

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘旻霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评价	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评价及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评价	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响

张高宁, 徐绮雯, 何丙辉*, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为探究长期平衡施肥和秸秆覆盖对紫色土坡耕地土壤养分及其化学计量比的影响,以垫江县长期农田氮磷流失监测点为研究样地,设置3个处理:常规模式(CK)、平衡施肥模式(M1)和平衡施肥+秸秆覆盖模式(M2),每个处理各设3个重复,共建立9个小区(长7 m×宽3 m),并于2018、2019和2020年采集土样,研究不同处理下碳(C)、氮(N)、磷(P)和钾(K)含量及其化学计量变化特征。结果表明,2018年不同处理之间K含量差异显著,大小顺序为:CK>M2>M1;2019年不同处理之间硝态氮(NO_3^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)含量差异显著,表现为:M1>M2>CK;其他养分含量在同一年份不同处理之间差异均不显著。不同年份间各处理的土壤C和N含量差异不显著。2018年各处理中K含量均显著高于其他年份,其中,2018年的CK、M1和M2分别比2019年和2020年高78.26%和98.79%,19.13%和35.4%,54.49%和41.76%。P含量在CK和M2处理中均随着年份增大而减小,且2018年分别比2019年高20.29%和10.67%,比2020年高39.68%和17.33%。各处理不同年份间速效钾(AK)含量无显著差异,而 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N和速效磷(AP)含量差异显著,且均在2020年最高。土壤C:P、C:K、N:P、N:K和P:K在不同年份间都表现出显著差异($P<0.05$)。土壤C:K、N:K和AN:AP分别于2018年和2019年在不同施肥模式间差异显著($P<0.05$)。土壤C与N及P与K之间呈显著的线性正相关;土壤C:K与C:P、N:K、N:P和P:K之间,N:K与C:P、P:K和N:P之间,N:P与C:P之间都呈显著的线性正相关;土壤P与C:K和N:K之间呈显著的线性负相关。土壤 NO_3^- -N与 NH_4^+ -N、AN:AP和AN:AK之间, NH_4^+ -N与AN:AP和AN:AK之间,AP与AK和AP:AK之间,AN:AP与AN:AK之间都呈极显著正相关。研究发现平衡施肥+秸秆覆盖是紫色土坡耕地较为适宜的管理模式。

关键词: 秸秆覆盖; 长期施肥; 配施有机肥; 养分含量; 氮素盈余

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5135-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202209028

Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope

ZHANG Gao-ning, XU Qi-wen, HE Bing-hui*, LI Tian-yang, FENG Meng-die, LIANG Ke

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: To explore the effects of long-term balanced fertilization and straw mulching on soil nutrients and stoichiometric ratios in purple soil sloping cropland, nine plots (length 7 m×width 3 m) were established in Dianjiang County as the research sample area of long-term farmland nitrogen and phosphorus loss monitoring. The following three treatments were set up: conventional mode (CK), balanced fertilization mode (M1), and balanced fertilization + straw mulching mode (M2), with three replications for each treatment to compare the contents of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) and their stoichiometric changes under different treatments from 2018 to 2020. The results showed: K contents showed significant differences among the three treatments in 2018, in the order of CK>M2>M1. NO_3^- -N and NH_4^+ -N contents showed significant differences among the three treatments in 2019, both in the order of M1>M2>CK. Other nutrient contents showed no significant difference among different treatments each year. Soil C and N contents showed non-significant differences among different years. The total K contents of CK, M1, and M2 in 2018 were significantly higher than that in other years and were 78.26% and 98.79%, 19.13% and 35.4%, and 54.49% and 41.76% higher than that in 2019 and 2020, respectively. The total P content in the CK and M2 treatments decreased with years, and that of CK and M2 in 2018 was 20.29% and 10.67% and 39.68% and 17.33% higher than that in 2019 and 2020, respectively. The available potassium (AK) content of the three treatments showed non-significant differences among different years, whereas the contents of nitrate nitrogen (NO_3^- -N), ammonium nitrogen (NH_4^+ -N), and available phosphorus (AP) showed significant differences among the different treatments, with all being the highest in 2020. Soil C:P, C:K, N:P, N:K, and P:K ratios of each treatment showed significant differences among different years ($P<0.05$). Soil C:K, N:K, and AN:AP ratios all showed significant differences among different fertilization modes in 2018 and 2019, respectively ($P<0.05$). There was a significantly linearly positive relationship between soil C and N concentration and soil P and K concentration. There were very significant linear positive correlations between soil C:K and C:P, N:K, N:P, and P:K; N:K with C:P, P:K, and N:P; and N:P with C:P, N:P, and C:P. Soil P concentration was highly significantly linearly negatively correlated with C:K and N:K ratios. There were significant positive correlations between soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N, AN:AP, and AN:AK; NH_4^+ -N, AN:AP, and AN:AK; and AN:AP and AN:AK. The results suggested that balanced fertilization and straw mulching was a more suitable management mode for purple soil sloping cropland.

Key words: straw mulching; long-term fertilization; combined application of organic fertilizer; nutrient content; nitrogen surplus

收稿日期: 2022-09-04; 修订日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 农田氮磷流失及农田地膜残留污染监测评价项目(120A0701); 中央高校基本科研业务费专项(SWU-KT22060); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202100212)

作者简介: 张高宁(1999~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤侵蚀过程和农业面源污染,E-mail:zgn19990526@126.com

* 通信作者,E-mail:hebinghui@swu.edu.cn

长期以来,我国粗放的农业生产方式以及以增产增收为目标的农耕趋势,促使氮磷施用过量与钾肥施用不足等现象普遍发生^[1,2],导致土壤质量恶化与生态环境污染等问题.农业增收与绿色发展已成为农业生产中的主要矛盾之一,寻求优质增产和改良环境的施肥模式迫在眉睫.秸秆覆盖还田作为一种重要的保护性农业措施,可有效改良土壤质量,减少地表蒸发,增加土壤孔隙度和入渗能力.目前,已有大量学者探究了施肥与秸秆覆盖模式下的土壤养分特征.聂云等^[3]研究发现,秸秆还田伴随氮、磷化肥减量能够减少黄壤中过多的氮磷盈余,减少环境污染;张鑫尧等^[4]研究表明只减施磷肥 20% (P_2O_5 : $72\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)能够有效实现巢湖流域稻麦轮作体系的磷肥减量增效和作物优质生产;贾良良等^[5]研究发现增施钾肥和秸秆还田能够促进土壤中钾肥力的提高.氮(N)、磷(P)和钾(K)平衡施用在农业生产上可以实现增产、提质、节肥、增收和平衡土壤养分等显著效果.但目前对于施肥配施秸秆模式的研究主要集中于对 N、P、K 单种肥料配施模式效益的对比,而 N、P 和 K 这 3 种肥料综合调整施用与平衡配施对于土壤养分整体效益的研究相对较少.

