

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例

师晨迪¹, 许明祥^{1,2*}, 邱宇洁¹

(1. 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2. 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 80 年代全国第二次土壤普查以及 2006 年耕地质量评价土壤有机碳数据, 采用几种不同的估算方法对庄浪县农田表层(0~20cm)土壤固碳潜力进行了估算。结果表明:①最大值法和分类定级法(高)对同一地区农田土壤理想固碳潜力估算结果差异不大。最大值法估算庄浪县农田表层土壤理想固碳潜力为 1.13 Mt, 而分类定级法(高)估算的理想固碳潜力为 1.09 Mt。②分类定级法(中)、饱和值法、加权法这 3 种固碳潜力估算方法求得庄浪县农田土壤现实固碳潜力分别为 0.37、0.32、0.28 Mt, 约为理想固碳潜力水平的 1/3。③采用分类定级法(中)、饱和值法和加权法估算现实固碳潜力, 有机碳密度增量依次为 6.76、5.21、4.56 t·hm⁻²。按照庄浪县近 30 年农田表层(0~20 cm)土壤的固碳速率, 达到现实固碳潜力水平大约需要 24~34 a。④在县域尺度上估算现实固碳潜力, 加权法优于饱和值法, 饱和值法优于分类定级法(中); 估算理想固碳潜力, 分类定级法(高)优于最大值法。

关键词: 土壤有机碳; 固碳潜力; 估算方法; 农田土壤; 加权法

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-1098-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.040

Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province

SHI Chen-di¹, XU Ming-xiang^{1,2*}, QIU Yu-jie¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland 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 SOC data of the second national soil survey by the mid 80s and the national cultivated land quality evaluation in 2006 in Zhuanglang County, the article studied the cropland topsoil organic carbon sequestration potential estimation using several different methods. The results showed that: ① There was no significant difference among different estimation methods about cropland carbon sequestration potential in the same region. Taking cropland carbon sequestration potential in Zhuanglang County for example, the theoretical values estimated by maximum value method and classification grading method were 1.13 Mt and 1.09 Mt, respectively. ② The real values estimated by classification grading method, saturation method, weighting method were 0.37 Mt, 0.32 Mt, 0.28 Mt, respectively, which were about 1/3 of the theoretical value. ③ The SOC density increments to reach the real level of carbon sequestration potential estimated by classification grading method, saturation method and weighting method were 6.76 t·hm⁻², 5.21 t·hm⁻², 4.56 t·hm⁻² respectively. According to the topsoil carbon sequestration rate of cropland in Zhuanglang county in the recent 30 a, it would need about 24-34 a to achieve the real level. ④ At the county scale, the weighted method was superior to the saturation value method, and the saturation value method was better than the classification grading method in the actual carbon sequestration potential estimation. The classification grading method was better than the maximum value method in the ideal carbon sequestration potential estimation.

Key words: soil organic carbon; carbon sequestration potential; estimation method; cropland soil; weighting method

作为气候变化的风向标, 碳收支的动态变化已经成为全球变化研究的核心内容之一, 而土壤碳库的收支对大气中温室气体的浓度以及全球气候变化有着重大影响, 因此土壤碳库收支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]。农田土壤碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 由于受到人类活动的强烈影响, 农田土壤有机碳库的研究一直是碳循环研究的热点^[2-5], 同时

也是全球变化、温室气体减排和粮食安全等问题研究的核心内容之一^[6,7]。在固碳减排目标驱使下^[8,9], 农田土壤固碳潜力研究得到了科学界的空

收稿日期: 2015-06-03; 修订日期: 2015-10-26

基金项目: 科技基础性工作专项(2014FY210100); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050504); 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技术, E-mail: gsqyscd@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn

前关注^[10,11]。

土壤固碳潜力的估算方法一直以来都是固碳潜力研究的重点和难点^[12], 基于不同的“潜力”范畴, 潜力估算有不同的方法。如何科学、准确地估算区域和全国尺度的固碳潜力, 是当前乃至今后一段时期内碳循环研究的核心内容。农田土壤固碳潜力是区域或国家农业土被的整体固碳能力^[13]。以往有关土壤固碳潜力的研究多集中在模型^[14]和机制^[15]上, 关于农田土壤固碳潜力的研究大多在影响因素^[16,17]和空间变异上^[18,19], 针对潜力的估算也往往集中在某一种方法上, 刘国栋等^[20]采用最大值法对松嫩平原耕层土壤固碳潜力进行了估算, 覃章才等^[21]基于饱和理论模型估算了全国农田土壤固碳潜力, 王晓丽等^[22]对海岛陆地生态系统固碳潜力做了估算, 但类似研究都集中在特定的一种方法对不同区域的潜力估算, 针对不同固碳潜力估算方法的对比研究还未见报道。

