

RCCSE中国核心学术期刊 (A)

中国学术期刊影响因子年报统计源期刊

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

美国《化学文摘》数据库收录

ISSN 2095-7300

CN 43-1522/Q

湖南生态科学学报

Journal of Hunan Ecological Science

湖南生态科学学报

第九卷 Vol.9
第4期 No.4

二〇二二年十二月

2022 第9卷 第4期
VOL.9 NO.4



《湖南生态科学学报》第二届编辑委员会

主任委员：苏 立

副主任委员：庾庐山

主 编：梁忠厚 颜晓元

副主编：付美云

编 委（按姓氏拼音为序）：

白军红	北京师范大学	陈功锡	吉首大学
陈光才	中国林业科学院亚热带林业研究所	陈永忠	湖南省林业科学院
邓明华	云南农业大学	杜辉辉	湖南农业大学
范 适	湖南环境生物职业技术学院	方 迪	南京农业大学
付美云	湖南环境生物职业技术学院	何铁光	广西农业科学院
胡永灵	湖南环境生物职业技术学院	姜小文	湖南环境生物职业技术学院
李芳柏	广东省生态环境与土壤研究所	李顺祥	湖南中医药大学
梁忠厚	湖南环境生物职业技术学院	刘菊华	海南大学
刘俊栋	江苏农牧科技职业学院	刘鸣达	沈阳农业大学
刘卫东	中南林业科技大学	马锦林	广西林业科学研究院
彭佩钦	中南林业科技大学	圣倩倩	南京林业大学
苏 立	湖南环境生物职业技术学院	谭志远	华南农业大学
汪 洋	湖北生态工程职业技术学院	汪思龙	中国科学院沈阳应用生态研究所
王克林	中国科学院亚热带农业生态研究所	王晓明	湖南省林业科学院
王旭军	湖南省林业科学院	魏甲彬	湖南环境生物职业技术学院
温小荣	南京林业大学	文锦芬	昆明理工大学
吴艳宏	中国科学院成都山地所	颜晓元	中国科学院南京土壤研究所
杨 宁	湖南环境生物职业技术学院	杨钙仁	广西大学
杨 华	湖南农业大学	易 诚	衡阳师范学院
易镇邪	湖南农业大学	于飞海	台州学院
庾庐山	湖南环境生物职业技术学院	曾长立	江汉大学
湛方栋	云南农业大学	张少良	东北农业大学
郑冠宇	南京农业大学	钟金凤	湖南环境生物职业技术学院
曾建国	湖南农业大学	周国英	中南林业科技大学
周立祥	南京农业大学	周顺桂	福建农林大学
周尧治	西藏农牧学院	朱校奇	湖南农业科学院
祝遵凌	南京林业大学		

目 次

研究论文

淹水对重金属污染土壤中杞柳生长和元素积累的影响

..... 王丽,郑怡晖,冯木彩,曹旖旎,邸东柳,陈光才(1)

长期施磷对玉米和土壤 C : N : P 及有机质稳定性的影响

..... 贾照杰,吉德昌,陈飞,武立萍,李铭轩,于占波,丁凡(10)

徐州市生态系统服务供需匹配研究 李传昌,胡嫚莉,雍新琴(19)

基于 RAPD 分子标记的藜蒿种质资源遗传多样性分析

..... 王宇航,魏清莹,薛天源,何思晓,陈伟达,董元火,曾长立(29)

碱性条件高效降解小麦秸秆菌群的筛选及酶活力特点

..... 佟旭楠,洪梓萌,白狄纯,旦增卓嘎,王金龙(37)

不同产地葛功能成分含量与矿质元素相关性研究

..... 彭斯文,朱校奇,卢红玲,谢进,戴艳娇,黄艳宁,龙世平(43)

堵河源自然保护区四照花种群结构及动态分析 王定卿,罗刚,郑德国,施维华,汪洋(52)

萱草原生质体制备体系的优化 牛晓茹,景欢欢,田宁,郑硕理,陈白冰,黄程前,陈己任(60)

长沙地区引种萱草品种的综合评价 方娟,王晓红,黄程前,郑硕理,陈佳佳,胡灵璇(69)

‘辽胡 1 号杨’扦插苗耐盐碱性分析 于雷,王敏,侯庚,姜啸虹(77)

湖南省弄蝶科(鳞翅目:Lepidoptera)5 个新纪录种 张法明,于桂清,李欣,唐甲,唐耿超,黄太福(82)

三种发酵剂发酵猪粪优势菌种筛选及除臭试验研究 易诚,刘永鑫,龙九妹,邓景衡(85)

研究综述

土壤镉砷复合污染界面过程与调控技术研究进展 周敏,胡培良,舒心,包姗,周虹(96)

全球生物多样性领域数字技术应用趋势与发展建议 郭婷婷,马敏象,鲍亦平,邓禹,吴斌(103)

城市野境的生物多样性研究进展 姜雁林,马晓燕,冯丽(112)

2022 年第 9 卷中文总目次 (1)

2022 年第 9 卷英文总目次 (4)

CONTENTS

Research paper

- Effects of Flooded Condition on Growth and Elements Accumulation of *Salix integra* in Heavily Polluted Soil
 WANG Li, ZHENG Yihui, FENG Mucai, CAO Yini, DI Dongliu, CHEN Guangcai (1)
- Effects of Long-term Phosphorus Fertilization on Maize and Soil C : N : P and Organic Matter Stability
 JIA Zhaojie, JI Dechang, CHEN Fei, WU Liping, LI Mingxuan, YU Zhanbo, DING Fan (10)
- Supply-demand Matching of Ecosystem Services in Xuzhou LI Chuanchang, HU Manli, YONG Xinqin (19)
- Genetic Diversity Analysis of *Artemisia selengensis* Germplasm Resources Based on RAPD Molecular Markers
 WANG Yuhang, WEI Qingying, XUE Tianyuan,
 HE Sixiao, CHEN Weida, DONG Yuanhuo, ZENG Changli (29)
- Screening and Enzymic Activity Characteristics of Compound Microbes for Efficient Degradation of Wheat Straw
 under Alkaline conditions TONG Xunan, HONG Zimeng, BAI Dichun, Danzeng-Zhuoga, WANG Jinlong (37)
- Study on the Correlation Between the Contents of Functional Components in *Pueraria montana* and Mineral Elements
 PENG Siwen, ZHU Xiaoqi, LU Hongling, XIE Jin, DAI Yanjiao, HUANG Yanning, LONG Shiping (43)
- Population Structure and Dynamics of *Dendrobenthamia japonica* in Duheyuan Nature Reserve
 WANG Dingqing, LUO Gang, ZHENG Deguo, SHI Weihua, WANG Yang (52)
- Optimization of Protoplast Preparation System of *Hemerocallis fulva* NIU Xiaoru, JING Huanhuan,
 TIAN Ning, ZHENG Shuoli, CHEN Baibing, HUANG Chengqian, CHEN Jiren (60)
- Comprehensive Evaluation of *Hemerocallis fulva* Varieties Introduced in Changsha Area FANG Juan,
 WANG Xiaohong, HUANG Chengqian, ZHENG Shuoli, CHEN Jiajia, HU Lingxuan (69)
- Analysis of Salt and Alkaline Tolerance of Poplar Cuttings ‘Liaohu No. 1’
 YU Lei, WANG Min, HOU Geng, JIANG Xiaohong (77)
- Five Newly Recorded Species of HesperIIDae (Lepidoptera) in Hunan Province
 ZHANG Faming, YU Guiqing, LI Xin, TANG Jia, TANG Gengchao, HUANG Taifu (82)
- Screening of Dominant Strains of Pig Manure Fermented by Three Starter Agents and Deodorization Experimental
 Research YI Cheng, LIU Yongxin, LONG Jiumei, DENG Jingheng (85)

Research review

- Advances on Interfacial Process and Regulation Technology of Soil Co-contaminated with Cadmium-Arsenic
 ZHOU Min, HU Peiliang, SHU Xin, BAO Shan, ZHOU Hong (96)
- The Digital Technology in Global Biodiversity Research Field Application Tendency and Developing Suggestions
 GUO Tingting, MA Minxiang, BAO Yiping, DENG Yu, WU Bin (103)
- Advances in Biodiversity Research in Urban Wilderness JIANG Yanlin, MA Xiaoyan, FENG Li (112)

淹水对重金属污染土壤中杞柳生长和元素积累的影响

王丽¹, 郑怡晖², 冯木彩³, 曹旖旎², 邸东柳², 陈光才^{2*}

(1. 杭州市富阳区环境卫生保障中心, 浙江 杭州 311400; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 3. 诸城市农业技术推广中心, 山东 潍坊 262200)

摘要:【目的】通过研究杞柳(*Salix integra*)‘一支笔’在淹水条件下的生长表现、生理适应性以及元素积累特征, 为杞柳在污染湿地修复应用提供理论依据。【方法】采用 Cd-Zn 重度污染土壤盆栽培养并模拟淹水试验, 比较研究淹水/非淹水 90 d 后杞柳的生长、光合生理和重金属积累的响应差异。【结果】(1) 土壤淹水降低杞柳 7.70% 光合速率, 但未对杞柳生长造成显著影响。(2) 淹水增加了杞柳对营养元素的吸收, 如茎内 Fe 浓度增加了 2.71 倍、Mo 浓度增加了 2.62 倍, 插条内 Fe、Mn 和 Mo 的浓度分别增加了 7.50、3.05、2.50 倍, 根内 Fe、Mn 和 Mo 的浓度分别增加了 2.71、6.48、4.91 倍, 淹水条件下杞柳体内微量元素(除 B 外)相关性加强。(3) 淹水抑制杞柳对 Cd 的积累和转运能力, 地上部及根的生物富集系数(BCF)分别降低 74.39%、29.94%, 而转运系数(TF)降低 63.46%。淹水增加了根对 Zn 的吸收, BCF 值提高 27.06%, 抑制了 Zn 的转运能力, TF 值降低 80.56%。【结论】杞柳‘一支笔’在 Cd-Zn 复合污染土壤中经较长时间淹水后, 表现出良好的光合能力和生理适应性, 表现出较强的重金属耐受性和重金属富集转运能力, 说明其在淹水区域仍然具有较强的植物修复潜力, 具有应用于重金属污染湿地和水系消落区植物修复的潜力。

