

# 青藏高原典型沙化区草地土壤质量评价

刘文民<sup>1</sup>, 田鹏<sup>2</sup>, 刘利昆<sup>1</sup>, 赵广举<sup>1,3</sup>, 穆兴民<sup>1,3</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**为了探究青藏高原沙化区草地土壤质量变化,采用主成分分析法筛选具有代表性的土壤质量指标构建最小数据集,计算土壤质量指数 SQI(Soil Quality Index),评价了青藏高原海晏县、共和县、贵南县 3 个典型沙化区不同沙化程度下的土壤质量变化特征。结果表明:(1) 随着沙化程度的减弱,3 个典型沙化区草地的地上生物量均值由 0 增大至 $(0.8\pm0.18)\text{kg}/\text{m}^2$ ;土壤有机质、全氮、全钾、全磷、速效钾、速效磷、碱解氮等养分含量增大,土壤阳离子交换量(CEC)增大了 87.28%;土壤容重减小了 33.62%;(2) 3 个典型沙化区内不同沙化程度下,贵南县森多镇土壤质量最好,其次为共和县铁盖乡,海晏县三角城镇土壤质量最差;(3) 最小数据集与全数据集的土壤质量指数呈现极显著相关关系,表明采用最小数据集法代替全数据集法评价典型区沙化草地土壤质量是行之有效的。综上所述,沙化区草地的土壤质量随沙化程度的加剧逐渐降低,不同沙化区草地土壤质量存在空间差异性。

**关键词:**土壤质量评价; 土地沙化; 主成分分析; 土壤质量指数; 青藏高原

**中图分类号:**S152; S153; S158

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)02-0118-07

## Evaluation of Grassland Soil Quality in Typical Desertified Areas of Qinghai-Tibet Plateau

LIU Wenmin<sup>1</sup>, TIAN Peng<sup>2</sup>, LIU Likun<sup>1</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,3</sup>, MU Xingmin<sup>1,3</sup>

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

**Abstract:** In order to explore the changes of grassland soil quality in the desertification area of the Qinghai-Tibet Plateau, the principal component analysis method was used to screen the representative soil quality indexes, construct the minimum data set, calculate the soil quality index SQI (soil quality index), and evaluate the characteristics of soil quality changes under different degrees of desertification in three typical desertification areas of Haiyan County, Gonghe County and Guinan County of the Qinghai Tibet Plateau. The results show that: (1) with the decrease of desertification degree, the mean aboveground biomass of grassland in three typical desertification areas increased from 0 to  $(0.8\pm0.18)\text{kg}/\text{m}^2$ ; the contents of soil organic matter, total nitrogen, total potassium, total phosphorus, available potassium, available phosphorus and alkali hydrolyzable nitrogen increased, and the soil cation exchange capacity (CEC) increased by 87.28%; the soil bulk density decreased by 33.62%; (2) in the three typical desertification areas, under different desertification degrees, the soil quality in Senduo Town, Guinan County is the best, followed by Tiegai Township, Gonghe County, and the soil quality in Sanjiaocheng Town, Haiyan County is the worst; (3) there is a very significant correlation between the soil quality index of the minimum data set and the full data set, which shows that it is effective to use the minimum data set method instead of the full data set method to evaluate the soil quality of sandy grassland in typical areas. In conclusion, the soil quality of grassland in desertification areas gradually decreases with the aggravation of desertification degree, and there are spatial differences in soil quality of grassland in different desertification areas.

收稿日期:2021-02-25

修回日期:2021-03-27

资助项目:中国科学院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202)

第一作者:刘文民(1995—),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:Wenmin\_Liu@nwfau.edu.cn

通信作者:田鹏(1982—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,主要从事流域水文过程研究。E-mail:pengtian@nwsuaf.edu.cn

**Keywords:** soil quality evaluation; land desertification; principal component analysis; soil properties; Qinhai-Tibetan Plateau

土地沙漠化是土地退化的主要类型之一,导致土壤质量下降,生态环境恶化<sup>[1]</sup>。青藏高原被称为“世界屋脊”和“地球第三极”,既是我国乃至世界重要的生态安全屏障,也是我国江河源区重要的水源涵养地<sup>[1-2]</sup>。受气候变化与人类活动影响,青藏高原沙漠化土地呈现不断扩张趋势,威胁着青藏高原的“生态安全屏障”<sup>[2]</sup>。土壤质量决定着土壤的功能,是土壤物理、化学和生物等特性的综合反映。沙漠化是引起土壤物理、化学和生物指标降低的主要原因,其通过影响土壤物理水文特征、养分循环与利用和碳储存能力,从而影响土壤功能的发挥<sup>[3-4]</sup>。