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。本研究以黄土丘陵沟壑区典型代表县——庄浪县为例, 针对黄土丘陵沟壑区县域尺度农田土壤固碳潜力研究的薄弱环节以及区域农田固碳潜力估算实际需求, 基于研究区农田土壤固碳潜力影响因素的剖析, 分别采用最大值法^[23]、分类定级法、饱和值法^[21]、加权法, 通过野外调查采样, 借助全国第二次土壤普查数据和耕地质量评价数据, 分析了庄浪县农田土壤

理想固碳潜力和现实固碳潜力。通过探究固碳潜力估算方法优劣, 以期区域农田土壤固碳潜力估算与方法选择提供依据。

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1 405~2 857 m, 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。境内群山起伏, 地势东高西低。全县共有耕地6.13万hm², 人均0.17 hm²。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92%。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 样点布设

样点布设首先采用联合单元布点法^[24], 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

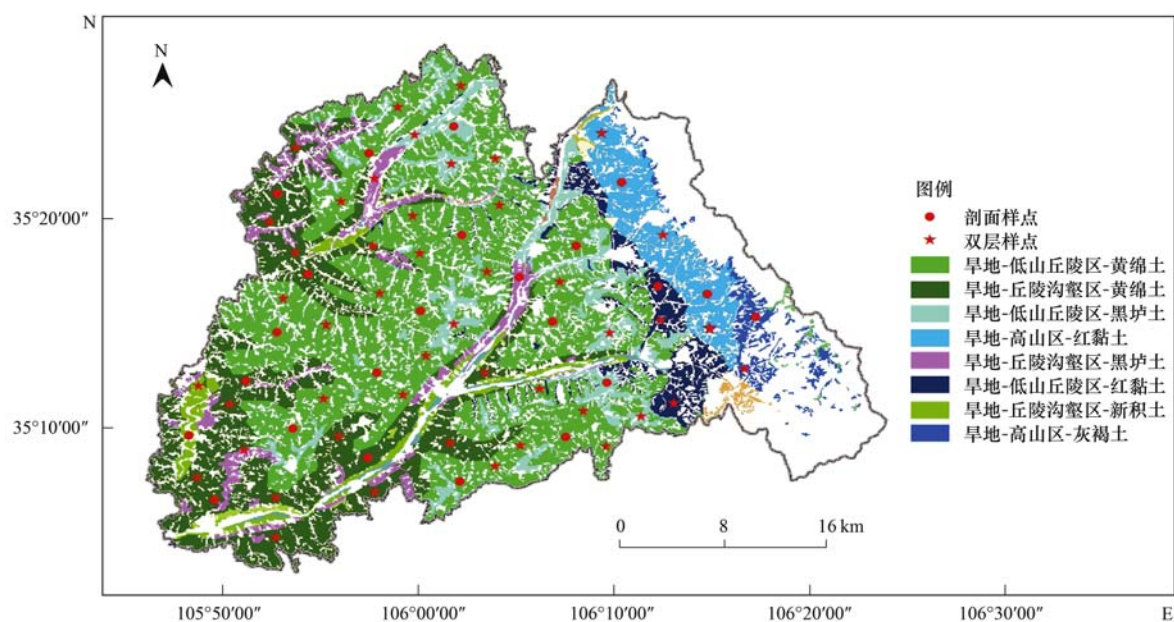


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution map of sampling points

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 points

土地利用-地貌类型-土类组合	面积比例 /%	剖面点数 /个	双层点数 /个
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 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分层取土,双层点取 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤,分别从布设样地的四角和中心部位采集,采用 5 点混合的方法取土样,混匀后将样品缩分至 1.5 kg,将土样风干后过 2 mm 和 0.25 mm 筛,供分析测定. 记录每个样点的经纬度、海拔、地理位置、地形、坡度、坡向等自然地理因素,通过走访调查当地的耕作制度、田间施肥管理情况、正常产量水平、灌溉条件等构建土壤描述性指标数据库. 本研究均采用 0~20 cm 表层土样数据.

