

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.006.

牧仁, 孙非, 李新乐, 等. 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 Ren, Sun Fei, Li Xinle, et al. 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.

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

牧仁, 孙非, 李新乐, 王丹阳, 安景源, 刘雅靖

(中国林业科学研究院沙漠林业试验中心/内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 巴彦淖尔 015200)

摘要: [目的] 探究乌兰布和沙漠不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分垂直分布情况, 为该区白刺灌丛稳定发展提供科学依据。[方法] 选取不同演替阶段白刺灌丛沙堆作为研究对象。通过前期植被调查, 依据白刺灌丛枯死率和盖度将其划分不同演替阶段, 分别为发育阶段(枯死率 10%~30%, 盖度 20%~40%)、稳定阶段(枯死率 <10%, 盖度 40%~60%) 和衰退阶段(枯死率 >50%, 盖度 <20%), 分别选取每个演替阶段 3 个相对独立的白刺灌丛沙堆, 在丘间地、沙堆迎风坡和背风坡进行植被特征调查和土壤养分测定。[结果] 随着白刺灌丛演替推进, 白刺高度、冠幅长度和宽度呈先升后降趋势, 其中, 稳定阶段冠幅长度显著高于其他阶段 ($p < 0.05$), 较发育阶段和衰退阶段分别增加 45.50% 和 50.01% ($p < 0.05$)。背风坡处, 发育阶段土壤养分含量随着土层深度增加均呈“降—升—降”趋势, 稳定和衰退阶段有机质含量呈下降趋势, 40—60 cm 达到最小值。迎风坡处, 40—60 cm 土层土壤有机质和全氮含量随着演替阶段发展在衰退阶段达到最大值, 但发育和衰退阶段土壤全氮含量随着土层深度增加在 40—60 cm 达到最小值, 较 0—10 cm 土层分别低 83.33% 和 80.31% ($p < 0.05$)。不同坡位白刺灌丛沙堆土壤养分均在 0—10 cm 达到最大值, 但总体上白刺灌丛沙堆土壤养分富集作用不明显。[结论] 白刺灌丛沙堆土壤养分主要集中在沙堆表层, 如何缓解白刺灌丛沙堆活化和土壤养分流失, 是白刺灌丛沙堆在干旱环境维持稳定的重要保障。

关键词: 荒漠; 白刺; 植被演替; 土壤肥力; 肥岛效应

中图分类号: S793.9

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0195-09

Distribution and Enrichment Characteristics of Nutrients in Soil of *Nitraria tangutorum* Nebkhas at Different Succession Stages in the Ulanbuhe Desert

Mu Ren, Sun Fei, Li Xinle, Wang Danyang, An Jingyuan, Liu Yajing

(Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry/Inner Mongolia Dengkou
Desert Ecosystem National Observation Research Station, Bayannaoer, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the vertical distribution of soil nutrients in sand dunes of *N. tangutorum* nebkhas at different successional stages in the Ulanbuhe Desert, and to provide a scientific foundation for the stable growth of *N. tangutorum* shrubs in the region. [Methods] *N. tangutorum* nebkhas sand piles at different succession were selected stages as the research objects. Through preliminary vegetation investigation, based on the dead rate and coverage of the *N. tangutorum* shrub, it was divided into different succession stages, namely the development stage (dead rate 10%~30%, coverage 20%~40%), stable stage (dead rate <10%, coverage 40%~60%), and decline stage (dead rate >50%, coverage <20%). Three relatively independent *N. tangutorum* nebkhas sand piles were selected for each succession

收稿日期: 2023-05-26

修回日期: 2023-07-07

资助项目: 中国林业科学研究院基本科研业务费专项“增雨驱动油蒿入侵白刺沙包的机理研究”(CAFYBB2020MB007)

第一作者: 牧仁(1995—), 男(蒙古族), 内蒙古巴彦淖尔人, 硕士, 助理工程师, 主要从事水土荒漠化治理研究。E-mail: 1974447781@qq.com

通信作者: 孙非(1984—), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 工程师, 主要从事水土荒漠化治理研究。E-mail: nxyxl@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

stage. The vegetation characteristics and soil nutrients in the inter dune area and on windward and leeward slopes of sand piles were investigated and determined, respectively. [Results] As the succession of the *N. tangutorum* shrub progresses, the height, crown length, and width of the *N. tangutorum* first increased and then decreased. Among them, the crown length in the stable stage was significantly higher than that in other stages ($p < 0.05$), increased by 45.50% and 50.01% compared to the developmental and declining stages, respectively ($p < 0.05$). At the leeward slope, the soil nutrient content during the development stage shows a ‘descending ascending descending’ trend with the increase of soil depth, while the organic matter content during the stable and declining stages showed a decreasing trend, reaching the minimum value at 40—60 cm. At the windward slope, the content of soil organic matter and total nitrogen in 40—60 cm soil layer reached the maximum value in the decline stage with the development of the succession stage, but the content of total nitrogen in the development and decline stage reached the minimum value in 40—60 cm soil layer with the increase of the soil depth, which was 83.33% and 80.31% lower than that in 0—10 cm soil layer, respectively ($p < 0.05$). The soil nutrients of the white thorn shrub sand pile at different slope positions reached their maximum values at 0—10 cm, but overall, the nutrient enrichment effect of the *N. tangutorum* nebkhas sand pile soil was not significant. [Conclusion] This research has shown that the soil nutrients in the *N. tangutorum* nebkhas sand pile are mainly concentrated on the surface of the sand pile. How to alleviate the activation of the *N. tangutorum* nebkhas sand pile and soil nutrient loss is an important guarantee for the stability of the *N. tangutorum* nebkhas sand pile in arid environments.

