

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1

第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM _{2.5} 污染演变的时空过程	时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)
2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析	郑庆峰, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)
夏季大气PM _{2.5} 中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例	刘威杰, 石明明, 程敏, 黎莹, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)
呼包鄂地区冬季、夏季PM _{2.5} 污染特征	李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)
2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM _{2.5} 污染特征及来源解析	周静博, 段青春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)
基于模型模拟的成都市PM _{2.5} 污染来源解析	许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)
北京市PM _{2.5} 中砷污染特征	石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段青春, 谭吉华, 陈荣志 (57)
夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析	易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)
安阳市大气PM _{2.5} 中水溶性离子季节特征及来源解析	孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)
新乡市夏冬季节PM _{2.5} 稳定碳同位素特征分析	闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)
基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估	梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)
超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征	王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)
京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨	余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)
安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析	杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)
长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响	王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)
华东典型城市非道路移动机械排气烟度	鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昀, 黄成 (133)
国内外储油库VOCs排放现状与标准分析	胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)
四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响	庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)
乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比	徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张显, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)
长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素	汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)
巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征	沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)
城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例	田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)
典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估	陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)
长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估	李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)
雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析	周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)
白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析	汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)
松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评价	王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟丰, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)
鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系	李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)
臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响	刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒峰, 潘杨 (253)
兰州市西固区儿童饮水重金属暴露与健康风险精细化评估	陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)
镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制	吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)
一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制	廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)
酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能	谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)
脱氮菌剂在低溶解性黑臭水体中氮代谢特征	赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)
宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及耐药基因	陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)
淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析	赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)
基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控	陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)
基于间歇饥饿的SNAD工艺运行	李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)
反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液	陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)
硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现	刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)
高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响	张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)
中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评价	向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖偲, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)
某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征	孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)
北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征	张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征	杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)
亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征	宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)
宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化	陈志浩, 覃云斌, 丁帮琛, 胡优优, 陈湜, 李正魁 (412)
秸秆炭化还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响	王晶, 马丽娟, 刘泽华, 陆伟, 侯振安 (420)
基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析	黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)
塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征	陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)
广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征	马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)
不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响	张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)
不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响	栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)
黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应	周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)
炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响	蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)
《环境科学》征订启事(89)	
《环境科学》征稿简则(97)	
信息(303, 329, 344)	

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征

宋佳龄¹, 盛浩^{2*}, 周萍³, 段良霞¹, 周清¹, 张杨珠²

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学土壤研究所, 长沙 410128; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125)

摘要: 为了解稻田土壤中是否存在稳定的土壤有机碳(C)、氮(N)和磷(P)比值, 基于亚热带区 110 个水稻土剖面 and 587 个发生层的土壤调查数据库, 在区域尺度上分析了典型水稻土 C:N:P 比值的生态化学计量学特征, 并应用相关分析和冗余分析, 研究水稻土 C:N:P 比值与土壤-环境因子(地形和母质、土壤发生层、土壤类型和土壤理化性质)的关系。结果显示, 亚热带区稻田土壤 C:N、C:P 和 N:P 的剖面加权平均值分别为 12.6、49 和 3.9, C:N:P 为 38:3.2:1。不同母质起源、不同土壤亚类 and 不同发生层的水稻土 C:N 变异相对较小; 但 C:P 和 N:P 的变异很大, 两者均值也远低于全球(186 和 13.1)和中国土壤(136 和 9.3)的 C:P 和 N:P 的平均水平。尽管稻田土壤剖面的 C:N:P 相对不稳定, 但由于稻田表土生物与环境相互作用强烈, 表土 C:N 相对稳定(14.2)。这反映长期水耕熟化作用下, 稻田表土中 C 和 N 仍存在紧密的耦合作用。然而, 在稻田土壤剖面上, C:P 和 N:P 并不稳定, SOC 与全 P 含量、全 N 与全 P 含量也无显著相关性, 表明环境变化可能导致土壤 C:N:P 解耦。地形、土壤质地、氧化铁和容重是调控稻田土壤剖面 C:N:P 的关键土壤环境因子。

关键词: 计量土壤学; 土壤养分; 底土; 土壤剖面; 土壤发生分类; 土壤环境因子

中图分类号: X144; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0403-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.201906169

Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils

SONG Jia-ling¹, SHENG Hao^{2*}, ZHOU Ping³, DUAN Liang-xia¹, ZHOU Qing¹, ZHANG Yang-zhu²

(1. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Institute of Soil Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: This study aims to understand the existence of stable soil organic carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) ratios in paddy soil. Based on a field soil survey database, the ecological stoichiometry of the C:N:P ratio of 110 subtropical paddy soil profiles and 587 genetic horizons were analyzed at a regional scale. Relevant analysis and redundancy analysis (RDA) are used to study the relationships between C:N:P ratios and soil-environmental factors (topography, parent materials, soil genetic horizons, soil groups, soil physical, and chemical properties). The results showed that the weighted averages of C:N, C:P, and N:P in paddy soils of subtropical regions were 12.6, 49, and 3.9, respectively, and C:N:P was 38:3.2:1. The C:N of paddy soil did not vary significantly with parent materials, soil groups, or genetic horizons. However, the C:P and N:P variations were significantly different, and the mean values of the two were much lower than global ratios (186 and 13.1) and average levels of C:P and N:P in Chinese soils (136 and 9.3). Although the C:N:P ratio in the paddy soil profile was relatively unstable, the topsoil C:N (14.2) was relatively stable due to the strong interaction between the topsoil and the environment. This reflects the close coupling of C and N in the topsoil of paddy fields under long-term anthrostatic maturation. However, in the paddy soil profile, C:P and N:P were not stable, and there was no significant correlation between soil organic carbon (SOC) and total P content, total N, or total P content, which suggests that environmental changes may lead to soil C:N:P decoupling. It was found that topography, soil texture, iron oxide, and bulk density are all key soil-environmental factors that regulate the soil profile of rice paddy C:N:P.

