

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析 张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)

我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价 杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)

基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)

城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例 陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)

天津市“十三五”期间 PM_{2.5} 减排效果评估 肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)

清洁取暖对保定市采暖期 PM_{2.5} 中碳质气溶胶的影响 罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关健, 郭志强, 李博文 (3063)

南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)

大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响 汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)

热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析 符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (3089)

基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析 林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)

2016~2020 年成都市控制 PM_{2.5} 和 O₃ 污染的健康效益评价 张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)

深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析 刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗攻 (3117)

贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单 王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)

西安市大气降水的主要化学组分及其来源 周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)

宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源 刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)

雅鲁藏布江水化学演变规律 江平, 张全发, 李思悦 (3165)

无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析 徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)

太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价 罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)

北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估 蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)

氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程 郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)

淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估 武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)

西宁市浅层地下水化学特征及形成机制 刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)

叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价 闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)

密云水库细菌群落组成结构及影响因素 陈颖, 王佳文, 梁恩航, 陈倩 (3247)

可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径 许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)

纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制 陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)

高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制 张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)

铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定 何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)

城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素 张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)

基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响 符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)

我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估 黄静文, 刘磊, 顾晓元, 凌超普 (3321)

气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析 金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩茹, 陈明利 (3329)

基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量 丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态学计量特征 孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)

乌梁素海东部流域非生长季草地土壤细菌群落结构的垂向差异 李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)

芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局 毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)

植被类型对黄土高原露天复垦土壤碳循环功能基因的影响 赵蛟, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)

施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响 姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)

甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响 朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)

生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N₂O 排放及其功能基因的影响 陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)

覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响 蒋洪雨, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响 穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)

基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析 陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)

云南 5 城市道路扬尘 PM_{2.5} 中重金属含量表征及健康风险 韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)

兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价 李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)

PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例 高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)

基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)

PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析 王美华 (3509)

三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价 刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)

皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准 刘海, 魏伟, 潘海, 宋阳, 靳磊, 李建设, 叶林 (3531)

张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析 安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)

滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)

矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)

基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析 卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)

不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险 祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)

山东省典型灌溉区土壤-小麦重金属健康风险评估 王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)

基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测 牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)

《环境科学》征订启事(3062) 《环境科学》征稿简则(3116) 信息(3164, 3259, 3572)

河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征

孙雪¹, 龙永丽¹, 刘乐¹, 刘继亮², 金丽琼³, 杜海峰⁴, 陈凌云^{1*}

(1. 西北师范大学生命科学学院, 微型生物学研究室, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究所临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 3. 甘肃省分析测试中心, 兰州 730000; 4. 甘肃省陇南生态环境监测中心, 陇南 746000)

摘要: 为探究荒漠绿洲土壤 C、N、P 和 K 的含量变化及生态化学计量特征, 阐明其对环境因子的生态学响应, 选择河西走廊中段张掖临泽荒漠绿洲 10 块样地, 采集表层土壤样品, 测定土壤 C、N、P 和 K 含量, 揭示不同生境中土壤养分含量变化和化学计量比的分布特征以及与其他环境因子间的相关关系。结果表明: ①土壤 C 在各样点分布不均匀且具有明显的异质性 ($R = 0.761$, $P = 0.06$)。其中, $\omega(C)$ 在绿洲平均值最高, 为 $12.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 过渡带次之, 为 $8.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 荒漠最低, 为 $4.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; ②土壤 K 含量除在盐碱地含量较低外, 在荒漠、过渡带和绿洲之间均无显著变化且含量较高; ③土壤 C:N 平均值为 12.92, C:P 平均值为 11.69, N:P 平均值为 0.9, 均低于全球土壤平均水平 (13.33、72.0、5.9) 和中国土壤平均水平 (12、52.7、3.9); ④土壤含水量为影响荒漠绿洲土壤 C、N、P、K 和生态化学计量特征的最大影响因子, 贡献率为 86.9%, 其次为土壤酸碱度和土壤孔隙度, 贡献率分别为 9.2% 和 3.9%。研究结果为荒漠和绿洲生态系统的恢复和保护提供基础资料, 也为后期研究该地区生物多样性维持机制及其与环境间的相关关系提供科学依据。

关键词: 张掖临泽; 荒漠绿洲; 荒漠过渡带; 生态化学计量; 空间异质性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3353-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204242

Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye

SUN Xue¹, LONG Yong-li¹, LIU Le¹, LIU Ji-liang², JIN Li-qiong³, DU Hai-feng⁴, CHEN Ling-yun^{1*}

(1. Laboratory of Microbiota, College of Life Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Ecological and Environmental Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Gansu Provincial Analysis and Testing Center, Lanzhou 730000, China; 4. The Longnan Environmental Monitoring Station of Gansu Province, Longnan 746000, China)

Abstract: To investigate the changes in C, N, P, and K contents and ecological stoichiometry of desert oasis soils and to elucidate their ecological responses to environmental factors, 10 sample plots were selected in the Zhangye Linze desert oasis in the middle part of the Hexi Corridor, and surface soil samples were collected to determine the C, N, P and K contents of soils and to reveal the distribution characteristics of soil nutrient contents and stoichiometric ratios in different habitats and the correlation with other environmental factors. The results showed that: ① the distribution of soil carbon was uneven and heterogeneous across sites ($R = 0.761$, $P = 0.06$). The highest mean value was $12.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the oasis, followed by $8.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the transition zone and $4.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the desert. ② The content of total soil potassium did not vary significantly and was high among deserts, transition zones, and oases and low in saline areas. ③ The mean soil C:N value was 12.92, the mean C:P value was 11.69, and the mean N:P value was 0.9, all of which were lower than the global average soil content (13.33, 72.0, and 5.9) and the Chinese soil average (12, 52.7, and 3.9). ④ Soil water content was the most influential factor affecting C, N, P, K, and ecological stoichiometry characteristics of desert oasis soils, with a contribution of 86.9%, followed by soil pH and soil porosity, with contributions of 9.2% and 3.9%, respectively. The results of this study provide basic information for the restoration and conservation of desert and oasis ecosystems and establish a basis for future study of the biodiversity maintenance mechanism in the region and its correlation with the environment.

Key words: Zhangye Linze; desert oasis; desert-oasis transition zone; ecological stoichiometry; spatial heterogeneity

土壤是陆地生态系统中养分储存和利用的重要场所, 其时空差异性导致土壤理化性质出现巨大差异。陆地生态系统中的物质循环和能量流动受到土壤理化性质的间接影响^[1,2]。土地利用方式改变、植被凋落物和土壤微生物的活动使养分在土壤生态系统中再分配, 进而间接影响土壤健康^[3,4]。近年来, 有关河西走廊土壤理化性质的研究主要集中在人工栽培、植被恢复对荒漠土壤理化性质的影响等方面^[5-7]。我国是世界上受到沙漠化危害最严重的国家之一, 甘肃荒漠区是西北重要的生态安全屏障, 同时又是国家“北方防沙带”生态安全战略格局的重要组成部分, 对该区土壤的研究就显得尤为重要^[8]。

荒漠-绿洲过渡带作为重要枢纽, 连接着荒漠和绿洲两大生态系统, 对维护绿洲内安全与稳定起到重要的作用, 也是荒漠和绿洲之间人为构建的生态交错区。绿洲扩张使荒漠绿洲土地覆被急剧变化, 影响着当地土壤的营养构成。目前, 国内外学者对荒漠

收稿日期: 2022-04-20; 修订日期: 2022-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(42067012); 甘肃省自然科学基金项目(20JR5RA532); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5WA012); 甘肃省陇南市科技计划项目(2021-03); 环境化学与生态毒理学国家重点实验室开放基金项目(KF2021-02); 甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-335); 西北师范大学研究生科研项目(2021KYZZ02129)

作者简介: 孙雪(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤生态学, E-mail: 2020212608@nwnu.edu.cn
* 通信作者, E-mail: lychen@nwnu.edu.cn

生态系统的研究主要聚焦在荒漠生境的物质循环、能量流动和信息传输,免灌植被生长区土壤水分的变化状况,荒漠灌丛内外土壤养分含量的变化,降雨变化对荒漠草原植物群落多样性和生态化学计量特征的影响等方面^[9~13].张掖临泽地处甘肃省河西走廊中部,区域内受“干”“湿”气候条件的双重作用,为“荒漠绿洲”间进退消长的过渡区,保护着绿洲不受荒漠的侵蚀同时维持着绿洲的内部稳定.现阶段,对土壤生态化学计量特征的研究主要集中在祁连山,黄河三角洲湿地,施肥耕种土地,河西走廊不同戈壁,西南喀斯特地貌和亚热带地区等,涉及不同地域和生境^[14~22].然而,针对荒漠绿洲3种生境土壤理化性质的研究报道较少,本研究将为当地的陆地生态系统的土地恢复与治理提供参考依据.

