ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第35卷 第8期
2014年8月15日

目 次

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析 …… 刘庆阳,刘艳菊,赵强,张婷婷,张美根,王存美(2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征 …… 陈秋方,孙在,谢小芳(2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响 …… 杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪(2857)
龙凤山本底站大气 CO_2 数据筛分及浓度特征研究 …… 栾天,周凌晞,方双喜,姚波,王红阳,刘钊(2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响 …… 苏彬彬,许楉洋,张若宇,纪贤鑫(2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究 …… 张诗建,姬亚芹,张雷波,赵雪艳,朱振宇,杨文(2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征 …… 梁俊宁,李文慧,葛毅,陈洁,宋丽娜,刘杰(2883)
KI改性黏土脱除烟气中单质汞的研究 …… 沈伯雄,陈建宏,蔡记,何川,李卓(2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究 …… 陈文和,邓明佳,罗辉,张婧赢,丁文杰,刘俊新,李琳(2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究 …… 白利平,王业耀,郭永丽,周友亚,刘俐,颜增光,李发生(2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应 …… 张柏发,陈丁江(2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究 …… 蔡春晓,刘红玉,李玉凤,王聪,侯明行(2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征 …… 李瑞利,柴民伟,邱国玉,石福臣,Sasa Kaichiro(2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析 …… 蓝家程,孙玉川,师阳,徐昕,袁道先,胡宁(2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究 …… 张陶,蒲俊兵,袁道先,章程,何师意,于奭,刘文,莫雪,周建超,杨会,唐伟(2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究 …… 肖可,沈立成,王鹏(2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究 …… 刘文,蒲俊兵,于奭,章程,区绎如,袁道先,杨会,唐伟(2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究 …… 陈莉薇,徐晓春,王军,陈芳(2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究 …… 王巍,丛海兵,徐亚军,陈雯婧,徐思涛,吴军,蒋新跃(2974)
酸性条件下Ti(Ⅳ)催化 O_3/H_2O_2 降解邻苯二甲酸二甲酯 …… 高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平(2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(Ⅱ)、Hg(Ⅱ)的影响 …… 施秋伶,周欣,张进忠,邱昕凯(2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究 …… 方巧, 林建伟, 詹艳慧, 杨孟娟, 郑雯婧(2992)
不锈钢201、304和316L在模拟污水管道反应器中的腐蚀 …… 鲍国栋,左剑恶,王雅娇,干里里(3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究 …… 王磊,王磊,黄丹曦,王旭东(3007)
不同类型LDHs对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究 …… 张翔凌,郭露,陈俊杰,刘小婷,徐璐,陈巧珍,王晓晓(3012)
SPG膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究 …… 刘春,龚鹏飞,肖太民,张明,年永嘉,杨景亮,张晶(3018)
SPG膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究 …… 张磊,张明,刘春,张静,刘俊良(3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响 …… 陈烜,汤兵,张姿,宾丽英,黄绍松,付丰连,邱兵(3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究 …… 刘文如,阴方芳,王建芳,沈耀良(3038)
UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究 …… 李亚峰,马晨曦,张驰(3044)
开封周边地区地表灰尘砷、汞背景值及其应用 …… 陈彦芳,马建华,董运武,刘德新,陈星(3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险 …… 段恒轶,吴亚涛,王珏,刘兆荣(3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险 …… 朱智成,陈社军,丁南,王璟,罗孝俊,麦碧娴(3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应 …… 齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,孙良杰,刘欣超,何亚婷,贾军强,曹丛丛(3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响 …… 刘希玉,邹敬东,徐丽丽,张心昱,杨风亭,戴晓琴,王忠强,孙晓敏(3083)
低分子有机酸对土壤中Cu化学形态的影响 …… 黄国勇,付庆灵,朱俊,万田英,胡红青(3091)
EDTA与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究 …… 尹雪,陈家军,蔡文敏(3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N_2O 排放的关系 …… 陈玲,范会,蒋静艳(3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N_2O 产生的不同过程及贡献 …… 孙文广,孙志高,甘卓亭,孙万龙,王伟(3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其全球增温潜势的影响 …… 王聪,沈健林,郑亮,刘杰云,秦红灵,李勇,吴金水(3120)
我国北方两地环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响 …… 袁相洋,张巍巍,孙敬松,胡恩柱,张玉龙,张红星,田媛,冯兆忠(3128)
丛枝菌根影响纳米ZnO对玉米的生物效应 …… 王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴(3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响 …… 李霞,彭霞薇,伍松林,李志茹,冯红梅,江泽平(3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响 …… 雷鸣,曾敏,廖柏寒,胡立琼,周航,龙水波(3149)
重金属铬(Ⅵ)的生态毒性及其土壤环境基准 …… 王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红(3155)
维生素 B_{12} 对脱氯功能蓝藻降解2,4,4′-三氯联苯的促进作用研究 …… 刘嘉裕,肖文丰,鲁莉萍,张杭君(3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性 …… 徐冉芳,孙敏霞,刘娟,汪泓,李欣,朱雪竹,凌婉婷(3169)
多溴联苯醚在市场鲫鱼体内分布和食鱼暴露量 …… 王俊霞,王春艳,刘莉莉,周啸宇,刘洋成,林匡飞(3175)
稀有鮈鲫HMGR基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析 …… 邓川,毛思予,熊力,张晓峥,李伟,高香,刘秋萍,陈韵,刘堰(3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒MS2存活的影响 …… 何强,吴庆庆,马红芳, 周真明,苑宝玲(3192)
多胺功能化介孔炭对Pb(Ⅱ)的吸附动力学与机制 …… 李坤权,王艳锦,杨美蓉,朱志强,郑正(3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响 …… 崔延瑞,郭焱,吴青,马罗丹,孙剑辉,崔凤灵(3206)
经济结构调整的污染减排效应:以COD减排为例 …… 李名升,周磊,陈远航,李茜,张建辉(3212)
中国铅流改变原因分析 …… 马兰,毛建素(3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨 …… 汪诗平,Andreas Wilkes,汪亚运,白玲(3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展 …… 徐志伟,张心昱,于贵瑞,孙晓敏,温学发(3230)
《环境科学》征稿简则(2936) 《环境科学》征订启事(3051) 信息(2882,2927,3059,3218)

三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征

李瑞利[1],柴民伟[1],邱国玉[1*],石福臣[2*],Sasa Kaichiro[3]

(1. 北京大学深圳研究生院, 环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 南开大学生命科学学院, 天津 300071; 3. 北方生物圈野外科学中心, 北海道大学, 札幌 060-0809, 日本)

摘要: 研究了三江平原两类典型沼泽湿地(毛果苔草沼泽和芦苇沼泽)沉积物剖面有机碳、全氮、全磷和全硫的垂直分布规律,初步分析了三江平原湿地的沉积速率与沉积通量. 结果表明,土壤有机碳、全氮、全磷和全硫在垂直方向上具有明显的分层和富聚现象,自上而下,有机碳的含量逐渐降低; 全氮含量呈先增加后减少的分布趋势; 毛果苔草沼泽全磷含量呈先减少后增加的"V"型分布,芦苇沼泽全磷含量逐渐降低; 全硫的分布和有机碳的分布规律一致. 相关性分析表明,全氮、全磷和全硫与有机碳之间呈极显著的正相关关系($P<0.01$); 有机碳与容重之间呈极显著的负相关关系($P<0.01$). 植被类型是影响沼泽湿地土壤有机碳、全氮、全磷和全硫的空间分布的主要因素之一. 应用^{137}Cs、^{210}Pb测定沉积年代,并结合恒定放射性通量(CRS)模式推算年龄的结果表明,三江平原湿地平均沉积速率为 0.33 cm·a^{-1},沉积通量为 0.03 ~ 0.48 g·(cm^2·a)$^{-1}$,平均为 0.29 g·(cm^2·a)$^{-1}$.

