不同植被恢复类型的沙地土壤中溶解性有机质演变特征

贾汉忠¹, 刘子雯¹, 石亚芳¹, 杨康杰¹, 付广军², 祝凌燕^{1,3*}

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 陕西省林业科学院, 榆林 719000;

3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350

* 联系人, E-mail: zhuly@nankai.edu.cn

2021-04-19 收稿, 2021-06-14 修回, 2021-07-14 接受, 2021-07-15 网络版发表

国家自然科学基金(21737003, 41877126)和陕西省重点研发项目(2019ZDLNY01-02-01)资助

摘要 溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是土壤有机碳的重要组成部分,可以有效地评价干旱区沙漠化土壤植被恢复状况。然而,对于不同恢复方式、不同植被类型(如草地、灌木丛、针叶林、落叶林等)沙地土壤中DOM的演变特征与光谱学特性缺乏认知。本研究以毛乌素沙地为例,采集3种土地利用类型(裸沙地、配土改良地和植被覆盖地)的表层土壤,采用紫外吸收光谱、三维荧光光谱和平行因子模型法,结合主成分分析法探究了不同土地改良措施和植被覆盖类型下土壤中DOM的来源、含量与组分特征。结果表明,不同土地利用类型和不同植被覆盖下土壤DOM含量和溶解性有机碳(DOC)/土壤有机碳(SOC)值存在较大差异,相较于裸沙地,配土改良和植被覆盖显著提高了DOC的含量,但DOC/SOC的比值降低,SOC的稳定性有所提升;且乔木覆盖地中有机碳的稳定性略高于草地及灌木地。平行因子分析(PARAFAC)结果表明,裸沙地DOM主要由类蛋白质(C3)组成,而配土改良和植被覆盖地则以类腐殖酸(C1和C2)为主。相关性分析表明,C1与C3及C2与C3均为极显著负相关关系($P<0.01$)。这说明C3组分与C1、C2组分的来源不同。在不同的植被类型之间,类腐殖酸物质(C1与C2)的总占比为乔木>草本>灌木,且恢复年限越长,腐殖质类物质的相对含量越高。相比于裸沙地和配土改良地,植被覆盖地土壤DOM的荧光指数(FI值)下降、自生源指数(BIX值)与腐殖化指数(HIX值)显著提高,呈现明显的陆源特征,证实了有机碳稳定性的增强。且乔木区域土壤的腐殖化程度相较于灌木地和草地更高。总之,植被恢复过程,特别是乔木的种植,较配土改良地和裸沙地可有效增加DOM的含量,提高DOM的稳定性,有利于土壤有机碳的固存。本研究为毛乌素沙地的治理改善提供一定的理论支持和参考依据。

关键词 植被恢复, 溶解性有机质, 毛乌素沙地, 荧光特性, 平行因子分析

土壤沙化是一个全球性的生态环境问题,会造成严重的水土散失、肥力下降以及频发的沙尘暴等自然灾害,已经引起了国际社会和我国政府决策部门的高度重视。植被恢复被认为是治理土壤沙化最有效的方法之一^[1]。在植被恢复过程中,通过改变土壤有机物的输入与分解,影响土壤碳素生物地球化学循环过程,促使土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)累积。朱志建等

人^[2]研究发现,黄土高原退耕还林还草的50年中,SOC含量显著提升,土壤性质和结构得以改善,多种理化指标经过动态变化后已实现平衡^[3]。SOC已成为衡量土壤沙化治理效果的关键指标^[4,5]。然而,在不同的研究区域,SOC的含量变化受土地利用方式、植被覆盖程度、恢复时间等因素的共同影响^[6,7],同时植被类型对区域碳循环能力的影响也存在较大差异^[8]。目前,人们

引用格式: 贾汉忠, 刘子雯, 石亚芳, 等. 不同植被恢复类型的沙地土壤中溶解性有机质演变特征. 科学通报, 2021, 66: 4425–4436

Jia H Z, Liu Z W, Shi Y F, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matter under different vegetation types in sandy soil (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 4425–4436, doi: 10.1360/TB-2021-0384

对于恢复过程对SOC循环与演变规律还缺乏足够的认识。

溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)是SOC的重要活性组分,在土壤演变过程中起关键作用^[9]。DOM主要来源于植物碎屑、土壤腐殖质、微生物或根际分泌物,是由植物残体分解形成的过渡性有机物,对SOC的累积、土壤碳循环、重金属迁移及有机污染物转化等过程起重要作用。DOM是有机质从森林地面进入矿质土壤的主要形式,是评价土壤肥力的一项重要指标,并与不同植被类型、土地利用方式等具有很好的响应关系^[10,11]。有研究指出,侵蚀土壤植被恢复后,DOM的结构更加复杂与稳定,生物可利用性降低,这有利于土壤肥力的恢复,同时DOM的变化还可以灵敏地反映改良方法和植物恢复对土壤质量的影响^[12,13]。Sheng等人^[14]发现,人工种植林和耕地土壤的DOC含量低于自然森林生态系统,当草地转变为裸地时,土壤DOC含量有所降低^[15]。因此,探究DOM在植被恢复过程中的动态变化具有重要意义。

近年来,随着紫外吸收光谱和三维荧光激发发射矩阵荧光光谱(fluorescence excitation-emission matrix, EEM)等技术的发展,现代谱学研究方法被广泛用于描述DOM的非均相分子组成^[16,17]。通过分析荧光团可以定性定量表征类腐殖质和类蛋白质等成分及不同组分类型所占比例^[18]。Li等人^[19]利用采用紫外-可见光谱和荧光激发-发射光谱法,分析了黄土高原不同土地利用类型(农田、丘陵和林地)土壤DOM的垂直分布特征,能够更好地了解土地利用变化后,土壤DOM组成结构的变化趋势。此外,平行因子分析(parallel factor, PARAFAC)也已经成为一种分辨DOM中不同荧光物种信息的有效方法^[20]。Ohno和Bro^[21]通过EEM-PARAFAC方法识别出5种荧光成分。因此,这些现代谱学和分析方法是研究DOM有机组成与赋存特征的一种有效手段,能够更加科学地评估土壤DOM的变化,为土壤改良过程中碳循环和演变提供认知依据。

