

目次

2018~2020年北京市大气PM _{2.5} 污染特征及改善原因	刘保献, 李倩, 孙瑞雯, 董瑞, 王书肖, 郝吉明	(2409)
京津冀城市群冬季二次PM _{2.5} 的时空分布特征	姚青, 杨旭, 唐颖潇, 樊文雁, 蔡子颖, 韩素芹	(2421)
COVID-19管控前后不同污染阶段PM _{2.5} 中二次无机离子变化特征	姜楠, 郝雪新, 郝祺, 魏云飞, 张瑜, 吕政卿, 张瑞芹	(2430)
基于在线观测的太原市冬季PM _{2.5} 中金属元素污染水平及来源解析	崔阳, 郭利利, 李宏艳, 李永麒, 李滨, 何秋生, 王新明	(2441)
青藏高原东缘黑碳气溶胶变化特征及其来源	王红磊, 刘思吟, 赵天良, 卢文, 夏俊荣, 施双双	(2450)
湛江市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	虎晓蝶, 高博, 陈来国, 刘明, 陆海涛, 王硕, 赵伟, 梁小雅, 郭送军	(2461)
2021年夏季新乡市城区臭氧超标日污染特征及敏感性	侯墨, 蒋小梅, 赵文鹏, 马琳, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启	(2472)
台风“浪卡”过程对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅	(2481)
天津市空气污染的健康影响分析	华琨, 罗忠伟, 贾斌, 薛倩倩, 李亚菲, 肖致美, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂	(2492)
2002~2020年中国河流环境质量演变及驱动因子分析	杨传玺, 薛岩, 高畅, 万孜恒, 王小宁, 刘永林, 刘琳, 刘长青, 王炜亮	(2502)
1990~2020年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析	王芳, 李文慧, 林妍敏, 南雄雄, 胡志瑞	(2518)
长江上游小型水库枯水期水质对景观组成、配置和水库特征的响应	钟泳林, 冉娇娇, 文雯, 张名瑶, 吕明权, 吴胜军	(2528)
宁夏入黄排水沟中典型内分泌干扰物的污染特征与风险评价	李凌云, 高礼, 郑兰香, 李富娟, 陶红, 马兰	(2539)
微塑料及金属在黄浦江地表水环境的赋存特征及与金属抗性基因的相关性分析	陆嘉玮, 徐晨辉, 胡纯, 刘树仁, 李方	(2551)
黄河兰州段城市河道表层沉积物重金属空间分布特征及来源解析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 臧飞, 毛满萱, 潘文惠, 米璇	(2562)
三峡库区支流库湾消落带土壤磷形态赋存特征及其释放风险	张雪, 朱波	(2574)
霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价	刘海, 赵国红	(2583)
基于贝叶斯网络的太湖叶绿素a影响因素分析	刘杰, 何云川, 邓建明, 汤祥明	(2592)
河北省顺平县地下水化学特征及其成因分析	刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 路小慧, 郑一迪, 孟顺祥	(2601)
饮用水处理过程中全氟化合物的分布、转化及去向	钟婷婷, 林涛, 刘威	(2613)
镍铁氧体@活性炭复合材料去除六价铬的表征、性能及机制	张华, 李荣华, 陈金雄, 曾鸿鹄, 黄海艺, Asfandiyar Shahab	(2622)
纳米核壳Co@NC催化剂活化过氧乙酸降解磺胺甲噁唑	郑婷露, 张龙龙, 陈家斌, 张亚雷, 周雪飞	(2635)
富里酸改性FeMnNi-LDH复合材料对水中砷的吸附性能与机制	何雅馨, 柯心怡, 魏世强, 蒋珍茂	(2646)
富含钙/铝的污泥生物炭复合材料对水溶液中磷酸盐的吸附机制	欧阳铸, 曹露, 王炳乾, 丁丽, 黄海明, 祝采莹, 卞晓彤	(2661)
污泥生物炭掺杂改性及其对水中1,2-二氯乙烷吸附行为和机制	周佳伟, 施维林, 许伟, 魏晨军, 吴建生, 孟宪荣	(2671)
森林生态系统对大气氮沉降降低的响应	谢丹妮, 仰东星, 段雷	(2681)
气候变化和人类活动对我国典型草原区植被恢复的影响	张良侠, 岳笑, 周德成, 樊江文, 李愈哲	(2694)
西南地区陆地植被生态系统NPP时空演变及驱动力分析	徐勇, 黄海艳, 戴强玉, 郭振东, 郑志威, 盘钰春	(2704)
不同碳输入对天山雪岭云杉林土壤化学计量特征的影响	马鑫钰, 贡璐, 朱海强, 张甜, 殷珂洁, 陆星宇	(2715)
氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响	刘姝萱, 安慧, 张馨文, 邢彬彬, 文志林, 王波	(2724)
互花米草入侵对杭州湾滨海湿地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响	李文琦, 项琦, 解雪峰, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞	(2735)
黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征	姚志霞, 周怀平, 解文艳, 杨振兴, 陈浩宁, 文永莉, 程曼	(2746)
黄土高原子午岭植被自然恢复下的固碳特征	许小明, 张晓萍, 王浩嘉, 贺洁, 王妙倩, 易海杰, 薛帆, 邹亚东, 田起隆, 何亮	(2756)
短期氮添加对黄土高原人工刺槐林土壤有机碳组分的影响	简俊楠, 刘伟超, 朱玉帆, 李佳欣, 温宇豪, 刘付和, 任成杰, 韩新辉	(2767)
福建省水田土壤有机碳积累对未来温度升高的响应	车燕, 邱龙霞, 吴凌云, 龙军, 毋亭, 李晶, 邢世和, 张黎明	(2775)
中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议	赵晓峰, 雷梅, 陈同斌	(2786)
基于地理探测器的土壤重金属空间分异及其影响因素分析研究进展	龚仓, 王顺祥, 陆海川, 陈勇, 刘玖芬	(2799)
河北省土壤化学元素的背景值与基准值	张丽婷, 成杭新, 谢伟明, 齐全强, 谢晓阳, 于文龙, 王俊达	(2817)
非粮化利用下耕地土壤重金属分布特征、生态风险和来源解析	邱乐丰, 祝锦霞, 潘艺, 党云晓, 吴绍华	(2829)
基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价	余飞, 王佳彬, 王锐, 王宇, 宁墨奂, 张云逸, 苏黎明, 董金秀	(2838)
长株潭地区土壤Cd和Pb固液分配特征与环境风险	李钰滢, 彭驰, 刘乐乐, 张严, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元	(2849)
贵州铅锌矿区土壤和作物重金属生态风险与迁移特征	马宏宏, 张利, 郭飞, 杨峰, 王惠艳, 彭敏, 张富贵	(2856)
贵州省旱地土壤Hg污染状况与玉米安全生产评估	马丽钧, 周浪, 宋波, 王佛鹏, 张云霞, 吴勇	(2868)
山西野生连翘生长地土壤PAHs污染特征及风险评价	郭佳佳, 王琦, 康敏捷, 焦海华, 茹文明, 白志辉	(2879)
P对小麦Cd和As吸收与转运的影响	王云, 赵鹏, 李广鑫, 胡彩霞, 王俊, 刘红恩, 高巍, 秦世玉, 睢福庆, 李畅	(2889)
施硅对水稻铁膜砷固定和体内砷转运的影响	李林峰, 文伟发, 徐梓盛, 陈勇, 李奇, 李义纯	(2899)
广东海丰湿地生态恢复进程中不同生境的土壤微生物特征分析	马姣娇, 高常军, 易小青, 吴琰, 李佳鸿, 曾向武, 蔡坚	(2908)
五台山不同退化程度亚高山草甸土壤微生物群落分类与功能多样性特征	罗正明, 刘晋仙, 胡砚秋, 赫磊, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰	(2918)
天然高寒草地转变为混播人工草地对土壤微生物群落特征的影响	于皓, 刘悦, 邓晔, 芦光新, 颜琿璘, 王英成	(2928)
紫云英还田与化肥减量施肥对稻田土壤细菌群落组成和功能的影响	张济世, 刘春增, 郑春风, 张琳, 张香凝, 吕玉虎, 曹卫东, 张玉亭	(2936)
长期生草栽培对山核桃人工林土壤真菌群落和酶活性的影响	胡颖榕, 梁辰飞, 金锦, 王潇璇, 叶子豪, 吴家森	(2945)
高密度聚乙烯微塑料胁迫对棉花生长、枯萎病发生和根际细菌群落的影响	张浩, 孙洁, 杨慧颖, 董联政, 滑紫微, 韩辉, 陈兆进	(2955)
菌藻复合体系氮代谢性能及菌群特征	赵志瑞, 吴海森, 马超, 李书缘, 李晴, 袁凯倪, 孟祥源, 刘硕, 方晓峰	(2965)
中国碳排放及影响因素的市域尺度分析	吴健生, 晋雪茹, 王晗, 冯喆, 张丹妮, 李雪尘	(2974)
碳交易政策如何影响工业碳生产率:来自中国省级数据的准自然实验	房琪, 李绍萍	(2983)
垃圾分类对碳减排的影响分析:以青岛市为例	陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 高晨琦, 孙英杰, 李卫华, 张国栋, 占美丽	(2995)
1950~2019年中国季节平均最高气温时空演变特征及其大气环流影响定量化分析	苏越, 路春燕, 黄雨菲, 苏艳琳, 王自立, 雷依凡	(3003)
《环境科学》征订启事(2480)	《环境科学》征稿简则(2538)	信息(2766, 2798, 2927)

氮磷添加对荒漠草原土壤养分含量及生态化学计量特征的影响

刘姝萱¹, 安慧^{1*}, 张馨文¹, 邢彬彬¹, 文志林², 王波³

(1. 宁夏大学生态环境学院, 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 2. 盐池县草原实验站, 宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站, 盐池 751506; 3. 宁夏回族自治区草原工作站, 银川 750004)