1.3 其他数据来源

除采样分析数据外,本研究还采用了庄浪县第二次土壤普查数据和耕地质量评价数据,第二次土壤普查数据样点数量和分布与采样分布图一致,耕地质量评价数据由庄浪县农业技术推广中心提供. 耕地质量评价采样点覆盖全县所有农田,总面积为 6.13 万 hm^2 ,布点均匀,每 16 hm^2 一个样点,总样点数共计 3 839 个(如图 2).

1.4 样品分析与数据处理

1.4.1 样品分析

所有土壤有机碳数据均采用重铬酸钾-外加热法测得.

1.4.2 土壤固碳潜力的估算

基于固碳潜力可实现程度,将固碳潜力分为理想固碳潜力和现实固碳潜力. 理想固碳潜力是指将当前所有区域有机碳水平提升到当前有机碳含量的最高水平,土壤中还能容纳的碳. 由于不同区域环境条件不同,不可能完全实现,因此把这种潜力称之

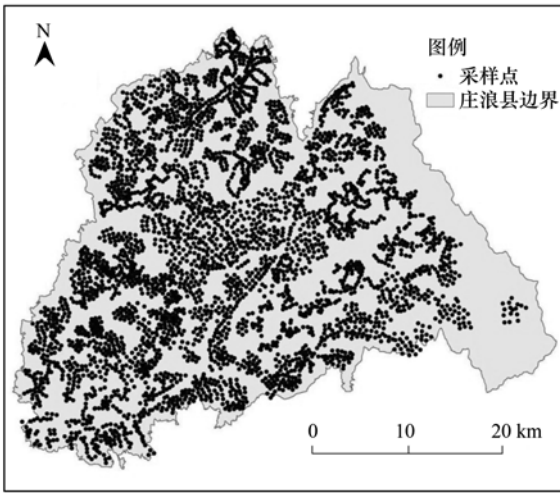


图 2 耕地质量评价样点分布示意

Fig. 2 Distribution map of sampling points in cultivated land quality evaluation

为理想固碳潜力. 现实固碳潜力是指将土壤有机碳提高到环境条件允许的最高水平即为饱和水平时,土壤中还能容纳的碳. 现实固碳潜力是可以人为管理措施等人为技术手段实现的潜力.

基于目标值理论的潜力估算.

最大值法^[23]是将该土壤类型中有机碳含量的最大值与每个实测数值之差被视为该点土壤有机碳的增加潜力. 饱和值法^[21]是将该土壤类型中有机碳变化量为零时的有机碳含量水平与每个实测含量之差被视为该点土壤有机碳的增加潜力. 分类定级法是将该土壤类型中有机碳含量分为不同水平层次,通过比较不同等级水平有机碳含量与实测值中低于该水平有机碳含量差值作为该点土壤有机碳的增加潜力.

庄浪县农田土壤的固碳潜力(SOC_p)等于土壤有机碳密度目标值($\text{SOC}_{D_{bi}}$)与土壤有机碳密度现状($\text{SOC}_{D_{0i}}$)之间的差值乘以该土类面积,计算方法为:

$$\text{SOC}_p = \sum_{i=1}^n S_i \cdot (\text{SOC}_{D_{bi}} - \text{SOC}_{D_{0i}})$$

式中, i 为不同土壤类型, $\text{SOC}_{D_{0i}}$ 为某种土壤有机碳密度现状, $\text{SOC}_{D_{bi}}$ 为某种土壤有机碳密度目标值,可通过最大值法、饱和值法、分类定级等方法求得.

基于影响因素的权重分析原理:加权法是在有机碳变化多因素影响分析的基础上,通过分析有机碳含量处于高水平的样点的属性,找出其他样点与该样点有机碳含量差值的大小,排除因自然因素而无法实现的影响部分,求得各样点与其差值,进而求得该区域农田土壤的固碳潜力.

1.4.3 土壤有机碳密度的计算

土壤有机碳密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)的计算方法：

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 100$$

式中, θ_i 是土壤大于 2 mm 的较粗颗粒体积分数, SOCD 是有机碳的密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$). ρ_i 是土壤的容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), T_i 是土层厚度(cm), C_i 是土壤中有有机碳的含量($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$).

1.4.4 土壤有机碳储量的计算

采用土壤类型法估算庄浪县表层土壤有机碳储量.

$$\text{TC} = \sum_{i=1}^n S_i \cdot \text{SOCD}_i$$

式中, TC 为有机碳总量(t); S_i 为第 i 种土壤的面积(hm^2); SOCD_i 为第 i 种土壤的碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$).

1.4.5 数据处理

数据处理及制图采用 Arcgis 10.0、SPSS 20.0 和 Excel 2007 等软件.

