

DOI: 10.11766/trxb202412260510

CSTR: 32215.14.trxb202412260510

欧阳硕, 庞国伟, 袁笑甜, 王雷, 龙永清, 王春梅, 杨勤科. 黄土高原土壤质量评价及其主导影响因素[J]. 土壤学报, 2025, 62 (6): 1635–1650.

OUYANG Shuo, PANG Guowei, YUAN Xiaotian, WANG Lei, LONG Yongqing, WANG Chunmei, YANG Qinke. Assessment of Soil Quality and Dominant Influencing Factors on the Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62 (6): 1635–1650.

黄土高原土壤质量评价及其主导影响因素^{*}

欧阳硕¹, 庞国伟^{1, 2, 3†}, 袁笑甜^{1, 2, 3}, 王雷^{1, 2}, 龙永清^{1, 2, 3}, 王春梅^{1, 2, 3}, 杨勤科¹

(1. 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 3. 西安市黄河流域环境模拟及生态健康重点实验室, 西安 710127)

摘要: 黄土高原的土壤退化问题已成为制约区域可持续发展的主要障碍之一。土壤质量评价对土壤资源的保护和合理利用至关重要。本研究基于与土壤质量相关的土壤物理、化学、生物指标等数据, 运用土壤质量指数法, 对黄土高原的土壤质量进行了全面而系统的评价。结果表明: (1) 黄土高原土壤质量呈三段空间分布: 西北部毛乌素沙地及干旱区土壤质量最低, 中西部丘陵区中等, 南部、东部和北部山地及黄土塬—平原区最佳。(2) 在不同土地利用和地貌类型中, 黄土高原土壤质量分别呈现出林地>耕地>草地>未利用地, 山地>黄土塬>平原>黄土丘陵的递减趋势; 在主要农业区黄土高原耕地土壤质量呈现出汾渭平原>银川平原>黄土塬>黄土丘陵的递减趋势。(3) 黄土高原土壤质量由土壤养分(全氮、有机质、全磷)、土壤生物活性(线虫丰度、土壤呼吸强度)及土壤质地(黏粒、粉粒含量)共同主导。本研究可为黄土高原土壤资源保护与土壤质量改善提供重要依据。

关键词: 黄土高原; 土壤质量评价; 主导因素; 空间尺度

中图分类号: 159.2 文献标志码: A

Assessment of Soil Quality and Dominant Influencing Factors on the Loess Plateau

OUYANG Shuo¹, PANG Guowei^{1, 2, 3†}, YUAN Xiaotian^{1, 2, 3}, WANG Lei^{1, 2}, LONG Yongqing^{1, 2, 3}, WANG Chunmei^{1, 2, 3}, YANG Qinke¹

(1. College of Urban and Environment, Northwest University, Xian 710127, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 3. Xi'an Key Laboratory of Environmental Simulation and Ecological Health in the Yellow River Basin, Xi'an 710127, China)

Abstract: 【Objective】 Soil degradation on the Loess Plateau has become a major obstacle to regional sustainable development. Therefore, assessing soil quality is crucial for the conservation and rational use of soil resources. 【Method】 Based on data for soil physical, chemical, and biological indicators related to soil quality, this study applied the Soil Quality Index method to carry out a

* 国家重点研发计划项目(2022YFE0115300)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (No. 2022YFE0115300)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: gwpang@nwu.edu.cn

作者简介: 欧阳硕(2002—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事土壤质量评价与制图研究。E-mail: souyang@stumail.nwu.edu.cn

收稿日期: 2024-12-26; 收到修改稿日期: 2025-07-06; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-22

comprehensive and systematic evaluation of soil quality across the Loess Plateau.【Result】The results indicate that(1)soil quality exhibits a three-tier spatial distribution: the lowest quality occurs in the Mu Us Sandy Land and arid northwest, moderate quality in the central-western hilly zones, and the highest quality in the southern, eastern, and northern mountain regions as well as the loess hilly-plain area; (2)under different land-use and geomorphic conditions, soil quality declines in the order forestland > cropland > grassland > unused land and mountain > loess plateau > plain > loess hills, and within major agricultural areas, cropland quality decreases in the sequence Fen-Wei Plain > Yinchuan Plain > loess plateau > loess hills; (3)soil nutrients(total nitrogen, organic matter, total phosphorus), biological activity(nematode abundance, soil respiration intensity), and texture(clay and silt content)jointly dominate soil quality.【Conclusion】This study reveals that soil quality on the Loess Plateau follows a distinct three-tier spatial pattern with significant differences among land-use types and landforms, primarily governed by nutrients, biological activity, and texture. These findings provide an important foundation for the conservation and improvement of soil resources on the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; Soil quality assessment; Dominant factors; Spatial scale

土壤是人类生存最基本的自然资源之一，也是所有陆地生态系统不可或缺的一部分^[1]。土壤不仅为人类提供必需的食物，还在调节水资源供应、参与养分循环、调节大气成分等方面发挥着关键作用^[2]。

土壤质量可以理解为在生态系统和土地利用范围内，维持生物生产力、维护环境质量、促进动植物和人类健康的能力^[3]。了解土壤质量，对于评估生态系统发展状况、监测土壤退化以及实现可持续的农田管理具有重要意义。土壤质量定量评价方法主要包括多变量指标克里金法^[4]、土壤质量指数法^[5-7]、模糊数学综合评价法^[8]、TOPSIS 法^[9]等。其中，土壤质量指数法（Soil Quality Index, SQI）因其操作简单、适用性广的特点而被广泛使用^[10-11]。

黄土高原位于黄河中游，是全球最大的黄土堆积区，同时也是因土壤侵蚀、土壤养分失衡等问题而导致土壤退化的地区。为此，前人对黄土高原的土壤质量展开了一系列研究，许明祥^[12]利用土壤质量指数法探究了黄土丘陵区植被恢复重建与土壤质量演变的互动关系；张嘉宁^[13]基于土壤质量指数法定量评价了黄土高原 6 个典型小流域不同土地利用方式的土壤质量；马芊红等^[14]和白文娟等^[15]基于土壤质量指数法分别评价了黄土丘陵区和风蚀水蚀交错区典型小流域的土壤质量；Zhang 等^[7]在黄土丘陵区典型小流域探究了不同微地形类型的土壤质量在两种主要生态系统恢复模式下的响应和差异；Ma 等^[16]基于土壤质量指数法对延安市复垦耕地的土壤质量进行评价，并划分了影响其质量提升的主要障

碍因素。

然而，现阶段对黄土高原土壤质量的认识仍存在以下问题：一是评价对象及涉及的土壤功能较为单一，已有研究更多关注不同土地利用方式和管理措施下的土壤质量，却缺乏对黄土高原不同自然条件下（如地貌类型、土壤类型等）土壤质量的研究^[17, 12-13]；二是评价尺度较小，多数研究集中在流域或市、县级尺度^[14-16, 18]，缺乏区域尺度的系统评估；三是对土壤质量制图的研究较少，现有研究更多关注土壤质量的相对大小，而忽略了土壤质量的空间分布格局^[14-15, 18]，有部分研究使用较为基础的空间插值方法分析土壤质量的空间分布，但制图效果并不理想^[16, 19]。大尺度土壤空间数据的获取在一定程度上限制了上述研究，然而，随着土壤调查工作的持续开展，以及遥感、机器学习等技术的发展，为大尺度土壤理化属性的制图和土壤质量评价提供了新的方法和数据支撑^[20-24]。

本文以中国典型土壤流失区黄土高原为例，采用土壤质量指数法，基于土壤物理、化学、生物指标及土壤侵蚀模数等数据，对黄土高原的土壤质量进行评价，并探究其空间格局分布特征及主导影响因素。本研究可为黄土高原地区的土壤资源保护和合理利用提供科学依据，促进土壤资源的可持续利用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于 $33^{\circ}43'-41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}54'-114^{\circ}33'E$,

