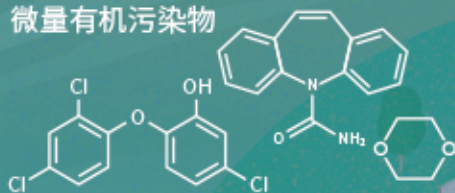


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路

王文龙, 吴乾元, 杜烨, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

下游城市河湖

污水达标排放

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM_{2.5} 载带金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM_{2.5} 质量浓度特征及相关性分析 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)
天津市 PM_{2.5} 中二次硝酸盐形成及防控 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)
南京市大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析
... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沐, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析
曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)
基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)
不同流域水陆过渡带氮磷有效态的特征对比及环境意义 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析
李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)
太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素
梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡延江 (2826)
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)
pg-C₃N₄/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 李诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)
超顺磁性纳米 Fe₃O₄@SiO₂ 功能化材料对镉的吸附机制 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 黄福义, 周曙仡, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响
许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)
调理剂对磷富集土壤中两种元素交互作用的影响 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)
连续 4 个生长季大气 CO₂ 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征
贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤禄, 蒋敏, 宋琪 (3063)
罗红霉素对大型溞生殖生长及抗氧化系统的影响 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 冯兆忠, 彭金龙 (3084)
《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素

张燕江^{1,2}, 王俊鹏¹, 王瑜¹, 张兴昌^{1,2*}, 甄庆^{1,2}, 李鹏飞³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3. 水利部黄河水利委员会黄河上中游管理局, 西安 710021)

摘要: 土壤氮磷在土壤物理、化学和生物过程中扮演着重要角色, 明确土壤氮磷含量和空间分布对土壤资源管理和利用具有重要意义. 利用经典统计学和地统计学方法对准格尔旗土壤全氮和全磷空间分布特征及影响因子进行研究. 结果表明, 研究区土壤肥力水平较低, 0~100 cm 深度土壤全氮和全磷含量加权平均值分别为 0.29 g·kg⁻¹ 和 0.26 g·kg⁻¹. 土壤全氮和全磷的块金效应值分别集中在 0.15~0.43 和 0.34~0.53 之间, 表明土壤全氮(0~10 cm 和 80~100 cm 除外)和全磷呈中等空间依赖性, 空间变异由结构性和随机性因子共同主导. 土壤全氮和全磷空间分布特征与土层和元素有关, 即使在同一深度, 土壤氮磷的空间分布特征亦不相吻合. 土壤全氮主要受有机碳的影响, 而土壤全磷主要受纬度、海拔、土地利用类型和土壤质地的影响.

关键词: 土壤质地; 土地利用类型; 土壤氮磷; 空间分布; 农牧交错带

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-3010-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008312

Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone

ZHANG Yan-jiang^{1,2}, WANG Jun-peng¹, WANG Yu¹, ZHANG Xing-chang^{1,2*}, ZHEN Qing^{1,2}, LI Peng-fei³

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 3. Upper and Middle Yellow River Bureau, Yellow River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources, Xi'an 710021, China)

Abstract: Soil nitrogen and phosphorus influence physical, chemical, and biological processes in soil, therefore, clarifying their contents and spatial patterns is of great significance for soil resource management and utilization. The spatial patterns of soil total nitrogen (TN) and phosphorus (TP) and the influencing factors in Jungar Banner were studied using classical statistical and geostatistical methods. The results showed that soil TN and TP contents decreased with soil depth, and the weighted mean values of TN and TP were 0.29 g·kg⁻¹ and 0.26 g·kg⁻¹, respectively. The nugget effect values of soil TN and TP were concentrated in the ranges 0.15-0.43 and 0.34-0.53, respectively, indicating that soil TN (except in the 0-10 cm and 80-100 cm zones) and TP were moderately spatially dependent, dominated by structural and random factors. The spatial distributions of soil nutrients were related to soil layers and elements, even in same layer, while the distributions of TN and TP were not consistent. Soil total nitrogen was mainly affected by soil organic carbon, while TP was mainly affected by latitude, altitude, vegetation, and soil texture.

Key words: soil textures; land use type; soil nitrogen and phosphorus; spatial distribution; agro-pastoral transitional zone

土壤氮磷是土壤肥力和农业环境风险的重要指标, 其对植物生长、土壤理化性质和微生物活动等具有重要影响, 已成为陆地生态系统养分循环最重要的研究内容^[1,2]. 在长期自然和人为因子共同作用下, 土壤氮磷含量具有明显的空间异质性. 一方面, 随着我国工业活动的迅速发展和农业肥料投入量的增加, 农田表层土壤中氮磷含量明显升高^[3]; 另一方面, 放牧、森林砍伐和垦荒等活动引起的氮磷经淋滤、径流和侵蚀作用而损失, 导致土壤氮磷含量降低^[4]. 针对土壤氮磷的丰缺特点, 可通过施肥或者改变土地利用方式提高土壤氮磷利用率和植物生产力, 减少氮磷流失. 以往的研究较多地关注了退耕还林、土地利用类型之间土壤氮磷的差异^[5,6], 而对区域氮磷空间变异性的研究略显不

足, 仅有的研究也主要集中在土壤表层^[7], 这不利于区域内土地利用的总体规划 and 生态评价. 为实现区域内土地利用和管理的优化, 充分发挥土壤生产潜力, 亟需对土壤氮磷的空间分布格局及其影响因子开展研究.

