

基于最小数据集的墨脱地区不同 土地利用类型土壤质量评价

李春¹, 毕彪¹, 丹增松格¹, 李岳天¹, 郑洛钧¹, 薛蕙², 杨锦秋²

(1. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都 611130;

2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院/水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 系统分析不同土地利用类型(林地、草地、耕地)对土壤质量的影响, 揭示高海拔河谷区土壤质量的空间分异规律, 为区域土壤资源管理与生态恢复提供科学依据。[方法] 以青藏高原高落差河谷地区墨脱县表层土壤为研究对象, 构建基于主成分分析(PCA)的最小数据集(MDS), 并通过土壤质量指数(SQI)评价区域土壤质量的空间分异特征。[结果] (1) 土地利用类型显著影响土壤理化及生物学特性: 林地土壤容重最低($1.01 \text{ g/cm}^3 \pm 0.24 \text{ g/cm}^3$), 有机质含量最高($32.58 \text{ g/kg} \pm 32.92 \text{ g/kg}$); 草地土壤酶活性及速效钾含量($173.16 \text{ mg/kg} \pm 161.53 \text{ mg/kg}$)显著高于其他类型; 耕地土壤pH(7.29 ± 0.67)、硝态氮含量($2.43 \text{ mg/kg} \pm 2.07 \text{ mg/kg}$)及过氧化氢酶活性[($410.49 \text{ nmol}/(\text{g} \cdot \text{h}) \pm 362.57 \text{ nmol}/(\text{g} \cdot \text{h})$)]最高。(2) 通过主成分分析筛选出6项核心指标(砂粒、 β -葡萄糖苷酶、铵态氮、有机质、pH、速效钾)构建最小数据集(MDS), 其累计方差贡献率达69.75%, MDS与全量数据集(TDS)的SQI显著正相关($p < 0.001$)。(3) 根据最小数据集计算的SQI中位数表现为草地(0.55) > 耕地(0.49) > 林地(0.41), 林地土壤质量最不均匀, 异质性较大。[结论] 研究验证了基于最小数据集的土壤质量指数对青藏高原河谷地区土壤质量评价的适用性, 发现不同土地利用类型具有差异化的土壤质量格局。

关键词: 土地利用类型; 土壤质量; 最小数据集; 高落差河谷; 青藏高原

中图分类号: S158

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0123-09

Soil quality assessment of different land use types in Medog area based on minimum dataset

Li Chun¹, Bi Biao¹, Tenzin Songyal¹, Li Yuetian¹, Zheng Mingjun¹, Xue Sha², Yang Jinqiu²

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 611130, China;

2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering/State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to systematically analyze the effects of different land use types (forestland, grassland, cropland) on soil quality and reveal the spatial differentiation patterns of soil quality in high-altitude valley areas, thereby providing a scientific basis for regional soil resource management and ecological restoration. [Methods] Taking the surface soil of Medog County, a high-gradient valley area on the Qinghai-Xizang Plateau as the research object, a minimum dataset (MDS) was established based on principal component analysis (PCA), and the spatial differentiation characteristics of soil quality were evaluated via the soil quality index (SQI). [Results] (1) Land use types significantly affected soil physicochemical and biological properties. Forestland exhibited the lowest soil bulk density ($1.01 \text{ g/cm}^3 \pm 0.24 \text{ g/cm}^3$) and the highest organic matter content

收稿日期: 2025-04-21

修回日期: 2025-06-09

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42171301); 陕西省创新人才推进计划科技创新团队项目(2023-CX-TD-37)

第一作者: 李春(1985—), 男, 重庆巴南人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为水土保持。E-mail: 214699148@qq.com

通信作者: 杨锦秋(2000—), 女, 山东济南人, 博士研究生, 研究方向为土壤生态学。E-mail: jinqiuyang2000@163.com

薛蕙(1978—), 男, 陕西西安人, 博士, 研究员, 主要从事土壤微生物和生态修复研究。E-mail: xuesha100@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

(32.58 g/kg±32.92 g/kg). Grassland showed significantly higher soil enzyme activity and available potassium content (173.16 mg/kg±161.53 mg/kg) than other land use types. Cropland had the highest soil pH (7.29±0.67), nitrate nitrogen content (2.43 mg/kg±2.07 mg/kg), and catalase activity [(410.49 nmol/(g·h)±362.57 nmol/(g·h)]. (2) Six core indicators (sand content, β -glucosidase, ammonium nitrogen, organic matter, pH, and available potassium) were selected through PCA to construct the MDS, achieving a cumulative variance contribution rate of 69.75%. A significant positive correlation ($p<0.001$) was observed between the SQI derived from the MDS and the total dataset (TDS). (3) The SQI calculated using the MDS ranked as grassland (0.55) > cropland (0.49) > forestland (0.41). Forest soil exhibited the highest spatial heterogeneity and the most uneven quality distribution. [Conclusion] The study validates the applicability of the MDS-based SQI for evaluating soil quality in valley areas of the Qinghai-Xizang Plateau, revealing distinct soil quality patterns across different land use types.

