

砒砂岩区不同退耕还林措施土壤颗粒及交换性能分布特征

陈鹏¹, 郭建英², 董智¹, 李红丽¹, 张铁钢², 仇苏倩¹, 高娅¹, 陈小雪¹

(1. 山东农业大学林学院, 泰山森林生态系统定位研究站,

山东 泰安 271018; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 为研究砒砂岩区退耕还林还草措施下林地和草地的土壤结构及土壤交换性能对其措施响应, 选取柠条林、油松林、小叶杨林和本氏针茅草地为研究对象, 并以荞麦坡耕地为对照, 通过野外取样与室内试验相结合的方式, 采用分形理论探究土壤粒径分布(PSD)、阳离子交换量(CEC)和交换性盐基总量(ECEC)及其组成(Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的分布特征, 并分析其相关性关系。结果表明:(1)实施退耕还林措施后, 草地和林地的 PSD 分布范围、非均一性、离散程度均高于坡耕地, 且柠条林的土壤粉粒含量、PSD 分布范围的增幅效果最显著($P < 0.05$); 土壤剖面垂直层次上, 草地有利于增加表层土壤的细粒组分和粒径的分布范围, 而林地更有利于对深层土壤粒径的改良与细化;(2)研究区交换性盐基组成主要以碱土金属为主(Ca^{2+} 、 Mg^{2+}), 不同措施的土壤 ECEC 和 CEC 值由大到小依次为柠条林>油松林>小叶杨林>草地>坡耕地。草地表层土壤交换性能优于底层土壤, 而林地与之相反;(3)黏、粉粒和细砂是决定研究区土壤交换性能的细粒土壤和粗粒土壤, 粉粒是 CEC、ECEC 的主要贡献因子, 多重分形维数可较好地描述土壤交换性能与土壤颗粒间的关系。不同措施以柠条林对土壤颗粒组成和土壤交换性能的改良效果最优。

关键词: 退耕还林; 砒砂岩区; 土壤粒径分布; 多重分形; 土壤交换性能

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0043-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.007

Distribution Characteristics of Soil Particles and Exchangeable Capacity Under Grain for Green Project in Pisha Sandstone Area

CHEN Peng¹, GUO Jianying², DONG Zhi¹, LI Hongli¹,

ZHANG Tiegang², QIU Suqian¹, GAO Ya¹, CHEN Xiaoxue¹

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taishan Forestry Ecosystem Research Station, Tai'an,

Shandong 271018; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China, Hohhot 010020)

Abstract: In order to study the response of soil structure and soil exchangeable capacity of forest and grass to different measures of Grain for Green Project in Pisha sandstone area, we selected *Pinus tabulaeformis* forest (YS), *Caragana korshinskii* forest (NT), *Populus simonii* forest (XY) and *Stipa bungeana* grassland (ZM) as the research objects and buckwheat slope farmland (QM) as the control. Multi-fractal theory was used to determine the soil particle size distribution (PSD), which measured the fractions of CEC, ECEC and the composition of ECEC (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), as well as their distribution status and their correlations. The results showed that: (1) The PSD distribution, heterogeneity and dispersion of grassland and woodland were higher than those of sloping farmland after the implementation of conversion of cropland to forest. In the different soil profiles. Grassland was conducive to increasing the distribution range of fine-grained components and particle size of surface soil. However, in the improvement of the above indicators, woodland was more conducive to the deep soil. Moreover, the increase of soil silt contents and PSD distribution range in *Caragana korshinskii* forest were the most significant among all the measures ($P < 0.05$). (2) In terms of soil exchangeability, alkaline earth metals (Ca^{2+} , Mg^{2+}) were the main components of exchangeable base in the studied area. The CEC and ECEC values of soil under different measures were

收稿日期: 2018-12-14

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目(201601062); 国家自然科学基金项目(41701327); 国家重点研发计划项目(2016YFC0500504)

第一作者: 陈鹏(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事水土流失过程与机制研究。E-mail: chenpeng_sdau@163.com

通信作者: 董智(1971-), 男, 博士, 教授, 主要从事荒漠化防治与生态修复研究。E-mail: nmgdz@163.com

ranked as $NT > YS > XY > ZM > QM$. The exchangeable capacity of grassland surface soil was better than that bottom soil, while that of woodland was opposite. (3) Clay, silt and fine sand were the fine-grained soils and coarse-grained soils that determine soil exchangeable capacity in the studied area, and silt content was the main contributing factor of CEC and ECEC values. Multifractal dimension could well describe the relationship between soil exchangeable capacity and soil particles. It was found that among all the measures of Grain for Green Project, *Caragana korshinskii* had the best improvement effect on soil particle composition and soil exchangeable performance.

Keywords: Grain for Green Project; Pisha sandstone area; soil particle size distribution; multifractal; soil exchangeable capacity

砒砂岩主要分布在黄河流域的晋陕蒙接壤地区,是黄河多沙粗沙的主要来源区,也是黄土高原地区侵蚀最为剧烈、治理难度最大的地区^[1]。砒砂岩成岩程度低,沙粒之间胶结程度差,结构强度低,渗透性能差,遇风起尘,遇雨水松散,致使其水土流失极其强烈^[2]。合同沟小流域是典型的砒砂岩强烈侵蚀区^[1],20世纪90年代,为治理区域水土流失,改善生态环境,该区实施大规模退耕还林工程,将油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)和小叶杨(*Populus simonii* Carr.)等作为主要退耕还林树种,在当地进行大面积人工种植,使当地生态环境及水土流失情况得到了改善,但砒砂岩地区整体生态环境依旧比较脆弱,水土流失、荒漠化问题依然存在^[3],因此对生态工程的修复效果进行评价,并合理选择切实有效的生态修复措施,对治理砒砂岩区剧烈的水土流失、提升水土保持工程效益具有重要意义。

