

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.046.

白永会, 查轩, 吴伟成, 等. 植被恢复花岗岩红壤土壤颗粒组成及土壤养分储量特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 179-186.

Bai Yonghui, Zha Xuan, Wu Weicheng, et al. Characteristics of Soil Particle Composition and Soil Nutrient Storage in Vegetated Granite Red Soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 179-186.

植被恢复花岗岩红壤土壤颗粒组成及土壤养分储量特征

白永会^{1,2}, 查轩³, 吴伟成¹, 周飞华³

(1. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013; 3. 福建师范大学 地理科学学院, 福州 350007)

摘要: [目的] 探明植被恢复下花岗岩红壤土壤颗粒组成和土壤养分的关系以及土壤养分储量特征, 为植被恢复花岗岩红壤侵蚀退化地提供理论依据和实践指导。[方法] 选择 5 种植被恢复模式(乔灌草模式(ASG)、条沟草灌(GGH)、全坡面播草(FSG)、低效林改造(IFT)、封禁(CC))以及严重侵蚀退化地(HDL)和自然林(NV)为对照作为研究对象, 通过野外调查和室内试验方法, 明晰植被恢复模式下土壤颗粒组成和土壤养分的关系, 土壤养分储量特征和识别植被恢复退化红壤养分恢复状况的指标。[结果] 5 种植被恢复模式改善了 0—5 cm 花岗岩退化地土壤颗粒组成, 0—5 cm 土壤颗粒组成和土壤养分指标的冗余分析表明, 土壤黏粒和土壤养分呈显著正相关。5 种植被恢复模式增加了 0—5 cm 花岗岩红壤退化地的土壤有机碳、全氮、全钾、速效钾、全磷、速效磷的养分含量和储量, 0—5 cm 土壤有机碳含量、0—60 cm 土壤有机碳储量和 0—60 cm 土壤养分总储量顺序一致, 均表现为乔灌草模式>条沟草灌>全坡面播草>低效林改造>封禁。[结论] 土壤黏粒是提高 0—5 cm 土壤养分含量的关键因子, 土壤有机质是识别植被恢复模式土壤养分状况的直观指标, 乔灌草模式是改善土壤颗粒组成、提高土壤养分含量和土壤养分储量的最佳模式。

关键词: 植被恢复模式; 土壤颗粒组成; 土壤养分储量; 花岗岩红壤; 侵蚀退化地

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0179-08

Characteristics of Soil Particle Composition and Soil Nutrient Storage in Vegetated Granite Red Soil

Bai Yonghui^{1,2}, Zha Xuan³, Wu Weicheng¹, Zhou Feihua³

(1. Key Laboratory of Digital Lands and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the relationship between soil particle composition and soil nutrients and the storage characteristics of soil nutrients under vegetation restoration of granite red soil, and to provide theoretical basis and practical guidance for vegetation restoration of granite red soil erosion and degradation. [Methods] Five vegetation restoration modes (ASG, CC, FSG, GGH, IFT), highly degraded land (HDL) and natural vegetation (NV) were selected as survey plots. The relationship between soil particle composition and soil nutrients and the characteristics of soil nutrient storage under vegetation restoration model were clarified, and the indicators of nutrient recovery in degraded red soil after vegetation restoration were identified by using field investigation and laboratory test method. [Results] Soil particle composition of 0—5 cm layer in granite degraded soil was improved by planting restoration model. The

收稿日期: 2023-07-15

修回日期: 2023-09-17

资助项目: 江西省数字国土重点实验室开放基金“赣南典型水土流失区遥感监测与精准修复”(DLLJ202003); 国家自然科学基金项目“南方丘陵红壤侵蚀退化地植被恢复对土壤分离过程的调控机理”(42377326); 东华理工大学博士科研启动基金“红壤区不同植被恢复时期土壤团聚体稳定机理研究”(DHBK2019004)

第一作者: 白永会(1981—), 女, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要从事植被恢复侵蚀退化地方面的研究。E-mail: 201960070@ecut.edu.cn

通信作者: 查轩(1961—), 男, 陕西咸阳人, 博士生导师, 教授, 主要从事植被恢复侵蚀退化地方面的研究。E-mail: xzha@fjnu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

redundancy analysis showed that there was a significant positive correlation between soil clay and soil nutrients. The nutrient contents and reserves of soil organic carbon, total nitrogen, total potassium, available potassium, total phosphorus and available phosphorus in the red soil degraded land of 0—5 cm were increased by planting restoration mode. The organic carbon content of soil 0—5 cm and the organic carbon storage of soil 0—60 cm were in the same order as the total nutrient storage of soil 0—60 cm, the order was $ASG > GGH > FSG > IFT > CC$. [Conclusion] Soil clay is the key factor to increase soil nutrient content in 0—5 cm soil layer. Soil organic matter is an intuitive index to identify soil nutrient status in vegetation restoration mode. ASG is the best model to improve soil particle composition, increase soil nutrient contents, and soil nutrient storage.