Keywords: land use type; soil quality; minimum dataset; high-gradient valley; Qinghai-Xizang Plateau

土壤作为陆地生态系统的核心组成部分,其多功能性体现在农业生产、生物多样性维持以及碳氮水循环调控等多个维度^[1]。土壤质量是土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤健康质量的综合量度,涵盖土壤维持生物生产力、保护环境质量及促进动植物健康等多个方面^[2-3]。青藏高原作为“亚洲水塔”,其土壤质量的优劣不仅关系到当地农牧业的生产力,还对下游地区的水资源供应和生态安全具有深远影响^[4]。墨脱地区属于青藏高原高落差河谷地区,是全球气候变化敏感区,显著的海拔落差(200~7 787 m)和复杂地形对土壤质量及其空间异质性具有独特影响^[5]。因此,科学评估该类区域土壤质量,揭示其空间分布规律及影响因素,对于制定合理的土地利用政策和生态恢复措施具有重要意义。

近年来,土壤质量指数(Soil Quality Index, SQI)作为一种综合评估指标,被广泛应用于不同土地利用方式下的土壤质量评价^[6-8]。然而,由于土壤系统的复杂性和区域差异性,如何筛选关键指标并构建适用于特定区域的SQI模型,仍然是当前研究的难点^[2]。特别是在青藏高原河谷地区,海拔的高落差变化、地形的复杂性和土地利用方式的多样性使得土壤质量评价更具挑战性。现有研究中,基于主成分分析创建的最小数据集(Minimum Dataset, MDS)计算土壤质量指数被广泛应用,例如蒋丛泽等使用MDS对青藏高原东北缘土壤进行质量综合评价^[6],刘利昆等确定全钾、全磷、有机质、黏粒和粉粒作为青藏铁路沿线土壤质量评价的最小数据集进行土壤质量评价^[9]。然而目前研究多集中于单一指标或局部区域,缺乏对多因素综合影响的系统性分析^[6-10]。因此,结合物理、化学和生物指标,构建适用于青藏高原河谷地区的土壤质量评价体系,不仅有助于揭示土壤质量的空间异质性,还能为区域生态恢复和

土地资源管理提供科学依据。

经实地勘察,林地、草地、耕地为墨脱地区主要土地利用类型,且分别代表自然生态系统(林地)、放牧地复合生态系统(草地)及高强度农业系统(耕地),其土壤质量差异可反映人类活动与自然过程的交互效应^[11]。基于此,本研究通过采集具有高海拔落差的墨脱地区典型林地、草地和耕地土壤样品,并测定20项土壤理化性质指标,通过筛选MDS,构建适用于青藏高原河谷地区的SQI,并探讨海拔、坡度和土地利用方式对土壤质量的综合影响。研究结果将为区域土壤资源的可持续利用和生态保护提供理论支持,同时也为类似生态脆弱区的土壤质量评价提供方法参考。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区林芝市墨脱县,属南亚—藏东南气候区过渡带,同时具备特殊的热带、亚热带、温带及寒带气候并存的多种气候带及湿润和半湿润的气候特征^[12]。年降雨量约650 mm,年均温度8.7℃,年均日照2 000 h,无霜期180 d。墨脱县境内地势北高南低,海拔200~7 787 m,平均海拔1 200 m。因海拔高差大,土壤带发育多形成寒、温、热带完整的垂直结构^[13]。

1.2 土壤样品采集与测定

于2023年7月份,采用网格布点法结合分区布点法采样。样点覆盖墨脱县内696~3 487 m海拔梯度范围,其中耕地分布海拔701~3 122 m,林地分布海拔696~3 487 m,草地分布海拔839~3 312 m,坡度、坡向、坡位均衡分布。充分考虑地势变化和土壤特性的不均衡性,耕地采样密度为5 hm²/采样点,林地和草地采样密度为10 hm²/采样点。依据《土地利

用现状分类》(GB/T21010—2017)^[14]中对植被及郁闭度的规定划分土地利用类型。共采集耕地样点183个(种植农作物的土地)、林地样点237个(乔木郁闭度 ≥ 0.2 、灌木郁闭度 ≥ 0.4)、草地样点14个(生长草本植物为主的土地)。在预设样点所在地块范围内,采用五点采样法采集0—20 cm深度土壤样品并充分混匀,过2 mm筛,带回实验室进行分析测定。土壤机械组成采用激光粒度仪测定,土壤容重采用环刀法测定,砾石质量采用筛分质量法测定,pH值采用电位法测定,含盐量采用电导率仪测定,有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用碳酸钠熔融—钼锑抗比色法测定,速效氮采用流动分析仪法测定,有效磷采用Olsen法测定,速效钾采用乙酸铵提取—火焰光度法测定。 β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG)、N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(N-acetyl- β -D-glucosaminidase, NAG)、磷酸酶(Acid Phosphatase, AP)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)采用微孔板荧光法测定活性。

1.3 土壤质量评价方法

1.3.1 最小数据集的构建 采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA),通过降维将多个指标转化为少数指标,选择全量数据集(Total Dataset, TDS)中具有代表性且相互独立的评价指标进入最小数据集。运用SPSS 25.0对全部指标数据集进行主成分分析,提取特征值 ≥ 1 的主成分,将同组主成分中载荷值 ≥ 0.5 的评价指标划分为一组。如果某指标在每组主成分上的载荷值均 < 0.5 ,则将该指标划归到载荷值较高的那一组中;如果某指标在每组主成分的载荷值均 ≥ 0.5 ,则将其划分到此指标与其主成分中其他指标相关性较小的一组。分别计算每组主成分中评价指标的综合载荷值,选取每组中达最高综合载荷值的90%范围内的指标。如果只有1个指标,则直接入选最小数据集;如果不止1个指标,则分析各指标间的相关性。考虑研究区范围较大,如果指标间的相关系数 ≥ 0.3 ,则综合载荷值大的指标进入最小数据集;如果指标间的相关系数 < 0.3 ,则均入选最小数据集。综合载荷值是基于Norm值法计算的,该方法能在消除数据重复的同时能充分地将指标包含的关键信息保留下来,其计算公式如下:

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

式中: N_{ik} 为第*i*个变量在特征值 ≥ 1 的前*k*个主成分上的综合载荷值; u_{ik} 为第*i*个变量在第*k*个主成分上的荷载值; λ_k 为第*k*个主成分的特征值。