土壤阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)能够影响土壤结构的稳定性、养分利用率以及土壤对肥料等改良剂的响应^[4],在一定程度上也体现了土壤各方面的综合质量,是衡量土壤保育功能和交换阳离子能力的指标^[5],故其常被用来量度土壤肥力以及养分保持能力。国内外学者^[5-8]对土壤交换性能进行了多角度的研究,发现阳离子盐基组成及CEC受土壤物理、化学、生物学多种特性的影响,包括土壤质地、pH、有机质等;土壤粒径分布(particle size distribution, PSD)与土壤质地、理化性质密切相关^[9-10],故PSD亦是影响土壤交换性能的重要因素之一^[11]。掌握PSD与土壤交换性能之间的关系,是解释不同措施下土壤质量差异原因以及进一步实施合理管理措施的前提。以往对土壤交换性能与粒径关系的研究^[6],仅停留在土壤CEC值与黏、粉、砂粒含量的简单回归拟合,而对其与粒径分布的关系未进行更为细致的探讨。随着分形理论在土壤学领域的运用及发展,土壤粒径分形成为定量探究土壤PSD特征的重要技术^[12]。有研究^[10]指出,运用多重分形参数有助

于揭示土壤PSD的复杂性及非均质性。因此,结合多重分形维数可以更全面地了解土壤交换性能与土壤粒径的内在联系。目前,有关此类研究多集中于酸性土壤地区^[7,13],而在砒砂岩区多以土壤粒径、理化性质的研究为主^[14],尚未见关于土壤交换性能及其与粒径间关系的相关报道。

为探究不同退耕还林措施对土壤颗粒及交换性能的影响,本研究以砒砂岩地区的典型草地(本氏针茅(*Stipa bungeana* Trin.)和人工林地(柠条林、油松林、小叶杨林)为研究对象,并以坡耕地(荞麦(*Fagopyrum esculentum* Moench.)地)为对照,分析不同措施下土壤颗粒与交换性能的差异性及其原因,为砒砂岩区退耕还林工程土壤改良效果评价及合理选择树种提供基础理论。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古达拉特旗合同沟小流域,地理坐标为 $109^{\circ}53'36''-110^{\circ}06'53''$ E, $39^{\circ}59'58''-40^{\circ}13'18''$ N。属温带半干旱大陆性气候,多年平均降水量310.3 mm,71.2%的降水集中于7—9月,平均蒸发量2 157 mm。研究区属于砒砂岩覆沙区,丘陵沟壑交错,地形支离破碎,岩性结构松散,植被稀疏,水土流失严重。区内主要建群植物有羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)、本氏针茅、沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)等。退耕还林树种主要有柠条、油松、小叶杨、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)等。

1.2 样地选取

研究区坡耕地经退耕还林还草措施后,主要转变为本氏针茅草地、油松林地、柠条灌木林地、小叶杨林地,因此,选择这6种典型样地为研究对象。各措施调查样地情况见表1。

2018年7—8月,在研究区选择地貌类型相似的退耕还林措施地块作为调查样地,在各措施样地内,分别设置3块植物长相基本一致的 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的标准地,在标准地内以“S”形土壤采样法挖取5个剖面,每层10 cm采集土样,采样深度60 cm。将土样带回实验室,去

除植物根系及残体,风干后研磨过 2.0,0.149 mm 筛,用于土壤粒径及土壤交换性能指标的测定。

表 1 样地概况

样地类型	地理坐标	坡向	植被特征
荞麦坡耕地(QM)	40°02'56.02" N, 110°02'06.48" E	半阴坡	坡耕地主要种植荞麦,有翻耕,人为扰动较大,施肥频率较低
本氏针茅草地(ZM)	40°03'06.76" N, 110°01'58.53" E	半阴坡	草本覆盖度在 40%左右,为弃耕后自然植被,年限为 20 年
柠条林(NT)	39°56'57.84" N, 110°16'09.34" E	半阴坡	灌丛高 1 m 左右,主要植被为针茅+百里香,种植年限 20 年,无人为扰动
油松林(YS)	39°57'02.07" N, 110°16'34.02" E	半阴坡	树高在 4 m 左右,主要植被为针茅+达乌里胡枝子,种植年限 20 年,无人为扰动
小叶杨林(XY)	39°56'52.48" N, 110°16'11.00" E	半阴坡	树高 3.5 m 左右,主要植被为虫实+赖草,种植年限为 20 年,无人为扰动

1.3 样品测定与数据分析

1.3.1 样品测定 土壤粒径采用马尔文激光粒度仪测定,土壤阳离子交换量采用乙酸铵-火焰光度法,土壤交换性阳离子测定先使用 $\text{NH}_4\text{Cl}-70\%\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ (pH 8.5) 浸提,然后使用原子分光光度计测定交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,使用火焰光度计测定交换性 Na^+ 、 K^+ 。土壤交换性盐基总量(ECEC)采用加和法计算($\text{ECEC} = \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \frac{1}{2}\text{Ca}^{2+} + \frac{1}{2}\text{Mg}^{2+}$)^[15]。

1.3.2 土壤粒径分布与单重分形维数、多重分形参数 单重分形维数计算公式为:

$$\frac{V(r < R_i)}{V_T} = \left(\frac{R_i}{R_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