Keywords: vegetation restoration model; soil particle composition; soil nutrient storage; granite red soil; erosion-degraded land

植被与土壤之间存在着相互影响、相互制约的关系。植被类型通过影响土壤的发育状况来改善土壤中各粒级颗粒的比例^[1]。土壤颗粒组成、分布、粒径大小、组合比例和排列状况直接影响植物生长,也会影响土壤的其他物理和化学性质。如毛乌素沙地植被恢复下土壤颗粒组成和固碳研究,说明土壤颗粒组成和固碳存在必然联系^[2],樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响表明^[3],樟子松人工林增加了表层土壤细颗粒的含量,也改变其他土壤因子。另外,植被恢复作为治理水土流失和恢复侵蚀退化地的长期且主要有效措施,具有调控水土流失过程,增加土壤养分含量和养分储量、促进土壤养分循环,应对退化地生态系统变化的功能^[4-5]。福建省长汀县是我国南方花岗岩红壤丘陵区典型的水土流失区之一。从20世纪80年代以来,植被恢复在水土流失治理和退化地修复方面发挥着重要作用。植被恢复红壤区研究的各个方面均取得丰硕成果,如植被恢复不仅改善土壤理化性质、增加土壤养分积累和固存,而且可以提高土壤微生物活性和多样性等^[6-7]。如夏江宝等^[8]研究认为植被恢复措施具有显著提高红壤丘陵区土壤细砂砾和粉黏粒质量含量的作用。然而,南方花岗岩红壤区植被恢复下土壤颗粒组成和土壤养分的相关性以及养分储量特征的研究报道相对比较少,尤其是植被恢复红壤退化地以来,长期缺乏简单直接的方法和指标识别植被恢复退化红壤养分恢复状况。

因此,本文通过野外调查与室内试验相结合的方法,以5种植被恢复模式和对照样地(严重退化地和自然林)为研究对象,明晰不同植被恢复模式下土壤颗粒组成和土壤养分的关系,以及土壤养分储量特征,并寻找简单直接的方法和指标判定退化地养分恢复状况,为花岗岩红壤退化地修复的植被选择和生态功能恢复的精准判定提供数据支持和实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇(35°35′—25°46′N, 116°16′—116°30′E),属于中亚热带季风气候,气候温和湿润,年均温 17.5~18.8℃。降雨充沛,年降雨量 1 698.7mm,季节性降水集中于3—6月。该地区土壤类型以花岗岩红壤为主,土壤抗冲抗侵蚀性能弱,由于特殊的自然和人文因素,20世纪80年代开始该区域土壤保肥保水能力差,存在极其严重的林下水土流失现象。近40多年的植被恢复措施治理,水力侵蚀引起的花岗岩红壤退化现象得到明显改善。

1.2 样品采集与测定

2022年8月选择恢复时间均为15a且坡度、坡向相同的〔乔灌木模式(ASG)、条沟草灌(GGH)、全坡面播草(FSG)、低效林改造(IFT)、封禁(CC)〕以及严重退化地(HDL)和自然林(NV)的样地,每个治理模式样地 and 对照样地分别设置3个标准重复相邻样地,样地大小为20m×20m,共21个,样地基本概况见表1。土钻取土随机依“S”形8点0—5,5—20,20—40,40—60cm取样,将8个土样均匀混合,按照四分法取1kg土壤带回实验室自然风干备用用于测定土壤理化指标。采用重铬酸钾—外加热法测定土壤有机碳;采用半微量开氏法测定土壤全氮,采用浓硫酸和高氯酸消煮法测定全磷,采用双酸浸提法土壤速效磷;采用氢氧化钠熔融法测定土壤全钾,采用乙酸铵浸提测定土壤速效钾。采用环刀法(100cm³)测定土壤容重。采用激光粒度仪法测定土壤颗粒组成。土壤颗粒组成粒径分类为砂粒(2~0.05mm),粉粒(0.05~0.002mm),黏粒(<0.002mm)。

1.3 土壤养分储量计算

$$SOC D = SOC \times D \times BD / 100 \quad (1)$$

$$TND = TN \times D \times BD / 100 \quad (2)$$

$$TKD = TK \times D \times BD / 100 \quad (3)$$

$$AKD=AK\times D\times BD/100$$
$$TPD=TP\times D\times BD/100$$
$$APD=AP\times D\times BD/100$$

(4)
(5)
(6)

壤有机碳(全氮、全钾、速效钾、全磷、速效磷)储量
(kg/m^2); D 为土层厚度(cm);SOC, TN, TK, AK, TP,
AP 分别土壤有机碳(全氮、全钾、速效钾、全磷、速效磷)
含量;BD 为土壤容重(g/cm^3);100 为单位转化系数^[9]。

表 1 不同植被恢复模式样地基本概况

Table 1 Basic plots with different vegetation restoration modes							
样地名称	严重退化地 HDL	低效林改造 IFT	条沟草灌 GGH	封禁 CC	全坡面播草 FSG	乔灌草 ASG	自然林 NV
位置	来油坑	龙颈	红畲	晨光	游坊	水东坊	露湖
经度	116°28'57.7"E	116°27'37.7"E	116°27'51.8"E	116°28'52.3"E	116°27'40.1"E	116°24'55.1"E	116°27'38.7"E
纬度	25°39'44.8"N	25°39'22.8"N	25°39'22.1"N	25°39'43.5"N	25°40'13.8"N	25°41'26.2"N	25°37'54.2"N
海拔/m	315	351	327	328	331	329	321
坡度/(°)	16~19	15~19	14~18	13~18	14~19	15~18	15~20
坡向	SE15°	SE16°	SE16°	SE14°	SE15°	SE15°	SE14°
植被覆盖度/%	10	75	85	85	75	90	98
主要植物类型	马尾松和竺萁	马尾松、枫香、木荷、百喜草、竺萁	马尾松、木荷、枫香、百喜草、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、枫香、木荷、胡枝子、竺萁	马尾松、百喜草、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、枫香、木荷、胡枝子、宽叶雀稗、竺萁	马尾松、枫香、木荷、杉木、黑荆、胡枝子、宽叶雀稗、百喜草、竺萁