本文对河西走廊中段张掖临泽荒漠、荒漠过渡带和绿洲这3种生境中的土壤C、N、P和K含量进行测定,计算其生态化学计量比,旨在分析:①荒漠绿洲不同生境土壤养分含量分布及其生态化学计量特征;②孔隙度、酸碱度和含水量等环境因子与土壤C、N、P、K及生态化学计量特征的相关关系;③土壤生态化学计量特征的空间异质性.本研究结果通过揭示荒漠绿洲土壤生态化学计量特征在不同生境的变化规律,可初步分析土壤养分生物地球化学循环特征,并探讨干旱区人类活动驱动下的地下生态系统演变过程,对治理荒漠和荒漠土壤具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河西走廊中段张掖绿洲北部的临泽绿洲边缘,巴丹吉林沙漠深入到河西走廊的延伸带(39°18′20″N~39°40′40″N、100°08′32″E~100°11′35″E;平均海拔为1384 m).该区属于大陆性干旱气候,冬季漫长寒冷,春季干旱少雨,降雨主要集中在7、8和9这3个月,夏季和秋季比较湿润.年均降水量为117 mm,蒸发量高达2390 mm,干燥度指数0.05.年平均气温为7.6℃,≥10℃年积温为3085℃,无霜期为165 d.

张掖绿洲是河西走廊最大的一块人工绿洲,它自汉代屯田开始,已经有几千年的历史^[23].绿洲外围有灌溉维持的杨树等乔木组成的防风林带和雨林的柽柳、梭梭和沙拐枣等人工固沙林带,这些天然和人工固沙植被组成的荒漠-绿洲过渡带维持绿洲的安全与稳定^[24].近年来,随着社会经济的快速发展,张掖绿洲边缘不断向外扩张,荒漠-绿洲过渡带逐步片段化,植被呈斑块状分布,过渡带外围部分荒

漠转变为绿洲农田或是防护林.荒漠-绿洲过渡带植被的快速变化影响地表和地下水文过程变化,土壤生物多样性、土壤理化性质和土壤的多功能性也随之发生变化.

1.2 样地设计、样品采集和测定方法

2021年7月12日在荒漠、荒漠过渡带和绿洲选择10块样地进行土壤样品采集(图1).采集3种土壤生境样品,采集土壤样品均靠近植物周边3~5 m处:①荒漠(HM)样地靠近巴丹吉林沙漠左侧,由北向南依次设置6个样点,均在荒漠植物周边3~5 m范围内,其中HM03生境较为特殊(典型盐碱地);②荒漠过渡带(GDD)样地位于荒漠与绿洲之间,是当地典型退耕还林50 a的灌丛人工梭梭林(GDD07)和乔木樟子松林(GDD08),其中人工梭梭林为当地的固沙造林优势种,生境接近于荒漠,樟子松林位于临泽县治沙实验站旁,生境接近于绿洲;③绿洲(LZ)样地靠近中国科学院临泽内陆河流域研究站,为两块农田玉米种植区,分别为居民区农田(LZ09)和黑河农田(LZ10),其中,LZ09为新农田,早期由沙地开垦形成,LZ10为老农田,由草地开垦形成.

在每个样地使用随机取样法选择3个1 m×1 m的采样点,在每个样方内设置3个重复.在样方内用直径为5 cm的钢质环刀采集原位土用于土壤含水率和容重的测定,采用环刀法和烘干法^[25].用自制直径为20 cm的钢质环刀采集表层0~5 cm土壤样品,全部置于白瓷盘自然风干后过筛(10目和100目)用于后续土壤理化指标的测定,pH、C、N、P和K各测定方法详见文献^[26].剩余土样倒入牛皮纸袋保存用作其他实验,避免土样交叉污染.

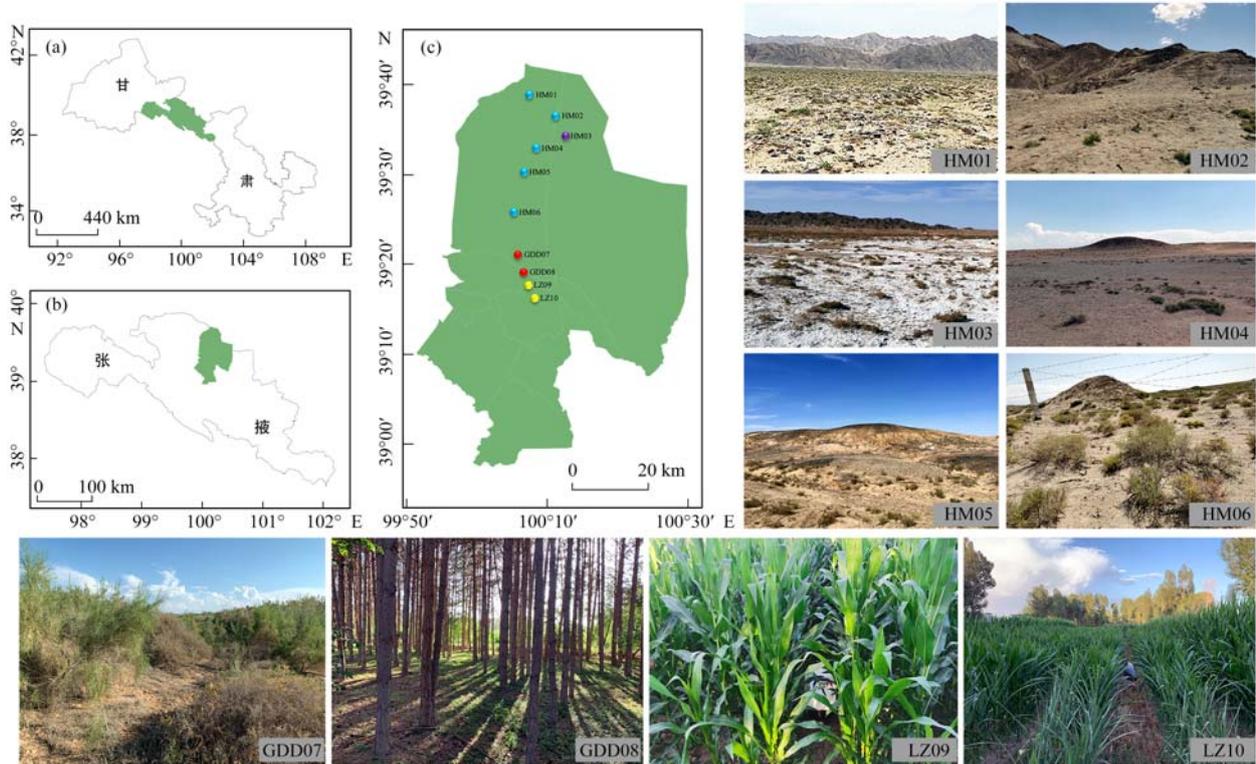
1.3 数据处理

原始数据录入采用Microsoft Excel 2020,相关性分析使用R语言和IBM SPSS Statistics 25统计软件,单因素方差分析使用Origin 2021,主成分分析和贡献率分析使用CANOCO 5,相似性分析(ANOSIM)、聚类分析(Cluster)和非度量多维尺度分析(NMDS)由PRIMER 7(Plymouth routines in multivariate ecological research)软件完成.

