

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

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

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响	
..... 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)	
利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态	黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)
南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究	朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)
北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究	苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)
重庆市主城区 PM _{2.5} 时空分布特征	刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)
大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比	庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)
深圳市大气中全氟化合物的残留特征	何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)
北京上甸子站大气 CO ₂ 及 δ ¹³ C(CO ₂) 本底变化	夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)
梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布	刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)
城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险	刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)
北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估	
..... 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)	
西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析	王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)
PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究	刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)
海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价	张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)
曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究	薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)
滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源	李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)
江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价	李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)
城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究	刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)
我国北方温排水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性	
..... 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)	
额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征	韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)
太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析	冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)
铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征	程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)
基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究	马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)
重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算	张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)
山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价	邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)
伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡河道脱氮机制的影响	韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)
环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征	高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)
藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律	陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)
扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响	郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)
铅改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响	章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)
电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究	王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)
水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用	
..... 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)	
多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除	乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)
污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析	牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)
高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析	李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)
连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良 (1472)
反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复	王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)
低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响	
..... 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)	
低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究	
..... 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)	
短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响	谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)
不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子	崔海, 张亚红 (1507)
塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性	贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)
小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响	刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)
鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析	王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)
水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素	罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)
高温纤维素降解菌筛选及产酶特性	冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)
基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发	
..... 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)	
养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价	金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)
4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响	王兰君, 王金花, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)
新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应	林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)
水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究	李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)
《环境科学》征订启事 (1218) 《环境科学》征稿简则 (1370) 信息 (1352, 1412, 1498)	

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性

贡璐^{1,2}, 朱美玲^{1,2}, 刘曾媛^{1,2}, 张雪妮^{1,2}, 解丽娜^{1,2}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 以塔里木盆地南缘的于田绿洲为靶区, 结合经典统计方法分析研究区灌漠土、棕漠土、盐土和风沙土的土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的分异规律, 利用冗余分析探讨了土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性。经典统计结果表明, 研究区土壤有机碳、无机碳含量均值分别为 $2.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $25.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中灌漠土的有机碳含量显著高于棕漠土、盐土和风沙土, 风沙土的无机碳含量显著高于其他土壤类型; 灌漠土的土壤含水量及养分含量最高, 风沙土最低; 除灌漠土外, 各土壤类型盐碱化程度较高。冗余分析结果显示: 环境因子对土壤碳含量影响的重要性排序为: 全氮 > 有效磷 > 土壤含水量 > 地下水埋深 > 速效钾 > pH > 全盐。其中全氮、有效磷、土壤含水量和地下水埋深与土壤碳含量呈极显著相关性 ($P < 0.01$); 速效钾、pH 与土壤碳含量表现为显著相关性 ($P < 0.05$); 其他环境因子与土壤碳含量的相关性均不显著 ($P > 0.05$)。

关键词: 土壤有机碳; 土壤无机碳; 环境因子; 冗余分析; 极端干旱区

中图分类号: X144; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1516-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.04.042

Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin

GONG Lu^{1,2}, ZHU Mei-ling^{1,2}, LIU Zeng-yuan^{1,2}, ZHANG Xue-ni^{1,2}, XIE Li-na^{1,2}

(1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China)

Abstract: We analyzed the differentiation among the environmental factors and soil organic/inorganic carbon contents of irrigated desert soil, brown desert soil, saline soil and aeolian sandy soil by classical statistics methods, and studied the correlation between soil carbon contents and the environmental factor by redundancy analysis (RDA) in a typical oasis of Yutian in the southern edge of the Tarim Basin. The results showed that the average contents of soil organic carbon and soil inorganic carbon were $2.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $25.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ respectively. The soil organic carbon content of the irrigated desert soil was significantly higher than those of brown desert soil, saline soil and aeolian sandy soil, while the inorganic carbon content of aeolian sandy soil was significantly higher than those of other soil types. The soil moisture and nutrient content were the highest in the irrigated desert soil and the lowest in the aeolian sandy soil. All soil types had high degree of salinization except the irrigated desert soil. The RDA results showed that the impacts of environmental factors on soil carbon contents ranked in order of importance were total nitrogen > available phosphorus > soil moisture > ground water depth > available potassium > pH > total salt. The soil carbon contents correlated extremely significantly with total nitrogen, available phosphorus, soil moisture and ground water depth ($P < 0.01$), and it correlated significantly with available potassium and pH ($P < 0.05$). There was no significant correlation between soil carbon contents and other environmental factors ($P > 0.05$).

