

柴达木盆地盐碱地土壤质量评价及障碍因子特征

张慧敏^{1,2,3}, 王雅琼^{1,2,3*}, 段成伟^{1,2,3}, 金欣^{1,2,3}, 栾文莉^{1,2,3}, 杨雪瑾¹

¹青海民族大学生态环境与资源学院, 青海 西宁

²青海省特色经济植物高值化利用重点实验室, 青海 西宁

³青海省生物技术与分析测试重点实验室, 青海 西宁

收稿日期: 2026年7月15日; 录用日期: 2026年8月15日; 发布日期: 2026年8月25日

摘要

本研究以青海省都兰县、乌兰县、德令哈市轻度、中度、重度、极重度4类盐碱地为对象, 分层采集0~10、10~20、20~30 cm土壤样品, 测定pH、有机碳、全氮、全磷、全钾及交换性钙、镁、钠、钾9项土壤化学指标; 运用主成分分析构建土壤肥力综合评价模型, 结合Norm值与相关性分析筛选土壤质量评价最小数据集(MDS), 引入障碍度模型定量诊断不同盐碱梯度、不同土层的土壤障碍因子。结果表明: ① 土壤化学性质存在显著盐碱梯度与垂直剖面分异; 轻度、重度、极重度盐碱地有机碳呈表层富集, 中度盐碱地有机碳集中于10~20 cm土层; 轻度、中度盐碱地全氮、全磷呈表层富集, 重度、极重度盐碱地全氮、全磷、全钾整体表现底聚特征; 交换性盐基离子受阳离子交换、水分运移共同调控, 重度盐碱地交换性盐基总量整体最高。② 土壤肥力综合得分随盐碱化加剧整体下降, 轻度盐碱0~10 cm土层肥力最优, 重度、极重度盐碱地各土层肥力得分均为负值; 低盐碱土壤肥力表层富集规律显著, 高盐碱梯度下肥力垂直分布格局反转。③ 基于主成分、Norm值与相关性筛选, 确定由全磷、pH、交换性钠组成最小数据集, 可解释80.49%土壤指标变异信息。④ 土壤障碍因子随盐碱程度、土层深度梯度更替: 轻度盐碱地表层以交换性钠为核心障碍, 中底层pH限制突出; 中度、重度盐碱全域土层首要障碍为全磷, 且重度盐碱全磷障碍度随土层加深持续升高; 极重度盐碱0~20 cm土层以全磷为主要障碍, 20~30 cm底层交换性钠成为首要限制因子。研究明确了柴达木盆地不同类型盐碱土肥力差异与分层障碍特征, 可为区域盐碱地分层、分级差异化生态修复与培肥改良提供理论支撑。

关键词

柴达木盆地, 盐碱地, 土壤质量评价, 障碍因子

Soil Quality Assessment and Obstacle Factor Characteristics of Saline-Alkali Soils in the Qaidam Basin

*通讯作者。

文章引用: 张慧敏, 王雅琼, 段成伟, 金欣, 栾文莉, 杨雪瑾. 柴达木盆地盐碱地土壤质量评价及障碍因子特征[J]. 世界生态学, 2026, 15(3): 516-531. DOI: 10.12677/ije.2026.153057

Huimin Zhang^{1,2,3}, Yaqiong Wang^{1,2,3*}, Chengwei Duan^{1,2,3}, Xin Jin^{1,2,3}, Wenli Luan^{1,2,3}, Xuejin Yang¹

¹College of Ecology, Environment and Resources, Qinghai Minzu University, Xining Qinghai

²Key Laboratory of High-Value Utilization of Characteristic Economic Plants in Qinghai Province, Xining Qinghai

³Biotechnology and Analytical Testing Laboratory, Xining Qinghai

Received: July 15, 2026; accepted: August 15, 2026; published: August 25, 2026

Abstract

This study selected four grades of saline-alkali soils (light, moderate, heavy and extreme salinization) distributed in Dulan County, Wulan County and Delingha City of Qinghai Province as research subjects. Soil samples were collected from three vertical layers of 0~10 cm, 10~20 cm and 20~30 cm, and nine soil chemical indicators were measured, including pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), as well as exchangeable calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) and potassium (K^+). Principal component analysis (PCA) was adopted to establish a comprehensive assessment model for soil fertility. Combined with Norm value calculation and Pearson correlation analysis, the minimum data set (MDS) for soil quality evaluation was screened. Furthermore, an obstacle degree model was employed to quantitatively identify the dominant Obstacle factors across varying salinization gradients and soil depths. The results revealed four key findings: ① Soil chemical properties exhibited pronounced horizontal differentiation along salinization gradients and vertical stratification within soil profiles. Soil organic carbon accumulated predominantly in topsoil under light, heavy and extreme salinization, while its maximum concentration occurred at the 10~20 cm layer in moderately saline-alkali soils. Total nitrogen and total phosphorus were enriched in surface layers of lightly and moderately saline-alkali soils, whereas TN, TP and TK generally accumulated in subsoil layers under heavy and extreme salinization. Co-regulated by cation exchange processes and water-salt transport, the total exchangeable base (TEB) content reached the highest level in heavily saline-alkali soils. ② The integrated soil fertility score declined progressively with increasing salinization intensity. The 0~10 cm topsoil of lightly saline-alkali plots possessed the highest fertility value, and all soil layers under heavy and extreme salinization yielded negative comprehensive fertility scores. Surface accumulation of fertility was distinct under low salinization stress, whereas the vertical distribution pattern of soil fertility reversed when salinization intensity reached high levels. ③ A MDS consisting of total phosphorus, soil pH and exchangeable sodium was extracted via PCA, Norm value ranking and correlation screening, which could account for 80.49% of the total variance contained in all measured soil indicators. ④ Soil Obstacle factors shifted systematically with salinization severity and soil depth. Exchangeable sodium constituted the dominant obstacle in the topsoil of lightly saline-alkali land, while pH served as the major constraint in middle and deep layers. Total phosphorus was the primary Obstacle factor throughout all soil layers of moderately and heavily saline-alkali soils, and its obstacle degree increased continuously with soil depth in heavily saline-alkali profiles. For extremely saline-alkali soils, total phosphorus remained the dominant constraint within the 0~20 cm layer, while exchangeable sodium replaced TP as the primary Obstacle factor in the 20~30 cm subsoil. This study quantitatively characterizes fertility disparities and stratified obstacle patterns of diverse saline-alkali soils in the Qaidam Basin. The outcomes can provide theoretical foundations for stratified and classified differentiated ecological restoration and fertility amelioration of regional saline-alkali land resources.