以荒漠绿洲10个样点为样本,样点的土壤理化因子为变量,建立各样点理化性质的原始矩阵,除pH外,其他理化因子进行 $\lg(x+1)$ 转换,建立相似性矩阵计算各样点间的相似性指数.根据各样点间的相似性指数用组平均值进行聚类分析(Cluster)和非度量多维尺度分析(NMDS)并通过非参数多元方法(ANOSIM)来检验各样点间的差异显著性. NMDS分析的二维点图的可行性用胁迫系数(2D Stress)来

衡量, $Stress < 0.05$ 时, 结果具有很好的代表性; $0.05 < Stress < 0.1$ 时, 结果基本可信; $0.1 < Stress < 0.2$ 时, 结果具有一定的解释意义. ANOSIM 检验

时用 R 值判断组间差异性, P 值判断差异显著性. $R = 0$ 时表示组间没有差异, $R > 0$ 时表示组间差异大于组内差异.



(a) 甘肃张掖, (b) 张掖临泽, (c) 临泽县样点分布; HM01 ~ LZ10 表示样地

图 1 研究区地理位置及样地示意

Fig. 1 Geographical location of the study area and sample sites

2 结果与分析

2.1 不同生境土壤养分含量分布特征及其相关关系

10 块样地土壤养分含量平均值的结果表明, GDD08、LZ09 和 LZ10 的 C 和 N 含量远大于 HM01 ~ HM06 和 GDD07 [$\omega(C)$ 平均值为 $6.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(N)$ 平均值为 $0.53 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表 1 和图 2], P 含量在 HM01 ~ HM06 之间整体变化趋势不明显, LZ10 最高并远大于 GDD, K 含量除 HM03 变化显著外, 其他

样点无明显变化 [$\omega(P)$ 平均值为 $0.59 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(K)$ 平均值为 $18.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表 1 和图 2]. 环境因子除 GDD08 的土壤含水量较高外, 其余样点均无明显变化(表 1). 其中, $\omega(C)$ 的变化范围为 $2.00 \sim 15.30 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 4%; $\omega(N)$ 的变化范围为 $0.17 \sim 1.11 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 2.5%; $\omega(P)$ 变化范围为 $0.33 \sim 1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 0.2%; $\omega(K)$ 变化范围为 $14.03 \sim 20.76 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 变异系数为 1.4%.

表 1 荒漠绿洲土壤养分含量¹⁾

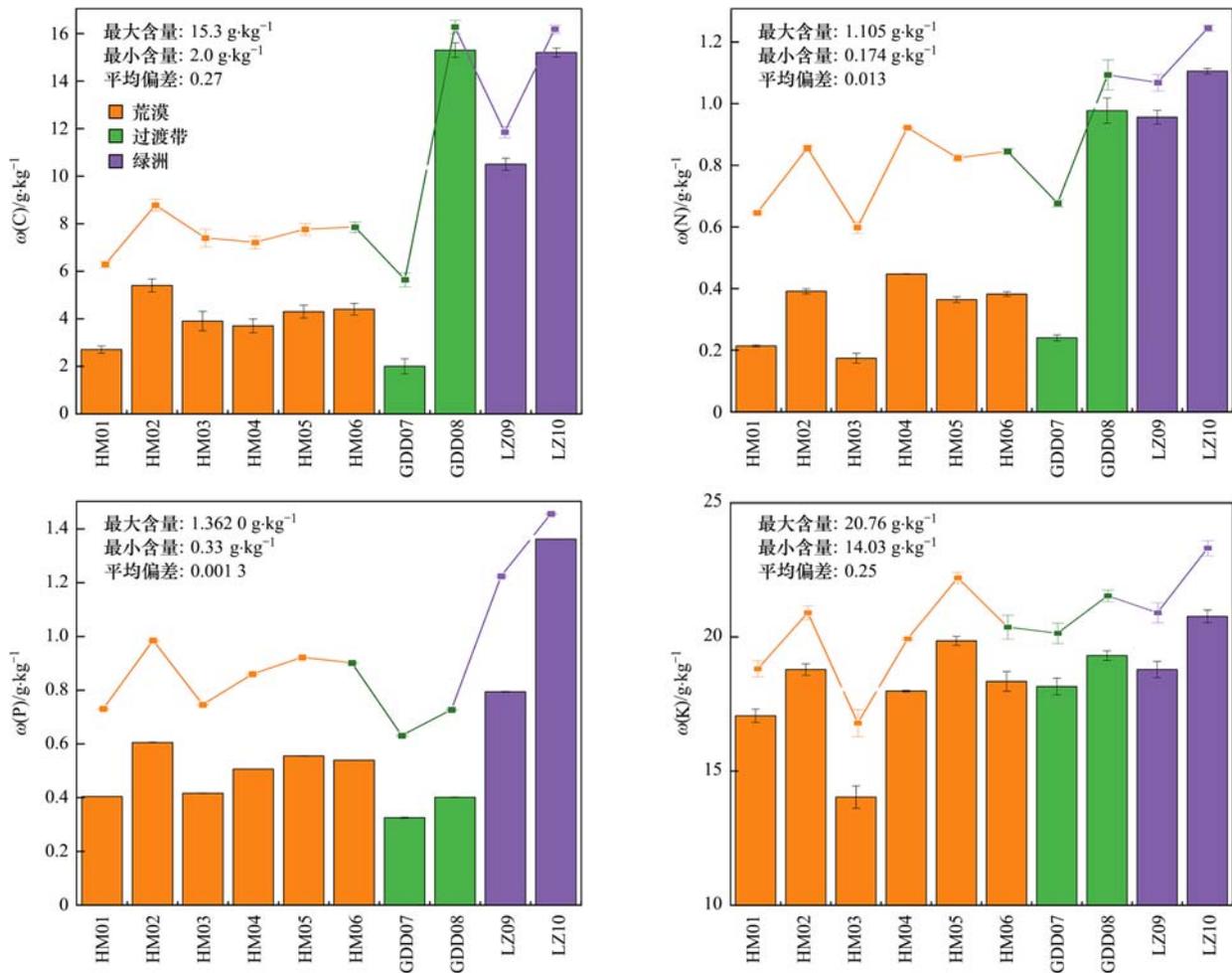
Table 1 Nutrient content of desert oasis soils

采样点	$\omega(C)$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(N)$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(P)$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\omega(K)$ / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	含水量 /%	孔隙度 /%
HM01	$2.70 \pm 0.15\text{f}$	$0.21 \pm 0.00\text{h}$	$0.40 \pm 0.00\text{e}$	$17.06 \pm 0.25\text{f}$	$0.00 \pm 0.00\text{b}$	$1.70 \pm 0.15\text{a}$
HM02	$5.40 \pm 0.27\text{c}$	$0.39 \pm 0.01\text{c}$	$0.61 \pm 0.00\text{d}$	$18.78 \pm 0.22\text{cd}$	$0.01 \pm 0.00\text{b}$	$1.60 \pm 0.03\text{ab}$
HM03	$3.90 \pm 0.41\text{de}$	$0.17 \pm 0.02\text{g}$	$0.42 \pm 0.00\text{f}$	$14.03 \pm 0.41\text{g}$	$0.01 \pm 0.00\text{b}$	$1.26 \pm 0.10\text{bc}$
HM04	$3.70 \pm 0.29\text{e}$	$0.45 \pm 0.00\text{f}$	$0.51 \pm 0.00\text{c}$	$17.98 \pm 0.03\text{e}$	$0.03 \pm 0.02\text{b}$	$1.44 \pm 0.22\text{abc}$
HM05	$4.30 \pm 0.27\text{de}$	$0.36 \pm 0.01\text{d}$	$0.56 \pm 0.00\text{d}$	$19.85 \pm 0.17\text{b}$	$0.00 \pm 0.00\text{b}$	$1.63 \pm 0.13\text{a}$
HM06	$4.40 \pm 0.24\text{d}$	$0.38 \pm 0.01\text{e}$	$0.54 \pm 0.00\text{d}$	$18.34 \pm 0.37\text{de}$	$0.01 \pm 0.00\text{b}$	$1.60 \pm 0.05\text{ab}$
GDD07	$2.00 \pm 0.32\text{g}$	$0.24 \pm 0.01\text{i}$	$0.33 \pm 0.00\text{e}$	$18.15 \pm 0.31\text{e}$	$0.01 \pm 0.00\text{b}$	$1.49 \pm 0.13\text{abc}$
GDD08	$15.30 \pm 0.31\text{a}$	$0.98 \pm 0.04\text{h}$	$0.40 \pm 0.00\text{b}$	$19.30 \pm 0.18\text{bc}$	$0.15 \pm 0.09\text{a}$	$1.22 \pm 0.30\text{c}$
LZ09	$10.50 \pm 0.25\text{b}$	$0.96 \pm 0.02\text{b}$	$0.79 \pm 0.00\text{b}$	$18.78 \pm 0.31\text{cd}$	$0.04 \pm 0.00\text{b}$	$1.45 \pm 0.09\text{abc}$
LZ10	$15.20 \pm 0.19\text{a}$	$1.11 \pm 0.01\text{a}$	$1.36 \pm 0.00\text{a}$	$20.76 \pm 0.24\text{a}$	$0.04 \pm 0.01\text{b}$	$1.49 \pm 0.03\text{abc}$
平均值	6.74	0.53	0.59	18.30	0.03	1.49

