

植被恢复对重金属污染土壤有机质及团聚体特征的影响

徐磊^{1,2,3,5}, 周俊^{1,2,5}, 张文辉^{1,2,5}, 崔红标⁶,
刘海龙^{1,2,3,5}, 刘创慧^{1,7}, 梁家妮^{1,2,5}, 周静^{1,2,3,4,5}

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 江西省重金属污染生态修复工程技术研究中心, 南昌 330096; 5. 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态试验站, 江西鹰潭 335211; 6. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001; 7. 长安大学环境科学与工程学院, 西安 710064)

摘要:采用田间原位试验,研究了不同植被恢复3年对重金属污染土壤有机碳及团聚体结构和稳定性的影响,评价了不同植物修复效果的差异,为农田重金属污染土壤修复中,合理选择植被类型,以及建立评价标准提供理论依据。在某Cu、Cd重度污染农田建立田间小区,施加钝化材料石灰(对照除外)后种植海州香薷(ME),伴矿景天(MS)和巨菌草(MP)3种植物,3年的田间原位修复试验后,分析各处理下土壤有机质含量, >0.25 mm机械稳定性团聚体(DR_{0.25})和水稳定性(WR_{0.25})团聚体含量,团聚体平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD),团聚体稳定率(AR,%)和分形维数(D)等团聚体稳定性指标。结果表明,3年植被恢复后,3种植物处理均提高了土壤有机质含量,提高幅度为2.89%~5.39%,并提高了 >0.25 mm机械稳定性团聚体(DR_{0.25})和水稳定性(WR_{0.25})团聚体含量,提高幅度分别为2.89%~5.39%,6.64%~10.40%和13.34%~17.48%。3种植物处理均可以显著提高土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),其中以巨菌草处理提高幅度最大。在团聚体稳定性方面,3种植物处理均可以提高团聚体的稳定率(AR,%),以海州香薷处理提高幅度最大;植物处理可以显著降低土壤机械稳定性团聚体的分形维数(D),但对水稳定性团聚体的分形维数没有明显的影响。综上所述,采用钝化加原位植物修复可以提高重金属重度污染农田的有机质含量和土壤团聚体的稳定性,改善土壤结构,可以在重金属重度污染土壤修复中推广应用。

关键词:土壤; 重金属污染; 植被恢复; 有机质; 团聚体稳定性

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)06-0194-06

Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Matter and Aggregate Characteristics of Heavy Metal Contaminated Soils

XU Lei^{1,2,3,5}, ZHOU Jun^{1,2,5}, ZHANG Wenhui^{1,2,5}, CUI Hongbiao⁶,
LIU Hailong^{1,2,3,5}, LIU Chuanghui^{1,7}, LIANG Jiani^{1,2,5}, ZHOU Jing^{1,2,3,4,5}

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Nanjing 210008, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Jiangxi Academy of Science, Jiangxi Engineering Research Center of Eco-Remediation of Heavy Metal Pollution, Nanchang 330096, China; 5. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Red Soil Ecological Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Liujiazhan Plantation, Yingtan, Jiangxi 335211, China; 6. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan, 232001, China; 7. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to study the influence of vegetation restoration on soil organic carbon and soil aggregate structure and stability, a 3-year in-situ experiment was conducted. In a Cu and Cd contaminated farmland, 12 plots were built, after applying the passivation materials(except the CK treatment), three kinds of plants (*Elsholtzia splendens*, *Sedum plumbizincicola* and *Pennisetum sinense*) were planted, three years later, the

收稿日期:2016-12-09

修回日期:2017-01-07

资助项目:国家“973计划”课题(2013CB934302);国家科技支撑计划课题(2015BAD05B01);国家自然科学基金(41571461);国家自然科学基金重点课题(41601340)资助

第一作者:徐磊(1988—),男,河南南阳人,博士研究生,主要从事环境污染的防治研究。E-mail:lxu@issas.ac.cn

通信作者:周静(1963—),男,安徽肥西人,研究员,主要从事土壤污染生态修复与技术研发工作。E-mail:zhoujing@issas.ac.cn

soils were collected to analyze the content of soil organic matter and aggregate composition, and then the content of >0.25 mm mechanical-stable ($DR_{0.25}$) and water-stable ($WR_{0.25}$) aggregates, aggregate mean mass diameter, geometric mean diameter, aggregate stability rate and fractal dimension (D) were analyzed too. The results showed that after the 3-year vegetation restoration, all of the 3 vegetation treatments increased soil organic matter content, and improved the contents of >0.25 mm mechanical-stable($DR_{0.25}$) and water-stable ($WR_{0.25}$) aggregates, increased by 2.89%~5.39%, 6.64%~10.40% and 13.34%~17.48%, respectively. The three kinds of plant treatments could significantly improve aggregate mean mass diameter and geometric mean diameter, the largest increase was the treatment of *Pennisetum sinense*. In aggregate stability, 3 kinds of plant treatments could improve the aggregate stability rate, the treatment of *Elsholtzia splendens* with the largest increase. The vegetation restoration could significantly reduce the soil mechanical-stable aggregate fractal dimension, but have no obvious influence on the water-stable aggregates fractal dimension. In summary, the content of organic matter and soil aggregate stability can be improved by adding passivation materials and in-situ phytoremediation, in this way the soil structure can be improved, the soil quality will be restored in the process.