面积约 64 万 km², 海拔在 95~5 092m 之间, 地势西部高东南低, 六盘山、吕梁山和太行山脉将黄土高原分为陇西高原、陕甘高原和山西高原。

黄土高原自东南向西北横跨半湿润—湿润区、半干旱区两个气候区, 平均气温 8°~14°, 平均降雨量 200~700 mm, 大部分降雨集中在 6—9 月。黄土高原分布较为广泛(分布面积>5%)的土壤大致有 6 种, 西北地区以风沙土和灰钙土为主, 中部地区以黄绵土为主, 南部的关中平原以壤土为主要类型, 东部地区则主要分布褐土和潮土。基于自然地理和生态环境等因素, 将黄土高原划分为河流冲积平原、黄土塬、黄土丘陵和山地 4 种地貌类型^[25]。黄土高

原的植被从东南到西北依次为湿润森林、半湿润森林草原、半干旱草原和干旱荒漠化草原, 植被覆盖度自东南向西北逐渐降低; 汾渭平原、黄土塬、黄土丘陵缓坡和梯田、黄河灌渠等地, 以农作物为主。

1.2 数据来源

本研究所使用的基础数据包括计算土壤质量所需的土壤物理、化学、生物属性数据、坡度、土壤侵蚀模数以及植被覆盖度等数据(表 1)。其中, 土壤有机质含量由土壤有机碳含量乘以换算系数 1.724 得出; 土壤侵蚀模数是通过中国土壤水流失方程(CSLE), 并结合沟蚀因子计算得出^[26], 该数据经过坐标转换、重采样后与文章中其余数据相匹配。

表 1 基础数据清单

Table 1 List of basic data

数据 Data	数据来源 Data sources	分辨率 Resolution	数据用途 Data usage
砂粒含量 (%)	时空三极环境大数据平台 ^①	250 m	计算土壤质量
Sand content			
pH	同上	同上	同上
粉粒含量	同上	同上	同上
Silt content/%			
黏粒含量	同上	同上	同上
Clay content/%			
容重	同上	同上	同上
Bulk density/ (g·cm ⁻³)			
砾石含量	同上	同上	同上
Coarse fragments/%			
土层厚度	同上	同上	同上
Soil thickness /cm			
有机质含量	同上	同上	同上
Soil organic matter/ (g·kg ⁻¹)			
阳离子交换量	同上	同上	同上
CEC/ (cmol·kg ⁻¹)			
全氮	同上	同上	同上
Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)			
全磷	同上	同上	同上
Total phosphorus/ (g·kg ⁻¹)			
全钾	同上	同上	同上
Total potassium/ (g·kg ⁻¹)			
土壤生物多样性指数	欧洲土壤数据中心 ^②	0.1°	同上
Soil biodiversity index			

续表

数据 Data	数据来源 Data sources	分辨率 Resolution	数据用途 Data usage
土壤呼吸强度	Zenodo 数据共享平台 ^③	1 km	同上
Soil respiration (g·m ⁻¹ ·a ⁻¹ , 以 C 计)			
线虫丰度 (Ind·100 g ⁻¹)	ETH Zurich 研究资料库 ^④	1 km	同上
Nematode abundance			
坡度	项目组前期工作	250 m	同上
Slope/°			
土壤侵蚀模数	同上	250 m	同上
Soil erosion rates (t·km ⁻² ·a ⁻¹)			
黄土高原地区地貌分区图	同上	矢量数据	分析不同地貌分区对土壤质量的影响
Geomorphological regionalization			
map of the Loess Plateau			
植被覆盖度	同上	250 m	分析植被覆盖度对土壤质量的影响
Fractional vegetation cover			
土壤类型 Soil type	资源与环境科学数据平台 ^⑤	250 m	分析土壤类型对土壤质量的影响
土地利用数据	资源与环境科学数据平台 ^⑥	250 m	分析不同土地利用类型对土壤质量的影响
Land use			
黄河流域基础数据集	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 ^⑦	矢量数据	研究区概况制图
Yellow River Basin fundamental			
dataset			

① 时空三极环境大数据平台 (Big earth data platform for three poles): <https://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/e1ccd22c-348f-41a2-ab46-dd1a8ac0c955>; ② 欧洲土壤数据中心 (European Soil Data Centre): <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-biodiversity-maps-0>; ③ Zenodo 数据共享平台 (Zenodo Data Sharing Platform): <https://zenodo.org/records/5909563>; ④ ETH Zurich 研究资料库 (ETH Zurich Research Collection): <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/354035>; ⑤ 资源与环境科学数据平台 (Resource and Environmental Science Data Platform): <https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=145>; ⑥ 资源与环境科学数据平台 (Resource and Environmental Science Data Platform): <https://www.resdc.cn/DOI/DOI.aspx?DOIid=54>; ⑦ 国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (National Cryosphere Desert Data Center): <http://www.ncdc.ac.cn/portal/metadata/6ce682a2-009d-41a8-acb3-c3a81ec4380c>.

1.3 土壤质量评价方法

(1) 评价指标选择。本文在土壤物理、化学和生物指标评价体系的基础上, 进一步纳入地形、坡度等成土因素对土壤质量的影响^[27]。同时, 土壤质量评价既要考虑成土因素长期作用下形成的自然属性, 也要考虑人类活动时间尺度上因土地利用和管理措施而影响的土壤特性^[28]。土壤侵蚀强度受土地利用类型和管理措施的显著影响, 过度侵蚀可引发养分流失、土壤蓄水能力下降、土层变薄, 并降低土壤生物多样性^[29], 因此本研究将土壤侵蚀强度纳入评价体系。综上所述, 本文选取 17 个土壤质量相关指标(砂粒、粉粒、黏粒含量、砾石含量(>2 mm)、容重、土壤厚度、有机质含量、pH、阳离子交换量、

全氮含量、全钾含量、全磷含量、土壤呼吸强度、土壤生物多样性指数、线虫丰度、土壤侵蚀模数、坡度) 评价黄土高原土壤质量。其中, 土壤理化指标均采用土壤表层 0~20 cm 的数据。土壤生物指标中线虫丰度来自土壤表层 0~15 cm; 土壤呼吸速率 (Rs) 和土壤生物多样性指数为全剖面 (地表至根系最深处) 数据。

(2) 指标得分。由于不同土壤指标的单位存在差异, 需要使用标准化评分函数对评价指标进行标准化处理。根据各指标对土壤质量的影响方式和效应关系将评分函数分为三类: 戒上型函数、戒下型函数和峰型函数。标准化评分函数及其参数的具体确定方法, 可参见相关研究^[5, 10, 12, 28] (表 2)。

表 2 土壤指标标准化评分函数和参数

Table 2 Standard scoring functions and parameters for the soil indicators

函数类型 Function	评价指标 Indicator	标准化评分函数 Standard scoring function	a_1	b_1	b_2	a_2
最适范围型 Optimum	pH	$R(x) = \begin{cases} 0.1, x \leq a_1, x \geq a_2 \\ 0.9 \times \frac{x - a_1}{b_1 - a_1} + 0.1, a_1 < x \leq b_1 \\ 1, b_1 < x \leq b_2 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x - b_2}{a_2 - b_2}, b_2 < x < a_2 \end{cases}$	5.5	6.5	7.5	8.5
	砂粒		0	20	35	100
	容重		0.8	1.1	1.3	1.55
	黏粒		0	20	25	100
戒上型 More is better	粉粒		0	50	65	100
	全氮	$M(x) = \begin{cases} 1, x \geq a_2 \\ 0.9 \times \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} + 0.1, a_1 < x < a_2 \\ 0.1, x \leq a_1 \end{cases}$	0.3	/	/	1.2
	全钾		5	/	/	25
	全磷		0.4	/	/	0.8
戒下型 Less is better	有机质		10	/	/	30
	土层厚度		60	/	/	100
	阳离子交换量		10	/	/	20
	生物多样性指数		0.1			0.9
	土壤呼吸强度		200			840
	线虫丰度		620			1 785
	砾石含量		0	/	/	15
	土壤侵蚀模数	$L(x) = \begin{cases} 1, x \leq a_1 \\ 1 - 0.9 \times \frac{x - a_1}{a_2 - a_1}, a_1 < x < a_2 \\ 0.1, x \geq a_2 \end{cases}$	500	/	/	2 500
	坡度		3	/	/	15

注: x 为每个指标的实际值; a_1 , a_2 分别为指标的下临界值和上临界值, b_1 , b_2 分别为最适范围的上临界值和下临界值。 x is the value of the indicator, a_1 , a_2 are the lower and upper threshold values of the indicator, respectively, b_1 , b_2 are the lower and upper bounds of the indicator's optimal range, respectively.

