

DOI: 10.5846/stxb202006231635

曹佳锐, 龚可杨, 别宇静, 吴冠宇, 毕郑文, 拓卫卫, 王健, 佟小刚. 水土保持林恢复土壤可溶性碳氮组分动态与三维荧光特征分析. 生态学报, 2021, 41(19): 7679-7688.

Cao J R, Gong K Y, Bie Y J, Wu G Y, Bi Z W, Tuo W W, Wang J, Tong X G. Analysis of dynamics of soil dissolved carbon and nitrogen fractions and its three-dimensional fluorescence characteristics during restoration of soil and water conservation forests. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7679-7688.

水土保持林恢复土壤可溶性碳氮组分动态与三维荧光特征分析

曹佳锐¹, 龚可杨¹, 别宇静¹, 吴冠宇², 毕郑文³, 拓卫卫³, 王健¹, 佟小刚^{1,*}

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 陕西省水利水电工程咨询中心, 西安 710000

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:为探究水土保持林恢复过程中土壤可溶性碳氮含量变化及其有机组成特性, 揭示水保林土壤固存可溶性有机质的效应及机制。选取了黄土丘陵区恢复 12—45a 的人工柠条、刺槐林以及撂荒地, 分析了土壤可溶性碳氮含量及其三维荧光光谱特征与特性参数的动态变化。结果表明: 随恢复年限的增加, 3 种植被土壤可溶性有机碳 (DOC)、有机氮 (DON)、无机氮 (DIN) 的含量均呈增加趋势, 并且相同恢复年限下 DOC、DON、DIN 含量总体表现为撂荒 < 柠条 < 刺槐; 但柠条和刺槐林土壤 DOC、DON 及二者占总有机碳、全氮比例并未持续增加, 到恢复 45a 时 DOC 占总有机碳比例以及 DOC: DON 均以撂荒地最高, 刺槐林最低, DON 占全氮比例则表现相反。三维荧光结合平行因子分析得出所有样地土壤可溶性有机质 (DOM) 主要有大分子腐殖物质 (C1)、低分子量类富里酸 (C2)、类色氨酸 (C3) 及农业措施输入的腐殖物质 (C4) 4 个组分, 并且以 C1 组分占比最大, 平均达 37.4%。随恢复年限增加, 3 种植被土壤 DOM 中 C3 组分占比升高, C2 和 C4 组分占比降低, C1 组分占比在柠条和刺槐林中升高, 在撂荒地中则降低。不同植被土壤可溶性有机质荧光指数 (FI)、新鲜度指数 ($\beta:\alpha$) 及自生源指数 (BIX) 差异不显著, 分别为 1.63、0.58、0.59; 不同恢复年限撂荒地腐殖化指数 (HIX) 没有差异, 但柠条和刺槐林显著高于撂荒且随恢复年限增加先增大后稳定。综上, 水保林持续恢复可以显著提升土壤可溶性碳氮含量, 也使土壤可溶有机质组成趋向复杂和相对稳定, 利于累积固持, 特别以刺槐林效应最明显。

关键词: 土壤可溶性有机质; 三维荧光光谱特征; 平行因子分析; 水土保持林; 黄土丘陵区

Analysis of dynamics of soil dissolved carbon and nitrogen fractions and its three-dimensional fluorescence characteristics during restoration of soil and water conservation forests

CAO Jiarui¹, GONG Keyang¹, BIE Yujing¹, WU Guanyu², BI Zhengwen³, TUO Weiwei³, WANG Jian¹, TONG Xiaogang^{1,*}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Water Conservancy and Hydropower Engineering Consulting Center of Shaanxi Province, Xi'an 710000, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

Abstract: For revealing the effects and mechanism of dissolved organic matter (DOM) accumulation in soil during the restoration process of soil and water conservation forests, the dynamics of dissolved carbon and nitrogen content and its

基金项目: 陕西省水利科技计划项目 (2018slkj-7); 陕西省自然科学基金重点项目 (2018JZ4002); 国家林业和草原局林草科技创新发展与研究项目 (2020132111)

收稿日期: 2020-06-23; 网络出版日期: 2021-07-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaogantong@126.com

organic composition characteristics was analyzed in the surface soil. The soils were collected from three typical kinds of forestlands: *Caragana korshinskii*, *Robinia pseudoacacia* and abandoned land, which have been established for 12 to 45 years, and changes in soil dissolved carbon and nitrogen content, three-dimensional fluorescence characteristics and parameters were determined. The results showed that the contents of dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) in the three vegetation soils increased significantly with recovery duration. Under the same recovery period, the contents of DOC, DON and DIN generally appear as abandoned land < *Caragana korshinskii* < *Robinia pseudoacacia*. However, the ratios of DOC to SOC, DON to TN and DOC to DON in *Caragana korshinskii* and *Robinia pseudoacacia* did not increase continuously. After 45 years, the ratio of DOC to SOC and DOC to DON were the highest in abandoned land and the lowest in *Robinia pseudoacacia*. The ratio of DON to TN was the highest in *Robinia pseudoacacia*, while the lowest in abandoned land. Three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis showed that the dissolved organic matter (DOM) in all plots mainly consists of 4 components: macromolecule humus (C1), fulvic acid (C2), tryptophan-like (C3), and humus substance related to human activities such as manure (C4). The C1 component has the largest proportion, with an average proportion of 37.4%. With the extension of the restoration period, the proportion of C3 component in soil DOM of the three vegetation types increased, the proportion of C2 and C4 components decreased, the proportion of C1 component increased in *Caragana korshinskii* and *Robinia pseudoacacia* forests and decreased in abandoned land. The DOM fluorescence index (FI), freshness index (β/α), and biological index (BIX) of all plots were not significantly different. The average fluorescence index of each plot was 1.63, the average freshness index was 0.58, and the biological index was 0.59. The humification index (HIX) of abandoned land at different restoration years has no difference. The humification index of *Caragana korshinskii* and *Robinia pseudoacacia* forests are significantly higher than the abandoned land. The humification index of *Caragana korshinskii* forest restored 45 years and 28 years was significantly higher than that of restoration 18a, and the humification index of *Robinia pseudoacacia* forest restored 45 years and 18 years was significantly higher than 12 years. In conclusion, the continuous restoration of soil and water conservation forests significantly increased the content of soil dissolved carbon and nitrogen, and result in more stable and complex composition of dissolved organic matter, which is conducive to continuous accumulation, especially in the *Robinia pseudoacacia* forestland.