生态化学计量学是探究生态系统内多重化学元素的平衡关系,判断限制性元素和生态系统稳定性的重要方法^[6-8].土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是植物生长的主要物质来源,且直接影响植物的生命活动,其中 C、N、P 和 K 不仅是土壤的重要养分元素,更是维持植物生长的基础元素^[9,10].土壤生态化学计量比是判断土壤质量状况及养分供给能力的重要指标,由于生态系统中土壤养分之间存在相互耦合,仅仅探究土壤养分含量是不够全面的,深入研究土壤养分及其化学计量特征可以进一步反映土壤 C、N、P 和 K 的矿化和固持作用,全面理解土壤养分供应,阐明土壤养分之间的耦合关系和平衡

机制^[11,12].

因此,本文基于平衡施肥和秸秆覆盖下的紫色土坡耕地的长期定位试验点,对比不同施肥模式下土壤 C、N、P 和 K 及其化学计量比变化特征,探究平衡施肥及秸秆覆盖对土壤养分的内在机制,以期作为紫色土坡耕地改良、肥料高效利用和实现农业增产增收提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于重庆市垫江县(E $107^{\circ}24'$ 、N $30^{\circ}24'$)农田氮磷流失监测点,属亚热带湿润季风气候,年平均气温 17.1°C ,无霜期 329 d,平均降水量 $1\,104.8\text{ mm}$ (图 1),年日照时数为 $973.1\sim1\,251.6\text{ h}$.试验区主要土壤类型为紫色土,主要种植禾本类、薯类和豆类,农作物有稻谷、小麦、玉米、高粱、甘薯和马铃薯等.

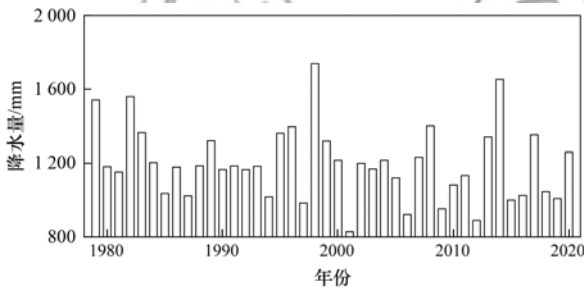


图 1 研究区 1978~2020 年降水量
Fig. 1 Precipitation in the study area from 1978 to 2020

1.2 试验设计

长期定位试验开始于 2010 年,试验在坡度为 15° 的紫色土坡面上,建立 9 个小区,规格为 21 m^2 (长 $7\text{ m}\times$ 宽 3 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 $5\sim8\text{ cm}$,垄宽 $40\sim50\text{ cm}$,垄距 40 cm .各小区均采用当地典型种植模式,为马铃薯-玉米-甘薯轮作,移栽、播种和收获日期见表 1.

表 1 各作物播种和移栽日期¹⁾
Table 1 Date of sowing and transplanting of each crop

种植作物	种植季度	品种	播种日期	移栽日期	收获日期
马铃薯	1	渝万薯 3 号	1 月下旬	—	5 月上旬
玉米	2	金穗 33	—	3 月下旬	8 月上旬
甘薯	3	渝薯 4 号	—	5 月下旬	10 月下旬

1) “—”表明没有进行播种或者移栽

本试验共设置 3 个处理:常规施肥模式(CK)、平衡施肥模式(M1)和平衡施肥+秸秆覆盖模式(M2).CK 处理依据当地常规施肥方式和施肥量,M1 处理相比常规模式减少氮、磷施肥量,增施钾肥,M2 处理相比常规模式在减少氮、磷施肥量,增

施钾肥的同时,每次作物收获后,将马铃薯藤和甘薯藤覆盖还田、玉米秸秆粉碎覆盖还田.试验执行期间每年施肥量保持一致,每个处理设置 3 个重复. N、P、K 肥分别采用尿素、过磷酸钙和硫酸钾. 尿素含 $\text{N}\geq 46.4\%$,过磷酸钾含 $\text{P}_2\text{O}_5\geq 12\%$,硫酸钾含

$K_2O \geq 51\%$ ，有机肥为农家肥（人畜粪），含 N 0.019% 和 P_2O_5 0.015%，具体施肥量见表 2。

表 2 各处理施肥量¹⁾

试验设计	施肥方式	是否秸秆覆盖	是否配施有机肥	施肥投入量/ $kg \cdot hm^{-2}$		
				N	P_2O_5	K_2O
CK	穴施	否	是	29.44	12.90	5.10
M1	穴施	否	是	25.03	9.24	13.26
M2	穴施	是	是	13.18	8.52	13.26

1) CK 为常规施肥模式, M1 为平衡施肥模式, M2 为平衡施肥 + 秸秆覆盖模式

1.3 土壤样品采集及分析

于 2018 ~ 2020 年每年九月中旬甘薯收获后采集土样. 采用梅花 5 点采样法, 在各小区分别选取 5 个样点, 共计 45 个样点 (3 个处理 $\times$ 3 个重复 $\times$ 5 个样点). 采用直径 5 cm 不锈钢土钻在每个点采集 0 ~ 20 cm 土层的土样, 将同一小区不同点位的土壤混合均匀, 用四分法剔除多余土壤后, 装入自封袋, 带回实验室. 自然条件风干后, 过筛, 装入自封袋保存. 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机 C, 半微量凯氏蒸馏法测定土壤全 N, 钼蓝比色法测定土壤全 P 和 AP, 火焰光度法测定土壤全 K 和 AK, 酚二磺酸比色法测定土壤 NO_3^- -N, 氯化钾浸提-靛酚蓝比色法测定土壤 NH_4^+ -N^[13].