摘要: 为明确土壤养分含量及化学计量比对多种限制性养分添加的响应, 分析土壤中速效养分与全量养分相关关系, 以及土壤全量和速效化学计量特征的指示作用, 阐明养分添加对荒漠草原土壤养分动态平衡关系的影响。以宁夏荒漠草原为研究对象, 于2018年开始进行氮(N)和磷(P)养分添加控制试验, 试验处理包括对照(CK)、N添加、P添加和NP共同添加这4个处理。结果表明: ①养分添加第4年, 土壤N含量显著增加; N添加显著增加土壤N:P, P添加和NP共同添加显著增加土壤有机碳(SOC)含量。养分添加第3年和第4年, N添加显著提高土壤速效N:P(AN:AP); N添加和NP共同添加显著增加土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量, 而降低土壤速效C:N(C:AN); P添加和NP共同添加显著增加土壤全磷(TP)和速效磷(AP)含量, 而降低土壤全量和速效N:P、C:P。②N添加和P添加对荒漠草原土壤NH₄⁺-N、AP含量和土壤速效C:N、AN:AP的影响具有显著交互作用。③荒漠草原具有较为稳定的C:N, N:P主要受土壤P含量的限制, 速效C:P(C:AP)和AN:AP主要受土壤AP含量的限制。④N、P养分添加对土壤TN、SOC和无机氮的影响具有累积性效应, N添加缓解荒漠草原N限制, P添加和NP添加加剧荒漠草原N限制。土壤速效化学计量特征变异系数均大于土壤全量化学计量特征变异系数, 荒漠草原土壤速效化学计量对N、P养分添加更敏感, 可更好反映N、P养分添加对荒漠草原土壤生态化学计量的影响, 更快速地指示土壤养分状况。

关键词: 荒漠草原; 养分添加; 土壤养分; 生态化学计量

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)05-2724-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205072

Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland

LIU Shu-xuan¹, AN Hui^{1*}, ZHANG Xin-wen¹, XING Bin-bin¹, WEN Zhi-lin², WANG Bo³

(1. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, School of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Grassland Experiment Station of Yanchi, Temperate Grassland Ecosystem Observation and Experiment Station in Agro-Pastoral Ecotone of Ningxia, Yanchi 751506, China; 3. Grassland Station of Ningxia, Yinchuan 750004, China)

Abstract: In order to discuss the response of soil nutrient content, stoichiometric ratio, and dynamic nutrient balance to the addition of multiple restrictive nutrients, the correlation between available nutrients and total nutrients in soil, as well as the indication of soil total and available stoichiometric characteristics, were studied in a desert grassland subjected to 4 years of nutrient addition treatments. The Ningxia desert grassland was used as the research object to carry out nitrogen (N) and phosphorus (P) addition experiments. The experiment included four treatments: control (CK), N addition [10 g·(m²·a)⁻¹], P addition [10 g·(m²·a)⁻¹], and NP co-addition (10 g·(m²·a)⁻¹ N + 10 g·(m²·a)⁻¹ P). The results showed that: ① in the fourth year of nutrient addition, soil total nitrogen (TN) content was significantly increased. The N:P ratio was significantly increased by N addition, and soil organic carbon (SOC) content was significantly increased by P addition and NP co-addition. In the third and fourth years of nutrient addition, the soil available N:P ratio (AN:AP) was significantly increased by N addition; N addition and NP co-addition significantly increased the content of ammonium nitrogen (NH₄⁺-N) and nitrate nitrogen (NO₃⁻-N) but significantly reduced the soil available C:N ratio. P addition and NP co-addition significantly increased total phosphorus (TP) and soil available phosphorus (AP), whereas it significantly reduced the soil total and available C:P and N:P ratios. ② The interaction between N addition and P addition had a combined effect on NH₄⁺-N, AP, available C:N, and AN:AP ratio of desert grassland. ③ The soil C:N ratio was relatively stable in desert grassland, soil N:P ratio was mainly limited by soil TP content, and the soil available C:P and AN:AP ratios were mainly limited by soil AP content. ④ There were cumulative effects of N and P additions on soil N, SOC, and inorganic nitrogen. N limitation in desert grassland was alleviated by N addition, whereas it was aggravated by P addition and NP co-addition. The variation coefficients of soil available stoichiometric characteristics were higher than that of soil total stoichiometric characteristics. Soil available stoichiometry was more sensitive to N and P addition than soil total stoichiometry in desert grassland, which could better reflect the effects of N and P addition on soil ecological stoichiometry and as a rapid indicator of soil nutrient status in desert grassland.

Key words: desert grassland; nutrient addition; soil nutrient; ecological stoichiometry

收稿日期: 2022-05-07; 修订日期: 2022-07-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31960244); 宁夏自然科学基金项目(2022AAC02010); 宁夏回族自治区西部一流学科项目(NXYLXK2017B06)

作者简介: 刘姝萱(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化生态学, E-mail: lxx19980123@163.com

* 通信作者, E-mail: anhui08@163.com

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是植物生长和发育所需营养的主要来源^[1]. 土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)是土壤必需的养分,它们的比值被认为是生态系统结构和功能的重要指标^[2]. 土壤生态化学计量比常被用于反映土壤中各营养元素之间的关系和养分的可获得性,揭示土壤养分限制、养分循环和平衡机制^[3,4]. 因此,综合研究陆地土壤养分含量及其化学计量比可以为陆地生态系统土壤恢复提供理论依据. 土壤养分主要分为有效养分和无效养分,其中有效养分能够直接被植物吸收利用,而某种养分总储量称为全量养分^[5]. 有研究表明铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、速效氮(AN)和速效磷(AP)作为土壤有效氮和有效磷的主要存在形式,相比全量养分,其含量变化容易在土壤中得以体现,更能直观反映出土壤中 N、P 养分的供需状况^[6,7]. 但目前有关土壤生态化学计量的研究多集中于全量生态化学计量,而有关速效生态化学计量的研究较少,何种能更好地反映土壤 N、P 养分有效性、矿化程度和养分限制情况还有待研究.

N 和 P 作为草地生态系统土壤中的主要限制养分,N 添加和 P 添加显著影响土壤全量养分及其生态化学计量特征^[8,9]. 有研究认为 N 添加显著提高土壤全氮(TN)、全磷(TP)含量和 N:P^[9,10],降低土壤有机碳(SOC)含量和 C:N^[11];也有研究指出 N 添加对土壤 TN 和 TP 含量无显著影响^[12],SOC 含量变化受 N 添加时间的影响,短期(<3 a)无显著影响,中长期(>3 a)显著增加 SOC 含量^[13],土壤 C:N 保持相对稳定,不受外源养分添加的影响^[14]. P 添加对土壤 TN 和 SOC 含量无显著影响,而显著提高土壤 TP 含量,降低土壤 C:P 和 N:P,提高土壤 P 的有效性,加剧生态系统 N 限制^[15]. 同时,N 添加和 P 添加显著影响土壤速效养分及生态化学计量特征. 对内蒙古典型草原的研究认为 N 添加对土壤 AP 含量无显著影响,而显著提高土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 AN 含量,从而提高土壤 AN:AP 进而缓解生态系统 N 限制^[16,17]; P 添加对土壤 AN 含量无显著影响,而显著提高土壤 AP 含量,从而降低土壤 AN:AP 进而加剧生态系统 N 限制^[15~17]. 养分添加在一定程度可以缓解生态系统 N 和 P 养分的限制,

但持续的养分添加可能会改变生态系统结构和限制因素^[18]. 对草地生态系统的研究表明,长期或过量地进行 N 添加,限制元素可能由 N 转化为 P^[16]. 因此,考虑 NP 共同添加对土壤养分含量及生态化学计量特征的影响也至关重要. NP 共同添加显著提高土壤 AN、AP 含量^[15,19],且 N 和 P 对土壤 AP 含量具有显著交互作用^[10]. 目前大多数研究仅考虑 N 或 P 添加对土壤养分含量及生态化学计量特征的影响,很少考虑 NP 共同添加以及 N 和 P 的交互作用^[17];且多数集中于 N、P 添加对土壤全量养分及生态化学计量特征的影响,关于 N、P 养分添加对土壤速效养分及生态化学计量特征影响的研究较少.

荒漠草原作为草原向荒漠过渡的生态交错带,对全球变化反应较为敏感^[20]. 养分是干旱、半干旱地区草地生态系统的重要限制因子之一,能对该地区生态系统结构和功能产生重要影响. 养分添加是维持草地生态系统养分平衡的有效措施^[21]. 土壤中添加多种限制性养分(N 和 P)对土壤速效养分含量以及全量养分含量有何影响,对土壤速效生态化学计量以及全量生态化学计量有何影响? 土壤速效生态化学计量与土壤全量生态化学计量有何关系? 为此,本文以宁夏荒漠草原为研究对象,通过对 N、P 养分添加下土壤全量及速效养分含量、全量及速效化学计量比的研究,分析土壤中速效养分与全量养分相关关系,以及土壤全量及速效化学计量特征的指示作用,阐明养分添加对荒漠草原土壤养分动态平衡关系的影响,以期为荒漠草原恢复与保护提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托宁夏农牧交错带温性草原生态系统定位观测研究站,研究区位于宁夏回族自治区盐池县荒漠草原(37.783 3°N, 107.407 07°E,海拔 1 523 m),2017 年土壤理化性质见表 1. 该地区位于鄂尔多斯台地向黄土高原过渡带,是荒漠向典型草原的过渡区域. 研究区 2020 年和 2021 年年降雨量分别为 181.2 mm 和 210.3 mm,研究区详细信息见文献[22].

表 1 2017 年荒漠草原土壤理化性质

Table 1 Soil physical and properties in desert grassland in 2017

项目	$\omega(\text{TN})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{SOC})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{TP})$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AN})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{AP})$ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH
参数	0.70	6.38	0.33	6.02	1.31	8.32

1.2 试验设计

本试验依托 2017 年建立的草地生态系统(典型

草原、草甸草原和荒漠草原)全球变化联网试验(NPK 养分添加和降水变化)的荒漠草原试验样地,

选取全球变化试验中对照(CK)、N添加(N)、P添加(P)和NP共同添加(NP)这4个处理.每个处理6次重复,共计24个小区,每个小区面积为6 m×6 m,样方间均设置有2 m宽的缓冲带.N和P添加采用全球草地生态系统营养物研究网络(nutrient network)的试验设计^[23]:N添加[缓释型(NH₂)₂CO,10 g·(m²·a)⁻¹],P添加[Ca(H₂PO₄)₂·H₂O,10 g·(m²·a)⁻¹],NP添加[10 g·(m²·a)⁻¹(NH₂)₂CO+10 g·(m²·a)⁻¹Ca(H₂PO₄)₂·H₂O].自2018年开始进行N、P养分添加处理,每年5月初将缓释型尿素和磷肥于降雨前撒施.