Key Words: soil dissolved organic matter; three-dimensional fluorescence characteristics; parallel factor analysis; soil and water conservation forest; loess hilly region

20 世纪 70 年代末陆续开始实施的三北防护林、退耕还林等一系列生态造林工程使黄土高原林草覆盖率提升到近 65%, 水土流失面积减少 67%, 产生了显著的水土保持生态效应^[1]。但如何防止林地退化, 提升林草质量, 维持人工林可持续恢复, 还亟需掌握人工林恢复生态过程与机制, 科学评价生态恢复效应^[2]。碳和氮作为土壤养分的核心组分, 不仅是反映土壤质量的重要指标, 也是维持林地生态系统结构和功能的重要因素^[3], 所以土壤累积碳氮的能力亦成为人工林植被恢复过程研究的热点^[4]。目前, 大部分研究已表明人工林恢复通过生物量返还增加土壤碳、氮储量^[3], 并且随林龄的增大或恢复年限延长土壤有机碳、全氮均呈显著增加趋势^[5-6]。尽管这些研究从土壤总有机碳和全氮累积上揭示了人工林土壤累积碳氮效应, 但土壤中碳氮绝大部分都以多种有机复合态存在, 既有易分解的简单小分子单糖或多糖, 也有复杂难分解的腐殖质类^[7]。可见, 仅从总有机碳和全氮上还不能很好地反映土壤碳氮库对植被恢复的响应过程和机制^[8]。因此, 近年来土壤碳氮研究开始关注于易分解, 运移快, 易吸收利用的活性组分^[9-10]。特别是可溶性碳、氮, 作为土壤碳、氮库中最活跃的组分可以直接被土壤微生物分解利用, 促进土壤有机态养分转化为无机态向植被供应, 对土壤碳、氮元素的迁移、转化、利用都有重要作用。同时, 土壤可溶性碳氮也是可溶性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 的主要组成部分, 它们复合形成了一系列大小、结构不同的分子组成, 包括低分子量的游离氨基

酸、碳水化合物、有机酸以及大分子量的多糖和腐殖酸等有机组分。这些组分的荧光特征可以采用快速、高灵敏度、无破坏的三维荧光光谱分析,通过观察对应荧光峰值及计算荧光指数、腐殖化指数、新鲜度指数及自生源指数等荧光参数,定性定量地分析 DOM 的不同组分类型以及各个组分所占的比例,进而掌握 DOM 的芳香化、腐殖化程度及官能团组成等结构方面的信息^[11]。

黄土丘陵区是我国水土流失治理的重点区域之一,对该区域植被恢复过程土壤可溶性有机质含量变化已有一定研究^[12],但对有机组分荧光光谱特征分析还相对薄弱,研究也零散于不同林地^[13]、林地管理措施^[14]或侵蚀土壤^[15],对人工林植被恢复过程更缺乏相关认知。因此,本研究选取黄土丘陵沟壑区典型人工乔木、灌木林及撂荒地不同恢复年限样地,探究植被恢复过程土壤可溶性碳氮组分及其三维荧光光谱特征,揭示土壤可溶性有机质响应水土保持林恢复的累积效应与有机组成特性动态变化,以期为深入认知研究区水土保持林恢复土壤固定碳、氮机制及其生态效应评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省国家生态造林工程示范区安塞区境内五里湾流域(109°18'E—109°22'E,36°51'N—36°53'N,海拔 1010—1400m)。该区属温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 8.8℃,年平均降水量 505.3mm,主要集中在每年的 7、8 月份,无霜期 157 天;地貌以丘陵沟壑为主,土壤为黄绵土,抗侵蚀力差,属最具代表性的黄土侵蚀区,生态环境十分脆弱。为有效治理水土流失,恢复生态环境,自 20 世纪 70 年代开始,该区域进行了一系列人工造林工程,在多年的植被恢复过程中形成了不同恢复年限与类型的人工植物群落及撂荒草地,为本试验提供了良好的试验平台。植物群落中主要的建群种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等,林下草本主要有铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等,草本状半灌木主要有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等。

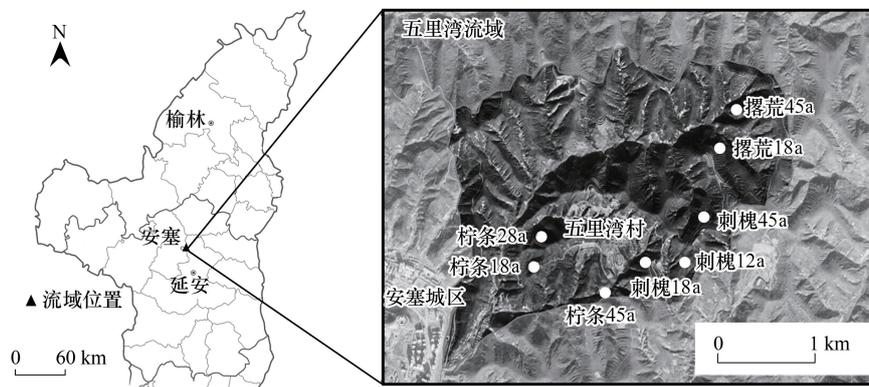


图 1 样地分布图

Fig.1 Map of research region (Ansai district, Shaanxi Province of China)

