

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 郭玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小峰, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究:以甘肃庄浪县为例

师晨迪¹, 许明祥^{1,3*}, 邱宇洁¹, 张志霞³, 张晓伟²

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

摘要: 通过采样分析, 结合 20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查土壤有机碳数据, 对庄浪县农田耕层(0~20 cm)土壤近 30 年有机碳变化及影响因素进行研究。结果表明: ①全国第二次土壤普查时土壤平均有机碳含量为 $6.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2011 年为 $8.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。近 30 年有机碳含量增加了 30.9%, 表现为碳汇效应。有机碳含量增加的农田面积约占庄浪县耕地总面积的 90%。②在现有管理措施和农田投入下, 黄绵土有机碳的稳定水平约为 $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。有机碳积累量呈现出离稳定值越远变化越大、离稳定值越近变化越小的规律。③近 30 年土壤有机碳含量变化受海拔高度、初始有机碳含量和土壤类型等因素的显著影响, 其中海拔高度对有机碳变化的影响程度最大, 初始有机碳含量、土壤类型、产量及有机肥用量对土壤有机碳变化的影响次之, 坡向对有机碳变化的影响最小。

关键词: 土壤有机碳; 有机碳变化; 影响因素; 县域; 黄土丘陵区

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1098-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.039

Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province

SHI Chen-di¹, XU Ming-xiang^{1,3}, QIU Yu-jie¹, ZHANG Zhi-xia³, ZHANG Xiao-wei²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resource, Yangling 712100, China)

Abstract: By analyzing the sampled data and the results of the second national soil survey by the mid 80 s in Zhuanglang County, the article studied on the changes and influencing factors of the soil organic carbon in farmland of this area in the last 30 years. Farmland samples of top soil (0-20 cm) were collected and analyzed in July 2011. The results showed that ① The average contents of the soil organic carbon in the county's farmlands were $6.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 1985 and $8.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2011. It increased by 30.9% in the past 30 years, which appeared as a carbon sink effect. The area of increasing contents of soil organic carbon accounted for about 90% of the county's farmland area. ② Under the available management measures and farmland input, the loessal soil organic carbon stability level was $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, The SOC accumulation rate showed that the farther the SOC was from the stability level the more quickly it changed, and the closer the SOC was from the stability level the slower it changed. ③ The SOC changes was affected by the altitude, the primary content of organic carbon, and the soil types and so on, in which the greatest contribution factor was the altitude, the influence of the primary content of organic carbon, soil type, production and organic fertilizer on soil organic carbon change was smaller, and the slope aspect had the smallest effect on soil organic carbon change.

Key words: soil organic carbon; organic carbon content change; influencing factors; county scale; Hilly Loess Plateau

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库, 作为全球碳循环的重要组成部分, 其较小幅度的变动也可能对大气中温室气体的浓度以及全球气候变化产生重大影响, 因此土壤碳库在调控地球表层生态系统碳平衡和减缓温室气体方面具有重要作用^[1]。农田土壤对 CO_2 具有源和汇的双重功能, 与自然土壤相比农田土壤在全球碳库中更为活跃, 是受人为活动干扰严重、但又可在较短时间内调节的碳库^[2], 这

样的干扰提供了一个减少人类向大气排放碳的潜在机制^[3], 同时也为大气碳固定于农田土壤提供了可能。因此, 关于农田土壤有机碳库的研究日益成为

收稿日期: 2013-07-02; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-443); 国家自然科学基金项目(41171422)

作者简介: 师晨迪(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农田土壤固碳, E-mail: gsqyscd@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

全球碳循环研究的热点^[4~7],同时也成为全球变化问题研究的核心内容之一^[8,9].

农田土壤有机碳变化受气候、土壤类型、地形等自然因素和人为因素的双重影响. 有机碳含量及其动态主要取决于土壤中有机质输入与降解的平衡. 长期耕种土地的有机碳动态很大程度上受诸如耕作、轮作、施肥、灌溉等农业措施影响^[10]. 目前有关农田土壤有机碳变化及其影响因素相关研究主要针对不同耕作管理措施展开^[11~14],研究尺度涵盖了田块、县域、区域、全国乃至全球不同尺度^[15,16]. 受研究方法、区域差异、不同尺度资料获取的可靠性等因素的影响,尤其是不同地区小尺度上农田土壤固碳过程和影响因素定量研究的不足,有关农田土壤有机碳固存速率的研究结果仍存在较大的不确定性.