毛乌素沙地位于我国西北部荒漠草原和森林草原的过渡地带,是我国四大沙区之一,生态系统脆弱。近年来,通过固沙植物、飞播种植、覆盖土壤、封堵固沙等工程技术取得了明显的治沙效果^[22],形成了多种处于不同恢复阶段的植物群落(草地、灌木丛、针叶林、落叶林等),但对于不同演替阶段土壤DOM有机组成与赋存特征却鲜有报道。由此,以毛乌素治沙区域为研究对象,基于紫外-可见光谱和荧光光谱表征技术,结

合PARAFAC分析方法,预期确定DOM有机物组成与分布规律,旨在分析沙地不同植被恢复状态土壤中DOM含量、有机组成和荧光特征的演变规律,为认识沙地碳素生物地球化学循环提供理论支撑。

1 实验

(i) 研究区域概况。研究区域位于毛乌素沙地东南边缘的陕西省榆林市(图1)。毛乌素沙地处于37°20'~39°22'N, 107°20'~111°30'E,是沙质景观与黄土高原的边界,属于中国北方12个主要沙丘田之一^[23]。这里年平均气温为6.0~8.5℃,平均年降水量较少,年平均降水量东南部为400~450 mm,西北部为250~300 mm,60%~75%的降水集中在7~9月。为控制沙漠化程度,毛乌素沙漠进行了长期的植被恢复过程,主要物种有樟子松、蒿、沙柳、锦鸡等,人类和动物活动的干扰较少。

(ii) 样品的收集。根据该地区近60年的历史数据,收集了3种类型的恢复种植区样品,分别为裸沙地(沙地土壤的自然变化)、配土改良地(于2016年开始采用配比黄土、覆土盖沙的方法改良沙地)、沙地植被覆盖地(主要通过飞播造林、人工种植沙生植物进行沙地恢复)。为了更好地了解土壤DOM对不同沙生植物恢复的响应,本研究同时在植被覆地选定了茅草(*Imperata cylindrica* L., 草本植物)、沙地柏(*Sabina vulgaris* Antoine, SvA, 常绿灌木)、沙柳(*Salix cheilophila*, SP, 落叶丛生灌木)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv., PSs, 针叶常绿乔木)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr., PTs, 针叶常绿乔木)和杨树(*Populus* L., PPs, 落叶乔木)6种植被覆盖下的土壤为研究对象。采用多点混合采样法,分别在3种类型的恢复种植区采集0~20 cm表层土壤,每个采样点3个重复,同时记录采集地点、植被类型(图1和表1)。每个采样点土壤样品混合后装在自封袋中带回室内^[24],并保存于4℃冰箱中用于理化性质分析和DOM提取。

(iii) 理化指标测定。土壤颗粒组成采用激光粒度仪(malver-2000)测定,采用pH测定法(水土比2.5:1),土壤样品中SOC含量采用重铬酸钾氧化外加热法测定,DOC含量采用日本岛津公司的TOC-L分析仪进行测定^[24]。

(iv) DOM的提取。土壤样品自然风干,过2 mm筛,称取10 g样品于100 mL离心管中,以水土比5:1的比例加入50 mL去离子水混合。充分摇匀后,在20℃的温度下以200 r/min震荡12 h^[25],以3500 r/min离心25 min,离

图 1 (网络版彩色)采样点分布. S: 裸沙地; NL: 配土改良地; SG: 草地; SvA: 沙地柏; SP: 沙柳; PSs: 樟子松; PTs: 油松; PPs: 杨树. 编号为采样点标记

Figure 1 (Color online) Maps of the samples. S: Sandy land; NL: Newly improvement land; SG: *Imperata cylindrica* L.; SvA: *Sabina vulgaris* Antoine; SP: *Salix cheilophila*; PSs: *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.; PTs: *Pinus tabuliformis* Carr.; PPs: *Populus* L. The number is the sampling point marker

表 1 样地区域的基本理化特征^{a)}

Table 1 Basic physical and chemical properties of the three soil types

土地恢复类型	主要植被类型	SOC(g/kg)	pH	砂粒含量(>0.02 mm)
裸沙地区	—	1.02 ± 0.16B	8.03 ± 0.26A	98.70 ± 0.10A
配土改良区	—	4.07 ± 1.03B	7.49 ± 0.10A	77.27 ± 4.42B
植被覆盖区	白茅草	6.83 ± 1.99Ab	7.73 ± 0.13Aa	95.75 ± 0.87Aa
	沙地柏	7.10 ± 1.62Ab	7.73 ± 0.10Aa	89.43 ± 3.60Aab
	沙柳	12.20 ± 1.80Aab	7.80 ± 0.01Aa	87.36 ± 2.91Ab
	樟子松	12.50 ± 0.67Aa	7.61 ± 0.14Aab	92.92 ± 1.38Aa
	油松	18.17 ± 2.93Aa	7.43 ± 0.12Ab	89.17 ± 1.08Aab
	杨树	19.05 ± 2.33Aa	7.46 ± 0.07Ab	88.83 ± 0.93Ab
	植被区平均值	13.39 ± 2.99A	7.58 ± 0.12A	90.32 ± 3.17A

a) 大写字母A, B表示不同土地恢复类型之间差异显著($P<0.05$); 小写字母a, b表示植被覆盖区之间不同植被覆盖类型间差异显著($P<0.05$); “—”表示无植被覆盖

心后上清液用0.45 μm滤膜过滤, 滤液即为土壤DOM溶液. 随后DOM溶液装入棕色螺口玻璃瓶中于4℃冰箱中保存, 并及时进行紫外光谱和三维荧光光谱测定, 光谱测定前将DOM溶液用去离子水稀释至DOC含量为< 10 mg/L, 避免内滤效应的干扰^[26].