Keywords: desert; *Nitraria tangutorum*; vegetation succession; soil fertility; fertilizer island effect

近几十年来,在气候变化和人为因素的共同作用下,全球 CO_2 浓度持续上升,升温效应愈加明显,对我国荒漠生态系统结构和功能产生了深远影响^[1]。灌丛作为荒漠地区防风固沙主要植被,在长期进化过程中,已形成一套完备的生存机制,可较好地适应荒漠环境。灌丛沙堆是指由于灌丛阻挡作用,造成地面风速降低,沙物质在灌丛周围堆积,加上植物根系的固沙作用,从而形成的风积地貌类型^[2]。从生态学角度看,灌丛沙堆是一种由荒漠灌木组成的特殊植被类型^[3],是阻挡流沙迁移的重要屏障,对于保护荒漠生态安全有重要意义。

我国灌丛沙堆主要分布在西北干旱、半干旱荒漠区及荒漠—绿洲过渡带,不同生态区灌丛类型也大相径庭,总体上能够形成灌丛沙堆的灌丛类型包括白刺(*Nitraria*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和蒿类(*Artemisia*)等^[4]。白刺为蒺藜科白刺属灌木^[5],是亚洲中部荒漠特有的一种灌木,耐盐碱、耐旱、抗风蚀和沙埋,多长于荒漠和半荒漠的湖盆沙地、山前平原积沙地和有风积沙的黏土地,具有优秀的防风固沙功能^[6]。关于白刺灌丛沙堆影响因素的探究一直备受关注,如魏亚娟等^[7]通过测定不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤性质发现,影响白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量比的众多因素中,有机质和全氮含量是其主要影响因素。白刺灌丛具有发达的根系系统,可

以聚集根系周围土壤营养,进而导致植物周边土壤的物质循环发生改变。李晓乐等^[8]采用总根挖掘和根系追踪相结合的方法,对鄂尔多斯自然保护区白刺灌丛不定根形态进行研究,发现沙堆土壤养分积累能力随白刺灌丛生长而增强,并在灌丛发育和稳定阶段形成“肥岛效应”。风况和风力强度对灌丛沙堆稳定同样具有重要影响。闫晴等^[9]利用 FLUENT 软件对 3 类典型株型灌丛沙堆周围的流场进行数值模拟,发现白刺灌丛阻沙效果最好。植被类型是影响灌丛沙堆发育的直接因素。李敏等^[10]通过对荒漠—绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤种子库(SSB)研究发现,当白刺灌丛发育到一定程度时,会对植被产生影响,从而加剧白刺灌丛不同部位植被物种组成的差异,进一步影响 SSB。

乌兰布和沙漠东北部荒漠—绿洲过渡带则以唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆为主,不同演替阶段白刺灌丛沙堆植被盖度也不同,通常稳定期植被盖度达到最大,初始发育阶段和衰退阶段,植被盖度则较低,总体上白刺覆盖度在 40% 左右^[11]。然而,在环境变化和人类活动的共同作用下,大面积的天然白刺灌丛表现出衰退现象,甚至出现白刺沙堆活化,如不加以控制,会成为新的沙源,威胁着乌兰布和沙漠生态安全。

本文通过调查乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆植被

特征,将其划分为发育、稳定和衰退3种不同演替阶段,通过测定沙堆土壤养分含量,对比分析不同演替阶段白刺灌丛沙堆植被特征和不同坡位土壤养分变化差异及相互关系,揭示不同演替阶段对白刺灌丛沙堆植被特征及养分积累的影响规律,从而深化对白刺灌丛沙堆演替的认识,为乌兰布和沙漠化白刺灌丛沙堆演变趋势的分析和生态保护提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于国家林业和草原局内蒙古磴口荒漠生态系统国家定位观测研究站长期科研试验样地(106°09′—107°10′E,40°09′—40°57′N),处于乌兰布和沙漠东北部荒漠绿洲过渡带。研究区属于典型温带大陆性干旱气候,海拔1 043 m,年平均气温为9.3℃,年平均降水量为145 mm,多年平均蒸发量为2 327 mm,风向以西北风为主,年平均风速为2.6 m/s。土壤类型以砂壤土为主,土壤pH 7.58~7.94。研究区天然植被主要以旱生灌木与半灌木为主,常见的植物物种有唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)等。

1.2 白刺灌丛沙堆调查

基于乌兰布和沙漠地理环境特点,结合前期对研究区大范围白刺灌丛沙堆的规模、表层土壤和植被生长情况的调查,按照白刺灌丛枯死率和盖度将白刺灌丛沙堆演替过程分为发育阶段(枯死率10%~30%,盖度20%~40%)、稳定阶段(枯死率<10%,盖度>40%)和衰退阶段(枯死率>50%,盖度<20%)3个阶段^[12],不同演替阶段选取3个相对独立的白刺灌丛沙堆作为研究对象,同时每个白刺灌丛沙堆上随机选择10个相对独立的枝条,分别测定白刺枝条基径、高度和冠幅。

1.3 土样采集

于2019年7月在白刺灌丛沙堆迎风坡和背风坡中部位置分别进行土壤采集,用铁锹在垂直与坡面方向挖掘50 cm宽、60 cm深的土壤剖面,沿剖面用铝盒钻取3盒土壤装入自封袋,0—20 cm土层每10 cm为一个取样层,20 cm以下每20 cm为一个取样层,取样深度达60 cm,共4层,分别为表层0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm,40—60 cm。同时,沿白刺灌丛沙堆长轴方向,距沙堆1 m处取丘间地0—10 cm土层土壤(图1)。用小铲子取土样装入自封袋。将带回实验室的土壤自然风干后,过筛测定土壤养分指标。

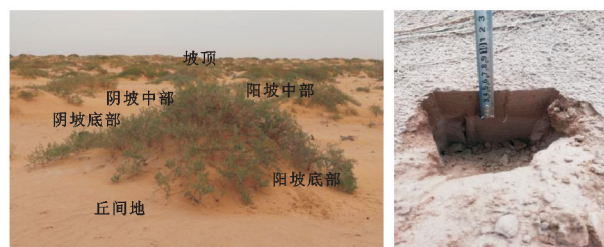


图1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling location

1.4 测定指标

(1) 沙堆形态测定:将主风向沙轴定为沙堆长轴,垂直于主风向沙轴定为沙堆短轴,采用米尺测定沙堆长度;在沙堆顶部水平放置一个6 m长的基准杆,沙堆丘间地与基准杆的垂直高度等同于沙堆高度。

