

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

目次

综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 宋长青 谭文峰 (957)
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 吴绍华 虞燕娜 朱江等 (970)

研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 李玲 张少凯 吴克宁等 (979)
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 刘莉红 胡雪峰 叶玮等 (991)
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 李硕 汪善勤 史舟 (1014)
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 王升 陈洪松 付智勇等 (1024)
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 曹永强 徐丹 曹阳 (1031)
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 赵丹 李毅 冯浩 (1058)
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 李婷 王火焰 陈小琴等 (1078)
生物质灰对红壤酸度的改良效果 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 李洋 宋洋 王芳等 (1096)
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 张默 贾明云 卞永荣等 (1106)
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 王慧 桂娟 刘满强等 (1124)
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)
土壤团聚体 N_2O 释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 周汉昌 张文钊 刘毅等 (1144)
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 王寅 冯国忠 张天山等 (1153)

问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 易晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 吴丽 杨红 兰书斌等 (1173)
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 李从娟 唐俊妍 高培等 (1180)
不同 $NaNO_3$ 浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 张政勤 罗文贱 陈勇等 (1188)

封面图片: 不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性 (由王赢利提供)

基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测*

王 升^{1, 2} 陈洪松^{1, 2†} 付智勇^{1, 2} 聂云鹏^{1, 2} 王克林^{1, 2}

(1 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125)

(2 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西环江 547100)

摘 要 土层厚度是坡地水文过程的一个重要控制因素。使用瑞典MALA公司生产的ProEx系统探地雷达, 分别采用100和500 MHz频率的天线对土层厚度进行探测, 然后通过开挖探槽实测土层厚度, 同时调查了影响探地雷达结果的因素——土石交界面处的基岩风化度, 并建立了不同自变量下的线性回归模型和GEP模型, 对探地雷达在喀斯特坡地土层厚度估测中的适用性进行了探讨。结果表明, 喀斯特坡面土层浅薄且含有较多碎石, 使用频率较高的天线可以提高探测精度; 以100、500 MHz频率天线的探测结果和基岩风化度这3个自变量的组合作为输入变量, 较仅使用一种频率天线的探测结果为输入变量的模拟精度高; 相同输入变量条件下, 受限于实际探测情况, 基于GEP算法建立的土层厚度模型较经典统计的线性回归模型预测精度的提升空间有限, 因此采用线性回归模型即可, 以100、500 MHz频率天线的探测值和基岩风化度为自变量的线性模型的决定系数和均方根差分别能达到0.660和15.0 cm。

关键词 土层厚度; 探地雷达; 遗传算法; 喀斯特

中图分类号 S152 **文献标识码** A

土层厚度(地表到基岩的深度)是由成土母质风化和土壤侵蚀的交互作用所决定, 它是坡地水文过程的关键控制因素, 也是评价土地质量的一个重要指标。早期研究结果表明土层厚度的空间分布格局对径流系数有显著影响^[1]。土层厚度和土体孔隙决定了坡面的储水能力^[2]。因此, 土层厚度在许多有物理基础的水文模型中是一个重要的参数, 如DHSVM^[3]、HSDMs^[4]等。目前, 水利学者主要使用基于土壤调查数据库获取土层厚度, 如美国农业部国家土壤数据库(包括SSURGO和STATSGO)^[5]、中国土壤信息系统(SISChina)^[6]。由于土壤调查的目的并不是为了得到高分辨率的土层厚度图, 故此得到的数据库在分布式水文模型中的应用受到限制。因此, 有必要研究获得高分辨率土层厚度的方法。