1.3 土壤样品采集

于2020年8月和2021年8月进行土壤样品采集.在每个小区内采用五点取样法采集0~10 cm土壤样品,将每个小区内土壤样品混匀并去除残留根系、石块及其他杂质后带回实验室分为3份,一份4℃保存用于土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N的测定;一份土壤样品过2 mm土壤筛用于AP的测定;一份风干研磨后用于测定土壤TN、TP和SOC含量.

1.4 测定方法

土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N采用KCl浸提,连续流动分析仪测定;AP采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;土壤C、N含量分别采用重铬酸钾外加热法和H₂SO₄-H₂O₂消煮-凯氏定氮法测定;土壤P含量采用HClO₄-H₂SO₄消煮-钼锑抗比色法测定.

1.5 数据处理

速效氮(AN)为NH₄⁺-N与NO₃⁻-N总和,化学计量比为质量比,其中速效含量生态化学计量比(C:AN、C:AP、AN:AP)由土壤AN、AP、SOC计算得出;全量生态化学计量比(C:N、C:P、N:P)由土壤TN、TP、SOC计算得出^[11,17,24,25].利用Origin 2018中的主成分分析方法提取公因子,特征值大于1的主成分能够解释较多的总变异性^[26],权重系数以及负荷量表示各因子的重要性程度,方差贡献率、

累积方差贡献率以及特征值判断各土壤因子对总变异的解释情况^[27,28].权重计算公式为:

$$W_i = C_i / \sum C_i \quad (1)$$

式中,W_i为各土壤因子的权重;C_i为第i个土壤因子的负荷量.

采用SPSS 25.0分析软件对数据进行统计分析,对土壤养分含量及化学计量特征进行单因素方差分析、双因素方差分析以及多重比较(LSD)(α=0.05)、利用Graphpad Prism 9制图.利用R4.0.3中corrplot包计算土壤养分含量及化学计量的Pearson相关性.

2 结果与分析

2.1 N、P添加对荒漠草原土壤全量养分含量及生态化学特征的影响

N、P养分添加对土壤TN和SOC的影响与养分添加年限有关(图1).N、P养分添加第3年,土壤TN和SOC含量呈增加趋势但是差异不显著(P>0.05);而养分添加第4年,P添加和NP共同添加显著增加SOC含量,N添加、P添加和NP共同添加显著增加土壤TN含量(P<0.05).N、P养分添加第3年与第4年对土壤TP含量的影响相同,P添加和NP共同添加显著增加土壤TP含量(P<0.05).

N、P养分添加显著影响土壤C:P和N:P,而对土壤C:N无显著影响(图1,P<0.05).N、P养分添加第3年与第4年对土壤C:P的影响相同,P添加和NP共同添加显著降低了土壤C:P.P添加和NP共同添加第3年和第4年对土壤N:P的影响相同,均显著降低土壤N:P.N添加第3年与第4年对土壤N:P的影响不同,N添加第3年对土壤N:P无显著影响,而N添加第4年显著增加了土壤N:P.在养分添加第3年与第4年,N、P对土壤全量养分含量及生态化学计量特征均无显著交互作用(表2,P<0.05).

表2 N、P养分添加对土壤全量养分含量及生态化学计量特征影响的方差分析

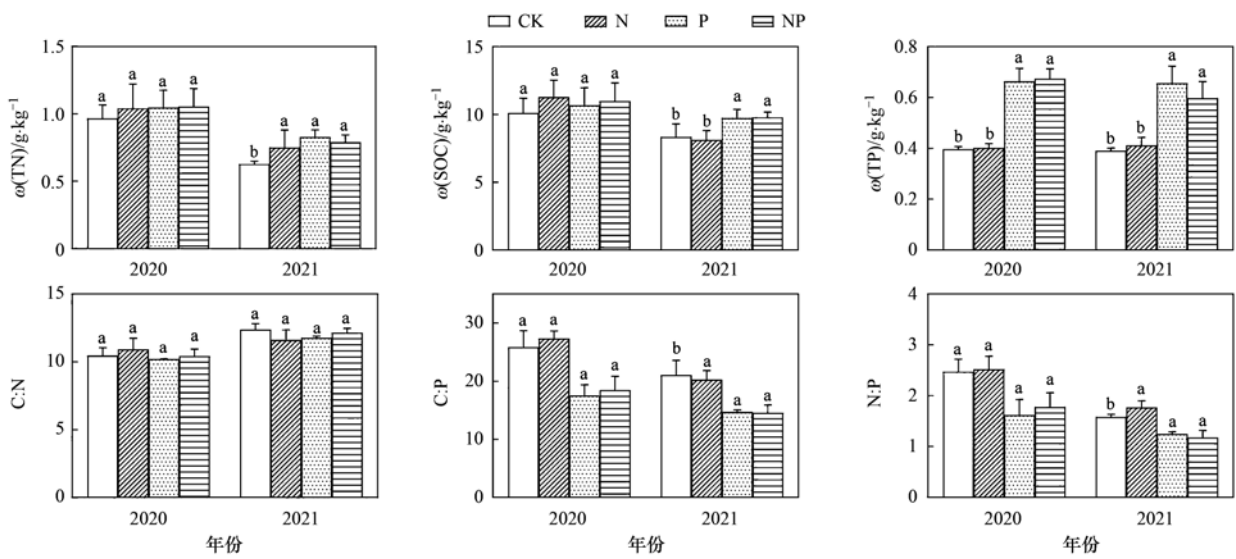
Table 2 Results of two-way ANOVA of the effects of N and P additions on soil total nutrient content and ecological stoichiometric characteristics in desert grassland

项目	TN		SOC		TP		C:N		C:P		N:P	
	2020年	2021年	2020年	2021年	2020年	2021年	2020年	2021年	2020年	2021年	2020年	2021年
N	0.475	0.194	0.166	0.776	0.356	0.588	0.153	0.334	0.061	0.508	0.364	0.175
P	0.421	0.001	0.784	<0.001	<0.001	<0.001	0.119	0.836	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
N×P	0.552	0.018	0.403	0.642	0.066	0.843	0.611	0.06	0.259	0.605	0.619	0.067

2.2 N、P添加对荒漠草原土壤速效养分及生态化学计量特征的影响

N、P养分添加显著影响土壤速效养分及其生态化学计量特征,且不同养分添加年限对土壤速效

养分及其生态化学计量特征影响一致(图2和图3,P<0.05).N添加与NP共添加显著增加土壤NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量,P添加与NP共同添加显著增加土壤AP含量,其中与N添加相比,NP共同添加



不同字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图1 N和P添加对荒漠草原土壤全量养分及生态化学计量特征的影响

Fig. 1 Effects of N and P additions on soil total nutrient content and ecological stoichiometric characteristics in desert grassland

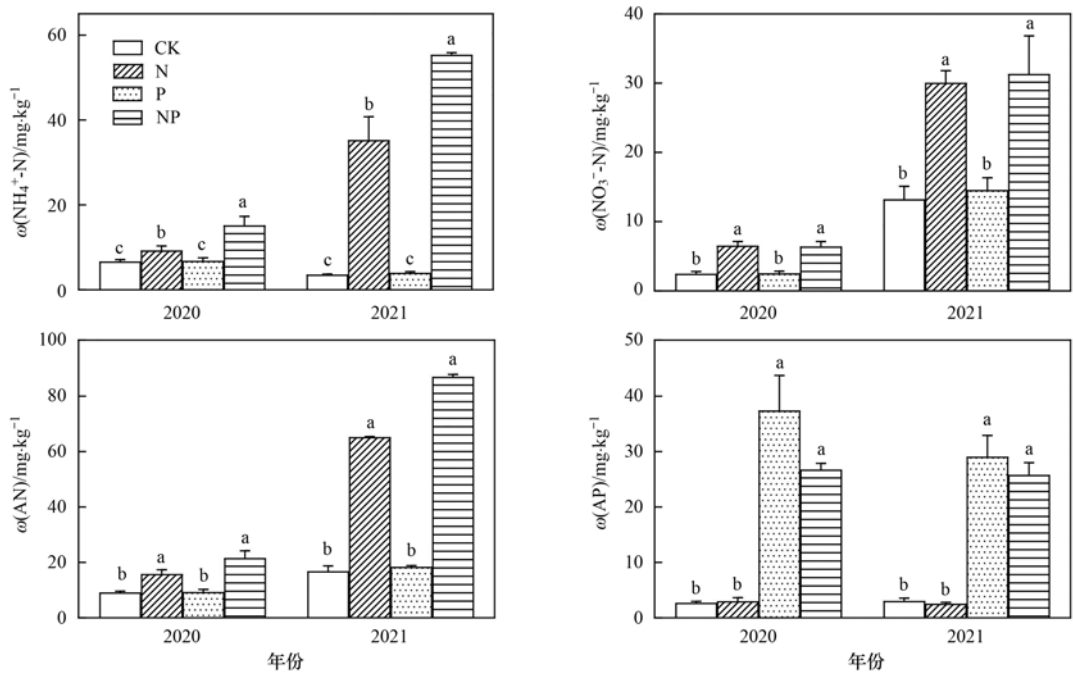


图2 N和P添加对荒漠草原土壤速效养分含量的影响

Fig. 2 Effects of N and P additions on soil available nutrient content in desert grassland

