

DOI: 10.5846/stxb201708311575

刘霞娇,段亚峰,叶莹莹,肖霜霜,张伟,王克林.耕作扰动对喀斯特土壤可溶性有机质及其组分迁移淋失的影响.生态学报,2018,38(19): - .
Liu X J, Duan Y F, Xiao S S, Ye Y Y, Zhang W, Wang K L. The impacts of tillage on soil soluble organic matter and its movement and leaching in karst area. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19): - .

耕作扰动对喀斯特土壤可溶性有机质及其组分迁移淋失的影响

刘霞娇^{1,2,3}, 段亚峰^{4,5}, 叶莹莹^{1,2,3}, 肖霜霜^{1,2,3}, 张 伟^{1,2}, 王克林^{1,2,*}

1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125

2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 环江 547100

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 湖南农业大学, 长沙 410125

5 长沙市环境监测中心站, 长沙 410001

摘要:土壤可溶性有机质(DOM)及其组分淋失特征研究对深入理解干扰作用下土壤碳氮养分损失机制具有重要意义,本研究基于翻耕模拟试验,分析喀斯特石灰土可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)及DOM官能团组分的淋失动态特征及其对不同耕作频率的响应,并探讨其影响因子。结果表明:(1)土壤DOC与DON的淋失量均随翻耕频率的增加而增加,但4个官能团特征参数对翻耕频率响应均不显著;DOC/DON淋失比随翻耕频率的增大而减少,DON占淋溶水可溶性总氮(TDN)比例随翻耕频率增加而增加。(2)DOC和DON月淋失量同时受翻耕处理与季节变化及其交互作用的影响,4个官能团特征参数仅受季节变化的影响;翻耕处理实施后,DOC月淋失量表现为初期大、后期小,各处理间差异性逐渐降低;但DON月淋失量初期小、后期大,各处理间差异性逐渐增大。(3)DOC淋失量与4个官能团特征参数呈显著负相关($P<0.05$),与 Ca^{2+} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的淋失量呈显著正相关;DON淋失量与4个官能团参数无显著相关关系,与 Mg^{2+} 淋失量呈显著正相关关系。以上结果表明耕作扰动会加剧土壤DOM淋失,但淋失组分中稳定性组分没有变化,意味着耕作干扰将导致土壤有机质的持续损失,且由于其淋失组分碳氮比(DOC/DON)随扰动频率增加而降低,DON/TDN比随扰动频率增加而增加,持续的耕作干扰将大大增加水体氮素污染风险。

关键词:喀斯特;翻耕频率;可溶性碳;可溶性氮;官能团

The impacts of tillage on soil soluble organic matter and its movement and leaching in karst area

LIU Xiajiao^{1,2,3}, DUAN Yafeng^{4,5}, XIAO Shuangshuang^{1,2,3}, YE Yingying^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Kelin^{1,2,*}

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Science, Huanjiang 547100, China

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

4 College of Resources & Environment, Agricultural University of Hunan, Changsha 410125, China

5 Changsha environmental monitoring center station, Changsha 410001, China

Abstract: The study of soil soluble organic matter (DOM) and its component leaching characteristics is of great significance in understanding the mechanism of soil carbon and nitrogen nutrient loss under disturbance. Based on the tillage simulation trial, we analyzed the leaching dynamic characteristics of dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0502400);国家自然科学基金项目(41471445; 31670529)

收稿日期:2017-08-31; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kelin@isa.ac.cn

nitrogen (DON) and the functional components changes of the DOM in karst calcareous soil and their responses to different tillage frequencies. The main impact of these dynamics was also explored in this study. Our results showed that the leaching amount of DOC and DON increased as the tillage frequency increased, but it did not happen in the four functional group parameters. As the tillage frequency increased, the ratio of DON to total dissolved nitrogen (TDN) increased, but the DOC/DON ratio decreased. The monthly leaching amount of DOC and DON was impacted by tillage treatment, seasonal variation and their interactions. However, the four functional group parameters were only impacted by the seasonal variation. During the experiments, the monthly leaching amount of DOC decreased gradually and the differences among treatments were also reduced, but the leaching amount of DON increased gradually and the differences among treatments increased. The leaching amount of DOC showed a negative relationship with the four functional group parameters, but a positive relationship with the leaching amount of Ca^{2+} and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($P < 0.05$). The leaching amount of DON had a positive relationship with the leaching amount of Mg^{2+} ($P < 0.05$), but no significant relationship with the four functional group parameters. We concluded that the tillage increased the leaching amount of DOM, but did not influence the leaching of its stable components, indicating a continuing losses of soil organic matter and a high risk of nitrogen pollution in water would happen if the tillage frequency increase.

Key Words: karst region; tillage frequency; soil dissolved organic carbon and nitrogen; unit absorbance value of leaching water

溶解性有机质(DOM)是指通过 $0.45\mu\text{m}$ 微孔滤膜且能溶于水、酸或碱溶液的有机质^[1],它主要由可溶性有机碳(DOC)和可溶性有机氮(DON)构成,其中 DOC 是微生物生长的重要能源^[2],其含量高低和周转速率直接影响微生物活性,从而影响土壤有机碳的矿化过程。而 DON 作为土壤有机氮矿化和无机氮固定过程中重要的中间氮库,调控着土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的供应和氮素的生物转化过程,是土壤有效养分的来源之一^[3-4]。前期研究土壤淋失过程中通常以无机态氮为主,但是近年来研究发现 DON 淋失现象可能比无机态氮更严重^[5]。DOM 淋失不仅是土壤养分流失的重要途径,同时也会导致河流和饮用水源富营养化和酸化,对人类健康带来很大的安全风险^[6]。

DOM 淋失与人类干扰密切相关,且受到多种环境因素的影响。Meek 等研究表明,耕作会增加土壤养分的淋失^[7]。不合理的耕作会导致土壤团聚体破碎,加快有机质活性组分氧化和矿化,致使土壤养分大量丢失^[8]。而适当的耕作措施有利于土壤水分与养分的保持,同时减少地下水污染风险^[9]。DOM 淋失具有显著的季节性特征,且 DOC 与 DON 的淋失特征不尽相同。Kaiser 等发现,土壤 DOC 淋失量在夏季最大,在短暂的干旱后的降雨期间达到最大值^[1],而 DON 在冬季淋溶量明显小于夏季^[10],降雨或灌溉及其频率是导致农田 DON 渗漏的最大驱动力^[5]。DOM 的淋失还与其自身组分与结构有关,有研究表明 DOC 吸附过程中,难分解组分易于受到吸附保护,而亲水性化合物、简单小分子化合物不容易被吸附,且吸附后的生物稳定性差,还易出现解吸或被疏水性化合物替代吸附的现象^[11]。Kaiser 等发现,土壤 DOC 夏季淋失多为亲水化合物和小分子物质,而秋季多疏水性化合物^[12]。Nguyen 等发现温度能影响土壤 DOM 淋失的质与量,其 SUVA 值随着温度的升高而增大^[13]。以上研究均从单一影响因素出发,缺乏人为因素与自然因素相结合的研究,且对 DOM 分子结构对人为干扰的响应尚不明确。