农牧交错带是我国生态系统最为脆弱的区域之一, 在长期水蚀和风蚀共同作用下, 土地退化、荒漠化以及水土流失现象十分严重^[8,9]. 该区土层薄, 质地粗糙, 母质极易风化, 在长期外力作用下土壤性质具有极显著的空间变异性. 为减少水土流失, 保护生

收稿日期: 2020-08-31; 修订日期: 2020-11-29

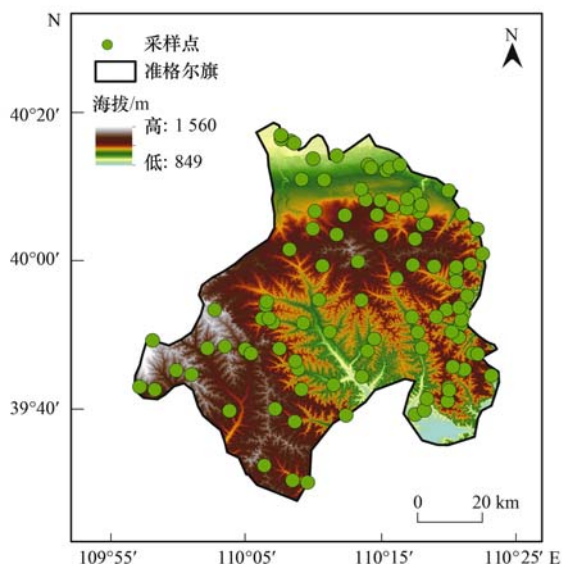
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0504504); 中国科学院西部之光项目(XAB2019B12)

作者简介: 张燕江(1987~), 男, 博士, 主要研究方向为土壤养分变化过程, E-mail: zhyjdw@126.com

* 通信作者, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

态环境,我国在此先后实施了包括“天保工程”,“三北防护林工程”等在内的一系列生态重建和保护工程^[10,11]. 土壤氮磷作为植物生长的必需元素,其含量的高低和空间分布直接关系到区域土地利用管理措施和植被生产力的提高,加强该区域土壤氮磷空间变异的研究对实现脆弱生态系统的保护和利用具有重要价值.

本文以农牧交错带典型区域土壤氮磷为研究对象,利用经典统计学和地统计学方法,对土壤全氮和全磷进行区域性调查,以阐明区域土壤全氮和全磷的含量和空间变异特征;确定土壤全氮和全磷与其他环境因子和植被之间的关系;绘制该区各层土壤氮磷的空间分布情况,以期为制定合理的区域土地利用和管理措施提供参考.



(a) 砭砂岩区荒地, (b) 灌木林, (c) 杨树, (d) 油松, (e) 玉米, (f) 撂荒草地

图1 土壤氮磷空间分布采样点示意图和主要土地利用类型

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites for the spatial distribution of soil nitrogen and phosphorus and main land use types

1.2 样本采集和测定

考虑不同土壤质地、土地利用类型以及交通条件是否便利,在研究区选择 122 个代表性采样点,同时利用 GPS 记录采样点的经纬度和海拔. 于 2017 年 8~9 月在每个采样点 10 m 直径范围内利用 5 点采样法分别采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 这 6 个深度土壤样品,同土层混合后以四分法取样得到测试样品. 将样品带回室内自然风干后,研磨、过筛(0.25mm)和储存并用于土壤氮磷含量的测定,测定方法分别为凯氏定氮法和钼锑抗比色法.

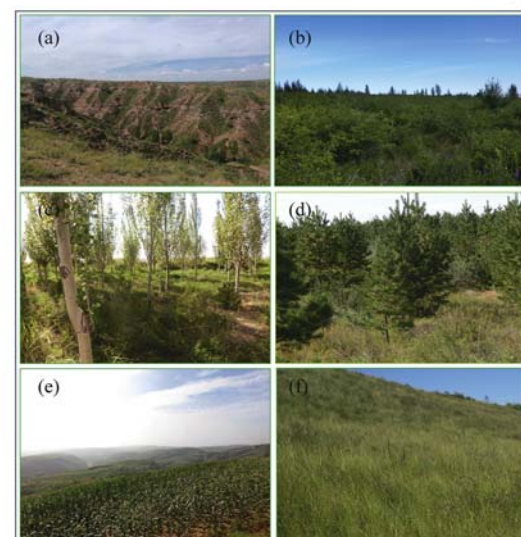
1.3 环境及植被数据来源

采样点数字高程数据 (DEM) 和植被数据从地理空间数据云下载,精度分别为 30 m 和 500 m (<http://www.gscloud.cn/>). 利用 ArcMap 软件将数

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在内蒙古准格尔旗 (39°20'~40°20'N, 110°13'~111°46'E) 进行,区域面积 7 692 km² (图 1),多年平均降雨量 300 mm,年均气温 6.2~8.7℃,年蒸发量可达 2 093 mm,属温带半干旱气候. 根据土壤质地特征,将研究区划分为 3 个区域:南部黄土区,海拔较高、落差大,以黄绵土为主,土壤质地较细;中部砭砂岩区,相对平缓、落差 200 m 左右,以风沙土、黄绵土和石质初育土 (砭砂岩风化物) 为主,黄绵土或风沙土上覆于砭砂岩,平均土壤质地比风沙土细,但比黄绵土粗;西北风沙土区,地势平缓,多沙丘,以风沙土为主,质地较粗.



据拼接融合后提取采样点坡度、坡向和植被归一化指数 (NDVI).

1.4 数据处理和分析

利用 SPSS (Version 22.0) 软件对研究区土壤氮磷含量进行经典统计学分析,计算均值、最大值、最小值、峰度和偏度等. 土壤氮磷的空间结构性分析利用 GS + (version 9.0, Gamma Design Software) 软件完成,空间分布采用反距离权重法 (IDW) 插值在 ArcMap 10.2 (ESRI Inc., USA) 中完成. 土壤氮磷与地形、植被等因子之间的关系采用冗余分析在 Canoco 5.0 中完成.