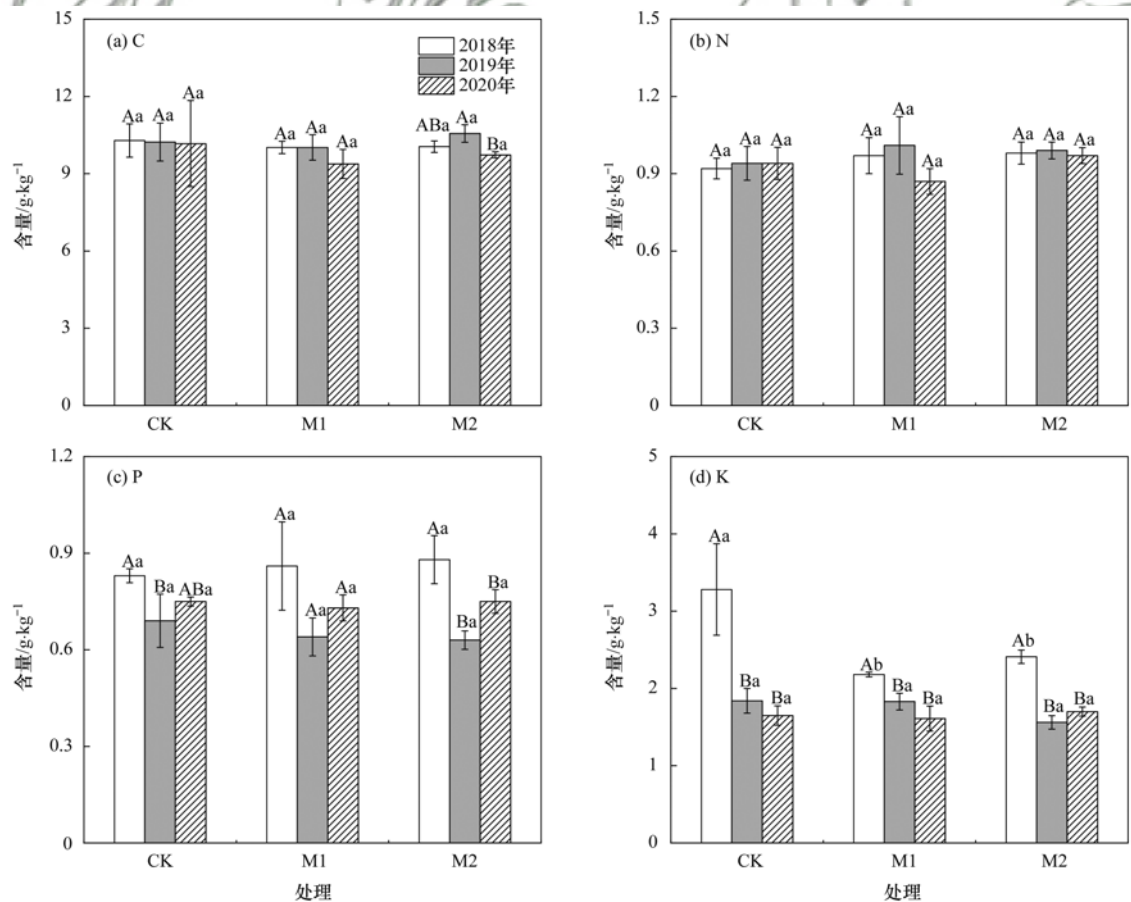
1.4 数据处理

采用摩尔质量比计算土壤 C、N、P、K、AP、AK、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的化学计量比. 采用 SPSS 25.0 对数据进行单因素方差分析和 Duncan 法进行多重比较; 相关性分析取各处理 2018 ~ 2020 年的平均值计算; 采用 Pearson 相关分析探究 C、N、P 和 K 含量和化学计量比之间的关系, Origin 2016 进行线性方程拟合; 采用 OriginPro 2016 绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤 C、N、P 和 K 含量变化

长期不同施肥模式下 C、N、P 和 K 的含量如图 2 所示. 不同施肥模式下仅 2018 年 K 含量差异显著



不同大写字母表示同一处理下,不同年份的 C、N、P 和 K 含量的差异性显著,
不同小写字母表示同一年份下,不同处理的 C、N、P 和 K 含量的差异性显著,下同

图 2 平衡施肥和秸秆覆盖下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量

Fig. 2 Contents of C, N, P, and K in purple soil slope under balanced fertilization and straw mulching

($P < 0.05$), 表现为: $CK > M2 > M1$, C、N 和 P 的含量变化相对稳定. 而不同年份间土壤养分含量则呈现不同规律. 在 CK 处理中, P 和 K 含量在各年份差异显著($P < 0.05$), P 含量表现为: 2018 年 $>$ 2020 年 $>$ 2019 年, 2018 年分别比 2020 年和 2019 年高 10.67% 和 20.29%, K 含量也于 2018 年达最大值, 分别比 2019 年和 2020 年显著提升了 78.26% 和 98.79%, 而 C 和 N 含量差异不显著($P > 0.05$); M1 处理中, 不同年份间 C、N 和 P 含量差异不显著($P > 0.05$), 仅 K 含量显著差异($P < 0.05$), 且 2018 年显著高于 2019 年和 2020 年 19.13% 和 35.40%; M2 处理中, 各年份 C、P 和 K 含量差异显著($P < 0.05$), 仅 N 含量无差异显著($P > 0.05$). 2019 年 C 含量比 2018 年和 2020 年分别高出 5.07% 和 8.53%; 2018 年 P、K 含量较 2019 年和 2020 年分

别高出 39.68% 和 17.33%, 54.49% 和 41.76%.

长期不同施肥模式下, 2018 ~ 2020 年间速效养分的含量如图 3 所示. 仅 2019 年 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量在不同管理模式差异显著($P < 0.05$), 表现为: $M1 > M2 > CK$, 其他速效养分的含量差异均不显著($P > 0.05$). 但各处理下不同年份间呈现不同规律: CK 处理中, 各年份 AP 和 NH_4^+ -N 的含量差异显著($P < 0.05$), 其中 2019 年和 2020 年 AP 含量显著高出 2018 年 85.97% 和 87.80%, 而 2020 年 NH_4^+ -N 含量显著高出 2018 年和 2019 年 69.20% 和 201.85%, NO_3^- -N 和 AK 含量不同年份间差异不显著($P > 0.05$); M1 与 M2 处理中, 仅 NH_4^+ -N 含量在不同年份间显著差异($P < 0.05$), 且均在 2020 年达最大值, 2020 年 M1 处理, M2 处理的 NH_4^+ -N 含量显著高出 2018 年 115% 和 112%, 高出 2019 年 105% 和 168%.

