白方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2022年6月
第43卷 第6期
Vol.43 No.6

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第43卷 第6期
2022年6月15日

目 次

COVID-19管控期间气象条件变化对京津冀$PM_{2.5}$浓度影响 …… 邱雨露，陈磊，朱佳，马志强，李梓铭，郭恒，唐颖潇(2831)
新冠疫情管控措施对郑州市$PM_{2.5}$浓度、粒径分布、组分和来源的影响 …… 黄兵役，王申博，和兵，薛若雨，高更宇，张瑞芹(2840)
COVID-19管控期间苏州市$PM_{2.5}$中金属元素浓度变化及来源解析 …… 缪青，杨倩，吴也正，魏恒，周民锋，张晓华，邹强(2851)
2015～2019年南京北郊碳质气溶胶组成变化 …… 谢添，曹芳，章炎麟，林煜棋，范美益，宋文怀，鲍孟盈，项妍琨，赵祝钰，杨笑影，谢锋，张煜娴，俞浩然，张子金，邢佳莉(2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆$PM_{2.5}$来源 …… 彭超，李振亮，曹云擎，蒲茜，方维凯，王晓宸，汪凌韬(2867)
保定市冬季$PM_{2.5}$的氧化潜势特征及其影响来源分析 …… 吴继炎，杨池，张春燕，范美益，吴爱坪，章炎麟(2878)
南京江北新区$PM_{2.5}$中水溶性有机氮的污染特征及其来源 …… 关璐，丁铖，张毓秀，胡建林，于兴娜(2888)
广西十万大山背景点$PM_{2.5}$中非极性有机气溶胶组成及来源解析 …… 邢佳莉，曹芳，王谦，张煜娴，章炎麟(2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素:以京津冀地区为例 …… 张馨露，刘世杰，韩美丽，苏超，张志鹏，马琳琳，李洋，程苗苗(2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 …… 唐颖潇，姚青，蔡子颖，丁净，樊文雁，杨旭，韩素芹(2917)
天津市$PM_{2.5}$-O_3复合污染特征及气象影响分析 …… 肖致美，李源，孔君，李鹏，蔡子颖，高璟赟，徐虹，戢运峰，邓小文(2928)
2016～2020年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 …… 周梦鸽，杨依，孙媛，张凤英，李永华(2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 …… 晏洋洋，尹沙沙，何秦，秦凯，张瑞芹(2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 …… 赵伟，吕梦瑶，卢清，高博，梁小明，刘明，孙家仁，陈来国，范绍佳(2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 …… 苏维峰，孔少飞，郑煌，陈楠，祝波，全继宏，祁士华(2966)
运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 温肖宇，赵文婷，罗淑贞，张强，王妘涛，马俊杰，刘新罡(2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 …… 范丹丹，刘红玲，杨柳燕(2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 …… 武俊梅，魏琳，彭晶倩，何鹏，施鸿媛，汤冬梅，吴振斌(2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 …… 张坤锋，昌盛，付青，樊月婷，王恩瑞，孙兴滨，王山军(3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 …… 宋静雯，张学霞，姜东旸，赵丞蒙，李鹏飞(3016)
高原湖泊周边浅层地下水:氮素时空分布及驱动因素 …… 李桂芳，杨恒，叶远行，陈清飞，崔荣阳，陈安强，张丹(3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 …… 张雅然，车霏霏，付正辉，许野，李薇(3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 …… 赵晓亮，李响，卢洪斌，卢少勇，王涛，张森霖，国晓春，张静，弥启欣，刘晓贺，宋书峰(3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 …… 刘哲哲，倪兆奎，刘思儒，李晓秀，王圣瑞(3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 …… 张智博，段艳平，涂耀仁，罗鹏程，高峻(3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 …… 陈圣盛，李卫明，张坤，熊伟唯，张续同，刘子健(3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 …… 陈玉芳，闫振华，张燕，赵海洲(3088)
2015～2020年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 …… 屈宁，邓建明，张祯，蔡永久，龚志军，李明(3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游动植物群落结构特征与环境因子关系 …… 王雅雯，李迎鹤，张博，郭云艳，陈俊伊，韩松(3106)
近20年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 …… 葛小君，黄斌，袁再健，王栋栋，王泉泉，陈佳村，谢真越(3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 …… 谭少军，刘洋，朱小婕，刘荷，邵景安，邓华(3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 …… 顾晶晶，冶运涛，董甲平，蒋云钟，曹引，赵红莉(3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 …… 陈旭东，高良敏(3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 …… 石雷，杨小丽，吴青宇，王亦铭，徐佳莹(3160)
不同水力扰动强度对老化PSMPs在泥水两相间迁移的影响 …… 吴香香，艾萍，李大鹏(3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 …… 席玥，郭婧，陶蕾，田颖，陈吉吉，吴悦，徐蘇士，荆红卫，刘保献(3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 …… 章孙逊，张守红，葛德，闫婧，杨航，王任重远，魏良怡，张成玉(3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 …… 曹丝雨，许路，付权超，金鑫，石烜，金鹏康(3195)
4种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 …… 唐佳，陈茜，覃牧川，唐溪，唐崇俭(3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 …… 龚沛云，孙丽娟，宋科，孙雅菲，秦秦，周斌，薛永(3211)
腐殖酸-重金属对ANAMMOX菌脱氮性能的影响及其动力学分析 …… 李芸，崔楠，熊星星，黄志远，李泽兵，王东亮，李朝明，许丹，李军(3221)
2000～2020年西南地区植被NDVI对气候变化和人类活动响应特征 …… 徐勇，黄雯婷，窦世卿，郭振东，李欣怡，郑志威，靖娟利(3230)
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 …… 孙德斌，栗云召，于君宝，杨继松，杜朝红，孙丹丹，凌越，马元庆，周迪，王雪宏，赵佳怡(3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 …… 温祥洁，陈朝辉，徐维新，吴小娟，郝云庆，刘伟，印红玲，方淑红(3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 …… 刘永林，刘属灵，吴梅，田兴磊，刘双燕(3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 …… 张倩，韩贵琳(3269)
南阳盆地东部山区土壤锗分布特征及其影响因素分析 …… 董秋瑶，赖书雅，宋超，温皓天，严明疆，杨振京(3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 …… 严佳莉，于紫玲，余辉亮，向明灯，王传华(3288)
石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 …… 许璐，周春海，刘梅，孔辉，李元，黄志红(3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 …… 谭文韬，霍洋，周航，仇银燕，曾鹏，辜娇峰，廖柏寒(3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 …… 罗会龙，陈娟，张云慧，袁贝，杨宾，张昊，杜平(3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 …… 罗正明，赫磊，刘晋仙，胡砚秋，周妍英，郑庆荣，柴宝峰(3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 …… 靳海洋，岳俊芹，闫雅倩，张德奇，杨程，张素瑜，李向东，邵运辉，方保停，王汉芳，秦峰(3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 …… 廖宇琴，龙娟，木志坚，文首鑫，李翠莲，杨志敏，赵秀兰(3348)
长江三角洲2018年土壤NO排放特征 …… 廖加强，薛金，王文锦，朱永慧，朱安生，黄凌，王杨君，李莉(3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 …… 梁建设，白永平，杨雪荻，高祖桥，李玲蔚，张春悦，王倩(3365)
《环境科学》征订启事(3004) 《环境科学》征稿简则(3047) 信息(3252，3298，3327)

白方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第43卷第6期 2022年6月
Vol.43, No.6 Jun., 2022

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价

严佳莉[1], 于紫玲[2], 余辉亮[3], 向明灯[2*], 王传华[1*]

(1. 三峡大学生物与制药学院, 宜昌 443002; 2. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护环境污染健康风险评价重点实验室, 广州 510655; 3. 神农架国家公园管理局, 神农架 442400)

摘要: 神农架川金丝猴是中国特有的濒危物种之一. 为探究神农架川金丝猴栖息地重金属污染情况,采集川金丝猴栖息地食源植物、土壤和水体样品,分析了7种重金属含量特征(Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni和As),并采用综合污染指数法、潜在生态风险指数法和内梅罗指数对水体、土壤和食源植物进行污染物评价,同时通过靶标危害系数法(THQ)对川金丝猴食源植物进行健康风险评价. 结果表明,栖息地水体重金属浓度为: 0.004 ~ 1.220 μg·L^{-1},处于无污染状态. 土壤中 ω(Cd)(0.162 ~ 0.822 mg·kg^{-1})为湖北省土壤背景值的2.71倍,处于中等生态危害风险. 食源植物中Pb、Cd、Cr和Ni超标率分别为29%、29%、18%和35%,地衣和树皮污染指数为6.038和7.709,处于重度污染水平; 巴山冷杉种子和广布野豌豆的污染指数为2.716和2.034,处于中度污染,其余植物均处于安全水平. 经健康风险评价发现,地衣及树皮类 > 树叶类 > 果实类, As对川金丝猴健康存在威胁(THQ > 1). 综上所述,笔者认为川金丝猴栖息地存在重金属污染风险,且重金属污染主要受人类活动的影响,建议在今后的工作中合理限制人类活动,本研究可为神农架川金丝猴健康保护提供部分科学依据.