为明确自然与人为因素对沙漠化进程的驱动,许多研究通过评价土壤质量的变化,从多个角度探索,尤其关注农田与草地沙化过程的土壤质量变化<sup>[3]</sup>。余卫等<sup>[5]</sup>运用主成分分析法(PCA)对青藏高原金露梅灌丛草甸进行了研究,发现微生物指标可作为表征金露梅灌丛土壤质量的生物学指标;张立欣等<sup>[6]</sup>探究了库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征,发现不同人工固沙灌木林的建植均能提高土壤养分和微生物量,沙漠化研究多集中在沙漠草原土壤理化性质、生物特性等方面。罗雅曦等<sup>[7]</sup>探究了宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量,发现流动沙地扎设草方格营造油蒿能在短期内提高风沙土壤综合质量,而其他造林方式固沙效果有限。已有研究依据土壤理化指标、土壤微生物及植被群落等指标探究了其在沙漠化过程中的变化,然而针对青藏高原土地沙漠化演变过程中的土壤质量特征与变化研究仍较少。

鉴于此,本文选取青海省3个县沙化地区5种不同沙化程度的草地,对比分析沙化过程中植被地上、地下生物量、土样容重、土壤机械组成(黏粒、粉粒、砂粒)、土壤养分(全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮)、CEC、pH值等指标特征,构建沙化区草地土壤质量评价指标体系,采用主成分分析法构建研究区沙化草地土壤质量评价的最小数据集(MDS),对典型沙化区5种不同沙化程度的草地土壤质量进行评价,以期对青藏高原制定相应的沙漠化防治策略提供理论支撑。

## 1 研究区概况

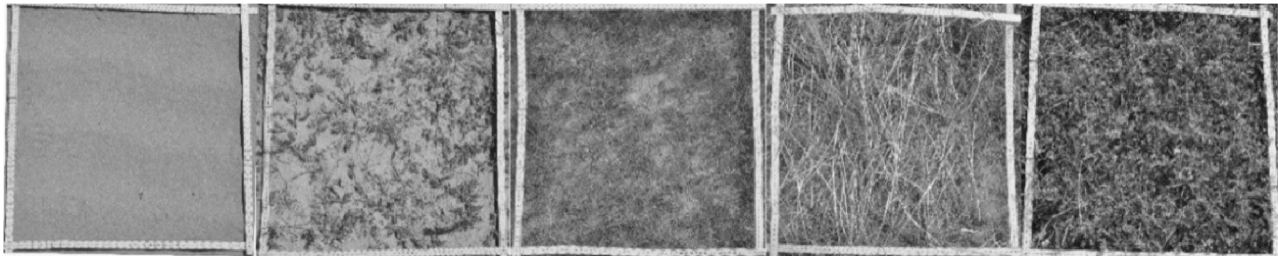
本研究选取海晏县三角城镇(36°75′89″—36°87′29″N, 100°78′31″—100°86′94″E)、贵南县森多镇(35°57′86″—35°59′33″N, 100°87′03″—100°89′14″E)、共和县铁盖乡(35°83′95″—35°84′03″N, 100°28′56″—

100°29′04″E)3个典型沙化区作为研究区。研究区位于青海省东北部平均海拔3 100~3 300 m,属高原大陆性气候。海晏县三角城镇多年平均气温在-0.8~0.6℃,平均年降水介于300~400 mm,全年蒸发量高达1 502 mm;贵南县森多镇多年平均气温为2.3℃,平均年降水量为403.8 mm,年平均蒸发量为1 378.5 mm;共和县铁盖乡年平均气温4.1℃,年均降水量为250~450 mm。海晏县三角城镇试验地植被类型主要为蒺藜(*Tribulus terrester*)、矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、草地老鹤草(*Geranium pratense*);贵南县森多镇试验地主要植被为:猪毛菜(*Salsola collina*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、香附子(*Cyperus rotundus*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*);共和县铁盖乡试验地主要植被为:芨芨草(*Achnatherum splendens*)、针茅(*Stipa capillata* Linn)、沙生苔草(*Carex praeclara* Nelmes)。研究区内生态环境脆弱,受自然和人为因素影响,草地沙化现象极为普遍,植被破坏严重,导致区内植被盖度差异显著。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验设计与样品采集

