

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.049.

刘军, 杨凯齐, 刘科, 等. 内蒙古砒砂岩不同类型区土壤水分、养分特征研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 47-52.

LIU Jun, YANG Kaiqi, LIU Ke, et al. Characteristics of Soil Water and Nutrients in Different Types Area of Pisha Sandstone in Inner Mongolia [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 47-52.

# 内蒙古砒砂岩不同类型区土壤水分、养分特征研究

刘军<sup>1</sup>, 杨凯齐<sup>2</sup>, 刘科<sup>1</sup>, 马章怀<sup>2</sup>

(1. 准格尔旗水利局 水利事业发展中心, 内蒙古 准格尔旗 010300; 2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究砒砂岩不同类型区及不同土地利用方式对土壤水分、有机碳和全氮含量的影响, 对于砒砂岩区进一步发展具有重要指导作用。[方法] 以内蒙古准格尔旗砒砂岩覆土区的13年生沙棘林地、6年生沙棘林地、天然草地及砒砂岩裸露区草地和砒砂岩覆沙区的天然草地、柠条林地、农地、退耕5年地共8个样地为研究对象, 通过测定0—100 cm深度不同土层土壤含水量、有机碳和全氮含量, 研究和比较了不同土层土壤水分、有机碳和全氮含量与变化规律。[结果] (1) 覆土区(13年生沙棘林地 152.36 mm、6年生沙棘林地 165.16 mm、天然草地 160.97 mm) 0—100 cm土层土壤储水量均高于覆沙区(天然草地 73.03 mm、柠条林地 66.56 mm、农地 79.70 mm、退耕5年地 107.03 mm)。(2) 裸露区草地土壤有机碳含量均低于覆土区和覆沙区, 0—100 cm土壤有机碳储量(1.97 kg/m<sup>2</sup>) 分别比覆土区天然草地、6年生沙棘林地、13年生沙棘林地和覆沙区天然草地、柠条林地、农地、退耕5年地分别低了 2.24 kg/m<sup>2</sup>, 2.36 kg/m<sup>2</sup>, 1.74 kg/m<sup>2</sup>, 1.23 kg/m<sup>2</sup>, 0.66 kg/m<sup>2</sup>, 2.58 kg/m<sup>2</sup>, 1.21 kg/m<sup>2</sup>。(3) 各类型区相比, 裸露区草地全氮储量最低(0.18 kg/m<sup>2</sup>), 比覆土区天然草地和覆沙区天然草地全氮储量均低 0.22 kg/m<sup>2</sup>。[结论] 覆土区13年生沙棘林地和覆沙区柠条林地0—100 cm土层土壤储水量、有机碳和全氮储量均低于相同类型区天然草地储量, 柠条和沙棘种植一定年限后, 综合考虑水保效益后可以对其进行间伐, 减少灌草竞争, 从而加速其林下植被的自然演替, 确保砒砂岩区生态环境的可持续发展。

**关键词:** 砒砂岩裸露区; 砒砂岩覆土区; 砒砂岩覆沙区; 土壤水分; 有机碳; 全氮

**中图分类号:** S152.7; S158

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2023)04-0047-06

## Characteristics of Soil Water and Nutrients in Different Types Area of Pisha Sandstone in Inner Mongolia

LIU Jun<sup>1</sup>, YANG Kaiqi<sup>2</sup>, LIU Ke<sup>1</sup>, MA Zhanghuai<sup>2</sup>

(1. Water Resources Development Center, Water Resources Bureau of

Jungar Banner, Jungar Banner, Inner Mongolia 010300, China; 2. College of Natural

Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Exploring the effects of different types of Pisha Sandstone and different land use patterns on soil water, organic carbon and total nitrogen content plays an important guiding role in the further development of Pisha Sandstone area. [Methods] 13-year-old Seabuckthorn (*Hippophae rhamnoides*) woodland, 6-year-old Seabuckthorn woodland, natural grassland in the soil-covered Pisha Sandstone area of Jungar banner of Inner Mongolia, natural grassland in the exposed Pisha Sandstone area, and natural grassland, *Caragana korshinskii* woodland, farmland and 5-year-old abandoned farmland in the sand-covered Pisha Sandstone area, a total of eight sample plots were used as the research objects. By measuring the soil water content, organic carbon and total nitrogen content of different soil layer at a depth of 0—100 cm, the contents and variation of soil water, organic carbon and total nitrogen in different soil layers were studied and compared. [Results] (1) The soil water storage in

