

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24115

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24115

马媛, 辛智鸣, 蔺方春, 白珍, 李青茂, 庞嘉诚, 李彬州, 敖亚宁. 乌兰布和沙漠不同固沙灌木群落的土壤质量评价[J]. 植物科学学报, 2025, 43 (2): 181~191

Ma Y, Xin ZM, Lin FC, Bai Z, Li QM, Pang JC, Li BZ, Ao YN. Soil quality evaluation of different sand-fixing shrub communities in Ulan Buhe Desert[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (2): 181~191

乌兰布和沙漠不同固沙灌木群落的土壤质量评价

马媛^{1,2}, 辛智鸣^{1,2*}, 蔺方春¹, 白珍³, 李青茂¹, 庞嘉诚¹, 李彬州¹, 敖亚宁¹

(1. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心, 内蒙古巴彦淖尔 015200; 2. 内蒙古磴口荒漠生态系统定位观测研究站, 内蒙古巴彦淖尔 015200; 3. 巴彦淖尔市林业和草原事业发展中心, 内蒙古巴彦淖尔 015000)

摘要: 以乌兰布和沙漠典型固沙灌木群落为研究对象, 比较 6 种群落中 0~150 cm 土层的化学性质差异。结果显示: (1) 各群落有机质均显著高于对照 ($P<0.05$) ; 白刺 (*Nitraria tangutorum* Bobrov) + 盐爪爪 (*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.) 群落在 pH 值、电导率等多项指标上表现最优; 沙冬青 (*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng) + 白刺群落全氮最高; 驼绒藜 (*Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst.) 群落碱解氮最高; 霸王 (*Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.) 群落全钾最高。(2) 相关分析结果显示, pH 值、电导率、有机质、全磷和速效磷与多项指标呈显著正相关。(3) 土壤综合质量指数 SQI 评价中, 白刺+盐爪爪群落的土壤质量最优, 梭梭 (*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge) + 白刺群落和沙冬青+白刺群落次之, 均显著优于其他群落及对照。此 3 种灌木群落在改善乌兰布和沙漠土壤质量方面具有显著优势, 对沙漠生态恢复具有重要意义。

关键词: 土壤性质; 土壤质量; 固沙灌木; 乌兰布和沙漠

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 02-0181-11

Soil quality evaluation of different sand-fixing shrub communities in Ulan Buhe Desert

Ma Yuan^{1,2}, Xin Zhiming^{1,2*}, Lin Fangchun¹, Bai Zhen³, Li Qingmao¹,
Pang Jiacheng¹, Li Binzhou¹, Ao Yaning¹

(1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Bayannaoer, Inner Mongolia 015200, China; 2. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem Observation Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Bayannaoer, Inner Mongolia 015200, China; 3. Bayannur Forestry and Grassland Development Center, Bayannaoer, Inner Mongolia 015000, China)

Abstract: This study examined the chemical properties of soil in six sand-fixing shrub communities in Ulan Buhe Desert, focusing on the 0~150 cm soil layer. Results demonstrated that: (1) Soil organic matter content was significantly higher in all shrub communities than in the control site (BS) ($P<0.05$). The *Nitraria tangutorum* Bobrov+*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq. community exhibited the most favorable pH and electrical conductivity. The *Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng+N. tangutorum community had the highest total nitrogen content, while the highest alkali-hydrolyzed nitrogen content was recorded in the *Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst. community. Total potassium levels were highest in the *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. community. (2) Correlation analysis revealed that pH, conductivity, organic matter, total phosphorus, and available phosphorus were significantly positively correlated with multiple soil

收稿日期: 2024-06-21, 接受日期: 2024-09-04。

基金项目: 中央公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2024MA047)。

作者简介: 马媛 (1993-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为荒漠化防治 (E-mail: 453239598@qq.com)。

* 通信作者 (Author for correspondence. E-mail: xzmlkn@163.com)。

quality indicators. (3) The soil quality index (SQI) evaluation identified the *N. tangutorum* + *K. foliatum* community as having the highest soil quality, followed by the *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge + *N. tangutorum* community and the *A. mongolicus* + *N. tangutorum* community, all of which exhibited significantly better soil properties than other communities and the control. These three shrub communities play a critical role in improving soil quality in the Ulan Buhe Desert and have substantial implications for ecological restoration efforts in arid environments.

Key words: Soil properties; Soil quality; Sand-fixing shrub; Ulan Buhe Desert

乌兰布和沙漠作为中国八大沙漠，其生态环境修复工作一直备受关注^[1]。在沙漠治理与生态恢复领域，灌木因其独特的生态功能而备受青睐，尤其是拧条锦鸡儿（*Caragana korshinskii* Kom.），已被证实是提升土壤肥力的有效手段^[2]。然而，不同固沙灌木对土壤质量的影响差异显著。盲目选择单一植被类型不仅无法全面发挥土壤的改良潜力，甚至可能导致土壤生产力下降和植被退化，加剧沙漠化风险。因此，在实际应用中，科学选择并合理配置多种固沙灌木尤为重要。

前人在不同沙漠和荒漠化地区的研究结果显示，固沙灌木在改善土壤综合质量方面发挥着关键作用，但其效果受灌木种类及环境因素的显著影响^[3-7]。研究表明，不同种类的固沙灌木（如白刺（*Nitraria tangutorum* Bobrov）、油蒿（*Artemisia ordosica* Krasch.）、梭梭（*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge）等均表现出较强的环境适应能力，能够在干旱、半干旱及风沙严重的地区生长，并发挥作用。这些植物通过根系固土、增加有机质、改善土壤结构等机制，促进沙漠和荒漠化地区的生态恢复，但在改善土壤肥力、结构和稳定性方面的具体效果存在差异。譬如，油蒿、梭梭等在某些区域因其独特的生态适应性，表现出更显著的土壤改良效果，而群落多样性的增加也与土壤质量的提升呈正相关。因此，在利用固沙灌木进行荒漠化治理时，需充分考虑不同物种的生态适应性和区域特异性，选择适宜种类，并维持或增加群落多样性，以提升土壤质量和促进生态恢复。这些研究强调了固沙灌木在沙漠化防治中的重要性，及因地制宜、科学规划的必要性，并指出在实践中需综合考虑不同灌木的生物学特性和对土壤质量的具体影响，以实现更持久有效的生态恢复效果。