西南喀斯特地貌特殊,生态环境脆弱,具有土壤浅薄、植被不连续等特征^[14]。前期研究发现,喀斯特自然生态系统土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)等养分含量显著高于同地区红壤,但是一旦转变为耕地,土壤养分含量显著降低,开垦两年后,土壤有机质丢失率高达 42%,表现出急剧损失特征^[15]。然而,以往研究表明喀斯特坡地地表侵蚀过程并不发育,且地表径流系数普遍小于 5%,因而喀斯特地区养分淋失过程对土壤养分损失和土壤退化的贡献比非喀斯特地区更为重要^[16]。目前,喀斯特地区土壤 DOM 淋失研究主要关注森林生态系统,如曹建华等发现,不同植物凋落物会产生不同质和量的 DOC 淋失,并导致 Ca^{2+} 的淋失差异,且土壤 DOC

浓度呈现与水热相关的季节变化动态^[17-18]。Georg 等通过对喀斯特区两个森林进行 13 年的监测发现, DON 淋失呈现出明显的季节特征, 融雪和全年降雨量是其主要驱动因素^[19]。但是, 森林与农田的养分淋失存在很大的差异, 而目前对喀斯特地区农田生态系统 DOM 的研究主要集中在不同剖面 DOM 差异上, 缺乏对 DOM 淋失的相关研究。如汪智军等通过对岩溶区不同土壤剖面 DOM 分布研究发现, 耕地较其他用地类型更易发生养分淋失^[20]。田丽艳等通过对不同岩性的 2 个坡地的土壤剖面研究发现, SOC 含量随剖面深度的增加而降低, 且 SOC 含量坡脚>坡顶大于坡腰^[21]。

因此, 针对喀斯特地区更易产生养分锐减、土壤退化和水体污染等生态环境问题, 对其土壤的耕作方式及其 DOM 迁移淋失的研究显得尤为迫切。本文基于翻耕模拟试验, 通过对典型喀斯特石灰土 DOM 及其官能团组分淋失动态进行研究, 分析淋溶水 DOM 及其官能团组分对翻耕频率的响应, 探讨 DOM 及其官能团组分淋失的主要影响因素, 为深入揭示人为干扰作用下喀斯特土壤养分的快速丢失机制奠定基础。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西壮族自治区毛南族自治县, 该区域属于云贵高原南部边缘斜坡地带的典型喀斯特峰丛洼地, 地理坐标为 107°51′—108°43′E、24°44′—25°33′N, 属亚热带季风气候区, 气候温和, 雨水充沛、雨热同季、无霜期长。年平均气温 16.5—20.5℃, 多年平均降雨量为 1380mm, 雨季平均持续 130—140d, 本次研究观测期降水主要集中在 4—9 月, 尤以 6 月中旬至 7 月中旬最多, 达 350—460mm, 常出现涝灾, 10 月至次年 3 月份为旱季, 常受到干旱威胁。平均蒸发量为 1570mm, 相对湿度平均为 70%。土壤为白云岩发育而成的石灰土, 土壤质地为粘壤土, 土壤 pH 值为中性至微碱性。

1.2 试验设计与样品采集

2013 年 12 月在中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站选取典型坡脚部位建立样地。该样地原始植被类型为灌木丛, 优势种为三对节 (*Clerodendrum serratum*)、八角枫 (*Alangium chinense*) 及千里光 (*Senecio scandens*) 等。试验设置 6 个处理, 分别为: 原始对照 (natural vegetation, NV)、免耕对照 (T0)、每 6 个月翻耕 (T1)、每 4 个月翻耕 (T2)、每 2 个月翻耕 (T3)、和每月翻耕 (T4) 等处理。试验样地采用随机区组设计, 包括 4 个区组, 每个区组包含 6 个规格为 2m×2m 的小区, 共 24 个小区 (图 1a)。除 NV 处理外, 其他 5 个处理均刈除地上植被, 按照试验设计进行翻耕处理。每个小区四周由 PVC 板隔断, 相邻两块 PVC 板由焊条焊接。PVC 板地下埋深为 30cm, 以阻隔相邻小区土壤侧向的养分流动; 地上出露 20cm, 以阻断小区内外和小区之间地表径流交换; 为了更好的模拟耕作地的覆被环境, 并避免种植玉米所导致的养分吸收及凋落物输入等复杂的养分循环过程对本研究结果的影响, 本试验样地选用塑料仿真模拟植物, 每株仿真植物高 1.5m, 冠幅约 1m², 每小区栽植 4 株仿真植物 (图 1b)。

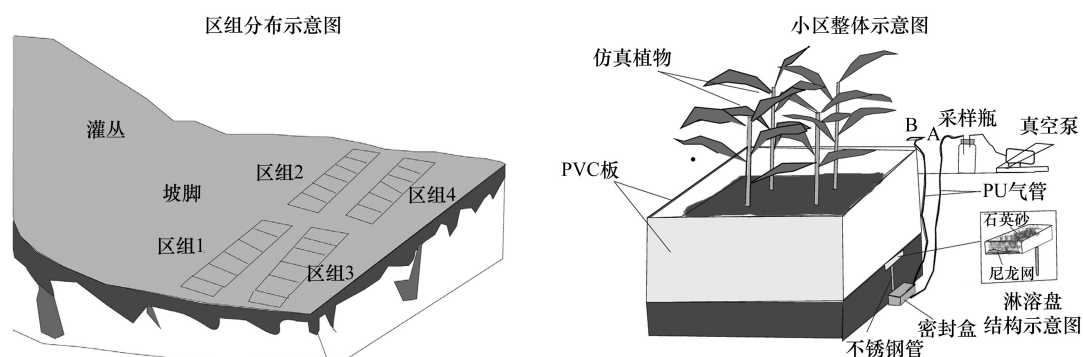


图 1 小区分布示意图及淋溶水收集装置安放示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling plot distribution and leaching device