式中: D 为土壤体积分形维数; r 为土壤粒径值(mm); R_i 为第 i 级的土壤粒径值(mm); R_{\max} 为土壤粒径的最大值(mm); $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于 R 的土壤体积分数(%); V_T 为各粒径等级体积分数累加和(%)。

土壤单重分形维数难以反映土壤复杂的空间变异及非均质行为,而多重分形维数恰好可以弥补这一不足^[10],为更深入揭示土壤 PSD 分布的信息,下文引入多重分形维数。

多重分形维数的计算:激光粒度仪测量粒度区间 $I = [0.02, 200.0]$,以对数差划分为区间 $I_i = [\Phi_i, \Phi_{i+1}]$ 。式中: i 为取值范围 1~100 的正整数,后将区间进行对数变化, $\varphi_i = \lg(\Phi_i/\Phi_1)$,得到无量纲区间 $T = [0, 5]$,内有 100 个等距子区间 $T_i = [\varphi_i, \varphi_{i+1}]$,区间 T 含有 $N(\delta) = 2^k$ 个相同尺度的小区间,区间尺寸为 $\delta = 5 \times 2^{-k}$,为保证最小的子区间内含有测量值,遂令 k 取值范围为 1~6, $P_i(\delta)$ 为各子区间土壤粒径分布的概率密度(%),根据尺度 δ 及参数 q ,利用 $P_i(\delta)$ 构造分配函数族:

$$u_i(q, \delta) = \frac{P_i(\delta)^q}{\sum_{i=1}^{N(\delta)} P_i(\delta)^q} \quad (2)$$

式中: $u_i(q, \delta)$ 为第 i 个子区间的 q 阶概率; q 为实数。

PSD 的多重分形广义维数 $D(q)$:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^n P_i^q(\delta)}{\log(\delta)} \quad (q \neq 1) \quad (3)$$

$$D(q) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^n P_i(\delta) \log P_i(\delta)}{\log(\delta)} \quad (q = 1) \quad (4)$$

q 取值范围为 $[-10, 10]$,以 1 为步长,通过最小二乘法对公式(3)~公式(4)拟合得 $D(q)$,关于 $D(q)$ 本文只讨论 q 为 0,1 时的特殊情况; D_0 为容量维数; D_1 为信息维数^[10]。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 和 Matlab 2016 软件进行计算处理,采用 IBM SPSS 24.0 软件对各指标进行统计分析。采用最小显著差异法(LSD)进行差异显著性比较,显著水平为显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。采用 Origin 2017 软件进行图件的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同退耕还林措施下 PSD 特征

不同措施下 PSD 分布差异较大,由图 1 可知,坡耕地 PSD 高峰范围出现在细、中砂范围(0.1~0.5 mm),显著高于其他粒径的体积分数,草地与小叶杨 PSD 高峰范围相似,均位于位于极细、细砂范围(0.05~0.25 mm),柠条林、油松林 PSD 分布均出现了 2 个峰值,分别位于粉粒范围(0.002~0.05 mm)和极细、细砂范围(0.05~0.25 mm)。但油松林粉粒体积分数低于柠条林。

不同措施下土壤粒径分布有所不同(表 2),黏粒分布以柠条林最多(3.46%),坡耕地最少(1.33%),柠条、油松、小叶杨林及草地黏粒含量分别比坡耕地增长了 160.2%、46.6%、29.3%、46.6%。砂粒含量坡耕地最多(70.57%),柠条林最低(44.95%),柠条、油松、小叶杨林及草地分别比坡耕地减少了 36.3%、

