

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.017.

张宇恒, 王忠诚, 王亚楠, 等. 基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 241-247.

ZHANG Yuheng, WANG Zhongcheng, WANG Yanan, et al. Soil Quality Evaluation with Different Treatment Models in Yimeng Mountainous Area Based on minimum Data Set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 241-247.

# 基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的 土壤质量评价

张宇恒<sup>1</sup>, 王忠诚<sup>2</sup>, 王亚楠<sup>1</sup>, 王兴玲<sup>1</sup>, 韩佳忻<sup>1</sup>, 安娟<sup>1</sup>

(1.山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学 资源环境学院,  
山东 临沂 276005; 2.平邑县天宝山林场, 山东 临沂 273306)

**摘 要:**沂蒙山区是北方土石山区水土流失治理重点区域, 定量评价不同治理模式下的土壤质量, 进而优选适宜的生态恢复措施, 是推进沂蒙山区生态环境建设的关键。以沂蒙山区 4 种治理模式(乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草)为研究对象, 基于主成分分析、相关性分析和 Norm 值计算, 对土壤养分、孔隙、水分、容重 4 类 9 项土壤属性指标进行筛选, 构建土壤质量评价最小数据集。结果表明: (1) 治理模式对土壤理化性质具有明显影响, 硝态氮属于极敏感指标, 全氮为高度敏感指标, 而有机质、全磷、无机磷、田间持水量与饱和含水量属中度敏感指标, 土壤容重为低度敏感指标; (2) 影响沂蒙山区土壤质量的最小数据集指标包括全氮、土壤孔隙度、容重, 经总数据集验证所构建的最小数据集可体现沂蒙山区土壤质量有效信息、准确性较高; (3) 沂蒙山区不同治理模式下土壤质量指数介于 0.41~0.53, 土壤质量属于中等水平, 且 0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤质量指数较 10—20 cm 分别增加 136.20% 和 37.60%。土壤质量表现为乔草混交>土坎梯田+果树种植>撂荒>封禁植草。综上, 在水土流失严重、土壤较为贫瘠的沂蒙山区, 生态恢复措施应以乔草混交模式为主。

**关键词:**最小数据集; 治理模式; 土壤质量指数; 主成分分析; 沂蒙山区

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0241-07

## Soil Quality Evaluation with Different Treatment Models in Yimeng Mountainous Area Based on Minimum Data Set

ZHANG Yuheng<sup>1</sup>, WANG Zhongcheng<sup>2</sup>, WANG Yanan<sup>1</sup>, WANG Xingling<sup>1</sup>, HAN Jiaxin<sup>1</sup>, AN Juan<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China; 2. Tianbao Mountain Tree Farm in Pingyi, Linyi, Shandong 273306, China)

**Abstract:** Yimeng mountainous area is regarded as the key area for soil erosion control in the earth-rocky mountain areas of northern China. It is greatly necessary to make quantitative evaluation for soil quality with different treatment models and then to determine optimum treatment for ecological remediation, which is helpful to promote ecological environment construction in Yimeng mountainous area. This study took four treatment models as the research object: arbor-grass mixture, ridge terrace + orchard planting, fallow land, and banned + grass planting. In order to construct minimum data set for soil quality evaluation, nine soil attribute indices of soil nutrient, pore, water content, and soil bulk density were selected with the combined methods of principal component analysis, correlation analysis, and the calculation of Norm value. The results showed that soil physical and chemical characteristic pronouncedly varied with the change of treatment models; nitrate nitrogen was extremely sensitive indicator, and total nitrogen was highly sensitive indicator,

收稿日期: 2021-10-09

修回日期: 2021-10-28

资助项目: 水利部黄土高原水土保持重点实验室开放课题(WSLP202103); 国家自然科学基金面上项目(41977067).

第一作者: 张宇恒(2000—), 女, 山东济宁人, 本科生, 主要研究方向: 土壤质量. E-mail: 374881837@qq.com

通信作者: 安娟(1982—), 女, 山东泰安人, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究. E-mail: anjuan0715@126.com

<http://stbcj.paperonce.org>

while soil organic matter, total phosphorus, inorganic phosphorus, field capacity, saturated water capacity were moderately sensitive indicators, and bulk density were lowly sensitive indicator; three indicators including total nitrogen, soil porosity, and soil bulk density were identified as the key indicators for soil quality evaluation in the minimum data set; the verification of total data set suggested that the minimum data set could reflect the effective information and accuracy evaluation for soil quality in Yimeng mountainous area; soil quality index ranged from 0.41 to 0.53, which indicated that soil quality with different treatment models in Yimeng mountainous area was on the middle level; meanwhile, soil quality index in the 0—5 cm and 5—10 cm soil layer increased by 136.20% and 37.60% relative to that in the 10—20 cm soil layer, respectively; soil quality with different treatment models ranked in order: arbor-grass mixture>ridge terrace + orchard planting>fallow land>banned + grass planting. Therefore, the model of arbor-grass mixture was the optimal ecological remediation measure in Yimeng mountainous area with serious soil erosion and impoverished soil.