(2) 植物特性测定:白刺枝条高度和冠幅采用卷尺测定;基径采用游标卡尺测定。

(3) 土壤化学性质测定^[13]:有机质采用重铬酸钾外加热法;全氮采用凯氏定氮法;速效磷采用碳酸氢钠浸提钼蓝比色法。

(4) 土壤富集率计算:白刺灌丛沙堆土壤养分富集率计算公式为: $E_i = C_i / O_i$ ^[14]。其中,迎风坡、背风坡处土壤养分用字母C表示;丘间地0—10 cm处土壤养分用字母O表示;i表示不同测定指标,富集率用字母E表示。

1.5 数据分析

用Origin 2022和Excel 2010处理并制作数据图表,采用SPSS 20.0分析软件对数据进行方差分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同演替阶段白刺灌丛沙堆形态与植物特征变化

如表1所示,在白刺灌丛沙堆形态方面,随着演替阶段发展,沙堆高度、长轴长和短轴长呈先升后降趋势,均在稳定阶段达到最大值。在白刺灌丛沙堆植物生长方面,随着演替阶段发展,白刺基径呈降低趋势,衰退阶段白刺基径达到最小值,较发育阶段减少13.24%。白刺高度的变化范围为43.70~44.53 cm,稳定阶段达到最大值。白刺冠幅长度和宽度随着演替阶段发展均呈先升后降趋势,在稳定阶段达到最大值,其中,稳定阶段冠幅长度较发育阶段和衰退阶段分别增加45.50%和50.01%($p < 0.05$)。

2.2 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分垂直变化

2.2.1 丘间地不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮和速效磷变化。

白刺灌丛沙堆丘间地土壤有机质和全氮含量变

化范围分别为 1.86~2.46, 0.16~0.19 g/kg, 速效磷含量变化范围为 5.57~6.00 mg/kg。随着演替阶段发展, 有机质和全氮含量均呈下降趋势, 衰退阶段达

到最小值, 较发育阶段分别减少 24.39% 和 15.79%。而速效磷含量随着演替阶段发展呈先降后升趋势, 发育阶段达到最大值(表 2)。

表 1 不同演替阶段白刺灌丛沙堆形态和植物特征变化

Table 1 Variation of soil bulk density and water content in sand pile of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different succession stages

演替阶段	盖度/%	枯死率/%	长轴/m	短轴/m	沙堆高度/m	植被生长状况			
						基径/mm	高度/cm	冠幅长度/cm	冠幅宽度/cm
FY	21.67±1.67B	30.67±2.33B	5.33±2.28A	5.73±0.63A	1.72±0.43A	10.80±0.98A	43.70±1.79A	54.77±5.15B	41.23±7.29A
WD	66.67±3.33A	14.00±2.28C	9.77±1.37A	6.03±0.29A	1.75±0.11A	10.73±1.07A	44.53±2.72A	79.70±4.01A	53.43±4.44A
ST	8.67±0.88C	61.67±4.41A	7.40±1.01A	4.97±0.37A	1.48±0.07A	9.37±0.56A	43.70±1.38A	53.13±5.14B	42.93±3.29A

注: FY, WD, ST 分别代表发育阶段、稳定阶段、衰退阶段, 不同大写字母表示不同演替阶段之间差异显著 ($p < 0.05$)。

表 2 丘间地不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分变化

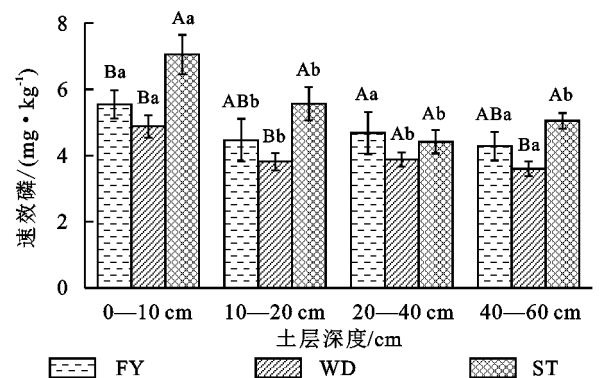
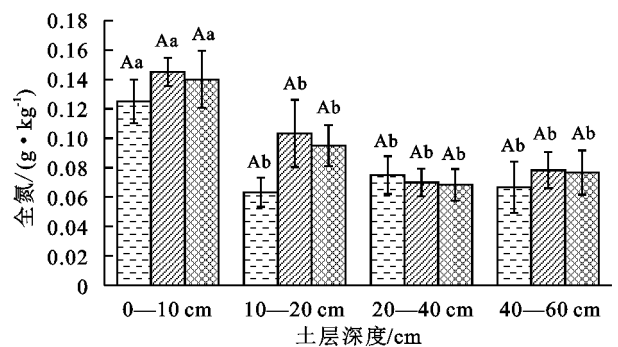
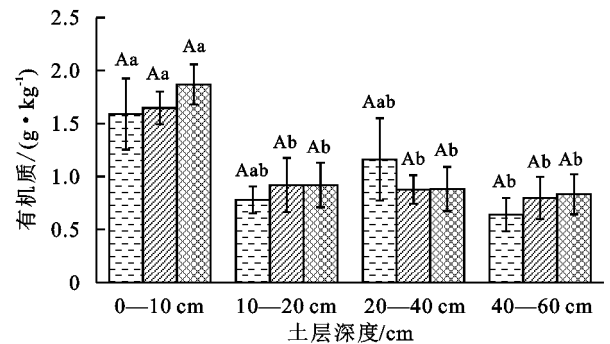
Table 2 Variation of soil bulk density and water content in sand pile of *Nitraria tangutorum* nebkhas in different succession stages

演替阶段	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)
FY	2.46±0.36A	0.19±0.02A	6.00±0.59A
WD	2.18±0.23A	0.16±0.04A	5.57±0.39A
ST	1.86±0.19A	0.16±0.03A	5.68±0.69A