Key words: pedometrics; soil nutrients; subsoil; soil profile; soil classification; soil-environmental factor

土壤元素组成及其生物地球化学循环如何调控陆地生态系统结构和服务功能, 一直是地球表层科学研究的核心科学问题之一^[1,2]。尽管在复杂的成土因素作用下, 土壤元素的分布具有高度的空间异质性, 但全球、区域或生态系统尺度上的研究显示, 土壤有机碳(C)、氮(N)和磷(P)循环常常存在相互耦合的紧密关系。据统计, 全球 0~10 cm 表层土壤的 C:N:P 均值为 60:7:1, 中国南方 1 069 个水田和旱地 0~20 cm 表层土壤的 C:N:P 均值为 80:7.9:1, 中国 2 384 个 0~250 cm 土壤剖面 C:N:P 均值为

60:5:1^[3~5]。这暗示土壤中可能存在一个类似的、较稳定的 C、N 和 P 比值。然而, 自然土壤的 C、N 和 P 循环还受到土壤微生物、植被覆盖、母质/母岩及其风化度、地形和气候的综合制约。近 10 余年来, 室内模拟和野外控制试验表明, 自然环境变化和

收稿日期: 2019-06-22; 修订日期: 2019-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571234, 41671242); 国家科技基础性工作专项(2014FY110200A15); 湖南农业大学 2018 大学生科技创新基金项目(2018ZK28)

作者简介: 宋佳龄(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为土壤资源与利用, E-mail: songjialing17@stu.hunau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn

土地利用可以解耦土壤 C、N 和 P 循环^[2,6,7]. 特别是在高强度的土地利用背景下,有关人为土壤 C、N 和 P 元素组成、阈值比例和环境调控因素仍有待深入探究^[2]. 因此,解析不同环境因子对土壤元素组成的调控和反馈作用,对精确预测土壤圈物质循环过程及其对环境变化的响应具有重要意义.

目前,有关土壤 C、N 和 P 元素组成、计量特征和调控因素的研究主要集中在森林、湿地和草地的自然生态系统,较少涉及养分高投入的人工生态系统(如稻田)^[7~9]. 与自然生态系统的成土过程不同,稻田经频繁淹水植稻和人工培育,长期演变形成特殊的耕作土壤——水稻土. 此外,稻田承接外部养分的投入途径多、数量大且频率高,还具有氧化-还原过程诱发的特殊生物化学过程,导致水稻土的元素组成和化学计量特征更具易变性和复杂性^[1]. 近 30 年来,水稻土是全球显著的“碳汇”之一,这一碳汇不仅与外源 N 投入关系密切,还受 P 素的限制^[10,11]. 外源 N 和 P 投入常导致农田土壤 C:P 和 N:P 低于自然土壤^[12~14]. 因此,充分了解水稻土 C、N 和 P 生态化学计量特征及其与环境因子的相互作用,对于深入揭示人为土壤养分的可获得性和限制性,阐明稻田生态系统养分循环机制和精确预测土壤质量演变趋势具有重要意义.

中国拥有世界上最大面积的稻田生态系统(340 多万 hm^2),约 90% 水稻土分布在亚热带双季稻区^[11,15]. 本研究以中亚热带传统稻作区的湖南省为例,选取 6 种不同母质发育的水稻土,涉及潜育、潜育和淹育这 3 个亚类、110 个水稻土剖面 and 587 个土壤发生层,野外系统地调查成土环境条件,描述土壤剖面发生层和划分土壤类型,室内分析土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量和土壤其他理化性质. 目的在于:①阐明不同母质、土类和发生层的水稻土 C、N 和 P 化学计量特征;②揭示稻田土壤 C、N 和 P 化学计量特征与环境因子的关系;③以期了解稻田土壤养分的空间分异、限制作用和矿质养分的均衡增效、平衡施肥提供基础数据和科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江中下游,洞庭湖以南的湖南省,地理坐标介于 $108^{\circ}47' \sim 114^{\circ}15'E$ 、 $24^{\circ}39' \sim 30^{\circ}08'N$,为中国传统稻作核心区,水稻产量常年居全国首位. 研究区面积 21.18 万 km^2 ,其中植稻土壤面积约 4.1 万 km^2 ,约占土地总面积的 19%^[16]. 研究区东、南和西三面环山,中部丘岗起伏,北部洞庭湖平原展

布,湘、资、沅和醴四水贯穿境内,>80% 的稻田土壤分布在湘东、湘中和湘北的丘岗、冲积平原区,多呈原田、树枝、阶梯和镶嵌状的复域分布. 区域属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 $16 \sim 18^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 1 200 ~ 1 700 mm,无霜期 260 ~ 310 d,适宜种植双季稻^[17]. 本区是世界上最早人工植稻区之一,玉蟾岩和彭头山的炭化稻谷最早可追溯到 12 000 a 以前. 据调查,区域内长期淹水植稻形成的水稻土起源母质主要有板页岩风化物、花岗岩风化物、第四纪红色黏土、河流沉积物、紫色岩风化物 and 石灰岩风化物,发育的土壤类型涉及淹育型、潜育型、潜育型和漂白型水稻土 4 个亚类,32 个土属,158 个土种^[18]. 稻田种植制度以双季稻-冬闲/油菜/绿肥和一季稻-冬闲/油菜为主.

1.2 野外采样和室内分析研究方法

2011 ~ 2017 年冬季,依据综合地理法,选取湖南省 110 个稻田土壤剖面采样点(图 1). 按照野外采样手册的要求,记录采样点成土环境,挖掘宽度约为 1.2 m、深度约为 1.5 ~ 2 m 的土壤剖面,划分土壤发生层,分别记录为 A 层(Ap1-耕作表层及 Ap2-犁底层)、B 层(Br-水耕氧化还原层)和 C 层(母质层),自下而上依次采集各发生层的土壤环刀样和理化分析样品,带回室内的环刀样烘干后测定容重,理化分析样品风干、过筛后置于密封袋备用^[19].

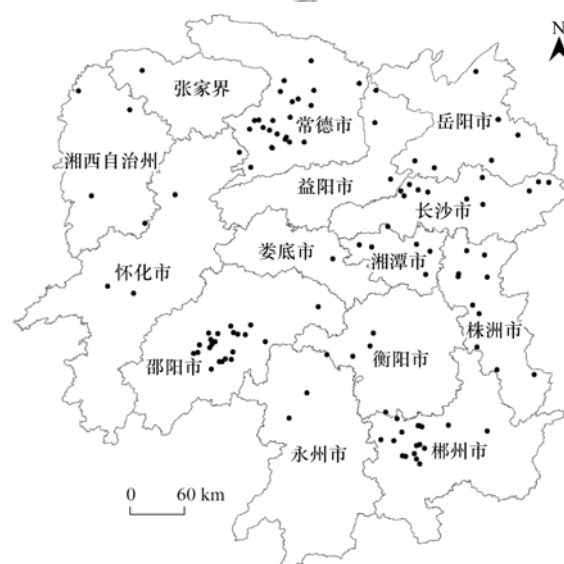


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Geographical distribution of sampling sites

土壤 SOC、TN 和 TP 分别采用重铬酸钾容量(外加热)法、硒粉-硫酸铜-硫酸消化-蒸馏法和碱熔-钼锑抗比色法测定;土壤 pH 采用电位法;土壤阳离子交换量(CEC)采用醋酸铵-EDTA 交换法;土壤氧化铁采用碳酸锂-硼酸熔融-ICP 法;土壤游离氧化铁采用柠檬酸钠-连二亚硫酸钠-重碳酸钠(DCB)浸

提-邻菲罗啉比色法;土壤氧化铝采用氟化钾取代-EDTA 滴定法;土壤容重采用环刀法;土壤颗粒组成采用吸管法^[20].