土层厚度的获取包括模型法和调查测量法。

模型法可分为随机统计模型和有物理基础的模型, 随机统计模型包括回归模型(多元回归或逐步回归等)、地统计模型和神经网络模型等。Moore等^[7]建立了基于地形因子和土层厚度的线性回归模型; Ziadat^[8]采用多元线性回归模型预测土层厚度, 并发现坡度、曲率和地形指数在计算土层厚度时有重要作用。Catani等^[9]建立了基于地形地貌的经验模型, 采用坡度、曲率及在坡面的相对位置来模拟土深。经验模型的主要局限性在于对模型参数的校正。有物理基础的模型则结合成土过程方程、泥沙运移及沉积方程来建立。Dietrich等^[10]假定土壤搬运速率与坡度成正比, 建立了基于DEM的数值模型来预测土深。随后Roering^[11]对Dietrich的方法通过引入三个线性和非线性传输方程进行了扩展。由于成土母质、气候和地形等因素的变异性, 目前并没有能够普遍采用的有物理基础的模型来获

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB452703)、国家自然科学基金项目(51379205, 41301300)资助

† 通讯作者: 陈洪松(1973—), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持与生态水文方面的研究工作。E-mail:

hbchs@isa.ac.cn

作者简介: 王 升(1987—), 男, 湖北十堰人, 博士研究生, 主要从事坡地水文方面研究工作。E-mail: hjdx@foxmail.com

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2015-05-07

得土层厚度。调查测量法主要是开挖实测，因而其测量结果很准确，然而这种方法费时费力、只能在小尺度上应用，而且对土壤结构具有破坏性，因此主要用来对其他测量方法和模型进行验证。

探地雷达（Ground Penetrating Radar, GPR）是一种快速无损而高效的浅层地球物理探测技术，具有快速便捷、操作简单、抗干扰、场地适应能力强和探测分辨率高等方面的优势。早在20世纪70年代末，人们就开始利用GPR测量土层厚度、浅层地下水埋深等^[12]。于秀秀等^[13]利用GPR探测新疆伊犁新垦区土层厚度，结果表明，该区土层厚度范围为40~140 cm，与传统方法调查获得的土层厚度数据吻合较好。

基因表达式编程（GEP）是一种通用的自适应式随机搜索遗传算法，能够在缺乏先验知识，只有实验数据的情况下挖掘出较为准确的公式，以其较强的普适性和较高的精确度在很多应用领域均取得了很好的实际效果，目前该算法在水文学及土壤学领域应用较少。

我国西南喀斯特地区岩溶发育强烈、生态环境脆弱，土层浅薄且不连续、碎石含量较高，目前存在少量对喀斯特地区土层厚度与分布的研究。周运超等^[14]对贵州花江1.2 km²小流域内石漠化过程土壤的空间分布进行了调查，结果显示喀斯特土壤分布极不均匀，土被极度破碎，土壤厚薄分布不均，厚土主要分布在潜在石漠化区域，石漠化过程中土壤厚度的变化趋势随着石漠化的进行土层变薄，土壤分布面积与土壤厚度之间没有关联。严冬春等^[15]调查了黔中王家寨喀斯特坡地的土壤厚度，发现土层厚度顺坡增大，厚度普遍小于8 cm，除坡脚为10.37 cm外，平均厚度仅为4.28 cm；土壤厚度变异系数介于100%~150%之间，变异较大。在土壤介质均匀的区域利用探地雷达技术来探测土壤厚度已获得成功，但在强烈空间异质性的喀斯特地区，能否利用探地雷达快速有效地探测出土壤分布和土壤厚度还未见报道。喀斯特地区土壤、岩石之间以及溶蚀洞、溶蚀裂缝带与围岩之间存在较大的电性、电磁性差异^[16]，具备GPR探测的物理前提。本文对探地雷达在喀斯特坡地土层厚度探测的适用性进行了探讨，并引入GEP算法以期提高模拟精度，旨在喀斯特地区建立及应用水文模型提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于桂西北中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站（24°43′58.9″~24°44′48.8″N，108°18′56.9″~108°19′58.4″E）内。属中亚热带季风气候和低山丘陵区，地势四周高、中间低，海拔最高为647 m，最低为272 m，最大相对高差375 m，地形破碎，坡度较陡，≥25°的坡面占62%。土壤为深色或棕色石灰土，洼地基岩裸露面积占15%，土壤厚度介于20~160 cm之间，坡地基岩裸露面积≥30%，土层较薄，一般为10~50 cm。

