

兰州市北山削山造地的土壤质量变化评价

任秀子¹, 王龙², 徐学选³, 张连科⁴

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2.北京良乡蓝鑫水利工程设计有限公司, 北京 102488;
3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.甘肃省科学院 地质自然灾害防治研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: [目的] 评价兰州市北山削山造地引起的土壤质量变化, 旨在为该区削山造地工程和生态效益评价提供科学依据和建议。[方法] 选择兰州市城关区北山原有耕地、林地、草地、削山产生的新造地4种土地利用方式, 采集土壤物理性质、化学性质和根系生物量样品, 基于主成分分析法(principal component analysis, PCA)筛选出最小数据集(minimum data set, MDS), 通过土壤质量指数对兰州市北山土壤质量进行评价。[结果] ①基于包括12项理化指标的土壤质量全数据集(total data set, TDS)的主成分分析, 构建了由容重、速效磷、速效钾、全氮、pH值组成的最小数据集。②兰州市北山4种土地利用方式下土壤质量指数排序为: 耕地>林地>新造地>草地, 削山造地显著影响了土壤的水分保持、有机质积累、全氮、速效钾含量等。③最小数据集和全数据集之间相关性系数为0.66, 最小数据集能够较好地进行土壤质量评价($p<0.01$)。[结论] 兰州市北山的耕地和林地具有更好的土壤质量, 新造地土壤的持水与积累养分能力低于原有耕地和林地, 是未来植被恢复和重建的重点区域。削山造地时应尽量安排在草地上进行, 注意对原有耕地和林地的保护。

关键词: 土壤质量; 最小数据集; 主成分分析; 削山造地; 兰州市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0061-07

中图分类号: S157.2

文献参数: 任秀子, 王龙, 徐学选, 等. 兰州市北山削山造地的土壤质量变化评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 61-67, 82. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.008; Ren Xiuzi, Wang Long, Xu Xuexuan, et al. Evaluation on soil quality changes due to land from hill cutting in Beishan Mountain in Lanzhou City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 61-67, 82.

Evaluation on Soil Quality Changes due to Land from Hill Cutting in Beishan Mountain in Lanzhou City

Ren Xiuzi¹, Wang Long², Xu Xuexuan³, Zhang Lianke⁴

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2.Beijing Liangxiang Lanxin Hydraulic Engineering & Design Co., Ltd, Beijing 102488, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Geological Hazards Prevention Research Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: [Objective] The soil quality changes caused by land from hill cutting in Beishan Mountain in Lanzhou City were assessed in order to provide a scientific basis and suggestions for land-cutting and land-reclamation projects and ecological benefit evaluation in this area. [Methods] We selected four land use types for evaluation: original cultivated land, forest land, grassland, and newly reclaimed land created by mountain cutting in Beishan Mountain of Chengguan District, Lanzhou City. We collected soil physical properties, chemical properties, and root biomass samples. We screened the minimum data set based on principal component analysis (PCA), and evaluated the soil quality of Beishan Mountain through the soil quality index. [Results] ① Based on the principal component analysis of the full data set of soil quality (including 12 physical and chemical indicators), a minimum data set consisting of bulk density, available

收稿日期: 2022-09-10

修回日期: 2022-12-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵区土壤斥水性及其对降水入渗机制的影响研究”(41977426); 甘肃省科学院应用研究与开发项目“马兰黄土边坡土壤侵蚀降雨模拟研究”(JK-2019-07)

第一作者: 任秀子(1999—), 女(汉族), 陕西省勉县人, 硕士研究生, 研究方向为草地生态。Email: 2021051671@nwfufu.edu.cn.

通讯作者: 徐学选(1966—), 男(汉族), 陕西省大荔县人, 博士, 研究员, 主要从事草地生态方面的研究。Email: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn.

phosphorus, available potassium, total nitrogen, and pH value was constructed. ② Soil quality index for the four land use types followed the order of cultivated land > forest land > newly reclaimed land > grassland. Hill cutting significantly affected soil water conservation, organic matter accumulation, total nitrogen, available potassium, etc. ③ The correlation coefficient between the minimum data set and the full data set was 0.66, and the minimum data set better evaluated soil quality ($p < 0.01$). [Conclusion] Cultivated land and forest land in Beishan Mountain had better soil quality than grassland and newly reclaimed land. Water holding capacity and nutrient accumulation capacity of newly reclaimed land was lower than that of cultivated land and forest land, which is a key area for future vegetation restoration and reconstruction. Land cutting on mountains should take place on grasslands as far as possible, and attentions should be given to the protection of original cultivated land and forest land.