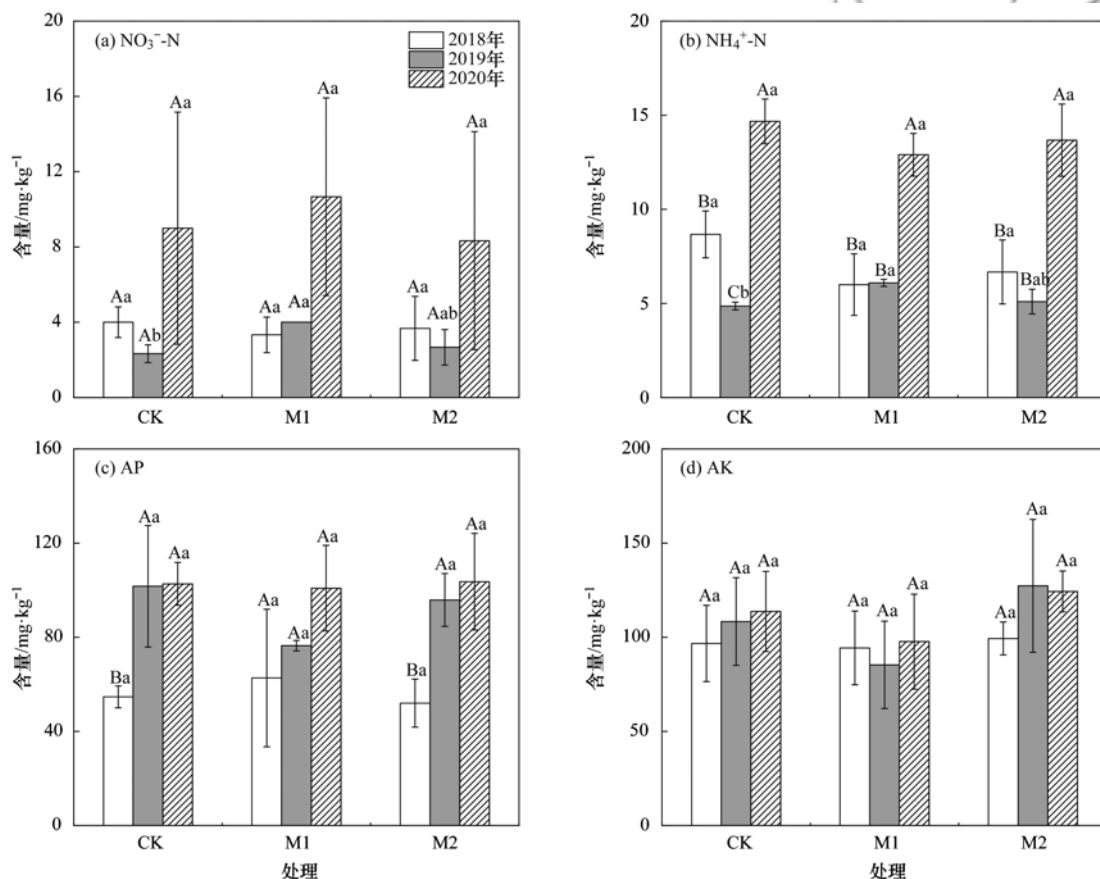


图 3 平衡施肥和秸秆覆盖下紫色土坡耕地速效养分含量

Fig. 3 Contents of available nutrients in purple soil slope under balanced fertilization and straw mulching

2.2 土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征

长期不同施肥模式下, 2018 ~ 2020 年 C、N、P 和 K 化学计量比如图 4 所示. 与土壤养分含量规律相似, 土壤 C、N、P 和 K 化学计量特征仅于 2018 年在不同施肥模式间有显著差异, 其中 C:K 和 N:K 差异显著($P < 0.05$), 但 C:N、C:P、N:P 和 P:K 差异不显著($P > 0.05$). 各年份之间不同处理下呈现

不同的差异规律. CK 处理中, C:K、N:P、N:K 和 P:K 差异显著($P < 0.05$), 而 C:N 和 C:P 差异不显著($P > 0.05$), 其中, N:P 呈现出 2019 年 $>$ 2020 年 $>$ 2018 年的规律, 2019 年高出 2020 年和 2018 年 8.66% 和 21.86%; C:K、N:K 和 P:K 均呈现出 2020 年 $>$ 2019 年 $>$ 2018 年的规律, 2020 年相比 2019 年和 2018 年分别增加 12.11% 和 95.98%,

11.89%和97.53%, 23.4%和75.76%; M1处理中, 仅C:K差异显著($P < 0.05$), 2020年分别比2019年和2018年高27.8%和6.41%; M2处理中, 各年份间除C:N和P:K外, 其他化学计量比均差异显著($P < 0.05$), 其中, C:P、C:K、N:P、N:K均在2019

年达到最大值, 与2018年和2020年相比分别高出45.3%和27.85%、62.01%和18.61%、38.55%和20.21%、55.26%和12.03%。2018~2020年各处理C:N、C:P、C:K、N:P、N:K和P:K的平均值分别为12.31、35.21、17.26、2.87、1.40和0.49。

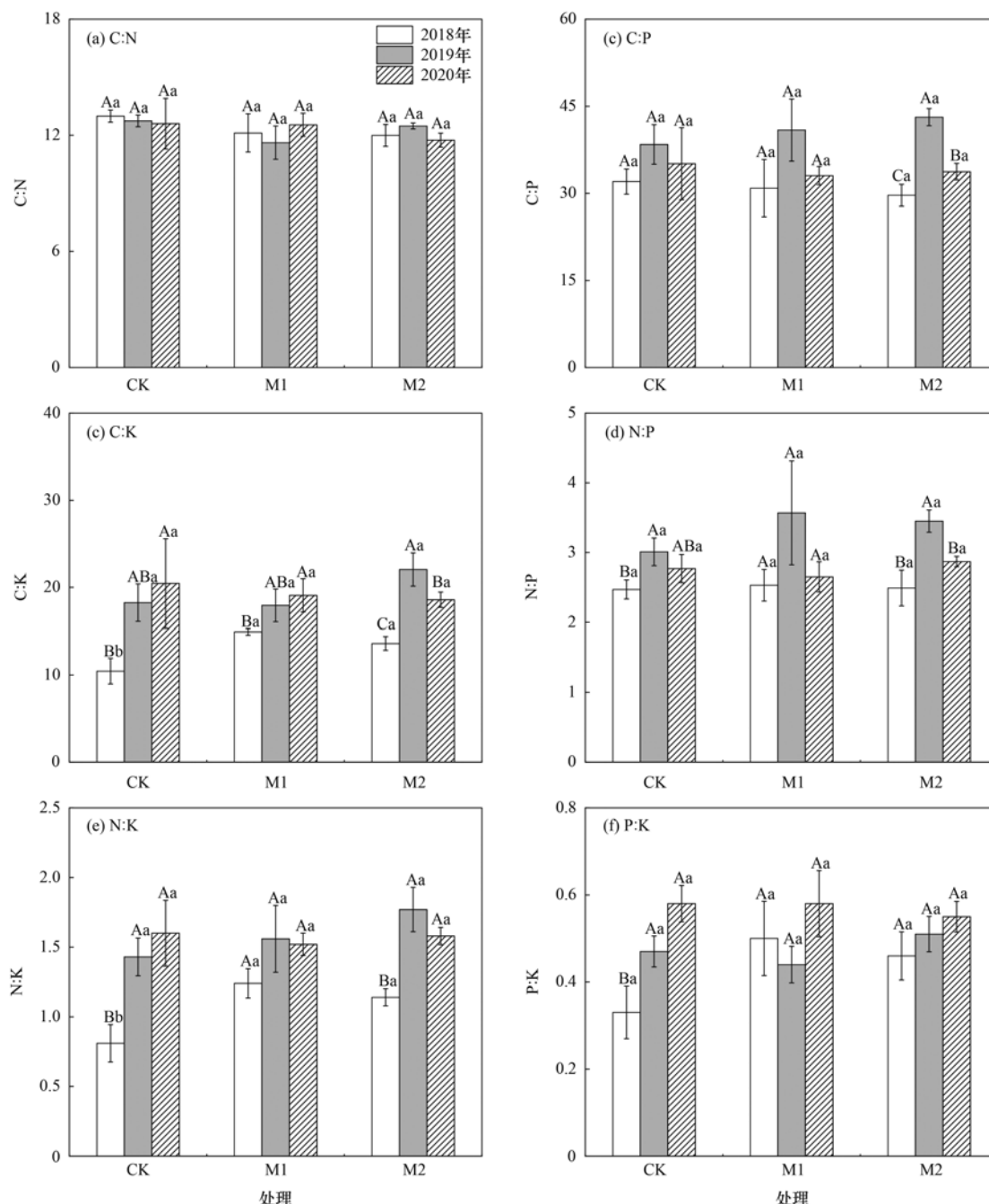


图4 平衡施肥和秸秆覆盖下紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 化学计量特征

Fig. 4 Stoichiometric characteristics of C, N, P, and K in purple soil slope under balanced fertilization and straw mulching

