

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/NH_4^+-N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀臻, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

近30年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素

江叶枫^{1,2}, 钟珊^{1,2}, 李婕^{1,2}, 王澜珂^{1,2}, 郭熙^{1,2*}

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 2. 江西省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室, 南昌 330045)

摘要: 基于1982年余干县第二次土壤普查200个样点数据和2012年测土配方施肥项目423个样点数据, 运用方差分析、相关性分析、回归分析和普通克里格法, 结合成土母质、土壤类型、耕地利用方式、地形因子、pH、秸秆还田和氮肥施用量, 探讨近30年来余干县耕地表层(0~20 cm)土壤碳氮比(C/N)时空变异特征及其影响因素。结果表明余干县1982年和2012年土壤C/N均值依次为10.05和11.18, 变异系数分别为19.40%和25.04%, 均呈中等程度的变异性。经半变异函数分析, 块金效应值分别为15.91%和71.25%, 表明土壤C/N由结构性因素和随机性因素共同作用变为更倾向于受随机性因素的主导作用。近30年来大部分区域土壤C/N增加明显, 以东部区域增加最为显著。1982年土壤C/N空间变异主要受成土母质、土壤类型、地形因子和pH的影响, 其影响程度依次为17.3%、14.2%、7.4%和2.3%。2012年土壤C/N空间变异受成土母质、土壤类型、耕地利用方式、地形因子、秸秆还田和氮肥施用量共同作用, 其影响程度依次为8.7%、23.5%、28.2%、12.2%、12.6%和42.3%。

关键词: 余干县; 土壤碳氮比; 时空变异; 成土母质; 氮肥施用量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1386-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706186

Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years

JIANG Ye-feng^{1,2}, ZHONG Shan^{1,2}, LI Jie^{1,2}, WANG Lan-ke^{1,2}, GUO Xi^{1,2*}

(1. Academy of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Jiangxi Province, Nanchang 330045, China)

Abstract: The soil carbon-to-nitrogen (C/N) ratio of soils is a sensitive indicator of soil quality and an indicator for assessing the carbon and nitrogen nutrition balance of soils. Its variation is significant in reflecting the carbon and nitrogen cycling of soils. An accurate knowledge of how the C/N ratio varies spatially and temporally and the driving factors at county scale is of great significance to the extrapolation of balanced fertilization based on soil C/N ratio regulation as well as to the protection of the ecological environment. This study was based on 200 points of surface soil samples (0-20 cm) collected during the second National Soil Survey in 1982 and 423 points of surface soil samples (0-20 cm) collected during the soil test-based formulated fertilization project in 2012 in Yugan County. Combined with the soil parent material, soil type, farmland-use type, terrain factors, pH, straw incorporation pattern, and nitrogen fertilizer rate over the past 30 years, spatial and temporal variability characteristics of the soil C/N ratio were analyzed by using ordinary kriging methods, and the effects of the influencing factors were quantified by regression analysis. The results indicated that the mean value of the C/N ratio was 10.05 and 11.18 in 1982 and 2012, respectively. The coefficient of variation was 19.40% and 25.04%, respectively, which suggested the soil C/N ratio had moderate variability in the study area. The ratios of nugget to sill were 15.91% and 71.25% in 1982 and 2012, respectively. This means that the leading factor from the structural factors (parent material and soil type) into the stochastic factors (nitrogen fertilizer rate and straw incorporation pattern). In the past 30 years, most of the regional soil C/N ratio increased significantly especially the eastern region. The spatial variability of soil C/N in 1982 was mainly affected by soil parent material, soil type, terrain factor, and pH, with the degree of influence of each variable at 17.3%, 14.2%, 7.4%, and 2.3%. In 2012, the spatial variability was mainly affected by soil parent material, soil type, farmland-use type, terrain factor, straw incorporation pattern, and nitrogen fertilizer rate, with the degree of influence of each variable of 8.7%, 23.5%, 28.2%, 12.2%, 12.6%, and 42.3%, respectively. To maintain the steady growth of the soil C/N ratio, it is suggested that the return of carbon be incorporated with the input of nitrogen, such as incorporating crop residues into the soil and inputting more organic fertilizers into the soil in future farming practices.

Key words: Yugan County; soil carbon-to-nitrogen ratio; spatial and temporal variability; parent material; nitrogen fertilizer rate

收稿日期: 2017-06-19; 修订日期: 2017-08-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41361049); 江西省自然科学基金项目(20122BAB204012); 江西省赣鄱英才“555”领军人才项目(201295)

作者简介: 江叶枫(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤养分空间变异, E-mail: jiangyf0308@163.com

* 通信作者, E-mail: xig435@163.com

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)是植物矿物质营养和有机营养的主要来源,也是陆地土壤碳(C)库与氮(N)库的重要组成部分,其含量与动态变化在一定程度上威胁着土壤肥力、生态安全和全球 C、N 元素循环,已成为近些年来环境保护与全球气候变化背景下土壤学、环境学和水文科学的热点研究与应用发展领域^[1-3]。由于地球运动、环境变化以及人为活动等因素影响,直接或间接引起土壤 C、N 空间分布差异,致使土壤 C、N 存在着明显的区域效应、尺度效应和时间效应^[4, 5]。近年来,国内外学者对不同地区、不同尺度和不同时空下土壤 C、N 空间分布特征及其影响因素进行了较为深入的探讨,并取得了丰硕的研究成果^[6-8]。但这些都仅考虑土壤 C、N 自身变异特征,而忽略了 C、N 间耦合平衡的关系(土壤碳氮比)。有研究表明^[9, 10],土壤碳氮比(C/N)能更全面地阐述土壤 C、N 变异,研究其空间变异特征及其影响因素对调控区域土壤 C、N 循环、土壤保护以及耕地可持续利用具有重要作用。

