

基于最小数据集的青藏公路沿线土壤质量评价

刘利昆^{1,2}, 赵广举^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 高鹏^{1,2}, 孙文义^{1,2}, 韩剑桥^{1,2}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,
陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为明确青藏公路沿线土地土壤质量的基本特征,通过采集沿线 3 种不同土地利用类型(农地、草地和沙地)的土壤样品,采用主成分分析法(PCA, Principal Component Analysis)筛选最小数据集(MDS, Minimum Data Set)指标,并构建土壤质量指数(SQI, Soil Quality Index)定量评价其土壤质量。结果表明:(1)相较于农地和草地,沙地的土壤肥力较为贫瘠,其土壤有机质、全氮和有效磷的土壤肥力等级均为 6 级。9 个土壤指标均为中低度敏感指标,沙地土壤黏粒和粉粒含量具有更强的空间分异性。(2)沿线土壤质量评价最小数据集由全钾、全磷、有机质、黏粒和粉粒组成,最小数据集能够较好地替代全数据集进行土壤质量评价($p < 0.01$)。(3)沿线农地的土壤质量指数 SQI(0.535 ± 0.043)高于草地 SQI(0.499 ± 0.044)和沙地 SQI(0.449 ± 0.066)。该研究发现沿线农地土壤质量为中等水平,沿线草地和沿线沙地土壤质量处于较低水平,土壤有机质是影响青藏公路沿线土壤质量的主要因素。

关键词:土壤质量; 主成分分析; 最小数据集; 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)02-0125-07

Soil Quality Evaluation Along the Qinghai-Tibet Highway Based on the Minimum Data Set

LIU Likun^{1,2}, ZHAO Guangju^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, GAO Peng^{1,2}, SUN Wenyi^{1,2}, HAN Jianqiao^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,
Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,
China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to clarify the characteristic of soil quality along the Qinghai-Tibet highway, field sampling was undertook to investigate soil quality variation between three different types of land use (farmland grassland, and sandy land) in this study. The principal component analysis method (PCA) was used to select the minimum data set indicators, and soil quality index was built to quantitatively evaluate soil quality. The results showed that: (1) compared with farmland and grassland, the soil fertility of sandy land was relatively poor, and the soil fertility grades of soil organic matter, total nitrogen and available phosphorus were all grade 6; the nine soil indicators in the study were all low-to-medium sensitive indicators, and clay and silt content of sandy land had stronger spatial differentiation; (2) the minimum data set for soil quality evaluation was consisted of total potassium, total phosphorus, organic matter, clay and silt content; the minimum data set could better replace the full data set for soil quality evaluation ($p < 0.01$); (3) the soil quality index SQI (0.535 ± 0.043) of the farmland was higher than the grassland SQI (0.499 ± 0.044) and the sandy land SQI (0.449 ± 0.066). This study found that the soil quality of farmland along the line was at a medium level, while the soil quality of grassland and sandy land was at a low level, and soil organic matter was the main factor affecting soil quality along the Qinghai-Tibet Highway.

Keywords: soil quality; principal component analysis; minimum data set; Qinghai-Tibet Plateau

收稿日期: 2021-03-10

修回日期: 2021-04-07

资助项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”(XDA20040202)

第一作者: 刘利昆(1997—), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与流域水土过程。E-mail: llk-nwafu@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与流域水土过程研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

土壤作为维持植物、动物和人类生长发育的重要生态系统,位于大气、岩石圈、水圈和生物圈的交汇处^[1],起到调节水气和提供植物生长发育所需养分的作用^[2]。在特定的边界内具有维持作物生产水平和提高环境质量的能力被称为土壤质量^[3]。土壤质量主要是由静态部分,即土壤固有的促进植物生长的能力,以及受土壤使用者扰动影响的动态部分组成^[4],可以反映土壤的健康状况。有研究发现土壤退化会导致土壤中的碳以二氧化碳的形式排放到大气中,对气候变化和作物生产产生负面影响^[5]。虽然土壤质量不能被直接测量或监测,但可通过其固有且可测量的土壤特性进行评估和计算。土壤质量指数法作为评价土壤质量的有效途径,具有量化土壤质量的灵活性和便捷性,与土壤管理实践活动密切相关,因此被广泛应用于土壤质量评价^[6-9]。然而,在进行土壤质量评价时,进行大量评价指标的测定往往比较费时费力,因此如何选择包含重要土壤信息的最小数据集指标成为土壤质量评价的关键^[8,10],主成分分析法作为一种降低数据集维数的多元分析方法,被用于最小数据集指标的筛选^[11]。李强等^[12]采用主成分分析法对 16 个土壤理化指标进行筛选,确定以土壤有机质、土壤比水表面、水稳性团聚体含量和土壤容重作为最小数据集,对黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量进行了研究。计算土壤质量指数主要分为 3 个步骤:(1) 选择最能代表土壤功能的指标;(2) 采用线性或非线性评分模型对评价指标进行评分,并根据主成分分析结果分配其权重;(3) 将评价指标和权重整合成土壤质量指数。许明祥等^[13]从涵盖土壤物理化学生物性质的 29 项指标中选取 8 项指标,采用土壤质量指数法定量评价黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型土地的土壤质量变化,研究发现基于最小数据集的土壤质量指数法能够比较准确地量化黄土丘陵区土壤质量变化特征。此外,也有部分学者研究发现土壤质量指数法可实现不同土地利用方式下土地土壤质量的定性和定量评价,体现评价指标的差异和变异性^[14-16]。

