

Changes of Soil Physical and Chemical Properties during the Process of *Artemisia* Vegetation Establishment in the Semi-Arid Sandy Land

Peipei Sun^{1,2}, Chaoju Qian¹, Xiaoyue Yin^{1,2}, Xingke Fan^{1,2}, Jin Wang^{1,3}, Xia Yan^{1,4}, Xiaojun Li^{1,3}, Xiaofei Ma^{1*}, Tao Wang⁵

¹Key Laboratory of Adversity Physiology and Ecology of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Shapotou Desert Research and Experiment Station, Northwest Institute of Eco-Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

⁴Key Laboratory of Ecology and Hydrology of Inland River Basin, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

⁵Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu

Email: sunpp2017@163.com, *maxiaofei@lzb.ac.cn

Received: Jun. 8th, 2019; accepted: Jul. 2nd, 2019; published: Jul. 9th, 2019

Abstract

The ecological restoration of sandy land in semi-arid areas is one of the main battlefields for the construction of ecological civilization in China, which has been remarkable in recent decades. Unfortunately, previous studies were limited to reflecting the effect of ecological restoration through indicators, such as vegetation coverage and species richness while ignoring the systematic study of the changes in soil physical and chemical properties in the early stage of vegetation restoration succession. In this study, the communities of *Artemisia ordosica*-*Artemisia halodendron* at the early stage of ecological restoration in the typical semi-arid sandy land of Horqin sandy land and Mu Us sandy land were selected to investigate the changes of the physical and chemical properties of biological soil crust at different development levels. The results showed that the physical and chemical properties of soils under different development degrees in the two sandy had the following laws: 1) The value of total carbon, total nitrogen, water content and electrical conductivity were all expressed as moss crusts > algae crusts > physical crusts > mobile sand. 2) The value of total phosphorus expressed as moss crusts > algae crusts > mobile sand > physical crusts. 3) pH values did not change significantly among the four development stages. The changes of physical and chemical properties of soil at different developmental levels in the soil depth are as following: 1) In the early stage of soil development, the content of total nitrogen and total carbon increased with the increase of depth. At the later stage of soil development, the content of total nitrogen and total carbon decreased with the increase of depth. 2) The conductivity and total phosphorus showed gradual decrease with the increase of depth. These results provide an important reference for us to understand the laws of soil evolution during the construction of semi-arid sandy vegetation.

*通讯作者。

Keywords

Semi-Arid Area, Physical and Chemical Properties, Vegetation Construction, Sandy Soil

半干旱沙地蒿类植被建成过程中土壤理化性质变化规律

孙沛沛^{1,2}, 钱朝菊¹, 尹晓月^{1,2}, 范兴科^{1,2}, 王进^{1,3}, 燕霞^{1,4}, 李小军^{1,3}, 马小飞^{1*}, 王涛⁵

¹中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃省逆境生理生态重点实验室, 甘肃 兰州

²中国科学院大学, 北京

³中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙坡头沙漠研究试验站, 甘肃 兰州

⁴中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃 兰州

⁵中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州

Email: sunpp2017@163.com, *maxiaofei@lzb.ac.cn

收稿日期: 2019年6月8日; 录用日期: 2019年7月2日; 发布日期: 2019年7月9日

摘要

半干旱区沙地生态恢复是我国生态文明建设的主战场之一, 最近几十年来生态恢复成绩显著, 但遗憾的是, 之前的研究多局限于通过植被覆盖率和物种丰富度等指标反映生态恢复的效果, 而忽视了植被恢复演替早期阶段土壤理化性质变化规律的系统研究。本研究选取了典型的半干旱沙地科尔沁沙地和毛乌素沙地生态恢复早期阶段的建群种油蒿-差巴嘎蒿群落, 调查了不同发育程度的生物土壤结皮理化性质的变化规律。结果表明: 两沙地中土壤随植被建成下理化性质变化规律为: 1) 总碳、总氮、含水率和电导率均表现为藓类结皮 > 藻类结皮 > 少量物理结皮 > 流动沙丘; 2) 全磷表现为藓类结皮 > 藻类结皮 > 流动沙丘 > 少量物理结皮; 3) pH值从流动沙丘到藓类结皮的整个过程中变化不显著。土壤理化性质随土层深度的变化规律为: 1) 总氮和总碳的含量变化分别为发育前期: 中层和底层 > 表层, 发育后期: 中层和表层 > 底层; 2) 电导率和全磷含量则表现为随着深度的增加而逐渐降低。这些结果为我们理解半干旱沙地植被建成过程中的土壤演化规律提供了重要参考。