(3) 土壤质量指数计算。土壤质量指数法多使用主成分分析(Principal components analysis, PCA)计算各指标权重,然而该方法具有一定的局限性:1)PCA方法仅保留特征值大于1的主成分,在此过程中会不可避免地丢失部分信息,可能导致关键指标被滤除^[30]。2)PCA得出的指标权重会随时间而变化,并且每个指标的权重在不同的管理区域可能不同^[31]。3)采用不同参数与权重,不同研究区域甚至相同区域研究间土壤质量指数比较极为困难甚至不可能^[32]。为了避免以上问题,本文使用SQI_{area}方法计算土壤质量指数,该方法包含所有土壤指标的雷达图综合评价土壤质量,从而无需考虑指标数量与权重差异即可比较不同土壤类型或土地利用方式下的SQI^[31],计算公式如下:

$$SQI_{\text{area}} = 0.5 \times \sum_i^n S(x_i)^2 \sin \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

式中, n 表示用于土壤质量评价的指标数量; $S(x_i)$ 为指标的标准化评分, π 为 3.14。

1.4 主控因子分析

采用地理探测器进行主控因子分析。地理探测器从定量和定性角度全面探讨同一地理现象的自变量和因变量之间的空间异质性,从而揭示地理现象空间异质性背后的驱动力^[33]。本文使用地理探测器中的“因子探测”模块及“交互作用探测”模块,对研究区土壤质量空间分异的影响因子及交互作用进行定量探测。“因子探测”和“交互作用探测”的原理及计算方法参照文献^[33],交互作用类型如下表(表3)。

表3 两个自变量对因变量交互作用的类型

Table 3 Types of interaction between two covariates

交互作用 Interaction	判断依据 Criterion
单因子非线性减弱 Weakened, univariate	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性减弱 Weakened, nonlinear	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强 Enhanced, bivariate	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强 Enhanced, nonlinear	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
独立 Independent	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

2 结果

2.1 土壤质量指标统计特征

黄土高原土壤机械组成以粉粒和砂粒为主(表4),平均土层厚度约为147.20 cm;pH约为8.06,土壤偏碱性;土壤容重均值为1.34 g·cm⁻³;阳离子交换量均值为14.52 cmol·kg⁻¹;土壤养分含量中仅

全钾处于较丰富等级,有机质、全氮和全磷均处于适量等级^[34]。

黄土高原土壤属性差异较为明显,一般采用变异系数(Coefficient of variation, CV)来描述土壤属性分异特征。本文基于指标CV值的大小将土壤性质分为三种类型:弱变异性(CV<15%),中变异性(15%≤CV<35%)和强变异性(CV≥35%)^[35]。其

表4 土壤属性统计特征

Table 4 Statistical characteristics of soil indicators

指标 Indicator	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
pH	8.88	6.29	8.06	0.39	4.85
有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	101.61	2.65	14.79	11.82	79.94
粉粒 Silt/%	71.50	7.40	50.20	11.52	22.94
砂粒 Sand/%	93.20	4.50	33.36	16.03	48.07
黏粒 Clay/%	27.40	1.10	16.34	4.69	28.69
阳离子交换量 CEC/cmol·kg ⁻¹	38.0	5.95	14.52	4.86	33.45
砾石 CF/%	42.00	0.00	8.66	6.49	74.89
容重 BD/(g·cm ⁻³)	1.53	0.85	1.34	0.11	8.04
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.83	0.31	0.52	0.09	17.75
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	3.59	0.22	0.79	0.51	64.89
全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	23.89	12.13	17.68	1.88	10.61
土壤侵蚀模数 SER/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)	11186.20	0.00	707.96	1297.90	183.34
坡度 SL/°	61.51	0.00	9.74	9.21	94.55
土层厚度 Thick/cm	321.00	2.00	147.22	64.18	43.60
线虫丰度 Nem/(Ind·100g ⁻¹)	3163.28	148.78	1258.10	445.06	35.38
土壤生物多样性指数 SBI	0.79	0.45	0.61	0.09	14.80
土壤呼吸强度 Sr/(g·m ⁻¹ ·a ⁻¹ , 以C计)	1225.19	119.35	500.66	234.13	46.76

表 5 黄土高原多维度下土壤质量指数

Table 5 Soil quality index of different natural conditions on the Loess Plateau

维度 Dimensional			最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 CV/%
土地利用 Land use	耕地 Cultivated land		0.11	1.00	0.55	17.75
	林地 Forest		0.08	1.00	0.67	19.15
	草地 Grassland		0.05	0.98	0.50	29.94
地貌类型 Landform	未利用地 Unuse land		0.00	1.00	0.34	38.15
	山地 Mountain		0.13	0.99	0.66	17.51
	黄土塬 Loess tableland		0.14	0.93	0.58	12.79
平原 Plain	平原 Plain		0.05	1.0	0.54	23.16
	丘陵 Hilly		0.06	1.0	0.47	30.18

中, pH、生物多样性指数、土壤容重和全钾表现为弱变异性, 全磷、粉粒、黏粒和阳离子交换量表现出中变异性, 其余指标均为强变异性(表 5)。其中, pH 和土壤侵蚀模数分别表现出最低和最高的变异性。pH 较高的区域主要分布在平原和盆地区域, 而 pH 较低的区域主要集中在海拔较高的石质山地。土壤水蚀速率较高的区域主要分布在黄土沟壑区, 侵蚀速率大致为 $1\ 500\sim5\ 000\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$, 土壤侵蚀模

数大于 $10\ 000\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$ 的区域仅占黄土高原总面积的 0.17%, 西北部风沙丘陵区土壤水蚀速率较低, 侵蚀速率一般低于 $1\ 000\ t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$ 。

2.2 黄土高原土壤质量分布特征

采用自然间断点法将黄土高原土壤质量分为 5 个等级(图 1)。黄土高原的土壤质量指数范围为 0~1, 平均值为 0.53, 变异系数为 28.41%。黄土高原地区土壤质量以Ⅱ级和Ⅲ级为主, 二者合计占比达

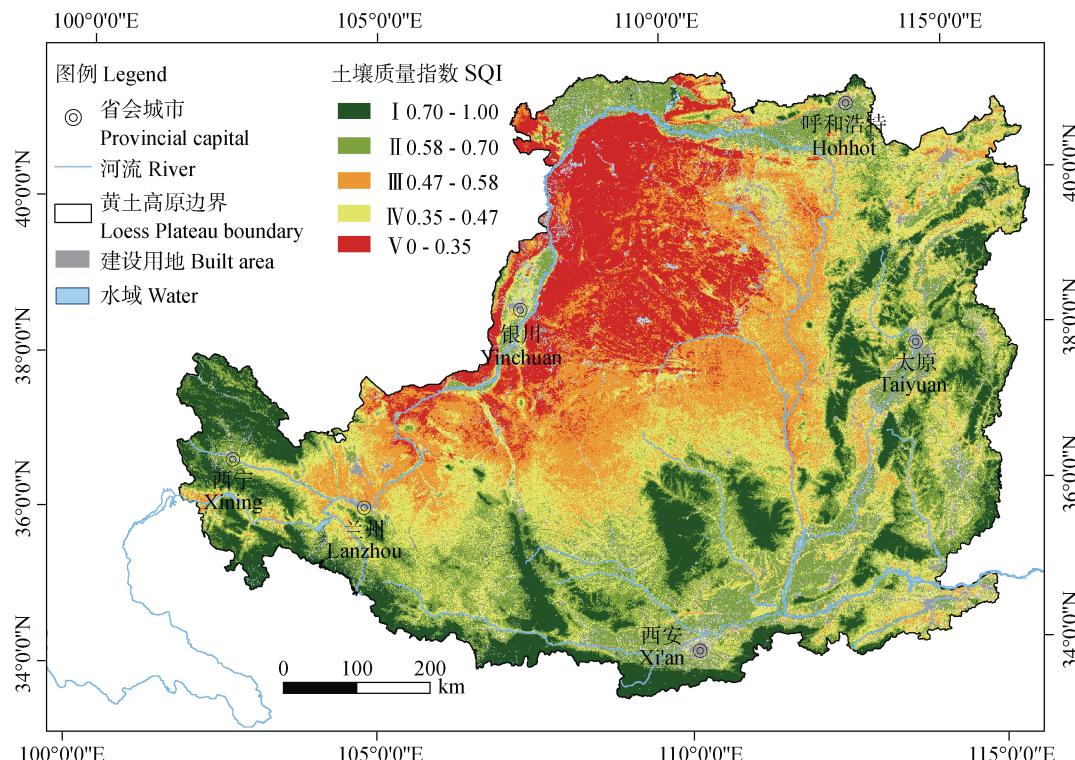


图 1 黄土高原土壤质量空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of soil quality in the Loess Plateau