Key words: soil organic carbon; soil inorganic carbon; environmental factors; redundancy analysis; extremely arid areas

土壤碳库是陆地生态系统中最大且周转时间最慢的碳库, 它由有机碳库和无机碳库两大部分组成, 在全球碳循环中起着关键作用^[1,2]。当前在人类活动影响下, 土壤碳循环加快发生改变并引起土壤环境性状的变化, 同时各种环境因子交互作用深刻影响着碳库的迁移和转化。目前, 土壤碳库特征及其影响因素研究仍是土壤碳循环与全球变化研究的热点领域, 国内外学者探讨了森林、草地、农田等不同生态系统类型的土壤碳库特征及其影响因素^[3-6], 特别针对干旱区土壤碳的研究相对匮乏, 且

研究内容大多侧重有机碳^[7,8], 涉及土壤无机碳的研究相对较少^[9]。系统解析干旱区绿洲土壤有机碳和无机碳含量与环境因子相关性的工作更是鲜见报道^[10]。干旱土地占全球陆地总面积 40%, 在全球碳循环过程中占有十分重要的地位。作为干旱区碳素的主要存储场所, 绿洲土壤碳库联系着生态系统内

收稿日期: 2015-10-14; 修订日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1138303)

作者简介: 贡璐(1978~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为干旱区资源与环境, E-mail: gonglu721@163.com

部及外部物质循环,其土壤碳库特征和影响因素的研究是评价不同陆地生态系统土壤碳的“源/汇”效应的基础,对研究陆地碳循环机制和全球碳收支平衡具有重要意义^[11]。

克里雅河流域位于塔里木盆地南缘,地处极端干旱区,生态环境十分脆弱^[12]。大规模人类开发利用改变了区域水土资源的时空分布,扩展了绿洲的面积,耕作、灌溉、施肥等农业活动使得原始荒漠土壤逐步演变为绿洲耕作土壤,绿洲土壤有机碳和无机碳库发生了显著变化^[13]。本研究以克里雅河流域于田绿洲为靶区,在分析不同土壤类型下土壤有机碳、无机碳含量与环境因子分异特征的基础上,结合冗余分析技术探讨了土壤有机碳、无机碳含量与环境因子间的关系,有助于深入理解土壤碳与环境因子间的作用机制,贡献于流域绿洲土壤生态系统的保护和恢复,以期为全球碳循环研究提供丰富而准确的小尺度信息。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于田绿洲位于新疆维吾尔自治区西南部,地处昆仑山脉北麓,是塔里木盆地南缘克里雅河流域的典型绿洲,其跨东经 $81^{\circ}09' \sim 82^{\circ}51'$,北纬 $35^{\circ}14' \sim 39^{\circ}29'$ 。地势南高北低,南北高差 3 500 m。属暖温带大陆性干旱荒漠气候,四季分明、昼夜温差大,降水稀少,蒸发量大,热量资源丰富,光照充足。年均气温 11.6°C 、降水量 47.7 mm、蒸发量 2 432.1 mm。土壤形成简单,土壤母质以棕漠土为主,土壤类型主要有灌漠土、盐土、棕漠土、风沙土等。该区域经济发展依靠农业,主要种植棉花、小麦、玉米、水稻等作物。自 20 世纪 50 年代以来,随着人类对水土资源的无序开发利用,绿洲生态系统严重受损,农业生产受到极大威胁。该地区已成为我国西部干旱区水土资源利用与生态环境问题最为突出的地区之一^[14]。

1.2 野外采样

样区设置于克里雅河流域于田绿洲,野外采样时间为 2014 年 7 月。在样区内选择海拔高度接近的 4 种主要土壤类型,分别为灌漠土(主要耕种作物)、棕漠土(主要生长沙拐枣、琵琶柴、猪毛菜)、盐土(主要植物为怪柳、盐爪爪)和风沙土(主要植物为沙柳、柠条、梭梭、沙拐枣、怪柳)(图 1)。每种土壤类型采集 20 个样点的表层土样(0 ~ 20 cm),每个样点设置 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,共计 80 个。

每个采样点设置 5 次重复,将 5 次重复的土样去除植物根系和石块,充分混匀后用四分法取约 500 g 封装带回实验室,自然风干后研磨过筛以供测定。同步利用土钻法或通过 HOBO 水位自动记录仪获取相应样点的地下水位。