1) 同列不同小写字母表示变化显著 ($P < 0.05$); $n = 3$

荒漠、荒漠过渡带和绿洲这 3 种生境的土壤理化因子结果显示(图 2),土壤 C 与 N 整体变化趋势一致,在 GDD08 处急剧上升,C 在 LZ09 处变化明显、N 在 GDD08、LZ09 和 LZ10 基本保持水平,其中,在荒漠生境 6 个样点中(HM01 ~ HM06),土壤

C 变化幅度较小,在 HM01 处最低, HM02 处最高, N 在 HM03 处最低, HM04 处最高; 土壤 P 在 GDD07 处最低, LZ10 处最高; 土壤 K 除在 HM03 处急剧下降,变化显著外,在 HM01 ~ LZ10 之间无明显变化。



折线图与柱形图均表示变化趋势

图 2 荒漠绿洲土壤养分水平格局分布特征 ($n=3$)

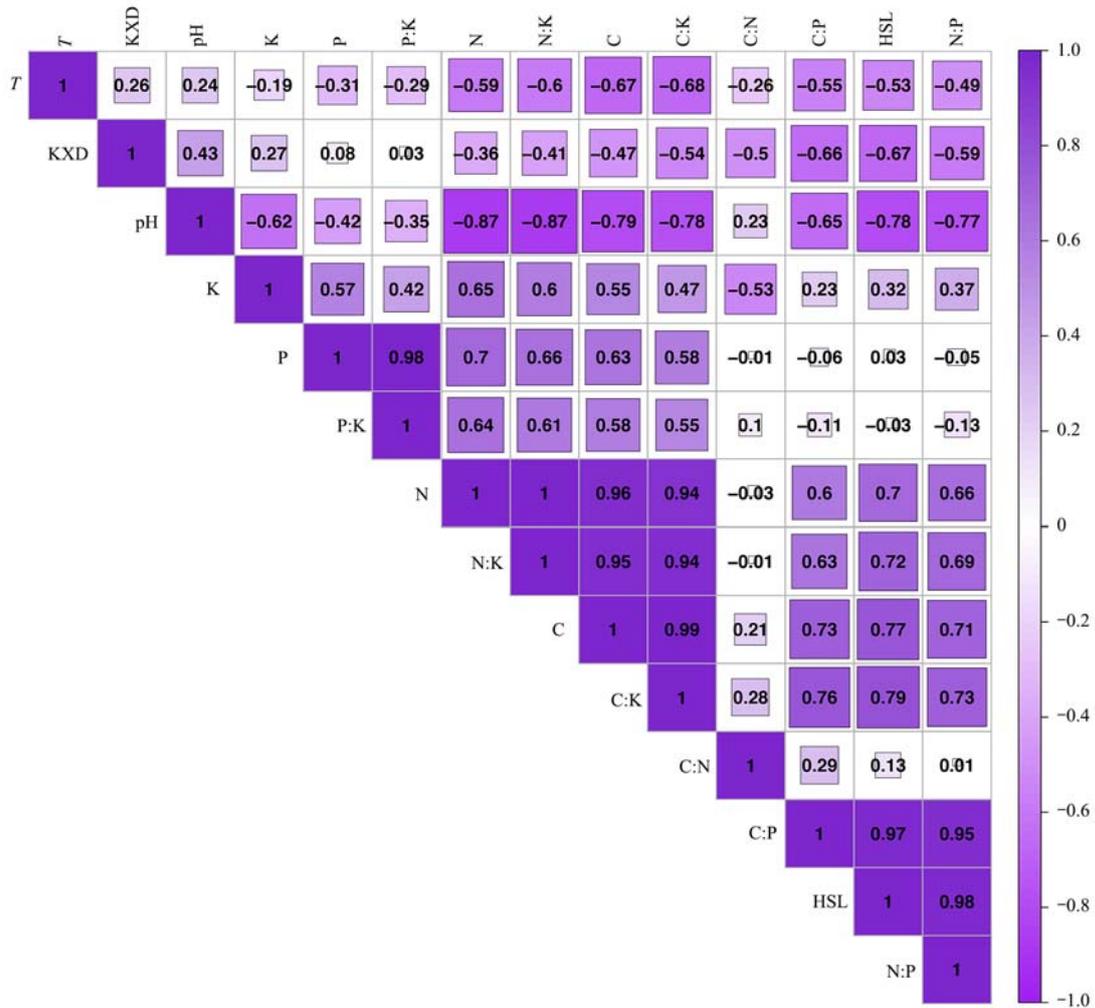
Fig. 2 Distribution characteristics of soil nutrient level pattern in desert oasis ($n=3$)

对荒漠绿洲土壤 C、N、P 和 K 进行相关性分析可知(图 3),土壤 C 与 N 之间呈现极显著正相关($P < 0.01$),即土壤 C 和 N 含量在水平分布上变化同步,而与 P 和 K 相关性较差; N 与 P 和 K 之间呈显著正相关($P < 0.05$); P 与 K 相关性较差。

2.2 不同生境 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征变化及相关性

对荒漠、荒漠过渡带和绿洲这 3 种生境土壤样本的 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征进行比较分析(表 2 和图 4),发现在水平格局的分布上, C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 和 P:K 变化特征较为不同。土壤 C:N、C:P 和 C:K 的变化范围分别为 8.28 ~ 22.41、6.15 ~ 38.15 和 0.11 ~ 0.79,变

异系数分别为 5.7%、4.8% 和 4.3%。C:N 在 HM04 处最低, HM03 处最高; C:P 和 C:K 除 LZ 外,总体变化趋势相似,在 GDD07 处最低, GDD08 处最高。土壤 N:P、N:K 的变化范围分别为 0.42 ~ 2.44、0.01 ~ 0.05,变异系数分别为 2.8% 和 2.9%。N:P、N:K 在 HM01 ~ HM06 变化趋势一致, N:P 在 GDD08 处急剧上升,之后在 LZ09 和 LZ10 处呈现下降趋势,变化明显, N:K 在 GDD08 处升高并趋于稳定,在 LZ09 和 LZ10 处未出现明显变化。土壤 P:K 的变化范围为 0.02 ~ 0.07,变异系数为 1.5%。比值较小,在 HM01 ~ HM06 无明显变化,在 GDD 处下降又在 LZ09 和 LZ10 出现升高现象。



色柱颜色越深,相关性越大; *T* 为温度, HSL 为土壤含水量, KXD 为孔隙度

图3 荒漠绿洲土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of C, N, P, K, and ecological chemometric characteristics of desert oasis soils

表2 荒漠绿洲土壤 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征¹⁾

Table 2 Ecological stoichiometry characteristics of C, N, P, and K in desert oasis soils