关键词: 杞柳; 植物修复; 重金属; 淹水; 土壤

中图分类号: S793.9; X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-7300(2022)04-0001-09

Effects of Flooded Condition on Growth and Elements Accumulation of *Salix integra* in Heavily Polluted Soil

WANG Li¹, ZHENG Yihui², FENG Mucai³, CAO Yini²,
DI Dongliu², CHEN Guangcai^{2*}

(1. Hangzhou Fuyang District Environmental Health Security Center, Hangzhou 311400, China;

2. Research Institute of Subtropical forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China;

3. Zhucheng Agricultural Technology Extension Center, Weifang 262200, China)

Abstract:【Objective】The growth performance, physiological adaptability, elements accumulation of

收稿日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071736); 中央级公益性科研院所基金重点项目(CAFYBB2019SZ001)。

作者简介: * 为通信作者: 陈光才, 博士, 研究员, 研究方向: 受损/退化生态系统的修复, E-mail: guangcaichen@sohu.com; 王丽, 硕士, 工程师, 研究方向: 环境卫生管理, E-mail: 799954962@qq.com。

引文格式: 王丽, 郑怡晖, 冯木彩, 等. 淹水对重金属污染土壤中杞柳生长和元素积累的影响[J]. 湖南生态科学学报, 2022, 9(4): 1-9. WANG L, ZHENG Y H, FENG M C, et al. Effects of flooded condition on growth and elements accumulation of *salix integra* in heavily polluted soil[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2022, 9(4): 1-9.

Salix integra under flooded/non-flooded soil were studied to provide theoretical basis for the restoration of polluted wetlands. 【Method】 The willows were cultivated in Cd-Zn polluted soils under flooded and non-flooded conditions. After flooding for 90 d, the variations of growth, physiological and biochemical, uptake of heavy metals were determined and investigated. 【Result】 (1) Flooded soil reduced photosynthesis of *S. integra* slightly by 7.70%, and the biomass was insignificantly affected by flooding. (2) The flooding increased the accumulation of Fe by 2.71 times and Mo by 2.62 in stem, Fe, Mn and Mo in the cuttings increased by 7.50, 3.05, 2.50 times, respectively. Fe, Mn and Mo in root increased by 2.71, 6.48, 4.91 times, respectively. Meanwhile, the correlation of trace elements (except B) was strengthened in *S. integra* under flooded condition. (3) Flooded condition decreased bioconcentration factor (BCF) of Cd for aboveground and root by 74.39%, 29.94%, respectively, transfer factor (TF) of Cd decreased by 63.46%. Flooding increased the absorption of Zn by roots and its BCF was enhanced by 27.06%, while inhibiting the transport capacity of Zn and its TF was reduced by 80.56%. 【Conclusion】 *S. integra* ‘Yizhibi’ maintains normal photosynthetic capacity, physiological activities, and normal growth under flooded condition, and keeps relative high capacities in metal tolerance, accumulation and transportation under flooded-soil. The result suggests its high application potential in phytoremediation for wetland and riparian zone polluted by heavy metals.

Keywords: *Salix integra*; phytoremediation; heavy metals; flooded soil; soil

近年来,随着我国经济的快速发展,土壤污染问题愈发严重,由此引发的一系列环境问题不容忽视^[1]。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤环境状况整体形势较为严峻,全国土壤污染点位总超标率达 16.10%,其中以重金属为主的污染点位占全部超标点位的 82.80%,镉(Cd)、锌(Zn)的点位超标率分别为 7.00%、0.90%^[2]。土壤重金属含量超标,将降低土壤微生物活性和土壤肥力。同时,土壤中的重金属可通过食物链富集,最终影响植物、动物和人体健康^[3]。人体内镉积累将破坏肝脏、肾脏功能^[4-5],因此亟需开展重金属污染土壤的绿色修复技术研发。

与价格高昂且容易产生二次污染的传统物理修复和化学修复方法相比,植物修复具有成本低、适用性广、环境友好等优势,广泛运用于修复土壤重金属污染^[6]。植物修复是通过植物吸收、固定土壤重金属后,降低土壤重金属含量或土壤重金属的移动性,达到土壤修复目标^[7-8]。目前,用于湿地污染修复的植物多为草本,如香蒲(*Typha orientalis*)、美人蕉(*Canna indica*)、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)等^[9]。但草本植物因个体矮小、生长缓慢、对重金属耐受性弱等,在土壤污染治理中存有一定局限性^[10]。相较于草本植物,木本植物具有生长期长,生物量大,吸收污染物多、吸收重金属种类丰富等特点,被广泛用于重金属重度污染土壤的修复^[11]。

柳树(*Salix* spp.)因其生长速度快、根系发达、生物量大、耐水湿、重金属耐性强,可用于修复重金属重度污染土壤^[12]。如 Migeon 等^[13]在 Cd、Zn 严重污染条件下比较了 25 个树种的重金属富集情况,发现柳树对于 Cd 和 Zn 具有高积累特性。Tozser 等^[14]利用蒿柳(*S. viminalis*)提取污染地区重金属,结果显示 Zn、Mn、Fe、Cu 的生物富集系数较高,Cd、Mn 及 Zn 的转运系数较高,表明蒿柳对重金属有较高的积累潜力。陈彩虹等^[15]及刘治昆等^[16]在水培条件下探究了 Cu 胁迫对‘苏柳 172’(*S. jiangsuensis* CL J-172)和垂柳(*S. babylonica*)矿质元素积累、生长及生理特性的影响,明确了 2 种柳树用于 Cu 污染修复的潜力。在淹水条件下,杞柳(*S. integra*)能够增加不定根和皮孔数量,调节抗氧化酶系统和渗透调节物质等积极防御和共同作用来缓解淹水和 Cu 污染的复合胁迫^[17-18]。

在河流、湖库等水陆交错带,因为水位的周期性变化,土壤淹水成为限制滨岸带植物生长的主要非生物胁迫因子之一^[19]。淹水胁迫使植物地上叶片萎蔫脱落、地下根部腐烂,减少植物生物量,降低光合作用强度,从而削弱重金属污染土壤的植物修复效率^[20]。柳树本身具有较强的生态适应性,能够在河沿岸带等低洼处生长良好,并且能够在淹水的 Cd 污染和 Cu 污染土壤中生长良好^[21-22]。但在多种重金属污染的淹水环境下,柳树的生长适应性及

重金属修复潜力尚不清楚,亟需开展系统研究。本研究以杞柳‘一支笔’(*S. integra* ‘Yizhibi’)为试材,以超过风险管控值的Cd、Zn污染土壤为培养基质,通过盆栽试验,设置淹水 and 非淹水2组处理,研究其生长表现、生理适应性以及重金属积累和转运能力,以期为杞柳在污染湿地修复方面提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选取杭州市富阳区(29°53'N,119°54'E)

表1 供试土壤理化性质
Table 1 Physicochemical properties of tested soil

土壤质地	pH	有机质/ (g/kg)	总氮/ (g/kg)	总磷/ (g/kg)	总钾/ (g/kg)	金属浓度/(mg/kg)			
						Cu	Cd	Zn	Pb
中壤土	7.5±0.08	53±7.2	3.04±0.33	1.05±0.05	6.95±0.43	73.2±2.0	42.6±0.6	1 601.9±47.6	139.4±2.3

注:表中数据表示平均值±标准差,n=3

1.2 试验设计

盆栽试验在塑料大棚中进行,自然光照,环境温度 为 23 ℃ ~ 38 ℃ ,相对湿度为 60% ~ 65% 。将剪好的杞柳插条插入装有 1.2 kg 重金属污染土壤的塑料花盆中(高 15 cm,直径 11 cm),每盆 1 个插条,插条插入土壤 10 cm,培养 120 d 后,将其随机分为 2 组,每组 3 个重复,每个重复有 3 盆,每盆 1 株苗,分别进行淹水 and 非淹水处理。淹水处理组淹水深度超过土壤表面 10 cm,非淹水处理为对照组,对照组每天用自来水浇水,土壤湿度大致保持在田间持水量的 70% 。淹水处理维持 90 d,整个试验周期为 7 个月。

1.3 土壤理化性质测定

土壤样品经风干、研磨,再通过 2 mm 的筛网筛分后贮存备用。将土壤和去离子水按 1 : 2.5 的体积比混合摇匀,用 pH 计(Mettler Toledo, Columbus, USA)测量土壤 pH^[23]。土壤有机质采用重铬酸盐加热氧化法和硫酸亚铁试剂滴定法测定^[23]。用元素分析仪(FLASH2000 CHNS/O, Thermo, USA)测量土壤中的总氮^[23];用硫酸消解钼蓝法测定总磷^[23]。用王水(HNO₃ : HCl 为 3 : 1)在 105 ℃ 消解土壤 2 h 后,通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES,Perkin Elmer Optima 8000, Waltham, MA, USA)

受污染的土壤,其理化性质如表 1 所示。根据《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018),该土壤样品重金属 Cd 和 Zn 远超土壤污染风险管制值,Cu 和 Pb 未达到污染水平。