1.2 样地选择与取样

通过走访当地林业部门和农户调查,以空间代替时间法选取了人工种植恢复 12a、18a、45a 的刺槐林(*Robinia pseudoacacia*) RP12a、RP18a、RP45a;恢复 18a、28a、45a 的柠条林(*Caragana korshinskii*) CK18a、CK28a、CK45a 为研究样地,并同时选择自然恢复 18a、45a 的撂荒地(abandoned land) AL18a、AL45a 为对照样地,各个样地间直线距离小于 3km,均为坡地人工造林而来,管理方式一致,土壤类型相同,各样地分布见图 1,其基本特征见表 1。2019 年 9 月进行采样,该时期土壤碳氮库组分变化与微生物活性较强,可代表样地的养分状态。每种林地选取 3 个立地条件相似的重复采样地,采样时在每个采样地内设置 20m×20m 的标准采样区进行取样。采样时去除土壤表面枯落物,并在每个标准小区沿着坡位自上至下 S 型布设 12 点,以直径

5cm 土钻钻取 0—20cm 土样,最后将各点所取土样充分混合后按四分法取样,装入塑封袋作为待测土样。同时,采用环刀法测定土壤容重。土壤样品一部分保存于-20℃冰箱内用于可溶性有机质的提取与测定,其余自然风干后研磨过 2mm 筛测定有机碳和全氮等。由此,每个样地 3 个重复混合土样,共 24 个,每个样品平行测定 2 次,最后以均值与标准误差表示。

表 1 样地基本特征及 0—20cm 土层理化性质

Table 1 Characteristics of sampling sites and selected physical and chemical properties in 0—20 cm soil depth

样地 Sites	经纬度 Location	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect/(°)	覆盖度 Coverage/%	pH	容重/(g/cm ³) Soil bulk density	林下主要草本 Understory herbs
AL18a	E109°21' N36°52'	28	北偏西 13	70	8.3	1.25	达乌里枝子、铁杆蒿
AL45a	E109°21' N36°52'	32	北偏东 18	85	8.2	1.11	茭蒿、铁杆蒿
RP12a	E109°21' N36°52'	24	北偏西 75	70	8.3	1.15	铁杆蒿、长芒草
RP18a	E109°21' N36°51'	22	北偏东 80	65	8.2	1.27	铁杆蒿、长芒草
RP45a	E109°21' N36°52'	32	北偏东 18	72	8.0	1.24	茭蒿、菵草
CK18a	E109°25' N36°51'	24	北偏西 5	75	8.3	1.10	铁杆蒿、阿尔泰狗娃花
CK28a	E109°21' N36°51'	25	北偏西 70	80	8.3	1.21	铁杆蒿
CK45a	E109°21' N36°52'	31	北偏东 18	87	8.2	1.10	铁杆蒿

AL: 撂荒地 Abandoned land; RP: 刺槐 *Robinia pseudoacacia*; CK: 柠条 *Caragana korshinskii*

1.3 测定指标与方法

土壤总有机碳(SOC)与全氮(TN)分别采用重铬酸钾外加热法和全自动间断化学分析仪(Cleverchem Anna, Germany)测定。土壤可溶有机质(DOM)以水浸提法^[16]提取:称取 25 g 土样与 50mL 超纯水混合均匀(水:土=2:1),在 25℃下 180r/min 震荡 60min,再以 8000r/min 离心 6min,上清液过 0.45μm 滤膜。滤液中可溶性有机碳(DOC)、无机碳(DIC)采用总有机碳分析仪(岛津 TOC-VCPH)测定;可溶性总氮含量采用过硫酸钾氧化—凯氏定氮法测定,可溶性无机氮(DIN)为铵态氮和硝态氮之和,采用连续流动分析仪测定,可溶性有机氮(DON)为可溶性总氮与可溶性无机氮之差^[17]。

土壤 DOM 三维荧光光谱(3DEEMs)利用荧光光谱仪(R6000, Shimadzu, Japan)测定,测定激发波长(E_x)范围为 200—500nm,激发采样间隔为 5nm,发射波长(E_m)范围为 250—550nm,发射采样间隔为 2nm,扫描速度为 6000nm/min。利用三维荧光光谱技术结合平行因子分析法对 DOM 组分进行分析,使用 Matlab 软件中的 drEEM(version 0.1.0)和 DOMFour 工具包对 DOM 三维荧光光谱进行平行因子(PARAFAC)分析,采用最大荧光强度法评价得出的各组分的相对浓度。荧光指数(FI)为激发波长在 370nm 时,发射波长在 470nm 和 520nm 荧光强度的比值^[18];腐殖化指数(HIX)为激发波长在 254nm 时,发射波长在 435—480nm 的荧光强度积分值与 300—345nm 范围内的荧光强度积分值之比^[19];新鲜度指($\beta:\alpha$)为激发波长为 310nm 时,发射波长在 380nm 的荧光强度与 420—435nm 范围内的最大荧光强度的比值;自生源指数(BIX)为激发波长为 310nm 时,发射波长在 380nm 和 430nm 时荧光强度的比值^[20]。

1.4 数据处理及分析

不同恢复年限和植被类型样地土壤总有机碳、全氮、可溶性碳氮组分含量及其比例采用 Excel 2016 进行分析和作图;各样地间指标差异显著性采用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析和 Duncan 法($P<0.05$)多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤总有机碳与全氮含量变化

3 种植被及不同恢复年限样地累积碳氮的效应见图 2。与恢复 18a 相比,恢复 45a 的撂荒地 SOC 和 TN 含量分别增加了 84.4%和 109.1%。恢复 45a 的柠条比 28a 和 18a SOC 含量分别提高了 12.3%和 66.2%,TN

含量分别提升了 17.5% 和 47.3%。而刺槐 45a 比 18a 和 12a SOC 含量提升了 23.7% 和 79.9%, TN 含量分别提升 8.3% 和 36.0%。恢复 45a 后, SOC 含量刺槐和柠条林地分别比撿荒地高 62.9% 和 36.3%, TN 含量分别高 27.2% 和 45.7%。