52.04%。黄土高原土壤质量大致分为三个区域:(1)毛乌素沙地和西北干旱区土壤质量最低,以IV级和V级土壤为主;(2)黄土高原中西部的黄土丘陵区土壤质量中等,以III、IV级土壤为主;(3)黄土高原南部、东部和北部的山地,黄土塬区及平原地区土壤质量较好,以I级和II级土壤为主。

2.2.1 多维度条件下的土壤质量空间格局

(1) 不同景观区域的土壤质量。I级土壤占比15.33%,分布较为零散,主要位于石质山地和部分土石丘陵区。黄土高原II级土壤占比最大,占比约26.04%,主要分布在汾渭平原、河套平原以及山西省境内的盆地(图1);III级土壤则主要分布在黄土高原中西部的黄土丘陵区以及山西境内的黄土盆地丘陵区,占比约26.01%。IV级和V级土壤总占比为32.62%,主要分布于黄土高原西北部的毛乌素沙地和其他干旱区。

(2) 不同土地利用类型的土壤质量。黄土高原不同土地利用类型间土壤质量呈现出林地(0.67)>耕地(0.55)>草地(0.50)>未利用地(0.34)的趋势(表5)。林地主要分布在山地和土石丘陵区,土壤质量以I级和II级为主;草地的分布较为均匀,土壤质量从I级到V级均有分布,其中I、II级土壤质量的草地主要分布在石质山地和黄土丘陵区,III级土壤质量的草地集中分布在黄土高原中西部的黄土丘陵区及黄土塬区,IV和V级土壤质量的草地主要分布在黄土高原西北部水分不足、植被较为稀疏的中、低覆盖度区域;耕地主要分布在黄河及其支流周围的滩涂区域,耕地土壤质量以II级和III级为主。黄土高原未利用地面积集中分布在黄土高原西北部的风沙丘陵区,土壤质量以V级为主。

(3) 不同地貌类型的土壤质量。分区统计黄土高原山地、丘陵、黄土塬和平原4类地貌类型的土壤质量分布特征(表5)。土壤质量较高的区域集中分布于石质山地和子午岭地区的土石丘陵区,而土壤质量较低的区域为西北部的风沙丘陵区(图2)。黄土塬区的土壤质量仅次于山地,其中土壤质量较高的区域集中在洛川塬与董志塬;平原地区的土壤质量低于黄土塬区,且土壤质量较为稳定,除银川平原内有部分III级土壤外,其余区域均以II级土壤为主。

(4) 不同植被覆盖度的土壤质量。参考《土壤侵蚀分类分级标准》^[36],将黄土高原植被覆盖度分

为6个等级,分别为裸露(<10%)、低(10%~30%)、中低(30%~45%)、中度(45%~60%)、中高(60%~75%)、高(>75%)6个等级。研究结果表明,黄土高原土壤质量指数随着植被覆盖度的增加而增加(图2)。

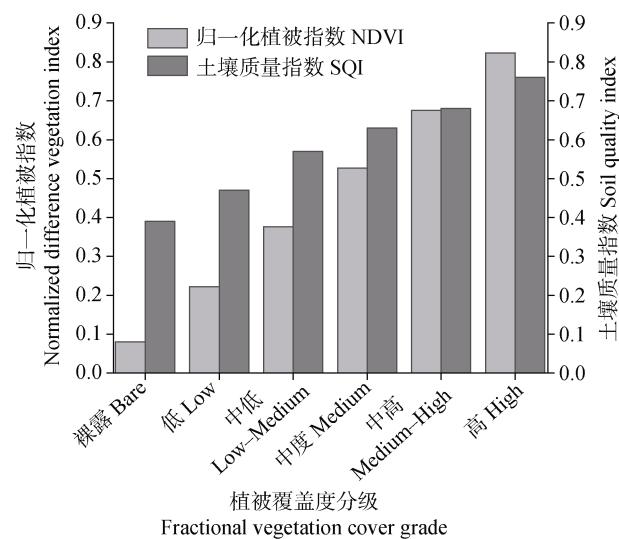


图2 不同植被覆盖度下NDVI和土壤质量的关系
Fig. 2 Relationship between NDVI and soil quality under different fractional vegetation cover grades

2.2.2 耕地土壤质量的空间分异特征

(1) 不同农业区耕地土壤质量分布特征。分区统计汾渭平原、河套平原、黄土塬和黄土丘陵区范围内的耕地土壤质量,结果表明:不同区域耕地土壤质量呈现出汾渭平原>河套平原>黄土塬>黄土丘陵区的趋势。汾渭平原耕地平均土壤质量指数为0.60,其中西南和东北部耕地土壤质量较高,中部、东部部分地区土壤质量略低(图2);河套平原耕地土壤质量均值为0.58,其中银川平原耕地土壤质量低于内蒙古前套和后套平原;黄土塬区耕地平均土壤质量为0.57(表6),耕地土壤质量较高的区域分布在董志塬的中部、洛川塬的北部以及中条山南部黄土台塬(图2);黄土丘陵区耕地土壤质量均值为0.51,空间分布上甘肃省东南部、宁夏回族自治区南部耕地土壤质量较高,而中部陕甘宁交界区、陕北地区耕地土壤质量较低。

(2) 不同土壤类型耕地土壤质量分布特征。本文统计分析了黄土高原分布面积大于5%的6种土壤类型的耕地土壤质量。其中,主要分布于黄土高原东南部的壤土、潮土和褐土类型耕地,其土壤质

表 6 黄土高原主要农业区耕地土壤质量指数

Table 6 Soil quality index of cultivated land in major agricultural regions of the Loess Plateau

农业区 Agricultural region	土壤质量指数 SQI			
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 CV/%
汾渭平原 Fenwei Plain	0.34	0.83	0.60	8.22
河套平原 Hetao Plain	0.12	1.0	0.58	15.57
黄土塬 Loess tableland	0.14	0.92	0.57	12.25
黄土丘陵 Loess Hilly	0.07	1.0	0.51	17.76

量相对较高; 分布在黄土丘陵区的黄绵土耕地土壤质量处于中等水平; 而毛乌素沙地的风沙土及西北干旱区的灰钙土耕地, 则表现出较低的土壤质量。土壤质量是耕地质量的重要组成部分, 与耕地质量相比, 土壤质量更加侧重于自然资源维度。2020年,

农业农村部统计了全国九大农业区内不同耕地质量等级下的主要土壤类型^[37]。本研究得出的不同土壤类型的耕地土壤质量等级与农业农村部公布的耕地质量等级高度一致(表7), 即土壤质量较高的土壤类型在耕地质量评定中也表现出较高的等级。

表 7 黄土高原主要土壤类型耕地土壤质量指数

Table 7 Cultivated land soil quality index of major soil types on the Loess Plateau