我国西北五省(区)(陕甘青宁新)占全国耕地的 10% 以上. 西北地区独特的气候、地形和土壤条件决定了其农业生产具有明显的区域特征. 以往有关农田碳循环及碳储量相关研究在我国南方、东部、中部等地开展较多^[16~20],而就西北地区农田土壤固碳现状及速率研究开展很少^[21,22]. 回答西北地区农田土壤有机碳变化及固碳速率是正确评估我国农田土壤碳储量及固碳潜力的重大需求. 以县域为单元开展农田土壤固碳研究可为区域土壤固碳评估提供依据. 为此,本研究以地处黄土丘陵区的梯田县——庄浪县为例,分析县域农田耕层土壤有机碳分布特征、近 30 年变化规律及其影响因素,以期为区域农田土壤固碳潜力估算及土壤固碳增汇技术措施选择提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庄浪县(东经 105°46′15″~106°23′45″,北纬 35°03′23″~35°28′26″)位于甘肃省中东部,属黄土丘陵沟壑区第三副区,面积 1 553 km²,海拔高度在 1 405~2 857 m 之间,属于大陆性季风区气候,年降雨量 510 mm,多集中在 5~9 月,年均气温为 8.1℃,无霜期 159 d. 植被属森林草原向半干旱过渡类型,地带性植被为草原植被. 主要土类有黄绵土、黑垆土、红黏土、新积土、灰褐土类. 境内群山起伏,地势东高西低. 全县共有耕地约 6.14 万 hm²,人均 0.17 hm². 20 世纪 80 年代以来以基本农田建设为突破口的生态环境建设取得了重要进展,梯田化程度达到了 91.74%.

1.2 样品采集与分析

1.2.1 样点布设

样点布设首先采用联合单元布点法^[21],依据综合性、均衡性、可对照性原则,考虑土地利用类型、地形地貌、土壤类型等多种因素,将庄浪县划分为 8 种“土地利用类型-地貌类型-土壤类型”组合斑块类型,其代表面积占全县耕地面积的 97%. 在此基础上,参照全国第二次土壤普查样点信息,依据“点对点”的原则,使所选样点与全国第二次土壤普查样点尽可能重合. 据此,在全县共布设 70 个样点,样点数与类型单元面积成比例,空间分布大致均匀,确保布设样点具有代表性. 其中 47 个双层点,23 个剖面点,能够代表全县农田土壤的基本情况(表 1、图 1).

表 1 样点布设情况

Table 1 Design of sampling sites			
土地利用-地貌类型-土类组合	面积比例/%	剖面点数	双层点数
旱地-低山丘陵区-黄绵土	44	10	20
旱地-丘陵沟壑区-黄绵土	23	5	11
旱地-低山丘陵区-黑垆土	8	2	5
旱地-高山区-红黏土	7	2	3
旱地-丘陵沟壑区-黑垆土	5	1	2
旱地-低山丘陵区-红黏土	5	1	2
旱地-丘陵沟壑区-新积土	3	1	2
旱地-高山区-灰褐土	2	1	2
合计	97	23	47

1.2.2 野外调查及样品采集

2011 年 8 月在庄浪县进行样品采集,剖面点根据土壤发生层次分层取土,每层取 1.5 kg 左右,双层点取 0~20 cm、20~40 cm 土壤,分别从布设样地的四角和中心部位采集,采取 5 点混合法取土样,混匀后将样品缩分至 1.5 kg,将土样风干后过筛供实验室分析测定. 记录每个样点的经纬度、海拔高度、地理位置、地形、坡向、坡度等信息,同时走访调查样点的耕作制度、施肥状况、小麦产量、灌溉条件等,构建土壤描述性指标数据库. 通过调查发现,研究区小麦生产在 2011 年属正常年份,小麦产量与多年平均水平相当,可代表当地小麦多年平均产量.

1.2.3 样品测定

测定指标包括土壤容重和土壤有机碳. 容重用环刀法测定,土壤有机碳用重铬酸钾氧化-外加热法测定.

