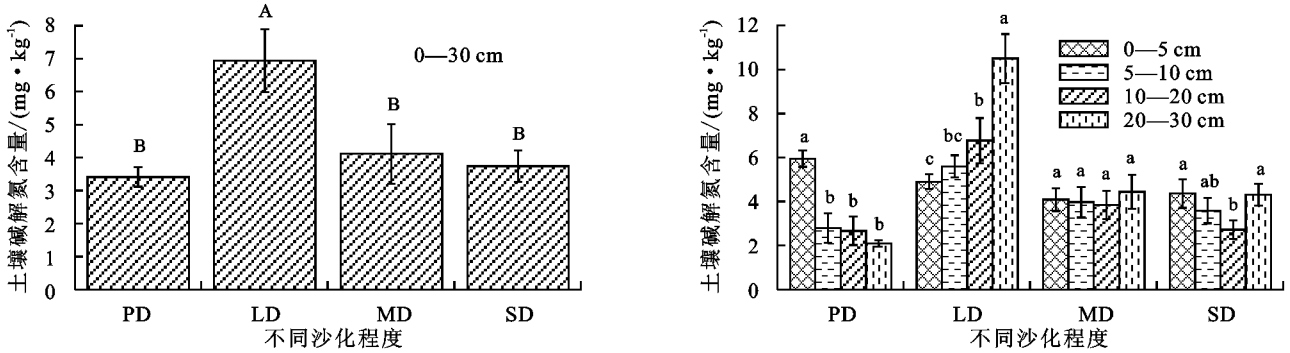


图 3 不同沙化程度土壤碱解氮含量及其垂直分布特征

2.2.3 速效磷含量变化 土壤中的磷素来自于成土母质,通过根系吸收进入植物体,再由凋落物回归到土壤中[14],而土壤速效磷是土壤中可直接被植物所吸收的磷部分,土壤速效磷含量的多少在一定程度反映了土壤中磷素的贮量和供应能力的高低[15]。由图 4 所示,潜在沙化 0—30 cm 层土壤速效磷含量最低,其值为 2.62 mg/kg,轻度沙化土壤速效磷含量较潜在沙化增加了 38.06%,且两者之间差异不显著。随着沙化程度的加剧,0—30 cm 层土壤速效磷含量趋于稳定。

从整个剖面来看,潜在沙化程度与中度沙化程度各土层速效磷含量随着土层深度的增加而降低,而重度沙化程度速效磷含量随着土层深度的增加而增加。轻度沙化 0—30 cm 层速效磷含量呈先增加后降低的趋势,且各土层间速效磷含量差异显著($P<0.05$)。

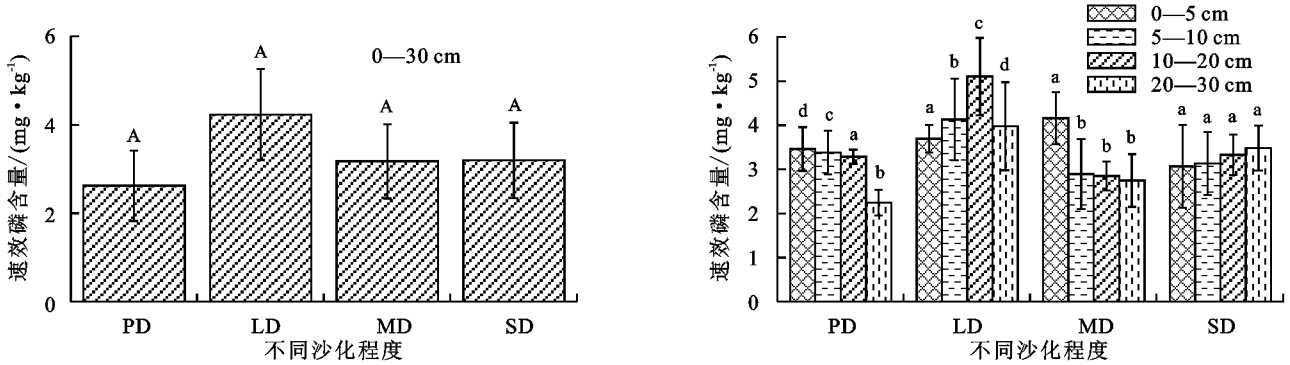


图 4 不同沙化程度土壤速效磷含量及其垂直分布特征

2.2.4 速效钾含量变化 土壤中的速效钾是衡量土壤钾元素养分供应能力的现实指标[16]。由图 5 所示,不同沙化程度 0—30 cm 土壤速效钾含量均不断下降,轻度、中度、重度沙化程度土壤速效钾含量分别较潜在沙化程度降低了 7.04%,20.18% 和 27.76%。