采样点	C: N	C: P	C: K	N: P	N: K	P: K
HM01	12.62 ± 0.81cd	6.68 ± 0.39gk	0.16 ± 0.01f	0.53 ± 0.01g	0.01 ± 0.00f	0.02 ± 0.00f
HM02	13.83 ± 0.73c	8.93 ± 0.46de	0.29 ± 0.02d	0.65 ± 0.01f	0.02 ± 0.00c	0.03 ± 0.00d
HM03	22.41 ± 0.75a	9.38 ± 1.00d	0.28 ± 0.02d	0.42 ± 0.04h	0.01 ± 0.00d	0.03 ± 0.00f
HM04	8.28 ± 0.66e	7.31 ± 0.56fgk	0.21 ± 0.02e	0.88 ± 0.00c	0.02 ± 0.00e	0.03 ± 0.00c
HM05	11.81 ± 0.61d	7.75 ± 0.49efg	0.22 ± 0.01e	0.66 ± 0.02f	0.02 ± 0.00e	0.03 ± 0.00e
HM06	11.52 ± 0.63d	8.16 ± 0.46def	0.24 ± 0.01e	0.71 ± 0.02ef	0.02 ± 0.00d	0.03 ± 0.00d
GDD07	8.33 ± 1.71e	6.15 ± 0.96k	0.11 ± 0.02g	0.74 ± 0.03de	0.01 ± 0.00h	0.02 ± 0.00f
GDD08	15.66 ± 0.85b	38.15 ± 0.83a	0.79 ± 0.02a	2.44 ± 0.09a	0.05 ± 0.00g	0.02 ± 0.00b
LZ09	10.98 ± 0.43d	13.22 ± 0.35b	0.56 ± 0.02c	1.20 ± 0.03b	0.05 ± 0.00b	0.04 ± 0.00b
LZ10	13.76 ± 0.23c	11.16 ± 0.15c	0.73 ± 0.00b	0.81 ± 0.01cd	0.05 ± 0.00a	0.07 ± 0.00a
平均值	12.92	11.69	0.36	0.90	0.03	0.03

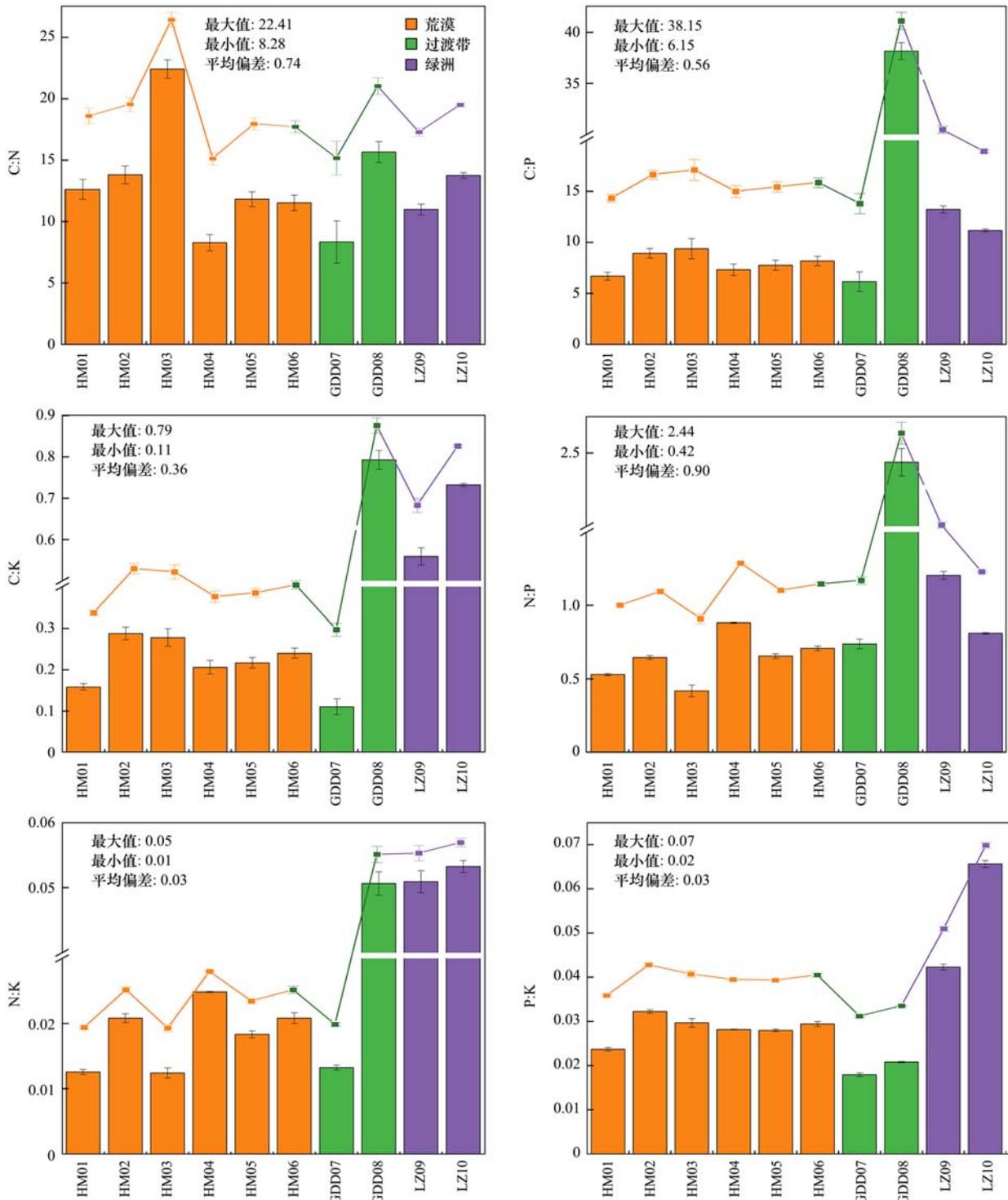
1) 同列不同小写字母表示变化显著 ($P < 0.05$); $n = 3$

对荒漠绿洲土壤 C: N、C: P、C: K、N: P、N: K 和 P: K 进行相关性分析 (图 3), 发现土壤 C: P 和 N: P, C: K 和 N: K 之间呈现极显著正相关 ($P < 0.01$); 土壤 C: P 与 C: K, C: K 与 N: P 之间呈现显著正相关 ($P < 0.05$); 而 C: N 和 N: K, C: P 和 P:

K, N: P 和 P: K 之间呈现负相关.

2.3 环境因子对土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征的影响

对环境因子与土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征进行主成分分析 (图 5), 结果显示土壤 C、



折线图与柱形图均表示变化趋势

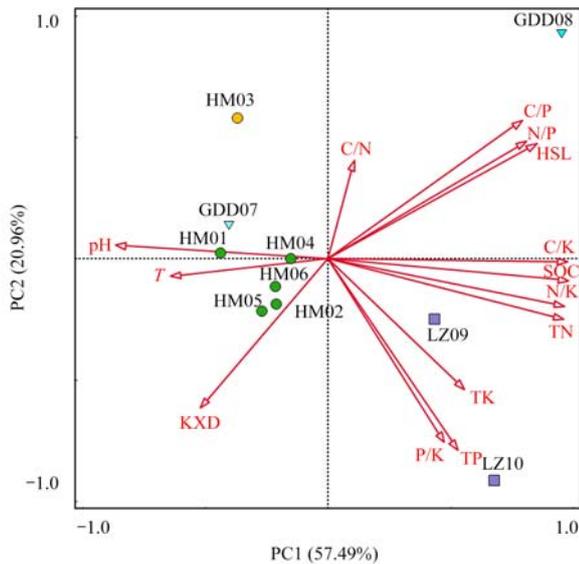
图 4 荒漠绿洲土壤生态化学计量比特征 ($n=3$)

Fig. 4 Characteristics of soil ecological stoichiometric ratios in desert oases ($n=3$)

N、P 和 K 含量及生态化学计量特征在第一轴和第二轴的贡献率分别为 57.49% 和 20.96%，累积贡献值为 78.45%，两轴可以较好地反映样点与环境因子的相关关系，除特殊生境 HM03 外，HM01、HM02 和 HM04 ~ GDD07 样本之间相似性很高。GDD07 与 HM 受 pH、温度和孔隙度的影响大，而 GDD08 与 LZ 则受含水量影响更大。土壤含水量与 C、N 含量

及 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 呈正相关关系，与 pH、温度、孔隙度呈负相关关系；土壤 pH 与 C:N 呈正相关关系，与 C、N、K 含量及 C:P、C:K、N:P、N:K 呈负相关关系；土壤孔隙度与 P、K 含量和 P:K 呈正相关关系，与土壤 C、N 含量及 C:N、C:P、C:K、N:P、N:K 呈负相关关系。