Keywords: soil; heavy metal pollution; vegetation restoration; organic matter; aggregate stability

随着工业化和农业现代化的发展,重金属污染已经成为许多国家面临的问题,土壤重金属污染作为主要污染问题也变得日趋突出^[1],因此对重金属污染土壤进行修复也日益成为国际和国内关注的热点^[2]。土壤重金属污染修复常用的方法中,物理法因工作量大、对土壤破坏严重、容易产生二次污染等特点,难以应用到大面积的重金属污染农田修复中,而化学法和生物法,因为操作简便,成本低廉等特点被越来越多地应用到修复实践中^[3]。目前化学法较常用的是向土壤中加入各类钝化材料,通过对重金属的吸附、沉淀(共沉淀)及络合等作用,降低土壤中重金属的生物有效性和迁移性^[4],而生物法目前较常用的是利用超积累植物或高生物量植物,通过萃取作用降低土壤中重金属的含量^[5]。在重度污染的农田中,由于重金属浓度高、毒性强,导致许多作物难以生长,此时将化学钝化法和植物法结合进行田间修复,将是一种解决重度污染问题的有效方法^[6]。

团聚体作为土壤结构的基本单元,其稳定性及其影响其稳定性因素的研究,对保持土壤良好的结构和土壤肥力具有重要意义^[7]。生物措施作为水土保持及改善土壤质量最根本的方法,对土壤团聚体有重要的影响,植物通过根系分泌物,以及凋落物的分解增加土壤有机质含量,从而促进团聚体的形成和稳定性的提高,改善土壤理化性质。另一方面,有机质作为土壤质量和功能的核心评价指标,与团聚体关系密切;土壤团聚体和有机质可以直接或间接反映土壤类型、植株类型、环境的综合指标,团聚体对有机质的包裹也是土壤固定碳的重要途径^[8]。然而目前国内外在土壤重金属污染修复的研究中,多关注修复后土壤重金属的存量或毒性,而关

于修复后土壤团聚体及有机质变化的研究鲜见报道。在重金属污染农田修复过程中,为了控制修复成本,通常选用廉价易得的修复材料,而石灰作为一种常见的材料,价格低廉,在较小的施用量时便可以达到固化土壤中重金属的效果,同时石灰作为一种碱性材料还具有提高土壤 pH 值,降低土壤酸化危害的作用,在我国南方地区得到了大范围的应用^[9]。海州香薷和伴矿景天分别作为 Cu 的耐性植物和 Cd 的超富集植物,在重金属污染土壤的修复中都得到了广泛应用,而巨菌草作为一种能源植物,具有生长速度快、抗逆性强、生物量大的特点,具有进行重金属污染土壤修复的潜力^[10]。因此在本研究中,通过向土壤中添加石灰,然后种植海州香薷、伴矿景天和巨菌草,经过 3 a 的田间试验后研究土壤团聚体的结构和稳定性特点,以及土壤中有机质的含量变化,分析不同植被恢复对土壤团聚体分布和稳定状况的影响。通过研究不同植被恢复过程对土壤有机质含量、土壤团聚体结构和稳定性的影响,优化重金属污染土壤修复技术和评价标准,从而为重金属污染农田修复技术的提高和评价标准的优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于江西省贵溪市滨江乡柏里村陈家村小组,该区紧邻贵溪市某大型铜冶炼厂,由于长期的引水灌溉和大气沉降等因素导致该区农田受到严重的重金属污染,主要污染物为 Cu, Cd, 由于污染程度重,该区域大部分农田已弃耕多年,试验区部分农田已出现沙化现象,加之该区域位于南方典型的酸雨区^[11],酸沉降等因素加剧了土壤的污染程度。试验

区土壤为砂质壤土,土壤 pH 值为 4.23,有机质含量为 31.1 g/kg,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为 51.6、87.4 和 52.0 mg/kg,土壤全 Cu 和全 Cd 浓度分别为 606 和 0.38 mg/kg。