由于不同生态系统的土壤微生物活性差异、土壤 C、N 循环与转换以及有机质分解与积累速度的不同,导致土壤 C/N 变化明显。目前关于土壤 C/N 的侧重点主要在土壤 C、N 与土壤微生物生物量和土壤肥力之间的关系上,在区域尺度上如县域尺度研究土壤 C/N 空间变异及其影响因素相对较少^[11-13]。且在以往研究过程中,由于数据采集、收集以及点位发生变化等问题,导致已有研究较少考虑土壤 C/N 的时空变异特征。张春华等^[14]研究近 25 年松嫩平原玉米带土壤 C/N 变异特征,发现土壤 C/N 均值明显上升,空间自相关范围减少。罗由林等^[15]对近 30 年川中丘陵地区土壤 C、N 变异特征及其影响因素进行分析,其研究结果表明土壤 C、N 均表现为周围低、中部高的趋势,土壤 C/N 均值明显上升,不同时期影响土壤 C、N 变异的影响因素不尽相同。前人的研究表明^[16-18],分析不同时期土壤 C/N 空间变异特征及其影响因素有利于更加详细地描述土壤 C/N 空间变异规律和精确估算土壤 C、N 汇潜力变化。

鄱阳湖生态经济区是以保护生态环境和发展经济为重要战略构想的经济特区,是世界性生态文明与经济社会发展协调统一、人与自然和谐相处的生态经济示范区和中国低碳经济发展先行区^[19, 20]。鄱阳湖在不同时期均存在着剧烈水位波动,由此引起频繁地干湿交替势必造成耕地土壤 C、N 含量的

极大波动^[21]。本研究以鄱阳湖生态经济区商品粮基地县余干县为案例区,通过对 1982 年余干县第二次土壤普查数据的整理和 2012 年余干县测土配方施肥项目收集的土壤样点数据,结合成土母质、土壤类型、耕地利用方式、地形因子、pH、秸秆还田和氮肥施用量,运用普通克里格法、相关性分析和回归分析,系统探讨了近 30 年来土壤 C/N 空间变异特征及其影响因素,以期为余干县耕地土壤 C、N 调控和指导土壤 C/N 数字制图方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

余干县(28°21'36"N ~ 29°03'24"N, 116°13'48"E ~ 116°54'24"E)总面积为 $2.33 \times 10^3 \text{ km}^2$,人口 100 万,下辖 27 个乡镇,372 个村委会。地貌以低丘和滨湖平原为主,地势东南高,西北低,由东南部丘陵向西北缓慢倾斜,过渡到湖滨平原。年均降水量 1 548 ~ 1 692 mm,雨量充沛,年平均气温 15.4 ~ 19.5℃,全年无霜期约 240 ~ 300 d,为亚热带湿润气候。土地利用类型以耕地和林地为主(图 1)。耕地面积为 67 713 hm^2 ,其中水田面积 63 974 hm^2 ,旱地面积 3 739 hm^2 。粮食作物以水稻为主,水稻产量占粮食总产量的 90% 以上。土壤类型主要是水稻土和红壤,潮土和草甸土较少。植被以阔叶林、针叶林和野生草被为主,具有典型的亚热带森林植物群落。

1.2 土壤采样

研究区 1982 年土壤样点数据来源于余干县第二次土壤普查时采集的 200 个土壤剖面数据[图 1(a)]。每一个点位数据都记录在《江西省土壤》、《上饶市土壤》和《余干县土壤》等相关资料中,且详细地介绍了该点位所在的采样地点、采样深度、酸碱度、SOC 含量、TN 含量、土壤 C/N、成土母质、土壤类型、耕地利用方式、以及其他土壤养分因子含量。由于行政区域更名和合并等因素,笔者结合研究区 1982 年和 2012 年余干县行政区划图和各乡镇行政区划图、1:1 万地形图、居民点空间分布、遥感影像图、30 m 的数字高程模型数据以及各乡镇土壤类型图等辅助资料对 200 个土壤样点数据逐一进行矢量化,尽可能使采样点接近原采样位置^[22]。

2012 年土壤样点按照耕地地力调查与质量评价技术规程(NYT 1634-2008),根据研究区的实际情

况,在考虑均匀性、代表性和连续性以及研究区土壤类型、耕作制度、产量水平和土地利用现状等因素的前提下,于农作物收获后在全县范围内采用多点混合的方法采集耕地表层(0~20 cm)土壤样品 423 个

[图 1(a)]. 每个样点采集样品 1 kg, 土壤样品经过自然风干后,在实验室磨碎过筛,采用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$)油浴加热测定 SOC 含量^[23]; FossKjeltec8400 全自动凯氏定氮仪测定 TN 含量^[24].

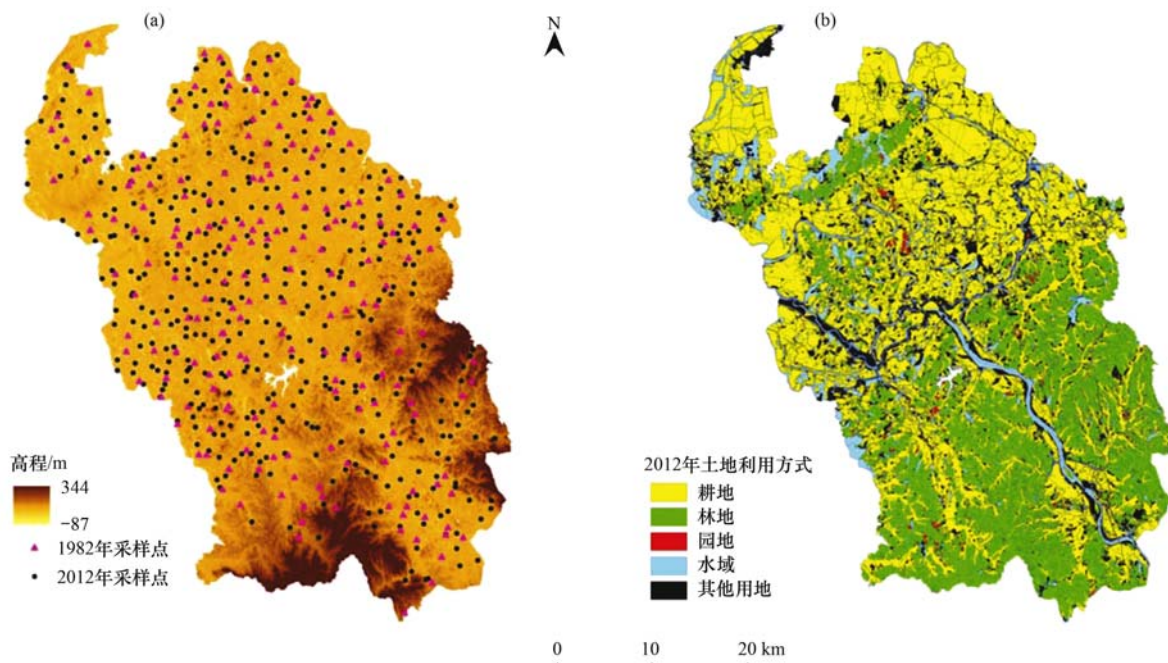


图1 研究区样点分布图和土地利用类型

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites and land-use types in the study area