1.2 探地雷达机理及测量方法

探地雷达（GPR）通过发射高频电磁脉冲波，利用地下介质电性参数的差异，根据回波的振幅、波形和频率等运动学和动力学特征来分析和推断介质结构和物性特征^[17]。

本研究采用MALA公司生产的ProEx系统探地雷达主机以及100和500 MHz屏蔽天线，数据采集软件为GroundVision 2，GPR数据利用Reflexw软件进行解读。其中100 MHz的探测深度为10~20 m，500MHz的探测深度为7.5 m。测定前已经进行了传播速率的标定。测量方法为：利用雷达沿样线进行探测，每间隔0.1 m探测一次，进行数据的采集；将雷达采集到的数据先通过Ground Vision 数据处理软件进行处理，然后利用REFLEX 2D解释，得到土层深度；沿样线开挖断面实测土层深度，对雷达探测的二维土石分布图进行验证。由于基岩风化程度影响GPR探测结果，因此实测土深时同时记录所测量位置基岩的风化程度，分为五个等级，分别为：全风化、强风化、弱风化、微风化和未风化，为便于量化，分别用5、4、3、2、1表示^[18]。

样区如图1所示，坡面大小为30 m×20 m，坡度为19.1°，沿坡脚至坡顶方向布设6条样线，样线间隔为5 m。由于每条样线长度不一致（13~22 m），每间隔10 cm设置一个测点，共有样本数924个，将数据分为两部分：前五条测线的761个数据用于建立模型（1~761），最后一条测线的163个数据用于检验模型（762~924），建模样本和验证样本基本特征如表1所示。

表1 土层厚度的基本特征

Table 1 Basic features of soil thickness

	样本数 Number of sample	最大值 (cm) Max	最小值 (cm) Min	平均值 (cm) Mean	标准差 (cm) SD	变异系数 CV
建模样本 Training data	761	336.0	0.0	65.6	59.7	0.910
验证样本 Testing data	163	116.0	0.0	34.1	24.3	0.713



图1 探槽及样线示意图

Fig.1 Schematic description of trench and sampling line

1.3 基因表达式编程算法概述和土层深度模型的建立

基因表达式编程主要以发现公式和规律为应用目的，因此涉及的都是些基本常见函数（如下函数集所示），过程为：首先产生一个初始种群，种群包含代表不同解答方案的个体，每个个体按一定的遗传方式和概率进行进化，当达到进化结束条件（如设定最大进化代数或计算精度）后，则停止进化。基于基因表达式编程（GEP）算法^[19]的土层厚度模型的建立：

- (1) 选择输入因子，如表3所示；
- (2) 选择函数集： $\sqrt{\quad}$ ， x^2 ， x^3 ， $\ln(x)$ ， e^x ， x^y ， $+$ ， $-$ ， \times ， \div ， $x^{1/3}$ ；
- (3) 选用基于绝对误差的适应度函数；
- (4) 根据大量试验的结果^[20]，选择所需的遗传算子及相应概率，如表2；

表2 GEP模型中遗传算子的取值

Table 2 Values of the genetic operators in the GEP models

参数 Parameters	值 Value	参数 Parameters	值 Value
染色体个数 Number of chromosomes	30	单点重组 One point recombination rate	0.3
头部长度 Head size	8	两点重组 Two point recombination rate	0.3
基因个数 Number of genes	3	基因重组 Gene recombination rate	0.1
连接函数 Linking function	+	基因插串 Gene transposition rate	0.1
适应度函数 Fitness function	RMSE	IS插串 Insertion sequence transposition rate	0.1
变异 Mutation rate	0.044	RIS插串 Root insertion sequence transposition	0.1
倒串 Inversion rate	0.1		

(5) 选择遗传终止的标准：本研究当RMSE接近于0且基本稳定时即停止，接受产生的模型。

1.4 评价指标

本研究采用两个评价指标——决定系数 R^2 和均方根误差RMSE：

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(y'_i - \bar{y}') \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (y'_i - \bar{y}')^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, y_i 和 y'_i 分别为实测和模型计算的土层深度, \bar{y} 和 \bar{y}' 分别为 y_i 和 y'_i 的平均值。