注:马尾松(*Pinus massoniana*), 竺萁(*Dicranopteris dichotoma*), 枫香(*Liquidambar formosana*), 木荷(*Schima superba*), 百喜草(*Paspalum notatum*), 宽叶雀稗(*Paspalum wettsteinii*), 胡枝子(*Lespedeza bicolor*), 杉木(*Cunninghamia lanceolata*), 紫穗槐(*Amorpha fruticosa*), 黑荆(*Acacia mearnsii*)。

1.4 数据处理和图形制作

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)比较不同植被恢复模式和对照样地的土壤颗粒组成和土壤容重、土壤养分含量和土壤养分储量,并运用LSD法进行多重比较。再采用Origin 2022对0—5 cm不同植被恢复模式和对照样地的土壤颗粒组成和土壤养分含量指标进行冗余分析。采用Excel 2010, SPSS 21.0和Origin 2022对数据处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同植被恢复模式下土壤颗粒组成和土壤容重变化

如表2所示,0—5 cm不同植被恢复模式、自然林和严重退化地的土壤颗粒组成存在显著差异($p<$

0.05)。砂粒含量在严重退化地最大73.90%,砂粒含量最低出现在自然林61.59%,其他植被恢复模式中乔灌草砂粒含量最低67.60%;粉粒含量最大值出现在条沟草灌模式18.11%,最小值是乔灌草植被恢复模式10.10%。土壤黏粒的含量最小值出现在严重退化地10.65%,最大值出现在自然林数值是24.03%,不同植被恢复乔灌草的土壤黏粒含量最大值是21.52%,其次是全坡面播草15.01%。严重退化地0—5 cm的土壤容重最大,自然林土壤容重最小,分别为1.52, 0.93 g/cm^3 ,各种植被恢复模式土壤容重之间差异性不显著($p>0.05$),0—5 cm植被恢复模式土壤容重的顺序为低效林改造(1.39 g/cm^3)>条沟草灌(1.28 g/cm^3)>封禁治理模式(1.16 g/cm^3)>全坡面播草(1.08 g/cm^3)>乔灌草(1.00 g/cm^3)。

表 2 不同植被恢复模式下土壤颗粒组成和土壤容重变化

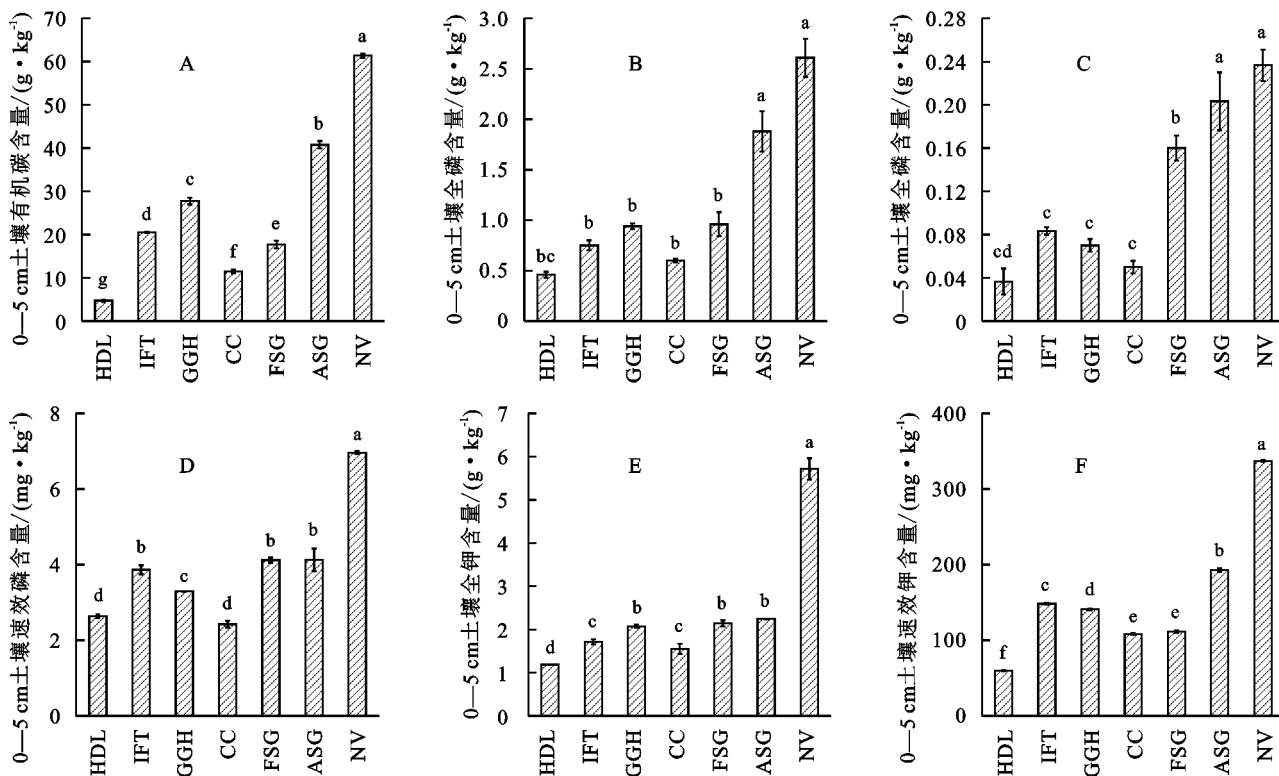
Table 2 Changes of soil particle composition and soil bulk density under different vegetation restoration modes							
样地名称	严重退化地 HDL	低效林改造 IFT	条沟草灌 GGH	封禁 CC	全坡面播草 FSG	乔灌草 ASG	自然林 NF
砂粒/%	73.90±0.06a	74.6±0.05a	71.77±0.16a	69.83±0.05a	70.07±0.09a	67.60±0.05b	61.59±0.09c
粉粒/%	16.23±0.04c	15.47±0.14d	17.23±0.02b	18.11±0.04a	15.20±0.05d	10.10±0.06f	14.16±0.09c
黏粒/%	10.65±0.15d	10.66±0.01d	11.33±0.02d	11.03±0.05d	15.01±0.05c	21.52±0.06b	24.03±0.03a
土壤容重/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.52±0.03a	1.39±0.08a	1.28±0.03c	1.16±0.02d	1.08±0.01e	1.00±0.01f	0.93±0.01f