1.3 数据分析

基于 Excel 2010 软件平台,计算不同母质、土壤类型(亚类)、土壤发生层 SOC、TN、TP 含量和 C:N、C:P、N:P 摩尔比的均值、中值、极值、标准差和变异系数.土壤剖面元素计量比基于不同发生层深度的加权平均值,以 C:N 的计算公式为例:

$$C:N = \frac{\sum C_i \times P_i \times D_i}{\sum N_i \times P_i \times D_i}$$

式中,*i* 为第 *i* 层土壤;*C_i* 为第 *i* 层 SOC(TN 或 TP) 含量(g·kg⁻¹);*N_i* 为第 *i* 层 TN 含量(g·kg⁻¹);*P_i* 为第 *i* 层的土壤容重(g·cm⁻³);*D_i* 为第 *i* 层发生层厚度(cm).

基于 SPSS 22.0 软件平台,应用单因素方差分析(One-way ANOVA),比较不同母质、土壤类型、发生层的土壤 SOC、TN、TP 含量和 C:N、C:P、N:P 的均值差异,显著性检验采用最小极差法(LSD).应用线性回归分析,研究土壤 C、N 和 P 含量与其生态化学计量比的关系.应用 Pearson 相关分析,研究土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征与土壤-环境因子(经度、纬度、海拔、土壤质地、容重、pH、CEC、盐基饱和度和氧化硅、氧化铝、氧化铁、游离氧化铁含量)的关系.

基于 CANOCO 5.0 软件平台,对土壤 C、N、P 生态化学计量特征和环境因子的趋势分析(DCA)表明,土壤 C、N、P 含量及其计量比的排序轴长度(LGA)最大为 0.68(<3),适合线性排序法,可应用冗余分析(RDA),进一步研究土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征的综合影响因子.由于不同环境因子的样本数有所差异,单独对氧化铁、游离氧化铁、氧化铝、氧化硅、CEC 和盐基饱和度进行冗

余分析(RDA1,*n* = 56),另对经度、纬度、海拔、粉粒、砂粒、黏粒、pH 和容重进行冗余分析(RDA2,*n* = 110).所有统计显著水平设为 0.05,极显著水平设为 0.01.采用 Origin 9.0 和 Excel 2010 软件进行统计制图,采用 Arc GIS 软件绘制采样点分布.

2 结果与分析

2.1 稻田土壤有机碳、全氮和全磷含量

母质和土壤发生层显著影响稻田土壤 SOC、TN 和 TP 含量[图 2(a)~2(c),2(g)~2(i)].土壤 SOC 和 TN 含量均以石灰岩风化物发育的稻田土壤最高,可能与石灰岩发育水稻土中钙含量较高,有助于土壤有机质的保存有关.然而,土壤 TP 含量以河流沉积物发育的水稻土最高,反映了河流沉积泥沙中存在大量自然和人为的 P 素累积.尽管水稻土 SOC、TN 和 TP 含量均随土壤剖面深度的增加而降低,但未观察到土壤类型(亚类)对 SOC、TN 和 TP 分布具有一致性的影响[图 2(d)~2(f)].

基于土壤剖面的回归分析表明,SOC 与 TN 含量显著正相关(*R*² = 0.67,*P* < 0.05),但 SOC 与 TP 含量、TN 与 TP 含量均无显著相关性(图 3).

2.2 稻田土壤碳、氮、磷的比值

从表 1 来看,土壤发生层的 C:N、C:P、N:P 和 C:N:P 平均值分别为 12.88、54.62、4.38 和 41:3.33:1,略高于整个水稻土剖面的 C:N、C:P、N:P 和 C:N:P 加权平均值(12.58、48.71、3.86 和 38:3.16:1).由于所选水稻土发育于不同的母质且地形、局地小气候和种植制度存在差异,环境因子变化可能解耦 C:N:P.从偏度和峰度看,水稻土 C、N 和 P 比值呈偏正态分布,特别是 C:N 呈明显右偏态分布且陡峭(偏度 > 3、峰度 > 14).变异系数介于 0.3~1.0,属中等程度的空间变异.

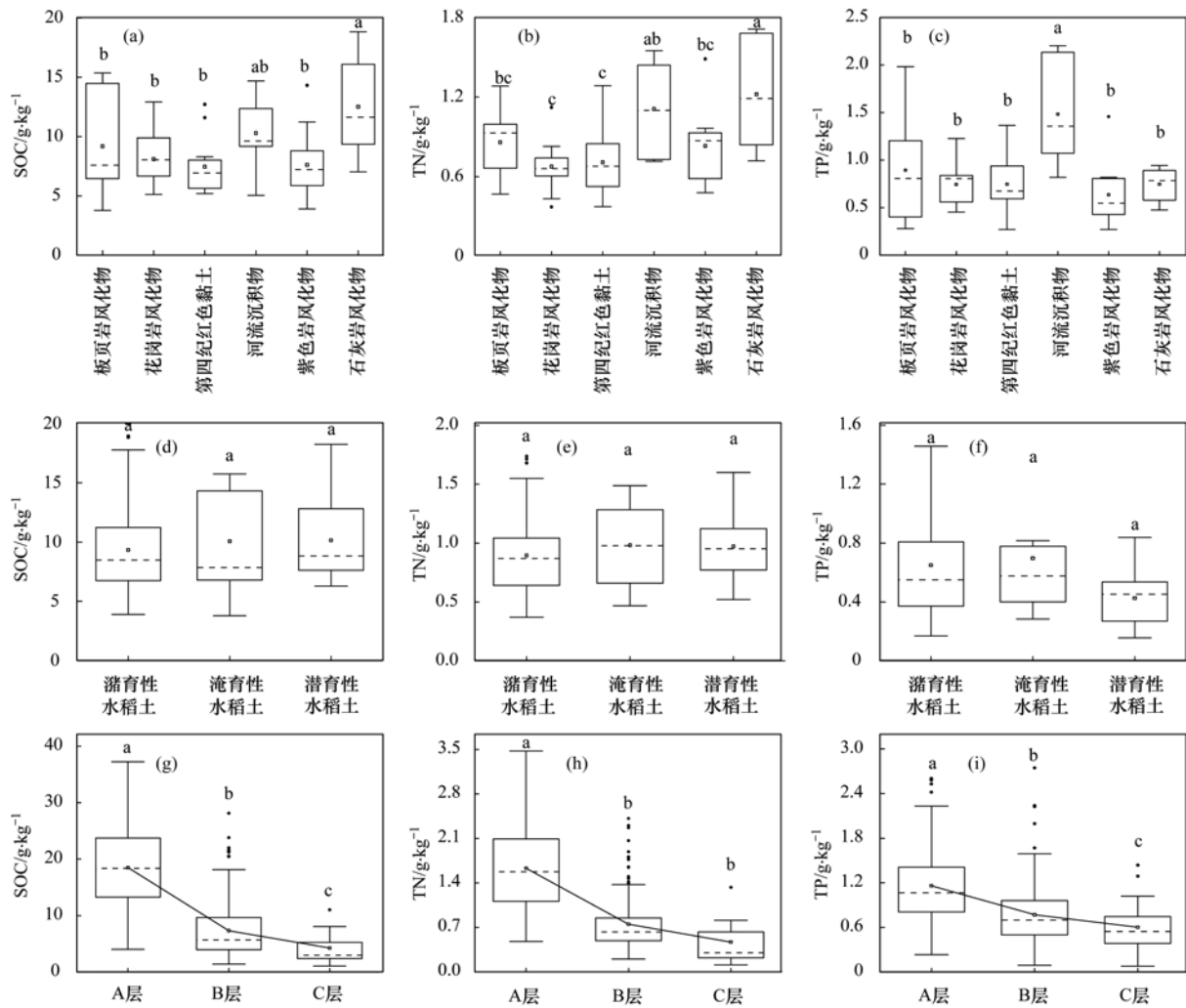
表 1 稻田土壤 C、N 和 P 比值的描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistics of paddy soil C, N, and P ratios