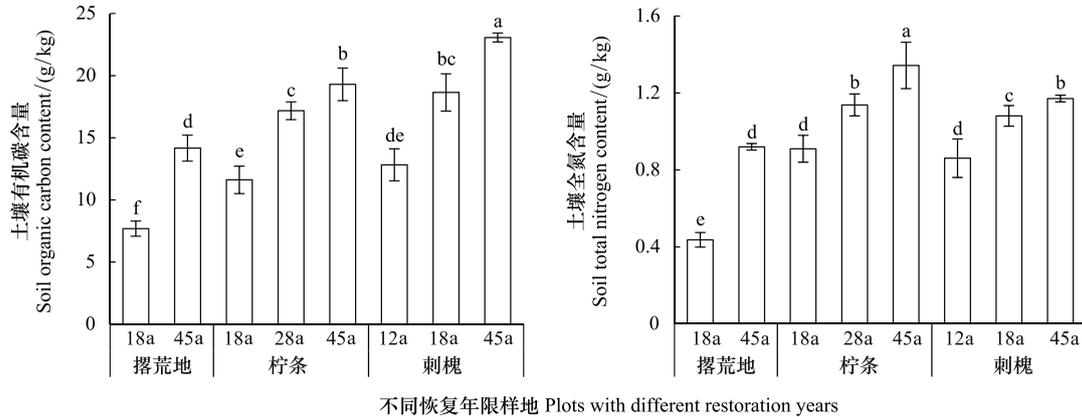


图 2 不同恢复年限与植被类型下土壤有机碳和全氮含量

Fig.2 Soil organic carbon and total nitrogen content under different restoration years and vegetation types

不同字母表示不同样地在 $P < 0.05$ 水平差异显著, 误差线均为标准误差; E_x : 激发波长 Excitation wavelength; E_m : 发射波长 Emission wavelength; PARAFAC: 平行因子分析法 Parallel factor analysis; DOM: 可溶性有机质 Dissolved organic matter.

2.2 土壤可溶性碳氮组分变化

土壤 DOC, DON 和 DIN 含量的变化趋势与 SOC 和 TN 一致, DIC 含量变化无明显规律(图 3)。恢复 45a 的撿荒地土壤 DOC、DIC、DON、DIN 分别较 18a 增加了 137.3%、33.7%、13.9% 和 51.2%。恢复 45a 后, 柠条林地 DOC、DON 及 DIN 含量比 18a 高 93.6%、109.0% 和 194.5%, 刺槐林地 DOC、DON、DIN 含量分别比 12a 和 18a 提升了 146.6%、90.4%、96.9% 和 28.1%、10.4%、20.0%, 且 DOC 含量刺槐 ≈ 柠条 > 撿荒地, DON 和 DIN 含量刺槐 > 柠条 > 撿荒地。

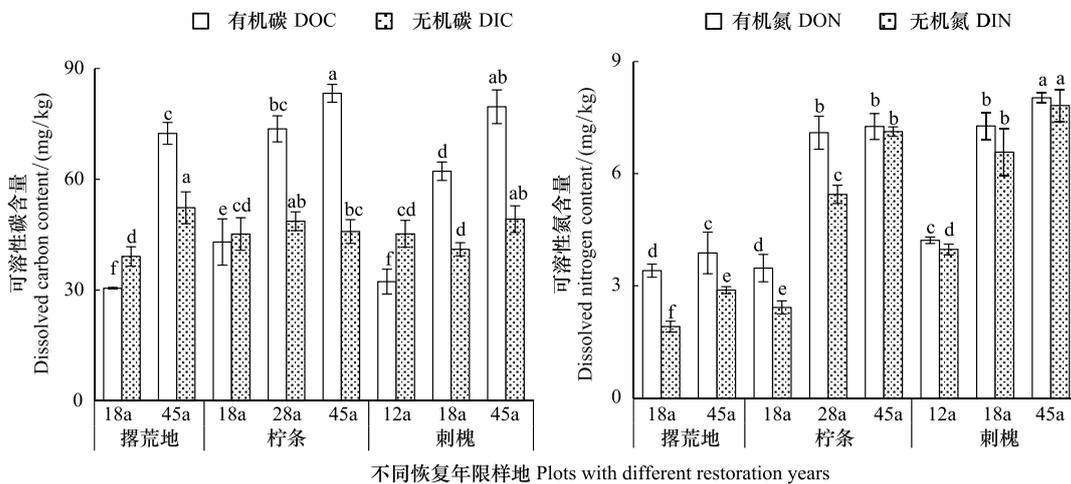


图 3 不同恢复年限与植被类型下土壤可溶性碳氮组分含量

Fig.3 The content of soil dissolved carbon and nitrogen under different restoration years and vegetation types

图 4 显示随恢复年限的增加, 柠条和刺槐林地土壤可溶性碳氮占全量碳氮的比率先增大后保持稳定。恢复 45a 时, 柠条林地 DOC/SOC、DON/TN 与 28a 相近, 比 18a 分别高 13.0% 和 53.9%。刺槐林地 DOC/SOC、DON/TN 45a 和 18a 差异不显著, 比 12a 分别提升 47.8% 和 42.6%。从 18a 到 45a, 撿荒地 DOC/SOC 显著提

升, DON/TN 则明显降低。恢复 45a 后, 撂荒地 DOC/SOC 最高, 刺槐林最低, DON/TN 则相反。

土壤碳氮比是影响土壤有机碳分解的重要因子, 研究区土壤 SOC:TN 和 DOC:DON 的范围分别为 12.8—19.7 和 7.4—17.0, 除撂荒 45a, 其余样地 SOC:TN 均大于 DOC:DON。恢复 45a 后, SOC:TN 刺槐>柠条≈撂荒, DOC:DON 撂荒>柠条>刺槐。随恢复年限的增加, 柠条林地 SOC:TN 表现为 18a<28a≈45a, 刺槐林地显著增加, 撂荒地则显著降低; DOC:DON 撂荒地显著降低, 刺槐林地表现为 12a<18a≈45a, 柠条林地仅 45a 显著高于 12a(图 5)。