关键词: 土壤养分; 垂直分布; 沉积通量; 沼泽湿地; 三江平原

中图分类号: X52; X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2014)08-2928-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2014.08.013

Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain

LI Rui-li[1], CHAI Min-wei[1], QIU Guo-yu[1], SHI Fu-chen[2], Sasa Kaichiro[3]

(1. School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China; 3. Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Sapporo 060-0809, Japan)

Abstract: Profile distribution characteristics of organic carbon (C), total nitrogen (N), total phosphorus (P) and total sulfur (S) were studied in two typical marshes including *Carex lasiocarpa* marsh and *Phragmites australis* marsh in the Sanjiang Plain. Sedimentary characteristics of typical mashes were analyzed. The results showed that vertically these soil chemical elements also varied, showing obvious stratification and enrichment. In a soil profile, soil organic C under both vegetation communities gradually decreased; soil total N first increased and then decreased under both; total P under *Carex lasiocarpa* first decreased and then increased, whereas it decreased with the increasing depth under *Carex lasiocarpa*; total S was reduced with increasing depth under both marshes. Total N, total P and total S were all strongly correlated with soil organic C ($P<0.01$); soil organic C was strongly correlated with bulk density ($P<0.01$). Our study also illustrated that the vegetation types had different influences for organic C, total N, total P and total S of the marsh profiles. Environmental ^{137}Cs and ^{210}Pb dating techniques were applied to determine recent sedimentation rates, and the constant rate of supply (CRS) was applied to deduce the age of sediment core, and the results showed that the mean sedimentation rate was 0.33 cm·a^{-1}, and the sedimentation fluxes ranged 0.03-0.48 g·(cm^2·a)$^{-1}$ [Mean = 0.29 g·(cm^2·a)$^{-1}$].

Key words: soil nutrient; vertical distribution; sedimentation flux; marsh; Sanjiang Plain

湿地是介于陆地生态系统和水生生态系统之间的一种过渡类型,兼有陆生和水生生态的特点, 是地球上生产力最高的生态系统之一[1]. 湿地土壤中的有机碳、氮、磷元素是生态系统中极其重要的生态因子,显著影响湿地生态系统的生产力,是目前全球变化研究的核心内容之一[2]. 天然湿地尽管占全球陆地面积不大(4% ~5%),但是有机碳储量非常丰富,估计全球湿地的有机碳储量大约为 4.5×10^{11} t,占地球陆地 1 m 土层总储量的 1/3,相当于大气 CO_2 总量的 40%,因此湿地碳库对于稳定和维持气候起重要作用[3~6]. 氮和磷是引发江河湖泊等湿地发生富营养化的重要因子之一[7~9],硫是植物体必需的大量元素之一[10]. 同时,湿地化学元素的含量也是划分湿地类型的重要依据[11],因此研究湿地土壤的有机碳、氮、磷和硫元素的空间分布规律具有重要意义.

三江平原是由黑龙江、松花江和乌苏里江汇流冲积而形成的沼泽化低平原,是我国最大的淡水湿

收稿日期: 2013-09-03; **修订日期**: 2014-03-19

作者简介: 李瑞利(1981 ~),女,博士,副研究员,主要研究方向为湿地生态学,E-mail: liruili@pkusz.edu.cn

* 通讯联系人,E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn; fcshi@nankai.edu.cn

地分布区之一，同时也是受人类活动影响，天然湿地分布面积减少最快的区域之一[12]. 位于三江平原腹地的七星河湿地国家级自然保护区，沿七星河南岸由西向东走向分布，土地总面积 200 km^2，其中芦苇沼泽面积 140 km^2，是三江平原唯一大面积分布的芦苇沼泽. 七星河湿地属于内陆湿地与水域生态系统类型保护区，形成有三江平原较为典型的各种不同类型的湿地生态，是目前三江平原保存比较完整的原始湿地，因此是研究天然湿地土壤有机碳、全氮、全磷和全硫空间分布规律的很好场所. 其中分布的毛果苔草沼泽是三江平原沼泽湿地中面积最大的湿地类型，面积约 449 km^2，占三江平原沼泽湿地总面积的 57%[13].

目前，国内外对营养物质在生态系统的存在特征及转化规律的研究较多，且主要集中在森林生态系统、草原生态系统和农田生态系统中，对湿地生态系统中营养物质的沉积、分布研究较少[10,14,15]. 三江平原湿地生态系统的碳、氮、磷和硫的循环和积累状况受到越来越多的关注，并已经开展了系统的研究[16~21]. 本研究组前期的研究结果发现不同的植被类型对湿地剖面有机碳和全氮具有不同程度的影响[18]. 另外，通过研究湿地的沉积速率特征不仅可以了解沉积的历史演化过程，而且能够揭示不同因素在影响重金属和营养物质分布和积累中所起的作用[22,23]. 因此，通过对三江平原进行沉积速率和沉积年代分析有助于深入分析不同植被类型对营养物质分布和积累的影响.

本研究通过对七星河湿地自然保护区毛果苔草沼泽和芦苇沼泽的调查取样，分析了沉积物剖面有机碳、氮、磷和硫元素的分布特征，以及有机碳含量、容重与湿地调蓄洪水能力之间的关系，并探讨了七星河湿地的沉积特征，有助于完善湿地土壤形成和发育的理论，探明湿地的生态过程和功能，以期为湿地的合理利用与保护提供科学依据.

1　研究区概况与方法

1.1　采样点概况

观测样地位于三江平原(45°01′ ~ 48°27′N，130°13′ ~ 135°05′E)腹地，七星河湿地国家级自然保护区(46°40′ ~ 46°52′N，132°5′ ~ 132°26′E). 保护区总面积为 200 km^2，是三江平原保存较完好的原始湿地之一. 本区气候类型为温带湿润、半湿润大陆性季风气候，年均温 1.9℃，1 月均温 -20℃，7 月均温 22℃，年均降水量为 500 ~ 600 mm，年无霜期 125 d 左右，为季节性冻土区. 主要土壤类型为草甸沼泽土、腐殖质沼泽土和泥炭沼泽土.