Keywords: soil quality; minimum dataset; principle component analysis (PCA); land from hill cutting; Lanzhou City

21 世纪后中国经济飞速发展引起部分区域城市空间的不足,位于黄土高原西部的兰州市城关区因其典型的带状狭长地貌,长期存在自然生态保护与城市用地扩建冲突的矛盾^[1]。削山造地作为一种更符合经济规律的城市化政策在兰州市城关区北山实施,尽管削山整地区主要土地为未利用荒山,通过削去山头,将无法建设的沟壑整理为城市可利用土地。但在土壤侵蚀强度大的山坡地整治土地后,原有的植被被破坏,水土流失时有发生^[2],脆弱的生态环境面临巨大的风险和挑战。研究^[3]表明,近年来城市化过程中人为扰动导致土壤侵蚀程度的加剧已影响人类发展,如何协调好削山造地和生态保护是目前的急迫任务。削山造地会引起土地利用格局发生变化,导致区域土壤质量改变,众多国内外学者在寻求解决土壤退化和改善土壤环境等内容时都选择了土壤质量这一综合指标^[4-5]。土壤质量评价作为衡量不同空间或时间尺度土壤属性的重要方式,可评价不同土地利用方式下土壤的响应。到目前为止,尽管国内外没有统一的土壤质量评价标准体系,但有诸多被普遍使用的土壤质量评价方法。如国外多用克立格法^[6]、土壤质量动力学^[7]、土壤质量综合评分,后者一般通过建立最小数据集评价土壤质量^[8]。国内多用土壤质量定量评价方法,包括:层次分析法、主成分分析法、模糊评价法、神经网络法、“3S”技术评价法、灰色关联分析法等^[9]。主成分分析法通过降维减少变量的干扰,能够提取原始变量信息,但由于各因素载荷值具有正负性,影响最终评价结果的准确性^[10-11]。各个评价方法具有适合的应用范围,评价方法的结果也会受到选取指标的影响,结果通常具有不一致性。目前针对削山造地对兰州北山生态环境的影响,已开展不同方面研究工作。有学者^[12]预测开发新城对生态环境、水土流失、土地利用等方面的影响。彭建等^[13]提出评估削山生态风险的方法和基本框架。但国内并没有针对削山造地区土壤质量变化以及如何为削山造地工

程提出合理利用土地资源建议的研究。同时在西北地区土壤数据库往往不健全,在全数据集不足的情况下建立最小数据集的方法十分重要。为此,本研究将利用主成分分析法和土壤质量指数法评价甘肃省兰州市城关区北山削山造地后土壤质量,旨在了解兰州市城关区人为扰动下的土壤质量状态,为削山造地工程提供科学依据和建议。

1 材料与方 法

1.1 研究区及样地概况

兰州市城关区(35°56′—36°10′N, 103°46′—103°59′E),海拔 1 503~2 171 m,属于黄土高原丘陵沟壑区,自北向南可大致划分为北山、城区和南山,总面积约为 208 km²。研究区域位于季风与非季风交界地带,温带半干旱气候,年平均气温约为 11.5 ℃,夏季 7—8 月降水量多,最大小时雨强为 52.2 mm,冬季月均降水量小于 3 mm,年均蒸发量 1 441 mm。北山主要土质为灰钙土^[1],pH 值在 8~9 之间。降水量少而集中、蒸发强度大、温度适宜以及日照充足是研究区的主要气候特点。

1.2 样品采集与分析

1.2.1 代表样地选取 试验根据兰州市城关区北山削山造地后形成的新造地、北山原有的耕地、林地、草地等 4 个类别,选择当地面积较大、现状土地利用年限长(年限为 20 a 以上)的侧柏油松混交林地,梯田农地、多年自然草地以及新造地(年限 < 5 a)(表 1)。

1.2.2 样品的采集 于 2021 年 7 月在每种土地利用方式下选定相同坡向的 3 个平缓样地,每个样地分别随机设定 3 个样点:用直径 50.46 mm,高 50 mm 的环刀在每个样点采集表层 0—30 cm 土壤样品,测定土壤总孔隙、容重、含水率的土壤样品有 38 个;同时,在每个样点用 10 cm×15 cm 自封袋采集土样,去除植物根系和石块,带回实验室自然风干,用于土壤化学性质的测定,有 38 个样品。直径 10.6 cm,高

15 cm的环刀取每个样点的土样,用于测定根系生物量,39个样品,共计土壤样品 115 个。

表 1 代表样地基本情况

Table 1 Represents basic situation of sample plot

土地利用方式	海拔/m	植被覆盖度/%	群落主要物种
耕地	2 063	90	牡丹(<i>Paeonia × suffruticosa</i>) 酥梨(<i>Pyrus bretschneideri</i>)
林地	2 047	65	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>) 油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>) 白茅(<i>Imperata cylindrica</i>) 白莲蒿(<i>Artemisia sacrorum</i>)
草地	1 778	70	长芒草(<i>Stipa bungeana</i>) 多裂骆驼蓬(<i>Peganum multisectum</i>)
新造地	1 618	20	柽柳(<i>Tamarix chinensis</i>) 白茎盐生草(<i>Halogeton arachnoideus</i>) 黄花补血草(<i>Limonium aureum</i>) 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)

