

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2  
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM<sub>2.5</sub>长期变化影响因素 ..... 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 ..... 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM<sub>2.5</sub>中碳质组分时空分布特征与来源 ..... 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM<sub>2.5</sub>中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 ..... 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM<sub>2.5</sub>中有机物的污染特征及来源解析 ..... 李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM<sub>2.5</sub>中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 ..... 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM<sub>2.5</sub>叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 ..... 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 ..... 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 ..... 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM<sub>2.5</sub>中水溶性有机气溶胶 ..... 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 ..... 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 ..... 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 ..... 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 ..... 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构 ..... 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 ..... 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 ..... 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 ..... 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 ..... 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 ..... 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 ..... 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 ..... 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 ..... 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 ..... 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 ..... 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B ..... 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 ..... 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 ..... 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 ..... 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董勇(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 ..... 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 ..... 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 ..... 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 ..... 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 ..... 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N<sub>2</sub>O产生特性 ..... 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 ..... 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 ..... 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 ..... 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 ..... 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 ..... 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 ..... 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

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 ..... 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 ..... 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 ..... 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 ..... 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 ..... 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 ..... 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律 ..... 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 ..... 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 ..... 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 ..... 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 ..... 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 ..... 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

# 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

宋亚辉<sup>1,2</sup>, 张骄阳<sup>1,2</sup>, 刘鸿飞<sup>3</sup>, 薛蕙<sup>1,3</sup>, 李秧秧<sup>1,4\*</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

**摘要:** 为研究不同管理措施(凋落物去除、油松幼林、灌木和草地)下土壤水溶性碳、氮含量的变化以及土壤溶解性有机质(SDOM)的组分, 选取黄土高原油松人工林为研究对象, 以未皆伐油松人工林作为对照, 对土壤水溶性碳、氮以及SDOM荧光组分等相关重要特征量进行研究分析。结果表明, 灌木和油松幼林的土壤水溶性有机碳含量显著高于其他管理措施, 并且土壤水溶性有机碳含量随土层深度的增加而降低, 土壤水溶性有机碳/土壤有机碳(WSOC/SOC)值随深度增加呈上升趋势; 土壤水溶性氮含量的变化和可溶性碳的变化趋势一致, 油松幼林土壤水溶性氮组分含量高于其他管理措施, 总体上随深度的增加而降低。不同管理措施对SDOM组分影响显著, 基于三维荧光光谱技术结合平行因子(EEM-PARAFAC)分析可知SDOM有4种组分, 主要分为类腐殖质、类蛋白和可溶性微生物代谢产物三大类, 其中SDOM的主要成分为富里酸类腐殖质, 油松幼林土壤中富里酸含量最高。本研究表明, 管理措施对土壤水溶性碳氮含量变化和SDOM组分具有一定的影响, 特别是油松幼林和灌木影响较大。两种管理措施提高了土壤水溶性有机碳以及水溶性氮组分的含量, 增强其在土壤中的迁移转化能力, 同时改变土壤有机物的结构组成, 加深腐殖化程度, 进一步改善土壤质量。

**关键词:** 管理措施; 土壤水溶性碳氮; 三维荧光; 平行因子分析; 油松人工林

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0905-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907085

## Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of *Pinus tabulaeformis* Plantations on Loess Plateau

SONG Ya-hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiao-yang<sup>1,2</sup>, LIU Hong-fei<sup>3</sup>, XUE Sha<sup>1,3</sup>, LI Yang-yang<sup>1,4\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The *Pinus tabulaeformis* plantation on the Loess Plateau was selected as the research site to study the changes of soil water-soluble carbon and nitrogen content and components of soil dissolved organic matter (SDOM) under different management measures (litter removal, young *Pinus tabulaeformis* forest, shrubs, grassland). The uncleared *Pinus tabulaeformis* plantation was used as the control. Results show that the soil water-soluble organic carbon content of shrubs and young *Pinus tabulaeformis* forests was significantly higher than that in other management measures. The content of soil water-soluble organic carbon decreased with an increase in soil depth, whereas soil water-soluble organic carbon/soil organic carbon (WSOC/SOC) increased. The change of soil water-soluble nitrogen content corresponded to that of water-soluble carbon. The content of soil water-soluble nitrogen content in the young *Pinus tabulaeformis* forest was higher than that of other management measures, and generally decreased with an increase in depth. Different management measures have significant effects on SDOM components. Based on three-dimensional fluorescence spectroscopy combined with parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis, four components of SDOM are identified, which are mainly divided into categories, humus, protein-like, and soluble microbial metabolites in three major categories, among which the main component of the SDOM is the rich acid humus, and the highest content in the soil of the young forest of *Pinus tabulaeformis* is rich acid. The results suggested that management measures had certain effects on soil water-soluble carbon and nitrogen content as well as SDOM components, especially in young *Pinus tabulaeformis* forests and shrubs. The young *Pinus tabulaeformis* forest and shrubs increased the content of soil water-soluble organic carbon and water-soluble nitrogen, enhanced their ability to migrate and transform in the soil, and changed the structural composition of soil organic matter, hence enhancing the degree of humification and further improving soil quality.

**Key words:** management measures; soil water-soluble carbon and nitrogen; three-dimensional fluorescence; parallel factor analysis; Chinese pine forest

收稿日期: 2019-07-09; 修订日期: 2019-09-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501707); 国家自然科学基金项目(41771557)

作者简介: 宋亚辉(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤微生物生态, E-mail: songyahh@163.com

\* 通信作者, E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分,全球土壤有机碳库的 70%~73% 是森林土壤有机碳<sup>[1]</sup>. 已有研究表明,皆伐后植被群落地能显著影响林地土壤结构特性、改变土壤温度、腐殖质形态、碳和氮的矿化速率等<sup>[2,3]</sup>. 在森林生态系统中,凋落物分解影响土壤氮动态<sup>[4]</sup>,以及土壤有机质分解、氮素转化和微生物活性等过程<sup>[5]</sup>,从而导致皆伐后不同管理措施,对土壤水溶性碳氮含量的影响具有很大差异. 相关研究表明,皆伐后植被恢复有利于改善土壤结构,提高土壤肥力<sup>[6,7]</sup>,皆伐干扰能够显著提高土壤氮素的有效性<sup>[8]</sup>.

