

基于耦合模型的重金属污染土壤植物 修复效益空间差异分析*

王 维¹ 张金婷¹ 王 伟² 周 静² 刘晓磊³ 孙 华^{1†}

(1 南京农业大学资源环境与城乡规划系, 南京 210095)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

(3 江苏省环境保护厅, 南京 210036)

摘 要 在污染土壤生态修复的同时须兼顾其经济、社会效益, 以提高其修复综合效益并推动修复工作的顺利开展。以贵溪市为研究区域, 使用耦合模型对污染土地植物修复效益进行空间差异评价并筛选适宜的修复植物类型。研究结果显示: 研究区域重金属污染土壤植物修复综合效益存在较大空间差异, 其中水泉区重金属污染土壤植物修复效益最低为 0.173 6, 苏门区重金属污染土壤植物修复效益最高为 0.835 4; 九牛岗区和庞源区效益相近, 效益值小于 0.4, 属于效益较低区块; 在种植植物类型上看, 混合种植的树木和乔灌木植物, 能产生较好的效益, 单纯种植一种植物类型, 总体效益低; 建议将高效益的苏门区植物类型和种植方式进行推广, 并采用红叶石楠和栎树间套种植方式。

关键词 土壤; 重金属污染; 植物修复; 耦合模型; 贵溪市

中图分类号 X820.4 **文献标识码** A

矿业发展加剧了工矿区土地污染。农田土壤遭受不同程度工业污染, 部分或全部遭废弃、闲置或无人使用, 重新开发与再次利用可能存在各种障碍, 也是西方国家所说的广义“棕褐色地块(简称棕(褐)地)”^[1]。重金属具有难溶性、持久性的特点, 植物修复能有效地降低其毒害程度, 国外学者在重金属污染土壤植物修复效益和可持续性方面已展开研究^[2-6], 主要利用绿色植物从环境中吸收带走重金属, 将它们无害化从而达到治理目的, 是目前发展最快的环境友好、经济、高效的治理技术; 而国内植物修复技术研究也较多, 但在植物修复区域再利用效益上尚待提高, 修复植物的筛选主要依据定性分析或者植物的富集系数, 未能综合考虑经济效益、生态效益和社会效益^[7-9], 导致再利用效益偏低; 另外, 植物修复效益分析缺乏有效模型, 评价结果准确性差, 因此, 如何在生态修复同时兼顾社会和经济效益, 实现效益最大化, 已成为重金属污染土壤植物修复研究的重要内容。

重金属污染的植物修复过程已有较多相关研究, 但所需植物的筛选尚缺乏定量化研究, 导致重金属污染土壤植物修复时存在效益低下、空间差异显著等问题^[10]。以研究方法划分的层次分析法^[11]、模糊综合评价法^[12]、专家打分法^[13]多用于综合分析, 这些方法无法回避主观性影响。此外, 统计分析方法需大量数据、模糊综合评价易造成重复计算、BP 神经网络易陷入局部最小点^[14-15]。而使用遗传算法和 BP 神经网络耦合模型, 可以充分降低其他方法带来的主观因素和客观因素的影响, 并且该方法便于操作且应用广泛, 同时还可以增加效益评价的客观性和准确性, 实现从整体上考虑经济效益、生态效益和社会效益和植物修复关系。本文针对植物修复效益评价定量化模型缺乏问题, 尝试建立重金属污染土壤植物修复综合效益指标体系, 使用遗传算法和 BP 神经网络耦合模型对研究区重金属污染土壤植物修复效益进行综合评价, 以期进行有益的探索。

* 国家自然科学基金项目(41371484, 71073082)、环保部重金属污染防治专项“江铜贵冶周边区域九牛岗土壤修复示范项目”和江苏省“青蓝工程”项目资助

† 通讯作者, E-mail: sh@njau.edu.cn

作者简介: 王 维(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为土地可持续利用, 污染土地修复。E-mail: wxy2871901@163.com

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2013-11-05

1 材料与方 法

1.1 研究区域

江铜集团贵溪冶炼厂周边区域九牛岗土壤修复示范项目共分 8 个区块,包括苏门区、庞源区、九牛岗、李家-蒋家区、沈家-林家区、水泉区、长塘周家区、串山垅水库部分老灌区(见图 1)。各区块的污染状况不同,则修复目标不同,轻度污染土壤经修复治理后,预期可种植水稻等粮食作物或纤维、能