Keywords

Qaidam Basin, Saline-Alkali Land, Soil Quality Evaluation, Obstacle Factor



1. 引言

柴达木盆地地处青藏高原东北部,属典型的高寒大陆性气候,是我国重要的盐碱地分布区之一。受气候干旱、降雨稀少、地表蒸发强烈以及灌区灌溉不合理等自然和人为因素的综合影响,区域土壤盐分持续积累,植被覆盖度下降,土壤活性和功能减退,生态系统功能不断弱化[1]。长期不合理的开发利用进一步导致盐碱地生态系统养分循环失衡,土壤贫瘠化和肥力衰减加剧[2]。土壤盐碱化已成为世界性的严重环境问题,尤其在西北干旱区,严重制约区域经济发展和畜牧业生产,优质饲草供给不足以成为当地牧区发展的主要瓶颈。因此,精准识别和评价盐碱地土壤障碍因子,是消除障碍、提升土壤生产力的前提。

针对盐碱地改良与生态修复,国内外已开展长期探索。在生物修复方面,通过耐盐植物种植和根际微生物调控,可有效吸收盐分、改善土壤结构并提高肥力[3][4];化学改良借助改良剂调节土壤酸碱度和盐分含量[5];物理措施如平整土地、深耕翻土和排水调控也被广泛应用[6];多学科交叉融合为盐碱地形成机制及修复策略提供了系统支撑。在西北地区,结合节水灌溉、耐盐植物筛选和生态防护林建设,已形成区域性改良模式[7][8],但针对柴达木盆地等特定区域的研究仍显不足。鉴于此,本研究通过测定分析不同类型(轻度、中度、重度、极重度)和不同土层深度(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)盐碱地的土壤化学性质指标,在水平空间和垂直空间尺度上对比其变化规律,并采用主成分分析法开展土壤质量评价与障碍因子的筛选,以期柴达木盆地不同类型盐碱地制定因地制宜、科学有效的生态修复策略提供理论依据和技术支撑。

2. 材料与方法

2.1. 试验地概况

研究地点位于青海省柴达木盆地的都兰县、乌兰县和德令哈市,涵盖4种类型盐碱地,地理坐标为36°20'45"N~36°54'9"N、98°10'0"E~98°21'47"E,海拔范围为2910.1~3184.5 m。柴达木盆地腹地属高原大陆性气候,降水稀少,蒸发量大,呈现典型的干旱气候特征,气候极端干燥,年均降水量远低于蒸发量,导致水资源匮乏。年降水量自东南部的200 mm递减至西北部的15 mm,年均相对湿度为30%~40%,最低可降至5%以下。盆地年均温均在5℃以下,气温变化剧烈,绝对年温差可达60℃以上,日温差也常达30℃左右,夏季夜间气温可降至0℃以下。各研究区土壤盐碱化程度较为严重,土壤类型以盐土和碱土为主,植被类型为灌木和草本,主要植物包括碱蓬(*Suaeda glauca* Bunge)和芨芨草(*Neotrinia splendens* (Trin.) M. Nobis, P. D. Gudkova & A. Nowak)等耐盐碱植物。

2.2. 试验设计

柴达木地区盐碱地广泛分布于格尔木市、德令哈市、茫崖市、都兰县、乌兰县及大柴旦行委。其中,发育植被、具备农业利用潜力的盐碱地块主要集中分布在德令哈市、都兰县与乌兰县。前期野外调查表明:德令哈市盐碱地存在较多轻度盐碱化地块,乌兰县以中度盐碱化地块为主,都兰县集中分布重度及极重度盐碱化地块。据此,本研究选取青海柴达木盆地德令哈市(轻度)、乌兰县(中度)、都兰县(重度、极重度)盐碱地作为研究对象。参照相关研究[9],依据土壤含盐量将样地划分为4个盐碱化等级(见表1):

轻度盐碱化(含盐量 0.1%~0.3%)、中度盐碱化(含盐量 0.3%~0.6%)、重度盐碱化(含盐量 0.6%~1.0%)、极重度盐碱化(含盐量 > 1.0%)。

Table 1. Aboveground vegetation characteristics of plots with different salinization degrees
表 1. 不同盐碱化程度地块地上植被特征

盐碱化程度	编号	含盐量	植被盖度	植被高度	优势种
轻度盐碱化 Light salinization	LS	0.21 ± 0.02d	52.38 ± 3.12a	66.25 ± 3.95a	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)、白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)
中度盐碱化 Moderate salinization	MS	0.45 ± 0.06c	18.15 ± 2.35b	53.77 ± 3.86b	碱蓬(<i>Suaeda glauca</i>)、芨芨草(<i>Achnatherum splendens</i>)
重度盐碱化 Heavy salinization	HS	0.81 ± 0.09b	5.68 ± 0.88c	17.56 ± 1.94c	白刺(<i>Nitraria tangutorum</i>)
极重度盐碱化 Extreme salinization	SS	1.56 ± 0.13a	1.52 ± 0.49d	10.09 ± 1.05d	—

2.3. 土壤样品采集

2024 年 8 月中旬,在植物生长旺盛期,前往乌兰县、都兰县和德令哈市试验样地实地调查,在轻度、中度、重度和极重度盐碱地中各选取 100 m × 100 m 的三块重复样地,每块样地间隔 50 m,在样地内利用样方法(灌木: 5×5 m; 草本: 1×1 m)设置 3 个样方(即重复),采用 5 点取样法用土钻钻取 0~10、10~20、20~30 cm 原状土壤样品(5 钻合 1),带回实验室在室温条件下进行风干,剔除砾石、植物根系等杂质,进行 pH、有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、交换性钙(Ca²⁺)、交换性镁(Mg²⁺)、交换性钠(Na⁺)、交换性钾(K⁺)等 9 项化学指标的测定。

2.4. 测定指标及方法

2.4.1. 土壤化学性质指标测定

- (1) 土壤 pH 采用 pH 计测定(水土比: 1:2.5)。
- (2) 土壤养分指标: 土壤 SOC 采用重铬酸钾 - 硫酸氧化外加热法测定; TN 和 TP 采用 AA3 连续流动分析仪(Auto Analyzer 3-HR)测定; 土壤 TK 含量采用火焰光度法测定。
- (3) Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺含量采用氯化铵 - 乙醇交换法测定。
- (4) TEB 为交换性盐基离子(Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺)含量之和。

2.4.2. 土壤肥力综合评价模型

对各项土壤理化指标开展标准化处理,消除不同指标间量纲差异;运用 SPSS 软件进行主成分分析,依据特征值 > 1 的准则提取 3 个主成分,并进行最大方差旋转。将各主成分旋转后方差贡献率进行归一化处理,得到各主成分权重;利用归一化权重对各样点主成分得分进行加权求和,得到土壤肥力质量综合得分,依据综合得分大小完成各样点土壤肥力水平排序。

土壤肥力综合得分计算公式如下:

$$F = \sum_{i=1}^n a_i F_i \tag{1}$$

式中: F 为土壤肥力质量综合得分; F_i 为第 i 个主成分得分; a_i 为第 i 个主成分权重,即该主成分旋转后方差贡献率占提取主成分累积方差贡献率的比值。

2.4.3. 最小数据集(MDS)构建

采用主成分分析结合 Pearson 相关性分析构建最小数据集(MDS), 具体步骤如下: 筛选出特征值 ≥ 1 的主成分, 特征值 ≥ 1 的主成分能够解释原始变量大部分变异信息; 将各指标依据载荷绝对值最大的主成分归属原则分组; 结合指标在各主成分的载荷值与对应主成分特征值计算综合载荷值(Norm 值), Norm 值表征指标在多维主成分空间中的矢量长度, 数值越大代表指标承载的综合信息量越高; 在各个分组内优先选取 Norm 值最大的指标作为 MDS 候选指标; 随后分析组内其余指标与本组 Norm 最大值指标的相关系数, 当相关系数($r \geq 0.5$)时判定指标间信息冗余, 予以剔除; 当相关系数($r < 0.5$)时, 优先保留 Norm 值更高的指标。按照上述规则逐级筛选, 确定最终最小数据集[10]。

Norm 值计算见公式(1)。

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

式中 N_{ik} 是第 i 个指标在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的 Norm 值; u_{ik} 是第 i 个指标在第 k 个主成分上的载荷; λ_k 是第 k 个主成分的特征值。