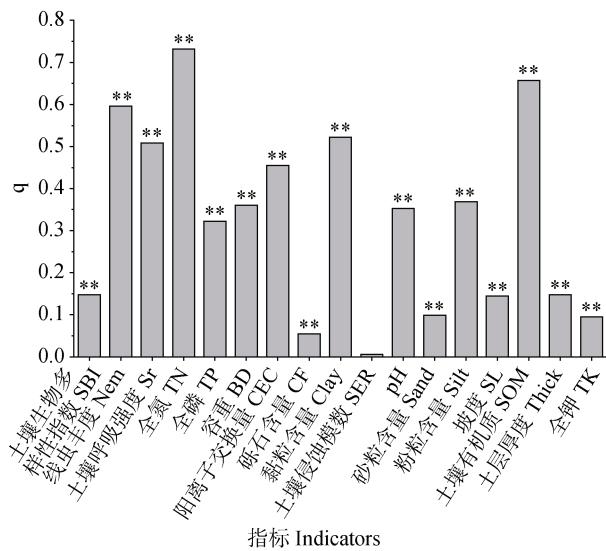
土壤类型 Soil type	耕地土壤质量指数 Cultivated land SQI				耕地质量 等级分类 Cultivated land quality grade
	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	变异系数 CV/%	
壤土 Lou soil	0.35	0.82	0.61	7.01	/
潮土 Fluvo-aquic soil	0.20	0.87	0.60	10.32	1~3等地
褐土 Cinnamon soil	0.32	0.96	0.59	12.61	1~3等地
黄绵土 Loessial soil	0.10	0.96	0.52	17.32	4~6等地
灰钙土 Sierozem	0.12	0.80	0.46	18.28	7~10等地
风沙土 Aeolian sand soil	0.12	0.79	0.45	22.56	7~10等地

2.3 黄土高原土壤质量的影响因素

2.3.1 土壤质量空间分布的影响因素 因子探测器的结果表明, 在统计学显著($\alpha < 0.05$)的前提下, 黄土高原土壤质量的分布格局主要由土壤养分含量、土壤生物活性因子及土壤质地共同控制。全氮、有机质、线虫丰度、黏粒含量和土壤呼吸强度对黄土高原区域土壤质量空间分异的影响力较高(图3), 而土壤侵蚀模数和砾石含量、全钾和坡度的影响力较低。

不同地貌类型下土壤质量的不同指标影响力不同(图4a), 在地形相对破碎的丘陵区, 坡度、全

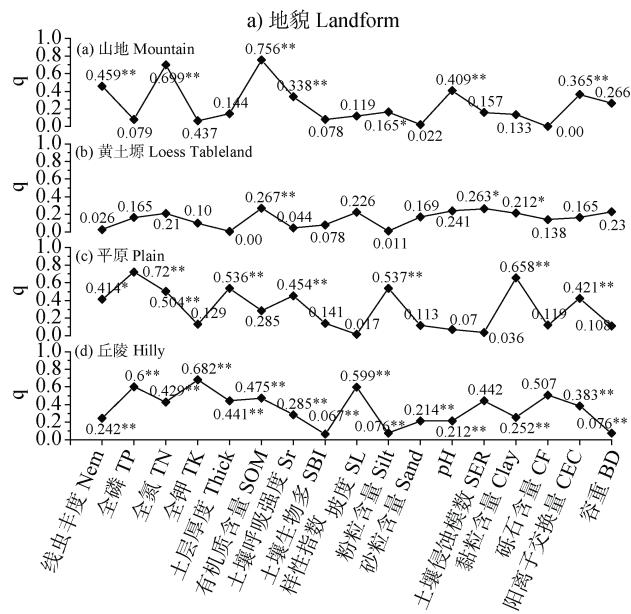
钾含量和有机质为主要影响因素; 在塬面较为平坦、边缘较为陡峭的黄土塬区, 有机质含量和土壤侵蚀量为主要影响因素。在坡度较陡、但植被覆盖度较高的山地, 土壤养分含量和线虫丰度为土壤质量主要影响因素。总体而言, 土壤养分含量(土壤有机质、全氮、全磷、全钾)作为土壤质量的基础对每种地貌类型的土壤质量均有较高的影响力。此外, 不同地貌单元的地形条件显著主导了土壤质量关键影响因子。例如, 山地陡坡区主要受侵蚀-运移过程驱动, 而塬面平坦区则更多受到物质积累和人为调控的共同影响。



注：**表示1%的统计显著性。Note: ** Significance at the 0.01 level.

图3 土壤质量影响因子对土壤质量的解释力 q 值

Fig. 3 Statistics of the explanatory power (q value) of soil quality influencing factors on soil quality



注：*和**分别表示5%和1%的统计显著性。Note: * Significance at the 0.05 level, ** Significance at the 0.01 level.

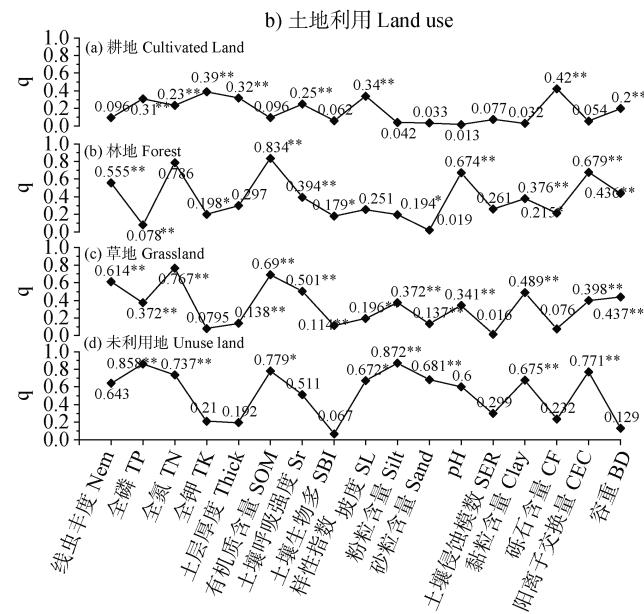
图4 不同地貌(a)、土地利用类型(b) 土壤质量影响因子 q 值

Fig. 4 q -values of soil quality influencing factors for different landforms (a) and land use (b)

此外，土壤侵蚀模数、砂粒含量和土层厚度与其他因子之间表现出显著的协同作用，其联合效应远强于单因子作用，呈现出典型的非线性增强交互特征。以土壤侵蚀模数为例，在砂粒含量较高且土

在统计学显著 ($\alpha < 0.05$) 的前提下，不同土地利用类型间土壤质量主要影响因子不同(图4b)。黄土高原耕地分布较为破碎，丘陵区、塬区和平原区均有分布，从区域尺度来看，黄土高原耕地土壤质量主要受立地条件(砾石含量、坡度、土层厚度)和土壤养分含量(全钾、全磷)的影响；林地主要受有机质、pH 以及阳离子交换量的影响；草地土壤质量空间分布的主要影响因素为土壤养分含量和线虫丰度；未利用地集中分布于西北干旱区，土壤质量的主要影响因素为土壤养分含量和土壤质地。

2.3.2 不同因素之间的相互作用 交互作用探测分析结果表明，不同影响因子间的相互作用会增强对土壤质量的影响程度。其中有机质和黏粒含量之间、全磷和全氮含量之间的交互作用对土壤质量空间分异的影响程度最高(图5)。与单因子探测分析结果一致，对土壤质量影响程度较高的指标仍为土壤养分含量、土壤生物活性及土壤质地。



层厚度较薄的区域，高土壤侵蚀模数的叠加作用可能显著加剧表土流失与土壤退化，其综合效应远超各单一因子的独立影响，体现出明显的非线性增强特征。在制定土壤管理策略时，应优先关注这些指