2 结果与分析

2.1 土壤氮磷含量描述性统计分析

如表 1 所示,研究区土壤氮磷平均值均随着土

层深度的增加而减小. 各层土壤氮含量平均值介于 $0.53 \sim 0.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层明显高于其它土层 ($P < 0.01$), 其值分别为 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 、 $40 \sim 60$ 、 $60 \sim 80$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层的 1.35、1.76、2.04、2.52 和 2.65 倍; 土壤磷含量平均值介于 $0.33 \sim 0.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 40$ 和 $40 \sim 60 \text{ cm}$ 土层之间的差异不显著, 但明显高于 60

$\sim 80 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层 ($P < 0.01$). 各层土壤氮和磷含量的变异系数介于 $39\% \sim 64\%$, 属中等变异, 主要受自然因子、成土过程和土地利用类型变化等因子的影响^[12,13]. 正态分布检验表明, 除 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层氮含量和 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 土层磷含量之外, 其余土层氮磷含量均符合正态分布.

表 1 农牧交错带典型区域土壤氮磷含量的经典统计学分析¹⁾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Classical statistical analysis of soil total nitrogen and phosphorus contents in a typical area of agro-pastoral ecotone zone/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

项目	深度/cm	数量	最小值	最大值	均值 $\pm$ 标准差	变异系数/%	偏度	峰度	K-S 检验	分布类型
TN	0 ~ 10	122	0.06	1.10	$0.53 \pm 0.24\text{a}$	44	0.14	-0.55	0.79	Normal
	10 ~ 20	122	0.01	0.95	$0.39 \pm 0.21\text{b}$	52	0.46	-0.04	0.95	Normal
	20 ~ 40	122	0.03	0.84	$0.30 \pm 0.17\text{b}$	58	0.57	-0.25	0.40	Normal
	40 ~ 60	122	0.01	0.62	$0.26 \pm 0.16\text{b}$	61	0.66	-0.50	0.18	Normal
	60 ~ 80	122	0.02	0.55	$0.21 \pm 0.12\text{b}$	58	0.73	-0.27	0.07	Abnormal
	80 ~ 100	122	0.03	0.75	$0.20 \pm 0.13\text{b}$	64	1.33	2.32	0.01	Abnormal
	0 ~ 100	122	0.05	0.78	0.29 ± 0.14	45	0.46	-0.12	0.38	Normal
TP	0 ~ 10	122	0.11	0.65	$0.33 \pm 0.12\text{a}$	39	0.86	0.12	0.02	Abnormal
	10 ~ 20	122	0.10	0.64	$0.29 \pm 0.11\text{a}$	39	0.89	0.42	0.11	Normal
	20 ~ 40	122	0.09	0.62	$0.27 \pm 0.11\text{a}$	42	0.85	0.19	0.17	Normal
	40 ~ 60	122	0.08	0.61	$0.26 \pm 0.09\text{a}$	38	0.83	0.93	0.08	Normal
	60 ~ 80	122	0.06	0.59	$0.23 \pm 0.09\text{b}$	39	1.04	2.21	0.11	Normal
	80 ~ 100	122	0.05	0.58	$0.21 \pm 0.09\text{b}$	44	1.13	2.26	0.04	Abnormal
	0 ~ 100	122	0.10	0.62	0.26 ± 0.09	40	0.98	0.96	0.02	Abnormal

1) 同列不同小写字母表示氮磷含量在土层之间差异达到显著, $P < 0.05$

2.2 土壤氮磷含量地统计学分析

土壤养分在空间上具有连续性和自相关性, 基于地统计学中的半方差函数可以很好地揭示变量在空间尺度上的结构性、随机性和相关性^[14]. 表 2 列出了氮磷含量与半方差函数相匹配的最优模型和相关参数. 其中, 土壤全氮在 6 个土层的最佳拟合模型均为球状模型, 决定系数介于 $37\% \sim 50\%$; 土壤全磷的最佳拟合模型与土层有关, $0 \sim 60 \text{ cm}$ 深度的 4 个土层为高斯模型, 而 $60 \sim 80 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$ 深度分别符合球状和指数模型, 决定系数均大于 54% . 块金效应 [$C_0 / (C_0 + C)$] 是土壤性质空间分布结构性分析的重要参数, 其值 $\leq 25\%$ 时, 变量具有强空间依赖性, 空间变异主要由结构因子决定, 包括气候、土壤质地、地形等因子; $25\% \sim 75\%$ 时变量具有中等空间依赖性, 空间变异受结构性和随机性因子的共同作用, 在结构因子的基础上又包括土地利用管理、施肥和耕作等措施; $\geq 75\%$ 时变量空间自相关性较弱, 变异主要由随机因子决定^[15,16]. 本研究中, 土壤全氮和全磷的块金效应值分别在 $15\% \sim 43\%$ 和 $34\% \sim 53\%$ 之间, 表明各层氮 (除 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 和 $80 \sim 100 \text{ cm}$) 和磷含量均属于中等空间依赖性, 主要由结构性因子和随机性因子共同主导 (表 2). 变程是土壤性质具有空间相关性的最大平均距离, 在小于变程的距离范围内, 任意两点间的土壤性质

具有明显空间自相关性^[16]. 由表 2 可知, 除全氮 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 深度的变程值 (4.6 km) 小于采样点平均距离 (8 km) 外, 其余各层氮磷含量的变程均远大于采样点平均距离 (尤其是全磷).