注: 不同大写字母表示相同土层内不同演替阶段之间差异显著 ($p < 0.05$)。

2.2.2 背风坡不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮和速效磷变化 如图 2 所示, 在白刺灌丛沙堆背风坡处, 相同土层下, 随着演替阶段发展, 除 20—40 cm 土层外, 其余土层土壤有机质和全氮含量分别呈增加和先升后降趋势。而土壤速效磷含量在不同土层随着演替阶段发展均呈先降后升趋势, 其中, 除 20—40 cm 土层外, 其余土层衰退阶段土壤速效磷显著高于稳定阶段 ($p < 0.05$), 分别增加 27.03%, 46.04% 和 40.28%。

不同演替阶段, 白刺灌丛沙堆土壤养分含量均在 0—10 cm 土层达到最大。相同演替发展下, 随着土层深度增加, 发育阶段土壤养分含量均呈“降—升—降”趋势, 其中, 0—10 cm 土层有机质含量较 40—60 cm 土层高 148.60% ($p < 0.05$), 0—10 cm 土层速效磷含量较 10—20 cm 土层高 24.25% ($p < 0.05$), 全氮含量在 0—10 cm 土层较其余土层分别高 97.47%, 66.67% 和 87.41% ($p < 0.05$)。稳定阶段随着土层深度增加, 土壤有机质和全氮含量分别呈下降和先降后升趋势, 而速效磷含量变化范围为 3.60~4.89 mg/kg。衰退阶段土壤有机质含量呈随着土层深度增加呈下降趋势, 而全氮和速效磷含量均呈先降后升趋势, 其中, 土壤有机质含量在 40—60 cm 土层达到最小值 0.83 g/kg, 较 0—10 cm 土层低 55.57%。而土壤全氮和速效磷含量则在 20—40 cm 土层达到最小值 0.07 g/kg, 4.4 mg/kg, 较 0—10 cm 土层低 100% 和 37.59%。



注: 不同大写字母表示相同土层内不同演替阶段之间差异显著 ($p < 0.05$), 不同小写字母表示相同演替阶段内不同土层之间差异显著 ($p < 0.05$), 下同。

图 2 背风坡不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分变化

Fig. 2 Changes of soil nutrients *Nitraria tangutorum* nebkhas at different succession stages on leeward slope

2.2.3 迎风坡不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮和速效磷变化 如图 3 所示, 在白刺灌丛沙堆迎风坡处, 相同土层下, 随着演替阶段发展, 0—10 cm 土

层土壤有机质、全氮和速效磷变化范围分别为 1.58~2.62 g/kg, 0.11~0.14 mg/kg, 5.77~6.13 mg/kg, 其中, 有机质和速效磷含量在衰退阶段达到最大, 全氮含量在稳定阶段达到最大, 其余土层土壤养分含量变化差异不尽相同, 整体变化趋势不明显。

与白刺灌丛沙堆背风坡相同, 迎风坡处不同演替阶段土壤养分含量同样均在 0—10 cm 土层达到最大。相同演替发展下, 发育和稳定阶段土壤有机质含量均在 10—20 cm 土层达到最小, 较 0—10 cm 土层低 227.95% 和 176.14% ($p < 0.05$)。衰退阶段土壤有机质含量随着土层深度增加呈先降后升趋势, 在 20—40 cm 土层达到最小, 较 0—10 cm 土层低 289.30% ($p < 0.05$)。发育阶段土壤全氮含量变化范围为 0.06~0.11 g/kg, 40—60 cm 土层达到最小, 较 0—10 cm 土层低 83.33% ($p < 0.05$)。稳定阶段土壤全氮含量随着土层深度增加呈先降后升趋势, 在 20—40 cm 土层土壤全氮含量达到最小, 较 0—10 cm 土层低 100.00% ($p < 0.05$)。衰退阶段土壤全氮含量随着土层深度增加呈降低趋势, 在 40—60 cm 土层达到最小, 较 0—10 cm 土层低 80.31% ($p < 0.05$)。发育阶段土壤速效磷含量随着土层深度增加呈下降趋势, 0—10 cm 土层土壤速效磷含量显著高于其他土层 ($p < 0.05$), 较其他土层分别高 37.30%, 45.38% 和 53.10%。衰退阶段土壤速效磷含量变化范围为 3.83~6.13 mg/kg, 0—10 cm 土层速效磷含量显著高于其他土层 ($p < 0.05$), 较其他土层分别高 60.01%, 53.98% 和 54.61%。

2.3 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分富集率变化

如表 3 所示, 在白刺灌丛沙堆背风坡处, 土壤养分富集现象并不明显, 有机质在稳定阶段和衰退阶段 0—10 cm 土层发生富集作用, 富集率分别为 1.08, 1.41。速效磷只有在衰退阶段 0—10 cm 土层发生, 富集率为 1.08。除 20—40 cm 土层外, 土壤有机质富集率随着演替阶段发展均呈增加趋势, 其中, 0—10 cm 和 10—20 cm 土层内土壤有机质在衰退阶段富集率显著高于发育阶段 ($p < 0.05$), 分别增加 116.92% 和 173.68%。而土壤速效磷富集率在表层土壤中呈增加趋势, 其余土层变化趋势则与之相反。发育阶段, 随着土层深度增加, 土壤有机质和全氮富集率呈先减少后增加再减少趋势, 速效磷富集率呈减少趋势, 且均在 0—10 cm 土层中显著高于其他土层 ($p < 0.05$)。土壤有机质与速效磷富集率在稳定阶段, 随着土层深度增加, 呈先减少后增加再减少趋势, 而在衰退阶段则呈先减少后增加趋势, 且均在 0—10 cm 土层中显著高于其他土层 ($p < 0.05$)。

