

基于神经机器的电动-植物联合修复污染土壤方案评估

郭琳^{1,2}, 张孝存^{2,3*}, 赵培^{2,3}, 陈焱¹, 刘俊¹, 张商州¹

(1. 商洛学院电子信息与电气工程学院, 陕西 商洛 726000; 2. 商洛市生态环境技术研究中心, 陕西 商洛 726000; 3. 商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000)

摘要:以地处秦岭山区闭库14 a的金矿尾矿库为研究对象,实施电动-植物联合修复污染土壤方案,设计一种先甄别提取,再计算优化、交互集成,最后自动评估的方法,经模型训练得到该方案的评估值。结果表明:尾矿库区适宜生长的东南景天、白茅、黑麦草和蒲公英可作为富集植物,选取Cd、Cu、Zn作为去除对象,训练样本评估效率和实验效率的相对误差分别为4.7%、-3.5%、12.4%,测试样本的评估效率分别为75.6%、47.2%、56.5%,可用于指导实验室或场地土壤修复。

关键词:重金属;BP神经网络;电动-植物联合修复;污染土壤

中图分类号:X53 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2021)03-0064-04

Evaluation of Combined Electrokinetic-Phytoremediation Program for Contaminated Soil Based on Neural Machine

GUO Lin^{1,2}, ZHANG Xiao-cun^{2,3*}, ZHAO Pei^{2,3}, CHEN Yao¹, LIU Jun¹, ZHANG Shang-zhou¹

(1. *Electronic Information and Electrical Engineering College, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China*; 2. *Shangluo Ecological Environment Technology Research Center, Shangluo, Shaanxi 726000, China*; 3. *College of Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo, Shaanxi 726000, China*)

Abstract: Taking the gold tailing ponds which had been closed for 14 years in Qinling Mountains as the research object, a combined electrokinetic and phytoremediation program for contaminated soil was developed. The program was designed as first screening and extracting, then calculating for optimization and interactive integrating, finally automatic evaluating. The estimated value of the program was derived from model training. The results showed that as suitable plants for growing in the tailing ponds area, *Sedum alfredii*, *Imperata cylindrica*, *Lolium perenne* and *Dandelion* were selected as hyperaccumulators. Taking Cd, Cu and Zn as eliminating objects, the relative error of evaluation efficiency and experimental efficiency of training samples were 4.7%, -3.5% and 12.4%, respectively. The evaluation efficiency of test samples were 75.6%, 47.2% and 56.5%, respectively. It could be used to guide laboratory or site soil remediation.

Key words: Heavy metal; BPNN; Electrokinetic and phytoremediation; Contaminated soil

因地理位置、经济或技术等原因,修复污染程度较高的闭库尾矿库土壤修复过程复杂且漫长。电动修复技术具有低功耗、原位修复优势,将其与绿色环保的植物修复技术相结合,是当前重金属污染土壤修复的研究热点。2016年勾凯等^[1]以金矿尾渣为对象开创性研究了电动力对Cu的提取效果;2017年袁立竹^[2]首次系统研究了强化电动修复要素如电流类型、电场模式和电极结构等,提出

能耗建模计算概念;2018年李亚娇等^[3]总结了土

收稿日期:2020-04-16;修订日期:2021-04-27

基金项目:陕西省自然科学“基于光矿农互补技术的尾矿库污染土壤修复与资源综合利用研究”基金资助项目(2019SF-246);国家自然科学基金“不同根系深度植物对薄层紫色土坡地的水分适应机理”基金资助项目(41471188)

作者简介:郭琳(1980—),男,陕西商洛人,副教授,硕士,主要从事农业环境保护与智能检测工作。

*通信作者:张孝存 E-mail: 1026248186@qq.com

壤修复技术最新研究进展;2019 年盛春蕾等^[4]首次发掘 1972—2017 年期间 SCI 文献,描述了世界土壤电动修复研究态势。然而,用于实地电动复合修复的案例较少见,且缺少定量评价和科学预测方法。今采用基于神经机器的电动-植物联合修复评估系统(EPES)修复污染土壤,并评价修复效果,为尾矿库土壤实际修复提供理论方法指导,以期减少实验成本、缩短周期和提高修复效率。