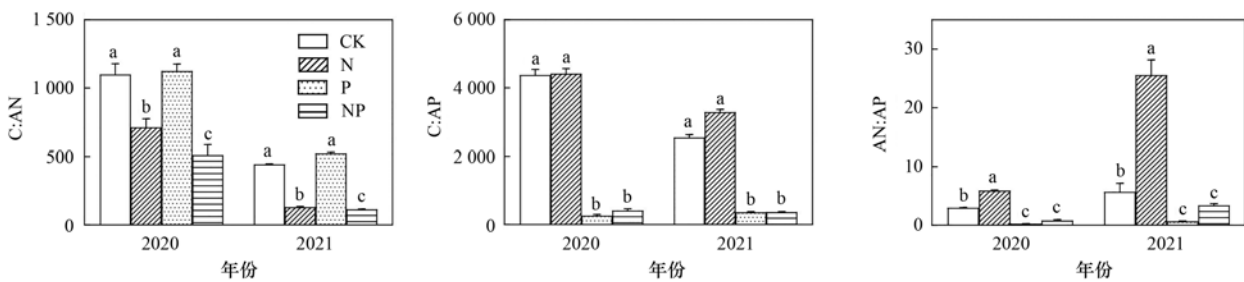


图3 N和P添加对荒漠草原土壤速效养分及生态化学计量特征的影响

Fig. 3 Effects of N and P additions on soil available ecological stoichiometric characteristics in desert grassland

显著增加土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 AP 含量. N 添加和 NP 共同添加显著降低土壤 C: AN, 且 NP 共同添加与 N 添加之间对土壤 C: AN 的影响差异也达到显著水平; P 和 NP 共同添加显著降低土壤 C: AP; N 添加显著增

加土壤 AN: AP, P 添加和 NP 共同添加显著降低土壤 AN: AP. 在养分添加第 3 年和第 4 年, N、P 对土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、AP 含量和 C: AN、AN: AP 具有显著交互作用(表 3, $P < 0.05$).

表 3 N、P 养分添加对土壤速效养分含量及生态化学计量特征影响的方差分析

Table 3 Results of two-way ANOVA of the effects of N and P additions on soil available nutrient content and ecological stoichiometric characteristics in desert grassland

项目	$\text{NO}_3^- \text{-N}$		$\text{NH}_4^+ \text{-N}$		AP		C: AN		C: AP		AN: AP	
	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年	2020 年	2021 年
N	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.005	<0.001	<0.001	0.180	0.145	<0.001	<0.001
P	0.813	0.329	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
N × P	0.608	0.986	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.754	0.823	<0.001	<0.001

2.3 土壤养分含量及化学计量特征相关性分析

2.3.1 土壤养分含量和化学计量相关性

土壤速效养分和土壤全量养分之间存在显著相关关系(表 4, $P < 0.05$). AN 和土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 无显著相关性, 和土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 呈显著正相关; 土壤 AN 和土壤 TN、SOC 呈显著负相关关系, 和土壤 TP 呈显著正相关; 土壤 AP 和土壤 TP 呈显著正相关关系; 土壤 TN 和土壤 SOC 呈显著正相关. 土壤养分含量和生态化学计量特征之间也具有显著相关关系(表 4, $P < 0.05$). 土壤 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、AN 和

土壤 C: N 呈显著正相关, 而和土壤 N: P、C: AN 呈显著负相关; AP、TP 和土壤 C: P、N: P、C: AP、AN: AP 呈显著负相关; TN 和土壤 C: N 呈显著负相关, 和土壤 C: AN、N: P 呈显著正相关; SOC 和土壤 C: N 呈显著负相关, 和土壤 C: AN 呈显著正相关. 土壤速效生态化学计量特征和土壤全量生态化学计量特征之间存在显著相关性. 其中土壤 C: P 和土壤 C: AP、土壤 N: P 和土壤速效 N: P 均呈显著正相关, 土壤全量 C: N 和速效 C: N 呈显著负相关(表 5, $P < 0.05$).

表 4 荒漠草原土壤养分含量与化学计量相关性¹⁾

Table 4 Correlation of soil nutrient content and stoichiometric of desert grassland

	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	AN	AP	TN	SOC	TP
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	1	—	—	—	—	—	—
$\text{NO}_3^- \text{-N}$	0.826	1	—	—	—	—	—
AN	0.972 **	0.922	1	—	—	—	—
AP	0.07	-0.087	0.011	1	—	—	—
TN	-0.218	-0.566 **	-0.366 **	0.25 *	1	—	—
SOC	-0.164	-0.485 **	-0.30 **	0.275	0.866 **	1	—
TP	0.226	0.111	0.183 *	0.907 **	0.189 *	0.281	1
C: N	0.339 *	0.635 **	0.460 **	-0.198	-0.764 **	-0.470 **	-0.024
C: P	-0.195	-0.146	-0.185	-0.911 **	-0.012	-0.09	-0.889 **
N: P	-0.347 *	-0.517 *	-0.427 *	-0.586 **	0.556 *	0.430 **	-0.678 **
C: AN	-0.699 **	-0.879 **	-0.806 **	0.118	0.565 **	0.459 **	-0.05
C: AP	-0.344 *	-0.437 **	-0.397 **	-0.718 **	0.306 *	0.302 *	-0.786 **
AN: AP	0.383 *	0.586 *	-0.488 *	-0.558 **	-0.342 *	-0.503 *	-0.511 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$, 下同

2.3.2 不同养分添加下土壤养分含量及生态化学及生态化学计量特征的主成分分析

土壤速效生态化学计量特征的变异系数均大于土壤全量生态化学计量的变异系数(图 4). 养分添加第 3 年、第 4 年土壤速效化学计量特征和全量化学计量特征的变异系数表现为 N: P 和 C: P 高于 C: N. 对土壤养分和生态化学计量特征进行因子分析, 利用主成分方法提取公因子, 在 CK 处

理下提取出 2 个主成分(C: AN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$), N 添加处理下提取出 2 个主成分($\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 AN: AP), P 添加处理下提取出 3 个主成分(C: AN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 AN), NP 共同添加处理下提取出 2 个主成分($\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 AN: AP)(表 6), 且 PCA 结果显示两轴累积解释率达 85% 以上, 能够解释较多的总变异性(图 5). 通过 PCA 图可知(图 5), 不同处理下(CK、N 添加、P 添加和 NP 共同添加)PC1 的解释

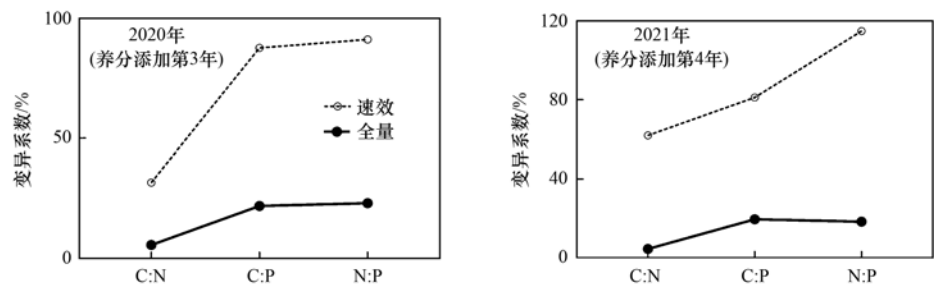
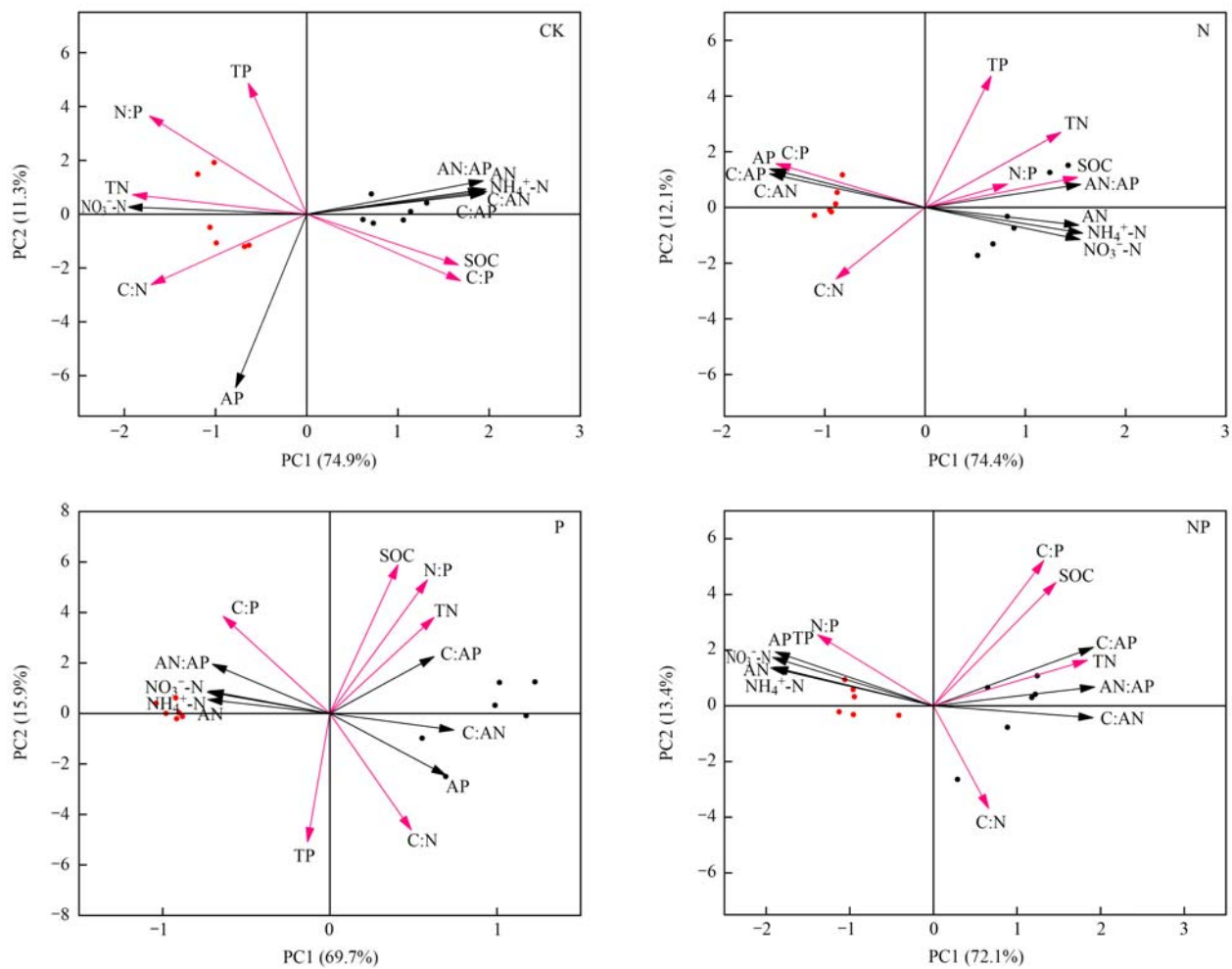