1.2　样品采集

选取保护区内典型的、具有代表性的毛果苔草沼泽和芦苇沼泽 2 类样地(表 1)，地上生物量分别为 551 $g \cdot m^{-2}$ 和 802 $g \cdot m^{-2}$. 土壤类型为腐殖质沼泽土. 为了避免干扰，应用自主研发的湿地土壤取样器(专利号：200410093777.3)进行取样. 分别在毛果苔草沼泽和芦苇沼泽随机布点，每个采样点选 3 个小区，分别采集 100 cm 的沉积物柱芯，按统一的标准进行分截，然后进行多点混合. 沉积物柱芯上层(0 ~ 60 cm)按 5 cm 间隔切割，下层(60 ~ 100 cm)按 20 cm 间隔切割，同时记录土壤剖面状况，并采集相应植物样品 12 个(1 × 1 m^2). 样品置于密封袋中保存，用手选法挑去活体根系，混匀，分取部分新鲜样品测定其干物质含量(105℃)，部分烘干(60℃)，磨碎，过 80 目筛，保存备用.

表 1　采样点基本情况

Table 1　Description of the sampling sites

采样点[1)]	种类组成	群落盖度/%	水文状况	主要建群种			
				种名	株数	高度/cm	盖度/%
CLM	毛果苔草、湿地柳叶菜、水木贼、驴蹄菜、泽芹等	90	常年积水	毛果苔草	500	80	85
PAM	芦苇、毛果苔草、水木贼、湿地柳叶菜等	80	常年积水	芦苇	70	170	45

1) CLM：*C. lasiocarpa* marsh(毛果苔草沼泽)，PAM：*P. australis* marsh(芦苇沼泽)

1.3　分析方法

土壤容重的测定采用烘干法. 土壤 pH 测定采用土液比 1∶5. 样品有机碳、全氮和全硫含量的测定在日本北海道大学 Field Science Center for Northern Biosphere 实验室进行，采用 Perkin-Elmer 2400 CHNS Analayzer 进行分析，该方法采用的是干烧法，有效避免了传统湿消化法中还原物质对测定结果的干扰. 全磷含量采用 ICP(PS-1000AT，美国)分析仪测定. ^{137}Cs、^{210}Pb的测定，采用美国 OTEC 公司多道低本底能谱仪对样品进行无损坏直接测

定,测年工作由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室完成. 通过测量沉积物不同深度的^{210}Pb放射性活度,扣除本底值后得到^{210}Pbex,根据^{210}Pbex估算沉积物的沉积速率[24]. 根据^{210}Pbex的垂向变化过程计算沉积速率:$R = \lambda/b$,式中,R 为沉积速率(cm·a^{-1}),λ 为^{210}Pb 衰变常数(0.031 14 a^{-1}),b 为^{210}Pbex取自然对数后与深度之间线性拟合直线的斜率. 假定沉积速率在所研究的时间范围内恒定不变,经过简单换算即可得到沉积物的沉积速率和年龄. 沉积通量[g·(cm^2·a)$^{-1}$]是单位时间内单位面积上形成的堆积物质量,由沉积速率乘以沉积物的干密度(g·cm^{-3}). 沉积物干密度测定方法为沉积物烘干后所得的干重除以湿样体积[25].

数据分析采用 SPSS 13.0 和 Origin 7.5 处理.

2 结果与讨论

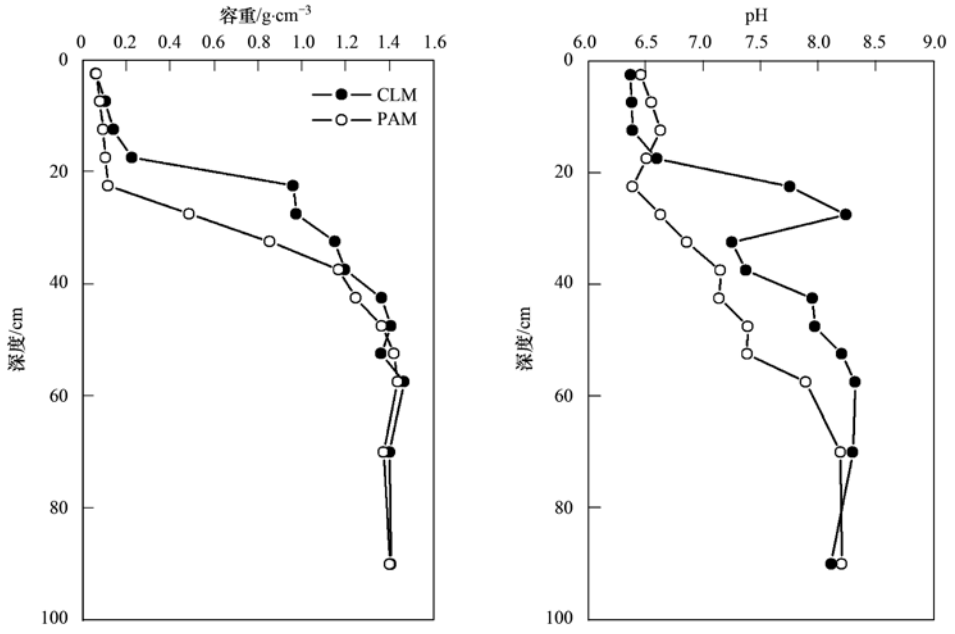
2.1 三江平原典型沼泽土壤的结构特征

两类沼泽土壤剖面均具有 4 个明显不同的发生层. 由表层向下依次为未充分分解的草根层、深褐色腐殖质层、棕黄色潜育层及最下层的母质层,其中,草根层与其下土壤发生层之间具有明显的界面. 沼泽剖面柱样层理明显(沼泽剖面土层过渡不明显),沉积特征变化不大,可能是由于七星河天然沼泽湿地受人为干扰较少,又处于相对较稳定的水动力及沉积条件下引起的.

两类典型湿地剖面表层(0 ~ 20 cm)容重均较小,平均容重分别为 0.132 g·cm^{-3}和 0.106 g·cm^{-3}(图 1). 在 20 ~ 40 cm 内,发生急剧变化; 40 cm 以下,容重均在 1.2 g·cm^{-3}以上; 在 0 ~ 60 cm 内,毛果苔草沼泽容重(Mean = 0.868 g·cm^{-3})高于芦苇沼泽(Mean = 0.703 g·cm^{-3}). 以上结果表明,2 类沼泽剖面沉积物容重表层较小,但有随深度逐渐增大的趋势,这与美国北卡罗来纳河口沼泽中规律性淹水沼泽土壤剖面容重的变化规律有很好的一致性[28]. 土壤剖面中 pH 的变化如图 1,垂直方向上两类沼泽的 pH 变化均不大,在 6.5 ~ 8.3 范围内; 表层(0 ~ 30 cm) pH 值呈弱酸性,并由于常年积水,沼泽土壤处于还原状态.