土壤水溶性有机碳是指土壤有效性较高、易被土壤微生物分解矿化和对植物养分供应有最直接作用的那部分有机碳<sup>[9,10]</sup>,并且是土壤活性有机碳库的重要组成部分,其含量和性质能够反映土壤有机碳的稳定性,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要作用<sup>[11]</sup>. 虽然土壤水溶性有机碳占土壤有机碳的比值较小,但其运移速度快、易分解、易氧化、是直接参与土壤生物化学转化过程的重要组成部分,可敏感地反映土壤有机碳的微小变化<sup>[12,13]</sup>. 土壤水溶性氮是指土壤中可以溶于水或稀盐溶液的那部分氮素<sup>[14,15]</sup>,是土壤氮素最为活跃的组成部分,可以直接或间接地被植物吸收和利用,迁移性较强,易随水分运移而发生径流或淋溶损失<sup>[16,17]</sup>,含量的高低直接决定着土壤氮素的可利用性,对研究土壤氮素迁移、转化具有重要意义<sup>[18,19]</sup>. 现有的研究发现,新鲜凋落物中的水溶性氮、磷在淋洗作用下能够直接输入到土壤,从而提高土壤的有效养分含量,并且水溶性氮和磷动态是凋落物参与生态系统氮和磷循环的关键内容<sup>[20]</sup>.

土壤溶解性有机质 (soil dissolved organic matter, SDOM) 是一类含有富里酸、腐殖酸、芳烃聚物质等可溶性的有机质,对生态系统有重要作用<sup>[21]</sup>,其来源主要为植物残体、根系分泌物及土壤有机质中的腐殖质等<sup>[22]</sup>. SDOM 的结构组成和分布规律与其来源十分密切. SDOM 荧光物质主要分为类腐殖质和类蛋白两大类. 类腐殖质荧光物质由分子结构复杂的腐殖质类物质产生,而类蛋白质荧光物质则由具有芳香结构的氨基酸,如色氨酸、酪氨酸等产生<sup>[23]</sup>. 三维荧光光谱因其具有灵敏度高、可重复性好以及不破坏样品结构等优点,被广泛用于测定各类水体 DOM 不同类型有机物组成之间的变化规律<sup>[24]</sup>. 结合三维荧光光谱法对 SDOM 进行分析,通过观察三维荧光光谱不同组分的荧光峰值,可以定性定量地分析 SDOM 的不同组分类型以及各个组分所占的比例,进一

步研究其组分的来源以及 SDOM 腐殖化的特点. 然而,目前关于三维荧光光谱分析应用仍停留在其他相关领域,对土壤水溶性有机质测定的研究还很匮乏.

因此,本文以黄土高原油松人工林为研究对象,基于三维荧光光谱技术结合平行因子对土壤水溶性有机碳、水溶性总氮、土壤硝态氮、土壤铵态氮含量变化以及 SDOM 不同组分进行分析,进一步研究不同管理措施(凋落物去除、油松幼林、灌木和草地)对土壤水溶性碳氮及其三维荧光特性的影响,以期对该区林业管理提供一定的参考依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于陕西省北部宜川县黄龙山森林东缘(35°39'N, 110°06'E)的铁龙湾林场,属于典型的黄土丘陵区油松林,海拔 860~1 200 m,坡度 25°. 该地区属大陆性气候,年平均气温 9.7°C,平均无霜期为 180 天,年平均降水量为 584.4 mm,主要集中在 7~9 月之间,土壤类型为灰褐色森林土.

试验区油松人工林于 1966 年建立,面积为 600 hm<sup>2</sup>. 地带性植被为温带落叶阔叶林,主要树种为油松,同时包含其他植被,如灌木(胡枝子、忍冬、黄刺玫、绣线菊等)和草本植物(大披针苔草)等.

### 1.2 试验设计和取样

本试验选取与气候、地理位置、地形条件及林分密度等基本条件一致的油松人工林为研究对象. 1999 年皆伐后,该油松人工林用铁丝围成面积相等的试验小区,以确保各个小区环境基本一致. 以未进行人为干扰的油松人工林作为对照,设置 4 种试验处理,分别为凋落物去除、油松幼林、草地和灌木. 每个处理 3 次重复,每个小区为 5 × 10 m<sup>2</sup>.

2015 年 9 月采集土壤样品,在每个小区采用多点法分别从 0~20 cm 和 20~40 cm 土层中采集土样,并将各层土样进行充分混匀,装入自封袋中运回实验室保存. 将采集的土样剔除石头和根系等杂物后,过 2 mm 筛,一部分鲜土用于测定土壤水溶性有机碳和水溶性氮组分.

### 1.3 测定方法

土壤水溶性有机碳、氮的提取及测定采用 Ghani 等的方法<sup>[25]</sup>. ①土壤浸提液的制备:称取 40 g 新鲜土壤样品,加 120 mL 蒸馏水(水土比为 3:1)浸提,25°C 下振荡 30 min 后,使用高速离心机(8 000 r·min<sup>-1</sup>)离心 10 min,用 0.45 μm 滤膜进行抽滤,所得浸提液冷冻保存备用. ②土壤水溶性有机碳(WSOC)用 TOC 分析仪分析测定;土壤水溶性总

氮(WSN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法比色测定;土壤硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)含量采用紫外比色法测定,土壤铵态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)含量用连续流动分析仪进行测定;土壤水溶性有机氮含量  $\text{WSN} = \text{WSN} - (\text{NO}_3^- \text{-N}) - (\text{NH}_4^+ \text{-N})$ .

水样中水溶性有机物的三维荧光光谱(3DEEMs)利用 F-4600 荧光光谱仪(日立,日本)进行测定,配以 10 mm 的石英试管,用超纯水作空白对照, PMT 电压 700 V,扫描速度  $2\ 400\ \text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,激发光波长( $E_x$ )范围 200 ~ 450 nm,发射光波长( $E_m$ )范围 250 ~ 450 nm,激发光和发射光的狭缝宽度均为 5 nm. 在测定前,利用荧光光度计自带的比率模型,校正波长所依赖的光源强度和探测器的光敏度,修正仪器特定偏差的激发和发射强度. 在数据分析之前,对荧光数据进行预处理,消除拉曼散射和瑞利散射的影响. 用超纯水作为空白,通过处理从样本光谱图中减去超纯水空白的三维荧光光谱图,将拉曼散射效应从数据中剔除,同时排除瑞利散射效应,去除波长小于或等于激发波长 220 nm 的辐射测量<sup>[26]</sup>.

