

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	
《环境科学》征订启事(3952)	
信息(3644, 3688, 3768)	

江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素

江叶枫^{1,2}, 郭熙^{1,2*}, 孙凯^{1,2}, 饶磊^{1,2}, 李婕^{1,2}, 王澜珂^{1,2}, 叶英聪², 李伟峰^{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: 以江西省2012年测土配方施肥项目采集的16 582个耕地表层(0~20 cm)土壤样点数据, 运用普通克里格和回归分析方法, 对江西省土壤碳氮比(C/N)空间变异特征及其影响因素进行分析。结果表明江西省土壤C/N在2.98~52.67之间, 平均值为11.72, 变异系数为25.17%, 呈中等变异性。经半方差分析, 土壤C/N的块金效应为88.44%, 其空间变异受结构性和随机性因素共同影响, 但随机性因素的影响更大。土壤C/N空间分布较为平滑, 高值区主要分布在九江市彭泽县、萍乡市上栗县和抚州市乐安县。地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和氮肥施用量对土壤C/N空间变异影响均显著($P < 0.05$), 但影响程度不一。地形因子可解释0.3%的土壤C/N空间变异, 耕地利用方式的独立解释能力为1.4%, 成土母质的独立解释能力为2.4%, 土类、亚类和土属的独立解释能力分别为2.7%、3.6%、5.5%。氮肥施用量对土壤C/N空间变异的独立解释能力最高, 为33.4%, 是引起江西省土壤C/N空间变异最主要的因素。

关键词: 江西省; 土壤碳氮比; 空间变异; 影响因素; 氮肥施用量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3840-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201702193

Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province

JIANG Ye-feng^{1,2}, GUO Xi^{1,2*}, SUN Kai^{1,2}, RAO Lei^{1,2}, LI Jie^{1,2}, WANG Lan-ke^{1,2}, YE Ying-cong², LI Wei-feng^{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: Spatial variability of soil carbon-to-nitrogen ratio (C/N) at the provincial scale was analyzed using ordinary kriging methods. The effects of the factors influencing C/N were quantified by regression analysis based on 16,582 points of surface soil samples (0-20 cm) collected during the project of soil-test-based formulated fertilization in Jiangxi Province in 2012. The results showed that soil C/N ranged from 2.98 to 52.67, with an average of 11.72. The coefficient of variation was 25.17%, suggesting moderate variability. The nugget-to-sill ratio was 88.44%, meaning that the stochastic factors played a more important role in the spatial variability of soil C/N between the structural and stochastic factors. The spatial distribution of soil C/N was relatively smooth and the high-value areas were mainly distributed in Pengze County-Jiujiang City, Shangli County-Pingxiang City, and Lean County-Fuzhou City. The terrain factors, farmland-use type, parent material, soil type, and the level of nitrogen fertilizer had significant impacts on the spatial variability of soil C/N ($P < 0.05$), but the degree of influence was different for each factor. Soil C/N indicated a significant positive Pearson's correlation with elevation and the slope of slope ($P < 0.05$). The terrain factors explained 0.3% of the spatial variability of soil C/N and the farmland-use could explain 1.4%. The explanatory power of soil groups, subgroups, and soil family were 2.7%, 3.6%, and 5.5% respectively. The level of nitrogen fertilizer could explain 33.4% of the spatial variability of soil C/N, which showed that the amount of nitrogen fertilizer was the main factor that controls the spatial distribution of soil C/N.

Key words: Jiangxi province; soil carbon-to-nitrogen ratio; spatial variability; influencing factors; level of nitrogen fertilizer

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)和全氮(total nitrogen, TN)是植物矿物质营养的主要来源,也是陆地上土壤碳库和氮库的重要组成部分,其含量和动态变化将直接影响全球碳氮循环^[1~3]。受地形、成土母质和土壤类型等因素的影响,导致土壤碳氮在空间分布上呈非均匀分布^[4~6]。土壤碳氮空间变异影响因素分析已成为全球碳氮循环背景下国内外学者关注的焦点之一,同时也取得了一些研究成果。如顾成军等^[7]对河北省域尺度下土壤有机碳空间变异的影响因素进行分析,发现受土壤类型与土地利用的共同影响。罗由林等^[8]研究川中丘陵县域尺度上土壤氮素空间变异及其影响因素,发现土

地利用方式是影响土壤氮素空间变异的主控因子。但这些都仅考虑土壤碳氮自身变异特征,而忽略了碳氮间耦合平衡的关系。研究表明^[9,10],土壤碳氮之间的耦合关系能更全面地阐述土壤碳氮变异,明确耕地土壤C/N空间变异特征,对区域环境保护与耕地可持续利用意义重大。

土壤C/N变化会影响土壤微生物生物量和有

收稿日期: 2017-02-27; 修订日期: 2017-04-05

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

机肥中的元素固定与释放,进而影响土壤肥力和土壤碳氮循环^[11,12]。目前国内外关于土壤碳氮耦合关系的侧重点主要在土壤微生物生物量与碳氮含量间的关系上^[11,13~15],在区域尺度如省域尺度上研究土壤 C/N 空间变异及其影响因素研究相对较少。且在以往研究过程中,较少考虑氮肥施用量对土壤 C/N 空间变异的影响^[16,17]。蔡乾坤^[18]对长期施用氮肥下土壤 C/N 进行监测,发现氮肥施用量对土壤 C/N 的大小影响显著;李新爱等^[17]对稻田长期定位试验点 18 年的田间定位试验,结果表明施肥显著地改变了土壤碳氮含量。因此,在土壤 C/N 空间变异研究中施肥是一个重要的影响因素。在众多的影响因素中,对定性因素进行量化的研究越来越受到国内外学者的重视与关注。顾成军等^[7]、胡玉福等^[19]、罗由林等^[20]、李婷等^[21]在影响土壤 C、N 和 C/N 定性因素定量化研究方面进行了探索。前人的研究表明^[22],定性因素定量化研究对准确获取土壤 C/N 变异信息、精确估算土壤碳氮库、区域资源优化利用以及环境保护方面具有重要作用。

江西省地处中国东南部,是长江中下游地区农业人口较为密集的农业区,也是南方红壤区典型的农业大省。耕地质量关系到粮食安全,土壤 C/N 是表征耕地质量的重要因素,掌握土壤 C/N 空间变异特征及其影响因素是有效应对粮食安全和农业可持续发展的依据^[9,23,24]。目前对土壤碳氮空间变异的研究报道主要集中在小流域尺度和县域尺度