1.2 供试材料

供试钝化材料:石灰(熟石灰,过 60 目),购自鹰潭建材大市场, pH 值为 12.2, Cu, Cd 含量分别为 1.36, 0.87 mg/kg。海州香薷(*Elsholtzia splendens*):采用室内种子育苗,田间移栽;伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*):采用室内种子育苗,田间移栽;巨菌草(*Pennisetum sinense*):采用扦插种植,扦插种苗购自当地农民。

1.3 试验方法

试验设计:本田间试验共有 4 个处理,每个处理设 3 个重复,共 12 个小区,小区面积 4 m² (2 m × 2 m),为防止相邻小区的相互影响,小区之间用水泥板隔开,水泥板地下埋深 30 cm,地上部分 20 cm。

试验过程:试验于 2013 年 4 月 25 日开始,将 0.2% 的石灰(0—17 cm 表层土壤质量百分比)一次性施加入除 CK 处理的每 1 个小区,然后进行人工混匀平整,并于平整后的 1 个星期栽种植物,其中海州香薷(记为 ME)和伴矿景天(记为 MS)株距为 20 cm × 20 cm,巨菌草(记为 MP)为 50 cm × 50 cm。试验中每年 7 月份初所有处理施加一次尿素,用量为 80 g/小区。伴矿景天在每年的 8 月初进行收获,由于伴矿景天根系较小,难于取出,因此只收获地上部分,海州香薷和巨菌草于每年的 12 月初进行刈割,并用锄头取出海州香薷的根系,而巨菌草由于根系发达,且为多年生草本植物,根系可越冬,因此不取出,次年春天会发芽生长。2015 年 12 月 10 日,在采集植物样品前,在各个小区随机选取 3 个点,用铁锹采集 0—17 cm 表层的原状非根际土壤,每个样点约 1 kg,组合成混合样品,装入硬质塑料盒后带回实验室,风干后用于土壤团聚体和土壤性质分析。

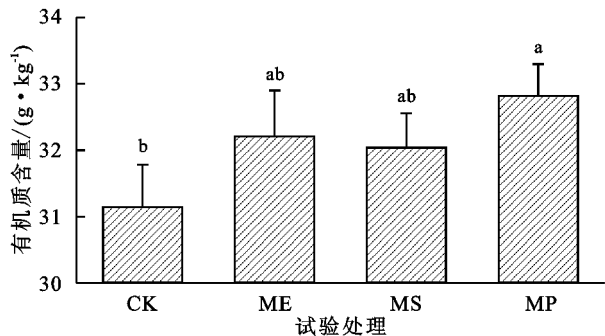
样品测定:土壤团聚体的测定,采用干筛法^[12]和湿筛法^[13]分别测定了 ≥5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm 和 <0.25 mm 等不同粒级的团聚体组成。并在此基础上计算了 >0.25 mm 机械稳定性团聚体(DR_{0.25}),水稳性团聚体含量(WR_{0.25}),团聚体平均质量直径(MWD, mm),几何平均直径(GMD, mm),土壤团聚体稳定率(AR, %)和质量分形维数(D)^[14]。

数据处理:采用 Ecel 2010 进行数据处理、SPSS 20.0 软件进行方差分析(One-way ANOVA-Tukey)和相关性分析(Pearson),用 Sigmaplot 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 植被恢复对土壤有机质的影响

由图 1 可知,该退化土壤植被恢复 3 a 后,3 种不同的植物恢复条件均显著提高了土壤有机质含量,其中 MP 处理提高最大,达到 5.39%,伴矿景天和海州香薷处理次之,分别为 3.44% 和 2.89%。这说明,不同的植被类型对退化土壤有机质的影响存在一定差异。结合 3 a 中 3 种植物的生物量(图 2)情况可以发现,在未施加石灰的 CK 处理中,无任何植物不能生长(包括杂草),而施加石灰后,3 种植物均可以正常生长,巨菌草的地上部分生物量最大,单位小区年平均生物量为 11.89 kg,而伴矿景天的年平均生物量最小,只有 0.94 kg。戴全厚等^[15]的研究结果表明,在植被恢复的过程中,植物地上部分生物量和土壤有机质含量呈二次曲线正相关。在本研究中,对植物地上部分生物量和土壤有机质含量进行相关性分析发现相关系数为 0.589,但并未达到显著性水平,这可能是由于植被恢复时间较短,对土壤有机质含量的提高量有限。同时 3 a 中巨菌草的生物量呈现上升趋势,而其他两种植物并没有出现该现象,这可能是由于在植被恢复的过程中,巨菌草对土壤质量的提高作用较大,在植被恢复的 3 a 中,土壤质量不断得到改善,有利于植物生长和植物地上部分生物量的累积^[16]。因此,在植被恢复过程中,植物地上部分生物量和土壤有机质含量呈现正向互作效应,选择生物量较大,生长速度较快的植物进行重金属重度污染土壤的田间原位修复,有利于土壤有机质的积累和土壤质量的提高。