选用杞柳‘一支笔’为试材,从同一棵母树上挑选粗细一致、直径为 0.80 ~ 1.00 cm 的 1 年生枝条,用去离子水洗净后剪成长度为 15 cm 的插条备用。

测定土壤重金属和总钾含量。土壤理化性状测试结果详见表 1,每组数据 3 次重复。

1.4 植物生长指标测定

淹水处理的 7、14、28、56、90 d,9:00 至 14:00 间,选取每株杞柳的 3 片成熟叶片,使用 Li Cor-6800 便携式光合系统测定植物光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(E)。样品室内光强设定为 1 000 $\mu\text{mol photon/s}$,气流为 500 $\mu\text{mol/s}$, CO_2 浓度为 400 $\mu\text{mol/s}$ 。

收获植株前,测量杞柳株高及茎径,使用叶面积测量仪,测出叶长、叶宽和叶面积。将叶片与 95% 乙醇溶液混合后研磨,浸取 3 ~ 5 min,后用分光光度计(UV-1800, MAPADA, Shanghai, China)分别在波长为 665、649、652、470 nm 测定叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b(Chl b)、叶绿素 a+b(Chl a+b)和类胡萝卜素(Car)的含量^[23]。

1.5 植物取样与化学测定

每株杞柳收取后,分为根、插条、茎(插条上新长出主干部分)和叶 4 部分,用自来水清洗后用去离子水漂洗 3 次后,将样品放入 105 ℃ 烘箱烘干 1 h,随后在 75 ℃ 烘至恒重。干燥完的样品用小型磨粉机研磨后,用 0.25 mm 筛网筛分备用。取各组织粉末 0.25 g

用浓硝酸(HNO_3)和过氧化氢(H_2O_2)热阻断系统消化后,用2% (v/v) HNO_3 溶液稀释至 50 mL,再采用电感耦合等离子体发射光谱法测定各样品中的重金属(Cd 和 Zn)和矿质元素(K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Na、B、Mo)含量。氮和磷的测定,参见 1.3。

柳树富集系数和转运系数的计算公式分别如下:

$$\text{富集系数 (BCF)} = \frac{\text{植物组织中重金属含量}}{\text{土壤中重金属含量}} \times 100\%$$

$$\text{转运系数 (TF)} = \frac{\text{地上组织中重金属含量}}{\text{根中重金属含量}} \times 100\%$$

1.6 数据处理与分析

采用 DPS 13.01 软件中 LSD 法在 0.05 水平进行单因素方差分析,通过 Origin 2018 绘制图表,试

验结果值均表示为平均值 $\pm$ 标准误。

2 结果与分析

2.1 淹水条件下杞柳的生长表现

试验期间观察发现,杞柳能在 Cd 和 Zn 重度污染土壤中正常生长并维持较好的长势,淹水处理对杞柳生长影响不明显。较对照相比,淹水条件下的杞柳株高、叶面积、叶长及叶宽仅略微增加,但茎粗减少(表 2);总生物量差异不明显,但各组织生物量的差异不一致,淹水处理分别减少了杞柳叶部、插条、根部生物量的 15.30%、30.20% 和 18.00%,但大幅增加了茎部生物量,为对照的 147.30%(图 1)。

表 2 土壤淹水对杞柳生长及叶片性状的影响

Table 2 The plant parameters and leaf traits of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

处理	株高/cm	茎径/mm	叶面积/ cm^2	叶长/cm	叶宽/cm
非淹水	98.20 $\pm$ 4.80	5.00 $\pm$ 0.40	7.60 $\pm$ 1.00	8.50 $\pm$ 0.50	1.19 $\pm$ 0.11
淹水	100.70 $\pm$ 6.10	4.50 $\pm$ 0.40	7.90 $\pm$ 0.50	8.60 $\pm$ 0.40	1.29 $\pm$ 0.05
显著性	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns

注:表中数据表示平均值 $\pm$ 标准差,NS 表示在 0.05 水平上差异不显著, $n=3$,下同

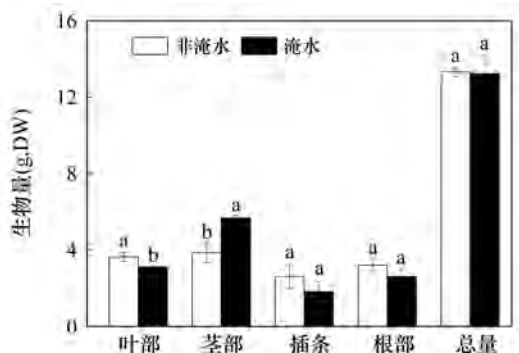


图 1 土壤淹水对杞柳生物量的影响

Figure 1 The biomass of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

表 3 土壤淹水条件下杞柳叶片光合色素含量

Table 3 The photosynthetic pigment of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

处理	Chl a	Chl b	Car	Chl a+b	Chl a/Chl b
非淹水	1.78 $\pm$ 0.27	0.56 $\pm$ 0.05	0.36 $\pm$ 0.06	2.34 $\pm$ 0.32	3.19 $\pm$ 0.19
淹水	1.79 $\pm$ 0.13	0.52 $\pm$ 0.04	0.37 $\pm$ 0.03	2.31 $\pm$ 0.17	3.41 $\pm$ 0.19
显著性	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns

2.2 淹水条件下杞柳的光合色素含量及光合能力

由表 3 可知,土壤淹水处理对杞柳叶绿素含量无显著影响,仅略微增加 Chl a、Car 含量和 Chl a/Chl b 值,降低 Chl b 和 Chl a+b 含量。处理时间对杞柳光合指标的影响如图 2 所示,从图中可以看出,土壤淹水降低杞柳光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及蒸腾速率(E)。当淹水处理为 90 d 时, P_n 、 G_s 、 C_i 、 E 分别下降 7.70%、1.69%、37.87%、25.89%。此外,在 28 d 至 56 d 时,杞柳在淹水条件下的 C_i 值显著降低。

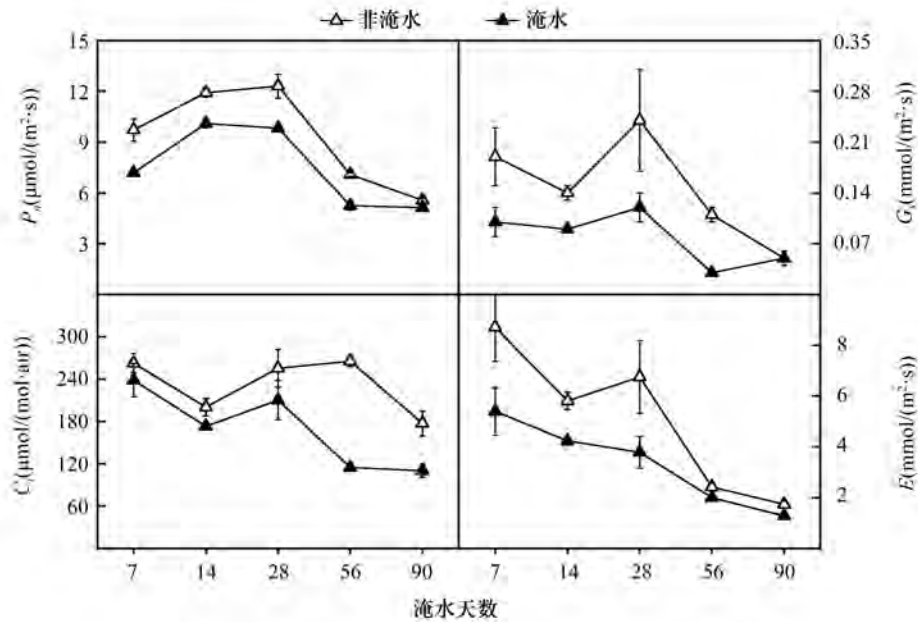


图 2 土壤淹水对杞柳的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(E)的影响
Figure 2 Effects of different flooded time on photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and evaporation rate (E) of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

2.3 淹水条件下重金属元素在杞柳各器官的积累和分布

土壤淹水对杞柳各部位 Cd、Zn 分布均有显著影响(图 3)。淹水显著降低杞柳根、插条、茎及叶部 Cd 含量,其中不同组织中 Cd 的积累量由高到低排

序为:根>叶>插条>茎。而在非淹水条件下,Cd 在杞柳各组织中的积累量由高到低依次为:根>叶>茎>插条。土壤淹水显著降低杞柳叶部、茎部、插条中 Zn 的含量,增加根部 Zn 浓度,其中各组织中 Zn 的积累量由高到低排序为根>叶>插条>茎。非淹水条件下各组织 Zn 积累量为叶>根>插条>茎。

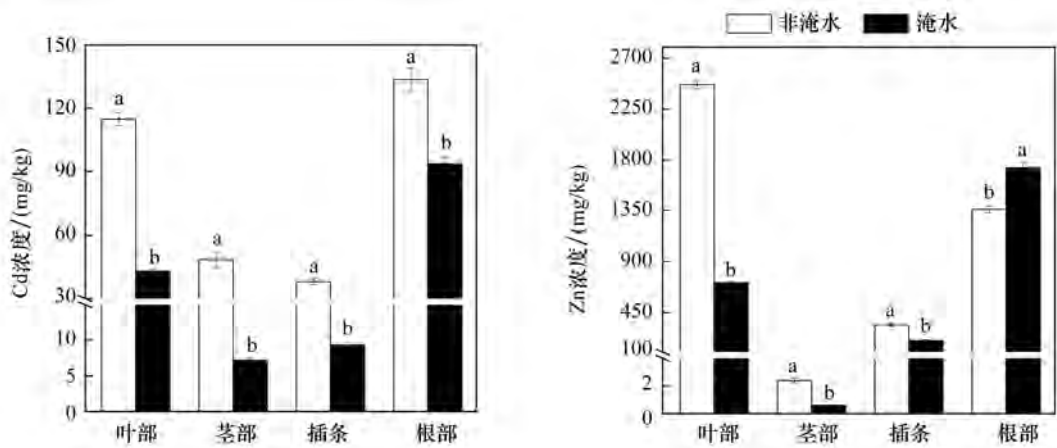


图 3 土壤淹水条件下 Cd、Zn 在杞柳各组织的浓度
Figure 3 Concentration of Cd and Zn in tissue of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions
注:图中数据表示平均值±标准差,不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, $n=3$,下同