**Keywords:** minimum data set; treatment models; soil quality index; principal component analysis; Yimeng mountainous area

沂蒙山区作为北方土石山区的典型代表,区内广泛分布的棕壤性土夹杂大量石砾、土层浅薄、涵蓄水能力低,且暴雨集中、区内轻度及以上侵蚀强度面积达44%<sup>[1]</sup>,是中国土壤侵蚀治理重点区域。此外,区内土壤结构松散,土壤水分易蒸发和渗漏,且随风化裂隙多形成裂隙水,难以被植物利用。水土流失和土壤干旱致使沂蒙山区土壤退化严重,甚至出现了石漠化,加剧了土壤质量下降趋势,严重限制了该区经济发展。治理模式是影响土壤质量演变方向、强度最为关键的因子之一<sup>[2]</sup>。科学合理的治理模式可改善土壤水、肥、气、热因子的耦合关系,提高土壤质量<sup>[3]</sup>,削弱土壤侵蚀强度;不适宜的治理模式则降低水分利用效率,致使土壤质量下降,加剧土壤侵蚀。土壤质量评价是评估不同治理模式对土壤影响最为有效的手段之一,可有助于掌握不同治理模式下的土壤质量现状<sup>[4]</sup>。因此,定量评价沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量,及时掌控土壤质量动态变化,成为修复和改善该区生态环境的迫切需求。

土壤质量评价过程中,影响土壤功能且对土壤环境变化敏感的土壤物理、化学和生物特性等因子往往被作为评价指标<sup>[5]</sup>。虽然指标选取越多越能体现土壤的综合质量,但指标间往往存在一定的相关关系,这可造成指标数据间的冗余,且大量土壤质量指标的测试费时费力。因此,减少土壤质量评价指标,构建评价指标最小数据集(MDS),成为开展土壤质量评价的关键。目前,国内外一般常采用主成分分析<sup>[6-10]</sup>、聚类分析<sup>[11]</sup>、逐步回归分析<sup>[12]</sup>、典范对应分析等<sup>[13]</sup>方法建立最小数据集,多以主成分分析法为主,并基于最小数据集中各指标的权重或隶属度/指标得分获取土壤质量指数来综合评价土壤质量优劣。目前,基于最小数据集方法已在黄土高原黄土区、东北黑土区、紫色丘陵区等区域对耕地、乔草

混交、矿区废弃地等土地利用类型开展了土壤质量评价<sup>[10,14-16]</sup>。然而,受气候、水文等条件的影响,土壤类型的复杂、评价对象的多样性,评价指标选取的差异,加之评级方法的不同(过多删除指标信息,未根据指标对土壤质量影响的正负效应选取隶属度函数),使得土壤质量评价的标准难以统一。同时,针对沂蒙山区土壤质量评价的研究较少,尤其是关于该区不同治理模式下土壤质量评价的研究较为匮乏。因此,本文以沂蒙山水土保持示范园为研究地,分析径流小区内不同治理模式(乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草)下土壤理化性质,结合主成分分析、相关分析和 Norm 值计算,建立土壤质量评价最小数据集,并以此开展不同治理模式下的土壤质量评价。研究结果可为沂蒙山区乃至北方土石山区水土流失治理模式优选、土壤质量改良提供科学依据与指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于沂蒙山国家水土保持示范园(117°44'30"—117°45'00" E, 35°18'24"—35°19'05" N)。示范园建设于2012年,总面积为145 hm<sup>2</sup>。园区内多年平均降雨量803.4 mm,土壤以棕壤为主。园区内建有16个面积为5 m×10 m的径流小区,包含10°,15°,20°,25°共4个坡度,且每个坡度设4个小区。本研究选取径流小区内典型的4种治理模式:乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草。其中,乔草混交小区内按照株行距3 m×2 m种植黑松(*Pinus tabulaeformis*),并在林下撒播种植马唐草(*Digitaria sanguinalis*);土坎梯田+果树种植小区,在两个土坎上按照株行距为4 m×3 m种植桃树;撂荒小区不做任何处理;封禁植草小区内种植黑麦草(*Lolium perenne* L.)。