针对青藏高原沙化草地特征,结合前人对沙化类型和程度的划分方法<sup>[2,8]</sup>,将高寒草地沙化程度划分为5种类型(图1),即无沙化草地、轻度沙化草地、中度沙化草地、重度沙化草地和完全沙化土地,具体地表特征见表1。于2020年7月在典型区内以极重度沙化程度样地为中心,根据植被覆盖度划分样地,向周围发散确定每种沙化程度的采样点,并采集土壤样品。在典型沙化区内的不同沙化程度的草地设置3个1 m×1 m的样方,共计45个样方,将样方内植物齐地剪取,记录每个样方内优势种和种群数量、种群高度等,测定地上生物量;同时在各样方内用随机取样法,用土钻(直径8 cm)取0—15 cm的土样,用粗筛筛去与根系脱离的土壤,将根系样品带回实验室,采用漂洗法清洗根系,在烘箱内烘干至恒重并称量获取每个样方内的地下生物量<sup>[9]</sup>;用环刀取样和S型取样法,在每种沙化程度过渡带内选取15个采样点,3个典型区共计225个土壤样品。取3个环刀和300 g土样装袋并编号带回实验室。在各样方内用环刀取样,记录样品环刀重和湿土重,带回实验室烘干至恒重测定土壤容重<sup>[10]</sup>;用数码相机垂直对每个样地进行拍照,通过Photoshop CC 2018计算得到植被覆盖度<sup>[11]</sup>。



注:从左至右沙化程度依次为完全沙化、重度沙化、中度沙化、轻度沙化、无沙化草。

图 1 不同沙化程度下植被分布状况

表 1 研究区植被特征描述

沙化程度	描述	植被盖度/%	地上生物量/ (kg·m <sup>-2</sup> )	地下生物量/ (kg·m <sup>-2</sup> )
完全沙化	无植被覆盖,裸露沙地	0	0	0
重度沙化	流沙纹理明显,风沙活动剧烈,裸露沙地面积较大,植被分布稀疏	0.11±0.06d	0.20±0.03c	0.004±0.001c
中度沙化	分布斑块状流沙,出现风沙活动,样区内植被较少	0.27±0.06c	0.38±0.11b	0.01±0.005b
轻度沙化	存在裸露斑点,无风沙活动,植被覆盖相对较高	0.59±0.06b	0.80±0.18a	0.02±0.004a
无沙化草地	天然植被良好,地表植被覆盖完全	0.89±0.05a	0.74±0.33a	0.03±0.01a

注:表中同列数据后面的不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

2.2 土壤理化性质测定

土壤样品经冷藏带回实验室测定。土壤容重(BD)用环刀法测定,土壤 pH 值用电位法测定,全氮(TN)用凯氏法消解,凯氏定氮仪测定,全磷(TP)用钼锑抗比色法测定,碱解氮(AN)用碱解扩散法测定,阳离子交换量(CEC)用乙酸钠法测定,全钾(TK)用火焰光度法测定,有机质(OM)用重铬酸钾容量法测定,速效磷(AP)用 0.5 mol/L 的 NaHCO<sub>3</sub> 浸提,钼锑抗比色法测定,速效钾(AK)1 mol/L 的 NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定,土壤机械组成用马尔文激光粒度仪 2000E 测定,以上指标测定主要参照《土壤农化分析》第 3 版<sup>[12]</sup>。

2.3 土壤质量指数的构建

2.3.1 最小数据集的建立 主成分分析法是通过降维的思想,将多个指标转化为少数的综合指标即主成分,且采用几个综合指标来表征原始指标的方法;基于主成分分析法筛选评价土壤质量的最小数据集<sup>[13]</sup>。通过对土壤指标进行主成分分析,选取特征值≥1 的主成分,并根据各主成分上的因子载荷值进行分组,并计算 Norm 值,比较每组中指标间的相关性和 Norm 值,确定最小数据集。其中 Norm 值越大,表明该指标对所有主成分的综合载荷越大,指标所包含的土壤质量信息就越多,其解释综合信息的能力越强<sup>[14]</sup>。

2.3.2 土壤指标评分及评价指标权重的计算 通过线性评分模型将土壤各指标转换为 0~1 无量纲分数。选取线性评分模型中的“越多越好”型函数和“越少越好”型函数<sup>[14]</sup>,计算各指标的线性评分,计算公

式如下:

$$S_L=\frac{X-m}{M-m}$$
(1)

$$S_L=1-\frac{X-m}{M-m}$$
(2)

