农业资源与环境学报

2019年5月·第36卷·第3期:279-286

马 冉,刘洪斌,武 伟.流域尺度下地形属性对土壤质地类型变异的影响——以重庆市彭水县一小流域为例[J].农业资源与环境学报,2019,36 (3):279-286.

MA Ran, LIU Hong-bin, WU Wei. Effect of topographic attributes on soil texture class variations at a watershed scale: A case study of a basin in Pengshui County of Chongqing, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 279–286.

流域尺度下地形属性对土壤质地类型变异的影响 ——以重庆市彭水县一小流域为例

马 冉^{1,3}, 刘洪斌^{1,3*}, 武 伟^{2,3}

(1.西南大学资源环境学院,重庆400716;2.西南大学计算机与信息科学学院,重庆400716;3.重庆市数字农业重点实验室,重庆400716)

摘 要:为探究流域尺度下地形属性对土壤质地类型变异的影响,以西南地区重庆市彭水县的一个流域为研究区,基于成土母质和地形因子,运用分类回归树(Classification and regression tree, CART)模型,对研究区1165个样点数据进行分析。结果表明:成土 母质和地形因子均对土壤质地类型有重要影响,相对重要性较高的因子排序:成土母质(PAR)>风效应(WindEff)>地形湿度指数 (SAGATWI);不同母质、不同质地之间地形因子存在显著差异,风效应(WindEff)和漫射辐射(DiffuseIns)分别是奥陶系和志留系 母质条件下影响土壤质地分类的相对重要性最高的地形因子;流域尺度CART模型解释率为86.3%,说明CART模型对土壤质地 分类精度高。研究表明,基于成土母质和地形因子构建的模型解释效果好,影响显著,可为该地区土壤利用区划和管理提供科学 依据。

Effect of topographic attributes on soil texture class variations at a watershed scale: A case study of a basin in Pengshui County of Chongqing, China

MA Ran^{1,3}, LIU Hong-bin^{1,3*}, WU Wei^{2,3}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400716, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Digital Agriculture, Chongqing 400716, China)

Abstract: A total of 1165 samples were collected from the topsoil at a depth of 20 cm to explore the effect of soil material and topography on the variation of soil texture classification over a basin of Pengshui in Chongqing, southwest China. Classification and regression tree (CART) method was applied to class the soil texture based on parent materials and terrain indicators (elevation, slope, slope height, slope length, flow accumulation, SAGA topographical wetness index, flow path length, vector ruggedness, measure multi-resolution index of valley bottom flatness, multi-resolution index of the ridge top flatness, diffuse insolation, wind effect, wind exposition index). The major influencing factors on soil texture class variability were investigated by the CART model. The results showed that: Parent material and topographic factors both had important effects on soil texture class variations, the factors with higher relative importance were parent material (PAR)>wind effect(WindEff)>SAGA topographic wetness index (SAGATWI); The relative importance of terrain attributes to soil texture class variations varied with parent materials, wind effect(WindEff) and diffuse insolation(DiffuseIns) were the most essential variables for the Ordovician and the Silurian. The CART model produced a good accuracy with 86.3%(P<0.05) for the watershed. The results could provide a scientific basis for the rational planning and management of soil utilization in this area.

Keywords: watershed scale; CART model; parent material; topographic attributes; soil texture class; variation

收稿日期:2018-07-13 录用日期:2018-10-08

作者简介:马 冉(1996—),女,贵州威宁人,硕士研究生,主要从事土地信息系统研究。E-mail:mr5159@126.com

^{*}通信作者:刘洪斌 E-mail: lhbin@swu.edu.cn

基金项目:国家科技支撑计划项目(2008BADA4B10);中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016D041)

Project supported: The National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2008BA-DA4B10); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(XDJK2016D041)

质地作为一项重要的土壤物理属性,几乎在所有 土壤活动中都起着重要的作用,与土壤的通气、保水、 保肥状况及耕作难易都有着密切的联系。它影响了 土壤质量、生产力及其管理,对制定土壤利用规划、进 行土壤改良等具有重要的意义^[1-2]。近年来,随自然 环境变化和人为因素的影响,我国的耕地质量和土壤 肥力也发生了重大变化。在长期的地球化学过程中, 土壤质地受到了母质、地形、水文、气候等自然因素和 人类活动的影响,在空间上呈现出一定结构性和规律 性分布^[3-5]。

