

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表面污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
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	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

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

柴立伟¹, 刘梦娇², 蒋大林¹, 樊灏¹, 曹晓峰², 黄艺^{1*}

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055)

摘要: 球囊霉素相关土壤蛋白是一种菌根真菌产生的耐热糖蛋白, 因其与微生物密切联系而常用来表征土壤的健康状况。由于球囊霉素相关土壤蛋白的提取过程中容易产生干扰物质, 影响了这个指标在土壤状态评估方面的进一步应用。本研究采集了北京北部山区、中部城区以及南部郊区的土壤样品, 使用三维荧光-平行因子模型技术解析球囊霉素相关土壤蛋白中可溶性有机物的荧光特征, 将土壤类球囊霉素蛋白分解为 5 个荧光组分, 分别为微生物源 UVC 腐殖质类物质、UVA 人为来源腐殖质类物质、微生物来源的氧化醌物质、土壤富里酸类物质和类蛋白质, 蛋白质在其中所占比例为 0~20%。不同采样区域的荧光特征比较显示, 球囊霉素土壤相关土壤蛋白的 5 个荧光组分总体稳定, 与山区相比较, 城区和郊区的类蛋白质组分受人类活动影响降低, 氧化醌类物质组分含量升高。不同采样点的理化特征结果显示, 以城市建设和耕作为代表的人类活动减少了土壤中的含水率、有机质含量以及总氮含量。比较球囊霉素相关土壤蛋白的荧光特征与土壤理化特征的相关性结果显示, 球囊霉素土壤相关蛋白浓度、UVA 腐殖质组分、UVC 腐殖质组分与土壤有机质含量、总氮含量显著相关, 具有表征土壤健康状况的潜力。

关键词: 城市土壤; 三维荧光; 平行因子分析; 土壤理化性质; 球囊霉素相关土壤蛋白

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4806-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606113

Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City

CHAI Li-wei¹, LIU Meng-jiao², JIANG Da-lin¹, FAN Hao¹, CAO Xiao-feng², HUANG Yi^{1*}

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Glomalin-related soil proteins (GRSP), which has been used as a presumable biological indicator of soil quality, is of vital ecological importance. In this research, we tested the GRSP content and physicochemical property of soils collected in mountain, urban and suburb areas of Beijing City. Besides, the fluorescence property of GRSP was also studied by using EEM-PARAFAC. The results showed that GRSP could be decomposed into five compounds, terrestrial humic-like substances UVA, terrestrial humic-like substances UVC, oxidized quinones, soil fulvic acid and amino acids. The GRSP content and protein-like fluorescence substances in urban and suburb areas significant decreased and oxidized quinones content elevated in comparison with those in mountain area. The physicochemical property was also shaped by urbanization. Compare to mountain area, moisture content, total organic matters and total nitrogen significantly decreased in urban area soil and suburb area. GRSP content, terrestrial humic-like substances UVA and oxidized quinones content showed significant correlation with soil organic matter and total nitrogen. Base on that, an integrated index system mainly consisting of GRSP concentration and C1 component and C3 component was recommended to evaluate the soil health status.

Key words: urban soil; EEM; PARAFAC; soil physicochemical property; glomalin-related soil proteins (GRSP)

城市是人类与自然相互作用的综合耦合系统 (Coupled Human and Natural Systems)^[1], 城市土壤是人类活动的基础, 人类活动驱动的城市小气候、大气化学、水文、营养盐循环等因素直接作用于城市土壤, 改变土壤的物理化学性质, 影响土壤的生态结构和健康状况。

土壤健康状态指的是土壤能够正常提供各种生态服务功能的状态, 如维持生产植物性和动物性产品, 改善水和大气的能力等^[2]。大量研究表明, 土壤

微生物与土壤健康状态的维持有着紧密的关系^[3]。球囊霉素相关土壤蛋白 (glomalin-like soil proteins, GRSP) 是一种耐热性糖蛋白^[4~7], 具有改善土壤结构、固定土壤中有毒离子的功能^[8], 因其在环境中存在状态稳定而被认为是土壤碳库的重要组成部分

收稿日期: 2016-06-16; 修订日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271325)

作者简介: 柴立伟 (1990~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水环境控制与环境生物技术, E-mail: chailiwei@pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: yhuang@pku.edu.cn

分。有充分的证据表明,球囊霉素相关土壤蛋白的主要成分蛋白质来源于以丛枝菌根真菌为代表的微生物代谢活动^[5, 9, 10],因而广泛用于土壤健康状态的表征^[10, 11]。

目前,关于土壤球囊霉素相关土壤蛋白的定性和定量研究,使用较多的方法是聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)^[12]、酶联免疫吸附(ELISA)^[4]以及考马斯亮蓝显色^[13]等。然而,Jorge-Araújo 等^[14]的研究表明传统方法提取的球囊霉素相关土壤蛋白,因其包含大量其他有色有机物(如腐殖质类物质)成分,易干扰蛋白定量导致蛋白质含量被高估,影响其评估土壤状态的准确性和科学性,因而实现球囊霉素相关土壤蛋白中蛋白质成分与其他干扰成分的有效区别,对进一步研究球囊霉素相关土壤蛋白的生态效应及其对土壤健康状态的表征作用有着重要的意义。

三维荧光光谱(EEM)与平行因子模型(PARAFAC)联用技术,通过分离不同有机物在不同波长段的荧光特征,识别有机物的组分和含量^[15, 16],广泛运用于环境中有色有机物的检测和识别^[15, 17, 18]。Hudson 等^[19]讨论了使用 PARAFAC 模型代替 BOD₅ 指标评估水体健康状况的可能性,认为相比较于传统的物理化学检测手段,EEM-PARAFAC 指标更为简单快速。Jorge-Araújo 等^[14]率先使用三维荧光分析土壤样品组分,从中识别出了腐殖酸。Wang 等^[20]使用平行因子方法建模,从土壤样品中得到的球囊霉素相关土壤蛋白样品中识别出了多种有机物,丰富了人们对球囊霉素相关土壤蛋白的认识。

