

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM<sub>2.5</sub>的源贡献分析..... 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)

华北地区乡村站点(曲周)夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分的生成机制与来源解析 ..... 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)

成都市大气PM<sub>2.5</sub>中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 ..... 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)

不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 ..... 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)

北京地区大气消光特征及参数化研究 ..... 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 ..... 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 ..... 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 ..... 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商细彬, 曹阳, 张君 (3603)

太湖湖表反照率时空特征及影响因子 ..... 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)

基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 ..... 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)

河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤孔隙水溶解性甲烷时空特征 ..... 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)

石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 ..... 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)

长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 ..... 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 ..... 王晓锋, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)

湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 ..... 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 ..... 李邵龙, 陈道毅 (3683)

城市道路径流的排污特征 ..... 王俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)

杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 ..... 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)

海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 ..... 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)

天然有机物和电解质对水中C<sub>60</sub>凝聚行为的影响 ..... 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 ..... 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 ..... 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)

微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 ..... 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)

倒置A<sup>2</sup>/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 ..... 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)

高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 ..... 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 ..... 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)

驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 ..... 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 ..... 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)

连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 ..... 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)

FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 ..... 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)

污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 ..... 刘吉宝, 李亚明, 吕镗, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 ..... 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)

大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 ..... 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 ..... 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)

三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 ..... 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)

坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 ..... 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)

不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 ..... 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 ..... 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 ..... 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)

菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 ..... 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 ..... 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)

生物传感细胞ADP1\_pWHlux在水环境急性毒性检测中的应用 ..... 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)

虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 ..... 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)

纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 ..... 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)

黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用 ..... 陈亚楠, 袁玲 (3892)

发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 ..... 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 ..... 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)

COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 ..... 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)

养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 ..... 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)

土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 ..... 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)

《环境科学》征订启事 (3553) 《环境科学》征稿简则 (3589) 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)

# 大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征

丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦\*

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:** 为了解亚热带典型森林土壤氮素和有机氮素特征, 采集大围山森林公园典型森林土壤剖面(0~100 cm), 按每10 cm一层采集土壤样品, 研究土壤氮素和有机氮变化规律及其与土壤理化性质的关系。结果表明: ① 土壤全氮、酸解性有机氮、可溶性有机氮含量均随剖面深度增加而呈下降趋势, 受海拔高度影响, 高海拔山地花岗岩黄棕壤土壤全氮和有机氮组分含量较高; ② 土壤有机氮占全氮比平均  $97.39\% \pm 1.17\%$ , 酸解性有机氮占全氮比平均  $64.38\% \pm 10.68\%$ , 酸解性有机氮各组分均随剖面深度增加而降低; ③ 土壤可溶性有机氮含量范围为  $9.92 \sim 23.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 游离氨基酸氮 ( $1.62 \sim 12.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 占可溶性有机氮比为  $27.36\% \pm 9.95\%$ ; ④ 酸解性有机氮、可溶性有机氮与土壤全氮、可溶性总氮、无机氮均达到显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ), 与土壤容重、有机碳和全磷具有极显著的相关关系 ( $P < 0.01$ )。亚热带典型森林土壤中有机氮是土壤全氮的主体, 受海拔高度和土壤理化性质的影响, 各组分随土壤剖面深度的增加呈下降趋势, 有机氮组分与各氮素形态间的转化关系密切, 土壤有机氮特征将深刻影响森林生态系统氮的循环过程。

**关键词:** 森林土壤; 有机氮; 酸解性有机氮; 可溶性有机氮; 垂直分布

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3809-07 DOI: 10.13227/j.hjx.2015.10.033

## Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain

DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, CHEN Shan, HOU Hong-bo, PENG Pei-qin\*

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

**Abstract:** To clarify altitudinal gradient of subtropical forest soil total nitrogen and organic nitrogen, soil samples were collected per 10 cm on soil profile (0-100 cm) in Dawei Mountain, researched the variation of soil organic nitrogen and correlation with soil physical and chemical properties. The results showed that: ① Total nitrogen, acid hydrolysable organic nitrogen and soluble organic nitrogen decreased with the increase of depth, content of each component in mountain granite yellow-brown soils was much higher affected by altitude; ② The average percentage of soil organic nitrogen to total nitrogen was  $97.39\% \pm 1.17\%$ , and soil acid hydrolysable organic nitrogen was  $64.38\% \pm 10.68\%$ , each component decreased with the increase of soil depth; ③ Soil soluble organic nitrogen content was  $9.92 \sim 23.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , free amino acids ( $1.62 \sim 12.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) accounted for about  $27.36\% \pm 9.95\%$  of soluble organic nitrogen; ④ Soil acid hydrolysable organic nitrogen and soluble organic nitrogen were significantly positively correlated with total nitrogen, total soluble nitrogen and inorganic nitrogen ( $P < 0.05$ ), were highly significantly correlated with soil bulk density, organic carbon, and total phosphorus ( $P < 0.01$ ). Organic nitrogen was the main body of soil nitrogen in typical subtropical forest, each component showed a downward trend increase with soil depth affected by altitude and soil physical and chemical properties. There was a close conversion relationship between soil organic nitrogen and other nitrogen forms, the characteristics of soil organic nitrogen will have profound impact on nitrogen cycling of forest ecological system.

