

基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区 土壤侵蚀定量归因

王 欢^{1,2}, 高江波¹, 侯文娟¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 土壤侵蚀形成机制与影响因素识别是当前研究的核心与前沿议题, 然而从多因素综合作用的角度进行定量归因仍需加强。以喀斯特典型峰丛洼地流域为研究区, 基于GIS手段和RUSLE模型模拟土壤侵蚀, 综合土地利用、坡度、降雨、高程、岩性、植被覆盖度等影响因子, 应用地理探测器方法针对喀斯特不同地貌形态类型区进行土壤侵蚀的定量归因研究。结果表明, 各影响因子对土壤侵蚀的解释力及因子间耦合作用程度在不同地貌形态类型区差异显著, 其中土地利用和坡度是决定土壤侵蚀空间异质的主导因子, 但在山地丘陵区, 随着地形起伏度的升高, 坡度的控制作用下降, 即地理探测器 q 值表现为中海拔丘陵>小起伏中山>中起伏中山; 生态探测器显示土地利用对土壤侵蚀的影响相比于其他因子有显著差异; 双因子交互作用有助于增强对土壤侵蚀的解释力, 土地利用与坡度的协同作用对土壤侵蚀的解释力达到70%以上; 对于土壤侵蚀空间分布的差异性检验, 风险探测器显示在小起伏中山、中起伏中山等地貌形态类型中, 具有显著差异的影响因子分层组合数占比至少55%。因而, 喀斯特地区土壤侵蚀的治理应综合考虑不同地貌形态类型区土壤侵蚀影响机制的空间异质性。

关键词: 土壤侵蚀; 定量归因; RUSLE模型; 地理探测器; 三岔河流域

DOI: 10.11821/dlxb201809005

1 引言

中国是世界上土壤侵蚀最严重的国家之一, 全国水蚀和风蚀的面积占国土面积的37%^[1]。西南喀斯特地区是水蚀最为严重的区域, 土壤侵蚀已成为制约区域发展的头号问题, 喀斯特地区特有的地上地下二元水文结构、湿润的气候条件以及碳酸盐岩基底为土壤侵蚀的内在原因, 不合理的人类活动成为其外在驱动力, 林退、草毁、陡坡开荒加剧土壤侵蚀, 浅薄的土层流失殆尽造成更为严重的石漠化问题^[2-4], 进而土地退化、旱涝灾害频发, 生态系统几近崩溃。科学认识和定量评估地理环境因子、人类活动及其耦合作用对土壤侵蚀的影响, 对遏制该地区的水土流失及推进石漠化生态系统恢复重建至关重要。

喀斯特地区生态系统的高度脆弱性、特殊的水文地质结构及石漠化问题引起国内外专家学者的高度重视, 诸多有关土壤侵蚀的研究在该地区开展。在喀斯特土壤侵蚀驱动

收稿日期: 2017-10-10; 修订日期: 2018-06-25

基金资助: 国家重点基础研究发展计划(2015CB452702); 国家自然科学基金项目(41671098, 41530749) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2015CB452702; National Natural Science Foundation of China, No.41671098, No.41530749]

作者简介: 王欢(1993-), 女, 河北承德人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地区生态系统服务研究。

E-mail: wangh.16s@igsnrr.ac.cn

通讯作者: 高江波(1984-), 男, 山东临沂人, 副研究员, 主要从事喀斯特土地利用—地表过程—资源环境效应研究。

E-mail: gaojiangbo@igsnrr.ac.cn

因子识别方面, 王尧等^[5]探究了贵州省乌江流域土地利用及植被覆盖度与土壤侵蚀的关系, 并指出旱地土壤侵蚀最为严重, 因而耕地进行坡改梯建设可有效防治水土流失^[6]; 张信宝等^[7]提出植被破坏和土地垦殖等活动会加剧纯碳酸盐岩坡地土壤的地下漏失; 熊康宁等^[8]指出, 地质、地貌因素是石漠化脆弱生态系统得以存在、发展的载体和物质基础, 并决定了喀斯特生态系统的结构和运行规律。在喀斯特土壤侵蚀定量估算方法上, Bai等^[9]采用¹³⁷Cs及²¹⁰Pb_{ex}方法研究喀斯特流域土壤侵蚀对土地利用变化的响应, 发现1979年森林砍伐后, 土壤侵蚀的净侵蚀速率大大增加; Feng等^[10]在广西喀斯特流域使用RUSLE模型及¹³⁷Cs示踪法进行土壤侵蚀模拟, 综合考虑土地利用和降雨的变化时, 两种方法得到的结果的一致性较好, 但由于喀斯特地区地表径流的不连续性, RUSLE模型中坡长因子对DEM精度有较高要求; Peng等^[11]基于坡面径流小区实验揭示了不同的降雨机制及土地利用方式对水土流失及地表径流的影响有显著差异。