上^[11,19~26],有关省域尺度的研究则鲜见报道。本文以江西省耕地表层土壤 C/N 为研究对象,分析省域尺度下土壤 C/N 空间变异及其影响因素,结合地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和氮肥施用量^[16~22],运用单因素 ANOVA 分析、回归分析和普通克里格方法对江西省耕地表层土壤 C/N 空间变异特征及其影响因素进行分析,以为江西省耕地土壤碳氮调控和指导土壤 C/N 数字制图方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概括

江西省(24°29'14"N ~ 30°04'41"N, 113°34'36"E ~ 118°28'58"E)总面积为 $1.67 \times 10^5 \text{ km}^2$,人口 4 566 万,辖 11 个地级行政区、100 个县级行政区、1 个国家级新区。地处北回归线附近,全省气候温暖湿润,四季比较分明,春秋短而夏冬长。年均降水量 1 300 ~ 1 950 mm,雨量充沛,年平均气温 20 ~ 27℃;全年无霜期约 240 ~ 300 d,为亚热带湿润气候。省内东、西、南三面环山,中部丘陵和河谷平原交错分布,北部则为鄱阳湖平原。土地利用类型以林地、耕地和园地为主[图 1(a)],其中耕地面积为 $3.87 \times 10^4 \text{ km}^2$,约占全省土地总面积的 23.21%。土壤类型主要有水稻土、红壤、黄褐土、石灰土和潮土等。粮食作物以水稻为主,水稻种植面积约占全省耕地总面积的 80%。植被以常绿阔叶林为主,具有典型的

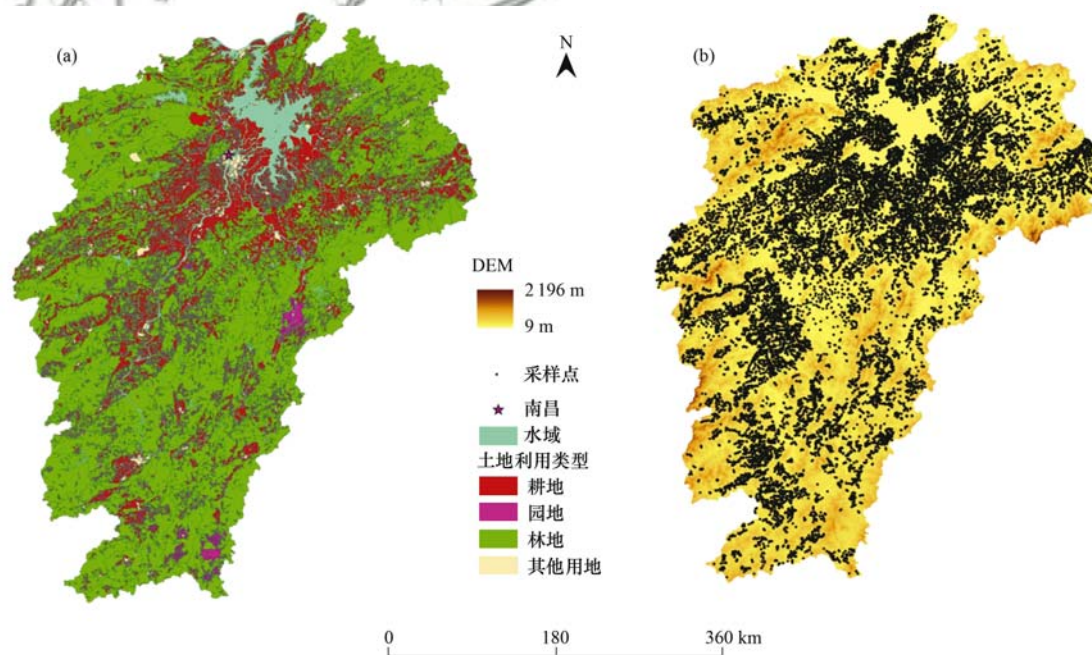


图 1 江西省土地利用类型、样点分布图以及 DEM

Fig. 1 Land-use types, distribution of soil sampling sites, and DEM in Jiangxi Province

亚热带森林植物群落.

1.2 土壤采样

土壤样品按照《全国耕地地力调查与质量评价技术规程》,于2012年11月至2013年2月农作物收获后采用多点混合的方法采集耕地表层(0~20 cm)土壤样品16 582个[图1(b)].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^[27];FossKjeltec8400全自动凯氏定氮仪测定TN含量^[28].本研究中各地区氮肥施用量空间分布来源于1985~2015年《江西省统计年鉴》中各县市平均氮肥施用量.

1.3 数据处理

在采样与农化分析过程中受采样及指标测试误差的影响,导致土壤碳氮的测量结果存在异常值.本文采用拉依达准则法(3倍的标准差)^[20]对采样点数据的土壤碳氮含量进行处理,剔除后总耕地样点为16 109个,本文相关内容的研究均采用剔除异常值后的数据. DEM(数字高程模型)由全省1:10万的地形图生成.高程(H)、坡度(S)、坡度变率(SOS)、坡向(AS)、坡向变率(SOA)、地形起伏度(QFD)、曲率(C)、河流动能指数(Ω)均由DEM数据在ArcGIS10.2软件中处理提取.各地形因子的计算公式见文献[29,30].土壤类型、耕地利用方

式、成土母质和氮肥施用量(分区间)为定性变量,本文采用虚拟变量^[31]进行赋值. Pearson相关性分析用于揭示土壤C/N与地形因子的相关性,单因素ANOVA分析用于说明定性变量之间土壤C/N空间分布是否存在显著差异;回归分析用于定量表达各定性变量对土壤C/N空间变异的独立解释能力.常规性统计分析均在SPSS(version 22)中完成.在GS+(version 7)中对C、TN、C/N进行半方差分析与模型拟合,空间分布特征在ArcGIS10.2中运用普通克里格法插值实现.

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮比描述性统计

描述性统计分析结果见表1,江西省耕地表层土壤SOC、TN和C/N的平均值分别为17.90 $g\cdot kg^{-1}$ 、1.58 $g\cdot kg^{-1}$ 和11.72. SOC较全国平均水平(17.53 $g\cdot kg^{-1}$)^[32]高0.37 $g\cdot kg^{-1}$,TN较全国平均水平(1.54 $g\cdot kg^{-1}$)^[33]高0.04 $g\cdot kg^{-1}$,C/N略高于全国平均水平(11.38)^[22];值域范围分别为5.22~40.31 $g\cdot kg^{-1}$ 、0.26~3.57 $g\cdot kg^{-1}$ 和2.98~52.67;变异系数分别为31.01%、31.01%和25.17%,均呈中等变异性;从K-S检验($P>0.05$)可以得出SOC、TN与C/N均符合正态分布,可进行半方差分析和地统计学分析.