1.3.2 土壤质量评分方程的建立 由于土壤指标的

量纲和数量级不同,无法直接比较,可以通过非线性

$$S = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b} \quad (2)$$

评分方程将各指标数值标准化为0~1的无量纲值。计算方程如下:

式中: S 为非线性得分值,取值为0~1; a 取1,表示最大得分值; x 为各指标实测值; x_0 为各指标均值; b 为方程斜率,若指标与土壤质量正相关则 **b** 取值-2.5(如化学和生物学指标),若指标与土壤质量负相关则 **b** 取值为2.5(如物理指标)。

1.3.3 土壤质量指数的计算 评价指标通过主成分分析确定权重,根据评价指标的得分和权重,计算土壤质量指数(Soil Quality Index)。计算公式如下:

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

式中:SQI指土壤质量指数; n 为土壤指标个数; W_i 指第*i*项土壤指标的权重; S_i 指土壤指标的得分值。SQI的范围为0~1,其值越大表明土壤质量越好。土壤指标的权重 W_i 是根据主成分分析中的公因子方差与总方差的比值计算所得。全量数据集土壤质量指数(SQI-TDS)和最小数据集土壤质量指数(SQI-MDS)分别是基于全量数据集和最小数据集计算所得。利用广义线性模型(Generalized Linear Model, GLM),通过验证SQI-TDS与SQI-MDS的相关性来评估最小数据集的合理性。

1.4 数据处理

运用R软件(版本4.3.2)进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、Pearson相关性分析和Norm值的计算,利用单因素方差分析(One-way Analysis of Variance, ANOVA)对土壤指标进行检验。采用非参数检验方法来检验土壤质量指数不同处理之间的显著差异。对于土地利用类型之间,采用stats包的kruskal.test函数进行Kruskal-Wallis显著性检验。如果发现处理对响应变量的影响达到显著水平($p < 0.05$),则继续使用FSA包的dunnTest函数进行Dunn's test事后比较,以确定任意两组处理间是否存在显著差异($p < 0.05$)。使用双因素方差分析研究不同海拔梯度和坡度对两种土壤质量指数的影响及交互作用。

2 结果与分析

2.1 各土地利用类型土壤理化性质

本研究发现土壤理化性质和酶活性等各项指标呈现明显的土地利用分异特征。林地土壤具有最低的容重($1.01 \text{ g/cm}^3 \pm 0.24 \text{ g/cm}^3$)和最高的石砾含量

(19.80%±21.02%),与耕地和草地存在显著差异($p<0.05$)。化学性质方面,耕地土壤表现出最高的pH值(7.29±0.67)和电导率(92.49 $\mu\text{S}/\text{cm}\pm 97.97 \mu\text{S}/\text{cm}$),高于林地和草地($p<0.01$)。土壤养分含量在不同土地利用类型间呈现显著差异(表1)。林地土壤的铵态氮(8.35 mg/kg±5.05 mg/kg)和有机质含量(32.58 g/kg±32.92 g/kg)显著高于其他土地利用类型($p<0.05$)。耕地土壤的硝态氮含量(2.43 mg/kg±2.07 mg/kg)显著高于林地和草地($p<0.01$)。草地土壤则

表现出最高的速效钾含量(173.16 mg/kg±161.53 mg/kg)($p<0.05$)。草地土壤的AP[碱性磷酸酶 744.26 nmol/(g·h)±1 037.46 nmol/(g·h)、BG(β -葡萄糖苷酶 342.96 nmol/(g·h)±522.86 nmol/(g·h))和NAG[N-乙酰- β -葡萄糖苷酶,130.21 nmol/(g·h)±164.56 nmol/(g·h)]活性均显著高于其他土地利用类型($p<0.01$),耕地土壤的CAT(过氧化氢酶)活性达到410.49 nmol/(g·h)±362.57 nmol/(g·h),显著高于林地($p<0.05$)。

表1 各土地利用类型土壤理化性质
Table 1 Physicochemical properties of soil under different land use types

指标	土地利用类型(平均值±标准差)			变异系数
	耕地(n=183)	林地(n=237)	草地(n=14)	
海拔/m	2792.85±539.69a	2535.19±888.46b	2732.36±805.57ab	0.289
pH	7.29±0.67a	6.53±0.82b	6.72±0.88b	0.124
电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	92.49±97.97a	49.46±47.30b	62.44±40.55ab	1.114
铵态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	6.40±3.22b	8.35±5.05a	7.20±2.25ab	0.587
硝态氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	2.43±2.07a	1.08±0.73b	1.41±0.52b	0.961
速效氮/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	8.83±3.64a	9.43±5.01a	8.61±2.10a	0.483
速效钾/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	105.37±58.28b	109.20±118.57b	173.16±161.53a	0.913
速效磷/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	12.94±15.46a	9.04±10.11b	19.12±18.97a	1.194
有机质/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	23.68±14.07b	32.58±32.92a	26.27±13.89ab	0.924
全磷/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.77±0.20a	0.76±0.27a	0.85±0.18a	0.316
全氮/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	1.36±0.69a	1.45±1.25a	1.46±0.76a	0.733
石砾含量/%	4.26±8.52b	19.80±21.02a	12.38±15.50ab	1.410
容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.09±0.11a	1.01±0.24b	1.08±0.14ab	0.188
黏粒/%	18.73±5.88a	12.84±5.67b	17.15±6.50a	0.417
粉粒/%	78.21±5.44a	75.71±10.17b	81.34±6.42a	0.110
砂粒/%	3.06±5.02b	11.46±13.11a	1.52±2.47b	1.456
AP/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	520.48±966.97a	165.85±158.88b	744.26±1037.46a	2.063
BG/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	239.79±351.54a	84.08±94.44b	342.96±522.86a	1.697
NAG/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	61.23±86.44b	47.41±60.95b	130.21±164.56a	1.409
CAT/($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	410.49±362.57a	235.66±200.64b	398.74±336.53a	0.943