2.4.4. 土壤障碍因子诊断模型

引入障碍因子诊断模型对影响土壤质量的障碍因子进行分析[10]。

其公式为:

$$P_{ij} = 1 - N_{ij} \quad (3)$$

$$M_{ij} = \frac{P_{ij} W_i}{\sum_{i=1}^j P_{ij} W_i} \quad (4)$$

$$M_j = \frac{\sum_{i=1}^n M_{ij}}{n} \quad (5)$$

式中: P_{ij} 是衡量第 i 个样点的第 j 项指标与理想状态(隶属度为 1)之间差距, 差距越大则表示该指标对土壤质量越不利, N_{ij} 表示第 i 个样点的第 j 项指标的隶属度; M_{ij} 表示第 j 项指标在第 i 个样点的障碍度, j 为指标个数, W_i 表示第 i 个指标的权重; M_j 为第 j 项指标的平均障碍度, 其值越大, 说明该因素的障碍作用越强。采用等距法将指标障碍度分为无障碍(0, I)、轻度障碍(0~10%, II)、中度障碍(10%~20%, III)和重度障碍($\geq 20\%$, IV) 4 个等级[11]。

2.5. 数据分析

采用 Excel 2021、SPSS 22.0 进行数据整理分析, 主要包括相关性分析、描述性统计及主成分分析等。

3. 结果与分析

3.1. 土壤化学性质变化

3.1.1. 土壤养分含量

不同盐碱化程度及土层深度条件下土壤 pH 变化如表 2 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤 pH 随土层加深小幅上升, 各土层之间 pH 无显著差异; 中度盐碱化(MS)土壤 pH 由表层向深层缓慢降低, 土层间同样无显著差异。重度盐碱化(HS)与极重度盐碱化(SS)土壤 pH 随土层增加持续下降, 0~10 cm 土层 pH 显著高于 20~30 cm 土层($P < 0.05$), 垂直分异效应明显。沿盐碱化梯度来看, 不同土层土壤 pH 对

盐碱化程度梯度的响应存在明显区别。0~10 cm 土层中, 中度盐碱化土壤 pH 显著高于其余盐碱化类型($P < 0.05$), 极重度盐碱化土壤 pH 最低; 10~20 cm 土层四类盐碱化程度土壤 pH 相互之间无显著差异; 20~30 cm 土层轻度盐碱化土壤 pH 显著高于极重度盐碱化土壤($P < 0.05$)。整体来看, 表层 0~10 cm 土壤 pH 对盐碱化程度变化响应最为敏感, 10~20 cm 中层土壤 pH 趋于稳定; 伴随盐碱化程度升高, 表层土壤 pH 呈现先上升后下降的变化趋势, 并在中度盐碱化阶段达到峰值。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤有机碳含量变化如表 2 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤有机碳随土层加深持续降低, 各土层间差异显著($P < 0.05$), 表层 0~10 cm 有机碳含量最高; 中度盐碱化(MS)有机碳呈先升高后降低的变化特征, 10~20 cm 土层含量显著高于上下两层($P < 0.05$); 重度盐碱化(HS)土壤有机碳表现为表层富集, 0~10 cm 含量显著高于 10~20 cm、20~30 cm 土层($P < 0.05$); 极重度盐碱化(SS)土壤有机碳表层含量最高, 10~20 cm 土层最低, 20~30 cm 土层略有回升, 各土层有机碳含量相互差异显著($P < 0.05$)。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm 土层有机碳含量表现为极重度盐碱化 > 重度盐碱化 > 轻度盐碱化 > 中度盐碱化, 四类盐碱化程度相互间差异显著($P < 0.05$); 10~20 cm 土层有机碳含量呈现极重度盐碱化显著最高($P < 0.05$), 轻度、中度盐碱化次之, 重度盐碱化最低; 20~30 cm 土层有机碳变化趋势与中层一致, 极重度盐碱化土壤有机碳显著高于其余三类盐碱地($P < 0.05$)。综合来看, 同一土层内, 极重度盐碱化地块有机碳含量整体处于最高水平; 除中度盐碱化外, 其余类型盐碱地有机碳均呈现表层富集的剖面分布特征。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤全氮含量变化如表 2 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤全氮含量随土层加深逐步降低, 表层 0~10 cm 含量最高, 表层与底层差异显著($P < 0.05$); 中度盐碱化(MS)土壤全氮同样自表层向深层持续下降, 各土层之间差异显著($P < 0.05$); 重度盐碱化(HS)与极重度盐碱化(SS)土壤全氮随土层加深呈上升趋势, 深层 20~30 cm 全氮含量显著高于表层($P < 0.05$)。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm 土层土壤全氮表现为轻度盐碱化显著最高, 重度盐碱化显著最低($P < 0.05$); 10~20 cm 土层全氮含量呈现轻度盐碱化 > 极重度盐碱化 > 中度盐碱化 > 重度盐碱化, 各类处理间差异显著($P < 0.05$); 20~30 cm 土层全氮含量表现为轻度盐碱化显著最高($P < 0.05$), 其次为极重度盐碱化, 重度、中度盐碱化含量相对较低。总体来看, 轻度、中度盐碱化土壤全氮呈现表层富集特征, 而重度、极重度盐碱化土壤全氮呈现底聚分布特征。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤全磷含量变化如表 2 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)与中度盐碱化(MS)土壤全磷含量随土层加深持续降低, 表层 0~10 cm 全磷含量最高, 土层间差异显著($P < 0.05$); 重度盐碱化(HS)与极重度盐碱化(SS)土壤全磷随土层加深小幅上升, 20~30 cm 土层含量显著高于上层土壤($P < 0.05$), 呈现底聚特征。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm 土层土壤全磷表现为轻度盐碱化显著最高($P < 0.05$), 中度盐碱化次之, 重度、极重度盐碱化相对较低; 10~20 cm 土层全磷变化趋势与表层保持一致, 轻度盐碱化全磷显著高于其余类型($P < 0.05$); 20~30 cm 土层全磷含量为轻度盐碱化 > 极重度盐碱化 > 重度盐碱化 > 中度盐碱化, 各类型间差异显著($P < 0.05$)。综合来看, 轻度、中度盐碱化土壤全磷呈表层富集特征, 重度、极重度盐碱化土壤全磷呈底聚分布特征。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤全钾含量变化如表 2 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤全钾含量随土层加深持续升高, 20~30 cm 土层含量显著高于上层土壤($P < 0.05$); 中度盐碱化(MS)土壤全钾自表层向深层不断降低, 表层 0~10 cm 含量显著最高($P < 0.05$); 重度盐碱化(HS)与极重度盐碱化(SS)土壤全钾随土层加深逐步上升, 深层 20~30 cm 全钾含量显著高于表层($P < 0.05$), 表现出底聚分布特征。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm 土层与 10~20 cm 土层土壤全钾均表现为轻度、中度盐碱化显著高于重度、极重度盐碱化($P < 0.05$); 20~30 cm 土层全钾含量表现为轻度盐碱化显著最高($P < 0.05$), 中度、极重度盐