利用三维荧光光谱技术结合平行因子分析法对 SDOM 组分进行分析. 使用 Matlab 软件中的 drEEM (version 0.1.0) 和 DOMFour 工具包对 SDOM 三维荧光光谱进行平行因子(PARAFAC)分析. 主要分为 5 个步骤,第一,将荧光数据导入模型,组装数据集;

第二,预处理数据集,包括校正偏差、去除散点和标准化,光谱强度单位为 RU;第三,搜集数据集,去除异常值和开发初步模型;第四,验证模型,对模型适合度和灵敏度进行评估和分析;最后对结果进行解析<sup>[27]</sup>. 采用最大荧光强度法( $F_{\text{max}}$ )评价 PARAFAC 各组分的相对浓度<sup>[28]</sup>.

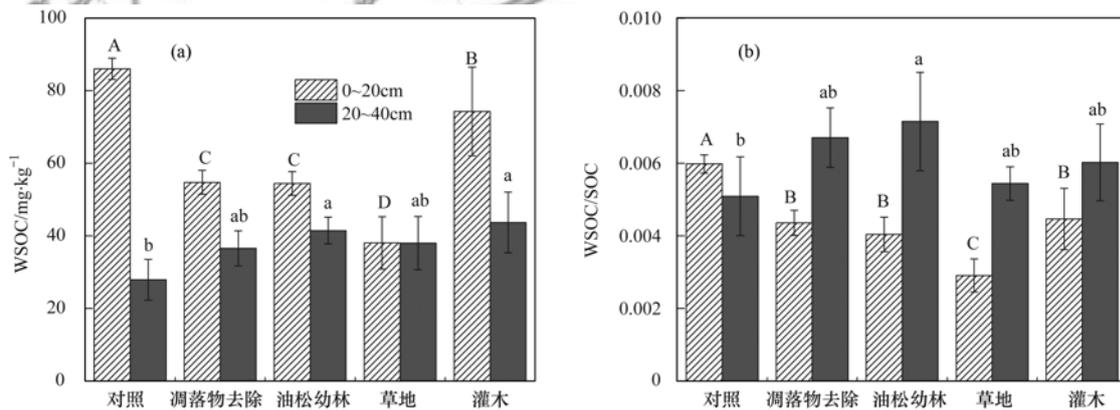
#### 1.4 数据处理

采用 Excel 2007 软件对数据进行统计分析;不同管理措施各指标的方差分析和多重比较,采用 SPSS 24.0 软件中的 LSD 法和 Duncan 方法( $P < 0.05$ );部分图由 Origin 9.4 进行绘制;平行因子模型(PARAFAC)的建立使用 Matlab 2014 a 软件, drEEM 和 DOMFlour 工具包共同完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同管理措施土壤水溶性有机碳分布特征

不同管理措施会显著影响 0 ~ 20 cm 土层 WSOC 含量,且 WSOC 含量随土层加深而有所下降[图 1(a)]; WSOC/SOC 变化趋势与 WSOC 含量的变化趋势相反,除对照外,4 种管理措施随土层加深均有所上升[图 1(b)]. 对照 WSOC 含量和 WSOC/SOC 在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层分别为最大值和最小值,其中在 0 ~ 20 cm 土层,4 种管理措施均显著高于对照;在 20 ~ 40 cm 土层,油松幼林显著高于对照.



不同大写字母表示 0 ~ 20 cm 土层不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ); 不同小写字母表示 20 ~ 40 cm 土层不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同

图 1 不同管理措施土壤水溶性有机碳分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of water-soluble organic carbon in soils with different management measures

### 2.2 不同管理措施土壤水溶性氮组分分布特征

WSN 含量的变化趋势与 WSOC 一致,不同管理措施会影响 WSN 和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量[图 2(a)和 2(b)],特别是在 0 ~ 20 cm 土层,会显著影响 WSN 含量. 与对照相比,4 种管理措施 WSN 含量在 0 ~ 20 cm 土层均显著降低[图 2(a)];而在 20 ~ 40 cm 土层,4 种管理措施 WSN 含量与对照相比均有所提高,且凋

落物去除、油松幼林和灌木显著高于对照.  $\text{NO}_3^-$ -N 含量的变化趋势与 WSN 相似[图 2(b)],但除了对照和草地  $\text{NO}_3^-$ -N 含量随土层的加深明显下降,凋落物去除、油松幼林和灌木  $\text{NO}_3^-$ -N 含量随土层的加深变化不明显. 不同管理措施下  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 两个土层含量变化不明显,只有灌木  $\text{NH}_4^+$ -N 含量在 0 ~ 20 cm 土层显著低于对照[图 2

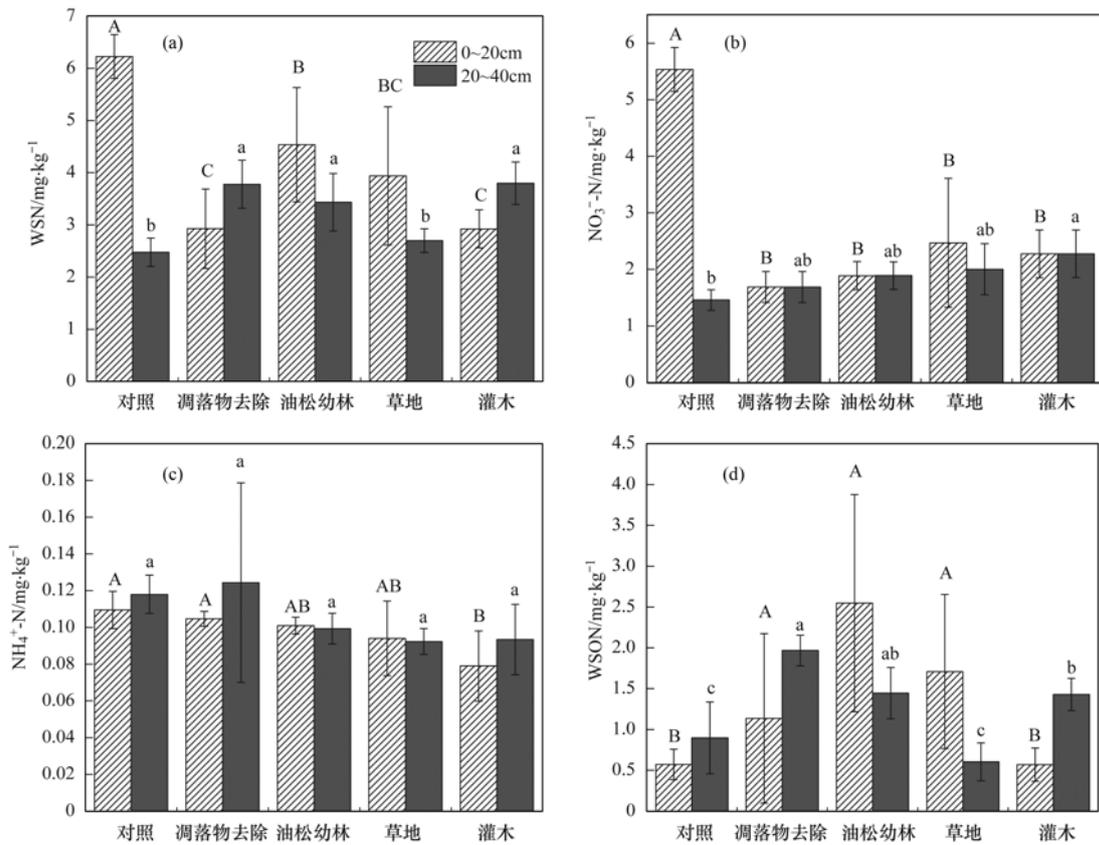


图2 不同管理措施土壤水溶性氮组分分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of water soluble nitrogen components in soils with different management measures