## 1.2 土样采集及其土壤理化性质测定

自 2013 年对 4 种治理模式下的径流小区进行监测, 次降雨结束后采集径流池内样品, 称重、烘干后, 测定径流量、泥沙量等指标。2019 年 10 月在 4 种治理模式径流小区的坡上、坡下位置利用环刀按照 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 深度采集土壤样品, 用于土壤容重、土壤总孔隙度、饱和含水量和田间持水量 4 个土壤物理指标的测定。同时, 利用土钻采集 0—5 cm, 5—10 cm, 10—20 cm 深度的土壤样品, 用于土壤化学指标的测定。土钻采集样品带回实验室避光自然风干后, 剔除石块、植物根系等杂质, 研磨后分别过 0.25 mm, 0.15 mm 土筛。全磷含量采用  $\text{HClO}_4\text{--H}_2\text{SO}_4$  法测定, 有机质含量用重铬酸钾法测定, 全氮含量利用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,  $\text{NO}_3\text{--N}$  含量用双波长系数法测定, 无机磷含量采用钼蓝比色分光光度法测定。

## 1.3 土壤质量评价

**1.3.1 最小数据集的建立** 野外径流小区监测过程中, 2014—2016 年在撂荒、土坎梯田+果树种植小区观测到部分泥沙, 但 2016 年以后仅土坎梯田+果树种植小区产生较少泥沙。因此, 未将土壤侵蚀参数纳入土壤质量评价指标体系。而, 对于土壤侵蚀严重、土层贫瘠的沂蒙山区, 土壤理化性质是制约该区生态恢复的关键因素。所以, 本文选取代表土壤养分、孔隙、水分、容重 4 类 9 个土壤属性指标构建初选指标评价体系。由于指标量纲的不统一, 先将各指标值标准化处理后进行主成分分析, 以便对指标进行降维和剔除指标间可能包含的重叠信息。主成分分析过程中, 先选取特征值  $\geq 1$  的主成分, 将同一主成分上载荷  $\geq 0.5$  的土壤指标归为一组; 同时在 2 个主成分上且载荷均  $> 0.5$  的指标, 对其做相关性分析后, 将其归到与其他指标相关性较低的那一组。

分组完成后, 分别计算各组指标的 Norm 值(公式 1), 选取每组中 Norm 值在该组最大 Norm 值 10% 范围内的指标。当同组同时保留多个指标时, 基于 Pearson 相关系数分析指标间的相关性。若指标间的相关系数  $> 0.5$ , 则认为指标间高度相关, 此时 Norm 值较高的进入最小数据集; 若相关系数  $< 0.5$ , 则全部指标均纳入最小数据集<sup>[17]</sup>。

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

式中:  $N_{ik}$  代表第  $i$  个指标在特征值  $\geq 1$  的前  $k$  个主成分的 Norm 值;  $u_{ik}$  表示第  $i$  个指标在第  $k$  个主成分的载荷;  $e_k$  为第  $k$  个主成分的特征值。

**1.3.2 土壤质量指数** 土壤质量指数(SQI)是对最

小数据集中选取指标的集成, 其值越大代表土壤质量越高。计算如下:

$$\text{SQI} = \sum A_i X'_i \quad (2)$$

式中:  $A_i$  是第  $i$  个指标的权重;  $X'_i$  是第  $i$  个指标的隶属度值。

参选指标的权重由主成分分析中该指标公因子方差占有所有指标公因子方差之和的比例确定<sup>[18]</sup>; 指标隶属度值利用指标所属的隶属度函数计算获取。基于土壤指标对土壤质量评价的正负效应, 本文选择了升型和降型两种隶属度函数(公式 3, 4), 并将指标的最小值  $x_1$  和最大值  $x_2$  作为函数的转折点<sup>[19]</sup>。

升型隶属函数:

$$X'(x) = \begin{cases} 0.1 & x \leq x_1 \\ 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \geq x_2 \end{cases} \quad (3)$$

降型隶属函数:

$$X'(x) = \begin{cases} 0.1 & x \geq x_2 \\ 0.9(x_2 - x)/(x_2 - x_1) + 0.1 & x_1 < x < x_2 \\ 1.0 & x \leq x_1 \end{cases} \quad (4)$$

## 1.4 数据处理

应用 SPSS 16.0 软件中的 Descriptive Statistics 模块对土壤属性指标进行统计性分析, 并利用该软件中的 Factor Analysis 进行相关性分析、主成分分析及 Norm 值计算, 并在 0.05 水平上达到显著。利用 Origin 8.6 软件绘制柱状和线性回归图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同治理模式间土壤理化性质差异