源等经济植物。2012 年 11 月 1 日调查的六个主要区域中,苏门区主要种植桂花树 (*Osmanthus fragrans* Lour) 和栲树 (*Koelreuteria paniculata*),庞源区为樟树 (*Cinnamomum camphora*),九牛岗主要为樟树 (*Cinnamomum camphora*),沈家-林家区主要为红叶石楠 (*Photinia serrulata*) 和栲树 (*Koelreuteria paniculata*),水泉区主要为能源草 (*Panicum virgatum*),长塘周家区主要为红叶石楠 (*Photinia serrulata*) 和瓜子黄杨 (*Buxus sinica*)。

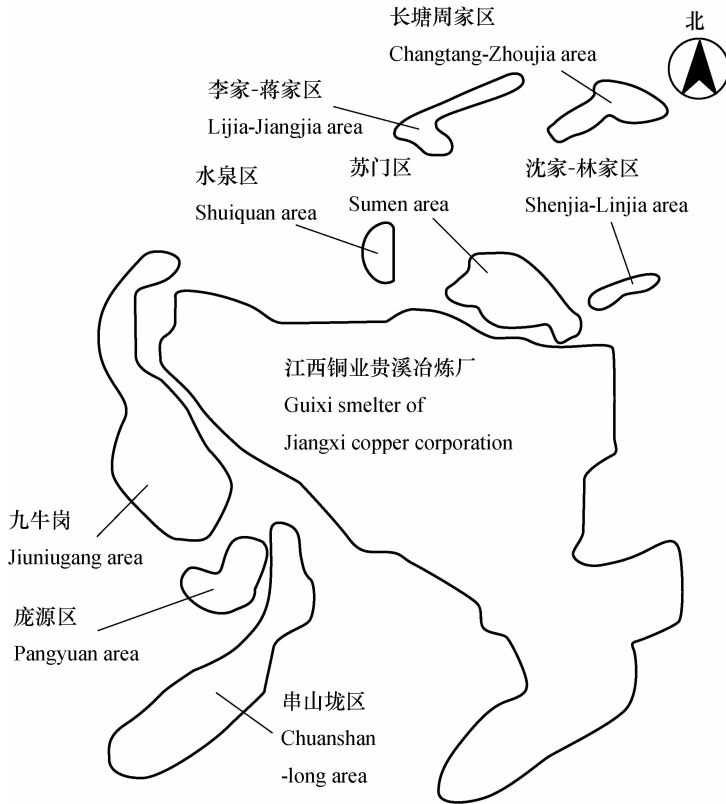


图 1 土壤修复区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the studied region of soil remediation

1.2 指标体系构建

土地利用类型分为农用地、工业用地和未利用地,其中矿区及冶炼厂周边以农用地居多。农用地一般用于农业生产,通过栽培作物,最终获得粮食作物、经济作物,其经济效益受到投入-产出效率影响。参考本文的社会效益评价指标,农地利用的环境效益分为正面和负面。正向情况下土地合理利用,产生积极效益;负向情况下由于不合理生产活动,如施用化肥、农药过量等,对农田和人体健康产生影响。在以上分析基础上,构建了评价指标体系。

依据重金属污染土壤植物修复的特点,借鉴已有的城市土地利用效益评价指标体系、污染土壤特性和植物修复的特点,建立植物修复效益评价指标体系,主要从社会效益、经济效益和环境效益三方面进行分析。评价指标体系包括目标层、子目标层和指标层,其中每个子目标层下属有若干指标层,采用最小均方差法进行指标筛选,最小均方差法可以排除指标相关性较大指标。具体评价指标如表 1 所示。

表 1 重金属污染土壤植物修复效益评价指标体系

Table 1 Index system for evaluation of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soils