项目	变量	平均值	标准差	最小值	最大值	偏度	峰度	变异系数
土壤剖面(<i>n</i> = 110)	C:N	12.58	4.24	7.13	39.16	3.06	14.66	0.34
	C:P	48.71	33.96	4.56	201.92	1.62	3.39	0.70
	N:P	3.86	2.30	0.49	12.68	1.25	1.61	0.60
发生层(<i>n</i> = 587)	C:N	12.88	6.35	0.92	62.93	3.13	15.71	0.49
	C:P	54.62	50.41	2.20	460.33	2.37	9.48	0.92
	N:P	4.38	4.05	0.21	38.00	3.25	17.73	0.92

母质类型显著影响稻田土壤 C:P 和 N:P 比值,C:P 均值以板页岩风化物发育的土壤最高(47.52),N:P 以河流沉积物发育的土壤明显最低(1.67),但母质对 C:N 无显著影响[图 4(a)~4

(c)].在亚类水平上,土壤类型显著影响 C:P 和 N:P,以潜育性水稻土最高,均值分别为 76.02 和 5.82 [图 4(d)~4(f)].在土壤剖面上,土壤 SOC、TN、TP 含量及其计量比均以 A 层最高,随剖面加深显著



同一张图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图2 不同母质、土壤亚类和发生层的稻田土壤 SOC、TN 和 TP 含量

Fig. 2 Soil SOC, TN, and TP contents of in paddy fields with various parent materials, soil subgroups, and horizons

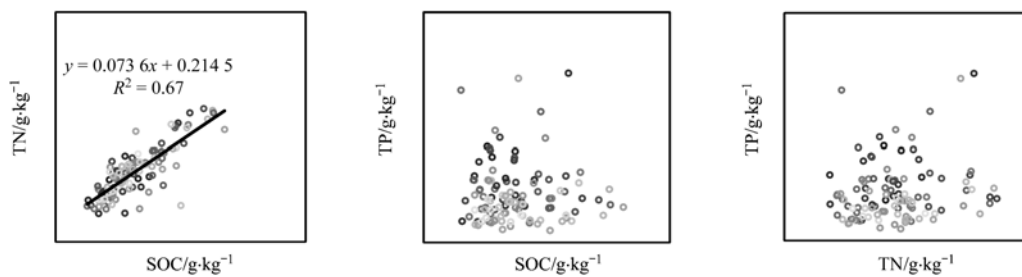


图3 稻田土壤 SOC、TN 和 TP 含量之间的关系

Fig. 3 Relationships between soil SOC, TN, and TP contents in paddy fields

降低[图 4(g)~4(i)]. 其中,C:P 的降幅(31%)明显高于 C:N 和 N:P 的降幅(16%和 18%),这可能与 SOC 含量的降幅(60%)明显高于 TN 和 TP 含量的降幅(54%和 34%)有关.