关键词

半干旱区, 理化性质, 植被建成, 沙地土壤

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

植被群落演替是土壤质量条件改善和生态环境恢复的有效途径之一[1][2]。研究表明, 在受干扰条件

下发生次生演替的地区,其特征变化主要是由植被覆盖度、群落组成、生物量、土壤水分和土壤可蚀性等因素所决定[3]。随着演替的进行,植被群落的多样性和组成的变化通常会进一步引起土壤理化性质的改变,即植物凋落物的分解和根系分泌物会通过将碳(C)和氮(N)等元素输入土壤中,从而导致土壤性质的改变[4]。通过对植被多样性保护的效果及环境的影响分析,不仅能够为生态环境保护和干旱半干旱区资源的可持续利用提供依据[5],而且对了解植被群落动态演替过程对土壤理化性质变化有着至关重要的作用[6]。前期一些研究表明,在排除人为干扰的情况下,植物次生演替对于改善土壤条件和生态环境恢复起了很大的作用,这对退化土地的修复具有积极的意义[7][8]。

已有大量的文献阐述了土壤性质和组成随着植物群落演替变化而变化的生态机制,认为次生演替可以增强土壤的养分和肥力,这与植被恢复和微生物的作用紧密相关[9][10][11],为土壤理化性质的变化创造了条件。例如,郭轶瑞等[12]对科尔沁沙地不同沙丘典型灌丛下结皮发育及结皮下表层土壤特性进行了初步研究,已得到半固定沙丘和半流动沙丘部分灌丛下发育的物理结皮、藻、地衣及苔藓结皮中部分理化指标的变化规律。李新荣等[13]对沙漠地区土壤结皮进行了相关的研究,并以此建立了防沙固沙的全新模式和理论。这些研究,为我们研究半干旱区沙地植被群落演替过程中土壤理化性质的变化提供了丰富的知识和方法,积累了较多的经验,但是这类研究大都只关注于某种土壤类型或深度而并未注重整个植被群落演替序列中土壤理化性质的变化,特别是关于半干旱区建群种蒿类植被演替过程中土壤理化性质的系统性研究较少。事实上,蒿类植被是从流动沙丘到固定沙丘土壤演化早期非常关键的植被类型,已经从一年生草本(沙米等)向多年生木本植物群落阶段的转变。蒿类作为固沙先锋植物,存在于从沙丘到藓藻类土壤结皮发育的完整过程中,并常常作为荒漠群落演替阶段的关键指示植物[14][15],研究其根部土壤理化性质演替变化具有很强的代表性。此外,油蒿和差巴嘎蒿是分布于半干旱沙区的两个姊妹种,因而生境差异很小,做这种对比,最重要的是能归纳出半干旱沙地植被稳定恢复早期阶段的土壤理化共性。

本研究主要以半干旱区沙地不同演替阶段纯油蒿-差巴嘎蒿植被群落为研究对象,包括流动沙丘、少量物理结皮、藻类结皮和藓类结皮的土壤类型(图1),这样设计实验,以往的研究相比,主要有以下优势:1) 研究半干旱区单一植被建成对土壤的影响,相较于之前的研究,对于揭示植物对土壤理化指标的影响机制更有意义;2) 对不同地理位置的沙地土壤,以不同发育过程下阶段性样品进行取样,摒弃了之前研究中仅对某一阶段下的研究,这样能够对半干旱区植被建成下的土壤理化性质变化规律进行全面的诠释。通过深入研究其土壤理化性质变化情况,旨在解决以下科学问题:1) 半干旱区沙地植被恢复演替过程不同深度土壤的理化性质变化规律如何?2) 随着土壤演替的进程,不同理化性质指标间其变化规律是否存在相关性?3) 不同沙地相同植被群落演替阶段下土壤理化性质的变化是否存在共性?

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

此研究地点选取在科尔沁沙地(宝古图旅游沙漠,43°11'11.1336"N,120°38'20.9796"E)和毛乌素沙地(乌审旗,38°27'7.62"N,108°42'17.7"E)的部分区域,依照油蒿-差巴嘎蒿群落恢复过程中土壤发育各个阶段进行取样。

科尔沁沙地地跨内蒙古、辽宁和吉林三个省(区)的26个县(旗、市),432个乡(镇、苏木)[16],科尔沁沙地地势起伏广阔,西边高东边低,南北高中间低,海拔约1200~1500 m。地表为沙丘与沙质草甸交错分布,与沙漠的地貌景观比较类似。科尔沁沙地属于温带半干旱、半湿润大陆性季风气候区,年平均气温3℃~7℃,最冷月(1月)平均气温-12℃~-17℃,最热月(7月)平均气温20℃~24℃,≥10℃的积温2200℃~3200℃,无霜期90~140 d,年均降水量350~500 mm,其中70%集中于夏季,冬春季节相当干燥,特别