1.3 数据处理

用 Excel 2003 进行数据的预处理,用 SPSS 20.0

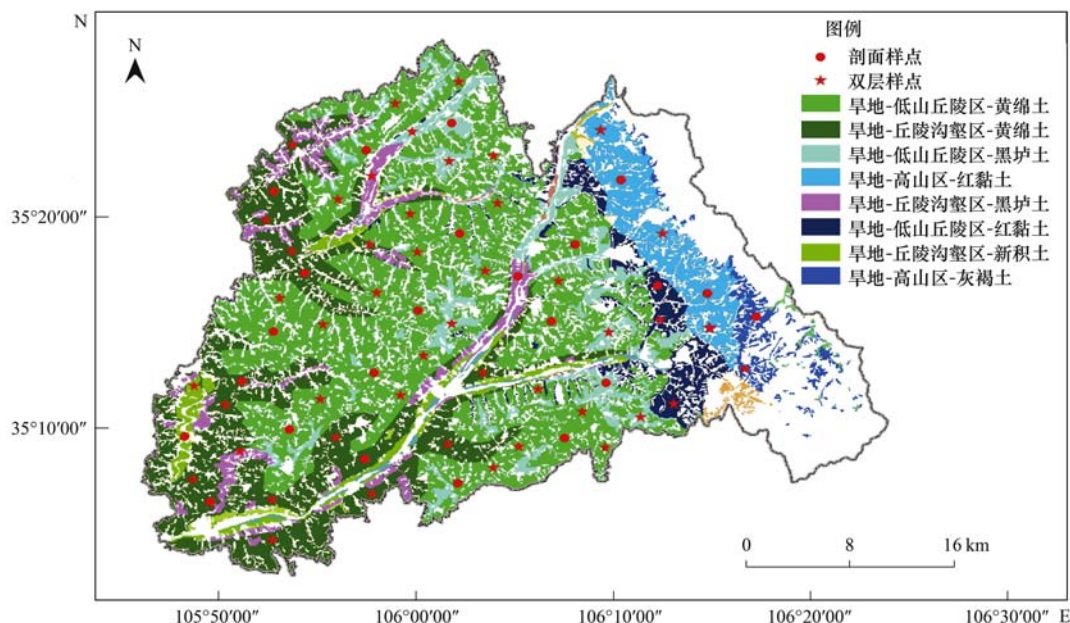


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of sampling sites

软件对不同土壤类型、海拔高度、有机肥、小麦产量等进行 ANOVA 分析, LSD 法进行差异显著性检验. 通过定性变量的定量化赋值, 将所有数据进行标准化处理(线性比例变换法), 消除不同变量量纲差异. 用 SPSS 20.0 统计软件对初始有机碳含量、土壤类型、有机肥等因子与土壤有机碳变化的关系进行多元线性回归分析, 回归方程中各因子偏回归系数的大小反映了各因子对土壤有机碳变化的影响程度.

2 结果与分析

2.1 农田土壤有机碳变化特征

2.1.1 不同土壤类型有机碳含量变化

由图2可以看出, 不同土壤类型下有机碳含量有一定差异. 1985年土壤有机碳含量最高的是灰褐土为(10.38 ± 0.24) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 黄绵土最低为(6.33 ± 1.20) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总体表现为灰褐土 > 黑垆土 > 红黏土 > 新积土 > 黄绵土. 2011年有机碳含量最高为灰褐土(14.27 ± 1.27) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 新积土最低为(8.11 ± 1.43) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表现为灰褐土 > 黑垆土 > 红黏土 > 黄绵土 > 新积土. 两个年份下的有机碳含量均表现出灰褐土、黑垆土大于其余3种土壤类型($P < 0.05$). 近30年土壤有机碳均表现为增加, 其增幅达37.4%~19.2%, 增幅呈现出灰褐土 > 黄绵土 > 红黏土 > 黑垆土 > 新积土. 土壤平均有机碳含量($\text{SOC}_{2011} = 8.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{SOC}_{1985} = 6.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 近