2 结 果

2.1 基于线性回归方程建立的土层厚度模型

本文采用线性回归方程分别对100、500 MHz频率天线的土层厚度的GPR测定值和实测值进行拟合, 拟合方程均通过显著性检验, 且均在 $p < 0.01$ 水平上显著, 结果如表3所示。回归方程中, GPR_{100} 、 GPR_{500} 分别表示使用频率为100、500 MHz天线的GPR探测深度, 单位为cm, f 表示所测位置基岩的风化度, h 表示实测深度, 单位为cm。由表3中的模型1和模型2可见, 当仅以GPR探测结果这一单因素为自变量时, 由于本试验区的土层厚度为0~3.5 m, 较为浅薄, 而GPR的特点是所使用天线的频率越高, 探测深度越浅, 探测精度越高, 因此使用500MHz频率的天线效果更好, 训练阶段

和检验阶段500、100MHz天线的探测值与实测值的决定系数(R^2)分别为0.609、0.468和0.564、0.393, 均方根误差($RMSE$)分别为42.2 cm、45.8 cm和19.1 cm、21.9 cm。同时以100和500 MHz天线的探测深度为自变量, 与实测深度进行二元线性回归, 由于频率较低的天线(100 MHz)适用于较深土层, 而频率较高的天线(500 MHz)适用于较浅土层, 结果表明较单独使用两种频率的天线的预测结果精度要高, R^2 和 $RMSE$ 分别为0.625和12.2 cm, 分别较单独使用100、500 MHz频率天线的探测精度提高了37.1%、9.8%和80.0%、56.2%。电磁波在不同程度的风化基岩中的传播速率不同, 因此基岩的风化度也会影响探测精度, 当将风化度 f 引入回归方程后, 比较模型1、2、3和4、5、6可见, 训练阶段和检验阶段 R^2 分别提高了13.8%、4.2%、3.5%和19.8%、4.2%、5.6%, $RMSE$ 分别减小了11.9%、12.4%、3.6%和14.2%、6.8%、7.5%。总体来看, 当以“ $GPR_{100}+GPR_{500}+f$ ”为自变量(模型6)时, 模型的精度最高, 预测值和实测值的对比图如图2所示。

表3 训练和检验数据集在不同自变量下的线性回归模型模拟结果

Table 3 Statistical performances of the linear regression model using the training and testing data with different independent variable

模型代码 Model code	经典线性回归模型 Linear regression model	R^2		$RMSE$ (cm)	
		训练 Training	检验 Testing	训练 Training	检验 Testing
1	$h=0.765GPR_{100}+15.088$	0.468**	0.393**	45.7	22.0
2	$h=0.960GPR_{500}+19.767$	0.609**	0.564**	42.2	19.1
3	$h=0.340GPR_{100}+0.707 GPR_{500}+11.518$	0.666**	0.625**	34.4	16.2
4	$h=0.655GPR_{100}+18.239f-29.968$	0.543**	0.490**	40.3	18.8
5	$h=0.867GPR_{500}+11.439f-8.182$	0.636**	0.589**	37.0	17.8
6	$h=0.330GPR_{100}+0.635GPR_{500}+10.682f-16.161$	0.690**	0.660**	33.2	15.0

注: **表示 $p < 0.01$ Note: ** represents $p < 0.01$

2.2 基于GEP算法和探地雷达估测的土层厚度模型

GEP算法在函数挖掘和最优化问题方面具有较大优势, 本研究将 GPR_{100} 、 GPR_{500} 和 f 作为自变量分别全部引入到基于GEP的土层厚度模型中, 以期找出能够模拟土层厚度的最优组合, 并与经典统计的线性回归拟合方法进行比较, 检验GEP算法在模拟土层厚度方面的应用效果。所有GEP模型均在 $p < 0.01$ 水平上显著, 结果如表4所示。由决定系数

