

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2019.01.010

利用方式对青海省高寒草甸土壤可溶性有机质光谱学特性的影响

张苗苗¹, 陈伟², 赵军³, 林丽⁴, 张德罡^{1*}

(1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃兰州 730070; 2. 兰州城市学院地理与环境工程学院, 甘肃兰州 730070; 3. 甘肃祁连山国家级自然保护区西营河自然保护站, 甘肃张掖 734031; 4. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海西宁 810001)

摘要:为深入了解不同利用方式对青海省高寒草甸土壤可溶性有机质含量和结构特性的影响,以次生沙棘林地、退耕还林地、农田和天然放牧地等 4 种利用方式土壤作为对象,研究了其 0~10 cm 和 10~20 cm 土层可溶性有机质含量、紫外-可见光光谱及其特征参数、荧光光谱及其特征参数等。结果表明,0~10 cm 土层可溶性有机碳和有机碳含量由高到低的顺序为天然放牧地>退耕还林地>次生沙棘林>农田。10~20 cm 土层中的可溶性有机碳及有机碳含量在退耕还林地和次生沙棘林中较高。有机碳含量和可溶性有机碳含量及其复杂程度随土层的加深而降低。天然放牧地土壤可溶性有机质的芳香化程度和腐殖化程度较高,含有较多的多环芳烃。研究结果指出,天然放牧地土壤可溶性有机质的结构更为复杂,稳定性更强,对维护青海省高寒地区碳库平衡和生态稳定有积极作用。0~10 cm 土层土壤可溶性有机质的结构更为复杂。

关键词:利用方式;高寒草甸;可溶性有机质;光谱学特性

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2019)01-0071-09

Effects of Utilization Patterns on the Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter in Alpine Meadow of Qinghai Province

ZHANG Miao-miao¹, CHEN Wei², ZHAO Jun³, LIN Li⁴, ZHANG De-gang^{1*}

(1. College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

2. Geography and Environmental Engineering College, Lanzhou City University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China;

3. Xiyong River Nature Conservation Station of Qilian Nature Reserve, Zhangye, Gansu Province 734031, China;

4. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai Province 810001, China)

Abstract: Soil dissolved organic matter is the most active component of the global carbon cycle. It plays an important role in the terrestrial ecosystem. In order to explore the effects of utilization patterns to the content and structural characteristics of soil dissolved organic matter of alpine meadow in Qinghai province, the contents of soil dissolved organic carbon, ultraviolet-visible spectroscopy, $SUVA_{254}$, $SUVA_{280}$, $f_{450/500}$, HIX and synchronous fluorescence spectroscopy in 0 to 10 cm and 10 to 20 cm soil layers under 4 different utilization patterns, including secondary seabuckthorn forest, returning farmland to forest, farmland and natural pasture, were measured. The results showed that the variation of soil dissolved organic carbon and organic carbon contents in 0 to 10 cm layers performed a similar pattern, i. e. natural pasture > secondary seabuckthorn forest > returning farmland to forest > farmland. However, soil of returning farmland to forest and secondary seabuckthorn forest in 10 to 20 cm layers had higher dissolved organic carbon and organic carbon contents. The contents of organic carbon and dissolved organic carbon decreased with the depth of the soil layer. The same as the complexity of soil dissolved organic matter. The soil dissolved organic matter in the soil of natural grazing land had a higher degree of aromatization and humification, and had more polycyclic aromatic hydrocarbons. The results indicated that the structure of soil dissolved organic matter of natural pasture was more complicated and more stable. It could give a positive effect on maintaining the balance

收稿日期:2018-09-21;修回日期:2018-12-19

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0501900,2016YFC0501902);自然科学基金青年基金项目(31500368);中国农业科学院科技创新工程专项资金项目(CAAS-ASTIP-08-LIHP-08);甘肃省高等学校科研项目(2015A-124)资助

作者简介:张苗苗(1985-),女,山东嘉祥人,博士研究生,主要从事草地生态、资源与环境方面的研究。E-mail:187342041@qq.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail:zhangdg@gsau.edu.cn

and ecological stability of the carbon pool in the alpine region of Qinghai province. The structure of soil dissolved organic matter in 0 to 10 cm layers was more complicated.

Key words: Utilization patterns; Alpine meadow; Dissolved organic matter; Spectral characteristics

土壤可溶性有机质(Dissolved Organic Matter, DOM)是包括腐殖酸、有机酸、氨基酸等一系列组分在内的复杂可溶性混合物^[1-2],主要来源于植物凋落物、根系及其根系分泌物、微生物、土壤腐殖质等^[3-4]。它不仅与土壤养分的有效性息息相关,而且是植物和微生物重要的能量和养分来源,又因其具有高度的流动性,是土壤底层有机质的重要来源之一,所以 DOM 影响着生态系统的生产力和可持续发展^[5]。DOM 虽然在有机质中的比例很小^[6-8],但它是陆地生态系统中极为活跃的组分,生物圈碳平衡很小的变化就会引起 DOM 的反馈,可用来反映有机质和环境条件的变化^[7,9]。DOM 的组分和结构特性会影响其化学稳定性、可利用性和在土壤中的吸附特性^[7]。有研究指出,芳香化和腐殖化程度高的 DOM 具有更高的稳定性,容易被土壤颗粒吸附,更有利于有机质的积累^[10-12]。土地利用方式是陆地碳库动态变化的重要驱动力,目前针对土地利用方式对土壤有机质含量及其结构性质影响的研究较多^[13-15],对 DOM 影响的研究多集中在湖泊河流、生活垃圾、猪粪堆肥、森林和农田土壤等方面^[16-20],种植不同类型的作物和不同的草地类型对土壤有机质和 DOM 含量均有显著影响^[21-22],但针对不同土地利用方式对青海省高寒草甸土壤 DOM 影响的研究却非常少。