(c)]. 凋落物去除、油松幼林 WSON 含量在两个土层均显著高于对照,而草地和灌木分别在 0~20 cm 和 20~40 cm 显著高于对照[图 2(d)].

除草地 WSON/WSN 值在 20~40 cm 土层低于对照外,其他管理措施 WSON/WSN 值在不同土层相较于对照,均有所增加,其中油松幼林和草地在 0~20 cm 土层以及凋落物去除在 20~40 cm 土层均显著高于对照(图 3).

### 2.3 土壤溶解性有机质三维荧光光谱特性分析

利用 PARAFAC 模型对油松人工林 SDOM 进行三维荧光光谱分析(如图 4),主要分析出 4 个荧光组分(C1~C4). 其中,C1 荧光峰的位置为激发/发射( $E_x/E_m$ )波长 220, 250/440 nm,均属于类腐殖质荧光峰<sup>[29]</sup>,分别为类富里酸和类腐殖酸,与腐殖质结构中的羰基和羧基等有关,由分子结构复杂的腐殖质类产生,一般来源于植物残体的腐烂、降解产物等<sup>[30]</sup>;C2 荧光峰的位置为  $E_x/E_m$  波长 230, 280/355 nm,分别为芳香性类蛋白类色氨酸荧光组分和可溶性微生物代谢产物<sup>[31]</sup>,其中前者与微生物降解产生的芳香性蛋白类结构有关<sup>[32]</sup>,后者主要来源于微生物的生命活动,主要为土壤中自身的微生物;C3 荧光峰的位置为  $E_x/E_m$  波长 225/450 nm,属于类腐殖质荧光峰,为富里酸类荧光物质;C4 荧光峰的位置为

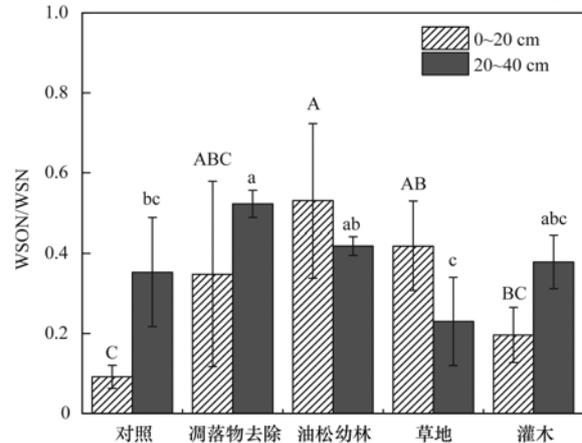


图3 不同管理措施水溶性有机氮(WSON)占水溶性总氮(WSN)的比例特征

Fig. 3 Proportion of water-soluble organic nitrogen (WSON) to water-soluble total nitrogen (WSN) in different management measures

$E_x/E_m$  波长 220, 275/300 nm,分别为芳香性类蛋白质类络氨酸荧光物质和可溶性微生物代谢产物.

通过研究不同管理措施下两个土层的总荧光强度发现(图 5),C3 组分所占的比例相对较大,占绝对优势,并且与其他 4 个处理相比,对照的荧光强度值最大.与对照相比,不同管理措施的总荧光强度均有所降低,特别是在 0~20 cm 土层,降低趋势十分明显.结合 DOM 三维荧光光谱可以看出,油松人工