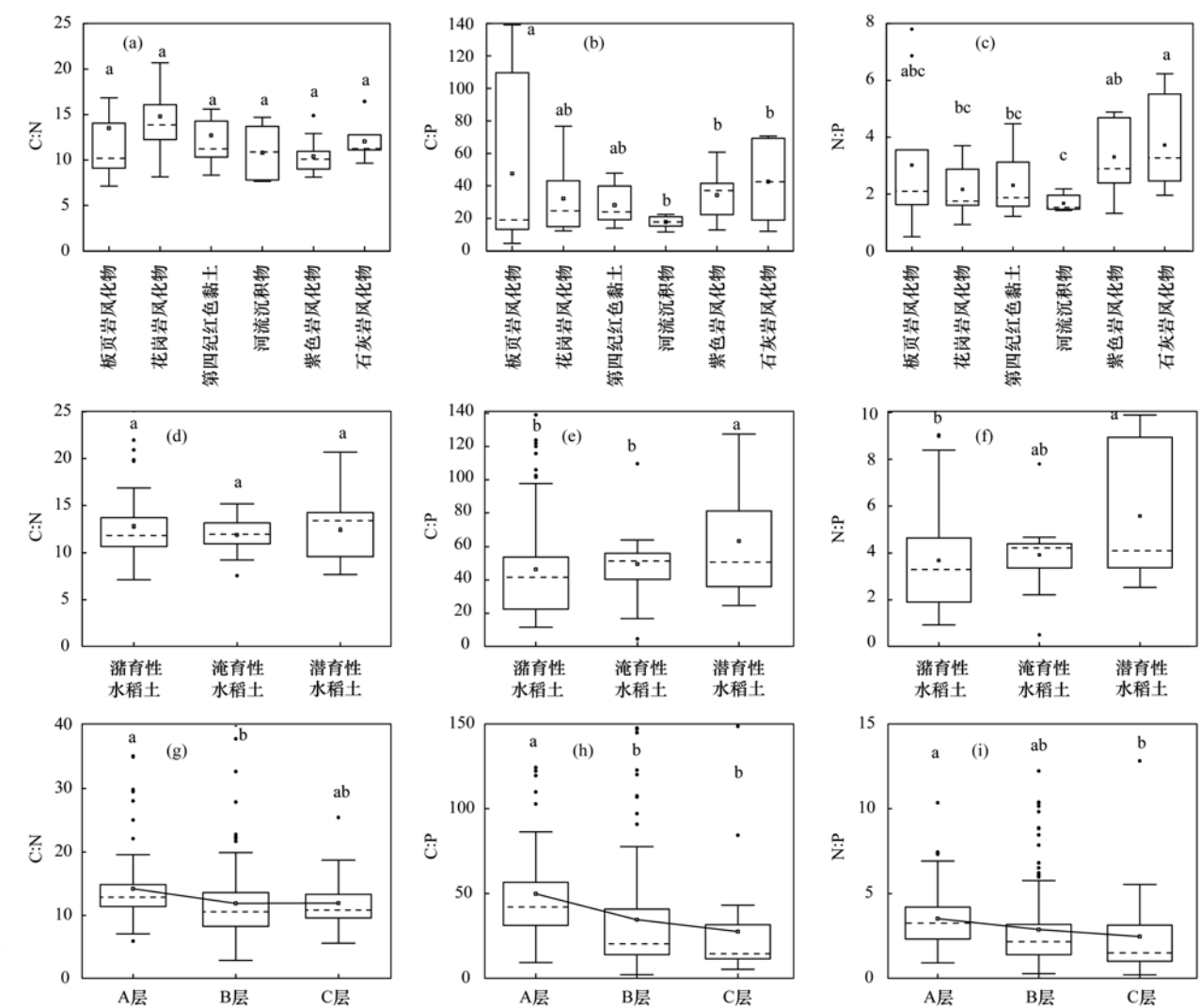
2.3 土壤碳、氮、磷比值与环境因子的关系

Pearson 相关分析表明,C:N 与海拔呈显著正相关,与容重、pH 和氧化硅含量呈显著负相关;C:P 与海拔呈显著正相关,与经度、容重、砂粒、粉粒、黏粒、氧化铁和游离氧化铁含量呈显著负相关;

N:P 与经度、砂粒、粉粒、黏粒、氧化铁、游离氧化铁和氧化铝含量呈显著负相关(表 2).

进一步的冗余分析表明,土壤 C、N、P 生态化学计量特征与环境因子第 1、2 轴的相关系数分别介于 0.58~0.62 和 0.40~0.55,生态化学计量特征与环境因子的累积解释量达到 99.80%~99.94%(表 3). 显然,第 1、2 轴排序轴成分对稻田土壤 C、N、P 生态化学计量特征起主要控制作用.

二维排序图显示,土壤 C:P、N:P 与土壤氧化



同一张图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 4 不同母质、土壤亚类和发生层的稻田土壤 C、N 和 P 比值

Fig. 4 Variation of paddy soil C, N, and P stoichiometric characteristics with different parent materials, soil subgroups, and horizons

表2 稻田土壤 C、N 和 P 比值与环境因子的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between paddy soil C, N,

P ratios, and environmental factors

环境因子	C: N	C: P	N: P
经度	-0.091	-0.377 **	-0.378 **
纬度	0.037	0.053	0.006
海拔	0.203 *	0.190 *	0.152
容重	-0.220 *	-0.216 *	-0.163
砂粒	0.139	-0.291 **	-0.371 **
粉粒	-0.106	-0.376 **	-0.462 **
黏粒	-0.019	-0.284 **	-0.323 **
pH	-0.229 *	-0.050	0.071
阳离子交换量	-0.198	-0.216	-0.137
氧化铁	-0.180	-0.380 **	-0.408 **
游离氧化铁	-0.258	-0.425 **	-0.350 **
氧化铝	0.041	-0.158	-0.269 *
氧化硅	-0.284 *	-0.156	-0.095
盐基饱和度	0.121	-0.054	-0.093

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

铁、游离氧化铁、土壤质地(砂粒、粉粒和黏粒)、

经度在排序轴之间夹角的余弦值不仅相对最大,箭头也明显较长,反映土壤氧化铁、游离氧化铁含量、土壤质地和地形很好地解释了土壤 C、N 和 P 生态化学计量特征的变异(图 5)。

环境因子对土壤 C、N、P 生态化学计量特征影响程度大小的排序为:氧化铁 > 粉粒 > 游离氧化铁 > 经度 > 砂粒 > 黏粒 > 容重 > 海拔 > 氧化铝 > 氧化硅 > pH; 其中,粉粒、砂粒、黏粒、氧化铁、游离氧化铁、经度极显著影响稻田土壤 C、N、P 生态化学计量特征(表 4)。

3 讨论

3.1 稻田土壤碳、氮、磷是否存在稳定的比值

在全球或区域尺度上,表土中似乎存在一个相对稳定的 C: N。本研究中,110 个稻田表层土壤 C: N 均值为 14.2,与全球、中国表土 C: N 均值(分别为 14.3 和 14.4)均非常接近^[3,4]。此外,稻田土壤 SOC

表 3 土壤 C、N、P 生态化学计量比与环境因子的 RDA 排序

Table 3 RDA ordination of soil C, N, P stoichiometric characteristics, and environmental factors

项目	排序轴	特征值	生态化学计量比与 环境因子相关系数	生态化学计量比 累积解释量/%	生态化学计量比与环境 因子关系累积解释量/%	所有排序轴 显著性检验
RDA1	Axis1	0.318 5	0.613 8	31.85	93.76	$F = 4, P = 0.020$
	Axis2	0.021 0	0.375 8	33.95	99.94	
	Axis3	0.000 2	0.187 9	33.97	100	
	Axis4	0.527 5	0	86.72	0	
RDA2	Axis1	0.304 1	0.586 6	30.41	94.01	$F = 6, P = 0.002$
	Axis2	0.018 7	0.408 3	32.29	99.80	
	Axis3	0.000 6	0.412	32.35	100	
	Axis4	0.581 3	0	90.48	0	