注:不同小写字母表示不同植被恢复模式和对照样地之间土壤颗粒组成和土壤容重差异性显著($p<0.05$)。

2.2 不同植被恢复模式下土壤养分含量变化

如图1所示,0—5 cm不同植被恢复模式和对照样地的土壤有机碳呈显著差异($p < 0.05$)(图1A),乔灌木模式增加土壤有机碳含量达到最大值 61.3 g/kg,其他植被恢复模式的增加有机碳含量分别为条沟草灌 27.78 g/kg,低效林改造 20.52 g/kg,全坡面播草 17.70 g/kg,封禁 11.45 g/kg。0—5 cm不同植被恢复模式和对照样地的土壤全氮(图1B)、全磷(图1C)、速效磷(图1D)、全钾(图1E)、速效钾(图1F)差异不显著($p > 0.05$)。0—5 cm土壤全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾的含量最小值均出现在严重退化地,最大值均出现在自然林。0—5 cm土壤全氮含量变化范围是 0.61~1.87 g/kg。0—5 cm土层全磷含量是严重退化地最小值 0.03 g/kg 和自然林最大值

是 0.23 g/kg,乔灌木增加全磷含量达到 0.20 g/kg,其他植被恢复模式增加全磷含量范围是 0.05~0.16 g/kg。不同植被恢复模式 0—5 cm 土壤速效磷的含量变化范围分别为 2.42~4.12 mg/kg。乔灌木和全坡面播草增加速效磷含量达到最大值 4.12 mg/kg。0—5 cm 土层全钾含量是最小值和最大值是严重退化地和自然林分别为 1.18 g/kg 和 5.17 g/kg。0—5 cm 土壤全钾的含量变化范围是 1.56~2.23 g/kg,不同植被恢复模式增加土壤全钾含量的顺序是乔灌木>全坡面播草>条沟草灌>低效林改造>封禁。0—5 cm 土壤速效钾含量最小值和最大值是分别是 57.96 mg/kg 和 336.93 mg/kg,不同植被恢复模式 0—5 cm 土壤速效钾的含量范围是 111.70~192.75 mg/kg,其他不同植被恢复模式增加土壤速效钾的含量 108.2~148.30 mg/kg。



注:不同小写字母表示不同植被恢复模式和对照样地之间土壤养分含量差异性显著($p < 0.05$)。

图1 不同植被恢复模式土壤养分含量变化特征

Fig. 1 Changes of soil nutrient content in different vegetation restoration modes