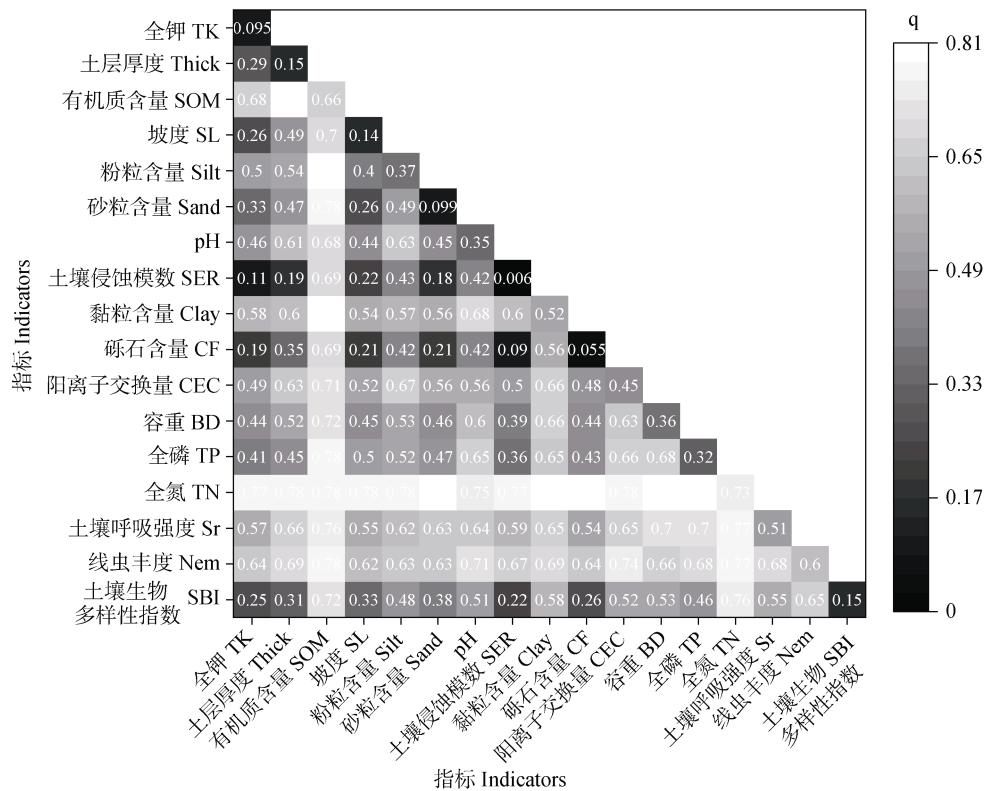


图 5 土壤质量影响因子交互作用强度结果

Fig. 5 Interaction of factors affecting soil quality

标的联合调控作用，而非孤立改善。

在不同土地利用类型中，主导交互作用组合呈现出较为清晰的分化特征。如在耕地中， $TN \cap CF$ (0.647) 以及 $TN \cap TP$ (0.641) 显示出养分含量与砾石含量的联合作用在耕地质量评价中的主导地位(表 8); 在林地中，有机质(SOM)与土壤呼吸强度(Sr)的交互作用最为显著(0.920)，表明生物活性与碳循环过程在林地土壤质量中的核心作用;而在草地中， $TN \cap Sand$ (0.824)、 $TN \cap TP$ (0.822) 和 $TN \cap Clay$ (0.821) 等营养元素与土壤质地的联合效应也表现出高强度交互，说明草地土壤质量主要受养分含量和土壤质地控制。未利用地中， $Thick \cap Silt$ (0.972)、 $Clay \cap Nem$ (0.952) 和 $Silt \cap BD$ (0.947) 等组合交互作用强度更高，表明未利用地土壤质量主要受土壤质地的影响。

在不同地貌类型中，土壤质量影响因子的主导交互作用亦展现出地貌特征的响应性(表 8)。在山地地区， $SOM \cap Thick$ (0.83) 和 $SOM \cap TP$ (0.829) 等交互作用显著，表明山地生态系统中土壤养分含量和土层厚度联动对维持土壤质量至关重要; 在丘

陵区， $TN \cap Sand$ (0.776) 和 $TN \cap Silt$ (0.759) 突出显示了养分含量与土壤质地的共同影响; 而在黄土塬区域， $CSLE \cap SOM$ (0.581)、 $CSLE \cap CF$ (0.528) 等交互作用则强调了土壤侵蚀模数与有机质及砾石含量的协同作用对土壤质量的驱动作用; 在平原地区， $Clay \cap CF$ (0.826)、 $TP \cap pH$ (0.826) 等高交互强度说明土壤成分与酸碱条件对耕作型土壤质量的重要影响。

3 讨 论

3.1 黄土高原土壤质量分布特征

本文的研究结果表明，黄土高原不同土地利用类型的土壤质量呈现出林地>耕地>草地>未利用地的分布趋势。而有研究表明黄土高原不同土地利用类型下土壤质量呈现出林地>草地>耕地>未利用地的分布趋势^[12-13, 15]。黄土高原的林地主要分布在石质山地和部分土石丘陵区，该区域植被覆盖度较高、受人为影响程度较小; 土壤质地和土壤养分含量较好，主要限制因子为坡度和砾石含量。耕地土壤

表8 不同地貌、土地利用类型土壤质量影响因子交互作用探测

Table 8 Interaction of soil quality influencing factors across different landform and land use types

交互作用 Interaction	地貌类型 Landform type				土地利用类型 Land use type			
	山地 Mountain	丘陵 Hilly	黄土塬 Loess tableland	平原 Plain	耕地 Cultivated Land	林地 Forest	草地 Grassland	未利用地 Unuse land
	SOM \cap Thick	TN \cap Sand	SER \cap SOM	Clay \cap CF	TN \cap CF	SOM \cap Sr	TN \cap Sand	Thick \cap Silt
Dominant interaction 1	0.83	0.776	0.581	0.826	0.647	0.920	0.824	0.972
主导交互作用 2	SOM \cap TP	TN \cap Silt	SER \cap CF	TP \cap pH	TN \cap TP	SOM \cap Sand	TN \cap TP	Clay \cap Nem
Dominant interaction 2	0.829	0.759	0.528	0.826	0.641	0.893	0.822	0.952
主导交互作用 3	SOM \cap Silt	TN \cap Clay	TP \cap pH	TP \cap Nem	TN \cap BD	SOM \cap CEC	TN \cap Clay	Silt \cap BD
Dominant interaction 3	0.822	0.755	0.523	0.805	0.612	0.891	0.821	0.947
主导交互作用 4	SOM \cap Sr	TN \cap Thick	SER \cap CEC	TP \cap CEC	SOM \cap TP	SOM \cap TN	SOM \cap Clay	Silt \cap CF
Dominant interaction 4	0.816	0.755	0.519	0.80	0.604	0.890	0.815	0.943
主导交互作用 5	SOM \cap SBI	TN \cap Nem	SL \cap pH	TP \cap TN	SOM \cap Clay	SOM \cap Clay	SOM \cap Nem	Thick \cap pH
Dominant interaction 5	0.815	0.751	0.517	0.799	0.599	0.888	0.814	0.939

量低于林地的主要限制因子为 pH、全氮、有机质和阳离子交换量(图 6a)。草地土壤质量低于林地的主要限制因子为全氮、有机质、土壤呼吸强度、阳离子交换量和 pH, 这与张嘉宁^[13]在黄土高原的研究结果一致。本研究中草地土壤质量低于耕地土壤质量的部分原因可能在于, 本研究包括了研究区西北部半干旱和小面积干旱地区的低和极低覆盖度的草地, 也包括了黄土丘陵区沟坡等陡坡地形下的低覆盖草地; 此类草地缺乏水分, 植被稀疏, 土壤养分和土壤质地较差。许明祥^[12]、张嘉宁^[13]的研究均以黄土丘陵区典型流域为主, 草地植被覆盖度优于黄土高原西北部干旱一半干旱区; 已有研究表明, 植被覆盖度的增加可以有效控制土壤侵蚀^[38], 增加土壤养分和水分含量, 降低土壤容重^[39]; 植被覆盖度通过改善土壤物理、化学指标, 进而改善土壤质量^[39-40]。除此之外, 不同采样位置土壤质量存在差异。宋娟丽^[41]的研究表明, 草地土壤质量在不同坡向之间存在差异, 同一坡向的不同坡位之间也表现出显著差异; Zhang 等^[7]的研究结果表明, 不同微地形下草地土壤质量差异较大; 已有研究的采样点布设可能未反映研究区域整体草地土壤质量, 导致草地土壤质量评估偏高或偏低。本研究结果表明, 黄土高原草地土壤质量随着植被覆盖度的增加而增加, 高、中和低植被覆盖度草地土壤质量均值分别为 0.56、0.50 和 0.47, 这与已有的研究结果相吻合^[40-41]。