采用 3 个土层深度土壤理化性质指标值的算术平均值, 对比分析治理模式间土壤理化性质的差异。养分类中, 封禁植草的全氮、硝态氮、有机质、无机磷含量最高, 分别为 1.01 g/kg, 14.56 mg/kg, 20.81 g/kg, 11.76 mg/kg(表 1), 且显著高于乔草混交、土坎梯田+果树种植和撂荒; 全磷含量最高则出现在撂荒(3.28 g/kg), 但撂荒和土坎梯田+果树种植间的全磷含量无显著性差异。此外, 全氮、硝态氮、有机质、全磷、无机磷含量最低值则分别出现在乔草混交、撂荒、土坎梯田+果树种植、封禁植草和撂荒。孔隙类和水分 3 个指标中, 封禁植草的孔隙度、田间含水量和饱和含水量最高, 分别为 45.00%, 25.03% 和 29.81%, 最小值则出现在土坎梯田+果树种植。但, 撂荒和封禁植草间的孔隙度、田间含水量无显著性差异, 且乔草混交和封禁植草的饱和含水量差异不显著。土坎



梯田+果树种植的容重最大为 1.59 g/cm<sup>3</sup>,与撂荒间无显著性差异,而乔草混交的容重最小。可见,四大类各指标的评价结果无统一指向。因此,无法判定哪一种治理模式下的土壤质量更优。

表 1 土壤理化性质指标

类别	指标	治理模式				变异 系数/%
		乔草混交	土坎梯田+果树种植	撂荒	封禁植草	
养分类	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.28±0.05d	0.38±0.05c	0.52±0.07b	1.01±0.14a	62.97
	硝态氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	0.84±0.54b	0.77±0.29b	0.61±0.11c	14.56±1.58a	192.71
	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	7.64±0.81d	10.00±1.11c	12.52±1.07b	20.81±1.43a	44.64
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.87±0.07b	3.06±0.04a	3.28±0.14a	2.24±0.08c	15.48
	无机磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	5.96±0.27b	6.14±0.40b	4.65±0.43c	11.76±1.72a	49.00
孔隙类	总孔隙度/%	40.87±1.50b	40.91±0.86b	43.84±2.76a	45.00±1.59a	10.62
水分类	田间持水量/%	21.98±1.02b	22.87±0.19b	24.19±2.02a	25.03±1.45a	14.06
	饱和含水量/%	28.49±1.19a	25.35±0.59b	26.24±0.80b	29.81±1.02a	11.81
容重	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.44±0.04c	1.59±0.01a	1.58±0.02a	1.51±0.02b	6.04

注:同一行中不同小写字母代表不同治理模式间土壤养分含量、孔隙度等指标差异显著( $p<0.05$ ),相同字母表示在此水平下无显著差异。

不同治理模式下的土壤容重变异系数仅为 6.04%,属低度敏感指标( $CV\%<10\%$ 或相对极差 $<1.00$ )(表 1)。田间持水量、饱和含水量的变异系数介于 10.62%~14.06%;有机质、全磷和无机磷含量的变异系数为 15.48%~49.00%,六者均属于中度敏感指标( $10\%\leq CV\%\leq 50\%$ 或相对极差 $>1.00$ )。全氮变异系数为 62.97%,是高度敏感指标( $50\%\leq CV\%\leq 100\%$ 或相对极差 $>2.00$ );硝态氮变异系数高达 192.71%,是极敏感指标( $CV\%>100\%$ 或相对极差 $>5.00$ )。可见,土壤化学指标随治理模式的变异程度高于土壤物理指标,即土壤化学指标对治理模式更为敏感。

2.2 最小数据集的建立

为减少数据冗余,筛选最少且最为敏感的影响土壤质量的指标,需建立土壤质量评价最小数据集。对影响土壤理化性质的 9 个指标进行主成分分析,发现前 3 个主成分的特征值大于 1,且累计方差贡献率达到 89.16%(表 2)。可见,这 3 个主成分可解释大部分参评指标的变异性。

主成分 1(PC1)上载荷 $>0.5$ 的指标有 8 个,分别为全氮、有机质、全磷、无机磷、硝态氮、田间持水量、饱和含水量、土壤孔隙度(表 2)。表明,第 1 组选取指标主要反映了土壤水肥特性。主成分 2(PC2)上土壤孔隙度、田间持水量、全磷、饱和含水量的载荷均大于 0.5,说明第 2 组选取指标主要体现土壤水分特性。主成分 3(PC3)上载荷 $>0.5$ 的指标仅包含容重。进一步分析发现,土壤孔隙度、田间持水量、饱和含水量、全磷在 PC1,PC2 的载荷均大于 0.5。因此,需分析这 4 个指标与其他指标的相关性。相关分析表明,全磷与第 1 组中的全氮、有机质、无机磷、硝态氮呈极显著的负相关关系(相关系数 $>0.58$ )(表 3),且相关系数大于与第 2 组指标间的相关系数;土壤孔隙度与