(V) 光谱分析. 使用紫外可见光谱仪(Thermo, UV2000, 美国)测定DOM在波长为200~800 nm范围内的吸光度, 扫描间隔为1 nm^[27], 用254 nm处的紫外吸收

度与DOC浓度(mg/L)的比值得到SUVA₂₅₄, 单位为L mg/(C m), 通常表征单位有机碳上的芳香度. 光谱斜率通过公式 $a(\lambda) = a(\lambda_0)\exp^{[S(\lambda_0 - \lambda)]}$ 非线性拟合, 光谱斜率比(S_R)为 $S_{275-295}$ 与 $S_{350-440}$ 的比值, 反映DOM的平均分子量^[19].

三维荧光光谱的测定采用日本岛津RF-6000进行, 将检测器设置为高灵敏度. 激发波长(E_x)为200~500 nm, 扫描间隔均为5 nm; 发射波长(E_m)为200~

550 nm, 扫描间隔为2 nm^[27], 扫描速度为6000 nm/min. 以去离子水作为空白, 所有数据均扣除去离子水的拉曼散射峰.

(vi) 荧光指数. 本研究使用如下光谱参数进一步描述土壤DOM的组成特征^[25]. 腐殖化指数(HIX): 在254 nm的激发波长下, 计算435~480 nm处的荧光发射光谱下的面积与300~345 nm处面积的比值. 荧光指数(FI): 激发波长为370 nm时, 发射波长为470与520 nm荧光强度的比值. 生物指数(BIX)表示DOM生物特征的强度, 计算方法为在激发波长为310 nm时, 发射波长为380 nm处的荧光强度与发射波长为430 nm处的荧光强度之比^[28].

(vii) 数据统计与分析. 使用Excel、SPSS、Origin 2021、MatlabR2019b等软件对数据进行处理、统计与分析. 利用Pearson相关系数获取土壤性质与植被的相关关系. 使用Origin 2021进行主成分分析(PCA), 使用MatlabR2019b(Natick, MA, 美国)的DOM Fluorv.1.7工具箱建立PARAFAC建模, 对81个DOM样本的三维荧光光谱进行识别和PARAFAC拟合, 通过构建二到七组分的PARAFAC模型确定正确的组分数. 采用Stedmon和Bro^[20]核心一致性与半分裂分析方法(split-half analysis)对模型进行验证, 即通过验证两个随机形成的子数据库拟合光谱与实测光谱的一致性, 测试构建模型的可靠性, 最终确定为三组分. 推导出DOM荧光分量的特征变量, 并利用这些特征变量进行源分析. 通过Fmax均值转化为荧光成分(即每个组分对总荧光的贡献百分比), 确定每个组分荧光强度对DOM的相对贡献, 进一步比较每个样点DOM组分的差异^[20,21].

2 结果与讨论

2.1 土壤DOC含量及空间分布特征

不同恢复区域土壤SOC、砂粒含量和pH见表1. 配土改良和植被覆盖后, 土壤的砂粒含量呈现明显下降, 但3种类型土壤的pH差不大, 与背景值较为一致^[29]. 在不同的改良模式下, SOC含量呈现出显著差异($P<0.05$), 其中: 植被覆盖地(13.39 g/kg)>配土改良地(5.54 g/kg)>裸沙地(1.05 g/kg). 进一步采用DOC含量和DOC/SOC分别表征DOM在土壤中的含量及DOC占土壤总有机碳的比例. 由图2(a)可知, 植被覆盖和配土改良对SOC的提升有显著作用, 其含量明显高于裸沙土. 这是由于有机质的初步积累主要发生在表层土层^[30],

DOC含量的变化趋势与SOC一致, 表土中相对较高含量的凋落物和残渣输入是植被覆盖土壤DOC含量增加的主要原因^[31,32]. 然而, DOC/SOC表现出与DOC含量相反的趋势, 沙地土壤中DOC/SOC显著高于其他区域土壤. 表明裸沙地土壤碳的活性较强、稳定性较差^[2], 不利于SOC的积累, 而植被覆盖有利于提升表层土壤中有机碳的稳定性和累积水平^[29].

在本研究中, 樟子松、油松和杨树种植区域对于土壤DOC含量的提升能力较种植草本、灌木区域高, 这说明植被类型对DOM质量亦有影响^[12]. 以往的研究表明, 林地土壤的DOC浓度较高, 农田和草地土壤浓度较低^[13], 且林地的DOC含量随林龄的增加而增加^[19]. 陈高起等人^[33]研究岩溶区土地利用方式对表层土壤DOC含量时发现, 林地>草地>橘园地>弃耕地, 这与本研究结果一致. 此外, 不同类型植被覆盖下, 土壤DOC/SOC值亦存在差异, 乔木略高于草本及灌木地, 说明乔木覆盖下土壤的有机碳更为稳定. 由此可以看出, 随着植被和恢复年限的增加, 凋落物的不断积累, 有机质积累和矿化分解过程加快, 土壤性质发生改变, 土壤砂粒含量有所降低. 这有利于沙土吸附有机碳, 形成稳定的有机-无机复合体, 增强土壤的固碳能力.