注:不同小写字母表示同一指标不同土地利用类型差异显著($p<0.05$)。

2.2 最小数据集的建立和适用性验证

经过对上述20个理化指标进行主成分分析(表2),发现前6个主成分特征值大于1,并且累积方差贡献率达到69.75%,这表明前6个主成分能够很好地解释大部分评价指标的变异性。

基于主成分分析的结果,在土壤质量评价的理化生指标中,特征值大于1的主成分有6个,累计贡献率为69.75%,满足信息提取的要求。根据各主成分上的因子载荷,将土壤指标分为6组(表2)。第1组中有机质、全氮、容重相关性较高(图1),选取Norm值最高的有机质进入MDS;第2组中BG、AP、NAG高度相关,BG的Norm值最高,进入MDS;第3组中选取砂粒进入MDS;第4组中Norm值最高的指标为pH,而Norm值在其90%以内的硝态氮与其相

关系数较大(图1),因此pH选入MDS;第5组速效氮与铵态氮高度相关,选取Norm值最高的铵态氮进入MDS;第6组中速效钾Norm值最高,其他指标不在其90%范围内。最终,选定最小数据集包括有机质、BG、砂粒、pH、铵态氮、速效钾。

用指标公因子方差占有所有指标公因子方差之和的比例来获取各指标的权重,进而计算两种数据集下土壤质量指数。为验证所建立MDS的准确性,对基于全量数据集的土壤质量指数(SQI-TDS)和基于最小数据集的土壤质量指数(SQI-MDS)进行线性拟合,发现二者存在极显著正相关关系($p<0.001$)(图2)。这说明对于所研究地区的表层土壤,可以使用MDS的土壤质量评价指标来替代TDS进行土壤质量评价。

表 2 土壤指标在各主成分上的因子载荷和 Norm 值
Table 2 Factor loadings and Norm values of soil indicators on each principal component

土壤指标	主成分						综合 载荷值	分组
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6		
有机质	0.855	0.107	-0.086	-0.059	0.168	0.245	1.706	1
全氮	0.829	0.159	0.051	0.024	0.161	0.308	1.679	1
容重	-0.773	-0.016	0.002	-0.041	-0.128	0.058	1.508	1
BG	0.028	0.945	0.072	0.113	-0.009	0.064	1.778	2
AP	0.006	0.898	0.013	0.131	0.029	-0.040	1.688	2
NAG	0.210	0.844	0.088	-0.017	-0.062	0.032	1.637	2
砂粒	0.030	-0.139	-0.953	-0.204	-0.033	-0.060	1.415	3
粉粒	0.094	-0.085	0.821	0.150	0.088	-0.106	1.224	3
黏粒	-0.177	0.350	0.553	0.154	-0.059	0.242	1.132	3
硝态氮	-0.332	-0.035	-0.089	0.654	0.347	0.144	1.123	4
石砾含量	-0.117	-0.132	-0.202	-0.652	0.163	0.114	0.943	4
pH	-0.470	0.034	0.207	0.602	-0.173	-0.043	1.229	4
电导率	0.275	0.020	0.147	0.582	-0.080	0.066	0.925	4
CAT	-0.030	0.163	0.153	0.452	-0.180	-0.180	0.730	4
速效氮	0.182	-0.025	0.042	-0.051	0.968	0.082	1.161	5
铵态氮	0.303	-0.013	0.074	-0.289	0.846	0.030	1.185	5
速效磷	0.072	0.070	0.117	0	0.142	0.771	0.879	6
全磷	0.125	-0.009	-0.173	-0.203	-0.012	0.686	0.850	6
速效钾	0.385	-0.014	0.209	0.161	-0.040	0.494	0.984	6
特征值	3.756	3.499	2.052	1.513	1.287	1.147		
方差贡献率/%	19.768	18.416	10.798	7.961	6.776	6.035		
累计贡献率/%	19.768	38.183	48.982	56.942	63.719	69.754		