长期不同施肥模式下, 速效养分化学计量比如图5所示, 土壤速效养分化学计量特征仅2019年AN:AP差异显著($P < 0.05$). 各年份之间不同处理下呈现如下差异规律: CK处理中, 仅AN:AP差异显著($P < 0.05$), 2018年和2020年分别比2019年显著高出208%和216%; M1处理中, 仅AN:AK差

异显著($P < 0.05$), 2020年分别比2019年和2018年显著高出94.28%和142.86%; M2处理中, 仅AP:AK差异显著($P < 0.05$), 2019年和2020年分别比2018年显著高出46.67%和53.33%。2018~2020年各处理AN:AP、AN:AK和AP:AK的平均值分别为1.78、0.39和0.23。

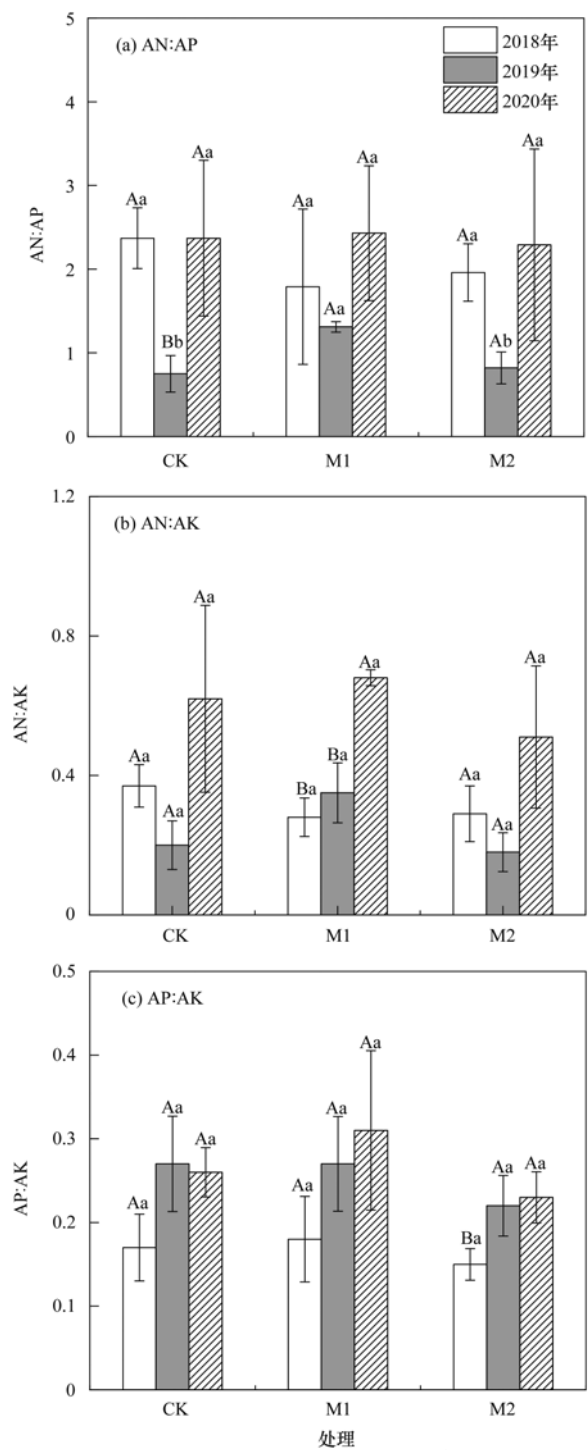


图5 平衡施肥和秸秆覆盖下紫色土坡耕地 AN、AP 和 AK 化学计量特征

Fig. 5 Stoichiometric characteristics of AN, AP, and AK in purple soil slope under balanced fertilization and straw mulching

2.3 土壤 C、N、P 和 K 的含量与化学计量的相关性

由表 3 可知,土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, AN: AP, AN: AK、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 AN: AP, AN: AK、AP 与 AK, AP: AK 和 AN: AP 与 AN: AK 之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 AP 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$).

由图 6 可知,土壤 C 含量与 N 含量呈显著的正相关线性关系 ($P < 0.05$);土壤 C: K 与 N: K、C: K 与 N: P、C: K 与 P: K、C: P 与 C: K、C: P 与 N: K、C: P 与 N: P、N: K 与 P: K 和 N: P 与 N: K 呈显著的正相关线性关系 ($P < 0.05$),其中 C: K 与 N: K 的相关性最强 ($R^2 = 0.88$);而土壤 P 含量与 C: K、N: K 呈显著的负相关线性关系 ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 平衡施肥和秸秆覆盖对紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 含量的影响

长期不同施肥模式下,2018 ~ 2020 年间土壤 C 和 N 的含量变化相对稳定,说明平衡施肥与平衡施肥配施秸秆均可有效维持土壤肥力,满足当地作物生长的基本养分需求,同时秸秆覆盖有效补偿了平衡施肥条件下的养分亏缺,且当地的常规施肥模式已超出肥料最佳施用量,导致土壤处于氮素盈余状态. 当农田施氮量超过最佳水平后,过量的氮素一部分会通过硝化和反硝化作用排放到空气中,另一部分则通过淋溶作用和径流损失,加剧对生态环境的污染^[14,15]. 同时,在不同施肥模式下, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 在 2018 年和 2020 年差异均不显著,而在 2019 年常规施肥处理显著低于平衡施肥处理,这进一步证实该常规施肥模式并不符合当地最佳施肥水平. 平衡施肥模式下有机 C 含量高于常规模式,但却低于平衡施肥 + 秸秆覆盖模式,这表明秸秆覆盖有利于增加土壤中有机 C 的含量,该结果与俄胜哲等^[16]和潘剑玲等^[17]研究的结论一致. 有研究发现,长期施肥有利于增加土壤中全 P 和全 K 的含量^[18,19]. 但在本试验中 2019 年和 2020 年不同施肥模式下土壤全 P 和 K 与 2018 年相比其含量均呈下降趋势,基于相关性分析进一步发现,紫色土全 P

表 3 速效养分之间的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of available nutrients