黄土高原不同农业区的耕地土壤质量大小表现为汾渭平原>河套平原>黄土塬>黄土丘陵。李彬彬^[42]在关中平原、黄土塬区、黄土丘陵区和银川平原区选取典型县进行土壤质量评价, 结果表明关中平原>银川平原>黄土塬>黄土丘陵, 与本文结果基本相似。黄土高原不同农业区的土壤 pH 和土壤有机质含量评分普遍偏低, 成为该区域土壤质量的主要限制因子(图 6b)。除 pH 与有机质含量之外, 各农业区耕地土壤质量的其他限制因素也存在一定差异。汾渭平原和河套平原耕地土壤质量主要受全氮含量和土壤容重的制约。长期机械化耕作使土壤结构趋于紧实, 容重随之升高, 进而降低了土壤的导水性和透气性^[43], 限制了养分的吸收利用效率^[44]。而在黄土塬区和黄土丘陵区, 土壤养分含量及阳离子交换量也是关键限制因子。该区域主要以黄绵土为主, 土壤养分较为贫乏^[45], 且部分地区存在水土流失问题, 过度侵蚀可引发养分流失、土壤蓄水能力下降、土层变薄^[27], 因此耕地土壤质量较差。

3.2 土壤质量主控因素

黄土高原土壤质量空间分布特征受多种因素共同影响。本文定量研究了不同因子对土壤质量影响作用的大小, 并综合分析了因子探测和交互探测的结果。黄土高原土壤质量的主控因素主要包括土壤养分含量(全氮、有机质、全磷)、土壤生物多样性及活性(线虫丰度、土壤呼吸强度)及土壤质地(黏

粒含量、粉粒含量)。土壤氮素是植物生长和发育所必需的营养元素, 土壤有机质含量的高低直接影响土壤的保肥和供肥能力。全氮和土壤有机质的空间分布具有相似的规律性, 两者之间具有密切的相关性。粉粒、黏粒含量较高的土壤通常具有较强的保持水分和养分的能力^[28], 可以积累更多的有机质。

土壤生物多样性和活性可以促进有机质分解、提高土壤养分利用效率、改善土壤结构等^[46]。有机质与黏粒含量, 以及全氮与全磷间的交互作用对黄土高原土壤质量的影响最大。有机质和黏粒共同控制着土壤的保肥供肥能力, 全氮和全磷共同控制着地表植被生长和发育所需的营养元素。

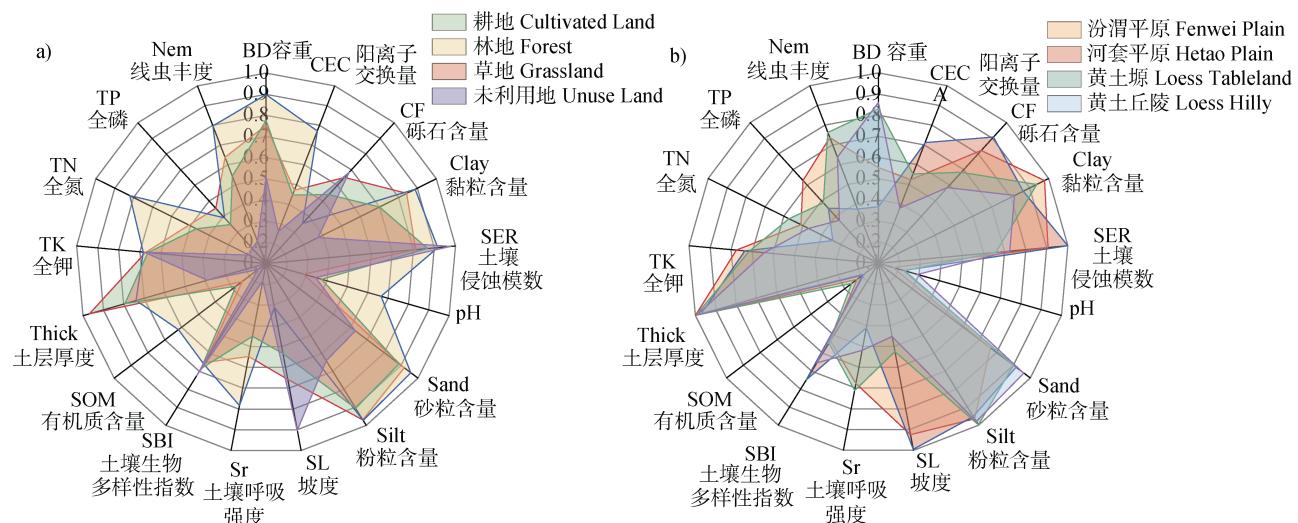


图 6 不同土地利用类型 a) 和农业区耕地 b) 土壤质量评价指标得分

Fig.6 Scores of soil quality assessment indicators for different land use types (a) and cultivated land in agricultural zones (b)

已有研究表明, 在不同空间尺度下, 土壤质量的主控因素存在差异。原因在于各研究者在不同的尺度下会选择不完全相同的评价指标和评价模型。例如, 在黄土高原丘陵沟壑区第二副区, Xu 等^[47]在流域尺度, 基于最小数据集探究了黄土高原丘陵坡耕地短暂沟蚀对土壤质量的影响, 结果表明, 在第一个侵蚀阶段, 土壤可蚀性、土壤质地和结构是土壤质量的主控因素; 而在第二个侵蚀阶段, 土壤养分含量为主控因素。而 Ma 等^[16]对延安市的土壤质量研究表明, 有机质、阳离子交换量、全氮和全磷是耕地土壤质量的主控因素, 这与本文的研究结果较为相似。

3.3 本研究的局限性

本研究选取了土壤物理、化学和生物属性, 以及土壤侵蚀模数作为评价指标, 涵盖了较为全面的土壤属性特征。然而, 土壤生物指标空间异质性高, 栅格数据较为匮乏, 因此, 本研究在生物指标的选取上存在一定的局限性, 尚未实现对其全面表征。其次, 通过数字土壤制图技术绘制的土壤属性图所使用的数据源时效性较差, 以本研究所使用的《中

国高分辨率土壤基本属性栅格数据集(2010-2018)》为例, 制作该数据集的原始剖面数据采集于2010—2018年^[21]; 在此期间, 土壤物理属性如土层厚度、土壤质地等指标状态较为稳定, 但土壤化学属性如全氮、全钾、有机质等指标的性质和特征较容易发生变化^[48], 因此本研究的土壤质量评价结果可能在时间上存在滞后性。本研究初步探索了基于数字土壤制图进行大尺度土壤质量评价的可行性, 但本研究缺乏实测土壤质量评价数据, 无法评估结果的不确定性, 限制了结果的准确度。针对这些问题, 有待进一步研究。

4 结 论

根据土壤质量的空间分布格局, 黄土高原可划分为三个典型区域: 毛乌素沙地及西北干旱区土壤质量最低; 中西部黄土丘陵区居中; 南部、东部和北部的山地、黄土塬和平原地区土壤质量较高。整体上, 土壤质量随植被覆盖度的增加而提升。不同土地利用类型中, 土壤质量依次表现为林地>耕地>

草地>未利用地；不同地貌区中，表现为山地>黄土塬>平原>黄土丘陵；不同农业区耕地土壤质量依次为汾渭平原>银川平原>黄土塬区>黄土丘陵区。从限制因子角度看，土壤有机质含量和pH是制约黄土高原土壤质量现状的主要因素。总体而言，黄土高原土壤质量受多重因素共同驱动，包括土壤养分（全氮、有机质、全磷）、土壤生物多样性与活性（如线虫丰度、土壤呼吸强度）以及土壤质地特征（黏粒和粉粒含量）等。

参考文献 (References)

