

基于“肥岛”效应探讨人工梭梭土壤养分时空演变趋势

陈婧¹, 崔向新¹, 丁延龙¹, 王则宇², 刘宗奇³, 石涛¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.鄂尔多斯林业规划设计院,
内蒙古 鄂尔多斯 017000; 3.内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要:为阐明不同林龄人工梭梭对干旱荒漠区土壤养分利用机制及时空演变趋势,选取了乌兰布和西南缘营造年限为2,5,10,15,30 a的人工梭梭为研究对象,通过野外调查与室内试验的方法,分析了不同林龄梭梭土壤养分空间分布及其富集效应。结果表明:(1)人工梭梭土壤养分表现出显著的层化分布特征,整体表现为0—10 cm>10—20 cm>20—40 cm,其中表层土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾均比深层平均高82.0%,228.2%,172.7%,39.0%,表层土壤养分积累更明显,说明表层土壤中的大部分养分主要从植物的枯落物质中获得。(2)水平方向土壤养分含量在15~30 a表现出显著差异,根部、灌丛内及株间空地土壤有机质、碱解氮、速效磷及速效钾分别增高了30.8%和38.0%,196.7%和15.6%,22.5%和8.3%,56.4%和10.6%,且富集率显著高于其他林龄,表层(0—10 cm,10—20 cm)表现出随林龄增高而增加的趋势,深层(20—40 cm)则先降低后升高。说明人工梭梭林在种植15 a后其土壤养分“肥岛”效应强于低林龄,而在10 a生长旺盛,养分消耗量大,“肥岛”效应较弱。(3)梭梭各生长指标均与有机质和碱解氮富集率显著相关($p<0.05$),其中与有机质极显著相关($p<0.01$),说明随着林龄的增加,土壤有机质与碱解氮含量累积较为明显。其中有机质的空间异质性最明显,而速效磷、钾时空异质性较弱。由此也进一步表明了干旱荒漠区人工梭梭与土壤养分间具有明显的时空耦合关系。

关键词:“肥岛”效应;人工梭梭;土壤养分富集率;干旱荒漠区

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0071-09

Exploring the Temporal and Spatial Evolution Trend of Soil Nutrients of Different Plantation Ages Based on the Fertile Island

CHEN Jing¹, CUI Xiangxin¹, DING Yanlong¹, WANG Zeyu², LIU Zongqi³, SHI Tao¹

(1.College of Desert Control and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2.Ordos Forestry Planning and Design Institute, Ordos, Inner Mongolia 017000, China; 3.Inner Mongolia Forestry Science Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: In order to clarify the spatial and temporal evolution trend of soil nutrient utilization mechanism of planted *Haloxylon ammodendron* in arid desert areas, the planted *Haloxylon ammodendron* with the plantation ages of 2 years, 5 years, 10 years, 15 year, and 30 years in the southwestern margin of Ulan Buh were selected as the research samples. The spatial distribution and enrichment effects of soil nutrients in different ages of *Haloxylon ammodendron* were analyzed by field investigation and laboratory experiments. The conclusions were drawn as follows. (1) The soil nutrients of the planted sand bogs of different ages demonstrated the significant stratification distribution, the nutrient contents decreased in the order: 0—10 cm>10—20 cm>20—40 cm, among them, soil organic matter, alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium of surface layer were 82.0%, 228.2%, 172.7% and 39.0% higher than the averages of deep layers, and the accumulation of nutrients in surface soil was more obvious, indicating that most of the nutrients in the topsoil mainly resulted from plants litter material. (2) The soil nutrient content in the horizontal direction showed significant difference in 15~30 years, soil organic matter, alkali nitrogen, available phosphorus and available potassium in roots, shrubs and intercropping increased by 30.8% and 38.0%, 196.7% and 15.6%,

收稿日期:2018-12-18

修回日期:2019-01-17

资助项目:国家重点研发计划项目“绿洲、盐碱湖区沙害防治关键技术与示范”(2016YFC0501003)

第一作者:陈婧(1993—),女,内蒙古多伦县人,在读硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:542953781@qq.com

通信作者:崔向新(1962—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,教授,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:cuixiangxin1962@163.com

22.5% and 8.3%, and 56.4% and 10.6%, respectively. The enrichment rates were significantly higher than other forest ages. The nutrients in surface layers (0—10 cm, 10—20 cm) increased with the increase of forest age, while the nutrients in the deep layer (20—40 cm) decreased first and then rose. The results showed that the soil ‘fertile island’ of the artificial *Haloxylon ammodendron* was stronger than that of the low forest age, because the nutrient accumulation rate was strong and the nutrient consumption was large in 10 years, the ‘fertile island’ was weak. (3) The growth indexes of *Haloxylon ammodendron* were closely related to the enrichment and distribution of soil organic matter and alkali nitrogen, indicating that soil organic matter and alkali nitrogen content are more heterogeneous in space-time heterogeneity. Spatial and temporal heterogeneity of potassium is weak, which indicates that there is a significant spatial and temporal coupling relationship between planted *Haloxylon ammodendron* and soil nutrients in the arid desert areas.

Keywords: fertile island; *Haloxylon ammodendron*; enrichment rate; arid desert area

在干旱荒漠区植被—土壤生态系统中,研究灌木等植被引起的土壤养分的变化,对了解土壤养分动态变化,植被演替与种间竞争以及植被与土壤间的生态学效应有着积极的影响^[1]。灌木等植被通过拦截空气中的尘埃和自身凋落物及根部分泌等方式将灌丛周围的土壤养分向灌丛中心聚集,从而改变灌木周围土壤养分含量及结构的现象,称为灌丛“肥岛”效应^[2-3]。近年来,围绕“肥岛”效应的形成机制、作用机理及时空变化特征展开了大量研究^[4]。Fuhlendorf等^[5]认为灌木下“肥岛”效应的形成,对其自身的生存发展和恢复更新有着积极影响。也有研究表明干旱区“肥岛”形成和发展与灌木扩散之间存在着反馈效应^[6]。Schlesinger^[7]认为灌丛群落“肥岛”效应发展时间越长,土壤养分空间自相关越明显,反之越弱。因此“肥岛”效应被大量学者认为是天然草地退化以及干旱、半干旱环境荒漠化的重要标志^[8]。