碱化次之，重度盐碱化最低。总体来看，轻度盐碱化地块各土层全钾含量整体维持较高水平；中度盐碱化土壤全钾呈现表层富集特征，重度、极重度盐碱化土壤全钾呈底聚分布特征。

Table 2. Effects of salinization degree and soil depth on soil nutrients

表 2. 不同盐碱化程度和不同土层深度对土壤养分的影响

土壤养分	盐碱化程度	土层深度		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
pH	LS	8.30 ± 0.27BCa	8.67 ± 0.68Aa	8.72 ± 0.71Aa
	MS	8.89 ± 0.18Aa	8.71 ± 0.27Aa	8.58 ± 0.16ABa
	HS	8.45 ± 0.06Ba	8.26 ± 0.13Aab	8.19 ± 0.08ABb
	SS	8.11 ± 0.06Ca	8.06 ± 0.12Aab	7.93 ± 0.02Bb
有机碳 Soil organic carbon/(g·kg ⁻¹)	LS	7.94 ± 0.15Ca	7.10 ± 0.17Bb	6.04 ± 0.17Bc
	MS	5.62 ± 0.18Db	6.75 ± 0.19Ba	5.84 ± 0.26Bb
	HS	8.53 ± 0.21Ba	4.54 ± 0.18Cc	5.72 ± 0.10Bb
	SS	10.59 ± 0.08Aa	7.97 ± 0.39Ac	8.88 ± 0.40Ab
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	LS	0.72 ± 0.01Aa	0.71 ± 0.01Aab	0.68 ± 0.03Ab
	MS	0.60 ± 0.02Ba	0.52 ± 0.02Cb	0.43 ± 0.02Dc
	HS	0.39 ± 0.00Dc	0.47 ± 0.02Db	0.52 ± 0.03Ca
	SS	0.50 ± 0.02Cb	0.57 ± 0.02Ba	0.60 ± 0.03Ba
全磷 Total phosphorus/(g·kg ⁻¹)	LS	0.45 ± 0.02Aa	0.36 ± 0.01Ab	0.32 ± 0.01Ac
	MS	0.27 ± 0.02Ba	0.24 ± 0.02Ba	0.14 ± 0.01Db
	HS	0.17 ± 0.01Cb	0.17 ± 0.00Db	0.18 ± 0.00Ca
	SS	0.20 ± 0.01Cb	0.19 ± 0.00Cb	0.22 ± 0.01Ba
全钾 Total potassium/(g·kg ⁻¹)	LS	18.73 ± 0.07Ac	19.26 ± 0.18Ab	19.64 ± 0.02Aa
	MS	18.47 ± 0.42Aa	16.45 ± 0.10Bb	14.77 ± 0.14Bc
	HS	7.67 ± 0.33Cc	11.18 ± 0.19Db	13.37 ± 0.42Ca
	SS	11.55 ± 0.12Bc	13.40 ± 0.23Cb	14.85 ± 0.10Ba

注：表中含有不同大写字母表示各指标在相同土层深度不同盐碱地类型间存在差异显著($P < 0.05$)；表中含有不同小写字母表示各指标在相同盐碱地类型下不同土层深度间存在差异显著($P < 0.05$)；下同。

3.1.2. 土壤交换性盐基离子及交换性盐基总量特征

不同盐碱化程度及土层深度下土壤交换性钙含量变化如表 3 所示。在土壤剖面上，轻度盐碱化(LS)土壤交换性钙含量随土层加深逐步降低，各土层间无显著差异；中度盐碱化(MS)土壤交换性钙土层间数值相近，剖面分布较为均匀；重度盐碱化(HS)土壤交换性钙表现为先上升后下降，10~20 cm 土层含量显著高于 0~10 cm 土层($P < 0.05$)；极重度盐碱化(SS)土壤交换性钙随土层加深缓慢降低，土层之间无显著差异。沿盐碱化梯度对比，0~10 cm 土层土壤交换性钙表现为轻度盐碱化显著高于中度、重度、极重度盐碱化($P < 0.05$)；10~20 cm 与 20~30 cm 土层各类盐碱化程度交换性钙相互间无显著差异。总体来看，轻度盐碱化 0~10 cm 表层交换性钙优势明显；盐碱化梯度差异主要体现在表层土壤，中下层交换性钙受盐碱化程度影响较小。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤交换性镁含量变化如表 3 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤交换性镁含量随土层加深先升高后降低, 10~20 cm 土层含量最高; 中度盐碱化(MS)土壤交换性镁自表层向深层逐步下降, 表层 0~10 cm 含量最高; 重度盐碱化(HS)土壤交换性镁表现为表层最高, 中层有所降低, 底层小幅回升; 极重度盐碱化(SS)土壤交换性镁随土层加深持续升高, 深层 20~30 cm 含量最高, 呈现底聚分布特征。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm 土层土壤交换性镁表现为重度、中度盐碱化显著高于轻度盐碱化($P < 0.05$); 10~20 cm 土层交换性镁含量表现为重度盐碱化最高, 极重度、中度盐碱化次之, 轻度盐碱化最低; 20~30 cm 土层交换性镁含量表现为重度、极重度盐碱化显著高于轻度盐碱化($P < 0.05$)。总体来看, 轻度盐碱化地块各土层交换性镁整体处于较低水平; 中度、重度盐碱化土壤交换性镁呈现表层富集特征, 极重度盐碱化土壤交换性镁具有底聚分布特征。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤交换性钠含量变化如表 3 所示。在土壤剖面上, 轻度盐碱化(LS)土壤交换性钠含量随土层加深先降低后小幅回升, 表层 0~10 cm 含量显著高于下层土壤($P < 0.05$); 中度盐碱化(MS)土壤交换性钠表层最高, 中层小幅降低、底层略有回升, 各土层间无显著差异; 重度盐碱化(HS)土壤交换性钠随土层加深逐步降低, 表层 0~10 cm 含量显著最高($P < 0.05$); 极重度盐碱化(SS)土壤交换性钠在剖面内变化平缓, 随土层加深略有下降, 各土层含量差异不显著。沿盐碱化梯度对比, 0~10 cm

Table 3. Effects of salinization type and soil depth on total exchangeable bases

表 3. 不同盐碱类型和不同土层深度对交换性盐基总量的影响

指标	盐碱化程度	土层深度		
		0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm
交换性钙 Exchangeable calcium/(cmol·kg ⁻¹)	LS	3.54 ± 0.63Aa	2.62 ± 1.29Aa	2.12 ± 0.99Aa
	MS	1.49 ± 0.25Ba	1.48 ± 0.18Aa	1.61 ± 0.23Aa
	HS	1.57 ± 0.01Bb	1.96 ± 0.20Aa	1.72 ± 0.08Aab
	SS	1.61 ± 0.13Ba	1.60 ± 0.13Aa	1.51 ± 0.12Aa
交换性镁 Exchangeable magnesium/(cmol·kg ⁻¹)	LS	0.99 ± 0.31Ba	1.37 ± 0.94Aa	1.20 ± 0.29Ba
	MS	3.30 ± 2.07Aa	2.33 ± 1.49Aa	2.33 ± 0.85ABa
	HS	3.76 ± 0.28Aa	2.65 ± 0.53Aa	2.84 ± 1.07Aa
	SS	2.19 ± 0.36ABa	2.41 ± 0.71Aa	2.83 ± 0.67Aa
交换性钠 Exchangeable sodium/(cmol·kg ⁻¹)	LS	1.68 ± 0.15Aa	1.27 ± 0.12Cb	1.34 ± 0.15Bb
	MS	1.60 ± 0.11Aa	1.49 ± 0.05ABa	1.51 ± 0.02ABa
	HS	1.77 ± 0.03Aa	1.44 ± 0.13BCb	1.32 ± 0.23Bb
	SS	1.71 ± 0.08Aa	1.69 ± 0.13Aa	1.67 ± 0.12Aa
交换性钾 Exchangeable potassium/(cmol·kg ⁻¹)	LS	0.34 ± 0.09Aa	0.25 ± 0.04Aa	0.25 ± 0.06Aa
	MS	0.45 ± 0.31Aa	0.38 ± 0.28Aa	0.34 ± 0.18Aa
	HS	0.24 ± 0.04Aa	0.20 ± 0.02Aa	0.26 ± 0.05Aa
	SS	0.19 ± 0.04Aa	0.20 ± 0.06Aa	0.21 ± 0.05Aa
交换性盐基总量 Total exchangeable bases/(cmol·kg ⁻¹)	LS	6.55 ± 0.70Aa	5.52 ± 1.01Aa	4.91 ± 0.82Aa
	MS	6.85 ± 2.73Aa	5.69 ± 1.95Aa	5.79 ± 1.13Aa
	HS	7.34 ± 0.31Aa	6.25 ± 0.75Aa	6.13 ± 1.30Aa
	SS	5.70 ± 0.54Aa	5.90 ± 0.88Aa	6.21 ± 0.85Aa