收稿日期: 2022-09-06

修回日期: 2022-09-26

资助项目: “十三五”国家重点研发计划项目“鄂尔多斯高原砒砂岩区生态综合治理技术”(2017YFC0504504); 准格尔旗科技计划项目(2017007)

第一作者: 刘军(1968—), 男, 内蒙古准格尔旗人, 高级工程师, 主要从事水土保持与植被恢复研究。E-mail: 651659180@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

0—100 cm soil layer in the soil-covered Pisha Sandstone area (13-year-old Seabuckthorn woodland (152.36 mm), 6-year-old Seabuckthorn woodland (165.16 mm), natural grassland (160.97 mm)) was higher than that of the sand-covered Pisha Sandstone area (natural grassland (73.03 mm) and *Caragana korshinskii* woodland (66.56 mm), farmland (79.70 mm), and 5-year-old abandoned farmland (107.03 mm)). (2) Soil organic carbon content of grassland in the exposed Pisha Sandstone area was lower than that in the soil-covered and sand-covered Pisha Sandstone area. Soil organic carbon storage in the 0—100 cm soil layer ( $1.97 \text{ kg/m}^2$ ) was lower than that of the natural grassland, 6-year-old and 13-year-old Seabuckthorn woodland in the soil-covered Pisha Sandstone area, natural grassland, *Caragana korshinskii* woodland, farmland and 5-year-old abandoned farmland in the sand-covered Pisha Sandstone area by  $2.24 \text{ kg/m}^2$ ,  $2.36 \text{ kg/m}^2$ ,  $1.74 \text{ kg/m}^2$ ,  $1.23 \text{ kg/m}^2$ ,  $0.66 \text{ kg/m}^2$ ,  $2.58 \text{ kg/m}^2$  and  $1.21 \text{ kg/m}^2$ , respectively. (3) Compared with each type of Pisha Sandstone area, the total nitrogen storage of the grassland in the exposed Pisha Sandstone area was the lowest ( $0.18 \text{ kg/m}^2$ ), which was lower than that of the natural grassland in the soil-covered Pisha Sandstone area and the natural grassland in the sand-covered Pisha Sandstone area by  $0.22 \text{ kg/m}^2$ . [Conclusion] To sum up, the soil water storage, organic carbon and total nitrogen storage in the 0—100 cm soil layer of the 13-year-old Seabuckthorn woodland in the soil-covered Pisha Sandstone area and the *Caragana korshinskii* woodland in the sand-covered Pisha Sandstone area were all lower than those of the natural grassland in the same type of area. *Caragana korshinskii* and Seabuckthorn planting after a certain period of years, comprehensively considering the benefits of water conservation, it should be thinned to reduce the competition with understory herbss, thereby accelerating the natural succession of the understory vegetation and ensuring the sustainable development of the ecological environment in the Pisha Sandstone area.

**Keywords:** exposed Pisha Sandstone area; soil-covered Pisha Sandstone area; sand-covered Pisha Sandstone area; soil water; organic carbon; total nitrogen

20 世纪 50 年代以来,为减少水土流失,改善人居环境,黄土高原实施了大规模的生态恢复措施(三北防护林、退耕还林还草等工程),生态环境得到了极大的改善<sup>[1-2]</sup>。基于遥感数据显示,2000—2018 年,黄土高原生长季植被覆盖度均值从 37% 提高至 49%,呈现出波动性增长趋势<sup>[3]</sup>,而黄土高原进行人工造林时,往往忽略微下垫面水土等条件的差异,造成人工林林分质量差和成活率不高的现象<sup>[4-5]</sup>,且土壤水分和养分对于不同土壤质地和不同土地利用方式的响应也有较大差异<sup>[6-9]</sup>。

