

土壤溶解性有机质的研究进展

王美丽^{1,2}, 李 军¹, 朱兆洲¹, 郭笑笑^{1,2}

1. 天津师范大学 水环境与水资源重点实验室, 天津 300387; 2. 天津师范大学 城市与环境科学学院, 天津 300387

摘 要: 溶解性有机质(DOM)是土壤的重要组成部分,虽然含量占土壤有机质成分的比例不高,却是非常活跃的化学物质,可影响土壤的形成及肥力,通过水循环进入水生生态系统参与水体内的各个过程、经微生物作用进入大气圈对全球气候产生巨大影响,在土壤乃至全球系统中都发挥着极其重要的作用,已渐成为土壤学家、环境学家和生态学家研究的焦点。本文综述了众多学者的研究成果,讨论了土壤DOM的来源、含量、组成和分类,以及影响其含量变化的因素及其环境效应,指出了研究中存在的问题和未来发展趋势。

关 键 词: 土壤; 溶解性有机质; 影响因素; 环境效应

中图分类号: S153.6⁺ 21 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2010)03-0304-07

Advances in Research on Dissolved Organic Matter in Soils

WANG Mei-li^{1,2}, LI Jun¹, ZHU Zhao-zhou¹, GUO Xiao-xiao^{1,2}

1. Key Laboratory of Water Environment and Resource, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China;

2. Urban and Environmental Science College, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

Abstract: Dissolved organic matter(DOM) is an important constituent of soils. Although the content accounts for a low proportion of soil organic matter, it's a very active chemical substance. DOM can affect soil formation and fertility, each process of the water system in the aquatic ecosystem and the global climate after being decomposed by microbiology, which plays an important role in soil chemical and biological processes, even to global carbon cycle. Now, DOM has been researched broadly by pedologists, environmentalists and ecologists and a lot of scientific achievements have been obtained. In this paper, the origins, contents, components, classifications of DOM in soils and its affecting factors as well as its environmental effects are reviewed on current research findings by many scholars. Meanwhile, some problems of current research and some prospects for the future research on soil DOM are also proposed.

Key words: soil; dissolved organic matter; effecting factors; environmental effects

土壤中能够被水溶液或稀盐溶液提取的那部分有机质组分被称为土壤DOM^[1]是土壤溶解有机碳(DOC)、溶解有机氮(DON)、溶解有机磷(DOP)和溶解有机硫(DOS)的总称,但以DOC组分为主。它们是土壤有机质中最活跃的组分之一,也是土壤有机质研究中最有意义的量化指标^[2]。从某种意义上说,土壤DOM仅是一个操作上的定义,是指土壤经水溶液浸提后,能通过0.45 μm滤膜、结构不均一、分子大小不同的低分子量有机质和以胶体态悬

浮于土壤溶液中的大分子量有机质的连续统一体^[3],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酶、氨基糖和腐殖质等^[4]。

过去的研究多集中于土壤DOM对土壤组分、结构和肥力的影响,现在逐渐认识到它对土壤养分、元素的生物地球化学循环、重金属和有机污染物的迁移和转化、地表水体的富营养化,以及全球碳循环甚至全球气候变化都有着深刻的影响^[5~7]。

收稿日期: 2009-12-22 收到, 2010-03-01 改回

基金项目: 天津市科技发展计划项目(06YFSZSF05100); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(09JCZDJC25900); 环境地球化学国家重点实验室开放课题(SKLEG9004); 天津师范大学博士基金资助项目(52LX24)

第一作者简介: 王美丽(1984-), 女, 硕士研究生, 专业方向: 环境科学。E-mail: ruohan114@163.com.

通讯作者: 李军。E-mail: lijun5931@163.com.

1 土壤 DOM 的来源和含量

1.1 DOM 的来源

土壤 DOM 来源于土壤母质风化过程中产生和由外部有机质的输入;主要有植被凋落物、根系分泌物、动物残体、微生物残体及其分泌物和施用的有机肥等^[8]。不同土壤中 DOM 的来源尚有争议。研究表明,新近凋落物对 DOM 的变化有显著影响^[9, 10];凋落物淋滤液 DOM 与表层土壤 DOM 组成相似,但土壤 DOM 中含的芳香环多酚类,以及与腐殖质结合的碳水化合物却主要来源于腐殖质、根系分泌物等^[11];森林土壤中的大部分 DOM 来自腐殖质的淋滤与微生物的分解^[12];水稻整个生长过程中根际 DOM 含量不断增加且都高于对应时期土壤 DOM 的含量,这可能与有机质促进作物根际分泌有关^[13]。近年的研究表明,土壤 DOM 中碳水化合物的结构与植物残渣和腐殖质中明显不同,表明微生物代谢产物对土壤 DOM 组成有重要影响^[14]。

1.2 土壤 DOM 的含量

土壤 DOM 的含量很低,仅占土壤有机质总量的极小一部分;不同类型土壤的 DOM 含量也不同。农田土壤 DOM 含量一般不会超过 C 100 mg/L,森林土壤 DOM 含量从几个到几百个 C mg/L。一般情况下,森林土壤 DOM 含量高于农田土壤^[15]。