土壤质量评价是评估生态恢复对土壤影响的

关键手段，能够准确反映土壤质量的当前状态与变化趋势，为土壤质量提升提供科学依据。然而，由于地域差异和土壤特性的多样性，土壤质量评价尚未形成统一标准，评价指标也各不相同。目前，土壤质量指数法在土壤质量定量评价中应用最为广泛，其可定量化评估不同措施对土壤质量的影响并进行排序。土壤质量评价指标宜选择对环境敏感且影响土壤功能的理化指标和生物学特性因子^[8]，其中，土壤 C、N、K 含量及有机质是重要的指示性指标^[9, 10]。前期研究已通过土壤质量评价指数对沙漠的不同恢复措施^[11]和植被恢复模式^[12]进行了深入分析，并得出了综合性结论。因此，将土壤化学指标应用于土壤质量评价中，对提升评价精度尤为重要。

目前，对固沙灌木改良土壤质量的研究多从土壤理化性质^[13]、群落稳定性^[14]和土壤养分空间异质性^[15, 16]等角度展开，而对不同固沙灌木间土壤质量的评价研究较少^[17, 18]，尤其是关于乌兰布和沙漠不同固沙灌木群落下土壤质量的对比和评价方面还鲜见报道。因此，乌兰布和沙漠中何种灌木更有利于土壤质量的改善和恢复，尚待进一步研究。为此，本文选取驼绒藜（*Krascheninnikovia ceratoides* (L.) Gueldenst.）和霸王（*Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim.）两个单一优势种灌木群落，以及白刺+盐爪爪（*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.）、油蒿+白沙蒿（*Artemisia stelleriana* Bess.）、梭梭+白刺、沙冬青（*Ammodiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) S. H. Cheng）+白刺等 4 个组合优势种灌木群落作为研究对象，通过对其土壤化学性质的比较分析，结合隶属函数与因子分析法，对 6 种灌木群落下的土壤质量进行综合评价，研究结果旨在为乌兰布和沙漠恢复过程中固沙灌木的科学选择提供理论依据，推动沙漠生态环境的恢复工作。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠, 其地理坐标为 $39^{\circ}16' \sim 40^{\circ}57'N$, $106^{\circ}09' \sim 106^{\circ}57'E$, 海拔为 1028~1 054 m。该地区属于典型的中温带干旱气候区, 年均降水量 102.9 mm^[19], 其中 6~9 月为降水集中期, 年际降水变化显著。年均蒸发量 2 258.8 mm, 蒸发量显著大于降水量。年均气温 7.8 ℃, 极端最高气温 39 ℃, 极端最低气温 -29.6 ℃, 无霜期 168 d, 大于 10 ℃ 的有效积温 3 289.1 ℃。植被类型有以沙冬青、白刺和霸王等为主的灌木以及沙米 (*Agriophyllum squarrosum* (L.) Moq.)、猪毛菜 (*Salsola collina* Pall.) 和画眉草 (*Eragrostis Pilosa* (L.) P. Beauv.) 为主的草本植物。土壤类型主要包括风沙土、灌淤土、灰漠土、盐土、淡棕钙土^[20]。

1.2 土壤样品采集与测定

采样时间为 8 月份, 在乌兰布和沙漠腹地针对两个单一优势种灌木群落 (驼绒藜 (KC) 和霸王 (ZX)) 以及 4 个组合优势种灌木群落 (白刺+盐爪爪 (NT+KF)、油蒿+白沙蒿 (AO+AS)、梭梭+白刺 (HA+NT)、沙冬青+白刺 (AM+NT)) 进行采样。共布设 6 个样地, 每个样地内设置 3 个样方, 每个样方按照“S”布点法设 5 个采样点, 开挖 5 个土壤剖面, 剖面深度为 150 cm, 在每个剖面上按 [100~150)、[70~100)、[50~70)、[30~50)、[10~30) 和 [0~10) cm 分为 6 个土层, 用土钻和环刀自下而上取样, 将所有样品混合后作为该样方的土壤平均水平; 采集完毕后, 将土样带回实验室, 置于阴凉通风处自然风干, 去除杂质, 根据不同指标的测定要求进行研磨、过筛, 备用。

1.3 土壤指标测定方法

采用 PHS-3C 型 pH 计测量 pH 值; 使用 DDS-307 型电导率仪测定电导率; 有机质采用重铬酸钾氧化法-外加热法测定; 利用半微量开氏法测定全氮; 分别采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法和 NaOH 熔融火焰光度法测定全磷和全钾; 碱解氮采用碱解扩散法测定; 速效磷和速效钾分别采用盐酸氟化铵提取-钼锑抗比色法和乙酸铵浸提-原子吸收分光光度

法测定; 全盐量 EC 采用电导率仪测定^[21]。

1.4 数据分析方法

采用 Excel 2020 软件进行数据输入与整理, 使用 SPSS 22.0 软件进行相关性分析和方差分析, 利用 SQI 土壤综合质量指数评价土壤质量。

在进行土壤质量评价时, 先分析各个指标与土壤质量之间的正负相关性, 选择适合的隶属度函数类型。通过权重计算不同指标在土壤质量评价中的重要性。采用加权求和法来综合评估各项指标对土壤质量的贡献, 即土壤质量评价指数。正负相关性隶属度函数^[17]、权重值以及土壤质量评价指数公式如下:

$$F(X_{ij1}) = \frac{(X_{ij} - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (1)$$

$$F(X_{ij2}) = 1 - \frac{(X_{ij} - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2)$$

式中, X_{ij} 是 i 处理的 j 指标, 即各处理下土壤性状指标; X_{\max} 和 X_{\min} 指所有处理中 j 指标的最大值和最小值; $F(X_{ij})$ 为 i 处理的 j 指标的隶属函数值; 如果某个指标与土壤质量呈正相关则采用 $F(X_{ij1})$; 反之采用 $F(X_{ij2})$ 。