每个小区淋溶水样品通过淋溶盘收集^[22](图 1b),并储存在深埋地下 70cm 处的密封盒(1.6L)中。淋溶盘为不锈钢质地,长 50cm、宽 30cm、高 5cm。在侧边靠近盘底的位置设出水口,由不锈钢管头引流。淋溶盘中装填粗石英砂颗粒。为防止石英砂随淋溶水流出,预先在盘底铺尼龙网。淋溶盘埋设深度为 30cm。在小区侧边于地下 30cm 处向小区内部埋设淋溶盘。淋溶盘埋设略呈倾斜状,内高外低,以利于淋溶水顺利流出。淋溶盘装填完毕后,用开挖出的土壤填实埋设槽内的缝隙。淋溶水由淋溶盘的出水口流出、经由导流管收集至密封盒中。该淋溶水收集装置布设好后,回填施工沟。通过两根由密封盒延伸至地表之上的硬质 PU 气管抽提密封盒中的淋溶水。其中一根 PU 气管(A)插入密封盒底部,用以抽提,另一根 PU 气管(B)的管口高度与盒盖平齐,用以通气。采样时,将气管 A 连接真空泵,通过负压将密封收集盒中的淋溶水全部抽出,记录体积并取部分带回实验室进行过滤分装,样品置于-18℃冰箱进行冷冻保存,以备分析。翻耕处理于 2014 年 6 月底开始实施,淋溶水采集从 2015 年 8 月持续至 2016 年 7 月,每月 1 次(于每月翻耕当日计算)。气象数据采用环江站气象观测站数据。

1.3 样品分析与测定

将样品解冻后,用浓磷酸将其 pH 值调节至 2—3,采用流动注射仪(AA3)测定原溶液的全氮(TDN)、NO₃-N、NH₄⁺-N 含量;DON 含量用 TDN 与无机氮的差减法进行计算。将原溶液稀释五倍后采用原子吸收分光光度计(Avanta M)分析其中的 Ca²⁺、Mg²⁺含量;DOC 浓度采用总有机碳分析仪(TOC-Vw)测定。DOM 官能团组分采用紫外/可见分光光度计(UV2300)分析,具体为将样品 DOC 浓度用超纯水稀释至 1mg/L,pH 值用浓磷酸调节至 2,用紫外/可见分光光度计测定其在 254、260、272 以及 280nm 处的吸光光度值,之后表述简称 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₇₂与 SUVA₂₈₀。研究表明 DOM 的芳香性、分子量大小以及疏水性等官能团结构特征能通过光谱特征进行表征,各指标对应的 DOM 官能团特征如表 1 所示^[23]。

表 1 选用的光谱波长及其对应的土壤有机物特性和生物学意义

Table 1 Wavelengths used in this study and their feature and significance for soil organic matter characterization

序号 No.	波长/nm Wavelength	特性 Features	意义 Significance
1	254	芳香族化合物结构	与可溶性有机质中芳香性部分所占比例成正比
2	260	疏水碳容量	与疏水性有机质所占比例成正比
3	272	芳香族化合物结构	与芳香性有机质所占比例和 C/H 比成正比
4	280	芳香性、疏水碳容量、腐殖化	与芳香性有机质所占比例和平均分子量成正比;与矿质化部分成反比

1.4 数据分析

使用 Excel 2010 软件进行数据初处理;进行方差分析之前,利用单样本 K-S 检验,对淋溶水中各养分及其紫外光谱数据进行正态分布检验,DON 与紫外光谱数据符合正态分布,DOC、TDN、NO₃-N、NH₄⁺-N、Ca²⁺及 Mg²⁺数据均不符合正态分布,对其采用平方根反正切函数对数据进行转化,转换后数据符合正态分布,可以进行方差分析;用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、多重比较(Duncan)和 Pearson 相关分析,所有统计分析显著水平均设为 0.05;相关图表以及指数、线性函数拟合用 Sigma Plot 12.5 软件完成。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石灰土 DOC、DON 淋失量对耕作扰动频率的响应

土壤 DOC 和 DON 淋失总量都随着翻耕频率的增加而显著增加(表 2),DOC 的淋失总量大于 DON,但各处理间 DON 淋失总量的差异大于 DOC(表 2)。TDN 与 NO₃-N 的淋失量在各处理间的变化与 DON 相似(表 2),NH₄⁺-N 淋失量对翻耕处理的响应无明显变化规律。DON 占淋溶总氮的比值(DON/TDN)随着翻耕频率的增加而增加,5 个不同的翻耕频率处理分别为:16.1%(T0)、20.1%(T1)、19.1%(T2)、28.1%(T3)与 31.3%(T4),DOC/DON 随着翻耕频率的增加而减小(表 2)。

表 2 不同翻耕频率处理下可溶性碳、氮及阳离子年总淋失量差异比较

Table 2 Difference of corban, nitrogen leaching amount parameters for variable function groups from ploughing frequency treatment

指标 Parameters	翻耕处理 Tillage frequency treatment					
	NV	T0	T1	T2	T3	T4
淋溶水/(L/m ²)	67.22(7.87)bc	63.48(5.12)c	75.28(4.86)ab	72.43(3.33)abc	76.37(6.78)ab	79.78(7.80)a
DOC/(g/m ²)	0.376(0.026)bc	0.332(0.005)d	0.376(0.017)bc	0.348(0.012)cd	0.381(0.022)b	0.431(0.016)a
DON/(g/m ²)	0.055(0.003)c	0.077(0.010)c	0.127(0.013)b	0.132(0.029)b	0.237(0.035)a	0.273(0.045)a
DOC/DON	6.34	4.31	2.96	2.64	1.61	1.58
TDN/(g/m ²)	0.076(0.007)d	0.416(0.035)c	0.633(0.025)b	0.690(0.036)b	0.845(0.060)a	0.872(0.066)a
DON/TDN	72%	16.1%	20.1%	19.1%	28.1%	31.3%
NO ₃ ⁻ -N/(g/m ²)	0.034(0.012)d	0.367(0.037)c	0.539(0.053)b	0.549(0.016)b	0.583(0.084)ab	0.655(0.027)a
NH ₄ ⁺ -N/(g/m ²)	0.018(0.004)b	0.019(0.004)b	0.035(0.011)a	0.024(0.008)ab	0.029(0.005)ab	0.028(0.006)ab
Ca ²⁺ /(g/m ²)	1.01(0.04)ab	0.95(0.02)b	1.07(0.06)a	1.05(0.06)a	1.03(0.06)ab	1.09(0.06)a
Mg ²⁺ /(g/m ²)	0.417(0.013)c	0.485(0.037)bc	0.578(0.091)ab	0.549(0.058)ab	0.548(0.038)ab	0.651(0.057)a

NV:原始对照,natural vegetation;T0:免耕对照,no-till contrast;T1:每6个月翻耕,semiannual tillage;T2:每4个月翻耕,tillage every four months;T3:每2个月翻耕,bimonthly tillage;T4:每月翻耕,monthly tillage;DOC:可溶性有机碳,dissolved organic carbon;DON:可溶性有机氮,dissolved organic nitrogen;DOC/DON:可溶性有机碳氮比;TDN:可溶性总氮,total dissolved nitrogen;DON/TDN:可溶性有机氮占总氮百分比;括弧内值为标准差;同一行内相同字母表示不存在显著性差异;不同字母表示差异性显著($P<0.05$, $n=4$)