土层交换性钠表现为重度、极重度盐碱化略高，轻度、中度盐碱化稍低，各组间无显著差异；10~20 cm 土层交换性钠含量表现为极重度盐碱化显著最高($P < 0.05$)，中度盐碱化次之，重度、轻度盐碱化较低；20~30 cm 土层交换性钠同样表现为极重度盐碱化显著最高($P < 0.05$)，中度盐碱化次之，轻度、重度盐碱化最低。总体来看，轻度、重度盐碱化土壤交换性钠呈现明显表层富集特征；中度盐碱化土壤交换性钠表层富集效应较弱；极重度盐碱化土壤交换性钠在土壤剖面分布较为均匀。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤交换性钾含量变化如表 3 所示。在土壤剖面上，轻度盐碱化(LS)土壤交换性钾含量表层最高，随土层加深有所降低，各土层间无显著差异；中度盐碱化(MS)土壤交换性钾自表层向深层持续降低，土层之间无显著差异；重度盐碱化(HS)土壤交换性钾随土层加深先小幅下降、底层略有回升；极重度盐碱化(SS)土壤交换性钾随土层加深缓慢上升，表现出微弱底聚趋势，各土层含量无显著差异。沿盐碱化梯度对比，0~10 cm 土层交换性钾表现为中度盐碱化最高，轻度盐碱化次之，重度、极重度盐碱化较低；10~20 cm 土层交换性钾同样以中度盐碱化最高，轻度、重度、极重度盐碱化水平相近；20~30 cm 土层交换性钾表现为中度盐碱化最高，重度盐碱化次之，轻度盐碱化稍低，极重度盐碱化最低。总体来看，中度盐碱化地块各土层交换性钾整体处于较高水平；轻度盐碱化土壤交换性钾呈表层富集特征；重度、极重度盐碱化土壤交换性钾剖面整体波动较小，分布相对均匀。

不同盐碱化程度及土层深度下土壤交换性盐基总量变化如表 3 所示。在土壤剖面上，轻度盐碱化(LS)和重度盐碱化(HS)土壤交换性盐基总量均表现为随土层加深持续降低，表层富集特征明显，各土层间无显著差异；中度盐碱化(MS)土壤交换性盐基总量表层最高，中层有所下降，底层小幅回升，土层间差异不显著；极重度盐碱化(SS)土壤交换性盐基总量随土层加深持续升高，表现出底聚分布特征，土层间差异不显著。沿盐碱化梯度对比，0~10 cm 土层交换性盐基总量表现为重度盐碱化最高，中度盐碱化次之，轻度、极重度盐碱化较低；10~20 cm 土层交换性盐基总量同样以重度盐碱化最高，极重度、中度盐碱化次之，轻度盐碱化最低；20~30 cm 土层交换性盐基总量表现为重度、极重度盐碱化水平较高，中度盐碱化次之，轻度盐碱化最低。总体来看，重度盐碱化地块各土层交换性盐基总量整体维持较高水平；轻度、中度和重度盐碱化土壤交换性盐基总量呈现表层富集特征；极重度盐碱化土壤交换性盐基总量具有底聚分布特征。

3.2. 土壤肥力质量综合评价

由表 4 可知，不同盐碱化程度与土层深度组合下土壤肥力质量综合得分存在明显差异。综合得分最高为轻度盐碱化 0~10 cm 土层(1.36)，排名第 1；得分最低为重度盐碱化 10~20 cm 土层(-0.61)，排名第 12。总体上，土壤肥力综合得分随盐碱化程度升高呈下降趋势，排名靠前的处理均属于轻度与中度盐碱化地块。所有综合得分 > 0 的处理均分布在轻度、中度盐碱化地块；重度、极重度盐碱化各土层综合得分均 < 0 。同一盐碱梯度内部对比，轻度盐碱化各土层肥力排序为 0~10 cm $>$ 10~20 cm $>$ 20~30 cm；中度盐碱化同样呈现表层最优，向下逐层变差；重度盐碱化肥力表现为 0~10 cm $>$ 20~30 cm $>$ 10~20 cm；极重度盐碱化肥力排序为 20~30 cm $>$ 10~20 cm $>$ 0~10 cm。可见，轻度、中度、重度盐碱地肥力呈表层富集特征；极重度盐碱地表层肥力在自身剖面内最低，不具备表层富集特征。

3.3. 土壤障碍因子分析

3.3.1. 最小数据集(MDS)的确定

对 9 项土壤指标进行主成分分析，依据特征值 > 1 的原则提取主成分，共提取 3 个主成分(见表 5)。第 1 主成分特征值为 3.646，方差贡献率为 40.517%；第 2 主成分特征值为 2.037，方差贡献率为 22.634%；第 3 主成分特征值为 1.560，方差贡献率为 17.339%。3 个主成分的累计方差贡献率为 80.490%，表明

Table 4. Comprehensive scores and rankings of soil fertility quality under different salinization degrees and soil depths
表 4. 不同盐碱化程度和不同土层深度土壤肥力质量综合得分及排名

盐碱化程度	土层深度	土壤肥力质量综合得分	土壤肥力质量综合评价得分排名
LS	0~10	1.36	1
MS	0~10	0.86	2
LS	10~20	0.35	3
MS	10~20	0.12	4
LS	20~30	0.02	5
HS	0~10	-0.14	6
SS	20~30	-0.24	7
MS	20~30	-0.34	8
SS	10~20	-0.38	9
SS	0~10	-0.50	10
HS	20~30	-0.53	11
HS	10~20	-0.61	12

Table 5. Principal component analysis results and Norm values of soil indicators
表 5. 土壤指标主成分分析结果及 Norm 值

土壤指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	Norm 值	分组
全磷	0.904	-0.15	0.293	1.78	1
全钾	0.905	0.226	0.072	1.76	1
全氮	0.907	-0.134	0.17	1.76	1
交换性镁	-0.654	0.389	0.535	1.52	1
交换性钙	0.67	-0.422	0.179	1.43	1
pH	0.245	0.792	0.069	1.23	2
有机碳	-0.191	-0.709	0.369	1.17	2
交换性钠	-0.438	-0.395	0.701	1.34	3
交换性钾	0.153	0.574	0.7	1.23	3
特征值	3.646	2.037	1.56		
方差贡献率(%)	40.517	22.634	17.339		
累计贡献率(%)	40.517	63.151	80.49		

提取的 3 个主成分能够反映原始 9 项指标 80%以上的变异信息。

根据各指标在主成分上的最大绝对载荷值进行分组(见表 5)。第 1 主成分中,全氮(0.907)、全钾(0.905)、全磷(0.904)、交换性钙(0.670)的载荷值较高,交换性镁(-0.654)呈较大负向载荷。第 2 主成分中,pH (0.792)和有机碳(-0.709)的载荷值较高。第 3 主成分中,交换性钠(0.701)和交换性钾(0.700)的载荷值较高。各指标 Norm 值由高到低依次为:全磷(1.78)、全钾(1.76)、全氮(1.76)、交换性镁(1.52)、交换性钙(1.43)、交换性钠(1.34)、pH (1.23)、交换性钾(1.23)、有机碳(1.17)。

由相关系数矩阵(见表 6)可知,第 1 主成分组内,全磷与全氮、交换性钙、交换性钾、交换性镁的相关系数分别为 0.881、0.755、0.704、-0.488,全氮与全钾、交换性钙的相关系数分别为 0.843、0.564,全钾与交换性钙的相关系数为 0.401。第 2 主成分组内,pH 与有机碳的相关系数为-0.382。第 3 主成分组内,交换性钠与交换性钾的相关系数为 0.111。