**Key words:** forest soil; organic nitrogen; acid hydrolysable nitrogen; soluble organic nitrogen; vertical distribution

氮是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素<sup>[1,2]</sup>。但土壤中无机态氮含量较少,以有机氮形式存在的氮素占85%以上<sup>[3]</sup>。一般认为,有机氮需要矿化为无机氮,才能供植物吸收利用<sup>[4]</sup>。目前已有证据表明植物可直接利用部分有机氮组分,土壤氮素转化以及植物吸收氮素对于微生物矿化作用的依赖性需要重新认识<sup>[5~8]</sup>。土壤有机氮作为氮素转化的重要中间产物,直接关系到氮素的再利用效率和环境运移强度<sup>[9]</sup>,其中可溶性有机氮(soluble organic nitrogen, SON)虽仅占土壤有机氮库的一小部分,但代表了土壤及水体中的溶解氮的主体部

分<sup>[10]</sup>,因而是其中最活跃的组分之一<sup>[11]</sup>。因此土壤有机氮尤其是可溶性有机氮,已经成为土壤学、植物营养学、环境生态学等诸多领域的研究热点。

Bremner<sup>[12]</sup>于1965年提出了土壤酸解性有机氮的概念及测定方法,受到国内外学者的普遍认同<sup>[13~15]</sup>,并作为表征土壤氮素指标之一。此后国内

收稿日期: 2014-11-06; 修订日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470629); 湖南省环境科学重点学科建设项目; 中南林业科技大学研究生创新基金项目(CX2014B22)

作者简介: 丁咸庆(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境生态学, E-mail: dringxianqing@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: pqpeng123@sina.com

学者陆续开展了大量植物利用土壤有机氮组分的研究<sup>[8,14]</sup>,对于耕作土壤的研究较多,如在施加肥料后的酸解性有机氮组分变化特征等<sup>[15,16]</sup>.而对森林土壤酸解性有机氮的含量及分布特征的研究较少,鲜见森林土壤的垂直分布特征研究的报道.本研究选择亚热带常绿阔叶林地区不同海拔高度的典型森林土壤剖面,分析有机氮组分含量及其分布特征,探讨其受海拔和土壤理化性质影响的垂直分布规律,以期为进一步揭示森林生态系统中土壤氮素组成和循环过程提供科学依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区域概况

大围山国家森林公园地处湘东幕阜山-罗霄山接壤地带的大围山支脉,位于湖南省浏阳市的东北部,总面积达5 053 hm<sup>2</sup>.气候属中亚热带季风湿润气候,年平均气温 11~16℃,1月平均温度-4~2.5℃,7月平均温度 20~28℃,年平均降雨量1 200

~2 000 mm.成土母岩主体是燕山期花岗岩侵入体,土壤土层深厚,质地较轻,为壤土或黏壤土.植被为典型的亚热带典型常绿阔叶林地带,原生植被多被破坏,现存的主要为原始次生林和人工林.由于海拔高低相差大,植被垂直变化明显,海拔 500 m 以下为常绿阔叶林,500~1 000 m 为常绿落叶阔叶混交林,1 000~1 400 m 为落叶阔叶林,1 400 m 以上为草灌群落<sup>[17]</sup>.

### 1.2 样地选择与样品采集

2013年10月,于大围山自然保护区选取几种典型森林植被类型土壤作为研究对象,沿不同海拔高度按照土壤调查规范采集土壤剖面样品.观察土体各层次土壤结构与发育特征,并按每 10 cm 采集 1 个土壤样品 1~2 kg,3 个环刀样品.剖面构型分别为 DWS001: A-B-C (0~40~100 cm);剖面 DWS002: A-B1-B2 (0~50~100 cm);剖面 DWS003: A-B1-B2 (0~35~100 cm).样地基本情况见表 1.

表 1 取样地概况

Table 1 Basic situation of the survey sample plots

| 剖面编号   | 海拔/m  | 土壤发生类型   | 植被类型  | 地理位置                           |
|--------|-------|----------|-------|--------------------------------|
| DWS001 | 1 402 | 山地花岗岩黄棕壤 | 落叶阔叶林 | 28°25' 15.9" N, 114°06'52.5" E |
| DWS002 | 1 002 | 山地花岗岩黄壤  | 落叶阔叶林 | 28°25' 58.9" N, 114°05'06.2" E |
| DWS003 | 800   | 山地花岗岩黄红壤 | 杉木人工林 | 28°25' 03.6" N, 114°03'47.1" E |

土壤样品带回实验室,经自然风干 1~2 周后,剔除根块和碎石研磨过 20 目筛,再四分法均匀取样

研磨过 100 目筛,分别装入磨口瓶保存待测.土壤理化性质见表 2.

表 2 土壤剖面构型层次理化性质<sup>1)</sup>

Table 2 Physical and chemical properties in each soil genetic horizon

| 剖面编号   | 层次 | 质地类型  | pH   | 黏粒<br>( < 2 μm ) / % | 砂粒<br>( > 50 μm ) / % | 容重<br>/ g · cm <sup>-3</sup> | 毛管孔隙度<br>/ % |
|--------|----|-------|------|----------------------|-----------------------|------------------------------|--------------|
| DWS001 | A  | 砂壤土   | 4.66 | 14.33                | 56.65                 | 1.05                         | 52.52        |
|        | B  | 砂壤土   | 4.70 | 12.02                | 62.34                 | 1.32                         | 48.68        |
| DWS002 | A  | 黏壤土   | 4.75 | 31.49                | 32.56                 | 1.18                         | 48.62        |
|        | B1 | 黏壤土   | 4.80 | 33.05                | 32.32                 | 1.40                         | 42.35        |
| DWS003 | A  | 黏壤土   | 4.50 | 34.39                | 32.69                 | 1.11                         | 41.75        |
|        | B1 | 砂质黏壤土 | 4.62 | 25.31                | 54.88                 | 1.52                         | 38.63        |