1 EPES 设计

1.1 实验评估对象

以地处秦岭山区商洛市的 1 个闭库 14 a 的金矿尾矿库为例^[5-6],作为电动-植物联合修复方案实验和仿真测试样本。调查统计尾矿库库顶和边坡常见的狗尾草、艾蒿和小蓬草等 16 种自然生长植物,分析富集植物的优势度、富集系数和转运系数,筛选出库区适宜自然生长的富集植物东南景天、白茅、黑麦草和蒲公英,其相对密度分别为 5.67%、42.5%、2.41% 和 1.05%,相对高度分别为 8.18 cm、25.0 cm、23.5 cm 和 6.82 cm,相对盖度分别为 7.45%、37.4%、15.5% 和 0.23%。在库区中心位置采集地面下 20 cm 处的土壤,测得风干土壤和富集植物根、茎、叶的 Cd、Cu 和 Zn 质量比(5.23 mg/kg、116.5 mg/kg 和 223.62 mg/kg)分别超出附近土壤背景值 13.4 倍、3.4 倍和 1.7 倍。

通过异地取土把测试样本 B1(Cd)、B2(Cu)和 B3(Zn)放进自制实验箱中,垂直插入石墨电极,移栽富集植物,分别对土壤中 Cd、Cu、Zn 实施电动-植物联合诱导和迁移实验,通过修复前后重金属含量获得修复实际效率,用于检验方案仿真评估值。选取的参考样本 A1 中,肖文丹等^[7]采用异地取土盆栽东南景天修复 Cd 污染土壤,探索直流电场下不同因素的影响效率和最优条件;参考样本 A2 中,陈海峰等^[8]通过室内土柱法研究垂直电场下黑麦草吸收土壤重金属 Cu/Zn 的效率,以及添加 EDTA 后土壤溶液络离子变化影响;参考样本 A3 中,朱凰榕等^[9]利用盆栽实验和田间试验,同时研究植物东南景天和伴矿景天对酸性 Cd 和 Zn 污染土壤的修复效果,考察不同环境条件下 Cd/Zn 富集系数和转运系数。

1.2 EPES 搭建和特征向量的提取

设计的 EPES 包括变量特征提取、计算权重和决策评估 3 个核心模块。通过建立系统基础变量

特征库,分类搭建静态变量、动态变量和辅助变量的特征评价模型,依靠因子探测器、空间插值法和交互探测器分别对输入特征向量单独评价,再交互集成之后由神经机器模型进行综合评估。根据现有研究成果设计系统变量特征库和参考特征度,特征库 W 分为静态变量特征库 $h[T]$ 、动态变量特征库 $g[T]$ 和辅助变量特征库 $l[T]$,包括土壤原始 pH 值、电极阳极/阴极布置方式、电极材料、变电极时间等 13 项。为快速提取特征向量和提高系统源代码可移植性,特别制定了提取标准和编号,见表 1。

机器系统识别或区分文本的标志是特征,用空间向量 $(T_1, x_1; T_2, x_2; \dots; T_j, x_j)$ 来描述特征,其中 T_j 为特征项, x_j 为特征项对应的基础权重,用以定义特征项在描述变量时的重要程度。为了提高特征度获取的精度和速度,需对变量特征项进行预处理,利用 Doc2Vec 方法、NLTK 或 Stanford Parser 工具包进行文本提取处理(包括计数、平均、加权、百分率等),获得文本编码和特征度。为获得更好区分效果,利用小波变换和短时傅里叶分析工具^[10]再次处理变量特征,通过公式(1)得到 j 节点处第 i 个时间窗特征度的均方根值:

$$X_{j,i}(h, g, l) = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N K_{j,n}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $X_{j,i}$ 为节点 j 在第 i 个时间窗下特征度的均方根值; $K_{j,n}$ 为节点 j 处的第 n 个系数; N 为 j 节点的系数数量。