土壤淹水对杞柳生物富集系数及转运系数的影响如图 4 所示。淹水显著降低杞柳地上部 Cd、Zn

的生物富集系数,与非淹水处理相比,Cd、Zn 的 BCF 值分别减少 74.39%、90.68%。土壤淹水对根部 Cd、Zn 的富集系数影响显著,但变化不同,其中,淹

水使根部 Cd 的 BCF 值降低 29.94%,Zn 的 BCF 值增加 27.06%。土壤淹水对 Cd、Zn 的转运系数影响显著,地上部 Cd、Zn 的 TF 值分别降低了 63.46%、80.56%。

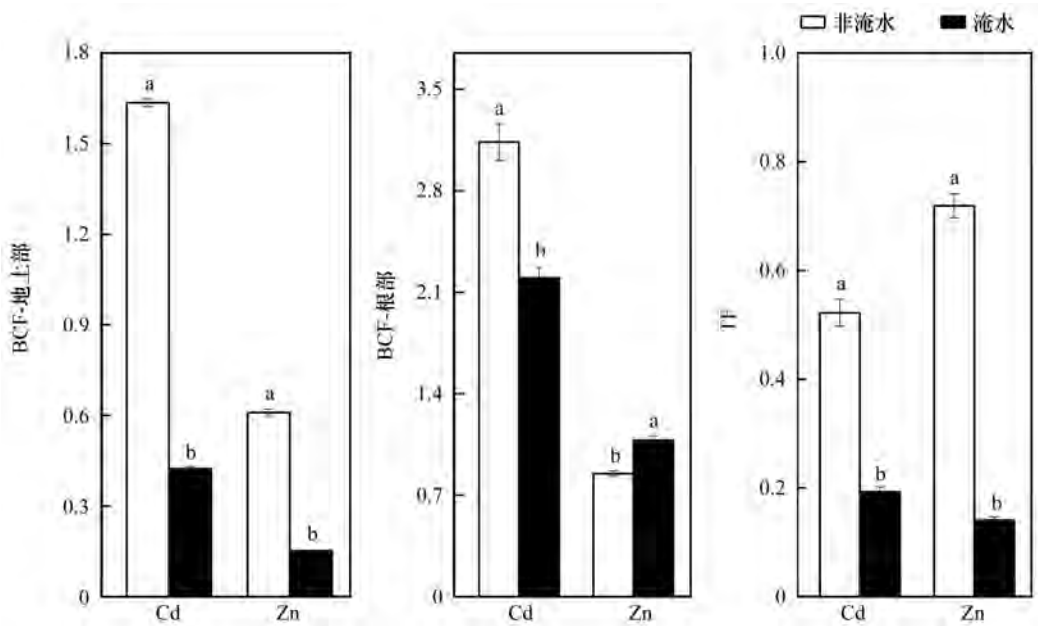


图4 土壤淹水条件下杞柳地上部、根系重金属生物富集系数(BCF)及转运系数(TF)

Figure 4 BCF and TF of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

2.4 淹水条件下杞柳矿质元素的积累和分布

土壤淹水条件下杞柳不同组织中的矿质元素含量如表4所示。淹水处理对不同组织中矿质元素含量影响显著。对大量元素分析发现,淹水处理显著降低叶片中P、Ca含量,增加K含量;显著降低茎组织中N、P、K、Ca、S含量;降低插条组织中N、P、K、Ca、Mg、S含量;降低根组织中N、P含量,增加K、Ca、Mg、S含量。

淹水处理对不同组织中微量元素含量影响更为明显。土壤淹水显著增加叶部和茎部Mn、Mo含量,降低Na、B含量,其中叶部Fe、Mn和Mo含量分

别增加1.16倍、1.67倍、1.74倍,Na、B含量分别减少20.30%、33.40%;茎部Mn、Fe和Mo分别增加1.03、2.71、2.62倍,Na、B含量分别减少37.44%、8.07%。土壤淹水提高插条和根部对微量元素的吸收,其中插条Fe、Mn、Na、B和Mo含量分别增加7.50、3.05、1.57、1.22、2.50倍;根系Fe、Mn、Na、B和Mo分别增加2.17、6.48、1.81、1.69、4.91倍(表4)。

对土壤淹水条件下杞柳微量元素间的相关性进行分析,发现土壤淹水促进了杞柳各微量元素(除B外)间的相关性。无论是否淹水,Cd、Zn与各元素均呈正相关,在淹水条件下Cd、Zn与B的相关性不高,但与其他元素相关性较强(图5)。

表4 土壤淹水条件下杞柳不同组织中的营养元素含量

Table 4 Elements level in tissue of *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

元素成分	植物组织							
	叶		茎		插条		根	
	非淹水	淹水	非淹水	淹水	非淹水	淹水	非淹水	淹水
N/%	1.72±0.01a	1.71±0.01a	0.55±0.03a	0.44±0.01b	0.53±0.01a	0.40±0.00b	0.85±0.00a	0.81±0.01b
P/%	0.20±0.00a	0.14±0.00b	0.15±0.01a	0.11±0.00b	0.16±0.01a	0.14±0.00b	0.63±0.01a	0.58±0.02b
K/%	1.66±0.01b	1.86±0.04a	0.46±0.02a	0.38±0.01b	0.47±0.02a	0.42±0.01b	0.89±0.01b	1.11±0.00a

续表

元素成分	植物组织							
	叶		茎		插条		根	
	非淹水	淹水	非淹水	淹水	非淹水	淹水	非淹水	淹水
Ca/%	4.74±0.09a	4.25±0.14b	1.11±0.06a	0.85±0.02b	0.79±0.05a	0.67±0.02b	0.96±0.01b	1.55±0.07a
Mg/%	0.12±0.00a	0.12±0.00a	0.03±0.00a	0.03±0.00a	0.04±0.00a	0.02±0.00b	0.07±0.00b	0.10±0.00a
S/%	1.64±0.05a	1.59±0.05a	0.10±0.00a	0.07±0.00b	0.10±0.00a	0.07±0.00b	0.27±0.01b	0.38±0.02a
Fe/(mg/kg)	331.7±9.7a	385.1±46.8a	26.9±0.8a	27.8±1.1a	244.6±20.5b	1834.8±47.7a	10536.0±470.9b	22902.1±988.9a
Mn/(mg/kg)	60.2±2.6b	100.4±5.5a	8.7±0.4b	23.6±0.7a	24.5±3.3b	74.8±2.5a	87.3±1.7b	565.3±20.7a
Na/(mg/kg)	400.0±19.9a	323.6±26.9b	99.7±3.5a	63.2±10.0b	101.8±8.7b	159.7±2.7a	173.0±7.3b	312.9±3.4a
B/(mg/kg)	79.8±12.6a	53.4±7.7b	13.1±2.3a	12.0±3.1a	11.6±0.9b	14.1±0.7a	11.5±1.8b	19.4±0.6a
Mo/(mg/kg)	52.2±2.9b	91.1±3.9a	2.6±0.3b	6.8±0.5a	2.2±0.2b	5.5±0.4a	50.7±5.1b	249.1±7.4a

注:表中数据表示平均值±标准差,不同字母表示不同处理相同植物组织中营养元素在0.05水平上差异显著,n=3

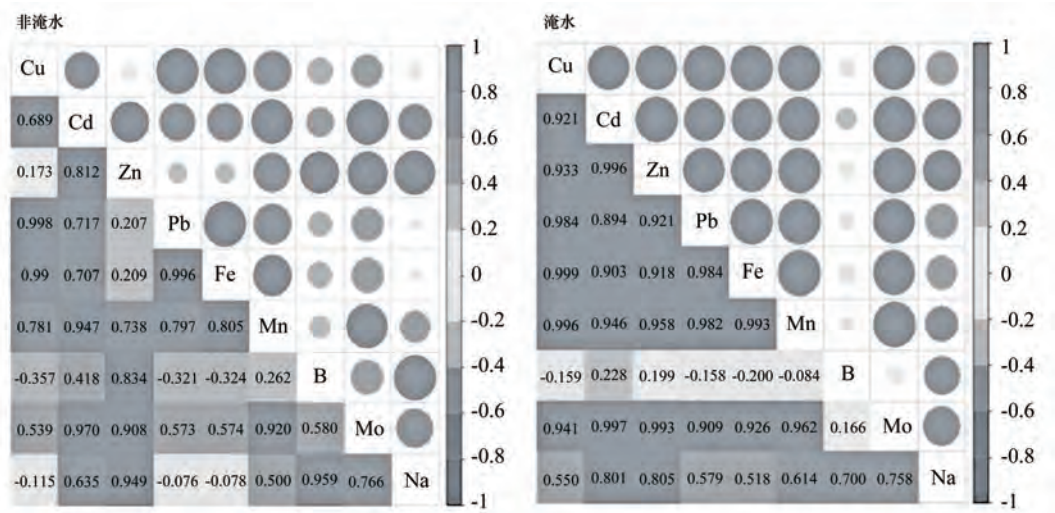


图5 土壤淹水条件下杞柳中微量元素间的相关性
Figure 5 The correlations of elements in *Salix integra* grown in non-flooded/flooded conditions