1.3 数据处理

1982 年和 2012 年土壤样点数据及其相关图件均投影到同一坐标系统. 由于 2012 年余干县测土配方施肥项目仅收集了耕地表层(0~20 cm)土壤样点数据, 而第二次土壤普查的数据收集的为 0~100 cm 左右的样点信息, 因此 1982 的所有数据均选取耕地表层(0~20 cm)的土壤样点信息进行探讨. 高程、坡度、坡向、曲率、坡度变率、坡向变率均由高程数据[图 1(a)]在 ArcGIS10.2 中处理提取. 常规性统计分析、方差分析、相关性分析和回归分析均在 IBM SPSS Statistics 22 软件中完成. 在 GS⁺ (version7) 软件中对半变异函数进行计算与模型拟合, 运用 ArcGIS10.2 地统计模块的普通克里格法对两段时期的土壤 C/N 进行空间插值. 1982~2012 年的土壤 C/N 时空变化图则通过两时段土壤 C/N 空间分布图进行栅格叠加运算得到.

2 结果与分析

2.1 描述性统计特征

从描述性统计分析结果可以看出(表 1), 余干县 1982 年土壤 C/N 介于 0.50~15.10 之间, 均值

为 10.05, 土壤 C/N 要低于全国第二次土壤普查平均水平(11.38)^[15]; 变异系数为 19.40%, 表现为中等变异性. 余干县 2012 年土壤 C/N 值域范围 4.13~27.30, 均值为 11.18, 要低于全国平均水平(13.06)^[25]; 从变异系数可以看出(表 1)2012 年土壤 C/N 呈中等变异性. 1982 年和 2012 年土壤 C/N 均值差异显著($P<0.01$). 从 K-S 检验($P>0.05$)可以得出 1982 年和 2012 年土壤 C/N 均符合正态分布, 可以进行半变异函数分析和普通克里格法插值.

2.2 半变异函数分析

在 GS⁺ 软件中对土壤 C/N 进行半变异函数拟合, 用半变异函数描述其空间变异性. 从半变异函数拟合结果可以看出(图 2 和表 2), 1982 年和 2012 年研究区土壤 C/N 的最优模型分别为高斯模型和指数模型, 模型的拟合系数分别为 0.430 和 0.491, 模型的拟合效果较好. 从模型的参数来看(表 2), 1982 年和 2012 年的块金效应值(随机性因素引起的空间变异与系统总空间变异的比值)^[8,10]分别为 15.91% 和 71.25%, 表明 1982 年土壤 C/N 空间变异主要由结构性因素引起, 呈弱空间相关性, 而

表 1 描述性统计结果¹⁾

Table 1 Descriptive statistical results								
指标	年份	样点数	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	K-S/Sig.
SOC	1982	200	2.96	36.99	15.60	5.99	38.40	0.056
	2012	423	7.60	38.93	17.27	5.06	29.30	0.523
TN	1982	200	0.34	3.41	1.50	0.48	32.00	0.214
	2012	423	0.43	3.15	1.58	0.41	25.95	0.095
C/N	1982	200	0.50	15.10	10.05AB	1.95	19.40	0.118
	2012	423	4.13	27.30	11.18AB	2.80	25.04	0.065

1) AB 表示差异显著($P < 0.01$)

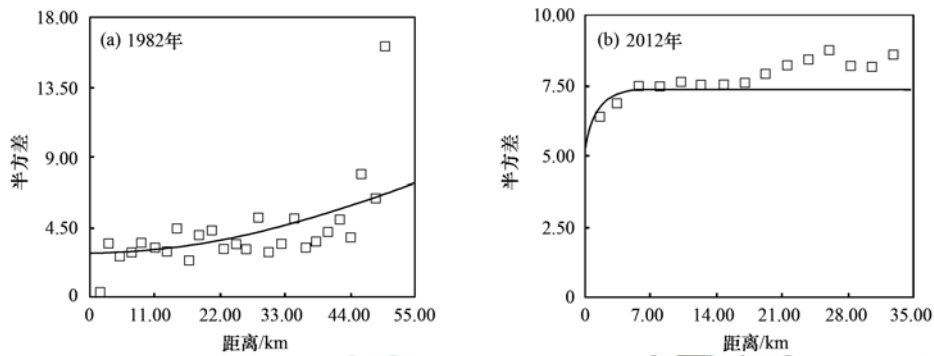


图 2 土壤 C/N 半方差函数

Fig. 2 Isotropic semivariogram of soil C/N ratio

表 2 土壤 C/N 的半变异函数参数

Table 2 Semi-variance parameters of soil C/N ratio							
年份	模型	块金值	基台值	块金效应/%	变程/km	决定系数	残差
1982	高斯	2.82	17.73	15.91	5.58	0.430	0.012
2012	指数	5.23	7.34	71.25	3.96	0.491	0.007

2012 年土壤 C/N 空间变异由结构性因素与随机性因素共同影响,但更倾向于受随机性因素影响,呈强空间相关性.近 30 年来土壤 C/N 由结构性因素和随机性因素的共同作用变为更倾向于受随机性因素的主导作用.1982 年和 2012 年土壤 C/N 的变程分别为 5.58 和 3.96 km,表明 1982 年和 2012 年土壤 C/N 的空间自相关范围均较小.

