

梁紫嫣, 李晓明, 王涛, 等. 冰川退缩区不同演替阶段土壤溶解性有机质光谱特征及环境响应. 应用生态学报, 2022, 33(4): 1074-1082

Liang Z-Y, Li X-M, Wang T, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter and its environmental responses across successional stages in a glacier retreat area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(4): 1074-1082

冰川退缩区不同演替阶段土壤溶解性有机质光谱特征及环境响应

梁紫嫣^{1,2} 李晓明³ 王涛¹ 段宝利¹ 类延宝^{1*}

(¹中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要 溶解有机质(DOM)作为土壤中最活跃的有机组分,在土壤生物地球化学过程中起着关键作用,探讨植被演替过程中DOM的来源、组成、环境响应与累积规律,对预测土壤碳循环过程具有重要意义。本研究从海螺沟冰川退缩区植被原生演替序列选取演替年龄分别为12、30、40、50、80、120年的样地采集表层和亚表层土壤样本,测定DOM浓度并进行紫外-可见光光谱和三维荧光光谱分析,研究原生演替过程中DOM含量和组成的变化特征及其影响因素。结果表明:土壤DOM浓度随演替年龄的增加而显著增加。土壤DOM中类蛋白组分、荧光指数和生物指数随演替时间的增加而减小,类腐殖质组分和腐殖化程度随演替过程不断增加,土壤DOM芳香化程度先增加后减小。pH值、铵态氮含量解释了62.2%的表层土壤DOM组分变异,土壤含水率和pH值解释了64.3%的亚表层土壤DOM组分变异,说明环境因素是影响海螺沟冰川退缩区原生演替过程中土壤DOM数量和组成的重要因子。

关键词 土壤溶解性有机质; 原生演替; 三维荧光光谱; 紫外-可见光光谱; 冰川退缩

Spectral characteristics of dissolved organic matter and its environmental responses across successional stages in a glacier retreat area. LIANG Zi-yan^{1,2}, LI Xiao-ming³, WANG Tao¹, DUAN Bao-li¹, LEI Yan-bao^{1*} (¹*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China;* ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;* ³*Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*).

Abstract: Dissolved organic matter (DOM), the most active type of soil organic matter, plays a key role in soil biogeochemical cycling. Therefore, exploring the source, composition, environmental response, and accumulation mechanism of DOM during vegetation succession has great significance for predicting soil carbon cycling. In this study, DOM was extracted from topsoil and subsoil at plots after 12, 30, 40, 50, 80, and 120 years of primary succession along the Hailuoguo Glacier retreat area. The concentrations and spectral characteristics of DOM were analyzed via a combination of elemental analysis, ultraviolet-visible spectroscopy, and three-dimensional fluorescence excitation-emission matrix spectroscopy. The results showed that concentrations of soil dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen of both topsoil and subsoil increased significantly during vegetation succession. Along the chronosequence, the protein-like components and optical indices were significantly enhanced, humic-like components and the optical indices decreased, the aromaticity degree of DOM increased first and then decreased. Soil pH and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content explained 62.2% of the total variation of surface soil DOM components, while soil moisture and pH explained 64.3% of that of subsurface soil DOM, indicating that environmental conditions were key factors affecting the concentrations and composition of soil DOM in the Hailuoguo Glacier retreat area.

Key words: soil dissolved organic matter; primary succession; three-dimensional fluorescence excitation emission matrix spectra; ultraviolet-visible absorption spectra; glacial retreat.

本文由国家自然科学基金项目(31971632)和四川省科技厅项目(2020YFH0215 2021ZHYZ0002 2021YFH0008)资助。
2021-08-19 收稿, 2022-02-21 接受。

* 通讯作者 E-mail: leiyb@cib.ac.cn

溶解性有机质(DOM)通常是指水相或土壤提取液中能通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 或 $0.2\ \mu\text{m}$ 滤膜的一系列非均质有机物的混合体^[1]。土壤DOM虽然只占土壤中总有机质的一小部分,却是最具流动性和最活跃的有机质组分,在土壤碳库存储与周转^[2]、植物有效养分和微生物能源供给^[1,3]、调节温室气体的产生等方面扮演重要角色^[4]。与土壤总有机质相比,DOM能够更敏感地反映土壤有机碳的短期动态变化及环境响应^[5]。

有机质与土壤生物及其周围环境(如土壤矿物)之间复杂的相互作用是影响土壤有机质(SOM)含量、组成及周转的重要因素^[6]。因此,DOM也极易受到环境条件和微生物过程变化的影响。目前已有不少研究证明环境条件是影响土壤DOM含量和组成的重要因素。Li等^[7]研究表明,土壤pH值是影响水稻土中DOM组分和化学多样性的关键因素,伴随pH值的降低,水稻土DOM中维管植物源的多酚类化合物和多环芳烃类化合物的丰度下降,而脂质、蛋白质/氨基糖和碳水化合物等组分的丰度增加。Smith等^[8]发现,土壤干旱减少了土壤DOM中脂质的相对含量,同时增加了木质素、单宁酸等化合物的相对含量。Ding等^[9]和Ma等^[10]的研究结果表明,土壤水分和黏土矿物含量是影响土壤DOM组分变异最重要的两个环境因素。土壤水分与脂质、蛋白质/氨基糖、碳水化合物及与微生物源相关的光学指数呈正相关,与酚类化合物、稠环芳香族化合物及与芳香族化合物相关的光学指数呈负相关;土壤矿物含量与非芳香族化合物呈正相关,与芳香族化合物呈负相关。了解关键环境因素对土壤DOM的影响,对预测气候变化下土壤环境中DOM的组成动态和反应活性至关重要^[11]。

自小冰期结束以来(约1850年),气候变暖导致了全球范围的冰川退缩。1951—2009年间,气温每10年升高 $0.23\ ^\circ\text{C}$,致使青藏高原20%的冰川消退^[12]。在冰川退缩迹地上,可以观察到显著的土壤发育和植被演替过程。Wei等^[13]对天山一号冰川退缩区原生演替序列植被群落变化规律的研究发现,植物物种的多样性和植被覆盖率随退缩时间的增加而增加,土壤养分含量则呈非线性变化。Jiang等^[14]对海螺沟冰川退缩区植被演替的地下驱动机制进行研究,发现随植被演替和土壤发育进行,土壤中微生物生物量显著增加,在演替后期达到最大值,微生物群落结构由早期的细菌为主转变为真菌主导。Bai等^[15]研究表明,随土壤发育的进行,海螺沟