从整个剖面来看,潜在沙化程度土壤速效钾含量随土层深度的增加而降低,速效钾含量在 0—5 cm 层达到最高,其值为 866.43 mg/kg,且 0—5 cm 层速效

钾含量均与 5—10,10—20,20—30 cm 速效钾含量差异显著($P<0.05$)。而在轻度、中度与重度沙化程度中,土壤速效钾含量随土层深度的增加而增加,且重度沙化各土层间土壤速效钾含量差异不显著。

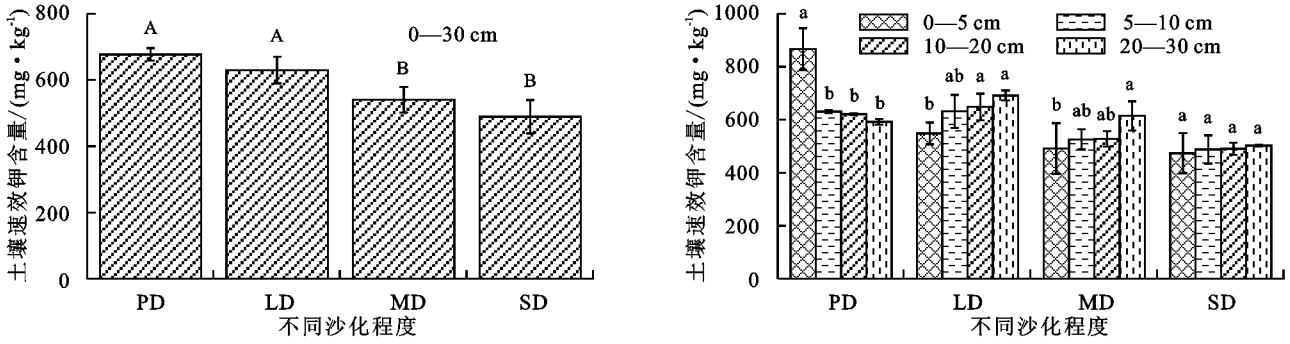


图 5　不同沙化程度土壤速效钾含量及其垂直分布特征

2.3　植被群落特征与土壤养分相关性研究

土壤养分与植被情况是一种双向互动的关系,土壤养分含量的变化会制约植被的生长,反过来植被生长发育会在一定程度上影响土壤养分的改良、固定、转化,因而两者之间存在不同程度的线性关系。从表 3 可以看出,土壤有机质与 Shannon-Wiener 多样性指数呈极显著正相关,与 Margalef 丰富度指数、覆盖度呈显著正相关,相关系数分别为 0.962,0.938,0.915,表明随着植被覆盖度的增加,植物生长产生的枯枝落叶和根系腐解物在土壤中积累、矿化,进而促进土壤中难溶性物质进行有效转化,最终使土壤中的有机质含量增加,反过来又促进植被的生长。碱解氮与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关,表明碱解氮含量与 Margalef 丰富度指数的关系较为密切,这可能由于研究区氮素含量缺乏,土壤距盐湖较近而整体偏碱性,使生长在该地区的植物朝向氮素含量高和耐盐碱的生态适应方向生长。速效磷与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著正相关;速效钾与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著正相关、与 Pielou 均匀度指数呈显著负相关;而其他相关性不显著。综上所述,土壤养分的差异会导致群落物种多样性变化。

表 3　植被群落特征与土壤养分的相关关系

土壤养分	多样性指数 SW	优势度指数 SP	丰富度指数 R	均匀度指数 Jsw	覆盖度
有机质	0.962**	0.372	0.938*	0.358	0.915*
碱解氮	0.366	0.685	0.928*	0.223	0.345
速效磷	0.985*	0.365	0.564	0.547	0.512
速效钾	0.974*	0.623	0.208	−0.893*	0.081