2 结果与分析

2.1 基于不同方法的固碳潜力估算

2.1.1 最大值法

利用 2006 年庄浪县耕地质量评价土壤有机碳数据,依据最大值法,对庄浪县农田表层土壤固碳潜力进行了估算. 首先去掉累计频率大于 99.5% 所对应的土壤有机碳含量数值,然后将去掉极值以后的最大值作为该土壤类型中有有机碳含量的最大值,从而减少极值误差. 每个实测数值与最大值之差被视为该点土壤有机碳的潜力增量. 计算得出该土壤类

型表层土壤的平均有机碳密度的增量,依据各土壤类型所占面积,计算该类型表层土壤有机碳的潜力增量. 由图 3 可知,在 3 037 个黄绵土样点中,有机碳含量在 7 ~ 9 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样点个数占样本容量的 52.16%; 在 6 ~ 11 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的样点占样本容量的 93.41%; 累计频率小于 99.5% 的样点的有机碳含量介于 3 ~ 14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效样点为 3 028 个. 其他土类均按照此法选出有效样点.

各土类有机碳含量最大值依次为黑垆土、红黏土、黄绵土、新积土和潮土(表 2),平均有机碳密度增加潜力最大的为黑垆土 24.68 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,其次为红黏土 20.93 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,第三为黄绵土 17.20 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$,最小为潮土 5.11 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$. 根据各土壤类型有机碳含量的最大值法估算,庄浪县表层土壤有机碳贮存量增加潜力为 1.13 Mt,主要集中在黄绵土、黑垆土和红黏土三大类型中(表 2),三者分别占了总潜力的 73.78%、21.82% 和 4.11%.

2.1.2 饱和值法

以 1980 年的农田土壤有机碳值作为庄浪县农田土壤初始有机碳含量,土壤有机碳变化量为 2011 年与 1980 年农田土壤相对应样点有机碳含量的差值,以庄浪县不同土壤类型农田土壤初始有机碳与其变化量,建立两者之间的拟合关系曲线. 当土壤有机碳变化量为零时,所对应的初始土壤有机碳含量达到饱和. 该饱和水平的有机碳含量称为该土壤类型下有机碳含量的饱和值,将每个实测值和饱和值之差视为该点土壤有机碳的潜力增量. 计算所得该土壤类型表层土壤平均有机碳密度增加量,然后根据各种土壤类型面积计算取得其表层土壤的固碳

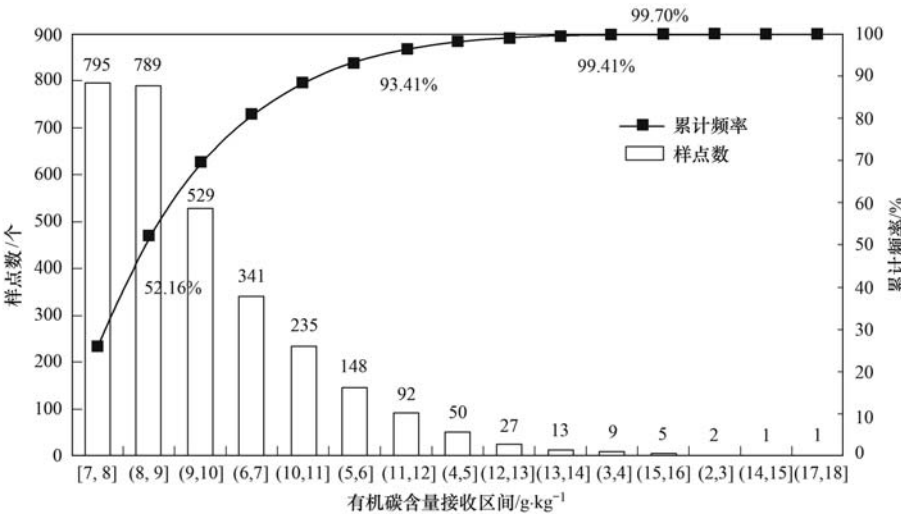


图 3 黄绵土有机碳含量区间分布

Fig. 3 Frequency distribution histogram of SOC content in Loess soil

潜力(表3). 不同土壤类型的有机碳饱和值不同, 饱和值最大的为黑垆土 $13.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为黄绵土 $11.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 红黏土的饱和值最小. 平均有机碳密度增量最大的为黑垆土 $7.3 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其次是黄绵土

为 $5.1 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 红黏土最小. 因黄绵土面积较大, 故其固碳潜力增量最大, 约为 0.25 Mt , 约占总潜力增量的 78% . 而黑垆土固碳潜力增量为 0.073 Mt , 约占总潜力增量的 22% .