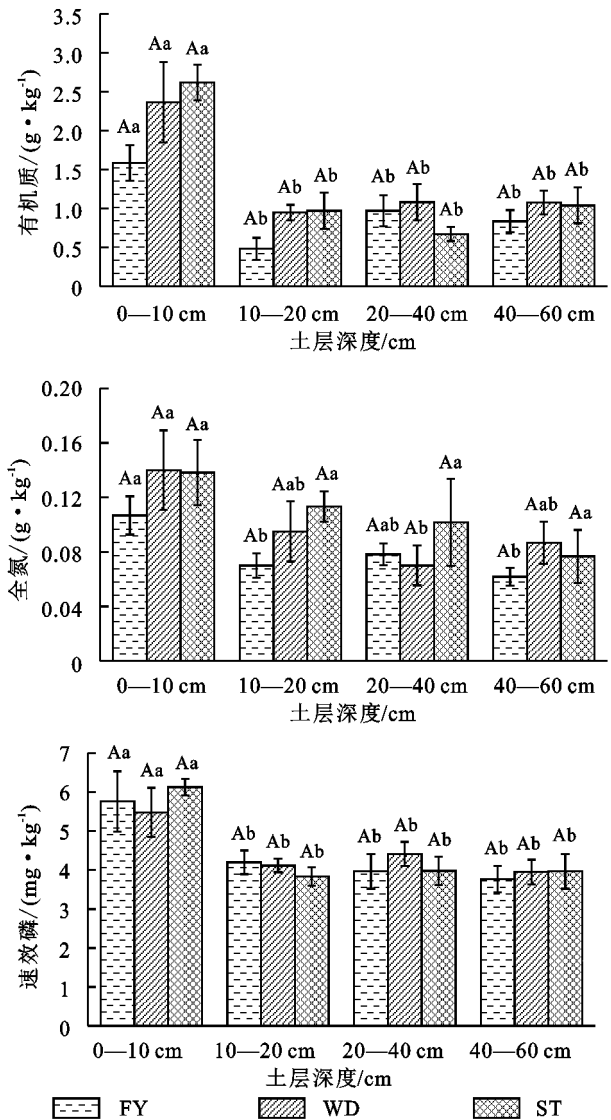


图3 迎风坡不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分变化
Fig. 3 Changes of soil nutrients in sand pile of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different succession stages on the windward slope

在白刺灌丛沙堆迎风坡处, 土壤养分富集程度同样并不明显, 有机质和速效磷均在衰退阶段 0—10 cm 土层发生, 分别为 1.01, 1.24。在相同土层下, 随着演替阶段发展, 土壤有机质富集率除在 20—40 cm 土层呈先减少后增加趋势外, 其余土层均呈增加趋势。而土壤全氮和速效磷富集率随着演替阶段发展, 分别呈先增加后减少和先减少后增加趋势。其中, 0—20 cm 土层衰退阶段土壤速效磷富集率显著高于稳定阶段 ($p < 0.05$), 较其分别增加 40.91% 和 42.03%。发育阶段, 随着土层深度增加, 土壤有机质、全氮速效磷富集率均呈先减少后增加再减少趋势, 且 0—10 cm 土层土壤全氮富集率显著高于其他土层 ($p < 0.05$)。稳定阶段, 随着土层深度增加, 除土壤全氮富集率呈先减少后增加趋势, 有机质和速效磷富集率呈减少趋

势,而衰退阶段,除土壤有机质富集率呈先减少趋势外,全氮和速效磷富集率呈先减少后增加趋势。其中,0—10 cm 土层内土壤有机质、全氮和速效磷显著高于其他土层($p<0.05$)。

表 3 不同演替阶段白刺灌丛沙堆土壤养分富集变化

Table 3 Changes of soil nutrient enrichment in *Nitraria tangutorum* nebkhas in different succession stages

位置	演替阶段	有机质富集率				全氮富集率				速效磷富集率			
		0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
BFP	FY	0.65±0.09Ba	0.19±0.06Bb	0.40±0.08Ab	0.34±0.06Ab	0.56±0.07Aa	0.37±0.05Ab	0.41±0.04Ab	0.33±0.03Ab	0.96±0.13Aa	0.70±0.05Ab	0.66±0.07Ab	0.63±0.06Ab
	WD	1.08±0.24ABa	0.44±0.05ABb	0.50±0.11Ab	0.49±0.07Ab	0.88±0.18Aa	0.60±0.14Aab	0.44±0.09Ab	0.54±0.10Aab	0.98±0.11Aa	0.74±0.03Ab	0.79±0.05Aab	0.71±0.06Ab
	ST	1.41±0.12Aa	0.52±0.13Ab	0.36±0.05Ab	0.56±0.12Ab	0.87±0.15Aa	0.71±0.07Aa	0.64±0.20Aa	0.48±0.12Aa	1.08±0.04Aa	0.68±0.04Ab	0.70±0.06Ab	0.70±0.08Ab
YFP	FY	0.65±0.14Aa	0.32±0.05Aab	0.47±0.16Aab	0.26±0.06Ab	0.66±0.08Aa	0.34±0.05Ab	0.39±0.07Ab	0.35±0.09Ab	0.93±0.07ABa	0.75±0.11Ba	0.78±0.11Aa	0.71±0.07ABa
	WD	0.76±0.07Aa	0.42±0.12Ab	0.40±0.06Ab	0.37±0.09Ab	0.91±0.06Aa	0.65±0.14Aab	0.44±0.06Ab	0.49±0.08Ab	0.88±0.06Ba	0.69±0.05Bb	0.69±0.04Ab	0.65±0.04ABb
	ST	1.01±0.10Aa	0.50±0.11Ab	0.48±0.11Ab	0.45±0.10Ab	0.88±0.12Aa	0.60±0.09Ab	0.43±0.07Ab	0.48±0.09Ab	1.24±0.11Aa	0.98±0.09Ab	0.78±0.06Ab	0.89±0.04Ab

2.4 白刺灌丛沙堆形态、植物特征和土壤养分三者相关分析

由表 4 可以看出,沙堆高度与沙堆短轴长呈显著正相关关系($p<0.05$);冠幅长度与沙堆长轴长呈显著正相关关系($p<0.05$);冠幅宽度与冠幅长度呈显著正相关关