2.2 土壤DOM紫外可见吸收光谱特征

不同恢复类型土壤中, DOM的紫外-可见吸收光谱特征值如图2显示. $SUVA_{254}$ 表示单位质量溶解性有机碳的吸光度, 其值越大代表芳香化程度越高, 难被利用和分解的有机物质越多^[22,34]. 由图2(c)可见, 配土改良地和植被覆盖土壤中, $SUVA_{254}$ 值分别在1.50~5.30和1.66~6.81 L/(mg m)之间. 当 $SUVA_{254}>4$ 时, DOM主要含有芳香疏水物质; 当 $SUVA_{254}<3$ 时, DOM为亲水性物质^[35]. 本研究中配土改良地 $SUVA_{254}$ 的值为 2.82 ± 0.52 , 说明该类型土壤主要包含亲水性物质, 植被覆盖区多集中在3~4之间, 说明同时含有疏水性和亲水性物质. 李璐璐等人^[36]研究土壤及沉积物中DOM的紫外光谱特征值时发现, 疏水性与芳香结构关系密切, 芳香性结构主要存在于疏水组分中. 因此在本研究中, 相较于配土改良土壤, 植被覆盖区域土壤中DOM的芳香化程度较高. 此外, 裸沙地DOM的 $SUVA_{254}$ 值达到14.25 L/(mg m), 显著高于其他2个区域的土壤. 这可能由于沙地土壤中含有植物根系大都未分解, 易发生根际有机质的直接溶出, 但还未被土壤所吸附, 这些木质素和酚类物质会进一步促使土壤SOM转变与形成^[37].

图2 (网络版彩色)不同恢复区域的DOC含量(a)、DOC/SOC(b)、SUVA₂₅₄值(c)、S_R值(d)。大写字母A, B表示不同土地恢复类型之间差异显著($P<0.05$);小写字母a, b表示植被覆盖区之间不同植被覆盖类型间差异显著($P<0.05$)

Figure 2 (Color online) The values of DOC (a), DOC/SOC (b), SUVA₂₅₄ (c) and S_R (d) of different recovery areas. Capital letters (A, B) represent significant difference of land restoration types ($P<0.05$); lower case letters (a, b) represent significant difference of different vegetation cover types in plant-covered land ($P<0.05$)

S_R值通常与相对分子量大小呈负相关关系, S_R值越低表示形成DOM的有机物分子量越高^[29]。当S_R<0.7时,通常表示有机分子缩合度较高^[38]。图2(d)显示, S_R值在所有样点均>0.7,表明各区域DOM的有机分子缩合程度都处于较低水平, S_R值在裸沙地土壤相对最大(1.16 ± 0.01),说明裸沙地土壤的DOM有机物分子量最小。S_R值在植被覆盖地整体相对较小,平均值为0.92。说明植被覆盖土壤中DOM的相对分子量较高,腐殖化程度较强,且不同类型植被覆盖土壤的腐殖化程度呈现如下规律:乔木(樟子松、油松、杨树)>灌木(沙柳、沙地柏)>草本植物。

2.3 土壤中DOM的荧光光谱特征

通过对8个区域DOM样品进行平行因子分析,共发现了3种PARAFAC组分(分别标记为C1、C2、C3),结果如图3所示。其中, C1(E_x/E_m : 235/432 nm)属于低分子

量类富里酸组分^[39]。C2(E_x/E_m : 265/496 nm)属于疏水性高分子类腐殖酸物质^[32],是由复杂分子结构的腐殖质产生,通常来源于植物残体等的腐烂和降解产物^[40,41]。C3(E_x/E_m : 200, 289/294 nm)属于类蛋白质样荧光团^[42],由新鲜植物的凋落物产生^[43]。由于发射波长与高分子量腐殖质类结构的数量呈正相关关系,与C1相比, C2组分具有较大的发射波长,因此C2组分具有更高的疏水性和更大的分子尺寸。C2可以被鉴定为一种高分子量的陆生源腐殖酸,广泛分布在湿地和森林土壤环境中^[29,30]。此结果与之前的研究结果相似^[40,44]。

不同恢复演替阶段的DOM不同组分占比情况如图4(a)所示,在裸沙地中, DOM的主要成分以低分子量的C3组分为主(占比83.85%),配土改良地的C1和C2的比例有所增加, C3(54.53%)较裸沙地下降29.32%。植被覆盖地的C3占比仅为26.42%,同时随着植被覆盖程度的增加, C1和C2的比例逐渐增加,即增加了腐殖质类物

图3 (网络版彩色)基于EEM-PARAFAC分析得到的3种荧光特征组分。(a) C1: 类富里酸组分; (b) C2: 类胡敏酸组分; (c) C3: 类蛋白质组分
Figure 3 (Color online) Three fluorescence components obtained by EEM-PARAFAC analysis. (a) C1: Fulvic acid-like; (b) C2: Humic acid-like; (c) C3: Tryptophan-like

图4 (网络版彩色)不同植被演替恢复地土壤DOM的3种荧光组分占比(a)与植被覆盖地中, 樟子松与油松地的土壤DOM不同恢复年限3种荧光组分占比(b)。C1: 类富里酸组分; C2: 类胡敏酸组分; C3: 类蛋白质组分
Figure 4 (Color online) The relative content of DOM fluorescence components of soil in each region (a) and different recovery years of PSs and PTs in the vegetation covered land (b). C1: Fulvic acid-like; C2: Humic acid-like; C3: Tryptophan-like

质的相对含量。在不同的植被类型之间, C1与C2的总占比为乔木>草本>灌木。为进一步探究不同恢复年限对土壤中DOM的3种组分比例的影响, 本研究在毛乌素典型沙生植物樟子松与油松的种植区域采集了不同年份的土壤样品, 并计算了其3种组分占比(图4(b))。随着恢复年限的增加, 41和30年的油松林土壤DOM中的类腐殖酸物质(C1和C2)的比例均显著高于25年种植龄油松, 类蛋白(C3)组分有所降低。55年龄的樟子松林相比18和23年龄的樟子松林, 也呈现出同样的规律。由此说明, 恢复年限越长, 腐殖质类物质的相对含量越高。