1.2.3 具体分析方法 本研究共测定土壤物理化学指标 12 项。容重、总孔隙度采用环刀法测定;含水率采用烘干法测定;采用土壤团聚体干筛—湿筛方法获得不同粒级组分数据,计算团聚体破坏率指标。土壤养分状况参考常规方法测得:浓 H_2SO_4 消煮—凯氏定氮法测定全氮;碱解扩散法测定碱解氮;土壤速效磷含量采用 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用 NH_4OAc 浸提—火焰光度法测定; $K_2Cr_2O_7$ —浓 H_2SO_4 外加热法测定土壤有机质;pH 值测定时采用 1:2.5 土水比电位法(Satorius PB-10, Germany);电导率测定时采用 1:5 土水比电导法(雷磁 DDSJ-308F, 上海)测定。根系生物量采用烘干法测定,先用粗筛筛去与根系脱离的土壤,采用漂洗法清洗根系,在烘箱内烘干至恒重,并称量获取每个样点的根系生物量^[14-15]。

1.3 土壤质量指数法

(1) 构建最小数据集。多指标评价土壤质量计算过程繁琐冗杂,最小数据集(minimum data set, MDS)能够指示对土壤功能和最终评价结果有显著影响的指标^[16-17]。主成分分析(principal component analysis, PCA)能将大量指标转化为少量指标,广泛应用于土壤质量评价研究^[18]。总体步骤为:各项土壤理化指标主成分分析完毕后,提取特征值 ≥ 1 的主成分,主成分中载荷 ≥ 0.5 的分为一组。分组后,每组中因子 Norm 值在该组最大 Norm 值 10%范围内的因子入选最小数据集。若各项土壤理化指标显著相关($p < 0.05$),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 值为该指标在所有主成分上的综

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^[19-20]。

Norm 值计算公式为:

$$N_{xy} = \sqrt{\sum_{x=1}^m (u_{xy}^2 t_y)} \quad (1)$$

式中: N_{xy} 表示第 x 个因子在特征值大于 1 的前 y 个主成分的 Norm 值; U_{xy} 表示第 x 个因子在第 y 个主成分的载荷; t_y 为第 y 个主成分的特征值。

(2) 土壤指标非线性评分。土壤指标测定值通过非线性计算转换为各指标得分值,模型为:

$$S_i = \frac{A}{1 + (x/x_0)^B} \quad (2)$$

式中: S_i 为介于 0~1 之间的土壤指标得分; A 为最大得分,被确定为 1; x 为土壤指标实测值; x_0 为相应的指标平均值; B 为方程的斜率,“越多越好”类型指标被确定为 -2.5,“越少越好”类型指标被确定为 2.5^[20]。

(3) 计算评价因子的权重。因子权重为主成分分析的公因子方差占总公因子方差的比例^[21]。

(4) 土壤质量指数的计算。将土壤各指标的非线性评分和权重代入公式(3)计算土壤质量指数(soil quality index, SQI)。

$$SQI = \sum_{i=1}^n T_i S_i \quad (3)$$

式中: S_i 代表指标得分; n 为指标数量; T_i 代表指标权重值;SQI 值越高,代表土壤质量更好。

1.4 数据处理

基于 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 对数据进行 Spearman 相关性分析、单因素方差分析和主成分分析,Origin 2022 绘制柱状图和箱线图,R 4.2.1 进行线性回归分析并绘制回归图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用下的土壤质量表现

不同土地利用方式下土壤物理、化学性质详见表 2。表 2 表明,各样地中新造地容重、团聚体破坏率、速效磷、pH 值、电导率质量分数最高,土壤含水量、总孔隙度、速效钾质量分数最低。①土壤含水量。与新造地($6.29 \pm 2.18\%$)相比,林地($12.28 \pm 6.68\%$)、耕地($8.42 \pm 1.00\%$)、草地($6.83 \pm 3.32\%$)都增加了土壤含水量,林地土壤有更多储水,显著高于其他样地($p < 0.05$);草地的含水率相对于新造地增加最少。②团聚体破坏率。新造地中最高($92.16 \pm 8.27\%$),显著高于其他样地($p < 0.01$),草地($35.65 \pm 9.67\%$)相比林地($48.65 \pm 26.48\%$)、耕地($62.64 \pm 11.89\%$)更大程度地缓解了团聚体被破坏的程度。③总孔隙

度。林地 ($56.39 \pm 4.65 \text{ g/cm}^3$) 最高, 新造地最低 ($51.40 \pm 2.78 \text{ g/cm}^3$), 新造地的总孔隙度显著低于原有土地。④不同土地利用方式下氮、磷、钾的速效成分等都有显著差异 ($p < 0.01$)。新造地速效磷 ($5.74 \pm 0.45 \text{ mg/kg}$)、电导率 ($543.56 \pm 98.94 \mu\text{S/cm}$) 高于其他样地。耕地速效钾 ($228.67 \pm 48.66 \text{ mg/kg}$)、有机质 ($8.18 \pm 2.63 \text{ g/kg}$)、根系生物量 ($3\ 003.65 \pm$