表1 江西省土壤有机碳、全氮和碳氮比的描述性统计特征/ $g\cdot kg^{-1}$

Table 1 Descriptive statistics of soil organic carbon, total nitrogen, and carbon-to-nitrogen ratio in Jiangxi Province/ $g\cdot kg^{-1}$

土壤属性	样点数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	K-S(Sig.)	分布类型
有机碳	16 109	5.22	40.31	17.90	5.55	31.01	0.35	正态
全氮	16 109	0.26	3.57	1.58	0.49	31.01	0.62	正态
碳氮比	16 109	2.98	52.67	11.72	2.95	25.17	0.47	正态

2.2 半方差分析

在GS+软件中对SOC、TN和C/N进行半方差函数的拟合,用半方差函数描述其空间变异性.从半方差拟合结果可以看出(图2和表2),江西省土壤TN和C/N的最优模型均为线性模型,SOC的

最优模型为指数模型,各模型的拟合系数均在0.7以上.从模型的参数来看(表2),SOC、TN和C/N的块金效应(随机性因素引起的空间变异占系统总空间变异的比值)^[34,35]分别为12.49%、80.77%和88.44%,表明TN和C/N呈弱空间相

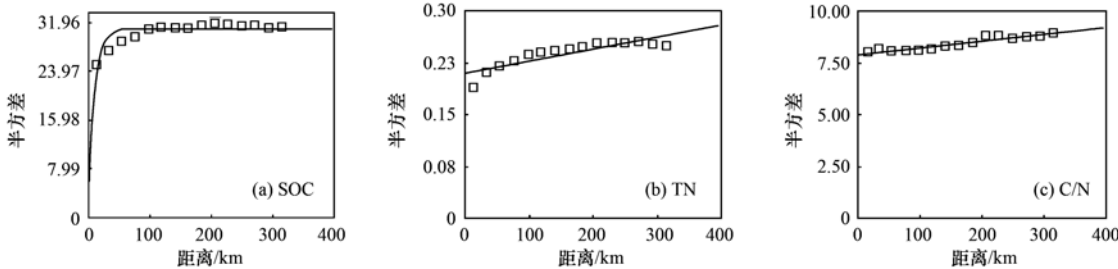


图2 江西省土壤有机碳、全氮和碳氮比半方差函数图

Fig. 2 Isotropic semivariogram of soil organic carbon, total nitrogen and carbon nitrogen ratio in Jiangxi province

关性,随机性因素引起的空间变异程度大于结构性因素,而 SOC 呈强空间相关性,受结构性因素影响大于随机性因素. SOC、TN 和 C/N 的变程分别为 30.60、314.89 和 314.89 km,表明 SOC 的空间自相关范围较小,而 TN 和 C/N 的空间自相关范围较大.

表 2 土壤有机碳、全氮和碳氮比的半方差函数参数

Table 2 Semivariance parameters of soil organic carbon, total nitrogen, and carbon-to-nitrogen ratio							
土壤属性	模型	块金值	基台值	块金效应/%	变程/km	拟合系数	残差
有机碳	指数	3.86	30.91	12.49	30.60	0.713	1.470
全氮	线性	0.21	0.26	80.77	314.89	0.736	0.001
碳氮比	线性	7.88	8.91	88.44	314.89	0.874	0.201