$$\text{权重} = \frac{\text{主成分特征根}}{\text{所有评价指标特征根总和}} \quad (3)$$

$$SQI = \sum_{i=1}^n X_i \times W_i \quad (4)$$

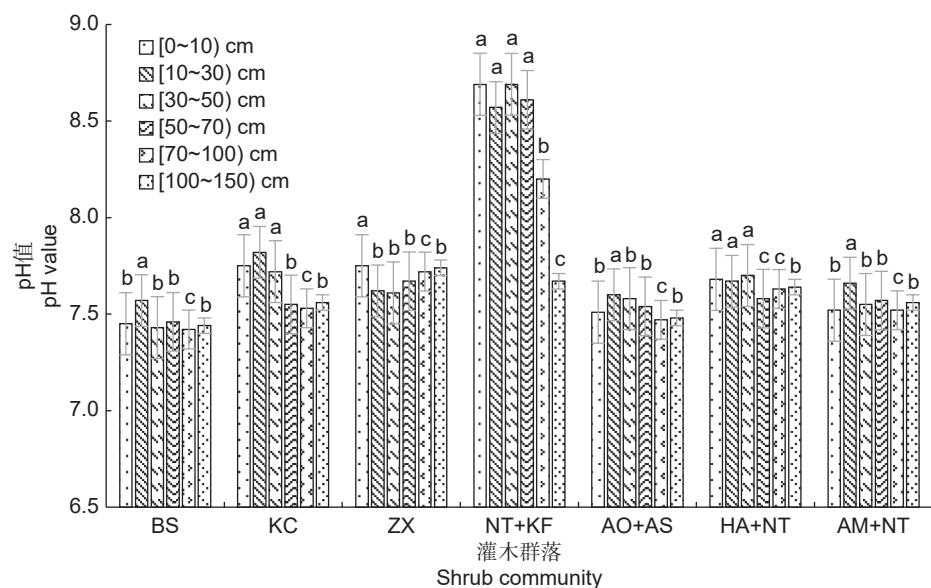
式中, SQI 为土壤质量指数; X_i 为第 i 个指标的隶属度值; W_i 为对应指标的权重值; n 为评价指标的数量。

2 结果与分析

2.1 不同固沙灌木下土壤化学性状分析

检测发现, 各灌木群落下的土壤 pH 值在 7.42~8.69 (图 1), 属于碱性土壤。在 0~150 cm 土层内, 相较于对照样地, 各灌木群落的 pH 值均有所上升。随着土层深度的增加, pH 值的增加趋势逐渐减弱。在所有土层深度中, 白刺+盐爪爪群落的 pH 值最高, 尤其是在表层土壤中, 其 pH 值高达 8.69。而油蒿+白沙蒿群落在多个土层中的 pH 值均相对较低。

由图 2 可知, 各群落下的土壤电导率在 0.051~1.558。随着土层深度的增加, 电导率多呈逐渐下降的趋势, 且不同群落之间的电导率存在



BS: 对照样地; KC: 骆绒藜群落; ZX: 霸王群落; NT+KF: 白刺+盐爪爪群落; AO+AS: 油蒿+白沙蒿群落; HA+NT: 梭梭+白刺群落; AM+NT: 沙冬青+白刺群落; 不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。下同。

BS: CK; KC: *Krascheninnikovia ceratoides* community; ZX: *Zygophyllum xanthoxylon* community; NT+KF: *Nitraria tangutorum*+*Kalidium foliatum* community; AO+AS: *Artemisia stelleriana*+*Artemisia stelleriana* community; HA+NT: *Haloxylon ammodendron*+*Nitraria tangutorum* community; AM+NT: *Ammopiptanthus mongolicus*+*Nitraria tangutorum* community. Different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$. Same below.

图 1 不同固沙灌木下土壤 pH 值的变化
Fig. 1 Changes in soil pH values under different sand-fixing shrubs

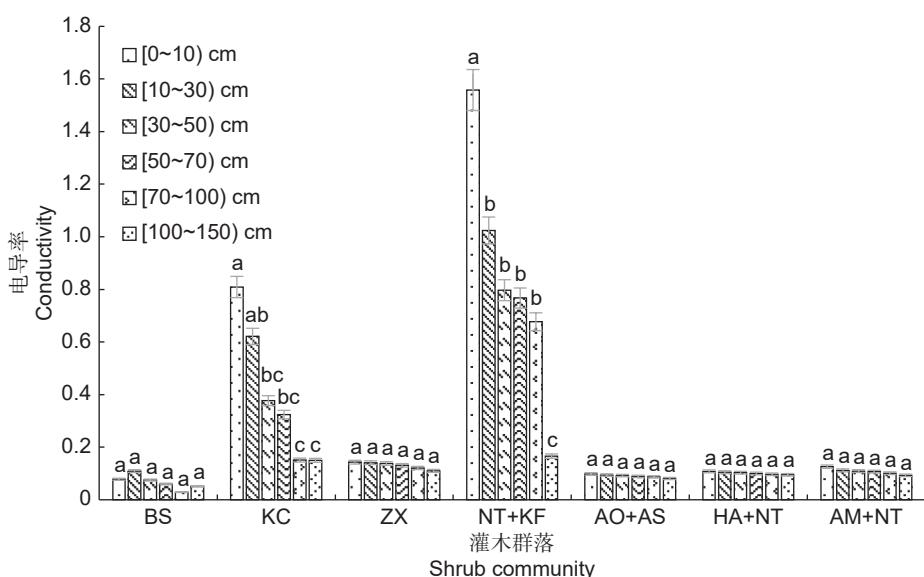


图 2 不同固沙灌木下土壤的电导率变化
Fig. 2 Changes in soil electrical conductivity under different sand-fixing shrubs

明显差异。在表层土壤中, 白刺+盐爪爪群落的电导率最高, 为 1.558, 随着土层深度的增加, 其电导率也呈下降趋势, 但仍高于其他群落。霸王、油蒿+白沙蒿、梭梭+白刺和沙冬青+白刺群落在各土层的电导率均相对较低, 且稳定。

由图 3 可知, 灌木群落的土壤有机质含量在

0.620~5.174 g/kg。随着土层深度的增加, 有机质含量呈逐渐降低趋势。比较而言, 沙冬青+白刺群落的有机质含量较高, 尤其在表层土壤, 达 8.499 g/kg, 远高于其他群落。而 BS 群落各土层的有机质含量均较低。

由图 4: A 可知, 土壤全氮范围在 0.062~

0.788 g/kg。在表层土壤中, 沙冬青+白刺群落土壤的全氮含量最高, 为 0.788 g/kg, 而驼绒藜群落的含量相对较低。白刺+盐爪爪群落土壤在 50~70 cm 土层中的全氮含量最高, 为 0.901 g/kg, 远高于其他土层和其他群落。由图 4: B 可知, 土壤碱解氮的含量在 0.09~4.95 mg/kg。随着土层深度的增加, 各个灌木群落的土壤碱解氮含量呈逐渐降低趋势。在表层土壤中, 驼绒藜和白刺+盐爪爪群落的碱解氮含量相对较高, 而梭梭+白刺、沙冬青+白刺以及霸王群落的含量相对较低。