关键词: 川金丝猴; 重金属污染; 健康风险评价; 生态风险评价; 栖息地

中图分类号: X53 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2022)06-3288-11 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202109083

Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus roxellana*) Habitat in Shennongjia Mountains

YAN Jia-li[1], YU Zi-ling[2], YU Hui-liang[3], XIANG Ming-deng[2*], WANG Chuan-hua[1*]

(1. College of Biological and Pharmaceutical Sciences, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Pollution Health Risk Assessment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 3. Shennongjia National Park Administration, Shennongjia 442400, China)

Abstract: The golden snub-nosed monkey is one of the most endangered animal species endemic to China. In order to explore the characteristics and health risks of golden snub-nosed monkeys exposed to heavy metals, we collected the plant food sources, soil, and water samples from the golden snub-nosed monkey habitat in the Shennongjia Mountains; examined the contents of seven heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Ni, and As); and adopted the comprehensive pollution index, potential ecological risk index, and Nemerow index to evaluate pollutants in the water, soil, and food plants. At the same time, the Target Hazard Quotient method was used to assess heavy metals in the food plants. The results showed that the heavy metal concentration of the habitat water was 0.004-1.220 μg·L^{-1}. The water comprehensive pollution index showed that the habitat water was safe. In addition, the ω(Cd)(0.162-0.822 mg·kg^{-1}) in the soil was 2.71 times the background value of the soil in Hubei province, indicating a moderate risk of ecological harm. The over-standard rates of Pb, Cd, Cr, and Ni in food plants were 29%, 29%, 18%, and 35%, respectively; the pollution indexes of lichen and bark were 6.038 and 7.709, which were at a heavy pollution level; and the pollution indexes of *Abies fragesii* and *Vicia cracca* were 2.716 and 2.034, which indicated a moderately polluted level. The rest of the plants were at a safe level. Our health risk analysis showed that the risk of lichen and bark were higher than that of leaves, followed by fruits. Among the seven metals, As most threatened the health of the golden snub-nosed monkeys (THQ > 1). In general, heavy metals had polluted the habitats of the golden snub-nosed monkeys in the Shennongjia Mountains, and we are certain that the heavy metal pollution was associated with human activities. Thus, human activities in the Shennongjia Mountains should be reasonably restricted in the future. Our results can provide scientific support for the population conservation of golden snub-nosed monkeys in China and provide research samples in the health risk valuation of heavy metals in endangered animals through food plants.

Key words: golden snub-nosed monkeys; heavy metals pollution; health risk assessment; ecological risk assessment; habitat

随着城市化、工业化和人类活动范围的迅速拓展,重金属污染引起了国内外学者的广泛关注. 有研究表明,重金属污染物排放到环境中,会造成土壤、水体和生物的污染,危害生态环境健康[1,2],最终对动物和人类健康产生负面影响. 主要原因是重金属无法降解,具有持久性和累积性,可通过生物富集等作用对动植物造成不利影响[3,4]. 但是,重金属污染对珍稀濒危动物健康风险影响的研究较为少见,仅对秦岭山脉野生和圈养川金丝猴的重金属暴露进行了评估报道[5]. 由于珍稀动物特性,一般不允许直接开展生物样品采集及相应的毒理研究,极大地增加了研究的难度. 目前的野生稀有动物重金属污染研究,一般使用羽毛、毛发和死体标本等无损伤标本[6],或通过测定动物器官中污染物的含量对其进行风险评估[7]. 上述情况极大地加剧了珍稀动物重金属污染研究的局限性,阻碍了保护工作的开展. 栖

收稿日期: 2021-09-09; **修订日期**: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570543, 21607048); 三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金项目(KF2019-06); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx703-202104-058)

作者简介: 严佳莉(1997 ~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染与风险评价, E-mail:3214479676@qq.com

* 通信作者, E-mail:xiangmingdeng@scies.org; wang740301@ctgu.edu.cn

息地重金属污染是濒危动物健康重要威胁因素之一，通过栖息地和食源植物重金属污染评价可在不伤害珍稀物种情况下间接反映其受重金属污染情况，因此开展野生动物栖息地重金属暴露风险评估可以定量重金属的威胁程度，对于动物的保护和重金属污染的防治具有重要意义.

川金丝猴（*Rhinopithecus roxellana*）是国家 I 级濒危动物. 目前川金丝猴仅分布于四川北部及甘肃南部、陕西秦岭和湖北神农架这 3 个孤立的地区，其中湖北神农架是我国川金丝猴种群分布最东端的孤立种群，种群数量1 400余只，在金丝猴进化史上占有重要地位[8]. 关于川金丝猴研究主要有栖息地植物区系特征及栖息地优势树种生态位，食源植物的可利用性、含水量、各种营养成分含量[9,10]和生境适宜性评价[11]等方面，对于川金丝猴栖息地重金属污染水平及其健康风险评价尚未见报道. 为了初步评价我国川金丝猴的重金属污染程度，并评估人类干扰对重金属污染的影响，本文首次以神农架国家森林公园作为研究地区，在人类影响程度不同的地区设置取样点，采集川金丝猴可能暴露的土壤、溪水及其食源植物并测定多种重金属含量，借鉴评价人类重金属污染健康风险方法，以确定：①神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征，②评价川金丝猴栖息地的重金属污染生态风险及其健康风险，③人类活动是否对栖息地重金属有影响. 上述研究将为我国、特别是神农架地区川金丝猴栖息地的生态环境保护提供部分科学依据，并为经食物途径评价我国珍稀动物重金属健康风险提供方法借鉴.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于中国湖北省神农架林区（109°56′～110°58′E，31°15′～31°57′N）. 林区地处东亚东、西两大植物区系的交汇处，拥有3 700余种植物，动物种类达1 000余种，森林覆盖率达 90% 左右，具有独特的生态价值和生物多样性[12]，该区域现有川金丝猴共 8 群，约1 400余只，主要分布于金猴岭、大龙潭和千家坪等地区，栖息于神农架林区海拔1 700～3 000 m之间的针阔混交林中[13].

1.2　研究方法

1.2.1　样品采集与预处理

根据川金丝猴活动情况（见表 1），于酒壶坪（JHP）、神农架国际滑雪场（HXC）、大龙潭（DLT）、小千家坪（XQJP）和金猴岭（JHL）采集样品（见图 1）. 每一个采样区域选择 3～5 个间距 50～200 m 的地点，选择食源植物 3～5 株，采集食源植物的叶、果、树皮或地衣[18]，并将同采样区同种植物混合成一个样品，室内风干后保存于 －80℃ 冰箱中；每采样处采集 3～5 个 0～20 cm 深度的土壤样品，并将土壤混合成一个样[19]；同时，对附近的水源采集 2～3 个水样，带回实验室酸化，于 －18℃ 下保存备用[20].

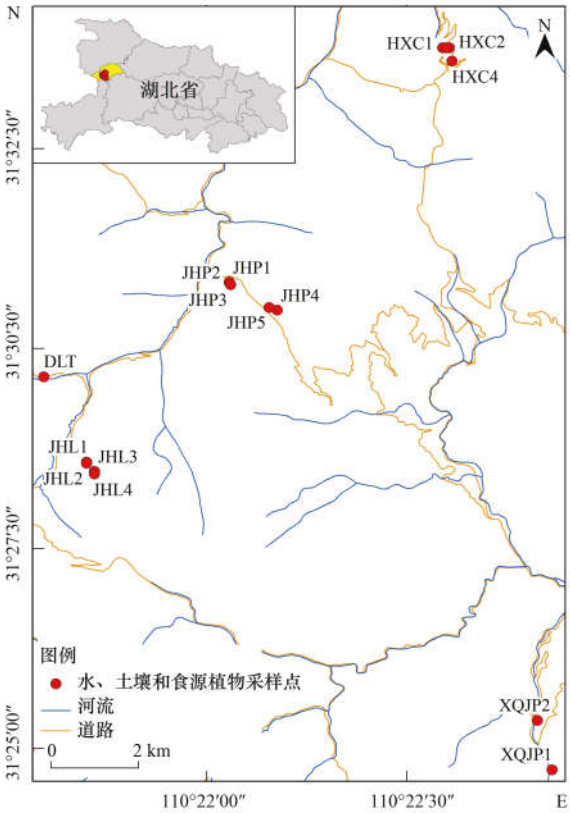


图 1　采样点分布示意

Fig. 1　Distribution of sampling sites

表 1　采样点信息

Table 1　Information on sampling sites

地点	有无川金丝猴活动	人类干扰情况	文献
JHP	无	位于居民区附近、生活垃圾和汽车尾气	[14]
HXC	无	游客聚集区、生活垃圾和汽车尾气（1 000～1 500 人·d^{-1}）	[15]
DLT	有	游客聚集区、生活垃圾和汽车尾气（669～1 338 人·d^{-1}）	[16]
JHL	有	游客聚集区、生活垃圾和汽车尾气（970～1 940 人·d^{-1}）	[16]
XQJP	有	禁止人类活动	[17]

1.2.2　样品测试

参考 Zhao[21]的方法，称取（0.1 ± 0.02）g 植物和土壤样品置于消解罐中，加入 6 mL 王水，采用微波消解仪（MARS，CEM，USA）以梯度式升温程序进

行消解,程序升温条件为 5 min 升至 120℃, 120℃保持 3 min, 5 min 升至 150℃, 150℃保持 5 min, 5 min 升至 200℃,并保持 20 min. 冷却后消解液转移、定容、静置过夜,取上清液过 0.45 μm 亲水性滤膜,采用电感耦合等离子体质谱仪(Perkin Elmer Nex ION 2000,USA)进行重金属测定. 水样、植物和土壤处理步骤一致.