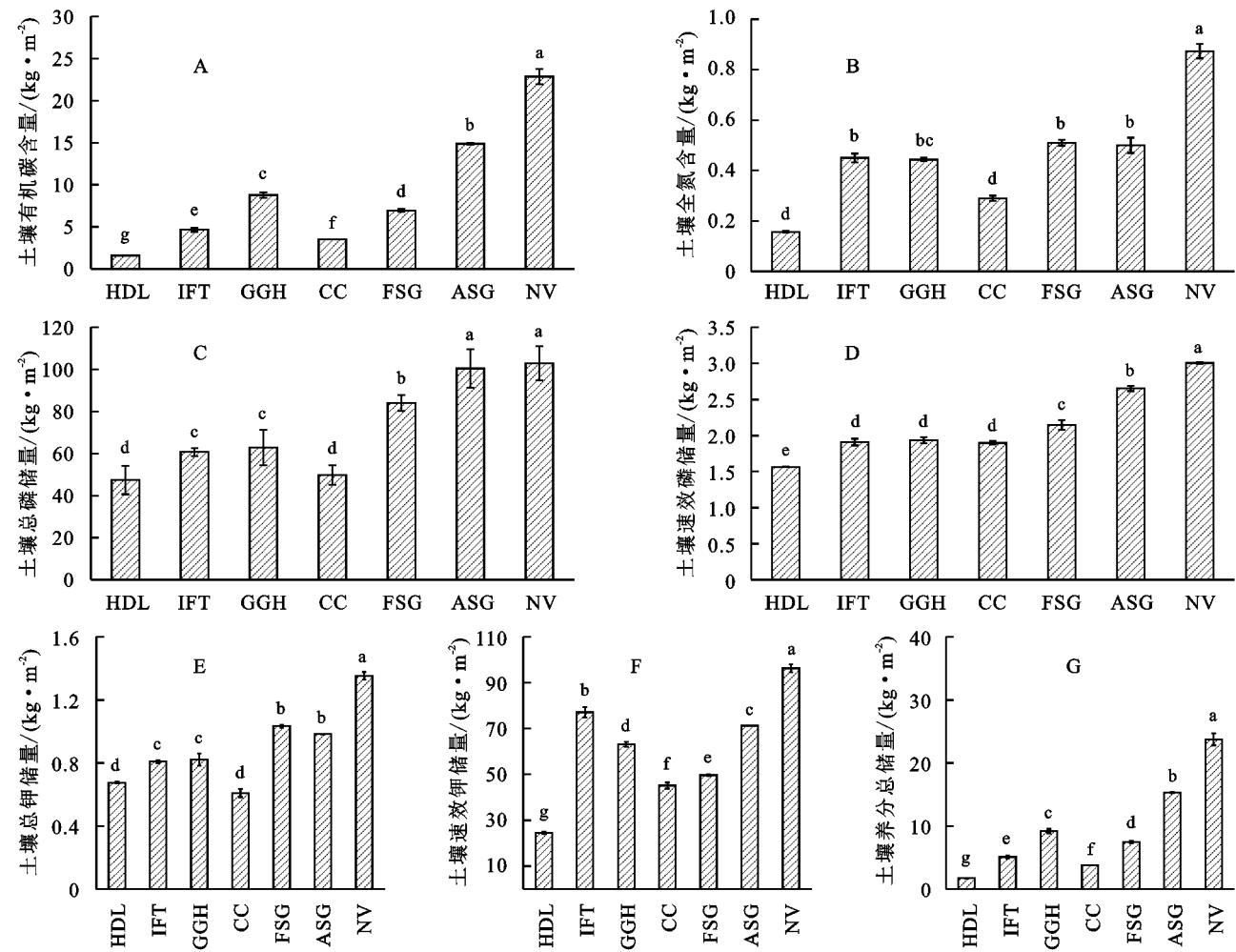
2.3 不同植被恢复模式下土壤养分储量特征

如图2所示,0—60 cm不同植被恢复模式和对照样地间土壤有机碳储量(图2A)、速效钾储量(图2F)、土壤养分总储量(图2B)存在显著差异($p < 0.05$),养分储量的最大值和最小值出现在自然林和严重退化地。0—60 cm土壤有机碳储量的最大值和最小值分别是自然林(22.86 kg/m²)和严重退化地(1.59 kg/m²),其他植被恢复模式增加土壤有机碳储量范围为 2.30~14.87 kg/m²。0—60 cm 土层速效钾储量的最大值是自然林(96.27

g/m²),最小值严重退化地(24.57 g/m²),不同植被恢复模式总钾储量顺序是低效林改造>条沟草灌>全坡面播草>乔灌木模式>封禁。不同植被恢复模式土壤养分总储量最大值是自然林 23.74 kg/m²,最小值是严重退化地 1.75 kg/m²,不同植被恢复模式土壤养分的总储量增加范围 2.79~15.30 kg/m²。其顺序为乔灌木模式>条沟草灌>全坡面播草>低效林改造>封禁。0—60 cm不同植被恢复模式和自然林、严重退化地土壤全氮(图2B)、总磷(图2C)、总钾(图2E)、速效磷(图

2D) 储量不存在显著差异 ($p>0.05$), 但各储量最大值和最小值均出现在自然林和严重退化地。土壤全氮总储量的最大值是自然林和严重退化地, 数值分别是 0.87 kg/m^2 , 0.15 kg/m^2 , 其他植被恢复模式全氮储量的顺序为乔灌草 (0.5 kg/m^2) > 条沟草灌 (0.44 kg/m^2) > 全坡面播草 (0.51 kg/m^2) > 低效林改造

(0.45 kg/m^2) > 封禁 (0.29 kg/m^2)。不同植被恢复土壤总磷储量变化范围为 $49.75\sim100.44\text{ mg/m}^2$ 。不同植被恢复模式土壤速效磷的总储量变化范围为 $1.89\sim2.65\text{ mg/m}^2$, 其中乔灌草模式增加土壤速效磷储量达到最大值 2.65 mg/m^2 。不同植被恢复模式土壤全钾的总储量数值是 $0.60\sim1.03\text{ g/m}^2$ 。



注:不同小写字母表示不同植被恢复模式和对照样地之间土壤养分储量差异性显著($p<0.05$)。

图 2 不同植被恢复模式土壤养分储量特征

Fig. 2 Soil nutrient storage characteristics of different vegetation restoration models