2.3 土壤 C/N 时间变异特征

为直观反映余干县土壤 C/N 的空间变异特征,在半变异函数拟合的基础上运用普通克里格法对余干县 1982 年和 2012 年土壤 C/N 进行空间插值,进而得到 1982 年[图 3(a)]和 2012 年[图 3(b)]土壤 C/N 的空间分布;同时对测定值与预测值进行交叉验证,其测定值与预测值显著相关($P < 0.01$,表 3),平均误差较小,表明普通克里格的空间插值结果较为可靠(表 3).并运用 ArcGIS 10.2 空间分析中的栅格计算器模块将 2012 年与 1982 年的空间分布进行叠加,得到近 30 年来余干县土壤 C/N 时空变化图[图 3(c)].

由图 3 可知,1982 年余干县土壤 C/N 在空间分布上表现为中部高,四周低,大部分区域土壤 C/N 在 9.0 ~ 11.0 之间,与表 1 结果较为一致,高值区域主要分布在白马桥乡、杨埠乡和大溪乡,低值区域主要分布在梅港乡和黄金埠镇.2012 年余干县土壤 C/N 由西向东增大的趋势较为明显,高值区相对集中且大部分区域土壤 C/N 大于 11,低值区域主要分布在江埠乡.从时空变化情况来看,1982 ~ 2012 年,余干县绝大部分区域土壤 C/N 增加明显,以东部区域增加最为显著,包括古埠镇、杨埠乡、东塘乡、信丰垦殖场和康山垦殖场,表明这些区域土壤 C 素增加速度要高于 N 素,有利于 SOC 的固定^[15].而江埠乡、瑞洪镇和白马桥乡土壤 C/N 明显降低,表明土壤 N 素的积累速度要大于 C 素^[18].这可能是因为西部地区靠近鄱阳湖,土壤水分相对东部较充裕,干湿交替周期短, SOC 矿化速率要高于东部区域,因此西部土壤 C/N 上升较东部而言较缓慢,甚至出现土壤 C/N 下降的现象.

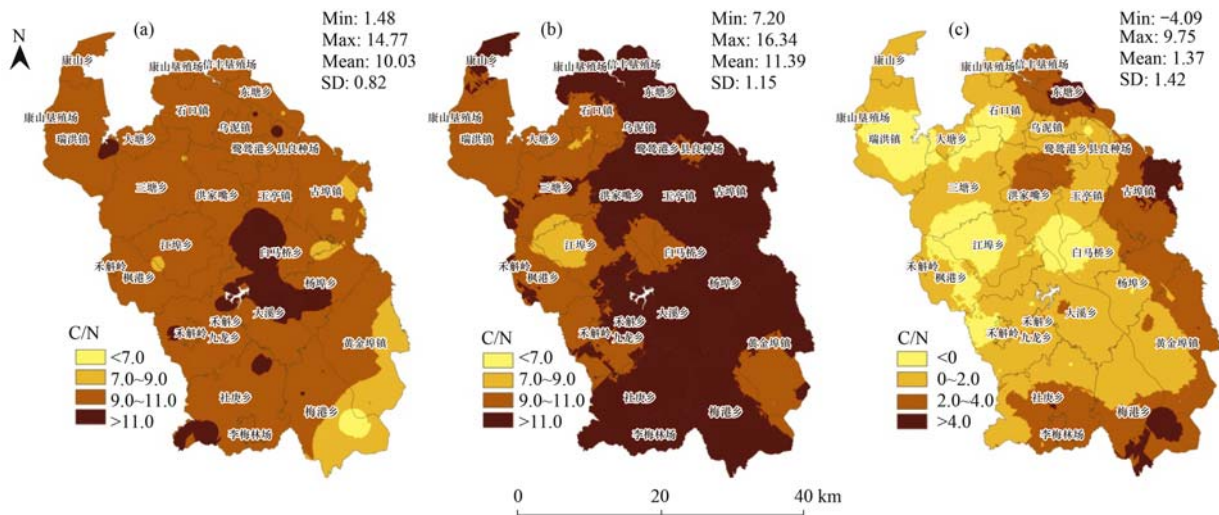


图 3 研究区土壤 C/N 的时空变化

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of soil C/N ratio in the study area

表 3 C/N 插值的交叉验证结果¹⁾

Table 3 Cross validation result of C/N interpolation

年份	相关系数	平均误差
1982	0.208 **	-0.210
2012	0.376 **	-0.009

1) * * 表示 $P < 0.01$

2.4 土壤 C/N 时间变异的影响因素

2.4.1 成土母质和土壤类型

不同成土母质土壤 C/N 描述性统计分析结果表明(表 4):近 30 年来,不同成土母质均值有较大提高,相比于 1982 年,2012 年第四纪红色黏土、河

湖沉积物和泥质岩类风化物土壤 C/N 均值分别提高了 0.33、1.27 和 2.57。从变异系数可以看出,近 30 年来不同成土母质土壤 C/N 的变异系数总体均呈下降趋势。不同土壤类型土壤 C/N 描述性统计分析结果表明(表 5):2012 年和 1982 年土壤 C/N 均值表现为水稻土 > 红壤,近 30 年来红壤呈下降趋势,水稻土呈上升趋势。这主要与土壤自身特性有关,红壤多由花岗岩、千枚岩、石灰岩、玄武岩等风化物发育而来,土壤保水保肥力差,呈弱酸性,有机质含量较低且易于分解;水稻土作为长期处于干湿交替的人为土,耕作层有机质易于累积^[26]。

表 4 不同成土母质土壤 C/N 描述性统计结果

Table 4 Descriptive statistical results comparing soil C/N to soil parent material

年份	成土母质	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
1982	第四纪红色黏土	76	6.62	13.24	9.88	4.37	42.80
	河湖沉积物	61	7.68	15.19	10.47	4.07	38.87
	泥质岩类风化物	63	4.51	13.27	9.15	6.99	76.39
2012	第四纪红色黏土	135	4.13	15.58	10.21	2.80	28.34
	河湖沉积物	125	7.12	27.30	11.71	2.44	20.84
	泥质岩类风化物	163	4.99	25.07	11.72	3.01	25.68