尽管上述工作均聚焦于地理环境因子、人类活动对土壤侵蚀的影响, 但对于要素之间及变量组合的综合比较尚显缺乏, 而且大多数采用相关或回归统计方法, 对于多因子影响及其交互作用的定量归因相对薄弱。事实上, 传统的统计分析或空间分析手段并不能量化地给出影响因子对土壤侵蚀的作用程度, 而地理探测器方法则可通过探测地理现象的空间分层异质性来揭示其背后的驱动力, 该方法不仅在社会科学^[12-13]、人类健康^[14]等方面应用广泛, 在自然科学^[15]和环境科学^[16]中的应用也逐渐普及, 其核心假设为: 如果某个自变量对某个因变量有重要影响, 那么自变量和因变量的空间分布具有较强的一致性^[17]。因此本文以地貌形态类型空间分布作为宏观背景, 借助地理探测器方法开展喀斯特流域土壤侵蚀的多因子定量归因, 以期甄别不同地貌形态类型区的主导影响因子及交互作用, 为喀斯特地区生态治理及环境保护政策提供科学依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文以贵州省西北部的典型喀斯特峰丛洼地流域(三岔河流域)为案例区, 该区位于贵州省乌江流域西南部(图1), 流域面积为4860 km²。三岔河为乌江的一级支流, 河流全长325.6 km。研究区基岩以碳酸盐岩为主, 夹杂少量非可溶岩, 岩溶作用形成的地上地下的二元结构使得三岔河流域地面河网系统匮乏, 地下河网发达。喀斯特多呈垂向发育, 存在大面积陡坡^[18], 易发生土壤侵蚀。土层浅薄、成土速度慢、土壤生态物理性状差, 缺少半风化母质层, 土石之间黏着力较低, 存在明显的软硬界面, 易产生水土流失及土块滑移^[18]。三岔河流域属亚热带季风气候区, 年均降水量在1100 mm左右, 雨量充沛且多暴雨, 降雨主要集中在5月-10月份。植物群落单调, 森林生态功能较弱。喀斯特地貌地表破碎, 耕地分散, 且人口众多, 人地矛盾突出, 不合理的土地利用方式造成严重的水土流失。

2.2 数据来源及处理

基于RUSLE模型进行土壤侵蚀量计算需要的数据包括: 鉴于喀斯特土壤侵蚀的计算对于地形数据的分辨率较为敏感, 本文采用9 m空间分辨率DEM影像(Google Earth); 基于2010年2景30 m分辨率TM影像(美国地质调查局官网<https://glavis.usgs.gov/>)及野外调查定点数据, 采用ENVI软件监督分类方法进行影像解译得到土地利用数据, 并在已有GPS样点中抽样选取部分样点进行验证(图2c), Kappa系数值为0.81, 数据较为可靠; 1 km分辨率土壤机械组成数据(联合国粮食及农业组织(FAO)和国际系统分析研