R^2 和均方根误差($RMSE$)可以看出, 当仅以GPR探测结果这一单因素为输入时, 依然是500 MHz频率的天线效果最好, 训练阶段100和500 MHz天线的探测值与实测值的决定系数(R^2)和均方根误差($RMSE$)分别为0.469、0.608和45.1 mm、37.4 mm。同时使用100和500 MHz频率天线的探测深度作为GEP模型的输入, 结果表明较单独使用两种频率的天线的模拟结果精度要高, 从 $RMSE$ 来看, 检

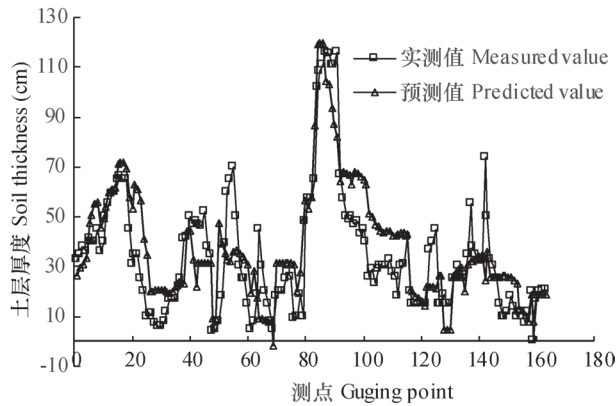


图2 线性模型6实测值和预测值的对比

Fig. 2 Comparison between measured and predicted values of Linear Model 6

验阶段为17.4 cm，分别较单独使用100、500 MHz频率天线的探测精度提高了15.9%、7.9%。分别在

前三个模型中引入风化度 f ，可见模型精度均有所提高，检验阶段 R^2 分别为0.460、0.585和0.588，较未引入时分别提高了14.3%、3.6%和6.3%； $RMSE$ 分别为18.6 cm、17.7 cm和16.3 cm，较未引入时分别提高了8.0%、5.9%和6.7%。综合来看，同时以 GPR_{100} 、 GPR_{500} 和 f 作为输入变量所建立的模型精度最高。

GEP模型与线性回归模型比较可以发现（表3~表4），从 R^2 角度来看，训练阶段提升较为明显，然而在检验阶段 R^2 较线性回归模型低；从 $RMSE$ 角度来看，除输入为“ $GPR_{100}+GPR_{500}$ ”和“ $GPR_{100}+GPR_{500}+f$ ”外，其他输入条件下所建立的GEP模型，无论在训练阶段还是在检验阶段，其 $RMSE$ 值均小于经典统计的线性回归模型。然而总体而言，基于GEP算法建立的土层厚度模型较经典统计的线性回归模型预测精度的提升空间有限。

表4 不同输入变量下训练和检验数据集的GEP模型结果

Table 4 Statistical performances of the GEP model using the training and testing data with different input variables

GEP模型 GEP Model	R^2		$RMSE$ (cm)	
	训练 Training	检验 Testing	训练 Training	检验 Testing
$h = GPR_{100} + \ln(GPR_{100}) - 0.545 \times (GPR_{100})^{2/3}$	0.469**	0.394**	45.1	20.2
$h = GPR_{500} + 19.619$	0.608**	0.564**	37.4	18.8
$h = 1.229 * GPR_{500} + 4 * \ln^2[\ln(GPR_{100}) - 2.874] + 47.149$	0.758**	0.551**	29.4	17.4
$h = 0.5 * GPR_{100} * \ln(1.245 * f) + (f + 1.580) + \frac{12.335 * (GPR_{100})^2}{5887.2 - (GPR_{100})^3}$	0.602**	0.460**	37.6	18.6
$h = GPR_{500} - \sqrt{GPR_{500}} + 7.842 * f + \exp\left(\frac{f}{GPR_{500} - 16.565}\right)^{2/3}$	0.675**	0.585**	34.0	17.7
$h = 0.879 * GPR_{500} + \exp\left(\sqrt[3]{GPR_{100} - GPR_{500} - 92.041}\right) + [\exp(1.141 * f)]^2$	0.738**	0.588**	30.5	16.3