2.3 空间变异特征

为直观反映江西省土壤 C/N 的空间变异特征,

在半方差模型拟合的基础上运用普通克里格法对江西省土壤 SOC、TN 和 C/N 进行空间插值,进而得到

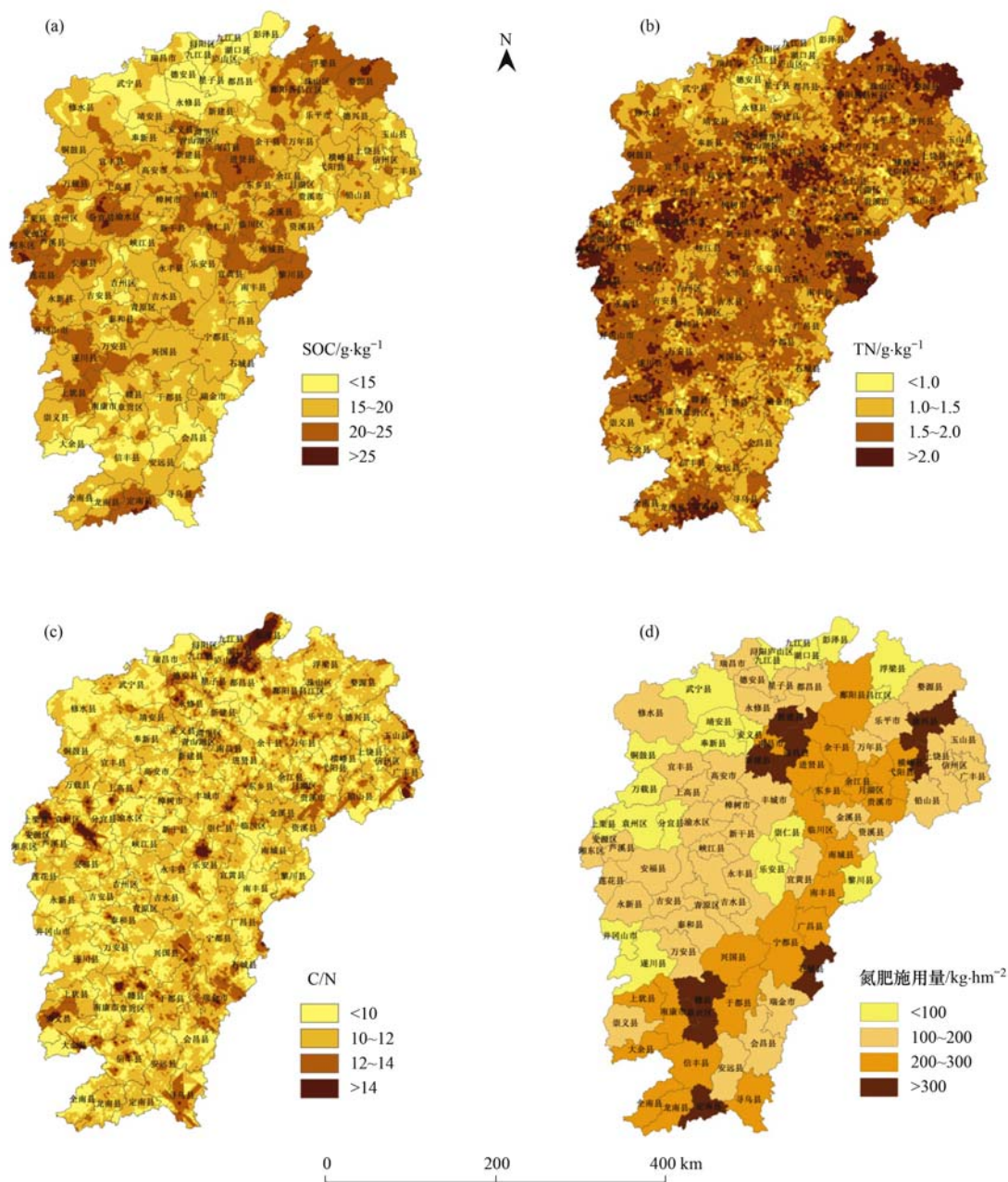


图 3 江西省土壤有机碳、全氮、碳氮比和氮肥施用量空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of soil organic carbon, total nitrogen, carbon-to-nitrogen ratio and the level of nitrogen fertilizer in Jiangxi Province

三者的空间分布. 如图 3 所示, SOC 和 TN 的空间分布图较为相似[图 3(a)和图 3(b)], 高低分布趋势相当, 这主要是由于 SOC 与 TN 具有较强的相关性, 前人的研究表明^[36~38], SOC 含量较高的区域 TN 含量也相对较高, SOC 含量相对较低处 TN 含量也相对较低. SOC 和 TN 的空间分布为突变而非渐变, 能在一定程度上体现二者的空间异质性; 二者的高值区域主要分布在赣州市定南县、萍乡市湘东区、抚州市黎川县、上饶市婺源县以及南昌市进贤县, 主要分布在海拔相对较低或鄱阳湖平原地区[图 1(b)], 这与表 3 结果一致; 低值区主要分布在赣州市信丰县和九江市九江县、德安县、湖口县、永修县与彭泽县[图 3(a)和图 3(b)]. 而 C/N 空间分布较为平滑, 与 SOC 和 TN 分布差异明显. 大部分区域 C/N 位于 10~14 之间, 出现的高值区主要分布在萍乡市上栗县、抚州市乐安县以及九江市彭泽县, 高值区域主要分布在 DEM 相对较高处[图 1(b)], 与表 3 结果类似.

2.4 土壤 C/N 空间变异的影响因素

土壤 C/N 空间变异的影响因素可分为随机性因素和结构性因素. 随机性因素是指土壤改良、施肥调节和耕作措施等各种人为活动因素; 结构性因素是指地形、母质、土壤类型等土壤形成过程中因

素^[39,40]. 半方差表明 C/N 空间变异主要受随机性因素影响, 但各影响因素对 C/N 空间变异需进一步分析. 本研究以地形因子、成土母质和土壤类型作为结构性因素, 耕地利用方式和氮肥施用量为随机性因素, 探讨各影响因素对土壤 C/N 空间变异的独立解释能力.

2.4.1 地形因子

Pearson 相关性分析结果表明(表 3), 江西省土壤 SOC、TN 与高程呈显著的负向相关性($P < 0.05$), 相关系数分别为 -0.031 和 -0.044 , 表明地形低洼处 SOC 和 TN 的含量越大; SOC 与坡向呈显著的正向相关关系($P < 0.05$), 表明 SOC 含量随由阳坡转为阴坡时(转北)表现出增大的趋势; 这与以往研究结果一致^[20,22]. 土壤 C/N 与高程、坡度变率呈显著的正向相关性, 这可解释为 C/N 随着海拔和坡度变率的增加呈增大趋势. 与其他影响因子相关性均不显著, 这与以往研究有所不同^[8,12,20,22,25]. 这可能与本文研究尺度有关, 以往研究多数集中在小流域和县域尺度, 地形因子变化较为明显, 而省域尺度下由于复杂的地形地貌导致其地形因子与县域以及较小尺度而言较模糊. 地形因子对江西省土壤 C/N 空间变异影响显著($P < 0.05$, 表 4).

表 3 地形因子与土壤有机碳、全氮、碳氮比之间的 Pearson 相关系数¹⁾

土壤属性	高程	坡度	坡向	曲率	坡度变率	坡向变率	河流动能指数	地形起伏度
有机碳	-0.031 *	-0.002	0.021 *	0.003	-0.004	0.012	0.005	-0.008
全氮	-0.044 *	-0.009	0.013	0.001	-0.010	0.012	0.006	-0.012
碳氮比	0.032 *	0.008	0.010	-0.004	0.016 *	-0.004	-0.005	0.010

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

表 4 不同因素对土壤碳氮比的回归分析

影响因素	因素类别	F	决定系数	调整决定系数	P
地形因子		5.23	0.003	0.003	<0.05
耕地利用方式		30.77	0.016	0.014	<0.01
成土母质		36.76	0.027	0.024	<0.01
土壤类型	土类	100.81	0.028	0.027	<0.01
	亚类	108.81	0.038	0.036	<0.01
	土属	123.60	0.057	0.055	<0.01
氮肥施用量		2 462.38	0.340	0.334	<0.01

2.4.2 成土母质

成土母质通过影响土壤团聚体结构、物理化学和风化过程等进而引起土壤碳氮含量的差异. 成土母质对江西省土壤 C/N 空间变异影响极显著($P < 0.01$, 表 4). 不同成土母质类型间 C/N 均值差异明

显(表 5), 以下蜀系黄土状物最高(14.36), 第四纪红色黏土最低(11.52). 从变异系数可以看出(表 5), 不同母质间 C/N 均呈中等变异性, 变异系数最高为 36.84% (下蜀系黄土状物), 最低为 21.85% (酸性结晶岩类风化物).