2.2 喀斯特石灰土 DOC、DON 淋失量及其官能团组分的月变化动态

随翻耕处理实施,DOC 与 DON 的淋失量呈现相反的变化趋势(图 2a,b),且在旱季呈显著负相关关系(图 3a)。观测期内,DOC 淋失量呈减少趋势,其雨季淋失量<旱季淋失量。DON 淋失量呈增加趋势其雨季淋失量>旱季淋失量。随翻耕处理时间的增加,DON 占淋溶总氮的比例逐渐增加,NO₃⁻-N 淋失比例逐渐减少(图 4);4 个官能团指标在监测前期小,后期大(图 2c),但在整个监测期内,各处理间差异均不显著;DOC、DON 的淋失量均受温度、降雨量的影响,但其影响存在季节差异。DOC 淋失量与降雨量和温度在雨季均呈显著负相关关系,而在旱季呈显著正相关关系(图 5a);DON 淋失量与温度在雨季和旱季均呈显著正相关关系,与降雨量仅在旱季呈显著负相关关系(图 5b)。

2.3 DOC、DON 淋失量与官能团特征指标的相关关系

DOC 淋失量与 4 个官能团特征参数都具有显著的负相关关系($P<0.01$)(图 6a),说明 DOC 淋失量较低时,其芳香性、疏水性以及大分子化合物淋失量较大,DOC 淋失量较高时,DOM 组分中小分子有机物较多。DON 淋失量与 4 个官能团特征参数无显著相关关系,说明 DON 的淋失量与芳香性、疏水性官能团以及大分子化合物含量无关(图 6b),DON 的淋失与其他性质相关。

2.4 DOC、DON 淋失量与 Ca²⁺、Mg²⁺、TDN 及无机氮组分淋失量的相关关系

Ca²⁺的淋失量与 DOC 的淋失量呈现显著正相关关系($P<0.01$),而 Mg²⁺的淋失量与可溶性氮的淋失量呈显著正相关关系($P<0.01$)。DOC 的淋失量与 NH₄⁺-N 淋失量呈现显著正相关关系,而 DON 与 NO₃⁻-N 呈现显著正相关关系(表 3)。

3 讨论

耕作方式通过影响土壤物理结构、微生物活性及土壤养分状况等,进一步影响水分运动和 DOM 淋失^[24-25]。耕作一方面会使土壤表层通透性提高,湿度降低,微生物分解活动加强,从而加快土壤有机质(SOM)的分解和小分子 DOM 的产生,导致 DOM 淋失量增大^[26];另一方面耕作导致团聚体结构破坏,从而使闭蓄态有机碳、氮矿化丢失,DOM 淋失量增大^[24]。本文的研究表明,DOC、DON 在各耕作扰动处理之间都存在显著差异,且都与耕作扰动频率存在显著正相关关系,但 DON 与耕作频率之间的相关性更明显(表 2)。随着翻耕频率的增加,淋溶水 DOC/DON 逐渐减低,氮淋失量呈上升趋势。一般而言,C/N 比降低意味着土壤有机质降解加快^[21],不利于土壤碳氮固持,增大氮淋失风险^[27]。这表明,持续翻耕会削弱土壤碳与氮的汇功能,不利于当地生态系统的维持与发展。

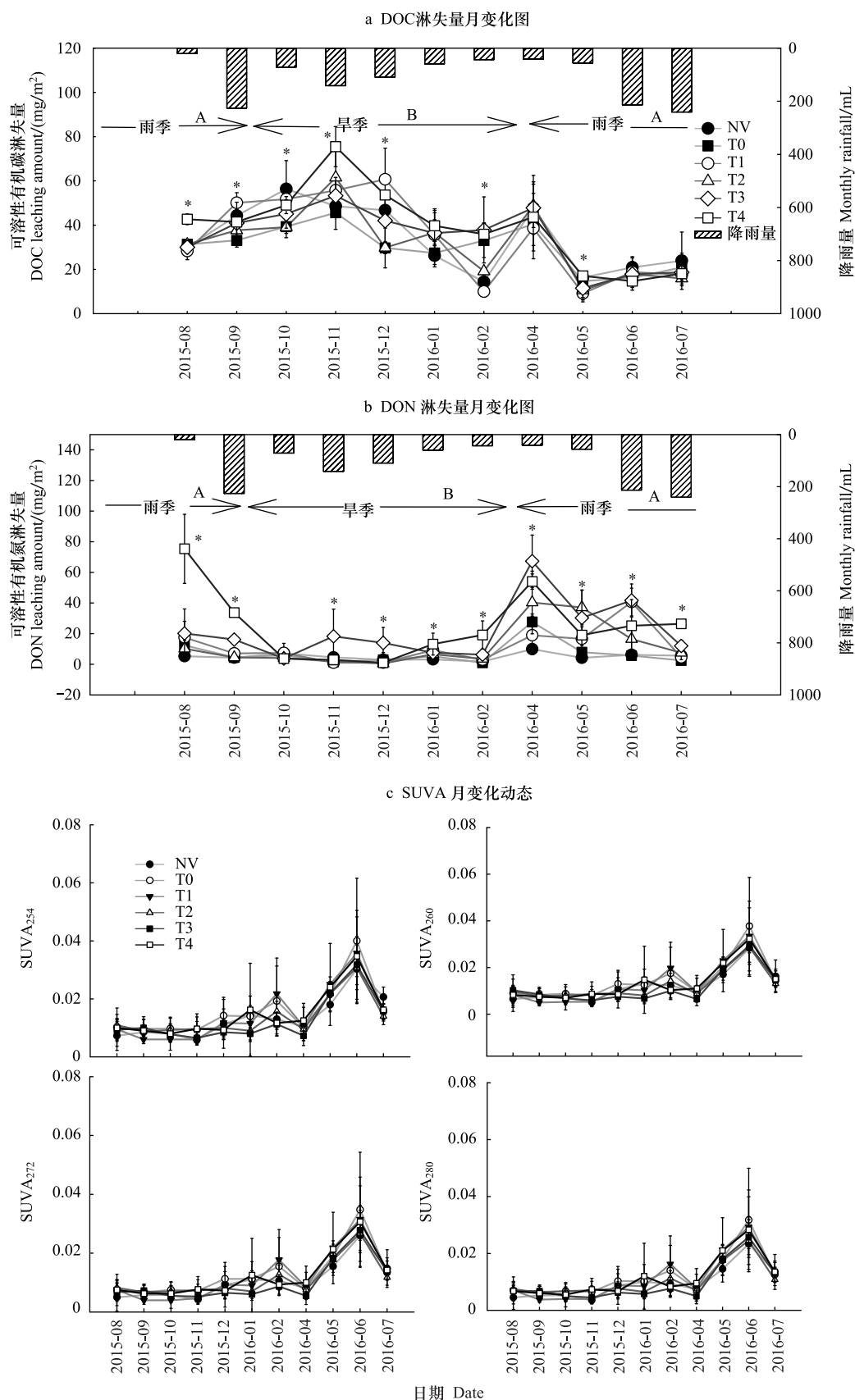


图2 耕作扰动处理下可溶性有机碳 DOC、可溶性有机氮 DON 淋失量以及单位吸光度 SUVA 的月变化动态 ($n=4$)