注:** 表示极显著相关($P<0.01$);* 表示显著相关($P<0.05$)。

3　讨 论

3.1　植被特征

植被是对自然条件敏感程度的最好标志,也是对某一地区生态环境变化的综合反映[5]。植被生长过程是植被对土壤环境不断适应的过程,而土壤养分则是植被生长重要驱动力之一[11]。植被生长发育受土壤养分条件制约,土壤养分的差异会导致群落物种多样性变化[17]。已有研究表明,荒漠植被群落物种多样性水平普遍较低,且群落结构简单,物种组成稀少。本研究对吉兰泰盐湖区不同沙化程度植被调查表明,由潜在沙化、轻度沙化、中度沙化到重度沙化,植被群落多样性指数呈先增加后降低趋势,且植被群落物种多样性指数介于 0.22～1.43,这与张锦春等[18]的研究结果相一致。4 种沙化程度 Simpson 优势度指数为 0.53～0.73,与王蒙等[19]在巴丹吉林沙漠周边对物种多样性的研究所一致。就植被群落而言,多样性指数随均匀度的增加而增大,随优势度的升高而递减,即多样性指数越高,群落结构越复杂,组成群落植物种类越多,群落越稳定,反之亦然[20]。该研究区群落多样性指数、优势度指数、丰富度指数、均匀度指数均较低,且群落间均匀度指数相差不大。

3.2　土壤养分特征

土壤是整个生态系统中许多生态过程的载体和参与者,而沙漠化直接作用于土壤,土壤的变化,特别是土壤肥力的变化是沙漠化扩张或逆转的基本表征,而土壤速效养分的高低直接影响土壤供肥能力的大小,因此,速效养分亦可作为评价土壤肥力的重要指标[21]。土壤养分含量因不同沙化程度而有所差异。本试验结果表明,土壤碱解氮、速效磷含量整体表现为:轻度沙化>中度沙化>重度沙化>潜在沙化;土壤速效钾、有机质含量整体表现为:潜在沙化>轻度沙化>中度沙化>重度沙化。总体来说,随着沙化程度的加剧,土壤有机质与速效养分含量总体呈降低趋势,与苏永中等[22]研究结果基本一致。与此同时,本次野外观测还发现,研究区土壤速效钾含量均远远高于其他 3 种养分含量,4 种沙化程度土壤速效钾含量分别为 677.25,629.59,540.55,489.23 mg/kg,研究结果与刘谦等[23]在西北荒漠区土壤理化性质研究中指出我国西北地区土壤普遍不缺钾的观点所一致。而各沙化程度土壤有机质、速效磷、速效钾、碱解氮含

量的垂直波动变化与贾晓红等[24]在沙坡头固沙区得出 0—30 cm 土壤有机质、速效养分随土层深度的增加呈一定变化趋势的结果有所不同,究其原因可能与沙漠化的多次反复有关。

3.3 植被群落特征与土壤养分相互关系

植被与土壤特征是沙漠化正逆过程的一个表征,探讨植被群落特征与土壤养分之间的相互关系,对于荒漠植被恢复具有重要的指导意义[25]。在本研究范围内,土壤有机质与植被多样性指数、丰富度指数呈正相关,这与李新荣等[26]研究结果相一致,而与 Rosenzweig[27]研究结果有所差异。Rosenzweig 等[27]研究发现土壤有机质与物种多样性指数、丰富度指数均存在显著负相关关系。速效钾是最直接反映土壤供钾能力的指标,不仅影响植物群落的丰富度,而且还制约其均匀度。速效钾与植被多样性指数呈显著正相关,与均匀度指数呈显著负相关,这与王晓龙等[28]对巢湖低地土壤速效钾与均匀度指数呈现良好的正相关关系相冲突,导致这种差异的原因可能由于研究区域不同,气候条件、地形、土壤、降雨等因素对植被—土壤影响程度不同,且两者所挖取的土层深度不同而异。