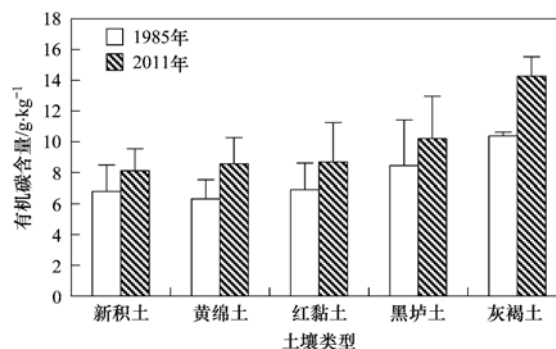


图2 不同土壤类型有机碳含量变化

Fig. 2 Changes of SOC content in different soil types

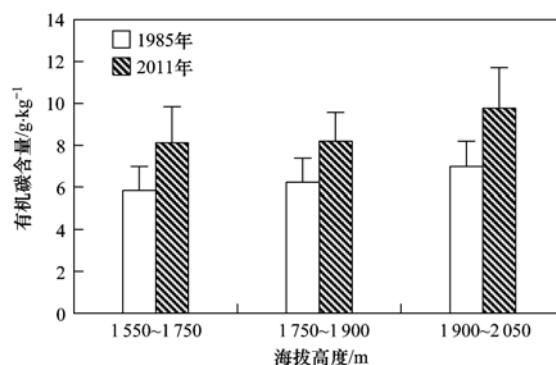


图3 不同海拔区间黄绵土有机碳含量

Fig. 3 Changes of SOC content at different altitudes in loessal soil

30年增加了30.9%.

2.1.2 不同海拔高度下土壤有机碳含量变化

图3显示不同海拔高度下黄绵土有机碳含量与

海拔高度呈正相关关系. 两个年份下黄绵土有机碳含量最高值均位于海拔1 900 ~ 2 050 m区域,平均有机碳含量在 1985 年和 2011 年分别为 $(6.99 \pm 1.20) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(9.77 \pm 1.94) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 最低位于海拔 1 550 ~ 1 750 m区域,平均有机碳含量在 1985 年和 2011 年分别为 $(5.84 \pm 1.16) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(8.12 \pm 1.72) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均呈现随海拔高度的增加,有机碳含量逐渐增大的趋势. 近 30 年来,3 个海拔区间有机碳含量分别增加了 39.0%、31.3%和 39.7%,不同海拔区域有机碳增加量差异不显著 ($P > 0.05$).

2.1.3 不同坡向下土壤有机碳含量变化

不同坡向下土壤有机碳含量差异在一定程度上反映了温度、水分等对土壤有机碳的综合影响. 由图 4 可知,1985 年黄绵土有机碳含量表现出阴坡略大于阳坡,分别为 $(6.38 \pm 1.42) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(6.28 \pm 1.03) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 2011 年有机碳含量也呈现出阴坡略大于阳坡,分别为 $(8.78 \pm 1.55) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(8.39 \pm 1.83) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,均无显著差异 ($P > 0.05$). 而近 30 年土壤有机碳在阳坡和阴坡下,分别增加了 $2.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅分别为 33.5%和 37.5%. 表明半干旱黄土丘陵区梯田土壤中,在同一年份坡向对土壤有机碳含量无显著影响,但近 30 年来阴坡更有利于土壤有机碳的累积.

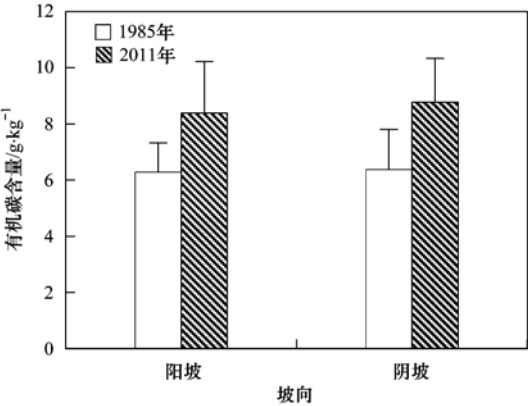


图 4 不同坡向黄绵土有机碳含量变化
Fig. 4 Changes of the loessal soil SOC contents in different slope aspects

2.2 农田土壤有机碳变化的单因素分析

2.2.1 农田土壤有机碳变化量频率分布

对 70 个样点近 30 年来土壤有机碳变化量分布频率进行分析(图 5),可以看出,有机碳变化量大于 $5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本数占总数的 4.3%; 在 $0 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间的占 85.7%; 小于 0 的占 10%. 90%的样点的土壤有机碳是增加的. 最大增幅为 $6.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最

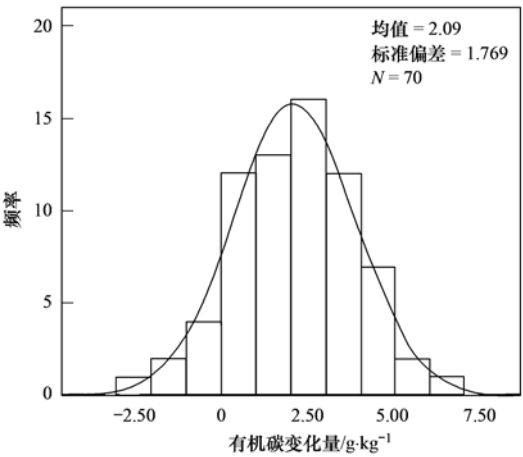


图 5 土壤有机碳变化量频率分布直方图
Fig. 5 Histogram of distribution frequency in SOC changes

大降幅为 $2.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均变化量为 $2.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