为了解城市发展过程中人类活动对城市土壤健康状况的影响,本研究采集了北京市山区、城区和郊区的土壤样品,分析土壤样品物理化学指标的同时,使用 EEM-PARAFAC 技术识别土壤样品中球囊霉素相关土壤蛋白的荧光组分特征,探讨使用球囊霉素相关土壤蛋白指标评估土壤健康状况的可能性。

1 材料与方法

1.1 调查地概况和取样方法

本研究按照山区、城区和郊区的采样方案,将所采集的土壤分为 3 类,山区土壤采集于北京市北五环外的山区,共采集 24 份土壤样品;城区土壤采集于北京市城区内没有施工的路边绿化带草地土壤,共采集 22 份土壤样品;郊区土壤采集于北京市南六环外大兴区和通州区南部郊区的 4 个区域,区

域内主要的土地利用类型为耕地,共采集 20 份土壤样品。每个样点按照 1/4 样圆法进行取样^[21],取样时去除表面 3 cm 附着物和植被以及部分土壤,土壤装入锡箔纸袋密封带回实验室。避光晾干研磨后,过 2 mm 筛子,检测前避光 4℃ 保存,所有检测在一个月內完成。

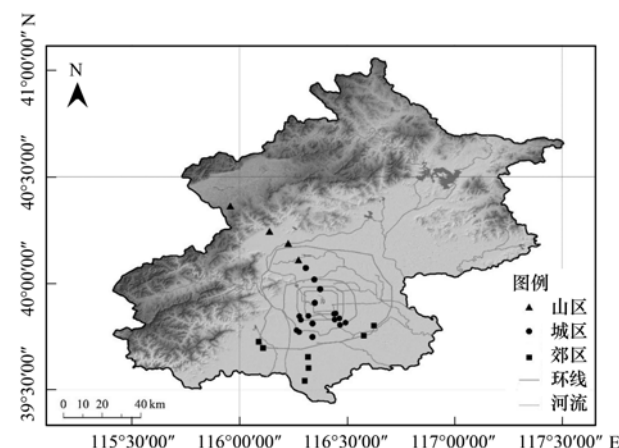


图1 北京市采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites in Beijing

1.2 主要的试剂和仪器

本研究使用的试剂购置于国药集团化学试剂有限公司,纯度均为分析纯。所使用仪器包括:721 可见分光光度计(上海菁华科技仪器有限公司),2600 + 紫外可见分光光度计(日本岛津公司),932 火焰原子吸收分光光度计(澳大利亚 GBC 科学仪器公司),AL204 电子分析天平(瑞士梅特勒-托利多公司),Cary 三维荧光检测仪(美国瓦里安公司)。

1.3 土壤物理化学性质测定

测定的土壤物理性质包括土壤密度和含水率。密度采用环刀法测定,含水率按照烘干法测定,检测方法见于土壤农业化学分析方法^[22]。土壤的化学性质包括 pH、有机质、全钾、全氮、全磷以及水解性氮。pH 的测定使用复合甘汞电极法测定,水土比为 2.5:1。有机质采用重铬酸钾法测定,全钾采用火焰原子分光光度计测定,全氮采用半微量开氏法,全磷采用钼锑抗比色法,水解性氮使用容量法测定。

1.4 土壤类球囊霉素的提取与蛋白浓度检测

球囊霉素相关土壤蛋白的提取按照 Janos 等^[23]改进过的提取方法进行,1 g 过筛土壤加入 8 mL 碱性柠檬酸钠提取液(50 mmol·L⁻¹ 柠檬酸溶液, pH = 8.0),高压灭菌锅 121℃ 热提 1 h, 6 000 r·min⁻¹ 离心 4 min 取上清液,提取液呈现标准的红棕色,以上步骤重复若干次,直到上清液完全变为无色为止。

提取的球囊霉素相关土壤蛋白使用酸沉降法纯

化^[20],具体步骤为:收集到的蛋白粗提液加入 0.1 mol·L⁻¹ 盐酸溶液直到 pH 值降至 2.1,6 000 r·min⁻¹ 离心 4 min,去除上清液,加入 0.1 mol·L⁻¹ NaOH 溶液中直到沉淀完全溶解,提纯后的蛋白样品保存于 4℃ 冰箱,后续检测在一周内完成。

球囊霉素相关土壤蛋白浓度使用 Bradford 方法检测,以牛血清蛋白为标准蛋白质^[24]。

1.5 三维荧光 (EEM) 检测以及平行因子模型 (PARAFAC model)

为了避免浓度过高导致的内滤效应干扰,所有提纯后的球囊霉素相关土壤蛋白荧光检测前使用超纯水稀释 50 倍保证所有样品的 254 nm 吸光度 (A_{254}) 小于 0.3^[14]。荧光检测参数如下:激发波长范围 210 ~ 550 nm,检测步长 5 nm;发射波长范围 250 ~ 650 nm,检测步长 2 nm。使用 Parker 提出的内滤效应校正模型对荧光信号进行内滤校正^[25~27]。检测每个样品的紫外-可见吸收光谱,检测波长范围为 200 ~ 700 nm,检测步长 1 nm。使用扫描得到的紫外-可见吸收光谱通过以下公式建立内滤效应校正矩阵 I^{IFE} 用于后续标准化:

$$I_{\lambda_{ex},\lambda_{em}} = 10^{0.5(A_{\lambda_{ex}}+A_{\lambda_{em}})}$$

原始数据 EEM 矩阵与 I^{IFE} 的张量积即为内滤效应校正后的矩阵 F^{IFE} :

$$F^{IFE} = I \times F^{corr}$$

之后使用空白水样中提取得到的拉曼散射峰进行拉曼标准化转化,得到拉曼单位的荧光校正数据,记为 F^{cal} (RU),公式如下^[26]:

$$F^{cal} (RU) = \frac{1}{A_{rp}^{275}} F^{IFE}$$

平行因子模型建立:平行因子模型是一种多线性分解方法 (multi-linear decomposition methods),模型通过将三维数据解构为 3 个具有实际意义的载荷向量的向量积和残差的和,进而对数据进行更为简单的解释^[28, 29]。其公式如下:

$$X_{ijk} = \sum_{f=1}^F a_{if} b_{jf} c_{kf} + \varepsilon_{ijk}$$

$i = 1, \cdots, I; j = 1, \cdots, J; k = 1, \cdots, K$
式中, k 为样品数, i 为激发光波长数, j 为发射光波长数, X_{ijk} 表示第 k 个样品在第 i 个激发光激发下第 j 个发射波长的荧光值。在 PARAFAC 模型中 X 被分解成了 F 个荧光物质的荧光强度和 $\sum_{f=1}^F a_{if} b_{jf} c_{kf}$ 以及不能解释的残差部分 ε_{ijk} 。 $a_{1f}, \cdots, a_{if}$ 和 $b_{1f}, \cdots, b_{jf}$ 组成的向量 A_f 和 B_f 即为第 f 个因子的激发波和发射波的载荷 (loadings) 向量, $c_{1f}, \cdots, c_{kf}$ 即为第 F 个因子在不同样点的得分 (scores) 向量,此向量可以表征不同样品的特定荧光组分的相对浓度^[30]。

1.6 数据分析

实验数据的整理、编辑使用 Excel 完成;部分图的绘制使用 OriginPro 9 完成。平行因子模型的建立使用 Matlab 2012b 平台与 drEEM 工具包完成。相关性分析、总体大小的比较和单因素方差分析使用 SPSS 20 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤球囊霉素浓度及其荧光特征分析

模型使用 Stedman 提出的拆半生效 (half-split validation) 方法,所有用到的数据随机分为两组,分别使用随机初始化,当模型收敛判别准则 (convergence criteria, CC) 小于 10^{-8} 时表明模型生效,结果分析得到的 5 因子模型如图 2 所示,5 个因子分别记为 C1、C2、C3、C4、C5。使用 OpenFluor 数据库提供的比对工具和传统的区域分析对球囊霉素相关土壤蛋白的平行因子模型的 5 个因子的成分进行识别^[31],结果表明 (表 1),其中 C1、C2、C4 分别为微生物来源的 UVC 腐殖质 C1^[32],人为来源的 UVA 腐殖质 C2^[16~19] 和土壤富里酸物质 C4^[20]。通过与已经有报道的组分相比较,C3 组分峰位置与土壤中广泛存在的氧化醌类相似^[33],C5 组分峰位置与酪氨酸类蛋白质相似^[34]。

图 3 所示为不同采样区域球囊霉素相关土壤蛋白浓度以及使用平行因子模型所识别得到的 5 个因

表 1 球囊霉素相关土壤蛋白荧光组分成分特征¹⁾

Table 1 Fluorescent characteristics of GRSP

荧光组分	E_x/nm	E_m/nm	成分类型	文献
C1	340	450	UVC 腐殖类物质;微生物来源	[32]
C2	320	420	UVA 腐殖类物质;人为来源	[32, 35~37]
C3	250	450	氧化醌类;微生物来源	[33]
C4	300/430	510	土壤富里酸类物质	[38]
C5	260	390	类蛋白质 (酪氨酸)	[34]