2.3 土壤氮磷与环境因子的关系

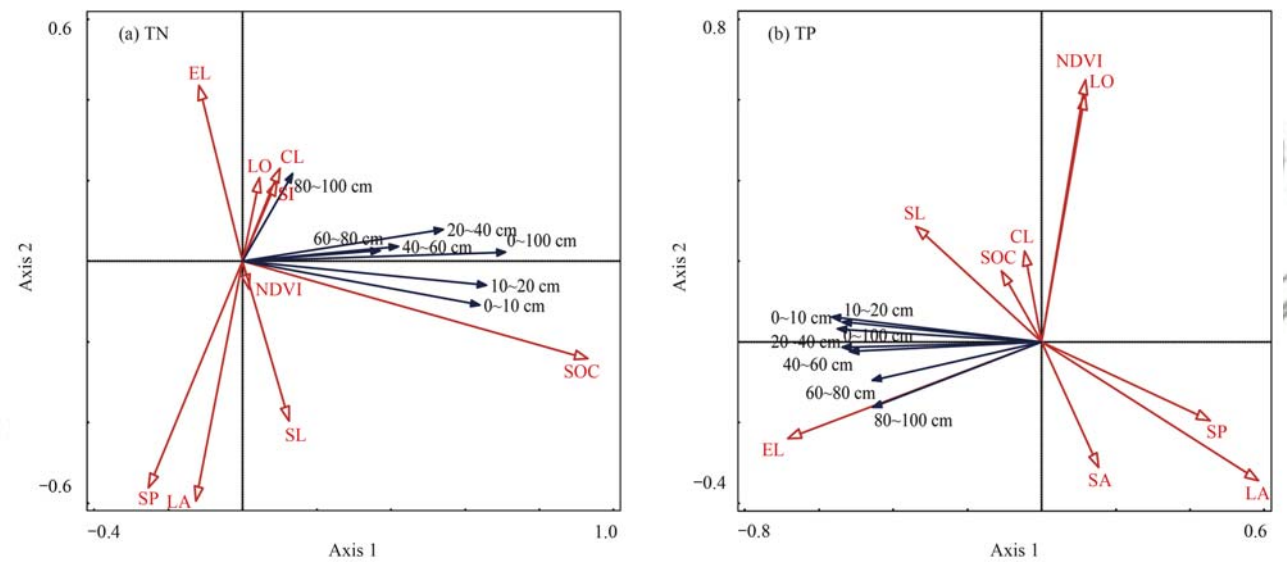
冗余分析 (RDA) 结果显示了土壤氮磷含量与环境因子之间的关系. 由图 2(a) 可知, 土壤全氮与土壤有机碳 (SOC) 呈正相关关系, 对土壤全氮含量的影响最大, 且随着土层深度的增大, 两者的夹角变大, 表明有机碳的正效应逐渐降低, 土壤质地和地理位置等其它因子的作用变大. 分析其原因可能是土壤有机碳和全氮的固定具有同步效应, 主要受枯落物、根系和分泌物的影响, 而在微生物作用下, 有机质的分解主要发生在表层^[17,18], 土壤深层根系密度低、有机质的淋溶作用减弱. 土壤全磷与海拔 (EL) 和坡度 (SL) 呈正相关关系, 与砂粒 (SA) 和坡向 (SP) 呈负相关, 且土层深度越深, 海拔与坡向的影响越小 [图 2(b)].

2.4 土壤氮磷在土地利用类型和土壤质地间的变化

土地利用类型和土壤质地是影响土壤养分含量和垂直分布的重要因素^[5,19]. 如图 3 所示, 不同土壤质地和土地利用类型下, 土壤氮磷含量均随着土层深度的增加而降低, 全氮的降低程度更加明显. 土壤质地和土地利用类型对全氮的影响均不显著, 但对

表 2 农牧交错带典型区各层土壤氮磷含量半方差函数模型及参数
Table 2 Models and parameters of an experimental semi-variogram for soil total nitrogen and phosphorus
at each soil depths in a typical area of agro-pastoral ecotone zone

项目	深度/cm	最优模型	块金值(C_0)	基台值($C_0 + C$)	块金效应[$C_0/(C_0 + C)$]	变程/km	决定系数/%
TN	0 ~ 10	Spherical	0.01	0.05	0.21	4.60	41
	10 ~ 20	Spherical	0.01	0.03	0.43	12.98	50
	20 ~ 40	Spherical	0.01	0.03	0.35	19.92	44
	40 ~ 60	Spherical	0.01	0.02	0.30	11.47	38
	60 ~ 80	Spherical	0.01	0.02	0.35	8.41	37
	80 ~ 100	Spherical	0.02	0.14	0.15	19.70	43
TP	0 ~ 10	Gaussian	0.01	0.03	0.34	60.10	83
	10 ~ 20	Gaussian	0.01	0.02	0.42	45.00	75
	20 ~ 40	Gaussian	0.01	0.02	0.38	47.20	78
	40 ~ 60	Gaussian	0.01	0.01	0.49	40.50	74
	60 ~ 80	Spherical	0.00	0.01	0.53	72.90	67
	80 ~ 100	Exponential	0.00	0.01	0.41	64.40	54



SOC 表示土壤有机碳; TN 表示全氮; TP 表示全磷; LO 表示经度; LA 表示纬度; EL 表示海拔; CL 表示黏粒;
SI 表示粉粒; SA 表示砂粒; SL 表示坡度; SP 表示坡向; NDVI 表示归一化植被指数

图 2 农牧交错带典型区各层土壤氮磷含量与环境因子之间关系的冗余分析

Fig. 2 RDA of the relationship between environmental factors and total nitrogen and phosphorus in a typical area of agro-pastoral ecotone zone