冰川退缩前沿土壤时间序列中有机碳、总氮和有效磷含量增加,土壤总磷含量呈减少趋势。综上所述,现有的大量研究结果揭示了原生演替土壤发育过程中土壤养分含量与生物群落结构的变化规律,然而对土壤肥力与碳周转的核心物质——DOM的变化趋势及其环境响应却鲜有报道。鉴于此,本研究以贡嘎山海螺沟冰川退缩区不同演替阶段、不同土层的土壤DOM为对象,通过紫外-可见光光谱(UV-Vis)、三维荧光光谱(3D-EEM)等技术,研究植被演替过程中土壤DOM含量和组成的变化规律,并结合冗余分析(RDA),探讨DOM特性对环境条件变化的动态响应,为预测敏感脆弱的亚高山森林生态系统土壤质量及碳汇功能对全球变暖的响应与适应提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区位于青藏高原东缘的贡嘎山海螺沟冰川退缩区($29^\circ34'07''\text{N}$, $101^\circ59'40''\text{E}$),海拔2800~3000 m,长约2000 m,宽50~200 m,年均气温 $3.8\ ^\circ\text{C}$,年降水量约2000 mm,年平均相对湿度90.2%^[16]。海螺沟冰川经过约120年的退缩,形成了完整的植物演替带谱和土壤发育序列。植被演替经历了从黄芪(*Astragalus souliei*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、各种柳树(*Salix* spp.)等固氮植物,到以冬瓜杨(*Populus purdomii*)为主的植被群落,此时群落郁闭度增加,利于耐荫植物种子萌发,进而形成了冬瓜杨、糙皮桦(*Betula utilis*)、麦吊云杉(*Picea brachytyla*)和峨眉冷杉(*Abies fabri*)针阔混交林植被群落,最终形成以云杉和冷杉为主的顶极群落阶段^[17]。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 土壤样品于2020年8月根据Zhou等^[18]描述的海螺沟冰川退缩区土壤时间序列的后6个阶段进行采集,本研究植被演替的第1阶段~第6阶段分别为冰川退缩后12、30、40、50、80、120年(s1~s6)。6个演替阶段的年龄是根据历史记录和树木年轮确定的^[19]。由于演替前2个阶段样带空间有限,将样方设置为 $5\ \text{m}\times5\ \text{m}$,间隔为5 m,演替后4个阶段样方设置为 $20\ \text{m}\times20\ \text{m}$,间隔为15 m。每个演替阶段设置3个重复样方,每个样方内按S型布设5个土壤取样点,分层采集表层和亚表层土壤。参考Zhou等^[20]对海螺沟冰川退缩区演替阶段土壤剖面的研究,将6个阶段表层土壤的采

集深度分别设为 0~2、0~5、0~5、0~5、0~10 和 0~10 cm, 亚表层土壤采集深度分别设为 2~5、5~10、5~10、5~10、10~20 和 10~20 cm。将所有同一样方相同土层的 5 个取样点的土壤混合均匀成一份样品后运回实验室, 过 2 mm 网筛后用镊子将其中的根系、石块、动植物残体挑出, 并将样品分成两份, 一份用于土壤理化性质的分析, 另一份用于提取 DOM。

1.2.2 土壤理化性质测定 土壤 pH 值用 pH 计 (CHN868, Thermom, Orion, 美国) 测定, 水土比为 2.5:1。土壤含水率用烘干法进行测定。土壤总碳和总氮含量用元素分析仪 (Vario EL III, Elementar, 德国) 测定, 从而换算得出不同样品的 C/N。硝态氮 (NO_3^- -N) 和铵态氮 (NH_4^+ -N) 含量用连续流动分析仪 (SAN++, Skalar, 荷兰) 测定。

1.2.3 土壤 DOM 测定 土壤溶解性有机质 (DOM) 提取: 取 8 g 鲜土, 加入 40 mL 超纯水, 25 °C 恒温震荡 8 h 后, 4000 ×g 离心 10 min, 取上清液过 0.45 μm 纤维素滤膜^[7], 滤液中的有机质即为土壤 DOM。土壤溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON) 浓度利用总有机碳分析仪 (Liquid TOC, Elementar, 德国) 测定。

采用紫外可见分光光度计 (UV-2600, Shimadzu, Kyoto, 日本) 测定 DOM 浸提液在波长 254 nm 的吸收值。通过计算芳香化指数 (AI) 来表征 DOM 的芳香化程度。AI 计算公式^[21]如下:

$$AI = UV_{254} / C \times 100$$

式中: UV_{254} 为 254 nm 处的吸光度值 (cm^{-1}); C 为 DOC 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

通过归一化到 Milli-Q 水样的拉曼散射峰 (激发波长为 350 nm) 下的区域, 对荧光光谱进行拉曼校准, 采用三维荧光光度计 (Hitachi F-7000) 测定 DOM 样品的三维荧光光谱。扫描波长范围为: 发射波长 250~550 nm, 激发波长 230~500 nm, 增量均为 5 nm。发射和激发狭缝宽度为 10 nm, 扫描速度为 6000 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。检测后通过扣除纯水空白消除拉曼散射的影响。通过计算光谱指数来评估 DOM 中荧光部分的特征。腐殖化指数 (HIX) 为激发波长在 254 nm 时, 发射波长在 435~480 nm 区域荧光强度积分值除以 300~345 nm 区域荧光强度积分值^[22-23]。HIX 值可用来表征 DOM 的腐殖质含量或腐殖化程度, HIX 值越大, 说明 DOM 中分子构成越复杂, π - π 共轭体系越大, 腐殖类物质, 如缩合芳环和大分子化合物的含量越高。荧光指数 (FI) 为激发波长在 370 nm 时, 发射波长在 470 与 520 nm 处

