

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抗性基因	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钾空间分布及农作物钾富集特征	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, 纪艺凝, 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)	

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¹, 李天阳¹, 何丙辉^{1*}, 贺小容², 付适¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 重庆市璧山区水土保持监测站, 重庆 402760)

摘要: 阐明长期施肥和耕作对坡耕地土壤 C、N、P 和 K 含量及其化学计量比的影响, 将有助于深刻理解土壤 C 和养分元素循环过程及其相互作用机制, 对施肥管理及农业面源污染防治具有重要意义。在紫色土坡耕地(坡度为 15°)建立 15 个小区(长 8 m × 宽 4 m), 设置 5 个处理(每个处理 3 次重复): 顺坡无施肥处理(对照, CK)、顺坡复合施用有机肥和化肥处理(T1)、顺坡单施化肥处理(T2)、顺坡单施化肥增量处理(T3)和横坡单施化肥处理(T4), 比较各处理 0~10 cm 及 10~20 cm 土层的 C、N、P 和 K 含量及其化学计量变化特征。结果表明, 各处理土壤 C、N 和 P 差异显著($P < 0.05$), 均表现为 $T1 > T3 > T4 > T2 > CK$, 施肥处理下 K 含量差异不显著($P > 0.05$), 但均显著高于对照处理($P < 0.05$), 表现为 $T4 > T3 > T2 > T1 > CK$ 。各处理土壤的 C:N 在 10~20 cm 土层中差异显著($P < 0.05$), 表现为 $T4 > T3 > T1 > CK > T2$; 而 C:P 则在 0~10 cm 土层差异显著($P < 0.05$), 表现为 $T1 > T3 > CK > T4 > T2$; 各处理土壤的 C:K、N:P、N:K 和 P:K 在不同土层中均差异显著($P < 0.05$), 其中 C:K、N:K 和 P:K 表现为 $T1 > T3 > T4 > T2 > CK$, N:P 表现为 $T1 > CK > T4 > T3 > T2$ 。土壤的 C、N、P 和 K 含量及其化学计量比均随土层加深而递减。试验区土壤 C、N 和 P 含量属中等变异, 变异系数(CV)分别为 37.50%、38.91% 和 25.35%, K 含量属弱变异, CV 为 5.03%。化学计量比中, C:N 和 C:P 属弱变异, CV 分别为 7.52% 和 14.38%, C:K、N:P、N:K 和 P:K 属中等变异, CV 分别为 35.62%、17.01%、37.24% 和 44.78%。土壤 C、N、P 和 K 含量及化学计量比之间存在显著正相关($P < 0.05$)。试验区土壤 N:P 平均值为 2.09, 低于中国土壤平均水平(9.3)。研究表明紫色土坡耕地土壤 N 为养分限制因子, 而复合施用有机肥和化肥可有效缓解紫色土坡耕地 N 缺乏的状况。

关键词: 施肥和耕作; 化学计量特征; 碳含量; 养分因子; 紫色土

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0394-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907098

Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation

DU Ying-ni¹, LI Tian-yang¹, HE Bing-hui^{1*}, HE Xiao-rong², FU Shi¹

(1. Key Laboratory of Eco-environment in the Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Bishan Eco-environment Monitoring Station of Soil and Water Conservation, Chongqing 402760, China)

Abstract: Clarification of the effects of long-term fertilization and cultivation on soil organic carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) contents and their stoichiometric ratios can contribute to existing research on the C and nutrient biogeochemical cycles and their interacting mechanisms. Such information is also of great significance to fertilization management and for the control of non-point pollution. Fifteen plots (8 m long, 4 m wide) were set up on a representative purple hillslope (15°). Five treatments (three replications) were used on the plots: i) no fertilizer with downslope cultivation (CK), ii) combined application of manure and fertilizer with downslope cultivation (T1), iii) chemical fertilizers with downslope cultivation (T2), iv) chemical fertilizer with increasing fertilization with downslope cultivation (T3), and v) chemical fertilizer with contour cultivation (T4). The C, N, P and K contents and their ratios in the five treatments corresponding to 0-10 cm and 10-20 cm soil depths were compared. The results showed that C, N and P contents for the different treatments were differed significant and could be ranked: $T1 > T3 > T4 > T2 > CK$ ($P < 0.05$). K content was not significantly different among the four fertilizations ($P > 0.05$) but was significantly higher than the CK treatment ($P < 0.05$), and could be ranked: $T4 > T3 > T2 > T1 > CK$. The C:N ratios in the five treatments were significantly different ($P < 0.05$) at a soil depth of 10-20 cm ($T4 > T3 > T1 > CK > T2$). The C:P ratios in the five treatments were significantly different ($P < 0.05$) at a soil depth of 0-10 cm ($T1 > T3 > CK > T4 > T2$). The C:K, N:P, N:K, and P:K ratios for the five treatments at both of the soil depths showed significant differences ($P < 0.05$), and the C:K, N:K, and P:K were ranked as $T1 > T3 > T4 > T2 > CK$, whereas the N:P ratio was ranked as $T1 > CK > T4 > T3 > T2$. The C, N, P, and K contents and their stoichiometric ratios decreased with increasing soil depth. Soil C, N and P in the study site showed moderate variations based on their coefficient of variation (CV): 37.50%, 38.91%, and 25.35%, respectively. Soil K on the other hand showed a weak variation (CV 5.03%). Soil C:N and

收稿日期: 2019-07-11; 修订日期: 2019-08-01

基金项目: 农业部公益性行业科研项(201003014-6-3); 国家自然科学基金项目(41771312); 中央高校基本科研业务费专项(SWU118079)

作者简介: 杜映妮(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水土保持与农业面源污染, E-mail: dyn1042056130@126.com

* 通信作者, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

C:P also showed a weak variation with a CV of 7.52% and 14.38%, respectively. Soil C:K, N:P, N:K, and P:K showed moderate variations, with a CV of 35.62%, 17.01%, 37.24% and 44.78%, respectively. There were significant positive interrelations among soil C, N, P, and K contents and their stoichiometric ratios ($P < 0.05$). The average N:P ratio was 2.09, which was much lower than the average value for various soil types in China. Our results indicate that soil N is the key limiting nutrient in purple hillslope land, and that the combination of organic and inorganic fertilizers can effectively alleviate the N deficiency in the study area.