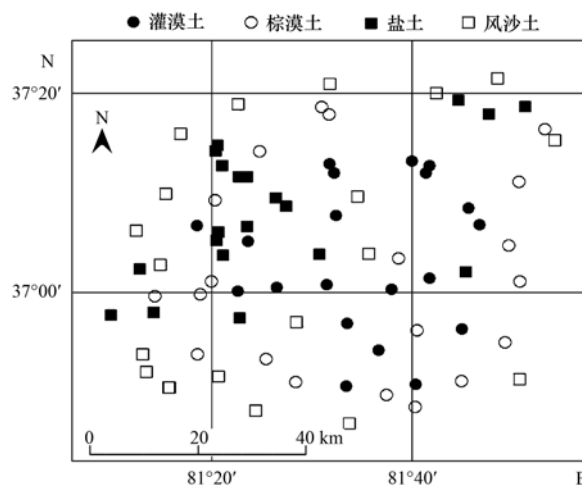


图 1 不同类型土壤样点分布示意

Fig. 1 Map of plot distribution of different soil types

1.3 实验室分析

土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定,土壤无机碳含量采用快速滴定法测定。土壤环境因子及实验方法分别为:土壤水分采用烘干法;容重采用环刀法;pH 值采用电位法;全盐含量采用由八大离子含量加和计算得出,具体 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂中和法, Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法, SO_4^{2-} 采用间接滴定法, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 EDTA 络合滴定法, Na^+ 和 K^+ 采用火焰光度法;全氮采用半微量凯氏法;有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度计法^[15]。每个土样各指标进行 5 次平行测定,结果取其平均值。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19.0 计算数据平均值和标准差(SD);选择单因素方差分析检验不同土壤类型土壤有机碳、无机碳含量及环境因子的差异性,并采用 LSD 方法进行多重比较,差异显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

利用 CANOCO5.0 软件分析土壤有机碳、无机碳含量与环境因子间相关性。首先利用去趋势对应分析(DCA),通过查看排序轴梯度长度(lengths of gradient, LGA)判断土壤有机碳、无机碳含量的变化趋势。理论上, $\text{LGA} < 3$ 适合线性模型, $\text{LGA} > 4$ 适合非线性模型, LGA 介于 3 ~ 4 之间,两种模型均适合^[16]。本研究中有有机碳、无机碳的 DCA 分析显示 4

个排序轴的 LGA 最大值为 0.337,因此采用线性模型进行后续分析比较适宜.冗余分析(redundancy analysis,RDA)可用来分析两个变量集的线性关系,并能在排序轴上直观揭示变量间的直接相关性.在 RDA 中,如果某种环境因子具有高的变异膨胀因子(>20)表明其与其他因子具有高的多重共线性,对模型的贡献很少^[17].本研究以土壤有机碳、无机碳为响应变量,以土壤含水量、地下水埋深、容重、pH、全盐、全氮、有效磷、速效钾这 8 个土壤环境因子为解释变量,首先对环境因子使用前向选择法和 Monte Carlo 检验法,结果显示容重具有高的膨胀因子(>20),将其去除后,重新获得土壤含水量、地下水埋深、pH、全盐、全氮、有效磷、速效钾的变异膨胀因子,均小于 20,此 7 个环境因子对模型均有一定的贡献,可进行后续分析.将环境因子进行重要性排序后,对与土壤碳含量有极显著影响的土

壤环境因子进行逐一分析,进一步确定单一土壤环境因子对土壤碳的影响,分析采用包含土壤有机碳与土壤无机碳的箭头连线和其他土壤环境因子箭头及虚实圆圈的 *t*-value 双序图. *t*-value 双序图可以解释土壤有机碳和无机碳依赖土壤环境因子的程度,在 *t*-value 双序图中如果土壤有机碳或无机碳的箭头连线完全落入实线圆圈中,代表该指标与研究的单一土壤环境因子显著正相关,反之如果土壤有机碳或无机碳的箭头连线完全在虚线圆圈中,代表该指标与研究的单一土壤环境因子显著负相关^[17].

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳、无机碳与环境因子经典统计学分析

对整个研究区土壤有机碳、无机碳与环境因子进行统计学分析,结果如表 1 所示.

表 1 土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的统计学参数

Table 1 Descriptive statistical parameters of soil organic/inorganic carbon contents and environmental factors							
变量指标	最大值	最小值	均值	标准方差	偏度	峰度	变异系数
有机碳/g·kg ⁻¹	5.17	0.61	2.51	1.35	0.75	-0.50	0.54
无机碳/g·kg ⁻¹	28.13	20.85	25.63	1.92	-1.02	0.62	0.07
土壤含水量/%	39.40	0.9	14.33	12.44	0.94	-0.38	0.87
地下水埋深/m	7.86	0.85	3.38	1.96	0.85	-0.26	0.58
容重/g·cm ⁻³	1.55	1.02	1.33	0.16	-0.61	-0.61	0.12
pH	9.13	8.03	8.56	0.34	-0.03	-1.24	0.04
全盐/g·kg ⁻¹	77.41	0.62	19.64	23.12	1.39	0.70	1.18
全氮/g·kg ⁻¹	0.30	0.07	0.15	0.07	0.72	-0.55	0.45
有效磷/mg·kg ⁻¹	5.76	0.49	2.44	1.54	0.76	-0.29	0.63
速效钾/mg·kg ⁻¹	527.00	137.00	401.65	127.49	-1.28	0.21	0.32