表 5 不同成土母质类型土壤碳氮比描述性统计特征

Table 5 Descriptive statistics of the characteristics of carbon-to-nitrogen ratio in different parent materials							
成土母质类型	样点数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	分布类型
第四纪红色黏土	2 456	4. 09	33. 52	11. 52	2. 63	22. 83	正态
河湖沉积物	3 002	4. 35	33. 43	11. 71	2. 74	23. 40	正态
红砂岩类风化物	2 425	4. 42	52. 67	11. 73	3. 00	25. 58	正态
泥质岩类风化物	3 649	2. 98	40. 63	11. 73	2. 97	25. 32	正态
石英岩类风化物	1 010	3. 63	38. 14	11. 64	3. 31	28. 44	正态
酸性结晶岩类风化物	2 159	4. 95	36. 78	11. 67	2. 55	21. 85	正态
碳酸岩类风化物	428	4. 31	35. 92	11. 58	3. 44	29. 71	正态
下蜀系黄土状物	340	5. 03	32. 53	14. 36	5. 29	36. 84	正态
紫色岩类风化物	640	3. 04	40. 11	11. 55	2. 75	23. 81	正态

2.4.3 土壤类型

不同土壤类型具有不同的成土过程、矿物组成和发育程度,从而影响土壤碳氮含量. 土壤类型对江西省土壤 C/N 空间变异影响极显著($P < 0. 01$, 表 4). 从表 6 可以看出,5 种土壤类型中均值大小依次为黄褐土(14. 60) > 潮土(11. 81) > 水稻土(11. 76) > 石灰土(9. 78) > 红壤(9. 33). 变异系数处于 23. 72% ~ 44. 59% 之间,以红壤变异系数最大

(44. 59%),以水稻土变异系数最小(23. 72%),均属于中等变异性. 在水稻土的 3 种亚类中,以潜育型水稻土均值最低(11. 75),而潜育型水稻土均值最高(11. 92),这反映了水稻土不同亚类之间由于附加的成土过程导致其 C/N 均值已出现了一定的差异. 从土属来看,土属值域范围为 6. 98 ~ 15. 00,差异较大;但同一亚类的土属之间均值差异较小,淹育型红沙泥田和麻沙泥田仅相差为 0. 01.

表 6 不同土壤类型土壤碳氮比描述性统计特征

Table 6 Descriptive statistics of the characteristics of soil carbon-to-nitrogen ratio under different soil types									
土类	亚类	土属	样点数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	分布类型
水稻土		土类合计	15320	4.54	47.84	11.76	2.79	23.72	正态
	潜育型水稻土	亚类合计	617	6.55	28.62	11.92	3.27	27.43	正态
		潮沙泥田	251	6.55	28.62	11.86	2.89	24.37	正态
		麻沙泥田	366	6.55	22.95	11.54	2.19	18.98	正态
	淹育型水稻土	亚类合计	89	8.13	16.47	11.91	3.24	27.20	正态
		红沙泥田	64	8.13	16.47	11.52	1.77	15.36	正态
		麻沙泥田	25	8.28	15.59	11.53	1.87	16.22	非正态
	渚育型水稻土	亚类合计	14614	4.54	47.84	11.75	2.76	23.49	正态
		潮沙泥田	3796	4.88	33.43	11.68	2.62	22.43	正态
		红沙泥田	2273	6.12	47.84	11.81	2.88	24.39	正态
		黄泥田	2363	5.68	33.52	11.72	2.50	21.33	正态
		麻沙泥田	2815	5.34	38.14	11.72	2.69	22.95	正态
		鳊泥田	3367	4.54	38.53	11.76	2.81	23.89	正态
红壤	红壤	土类合计	454	2.98	28.27	9.33	4.16	44.59	正态
		亚类合计	213	3.20	15.20	7.67	2.55	33.25	正态
		黄泥	125	4.09	15.21	7.86	2.73	34.73	正态
	棕红壤	黄沙泥	87	3.63	12.86	6.98	2.52	36.10	对数正态
		亚类合计	241	2.98	28.27	10.80	4.72	43.70	正态
		鳊泥	143	2.98	25.53	10.62	4.54	42.75	正态
		黄泥	98	3.63	28.27	9.53	4.43	46.48	正态
黄褐土	黏盘黄褐土	土类合计	186	5.03	29.87	14.60	5.69	38.97	正态
		黏盘黄褐土	40	5.49	24.01	13.14	4.64	35.31	非正态
		马肝泥土	146	5.03	29.87	15.00	5.89	39.27	正态
石灰土	棕色石灰土	棕色石灰土	47	4.30	19.50	9.78	3.67	37.53	正态
潮土		土类合计	102	4.35	27.83	11.81	4.65	39.37	正态
	壤质潮土	壤质潮土	62	4.35	27.83	12.25	5.24	42.78	正态
	潮沙泥土	潮沙泥土	40	4.97	21.09	11.12	3.43	30.85	正态

2.4.4 耕地利用方式

耕地利用方式通过影响土壤肥料和植物残体的数量和性质、土壤水分含量和耕作管理措施,因而使得土壤碳氮含量存在差异性。耕地利用方式对江西省土壤 C/N 空间变异影响极显著($P < 0.01$, 表 4)。从表 7 可以看出,均值大小依次为:两季水田 > 两季旱地 > 一季水田 > 水旱轮作 > 一季旱地。表现为水田大于旱地的总体趋势;水田一般灌溉条件较好,处于淹水状态时间长,有机物料投入多且秸秆还

田量较高,从而导致土壤 C/N 呈上升趋势;而旱地相对水田而言土壤通气条件较好,有机碳易于分解,同时地表作物大多被人为收取,归还量小,这使得土壤 C/N 处于相对较低水平。两季水田(11.80) > 一季水田(11.61),一季水田多为望天田,土地利用效益低,灌溉能力差,机械化程度低且另一季由于荒废导致土壤中有有机质等营养物质被其他植物吸取,这使得其土壤 C/N 低于两季水田。变异系数处于 18.44% ~ 46.05% 之间,均呈中等变异性。

表 7 不同耕地利用方式土壤碳氮比描述性统计特征

Table 7 Descriptive statistics of soil carbon-to-nitrogen ratio under different farmland-use types

耕地利用方式	样点数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	分布类型
一季水田	3 364	4.54	32.86	11.61	2.56	22.05	正态
两季水田	11 480	3.04	40.63	11.80	2.79	23.64	正态
一季旱地	336	2.98	27.83	10.02	4.60	45.91	正态
两季旱地	431	3.20	29.87	11.77	5.42	46.05	正态
水旱轮作	498	6.89	20.55	11.44	2.11	18.44	正态

2.4.5 氮肥施用量

氮肥施用量通过控制土壤氮积累速度来影响土壤 C/N 空间变异。氮肥施用量对江西省土壤 C/N 空间变异影响极显著($P < 0.01$, 表 4),具体表现为:随着氮肥施用量增大,土壤 C/N 均值呈下降趋势

(表 8),这与蔡乾坤^[18]研究结果基本一致。从变异系数看,氮肥施用量大于 300 kg·hm⁻² 的变异系数最小,为 24.07%;氮肥施用量小于 100 kg·hm⁻² 的变异系数最大,为 37.72%;不同氮肥施用量土壤 C/N 均呈中等变异性。

表 8 不同氮肥施用量土壤碳氮比描述性统计特征值

Table 8 Descriptive statistics of soil carbon-to-nitrogen ratio at different levels of nitrogen fertilizer