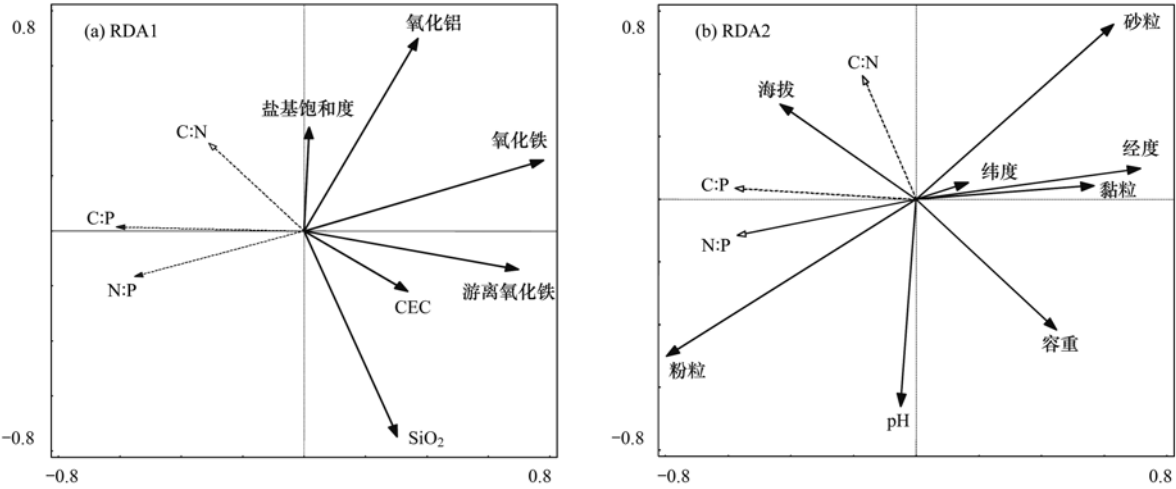


图 5 土壤 C、N、P 生态化学计量特征与环境因子的 RDA 分析二维排序

Fig. 5 Two-dimensional sequence diagram of the RDA of the environmental factors and soil C, N, P stoichiometric characteristics

表 4 环境因子解释量与显著性检验

Table 4 Explanation rate of the environmental factors and Duncan tests

项目	环境因子	因子解释量	F	P
RDA1	氧化铁	17.3	10.9	0.002
	游离氧化铁	13.8	8.30	0.002
	氧化铝	5.1	2.80	0.060
	氧化硅	4.0	2.20	0.120
	阳离子交换量	3.4	1.80	0.174
	盐基饱和度	0.8	0.40	0.650
RDA2	粉粒	17.1	22.4	0.002
	经度	13.7	17.2	0.002
	砂粒	11.0	13.3	0.002
	黏粒	8.5	10.0	0.002
	容重	6.8	7.90	0.002
	海拔	5.6	6.40	0.010
	pH	1.3	1.50	0.216
	纬度	1.1	1.20	0.298

与 TN 含量呈极显著正相关关系 ($R^2 = 0.67$, 图 3), 不同母质起源和土壤类型 (亚类) 的水稻土 C:N 类似 (图 4). 这些证据都显示, 稻田土壤中可能存在较稳定的 C、N 耦合关系. 稻田土壤中存在相对稳定的 C:N, 反映土壤生物具有改造外界环境条件的能力, 以满足自身的养分需求. 在土壤剖面上, 特别是稻田表层土壤有机质含量相对较高, 土壤生物与外

部环境的相互作用最为剧烈, 土壤生物与环境的协同进化可能已达到一种相对的准平衡状态.

尽管稻田表土 C:N 较为稳定, 但是其 C:P (50) 和 N:P (3.5) 却远远低于全球、中国表土的 C:P 和 N:P (186 和 13.1、136 和 9.3), 暗示环境变化很可能解耦土壤 C:N:P^[4,5]. 统计分析表明, 稻田土壤中 SOC 与 TP、TN 与 TP 含量均无显著的相关关系 (图 2), 这一结果与以自然土壤和旱地土壤为主的报道不同, 说明水耕熟化形成的人为土中, P 素对 C 和 N 的限制可能相对较弱^[3,21~24]. 此外, 虽然亚热带湿润季风气候下的自然土壤中 P 素容易淋失, 但是稻田土壤 P 素容易固持且利用率低, 长期人工施肥下的稻田表土是典型的 P 素累积系统^[25,26]. 小流域长期定位试验也表明, 红壤荒地改为水田、旱地和果园的农业用地后, 初期土壤 C:N:P 类似, 但土地利用方式转换 10 a 后, 土壤 C:P 和 N:P 均明显降低, C:N:P 出现解耦现象, 推测主要与长期施肥有关^[21].

与土壤 C 和 N 不同的是, 土壤 P 素很大一部分来源于母质和原生矿物的风化, 这也导致深层底土 (淀积层或母质层) 中 C:P 和 N:P 更低 (图 4). 河流沉积物发育的水稻土 C:P 和 N:P 均相对最低 (18

和 1.7, 图 4), 可能与土壤有机质积累较少, 且 P 素更易吸附和累积有关(图 2)^[27]. 在当前稻田氮肥的高投入背景下, 水稻土较低的 C:P、N:P 比值也暗示, 稻田土壤生态系统存在着 P 素的过量累积与总体失衡. 据报道, 稻田长期 P 肥投入引起土壤和微生物的 C、N 限制; 而部分稻田因 P 素盈余, 利用率低, 土壤有效 P 含量甚至超出环境临界点, 产生环境污染^[26,28].

另外, 成土环境也能改变土壤 C:N:P 和土壤养分的限制因子. 相关和冗余分析均表明, 地形(经度和海拔)是调控区域尺度上稻田土壤 C:N:P 的关键因素之一(表 3 和表 4). 经度是调控水分的关键地带性因子, C:P 和 N:P 与经度均呈显著负相关, 反映稻田土壤 C:N:P 可能具有经向地带性特征. 随着海拔升高, 丘陵山区潜育性水稻土所占比例增加, 土壤 C:N 和 C:P 与海拔呈显著正相关. 在土壤亚类水平上, 潜育性水稻土多分布在地势相对较低的丘陵山冲、山区沟谷或山前洼地, 无排水出路或山泉水补给但排水困难, 多为冲田、垅田或梯田; 由于长期滞水或淹水, 土壤有机 C 和 N 分解相对缓慢, 土体 P 素容易流失, 这可能导致潜育性水稻土 C:P 和 N:P 相对最高^[29-31]. 随着海拔升高, 温度降低, 母质风化成土和有机质分解速率减缓, 土体中 SOC 累积增强, P 素积累可能减弱; 人为施肥量随海拔升高也相应减少, 随海拔升高, 稻田土壤 P 素限制作用增强^[5,14,23]. 由此看来, 人为养分投入和自然环境变化(起源物质、成土环境因素和土体分异)都可能导致水稻土 C:N:P 解耦和失稳.

3.2 稻田土壤碳、氮、磷比值与土壤理化性质的关系

土壤物理、化学环境制约着土壤有机质和养分的平衡. 综合来看, 土壤质地、氧化铁及其游离度和容重是调控区域水稻土 C:N:P 的关键土壤理化因子(表 4). 水稻土 C:P 和 N:P 与砂粒、粉粒和黏粒含量均呈显著负相关. 在红壤小流域, 旱地和水田土壤 C:N:P 亦与黏粒含量呈负相关^[21]. 原因在于一方面, 虽然水稻土多为壤质土, 但随着砂粒、粉粒和 SiO₂ 含量的提高(表 2), 土壤 SOC、N 分解与矿化的损失增大, 可能导致 C:P 和 N:P 降低; 另一方面, 稻田土壤有机质的提升过程常同步伴随土体内黏粒的淋失; 与黏粒含量高的母土相比, 初始黏粒含量更低的母土经水耕熟化, SOC 提升和达到准平衡态的速度也更快^[32].