荧光强度的比值, 被用于确定 DOM 的来源^[24], 即: 微生物 ($FI > 1.8$, 来源于细菌和藻类释放的胞外结合物) 或地球衍生 ($FI < 1.2$, 来源于植物)。生物指数 (BIX) 为激发波长为 310 nm 时, 发射波长在 380 与 430 nm 处的发射强度之比^[25]。BIX 作为 DOM 溯源的另一个指标, 用于表征微生物对 DOM 的贡献, BIX 值高, 表明 DOM 主要来源于微生物和藻类, 同时也体现 DOM 生物可利用性高。BIX 为 0.8~1.0 时, 表示 DOM 来源于新产生的生物或微生物, 而 BIX 低于 0.6 时, 表明很少存在本地有机物, 主要为外源有机物^[26-27]。

1.3 数据处理

用 Matlab 2018b 软件加载 DOMFluor 工具箱进行平行因子分析 (PARAFAC)^[28] 和荧光指数的计算, 模型通过拆半检验和残差分析, 确定检测样本中合适的 DOM 组分数; 荧光指数通过 peaklist 包进行计算。数据的统计分析由 Excel 2003、SPSS 22.0 和 R 软件共同完成。用 SPSS 22.0 软件中的单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha = 0.05$)。冗余分析 (RDA) 通过 R 软件加载 'vegan' 包进行。图表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 原生演替过程中土壤理化性质变化

土壤含水率、 NH_4^+ -N 含量、pH 值、C/N 在演替阶段上变化显著 (表 1)。土壤含水率和 NH_4^+ -N 含量显著上升; 土壤 pH 值、C/N 显著下降。在表层土壤, s4 阶段土壤 NO_3^- -N 含量显著高于其他阶段; 在亚表层土壤, NO_3^- -N 含量在演替阶段上无显著差异。s1 至 s6 阶段, 表层与亚表层土壤 C/N 和 NH_4^+ -N 含量无显著差异。s3、s4 阶段, 表层土壤含水率和 NO_3^- -N 含量显著高于亚表层土壤。

2.2 原生演替过程中土壤溶解有机质含量变化

土壤溶解性有机碳 (DOC)、溶解性有机氮 (DON) 含量在不同演替阶段上的差异显著 (图 1), 表现为随植被演替时间的增加, DOC、DON 含量显著增加。s1、s2 和 s6 阶段, 表层土壤 DOC 含量显著低于亚表层土壤; s4 阶段, 表层土壤 DOC 含量显著高于亚表层土壤。除 s3 阶段表层土壤 DON 含量显著高于亚表层土壤外, 其他演替阶段表层与亚表层土壤 DON 含量无显著差异。

2.3 原生演替过程中土壤溶解有机质光谱特征

芳香化指数 (AI)、腐殖化指数 (HIX)、荧光指

表 1 不同演替阶段下表层和亚表层土壤理化性质变化

Table 1 Changes of soil physicochemical properties in topsoil and subsoil at different successional stages

性质 Property	演替阶段 Successional stage						
		s1	s2	s3	s4	s5	s6
含水率 Moisture (%)	I	15.0±2.3b	18.4±4.5b	38.6±9.9b*	118.4±6.1ab*	213.1±60.3a	226.4±56.9a
	II	13.7±1.3b	13.7±2.5b	16.9±2.6b	24.3±14.2b	108.6±11.0a	173.1±75.2a
pH	I	8.48±0.04a	8.38±0.22a	6.38±0.27b	6.12±0.59b	5.01±0.34c*	4.77±0.71c
	II	8.48±0.07a	8.42±0.11a	7.64±0.61a	5.96±0.33b	5.80±0.17b	4.44±0.57c
C/N	I	33.79±4.24a	20.89±4.92b	14.97±1.18b	14.35±0.81b	16.11±2.06b	15.98±1.87b
	II	27.01±3.34a	24.07±6.19ab	23.07±6.24b	14.23±1.09c	14.58±1.20bc	17.65±2.84bc
NH ₄ ⁺ -N (mg·kg ⁻¹)	I	1.54±0.24b	4.11±2.67b	18.12±10.52b	18.55±2.56b	243.71±8.68a	135.55±3.54a
	II	1.30±0.30b	2.64±0.96b	4.10±1.81b	15.26±1.07b	132.19±17.53a	302.37±52.12a
NO ₃ ⁻ -N (mg·kg ⁻¹)	I	3.82±2.50b	4.75±3.61b	35.06±8.84b*	87.29±3.27a*	28.49±4.83b	10.51±2.76b
	II	1.76±0.97a	3.62±3.26a	11.58±3.37a	14.93±5.39a	19.36±2.65a	24.36±5.82a

I: 表层土壤 Topsoil; II: 亚表层土壤 Subsoil. s1~s6: 原生演替的 6 个阶段 Six stages of the primary succession. 同行不同小写字母表示同一土层下不同演替阶段间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference among different successional stages in the same soil layer at 0.05 level. * 表示同一演替阶段下不同土层间差异显著 ($P<0.05$) * indicated significant difference between different soil layers under the same successional stage at 0.05 level.

数 (FI)、生物指数 (BIX) 在不同演替阶段差异显著 (图 2)。s1 至 s6 阶段, AI 先增加后下降, 在 s5 阶段最大; HIX 显著升高; FI、BIX 显著下降。s1~s4 阶段 $FI>1.8$, s5、s6 阶段 $FI<1.8$; s1、s2 阶段 $BIX>0.8$, s5、s6 阶段 $BIX<0.6$ 。s1~s3 阶段, 表层土壤 DOM 的 AI 显著高于亚表层; s5 阶段, 表层土壤 DOM 的 AI

则显著低于亚表层。s5 阶段, 表层土壤 DOM 的 HIX 显著低于亚表层; 其他演替阶段, HIX 在两个土层间无显著差异。s1~s6 阶段, 表层与亚表层土壤 DOM 的 FI 无显著差异。s5 阶段, 表层土壤 DOM 的 BIX 显著高于亚表层; 其他演替阶段, BIX 在两个土层间无显著差异。