是春季,大部分地区降雨量几乎为零;年蒸发量 1500~2500 mm,干燥系数 1.0~1.8;年平均风速 3.4~4.4 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,春季平均风速 4.2~5.9 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $\geq 5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 起沙风日每年出现 210~310 d,最高甚至可达 330 d;每年 $\geq 17.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风日数 25~40 d,其中沙暴天气 10~15 d,主要出现于春季。沙区的地带性土壤类型为栗钙土、黑钙土和栗褐土。由于土地沙漠化,地带性土壤正在向风沙土演变[17]。

毛乌素沙地是我国四大沙地之一,位于鄂尔多斯高原东南部和陕北黄土高原以北的洼地,在 37°30'~39°35'N, 106°21'~111°30'E 之间,海拔 1000~1600 m,南北长 220 km,东西宽 100 km,总面积 13.99 万 km^2 。包括内蒙古鄂尔多斯南部、陕西榆林地区的北部和宁夏黄河以东地区,沙化土地面积达 6.33 万 km^2 。沙区境内的梁地主要是白垩纪红色和灰色砂岩,大部分顶面平坦。第四纪沉积物具明显沙性,松散沙层经风力搬运,形成易动流沙。沙区年均温 6.0℃~8.5℃,年降水量 250~440 mm,集中于 7~9 月,占全年降水 60%~75%。降水年际变率大,多雨年为少雨年的 2~4 倍,常发生旱灾和涝灾,且旱多于涝。夏季常降暴雨,又多雹灾。沙地东部年降水量达 400~440 mm,西北部为 250~300 mm [18]。

从以上研究区概况发现,科尔沁沙地相较于毛乌素沙地,地理位置差别较大;年降雨量较高,雨量较集中,蒸发量大;年平均气温较低;沙地土壤类型有区别。这些因素就使得对土壤的理化性质产生不同的影响。

2.2. 样品采集

实验研究所需的土壤样品分别从科尔沁沙地(宝古图沙漠公园, 43°11'N, 120°38'E)和毛乌素沙地(乌审旗, 38°27'N, 108°42'E)采集,根据发育的不同阶段,依次选取了次生演替过程中四个典型的土壤发育阶段(图 1):流动沙丘(无结皮)(S1),少量物理结皮(S2),藻类结皮(S3)和藓类结皮(S4)四种演替过程中不同发育程度的土壤类型[9]。在所选的土壤类型下选取面积为 20 × 20 cm 的样方,运用采样器分别在两沙丘类型的土壤中采集了深度为 0~10 cm 的土壤,其中 0~2 cm 的标为表层土,2~10 cm 的标为底层土;而对于有结皮的土壤类型,同样采集了 0~10 cm 深度的土样,不同的是,由于结皮的存在,所以划分为三层:0~1 cm 的标为表层土,1~3 cm 的标为中层土,3~10 cm 的标为底层土,共 30 个土壤样品。将所取得土样立即放入-80℃的冰箱里保存,运回实验室用于测定土壤理化性质。



Figure 1. Soil sampling at various sites during secondary succession
图 1. 次生演替过程中各个研究点土壤取样的照片

2.3. 数据分析

在测定土壤理化性质的过程中,将采集的样品一部分用直径为 0.5 mm 的筛网筛分用于含水率(%)和 pH 值(土:水 = 1:2.5)等理化性质的测量;另一部分用 0.2 mm 的筛网筛分用于总碳(TC, g/kg)、总氮(TN, g/kg)、全磷(P_2Q_5 , g/kg)和电导率(土:水 = 1:5, us/m)等理化性质的测定。采用 1:5 (w:v 重量:体积)的水溶液

测定电导率；用 pH 计测 1:2.5 的水溶液记为 pH 值[19]；总氮采用凯氏定氮仪(KDY-9830)进行测定；采用 C/N 分析仪(LECO Truspec, MI, USA)测定土壤总碳。对所获得的理化性质数据，运用 SIMCA 13.0 软件[20]进行统计分析。