由图 5: A 可知, 各固沙灌木群落的全磷含量在 0.102~0.494 g/kg。不同土层具有一定的波动性,

但总体相对稳定。在表层土壤中, 白刺+盐爪爪群落的全磷含量相对较高, 为 0.250 g/kg, 而油蒿+白沙蒿以及 BS 群落的含量相对较低。随着土层深度的增加, 各群落的全磷含量没有明显的变化趋势。由图 5: B 可知, 土壤速效磷含量在 0.71~6.85 mg/kg。在表层土壤中, 沙冬青+白刺群落的速效磷含量最高。

由图 6: A 可知, 土壤全钾含量范围在 12.83~21.20 g/kg。表层土壤中, 霸王和沙冬青+白刺群落的全钾含量较高, 而梭梭+白刺群落的含量较低。随着土壤深度的增加, 全钾含量没有明显的变化趋势。由图 6: B 可知, 土壤速效钾含量范围

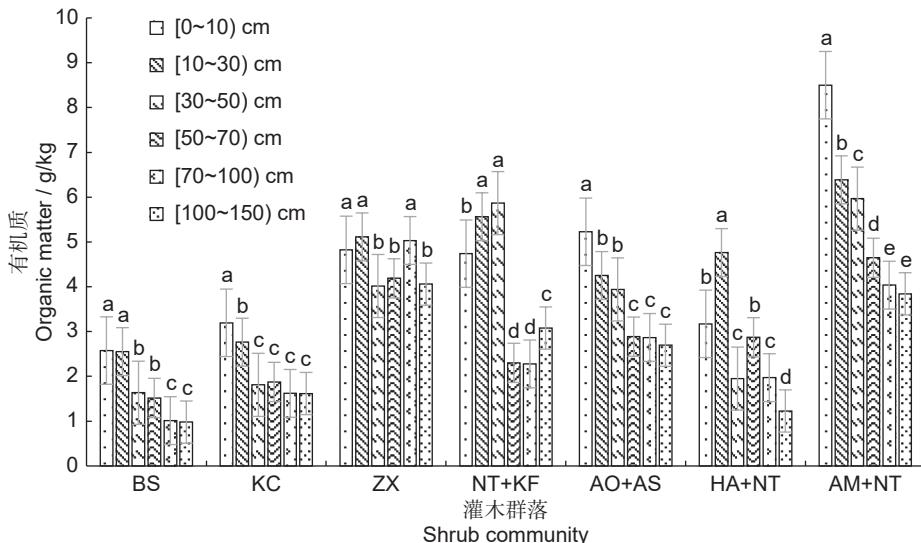


图 3 不同固沙灌木下土壤的有机质含量
Fig. 3 Organic matter content in soil under different sand-fixing shrubs

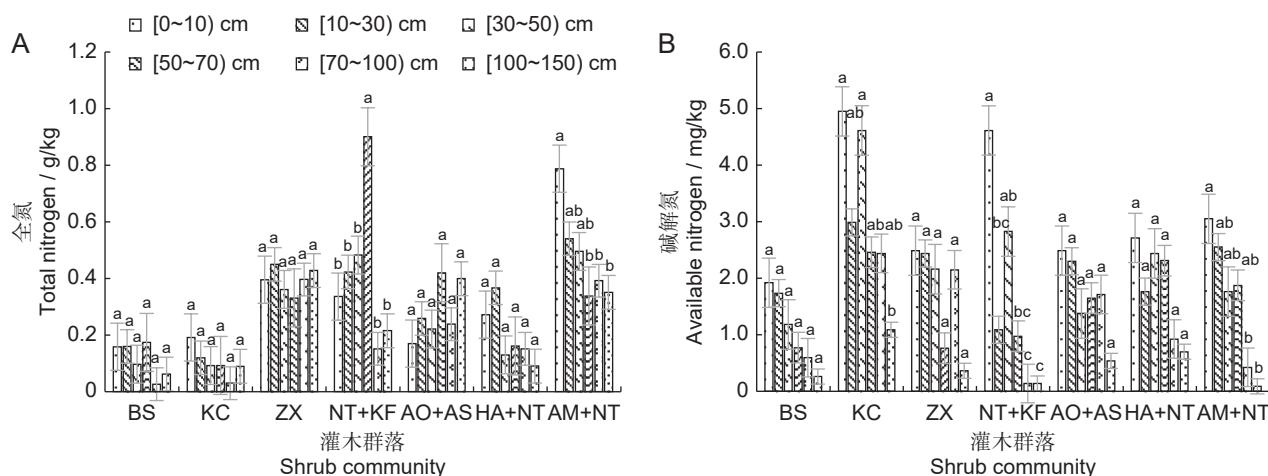


图 4 不同固沙灌木下土壤的氮素含量
Fig. 4 Soil nitrogen content under different sand-fixing shrubs

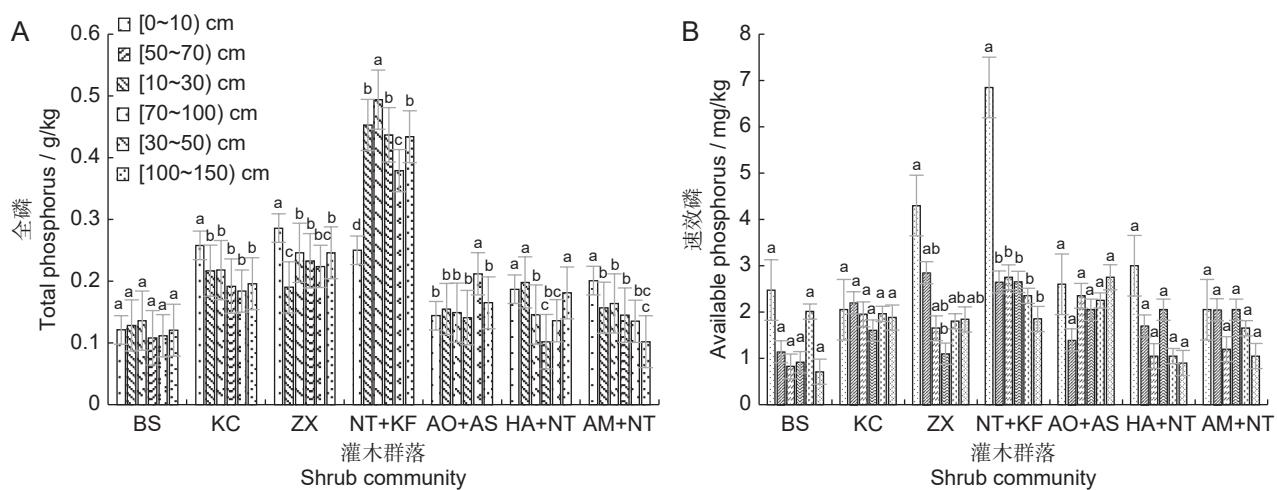


图 5 不同固沙灌木下土壤的磷素含量
Fig. 5 Soil phosphorus content under different sand-fixing shrubs