$1\ 795.67 \text{ kg/m}^3$) 在 4 种样地中最高。4 种样地全氮质量分数没有显著差异 ($p > 0.05$)。⑤根系生物量中, 林地、耕地的根系生物量显著高于草地根系生物量 ($383.59 \pm 325.01 \text{ kg/m}^3$)、新造地根系生物量 ($559.56 \pm 705.90 \text{ kg/m}^3$)。以上结果表明, 兰州市北山的林地、耕地相对于草地和新造地在土壤物理、化学、生物指标方面有明显差异。

表 2 不同样地土壤基本性质

Table 2 Basic properties of different soils

土壤指标	耕地	林地	草地	新造地	F	p
土壤容重/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	1.19 ± 0.04^b	1.05 ± 0.22^c	1.16 ± 0.06^{bc}	1.49 ± 0.07^a	20.717	0.000**
土壤含水量/%	8.42 ± 1.00^a	12.28 ± 6.68^a	6.83 ± 3.32^b	6.29 ± 2.18^b	4.277	0.012*
团聚体破坏率/%	62.64 ± 11.89^b	48.65 ± 26.48^{bc}	35.65 ± 9.67^c	92.16 ± 8.27^a	21.057	0.000**
总孔隙度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	54.41 ± 1.83^{ab}	56.39 ± 4.65^a	54.09 ± 3.27^{ab}	51.40 ± 2.78^b	3.507	0.026*
速效磷/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.99 ± 0.27^{bc}	4.46 ± 1.36^b	3.51 ± 0.61^c	5.74 ± 0.45^a	13.078	0.000**
速效钾/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	228.67 ± 48.66^a	167.44 ± 21.21^b	177.11 ± 21.24^b	163.78 ± 30.36^b	7.803	0.000**
pH 值	8.70 ± 0.23^b	8.62 ± 0.10^b	8.93 ± 0.14^a	9.00 ± 0.28^a	7.234	0.001**
电导率/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	160.71 ± 50.81^b	164.11 ± 63.46^b	154.01 ± 67.14^b	543.56 ± 98.94^a	63.493	0.000**
全氮/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.39 ± 0.18^a	0.36 ± 0.12^a	0.37 ± 0.16^a	0.37 ± 0.13^a	0.059	0.981
碱解氮/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	40.83 ± 5.19^b	66.22 ± 28.83^a	29.63 ± 3.77^b	29.70 ± 6.12^b	11.757	0.000**
有机质/ $(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	8.18 ± 2.63^a	7.15 ± 3.03^a	4.30 ± 1.11^b	4.73 ± 1.67^b	6.279	0.002**
根系生物量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$3\ 003.65 \pm 1\ 795.67^a$	$2\ 719.78 \pm 1\ 598.10^a$	383.59 ± 325.01^b	559.56 ± 705.90^b	10.846	0.000**

注:表中数据为平均值±标准误,同行不同字母表示在 0.05 水平上差异显著,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 (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$),不同字母表示差异显著。

2.2 基于主成分的最小数据集对土壤质量的评价

2.2.1 最小数据集的确定 基于最小数据集对土壤质量的多维参数进行主成分分析,发现其前 4 个主成分(表 3),累积贡献率达 77.852%,前 4 个主成分特征值大于 1。因此将 12 个土壤指标通过主成分分析分

为 4 组。土壤质量指标的公因子方差表明,4 组主成分能够解释容重、速效磷 90% 以上的差异,碱解氮 80% 以上的差异,含水率、团聚体破坏率、pH 值、电导率、全氮 70% 以上的差异,总孔隙度、有机质、根系生物量 60% 以上的差异;速效钾 50% 以上的差异。

表 3 各土壤指标载荷矩阵及 Norm 值

Table 3 Load matrix and Norm values of various soil indicators

土壤指标	主成分				分组	Norm 值
	1	2	3	4		
BD	-0.930	0.057	0.207	-0.049	1	<u>2.066</u>
SP	0.714	0.547	-0.164	0.221	1	<u>1.777</u>
PAD	-0.705	0.406	0.144	-0.211	1	1.678
TP	0.606	-0.053	-0.284	0.226	1	1.400
AP	-0.201	0.916	0.082	0.174	2	<u>1.376</u>
AK	0.412	-0.203	0.536	0.271	3	<u>1.181</u>
pH	-0.490	0.100	-0.243	0.790	4	<u>1.396</u>
EC	-0.748	0.496	0.230	-0.059	1	1.811
TN	0.187	-0.28	0.725	0.259	3	<u>1.071</u>
AHN	0.810	0.458	-0.010	-0.020	1	1.897
SOM	0.689	0.080	0.567	0.087	1	1.669
RB	0.680	0.372	-0.051	-0.420	1	1.647
特征值	4.856	1.971	1.427	1.088		
解释方差百分比/%	40.467	16.427	11.895	9.063		
累计解释百分比/%	40.467	56.893	68.788	77.852		

注:BD 代表容重;SP 代表含水率;PAD 代表团聚体破坏率;TP 代表总孔隙度;AP 代表速效磷;AK 代表速效钾;EC 代表电导率;TN 代表全氮;AHN 代表碱解氮;SOM 代表有机质;RB 代表根系生物量。下同。Norm 值有下划线的指标入选最小数据集。