图4 荒漠草原土壤速效化学计量比及土壤全量化学计量比变异系数

Fig. 4 Coefficient variation in soil available stoichiometric ratio and total stoichiometric ratio in desert grassland



黑线:速效养分及生态化学计量特征;红线:全量养分含量及生态化学计量特征

图5 荒漠草原土壤养分及生态化学计量特征主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of soil nutrients and ecological stoichiometry in desert grassland

表5 荒漠草原土壤速效化学计量比与全量化学计量比相关性

	C: N	C: P	N: P	C: AN	C: AP	AN: AP
C: N	1	—	—	—	—	—
C: P	-0.054	1	—	—	—	—
N: P	-0.534 **	0.776 **	1	—	—	—
C: AN	-0.644 **	0.183	0.504 *	1	—	—
C: AP	-0.253	0.859 **	0.921 *	0.405 **	1	—
AN: AP	0.225	0.446 **	0.103 **	-0.511 **	0.162	1

率最低为 69.7%,特征值均达 9 以上. 因此,本研究主要依据各土壤因子在 PC1 上的结果进行分析. 在不同处理下第一轴土壤 C: AN 的负荷量和权重大于

土壤 C: N、土壤 C: AP 的负荷量和权重大于土壤 C: P、土壤 AN: AP 的负荷量和权重大于土壤 N: P (表 6).

表 6 荒漠草原土壤养分及生态化学计量特征载荷矩阵和权重

Table 6 Load matrix and weight of soil nutrient content and ecological stoichiometric characteristics in desert grassland

CK					N				
土壤因子	特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%	权重	土壤因子	特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%	权重
C: AN	9.743	74.945	74.945	0.09	NH ₄ ⁺ -N	9.676	74.434	74.434	0.09
NH ₄ ⁺ -N	1.465	11.269	86.214	0.09	AN: AP	1.577	12.134	86.568	0.088
NO ₃ ⁻ -N	0.801	6.161	92.375	0.089	C: AP	0.935	7.194	93.762	0.088
AN: AP	0.734	5.643	98.018	0.089	C: AN	0.498	3.832	97.594	0.088
AN	0.147	1.133	99.151	0.089	NO ₃ ⁻ -N	0.195	1.5	99.094	0.088
C: AP	0.092	0.709	99.86	0.088	AP	0.046	0.463	99.909	0.087
TN	0.012	0.089	99.949	0.087	AN	0.06	0.352	99.557	0.087
N: P	0.005	0.038	99.987	0.079	SOC	0.006	0.044	99.953	0.086
C: N	0.001	0.01	99.997	0.078	C: P	0.005	0.037	99.989	0.085
C: P	0	10.002	99.999	0.077	TN	0.001	0.009	99.998	0.077
SOC	0	0.001	100	0.076	C: N	0	0.002	100	0.05
AP	0	0	100	0.036	N: P	0	0	100	0.047
TP	0	0	100	0.029	TP	0	0	100	0.038

P					NP				
土壤因子	特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%	权重	土壤因子	特征值	贡献率 /%	累积贡献率 /%	权重
C: AN	9.063	69.718	69.718	0.095	NO ₃ ⁻ -N	9.375	72.119	72.119	0.088
NH ₄ ⁺ -N	2.073	15.947	85.665	0.094	AN: AP	1.744	13.416	85.535	0.088
AN	1.098	8.442	94.107	0.093	NH ₄ ⁺ -N	0.978	7.522	93.057	0.087
NO ₃ ⁻ -N	0.372	2.858	96.966	0.092	AN	0.725	5.577	98.634	0.087
AN: AP	0.23	1.77	98.736	0.09	C: AP	0.095	0.733	99.367	0.087
AP	0.099	0.759	99.495	0.089	N: P	0.059	0.451	99.818	0.087
C: AP	0.038	0.29	99.785	0.082	C: AN	0.017	0.129	99.947	0.086
C: P	0.017	0.134	99.92	0.08	AP	0.006	0.043	99.991	0.086
TN	0.007	0.055	99.975	0.08	TN	0.001	0.006	99.996	0.084
N: P	0.003	0.019	99.994	0.075	SOC	0	0.003	100	0.067
C: N	0.001	0.006	100	0.062	TP	0	0	100	0.062
SOC	0	0	100	0.052	C: P	0	0	100	0.059
TP	0	0	100	0.017	C: N	0	0	100	0.03

3 讨论

3.1 N、P 添加对荒漠草原土壤全量养分含量及生态化学特征的影响

养分添加第 4 年不同处理下土壤 TN 和 SOC 含量均低于养分添加第 3 年. 降雨量大小对土壤有机质分解和养分迁移转化等过程具有一定的调控作用,降雨量增加导致土壤 TN 和 SOC 的流失较多,进而土壤 TN 和 SOC 含量随降雨量增加降低^[29,30],研究区 2021 年年降雨量(210.3 mm)高于 2020 年年降雨量(181.2 mm),因此养分添加第 4 年土壤 TN 和 SOC 含量均低于养分添加第 3 年,且养分添加第 3 年和第 4 年土壤 TN 和 SOC 含量均高于养分添加处理前(2017 年). P 添加和 NP 共同添加第 3 年和第 4 年均显著增加土壤 TP 含量,而 N、P 养分添加

第 3 年虽增加土壤 TN 和 SOC 含量但未达到显著水平,直到 N、P 养分添加第 4 年才达到显著水平. 这与黄土高原^[14]和内蒙古典型草原^[31]的研究结果相同. 这是因为 N、P 养分添加通过影响生态系统的净初级生产力、硝化速率来间接改变土壤 TN 和 SOC 含量,而外源 P 输入直接增加了土壤 P 的供给;并且土壤中 P 比 C 和 N 更难溶,即不易因淋溶等原因流失,更易在土壤中固持,导致养分添加对土壤 TN 和 SOC 含量的影响在短期主要依靠水和光的可用性,长期主要依靠养分添加的累积效应^[11,31,32]. 因此 N、P 养分添加显著影响荒漠草原土壤全量养分,其中荒漠草原 TP 含量不受养分添加时间影响,而 TN 和 SOC 含量受养分添加时间影响;短期(3 a)N、P 添加对土壤 TN 和 SOC 含量无显著影响,中长期(>3 a)N、P 养分添加显著增加土壤中 TN 和 SOC

含量。

N、P 养分添加通过影响土壤养分含量而改变土壤 C:N:P 生态化学计量特征^[8,33]。土壤 C:N 是反映土壤质量的敏感指标,C:N 的演变趋势对土壤 C 和 N 循环有重要影响,土壤 C:N 可指示 SOC 分解速率,较低的 C:N 比表明具有较快的 SOC 分解速率^[33]。有研究表明 N、P 养分添加对荒漠草原 C:N 无显著影响,这与松嫩草地的研究结果一致^[19]。这是由于 SOC 和 TN 之间具有显著正相关关系,导致土壤 SOC 和 TN 含量对 N、P 添加的响应几乎是一致的,并且对森林生态系统^[34]和农田生态系统^[35]的研究均认为土壤 TN 和 SOC 之间极强正相关性使得 C:N 较为稳定;同时土壤 TN 和 SOC 作为结构性成分,其积累和消耗过程存在相对固定的比值^[36]。因此,荒漠草原地区土壤具有较为稳定的 C:N。土壤 C:P 作为土壤 P 有效性的指标,较低的 C:P 表示研究区域土壤 P 的有效性较高^[35,37]。本研究表明,P 添加和 NP 共同添加显著降低荒漠草原土壤 C:P。土壤 C:P 和 SOC 无显著相关性但和土壤 TP 呈显著负相关关系,即土壤 C:P 大小主要由土壤 TP 含量大小决定,C:P 随 TP 含量的增高而降低;且 P 添加和 NP 共同添加显著增加土壤 TP 含量^[38,39]。因此,P 添加和 NP 共同添加提高荒漠草原土壤 P 的有效性。土壤 N:P 常被用于预测养分限制类型,低的土壤 N:P 表示该地区植物生长受 N 限制^[14]。本研究中,P 添加和 NP 共同添加显著降低荒漠草原土壤 N:P,是由于 P 添加对荒漠草原土壤 TN 含量无显著影响却显著提高了荒漠草原 TP 含量;而且荒漠草原地区 N 缺乏而 P 富足,土壤中大部分 N 因植物生长而被吸收利用,从而导致土壤中 TN 含量的增加量低于 TP 含量的增加量^[8]。N 添加第 3 年对荒漠草原土壤 N:P 无显著影响,N 添加第 4 年显著提高荒漠草原土壤 N:P。这是由于 N 添加对荒漠草原土壤 TN 含量的影响受养分添加时间影响,N 添加第 3 年对土壤 TN 含量无显著变化,N 添加第 4 年显著提高土壤 TN 含量,从而在 N 添加第 4 年显著提高土壤 N:P。因此,N 添加有效缓解了荒漠草原植物生长的 N 限制,而 P 添加和 NP 共同添加加剧了荒漠草原植物生长的 N 限制。

3.2 N、P 添加对荒漠草原土壤速效生态化学计量特征的影响

NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 是有机氮经矿化作用转化而来的,土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量对养分添加的响应比 TN 含量更敏感,可以更直观反映土壤中 N 的供需状况^[6]。N 添加可以直接或间接增加土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量,提高土壤养分有效性^[40]。本研究中