Key words: fertilization and tillage; stoichiometric characteristics; carbon content; nutrient factor; purple soil

土壤是生态系统的重要组成部分,是植物生长发育的基础^[1],碳(C)、氮(N)、磷(P)和钾(K)等化学元素是植物生长的必需元素,直接影响植物的生长发育、土壤微生物的活动以及土壤的养分循环^[2].生态化学计量学是一门研究生态系统中多种化学元素(主要是C、N和P)平衡关系和相互作用的科学^[3,4],其认为有机体的元素组成(C、N和P)比例是稳定的,其中任何一种元素的变化都会改变这个比值^[5],可以用于研究土壤生态系统中养分循环和判断其养分限制因子^[6].目前,生态化学计量学理论已在植物组织、森林群落、植物对环境的响应、土壤的养分循环、微生物元素的动态变化等方面得到广泛应用^[7~10].我国土壤受区域水热条件及成土作用的影响,C、N和P含量差异较大^[11],且人类活动也显著改变土壤C、N和P含量及其化学计量比,并影响其相互间的耦合关系^[12,13].施肥和耕作是农业生产活动最主要的方式,但关于长期不同施肥和耕作方式下土壤C、N、P和K含量及化学计量比变化特征的研究还较少见,且上述元素及其化学计量比间的耦合机制也尚不清楚^[14].

紫色土是在亚热带气候条件下由紫色砂、页岩发育而来的一种岩性土,其养分含量丰富,肥力高,但其质地松软,结构松散,极易发生土壤侵蚀,导致养分大量流失,土地生产力急剧下降^[15].目前,已有大量研究报道了紫色土坡耕地养分流失、产流产沙等方面的特征^[16~19],而针对长期施肥和耕作对土壤C、N、P和K含量及化学计量比变化特征的研究却还较少见.因此,本文基于紫色土坡耕地长期不同施肥水平和耕作方式的定位试验,分析土壤C、N、P和K含量及其化学计量比变化特征,揭示它们间的耦合关系,并明确该区土壤养分限制因子,以期为紫色土坡耕地土壤施肥管理及农业面源污染防治提供科学依据.

1 材料与方法

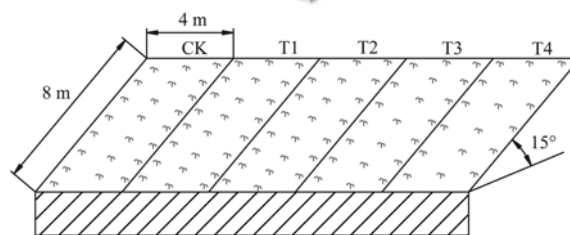
1.1 试验区概况

本试验位于重庆市西南大学后山水土保持试验基地(106°24'20"E, 29°48'42"N).该试验基地是农业部南方山地丘陵区种植业面源污染地表径流监测试验点之一.试验区属亚热带季风气候区,年平均降雨量1 100 mm,且降雨主要集中在5~9月.该区年

平均气温18.3℃,平均日照时数1 270 h,无霜期334 d.试验基地土壤类型为紫色土,成土母质为中生代侏罗纪沙溪庙组紫色砂泥岩.

1.2 试验设计

在坡度为15°的紫色土坡面上,建立15个小区,规格为32 m²(长8 m×宽4 m),各小区之间用水泥田埂隔开,埂宽25 cm,埂体高出地面20 cm,小区内垄高5~8 cm,垄宽40~50 cm,垄距40 cm.各小区均为冬小麦-夏玉米轮作,开展长期定位施肥和耕作试验(始于2008年).试验共设置5个处理(每个处理设置3个重复,图1):顺坡无施肥对照处理(CK)、顺坡复合施用有机肥和化肥处理(T1)、顺坡单施化肥处理(T2)、顺坡单施化肥增量处理(T3)和横坡单施化肥处理(T4).试验执行期间每年施肥量保持一致,具体施肥量见表1.其中,氮、磷、钾肥分别采用尿素、过磷酸钙、氯化钾,尿素含N≥46.4%,过磷酸钾含P₂O₅≥12%,氯化钾含K₂O≥60%,有机肥为农家肥(猪粪尿),含有机C 4.31%、N 0.24%、P₂O₅ 0.17%和K₂O 0.21%.



CK、T1、T2、T3 为顺坡耕作,T4 为横坡耕作

图1 试验设计及田间排列示意

Fig. 1 Schematic of the experimental design and field arrangement

1.3 试验管理

施肥方法:施肥方式为撒施,冬小麦播种前施底肥,次年2月施追肥;夏玉米播种前施底肥,同年5月下旬施追肥.

轮作模式:试验小区为冬小麦-夏玉米轮作模式.冬小麦采用穴播的方式,固定30 cm×30 cm的株行距;夏玉米则采用移栽的方式,固定40 cm×150 cm的株行距.

播种及收获时间:冬小麦播种时间为上年11月上旬,当年5月中旬收获;夏玉米为当年3月开始育苗,4月中旬移栽,8月上旬收获.

作物品种:冬小麦的品种为“渝麦7号”;夏玉米的品种为“中糯309”.