注：**表示 $p < 0.01$ 。Note: ** represents $p < 0.01$

3 结 论

喀斯特坡地土层浅薄，用探地雷达估测土层厚度时，应使用频率较高的天线，从而提高探测精度。不同频率的天线对风化基岩的敏感性不同，同时使用不同频率的天线组合，无论是GEP模型还是传统回归模型，均能提高土层厚度的预测精度；将基岩风化度引入模型，也能提高预测精度。相同输入条件下，受限于实际探测情况，基于GEP算法建

立的土层厚度模型较经典统计的线性回归模型预测精度的提升空间有限，因此采用线性回归模型即可，同时以100、500 MHz频率天线的探测值和基岩风化度为自变量的线性模型的决定系数和均方根误差分别能达到0.660和15.0 cm。

参 考 文 献

[1] Hoover M D, Hursh C R. Influence of topography and soil-depth on runoff from forest land. Transactions-

- American Geophysical Union, 1943, 24 (6): 693—698
- [2] Meerveld T V H J, McDonnell J J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. *Water Resources Research*, 2006, 42 (2): 1—11
- [3] Wigmosta M S, Vail L W, Lettenmaier D P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, 1994, 30 (6): 1665—1679
- [4] Fan Y, Bras R L. Analytical solutions to hillslope subsurface storm flow and saturation overland flow. *Water Resources Research*, 1998, 34 (4): 921—927
- [5] Smith M B, Seo D J, Koren V I, et al. The distributed model intercomparison project (DMIP): Motivation and experiment design. *Journal of Hydrology*, 2004, 298 (1/4): 4—26
- [6] 史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统 (SISChina) 及其应用基础研究. *土壤*, 2007, 39 (3): 329—333. Shi X Z, Yu D S, Gao P, et al. Soil information system of China (SISChina) and its application (In Chinese). *Soils*, 2007, 39 (3): 329—333
- [7] Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57 (2): 443—452
- [8] Ziadat F M. Prediction of soil depth from digital terrain data by integrating statistical and visual approaches. *Pedosphere*, 2010, 20 (3): 361—367
- [9] Catani F, Segoni S, Falorni G. An empirical geomorphology-based approach to the spatial prediction of soil thickness at catchment scale. *Water Resources Research*, 2010, 46 (5): W05508
- [10] Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Processes*, 1995, 9 (3/4): 383—400
- [11] Roering J J. How well can hillslope evolution models “explain” topography? Simulating soil transport and production with high-resolution topographic data. *Geological Society of America Bulletin*, 2008, 120 (9/10): 1248—1262
- [12] Allred B, Jeffrey J D, Mohammad R E. *Handbook of agricultural geophysics*: CRC Press, 2008
- [13] 于秀秀, 马兴旺, 迪力夏提, 等. 探地雷达在土层厚度调查中的试验研究. *土壤学报*, 2011, 48 (4): 874—878. Yu X X, Ma X W, Di L X T, et al. Using ground penetrating radar in determination of soil depth (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (4): 874—878
- [14] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布. *地球与环境*, 2010, 38 (1): 1—7. Zhou Y C, Wang S J, Lu H M. Spatial distribution of soils during the process of karst rocky desertification (In Chinese). *Earth and Environment*, 2010, 38 (1): 1—7
- [15] 严冬春, 文安邦, 鲍玉海, 等. 黔中高原岩溶丘陵坡地土壤中的 ^{137}Cs 分布. *地球与环境*, 2008, 36 (4): 342—347. Yan D C, Wen A B, Bao Y H, et al. The distribution of ^{137}Cs in hilly upland soil on the Qianzhong karst plateau (In Chinese). *Earth and Environment*, 2008, 36 (4): 342—347
- [16] 余中明, 丁强. 地质雷达探测工程的几个问题. *地质找矿论丛*, 2006, 21 (Z1): 182—184. Yu Z M, Ding Q. Comments for ground prospecting radar (GPR) engineering application (In Chinese). *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 2006, 21 (Z1): 182—184
- [17] 朱德兵. 工程地球物理方法技术研究现状综述. *地球物理学进展*, 2002, 17 (1): 163—170. Zhu D B. Summarization of engineering geophysics in major of geophysical prospecting and information technique (In Chinese). *Progress in Geophysics*, 2002, 17 (1): 163—170
- [18] 赵善国, 李景山, 田春竹, 等. 基岩风化带的划分及风化效应. *黑龙江水专学报*, 2002, 29 (2): 34—35. Zhao S G, Li J S, Tian C Z, et al. Dividing and weathering effect of foundation rock weathering belt (In Chinese). *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2002, 29 (2): 34—35
- [19] 元昌安. 基因表达式编程算法原理与应用. 北京: 科学出版社, 2010. Yuan C A. The principle and application of gene expression programming algorithm (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010
- [20] Traore S, Guven A. New algebraic formulations of evapotranspiration extracted from gene-expression programming in the tropical seasonally dry regions of West Africa. *Irrigation Science*, 2013, 31 (1): 1—10