目前,干旱荒漠区生态恢复主要通过人工营建以灌木为主的防风固沙植被^[9-10],而对于本就植被稀少、贫瘠缺水、风蚀严重的荒漠化地区的土壤环境,灌木植物的这种“肥岛”效应则可以通过自身和外界对土壤养分的积累使养分聚集到灌丛下,从而改变局部生态环境,使周围植物生物量、植物组成、植物化学成分、土壤资源的空间分布格局发生变化,使灌丛下土壤养分升高,进而促进草本植被生长,因此荒漠区灌丛“肥岛”效应是干旱荒漠区土壤养分高度异质性的表现,对于干旱荒漠区的植被恢复有着积极影响^[11-13]。梭梭(*Haloxylon ammodendron*)是一种典型的荒漠化灌木,多生长于干旱、半干旱地区,其由于具备良好的耐盐碱、耐干旱、防风固沙及改良土壤的特性,成为优良的干旱荒漠区防风固沙造林树种,并在我国干旱荒漠地带分布较广^[14-16]。因此本文选取乌兰布和沙漠西南缘不同发育年限人工梭梭防护林为研究对象,分析不同发育年限人工梭梭不同部位及

不同土层深度土壤养分含量差异及其根部及灌丛内外对土壤养分的富集程度,揭示不同林龄人工梭梭防护林土壤养分的“肥岛”效应强度,从而发现梭梭林下土壤养分时空演变趋势,旨在为干旱荒漠区人工梭梭防护林的合理建设及可持续发展,植被恢复及保护重建提供理论依据及科学支撑。

1 研究区概况

研究区选在内蒙古自治区阿拉善盟吉兰泰镇,位于乌兰布和沙漠西南缘,地理位置为 105°35′—105°46′E, 39°38′—39°49′N,海拔 1 030~1 474 m。该地区属于典型的大陆性干旱季风气候,年均气温 7.5~8.6℃,年均降水量为 117.1 mm,且年内分布多集中于 7—8 月份,年潜在蒸发量为 3 005.2 mm,该地区以西北风为主,年均风速 3.7 m/s,多年平均扬沙日数>30 d。该区具有典型荒漠植被特点,主要荒漠植物种有梭梭、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、白刺(*Nitraria tangutoum*)等灌木、半灌木以及芦苇(*Phragmites australis*)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula*)、沙米(*Agriophyllum pungens*)、沙蒿(*Artemisia renaria*)等草本植物。

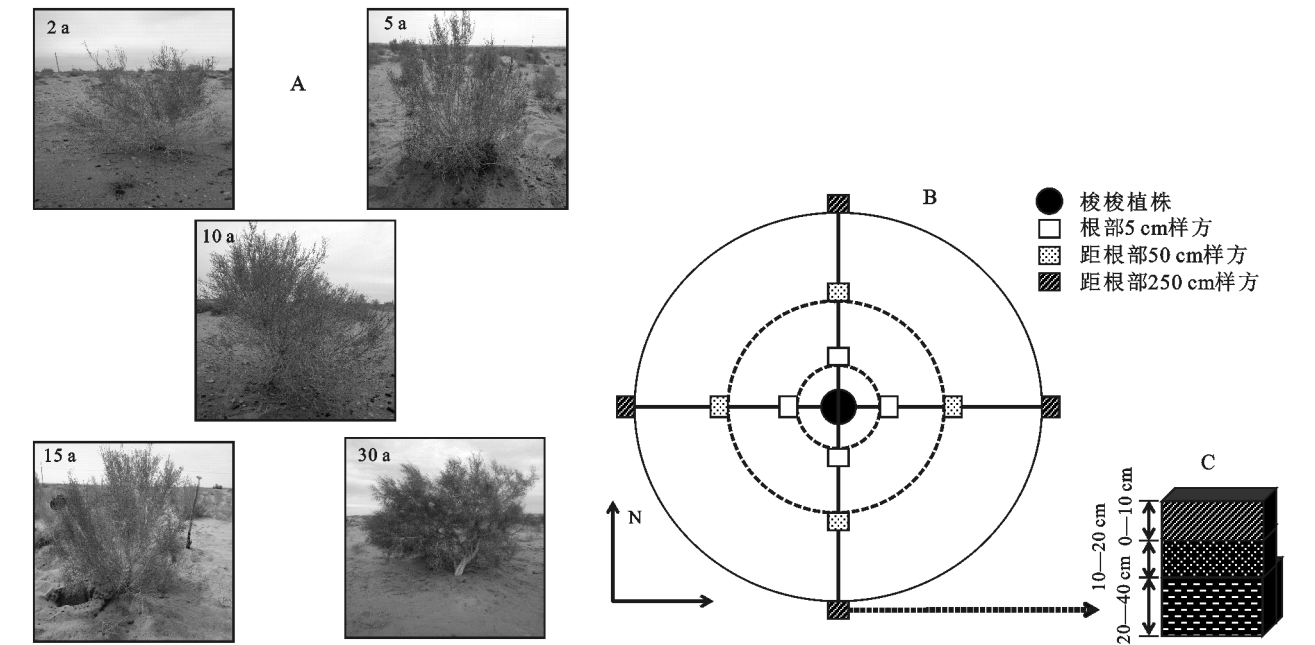
2 材料与方法

2.1 样地选取与土壤样品采集

试验于 2018 年 7 月初在研究区选择通过植苗建立的不同生长年限(2, 5, 10, 15, 30 a)人工梭梭林为研究对象。在每种发育年限梭梭林中分别建立 3 个 10 m×10 m 的研究样地,每个样地间隔 10 m。在每个样地内选取地形特征、冠幅、株高、基径等生长情况基本一致的 3 株梭梭,调查其生长指标,并对选好的梭梭以根部为中心按 5, 50, 150 cm 作为根部、灌丛内以及株间空地的取样位置,向外延伸进行土壤样品的采集(30 a 梭梭为 5, 50, 250 cm),每株梭梭均按东南西北 4 个方位