表 1 各处理长期施肥量/kg·hm⁻²
Table 1 Average annual nutrient applications for different treatments/kg·hm⁻²

试验处理	小麦肥料施用量				玉米肥料施用量			
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	有机肥
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
T1	138.00	45.00	0.00	72.00	221.00	144.00	0.00	216.00
T2	225.00	75.00	150.00	0.00	188.00	90.00	150.00	0.00
T3	337.50	112.50	225.00	0.00	282.00	135.00	225.00	0.00
T4	225.00	75.00	150.00	0.00	188.00	90.00	150.00	0.00

1.4 土壤样品采集和分析

本研究于 2018 年玉米收获后采集土样. 采用梅花形布点法,在各小区分别选取 5 个点, 共计 75 个点(5 个处理×3 个重复×5 个点). 采用直径 5 cm 不锈钢土钻在每个点分别采集 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的土样,将同一小区相同土层不同点位的土壤混合均匀,用四分法剔除多余土壤,并采集 1 kg 左右的混合样品带回实验室,弃除砾石、草根等杂物,风干后研磨过 0.25 mm 筛以备化学分析. C、N、P 和 K 含量均采用常规方法测定^[20];土壤有机 C 采用重铬酸钾容量法测定,全 N 采用半微量开氏蒸馏法测定,全 P 采用钼蓝比色法测定,全 K 采用火焰光度法测定.

1.5 数据处理

土壤 C、N、P 和 K 的化学计量比均采用摩尔质量比^[14, 21]. 利用 SPSS 18.0 软件进行数据处理和分析. 采用单因素方差(One-way ANOVA)对不同处理土壤的 C、N、P 和 K 的含量及化学计量比进行分析,用 Duncan 法进行多重比较;采用独立样本 t 检验比较相同处理不同土层间的 C、N、P 和 K 的含量及化学计量比的差异性. 利用 Pearson 相关分析探究 C、N、P 和 K 含量与化学计量之间的关系. 本文显著水平为: $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著. 采用变异系数(CV)评价试验区 C、N、P 和 K 的含量及化学计量比的变异程度,当 $CV < 15\%$ 时为弱变异, $15\% < CV < 75\%$ 之间为中等变异, $CV > 75\%$ 时为强变异^[22, 23]. 采用 AutoCAD 2014 和 Originlab 2018 绘图.

2 结果与分析

2.1 长期施肥与耕作对紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量的影响

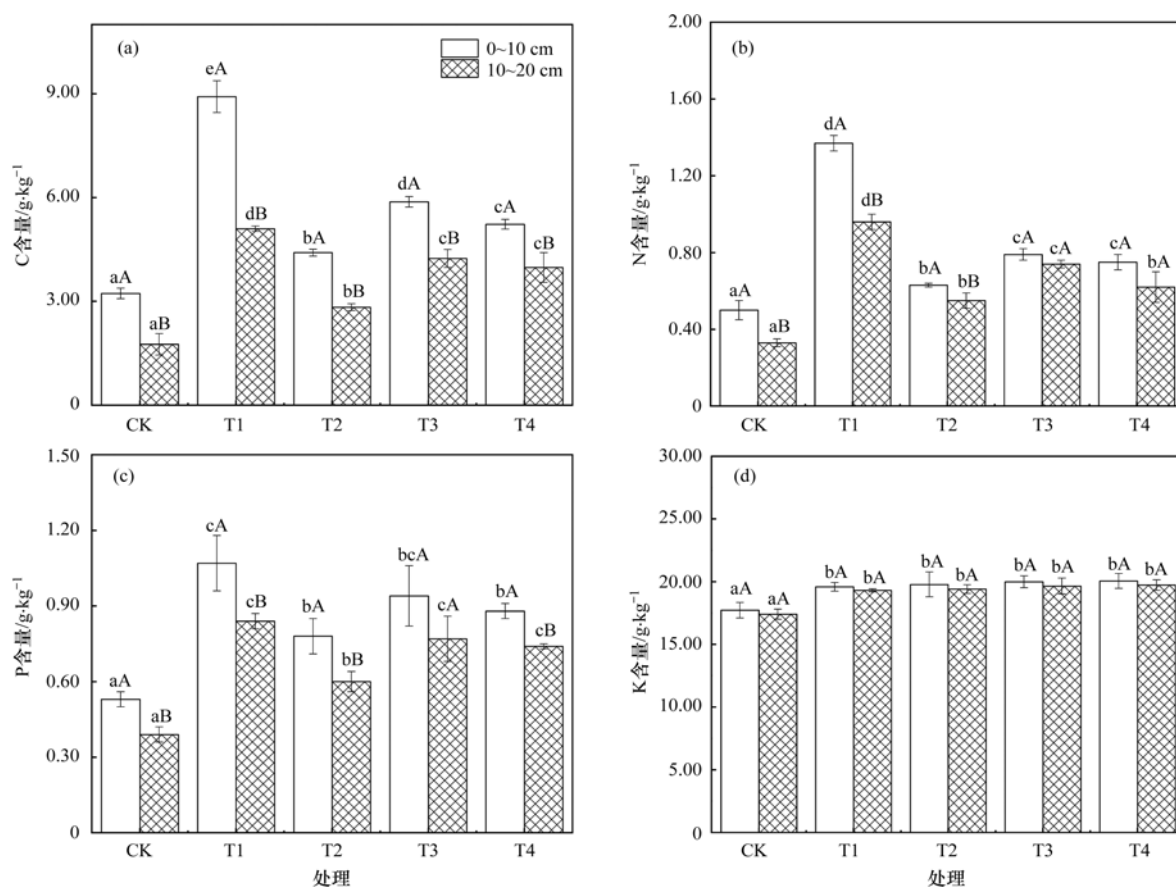
长期施肥和耕作下,各处理不同土层 C、N、P 和 K 含量如图 2 所示. 可以看出,除 T3 下 N 和 P 以及 T4 下 N 含量在不同土层(0~10 cm 和 10~20 cm)间差异不显著($P > 0.05$)以外,其他处理下 0~10 cm 土层的 C、N 和 P 含量显著高于 10~20 cm 土层($P < 0.05$). 相同处理下各土层 K 含量差异不

显著($P > 0.05$).