在分组基础上,依据每组内选取 Norm 值最大指标,并结合相关系数阈值($r \geq 0.5$)剔除组内信息冗余指标的原则筛选最小数据集。第 1 主成分中全磷的 Norm 值最高(1.78),且全磷与全氮($r = 0.881$)、全钾($r = 0.755$)的相关系数均 > 0.5 ,信息高度冗余,因此保留全磷作为第 1 主成分的代表指标。第 2 主成分中 pH 的 Norm 值(1.23)高于有机碳(1.17),保留 pH。第 3 主成分中交换性钠的 Norm 值(1.34)高于交换性钾(1.23),二者相关系数为 0.111,小于 0.5,但依据 Norm 最大原则保留交换性钠。

综上,本研究确定的最小数据集(MDS)包含全磷、pH 和交换性钠共 3 项指标。

Table 6. Pearson correlation coefficient matrix of soil indicators
表 6. 土壤指标 Pearson 相关系数矩阵

	pH	有机碳	全氮	全磷	全钾	交换性钙	交换性镁	交换性钠	交换性钾
pH	1								
有机碳	-0.382*	1							
全氮	0.111	0.03	1						
全磷	0.214	0.063	0.881**	1					
全钾	0.384*	-0.268	0.843**	0.755**	1				
交换性钙	-0.294	0.015	0.564**	0.704**	0.401*	1			
交换性镁	0.093	-0.02	-0.489**	-0.488**	-0.486**	-0.459**	1		
交换性钠	-0.298	0.556**	-0.238	-0.111	-0.389*	-0.052	0.450**	1	
交换性钾	0.404*	-0.218	0.122	0.193	0.299	0.095	0.470**	0.111	1

注: *表示相关关系显著($P < 0.05$); **表示相关关系极显著($P < 0.01$)。

3.3.2. 土壤指标障碍度特征

由表 7 可知,随土壤盐碱化程度提升,剖面土壤障碍因子呈现明显的梯度分异特征;同一盐碱梯度内部,障碍因子同样存在显著的垂直剖面变化规律。

轻度盐碱化土壤障碍因子随土层深度增加发生明显更替。0~10 cm 表层土壤交换性钠障碍度最高,达到 65.5%,属于重度障碍,为本层首要障碍因子;pH 障碍度 25.4%,同样为重度障碍;全磷障碍度 9.1%,仅构成轻度障碍。10~20 cm 亚表层土壤障碍格局发生转变,pH 障碍度上升至 55.3%,取代交换性钠成为首要障碍因子,属于重度障碍;交换性钠障碍度回落至 38.4%,仍处于重度障碍区间;全磷障碍度 6.3%,为轻度障碍。20~30 cm 底层土壤仍以 pH 为首要障碍因子(47.8%,重度障碍),交换性钠障碍度为 45.2%,同样属于重度障碍,二者限制作用接近;全磷障碍度依旧维持较低水平(7.1%,轻度障碍)。

中度盐碱化土壤各土层首要障碍因子统一为全磷。0~10 cm 土层全磷障碍度 45.8%,属于重度障碍;pH 障碍度 41.9%,亦为重度障碍;交换性钠障碍度 12.3%,属于中度障碍。10~20 cm 土层全磷障碍度小幅下降至 39.4%(重度障碍),pH 障碍度为 31.5%(重度障碍),交换性钠障碍度上升至 29.0%(重度障碍)。20~30 cm 底层土壤全磷障碍度回升至 52.2%(重度障碍),pH 障碍度降低至 21.4%(重度障碍),交换性钠障碍度为 26.4%(重度障碍)。

重度盐碱化所有土层首要障碍因子均为全磷，且全磷障碍度随土层加深持续升高。0~10 cm 土层全磷障碍度为 50.5% (重度障碍)，交换性钠障碍度 34.5% (重度障碍)，pH 障碍度 15.1% (中度障碍)；10~20 cm 土层全磷障碍度上升至 61.8% (重度障碍)，交换性钠、pH 障碍度分别降至 23.6% (重度障碍)、14.6% (中度障碍)；20~30 cm 底层全磷障碍度达到 67.8%，为全剖面全磷障碍度最大值(重度障碍)，交换性钠障碍度进一步下降至 16.6% (中度障碍)，pH 障碍度稳定在 15.6% (中度障碍)。

极重度盐碱化土壤障碍因子在底层发生转变。0~10 cm 表层全磷障碍度最高，为 63.7% (重度障碍)，交换性钠障碍度 34.0% (重度障碍)；pH 障碍度仅 2.3%，属于轻度障碍，基本不构成土壤生产力限制。10~20 cm 亚表层全磷障碍度下降至 51.5% (重度障碍)，交换性钠障碍度上升至 41.9% (重度障碍)，pH 障碍度为 6.6% (轻度障碍)。20~30 cm 底层，交换性钠障碍度升至 54.1% (重度障碍)，超过全磷障碍度(44.6%，重度障碍)，取代全磷成为首要障碍因子；此时 pH 障碍度仅 1.3%，为轻度障碍。

Table 7. Obstacle degree characteristics of soil indicators under different salinization degrees and soil depths
表 7. 不同盐碱化程度与土层深度下土壤指标障碍度特征

盐碱化程度	土层	土壤指标障碍度			首要障碍因子
		pH	全磷	交换性钠	
LS	0~10	25.4%	9.1%	65.5%	交换性钠
	10~20	55.3%	6.3%	38.4%	pH
	20~30	47.8%	7.1%	45.2%	pH
MS	0~10	41.9%	45.8%	12.3%	全磷
	10~20	31.5%	39.4%	29.0%	全磷
	20~30	21.4%	52.2%	26.4%	全磷
HS	0~10	15.1%	50.5%	34.5%	全磷
	10~20	14.6%	61.8%	23.6%	全磷
	20~30	15.6%	67.8%	16.6%	全磷
SS	0~10	2.3%	63.7%	34.0%	全磷
	10~20	6.6%	51.5%	41.9%	全磷
	20~30	1.3%	44.6%	54.1%	交换性钠

4. 讨论

4.1. 不同盐碱梯度与土层深度对土壤化学性质的影响

本研究结果表明，表层 0~10 cm 土壤 pH 对盐碱梯度变化响应最为敏感，随盐碱化程度升高呈先升高后降低趋势，并在中度盐碱化土壤达到峰值，中层 10~20 cm 土壤 pH 梯度差异趋于平缓；轻、中度盐碱地 pH 垂直分异微弱，而重度、极重度盐碱地 pH 随土层加深显著下降。一方面，柴达木盆地气候干旱，强烈蒸发驱动盐分表聚，中度盐碱地表层大量可溶性碱性离子富集推高土壤 pH；而极重度盐碱环境下高浓度钠盐引发土壤胶体分散、碱化水解过程被抑制，同时离子竞争作用降低土壤交换性碱饱和度，最终造成 pH 回落[12]。养分剖面分异结果显示，有机碳仅在中度盐碱地集中分布于 10~20 cm 土层，轻度、重度、极重度盐碱地均呈表层富集；全氮、全磷在轻度、中度盐碱地表层富集，在重度、极重度盐碱地表现明显底聚特征；全钾仅中度盐碱地表层富集，轻度、重度与极重度盐碱地深层含量更高。轻度盐碱胁