1.3 EPES 变量特征权重的提取

(1) 静态变量特征权重。修复系统的静态变量采用地理探测器中的因子探测器模型方法^[11]过滤提取静态变量特征 $(T_1 \sim T_3)$,根据变量库 $h[T]$ 由影响因子映射到固定特征,对影响因子进行编码,根据变量库特征度获得特征基础权重。

(2) 动态变量特征权重。土壤中金属成分迁移、活性和植物吸收情况,变电极时间、电场强度等动态变量采用空间插值法及半方差函数描述不同属性因子的影响程度,获取变量特征信息,然后根据 $g[T]$ 特征度,由给定变量标签分类计算特征基础权重。选用风险探测器提取特征^[11],进行特征组合和优化,用奖励函数来干预模型训练。

(3) 辅助变量特征权重。此类变量多样性大,采用地理探测器中的交互探测器模型^[11]研究影响因素交互作用,提取变量特征,根据 $l[T]$ 特征度,

表 1 EPES 系统的变量特征库

Table 1 Variable characteristic database of EPES

文本库	编号	特征	特征描述	参考特征度	权重
h[T]静态变量特征库	T ₁	土壤原始 pH 值	影响重金属的氧化还原、吸附和迁移转化,以及植物生长	2.5 ~ 9	x ₁
	T ₂	电极阳极、阴极布置方式	布置位置影响重金属迁移的方向和吸附程度,有水平平行、竖直平行、垂直等	1 ~ 5	x ₂
	T ₃	电极材料	不同材料或组合的电极影响不同,常用的有石墨、铝、不锈钢、钛等,其中石墨最适合	1 ~ 5	x ₃
	T ₄	土壤湿度	土壤干湿程度影响重金属迁移和植物生长	0 ~ 100%	x ₄
	T ₅	土壤温度	光照度和气候影响修复过程和植物生长,温度过高或过低影响电迁移和电渗过程	5 ℃ ~ 35 ℃	x ₅
g[T]动态变量特征库	T ₆	变电极时间	极性交替可减少极化现象、提高电流密度,周期很重要	1 ~ 5	x ₆
	T ₇	电极间距	影响电场分布、放电速率,逐次逼近阳极技术可减少极化和能耗,间距和周期很重要	1 ~ 5	x ₇
	T ₈	直流电场强度	电场强度对重金属生物有效性和迁移率有影响,同时对植物生长有影响	0 V/cm、1 V/cm、2 V/cm、3 V/cm、5 V/cm	x ₈
	T ₉	交流/直流交替周期	交流电场有利于提高土壤活性、控制 pH 值和促进植物生长,周期很重要	1 ~ 5	x ₉
l[T]辅助变量特征库	T ₁₀	各种添加剂的促进作用	缓冲液控制电极 pH 值,螯合剂可提高重金属迁移率和生物有效性,有机肥料可促进植物生长	1 ~ 5	x ₁₀
	T ₁₁	富集植物的迁移能力	不同富集植物吸收重金属的差异性,表现出的富集系数和转运系数	1 ~ 5	x ₁₁
	T ₁₂	植物吸收与电动法的契合度	富集植物生长适应电场强度的能力,不同电压等级下的吸收速度	1 ~ 5	x ₁₂
	T ₁₃	自然水循环和污水处理条件	良好的水循环和污水处理系统加速重金属的消解	1 ~ 3	x ₁₃

利用其双协同模型计算获得基础权重 $x(l)$ 。当变量为数值量时采用 K -means 聚类法划分因子层次,获取特征基础权重。

为了综合计算上述三部分变量特征权重,需要根据修复规则和污染土壤类型特点,建立特征权重赋值仿真模型,见公式(2),以小波变换后的系数变化作为模型基础,经 Stacking 方法集成后赋值^[12]。套用 5 层小波包分解法,使用节点重要度比值 λ ,以公式(3)的 2~5 节点间重要度与 1 节点重要度的比值作为有效特征量权重,设定好阈值计算 13 个特征度,在预设周期内计算特征量权重。该方法充分考虑了变量间的相互影响。