Fig.2 The leaching amount of DOC, DON and unit absorbance SUVA along with the change of time from ploughing treatment ($n=4$)

* 表示在 0.05 水平上存在显著差异; 大写字母表示旱季与雨季之间差异性; 相同字母表示不存在显著性差异; 不同字母表示差异性显著 ($P<0.05$)

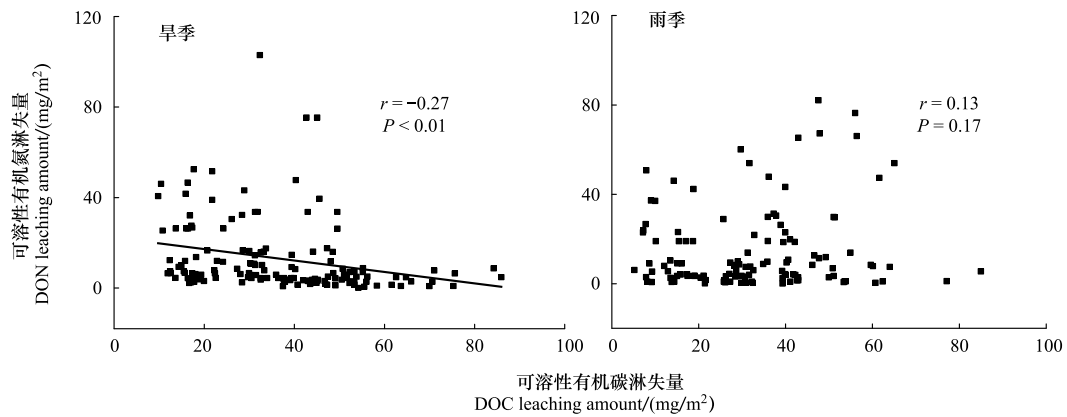


图 3 DOC、DON 淋失量相关关系

Fig.3 Relations between DOC and DON amount in leaching water

敏感,温度与湿度的升高导致微生物活性增强,土壤 SOM 分解加速,所以 DOC 淋失量大。故 DOC 旱季淋失量>雨季。这与苟小林等^[32]对高山土壤 DOC 淋溶特征研究的结果一致。

在整个监测期间,DOC、DON 呈现不同的变化趋势,且都受到耕作频率与季节变化及其交互作用的影响(表 4)。DOC 总淋失量在监测初期淋失量大、后期小(图 2a)。是因为土壤中 DOC 的淋失存在累积效应^[20, 28]。淋溶发生时,表层土壤养分向下淋失,下层土壤对淋溶 DOC 表现出吸附截留,而后发生解吸附的现象^[29]。因此在无外源碳补给的条件下,长时间的淋溶作用,使 DOC 的淋失规律表现为先上升而后下降趋势。在监测初期,翻耕处理 DOC 淋失量大于免耕,但在后期却呈现相反的趋势(图 2a),说明翻耕会导致土壤碳库发生变化,使土壤可溶性有机碳含量降低。土壤有机碳库由两个降解速度不同的组分库组成^[30],耕作扰动会使周转周期短的小分子淋失加剧,导致扰动土壤上部缺失活性碳库,稳定碳库上限深度下降^[4, 26],故后期翻耕处理后期 DOC 淋失量小于免耕。DOC 淋失受到季节变化的影响,表现为雨季<旱季(图 2a)。前期研究表明,季节变化引起的土壤温度与湿度变化会影响土壤微生物活性和土壤有机质分解矿化,进而影响 DOC 的淋失^[31]。土壤微生物活性会随温度与湿度的升高而增

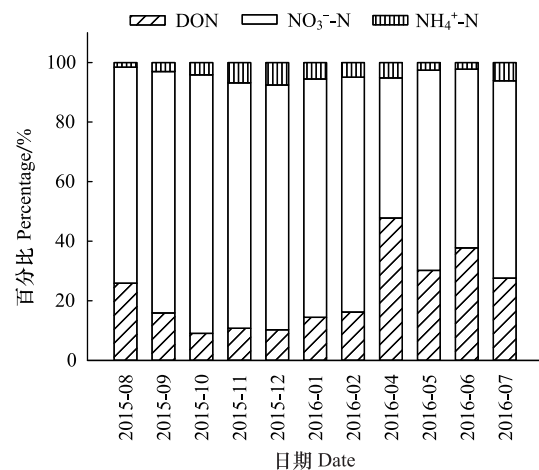


图 4 不同形态氮素淋失比例月变化特征(n=4)

Fig.4 The leaching amount of N along with the change of time (n=4)

表 3 Ca²⁺、Mg²⁺淋失量与碳氮淋失量的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlations between Ca²⁺, Mg²⁺ amount and C, N leached amount in leaching water

指标 Parameters	可溶性有机碳 Dissolved organic carbon (DOC)	可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen (DON)	可溶性总氮 Total dissolved nitrogen (TDN)	硝态氮 Nitrate nitrogen NO ₃ ⁻ -N	铵态氮 Ammonium nitrogen (NH ₄ ⁺ -N)
Ca ²⁺	0.441 **	0.169	0.211	0.187	0.178
Mg ²⁺	0.197	0.341 **	0.633 **	0.644 **	0.328 **
NO ₃ ⁻ -N	0.176	0.262 *	0.878 **	1	0.182
NH ₄ ⁺ -N	0.527 **	0.077	0.173	0.182	1