1.2.3 质量控制与保证

配制重金属标准混合液,建立标准曲线(见表 2),按样品总数的 20% 设置平行样并同步分析空白样品,同时测定标准样品 GBW07405(GSS-5),检测结果均在允许范围内,各重金属元素回收率为 95.4%~99.2%.

1.2.4 重金属污染评价

(1)生态风险评价 采用单因子污染指数(P_i)与内梅罗综合指数($P_{综}$)评估食源植物重金属污染程度[22],公式为:

$$P_i = C_i/S_i;\ P_{综} = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}}$$

式中, P_i 为植物中 i 重金属的单项污染指数[23], C_i 为植物中 i 重金属的实测值($mg \cdot kg^{-1}$), S_i 为植物中 i 重金属的标准值. Pb、Cd、Cr 和 As 参考文献[24]进行计算, Cu、Zn 和 Ni 参考文献[25]进行计算.

表 2 标准曲线

Table 2 Standard curve

元素	标准曲线	R^2	RSD 值/%	平均回收率/%
Cu	$y = 0.998\,3x + 0.102\,8$	1.000	5.3	98.6
Zn	$y = 1.037\,1x - 2.558\,2$	0.999	7.0	98.6
Pb	$y = 0.981\,8x - 0.103$	0.999	8.2	95.4
Cd	$y = 1.008\,3x - 0.175\,1$	0.999	7.0	97.1
Cr	$y = 1.006\,4x - 0.000\,3$	1.000	6.0	98.6
Ni	$y = 1.001x + 0.008\,6$	1.000	11.2	98.6
As	$y = 1.008\,7x - 0.187\,2$	0.999	11.7	99.2

采用地累积指数(I_{geo})和潜在生态风险指数法(RI)进行土壤重金属污染分析[26],公式为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n/1.5B_n)$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i = \sum T_r^i C_D^i / C_R^i$$

式中, C_n 为所测的重金属含量($mg \cdot kg^{-1}$), B_n 为湖北省土壤重金属背景值, C_D^i 为土壤重金属 i 的含量, C_R^i 计算所需参比值, T_r^i 为重金属 i 的毒性响应因子, E_r^i 为重金属潜在危害指数.

采用综合污染指数(R)评价对水环境造成的综合危害[27],公式为:

$$R_i = C_i/H_i$$

$$R = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} R_i$$

式中, R_i 为元素 i 的污染指数, C_i 为水环境中元素 i 的浓度值($\mu g \cdot L^{-1}$), H_i 为水体功能允许的最高浓度值,选取 Ⅰ 类标准限值(GB 3828-2002)为标准[28].

(2)健康风险评价 采用靶标危害系数法(THQ)评价神农架川金丝猴食源植物的重金属健康风险[29]. 因冬季食物匮乏,川金丝猴每日进食地衣和树皮量按维持生存最低进食量乘以树皮和地衣采食率计算,重金属日参考剂量(RfD)参考文献[30],用于评价的相关参数见表 3,计算公式为:

$$THQ = \frac{EFr \times ED_{tot} \times FIR \times C}{RfD \times BW_a \times AT_n} \times 10^{-3}$$

式中, C 为植物中重金属含量($mg \cdot kg^{-1}$),若 THQ <1,则认为通过食源植物进入川金丝猴的重金属健康风险较低,对其健康造成的影响不明.

表 3 健康风险评价相关参数设定

Table 3 Parameter used in THQ for heavy metals risk assessment

名称	参数	文献
成年雄性金丝猴体重(BW_a)	16.40 kg	[31]
金丝猴平均寿命(ED_{tot})	18 a	[31]
树叶采食量(FIR_1)	600 $g \cdot d^{-1}$	[32]
树叶年采食频率(EFr_1)	92 $d \cdot a^{-1}$ (5~7 月)	[33]
果实年采食量(FIR_2)	500 $g \cdot d^{-1}$	[32]
果实采食频率(EFr_2)	92 $d \cdot a^{-1}$ (8~10 月)	[33]
地衣及树皮采食量(FIR_3)	268 $g \cdot d^{-1}$	[33,34]
地衣及树皮年采食频率(EFr_3)	181 $d \cdot a^{-1}$ (11 月~次年 4 月)	[33]
平均年暴露时间(AT_n)	365 $d \cdot a^{-1} \times 18$ a	[31]

1.2.5　数据处理与分析

采用 SPSS 24.0 和 Origin 9.0 软件对数据进行分析和绘图；运用 Pearson 相关性和系统聚类分析(组间连接法)，探究植物重金属的相关关系和重金属来源；利用独立样本 *T* 检验方法分析人为活动对重金属影响.

2　结果与分析

2.1　川金丝猴栖息地重金属含量特征

(1)食源植物　首先，神农架地区食源植物 ω(Cu)、ω(Zn)、ω(Pb)、ω(Cd)、ω(Cr)、ω(Ni)和 ω(As)的平均值分别为 6.35、22.18、0.56、0.08、0.56、0.39 和 0.08 mg·kg^{-1}，其中，Pb、Cd 和 Cr 均高于 GB 2762-2017 中蔬菜限量标准，食源植物中 Ni 超标最严重(见表 4). 其次，不同食源植物之间的重金属含量存在差异性，如广布野豌豆中 Cu 和 Pb 含量显著高于其他植物，树皮中 Zn 和 Cr 含量显著高于其他植物. 其三，冬季取食的树皮及地衣类的重金属含量要高于秋季(果实)和夏季(树叶类). 其四，食源植物重金属污染在各取样点间差异较大，重金属高值区主要集中在 HXC，其次是 DLT，而低值区主要在 XQJP.

(2)土壤　土壤中 ω(Cu)、ω(Zn)、ω(Pb)、ω(Cd)、ω(Cr)、ω(Ni)和 ω(As)的平均值分别为 13.53、76.15、9.89、0.49、32.39、18.31 和 7.91 mg·kg^{-1}(见表 5)，其中 Cd 含量为背景值的 2.71 倍，其余元素均低于湖北省土壤重金属背景值. 土壤重金属在研究区间差异较大，以金猴岭(JHL)最低，HXC 的 As、Pb 和 Zn 分别为 JHL 的 3.38、2.53 和 3.15 倍，JHP 的 Cr 为 JHL 的 4.26 倍.

(3)水体　水体重金属质量浓度均低于 Ⅰ 类标准限值(GB 3828-2002)，但具有 Zn > Cu > Ni > Cr > Pb > As > Cd 的特征(见表 6).