目标层 Destination layer	子目标层 Subgoal layer	指标层(代码) Index layer (code)	单位 Unit
重金属污染土壤植物 修复效益评价 Evaluation of benefits of phytoremediation of heavy metal contaminated soil	社会效益(影响因素) Social benefits (Influence factor)	污染受体人数(A1)	个
		项目相关就业人数(A2)	个
		当地居民与项目相关收入(A3)	万元
	环境效益(影响因素) Environmental benefits (Influence factor)	土地租赁费用(A4)	万元
		污染程度下降率(A5)	%
		植被覆盖增加率(A6)	%
	经济效益(影响因素) Economic benefits (Influence factor)	植物 Cd 富集系数(A7)	mg kg ⁻¹
		植物 Cu 富集系数(A8)	mg kg ⁻¹
		Cd 人体健康负荷变化程度(A9)	%
		Cu 人体健康负荷变化程度(A10)	%
		植物生长周期(A11)	a
		植物株数(A12)	株
		存活率(A13)	%
		产值(A14)	万元
		种苗投入(A15)	万元
		道路通达度(百分制)(A16)	%
		产品到消费地距离(A17)	km
		运输成本(A18)	元

1.3 BP 神经网络-遗传算法耦合模型的建立

神经网络与遗传算法耦合过程,实际上是将整个网络训练分成了两部分:首先采用遗传算法优化网络的初始权重,再利用 BP 算法最终完成网络训练,棕褐地再利用效益的权值(阈值)得到不断进化,直至训练目标满足条件;然后采用遗传算法的解码,将该组编码数据转换为权重组合,再将其作为初始权值(阈值),应用到 BP 神经网络的系统中去^[15-17],当以另外的样本作为输入层,利用训练好的 BP 网络进行仿真时,将得到模拟的结果。

1.4 评价指标标准化

指标标准化处理的目的是消除不同指标量纲的影响。由于各指标间量纲不同,所以无法进行比较。因此,考虑到神经网络训练收敛问题,也为了便于最终评价价值的确定,在网络学习训练前要将各指标的原始数据进行无量纲化^[14]。参考效益评价指标无量纲化的相关文献,得知效益型指标一般采

用最值法进行标准化,经过处理后各指标的数值界于[0,1]的区间内。其计算公式如下:

$$F_{ij} = \frac{X_{ij}}{\max X_{ij}}$$

式中, F_{ij} 代表评价指标标准化后的数值, X_{ij} 代表第 i 个区块的第 j 个评价指标的实际值。无量纲化数据见表 2,模型训练数据见表 3。

1.5 训练过程及输出结果

在 MATLAB 环境下,运用 GA 工具箱及 MATLAB 编程语言,采用的实数编码,码串长度为 235,初始种群规模为 50,遗传代数数为 100,精度为 0.01 选择运算使用比例选择算子;交叉运算使用单点交叉算子;变异运算使用基本位变异算子。交叉概率 $P_c = 0.1$,变异概率 $P_m = 0.09$,输入训练样本数据。遗传算法改进的 BP 神经网络训练完成后,得到各权值及阈值。

训练过程如图 2 和图 3(右边虚线代表根周期停止的分界线)所示:

表 2 重金属污染土壤植物修复效益指标无量纲化

Table 2 Non-dimensional data of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soils

指标 Index	苏门区 Sumen area	庞源区 Pangyuan area	九牛岗 Jiuniugang area	沈家-林家区 Shenjia-Linjia area	水泉区 Shuiquan area	长塘周家区 Changtang-Zhoujia area
A1	0.484 7	0.123 7	0.969 3	0.333 3	0.242 3	1
A2	0.657 1	0.171 4	1	0.342 9	0.2	0.685 7
A3	0.397 4	0.198 7	1	0.2	0.200 5	0.4
A4	0.471 2	0.124 1	1	0.119 8	0.172 4	0.400 9
A5	0.972 2	0.902 8	1	0.763 9	0.763 9	0.625
A6	1	0.7	0.85	0.6	0.75	0.3
A7	0.481 3	0.093 3	0.093 3	1	0.395 7	0.485 1
A8	1	0.317 6	0.317 6	0.864 7	0.560 1	0.664 7
A9	0.8	0.6	1	0.4	0.4	0.2
A10	0.8	0.6	1	0.4	0.4	0.2
A11	0.666 7	1	1	0.666 7	0.166 7	0.333 3
A12	0.117	0.028 8	0.201 2	0.090 8	1	0.575
A13	0.894 7	0.842 1	0.894 7	0.736 8	1	0.842 1
A14	0.362 6	0.034 8	0.258 1	0.235 4	0.006	1
A15	1	0.096 4	0.669 4	0.073 8	0.016 7	0.038 5
A16	1	0.5	0.75	0.75	0.25	1
A17	0.925 9	0.936 1	0.886 2	0.952 6	0.053 4	1
A18	0.925 9	0.936 1	0.886 2	0.952 6	0.053 4	1