为探究地形属性与土壤质地空间变异的关系,很 多学者也做了相关研究,研究表明地形与土壤质地的 变异存在密切联系[4-6]。张世文等[5]采用普通克里格 插值法对县域尺度的土壤质地空间变异进行了研究, 发现研究区土壤质地空间格局主要受地形、母质等因 素的影响。Ließ等¹⁷在对南美洲厄瓜多尔土壤质地空 间变异的研究中,基于地形因子分别构建了回归树 (RT)模型和随机森林(RF)模型,研究了土壤质地空 间变异的影响因子,结果表明海拔高度、坡度、距河网 垂直距离等对土壤质地空间变异产生明显的影响。 Gessler 等^[8]以坡度、汇流面积等数字地形属性为基 础,对加利福尼亚州的山坡土壤构建土壤景观模型, 结果能解释52%~88%的土壤属性变异。Gobin等¹⁹也 采用以数字高程模型(DEM)为基础获取的地形属 性,预测了尼日利亚东南部表层土壤质地的空间分 布,发现地形属性能在一定程度上影响土壤质地的空 间分布。Ceddia 等^[10]以巴西杰尼罗州的一个牧场为 例,研究了包括土壤质地在内的土壤物理属性的空间 变异性,结果表明海拔高度与土壤质地的变异密切 相关,海拔越高,黏土含量越高。另一方面,国内外的 相关研究大多针对微观的土壤颗粒含量和粒径,从山 坡尺度来分析其与地形属性的关系。相对来说,国内 直接分析地形属性对土壤质地类型影响的研究相对 较少。

重庆市位于我国内陆西南部、长江上游地区,属 于盆中丘陵和山地的交接地带,同时也是川东平行岭 谷的一部分,地形比较复杂,形成了渝西北非喀斯特 地貌区、渝中槽谷型、渝东南峡谷型和渝东北层状构 造喀斯特山地区。研究区为喀斯特石灰岩地区,独 特、复杂的地形使之形成了坡地和梯地并存、相对碎 化的耕作方式,流域尺度下的研究更能准确反映地形 属性对土壤质地变异的影响。在农业实践中对每个 区域都进行具体的土壤粒径测量,会耗费大量的时 间、人力和财力。所以本研究以手测法^[11-12]划分的土 壤质地类型为基础,采用分类回归树(Classification and regression tree, CART)模型从流域尺度来探讨地 形属性对土壤质地类型变异的具体影响,为研究区农 业区划、农业技术推广、土壤改良与管理提供技术支 撑和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市东南部彭水县的一个小流域, 地处北纬28°57′~29°51′、东经107°48′~108°36′,面 积36.86 km²(图1)。该地区气候温和、雨量充沛,多 年平均气温17.50℃,常年平均降雨量1104.20 mm, 相对高差900 m(473~1373 m),相对坡度差52°(0~ 52°),地形变化具有一定的渐变性,呈现西南-东北走 向的条带状地质条件,地质年代为志留纪和奥陶系。 土壤有机质平均含量为22.9 g·kg⁻¹,pH为6.1,土壤呈 酸性,质地包含黏质、壤质和砂质三种类型。复杂的 地形地貌引起土壤和其他一些地形、生态因子的时空 变异。

1.2 样品采集

采用GPS定位技术,以数字高程模型为基础,于 2012年秋季对研究区进行定点采样,遵循均匀、代表 性原则进行"S"型取样。在耕作层土壤深度0~20 cm 取样,记录成土母质和土壤质地类型。共采集土壤 样点1165个,均采自耕地土壤,分布如图2所示。样 点的土壤质地类型采用手测法[11-12]分类,共分为黏 质、壤质和砂质三类,其样点数量分别是34、891、 240个。

1.3 数据分析

1.3.1 地形因子选取

地形对土壤属性空间变异的影响不容忽视。有研究表明土壤的很多属性与地形因子之间存在紧密的联系,且这些地形因子能够通过DEM提取出来^[13-15]。本研究以重庆市DEM为基础,通过SAGAGIS软件共提取56种地形因子。其中DEM数据为30m的ASTERGDEM数据,来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gs-cloud.cn)。在结合研究区地形和相关地学知识,以及相关研究^[5-10,16]的基础上进行了初步筛选,考虑到若将所有变量都参与到模型计算可能会因这些独立变量之间存在的多重共线性而导致模型精度有误,造成耗时计算^[17-19],所以用方差膨胀因子(Variance infla-