氧化铁是稻田土壤中的黏粒矿物, 游离氧化铁则是水稻土团聚体的重要矿质胶结物质^[33]. 本研究中, 稻田土壤 C:P、N:P 与氧化铁、游离氧化铁含量呈显著负相关. 据稻田土壤长期定位施肥试验报道,

水稻土 SOC 含量与无定型氧化铁、氧化铁活度呈显著正相关, 但与游离氧化铁含量呈显著负相关^[34]. 此外, 水稻土中随着氧化铁(特别是无定型铁)、氧化铝含量的提高, 土壤对磷酸根离子的吸附增强, 促进土壤 P 素的固定^[35].

土壤容重反映水稻土的疏松程度, 容重越小, 越有利于稻根的生长、周转和凋落物分解^[36]. 本研究中, 水稻土 C:N 和 C:P 与容重呈显著负相关. 农田、山地土壤中, C:N 和 C:P 也与容重呈负相关^[14,37]. 随着土壤容重的下降, 稻田土壤结构和孔隙改善, 有利于水稻土碳库的保存与提升, 但土质疏松也会促进 P 素的渗漏和淋失, 这可能引起 C:N 和 C:P 的升高. 此外, 水稻土中仅 C:N 与 pH 呈显著负相关. 据报道, 湿地土壤有机质含量与 pH 也呈负相关, 反映土壤 C 的累积^[8]. 水稻土 pH 适当升高, 特别是 pH 朝中性发展, 有利于土壤微生物对土壤有机质分解和转化, 在中性环境下, 土壤 P 素的有效性也最高.

4 结论

在中亚热带区域尺度上, 稻田土壤剖面上所有发生层的 C:N、C:P、N:P 和 C:N:P 均值分别为 12.9、54.6、4.4 和 41:3.3:1. 不同母质起源、不同亚类和不同发生层的稻田土壤 C:N 的变异相对较小, 特别是在稻田表土中的生物与外部环境相互作用强烈, C:N 相对稳定, 反映稻田表土中 C、N 素存在紧密的耦合作用. 然而, 稻田土壤剖面上 C:P 和 N:P 不仅变异很大, 还受到土壤环境因子的显著影响, 指示稻田土壤中 C、P 和 N、P 关系的解耦. 稻田土壤 C:P 和 N:P 也远低于全球、中国土壤的 C:P 和 N:P 平均水平, 说明水稻土中存在 P 素的相对累积, 可能减弱 P 素的限制作用. 本研究表明, 稻田土壤剖面的 C:N:P 相对不稳定, 自然环境变化和人为养分管理都可能解耦土壤 C:N:P. 地形、土壤质地、铁氧化物和容重是调控稻田土壤剖面上 C:N:P 的关键土壤环境因子.

参考文献:

- [1] 吴金水, 葛体达, 祝贞科. 稻田土壤碳循环关键微生物过程的计量学调控机制探讨[J]. 地球科学进展, 2015, **30**(9): 1006-1017.
Wu J S, Ge T D, Zhu Z K. Discussion on the key microbial process of carbon cycle and stoichiometric regulation mechanisms in paddy soils[J]. Advances in Earth Science, 2015, **30**(9): 1006-1017.
- [2] Crowther T W, Riggs C, Lind E M, et al. Sensitivity of global soil carbon stocks to combined nutrient enrichment[J]. Ecology Letters, 2019, **22**(6): 936-945.
- [3] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, **85**(3): 235-252.

- [4] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, *et al.* Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98**(1-3): 139-151.
- [5] Li Y, Wu J S, Liu S L, *et al.* Is the C:N:P stoichiometry in soil and soil microbial biomass related to the landscape and land use in southern subtropical China? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, **26** (4): GB4002, doi: 10.1029/2012GB004399.
- [6] Yang Y H, Fang J Y, Ji C J, *et al.* Stoichiometric shifts in surface soils over broad geographical scales: evidence from China's grasslands [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, **23**(8): 947-955.
- [7] Yu Z P, Wang M H, Huang Z Q, *et al.* Temporal changes in soil C-N-P stoichiometry over the past 60 years across subtropical China [J]. *Global Change Biology*, 2018, **24** (3): 1308-1320.
- [8] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究 [J]. *土壤学报*, 2016, **53** (5): 1160-1169.
- Zhang Z S, Lv X G, Xue Z S, *et al.* Is there a redfield-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(5): 1160-1169.
- [9] 瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 等. 黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2904-2911.
- Qu Q, Xu H W, Wu X, *et al.* Soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in *Robinia pseudoacacia* forest within different vegetation zones on the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2904-2911.
- [10] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, *et al.* Soil organic carbon storage as a key function of soils-A review of drivers and indicators at various scales [J]. *Geoderma*, 2019, **333**: 149-162.
- [11] Zhou P, Sheng H, Li Y, *et al.* Lower C sequestration and N use efficiency by straw incorporation than manure amendment on paddy soils [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, **219**: 93-100.
- [12] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change [J]. *New Phytologist*, 2012, **196**(1): 68-78.
- [13] 赵航, 贾彦龙, 王秋凤. 中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征 [J]. *第四纪研究*, 2014, **34**(4): 803-814.
- Zhao H, Jia Y L, Wang Q F. Statistical characteristics of C-N-P stoichiometry in Chinese zonal forest and farmland ecosystems [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(4): 803-814.
- [14] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 939-951.
- Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 939-951.
- [15] Liu S L, Huang D Y, Chen A L, *et al.* Differential responses of crop yields and soil organic carbon stock to fertilization and rice straw incorporation in three cropping systems in the subtropics [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **184**: 51-58.
- [16] 黄国勤, 周泉, 陈阜, 等. 长江中游地区水稻生产可持续发展战略研究 [J]. *农业现代化研究*, 2018, **39**(1): 28-36.
- Huang G Q, Zhou Q, Chen F, *et al.* The sustainable development strategy of rice production in the middle reaches of Yangtze River [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(1): 28-36.
- [17] 高冠民, 窦秀英. 湖南自然地理 [M]. 长沙: 湖南人民出版社, 1981.
- [18] 杨锋. 湖南棕红壤的研讨 [J]. *土壤学报*, 1989, **26**(1): 87-96.
- Yang F. A study on brown red earth in Hunan Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, **26**(1): 87-96.
- [19] 张甘霖, 李德成. 野外土壤描述与采样手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- Zhang G L, Li D C. Manual of soil description and sampling [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [20] 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.
- [21] Liu M, Li Z P, Zhang T L. Changes of soil ecological stoichiometric ratios under different land uses in a small catchment of subtropical China [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2016, **66**(1): 67-74.
- [22] Zhang K, Su Y Z, Yang R. Variation of soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry and biogeographic factors across the desert ecosystem of Hexi Corridor, northwest China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(1): 49-57.
- [23] 杨文, 周脚根, 王美慧, 等. 亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性 [J]. *土壤学报*, 2015, **52**(6): 1336-1344.
- Yang W, Zhou J G, Wang M H, *et al.* Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(6): 1336-1344.
- [24] 宋佳龄, 盛浩, 张亮, 等. 湘东地区水耕人为土的碳氮磷化学计量学特征 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2018, **13**(3): 9-16.
- Song J L, Sheng H, Zhang L, *et al.* Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of stagnic anthrosols in East Hunan province [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2018, **13**(3): 9-16.
- [25] 王传杰, 王齐齐, 徐虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征 [J]. *生态学报*, 2018, **38** (11): 3848-3858.
- Wang C J, Wang Q Q, Xu H, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38** (11): 3848-3858.
- [26] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 长期施肥红壤性水稻土磷素演变特征及对磷盈亏的响应 [J]. *土壤学报*, 2017, **54**(6): 1471-1485.
- Lu Y H, Liao Y L, Nie J, *et al.* Evolution of soil phosphorus in reddish paddy soil under long-term fertilization varying in formulation and its response to P balance [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(6): 1471-1485.
- [27] 吕豪朋, 李崇巍, 马振兴, 等. 天津于桥水库上游河流表层沉积物不同形态磷的空间分布 [J]. *天津师范大学学报(自然科学版)*, 2018, **38**(3): 66-71.
- Lv H P, Li C W, Ma Z X, *et al.* Spatial distribution of different forms of phosphorus in sediments of the upstream of Tianjin