根据最小数据集的构建原则,参评的土壤参数先根据主成分分析结果中的载荷分组,选取载荷大于 0.5,因子间相关系数低位代表最小数据集。将所有的土壤质量指标分为以下 4 组,第 1 组包括容重、含水率、团聚体破坏率、总孔隙度、电导率、碱解氮、有机质、根系生物量;第 2 组包括速效磷;第 3 组包括速效钾、全氮;第 4 组包括 pH 值。

按照每组中各项参数的 Norm 值在最高值 10% 范围内的选取原则,同时比较同组内两两指标间 Spearman 相关系数(表 4)。第 1 组土壤参数 Norm 值

最高的是土壤容重,为 2.066,在 10% 范围内的指标只有碱解氮,但碱解氮和土壤容重显著相关($p < 0.05$),因此只有容重入选最小数据集;第 2 组中,速效磷作为唯一的参数入选最小数据集;第 3 组中速效钾的 Norm 值为 1.181,高于全氮, Norm 值为 1.071,全氮在速效钾的 10% 范围内,但两者不显著相关,因此速效钾和全氮都被入选为最小数据集;4 组中,pH 值作为唯一指标入选最小数据集。本研究中土壤质量评价指标最小数据集为容重、速效磷、速效钾、全氮、pH 值(表 5)。

表 4 各土壤指标间相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix between various soil indicators

项目	BD	SP	PAD	TP	AP	AK	pH	EC	TN	AHN	SOM	RB
BD	1											
SP	-0.494**	1										
PAD	0.819**	-0.279	1									
TP	-0.434**	0.112	-0.306	1								
AP	0.448**	0.182	0.455**	-0.440**	1							
AK	-0.284	0.169	-0.308	0.183	-0.034	1						
pH	0.306	-0.050	0.208	0.009	0.180	0.018	1					
EC	0.699**	-0.550**	0.645**	-0.508**	0.385*	-0.319	0.010	1				
TN	-0.129	0.161	-0.076	-0.132	-0.006	0.071	-0.199	0.021	1			
AHN	-0.408*	0.510**	-0.198	0.275	-0.045	0.218	-0.552**	-0.370*	0.653**	1		
SOM	-0.449**	0.412*	-0.310	0.274	0.016	0.559**	-0.477**	-0.268	0.266	0.651**	1	
RB	-0.373*	0.516**	-0.136	0.309	0.022	0.218	-0.541**	-0.243	-0.093	0.662**	0.512**	1

注:采用单因素方差 LSD 法分析指标间相关性,*表示 $p < 0.05$ 水平显著相关,**表示 $p < 0.01$ 水平极显著相关。

表 5 土壤质量评价最小数据集和全数据集公因子方差和权重
Table 5 Common factor variance and weights of minimum and full dataset for soil quality evaluation

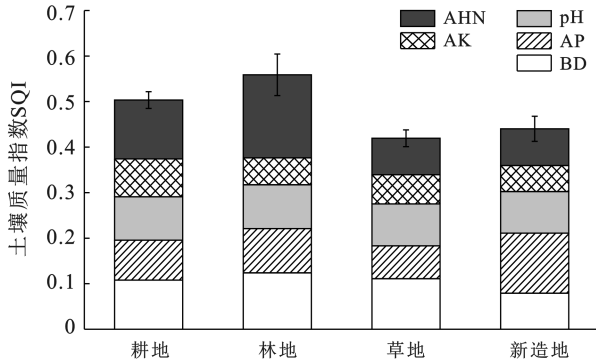
指标	总数据集 TDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
BD	0.914	0.087 8	0.596	0.211 2
SP	0.884	0.100 1		
PAD	0.727	0.091 0		
TP	0.502	0.071 8		
AP	0.917	0.072 6	0.399	0.172 9
AK	0.573	0.076 6	0.477	0.196 3
pH	0.933	0.084 4	0.579	0.207 2
EC	0.861	0.097 0		
TN	0.575	0.051 8	0.721	0.212 5
AHN	0.866	0.089 0		
SOM	0.809	0.086 7		
RB	0.780	0.091 2		

2.2.2 土壤质量指数 如图 1 所示,不同土地利用下,基于最小数据集的土壤质量评价指数为:耕地(0.511 7±0.018 5) > 林地(0.498 6±0.045 6) > 新造地(0.467 4±0.018 4) > 草地(0.475 7±0.027 6)。耕

地、林地土壤质量指数高于新造地和草地($p < 0.05$)。新造地的土壤质量指数略高于草地,削山造地如果能尽量在荒草地上进行,会较好地减少环境影响。MDS 中各理化指标对土壤质量指数的影响如图 2 所示,土壤容重对 4 种土地利用方式下的土壤质量影响最大,土壤质量指数分布在 0.075~0.179,均值为 0.107;速效磷对土壤质量影响最小,其土壤质量指数分布在 0.040~0.135,均值为 0.083。MDS 中各土壤理化指标对土壤质量指数的影响大小依次为:土壤容重 > 全氮 > pH 值 > 速效钾 > 速效磷。