Figure 1 Digital elevation map(DEM) of the study region



图2 初九匹件黑力印图

Figure 2 Map of sample locations of the study region

tion factor, VIF)来检验这些独立变量之间的多重共线性^[14,19]。

$$\operatorname{VIF}_{i} = \frac{1}{1 - R_{i}^{2}} \tag{1}$$

式中:*R*²为第*i*个独立变量*X*_i对其余独立变量线性回 归模型的决定系数。

一般, VIF>10, 模型有很强的共线性, VIF < 10 可

被接受参与到模型中进行计算[18]。本文通过初步筛 选和共线性检验,最终选取13个地形因子(表1),参 与到模型中以评估地形因子对流域土壤质地类型变 异的影响。选取的地形因子包括海拔(Ele)、坡度 (Slp)、坡高(SlpH)、坡长(SlpLen)、汇流面积 (FlowAcc)、地形湿度指数(SAGATWI)、径流长度 (FlowPL)、矢量粗糙度测量(VRM)、谷底平坦综合指 数(MRVBF)、脊顶平坦综合指数(MRRTF)、漫射辐射 (DiffuseIns)、风效应(WindEff)、风蚀指数(Wind-Exp)。其中漫射辐射指太阳辐射穿过地球大气层 时,受水汽、尘埃等散射后到达地表的那部分辐射,是 到达地表太阳总辐射的重要组成部分,在SAGA GIS 的光分析模块(Terrain analysis/Lighting visibility)。 风效应和风蚀指数^[20]均在 SAGA GIS 的地貌形态测定 模块(Terrain analysis/Morphometry)中提取,其中风效 应包括了迎风和背风,与风向和风速有关,而风蚀指 数直接依赖于DEM的海拔提取,二者皆反映气候与 天气中的风力作用。

1.3.2 分类回归树模型

分类回归树是 Breiman于 1984年提出的一种数 据分析的非参数统计方法,其计算原理是:对一个由 测试变量和目标变量构成的已知类别的训练样本数, 根据一定的规则进行二分,形成二叉树结构,并对每

表1 研究区地形因子选取

Table 1 Terrain attributes used in this study

名称 Names	描述Describing	方差膨胀 因子 VIF
Ele	海拔(Elevation)	5.396
Slp	坡度(Slope)	3.646
SlpH	坡高(Slope Height)	1.818
SlpLen	坡长(Slope Length)	1.159
FlowAcc	汇流面积(Flow accumulation)	1.101
SAGATWI	地形湿度指数(SAGA topographical wetness index)	2.193
FlowPL	径流长度(Flow path length)	1.311
VRM	矢量粗糙度测量(Vector ruggedness measure)	1.877
MRVBF	谷底平坦综合指数(Multi-resolution index of valley bottom flatness)	1.502
MRRTF	脊顶平坦综合指数(Multi-resolution index of the ridge top flatness)	1.109
DiffuseIns	漫射辐射(Diffuse insolation)	3.901
WindEff	风效应(Wind effect)	1.882
WindExp	风蚀指数(Wind exposition index)	5.272

一个节点进行循环二分,直至不可再分,成为叶节点。 该算法的优点在于:它本身是一种非参数统计方法,不 需要有一定的统计假设,并且数据处理结果中所包含 的规则清晰易懂。该模型采用基尼系数(Gini Index) 作为选择最佳测试变量的准则,基尼系数定义为:

Gini Index=
$$1 - \sum_{i}^{J} P^{2}(i/m)$$
 (2)

$$P(i/m) = \frac{n_i(m)}{n(m)}, \sum_{i=1}^{J} P(i/m) = 1$$
(3)

式中:P(i/m)指从训练样本中随机抽取一个样本,当 某一测试变量的值为m时属于第i类的概率;n_i(m)表 示训练样本中测试变量值为m时属于第i类的样本个 数;n(m)为训练样本中测试变量值为m的总样本数; J为类别个数。

CART算法在具有其他决策树算法的一些功能 的同时,能够完成其他算法所不能做到的非数值型数 据处理,是决策树模型的典型代表^[21]。CART算法的 输出结果能反映各独立变量对于该模型的相对重要 性排序。因此,它也常被用来探索影响因子对某一目 标变量的相对重要性差异,如气候、土壤参数和人工 管理等对农作物质量及分布的影响^[22-25]。在本研究 中,CART模型被用来对研究区土壤质地类型进行分 类并分析其影响因子相对重要性。经多次试验,确定 相对较为适当的参数,即父节点最小个案和子节点最 小个案分别为4和2,最大树深度为5,采用交叉验证 进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤质地类型统计