注:CK=对照;ME=石灰+海州香薷;MS=石灰+伴矿景天;MP=石灰+巨菌草;不同小写字母表示不同植物处理间差异性显著($n=3$, $p<0.05$)。

图 1 不同植物处理对土壤有机质的影响

2.2 植被恢复对土壤团聚体结构的影响

2015 年植被收获前各处理土壤 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(DR_{0.25})为 69.36%~76.57%(表 2),低于许多报道中机械稳定性团聚体含量^[17],这说明该区土壤物理结构较差,这可能与该区域土壤污染严重,植物难以生长,导致土壤出现轻微沙化现象,导

致土壤结构恶化有关。3 种植物恢复 3 a 后,均显著提高了土壤 $DR_{0.25}$ 的含量。而且 3 种植物处理主要提高了机械稳定性团聚体中 $>5, 2 \sim 5, 0.5 \sim 1$ mm 的团聚体含量,尤其是 >2 mm 团聚体,这说明这 3 种植物恢复对土壤 >0.25 mm 机械稳定性团聚体形成有显著的促进作用,且主要通过提高 >2 mm 机械稳定性团聚体含量来提高 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量。在 3 种植物中,巨菌草处理对土壤大团聚体的提高幅度最大,尤其是 $>5, 2 \sim 5$ mm 团聚体,分别较 CK 处理提高 28.98% 和 10.11%,而对 $1 \sim 2, 0.5 \sim 1, 0.25 \sim 0.5$ mm 团聚体的影响中,3 种植物处理之间的差异并不显著,这说明在 3 a 的植被恢复过程中,巨菌草对大团聚体的提高幅度最大,最能改善土壤的物理结构。

在土壤水稳性团聚体组成方面,各处理 >0.25 mm 水稳定性团聚体含量($DR_{0.25}$)含量为 44.74%~52.56%(表 3),3 种植物恢复 3 a 后都可以显著增加

土壤水稳定性团聚体含量,但与机械稳定性团聚体相似的是,3 种植物处理之间并不存在显著差异。分析水稳定性团聚体增加部分的粒径组成可以发现,增加部分主要集中在 >5 mm 团聚体中,而在其他粒径组成中增加幅度并不显著,甚至海州香薷处理和伴矿景天处理在 $0.5 \sim 1$ mm 之间的团聚体出现了显著的下降趋势,这和郑学博^[18]等人的研究结果相同,即植被恢复过程中主要增加了 >5 mm 大团聚体的含量。

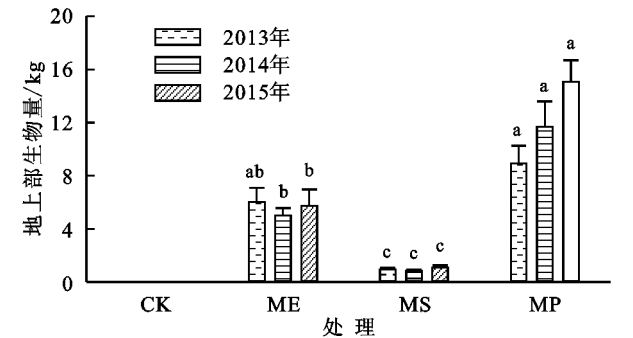


图 2 3 种植物不同年份中的地上部分生物量

表 2 植被恢复对重金属污染土壤机械稳定性团聚体组成的影响

处理	团聚体粒径						$DR_{0.25}$
	>5 mm	$5 \sim 2$ mm	$2 \sim 1$ mm	$1 \sim 0.5$ mm	$0.5 \sim 0.25$ mm	<0.25 mm	
CK	$10.18 \pm 0.41b$	$26.01 \pm 1.19b$	$8.34 \pm 0.95a$	$10.96 \pm 1.10b$	$13.88 \pm 0.49a$	$30.23 \pm 1.46a$	$69.36 \pm 1.34b$
ME	$10.44 \pm 0.36b$	$27.55 \pm 1.21ab$	$9.35 \pm 0.82a$	$14.12 \pm 0.81a$	$12.50 \pm 0.57b$	$25.32 \pm 2.35b$	$73.97 \pm 2.64a$
MS	$11.48 \pm 0.65ab$	$27.99 \pm 1.05ab$	$8.83 \pm 0.46a$	$14.05 \pm 0.20a$	$12.27 \pm 0.22b$	$24.60 \pm 0.93b$	$74.63 \pm 0.90a$
MP	$13.13 \pm 1.30a$	$28.64 \pm 0.17a$	$8.96 \pm 1.27a$	$13.24 \pm 0.74a$	$12.60 \pm 0.63ab$	$22.79 \pm 1.00b$	$76.57 \pm 0.73a$

