DOI: 10.20103/j.stxb.202503250689

齐艳莹,李宗善,卢涵珏,龙兰兰,王璇,买尔当·克依木,曾凡江.塔里木盆地南缘不同灌木土壤“肥岛”效应及其垂直分布特征.生态学报,2026,46(2):1024-1033.

Qi Y Y, Li Z S, Lu H J, Long L L, Wang X, Keyimu Maierdang, Zeng F J. Soil “fertile island” effect of two desert plant species and its vertical heterogeneity at the southern Tarim Basin. Acta Ecologica Sinica, 2026, 46(2): 1024-1033.

塔里木盆地南缘不同灌木土壤“肥岛”效应及其垂直分布特征

齐艳莹[1,2,3,5],李宗善[4,5],卢涵珏[1,2,3],龙兰兰[1,2,3,5],王 璇[1,2,3],买尔当·克依木[1,2,3,5,*],曾凡江[1,2,3,5]

1 中国科学院新疆生态与地理研究所新疆荒漠植物根系生态与植被修复重点实验室,乌鲁木齐 830011

2 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室,干旱区生态安全与可持续发展重点实验室,乌鲁木齐 830011

3 中国科学院新疆生态与地理研究所策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,策勒 848300

4 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室,北京 100085

5 中国科学院大学,北京 100049

摘要:为揭示塔里木盆地南缘荒漠绿洲过渡带主要防护物种多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)和头状沙拐枣(*Calligonum caput-medusae* Schrenk.)土壤改良功能的差异,采用野外取样与室内实验相结合的方法,分析不同盖度(30%、50%)的柽柳和沙拐枣在不同深度的土壤养分含量,并与空旷裸地对比,进而研究这两种灌木的土壤“肥岛”效应及差异。结果表明:(1)不同灌木均具有明显的土壤“肥岛”效应。与空旷裸地相比,柽柳土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、和全磷(TP)含量分别高 265%,220%和 230%;沙拐枣高 195%,120%和 185%;柽柳立地土壤 SOC、TN、TP 富集率分别为 2.17±0.32,4.80±0.16,3.04±0.25,沙拐枣的为 1.84±0.24,4.39±0.15,2.63±0.18。(2)不同盖度灌木土壤“肥岛”效应具有差异。其中,50%盖度柽柳土壤 SOC、TN、TP 含量及其富集率最高。(3)不同灌木土壤“肥岛”效应垂直分布特征具有差异。50%盖度柽柳立地土壤 TP 含量以及富集率在各个土层均显著高于其他植被类型区;在 80—140 cm 的土层对 SOC 和 TN 的富集量比其他植被类型区高。总体而言,柽柳土壤养分含量高于沙拐枣,具有更强的土壤“肥岛”效应。因此,塔里木盆地南缘荒漠绿洲过渡带防护林建设中,柽柳是可优先考虑的物种。研究结果对干旱区生态恢复和保护及可持续发展具有重要意义。

关键词:荒漠植物;覆盖度;土壤养分;“肥岛”效应

Soil “fertile island” effect of two desert plant species and its vertical heterogeneity at the southern Tarim Basin

QI Yanying[1,2,3,5], LI Zongshan[4,5], LU Hanjue[1,2,3], LONG Lanlan[1,2,3,5], WANG Xuan[1,2,3], KEYIMU Maierdang[1,2,3,5,*], ZENG Fanjiang[1,2,3,5]

1 *Xinjiang Key Laboratory of Desert Plant Roots Ecology and Vegetation Restoration, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*

2 *Xinjiang State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi* 830011, *China*

3 *Cele National Station of Observation and Research for Desert Grassland Ecosystems, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sceinces, Cele* 848300, *China*

基金项目:国家重点研发项目(2022YFF1302504);中科院青年创新促进会项目(2022445);新疆维吾尔自治区青年基金项目(2022D01B215)

收稿日期:2025-03-25; **网络出版日期**:2025-10-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mhk@ ms.xjb.ac.cn

4 *State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*

5 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: Shrubs can improve soil structure and the micro-environment during growth, enriching soil nutrients in their vicinity compared to the surrounding areas which is known as soil “fertile island” effect. The formation and development of the “fertile island” effect significantly influence soil ecological stability as well as the structure and function of vegetation ecosystems in arid regions, which play a critical role in mitigating wind-sand hazards and safeguarding oasis ecological security. *Tamarix ramosissima* Ledeb. and *Calligonum caput-medusae* Schrenk. are two dominant shelterbelt species in the protective shelterbelt system of desert-oasis transition zone at the southern Tarim Basin, perform pivotal ecological functions including windbreaking and sand fixation, desertification control, climate regulation, and stabilization of regional ecological equilibrium. In present study, we combined field sampling and laboratory experiments to reveal the differences in soil improvement functions between these two species. Soil nutrient content was analyzed at different depths under varying canopy cover densities (30% and 50%) of both shrubs and compared with bare land in order to investigate their “fertile island” effects and associated variations. According to the results (1) Both shrubs demonstrated significant soil “fertile island” effects, but these were species-specific. At the *Tamarix* site, the amounts of soil organic content (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were 265%, 220%, and 230% higher than those of bare land; at the *Calligonum* site, they were higher by 195%, 120%, and 185%. The enrichment rates of SOC, TN, and TP at the *Tamarix* site were 2.17±0.32, 4.80±0.16, and 3.04±0.25, respectively, while those at the *Calligonum* site were 1.84±0.24, 4.39±0.15, and 2.63±0.18. (2) The strength of the soil “fertile island” effect varied with vegetation coverage. Both the soil SOC, TN, TP contents and their enrichment rates were highest at the *Tamarix* site with 50% vegetation coverage. (3) The vertical distribution of soil nutrients was also species-specific. At the *Tamarix* site with 50% coverage, the content and enrichment rate of TP in all soil layers exceeded those of other sites, while the enrichment rates of SOC and TN peaked at lower depths (80—140 cm). In general, *Tamarix* showed a stronger soil “fertile island” effect than *Calligonum*. Therefore, *Tamarix* could be prioritized in species selection for shelterbelt forest construction at the southern margin of the Tarim Basin. These findings were significant for ecological restoration, protection, and sustainable development in arid regions as well as combating against desertification in the southern Taklamakan.