** 表示在 0.01 水平(双侧)上达到显著相关, * 表示在 0.05 水平上显著相关, n=4

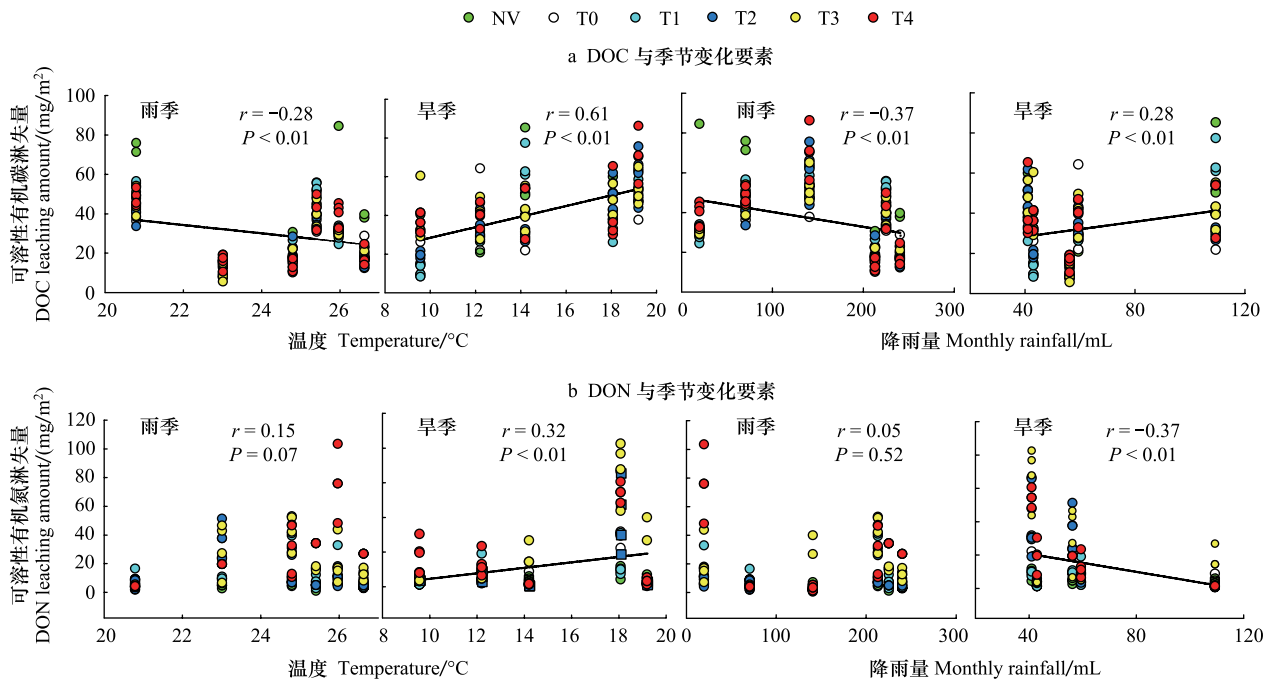
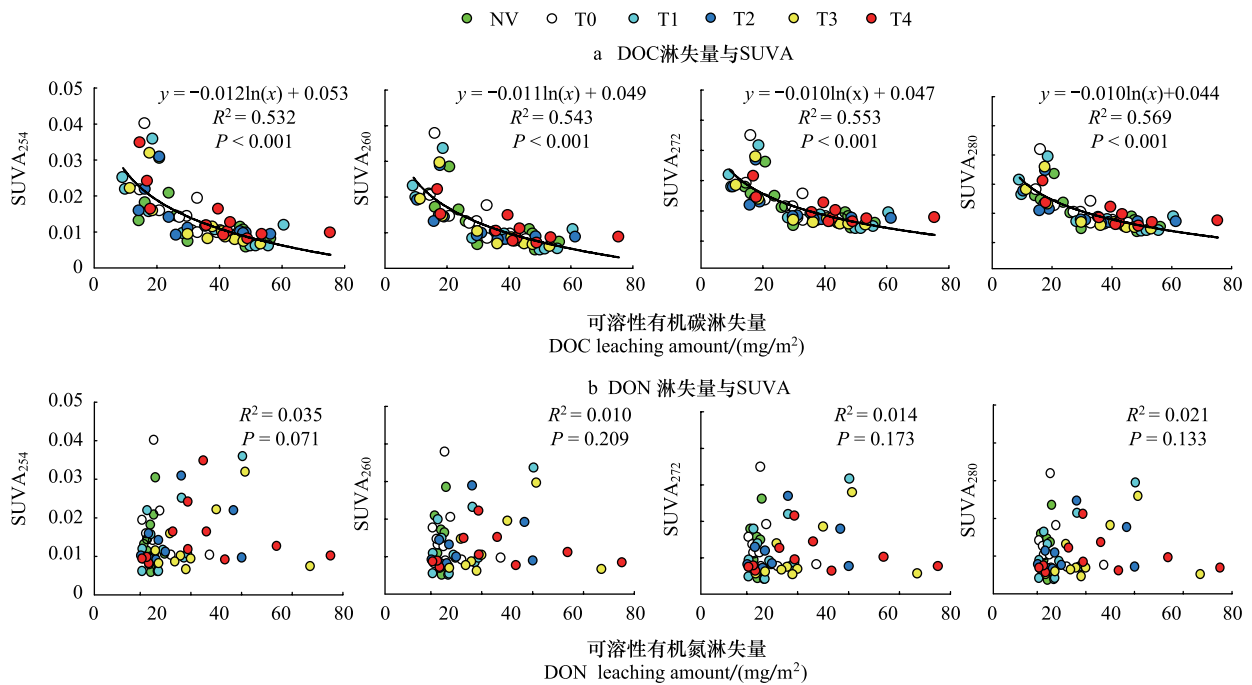


图 5 DOC、DON 淋失量与降雨量及温度的相关关系

Fig.5 Relations between rainfall, temperature and DOC, DON amount in leaching water

图 6 不同月份 DOC、DON 淋失量与 4 个官能团指标 SUVA₂₅₄、SUVA₂₆₀、SUVA₂₇₂和 SUVA₂₈₀的相关关系 ($n=4$)Fig.6 Relation between DOC、DON leaching amount and function group parameters of SUVA₂₅₄, SUVA₂₆₀, SUVA₂₇₂, SUVA₂₈₀ from different month ($n=4$)

SUVA₂₅₄: 254nm 单位吸光度; SUVA₂₆₀: 260nm 单位吸光度; SUVA₂₇₂: 272nm 单位吸光度; SUVA₂₈₀: 280nm 单位吸光度

表 4 翻耕频率与季节变化及其交互作用对 DOC、DON 淋失量以及 4 个官能团指标的影响

Table 4 Responses of DOC, DON and SUVA to tillage frequency, sample time, and their interaction in two-way ANOVA

指标 Parameters		翻耕频率 Ploughing frequency	月份变化 Sample time	翻耕频率×月份变化 Ploughing frequency ×Sample time
DOC 淋失量	<i>df</i>	5	10	50
	<i>F</i>	9.99 **	110.51 **	4.68 **
DON 淋失量	<i>df</i>	5	10	50
	<i>F</i>	48.71 **	45.93 **	8.58 **
SUVA ₂₅₄	<i>df</i>	5	10	50
	<i>F</i>	1.45	36.99 **	0.55
SUVA ₂₆₀	<i>df</i>	5	10	50
	<i>F</i>	1.38	36.03 **	0.49
SUVA ₂₇₂	<i>df</i>	5	10	15
	<i>F</i>	1.64	40.71 **	0.47
SUVA ₂₈₀	<i>df</i>	5	10	15
	<i>F</i>	1.69	40.86 **	0.51

df 表示自由度, *F* 为统计量, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上达到显著效应, *n* = 4