12.9%, 4.5%, 12.6%。

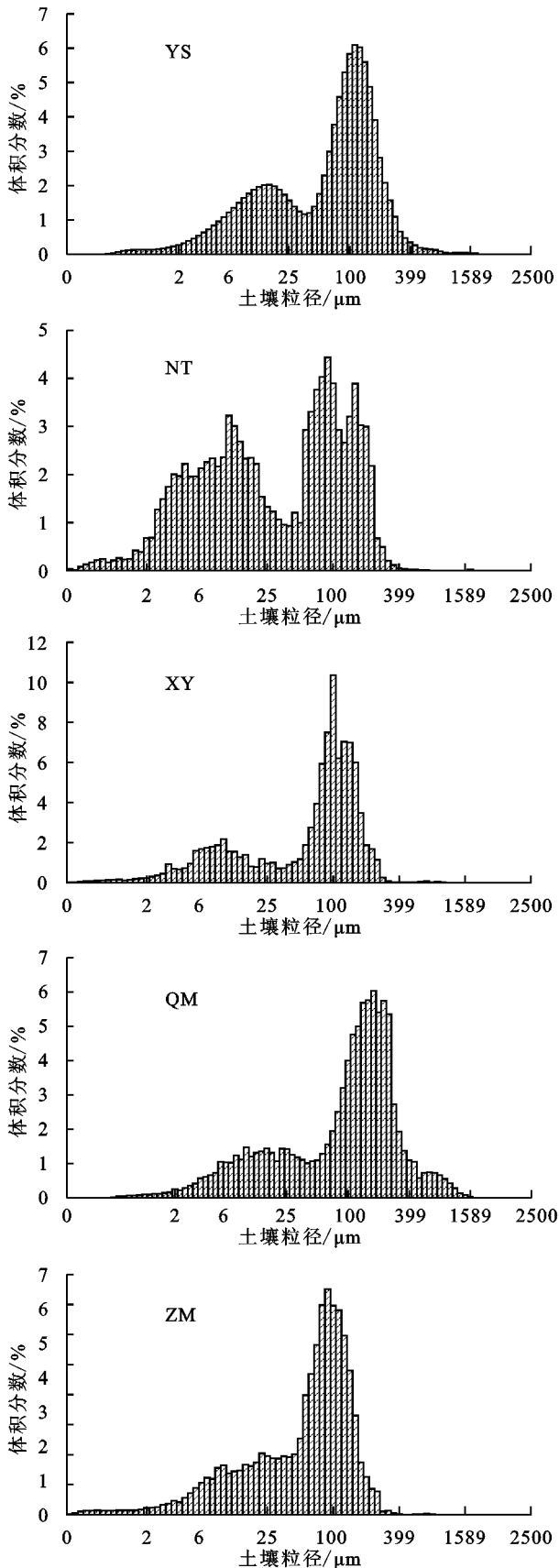


图 1 不同措施下 PSD 分布特征

就土壤分形维数(D)而言, 柠条林最大(2.478), 坡耕地最小(2.307), 其余措施 D 值均无显著差异且介于两者之间(表 3)。不同剖面深度的分形维数, 坡

耕地、草地呈现随土层深度增加而减少的趋势, 而油松林、柠条林、小叶杨林却呈现随土层深度增加而变大的趋势。 D 可量化表征土壤质地粗细水平, 且与土壤黏、粉粒含量呈显著正相关, 与砂粒含量呈负相关关系^[16]。由此, 退耕还林措施对土壤颗粒的细化具有促进作用, 林地更有利于深层土壤的细化改良, 其中柠条林对土壤的细化作用最显著($P < 0.05$)。 D_0 表征土壤 PSD 颗粒群体的范围, 数值越大则缺失粒径越少^[10]。不同措施 D_0 均值介于 0.848~0.904, 大小关系为柠条林(0.904) > 油松林(0.884) > 小叶杨林(0.875) > 草地(0.856) > 坡耕地(0.848)。实施退耕还林后, 林地和草地 PSD 范围均大于坡耕地, 柠条林 PSD 分布范围最广, 即砒砂岩区柠条灌丛增加 PSD 范围的效果最好($P < 0.05$)。 D_1 表征 PSD 均匀度, 数值越大则 PSD 不均匀度越高^[10], D_1 均值范围介于 0.753~0.774, 大小关系为柠条林 > 油松林 > 草地林 > 小叶杨林 > 坡耕地, 坡耕地 D_1 均值分别是柠条林、油松林、小叶杨林和草地的 97.3%, 98.8%, 99.3%, 99.0%。因此, 实施退耕还林有利于提高 PSD 的非均一性, 但除柠条林 D_1 值提升显著外($P < 0.05$), 其余林地、草地和坡耕地间 D_1 值差异不明显。

D_1/D_0 表征 PSD 的异质程度, 数值越大则离散程度越小^[10]。 D_1/D_0 均值范围介于 0.856~0.892, 大小关系为坡耕地(0.892) > 草地(0.888) > 小叶杨林(0.866) > 油松林(0.862) > 柠条林(0.856), 与 D_0 均值完全相反, 由此可知, 退耕还林有利于增大 PSD 的异质性, 使得不同粒径的颗粒在土壤中均有分布, 也说明不同措施对土壤颗粒的细化改良作用, 从效果来看, 林地的改良效果优于草地, 且柠条林对 PSD 离散度的增幅效果最为明显($P < 0.05$)。

2.2 不同退耕还林措施下土壤交换性能

2.2.1 土壤阳离子交换量

由图 2 可知, 研究区土壤 CEC 值介于 6.64~24.31 cmol/kg, 保肥能力中等, 其中最高值位于柠条林地(20—30 cm), 最低值位于农田(30—40 cm), 不同措施间 CEC 值差异较大。各土层 CEC 含量各有不同, 草地在 0—10 cm 土层土壤 CEC 最高, 其余各土层均以柠条林最高。柠条林及油松林土壤 CEC 平均值显著高于其他措施($P < 0.01$), CEC 值由大到小排列为柠条林 > 油松林 > 小叶杨林 > 草地 > 坡耕地(分别为 17.65, 12.05, 9.16, 9.02, 8.68 cmol/kg)。与坡耕地相比, 退耕还林后土壤 CEC 值均得到提升, 其中柠条林和油松林 CEC 值增长最为显著($P < 0.01$), 分别提高了 103.3% 和 38.8%, 小叶杨和草地提升幅度较小, 分别提高了 5.5% 和 3.9%。

剖面层次上, 坡耕地和草地土壤 CEC 值随土层

深度增加而减小,而林地与之相反,表现为随土层深度增加而上升的趋势。具体表现为坡耕地和草地深层土壤(20—60 cm)的土壤 CEC 值是表层土壤(0—

20 cm)的 68.1%和 68.9%;而林地,即柠条林、油松林和小叶杨林地,深层土壤 CEC 值是表层土壤的 145.3%,119.2%,127.7%。

表 2 不同措施下土壤颗粒组成

单位:%

样地类型	黏粒	粉粒	砂粒					砂粒合计
			极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	
QM	1.33	28.10	14.51	43.10	8.55	3.85	0.56	70.57
YS	1.95	36.57	24.77	32.96	3.00	0.57	0.19	61.48
NT	3.46	51.59	23.35	20.70	0.87	0.02	0.00	44.95
XY	1.72	30.91	32.36	34.40	0.40	0.20	0.00	67.37
ZM	1.95	36.37	35.78	25.50	0.31	0.08	0.01	61.68