晋陕蒙砒砂岩区( $16\,700 \text{ km}^2$ )位于黄土高原向毛乌素沙地和库布奇沙漠过渡地带。地貌和土壤结构复杂,包括黄土、沙漠、沙地和砂岩<sup>[10]</sup>,侵蚀频繁,逐渐形成了众多的沟壑和破碎地貌,是黄河中游地区的剧烈侵蚀中心<sup>[11]</sup>,同时也是黄河粗泥沙主要来源地之一<sup>[12]</sup>。根据上覆土层类型的不同,砒砂岩区可分为砒砂岩裸露区、砒砂岩覆土区和砒砂岩覆沙区,分别占 27.23%,50.54%和 22.23%<sup>[13]</sup>。砒砂岩区上伏地表土壤质地的差异对该地区水分过程、主要养分的赋存和分布具有重要影响。以往对砒砂岩地区研究主要集中在土壤抗蚀性分析、形态特征等<sup>[14]</sup>。然

而,对于砒砂岩区不同类型上覆土层(覆土区、覆沙区和裸露区)和不同土地利用方式(草地、林地、农地和退耕地)土壤储水能力以及养分含量变化规律还没有得到充分研究。

基于此,本文以准格尔旗内砒砂岩覆土区的 13 a 生沙棘林地、6 a 生沙棘林地、天然草地及砒砂岩裸露区草地和覆沙区的天然草地、柠条林地、农地、退耕 5 a 地共 8 个样地为研究对象,通过测定砒砂岩区不同类型上覆土层(覆土区、覆沙区和裸露区)和不同土地利用方式(草地、林地、农地和退耕地)下 0—100 cm 深度不同土层土壤的含水率、有机碳和全氮含量,以求弄清砒砂岩不同类型区土壤剖面水分分布及养分特征,为砒砂岩地区生态环境可持续发展提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡小流域。年平均降水量 390.2 mm,其中约 78% 发生在 6—9 月,年平均气温  $7.8^\circ\text{C}$  (2005—2020 年)。当地植物主要有无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss)、本氏针茅(*Stipa capillata* Linn)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.)

Tzvel〕、阿尔泰狗娃花〔*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr〕、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)和柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等。

1.2 试验处理

砒砂岩覆沙区选取的样地分别为天然草地、柠条林地、农地、退耕 5 a 地,砒砂岩覆土区选取的样地分别为 13 a 生沙棘林地、6 a 生沙棘林地、天然草地及砒砂岩裸露区草地,共计 8 个样地,样地基本情况见表 1。

表 1 砒砂岩区不同覆土层土壤性质

土壤类型	土壤质地			pH 值	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%		
砒砂岩	40.7	46.8	12.5	9.1	1.51
黄土	29.8	55.8	14.4	8.7	1.35
风沙土	90.5	5.8	3.7	8.5	1.60

1.3 样品采集与分析

2018 年 5 月,选取坡度、坡向、坡位基本一致的样地,在每个样地建立 3 个相距 50 m 以上的 5 m×5 m 的样方,每个样方内用土钻钻取 3 个样点,其中钻头直径为 40 mm,采样深度为 100 cm。首先除去地表杂物,然后用土钻由上至下垂直取样,每 10 cm 为一层。土壤含水量采用烘干法(105℃)进行测定,其余土壤装入自封袋后带回实验室,自然风干过筛(2 mm)后用于土壤有机碳及全氮含量的测定,土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法进行测定,土壤全氮采用凯氏定氮仪测定<sup>[15]</sup>。每个样方内挖取一个 100 cm 深土壤剖面,每 10 cm 一层用环刀进行采样,用于测定土壤容重。

1.4 数据处理

(1) 土壤体积含水量计算公式如下:

$$SWC = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \times BD \times 100\%$$

式中:SWC 为土壤体积含水量(%);V<sub>1</sub> 和 V<sub>2</sub> 为土壤湿重和土壤干重(g);BD 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>)。

(2) 一定深度土壤储水量(SWS)计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$SWS = SWC_i \times h_i \times 10^{-1}$$

式中:SWS 为一定深度土壤储水量(mm);SWC<sub>i</sub> 为第 i 层土壤体积含水量(%);h<sub>i</sub> 为第 i 层土壤厚度(cm)。