研究区土壤有机碳、无机碳含量不高,均值分别为 2.51 g·kg⁻¹和 25.63 g·kg⁻¹,二者的变异系数介于 0.1~1.0 之间,属中等程度变异.环境因子中,土壤水分含量较低,均值为 14.33%;地下水埋深变化较大,在 0.85~7.86 m 范围内;容重平均为 1.33 g·cm⁻³,最大可达 1.55 g·cm⁻³;土壤偏碱性,盐渍化程度较高,pH 均值为 8.56,最大值达 9.13,全盐均值达 19.64 g·kg⁻¹;研究区土壤较贫瘠,养分含量低,全氮、有效磷和速效钾的均值分别为 0.15 g·kg⁻¹、2.44 mg·kg⁻¹和 401.65 mg·kg⁻¹;在环境因子中,除全盐变异性较强外,其他因子均为中等变异性.

2.2 不同土壤类型有机碳、无机碳含量与环境因子的多重比较

对研究区内不同土壤类型有机碳、无机碳含量与环境因子进行多重比较,结果如表 2 所示.

灌漠土有机碳含量为 4.54 g·kg⁻¹,显著高于其

他土壤类型,棕漠土、盐土、风沙土有机碳含量依次降低.棕漠土、盐土、灌漠土无机碳含量无显著差异,风沙土无机碳含量为 26.85 g·kg⁻¹,显著高于其他三类土壤.

各土壤类型的环境存在着不同程度的差异性:灌漠土土壤水分含量达 33.66%,显著高于其他各类型;风沙土地下水埋深显著深于灌漠土、棕漠土,达 6.17 m,而棕漠土与盐土间无显著性差异;风沙土的容重高达 1.50 g·cm⁻³,最小值则是灌漠土,为 1.08 g·cm⁻³;pH 值与全盐的变化趋势较为一致,均表现为盐土最高,灌漠土最低,盐土 pH 值与全盐分别达 8.94、56.62 g·kg⁻¹;各土壤类型全氮含量差异较为显著,排序为灌漠土>棕漠土>盐土>风沙土;灌漠土有效磷显著高于其他土壤类型,为 4.66 mg·kg⁻¹;速效钾在灌漠土中含量最高,高达 490.40 mg·kg⁻¹,风沙土低至 220.60 mg·kg⁻¹.

2.3 土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的 RDA

RDA 中 7 个土壤环境因子对土壤有机碳、无机碳的解释量显示(表 3),有机碳和无机碳含量在前两轴的解释量分别为 94.6% 和 0.3%,累计

解释量已达 94.9%;碳含量与环境因子间关系的累计解释量高达 100%。上述结果说明,前两个排序轴已能充分反映研究区土壤碳含量和环境因子间的相关关系。

表 2 不同土壤类型土壤有机碳、无机碳与环境因子的多重比较

Table 2 Results of multiple comparison of soil organic/inorganic carbon contents and environmental factors of different soil types				
变量指标	灌漠土	棕漠土	盐土	风沙土
有机碳/g·kg ⁻¹	4.54 ± 0.55 ^a	2.29 ± 0.64 ^b	1.89 ± 0.51 ^{bc}	1.32 ± 0.50 ^c
无机碳/g·kg ⁻¹	23.23 ± 1.69 ^a	25.86 ± 1.78 ^a	26.57 ± 0.55 ^a	26.85 ± 0.95 ^b
土壤含水量/%	33.66 ± 4.87 ^a	9.96 ± 3.81 ^b	11.50 ± 3.16 ^b	2.18 ± 1.18 ^c
地下水埋深/m	1.56 ± 0.54 ^a	3.15 ± 1.21 ^b	2.63 ± 0.76 ^{bc}	6.17 ± 1.14 ^c
容重/g·cm ⁻³	1.08 ± 0.05 ^a	1.34 ± 0.05 ^b	1.38 ± 0.03 ^b	1.50 ± 0.06 ^c
pH	8.28 ± 0.16 ^a	8.41 ± 0.26 ^b	8.94 ± 0.14 ^c	8.62 ± 0.34 ^{bc}
全盐/g·kg ⁻¹	2.09 ± 1.54 ^a	10.89 ± 3.39 ^b	56.62 ± 12.96 ^b	8.95 ± 4.93 ^b
全氮/g·kg ⁻¹	0.26 ± 0.03 ^a	0.14 ± 0.03 ^b	0.12 ± 0.03 ^b	0.09 ± 0.02 ^c
有效磷/mg·kg ⁻¹	4.66 ± 0.81 ^a	2.38 ± 0.54 ^b	1.80 ± 0.77 ^b	0.91 ± 0.30 ^c
速效钾/mg·kg ⁻¹	490.40 ± 20.40 ^a	418.40 ± 54.13 ^a	477.20 ± 31.56 ^a	220.60 ± 120.63 ^b