1) 各数值是按土壤剖面构型层次取得的平均值

### 1.3 测定方法

土壤酸解性有机氮经 6 mol · L<sup>-1</sup> HCl 浸提 24 h 获得酸解液,采用 Bremner 法<sup>[12]</sup>测得酸解性氨基酸态氮、酸氨态氮、氨基糖氮和未知态氮等有机氮形态;土壤全氮和全磷采用凯氏定氮法消解,间断化学分析仪(Easychem plus,意大利 SYSTEA)测定,测定波长均为 660 nm;有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤容重、毛管孔隙度采用环刀法

测定;pH 值使用酸度计(pHS-3C,上海雷磁)测定,土水比 1:2.5;土壤机械组成采用比重计法,测定土壤各粒径颗粒所占比(黏粒 < 2 μm;粉粒 2~50 μm;砂粒 > 50 μm),并确定样地的土壤质地.

可溶性有机氮,通过测定土壤可溶性总氮(TSN)及无机氮(TIN)的含量由差减法获得<sup>[18]</sup>,超纯水浸提,土水比 1:5,20℃水浴振荡 0.5 h;可溶性总氮与土壤全氮的测定方法相同;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用水

杨酸-硝普钠显色法, 间断化学分析仪测定(波长 660 nm);  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的总量采用氯化钒还原, Griess 试剂显色法, 间断化学分析仪测定(波长 540 nm); 总游离氨基酸总量(TFAA)采用茚三酮比色法, 紫外分光光度计(UV-2450, 日本岛津)测定(波长 570 nm)。

#### 1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 和 Excel 2003 对数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤全氮与无机氮特征

土壤全氮含量表现出与海拔高度显著相关的特征, 海拔较高的土壤全氮也越高。不同样点剖面土壤全氮平均值大小依次为: DWS001,  $(1.10 \pm 0.39) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS002,  $(1.05 \pm 0.50) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS003,  $(0.84 \pm 0.44) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤全氮的垂直分布特征见图 1。从中可以看出, 随着剖面深度的增加, 土壤全氮含量逐渐降低。

不同样点剖面土壤无机氮含量平均值大小分别为, 土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量: DWS001,  $(9.53 \pm 1.77) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS002,  $(7.27 \pm 1.27) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS003,  $(11.98 \pm 4.00) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的总量: DWS001,  $(17.86 \pm 7.99) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS002,  $(10.08 \pm 1.14) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS003,  $(13.53 \pm 3.35) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤无机氮的垂直分布特征见图 2。随着剖面深度的增加, 土壤无机氮含量同样表现出逐渐降低的趋势。海拔较高的阔叶林 DWS001 剖面以及受人为干扰较大的杉木人

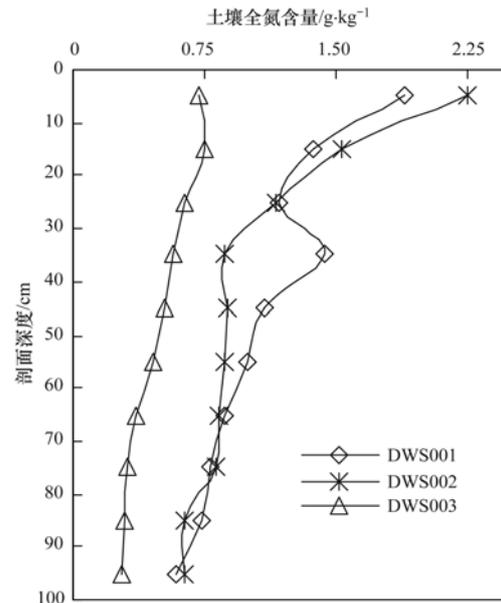


图 1 土壤全氮含量的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil total nitrogen content

工林 DWS003 剖面土壤中, 无机氮含量相对较高。

以上数据结果表明, 土壤有机氮占全氮的百分比表现出随着土壤剖面深度的增加而下降趋势。其平均值所占百分比分别为: DWS001,  $97.44\% \pm 0.52\%$ ; DWS002,  $98.09\% \pm 0.62\%$ ; DWS003,  $96.23\% \pm 1.86\%$ 。典型森林土壤, 土壤有机氮占全氮近  $93.22\% \sim 99.33\%$ , 平均  $97.39\% \pm 1.17\%$ 。

### 2.2 酸解性有机氮与酸解性有机氮组分

土壤酸解性有机氮在剖面中变化范围较大, 剖面 DWS001 表层土壤最高可达  $1137.09 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 底层最低仅为  $471.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。剖面均值为: DWS001:  $(699.84 \pm 222.58) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; DWS002:

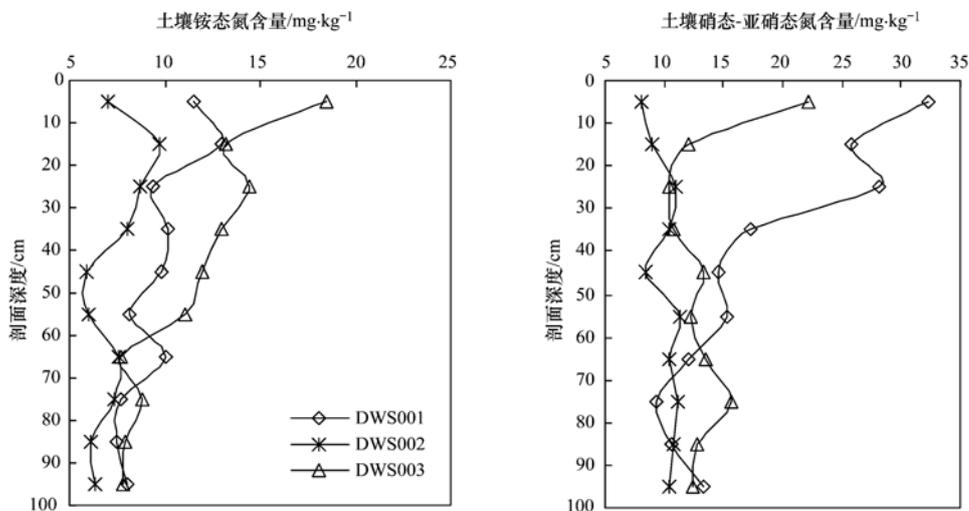


图 2 土壤无机氮含量的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of soil inorganic nitrogen content

( $620.57 \pm 194.36$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; DWS003: ( $492.40 \pm 174.85$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 表现出随海拔高度而增加的特征. 随着剖面深度的增加, 土壤酸解有机氮逐渐降低(图3). 土壤酸解有机氮与剖面深度的负相关关系达到极显著水平: DWS001:  $y = 1.11e^{-0.09x}$ ,  $r = 0.95$ ; DWS002:  $y = 0.92e^{-0.08x}$ ,  $r = 0.90$ ; DWS003 剖面:  $y = 0.87e^{-0.11x}$ ,  $r = 0.98$ .

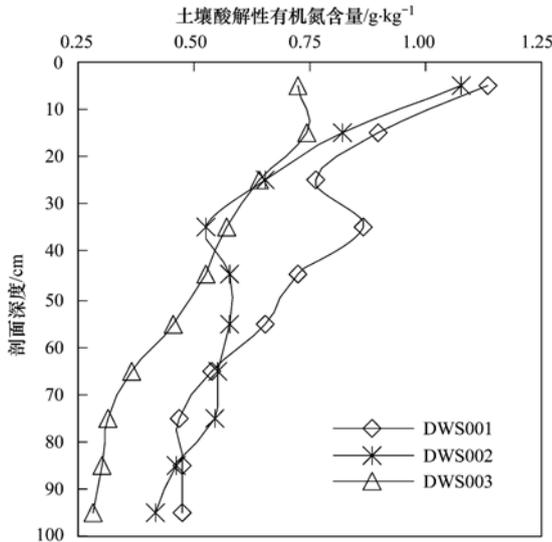


图3 土壤酸解有机氮含量的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil acid hydrolysable nitrogen content

表3 土壤酸解性有机氮组分<sup>1)</sup>/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 3 Content of each component of acid hydrolysable organic nitrogen/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

| 剖面编号   | 酸解氨态氮           |                    | 酸解氨基糖氮         |                  | 酸解氨基酸氮         |                  |
|--------|-----------------|--------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|        | 变化范围            | 均值                 | 变化范围           | 均值               | 变化范围           | 均值               |
| DWS001 | 711.22 ~ 265.89 | 438.52 ± 137.36 aA | 99.12 ~ 29.26  | 68.56 ± 24.04 bB | 137.92 ~ 43.92 | 83.65 ± 29.60 aB |
| DWS002 | 866.92 ~ 294.65 | 420.26 ± 168.23 aA | 119.84 ~ 28.16 | 58.34 ± 26.56 bB | 111.13 ~ 31.41 | 65.05 ± 22.17 aB |
| DWS003 | 474.27 ~ 163.35 | 315.46 ± 119.85 aA | 102.60 ~ 51.93 | 89.74 ± 15.59 aB | 92.95 ~ 18.93  | 50.21 ± 26.94 aB |

1) “±”表示标准偏差, 大写字母不同表示同行内差异显著( $P < 0.01$ ,  $n = 10$ ), 小写字母不同表示同列内差异显著( $P < 0.01$ ,  $n = 10$ )

而酸解氨基糖氮变化不明显.

此外, 酸解有机氮组分所占比相对稳定, 酸解氨态氮为  $64.39\% \pm 5.16\%$ , 酸解氨基酸氮  $10.71\% \pm 2.28\%$ , 酸解氨基糖氮  $13.39\% \pm 7.37\%$ . 而酸解未知态氮所占百分比有所差异, 平均所占比表现为: DWS001 ( $14.78\% \pm 4.56\%$ ) > DWS002 ( $12.67\% \pm 3.13\%$ ) > DWS003 ( $6.65\% \pm 3.25\%$ ).

#### 2.4 可溶性有机氮的垂直分布

土壤可溶性有机氮含量较低, 变化范围在  $9.92 \sim 23.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 平均含量分别为, DWS001: ( $21.73 \pm 4.35$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; DWS002: ( $9.92 \pm 3.07$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; DWS003: ( $23.45 \pm 5.24$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 土壤可溶性有机氮含量随土壤深度的垂直变化特征, 如图5所示. 从中可以看出, 可溶性有机氮同样表现

土壤酸解性有机氮占全氮的百分比, 表现出随着土壤剖面深度的增加而降低趋势. 剖面深度  $0 \sim 60 \text{ cm}$ , 其平均值大小依次为: DWS001,  $63.69\% \pm 2.88\%$ ; DWS002,  $58.54\% \pm 7.52\%$ ; DWS003,  $54.56\% \pm 6.26\%$ ; 剖面深度在  $60 \sim 100 \text{ cm}$ , 依次为: DWS003,  $83.26\% \pm 9.01\%$ ; DWS002,  $67.78\% \pm 2.61\%$ ; DWS001,  $64.88\% \pm 9.09\%$ . 典型森林土壤, 酸解有机氮占全氮约  $46.62\% \sim 95.86\%$ , 平均  $64.38\% \pm 10.68\%$ .