2.2.3 基于最小数据集的土壤质量评价方法的适用性验证 多指标实测值进行分析费时费力,最小数据集虽能简化土壤评价指标,但需要验证其代表性。MDS-SQI 变化幅度介于 0.364~0.597,变异系数为 14.6%;TDS-SQI 变化幅度为 0.389~0.710,变异系数为 18.2%,两者都属于低度敏感水平,显示兰州市削山造地区土壤质量空间分布较均匀。通过最小数据集和全数据集的土壤综合质量指数非线性比较可知两者之间相关性较高(图 3)。非线性评价方法回归

方程为： $y = 1.106x - 0.013$ ($n = 36, R^2 = 0.66, p < 0.01$), 其中, y 代表总数据集, x 代表最小数据集。说明基于最小数据集的土壤质量评价指标可以代替全数据集对兰州市削山造地地区不同土地利用方式下的土壤质量进行评价。



注:不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

图 1 不同土地利用类型的土壤质量指数

Fig.1 Soil quality index of different land use types

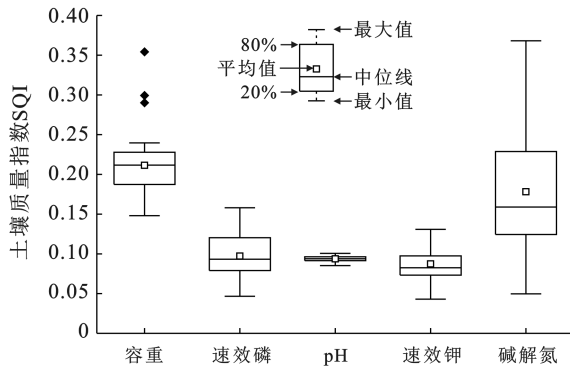


图 2 最小数据集 (MDS) 土壤理化指标对土壤质量指数的影响

Fig.2 Impact of minimum dataset (MDS) soil physical and chemical indicators on soil quality index

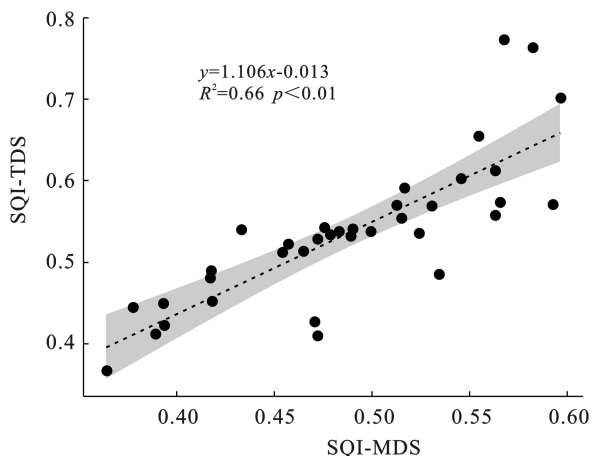


图 3 土壤质量指数的最小数据集和总数据集之间的关系

Fig.3 Relationship between minimum dataset and total dataset of soil quality index

3 讨论

3.1 土壤质量评价方法

本研究基于主成分分析评价兰州市城关区削山造地土壤质量,确定由容重、速效磷、速效钾、碱解氮、pH 构成的最小数据集。不同的土地特性和利用类型决定了最小数据集指标的多样性^[22]。李霞等^[23]对大渡河中游干暖河谷草地土壤质量进行评价时,基于主成分和 Norm 值,确定的 MDS 包括土壤非毛管孔隙度、容重、有机质和碳氮比;梅楠等^[24]采用主成分和 Norm 值的方法,选用容重、pH 值、有机质、速效磷作为土壤质量评价指标;李桂林等^[25]基于苏州城市边缘带土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集,选取有机质、pH 值、容重、速效磷、速效钾等指标。本研究中不同土地利用类型 MDS 与其他研究不同之处在于入选指标主要为速效养分。从相关性(表 4)也可以看出土壤有机质与全氮相关性较低,但与碱解氮、速效钾显著相关($p < 0.01$),说明速效养分能更好地解释土壤养分的变化。这可能与全量养分在土壤中较稳定,受随机因素影响较小,速效养分在土地利用方式变化时的响应更加突出有关^[26-28]。Norm 值与主成分分析相结合更好地避免了单一参照某指标在一个 PC(特征值 ≥ 1)上的荷载从而进入 MDS 的不全面性^[14]。且 MDS-SQI 和 TDS-SQI 结果进行线性回归分析的结果证明了 MDS 的可靠性和合理性。本研究对各指标得分采用非线性变换,前人^[29]研究表明与线性变换方法相比,非线性变换更能准确地反映土壤过程及功能。