第 1,2 组中的田间持水量、饱和含水量呈极显著正相关关系(相关系数 $>0.8$ ),且土壤孔隙度在 PC2 的载荷最高。因此,将全磷和土壤孔隙度归到第 2 组。则,第 1 组中包含全氮、有机质、无机磷、硝态氮、田间持水量、饱和含水量 6 个指标;第 2 组中涉及土壤孔隙度和全磷 2 个指标,第 3 组指标则为容重。

表 2 土壤指标在各主成分上的因子载荷和 Norm 值

指标	载荷矩阵			分组	Norm 值
	PC1	PC2	PC3		
有机质	0.862	-0.279	0.232	1	1.977
无机磷	0.875	-0.204	0.103	1	1.976
硝态氮	0.761	-0.471	0.072	1	1.816
田间持水量	0.709	0.652	0.08	1	1.815
饱和含水量	0.744	0.512	-0.418	1	1.857
全氮	0.918	-0.166	0.218	1	2.075
全磷	-0.657	0.531	0.17	2	1.644
土壤孔隙度	0.705	0.683	0.077	2	1.828
容重	-0.251	0.187	0.933	3	1.194
特征值	4.981	1.84	1.203		
解释方差百分比/%	55.34	20.45	13.37		
累计解释方差百分比/%	55.34	75.79	89.16		

注:PC1:主成分 1; PC2:主成分 2; PC3:主成分 3。

根据最小数据集建立原则,需计算 3 组中各指标的 Norm 值,每组中 Norm 值在最高总分值 10%范围内的指标才能最终进入最小数据集。第 1 组中,全氮的 Norm 值最大为 2.075,有机质和无机磷均在其 10%范围内,但全氮与有机质、无机磷均呈极显著正相关关系(表 3)。因此,全氮进入最小数据集。第 2 组中,土壤孔隙度的 Norm 值最大为 1.828,全磷不在其 10%范围内,虽然二者间的相关系数小于 0.5。因此,土壤孔隙度归入最小数据集。第 3 组中仅包含容重一个指标。最终,全氮、土壤孔隙度和容重 3 个指标构成土壤质量评价最小数据集。

表 3 土壤质量评价初选指标相关系数矩阵

指标	全氮	有机质	全磷	无机磷	硝态氮	田间持水量	饱和含水量	土壤孔隙度	容重
全氮	1								
有机质	0.927**	1							
全磷	-0.599**	-0.589**	1						
无机磷	0.854**	0.740**	-0.674**	1					
硝态氮	0.735**	0.808**	-0.641**	0.700**	1				
田间持水量	0.525**	0.423*	-0.115	0.498*	0.284	1			
饱和含水量	0.510*	0.413*	-0.29	0.487*	0.295	0.808**	1		
土壤孔隙度	0.542**	0.428*	-0.141	0.467*	0.206	0.926**	0.855**	1	
容重	-0.086	-0.089	0.339	-0.156	-0.228	0.019	-0.477*	0.045	1

注: \* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* 在 0.01 水平(双侧)上极显著相关。

2.3 基于最小数据集评价土壤质量准确性的验证

最小数据集构建的合理性,直接关系到土壤质量评价的准确程度。过度的简化指标,导致土壤质量评价准确度的下降。因此,需对比分析基于全部指标计算(总数据集,TDS)的土壤质量指数和基于最小数据集指标计算的土壤质量指数间的差异。全部评价指标标准化处理后进行主成分分析,用指标公因子方差占有指标公因子方差之和的比例来获取各指标的权重(表 4)。总数据集中,土壤孔隙度的权重最大(0.123),其次为饱和含水量和容重(0.121),全氮(0.114)和田间含水量(0.117)的次之;最小数据集中,权重大小顺序表现为容重(0.386)>土壤孔隙度(0.308)>全氮(0.306)。基于全氮、有机质、全磷、无机磷、硝态氮、土壤孔隙度、田间持水量、饱和含水量对土壤质量的正效应,选择升型隶属函数,根据公式(3)确定隶属度;土壤容重对土壤质量起负效应,选择降型隶属函数,根据公式(4)计算其隶属度。基于各指标的权重和隶属度,根据公式(2)分别获取不同治理模式下基于总数据集和最小数据集指标的土壤质量指数。

表 4 土壤指标的公因子方差和权重

评价指标	总数据集		最小数据集	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
全氮	0.918	0.114	0.783	0.306
有机质	0.875	0.109	—	—
全磷	0.743	0.093	—	—
无机磷	0.818	0.102	—	—
硝态氮	0.806	0.100	—	—
田间持水量	0.935	0.117	—	—
土壤孔隙度	0.990	0.123	0.787	0.308
饱和含水量	0.970	0.121	—	—
容重	0.968	0.121	0.988	0.386