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{x_{j,i}^2}{\delta_c^2} - 1 \right) \quad (2)$$

$$\lambda_{j,i} = \frac{E}{E_1} = \frac{\sum_{r=2}^j \sum_{n=1}^{13} |u_r(n)|^2}{\sum_{n=1}^{13} |u_1(n)|^2} \quad (3)$$

式中: φ 为特征量导数值; τ 为时间常数; $x_{j,i}$ 为基础权重赋值; δ_c 为权重赋值系数; $\lambda_{j,i}$ 为特征量权重; E 为 2~5 节点间重要度之和; E_1 为 1 节点重要度; $u_1(n)$ 为 1 节点重建系数; $u_r(n)$ 为 r 节点重建系数。

2 结果与讨论

EPES 是建立在人工神经网络 (ANN) 算法和机器学习的基础上,模拟评估方案的优劣。EPES 将上文得到 3 个变量库的 13 个特征量权重引入 BP 神经网络 (BPNN),保证输入和输出向量满足线性映射。把修复方案 A1、A2 和 A3 中的相关参数、修复条件等指标作为训练样本,同时把变量特征、特征度和特征赋值综合后提交实验评估组,给出静态、动态特征赋值参数和协同交互作用力参数,并根据实际训练样本的特点和现有案例给出特征赋值系数 δ_c 。通过 Matlab 软件输入公式(1)~(3),在预设周期内进行机器学习得到最优特征权重和阈值,BPNN 输出层 α_{ix} 即为系统对方案样本的评估值。最终根据实验室修复结果对机器虚拟修复方案进行修正,提高修复方案的可靠性。若输出结果的误差低于设定的 ε ,或者训练学习次数超过了设定的最大值,则本次算法自动结束;若结果吻合度较差,则需要调整特征度和基础权重赋值,从公式(1)开始重新训练。

在室内修复实验方案中,土壤原始 pH 值、土壤温度、电极间距、自然水循环条件等变量设定不变,可变的样本变量总结见表 2。样本 A1—A3 通过评估系统训练得到评估效率,与实际修复效率对

表 2 样本变量及修复效率
Table 2 Sample variable and evaluation efficiency

样本	元素	电极材料	电极布置	电压梯度 DCVG/ ($V \cdot cm^{-1}$)	日通电时间 t/h	相对含 水率/%	添加剂	筛选富集 植物	实验效率 /%	评估效率 /%
A1	Cd	高纯石墨	竖直平行	1	6	60	EDTA	东南景天	85.3	89.5
A2	Cu	不锈钢网	水平平行	1	6	70	EDTA 二钠盐	黑麦草	86.8	83.9
A3	Zn	不锈钢网	水平平行	1	6	70	EDTA 二钠盐	东南景天	37.3	42.6
B1	Cd	石墨	竖直平行	1.5	12	60	柠檬酸 + 氯化钙	东南景天	60.8	75.6
B2	Cu	石墨	竖直平行	1.5	12	70	柠檬酸 + 氯化钙	黑麦草	39.4	47.2
B3	Zn	石墨	竖直平行	1.5	12	70	柠檬酸 + 氯化钙	白茅	42.5	56.5