目前,DOM 含量的分析尚无统一方法,各种方法差别较大,且测试的数据在很大程度上取决于样

品的采集方法和前处理^[16]。不同的提取剂种类和浓度对 DOC 量的影响较显著,如在相同浓度下, K₂SO₄ 溶液提取的 DOC 量最高^[17]。因此,文献中的土壤 DOM 的含量数据不宜互相对比。

2 土壤 DOM 的组成和分类

土壤 DOM 的组分比较复杂,且各个组分的比例都较小,在实际操作过程中尚不可能对所有的组分进行逐一分离和测试,所以难能进行 DOM 组分的分组研究。目前,DOM 的组分划分方法有 4 类^[18]: 1) 单个化合物的分组; 2) 以生物化学分类方法进行化合物组分分组,如蛋白质、游离氨基酸、单糖、多糖、脂、酚、丹宁等; 3) 以分子量大小分组; 4) 用吸附色谱法进行化学与功能的分组。

方法(1)和(2)只是对 DOM 中能鉴别出的一少部分进行分组,主要是低分子量 DOM,如有机酸、糖、氨基酸等^[19],但大部分 DOM 由于其结构的复杂性尚无法分离和分析。

一些学者按照方法(3)对 DOM 进行分组,将其分为 < 1 kda、1 ~ 10 kda 和 > 10 kda 三大组^[20];分子小于几千的 DOM 主要包括脂肪酸、芳香酸、氨基酸等,而分子量较大的 DOM 则包括结构尚未十分明确的复杂有机物(如富里酸等)。

方法(4)是目前比较热门的一种方法,按照化合物的极性和电荷特性,用 XAD 树脂和阴阳离子交换树脂,将水中的 DOM 分为 6 个组分^[21](表 1)。

表 1 土壤溶解性有机质的一般组成^[18]
Table 1 General compositions of dissolved organic matter in soils

DOM 组分		结构组成	化学性质	相对含量
疏水性	酸性化合物	5 ~ 9 个碳原子的脂肪酸、1 ~ 2 个环的芳香羧酸、1 ~ 2 个环的酚、棕黄酸、腐殖酸与腐殖质键合的氨基酸、肽和糖	酸交换量为 8.5 ~ 11.8 mol · kg ⁻¹ C, pH 取决于电荷密度	30 ~ 70
	中性化合物	烃、> 5 个碳原子的脂肪醇、胺、酯、酮和醛; > 9 个碳原子的脂肪酸、脂肪胺; ≥ 3 个环的芳香羧酸、芳香胺		≈ 15
	碱性化合物	除嘧啶以外的 1 ~ 2 个环的芳香胺、酯和酮		< 1
亲水性	酸性化合物	≤ 5 个碳原子的脂肪酸、多官能团酸	酸交换量为 10.6 ~ 14.3 mol · kg ⁻¹ C, pH 取决于电荷密度	30 ~ 50
	中性化合物	≤ 5 个碳原子的脂肪醇、胺、酯、酮和醛; > 9 个碳原子的脂肪酸、脂肪胺、多官能团醇、糖		≈ 12
	碱性化合物	≤ 9 个碳原子的脂肪胺、氨基酸、两性蛋白质、嘧啶		5 ~ 10

(1) 亲水的酸性有机质(HPIA)。包括低分子量的及高羟基/碳比(COOH/C)的腐殖质和非腐殖质,如羧酸等。(2) 亲水的中性有机质(HPIN)。包括单糖、醇和非腐殖质结合的多糖等。(3) 亲水的碱性有机质(HPIB)。包括蛋白质等。(4) 疏水的酸性有机质(HPOA)。这一组分大致与土壤中的富里酸

和胡敏酸相似。(5) 疏水的中性有机质(HPON)。主要包括碳水化合物、长链脂肪酸、烷基醇和带有少量功能团的腐殖质等。(6) 疏水的碱性有机质(HPOB)。主要有芳香族胺类等。

XAD 树脂分离法也有一定的缺点,如 pH 的剧烈变化可能会改变 DOM 各组分的结构和活性,导

致得到的碱性组分较少,一般不足以用来进行性质测定等,但从化学结构上仍能真实反映 DOM 各部分的组成^[22]。

还有学者将提取的 DOM 进行生物培养,根据降解过程中的矿化速率,分为难降解性和易降解性两大类。不同分组方法的实用性尚有争议,方法(3)和(4)是当前较为公认的分组方法^[3]。

3 影响土壤 DOM 含量变化的因素

Kalbitz 等^[10]将影响土壤 DOM 含量变化的因素分为 4 类:1) 土壤固相的性质;2) 土壤溶液的化学性质;3) 环境因素;4) DOM 的分解和转化等。但由于实验室模拟与田间研究条件的不同,各因素的影响程度与方式均不一致。