表 3 重金属污染土壤植物修复效益输入数据和输出数据

Table 3 Input and output data for evaluation of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soils

输入数据 Input data										
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.5	0.657	0.397	0.471	0.972	0.85	0.481	0.86		
	0.344	0.342	0.200 5	0.172	0.903	0.75	0.396	0.56		
	0.25	0.2	0.2	0.124	0.764	0.7	0.093	0.317 6		
	0.128	0.171	0.198 7	0.120	0.764	0.6	0.093	0.317		
输入数据 Input data										输出数据 Output data
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0.201 2	0.894	0.712	0.67	0.8	0.8	0.75	0.982	0.983	0.8
0.667	0.117	0.894	0.650	0.096	0.6	0.6	0.75	0.972	0.972	0.6
0.667	0.090 8	0.842	0.096	0.074	0.4	0.4	0.5	0.930	0.93	0.4
0.167	0.028	0.737	0.016 7	0.016 7	0.4	0.4	0.25	0.056	0.056	0.2

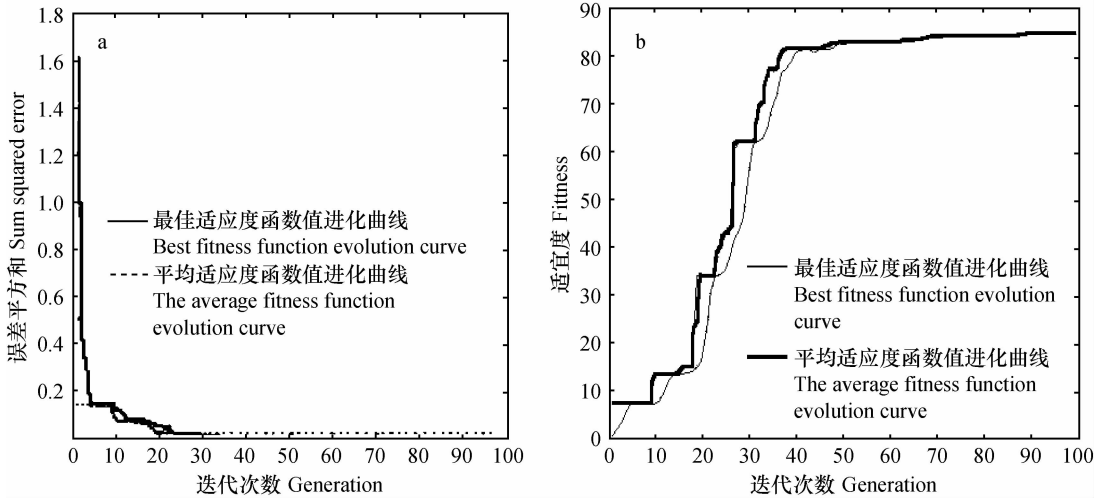


图2 遗传算法改进的BP神经网络均方误差和适合度曲线

Fig. 2 GA-BP mean-squared error and fitness curves

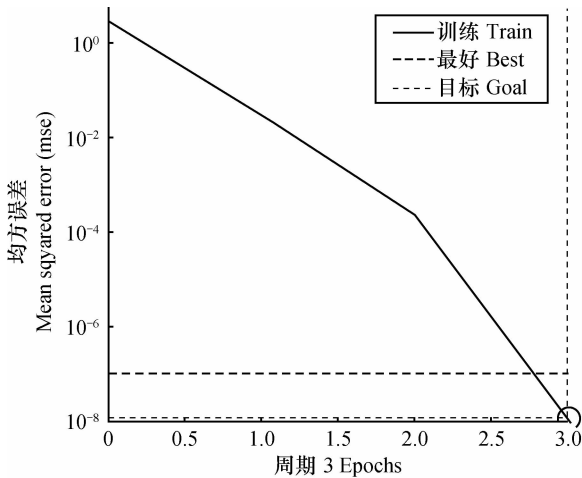


图3 遗传算法改进的BP神经网络训练过程

Fig. 3 Process of training of GA-BP

1.6 重金属污染土壤植物修复效益评价等级确定

重金属污染土壤植物修复效益等级是在再利用效益计算的基础上确定的,评价分值越大,则重金属污染土壤的土地利用效益越合理或是接近合理,同时也表示修复植物适宜程度较高,可适度推广该修复植物,提高再利用效益。本文参照有关文献的选取方法,应用线性内插法,通过构建所有样本数据的最大和最小区间,线性设定影响等级,将重金属污染土壤植物修复效益评价目标分为5级,由0.2到1表示修复效益等级由低到高(见表4):

1 当 $0 \leq Y < 0.2$ 时,重金属污染土壤植物修复效益极低,植物适宜度最低;

2 当 $0.2 \leq Y < 0.4$ 时,重金属污染土壤植物修复效益较低,植物适宜度较低;

3 当 $0.4 \leq Y < 0.6$ 时,重金属污染土壤植物修复效益居中,植物适宜度居中;

4 当 $0.6 \leq Y < 0.8$ 时,重金属污染土壤植物修复效益较高,植物适宜度较高;

5 当 $0.8 \leq Y < 1$ 时,重金属污染土壤植物修复效益极高,植物适宜度最高。

2 结果与讨论

2.1 重金属污染土壤植物修复效益评价