0~10 cm 土层中,各施肥处理间 C、N 和 P 含量差异显著($P < 0.05$),且均显著高于 CK($P < 0.05$);各施肥处理间 K 含量差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 CK($P < 0.05$). 与 CK 相比,T1、T2、T3 和 T4 处理下 C 含量分别增加了 176.05%、36.48%、82.06% 和 61.98%,N 含量增加了 173.07%、26.55%、57.22% 和 49.03%,P 含量增加了 102.40%、47.84%、76.83% 和 65.97%,K 含量增加了 10.56%、11.64%、12.81% 和 13.20%. 试验区 0~10 cm 土层 C、N 和 P 含量的 CV 值分别为 38.56%、41.32% 和 24.24%,为中等变异,K 含量 CV 值为 5.01%,为弱变异. 10~20 cm 土层中,各施肥处理间 C、N 和 P 含量差异显著($P < 0.05$),且均显著高于 CK($P < 0.05$);各施肥处理间 K 含量差异不显著($P > 0.05$),但显著高于 CK($P < 0.05$). 与 CK 相比,T1、T2、T3 和 T4 处理下 C 含量分别增加了 190.23%、60.84%、141.21% 和 126.55%,N 含量增加了 191.13%、22.61%、75.41% 和 39.13%,P 含量增加了 114.37%、54.67%、97.67% 和 90.98%,K 含量增加了 10.92%、11.47%、12.86% 和 13.34%. 试验区 10~20 cm 土层 C、N 和 P 含量的 CV 值分别为 36.44%、36.50% 和 26.45%,为中等变异,K 含量的 CV 值为 5.04%,为弱变异.

2.2 紫色土坡耕地土壤 C、N、P 和 K 的化学计量特征

长期施肥和耕作下,各处理不同土层土壤 C、N、P 和 K 化学计量比如图 3 所示. 可以看出,在各土层之间(0~10 cm 和 10~20 cm),CK 处理下 C:N、C:P、N:P 和 P:K 差异不显著($P > 0.05$),C:K 和 N:K 差异显著($P < 0.05$);T1 处理除了 N:P 和 P:K 差异不显著($P > 0.05$)外,其他化学计量比差异显著($P < 0.05$);T2 处理 C:N、C:K 和 N:K 差异显著($P < 0.05$),C:P、N:P 和 P:K 差异不显著($P > 0.05$);T3 处理除了 C:N 和 C:K 差异显著外($P < 0.05$),其他化学计量比差异都不显著($P > 0.05$);T4 处理仅 C:K 差异显著($P < 0.05$),其他化学计量比差异均不显著($P > 0.05$).



不同小写字母表示相同土层不同处理差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同处理不同土层差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图2 不同施肥和耕作下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量

Fig. 2 Soil C, N, P, and K contents under five different fertilization and tillage treatments in purple sloping cropland

0~10 cm 土层中,各施肥处理间除了 C:N 间差异不显著 ($P > 0.05$),其他化学计量比均差异显著 ($P < 0.05$).与 CK 相比,T2、T3 和 T4 处理下 C:N 分别增加了 6.38%、14.39% 和 7.49%,T1 处理降低了 0.25%;T1 和 T3 处理下 C:P 分别增加了 35.75% 和 3.46%,T2 和 T4 处理分别降低了 8.05% 和 3.06%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 C:K 分别增加了 150.66%、23.04%、62.15% 和 43.79%;T1 处理的 N:P 增加了 36.39%,T2、T3 和 T4 处理分别降低了 13.64%、9.95% 和 9.85%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 N:K 分别增加了 142.65%、11.60%、37.03% 和 29.35%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 P:K 分别增加了 81.19%、31.75%、55.22% 和 45.22%.C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 的变化范围分别 7.62~8.74、14.59~21.54、0.59~1.48、1.80~2.84、0.08~0.19 和 0.04~0.07,平均值分别为 8.07、16.76、0.92、2.09、0.11 和 0.05.C:N 的 CV 值为 5.73%,为弱变异,C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 的 CV 值分别为 16.44%、36.98%、20.52%、39.96% 和 21.34%,为中等变异。

10~20 cm 土层中,各施肥处理间 C:P 差异不显著 ($P > 0.05$),C:N、C:K、N:P、N:K 和 P:K 间差异

显著 ($P < 0.05$).与 CK 相比,T1、T3 和 T4 处理下 C:N 分别增加了 0.31%、7.86% 和 21.62%,T2 处理降低了 2.34%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 C:P 分别增加了 35.37%、4.25%、22.61% 和 18.70%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 C:K 分别增加了 160.35%、43.56%、112.49% 和 98.80%;T1、T2 和 T3 处理的 N:P 增加了 35.73%、7.62% 和 14.65%,T4 处理降低了 1.46%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 N:K 分别增加了 142.65%、11.60%、37.03% 和 29.35%;T1、T2、T3 和 T4 处理下 P:K 分别增加了 94.51%、39.61%、76.20% 和 69.68%.C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 的变化范围分别 6.05~7.54、11.66~15.78、0.33~0.86、1.84~2.54、0.05~0.14 和 0.03~0.05,平均值分别为 6.54、13.84、0.60、2.08、0.09 和 0.04.C:N、C:P 和 N:P 的 CV 值分别为 9.30%、12.31% 和 13.58%,为弱变异,C:K、N:K 和 P:K 的 CV 值分别为 34.25%、34.51% 和 23.44%,为中等变异。