表 3 土壤有机碳、无机碳与环境因子的 RDA 结果

Table 3 RDA (redundancy analysis) results for the soil organic/inorganic carbon contents and environmental factors						
排序轴	特征值	碳-环境因子相关系数	环境因子的累计贡献率/%	碳与环境变化累计贡献率/%	典范特征值	总特征值
第Ⅰ轴	0.946	0.980	94.6	99.7	0.949	1.000
第Ⅱ轴	0.003	0.448	94.9	100.0		
第Ⅲ轴	0.040	0.000	98.9	100.0		
第Ⅳ轴	0.011	0.000	100.0	100.0		

进一步得到土壤有机碳、无机碳含量与环境因子二维排序图(图 2),其中土壤有机碳与无机碳用实的连线箭头表示,土壤环境因子用虚的连线箭头表示。可以看出,全氮、有效磷、土壤含水量在有机碳箭头连线上的投影长度最长,表明其与有机碳呈强的正相关关系;而地下水埋深、全盐、pH 与有机碳呈负相关关系,但相关性不大。无机碳、有机碳与环境因子的相关性正好相反,其中全氮、土壤含水量、有效磷在无机碳箭头连线的延长线上投影长度最长,显示其与土壤无机碳呈很强的负相关性;地下水埋深、pH、全盐则与无机碳呈正相关性。

环境因子对有机碳、无机碳含量的影响存在一定的差异(表 4)。各环境因子对有机碳、无机碳含量影响的重要性排序由大到小依次为:全氮>有效磷>土壤含水量>地下水埋深>速效钾>pH>全盐,其中全氮、有效磷、土壤含水量和地下水埋深对有机碳、无机碳含量的影响极显著($P<0.01$),

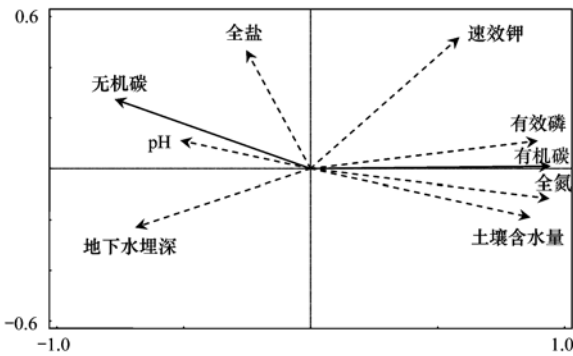


图 2 有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性(冗余分析)

Fig. 2 Redundancy analysis showing the correlation between soil organic/inorganic carbon contents and environmental factors

占有因子解释量的比例分别为 97.8%、89.3%、83.5% 与 54.5%,说明土壤中氮磷等养分因子与水分因子是影响研究区土壤碳含量的关键因素;速效钾、pH 对有机碳、无机碳含量有显著影响($P<0.05$);全盐对土壤碳含量无显著影响。

表 4 环境因子贡献率的重要性排序和显著性检验结果

Table 4 Importance and signification level of environmental factors							
环境因子	全氮	有效磷	土壤含水量	地下水埋深	速效钾	pH	全盐
重要性排序	1	2	3	4	5	6	7
相对贡献率/%	24.2	22.1	20.7	13.5	9.6	7.8	1.9
F	236.025	100.080	68.836	19.316	10.589	7.699	1.436
P	0.002	0.002	0.002	0.002	0.010	0.012	0.260

将以上研究中对土壤碳含量有极显著影响的土壤环境因子进行深入分析,进一步确定单一土壤环境因子对土壤碳的影响,分析采用 t -value 双序图。

[图 3(a)]表示全氮对土壤有机碳、无机碳的影响,有机碳全部落入实线圈内,无机碳穿过虚线圈且大部分落入虚线圈内,说明有机碳含量与全氮呈显著正相关,而土壤无机碳与全氮呈负相关性,即随着全氮的增加有机碳显著增加,而无机碳

含量会有所减小;对有效磷进行分析[图 3(b)],有机碳全部落入实线圈内,可以看出有机碳与有效磷有显著的正相关关系,随有效磷的增大有机碳有明显的升高的趋势;土壤含水量与土壤碳含量的关系见[图 3(c)],土壤无机碳穿过虚线圈,可知土壤含水量与无机碳呈负相关关系;对地下水埋深进行分析[图 3(d)],其与土壤有机碳、无机碳的相关性均不大。