每公顷氮肥施用量 /kg·hm ⁻²	样点数/个	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%	分布类型
<100	2 032	5.02	29.68	13.23	4.99	37.72	正态
100~200	5 676	3.20	52.67	11.88	2.94	24.75	正态
200~300	6 354	3.04	47.84	11.67	2.94	25.19	正态
>300	2 047	2.98	32.68	11.30	2.72	24.07	正态

2.4.6 各因素影响程度

随机性和结构性因素的回归分析结果表明(表 4),地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和氮肥使用量对江西省土壤 C/N 空间变异影响程度不一。在结构性因素中,地形因素对土壤 C/N 空间变异的独立解释能力较低,仅为 0.3%;成土母质次之,为 2.4%;土壤类型最高,土类、亚类和土属分别为 2.7%、3.6% 和 5.5%,土壤类型的独立解释能力随分类级别降低而升高,这与其他区域研究结果一致^[7,8,22]。在随机性因素中,氮肥施用量对土壤 C/N 空间变异的独立解释能力最高,为 33.4%,远远高于耕地利用方式(1.4%)。两种随机性因素对土壤 C/N 空间变异的解释总和(34.8%)明显大于 3 种结构性因素的总和(5.4%),这与表 2 研究结果一致。这表明在研究江西省土壤 C/N 调控措

施时主要考虑随机性因子。

3 讨论

3.1 各影响因素对土壤 C/N 的影响

土壤 C/N 的空间变异受多种因素共同影响,本研究结果显示受结构性因素和随机性因素共同作用,但随机性因素影响更大。Pearson 相关性分析和回归分析结果表明(表 3 与表 4),土壤 C/N 与大部分地形因子相关性并不显著,独立解释能力低,这与前人研究结果较为一致^[22]。耕地利用方式对土壤 C/N 的独立解释能力仅为 1.4%,远远低于顾成军等^[7]、罗由林等^[22]研究结果。究其原因:①不同土地利用方式下土壤 C/N 差异显著可能与碳氮的积累速度^[41~45]以及有机物本身的化学性质的差异有关,且林草地 C/N 要高于耕地^[44],但本研究只针对

耕地。②研究表明,地上植被变化往往会导致土壤碳氮含量及土壤 C/N 发生分异^[41],其他土地利用方式如林地、园地、草地等土壤 C/N 主要来源于母质与植物凋落物;而耕地除了种植作物的残骸与母质外,我省“高氮高产”的种植观念决定了大部分耕地土壤碳氮比例失调地区都进行了不同程度的施肥调节,导致仅耕地一种土地利用方式独立解释土壤 C/N 空间异质能力较低。土壤类型对土壤 C/N 空间变异性的独立解释能力与土壤分类级别呈反比,这与张忠启^[46]、Bell 等^[47]研究的结果一致。这是因为级别越低,反映的成土过程、母岩特性、土体构型等信息越多,因此其独立解释能力越高。对江西省 16 109 个耕地表层 SOC、TN 和 C/N 进行 Pearson 相关性分析,从表 9 可以看出,SOC 与 TN 的相关系数为 0.779 ($P < 0.01$),普通克里格法插值得到的空间分布图也呈现出较高的相似性,这与前人研究的结果较为一致^[48]。SOC 与 C/N 的相关系数为 0.171 ($P < 0.01$),TN 与 C/N 的相关系数为 -0.399 ($P < 0.01$),相关性均达到显著水平,表明土壤 C/N 主要取决于 SOC 与 TN 含量。这与江西省其他区域研究结果基本一致^[49,50],而蔡家艳等^[51]的研究表明,鄱阳湖湿地 C/N 和 SOC 与 TN 相关性不显著,与耿远波等^[52]对草地 C/N 和 TN 的相关系数为 0.777 ($P < 0.05$)不一致,这也进一步说明江西省耕地土壤 C/N 与草地、湿地对 SOC 与 TN 的敏感性存在差异性。

表 9 土壤有机碳、全氮、碳氮比之间的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 9 Pearson's correlations among soil organic carbon, total nitrogen, and carbon-to-nitrogen ratio

土壤属性	SOC	TN	C/N
SOC	1.000		
TN	0.779 **	1.000	
C/N	0.171 **	-0.399 **	1.000

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

3.2 氮肥施用量对土壤 C/N 的影响

在 20 世纪初,江西省作物生产就开始由传统的仅仅依赖土壤自身肥力与有限的有机肥转变到使用化肥(尤其是氮肥)与秸秆还田中来。20 世纪 80 年代以来,土壤碳氮含量具有不同程度的提升,其原因一方面与江西省大力推广秸秆还田有关;另一更重要的原因是江西省“高氮高产”的种植观念。从空间分布图可以看出[图 2(c)和图 2(d)],土壤 C/N 高值区域主要分布在氮肥施用量小于 100 kg·hm⁻²的县市(如萍乡市上栗县、抚州市乐安县、赣州市崇

义县以及九江市彭泽县),而低值区域主要分布在氮肥施用量大于 200 kg·hm⁻²的县市(如九江市修水县、上饶市余干县、南昌市新建县以及赣州市南丰县和全南县),表现为随着氮肥施用量增加,土壤 C/N 下降的总体趋势,与前人研究结果一致。究其原因:①氮肥的施用降低了土壤 pH 值^[53,54],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,从而使得有机碳含量减少^[18];②氮肥的施用提高了土壤全氮的含量,使得 C/N 整体上呈显著降低的趋势。但部分氮肥施用量较低区域土壤 C/N 较低(如九江市武宁县),氮肥施用量较高区域土壤 C/N 较高(如赣州市赣县)。氮肥施用量作为随机性因素中人为活动和施肥调节的综合反映,通过影响土壤理化性质、土壤碳氮磷钾等营养元素和土壤微生物活性等,导致 SOC 与 TN 含量有不同程度的升高或降低,进而导致土壤 C/N 存在差异性。氮肥施用量在本研究所有影响因素中对土壤 C/N 空间变异的独立解释能力最高,达到 33.4%,远远高于其他因素。