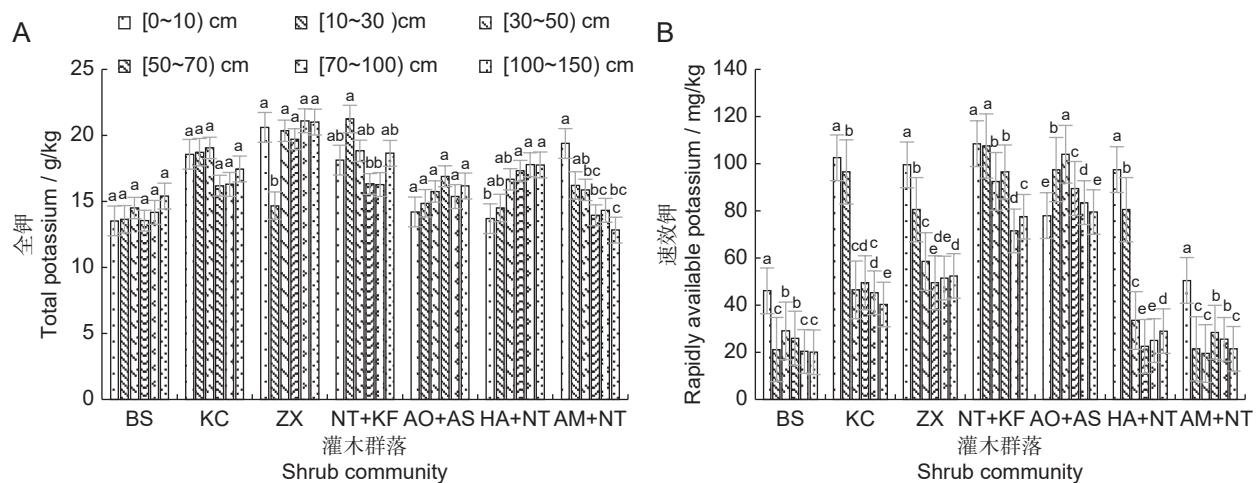


图 6 不同固沙灌木下土壤的钾素含量
Fig. 6 Soil potassium content under different sand-fixing shrubs

在 19.5~108.5 mg/kg。在表层土壤中, 驼绒藜和白刺+盐爪爪群落的速效钾含量相对较高, 分别为 102.5、108.5 mg/kg, 明显高于其他群落。随着土层深度的增加, 速效钾含量呈逐渐降低的趋势。在 [50~70) cm 和 [70~100) cm 土层中, 各群落的土壤速效钾含量相对较低, 且波动较小。

2.2 不同固沙灌木下的土壤盐分分析

由图 7 可知, 土壤全盐量在 0.344~5.268 g/kg。在表层土壤中, 白刺+盐爪爪群落的全盐含量最高。在 [10~30) cm 土层中, 各群落的全盐含量普遍较低, 且波动较小。但在 [30~100) cm 土层中, 全盐含量呈现出上升趋势。在整个土壤剖面中,

驼绒藜群落的全盐含量较高, 油蒿+白沙蒿和梭梭+白刺群落的全盐含量较低。

2.3 不同固沙灌木土壤综合质量评价

由图 8 可知, pH 值与电导率、全磷、全盐量呈极显著正相关, 与速效磷呈显著正相关; 电导率与全磷、全盐量呈极显著正相关, 与速效磷呈显著正相关; 有机质与全氮呈极显著正相关; 全磷与速效磷、全盐量呈极显著正相关; 速效磷与速效钾、全盐量呈显著正相关。

对 pH 值、电导率、有机质等 10 个变量进行主成分分析, 选择累计贡献率超过 85% 且特征值大于 1 的主成分作为土壤特性综合评价的敏感性指标^[22]。由表 1 可知, 3 个主成分的特征根值大于

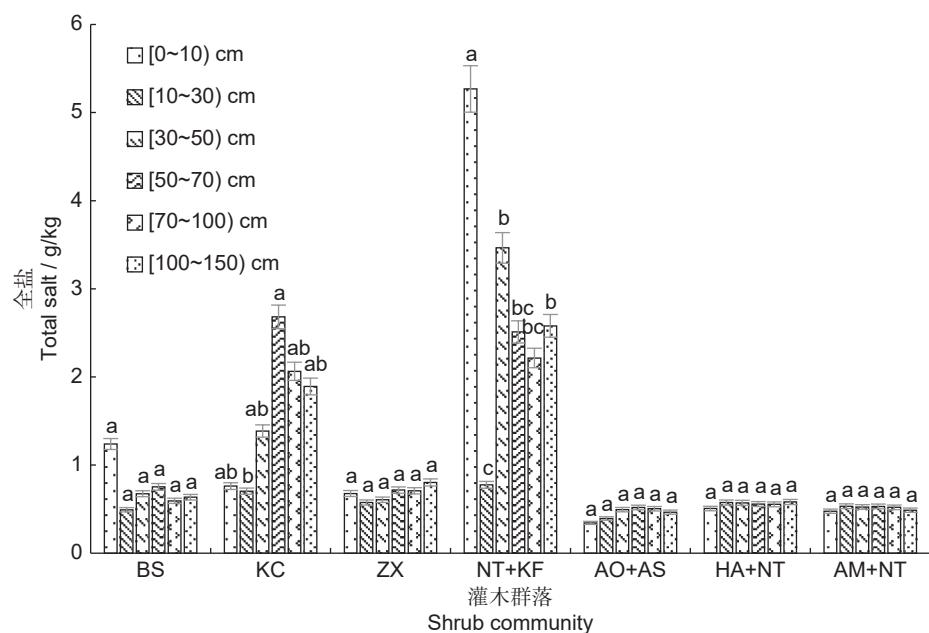
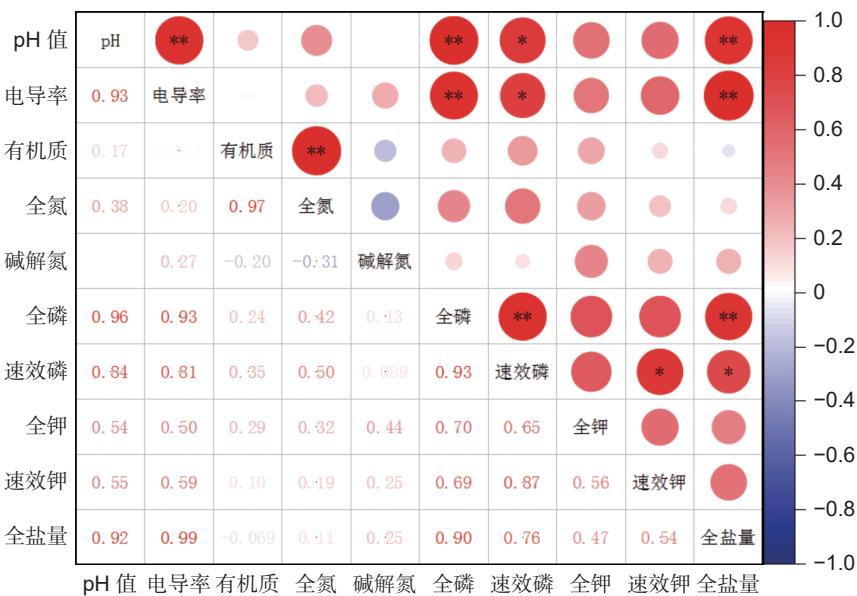