各环境因子对土壤 C、N、P、K 及生态化学计



T 为温度, HSL 为土壤含水量, KXD 为孔隙度, pH 为土壤酸碱度

图 5 环境因子和土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征的主成分分析

Fig. 5 Principal component analysis of environmental factors and soil C, N, P, K, and ecological chemometric characteristics

量特征的贡献率大小为: 土壤含水量 > 土壤酸碱度 > 土壤孔隙度 (表 3), 其贡献率分别为 86.9%、9.2% 和 3.9%。土壤含水量高度极显著影响土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征 ($P < 0.01$), 土壤酸碱度显著影响土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征 ($P < 0.05$)。

表 3 环境因子对土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征贡献率及显著性检验¹⁾

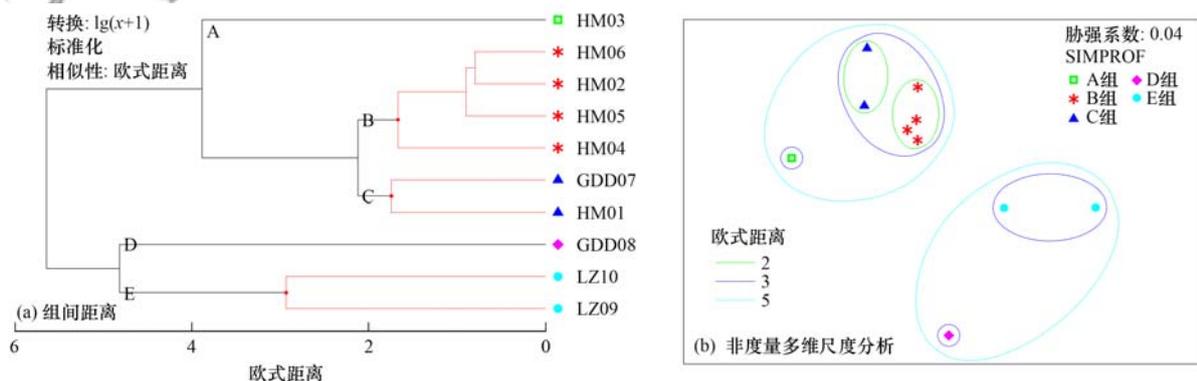
Table 3 Contribution of environmental factors to soil C, N, P, K, and ecological chemometric characteristics and significance test

环境因子	贡献率/%	F	P
土壤含水量	86.9	22.5	0.004
土壤酸碱度	9.2	3.0	0.03
土壤孔隙度	3.9	1.3	0.314

1) F 为 F 检验

2.4 土壤 C、N、P、K 及生态化学计量多元统计分析

Cluster 和 SIMPROF 相似性分析检验结果显示 (图 6), 3 种生境环境因子间差异显著 ($R = 0.567$, $P = 0.02$)。两两检验表明, 荒漠和绿洲之间差异显著 ($R = 0.76$, $P = 0.03$), 荒漠和过渡带之间差异不显著 ($R = 0.396$, $P = 0.1$), 过渡带与绿洲之间没有差异 ($R = 0$, $P = 1$), 这与 2.1 ~ 2.3 节所得出的结论相一致。其中, HM03 (盐碱地) 和 GDD08 (樟子松林) 各为一支 (A 组和 D 组); HM02 和 HM04 ~ HM06 聚为一支 (B 组), HM01 和 GDD07 聚为一支 (C 组), LZ09 和 LZ10 聚为一支 (E 组)。NMDS 排序结果显示, 土壤生态化学计量特征存在显著的时空差异, 同一生境土壤理化性质空间差异较小, 2D Stress 值为 0.04 ($\text{Stress} < 0.05$), 说明二维排序结果能够较好地反映各样点的生态化学计量特征在 3 种生境具有明显的空间异质性。



聚类分析使用 SIMPROF 分析, 红色虚线表示差异不显著: $P > 0.05$

图 6 荒漠绿洲土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征聚类分析和非度量多维尺度分析

Fig. 6 Cluster analysis and non-metric multidimensional scale analysis of C, N, P, K, and ecological chemometric characteristics of desert oasis soils

3 讨论

3.1 土壤 C、N、P 和 K 含量分布特征

土壤养分的变化发展是在母质成土过程中起主导作用的生物因素与地质大循环和生物小循环共同作用导致的^[27,28]。C、N、P 和 K 是生物有机体最重要的生源元素, 对生态系统的结构和功能起着至关

重要的作用^[29]。有研究表明, 中国表层土壤 (0 ~ 10 cm) $\omega(\text{C})$ 平均值为 $10.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{N})$ 平均值为 $1.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{P})$ 平均值为 $0.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[30,31]。本研究中, 土壤 $\omega(\text{C})$ 平均值为 $6.74 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1), 仅达到中国表层土壤平均水平的 65% 左右, 影响土壤 C 含量主要因素是凋落物的矿化分解与转化累积, 本研究中涉及到过渡带与绿洲, GDD08、LZ09 和

LZ10 的土壤 C 含量相对较高,分布特征图上显示土壤 C 呈现明显的偏态分布(图 2),意味着张掖临泽荒漠区表层土壤 C 含量相对偏小.解宪丽等^[32]在全国范围内的研究也发现,土壤 C 含量在空间分布上具有明显地域性,差异较大.中国表层土壤 C 含量最低的地区是荒漠与荒漠化地区,主要有准噶尔盆地、塔里木盆地、阿拉善高原、河西走廊及柴达木盆地等,这与本研究的结果一致.本研究中土壤 ω (N) 平均值为 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1), N 含量不足中国表层土壤平均水平的 30%. 土壤 N 的来源是氮素的矿化、固定、硝化和反硝化等一系列过程^[1,33],本研究结果与中国土壤氮素研究结果相一致,荒漠区土壤 N 含量相对较低,亦低于全国自然植被下的土壤 N 含量^[34].

在本研究中,GDD08、LZ09 和 LZ10 的 C 和 N 含量骤然升高(图 2),导致其升高的原因是樟子松林和绿洲农田的地表腐殖质较厚,植物的枯枝落叶在寒冷或干旱的季节脱落,进行矿化分解,进而不断地向土壤提供肥料,输送 C 和 N 等养分^[35]. 本研究中土壤 ω (P) 平均值为 $0.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1),低于中国表层土壤平均水平,是由于研究区域降水量低进而使得养分元素的淋溶作用弱所导致的^[36]. 土壤中的 P 和 K 属于沉积性元素且迁移率较低,一般来源于土壤基岩或母质矿化分解作用^[37-39]. K 主要以无机形态存在,其含量远远高于氮磷,也在本研究中进一步得到证实.此外,土壤不同的水热条件也会影响土壤 P 和 K 的含量,适宜的水热条件下土壤微生物和酶的活性提高,促进分解作用^[20],本研究区土壤 P 含量较为缺乏(表 1),与该地区土壤 pH 较高有关,而该区域 K 无明显变化趋势则与该区域降水量低有关.这与已有的研究结果一致^[20-22],pH 高,氧化还原电位高,会增强土壤中金属离子对磷的吸附作用,容重增加与含水率降低会减弱土壤的风化能力,减少土壤母质中磷的释放量,进而造成土壤磷含量的缺乏.

3.2 土壤 C、N、P、K 生态化学计量学特征

土壤作为生态系统重要的组成部分,地表凋落物的分解速率、地下土壤微生物的数量和土壤养分含量都是影响土壤 C、N、P、K 生态化学计量学特征的关键因素,进而影响陆地生态系统生物地球化学循环^[40]. C:N:P 可用于反映土壤养分的限制情况和循环特征,是土壤碳氮磷矿化和固持作用指标之一^[1]. 根据土壤碳氮储量计算,全球土壤 C:N 范围为 9.9 ~ 29.8, C:N 平均值为 13.33,中国土壤 C:N 平均值范围在 10 ~ 12 之间^[41,42]. 在本研究中,张掖临泽荒漠绿洲的 C:N 平均值为 12.92(表 2),低于

全球土壤 C:N 平均值却略高于中国土壤 C:N 平均值,而在 HM03 和 GDD08 却远高于全球土壤 C:N 平均值. HM03 为 22.41, GDD08 为 15.66(表 2). 主要原因是由于不同生境的气候和地形不同,在 HM03 表现为氮素严重缺乏,而在 GDD08 由于植物凋落物较多使得 C 较为充足.