Key Words: desert plants; vegetation coverage; soil nutrients; “fertile island” effect

研究干旱-半干旱生态系统内植被引起的土壤养分变化是植被与土壤间的生态学效应重要方面之一[1]。养分被植物根系吸收后,又以凋落物形式返回到土壤中,凋落物在土壤中被微生物分解和固定后,进而出现土壤养分富集过程,被称为土壤“肥岛”效应[2]。“肥岛”现象虽是土壤小尺度空间异质性的体现,却对干旱生态系统养分循环和大尺度植被格局具有重要影响[3]。“肥岛”效应广泛存在于全球干旱生态系统[4—6],其形成和发展对干旱区植被生态系统的结构与功能均产生重要影响[7],在干旱区生态学研究领域受到广泛关注。

以往对干旱区灌丛土壤养分的相关研究结果显示,准噶尔盆地南缘柽柳(*Tamarix* spp.)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)两种灌木“肥岛”现象主要表现在土壤表层,其土壤性状与“岛”外土壤的差异随土壤深度的增加而减弱。相较于梭梭,柽柳“肥岛”发育更广,对养分的聚集能力更强[7]。在黄河三角洲盐碱地对柽柳的研究得出相似结果,柽柳“肥岛”效应主要体现在土壤 SOC、TN 含量随着土层的加深呈现降低趋势,而 TP 含量先降低后升高[8]。也有学者对甘肃临泽北部荒漠绿洲过渡带的沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)等 3 种固沙植物进行研究,发现随土层深度增加,植物根部土壤中 SOC 含量基本呈先增高后降低的变化特征,而 TP、TN 含量在土壤表层较高[9]。

目前国内外相关研究中,普遍采用富集率(E)来表征土壤养分的富集程度[2,10]。如那尔格孜等对西北地

区两种荒漠植物养分富集率的研究表明,两种植物均在主根附近对 SOC、TN 和 TP 有较高的富集率,且“肥岛”在不同植物中表现出明显的物种效应。并对“岛”外不同空间位置处土壤养分含量及富集情况进行分析,以探究“肥岛”发育的广度和程度[2]。王湘等对柴达木盆地白刺灌丛养分富集特征进行探究,发现白刺(*Nitraria tangutorum* nebkhas)剖面各土层中 TN、TK 均具有不同程度的富集效应,其中对 TK 的富集最少,而对 TP 未表现出富集效应[11]。王言意等也用富集率探讨了四合木灌丛衰退对立地沙堆养分特征的影响,发现四合木灌丛沙堆“肥岛”效应强度随灌丛衰退梯度递增[12]。有学者同样对祁连山地区高寒灌丛土壤养分富集率也进行了研究,结果表明 3 种灌丛在 0—60 cm 土层深度表现出不同的富集能力,对 SOC 的富集作用更加明显,且不同灌丛对不同种类养分富集存在种间差异[13]。

干旱区气候干燥、降水稀少、植被稀疏且类型简单,土壤养分较为贫瘠,植物生长所需养分受到一定限制[14]。塔里木盆地南缘(以下简称塔南)位于我国西北地区,地处极端干旱区,生态环境十分脆弱。在恶劣的环境背景下,该地区植物种类贫乏、植被覆盖度低,适应性较强、生态位较宽。多枝柽柳(*Tamarix ramosissima* Ledeb.)和头状沙拐枣(*Calligonum caput-medusae* Schrenk.)成为该区域广泛分布的灌木物种。多枝柽柳为柽柳科柽柳属,多为灌木,为泌盐植物,具有喜光、耐热及耐旱等特性[15]。头状沙拐枣为藜科沙拐枣属灌木,主要分布于我国新疆塔里木盆地边缘等区域,大多生长于半固定、流动沙丘、沙地、沙砾质及砾质荒漠的粗沙积聚处[16],是典型的沙生植物。柽柳和沙拐枣作为塔南地区荒漠绿洲过渡带防护体系中重要组成物种,在防风固沙、遏制沙漠化、调节气候、稳定区域生态平衡等方面发挥极其重要的生态功能[17—18]。灌木可改善土壤结构和灌丛周围土壤小环境,使灌丛附近土壤养分比周围土壤更富集[2],土壤养分的富集对其生态系统稳定性具有重要影响,而土壤生态稳定性对抵御风沙危害、保护绿洲安全意义重大[9]。因此,对以上两种干旱区灌木的“肥岛”效应的研究极为关键且必要。

目前对干旱区灌木土壤“肥岛”效应方面的研究多集中于浅层土壤,而在深层土壤的垂直分布特征研究较为少见。同时,不同覆盖度植被土壤“肥岛”效应的差异在以往的研究中更鲜少涉及。鉴于此,本研究在塔南地区选取不同覆盖度柽柳和沙拐枣地,探讨两种荒漠灌木土壤“肥岛”效应的差异、不同植被覆盖度对土壤“肥岛”效应的影响,以及两种荒漠植物土壤养分垂直分布特征及差异,从而深化对这两种灌木土壤改良功能的认识。研究结果将为塔南地区防护林营建提供科学依据,对干旱脆弱区植被恢复和保护、生态修复和改良、防治沙漠化,以及区域可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于塔南地区策勒绿洲外围,地理位置为 37.02N,80.73E,海拔 1343 m,具有典型的大陆性干旱气候,年均气温为 12 ℃,年均降水量为 53 mm。夏季高温,降水稀少,水分潜在蒸发量大。该区域分布的主要植物种为柽柳、沙拐枣、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia* Shap.)和花花柴(*Karelinia caspia* (Pall.) Less.)等。