1) E_x 、 E_m 分别表示局域 PARAFAC 确定的荧光物质对应的激发、发射波长

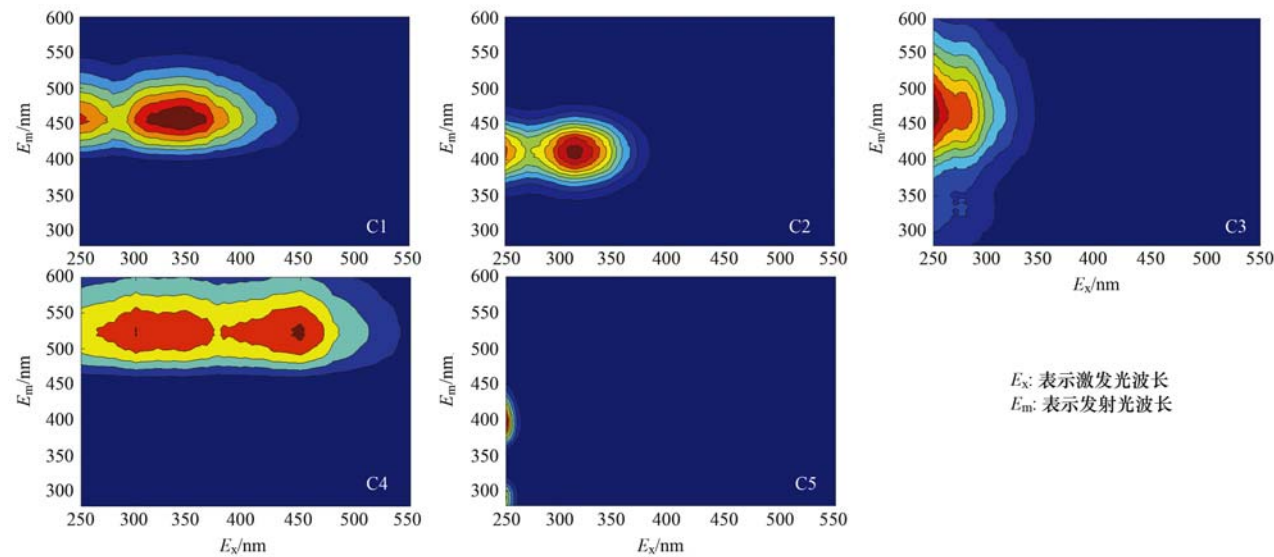
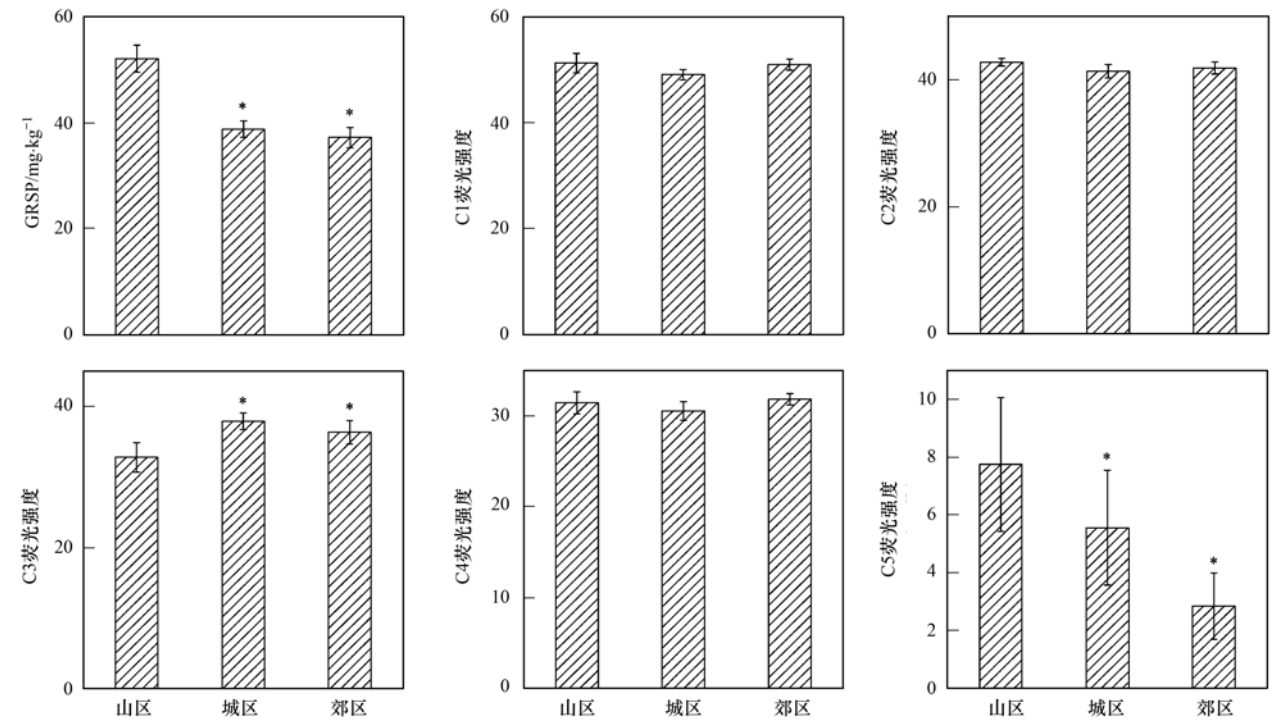


图 2 球囊霉素相关土壤蛋白中 5 因子模型等高线

Fig. 2 Contour pattern of GRSP's 5 components PARAFAC model

子的相对浓度比较(以 scores 向量为表征). 人为活动显著降低了球囊霉素相关土壤蛋白浓度. 不同荧光组分对总荧光强度的贡献率可以对不同的样品中不同 DOM 的性质进行定量描述. 山区,城区和郊区土壤中氧化醌类物质(C3)和类蛋白质物质(C5)的贡献率分别为 5% ~ 24.68% 和 0 ~ 19.72%; 12.28% ~ 29.58% 和 0 ~ 20.61%; 13.31% ~ 27.56% 和 0 ~

13.46%,其余 3 个荧光组分保持稳定(如图 3). 以人为活动为主要来源的腐殖质成分 C3 在城市内和耕地内含量高于自然样地,而类蛋白质组分 C5 受人类活动影响显著下降. 以上结果表明土壤类球囊霉素中的荧光组分较为稳定,人类活动显著提高了球囊霉素相关土壤蛋白中的人为源腐殖质成分的同时使得类蛋白质物质含量减少.



* 表示与山区比较有显著性差异 ($P < 0.05$)