土壤 C:P 作为判断土壤磷矿化能力、微生物矿化有机物释放磷和从环境中吸收磷潜力的重要指标^[43,44]. 根据土壤碳磷储量计算,全球陆地土壤 C:P 平均值为 72.0,中国陆地 C:P 平均值为 52.7,本研究中,土壤平均 C:P 为 11.69(表 2),远低于全球土壤平均水平和中国土壤平均水平. 研究表明,较低的 C:P 会对微生物在有机质分解过程中的养分释放有一定的促进作用^[45],说明本研究中,土壤 TP 具有较高的有效性,表现为净矿化.

土壤 N:P 常用于确定养分的限制阈值和判断氮饱和^[45],根据土壤氮磷储量计算,全球陆地平均水平为 5.9,中国 N:P 平均水平为 3.9^[45],本研究中,土壤平均 N:P 为 0.90(表 2),同 C:P 一样,远低于全球土壤平均水平和中国土壤平均水平. 研究发现温度较低时,土壤微生物的生长速度会变得缓慢,但在矿化土壤有机质释放磷素方面的速率会加大^[46],故将氮素认为是温带气候地区土壤的主要限制因子^[45],与本研究结果显示的张掖临泽荒漠绿洲土壤氮素呈现明显的缺乏现象相一致.

3.3 土壤 C、N、P、K 与生态化学计量特征的影响因素

土壤 C:N:P 主要受水热条件、成土作用和土壤养分特征的控制,但由于受土壤形成因子(气候、地貌、植被、母岩、土壤动物等)和人类活动的影响,导致土壤 C:N:P 的空间变异较大. 同时,不同气候、土地利用强度、植被凋落物分解及生物演替过程等都会使土壤 C、N、P 含量及其比例发生改变^[1]. 在本研究中,GDD08、LZ09 和 LZ10 的表层土壤 C、N 和 P 含量均显著高于 HM01 ~ HM06 ($P < 0.05$,表 1 和图 2). 一般而言,高温湿润的环境有利于土壤有机质的积累^[35],在荒漠区,较为干旱的环境导致地表植被盖度率极低,凋落物的输入量每年极为有限,水热条件的缺失,会导致地上生物量减少,随之形成的凋落物也不断减少,致使输送到土壤中凋落物分解合成的有机质含量降低^[35],这是造成荒漠区土壤 C、N 和 P 含量低的主要原因. 而在绿洲农田人类耕作过程中,施肥使部分肥料遗留在土壤中,在一定程度上会增加农田土壤有机质和氮元素的输入量,造成荒漠区和绿洲农田表层土壤 C、N 和 P 含量的差异.

荒漠绿洲土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征综合不同环境因子的影响, 本研究结果表明土壤含水量和土壤酸碱度高度极显著影响土壤生态化学计量特征, 其中土壤含水量和土壤酸碱度贡献率达 86.9% 和 9.2% (表 3)。土壤含水量作为土壤生态系统中各类元素迁移和循环的重要载体, 直接或间接地影响土壤的生理生化特性和地表植物的生长发育^[47]。本研究中樟子松林过渡带和绿洲土壤 C 和 N 含量远高于荒漠和梭梭林过渡带, 是由于在土壤含水量较高的条件下, 嫌气性微生物的固氮能力较强, 有助于土壤 C 和 N 的积累导致的^[48]。李红林等^[47]研究发现, 土壤含水量是影响塔里木盆地北缘绿洲土壤 C、N、P 生态化学计量特征的最主要的驱动因子, 并且得到了土壤含水量与土壤 C、N 元素含量和 N:P、C:P 呈现极显著正相关关系的结论, 此结论在本研究中也得到了进一步证实。

4 结论

(1) 由于本研究涉及到的过渡带与绿洲土壤 C 相对较高, 土壤 C 呈现明显的偏态分布。不同土壤类型下的 $\omega(C)$ 存在显著差异, 绿洲平均值最高, 为 $12.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 过渡带次之, 为 $8.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 荒漠最低, 为 $4.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 土壤 K 除在盐碱地含量较低外, 在荒漠、过渡带和绿洲之间均无显著变化且含量较高, 变化范围为 $14.03 \sim 20.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 土壤 C:N 平均值为 12.92、C:P 平均值为 11.69、N:P 平均值为 0.90。C:N、C:P 和 N:P 均低于全球土壤平均含量 (13.33、72.0、5.9) 和中国土壤平均水平 (12、52.7、3.9)。

(4) 荒漠绿洲各环境因子对土壤 C、N、P、K 及生态化学计量特征影响最大的为土壤含水量, 贡献率为 86.9%, 其次为土壤酸碱度和土壤孔隙度, 贡献率为 9.2% 和 3.9%。

(5) 本文仅对荒漠绿洲表层土壤养分变化及生态化学计量特征进行了初步研究, 为荒漠生态系统和绿洲生态系统的保护和恢复等提供科学依据, 将生物地球化学循环联系在一起, 为后期深入探索该生境的土壤生态化学计量特征与生物多样性维持机制的相互关系和空间变异奠定研究基础。

致谢: 中国海洋大学龙红岸教授对于写作的指导, 特此感谢!

参考文献:

[1] 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.

- [2] 秦璐, 傅德平, 杨军, 等. 艾比湖湿地自然保护区典型群落土壤理化性质分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(8): 144-151.
Qin L, Fu D P, Yang J, et al. The soil physiochemical properties of typical communities in Ebinur Lake Wetlands Nature Reserve[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(8): 144-151.
- [3] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4112-4118.
Xu H Q, Zhang J E, Feng L F, et al. Effects of different land use patterns on microbial biomass carbon and nitrogen in Guangdong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(8): 4112-4118.
- [4] Kennedy A C, Papendick R I. Microbial characteristics of soil quality[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1995, 50(3): 243-248.
- [5] 陈叶, 秦嘉海. 人工栽培中麻黄对荒漠化土壤理化性质的影响[J]. 土壤, 2005, 37(5): 563-565.
Chen Y, Qin J H. Effect of cultivation of Chinese Ephedra on physico-chemical properties of desert soil[J]. Soils, 2005, 37(5): 563-565.
- [6] 李尝君, 曾凡江, 郭京衡, 等. 植被恢复程度与沙地土壤性质——以塔克拉玛干沙漠南缘为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1061-1067.
Li C J, Zeng F J, Guo J H, et al. Soil properties of different sandy lands under different vegetation recovering levels—a case in southern Taklimakan Desert[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1061-1067.
- [7] 孔涛, 张莹, 雷泽勇, 等. 沙地樟子松人工林土壤氮矿化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 296-306.
Kong T, Zhang Y, Lei Z Y, et al. Soil nitrogen mineralization under *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation on sandy soil[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 296-306.
- [8] 孙小丽, 马丁丑, 邱芳. 甘肃国家生态安全屏障制度化保障机制构建研究[J]. 资源开发与市场, 2016, 32(4): 468-472.
Sun X L, Ma D C, Qiu F. Research on construction of institutionalized safeguard mechanism of national ecological security barrier in Gansu province[J]. Resource Development & Market, 2016, 32(4): 468-472.
- [9] Evans D D, Thames J L. Water in desert ecosystems [M]. Stroudsburg: Academic Press, 1981.
- [10] 常学向, 赵爱芬, 赵文智, 等. 黑河中游荒漠绿洲区免灌植被土壤水分状况[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 126-129.
Chang X X, Zhao A F, Zhao W Z, et al. Status of soil moisture in oasis and desert unirrigated vegetation region along middle reaches of Heihe river basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 126-129.
- [11] 许文强, 罗格平, 陈曦. 干旱区绿洲-荒漠过渡带灌丛土壤属性研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 583-586.
Xu W Q, Luo G P, Chen X. Soil properties under shrubs in arid area of oasis-desert transition belt [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4): 583-586.
- [12] 李秋艳, 何志斌, 赵文智, 等. 不同生境条件下泡泡刺 (*Nitraria sphaerocarpa*) 种群的空间格局及动态分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 484-488.
Li Q Y, He Z B, Zhao W Z, et al. Spatial pattern of *Nitraria sphaerocarpa* population and dynamics in different habitats [J].