表 3 植被恢复对重金属污染土壤水稳定性团聚体组成的影响

处理	团聚体粒径						$WR_{0.25}$
	>5 mm	$5 \sim 2$ mm	$2 \sim 1$ mm	$1 \sim 0.5$ mm	$0.5 \sim 0.25$ mm	<0.25 mm	
CK	$5.18 \pm 0.63b$	$7.26 \pm 1.60a$	$6.00 \pm 0.27b$	$8.29 \pm 0.66ab$	$18.01 \pm 3.39a$	$55.26 \pm 2.97a$	$44.74 \pm 2.97b$
ME	$6.41 \pm 0.70ab$	$8.83 \pm 1.55a$	$6.68 \pm 0.18b$	$7.59 \pm 1.13b$	$22.82 \pm 1.39a$	$47.67 \pm 2.32b$	$52.33 \pm 2.32a$
MS	$5.32 \pm 0.77b$	$7.98 \pm 1.33a$	$6.70 \pm 0.10b$	$7.00 \pm 0.25b$	$23.71 \pm 2.33a$	$49.29 \pm 2.27b$	$50.71 \pm 2.27a$
MP	$7.70 \pm 0.89a$	$7.49 \pm 0.60a$	$8.39 \pm 0.45a$	$9.64 \pm 0.13a$	$19.34 \pm 0.61a$	$47.44 \pm 1.16b$	$52.56 \pm 1.16a$

通过分析各个处理土壤 >0.25 mm 机械稳定性团聚体($DR_{0.25}$)和水稳定性团聚体($WR_{0.25}$)与土壤有机质的相关性发现, $DR_{0.25}$ 和 $WR_{0.25}$ 均与土壤有机质含量呈显著正相关关系,相关系数 R^2 分别为 0.829 和 0.741。为了得出土壤有机质与 >0.25 mm 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的关系,我们进一步将其与土壤有机质含量进行线性拟合(图 3),发现两者均与土壤有机质呈显著线性正相关,这与巩杰^[19]等人的研究结果是一致的。这一结果说明, >0.25 mm 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量提高的主要原因可能是植被恢复的过程中,土壤有机质含量升高,促进了团聚体的胶结过程,加快了小团聚体向大团聚的转化,从而改善土壤结构,这对于该重金属重度污染土壤的质量恢复有重要作用。

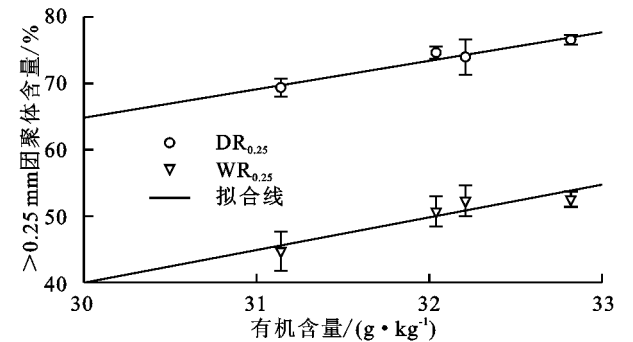


图 3 >0.25 mm 团聚体含量($DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$)与有机质含量的拟合

2.3 植被恢复对对土壤团聚体稳定性的影响

2.3.1 团聚体大小 平均质量直径 MWD 和几何平均直径 GMD 是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,MWD 和 GMD 值的提高可以代表土壤团聚体稳

定性增大^[20]。本试验研究中,经过 3 a 的植被恢复,各处理的机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 均得到显著的提高(表 4),两种团聚体类型的 MWD 和 GMD 值均以巨菌草处理最高,在 MWD 方面,巨菌草处理较 CK 处理提高机械稳定性团聚体和水稳性团聚体 16.2%和 24.2%,而在 GMD 方面,分别提高机械稳定性团聚体和水稳性团聚体 29.1%和 25.0%,这说明应用巨菌草对退化的重金属污染土壤进行植被恢复可以提高土壤团聚体的稳定性,有利于土壤物理结构的改善。同时通过对比发现,各处理机械稳定性团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均大于水稳性团聚体,这说明机械稳定性团聚体是该土壤的主要团聚体类型,这一结果和张鹏^[21]等人研究其他区域土壤团聚体结果一致。

表 4 植被恢复对重金属污染土壤机械稳定性和水稳性团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)的影响