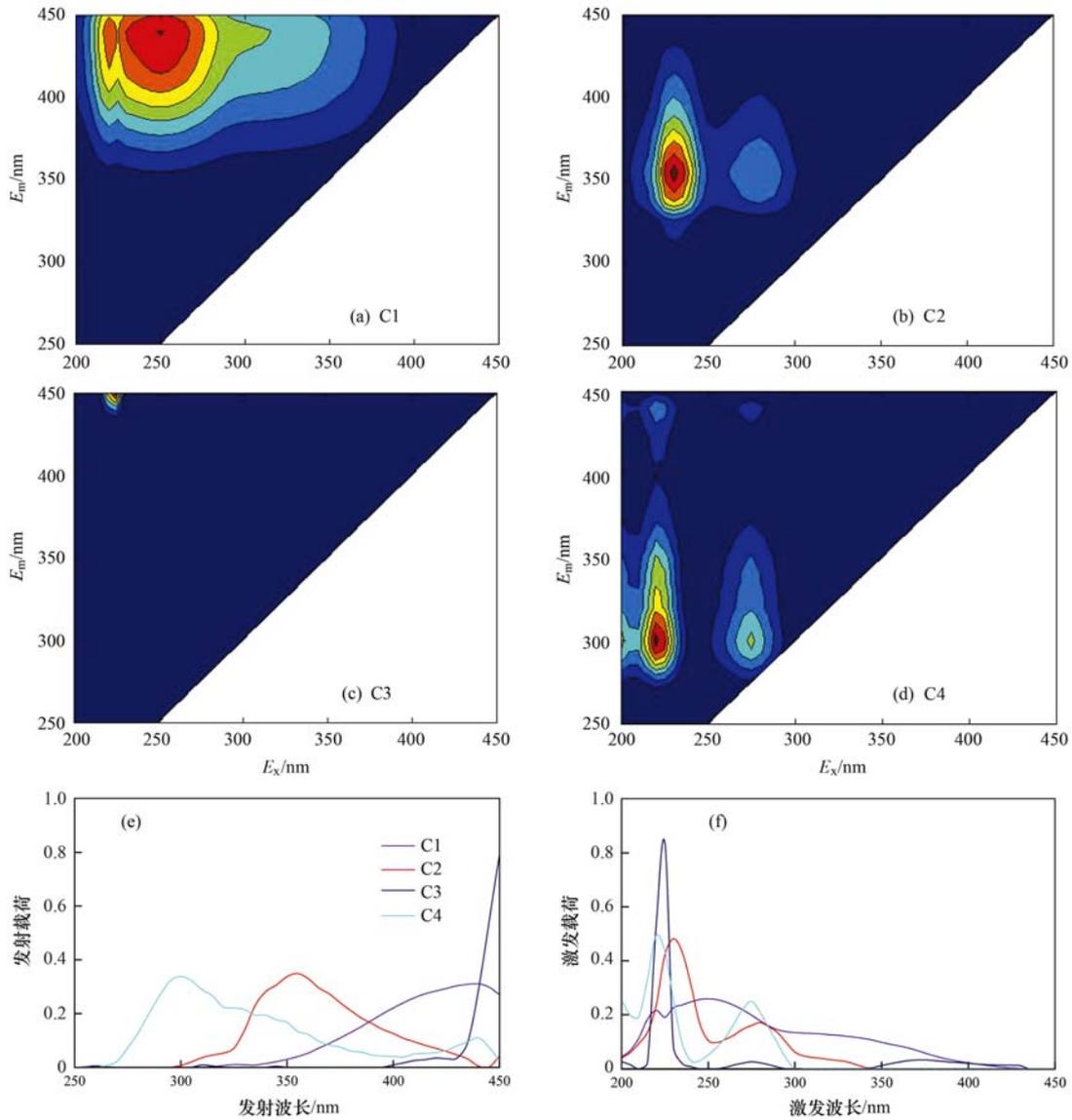


图 4 经 PARAFAC 分析的 SDOM 4 个组分的三维荧光光谱图及其荧光载荷

Fig. 4 Three-dimensional fluorescence spectroscopy and fluorescence load of four components of SDOM analyzed by PARAFAC

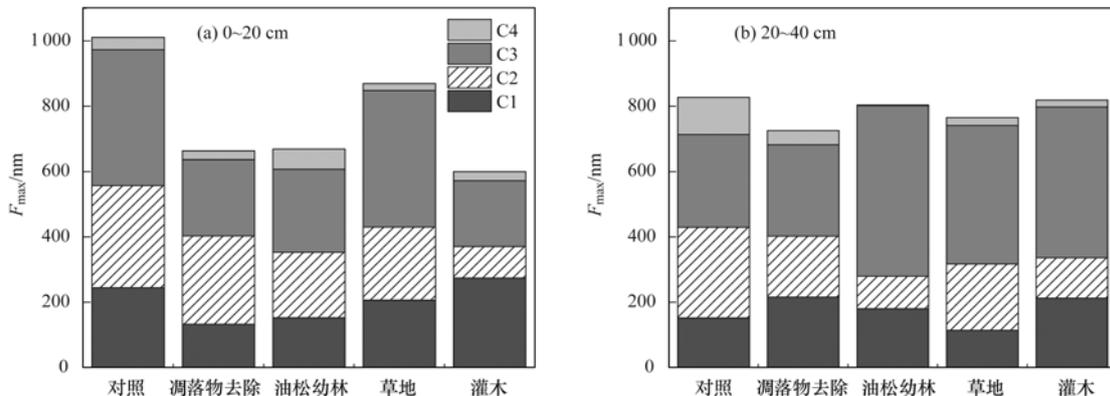


图 5 SDOM 中 4 种荧光组分相对比例

Fig. 5 Relative proportion of four fluorescent components of SDOM

林的 SDOM 主要以腐殖质物质为主, 占比为 33.65%~64.93%。随着土层加深, C3 组分所占的比例也在增加, 由 39.24% 提升至 49.92%, 即腐殖质物质含量增加。

### 3 讨论

3.1 不同管理措施对土壤水溶性有机碳含量的影响  
表层的水溶性有机碳含量丰富, 随土壤层的加

深,水溶性有机碳有减少的趋势<sup>[33]</sup>.本研究结果与其相似,不同管理措施 0~20 cm 土层土壤水溶性有机碳含量 38.03~86.05 mg·kg<sup>-1</sup>,高于 20~40 cm 土层(37.98~45.55 mg·kg<sup>-1</sup>),随土层加深而减少,主要原因在于表层土壤有机质和养分的含量高,有良好的通气性,有利于微生物生长繁殖,加速了外界有机质向土壤中的输入和土壤中有机碳的分解速率,同时土壤水溶性有机碳属于活性有机碳组分,在土壤剖面中遇水易向下层淋溶.这与张义凡等<sup>[12]</sup>对宁夏东北部不同荒漠草原植被土壤活性有机碳随土层加深而减少的研究结果一致.不同管理措施下 20~40 cm 土层 WSOC/SOC 值(0.51%~0.72%)相对较高,可能是由于土壤活性有机碳从表层向下层迁移的过程中,为下层土壤提供有机碳源,同时为下层土壤中微生物提供养分和能量,增加微生物活性,促进下层土壤有机质分解,从而增加下层活性有机碳占土壤有机碳的比重<sup>[34]</sup>.土壤水溶性有机碳作为活性有机碳的一部分,其占土壤有机碳的比重,也会随之增加,导致下层 WSOC/SOC 较大.0~20 cm 土层 WSOC/SOC 值在 0.29%~0.60% 范围,差异较大,表现为对照(0.60%)>灌木(0.45%)、凋落物去除(0.44%)、油松幼林(0.40%)>草地(0.29%),其差异原因可能是由于不同管理措施下土壤表层植物残体或者凋落物数量差异较大造成.本研究中不同管理措施对土壤水溶性有机碳含量的影响也十分明显.由于灌木的凋落物和根系以及油松幼林的根系向土壤输送大量有机物质,致使土壤积累了较多的有机碳并支持了较大的微生物生物量,有利于土壤有机碳固持<sup>[35]</sup>,因而,灌木和油松幼林的土壤水溶性有机碳含量高于其他管理措施.