3.3 土壤 C/N 变化的重要意义

土壤 C/N 既是土壤肥力的敏感指标,也是衡量土壤 C、N 营养平衡状况的重要指标,与仅考虑土壤 C、N 自身的变异特征相比,土壤 C/N 更能准确地描述土壤 C、N 空间变异特征。土壤 N 大多以有机氮的形式存在于有机质中,江西省 SOC 与 TN 之间存在良好的相关性($r = 0.779, P < 0.01$)。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,进而提高土壤的固碳与固氮能力。但针对江西省的具体情况,作为全国粮食输出省份之一,土壤碳氮耦合平衡关系到耕地质量与粮食安全。据《江西省统计年鉴》数据显示近 10 年来江西省氮肥施用量从 2005 年的 47.75 万 t 下降到 2015 年的 42.36 万 t,氮肥施用量呈下降趋势,反映出江西省 C/N 一定的情况下,若继续加大氮肥的使用对土壤碳氮耦合平衡意义甚微,且过量的使用氮肥不但对土壤固碳能力是一种削弱,而且氮肥残留量或损失到环境中的量会显著增加,造成土壤酸化和水体污染等农业面源污染问题^[11,16,17,55]。因此,保持稳定的 C、N 含量以及 C/N 是实现粮食增产与土壤碳氮平衡的主要途径,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,同时将土地质量较差或者土壤侵蚀严重的水田改成旱地,实现土壤碳氮平衡;另一方面继续大力推广秸

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碳氮含量,在追求高产的前提下实现 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

江西省耕地表层土壤 C/N 在 2.98 ~ 52.67 之间,平均值为 11.72,变异系数为 25.17%,呈中等变异性。土壤 C/N 空间分布较为平滑,与 SOC 和 TN 空间分布差异明显,土壤 C/N 的块金效应为 88.44%,表明空间变异受随机性因素影响大于结构性因素。高值区主要分布在萍乡市上栗县、抚州市乐安县以及九江市彭泽县,地形因子、耕地利用方式、成土母质、土壤类型和氮肥施用量对江西省耕地土壤 C/N 空间变异影响均显著($P < 0.05$)。在所有因素中氮肥施用量对土壤 C/N 空间变异的独立解释能力最大,远远大于其他影响因素,是影响江西省耕地土壤 C/N 空间变异的主要因素。

参考文献:

- [1] 王淑芳,王效科,欧阳志云. 环境因素对密云水库上游流域土壤有机碳和全氮含量影响的通径分析[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(8): 1378-1383.
Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Path analysis on environmental factors controlling soil organic carbon and total nitrogen contents in the upstream watershed of Miyun reservoir, North China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(8): 1378-1383.
- [2] 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.
- [3] 罗赵慧,田大伦,宁晨,等. 栎树林对湘潭锰矿废弃地土壤碳氮含量的影响[J]. 林业科学, 2014, **50**(3): 130-133.
Luo Z H, Tian D L, Ning C, et al. Effects of *Koeleria paniculata* plantation on soil carbon, and nitrogen content in Xiangtan manganese mining wasteland, Hunan [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, **50**(3): 130-133.
- [4] Sarkar S, Roy A K, Martha T R. Soil depth estimation through soil-landscape modelling using regression kriging in a Himalayan terrain[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2013, **27**(12): 2436-2454.
- [5] 李凤博,卢光德,周锡跃,等. 云南元阳梯田稻田土壤碳氮空间分布及其影响因素[J]. 中国水稻科学, 2012, **26**(5): 576-582.
Li F B, Lu G D, Zhou X Y, et al. Spatial distributions of soil organic carbon and total nitrogen concentrations, and their influencing factors in terraced paddy fields of Yuanyang County, China[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, **26**(5): 576-582.
- [6] 薛志婧. 宁南山区小流域土壤属性空间异质性及土壤碳、氮储量研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
Xue Z J. Spatial variability of soil properties and soil carbon, nitrogen storage of small watershed in southern Ningxia [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012.
- [7] 顾成军,史学正,于东升,等. 省域土壤有机碳空间分布的主控因子——土壤类型与土地利用比较[J]. 土壤学报, 2013, **50**(3): 425-432.
Gu C J, Shi X Z, Yu D S, et al. Main factor controlling SOC spatial distribution at the province scale as affected by soil type and land use[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(3): 425-432.
- [8] 罗由林,李启权,王昌全,等. 川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 652-660.
Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, et al. Spatial variability of soil nitrogen and related affecting factors at a county scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin[J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 652-660.
- [9] 许泉,芮雯奕,刘家龙,等. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, **22**(3): 57-60.
Xu Q, Rui W Y, Liu J L, et al. Spatial variation of coupling characteristics of soil carbon and nitrogen in farmland of China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, **22**(3): 57-60.
- [10] 于佳. 培肥措施对黑土碳、氮变化影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
Yu J. Study on the effect of fertilizing management on carbon and nitrogen of black soil [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [11] 王利利,董民,张璐,等. 不同碳氮比有机肥对有机农业土壤微生物生物量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(9): 1073-1077.
Wang L L, Dong M, Zhang L, et al. Effects of organic manures with different carbon-to-nitrogen ratios on soil microbial biomass of organic agriculture[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(9): 1073-1077.
- [12] 高凤杰,马泉来,张志民,等. 黑土区小流域土壤氮素空间分布及主控因素研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(8): 2990-2999.
Gao F J, Ma Q L, Zhang Z M, et al. Spatial distribution of soil nitrogen and its main driving factors in a Mollisol watershed of China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(8): 2990-2999.
- [13] Chaopricha N T, Marín-Spiotta E. Soil burial contributes to deep soil organic carbon storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, **69**: 251-264.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 鲁艳红,廖育林,聂军,等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016,