- Journal of Desert Research, 2004, **24**(4): 484-488.
- [13] 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.
- [14] 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 等. 黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3241-3252.
- Sun D B, Li Y Z, Yu J B, *et al.* Spatial distribution and eco-stoichiometric characteristics of soil nutrient elements under different vegetation types in the Yellow River Delta Wetland[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 3241-3252.
- [15] 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.
- [16] 安富博, 张德魁, 赵锦梅, 等. 河西走廊不同类型戈壁土壤理化性质分析[J]. 中国水土保持, 2019, (6): 42-47.
- An F B, Zhang D K, Zhao J M, *et al.* Soil physical and chemical properties of different types of Gobi deserts in Hexi corridor[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019, (6): 42-47.
- [17] 田静, 盛茂银, 汪攀, 等. 西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- Tian J, Sheng M Y, Wang P, *et al.* Influence of land use change on litter and soil C, N, P stoichiometric characteristics and soil enzyme activity in karst ecosystem, southwest China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4278-4286.
- [18] 何宇, 盛茂银, 王珂, 等. 土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- He Y, Sheng M Y, Wang K, *et al.* Effects of land use change on constitution, stability, and C, N, P stoichiometric characteristics of soil aggregates in Southwest China Karst [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3752-3762.
- [19] 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 等. 中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 1059-1068.
- Jiao P Y, Guo W, Chen Z L, *et al.* Soil enzyme stoichiometric characteristics of *Pinus massoniana* plantations at different stand ages in Mid-subtropical Areas [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 1059-1068.
- [20] 张光德, 赵传燕, 戎战磊, 等. 祁连山中部不同植被类型土壤生态化学计量特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2019, **55**(4): 533-540.
- Zhang G D, Zhao C Y, Rong Z L, *et al.* Ecological stoichiometry of soils with different vegetation types in the middle part of the Qilian Mountains [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2019, **55**(4): 533-540.
- [21] 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.
- [22] 井赛, 陈志林, 侯晓巍, 等. 青海省祁连山天然林林地土壤生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2021, **36**(6): 1-8.
- Jing S, Chen Z L, Hou X W, *et al.* Soil ecological stoichiometry characteristics of *Juniperus przewalskii* natural forest lands in Qinghai, China [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, **36**(6): 1-8.
- [23] 刘继亮, 李锋瑞. 干旱区绿洲扩张方式对土壤生物优势类群及功能的影响[J]. 生物多样性, 2018, **26**(10): 1116-1126.
- Liu J L, Li F R. Effects of oasis expansion regimes on ecosystem function and dominant functional groups of soil biota in arid regions [J]. Biodiversity Science, 2018, **26**(10): 1116-1126.
- [24] 苏永中, 杨晓, 杨荣. 黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(10): 3683-3691.
- Su Y Z, Yang X, Yang R. Effect of soil texture in unsaturated zone on soil nitrate accumulation and groundwater nitrate contamination in a marginal oasis in the middle of Heihe river basin [J]. Environmental Science, 2014, **35**(10): 3683-3691.
- [25] 李广文, 王永洁, 罗金明, 等. 融冻时期扎龙湿地土壤含水量变化研究[J]. 高师理科学刊, 2009, **29**(6): 71-74.
- Li G W, Wang Y J, Luo J M, *et al.* Research on the soil moisture content of Zhalong wetland during thawing period [J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2009, **29**(6): 71-74.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [27] 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.
- [28] 顾峰雪, 文启凯, 潘伯荣, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地人工绿地风沙土的理化性质研究[J]. 干旱区资源与环境, 2000, **14**(1): 74-79.
- Gu F X, Wen Q K, Pan B R, *et al.* Reseaechon soil physico-chemical properties of artificial vegetation in center of Taklimakan Desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2000, **14**(1): 74-79.
- [29] Westheimer F H. Why nature chose phosphates [J]. Science, 1987, **235**(4793): 1173-1178.
- [30] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000, **55**(5): 533-544.
- Wang S Q, Zhou C H, Li K R, *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, **55**(5): 533-544.
- [31] 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.
- [32] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. 土壤学报, 2004, **41**(5): 687-699.
- Xie X L, Sun B, Zhou H Z, *et al.* Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, **41**(5): 687-699.
- [33] 谢锦, 常顺利, 张毓涛, 等. 天山北坡植物土壤生态化学计量特征的垂直地带性[J]. 生态学报, 2016, **36**(14): 4363-4372.
- Xie J, Chang S L, Zhang Y T, *et al.* Plant and soil ecological stoichiometry with vertical zonality on the northern slope of the

- middle Tianshan Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(14): 4363-4372.
- [34] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(5): 778-783.
- Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, **45**(5): 778-783.
- [35] 宋莉群, 王义东, 李冬初, 等. 长期退耕对红壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(6): 1707-1715.
- Song L Q, Wang Y D, Li D C, *et al.* Long-term effects of natural restoration on C : N : P ecological stoichiometry in aggregates of red soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(6): 1707-1715.
- [36] 韩琳, 李征, 曾艳, 等. 太湖流域河岸带不同土地利用下草本植物叶片和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(12): 3281-3288.
- Han L, Li Z, Zeng Y, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorous stoichiometry of herbaceous plant leaf and soil in Ripa-Rian zone of Taihu Lake basin, East China under effects of different land use types [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(12): 3281-3288.
- [37] Cheng M, An S S. Responses of soil nitrogen, phosphorous and organic matter to vegetation succession on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, **7**(2): 216-223.
- [38] 李婷, 邓强, 袁志友, 等. 黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2988-2996.
- Li T, Deng Q, Yuan Z Y, *et al.* Latitudinal changes in plant stoichiometric and soil C, N, P stoichiometry in Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2988-2996.
- [39] 刘爱琴, 严加亮, 侯晓龙, 等. 武夷山自然保护区不同海拔土壤磷素的分布规律[J]. *森林与环境学报*, 2015, **35**(4): 310-316.
- Liu A Q, Yan J L, Hou X L, *et al.* Heterogeneity distribution of soil phosphorus in Wuyishan nature reserve[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2015, **35**(4): 310-316.
- [40] Dormaar J F, Smoliak S, Willms W D. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grassland Ah horizons [J]. *Journal of Range Management*, 1990, **43**(1): 6-9.
- [41] 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.
- [42] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2018, **38**(2): 678-688.
- Gao L Q, Zhao Y G, Xu M X, *et al.* The effects of biological soil crust succession on soil ecological stoichiometry characteristics[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(2): 678-688.
- [43] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. *自然资源学报*, 2015, **30**(5): 870-879.
- Zeng Q C, Li X, Dong Y H, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soils at different latitudes on the Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, **30**(5): 870-879.
- [44] 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.
- [45] 陶冶, 吴甘霖, 刘耀斌, 等. 古尔班通古特沙漠典型灌木群落土壤化学计量特征及其影响因素[J]. *中国沙漠*, 2017, **37**(2): 305-314.
- Tao Y, Wu G L, Liu Y B, *et al.* Soil stoichiometry and their influencing factors in typical shrub communities in the Gurbantungut Desert, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2017, **37**(2): 305-314.
- [46] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征[J]. *应用生态学报*, 2013, **24**(12): 3399-3406.
- Wang J L, Zhong Z M, Wang Z H, *et al.* Soil N/P ratio distribution characteristics of alpine grassland ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(12): 3399-3406.
- [47] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. *土壤学报*, 2015, **52**(6): 1345-1355.
- Li H L, Gong L, Zhu M L, *et al.* Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, **52**(6): 1345-1355.
- [48] 张晗, 欧阳真程, 赵小敏. 不同利用方式对江西省农田土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 939-951.
- Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M. Effects of different land use types on ecological stoichiometry characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in farmland soils in Jiangxi Province, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 939-951.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wenze, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Yue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non-Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)