#### 2.3 酸解性有机氮组分的垂直分布

土壤酸解性有机氮组分结果见表3. 从中可见, 酸解有机氮组分中, 酸解氨态氮含量较高, 达  $315.46 \sim 438.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 且表现为: DWS001 > DWS002 > DWS003; 酸解氨基糖氮平均含量为 ( $66.30 \pm 29.04$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低海拔 DWS003 剖面中的平均含量较高; 而酸解氨基酸氮含量差异较小, 平均为 ( $72.21 \pm 25.50$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 酸解未知态氮含量 DWS001 > DWS002 > DWS003, 表现出随海拔高度的降低而显著下降, 全剖面 ( $0 \sim 100 \text{ cm}$ ) 平均含量 ( $74.35 \pm 47.86$ )  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

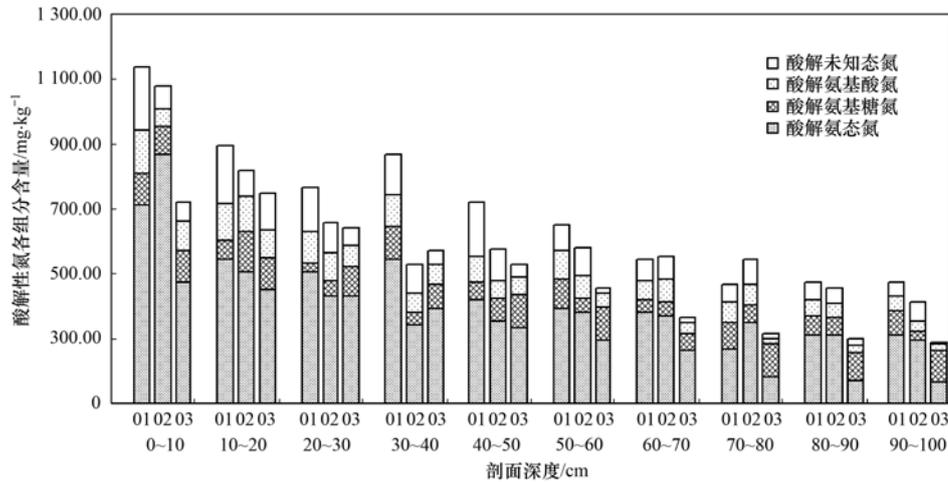
酸解有机氮组分随剖面深度的含量变化趋势见图4. 从中可知, 随着剖面深度的增加, 酸解氨态氮、酸解氨基酸氮、酸解未知态氮均表现出下降趋势,

出随剖面深度而降低的趋势. 海拔较高的阔叶林 DWS001 剖面以及受人为干扰较大的杉木人工林 DWS003 剖面土壤中, 可溶性有机氮含量相对较高.

可溶性有机氮中低分子量的游离氨基酸是可被微生物和植物直接吸收利用的氮素部分, 因而具有重要意义. 表4列出了土壤中总游离氨基酸态氮含量及占可溶性有机氮的比例. 由表可见, 总游离氨基酸态氮含量变化范围为:  $1.62 \sim 12.02 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 占可溶性有机氮的比例平均为  $27.36\% \pm 9.95\%$ .

#### 2.5 有机氮组分与土壤理化指标的相关性分析

表5列出了土壤有机氮组分与土壤理化指标间的相关系数. 从表可见, 酸解性有机氮、可溶性有机氮与土壤全氮、可溶性总氮、土壤无机氮之间均达到显著的正相关关系 ( $P < 0.05$ ,  $n = 60$ ), 酸解性



01、02、03 分别表示 DWS001、DWS002、DWS003

图 4 土壤酸解性有机氮组分含量的垂直分布

Fig. 4 Content of each component of acid hydrolysable organic nitrogen varies with layers

表 4 各剖面土壤总游离氨基酸氮含量<sup>1)</sup>

Table 4 Content of soil extracts of free amino acids nitrogen in each profile

| 样地编号   | 变化范围/mg·kg <sup>-1</sup> | 均值/mg·kg <sup>-1</sup> | 平均所占比/%         |
|--------|--------------------------|------------------------|-----------------|
| DWS001 | 3.42 ~ 8.74              | 5.16 ± 1.85 a          | 23.40 ± 4.54 a  |
| DWS002 | 1.62 ~ 4.41              | 2.88 ± 1.00 b          | 32.27 ± 14.96 a |
| DWS003 | 4.37 ~ 12.02             | 6.29 ± 2.28 a          | 26.91 ± 6.84 a  |

1) “±”表示标准偏差,字母不同表示同列内差异显著( $P < 0.01, n = 10$ )