目前,对 DOM 研究采用较多的是光谱法,其操作简单,分析高效,分析结果信息量丰富,并且不会对样品产生破坏^[6]。紫外-可见光谱和荧光光谱法常被用来表征土壤中有机质的特性和来源^[6-7,23]。单位浓度可溶性有机质在波长 254 nm 处的紫外吸光度值能够反映样品中腐殖质类大分子有机物及含有 C=C 和 C=O 的芳香环有机物相对含量的多少^[24]。可溶性有机质在 280 nm 波长处的紫外吸光度也能提供其分子量大小和芳香性程度等有关的信息^[25]。而荧光指数 $f_{450/500}$ 和腐殖化指数 HIX 则常被用来表征可溶性有机质中腐殖质的来源和腐殖化程度^[26-27]。

高寒草甸作为青海省广泛分布的主要植被类型之一,不仅为当地居民的生产生活提供了物质基础,还具有涵养水源、保持水土等多种生态功能^[28]。但由于不同利用方式的影响,高寒草甸原有的生态平衡逐渐被打破。本研究以 4 种不同利用方式下的高寒草甸土壤为对象,在测定不同土层有机碳和可溶

性有机碳含量的同时,采用紫外-可见光谱和荧光光谱法,对其 DOM 的结构特性进行分析,以期进一步了解 DOM 的数量和结构对不同土地利用方式的响应,为青海省高寒草甸生态系统维持及草地合理经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样点位于青海省东北部海北藏族自治州门源县境内,地处青藏高原东北部,属于明显的高原大陆性气候,四季区分不明显,只有冷暖两季,年平均气温在 $-0.4 \sim -2.5^{\circ}\text{C}$ 之间,年降雨量在 425~850 mm 之间,年蒸发量 100 mm 左右,形成了独特的高寒草甸生态系统^[29-30]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 在原生植被为高寒草甸的区域内,选取次生沙棘林地、退耕还林地、农田和天然放牧地等 4 种典型的土地利用方式,各样地具体情况见表 1。

1.2.2 土壤样品采集 采样时间为 2017 年 7 月-8 月。在 4 种土地利用方式样地中随机设置 3 个 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 的重复样方,每个样方用土钻按 0~10 cm 和 10~20 cm 土层重复采集 10 个土样,同一方采集的土样混合成一个样品。

1.2.3 指标测定 土壤可溶性有机质提取:土样风干后过 2 mm 筛,按照水土比 10:1 的比例浸提,25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温震荡 60 min,悬浊液以 4 000 r/min 的速度离心 20 min,上清液过 0.45 μm 滤膜。

可溶性有机碳:利用总有机碳分析仪(vario TOC SELECT)测定可溶性有机碳的含量,用 DOC/mg \cdot L $^{-1}$ 表示。

紫外光谱:将可溶性有机质提取液采用紫外-可见分光光度计(UV-2450)进行扫描,扫描波长范围为 200~800 nm,扫描波长间隔 1 nm,扫描前可溶性有机质的碳浓度标准化到 10 mg \cdot L $^{-1}$ 。测定 254 nm,280 nm 处的吸光度值,分别记为 E_{254} 和 E_{280} ,计算参数 $\text{SUVA}_{254} = E_{254}/\text{DOC} \times 100$, $\text{SUVA}_{280} = E_{280}/\text{DOC} \times 100$ 。

荧光光谱:采用荧光分光光度计(RF-5301PC)进行扫描。激发和发射光栅狭缝宽度为 5 nm,扫描速度为 3 000 nm · min⁻¹。

激发、发射荧光光谱:选择激发波长 370 nm,对 380~550 nm 发射波长进行扫描,得到发射光谱。发射光谱中荧光强度在发射波长 450 nm 和

500 nm 处的比值,即荧光指数($f_{450/500}$),可表征可溶性有机质的芳香性。选择激发波长在 254 nm 处,对 280~500 nm 的发射波长进行扫描,通过荧光强度曲线和发射光谱 435~480 nm 与 300~345 nm 所包围面积的比值计算腐殖化指数(HIX)^[26]。