目前有关土壤质量的研究主要集中于土壤质量评价方法及指标的选取,以此评估土地利用^[4,14-16]、土壤侵蚀^[17-18]及耕作管理措施^[19-21]对土壤质量的影响等,而针对青藏高原地区土壤质量的研究相对较少。近几十年来,由于人类活动和气候变化的双重影响,青藏高原遭受了严重的土地退化^[22]。而研究土壤质量对不同土地利用类型的反映对于解决农业和畜牧业的可持续性问题很重要^[8]。基于此,本研究以青藏高原工程走廊——青藏公路沿线为研究对象,通过土壤质量指数(SQI)评价青藏公路沿线 3 种不同土地利用类型的土壤质量。

1 研究区概况

本研究区为青藏高原公路沿线,由西宁向西至格尔木,后向西南方向抵拉萨,全长约 1 800 km。地理坐标为 29°39′—36°37′N,101°46′—91°09′E,海拔 2 900~5 200 m。研究区所在的青藏高原高海拔地区生态环境脆弱,属于干旱半干旱、高寒大陆性气候,多年均气温-5.2~4.7℃,多年均降水量 66~560 mm,冬季长达 7—8 月。土壤类型以高山草甸土、高山草原化草甸土为主,呈弱碱性,土壤抗蚀性较差,土质疏松且土壤肥力流失严重。青藏公路沿线植被优势种为短嵩草、高山嵩草,主要伴生种为矮火绒草、紫羊茅等^[23]。

2 材料与方法

2.1 样品采集和分析

2019 年 7 月在青藏公路沿线远离人为扰动的样地进行野外采样,采样点见图 1,共 73 个样点。在每个样地设置 5 个样点,用土钻采集每个样点垂直剖面表层 0—20 cm 的土壤混合样,按四分法装袋并带回实验室,风干过筛后进行土壤理化性质的测定。测定的理化指标主要有土壤全氮、全磷、全钾、有效磷、土壤有机质、土壤 pH 值、土壤黏粒、粉粒、砂粒。全氮采用全自动凯氏定氮仪测定,全磷采用钼锑抗比色法,全钾采用火焰光度法,速效磷采用 Olsen 法,土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化—外加加热法测定,土壤 pH 值采用水土比 1:1 电极法测定,砂粒、粉粒和黏粒百分比采用马尔文激光粒度仪测定,以上指标的具体测定步骤参照《土壤农业化学分析方法》^[24]。

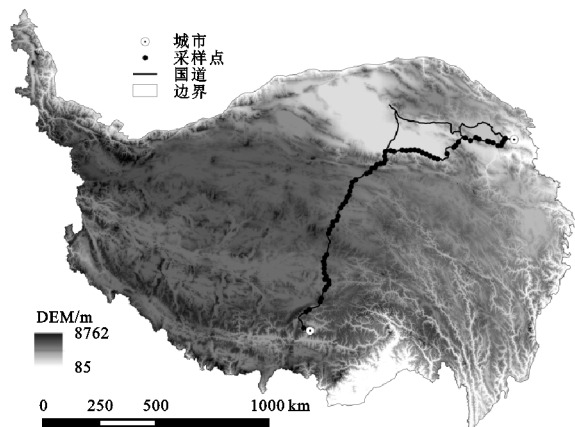


图 1 研究区位置及采样点

2.2 主成分分析

主成分分析法(PCA, Principal Component Analysis)是通过线性代数矩阵方程计算相关矩阵的特征值、特征向量和主成分的累计贡献率,将多个指标简化成相互独立的少数指标的作用,目前已被国内外学者广泛应用于土壤质量评价^[25-26]。可利用主成