3. 结果与讨论

3.1. 不同沙地植物群落演替过程中土壤理化性质的变化规律

随着次生演替的进程，各个阶段土壤样品的理化性质测定结果图 2 所示：在半干旱沙地土壤中，随着植物群落演替的进行，总氮(TN)和总碳(TC)的含量变化相似，均随着演替的进行，含量从 S1 到 S4 时期逐渐增加(图 2(a)和图 2(b))，说明油蒿或差吧嘎蒿群落植被建成，能够有效固定沙土不被风蚀[21]，易于土壤养分的增加。全磷(P₂Q₅)的含量随着演替的进行，从 S1 时期到 S2 时期呈降低趋势，随后逐渐增加(图 2(c))，这一结果与别人的研究结果有差异[12]，可能的原因是流动沙丘中由于无植被的干扰，土壤中的全磷含量保持恒定，而当蒿类植被逐渐建成初期，增加了以磷为主要营养源的微生物种类和数量[22]，导致蒿类植被建成初期土壤中全磷的含量较流动沙丘中的有降低趋势，但随着植被稳定和土壤演替成熟，微生物对凋落物的分解及结皮的形成，使得演替后期全磷含量逐渐提升，说明蒿类植被群落建成能够增加土壤中全磷的含量。电导率和含水率的变化规律与总碳总氮的变化相似，均随着演替的进行逐渐升高(图 2(d)和图 2(e))，这也印证了半干旱沙地土壤含水率的变化范围规律[23]；而 pH 值在整个演替过程中，虽然中期有点降低，但总体变化不明显(图 2(f))，这与之前研究其它不同类型土壤的演替过程结果相似[24][25][26]，表明在单一物种蒿类植被建成过程中，沙地土壤 pH 不会随着时间的推移而变化。比较不同沙地土壤发育同一阶段的数据，可以得出两个沙地土壤理化性质的变化规律基本一致。