1.2 样地设置及土壤样品采集

土壤样品采用土壤剖面法采于 2023 年 6 月。在荒漠绿洲过渡带选取沙拐枣盖度 30%(S1)和 50%(S2)、柽柳盖度 30%(S3)和 50%(S4)以及空旷地(无植被覆盖的土壤,SK)进行取样。选取的柽柳生长于平缓沙坡(地形起伏不大),而沙拐枣生长于平坦沙地。两者树龄较为接近,平均为 20a。记录样地的基本特征如下表所示(表 1),且各样地之间的距离足够远。沙拐枣平均株高为(4.20±3.21) m,柽柳平均株高为(2.96±1.51) m。各个样地的植株下无草本植物覆盖。每个样地在植冠下部挖取 3 个 2 m 深的土壤剖面,以 20 cm 为间距(10 个土层)采集土壤,共采集土壤样品 10×3×6=180 个。

1.3 指标测定

土壤理化性质:按照《土壤农化分析》[19]中的有关方法测定土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)及全钾(TK)含量。采用重铬酸钾氧化法、凯氏定氮法、钼锑抗比色法和火焰光度法分别测定 SOC、TN、TP 和 TK 含量。

土壤养分富集率:不同盖度灌木的土壤养分富集率计算公式为:$E_i = C_i / O_i$[20]。其中,C 表示有植物覆盖的(各个层次)土壤养分,O 表示空旷地土壤养分,i 表示不同测定指标,E 表示富集率。

表 1　样地基本特征

Table 1　Basic characteristics of the sample plots

样地编号 Plot number	S1	S2	S3	S4	SK
经度 Longitude(E)	80°43′ 33″	80°43′ 38″	80°43′ 1″	80°42′ 55″	80°42′ 14″
纬度 Latitude(N)	37°0′ 57″	37°0′ 59″	37°1′ 32″	37°1′ 34″	37°1′ 45″
海拔 Elevation/m	1361.80	1360.81	1354.79	1356.47	1350.67
植株个数 Number of plants/株	11	18	8	14	—
平均高度 Average height/m	3.69±0.67	3.48±0.17	2.76±0.49	3.07±0.59	—
平均基径 Average base diameter/cm	3.80±0.51	3.60±0.29	3.20±0.47	3.00±0.54	—
平均冠幅 Average crown diameter/m	3.20±0.27	2.90±0.34	4.10±0.38	3.80±0.61	—

SK:空旷地(无植被覆盖) Bare land;S1:样地 1(30%盖度沙拐枣)Sample plot 1;S2:样地 2(50%盖度沙拐枣)Sample plot 2;S3:样地 3(30%盖度柽柳)Sample plot 3;S4:样地 4(50%盖度柽柳)Sample plot 4

1.4　数据分析

使用 Excel 2021 软件整理数据,并使用 SPSS 27.0 软件进行统计分析。分别对 SK、S1—S4 的 10 个土层土壤养分含量和富集率的差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行比较,差异的显著性控制在 0.05 水平。图表中数据均为 3 个剖面土壤样品测定的养分含量平均值±标准差,用 Origin 2021 软件绘制图件。

2　结果与分析

2.1　不同植被类型立地土壤“肥岛”效应的比较

表 2 为两种覆盖度的柽柳和沙拐枣立地 0—200 cm 土壤养分含量平均值,结果表明不同灌木立地土壤养分含量存在明显差异。与空旷地相比,柽柳土壤 SOC、TN 和 TP 含量分别高 265%、220%和 230%;沙拐枣高 195%、120%和 185%。不同灌木立地土壤 SOC、TN 和 TP 含量具有显著差异,而 TK 含量差异不显著。从土壤养分富集率而言,柽柳样地对 SOC、TN 和 TP 的富集率分别为 2.17±0.32,4.80±0.16,3.04±0.25,均高于沙拐枣(分别为 1.84±0.24,4.39±0.15,2.63±0.18)。综合来看,柽柳立地土壤 SOC、TN 和 TP“肥岛”效应均强于沙拐枣。

表 2　不同灌木立地土壤养分含量对比

Table 2　Comparison of soil nutrient contents in the soil of different shrubs

养分含量 Nutrient content	SOC 含量/(g/kg) SOC content	TN 含量/(g/kg) TN content	TP 含量/(g/kg) TP content	TK 含量/(g/kg) TK content
空旷地 Bare land	0.55±0.05b	0.05±0.01b	0.20±0.01b	18.47±0.14a
柽柳 *Tamarix*	2.01±0.14a	0.16±0.01a	0.66±0.02a	18.50±0.15a
沙拐枣 *Calligonum*	1.62±0.08ab	0.11±0.01ab	0.57±0.01ab	18.68±0.20a

SOC: 土壤有机碳 Soil organic content;TN: 全氮 Total nitrogen;TP: 全磷 Total phosphorus;TK: 全钾 Total potassium;不同小写字母表示相同养分元素不同物种间具有差异显著 (P<0.05)