通过平行因子 (PARAFAC) 模型解析出海螺沟冰川退缩区植被原生演替阶段土壤 DOM 中的 7 种荧光组分 (图 3 表 2)。将 PARAFAC 模型识别出的荧光组分的激发波长和发射波长数据上传至 Open-Fluor 在线数据库, 对比已发表的 PARAFAC 模型, 发现 7 种组分均存在置信区间大于 0.95 的相似组分, 包括 2 种类蛋白组分 (C1、C2) 和 5 种类腐殖质组分 (C3~C7)。

7 种荧光组分的最大荧光强度和相对丰度在 6 个演替阶段两个土层的分布如图 4 所示。表层土壤在 s1~s6 演替阶段 C1 组分的最大荧光强度变化为 $s3>s4>s1>s2>s6>s5$; C2 组分的最大荧光强度逐渐减小; 类腐殖质组分 C3、C4 的最大荧光强度逐渐增加; C5、C6、C7 组分的最大荧光强度随演替进行先增加后减小, 在 s4 阶段达到最大值。亚表层土壤在 s1~s6 演替阶段, 两种类蛋白组分 C1、C2 的最大荧光强度先增加后减小, 在 s2 阶段达到最大值; 类腐殖质组分 C3~C7 的最大荧光强度先增加后减小, 在 s5 阶段达到最大值。表层和亚表层土壤 s1 至 s6 阶段, 两种类蛋白组分 (C1、C2) 的相对丰度逐渐减小, s1 阶段两种类蛋白组分 C1、C2 的相对丰度高达 70%, s6 阶段下降至不到 10%; 类腐殖质组分 C3~C7 的相对丰度逐渐增加, 由 30% 上升至 90% 以上。

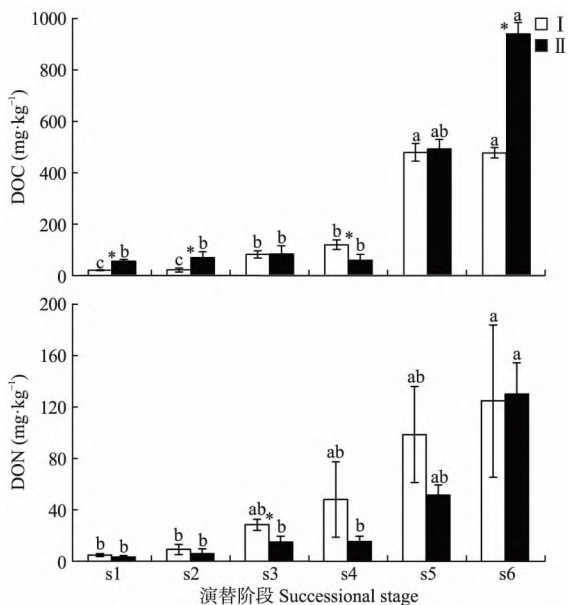


图 1 不同演替阶段下表层与亚表层土壤溶解性有机碳 (DOC) 和溶解性有机氮 (DON) 含量

Fig.1 Contents of dissolved organic carbon (DOC) and nitrogen (DON) in topsoil and subsoil at different successional stages.

I: 表层土壤 Topsoil; II: 亚表层土壤 Subsoil. 不同小写字母表示同一土层下不同演替阶段间差异显著 Different lowercase letters indicated significant difference among different successional stages in the same soil layer at 0.05 level. * 表示同一演替阶段下不同土层间差异显著 ($P<0.05$) * indicated significant difference between different soil layers under the same successional stage at 0.05 level. 下同 The same below.

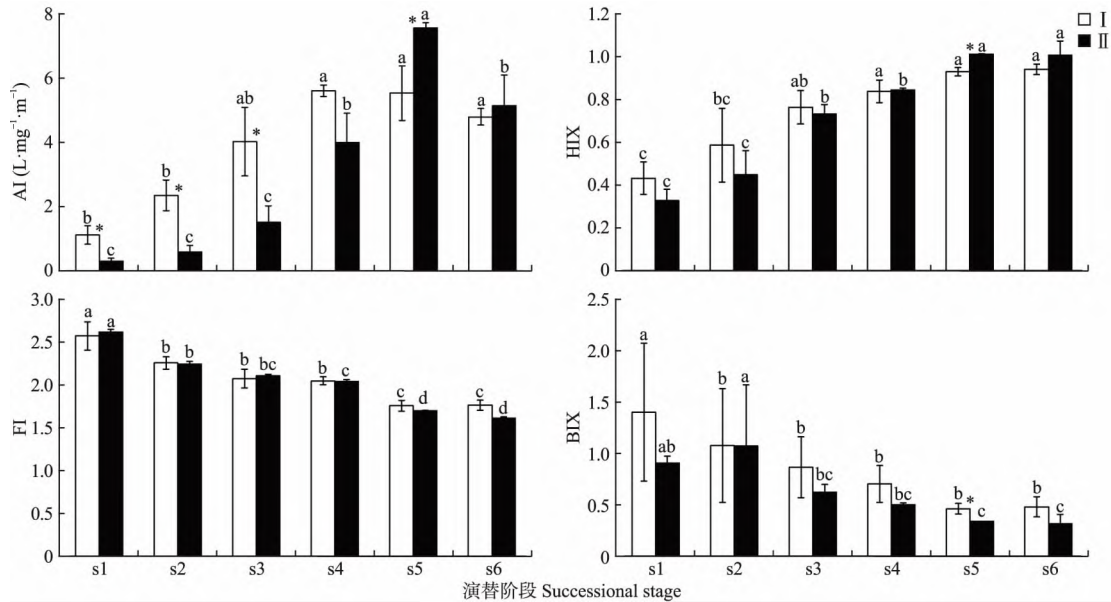


图 2 不同演替阶段下表层与亚表层土壤溶解性有机质的光谱指数

Fig.2 Spectral indices of dissolved organic matter in topsoil and subsoil at different successional stages.

AI: 芳香化指数 Aromaticity index; HIX: 腐殖化指数 Humification index; FI: 荧光指数 Fluorescence index; BIX: 生物指数 Biological index. 下同 The same below.