表 5 土壤有机氮组分与土壤理化指标间的相关系数<sup>1)</sup>

Table 5 Correlation coefficient ( $r$ ) between soil organic nitrogen and physical-chemical indicators

|         | 酸解有机氮     | 酸解氨态氮     | 酸解氨基糖氮    | 酸解氨基酸氮    | 酸解未知态氮    | 可溶性有机氮    | 游离氨基酸氮    |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| pH      | -0.062    | -0.030    | -0.495 ** | -0.078    | 0.134     | -0.761 ** | -0.719 ** |
| 容重      | -0.845 ** | -0.782 ** | -0.226    | -0.831 ** | -0.645 ** | -0.488 ** | -0.547 ** |
| 毛管孔隙度   | 0.681 **  | 0.629 **  | -0.086    | 0.650     | 0.680 **  | 0.132     | -0.019    |
| 黏粒      | -0.190    | -0.106    | 0.071     | -0.254    | -0.388    | -0.242    | -0.035    |
| 粉粒      | 0.435 *   | 0.445 *   | -0.209    | 0.435 *   | 0.368 *   | -0.152    | -0.053    |
| 砂粒      | -0.055    | -0.118    | 0.041     | -0.010    | 0.113     | 0.236     | 0.048     |
| 有机碳     | 0.917 **  | 0.940 **  | 0.318     | 0.684 **  | 0.515 **  | 0.407 *   | 0.488 **  |
| 全磷      | -0.699 ** | -0.706 ** | 0.053     | -0.610 ** | -0.532 ** | -0.067    | -0.176    |
| 全氮      | 0.957 **  | 0.968 **  | 0.24      | 0.760 **  | 0.604 **  | 0.320     | 0.392 *   |
| 可溶性总氮   | 0.411 *   | 0.308     | 0.357     | 0.485 **  | 0.363 *   | 0.930 **  | 0.861 **  |
| 氨氮      | 0.294     | 0.232     | 0.463 **  | 0.364 *   | 0.099     | 0.797 **  | 0.863 **  |
| 硝态-亚硝态氮 | 0.484 **  | 0.373 *   | 0.050     | 0.573 **  | 0.592 **  | 0.538 **  | 0.593 **  |

1) \* 表示相关系数达到显著水平(0.05), \*\* 表示相关系数达到极显著水平(0.01)

有机氮、可溶性有机氮与土壤容重、毛管孔隙度、有机碳和全磷具有极显著的正相关关系 ( $P < 0.01, n = 60$ ).

### 3 讨论

土壤有机氮在很多生态系统中的循环并没有被很好地理解<sup>[19]</sup>. 在没有人干扰时,当土壤不能提供足量的无机氮时,氮的矿化速率不能够满足植物

利用,有机氮组分可作为植物主要的氮素来源,是植物可吸收的一个主要的氮形式. 有机氮是森林土壤中氮素的主要形态,同时也是土壤溶液和水体中氮淋溶流失的主体部分<sup>[11,20]</sup>,Perakis 等<sup>[21]</sup> 研究指出南美的森林流域 13 个地区,即使是未受人类干扰的 100 条河流中,分析的水样中有机氮平均占可溶性氮的近 80%; 郝卓等<sup>[22]</sup> 发现次降雨对南方红壤区流域氮流失贡献巨大,可溶性总氮占全氮比的流失

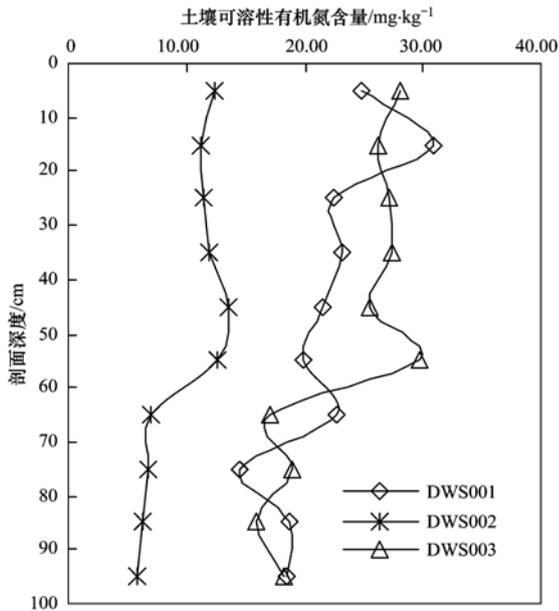


图5 土壤可溶性有机氮含量的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of soil soluble organic nitrogen content

负荷 57.7%。由此可见,可溶性氮的环境重要影响。植物凋落物是土壤有机氮最主要来源<sup>[8]</sup>。在有机物质的分解过程中,释放出大量有机氮组分如氨基氮、氨基酸氮、氨基糖氮等<sup>[23]</sup>。土壤有机氮组分流失,不仅带走了大量森林土壤养分,而且也干扰和破坏生态系统功能。有关研究应当进一步加强对氮素流失破坏的环境生态学效应进行评价,深入了解各生态系统间物质循环利用的相互关系。

本研究获得典型森林生态系统土壤中,土壤有机氮占全氮近 93.22% ~ 99.33%, 平均  $97.39\% \pm 1.17\%$ 。土壤酸解性有机氮是土壤可矿化氮的主要来源<sup>[24]</sup>。研究结果表明,酸解有机氮占全氮 46.62% ~ 95.86%, 平均  $64.38\% \pm 10.68\%$ , 该组分有机氮随土壤剖面深度的增加整体逐渐下降,与多数研究结果一致<sup>[25,26]</sup>。各酸解有机氮组分含量及特征有所差异,平均含量及其所占酸解性有机氮的百分比表现为: 酸解氨态氮 [ $(391.41 \pm 148.79) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $64.39\% \pm 5.16\%$ ] > 酸解氨基糖氮 [ $(72.21 \pm 25.50) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $13.39\% \pm 7.37\%$ ] > 酸解氨基酸氮 [ $(66.30 \pm 29.04) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $10.71\% \pm 2.28\%$ ]  $\approx$  酸解未知态氮 [ $(74.35 \pm 47.86) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,  $11.32\% \pm 5.11\%$ ]。并且,各酸解性有机氮组分各土层深度中所占比例相对稳定,与有关研究的结论类似<sup>[27,28]</sup>。