N 添加和 NP 共同添加显著增加荒漠草原土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量,且土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量随养分添加年限增长而增加。这与草原生态系统^[16,19,41]的研究结果一致。原因可能是由于 N 添加和 NP 共同添加刺激了土壤微生物活性,加快了土壤有机 N 的分解;也可能是本研究 N 的添加选用尿素为速效态肥,其经过土壤中酶的作用后水解为速效态氮,直接影响土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量;也有研究认为 N 添加和 NP 共同添加通过促进硝化速率间接增加土壤中 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量^[40,42]。因此,N 添加和 NP 共同添加显著提高土壤 N 的供应能力以及土壤 N 的有效性^[16],并且对土壤有效氮 (NH_4^+ -N、 NO_3^- -N) 的影响存在累积性效应。N 添加还可以改变土壤 P 循环。对天然草地的研究认为 N 的输入提高微生物活性增加其对 P 的需求,进而促进微生物对土壤有机质和凋落物的分解,加快土壤中 P 的转换,最终提高土壤中 AP 含量^[43]。而本研究结果表明 N 添加对土壤 AP 含量无显著影响,这与对典型草原的研究结果一致^[41]。原因可能是由于 N 添加在提高 AP 释放到土壤中的速率的同时促进了植物对土壤 AP 的吸收^[44,45]。P 和 NP 共同添加显著增加土壤 AP 含量。外源 P 可直接输入土壤 P 库并提高土壤中 P 的可利用性^[9]。与 P 添加和 N 添加处理相比,NP 共同添加显著增加土壤 NH_4^+ -N 和 AP 含量,这与对典型草原的研究结果一致^[19]。结合双因素方差分析结果认为,这是 N 和 P 对土壤 NH_4^+ -N 和 AP 的交互作用所产生的结果;也可能是因为只有在 N 有效性较大时,P 的添加才会最大程度地影响土壤动态^[17]。因此 NP 共同添加更有利于增加土壤速效养分含量。

N、P 养分添加对土壤速效生态化学计量特征具有显著影响,且养分添加第 3 年和第 4 年影响相同。N、P 养分添加显著影响土壤 C:AN。这是由于同土壤 TN 不同,土壤 AN 和 SOC 呈显著负相关;且含量较为固定,受环境影响较小,而速效养分对环境变化更敏感^[17]。因此,N、P 养分添加显著降低土壤 C:AN。P 添加和 NP 共同添加显著降低荒漠草原土壤 C:AP。土壤 AP 和土壤 C:AP 呈显著负相关关系,即土壤 C:AP 受土壤 AP 含量的影响,且 P 添加和 NP 共同添加显著提高土壤 AP 含量^[38,39]。N 添加显著增加土壤 AN:AP,而 P 添加和 NP 共同添加显著降低荒漠草原土壤 AN:AP,这与对内蒙古典型草原的研究结果一致^[16]。N 添加显著增加土壤 AN 含量,但对土壤 AP 含量无显著影响;P 添加和 NP 共同添加下,土壤中 AN 含量的增加量低于 AP 含量。从而导致 N 添加、P 添加和 NP 共同添加对土壤 AN

: AP 的影响不同.

3.3 荒漠草原土壤养分含量及其生态化学计量特征关系

本研究发现, N、P 养分添加下土壤全量养分、速效养分和各化学计量比之间存在一定的相关性. 土壤 NH_4^+ -N 和土壤 AN 呈显著正相关关系, 而 NO_3^- -N 和土壤 AN 无显著相关性, 说明土壤 AN 主要受土壤 NH_4^+ -N 含量影响. 这可能是因为 NH_4^+ -N 带正电荷而 NO_3^- -N 带负电荷导致 NH_4^+ -N 更容易被固持, 因此土壤中 AN 主要为 NH_4^+ -N, 从而土壤 NH_4^+ -N 和 AN 的相关性更强^[44]. 土壤 TN 和 SOC 之间存在极显著的正相关关系, 这与高寒草甸的研究一致^[9]. 这验证了不同生态系统土壤 C:N 相对稳定的结论^[24], 合理解释了 N、P 养分添加对荒漠草原土壤 C:N 无显著影响的原因. 土壤 C:P、C:AP 和 SOC 无显著相关性, 和土壤 TP、AP 含量呈显著负相关; 土壤 N:P、AN:AP 和土壤 TP、AP 的相关性强于土壤 N:P、AN:AP 和土壤 TN、AN 的相关性. 这与对克氏针茅草原^[36]的研究结果一致, 表明在荒漠草原地区 C:P、C:AP、N:P 和 AN:AP 主要受土壤 TP 和 AP 含量的限制, SOC 和 TN 对土壤 C:P、C:AP、N:P 和 AN:AP 的影响小于 TP 和 AP.

3.4 荒漠草原土壤速效生态化学计量特征与土壤全量生态化学计量特征对养分添加响应的比较

土壤 N:P 和 AN:AP、土壤 C:P 和 C:AP 均呈显著正相关, 土壤 C:N 和 C:AN 呈显著负相关. 表明土壤全量化学计量比与土壤速效化学计量比存在较强的相关关系, 即均可用来指示 SOC 分解速率, P 的有效性以及土壤养分限制类型. 本研究结果表明 N、P 养分添加显著影响土壤 C:AN, 但对 C:N 无显著影响; 土壤 AN:AP 在养分添加第3年已经表现为显著提高, 而土壤 N:P 在养分添加第4年才表现出显著提高. 这是因为和全量养分相比, 速效养分对 N、P 养分添加更敏感, 从而导致速效化学计量比可以在较短的养分添加年限中更快速地做出反应^[46]. 因此, 短期养分添加下, 土壤速效生态化学计量特征可以更好指示土壤养分限制状况. 变异系数大小可反映土壤养分含量化学计量特征对 N、P 养分添加引起的环境条件变化响应的敏感程度^[29]. 本研究表明, 土壤速效化学计量特征变异系数均大于土壤全量化学计量特征变异系数; 且土壤速效化学计量特征变化范围大于土壤全量化学计量变化范围, 可以更好地表征 N、P 养分添加引起的土壤化学计量的变化. 因此, 土壤速效化学计量特征能更好地反映 N、P 养分添加对土壤生态化学计量特征的影响. 本研究通过对荒漠草原地区土壤养分及生态化学计量

特征的主成分分析得出土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、AN 和 C:AN、AN:AP 为土壤主要影响因子, 均为土壤速效养分及土壤速效化学计量. 在不同处理下第一轴土壤速效化学计量特征的负荷量均大于相对应的土壤全量化学计量特征的负荷量, 土壤速效化学计量特征的权重高于相对应的土壤全量化学计量特征, 这表明各土壤因子中土壤速效化学计量特征的重要性程度高于土壤全量化学计量特征. 且土壤速效化学计量特征解释率高于土壤全量化学计量特征, 表明土壤速效化学计量特征更好地解释土壤养分状况的变异性. 综上所述, 荒漠草原土壤速效化学计量比能更好反映 N、P 养分添加对荒漠草原土壤生态化学计量的影响, 更快速地指示土壤养分状况以及土壤质量.

4 结论

(1) N、P 养分添加显著影响荒漠草原土壤养分含量及其生态化学计量比, 其中土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、土壤 TN 和 SOC 含量受 N、P 养分添加年限影响, 具有累积性效应; N 添加和 P 添加对荒漠草原土壤 NH_4^+ -N、AP 含量和土壤 C:AN、AN:AP 具有显著交互作用.

(2) N 添加降低土壤 C:AN, 提高土壤 AN:AP; P 添加降低土壤 C:AP 和 AN:AP, NP 共同添加降低土壤 C:AN、C:AP 和 AN:AP. 较低的 C:AN、C:AP 和 AN:AP 分别指示较低的 SOC 分解速率、较高的 P 有效性和植物生长受 N 限制. 荒漠草原受 N 限制, N 添加可以有效缓解荒漠草原土壤 N 限制, P 添加和 NP 共添加加剧荒漠草原 N 限制.

(3) 土壤速效生态化学计量特征的变异系数均大于土壤全量生态化学计量的变异系数, 且在不同处理下土壤速效化学计量特征的负荷量和权重均大于相应的全量化学计量特征. 因此, 荒漠草原土壤速效化学计量对 N、P 养分添加更敏感, 可更好反映 N、P 养分添加对荒漠草原土壤生态化学计量的影响, 更快速地指示土壤养分状况.

参考文献:

- [1] 张继辉, 蔡道雄, 卢立华, 等. 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, **40**(16): 5718-5728. Zhang J H, Cai D X, Lu L H, et al. Soil ecological stoichiometry of different aged Teak (*Tectona grandis*) plantations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(16): 5718-5728.
- [2] Liu X, Ma J, Ma Z W, et al. Soil nutrient contents and stoichiometry as affected by land-use in an agro-pastoral region of northwest China[J]. CATENA, 2017, **150**: 146-153.
- [3] 黄磊, 张永娥, 邵芳丽, 等. 冀北山地天然次生林土壤生态化学计量特征及影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(15): 6267-6279.