表 4　川金丝猴食源植物重金属含量[1)]/mg·kg^{-1}

Table 4　Heavy metal contents of golden snub-nosed monkey food plants/mg·kg^{-1}

项目	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	As
湖北山楂叶	0.660 ± 0.089b	4.243 ± 0.296b	0.070 ± 0.023b	0.039 ± 0.004c	0.076 ± 0.015a	0.144 ± 0.018a	0.026 ± 0.006b
湖北山楂果	0.219 ± 0.010b	1.076 ± 0.820b	0.011 ± 0.001b	0.003 ± 0.000c	0.032 ± 0.002a	0.034 ± 0.014a	0.008 ± 0.003b
峨眉蔷薇	5.88 ± 3.136b	10.523 ± 3.005b	0.351 ± 0.232b	0.035 ± 0.023c	0.416 ± 0.348a	0.378 ± 0.158a	0.070 ± 0.019b
青荚叶	0.944 ± 0.0547b	5.946 ± 0.965b	0.033 ± 0.016b	0.113 ± 0.038c	0.283 ± 0.224a	0.105 ± 0.008a	0.116 ± 0.122b
披针叶胡颓子	6.597 ± 6.552b	4.192 ± 1.932b	0.273 ± 0.230b	0.015 ± 0.009c	0.224 ± 0.130a	0.680 ± 0.627a	0.038 ± 0.020b
荚蒾叶	6.352 ± 1.592b	30.502 ± 13.370b	0.352 ± 0.044b	0.688 ± 0.200a	0.435 ± 0.028a	0.601 ± 0.208a	0.08 ± 0.018b
卫矛	0.7378 ± 0.018b	3.709 ± 0.449b	0.044 ± 0.005b	0.009 ± 0.002c	0.119 ± 0.013a	0.2633 ± 0.0126a	0.059 ± 0.044b
猫儿屎叶	0.048 ± 0.001b	1.235 ± 0.206b	0.049 ± 0.066b	0.001 ± 0.003c	0.244 ± 0.230a	nd	0.047 ± 0.028b
五月瓜叶	5.825 ± 0.310b	15.018 ± 7.125b	0.060 ± 0.010b	0.011 ± 0.003c	0.122 ± 0.025a	0.197 ± 0.028a	0.019 ± 0.001b
海棠果	0.847 ± 0.641b	3.912 ± 3.347b	0.034 ± 0.028b	0.012 ± 0.008c	0.040 ± 0.030a	0.158 ± 0.118a	0.024 ± 0.011b
巴山冷杉种子	3.920 ± 0.032b	19.101 ± 1.093b	0.014 ± 0.003b	0.057 ± 0.000c	0.302 ± 0.014a	1.123 ± 0.002a	0.025 ± 0.004b
广布野豌豆	45.524 ± 45.274a	5.264 ± 3.572b	0.734 ± 0.431a	0.006 ± 0.006c	0.998 ± 0.586a	0.314 ± 0.284a	0.138 ± 0.138b
大龙潭旬子	0.869 ± 0.018b	2.354 ± 0.027b	0.013 ± 0.005b	0.007 ± 0.001c	0.045 ± 0.002a	0.137 ± 0.044a	0.010 ± 0.002b
五月瓜果	0.143 ± 0.113b	0.404 ± 0.324b	0.010 ± 0.010b	0.001 ± 0.001c	0.015 ± 0.012a	0.033 ± 0.026a	0.005 ± 0.004b
猫儿屎果	2.349 ± 2.080b	16.943 ± 3.653b	0.077 ± 0.077b	0.002 ± 0.002c	0.092 ± 0.068a	0.235 ± 0.182a	0.031 ± 0.015b
树皮	13.238 ± 4.456b	202.305 ± 6.849a	1.071 ± 0.793ab	0.382 ± 0.24ab	5.026 ± 0.600a	1.123 ± 0.620a	0.179 ± 0.059b
地衣	6.952 ± 5.151b	20.617 ± 13.276b	1.921 ± 1.219a	0.526 ± 0.245a	0.855 ± 0.575a	0.571 ± 0.466a	0.440 ± 0.192a
均值(mean)	6.352	22.180	0.555	0.081	0.559	0.385	0.077
限量标准值	10.000	20.000	0.300	0.050	0.500	0.300	0.500
超标率/%	12	18	29	29	18	35	0

1)数值为均值 ± 标准差；*n* 表示植物样品数量；同列不同小写字母表明不同植物间在 0.05 水平上有显著差异；nd 表示样品未检出. 湖北山楂叶(n = 2)：*Crataegu hupehensis*；湖北山楂果(n = 2)：*Crataegu hupehensis*；峨眉蔷薇(n = 4)：*Rosa omeiensis*；青荚叶(n = 4)：*Helwingia*；披针叶胡颓子(n = 6)：*Elaeagnus lanceolata*；荚蒾叶(n = 4)：*Viburmun*；卫矛(n = 4)：*Euonymus*；猫儿屎叶(n = 4)：*Decaisnea fragesii*；五月瓜叶(n = 2)：*Holboellia fargesii*；海棠果(n = 8)：*M. hupehensis*；巴山冷杉种子(n = 2)：*Abies fragesii*；广布野豌豆(n = 4)：*Vicia cracca*；大龙潭旬子(n = 2)：*Cotoneaster*；五月瓜果(n = 2)：*Holboellia fargesii*；猫儿屎果(n = 4)：*Decaisnea fragesii*；树皮(n = 8)：bark；地衣(n = 6)：lichen.

2.2　川金丝猴栖息地重金属污染与健康风险评价

(1)食源植物污染研究　结果表明(见表 7)，川金丝猴食源植物中地衣和树皮处于重度污染水平. 荚蒾叶为轻度污染，巴山冷杉种子和广布野豌豆处于中度污染，其余植物均处于安全水平. 食源植物中地衣及树皮类污染程度大于树叶类和果实类.

(2)食源植物健康风险评价　利用 THQ 模型对 7 种重金属健康风险评价，结果表明(见表 8)，Cu 和 As 在 3 类食源植物中 THQ 值均大于 1. 各重金属 THQ 值在树皮及地衣类中表现出最高水平，植物健康风险具有地衣及树皮类 > 树叶类 > 果实类的

特点. THQ 最大值均分布在人类干扰程度最强的 HXC 采样点,由此可知,人类活动干扰会增强重金属污染.

(3)水体与土壤污染风险评价 水体综合污染指数表明,神农架川金丝猴栖息地水体重金属处于无污染水平. 土壤地累积指数法及潜在生态风险系数评价结果表明(见表 9),各采样点的 I_{geo} 值在 -3.33 ~ 0.02 之间,除 Cd 处于偏中度污染外,其余元素均处于无污染水平. 各采样点 Cd 具有最大的潜在生态风险, 5 个取样点中, HXC 样点土壤处于轻微生态危害程度,其余地区 RI 均小于 150,暂未存在生态风险.

表 5 栖息地土壤重金属含量[1)]/mg·kg^{-1}

Table 5 Statistical description of heavy metals in habitat soil/mg·kg^{-1}

元素	JHP	DLT	XQJP	JHL	HXC	均值	土壤背景值
Cu	12.038 ± 2.635	12.978 ± 2.345	21.156 ± 9.773	8.268 ± 6.368	12.166 ± 1.831	3.531 ± 7.072	30.7
Zn	62.623 ± 5.788	63.040 ± 11.768	90.551 ± 8.904	37.493 ± 21.738	118.278 ± 42.366	76.146 ± 36.241	83.6
Pb	8.781 ± 1.425	6.799 ± 1.576	11.363 ± 0.976	5.789 ± 3.007	14.669 ± 4.214	9.892 ± 4.061	26.7
Cd	0.275 ± 0.043	0.257 ± 0.047	0.547 ± 0.066	0.399 ± 0.262	0.834 ± 0.517	0.492 ± 0.330	0.17
Cr	54.615 ± 3.896	36.576 ± 8.825	42.815 ± 14.221	12.824 ± 12.603	36.683 ± 6.470	32.389 ± 14.339	86.0
Ni	18.923 ± 4.129	19.507 ± 3.982	24.449 ± 7.796	5.765 ± 5.056	23.718 ± 4.426	18.313 ± 8.730	37.3
As	8.228 ± 2.245	8.095 ± 3.308	10.146 ± 2.853	3.013 ± 2.039	10.194 ± 0.934	7.911 ± 3.441	12.3

1)数值为平均值 ± 标准差

表 6 栖息地水体重金属浓度[1)]/μg·L^{-1}

Table 6 Statistical description of heavy metals in habitat water/μg·L^{-1}

元素	JHP	DLT	XQJP	JHL	HXC	均值	Ⅰ类标准
Cu	0.418 ± 0.096	0.038 1 ± 0.050	0.533 ± 0.070	1.167 ± 0.962	0.756 ± 0.000	0.688 ± 0.545	10
Zn	0.814 ± 1.030	0.000 ± 0.000	3.459 ± 3.309	0.790 ± 1.173	1.036 ± 0.000	1.220 ± 1.074	50
Pb	0.012 ± 0.002	0.007 ± 0.003	0.017 ± 0.004	0.017 ± 0.011	0.069 ± 0.000	0.019 ± 0.017	10
Cd	0.004 ± 0.000	0.002 ± 0.001	0.003 ± 0.002	0.004 ± 0.002	0.005 ± 0.000	0.004 ± 0.002	1
Cr	0.044 ± 0.104	0.381 ± 0.050	0.844 ± 0.326	0.735 ± 0.356	0.607 ± 0.000	0.614 ± 0.251	10
Ni	0.270 ± 0.091	0.212 ± 0.010	0.387 ± 0.074	0.801 ± 0.616	0.578 ± 0.000	0.472 ± 0.365	20
As	0.055 ± 0.043	0.028 ± 0.008	0.047 ± 0.019	0.033 ± 0.020	0.109 ± 0.000	0.047 ± 0.029	50