表 3 不同措施下不同深度分形维数

样地类型	分形参数	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—60 cm	均值
QM	D	2.421±0.051	2.299±0.045	2.311±0.060	2.249±0.049	2.207±0.049	2.307±0.046c
	D_0	0.836±0.025	0.821±0.028	0.873±0.027	0.853±0.026	0.858±0.025	0.848±0.025c
	D_1	0.774±0.024	0.800±0.028	0.678±0.020	0.758±0.023	0.756±0.023	0.753±0.023b
	D_1/D_0	0.927±0.028	0.987±0.030	0.777±0.023	0.889±0.027	0.881±0.027	0.892±0.027c
YS	D	2.473±0.054	2.291±0.050	2.352±0.047	2.386±0.050	2.347±0.061	2.370±0.050b
	D_0	0.878±0.026	0.932±0.028	0.836±0.025	0.836±0.025	0.939±0.027	0.884±0.026b
	D_1	0.801±0.024	0.792±0.025	0.706±0.020	0.722±0.024	0.790±0.023	0.762±0.024b
	D_1/D_0	0.912±0.027	0.850±0.026	0.845±0.025	0.864±0.029	0.842±0.027	0.862±0.027b
NT	D	2.458±0.054	2.518±0.051	2.557±0.051	2.421±0.049	2.435±0.049	2.478±0.055a
	D_0	0.836±0.025	0.858±0.026	0.968±0.025	0.958±0.026	0.902±0.025	0.904±0.025a
	D_1	0.794±0.023	0.802±0.023	0.731±0.023	0.761±0.024	0.784±0.023	0.774±0.023a
	D_1/D_0	0.950±0.029	0.934±0.028	0.755±0.028	0.794±0.028	0.870±0.028	0.856±0.028a
XY	D	2.283±0.062	2.373±0.049	2.406±0.050	2.347±0.048	2.383±0.048	2.358±0.047b
	D_0	0.878±0.026	0.830±0.025	0.903±0.025	0.847±0.027	0.918±0.025	0.875±0.025b
	D_1	0.787±0.019	0.716±0.022	0.761±0.021	0.755±0.024	0.770±0.021	0.758±0.021b
	D_1/D_0	0.896±0.022	0.863±0.026	0.843±0.024	0.892±0.026	0.839±0.025	0.866±0.025b
ZM	D	2.382±0.050	2.396±0.050	2.401±0.048	2.377±0.062	2.304±0.047	2.372±0.048b
	D_0	0.858±0.026	0.836±0.025	0.830±0.025	0.854±0.027	0.904±0.026	0.856±0.026c
	D_1	0.815±0.023	0.728±0.022	0.730±0.022	0.736±0.024	0.794±0.022	0.760±0.022b
	D_1/D_0	0.949±0.028	0.872±0.026	0.879±0.026	0.861±0.026	0.879±0.027	0.888±0.027c

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示不同措施同一指标差异显著($P<0.05$)。

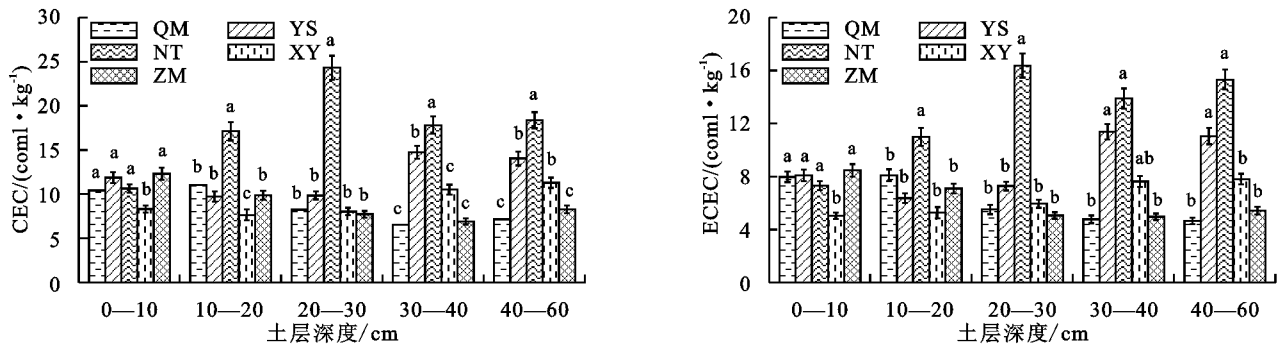


图 2 不同退耕还林措施土壤 CEC 和 ECEC 含量

2.2.2 土壤盐基离子含量 ECEC 值介于 4.64~16.37 cmol/kg,其趋势与 CEC 值基本相似(图 2)。研究区各盐基离子含量见图 3,林地、草地和坡耕地($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$)含量均显著高于($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$)($P<0.01$),说明该区盐基离子组成以碱土金属离子为主导, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在成土母质和土壤形成过程具有的优先固持作用是影响

土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量大小的关键因素^[17]。剖面层次上,林地与草地的盐基离子(Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})含量变化趋势不同,与坡耕地相比,草地的盐基离子含量变化主要集中于 0—20 cm 层,而林地则集中于 20—60 cm 层。说明草地有利于提升表层土壤的盐基离子含量,而林地有利于提升深层土壤的盐基离子含量。