2.2 土壤有机碳、全氮、全磷和全硫垂直分布特征

两类沼泽土壤有机碳的垂直分布规律基本趋于一致(图 2),由表层向下逐渐减少,母质层(80 cm 以下)达到最小值,这与大多数土壤有机碳的垂直分布规律一致. 从图 2 还可看出,在 0 ~ 60 cm 深度内有机碳含量变化比较大,最大值出现在 15 cm 左右,在 15 ~ 60 cm 深度内有机碳含量急剧减少到 50 g·kg^{-1}左右; 在 60 ~ 100 cm 深度内有机碳含量变幅较小,稳定在 50 g·kg^{-1}左右. 芦苇沼泽土壤有机碳含量高于毛果苔草沼泽,这和沼泽植物体地下部分元素含量相关(表 2),也与沼泽植物不同的 C/N 有关. 表 2 中,毛果苔草和芦苇地上部分 C/N 分别为 34.81 和 22.08,地下部分 C/N 分别为 22.16 和 17.66.



CLM: *C. lasiocarpa* marsh(毛果苔草沼泽), PAM: *P. australis* marsh(芦苇沼泽), 下同

图 1 土壤剖面中容重和 pH 的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of bulk density and pH in soil profiles

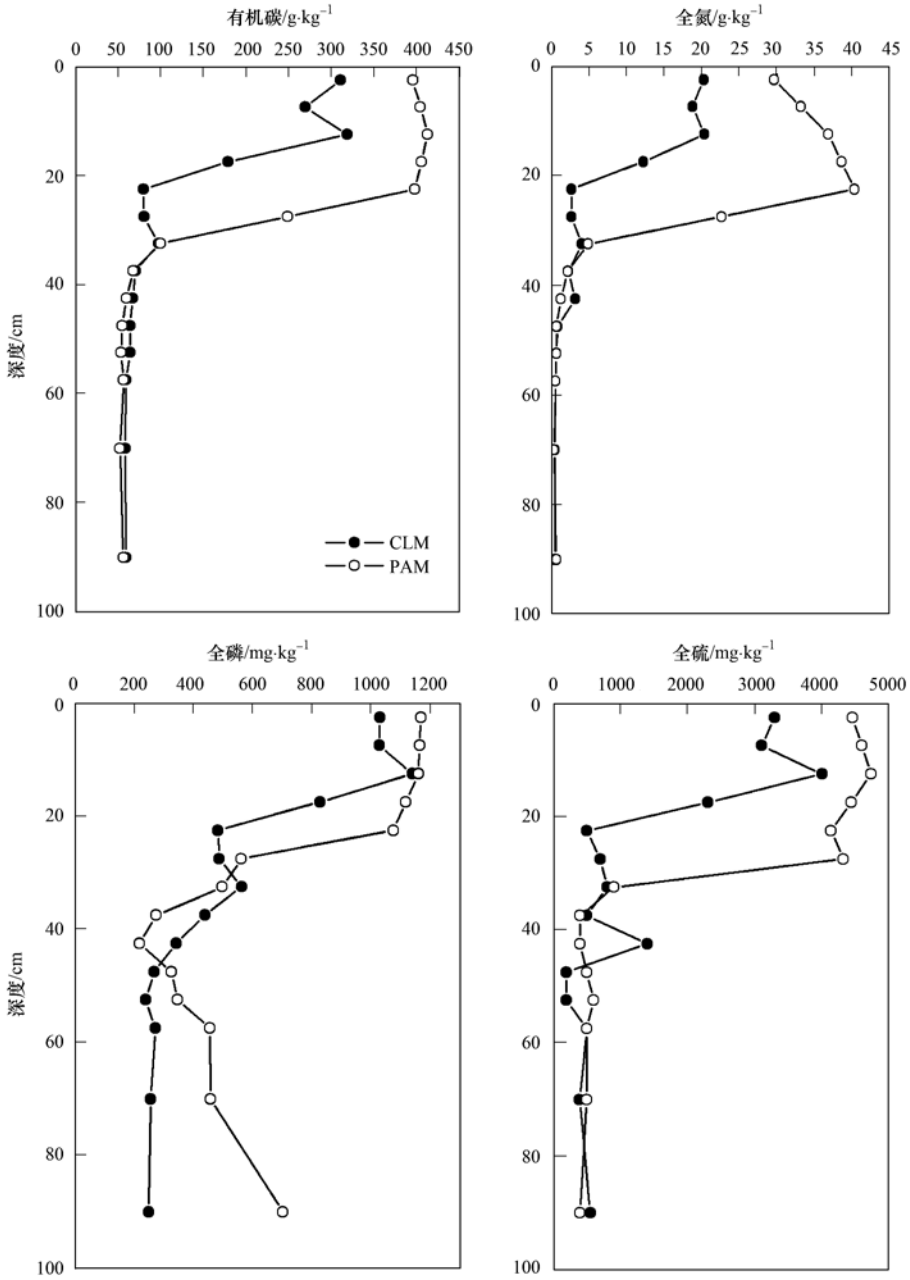


图 2　土壤剖面中有机碳和全氮全磷和全硫的垂直分布

Fig. 2　Vertical distribution of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), soil total phosphorus (TP), and total sulfer(TS) in soil profiles

表 2　毛果苔草和芦苇中有机碳和全氮含量[1)] (n = 12)

Table 2　Contents of organic C and total N in *C. lasiocarpa* and *P. australis* (n = 12)

分析项目	地上部分		地下部分	
	毛果苔草	芦苇	毛果苔草	芦苇
有机碳/g·kg⁻¹	412.1 ± 30.11[a]	410.5 ± 44.73[a]	335.0 ± 43.15[a]	421.1 ± 44.44[a]
全氮/g·kg⁻¹	11.84 ± 4.121[a]	18.59 ± 4.533[b]	15.12 ± 2.208[a]	23.84 ± 4.594[b]
全磷/mg·kg⁻¹	1 515 ± 154[a]	1 797 ± 210[a]	1 730 ± 198[a]	1 988 ± 236[a]
全硫/mg·kg⁻¹	2 366 ± 108[a]	2 500 ± 153[a]	2 425 ± 189[a]	2 603 ± 178[a]

1)不同小写字母表示毛果苔草和芦苇间差异显著(P < 0.05)

两类沼泽土壤表层全氮含量较高(图 2). 毛果苔草沼泽剖面在 0 ~ 20 cm 内快速下降至较低含量，而在 20 ~ 100 cm 深度内没有太大变化；最大值为 20 g·kg⁻¹,出现在 15 cm 左右. 芦苇沼泽剖面在 30

cm 处下降至较低含量,30 cm 深度以下没有太大变化; 最大值为 40 g·kg^{-1},出现在 25 cm 左右. 从图 2 中还可看出,毛果苔草沼泽土壤全氮含量明显低于芦苇沼泽,可能是由于芦苇地下部分的全氮含量明显高于毛果苔草所致(表 2).