处理	平均质量直径/mm		几何平均直径/mm	
	机械稳定性	水稳性	机械稳定性	水稳性
	团聚体	团聚体	团聚体	团聚体
CK	1.98±0.037c	0.95±0.094b	0.79±0.026c	0.32±0.020b
ME	2.08±0.061bc	1.10±0.073ab	0.91±0.053b	0.38±0.022a
MS	2.16±0.035ab	1.00±0.092ab	0.95±0.024ab	0.35±0.021ab
MP	2.30±0.073a	1.18±0.065a	1.02±0.029a	0.40±0.17a

2.3.2 团聚体稳定率和分形维数 团聚体稳定率(AR)和分形维数(D)也是评价土壤团聚体稳定性的重要指标,其中团聚体稳定率(AR,%)越大说明团聚体越稳定,而分形维数是一种评价土壤结构的综合的新型的指标,它在反映土壤团聚体稳定性的同时可以反映土壤质地的均一性,分形维数越低表明土壤结构越松散,通透性越好,越有利于土壤养分的循环和结构的改善^[22]。本研究发现,3 种植物处理 3 a 后,土壤团聚体稳定率(AR)较 CK 处理均得到显著提高,提高范围为 5.4%~9.7%(表 5)。在分形维数方面,3 种植被恢复 3 a 可以显著降低机械稳定性团聚体的分形维数,降低幅度范围为 1.9%~3.8%(表 5),这说明经过 3 a 的植被恢复过程,土壤团聚体的粒径组成更加均一,土壤物理结构得到了改善。通过分析>0.25 mm 机械性稳定性团聚体(DR_{0.25})和水稳性团聚体(WR_{0.25})与平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD),团聚体稳定率(AR,%)和分形维数(D)的相关性发现,DR_{0.25}与平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)呈极显著正相关,而与分形维数呈极显著负相关,WR_{0.25}除与平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)呈显著正相关,与分形维数呈显著负相关外,还与团聚体稳定率(AR,%)呈极显

著相关关系,这说明>0.25 mm 水稳定性团聚体含量(WR_{0.25})对提高团聚体稳定率的贡献更大。

表 5 植被恢复对重金属污染土壤团聚体稳定率和分形维数的影响

处理	团聚体稳定率/%	分形维数	
		机械稳定团聚体	水稳定团聚体
CK	64.48±1.66b	3.15±0.010a	3.54±0.056a
ME	70.74±2.03a	3.09±0.021b	3.47±0.036a
MS	67.96±2.28ab	3.07±0.014b	3.52±0.048a
MP	68.65±1.08ab	3.03±0.015c	3.44±0.026a

表 6 机械稳定性和水稳定性团聚体含量与 MWD,GMD,AR 和 D 的相关性

>0.25 mm 团聚体含量	平均质量	几何平均	团聚体稳	分形
	直径(MWD)	直径(GMD)	定率(AR)	维数(D)
机械稳定性团聚体含量(DR _{0.25})	0.857**	0.966**	0.466	-0.926**
水稳性团聚体含量(WR _{0.25})	0.657*	0.857**	0.893**	-0.582*

注: ** 代表 $p<0.01$; * 代表 $p<0.05$ 。

3 讨论与结论

3.1 讨论

有机质是评价土壤质量的重要指标,对团聚体的形成和胶结有重要影响,而团聚体作为有机质的存在场所,对有机质的蓄存及空气水分的运输有重要作用,因此两者是相互影响不可分割的^[23]。本田间研究结果表明,在该重金属污染土壤上进行植被恢复 3 a 后,土壤有机质和>0.25 mm 团聚体含量均得到显著提高,而单位面积年生物量最大的巨菌草处理提高幅度最大。通过回归分析发现,土壤有机质含量与>0.25 mm 机械稳定性团聚体(DR_{0.25})和水稳性团聚体(WR_{0.25})均呈显著正相关(R^2 分别为 0.550,0.504),这一结果与程曼等^[24]的研究结果一致,即大团聚体的形成和增加主要是有机质含量增加的结果,植被恢复提高了土壤中有机质和有机残体的含量,土壤中较小的团聚体通过与土壤中的有机碳、菌丝核和植物残体胶结,逐渐形成更大的团聚体^[25]。

团聚体作为土壤的基本组成,对土壤中水分、养分和空气的运输有重要作用,而团聚体越稳定就越有利于这些过程的进行^[26]。在评价土壤团聚体稳定性的过程中,平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD)和团聚体稳定率(AR,%)是常用的指标,综合这些指标可以客观地评价土壤团聚体的稳定性^[27]。本研究发现,重金属污染土壤进行植被恢复 3 a 后,各个处理均可以显著提高土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的平均质量直径(MWD),几何平均直径(GMD)和团聚体稳定率(AR,%),相关性分析结果表明,上述 3 个指标与土壤>0.25 mm 团聚体