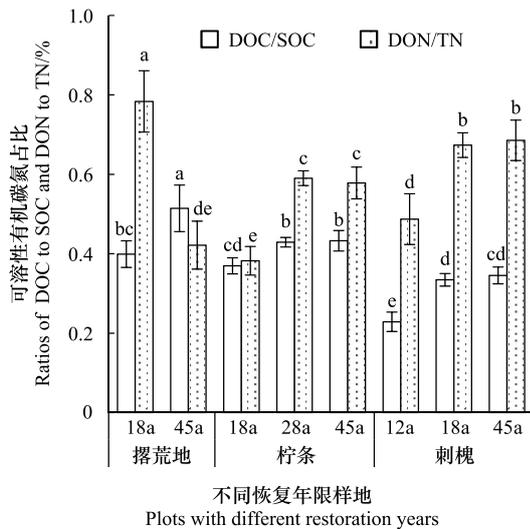


图 4 不同恢复年限与植被类型土壤可溶性碳氮占全量碳氮比例
Fig.4 The ratio of DOC and DON in SOC and TN under different restoration years and vegetation types

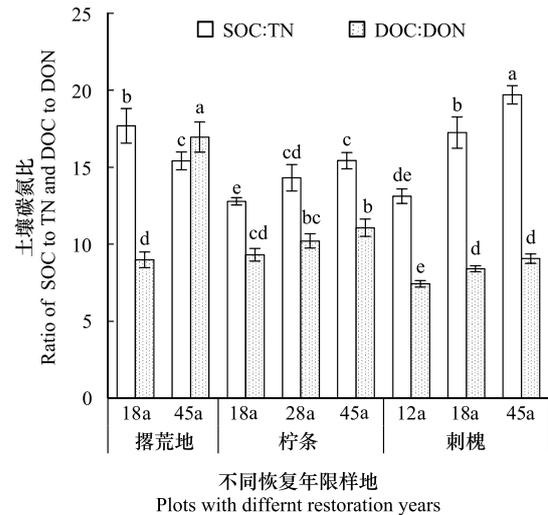


图 5 不同恢复年限与植被类型土壤全量碳氮与可溶性碳氮比
Fig.5 The ratio of SOC to TN and DOC to DON under different restoration years and vegetation types

2.3 土壤可溶性有机质的三维荧光光谱及荧光组分比例分析

根据 PARAFAC 模型区分 DOM 三维荧光光谱(图 6)得出所取样地土壤 DOM 共有 4 个荧光组分 C1 (225nm, 260nm/>450nm), C2 (255nm, 310nm/410nm), C3 (225nm, 285nm/338nm), C4 (225nm, 260nm, 300nm/400nm)。其中 C1 被认为是分子量较大的腐殖物质、木质素等芳香性强的物质^[21], 来自于植物残体和土壤有机物^[22]; C2 被认为分子量相对较低的类富里酸, 可能来源于 C1 组分的降解与转化^[23]; C3 与色氨酸单体有相似的荧光峰, 为类色氨酸物质; C4 普遍存在于地表径流与废水中, 通常被认为是与人类排放, 农业活动等相关的腐殖物质^[24-25], 研究区原为坡耕地, 故可能来源于灌溉、施有机肥、植物残体等的投入等。各组分的激发波长(E_x)、发射波长(E_m)、荧光类型及与相关文献的对比见表 2。

表 2 平行因子分析法得到的四种荧光组分

Table 2 Composition and characterization of four fluorescent components obtained by PARAFAC

组分 Component	激发波长/发射波长 E_x/E_m /nm	类型 Type	参考文献中对应组分 E_x/E_m /nm Reference
C1	225, 260/> 450	大分子腐殖物质, 木质素等芳香物质	225/450 ^[22] ; <240/465 ^[26] ; 260, 340/462 ^[27]
C2	255, 310/410	类富里酸	250, 325/416 ^[28] ; 250, 320/400 ^[29]
C3	225, 285/338	类色氨酸	215, 280/325 ^[30] ; 225, 290/342 ^[27]
C4	220, 260, 300/ 400	腐殖物质(与人类活动相关联如施肥等)	<250, 320/400 ^[24] ; 240/390 ^[25]

E_x : 激发波长 Excitation wavelength; E_m : 发射波长 Emission wavelength; PARAFAC: 平行因子分析法 Parallel factor analysis

通过对各水土保持林土壤 DOM 各荧光组分占比进行分析发现, 总体来说各样地土壤 DOM 中 C1 组分占比最高, 所占比例处于 23.8%—44.7% 之间, C4 组分占比最低, 为 6.8%—18.9%。随恢复年限的延长, 3 种样

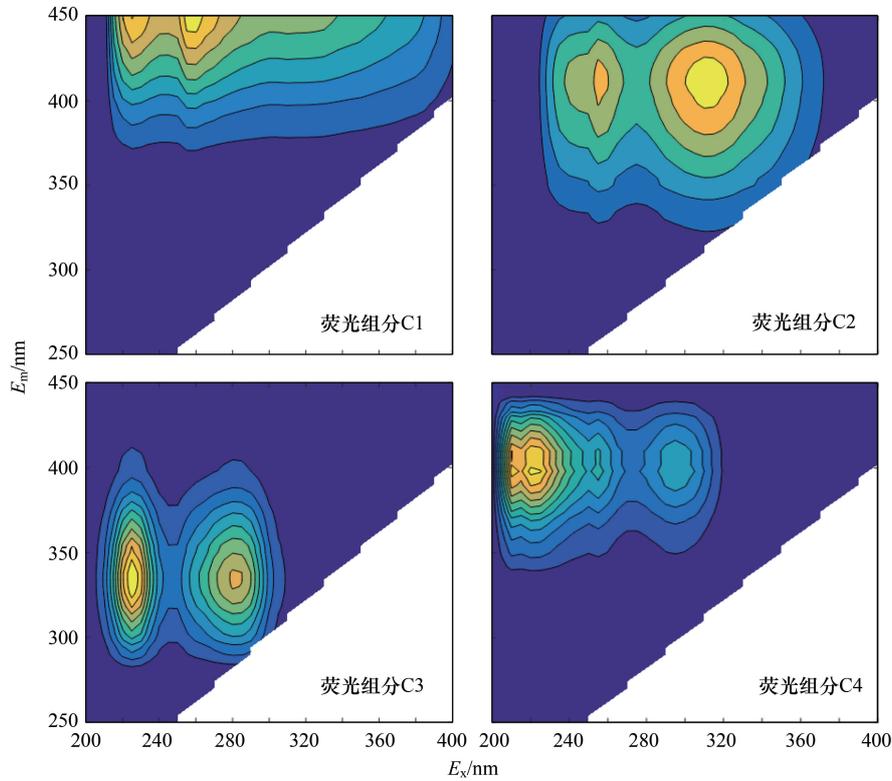


图 6 基于 PARAFAC 分析得到土壤可溶有机质组分的荧光光谱图

Fig.6 Three-dimensional fluorescence spectroscopy of four components of DOM analyzed by PARAFAC