2.3 长期施肥与耕作下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量与其化学计量比的相关性

由表 2 可以看出,土壤 C 与 N、N:K、P:K 呈极显著正相关 ($P < 0.01$).土壤 N 与 C:K 呈极显著正相关 ($P < 0.01$),与 C:P、P:K 呈显著正相关 ($P <$

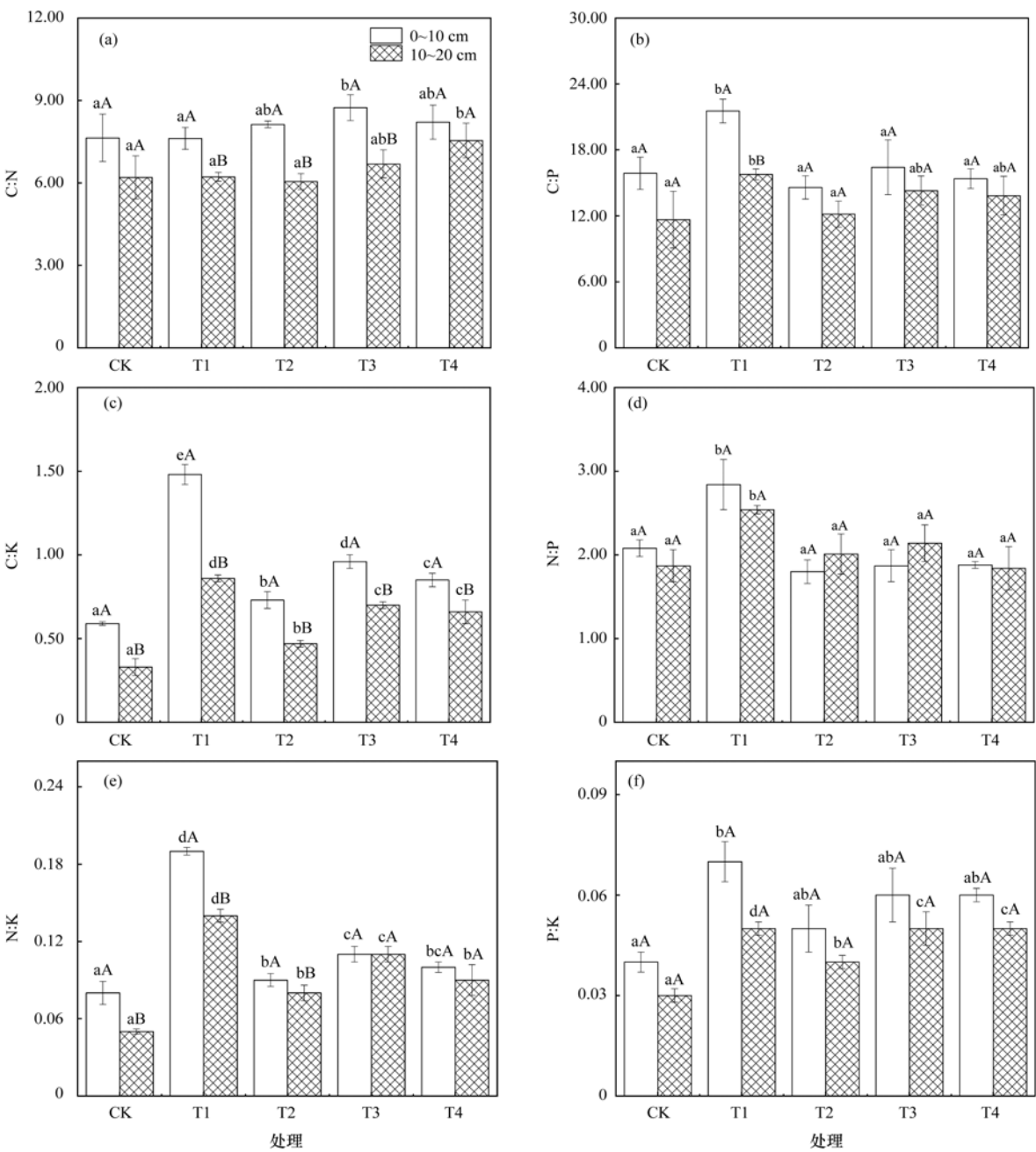


图3 不同施肥与耕作下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 化学计量特征

Fig. 3 Soil stoichiometric characteristics of five different fertilizer and tillage treatments in sloping cropland of purple soil

表2 紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量与化学计量比之间的相关性分析¹⁾

Table 2 Pearson correlation coefficients between C, N, P, and K contents and their stoichiometric ratios in purple sloping cropland

	C	N	P	K	C: N	C: P	C: K	N: P	N: K	P: K
C	1	0.983 **	0.835	0.635	—	—	—	0.796	0.976 **	0.974 **
N		1	0.747	0.532	—	0.957 *	0.990 **	—	—	0.938 *
P			1	0.913 *	0.600	—	0.797	—	0.700	—
K				1	0.632	0.311	—	0.068	—	—
C: N					1	0.632	0.311	0.581	0.068	0.453
C: P						1	-0.172	0.030	-0.499	-0.098
C: K							1	0.954 *	0.939 *	0.986 **
N: P								1	0.833	0.988 **
N: K									1	0.904 *
P: K										1

1) * 表示显著相关性($P < 0.05$) (双尾), ** 表示极显著相关性($P < 0.01$) (双尾), “—”表示存在自相关关系, 不进行相关分析

0.05). 土壤 P 与 K 呈显著正相关($P < 0.05$). C:K 与 N:P、N:K 呈显著正相关($P < 0.05$), 与 P:K 呈极显著正相关($P < 0.01$). N:P 与 P:K 呈极显著正相关($P < 0.01$). N:K 与 P:K 呈显著正相关($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 长期施肥和耕作对紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量的影响