表2 不同土类农田表层土壤固碳潜力

Table 2 SOC sequestration potential of cropland surface soils in different soil types

土壤类型	有效样点	有机碳含量 最大值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	平均有机碳密度增量 $/\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	面积 $/\text{hm}^2$	固碳潜力 $/\text{t}$
新积土	8	10.55	7.46	144	1 074.24
红黏土	138	15.55	20.93	2 222	46 506.46
黄绵土	3 028	13.92	17.20	48 541	834 905.20
黑垆土	622	17.48	24.68	10 006	246 948.08
潮土	25	9.55	5.11	416	2 125.76
合计	3 821		15.08		1 131 559.74

表3 饱和值法估算土壤固碳潜力

Table 3 Soil carbon sequestration potential estimated by saturation value method

土壤类型	黄绵土	黑垆土	红黏土	合计
面积/ hm^2	48 541	10 006	2 222	60 769
有机碳增量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.18	3.15	0.00	1.78
有机碳密度增量/ $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$	5.10	7.30	0.00	4.10
固碳潜力/ t	247 561.10	73 040.66	0.00	320 601.76

2.1.3 分类定级法

鉴于不同土壤类型固碳潜力的可实现程度不同, 笔者按照土壤类型对所有样点进行分类. 在同一土壤类型下对土壤有机碳含量进行分级, 每种土壤类型下分5个有机碳含量水平, 分别为低、较低、中、较高、高这5个等级水平, 通过5个标准等级水平与实测数据的差值, 可以得出实现到不同水平的土壤固碳潜力.

不同土壤类型各个水平的固碳潜力差异较大(表4). 在高水平下, 黄绵土的固碳潜力达 0.78 Mt , 占到总固碳量的 71.0% ; 其次是黑垆土为 0.26

Mt , 占到总固碳量的 24.1% ; 新积土的固碳潜力最小为 1.1 kt ; 总固碳量为 1.09 Mt . 在中等水平下, 黄绵土的固碳潜力达 0.25 Mt , 占到总固碳量的 66.55% ; 其次是黑垆土为 0.11 Mt , 占到总固碳量的 28.89% ; 新积土的固碳潜力最小为 448 t ; 总固碳量为 0.37 Mt . 可见, 不同土类土壤有机碳密度增量存在差异, 以中等水平的固碳潜力为例(表5), 各土类土壤有机碳密度增量由大到小依次为黑垆土 > 红黏土 > 黄绵土 > 新积土 > 潮土, 最高为 $11.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 最低的为 $3.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$. 各土类有机碳增加面积存在差异, 故黄绵土的潜力增量最大.

表4 不同固碳水平下各土类固碳潜力/ t

Table 4 SOC sequestration potential in different soil types under different carbon sequestration levels/ t

水平级别	低	较低	中	较高	高
黄绵土	5 393.07	59 738.55	247 578.22	505 948.87	777 078.65
新积土	85.70	194.33	447.76	756.02	1 113.65
红黏土	283.42	3 155.72	15 983.10	32 643.65	49 773.61
黑垆土	2 748.58	37 436.31	107 515.22	184 742.38	263 480.93
潮土	55.00	194.66	512.99	1 314.72	2 694.94
总固碳潜力	8 565.76	100 719.58	372 037.29	725 405.64	1 094 141.78

2.1.4 加权法

通过对庄浪县农田表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤近30年有机碳变化及影响因素的研究, 基于多因素影响分析, 得出土壤有机碳主要受到海拔高度、初始有机碳含量、土壤类型、有机肥以及坡向的影响, 且

影响程度均可量化. 假设其单一因素的影响结果符合线性规律, 笔者对各影响因子的影响结果进行加权, 从而得出其多因素影响的加权结果.