基于总数据集指标的土壤质量指数(SQI-TDS)为 0.12~0.83,平均值为 0.49,变异系数为 43.44%;基于最小数据集指标的土壤质量指数(SQI-MDS)介于 0.10~0.89,平均值为 0.50,变异系数为 47.41%。为进一步验证最小数据集建立的准确性,对 SQI-TDS 和 SQI-MDS 进行线性拟合。发现,SQI-TDS

和 SQI-MDS 间呈显著的正相关关系(图 1),关系为:  $SQI-TDS=0.8615SQI-MDS+0.0603$ ,  $R^2=0.9147$ 。说明,构建的最小数据集能较好地体现全部数据集指标对沂蒙山区不同治理模式下土壤质量评价的信息,且评价结果准确性较高。

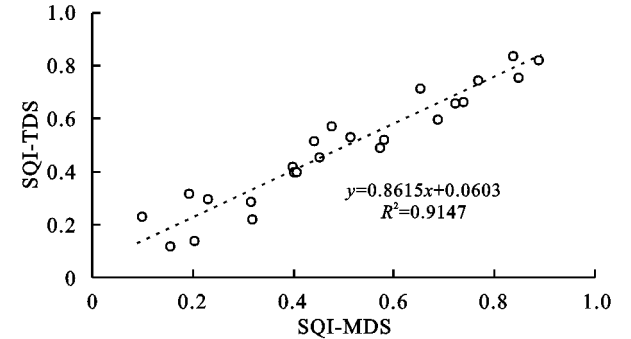


图 1 最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS)与总数据集土壤质量指数(SQI-TDS)的相关性

2.4 不同治理模式下的土壤质量评价

4 种治理模式下,土壤质量指数均随土层深度的增加而减小(图 2)。0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤质量指数较 10—20 cm 土层分别增加了 136.20% 和 37.60%。这是因为表层土壤质量通气性好、枯枝落叶物较多、透水性较好。然而,治理模式间土壤质量的差异随土层深度明显变化,且在 10—20 cm 土层深度内差异最明显(图 2)。0—5 cm 土层,乔草混交、撂荒和土坎梯田+果树种植间的土壤质量指数无显著性差异,但较封禁植草显著增加了 39.25%~46.86%。5—10 cm 土层,土壤质量指数表现为撂荒>乔草混交>封禁植草>土坎梯田+果树种植;与土坎梯田+果树种植相比,撂荒、乔草混交和封禁植草的土壤质量指数分别增加 45.91%,14.40%和 3.49%。10—20 cm 土层,乔草混交、土坎梯田+果树种植和封禁植草的土壤质量指数显著高于撂荒,分别增加 85.84%,82.22%和 34.70%。0—20 cm 土层深度内,乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草 4 种治理模式下的平均土壤质量指数分别为 0.53,0.52,0.51,0.41。可见,乔草混交和土坎梯田+果树种植的土壤质量指数较高,撂荒次之,封禁植草最小。说明,乔草

混交可有效提高土壤质量,在今后小流域治理中应重点增加乔草混交措施的经济投入。

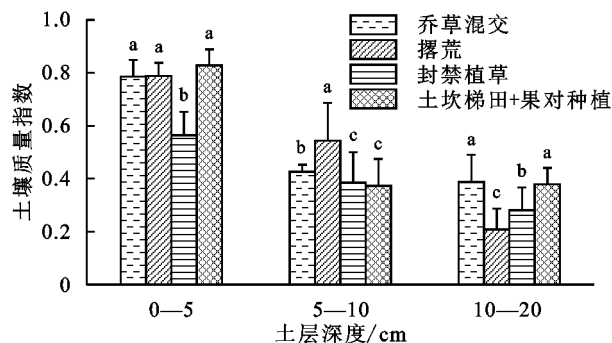


图2 不同治理模式的土壤质量指数

为更直观分析不同治理模式下的土壤质量,以0.2为组距将土壤质量指数划分为5个等级<sup>[20]</sup>。各级土壤质量指数分布如下:低( $0 < \text{SQI} \leq 0.2$ )、较低( $0.2 < \text{SQI} \leq 0.4$ )、中( $0.4 < \text{SQI} \leq 0.6$ )、较高( $0.6 < \text{SQI} \leq 0.8$ )、高( $0.8 < \text{SQI} < 1$ )。乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草4种治理模式下0—5 cm,5—10 cm和10—20 cm土层的土壤质量分别处于较高、中等、较低水平,而0—20 cm土层内4种治理模式下的土壤质量均为中等水平。说明,沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量属于中等水平。