4 结 论

(1)随着沙化程度的加剧,研究区植被覆盖度均不断降低,Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数与 Margalef 丰富度指数均呈中度沙化>轻度沙化>潜在沙化>重度沙化,群落结构趋于简单化。

(2)随着沙漠化程度的加剧,土壤有机质与速效养分含量总体呈降低趋势。土壤碱解氮、速效磷含量整体表现为:轻度沙化>中度沙化>重度沙化>潜在沙化;土壤有机质、速效钾含量整体表现为:潜在沙化>轻度沙化>中度沙化>重度沙化。

(3)土壤有机质、速效磷、速效钾均与 Shannon-Wiener 多样性指数呈显著正相关;碱解氮与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关。

吉兰泰盐湖区不同沙化程度对植被群落特征和土壤养分均具有一定影响。建议在今后的研究中,重点对天然植被群落保护和开发利用技术进行研究,寻找有利于植被恢复的有效手段,在围栏封育的同时对研究区植被的自然恢复提供人为的辅助措施,从而有效控制流沙入侵盐湖,提高该地区盐矿资源的经济效益。

参考文献:

[1] 李文斌,李新平. 陕北风沙区不同植被覆盖下的土壤养分特征[J]. 生态学报,2012,32(22):6991-6999.

[2] 刘加珍,陈亚宁,陈永金,等. 荒漠河岸生态系统退化机理的定量分析[J]. 生态环境学报,2010,19(1):131-139.

[3] 郝清华. 吉兰泰盐湖周边地区不同植被恢复方式效果研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.

[4] 江仁涛,李富程,沈淞涛. 不同年限红柳恢复川西北高寒沙地对土壤团聚体和有机碳的影响[J]. 水土保持学报,2018,32(1):197-203.

[5] 张继义,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地植被恢复系列上群落演替与物种多样性的恢复动态[J]. 植物生态学报,2004,28(1):86-92.

[6] 左小安,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性[J]. 草业学报,2009,18(4):9-16.

[7] 聂素梅,高丽,闫志坚. 库布齐沙漠植被特征与土壤营养状况的研究[J]. 草业科学,2010,27(8):23-28.

[8] 李少华,高琪,王学全,等. 光伏电厂干扰下高寒荒漠草原区植被和土壤变化特征[J]. 水土保持学报,2016,30(6):325-329.

[9] 赵哈林,周瑞莲,赵学勇,等. 科尔沁沙地沙漠化正、逆过程的地面判别方法[J]. 中国沙漠,2008,28(1):8-15.

[10] 李胜平,王克林. 桂西北喀斯特山地草地土壤养分季节变化规律及其对植被多样性的响应[J]. 水土保持学报,2016,30(4):199-205.

[11] 张鹏,包雪莲,张玉龙,等. 水钾耦合对褐土养分及花生养分累积的影响[J]. 水土保持学报,2017,31(2):272-278.

[12] 吴才武,夏建新,段峥嵘. 土壤有机质测定方法述评与展望[J]. 土壤,2015,47(3):453-460.

[13] 于洋,赵业婷,常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. 土壤学报,2015,52(6):1251-1261.

[14] 梁佳辉,张少良,穆林林,等. 东北典型黑土区坡面土壤速效磷空间分布规律[J]. 水土保持研究,2017,24(1):90-95,102.

[15] 王长庭,王根绪,刘伟,等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(9):160-165.

[16] 赵业婷,李志鹏,常庆瑞,等. 西安市粮食主产区耕层土壤速效养分空间特征[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(6):1376-1385.

[17] 杨丽霞,陈少锋,安娟娟,等. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究[J]. 草地学报,2014,22(2):291-298.

[18] 张锦春,王继和,赵明,等. 库姆塔格沙漠南缘荒漠植物群落多样性分析[J]. 植物生态学报,2006,30(3):375-382.

[19] 王蒙,董治宝,逯军峰,等. 巴丹吉林沙漠周边植被特征和物种多样性[J]. 中国沙漠,2015,35(5):1226-1233.

[20] 周兰萍,纪永福,李亚,等. 腾格里沙漠东南缘绿洲荒漠过渡带天然群落结构特征及其多样性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(19):80-84.