地类色氨酸组分 C3 占比显著增加,和人类活动相关的腐殖物质组分 C4 占比逐渐降低,C1 大分子腐殖物质组分占比在柠条和刺槐林中呈增加趋势,在撂荒地中则减少,C2 类富里酸组分占比在撂荒地中显著降低,刺槐林地中 12a>18a≈45a,柠条林地中则无明显变化(图 7)。

2.4 荧光特征参数

荧光指数(FI)、腐殖化指数(HIX)、新鲜度指数($\beta:\alpha$)及自生源指数(BIX)是可以表征 DOM 的变化情况的重要参数。各水土保持林地 FI 处于 1.58 到 1.74 之间,仅刺槐 12a 显著高于其他样地,其余样地间没有差异。HIX 可衡量 DOM 腐殖化程度,高 HIX 表明有机质腐殖化程度较高。相同恢复年限下,柠条和刺槐林地 HIX 高于撂荒地,刺槐林地 12a<18a≈45a,柠条林地 18a<28a≈45a,不同恢复年限撂荒地则差异不显著。 $\beta:\alpha$ 则可以反映新产生 DOM 所占的比例,BIX 表征 DOM 自生源特征。除刺槐 12a,各水土保持林地 $\beta:\alpha$ 和 BIX 没有差异,研究区土壤 DOM $\beta:\alpha$ 的范围位于0.56—0.64,均值为 0.58,BIX 的范围是 0.56—0.60,均值为 0.59(表 3)。

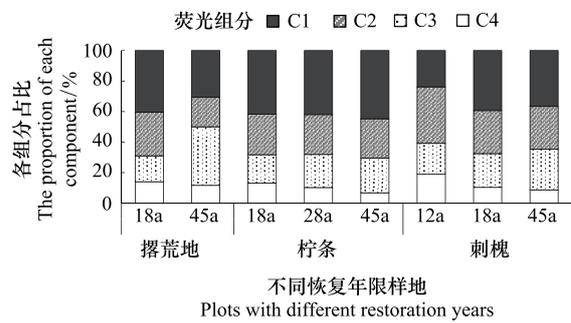


图 7 不同恢复年限与植被类型土壤荧光组分分布比例

Fig.7 Relative proportion of four fluorescent components of DOM under different restoration years and vegetation types

3 讨论

3.1 水土保持林恢复过程土壤可溶性碳氮组分变化

土壤可溶性碳氮含量及其组分受植物凋落物输入和分解、土壤水分和养分变化、微生物群落结构与活性、

季节与气候变化以及人为扰动等因素的影响,且不同林分类型的影响因素及受影响程度也有差异^[31-32]。水土保持林植被恢复具有地上凋落物与地下根系碳源氮源输入、改善土壤理化性质等多种生态效应,进而可以影响土壤可溶性碳氮组分变化。本研究中,柠条、刺槐林地和撂荒地表层土壤 SOC、TN、DOC、DON 和 DIN 含量均随恢复年限延长呈增加趋势,相同恢复年限下柠条和刺槐林地土壤养分含量高于撂荒地,与前人研究一致^[17]。林地中地上部植物残体、凋落物、地下部根系分泌物及微生物残体和代谢产物的投入不仅可以提升有机碳和全氮的含量,也相应的增加了可溶性碳氮的溶出量^[33],随着恢复年限的增加,植物残体及凋落物等的积累也不断增多,且刺槐和柠条林地比撂荒地有更多的凋落物归还,故而养分含量提升也更高。

表 3 不同恢复年限与植被类型下土壤可溶性有机质四种荧光指标

Table 3 Four fluorescence indexes of dissolved organic matter under different restoration years and vegetation types

参数 Indexes	AL18a	AL45a	RP12a	RP18a	RP45a	CK18a	CK28a	CK45a
荧光指数 Fluorescence index	1.63± 0.04b	1.61± 0.02b	1.74± 0.05a	1.64± 0.04b	1.58± 0.01b	1.65± 0.04b	1.59± 0.02b	1.61± 0.05b
腐殖化指数 Humification index	4.53± 0.40c	4.56± 0.30c	4.69± 0.24c	5.75± 0.34b	6.45± 0.54ab	5.86± 0.32b	7.1± 0.30a	7.04± 0.73a
新鲜度指数 Freshness index	0.59± 0.01b	0.57± 0.01b	0.64± 0.02a	0.57± 0.01b	0.57± 0.01b	0.56± 0.04b	0.57± 0.01b	0.58± 0.02b
自生源指数 Biological index	0.60± 0.01b	0.58± 0.01b	0.65± 0.02a	0.58± 0.02b	0.58± 0.01b	0.57± 0.04b	0.57± 0.01b	0.56± 0.02b