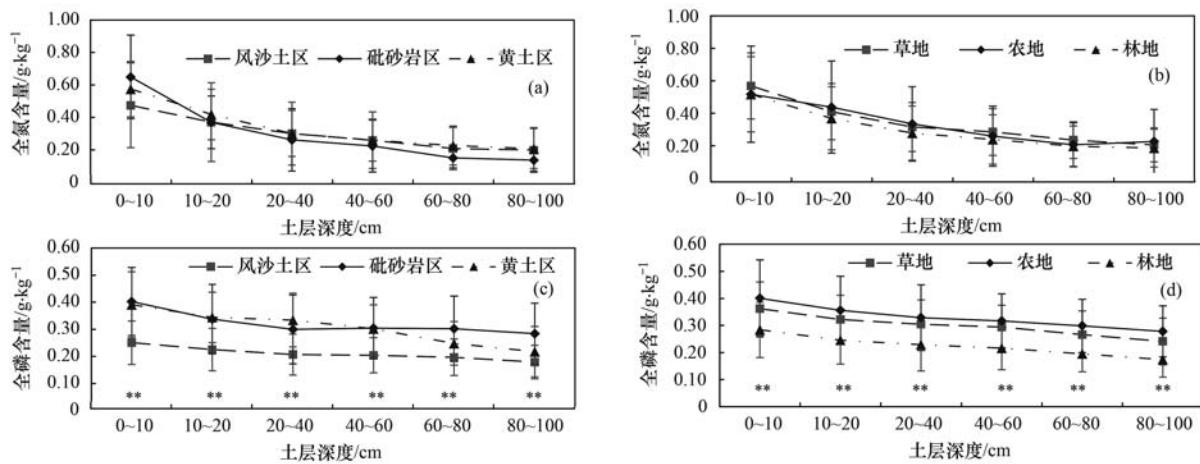
全磷的影响达到显著:从不同土壤质地分区来看,黄土区和砒砂岩区土壤全磷含量明显高于风沙土区($P<0.01$),黄土区和砒砂岩区整个剖面全磷含量平均值分别是风沙土区的 1.52 倍和 1.45 倍;在土地利用类型间,草地和农地土壤全磷含量明显高于林地($P<0.01$),草地和农地整个剖面全磷含量平均值分别是林地的 1.47 倍和 1.33 倍。

2.5 土壤氮磷含量反距离权重插值结果

土壤性质受结构性和随机性因子的共同影响,表现出复杂的空间变异性^[5,13]。为直观反映土壤氮磷在该区域的空间分布特征,采用反距离权重插值法绘制了研究区氮磷含量的空间分布模式(图 4 和图 5)。总体来看,土壤氮磷含量的空间分布特征与养分类型和土层深度有关。全氮在 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 深度的空间分布相似,自北向南呈下降趋势,高值区

位于十里长川等小流域,大部分地区土壤全氮含量集中在 0.32 ~ 0.57 g·kg⁻¹ 和 0.57 ~ 0.83 g·kg⁻¹ 之间。此外,全氮在 20 ~ 40、40 ~ 60 和 60 ~ 80 cm 深度的空间分布相似,高值和低值呈斑块状分布,大部分地区的土壤全氮含量集中在 0.24 ~ 0.43、0.16 ~ 0.31 和 0.15 ~ 0.28 g·kg⁻¹ 之间(图 4)。

土壤全磷含量空间插值结果表明,0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 深度具有相似的空间分布特征。在位于毛乌素沙地以东、准格尔旗北部宽约 30 km 的区域,各层土壤全磷含量均最低,而在东南丘陵地带,受长期耕作和施肥的影响,土壤全磷含量较高。此外,60 ~ 80 cm 和 80 ~ 100 cm 土层类似,全磷含量高值区变小,大部分区域全磷含量分别集中在 0.05 ~ 0.32 g·kg⁻¹ 和 0.04 ~ 0.31 g·kg⁻¹ 之间(图 5)。



(a) 和 (b) 全氮, (c) 和 (d) 全磷; ** 表示土壤氮磷在不同分类之间差异达到显著, 显著性水平为 $P < 0.01$

图3 农牧交错带典型区不同土地利用类型和土壤质地间土壤全氮和全磷含量的变化

Fig. 3 Differences in soil total nitrogen and phosphorus among different soil textures and land use types in a typical area of agro-pastoral ecotone zone