分分析法从全量数据指标中筛选最能反映土壤质量特征且对评价结果具有显著影响的土壤指标作为最小数据集。具体步骤为:将土壤理化指标进行主成分分析,挑选特征值 ≥ 1 的主成分,并将主成分中载荷 ≥ 0.5 的划分为一组^[27]。若出现土壤指标在多组主成分中的理化载荷都 ≥ 0.5 ,将其归入与其他土壤指标相关系数较小的那一组。分组后计算每组指标的 Norm 值,将 Norm 值在该组最高 Norm 值 10%范围内的指标作为 MDS 指标。因本文研究尺度较大,若所选土壤指标呈显著相关($p < 0.05$),则选择 Norm 值最大的土壤指标归入 MDS,若组内各指标不显著相关,则组内指标全部进入 MDS。Norm 值为该指标综合载荷大小,其值越大则表明该土壤指标反映的土壤质量信息越丰富^[28]。Norm 值的计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \cdot e_k)}$$

(1)

表 1 隶属函数及评价指标

函数类型	函数公式	评价指标	隶属函数参数		函数意义
			L	H	
S 型	$S_i = \frac{x-L}{H-L}$	TN/(g · kg ⁻¹)	0.07	5.14	土壤指标在一定范围内与土壤功能呈正相关
		TP/(g · kg ⁻¹)	0.06	1.18	
		TK/(g · kg ⁻¹)	10.26	28.16	
		AP/(mg · kg ⁻¹)	0.30	51.50	
		OM/(g · kg ⁻¹)	0.78	40.92	
反 S 型	$S_i = \frac{1-(x-L)}{H-L}$	Clay/%	0.00	2.95	土壤指标在一定范围内与土壤功能呈负相关
		Silt/%	1.01	62.49	
		Sand/%	34.55	98.99	
		pH 值	7.08	8.34	

注: S_i 为土壤理化指标的线性评价模型得分; x 为土壤指标实测值; L 为土壤指标实测最小值; H 为土壤指标实测最大值。TN 为全氮; TP 为全磷; TK 为全钾; AP 为有效磷; OM 为有机质; Clay 为黏粒; Silt 为粉粒; Sand 为砂粒,下同。

土壤质量指数计算公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot S_i$$

(2)

式中: n 为指标个数; W_i 为土壤指标的权重; 土壤质量指数的范围为 0~1。

3 结果与分析

3.1 土壤质量评价指标特征分析

土壤质量评价指标能够反映土壤质量的优劣,对土壤指标特征进行分析,由表 2 可知,各样地中沿线农地除全钾、黏粒和砂粒外其余指标的平均含量均高于草地和沙地;草地全钾和黏粒含量最高,沙地砂砾含量最高。根据全国第二次土壤肥力普查推荐的分级标准,农地有机质(28.89±13.11) g/kg,有效磷(24.80±23.20) g/kg,全氮(2.79±1.20) g/kg 土壤肥力等级分别为 3 级、2 级和 1 级;草地有机质(18.28±

式中: N_{ik} 为第 i 个指标在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分的 Norm 值; u_{ik} 为第 i 个指标在第 k 个主成分的 Norm 值; e_k 为第 k 个主成分的特征值。

2.3 土壤质量评价方法

土壤质量指数(SQI, Soil Quality Index)是通过计算各土壤质量评价指标权重和评分,将指标得分整合成的一个方程,是对土壤功能的综合反映,其值越大,则表明土壤质量越好,通过土壤质量指数可定量评价青藏公路沿线土壤质量。根据各土壤质量评价指标对土壤质量的正负相关性,建立评价指标与土壤质量之间的隶属函数,详见表 1。土壤全氮、全磷、全钾、有效磷和有机质是表征土壤肥力优劣的关键因子,适用于 S 型隶属函数;土壤黏粒、粉粒、砂粒和 pH 值代表的是土壤结构,不合理的土壤结构会影响植被的生长,因此采用反 S 型隶属函数。本研究选取评价指标实测的最大最小值作为指标阈值的上下限。