(1) 土壤有机质的总量:土壤有机质的总量对 DOM 的影响研究多集中在 DOC 方面。土壤 DOC 是指在一定条件下,有一定溶解性、在土壤中运移较快、易氧化矿化,对植物、微生物活性较高的那部分土壤碳素,是土壤有机碳的组成部分之一^[23]。研究表明,土壤 DOM 含量与总有机质含量呈正比关系,也有结果显示两者的相关性并不显著。Gregorich 等^[24]报道 DOC 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值非常相近,认为土壤有机质是影响土壤 DOM 的主要因素。Tipping 等^[25]的研究发现有机质含量高的土壤,DOC 的输出量就大。

(2) pH: DOM 以酸性组分为主,降低 pH 值可使其表面电荷密度增大,溶解度降低,导致吸附作用增强;而提高 pH 值会使 DOM 的吸附作用减弱,释放量增加^[26]。研究表明,随着石膏施用量的增加,淋溶液 DOM 的含量逐渐增加^[27];在 pH 值从 6.0 升到 7.0 时,DOM 的释放速率常数也逐渐升高^[28];pH 值较低的土壤对 DOM 的吸附较强,较高的对 DOM 的吸附较弱^[29];pH 值为 5.0 的土壤对 DOC 的吸附最强,为 7.0 时最弱^[30]。然而,关于土壤 DOC 与 pH 的关系,前人的研究结果也有差异,例如对南方森林土壤 DOM 的研究发现,土壤 DOC 与土壤 pH 在一定范围内呈极显著的负相关关系^[31]。上述成果说明,土壤 DOM 与土壤 pH 的相关性需限定在一定的 pH 值范围内进行比较。

(3) 温度:温度对土壤 DOM 影响的研究结论较为一致:温度升高,生物活性增加,土壤 DOC 含量增加^[32, 33]。不同温度实验的条件下土壤 DOC 的含量明显高于对照体系,尤其是培养中期、中等培养温度下土壤 DOC 有着较大的含量差^[34];20℃时 DOC 释放最快,温度降低与升高均会导致释放速率下降。

温度较低时分子热运动较慢,从而减缓 DOM 在滞膜层中的扩散速率,温度较高时 DOM 则会发生絮凝作用使其分子量增加,从而使扩散系数降低^[28]。

(4) 水分:水分是影响土壤 DOM 的另一个重要因素,学者们探讨了土壤干湿交替过程中 DOM 含量的变化,其结果都比较一致,即风干的土壤再湿润后 DOM 含量会有较大程度的提高。研究表明,土壤可溶性有机质可分为可移动的和非移动的两个部分,前者可溶性有机质多分布在大、中孔隙中(大于 0.2 μm),而非移动性有机质多分布在微孔隙中(小于 0.2 μm)。在干湿交替作用下,团聚体湿润分散后释放出所含的 DOM,甚至微孔隙中可溶性有机物^[35]。随着淋溶次数的增多,森林土壤中淋洗出来的 DOC 的总量会增加^[36];淹水初期土壤溶液中 DOC 的含量明显增加^[37]。

(5) 施肥:DOM 含量变化受人为和自然等诸多因素影响,特别是田间条件下的动态过程十分复杂。施用秸秆、有机肥、无机肥等都会对土壤中 DOC 产生影响。研究指出,水稻生产期前 2 个月内添加秸秆,使土壤 DOC 显著升高^[37];施用有机肥后土壤 DOM 含量明显增加,而且经有机肥和化肥混合处理后土壤 DOC 明显高于单施用化肥处理的土壤^[13, 38]。也有人认为 DOC 的变化与秸秆施用关系不大^[39]。

(6) 土地利用和管理方式:国内外对不同的土地利用方式下土壤 DOM 含量的研究较多,一般认为土壤 DOM 含量都会随土层加深而递减,但不同类型土壤 DOM 降低的速率有一定的差异。植被类型不同,土壤有机质及 DOM 的含量也有着显著的区别,溶解有机碳分配比例为荒地>割草地>裸地^[40, 41]。不同耕地利用类型也会引起土壤中 DOM 含量的差别,如洞庭湖区各种耕地利用方式中,DOC 含量为水旱轮作地>双季稻水田>一季稻水田>旱地^[42]。同种类型、不同利用方式的土壤 DOM 含量的差别也较大,如连栽时土壤养分含量呈下降趋势,连续经营使土壤中 DOM 的含量明显降低^[43],集约经营比粗放经营的土壤有机质矿化率增加,从而使 DOM 的含量降低^[44]。

4 土壤 DOM 的环境效应

(1) 土壤肥力:DOM 对土壤养分有很大影响,对改善土壤结构、提高土壤肥力、促进植物生长起着很大的作用。DOM 具有亲水和疏水的双重性质,疏水性 DOM 被吸附到团聚体表面形成一层有机薄膜,提高了团聚体的稳定性^[35],而亲水性 DOM 的

功能团则具有较强的络合能力,容易与土壤胶体结合的营养亲和,提高了土壤养分的有效性。

DOM 还可被直接利用或通过自身分解产生养分因子,提高土壤肥力。一方面,DOM 组分的分子量较低、活性较强的部分,可直接被植物利用,促进植物的生长发育;另一方面,DOM 使土壤中微生物数量增加、活性增强,进而促进养分矿化,提高了土壤养分的有效性^[3]。土壤中的 DOC 含量与土壤全氮、全钾、速效钾含量间存在显著的正相关关系^[45]。不同来源的 DOM 均能显著提高土壤的肥力^[46]。