在湿地土壤中,磷具有以无机和有机形式存在的溶解态和不溶态,湿地植物通过土壤吸收磷,同时植物将无机磷转化成有机磷又储存在土壤有机质中,矿化后再循环或被迁出湿地[26]. 研究结果表明,全磷在两类沼泽土壤中的垂直分布规律不同(图 2). 从图 2 可以看出,毛果苔草沼泽的全磷含量在草根层(0 ~ 20 cm)最高,为(1 007 ± 112) mg·kg^{-1},然后在腐殖层逐渐降低,在母质层降到最低(250 mg·kg^{-1}),呈逐渐降低的趋势. 芦苇沼泽呈先减后增的"V"型分布,草根层(0 ~ 30 cm)较高,为(1 152 ± 20) mg·kg^{-1},然后逐渐降低,在 45 cm 左右降到最低值 220 mg·kg^{-1},然后又逐渐升高,至母质层达到最大值为 703 mg·kg^{-1}. 总体来讲,芦苇沼泽土壤全磷含量高于毛果苔草沼泽. 在 0 ~ 30 cm 内,以及 50 cm 以下,芦苇沼泽土壤全磷含量均高于毛果苔草沼泽,这可能与芦苇的地上部分与地下部分的全磷含量均高于毛果苔草有关. 另外,从图 2 可以看出,0 ~ 50 cm 内,毛果苔草沼泽与芦苇沼泽土壤含氮量均下降,而在 50 cm 以下,二者含氮量变化情况开始出现不同,芦苇沼泽土壤含氮量开始上升,而毛果苔草沼泽含氮量基本不变,这可能由于早期该湿地芦苇分布面积较大,后来逐渐减少,而毛果苔草分布情况较稳定有关. 由此表明,植被类型是影响沼泽湿地土壤全磷的空间分布的主要因素之一.

硫广泛分布在地壳中,岩石圈中估计约为 600 mg·kg^{-1},且在土壤中的含量变化较大,一般在 30 ~ 10 000 mg·kg^{-1}之间,平均值约为 700 mg·kg^{-1}. 本研究中,毛果苔草沼泽(1 317 mg·kg^{-1} ± 1 297 mg·kg^{-1})和芦苇沼泽(2 533 mg·kg^{-1} ± 2 398 mg·kg^{-1})湿地土壤中全硫的含量差异较大,且均高于世界土壤硫含量均值(700 mg·kg^{-1}). 在垂直方向上,两类沼泽中的硫含量有很强的规律性(图 2),在草根层中的全硫含量比较高,且毛果苔草沼泽(3 175 mg·kg^{-1} ± 606 mg·kg^{-1})低于芦苇沼泽(4 444 mg·kg^{-1} ± 190 mg·kg^{-1}),相应地,毛果苔草体内含硫量也低于芦苇; 然后向下降低并维持在一个稳定的水平,约为 500 mg·kg^{-1}. 两类沼泽长期积水,地表以还原性环境为主,有利于硫化物的形成和积累,所以全硫含量在两类沼泽中均较高.

两类沼泽土壤碳氮比基本维持在 9.2 ~ 25.14 之间,平均为 13.54,表明土壤有机质的腐殖化程度较高[26]. 土壤碳氮比垂直方向具有明显的分布规律(图 3). 分析结果表明,毛果苔草沼泽土壤碳氮比高于芦苇沼泽,这与有机碳和全氮的分布规律不同,与刘吉平对三江平原环形湿地[26]以及白军红对内蒙古乌兰泡湿地[29]的研究结论类似. 研究表明

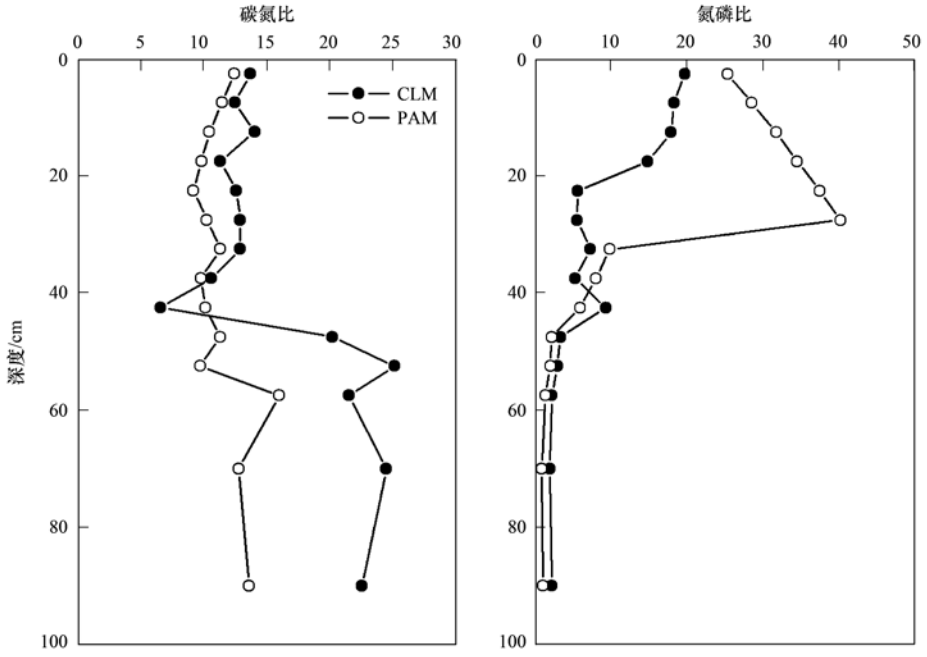


图 3 土壤剖面中碳氮比(C/N)和氮磷比(N/P)的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of soil C/N and N/P ratio in soil profiles

氮含量相对富集的情况影响土壤 C/N 的大小，毛果苔草体内全氮含量明显低于芦苇沼泽（表 2），这也是导致芦苇沼泽碳氮比相对较低的主要原因.

两类沼泽土壤氮磷比在垂直方向上具有明显的分布规律（图 3）. 垂直方向上，毛果苔草沼泽 N/P 随深度增加逐渐降低：在草根层（0 ~ 20 cm）最高，为 17.67 ± 1.77；腐殖质层平均为 6.59，潜育层以下维持在 2 左右. 芦苇沼泽 N/P 呈先增加后减小，最后趋于稳定的趋势：草根层（0 ~ 30 cm）内逐渐升高，为 32.98 ± 5.08，后逐渐减小. 结果还表明，毛果苔草沼泽 N/P 低于芦苇沼泽，这与全氮的分布规律一致.