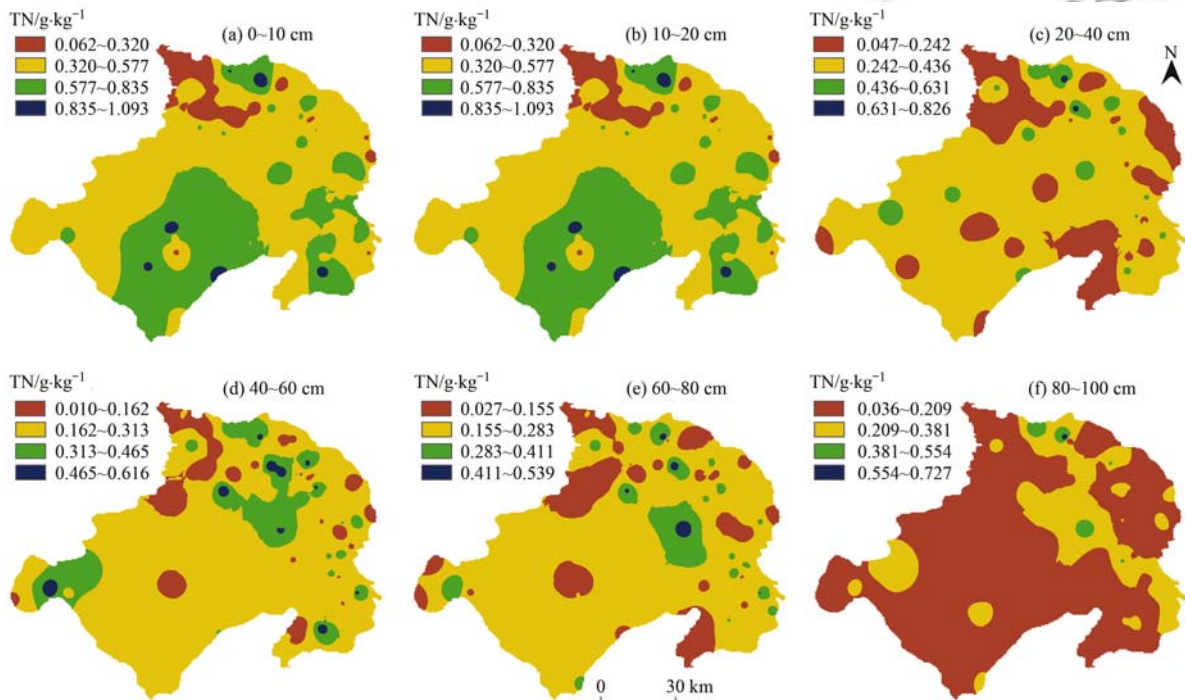


图4 农牧交错带典型区不同土层土壤全氮含量的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution patterns of soil total nitrogen at each soil depths in a typical area of agro-pastoral ecotone zone

3 讨论

3.1 农牧交错带典型区土壤氮磷含量和垂直分布特征

研究区位于农牧交错带, 0~100 cm 深度各层土壤全氮和全磷含量的平均值分别为 $(0.29 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.26 \pm 0.09) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与全国其它地方相比, 土壤氮磷含量均处于较低水平^[8,17]. 土壤全氮的变异系数普遍高于全磷, 可能与土壤氮磷元素参与的生物地球化学过程有关. 土壤全氮主要来源于植物对大气氮的固定, 与植被类型、生物量和根系分布等密切相关, 变异性高; 而土壤全磷主要来

源于土壤矿物质, 受土壤母质的影响, 在区域范围内变异性较低, Gao 等^[20]对四川仁寿县土壤氮磷钾空间变异性的研究中也得到类似的结果, 土壤全氮的变异系数高于土壤全磷和全钾. 在不同土层深度, 土壤全氮含量随着土层深度的增加明显降低, 而全磷含量在 0~60 cm 深度各层之间的差异不大(表1和图3), 其可能原因是全氮主要源于动植物残体的分解和氮沉降, 在表层通常以硝、铵态氮的形式呈聚集状态, 下层硝态氮的淋溶和根系分解释放的氮素有限, 而全磷的分布主要取决于矿物质的风化和植物根系吸收后的重分配, 在较大的空间尺度上受土壤母质的影响较大, 而在土层之间具有较高的连续

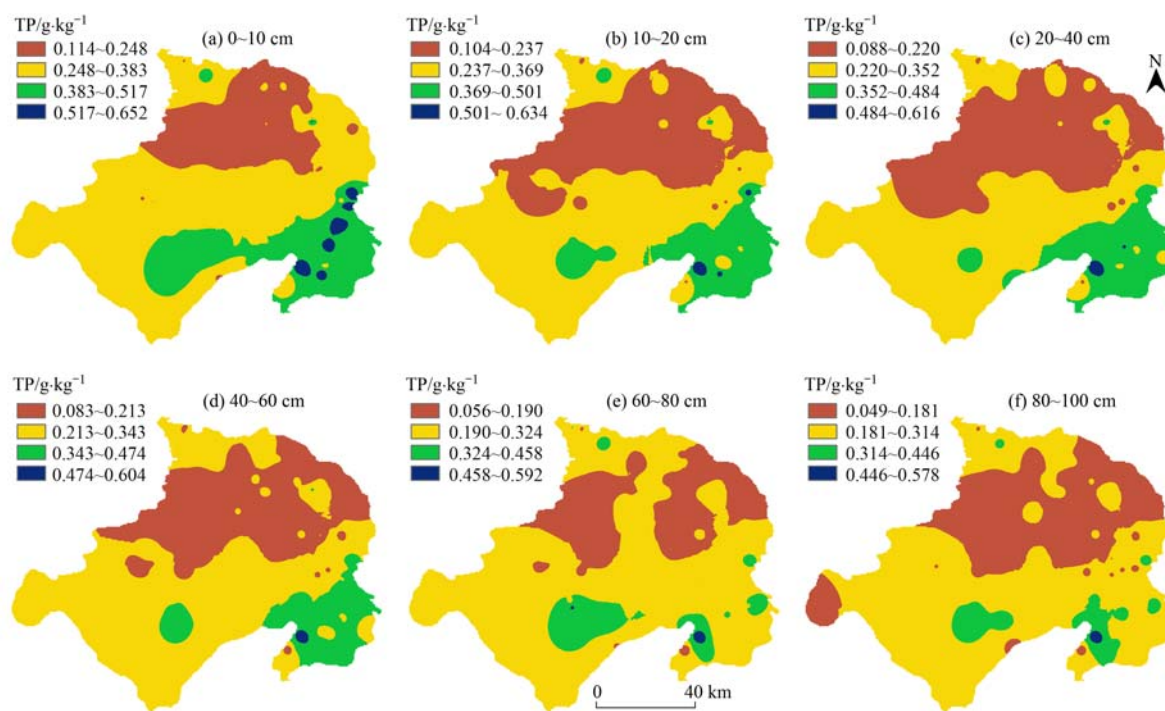


图5 农牧交错带典型区不同土层土壤全磷含量的空间分布特征

Fig. 5 Spatial distribution patterns of soil total phosphorus at each soil depths in a typical area of agro-pastoral ecotone zone

性^[21].