2.2.2 土壤有机碳变化量在不同土壤类型下的分布比例

由表 2 看出,庄浪县的耕地中,黄绵土占总耕地面积的 69.1%,其中仅有 4.4%的面积在近 30 年内有机碳是降低的. 增幅在 $0 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围的面积占黄绵土耕地总面积的 65.2%,增幅大于 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 30.4%. 可见,近 30 年黄绵土有机碳含量总体表现为增加,以有机碳增幅在 $0 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为主. 黑垆土约占总耕地面积的 13.4%,近 30 年有机碳含量降低的面积占 20.4%,增幅在 $0 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围的面积占黑垆土耕地总面积的 49.3%,增幅大于 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 30.3%. 近 30 年黑垆土有机碳含量总体表现为增加,以有机碳增幅 $0 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 为主. 红黏土约占总耕地面积 12.4%,近 30 年有机碳含量以增加为主,有机碳增加的面积占红黏土耕地总面积的 3/4. 有 1/4 的红黏土有机碳含量是降低的,降幅均在 $0 \sim 1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 灰褐土和新积土约占耕地总面积的 5.1%,近 30 年有机碳含量以增加为主,其中灰褐土的增幅较为明显. 近 30 年土壤有机碳含量增加的面积约占到庄浪县耕地总面积的 90%,其中黄绵土占 62.9%; 黑垆土占 11.4%; 红黏土占

表 2 不同土壤类型下有机碳变化量的分布比例/%

Table 2 Distribution proportion of SOC changes in different soil types/%					
有机碳变化量 / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	黄绵土	黑垆土	红黏土	灰褐土	新积土
-3 ~ 0	2.9	2.9	2.9	0	1.4
0 ~ 3	42.8	7.0	5.7	0	2.9
>3	20.0	4.3	2.9	4.3	0
合计	65.7	14.2	11.5	4.3	4.3
w ¹⁾	69.1	13.4	12.4	3.0	2.1

1) w 为庄浪县各土壤类型耕地占耕地总面积的比例

8.6%；灰褐土和新积土约占 7.1%，总体表现为碳汇。

2.2.3 土壤有机碳变化量与有机肥用量的关系

有机肥用量与土壤有机碳存在正相关关系 ($n = 46, P < 0.05$), 增施有机肥能够在较大程度上提高半干旱黄土丘陵区梯田土壤有机碳。以黄绵土为例(图 6), 随着有机肥用量的增加, 农田土壤有机碳的增幅逐渐变大。在当前有机肥用量下, 土壤有机碳增量随有机肥用量线性增加, 可能因为该地区有机肥用量较低, 尚未达到有机碳增长的饱和值。

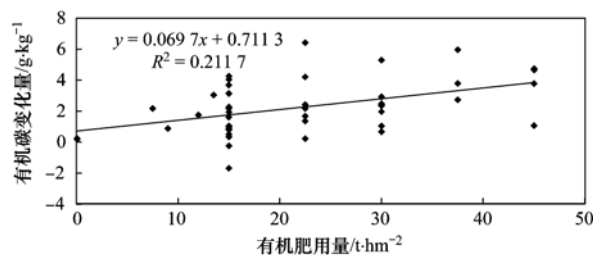


图 6 有机肥用量与黄绵土有机碳变化量的关系

Fig. 6 Correlation of the organic fertilizer amount and SOC changes in loessal soil

2.2.4 土壤有机碳变化量与初始碳含量的关系

近 30 年农田土壤有机碳变化量与土壤初始有机碳含量 (1985 年) 呈负相关关系 ($n = 46, P < 0.05$), 随着初始有机碳的增加, 土壤有机碳的增加量逐渐减小 (图 7、图 8)。从图 7 拟合曲线可以看出, 当黄绵土有机碳含量趋于 $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 有机碳的变化量为零, 土壤有机碳达到动态平衡, 达到了现有农田管理措施和有机物料投入下的稳定水平; 当有机碳含量低于 $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 有机碳含量处于累积状态。图 8 拟合曲线表明 ($n = 9, R^2 = 0.4546$), 黑垆土也存在类似的稳定值 (13.4