3 讨论

3.1 土壤淹水对杞柳生长的影响

淹水导致土壤缺氧从而影响植物生长,植物会通过自身形态或生理改变以适应土壤环境,如增生不定根等,来满足植物生长对氧气的需求^[24]。土壤淹水使柳树根系从有氧呼吸转为无氧呼吸,导致柳树树根腐烂死亡,虽增加不定根维持呼吸,但根的总生物量显著减少。土壤淹水减少了根部 O₂ 供应,导致植物叶片气孔关闭,从而降低气孔导度,减小蒸腾速率^[25]。气孔导度降低,气体交换速率降低,致使叶片吸收 CO₂ 减少,其胞间 CO₂ 浓度降低,净光合速率也减小^[20]。本研究中淹水 56 d 至 90 d 时,杞柳叶片气孔导度增加,推测是因不定根形成,增加了杞柳对 O₂ 的吸收,促使杞柳 C_i 值和 P_n 值下

降幅度减弱^[26-27]。同时,叶绿素与 P_n 值有着密切联系,叶绿素含量随着 P_n 值下降而下降^[9]。在试验中,淹水条件对杞柳叶绿素影响微弱,但总含量略微减小,因此土壤淹水对杞柳的光合作用有削弱作用。

3.2 土壤淹水对杞柳矿质元素积累的影响

土壤条件会影响植物对无机离子的吸收和转运,干扰矿质营养代谢过程,作为生长和发育必需的物质,矿质元素在植物体内具有重要作用。本研究发现土壤淹水对杞柳体内矿质元素含量有显著影响,且淹水条件加强了杞柳中微量元素(除 B 外)之间的相关性。无论是否淹水,Cd、Zn 与各元素影响均呈正相关,表明杞柳体内,Cd、Zn 与矿质元素之间存在协同效应。土壤淹水增加了插条和根部对各微量元素的吸收,在缺氧条件下,杞柳地下部分

微量元素的积累可能与根部渗透调节有关。土壤淹水增加了杞柳叶内和茎内 Fe、Mn、Mo 含量,减少了 Na、B 含量。Fe、Mn、Mo 与光合作用关系密切,在叶绿体受损情况下,Fe、Mn 含量的增加可以减缓淹水对杞柳光合作用的削弱^[28]。Na、B 含量减少可能是因为淹水和重金属双重胁迫下,杞柳木质部转运受阻,金属离子转移能力下降,从而导致叶、茎部 Na、B 含量的减少^[29-30]。

3.3 土壤淹水对杞柳重金属富集和转运的影响

植物对 Cd 的吸收是以蒸腾作用为动力,通过木质部运输完成,因此无论是否淹水,杞柳根部 Cd 含量最高,叶部其次^[31]。但与非淹水土壤相比,土壤淹水减少杞柳各组织 Cd 含量,降低杞柳体内 Cd 的富集系数和转运系数,表明土壤淹水抑制杞柳对 Cd 的吸收和转运能力,推测是因土壤淹水破坏了根系的外皮层和内皮层,缺少内外皮层转运蛋白,致使 Cd 转运至茎部时受阻,从而导致杞柳的转运系数下降,地上部 Cd 富集能力下降^[32]。

杞柳蒸腾速率的降低同样影响地上部 Zn 转运系数,但是在非淹水条件下,杞柳地上部 Zn 的转移系数高于 Cd,推测是因 Zn 可参与光合作用,提高了转运效率^[33]。淹水土壤根内 Zn 含量较对照处理显著增加,叶、茎和插条组织 Zn 含量减少,降低杞柳地上部的富集系数和转运系数,但增加了根系的富集系数。表明土壤淹水增加了杞柳根对 Zn 的吸收,抑制 Zn 的转运能力。推测是因土壤淹水破坏了根部结构,杞柳根系细胞液泡成为 Zn 的主要区隔场所,减少 Zn 从根部向地上部的运输。

3.4 淹水条件下杞柳的重金属修复潜力

生物量和重金属富集系数是决定植物修复能力的两大重要指标^[34]。非淹水条件下,杞柳生长良好,对重金属吸收、积累和转运能力更强,表明其对重金属有良好的耐受性和修复能力。淹水条件下,杞柳均能存活并保持正常生长。淹水 90 d 时,光合速率和蒸腾速率下降,Cd、Zn 的 TF 值分别降低 63.46%、80.56%,土壤中 Cd、Zn 主要富集在杞柳根部,淹水降低杞柳的重金属转运能力,该现象与重金属的木质部转运驱动力—蒸腾拉力降低有关^[21]。但淹水条件下杞柳总生物量及根、茎、叶生物量没有受到显著影响,表明杞柳有较强耐水淹能力,这与柳属植物生态幅较宽、抗逆性较强等生物学特性密切相关^[35]。

综上所述,土壤淹水虽然对杞柳‘一支笔’地上部分的重金属转运能力和富集能力有一定上的削弱,但这是一种植物在适应淹水环境的普遍现象,常见于大多数湿地植物^[36-39]。并且,淹水环境中杞柳仍能保持良好生长状态且具有较高生物量,根系生物富集 Cd、Zn 能力也较强,与其他草本湿地植物(香蒲、美人蕉、凤眼莲、芦苇、互花米草、香根草等)相比^[9,40-41],杞柳能利用自身更大的生物量和发达的根系,将土壤中金属污染物固定于体内,从而减少向湿地系统的释放,修复更大的土壤范围。因此,淹水条件下杞柳仍然具有较高的植物修复潜力。

4 结 论

杞柳‘一支笔’在重金属污染土壤中经 90 d 淹水后仍可正常生长,其光合速率略有下降,但生物量无显著降低。土壤淹水使杞柳体内微量元素间(除 B 外)相关性增强,增加杞柳插条和根部对微量元素的吸收和柳树叶内和茎内 Fe、Mn、Mo 含量,减少 Na、B 含量。土壤淹水降低杞柳蒸腾速率,致使杞柳的重金属转运能力降低,地上部的重金属富集能力减弱。综合考虑杞柳“一支笔”生长和金属积累情况,我们认为杞柳对淹水胁迫具有很高耐受性、生理适应机制和重金属富集能力,在淹水地区仍然具有较强的植物修复潜力,为更好地利用该物种改善湿地环境的重金属污染土壤、湿地和水系消落带物种的选择及植被的构建提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 常跃畅,曹占强.我国土壤修复行业发展历程及开展模式分析[J].中国资源综合利用,2021,39(11):105-108.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].国土资源通讯社,2014,5(1):10-11.
- [3] 罗汇东.土壤重金属污染危害分析及修复方法探讨[J].农家参谋,2021(9):195-196.
- [4] 闫晓强,李汉杰,周辉,等.农田土壤重金属污染的危害及修复技术[J].南方农业,2022,16(2):24-26.
- [5] 张迪,周明忠,熊康宁,等.遵义松林 Ni-Mo 矿区土壤 Cu、Zn 污染及农作物健康风险评价[J].地球与环境,2018,46(6):581-589.
- [6] 李娜.土壤重金属污染的植物修复技术研究现状[J].中国资源综合利用,2021,39(12):106-108.
- [7] 耿盼瑶,秦绪明,刘一帆.生物修复技术在矿山重金属污染修复中的应用与展望[J].中国资源综合利用,2021,39(12):102-105.
- [8] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟.重金属污染土壤修复技术研究