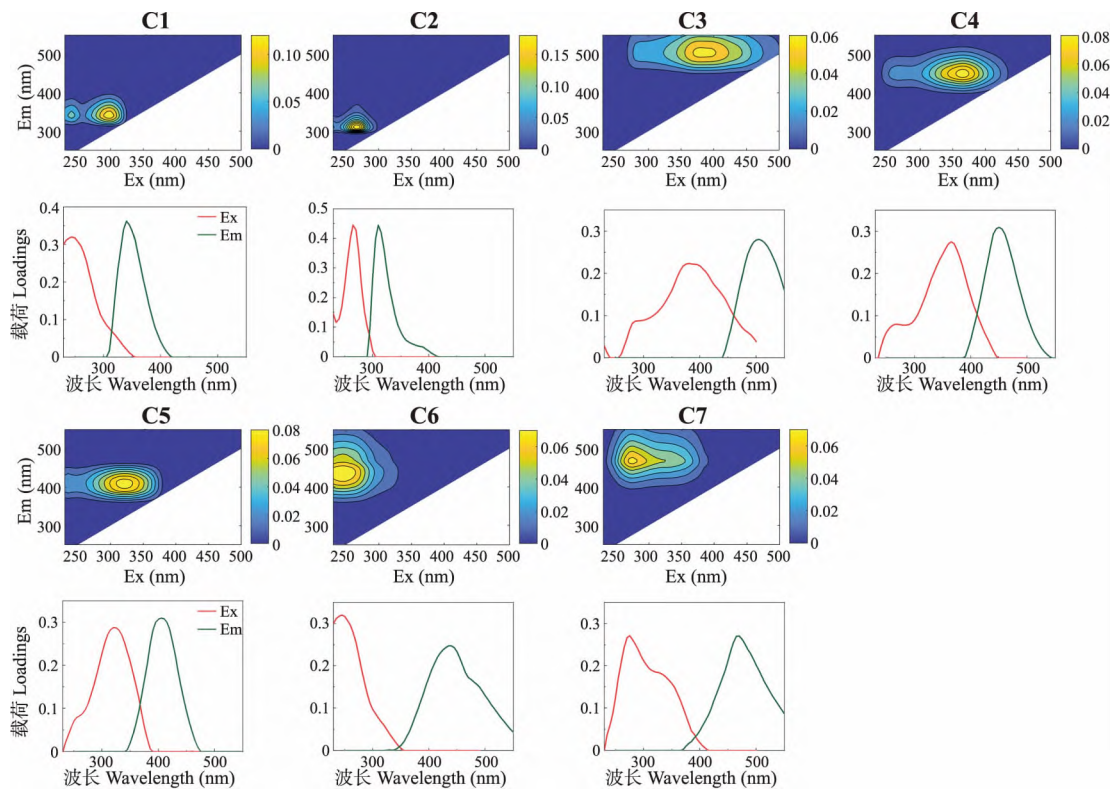


图 3 PARAFAC 解析出的 7 种荧光组分 (C1~C7) 的 3D-EEM 图谱及载荷图

Fig.3 3D-EEM spectra and loadings of the fluorescence components (C1-C7) identified using PARAFAC model.

Ex: 激发波长 Excitation wavelength; Em: 发射波长 Emission wavelength.

2.4 原生演替过程中土壤理化性质对 DOM 含量与组成的影响

以土壤 DOM 含量和组分为响应变量,以土壤

理化性质为解释变量,结合 6 个演替阶段的样点,分别对表层和亚表层土壤 DOM 进行冗余分析 (RDA)。由图 5 可知,RDA 分析将演替阶段明显分

表 2 不同演替阶段土壤溶解性有机质的 7 个组分的荧光峰

Table 2 Fluorescence peaks of seven components of dissolved organic matter at different successional stages

名称 Name	组分 Component	激发和发射最大值 Excitation and emission maxima (nm)		可能的来源 Probable source	描述 Description
		Ex	Em		
C1	类色氨酸 Tryptophan-like	270~280	345~355	T, M	氨基酸, 游离或与蛋白质结合, 荧光类似于游离色氨酸, 可能表明完整的蛋白质或较少降解的肽物质 ^[29]
C2	类酪氨酸 Tyrosine-like	270~275	304~312	T, M	氨基酸, 游离或与蛋白质结合, 荧光类似于游离酪氨酸, 可能表明更多降解的肽物质 ^[29]
C3	未知 Unknown	380~410	490~510	U	未被定义, 仅与 Chen 等 ^[30] 观察到的类腐殖质荧光峰类似
C4	UVC 类腐殖质 Ultraviolet C (UVC) humic-like	350~360	450~460	T	高分子量的腐殖质, 广泛分布, 但在湿地和森林环境中含量最高 ^[29]
C5	UVA 类腐殖质 Ultraviolet A (UVA) humic-like	300~325	390~430	T, M	低分子量, 常见于与生物活动相关的海洋环境, 在废水、湿地和农业环境中亦可发现 ^[29]
C6	UVA 类腐殖质 UVA humic-like	240~260	420~450	T	荧光类似于黄腐酸, 广泛存在 ^[29]
C7	UVC 类腐殖质 UVC humic-like	260	460~480	T	高分子量和芳香性腐殖质, 广泛分布, 但在湿地和森林环境中最高 ^[29]

Ex: 激发波长 Excitation wavelength; Em: 发射波长 Emission wavelength. T: 植物或土壤有机质 Plant or soil organic matter; M: 微生物过程 Microbial processing; U: 未知 Unknown.