表 5 不同土壤类型土壤 C/N 描述性统计结果

Table 5 Descriptive statistical results comparing soil C/N to soil type

年份	土壤类型	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
1982	红壤	55	4.51	15.19	9.77	8.35	85.47
	水稻土	145	7.25	13.43	10.16	3.47	34.15
2012	红壤	66	4.13	14.31	8.02	2.54	31.67
	水稻土	357	6.77	27.30	11.76	2.43	20.66

2.4.2 耕地利用方式

从表 6 可以看出,不同耕地利用方式土壤 C/N 均值含量差异明显。1982 年和 2012 年土壤 C/N 均

值表现为水田 > 旱地。这与水田秸秆还田率高和氮肥施用量大有关,相对于水田而言,旱地土壤干湿交替周期短,通气条件好,有机质易于分解且地表

作物大多被人为收走，归还量小；同时对于江西省而言，水田氮肥施用量远远高于旱地^[8]。近 30 年来旱地和水田土壤 C/N 均值分别提高了 1.75 和 1.60。从变异系数可以看出，不同时期的土壤 C/N 均表现为中等程度的变异性，相比于 1982 年，2012 年变异系数有所降低，这反映出自然因素和耕作活动降低了研究区土壤 C/N 的空间变异程度，这与其它研究学者结果基本一致^[8,27]。

表 6 不同耕地利用方式土壤 C/N 描述性统计结果

Table 6 Descriptive statistical results comparing soil C/N to farmland-use type							
年份	耕地利用方式	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
1982	旱地	96	4.51	14.31	8.02	3.06	31.32
	水田	104	7.25	15.19	10.16	1.27	12.50
2012	旱地	77	4.13	15.19	9.77	2.54	31.67
	水田	346	6.77	27.30	11.76	2.43	20.66

2.4.3 地形因子和 pH

由于两个时期的采样点数量不同，仅比较其相关性是否显著而不比较相关系数的变化。从表 7 可以看出，1982 年高程与土壤 C/N 相关性未通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验，而 2012 相关性达到极显著相关水平 ($P < 0.01$)，表明地势越低，土壤 C/N 越高。1982 年和 2012 年坡度、坡向和坡度变率与土壤 C/N 分别为显著负相关关系、极显著正相关关系和极显著负相关关系，表明坡度越大，变化越剧烈，土壤的冲刷和侵蚀程度越严重，土壤 C/N

越低；而随着坡向转北（阳坡变成阴坡），植被和水分越充分，土壤 C、N 易于累积。1982 年，pH 对土壤 C/N 呈极显著负相关关系，随着 pH 上升，土壤 C/N 呈下降趋势。这是因为随着土壤 pH 的增大，使得有机碳溶解性增大易于溶出，而且有机矿物质会在酸性作用下被分解破坏，成为易流失的复合度较小的粒子或单粒，从而使得 SOC 含量减少^[28, 29]；但 2012 年 pH 对土壤 C/N 影响不显著，这在一定程度上反映出余干县土壤酸化趋势已有所改善。

表 7 土壤 C/N 和地形因子、pH 之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 7 Pearson's correlations among soil C/N, terrain factor, and pH							
年份	高程	坡度	坡向	曲率	坡度变率	坡向变率	pH
1982	-0.034	-0.200 **	0.133 *	-0.118	-0.152 *	0.231 *	-0.363 **
2012	-0.152 **	-0.231 **	0.192 *	0.101	-0.195 *	0.056	0.082

1) * 表示 $P < 0.05$ ，** 表示 $P < 0.01$

2.4.4 秸秆还田和氮肥施用量

由于第二次土壤普查时期没有记录秸秆还田和氮肥施用量信息，因此本文仅列出 2012 年秸秆还田和氮肥施用量与土壤 C/N 的描述性统计信息。从表 8 可以看出，秸秆还田与否和氮肥施用量大小会使得土壤 C/N 存在明显差异。具体表现为：秸秆还田 > 秸秆不还田，这是因为秸秆不还田时，部分

C 以农产品和作物秸秆的形式向系统外输出，导致 SOC 含量降低，而秸秆还田后，秸秆周围会有大量的微生物进行繁殖，形成土壤微生物活动层，加速了对秸秆中有机态养分的分解释放，可提高 SOC 含量；氮肥施用量越大，土壤 C/N 越低，这是因为氮肥施用量的升高将直接增加 TN 含量，同时氮肥施用会降低土壤酸碱度，有机质易于分解。

表 8 2012 年不同秸秆还田方式和氮肥施用量土壤 C/N 描述性统计结果

Table 8 Descriptive statistical results comparing soil C/N to straw incorporation patterns and nitrogen fertilization rate in 2012							
项目	类别	样点数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
秸秆	还田	251	4.13	27.30	11.94	3.17	32.12
	不还田	172	6.77	25.08	9.87	2.22	18.59
氮肥施用量/kg·hm ⁻²	<100	182	4.13	15.17	11.77	2.89	32.51
	100~200	103	5.36	20.50	11.62	2.39	20.57
	>200	138	7.56	27.30	8.89	2.53	21.50

2.4.5 各因素影响程度

运用 SPSS 软件中的回归分析方法，对不同时

期土壤 C/N 空间变异的影响因素进行分析。采用虚拟变量^[8,10]对成土母质、土壤类型、耕地利用方

式、地形因子、pH、秸秆还田和氮肥施用量进行赋值,基于回归分析法,得出土壤 C/N 与成土母质、土壤类型、耕地利用方式、地形因子、pH、秸秆还田和氮肥施用量之间的回归分析结果.