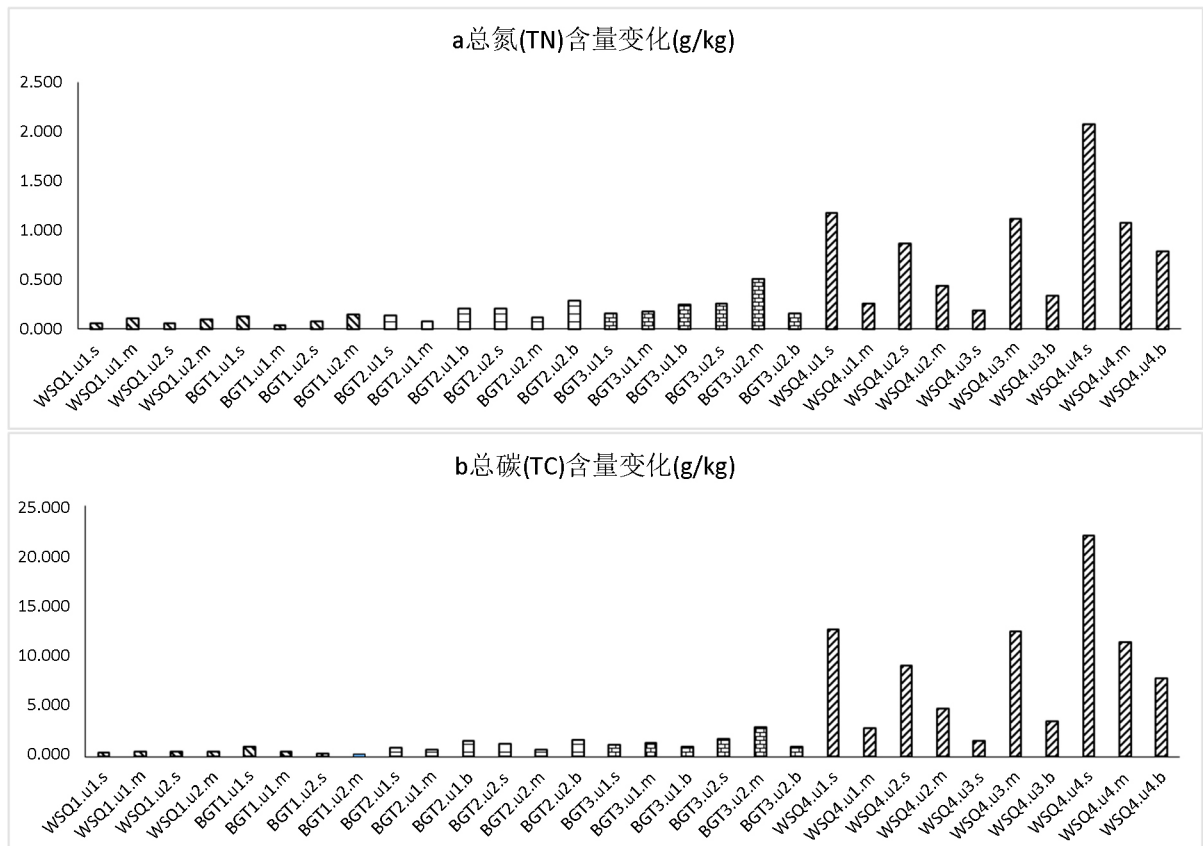


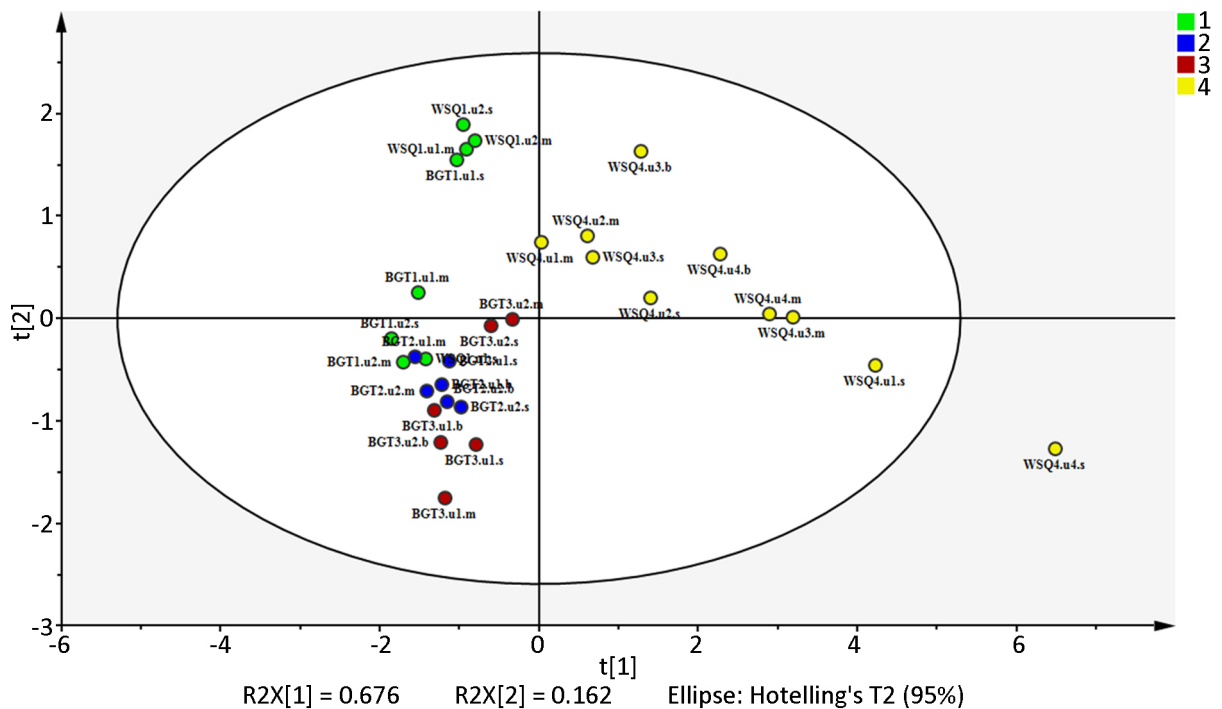


Figure 2. Changes in soil physical and chemical properties with succession
图 2. 土壤理化性质随着演替进程的变化

3.2. 不同演替阶段与不同采样深度下土壤理化性质的变化规律分析

3.2.1. 不同演替阶段下土壤理化性质的变化规律

我们将不同阶段土壤样品的理化性质数据利用 SIMCA 13.0 软件做 Principal Component Analysis (PCA)分析(图 3), 结果表明: 在整个植被恢复演替过程中, 沙丘土壤与藓类结皮的理化性质明显区别于其他两个阶段的土壤性质, 产生这一结果的原因与植被演替或许具有较大的关系: 在初期沙丘土壤中, 由于无植被的生长, 土壤的理化性质与其它阶段的具有较大差别; 而随着时间的增加, 沙丘的固定和植被的演替恢复, 一方面给土壤提供了一定的生存环境和营养成分, 另一方面植被凋落物和根系分泌物的分解也为土壤输入了养分, 导致土壤理化性质组成和含量发生变化, 并且不同阶段的微生物变化也会对土壤的理化性质产生影响, 这在很多研究中都已得到印证[27] [28] [29], 由此说明我们设计实验的方法合理, 数据可靠。此外, 从图 3 中我们还可以看出, 中期的两个阶段少量物理结皮和藻类结皮中的土壤理化性质相似, 造成这一结果可能的原因是两个阶段植被类型相似, 均为一些先锋种的早期生长阶段, 所以对土壤性质的贡献大致相同, 也不受凋落物和根系生长的影响, 因而这两个阶段的土壤理化性质相似[30]。此外, 对于聚类较差的样品数据(例如 WSQ4.u4.s), 造成这一结果的主要原因可能取决于采样方法, 在采样过程中, 由于采样的随机性导致所采样品中理化指标与其他样品的数据具有较大差异。