- 的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 1(6): 757-762.
- [9] 曹旖旎, 蔡泽宇, 李晓刚, 等. 土壤淹水和铜污染对杞柳形态及生理生化特性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 548-557.
- [10] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 409-417.
- [11] 邱媛, 何际泽, 杨汉彬, 等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 151-156.
- [12] 黄瑞芳, 王红玲, 施士争. 7个灌木柳无性系铅富集能力比较[J]. 江苏林业科技, 2020, 47(1): 11-16.
- [13] MIGEON A, RICHAUD P, GUINET F, et al. Metal accumulation by woody species on contaminated sites in the north of France[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2009, 204(1): 89-101.
- [14] TOZSER D, HARANGI S, BARANYAI E, et al. Phytoextraction with *Salix viminalis* in a moderately to strongly contaminated area [J]. Environmental science and pollution research, 2018, 22(4): 3275-3290.
- [15] 陈彩虹, 刘治昆, 陈光才, 等. Cu胁迫对‘苏柳172’和垂柳吸收矿质元素的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(6): 28-32.
- [16] 刘治昆, 陈彩虹, 陈光才, 等. Cu²⁺胁迫对2种速生柳幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(6): 1195-1202.
- [17] 徐晓寒. 不同品种柳树幼苗对重金属镉、铅富集能力与耐性机理研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
- [18] 曹旖旎. 土壤淹水抑制柳树Cu转运的生理生态机制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
- [19] RODRÍGUEZ-GAMIR J, ANCILLO G, GONZÁLEZ-MAS MC, et al. Root signalling and modulation of stomatal closure in flooded citrus seedlings [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2011, 49(6): 636-645.
- [20] 聂功平, 陈敏敏, 杨柳燕, 等. 植物响应淹水胁迫的研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(18): 57-64.
- [21] XIN Y, FENG FENG M, YOUZHI L, et al. Effect of water cadmium concentration and water level on the growth performance of *Salix triandroides* cuttings [J]. Environmental science and pollution research, 2018, 25(8): 8002-8011.
- [22] 陈锦平. 秋华柳对水淹—镉污染土壤的修复潜力研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 钟彦, 刘正学, 秦洪文, 等. 冬季淹水对柳树生长及恢复生长的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(2): 275-279.
- [25] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2662-2672.
- [26] 赵竑绯, 赵阳, 张驰, 等. 模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 898-906.
- [27] TSUKAHARA H, KOZLOWSKI T. Importance of adventitious roots to growth of flooded *platanus occidentalis* seedlings [J]. Plant and Soil, 1995, 88(1): 123-132.
- [28] 沈惠国. 土壤微量元素对植物的影响[J]. 林业科技情报, 2010, 42(4): 12-14.
- [29] 张晓博. 硼对植物营养与生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(22): 11962-11963.
- [30] TETSUYA I, SERGEY S. Control of xylem Na⁺ loading and transport to the shoot in rice and barley as a determinant of differential salinity stress tolerance [J]. Physiologia plantarum, 2018, 165(3): 619-631.
- [31] 王艳芳, 悦飞雪, 李冬, 等. 镉胁迫对不同基因型玉米生长和镉吸收分配的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(7): 1440-1447.
- [32] 宋瑜, 马艳华, 唐希望, 等. 重金属镉在植物体内转运途径研究进展[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(3): 56-59.
- [33] 段亚萍, 赵冰, 付丽童, 等. 铅、锌污染下蜀葵的生长生理响应和富集转运特性研究[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 418-425.
- [34] 韩存亮, 黄泽宏, 肖荣波, 等. 粤北某矿区周边镉、锌污染稻田土壤田间植物修复研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(1): 158-165.
- [35] 杨天雪, 何春光, 罗文泊, 等. 柳属植物特性及其在污染底泥修复中的应用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5): 837-841.
- [36] 江行玉, 王长海, 赵可夫. 芦苇抗镉污染机理研究[J]. 生态学报, 2003(5): 856-862.
- [37] 任珺, 陶玲, 杨倩, 等. 芦苇、菖蒲和水葱对水体中Cd富集能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1757-1762.
- [38] SUNTORNVONGSAGUL K, BURKE D J, HAMERLYNCK E P, et al. Fate and effects of heavy metals in salt marsh sediments [J]. Environmental Pollution, 2007, 149(1): 79-91.
- [39] WINDHAM L, WEIS J S, WEIS P. Uptake and distribution of metals in two dominant salt marsh macrophytes, *Spartina alterniflora* (cordgrass) and *Phragmites australis* (common reed) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 56(1): 63-72.
- [40] 毕春娟, 陈振楼, 许世远. 芦苇与海三棱藨草中重金属的累积及季节变化[J]. 海洋环境科学, 2003(2): 6-9+19.
- [41] 孙香丽. 重金属和淹水复合处理对互花米草的抗性生理以及重金属累积转运的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.

责任编辑: 朱敏杰
英文校对: 王芬

总 目 次

(作者后括号内前一数字表示期号,后一数字表示页码)

研究论文

- 苏南地区村镇垃圾特征及分类处理利用模式 崔春红,冯欢,程花,梁剑茹,周立祥(1,1)
- 基于 DPSIR 模型的乌鲁木齐城市扩张的生态效应分析..... 谢璐迪,史磊,玉米提·哈力克,田奥磊(1,7)
- 柏木人工林空间结构特征及其评价 付翠林,汪洋,孙林山,林虎,高树杰,唐志强(1,17)
- 基于遥感生态指数的塔里木垦区生态环境质量评价 何亮,杜清,崔丽洋,关力伟,郭帅,蒋磊(1,27)
- 一株氨化芽孢细菌的分离鉴定及氨化培养基优化
..... 朱欣乐,陈思宇,杨正,刘晶,黄元昊,彭英杰,兰时乐(1,34)
- 林窗面积对连香树幼苗生长及生物量分配的影响 程勇,张珉,陈明皋,吴际友,魏志恒,易剑(1,44)
- 露采金属矿山采坑境界面生态修复技术研究 程睿(1,50)
- 南瓜新品种‘源蜜 1 号’的选育及栽培技术
..... 旷碧峰,刘志华,荆爱霞,闵岳灵,余席茂,李健生,向晓阳,蒋可,谭建军(1,58)
- 三峡宜昌区域松材线虫病疫情扩散空间分析 古剑,肖正利,李金鞠,赵金文,汤丹,周丹(1,62)
- 天津子牙河浮游植物群落结构特征及水质评价 张新月,蔡鑫鹏,李翌,丁页,赵修青,卞少伟(1,70)
- 2010—2020 年衡阳 NOAA 监测火点时空分布特征分析
..... 旷煜菲,彭双姿,汪文龙,苏勇,许笛,闫峰(1,77)
- 美国高粱替代玉米对樱桃谷肉鸭生产性能和屠宰性能的影响 郝胜杰,梁明振,伍璋健,唐晓玲(1,85)
- 怀化市全面推行林长制的实践与探索 杨善为,杨万里,李雯,余拓,郭金平(1,92)
- 嗜热艾登短芽孢杆菌对聚乙烯醇的降解性能及机制
..... 陈泽伟,谢胜佳,黄可萱,杨兴桂,周顺桂,陈志(2,1)
- 栀子不同部位提取工艺优化与 7 种成分含量测定 刘芳,颜彬,龙吉财,许林,唐映红,陈建荣(2,10)
- 不同水分管理下 SO_4^{2-} 添加对土壤 Cd 形态的影响
..... 李松霖,张金阳,王海婷,欧阳晴雯,侯红波,龙坚,彭佩钦(2,19)
- 西藏东南部森林分布格局气候因素分析 程名,田睿,周尧治(2,27)

- 湖南省衡阳市滨水绿地生态效应分析 庾庐山(2,36)
- 西藏中南部高原鼠兔栖息地选择的潜在影响因素 宋璇紫,米玛旺堆(2,43)
- 2001—2019 年祁连山景观格局变化及其对人为干扰的响应
..... 苏礼梅,朱淑娴,余楚翘,李丽,吴巩胜,国洪艳(2,51)
- 堆肥发酵剂对发酵猪粪微生物群落组成影响 易诚,张叶瑾,龙九妹,邓景衡(2,62)
- 喷施硝酸钾对柑橘秋梢老熟和叶片特性的影响 欧翔,陈欢,陈雪玲,徐尉城,胡成阳,刘永忠(2,70)
- 不同基质配方对楠木容器苗生长的影响 匡敏,王定卿,赵佳文,吴文霖,汪洋,杨杰峰(2,76)
- 雨生红球藻胡萝卜素酮基化酶体外固定化催化研究 黄祖林,林葵,黄岛平,屈啸声(2,83)
- 病死猪无害化处理关键菌株分析
..... 王吉平,张野,王瑾,苏天明,谢育利,梁芷姮,甘国勇,杨振媚,何铁光(3,1)
- 基于生态系统服务供需的城市绿地空间布局优化 刘鑫,王宽,齐增湘,李涛,李晟(3,8)
- 珍稀特有植物吉首鳞毛蕨群落生态环境特征初探
..... 刘冰,向晓媚,谭璐,王志成,杨含茹,陈功锡(3,18)
- 衡阳市虎形山人防公园生态系统服务价值评估 姬瑞华,刘作云,范洲衡(3,24)
- 基于 BCF 的砷低积累水稻品种筛选
..... 周珍华,谷有君,刘汇川,胡文玲,黄蕊,柳赛花,田发祥,谢运河(3,31)
- 湘西州烟草与半夏复合套种的产量与效益分析
..... 熊绍军,雷艳,马幸幸,左小义,刘昱卉,刘钊,张丽(3,38)
- 福寿山森林公园植物资源多样性及在森林康养中的应用研究
..... 黎明,邓德明,魏德福,赵单(3,45)
- 模拟情景下环长株潭“3+5”城市群生态安全格局研究
..... 巩雅博,戈健宅,吴秋彤,周宸帆,李涛(3,52)
- 沈阳市地下水饮用水源挥发性有机物分布特征及风险评价 贾文娟(3,65)
- 福建省工业主要废水污染物特征研究 陈兴涛(3,71)
- 基于 Google Earth Engine 的河南省 1982—2018 年植被干旱研究 张少宇,邹时林,余弦(3,79)
- 淹水对重金属污染土壤中杞柳生长和元素积累的影响
..... 王丽,郑怡晖,冯木彩,曹旖旎,邸东柳,陈光才(4,1)
- 长期施磷对玉米和土壤 C : N : P 及有机质稳定性的影响
..... 贾照杰,吉德昌,陈飞,武立萍,李铭轩,于占波,丁凡(4,10)
- 徐州市生态系统服务供需匹配研究 李传昌,胡嫚莉,雍新琴(4,19)
- 基于 RAPD 分子标记的藜蒿种质资源遗传多样性分析
..... 王宇航,魏清莹,薛天源,何思晓,陈伟达,董元火,曾长立(4,29)

碱性条件高效降解小麦秸秆菌群的筛选及酶活力特点

..... 佟旭楠,洪梓萌,白狄纯,旦增卓嘎,王金龙(4,37)

不同产地葛功能成分含量与矿质元素相关性研究

..... 彭斯文,朱校奇,卢红玲,谢进,戴艳娇,黄艳宁,龙世平(4,43)

堵河源自然保护区四照花种群结构及动态分析 王定卿,罗刚,郑德国,施维华,汪洋(4,52)

萱草原生质体制备体系的优化 牛晓茹,景欢欢,田宁,郑硕理,陈白冰,黄程前,陈己任(4,60)

长沙地区引种萱草品种的综合评价 方娟,王晓红,黄程前,郑硕理,陈佳佳,胡灵璇(4,69)