以海拔高度为例: 样点数据来自20世纪80年代全国第二次土壤普查数据和2011年采样数据, 通

表 5 中等水平下不同类型土壤的固碳潜力

Table 5 SOC sequestration potential in different types under moderate levels

土类	黄绵土	黑垆土	红黏土	新积土	潮土
面积/hm ²	48 541	10 006	2 222	144	416
比例/%	87. 74	95. 83	89. 13	75. 00	36. 00
容重/g·cm ⁻³	1. 39	1. 40	1. 38	1. 37	1. 33
样点数	3 019	623	138	8	25
有机碳增量/g·kg ⁻¹	2. 09	3. 99	2. 93	1. 52	1. 29
有机碳密度增量/t·hm ⁻²	5. 81	11. 21	8. 07	4. 15	3. 43
固碳潜力/t	247 578. 22	107 515. 22	15 983. 10	447. 76	512. 99

过对比分析得知,庄浪县农田表层土壤有机碳含量分布与海拔高度成线性递增关系,同时海拔高度对有机碳含量变化的贡献因子为 q ,在这里将海拔高度分为4个区间水平,分别为1 400~1 600、1 600~1 800、1 800~2 000 和2 000~2 200 m,分别用1、2、3、4表示,而每个样点的海拔高度均用以上数字表示.笔者认为海拔属于自然因素,不同海拔高度对应着不同的气候条件,故属于不可改变因素,考虑海拔的影响作用,不可能使得海拔为1的样点有机碳达到海拔为4的水平,因而需要排除海拔对有机碳变化的影响效果.假设海拔对有机碳含量的影响是线性的,那么可以得出海拔为1的样点海拔高度对其影响为 $(4-1) \times q/3$,海拔为2的样点海拔高度对其影响为 $(4-2) \times q/3$,海拔为3的样点海拔高度对其影响为 $(4-3) \times q/3$,海拔为4的样点海拔高度对其无影响.假如在属于1水平海拔高度的样点的土壤有机碳含量为 x ,有机碳含量较高水平

的值为 m ,那么没有排除各个影响因素的该样点有机碳增量为 $m-x$,而排除海拔高度对该样点影响后的有机碳含量为 $(m-x) \times [1-(4-1) \times q/3]$.在分别考虑海拔高度、土壤类型、初始有机碳、有机肥施用量和坡向等因素后,可以得出每个样点在排除其不可改变影响因素作用后的有机碳增量,进而可以计算出庄浪县农田表层土壤固碳潜力.

加权法估算各土类有机碳增量差异较大,最大的为红黏土 $2.12 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,最小的为灰褐土 $0.38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表6);各土类有机碳密度自大到小依次为新积土、红黏土、黄绵土、黑垆土、灰褐土;平均有机碳密度为 $3.96 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.庄浪县农田表层土壤中总潜力增量为 0.28 Mt ,其中增量最大的为黄绵土 0.23 Mt ,占到总潜力增量的82%;其次是黑垆土 0.038 Mt ,占总潜力增量的13%;第三为红黏土 0.011 Mt ,占总固碳量的4%;最小的为灰褐土 291 t .

表 6 加权法估算土壤固碳潜力

Table 6 SOC sequestration potential estimated by weighting method

土壤类型	黄绵土	黑垆土	红黏土	潮土	新积土	合计/平均
样点数	46	10	8	3	3	70
面积/hm ²	48 541	10 006	2 222	416	144	61 329
有机碳增量/g·kg ⁻¹	2. 03	1. 63	2. 12	0. 38	2. 10	1. 65
有机碳密度增量/t·hm ⁻²	4. 80	3. 80	5. 10	0. 70	5. 40	3. 96
固碳潜力/t	232 996. 80	38 022. 80	11 332. 20	291. 20	777. 60	283 420. 60

2.2 不同估算方法固碳潜力对比

不同估算方法对同一地区估算结果差异较为明显(表7),其中估算得出固碳量最大的是最大值法,为 1.13 Mt ,平均增加有机碳密度为 $18.40 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.该方法估算结果为理论水平,由于受到各种自然和人为因素限制,农田的有机碳水平无法达到这一理论值,仅作理论参考.与最大值法相比,分类定级法可估算多个水平的潜力值,其中高水平的估值较为接近最大值法,为 1.09 Mt ,平均有机碳密度增量为 $17.84 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,而分类定级的中等水平是将低于高

水平60%层次的样点提升到这一水平值,能够固定的有机碳总量为 0.37 Mt ,平均有机碳密度增量为 $6.76 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,约为高水平下固碳潜力的1/3.饱和值法是基于饱和理论估算得出的,其准确性相对较高,能够较准确地反映出有机碳增量空间,其固碳量约为 0.32 Mt ,平均增加有机碳密度为 $5.21 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.加权法估算得出的固碳潜力为 0.28 Mt ,平均有机碳密度增量为 $4.56 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,与饱和值法估算结果较为接近,是一种比较实际的有机碳估算方法,有较强的参考价值.根据庄浪县近30年农田表层土壤有机