### 3.2 不同管理措施对土壤水溶性氮组分含量的影响

土壤水溶性氮的变化和水溶性碳的变化类似,这是因为土壤氮循环与碳循环存在偶联关系<sup>[36]</sup>.本研究结果中,不同管理措施水溶性氮素含量变化差异较大,随着土层加深,WSN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 WSON 含量总体上均有所降低.其中,不同管理措施对表层(0~20 cm)土壤水溶性氮素的影响明显高于 20~40 cm,特别是对照(未扰动的油松林)WSN 含量在 0~20 土层为 6.22 mg·kg<sup>-1</sup>,凋落物去除、油松幼林、草地和灌木的分别为 2.93、4.53、3.94 和 2.92 mg·kg<sup>-1</sup>,对对照明显高于其他管理措施.有研究表明,土壤中的氮素主要以有机态的形式存在,凋落物分解是土壤氮循环的重要来源<sup>[37]</sup>,凋落物分解环境的变化可能改变凋落物分解速率,从而改变碳和氮的释放速率.也有研究发现,凋落物分解是控制表层

土壤可溶性氮动态的主要因素<sup>[4]</sup>,特别是凋落物中的碳质量和半纤维素质量,凋落物分解主要是半纤维素和木质素进行分解,其降解性相对较低,有利于水溶性有机碳和水溶性氮素的积累<sup>[38]</sup>.皆伐后,未扰动的油松林表层保留了丰富的凋落物,提供养分进入土壤,增强土壤持水能力,有效控制养分流失,增加土壤碳氮含量,WSN 作为土壤氮组分的活跃部分,含量也会随之增加.

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 可以直接被农作物吸收利用.不同管理措施对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量的影响不明显.其中,油松幼林、草地和灌木的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量高于凋落物去除,与刘俊第等对植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响对土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量研究结果一致<sup>[39]</sup>,这是因为土壤主要来源于微生物对铵的硝化作用,皆伐后,自然恢复过程中,随着土壤环境进一步得到改善,增加了微生物活性和数量,有利于土壤进行硝化作用,导致土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量有所增加.

本研究中,不同管理措施下 WSON 含量在 0~20 cm 土层为 0.57~2.5 mg·kg<sup>-1</sup> 总体高于 20~40 cm 土层(0.60~1.97 mg·kg<sup>-1</sup>).不同管理措施对 0~20 cm 土层 WSON 占 WSN 的比例影响较大,油松幼林(56.15%)>草地(43.40%)>凋落物去除(38.80%)>灌木(19.44%)>对照(9.19%).对照 WSON 占 WSN 的比例较小,主要原因为皆伐后,未扰动的油松林表层富含凋落物,而凋落物中较难分解的木质素和多酚等会影响 WSON 的释放.油松幼林和草地两种管理措施下 WSON 占 WSN 的比例较大,一方面可以改善土壤养分状况,但另一方面,过多的 WSON 会造成有机氮流失,从而污染环境<sup>[40]</sup>.

### 3.3 不同管理措施对 SDOM 的影响

一般地,总荧光强度可以用来表征 DOM 浓度的高低<sup>[41]</sup>.本研究中,0~20 cm 土层的 SDOM 荧光强度值高于 20~40 cm 土层,由 39.24% 提升至 49.92%.产生这种现象的主要原因是 SDOM 具有迁移性,在迁移过程中 DOM 会出现“分馏”现象,即疏水性组分吸附在土壤表层,亲水性组分会随着一些有机物向深层迁移;在 SDOM 向地下迁移时容易与金属离子等形成络合物,络合物中的氢键可能导致荧光物质产生淬灭现象,严重影响它的荧光强度<sup>[30]</sup>.已有的相关研究结果与本研究一致,随着土层深度增加,荧光强度值会逐渐减小,这主要与 SDOM 的淋溶、生物降解或吸附有关,矿物质中疏水性组分被优先吸附在土壤表层,植物根系主要存在于土壤表层,与为土壤提供有机质等有关<sup>[42]</sup>.荧光参数对 SDOM 的来源具有一定的指示作用<sup>[43]</sup>.本研究中,对照、油松幼林、灌木以及草地这 4 种处理

方式中, C3 组分的类腐殖质富里酸类荧光物质所占比例相对较大, 占比为 33.65%~64.93%, 主要是因为对照、油松幼林、灌木以及草地凋落物相对较多, 在土壤微生物的作用下, 再加上良好的生长环境, 将其分解转化为腐殖质类物质, 最终导致腐殖质物质成为 SDOM 主要成分。腐殖质类物质(类富里酸和类腐殖酸)一般来自植物残体的腐烂及其降解产物, 凋落物分解刺激了微生物活性, 微生物的分解作用对腐殖质类荧光物质的增加具有一定贡献, 随微生物死亡消耗蛋白质降低、腐殖酸类物质积累<sup>[44]</sup>。