(2) 水体富营养化:地表径流可携带陆地生态系统中的 DOM 进入地表水体,从而对水体的物化性质产生重大影响。如果有机肥施用量过大或过于集中,会使大量 DOM 溶于土壤,DOM 则可能从土壤向环境中转移,使水体 DOM 含量迅速提高,对水环境产生负面影响^[3]。

DOM 是土壤 C、N、S、P 等从陆地生态系统向水生生态系统迁移的重要载体。有机肥中 DOC 占有机碳的比例与溶解性有机氮占可溶性总氮和全氮的比例都很高,可能会成为碳、氮流失和水体富营养化的潜在威胁^[47]。DOM 阻碍了水中胶体的絮凝,使粒子呈分散状,水体浑浊会引起水体颜色的变化。富营养化水体的色度决定于颗粒态有机碳及分子量为 500 ~ 3000 的 DOM^[48]。另外,迁移到水中的 DOM 为水中的微生物提供了能量,使其活性增强,生化耗氧量增大,从而使水体厌氧而致水质恶化。

(3) 温室效应:活性有机碳是微生物生长的速效基质,其含量直接影响土壤微生物的活性,影响到温室气体的排放。如土壤甲烷细菌、氨化细菌、硝化细菌、反硝化细菌的活性直接影响到 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的产生和排放。目前,有关土壤 DOM 对温室效应影响的研究多是国外一些学者的报道。他们认为,产甲烷菌需要额外的速效碳来源激活,土壤 DOC 的含量与 CH_4 产生量成正相关^[49];种植水稻施用尿素,会增加 CH_4 、 N_2O 排放量^[50];在一定范围内,秸秆的施用量与 CH_4 的排放量呈正相关关系^[51]。

(4) 对重金属的影响:DOM 对重金属的影响机制有络合、吸附、酸碱缓冲等,是一系列反应的结果^[52]。土壤 DOM 所含的活性功能团的活性位点比固相有机质多,为重金属离子提供了更多的“配位体”,从而提高了重金属的流动性和致毒性。如富里酸 FA 的移动性强、酸度高,在吸附重金属离子后一般呈溶解态,从而提高了重金属在土壤的迁移性^[53]。研究发现,土壤中添加 DOM 可促进菜心对

Cd 的吸收和 Cd 的毒性^[8]。

DOM 对重金属的影响还与土壤的理化性质有关。一般情况下,金属-有机络合物的稳定性随 pH 值升高而提高,如促进土壤对 Cu、Cd 的吸附^[54]。研究表明,DOM 种类、含量与土壤的理化性质也有一定的相关性。如污泥与稻秆 DOM 对 Cd 的吸附有明显的抑制作用,而菜叶 DOM 表现为促进作用^[55]。重金属的种类、浓度等自身性质的影响表现为 DOM 对 Hg 的吸附行为有一定的抑制作用^[56],但却能够提高 Zn、Cd 等重金属的溶解性^[50]。DOM 对不同浓度 Cu 的影响研究发现,Cu 浓度较低 DOM 抑制吸附,Cu 浓度较高则促进其吸附^[57]。

(5) 对有机污染物的影响:DOM 对土壤有机污染物的作用主要有:增溶、吸附-解吸、迁移-转化、光解和水解等。DOM 对有机污染物的吸附-解吸、迁移-转化过程的有双重影响:一方面 DOM 与有机污染物在土壤表面的共吸附提高了土壤对有机污染物的吸附容量,促进了有机污染物的吸附;另一方面,DOM 对有机污染物的增溶作用,有利于土壤中有有机污染物的解吸,提高了移动性^[58]。土壤自身的 DOM 会抑制菲的吸收,外加 DOM 对菲吸附的影响与 DOM 的含量有关^[59]。另外,生活污水灌溉会增强阿特拉津在土壤中的移动,这与污水中的 DOM 有关,但也有研究表明在 DOM 存在的条件下,PAH 的迁移性反而会降低^[18]。

5 结 语

土壤 DOM 对土壤各种物理、化学和生物过程都有着广泛而深刻的影响。有待深入研究的问题有:(1)对土壤 DOM 的形成模型、化学结构、表面行为、源/汇效应及其控制机制等。(2)建立土壤 DOM 的提取和分析标准方法,促进研究结果的可比性。(3)加强土壤中重金属、有机有毒化学品与土壤 DOM 间相互作用的研究,以揭示土壤污染物的环境行为和归宿。(4)加强 DOM 原位状态的生态效应研究。目前对 DOM 的研究大都停留在室内模拟阶段,脱离了土壤真实的环境,影响因素单一,使实验脱离野外的实际情况。

参考文献 (References):

- [1] 赵满兴,周建斌,陈竹君,郑险峰.不同类型农田土壤对可溶性有机氮、碳的吸附特性[J].应用生态学报,2008,19(1):76-80.
Zhao Manxing, Zhou Jianbin, Chen Zhujun, Zheng Xianfeng. Adsorption characteristics of soluble organic carbon and nitro-