1)数值为平均值 ± 标准差

表 7 川金丝猴食源植物重金属污染指数[1)]

Table 7 Pollution index of food plants of golden snub-nosed monkeys

食物类别	植物名称	单因子污染指数(P_i)							综合污染指数($P_{综}$)	污染等级
		Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	As		
树叶类	湖北山楂叶(n = 2)	0.066	0.212	0.233	0.197	0.152	0.479	0.052	0.216	安全
	峨眉蔷薇(n = 4)	0.588	0.526	1.169	0.173	0.831	0.158	0.140	0.952	警戒线
	青荚叶(n = 4)	0.094	0.297	0.113	0.565	0.566	0.350	0.232	0.459	安全
	披针叶胡颓子(n = 6)	1.326	0.210	1.467	0.073	0.447	2.267	0.075	0.797	警戒线
	荚蒾叶(n = 4)	0.635	1.525	1.175	3.441	0.869	2.005	0.159	1.465	轻度
	猫儿屎叶(n = 4)	0.048	0.062	0.165	0.050	0.489	nd	0.071	0.357	安全
	卫矛(n = 4)	0.073	0.185	0.147	0.045	0.238	0.878	0.119	0.074	安全
	五月瓜藤叶(n = 2)	0.582	0.751	0.199	0.053	0.243	0.658	0.039	0.589	安全
果实类	海棠果(n = 8)	0.085	0.196	0.113	0.058	0.081	0.527	0.047	0.178	安全
	湖北山楂果(n = 2)	0.022	0.054	0.038	0.014	0.064	0.114	0.017	0.056	安全
	巴山冷杉种子(n = 2)	0.392	0.955	0.047	0.287	0.604	3.742	0.050	2.716	中度
	广布野豌豆(n = 2)	4.552	0.638	14.072	0.029	3.735	1.045	0.276	2.043	中度
	大龙潭旬子(n = 2)	0.087	0.118	0.042	0.033	0.089	0.456	0.020	0.333	安全
	五月瓜果(n = 2)	0.014	0.020	0.032	0.004	0.031	0.111	0.010	0.081	安全
	猫儿屎果(n = 2)	0.235	0.847	0.257	0.009	0.184	0.783	0.062	0.645	安全
地衣及树皮	地衣(n = 6)	1.043	1.031	6.404	2.630	1.711	1.682	0.883	6.038	重度
	树皮(n = 8)	1.322	10.115	3.570	1.910	3.745	1.124	0.358	7.709	重度

1)n 表示植物样品数量; nd 表示样品未检出

表 8　川金丝猴食源植物重金属 THQ 值

Table 8　THQ of heavy metals in the food plants of golden snub-nosed monkeys

植物类型	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	As	THQ 超标率/%
树叶	1.14	0.33	0.48	1.02	0.00	0.22	1.33	43
果实	1.98	0.12	0.35	0.08	0.00	0.11	1.46	29
地衣及树皮	2.27	1.27	3.01	3.41	0.01	1.46	8.53	86
JHP	0.47	0.10	0.11	0.26	0.01	0.16	0.86	14
DLT	1.05	0.47	0.36	0.32	0.00	0.29	1.83	29
XQJP	1.00	0.13	0.73	0.95	0.00	0.69	2.51	29
JHL	1.15	0.72	0.77	1.93	0.00	0.25	2.12	43
HXC	9.85	5.62	2.45	3.11	0.01	0.44	5.80	86

表 9　土壤重金属地积累指数及潜在生态风险系数

Table 9　Accumulation index and potential ecological risk coefficient of soil heavy metals

地区	Cr	Ni	Cu	As	Cd	Pb	Mn	Zn	RI
JHP	-1.24	-1.56	-1.94	-1.16	0.11	-2.19	-0.67	-1.00	63.29
DLT	-1.82	-1.52	-1.62	-1.19	0.02	-2.56	-1.47	-0.99	60.02
XQJP	-3.33	-3.28	-2.47	-2.61	0.65	-2.79	-2.54	-1.74	76.78
JHL	-1.59	-1.19	-1.12	-0.86	1.10	-1.82	-0.31	-0.47	115.72
HXC	-1.81	-1.24	-1.92	-0.86	1.69	-1.45	-0.72	-0.08	164.00

2.3　人类活动对川金丝猴食源植物重金属污染的影响

相关性分析表明(见表 10)，As、Cu 和 Pb，Zn 和 Cd 之间有显著相关性，可能受同一类因素的影响. 聚类分析将重金属分为 4 类，第 1 类为 As、Cu 和 Pb，第 2 类为 Cr，第 3 类为 Zn 和 Cd，第 4 类为 Ni (见图 2)，这与相关性分析结果一致. 按有、无人为活动区来看，树叶类和地衣及树皮类的 Pb、Cd、As、Ni 和 Cr 具有显著差异性，而果实类中 7 种重金属都不具有差异性(见图 3)，同时，水体重金属在人为活动区和无人为活动区间无显著差异性(图 4). 土壤中仅 Cu 和 Cr 具有显著差异性(图 5)，植物与土壤中的 Zn、Pb 和 Cd 含量具有显著相关性，在一定程度上可以推测这 3 种元素来源于土壤(见表 11).

表 10　食源植物重金属含量相关性[1)]

Table 10　Correlation table of heavy metal contents in food plants

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	As
Cu	1	0.384**	0.669**	0.129	0.446**	0.338*	0.750**
Zn		1	0.636**	0.611**	0.283*	0.578**	0.268
Pb			1	0.487**	0.338*	0.459**	0.778**
Cd				1	0.158	0.287	0.276
Cr					1	0.380**	0.415**
Ni						1	0.267
As							1

1) * 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$

表 11　植物、土壤和水重金属含量相关性[1)]

Table 11　Correlation table of heavy metal contents among plants, soil, and water

土壤-植物	相关性	水体-植物	相关性
Cu-Cu	-0.130	Cu-Cu	0.809**
Zn-Zn	0.454*	Zn-Zn	0.153
Pb-Pb	0.727**	Pb-Pb	-0.081
Cd-Cd	0.833**	Cd-Cd	0.080
Cr-Cr	0.233	Cr-Cr	0.276
Ni-Ni	-0.061	Ni-Ni	-0.363
As-As	0.115	As-As	0.531

1) * 表示 $P<0.05$，** 表示 $P<0.01$

3　讨论

3.1　川金丝猴食源植物重金属污染特征分析

神农架川金丝猴食源植物中不同种类植物重金属含量差异大，树皮和地衣重金属含量要高于果实类和树叶类，这是由于不同植物生物学特性不一致，对重金属的吸收和富集能力不同导致[35]. 食源植物中 Ni 超标率是最高的为 35%，Ni 具有生殖危害毒性，食源植物 Ni 元素积累可能会对川金丝猴的生殖系统造成损伤[36]，应加强对川金丝猴栖息地 Ni 重金属的防控措施，避免损害川金丝猴健康. 食源植物

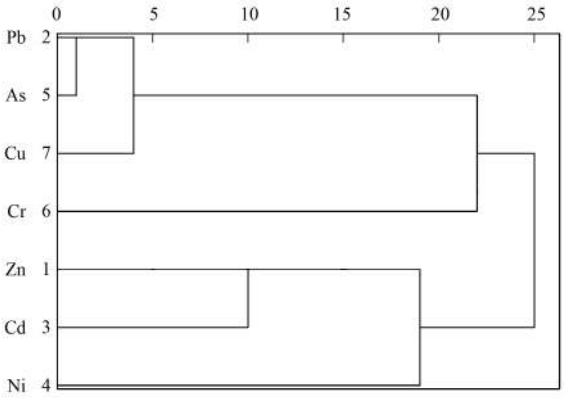
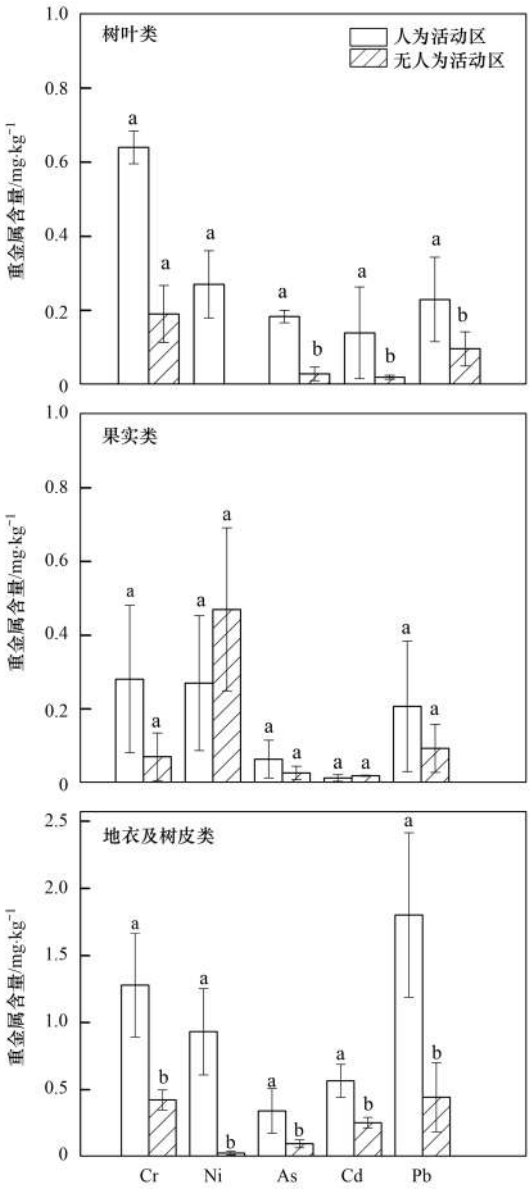