2.5 不同植被恢复模式土壤颗粒组成和土壤养分指标冗余分析

基于不同植被恢复模式下 0—5 cm 土壤颗粒组成指标和土壤养分 6 个指标进行冗余分析,如图 3 所示,主成分 1 的贡献率为 92.09%,主成分 2 的贡献率为 7.82%,累计贡献率达到 99.91%,6 个土壤养分指标评价了不同植被恢复模式的绝大部分信息。因此,选取这 2 个主成分作为评价不同植被恢复模式土壤颗粒组成主成分分析的依据,主成分 1 中土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾的权重系数较大,超过了 0.900,相反,主成分 2 中,土壤粉粒、砂砾和土壤养分呈明显负相关,表明主成分 1 中土壤有机碳、氮素、磷素、钾

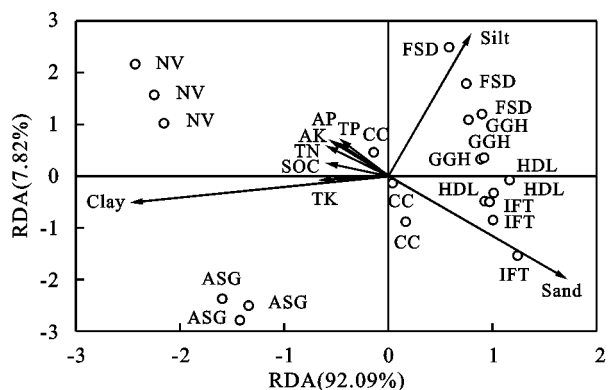
素能够表征不同植被恢复模式土壤颗粒组成中土壤黏粒含量的关系。如图 3 所示,土壤黏粒含量与土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾显著正相关,尤其是在自然林和乔灌草模式中最明显。

3 讨论

3.1 不同植被恢复模式土壤颗粒和土壤养分的关系

如表 2 所示,0—5 cm 土壤表层的土壤黏粒与土壤养分均呈显著正相关。该结果与张宏^[10]、Jin^[11]和 Yan^[12]等的研究结果相吻合,尽管是不同的土壤类型和土壤侵蚀类型。分析原因主要有以下几个方面:一是不同植被恢复模式下逐渐完善的地上部分如植被

多样性、植被冠层等增强或者改变了林冠截流,地表部分如丰富多样的地表凋落物聚集而构成的微形态提高了地表覆盖度和粗糙度,地下部分如地下的根系长度、根系直径、根系表面积和根系生物量、根系分泌物以及菌根真菌等微生物加固土壤,增强土壤的抗冲性和稳定性^[13-14],这些地上、地表和地下的单一指标作用及其综合协同效应不同程度地削弱和抑制了降雨的动能和势能^[4,15],降低了降雨对地表的溅蚀,削弱了地表径流流速和径流的冲蚀力,减少了水力侵蚀作用,进而降低了土壤黏粒的流失。二是从泥沙流失机理的视角分析,根据地表径流在土壤表面径流速度和侵蚀力的特点,水力侵蚀侵蚀过程中,地表径流首先搬运的是土壤表层的细颗粒^[16],所以不同植被恢复模式不同程度地降低了土壤表层细颗粒的流失和被搬运。不同植被恢复模式增加了土壤中碳、氮等养分的含量,且颗粒较小的黏粒能与土壤中的有机养分结合,所以土壤中有有机碳、氮含量在很大程度上得到保护。三是认为侵蚀泥沙是由不同粒径的土壤颗粒和团聚体组成,且土壤碳素和氮素总是与不同粒径颗粒相结合,即侵蚀泥沙中吸附碳氮素黏粒富集^[17],当侵蚀流失的土壤细颗粒和土壤团聚体减少,土壤养分留存也就越多。四是不同植被恢复模式下植被的丰富度、多样性和均匀度不同程度地改善了林内小气候,并且缓冲极端高温干燥和极端湿润的情况,进而缓冲和减少了降雨对土壤黏粒的破坏^[18]。以上分析表明,不同植被恢复模式下,尤其是自然林和乔灌木模式,土壤表层土壤黏粒含量和土壤养分含量呈显著正相关。



注:粉粒表示 Clay;砂砾表示 sand;黏粒表示 silt;有机碳表示 SOC;全氮表示 TN;全磷表示 TP;速效磷表示 AP;全钾表示 TK;速效钾表示 AK。

图3 不同植被恢复模式下土壤颗粒组成和土壤养分指标的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil particle composition and soil nutrient indexes under different vegetation restoration models

3.2 不同植被恢复模式下的土壤养分储量的影响因素

研究发现,0—5 cm 土壤有机碳含量、0—60 cm 土壤有机碳储量和 0—60 cm 土壤养分总储量顺序一致,其顺序为乔灌木模式>条沟草灌>全坡面播草>低效林改造>封禁。不同植被恢复模式下土壤养分含量和养分储量出现以上顺序的原因是乔灌木模式的植被多样性、林分结构、凋落物的数量和质量、根系的数量和质量、微生物的数量和质量等有利于土壤养分的长期积累,而条沟草灌模式是因为在沟内种植灌木和草本有丰富凋落物和根系。