2.2　不同盖度植被立地土壤“肥岛”效应的比较

不同盖度柽柳和沙拐枣的“肥岛”效应也具有差异(图 1)。对 30%和 50%盖度的沙拐枣而言,土壤 SOC、TN 和 TP 含量差异不明显,分别为(1.59±0.18) g/kg 和(1.64±0.23) g/kg,(0.11±0.03) g/kg 和(0.10±0.02) g/kg,(0.56±0.01 g/kg) 和(0.58±0.01) g/kg;SOC 富集率分别为 1.72±0.25,1.96±0.22,TN 富集率分别为 4.38±0.15,4.40±0.14,TP 富集率分别为 2.57±0.14,2.68±0.22,无显著差异。而对 30%和 50%盖度的柽柳而言,50%盖度柽柳立地土壤中的 SOC、TN、TP 含量分别为(2.08±0.22) g/kg,(0.17±0.02) g/kg 和(0.72±0.06) g/kg,均高于 30%盖度的柽柳;SOC 富集率分别为 2.01±0.23,2.32±0.41,TN 富集率分别为 4.29±0.13,5.31±0.18,TP 富集率分别为 2.73±0.18,3.34±0.31,有显著差异。不同盖度沙拐枣和柽柳立地土壤 TK 含量差异不

明显,富集率差异也较小。总而言之,对不同盖度灌木而言,50%盖度柽柳立地“肥岛”效应最为显著。

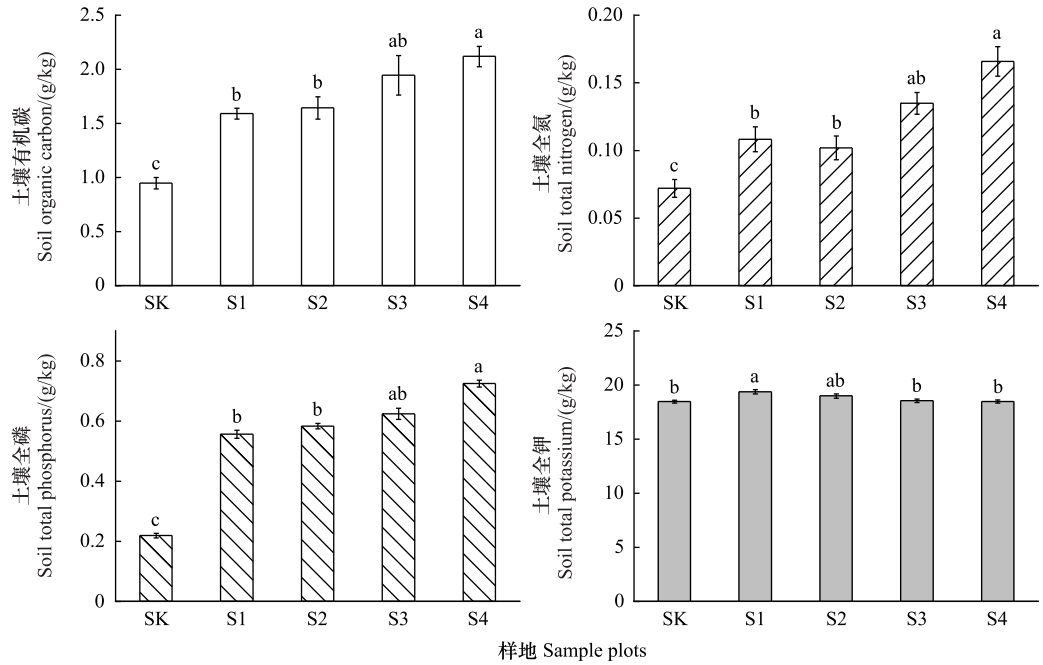

图 1 不同灌木土壤养分含量的差异

Fig.1 Differences in soil nutrient contents of different shrubs

SK:空旷地(无植被覆盖) Bare land;S1:样地 1(30%盖度沙拐枣)Sample plot 1;S2:样地 2(50%盖度沙拐枣)Sample plot 2;S3:样地 3(30%盖度柽柳)Sample plot 3;S4:样地 4(50%盖度柽柳)Sample plot 4;不同小写字母表示 $P<0.05$ 水平下差异的显著性

2.3 不同植被类型土壤“肥岛”效应垂直分布特征的比较

柽柳和沙拐枣样地各土层 SOC、TN 和 TP 含量均显著高于空旷地,而 TK 含量无显著差异(图 2)。两种灌木的土壤 SOC 和 TN 富集率随土层深度增加整体呈上升趋势,在 80—140 cm 处达到最高值后逐渐下降;TP 富集率随深度呈略微上升趋势,而 TK 富集率在不同土层间未呈现显著差异(图 3)。不同盖度的沙拐枣和柽柳在不同深度上对土壤养分的聚集效应也存在一定差异。50%盖度的柽柳样地在 80—140 cm 深处的土壤 SOC 和 TN 富集率高于其他植被盖度类型区,该盖度样地各土层土壤 TP 的富集率均高于其他植被盖度类型区(图 3)。

3 讨论

3.1 两种灌木土壤养分“肥岛”效应的差异

本研究显示,柽柳和沙拐枣立地土壤中 SOC、TN、TP 含量均显著高于空旷地,养分富集率较高,这表明两种灌木对土壤均具有较好的改良作用。可能由于两种灌木具有相似的外形特征:分枝的半球形冠层有利于冠层下凋落物的堆积,从而促进冠层下土壤养分积累[21—22]。但不同类型灌木对土壤养分的截留和富集情况具有差异[2]。灌木分布的生境、灌木高度、冠幅等多种因素均能对其土壤养分富集率产生影响。本文研究的柽柳和沙拐枣两种灌木“肥岛”效应的差异明显。与沙拐枣相比,柽柳立地土壤中 SOC、TN、TP 含量较高,土壤养分富集率也高,表明柽柳土壤养分“肥岛效应”较明显,这可能与其生长特性及根系特征有关。研究区频繁的风沙运动使得养分在灌木周围沉积[2, 23],同时由于柽柳是泌盐植物,可将吸收的盐分排出,排出的盐分晶粒落到地面遇水变干后形成坚硬结皮[24—25],从而将 SOC 等养分固定在土壤中[26]。此外,由于柽柳为深根植物,较为发达的根系也有利于植物对土壤养分的吸收[27—28]。对不同盖度灌木而言,50%盖度柽柳土壤 SOC 含量和富集率均最高,可能与柽柳光合作用产物碳分配策略有关[29]。植被盖度越高使植物进行光合作用越强,光合产物的积累也增加。在生长季结束后,土壤中凋落物的输入量也增加[30],也会导致土壤SOC含量