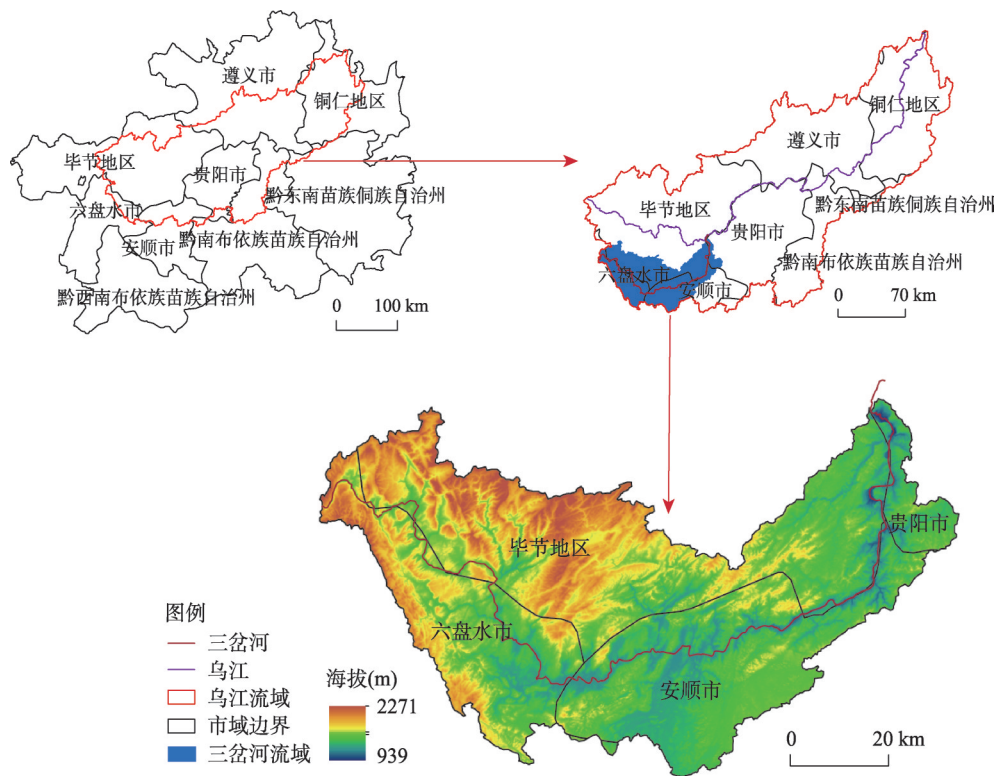


图1 研究区地理位置
Fig. 1 Location of the study area

究所 (IIASA) 建立的土壤数据库 (HWSD)); 三岔河流域及周边地区 28 个气象站点数据 (国家气候中心), 使用专业气象插值软件 ANUSPLIN 对气象站点进行插值得到栅格数据。根据周成虎等^[19]有关地貌分类的研究成果, 研究区域内喀斯特地貌形态类型包括小起伏中山、中起伏中山、中海拔平原、中海拔丘陵及中海拔台地 5 种 (图 2a), 地貌形态类型数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。针对这 5 种地貌形态类型进行土壤侵蚀主导因素探测分析, 本文选取的因子有: 岩性 (<http://www.resdc.cn>) (图 2b)、土地利用类型 (图 2c)、坡度 (图 2d)、降雨 (图 2e)、植被覆盖度 (250 m、<https://glovis.usgs.gov>) (图 2f) 及海拔 (图 1)。

2.3 研究方法

2.3.1 RUSLE 模型 在土壤侵蚀和土地退化日益加剧的背景下, 传统的基础研究如径流小区法、降雨侵蚀模拟法不能及时获得区域内土壤侵蚀数据, 依赖基础研究进行生态治理会导致水土保持措施的滞后性^[20], 因此模型模拟方法逐渐受到青睐, 其中 RUSLE^[21]模型是国际上广为流行的一种模型, 不仅弥补了野外观测在大尺度应用上的局限性, 而且适合多尺度的模拟研究^[5, 10], 在不同尺度的模拟中取得较好效果。其数学表达式如下:

$$A=R\times K\times LS\times C\times P\tag{1}$$

式中: A 表示年均土壤侵蚀量, 单位 ($\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$); R 表示降雨侵蚀力, 单位 ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子, 单位 ($\text{t ha h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$); LS 为地形因子, 也称为坡长坡度因子; C 是植被覆盖与管理因子; P 是水土保持措施因子; LS 、 C 、 P 是无量纲。