ESTIMATION OF THICKNESS OF SOIL LAYER ON TYPICAL KARST HILLSLOPES USING A GROUND PENETRATING RADAR

Wang Sheng^{1, 2} Chen Hongsong^{1, 2†} Fu Zhiyong^{1, 2} Nie Yunpeng^{1, 2} Wang Kelin^{1, 2}

(1 *Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China*)

(2 *Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China*)

Abstract Thickness of the soil layer on a hillslope is an important factor governing hydrologic processes on the hillslope. A field survey was carried out using a ProEx ground penetrating radar (GPR), product of MALA in Sweden, to detect thickness of the soil layer on a hillslope in a karst region. The detection used two antenna frequencies, 100 and 500 MHz, separately, Then exploratory trenchess were excavated on the slope to determine thickness of the soil layer physically and at same time to explore for factors affecting accuracy of the radar detection, like weathering degree of the bedrock at the interface between the soil layer and the bedrock. On such as basis, a linear regression model and a GEP model was established with different independent variables to verify applicability of the ground penetrating radar to soil thickness detection on karst hillslopes. Results show that as in the karst region, the soil layers on hillslopes are generally thin and contain a lot of debris, the use of a higher frequency antenna may improve detection precision; the use of the combination of the results of the radar detections with two different frequencies and weathering degree of the bedrock as input variable is higher in simulation accuracy than the use of the results of the radar detection with a frequency as input variable. When input variables are the same, the GEP model is very limitedly higher than the linear regression model in prediction accuracy because of limitations in actual detection. So, the latter is recommanded. The linear regression model combining results of the detection using 100 and 500 MHz antennas and weathering degree of the bedrock as independent variable may reach 0.660 and 15.0 cm in coefficient of determination and root mean square error, respectively.

Key words Soil thickness; Ground penetrating radar; Genetic algorithm; Karst

(责任编辑: 檀满枝)

CONTENTS

Reviews and Comments

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis Song Changqing, Tan Wenfeng (968)
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. (977)

Research Articles

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. (989)
 Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. (1000)
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. (1013)
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou (1022)
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. (1030)
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang (1042)
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. (1056)
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao (1067)
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti (1076)
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. (1086)
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. (1095)
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. (1104)
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. (1114)
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. (1122)
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. (1133)
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. (1142)
 Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. (1151)
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. (1164)

Communications and Comments

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. (1172)

Research Notes

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. (1179)
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. (1186)
 Distribution of Cu (II) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO₃ and its affecting factors Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. (1194)

Cover Picture: Toxicity of deca-brominated diphenyl ether (BDE-209) to *Caenorhabditis elegans* (by Wang Yingli)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址:南京市北京东路71号 邮政编码:210008
电话:025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
电话:010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京399信箱 邮政编码:100044

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号:2-560

国外发行代号:BM45

定价:60.00元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156