采集样品并混合成一个样品进行测定,每个方向设置取样点 3 个,每棵植株共设置采样点 12 个,每个采样点

按 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 土层深度进行取样(图 1)。取样梭梭生长发育状况见表 1。



注:A 不同营建年限梭梭;B 样方布设示意图;C 样方剖面示意图。

图 1 试验样地选取布设示意图
表 1 不同林龄人工梭梭的形态特征

| 种植年限/a | 株高/m | 基径/cm | 冠幅/m ² | 分枝数 | |
|--------|------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| | | | | 一级 | 二级 |
| 2 | 0.76±0.11a | 2.63±0.15a | 0.57±0.16a | 2.00±1.00a | 6.67±1.53a |
| 5 | 1.05±0.12b | 3.27±0.25ab | 1.30±0.20ab | 2.67±1.15a | 6.67±2.08a |
| 10 | 1.26±0.07c | 4.63±0.42b | 1.80±0.13b | 4.67±1.15ab | 13.67±2.52b |
| 15 | 1.80±0.07d | 10.43±0.81c | 3.33±0.69c | 6.33±2.08b | 16.33±2.08b |
| 30 | 3.45±0.10e | 14.50±1.11d | 18.06±0.60d | 6.33±2.52b | 22.67±5.03c |

注:不同小写字母代表不同林龄同一指标差异显著($p<0.05$)。

2.2 样品测定

土壤样品取回后在实验室内自然风干,除去残留的枯落物后,研磨过 2 mm 筛待测。土壤有机质(Organic matter)采用重铬酸钾外加热法测定,土壤碱解氮(Alkaline nitrogen)采用碱解扩散法测定,土壤速效磷(Available P)采用 NaHCO₃ 提取法测定,土壤速效钾(Available K)采用 NH₄OAc 浸提火焰光度法测定。

2.3 数据处理与分析

利用 Excel 对数据进行初步处理,数据分析在 SPSS 17.0 软件下进行,采用 Origin 2017 进行作图。人工梭梭根部、灌丛内、株间空地 3 个不同取样部位土壤养分含量差异、不同土层深度土壤养分含量差异和不同林龄人工梭梭同一取样部位土壤养分差异及其富集率差异均采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行比较;采用相关分析,分析人工梭梭土壤养分富集率与梭梭生长指标间的相关性。

利用富集率(enrichment ratio, E)来表征梭梭根

部及灌丛内土壤养分的富集程度^[17]。其中,植被根部土壤养分富集率分别为根部和株间空地土壤养分含量比值,表示为 $E_A=A/C$;灌丛内的土壤养分富集率分别为灌丛内和株间空地土壤养分含量比值,表示为 $E_B=B/C$,其中 A,B,C 分别为根部、灌丛内及株间空地土壤养分含量。

3 结果与分析

3.1 不同林龄人工梭梭土壤养分垂向分布特征

由图 2 可知,土壤有机质及速效养分含量在不同林龄梭梭根部均表现为 0—10 cm,10—20 cm 显著高于 20—40 cm。整体来看,0—10 cm 较 10—20 cm 土壤有机质平均高 65.6%,碱解氮平均高 71.3%,速效磷平均高 71.0%,速效钾平均高 25.1%,10—20 cm 较 20—40 cm 土壤有机质平均高 17.6%,碱解氮平均高 96.6%,速效磷平均高 71.8%,速效钾平均高 10.5%,0—10 cm 较 20—40 cm 土壤有机质平

均高 82.0%, 碱解氮平均高 228.2%, 速效磷平均高 172.7%, 速效钾平均高 39.0%。其中, 在 2, 5, 10 a 不同土层深度土壤有机质含量均表现出显著差异, 由大到小依次为 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm, 其余林龄梭梭根部土壤有机质含量在 0—10 cm 与 10—20 cm 没有显著差异; 灌丛内土壤有机质含量在 5 a 之后 0—10 cm, 10—20 cm 显著高于 20—40 cm, 其余林龄梭梭灌丛内土壤有机质含量均无显著差异; 株间空地土壤有机质含量除 2 a 和 30 a 各土层之间均表现出显著差异外, 其余林龄均为 0—10 cm, 10—20 cm 含量显著高于 20—40 cm 含量, 0—10 cm 含量与 10—20 cm 含量无显著差异。梭梭根部土壤碱解氮含量在 5 a 之前表现出 0—10 cm, 10—20 cm 显著高于 20—40 cm, 而 0—10 cm 与 10—20 cm 含量无显著差异, 在 5 a 之后各土层之间碱解氮含量表现出显著差异, 由大到小依次为 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm; 灌丛内和株间空地土壤碱解氮表现出相同的趋势, 均是在 10 a 和 30 a 各土层之间含量表现出显著差异, 其余林龄 0—10 cm 与 10—20 cm 碱解氮含量无显著差异。土壤速效磷含量在不同林龄梭梭(除 10 a)根部和灌丛内的各土层之间均表现出显著差异, 由大到小依次为 0—10 cm > 10—20 cm > 20—40 cm, 株间空地的土壤速效磷含量在 5 a 之前各土层之间存在显著差异, 在 5 a 之后则表现出 0—10 cm, 10—20 cm 显著高于 20—40 cm, 0—10 cm 与 10—20 cm 之间不存在显著差异。不同林龄梭梭根部土壤速效钾含量均表现出 0—10 cm 显著高于 20—40 cm, 灌丛内和株间空地的土壤速效钾含量无显著差异。

3.2 不同林龄人工梭梭土壤养分水平分布特征

如图 2 所示, 各土层土壤在 15~30 a 各取样部位均表现出显著差异性, 由大到小依次为根部 > 灌丛内 > 株间空地, 根部有机质、碱解氮、速效磷及速效钾分别比灌丛内高 30.8%, 196.7%, 22.5%, 56.4%, 灌丛内比株间空地分别高 38.0%, 15.6%, 8.3%, 10.6%。其余林龄各取样部位含量无显著差异。其中, 人工梭梭在 10 a 前, 表层(0—10 cm)土壤有机质含量均表现为株间空地 > 灌丛内 > 根部, 其中在 2 a 株间空地含量显著高于灌丛内和根部, 在 15 a 表现出根部含量显著高于灌丛内和株间空地, 灌丛内与株间空地含量差异不显著, 在 30 a 各取样部位均表现出显著差异性, 由大到小依次为根部 > 灌丛内 > 株间空地。其余林龄各取样部位含量无显著差异。10—20 cm 土层土壤有机质含量在 10 a 前根部与灌丛内无显著差异, 除 2 a 以外各林龄根部含量均显著高于株间空