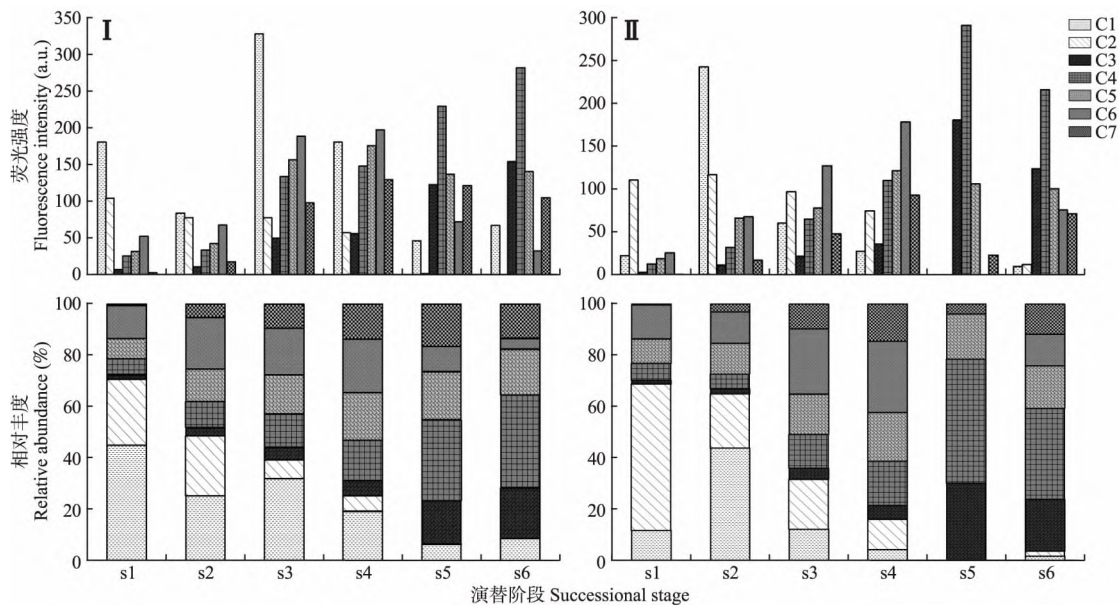


图 4 各演替阶段溶解性有机质荧光组分的强度和相对丰度

Fig.4 Fluorescence intensity and relative abundance of dissolved organic matter at different successional stages.

C1~C2: 类蛋白组分 Protein-like component; C3~C7: 类腐殖质组分 Humic-like component. 下同 The same below.

为 3 个聚群: s1~s2 阶段、s3~s4 阶段和 s5~s6 阶段。RDA1 轴和 RDA2 轴共同解释了表层土壤 DOM 变异的 62.2%, 其中, pH 值单独的解释率为 25.1% ($P=0.001$), NH_4^+ 单独的解释率为 10.0% ($P=0.002$), 两者共同解释的部分为 27.1%。表层土壤中, pH 值与类蛋白组分 C1~C2、BIX、FI、HIX 指数呈显著正相关, 与 DOC、DON 含量、类腐殖质组分 C3、C4、C7 呈显著负相关; NH_4^+ 与 DOC、DON 含量、类腐殖质组分 C3~C4、AI 指数呈显著正相关, 与类蛋白组分 C1~C2、类

腐殖质组分 C6 呈显著负相关。RDA1 轴和 RDA2 轴共同解释了亚表层土壤 DOM 变异的 64.3%, 土壤含水率单独的解释率为 23.5% ($P=0.001$), pH 值单独的解释率为 21.5% ($P=0.002$), 两者共同解释的部分为 19.3%。亚表层土壤中, 土壤含水率与 DOC 和 DON 含量呈显著正相关, 与类腐殖质组分 C5~C7、HIX 指数呈显著负相关; pH 值与类蛋白组分 C1~C2、BIX、FI 指数呈显著正相关, 与类腐殖质组分 C3~C4、AI 指数呈显著负相关。

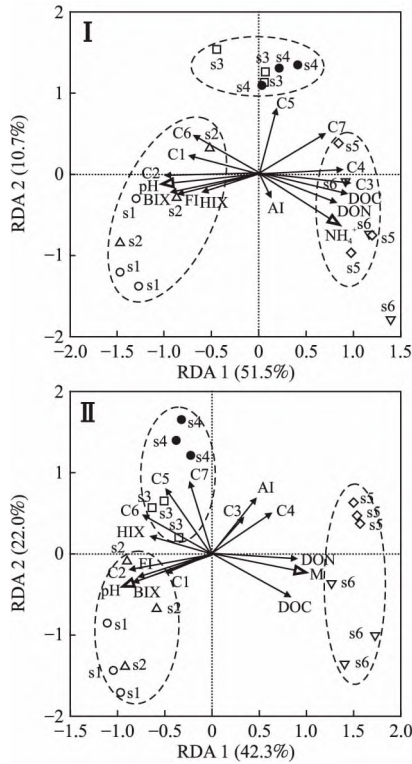


图5 土壤理化性质对溶解性有机质含量与组成影响的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) of the effects of soil properties on dissolved organic matter concentration and composition.

M: 土壤含水率 Soil moisture; NH₄⁺: 土壤铵态氮含量 Nitrate N content of soil; DOC: 溶解性有机碳含量 Dissolved organic carbon content; DON: 溶解性有机氮含量 Dissolved organic nitrogen content.

3 讨论

3.1 原生演替过程中土壤溶解性有机质含量变化及其影响因素

随演替进行,土壤 DOC、DON 含量显著升高。表层土壤 DOC、DON 含量的增长具有明显的阶段特征,表现为演替早期(s1~s2) < 演替中期(s3~s4) < 演替后期(s5~s6)。根据冗余分析的结果,土壤 NH₄⁺-N 含量与表层土壤 DOC、DON 含量呈正相关,这可能是由于土壤氮含量的增加促进了植被演替过程。地上和地下生物量、粗木质残体量和凋落物量随演替进行显著增加^[31],向土壤表层输入更多新鲜有机质,使表层土壤 DOC、DON 含量随演替过程显著增加。这与焦宏哲等^[32]的研究结果一致。pH 值与表层土壤 DOC、DON 含量呈负相关。pH 值随演替阶段下降使得 SOM 与土壤颗粒的结合力下降, SOM 受到的物理保护作用降低^[33],更容易被微生物分解转化为 DOM。