从表 9 可以看出:近 30 年来成土母质、土壤类型和地形因子对土壤 C/N 时空变异存在极显著影响($P < 0.01$),1982 年其分别能独立影响 17.3%、14.2% 和 7.4% 的土壤 C/N 空间变异,2012 年其影响程度分别为 8.7%、23.5% 和 12.2%. 这表明近 30 年来成土母质对土壤 C/N 时空变异影响程度减小,而土壤类型和地形因子的影响增大. 1982 年耕地利用方式对土壤 C/N 空间变异影响程度不显著,无法进行回归分析;2012 年耕地利用方式对土壤

C/N 空间变异影响程度极显著,影响程度达到 28.2%,反映出人为耕作活动对余干县对土壤 C/N 时空变异的影响正在逐渐增大,不同耕地利用方式下土壤 C/N 已形成较大差异,同时也反映出研究区土地整治效果和土地垦殖率的上升. 1982 年 pH 对土壤 C/N 空间变异影响程度极显著,影响程度为 2.3%,2012 年 pH 对土壤 C/N 空间变异无显著影响. 2012 年秸秆还田和氮肥施用量对土壤 C/N 空间变异影响极显著,可分别影响 12.6% 和 42.3% 的土壤 C/N 空间变异. 1982 年,主要受结构性因素影响(成土母质、土壤类型和地形因子);2012 年,主要受随机性因素影响(氮肥施用量和耕地利用方式);与半变异函数分析结果一致(表 2).

表 9 研究区土壤 C/N 与影响因素的回归分析结果¹⁾

Table 9 Regression equations for soil C/N ratio and influencing factors in the study area					
影响因素	年份	决定系数	调整决定系数	F	Sig.
成土母质	1982	0.176	0.173	86.86	0.000
	2012	0.089	0.087	40.99	0.000
土壤类型	1982	0.145	0.142	75.82	0.000
	2012	0.236	0.235	130.29	0.000
耕地利用方式	1982	/	/	/	/
	2012	0.285	0.282	194.45	0.000
地形因子	1982	0.075	0.074	37.07	0.000
	2012	0.125	0.122	61.60	0.000
pH	1982	0.023	0.023	9.80	0.002
	2012	/	/	/	/
秸秆还田	2012	0.128	0.126	75.28	0.000
氮肥施用量	2012	0.425	0.423	289.02	0.000

1) “/”表示没有该项目

3 讨论

3.1 土壤 C/N 时空变异的原因

20 世纪 80 年代以来,农地由集体种植变为家庭联产承包以来,农户的生产积极性迅速提高,精耕细作,有机肥料与化学肥料配合施用,开始使用杂交品种,耕地肥力与作物产量逐渐提高. 90 年代以后,随着工业企业的迅速壮大和农业生产机械化的发展,农民对农地的重视程度逐渐降低,有机肥料施用量逐渐降低,化学肥料大量施用^[30]. 近 30 年来 SOC 与 TN 含量均有不同程度的提高,其原因一方面与大力推广秸秆还田有关,尤其是第二次土壤普查后江西省在全省范围内推广秸秆还田技术. 有研究发现,1982 年和 2012 年 SOC 和 TN 对土壤 C/N 均呈显著影响,这是因为在绝大多数情况下 SOC 和 TN 与土壤 C/N 相关性显著^[2,6,14]. 从表 1

可以看出,研究区 2012 年 SOC 均值较 1982 年上升了 10.71%,TN 均值上升了 5.33%,变异系数有一定程度的降低,这与李忠佩等^[17]对鄱阳湖经济区研究结果较为一致. 另一方面与氮肥施用量密切相关,据文献^[31,32]的记载,近 30 年来余干县氮肥施用折纯量从 1992 年的 9.65×10^5 kg,到 2002 年的 1.11×10^6 kg 和 2012 年的 1.99×10^6 kg,氮肥施用量呈上升趋势,这在一定程度上说明 TN 含量在不断上升,这将直接导致土壤 C/N 变异.

3.2 不同地区土壤 C/N 的分异

目前,部分土壤 N 储量估算和生态系统 C 模型研究中将土壤 C/N 视为一个常数,由于土壤 C/N 在区域、尺度和时间上表现出较大的变异性. 因此,将土壤 C/N 视为一个常数会对土壤 C、N 储量估算产生极大的不确定性^[33,34].

从表 10 可以看出,土壤 C/N 存在着明显地区

域、尺度与时间效应. 从不同区域来看, 20 世纪 80 年代川中丘陵地区土壤 C/N 均值为 6.85, 松嫩平原地区为 10.49, 华北平原地区为 10.19, 而鄱阳湖经济区为 10.05, 处于中等偏下水平. 从不同尺度来看, 全球尺度下的土壤 C/N 较高, 为 13.33; 我国土壤 C/N 呈中等水平, 为 11.38; 而不同地区的土壤 C/N 普遍处于较低水平. 从不同时间来看, 近 30 年川中丘陵区土壤 C/N 呈上升趋势, 近 25 年松嫩平原地区土壤 C/N 也呈上升趋势, 这与本研究土壤 C/N 变化趋势一致; 但与松嫩平原土壤 C/N 的空间自相关范围减小不同^[14], 鄱阳湖经济区土壤 C/N 的空间自相关范围增大, 这表明随机性因素如人为活动对其影响越来越大, 而结构性因素如成土母质对其影响在不断减少. 然而, 近 30 年来华北平原地区土壤 C/N 表现出下降趋势, 主要由于长期耕作和秸秆焚烧造成耕地 SOC 的大量损失^[18]. 不同区域、尺度和时间下土壤 C/N 存在极大的变异性. 因此, 应构建不同区域、尺度和时间下的土壤 C/N 数据库, 加强区域、尺度以及时间 3 者之间土壤 C/N 的空间变异及其影响因素研究, 才能更加深入和精确地估测土壤 C、N 储量和模拟土壤 C、N 循环过程^[35].