#### 4 结论

不同管理措施对土壤水溶性碳氮含量变化有所影响, 且具有显著差异。油松幼林与灌木对表层土壤水溶性有机碳含量影响较大, 油松幼林对土壤水溶性氮含量影响较大。基于 EEM-PARAFAC 分析, 不同管理措施 SDOM 含有 4 种组分, 主要分为类腐殖质、类蛋白和可溶性微生物代谢产物三大类, 腐殖质为 SDOM 的主要成分。其中, 油松幼林的 SDOM 腐殖质含量较高, 主要来源于凋落物分解。不同管理措施下, 油松幼林和灌木通过影响土壤水溶性碳氮含量变化, 提高土壤水溶性有机碳以及水溶性氮组分的数量, 改变土壤有机物的结构组成, 加深腐殖化程度, 同时有利于其在土壤中的迁移转化, 进一步改善土壤质量。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Birdsey R A, Plantinga A J, Heath L S. Past and prospective carbon storage in United States forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 1993, **58**(1-2): 33-40.
- [ 2 ] Grayston S J, Prescott C E. Microbial communities in forest floors under four tree species in coastal British Columbia[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(6): 1157-1167.
- [ 3 ] 景航, 刘国彬, 王国梁, 等. 恢复措施对皆伐油松林团聚体活性有机碳含量的影响——以黄土丘陵区松峪沟流域为例[J]. *中国水土保持科学*, 2017, **15**(1): 113-120.
- Jing H, Liu G B, Wang G L, et al. Effects of restoration measure on labile organic carbon in aggregates after clear-cutting Chinese pine forest: a case study of Songyugou Watershed of the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2017, **15**(1): 113-120.
- [ 4 ] Zhou W J, Sha L Q, Schaefer D A, et al. Direct effects of litter decomposition on soil dissolved organic carbon and nitrogen in a tropical rainforest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **81**: 255-258.
- [ 5 ] Jiang J, Li Y K, Wang M Z, et al. Litter species traits, but not richness, contribute to carbon and nitrogen dynamics in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 931-941.
- [ 6 ] 黄和平, 杨劼, 毕军, 等. 皇甫川流域植被恢复对改善土壤肥力的作用研究[J]. *水土保持通报*, 2005, **25**(3): 37-40.
- Huang H P, Yang J, Bi J, et al. Effects of vegetative restoration on improving soil fertility in Huangfuchuan basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2005, **25**(3): 37-40.
- [ 7 ] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. *水土保持学报*, 2003, **17**(4): 38-41.
- Zhang J H, Chang Q R, Jia K L, et al. Effect of plant restoration to soil fertility quality on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, **17**(4): 38-41.
- [ 8 ] 杨秀云, 韩有志, 宁鹏, 等. 砍伐干扰对华北落叶松林下土壤有效氮含量空间异质性的影响[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(2): 430-439.
- Yang X Y, Han Y Z, Ning P, et al. The effect of cutting disturbance on spatial heterogeneity of soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in a larch (*Larix principis-rupprechtii*) forest[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(2): 430-439.
- [ 9 ] 裴隆翠, 陈月明, 张鑫, 等. 红松人工林植被恢复对土壤活性有机碳组分影响的时效性[J]. *东北林业大学学报*, 2019, **47**(6): 21-25.
- Pei L C, Chen Y M, Zhang X, et al. Effects of Vegetation restoration of *Pinus koraiensis* plantation on timeliness of soil active organic carbon structure[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2019, **47**(6): 21-25.
- [ 10 ] 沈宏, 曹志洪, 胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(3): 32-38.
- Shen H, Cao Z H, Hu Z Y. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, **18**(3): 32-38.
- [ 11 ] 李亚男, 武俊男, 高强, 等. 不同种植年限苏打盐碱型水稻土水溶性有机物三维荧光光谱特征分析[J]. *华南农业大学学报*, 2017, **38**(1): 44-49.
- Li Y N, Wu J N, Gao Q, et al. Three-dimensional fluorescence spectral characteristics of water extractable organic matter in soda saline-alkaline paddy soil with different planting years of rice[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2017, **38**(1): 44-49.
- [ 12 ] 张义凡, 陈林, 李学斌, 等. 不同荒漠草原植被根际与非根际土壤养分及碳库管理指数特征[J]. *草业学报*, 2017, **26**(8): 24-34.
- Zhang Y F, Chen L, Li X B, et al. Soil nutrients and carbon management indexes in the rhizosphere versus non-rhizosphere area of different plant species in desert grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, **26**(8): 24-34.
- [ 13 ] Bastida F, Barberá G G, García C, et al. Influence of orientation, vegetation and season on soil microbial and biochemical characteristics under semiarid conditions[J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **38**(1): 62-70.
- [ 14 ] 牛颖权, 李军, 杨曦, 等. 天津盐渍化土壤水溶性氮素组成及分布特征[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(2): 169-176.
- Niu Y Q, Li J, Yang X, et al. Composition and distribution of water-soluble nitrogen in salinized soils in Tianjin City, China[J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(2): 169-176.
- [ 15 ] Murphy D V, Macdonald A J, Stockdale E A, et al. Soluble organic nitrogen in agricultural soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**(5-6): 374-387.
- [ 16 ] Qualls R G, Richardson C J. Factors controlling concentration, export, and decomposition of dissolved organic nutrients in the Everglades of Florida[J]. *Biogeochemistry*, 2003, **62**(2): 197-229.
- [ 17 ] Nie S A, Zhao L X, Lei X M, et al. Dissolved organic nitrogen distribution in differently fertilized paddy soil profiles: implications for its potential loss[J]. *Agriculture, Ecosystems &*

- Environment, 2018, **262**: 58-64.
- [18] Xing S H, Chen C R, Zhang H, *et al.* Genotype and slope position control on the availability of soil soluble organic nitrogen in tea plantations[J]. Biogeochemistry, 2011, **103**(1-3): 245-261.
- [19] Xing S H, Chen C R, Zhou B Q, *et al.* Soil soluble organic nitrogen and active microbial characteristics under adjacent coniferous and broadleaf plantation forests[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, **10**(4): 748-757.
- [20] 袁吉, 黄美玉, 麦淑媛, 等. 华西雨屏区麻栎人工混交林凋落物水溶性碳、氮、磷含量及化学计量比随物候节律的变化特征[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(2): 376-383.
- Yuan J, Huang M Y, Mai S Y, *et al.* Changes in water-soluble carbon, nitrogen and phosphorus in fresh litter of *Quercus acutissima* mixed plantation with phenological rhythms in Rainy Zone of West China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(2): 376-383.
- [21] 冯伟莹, 朱元荣, 吴丰昌, 等. 太湖水体溶解性有机质荧光特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 475-482.
- Feng W Y, Zhu Y R, Wu F C, *et al.* The fluorescent characteristics and sources of dissolved organic matter in water of Tai Lake, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 475-482.
- [22] 周艳翔, 吕茂奎, 谢锦升, 等. 深层土壤有机碳的来源、特征与稳定性[J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, **8**(1): 48-55.
- Zhou Y X, Lyu M K, Xie J S, *et al.* Sources, characteristics and stability of organic carbon in deep soil[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, **8**(1): 48-55.
- [23] 郭卫东, 程远月, 吴芳. 海洋荧光溶解有机物研究进展[J]. 海洋通报, 2007, **26**(1): 98-106.
- Guo W D, Cheng Y Y, Wu F. An overview of marine fluorescent dissolved organic matter[J]. Journal of Marine Science Bulletin, 2007, **26**(1): 98-106.
- [24] Osburn C L, Handsel L T, Mikan M P, *et al.* Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. Environmental Science & Technology, 2012, **46**(16): 8628-8636.
- [25] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, **35**(9): 1231-1243.
- [26] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40**(6): 706-719.
- [27] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. Analytical Methods, 2013, **5**(23): 6557-6566.
- [28] Yu H R, Qu F S, Chang H Q, *et al.* Understanding ultrafiltration membrane fouling by soluble microbial product and effluent organic matter using fluorescence excitation-emission matrix coupled with parallel factor analysis [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, **102**: 56-63.
- [29] Kothawala D N, Von Wachenfeldt E, Koehler B, *et al.* Selective loss and preservation of lake water dissolved organic matter fluorescence during long-term dark incubations[J]. Science of the Total Environment, 2012, **433**: 238-246.
- [30] 警园园, 孔范龙, 郝敏, 等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(12): 3871-3881.
- Zi Y Y, Kong F L, Xi M, *et al.* Three dimensional fluorescent characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in Jiaozhou Bay coastal wetlands, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(12): 3871-3881.
- [31] 柴立伟, 刘梦娇, 蒋大林, 等. 北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4806-4814.
- Chai L W, Liu M J, Jiang D L, *et al.* Fluorescence properties of Glomalin and its relationship with soil Physicochemical characteristics in different regions of Beijing City [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4806-4814.
- [32] 颜秉斐, 彭剑峰, 邓齐玉, 等. 白塔堡河水体 DOM 分布特征及来源[J]. 环境工程技术学报, 2019, **9**(3): 225-232.
- Yan B F, Peng J F, Deng Q Y, *et al.* DOM distribution characteristics and source analysis of Baitabu River[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, **9**(3): 225-232.
- [33] 周丽甜, 耿玉清, 王玲, 等. 人工油松林土壤线虫密度垂直分布及其影响因素[J]. 西北林学院学报, 2017, **32**(1): 43-47.
- Zhou L T, Geng Y Q, Wang L, *et al.* Vertical distribution of soil nematodes density and the its driving factors in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, **32**(1): 43-47.
- [34] 刁丹, 旷远文. 广州城郊森林公园常绿阔叶林土壤有机碳及组分特征[J]. 生态科学, 2019, **38**(1): 226-232.
- Xi D, Kuang Y W. Characteristics of soil organic carbon and its components in evergreen broadleaved forests of suburban forest parks in Guangzhou [J]. Ecological Science, 2019, **38**(1): 226-232.
- [35] 李英, 韩红艳, 王文娟, 等. 黄淮海平原不同土地利用方式对土壤有机碳及微生物呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2017, **26**(1): 62-66.
- Li Y, Han H Y, Wang W J, *et al.* Effects of different land use types on soil organic carbon and microbial respiration in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, **26**(1): 62-66.
- [36] Gårdenäs A I, Agren G I, Bird J A, *et al.* Knowledge gaps in soil carbon and nitrogen interactions-from molecular to global scale[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 702-717.
- [37] 孔青, 王传宽, 王兴昌. 植物残体去除对帽儿山温带落叶林土壤碳、氮、磷化学计量特征及其相关因子的影响[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(7): 2173-2182.
- Kong Q, Wang C K, Wang X C. Effects of detritus removal on soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and related factors in a temperate deciduous forest in the Maoershan Mountain, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(7): 2173-2182.
- [38] 白潇, 张世熔, 钟钦梅, 等. 中国东部区域土壤活性有机碳分布特征及其影响因素[J]. 生态环境学报, **27**(9): 1625-1631.
- Bai X, Zhang S R, Zhong Q M, *et al.* Distribution and influencing factors of soil labile organic carbon among the east area of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, **27**(9): 1625-1631.
- [39] 刘俊第, 刘骏, 胡亚林, 等. 植被恢复对红壤侵蚀区土壤氮组分的影响[J]. 土壤通报, 2019, **50**(1): 115-123.
- Liu J D, Liu J, Hu Y L, *et al.* Effect of vegetation restoration on soil nitrogen fractions in eroded red soil area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, **50**(1): 115-123.