亚表层土壤 DOC、DON 含量随演替阶段的进行表现为:演替早、中期(s1~s4) < 演替后期(s5~s6)。根据冗余分析的结果,土壤含水率与亚表层土壤 DOC、DON 含量呈显著正相关,pH 值与亚表层土壤 DOC、DON 含量呈负相关。植被群落演替过程中地上和地下生物量增加,截流降水、涵养水源的功能增加,导致土壤含水率随演替进行差异显著,表现为:演替早、中期显著小于演替后期。土壤含水率的增加一方面促进了微生物活性,有利于微生物生物量的增长,并且加速了其凋落物和 SOM 的分解,促进 SOM 转化为 DOM^[34];另一方面在湿润环境下矿物风化作用增强,次生矿物(包括黏土矿物)含量较高,次生矿物的比表面积大,对 DOM 的非专性吸附作用促进了 DOM 的累积^[9]。

3.2 原生演替过程中土壤溶解性有机质组分变化及其影响因素

DOM 中光活性部分可以用来追踪其组成和来源的变化^[35]。本研究芳香化指数(AI)先增大后减小,表明随演替进行,土壤中芳香化合物的含量先增加后减小。腐殖化指数(HIX)随演替进行逐渐增加,土壤 DOM 中分子构成趋于复杂,腐殖类物质如芳香类和大分子化合物的含量增加。荧光指数(FI)随演替进行逐渐下降,s1~s4 阶段 FI>1.8,表明细菌或藻类释放的胞外结合物为演替早、中期阶段土壤 DOM 的主要来源;s5~s6 阶段 FI<1.8,表明随演替的进行,土壤 DOM 由细菌等微生物来源为主转向以植物来源为主。生物指数(BIX)随演替进行逐渐下降,土壤 DOM 的生物可利用性降低。s1~s2 阶段 BIX>0.8,表明细菌残体及其分解和代谢产物是冰川退缩迹地植被演替早期阶段土壤 DOM 的主要来源;s5~s6 阶段 BIX<0.6,显示在演替后期微生物对 DOM 的贡献较少,DOM 主要来源于植物的粗木质残体和地上凋落物分解。

根据冗余分析的结果,pH 值与表层土壤 DOM 中类蛋白组分(C1、C2)和与微生物、藻类起源相关的光学指数(FI、BIX)呈正相关,与类腐殖质组分(C5、C7)呈负相关。pH 值与亚表层土壤 DOM 中类蛋白组分(C1、C2)和微生物起源相关的光学指数(FI、BIX)呈正相关,与类腐殖质组分(C3、C4)和芳香化指数(AI)呈负相关。这与 Li 等^[7]和 Ding 等^[9]的研究结果相反。他们的研究结果显示,pH 值与高度不饱和化合物及酚类化合物、稠环芳香烃呈正相关,与脂肪族类化合物(例如,氨基糖类、蛋白类和碳水化合物类)呈负相关^[36]。本研究区特殊的植被

覆盖可能是造成土壤 DOM 组成规律与其他地区不同的原因。在植被演替的早期阶段, 主要生长黄芪、沙棘、柳树等先锋固氮植物, 向土壤输入“高质量”、易分解的凋落物。这些底物以较高的底物利用效率被微生物分解, 并转化为自身的生物量和代谢产物, 从长远来看, 微生物产物的积累相对较高^[37], 因而演替早期阶段土壤 DOM 中类蛋白组分相对丰度和与微生物、藻类起源相关的光学指数较高。在植被演替的后期, 主要优势植被为麦吊云杉和峨眉冷杉, 向土壤输入针叶和粗木质残体等“低质量”、不易分解的底物, 初始分解速度较慢, 转化为微生物产物的初始质量较少, 且粗木质残体(木质素含量 80%~90%) 比演替早期的阔叶凋落物和草本植物(木质素含量低至 3%~14%) 的纤维素和木质素浓度更高^[38], 故演替后期土壤 DOM 中类蛋白组分相对丰度和与微生物、藻类起源相关的光学指数与演替早期相比显著降低, 而类腐殖质组分相对丰度和腐殖化指数显著升高。

土壤含水率与亚表层土壤 DOM 中类腐殖质组分(C5~C7) 和腐殖化指数呈负相关, 这与 Ding 等^[9]的研究结果一致。这说明土壤水分的增加促进了木质素、酚类等大分子化合物的降解。另外, 贡嘎山海螺沟冰川退缩区演替后期阶段出现次生矿物蒙脱石^[39], 其对具有高芳香性和酸性官能团的 DOM 分子的选择性吸附^[11] 可能是演替后期土壤芳香化指数有所下降的原因。

表层和亚表层土壤 DOM 含量和组分受不同环境因子的影响, 这说明环境因素对土壤 DOM 的影响在不同土层深度存在差异。这与 Roth 等^[40]的研究结果一致。与亚表层土壤相比, 表层土壤更接近植物来源的有机质, 这是影响植物生长和演替的重要因素, 即 NH_4^+-N 含量是土壤 DOM 变化的主要影响因素。而亚表层土壤含水率影响微生物活性, 从而成为土壤 DOM 变化的主要影响因素。

4 结 论

海螺沟冰川退缩区原生演替过程中土壤 DOM 含量随演替时间的增加显著增加; 土壤 DOM 来源由早期的微生物贡献为主逐渐转变为以植物输入为主; DOM 中类蛋白组分相对丰度下降、类腐殖质组分相对丰度升高, 生物可利用性下降。原生演替过程中, pH 值、土壤含水率和 NH_4^+-N 含量是影响土壤 DOM 组成和含量的重要环境因素。不同土层影响土壤 DOM 组分和含量变化的因素不同, 说明环