11.07) g/kg,有效磷(2.07±1.42) g/kg,全氮(1.91±1.16) g/kg 土壤肥力等级分别为 4 级、6 级和 2 级;沙地有机质(2.70±0.99) g/kg,有效磷(2.55±1.83) g/kg,全氮(0.23±0.13) g/kg 土壤肥力等级均为 6 级,说明受土壤质地及结构影响,青藏公路沿线沙地土壤肥力较为贫瘠。青藏公路沿线农地全氮、有机质、有效磷的变异系数介于 40%~100%,为中度敏感指标,pH 值、全磷和黏粒含量呈现不敏感水平(CV<10%),其余指标均为低度敏感指标;草地全氮、有效磷、有机质、黏粒和粉粒含量为中度敏感指标;沙地全氮、有效磷、黏粒和粉粒含量的变异系数的变化区间为 40%~100%,为中度敏感指标,草地和沙地全钾和砂粒含量均为低度敏感水平。本研究区土壤呈弱碱性,农地、草地和沙地 pH 值的变异系数均小于 10%,表明青藏公路沿线土壤 pH 值空间差异性较小,土壤沙化和盐碱化是导致土壤呈弱碱性的

主要原因。此外,黏粒和粉粒在沙地的变异系数高达 6.50%和 55.96%,40.79%,表明黏粒和粉粒在沙地中具有较强的空间异质。75.04%,79.85%,而在农地和草地仅为 19.78%,

表 2 青藏公路沿线土壤理化特征分析

指标	农地			草地			沙地		
	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数	平均值	标准差	变异系数
TN/(g·kg ⁻¹)	2.79	1.20	43.02	1.91	1.16	60.59	0.23	0.13	56.00
TP/(g·kg ⁻¹)	0.84	0.30	35.59	0.48	0.15	31.39	0.48	0.15	31.10
TK/(g·kg ⁻¹)	17.65	1.59	9.00	18.42	3.60	19.54	17.40	1.79	10.28
AP/(mg·kg ⁻¹)	24.80	23.20	93.54	2.07	1.42	68.66	2.55	1.83	71.85
OM/(g·kg ⁻¹)	28.89	13.11	45.38	18.28	11.07	60.55	2.70	0.99	36.67
Clay/%	1.06	0.21	19.78	1.11	0.62	55.96	1.07	0.80	75.04
Silt/%	44.43	2.89	6.50	31.33	12.78	40.79	23.01	18.37	79.85
Sand/%	54.51	3.09	5.67	67.75	13.22	19.57	75.93	19.09	25.14
pH 值	7.76	0.03	0.39	7.81	0.29	3.71	7.63	0.28	3.67

3.2 土壤质量评价指标最小数据集

对青藏公路沿线 9 个土壤理化指标进行主成分分析(表 3),研究发现前 4 个主成分解释土壤质量的能力较强,其累计贡献率达到 86.1%,说明最小数据集可以代替全数据集进行沿线土壤质量评价。此外,粉粒和砂粒在 PC-1 中的载荷均>0.5,且在剩余各 PC 组的载荷均<0.5,将粉粒和砂粒划分为第 1 组;全氮、有机质和黏粒含量在 PC-2 中的载荷大于剩余 PC 组,根据分组原则将全氮、有机质和黏粒归入第 2 组;根据载荷大小,将全磷和有效磷的载荷纳入第 3 组;因为全钾在各主成分中载荷均<0.5,将其归入载荷值最高的一组,与 pH 值组成第 4 组。

通过对沿线土壤指标进行 Pearson 相关分析,由表 4 可知。第 1 组中粉粒和砂砾的相关系数为-1.00($p<0.01$),可见粉粒和砂粒相关性较高,并结合两者 Norm 值的大小,选取 Norm 值较高的砂粒进入 MDS。第 2 组中 Norm 值最高的为黏粒,黏粒与有机质和全氮的相关系数分别为 0.20,-0.28($p<0.01$),黏粒与全氮呈高度相关,黏粒与有机质的相关性较低且其 Norm 值在最高 Norm 值的 10%以内,因此剔除全氮,选取黏粒和有机质为最小数据集(MDS)指标。第 3 组中,全磷和有效磷的相关系数

为 0.52($p<0.01$),呈极显著性相关,根据 Norm 值大小比较,选取全磷进入最小数据集(MDS)。第 4 组中,由于 pH 值的变异系数<10%,为不敏感指标,因此将其剔除,将全钾纳入 MDS。最终确定青藏公路沿线土壤质量评价的 MDS 由砂粒、黏粒、有机质、全磷和全钾组成。将 MDS 各指标进行主成分分析,砂粒、黏粒、有机质、全磷和全钾的公因子方差分别为 0.227,0.093,0.219,0.232,0.230,其权重分别为 0.256,0.268,0.210,0.149,0.117。