比获得均方误差,由 BPNN 将误差沿路返回修改各层的权重值,开始相似条件下的测试样本训练,最后得到测试样本 B1—B3 的评估效率 α_{ix} 。

通过系统仿真得到评估结果,训练样本 A1、A2 和 A3 的实验效率分别为 85.3%、86.8% 和 37.3%,机器评估效率分别为 89.5%、83.9% 和 42.6%,通过评估结果对比,相对误差分别为 4.7%、-3.5% 和 12.4%。样本 A1 和 A2 评估结果相对误差小,说明用盆栽黑麦草提取 Cu 实验和盆栽东南景天提取 Cd 实验的变量特征向量基本达到最优值,而样本 A3 的评估结果相对误差较大,说明盆栽东南景天提取 Zn 的变量优化空间较大,实验结果存在偶然性,需要重新核实变量,或者增加类似样本再机器评估。测试样本 B1、B2 和 B3 的实验效率分别为 60.8%、39.4% 和 42.5%,评估效率分别为 75.6%、47.2% 和 56.5%,相对误差分别为 19.6%、16.5% 和 24.8%。虽然测试样本的模拟评估结果与盆栽实验结果有一定误差,评估效率低于训练样本,但是相比于已有参考文献数据,修复率相对较好。说明在改变实验条件后,相关变量特征权重需要重新训练学习,理论上 ANN 神经网络获得实验数据越多,或者事实上与土壤实际修复方案越接近,测试样本的仿真评估结果越准确。另外,相比于训练样本,实验所取土壤的矿渣氧化物成分较多,造成重金属整体去除率下降。因此,上述模拟修复方案具有一定可行性和实际指导意义。

3 结语

针对重金属超标的金矿尾矿库,设计了一种电动加富集植物联合修复方案,筛选了重金属富集植物,同时选取了 3 个测试样本和 3 个参考训练样本。把特征量权重及系数赋值于评估仿真模型,采用多层前馈神经网络模型,通过大量实验数据经系统充分训练后,可模拟任意模式数据,适用于预测

土壤特性、重金属可信度和修复评价等,且能够自我诊断和监测,可以反向优化变量特征度,获得测试样本的模拟评估结果,提高土壤修复效率。该方法能够对比分析模拟与实验修复结果,发现差距并进行优化提高,减少人为误判率和降低修复成本。该方法的训练规则要建立在分级修复的基础上,参考国家或者地方相关标准,设定不同级别评估标准,以达到污染土壤修复目的。

[参考文献]

- [1] 勾凯,张英杰,孙鑫,等. 金矿尾渣中铜的电动修复[J]. 化工进展,2016,35(4):1237-1241.
- [2] 袁立竹. 强化电动修复重金属复合污染土壤研究[D]. 北京:中国科学院大学,2017.
- [3] 李亚娇,温猛,李家科,等. 土壤污染修复技术研究进展[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(5):8-14.
- [4] 盛春蕾,袁立竹,盛宇平,等. 基于 SCI 文献计量的土壤电动修复研究态势分析[J]. 土壤与作物,2019,8(2):111-118.
- [5] 叶金利,田路萍,吴文卫,等. 云南会泽者海镇典型矿区场地重金属污染特征及健康风险评估[J]. 环境监测管理与技术,2019,31(3):36-40.
- [6] 赵培,王群盈,刘志鹏. 秦岭山区沟渠植物和土壤 CNP 生态化学计量特征[J]. 山地学报,2017,35(5):753-760.
- [7] 肖文丹,叶雪珠,徐海舟,等. 直流电场与添加剂强化东南景天修复镉污染土壤[J]. 土壤学报,2017,54(4):927-937.
- [8] 陈海峰,周东美,仓龙,等. 垂直电场对 EDTA 络合诱导铜锌植物吸收及其迁移风险的影响[J]. 土壤学报,2007,44(1):174-178.
- [9] 朱凰榕,周良华,阳峰,等. 两种景天修复 Cd/Zn 污染土壤效果的比较[J]. 生态环境学报,2019,28(2):403-410.
- [10] 石旭亮,刘怀山. 基于小波变换和短时傅里叶变换的混合时频分析方法研究[C]//中国地球物理学会. 第十届国家安全地球物理学术讨论会. 上海:中国地球物理学会,2014:241-245.
- [11] 肖艳桐,张瑞雪,吴攀. 土壤重金属分析常用空间插值法研究进展[J]. 环境科学与技术,2019,42(3):198-205.
- [12] 史佳琪,张建华. 基于多模型融合 Stacking 集成学习方式的负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(14):4032-4042.