式中: $S_L$  为线性评分(0~1); $X$  为指标实测值; $m$  为指标最低值; $M$  为指标最高值。公式(1)为“越多越好”型指标评分函数,公式(2)为“越少越好”型指标评分函数<sup>[15]</sup>。

通过主成分分析得到的公因子方差能够反映出某一指标对整体方差的贡献率,其值越大则对整体方差贡献越大;通过各指标公因子方差占有公因子方差之和的比率计算各指标权重<sup>[16]</sup>。

2.3.3 土壤质量指数的计算 根据各指标的评分和权重,采用下式计算土壤质量指数:

$$SQI=\sum_{i=1}^nW_iS_i$$
(3)

式中: $S_i$  为土壤质量指数; $n$  为指标数量; $W_i$  为指标权重值。SQI 值越高,表明土壤质量更好。

3 结果与分析

3.1 不同沙化程度下的土壤特征

表 2 为不同沙化程度草地的土壤理化性质及生物特征。不同沙化程度草地的土壤容重存在显著性差异( $p<0.05$ ),随沙化程度的减弱,土壤容重均值从 1.6 g/cm<sup>3</sup> 减小至 1.16 g/cm<sup>3</sup>;土壤砂粒、粉粒和土壤全氮、全磷、全钾、碱解氮含量在完全沙化草地、重度沙化和中度沙化程度下无显著性差异( $p>0.05$ ),在



轻度沙化地和无沙化草地差异显著;5 种沙化程度草地的土壤 pH 值变化范围为 8.14~8.67;土壤速效磷和速效钾含量随沙化程度的增强而减小,变化范围分别为 4.47~7.69 mg/kg,40.07~230.39 mg/kg,且不同沙化程度草地的差异显著( $p<0.05$ );轻度沙化地和无沙化草地的地上、地下生物量无显著差异( $p>$

0.05),与其他 3 种样地显著差异( $p<0.05$ ),无沙化草地的地下生物量均值最大,为 0.025 kg/m<sup>2</sup>;轻度沙化草地的地上生物量均值最大,为 0.80 kg/m<sup>2</sup>;无沙化草地的土壤有机质含量和 CEC 与其他 4 种样地差异显著( $p<0.05$ ),其有机质含量均值为 49.38 g/kg,CEC 均值为 23.27 cmol/kg。

表 2 土壤指标的描述性统计

指标及处理	完全沙化	重度沙化	中度沙化	轻度沙化	无沙化草地
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.60±0.04a	1.570±0.03a	1.55±0.04a	1.44±0.13b	1.16±0.15c
pH 值	8.67±0.09a	8.550±0.33ab	8.41±0.53bc	8.32±1.25c	8.14±1.82d
Silt/ %	0.11±0.32c	0.002±0.006c	1.89±2.00c	9.15±6.45b	18.58±7.32a
Sand/ %	99.89±0.32a	99.990±0.005a	98.07±2.05a	90.61±6.63b	81.01±7.53c
CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	2.37±0.56b	2.550±0.50b	2.96±0.56b	4.96±2.00b	23.27±11.52a
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.07±0.02c	0.090±0.01c	0.19±0.05bc	0.73±0.39b	3.00±1.32a
TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	13.29±0.76c	13.980±0.45c	14.03±0.62c	15.14±0.89b	17.88±1.61a
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.34±0.07c	0.360±0.09bc	0.38±0.06bc	0.43±0.06b	0.62±0.10a
AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	3.62±1.25c	3.990±0.94c	5.99±1.70bc	24.09±14.54b	88.94±42.70a
OM/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.43±0.44b	1.690±0.27b	3.15±1.03b	11.26±5.50b	49.38±25.38a
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	4.47±1.66d	5.330±1.36cd	6.19±0.75bc	6.76±1.52ab	7.69±1.06a
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	41.32±11.34c	40.070±15.96c	72.47±28.41c	107.58±47.82b	230.39±45.64a

注:采用单因素方差 LSD 法分析同一指标在不同样地之间差异性,不同字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