表 1 样地概况

Table 1 Description of sampling sites

利用方式 Land use type	经纬度 Latitude and longitude	海拔 Elevation/m	原生植被		成土母质 Parent material	植被概况 Vegetation situation	盖度 Coverage/%
			改变年限/Years Changing years of primary vegetations				
次生沙棘林 地 Secondary seabuckthorn forest	100°05.043' E, 37°38.164' N	3 179	8		亚高山草甸土 Sub- alpine meadow soil	次生沙棘林地,优势种为沙棘 (<i>Hippophae rhamnoides</i>)、鹅绒 委陵菜(<i>Potentilla anserina</i>)、二 裂委陵菜(<i>Potentilla bifurca</i>) 等。	80
退耕还林地 Returning farmland to forest	101°24.840' E, 37°34.0093' N	3 112	10		亚高山草甸土 Sub- alpine meadow soil	次生林地,优势种为云杉(<i>Picea asperata</i>)、冷地早熟禾(<i>Poa crymophila</i>)、赖草(<i>Leymus secalinus</i>)、芨芨草(<i>Ach- natherum splendens</i>)等。	100
农田 Farmland	101°23.489' E, 37°35.36' N	3 168	30		亚高山草甸土 Sub- alpine meadow soil	青稞(<i>Hordeum vulgare</i>)	100
天然放牧地 Natural pas- ture	100°03.124' E, 37°36.814' N	3 200	未改变 Not change		亚高山草甸土 Sub- alpine meadow soil	藏蒿草草地,优势种为藏蒿草 (<i>Kobresia tibetica</i>)、鹅绒委陵菜 (<i>Potentilla anserina</i>)、二裂委陵 菜(<i>Potentilla bifurca</i>)	95

同步荧光光谱:在发射波长为 250~500 nm 的范围内,以固定波长差 $\Delta\lambda=60$ nm 同时扫描激发和发射光谱,得到光谱图^[7,26,31]。

1.3 数据分析处理

运用 Excel2010、SPSS19.0 和 Origin2017 软件分析处理文中数据并制图。采用单因素方差分析法比较不同利用方式土壤有机碳、可溶性有机碳及其结构特性之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 利用方式对土壤有机碳和可溶性有机碳含量的影响

从表 2 可以看出,利用方式对高寒草甸土壤有机碳和可溶性有机碳含量均有影响。0~10 cm 土

层,有机碳含量从高到低的顺序为天然放牧地>退耕还林地>次生沙棘林>农田,且互相之间差异显著($P<0.05$)。其中,天然放牧地含量达到 9.54%,是农田有机碳含量的近 4 倍。可溶性有机碳含量有相同变化趋势,天然放牧地含量是农田的 2 倍以上。

10~20 cm 土层,有机碳含量从高到低的顺序同样为天然放牧地>退耕还林地>次生沙棘林>农田,互相之间差异显著($P<0.05$)。但含量最高的天然放牧地与含量最低的农田之间差距变小。可溶性有机碳含量从高到低的顺序为退耕还林地>次生沙棘林>天然放牧地>农田,互相之间差异显著($P<0.05$),与 0~10 cm 土层相比发生变化。

不同利用方式下,土壤有机碳和可溶性有机碳含量均呈现出 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层的变化规律。

表 2 不同利用方式高寒草甸土壤有机碳和可溶性有机碳含量

Table 2 Content of soil organic carbon and dissolved organic carbon in different land use types of Alpine meadow

利用方式	土层	有机碳	可溶性有机碳
Land use type	Soil layer/cm	Soil organic carbon/%	Dissolved organic carbon/mg · L ⁻¹
次生沙棘林地	0~10	4.17±0.07 ^C	76.92±1.62 ^B
Secondary seabuckthorn forest	10~20	2.66±0.07 ^c	65.75±0.87 ^b
退耕还林地	0~10	4.77±0.11 ^B	85.88±7.10 ^B
Returning farmland to forest	10~20	3.59±0.03 ^b	73.01±0.50 ^a
农田	0~10	2.52±0.06 ^D	53.46±1.85 ^C
Farmland	10~20	2.46±0.08 ^d	46.69±0.51 ^d
天然放牧地	0~10	9.54±0.03 ^A	110.04±0.42 ^A
Natural pasture	10~20	5.47±0.09 ^a	61.52±1.32 ^c

注:同列不同大写字母表示 0~10 cm 土层差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示 10~20 cm 土层差异显著($P<0.05$),下同

Note: The values with different capital letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level in 0–10 cm layers while different lowercase letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level in 10–20 cm layers. The same as below

2.2 紫外-可见光光谱特征

2.2.1 光谱分析 图 1 为 4 种利用方式下高寒草甸土壤可溶性有机质紫外-可见光扫描谱图。可以看出,土壤可溶性有机质的吸光度值随着波长的增加而呈降低趋势,在紫外光区的吸光度明显比可见光区大。天然放牧地、次生沙棘林和退耕还林地土壤可溶性有机质紫外-可见光图谱非常相

似,在 280 nm 左右有一个吸收平台,吸光度值在 200 nm 处达到最高,峰值由大到小的顺序为天然放牧地>次生沙棘林>退耕还林地,且 0~10 cm 土层各波段的吸光度值要高于 10~20 cm 土层。农田土壤可溶性有机质紫外-可见光图谱虽然在 280 nm 处也出现吸收平台,但吸光度值要远低于其他 3 种土地利用方式。