- Yuqiao Reservoir [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2018, **33**(3): 66-71.
- [28] Li X, Wang H, Gan S H, *et al.* Eco-stoichiometric alterations in paddy soil ecosystem driven by phosphorus application [J]. PLoS One, 2013, **8**(5): e61141.
- [29] 陈桂香, 王维奇, 曾从盛. 联合梯田不同海拔稻田土壤养分及其生态化学计量比分布特征 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2017, **33**(1): 60-67.
Chen G X, Wang W Q, Zeng C S. The distribution of soil nutrients and ecological stoichiometry in the Lianhe terraced fields at difference altitude [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2017, **33**(1): 60-67.
- [30] 岳振华, 陈均一, 冯敏. 潜育性水稻土肥力特性的研究——VI. 锈水田肥力特征及施肥改良探讨 [J]. 湖南农学院学报, 1984, (4): 19-29.
Yue Z H, Chen J Y, Feng M. Study on the fertility of rusty scum gleyey soil and its ameliorative practices by rational fertilizer application [J]. Journal of Hunan Agricultural College, 1984, (4): 19-29.
- [31] 王文军, 张祥明, 凌国宏, 等. 皖南山区潜育性水稻土剖面性状及无机改良剂改良效果 [J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 237-241.
Wang W J, Zhang X M, Ling G H, *et al.* Soil profile properties of gleyed paddy soils and improvement effects of inorganic amendment in south Anhui mountainous areas [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(1): 237-241.
- [32] 李忠佩, 李德成, 张桃林, 等. 红壤水稻土肥力性状的演变特征 [J]. 土壤学报, 2003, **40**(6): 870-878.
Li Z P, Li D C, Zhang T L, *et al.* Dynamics of soil properties of paddy fields in red soil region [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, **40**(6): 870-878.
- [33] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 三种南方典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 II. 团聚体内有机碳的化学结合机制 [J]. 土壤学报, 2009, **46**(2): 263-273.
Zhou P, Song G H, Pan G X, *et al.* SOC enhancement in three major types of paddy soils in a long-term agro-ecosystem experiment in South China II. Chemical binding and protection in micro-aggregate size fractions [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, **46**(2): 263-273.
- [34] 王莹, 尧水红, 李辉信, 等. 长期施肥稻田土壤团聚体内氧化铁分布特征及其与有机碳的关系 [J]. 土壤, 2013, **45**(4): 666-672.
Wang Y, Yao S H, Li H X, *et al.* Relationship between distribution patterns of iron oxidates and soil organic matter in aggregates of paddy soil in a long-term fertilization [J]. Soils, 2013, **45**(4): 666-672.
- [35] 苏玲, 章永松, 林咸永. 干湿交替过程中水稻土铁形态和磷吸附解吸的变化 [J]. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(4): 410-415.
Su L, Zhang Y S, Lin X Y. Changes of iron oxides and phosphorus adsorption-desorption in paddy soils under alternating flooded and dried conditions [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2001, **7**(4): 410-415.
- [36] Augusto L, Achat D L, Jonard M, *et al.* Soil parent material-A major driver of plant nutrient limitations in terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2017, **23**(9): 3808-3824.
- [37] 秦海龙, 付旋旋, 卢瑛, 等. 广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. 应用生态学报, 2019, **30**(3): 711-717.
Qin H L, Fu X X, Lu Y, *et al.* Soil C:N:P stoichiometry at different altitudes in Mao'er Mountain, Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, **30**(3): 711-717.

CONTENTS

Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years	SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> (1)
Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016	ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> (14)
Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China	LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (23)
PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China	LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> (31)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019	ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> (39)
Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China	XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo (50)
Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing	SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (57)
Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City	YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> (65)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City	SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (75)
Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xinxiang City	YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> (82)
Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species	LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> (90)
Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant	WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> (98)
Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018	YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> (106)
Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City	YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (115)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols	WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> (125)
Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China	LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> (133)
Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals	HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (139)
Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaacol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration	ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (146)
Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain	XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (155)
Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> (166)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwali, <i>et al.</i> (173)
Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years	TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> (183)
Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea	CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (194)
Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River	LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (205)
Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (213)
Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake	WANG Jing-zhong, LIU Zhao, WEI Hao, <i>et al.</i> (224)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River	WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (232)
Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River	LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> (242)
Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent	LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (253)
Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou	CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> (262)
Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments	WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (273)
Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> (284)
Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II)	XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> (293)
Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water	ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> (304)
Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant	CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> (313)
Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch	ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> (321)
Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR	CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (330)
Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (337)
Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter	CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> (345)
Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function	LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (353)
Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge	ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> (360)
Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China	XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> (368)
Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant	MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> (377)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils	ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> (385)
Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation	DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Tian-hui, <i>et al.</i> (394)
Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils	SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (403)
Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshang Lake	CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> (412)
Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field	WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> (420)
Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Jiulong River Basin Based on Positive Matrix Factorization	HUANG Hua-bin, LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin	CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (438)
Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China	MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> (449)
Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel	ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> (460)
Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes	LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (469)
Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region	ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> (479)
Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain	LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> (489)