地。20—40 cm 土层土壤有机质含量在 30 a 表现出根部与灌丛内显著高于株间空地, 其余林龄无明显规律; 土壤各土层碱解氮含量均在 15 a 之后表现出显著差异, 由大到小依次为根部 > 灌丛内 > 株间空地, 表层含量在 2 a 和 10 a 表现出根部显著低于株间空地, 在 5 a 根部显著高于株间空地, 10—20 cm 和 20—40 cm 土层碱解氮含量在 10 a 之前均表现出灌丛内低于根部与株间空地; 15 a 和 30 a 梭梭土壤速效磷含量在 0—10 cm 与 10—20 cm 土层中表现出根部 > 灌丛内 > 株间空地的变化趋势, 其中根部显著高于株间空地, 其余林龄表层土壤含量随距根部距离的增加养分增加, 10—20 cm 则表现出与表层相反的趋势。20—40 cm 除 30 a 根部与灌丛内含量显著高于株间空地以外, 其余林龄无明显规律; 各林龄梭梭土壤速效钾含量在 3 个土层中均表现出随距根部距离增加养分降低的趋势, 在 15 a 各土层土壤根部含量均显著高于灌丛内和株间空地含量, 而灌丛内与株间空地含量差异不显著。在 30 a 表层土壤速效钾含量显著高于灌丛内和株间空地, 其余土层无显著差异。

富集率是反映植被对土壤养分聚集程度的一种度量方式。由于各方面的影响, 不同林龄人工梭梭土壤基底值可能存在差异, 因此利用富集率这个相对指标对不同林龄人工梭梭土壤养分的富集程度进行比较。如图 3 所示, 根部土壤有机质、碱解氮富集率(除 5 a)均随营建年限增加而升高, 且在 10~30 a 有显著升高, 其中 5, 10 a 富集率较低, 其余林龄土壤富集率之间差异不显著。而速效磷和速效钾富集率均表现出 15 a 显著高于其他林龄的趋势, 且 10 a 的富集率最低。深层(0—10 cm, 10—20 cm)土壤根部有机质、碱解氮富集率均表现出 10~30 a 显著升高的趋势。各土层土壤速效磷、速效钾富集率均表现出 15 a 显著高于其他林龄的现象, 且均在 10 a 出现最低值; 如图 4 所示, 灌丛内表层土壤有机质、碱解氮富集率均表现出 15~30 a 显著高于其他林龄, 且在 10 a 最低。其中, 土壤有机质、碱解氮富集率均表现为 15~30 a 显著高于其他林龄的趋势。其中, 表层速效磷、速效钾富集率均表现出 10 a 显著低于其他林龄, 其他林龄富集率差异不显著, 其中, 5 a 富集率最高。速效磷、速效钾富集率在深层则表现出 15 a 和 30 a 显著高于其他林龄, 其他林龄无显著差异, 但富集率在 10 a 最低。除 2, 5 a 土壤有机质富集率与 2, 10 a 土壤碱解氮富集率根部低于灌丛内以外, 其余林龄各土壤养分根部富集率均大于冠幅内富集率, 说明林龄越高, 其根部养分富集率与冠幅内养分富集率差异越明显。