降雨侵蚀力因子反应了降雨特征对土壤侵蚀的影响, 如降雨强度。本文采用

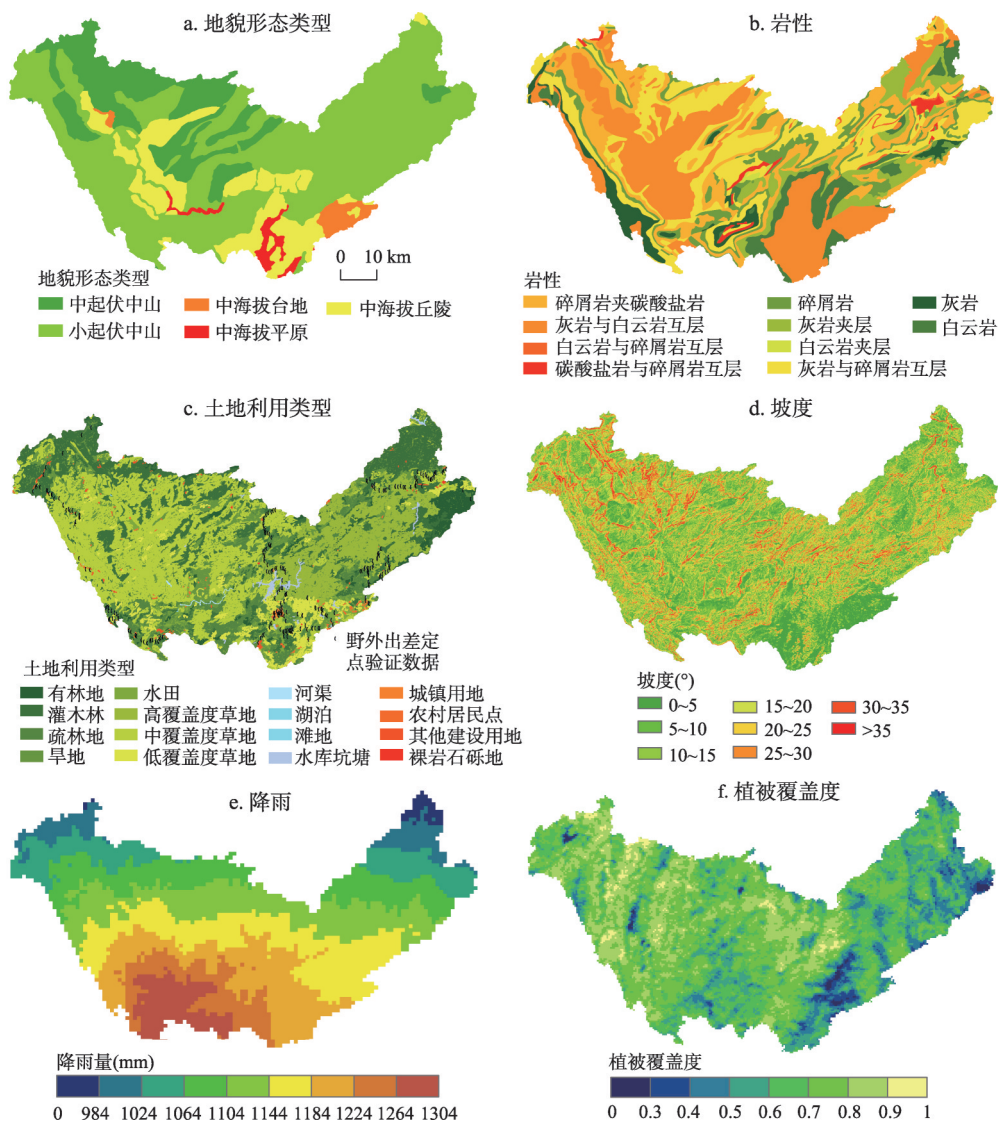


图2 三岔河流域地貌形态类型及土壤侵蚀影响因子(岩性、土地利用类型、坡度、降雨、植被覆盖度)

Fig. 2 Morphological types of geomorphology in the Sancha River Basin (a) and influencing factors of soil erosion (b. lithology; c. land use type; d. slope; e. rainfall; f. vegetation cover)

Wischmeier 提出并由 Arnoldus^[22]修正的降雨侵蚀力的公式来模拟降雨侵蚀力, 公式如下:

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left(1.735 \times 10^{1.5 \times \log \frac{P_i^2}{P} - 0.8188} \right) \quad (2)$$

式中: P_i 和 P 分别表示月均降雨和年均降雨, $i=1, 2, \dots, 12$, 表示月份。

K 为土壤可蚀性因子, 是关于土壤属性的函数, 本文使用 Williams 等^[23]提出的侵蚀力影响计算器来计算 (EPIC), 公式如下:

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3e^{[-0.0256W_i(1-W_i/100)]} \right\} \times \left(\frac{W_i}{W_i + W_t} \right)^{0.3} \times \left[1 - \frac{0.25W_c}{W_c + e^{(3.72-2.95W_c)}} \right] \times \left[1 - \frac{0.7W_n}{W_n + e^{(-5.51+22.9W_n)}} \right] \quad (3)$$

$$W_n=1-\frac{W_d}{100}$$

(4)

式中： W_d 是砂粒含量（%）； W_i 是粉粒含量（%）； W_l 是黏粒含量（%）； W_c 是有机碳含量（%）。

由于喀斯特地区的地上地下二元结构， LS 因子对RUSLE模型较为敏感，考虑到高精度地形数据对于喀斯特土壤侵蚀模拟的重要性，本文采用Google earth提供的9 m空间分辨率DEM作为计算坡度坡长因子的基础数据。并选用由McCool等^[24-25]提出、Zhang等^[26]修正的 LS 计算方法，公式如下：

$$LS=\left(\frac{\lambda}{22.13}\right)^{\alpha}$$

(5)

$$\alpha=\left(\frac{\beta}{\beta+1}\right)$$

(6)

$$\beta=\frac{\sin \theta}{3 \times(\sin \theta)^{0.8}+0.56}$$

(7)

$$S=\left\{\begin{array}{ll} 10.8 \times \sin \theta+0.03 & (\theta<9 \%, \lambda>4.6 m) \\ 16.8 \times \sin \theta-0.5 & (\theta \geq 9 \%, \lambda>4.6 m) \\ 3 \times(\sin \theta)^{0.8}+0.56 & (\lambda \leq 4.6 m) \end{array}\right.$$