图 2 食源植物重金属聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of heavy metals in food plants



同一重金属内不同小写字母表示有、无人为活动在 0.05 水平存在显著性差异,下同

图 3 人类活动对食源植物重金属含量影响

Fig. 3 Effects of human activities on heavy metal contents in food plants

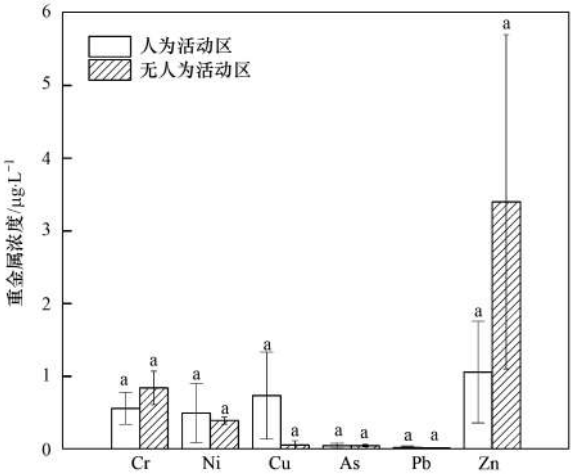


图 4 人类活动对水体重金属浓度影响

Fig. 4 Effects of human activities on heavy metal concentrations in water

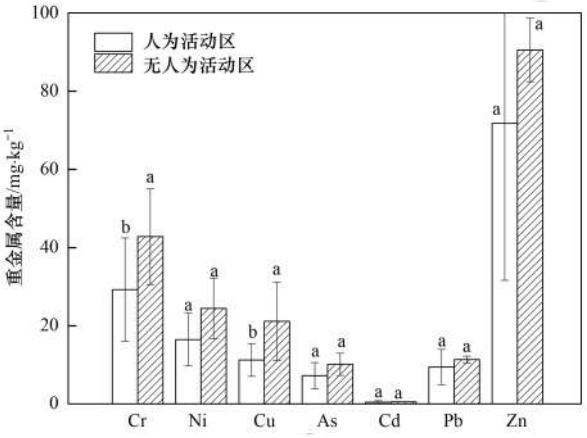


图 5 人类活动对土壤重金属含量影响

Fig. 5 Effects of human activities on heavy metal contents in soil

中披针叶胡颓子、荚蒾叶、广布野豌豆、树皮和地衣均受到不同程度的污染,在今后对川金丝猴重金属保护工作中可以着重关注其受污染情况,以反映食源植物整体受重金属污染水平. 地衣及树皮类重金属污染程度大于树叶类、果实类,这可能是因为地衣和树皮比树叶、果实暴露在外界环境中时间要长有关,地衣和树皮几乎是全年都暴露在重金属环境下,而树叶与果实在春秋季处于暴露状态,还可能与重金属元素随着植物从根部迁移和转化到树叶和果实等部位的过程中受到细胞壁及细胞膜阻碍作用有关[37].

3.2 川金丝猴食源植物重金属健康风险评价

川金丝猴与人类有很多生理上的相似之处,运用人类健康风险 THQ 模型对其进行健康风险评价具有合理性. 结果表明,THQ 值在树皮及地衣类最高,对川金丝猴健康存在一定程度威胁,应加强对川金丝猴“秋冬季补食”措施,来降低川金丝猴对地衣及树皮类的取食量. 川金丝猴全年大部分时期都是

以叶子为食,在秋冬季叶子可利用率最低时,才会增加树皮或地衣的取食量[38],所以川金丝猴实际取食地衣及树皮的健康风险比理论值要小,川金丝猴食源植物中 As 元素 THQ 值在各采样点和各类食源植物中都是最大值, As 会诱导 DNA 损伤并抑制基因表达[39], 川金丝猴长期食用受 As 污染的植物存在健康风险,应重点加强栖息地 As 污染防控.

3.3　栖息地重金属生态风险评价

神农架川金丝猴栖息地水体重金属总体处于无污染水平,这可能是由于水体中重金属浓度本身就比较低,且水体中重金属除了以溶解态存在以外,还以悬浮态、颗粒态等形态赋存于水体沉积物中[40]. 有研究表明即使水体中重金属浓度较低,但通过饮水、食物链等途径长期地进入动物体,可能会对动物体健康产生威胁[41],应对神农架川金丝猴栖息地水体定期开展重金属风险评估和防治工作,以免对川金丝猴健康产生威胁. JHL 和 HXC 两个地区土壤 Cd 处于轻度污染状态,由表 1 可知,JHL 和 HXC 是游客聚集区,会产生垃圾、汽车尾气等污染,推测土壤 Cd 污染有可能是来自游客活动干扰和排放大量汽车尾气等途径产生,同时,也不能排除跟湖北省土壤 Cd 含量较高有关[42]. Cd 中毒会造成野生动物心肌、骨骼肌变性等现象[43],有研究显示川金丝猴以食土作为矿物质元素补充[44],因此土壤 Cd 处于污染状态,可能会对神农架川金丝猴健康存在潜在威胁. 土壤和水体中其余元素均无明显超标,各样品中较高的重金属值可能是污染趋势和风险指示,应重点控制重金属污染,保护川金丝猴栖息地环境.

3.4　人类活动对栖息地重金属影响

(1)食源植物重金属来源初步分析　聚类分析将食源植物重金属分为 4 类,第 1 类为 As、Cu 和 Pb,这与有、无人为活动区中树叶类和地衣及树皮类中 As 和 Pb 都具有显著差异性分析结果一致(见图3),而由表1 可知,栖息地内有居民活动、游客聚集等活动,可以推测食源植物中 As 和 Pb 可能主要受人类活动的干扰,可能与栖息地内车流量大有关[45],可以在栖息地内各主要公路旁移栽银杏、桂花等对重金属具有较强富集作用的植物[46,47]. 第 2 类为 Cr,熊秋林等[48]的研究发现大气沉降对 Cr 累积有影响,而植物还可以通过叶片吸收空气中重金属元素[49],推测大气沉降可能是食源植物 Cr 来源之一. 第 3 类为 Zn 和 Cd,而植物与土壤中的 Zn 和 Cd 含量具有显著相关性,可以推测食源植物中 Zn 和 Cd 可能主要来源于土壤. 第 4 类 Ni,聚类分析距离比其他重金属远,表明 Ni 有其他的来源,如自然源[50].

(2)在有、无人为活动区中土壤中 Cr 和 Cu 具有显著差异性. 土壤 Cr 和 Cu 可能来自于人类活动干扰和交通污染,土壤中除 Cd 元素外,其余元素重金属含量均低于湖北省土壤重金属背景值,因此土壤中 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni 和 As 元素可能主要来源于成土母质[51]. 川金丝猴栖息地人类活动频繁,可能也会对栖息地水源产生不利影响,如农业面源污染、工业废水、生活污水的排放都会造成水体污染. 整体来看,人类活动对神农架川金丝猴栖息地重金属富集具有不可忽视的作用,这与 Zhao 等[52]对人类活动导致大熊猫栖息地土壤、水体和竹子中存在重金属污染风险的研究结果一致,在今后开展川金丝猴保护工作中,应减少人类活动对栖息地产生的污染.

4　结论

(1)神农架川金丝猴栖息地不同食源植物重金属含量差异大,其中 As 对川金丝猴造成健康风险,食用地衣和树皮存在的健康风险大于树叶和果实,应加强对川金丝猴“秋冬季补食”措施,来代替川金丝猴对地衣和树皮的取食.

(2)神农架川金丝猴栖息地水体处于无污染状态,土壤重金属 Cd 存在中度污染,在开展川金丝猴工作中,应结合栖息地重金属污染情况和觅食习性,全面综合考虑重金属对川金丝猴产生的危害.