大,但达到一定温度与湿度后,活性反而会下降^[18]。DOC 在雨季与降雨量和温度呈显著负相关,在旱季则反之(图 5a)。是因为雨季土壤温度与湿度都过大,土壤微生物活性受到抑制,土壤 SOM 分解速度减慢,而温度的升高会使土壤对 DOC 的吸附能力增强^[25],所以 DOC 淋失量小,旱季土壤温度与湿度都比较低,土壤微生物对其 DON 的淋失量表现为监测初期淋失量小、后期大(图 2b)。在整个监测期内,氮素主要以 NO₃-N 的淋失为主,且其比重在监测初期大,后期小(图 4)。在处理实施初期土壤环境发生改变,微生物活性增加,导致 DON 的矿化速率加快,土壤中 DON 浓度较低,所以 DON 淋失量少,氮素淋失以 NO₃-N 的淋失为主(图 4)。但随着耕作时间的延长,可供分解的土壤 SOM 减少,土壤 SOM 的组成趋向简单化,导致 SOM 中含氮复合体的抗分解能力降低^[30],周转周期较长的氮库开始参与循环,使土壤 DON 浓度升高,从而导致后期 DON 淋失量增大。DON 的淋失量也受到季节变化的影响,表现为雨季 > 旱季(图 2b)。DON 淋失量在雨季与降雨量和温度都无显著相关关系,在旱季与温度正相关,与降雨量负相关(图 5b)。有研究表明,雨季时水分不是限制土壤氮素淋溶的因子,这时土壤 DON 淋失受其自身矿化能力的影响^[33]。而雨季主要处于监测后期,周转周期较长的氮库开始参与循环,土壤 DON 浓度升高,从而使 DON 淋失量增加。旱季时温度低,微生物活性低, SOM 矿化速率慢,土壤对 DON 有一定的吸附作用,此时无机态氮比 DON 更容易被淋失,土壤淋溶的氮素主要以无机氮为主,所以 DON 淋失量旱季 < 雨季。在监测期间,4 月份所有处理 DON 淋失量均达到峰值(图 2b),主要是由于 3 月份降雨极少,未形成足够水量带走该月 TDN,导致 4 月份的淋失量显著提高。干旱交替条件下,翻耕也会导致 DON 淋失量增加。这可能一方面是因为干燥的土壤再湿润对土壤有机氮矿化具有激发作用,导致 DON 释放^[31],另一方面,干旱交替产生的土壤缝隙会加快水分向下运移的速度,从而导致 DON 淋失量增加^[34]。

4 个官能团参数在不同翻耕频率下差异不显著,在监测期内表现为初期小、后期大(图 2c),主要受季节变化的影响,各翻耕处理间无显著差异(表 4)。该结果表明,随翻耕频率的增加土壤 DOM 淋失量增加但不影响 DOM 官能团特征。DOM 中芳香性组分所占比例越大,说明所形成化合物越复杂、分子量越大,并具有更高的稳定性,而可溶性有机物中疏水性部分具有更大的 C/N 比和芳香性,因此更不易分解、具有更长的周转周期^[23]。4 个官能团特征参数与 DOC 淋失量都具有显著的负相关关系(图 6a),表明翻耕处理增加了 DOC 淋失,但其淋失组分仍以小分子物质为主,意味着持续的翻耕可能会进一步导致土壤 SOM 稳定组分的损失。SUVA 主要表征疏水基团含量(表 1),富碳有机物含有的疏水基团比例高,而富氮有机化合物所含的亲水基团比例高,所以 DON 与 SUVA 无紧密关系(图 6b)。但考虑到高频率的翻耕处理仍以小分子 DOM 淋失为主,同时随着处理实施时间的延长, DON 淋失量和 DON/TDN 逐渐增加,意味着进入水体的 DOM 容易分解矿化,

持续的耕作干扰将大大增加水体 N 素污染风险。

耕作处理过程中,随翻耕频率增加碳、氮淋失量增大,但随着耕作时间的延长,DON 与 DOC 呈现出不同的淋溶特征。这与 Hagedorn 等的研究结果一致^[35],DON 在土壤中的行为既不同于矿质氮,也不同于 DOC。这是因为土壤中 DOC 的浓度取决于土壤 SOC 含量,而 DON 的释放更多取决于土壤无机 N 库^[36],故碳氮周转率存在差异,其影响因素也不同。DOC 与 Ca^{2+} 以及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 呈现显著正相关关系,而 DON 则与 Mg^{2+} 以及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 淋失量呈现显著正相关(表 3)。这是因为大团聚体破碎后,土壤结构发生变化,导致与 Ca^{2+} 结合的部位被破坏,从而导致游离 Ca^{2+} 含量的升高^[17],另一方面,SOM 分解使土壤溶液中 DOC 浓度升高,导致微生物呼吸作用加强,产生的 CO_2 对土壤中碳酸钙进行溶解, Ca^{2+} 淋失量增加。故耕作导致 DOC 淋失量增加的同时,也导致了 Ca^{2+} 淋失量增加。而 NH_4^+ 的矿化生成与土壤 DOC 的可溶性有关,Andersson 等研究发现, NH_4^+ 的生成与有机质溶解性的提高密切相关,其原因可能是 NH_4^+ 与胡敏酸和富里酸结合成类似“溶解盐”的物质,从而提高了有机质的可溶性^[37]。 Mg^{2+} 则与氮的淋失紧密相关,是由于淋失的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 离子带负电荷,需要淋失等同的带正电荷的 Mg^{2+} 来保持土壤电荷平衡^[38]。

4 结论

喀斯特石灰土 DOC、DON 的淋失均受到翻耕频率、季节变化及其交互作用的影响,DOC、DON 及 DON/TDN 均随翻耕频率的增加而增加。在观测期内,DOC 与 DON 表现出截然不同的淋失特征,DOC 在监测初期淋失量大、后期小,DON 表现为监测初期淋失量小、后期大。DON 对耕作频率的变化更为敏感。少耕和免耕有利于减少 DOM 的淋失,尤其在干旱交替之际,应尽量避免耕作扰动,防止 DOM 的淋失。淋溶水 DOM 的芳香性、疏水性等大分子量组分不受翻耕频率的影响,但受季节变化影响,分子量小且芳香性低的 DOM 更容易淋失。以上结果表明耕作扰动会加剧土壤 DOM 淋失,但淋失组分中稳定性组分没有变化,意味着耕作干扰会导致土壤有机质的持续损失,且由于其淋失组分碳氮比(DON/DOC)随扰动频率增加而降低,DON/TDN 比随扰动频率增加而增加,持续的耕作干扰将大大增加水体氮素污染风险。同时,本文所获得 DOC、DON 及其官能团组成变化动态对于了解耕作过程中土壤碳库变化的机理和过程也具有一定的支撑作用。

参考文献(References):