含量($DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$)均显著相关(机械稳定性团聚体含量与团聚体稳定率无相关性),而土壤中 >0.25 mm 团聚体含量($DR_{0.25}$, $WR_{0.25}$)与土壤有机质含量呈正相关关系,这一结果表明,植被恢复过程在提高土壤有机质含量的同时,促进了土壤小团聚体向大团聚的转化,从而提高了团聚体的稳定性和土壤抗蚀能力。

土壤团聚体的分形维数可以量化反映土壤团聚体机构,分形维数越低,土壤质地均一性越好,土壤通透性也越好^[28]。本研究结果表明,3 a 的植被恢复过程可以提高机械稳定性团聚体的分形维数,可能的原因是植被恢复过程导致了土壤有机质含量的差异,引起土壤团聚体团聚作用的不同,从而导致团聚体大小和土壤结构的差异,而这些差异必然在分形维数上得到体现。

3.2 结论

(1) 在重金属重度污染土壤中施加石灰,并结合植被修复 3 a 后,可提高土壤有机质含量 2.89%~5.39%,并可 >0.25 mm 机械稳定性团聚体($DR_{0.25}$)和水稳定性团聚体($WR_{0.25}$)含量,提高幅度分别为 6.64%~10.4%和 13.3%~17.5%。

(2) 3 种植被与石灰联合修复 3 a 后,显著提高机械稳定性和水稳定性团聚体质量平均直径(MWD),提高幅度为 5.05%~16.2%和 5.26%~24.2%,在几何平均直径(GMD)方面,提高幅度为 15.2%~29.1%和 9.38%~25.0%。同时可显著降低土壤机械稳定性团聚体分形维数,降低幅度为 1.90%~3.81%。

(3) 在重金属重度污染土壤中施加石灰,降低重金属毒性后种植海州香薷、伴矿景天和巨菌草均可以改善土壤质量,适宜在重金属重度污染土壤的田间修复实践中进行推广。

参考文献:

- [1] Li N, Li R, Feng J, et al. Remediation effects of heavy metals contaminated farmland using fly ash based on bioavailability test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(16):213-219.
- [2] Xiao R, Sun X, Wang J, et al. Characteristics and phytotoxicity assay of biochars derived from a Zn-rich antibiotic residue[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2015,113:575-583.
- [3] El-Ramady H R, Abdalla N, Alshaal T, et al. Selenium Phytoremediation by Giant Reed[M] // Hydrogen Production and Remediation of Carbon and Pollutants. Springer International Publishing, 2015:133-198.
- [4] Ashrafi M, Mohamad S, Yusoff I, et al. Immobilization of Pb, Cd, and Zn in a contaminated soil using eggshell and banana stem amendments: metal leachability and a sequential extraction study[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(1):223-230.
- [5] Visioli G, DEgidio S, Sanangelantoni A M. The bacterial rhizobiome of hyperaccumulators: Future perspectives based on omics analysis and advanced microscopy[J]. Frontiers in Plant Science, 2015,5:752-758.
- [6] Huang G, Su X, Rizwan M S, et al. Chemical immobilization of Pb, Cu, and Cd by phosphate materials and calcium carbonate in contaminated soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(16):16845-16856.
- [7] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review [J]. Geoderma, 2005,124(1):3-22.
- [8] 刘恩科,赵秉强,梅旭荣,等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响[J]. 生态学报,2010,30(4):1035-1041.
- [9] 方熊,刘菊秀,尹光彩,等. 丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用:自然扩散修复技术研究[J]. 环境科学,2013,34(1):293-301.
- [10] 徐磊,周静,梁家妮,等. 巨菌草对 Cu, Cd 污染土壤的修复潜力[J]. 生态学报,2014,34(18):5342-5348.
- [11] 陶美娟,周静,梁家妮,等. 大型铜冶炼厂周边农田区大气重金属沉降特征研究[J]. 农业环境科学学报,2014,33(7):1328-1334.
- [12] 张心昱,陈利顶,傅伯杰,等. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报,2006,26(10):3198-3204.
- [13] Elliott E. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil science Society of America Journal, 1986,50(3):627-633.
- [14] 杨培岭,罗远培,石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [15] 戴全厚,薛莲,刘国彬,等. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应[J]. 中国农业科学,2008,41(5):1390-1399.
- [16] 周璟,张旭东,周金星,等. 我国植被恢复对土壤质量的影响研究综述[J]. 世界林业研究,2009,22(2):56-61.
- [17] 李婕,杨学云,孙本华,等. 不同土壤管理措施下壤土团聚体的大小分布及其稳定性[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):346-354.
- [18] 郑学博,樊剑波,周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学,2015,48(16):3201-3210.
- [19] 巩杰,陈利顶,傅伯杰,等. 黄土丘陵区小流域土地利用和植被恢复对土壤质量的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(12):2292-2296.
- [20] Li Y, Wei C, Xie D, et al. The features of soil water-stable aggregate before and after vegetation destruction in karst mountains[J]. Chinese agricultural Science Bulletin, 2004,21(10):232-234.