## 3 讨论

### 3.1 沂蒙山区土壤质量评价最小数据集

不同治理模式下,地表覆被、土壤结构、物质循环等土壤理化性状和人类干扰的差异,必然会导致土壤质量的不同。土壤质量评价主要针对土壤物理、化学和生物特性进行时间或空间尺度上的判断和衡量。目前,国内外基于最小数据集建立的土壤质量评价指标体系中,物理、化学指标的选取率较高,而生物指标选取频率却相对较低<sup>[4]</sup>,选取的土壤物理和化学指标主要包括土壤容重、pH值、全氮、有机质、孔隙度、有效磷等<sup>[20-25]</sup>。其中,土壤容重是入选最高的指标,入选频率高达90%;全氮、有机质的入选率分别为70%,60%。本文利用主成分分析,结合相关性分析和Norm值计算开展了最小数据集的筛选,这考虑了各个指标在所有主成分上的载荷,保留了指标在其他主成分上的信息,最终筛选出全氮、总孔隙度和容重为最小数据集指标。沂蒙山区棕壤砂砾含量达70%以上<sup>[26]</sup>,腐殖质层呈暗棕色,有机质含量较低,且与全氮呈极显著正相关关系,因此未纳入最小数据集。可见,本研究筛选出的3个指标均进入了土壤质量评价指标的前10位。此外,全氮含量在一定程度上代表了土壤肥力的高低,总孔隙度反映了土壤保持水分的能力,而容重也有助于土壤保持、释放水分和养分。说明,本文筛选出的这3个指标体现了土壤的水肥能

力,建立的最小数据集指标体系具有较好地地代表性,可准确量化沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量。由于沂蒙山区是北方土石山区水土流失重点治理区域,后续研究中可结合抗冲性、土壤崩解等试验,将影响土壤侵蚀性能的指标,如:侵蚀模数、径流量、可蚀性等纳入初选指标评价系统,以便提高所构建最小数据集的普适性和应用性。

### 3.2 沂蒙山区土壤质量评价及治理模式优选

本研究基于建立的最小数据集指标,获取乔草混交、土坎梯田+果树种植、撂荒、封禁植草4种治理模式下的土壤质量指数,发现乔草混交的质量最高,土坎梯田+果树种植和撂荒次之,封禁植草土壤质量最差。这与在国内其他区域开展的研究结果不一致。黄土高原区域,马芊红等<sup>[27]</sup>认为土壤质量表现为乔草混交>封禁植草>土坎梯田+果树种植>撂荒;南方丘陵区,闫建梅等<sup>[28]</sup>发现土坎梯田+果树种植的质量优于乔草混交和撂荒;盐渍化黄河三角洲区域,刘庆等<sup>[29]</sup>发现土坎梯田+果树种植利用方式下的土壤质量高于乔草混交和撂荒。这是因为沂蒙山区大力实行封山育林、人工林种植,树种以侧柏(*Platycladus orientalis*)、黑松、麻栎(*Quercus acutissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等为主,枯枝落叶物丰富、表层土壤通气性与透水性良好。同时,乔草混交植被系统可增加土壤微生物量<sup>[30]</sup>,进而加快有机质矿化和腐殖化速率。因此,乔草混交很好地改善和维持土壤肥力质量,体现出较高的土壤质量指数。然而,撂荒治理模式下的土壤表层易板结、养分含量低,不利于植被的演替和土壤生物活动,土壤质量较低。因此,在沂蒙山区小流域综合治理中,应将撂荒与人工林、经济林相结合。此外,为了加强沂蒙山区水土流失防治、土壤质量的提升,同时提高经济效益,可选择种植果树。而,当地优势果树(桃、苹果)一年中需4个灌水期,需水量较大,可结合果树盘草、秸秆覆盖等措施增加土壤含水量。沂蒙山区土层浅薄,棕壤砂砾含量大,且易“跑水、跑土、跑肥”,土壤酸化严重、有机质较为缺乏,土壤相对比较贫瘠。因此,根据沂蒙山区不同治理模式下土壤属性的变化,应继续推进封山育林、增加乔草混交覆盖率,同时结合土坎梯田+果树种植+树盘植草。这不仅可削弱该区水土流失强度、增加水源涵养量,改善生态环境,还可提高当地经济效益。

## 4 结论

(1) 土壤化学指标属中度到极敏感指标,而物理指标则为低度到中度指标。土壤化学指标随治理模式的变异性高于土壤物理指标。

(2) 沂蒙山区土壤质量评价最小数据集由全氮、土壤孔隙度、容重3个指标构成,且权重表现为容重



(0.386) > 土壤孔隙度(0.308) > 全氮(0.306)。

(3) 基于总数据集与最小数据集计算的土壤质量指数无明显差异,且二者呈极显著的正相关关系( $R^2=0.92$ )。说明,构建的最小数据集能较准确地体现沂蒙山区土壤质量信息。