	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	AP	AK	AN: AP	AN: AK	AP: AK
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	1	0.699 **	0.100	0.085	0.809 **	0.844 **	0.055
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$		1	0.388 *	0.149	0.619 **	0.809 **	0.288
AP			1	0.490 **	-0.352	0.103	0.669 **
AK				1	-0.127	-0.270	-0.294
AN: AP					1	0.764 **	-0.282
AN: AK						1	0.359
AP: AK							1

1) * 和 ** 分别表示各因子间在 0.05 和 0.01 水平上显著相关

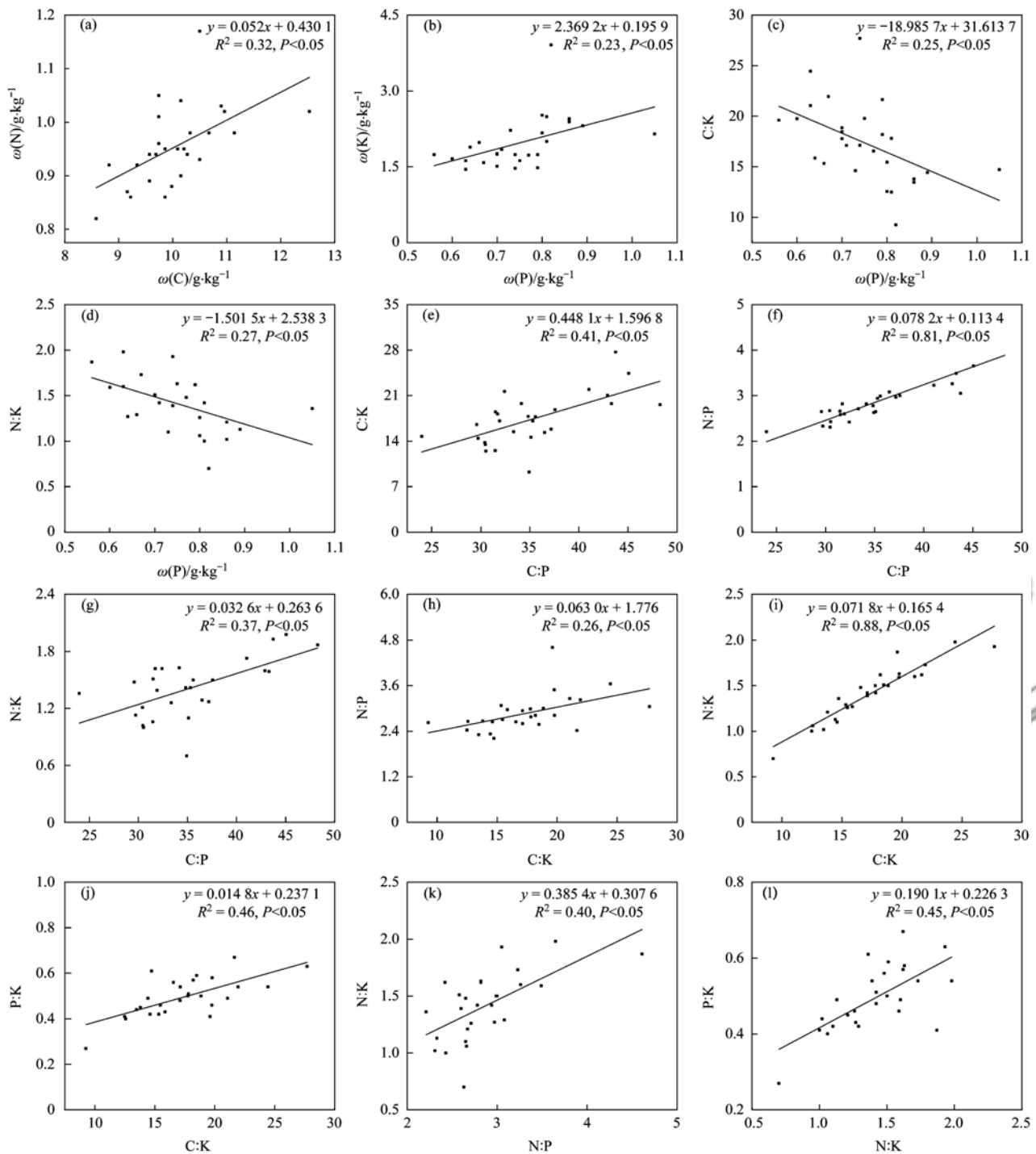


图6 土壤 C、N、P 和 K 含量与化学计量比之间的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between soil C, N, P, and K contents and stoichiometric ratio

与 K 呈协同关系,说明这两种养分的变化受到同一因素影响。研究区降水量记录显示,2020 年的降雨量高于 2018 年和 2019 年,同时 2019 年中几次施肥后突降暴雨,导致土壤中 P 随着径流流失^[20,21],K 向下迁移淋溶^[22]。其中,本研究发现 2018~2020 年连续 3 a 增施钾肥,但全 K 随年份呈下降趋势,AK 呈增长趋势。这可能是因为供试土壤因常年施氮、磷肥,改变了土壤的理化性质,使得土壤对钾的固定能力下降,同时增加了速效钾离子的释放^[23,24],其

他方面原因还需进一步探究。

3.2 平衡施肥和秸秆覆盖对紫色土坡耕地 C、N、P 和 K 化学计量比的影响

土壤中的 C:N 值是衡量土壤肥力、碳氮养分平衡的重要指标^[25]。土壤 C:N 值高表明有机质更容易积累,比值低表明有机质分解释放的速率快。与全国尺度相比,紫色土坡耕地有机质分解速率较慢,有效氮的含量较低^[17],本研究中紫色土 C:N 均值为 12.31,略高于中国土壤 C:N 的平均水平

(11.90)^[16],进一步印证该结论。

土壤 C:P 值是衡量土壤微生物对于土壤有机物矿化且释放出磷潜力的重要指标. 本研究中的土壤 C:P 均值为 35.28, 远低于中国土壤 C:P 的平均水平(61.0), 这表明研究区域有机质矿化能力强, 可能分解过程释放的磷元素多, 使得土壤中磷的有效性增加, 这与卓志清等^[26]研究的结果一致。

N:P 通常用来评定植物群落或者土壤养分的限制格局, 本研究中的土壤 N:P 均值为 2.87, 低于中国土壤 N:P 的平均水平(5.2). 有研究表明, 化肥配施有机肥会导致 P 的积累速率高于 N^[27], 从而降低了 N:P 值. 不同处理中, 除 2020 年 M1 处理的 N:P 低于 CK, 其他年份 M1 和 M2 处理都高于 CK. 这表明平衡施肥配施秸秆覆盖在一定程度上可以增加土壤中 N 的含量: 一方面, 经过腐殖化的秸秆丰富了土壤养分, 激发固氮微生物与相关酶的活性, 促进了土壤 N 的累积; 另一方面, 秸秆覆盖能够有效减少径流带走的 N, 这与朱浩宇等^[28]研究的结果一致。