[21] 靳虎甲,王继和,李毅,等. 腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤化学性质变化特征[J]. 水土保持学报,2008,22(5):119-124.

(下转第 108 页)

[14] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等.汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J].地理学报,2017,72(2):279-291.

[15] 李小妹,严平,吴伟,等.克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J].地理科学,2016,36(8):1269-1276.

[16] 梁丽,师育新,戴雪荣,等.苏州澄湖湖底硬粘土地球化学特征及其成因意义[J].地球与环境,2010,38(4):449-455.

[17] 魏志强,钟巍,陈永强,等.亚热带季风区湖沼流域表生地球化学元素研究:以江西定南大湖为例[J].地理科学进展,2015,34(7):909-917.

[18] 颜永毫,周杰,何忠,等.3 万年来卤阳湖沉积物地球化学元素变化特征及其环境意义[J].水土保持学报,2016,30(3):208-212,219.

[19] 罗万银,董治宝,钱广强,等.戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J].中国沙漠,2014,34(6):1441-1453.

[20] 龙黎,董玉祥,孙忠.海岸沙丘表面现代风成沙地球化学元素分异的典型研究:以河北昌黎黄金海岸横向沙脊为例[J].沉积学报,2012,30(4):724-730.

[21] 杨纫章.柴达木盆地托拉海河西地区的自然景观[J].地理学报,1959(6):422-434.

[22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: A study in the signification of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Petrology,1957,27:3-27.

[23] Taylor S R, McLennan S M. Continental crust: Its composition and evolution[M]. London: Blackwell,1985:277.

[24] 邵菁清,杨守业.化学蚀变指数(CIA)反映长江流域的硅酸盐岩化学风化与季风气候?[J].科学通报,2012,57(11):933-942.

[25] Muhs D R, Lancaster N, Skipp G L. A complex origin for the Kelso Dunes, Mojave National Preserve, California, USA: A case study using a simple geochemical method with global applications[J]. Geomorphology,2017,276:222-243.

(上接第 94 页)

[16] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: Coping with too many sources[J]. Oecologia,2003,136(2):261-269.

[17] Moore J W, Semmens B X. Incorporating uncertainty and prior information into stable isotope mixing models[J]. Ecology Letters,2008,11(5):470-480.

[18] 李玉山.黄土高原土壤水分性质及其分区[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1985,2:1-17.

[19] Ma J, Xiao X M, Bu R C, et al. Application of the space-for-time substitution method in validating long-term biomass predictions of a forest landscape model[J]. Environmental Modelling and Software,2017,94:127-139.

[20] 陈锡云,刘文兆.半干旱黄土丘陵区果园水分蒸散特征研究[J].水土保持学报,2000,14(3):67-71.

[21] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Seasonal variation in water uptake patterns of three plant species based on stable isotopes in the semi-arid Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment,2017,609:27-37.

[22] 程立平,刘文兆,李志.黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1977-1983.

[23] 王亮,郭小平,毕华兴,等.晋西地区不同树龄富士苹果树群体冠层结构特征研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(11):115-120.

(上接第 100 页)

[22] 苏永中,赵哈林.农田沙漠化过程中土壤有机碳和氮的衰减及其机理研究[J].中国农业科学,2003,36(8):928-934.

[23] 刘谦,陈亚宁,李卫红.干旱荒漠区新垦荒地的土壤理化状况研究[J].新疆农业科学,2007,44(3):318-321.

[24] 贾晓红,李新荣,王新平,等.流沙固定过程中土壤性质变异初步研究[J].水土保持学报,2003,17(4):46-50.

[25] 徐丽恒,王继和,李毅,等.腾格里沙漠南缘沙漠化逆转过程中的土壤物理性质变化特征[J].中国沙漠,2008,28(4):690-695.

[26] 李新荣,张景光,刘立超,等.我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J].植物生态学报,2000,24(3):251-257.

[27] Rosenzweig M L. Species diversity in space and time[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1995.

[28] 王晓龙,常龙飞,李恒鹏,等.巢湖低丘山区典型植被群落与土壤环境因子特征研究[J].土壤,2011,43(6):981-986.