注: (1) 图例中数字代表样本不同阶段, “1, 2, 3, 4” 分别代表不同演替程度下的土壤类型, 即分别为“流动沙丘, 少量物理结皮, 藻类结皮, 藓类结皮”。(2) 表中“u1, u2”表示同一阶段的重复样。

Figure 3. PCA analysis of physical and chemical properties of all soil samples at four different stages

图 3. 四种不同演替阶段的所有土样理化性质的 PCA 分析

3.2.2. 不同采样深度下土壤理化性质的变化规律

通过将不同演替阶段的土壤样品按不同深度进行聚类分析(图 2)发现, 在半干旱沙地中, 随着植被群落演替的进行, 总氮(TN)和总碳(TC)的含量在不同深度下表现出相似的变化规律, 在演替前期, 土壤中二者的含量变化规律为: 底层 > 表层, 而在演替后期, 土壤中二者的含量变化规律为: 表层 > 底层(图

2(a)和图 2(b)); 而全磷(P_2O_5)和电导率在整个演替过程中, 则表现为: 随着深度的增加, 含量依次减少(图 2(c)和图 2(d))。本研究中土壤理化指标在不同沙地同一类型植被建成过程下的演替结果, 解决了长久以来大范围环境异质性对研究半干旱区土壤理化性质演替的干扰问题, 我们的研究方法和数据结果出现前期和后期在不同深度下的不同变化规律, 这种结果在别的研究具有类似的结论[12] [31]。例如郭轶瑞等[12]在研流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘以及固定沙丘丘底下分别发育的不同结皮的理化指标, 发现结皮的全 N、全 P、速效 N 和速效 P 等指标在沙丘生境中呈现半流动沙丘 < 半固定沙丘 < 固定沙丘 < 固定沙丘丘底; 在结皮类型中为物理结皮 < 藻结皮 < 地衣结皮 < 苔藓结皮。与之相似, 我们也发现随着土壤发育, 理化指标出现上升趋势。但是, 我们的研究中还发现, 全磷含量随着土壤深度的增加, 在整个演替过程中都呈现下降的趋势, 与前人在其他生态系统下土壤类型的结果明显不一致[32] [33]。出现这种现象的可能原因是在流动沙丘土壤中, 微生物活性总体较低和植被无覆盖, 再加上风蚀作用, 使得随着深度的增加, 微生物多样性和数量逐渐增加[34], 因此利用土壤养分含量也就越多, 包括全磷, 所以前期随着土壤深度的增加, 全磷的含量呈降低趋势。而随着油蒿-差吧嘎蒿群落植被建成时间的增加, 植被覆盖率增加, 表层土大多以结皮[35]的形式存在, 其中由于微生物与植物间的复杂关系, 对于氮输入、碳固定和磷素提升等均有显著影响, 有研究对比了有生物结皮和无生物结皮 0~5 cm 土层中磷素的含量, 结果显示生物结皮中磷素的含量略高于无生物结皮中的[12] [36]。因此结皮中全磷的含量最高, 并随着深度的增加逐渐降低。进一步说明随着油蒿-差吧嘎蒿群落建成, 土壤不同深度下微生物的组成和多样性存在差异[37], 存在利用和合成 C、N 和 P 的能力差异的可能[38], 这也就是造成它们变化有差异的原因。本研究提供了半干旱区土壤随蒿类植被建成下不同演替阶段和不同深度下理化性质的变化规律, 并得到了与别人不同的结果, 这为半干旱区沙地恢复和单一物种建成提供了理论依据, 并更加确定了土壤结皮在生态恢复中的重要性。

4. 结论

本研究排除了其他植被类型的干扰, 仅以单一物种油蒿和差吧嘎蒿群落为研究对象, 从不同沙地、不同发育类型和不同深度下, 系统的调查蒿类植被对土壤理化指标的影响规律。结果分析显示: 1) 在半干旱沙地土壤中, 随着蒿类植被建成时间的增加, 土壤中总氮(TN)和总碳(TC)的含量变化规律相似, 均逐渐增加; 2) 全磷(P_2O_5)的含量随着时间的增加, 呈现出先降低再增加的变化趋势, 而电导率和含水率随着演替的进行, 均缓慢增加; 3) pH 值在整个演替过程中, 没有发生明显的变化; 4) 不同深度的同一种理化性质指标, 随着植被建成进行也可能会发生不同程度的变化。这项研究区别于其他研究的创新点在于: 1) 本研究针对半干旱沙地不同土壤类型及不同深度的样品进行理化性质的测定分析, 弥补了之前对于半干旱沙地土壤在垂直分布上的理化性质研究数据的空缺; 2) 本研究选取了半干旱沙地两个典型区域不同自然条件下沙地, 但从同一类型植被建成下取样, 排除了半干旱地区植被多样性复杂和可比性较差的干扰, 发现了两处沙地土壤理化性质从流动沙丘, 少量物理结皮, 藻类结皮, 演替到藓类高度发育的结皮过程中存在共性。这些研结论为半干旱区不同类型土壤的理化性质的研究提供了一定的理论基础, 而且为进一步研究半干旱区不同发育阶段土壤演化过程中的各项参数指标变化规律提供了科学的参考依据。