3.2 最小数据集的构建

3.2.1 土壤质量评价指标最小数据集 针对 3 个沙化样区不同沙化程度草地的 15 个土壤性质及生物指标,采用主成分分析,发现主成分特征值大于 1 的主成分有 3 个,且累计方差达到 86.24 %,通过 Norm 值,并进行指标间的相关性分析(表 3),所选指标中的粉粒、CEC 和地上生物量进入最小数据集。对 MDS 进行主成分分析,得出 MDS 中指标的公因子方差和指标的权重(表 4),粉粒百分含量、地上生物量、CEC 的公因子方差分别为 0.784,0.562,0.327;粉粒百分含量、地上生物量、CEC 的权重值分别为 0.469,0.336,0.195,选取线性评分模型将 MDS 中的指标转化为 0~1 之间的数。在本研究中,随沙化程度逐渐转好,地上生物量、CEC 及土壤粉粒含量增大,因此在本研究中 MDS 中的地上生物量、粉粒、CEC 适用于“越多越好”型函数。

3.2.2 土壤指标相关性分析 采用皮尔逊相关分析,计算每个样区的土壤性质相关性,结果见表 4。粉粒百分含量与砂粒、黏粒百分含量、有机质相关性较高(0.98,0.94,0.94),与速效磷相关性最低(0.53),与其他指标间的相关性较高(>0.70);地上生物量与有机质相关性较高(0.83),与速效磷相关性低(0.50);CEC 与全磷、速效钾、砂粒含量、有机质、粉粒含量相关性较高(0.92,0.88,0.88,0.87,0.88),与速效磷相关性低(0.50),与其他指标间的相关性较高(>0.70)。

3.3 不同沙化程度草地土壤质量评价

分析不同沙化程度土地的土壤质量指数,比较各研究区最小数据集的 SQI,结果如图 2 所示,3 个典型沙化区的 MDS-SQI 值随沙化程度减弱呈现明显的增大趋势。在不同沙化程度草地中,完全沙化草地 MDS-SQI 均值为 0;重度沙化草地 SQI 均值为 0.07,其中地上生物量的比重接近 1;中度沙化草地 MDS-SQI 均值为 0.18,地上生物量、粉粒含量占比分别为 66.67%,33.33%;轻度沙化草地 MDS-SQI 均值为 0.51,地上生物量、粉粒含量、CEC 占比分别为 50%,48%,2%;无沙化草地 MDS-SQI 均值为 0.83,其中地上生物量、粉粒含量、CEC 占比分别为 28%,51%,21%。海晏县三角城镇 MDS-SQI 均值为 0.27,变化范围 0~0.81;共和县铁盖乡 MDS-SQI 均值为 0.33,变化范围 0~0.90;贵南县森多镇 MDS-SQI 均值为 0.35,变化范围 0~0.92,研究区内土壤质量指数变化范围较大,贵南县沙化草地土壤质量指数最大,其次为共和县,海晏县沙化草地土壤质量指数最小。综上随沙化程度的加剧,MDS-SQI 值逐渐减小,MDS-SQI 中各指标的比重逐渐降低,且指标间的占比大小存在显著差异。

3.4 最小数据集的适用性验证

基于各指标在主成分的因子载荷和各指标间的相关性筛选出最小数据集,根据线性相关模型即“越多越好”和“越小越好”计算各指标的因子得分,通过

TDS 公因子方差计算出各指标权重,得到各研究区 TDS-SQI;对 MDS 进行主成分分析,分别得到各研究区的 MDS-SQI。为了验证最小数据集在各研究区的适用性,对各研究区 MDS-SQI 和 TDS-SQI 进行

了回归分析(图 3)。结果可知,3 个研究区的拟合系数  $R^2$  值分别为 0.92,0.95,0.98,表明 MDS-SQI 与 TDS-SQI 变化规律一致,即最小数据集指标体系对土壤特性指标的代表性和适用性较好。

表 3 土壤指标的相关性统计

指标	Sand	BD	pH 值	AP	TK	OM	AN	Silt	TN	地上生物量	Clay	CEC	地下生物量	TP	AK
Sand	1														
BD	0.79	1													
pH 值	0.60	0.81	1												
AP	-0.53	-0.38	-0.25	1											
TK	-0.87	-0.66	-0.41	0.57	1										
OM	-0.94	-0.75	-0.61	0.61	0.89	1									
AN	-0.93	-0.77	-0.60	0.60	0.87	0.97	1								
Silt	-0.98	-0.79	-0.60	0.53	0.87	0.94	0.93	1							
TN	-0.93	-0.82	-0.67	0.61	0.86	0.97	0.94	0.93	1						
地上生物量	-0.79	-0.61	-0.60	0.50	0.66	0.83	0.78	0.79	0.82	1					
Clay	-0.94	-0.83	-0.68	0.42	0.80	0.88	0.89	0.94	0.89	0.74	1				
CEC	-0.88	-0.79	-0.71	0.50	0.83	0.87	0.86	0.88	0.85	0.74	0.85	1			
地下生物量	-0.72	-0.78	-0.76	0.51	0.60	0.78	0.76	0.72	0.81	0.80	0.73	0.67	1		
TP	-0.73	-0.72	-0.67	0.41	0.73	0.71	0.72	0.73	0.70	0.56	0.73	0.92	0.53	1	
AK	-0.81	-0.85	-0.83	0.40	0.64	0.79	0.81	0.80	0.81	0.70	0.82	0.88	0.73	0.81	1