3.2 农牧交错带典型区土壤氮磷空间变异特征及影响因素

土壤氮磷的半变异函数模型分析结果显示,土壤氮磷块金效应值均低于 55%,表明土壤氮磷含量呈中等空间变异性,空间变异性由结构性因子和随机因子共同主导,是长期自然因子和人类活动共同作用的结果.在所有土层,全氮的变程远小于全磷,除 0~10 cm 土层的全氮以外,土壤氮磷的变程均小于采样点的平均距离,表明采样方案可用于揭示土壤氮磷空间分布特征,而准确得到 0~10 cm 土层全氮空间分布,则需要增加采样点密度.尽管土壤氮磷空间分布受气候、地形、土壤质地和人类活动等因子的共同作用,但在不同区域氮磷空间分布特征和主要影响因子亦不同.张瑶瑶等^[22]对甘南地区土壤氮磷空间分布的研究发现,土壤氮磷含量空间分布特征相似,均由西南向东北、西向东方向逐渐降低,主要受海拔和放牧等因素的影响. Guo 等^[5]对黄土高原氮磷空间分布的研究发现,受黄土高原气候、土壤质地和海拔等因素的影响,黄土高原北部 0~40 cm 深度土壤氮磷含量显著低于南部.本研究中,土壤氮磷主要受到土壤有机碳、海拔、经纬度和质地等其它因子的影响,具有其特殊的空间分布特征,即使同一元素,在不同土层之间其空间分布模式亦不能完全吻合.同一土层,土壤氮磷的不同分布模式与植被特征和土壤地球化学过程有关.一方面,不同

植被类型的固氮能力不同,如苜蓿、紫穗槐和柠条等豆科植物引起土壤氮含量的增加明显高于非豆科植物^[23,24];另一方面,研究区位于水蚀风蚀交错区,土壤质地具有较高的空间变异性,而质地越粗磷含量越低.具体来看,不同土层之间,土壤氮含量在 0~20 cm 深度的两土层中具有相似的空间分布特征,由南向北逐渐降低,高值区位于十里长川小流域.十里长川小流域的植被恢复可追溯到 20 世纪 70 年代,现已形成稳定的生态系统,具有较高的植被密度和生物量,枯落物和根系的积累和分解可显著地提高土壤有机碳和全氮含量^[25].土壤全磷含量在 0~60 cm 深度的各层间具有相似的空间分布特征,低值区位于研究区北部毛乌素沙地以东,高值区位于东南丘陵地带.总体表现为随着海拔升高而增大,随着纬度增大而降低.海拔对土壤氮磷的影响较为复杂,包含着不同的机制.王艳丽等^[17]和唐立涛^[26]对青海省森林土壤氮磷的研究发现,海拔与土壤全氮正相关,而与土壤全磷负相关,并将土壤氮随海拔升高而增加解释为低温抑制了土壤有机氮的分解和释放,而将土壤磷随着海拔升高而降低归因于植物在抵抗因海拔造成的低温胁迫时,需要激发酶参与的植物生理生化反应,这一过程需从土壤中吸收大量的磷.与此同时,高氮含量会促进植物生长,使植物从土壤中吸收更多的磷^[27].本研究中,海拔与土壤全氮无明显相关性,而与全磷显著正相关(图 2),分析原因可能与土壤质地特征有关,研究区

为典型农牧交错区,在长期地质和水蚀风蚀作用下,形成了自北向南(海拔由低到高)以风沙土、石质初育土和黄绵土为典型土壤类型的过渡区,各区域土壤全磷为风沙土明显低于黄土区和砒砂岩区.此外,土壤全磷含量在林地中最低,这可能与植被地上生物量和管理有关,人工林恢复可使土壤磷转移至植物组织,农地收获尽管会带走全磷,但施肥又可以弥补这种损失,草地中植物与土壤间的磷循环基本保持平衡.

4 结论

(1)农牧交错带典型区准格尔旗 0~100 cm 深度土壤氮磷含量处于较低水平,平均值分别为 $(0.29 \pm 0.14) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(0.26 \pm 0.09) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(2)研究区土壤氮磷分布具有中等空间依赖性,由结构性和随机性因子共同主导.土壤氮磷空间分布特征与土层和元素有关,全氮在 0~20 cm 深度的各层分布较为相似,高值区位于南部小流域,全磷在 0~60 cm 深度的各层分布较为相似,高值区位于东南部丘陵地带,同一土层全氮和全磷的空间分布特征亦不同.

(3)土壤全氮主要受有机碳的影响,而土壤全磷主要受纬度、海拔、植被和土壤质地的影响.