(4) 4 种治理模式下,0—5 cm 和 5—10 cm 土层的土壤质量指数较 10—20 cm 土层分别增加 136.20% 和 37.60%。不同治理模式下的土壤质量指数表现为乔草混交 > 土坎梯田 + 果树种植 > 撂荒 > 封禁植草。总体来看,沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量属于中等水平。

#### 参考文献:

- [1] 张明礼,杨浩,徐从安,等.沂蒙山区土壤侵蚀的<sup>137</sup>Cs 示踪法初步研究[J].土壤学报,2010,47(3):408-414.
- [2] 史志华,蔡崇法,王天巍,等.红壤丘陵区土地利用变化对土壤质量影响[J].长江流域资源与环境,2001,10(6):537-543.
- [3] 赵其国,吴志东.深入开展“土壤与环境”问题的研究[J].土壤与环境,1999,8(1):1-4.
- [4] 李鑫,张文菊,郭磊,等.土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J].中国农业科学,2021,54(14):3043-3056.
- [5] Takoutsing B, Weber J, Aynekulu E, et al. Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon[J]. Geoderma, 2016,276:64-73.
- [6] 刘江,吕涛,张立欣,等.基于主成分分析的不同种植年限甘封禁植草土壤质量评价[J].草业学报,2020,29(6):162-171.
- [7] Fernando S F, Antonio M G, Carmelo A Z, et al. Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility(Northern Plateau, Spain)[J]. Geoderma, 2019,354:113872.
- [8] 陈欢,曹承富,张存岭,等.基于主成分—聚类分析评价长期施肥对砂姜黑土肥力的影响[J].土壤学报,2014,51(3):609-617.
- [9] Rezaei S A, Gilkes R J, Andrews S S. A minimum data set for assessing soil quality in rangelands[J]. Geoderma, 2006,136(1):229-234.
- [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] 吴玉红,田霄鸿,南雄雄,等.基于因子和聚类分析的保护性耕作土壤质量评价研究[J].中国生态农业学报,2010,18(2):223-228.
- [12] Svoray T, Hassid I, Atkinson P M, et al. Mapping soil health over large agriculturally important areas[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(5):1420-1434.
- [13] 李静鹏,徐明锋,苏志尧,等.不同植被恢复类型的土壤肥力质量评价[J].生态学报,2014,34(9):2297-2307.
- [14] 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.
- [15] 杨振奇,秦富仓,于晓杰,等.基于最小数据集的砒砂岩区人工乔草混交土壤质量评价指标体系构建[J].土壤通报,2019,50(5):1072-1078.
- [16] 苗淑杰,赵红飞,乔云发,等.基于耕作指数评价耕作措施对东北风沙土耕层土壤质量的影响[J].中国土壤与肥料,2019(4):9-15.
- [17] 李桂林,陈杰,孙志英,等.基于土壤特征和土地利用变化的土壤质量评价最小数据集确定[J].生态学报,2007,27(7):2715-2724.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 许明祥.黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2003.
- [21] 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.
- [22] 贡璐,张雪妮,冉启洋.基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价[J].土壤学报,2015,52(3):682-689.
- [23] 张丽星,海春兴,常耀文,等.羊草及芨芨草原和西北针茅草原土壤质量评价[J].草业学报,2021,30(4):68-79.
- [24] Nosrati K. Assessing soil quality indicator under different land use and soil erosion using multivariate statistical techniques [J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013,185(4):2895-2907.
- [25] Mukhopadhyay S, Mastro R E, Yadav A, et al. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil [J]. Science of the Total Environment, 2016,542:540-550.
- [26] An J, Liu Q J, Wu Y Z. Optimization of the contour ridge system for controlling nitrogen and phosphorus losses under seepage condition[J]. Soil Use and Management, 2015,31:89-97.
- [27] 马芊红,张光辉,耿韧,等.黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].水土保持研究,2018,25(4):30-42.
- [28] 闫建梅,何丙辉,田太强,等.川中丘陵区不同治理模式对土壤质量的影响[J].灌溉排水学报,2015,34(10):73-76.
- [29] 刘庆,吕振江,郑文爽,等.黄河三角洲不同治理模式对土壤的改良效应[J].土壤通报,2011,42(2):262-266.
- [30] 汪明冲,张新长,李辉霞,等.喀斯特石漠化生态恢复过程中土壤质量变化分析:以古周生态恢复重建区为例[J].生态环境学报,2016,25(6):947-955.