2.3　土壤有机碳、全氮、全磷、全硫和容重之间的相关关系

对两类沼泽湿地土壤不同采样点各土壤层次的全氮、全磷、全硫和有机碳之间分别进行相关性分析，结果表明，全氮、全磷、全硫和有机碳之间的相关性非常显著，回归方程分别为：

$$TN(g \cdot kg^{-1}) = 0.092\,2TOC(g \cdot kg^{-1}) - 0.365\,6 \quad (R^2 = 0.969\,0,\ P < 0.01)$$

$$TP(mg \cdot kg^{-1}) = 2.223\,6TOC(g \cdot kg^{-1}) + 343.57 \quad (R^2 = 0.869\,0,\ P < 0.01)$$

$$TS(mg \cdot kg^{-1}) = 11.45TOC(g \cdot kg^{-1}) + 372.03 \quad (R^2 = 0.949\,5,\ P < 0.01)$$

说明在七星河湿地土壤中全氮、全磷、全硫和有机碳的消长一致. 研究结果还表明，三江平原两类典型沼泽湿地土壤容重与有机碳含量之间呈现极显著的指数关系 $y = 423.59e^{-2.548x}$（$R^2 = 0.939\,8$，$P < 0.01$）. 这与张文菊等[30]研究的洞庭湖湿地有机碳和容重之间的关系相似，和国外 Avnimelech 等[31]的研究一致，表明在不同地理分布的湿地中，有机碳和容重之间均存在显著的相关性.

2.4　三江平原沼泽湿地的沉积特征

沉积层年代通过测定 ^{137}Cs、^{210}Pb 的放射性活度来实现，在此基础上，采用恒定放射性通量（CRS）模式推算年龄. 分析结果表明，三江平原沼泽湿地平均沉积速率为 0.33 cm·a^{-1}，远大于松辽平原中部泥炭地堆积速率（0.02 ~ 0.044 cm·a^{-1}）[32]及我国东北地区全新世晚期泥炭平均堆积速率（0.039 cm·a^{-1}）[33]，而与大布苏盐湖现代平均沉积速率相似（0.26 ~ 0.27 cm·a^{-1}）[34]，但是低于吉林向海沼泽湿地平均沉积速率（0.49 cm·a^{-1}）[27]和东北辽河口平均沉积速率（1.1 cm·a^{-1}）[35]. 同国外相比，其平均值接近于美国佛罗里达州圣约汉斯河盆地草本沼泽（0.33 cm·a^{-1} ± 0.05 cm·a^{-1}）[36].

结果还表明，三江平原沼泽湿地沉积通量范围 0.03 ~ 0.48 g·(cm^2·a)$^{-1}$，平均为 0.29 g·(cm^2·a)$^{-1}$（图 4）. 说明三江平原沼泽湿地沉积通量和美国佛罗里达 Everglades 大沼泽（内陆淡水湿地）[0.07 ~ 0.22 g·(cm^2·a)$^{-1}$][37]相似，且与内蒙古乌兰泡沼泽[0.20 ~ 0.41 g·(cm^2·a)$^{-1}$]和大布苏湖的沉积通量[0.14 ~ 0.44 g·(cm^2·a)$^{-1}$]相近[34]，而低于向海自然保护区境内的付老文泡的沉积通量[0.53 ~ 0.96 g·(cm^2·a)$^{-1}$，平均 0.78 g·(cm^2·a)$^{-1}$][27].

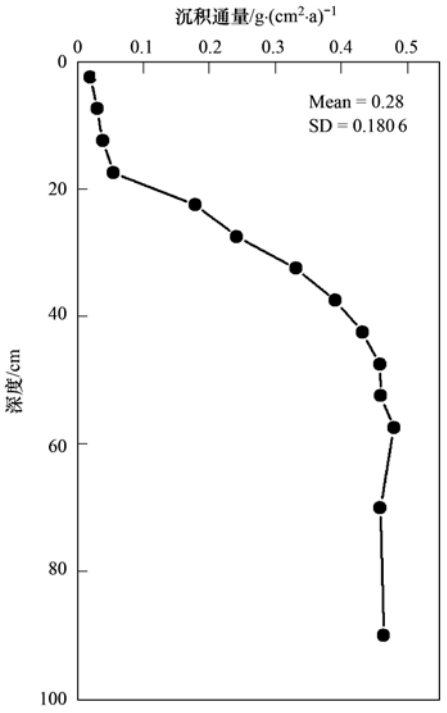


图 4　三江平原湿地剖面沉积通量垂向变化

Fig. 4　Vertical variety of fluxes in Sangjiang Plain Wetland

3　讨论

土壤有机碳、全氮、全磷和全硫的空间分布受沼泽植物体元素含量的影响，尤其是土壤表层（草根层和腐殖质层）受影响较大，由于毛果苔草有机碳、全氮、全磷和全硫含量总体低于芦苇，致使毛果苔草沼泽表层有机碳、全氮、全磷和全硫含量均低于芦苇沼泽.

植物根系的分布直接影响土壤有机碳的垂直分布，因为大量死根的腐解归还，以及大量的地表枯落物，为土壤提供了丰富的碳源. 本研究中，毛果苔草沼泽和芦苇沼泽表层（0 ~ 40 cm）有机碳含量较丰富，与孔范龙等[21]研究三江平原环形湿地的土壤活性有机碳的分布状况一致；腐殖质层以下，植物根系分布较少，使该层土壤中有机碳含量开始明显降

低. 大气中的 N 输入通过湿地土壤中固氮菌和蓝藻的活动进入生物体[38],土壤氮的输出主要是来自于土壤有机质的分解,分解后大部分被植物吸收利用,部分 NH_3 经硝化、反硝化或挥发,释放到大气中[3, 39]. 本研究中毛果苔草沼泽和芦苇沼泽土壤表层全氮含量均较高,与王洋等[40]研究三江平原典型碟形湿地以及孙志高等[41]研究三江平原小叶章湿地得出的结论一致,这主要是由于三江平原常年积水,微生物活动弱,有机质分解程度低,导致土壤表层全氮的含量均较高.

本研究中,两类沼泽土壤全磷和有机碳之间呈极显著的正相关关系,说明沼泽土壤中磷的沉积数量和有机质之间有密切的关系. 沼泽土壤中的磷主要以有机的形态存在,这是由于沼泽土壤中植物残体分解归还,而接收外部环境中无机磷很少所导致的. 这一结果与于君宝等[42]研究三江平原河床-河漫滩型泥炭地和谷底洼地型泥炭的结果不同,其结果是泥炭全磷和有机碳的关系不显著,磷大部分来源于外部环境. 而与刘吉平等[43]研究三江平原环形湿地土壤的结果,以及翟金良等[44]研究向海洪泛湿地土壤的结果一致. 说明湿地土壤全磷来源比较复杂,全磷含量还可能与湿地地形、水循环和湿地发育过程相关,还有待深入的研究.