参考文献:

- [1] 何高迅,王越,彭淑娴,等. 滇中退化山地不同植被恢复下土壤碳氮磷储量与生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2020, 40(13): 4425-4435.
- He G X, Wang Y, Peng S X, *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus stocks and ecological stoichiometry characteristics of different vegetation restorations in degraded mountainous area of central Yunnan, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4425-4435.
- [2] 谢经朝,赵秀兰,何丙辉,等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1760-1769.
- Xie J C, Zhao X L, He B H, *et al.* Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng lake basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1760-1769.
- [3] 李春越,郝亚辉,薛英龙,等. 长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1783-1791.
- Li C Y, Hao Y H, Xue Y L, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus in the farmland of the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1783-1791.
- [4] Rätty M, Järvenranta K, Saarijärvi E, *et al.* Losses of phosphorus, nitrogen, dissolved organic carbon and soil from a small agricultural and forested catchment in east-central Finland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 302, doi: 10.1016/j.agee.2020.107075.
- [5] Guo S J, Xu Y D, He C, *et al.* Differential responses of soil quality in revegetation types to precipitation gradients on the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 276-277, doi: 10.1016/j.agrformet.2019.107622.
- [6] Kong X B, Zhang F R, Wei Q, *et al.* Influence of land use change on soil nutrients in an intensive agricultural region of north China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 88(1-2): 85-94.
- [7] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China[J]. *Geoderma*, 2013, 197-198: 67-78.
- [8] Liu J, Chen H Q, Yang X M, *et al.* Annual methane uptake from different land uses in an agro-pastoral ecotone of northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 236: 67-77.
- [9] Wang X Y, Li Y Q, Gong X W, *et al.* Changes of soil organic carbon stocks from the 1980s to 2018 in northern China's agro-pastoral ecotone[J]. *CATENA*, 2020, 194, doi: 10.1016/j.catena.2020.104722.
- [10] Wang X M, Zhang C X, Hasi E, *et al.* Has the Three Norths Forest Shelterbelt program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China? [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 13-22.
- [11] 彭文英,张科利,陈瑶,等. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
- Peng W Y, Zhang K L, Chen Y, *et al.* Research on soil quality change after returning farmland to forest on the Loess sloping croplands[J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 272-278.
- [12] 舒田,熊康宁,陈丽莎,等. 基于遥感的石漠化治理下土壤肥力变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2019, 28(4): 776-785.
- Shu T, Xiong K N, Chen L S, *et al.* Analysis on variation characteristics of soil fertility under rocky desertification control based on remote sensing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(4): 776-785.
- [13] Sanches G M, Magalhães P S G, dos Santos Luciano A C, *et al.* Comprehensive assessment of spatial soil variability related to topographic parameters in sugarcane fields[J]. *Geoderma*, 2020, 362, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.114012.
- [14] 王佛鹏,肖乃川,周浪,等. 桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 876-885.
- Wang F P, Xiao N C, Zhou L, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals on farmland of geochemical anomaly area in southwest Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(2): 876-885.
- [15] 王辽宏,邱莉萍,高海龙,等. 农牧交错带本氏针茅坡地土壤-植物系统磷素分布特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(5): 1192-1199.
- Wang L H, Qiu L P, Gao H L, *et al.* Phosphorous distribution of plant-soil system in a *Stipa bungeana* slope land in the agro-pastoral transitional zone[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(5): 1192-1199.
- [16] 张燕江,邱莉萍,张兴昌,等. 黄土高原农牧交错带退耕坡地苜蓿-铁杆蒿群落养分分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 211-216.
- Zhang Y J, Qiu L P, Zhang X C, *et al.* The spatial distribution of nutrients in *Medicago sativa*-*Artemisia sacrorum* Ledeb community along an abandoned slope in the cropping-pastoral ecotone of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(5): 211-216.
- [17] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4096-

4105.
Wang Y L, Zi H B, Cheng R X, *et al.* Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4096-4105.
- [18] Zhang Y, Liao X N, Wang Z, *et al.* Synchronous sequestration of organic carbon and nitrogen in mineral soils after conversion agricultural land to forest [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 295, doi: 10.1016/j.agee.2020.106866.
- [19] Song B L, Yan M J, Hou H, *et al.* Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China[J]. *CATENA*, 2016, 143: 159-166.
- [20] Gao X S, Xiao Y, Deng L J, *et al.* Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou county of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2): 279-289.
- [21] Yang J S, Liu J S, Hu X J, *et al.* Changes of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations under different land uses in marshes of Sanjiang Plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 332-337.
- [22] 张瑶瑶, 冷若琳, 崔霞, 等. 甘南州高寒草地土壤氮磷空间分布特征[J]. *草业学报*, 2018, 27(12): 12-21.
Zhang Y Y, Leng R L, Cui X, *et al.* Spatial distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in soil on the Gannan Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12): 12-21.
- [23] 张萍, 章广琦, 赵一婷, 等. 黄土丘陵区不同森林类型叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5087-5098.
Zhang P, Zhang G Q, Zhao Y P, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil interactions in different forest types in the Loess hilly-gully region of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(14): 5087-5098.
- [24] Fu X L, Shao M A, Wei X R, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in northern Loess Plateau of China[J]. *Geoderma*, 2010, 155(1-2): 31-35.
- [25] Shi P, Zhang Y, Li P, *et al.* Distribution of soil organic carbon impacted by land-use changes in a hilly watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 505-512.
- [26] 唐立涛, 刘丹, 罗雪萍, 等. 青海省森林土壤磷储量及其分布格局[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(12): 1091-1103.
Tang L T, Liu D, Luo X P, *et al.* Forest soil phosphorus stocks and distribution patterns in Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2019, 43(12): 1091-1103.
- [27] 陈美领, 陈浩, 毛庆功, 等. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
Chen M L, Chen H, Mao Q G, *et al.* Effect of nitrogen deposition on the soil phosphorus cycle in forest ecosystems: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 4965-4976.

CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM _{2.5} Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM _{2.5} in Tianjin	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} of Nanjing, China	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O ₃ and NO ₂ in Shijiazhuang	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model	WANG Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C ₃ N ₄ /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-juan, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Functionalized Materials	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yan, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO ₂ on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i>	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)