- gen in two cultivated soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 76– 80. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王晶, 张旭东, 解宏图, 朱平, 姜桂敏. 现代土壤有机质研究中新的量化指标概述[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(10): 1809– 1812.
Wang Jing, Zhang Xudong, Xie Hongtu, Zhu Ping, Jiang Guimin. New quantificational indexes in modern study of soil organic matter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(10): 1809– 1812. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨佳波, 曾希柏. 水溶性有机物在土壤中的化学行为及其对环境的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(5): 206– 211.
Yang Jiabo, Zeng Xibai. Behavior and environmental impact of soil dissolved organic matter [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007, 15(5): 206– 211. (in Chinese with English abstract)
- [4] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 马强. 土壤活性有机碳[J]. *生态学杂志*, 2006, (11): 1412– 1417.
Liu Min, Yu Wantai, Jiang Zishao, Ma Qiang. A research review on soil active organic carbon [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(11): 1412– 1417. (in Chinese with English abstract)
- [5] 徐玉芬, 吴平霄, 党志. 水溶性有机质对土壤中污染物环境行为影响的研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2007, 26(3): 307– 312.
Xu Yufen, Wu Pingxiao, Dang Zhi. Advances in Research on the Influence of Environmental Behaviors of Pollutants in Soils Caused by Water Dissolvable Organic Matter [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2007, 26(3): 307– 312. (in Chinese with English abstract)
- [6] 吴丰昌, 王立英, 黎文, 张润宇, 傅平青, 廖海清, 白英臣, 郭建阳, 王静. 天然有机质及其在地表环境中的重要性[J]. *湖泊科学*, 2008, 20(1): 1– 12.
Wu Fengchang, Wang Liying, Li Wen, Zhang Runyu, Fu Pingqing, Liao Haiqing, Bai Yingchen, Guo Jianyang, Wang Jin. Natural organic matter and its significance in terrestrial surface environment [J]. *Journal of Lake Sciences*. 2008, 20(1): 1– 12. (in Chinese with English abstract)
- [7] McDowell W H. Dissolved organic matter in soils: future directions and unanswered questions [J]. *Geoderma*, 2003, 113: 179– 186.
- [8] 陈同斌, 陈志军. 土壤中溶解性有机质及其对污染物吸附和解吸行为的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(3): 201– 210. Chen Tongbin, Chen Zhijun. Dissolved organic matter and its effects on adsorption and desorption of pollutants in soils [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3): 201– 210. (in Chinese with English abstract)
- [9] Qualls R G, Haines B L. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem [J]. *Soil Science SocAm*, 1991, 55: 1112– 1123.
- [10] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: a review [J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277– 304.
- [11] 代静玉, 秦淑平, 周江敏. 水杉凋落物分解过程中溶解性有机质的分组组成变化[J]. *生态环境*, 2004, 13(2): 207– 210.
Dai Jingyu, Qin Shuping, Zhou Jiangmin. Dynamic changes of DOM fractions during the decaying process of *Metasequoia glyptostroboides* litter [J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 207– 210. (in Chinese with English abstract)
- [12] McDowell W H, Likens G E. Origin, composition and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley [J]. *Ecological Monographs*, 1988, 58: 177– 195.
- [13] 王良梅, 周立祥, 占新华, 黄焕忠. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 858– 864.
Wang Genmei, Zhou Lixiang, Zhan Xinhua, Joanthan W. C. Wong. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on metal availability in paddy soil: Field micro-plot trials [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5): 858– 864. (in Chinese with English abstract)
- [14] Guggenberger G, Zech W, Schulten H R. Formation and mobilization pathways of dissolved organic matter: Evidence from chemical structural studies of organic matter fractions in acid forest floor solutions [J]. *Org. Geochem.*, 1994, 21: 51– 66.
- [15] Seto M, Yui S. The amounts of dissolved organic carbon in the soil solution of a forest and a farm soil in situ. *Jpn Ecology*, 1983, 33: 305– 312.
- [16] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 土壤溶解有机碳的研究进展[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 422– 429.
Li Shufen, Yu Yuanchun, He Sheng. Summary of research on dissolved organic carbon (DOC) [J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 422– 429. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李忠佩, 焦坤, 吴大付. 不同提取条件下红壤水稻土溶解有机碳的含量变化[J]. *土壤*, 2005, 37(5): 512– 516.
Li Zhongpei, Jiao Kun, Wu Dafu. Soluble organic C content of Paddy soils in subtropical China in relation to extraction conditions [J]. *Soils*, 2005, 37(5): 512– 516. (in Chinese with English abstract)
- [18] 赵劲松, 张旭东, 袁星, 王晶. 土壤溶解性有机质的特性与环境意义[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 126– 130.
Zhao Jinsong, Zhang Xudong, Yuan Xing, Wang Jing. Characteristics and environmental significance of soil dissolved organic matter [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(1): 126– 130. (in Chinese with English abstract)
- [19] Herbert B E, Bertsch P M. Characterization of dissolved and colloidal organic matter in soil solution: A review [A]. Kelly J M, McFee W W. Carbon forms and functions in forest soils [J]. *SSSA, Madison, Wisconsin*, 1995, 63– 88.
- [20] Marschner B, Bredow A. Temperature effects on release and ecologically relevant properties of dissolved organic carbon in sterilized and biologically active soil samples [J]. *Soil Biology. Biochemistry*, 2002, 34: 459– 466.
- [21] Leenheer J A, Huffman J R. Classification of organic solutes