有关森林生态系统可溶性有机氮含量特征及迁移转化的研究,多集中于温带和寒温带<sup>[21,29]</sup>,国内

开展得较少。本研究得到,可溶性有机氮含量约  $9.92 \sim 23.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 游离氨基酸氮  $1.62 \sim 12.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与 Chen 等<sup>[30,31]</sup> 学者的研究一致。可溶性有机氮在土壤中的含量虽然相对较低,但具有强大的有效性,随土壤溶液淋溶迁移迅速,在土壤氮素循环转化过程中扮演着重要角色<sup>[32]</sup>。海拔高度不仅引起有机氮在迁移流动过程中的地带性分布,还影响着气候、植被组成及土壤性质等,进一步影响着森林土壤有机氮组分的组成特征以及新旧组分的演替。各有机氮组分随海拔特有的迁移性变化与组成成分和性质有关,各组分的分布规律有待深入研究和讨论。

通过分析土壤有机氮组分与土壤理化指标间的相关性,表明土壤物理性质及物质组成对有机氮组分的影响显著。有机氮组分与全氮、有机碳和全磷均表现出了极显著的相关性,明确了 C、N、P 作为土壤有机物质的基本组成元素,彼此之间的密切相关性。同时,与无机氮间的显著相关性,也显示出无机和有机氮之间时刻不分的转化关系。可溶性有机氮与土壤 pH 值的极显著负相关性,表明 pH 显著影响可溶于土壤水中的有机氮组分含量。这一效应提示,酸性物质的干湿沉降引起土壤酸度过高将会不断破坏土壤的环境生态平衡,引起森林生态系统土壤营养严重流失,造成雾霾、水体富营养化、赤潮等诸多环境问题,而危害人类和动植物正常的生命活动。由于土壤有机氮强的迁移性,其将深刻影响森林生态系统氮循环过程,并在陆地生态系统氮循环过程中扮演相当重要的角色。

#### 4 结论

典型亚热带森林土壤中有机氮是土壤氮素的主要形式,平均占全氮比近  $97.39\% \pm 1.17\%$ , 酸解性有机氮占全氮比约  $64.38\% \pm 10.68\%$ 。随土壤剖面深度的增加,土壤全氮、酸解性有机氮、可溶性有机氮均呈下降趋势,高海拔土壤全氮、酸解性有机氮、可溶性有机氮含量较高。土壤可溶性有机氮含量较低,约  $9.92 \sim 23.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 游离氨基酸氮占可溶性有机氮比约  $27.36\% \pm 9.95\%$ 。土壤有机氮与 pH、容重、全氮、可溶性总氮、无机氮、以及有机碳、全磷均具有显著的相关关系。

#### 参考文献:

- [1] Hobbie S E, Nadelhoffer K J, Höglberg P. A synthesis: the role of nutrients as constraints on carbon balances in boreal and arctic regions[J]. *Plant and Soil*, 2002, **242**(1): 163-170.