表 7 不同估算方法下固碳潜力对比

Table 7 Comparison of SOC sequestration potential estimated by different estimation methods

估算方法	固碳面积/km ²	固碳潜力/Mt	有机碳密度增量/t·hm ⁻²	主要土壤类型
最大值法	613	1.13	18.40	黄绵土、黑垆土、红黏土
分类定级(高)	613	1.09	17.34	黄绵土、黑垆土、红黏土
分类定级(中)	613	0.37	6.76	黄绵土、黑垆土、红黏土
饱和值法	608	0.32	5.21	黄绵土、黑垆土、红黏土
加权法	613	0.28	4.56	黄绵土、黑垆土、红黏土

碳增幅 30.9%^[25], 可知其平均增速约为 196 kg·(hm²·a)⁻¹, 在当前耕作管理方式下, 达到现实固碳潜力水平大约需要 24~34 a.

3 讨论

因最大值法能方便、快捷、粗略的估算土壤固碳潜力, 故当前土壤理想固碳潜力的估算多应用此方法. 由于形成每种土样的自然条件, 环境因素、耕作管理方式等属性各不相同, 不可能所有土样都能达到该土类的有机碳含量最高水平, 所以最大值法求得的潜力是一种理论值. 但仍具有一定的参考价值. 本研究采用最大值法所求的结果与张秀芝等^[23]采用同方法估算的河北平原平均有机碳密度增量相近. 分类定级法(高)是在最大值法的基础上通过分级而来的, 相比最大值法, 分类定级法(高)的最大值是一个级别水平的代表而不是某个样点的具体数值, 具有统计学意义, 更具有代表性. 分类定级法(高)求得的理想固碳潜力值略低于最大值法, 其差值源自目标值的差异. 由此可知, 在估算农田土壤理想固碳潜力方面, 分类定级法(高)是优于最大值法的.

目前, 关于土壤现实固碳潜力估算方法应用最为广泛的是饱和值法, 饱和值理论的难点在于确定饱和水平, 如何确定当前环境条件下土壤有机碳的饱和水平, 成为饱和值法能否估算准确的决定因素. 通过分析得到有机碳变化量为零时, 有机碳含量水平确定饱和值是较为准确的方法, 但这一结果需要满足以下两个条件: 一是满足一定数量的样点个数, 样点数量决定了获取饱和水平的高低. 二是外源有机质投入是否充足, 根据相关研究^[26~28]所作的 SOC 动态变化可知, 外源有机碳投入会出现土壤有机碳的稳定期, 当土壤有机碳含量不再随外源有机碳的投入而增加时, 才是土壤有机碳真实的饱和水平. 尽管本研究结果与任春颖等^[29]在松嫩平原玉米带农田表层土壤有机碳储量和固碳潜力的研究结果基本一致, 但由于有机碳饱和值的确定存在一定的不

确定性, 因此该方法在实际的操作过程中仍存在一定困难. 估算结果可靠性有待于进一步研究.

加权法是在土壤有机碳变化的影响因子贡献系数的基础上, 通过排除自然影响因子的影响效果, 从而求得土壤潜力增量的方法. 此方法假定有机碳的变化主要由这些影响因子引起, 由于自然影响因子如土壤属性、海拔、坡向等不可改变, 而人为的影响因子如秸秆还田、有机肥施用量等可以人为控制, 排除自然影响因子之后所得的有机碳增量即为实际有机碳的增量空间. 这一方法是基于有机碳变化影响因素, 其影响因子及权重对潜力估算影响较大. 同时, 影响因素的分级对其估算结果也有一定程度的影响. 由于该方法修正了自然因素的影响, 估算结果更能体现管理措施对土壤固碳潜力的影响, 具有较高的现实意义. 相比饱和值法, 加权法估算的结果更为准确.

分类定级法(中)估算的现实固碳潜力与饱和值法、加权法估算结果较为接近, 尽管分析结果不及饱和值法、加权法精确, 但该方法简单易操作, 在粗略估算方面应用较为广泛. 综合以上因素, 在县域尺度上, 估算农田表层土壤现实固碳潜力时, 在精确性上, 加权法优于饱和值法优于分类定级法(中); 在操作简易程度上, 分类定级法(中)优于饱和值法优于加权法. 而在估算理想固碳潜力时, 分类定级法(高)优于最大值法.