(3) 一定深度土壤有机碳储量(SOCS)和全氮储量(STNS)计算公式如下<sup>[17-18]</sup>:

$$SOCS = SOC_i \times BD_i \times h_i \times 10^{-2}$$

$$STNS = STN_i \times BD_i \times h_i \times 10^{-2}$$

式中:SOCS 为一定深度土壤有机碳储量(kg/m<sup>2</sup>);SOC<sub>i</sub> 为第 i 层土壤有机碳含量(g/kg);STNS 为一定深度土壤全氮储量(kg/m<sup>2</sup>);STN<sub>i</sub> 为第 i 层土壤全氮含量(g/kg);BD<sub>i</sub> 为土壤容重(g/cm<sup>3</sup>);h<sub>i</sub> 同上。

1.5 数据分析

用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据处理,通过 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析,用单因子 LSD 法进行多重比较,显著性水平为 p<0.05。用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 砒砂岩各类型区不同土地利用方式土壤水分特征

从图 1 中可以看出,60 cm 土层以下,13 a 生沙棘林地土壤体积含水量低于天然草地和 6 a 生沙棘林地,说明 13 a 生沙棘林地不断消耗着深层土壤水分。6 a 生沙棘林地在 30—50 cm 土层土壤体积含水量高于天然草地,可能原因是 6 a 生沙棘根系分布范围较深于天然草地,促进了雨水向深层(30—50 cm)的入渗<sup>[19-20]</sup>。裸露区草地 0—100 cm 各土层土壤体积含水量均低于天然草地、6 a 生沙棘和 13 a 沙棘的土壤体积含水量,主要原因是砒砂岩裸露区土壤容重显著高于砒砂岩覆土区(表 1),裸露区草本根系分布较浅,雨水向深层入渗较少,且裸露区相较于覆土区植被覆盖度较低,土壤蒸发量较高,导致裸露区草地水分较低。不同土地利用方式下,土壤储水量由大到小的顺序为:6 a 生沙棘林地>天然草地>13 a 生沙棘林地>砒砂岩裸露区草地。13 a 生沙棘林地(152.36 mm)比 6 a 生沙棘林地土壤储水量减少了 12.80 mm。砒砂岩裸露区草地(105.25 mm)比覆土区天然草地土壤储水量低了 55.71 mm。

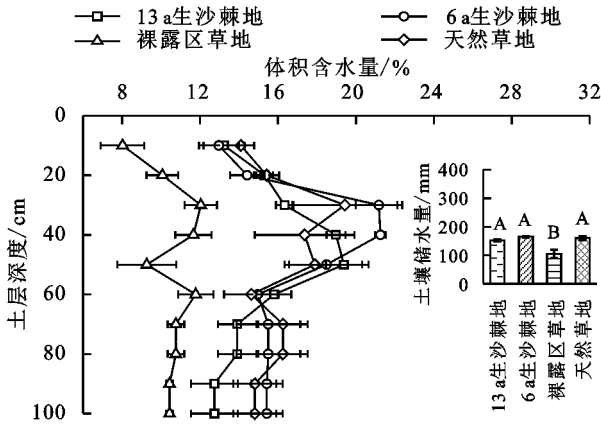


图 1 砒砂岩覆土区不同土地利用方式土壤水分剖面分布及土壤储水量

从图 2 中可以看出,0—80 cm 土层,柠条林地土壤体积含水量最低,基本在 5%~7%。柠条根系发达,说明柠条对土壤水分的消耗量高于其他土地利用方式下土壤水分消耗量。刘丙霞等研究发现在神木六道沟小流域 4 a 生柠条林地 1—1.4 m 已经产生干层,并建议柠条生长年限不要超过 6 a<sup>[21]</sup>。另外,退耕 5 a 地 40 cm

以下土层土壤体积含水量高于其他土地利用方式,基本在12%~15%,主要是因为农地退耕后,植被对土壤水分消耗较少,深层(50—100 cm)水分得到了一定程度的恢复。马俊梅等研究发现在干旱荒漠区退耕地土壤水分也呈现增加趋势<sup>[22]</sup>。不同土地利用方式下,柠条林地0—100 cm土壤储水量(66.56 mm)最低,退耕5 a地土壤储水量(107.03 mm)比农地显著提高了27.33 mm。天然草地土壤储水量(73.03 mm)比农地减少6.67 mm,但无显著差异。