(3)重金属污染主要来源之一是人类活动,人类活动干扰会增强神农架川金丝猴栖息地食源植物、土壤重金属污染,应合理限制人类活动对川金丝猴栖息地的干扰,对其旅游人数实行合理限量.

(4)由于野外采集金丝猴毛发、新鲜粪便等样品难度较大,本研究只采集到栖息地土壤、水体、食源植物等样品进行研究,不能直接反映其体内重金属含量,在今后的研究中,可以研究川金丝猴体内重金属污染情况,进一步探究重金属污染对川金丝猴生理健康的影响.

参考文献:

[1] Wei B G, Yang L S. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China [J]. Microchemical Journal, 2010, **94**(2): 99-107.

[2] Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, *et al*. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. Science of the Total Environment, 2015, **512-513**: 143-153.

[3] Li X Z, Wang M E, Jiang R, *et al*. Evaluation of joint toxicity of heavy metals and herbicide mixtures in soils to earthworms (*Eisenia fetida*)[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **94**: 137-146.

[4] Dutta S, Mitra M, Agarwal P, *et al*. Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability[J]. Plant Signaling & Behavior,

2018, **13**(8), doi: 10.1080/15592324.2018.1460048.

[5] Liu Q, Chen Y P, Maltby L, *et al*. Exposure of the endangered golden monkey (*Rhinopithecus roxellana*) to heavy metals: a comparison of wild and captive animals[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(9): 6713-6720.

[6] Berglund Å M M, Koivula M J, Eeva T. Species- and age-related variation in metal exposure and accumulation of two passerine bird species[J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2368-2374.

[7] Xiong B, Xu T, Li R P, *et al*. Heavy metal accumulation and health risk assessment of crayfish collected from cultivated and uncultivated ponds in the Middle Reach of Yangtze River[J]. Science of the Total Environment, 2020, **739**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139963.

[8] 蔡庆华, 罗情怡, 谭路, 等. 神农架国家公园: 现状与展望[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(6): 1378-1383.
Cai Q H, Luo Q Y, Tan L, *et al*. Shennongjia National Park: present situation and prospect[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(6): 1378-1383.

[9] 铁军, 张晶, 彭林鹏, 等. 神农架川金丝猴栖息地优势树种生态位及食源植物[J]. 植物生态学报, 2009, **33**(3): 482-491.
Tie J, Zhang J, Peng L P, *et al*. Dominant trees' niche characteristics and food plants in *Rhinopithecus roxellana* habitat in Shennongjia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, **33**(3): 482-491.

[10] 李义明, 廖明尧, 喻杰, 等. 社群大小的年变化、气候和人类活动对神农架自然保护区川金丝猴日移动距离的影响[J]. 生物多样性, 2005, **13**(5): 432-438.
Li Y M, Liao M Y, Yu J, *et al*. Effects of annual change in group size, human disturbances and weather on daily travel distance of a group in Sichuan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*) in Shennongjia Nature Reserve, China[J]. Biodiversity Science, 2005, **13**(5): 432-438.

[11] 白泄露, 李艳红, 郑维超, 等. 唐家河国家级自然保护区川金丝猴生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2021, **41**(11): 4460-4468.
Bai Y L, Li Y H, Zheng W C, *et al*. Habitat suitability assessment of *Rhinopithecus roxellana* in Tangjiahe National Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(11): 4460-4468.

[12] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(15): 6134-6145.
Zhou T, Chen W X, Li J F, *et al*. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(15): 6134-6145.

[13] 杜永林, 杨敬元, 任立志. 国宝金丝猴在神农架的发现与科研[J]. 档案记忆, 2021, (5): 20-22.

[14] 刘汉泽, 喻玲. 神农架冰雪游升温[N]. 湖北日报, 2020-12-15(11).

[15] 于晓东, 周红章, 罗天宏. 神农架保护区大步甲和蜗步甲属生境选择与物种多样性研究[J]. 生物多样性, 2001, **9**(3): 214-221.
Yu X D, Zhou H Z, Luo T H. Habitat distribution and species diversity of *Carabus* and *Cychrus* in Shennongjia Nature Reserve, Hubei Province[J]. Biodiversity Science, 2001, **9**(3): 214-221.

[16] 彭乾乾, 李亭亭, 汪正祥, 等. 神农架国家公园生态旅游环境容量研究[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2017, **39**(5): 451-454.
Peng Q Q, Li T T, Wang Z X, *et al*. The ecotourism environment capacity of Shennongjia National Park[J]. Journal of Hubei University (Natural Science), 2017, **39**(5): 451-454.

[17] 杨敬元, 刘学聪, 廖明尧. 神农架一个川金丝猴群的食物分布[J]. 动物学杂志, 2014, **49**(4): 465-475.
Yang J Y, Liu X C, Liao M X. Food distribution for a group of *Rhinopithecus roxellana* in Shennongjia, China[J]. Chinese Journal of Zoology, 2014, **49**(4): 465-475.

[18] 铁军, 张晶, 彭林鹏, 等. 神农架川金丝猴冬春季节取食影响因素[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(11): 2562-2569.
Tie J, Zhang J, Peng L P, *et al*. Factors affecting the foraging of *Rhinopithecus roxellana* in Shennongjia Nature Reserve in winter and spring[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(11): 2562-2569.

[19] 朱源, 胡灿实, 张明明, 等. 贵州草海湿地水鸟重金属暴露风险综合评估与保护管理应用[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(10): 4770-4781.
Zhu Y, Hu C S, Zhang M M, *et al*. Comprehensive assessment on heavy metal exposure risk to waterbirds and implications for conservation and management in Caohai wetland, China[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(10): 4770-4781.

[20] 张清华, 韦永著, 曹建华, 等. 柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(4): 1598-1607.
Zhang Q H, Wei Y Z, Cao J H, *et al*. Heavy metal pollution of the drinking water sources in the Liujiang River Basin, and related health risk assessment[J]. Environmental Science, 2018, **39**(4): 1598-1607.

[21] Zhao Y, Chen Y P, Ellison A M, *et al*. Establish an environmentally sustainable Giant Panda National Park in the Qinling Mountains[J]. Science of the Total Environment, 2019, **668**: 979-987.

[22] Adamu C I, Nganje T N, Edet A. Heavy metal contamination and health risk assessment associated with abandoned barite mines in Cross River State, southeastern Nigeria[J]. Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management, 2015, **3**: 10-21.

[23] 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 等. 海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(10): 4916-4924.
Yang J Z, Wang Z L, Gao J W, *et al*. Accumulation and health risk of heavy metals in cereals, vegetables, and fruits of intensive plantations in Hainan province[J]. Environmental Science, 2021, **42**(10): 4916-4924.

[24] GB 2762-2017《食品安全国家标准 食品中污染物限量》[J]. 中国食品卫生杂志, 2018, **30**(3): 329-340.

[25] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, **38**(1): 389-398.
Chen Z L, Huang L, Zhou C Y, *et al*. Characteristics and evaluation of heavy metal pollution in vegetables in Guangzhou[J]. Environmental Science, 2017, **38**(1): 389-398.

[26] 任婉侠, 薛冰, 马志孝, 等. 老工业搬迁区土壤重金属污染特征及潜在生态风险—以沈阳铁西老工业区为例[J]. 可持续发展, 2012, **2**(4): 159-166.
Ren W X, Xue B, Ma Z X, *et al*. Characters and potential ecological risks of heavy metals in soil of Chinese Brownfield Redevelopment Site * ——Case of Tiexi Old Industrial Area, Shenyang City[J]. Sustainable Development, 2012, **2**(4): 159-166.

[27] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游(清原段)水环境中重

金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 108-116.
Ma Y Q, Shi Y, Qin Y W, *et al*. Temporal-spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the upper reaches of Hunhe River (Qingyuan Section), Northeast China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 108-116.

[28] 任建丽, 金海龙, 叶茂, 等. 艾比湖湿地自然保护区水质分析与评价[J]. 干旱区资源与环境, 2011, **25**(5): 154-157.
Ren J L, Jin H L, Ye M, *et al*. Analysis and evaluation of water quality of Aibihu Lake Wetland Natural Reserve[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, **25**(5): 154-157.

[29] Huang Y P, Xiang J T, Wang C H, *et al*. Lichen as a Biomonitor for vehicular emission of metals: a risk assessment of lichen consumption by the Sichuan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **180**: 679-685.

[30] USEPA. Regional Screening Levels (RSL)[EB/OL]. USEPA. https://www.epa.gov/risk/regional-screening-levels-rsls, 2019-09-10.

[31] 梁冰, 戚汉君, 张树义, 等. 笼养川金丝猴不同年龄阶段的发育特征[J]. 动物学报, 2001, **47**(4): 381-387.
Liang B, Qi H J, Zhang S Y, *et al*. Developmental traits of captive Sichuan Snub-nosed monkeys (*Rhinopithecus roxellana*) at different age stages[J]. Acta Zoologica Sinica, 2001, **47**(4): 381-387.