不同字母表示不同样地间差异显著($P<0.05$);±为样本的标准误差

土壤碳氮各组分含量变化的同时,可溶性碳氮占比及碳氮比也随之变化。林地土壤 DOC/SOC 是指示土壤碳库质量的重要指标,该比例越高说明土壤有机碳库的分解活性和有效性更高^[34]。本研究中 DOC/SOC 随恢复年限先增大后稳定,可能是由于植被恢复前期 DOC 含量的增幅高于 SOC,DOC 占比增大,恢复一定年限后,生态系统内微生物数量和活性增大,对 DOC 的利用也增多,使得 DOC 和 SOC 的含量变幅相近,使得 DOC/SOC 相对稳定,土壤碳库活性维持在一定水平^[35]。DON/TN 与 DOC/SOC 有类似的变化规律。碳和氮作为土壤微生物能量来源和细胞结构的要素,碳氮比的高低可直接影响微生物的活动和繁殖,进一步影响有机质矿化分解和腐殖合成。本研究中柠条和刺槐林地土壤 SOC:TN 随恢复年限的增加呈增大的趋势,主要是由于凋落物输入大量有机碳,SOC 含量的增幅大于 TN,趋向于有机碳的积累,撂荒地 SOC:TN 没有增大可能是由于草地有机碳的投入量相对灌木和乔木林地较低,土壤 SOC 含量及 TN 含量变幅相近。邓健等^[36]在黄土丘陵区刺槐林地不同恢复年限土壤研究中 C:N 为 9.55—16.94,恢复 20a 到 45a 增大了 47.8%,与本文研究结果基本一致。DOC:DON 的变化有利于深入了解土壤中 DOC 及 DON 的来源及其转化,微生物活性越高,分解的土壤有机质及植物残体越多,使得 DOC:DON 增大^[37]。本研究中柠条和刺槐林地 DOC:DON 恢复一定年限后达到稳定,说明植被恢复前期土壤微生物活性呈增加趋势,随时间的延长可能由于微生物消耗和植物利用 DOC 或 DON 的同时,土壤中有有机物质分解增加 DOC、DON 含量使 DOC 和 DON 含量近似同等程度的改变,达到动态平衡^[35]。

3.2 水土保持林恢复土壤 DOM 三维荧光光谱特征变化

不同植被类型由于其枯枝落叶层的数量和质量、微生物群落的结构和活性、微生物残体和代谢产物及根系分泌物等不同,进而影响土壤 DOM 的数量和质量^[38]。光谱分析显示,水土保持林地土壤 DOM 中大分子腐殖物质和木质素等芳香物质组分所占比例较大,主要是因为研究对象为林地表层土壤,凋落物较多,在土壤微生物的作用下分解转化形成该组物质^[14],随着凋落物的积累,柠条和刺槐林地该组分占比随恢复年限的延长而增大。由于人类活动干涉较少,没有新的物质输入和该组物质的分解消耗,C4 腐殖物质组分随着恢复年限的延长不断减少。随年限的增长,植被恢复可以显著增加土壤微生物量^[39],因而和微生物活动相关的类蛋白组分占比增大。荧光参数(FI、HIX、 β : α 、BIX)对 DOM 的来源具有一定的指示作用,FI 可衡量 DOM 来源与降解程度^[40],FI 小于 1.4 时,DOM 被认为主要为陆生植物及土壤有机质等外源物质输入,大于 1.9 时主要为微生物活动等内源过程产生^[41]。研究区 FI 均值为 1.63,与李帅东等^[42]在环滇池土壤溶解性有机质的研究值 1.56 相近,表明土壤 DOM 的来源既有自生微生物活动产生,又有植物残体及根系分泌物等陆源输入,且总体上更接近 1.4,外源特征更典型。HIX 可以衡量 DOM 腐殖化的程度,HIX 越大,说明 DOM 中分子构成越复

杂,腐殖类物质如缩合芳香环难分解组分和大分子化合物的含量越高^[43]。柠条和刺槐林地土壤 DOM 腐殖化程度随恢复年限的延长先增大后趋于稳定,且显著高于撂荒地。 $\beta:\alpha$ 可以反映新产生 DOM 占总 DOM 的比例,本研究中不同种类和不同恢复年限植被并未改变新生 DOM 的占比。BIX 主要反映自生源的相对贡献,也可评价其生物的可利用性高低,BIX 指数越高,说明 DOM 降解程度增加、内源碳产物越容易生成。本研究中 BIX 较低,与王齐磊等^[44]在林地的研究结果相近,说明林地土壤 DOM 以植物残体等外源物质的投入为主,与 FI 指示结果一致。

4 结论

黄土丘陵区柠条、刺槐水保林及撂荒地长期恢复土壤均表现出显著累积总有机碳氮及其可溶性组分的效应,并以刺槐林固持可溶性有机质能力相对较高。这与植被恢复大量植物源碳氮返还土壤转化累积直接相关,可溶性有机质荧光指数、自生源指数特征也说明 DOM 主要来源于植物残体及根系分泌物等陆源输入以及土壤微生物活动。同时三维荧光光谱特征分析说明植被恢复使得土壤 DOM 的稳定性增强,组成趋向复杂,也可能是促进土壤固定碳氮的有效机制之一。这首先表现在林地土壤 DOC:DON 及二者占总有机碳、全氮比例趋向稳定,即使得可溶性有机质碳氮配比组成趋向稳定;其次水保林恢复过程中土壤 DOM 有机组成以大分子腐殖物质占比最高,且比例相对撂荒地显著升高,而占比较低的低分子量类富里酸和人类历史活动输入的腐殖物质明显降低;最后,相对于撂荒地水保林可以显著提高土壤 DOM 腐殖化程度。这些都说明随植被恢复土壤 DOM 稳定性逐渐提高也是人工林土壤固定碳氮,提升土壤质量的重要途径之一。

参考文献 (References):