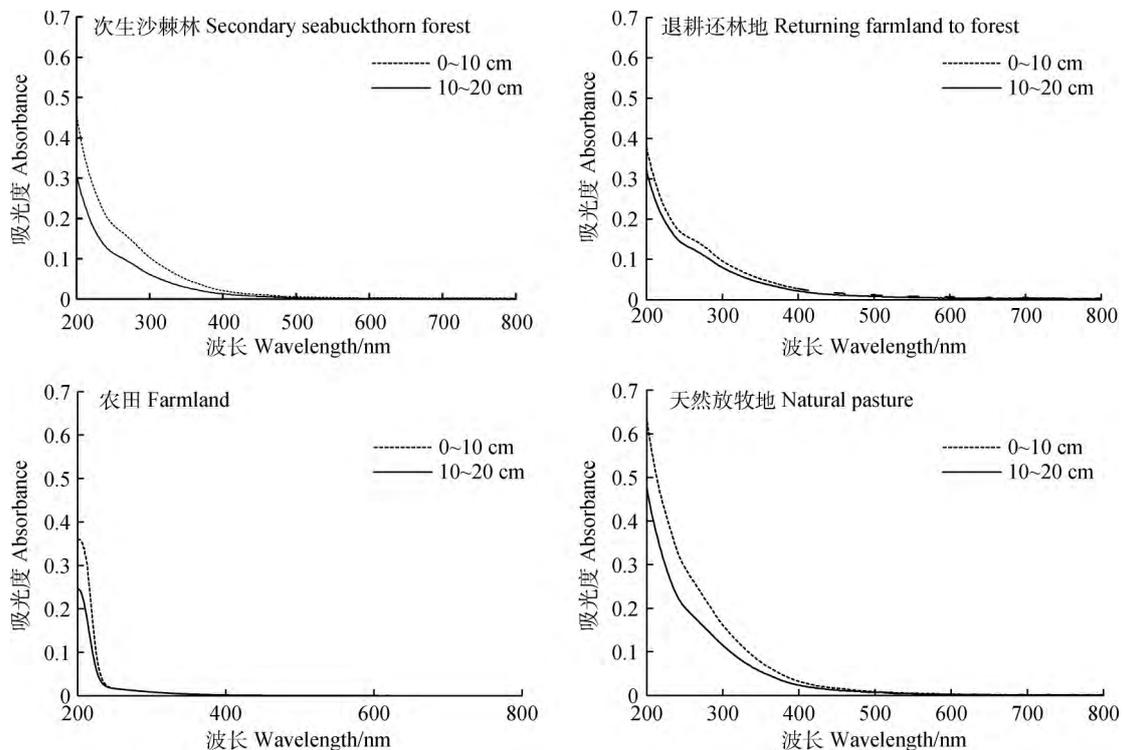


图 1 不同利用方式高寒草甸土壤可溶性有机质紫外可见光吸收光谱

Fig 1 Ultraviolet-visible spectroscopy of soil dissolved organic matter in different land use types of Alpine meadow

2.2.2 光谱参数分析 图 2 和图 3 显示,0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层天然放牧地可溶性有机质 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀ 显著高于其他利用方式($P<$

0.05),其次是次生沙棘林和退耕还林地,农田最低,且互相之间差异显著($P<0.05$)。除农田外,其他利用方式土壤可溶性有机质 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀

随着土层的加深均有所降低。

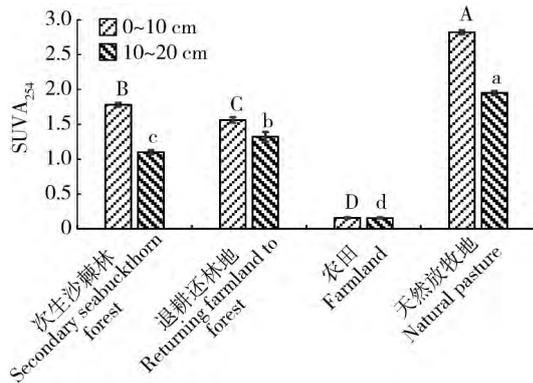


图 2 不同利用方式高寒草甸土壤可溶性有机质 SUVA₂₅₄

Fig 2 SUVA₂₅₄ of soil dissolved organic matter in different land use types of Alpine meadow

注: 误差线为标准差。不同大写字母表示 0~10 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示 10~20 cm 土层差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Note: Error bar means standard deviation. Different capital letters indicate significant differences at the 0.05 level in 0-10 cm layers while different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level in 10-20 cm layers. The same as below

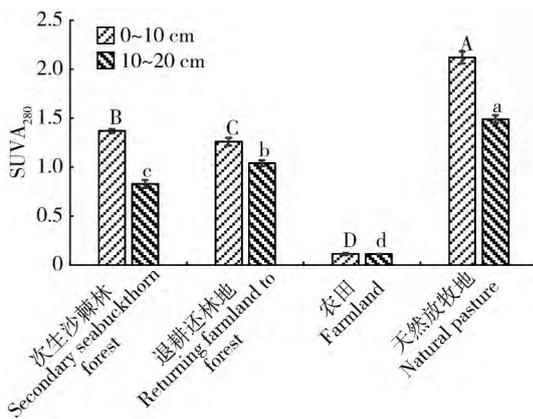


图 3 不同利用方式高寒草甸土壤可溶性有机质 SUVA₂₈₀

Fig 3 SUVA₂₈₀ of soil dissolved organic matter in different land use types of Alpine meadow