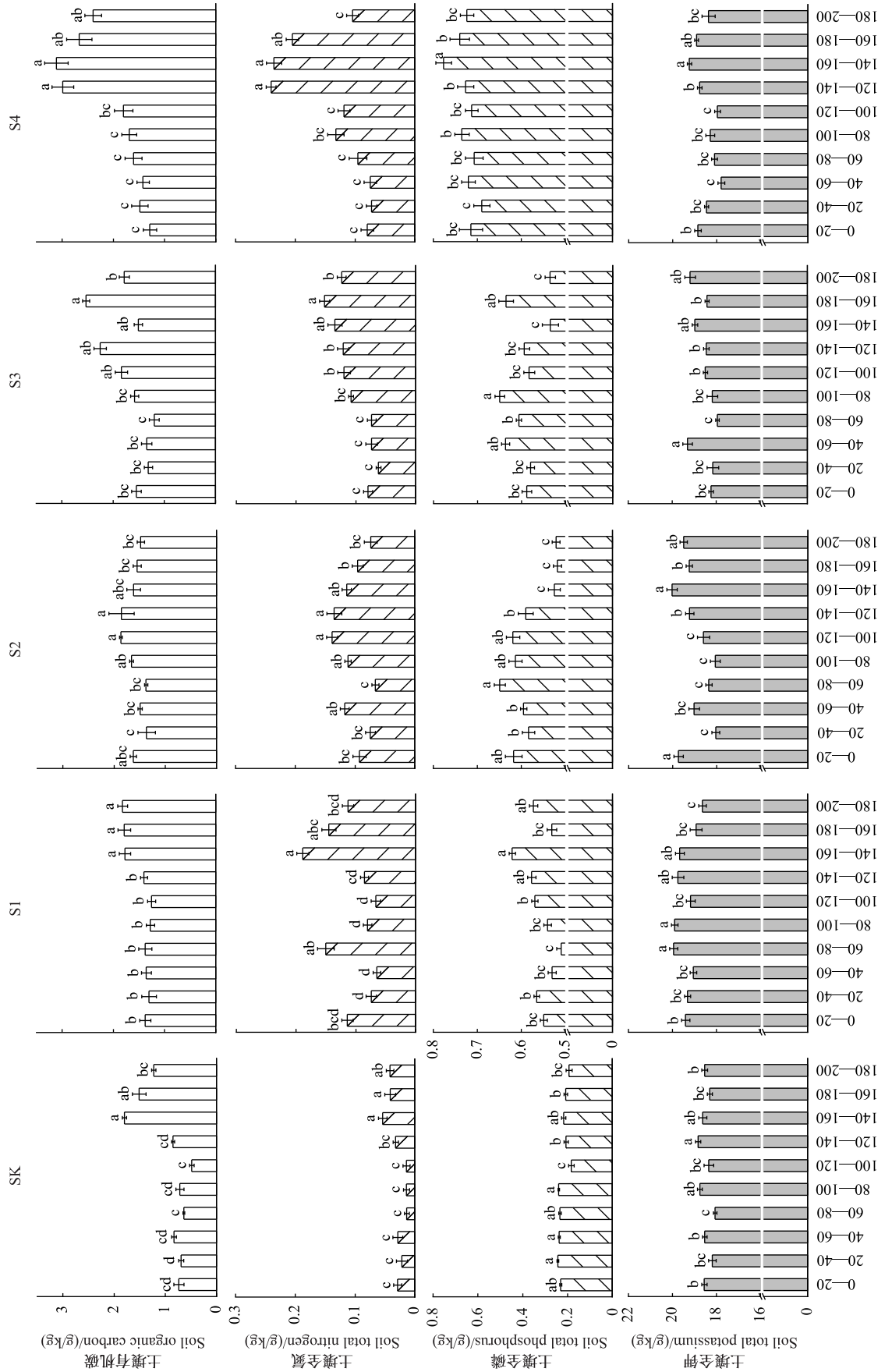

图2　两种灌木不同深度土壤养分含量的差异

Fig. 2　Differences in soil nutrient contents at different soil depths of two shrubs