由于在林地表层土中, 有机质主要来源于枯枝落叶的长期积累^[19], 因此, DOM三种组分的变化特征说明, 在沙生植物对沙地恢复的过程中, 植被凋落物和微

生物降解产物为土壤腐殖质的产生提供了重要来源, 进一步加速土壤腐殖质化, 提高了有机质与土壤碳储量, 有效地促进土壤中类腐殖酸和类富里酸的积累^[45]。在不同的植被覆盖地, 草地的类腐殖质组分(C1和C2)的比例仅次于杨树区和油松区。这是由于草本植物根系发达且主要密集于表层, 根系分泌物和死亡的根系可为微生物提供丰富的能源物质^[46], 易促进土壤微生物生长^[47], 从而有利于根系分解而生成腐殖化物质稳定下来。除草地外的植被覆盖地中, 不同的树种类型类腐殖质组分(C1和C2)的比例有所差异, 可能由于不同林区对各自凋落物及细根分解速率及细根养分归还能力的差异, 从而导致DOM有机组分的差异。

2.4 土壤DOM的荧光光谱指数

在三维荧光光谱激发波长为370 nm时, 发射波长为450和500 nm的荧光强度比值即为荧光指数(FI). FI值可表征DOC的来源^[48], 较低的荧光指数(FI<1.4)可认为来源是植物源有机碳, 较高的荧光指数(FI>1.9)则反映来源为微生物源有机碳. 如图5(a)所示, 除配土改良地外, 不同覆盖植被类型的FI<1.4, 说明该类土壤中DOM主要为陆源输入(植物和土壤); 配土改良地FI值为 1.48 ± 0.34 , 说明DOM存在部分微生物源输入. 自生源指数(BIX)是反映DOM中自生贡献比例的指标, 与微生物源有机质对DOM的相对贡献有关^[25]. BIX<0.8表示生物源的特性不显著^[49], $0.8 < \text{BIX} < 1$ 表示土壤自生源较强. 如图5(b)所示, 3个区域的BIX均值分布在0.70~0.90之间, 但相比于裸沙地, 植被覆盖区域的土壤DOM具有较高的自生源特征^[25]. 此外, 腐殖化指数(HIX)越大说明DOM腐殖化程度越高; 当HIX<4时, 表明DOM腐殖化程度较低, HIX为10~16时具有明显的腐殖化程度^[28]. 由图5(b)可知, 不同土地利用类型中, 土壤样品间HIX差异显著($P < 0.05$), 植被覆盖区的HIX整体最高, 均高于4. 这表明植被覆盖区的DOM腐殖化程度高, 稳定性越好, 同时环境中的存在时间越长^[50]. 然而, 裸沙地HIX仅为 0.68 ± 0.14 ; 配土改良地略高于裸沙地, 为 2.30 ± 0.30 . 这说明裸沙地与配土改良地的DOM腐殖化程度低, 稳定性弱. 根据以往的研究, 类腐殖质组分主要来源于土壤, 类蛋白质组分主要在植被凋落

物中产生^[43]. 在本研究中, 裸沙地的HIX最小, 类蛋白质组分(C3组分)占比最高、相对分子量最低, 植被覆盖地则相反. 这表明裸沙地DOM主要来源于新近凋落物, 而植被覆盖地的DOM来源于土壤, 进一步说明植被的覆盖可以有效提高沙地土壤中DOM的结构稳定性, 有利于土壤SOM的固存, 从而提高土壤肥力, 与上述结论一致.

2.5 不同植被恢复类型土壤DOM主成分分析

为了进一步分析不同植被类型对于DOM的贡献, 采用主成分分析(PCA)方法, 在3个不同区域中定性识别了土壤DOM的主要来源, 采用紫外可见吸收光谱、荧光光谱系数及3种荧光组分等参数作为PCA的变量^[25]. 前两个主成分(PC1和PC2)分别解释了80.59%和8.69%的变异. 由图6载荷可以看出, PC1与SOC、DOC、HIX、C1、C2呈正相关, 与FI、C3、DOC/SOC呈负相关. 说明PC1表示DOM的腐殖化较高, 主要包含类富里酸和类腐殖质物质, 为陆生源(植被与土壤). 同时可以发现, HIX与C1、C2的夹角较小, 说明类腐殖质物质的形成主导了DOM腐殖化程度的增加. PC2主要与FI、C3呈正相关说明PC2主要与类蛋白质物质有关, 较容易分解. 同时, 裸沙地的PC1与PC2得分与其他两个区域的差异显著, 与DOC/SOC指标较接近, 说明其土壤腐活性较强、稳定性较差.

在不同植被类型中, 樟子松、油松与杨树林区土

图5 (网络版彩色)不同区域FI-HIX分布(a)和BIX-HIX分布(b)
Figure 5 (Color online) FI-HIX (a) and BIX-HIX (b) distributions in different regions

图6 (网络版彩色)土壤DOM光谱特征参数和荧光组分所占比例的主成分分析

Figure 6 (Color online) Principal component analysis for DOM characteristic value and the percentage of each fluorescent component

壤的PC1值>0, 而草地、沙地柏林区土壤PC1值<0, 沙柳林区土壤PC1值接近0. 这说明乔木区域土壤DOM的腐殖化程度相较于灌木地和草地更高. 杨树的PC1得分最高, 樟子松与油松较相似, 沙柳与沙地柏的PC1得分均小于乔木. 这是因为不同林型因其林木种类等的不同会引起林下凋落物的数量、组成成分及分解速率不同, 进而影响土壤表层的养分含量^[49]. 由此说明, 植被的存在对DOM的腐殖化程度有了提升, 且乔木区优于草地和灌木区.