对研究区样点土壤质地进行统计,结果如表2所示。从表2可以看出,在总的1165个样点中,黏质240个(约21%),壤质34个(约3%),砂质891个(约76%),有746个(约64%)样点成土母质为奥陶系,419个(约36%)样点成土母质为志留系。其中,志留系成土母质中样点的土壤质地几乎全为砂质,黏质只占了非常少的一部分,且该研究区中壤质全部分布于奥陶系母质条件下。

表2 土壤质地类型统计

Table 2 Statistics for soil texture class

土壤质地	成土母质 Par	合计	
Soil texture	奧陶系Ordovician	志留系Silurian	Total
壤质Loam	34	0	34
砂质Sand	474	417	891
黏质 Clay	238	5	240
合计Total	746	419	1165

2.2 不同母质和不同质地下的地形因子差异分析

为探究不同质地、不同母质条件下,各地形因子 是否存在差异,对选取的地形因子在两种成土母质和 三种质地间分别做了t检验和单因素方差分析,显著 性结果见表3。除海拔、坡高和风蚀指数外,其余地 形因子在两种成土母质之间均有显著差异(P<0.05), 且志留系成土母质对应更高的坡度、坡长以及风效 应,而奧陶系母质则具有更高的汇流面积、地形湿度 指数、径流长度、矢量粗糙度测量、谷底平坦综合指 数、脊顶平坦综合指数和漫射辐射。这表明奥陶系成 土母质条件下,与水分相关的一些复杂地形指数更占 主导作用,地形因子和土壤水分平衡共同影响了土壤 的空间分异,从而导致不同母质条件下发育的土壤在 某些理化性质上有所不同。

除坡度、坡长、汇流面积、谷底平坦综合指数和脊 顶平坦综合指数外,其余地形因子在三种质地间也存 在显著差异(P<0.05)。与黏质和砂质相比,壤质对应 更高的海拔、坡度、风效应和风蚀指数,而黏质与砂质 具有更高的地形湿度指数、漫射辐射。相较于砂质来 说,黏质又具有更高的径流长度、矢量粗糙度测量,而 砂质则比黏质对应更高的风效应。这表明黏土通常 更倾向分布于土壤水分含量相对较多、地势较低的 地区,而壤土和砂土更倾向于分布在地形相对复杂一

地形因子	成土母质Parent material		土壤质地类型 Soil texture class		
Terrain parameters	奥陶系Ordovician	志留系Silurian	黏质 Clay	壤质Loam	砂质Sand
海拔Ele	745.73±125.94a	741.20±133.47a	$729.85 \pm 126.87 \mathrm{b}$	843.65±161.03a	744.14±162.22b
坡度 Slp	$15.96 \pm 8.33 \mathrm{b}$	19.95±8.45a	17.55±8.77a	18.06±8.30a	17.33±8.56a
拔高 SlpH	43.70±43.77a	41.02±36.33a	52.48±60.47a	43.51±28.60ab	40.08 ± 34.36 b
坡长 SlpLen	$168.28 \pm 174.24 \mathrm{b}$	201.29±249.73a	175.29±184.26a	114.42±122.55a	184.96±214.97a
汇流面积FlowAcc	284 075.41± 195 794.18a	92 778.32± 20 062.42b	187 228.65± 169 229.00a	17 656.64± 12 351.13a	230 369.44± 152 858.98a
地形湿度指数SAGATWI	4.62±1.41a	4.31±1.32b	4.50±1.35a	$3.95 \pm 0.73 \mathrm{b}$	4.53±1.41a
径流长度 FlowPL	878.94±507.29a	$769.05 \pm 156.60 \mathrm{b}$	970.65±546.24a	$727.05 \pm 639.62 \mathrm{b}$	$808.14{\pm}463.84{\rm ab}$
矢量粗糙度测量VRM	0.03±0.03a	$0.03 \pm 0.04 \mathrm{b}$	0.04±0.04a	$0.02 \pm 0.02 \mathrm{b}$	$0.03 \pm 0.03 \mathrm{b}$
谷底平坦综合指数MRVBF	0.10±0.26a	$0.06 \pm 0.21 \mathrm{b}$	0.09±0.26a	0.03±0.12a	0.08±0.24a
脊顶平坦综合指数 MRRTF	0.05±0.18a	$0.01 \pm 0.09 \mathrm{b}$	0.03±0.15a	0.06±0.18a	0.04±0.16a
漫射辐射 DiffuseIns	1.08±0.03a	$1.07 \pm 0.03 \mathrm{b}$	1.08±0.03a	$1.06 \pm 0.03 \mathrm{b}$	1.08±0.03a
风效应 WindEff	$0.96 \pm 0.13 \mathrm{b}$	1.04±0.15a	$0.91 \pm 0.12 \mathrm{b}$	1.03±0.15a	1.01±0.14a
风蚀指数WindExp	0.96±0.09a	0.95±0.09a	$0.97 \pm 0.09 \mathrm{ab}$	0.99±0.09a	$0.95 \pm 0.08 \mathrm{b}$