系($p<0.05$);土壤全氮与沙堆长轴长呈显著负相关关系($p<0.05$);土壤全氮和速效磷与有机质呈极显著正关系($p<0.01$);土壤全氮和速效磷富集率与有机质富集率呈极显著正相关关系($p<0.01$);土壤速效磷富集率与全氮富集率呈极显著正相关关系($p<0.01$)。

表 4 不同演替阶段白刺灌丛沙堆植物特征和土壤养分相关分析

Table 4 Correlation analysis of plant characteristics and soil nutrients in *Nitraria tangutorum* nebkhas at different succession stages

因素	LL	SL	NH	ED	PH	CL	CW	OM	TN	AP	OM E	TN E	AP E
LL	1	-0.073	-0.533	-0.009	0.125	0.766 *	0.580	-0.628	-0.713 *	-0.420	0.047	0.115	-0.023
SL		1	0.668 *	0.169	0.162	0.149	-0.083	-0.037	-0.075	0.021	-0.511	-0.474	-0.412
NH			1	0.269	-0.227	-0.252	-0.210	0.262	0.389	0.004	-0.453	-0.324	-0.474
BD				1	-0.373	0.202	0.184	0.425	0.180	0.362	-0.256	-0.132	-0.400
PH					1	0.416	0.521	-0.253	-0.182	-0.196	0.205	0.232	0.503
CL						1	0.793 *	-0.475	-0.393	-0.350	0.114	0.246	0.108
CW							1	-0.299	-0.243	-0.366	0.150	0.421	0.229
SOM								1	0.828 **	0.891 **	-0.451	-0.408	-0.318
TN									1	0.662	-0.168	-0.087	-0.046
AP										1	-0.377	-0.420	-0.213
OM E											1	0.925 **	0.909 **
TN E												1	0.864 **
AP E													1

注:LL 表示长轴长;SL 表示短轴长;NH 表示沙堆高度;BD 表示基径;BH 表示植物高度;CL 表示冠幅长度;CW 表示冠幅宽度;OM 表示有机质;TN 表示全氮;AP 表示速效磷;OM E 表示有机质富集率;TN E 表示全氮富集率;AP E 表示速效磷富集率;** 表示极显著水平为 $p<0.01$; * 表示显著水平为 $p<0.05$ 。

3 讨论

3.1 白刺灌丛沙堆形态和植被特征变化

白刺基径、株高和冠幅长宽等指标能够反映出白刺灌丛从土壤中吸收养分的能力,是植物生长状况的直观特征表现^[15]。白刺属于轴根系植物,稳定阶段白刺生长发育最强,其发达根系可以吸收地下更深、更大范围内的水分和养分,从而使白刺盖度达到最大。本研究表明,白刺株高和冠幅长宽随着演替发展呈先升后降趋势,在稳定阶段达到最大值。这与人研究结果相一

致^[16],证实稳定阶段灌丛植被发育最强。由于白刺茎秆根系化明显,且以更新苗为主,枝条埋沙后新的不定根才会生长,所以发育阶段白刺基径略高于稳定阶段。但衰退阶段白刺基径达到最小值,这表明灌丛植被的自我更新能力随着演替发展逐渐减弱^[17]。

大量研究已经证明^[18],风力状况和灌丛生长情况等因素是影响灌丛沙堆形态发育的主要因子。荒漠地区由于植被覆盖率较低,风向和风速对灌丛沙堆形态发育具有重要影响。本研究中灌丛沙堆长度和灌丛冠幅长度有较好的相关性($p<0.05$),表明灌丛

沙堆和灌丛生长受主风向的影响,是沿着主风向生长发育。而沙堆高度和沙堆短轴长度同样具有较好的相关性($p < 0.05$),是因为白刺灌丛沙堆由上部透风的植被和下部不透风的风积沙体组成,白刺灌丛通过拦截风中流动的沙物质,使其在自身周围堆积^[19]。当白刺灌丛生长到稳定阶段后,植物盖度和防风固沙能力达到最大,沙堆由原来的椭球体开始向上和侧向生长。Hesp^[20]也曾指出,影响沙堆形态的决定性因素是灌丛植被,包括灌丛植被覆盖度、植被密度和枝条分布等,枝条密度大、侧向分枝少的植物固定的沙堆更易于垂向发育。

3.2 白刺灌丛沙堆土壤养分变化特征

大多研究表明^[21-22],随着土层深度的增加,土壤养分呈现下降趋势,并在土壤表层发生表聚效应。这与本研究得出结果相似,造成此现象的原因,一方面是因为白刺属于深根系灌木,主根粗壮入土较浅,侧根发达深入地下,地下部分生物量是地上部分的5~8倍^[23],这使得土壤养分在深层土壤中消耗较大。另一方面,白刺灌丛沙堆表层会累计植物枯落物,枯落物经土壤微生物作用分解,释放有机质,增加沙堆表层土壤养分含量^[24]。此外,白刺灌丛枝叶除起到防风固沙的作用外,还可以拦截聚集外界尘埃,增加灌丛土壤养分含量^[25],而土壤全氮含量95%来源于有机质^[26],所以,本研究中不同坡向位置土壤全氮含量变化规律与有机质含量变化规律相似。

本研究发现不同土层土壤养分随演替阶段发展变化规律有所差异,这可能与沙堆形成过程中环境因素和生物作用有关。本研究中,迎风坡处浅层土壤有机质随着演替发展呈上升趋势,这是因为白刺灌丛沙堆从稳定阶段到开始发生衰退时,尚处于健康状态,此时土壤微生物数量较多,土壤退化生物分解速率快,使得这一阶段的有机质含量增加,凋落物积累也会引起土壤养分变化^[27]。与丁爱强等^[28]研究结果相类似,其对不同退化程度怪柳灌丛研究发现,轻度退化怪柳灌丛土壤有机质含量高于未退化怪柳灌丛。此外,本研究发现,迎风坡处不同土层速效磷含量随着演替阶段发展呈不同变化趋势,但相同土层间速效磷变化范围不大,这是因为土壤中磷元素主要受成土母质影响,有机质的降解会产生部分磷元素,土壤磷储量相对比较稳定^[29]。而荒漠地区土壤磷元素主要来源于岩石风化,但荒漠区干旱少雨,导致岩石风化缓慢,使得土壤磷含量相对较低^[30]。