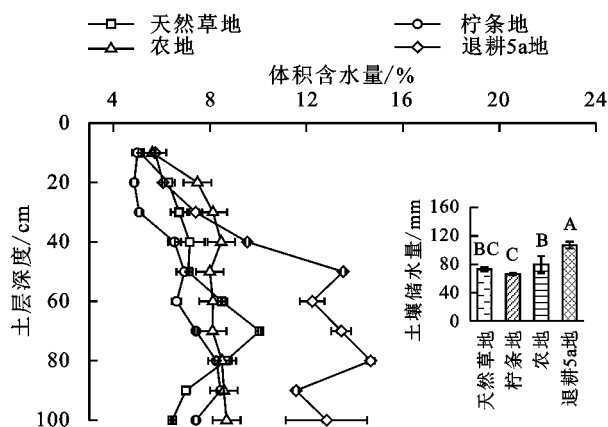


图2 砒砂岩覆沙区不同土地利用方式土壤水分剖面分布及土壤储水量

砒砂岩覆沙区除退耕5 a地外,覆沙区天然草地、柠条林地和农地土壤储水量均低于裸露区草地,分别低32.22 mm,38.69 mm,25.55 mm,原因主要与上覆土层不同土壤质地有关,风沙土中砂粒占90.5%,矿质颗粒较粗,比表面积较小,导致吸持性较弱,土壤水分不断向深层下渗<sup>[23]</sup>,杨敏研究发现砂粒与土壤水分含量呈负相关<sup>[24]</sup>。

## 2.2 砒砂岩各类型区不同土地利用方式土壤有机碳特征

从图3可以看出,0—30 cm土层,覆土区天然草地土壤有机碳含量( $>4.5$  g/kg)高于其他土地利用方式,主要原因可能是覆土区天然草地的凋落物高于裸露区草地,而且沙棘林下植被吸收利用较多养分,矿化作用强,导致表层有机碳含量较低<sup>[25]</sup>。60—100 cm土层,13 a生沙棘林地和6 a生沙棘林地土壤有机碳含量基本一致。裸露区草地各土层土壤有机碳含量均低于覆土区,0—100 cm土壤有机碳储量( $1.97$  kg/m<sup>2</sup>)分别比覆土区天然草地、6 a生沙棘林地和13 a生沙棘林地显著低了2.24 kg/m<sup>2</sup>,2.36 kg/m<sup>2</sup>,1.74 kg/m<sup>2</sup>。6 a生沙棘林地土壤有机碳储量最高( $4.33$  kg/m<sup>2</sup>),比13 a生沙棘林地和天然草地有机碳储量分别高0.63 kg/m<sup>2</sup>,0.12 kg/m<sup>2</sup>,但无显著差异。

从图4中可以看出,0—30 cm土层,天然草地、柠条林地和退耕5 a地土壤有机碳含量基本一致,农地土壤有机碳含量最高,含量均大于3.0 g/kg,主要原因是施肥导致土壤表层有机碳含量较高<sup>[26]</sup>。在50—80 cm土层,柠条林地土壤有机碳含量最低,含量基本为1.0 g/kg。不同土地利用方式下,柠条林地0—100 cm土层土壤有机碳储量( $2.63$  kg/m<sup>2</sup>)最低,比天然草地显著低了0.56 kg/m<sup>2</sup>,说明柠条林地种植到一定年限后固碳能力有限,Chai等研究发现黄土区30 a生柠条林地比10 a生柠条林地0—100 cm土层有机碳储量降低了23.9%<sup>[27]</sup>。退耕5 a地( $3.17$  kg/m<sup>2</sup>)比天然草地有机碳储量低0.02 kg/m<sup>2</sup>,但无显著差异。农地土壤有机碳储量显著高于其他土地利用方式,土壤有机碳储量高达4.55 kg/m<sup>2</sup>。