基金项目

国家重点研发计划项目(2016YFC0500903); 甘肃省科技支撑计划(1604NKCA049)。

参考文献

- [1] An, S., Huang, Y. and Zheng, F. (2009) Evaluation of Soil Microbial Indices Along a Revegetation Chronosequence in

- Grassland Soils on the Loess Plateau, Northwest China. *Applied Soil Ecology*, **41**, 286-292. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.001>
- [2] Zhang, C., Liu, G., Xue, S. and Wang, G. (2015) Changes in Rhizospheric Microbial Community Structure and Function during the Natural Recovery of Abandoned Cropland on the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, **75**, 161-171. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.059>
- [3] Finegan, B. (1984) Forest Succession. *Nature*, **312**, 109-114. <https://doi.org/10.1038/312109a0>
- [4] Singh, B.K., Millard, P., Whiteley, A.S. and Murrell, J.C. (2004) Unravelling rhizosphere-Microbial Interactions: Opportunities and Limitations. *Trends in Microbiology*, **12**, 386-393. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2004.06.008>
- [5] 杨秀莲. 半干旱区植物多样性保护与生态管理——以宁夏盐池县为例[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [6] Harris, J. (2009) Soil Microbial Communities and Restoration Ecology: Facilitators or Followers? *Science*, **325**, 573-574. <https://doi.org/10.1126/science.1172975>
- [7] Xu, L., Ravnkov, S., Larsen, J., R. Nilsson, H. and Nicolaisen, M. (2012) Soil Fungal Community Structure Along a Soil Health Gradient in Pea Fields Examined Using Deep Amplicon Sequencing. *Soil Biology & Biochemistry*, **46**, 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.010>
- [8] Palomo, A., Fowler, S.J., Gülay, A., Rasmussen, S., Sicheritz-Ponten, T. and Smets, B.F. (2016) Metagenomic Analysis of Rapid Gravity sand Filter Microbial Communities Suggests Novel Physiology of *Nitrospira* spp. *The ISME Journal*, **10**, 2569-2581. <https://doi.org/10.1038/ismej.2016.63>
- [9] Zhong, Y., Yan, W., Wang, R., Wang, W. and Shanguan, Z. (2018) Decreased Occurrence of Carbon Cycle Functions in Microbial Communities Along with Long-Term Secondary Succession. *Soil Biology & Biochemistry*, **123**, 207-217. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.017>
- [10] Cline, L.C. and Zak, D.R. (2015) Soil Microbial Communities Are Shaped by Plant-Driven Changes in Resource Availability during Secondary Succession. *Ecology*, **96**, 3374-3385. <https://doi.org/10.1890/15-0184.1>
- [11] Kuramae, E.E., Gamper, H.A., Yergeau, E., et al. (2010) Microbial Secondary Succession in a Chronosequence of Chalk Grasslands. *The ISME Journal*, **4**, 711-715. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.11>
- [12] 郭铁瑞, 赵哈林, 左小安, 等. 科尔沁沙地沙丘恢复过程中典型灌丛下结皮发育特征及表层土壤特性[J]. 环境科学, 2008, 29(4):1027-1034.
- [13] 李新荣, 张景光, 王新平, 等. 干旱沙漠区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究(英)[J]. 植物学报(英文版), 2000, 42(9): 965-970.
- [14] 丘明新. 油蒿植物群落与固沙造林关系的研究兼论用该群落在沙坡头建立人工植被的可能性[J]. 西北植物学报, 1984(1): 31-41+82.
- [15] 杨洪晓, 张金屯, 吴波, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)对半干旱区沙地生境的适应及其生态作用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(5): 684-690.
- [16] 赵哈林, 张铜会, 崔建坦, 等. 近 40a 我国北方农牧交错区气候变化及其与土地沙漠化的关系——以科尔沁沙地为例[J]. 中国沙漠, 2000, 20(S1): 1-6.
- [17] 任鸿昌, 吕永龙, 杨萍, 等. 科尔沁沙地土地沙漠化的历史与现状[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 544-547.
- [18] 龚维, 李俊, 姚源, 等. 毛乌素沙地现状、成因及治理对策[J]. 防护林科技, 2009(3): 73-74+97.
- [19] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [20] 王岚, 陈晶, 王睿, 等. 几种模式识别方法在生物信息学中的应用[J]. 计算机与应用化学, 2007, 24(1): 63-65.
- [21] Li, S.G., Harazono, Y., Zhao, H.L., et al. (2002) Micrometeorological Changes Following Establishment of Artificially Established *Artemisia* Vegetation on Desertified Sandy Land in the Horqin Sandy Land, China and Their Implication in Regional Environmental Change. *Journal of Arid Environments*, **52**, 101-119. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(01\)90983-8](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(01)90983-8)
- [22] 戴雅婷, 侯向阳, 闫志坚, 等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物群落功能多样性研究[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 56-65.
- [23] 葛岩, 王保泽, 李春龙, 等. 辽西北沙地流动沙丘土壤水分时空变化特征研究[J]. 中国农学通报, 2007, 23(6): 634-637.
- [24] Zhang, C., Liu, G., Xue, S. and Wang, G. (2016) Soil Bacterial Community Dynamics Reflect Changes in Plant Community and Soil Properties during the Secondary Succession of Abandoned Farmland in the Loess Plateau. *Soil Biology & Biochemistry*, **97**, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.013>
- [25] An, S.S., Huang, Y.M., Zheng, F.L. and Yang, J.-G. (2008) Aggregate Characteristics during Natural Revegetation on