- in water by using macroparticulate resins [J]. Res US Geology Survey, 1976, 4(6): 737– 751.
- [22] 王立英, 吴丰昌, 张润宇. 应用XAD系列树脂分离和富集天然水体中溶解有机质的研究进展[J]. 地球与环境, 2006, 34(1): 90– 96.
- Wang Liying, Wu Fengchang, Zhang Runyu. A method of separate and concentrate dissolved organic matter by XAD resin in natural aquatic systems [J]. Earth and Environment, 2006, 34(1): 90– 96. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513– 519.
- Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei, Huang Yu. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513– 519. (in Chinese with English abstract)
- [24] Gregorich E G, Liang B C, Drury C F, Mackenzie A F, McGill W B. Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils [J]. Soil Biology. Biochemistry, 2000, 32: 581– 587.
- [25] Tipping E, Woolf C, Rigg E, Harrison A F, Inneson P, Taylor K, Harkness D. Climatic influences on the leaching of dissolved organic matter from upland UK moorland soil, investigated by a field manipulation experiment [J]. Environment, 1999, 25: 83– 95.
- [26] 焦坤, 李忠佩. 土壤溶解有机质的含量动态及转化特征的研究进展[J]. 土壤, 2005, 37(6): 593– 601.
- Jiao Kun, Li Zhongpei. Advances in research on concentration and transformation of dissolved organic matter in soils [J]. Soils, 2005, 37(6): 593– 601. (in Chinese with English abstract)
- [27] 郭堃梅, 池宝亮, 黄学芳. 碳酸钙与石膏对土壤磷及溶解有机碳淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(1): 128– 130.
- Guo Kunmei, Chi Baoliang, Huang Xuefang. Effects of CaCO₃ and Gypsum on leaching of phosphorus and dissolved organic carbon in soil [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 128– 130. (in Chinese with English abstract)
- [28] 林滨, 陶澍, 刘晓航. 土壤与沉积物中水溶性有机物释放动力学研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 8– 13.
- Lin Bin, Tao Shu, Liu Xiaohang. Release Kinetics of water soluble organic COM-Pounds from soil and sediments [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(1): 8– 13. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王艮梅, 周立祥. 陆地生态系统中水溶性有机物动态及其环境学意义[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2019– 2025.
- Wang Genmei, Zhou Lixiang. Dynamics of dissolved organic matter in terrestrial ecosystem and its environmental impact [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 2019– 2025. (in Chinese with English abstract)
- [30] 俞元春, 何昇, 李炳凯, 李淑芬, 姜德锋. 杉林土壤溶解有机碳吸附及影响因素分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(2): 15– 18.
- Yu Yuanchun, He Sheng, Li Bingkai, Li Shufen, Jiang Deyang. The dissolved organic carbon (DOC) adsorption and its influence factor on the soil of Chinese fir plantation [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2005, 29(2): 15– 18. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李淑芬, 俞元春, 何晟. 南方森林土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(2): 119– 123.
- Li Shufen, Yu Yuanchun, He Sheng. Correlation between dissolved organic carbon and soil factors of the forest soil in southern of China [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2003, 20(2): 119– 123. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张甲坤, 陶澍, 曹军. 中国东部土壤水溶性有机物含量与地域分异[J]. 土壤学报, 2001, 38(3): 308– 314.
- Zhang Jiashen, Tao Shu, Cao Jun. Spatial Distribution pattern of water soluble organic carbon in eastern China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(3): 308– 314. (in Chinese with English abstract)
- [33] 莫彬, 曹建华, 徐祥明, 申宏岗, 杨慧, 李小方. 岩溶山区不同土地利用方式对土壤活性有机碳动态的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6): 1224– 1230.
- Mo Bin, Cao Jianhua, Xu Xiangming, Shen Honggang, Yang Hui, Li Xiaofang. Changes of soil active organic carbon under different land use types in karst area [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(6): 1224– 1230. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘艳, 汪思龙, 王晓伟, 于小军, 杨跃军. 不同温度条件下杉木、桉木和火力楠细根分解对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 481– 486.
- Liu Yan, Wang Silong, Wang Xiaowei, Yu Xiaojun, Yang Yuejun. Effects of tree species fine root decomposition on soil active organic carbon [J]. Chinese J Applied Ecology, 2007, 18(3): 481– 486. (in Chinese with English abstract)
- [35] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618– 623.
- Peng Xinhua, Zhang Bin, Zhao Qiguo. A review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 618– 623. (in Chinese with English abstract)
- [36] Christ M J, David M B. Dynamics of extractable organic carbon in spodosol forest floors[J]. Soil Biology Biochemistry, 1996, 28: 1171– 1179.
- [37] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 韩勇. 秸秆还田对稻田土壤溶液中溶解性有机质的影响[J]. 土壤学报, 2006, 42(5): 736– 741.
- Lu Ping, Shan Yuhua, Yang Linzhang, Han Yong. Effect of wheat straw incorporation into paddy soil on dissolved organic matter in soil solution [J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 42(5): 736– 741. (in Chinese with English abstract)
- [38] 黄伟生, 彭佩钦, 苏以荣, 黄道友, 朱奇宏. 洞庭湖区耕地利用方式对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 756– 760.
- Huang Weisheng, Peng Peiqin, Su Yirong, Huang Daoyou, Zhu Qihong. Soil active organic carbon of farmland under different uses in Dongting Lake region [J]. J Agro-Environ-