结合相关性分析显示(图7), HIX与 S_R 呈显著负相关($P<0.01$), 裸沙地DOM的 S_R 值最大、植被覆盖区的 S_R 值最小. 这说明植被覆盖区域土壤DOM分子量相对最大, 腐殖质化度最高, 且在植被区域内腐殖化程度乔木区>草地>灌木区, 与前文类腐殖质物质(C1和C2)总占比的变化趋势相同. 从综合荧光指数分布来看, 在该沙地恢复过程中, DOM的变化主要通过陆源输入途径增加腐殖化程度. 同时C1与C3、C2与C3均为显著负相关关系($P<0.01$). 这一结果揭示了在长期积累过程中, 土壤DOM组分的变化包含类蛋白质等小分子物质逐渐向分子量较高的类腐殖酸物质转变的过程, DOM的结构趋于复杂^[19], 一些难降解基团在微生物的作用下浓缩成难降解腐殖质并长期稳定存在^[51]. 进一步表明, 该区域土壤中存在高分子量的类腐殖酸物质与小

图7 (网络版彩色)不同指标之间的Pearson相关性. * $P\leq 0.05$, ** $P\leq 0.01$, *** $P\leq 0.001$

Figure 7 (Color online) Pearson correlation between different indicators. * $P\leq 0.05$, ** $P\leq 0.01$, *** $P\leq 0.001$

分子量类蛋白质之间的转化机制. 因此, 植被对沙地的恢复可以通过细根死亡和叶片脱落导致大量的碳输入. 这有助于增加土壤碳储量, 随着恢复时间的增加, 逐渐变得更加稳定. 本研究中, 类蛋白质组分(C3)与DOC呈显著负相关关系, 这一结果之前已有报道^[29], 可能与DOM中不具荧光特性的生物分子、C3组分的转化和微生物活性有关.

总的来说, 土地利用方式的改变和不同的植被演替阶段会通过影响土壤DOM的化学和生物利用度而影响有机碳转库的稳定性. 在不同植被覆盖类型土壤中, DOM理化特征有相似之处. 这是由于一定量的植物凋落物的存在都会增加土壤腐殖质化程度, 同时随着恢复年限的增长, 土壤DOM的类腐殖质物质含量增加, 有利于土壤碳的稳定. 间接说明不同土地利用方式与植被类型下, 土壤有机质化学成分从叶片到凋落物转化成SOM的趋势相似^[45], 均为不稳定活性炭组分的减少和稳定碳比值的增加.

3 结论

通过对毛乌素沙地3种不同土地利用方式和6种植被覆盖类型土壤DOM光谱学特征的研究, 发现不同土地恢复措施和不同恢复演替阶段, 植物群落的土壤DOM赋存形态和分布特征均存在显著差异. 相对于裸沙地, 配土改良和植被覆盖地均可以增加SOC和DOC的含量, 其中种植杨树区域有机质增幅最为显著, 而配比黄土的方式有利于土壤颗粒呈现细化的趋势. 紫外光谱和三维荧光光谱结果表明, 裸沙地配土和植被覆

盖都改变了DOM的组分结构, 主要表现为类腐殖酸物质(C1和C2)的增加, 类蛋白质物质(C3)减少。同时, 利用主成分与相关性分析发现, C1与C3及C2与C3之间存在类腐殖质和类蛋白质物质的转换机制。综合结果表明, 对毛乌素沙地进行植被恢复后, 土壤DOM的含量增加, 组成结构发生改变, 腐殖化程度有了一定程度的提升。因此, 在沙地进行植被恢复更有利于土壤固碳,

杨树、油松和樟子松区的DOM腐殖化程度大于草地和灌木区域, 这对进一步评价中国沙地区域土壤恢复状况提供了依据。同时由于三维荧光分析法主要表征DOM中的荧光组分, 难以对不具有荧光特性的生物分子(如多糖、脂肪等)的化学结构提供明确信息^[52], 因此, 未来可以结合更多的手段对DOM进行分析与研究。

参考文献

- 1 Liao C R, Liu B C, Xu Y N, et al. Effect of topography and protecting barriers on revegetation of sandy land, Southern Tibetan Plateau. *Sci Rep*, 2019, 9: 6501
- 2 Zhu Z J, Jiang P K, Xu Q F. Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation (in Chinese). *Forest Res*, 2006, 19: 523–526 [朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较. *林业科学研究*, 2006, 19: 523–526]
- 3 Holmgren M, Scheffer M, Ezcurra E, et al. El Niño effects on the dynamics of terrestrial ecosystems. *Trends Ecol Evol*, 2001, 16: 89–94
- 4 Qiu K Y, Xie Y Z, Xu D M, et al. Ecosystem functions including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for vegetation recovery. *Sci Rep*, 2018, 8: 847–851
- 5 Takafumi M, Toshiya O, Eriko M, et al. Effects of different restoration measures and sand dune topography on short- and long-term vegetation restoration in northeast China. *J Arid Environ*, 2014, 111: 1–6
- 6 Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci Soc Am J*, 1998, 62: 1367–1377
- 7 Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. *Soil Biol Biochem*, 1996, 28: 665–676
- 8 Yan R, Feng W. Effect of vegetation on soil bacteria and their potential functions for ecological restoration in the Hulun Buir Sandy Land, China. *J Arid Land*, 2020, 12: 473–494
- 9 Sauer D, Sponagel H, Sommer M, et al. Podzol: Soil of the year 2007. A review on its genesis, occurrence, and functions. *J Plant Nutr Soil*, 2007, 170: 581–597
- 10 Ponge J F. Humus forms in terrestrial ecosystems: A framework to biodiversity. *Soil Biol Biochem*, 2003, 35: 7
- 11 Zhou G M, Jiang P K. Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2004, 18: 68–70, 83 [周国模, 姜培坤. 不同植被恢复对侵蚀型红壤活性碳库的影响. *水土保持学报*, 2004, 18: 68–70, 83]
- 12 Chantigny M H. Dissolved and water-extractable organic matter in soils: A review on the influence of land use and management practices. *Geoderma*, 2003, 113: 357–380
- 13 Bolan N S, Adriano D C, Kunhikrishnan A, et al. Dissolved organic matter: Biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. *Adv Agron*, 2011, 110: 1–75
- 14 Sheng H, Zhou P, Zhang Y, et al. Loss of labile organic carbon from subsoil due to land-use changes in subtropical China. *Soil Biol Biochem*, 2015, 88: 148–157
- 15 Yu W T, Ma Q, Zhao X, et al. Changes of soil active organic carbon pool under different land use types (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2007, 12: 2013–2016 [宇万太, 马强, 赵鑫, 等. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化. *生态学杂志*, 2007, 12: 2013–2016]
- 16 Gonçalves-Araujo R, Granskog M A, Bracher A, et al. Using fluorescent dissolved organic matter to trace and distinguish the origin of Arctic surface waters. *Sci Rep*, 2016, 6: 108–118
- 17 Borisover M, Lordian A, Levy G J. Water-extractable soil organic matter characterization by chromophoric indicators: Effects of soil type and irrigation water quality. *Geoderma*, 2012, 179–180: 28–37
- 18 Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, et al. Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter. *Environ Sci Technol*, 2015, 37: 5701–5710
- 19 Li W, Jia X, Li M, et al. Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau. *Sci Total Environ*, 2019, 692: 613–621
- 20 Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial. *Limnol Oceanogr Methods*, 2008, 6: 572–579
- 21 Ohno T, Bro R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 2028–2037