本研究结果显示不同年限间 C:K 和 N:K 差异显著, 但 C 和 N 随年份无显著变化, K 含量变化显著, 主要是因为随着年份的增加 C 和 N 的含量相对稳定, 所以 C:K 和 N:K 主要受到土壤 K 的影响. 这与杜映妮等^[29]研究的结果有差异, 可能是由于研究区域年降水量不平衡, 导致 K 的流失量呈现出无规律性. 一般来说, 外源输入的钾养分被植株利用程度低, 未被利用的钾通常会被积累下来, 但可能由于 NH_4^+ -N 的常年积累, 影响了土壤的固钾能力, 促使钾随地表径流流失量相对增加^[24], 造成了土壤钾在年际间的显著差异。

本研究中, 土壤 C 与 N、C:K 与 C:P, N:K, N:P, P:K、C:P 与 N:K, N:P 和 N:K 与 P:K, N:P 呈显著的正相关线性关系; 而土壤 P 与 C:K、N:K 呈显著的负相关线性关系; 土壤 NO_3^- -N 与 AN:AP, AN:AK、 NH_4^+ -N 与 AN:AP, AN:AK、AP 与 AK, AP:AK 和 AN:AP 与 AN:AK 之间呈极显著正相关. 李树斌等^[30]的研究发现在亚热带地区不同人工林土壤中, C、N 与 C:N、C:P 和 N:P 呈极显著正相关. 王霖娇等^[31]的研究发现在西南喀斯特石漠化地区土壤 N 与 N:P、P 与 P:K 呈线性关系, C 与 N、P 和 C:N 呈二次函数关系, N 与 C:N、C:P 和 C:K 呈幂函数关系. 王家乐等^[32]的研究发现在红壤坡耕地区域土壤 C 和 N 均与 C:P 和 N:P 呈显著正相关. 土壤速效养分及其生态化学计量比之间, 土壤 C、N、P 和 K 及其生态化学计量比之间都存在一定的耦合关系, 且它们之间的关系呈现不稳定性, 可能是因为受到不同土壤类型和农艺措施的影响^[29]. 所以, 仅

用相关性分析或者线性方程拟合不能完全指示土壤中各养分及其生态化学计量特征的关系, 还需进一步地研究来确定它们之间的关系。

本研究以垫江县农田氮磷流失长期监测点为研究样地, 通过采集 2018~2020 年的土壤对紫色土坡耕地的养分及化学计量特征进行了分析, 探讨了平衡施肥和秸秆覆盖下紫色土坡耕地的土壤养分变化及化学计量特征, 与徐曼等^[33]依托中国科学院三峡库区水土保持与环境研究站, 于 2018~2020 年进行试验, 发现土壤氮素的流失风险期为 5~10 月, 加强三峡库区 5~10 月的施肥管理措施对于库区养分流失和农业面源污染具有重要意义的研究相似; 同时, 吴春晓等^[34]的研究也是以中国科学院安塞水土保持综合试验站养分长期定位试验样地为基础, 于 2019 年采样分析, 发现长期有机肥与磷肥混施可以缓解土壤微生物面临的资源限制. 综合来看, 施肥量和秸秆还田对于紫色土坡耕地土壤养分含量有较大影响, 且紫色土区土壤一般受到氮元素限制^[29,35]. 本研究发现, 当氮素达到适宜水平后, 限制因子转变为钾元素. 目前, 关于紫色土坡耕地整体生态系统中养分的相互作用及特征变化尚不明确, 下一步可重点研究土壤-微生物-作物的养分特征关系, 揭示它们之间的耦合关系。

4 结论

本试验点建于 2010 年, 共设置 3 个处理: CK、M1 和 M2, 于 2018~2020 年分别采样分析, 发现长期不同施肥模式下, 2018~2020 年间, 各处理土壤速效养分含量均在 2020 年最高, 表明连续施肥有利于紫色土坡耕地速效养分的积累; 各施肥模式下土壤 C 和 N 含量无显著差异, 与常规施肥模式相比, 平衡施肥与平衡施肥 + 秸秆覆盖模式均可有效维持土壤 C、N 和 AN 的供应. 综合来看, 常规施肥模式并不符合当地最佳施肥水平量, 平衡施肥 + 秸秆覆盖模式是紫色土坡耕地较为适宜的施肥管理模式。

参考文献:

- [1] 侯云鹏, 刘志全, 尹彩侠, 等. 长期秸秆还田下基于东北水稻高产和钾素平衡的钾肥用量研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(11): 2020-2031.
Hou Y P, Liu Z Q, Yin C X, et al. Optimum amount of potassium fertilizer based on high yield and soil potassium balance under straw return in rice production region of northeast China [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(11): 2020-2031.
- [2] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 秸秆还田方式对褐土钾素平衡与钾库容量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 936-942.
Xie W Y, Zhou H P, Yang Z X, et al. Effect of different straw return modes on potassium balance and potassium pool in