迫条件下, 表层水热条件相对适宜, 地表植被凋落物、根系残体集中输入表层, 有机质与氮磷养分持续累积, 形成表层富集格局[13]; 随着盐碱胁迫加剧, 高盐分抑制表层植被生长、降低表层有机质输入量, 同时盐分随重力水下渗迁移驱动氮、磷等养分随土壤水分向深层迁移, 加之深层厌氧环境减缓养分矿化分解, 最终造成重度、极重度盐碱地养分底聚现象[14]。对于全钾而言, 钾素主要赋存于土壤矿物晶格内, 迁移能力弱于氮磷, 分布同时受母质与盐分离子交换调控; 高钠盐环境中交换性钠离子置换胶体表面吸附钾离子, 促使钾离子随水分向下迁移, 进而使重度、极重度盐碱地深层全钾含量提升[15]。综上, 盐碱梯度通过改变植被生产力、有机质输入与离子交换平衡调控土壤养分储量, 土层尺度水盐再分配过程进一步重塑养分垂直分布; 低盐碱环境利于养分表层富集, 持续加剧的盐碱胁迫会扭转养分剖面分布模式, 促使大量养分向深层聚集。

本研究表明, 表层交换性钙以轻度盐碱地显著最高; 达到中度及以上盐碱水平后, 表层交换性钙维持在较低区间且组间差异不显著, 中下层交换性钙受盐碱梯度影响微弱。低盐环境中土壤胶体吸附位点更多被 Ca^{2+} 占据, 盐碱化程度上升, 土壤溶液 Na^{+} 浓度升高, 通过离子置换效应降低土壤交换性钙饱和度[15]。交换性镁、交换性钠剖面分异规律差异明显: 轻度、中度、重度盐碱地交换性钠大多呈现表层富集, 与干旱区蒸发作用驱动钠盐表聚有关; 极重度盐碱地交换性钠剖面分布均匀, 这是由于长期处于高盐环境下, 表层蒸发浓缩与深层水分下渗的交互作用使钠离子在整个剖面达到动态平衡, 垂直方向上分布趋于均一。交换性钾在中度盐碱地块整体含量最高, 随着盐碱化进一步加剧交换性钾含量下降, 高浓度 Na^{+} 竞争胶体吸附位点, 造成交换性钾流失[15]。交换性盐基总量在重度盐碱地整体最高, 轻度、中度、重度盐碱地交换性盐基总量表层富集, 而极重度盐碱地呈底聚特征。一方面, 重度盐碱环境下大量可溶性盐基离子被土壤胶体吸附, 提升交换性盐基总量; 另一方面极重度盐碱地盐分长期随水分下渗迁移促使盐基离子向深层迁移, 形成底聚格局[15] [16]。综上, 不同盐碱梯度下阳离子交换竞争强度存在差异, 结合剖面水分蒸发与盐分迁移过程, 共同塑造各类交换性盐基离子差异化的垂直分布特征。

4.2. 不同盐碱梯度与土层深度对土壤肥力的影响

本研究通过土壤肥力质量综合评价得到不同盐碱化程度、土层深度下土壤肥力综合得分。总体而言, 土壤肥力水平随盐碱化程度升高整体呈下降趋势, 且土层垂直分布特征受盐碱化程度调控, 体现养分表聚效应与盐分胁迫的耦合作用。

垂直剖面上, 轻度、中度盐碱化土壤肥力综合得分表现为 $0\sim 10\text{ cm} > 10\sim 20\text{ cm} > 20\sim 30\text{ cm}$, 表层肥力优于亚表层与深层, 与柴达木盆地盐渍土养分表聚规律一致。表层持续接纳植物残体归还, 有机质补给充足、微生物活性更高; 深层有机质输入匮乏, 养分水平偏低。高寒干旱环境蒸发强烈, 盐分随毛管水向表层聚集, 在轻度、中度盐碱条件下, 养分富集效应占据主导, 形成表层肥力更高的剖面特征。但盐碱化加剧至重度、极重度时, 该梯度规律消失: 重度盐碱土壤肥力呈 $0\sim 10\text{ cm} > 20\sim 30\text{ cm} > 10\sim 20\text{ cm}$; 极重度盐碱土壤剖面格局完全反转, 表现为 $20\sim 30\text{ cm} > 10\sim 20\text{ cm} > 0\sim 10\text{ cm}$ 。高强度盐分在表层集聚, 显著抑制养分有效性, 养分富集带来的肥力优势被盐分胁迫抵消, 土壤肥力垂直分布格局发生转变[17]。

同一土层横向对比可见, 仅 $0\sim 10\text{ cm}$ 表层肥力严格遵循轻度 $>$ 中度 $>$ 重度 $>$ 极重度的变化规律, 对盐碱胁迫响应最为敏感; $10\sim 20\text{ cm}$ 、 $20\sim 30\text{ cm}$ 土层未呈现单调递减趋势, 出现肥力交叉现象, 反映下层土壤水盐再分配过程更为复杂。重度、极重度盐碱土壤中多个土层的综合得分为负值, 表明其土壤综合肥力低于区域平均水平, 也说明当盐分胁迫突破阈值后, 土壤的养分供给功能会发生显著衰退[18]。

盐碱化程度与土层深度存在明显交互作用。表层养分富集优势仅在低盐碱环境下得以体现, 重度、极重度条件下盐分胁迫成为主导限制因素, 掩盖土层垂直分异带来的肥力差异。从改良实践来看, 轻度盐碱 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层肥力最优, 是植被修复优先利用层位; 中度盐碱地可优先开展表层培肥; 重度、极重

度盐碱区域单纯表层改良效果有限, 需控盐脱盐与有机培肥同步实施[19] [20]。

4.3. 最小数据集的构建

本研究对 9 项土壤指标提取 3 个主成分, 累计方差贡献率达到 80.49%, 可充分表征土壤指标总体变异特征。依据载荷特征将指标划分为 3 组, 结合 Norm 值大小与相关系数阈值筛选, 最终确定全磷、pH、交换性钠为本区盐碱地土壤质量评价最小数据集。全磷作为第 1 组代表性指标, 与全氮、全钾相关性较高, 代表土壤基础养分水平; pH 反映土壤酸碱环境, 交换性钠表征盐碱化离子特征, 二者共同体现区域土壤盐碱属性。上述 3 项指标分别涵盖土壤养分状况、酸碱条件与盐分离子特征, 兼顾了养分因子与盐碱胁迫因子, 能够较全面地反映柴达木盆地盐碱地的主要质量制约因素。大量同类研究证实[21] [22], 干旱区盐碱土壤最小数据集通常同时包含养分指标与盐碱特征指标; 仅依靠养分指标无法完整刻画盐碱地土壤质量, 必须纳入反映盐碱程度的关键离子指标。同时, 相较于全量指标评价, 由全磷、pH、交换性钠构成的 MDS 兼顾评价精度与工作效率, 可为区域盐碱地土壤质量快速评估提供支撑[10]。

4.4. 土壤障碍度特征分析

本研究表明, 柴达木盆地盐碱地土壤障碍因子随盐碱梯度与土层深度发生明显转变: 轻度盐碱环境下, 表层钠盐积累产生离子毒害, 交换性钠成为主要限制因素; 随着土层加深, 地表蒸发影响减弱且盐分随重力水下渗迁移, 碱度带来的 pH 胁迫凸显, 进而取代交换性钠成为主导障碍[23]。当盐碱化程度达到中度、重度水平, 磷素有效性受高 pH、钙离子固持作用大幅降低, 全磷养分匮乏上升为核心限制因子, 且重度盐碱地全磷障碍度随土层加深持续增大, 与高盐碱条件下养分底聚、深层有效磷供给不足密切相关[24]。而极重度盐碱底层盐分长期累积, 交换性钠的毒害效应再次超过磷素限制, 障碍因子再次切换。以上规律表明, 干旱区盐碱地改良不能采取统一方案, 轻度盐碱地表层治理重点为降低钠盐含量、中下层侧重调控土壤酸碱度; 中、重度盐碱地全剖面均需优先开展磷素补充; 极重度盐碱地则应当分层施策, 上层增施磷肥、底层重点缓解钠盐胁迫。