- [ 2 ] Sjögersten S, Wookey P A. The role of soil organic matter quality and physical environment for nitrogen mineralization at the forest-tundra ecotone in fennoscandia [ J ]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2005, **37**(1): 118-126.
- [ 3 ] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展 [ J ]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2184-2188.
- [ 4 ] Norton J M, Firestone M K. N dynamics in the rhizosphere of *Pinus ponderosa* seedlings [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, **28**(3): 351-362.
- [ 5 ] Lipson D, Näsholm T. The unexpected versatility of plants: organic nitrogen use and availability in terrestrial ecosystems [ J ]. *Oecologia*, 2001, **128**(3): 305-316.
- [ 6 ] 徐兴良, 白洁冰, 欧阳华. 植物吸收土壤有机氮的研究进展 [ J ]. *自然资源学报*, 2011, **26**(4): 715-724.
- [ 7 ] Kuz'yakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance [ J ]. *New Phytologist*, 2013, **198**(3): 656-669.
- [ 8 ] 崔晓阳. 植物对有机氮源的利用及其在自然生态系统中的意义 [ J ]. *生态学报*, 2007, **27**(8): 3500-3512.
- [ 9 ] Jones D L, Kielland K. Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, **34**(2): 209-219.
- [ 10 ] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, *et al.* Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review [ J ]. *Soil Science*, 2000, **165**(4): 277-304.
- [ 11 ] Zhong Z K, Makeshin F. Soluble organic nitrogen in temperate forest soils [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, **35**(2): 333-338.
- [ 12 ] Bremner J M. *Organic forms of nitrogen* [ M ]. Madison: American Society of Agronomy, 1965. 1238-1255.
- [ 13 ] 彭佩钦, 仇少君, 童成立, 等. 长期施肥对水稻土耕层微生物生物量氮和有机氮组分的影响 [ J ]. *环境科学*, 2007, **28**(8): 1816-1821.
- [ 14 ] 李世清, 李生秀, 杨正亮. 不同生态系统土壤氨基酸氮的组成及含量 [ J ]. *生态学报*, 2002, **22**(3): 379-386.
- [ 15 ] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中酸解有机氮含量与分配的影响 [ J ]. *中国农业科学*, 2002, **35**(4): 403-409.
- [ 16 ] 梁国庆, 林葆, 林继雄, 等. 长期施肥对石灰性潮土氮素形态的影响 [ J ]. *植物营养与肥料学报*, 2000, **6**(1): 3-10.
- [ 17 ] 侯红波. 浏阳大围山土壤研究初探 [ J ]. *湖南林业科技*, 2004, **31**(3): 27-28.
- [ 18 ] 葛体达. 番茄对有机氮的吸收及土壤可溶性有机氮行为特性研究 [ D ]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [ 19 ] 刘艳, 周国逸, 刘菊秀. 陆地生态系统可溶性有机氮研究进展 [ J ]. *生态学杂志*, 2005, **24**(5): 573-577.
- [ 20 ] Jones D L, Healey J R, Willett V B, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants—an important N uptake pathway? [ J ]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(3): 413-423.
- [ 21 ] Perakis S S, Hedin L O. Nitrogen loss from unpolluted south american forests mainly via dissolved organic compounds [ J ]. *Nature*, 2002, **415**(6870): 416-419.
- [ 22 ] 郝卓, 高扬, 张进忠, 等. 南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 [ J ]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1630-1638.
- [ 23 ] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, *et al.* Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen—a synthesis for temperate forests [ J ]. *Biogeochemistry*, 2001, **52**(2): 173-205.
- [ 24 ] 李世清, 李生秀, 邵明安, 等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响 [ J ]. *中国农业科学*, 2004, **37**(6): 859-864.
- [ 25 ] 李丽霞, 郝明德, 彭令发. 黄土区人工牧草地有机氮组分变化研究 [ J ]. *水土保持研究*, 2003, **10**(1): 55-57.
- [ 26 ] 彭令发, 郝明德, 来璐. 土壤有机氮组分及其矿化模型研究 [ J ]. *水土保持研究*, 2003, **10**(1): 46-49.
- [ 27 ] 党亚爱, 王国栋, 李世清. 黄土高原典型土壤有机氮组分剖面分布的变化特征 [ J ]. *中国农业科学*, 2011, **44**(24): 5021-5030.
- [ 28 ] 张俊清, 朱平, 张夫道. 有机肥和化肥配施对黑土有机氮形态组成及分布的影响 [ J ]. *植物营养与肥料学报*, 2004, **10**(3): 245-249.
- [ 29 ] Weigelt A, Bol R, Bardgett R D. Preferential uptake of soil nitrogen forms by grassland plant species [ J ]. *Oecologia*, 2005, **142**(4): 627-635.
- [ 30 ] Chen C R, Xu Z H, Zhang S L, *et al.* Soluble organic nitrogen pools in forest soils of subtropical australia [ J ]. *Plant and Soil*, 2005, **277**(1-2): 285-297.
- [ 31 ] Chen C R, Xu Z H. Analysis and behavior of soluble organic nitrogen in forest soils [ J ]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, **8**(6): 363-378.
- [ 32 ] 周建斌, 陈竹君, 郑险峰. 土壤可溶性有机氮及其在氮素供应及转化中的作用 [ J ]. *土壤通报*, 2005, **36**(2): 244-248.

## CONTENTS

|  |  |
|--|--|
| Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology ..... | LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)                             |
| Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM <sub>2.5</sub> at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer .....               | CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)     |
| Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM <sub>2.5</sub> in Chengdu City .....   | YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)   |
| Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning .....   | HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)    |
| Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing .....   | CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)           |
| Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction .....   | ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)     |
| Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors .....   | YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)     |
| Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China .....  | ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)    |
| Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors .....   | CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)             |
| Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images .....   | WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)      |
| Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary .....  | YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)     |
| Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City .....   | CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)           |
| Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir .....   | BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)    |
| Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR .....   | WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)  |
| Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes .....                            | WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)      |
| Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance .....  | LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)                                 |
| Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater .....   | WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)     |
| Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou .....   | DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)     |
| Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination .....                           | YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)             |
| Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....   | FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)           |
| Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers .....                                 | WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)      |
| Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network .....  | JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)                      |
| Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater .....  | ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)       |
| Efficacy of A <sup>2</sup> /O- <i>MBR</i> Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling .....   | WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)          |
| Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System .....   | LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)          |
| Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures .....  | LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)     |
| 2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway .....                | SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)       |
| Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....  | YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)       |
| Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage .....   | LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)                   |
| Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge .....  | MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)                |
| Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes .....  | LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)            |
| Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Alkaline Process .....                          | JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)     |
| Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain .....  | DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809) |
| Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain .....   | QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)     |
| Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area .....  | WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)        |
| Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China .....  | FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)       |
| Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils .....  | SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839) |
| Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment .....   | Ji Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)          |
| Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants .....                              | CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)    |
| Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i> .....              | SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)    |
| Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....  | LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)      |
| Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment .....  | TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)            |
| Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring .....  | GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)             |
| Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish .....   | LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)        |
| Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i> .....  | CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)                                    |
| Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions .....   | XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)       |
| Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater .....   | GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)         |
| Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components .....  | LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)            |
| Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment .....                              | DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)            |
| Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications .....   | DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)    |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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  
欧阳自远 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

|       |   |                  |    |   |
|-------|---|------------------|----|---|
| 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院   | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University  |
| 主 编   | 欧阳自远  | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan  |
| 编 辑   | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE)<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版   | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717   | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencecp. com   | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencecp. com  |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局   | Domestic         |    | All Local Post Offices in China   |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司<br>(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

国内外公开发行人