不同植被恢复模式土壤全氮、全磷、速效磷、速效钾等养分储量均未出现显著差异($p < 0.05$),原因一是在水力侵蚀条件下,不同的水力侵蚀方式如淋溶径流作用导致养分的流失^[19-20],二是由于土壤养分含量、土壤容重等影响养分储量的因素和养分储量本身均存在异质性^[21]。三是调查发现,除了严重退化地固氮胡枝子属胡枝子科不存在以外,不同植被恢复模式和自然林样地中均大量出现豆科植物如胡枝子,很大程度上改善土壤的肥力和微生物的活性,还有研究表明种植胡枝子灌木的凋落物生物量最大,这主要和胡枝子叶片中含有难于分解的木质素关系密切^[22]。四是土壤氮固存和植被的丰富度有关系,也取决于固氮植物和非禾本科植物,所以有胡枝子生长的恢复模式中,其土壤碳氮的储量恢复模式高于不存在胡枝子灌木的恢复模式。影响土壤磷素储存的因素有降水强度、降水历时、地形和微地形、地表植被和土壤微生物等多因素单一或者共同作用。研究发现,微生物对土壤中部分无机磷的生物固定,可以有效地减少土壤中无机磷的淋失。五是土壤养分含量和储量的积累也受到营养元素有效性的影响,但在严重侵蚀退化地营养元素如可溶性有机碳、硝态氮、铵态氮以及速效磷和速效钾等易溶于水的养分大多都被水力侵蚀作用通过淋溶、溶解、径流作用流失,土壤碳氮磷钾等有效元素缺乏时效性,植物利用养分的速度抵不过养分流失速度,所以在不同植被恢复模式下,部分土壤养分没来得及被植物吸收、存留和利用,也是土壤养分和积累没有规律性的原因。综上所述,花岗岩红壤严重侵蚀退化地采取植被恢复措施、选择当地适生的固氮乔灌木和草本、选择根系丰富的草本,提高植物多样性和种植密度,均有利于改善土壤颗粒组成,并提高土壤养分和土壤养分储量。

4 结论

(1) 5种植被恢复模式改善了 0—5 cm 花岗岩退化红壤土壤颗粒组成。冗余分析表明,土壤黏粒是

提高0—5 cm土壤养分含量的关键因子。

(2) 5种植被恢复模式增加0—5 cm土壤有机碳、全氮、全磷、速效磷和全钾和速效钾的养分含量和储量。0—5 cm土壤有机碳含量、0—60 cm土壤有机碳储量和0—60 cm土壤养分总储量顺序一致,均表现为乔灌木>条沟草灌>全坡面播草>低效林改造>封禁。

(3) 土壤有机质是识别植被恢复土壤养分效果的直观指标,乔灌木模式是改善土壤颗粒组成和提高土壤养分和养分储量的最佳模式。

参考文献(References):

- [1] 王贤,张洪江,程金花,等.重庆四面山几种林地土壤颗粒分形特征及其影响因素[J].水土保持学报,2011,25(3):154-159.
Wang X, Zhang H J, Cheng J H, et al. Fractal characteristics and related affecting factors of particle size distribution of different forest soil in Simian Mountains, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011,25(3):154-159.
- [2] 王丽梅,张谦,白利华,等.毛乌素沙地3种人工植被类型对土壤颗粒组成和固碳的影响[J].水土保持研究,2020,27(1):88-94.
Wang L M, Zhang Q, Bai L H, et al. Effects of three artificial vegetation types on soil particle composition and carbon fixation in the mu us sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(1):88-94.
- [3] 雷泽勇,于东伟,周凤艳,等.樟子松人工林营建对土壤颗粒组成变化的影响[J].生态学报,2020,40(15):5367-5376.
Lei Z Y, Yu D W, Zhou F Y, et al. Effects of afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on change of soil particle size distribution in sandy land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(15):5367-5376.
- [4] 欧阳帅,项文化,陈亮,等.南方山地丘陵区森林植被恢复对水土流失调控机制[J].水土保持学报,2021,35(5):1-9.
Ouyang S, Xiang W H, Chen L, et al. Regulation mechanisms of forest vegetation restoration on water and soil erosion in mountainous and hilly area of southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):1-9.
- [5] Paula R R, Calmon M, Lopes-Assad M L, et al. Soil organic carbon storage in forest restoration models and environmental conditions [J]. Journal of Forestry Research, 2022,33(4):1123-1134.
- [6] 朱丽琴,黄荣珍,段洪浪,等.红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响[J].生态学报,2017,37(1):249-257.
Zhu L Q, Huang R Z, Duan H L, et al. Effects of artificially restored forests on soil organic carbon and active organic carbon in eroded red soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(1):249-257.
- [7] 姜永孟,邓翠,吕茂奎,等.红壤侵蚀区马尾松林恢复过程中土壤异养呼吸及微生物多样性的变化特征[J].土壤学报,2023,60(4):1156-1168.
Jiang Y M, Deng C, Lyu M K, et al. Changes in soil heterotrophic respiration and its microbial diversity during restoration of *Pinus massoniana* plantations in eroded red soil area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(4):1156-1168.
- [8] 夏江宝,顾祝军,周峰,等.红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征[J].中国水土保持科学,2012,10(5):9-15.
Xia J B, Gu Z J, Zhou F, et al. Soil particle fractal dimension and soil moisture physical properties in different forest stands in hilly red soil region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012,10(5):9-15.
- [9] 张跃进,李沁谊,王好才,等.中国西南喀斯特地区植被自然恢复演替典型群落土壤碳氮储量特征[J].林业科学,2023,59(7):45-53.
Zhang Y J, Li Q Y, Wang H C, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen storage in typical communities of natural restoration and succession of vegetation in Karst areas of southwest China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023,59(7):45-53.
- [10] 张宏,刘建军,黄土沟壑区不同土地利用方式下土壤养分及其与土壤颗粒组成关系[J].中南林业科技大学学报,2016,36(11):80-85.
Zhang H, Liu J J. Distribution of soil nutrient under different land use and relationship between soil nutrient, and soil granule composition in Loess hilly region [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(11):80-85.
- [11] Jin Z, Dong Y S, Qi Y C, et al. Characterizing variations in soil particle-size distribution along a grass - desert shrub transition in the Ordos Plateau of inner Mongolia, China[J]. Land Degradation & Development, 2013,24(2):141-146.
- [12] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, et al. Quantitative effects of wind erosion on the soil texture and soil nutrients under different vegetation coverage in a semiarid steppe of Northern China[J]. Plant and Soil, 2013,369(1):585-598.
- [13] Hao H X, Qin J H, Sun Z X, et al. Erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow under contrasting textured soils[J]. CATENA, 2021,203:105378.
- [14] 李强,杨俊诚,张加琼,等.植物根系抗侵蚀指标及模型研究进展[J].农业资源与环境学报,2020,37(1):17-23.
Li Q, Yang J C, Zhang J Q, et al. Progress of research on soil erosion resistance of plant roots and future