表 4 土壤评价指标载荷矩阵、公因子方差及权重

指标	载荷矩阵			总数据集 TDS			最小数据集 MDS	
	主成 1	主成分 2	主成分 3	Norm	公因子方差	权重	公因子方差	权重
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	-0.808	0.433	0.153	2.467	0.864	0.067		
pH 值	-0.732	0.266	-0.240	2.177	0.664	0.051		
Clay/%	0.862	-0.132	-0.302	2.509	0.853	0.066		
Silt/%	0.910	-0.195	-0.296	2.658	0.954	0.074	0.784	0.469
Sand/%	-0.909	0.194	0.297	2.655	0.952	0.074		
AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.913	-0.214	-0.052	2.654	0.883	0.068		
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.826	-0.341	-0.274	2.476	0.874	0.068		
AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.646	-0.209	0.348	1.932	0.583	0.045		
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.691	0.572	0.200	2.271	0.845	0.065		
OM/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.548	0.799	0.022	2.184	0.939	0.073		
AN/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.487	0.828	0.103	2.105	0.934	0.072		
TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.792	0.551	0.087	2.505	0.939	0.073		
CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	0.613	0.766	-0.087	2.284	0.971	0.075	0.327	0.195
地上生物量/(kg·m <sup>-2</sup> )	0.628	-0.245	0.594	1.965	0.807	0.062	0.562	0.336
地下生物量/(kg·m <sup>-2</sup> )	0.559	-0.651	0.372	2.062	0.875	0.068		
特征值	8.250	3.590	1.110					
方差贡献率/%	54.970	23.910	7.310					
累计贡献率/%	54.970	78.870	86.240					

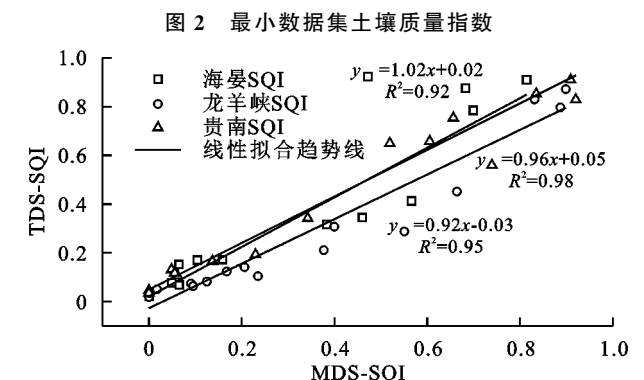
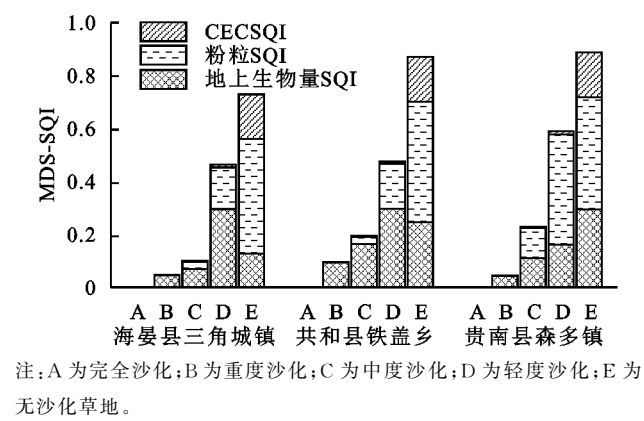
4 讨论

4.1 沙化草地土壤理化性状

土地沙化影响土壤物理、化学性质和生物特性,造成土壤功能的退化<sup>[3]</sup>。植被地上、地下生物量是土地生产力的表现。本研究表明,随沙化程度的加剧,植被生物量呈现递减趋势,且在中度沙化程度以后的下降幅度极为显著,与王辉<sup>[2]</sup>的研究一致,而轻度沙