2.3 荧光光谱特征

2.3.1 光谱参数分析 表 3 显示, 4 种利用方式下土壤可溶性有机质 $f_{150/500}$ 由低到高的顺序为天然放牧地 < 次生沙棘林 < 退耕还林地 < 农田, 且均在 1.4~1.9 之间, 土层间的差异不大 ($P < 0.05$)。HIX 由高到底的顺序为天然放牧地 > 次生沙棘林 > 退耕还林地 > 农田, 互相之间差异显著 ($P < 0.05$), 且呈现出 0~10 cm 土层大于 10~20 cm 土层的趋势。

2.3.2 同步荧光光谱分析 图 4 为 0~10 cm 和

10~20 cm 土层各利用方式土壤可溶性有机质的同步荧光光谱。从图中可以看出, 可溶性有机质的特征峰主要有以下 3 个: (1) 250~300 nm 处, 代表类蛋白基团区域, 如芳香氨基酸; (2) 300~370 nm 处, 代表富里酸类区域, 指示存在 3~4 个苯环构成的多环芳烃和 2~3 个共轭结构的不饱和脂肪结构; (3) 371~600 nm 处, 代表胡敏酸类区域, 对应于 5~7 个苯环构成的多环芳烃。各利用类型土壤可溶性有机质出现特征峰的位置大致相同, 但相对峰面积不同。

表 3 不同利用方式高寒草甸土壤可溶性有机质荧光指数和腐殖化指数

Table 3 $f_{150/500}$ and HIX of soil dissolved organic matter in different land use types of Alpine meadow

利用方式 (land use type)	土层 (Soil layer/cm)	$f_{150/500}$	HIX
次生沙棘林 (Secondary seabuckthorn forest)	0~10	1.53 ± 0.01 ^C	11.61 ± 0.01 ^B
	10~20	1.55 ± 0.00 ^b	10.54 ± 0.03 ^b
退耕还林地 (Returning farmland to forest)	0~10	1.55 ± 0.00 ^B	8.43 ± 0.03 ^C
	10~20	1.55 ± 0.01 ^b	7.11 ± 0.02 ^c
农田 (Farmland)	0~10	1.62 ± 0.00 ^A	6.86 ± 0.02 ^D
	10~20	1.61 ± 0.00 ^a	5.68 ± 0.02 ^d
天然放牧地 (Natural pasture)	0~10	1.45 ± 0.00 ^D	14.33 ± 0.02 ^A
	10~20	1.44 ± 0.00 ^c	13.16 ± 0.16 ^a

0~10 cm 土层, 在 250~300 nm 处的特征峰面积差别不大; 在 300~370 nm 处的特征峰面积由大到小的顺序为退耕还林地 > 农田 > 天然放牧地, 次生沙棘林在此波段特征峰不明显; 在 371~600 nm 处的特征峰面积天然放牧地最大, 其次是次生沙棘林和退耕还林地, 农田最小。

10~20 cm 土层, 在 250~300 nm 处的特征峰面积差别不大; 在 300~370 nm 处的特征峰面积天然放牧地和农田较大, 退耕还林地次之, 次生沙棘林在此波段特征峰不明显; 在 370~600 nm 处的特征峰面积从大到小的顺序为天然放牧地 > 次生沙棘林 > 退耕还林地和农田。

综合 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤可溶性有机质同步荧光光谱分析可以得出, 4 种利用方式下土壤可溶性有机质含有的简单类蛋白物质含量差别不大, 天然放牧地、退耕还林地和农田含有的富里酸类区域峰面积大小近似, 但是次生沙棘林在此区域内未见明显特征峰。4 种利用方式土壤可溶性有机质胡敏酸类区域差异较大, 天然放牧地含有较多的多环芳烃, 其次是次生沙棘林和退耕还林地, 农田最少。不同土层之间差异不明显。

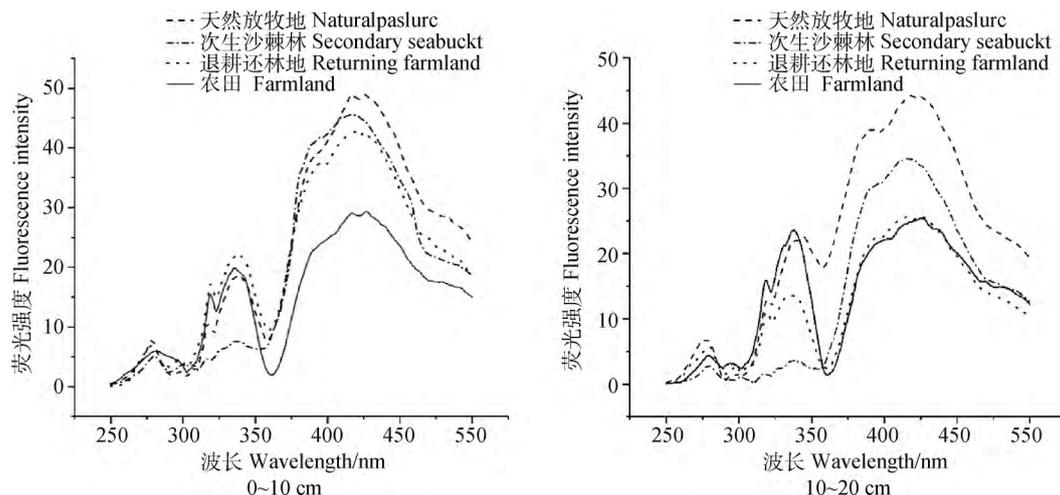


图 4 不同利用方式高寒草甸 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层土壤可溶性有机质同步荧光光谱