- 22 Liu J B, Zhang Y Q, Wu B, et al. Effect of vegetation rehabilitation on soil carbon and its fractions in Mu Us Desert, northwest China. *Int J Phytoremediat*, 2015, 17: 529–537
- 23 Ding Y G, Yang J, Song B Y, et al. Effect of different types on soil organic carbon in Mu Us Desert (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2012, 21: 18–25 [丁越焄, 杨劼, 宋炳煜, 等. 不同植被类型对毛乌素沙地土壤有机碳的影响. *草业学报*, 2012, 21: 18–25]
- 24 Liu Z, Yang Y S, Si Y T, et al. Effects of vegetation restoration on content and spectroscopic characteristics of dissolved organic matter in eroded red soil (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2014, 38: 1174–1183 [刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 等. 植被恢复对侵蚀红壤可溶性有机质含量及光谱学特征的影响. *植物生态学报*, 2014, 38: 1174–1183]
- 25 Liu C, Li Z, Berhe A A, et al. Characterizing dissolved organic matter in eroded sediments from a loess hilly catchment using fluorescence EEM-PARAFAC and UV-visible absorption: Insights from source identification and carbon cycling. *Geoderma*, 2019, 334: 37–48
- 26 Huang M, Li Z, Huang B, et al. Investigating binding characteristics of cadmium and copper to DOM derived from compost and rice straw using EEM-PARAFAC combined with two-dimensional FTIR correlation analyses. *J Hazard Mater*, 2018, 344: 539–548
- 27 Shafiquzzaman M, Ahmed A T, Azam M S, et al. Identification and characterization of dissolved organic matter sources in Kushiro river impacted by a wetland. *Ecol Eng*, 2014, 70: 459–464
- 28 Huguet A, Vacher L, Relexans S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Org Geochem*, 2009, 40: 706–719
- 29 Gao J, Liang C, Shen G, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in various agricultural soils throughout China. *Chemosphere*, 2017, 176: 108–116
- 30 Eghdami H, Azhdari G, Lebaillly P, et al. Impact of land use changes on soil and vegetation characteristics in Fereydan, Iran. *Agriculture*, 2019, 9: 58
- 31 Cuss C W, Guéguen C, Andersson P, et al. Advanced residuals analysis for determining the number of PARAFAC components in dissolved organic matter. *Appl Spectrosc*, 2016, 70: 334–346
- 32 Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis. *Limnol Oceanogr*, 2005, 50: 686–697
- 33 Chen G Q, Fu W L, Shen Y, et al. Effects of land use types on soil organic carbon and its fractions in karst area (in Chinese). *J Soil Water Conserv*, 2015, 29: 123–129 [陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响. *水土保持学报*, 2015, 29: 123–129]
- 34 Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, et al. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter. *Limnol Oceanogr*, 2008, 53: 955–969
- 35 Yeh Y L, Yeh K J, Hsu L F, et al. Use of fluorescence quenching method to measure sorption constants of phenolic xenoestrogens onto humic fractions from sediment. *J Hazard Mater*, 2014, 277: 27–33
- 36 Li L L, Jiang T, Yan J L, et al. Ultraviolet-bisible (UV-Vis) spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils and sediments of typical water-level fluctuation zones of three gorges reservoir areas (in Chinese). *Chin J Envir Sci*, 2014, 35: 933–941 [李璐璐, 江韬, 闫金龙, 等. 三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质(DOM)的紫外-可见光谱特征. *环境科学*, 2014, 35: 933–941]
- 37 Jafarian Z, Kaviani A. Effects of land-use change on soil organic carbon and nitrogen. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2013, 44: 339–346
- 38 He X S, Xi B D, Cui D Y, et al. Influence of chemical and structural evolution of dissolved organic matter on electron transfer capacity during composting. *J Hazard Mater*, 2014, 268: 256–263
- 39 Yamashita Y, Maie N, Briceño H, et al. Optical characterization of dissolved organic matter in tropical rivers of the Guayana Shield, Venezuela. *J Geophys Res Biogeosci*, 2010, 115: 149–227
- 40 Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: A critical review. *Environ Sci Technol*, 2012, 46: 2006–2017
- 41 Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnol Oceanogr*, 2010, 55: 2452–2462
- 42 Yamin G, Borisover M, Cohen E, et al. Accumulation of humic-like and proteinaceous dissolved organic matter in zero-discharge aquaculture systems as revealed by fluorescence EEM spectroscopy. *Water Res*, 2017, 108: 412–421
- 43 Lee H S, Hur J, Lee M H, et al. Photochemical release of dissolved organic matter from particulate organic matter: Spectroscopic characteristics and disinfection by-product formation potential. *Chemosphere*, 2019, 235: 586–595
- 44 Uchimiya M, Liu Z, Sistani K. Field-scale fluorescence fingerprinting of biochar-borne dissolved organic carbon. *J Environ Manage*, 2016, 169: 184–190
- 45 Vázquez C, Iriarte A G, Merlo C, et al. Land use impact on chemical and spectroscopical characteristics of soil organic matter in an arid ecosystem. *Environ Earth Sci*, 2016, 75: 883
- 46 Wang Y, Zou L, Wang Y. Major physiological groups of soil microorganism and its distribution in primitive Korean pine and broadleaved forest in Liangshui nature reserve (in Chinese). *J Northeast For Univ*, 2008, 36: 16–17, 48 [王轶, 邹莉, 王义. 凉水自然保护区原始阔叶红松林土壤微生物的主要生理类群及分布. *东北林业大学学报*, 2008, 36: 16–17, 48]