图 3 不同样点的球囊霉素相关土壤蛋白浓度以及荧光组分得分比较

Fig. 3 GRSP concentration and 5 components scores in different sampling sites

2.2 不同采样区域的物理化学性质差异研究

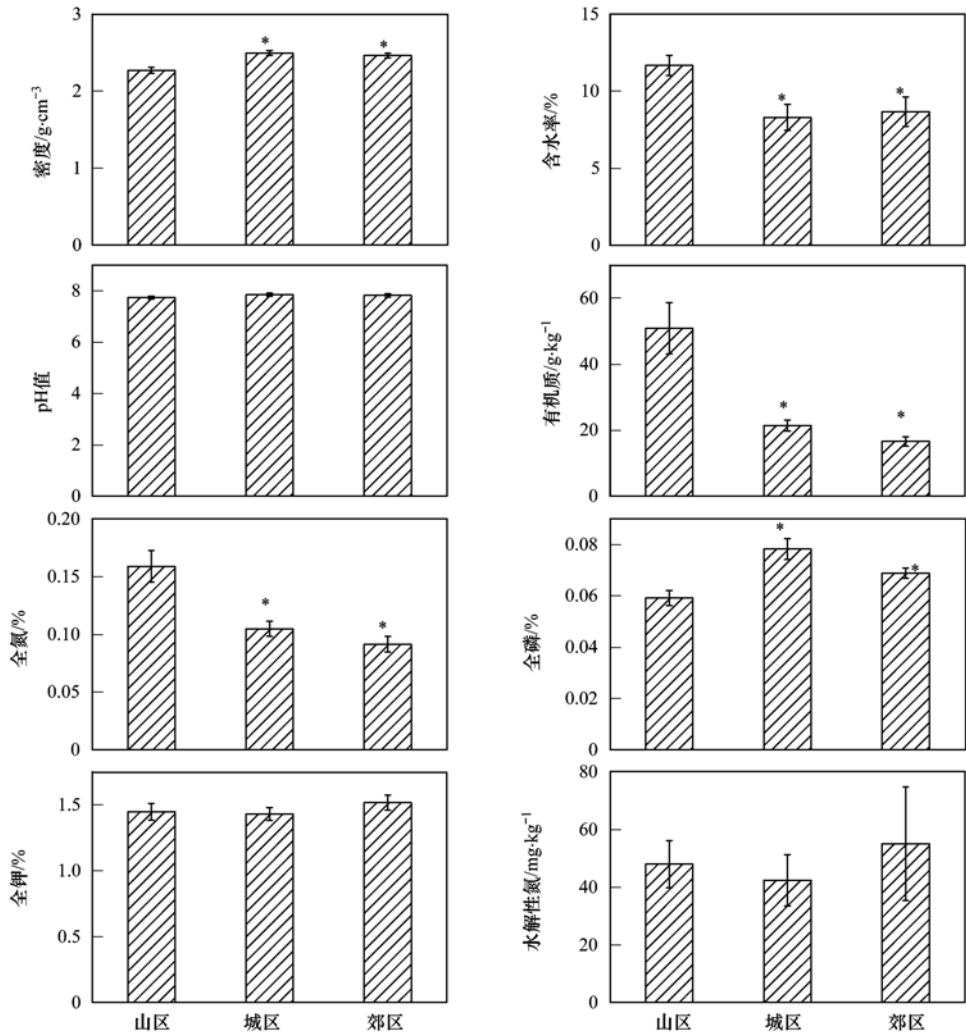
图4所示为不同采样区域土壤样品的物理化学性质,同山区等较为接近自然状态的土壤相比较,城区和郊区土壤密度、含水率、有机质含量、全氮、全磷等指标显著下降($P < 0.05$),其他如pH值,全钾和水解性氮没有显著性影响.具体地说,有机质含量总体趋势表现为山区>城区>郊区.城区土壤有机质含量均值为 $21.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,郊区土壤有机质含量均值为 $16.54\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,山区有机质含量 $50.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$.总氮含量呈现出相似的状态.城区土壤总氮含量为 0.191% ,郊区土壤总氮含量 0.169% ,山区土壤总氮含量为 0.306% .总磷含量表现出相反的趋势,城区土壤总磷 0.078% ,郊区土壤总磷 0.069% ,山区土壤总磷 0.059% .

2.3 球囊霉素相关土壤蛋白中的荧光组分与土壤物理化学性质的关系

比较球囊霉素相关土壤蛋白浓度及其荧光特征与土壤不同理化指标的相关性发现,球囊霉素相关土壤蛋白浓度和微生物源C1组分与土壤总有机质和总氮呈现正相关性($P < 0.001$),氧化酞类物质C3组分和土壤总有机质和总氮呈现负相关关系($P < 0.001$)(如图5),其相关系数如表2,其余相关性不显著.以上结果表明球囊霉素相关土壤蛋白与土

表2 球囊霉素相关土壤蛋白荧光组分成分(C1和C2)与土壤总氮、有机质的相关系数之间的关系

Table 2 Correlation analysis between GRSP, C1, C2 and soil organic matters and total nitrogen		
类型	相关系数	<i>P</i>
球囊霉素相关土壤蛋白 vs. 总有机质	0.54	<0.01
球囊霉素相关土壤蛋白 vs. 总氮	0.63	<0.01
C1 vs. 总有机质	0.52	<0.01
C1 vs. 总氮	0.65	<0.01
C3 vs. 总有机质	-0.71	<0.01
C3 vs. 总氮	-0.75	<0.01



* 表示与山区比较有显著性差异($P < 0.05$)