‘辽胡1号杨’扦插苗耐盐碱性分析 于雷,王敏,侯庚,姜啸虹(4,77)

湖南省弄蝶科(鳞翅目:Lepidoptera)5个新纪录种 张法明,于桂清,李欣,唐甲,唐耿超,黄太福(4,82)

三种发酵剂发酵猪粪优势菌种筛选及除臭试验研究 易诚,刘永鑫,龙九妹,邓景衡(4,85)

研究综述

生物炭用于育苗基质的研究进展 周伟,郝文溯,吴先宇,颜庆芳,颜晓元(1,97)

国内外城镇化与生态环境协调关系动态研究 王俊龙,庞凤娇,张艳梅(1,105)

铁氧化菌去除水中砷的机理与效果的研究进展 孙平平,周立祥(2,89)

茯苓人工栽培历史与栽培技术研究进展 刘明新,杨华,王先有(2,97)

森林小气候特征研究进展 陈文盛,丁慧慧,李江荣(3,89)

木兰科植物花香成分提取与鉴定研究进展 袁婕俐,金晓玲,余秋岫,胡筱璇(3,96)

土地利用变化对土壤有机质影响的研究进展及展望 李娟,魏甲彬,杨宁(3,106)

黑老虎植物资源利用研究进展 杨赛男,戴斌,潘清平,梁忠厚(3,112)

土壤镉砷复合污染界面过程与调控技术研究进展 周敏,胡培良,舒心,包姗,周虹(4,96)

全球生物多样性领域数字技术应用趋势与发展建议 郭婷婷,马敏象,鲍亦平,邓禹,吴斌(4,103)

城市野境的生物多样性研究进展 姜雁林,马晓燕,冯丽(4,112)

JOURNAL OF HUNAN ECOLOGICAL SCIENCE

TOTAL TABLE OF CONTENTS, VOLUME 9, 2022

Research paper

- Characteristics and Classification Treatment and Utilization Mode of Rural Garbage in Southern Jiangsu province
..... CUI Chunhong, FENG Huan, CHENG Hua, LIANG Jianru, ZHOU Lixiang(1,1)
- Ecological Effects of Urban Expansion in Urumqi Based on the DPSIR Model
..... XIE Ludi, SHI Lei, ÜMÜT Halik, TIAN Aolei(1,7)
- Spatial Structure Characteristics and Evaluation of *Cupressus funebris* Plantations
..... FU Cuilin, WANG Yang, SUN Linshan, LIN Hu, GAO Shujie, TANG Zhiqiang(1,17)
- Evaluation of Ecological Environment Quality in Tarim Reclamation Area Based on Remote Sensing
Ecological Index HE Liang, DU Qing, CUI Liyang, GUAN Liwei, GUO Shuai, JIANG Lei(1,27)
- Isolation and Identification of an Ammonifying Spore Bacterium and Optimization of Ammonifying Medium
..... ZHU Xinle, CHEN Siyu, YANG Zheng, LIU Jing, HUANG Yuanhao, PENG Yingjie, LAN Shile(1,34)
- Effects of Forest Gap Area on Growth and Biomass Allocation of *Cercidiphyllum japonicum* Seedling
..... CHENG Yong, ZHANG Min, CHEN Minggao, WU Jiyu, WEI Zhiheng, YI Jian(1,44)
- Study on Ecological Restoration Technology of Stope Boundary Interface in Open Pit Metal Mines
..... CHENG Rui(1,50)
- Breeding of a New Variety of Pumpkin ‘Yuanmi No. 1’ KUANG Bifeng, LIU Zhihua, JING Aixia,
MIN Yuelin, YU Ximao, LI Jiansheng, XIANG Xiaoyang, JIANG Ke, TAN Jianjun(1,58)
- Spatial Analysis of *Bursaphelenchus xylophilus* in Yichang Region of the Three Gorges
..... GU Jian, XIAO Zhengli, LI JinJu, ZHAO Jinwen, TANG Dan, ZHOU Dan(1,62)
- Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Ziya River of Tianjin
..... ZHANG Xinyue, CAI Xinpeng, LI Zhao, DING Ye, ZHAO Xiuqing, BIAN Shaowei(1,70)
- The Characteristics Analysis of Spatio-temporal Distribution of Fire in Hengyang Monitored by NOAA from
2010 to 2020 KUANG Yufei, PENG Shuangzi, WANG Wenlong, SU Yong, XU Di, YAN Feng(1,77)
- Effects of American Sorghum as Substitute of Corn in Diet on Growth Performance and Slaughter Performance of
Cherry Valley Ducks HAO Shengjie, LIANG Mingzhen, WU Zhangjian, TANG Xiaoling(1,85)
- Practice and Exploration of Comprehensively Implementing Forest Head System in Huaihua City
..... YANG Shanwei, YANG Wanli, LI Wen, YU Tuo, GUO Jinping(1,92)
- The Performance and Mechanism of Polyvinyl Alcohol Biodegradation Induced by *Brevibacillus aydinogluensis*
..... CHEN Zewei, XIE Shengjia, HUANG Kexuan, YANG Xingguo, ZHOU Shungui, CHEN Zhi(2,1)
- Optimization of Extraction Technology of Different Parts of *Gardenia jasminoides* and Determination of
Seven Chemical Components
..... LIU Fang, YAN Bin, LONG Jicai, XU Lin, TANG Yinghong, CHEN Jianrong(2,10)
- Effects of SO_4^{2-} Addition on Soil Cd Forms under Different Water Management
..... LI Songlin, ZHANG Jinyang, WANG Haiting,
OUYANG Qingwen, HOU Hongbo, LONG Jian, PENG Peiqin(2,19)

- Analysis on Climatic Factors of Forest Distribution Pattern in Southeastern Tibet
 CHENG Ming, TIAN Rui, ZHOU Yaozhi(2,27)
- Analysis on Ecological Effect of Waterfront Green Space in Hengyang City of Hunan Province
 YU Lushan(2,36)
- Potential Factors Influencing the Habitat Selection of Plateau Pika in Central and Southern Tibetan Rangelands
 SONG Xuanzi, Migmar-Wangdwei(2,43)
- Landscape Pattern Change and Its Response to Anthropogenic Disturbance in Qilian Mountains from 2001 to 2019
 SU Limei, ZHU Shuxian, YU Chuqiao, LI Li, WU Gongsheng, GUO Hongyan(2,51)
- Effect of Compost Starter on Microbial Community Composition of Fermented Pig Manure
 YI Cheng, ZHANG Yejin, LONG Jiumei, DENG Jingheng(2,62)
- Effects of Spraying Potassium Nitrate on Autumn Shoot Maturity and Leaf Characters of *Citrus reticulata*
 OU Xiang, CHEN Huan, CHEN Xueling, XU Weicheng, HU Chengyang, LIU Yongzhong(2,70)
- Effect of Substrate Formula on Growth of Container Seedlings of *Phoebe zhennan*
 KUANG Min, WANG Dingqing, ZHAO Jiawen, WU Wenlin, WANG Yang, YANG Jiefeng(2,76)
- Research on *in vitro* immobilization of β -carotene ketolase from *Haematococcus pluvialis*
 HUANG Zhulin, LIN Kui, HUANG Daoping, QU Xiaosheng(2,83)
- Analysis of Key Strains in Harmless Treatment of Dead Pigs
 WANG Jiping, ZHANG Ye, WANG Jin,
 SU Tianming, XIE Yuli, LIANG Zhiheng, GAN Guoyong, YANG Zhenmei, HE Tieguaug(3,1)
- Urban Green Space Layout Optimization Based on Ecosystem Service Supply and Demand
 LIU Xin, WANG Kuan, QI Zengxiang, LI Tao, LI Sheng(3,8)
- A Preliminary Study on the Biotope Characteristics of the Rare and Endemic Plant *Dryopteris jishouensis*
 LIU Bing, XIANG Xiaomei, TAN Lu, WANG Zhicheng, YANG Hanru, CHEN Gongxi(3,18)
- Evaluation of Ecosystem Service Value of Huxing Mountain Civil Air Defense Park in Hengyang City
 JI Ruihua, LIU Zuoyun, FAN Zhouheng(3,24)
- Screening of Rice Varieties with Low Arsenic Accumulation Based on BCF ZHOU Zhenhua,
 GU Youjun, LIU Huichuan, HU Wenling, HUANG Rui, LIU Saihua, TIAN Faxiang, XIE Yunhe(3,31)
- Experiment and Benefit Analysis of Tobacco and *Pinella ternate* Compound Intercropping in Xiangxi Prefecture
 XIONG Shaojun, LEI Yan, MA Xingxing, ZUO Xiaoyi, LIU Yuhui, LIU Zhao, ZHANG Li(3,38)
- Research on Plant Resource Diversity and Its Application in Forest Wellness of the Fushoushan Forest Park
 LI Ming, DENG Deming, WEI Defu, ZHAO Dan(3,45)
- Research on Ecological Security Pattern of Chang-Zhu-Tan “3+5” Urban Agglomeration under Simulation Scenario
 GONG Yabo, GE Jianzhai, WU Qitong, ZHOU Chenfan, LI Tao(3,52)
- Distribution Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Groundwater Sources in Shenyang
 JIA Wenjuan(3,65)
- Research on the Characteristics of Main Industrial Wastewater Pollutants in Fujian Province
 CHEN Xingtao(3,71)
- The Study of Vegetation Drought Health in Henan Province from 1982 to 2018 Based on Google Earth Engine
 ZHAGN Shaoyu, ZOU Shilin, YU Xian(3,79)
- Effects of Flooded Condition on Growth and Elements Accumulation of *Salix integra* in Heavily Polluted Soil
 WANG Li, ZHENG Yihui, FENG Mucai, CAO Yini, DI Dongliu, CHEN Guangcai(4,1)
- Effects of Long-term Phosphorus Fertilization on Maize and Soil C : N : P and Organic Matter Stability
 JIA Zhaojie, JI Dechang, CHEN Fei, WU Liping, LI Mingxuan, YU Zhanbo, DING Fan(4,10)
- Upply-demand Matching of Ecosystem Services in Xuzhou LI Chuanchang, HU Manli, YONG Xinqin(4,19)