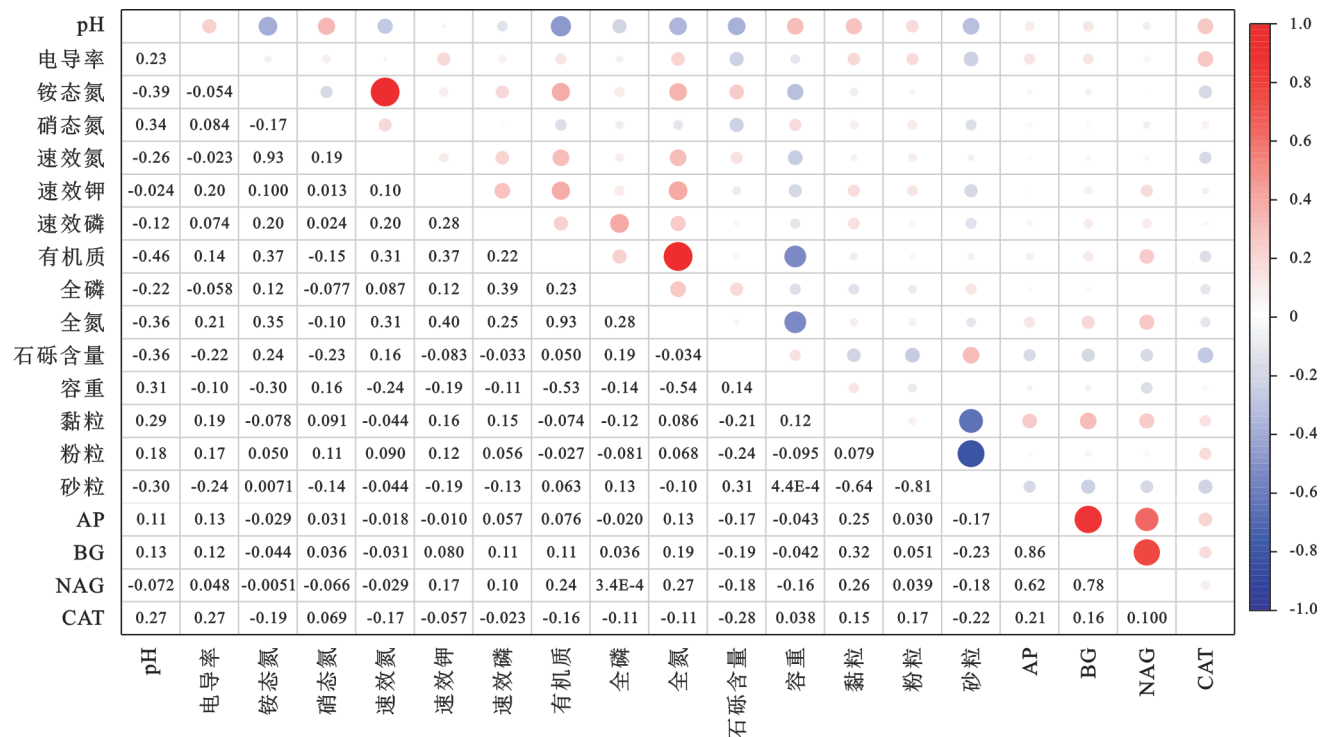


图 1 各土壤指标间相关性
Fig. 1 Correlation between soil indicators

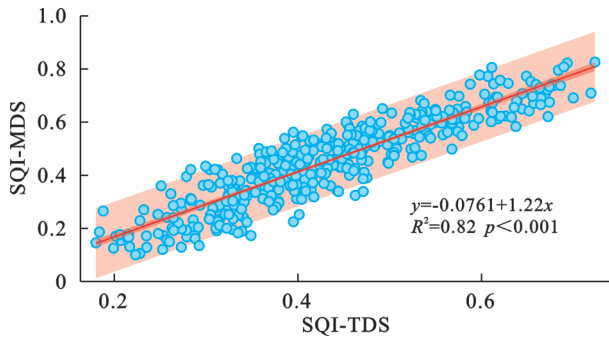


图 2 基于 SQI-TDS(全量数据集)与 SQI-MDS (最小数据集)的土壤质量指数相关性

Fig. 2 Correlation of soil quality indices based on SQI-TDS (total dataset) and SQI-MDS (minimum dataset)

2.3 土壤质量指数

土壤质量指数(SQI)分析结果表明,对于不同土地利用类型的土壤质量评价,基于 TDS 和 MDS 的评估结果呈现高度一致性。如表 3 所示,各指标权重大小为砂粒(0.205) > BG (0.193) > 铵态氮(0.189) > 有机质(0.177) > pH(0.139) > 速效钾(0.098)。墨脱县表层土壤基于 TDS 的土壤质量指数介于 0.180~0.724(图 3A)。基于 MDS 的土壤质量指数介于 0.101~0.826(图 3B)。

具体而言,草地和耕地的土壤质量指数显著高于林地($p < 0.001$),草地和耕地间则无显著差异($p > 0.05$)。其中草地 SQI-TDS 和 SQI-MDS 最高分别达到 0.69, 0.81, 其 SQI-TDS 和 SQI-MDS 中位数分别为 0.48, 0.55; 耕地 SQI-TDS 和 SQI-MDS 中位数分

别为 0.46, 0.49。林地土壤质量显著较低,其 SQI-TDS 和 SQI-MDS 中位数分别为 0.39, 0.41(图 3B)。

表 3 土壤指标的公因子方差和权重
Table 3 Common factor variance and weights of soil indicators

土壤指标	全量数据集		最小数据集	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重
pH	0.659	0.050	0.659	0.139
电导率	0.448	0.034	—	—
铵态氮	0.898	0.068	0.898	0.189
硝态氮	0.688	0.052	—	—
速效氮	0.981	0.074	—	—
速效钾	0.464	0.035	0.464	0.098
速效磷	0.638	0.048	—	—
有机质	0.842	0.064	0.842	0.177
全磷	0.558	0.042	—	—
全氮	0.837	0.063	—	—
石砾含量	0.536	0.040	—	—
容重	0.618	0.04	—	—
黏粒	0.545	0.041	—	—
粉粒	0.732	0.055	—	—
砂粒	0.975	0.074	0.975	0.205
AP	0.826	0.062	—	—
BG	0.917	0.069	0.917	0.193
NAG	0.77	0.058	—	—
CAT	0.32	0.024	—	—