图4 北京市不同采样区域土壤的物理化学性质

Fig. 4 Soil physicochemical property of different sampling sites in Beijing

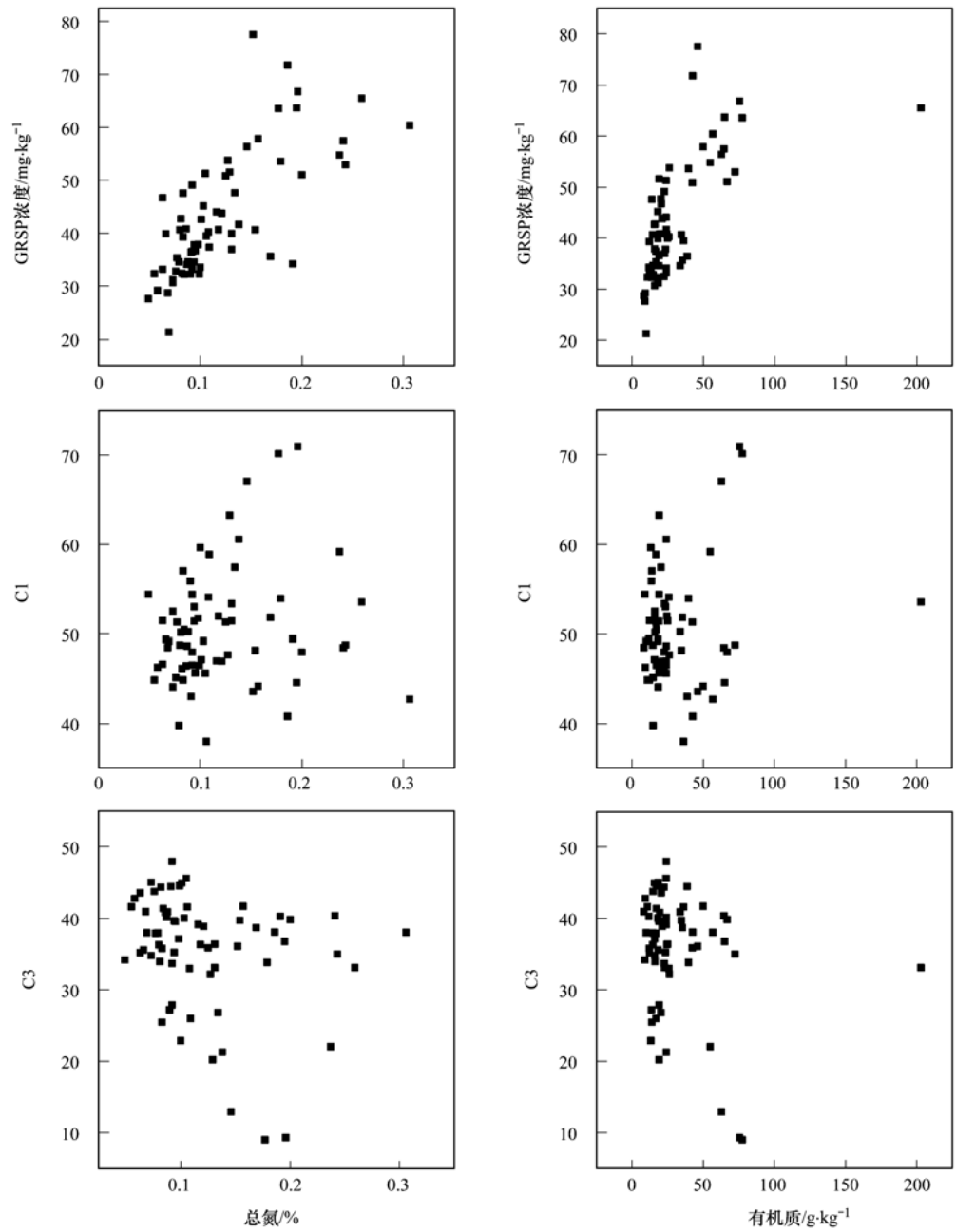


图5 总氮、总有机质与球囊霉素相关土壤蛋白浓度、荧光组分 C1 和 C3 的相关关系

Fig. 5 Correlation between total nitrogen, total organic matter and GRSP concentration, C1, C3 in PRAFAC model

壤有机质、总氮浓度正相关,土壤有机质和总氮可能同时受到微生物源组分 C1 和人为源 C3 的影响.

3 讨论

城市是人类活动最为集中的地区,人类活动对城市化的影响表现在城市小气候、城市水文、大气循环、营养盐的输入和输出等多个方面^[39, 40].但是城市化对土壤内部的碳循环和营养盐循环的作用尚不完全为人所知^[41].土壤有机质是土壤碳储量计算、土壤肥力和质量评估的重要指标.一般认为,

城市土壤有机质含量一般高于农业土壤和部分自然土壤^[41~43].然而本研究的结果表明城区土壤和郊区土壤的土壤有机质含量没有显著性差异,同时都低于山区接近自然状态的土壤的有机质含量(如图5).造成这种现象可能的原因是城市范围内土壤的空间异质性.按照城市功能区划分,一般来说城市内文教区土壤有机质含量高于交通区,同时交通区高于工业区和居民区^[39].本次采样的样点主要位于交通区,因而有机质含量呈现出城区和郊区小于更接近自然状态的山区.

此外,自然土壤中的有机质含量随着土壤深度的增加逐渐降低,然而城市土壤正好与此相反^[44],城市表层土壤受人类扰动的作用,深层土壤的有机质往往含量更高,本研究采样主要为淋溶层土壤,随着采样深度的增加,可能有机质含量也会增加。

土壤微生物是土壤内物质循环的主要参与者。球囊霉素相关土壤蛋白作为一种广泛接受的真菌代谢产物^[45],被认为与土壤微生物活动相关,因而球囊霉素相关土壤蛋白成分可以表征土壤的健康状态。例如,Preger 等^[46]的研究表明持续性的耕作会导致土壤球囊霉素相关土壤蛋白流失,土壤肥力下降。Vasconcellos 等^[10]使用球囊霉素相关土壤蛋白指标评估大西洋沿岸森林的土壤状况,结果表明球囊霉素相关土壤蛋白含量与土壤中的碳、氮以及微生物活性相关,进一步说明了球囊霉素相关土壤蛋白在碳循环和土壤肥力恢复过程中的重要作用。然而,关于球囊霉素相关土壤蛋白不同成分目前仍然存在争议,大量研究表明球囊霉素相关土壤蛋白提取物中含有可能干扰蛋白质定量的有机物成分^[14],同时不同地区土壤的干扰有机物表现出的空间异质性导致使用球囊霉素相关土壤蛋白浓度表征土壤健康状态可能不准确。一种更为稳妥的解决方案是使用酶联免疫吸附实验作为球囊霉素相关土壤蛋白的定量手段^[5, 23]。然而,受限于球囊霉素相关土壤蛋白的单克隆抗体获得不易因而不具有普遍意义。EEM-PARAFAC 技术使用更为广泛,并且三维荧光的检测具有方便、快速、前处理简单等优点。本研究证明 EEM-PARAFAC 技术分离球囊霉素相关土壤蛋白不同组分是可行的,使用球囊霉素相关土壤蛋白以及相应的荧光特征建立土壤健康状态的评价体系具有潜在的应用价值。尽管如此,Wang 等^[20]使用 EEM-PARAFAC 方法解析球囊霉素相关土壤蛋白的荧光组分,受土壤空间异质性的影响,无论从识别有机物的数量以及种类方面,该研究与本研究均有一定的差异,这表明尽管球囊霉素相关土壤蛋白及其荧光特征具有表征土壤健康状态的潜力,但是使其成为城市的评价体系还需要更多的数据以及更为稳定的模型支撑,包括建立不同土壤类型的球囊霉素相关土壤蛋白数据库,进一步增加样本量等手段。