表 3 不同母质和不同质地下地形因子均值比较 Table 3 Mean differences in terrain parameters for different parent materials and soil texture class

注:同行成土母质或质地类型下不同字母表示存在显著性差异(P<0.05)。

Note: Different letters in the same line indicate significant difference for different parent materials or soil texure class (P<0.05).

些的位置;砂质质地相对较轻,受风蚀作用的影响大 于其他较为黏重的质地。

2.3 土壤质地类型变异影响因子相对重要性分析

为进一步分析研究区土壤质地类型与各影响因 子之间的关系,将土壤质地类型作为因变量,成土母 质类别和13个地形因子作为自变量,设定CART树的 父节点和子节点数分别为4和2,并采用交叉验证,在 SPSS 20.0软件上对上述因变量和自变量构成的样本 进行学习,得到了各独立变量的相对重要性。图3所 示为流域尺度下各独立变量对土壤质地分类影响的 相对重要性,成土母质(PAR)、风效应、地形湿度指 数、海拔这四个独立变量的相对重要性较高,均达到 了70%以上,可见不同的成土母质和地形因子对土 壤质地类型变异都有重要的影响,且成土母质的影响 最重要。而与地形平整度相关的变量(谷底平坦综合 指数、脊顶平坦综合指数、矢量粗糙度测量)、与坡度 相关的变量(坡度、坡高)、与风热相关的变量(风蚀指 数、漫射辐射、径流长度)这些独立变量的相对重要性 则介于37%~68%之间,相对处于中等水平。汇流面 积和坡长的贡献率则相对较低,均低于20%。

由图3可知,流域尺度下成土母质对土壤质地类 型变异有最为重要的影响,因此采用同上的CART模 型进一步对不同成土母质条件下的土壤质地类别和 各地形因子构成的样本进行了学习,结果见图4和图 5。从相对重要性排序来看,风效应和漫射辐射分别



图3 流域尺度各变量对土壤质地类型变异影响的相对重要性

Figure 3 Relative importance of the variables of the watershed scale on the variation of soil texture type

是奧陶系成土母质和志留系成土母质下影响土壤质 地分类最重要的地形因子。在奧陶系成土母质下,除 风效应的影响最为显著外,海拔、漫射辐射和矢量粗 糙度测量对土壤质地分类也有一定的影响,相对重要 性均大于60%。对于志留系成土母质下的土壤质地 分类,坡长有一定的影响,相对重要性为46.8%,而谷 底平坦综合指数和海拔的相对重要性则不到3%,影 响非常小,其余地形因子对其没有影响。

2.4 模型总体精度和分类树结果

将土壤质地类型作为因变量,成土母质类别和 13个地形因子作为自变量,设定CART树的父节点和 子节点数分别为4、2,并采用交叉验证来测试精度。

-283 -

在 SPSS 20.0 软件上对上述因变量和自变量构成的样本进行学习,得到的流域尺度、奥陶系成土母质条件下和志留系成土母质条件下的 CART 模型解释率分别为 86.3%、82.3% 和 100%,流域尺度总体 CART 树结构如图 6 所示,成土母质是分类树的根节点,随后的树节点分别是风效应和漫射辐射等。这也与前面的描述性统计和相对重要性分析结果相一致。模型展示了不同独立变量对土壤质地类型的分类规则。