表 3 青藏公路沿线各土壤指标载荷矩阵和 Norm 值

指标	主成分				Norm 值	分组
	PC-1	PC-2	PC-3	PC-4		
TN	0.407	0.807	-0.220	0.235	1.47	2
TP	0.473	0.399	0.611	-0.068	1.25	3
TK	0.381	0.434	-0.336	-0.488	1.13	4
AP	0.325	0.112	0.829	0.136	1.14	3
OM	0.441	0.787	-0.237	0.179	1.47	2
Clay	0.640	-0.655	-0.084	-0.244	1.53	2
Silt	0.931	-0.293	-0.070	-0.011	1.68	1
Sand	-0.928	0.311	0.071	0.021	1.69	1
pH 值	0.239	-0.358	-0.212	0.773	1.07	4
特征值	3.030	2.371	1.342	1.006		
百分比/%	33.665	26.349	14.907	11.180		
累计百分比/%	33.665	60.013	74.921	86.101		

表 4 青藏公路沿线土壤指标相关系数矩阵

指标	OM	TN	TP	TK	AP	pH	Sand	Silt	Clay
OM	1.00								
TN	0.89**	1.00							
TP	0.33**	0.35**	1.00						
TK	0.42**	0.38**	0.20	1.00					
AP	0.08	0.05	0.52**	-0.07	1.00				
pH	-0.06	-0.03	-0.13	-0.15	-0.01	1.00			
Sand	-0.19	-0.15	-0.24*	-0.19	-0.19	-0.27*	1.00		
Silt	0.20	0.17	0.25*	0.19	0.20	0.27*	-1.00**	1.00	
Clay	-0.23	-0.28*	0.02	0.07	0.03	0.21	-0.77**	0.75**	1.00

注: * 表示相关性水平为 $p<0.05$, ** 表示相关性水平为 $p<0.01$ 。

3.3 基于 MDS 的不同土地利用类型的土壤质量评价

土壤质量指数作为土壤综合特性的量化,能够反映青藏公路沿线土壤质量的优劣。通过分析沿线农地、草地和沙地的土壤质量指数,比较最小数据集各评价指标在土壤质量指数中的占比,结果见图 2。沿线 $SQI_{\text{农地}}$ 的平均值为 (0.536 ± 0.074) ,粉粒、黏粒、有机质、全钾和全磷所占百分比的分别为 14%,32%,27%,12%,15%,黏粒和有机质的占比之和超过 50%,表明黏粒与有机质是影响沿线农地土壤质量的主要因素,可通过调节土壤结构增加黏粒含量和施加有机肥料提高农地土壤质量。 $SQI_{\text{草地}}$ 平均值为 (0.499 ± 0.141) ,相较于农地,粉粒在土壤质量指数中的占比大于前者 $(26\% > 14\%)$,有机质占比小于前者 $(18\% < 27\%)$,黏粒、全钾和全磷的占比分别为

33%,14%,9%。相比于 $SQI_{\text{农地}}$ 和 $SQI_{\text{草地}}$, $SQI_{\text{沙地}}$ 平均值仅为 (0.449 ± 0.029) ,其有机质(2%)的占比也明显小于草地(18%)和农地(27%),而粉粒在土壤质量指数中占比则呈现沙地>草地>农地的趋势,最小数据集中黏粒、全钾和全磷的占比依次为 38%,13%,10%。3 种土地类型的土壤 SQI 排序依次为: $SQI_{\text{农地}} > SQI_{\text{草地}} > SQI_{\text{沙地}}$ 。通过对比最小数据集中各土壤指标在 $SQI_{\text{农地}}$, $SQI_{\text{草地}}$ 和 $SQI_{\text{沙地}}$ 中的占比发现,粉粒在 $SQI_{\text{沙地}}$ 中的占比高达 37%,而在 $SQI_{\text{草地}}$ 和 $SQI_{\text{农地}}$ 中的占比仅为 26%,14%,有机质在 $SQI_{\text{沙地}}$ 中的占比仅为 2%,而在 $SQI_{\text{草地}}$ 和 $SQI_{\text{农地}}$ 中的占比高达 18%,27%,说明有机质是影响沿线 3 种不同土地利用类型土壤质量的关键因子。