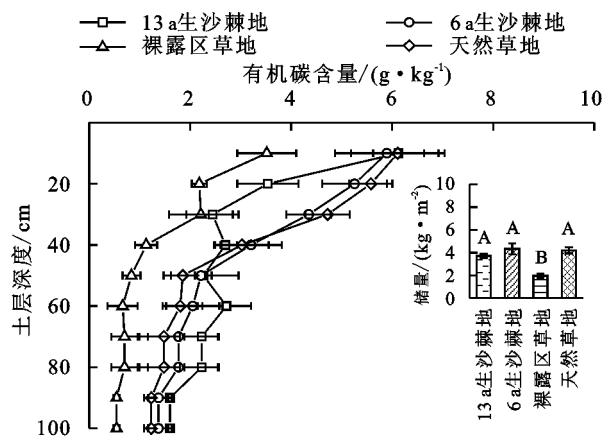


图3 砒砂岩覆土区不同土地利用方式土壤有机碳含量剖面分布及有机碳储量

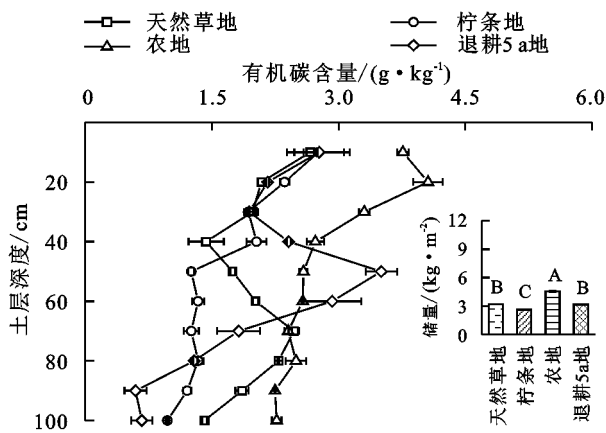


图4 砒砂岩覆沙区不同土地利用方式土壤有机碳含量剖面分布及有机碳储量

各类型区相比,裸露区草地有机碳储量( $1.97$  kg/m<sup>2</sup>)比覆土区天然草地和覆沙区天然草地有机碳储量分别低2.24 kg/m<sup>2</sup>,1.23 kg/m<sup>2</sup>,主要原因可能是由于表层砒砂岩的存在,裸露区草地生物量较低,导致其固碳能力低于覆土区和覆沙区天然草地。覆沙区柠条林地有机碳储量( $2.63$  kg/m<sup>2</sup>)比覆土区13 a生沙棘林地和6 a生沙棘林地分别低1.07 kg/m<sup>2</sup>,1.70 kg/m<sup>2</sup>。



2.3 砒砂岩各类型区不同土地利用方式土壤全氮特征

从图 5 中可以看出,0—40 cm 土层,覆土区天然草地土壤全氮含量均高于其他土地利用方式,主要原因可能是覆土区天然草地的凋落物高于裸露区草地,而且沙棘林下植被吸收利用较多养分,虽然沙棘根部具有一定的固氮能力<sup>[28]</sup>,但草本对氮元素消耗量大于归还量,导致沙棘林地表层全氮含量较低。裸露区草地各土层土壤全氮含量均低于覆土区,0—100 cm 土层土壤全氮储量(0.18 kg/m<sup>2</sup>)分别比天然草地、6 a 生沙棘林地和 13 a 生沙棘林地显著低了 0.22 kg/m<sup>2</sup>,0.14 kg/m<sup>2</sup>,0.08 kg/m<sup>2</sup>。6 a 生沙棘林地土壤全氮储量(0.32 kg/m<sup>2</sup>)比 13 a 生沙棘林地高 0.06 kg/m<sup>2</sup>,但差异不显著。