3 讨论

在本研究中,成土母质对土壤质地类型变异的影响最重要。土壤质地依据土壤颗粒组成进行划分,它的分类和特征主要继承了成土母质的类型和特点^[1]。成土母质在一定程度上对土壤理化性质产生了不可忽视的影响,它与土壤质地也密切相关^[5], Campos

等^[26]发现土壤质地随母质和地形的变化而变化,不同 母质间土壤质地存在显著差异。韩光中等^[27]在南方 丘陵区母质与水耕人为土理化性质演变关系的研究 中发现,成土母质是决定黏粒和土壤有机碳演变的主 要影响因素。研究区为石灰岩地区,母质主要为奥陶 系灰岩、页岩泥岩和志留系砂岩、粉砂岩。奥陶纪时 期,海侵范围不断扩大并向西侵进,自西向东陆源碎 屑不断减少,从而导致其以碳酸盐沉积为主导^[28-29]。 志留系下统由黑色页岩和硅质页岩组成,中统是一套 滨海相碎屑岩堆积^[29]。页岩、泥岩均属于沉积岩中的 泥质岩类,风化过程中形成的黏土矿物是其物质来 源,经过长期的综合作用,更易形成较为细腻、聚集的 质地。而砂岩、粉砂岩则属于沉积岩中的碎屑岩类, 通常是由母岩机械破碎的碎屑物质经搬运、沉积、胶 结而成,在长期环境作用下,更易形成易风化的砂质。



http://www.aed.org.cn

马 冉,等:流域尺度下地形属性对土壤质地类型变异的影响——以重庆市彭水县一小流域为例

此外,成土母质对土壤质地类型的影响还表现在 母质的化学组成方面,它在很大程度上控制了黏土潜 在含量、坚固矿物质(如石英等)和黏粒活性。硅质含 量越高的母岩下,黏土潜在含量越少,而硅质含量较 低、铁镁质矿物含量越高的母岩下,其黏土潜在含量 也就越高,如泥质岩的页岩就主要由黏粒构成^[26]。因 此,奥陶系页岩泥岩上发育的土壤,质地相对较为黏 重,而志留系砂岩、粉砂岩,尤其是硅质类的风化物, 属于石英含量较高的酸性岩母质,发育在该母质上的 土壤一般质地较粗,即砂粒含量较多、粉粒和黏粒的 含量较少。

地形和土壤质地类型的变化密切相关。在本研 究中,风效应、地形湿度指数、海拔与土壤质地类型变 异密切相关,相对重要性均达到70%以上,这也与Li 等^[6]和 Moore 等^[30]的研究结果一致,他们研究得到相 较于其他地形因子,地形湿度指数与土壤属性变异具 有更为密切的联系,地形湿度指数反映的是土壤水分 状况,其值越高表示土壤水分更高。研究区黏质相较 于壤质来说,具有较高的地形湿度指数均值,而相较 于砂质来说,则出现了相反的情况。这样的结果也出 现在之前的研究中,如Stepień等四在对波兰的A、B (砂质壤土)、C、D(壤质砂土)四个区域土壤质地影响 因素的研究中发现,B和C两个区域土壤质地与地形 因子的相关性是相反的,B区域地形湿度指数与黏土 含量呈正相关关系,而C区域黏土含量与地形湿度指 数则呈负相关关系。黏质的海拔均值和风力作用指 数均值相对较低,更多分布于海拔低的地方,受风蚀的 作用相对较弱。低海拔地区都有黏性土,类似的结果 也出现在其他研究中,如张世文等阿在研究中发现,不 同高程组的砂粒和粉黏粒含量不同,高程>400 m的粉 黏粒含量最小,处于100~200m高程的砂粒含量最小, 且与其他组之间存在显著差异。海拔高度影响了土 壤颗粒的运移速度和方向,从而影响质地分布。

土壤的空间变异主要受到了地形属性和土壤水 分平衡的综合影响^[20]。地形控制水和沉积物的分布, 除母质为土壤发育的基础外,水侵蚀是形成大多数地 貌特征的主要因素。Adhikari等^[32]的研究也发现地形 因子如地形湿度指数等对提高土壤质地预测模型的 精度也非常重要,在他的研究中也考虑了太阳辐射等 与环境更相关的因子,但影响较弱。而在本研究中该 类因素作用较为明显,这可能与当地气候环境条件有 关。研究区地形地貌复杂,气候潮湿,常年多云,风力 和辐射作用在一定程度上影响了水热分布,从而影响 质地分布。当然,本研究主要分析了地形属性对土壤 质地类型的影响,对具体的气候环境影响有待进一步 深入研究。