本研究结果表明,长期施肥有利于提高土壤的 C、N、P 和 K 含量,这主要是因为施肥增加了土壤外源养分输入^[24]. 与顺坡耕作相比,横坡耕作对 C、N 和 P 提高的效果更好,这可能是因为横坡耕作改变了地形条件,减少了水土流失带走的 C、N 和 P 含量,因而使横坡耕作中土壤 C、N 和 P 流失较少. 该结果与张怡等^[25]和付斌等^[26]的研究结论一致. 复合施用有机肥和化肥处理的 C、N 和 P 含量显著大于单施化肥处理,这是因为外源有机肥可以更加直接增加土壤的 N 和 P 含量,且有机肥中的有机物也有助于增加土壤 C 含量;此外,长期单施化肥可能会使土壤供氮不具有渐进性和持续性,尽管化肥施用提高了作物产量,但在无外源有机氮补充的情况下,其也可能加速作物对土壤 N 的消耗^[27~29]. 顺坡单施化肥增量处理与顺坡单施化肥处理相比,土壤 C 和 N 含量相对更丰富,这是因为增施化肥不仅增加了外源 N 输入,同时也促进了土壤中有有机物的分解,从而增加 C 含量^[6]. 尽管施肥处理下 K 含量均显著高于对照处理,但各施肥处理间 K 含量变异较弱. 这主要是因为一方面,紫色土母岩的钾素风化释放作用突出,土壤中 K 含量变化不大;另一方面,施肥中钾主要以离子态的形式进入土壤,虽可增加速效钾的含量,但使总钾含量相差不大^[30~32].

在本试验中,紫色土坡耕地土壤 C、N 和 P 含量随着土层的加深而显著降低,而 K 含量变化相对稳定,这可能是因为施肥和耕作活动直接作用于 0~10 cm 土层,加之外界环境因素(水、热等)及小麦、玉米植株残留物的影响,养分首先在土壤上层聚集,其后则随水分进行垂直迁移至下层,因此使不同土层间 C、N 和 P 含量差异较大,而 K 受母岩风化及施肥双重影响,各土层间含量差异不显著^[6, 33].

3.2 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 化学计量特征及养分限制

土壤中的 C:N 比是影响土壤中碳氮循环的重要因素^[8]. 本研究中的 C:N(平均值为 8.07),低于黄泥田的 C:N(平均值为 10.83)^[29],黑土区的 C:N

(平均值为 13.39)^[34],以及西南黄壤的 C:N(平均值为 16.96)^[35],同时,低于中国土壤的 C:N 平均值(11.9)^[11],且比全球 C:N 平均水平(14.3)^[36]低 43.57%. 一般地,较低 C:N 的土壤,其有机质分解速率快. 本研究结果表明相比于其他类型土壤,紫色土坡耕地土壤有机质的矿化作用速率相对较快^[6]. 此外,顺坡单施化肥处理的 C:N 高于顺坡复合施用有机肥和化肥处理,这可能是因为一方面,在单施化肥与复合施用有机肥和化肥条件下, C 和 N 含量均有所增加,但增加比例不一致;另一方面可能是因为施用化肥处理的作物产量大于复合施用有机肥和化肥处理,作物产量的提高加快作物对 N 素的消耗,降低了土壤的 N 素含量,使得土壤 C:N 较高. 本研究中土壤的 C:N 属于弱变异,相对稳定,可能与有机物质中含有一定数量的氮和其他营养成分与其相应的相对固定的比率的碳有关^[37],这与朱秋莲等^[6]和王传杰等^[34]的研究结果一致. 横坡耕作下各元素化学计量比均大于顺坡耕作,表明横坡耕作虽增加了土壤的 C、N、P 和 K 含量,但各元素的增加幅度不成比例. 本研究中 0~10 cm 土层的 C:N 值大于 10~20 cm 土层,这可能是因为农作物植株残留物以及施肥多集中在表土层,因此土壤养分随着土壤深度的增加而递减,该结果与朱秋莲等^[6]的研究结果相似.

土壤 C:P 比是衡量土壤有机质矿化释放磷或吸收固持磷潜力的重要指标^[38]. 本研究中 C:P 的平均值为 16.76, 低于黄泥田 C:P 平均值(116.74)^[29]、黑土 C:P 平均值(64.64)^[34]、黄壤 C:P 平均值(40.79)^[35],且远低于中国陆地(136)^[11]以及全球(186)^[36]的土壤 C:P 值. 本试验区 C:P 低的原因可能是一方面紫色土坡耕地中的微生物在有机质矿化分解过程中能更多地释放 P, 增加土壤有效磷的含量^[39],另一方面可能是作物对 C 和 P 吸收比例不一致以及水土流失引起 C 和 P 元素不成比例地流失,从而影响到土壤的 C:P 值. 本研究中,复合施用有机肥和化肥能显著提高紫色土坡耕地的 C:P, 可能是因为有机肥的投入直接增加了土壤 C 含量,这与孙立青^[40]的研究结果一致. 而 0~10 cm 土层的 C:P 高于 10~20 cm 土层,这可能与试验区小麦、玉米的残留物积累在表层,分解释放更多的 C 有关^[41].