Fig. 4 Synchronous fluorescence spectra of soil dissolved organic matter in 0 to 10cm layers and 10 to 20 cm layers in different land use types of Alpine meadow

3 讨论

土壤可溶性有机质主要来源于植物凋落物、动植物残体以及土壤有机质的分解,根系分泌物和微生物也是重要来源^[7]。植被覆盖类型和农业生产管理措施的不同,会引起土壤中有机碳库组分和分布发生变化^[32]。土壤表层由于地上生物量和植物凋落物的不断增加以及根系分泌物的积累,为土壤有机碳库提供了大量可溶性有机碳组分^[33]。有研究表明,土壤的利用方式会影响其中的微生物种类和有机质的数量与质量^[34]。不同种植方式下的土壤,耕地土壤中的可溶性有机质含量较低,林地和草地中的明显较高^[23,35-36]。本研究中,0~10 cm 土层可溶性有机碳含量与有机碳含量由高到低的变化规律一致,均为天然放牧地>退耕还林地>次生沙棘林>农田,与上述研究规律一致。天然放牧地是土壤受扰动最小的利用方式,因此可溶性有机碳含量最高^[37]。10~20 cm 土层土壤可溶性有机碳含量则是退耕还林地和次生沙棘林较高,可能与云杉和沙棘相对于天然放牧地的藏嵩草、鹅绒委陵菜、二裂委陵菜和青稞扎根较深有关,其根系分泌物和根际微生物为可溶性有机质提供了更多来源。研究还表明,可溶性有机质含量随土层深度的加深而降低^[35,38],与本文结论一致。

从紫外-可见光光谱特性来看,土壤可溶性有机质的吸光度值随着波长的增加而逐渐减小,这与魏自民等^[17]、王齐磊等^[1]、张甲等^[39]的研究结论一致。已有的研究显示,280 nm 附近的吸收平台为腐殖质

物质中木质素磺酸及其衍生物的光吸收所引起,随着腐殖质芳香族和不饱和共轭双键结构的增加,单位摩尔的腐殖质物质紫外吸收强度增强^[27,40]。一般情况下,随着 DOM 分子结构复杂程度的增加,其紫外光谱各波长对应的吸光度均呈增加趋势^[17-18]。通过紫外-可见光光谱分析可知,天然放牧地土壤含有更多的芳香族和不饱和共轭双键结构,结构更为复杂,其次是次生沙棘林和退耕还林地,农田最低。同时,0~10 cm 土层可溶性有机质结构比 10~20 cm 土层更为复杂。

特定波长的紫外-可见光吸收比常被用来指示可溶性有机质的腐殖化或聚合程度^[41]。有研究表明,254 nm 处的摩尔吸光度(SUVA₂₅₄)和 280 nm 处的摩尔吸光度(SUVA₂₈₀)分别可用于表征有机质的芳香化程度和分子量大小,其值越大,芳香化程度越高,分子量越大^[6,38,42-44]。从 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₈₀ 等紫外-可见光光谱参数来看,天然放牧地土壤可溶性有机质芳香化程度较高,分子量较大。有研究表明,天然林土壤可溶性有机质的芳香化程度和腐殖化程度均高于人工林^[5],天然放牧地虽不是天然林,但却是在高寒草甸中受到扰动最小的一种利用方式,有相对稳定且持续的凋落物归还量,在合理放牧的情况下通过家畜为土壤提供了相当数量的有机肥料,为增加微生物活性和多样性提供可能。当凋落物等植物残体分解加快,产物中大量结构复杂、分子量大的芳香化合物迅速积累,这个过程不仅使土壤可溶性有机质的芳香化指数上升,同时还有利于腐殖物质的形成。随着土层的加深 4 种利用方

式下土壤可溶性有机质芳香性有所降低,这与 Maddalena 等^[43]、Bu 等^[38]的研究结论一致。

荧光指数 $f_{450/500}$ 常被用来研究和表征可溶性有机质中腐殖质的来源和腐殖化程度^[26-27]。一般 $f_{450/500}$ 值越高,说明可溶性有机物的芳香性越低^[26]。表 3 显示,天然放牧地 $f_{450/500}$ 最低,说明其可溶性有机质的芳香性高于其他利用方式。 $f_{450/500}$ 小于 1.4 和大于 1.9 分别指示可溶性有机质的来源是植物和微生物,处于中间范围则是混合来源^[27,45-46]。有研究认为,可溶性有机质的腐殖化是随着 C/H 的增加而发生的,并会导致向更高的荧光发射波长转移^[43],因此腐殖化指数(HIX)一般可以用来指示可溶性有机质的缩合程度^[38]。通过荧光光谱参数分析可知,4 种利用方式下高寒草甸土壤可溶性有机质主要来源于植物和微生物的混合来源,腐殖化指数 HIX 表明天然放牧地土壤可溶性有机质缩合程度较高,结构更复杂,并随着土层的加深有降低趋势,与紫外-可见光光谱特性结论一致。