4 结论

(1)研究区成土母质和地形因子对土壤质地类型 变异都有重要影响,且流域尺度下成土母质的影响最 大,壤质土壤和大部分黏质土壤分布于奥陶系地质条 件下,砂质土壤均匀分布于两种地质条件。反映出研 究区土壤质地类型的空间变异受背景地质条件的影 响强烈。

(2)不同质地间各地形因子存在显著差异。黏质 相对倾向分布于水含量高、地势较低的地方。不同成 土母质条件下,产生最重要影响的地形因子也不同, 奥陶系母质条件下风效应是最重要的影响因子,而志 留系母质条件下的最重要影响因子则是漫射辐射。

(3)流域尺度CART模型解释率为86.3%,该模型 及独立变量组合应用于土壤质地类型分类研究具有 可行性。

在本研究中,以成土母质和地形因子为独立变量 的CART模型中,这些因子能解释土壤质地80%以上 的空间变异,展现出良好的精度。虽精度较高,但这 些地形因子也是依赖于DEM数据本身而提取的,对 于解释地形对土壤质地类型的空间变异可能存在不 确定性。另一方面,本研究针对特定的小流域进行分 析,其结论存在一定局限性。因此,在今后的研究中, 一方面,可以考虑加入其他因素(如气候等),筛选最 优变量组合共同参与模型构建,以得到更优的结果; 另一方面,考虑与周围流域做比较研究,得到更有借 鉴意义的结论。

参考文献:

- [1] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:66-82.
 HUANG Chang-yong. Soil science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:66-82.
- [2] Safari Y, Boroujeni I E, Kamali A, et al. Mapping of the soil texture using geostatistical method (a case study of the Shahrekord Plain, central Iran)[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2013, 6(9):3331–3339.
- [3] 俞 海, 黄季焜, Scott Rozelle, 等. 土壤肥力变化的社会经济影响因素分析[J]. 资源科学, 2003, 25(2):63-72.

YU Hai, HUANG Ji-kun, Scott Rozelle, et al. Impact of socio-economic factors on soil fertility over time[J]. *Resources Science*, 2003, 25(2): 63-72.

[4] 潘成忠, 上官周平. 土壤空间变异性研究评述[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 371-375.

PAN Cheng-zhong, SHANGGUAN Zhou-ping. Review of the research

on soil spatial variability[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(3): 371-375.

- [5] 张世文, 黄元仿, 苑小勇, 等. 县域尺度表层土壤质地空间变异与因素分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(6):1154-1164. ZHANG Shi-wen, HUANG Yuan-fang, YUAN Xiao-yong, et al. The spatial variability and factor analyses of top soil texture on a county scale[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(6):1154-1164.
- [6] Li A D, Guo P T, Wu W, et al. Impacts of terrain attributes and human activities on soil texture class variations in hilly areas, south-west China[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2017, 189(6):281.
- [7] Ließ M, Glaser B, Huwe B. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: Comparison of regression tree and Random Forest models[J]. *Geoderma*, 2012, 170(3):70–79.
- [8] Gessler P E, Chadwick O A, Chamran F, et al. Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64(6):2046–2056.
- [9] Gobin A, Campling P, Feyen J. Soil-landscape modeling to quantify spatial variability of soil texture[J]. *Physics & Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere*, 2001, 26(1):41-45.
- [10] Ceddia M B, Vieira S R, Villela A L O, et al. Topography and spatial variability of soil physical properties[J]. *Scientia Agricola*, 2009, 66 (3):338-352.
- [11] Zhang J H, Wang Y, Zhang Z H. Effect of terrace forms on water and tillage erosion on a hilly landscape in the Yangtze River basin, China [J]. *Geomorphology*, 2014, 216:114–124.
- [12] Thien S J. A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis[J]. Journal of Agronomic Education, 1979, 8:54-55.
- [13] Vos C, Don A, Prietz R, et al. Field-based soil-texture estimates could replace laboratory analysis[J]. Geoderma, 2016, 267:215-219.
- [14] Florinsky I V, Eilers R G, Manning G R, et al. Prediction of soil properties by digital terrain modelling[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2002, 17(3):295–311.
- [15] Guo P T, Wu W, Liu H B, et al. Effects of land use and topographical attributes on soil properties in an agricultural landscape[J]. Soil Research, 2011, 49(7):606-613.
- [16] 邓欧平,周 稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与 地形因子相关性研究[J].资源科学,2013,35(12):2434-2443. DENG Ou-ping, ZHOU Xi, HUANG Ping-ping, et al. Correlations between spatial variability of soil nutrients and topographic factors in the purple hilly region of Sichuan[J]. *Resources Science*, 2013, 35 (12):2434-2443.
- [17] 丁元林, 孔丹莉, 毛宗福. 多重线性回归分析中的常用共线性诊断 方法[J]. 数理医药学志, 2004, 17(4):299-300.
 DING Yuan-lin, KONG Dan-li, MAO Zong-fu. Common linear diagnosis method in multiple linear regression analysis[J]. Journal of Mathematical Medicine, 2004, 17(4):299-300.
- [18] 范立新.回归分析中多重共线性诊断方法[J].环境卫生学杂志, 1994(1):34-37.