图7 不同固沙灌木下的土壤全盐量变化
Fig. 7 Changes in total soil salt content under different sand-fixing shrubs



红色表示正相关，蓝色表示负相关。*: $P \leq 0.05$, **: $P \leq 0.01$ 。

Red indicates positive correlation, blue indicates negative correlation.

图8 各指标间相关性分析
Fig. 8 Correlation analysis table among indicators

1, 累积贡献率超过90%。主成分1的特征根贡献率为57.863%，载荷较高的指标为pH值、电导率、全磷、速效磷和全盐量，其中，全磷与其他指标的相关系数加和最高，因此选择其作为主成分1的代表评价指标。主成分2的特征根贡献率为21.108%，载荷较高的指标为有机质和全氮，其中

全氮的相关系数加和高于有机质，因此，选择全氮作为主成分2的代表评价指标。主成分3的特征根贡献率为11.194%，载荷较高的指标为速效磷和速效钾，其中速效磷的相关系数加和高于速效钾，因此，选择速效磷作为主成分3的代表评价指标。

根据表 1 中主成分的特征根, 计算全磷、全氮和速效磷指标的权重, 结果分别为 0.64、0.23 和 0.12。3 个指标的权重均大于 0.1, 说明对土壤质量指数的贡献较大。根据不同灌木群落测定值计算出全磷、全氮和速效磷指标的隶属度值, 结合权重值进一步分析各灌木群落的质量指数。

根据计算得到的土壤质量指数(表 2), 评价不同灌木群落的土壤质量。结果表明, 白刺+盐爪爪、梭梭+白刺、沙冬青+白刺群落的土壤质量指数排名前 3, 均高于对照 (BS) 群落。其中, 沙冬青+白刺群落较 BS 的土壤综合质量指数提升了 33.6%, 梭梭+白刺群落较 BS 上升了 40%, 白刺+盐爪爪群落较 BS 上升了 46.7%。

表 1 各指标间主成分分析
Table 1 Principal component analysis among indicators

指标 Index	主成分 Principal component		
	1	2	3
pH 值	0.930	-0.025	-0.307
电导率	0.920	-0.253	-0.198
有机质	0.289	0.901	0.251
全氮	0.444	0.883	0.058
碱解氮	0.209	-0.565	0.712
全磷	0.989	-0.011	-0.101
速效磷	0.959	0.113	0.857
全钾	0.716	0.004	0.541
速效钾	0.755	-0.117	0.905
全盐量	0.878	-0.329	-0.260
特征根	5.786	2.111	1.119
贡献率 / %	57.863	21.108	11.194
累积贡献率 / %	57.863	78.971	90.165

表 2 土壤质量指数
Table 2 Soil quality index calculation

群落编号 Community number	土壤质量指数 Soil quality index	排序 Sort
NT+KF	0.528	1
HA+NT	0.504	2
AM+NT	0.481	3
ZX	0.470	4
AO+AS	0.465	5
KC	0.404	6
BS	0.360	7

3 讨论

3.1 不同固沙灌木下土壤化学性质评价

本研究探讨了不同固沙灌木对土壤化学性质的影响, 为生态环境修复和土壤质量提升提供了参考。土壤 pH 值、电导率、有机质、氮、磷、钾等指标是评估土壤肥力的关键因素, 分别影响土壤养分有效性、盐渍化状况、保水保肥能力和植物生长等^[23-25]。本研究发现, 6 种灌木群落的有机质含量均高于对照区域 (BS), 且随土层深度的增加而降低, 表明有机质在表层更为富集, 与刘立佳^[26]的研究结果一致。白刺+盐爪爪群落的 pH 值、电导率、全磷、速效磷、速效钾和全盐含量最高, 与李玲等^[27]的研究结果相符。沙冬青+白刺群落的土壤全氮含量最高 (0.484 g/kg), 这可能与其根系促进氮素固定有关, 与前人研究结果一致^[28]。驼绒藜群落的碱解氮含量最高 (3.09 mg/kg), 有报道指出, 其根系有助于氮素积累和微生物活动^[29]。由此可见, 不同固沙灌木对土壤化学性质的影响差异显著, 选择适宜灌木可有效改善土壤质量, 促进生态恢复。

3.2 不同固沙灌木下土壤质量评价

在乌兰布和沙漠, 选取 pH 值、电导率、有机质等 10 个关键指标, 即可全面反映土壤的化学特性和生物特性, 为土壤质量评价提供科学依据^[30]。本研究结果显示, 白刺+盐爪爪群落的土壤质量最优。这两种植物的耐盐碱、抗旱性较强, 能在极端环境中稳定生长, 其根系可有效固定沙土, 减少养分流失, 枯落物和腐殖质则增加土壤有机质, 改善土壤结构^[31]。此外, 白刺+盐爪爪在盐分吸收、凋落物分解和生物多样性促进方面表现突出, 为土壤质量提升提供了良好条件。梭梭+白刺和沙冬青+白刺群落的土壤质量次之。梭梭和沙冬青的根系可固定沙土, 增加土壤有机质, 并与白刺形成生态位互补, 进一步促进土壤质量恢复。白刺作为组合成分之一, 其稳定土壤、保持水分和循环养分的能力为土壤质量恢复提供了重要支撑, 与其他灌木组合后效果更显著。