3.3 白刺灌丛沙堆土壤养分富集特征

大量研究已经表明灌丛沙堆具有显著的“肥岛效应”^[5,7,16]。本研究结果发现,虽然白刺灌丛沙堆土壤

养分含量在不同深度土层之间存在一定差异,但均表现为表层土壤养分含量较高,土壤养分呈现明显的表层聚集特征。主要原因是白刺灌丛能够拦截沙物质,且在白刺灌丛周围不断堆积,导致土壤养分含量较高^[31-32]。白刺灌丛沙堆发育是一个正反馈过程,植物促进土壤养分条件的改善,土壤养分供给植被生长所需的养分^[21]。本研究发现,白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮和速效磷富集率间呈极显著正相关关系($p < 0.01$),这是因为白刺在生长过程中通过根系会产生分泌物,可以改变土壤理化性质,使沙堆土壤养分含量得逐渐提高,但植物根系分泌物对土壤性质影响微弱,且需要时间较长^[33]。也有学者^[34]指出,灌木的外表特征也会影响灌丛沙堆土壤养分富集,不同冠幅形状的灌丛沙堆土壤富集程度不同,低矮且枝叶茂密的灌木下,灌丛沙堆土壤碳氮磷含量较高。灌丛沙堆“肥岛效应”的发生,不仅可以避免新沙源的产生,而且能够富集水分和土壤养分,保护生物多样性,使退化生态系统的资源能够得到合理分配,遏制荒漠生态系统进一步退化。

4 结论

随着白刺灌丛沙堆演替发展,白刺基径的峰值快于白刺高度、冠幅长度和宽度到达,表明白刺基径在白刺灌丛生长中主导其发育。研究区白刺灌丛沙堆土壤养分富集特征不明显,但不同坡向的白刺灌丛沙堆土壤有机质、全氮和速效磷含量均在0—10 cm土层达到最大值,且土壤有机质、全氮和速效磷富集率间呈极显著正相关关系($p < 0.01$),表明乌兰布和沙漠白刺灌丛沙堆在0—10 cm范围内富集作用最强。白刺灌丛沙堆背风坡处,相同演替发展下,随着土层深度增加,发育阶段土壤养分含量均呈“降—升—降”趋势,稳定和衰退阶段有机质含量呈下降趋势。而在白刺灌丛沙堆迎风坡处,0—10 cm土层下,随着演替阶段发展,土壤有机质和全氮含量在衰退阶段达到最大值。在发育和衰退阶段,土壤全氮含量随着土层深度增加,在0—10 cm土层达到最小值。

参考文献(References):

- [1] Martel J L, Brissette F P, Lucas-Picher P, et al. Climate change and rainfall intensity-duration-frequency curves: Overview of science and guidelines for adaptation[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2021, 26(10): 1-18.
- [2] Tengberg A. Nebkha dunes as indicators of wind erosion and land degradation in the Sahel zone of Burkina Faso[J]. Journal of Arid Environments, 1995, 30(3): 265-282.
- [3] 胡国云.河北坝上低山坡地灌丛沙堆形态特征及理化性质研究[D].石家庄:河北师范大学,2016.

- Hu G Y. Morphological characteristics and physico-chemical properties of Nabkhas on slopes in Bashang Region, Hebei Province[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2016.
- [4] 张奕,肖辉杰,辛智鸣,等. 乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(1): 87-96.
- Zhang Y, Xiao H J, Xin Z M, et al. Wind prevention and sand resistance of typical shrubs in Ulan Buh desert [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(1): 87-96.
- [5] 王湘,焦菊英,曹雪,等. 柴达木盆地尕斯库勒湖白刺灌丛沙堆剖面土壤养分的分布和富集特征[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 765-774.
- Wang X, Jiao J Y, Cao X, et al. Distribution and enrichment characteristics of soil nutrients in the nebkhas profile of *Nitraria tangutorum* in Gahai Lake Area, Qaidam Basin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(3): 765-774.
- [6] 张书亭,怪柳肥岛效应对土壤氮矿化及硝化速率的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- Zhang S T. Effects of fertile island on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification under *Tamarix* plant[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [7] 魏亚娟,党晓宏,汪季,等. 不同演化阶段白刺灌丛沙堆土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 377-384.
- Wei Y J, Dang X H, Wang J, et al. Characterization of the soil ecological stoichiometry of *Nitraria tangutorum* Nebkhas during different succession stages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 377-384.
- [8] Li X L, Dang X H, Gao Y, et al. Response mechanisms of adventitious root architectural characteristics of *Nitraria tangutorum* shrubs to soil nutrients in Nabkha [J]. Plants, 2022, 11(23): 3218.
- [9] 闫晴,李菊艳,尹忠东,等. 典型株型沙生灌丛对风沙流场影响的数值模拟[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 785-797.
- Yan Q, Li J Y, Yin Z D, et al. Numerical simulation of the influence of typical shrub types on wind-sand flow field[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 785-797.
- [10] Li M, Xiao H J, Xin Z M, et al. Soil seed bank characteristics of *Nitraria tangutorum* Nebkhas in a Desert-Qasis Ecotone[J]. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 937257.
- [11] 魏育新,纪永福,姜生秀,等. 干旱胁迫和风沙吹袭对白刺光合作用的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(2): 136-140.
- Wei Y X, Ji Y F, Jiang S X, et al. Effect of drought stress and windblown sand on photosynthesis of *Nitraria tangutorum* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(2): 136-140.
- [12] 杜建会,严平,俄有浩. 甘肃民勤不同演化阶段白刺灌丛沙堆分布格局及特征[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1165-1170.
- Du J H, Yan P, E Y H. Distribution patterns and characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkha at its different evolution stages in the Minqin County of Gansu Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1165-1170.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-114.
- [14] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agroecosystems in semi-arid Niger [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(4): 383-398.
- [15] 钟巧连,刘立斌,许鑫,等. 黔中喀斯特木本植物功能性状变异及其适应策略[J]. 植物生态学报, 2018, 42(5): 562-572.
- Zhong Q L, Liu L B, Xu X, et al. Variations of plant functional traits and adaptive strategy of woody species in a karst forest of central Guizhou Province, south-western China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(5): 562-572.
- [16] 罗维成,赵文智,任珩,等. 不同气候区灌丛沙堆形态及土壤养分积累特征[J]. 中国沙漠, 2021, 41(2): 191-199.
- Luo W C, Zhao W Z, Reng Y, et al. Nebkha morphological characteristics and soil nutrition content in three regions with different climates in North China [J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(2): 191-199.
- [17] 李小乐. 白刺灌丛不定根系空间构型特征对沙堆土壤理化性质的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- Li X L. Response of the adventitious root spatial architecture of *Nitraria tangutorum* to the physicochemical soil properties of nabkha[D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [18] 孙涛,贾志清,刘虎俊,等. 绿洲荒漠过渡带不同演替阶段白刺灌丛植被和沙堆形态特征相关性分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2020, 56(3): 396-403, 411.
- Sun T, Jia Z Q, Liu H J, et al. Analysis of the correlation between vegetation and morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkhas at different succession stages in a desert-oasis ecotone [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2020, 56(3): 396-403, 411.
- [19] 丁延龙. 白刺灌丛沙堆演化对地表蚀积的影响及其作用机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.