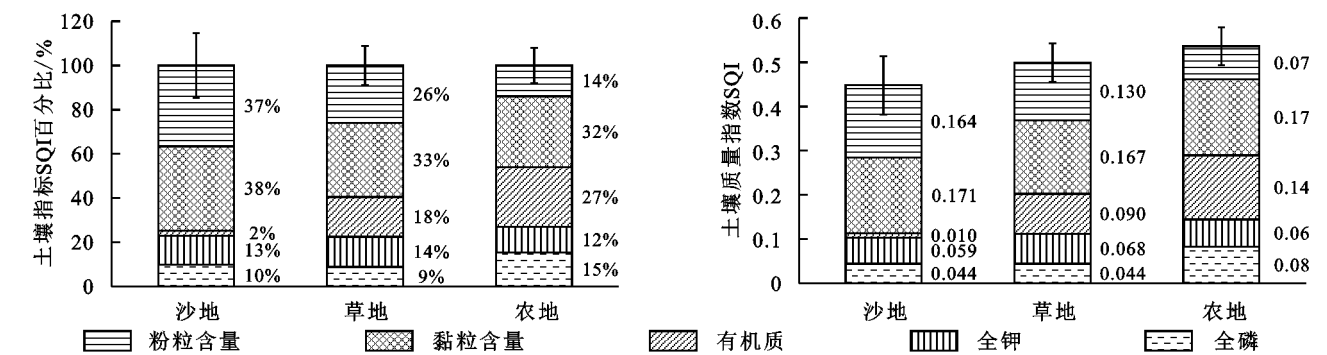


图 2 青藏公路沿线不同土地利用类型的 SQI

3.4 最小数据集的适用性验证

土壤指标全量数据集通常能够对土壤质量进行全面且准确的评价,然而进行大量指标的测定往往费时,运用最小数据集可以简化土壤评价指标,其评价指标体系的适用性是土壤质量评价的关键。青藏公路沿线 $SQI-TDS$ 变化幅度介于 0.250~0.592,均值为 0.400 ± 0.094 ,变异系数为 23.6%; $SQI-MDS$ 变化区间为 0.134~0.721,均值为 0.485 ± 0.138 ,变异系数为 28.4%,两者都属于低度敏感水平,说明青藏公路沿线土壤质量空间变异性较小。通过对比沿线样点 $SQI-MDS$ 和 $SQI-TDS$,发现 $SQI-MDS$ 变化趋势与 $SQI-TDS$ 具有较好的一致性。由图 3 可知,二者具有较好的线性关系, R^2 为 0.60,且两者相关系数为 0.77($p < 0.01$),呈极显著相关水平,表明基于 MDS 的土壤质量评价指标可以代替 TDS 对青藏公路沿线 3 种不同土地利用类型的土壤质量进行评价。

4 讨论

土壤质量评价结果的准确性受土地利用类型、土壤属性和生态恢复措施的影响^[29],因此如何筛选土壤指标建立土壤质量评价体系显得尤为重要。本研究基于主成分分析法(PCA)采用最小数据集(MDS)

计算土壤质量指数(SQI)对青藏公路沿线的 3 种土地利用类型进行土壤质量评价,并对 MDS 的可靠性进行了验证。尽管主成分分析法已被广泛应用于土壤质量评价中,却易造成部分土壤信息的缺失^[28],因此本研究在采用主成分分析法的基础上,应用 Norm 值综合考虑土壤指标在各主成分上载荷并以此筛选出更具代表性的指标进入 MDS,最大程度上避免了因数据冗长造成的重要土壤信息的缺失。目前已有研究对 MDS 中土壤指标的选取进行了系统且全面的研究^[27]。以往研究表明,人类活动(过度放牧、草地转化为耕地)和气候变化严重影响青藏高原土壤质量,因此本研究选取的评价指标以传统的土壤指标为主,包括物理稳定性和土壤养分循环、生态系统恢复力等。本研究中的黏粒含量、粉粒、全氮、土壤有机质和有效磷是土壤质量评价被选频次最高的几个指标,其中黏粒含量和土壤有机质被多次应用于 MDS 指标评价。土壤有机质和黏粒含量被认为是重要的土壤质量指标,在土壤肥力供应、养分有效性和团聚体稳定性方面具有重要作用^[8,30]。此外,本文还选取了全磷、全钾、粉粒含量作为 MDS 指标,土壤钾磷是表层植物生长必不可少的养分^[6],可以促进植被养分的循环和生化反应。