- [1] 陈婉.《三北防护林体系建设 40 年综合评价报告》发布 三大效益有机结合 生态效应显著. 环境经济, 2019, 1(241): 34-37.
- [2] 朱教君, 郑晓. 关于三北防护林体系建设的思考与展望——基于 40 年建设综合评估结果. 生态学杂志, 2019, 38(5): 1600-1610.
- [3] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 陈磊, 上官周平. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [4] 王志齐, 杜兰兰, 赵慢, 郭胜利. 黄土区不同退耕方式下土壤碳氮的差异及其影响因素. 应用生态学报, 2016, 27(3): 716-722.
- [5] 李慧, 许亚东, 王涛, 杨改河. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C、N、P 化学计量特征演变. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [6] 李智超, 张勇强, 宋立国, 厚凌宇, 孙启武. 江西大岗山不同林龄杉木人工林土壤碳氮储量. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 116-122.
- [7] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 高晓丹, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 裴久渤, 李明, 王阳, 张维俊, 葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. 土壤学报, 2019, 56(3): 528-540.
- [8] Han X H, Zhao F Z, Tong X G, Deng J, Yang G H, Chen L M, Kang D. Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation. *Catena*, 2017, 150: 317-327.
- [9] Kaiser K, Kalbitz K. Cycling downwards—dissolved organic matter in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 29-32.
- [10] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 任成杰, 韩新辉, 佟小刚, 冯永忠. 黄土丘陵区植被恢复对土壤可溶性氮组分的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3533-3542.
- [11] Yu H B, Song Y H, Du E D, Yang N, Peng J F, Liu R X. Comparison of PARAFAC components of fluorescent dissolved and particular organic matter from two urbanized rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(11): 10644-10655.
- [12] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 李娅芸, 安韶山. 黄土高原不同乔木林土壤微生物量碳氮和溶解性碳氮的特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3598-3605.
- [13] 王玉涛, 石辉, 刘雄飞, 管利, 武云飞, 郑纪勇. 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. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(1): 171-179.
- [14] 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛莲, 李秧秧. 管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响. 环境科学, 2020, 41(2): 905-913.
- [15] 刘翥, 杨玉盛, 司友涛, 康根丽, 郑怀舟. 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(11): 1174-1183.
- [16] 周江敏, 代静玉, 潘根兴. 土壤中水溶性有机质的结构特征及环境意义. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 731-735.
- [17] 王涛, 马宇丹, 许亚东, 郭书娟, 王维钰, 韩新辉, 杨改河, 王晓娇. 退耕刺槐林土壤养分与酶活性关系. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2083-2091.
- [18] Fellman J B, Hood E, Spencer R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater

- ecosystems; a review. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(6): 2452-2462.
- [19] Huguet A, Vacher L, Relexans S, Saubusse S, Froidefond J M, Parlanti E. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706-719.
- [20] Parlanti E, Wörz K, Geoffroy L, Lamotte M. Dissolved organic matter fluorescence spectroscopy as a tool to estimate biological activity in a coastal zone submitted to anthropogenic inputs. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(12): 1765-1781.
- [21] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(21): 8142-8149.
- [22] Liu H F, Wu Y, Ai Z M, Zhang J Y, Zhang C, Xue S, Liu G B. Effects of the interaction between temperature and revegetation on the microbial degradation of soil dissolved organic matter (DOM): A DOM incubation experiment. *Geoderma*, 2019, 337: 812-824.
- [23] 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. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(4): 2006-2017.
- [24] Stedmon C A, Markager S. Resolving the Variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis. *Limnology and Oceanography*, 2005, 50(2): 686-697.
- [25] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC). *环境科学*, 2019, 40(4): 1751-1759.
- [26] Ohno T, Fernandez I J, Hiradate S, Sherman J F. Effects of soil acidification and forest type on water soluble soil organic matter properties. *Geoderma*. 2007, 140(1): 176-187.
- [27] Li W, Jia X X, Li M, Wu H M. Insight into the vertical characteristics of dissolved organic matter in 5-m soil profiles under different land-use types on the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 613-621.
- [28] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry*, 2003, 82(3): 239-254.
- [29] 蔡文良, 许晓毅, 杜娴, 朱虹, 罗固源. 嘉陵江重庆段 DOM 三维荧光光谱的平行因子分析. *环境科学研究*, 2012, 25(3): 276-281.
- [30] 洪志强, 熊瑛, 李艳, 崔骏, 刘钰钦, 何江伟, 王京刚, 袁冬海. 白洋淀沉水植物腐解释放溶解性有机物光谱特性. *生态学报*, 2016, 36(19): 6308-6317.
- [31] 罗献宝, 张颖清, 徐浩, 郑俊强. 温带阔叶红松林表层土壤活性碳、氮库的季节动态. *生态与农村环境学报*, 2012, 28(1): 42-46.
- [32] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 任成杰, 韩新辉, 佟小刚, 冯永忠. 黄土丘陵区退耕地土壤可溶性氮组分季节变化与水热关系. *生态学报*, 2018, 38(2): 689-697.
- [33] 薛萇, 刘国彬, 戴全厚, 张超, 余娜. 黄土丘陵区退耕撂荒地土壤微生物量演变过程. *中国农业科学*, 2009, 42(3): 943-950.
- [34] 江姗, 赵光影, 臧淑英, 邵宗仁. 排水对小兴安岭森林沼泽湿地溶解性有机碳和有效氮磷的影响. *生态学报*, 2017, 37(5): 1401-1408.
- [35] 陈安强, 付斌, 鲁耀, 段宗颜, 胡万里. 有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 160-167.
- [36] 邓健, 张丹, 张伟, 任成杰, 郝雯晖, 刘冲, 韩新辉, 杨改河. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物碳氮磷化学计量学及其稳态性特征. *生态学报*, 2019, 39(15): 5527-5535.
- [37] 石思博, 王旭东, 叶正钱, 陈绩, 龚臣, 李婷, 任泽涛. 菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响. *生态学报*, 2018, 38(23): 8612-8620.
- [38] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 万晓华, 桑昌鹏, 周富伟, 黄志群. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1031-1038.
- [39] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响. *应用生态学报*, 2009, 20(1): 45-50.
- [40] Mladenov N, McKnight D M, Macko S A, Norris M, Cory R M, Ramberg L. Chemical characterization of DOM in channels of a seasonal wetland. *Aquatic Sciences*, 2007, 69(4): 456-471.
- [41] Inamdar S, Finger N, Singh S, Mitchell M, Levia D, Bais H, Scott D, McHale P. Dissolved organic matter (DOM) concentration and quality in a forested mid-Atlantic watershed, USA. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1/3): 55-76.
- [42] 李帅东, 姜泉良, 黎焯, 吴亚林, 江俊武, 黄涛, 杨浩, 黄昌春. 环滇池土壤溶解性有机质(DOM)的光谱特征及来源分析. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(5): 1448-1454.
- [43] 纪宇甯, 张秋芳, 周嘉聪, 游章浩, 徐鹏程, 林伟盛, 陈岳民, 杨玉盛. 亚热带地区竞争型和忍耐型树种叶片可溶性有机质数量及光谱学特征. *生态学报*, 2018, 38(11): 3998-4007.
- [44] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭. 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. *环境科学*, 2015, 36(3): 879-887.