显对数关系($R>0.97$)。通过对板栗林、苹果林以及荒坡这3种林分类型枯落物持水量的研究可知,枯落物有效拦蓄量以板栗林最大,苹果林次之,荒坡最小,可知水土保持经济林枯落物的持水能力远大于荒坡。

(3) 各林分枯落物吸水速率与浸泡时间呈明显幂函数关系($R>0.98$)。通过对板栗林、苹果林以及荒坡这3种林分类型枯落物最大持水率的研究可知,苹果林最大持水率为最大,板栗林次之,荒坡最小。这说明苹果林的潜在持水能力最大,以后的经营管理中可有意识保留该林分枯落物,以更好的发挥其涵养水源的功能。

参考文献:

- [1] 孙一荣,朱教军,于立忠,等.森林枯落物的水源涵养功能[C].中国环境科学学会学术年会,2009.
- [2] 彭玉华,黄小荣,申文辉,等.老虎岭库区不同林型凋落物特征[J].中国水土保持,2015(6):56-59.
- [3] Tamai K, Abe T, Araki M, et al. Radiation budget, soil heat flux and latent heat flux at the forest floor in warm, temperate mixed forest[J]. Hydrological processes, 1998, 12(13/14): 2105-2114.
- [4] 沈盈佳,曾建军.保山北庙水库集水区5种森林类型枯落物持水特性研究[J].长江科学院院报,2015,32(1): 43-48.
- [5] 张淑兰,张海军,张武,等.小兴安岭不同森林类型枯落物储量及其持水特性比较[J].水土保持通报,2015,35(4):85-90.
- [6] Rautiainen M, Stenberg P. Simplified tree crown model using standard forest mensuration data for Scots pine [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2005, 128(1): 123-129.
- [7] 张雷燕,刘常富,王彦辉,等.宁夏六盘山南侧森林枯落物及土壤的水文生态功能研究[J].林业科学研究, 2007, 20(1): 15-20.
- [8] Sao Y, Kumagai T O, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture of litter layers; the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. Hydrological Process, 2004, 18(16): 3007-3018.
- [9] 彭少麟,刘强.森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J].生态学报,2002,22(9):1534-1544.
- [10] 贾剑波.半城子流域3种林地枯落物的持水能力[J].中国水土保持学报,2015,13(6):26-32.
- [11] 赵勇.不同间伐强度下秦岭3种类型森林枯落物持水性能研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
- [12] 叶海英,赵廷宁,赵陟峰.半干旱黄土丘陵沟壑区几种不同人工水土保持林枯落物储量及持水特性研究[J].水土保持研究,2009,16(1):121-125,130.
- [13] 鲁绍伟,陈波,潘青华,等.北京山地不同海拔人工油松林枯落物及其土壤水文效应[J].水土保持研究,2013, 20(6):54-58.
- [14] 赵雨森.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.
- [15] 饶良懿,朱金兆,毕华兴.重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J].北京林业大学学报,2005,27(1):33-37.

(上接第199页)

- [21] 张鹏,贾志宽,王维,等.秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2011,45(8): 1513-1520.
- [22] 刘梦云,常庆瑞,齐雁冰.不同土地利用方式的土壤团粒及微团粒的分形特征[J].中国水土保持科学,2006, 4(4):47-51.
- [23] 窦森,李凯.土壤团聚体中有机质研究进展土壤团聚体中有机质研究进展[J].土壤学报,2011,48(2):412-418.
- [24] 朱秋莲,程曼,安韶山,等.宁南山区植被恢复对土壤团聚体特征及腐殖质分布的影响[J].水土保持学报, 2013, 27(4): 247-251.
- [25] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11(3/4): 199-238.
- [26] 李玮,郑子成,李廷轩,等.不同植茶年限土壤团聚体及其有机碳分布特征[J].生态学报,2014,34(21):6326-6336.
- [27] Sieling K, Herrmann A, Wienforth B, et al. Biogas cropping systems: short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 47: 44-54.
- [28] 李腾,饶伟,王代长,等.不同有机物料对潮土微团粒分形特征和速效养分的影响[J].中国水土保持科学, 2014, 12(5): 64-71.