- prospects[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020,37(1):17-23.
- [15] Ding W F, Li M. Effects of grass coverage and distribution patterns on erosion and overland flow hydraulic characteristics [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016,75(6):477.
- [16] Li J W, Luo B L, Wei X H, et al. Transportation of fine particles controlled by particles flocculation is a key feature of soil erosion on gentle slope land [J]. *Catena*, 2023,232:107382.
- [17] 沈子雅,程金花,管凝,等.模拟降雨条件下灌草配置对坡面侵蚀泥沙颗粒分布的影响[J].*农业工程学报*, 2022,38(11):125-133.
- Shen Z Y, Cheng J H, Guan N, et al. Effects of shrub-herb arrangements on the distribution of sediment particles eroded from slopes under simulated rainfall conditions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(11):125-133.
- [18] Bai Y H, Zha X, Chen S F. Effects of the vegetation restoration years on soil microbial community composition and biomass in degraded lands in Changting County, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020,31(4):1295-1308.
- [19] 张鑫,李博,祖艳群,等.滇池流域 4 种典型次生林径流养分输出特征及机理[J].*水土保持学报*, 2014,28(5):37-42.
- Zhang X, Li B, Zu Y Q, et al. Characteristics and mechanism of nutrient output from surface runoff of secondary forest in Dianchi Lake watershed, Yunnan Province of southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014,28(5):37-42.
- [20] 常琚枫,刘莹,李陈,等.农田氮磷流失特征及影响因素研究[J].*中国农学通报*, 2023,39(15):69-75.
- Chang J F, Liu Y, Li C, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in farmland and the influencing factors[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023,39(15):69-75.
- [21] 张广杰,巢林,张伟东,等.亚热带森林土壤理化性质的异质性和最佳取样量[J].*应用生态学报*, 2018,29(7):2139-2148.
- Zhang G J, Chao L, Zhang W D, et al. Heterogeneity and optimal sampe size of soil physicochemical properties in subtropical forest [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018,29(7):2139-2148.
- [22] Herman J, Moorhead D, Berg B. The relationship between rates of lignin and cellulose decay in aboveground forest litter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008,40(10):2620-2626.
- ~~~~~
- (上接第 178 页)
- [32] 唐柄哲,何丙辉,闫建梅.川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析[J].*应用生态学报*, 2016,27(5):1445-1452.
- Tang B Z, He B H, Yan J M. Gray correlation analysis of the impact of land use type on soil physical and chemical properties in the hilly area of central Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016,27(5):1445-1452.
- [33] 杨先野,付强,王宝华,等.三江平原土壤质量变化评价的模糊神经网络模型构建及应用[J].*水土保持研究*, 2008,15(3):54-57.
- Yang X Y, Fu Q, Wang B H, et al. Construction and application of fuzzy neural networks model in evaluation on the soil quality changes of Sanjiang plain[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008,15(3):54-57.
- [34] 解雪峰,濮励杰,朱明,等.基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J].*环境科学*, 2019,40(12):5484-5492.
- Xie X F, Pu L J, Zhu M, et al. Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS model [J]. *Environmental Science*, 2019,40(12):5484-5492.
- [35] 张宇恒,王忠诚,王亚楠,等.基于最小数据集沂蒙山区不同治理模式下的土壤质量评价[J].*水土保持研究*, 2023,30(1):241-247.
- Zhang Y H, Wang Z C, Wang Y N, et al. Soil quality evaluation with different treatment models in Yimeng mountainous area based on minimum data set [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,30(1):241-247.
- [36] 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.
- Sun T S, Li W Y, Liu J L. Soil nutrient characteristics of Haloxylon ammodendron plantation in a desert-oasis region in the middle reaches of Heihe river basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017,31(5):179-185.