- Huang L, Zhang Y E, Shao F L, *et al.* Soil ecological stoichiometry and its influencing factors in natural secondary forest, North Mountain of Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(15): 6267-6279.
- [4] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, **168**(2): 377-385.
- [5] 张勇强, 李智超, 厚凌宇, 等. 林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(1): 239-250.
- Zhang Y Q, Li Z C, Hou L Y, *et al.* Effects of stand density on understory species diversity and soil nutrients in Chinese fir plantation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(1): 239-250.
- [6] 张金玲, 于丽, 赵建宁, 等. 贝加尔针茅草原土壤无机氮含量对氮素添加的响应[J]. *草地学报*, 2017, **25**(5): 958-965.
- Zhang J L, Yu L, Zhao J N, *et al.* Responses of soil inorganic nitrogen content to nitrogen addition in the *Stipa baicalensis* grassland of inner Mongolia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, **25**(5): 958-965.
- [7] Tian D, Yan Z B, Niklas K J, *et al.* Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent[J]. *National Science Review*, 2018, **5**(5): 728-739.
- [8] 牛玉斌, 余海龙, 王攀, 等. 氮磷添加对荒漠草原植物群落多样性和土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(22): 8462-8471.
- Niu Y B, Yu H L, Wang P, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant community diversity and soil C:N:P ecological stoichiometry in a desert steppe of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(22): 8462-8471.
- [9] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 氮素添加对高寒草甸植物群落多样性和土壤生态化学计量特征的影响[J]. *草地学报*, 2021, **29**(12): 2769-2777.
- Xiang X M, De K J, Lin W S, *et al.* Effects of nitrogen addition on plant community diversity and soil ecological chemometric characteristics in alpine meadows[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, **29**(12): 2769-2777.
- [10] Schleuss P M, Widdig M, Heintz-Buschart A, *et al.* Stoichiometric controls of soil carbon and nitrogen cycling after long-term nitrogen and phosphorus addition in a mesic grassland in South Africa[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, **135**: 294-303.
- [11] 魏金明, 姜勇, 符明明, 等. 水、肥添加对内蒙古典型草原土壤碳、氮、磷及 pH 的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, **30**(8): 1642-1646.
- Wei J M, Jiang Y, Fu M M, *et al.* Effects of water addition and fertilization on soil nutrient contents and pH value of typical grassland in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(8): 1642-1646.
- [12] 岳泽伟, 李向义, 李磊, 等. 氮添加对昆仑山高山草地土壤、微生物和植物生态化学计量特征的影响[J]. *生态科学*, 2020, **39**(3): 1-8.
- Yue Z W, Li X Y, Li L, *et al.* Responses of soil, microbes and plant ecological stoichiometric characteristics to nitrogen addition in an alpine grassland of Kunlun Mountain[J]. *Ecological Science*, 2020, **39**(3): 1-8.
- [13] Xu H W, Qu Q, Li P, *et al.* Stocks and stoichiometry of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus after vegetation restoration in the loess hilly region, China[J]. *Forests*, 2019, **10**(1), doi:10.3390/f10010027.
- [14] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(1): 263-274.
- [15] 马顺容, 林永静, 卢同平, 等. 外源磷添加对西双版纳热带雨林土壤生态化学计量特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(10): 3194-3202.
- Ma S R, Lin Y J, Lu T P, *et al.* Effects of exogenous phosphorus addition on soil ecological stoichiometry in Xishuangbanna tropical rainforest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3194-3202.
- [16] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: evidence from inner Mongolia Grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2010, **16**(1): 358-372.
- [17] Chen H, Zhang W, Gurmessa G A, *et al.* Phosphorus addition affects soil nitrogen dynamics in a nitrogen-saturated and two nitrogen-limited forests[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, **68**(4): 472-479.
- [18] Jiang Y F, Rao L, Sun K, *et al.* Spatio-temporal distribution of soil nitrogen in Poyang lake ecological economic zone (South-China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **626**: 235-243.
- [19] 郑斯元. 氮磷添加对羊草-土壤-根际微生物化学计量特征的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- [20] 吕桂芬, 吴永胜, 李浩, 等. 荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J]. *中国沙漠*, 2010, **30**(1): 104-109.
- Lü G F, Wu Y S, Li H, *et al.* Microorganisms, soil nutrient and enzyme activity changing with the proceeding of desert steppe degradation in inner Mongolia[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(1): 104-109.
- [21] Tapia-Torres Y, Elser J J, Souza V, *et al.* Ecoenzymatic stoichiometry at the extremes: how microbes cope in an ultra-oligotrophic desert soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **87**: 34-42.
- [22] 杜忠毓, 安慧, 文志林, 等. 荒漠草原植物群落结构及其稳定性对增水和增氮的响应[J]. *生态学报*, 2021, **41**(6): 2359-2371.
- Du Z Y, An H, Wen Z L, *et al.* Response of plant community structure and its stability to water and nitrogen addition in desert grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(6): 2359-2371.
- [23] Borer E T, Harpole W S, Adler P B, *et al.* Finding generality in ecology: a model for globally distributed experiments[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, **5**(1): 65-73.
- [24] 陈涵兮, 海龙, 黄利民, 等. 坡向对毛竹林土壤养分及其生态化学计量特征的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, **30**(9): 2915-2922.
- Chen H X, Hai L, Huang L M, *et al.* Effects of slope direction on soil nutrient and its ecological stoichiometry in bamboo forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30**(9): 2915-2922.
- [25] Bell C, Carrillo Y, Boot CM, *et al.* Rhizosphere stoichiometry: are C:N:P ratios of plants, soils, and enzymes conserved at the plant species-level?[J]. *New Phytologist*, 2014, **201**(2): 505-517.
- [26] 陈正发, 史东梅, 金慧芳, 等. 基于土壤管理评估框架的云南坡耕地耕层土壤质量评价[J]. *农业工程学报*, 2019, **35**(3): 256-267.
- Chen Z F, Shi D M, Jin H F, *et al.* Evaluation on cultivated-layer soil quality of sloping farmland in Yunnan based on soil