遗传算法改进的BP神经网络在3个周期内达到最佳值,并且达到误差范围要求,均方误差低于0.2,适合度曲线高。遗传算法和BP神经网络耦合模型训练完成后,将样本数据作为网络的测试数据进行测试,测试结果均拟合。将贵溪市各修复区块标准化后的指标数据输入训练好的网络,得出各块重金属污染土壤植物修复效益评价价值,如表5所示。

2.2 贵溪市铜冶炼区重金属污染土壤植物修复效益水平及差异

城市工矿企业兴起带来的化工、冶金等活动导致土壤污染严重,城市周边产生大量废弃地。在冶炼区、尾矿堆积区和污水排放地,重金属污染随大气、地表、地下径流扩散,对居民生产生活造成重大影响。我国污染土壤修复及再利用也陆续开展^[13-14],植物修复存在潜在价值^[18-20],贵溪市重金属污染土壤植物修复项目平均效益仅为0.5173,总体状况居中,可以挖掘潜在空间,以进一步提高效益。

表 4 重金属污染土壤植物修复效益评价等级

Table 4 Rating of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soils

等级标准 Grade	评价等级 Rating	等级意义 Level of significance	植物种植建议措施 Suggested planting
$0 \leq Y < 0.2$	效益极低	植物修复效益最低,土地最大效益未实现,宜改变土地利用方式或植物类型	种植高效植物 采用多种植物混种方式 改良土壤 加强田间管理,提高存活率
$0.2 \leq Y < 0.4$	效益较低	植物修复效益较低,土地最大效益未实现,宜改变土地利用方式或植物类型	种植高效植物 多种植物套种和间种 加强田间管理,提高存活率
$0.4 \leq Y < 0.6$	效益居中	植物修复效益居中,土地最大效益未实现,宜改变土地利用方式或植物类型	种植高效植物 多种植物套种和间种
$0.6 \leq Y < 0.8$	效益较高	植物修复效益较高,土地效益实现,宜保持利用方式或改变修复植物种植模式,减少效益低的植物	改变或保持高效植物类型 加强田间管理,提高存活率 采用多种植物套种和间种
$0.8 \leq Y < 1$	效益极高	植物修复效益最高,实现土地最大效益,宜保持或推广该修复植物	保持该植物类型 推广该种植模式 进行日常田间维护

表 5 贵溪市铜冶炼区域重金属污染土壤植物修复效益空间分异

Table 5 Spatial differentiation of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soils in Guixi City

	苏门区 Sumen area	鹿源区 Pangyuan area	九牛岗 Jiuniugang area	沈家-林家区 Shenjia-Linjia area	水泉区 Shuiquan area	长塘周家区 Changtang-Zhoujia area
植物修复效益 Phytoremediation benefits	0.835 4	0.326 7	0.355 4	0.657 8	0.173 6	0.777 6
植物修复效益等级 Phytoremediation benefits level	效益最高 Maximum benefits	效益较低 Lower benefits	效益较低 Lower benefits	效益较高 Higher benefits	效益最低 Minimum benefits	效益较高 Higher benefits