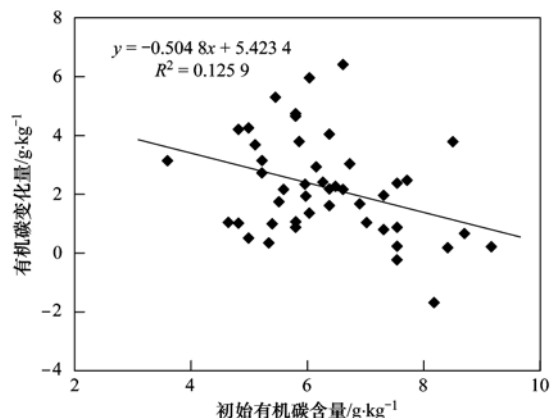


图 7 黄绵土有机碳的变化量与初始有机碳含量的关系

Fig. 7 Correlation of SOC changes and the original SOC content in loessal soil

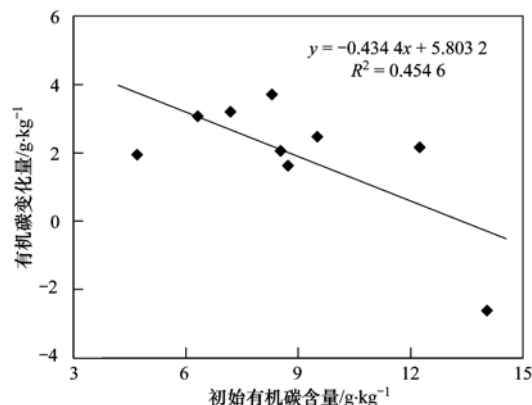


图 8 黑垆土有机碳的变化量与初始有机碳含量的关系

Fig. 8 Correlation of SOC changes and the original SOC content in dark loessal soil

$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 使得土壤有机碳维持在一定水平。

2.3 土壤有机碳变化的多因素分析

以初始有机碳含量、土壤类型、有机肥、产量、海拔高度和坡向为自变量, 土壤有机碳变化量为因变量, 采用多元线性回归法, 对土壤有机碳变化量与初始有机碳含量、土壤类型、有机肥等因子进行线性拟合, 分析不同因素对农田土壤有机碳变化的影响程度。首先将定性变量进行定量化赋值^[23], 然后将所有数据进行标准化处理 (线性比例变换法), 从而消除不同变量量纲差异。多元回归结果如下:

$$Y = -0.123 - 0.582x_1 + 0.316x_2 + 0.135x_3 + 0.533x_4 + 0.207x_5 + 0.037x_6$$

$$(n = 70, F = 5.716 > F_{0.05})$$

式中, Y 为近 30 年有机碳变化量, x_1 : 初始有机碳含量; x_2 : 土壤类型; x_3 : 有机肥用量; x_4 : 海拔高度; x_5 : 产量; x_6 : 坡向。

多元回归方程中不同因子偏回归系数的相对大小在一定程度上反映了各个因子对有机碳变化量的贡献 (表 3)。庄浪县近 30 年农田土壤有机碳变化主要受海拔高度、土壤初始有机碳含量和土壤类型的影响, 对土壤有机碳变化量的贡献率分别为 32.6%、22.5% 和 17.0%; 而产量、有机肥用量和坡向对有机碳变化的影响相对较小, 分别为 15.1%、10.1% 和 2.7%。在估算农田土壤固碳潜力时, 应该充分考虑海拔高度、初始有机碳含量和土壤类型对有机碳变化的影响, 可以考虑分级处理, 以便提高农田固碳潜力估算的准确性和可靠性。

为了检验拟合结果的准确性和可靠性, 将模型模拟结果与实测数据进行对比 (图 9), 在所有的 70 个样点预测结果中, 预测偏差大于 0.4 的只有 4 个

样点,偏差在0.2之内(包括0.2)的样点有45个,占到总样点的个数的64.3%。平均偏差为0.18,在一定程度上可以反映各影响因子对有机碳变化的影响程度。

表3 不同影响因子对土壤有机碳变化量的贡献

土壤有机碳	影响因子					
	海拔	初始有机碳含量	土壤类型	产量	有机肥	坡向
多元回归标准化系数	0.402	-0.277	0.209	0.186	0.124	0.033
贡献比例/%	32.6	22.5	17.0	15.1	10.1	2.7