- [40] 谢秉楼, 吴家森, 徐秋芳, 等. 覆盖与施肥处理对雷竹林土壤水溶性有机氮的影响[J]. 土壤学报, 2009, **46**(6): 1168-1171.  
Xie B L, Wu J S, Xu Q F, *et al.* Effect of different fertilization and mulching on water soluble organic N of the soil under *Phyllostachy praecox* stands[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(6): 1168-1171.
- [41] 王晓江, 黄廷林, 李楠, 等. 峡谷分层型水源水库表层沉积物溶解性有机物光谱特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(6): 1625-1635.  
Wang X J, Huang T L, Li N, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter in the surface sediments from a canyon-shaped, stratified, water-source reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(6): 1625-1635.
- [42] Wang Y L, Yang C M, Zou L M, *et al.* Spatial distribution and fluorescence properties of soil dissolved organic carbon across a riparian buffer wetland in Chongming Island, China [J]. Pedosphere, 2015, **25**(2): 220-229.
- [43] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 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)[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1751-1759.  
Li Y, Wei H J, Wang K, *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- [44] 孙小琳, 孔范龙, 李悦, 等. 胶州湾滨海湿地枯落物分解对土壤活性有机碳含量及其三维荧光特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, **30**(2): 563-572.  
Sun X L, Kong F L, Li Y, *et al.* Effects of litter decomposition on contents and three-dimensional fluorescence spectroscopy characteristics of soil labile organic carbon in coastal wetlands of Jiaozhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(2): 563-572.



## CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM <sub>2.5</sub> of Typical Regions in China Based on GAM Model .....	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui ( 499 )
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China .....	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. ( 510 )
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM <sub>2.5</sub> Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain .....	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. ( 520 )
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Nanjing Jiangbei New Area .....	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. ( 529 )
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM <sub>2.5</sub> ) in Northern Suburb of Nanjing .....	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. ( 537 )
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM <sub>2.5</sub> at Background Site of Yangtze River Delta .....	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. ( 554 )
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Changchun City, Autumn of 2017 .....	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. ( 564 )
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM <sub>2.5</sub> Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018 .....	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. ( 574 )
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province .....	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. ( 587 )
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province .....	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na ( 600 )
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM <sub>2.5</sub> with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS) .....	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. ( 609 )
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing .....	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. ( 620 )
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China .....	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. ( 630 )
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives .....	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao ( 638 )
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City .....	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu ( 647 )
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms .....	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. ( 656 )
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030 .....	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. ( 665 )
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine .....	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. ( 674 )
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin .....	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. ( 682 )
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River .....	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. ( 691 )
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River .....	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. ( 702 )
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China .....	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. ( 713 )
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea .....	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. ( 728 )
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai .....	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. ( 734 )
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an .....	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. ( 743 )
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure .....	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. ( 750 )
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation .....	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. ( 756 )
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite .....	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. ( 763 )
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism .....	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. ( 773 )
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar .....	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. ( 784 )
Phosphate Adsorption from Water on CaO <sub>2</sub> -loaded Magnetic Diatomite .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. ( 792 )
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach .....	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. ( 801 )
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed .....	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. ( 809 )
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process .....	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. ( 815 )
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge .....	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. ( 823 )
Denitrification Process and N <sub>2</sub> O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL .....	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. ( 831 )
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria .....	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. ( 839 )
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application .....	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. ( 849 )
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. ( 856 )
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules .....	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. ( 867 )
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi .....	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. ( 876 )
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau .....	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. ( 886 )
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta .....	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. ( 895 )
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau .....	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. ( 905 )
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types .....	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. ( 914 )
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil .....	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. ( 922 )
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism .....	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. ( 932 )
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds .....	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. ( 941 )
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry .....	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. ( 952 )
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium .....	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. ( 962 )
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars .....	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. ( 970 )
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA .....	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. ( 979 )
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks .....	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. ( 986 )
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors .....	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. ( 997 )
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces .....	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. ( 1005 )