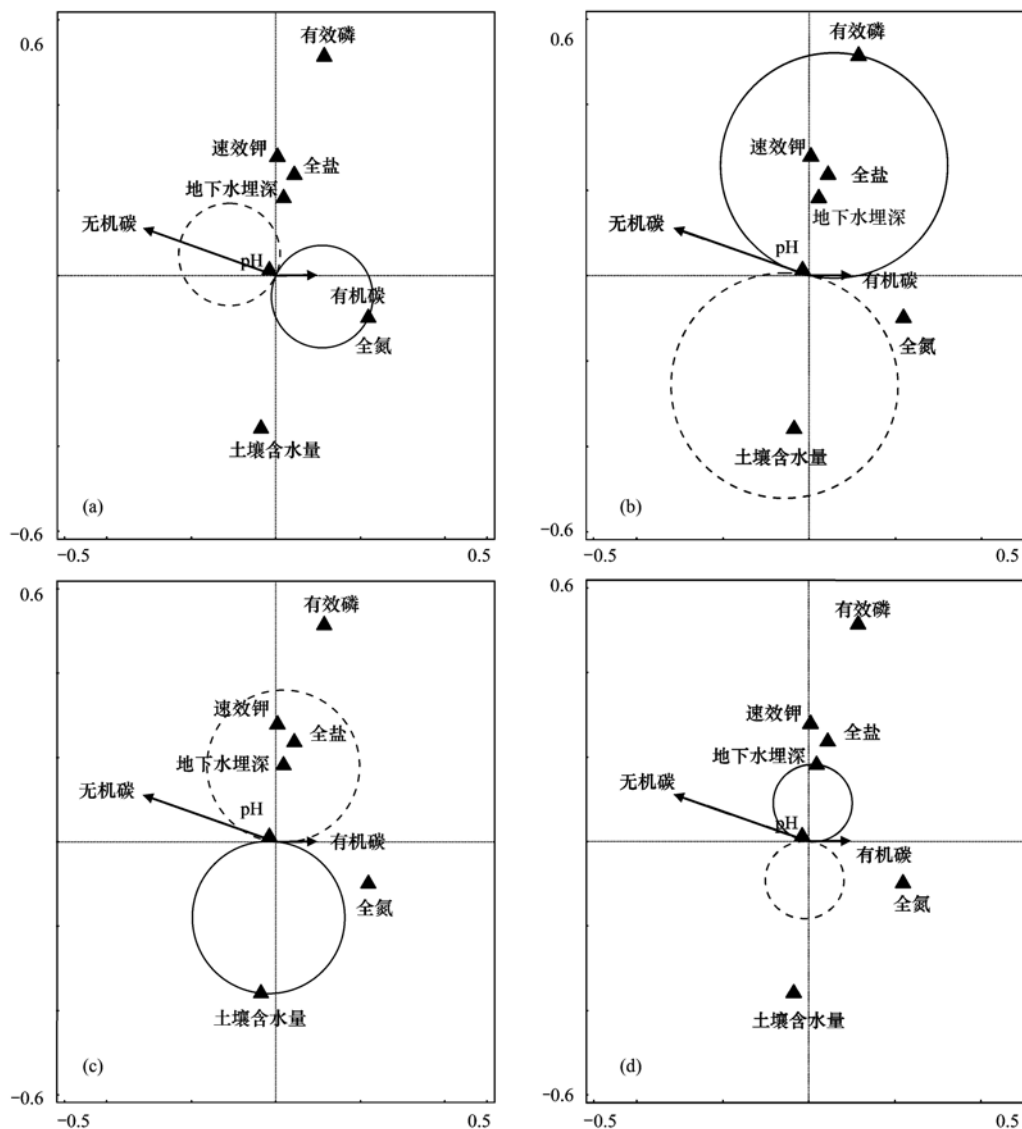


图 3 单一因子与土壤有机碳、无机碳的相关关系 (t -value 检验)

Fig. 3 The t -value results for single factor influencing soil organic/inorganic carbon contents

3 讨论

土壤有机碳和无机碳含量与区域特殊的水文、土壤环境条件密切相关,随土壤类型不同表现出一定的分异规律. 研究区灌漠土作为干旱区特有的耕作土壤,其水肥条件较高,有机碳含量显著高于其他类型,然而由于于田绿洲地处土壤盐渍化、沙化和

贫瘠化问题严重的极端干旱区^[18],其土壤有机碳平均含量也仅为 $4.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,远低于全国平均水平 ($24.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[19]. 无机碳主要指存在于干旱土壤中的碳酸盐碳,多分布在荒漠和半荒漠地区. 由于土壤长期处于干旱或是半干旱状态,除风沙土外,绿洲内各土壤类型的无机碳含量差异不大^[20],平均含量为 $25.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于前人研究的我国西北干旱

地区的平均水平 ($40 \sim 90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[21] 或 $100 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[22]),可能是由于研究区降水稀少,土壤含水量极低,不利于动植物体的钙化作用及土壤有机碳向无机碳的转化作用^[22]. 研究区土壤有机碳和无机碳含量特征在干旱区土壤母质的大背景下有其普遍性特征,但由于人为活动、小气候和地形等的局地影响,土壤有机碳、无机碳与环境因子间又存在不同的作用和影响机制.