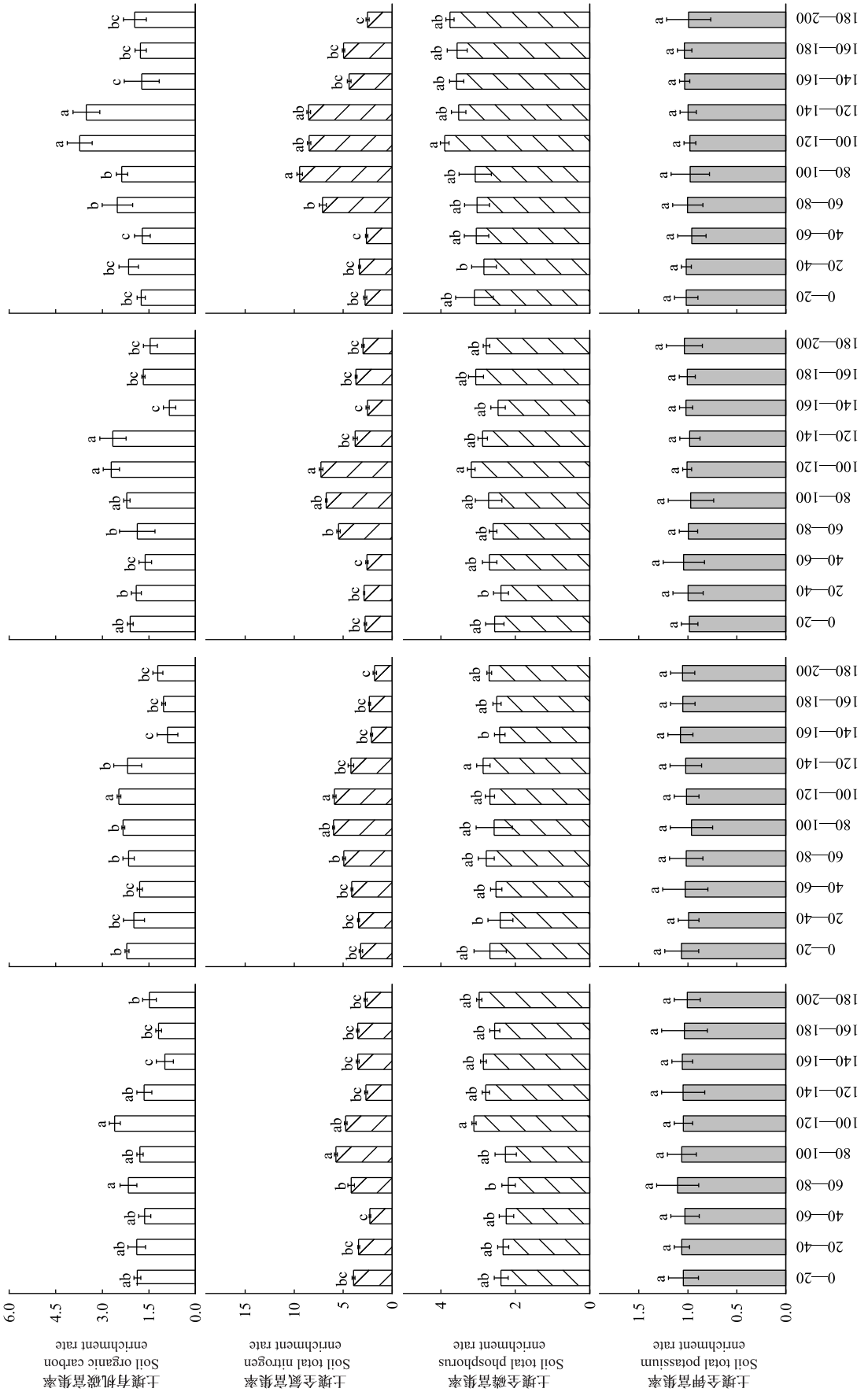

图3 两种灌木不同深度土壤养分富集率的差异

Fig. 3 Differences in soil nutrient enrichment rates at different soil depths of two shrubs

高。干旱生态系统中土壤养分水平较低,尤其是 N,被认为是限制干旱区植物生长的因素[31]。而 50%盖度柽柳土壤中 TN 含量较高,可能是由于柽柳盖度高,随着大气沉降及生物固氮等过程,冠层与大气接触面积大,从而有利于植物吸收更多的 N,转移到土壤中的 N 也随之增多,导致高盖度柽柳土壤 TN 含量较高。此外,土壤 N 含量 95%来源于有机质[32—33]。同时,相比于沙拐枣,柽柳地上部分冠层更大。有研究表明随着冠层的增大,植被土壤“肥岛”效应得以增强,从而在灌丛下捕获更多的土壤资源[34]。50%盖度柽柳土壤中 TP 含量较高的原因可能也与之相关。陈萍等[35]研究同样得出与低密度对比,中密度柽柳具有更强的“肥岛”效应,具有较好的提高土壤肥力作用,这与本研究得出的结论较为一致。

综合来看,柽柳“肥岛”效应比沙拐枣更明显,对土壤养分的聚集能力显著。另一方面,柽柳较强的富集能力可能与两种灌木分布的立地条件差异也有一定关系。柽柳灌丛一般生长于有坚硬结皮的缓平沙地,能够有效封锁土壤养分和水分[36],而沙拐枣生长在平坦沙地。同时,研究区频繁的风沙活动,不利于冠层下凋落物的积累,从而减少了养分在土壤中的富集与吸收[37—38]。因此相较于柽柳,沙拐枣对养分的富集较弱。该结果与那尔格孜等[2]对古尔班通古特沙漠两种灌木“肥岛”效应的研究得出结论也较为相似(准噶尔无叶豆(*Eremosparton songoricum*)“肥岛”效应比沙拐枣更为明显)。李君等[7]对准噶尔盆地南缘的柽柳和梭梭进行研究,同样发现相比于梭梭,柽柳“肥岛”发育具有更广、更深的特点,能够聚集更多养分元素。

3.2　两种灌木土壤养分“肥岛”效应垂直分布特征的差异

在植被-土壤体系中,植被类型、生长状况、分布情况均会对土壤养分的空间(垂直)变化产生影响[2]。即使是同一物种“肥岛”效应的空间特征也可能随土壤指标而异[39]。本研究发现 50%盖度柽柳样地各土层土壤 SOC 和 TN 的富集率普遍高于沙拐枣分布区,其中 80—140 cm 土层差异最显著。首先,这种差异可能与两种灌木地上部分植株形态的差异有关。有研究证实,灌木形态特征会对灌丛沙堆养分富集产生影响[28, 34]。柽柳较沙拐枣具有更茂盛的同化枝,这会显著增加其树冠下凋落物输入量,为“肥岛”的形成提供大量材料[15, 40]。柽柳冠下更多的凋落物输入不仅能够加强对冠下表土层的机械保护,还可以增加降雨截流,并提高表土微生物活性[41]。土壤颗粒与养分的结合,使得土壤颗粒间结合力、团聚体稳定性、孔隙度及土壤渗透能力增加[42],进而使得柽柳冠下土壤的生物地球化学循环能够达到更深的土层。其次,柽柳和沙拐枣根系分布特征的差异也可能是引起土壤养分垂直分布特征差异的重要因素。沙拐枣根系多为水平分布的浅层根系[43],而柽柳的根系分布更深、更广,也更复杂,其根系幼龄阶段都能达到 2—3 m[28]。柽柳地上部分凋落物分解后的养分,随水分向土壤深层迁移、扩散[8],另通过发达的根系将养分吸收并分配到更深层根际[29]。同时,残根的腐烂分解也会增加土壤中的养分含量和养分富集率[44—45]。陈雨晴等[46]对黑河下游柽柳的研究同样表明柽柳土壤中 120—160 cm 处 SOC 含量最高,随深度的增加 80—200 cm 范围内各个土层 TN 含量先缓慢上升后出现下降。