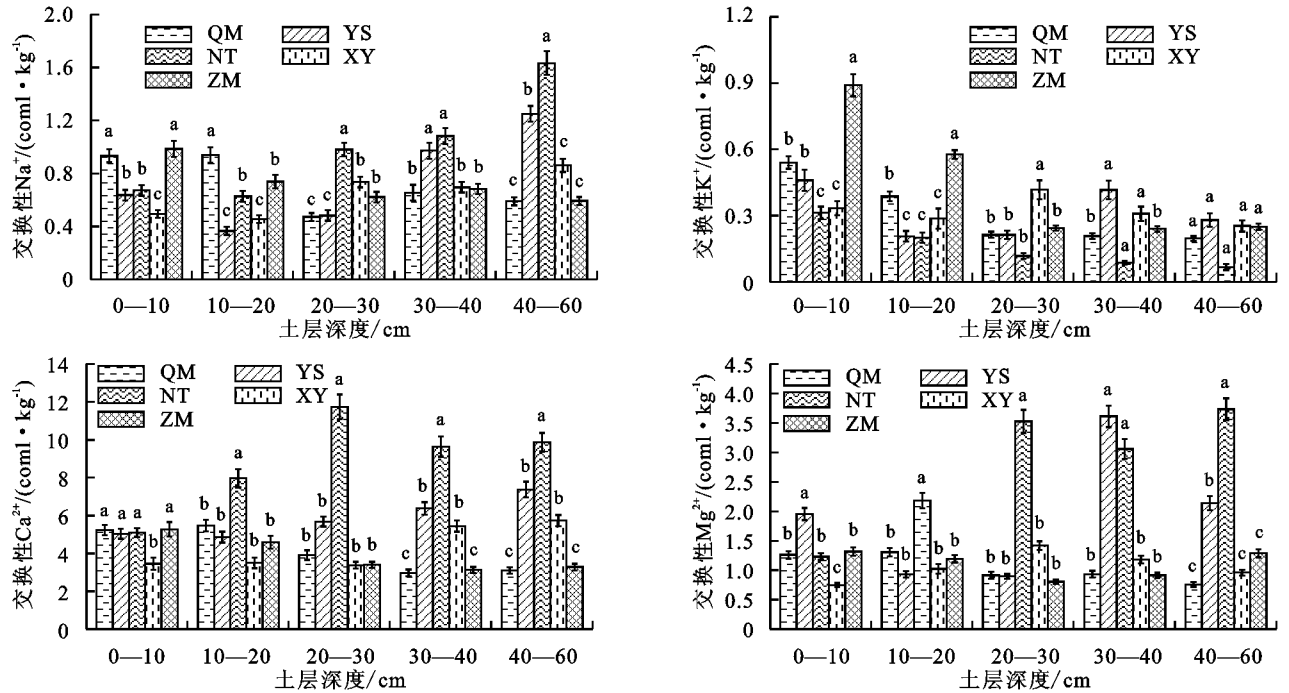


图 3 不同退耕还林措施土壤交换性阳离子含量

盐基离子组成方面,实行退耕还林还草措施后,林地对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量提升幅度较大(小叶杨林除外),介于 50.4%~124.6%。并且交换性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^+ 离子均以柠条林地含量最高(分别为 9.07, 1.93, 1.00 cmol/kg),草地的交换性 K^+ 离子含量最高(0.41 cmol/kg),说明林地对土壤盐基离子含量的提升作用优于草地,其中柠条林的提升作用最为显著($P < 0.05$)。

各离子在盐基离子总量的占比是评价离子有效性的一个重要指标。由表 4 可知,各样地盐基离子的组成均以 Ca^{2+} 占优势,达到交换性盐基的 69.10%左右,其次是交换性 Mg^{2+} ,占交换性盐基比重的 16.20%左右,交换性 Na^+ 、 K^+ 含量较少。

表 4 有效盐基离子分布特征 单位:%

样地类型	Ca/ECEC	Mg/ECEC	Na/ECEC	K/ECEC
QM	66.74	16.69	11.59	4.98
ZM	66.92	16.03	10.79	6.26
YS	71.52	16.29	8.55	3.64
NT	73.92	15.71	8.15	2.22
XY	69.10	16.20	9.85	4.85

2.3 不同退耕还林措施下土壤交换性能、PSD 组成、分形参数间的关系

土壤交换性能与 PSD 组成及分形参数之间的 Pearson 相关分析见表 5,土壤交换性阳离子及 ECEC、CEC 均与黏粒、粉粒含量呈显著正相关(除 K^+ 以外),且粉粒与交换性能指标之间的相关性强于黏粒。砂粒部分未与土壤交换性能指标呈现统一相关关系,其中细砂与除 K^+ 离子外的土壤交换性能指标均呈现显著或极显著负相关。由此可见,黏、粉粒及细砂是决定本区域土

壤交换性能的主要土壤粒径。

除 K^+ 与 D_0 呈负相关关系外,其余各交换性能指标均与 D_0 、 D_1 呈正相关关系,且 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、CEC、ECEC 均与 D_0 呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关关系。 D_1/D_0 与 Na^+ 、 K^+ 呈正相关关系,其中与 K^+ 显著正相关($P < 0.05$),与其他各指标均呈负相关关系。