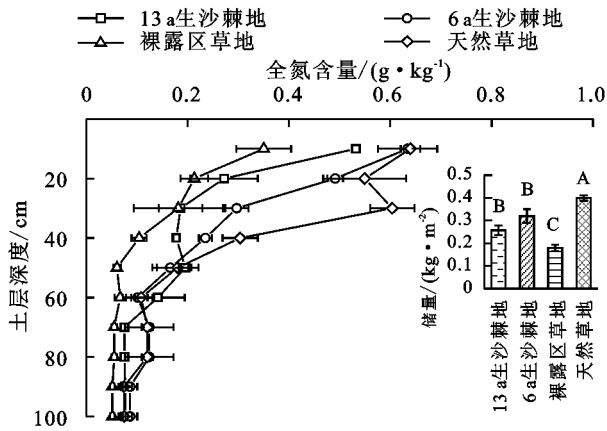


图 5 砒砂岩覆土区不同土地利用方式土壤全氮含量剖面分布及全氮储量

从图 6 可以看出,0—30 cm 土层,农地土壤全氮含量最高,含量大于 0.35 g/kg。而在 40—60 cm 土层,退耕 5 a 地全氮含量最高,可能原因是该地原用于农业生产,氮肥被淋溶到该土层深度<sup>[29]</sup>。在 50—70 cm 土层,柠条林地土壤全氮含量低于其他土地利用方式。不同土地利用方式下,覆沙区柠条林地 0—100 cm 土层土壤全氮储量最低(0.32 kg/m<sup>2</sup>),比天然草地显著低了 0.08 kg/m<sup>2</sup>,说明虽然柠条为豆科植物,根部具有一定的固氮能力,但柠条在砒砂岩覆沙区固氮能力十分有限,Chai 等也研究发现黄土区 30 a 生柠条林地比 10 a 生柠条林地 0—100 cm 土层全氮储量降低了 19.9%<sup>[27]</sup>。另外,退耕 5 a 地与天然草地全氮储量无显著差异,而农地土壤全氮储量显著高于其他土地利用方式,土壤全氮储量为 0.49 kg/m<sup>2</sup>。

各类型区相比,裸露区草地全氮储量(0.18 kg/m<sup>2</sup>)最低,比覆土区天然草地和覆沙区天然草地全氮储量均低 0.22 kg/m<sup>2</sup>。覆土区 13 a 生沙棘林地全氮储量(0.26 kg/m<sup>2</sup>)比 6 a 生沙棘林地和覆沙区柠条林地均低 0.06 kg/m<sup>2</sup>。

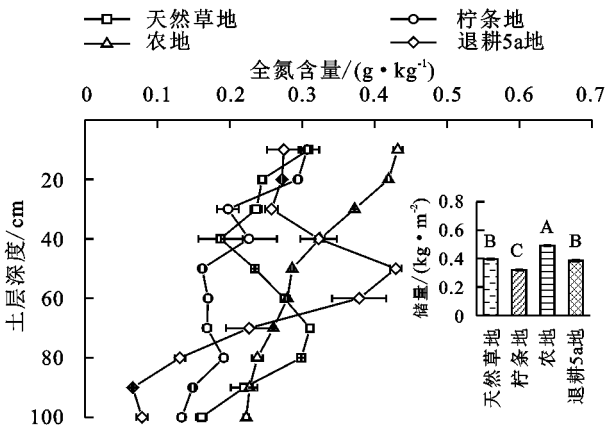


图 6 砒砂岩覆沙区不同土地利用方式土壤全氮含量剖面分布及全氮储量

3 结论

该试验结果表明,砒砂岩不同类型区不同土地利用方式土壤水分、有机碳和全氮含量存在显著差异。砒砂岩覆土区各土地利用方式(13 a 生沙棘林地、6 a 生沙棘林地、天然草地)下 0—100 cm 土层土壤储水量均高于砒砂岩覆沙区(天然草地、柠条林地、农地、退耕 5 a 地)。裸露区草地各土层土壤有机碳和全氮含量均低于覆土区,覆土区 13 a 生沙棘林地 0—100 cm 土层土壤有机碳和全氮储量低于覆土区天然草地,砒砂岩覆沙区柠条林地土壤有机碳和全氮储量也低于覆沙区天然草地。综合表明,砒砂岩覆土区 13 a 生沙棘林地和覆沙区柠条林地 0—100 cm 土层土壤储水量、有机碳和全氮储量均低于相同类型区天然草地储量,柠条和沙棘种植到一定年限后,综合考虑水保效益可以对其进行砍伐,减少灌草竞争,从而加速其林下植被的自然演替,确保砒砂岩区生态环境的可持续发展。

参考文献:

[1] 李婷,吕一河,任艳姣,等.黄土高原植被恢复成效及影响因素[J].生态学报,2020,40(23):8593-8605.  
[2] Fu B J, Wang S, Liu Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017,45(1):223-243.  
[3] 李依璇.黄土高原植被覆盖度变化特征及其影响因素[D].北京:北京林业大学,2021.  
[4] 白小芳,徐福利,王渭玲.我国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述[J].世界林业研究,2016,29(1):75-79.  
[5] 汪晓.立地条件对吴起沙棘人工林衰退及更新的影响[D].北京:北京林业大学,2020.  
[6] Chen Y X, Wei T X, Ren K, et al. The coupling interaction of soil organic carbon stock and water storage after vegetation restoration on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Environment Management, 2022,306:114481.