5. 结论

(1) 柴达木盆地盐碱地土壤化学性质受盐碱化程度与土层深度双重调控, 剖面分布规律存在显著梯度差异。表层 0~10 cm 土壤 pH 对盐碱胁迫响应最敏感, 随盐碱化升高呈先升后降趋势; 轻度、重度、极重度盐碱地有机碳呈表层富集, 中度盐碱有机碳集中于 10~20 cm 中层; 轻度、中度盐碱地全氮、全磷呈表层富集, 重度、极重度盐碱地大量全量养分向深层底聚。交换性盐基离子分异特征明显, 轻度盐碱地表层交换性钙优势突出, 重度盐碱地交换性盐基总量整体最高, 极重度盐碱地交换性钠剖面分布平缓、土层间含量无显著差异, 离子竞争交换与区域强蒸发水盐运移是造成上述分异的核心驱动机制。

(2) 区域土壤肥力水平随盐碱化程度提升持续降低, 垂直肥力分布格局随盐碱胁迫强度发生转变。轻度、中度盐碱地肥力表现 0~10 cm > 10~20 cm > 20~30 cm 的表层富集特征; 重度盐碱地肥力中层最低, 极重度盐碱地肥力底层最优、表层最差; 重度与极重度盐碱地所有土层肥力综合得分均 < 0, 土壤综合肥力显著偏低。表层土壤肥力对盐碱梯度变化最为敏感, 下层土壤水盐再分配作用削弱了肥力梯度差异, 高盐碱环境下强烈的盐分胁迫会抵消表层养分富集带来的肥力优势。

(3) 构建得到适配柴达木盆地盐碱地土壤质量评价的最小数据集(MDS)。研究提取 3 个特征值 > 1 的主成分, 累计方差贡献率 80.49%; 结合 Norm 值与 $r \geq 0.5$ 冗余剔除标准, 最终筛选全磷、pH、交换性钠 3 项核心指标构成最小数据集, 分别表征土壤养分供给、酸碱胁迫、钠质盐胁迫三类核心限制维度, 兼顾统计学有效性与盐碱地改良实践指导价值。

(4) 研究区土壤障碍因子存在明显分层、分级分异规律, 不同盐碱梯度土壤改良限制因素差异显著。轻度盐碱地表层主要受交换性钠重度障碍, 中底层 pH 为首要障碍; 中度、重度盐碱地全磷是全域核心限制因子, 高 pH 环境下磷素固定造成有效磷匮乏, 且重度盐碱底层磷素障碍程度达到峰值; 极重度盐碱地上层以全磷障碍为主, 深层盐分底聚使交换性钠重新成为主导障碍。据此提出差异化改良思路: 轻度盐碱地侧重表层控钠、深层调碱; 中度、重度盐碱地全域增施磷肥提升磷素有效性; 极重度盐碱地分层治理, 上层补磷、底层脱钠降盐。

基金项目

青海省青海民族大学理工类科学研究项目(2024XJMD06); 青海民族大学 2026 年度本科教育教学研究改革项目(2026-JYTD-005)共同资助。

参考文献

- [1] 张震中, 张金旭, 黄佳盛, 等. 不同排水措施对青海高寒区盐碱地改良效果的研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 78-85.
- [2] 严小功, 张金旭, 杨占云, 等. 柴达木盆地盐碱地现状及改良措施[J]. 农业与技术, 2020, 40(7): 18-20.
- [3] Zhang, M., Liu, Y., Liu, Y., Zhao, Y., Yuan, F. and Chen, M. (2022) Rotation of Triticale and Sweet Sorghum Improves Saline-Alkali Soil and Increases Productivity in a Saline Soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **54**, 910-925. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2137181>
- [4] Li, L., Yang, S., Hu, X., Li, Z. and Chen, H. (2024) The Combined Application of Salt-Alkali Tolerant Phosphate Solubilizing Microorganisms and Phosphogypsum Is an Excellent Measure for the Future Improvement of Saline-Alkali Soils. *Frontiers in Microbiology*, **15**, Article 1364487. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1364487>
- [5] Zhao, S., Wang, D., Li, Y., Wang, W., Wang, J., Chang, H., et al. (2024) The Effect of Modifier and a Water-Soluble Fertilizer on Two Forages Grown in Saline-Alkaline Soil. *PLOS ONE*, **19**, e0299113. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0299113>
- [6] 牛东玲, 王启基. 柴达木盆地弃耕地盐碱化形成机理及防治对策[J]. 草业科学, 2002, 19(8): 7-10.
- [7] 魏晓斌. 松嫩平原西部盐碱地苜蓿建植技术[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [8] Zhang, J.H., Ding, Q.D., Wang, Y.J., He, M. and Jia, K. (2023) Soil Quality Assessment and Constraint Diagnosis of Salinized Farmland in the Yellow River Irrigation Area in Northwestern China. *Geoderma Regional*, **34**, e00684. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00684>
- [9] Lei, S.H., Jia, X.X., Zhao, C.L. and Shao, M. (2025) A Review of Saline-Alkali Soil Improvements in China: Efforts and Their Impacts on Soil Properties. *Agricultural Water Management*, **317**, Article ID: 109617. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109617>
- [10] 王跃峰, 李亚鹏, 何宁波, 等. 山西省应县盐碱耕地土壤质量评价与障碍诊断[J]. 土壤通报, 2025, 56(6): 1535-1546.
- [11] 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.
- [12] 陈巍, 陈邦本, 沈其荣. 滨海盐土脱盐过程中 pH 变化及碱化问题研究[J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 521-528.
- [13] 杨秀娟, 胡玉昆, 房飞, 等. 不同类型盐碱土有机碳及微生物生物量碳的垂直分布特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1208-1214.
- [14] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 279-290, 330.
- [15] 李淑玲, 杨建国, 王晓静, 等. 银北盐碱地土壤交换性阳离子分布特征[J]. 宁夏农林科技, 2014, 55(11): 33-35.
- [16] 景宇鹏, 段玉, 妥德宝, 等. 河套平原弃耕地土壤盐碱化特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1410-1420.
- [17] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008(1): 56-65.
- [18] 冯君, 赵兰坡, 孙芸芸, 等. 吉林省西部地区苏打盐渍草原不同利用方式对土壤肥力质量的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2009, 31(2): 190-194.
- [19] 王靖荃, 李云, 王家辉, 等. 有机-无机肥耦合“增碳控盐”模式对中轻度盐碱地的改良效应[J]. 山东农业科学,

-
- 2020, 52(5): 70-76.
- [20] 王宏伟, 周文喜, 包红霞, 等. 生物有机肥配施脱盐剂、脱硫石膏对苏打型盐碱地改良效果研究[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2023, 38(1): 46-49.
- [21] 张俊华, 黄华雨, 丁启东, 等. 河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断[J]. 环境科学, 2025, 46(4): 2325-2336.
- [22] 刘敬美, 李新平, 李文斌, 等. 陕西省渭南市卤阳湖盐碱地土壤肥力综合评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 254-257+262.
- [23] 赵茜宇, 于会彬, 杨芳, 等. 半干旱区湖泊湿地土壤养分与盐碱化特征研究-以岱海为例[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 188-196.
- [24] 陈嘉兴, 黄立华, 晏益民, 等. 垦殖种稻年限对苏打盐碱土主要盐碱特性和磷素养分的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(4): 443-452.