植物修复效益与植物类型紧密相关,调查中的六个区块状况类似,但由于采用不同植物类型,综合效益存在差别。苏门区面积较大,区块呈多边形,修复植物类型多样,采用的多种植物间套种植方式,植物重金属富集系数较高,同时具有经济价值,综合效益处于第 5 级。相反水泉区面积小,植物类型单一,富集系数低,综合效益低,处于第 1 级,存在潜在提高空间。各区块空间差异巨大,如图 4 所示。

2.3 重金属污染土壤植物修复效益评价的准确性及影响因素

在评价方法方面,使用层次分析法、模糊综合评价法测算植物修复综合效益时均存在主观性问题,而使用遗传算法和 BP 神经网络耦合模型进行综合评价时,发现其准确性优于灰色聚类法、模糊

综合评判法,相关研究表明实际操作时可以提高 5%~10% 准确度^[21-22]。贵溪市铜冶炼区重金属污染土壤植物修复平均效益分值仅为 0.517 2,在实际利用效果方面,与当地状况基本一致。重金属污染土壤植物修复效益的影响因素,包括社会效益、经济效益、环境效益三个方面,但综合效益评价标准尚不完整,本文以贵溪市铜冶炼区域重金属污染土壤为研究对象,探讨植物修复效益评价。

如果采用超积累植物修复技术,可能会影响正常的农业生产和经济利益,不适用于中轻度重金属污染农田土壤的治理,而具有经济效益和一定富集作用的园林植物在此方面具有优势。种植能源草对园林公司(市场引导)并不起积极作用,主要原因是其经济效益过低,因此能源草并未得到广泛种植。为提高铜

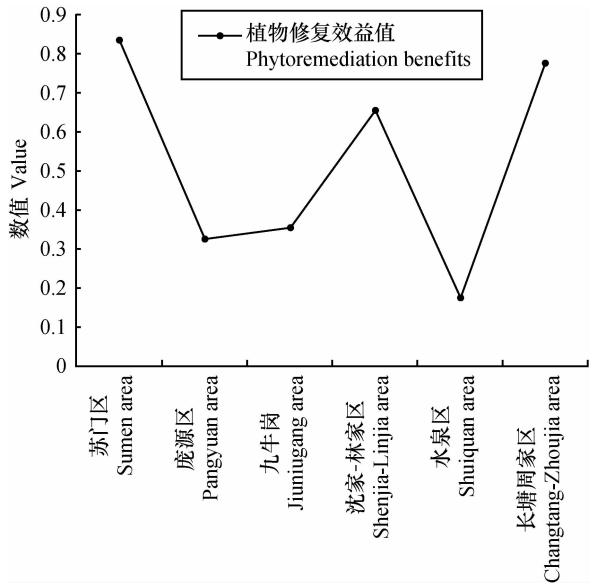


图 4 重金属污染土壤植物修复效益空间差异

Fig. 4 Spatial differentiation of benefits of the phytoremediation of heavy metal contaminated soil

冶炼区重金属污染土壤植物修复综合效益,可以将高效益的苏门区植物类型和种植方式进行推广。采用红叶石楠和栎树间套种植方式,进而促进整个区域综合效益的提高;同时,政府计划手段和市场机制是配置资源的两大手段,政府要引导重金属污染土壤修复工程,使植物修复效益达到最大。

3 结 论

研究以贵溪市重金属污染土壤修复项目为对象,利用遗传算法和 BP 神经网络耦合模型分析了重金属污染土壤植物修复效益,提高了评价的客观性和准确性。在实例研究结果中发现水泉区重金属污染土壤植物修复效益最低,结果为 0.173 6,苏门区重金属污染土壤植物修复效益最高,结果为 0.835 4,二者之间差距多达 6 倍。同一时期内,各地块间再利用效益空间差异较大,分析得出植物类型和种植方式是影响效益的重要因素。