表 10 其他地区土壤 C/N

Table 10 Soil C/N in different regions

地区	年份	土壤 C/N	文献
全球	2006	13.33	[36]
中国	1982	11.38	[37, 38]
川中丘陵	1981	6.85	[15]
川中丘陵	2012	11.93	[15]
松嫩平原	1980	10.49	[14]
松嫩平原	2005	12.36	[14]
华北平原	1980	10.19	[18]
华北平原	2010	6.55	[18]
南方红壤	1980	10.70	[17]
南方红壤	2006	10.73	[39]
南方红壤	2002	9.10	[17]
鄱阳湖经济区	1982	10.05	本研究
鄱阳湖经济区	2012	11.18	本研究

3.3 土壤 C/N 变化的环境意义

近 30 年来, 余干县农业管理措施、测土配方施肥和秸秆还田技术均有较大幅度的改善, 土壤 C/N 表现出明显地上升趋势, 均值增加了 1.13, 由此引发不同区域、尺度和时间上的差异将更加明显^[40]. 目前关于土壤 C/N 的研究主要集中在能否采取一定的措施提高土壤 C/N^[14]. 土壤 C/N 提高对土壤微生物分解 C、N 能力产生一定的抑制作用, 一般

来讲, 土壤 C/N 与土壤微生物生物活性呈反比, 土壤 C/N 提高会减缓土壤 C、N 的矿化速度, 进而提高土壤的固 C 与固 N 能力^[8,41]. 由于陆地生态系统中土壤 N 大多数以有机 N 的形式存在于 SOC 中, 因而 SOC 的变化与土壤 N 变化紧密联系. 文献 [31, 32] 的统计资料表明余干县氮肥施用折纯量在逐年上升, 秸秆还田量也在逐年上升, 而近 30 年来土壤 C/N 上升表明 SOC 的积累速度要大于 TN 的累积速度. 李忠佩等^[17]对鄱阳湖经济区近 22 年来 SOC 和 TN 进行研究, 发现 SOC 和 TN 均有提高但土壤 C/N 却明显下降. 因此, 若增加余干县氮肥施用量对提高土壤 C/N 意义甚微, 且过量的施用氮肥不但会削弱土壤固 C 与固 N 能力, 引起 N 素通过淋溶和反硝化过程而损失, 从而污染地下水和河流, 并引发一系列如土壤酸化和农业面源污染等问题^[15]. 因而余干县实现粮食增产和生态环境保护的主要途径是保持土壤 C/N 平衡. 一方面, 大力推广秸秆还田技术, 增加农家肥、有机肥的使用, 逐步改善土壤理化性质与土壤 C、N 含量; 另一方面, 避免盲目增加氮肥施用量, 重点放在提高氮肥有效率和氮肥管理水平, 在追求高产的前提下将耕地质量较差或者耕地侵蚀严重的改为林草地或园地, 实现 C、N 含量之间的平衡, 促进农业与生态系统的可持续发展.

4 结论

(1)1982 年和 2012 年余干县耕地土壤 C/N 的均值分别为 10.05 和 11.18, 空间自相关距离分别为 5.58 km 和 3.96 km, 呈降低趋势; 块金效应值分别为 15.91% 和 71.25%, 表明 1982 年土壤 C/N 主要受结构性因素影响, 2012 年土壤 C/N 主要受随机性因素影响.

(2)从时间变异来看, 1982 ~ 2012 年, 余干县绝大部分区域土壤 C/N 增加明显, 以东部区域增加最为显著, 包括古埠镇、杨埠乡、东塘乡、信丰垦殖场和康山垦殖场, 表明这些区域土壤 C 素增加速度要高于 N 素, 有利于 SOC 的固定. 而江埠乡、瑞洪镇和白马桥乡土壤 C/N 明显降低, 表明土壤 N 素的积累速度要大于 C 素.

参考文献:

[1] 王燕, 赵哈林, 董治宝, 等. 荒漠绿洲农田盐渍化过程中土壤有机碳和全氮变化特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (6): 200-205.
Wang Y, Zhao H L, Dong Z B, et al. The change characteristics of soil organic carbon and soil total nitrogen in farmland

- salinization in arid oasis [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, **28**(6): 200-205.
- [2] 翁伯琦, 郑祥洲, 丁洪, 等. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(12): 3610-3616.
- Weng B Q, Zheng X Z, Dong H, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(12): 3610-3616.
- [3] Wang X, Pu L, Zhang M, *et al.* Spatial and temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen pools in the coastal reclamation area, eastern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(6): 4763-4769.
- [4] Zhang Z Q, Yu D S, Shi X Z, *et al.* Priority selection rating of sampling density and interpolation method for detecting the spatial variability of soil organic carbon in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(5): 2287-2297.
- [5] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Large-scale spatial variability and distribution of soil organic carbon across the entire Loess Plateau, China [J]. *Soil Research*, 2012, **50**(2): 114-124.
- [6] Chen T, Chang Q R, Liu J, *et al.* Spatio-temporal variability of farmland soil organic matter and total nitrogen in the southern Loess Plateau, China: a case study in Heyang County [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**: 28.
- [7] Lu N, Liski J, Chang R Y, *et al.* Soil organic carbon dynamics of black locust plantations in the middle Loess Plateau area of China [J]. *Biogeosciences*, 2013, **10**(11): 7053-7063.
- [8] 江叶枫, 郭熙, 孙凯, 等. 江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(9): 3840-3850.
- Jiang Y F, Guo X, Sun K, *et al.* Spatial variability of C-to-N ratio of farmland soil in Jiangxi Province [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3840-3850.
- [9] 齐雁冰, 黄标, 顾志权, 等. 长江三角洲典型区农田土壤碳氮比值的演变趋势及其环境意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, **27**(1): 50-56.
- Qi Y B, Huang B, Gu Z Q, *et al.* Spatial and temporal variation of C/N ratios of agricultural soils in typical area of Yangtze Delta Region and its environmental significance [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, **27**(1): 50-56.
- [10] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2015, **26**(1): 177-185.
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatial variability of soil C/N ratio and its influence factors at a county scale in hilly area of Mid-Sichuan Basin, southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 177-185.
- [11] Chaopricha N T, Marín-Spiotta E. Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 251-264.
- [12] Rabbi S M F, Wilson B R, Lockwood P V, *et al.* Soil organic carbon mineralization rates in aggregates under contrasting land uses [J]. *Geoderma*, 2014, **216**: 10-18.
- [13] Zeng X H, Zhang W J, Cao J S, *et al.* Changes in soil organic carbon, nitrogen, phosphorus, and bulk density after afforestation of the "Beijing-Tianjin Sandstorm Source Control" program in China [J]. *Catena*, 2014, **118**: 186-194.
- [14] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, *et al.* Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain Maize Belt [J]. *Environment Science*, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- [15] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近30年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(3): 582-593.
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatio-temporal Variations of soil organic carbon and total nitrogen and driving factors in purple soil hilly area of Mid-Sichuan Basin in the past 30 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 582-593.
- [16] Wang Z, Liu G B, Xu M X, *et al.* Temporal and spatial variations in soil organic carbon sequestration following revegetation in the hilly Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2012, **99**: 26-33.
- [17] 李忠佩, 吴大付. 红壤水稻土有机碳库的平衡值确定及固碳潜力分析[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(1): 46-52.
- Li Z P, Wu D F. Organic C content at steady state and potential of C sequestration of paddy soils in subtropical China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(1): 46-52.
- [18] 李新民, 杨萍果, 邓树元. 晋南县域农田生态系统土壤碳氮时空变化特征[J]. *山西农业科学*, 2013, **41**(2): 160-162.
- Li X M, Yang P G, Deng S Y. Spatial and temporal variability of Agro-ecosystem soil carbon and nitrogen in southern Shanxi [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2013, **41**(2): 160-162.
- [19] 肖文婧. 鄱阳湖生态经济区土地生态脆弱性评价[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- [20] 刘滨, 陈美球, 罗志军, 等. 鄱阳湖生态经济区主体功能分区研究[J]. *中国土地科学*, 2009, **23**(7): 55-60.
- Liu B, Chen M Q, Luo Z J, *et al.* Main function zoning in Poyang lake ecological economic region [J]. *China Land Science*, 2009, **23**(7): 55-60.
- [21] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(2): 342-350.
- Wang Y, Song X S, Wang J, *et al.* Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, **51**(2): 342-350.
- [22] Li Q Q, Yue T X, Wang C Q, *et al.* Spatially distributed modeling of soil organic matter across China: An application of artificial neural network approach [J]. *Catena*, 2013, **104**: 210-218.
- [23] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Zhang G L, Gong Z T. *Soil survey laboratory methods* [M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [24] 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
- Mao D R. *Plant nutrition research methods* [M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1994.
- [25] 李丹维, 王紫泉, 田海霞, 等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2017, **51**(1): 160-170.
- Li D W, Wang Z Q, Tian H X, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **51**(1): 160-170.