4 结论

(1) 分类定级法(中)、饱和值法、加权法这 3 种固碳潜力估算方法求得庄浪县农田表层(0~20 cm)土壤现实固碳潜力约 0.28~0.37 Mt, 为理想固碳潜力水平的 1/3.

(2) 采用分类定级法(中)、饱和值法和加权法估算现实固碳潜力, 达到现实固碳潜力水平大约需要 24~34 a.

(3) 在县域尺度上, 采用最大值法和分类定级法(高)估算农田表层(0~20 cm)土壤理想固碳潜

力,估算结果差异不明显。但分类定级法(高)优于最大值法。估算现实固碳潜力时,加权法的精确性优于饱和值法优于分类定级法(中)。在操作的易行程度上分类定级法(中)优于饱和值法优于加权法。

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]. 生态学报, 1999, **18**(5): 29-35.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 徐冠华,葛全胜,宫鹏,等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策[J]. 科学通报, 2013, **58**(21): 2100-2106.
- [7] 覃志豪,唐华俊,李文娟,等. 气候变化对农业和粮食生产影响的研究进展与发展方向[J]. 中国农业资源与区划, 2013, **34**(5): 1-7.
- [8] 何建坤,陈文颖,滕飞,等. 全球长期减排目标与碳排放权分配原则[J]. 气候变化研究进展, 2009, **5**(6): 362-368.
- [9] 葛全胜,方修琦. 科学应对气候变化的若干因素及减排对策分析[J]. 中国科学院院刊, 2010, **25**(1): 32-40.
- [10] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, **304**(5677): 1623-1627.
- [11] 郑聚峰,程琨,潘根兴,等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题[J]. 科学通报, 2011, **56**(26): 2162-2173.
- [12] 孙文娟,黄耀,张稳,等. 农田土壤固碳潜力研究的关键科学问题[J]. 地球科学进展, 2008, **23**(9): 996-1004.
- [13] 潘根兴,赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和粮食安全[J]. 地球科学进展, 2005, **20**(4): 384-393.
- [14] 戴尔阜,黄宇,赵东升. 草地土壤固碳潜力研究进展[J]. 生态学报, 2015, **35**(12): 3908-3918.
- [15] 唐国勇,李昆,孙永玉,等. 干热河谷林地燥红土固碳特征及“新固定”碳景观稳定性[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 551-557.
- [16] 李小涵,郝明德,王朝辉,等. 农田土壤有机碳的影响因素及其研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, **26**(3): 176-181.
- [17] 梁二,蔡典雄,代快,等. 中国农田土壤有机碳变化: I 驱动因素分析[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (6): 80-86.
- [18] 张志霞,许明祥,吴永斌,等. 黄土丘陵区县域农田土壤有机碳空间变异性——以甘肃庄浪县为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, **19**(4): 955-963.
- [19] 张晓伟,许明祥. 关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例[J]. 环境科学, 2013, **34**(7): 2793-2799.
- [20] 刘国栋,李瑛,张立,等. 松嫩平原耕层土壤固碳潜力估算[J]. 中国地质, 2014, **41**(2): 658-664.
- [21] 覃章才,黄耀. 基于模型的农田土壤固碳潜力估算[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, **40**(7): 658-676.
- [22] 王晓丽,王媛,石洪华,等. 海岛陆地生态系统固碳估算方法[J]. 生态学报, 2014, **34**(1): 88-96.
- [23] 张秀芝,赵相雷,李宏亮,等. 河北平原土壤有机碳储量及固碳机制研究[J]. 地学前缘, 2011, **18**(6): 41-55.
- [24] 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.
- [25] 师晨迪,许明祥,邱宇洁,等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 1098-1104.
- [26] Izaurralde R C, McGill W B, Robertson J A, *et al.* Carbon balance of the Breton classical plots over half a century[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, **65**(2): 431-441.
- [27] Campbell C A, McConkey B G, Biederbeck V O, *et al.* Long-term effects of tillage and fallow-frequency on soil quality attributes in a clay soil in semiarid southwestern Saskatchewan [J]. Soil & Tillage Research, 1998, **46**(3-4): 135-144.
- [28] Campbell C A, McConkey B G, Zentner R P, *et al.* Tillage and crop rotation effects on soil organic C and N in a coarse-textured Typic Haploboroll in southwestern Saskatchewan [J]. Soil & Tillage Research, 1996, **37**(1): 3-14.
- [29] 任春颖,张春华,王宗明,等. 松嫩平原玉米带农田表层土壤有机碳储量和固碳潜力研究[J]. 自然资源学报, 2013, **28**(4): 596-607.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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