研究为提高整体效益,分析不同植物对应的重金属污染土壤植物修复效益大小,推广重金属污染土壤修复植物效益大的植物类型和种植方式,可有效解决植物选择中主观性问题。对重金属污染土壤植物修复获得生态效益同时,兼顾社会效益,提高综合效益问题的解决具有一定参考价值。

参 考 文 献

[1] 孙华,赵晶. 基于生命周期理论的无锡市锡山区棕(褐)地再

利用环境风险综合评价. 中国土地科学,2012,26(7):84—90. Sun H,Zhao J. Environment risk comprehensive assessment on the reuse of brownfield based on life-cycle theory in Xishan District,Wuxi City (In Chinese). China Land Sciences,2012,26(7):84—90

- [2] Padiaditi K, Doick K J, Moffatt A J. Monitoring and evaluation practice for brownfield, regeneration to greenspace initiatives; A meta-evaluation of assessment and monitoring tools. Landscape Urban Planning,2010,97(1):22—36
- [3] Doick K J, Sellers G, Castan-Broto V, et al. Understanding success in the context of brownfield greening projects: The requirement for outcome evaluation in urban greenspace success assessment. Urban Forestry & Urban Greening,2009,8(3):163—178
- [4] Padiaditi K, Wehrmeyer W, Burningham K. Evaluating brownfield redevelopment projects: A review of existing sustainability indicator tools and their adoption by the UK development industry. Wit Transactions on Ecology and The Environment,2006,94:51—60
- [5] Ma Y, Prasad M N V, Rajkumar M, et al. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. Biotechnology Advances,2011,29(2):248—258
- [6] Schaedler S, Morio M, Bartke S. Designing sustainable and economically attractive brownfield revitalization options using an integrated assessment model. Journal of Environmental Management,2011,92(3):827—837
- [7] 郭丹丹,吴晓英,陈永华,等. 矿区废弃地重金属的植物修复技术研究进展. 环境科学与管理,2012,37(4):53—57. Guo D D, Wu X F, Chen Y H, et al. Progress of phytoremediation technology of heavy metal in mining waste land (In Chinese). Environmental Science and Management,2012,37(4):53—57
- [8] 彭胜巍,周启星,张浩,等. 8 种花卉植物种子萌发对石油烃污染土壤的响应. 环境科学学报,2009,29(4):786—790. Peng S W, Zhou Q X, Zhang H, et al. Responses of seed germination of 8 ornamental plants to petroleum contamination (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae,2009,29(4):786—790
- [9] 刘家女,周启星,孙挺,等. 花卉植物应用于污染土壤修复的可行性研究. 应用生态学报,2007,18(7):1617—1623. Liu J N, Zhou Q X, Sun T, et al. Feasibility of applying ornamental plants in contaminated soil remediation (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology,2007,18(7):1617—1623
- [10] 陈小前,罗世彬,王振国,等. BP 神经网络应用中的前后处理过程研究. 系统工程理论与实践,2002,22(1):65—70,88. Chen X Q, Luo S B, Wang Z G, et al. Research on preprocessing and postprocessing of the application of BP neural network (In Chinese). Systems Engineering-Theory & Practice,2002,22(1):65—70,88
- [11] 彭建,蒋依依,李正国,等. 快速城市化地区土地利用效益评价——以南京市江宁区为例. 长江流域资源与环境,2005,14(3):304—309. Peng J, Jiang Y Y, Li Z G, et al. Evaluation of land use efficiency—A case study of Jiangning County (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin,2005,14(3):304—309
- [12] 周旭,安裕伦,许武成,等. 基于 GIS 和改进层次分析法的耕地土壤肥力模糊评价——以贵州省普安县为例. 土壤通报,2009,40(1):51—55. Zhou X, An Y L, Xu W C, et al. Fuzzy