- ment Science, 2006, 25(3): 756–760. (in Chinese with English abstract)
- [39] 于建光, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 818–824.
- Yu Jianguang, Li Huixin, Chen Xiaoyun, Hu Feng. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil labile organic carbon [J]. Chinese J Applied Ecology, 2007, 18(4): 818–824. (in Chinese with English abstract)
- [40] 宇万太, 马强, 赵鑫, 周桦, 李建东. 不同土地利用类型下土壤活性有机碳库的变化[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2013–2016.
- Yu Wantai, Ma Qiang, Zhao Xin, Zhou Hua, Li Jiandong. Changes of soil active organic carbon pool under different land use types [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 2013–2016. (in Chinese with English abstract)
- [41] 徐侠, 陈月琴, 汪家社, 方燕鸿, 权伟, 阮宏华, 徐自坤. 武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 539–544.
- Xu Xia, Chen Yueqin, Wang Jiashe, Fang Yanhong, Quan Wei, Ruan Honghua, Xu Zikun. Variations of soil labile organic carbon along an altitude gradient in Wuyi Mountain [J]. Chinese J. Applied Ecology, 2008, 19(3): 539–544. (in Chinese with English abstract)
- [42] 黄伟生, 彭佩钦, 苏以荣, 黄道友, 朱奇宏. 洞庭湖区耕地利用方式对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 756–760.
- Huang Weisheng, Peng Peiqin, Su Yirong, Huang Daoyou, Zhu Qihong. Soil active organic carbon of farmland under different uses in Dongting Lake Region [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(3): 756–760. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系. 生态学报, 2005, 25(6): 1299–1305.
- Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei. A study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation: Relationships with soil nutrients [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1299–1305. (in Chinese with English abstract)
- [44] 徐秋芳, 徐建明, 姜培坤. 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 15–21.
- Xu Qiufang, Xu Jianming, Jiang Peikun. Study on organic carbon pool of soil under intensive management bamboo forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 15–17. (in Chinese with English abstract)
- [45] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 1–5.
- Shen Hong, Cao Zhihong. Effect of long-term fertilization on soil available carbon pool and available ratio of soil carbon under different agroecosystems [J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1998, 7(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)
- [46] 高树芳, 王果, 方玲. 溶解性有机质对水稻生长及元素吸收的影响[J]. 福建农业大学学报, 2001, 30(1): 87–90.
- Gao Shufang, Wang Guo, Fang Ling. Effects of dissolved organic matter on rice growth and its uptake of elements [J]. Journal of Fujian Agricultural University, 2001, 30(1): 87–90. (in Chinese with English abstract)
- [47] 赵满兴, 周建斌, 陈竹君, 杨绒. 有机肥中可溶性有机碳、氮含量及其特性[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 397–403.
- Zhao Manxing, Zhou Jianbin, Chen Zhujun, Yang Rong. Concentration and characteristics of soluble organic nitrogen (SON) and carbon (SOC) in different types of organic manures [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 397–403. (in Chinese with English abstract)
- [48] 罗晓鸿, 曹莉莉, 王占生. 绍兴市富营养化水源水中有机物特性研究[J]. 环境科学, 1997, 18(3): 13–16.
- Luo Xiaohong, Cao Lili, Wang Zhan sheng. Study on characteristics of organics in the Eutrophic source water of Shaoxing City [J]. Environmental Science, 1997, 18(3): 13–16. (in Chinese with English abstract)
- [49] Wang Z P, Delaue R D. Methane production from anaerobic soil amended with rice straw and nitrogen fertilizer [J]. Fertil Res, 1992, 33: 115–121.
- [50] Landau C W, et al. Effect of urea fertilizer and environmental factors on CH₄ emissions from a Louisiana, USA Rice Field [J]. Plant and Soil, 1991, 136: 195–205.
- [51] Schutx H, Holzapfel Pschorn. A three-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy [J]. J Geophys Res, 1989, 94: 16405–16416.
- [52] 李廷强, 杨肖娥. 土壤中水溶性有机质及其对重金属化学与生物行为的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1083–1087.
- Li Tingqiang, Yang Xiao'e. Soil dissolved organic matter and its effect on chemical and biological behaviors of soil heavy metals [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(6): 1083–1087. (in Chinese with English abstract)
- [53] 许中坚, 刘广深, 刘维屏. 土壤中溶解性有机质的环境特性与行为[J]. 环境化学, 2003, 22(5): 427–433.
- Xu Zhongjian, Liu Guangshen, Liu Weiping. Environmental characteristic and behavior of dissolved organic matter in soils [J]. Environmental Chemistry, 2003, 22(5): 427–433. (in Chinese with English abstract)
- [54] 王果, 谷勋刚, 高树芳, 方玲. 三种有机肥水溶性分解产物对铜、镉吸附的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(2): 179–188.
- Wang Guo, Gu Xungang, Gao Shufang, Fang Ling. Adsorption of copper and cadmium on two soils as affected by water-soluble products of three organic materials [J]. Acta Pedologica Sinica, 1999, 36(2): 179–188. (in Chinese with English abstract)
- [55] 陈志军, 白厚义, 陈佩琼. 溶解性有机质对镉在蔬菜中积累的影响[J]. 广西农业大学学报, 1997, 16(2): 129–132.
- Chen Zhijun, Bai Houyi, Chen Peiqiong, Yu Zhangji. Effects of dissolved organic matter on deposit of (下转第316页)