4 结论

(1)使用三维荧光与平行因子模型联用的方法可以把球囊霉素相关土壤蛋白分解为 5 个独立组

分,分别为微生物源 UVC 腐殖质类物质,UVA 人为来源腐殖质类物质,微生物来源的氧化醌物质,土壤富里酸类物质和类蛋白质物质。其中类蛋白质所占比例为 0~20%。

(2)不同采样区域的球囊霉素相关土壤蛋白的荧光特征分析表明,同自然状态的土壤相比较,以城市建设和耕作为代表的人类活动显著提高了土壤类球囊霉素中的人为源腐殖质类物质 C3,而降低了类蛋白质物质 C5,这个结果与球囊霉素相关土壤蛋白浓度受人类活动影响降低相吻合。

(3)不同采样区的土壤物理化学指标表明人类活动造成了土壤质量的改变,表现在土壤含水率、有机质含量和总氮含量的下降。

(4)球囊霉素相关土壤蛋白浓度和人为源腐殖质类物质 C3 与土壤有机质以及总氮含量显著相关,以球囊霉素相关土壤蛋白和荧光组分的强度向量为标准的指标体系,具有表征土壤健康状况的潜力,能够更好地为土地资源的管理提供科学的依据。

参考文献:

- [1] Liu J G, Dietz T, Carpenter S R, *et al.* Complexity of coupled human and natural systems[J]. *Science*, 2007, **317**(5844): 1513-1516.
- [2] 杨晓霞,周启星,王铁良. 土壤健康的内涵及生态指示与研究展望[J]. *生态科学*, 2007, **26**(4): 374-380.
Yang X X, Zhou Q X, Wang T L. Connotation and ecological indicators of soil health and its research prospect[J]. *Ecological Science*, 2007, **26**(4): 374-380.
- [3] 周丽霞,丁明懋. 土壤微生物学特性对土壤健康的指示作用[J]. *生物多样性*, 2007, **15**(2): 162-171.
Zhou L X, Ding M M. Soil microbial characteristics as bioindicators of soil health[J]. *Biodiversity Science*, 2007, **15**(2): 162-171.
- [4] Wright S F, Franke-Snyder M, Morton J B, *et al.* Time-course study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots[J]. *Plant and Soil*, 1996, **181**(2): 193-203.
- [5] Gadkar V, Rillig M C. The arbuscular mycorrhizal fungal protein glomalin is a putative homolog of heat shock protein 60[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2006, **263**(1): 93-101.
- [6] 李涛,赵之伟. 丛枝菌根真菌产球囊霉素研究进展[J]. *生态学杂志*, 2005, **24**(9): 1080-1084.
Li T, Zhao Z W. Advances in researches on glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, **24**(9): 1080-1084.
- [7] 张英伟,柴立伟,王东伟,等. Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1169-1175.
Zhang Y W, Chai L W, Wang D W, *et al.* Effect of Ectomycorrhizae on heavy metals sequestration by thermostable protein in rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* under Cu and Cd stress[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 1169-1175.