- cinnamon soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, **21**(4): 936-942.
- [3] 聂云, 张雅蓉, 李渝, 等. 秸秆还田对黄壤农田氮、磷养分平衡的影响[J]. 玉米科学, 2022, **30**(4): 150-156.
- Nie Y, Zhang Y R, Li Y, *et al.* Effects of straw returning on nutrient balance of nitrogen and phosphorus in yellow soil farmland[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, **30**(4): 150-156.
- [4] 张鑫尧, 张敏, 朱远芃, 等. 巢湖流域磷肥减量施用对稻麦轮作体系作物产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, **55**(19): 3791-3806.
- Zhang X Y, Zhang M, Zhu Y P, *et al.* Effects of reduced phosphorus application on crop yield and grain nutritional quality in the rice-wheat rotation system in Chaohu Lake Basin [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, **55**(19): 3791-3806.
- [5] 贾良良, 韩宝文, 刘孟朝, 等. 河北省潮土长期定位施钾和秸秆还田对农田土壤钾素状况的影响[J]. 华北农学报, 2014, **29**(5): 207-212.
- Jia L L, Han B W, Liu M C, *et al.* The effects of long term K fertilization and straw recycling on soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2014, **29**(5): 207-212.
- [6] 高郅, 权红, 卢杰, 等. 藏东南高山松林表层土壤养分含量及其化学计量比特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, **49**(4): 62-70, 80.
- Gao T, Quan H, Lu J, *et al.* Characteristics of topsoil nutrients and their stoichiometry in *Pinus densata* forest in Southeast Tibet [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, **49**(4): 62-70, 80.
- [7] 卢立华, 李华, 陈琳, 等. 经营模式对马尾松近熟林土壤理化性质和化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(3): 654-663.
- Lu L H, Li H, Chen L, *et al.* Effects of management patterns on soil physicochemical properties and ecological stoichiometric ratio in *Pinus massoniana* near-mature forest [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(3): 654-663.
- [8] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5484-5492.
- Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(18): 5484-5492.
- [9] 赵雯, 黄来明. 高寒山区不同土地利用类型土壤养分化学计量特征及影响因素[J]. 生态学报, 2022, **42**(11): 4415-4427.
- Zhao W, Huang L M. Stoichiometric characteristics and influencing factors of soil nutrients under different land use types in an alpine mountain region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(11): 4415-4427.
- [10] 孙骞, 王兵, 周怀平, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(3): 766-774.
- Sun Q, Wang B, Zhou H P, *et al.* Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small catchment of loess hilly area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(3): 766-774.
- [11] 李梦天, 秦燕燕, 曹建军, 等. 青藏高原草地管理方式对土壤化学计量特征的影响[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(8): 2262-2268.
- Li M T, Qin Y Y, Cao J J, *et al.* Effects of grassland management patterns on soil stoichiometry on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(8): 2262-2268.
- [12] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(6): 312-318.
- Li Z B, Zhou B, Ma T T, *et al.* Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in loess hilly region, China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, **31**(6): 312-318.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 陈金, 唐玉海, 尹燕桦, 等. 秸秆还田条件下适量施氮对冬小麦氮素利用及产量的影响[J]. 作物学报, 2015, **41**(1): 160-167.
- Chen J, Tang Y H, Yin Y P, *et al.* Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on nitrogen utilization and grain yield in winter wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, **41**(1): 160-167.
- [15] 何翠翠, 魏志远, 张文, 等. 海南岛芒果主产区果园氮素盈余状况研究[J]. 土壤通报, 2020, **51**(4): 943-949.
- He C C, Wei Z Y, Zhang W, *et al.* Nitrogen budget in the mango orchards in Hainan Island [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, **51**(4): 943-949.
- [16] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 长期施肥条件下黄土高原黑垆土作物产量与土壤碳氮的关系[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(12): 4047-4055.
- E S Z, Ding N P, Li L L, *et al.* Relationship of crop yield and soil organic carbon and nitrogen under long-term fertilization in black loessial soil region on the Loess Plateau in China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, **29**(12): 4047-4055.
- [17] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(5): 526-535.
- Pan J L, Dai W A, Shang Z H, *et al.* Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, **21**(5): 526-535.
- [18] 宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 等. 秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(9): 4839-4847.
- Song J J, Xu X Y, Bai J Z, *et al.* Effects of straw returning and fertilizer application on soil nutrients and winter wheat yield[J]. Environmental Science, 2022, **43**(9): 4839-4847.
- [19] 贾立辉, 朱平, 彭畅, 等. 长期施肥下黑土碳氮和土壤pH的空间变化[J]. 吉林农业大学学报, 2017, **39**(1): 67-73.
- Jia L H, Zhu P, Peng C, *et al.* Spatial distribution of soil carbon, nitrogen and pH of black soil under long-term fertilization [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, **39**(1): 67-73.
- [20] 贾立志, 张建辉, 王勇, 等. 不同耕作方式对紫色土化学计量比的影响[A]. 见: 中国土壤学会. 土壤科学与生态文明(下册)——中国土壤学会第十三次全国会员代表大会暨第十一届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集[C]. 西安: 西北农林科技大学出版社, 2016.
- [21] 宋永林, 张淑香, 李小平, 等. 长期施肥对褐潮土磷、钾状况及速效供应能力的影响[J]. 华北农学报, 2009, **24**(S2): 286-291.
- Song Y L, Zhang S X, Li X P, *et al.* Effect of long-term fertilization on changes and availability supply capacity of P, K in fluvo-aquic soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2009, **24**

- (S2): 286-291.
- [22] Qiu S J, Xie J G, Zhao S C, *et al.* Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China[J]. *Field Crops Research*, 2014, **163**: 1-9.
- [23] 谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, **14**(5): 886-893.
- Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, **14**(5): 886-893.
- [24] 范钦桢, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. *土壤学报*, 2005, **42**(4): 591-599.
- Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, **42**(4): 591-599.
- [25] 彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 等. 自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2018, **35**(4): 318-326.
- Peng S L, He B H, Wang R Z, *et al.* Effect of soil fertility quality based on different fertilization and tillage patterns in slope cropland of purple soil under natural rainfall[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(4): 318-326.
- [26] 卓志清, 李勇, 兴安, 等. 东北旱作区土壤碳氮磷生态化学计量特征及其影响因素[J]. *农业机械学报*, 2019, **50**(10): 259-268, 336.
- Zhuo Z Q, Li Y, Xing A, *et al.* Characteristic of ecological stoichiometry of soil C, N and P and its influencing factors in dry farming region of northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(10): 259-268, 336.
- [27] Zhang Y L, Sun C X, Chen Z H, *et al.* Stoichiometric analyses of soil nutrients and enzymes in a Cambisol soil treated with inorganic fertilizers or manures for 26 years[J]. *Geoderma*, 2019, **353**: 382-390.
- [28] 朱浩宇, 高明, 龙翼, 等. 化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
- Zhu H Y, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of fertilizer reduction and application of organic fertilizer on soil nitrogen and phosphorus nutrients and crop yield in a purple soil sloping field[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1921-1929.
- [29] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 394-402.
- Du Y N, Li T Y, He B H, *et al.* Stoichiometric characteristics of purple sloping cropland under long-term fertilization and cultivation[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 394-402.
- [30] 李树斌, 周丽丽, 陈宝英, 等. 亚热带树种转换对林地土壤碳氮磷计量比的影响[J]. *森林与环境学报*, 2019, **39**(6): 575-583.
- Li S B, Zhou L L, Chen B Y, *et al.* Effects of tree species transition on stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus in subtropical areas[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2019, **39**(6): 575-583.
- [31] 王霖娇, 汪攀, 盛茂银. 西南喀斯特典型石漠化生态系统土壤养分生态化学计量特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2018, **38**(18): 6580-6593.
- Wang L J, Wang P, Sheng M Y. Stoichiometric characteristics of soil nutrient elements and its influencing factors in typical Karst rocky desertification ecosystems, Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(18): 6580-6593.
- [32] 王家乐, 王志刚, 高阳, 等. 植物配置模式对红壤坡地土壤养分及其化学计量特征的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2022, **20**(2): 89-98.
- Wang J L, Wang Z G, Gao Y, *et al.* Effects of plant allocation patterns on soil nutrients and their stoichiometry in red soil slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, **20**(2): 89-98.
- [33] 徐曼, 高明, 余砾, 等. 紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年际变化特征[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2758-2769.
- Xu M, Gao M, Yu L, *et al.* Interannual variation characteristics of nitrogen loss under rapeseed/maize rotation in purple soil sloping field[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2758-2769.
- [34] 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 等. 长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 521-529.
- Wu C X, Gao X F, Yan B S, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil nutrient characteristics and microbial resource restrictions in a terrace on the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 521-529.
- [35] 梁珂, 何丙辉. 紫色土区典型土地利用方式下土壤碳、氮、磷生态化学计量特征分析[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, **44**(10): 29-36.
- Liang K, He B H. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics under typical land uses in purple soil area[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, **44**(10): 29-36.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-qi, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)