- evaluation on soil fertility of cultivated land based on GIS and improved AHP—A case of Puan County in Guizhou Province (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(1): 51—55
- [13] 元继学. 专家主观评分比赛中群决策机制的研究. *中国软科学*, 2009, 24(2): 173—176, 192. Yuan J X. A study on group decision-making mechanism in the games of subjective scoring (In Chinese). *China Soft Science*, 2009, 24(2): 173—176, 192
- [14] 刘德玲, 关晓颖, 黄艳萍. 基于 BP 神经网络和改进遗传算法的钩藤碱提取工艺优化研究. *计算机与现代化*, 2012, 28(8): 17—20. Liu D L, Guan X Y, Huang Y P. Research on optimization of extraction technology of rhynchophylline based on neural network and improved genetic algorithm (In Chinese). *Computer and Modernization*, 2012, 28(8): 17—20
- [15] 钟颖, 汪秉文. 基于遗传算法的 BP 神经网络时间序列预测模型. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(4): 9—11. Zhong Y, Wang B W. BP network sequence prediction model based on genetic algorithm (In Chinese). *Systems Engineering and Electronics*, 2002, 24(4): 9—11
- [16] 于明洁, 郭鹏, 朱煜明. 基于方法集的棕地再开发项目组合评价研究. *运筹与管理*, 2011, 20(3): 119—126. Yu M J, Guo P, Zhu Y M. Research on combination evaluation of brownfield redevelopment project based on method set (In Chinese). *Operations Research and Management Science*, 2011, 20(3): 119—126
- [17] 李明, 李雪铭. 基于遗传算法改进的 BP 神经网络在我国主要城市人居环境质量评价中的应用. *经济地理*, 2007, 27(1): 99—103. Li M, Li X M. Application research on quality evaluation of urban human settlements based on the BP neural network improved by GA (In Chinese). *Economic Geography*, 2007, 27(1): 99—103
- [18] 马莹, 骆永明, 滕应, 等. 内生细菌强化重金属污染土壤植物修复研究进展. *土壤学报*, 2013, 50(1): 195—202. Ma Y, Luo Y M, Teng Y, et al. Effects of endophytic bacteria enhancing phytoremediation of heavy metal contaminated soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 195—202
- [19] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 重金属污染土壤的植物修复研究 III. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对锌镉的吸收和积累. *土壤学报*, 2002, 39(5): 664—670. Jiang X J, Luo Y M, Zhao Q G. Study on phytoremediation of heavy metal polluted soils III. Cadmium and zinc uptake and accumulation by indian mustard (*Brassica Juncea*) (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 664—670
- [20] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. *土壤学报*, 2003, 40(2): 161—169. Wong M H, Luo Y M. Land remediation and ecological restoration of mined land (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 161—169
- [21] 王保栋, 韩彬. 近岸生态环境质量综合评价方法及其应用. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 400—404. Wang B D, Han B. Method for integrated assessment of near-shore ecological environment quality and its application to Jiaozhou Bay (In Chinese). *Advances In Marine Science*, 2009, 27(3): 400—404
- [22] 薛巧英. 水环境质量评价方法的比较分析. *环境保护科学*, 2004, 30(4): 64—67. Xue Q Y. Comparison and analysis of the methods on water environment quality assessment (In Chinese). *Environmental Protection Science*, 2004, 30(4): 64—67

ANALYSIS OF SPATIAL DIFFERENTIATION OF BENEFITS OF PHYTOREMEDIATION OF HEAVY METAL CONTAMINATED SOIL USING COUPLED MODEL

Wang Wei¹ Zhang Jinting¹ Wang Wei² Zhou Jing² Liu Xiaolei³ Sun Hua^{1†}

(1 Department of Resource Environment and Urban Planning, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(3 Environment Protection Department of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Abstract To raise the comprehensive benefits (including ecological, economic and social benefits) of phytoremediation of heavy metal contaminated soils for smooth development of the work, a case study was conducted of Guixi, using a coupled model to analyze spatial differentiation of benefits of the phytoremediation and to screen out proper types of plants for use in phytoremediation. Results show that comprehensive benefits of the phytoremediation varied from region to region comprehensive benefits was the lowest in Shuiquan, being only 0.173 6, the highest, in Sumen, reaching as high as 0.835 4; and approximate in Jiuniugang and Pangyuan, both being lower than 0.4, and falling into the category of low benefit region. Among the types of vegetation used in phytoremediation, mixed plantation of arbor trees and shrubs was the best and mono-planting was the poorest in overall benefit. It is, therefore, recommended that the high-efficiency planting pattern in Sumen, i. e. mixed plantation of *Photinia fraseri* and *Koeleruteria paniculata*, be promoted.

Key words Soil, Heavy metal pollution, Phytoremediation, Coupled model, Guixi City

(责任编辑:汪叔生)