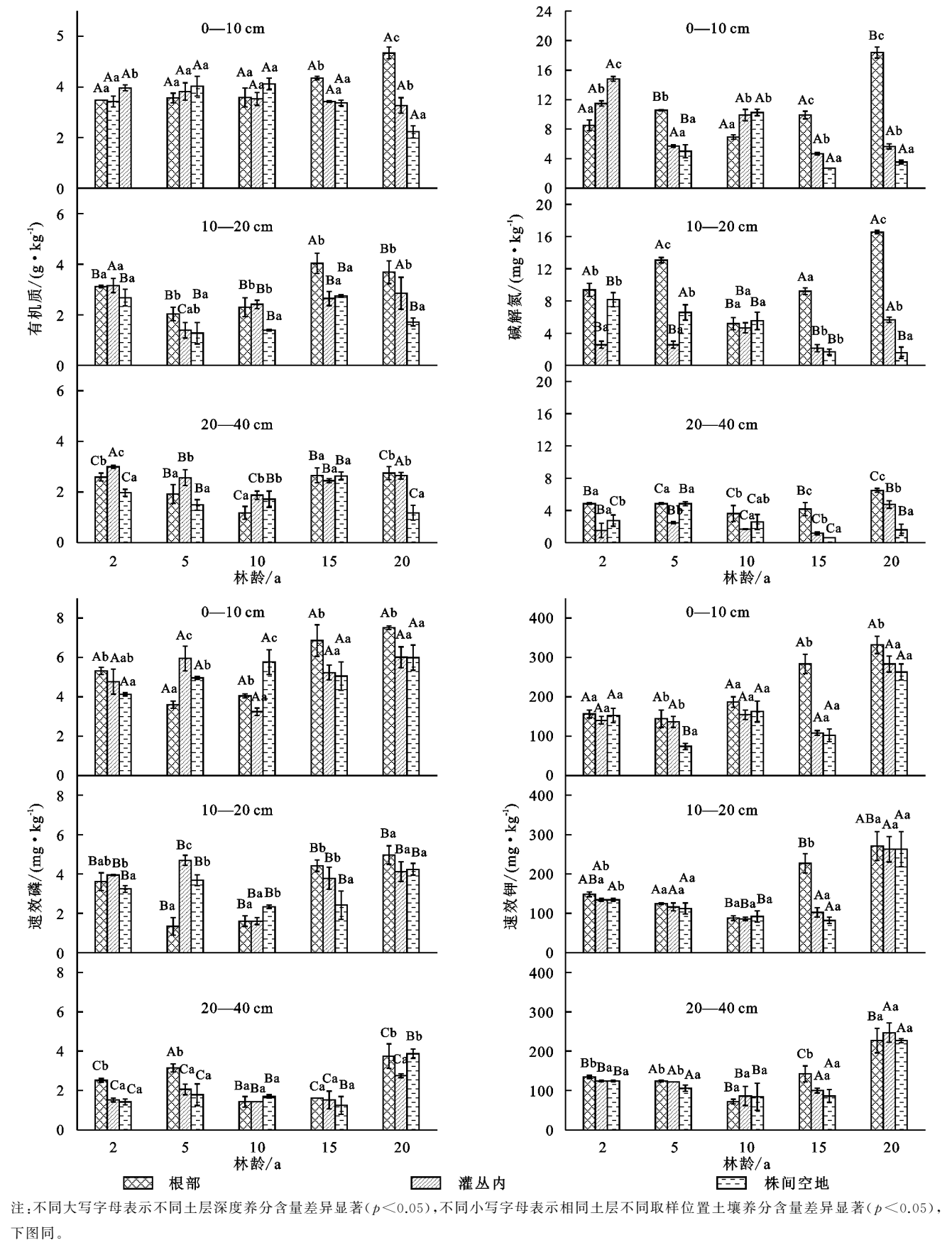


图2 不同林龄人工梭梭不同取样部位土壤养分差异

3.4 土壤养分富集率与梭梭生长发育指标的相关性

由表2可知,通过分析不同林龄梭梭土壤养分富集率及其生长发育指标相关关系发现,梭梭根部土壤

有机质富集率与基径、株高、冠幅均呈极显著的正相关关系($p<0.01$),灌丛内有机质富集率与基径、株高呈显著正相关关系($p<0.05$),与冠幅呈极显著正相关关系($p<0.01$),根部碱解氮富集率与基径、株高呈

显著正相关关系($p<0.05$),与冠幅无显著关系($p>0.05$)。灌丛内碱解氮富集率与梭梭各生长指标间均无显著关系。速效磷、速效钾根部与灌丛内富集率与梭梭各生长指标间均无显著关系。