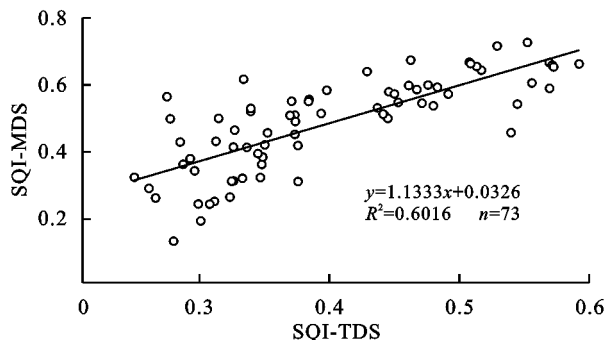


图3 基于MDS和TDS的沿线样点土壤质量指数线性关系

青藏高原地区生态系统脆弱,不合理的放牧、气候变化以及人为扰动是导致青藏高原土地退化的主要原因^[22]。也有研究表明,不合理的土地利用所导致的土壤有机质、养分和土壤物理结构的持续减少会引起土壤质量的下降^[31]。本研究中,沿线农地有机质含量 $[(28.89 \pm 13.11) \text{ g/kg}]$ 明显高于草地 $[(18.28 \pm 11.07) \text{ g/kg}]$ 和沙地 $[(2.70 \pm 0.99) \text{ g/kg}]$,这主要是因为青藏高原海拔高气温低,腐殖质矿化分解速度较慢^[32],有机质积累量增加,未被作物吸收的养分则残留在土壤表层,导致青藏公路沿线农地土壤表层有机质含量较高。另外有研究表明牛羊放牧采食会引起植被根冠比增加^[33],促进有机物向地下部分转移。此外,有研究发现土壤在种植一段时间的农作物后,其全氮含量会减少^[34],本研究中沿线农地全氮含量 $[(2.79 \pm 1.20) \text{ g/kg}]$ 明显高于草地 $[(1.91 \pm 1.16) \text{ g/kg}]$ 和沙地 $[(0.23 \pm 0.13) \text{ g/kg}]$,野外调查发现当地农户在施用有机肥的同时额外施用氮肥,张桐等^[35]研究发现长期施加化肥可增加土壤保肥与营养供给能力,施加氮肥的农地含氮量显著高于不施肥的沙地和草地。

虽然已有部分学者应用土壤质量指数法进行土壤质量评价,但是对于土壤质量指数的分级标准仍有分歧。许明祥等^[13]以黄土高原丘陵区为研究对象,研究不同土地利用类型的土壤质量,将土壤质量等级分为低(0~0.2)、较低(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、较高(0.6~0.8)和高(0.8~1.0);张汪寿等^[14]将土壤质量等级划分为极低(≤ 0.4)、低(0.4~0.5)、中(0.5~0.6)、中高(0.6~0.8)和高(0.8~1.0)5个等级。土壤质量指数的高低取决于土壤因子及环境因子的综合作用,本研究研究发现青藏高原沿线 $SQI_{\text{农地}} (0.536 \pm 0.074) > SQI_{\text{草地}} (0.499 \pm 0.141) > SQI_{\text{沙地}} (0.449 \pm 0.029)$,粉粒在 $SQI_{\text{沙地}}$ 中的占比为37%,而在 $SQI_{\text{草地}}$ 和 $SQI_{\text{农地}}$ 中的占比仅为26%,14%,有机质在 $SQI_{\text{沙地}}$ 中的占比仅为2%,而在 $SQI_{\text{草地}}$ 和 $SQI_{\text{农地}}$ 中的占比高达18%,27%,表明土壤有机质是制约青藏公路沿线土壤质量的主要因素。

5 结论

(1) 青藏公路沿线农地的土壤有机质、全氮和有效磷的土壤肥力分别为3级、1级和2级水平;草地土壤有机质、全氮和有效磷的土壤肥力分别为4级、2级和6级水平;沙地土壤有机质、全氮和有效磷的土壤肥力均为6级水平,土壤肥力较为贫瘠。黏粒和粉粒含量在沙地的空间变异性较强,而剩余土壤理化指标的均为中低度敏感指标。

(2) 青藏高原沿线不同利用类型土壤质量评价的最小数据集由全钾、全磷、有机质、黏粒和粉粒组成,其权重分别为0.117,0.149,0.210,0.268,0.256。最小数据集能够替代全数据集进行青藏公路沿线土壤质量评价。

(3) 青藏公路沿线3种土地利用方式下的土壤质量指数排序为: $SQI_{\text{农地}} > SQI_{\text{草地}} > SQI_{\text{沙地}}$,土壤有机质含量是限制沿线草地和沙地土壤质量的主要因素。

参考文献:

- [1] Lehmann J, Bossio D A, Kogel-Knabner I, et al. The concept and future prospects of soil health[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020,1:544-553.
- [2] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].*生态学报*,2006,26(3):901-913.
- [3] 郑昭佩,刘作新.土壤质量及其评价[J].*应用生态学报*,2013,14(1):131-134.
- [4] Mamehpour N, Rezapour S, Ghaemian N. Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem[J]. *Geoderma*, 2021, 382. DOI:10.1016/j.geoderma.2020.114781.
- [5] Graves A R, Morris J, Deeks L K, et al. The total costs of soil degradation in England and Wales[J]. *Ecological Economics*, 2015,119:399-413.
- [6] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, et al. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,115. DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106439.
- [7] Xu M X, Zhao Y G, Liu G B, et al. Soil quality indices and their application in the hilly loess plateau region of China[J]. *Soil Research*, 2006,44(3):245-254.
- [8] Yu P J, Han D L, Liu S W, et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland[J]. *Catena*, 2018,171:280-287.
- [9] Andrews S S, Carroll C R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management[J]. *Ecological Applications*, 2001,11(6):1573-1585.
- [10] 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.
- [11] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002,90(1):25-45.
- [12] 李强,许明祥,赵允格,等.黄土高原坡耕地沟蚀土壤质量评价[J].*自然资源学报*,2012,27(6):1001-1012.
- [13] 许明祥,刘国彬,赵允格.黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价[J].*植物营养与肥料学报*,2005,11(3):285-293.
- [14] 张汪寿,李晓秀,黄文江,等.不同土地利用条件下土壤质量综合评价方法[J].*农业工程学报*,2010,26(12):311-318.
- [15] 郭旭东,傅伯杰,陈利顶,等.低山丘陵区土地利用方式对土壤质量的影响:以河北省遵化市为例[J].*地理学报*,2001,56(4):447-455.
- [16] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions[J]. *Ecological Indicators*, 2017,75:307-320.
- [17] Nabiollahi K, Golmohamadi F, Taghizadeh-Mehrjardi R, et al. Assessing the effects of slope gradient and land use change on soil quality degradation through digital mapping of soil quality indices and soil loss rate [J]. *Geoderma*, 2018,318(15):16-28.
- [18] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等.土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J].*农业工程学报*,2017,33(13):270-279.
- [19] 金慧芳,史东梅,钟义军,等.红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J].*农业工程学报*,2019,35(20):84-93.
- [20] 陈正发,史东梅,金慧芳,等.基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J].*农业工程学报*,2019,35(3):256-267.
- [21] 娄义宝,史东梅,蒋光毅,等.基于最小数据集的紫色丘陵区坡耕地耕层土壤质量评价[J].*中国水土保持科学*,2019,17(5):75-85.
- [22] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].*草业学报*,2005,14(3):31-40.
- [23] 鲁汝坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [24] Jahany M, Rezapour S. Assessment of the quality indices of soils irrigated with treated wastewater in a calcareous semi-arid environment [J]. *Ecological Indicators*, 2020,109.DOI:10.1016/j.ecolind.2019.105800.
- [25] Ma J F, Chen Y P, Zhou J, et al. Soil quality should be accurate evaluated at the beginning of lifecycle after land consolidation for eco-sustainable development on the Loess Plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020,267.DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122244.
- [26] 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.
- [27] Yemefack M, Jetten V G, Rossiter D G. Developing a minimum data set for characterizing soil dynamics in shifting cultivation systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006,86(1):84-98.
- [28] Zhou Y, Ma H B, Xie Y Z, et al. Assessment of soil quality indexes for different land use types in typical steppe in the loess hilly area, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020,118.DOI:10.1016/j.ecolind.2020.106743.
- [29] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management [J]. *Geoderma*, 2014, 230/231, 131-142. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.04.019.
- [30] Dong S K, Shang Z H, Gao J X, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020,287.DOI:10.1016/j.agee.2019.106684.
- [31] Abdalla M, Hastings A, Chadwick D R, et al. Critical review of the impacts of grazing intensity on soil organic carbon storage and other soil quality indicators in extensively managed grasslands [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018,253:62-81.
- [32] 王长庭,龙瑞军,曹广民,等.三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J].*植物生态学报*,2006,30(3):441-449.
- [33] Li G, Zhang Z, Shi L L, et al. Effects of different grazing intensities on soil C, N, and P in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15 (11). DOI: 10.3390/ijerph15112584.
- [34] 邹丽娜,周志宇,颜淑云,等.玛曲高寒草地土壤养分对不同利用方式的响应[J].*中国草地学报*,2009,31(6):80-87.
- [35] 张桐,何小松,李猛,等.开垦和长期施肥下青海黑钙土中腐殖质的光谱特征[J].*土壤学报*,2019,56(2):398-407.