- [1] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532 (7597): 49—57.
- [2] Weil R R, Brady N C. *The nature and properties of soils*[M]. Maryland: Pearson International, 2016.
- [3] Doran J W, Coleman D C, Bezdicek D F, et al. Defining soil quality for a sustainable environment[M]. Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1994.
- [4] Diodato N, Ceccarelli M. Multivariate indicator Kriging approach using a GIS to classify soil degradation for Mediterranean agricultural lands[J]. *Ecological Indicators*, 2004, 4 (3): 177—187.
- [5] Andrews S S, Mitchell J P, Mancinelli R, et al. On-farm assessment of soil quality in California's central valley[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94 (1): 12—23.
- [6] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. *Geoderma*, 2009, 149 (3/4): 325—334.
- [7] Zhang Z Y, Ai N, Liu G Q, et al. Soil quality evaluation of various microtopography types at different restoration modes in the loess area of Northern Shaanxi[J]. *Catena*, 2021, 207: 105633.
- [8] Zhao Z H, Yang Y F, Dong B, et al. Evaluation of soil quality of Pingliang City based on fuzzy mathematics and cluster analysis[J]. *Agronomy*, 2024, 14 (6): 1205.
- [9] An Y D, Zhang L, Wang Q, et al. Soil quality assessment of different land use types based on TOPSIS method in hilly sandy area of Loess Plateau, northern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19 (24): 17059.
- [10] Cao Z H, Zhou J M. *Soil quality of China*[M]. Beijing: Science Press, 2008. [曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [11] Bünenmann E K, Bongiorno G, Bai Z G, et al. Soil quality—A critical review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 120: 105—125.
- [12] Xu M X. Soil quality evolvement mechanism in the process of ecosystem restoration and its management in the hilly Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2003.[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.]
- [13] Zhang J N. Research on soil quality evaluation in the Loess Plateau under different land use type[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.[张嘉宁. 黄土高原典型土地利用类型的土壤质量评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.]
- [14] Ma Q H, Zhang G H, Geng R, et al. Evaluation on soil quality of different land use types in Zhifanggou watershed of the Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (4): 30—35, 42.[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—35, 42.]
- [15] Bai W J, Zheng F L, Dong L L, et al. Integrated assessment on soil quality in the water-wind erosion region of the Loess Plateau area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8 (3): 28—37. [白文娟, 郑粉莉, 董莉丽, 等. 黄土高原地区水蚀风蚀交错带土壤质量综合评价[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8 (3): 28—37.]
- [16] Ma J F, Chen Y P, Zhou J, et al. Soil quality should be accurately evaluated at the beginning of lifecycle after land consolidation for eco-sustainable development on the Loess Plateau[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267: 122244.
- [17] Bao Y X. The characteristics and assessment on soil quality of dam land and terrace in Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.[包耀贤. 黄土高原坝地和梯田土壤质量特征及评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.]
- [18] Chen Y P, Wu J H, Wang H, et al. Evaluating the soil quality of newly created farmland in the hilly and Gully Region on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29 (5): 791—802.
- [19] Liu Z P. Spatial distribution of soil nutrients in Loess Plateau and its influencing factors[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2013. [刘志鹏. 黄土高原地区土壤养分的空间分布及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2013.]
- [20] Poggio L, de Sousa L M, Batjes N H, et al. SoilGrids 2.0: Producing soil information for the globe with quantified spatial uncertainty[J]. *Soil*, 2021, 7 (1): 217—240.
- [21] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67 (3): 328—340.
- [22] FAO & IIASA. Harmonized World Soil Database version 2.0. Rome and Laxenburg, 2023.

- [23] Shi G S, Sun W Y, Shangguan W, et al. A China dataset of soil properties for land surface modelling (version 2, CSDLv2)[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17 (2): 517—543.
- [24] Pacci S, Dengiz O, Alaboz P, et al. Artificial neural networks in soil quality prediction: Significance for sustainable tea cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 947: 174447.
- [25] Yang Q K. Graphs of geographical division on the Loess Plateau (2000). Data Sharing Infrastructure of Earth System Science_Data Sharing Infrastructure of Loess Plateau. 2013.[杨勤科. 黄土高原地区地理分区图(2000年). 地球系统科学数据共享服务平台-黄土高原科学数据共享平台.2013]
- [26] Huang C L. Temporal and spatial changes of soil erosion and its main controlling factors in Loess Plateau in recent 40 years[D]. Xi'an: Northwest University, 2021. [黄晨璐. 近40年黄土高原土壤侵蚀时空变化及其主控因子研究[D]. 西安: 西北大学, 2021.]
- [27] Nabioillahi 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: 16—28.
- [28] Moebius-Clune B N, Moebius-Clune D J, Gugino B K, et al. Comprehensive assessment of soil health – The cornell framework[M]. New York: Cornell University, 2017.
- [29] Gholamhosseini A, Bashtian M H, Sepehr A. Soil quality : Concepts , importance , indicators , and measurement[M]. Singapore: Springer, 2022.
- [30] Vasu D, Singh S K, Ray S K, et al. Soil quality index (SQI) as a tool to evaluate crop productivity in semi-arid Deccan plateau, India[J]. *Geoderma*, 2016, 282: 70—79.
- [31] Yakov K, Anna G, Kazen Z, et al. New approaches for evaluation of soil health, sensitivity and resistance to degradation[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2020, 7 (3): 282—288.
- [32] Lenka N K, Meena B P, Lal R, et al. Comparing four indexing approaches to define soil quality in an intensively cropped region of Northern India[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 865473.
- [33] Wang J F , Xu C D. Geodetector : Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116—134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72 (1): 116—134.]
- [34] Zhang Z Q, Jiao J Y, Chen T D, et al. Soil nutrient evaluation of alluvial fan in the middle and lower reaches of Lhasa River Basin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28 (11): 2082—2096.[张子琦, 焦菊英, 陈同德, 等. 拉萨河流域中下游洪积扇土壤养分评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28 (11): 2082—2096.]
- [35] Wilding L P. Spatial variability: Its documentation, accommodation and implication to soil surveys[M]. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [36] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion:SL 190—1996[S]. Beijing:China Water & Power Press, 1997. [中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—1996[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.]
- [37] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. China cultivated land quality grade bulletin (2019) [EB/OL]. 2020.[中华人民共和国农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[EB/OL]. 2020.]
- [38] Zhou Z C, Shangguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198 (1/2): 263—268.
- [39] Wang J, Zhao W W, Wang G, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 770: 144833.
- [40] Ma J, Zhou Y, Lu Q, et al. Soil properties and quality evaluation of desert steppe under different management measures in arid windy and sandy areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40 (24): 106—116. [马菁, 周瑶, 陆琪, 等. 不同管理方式下干旱风沙区荒漠草原土壤性状变化及质量评价[J]. 农业工程学报, 2024, 40 (24): 106—116.]
- [41] Song J L. The characters and evaluation on soil quality of grassland in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2010. [宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.]
- [42] Li B B. Cropland and soil quality assessment at a regional scale on the Loess Plateau in China [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.[李彬彬. 黄土高原区域尺度农田土壤质量评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.]
- [43] Nawaz M F, Bourrié G, Trolard F. Soil compaction impact and modelling. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33 (2): 291—309.

- [44] Lipiec J, Stępniewski W. Effects of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients[J]. Soil and Tillage Research, 1995, 35 (1/2): 37—52.
- [45] Kang Q J. Spatial variability of soil nutrients and evaluation of cultivated land quality in the Loess Plateau[D]. Yangling , Shaanxi : Northwest A & F University, 2019. [康钦俊. 黄土高原区土壤养分空间变异及其耕地质量评价[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [46] Wall D H, Nielsen U N, Six J. Soil biodiversity and human health[J]. Nature, 2015, 528 (7580): 69—76.
- [47] 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.
- [48] Sun X B, Kong X B, Zhang Q P, et al. Evaluation of inherent quality and dynamic quality of cultivated land based on comprehensive characteristics of indexes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36 (22): 254—265, 349. [孙晓兵, 孔祥斌, 张青璞, 等. 基于指标综合特征的耕地遗传质量和动态质量评价[J]. 农业工程学报, 2020, 36 (22): 254—265, 349.]

(责任编辑: 檀满枝)