境因素对土壤 DOM 组成和含量的影响因土层深度而异。

参考文献

- [1] Kalbitz K, Solinger S, Park JH, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, **165**: 277-304
- [2] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, **171**: 52-60
- [3] Kalbitz K, Kaiser K. Ecological aspects of dissolved organic matter in soils: Preface. *Geoderma*, 2003, **113**: 177-178
- [4] McDowell WH, Zsolnay A, Aitkenhead-Peterson JA, et al. A comparison of methods to determine the biodegradable dissolved organic carbon from different terrestrial sources. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, **38**: 1933-1942
- [5] 秦纪洪, 王姝, 刘琛, 等. 海拔梯度上川西高山土壤溶解性有机质(DOM) 光谱特征. *中国环境科学*, 2019, **39**(10): 4321-4328
- [6] Schmidt MWI, Torn MS, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 2011, **478**: 49-56
- [7] Li XM, Sun GX, Chen SC, et al. Molecular chemodiversity of dissolved organic matter in paddy soils. *Environmental Science and Technology*, 2018, **52**: 963-971
- [8] Smith AP, Bond-Lamberty B, Benscoter BW, et al. Shifts in pore connectivity from precipitation versus groundwater rewetting increases soil carbon loss after drought. *Nature Communications*, 2017, **8**: 1335
- [9] Ding Y, Shi ZQ, Ye QT, et al. Chemodiversity of soil dissolved organic matter. *Environmental Science and Technology*, 2020, **54**: 6174-6184
- [10] Ma T, Zhu SS, Wang ZH, et al. Divergent accumulation of microbial necromass and plant lignin components in grassland soils. *Nature Communications*, 2018, **9**: 3480
- [11] Arnosti C. Speed bumps and barricades in the carbon cycle: Substrate structural effects on carbon cycling. *Marine Chemistry*, 2004, **92**: 263-273
- [12] Guo WQ, Liu SY, Xu L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, **61**: 357-372
- [13] Wei TF, Shanguan DH, Yi SH, et al. Characteristics and controls of vegetation and diversity changes monitored with an unmanned aerial vehicle (UAV) in the foreland of the Urumqi Glacier No. 1, Tianshan, China. *Science of the Total Environment*, 2021, **771**: 145433
- [14] Jiang YL, Lei YB, Yang Y, et al. Divergent assemblage patterns and driving forces for bacterial and fungal communities along a glacier forefield chronosequence. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, **118**: 207-216
- [15] Bai Y, Xiang Q, Zhao K, et al. Plant and soil development cooperatively shaped the composition of the pho-harboring bacterial community along the primary succession in the Hailuoguo glacier chronosequence. *Msystems*,

- 2020, **5**: e00475-20
- [16] Yang Y, Wang GX, Shen HH, *et al.* Dynamics of carbon and nitrogen accumulation and C: N stoichiometry in a deciduous broadleaf forest of deglaciated terrain in the eastern Tibetan Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2014, **312**: 10-18
- [17] 罗辑, 李伟, 余佳, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区植被演替过程的碳动态. *山地学报*, 2017, **35**(5): 629-635
- [18] Zhou J, Wu YH, Jorg P, *et al.* Changes of soil phosphorus speciation along a 120-year soil chronosequence in the Hailuoguo Glacier retreat area (Gongga Mountain, SW China). *Geoderma*, 2013, **195**: 251-259
- [19] Zhou J, Wu YH, Turner BL, *et al.* Transformation of soil organic phosphorus along the Hailuoguo post-glacial chronosequence, southeastern edge of the Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2019, **352**: 414-421
- [20] Zhou J, Bing H, Wu Y, *et al.* Weathering of primary mineral phosphate in the early stages of ecosystem development in the Hailuoguo Glacier foreland chronosequence. *European Journal of Soil Science*, 2018, **69**: 450-461
- [21] Weishaar JL, Aiken GR, Bergamaschi BA, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**: 4702-4708
- [22] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter. *Environmental Science and Technology*, 2002, **36**: 742-746
- [23] 孔玉华, 朱龙飞, 吴浩浩, 等. 冻融条件和土壤湿度对森林土壤渗漏液溶解性有机质含量与光谱结构特征的影响. *应用生态学报*, 2019, **30**(9): 2903-2914
- [24] Cory RM, McKnight DM. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science and Technology*, 2005, **39**: 8142-8149
- [25] Parlanti E, Worz K, Geoffroy L, *et al.* Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. *Organic Geochemistry*, 2000, **31**: 1765-1781
- [26] Feng L, Xu JZ, Kang SC, *et al.* Chemical composition of microbe-derived dissolved organic matter in cryoconite in Tibetan Plateau glaciers: Insights from Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry analysis. *Environmental Science and Technology*, 2016, **50**: 13215-13223
- [27] Birdwell JE, Engel AS. Characterization of dissolved organic matter in cave and spring waters using UV-Vis absorbance and fluorescence spectroscopy. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**: 270-280
- [28] Stedmon CA, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: A tutorial. *Limnology and Oceanography-Methods*, 2008, **6**: 572-579
- [29] Fellman JB, Hood E, Spencer RGM. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**: 2452-2462
- [30] Chen BF, Huang W, Ma SZ, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter in the littoral zones of eutrophic lakes Taihu and Hongze during the algal bloom season. *Water*, 2018, **10**: 861
- [31] 杨丹丹, 罗辑, 余佳, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区原生演替序列植被生物量动态. *生态环境学报*, 2015, **24**(11): 1843-1850
- [32] 焦宏哲, 李欢, 陈惠, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤可溶性有机质数量和结构的影响. *生态学报*, 2021, **41**(4): 1593-1602
- [33] Fissore C, Giardina CP, Kolka RK, *et al.* Temperature and vegetation effects on soil organic carbon quality along a forested mean annual temperature gradient in North America. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 193-205
- [34] Moyano FE, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **59**: 72-85
- [35] Stedmon CA, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 2003, **82**: 239-254
- [36] 訾园园, 孔范龙, 郗敏, 等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性. *应用生态学报*, 2016, **27**(12): 3871-3881
- [37] Cotrufo MF, Wallenstein MD, Boot CM, *et al.* The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 2013, **19**: 988-995
- [38] Aber JD, Melillo J. *Terrestrial Ecosystems*. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1991: 434-435
- [39] 杨子江, 郗海健, 周俊, 等. 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化. *土壤学报*, 2015, **52**(3): 507-516
- [40] Roth VN, Lange M, Simon C, *et al.* Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil. *Nature Geoscience*, 2019, **12**: 755-761

作者简介 梁紫嫣,女,1997年生,硕士研究生。主要从事土壤生态学研究。E-mail: liangziyan@imde.ac.cn

责任编辑 张凤丽