- [26] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. 土壤学报, 2016, **53**(3): 582-593.
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatio-temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen and driving factors in purple soil hilly area of Mid-Sichuan Basin in the past 30 Years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 582-593.
- [27] 赵小敏, 邵华, 石庆华, 等. 近 30 年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征[J]. 土壤学报, 2015, **52**(4): 723-730.
- Zhao X M, Shao H, Shi Q H, *et al.* Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi province in the past 30 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(4): 723-730.
- [28] 蔡乾坤. 长期施用氮肥对杉木人工林土壤 C、N、P 的影响[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2015.
- Cai Q K. Impacts of long-term nitrogen fertilization on soil C, N and P in a Chinese fir plantation[D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2015.
- [29] 蔡丹, 杨秀虹, 雷秋霜, 等. 华南典型树种凋落叶的野外分解和溶解性有机质溶出动态[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(9): 2823-2830.
- Cai D, Yang X H, Lei Q S, *et al.* Field decomposition and dissolved organic matter release dynamics in leaf litter of typical trees in South China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, **27**(9): 2823-2830.
- [30] 江叶枫, 叶英聪, 郭熙, 等. 江西省耕地土壤氮磷生态化学计量空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, **54**(6): 1527-1539.
- Jiang Y F, Ye Y C, Guo X, *et al.* Spatial variability of ecological stoichiometry of soil nitrogen and phosphorus in farmlands of Jiangxi Province and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(6): 1527-1539.
- [31] 上饶市统计局, 国家统计局上饶调查队. 上饶统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1992-2012.
- [32] 余干县统计局. 余干统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1992-2012.
- [33] 贺合亮, 阳小成, 王东, 等. 青藏高原东部窄叶鲜卑花灌丛土壤 C、N、P 生态化学计量学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21**(6): 1128-1135.
- He H L, Yang X C, Wang D, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus of sibiraea angustata shrub in eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, **21**(6): 1128-1135.
- [34] 刘素真. 土壤有机碳储量估算及其空间分布—以福建省为例[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Liu S Z. Estimation of soil organic carbon storage and its spatial distribution—A case of Fujian Province[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [35] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳氮比的分布特征[J]. 生态学报, 2014, **34**(22): 6678-6691.
- Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, *et al.* Soil C/N distribution characteristics of alpine steppe ecosystem in Qinghai Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(22): 6678-6691.
- [36] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3937-3947.
- [37] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤有机质空间分布模拟分析方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, **25**(8): 1385-1399.
- Li Q Q, Yue T X, Fan Z M, *et al.* Study on method for spatial simulation of topsoil SOM at national scale in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(8): 1385-1399.
- [38] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析[J]. 地理研究, 2010, **29**(11): 1981-1992.
- Li Q Q, Yue T X, Fan Z M, *et al.* Spatial simulation of topsoil TN at the national scale in China[J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(11): 1981-1992.
- [39] 周学文, 赵小敏, 胡国瑞, 等. 南方丘陵地区水田土壤养分变异分析[J]. 江西农业大学学报, 2009, **31**(5): 919-926.
- Zhou X W, Zhao X M, Hu G R, *et al.* The analysis of soil nutrient variability in hilly paddy field of southern China[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2009, **31**(5): 919-926.
- [40] 乐丽红, 朱安繁, 侯英杰, 等. 余干县耕地土壤养分时空变化特征研究[J]. 江西农业大学学报, 2016, **38**(5): 986-994.
- Li L H, Zhu A F, Hou Y J, *et al.* A study on the spatial-temporal changes of farmland soil nutrient of Yugan county[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2016, **38**(5): 986-994.
- [41] 李涛, 葛晓颖, 何春娥, 等. 豆科秸秆、氮肥配施玉米秸秆还田对秸秆矿化和微生物功能多样性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(12): 2377-2384.
- Li T, Ge X Y, He C E, *et al.* Effects of straw retention with mixing maize straw by alfalfa straw or N fertilizer on carbon and nitrogen mineralization and microbial functional diversity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(12): 2377-2384.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LÜ Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)