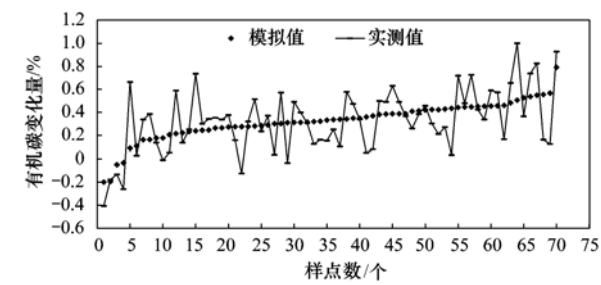


图9 土壤有机碳模拟值与实测值对比

Fig. 9 Measured and simulated value of SOC content

3 讨论

农田土壤有机碳变化既受自然因素如气候、地形、土壤类型的影响,又与人类活动息息相关。土壤中有有机质输入与降解的平衡决定着土壤有机碳含量及其动态变化。因此,不同地区农田土壤有机碳变化及其影响因素可能存在差异。关于庄浪县农田土壤有机碳变化的研究,张晓伟等^[21]研究的重点主要集中在有机碳固碳速率及空间变化的影响因素,而本研究主要针对近30年土壤有机碳变化的影响因素,通过单因素分析与多因子综合分析,系统阐明了各影响因子对有机碳变化的影响程度。尽管多元线性回归方程的模型效率不高,但此模型旨在反映各因子对有机碳变化的影响程度,而不是作为有机碳变化的预测模型,故在一定程度上有参考价值。

海拔对土壤有机碳含量有显著影响^[24~26]。在本研究所涉及的土壤初始有机碳含量、土壤类型、海拔高度、有机肥用量、产量等因子中,海拔高度对土壤有机碳变化的影响最为突出,这一结果可能与庄浪县独特的气候类型有关,庄浪县的高海拔地区主要集中在关山以西地区,受关山高海拔低温多雨的影响,土壤有机碳在这一区域分解较慢而得到累积,这可能是造成此区域有机碳累积量较高的主要原因。在影响有机碳矿化的因素中,温度^[27]和水分^[28]是调控其在海拔高度上变化的主导因子,而海拔能够间接地反映该地区的温度和降水的差异。此外,初始有机碳含量也对有机碳变化有较大影响,这

种影响在一定程度上也是土壤固碳潜力的反映。土壤有机碳固定的最大可获得水平为土壤的潜在碳固定提供了一个可靠的科学依据^[29]。在各种有利于土壤有机碳增加措施的共同作用下,土壤有机碳水平可以进一步提高,有机碳含量再次上升并累积到一个新的平衡状态,但对于特定的土壤类型,有机碳的积累不是无限上升的。当有机碳上升到某一水平后,有机碳将不再随有机物料的投入而积累^[30],而是稳定在此状态,这一稳定状态即为有机碳的饱和状态^[31]。在本研究区,当土壤有机碳含量到达11.0 g·kg⁻¹时,土壤有机碳趋于现有管理措施和农田投入的稳定状态,有机碳含量低于11.0 g·kg⁻¹时,有机碳含量正处于一个积累的过程。而且距离稳定值越远,有机碳的变化量越大,越靠近稳定值,有机碳的变化量越小,直至趋于相对稳定状态。

通过多因素分析和土壤固碳饱和理论,得出当前管理措施下庄浪县梯田土壤有机碳的饱和水平,能够较好地反映农田土壤固碳潜力的实际情况,较为明确地说明了当前管理措施下农田土壤潜力水平,结合多元线性回归分析得到了各个因子对有机碳变化量的贡献率,对黄土丘陵区农田土壤固碳潜力估算有一定的参考价值。然而这一研究只是针对县域尺度,如何将县域尺度的结果扩展到较大尺度仍有待于进一步研究。

4 结论

(1) 庄浪县近30年农田土壤有机碳变化以增加为主,农田土壤总体上表现为碳汇。有机碳增加的面积约占到庄浪县耕地总面积的90%。其中黄绵土占到65%,增量最大,而灰褐土增幅最大,约为37.4%。

(2) 庄浪县农田土壤有机碳变化量与初始含量呈负相关关系,存在一个有机碳变化量为零的有机碳稳定水平,且有机碳变化量呈现出离该稳定值越远变化越大,越近变化越小的规律。