- the Loess Plateau. *Pedosphere*, **18**, 809-816. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(08\)60077-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(08)60077-6)
- [26] Wang, B., Liu, G.B., Xue, S. and Zhu, B. (2011) Changes in Soil Physico-Chemical and Microbiological Properties during Natural Succession on Abandoned Farmland in the Loess Plateau. *Environmental Earth Sciences*, **62**, 915-925. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0577-4>
- [27] Cutler, N.A., Chaput, D.L. and van der Gast, C. (2014) Long-Term Changes in Soil Microbial Communities during Primary Succession. *Soil Biology & Biochemistry*, **69**, 359-370. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.11.022>
- [28] Williams, M.A., Jangid, K., Shanmugam, S.G. and Whitman, W.B. (2013) Bacterial Communities in Soil Mimic Patterns of Vegetative Succession and Ecosystem Climax but Are Resilient to Change between Seasons. *Soil Biology & Biochemistry*, **57**, 749-757. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.08.023>
- [29] Cleveland, C.C., Vitousek, P.M., *et al.* (2014) Litter Quality versus Soil Microbial Community Controls over Decomposition: A Quantitative Analysis. *Oecologia*, **174**, 283-294. <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2758-9>
- [30] García-Palacios, P., Shaw, E.A., Wall, D.H. and Hättenschwiler, S. (2016) Temporal Dynamics of Biotic and Abiotic Drivers of Litter Decomposition. *Ecology Letters*, **19**, 554-563. <https://doi.org/10.1111/ele.12590>
- [31] Yao, Q., Liu, J., Yu, Z., *et al.* (2017) Three Years of Biochar Amendment Alters Soil Physiochemical Properties and Fungal Community Composition in a Black Soil of Northeast China. *Soil Biology and Biochemistry*, **110**, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.005>
- [32] 张瑶瑶, 冷若琳, 崔霞, 等. 甘南州高寒草地土壤氮磷空间分布特征[J]. 草业学报, 2018, 27(12): 12-21.
- [33] 王波, 李琴, 朱炜, 等. 毛竹林覆盖经营对土壤养分含量、酶活性及微生物生物量的影响[J]. 林业科学, 2019, 55(1): 110-118.
- [34] 王少昆, 赵学勇, 曲浩, 等. 科尔沁沙地和浑善达克沙地流动沙丘中土壤微生物学特征比较[J]. 环境科学研究, 2010, 23(12): 1516-1522.
- [35] Duan, Z.H., Wang, G., Xiao, H.L. and Dong, Z. (2003) Abiotic Soil Crust Formation on Dunes in an Extremely Arid Environment: A 43-Year Sequential Study. *Arid Land Research and Management*, **17**, 43-54. <https://doi.org/10.1080/15324980301592>
- [36] Jafari, M., Tavili, A., Zargham, N., *et al.* (2004) Comparing Some Properties of Crusted and Uncrusted Soils in Alagol Region of Iran. *Pakistan Journal of Nutrition*, **3**, 273-277. <https://doi.org/10.3923/pjn.2004.273.277>
- [37] 邵玉琴, 赵吉, 杨劫. 恢复草地和退化草地土壤微生物类群数量的分布特征[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 223-226.
- [38] 李靖宇, 张琇, 孙敏, 等. 腾格里沙漠沙坡头地区土壤微生物多样性分析[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(5): 780-787.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-7255, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjss@hanspub.org