N:P 常用于土壤养分限制因子的诊断和养分限制阈值的确定^[38]. 本研究中紫色土坡耕地土壤 N:P 平均值为 2.09, 分别比黄泥田、黑土和黄壤平均值低 80.17%^[29]、58.77%^[34]和 17.06%^[35],且比中国土壤平均水平(9.3)低 77.53%^[11],比世界土壤

平均水平(13.1)低84.05%^[36],这可能是紫色土磷背景值较高,而氮素较为缺乏的缘故^[42].施肥处理中仅顺坡复合施用有机肥和化肥处理的土壤N:P显著高于对照处理,这表明相比于单施化肥处理,复合施用有机肥和化肥可以有效补充土壤有机氮源,促进微生物分解,从而增加土壤中N素的积累^[34].而顺坡单施化肥及增施处理下0~10 cm土层N:P低于10~20 cm土层,这与朱秋莲^[6]的结果有差异,一方面可能是因为上层N以溶解态形式存在而更易发生流失和淋失,而P则多附着于泥沙而流失,因此N损失强度相对更高;另一方面可能是因为这两种施肥处理下,小麦、玉米生长相对旺盛,加速了上层土壤的N、P元素的消耗,且两种养分消耗比例不一致,从而导致上层土壤的N:P低于下层.

不同处理间C:K和N:K差异显著,这是因为试验区土壤中K含量相对稳定,C:K和N:K主要受土壤C或者N含量的影响,因而呈现较大的差异性.本研究中,土壤C与N、P与K、C与N:K、P:K、N与C:P、C:K、P:K以及P与K均呈显著正相关.有研究表明,阐明土壤养分元素之间的耦合关系有助于揭示土壤生态系统中养分元素动态变化特征^[12,13].朱秋莲等^[6]的研究发现在黄土丘陵沟壑区不同植被土壤中,C与N、P、N:P及N:K呈显著正相关,N与C:P、C:K呈显著正相关,且P与C:K、N:K呈显著正相关.陶冶等^[43]的研究表明在伊犁河谷野果林浅层土壤中,C和N之间呈幂函数关系,C、N、P和K与其化学计量比之间则呈二次函数关系.可以看出,在不同类型生态系统中,土壤C、N、P和K与其化学计量比间的耦合关系显著不同,这可能与自然环境(土壤类型、植被类型等)及人为扰动(施肥、耕作等)不同有关,后期还需要更多数据来阐明不同养分及其化学计量比间的耦合特征及影响因素^[43].

4 结论

长期施肥和耕作显著影响了紫色土坡耕地土壤C、N、P和K含量、化学计量比及其耦合关系.施肥可以显著增加紫色土坡耕地土壤C、N、P和K含量,其中有机无机肥配施对提高土壤C、N和P含量的效果最好;横坡耕作比顺坡耕作更有利于土壤C、N、P和K含量的积累.土壤C:N、C:P、C:K、N:K和P:K在不同施肥和耕作间均表现出显著差异.试验区土壤C、N和P含量及C:K、N:P、N:K和P:K属中等变异,K含量及C:N和C:P属弱变异;土壤C与N、P与K、C与N:K、P:K以及N与C:P、C:K、P:K均呈显著正相关.试验区土壤N:P

平均值为2.09,远均低于中国(9.3)及世界(13.1)土壤平均水平.本研究结果表明紫色土坡耕地土壤氮素为养分限制因子,但复合施用有机肥和化肥可以有效缓解土壤N素缺乏的状况.

参考文献:

- [1] 刘蓉, 张卫国, 江小雷, 等. 垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J]. 草业科学, 2010, 27(10): 96-103.
Liu R, Zhang W G, Jiang X L, et al. Study on the characteristics of degradation succession of *Elymus nutans* community and its correlation to soil properties[J]. Pratacultural Science, 2010, 27(10): 96-103.
- [2] Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K M, Mooshammer M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. Ecological Monographs, 2015, 85(2): 133-155.
- [3] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [4] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266.
- [5] 樊兰英. 生态化学计量学的基本理论及应用领域[J]. 山西林业科技, 2016, 45(1): 37-39, 47.
Fang L Y. Basic theory of ecological stoichiometry and its applications[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2016, 45(1): 37-39, 47.
- [6] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly-gully region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [7] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6.
- [8] 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.
- [9] 王宝荣, 杨佳佳, 安韶山, 等. 黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物量生态化学计量特征的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(1): 247-259.
Wang B R, Yang J J, An S S, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(1): 247-259.
- [10] 王凡坤, 薛珂, 付为国. 土壤氮磷状况对小麦叶片养分生态化学计量特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(1): 60-71.
Wang F K, Xue K, Fu W G. Effects of soil nitrogen and phosphorus contents on ecological stoichiometry of wheat leaf[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 60-71.
- [11] 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.
- [12] 王维奇, 全川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 238-242.
- Wang W Q, Tong C, Jia R X, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, **24**(3): 238-242.
- [13] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 等. 不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2014, **37**(5): 996-1004.
- Li C J, Xu X W, Sun Y Q, *et al.* Stoichiometric characteristics of C, N, P for three desert plants leaf and soil at different habitats[J]. Arid Land Geography, 2014, **37**(5): 996-1004.
- [14] Li T Y, Wang C Y, He B H, *et al.* Soil nutrient concentrations and stoichiometry under different tree-cropping systems in a purple hillslope in southwestern China[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, **65**(6): 741-754.
- [15] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇)[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [16] 郑海金, 杨洁, 汤崇军, 等. 不同水土保持耕作措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J]. 水土保持通报, 2011, **31**(6): 1-4, 10.
- Zheng H J, Yang J, Tang C J, *et al.* Impacts of different soil and water conservation tillage measures on runoff, sediment and soil carbon stock[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, **31**(6): 1-4, 10.
- [17] 邱野, 王瑄, 李德利, 等. 不同耕作模式下坡耕地次降雨径流量及径流泥沙颗粒机械组成规律[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 62-65.
- Qiu Y, Wang X, Li D L, *et al.* Slope cultivated land rainfall runoff and sediment mechanical composition in different tillage patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, **26**(2): 62-65.
- [18] 林超文, 罗春燕, 庞良玉, 等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- Lin C W, Luo C Y, Pang L Y, *et al.* Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(22): 6091-6101.
- [19] 汪涛, 朱波, 武永锋, 等. 不同施肥制度下紫色土坡耕地氮素流失特征[J]. 水土保持学报, 2005, **19**(5): 65-68.
- Wang T, Zhu B, Wu Y F, *et al.* Nitrogen loss from slope cropland of purple soil under different fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, **19**(5): 65-68.
- [20] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [21] 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.
- [22] 和丽萍, 王玉杰, 方向京, 等. 昆阳磷矿植被恢复地土壤肥力状况分析及评价[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(12): 1492-1498.
- He L P, Wang Y J, Fang X J, *et al.* Analysis and comprehensive evaluation of soil fertility status for vegetation restoration area of Kunyang phosphorite mine[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(12): 1492-1498.
- [23] 李天阳, 何丙辉, 张怡, 等. 重庆山地血橙园不同模式土壤水分物理性状[J]. 水土保持研究, 2014, **21**(2): 33-38.
- Li T Y, He B H, Zhang Y, *et al.* Research on soil moisture properties under different types of blood orange garden in hilly area of Chongqing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, **21**(2): 33-38.
- [24] 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.
- [25] 张怡, 何丙辉, 王仁新, 等. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(2): 192-198.
- Zhang Y, He B H, Wang R X, *et al.* Effects of across-and along-slope ploughs on soil aggregate stability [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(2): 192-198.
- [26] 付斌, 胡万里, 屈明, 等. 不同农作措施对云南红壤坡耕地径流调控研究[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(1): 17-20.
- Fu B, Hu W L, Qu M, *et al.* Research on runoff regulation under different farming measures from red soil slope field in yunnan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, **23**(1): 17-20.
- [27] 马力, 杨林章, 颜廷梅, 等. 长期施肥水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47**(2): 286-294.
- Ma L, Yang L Z, Yan T M, *et al.* Profile distribution and mineralization characteristics of nitrogen in relation to temperature in paddy soil under long-term fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, **47**(2): 286-294.
- [28] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响[J]. 中国农业科学, 2004, **37**(1): 87-91.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, **37**(1): 87-91.
- [29] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 长期不同施肥下黄泥田土壤-水稻碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 土壤通报, 2017, **48**(1): 169-176.
- Wang F, Lin C, Li Q H, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in soil and plant under long-term different fertilizations in a yellow paddy field[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, **48**(1): 169-176.
- [30] 徐波, 朱雪梅, 刘倩, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式下土壤养分特征研究——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站小流域为例[J]. 西南农业学报, 2011, **24**(2): 663-668.
- Xu B, Zhu X M, Liu Q, *et al.* Study on nutrient characteristics of soils under different land utilization types in hilly area of central Sichuan basin—a case study in the small river valley of Yanting purple soil agricultural ecosystem experiment station[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2011, **24**(2): 663-668.
- [31] 汪涛, 朱波, 高美荣. 紫色土丘陵区小流域不同土地利用方式下土壤养分含量特征——典型农林复合生态系统案例分析[J]. 山地学报, 2006, **24**(S1): 88-91.
- Wang T, Zhu B, Gao M R. Nutrient content in different land use types in a watershed in the soil of central hilly area of Sichuan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2006, **24**(S10): 88-91.

- [32] 李天阳, 何丙辉, 田家乐, 等. 重庆市山地血橙园不同种植模式土壤理化性质关联分析[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(11): 1395-1402.
- Li T Y, He B H, Tian J L, *et al.* Correlation analysis of soil physical and chemical properties under different planting patterns of blood orange garden in hilly areas of Chongqing City[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(11): 1395-1402.
- [33] 魏孝荣, 邵明安. 黄土高原沟壑区小流域坡地土壤养分分布特征[J]. 生态学报, 2007, **27**(2): 603-612.
- Wei X R, Shao M A. The distribution of soil nutrients on sloping land in the gully region watershed of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(2): 603-612.
- [34] 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.
- [35] 张雅蓉, 李渝, 刘彦伶, 等. 长期施肥对西南黄壤碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 土壤通报, 2016, **47**(3): 673-680.
- Zhang Y R, Li Y, Liu Y L, *et al.* Effect of long-term fertilization on ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in southwest yellow soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(3): 673-680.
- [36] 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.
- [37] Sterner R W, Elser J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [38] 程欢, 宫溯波, 吴强, 等. 川西亚高山/高山典型土壤类型有机碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(1): 161-172.
- Cheng H, Gong Y B, Wu Q, *et al.* Content and ecological stoichiometry characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus of typical soils in sub-alpine/alpine mountain of Western Sichuan[J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(1): 161-172.
- [39] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, **51**(7): 1-8.
- Cao J, Yan W D, Xiang W H, *et al.* Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, **51**(7): 1-8.
- [40] 孙立青. 中国农田土壤碳氮磷化学计量特征的研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- Sun L Q. The study of farmland soil C: N: P stoichiometry characteristics in China [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [41] 张海东, 汝海丽, 焦峰, 等. 黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1128-1138.
- Zhang H D, Ru H L, Jiao F, *et al.* C, N, P, K stoichiometric characteristic of leaves, root and soil in different abandoned years in Loess Plateau[J]. Environmental Science, 2016, **37**(3): 1128-1138.
- [42] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近30年川中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮磷生态化学计量特征变化[J]. 土壤, 2016, **48**(4): 726-733.
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Last 30a changes of C, N and P ecological stoichiometry of different land use types in hilly area of mid-Sichuan basin, Southwest China[J]. Soils, 2016, **48**(4): 726-733.
- [43] 陶冶, 张元明, 周晓兵. 伊犁野果林浅层土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(7): 2239-2248.
- Tao Y, Zhang Y M, Zhou X B. Ecological stoichiometry of surface soil nutrient and its influencing factors in the wild fruit forest in Yili region, Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, **27**(7): 2239-2248.

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 Wanshangang 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)