(3) 庄浪县近30年土壤有机碳含量变化受海

拔高度、初始有机碳含量和土壤类型的显著影响,海拔高度对有机碳变化的影响程度最大,初始有机碳含量、土壤类型、产量及有机肥用量对土壤有机碳变化的影响次之,坡向对有机碳变化的影响最小。

参考文献:

- [1] 汪业勋,赵士洞,牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 1999, **18**(5): 29-35.
- [2] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(4): 384-393.
- [3] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳积蓄[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 丁雪丽,韩晓增,乔云发,等. 农田土壤有机碳固存的主要影响因子及其稳定机制[J]. 土壤通报, 2012, **43**(3): 737-744.
- [5] 黄耀,孙文娟,张稳,等. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, **40**(7): 577-586.
- [6] 韩冰,王效科,逯非,等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 612-619.
- [7] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, **4**(5): 282-289.
- [8] 孙成权,张志强. 国际全球变化研究计划综览[J]. 地球科学进展, 1994, **9**(3): 53-70.
- [9] 陈泮勤,郭裕福. 全球气候变化的研究与进展[J]. 环境科学, 1993, **14**(4): 16-23.
- [10] Chan K Y, Bowman A, Oates A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an Oxic Paleustalf under different pasture leys[J]. Soil Science, 2001, **166**(1): 61-67.
- [11] 许淑青,张仁陟,董博,等. 耕作方式对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17**(2): 203-208.
- [12] 徐胜祥,史学正,赵永存,等. 不同耕作措施下江苏省稻田土壤固碳潜力的模拟研究[J]. 土壤, 2012, **44**(2): 253-259.
- [13] 田慎重,宁堂原,王瑜,等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(2): 373-378.
- [14] 吕贻忠,廉晓娟,赵红,等. 保护性耕作模式对黑土有机碳含量和密度的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(11): 163-169.
- [15] 张四海,曹志平,张国,等. 保护性耕作对农田土壤有机碳库的影响[J]. 生态环境学报, 2012, **21**(2): 199-205.
- [16] 李典友,陈良松,李军,等. 霍山县县域范围内不同空间尺度下农田土壤有机碳变异分析[J]. 地理研究, 2012, **31**(9): 1571-1579.
- [17] 朱利群,杨敏芳,徐敏轮,等. 不同施肥措施对我国南方稻田表土有机碳含量及固碳持续时间的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(1): 87-95.
- [18] 许信旺,潘根兴,曹志红,等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. 地理研究, 2007, **26**(6): 1077-1086.
- [19] 石彦琴,高旺盛,陈源泉,等. 耕层厚度对华北高产灌溉农田土壤有机碳储量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(11): 85-90.
- [20] 沈雨,黄耀,宗良纲,等. 基于模型和 GIS 的江苏省农田土壤有机碳变化研究[J]. 中国农业科学, 2003, **36**(11): 1312-1317.
- [21] 张晓伟,许明祥,师晨迪,等. 半干旱区县域农田土壤有机碳固存速率及其影响因素——以甘肃庄浪县为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(5): 1086-1095.
- [22] 杨尚斌,温仲明,张佳. 基于自然植被的延河流域农田生态系统土壤固碳潜力评估[J]. 干旱地区农业研究, 2010, **28**(5): 211-217.
- [23] 许明祥,刘国彬,赵允格. 黄土丘陵区土地利用及环境因子对土壤质量指标变异性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(2): 409-417.
- [24] 周焱,徐宪根,阮宏华,等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(11): 1901-1907.
- [25] 王建林,欧阳华,王忠红,等. 贡嘎南山-拉轨岗日山南坡高寒草原生态系统表层土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2010, **41**(2): 346-350.
- [26] 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.
- [27] 施政,汪家社,何容,等. 武夷山不同海拔土壤呼吸及其主要调控因子[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(4): 563-568.
- [28] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,等. 森林生态系统土壤 CO₂ 释放随海拔梯度的变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2007, **27**(11): 4678-4685.
- [29] Smith P, Andren O, Karlsson T, et al. Carbon sequestration potential in European croplands has been overestimated[J]. Global Change Biology, 2005, **11**(12): 2153-2163.
- [30] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation[J]. Biogeochemistry, 2007, **86**(1): 19-31.
- [31] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. Climatic Change, 2007, **80**(1-2): 25-41.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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