3.2 土壤质量评价结果

本研究中土壤质量指数结果显示削山造地形成的新造地土壤质量,在短时间内与其他土地利用类型相比较差。与新造地相比,林地和耕地的土壤容重低,土壤孔隙性好,土壤含水量更高,团聚体破坏率更低。而草地的土壤含水量与新造地相对接近,而且草地根系生物量低、有机质积累不高,这与草地处于北山山顶有关^[29]。林地和耕地改善了土壤透气性和保水性,这可能是由于林地通过根系分解作用,增加凋落物和根分泌物,提供了大量有机质和氮素,改善土壤养分空间分布。全氮、速效钾含量均在林地、耕地中表现较高,且耕地全氮含量最高,林地速效磷含量最大,与此相比,草地则显示出较弱的养分积累能力,与赵同谦等^[30]和王岩等^[31]研究结果一致。土壤有机质与土壤的含水量、速效钾均表现为显著正相关,该结果与前人研究结果一致^[32]。兰州市北山土地原有结构侵蚀严重,养分贫瘠,人工林地和耕地对土

壤改良效果最好,草地对土壤改良的效果最小,与郭鑫等^[33]和刘畅等^[34]研究结果相似。这也源于耕地是在多年人工施肥影响下,土壤已累积较高的肥力,养分含量高于草地,新造地由于打断植被作用的养分积累,肥力表现出一定的弱化程度,且削山造地对脆弱的生态系统实施大规模人工干扰,暂时中断了生物成壤作用^[1],新造地的土壤质量在5 a后的长期恢复效果仍需评估,未来的研究中可以关注生物指标的变化,从更长时间内综合评价削山造地对土壤质量的影响。

4 结论

(1) 兰州市北山耕地和林地两种土地利用方式有较好的土壤质量。耕地土壤有机质、全氮、速效钾、根系生物量最高;林地土壤碱解氮、含水率、总孔隙度含量最高。综合评价结果显示兰州市北山原有耕地和林地土壤质量优于草地和新造地土壤质量,新造地的土壤持水与积累养分的能力低于原有耕地和林地。

(2) 兰州市北山不同土地利用类型土壤质量评价最小数据集由容重、速效磷、速效钾、全氮、pH值组成,和全数据集之间相关性系数为0.66,最小数据集能够较好地替代全数据集进行土壤质量评价。

(3) 削山造地时,如将林地、耕地改造成新造地,其对土壤质量的影响远大于草地,因此削山造地最好选择荒草地面积比例较大的区域进行,以减轻对区域土壤质量整体的损失,同时应注意对原有林地和耕地的保护。该区域削山造地形成的新造地土壤质量短期内较差,应该是未来植被人工恢复和重建的重点区域。在新造地植被恢复过程中,应综合考虑土壤特性、气候条件和管理措施等因素,增强新造地水土保持能力。

[参 考 文 献]

- [1] 张明泉,纪淑娜,孙年祥.兰州削山填沟整地工程主要环境影响及防治对策[J].干旱区资源与环境,2009,23(3):77-82.
- [2] 马蕾.削山造城之生态影响的论战及思考:以兰州新城为例[J].现代城市研究,2016,31(6):85-90.
- [3] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality [J]. *Applied Soil Ecology*, 2000,15(1):3-11.
- [4] Doran J W, Stamatiadis S I, Haberern J. Soil health as an indicator of sustainable management [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002,88(2):107-110.
- [5] Larson W E, Pierce F J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management [J]. *Soil Science*, 1994,551(1):37-51
- [6] Dalsgaard K. Defining soil quality for a sustainable environment [J]. *Geoderma*, 1995,66(1):44-46.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [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] 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.
- [11] Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua. Environment: Accelerate research on land creation [J]. *Nature*, 2014,510(7503):29-31.
- [12] 彭建,谢盼,刘焱序,等.低丘缓坡建设开发综合生态风险评价及发展权衡:以大理白族自治州为例[J].地理学报,2015,70(11):1747-1761.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [14] 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.
- [15] Woods K D. Dynamics in late-successional hemlock-hardwood forests over three decades [J]. *Ecology*, 2000,81(1):110-126.
- [16] An Shaoshan, Huang Yimei, Zheng Fenli. Evaluation of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008,41(3):286-292.
- [17] Bambo S K, Nowak J, Blount A R, et al. Soil nitrate leaching in silvopastures compared with open pasture and pine plantation [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2009,38(5):1870-1877.
- [18] Nyakatawa E Z, Mays D A, Naka K, et al. Carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in a loblolly pine-goat silvopasture system in the Southeast USA [J]. *Agroforestry Systems*, 2012,86(2):129-140.
- [19] 刘利昆,赵广举,穆兴民,等.基于最小数据集的青藏公路沿线土壤质量评价[J].水土保持研究,2022,29(2):126-131.
- [20] Delgado M E M, Canters F. Modeling the impacts of agroforestry systems on the spatial patterns of soil erosion risk in three catchments of Claveria, the Philippines [J]. *Agroforestry Systems*, 2012,85(3):411-423.
- [21] 彭斌,许伟,邵荣,等.不同生境种源盐地碱蓬幼苗生长发育对盐分胁迫的响应和适应[J].草业学报,2016,25(4):81-90.
- [22] 蒋丛泽,受娜,高玮,等.青藏高原东北缘不同土地利用类型土壤质量综合评价[J].应用生态学报,2022,33(12):3279-3286.