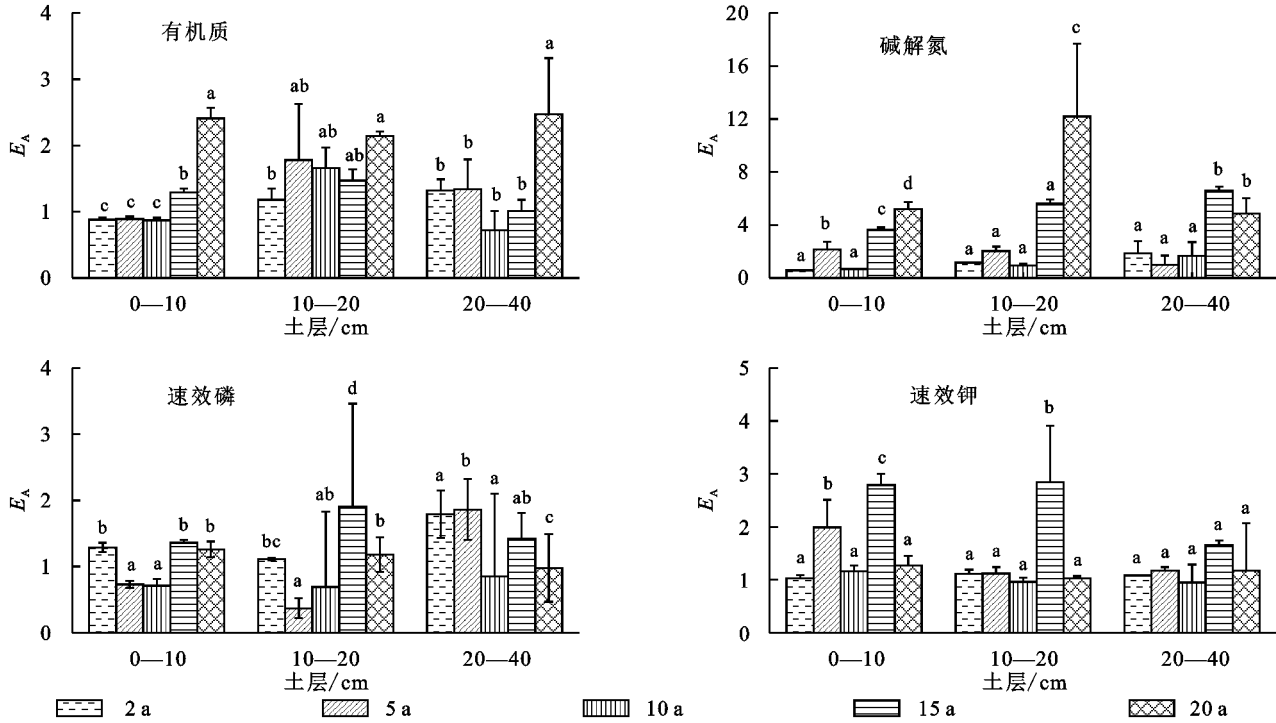


图 3 不同林龄人工梭梭根部土壤养分富集率比较

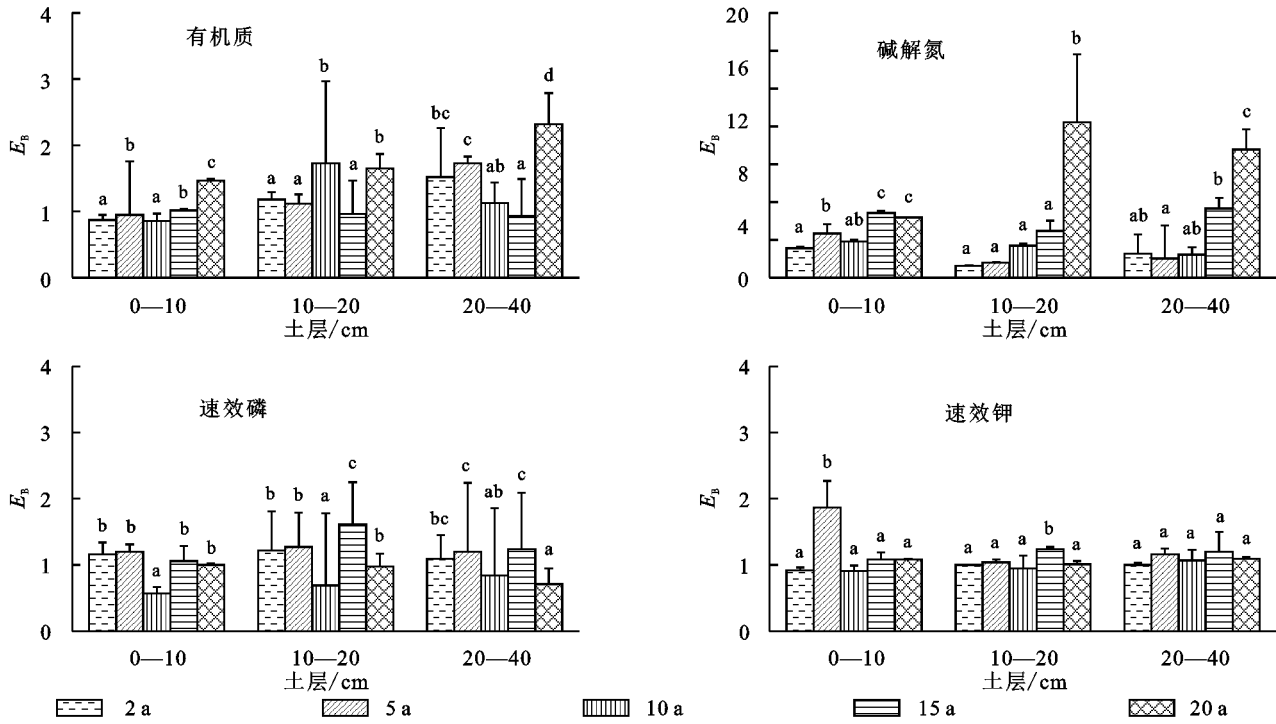


图 4 不同林龄人工梭梭灌丛内土壤养分富集率比较

4 讨论

4.1 人工梭梭土壤养分空间分布特征

土壤养分的空间分布特征能够反映土壤养分与

环境因子间的关系,在土壤—植被系统中,植被生长发育状况与植被分布情况与土壤养分空间变异情况密切相关^[17]。本研究对吉兰泰地区不同营建年限梭梭林下土壤养分的空间变异性进行研究,结果表明:

在垂直方向上,不同种植年限梭梭土壤有机质以及能被植物吸收的速效养分含量均表现为表层土壤养分高于深层,且根部各土层之间差异更为显著($p < 0.05$),这与张珂等^[18]对荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭土壤化学计量特征的研究中不同林龄土壤养分垂直分布特征的结果基本一致。这说明叶子的分泌物以及植物枯落物等在灌丛下的聚集会使小部分养分随径流与雨水渗透到下层土壤中,而大部分则保存在表层土壤中^[19-20]。因此,表层土壤更容易积累较高的养分,且由于灌木拥有较大的冠幅,其较好的防风固沙作用也有效防止灌丛下表层土壤养分风蚀的损耗,使大量的枯枝落叶得以保留在灌丛下,大大提高了养分在灌丛下土壤表层储存的可能,因此,土壤表层的土壤养分含量相对较高,是土层中最肥沃的部分^[21]。

表 2 土壤养分富集率与人工梭梭生长指标的相关性

| 土壤性质 | 富集率 | 基径 | 株高 | 冠幅 |
|------|-------|----------|----------|----------|
| 有机质 | E_A | 0.927 ** | 0.984 ** | 0.987 ** |
| | E_B | 0.895 * | 0.971 * | 0.984 ** |
| 碱解氮 | E_A | 0.933 * | 0.905 * | 0.839 |
| | E_B | 0.869 | 0.739 | 0.593 |
| 速效磷 | E_A | 0.539 | 0.389 | 0.362 |
| | E_B | -0.042 | -0.079 | -0.023 |
| 速效钾 | E_A | 0.24 | 0.008 | -0.175 |
| | E_B | -0.253 | -0.175 | -0.158 |

注: * 表示显著相关($p < 0.05$), ** 表示极显著相关($p < 0.01$)。

在水平方向上,人工梭梭根部、灌丛内、株间空地的养分含量存在显著差异。2~10 a 的梭梭表层土壤有机质与碱解氮含量基本均表现为株间空地>灌丛内>根部,深层含量则为根部高于株间空地,土壤速效磷、速效钾均在 15 a 和 30 a 表现出根部显著高于株间空地的趋势。从整体来看,在 15 a 和 30 a,梭梭各土层土壤有机质及速效养分含量均表现为根部>灌丛内>株间空地,说明梭梭在 10 a 后对土壤养分的富集作用趋于明显,即距根部由远及近土壤养分逐渐增加的趋势趋于明显,在 10 a 后表现出显著的富集效应。由于梭梭在 2~10 a 植被生长缓慢,相对于 10 a 后植物形态来说,其冠幅,株高,基径均较小,导致枯落物较少,从而使养分在灌丛内积累较少^[5,22]。而 10 a 后植物生长旺盛,其基径、株高、冠幅的增长有利于其对土壤风蚀物质、降尘和凋落物等的截获,并通过发达的根系以根际沉积的方式将大量的养分输入到土壤中,从而形成良好的根际富集效应,冠幅的增长也大大减弱了由风蚀导致的土壤养分的损耗,致使根部养分较高^[23]。而这与 Wezel 等^[24]对尼日尔荒

漠草原休耕地的变化一致,其研究表明至少要花 15 a 的时间才能探测到灌木下与株间空地土壤养分水平的明显变化。Schlesinger^[7]研究发现,灌丛群落平均年龄越大,即其对土壤养分的富集作用时间越长,土壤养分的空间自相关越明显。因此,灌木对土壤养分的富集效应的形成与发育是一个长期过程,不仅与多种生物非生物因子有关,与时间也有必然关联。