3 讨论

3.1 不同退耕还林措施对土壤粒径的影响

退耕还林还草措施可以优化土壤结构,提高土壤颗粒中的细颗粒物含量,并且提高土壤 D_0 、 D_1 值^[16]。本研究发现,不同措施容量维数(D_0)差异显著($P < 0.05$)且均大于坡耕地,说明退耕还林措施对拓宽 PSD 范围有促进作用,而不同措施之间土壤信息维数(D_1)波动较小,介于 0.753~0.774,除柠条林外,其余各措施均未表现出明显的差异性,董莉丽等^[18]对黄土高原安塞纸坊沟流域研究时也发现林地、荒地、农田之间 D_1 值波动较小的现象,这与本研究的结果相同,对此 Montero^[9]认为当土壤黏粒体积分数波动较小时, D_1 的变化范围也较小。研究区除修复效果最佳的柠条林的土壤黏粒含量提升较高外(3.46%),其余措施黏粒体积均波动极小,介于 1.33%~1.95%,因此导致不同措施下 D_1 差异较小。

实施退耕还林措施后,林地对 D_0 、 D_1/D_0 值的改良作用显著($P < 0.05$),增加了土壤颗粒中的细粒含量,改善了土壤结构。但在剖面层次上,林地对表层土壤的优化效果逊色于深层土壤,本研究中所涉及的柠条林,其表层土壤 D_0 值低于深层土壤,而 D_1/D_0

值高于深层土壤,表明柠条林深层土壤比表层土壤 PSD 离散程度大、分布范围广。这可能是因为根系对深层土壤改良作用的结果,张莉等^[19]在研究中发现柠条主要根系分布于 30—60 cm 层,占总根量的

60%左右,而根系活动及根系分泌物会加快成土母质的分解,增加土壤团聚体结构含量,促进土壤结构的改良^[20],因而,研究区林地深层土壤 D_0 、 D_1/D_2 等优于表层土壤。

表 5 土壤交换性能、PSD 组成、分形参数间相关关系

指标	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺	CEC	ECEC	D_0	D_1	D_1/D_0	黏粒	粉粒	极细砂	细砂	中砂	粗砂
K ⁺	0.007														
Ca ⁺	0.677 **	-0.303													
Mg ⁺	0.725 **	-0.222	0.846 **												
CEC	0.644 **	-0.217	0.978 **	0.880 **											
ECEC	0.764 **	-0.222	0.980 **	0.924 **	0.976 **										
D_0	0.243	-0.329	0.550 **	0.447 *	0.538 **	0.515 **									
D_1	0.306	0.180	0.122	0.075	0.094	0.142	0.233								
D_1/D_0	0.173	0.411 *	-0.189	-0.183	-0.203	-0.148	-0.440 *	0.761 **							
黏粒	0.510 **	-0.166	0.740 **	0.640 **	0.776 **	0.733 **	0.301	0.155	-0.010						
粉粒	0.578 **	-0.208	0.756 **	0.701 **	0.778 **	0.765 **	0.272	0.269	0.116	0.883 **					
极细砂	-0.264	0.472 **	-0.343 *	-0.329	-0.315	-0.331	-0.218	-0.065	0.062	-0.145	-0.254				
细砂	-0.448 *	-0.144	-0.579 **	-0.470 **	-0.606 **	-0.583 **	-0.098	-0.301	-0.273	-0.727 **	-0.756 **	-0.321			
中砂	-0.139	-0.107	-0.138	-0.202	-0.184	-0.171	0.006	-0.039	-0.026	-0.461 *	-0.501 **	-0.545 **	0.581 **		
粗砂	0.093	0.127	-0.006	-0.106	-0.035	-0.020	-0.218	0.195	0.384 *	-0.270	-0.230	-0.129	-0.052	0.511 **	
极粗砂	-0.074	0.067	-0.070	-0.167	-0.098	-0.099	-0.047	0.149	0.216	-0.316	-0.267	-0.066	-0.009	0.459 *	0.849 **

注: * 表示显著水平为 $P < 0.05$; ** 表示显著水平为 $P < 0.01$ 。

3.2 土壤粒径对土壤交换性能的影响

CEC 大小取决于土壤胶体比表面积及表面负电荷密度,通常不同粒级土壤其矿质颗粒比表面积及矿物晶格组成差异显著^[21],因而土壤颗粒的组成对土壤交换性能有显著影响。本研究发现,土壤黏粒、粉粒部分均与土壤 CEC、ECEC 及交换性离子呈现显著性正相关,且粉粒对土壤交换性能的贡献高于黏粒,而 Kassa 等^[15]认为成土母质风化的黏粒部分是影响 CEC、ECEC 含量的重要影响因素,王文艳等^[6]在黄土高原陕北地区的研究中发现,黏粒含量是该区域土壤交换性能的主要影响因素,而粉粒含量的影响作用较小,这与本研究的结果有所出入,其原因可能是研究区地处砒砂岩区,黏粒含量较低^[14],退耕还林后各措施下粉粒含量均达到较高水平,并且粉粒对土壤交换性能亦有不可忽视的贡献^[22],因此较高的粉粒比例使得黏粒部分对土壤交换性能的贡献度被粉粒部分所掩盖。

在剖面层次上,坡耕地、草地的土壤交换性能随深度的增加而降低,这与孙海东等^[23]研究结果一致。林地土壤交换性能随剖面深度的增加有上升的趋势,这可能是由于各土层深度土壤黏、粉粒含量的不同所造成的差异,王文艳等^[6]研究认为,土壤质地的粗细是影响土壤交换性能的重要原因,本研究中,林地深层土壤的黏、粉粒含量(尤其是粉粒含量)显著高于表层土壤($P < 0.05$),从而造成了研究区林地深层土壤交换性能高于表层土壤的现象。