除此之外,50%盖度柽柳对各土层土壤 TP 的富集率均高于其他植被类型区及空旷地,表明 50%盖度柽柳对土壤 TP 的富集能力最强,可能是由于柽柳对 TP 的吸收具有偏好性。Gao 等[34]对塔南地区柽柳等三种荒漠植物的研究同样表明柽柳对 TP 具有更明显的“肥岛”效应,且土壤深度和植物种类显著影响冠层下土壤中的 TP 含量。不同植物类型和不同盖度区土壤中 TK 含量均较高,且垂直分布特征不具有显著差异,其原因可能是塔南地区荒漠绿洲过渡带土壤中 TK 的含量丰富[47,48],因此,各植被类型及不同深度土壤中 TK 含量不具有显著差异。

4　结论

塔南地区荒漠绿洲过渡带柽柳和沙拐枣均具有明显的土壤“肥岛”现象。两种灌木立地土壤 SOC、TN、TP 含量显著高于空旷地,表明其能够聚集养分,具有较好的土壤改良作用。但这两种灌木土壤“肥岛”现象存在明显的物种效应。与沙拐枣相比,柽柳对土壤 SOC、TN 和 TP 的聚集能力更强。对不同盖度灌木而言,50%盖度柽柳立地土壤 SOC、TN 和 TP 含量和富集率最高。对两种灌木土壤“肥岛”效应垂直分布特征而言,随土壤

深度的增加,土壤 SOC 和 TN 富集率先缓慢上升,在 80—140 cm 深处达到较高值后出现下降,其中 50%盖度柽柳在该范围土壤 SOC 和 TN 养分富集率最高。因此,在塔里木盆地南缘防护林建设和植被恢复时,建议灌木造林优先选用柽柳,并保持较高的覆盖度,有助于发挥更有效改良土壤的作用。研究结果将为加快植被恢复和精准防治沙漠化提供重要依据。

参考文献(References):

[1] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究. 应用生态学报, 2002, 13(7): 802-806.

[2] 那尔格孜·阿力甫, 肖钰鑫, 宋泊沂, 庄伟伟. 荒漠植物“肥岛”效应对土壤养分空间分布的影响. 植物研究, 2023, 43(6): 868-880.

[3] HilleRisLambers R, Rietkerk M, van den Bosch F, Prins H H T, de Kroon H. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. Ecology, 2001, 82(1): 50-61.

[4] 刘任涛. 沙地灌丛的“肥岛”和“虫岛”形成过程、特征及其与生态系统演替的关系. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3463-3469.

[5] 陈婧, 崔向新, 丁延龙, 王则宇, 刘宗奇, 石涛. 基于“肥岛”效应探讨人工梭梭土壤养分时空演变趋势. 水土保持研究, 2019, 26(6): 71-79.

[6] 郭小龙, 王明力, 赵来朋, 杨建军. 干旱区梭梭与胡杨冠下“肥岛”效应. 西南农业学报, 2020, 33(5): 1035-1041.

[7] 李君, 赵成义, 朱宏, 王锋. 柽柳(Tamarix spp.)和梭梭(*Haloxylon ammodendron*)的“肥岛”效应. 生态学报, 2007, 27(12): 5138-5147.

[8] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653-658.

[9] 邓丽媛, 胡广录, 周川, 陈海志, 麻进, 焦娇. 荒漠绿洲过渡带不同固沙植物根区土壤养分空间分布特征. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 17-23.

[10] Yin C H, Feng G, Zhang F S, Tian C Y, Tang C X. Enrichment of soil fertility and salinity by tamarisk in saline soils on the northern edge of the Taklamakan Desert. Agricultural Water Management, 2010, 97(12): 1978-1986.

[11] 王湘, 焦菊英, 曹雪, 李建军, 白雷超, 孙晓晨. 柴达木盆地尕海湖区白刺灌丛沙堆剖面土壤养分的分布和富集特征. 应用生态学报, 2022, 33(3): 765-774.

[12] 王言意, 党晓宏, 高永, 蒙仲举, 刘阳. 四合木灌丛衰退对沙堆养分及沉积特征的影响. 水土保持通报, 2024, 44(3): 65-73.

[13] 樊宇航, 赵锦梅, 杨晓霞, 张碧艳, 王婧楠. 祁连山东段高寒灌丛土壤养分空间分布特征. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(2): 123-129.

[14] 刘子金, 徐存东, 朱兴林, 周冬蒙, 田俊姣, 谷丰佑, 黄嵩, 李智睿, 赵志宏, 王鑫. 干旱荒漠区人工绿洲土壤盐碱化风险综合评估与演变分析. 中国环境科学, 2022, 42(1): 367-379.

[15] 祖姆热提·于苏甫江, 董正武, 成鹏, 叶茂, 刘隋赟昊, 李生宇, 赵晓英. 多枝柽柳水分利用策略对沙堆堆积过程的响应. 植物生态学报, 2024, 48(1): 113-126.