- [6] 李裕瑞,范朋灿,曹智,等.毛乌素沙地砒砂岩与沙复配农田的固沙效应及其微观机理[J].中国沙漠,2017,37(3):421-430.
- [7] 赵彤,韩霁昌,张扬,等.4年作物种植对不同比例砒砂岩与沙复配土水稳性团聚体的影响[J].江苏农业科学,2016,44(10):443-447.
- [8] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水特性[J].农业工程学报,2014,30(14):115-123.
- [9] 魏彬萌,赵宣.添加砒砂岩对风沙土性质的改良及时间效应[J].水土保持研究,2017,24(6):16-21.
- [10] 罗林涛,程杰,王欢元,等.玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征[J].水土保持学报,2013,27(4):58-61,66.
- [11] 孙增慧,韩霁昌,毛忠安,等.砒砂岩改良风沙土对作物产量影响的 RZWQM2 模型模拟[J].农业机械学报,2018,49(7):235-243.
- [12] 王金悦,邓羽松,李典云,等.连栽桉树人工林土壤大孔隙特征及其对饱和导水率的影响[J].生态学报,2021,41(19):7689-7699.
- [13] 甄雪,王红雨,李雨佳,等.利用 Origin 8.0 绘制土水特征曲线的方法[J].宁夏工程技术,2016,15(3):262-265,269.
- [14] 李娟,吴林川,李玲.砒砂岩与沙复配土的水土保持效应研究[J].土地开发工程研究,2018,3(6):35-40.
- [15] 张露,韩霁昌,王欢元,等.砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J].中国水土保持科学,2015,13(2):44-49.
- [16] 李卓,冯浩,吴普特,等.砂粒含量对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].水土保持学报,2009,23(3):204-208.
- [17] 刘目兴,吴丹,吴四平,等.三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J].生态学报,2016,36(11):3189-3196.
- [18] 勃海锋,刘国彬,王国梁.黄土丘陵区退耕地植被恢复过程中土壤入渗特征的变化[J].水土保持通报,2007,27(3):1-5,31.
- [19] 刘建立,徐绍辉.非相似介质方法在估计土壤水分特征曲线中的应用[J].水利学报,2003(4):80-84.
- [20] 汪怡珂,罗昔联,花东文,等.毛乌素沙地复配土壤水分特征曲线模型筛选研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(6):167-173.
- [21] 赵炜,赵举,魏占民,等.气化渣改良风沙土对土壤水分物理性质的影响[J].水土保持研究,2022,29(2):64-69.
- [22] 文曼.黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.
- [23] 胡雅.砒砂岩与沙复配土壤理化性状及作物产量研究[J].农业与技术,2018,38(17):4-6.
- [24] 孙婴婴,孙绪博,曹婷婷,等.砒砂岩对毛乌素沙地风沙土储水能力影响的研究[J].水土保持研究,2017,24(6):105-110,121.
- [25] 贺睿,王钧,钱前,等.互助北山国家森林公园下枯落物及土壤水源涵养能力[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):133-141.
- [26] 何振嘉,范王涛,杜宜春.砒砂岩与沙复配成土技术研究综述[J].人民长江,2021,52(2):60-65.
- [27] 吕殿青,邵明安,刘春平.容重对土壤饱和水分运动参数的影响[J].水土保持学报,2006,20(3):154-157.
- [28] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.

(上接第 67 页)

- [23] 李霞,朱万泽,舒树森,等.基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J].生态学报,2021,41(10):3891-3900.
- [24] 梅楠,谷岩,李德忠,等.基于最小数据集的吉林省黑土耕层土壤质量评价[J].农业工程学报,2021,37(12):91-98.
- [25] 李桂林,陈杰,檀满枝,等.基于土地利用变化建立土壤质量评价最小数据集[J].土壤学报,2008,45(1):16-25.
- [26] 信忠保,余新晓,张满良,等.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J].干旱区研究,2012,29(3):379-384.
- [27] 张正杨.植烟土壤肥力变异特征研究[D].河南 郑州:河南农业大学,2008.
- [28] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial) [J]. Soil Science Society of America Journal, 1997,61(1):4-10.
- [29] 张灵,王绪芳,王春燕,等.兰州市南北两山土壤养分空间分布及其影响因子[J].兰州大学学报(自然科学版),2007,43(3):53-57.
- [30] 赵同谦,赵阳,贺玉晓,等.不同植被恢复类型对矿山废弃地土壤理化性质的影响:以焦作缝山公园为例[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(4):60-67.
- [31] 王岩,李玉灵,石娟华,等.不同植被恢复模式对铁尾矿物种多样性及土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):112-117.
- [32] 阿丽娅·阿力木,丛小涵,夏晓莹,等.不同土地利用方式下土壤养分特征变化分析[J].新疆农业科学,2022,59(4):925-933.
- [33] 郭鑫,高永,张超,等.不同植被恢复类型对煤炭物流园区废弃地土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2022,42(2):67-73.
- [34] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.