- Genetic Diversity Analysis of *Artemisia selengensis* Germplasm Resources Based on RAPD Molecular Markers
..... WANG Yuhang, WEI Qingying, XUE Tianyuan,
HE Sixiao, CHEN Weida, DONG Yuanhuo, ZENG Changli (4, 29)
- Screening and Enzymic Activity Characteristics of Compound Microbes for Efficient Degradation of Wheat Straw
under Alkaline conditions
..... TONG Xunan, HONG Zimeng, BAI Dichun, Danzeng-Zhuoga, WANG Jinlong (4, 37)
- Study on the Correlation Between the Contents of Functional Components in *Pueraria montana* and Mineral Elements
..... PENG Siwen, ZHU Xiaoqi, LU Hongling, XIE Jin, DAI Yanjiao, HUANG Yanning, LONG Shiping (4, 43)
- Population Structure and Dynamics of *Dendrobenthamia japonica* in Duheyuan Nature Reserve
..... WANG Dingqing, LUO Gang, ZHENG Deguo, SHI Weihua, WANG Yang (4, 52)
- Optimization of Protoplast Preparation System of *Hemerocallis fulva* NIU Xiaoru, JING Huanhuan,
TIAN Ning, ZHENG Shuoli, CHEN Baibing, HUANG Chengqian, CHEN Jiren (4, 60)
- Comprehensive Evaluation of *Hemerocallis fulva* Varieties Introduced in Changsha Area FANG Juan,
WANG Xiaohong, HUANG Chengqian, ZHENG Shuoli, CHEN Jiajia, HU Lingxuan (4, 69)
- Analysis of Salt and Alkaline Tolerance of Poplar Cuttings ‘Liaohu No. 1’
..... YU Lei, WANG Min, HOU Geng, JIANG Xiaohong (4, 77)
- Five Newly Recorded Species of Hesperidae (Lepidoptera) in Hunan Province
..... ZHANG Faming, YU Guiqing, LI Xin, TANG Jia, TANG Gengchao, HUANG Taifu (4, 82)
- Screening of Dominant Strains of Pig Manure Fermented by Three Starter Agents and Deodorization Experimental
Research YI Cheng, LIU Yongxin, LONG Jiumei, DENG Jingheng (4, 85)

Research review

- Research Progress of Biochar as Seedling Substrate
..... ZHOU Wei, HAO Wensu, WU Xianyu, YAN Qingfang, YAN Xiaoyuan (1, 97)
- Review on the Dynamic Relationship between Urbanization and Ecological Environment at Home and Abroad
..... WANG Junlong, PANG Fengjiao, ZHANG Yanmei (1, 105)
- Recent Progress on Mechanism and Effect of Removing Arsenic from Water by Iron(2)-oxidizing Bacteria
..... SUN Pingping, ZHOU Lixiang (2, 89)
- History of Artificial Cultivation and Development of Cultivation Technology of *Poria cocos*
..... LIU Mingxin, YANG Hua, WANG Xianyou (2, 97)
- Research Progress on Microclimate Characteristics of Different Forest Habitats
..... CHEN Wensheng, DING Huihui, LI Jiangrong (3, 89)
- Research Progress on Extraction and Identification of Floral Fragrance Components of Magnoliaceae
..... YUAN Jieli, JIN Xiaolin, YU Qiuxiu, HU Xiaoxuan (3, 96)
- Research Progress and Prospect of the Impact of Land Use Changes on Soil Organic Matters
..... LI Juan, WEI Jiabin, YANG Ning (3, 106)
- Research Progress on the Application Value and Comprehensive Utilization of *Kadsura coccinea* Resources
..... YANG Sainan, DAI Bin, PAN Qingping, LIANG Zhonghou (3, 112)
- Advances on Interfacial Process and Regulation Technology of Soil Co-contaminated with Cadmium-Arsenic
..... ZHOU Min, HU Peiliang, SHU Xin, BAO Shan, ZHOU Hong (4, 96)
- The Digital Technology in Global Biodiversity Research Field Application Tendency and Developing Suggestions
..... GUO Tingting, MA Minxiang, BAO Yiping, DENG Yu, WU Bin (4, 103)
- Advances in Biodiversity Research in Urban Wilderness JIANG Yanlin, MA Xiaoyan, FENG Li (4, 112)

《湖南生态科学学报》投稿指南

《湖南生态科学学报》(ISSN2095-7300/CN43-1522/Q)是国内外公开发行的生态类学术期刊,主要刊登农林、生物、环境、生态等专业领域基础理论和应用技术研究方面的学术论文,包括研究报告、研究简报、文献综述与调查报告等。中国学术期刊影响因子年报(2021版)复合影响因子1.038,综合影响因子0.850,入选《中国学术期刊评价》(RCCSE)核心期刊A区。

1 来稿项目

来稿必须包括(按顺序)题目、作者姓名、作者单位全称(有二级单位的必须标明二级单位)、所在城市、邮政编码、中文摘要、关键词、英文题目、作者英文姓名、作者单位英文全称、英文摘要、英文关键词、正文、参考文献等内容。

2 题名

应简明、具体,正确表达文章内容,一般不超过26个字,应尽量不用副标题。

3 作者与单位

多位作者姓名用逗号隔开。所有作者均须注明所在单位全称、城市及邮编。

4 汉语姓名译法

须执行GB/T 28039—2012《中国人名汉语拼音字母拼写规则》。姓在前名在后,姓用大写字母,名首字母大写,双名字中间加一短线(如:李爱英,LI Aiyi;旦增卓嘎,Danzeng-Zhuoga)。

5 中、英文摘要

中文摘要采用报道式文体,应反映论文的主要创新内容,给出重要结果和数据,并有自明性,包括研究“目的、方法、结果、结论”,并分4个部分撰写(综述性论文可有所区别),一般在500~800字(符)。

英文摘要用第三人称,时态保持一致。准确、完整、明确并能精练地概括文章的主要研究结果和结论,无语言文字错误。英文摘要包括题目,作者姓名(汉语拼音)及单位名称(与中文对应一致),研究摘要及关键词,中、英文关键词须一一对应。

6 首页脚注标识项目

基金项目:基金项目名称(项目编号)。作者简介包括:通信作者及第一作者的姓名,学位,职称或职务,主要研究方向及E-mail。

7 正文

研究论文包括引言/前言(不列出该标题)、材料与方法、结果与分析、讨论与结论等要素。各层次标题用阿拉伯数字连续编号,如1, 1.1, 1.1.1; 2, 2.1, 2.1.1……层次划分一般不超过3级。

8 图和表

文章可附必要的图和表,忌与文字表述重复。图表名及表第一行、第一列文字应有中英文对照。图要大小适中,清晰,标注完整。表采用三线表设计,表的主题标目要明确。

9 量和单位

量名称及其符号须符合国家标准GB 3100—1993《国际单位制及其应用》,采用法定计量单位及国际通用符号。书写要规范化,并注明外文字母的大小写、正斜体及上下角标,数字与单位须间隔半个字符。容易混淆的字母、符号,请特别注明。

10 参考文献

须执行GB/T 7714—2015《信息与文献 参考文献著录规则》。如:

专著参考文献格式:著者.书名[M].版本(初版省略).出版地,出版者,出版年.

期刊参考文献格式:作者(以逗号分隔).题名[J].刊名(全称),出版年.卷(期):起-止页.

学位论文参考文献格式:作者.题名[D].保存地点:保存单位,出版年.

欢迎您的关注与投稿。本刊不收取版面费及审稿费等任何费用,稿件一经录用1~3个月即可发表。

投稿网站: <http://www.hnstkxxb.com>

投稿邮箱: 2514634782@qq.com

联系电话: 0734-8591122

《湖南生态科学学报》编辑部

湖南生态科学学报

(季刊 1995年创刊)

2022年 第9卷 第4期

主管单位：湖南省林业局

主办单位：湖南环境生物职业技术学院

编辑出版：《湖南生态科学学报》编辑部

(湖南省衡阳市石鼓区望城路165号邮编421005)

电话：0734-8591122

邮箱：2514634782@qq.com

主编：梁忠厚 颜晓元

副主编：付美云

印刷：长沙市和一印刷设备有限公司

发行订阅：《湖南生态科学学报》编辑部

网址：www.hnstkxxb.com

出版日期：2022年12月25日

Journal of Hunan Ecological Science

(Quarterly, Started in 1995)

Vol.9 No.4 2022

Supervisor: Forestry Department of Hunan Province

Sponsor: Hunan Polytechnic of Environment and Biology

Edited and Published by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

(165 Wangcheng Road, Shigu District, Hengyang 421005, China)

Tel.: 0734-8591122

E-mail: 2514634782@qq.com

Editor-in-chief: Liang Zhonghou, Yan Xiaoyuan

Associate Editor-in-chief: Fu Meiyun

Printed by: Changsha Heyi Printing Equipment Co., Ltd.

Distributed by: Editorial Department of Journal of Hunan Ecological Science

Web.: www.hnstkxxb.com

Published date: 25 Dec, 2022

ISSN 2095-7300



国内定价：10.00元