化草地的地上生物量均值为(0.80±0.18) kg/m<sup>2</sup>,无沙化草地地上生物量均值为(0.74±0.33) kg/m<sup>2</sup>,低于轻度沙化草地地上生物量值,可能是为防止轻度沙化草地进一步发展,区域广泛开展了禁牧措施,在无沙化草地上,过多的人为扰动和动物啃食植被导致地上生物量减小<sup>[17]</sup>。草地沙化过程中植被群落与环境、土壤养分等理化性质相互作用,植被生长条件越差,沙化程度越高,生物量越低。因此,在草地沙化进

程中,植被生物量可直接或间接反映草地沙化程度,也能反映出各沙化阶段的土壤质量状况。



本研究表明,随着沙化程度减弱,砂粒含量占比减小,而黏粒、粉粒含量占比增加,与阎欣等<sup>[18]</sup>在宁夏荒漠草原的研究结果相似。在中度沙化阶段前,砂粒含量的增加不明显,可能是植被覆盖减弱了风蚀作用,地表土壤结构破坏相对较小,土壤保肥、保水能力相对较好,而中度沙化后,植被群落从减少到消亡,导致风沙活动剧烈,地表结构破坏程度逐渐加大,土壤水分和养分的消失逐渐向土壤深层演化,导致土壤逐步失去土地生产力,演变为沙漠。

沙化程度由极重度减弱至无沙化草地,土壤容重减小了 33.62%,CEC 逐渐增大了 87.28%。此外,土壤有机质和氮、磷、钾等土壤养分指标是衡量土壤质量和土壤肥力的重要指标<sup>[19]</sup>,随沙化程度的加剧,有机质含量逐渐减小,这表明土壤沙化加剧,不利于有机质积累,而有研究表明,土壤有机质影响土壤养分含量变化<sup>[20]</sup>,尤其对氮含量影响最为显著。本研究发现,以中度沙化为界,土壤养分指标前后变化幅度差异显著,在各沙化阶段,速效养分含量较全养分含量变化幅度差异最为明显。随沙化加剧,土壤养分含量不能满足植被生长的需求,导致土地贫瘠化,土壤质量逐渐降低。

## 4.2 沙化草地土壤质量

土壤质量指数的大小反映了土壤质量的好

坏<sup>[13]</sup>,对评价土地可持续利用与有效管理具有重要意义<sup>[21]</sup>。本研究选取了 15 个基于植物生物量和土壤理化性质的指标,通过主成分分析法选出 MDS 评价土壤质量。土壤粉粒含量反映了土壤的质地,土壤质地控制着土壤水分、养分和氧气的交换、保留和吸收<sup>[22]</sup>,随土地沙化程度减弱,粉粒含量增多。CEC 是土壤保肥、供肥和缓冲能力的重要标志,而有机质是 CEC 的贡献因子,随沙化程度的加剧,有机质含量减小,CEC 减小<sup>[23-24]</sup>,与张德罡<sup>[25]</sup>在祁连山区高寒草原的研究一致。综上所述,MDS 中的土壤指标能表征沙化草地状况,应考虑其合理性和可信度。

从评价结果看,无沙化草地 MDS 的 SQI 值最大,土壤质量相对较好,完全沙化地 MDS 的 SQI 值接近于 0,表明该程度沙化草地的土地丧失了土地生产力。3 个典型沙化区,同一程度沙化草地土壤质量存在差异,有研究表明,海拔、地形、气候及生物因素影响土壤质量<sup>[19,26]</sup>,不同程度沙化草地,受海拔、气候、降雨和过度放牧等因素的影响,土壤质量差异显著,综合来看,海晏县三角城镇土壤质量最差,容易发生土地沙化,应采取相应措施,防止土地沙化进一步发展,其次为共和县铁盖乡和贵南县森多镇。

## 5 结论

(1) 无沙化草地至极重度沙化地,3 个典型区沙化草地的地上生物量均值由  $(0.8\pm0.18)$  kg/m<sup>2</sup> 减少至 0 kg/m<sup>2</sup>;土壤容重、砂粒含量分别增大了 33.62%, 21.06%,粉粒、CEC、全氮、碱解氮、有机质分别减少了 89.83%,87.28%,93.67%,93.27%,93.62%。

(2) 随着沙化程度加剧,各沙化阶段土壤质量指数呈现显著递减的趋势。总体来看,3 个典型沙化区草地土壤质量指数变化范围为 0.27~0.35,土壤质量相对贫瘠,贵南县森多镇土壤质量最好,其次为共和县铁盖乡,海晏县三角城镇土壤质量最差。

(3) 基于最小数据集与全数据集的土壤质量指数评价结果对比分析,发现二者具有极显著的相关关系,表明最小数据集方法能够代替全数据集评价典型区沙化草地土壤质量。

探究青藏高原典型区草地沙化过程中的土壤质量变化,研究结果有助于深入认识沙化土地的土壤性质变化,为制定沙漠化防治对策提供科学依据。

### 参考文献:

[1] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.  
[2] 王辉.玛曲高寒草甸沙化特征及沙化驱动机制研究[D].兰州:兰州大学,2007.