4.2 人工梭梭土壤养分时间分布特征

土壤养分是具有高度变异性的时空连续体,植物的生长发育时间是影响土壤养分累积的重要因素之一^[25]。对不同营建年限人工梭梭土壤养分的研究结果表明:不同林龄人工梭梭之间的土壤养分富集率存在显著差异,整体表现为 15,30 a 土壤有机质及速效养分富集率显著高于其他林龄,但均在 10 a 出现富集率最低值,且根部养分富集率大于灌丛内养分富集率。这说明,人工梭梭根部养分“肥岛”效应强于灌丛内养分“肥岛”效应,且表层的“肥岛”效应更为明显。而在 10 a 出现较低的富集率的现象,是由于 5~10 a 为梭梭生长旺盛期,所需养分较大,而植被枯落物残体的分解和累计过程发生在人工梭梭建立 20 年以后^[26]。这与刘耘华等^[27]对北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究中所得出的结果基本一致,但与孙特生等^[28]对黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分动态特征的研究结果存在差异,这可能是由于研究区域的地理位置及生态环境的差异而导致,有研究表明,一些土壤化学属性在不同的研究区域会得到不同的研究结果,说明灌木下土壤资源的空间分布特征与研究区的具体环境有关^[21,29],体现了对乌兰布和沙漠西南缘人工梭梭土壤养分时空演变趋势研究的重要性。

从土壤养分富集率与梭梭生长发育指标间的相关关系可以发现,除土壤根部、灌丛内有机质富集率和根部碱解氮富集率均与植株基径、株高和冠幅显著相关以外,其余养分各部位富集率均与梭梭各生长发育指标无显著相关关系。其中,土壤根部、灌丛内有机质富集率及土壤根部碱解氮富集率均表现出表层(0—10 cm,10—20 cm)随着林龄的增加明显增长的趋势,深层则表现出先升高后降低的趋势(图 5)。这可能是由于土壤有机质、碱解氮除受土壤母质的影响外,还受到枯落物分解及植物吸收利用的影响,因此存在较大的时空异质性,而磷、钾主要受土壤风化影响,而土壤风化是一个较漫长的过程,且土壤速效磷、速效钾极易被植物吸收,从而使土壤中含量变异性较小^[30]。

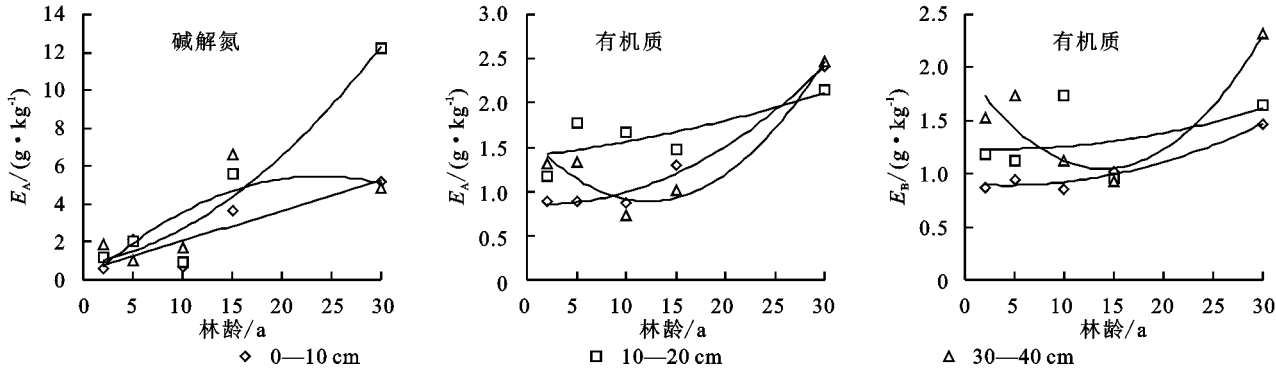


图 5 土壤养分富集率随时间变化趋势

表 3 土壤养分含量随时间变化趋势

| 变量 | 土层/cm | 线性方程 | R^2 |
|-----------|-------|------------------------------|--------|
| 有机质 E_A | 0—10 | $y=0.002x^2-0.0072x+0.8634$ | 0.9868 |
| | 10—20 | $y=0.0004x^2+0.0132x+1.3935$ | 0.5950 |
| | 20—40 | $y=0.005x^2-0.1211x+1.6247$ | 0.9498 |
| 有机质 E_B | 0—10 | $y=0.0009x^2-0.0071x+0.9047$ | 0.9669 |
| | 10—20 | $y=0.0005x^2-0.0034x+1.2372$ | 0.2254 |
| | 20—40 | $y=0.0048x^2-0.1339x+1.978$ | 0.8730 |
| 碱解氮 E_A | 0—10 | $y=0.0001x^2+0.155x+0.4888$ | 0.7868 |
| | 10—20 | $y=0.0098x^2+0.0916x+0.8012$ | 0.9458 |
| | 20—40 | $y=-0.01x^2+0.4761x-0.2074$ | 0.5924 |

综上所述,梭梭灌丛下的土壤养分空间分布特征、不同生境间的土壤养分富集率以及不同林龄间的“肥岛”效应强弱差异均可以反映出不同林龄人工梭梭对养分的利用机制及其时空演变趋势。而在风沙作用强烈的干旱荒漠区,植株拦截沙尘导致地表细颗粒富集,植物冠幅周围地表颗粒的变化是否影响养分分布本文未涉及到,因此,风沙作用与土壤养分空间分布间的耦合性还亟待研究。

5 结论

- (1) 不同林龄人工梭梭土壤养分表现出显著的成层化分布特征,且表层土壤养分显著高于深层土壤,土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾均比深层平均高 82.0%,228.2%,172.7%,39.0%,表层的养分积累优于其他土层,说明土壤中的大部分养分是从灌丛枯落物及风蚀拦截的物质中获得。
- (2) 不同林龄人工梭梭下土壤水平方向的养分含量均在 15~30 a 表现为根部>灌丛内>株间空地,各林龄均表现出根部“肥岛”效应强于灌丛内,在 15 a 后土壤养分“肥岛”效应强于低林龄人工梭梭林,而在 10 a 左右为梭梭生长旺盛,养分需求量大,养分富集能力较弱。
- (3) 通过对土壤养分富集率与生长指标进行相关分析,发现人工梭梭下主要受母质、枯落物等影响的土壤有机质、碱解氮含量时空异质性较明显,且有

机质时空异质性最明显,而主要受风沙作用影响的土壤速效磷、速效钾含量时空异质性较弱。

参考文献:

[1] 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.