- [7] Wang Y Q, Shao M A, Zhu Y J, et al. Impacts of land use and plant characteristics on dried soil layers in different climatic regions on the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(4): 437-448.
- [8] 史君怡, 王国梁, 刘国彬. 退耕还林(草)对黄土高原不同土地利用方式下土壤剖面水分含量的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(2): 81-86.
- [9] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(5): 1626-1632.
- [10] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. *中国水土保持科学*, 2007, 5(1): 14-18.
- [11] 张平仓, 刘玉民, 张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. *水土保持通报*, 1992, (2): 15-24.
- [12] 唐政洪, 蔡强国, 李忠武, 等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(2): 25-29.
- [13] Liang Z S, Wu Z R, Yao W Y, et al. Pisha Sandstone: causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 7: 1-8.
- [14] Li Y, Xie Z, Qin Y, et al. Temporal-spatial variation characteristics of soil erosion in the Pisha Sandstone Area, Loess Plateau, China [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019, 28(4): 2205-2214.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 高宇, 樊军, 彭小平, 等. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7038-7046.
- [17] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 83-88.
- [18] Albaladejo J, Ortiz R, Garcia-Franco N, et al. Land-use and climate change impacts on soil organic carbon stocks in semi-arid Spain[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 13: 265-277.
- [19] 卜繁靖, 郭月峰, 祁伟, 等. 砒砂岩区 3 种沙棘根系特征与固土能力[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 41-48. DOI: 10.13961/j. cnki. stbctb. 20220525.001.
- [20] 王浩, 黄晨璐, 杨方社, 等. 砒砂岩区沙棘根系的生境适应性[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 157-164.
- [21] 刘丙霞, 任健, 邵明安, 等. 黄土高原北部人工灌草植被土壤干燥化过程研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3795-3803.
- [22] 马俊梅, 满多清, 李得禄, 等. 干旱荒漠区退耕地植被演替及土壤水分变化[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 800-807.
- [23] 张鹤, 费洪岩, 韩凤朋, 等. 植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 98-106.
- [24] 杨敏, 赵西宁, 高晓东, 等. 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 100-106.
- [25] 李佩擎. 林下植被去除和凋落物添加对杉木林土壤关键生态过程的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
- [26] 息伟峰, 徐新朋, 赵士诚, 等. 长期施肥下 3 种旱作土壤有机碳含量及其矿化势比较研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(12): 2094-2104.
- [27] Chai Q L, Ma Z Y, An Q Q, et al. Does artificial *Caragana korshinskii* plantation increase soil carbon continuously in a water-limited landscape on the Loess Plateau [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30: 1691-1698.
- [28] 张爱梅, 殷一然, 孙坤. 沙棘属植物弗兰克氏菌研究进展[J]. *微生物学通报*, 2020, 47(11): 3933-3944.
- [29] 武昭. 基于室内土柱模拟的稳定性氮肥无机氮转化及淋溶探究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.

(上接第 46 页)

- [3] 梁晓珍, 符素华, 丁琳. 地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 21-26.
- [4] 戴海伦, 金复鑫, 张科利. 国内外风力侵蚀监测方法回顾与评述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(4): 401-408.
- [5] 李智广, 邹学勇, 程宏. 我国风力侵蚀抽样调查方法[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 17-21.
- [6] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 水利部水土保持监测中心. 2020 年度水土流失动态监测技术指南[R]. 北京: 水利部, 2020.
- [8] 邹海天, 李子轩, 张彩云. 基于栅格像元和矢量地块的区域土壤侵蚀计算结果对比分析: 以怀来县外井沟小流域为例[J]. *海河水利*, 2020(4): 16-19.
- [9] 宋胜明, 刘霞, 张荣华, 等. 黄泛风沙区耕地土壤风力侵蚀影响因子的通径分析[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 249-253.
- [10] 袁利, 张春强, 张芷温, 等. 淮河流域黄泛平原风沙区水土流失格局[J]. *中国水土保持*, 2019(12): 10-13.
- [11] 高睿瑜, 张芷温, 李文龙, 等. 2018—2019 年河南省兰考县土地利用变化对耕地风蚀的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(1): 112-117, 124.
- [12] 刘晓君, 李占斌, 李鹏, 等. 基于土地利用/覆被变化的流域景观格局与水沙响应关系研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(18): 5691-5700.