此外, 有研究指出, 灌木形态变化及动物啃食行为增强了肥岛效应, 对提升土壤肥力和促进植物生长也具有积极作用^[32]。这一发现为当地沙地

土壤质量评价提供了方法, 也为生态修复工作提供了实践指导。通过选择适宜的固沙灌木和植被恢复措施, 可有效提升土壤质量, 促进生态系统的恢复和可持续发展。

4 结论

6种固沙灌木群落均可显著提高土壤有机质含量, 其中, 白刺+盐爪爪群落的土壤pH值、电导率、全磷、速效磷、速效钾和全盐含量均最高, 沙冬青+白刺群落的土壤全氮含量最高, 驼绒藜群落的碱解氮含量最高, 而霸王群落全钾含量最高。相关分析显示, 土壤化学性质之间存在显著正相关。SQI计算结果表明, 白刺+盐爪爪群落、梭梭+白刺群落以及沙冬青+白刺群落在土壤质量恢复方面表现最优, 最有利于乌兰布和沙漠土壤质量的恢复。

参考文献:

- [1] 王涛, 赵哈林. 中国沙漠科学的五十年 [J]. *中国沙漠*, 2005, 25 (2): 145-165.
Wang T, Zhao HL. Fifty-year history of China desert science[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25 (2): 145-165.
- [2] 高晓妍. 西秦岭林区黑虎林场不同植被恢复模式研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 1-20.
- [3] 张立欣, 段玉玺, 王博, 王伟峰, 李晓晶, 刘矜杰, 库布齐沙漠不同人工固沙灌木林土壤微生物量与土壤养分特征 [J]. 应用生态学报, 2017, 28 (12): 3871-3880.
Zhang LX, Duan YX, Wang B, Wang WF, Li XJ, Liu JJ. Characteristics of soil microorganisms and soil nutrients in different sand-fixation shrub plantations in Kubuqi Desert, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28 (12): 3871-3880.
- [4] 罗雅曦, 刘任涛. 宁夏风沙区不同人工固沙灌丛林土壤质量评价 [J]. 水土保持研究, 2019, 26 (5): 60-67.
Luo YX, Liu RT. Evaluation on soil quality of different sand-binding shrub plantations within straw checkerboard in the desertified area of Ningxia[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, 26 (5): 60-67.
- [5] 宋兆斌, 辛智鸣, 朱雅娟. 内蒙古荒漠-草原过渡带灌木群落特征 [J]. 中国沙漠, 2022, 42 (2): 104-112.
Song ZB, Xin ZM, Zhu YJ. Characteristics of shrub communities in the desert-steppe ecotone of Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2022, 42 (2): 104-112.
- [6] 姚佳妮, 刘爽, 张钧杰, 胡明珠, 代金霞. 宁夏荒漠草原典型灌丛根际土壤酶活性及微生物代谢多样性 [J]. 草业学报, 2024, 33 (9): 1-14.
Yao JN, Liu S, Zhang JJ, Hu MZ, Dai JX. Enzyme activity and microbial metabolic diversity in typical shrub rhizosphere soil in Ningxia desert steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33 (9): 1-14.
- [7] 牧仁, 孙菲, 李新乐, 王丹阳, 安景源, 刘雅婧. 乌兰布和沙漠不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分分布与富集特征 [J]. 水土保持研究, 2024, 31 (3): 195-203.
Mu R, Sun F, Li XL, Wang DY, An JY, Liu YJ. Distribution and enrichment characteristics of nutrients in soil of *Nitraria tangutorum* Nebkhas at different succession stages in the Ulanbuhe Desert[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31 (3): 195-203.
- [8] Takoutsing B, Weber J, Aynekulu E, Rodríguez Martín JA, Shepherd K, et al. Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon[J]. *Geoderma*, 2016, 276: 64-73.
- [9] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 任意, 张骏达, 徐明岗. 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 WJ, Wu L, Ren Y, Zhang JD, Xu MG. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54 (14): 3043-3056.
- [10] 戴雅婷, 侯向阳, 闫志坚, 吴洪新, 解继红, 等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究 [J]. 生态学报, 2016, 36 (20): 6353-6364.
Dai YT, Hou XY, Yan ZJ, Wu HX, Xie JH, et al. Soil microbes and the chemical properties of the rhizosphere and non-rhizosphere soil under two types of vegetation restoration in the hobq sandy land of inner mongolia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (20): 6353-6364.
- [11] Deng JJ, Bai XJ, Zhou YB, Zhu WX, Yin Y. Variations of soil microbial communities accompanied by different vegetation restoration in an open-cut iron mining area[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 704: 135243.
- [12] 程红刚, 岳本江, 朱卫东, 李玉亭婷, 张国财. 沙棘在伊金霍洛旗矿区农林复合生态系统中的应用 [J]. 中国水土保持, 2021 (5): 30-32.
Cheng HG, Yue BJ, Zhu WD, Li YTT, Zhang GC. Application of *Hippophae rhamnoides* in agroforestry ecosystem of Yijinhuoluo county mining area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2021 (5): 30-32.