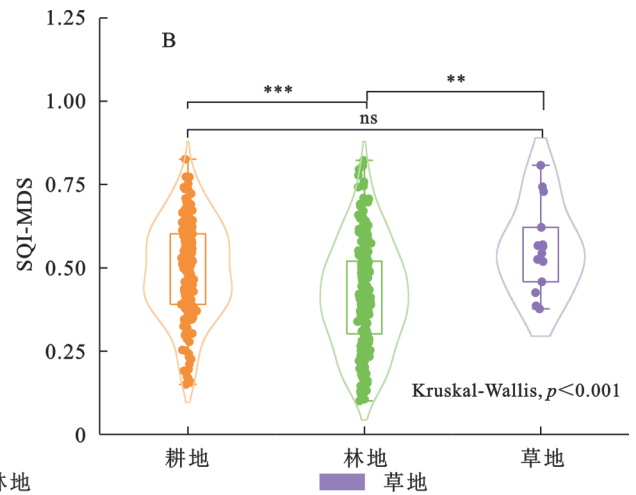
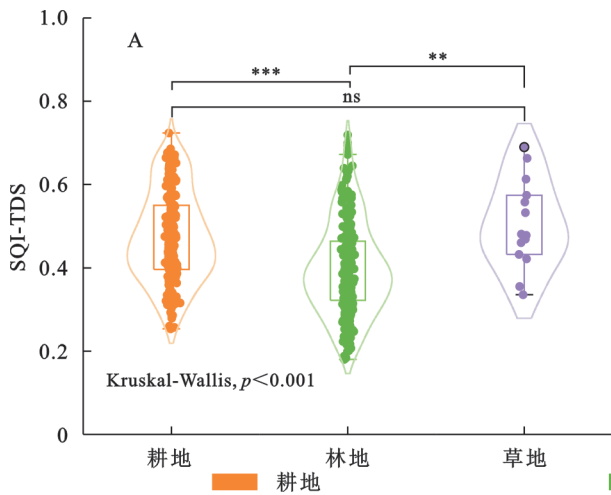


图 3 两种数据集下土壤质量指数

Fig. 3 Soil quality indices under two datasets

海拔梯度和坡度对 3 种土地利用类型土壤的 SQI-TDS 和 SQI-MDS 表现出相近的独立及交互效应规律(表 4)。海拔梯度($p < 0.001$)和坡度($p < 0.01$)对林地土壤质量指数影响显著,地形因素对耕地系统则无明显影响。

综合考虑 SQI 分布,采用等距划分法,将研究区

表土壤质量分为三级: I 级($0 \leq \text{MDS-SQI} < 0.25$), 质量较低; II 级($0.25 \leq \text{MDS-SQI} < 0.50$), 质量中等; III 级($0.50 \leq \text{MDS-SQI} < 0.75$), 质量良好; IV 级($0.75 \leq \text{MDS-SQI} < 1.00$), 质量较高。研究区域土壤质量呈现明显的空间分异特征:耕地土壤绝大多数为 II 级、III 级,草地土壤质量最优,大部分达到 III 级

(良好)水平,林地土壤质量普遍低于0.5,Ⅱ级(质量中等)占比远高于其他等级(图4)。

表4 海拔梯度和坡度对土壤质量指数影响的方差分析
Table 4 Analysis of variance of effects of altitude gradient and slope on soil quality index

指标	影响因素	F值		
		林地	草地	耕地
SQI-TDS	海拔梯度	8.619***	8.057**	0.153
	坡度	4.686**	0.906	0.386
	海拔梯度×坡度	1.093	—	0.096
SQI-MDS	海拔梯度	6.602***	4.629*	0.150
	坡度	6.993***	0.425	0.575
	海拔梯度×坡度	0.795	—	0.025

注:*,**,***分别代表在0.05,0.01,0.001水平上显著相关;草地因样本量限制无法计算交互项F值。

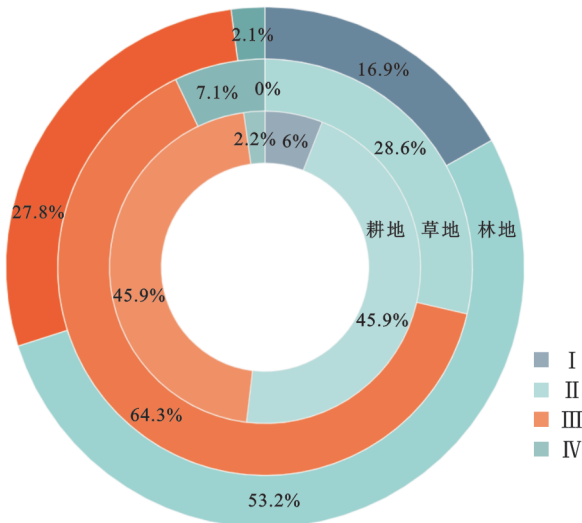


图4 不同土地利用类型土壤等级分布
Fig. 4 Distribution of soil grades under different land use types

3 讨论

3.1 墨脱地区土壤质量分异特征及影响因素

土地利用类型是影响土壤质量的关键因素之一,其通过改变植被覆盖、土壤管理方式以及养分循环过程,显著影响土壤的理化性质和生物学特性^[15]。本研究发现,林地、草地和耕地土壤质量呈现显著分异特征,这一结果与多个生态区的研究结论一致^[7-8]。具体而言,林地土壤表现出较低的容重和最高的有机质含量,这归因于林地生态系统的凋落物输入和根系活动促进了土壤团聚体形成和有机质积累^[16]。草地土壤的酶活性显著高于其他土地利用类型,与之相似的是,Yang等^[17]的研究表明草地土壤胞外酶活性提高。耕地土壤的硝态氮含量显著高于林地和草地,可能的原因是化肥施用和土壤硝化作用的增强,这与全球尺度上耕地氮素盈余的研究结论一致^[18]。

就土壤质量指数反映的土壤质量等级而言,草地土壤质量显著优于耕地和林地,这可能与草地生态系统的快速养分循环和较高的微生物活性密切相关。草地植被的密集根系促进了土壤有机质的积累和分解,从而提高了土壤肥力,草地的放牧活动加速了枯落物分解,进一步促进了养分循环^[19]。本研究中林地土壤质量均值较低(SQI<0.4),这与热带地区的研究结果形成鲜明对比,验证了高海拔地区低温环境对有机质分解和养分循环的抑制作用^[20]。但林地质量波动显著(离散程度高),兼具低质区和高质区,这反映了高落差河谷地区由于其特殊的地理和气候特征,即使同一利用类型的土壤质量也存在巨大差异。尽管林地容重较低且有机质含量较高,但养分可利用性较差,可能与林地生态系统的长期演替过程中养分固持作用有关^[21],同时已有研究证明对于高降水量的西藏河谷地区森林,养分淋溶效应明显^[22],这与低温高湿环境下需氧微生物活动受抑制的现象^[23]同时解释了我们的发现。耕地平均土壤质量介于草地和林地之间,其内部等级分布也较为均匀,这可能是由于人为施肥和耕作活动改造原始环境构建了其均质性。