- [1] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, Zech W. Seasonal variations in the chemical composition of dissolved organic matter in organic forest floor layer leachates of old-growth Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands in northeastern Bavaria, Germany. *Biogeochemistry*, 2001, 55(2): 103-143.
- [2] 杨玉盛,郭剑芬,陈光水,陈银秀,于占源,董彬,刘东霞. 森林生态系统 DOM 的来源、特性及流动. *生态学报*, 2003, 23(3): 547-558.
- [3] 周建斌,陈竹君,郑险峰. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用. *土壤通报*, 2005, 36(2): 244-248.
- [4] 韩成卫,李忠佩,刘丽,车玉萍. 溶解性有机质在红壤水稻土碳氮转化中的作用. *生态环境*, 2006, 15(6): 1300-1304.
- [5] 卢小慧,李奇龙,乔骁. 农业系统溶解性有机态氮淋滤损失及影响因素研究进展. *湖北农业科学*, 2016, 55(13): 3265-3268, 3275-3275.
- [6] Ritson J P, Bell M, Graham N J D, Templeton M R, Brazier R E, Verhoef A, Freeman C, Clark J M. Simulated climate change impact on summer dissolved organic carbon release from peat and surface vegetation: implications for drinking water treatment. *Water Research*, 2014, 67: 66-76.
- [7] 王红光,石玉,王东,张永丽,于振文. 耕作方式对麦田土壤水分消耗和硝态氮淋溶的影响. *水土保持学报*, 2011, 25(5): 44-47, 52-52.
- [8] 张伟,王克林,刘淑娟,叶莹莹,潘复静,何寻阳. 喀斯特峰丛洼地植被演替过程中土壤养分的积累及影响因素. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 1801-1808.
- [9] Dirnböck T, Kobler J, Kraus D, Grote R, Kiese R. Impacts of management and climate change on nitrate leaching in a forested karst area. *Journal of Environmental Management*, 2016, 165: 243-252.
- [10] 苟小林,吴福忠,杨万勤,谭波,徐振锋,刘金铃,李志萍,黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤氮素淋溶损失的影响. *环境科学学报*, 2014, 34(2): 439-448.
- [11] 黄倩,吴靖霆,陈杰,蔡武,王昊,陈韦,何云峰. 土壤吸附可溶性有机碳研究进展. *土壤*, 2015, 47(3): 446-452.
- [12] Kaiser K, Guggenberger G, Haumaier L, Zech W. The composition of dissolved organic matter in forest soil solutions: changes induced by seasons and passage through the mineral soil. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(3): 307-318.

- [13] Fröberg M, Hansson K, Kleja D B, Alavi G. Dissolved organic carbon and nitrogen leaching from Scots pine, Norway spruce and silver birch stands in southern Sweden. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(9): 1742-1747.
- [14] 王克林. 生态脆弱区域农业与环境协调发展策略. *中国生态农业学报*, 2001, 9(3): 86-88.
- [15] 张伟, 陈洪松, 苏以荣, 王克林, 林海飞, 刘坤平. 不同作物和施肥方式对新垦石灰土土壤肥力的影响. *土壤通报*, 2013, 44(4): 925-930.
- [16] 陈洪松, 杨静, 傅伟, 何菲, 王克林. 桂西北喀斯特峰丛不同土地利用方式坡面产流产沙特征. *农业工程学报*, 2012, 28(16): 121-126.
- [17] 曹建华, 潘根兴, 袁道先. 不同植物凋落物对土壤有机碳淋失的影响及岩溶效应. *第四纪研究*, 2000, 20(4): 359-366.
- [18] 曹建华, 潘根兴, 袁道先, 姜光辉. 岩溶地区土壤溶解有机碳的季节动态及环境效应. *生态环境*, 2005, 14(2): 224-229.
- [19] Jost G, Dirnböck T, Grabner M T, Mirtl M. Nitrogen leaching of two forest ecosystems in a karst watershed. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 218(1/4): 633-649.
- [20] 汪智军, 梁轩, 袁道先. 岩溶流域不同土壤剖面溶解性碳氮分布和淋失特征. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 83-87, 93-93.
- [21] 田丽艳, 郎赞超, 刘丛强, 丁虎, 赵志琦, 刘涛泽. 贵州普定喀斯特坡地土壤剖面有机碳及其同位素组成. *生态学杂志*, 2013, 32(9): 2362-2367.
- [22] 刘宏斌, 任天志, 范先鹏, 左强, 纪雄辉, 邹国元, 张继宗, 何丙辉, 李志宏, 刘光荣, 张云贵. 农田地下淋溶和地表径流原位监测一体化装置: 中国, CN200810102681.7[P]. 2009-02-18.
- [23] 苏冬雪, 王文杰, 邱岭, 王洪岩, 安静, 郑广宇, 祖元刚. 落叶松林土壤可溶性碳、氮和官能团特征的时空变化及与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2012, 32(21): 6705-6714.
- [24] 章程. 典型岩溶流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素. *水土保持学报*, 2009, 23(4): 165-169, 199-199.
- [25] 花可可, 朱波, 王小国. 紫色土坡耕地可溶性有机碳径流迁移特征. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 81-88.
- [26] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 孙彦敏, 易惟熙, 李英年. 土地利用变化对高寒草甸土壤有机质更新的影响. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 217-225.
- [27] 成剑波. 基于 C/N 调节的沼液灌溉土壤氮淋溶控制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [28] 崔思远, 尹小刚, 陈阜, 唐海明, 李锋, 张海林. 耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 174-179.
- [29] 张艳艳. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机碳淋溶特征研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2016.
- [30] 汪景宽, 李丛, 于树, 李双异. 不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性. *生态学报*, 2008, 28(12): 6165-6171.
- [31] 黄靖宇, 宋长春, 宋艳宇, 刘德燕, 万忠梅, 廖玉静. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响. *环境科学*, 2008, 29(5): 1380-1387.
- [32] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 徐振锋, 刘金铃, 李志萍, 黄莉. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(6): 205-210.
- [33] 袁玲, 王容萍, 黄建国. 三峡库区典型农耕地的氮素淋溶与评价. *土壤学报*, 2010, 47(4): 674-683.
- [34] 秦纪洪, 黄雪菊, 陈蓓, 孙辉, 沈丹杰. 干湿交替格局对川西南干热河谷土壤碳氮释放的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 250-254.
- [35] Hagedorn F, Bucher J B, Schleppi P. Contrasting dynamics of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil and surface waters of forested catchments with Gleysols. *Geoderma*, 2001, 100(1/2): 173-192.
- [36] Kalbitz K, Geyer S. Different effects of peat degradation on dissolved organic carbon and nitrogen. *Organic Geochemistry*, 2002, 33(3): 319-326.
- [37] 杨继松, 刘景双, 于君宝, 王金达, 周旺明, 秦胜金. 草甸湿地土壤溶解有机碳淋溶动态及其影响因素. *应用生态学报*, 2006, 17(1): 113-117.
- [38] 高茹, 李裕元, 杨蕊, 魏红安, 聂敏, 张满意, 吴金水. 亚热带主要耕作土壤硝态氮淋失特征试验研究. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 839-852.