- 49(21): 4169-4178.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Effect of successive fertilization on dynamics of basic soil productivity and soil nutrients in double cropping paddy soils with different fertilities [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(21): 4169-4178.
- [17] 李新爱, 童成立, 蒋平, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. *土壤*, 2006, **38**(3): 298-303.
- Li X A, Tong C L, Jiang P, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil organic matter and total nitrogen in paddy soil [J]. *Soils*, 2006, **38**(3): 298-303.
- [18] 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.
- [19] 胡玉福, 邓良基, 张世熔, 等. 川中丘陵区典型小流域土壤氮素空间变异特征及影响因素研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(3): 70-75.
- Hu Y F, Deng L J, Zhang S R, *et al.* Study on spatial variability and its influential factors of soils nitrogen in typical small watershed in the hilly region of the middle Sichuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, **22**(3): 70-75.
- [20] 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.
- [21] 李婷, 张世熔, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(4): 863-868.
- Li T, Zhang S R, Liu X, *et al.* Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang River Basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(4): 863-868.
- [22] 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.
- [23] Sarmiento L, Bottner P. Carbon and nitrogen dynamics in two soils with different fallow times in the high tropical Andes: indications for fertility restoration [J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, **19**(1): 79-89.
- [24] 王永旭, 陈波浪, 袁郁文, 等. 耕地土壤养分空间变异特征研究[J]. *新疆农业科学*, 2015, **52**(1): 145-150.
- Wang Y X, Chen B L, Yuan Y W, *et al.* Soil nutrients spatial variability of the farmland in Yuepuhu County, Southern Xinjiang [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, **52**(1): 145-150.
- [25] 马泉来, 高凤杰, 张志民, 等. 我国东北黑土丘陵区小流域土壤有机质空间分布模拟[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(3): 382-390.
- Ma Q L, Gao F J, Zhang Z M, *et al.* Simulation of spatial distribution of soil organic matter in a mollisol watershed in northeastern China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(3): 382-390.
- [26] 杨柳, 胡玉福, 许宗林, 等. 川中丘陵区土壤养分时间变异特征研究——以中江县玉兴镇为例[J]. *土壤通报*, 2009, **40**(5): 1057-1062.
- Yang L, Hu Y F, Xu Z L, *et al.* Temporal variation characteristics of soil nutrient in Hilly region of Mid-Sichuan basin: a case study in Yuxing town of Zhongjiang County [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, **40**(5): 1057-1062.
- [27] 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.
- [28] 毛达如. 植物营养研究方法[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994.
- [29] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(5): 188-194.
- Zhang S M, Wang Z M, Zhang B, *et al.* Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, **26**(5): 188-194.
- [30] Wang B W, Zhou W J, Ma S, *et al.* Regression-kriging of soil organic matter using the environmental variables derived from MODIS and DEM [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(4): 838-842.
- [31] 李丽霞, 邹艳晖, 张瑛. 哑变量在统计分析中的应用[J]. *数理医药学杂志*, 2006, **19**(1): 51-53.
- Li L X, Gao Y H, Zhang Y. The application of dummy variable in statistics analysis [J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2006, **19**(1): 51-53.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] Hernandez-Stefanoni J L, Ponce-Hernandez R. Mapping the spatial variability of plant diversity in a tropical forest: comparison of spatial interpolation methods [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **117**(1-3): 307-334.
- [35] Zhu Q, Lin H S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(5): 594-606.
- [36] Deng Q, Cheng X L, Yang Y H, *et al.* Carbon-nitrogen interactions during afforestation in central China [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 119-122.
- [37] Hu S, Chapin III F S, Firestone M K, *et al.* Nitrogen limitation of microbial decomposition in a grassland under elevated CO₂ [J]. *Nature*, 2001, **409**(6817): 188-191.
- [38] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO₂ [J]. *Nature*, 2001, **411**(6836): 466-468.

- [39] 庞凤, 李廷轩, 王永东, 等. 县域农田土壤氮素空间分布特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(6): 1497-1503.
- Pang S, Li T X, Wang Y D, *et al.* Spatial distribution pattern of soil nitrogen in croplands at county scale and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, **21**(6): 1497-1503.
- [40] 杨劲松, 姚荣江. 黄河三角洲地区土壤水盐空间变异特征研究[J]. 地理科学, 2007, **27**(3): 348-353.
- Yang J S, Yao R J. Spatial variability of soil water and salt characteristics in the Yellow river delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, **27**(3): 348-353.
- [41] 马玉红, 郭胜利, 杨雨林, 等. 植被类型对黄土丘陵区流域土壤有机碳氮的影响[J]. 自然资源学报, 2007, **22**(1): 97-105.
- Ma Y H, Guo S L, Yang Y L, *et al.* Influence of vegetation types on soil organic C at Yangou catchment in the Loess Hilly-gully region[J]. Journal of Natural Resources, 2007, **22**(1): 97-105.
- [42] O'Brien S L, Jastrow J D, Grimley D A, *et al.* Moisture and vegetation controls on decadal-scale accrual of soil organic carbon and total nitrogen in restored grasslands[J]. Global Change Biology, 2010, **16**(9): 2573-2588.
- [43] Fu X L, Shao M G, Wei X R, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2010, **155**(1-2): 31-35.
- [44] 张彦军, 郭胜利, 南雅芳, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮比的变化及其影响因素[J]. 自然资源学报, 2012, **27**(7): 1214-1223.
- Zhang Y J, Guo S L, Nan Y F, *et al.* The changes and influencing factors of soil C:N ratio in small watershed of Hilly region of Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2012, **27**(7): 1214-1223.
- [45] Tong C L, Xiao H A, Tang G Y, *et al.* Long-term fertilizer effects on organic carbon and total nitrogen and coupling relationships of C and N in paddy soils in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, **106**(1): 8-14.
- [46] 张忠启. 样点布置模式及密度对揭示土壤有机碳空间变异的影响[D]. 南京: 中国科学院南京土壤研究所, 2010.
- [47] Bell M J, Worrall F. Estimating a region's soil organic carbon baseline: the undervalued role of land-management[J]. Geoderma, 2009, **152**(1-2): 74-84.
- [48] 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]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- [49] 付姗, 吴琴, 尧波, 等. 南矶湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布[J]. 湿地科学, 2015, **13**(3): 374-380.
- Fu S, Wu Q, Yao B, *et al.* Distribution of soil carbon-nitrogen, carbon-phosphorus and nitrogen-phosphorus ratios along water level gradient in Nanji wetlands[J]. Wetland Science, 2015, **13**(3): 374-380.
- [50] 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.
- [51] 蔡家艳, 吴琴, 钟欣孜, 等. 鄱阳湖区不同围垦年限稻田土壤碳氮变化[J]. 生态学杂志, 2016, **35**(8): 2009-2013.
- Cai J Y, Wu Q, Zhong X Z, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen in reclaimed paddy fields vary with reclamation duration in Poyang Lake region[J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, **35**(8): 2009-2013.
- [52] 耿远波, 章申, 董云社, 等. 草原土壤的碳氮含量及其与温室气体通量的相关性[J]. 地理学报, 2001, **56**(1): 44-53.
- Geng Y B, Zhang S, Dong Y S, *et al.* The content of soil organic carbon and total nitrogen and correlativity between their content and fluxes of CO₂, N₂O and CH₄ in Xilin River Basin steppe[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, **56**(1): 44-53.
- [53] Blake L, Goulding K W T, Mott C J B, *et al.* Changes in soil chemistry accompanying acidification over more than 100 years under woodland and grass at Rothamsted Experimental Station, UK[J]. European Journal of Soil Science, 1999, **50**(3): 401-412.
- [54] Rasmussen P E, Rohde C R. Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on organic Nitrogen and Carbon in a semiarid soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, **52**(4): 1114-1117.
- [55] 巨晓棠. 氮肥有效率的含义及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, **51**(5): 921-933.
- Ju X T. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio—discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, **51**(5): 921-933.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Banksides in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong, <i>et al.</i> (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3845)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables Influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)