- 47 Bauhus J, Paré D, Co té L. Effects of tree species, stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30: 1077–1089
- 48 McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnol Oceanogr*, 2001, 46: 38–48
- 49 Shi C Q, Li Y, Yu S P, et al. Fluorescence spectral characteristics of soil dissolved organic matter in different plant formations after reverting farmland to wetland (in Chinese). *Spectrosc Spect Anal*, 2020, 40: 3472–3476 [史传奇, 李艳, 于少鹏, 等. 退耕还湿后不同植物群系土壤溶解性有机质的荧光光谱特征. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40: 3472–3476]
- 50 Birdwell J E, Engel A S. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy. *Org Geochem*, 2010, 41: 270–280
- 51 Cotrufo M F, Soong J L, Horton A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. *Nat Geosci*, 2015, 8: 776–779
- 52 Liu X H, Zhang Y L, Yin Y, et al. Application of three-dimensional fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis in CDOM study (in Chinese). *Trans Oceanol Limnol*, 2012, (3): 133–145 [刘笑菡, 张运林, 殷燕, 等. 三维荧光光谱及平行因子分析法在CDOM研究中的应用. *海洋湖沼通报*, 2012, (3): 133–145]

Summary for “不同植被恢复类型的沙地土壤中溶解性有机质演变特征”

Spectral characteristics of soil dissolved organic matter under different vegetation types in sandy soil

Hanzhong Jia¹, Ziwen Liu¹, Yafang Shi¹, Kangjie Yang¹, Guangjun Fu² & Lingyan Zhu^{1,3*}

¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

² Shaanxi Academy of Forestry, Yulin 719000, China;

³ College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China

* Corresponding author, E-mail: zhuly@nankai.edu.cn

Vegetation restoration is one of the most effective methods to control soil desertification. The change of the input and decomposition of soil organic matter (SOM) in the process of vegetation restoration not only affects the restoration of its own ecosystem, but also affects the biogeochemical cycle of soil carbon. In addition, the soil texture and the conversion and accumulation of organic carbon are also improved by vegetation restoration. Dissolved organic matter (DOM), an important component of SOM, can effectively evaluate the vegetation restoration status of desertification soil in arid area. However, the evolution and spectral characteristics of DOM in sandy soil with different restoration methods and vegetation types (such as grassland, shrub, coniferous forest, deciduous forest, etc.) are not well understood. Mu Us Sandy Land is located in the transition zone between desert steppe and forest steppe in the northwest of China, which is one of the four typical sand areas in China. In recent years, the restoration of Mu Us Sandy Land has achieved obvious results through engineering technologies such as sand-fixing plants, aerial seeding and soil recombination. In this study, the surface soil of three types of soils (sandy land, newly improved land and plant-covered land) was collected in Mu Us Sandy Land. In the present study, the source, content and composition of the DOM of soil under different land improvement measures and vegetation types (sandy land, SL; newly improved land, NL and plant-covered land, PL) in Mu Us Sandy Land were investigated using ultraviolet-visible spectral (UV-Vis) and fluorescence excitation-emission matrix spectrophotometry (EEM) with parallel factor analysis (PARAFAC), the correlation analysis and principal component analysis (PCA). Results showed that DOM content and DOC/SOC value were significantly under different types of land and vegetations cover. The proportion of dissolved organic carbon in shrub land and tree land showed an opposite trend to its content of dissolved organic carbon. Compared with bare sandy land, soil modification and vegetation cover significantly enhanced the content of DOC and the stability of SOC. Moreover, the stability of organic carbon in arbor covered land was slightly higher than that in grassland and shrub land. PARAFAC showed that the DOM of sandy land was mainly composed of tryptophan-like (C3), while the DOM of modified soil and vegetation covered land was mainly composed of humic acid-like (C1 and C2). Negative correlation between C1 and C3, C2 and C3 ($*P < 0.01$). Among different vegetation types, the total proportion of humic acids (C1 and C2) was in the order: Arbor>herb>shrub, and relative content of humic acid increased with the increased restoration years. DOM fluorescence index (FI value) decreased, biological index (BIX value) and humification index (HIX value) significantly increased in vegetation-covered soil, compared with SL and NL, which indicated obvious terrigenous characteristics, confirming the enhancement of organic carbon stability. The humification degree of soil in arbor area was higher than that in shrub land and grassland. Overall, compared with NL and SL, vegetation restoration process, especially the planting of arbor can contribute to the storage of soil organic carbon, increasing the content and the stability of DOM. This study provides a theoretical support and reference for the improvement of Mu Us Sandy Land management and it helps to provide a scientific basis for the accurate evaluation of soil improvement and ecological effects of vegetation restoration in sandy land. It will provide theoretical support for understanding the biogeochemical cycle of carbon in sandy land.

soil improvement, dissolved organic matter, Mu Us Sandy Land, fluorescence, parallel factor analysis

doi: [10.1360/TB-2021-0384](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0384)