- management assessment framework (SMAF) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(3): 256-267.
- [27] 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 等. 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5484-5492.
- Xie X F, Pu L J, Zhu M, *et al.* Assessment of soil quality in coastal tidal flat reclamation areas based on MDS-TOPSIS mode [J]. Environmental Science, 2019, **40**(12): 5484-5492.
- [28] 李鹏飞, 张兴昌, 郝明德, 等. 基于最小数据集的黄土高原矿区复垦土壤质量评价[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(16): 265-273.
- Li P F, Zhang X C, Hao M D, *et al.* Soil quality evaluation for reclamation of mining area on Loess Plateau based on minimum data set [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(16): 265-273.
- [29] 吴旭东, 季波, 何建龙, 等. 控制降水梯度对荒漠草原优势植物叶功能性状及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(7): 2719-2727.
- Wu X D, Ji B, He J L, *et al.* The effects of precipitation gradient control on the leaf functional traits and soil nutrients of the dominant plants in a desert steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(7): 2719-2727.
- [30] 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 等. 降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤 C:N:P 生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(2): 977-987.
- Gao J P, Zhao R F, Zhang L H, *et al.* Effects of precipitation changes on plant community diversity and soil C:N:P ecological stoichiometric characteristics in a desert steppe of China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(2): 977-987.
- [31] Zhan S X, Wang Y, Zhu Z C, *et al.* Nitrogen enrichment alters plant N:P stoichiometry and intensifies phosphorus limitation in a steppe ecosystem [J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, **134**: 21-32.
- [32] Gilliam J W. Phosphorus control strategies [J]. Ecological Engineering, 1995, **5**(2-3): 405-414.
- [33] Ai Z M, Zhang J Y, Liu H F, *et al.* Soil nutrients influence the photosynthesis and biomass in invasive *Panicum virgatum* on the loess plateau in China [J]. Plant and Soil, 2017, **418**(1-2): 153-164.
- [34] Gao Y, He N P, Yu G R, *et al.* Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: a case study in China [J]. Ecological Engineering, 2014, **67**: 171-181.
- [35] Jiang Y F, Guo X. Stoichiometric patterns of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in farmland of the Poyang Lake region in Southern China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, **19**(10): 3476-3488.
- [36] 张旭冉, 张卫青, 王海茹, 等. 克氏针茅草原土壤生态化学计量特征对放牧强度的响应[J]. 生态学报, 2021, **41**(13): 5309-5316.
- Zhang X R, Zhang W Q, Wang H R, *et al.* Response of soil ecological stoichiometric characteristics to grazing intensity in *Stipa kirschnii* grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(13): 5309-5316.
- [37] 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.
- [38] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报, 2016, **53**(2): 477-489.
- Zhao W J, Liu X D, Jin M, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian mountains [J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, **53**(2): 477-489.
- [39] 胡培雷, 王克林, 曾昭霞, 等. 喀斯特石漠化地区不同退耕年限下桂牧 1 号杂交象草植物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, **37**(3): 896-905.
- Hu P L, Wang K L, Zeng Z X, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of plants, soil, and microbes of *Pennisetum purpureum* cv. Guimu-1 pastures at different rehabilitation ages in a karst rocky desertification region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(3): 896-905.
- [40] 文旻, 胡启武, 阳文静, 等. 氮、磷添加对鄱阳湖典型苔草湿地土壤养分和植物生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(6): 1669-1676.
- Wen M, Hu Q W, Yang W J, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nutrients and plant biomass in a typical Poyang Lake marshland [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(6): 1669-1676.
- [41] 鄢创. 增温和氮添加对中国北方温带草原植被生产力与生态系统碳氮磷特征的影响[D]. 咸阳: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2022.
- [42] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. Nature, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [43] 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 等. 红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1960-1967.
- Lü L X, Song L, Liu Z L, *et al.* Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean pine plantation [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1960-1967.
- [44] 沈芳芳, 吴建平, 樊后保, 等. 杉木人工林凋落物生态化学计量与土壤有效养分对长期模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2018, **38**(20): 7477-7487.
- Shen F F, Wu J P, Fan H B, *et al.* Litterfall ecological stoichiometry and soil available nutrients under long-term nitrogen deposition in a Chinese fir plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(20): 7477-7487.
- [45] 裴广廷, 马红亮, 高人, 等. 模拟氮沉降对森林土壤速效磷和速效钾的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013, (4): 16-20, 87.
- Pei G T, Ma H L, Gao R, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on available P and K in soils of subtropical forest [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (4): 16-20, 87.
- [46] 文旻. 氮、磷添加对鄱阳湖典型苔草湿地生态化学计量特征及内稳性的影响[D]. 南昌: 江西师范大学, 2021.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Factors Influencing the Reduction in Ambient PM _{2.5} in Beijing from 2018 to 2020	LIU Bao-xian, LI Qian, SUN Rui-wen, <i>et al.</i>	(2409)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of Secondary Aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in Winter	YAO Qing, YANG Xu, TANG Ying-xiao, <i>et al.</i>	(2421)
Changes in Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} at Different Pollution Stages Before and After COVID-19 Control	JIANG Nan, HAO Xue-xin, HAO Qi, <i>et al.</i>	(2430)
On-line Measurement of Trace Elements in PM _{2.5} in Winter in Urban Taiyuan, China: Levels and Source Apportionment	CUI Yang, GUO Li-li, LI Hong-yan, <i>et al.</i>	(2441)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon Over the Eastern Tibetan Plateau	WANG Hong-lei, LIU Si-han, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i>	(2450)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Zhanjiang in Summer	PANG Xiao-die, GAO Bo, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i>	(2461)
Ozone Pollution Characteristics and Sensitivity During the Ozone Pollution Days in Summer 2021 of Xinxiang City	HOU Mo, JIANG Xiao-mei, ZHAO Wen-peng, <i>et al.</i>	(2472)
Influence of Typhoon Nangka Process on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i>	(2481)
Health Impacts of Air Pollution in Tianjin	HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, <i>et al.</i>	(2492)
Analysis of Change and Driving Factors of River Environmental Quality in China from 2002 to 2020	YANG Chuan-xi, XUE Yan, GAO Chang, <i>et al.</i>	(2502)
Spatiotemporal Pattern and Driving Force Analysis of Ecological Environmental Quality in Typical Ecological Areas of the Yellow River Basin from 1990 to 2020	WANG Fang, LI Wen-hui, LIN Yan-min, <i>et al.</i>	(2518)
Response of Water Quality in Small Reservoirs to Landscape Composition, Landscape Configuration, and Reservoir Characteristics in the Upper Reaches of the Yangtze River During Dry Season	ZHONG Yong-lin, RAN Jiao-jiao, WEN Wen, <i>et al.</i>	(2528)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Endocrine Disrupting Chemicals in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	LI Ling-yun, GAO Li, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(2539)
Occurrence Characteristics of Microplastics and Metal Elements in the Surface Water of Huangpu River and Their Associations with Metal Resistance Genes	LU Jia-wei, XU Chen-ye, HU Chun, <i>et al.</i>	(2551)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Urban River Surface Sediments from the Lanzhou Reach of the Yellow River	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(2562)
Distribution and Release Potential of Soil Phosphorus Fractions in Water-level Fluctuation Zone of the Tributary Bay, Three Gorges Reservoir	ZHANG Xue, ZHU Bo, <i>et al.</i>	(2574)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of Lake in Huoqiu County	LIU Hai, ZHAO Guo-hong, <i>et al.</i>	(2583)
Analysis of Influencing Factors of Chlorophyll-a in Lake Taihu Based on Bayesian Network	LIU Jie, HE Yun-chuan, DENG Jian-ming, <i>et al.</i>	(2592)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Shunping County, Hebei Province	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(2601)
Distribution, Transformation, and Fate of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Drinking Water Treatment	ZHONG Ting-ting, LIN Tao, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2613)
Removal of Cr(VI) via a Nickel Ferrite/Activated Carbon Composite Under Batch Experiments: Study of Characterization, Performance, and Mechanism	ZHANG Hua, LI Rong-hua, CHEN Jin-xiong, <i>et al.</i>	(2622)
Degradation of SMX with Peracetic Acid Activated by Nano Core-shell Co@NC Catalyst	ZHENG Ting-lu, ZHANG Long-long, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(2635)
Adsorption Characteristics of Arsenic and Cadmium by FeMnNi-LDH Composite Modified by Fulvic Acid and Its Mechanisms	HE Ya-xin, KE Xin-yi, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i>	(2646)
Adsorption Mechanism for Phosphate in Aqueous Solutions of Calcium/Aluminum-rich Sludge Biochar Composite	OUYANG Zhu, CAO Lu, WANG Bing-qian, <i>et al.</i>	(2661)
Sludge Biochar Modified by B-doped and Its Adsorption Behavior and Mechanism of 1,2-DCA in Water	ZHOU Jia-wei, SHI Wei-lin, XU Wei, <i>et al.</i>	(2671)
Response of Forest Ecosystems to Decreasing Atmospheric Nitrogen Deposition	XIE Dan-ni, YANG Dong-xing, DUAN Lei, <i>et al.</i>	(2681)
Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Restoration in Typical Grasslands of China	ZHANG Liang-xia, YUE Xiao, ZHOU De-cheng, <i>et al.</i>	(2694)
Spatial-temporal Variation in Net Primary Productivity in Terrestrial Vegetation Ecosystems and Its Driving Forces in Southwest China	XU Yong, HUANG Hai-yan, DAI Qiang-yu, <i>et al.</i>	(2704)
Effects of Different Carbon Inputs on Soil Stoichiometry in Tianshan Mountains	MA Xin-yu, GONG Lu, ZHU Hai-qiang, <i>et al.</i>	(2715)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Nutrient Content and Stoichiometry in Desert Grassland	LIU Shu-xuan, AN Hui, ZHANG Xin-wen, <i>et al.</i>	(2724)
Effect of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil C:N:P Stoichiometry in Coastal Wetland of Hangzhou Bay	LI Wen-qi, XIANG Qi, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(2735)
Effects of 24 Years Different Straw Return on Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Extracellular Enzymatic Stoichiometry in Dryland of the Loess Plateau, China	YAO Zhi-xia, ZHOU Huai-ping, XIE Wen-yan, <i>et al.</i>	(2746)
Carbon Sequestration Characteristics Under Natural Vegetation Restoration in Ziwlun Area of the Loess Plateau	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, WANG Hao-jia, <i>et al.</i>	(2756)
Effects of Short-term Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Components in <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Plantation	JIAN Jun-nan, LIU Wei-chao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i>	(2767)
Response of Soil Organic Carbon Accumulation in Paddy Fields in Fujian Province to Future Temperature Increases	CHE Yan, QIU Long-xia, WU Ling-yun, <i>et al.</i>	(2775)
Species, Habitat Characteristics, and Screening Suggestions of Cadmium Hyperaccumulators in China	ZHAO Xiao-feng, LEI Mei, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i>	(2786)
Research Progress on Spatial Differentiation and Influencing Factors of Soil Heavy Metals Based on Geographical Detector	GONG Cang, WANG Shun-xiang, LU Hai-chuan, <i>et al.</i>	(2799)
Geochemical Background and Baseline Value of Soil Chemical Elements in Hebei Province	ZHANG Li-ting, CHENG Hang-xin, XIE Wei-ming, <i>et al.</i>	(2817)
Distribution Characteristics, Ecological Risks, and Source Identification of Heavy Metals in Cultivated Land Under Non-grain Production	QIU Le-feng, ZHU Jin-xia, PAN Yi, <i>et al.</i>	(2829)
Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Arable Soil at the Geological High Background, Based on the Township Scale	YU Fei, WANG Jia-bin, WANG Rui, <i>et al.</i>	(2838)
Solid-solution Partitioning Coefficients and Environmental Risk of Cd and Pb in Soil in Chang-Zhu-Tan Area	LI Yu-ying, PENG Chi, LIU Le-le, <i>et al.</i>	(2849)
Ecological Risk and Migration Patterns of Heavy Metals in Soil and Crops in the Lead-Zinc Mining Area in Guizhou, China	MA Hong-hong, ZHANG Li, GUO Fei, <i>et al.</i>	(2856)
Mercury Pollution in Dryland Soil and Evaluation of Maize Safety Production in Guizhou Province	MA Li-jun, ZHOU Lang, SONG Bo, <i>et al.</i>	(2868)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs in the Soil of Wild <i>Forsythia Suspensa</i> in Shanxi	GUO Jia-jia, WANG Qi, KANG Min-jie, <i>et al.</i>	(2879)
Effects of P on the Uptake and Transport of Cd and As in Wheat Seedlings	WANG Yun, ZHAO Peng, LI Guang-xin, <i>et al.</i>	(2889)
Effects of Silicon Application on Arsenic Sequestration in Iron Plaque and Arsenic Translocation in Rice	LI Lin-feng, WEN Wei-fa, XU Zi-sheng, <i>et al.</i>	(2899)
Characteristics of Soil Microbial Community in Different Habitats in the Process of Ecological Restoration of Haifeng Wetland in Guangdong	MA Jiao-jiao, GAO Chang-jun, YI Xiao-qing, <i>et al.</i>	(2908)
Taxonomic and Functional Diversity of Soil Microbial Communities in Subalpine Meadow with Different Degradation Degrees in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, LIU Jin-xian, HU Yan-qiu, <i>et al.</i>	(2918)
Effects of the Transformation from Natural Alpine Grassland to Mixed Artificial Grassland on the Characteristics of Soil Microbial Community	YU Hao, LIU Yue, DENG Ye, <i>et al.</i>	(2928)
Effects of Chinese Milk Vetch Returning Incorporated with Chemical Fertilizer Reduction on the Composition and Function of Soil Bacterial Communities in Paddy Fields	ZHANG Ji-shi, LIU Chun-zeng, ZHENG Chun-feng, <i>et al.</i>	(2936)
Effects of Long-term Sod Cultivation on Chinese Hickory Plantation Soil Fungal Community and Enzyme Activities	HU Ying-bing, LIANG Chen-fei, JIN Jin, <i>et al.</i>	(2945)
Effects of Microplastic High-density Polyethylene on Cotton Growth, Occurrence of <i>Fusarium</i> wilt, and Rhizosphere Soil Bacterial Community	ZHANG Hao, SUN Jie, YANG Hui-ying, <i>et al.</i>	(2955)
Nitrogen Metabolism and Flora Characteristics of Bacteria Algae Complex System	ZHAO Zhi-rui, WU Hai-miao, MA Chao, <i>et al.</i>	(2965)
Analysis of Carbon Emissions and Influencing Factors in China Based on City Scale	WU Jian-sheng, JIN Xue-ru, WANG Han, <i>et al.</i>	(2974)
How Do Carbon Trading Policies Affect Industrial Carbon Productivity: Quasi-natural Experiments from Chinese Provincial Data	FANG Qi, LI Shao-ping, <i>et al.</i>	(2983)
Influence of the Classification of Municipal Solid Wastes on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions: A Case Study of Qingdao City, China	CHEN Ji-hong, BIAN Rong-xing, ZHANG Ting-xue, <i>et al.</i>	(2995)
Quantitative Analysis of Spatio-temporal Evolution Characteristics of Seasonal Average Maximum Temperature and Its Influence by Atmospheric Circulation in China from 1950 to 2019	SU Yue, LU Chun-yan, HUANG Yu-fei, <i>et al.</i>	(3003)