- Ding Y L. Influence of the evolution of *Nitraria tangutorum* Nebkhas on the surface erosion-deposition status and its mechanism [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [20] Hesp P, McLachlan A. Morphology, dynamics, ecology and fauna of *Arctotheca populifolia* and *Gazania rigens* nabkha dunes [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(2):155-172.
- [21] 韩福贵, 满多清, 郑庆钟, 等. 青土湖典型湿地白刺灌丛沙堆群落物种多样性及土壤养分变化特征研究[J]. 草业学报, 2021, 30(1):36-45.
- Han F G, Man D Q, Zheng Q Z, et al. Species diversity and soil nutrient changes of a *Nitraria tangutorum* shrub community in Qingtu Lake wetland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(1):36-45.
- [22] 陈芙蓉, 程积民, 刘伟, 等. 不同干扰对黄土高原典型草原土壤有机碳的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2):298-304.
- Chen F R, Cheng J M, Liu W, et al. Effects of disturbances on organic soil carbon in the typical grassland of loess plateau [J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(2):298-304.
- [23] 孙祥, 于卓. 白刺根系的研究[J]. 中国沙漠, 1992, 12(4):53-57.
- Sun X, Yu Z. A study on root system of *Nitraria tangutorum* [J]. Journal of Desert Research, 1992, 12(4):53-57.
- [24] 王晶, 吕昭智, 钱翌, 等. 新疆准噶尔盆地典型荒漠区不同景观植被对土壤养分的影响[J]. 中国沙漠, 2010, 30(6):1367-1373.
- Wang J, Lv Z Z, Qian Y, et al. Soil nutrients under vegetation cover of different desert landscapes in Junggar basin, Xinjiang [J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(6):1367-1373.
- [25] 赵灵. 中国沙棘对青藏高原高寒草甸土壤性质的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- Zhao L. Influence of *Hippophae rhamnoides* on soil properties in alpine meadow ecosystems of Qinghai-Tibet Plateau, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [26] 李娜, 李春利, 韩国栋. 冬季放牧场与夏季放牧场草地土壤理化性质分析[J]. 现代农业科技, 2009(8):178-179, 185.
- Li N, Li C L, Han G D. Analysis of soil physical and chemical properties of winter ranch and summer ranch grasslands [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(8):178-179, 185.
- [27] 陆志星. 桂西北石漠化区不同植被恢复类型对土壤质量的影响及其机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- Lu Z X. Effects of different vegetation restoration types on soil quality and its mechanism in rocky desertification area in Northwest Guangxi [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022.
- [28] 丁爱强, 徐先英, 张雯, 等. 不同退化程度柽柳灌丛的土壤理化和生物学特性[J]. 草业学报, 2019, 28(2):1-11.
- Ding A Q, Xu X Y, Zhang W, et al. Soil physicochemical and biological characteristics of *Tamarix ramosissima* Nebkhas in different degradation degree [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(2):1-11.
- [29] 牧仁, 焦婷, 陈鑫, 等. 氮添加对高寒生态条件下垂穗披碱草草地土壤肥力的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(5):50-57.
- Mu R, Jiao T, Chen X, et al. Effects of nitrogen addition on soil fertility of *Elymus nutans* grassland under alpine ecological conditions [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(5):50-57.
- [30] 董正武, 玉米提·哈力克, 李生宇, 等. 古尔班通古特沙漠西南缘柽柳沙包的土壤化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(20):7389-7400.
- Dong Z W, Umut H, Li S Y, et al. Soil stoichiometric characteristics of *Tamarix* cones in the southwest margin of Gurbantunggut Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20):7389-7400.
- [31] 赵栋, 屠彩芸, 李丹春. 封育年限对干旱河谷灌丛土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2):39-44, 49.
- Zhao D, Tu C Y, Li D C. Effects of fencing time on soil physicochemical properties of *sophora viciifolia* in semi-arid valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(2):39-44, 49.
- [32] 郭丁, 裴世芳, 俞斌华, 等. 阿拉善荒漠草地几种灌木对土壤有效态养分的影响[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1):95-100.
- Guo D, Pei S F, Yu B H, et al. Influence of several shrubs on soil available nutrient in Alxa desert steppe [J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(1):95-100.
- [33] 任伟. 旱生灌木对阿拉善荒漠土壤中、微量元素影响机制的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
- Ren W. The influencing mechanism of xeric shrub on medium and trace elements in Alxa desert [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [34] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 等. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(4):201-207.
- Qu W L, Yang X P, Zhang C T, et al. Shrub-mediated "fertile island" effects in arid and semiarid grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(4):201-207.