同步荧光法具有选择性好、干扰少、谱图简化、灵敏度高等特点,尤其适合对多组分混合物的分析^[38,47-48]。有研究表明,短波长范围的特征峰主要由分子结构简单、分子缩合度较低的有机物质形成,而分子质量较大,复杂化程度较高的有机物质所形成的特征峰处在长波长范围^[49-50]。同步荧光光谱分析中可以看出,4 种利用方式下土壤可溶性有机质含有的简单类蛋白物质含量差别不大,天然放牧地、退耕还林地和农田含有的富里酸类区域峰面积大小近似,但是次生沙棘林在此区域内未见明显特征峰,可能与沙棘根系存在根瘤有关。4 种利用方式土壤可溶性有机质胡敏酸类区域差异较大,天然放牧地含有较多的多环芳烃,其次是次生沙棘林和退耕还林地,农田最少。有研究表明,各类峰的相对面积大小表征分子基团含量的多少^[6],250~300 nm 处的荧光峰代表结构较简单的芳香性化合物,波长较长处的荧光峰则代表结构更加复杂的多环芳烃化合物^[17],因此,通过荧光光谱特性分析得出天然放牧地土壤可溶性有机质腐殖化程度较高,且是由多环芳烃化合物组成。

天然放牧地作为距离原始的高寒草甸最近的演替阶段,其有机碳含量、可溶性有机碳含量及其复杂程度都处于较高水平。农田是扰动较大的一种土地利用方式,由于耕作、田间管理等因素的影响,其土壤状态离原始状态最远,有机质含量、可溶性有机质含量及其复杂程度最低。次生沙棘林和退耕还林地

虽也受到扰动,但比农田更好地向原始状态靠近。可以在一定程度上把天然放牧地、次生沙棘林和退耕还林地、农田分别归类为由轻到重的不同退化阶段,而同步荧光光谱在 420 nm 附近的荧光峰能够更简单直接地体现出这一点,可以尝试将此作为区分不同退化阶段的依据之一。关于土壤可溶性有机质光谱特性对草地退化的具体指示作用还有待于进一步研究。

4 结论

天然放牧地 0~10 cm 土层土壤可溶性有机质含量、芳香化程度和腐殖化程度均较高。退耕还林地和次生沙棘林 10~20 cm 土层可溶性有机质含量较高,但芳香化程度和腐殖化程度较低。

土壤可溶性有机质的芳香化程度和腐殖化程度有随着土层的加深而逐渐降低的趋势。天然放牧地土壤可溶性有机质的结构更为复杂,易被土壤胶体吸附,稳定性更强,利于有机碳的积累和碳库稳定,对维护碳库平衡和生态稳定有积极作用。而扰动后的次生沙棘林、退耕还林地和农田都在不同程度上降低了这种作用的发挥。

紫外-可见光光谱分析和荧光光谱分析中,不同特征参数对 4 种利用方式土壤可溶性有机质结构和性质的指示灵敏程度不同,在应用过程中,可以尝试将两种分析方法联合使用,可以有效提高测定的全面性和准确度。