[2] West C N E. Plant-induced soil chemical patterns in some shrub-dominated semi-desert ecosystems of Utah[J]. Journal of Ecology, 1975,63(3):945-963.

[3] Reynolds J F, Virginia R A, Kemp P R, et al. Impact of drought on desert shrubs: effects of seasonality and degree of resource island development[J]. Ecological Monographs, 1999,69(1):69-106.

[4] 刘建军,陈海滨.秦岭火地塘林区主要树种根际微生态系统土壤性状研究[J].水土保持学报,1998,4(3):52-56.

[5] Fuhlendorf S D, Engle D M. Restoring heterogeneity on rangelands: Ecosystem management based on evolutionary grazing patterns[J]. Bioscience, 2001,51(8):625-632.

[6] 熊小刚.内蒙古半干旱草原灌丛化过程中小叶锦鸡儿引起的土壤碳、氮资源空间异质性分布[J].生态学报, 2005,25(7):1678-1683.

[7] Schlesinger W H. On the spatial pattern of soil nutrients in desert eco-systems[J]. Ecology, 1996,77(2):364-374.

[8] Stock W D, Lewis O A M. Soil nitrogen and the role of fire as a mineralizing agent in a South African coastal fynbos ecosystem[J]. Journal of Ecology, 1986,74(2): 317-328.

[9] 陈斌.干旱区立地条件与植物群落组成结构特征[D].南京:南京大学,2010.

[10] 李新荣,回嵘,苏洁琼,等.中国干旱区恢复生态学研究进展及趋势评述[J].地理科学进展,2014,33(11): 1435-1443.

[11] Garner W, Steinberger Y. A proposed mechanism for the formation of fertile islands in the desert ecosystem[J]. Journal of Arid Environments, 1989,16(3):257-262.

[12] Robertson G P, Crum J R, Ellis B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance

- [J]. *Oecologia*, 1993, 96(4): 451-456.
- [13] 陈广生, 曾德慧, 陈伏生, 等. 干旱和半干旱地区灌木下土壤“肥岛”研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2295-2300.
- [14] 刘乃君. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质的影响[J]. *土壤通报*, 2008, 39(6): 1480-1482.
- [15] 席军强, 杨自辉, 郭树江, 等. 人工梭梭林对沙地土壤理化性质和微生物的影响[J]. *草业学报*, 2015, 24(5): 44-52.
- [16] 黄丕振. 人工梭梭林的生态效益和经济收益[J]. *干旱区研究*, 1987(4): 16-20.
- [17] 李旭, 王海燕, 丁国栋, 等. 华北土石山区森林土壤养分空间变异研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 136-142.
- [18] 张珂, 苏永中, 王婷, 等. 荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3235-3243.
- [19] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in Savannas[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 517-544.
- [20] 刘发民, 金燕, 张小军. 梭梭林“肥岛”效应的初步研究[J]. *干旱区资源与环境*, 1999(3): 86-88.
- [21] Scottwendt J, Chase R G, Hossner L R. Soil chemical variability in sandy ustalfs in semiarid Niger, West Africa[J]. *Soil Science*, 1988, 145(6): 414-419.
- [22] Whitford W G, Anderson J, Rice P M. Stemflow contribution to the ‘fertile island’ effect in creosotebush, *Larrea tridentata* [J]. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(3): 451-457.
- [23] 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[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(7): 802-806.
- [24] 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.
- [25] 张晗, 赵小敏, 朱美青, 等. 近 30 年南方丘陵山区耕地土壤养分时空演变特征: 以江西省为例[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 58-65.
- [26] 董志玲. 干旱荒漠区人工梭梭林土壤碳氮储量分布规律及影响因子研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014.
- [27] 刘耘华, 杨玉玲, 盛建东, 等. 北疆荒漠植被梭梭立地土壤养分“肥岛”特征研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3): 545-554.
- [28] 孙特生, 李文彦, 刘继亮. 黑河中游荒漠绿洲人工梭梭土壤养分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(5): 179-185.
- [29] 裴世芳, 傅华, 陈亚明, 等. 放牧和围封下霸王灌丛对土壤肥力的影响[J]. *中国沙漠*, 2004, 24(6): 103-107.
- [30] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N, P 的化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- ~~~~~
- (上接第 70 页)
- [35] Martínez J A, Armesto J J. Ecophysiological plasticity and habitat distribution in three evergreen sclerophyllous shrubs of the Chilean matorral[J]. *Acta Oecologica: Oecologia Plantarum*, 1983, 4(3): 211-219.
- [36] Kohler J, Caravaca F, Roldán A. Effect of drought on the stability of rhizosphere soil aggregates of *Lactuca sativa* grown in a degraded soil inoculated with PGPR and AM fungi[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 42(2): 160-165.
- [37] Hammer E C, Rillig M C. The influence of different stresses on glomalin levels in an arbuscular mycorrhizal fungus—salinity increases glomalin content[J]. *PLoS One*, 2011, 6(12), DOI: 10.1371/journal.pone.0028426.
- [38] 李勇, 黄小芳, 丁万隆. 根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响[J]. *华北农学报*, 2008, 23(S1): 182-186.
- [39] 廖德华, 刘俊丽, 刘健健, 等. 植物激素响应和调控丛枝菌根共生研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1679-1689.
- [40] 刘永俊. 扰动对 AM 真菌群落影响及机制研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [41] 李雪静, 徐天乐, 陈保冬, 等. 荒漠和草原生态系统丛枝菌根真菌多样性和群落结构[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(10): 2734-2743.
- [42] 王建, 周紫燕, 凌婉婷. 球囊霉素相关土壤蛋白的分布及环境功能研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 634-642.
- [43] Wright S F, Upadhyaya A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Plant & Soil*, 1998, 198(1): 97-107.
- [44] 韩炜, 李自峰, 郑黎明, 等. 黄土丘陵区不同坡向柠条林地土壤水分动态研究[J]. *山东林业科技*, 2007(3): 3-5.
- [45] 马祥华, 焦菊英. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植被特征及其与土壤环境的关系[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 15-22.