两类沼泽中全硫含量和有机碳呈显著的正相关关系,土壤表层有机碳含量较高,所以全硫的含量也较高,从上到下有机碳含量递减,全硫含量也逐渐减少,和有机碳的分布规律一致. 这与郝庆菊等[45]的研究结果一致,说明毛果苔草沼泽和芦苇沼泽湿地中的全硫主要是以有机硫形式存在,且受外界环境的影响很小.

土壤容重是反映土壤性状的重要指标,它与土壤的水热状况密切相关. 对于湿地土壤而言,容重的大小不仅能反映出有机质含量高低和土壤结构状况,而且也是衡量湿地土壤持水和蓄水性能的重要指标之一[31, 46]. 本研究中,沼泽湿地表层的有机碳含量较高,容重较小,持水和蓄水性能强,对于沼泽湿地调蓄洪水具有重要意义.

我国湿地总面积为 6.6×10^7 hm^2,约占国土面积的 6.5%,居世界第四位,亚洲第一位[47]. 三江平原是我国最大的沼泽化低平原,区内沼泽分布广泛,湿地总面积为 1.1×10^6 hm^2,湿地类型丰富. 多年来,我国湖泊沉积及环境演变研究已经取得了令人瞩目的成就,但目前沼泽湿地沉积研究相对薄弱,尤其对三江平原沼泽湿地的现代沉积及其与流域环境变化关系方面的研究,还未见报道. 同时应用 ^{137}Cs、^{210}Pb 测年技术可以使现代沉积速率的计算定量化,两者相互印证,使研究的结构更为准确. 本文通过对七星河湿地典型沉积剖面的研究,初步分析了湿地的沉积速率与沉积通量,关于三江平原湿地沉积特征的系统研究还有待深入.

4 结论

(1) 七星河自然保护区两类沼泽湿地土壤有机碳、全氮、全磷和全硫在垂直方向上具有明显的分层和富聚现象; 自上而下,有机碳含量逐渐降低; 全氮含量先增加后减少; 毛果苔草沼泽全磷含量呈先减后增的"V"型分布,而芦苇沼泽全磷含量逐渐降低; 全硫和有机碳的分布规律一致.

(2) 毛果苔草沼泽有机碳、全氮、全磷和全硫含量均低于芦苇沼泽,与毛果苔草有机碳、全氮、全磷和全硫均低于芦苇有关. 植被类型是影响沼泽湿地土壤有机碳、全氮、全磷和全硫空间分布的主要因素之一.

(3) 全氮、全磷和全硫与有机碳之间呈极显著的正相关关系($P < 0.01$); 有机碳与容重之间呈极显著的正相关关系($P < 0.01$).

(4) 应用 ^{137}Cs、^{210}Pb 的放射性活度测定沉积层年代,并采用恒定放射性通量(CRS)模式推算年龄,结果表明,三江平原沼泽湿地平均沉积速率为 0.33 $cm \cdot a^{-1}$,沉积通量为 0.03 ~ 0.48 $g \cdot (cm^2 \cdot a)^{-1}$,平均为 0.29 $g \cdot (cm^2 \cdot a)^{-1}$.

致谢: ^{137}Cs、^{210}Pb 沉积物测年由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室完成,年代数据分析过程中得到了夏威岚老师的指导与帮助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(3): 384-389.

[2] Mitsch W J, Gosselin K J G. Wetlands[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000. 155-204.

[3] 刘春英, 周文斌. 我国湿地碳循环的研究进展[J]. 土壤通报, 2012, **43**(5): 1264-1270.

[4] Gudasz C, Bastviken D, Steger K, *et al*. Temperature-controlled organic carbon mineralization in lake sediments[J]. Nature, 2010, **466**(7305): 478-481.

[5] Sulman B N, Desai A R, Mladenoff D J. Modeling soil and biomass carbon responses to declining water table in a wetland-rich landscape[J]. Ecosystems, 2013, **16**(3): 491-507.

[6] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter-a key but

poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. Plant and Soil, 2011, **338**(1-2): 143-158.

[7] 张晋华, 于立霞, 姚庆祯, 等. 不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 569-576.

[8] 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 等. 黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 942-950.

[9] 马久远, 王国祥, 李振国, 等. 太滆南运河入湖河口沉积物氮素分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 577-584.

[10] Stribling J M, Cornwell J C. Nitrogen, phosphorus and sulfur dynamics in a low salinity marsh system dominated by *Spartina alterniflora*[J]. Wetlands, 2001, **21**(4): 629-638.

[11] Harris A G, McMurray S C, Uhlig P W, *et al*. Field Guide to the Wetland Ecosystem Classification for Northwestern Ontario [M]. NWST Field Guide FG-01. Queen's Printer, Ontario, 1996.

[12] 刘红玉, 张世奎, 吕宪国. 三江平原湿地景观结构的时空变化[J]. 地理学报, 2004, **59**(3): 391-400.

[13] 汲玉河, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原湿地毛果苔草群落的演替特征[J]. 湿地科学, 2004, **2**(2): 139-144.

[14] Crain C M. Shifting nutrient limitation and eutrophication effects in marsh vegetation across estuarine salinity gradients [J]. Estuaries and Coasts, 2007, **30**(1): 26-34.

[15] 王书伟, 颜晓元, 林静慧, 等. 不同土地利用方式下三江平原东北部土壤有机碳和全氮分布规律[J]. 土壤, 2010, **42**(2): 190-199.

[16] 童成立, 张文菊, 王洪庆, 等. 三江平原湿地沉积物有机碳与水分的关系[J]. 环境科学, 2005, **26**(6): 38-42.

[17] 曹宏杰,王立民,罗春雨,等. 三江平原地区土壤养分特征分析[J]. 中国农学通报,2013,**29**(35):254-262.

[18] 石福臣, 李瑞利, 王绍强, 等. 三江平原典型湿地土壤剖面有机碳及全氮分布与积累特性[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(7): 1425-1431.

[19] 李新华, 刘景双, 孙晓军, 等. 三江平原小叶章湿地土壤硫的组成与垂直分布[J]. 生态与农村环境学报, 2009, **25**(2): 34-38, 97.

[20] 郭雪莲, 吕宪国. 三江平原湿地典型植物群落氮的积累与分配[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(1): 59-63.

[21] 孔范龙, 郗敏, 李悦, 等. 三江平原典型环型湿地土壤 DOC 剖面分布及储量[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(5): 176-179.

[22] 王爱军, 叶翔, 李团结, 等. 近百年来珠江口淇澳岛滨海湿地沉积物重金属累积及生态危害评价[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1306-1314.

[23] 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 等. 近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 137-144.

[24] 曹琼英, 沈德勋. 第四纪年代学及实验技术[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988. 228-252.

[25] 章伟艳, 张富元, 陈荣华, 等. 南海深水区晚更新世以来沉积速率、沉积通量与物质组成[J]. 沉积学报, 2002, **20**(4): 668-674.

[26] Babiarz C, Hoffmann S, Wieben A, *et al*. Watershed and discharge influences on the phase distribution and tributary loading of total mercury and methylmercury into Lake Superior [J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 299-310.