土壤养分(主要为全氮与有效磷)和水分因子对研究区土壤有机碳和无机碳含量有极显著影响. 土壤氮磷等养分对土壤有机碳、无机碳含量的影响,主要是由于土壤微生物分解活动会引起土壤碳氮磷含量发生同步变化,故土壤氮素、磷素水平与土壤有机碳含量呈显著正相关关系^[23],这与刘妹媛等^[24]对土壤全氮与有机碳的相关性研究结果一致. 徐欢欢等^[25]对干旱区不同生境土壤有机碳含量的影响因子进行研究,同样发现土壤有机碳含量与全氮呈极显著正相关性. DeBusk 等^[26]研究结果也表明随土壤磷含量的增加其土壤有机碳含量同样有所提高. 在干旱、高温的气候环境下,土壤水分含量低,好氧型微生物活跃,有机碳的分解量增加,其土壤无机碳含量相应增加^[26]. 与王淑芳等^[27]、杨钙仁等^[28]、孙中林等^[29]学者的观点和研究成果相符. 地下水埋深则能间接影响土壤含水量,因此也在较大程度上决定着研究区的土壤有机碳和无机碳含量.

研究区土壤全盐与无机碳呈正相关关系值得剖析. 在极端干旱气候与长期灌溉农业方式共同作用下,于田绿洲区域盐渍化、荒漠化程度不断加剧,而土壤全盐与无机碳间的正相关关系说明,土壤在盐碱化、荒漠化过程中伴随着土壤无机碳的累积. 对此,国内外已有相关报道证实,如有关新疆内陆盐碱地的研究认为,土壤可能通过一种非生物的无机碳吸收过程固定相当大规模的碳^[30];美国荒漠化地区也存在生物量累积难以解释的较大规模的 C 吸收过程,因此很可能存在无机碳的固定过程^[31,32]. 可以推测,若土壤盐渍化与无机碳间的上述关系成立,则说明干旱区巨大的碳储存潜力,这可能是研究区今后值得深入探索的重要问题.

综上所述,在所有环境因子中,对土壤有机碳、无机碳含量影响最大的为土壤养分与土壤水分因子. 前人研究仅单独考虑土壤养分^[23~25]、土壤水分^[28,29]或土壤盐分^[33,34]对土壤碳含量的影响,且多数学者只关注土壤有机碳动态^[5,8,34],而对土壤无机

碳的关注甚少^[10]. 而地处极端干旱区的研究区,长期受大陆性气候作用,土壤系统的形成与发育同时受多方因素的作用,因此单独考虑土壤养分、土壤水分或盐分等作为影响因子是不足的;同时,土壤无机碳中的无机碳酸盐和碳酸氢盐等是植物生长发育不可或缺的要素^[35],仅对土壤有机碳进行研究有一定的局限性;本研究综合考虑土壤水分、容重、盐分、养分等多类环境因子,结合冗余分析技术分析了土壤碳与环境因子的相关性,直观诠释了多变量间的相互作用,是对干旱区土壤碳库研究成果的有益补充.

4 结论

(1)研究区土壤贫瘠,土壤碳含量低于全国平均水平,土壤有机碳、无机碳含量仅为 $2.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $25.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤干旱缺水,土壤水分为 14.33%,地下水埋深 3.38 m;土壤偏碱性,盐渍化程度高,pH 最大值达 9.13,全盐均值达 $19.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在不同土壤类型中,土壤有机碳、全氮、全磷、速效钾与土壤水分条件均表现为灌漠土最高,风沙土最低;风沙土地下水埋深最深可达 6.17 m;盐土的盐碱性最强,pH 值与全盐分别为 8.62 和 $8.95 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2)土壤有机碳、无机碳含量与土壤环境因子的冗余分析显示,土壤碳含量与土壤养分、水分因子关系密切,全氮、有效磷、土壤含水量与地下水埋深对土壤碳含量差异性的解释分别达 97.8%、89.3%、83.5% 和 54.5%,且其与土壤有机碳、无机碳的相关性达极显著水平 ($P < 0.01$). 速效钾和 pH 对土壤碳含量的影响显著;全盐对土壤有机碳、无机碳的影响较小,未达到显著水平.