[16] 王欢, 张萍, 王朔, 郭佳茹, 王博, 张昱, 秦海琴, 靳磊. 柠条锦鸡儿和沙拐枣主根暴露后的生理响应及抗逆机理. 生态学报, 2021, 41(2): 535-542.

[17] 王飞, 陈文业, 郭树江, 杨帆, 王强强, 杨自辉. 沙拐枣叶功能性状对生境变化的响应. 西北植物学报, 2024, 44(1): 77-87.

[18] 李光莹, 祖姆热提·于苏甫江, 董正武, 马晓东, 李生宇. 古尔班通古特沙漠西南缘多枝柽柳生理特性对沙堆不同堆积阶段的响应. 生态学报, 2024, 44(8): 3457-3470.

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 56-106.

[20] Wezel A, Rajot J L, Herbrig C. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. Journal of Arid Environments, 2000, 44(4): 383-398.

[21] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 魏冰. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展. 草业学报, 2015, 24(4): 201-207.

[22] Sun J, Xia J B, Zhao X M, Gao F L, Zhao W L, Xing X S, Dong M M, Chu J M. Enrichment of soil nutrients and salt ions with different salinities under *Tamarix chinensis* shrubs in the Yellow River Delta. Catena, 2023, 232: 107433.

[23] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, Bao S, Song B Y. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China. Plant and Soil, 2011, 347(1): 79-90.

[24] 陈阳, 王贺, 张福锁, 郗金标, 何奕昆. 新疆荒漠盐碱生境柽柳盐分分泌特点及其影响因子. 生态学报, 2010, 30(2): 511-518.

[25] 孙丽坤, 刘万秋, 陈拓, 刘光琇. 柽柳属(*Tamarix*)植物生境适应机制与资源价值研究进展. 中国沙漠, 2016, 36(2): 349-356.

[26] 李新荣, 贾玉奎, 龙利群, 王新平, 张景光. 干旱半干旱地区土壤微生物结皮的生态学意义及若干研究进展. 中国沙漠, 2001, 21(1): 7-14.

[27] 孙佳, 夏江宝, 董波涛, 高芳磊, 陈萍, 赵万里, 李传荣. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的根系形态及生长特征. 生态学报, 2021, 41(10): 3775-3783.

[28] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 张波, 刘波, 郭自春. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系. 干旱区研究, 2016, 33(1):

166-171.

[29] 杨国涛, 郭玉海, 杜友, 崔旭盛, 翟志席. 干旱胁迫对柽柳-肉苁蓉碳水化合物分配及有效成分含量的影响. 安徽农业科学, 2010, 38(26): 14246-14247, 14249.

[30] 平晓燕, 周广胜, 孙敬松. 植物光合产物分配及其影响因子研究进展. 植物生态学报, 2010, 34(1): 100-111.

[31] Day A D, Ludeke K L. Plant nutrients in desert environments. Heideiberg: Springer-Verlag, 1993. 39-43.

[32] 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. 现代农业科技, 2009,(8): 178-179, 185.

[33] 牧仁, 孙非, 李新乐, 王丹阳, 安景源, 刘雅靖. 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. 水土保持研究, 2024, 31(3): 195-203.

[34] Gao Y J, Tariq A, Zeng F J, Sardans J, Peñuelas J, Zhang Z H, Islam W, Xu M Q. “Fertile islands” beneath three desert vegetation on soil phosphorus fractions, enzymatic activities, and microbial biomass in the desert-oasis transition zone. Catena, 2022, 212: 106090.

[35] 陈萍, 夏江宝, 王善龙, 李栋, 高芳磊, 赵万里, 马金昭. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征. 生态学报, 2022, 42(24): 10180-10190.

[36] 王湘. 柴达木盆地东缘白刺灌丛沙堆土壤性质及其“沃岛”效应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.

[37] 陈海志. 黑河中游荒漠—绿洲过渡带斑块状灌丛植被生态环境效应[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.

[38] Chen Y L, Yao Z M, Sun Y, Wang E Z, Tian C J, Sun Y, Liu J, Sun C Y, Tian L. Current studies of the effects of drought stress on root exudates and rhizosphere microbiomes of crop plant species. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(4): 2374.

[39] 陈萍. 黄河三角洲不同潜水埋深下柽柳灌丛土壤养分和盐分的富集效应[D]. 泰安:山东农业大学, 2023.

[40] Parajuli R, O′Brien M J, Timilsina B, Pugnaire F I, Schöb C, Ghimire S K. Facilitation by a dwarf shrub enhances plant diversity of human-valued species at high elevations in the Himalayas of Nepal. Basic and Applied Ecology, 2021, 54: 23-36.

[41] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain. Catena, 1999, 38(1): 23-44.

[42] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. Geoderma, 1993, 56(1/2/3/4): 377-400.

[43] 杨小林, 张希明, 李义玲, 张永领. 基于分形理论的塔克拉玛干沙漠腹地自然植物根系构型特征分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 145-150.

[44] 张书亭. 柽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.

[45] Villarino S H, Pinto P, Jackson R B, Piñeiro G. Plant rhizodeposition: a key factor for soil organic matter formation in stable fractions. Science Advances, 2021, 7(16): eabd3176.

[46] 陈雨晴, 席海洋, 程文举, 赵欣悦. 荒漠河岸林区 3 种典型植物群落下土壤碳氮含量特征. 中国沙漠, 2023, 43(1): 150-159.

[47] 范琳杰, 李向义, 林丽莎, 热甫开提·沙比提, 薛伟. 2006—2018 年策勒绿洲农田不同施肥量对土壤养分的影响. 水土保持研究, 2021, 28(5): 41-46, 53.

[48] 段婧婧, 耿庆龙, 摆玮. 和田地区耕层土壤养分含量分析. 农村科技, 2019(5): 18-20.