[27] 王国平, 刘景双, 汤洁, 等. 吉林向海沼泽湿地典型剖面沉积及年代序列重建[J]. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 221-228.

[28] Craft C B, Seneca E D, Broome S W. Vertical accretion in microtidal regularly and irregularly flooded estuarine marshes[J]. Estuarine, Costal and Shelf Science, 1993, **37** (4): 371-386.

[29] 白军红, 邓伟, 张玉霞. 内蒙古乌兰泡湿地环带状植被区土壤有机质及全氮空间分异规律[J]. 湖泊科学, 2002, **14**(2): 145-151.

[30] 张文菊, 彭佩钦, 童成立, 等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 56-60.

[31] Avnimelech Y, Ritvo G, Meijer L E, *et al*. Water content, organic carbon and dry bulk density in flooded sediments[J]. Aquacultural Engineering, 2001, **25**(1): 25-33.

[32] 宋海远. 松辽平原中西部泥炭特征与古环境[A]. 见: 裘善文. 中国东北平原第四纪自然环境形成与演化[M]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 1990. 141-145

[33] 夏玉梅. 东北全新世泥炭孢粉组合特征及古环境的初步研究[A]. 见: 黄锡畴. 中国沼泽研究[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 65-72.

[34] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 35.

[35] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第十四分册(重要河口)[M]. 北京: 海洋出版社, 1998. 466-467.

[36] Brenner M, Schelske C L, Keenan L W. Historical rates of sediment and nutrient accumulation in marshes of the Upper St. Johns River Basin, Florida, USA[J]. Journal of Paleolimnology, 2001, **26**(3): 241-257.

[37] Merkel R S, Hickey-Vargas R. Element and sediment accumulation rates in the Florida Everglades[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, **122**(3-4): 327-349.

[38] 王玲玲, 孙志高, 牟晓杰, 等. 黄河口滨岸潮滩不同类型湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, **42**(6): 1439-1445.

[39] 周念清, 王燕, 钱家忠, 等. 湿地氮循环及其对环境变化影响研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, **38**(6): 865-869.

[40] 王洋, 刘景双, 孙志高, 等. 三江平原典型碟形湿地土壤氮素分布特征[J]. 土壤通报, 2011, **42**(3): 598-602.

[41] 孙志高, 刘景双, 于君宝. 三江平原小叶章湿地土壤中碱解氮和全氮含量的季节变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2009, **23**(8): 145-149.

[42] 于君宝, 刘景双, 王金达. 三江平原泥炭沼泽沉积物中营养物质的分布规律[J]. 湿地科学, 2004, **2**(1): 31-35.

[43] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原环型湿地土壤养分的空间分布规律[J]. 土壤学报, 2006, **43**(2): 247-255.

[44] 翟金良, 何岩, 邓伟. 向海洪泛湿地土壤全氮、全磷和有机质含量及相关性分析[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(6): 40-43.

[45] 郝庆菊, 王起超, 王跃思. 三江平原典型湿地土壤中硫的分布特征[J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 331-335.

[46] Celik I, Gunal H, Budak M, *et al*. Effects of long-term organic and mineral fertilizers on bulk density and penetration resistance in semi-arid Mediterranean soil conditions[J]. Geoderma, 2010, **160**(2): 236-243.

[47] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望[J]. 地球科学进展, 2000, **15**(6): 666-672.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1. 1,1. 1. 1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 35 No. 8

Aug. 15, 2014

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM_{10}) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China ····· LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, *et al.* (2843)

Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou ····· CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)

Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou ····· DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, *et al.* (2857)

Atmospheric CO_2 Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China ····· LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, *et al.* (2864)

Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China ····· SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, *et al.* (2871)

Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin ····· ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, *et al.* (2878)

Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter ····· LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, *et al.* (2883)

Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency ····· SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, *et al.* (2890)

Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process ····· CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, *et al.* (2897)

Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management ····· BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, *et al.* (2903)

Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period ····· ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)

Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing ····· CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, *et al.* (2920)

Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain ····· LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, *et al.* (2928)

Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin ····· LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, *et al.* (2937)

Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China ····· ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, *et al.* (2944)

Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet ····· XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)

Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China ····· LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, *et al.* (2959)

Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China ····· CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, *et al.* (2967)

Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures ····· WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, *et al.* (2974)

Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(Ⅳ)-catalyzed O_3/H_2O_2 Under Acidic Conditions ····· GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, *et al.* (2980)

Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(Ⅱ) and Hg(Ⅱ) in Water by Zero-Valent Iron ····· SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (2985)

Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution ····· FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, *et al.* (2992)

Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor ····· BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, *et al.* (3002)

Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration ····· WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, *et al.* (3007)

Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies ····· ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, *et al.* (3012)

Atrazine Wastewater Treatment in a SPG Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor ····· LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, *et al.* (3018)

Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane ····· ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, *et al.* (3024)

Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling ····· CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, *et al.* (3031)

Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular ····· LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, *et al.* (3038)

Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB ····· LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)

Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application ····· CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, *et al.* (3052)

Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing ····· DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, *et al.* (3060)

Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China: Sources and Human Exposure and Health Risks ····· ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, *et al.* (3066)

Reponses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China ····· QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, *et al.* (3073)

Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil ····· LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, *et al.* (3083)

Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil ····· HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, *et al.* (3091)

Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil ····· YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)

Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N_2O Emission ····· CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yan (3102)

Contribution of Different Processes in Wetland Soil N_2O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China ····· SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, *et al.* (3110)

Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH_4 and N_2O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping ····· WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, *et al.* (3120)

Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China ····· YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, *et al.* (3128)

Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize ····· WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, *et al.* (3135)

Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings ····· LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, *et al.* (3142)

Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice ····· LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, *et al.* (3149)

Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(Ⅵ) ····· WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, *et al.* (3155)

Promotion Effects of Vitamin B_{12} on the Degradation of 2,4,4′-Trichlorobiphenyl by *Nostoc* PD-2 ····· LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, *et al.* (3162)

Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain *Serratia* sp. ····· XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, *et al.* (3169)

Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake ····· WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, *et al.* (3175)

Cloning of Full-length cDNA of HMGR from *Gobiocypris rarus* and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol ····· DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, *et al.* (3183)

Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2 ····· HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, *et al.* (3192)

Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(Ⅱ) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon ····· LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, *et al.* (3198)

Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment ····· CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, *et al.* (3206)

Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD ····· LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, *et al.* (3212)

Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China ····· MA Lan, MAO Jian-su (3219)

Discussion on Reduction Potential of CH_4 Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak ····· WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, *et al.* (3225)

Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China ····· XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, *et al.* (3230)

《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　汤鸿霄　陈吉宁　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）

2014 年 8 月 15 日　第 35 卷　第 8 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 35　No. 8　Aug. 15, 2014

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	欧 阳 自 远	**Editor-in -Chief**	OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 （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：90.00 元　　国外发行代号：M 205

国 内 外 公 开 发 行