- [3] Mamoglu A, Dengiz O. Evaluation of soil quality index to assess the influence of soil degradation and desertification process in sub-arid terrestrial ecosystem[J]. Rendiconti Lincei, 2019, 30(4): 723-734.
- [4] Senay Ulu Agir, Surmen Burak, Hamdi Guray Kutbay, et al. The effects of erosion and accretion on plant communities in coastal dunes in north of Turkey[J]. Rendiconti Lincei, 2017, 28(1): 203-224.
- [5] 余卫, 张莉, 王启兰. 青藏高原金露梅灌丛草甸土壤质量的微生物学特征[J]. 草地学报, 2016, 24(6): 1248-1253.
- [6] 张立欣, 段玉玺, 王博, 等. 库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 3871-3880.
- [7] 罗雅曦, 刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5): 60-67.
- [8] 封建民, 王涛, 齐善忠, 等. 黄河源区土地沙漠化的动态变化及成因分析: 以玛多县为例[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 141-145.
- [9] 唐庄生, 安慧, 上官周平. 荒漠草原沙漠化对土壤养分与植被根冠比的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(3): 463-468.
- [10] 李亚娟, 曹广民, 龙瑞军. 青海省海北州不同草地利用方式土壤基本理化性状研究[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1039-1043, 1050.
- [11] 池宏康, 周广胜, 许振柱, 等. 草地植被盖度的近距离遥感测定[J]. 草业学报, 2007, 16(2): 105-110.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [13] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 155-164.
- [14] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 265-273.
- [15] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, et al. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilisation and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 136: 419-435.
- [16] Rahmanipour F, Marzaioli R, Bahrami H A, et al. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran[J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 19-26.
- [17] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.
- [18] 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.
- [19] 刘艳, 宋同清, 蔡德所, 等. 喀斯特峰丛洼地不同土地利用方式土壤肥力特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1561-1568.
- [20] 王葆芳, 杨晓晖, 江泽平, 等. 不同地区土地沙漠化过程中土壤退化演变规律[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 1-5, 9.
- [21] 蒋永梅, 姚拓, 李建宏, 等. 不同管理措施对高寒草甸土壤微生物量的影响研究[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 35-43.
- [22] Ping L, Taolin Z, Xingxiang W, et al. Development of biological soil quality indicator system for subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 112-118.
- [23] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原小流域土壤 pH、阳离子交换量和有机质分布特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(11): 2710-2715.
- [24] 刘世全, 蒲王琳, 张世熔, 等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 1-5.
- [25] 张德罡, 祁连山区高寒草原土壤肥力特征及肥力因子间的关系(简报)[J]. 草业学报, 2002, 11(3): 76-79.
- [26] Campbell B D, Grime J P. A comparative study of plant responsiveness to the duration of episodes of mineral nutrient enrichment[J]. New Phytologist, 1989, 112(2): 261-267.

(上接第 117 页)

- [25] 解雪峰, 项琦, 吴涛, 等. 滨海湿地生态系统土壤微生物及其影响因素研究综述[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 1-12.
- [26] Yang W, Jeelani N, Zhu Z H, et al. Alterations in soil bacterial community in relation to *Spartina alterniflora* Loisel. invasion chronosequence in the eastern Chinese coastal wetlands[J]. Applied Soil Ecology, 2019, 135: 38-43.
- [27] Liu J J, Sui Y Y, Yu Z H, et al. Diversity and distribution patterns of acidobacterial communities in the black soil zone of northeast China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 95: 212-222.
- [28] Wang C, Liu S Y, Zhang Y, et al. Bacterial communities and their predicted functions explain the sediment nitrogen changes along with submerged macrophyte restoration[J]. Microbial Ecology, 2018, 76(3): 625-636.
- [29] Zhu P, Wang Y P, Shi T T, et al. Intertidal zonation affects diversity and functional potentials of bacteria in surface sediments: a case study of the Golden Bay mangrove, China[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 130: 159-168.