carbon export in the early Eocene[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 278(3–4): 297–307.

[22] Iskowitz J M, Lee J H, Zeitlin H. Determination of thallium in deep-sea ferromanganese nodules[J]. *Marine Mining*, 1982, 3: 285–295.

[23] Ahrens I H, Willis J P, Oosthuizen C O. Further observations on the composition of manganese nodules with particular reference to some of the rarer elements[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1967, 31: 2169–2180.

[24] Savenko V S. Physicochemical state of thallium (I) and thallium (III) in seawater [J]. *Geochemistry International*, 2001, 39: 88–91.

[25] Schauble E A. Role of nuclear volume in driving equilibrium stable isotope fractionation of mercury, thallium, and other very heavy elements [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 2170–2189.

[26] Batley G E, Florence T M. Determination of thallium in natural waters by anodic stripping voltammetry[J]. *Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1975, 61: 205–211.

[27] Schedlbauer O F, Heumann K G. Biomethylation of thallium by bacteria and first determination of biogenic dimethylthallium in the Ocean [J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2000, 14: 330–340.

[28] Koschinsky A, Hein J R. Uptake of elements from sea-water by ferromanganese crusts: Solid-phase associations and sea-water speciation[J]. *Marine Geology*, 2003, 198: 331–351.

[29] Bidoglio G, Gibson P N, Ogorman M, Roberts K J. X-Ray-absorption spectroscopy investigation of surface redox transformations of thallium and chromium on colloidal mineral oxides[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1993, 57: 2389–2394.

[30] Nielsen S G, Peacock C L, Halliday A N. Investigation of Thallium isotope fractionation during sorption to Mn oxides [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2008, 72: A681–A681.

[31] Zachos J, Pagani M, Sloan L, Thomas E, Billups K. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present [J]. *Science*, 2001, 292: 686–693.

[32] Rehkämper M, Nielsen S G. The mass balance of dissolved thallium in the oceans[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 85: 125–139.

[33] Rehkämper M, Nielsen S G, Teagle D A H, Alt J C, Butterfield D A. Thallium isotope constraints on the water fluxes of ridge flank hydrothermal systems[C]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18): A524–A524.

[34] Pearson P N, Palmer M R. Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years[J]. *Nature*, 2000, 406: 695–699.

(上接第 310 页)

cadmium in vegetable[J]. *Journal of Guangxi agriculture University*, 1997, 16(2): 129–132 (in Chinese with English abstract)

[56] 陈春羽, 王定勇. 水溶性有机质对土壤及底泥中汞吸附行为的影响[J]. *环境科学学报*, 29(2): 312–317.
Chen Chunyu, Wang Dingyong. Effect of dissolved organic matter on adsorption of mercury by soils and sediment [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2): 312–317. (in Chinese with English abstract)

[57] 黄泽春, 陈同斌, 雷梅. 陆地生态系统中水溶性有机质的环境效应[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 259–269.
Huang Zechun, Chen Tongbin, Lei Mei. Environmental effects of dissolved organic matters in terrestrial ecosystems: A review [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(2): 259–269. (in Chinese with English abstract)

[58] 郭杏妹, 吴宏海, 王伟伟, 曾丁才, 林怡英. 土壤溶解性有机质及其表面反应性的研究进展[J]. *生态科学*, 2007, 26(1): 88–92.
Guo Xingmei, Wu Honghai, Wang Weiwei, Zeng Dingcai, Lin Yiyi. Advances on research of dissolved organic matter and its surface reactivity in soils [J]. *Ecologic Science*, 2007, 26(1): 88–92. (in Chinese with English abstract)

[59] 熊巍, 凌婉婷, 高彦征, 李秋玲, 代静玉. 水溶性有机质对土壤吸附菲的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 431–435.
Xiong Wei, Ling Wanting, Gao Yanzheng, Li Qiuling, Dai Jingyu. Effects of dissolved organic matter on phenanthrene adsorption by soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(2): 431–435. (in Chinese with English abstract)