参考文献

- [1] 王齐磊,江韬,赵铮,等. 三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征[J]. 环境科学,2015,36(3): 879-887
- [2] Ádám Zsolnay. Dissolved organic matter: artefacts, definitions, and functions[J]. Geoderma,2003,113(3-4):187-209
- [3] 杨景清,王铮,元晓春,等. 不同森林更新方式下亚热带土壤可溶性有机质的数量及质量[J]. 河南科技学院学报(自然科学版),2017,45(3):16-25
- [4] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. Soil Science,2000,165(4):277-304
- [5] 刘鑫,杨玉盛,朱锦懋,等. 中亚热带森林转换对土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响[J]. 生态学报,2015,35(19): 6288-6297
- [6] 张浩,吕茂奎,谢锦升. 红壤侵蚀区芒萁对土壤可溶性有机质光谱特征的影响[J]. 植物生态学报,2017,41(8):862-871
- [7] 刘鑫,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[J]. 植物生态学报, 2014, 38(11): 1174-1183
- [8] 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[J]. 水土保持学报, 2004(6): 68-70, 83
- [9] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, *et al.* Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26(12): 1647-1656
- [10] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, *et al.* Dissolved organic matter sorption on sub soils and minerals studied by ¹³C NMR and DRIFT spectroscopy[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 48(2): 301-310
- [11] Bu X L, Ding J M, Wang L M, *et al.* Biodegradation and chemical characteristics of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types in the Wuyi Mountains, southeastern China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(2): 102-107
- [12] 李婷, 赵世伟, 张扬, 等. 黄土区次生植被恢复对土壤有机碳官能团的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5199-5206
- [13] 全金辉, 胡业翠, 杜章留, 等. 广西喀斯特移民迁入区土地利用变化对土壤有机碳和全氮储量的影响[J]. 应用生态学报: 2018, 29(9): 2890-2896
- [14] 陈志杰, 韩士杰, 张军辉. 土地利用变化对漳江口红树林土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 2379-2385
- [15] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(12): 3094-3101
- [16] Williams C J, Yamashita Y, Wilson H F, *et al.* Unraveling the role of land use and microbial activity in shaping dissolved organic matter characteristics in stream ecosystems[J]. *Limnology & Oceanography*, 2010, 55(3): 1159-1171
- [17] 魏自民, 席北斗, 赵越, 等. 生活垃圾微生物堆肥水溶性有机物光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007(4): 735-738
- [18] 唐朱睿, 席北斗, 何小松, 等. 猪粪堆肥过程中水溶性有机物结构演变特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(5): 1526-1532
- [19] 周纯亮. 中亚热带四种森林土壤有机碳库特征初步研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 22-24
- [20] 黄慧. 成都龙泉驿区不同土地利用方式下土壤可溶性有机质含量的研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2013: 16-49
- [21] 董扬红, 曾全超, 李娅芸, 等. 黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分分布特征[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 277-284
- [22] 姚喜喜, 宫旭胤, 白滨, 等. 祁连山高寒牧区不同类型草地植被特征与土壤养分及其相关性研究[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 371-379
- [23] 新世蕊. 利用方式对土壤水溶性有机物紫外光谱特性影响评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014: 13-40
- [24] Leenheer J A, Croué J P. Characterizing aquatic dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(1): 18A-26A
- [25] 常单娜, 曹卫东, 包兴国, 等. 西北荒漠土长期不同施肥改变土壤可溶性有机质的化学及光谱学特性[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 220-225
- [26] 王玉涛. 黄土高原不同植被条件下土壤可溶性有机质的荧光特性[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015: 10-17
- [27] 郭旭晶, 席北斗, 谢森, 等. 乌梁素海沉积物孔隙水中溶解有机质的荧光及紫外光谱研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 440-444
- [28] 张小静, 王文颖, 李文全, 等. 高寒草甸土壤可溶性有机氮库动态变化格局[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 623-627
- [29] 耿元波, 王松, 胡雪荻. 高寒草甸草原净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 1-13
- [30] 李英年, 赵新全, 曹广民, 等. 海北高寒草甸生态系统定位站气候、植被生产力背景的分析[J]. 高原气象, 2004, (4): 558-567
- [31] 王玉涛, 石辉, 刘雄飞, 等. 黄土丘陵区不同植被下土壤可溶性有机物的荧光特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 171-179
- [32] 何冬梅, 王磊, 冯育青, 等. 不同土地利用类型对土壤可溶性有机碳的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 15-19
- [33] Yano Y, McDowell W H, Aber J D. Biodegradable dissolved organic carbon in forest soil solution and effects of chronic nitrogen deposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(11-12): 1743-1751
- [34] Templer P H, Groffman P M, Flecker A S, *et al.* Land use change and soil nutrient transformations in the Los Haitises region of the Dominican Republic[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(2): 215-225
- [35] 徐秋芳. 森林土壤活性有机碳库的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 28-48
- [36] 刘梦云, 常庆瑞, 杨香云. 黄土台塬不同土地利用方式下土壤碳组分的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1418-1425
- [37] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005(3): 343-347
- [38] Bu X L, Wang L M, Ma W B, *et al.* Spectroscopic characterization of hot-water extractable organic matter from soils under four different vegetation types along an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. *Geoderma*, 2010, 159(1-2): 139-146
- [39] 张甲, 曹军, 陶澍. 土壤水溶性有机物的紫外光谱特征及地域分异[J]. 土壤学报, 2003(1): 118-122.
- [40] Peuravuori J, Pihlaja K. Isolation and characterization of natural organic matter from lake water: Comparison of isolation with solid adsorption and tangential membrane filtration[J]. *Environment International*, 1997, 23(4): 441-451
- [41] 杨玉盛, 林瑞余, 李庭波, 等. 森林凋落物淋溶中的溶解有机物与紫外-可见光谱特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2004(2): 124-128
- [42] 魏自民, 李晨辰, 赵越, 等. 生活垃圾微生物接种堆肥水溶性有机物紫外光谱特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(2): 83-88
- [43] Corvasce M, Zsolnay A, D'Orazio V, *et al.* Characterization of water extractable organic matter in a deep soil profile[J]. *Chemosphere*, 2006, 62(10): 1583-1590

- [44] 李欢,杨玉盛,司友涛,等. 短期增温及减少降雨对杉木人工林土壤 DOM 的数量及其光谱学特征的影响[J]. 中国生态农业学报,2017,25(7):949-957
- [45] Battin T J. Dissolved organic matter and its optical properties in a blackwater tributary of the upper Orinoco river, Venezuela [J]. *Organic Geochemistry*,1998,28(9-10):561-569
- [46] 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[J]. *Limnology & Oceanography*,2001,46(1):38-48
- [47] 薛爽,王茜,仇付国,等. 冻融作用对土壤中溶解性有机物的光谱学特性的影响[J]. 环境科学学报,2016,36(5):1824-1832
- [48] Chen J,LeBoeuf E J,Dai S,*et al.* Fluorescence spectroscopic studies of natural organic matter fractions[J]. *Chemosphere*,2003,50(5):639-647
- [49] 耿春茂,席北斗,赵越,等. pH 及离子强度对渗滤液水溶性有机物同步荧光光谱的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(11):83-87,163
- [50] Senesi N,Miano T M,Provenzano M R,*et al.* Characterization, differentiation, and classification of humic substances by fluorescence spectroscopy[J]. *Soil Science*,1991,152(4):259-271

(责任编辑 闵芝智)