此外,研究表明影响土壤质量的地理因素呈现载体依赖性,多因子互作效应并不显著。海拔和坡度对林地土壤质量均有显著影响,但无明显交互作用,表明其影响可能是相互独立的叠加效应^[24]。对耕地系统的研究结果则强烈支持了人为管理消解自然地理效应的结论,即农耕活动通过梯田建造、灌溉施肥等措施,极大程度上消除了自然因素对土壤质量的影响。总体而言,不同土地利用类型通过改变植被、土壤管理和养分循环过程,形成了显著的土壤质量分异特征,这与前人研究结果一致^[25]。这一发现为理解全球变化背景下土地利用—土壤质量关系的区域特异性提供了新的证据。

3.2 墨脱地区最小数据集的适用性与局限性

最小数据集(MDS)的构建是土壤质量评价中的关键步骤,其通过筛选代表性指标简化评价过程,同时保留主要信息^[2]。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。本研究收集了包含物理、化学、生物指标的土壤质量评价的全量数据集,进一步基于主成分分析构建了最小数据集。MDS中包括砂粒、BG(β -葡萄糖苷酶)、铵态氮、有机质、pH和速效钾共6个指标,这些指标能够解释69.75%的土壤质量变异,表明其在本研究区域具有较高的适用性。砂粒占比是土壤质地的主要指标,直接影响土壤孔隙度、渗透性和抗侵蚀能力^[26]。

其高权重表明在研究区域内土壤颗粒组成是土壤质量分异的重要驱动因素,并可能通过负相关关系隐含了黏粒或粉粒的信息,从而综合反映土壤质地对水分保持、耕作适宜性的影响^[26]。土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)直接或间接影响土壤的物理、化学和生物性质,例如促进土壤团聚体形成、储存养分等,此外,土壤有机质含量对土地利用方式和气候变化响应迅速,能反映土壤的短期长期变化趋势^[27]。BG是纤维素分解的关键酶,直接反映土壤微生物的碳代谢能力,BG和有机质的高载荷值体现了碳循环在土壤质量中的核心地位,而BG的权重高于有机质,表明微生物功能而非单纯的有机碳储量对土壤质量评价更具敏感性^[28]。速效钾和铵态氮的入选则强调了养分有效性对土壤功能的重要性。研究认为,pH对土壤质量的调节功能通过与其他指标的交互作用发挥,例如影响养分有效性、微生物活性和重金属毒性^[29]。然而MDS同样存在局限性,例如本研究筛选出的MDS中未包含反映磷循环的指标,尽管磷是限制土壤生产力的关键元素之一^[30]。此外MDS中缺乏直接反映微生物多样性的指标,可能低估了生物因素对土壤质量的贡献。

海拔与坡度作为具有明显分异的研究区环境因素,其对两类土壤质量指数的影响整体一致,并揭示了MDS比TDS对坡度更敏感,说明最小数据集选用的指标能有效捕捉地理因素引起的土壤性质变化,这再次验证了所建立的简化评价体系。综上,本研究认为对于类似本研究的青藏高原河谷地区MDS能够有效替代TDS进行土壤质量评价,但对于更独特的生态系统,MDS可能低估了环境梯度的复杂性,未来需整合地形—环境因子构建多尺度框架以提高评价的全面性与精准度。

4 结论

本研究揭示了高海拔河谷区土壤质量的空间分异特征及其驱动机制。土地利用类型显著影响土壤质量,SQI均值表现为草地>耕地>林地。草地表现出较高的酶活性(AP、BG、NAG)和速效钾含量;耕地具有高pH、硝态氮及CAT活性特征;林地有机质积累显著,但其较低的pH与养分可利用性反映出微生物活性受到抑制。研究构建的6指标最小数据集(砂粒、BG、铵态氮、有机质、pH、速效钾)可解释69.75%的土壤质量变异,与全量数据集评价结果显著一致($p < 0.001$)。建议未来研究整合微生物群落分析,进一步量化多因子组合效应,为青藏高原高落差河谷地区土壤质量评价提供简化有效的指标体系。

参考文献(References):

- [1] Cheng T F, Chen D L, Wang B, et al. Human-induced warming accelerates local evapotranspiration and precipitation recycling over the Tibetan Plateau[J]. *Communications Earth & Environment*, 2024, 5:388.
- [2] 李鑫,张文菊,邬磊,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.
Li X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14):3043-3056.
- [3] 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.
Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):901-913.
- [4] 傅伯杰,刘焱序,赵文武,等.青藏高原生态安全屏障体系优化[J]. *中国科学院院刊*, 2024, 39(11):1882-1893.
Fu B J, Liu Y X, Zhao W W, et al. Optimization for Qinghai-Xizang Plateau ecological security barrier system [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(11):1882-1893.
- [5] Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. *Nature*, 2020, 577(7790):364-369.
- [6] 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.
Jiang C Z, Shou N, Gao W, et al. Comprehensive evaluation of soil quality of different land use types on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12):3279-3286.
- [7] 李笑雨,白金珂.青藏高原南部4种土地利用方式土壤质量评价[J]. *草业科学*, 2024, 41(7):1614-1623.
Li X Y, Bai J K. Evaluation of soil quality of different land use types in the southern Tibetan Plateau[J]. *Practical Science*, 2024, 41(7):1614-1623.
- [8] 滕慧颖,耿艳楼,张恒硕,等.冀北土石山区不同土地利用类型土壤质量评价[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11):3046-3054.
Teng H Y, Geng Y L, Zhang H S, et al. Assessment of soil quality under different land use types in the rocky mountain area of northern Hebei Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(11):3046-3054.
- [9] 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):125-131.
Liu L K, Zhao G J, Mu X M, et al. Soil quality evaluation along the Qinghai-Tibet highway based on the mini-