参考文献:

- [1] Lal R, Kimble J M. Inorganic carbon and the global C cycle: research and development priorities[A]. In: Lal R, Kimble JM, Eswaran H, *et al* (Eds.). Global Climate Change and Pedogenic Carbonates[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000. 291-302.
- [2] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(2): 151-163.
- [3] Satrio A E, Gandaseca S, Ahmed O H, *et al*. Effect of precipitation fluctuation on soil carbon storage of a tropical peat swamp forest[J]. American Journal of Applied Sciences, 2009, 6(8): 1484-1488.
- [4] Pringle M J, Allen D E, Phelps D G, *et al*. The effect of pasture utilization rate on stocks of soil organic carbon and total nitrogen

- in a semi-arid tropical grassland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **195**: 83-90.
- [5] 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 等. 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3422-3428.
- [6] Kou T J, Zhu P, Huang S, *et al.* Effects of long-term cropping regimes on soil carbon sequestration and aggregate composition in rainfed farmland of Northeast China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, **118**(2012): 132-138.
- [7] Ardö J, Olsson L. Soil carbon sequestration in traditional farming in Sudanese dry lands[J]. *Environmental Management*, 2004, **33**(S1): S318-S329.
- [8] 贾晓红, 李新荣, 周玉燕, 等. 干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 938-945.
- [9] 刘丽娟, 王玉刚, 李小玉. 干旱区绿洲土壤可溶性无机碳的空间分布特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(10): 2539-2544.
- [10] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 等. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J]. *生态学报*, 2011, **31**(18): 5207-5216.
- [11] 王长庭, 龙瑞军, 曹广民, 等. 三江源地区主要草地类型土壤碳氮沿海拔变化特征及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(3): 441-449.
- [12] 贡璐, 朱美玲, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 塔里木盆地南缘旱生芦苇生态特征与水盐因子关系[J]. *生态学报*, 2014, **34**(10): 2509-2518.
- [13] 张丽华, 谢忠奎, 王亚军, 等. 陇中黄土高原土地利用变化对土壤有机碳、无机碳的影响[J]. *土壤通报*, 2013, **44**(2): 369-375.
- [14] 解丽娜, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地南缘绿洲土壤酶活性与理化因子相关性[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1306-1313.
- [15] 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. 12-172.
- [16] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. New York: Cambridge University Press, 2002. 197-205.
- [17] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5 [M]. New York: Cambridge University Press, 2014. 309-322.
- [18] 贡璐, 韩丽, 任曼丽, 等. 塔里木河上游典型绿洲土壤水盐空间分异特征[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(4): 251-255, 278.
- [19] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(10): 2411-2416.
- [20] 张雪妮, 吕光辉, 贡璐, 等. 新疆艾比湖湿地自然保护区不同土壤类型无机碳分布特征[J]. *中国沙漠*, 2013, **33**(4): 1084-1090.
- [21] Mi N, Wang S Q, Liu J Y, *et al.* Soil inorganic carbon storage pattern in China[J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(10): 2380-2387.
- [22] 张林, 孙向阳, 曹吉鑫, 等. 西北干旱区森林和草原 SOC 向 SIC 转移的研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2010, **25**(2): 40-44.
- [23] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2002, **22**(3): 220-228.
- [24] 刘姝媛, 刘月秀, 叶金盛, 等. 广东省桉树人工林土壤有机碳密度及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2010, **21**(8): 1981-1985.
- [25] 徐欢欢, 曾从盛, 王维奇, 等. 艾比湖湿地土壤有机碳垂直分布特征及其影响因子分析[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **26**(5): 86-91.
- [26] DeBusk W F, Reddy K R. Turnover of detrital organic carbon in a nutrient-impacted everglades marsh[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**(5): 1460-1468.
- [27] 王淑芳, 王效科, 欧阳志云. 密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 946-951.
- [28] 杨钙仁, 童成立, 肖和艾, 等. 水分控制下的湿地沉积物氧化还原电位及其对有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(8): 2381-2386.
- [29] 孙中林, 吴金水, 葛体达, 等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 214-220.
- [30] Xie J X, Li Y, Zhai C X, *et al.* CO₂ absorption by alkaline soils and its implication to the global carbon cycle[J]. *Environmental Geology*, 2008, **56**(5): 953-961.
- [31] Wohlfahrt G, Fenstermaker L F, Arnone III J A. Large annual net ecosystem CO₂ uptake of a Mojave desert ecosystem [J]. *Global Change Biology*, 2008, **14**(7): 1475-1487.
- [32] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, *et al.* Soil carbon pools and world life zones[J]. *Nature*, 1982, **298**(5870): 156-159.
- [33] Setia R, Marschner P, Baldock J, *et al.* Salinity effects on carbon mineralization in soils of varying texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(9): 1908-1916.
- [34] Williams E K, Rosenheim B E. What happens to soil organic carbon as coastal marsh ecosystems change in response to increasing salinity? An exploration using ramped pyrolysis[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015, **16**(7): 2322-2335.
- [35] 郭兴森, 吕迎春, 孙志高, 等. 黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 457-463.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caoheidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppes	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 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	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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行