FAN Li – xin. Multiple collinear diagnosis in regression analysis[J]. Journal of Environmental Hygiene, 1994(1):34–37.

[19] Wu W, Fan Y, Wang Z, et al. Assessing effects of digital elevation model resolution on soil-landscape correlations in a hilly area[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 126(3):209-216.

- [20] Böhner J, Köthe R, Conrad O, et al. Soil regionalisation by means of terrain analysis and process parameterisation[M]//Micheli E, Nachtergaele F, Montanarella L. Soil classification. Ispra: The European Soil Bureau, Joint Research Centre, 2002.
- [21] 马雄威.线性回归方程中多重共线性诊断方法及其实证分析[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2008(2):78-81.
 MA Xiong-wei. Diagnosis and empirical analysis on multicollinearity in linear regression model[J]. Journal of Huazhong Agricultural University(Social Sciences Edition), 2008(2):78-81.
- [22] Ferraro D O, Rivero D E, Ghersa C M. Analysis of the factors that influence sugarcane yield in northern Argentina using classification and regression trees[J]. *Field Crops Research*, 2009, 112(2):149–157.
- [23] Lobell D B, Ortizmonasterio J I, Asner G P, et al. Combining field surveys, remote sensing, and regression trees to understand yield variations in an irrigated wheat landscape[J]. Agronomy Journal, 2005, 97 (1):241-249.
- [24] Tittonell P, Shepherd K D, Vanlauwe B, et al. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya: An application of classification and regression tree analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2008, 123(1):137-150.
- [25] 许安定, 杜国伟, 刘洪斌. 基于 CART 模型的烤烟评吸质量影响因子研究[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4):1356-1361.
 XU An-ding, DU Guo-wei, LIU Hong-bin. Investigation of factors controlling smoking quality of flue-cured tobacco using CART models
 [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(4): 1356-1361.
- [26] Campos M C C, Júnior J M, Pereira G T, et al. Soil texture spatial variability of different parent material in Pereira Barreto, Sao Paulo State [J]. *Ciência Agronômica*, 2007, 38(2):149–157.
- [27] 韩光中,张甘霖.母质对南方丘陵区水耕人为土理化性质演变的影响[J].土壤学报,2014(4):772-780.
 HAN Guang-zhong, ZHANG Gan-lin. Influence of parent material on evolution of physico-chemical properties of hydragric anthrosols in hilly regions of south China[J]. Acta Pedologic Sinica, 2014(4):772-780
- [28] 郭彤楼.四川盆地奥陶系储层发育特征与勘探潜力[J].石油与天 然气地质,2014(3):372-378.

GUO Tong-lou. Charateristics and exploration potential of Ordovician reservoirs in Sichuan basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014(3):372–378.

[29] 梁成华. 地质与地貌学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 98-99. LIANG Cheng-hua. Geology and Geomorphology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2002: 98-99.

- [30] Moore I D, Gessler P E, Nielsen G A, et al. Soil attribute prediction using terrain analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(2):443-452.
- [31] Stępień M, Samborski S, Gozdowski D, et al. Assessment of soil texture class on agricultural fields using ECa, Amber NDVI, and topographic properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2015, 178(3):523-536.
- [32] Adhikari K, Kheir R B, Greve M B, et al. High-resolution 3-D mapping of soil texture in Denmark[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(3):860-876.