[32] 王长美, 孙伟东, 葛超. 川金丝猴在南京地区人工饲养与管理研究[J]. 畜牧与兽医, 2020, **52**(3): 135-138.
Wang C M, Sun W D, Ge C. Study on the artificial breeding and management of Golden snub-nosed monkey in Nanjing[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2020, **52**(3): 135-138.

[33] Li Y M. Seasonal variation of diet and food availability in a group of Sichuan snub-nosed monkeys in Shennongjia Nature Reserve, China[J]. American Journal of Primatology, 2006, **68**(3): 217-233.

[34] 罗鹏, 雷青海, 王辉太, 等. 兰州市动物园川金丝猴的饲养管理及种群现状[J]. 野生动物学报, 2020, **41**(4): 879-884.
Luo P, Lei Q H, Wang H T, *et al*. The husbandry and population status of *Rhinopithecus roxellana* in the Lanzhou Zoo [J]. Chinese Journal of wildlife, 2020, **41**(4): 879-884.

[35] Vymazal J, Březinová T. Heavy metals in plants in constructed and natural wetlands: concentration, accumulation and seasonality[J]. Water Science & Technology, 2015, **71**(2): 268-276.

[36] Doreswamy K, Shrilatha B, Rajeshkumar T, *et al*. Nickel-induced oxidative stress in testis of mice: evidence of DNA damage and genotoxic effects[J]. Journal of Andrology, 2004, **25**(6): 996-1003.

[37] 费毅琴, 肖凌, 汪波, 等. 37 种植物类药材中重金属和有害元素残留分析及风险评估[J]. 药物分析杂志, 2021, **41**(6): 1000-1008.
Fei Y Q, Xiao L, Wang B, *et al*. Residue analysis and risk assessment of heavy metals and harmful elements in 37 plant medicinal materials [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2021, **41**(6): 1000-1008.

[38] Hou R, Chapman C A, Jay O, *et al*. Cold and hungry: combined effects of low temperature and resource scarcity on an edge-of-range temperate primate, the golden snub-nose monkey [J]. Ecography, 2020, **43**(11): 1672-1682.

[39] Zhang A L, Chen L, Ma L, *et al*. Role of H3K18ac-regulated nucleotide excision repair-related genes in arsenic-induced DNA damage and repair of HaCaT cells[J]. Human & Experimental Toxicology, 2020, **39**(9): 1168-1177.

[40] 周巧巧, 任勃, 李有志, 等. 中国河湖水体重金属污染趋势及来源解析[J]. 环境化学, 2020, **39**(8): 2044-2054.
Zhou Q Q, Ren B, Li Y Z, *et al*. Trends and sources of dissolved heavy metal pollution in water of rivers and lakes in China[J]. Environmental Chemistry, 2020, **39**(8): 2044-2054.

[41] Sundaray S K, Nayak B B, Lin S, *et al*. Geochemical speciation and risk assessment of heavy metals in the river estuarine sediments—A case study: Mahanadi basin, India[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(2-3): 1837-1846.

[42] 徐启胜, 李雨晴, 陈燕, 等. 我国中南地区土壤重金属污染状况及其空间分布研究[J]. 北方农业学报, 2018, **46**(3): 93-100.
Xu Q S, Li Y Q, Chen Y, *et al*. Study on heavy metal pollution and its spatial distribution in soil in central South China[J]. Journal of Northern Agriculture, 2018, **46**(3): 93-100.

[43] 王祥生, 娄虎, 张明海. 野生动物重金属污染研究进展[J]. 生命科学研究, 2019, **23**(1): 78-86.
Wang X S, Lou H, Zhang M H. Advances in heavy metal pollution in wildlife[J]. Life Science Research, 2019, **23**(1): 78-86.

[44] 何凤芝, 李延鹏, 高颖, 等. 土壤 pH 值对秦岭川金丝猴食土行为的影响[J]. 兽类学报, 2018, **38**(1): 12-17.
He F Z, Li Y P, Gao Y, *et al*. Effect of soil pH on geophagy in golden snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*) in Qinling Mountains[J]. Acta Theriologica Sinica, 2018, **38**(1): 12-17.

[45] Ewen C, Anagnostopoulou M A, Ward N I. Monitoring of heavy metal levels in roadside dusts of Thessaloniki, Greece in relation to motor vehicle traffic density and flow [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, **157**(1): 483-498.

[46] 唐敏, 张欣, 刘燕, 等. 镉在 3 种乔木中的积累及其亚细胞分布和化学形态研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2440-2447.
Tang M, Zhang X, Liu Y, *et al*. Accumulation, subcellular distribution and chemical forms of cadmium in three tree species [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2440-2447.

[47] 张前进, 刘华, 陈永生, 等. 合肥老城区土壤重金属分布格局及树木富集重金属潜力[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(12): 4140-4147.
Zhang Q J, Liu H, Chen Y S, *et al*. Distribution pattern of heavy metals in soil and the potential of heavy metals enrichment by trees in the old town of Hefei City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(12): 4140-4147.

[48] 熊秋林, 肖红伟, 程朋根, 等. 北京表层土壤重金属污染分布及大气沉降贡献[J]. 生态环境学报, 2021, **30**(4): 816-824.
Xiong Q L, Xiao H W, Cheng P G, *et al*. Pollution distribution of topsoil heavy metals in Beijing and its atmospheric deposition contribution[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, **30**(4): 816-824.

[49] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 等. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2361-2367.
Liu L, Fang Y M, Wang S C, *et al*. Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven tress species [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2361-2367.

[50] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布

及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al*. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.

[51] 于旦洋, 王颜红, 丁茯, 等. 近十年来我国土壤重金属污染源解析方法比较[J]. 土壤通报, 2021, **52**(4): 1000-1008.
Yu D Y, Wang Y H, Ding F, *et al*. Comparison of analysis methods of soil heavy metal pollution sources in China in last ten years[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, **52**(4): 1000-1008.

[52] Zhao Y, Chen Y P, Zheng Y J, *et al*. Quantifying the heavy metal risks from anthropogenic contributions in Sichuan panda (*Ailuropoda melanoleuca melanoleuca*) habitat[J]. Science of the Total Environment, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140941.

《环境科学》连续 10 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2021 年 12 月 6 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2021 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2021 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 10 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5%(Top5%)的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

HUANJING KEXUE Vol. 43 No. 6
Environmental Science (monthly) Jun. 15, 2022

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on $PM_{2.5}$ Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region ····· QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, *et al.* (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on $PM_{2.5}$ Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China ····· HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, *et al.* (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in $PM_{2.5}$ During COVID-19 Control in Suzhou ····· MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, *et al.* (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 ····· XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, *et al.* (2858)
Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing ····· PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, *et al.* (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of $PM_{2.5}$ in Baoding City in Winter ····· WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, *et al.* (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in $PM_{2.5}$ in Jiangbei New Area, Nanjing ····· GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, *et al.* (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi ····· XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, *et al.* (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example ····· ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, *et al.* (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis ····· TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, *et al.* (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, *et al.* (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 ····· ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, *et al.* (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province ····· YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, *et al.* (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn ····· ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, *et al.* (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan ····· SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, *et al.* (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City ····· WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, *et al.* (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China ····· FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River ····· WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, *et al.* (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia ····· ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, *et al.* (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism ····· SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, *et al.* (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors ····· LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, *et al.* (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai ····· ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, *et al.* (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake ····· ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, *et al.* (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks ····· LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, *et al.* (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area ····· ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, *et al.* (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin ····· CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, *et al.* (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water ····· CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, *et al.* (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 ····· QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, *et al.* (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City ····· WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, *et al.* (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years ····· GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, *et al.* (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China ····· TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, *et al.* (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data ····· GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, *et al.* (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution ····· CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution ····· SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, *et al.* (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water ····· WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing ····· XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, *et al.* (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, *et al.* (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron ····· CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, *et al.* (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System ····· TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, *et al.* (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions ····· GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, *et al.* (3211)
Effect of HumicAcid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis ····· LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, *et al.* (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, *et al.* (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland ····· SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, *et al.* (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau ····· WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, *et al.* (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China ····· LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, *et al.* (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province ····· ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin ····· DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, *et al.* (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (*Rhinopithecus roxellana*) Habitat in Shennongjia Mountains ····· YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, *et al.* (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation ····· XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, *et al.* (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice ····· TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, *et al.* (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments ····· LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, *et al.* (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai ····· LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, *et al.* (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops ····· JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, *et al.* (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing ····· LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, *et al.* (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 ····· LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, *et al.* (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data ····· LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, *et al.* (3365)