- [13] 付鹏程, 胡广录, 巩炜, 李浩然, 周川. 河西走廊沙漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性 [J]. 土壤通报, 2021, 52 (4): 811-820.
- Fu PC, Hu GL, Gong W, Li HR, Zhou C. Soil physical properties and water retention characteristics of the sand-fixing plant root zone in the desert-oasis transition area of Gansu corridor[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (4): 811-820.
- [14] 陈蕴琳, 缪倩倩, 王国华, 马改玲. 晋西北丘陵风沙区坡面尺度下不同固沙植物群落稳定性分析 [J]. 西北植物学报, 2022, 42 (2): 326-338.
- Chen YL, Gou QQ, Wang GH, Ma GL. Stability evaluation of different sand-fixing plant communities in hilly sandy area of northwest Shanxi[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2022, 42 (2): 326-338.
- [15] 赵朋波, 邱开阳, 谢应忠, 赵香君, 陈林, 等. 毛乌素沙地南缘不同固沙灌木下土壤养分的空间异质性 [J]. 草地学报, 2021, 29 (9): 2040-2048.
- Zhao PB, Qiu KY, Xie YZ, Zhao XJ, Chen L, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients under different sand-fixing shrubs in southern Mu us sandy land, China[J]. *Acta Agrestis Sinica*, 2021, 29 (9): 2040-2048.
- [16] 李小乐, 魏亚娟, 党晓宏, 戴玉芝, 翟波, 等. 红砂灌丛沙堆土壤粒度组成及养分积累特征 [J]. 干旱区研究, 2022, 39 (3): 933-942.
- Li XL, Wei YJ, Dang XH, Dai YZ, Zhai B, et al. Soil mechanical composition and soil nutrient content of *Reaumuria soongorica* nebkhlas[J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39 (3): 933-942.
- [17] 何毅, 邱开阳, 苏云, 刘王锁, 李海泉, 等. 毛乌素沙地南缘不同固沙灌木群落土壤质量评价 [J]. 草业科学, 2022, 39 (10): 2005-2015.
- He Y, Qiu KY, Su Y, Liu WS, Li HQ, et al. Soil quality and its evaluation under different sand-fixing shrubs in the southern edge of Mu us sandy sand[J]. *Pratacultural Science*, 2022, 39 (10): 2005-2015.
- [18] 董茜, 王根柱, 庞丹波, 董亮, 张梅, 等. 喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价 [J]. 林业科学研究, 2022, 35 (3): 169-178.
- Dong Q, Wang GZ, Pang DB, Dong L, Zhang M, et al. Soil quality evaluation of different vegetation restoration measures in Karst area[J]. *Forest Research*, 2022, 35 (3): 169-178.
- [19] 宋思梦, 林冬梅, 周恒宇, 罗宗志, 张丽丽, 等. 种植巨菌草对乌兰布和沙漠植物物种多样性与土壤理化性质的影响 [J]. 生态环境学报, 2023, 32 (9): 1595-1605.
- Song SM, Lin DM, Zhou HY, Luo ZZ, Zhang LL, et al. Effects of planting *Cenchrus fungigraninus* on plant species diversity and soil physicochemical properties in the Ulan Buh desert[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32 (9): 1595-1605.
- [20] 郝玉光. 乌兰布和沙漠东北部绿洲化过程生态效应研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 3-36.
- [21] 赵志强. 乌兰布和沙漠东北部沙区农田和林地土壤肥力特征及评价 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 2-50.
- [22] 高娃. 不同土地利用方式对土默川平原盐渍化土壤特性的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018: 1-50.
- [23] 刘晓民, 白嘉骏, 杨耀天, 于澜. 内蒙古圪秋沟流域不同林分类型对土壤养分含量的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54 (2): 328-335.
- Liu XM, Bai JJ, Yang YT, Yu L. Effects of different stand types on soil nutrient contents in Geqiugou watershed of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54 (2): 328-335.
- [24] 于秀丽, 赵明家. 增施生物有机肥对盐碱土壤养分的影响 [J]. 吉林农业大学学报, 2013, 35 (1): 50-54, 57.
- Yu XL, Zhao MJ. Effect of bio-organic fertilizer application on nutrients in saline-alkaline soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2013, 35 (1): 50-54, 57.
- [25] 唐琨, 朱伟文, 周文新, 易镇邪, 屠乃美. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展 [J]. *作物研究*, 2013, 27 (2): 207-212.
- Tang K, Zhu WW, Zhou WX, Yi ZX, Tu NM. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. *Crop Research*, 2013, 27 (2): 207-212.
- [26] 刘立佳. 有机替代和麦后复播对作物生长及土壤理化性质的影响 [D]. 石河子: 石河子大学, 2021: 1-30.
- [27] 李玲, 樊华, 李森, 邓东周, 涂卫国, Lillia L. 川西高原退化草地的中国沙棘生长及土壤养分研究 [J]. 四川林业科技, 2019, 40 (3): 27-30, 36.
- Li L, Fan H, Li S, Deng DZ, Tu WG, Lillia L. A study of the growth and soil nutrients of *Hippophae rhamnoides* on degraded grassland in western Sichuan Plateau[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science and Technology*, 2019, 40 (3): 27-30, 36.
- [28] 马琴, 梁咏亮, 余殿, 李静尧, 杨钧, 等. 沙冬青叶片化学计量特征及其驱动因素 [J]. 应用生态学报, 2024, 35 (4): 909-916.
- Ma Q, Liang YL, Yu D, Li JY, Yang J, et al. Characteristics of leaf stoichiometry and the driving factors of *Ammopiptanthus mongolicus*, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35 (4): 909-916.
- [29] 赵娟, 刘任涛, 刘佳楠, 常海涛, 罗雅曦, 张静. 北方农牧交错带退耕还林与还草对地面节肢动物群落结构的影响 [J].

- 生态学报, 2019, 39 (5): 1653–1663.
- Zhao J, Liu RT, Liu JN, Chang HT, Luo YX, Zhang J. Effect of conversion of cropland to agroforestry land versus natural grassland on ground-active arthropods in an agro-pasture zone of northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (5): 1653–1663.
- [30] 杨晓娟, 廖超英, 孙文艳, 包耀贤, 李陆平. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤肥力质量评价 [J]. 干旱区研究, 2012, 29 (4): 604–608.
- Yang XJ, Liao CY, Sun WY, Bao YX, Li LP. Assessment on soil fertility of planted forests in the northeast sandy area of the Ulanbuh desert[J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29 (4): 604–608.
- [31] 罗永清, 赵学勇, 李美霞. 植物根系分泌物生态效应及其影响因素研究综述 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (12): 3496–3504.
- Luo YQ, Zhao XY, Li MX. Ecological effect of plant root exudates and related affecting factors: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23 (12): 3496–3504.
- [32] 刘学东, 陈林, 杨新国, 赵伟, 李学斌. 荒漠草原 2 种柠条 (*Caragana korshinskii*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 灌丛土壤养分“肥岛”效应 [J]. *西北林学院学报*, 2016, 31 (4): 26–32, 92.
- Liu XD, Chen L, Yang XG, Zhao W, Li XB. "Fertile Island" effect of soil nutrients occurring in *Caragana korshinskii* and *Artemisia ordosica* shrubs in desert steppe[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31 (4): 26–32, 92.

(责任编辑: 李惠英)