- mum data set[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):125-131.
- [10] 刘鑫,王一博,杨文静.青藏高原植被退化背景下土壤质量评价方法研究[J].兰州大学学报:自然科学版,2020,56(2):143-153.
Liu X, Wang Y B, Yang W J. Study on soil quality evaluation methods under the background of vegetation degradation in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2020, 56 (2) : 143-153.
- [11] Dai H X, Riley M, Bürgi M, et al. Adaptive management and social learning of pastoral communities enhance ecosystem restoration on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Biological Conservation, 2025,308:111202.
- [12] 李冉,王改利,张永华,等.藏东南墨脱地区降水特征分析[J].气象,2024,50(3):303-317.
Li R, Wang G L, Zhang Y H, et al. Study on precipitation characteristics in medog, southeastern Tibetan Plateau[J]. Meteorological Monthly, 2024,50(3):303-317.
- [13] 解孟平,宋友桂,兰敏文,等.喜马拉雅南坡墨脱不同海拔表土理化组成及其气候响应[J].地球环境学报,2024,15(4):624-640.
Xie M P, Song Y G, Lan M W, et al. Physicochemical composition and climate response of surface sediments at different altitudes in Motuo on the southern slope of the Himalayas[J]. Journal of Earth Environment, 2024, 15(4):624-640.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会.土地利用现状分类:GB/T 21010—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Current land use classification: GB/T 21010—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [15] Kahsay A, Haile M, Gebresamuel G, et al. Assessing land use type impacts on soil quality: application of multivariate statistical and expert opinion-followed indicator screening approaches[J]. Catena, 2023,231:107351.
- [16] Adamczyk B, Sietiö O M, Straková P, et al. Plant roots increase both decomposition and stable organic matter formation in boreal forest soil[J]. Nature Communications, 2019,10:3982.
- [17] Yang Y, Li T, Wang Y Q, et al. Linkage between soil ectoenzyme stoichiometry ratios and microbial diversity following the conversion of cropland into grassland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 314: 107418.
- [18] Ren C C, Zhang X M, Reis S, et al. Climate change unequally affects nitrogen use and losses in global croplands[J]. Nature Food, 2023,4(4):294-304.
- [19] Li L, He X Z, Sun Y, et al. Legacy effects of grazing and nitrogen fertilization on soil carbon, nitrogen and phosphorus in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. European Journal of Soil Biology, 2025,124:103704.
- [20] Xu G, Chen J, Berninger F, et al. Labile, recalcitrant, microbial carbon and nitrogen and the microbial community composition at two *Abies faxoniana* forest elevations under elevated temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,91:1-13.
- [21] Zhang Y, Wang R Z, Gu B T, et al. Plant growth strategies and microbial contributions to ecosystem nitrogen retention along a soil acidification gradient[J]. Ecology, 2025,106(1):e4515.
- [22] 方江平,项文化,刘韶辉.西藏南伊沟原始林芝云杉林水文学过程的水化学特征[J].林业科学,2010,46(9):14-19.
Fang J P, Xiang W H, Liu S H. Chemical Characteristics of Hydrological Processes in a Primeval *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* Forest in Nanyigou of Tibet [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010,46(9):14-19.
- [23] Chen X L, Taylor A R, Reich P B, et al. Tree diversity increases decadal forest soil carbon and nitrogen accrual[J]. Nature, 2023,618(7963):94-101.
- [24] 邱扬,王勇,傅伯杰,等.土壤质量时空变异及其与环境因子的时空关系[J].地理科学进展,2008,27(4):42-50.
Qiu Y, Wang Y, Fu B J, et al. Spatiotemporal variation in soil quality and its relation to the environmental factors[J]. Progress in Geography, 2008,27(4):42-50.
- [25] 杨淇钧,吴克宁,冯喆,等.大空间尺度土壤质量评价研究进展与启示[J].土壤学报,2020,57(3):565-578.
Yang Q J, Wu K N, Feng Z, et al. Soil quality assessment on large spatial scales: advancement and revelation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020,57(3):565-578.
- [26] Zhao Z W, Zhou H K, Chen W J, et al. Response of soil structure and fertility to long-term fertilization in alpine grasslands revealed based on fractal theory [J]. Soil and Tillage Research, 2024,242:106167.
- [27] Beillouin D, Corbeels M, Demenois J, et al. A global meta-analysis of soil organic carbon in the Anthropocene [J]. Nature Communications, 2023,14:3700.
- [28] Wasner D, Schneckner J, Han X G, et al. Environment and microbiome drive different microbial traits and functions in the macroscale soil organic carbon cycle [J]. Global Change Biology, 2024,30(8):e17465.
- [29] Chen S D, Elrys A S, Yang W Y, et al. Soil recalcitrant but not labile organic nitrogen mineralization contributes to microbial nitrogen immobilization and plant nitrogen uptake[J]. Global Change Biology, 2024,30(4):e17290.
- [30] Helfenstein J, Ringeval B, Tamburini F, et al. Understanding soil phosphorus cycling for sustainable development: a review[J]. One Earth, 2024,7(10):1727-1740.