- [8] 黄艺, 王东伟, 蔡佳亮, 等. 球囊霉素相关土壤蛋白根际环境功能研究进展[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(2): 232-236.
Huang Y, Wang D W, Cai J L, *et al.* Review of glomalin-related soil protein and its environmental function in the rhizosphere[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, **35**(2): 232-236.
- [9] Gillespie A W, Farrell R E, Walley F L, *et al.* Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, **43**(4): 766-777.
- [10] Vasconcellos R L F, Bonfim J A, Baretta D, *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil protein as potential indicators of soil quality in a recuperation gradient of the Atlantic forest in Brazil[J]. Land Degradation & Development, 2016, **27**(2): 325-334.
- [11] 贺学礼, 陈程, 何博. 北方两省农牧交错带沙棘根围 AM 真菌与球囊霉素空间分布[J]. 生态学报, 2011, **31**(6): 1653-1661.
He X L, Cheng C, He B. Spatial distribution of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin of *Hippophae rhamnoides* L. in farming-pastoral zone from the two northern provinces of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(6): 1653-1661.
- [12] Chen S N, Rillig M C, Wang W. Improving soil protein extraction for metaproteome analysis and glomalin-related soil protein detection[J]. Proteomics, 2009, **9**(21): 4970-4973.
- [13] Bolliger A, Nalla A, Magid J, *et al.* Re-examining the glomalin-purity of glomalin-related soil protein fractions through immunochemical, lectin-affinity and soil labelling experiments [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(4): 887-893.
- [14] Jorge-Araújo P, Quiquampoix H, Matumoto-Pinto P T, *et al.* Glomalin-related soil protein in French temperate forest soils: interference in the Bradford assay caused by co-extracted humic substances[J]. European Journal of Soil Science, 2015, **66**(2): 311-319.
- [15] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物 (CDOM) 的三维荧光-平行因子分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 163-171.
Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Zhoushan fishery using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 163-171.
- [16] 闫丽红, 陈学君, 苏荣国, 等. 2010 年秋季长江口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 51-60.
Yan L H, Chen X J, Su R G, *et al.* Resolving characteristic of CDOM by excitation-emission matrix spectroscopy combined with parallel factor analysis in the seawater of outer Yangtze estuary in autumn in 2010[J]. Environmental Science, 2013, **34**(1): 51-60.
- [17] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. Organic Geochemistry, 2008, **40**(6): 706-719.
- [18] Cawley K M, Ding Y, Fourqurean J, *et al.* Characterising the sources and fate of dissolved organic matter in Shark Bay, Australia: a preliminary study using optical properties and stable carbon isotopes[J]. Marine & Freshwater Research, 2012, **63**(11): 1098-1107.
- [19] Hudson N, Baker A, Ward D, *et al.* Can fluorescence spectrometry be used as a surrogate for the Biochemical Oxygen Demand (BOD) test in water quality assessment? An example from South West England[J]. Science of the Total Environment, 2008, **391**(1): 149-158.
- [20] Wang Q, Wang W J, He X Y, *et al.* Role and variation of the amount and composition of Glomalin in soil properties in farmland and adjacent plantations with reference to a primary forest in North-Eastern China [J]. PLoS One, 2015, **10**(10): e0139623.
- [21] 赵忠, 李鹏, 薛文鹏, 等. 渭北主要造林树种细根生长及分布与土壤密度关系[J]. 林业科学, 2004, **40**(5): 50-55.
Zhao Z, Li P, Xue W P, *et al.* Study on relations of growth and vertical distribution of fine root system of main planting tree species to soil density in the WeiBei loess plateau[J]. Scientia Sinicae, 2004, **40**(5): 50-55.
- [22] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-13.
- [23] Janos D P, Gamszegi S, Beltran B. Glomalin extraction and measurement[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, **40**(3): 728-739.
- [24] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [25] 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.
- [26] Murphy K R, Butler K D, Spencer R G M, *et al.* Measurement of dissolved organic matter fluorescence in aquatic environments: an interlaboratory comparison [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(24): 9405-9412.
- [27] Parker C A, Barnes W J. Some experiments with spectrofluorimeters and filter fluorimeters[J]. Analyst, 1957, **82**(978): 606-618.
- [28] Bro R. PARAFAC. Tutorial and applications[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, **38**(2): 149-171.
- [29] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. Limnology and Oceanography Methods, 2008, **6**(11): 572-579.
- [30] 黄爽兵, 王焰新, 曹菱, 等. 包气带土壤 DOM 三维荧光表征及对神污染的指示意义[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, **37**(3): 605-611.
Huang S B, Wang Y X, Cao L, *et al.* Characterization of DOM from soil in unsaturated zone and its implication on arsenic mobilization into groundwater[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, **37**(3): 605-611.
- [31] Murphy K R, Stedmon C A, Wenig P, *et al.* OpenFluor-an online spectral library of auto-fluorescence by organic compounds in the environment[J]. Analytical Methods, 2014, **6**(3): 658-661.
- [32] 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.
- [33] Cory R M, Mcknight D M. Fluorescence spectroscopy reveals

- ubiquitous presence of oxidized and reduced Quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8129.
- [34] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [35] Kowalczyk P, Durako M J, Young H, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: Interannual variability[J]. *Marine Chemistry*, 2009, **113**(3-4): 182-196.
- [36] Yamashita Y, Scinto L J, Maie N, *et al.* Dissolved Organic matter characteristics across a subtropical wetland's landscape: application of optical properties in the assessment of environmental dynamics[J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(7): 1006-1019.
- [37] Stedmon C A, Thomas D N, Papadimitriou S, *et al.* Using fluorescence to characterize dissolved organic matter in Antarctic sea ice brines [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(G3): G03027.
- [38] Osburn C L, Wigdahl C R, Fritz S C, *et al.* Dissolved organic matter composition and photoreactivity in prairie lakes of the U. S. Great Plains[J]. *Limnology & Oceanography*, 2011, **56**(6): 2371-2390.
- [39] 罗上华, 毛齐正, 马克明, 等. 城市土壤碳循环与碳固持研究综述[J]. *生态学报*, 2012, **32**(22): 7177-7189.
- Luo S H, Mao Q Z, Ma K M, *et al.* A review of carbon cycling and sequestration in urban soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(22): 7177-7189.
- [40] 高群, 余成. 城市化进程对氮循环格局及动态的影响研究进展[J]. *地理科学进展*, 2015, **34**(6): 726-738.
- Gao Q, Yu C. A review of urbanization impact on nitrogen cycle [J]. *Progress in Geography*, 2015, **34**(6): 726-738.
- [41] Pouyat R V, Yesilonis I D, Nowak D J. Carbon storage by urban soils in the United States[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, **35**(4): 1566-1575.
- [42] Churkina G, Brown D G, Keoleian G. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(1): 135-143.
- [43] Chen Y J, Day S D, Wick A F, *et al.* Changes in soil carbon pools and microbial biomass from urban land development and subsequent post-development soil rehabilitation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **66**: 38-44.
- [44] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, *et al.* Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(S1): S107-S118.
- [45] Driver J D, Holben W E, Rillig M C. Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(1): 101-106.
- [46] Preger A C, Rillig M C, Johns A R, *et al.* Losses of glomalin-related soil protein under prolonged arable cropping: A chronosequence study in sandy soils of the South African Highveld [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, **39**(2): 445-453.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-lin, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行