4 结论

(1) 砒砂岩区退耕还林后显著增加了 PSD 分布范围、非均一性及离散程度。各林地和草地的土壤粉粒含量显著提升($P < 0.05$),但黏粒含量变化较不明显,草地能够有效改良表层土壤 PSD 分布,而林地更有利于对深层土壤质地的细化。

(2) 研究区土壤盐基离子主要以碱土金属离子为主导,不同措施间土壤交换性能总体上表现为林地 > 草地 > 坡耕地,退耕还林还草措施可以增加土壤细粒部分(尤其是粉粒),在一定程度上促进了土壤阳离子交换量及交换性盐基的增加。土壤 CEC 的剖面分布表现为草地、坡耕地随土层深度而减小,林地则与之相反。

(3) 黏粒、粉粒及细砂是决定本区域土壤交换性能的细粒和粗粒土壤,粉粒是土壤交换性能的主要贡献因素。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 魏彬萌,赵宣. 添加砒砂岩对风沙土性质的改良及时间效应[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 16-21.
- [3] 姚俊娜,秦奋. 基于 GIS 和 RS 的砒砂岩区生态环境质量综合评价[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 193-197, 345.
- [4] Hazelton P, Murphy B. Interpreting soil test results what do all the numbers mean [M] Australia: Csrios Publishing, 2007.

- [5] Saidi D. Importance and role of cation exchange capacity on the physicals properties of the cheliff saline soils (Algeria) [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 33: 435-449.
- [6] 王文艳,张丽萍,刘俏. 黄土高原小流域土壤阳离子交换量分布特征及影响因子[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5):123-127.
- [7] 黄尚书,叶川,钟义军,等. 不同土地利用方式对红壤坡地土壤阳离子交换量及交换性盐基离子的影响[J]. *土壤与作物*, 2016, 5(2):72-77.
- [8] Khaledian Y, Brevik E C, Pereira P, et al. Modeling soil cation exchange capacity in multiple countries[J]. *Catena*, 2017, 158: 194-200.
- [9] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182: 305-315.
- [10] 代豫杰,郭建英,董智,等. 不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(11): 4809-4818.
- [11] 姜林,耿增超,李珊珊,等. 祁连山西水林区土壤阳离子交换量及盐基离子的剖面分布[J]. *生态学报*, 2012, 32(11):3368-3377.
- [12] Li Y, Li M, Horton R. Single and joint multifractal analysis of soil particle size distributions [J]. *Pedosphere*, 2011, 21: 75-83.
- [13] 张瑶,邓小华,杨丽丽,等. 不同改良剂对酸性土壤的修复效应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5):330-334.
- [14] 李晓丽,苏雅,齐晓华,等. 高原丘陵区砒砂岩土壤特性的实验分析研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(1):315-318.
- [15] Kassa H, Dondeyne S, Poesen J, et al. Impact of deforestation on soil fertility, soil carbon and nitrogen stocks; The case of the Gacheb catchment in the White Nile Basin, Ethiopia [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2017, 247: 273-282.
- [16] 董莉丽,马孝燕,胡丹,等. 吴起县退耕还林样地土壤粒径分布的单一和多重分形特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(7):111-115.
- [17] 张玉革,梁文举,姜勇. 不同利用方式下潮棕壤交换性钙镁的剖面分布[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(4):813-818.
- [18] 董莉丽,郑粉莉. 纸坊沟流域不同土地利用类型下的土壤粒经多重分形研究[J]. *土壤*, 2010, 42(2):302-308.
- [19] 张莉,吴斌,丁国栋,等. 毛乌素沙地沙柳与柠条根系分布特征对比[J]. *干旱区资源与环境*, 2010, 24(3):158-161.
- [20] Yükses T, Yükses F. The effects of restoration on soil properties in degraded land in the semi-arid region of Turkey [J]. *Catena*, 2011, 84(1/2): 47-53.
- [21] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [22] 章明奎,朱祖祥. 粉粒对土壤阳离子交换量的影响[J]. *土壤肥料*, 1993(4):41-43.
- [23] 孙海东,刘备,吴炳孙,等. 橡胶树人工林地土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(2): 49-54.

(上接第 42 页)

- [10] 刘晓君,李占斌,李鹏. 基于土地利用/覆盖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.
- [11] 李莹,黄岁樑. 滦河流域景观格局变化对水沙过程的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(7):2463-2475.
- [12] 徐炫清,陈裕婵,李青圃,等. 五华河流域景观格局演变对径流泥沙的研究[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(1): 231-236, 242.
- [13] 张少伟,杨勤科,任宗萍,等. 江西省赣南地区土地利用动态分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2):53-56.
- [14] 李桂静,崔明,周金星,等. 南方红壤区林下土壤侵蚀控制措施水土保持效益研究[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5):1-5.
- [15] Liu J Y, Liu M L, Zhang D F, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000 [J]. *Science in China*, 2003, 46(4):373-384.
- [16] Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2):195-210.
- [17] 江西省水利厅. 江西河湖大典[M]. 武汉:长江出版社, 2010.
- [18] 徐晗泽宇,刘冲,王军邦,等. Google Earth Engine 平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J]. *地球科学信息学报*, 2018, 20(3):396-404.
- [19] 王金花,李占斌,张荣刚,等. 水蚀风蚀交错区流域景观格局变化及水沙响应关系[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(3):68-75.
- [20] 王璋珊. 江西赣南地区飞播造林成效调查[J]. *民航经济与技术*, 1995(7):49-50.
- [21] 徐义保,查轩,黄少燕. 南方红壤丘陵区马尾松林地水土流失研究进展[J]. *亚热带水土保持*, 2011, 23(4):40-43.