(8)

式中： λ 是坡长； α 是可变坡长指数； β 是随坡度变化的系数； θ 是坡度。

植被覆盖和管理因子（ C ）和水土保持措施因子（ P ）的计算目前尚未形成统一的标准，本文 C 和 P 因子的计算参考前人在喀斯特地区进行的研究^[6, 10]， C 因子和 P 因子的赋值标准如表1所示。

表 1 C 值和 P 值的赋值标准
Tab. 1 C value and P value

土地利用类型	水田	旱地	有林地	疏林地	灌木林	草地	水域	建设用地	裸岩
C 值	0.1	0.22	0.006	0.01	0.01	0.04	0	0	0
P 值	0.15	0.4	1	1	1	1	0	0	0

RUSLE模型中各因子数据来源、分辨率有所差异，需对数据进行统一化处理，在ArcGIS 10.2中将RUSLE模型中各因子的空间分辨率统一为30 m，投影坐标统一为Albers_Conic_Equal_Area。本文中使用的土地利用数据空间分辨率为30 m，以此为基准分辨率；将9 m分辨率的 LS 因子尺度上推为30 m；由于1 km空间范围内的降雨量差异较小，尤其是年和月尺度，因此将插值后1 km分辨率的降雨数据降尺度为30 m是可行的；土壤类型在1 km范围内空间异质性较低，且 K 因子数值较小，因此将其尺度下推为30 m，不影响其精度。

2.3.2 地理探测器的原理与应用 地理探测器是一种通过探测要素的空间分层异质性来揭示其背后驱动力的方法，空间分层异质性是指层内方差之和小于层间总方差的现象，分异性的大小由地理探测器的 q 值来衡量^[17]。该方法主要应用于空间分异性的影响因素识别与作用机制的研究^[12]，影响因素通常是类别变量，这一特点对土壤侵蚀的探测十分重要。地理探测器包括4个模块：因子探测器、风险探测器、交互作用探测器、生态探测器。

因子探测器探测因变量的空间分异性，以及自变量对因变量的解释力，其大小用 q 值来衡量^[27]，公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (11)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为自变量 X 的分层; N_h 和 N 为层 h 内和区域内的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差; SSW 为层内方差之和; SST 为区域总方差; q 为自变量对因变量的解释力, $q \in [0, 1]$, q 值越接近于 1, 表示自变量对因变量的解释力越强, 根据 q 值大小可识别土壤侵蚀的主导因子。 q 值的一个简单变换满足非中心分布, 地理探测器软件可对 q 值显著性做出检验^[17]。

生态探测器可比较影响因子对土壤侵蚀空间分布的影响是否有显著差异, 使用 F 检验度量^[17]; 交互作用探测器是地理探测器相对于其他统计方法的最大优势, 可用来探测双变量间的交互作用, 通过对比单因子 q 值及双因子 q 值的大小可判断两因子间交互作用的方向及方式, 该方法对于相互作用的假设不仅限于传统统计学方法, 如 Logistic 回归假设的相乘关系,

而是只要有交互作用就能够被检测出来^[17], 交互作用方式判断依据如表 2 所示; 风险探测器可判断影响因子的层间土壤侵蚀量是否有显著差别, 并识别土壤侵蚀高风险区域。

地理探测器的输入变量要求为类别数据, 需对连续型变量做离散化处理, 土地利用类型、岩性、地貌按类别分类, 结合王劲峰等提出的数据离散化方法^[17]及先验知识, 将植被覆盖度按照 < 0.3 、 $0.3 \sim 0.4$ 、 $0.4 \sim 0.5$ 、 $0.5 \sim 0.6$ 、 $0.6 \sim 0.7$ 、 $0.7 \sim 0.8$ 、 $0.8 \sim 0.9$ 、 $0.9 \sim 1$ 分为 8 类, 降雨、海拔数据按照等间距分类法分成 9 类, 坡度按照 $< 5^\circ$ 、 $5^\circ \sim 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 35^\circ$ 、 $> 35^\circ$ 等级分为 8 类。使用 ArcGIS 10.2 中的渔网点功能将栅格数据提取到点, 采样间距为 500 m, 共提取 19686 个点, 作为地理探测器的运行数据。针对不同地貌形态类型区, 土壤侵蚀影响因子采取一致的分层方法, 确保在同样空间分层条件下探究因子对土壤侵蚀的影响, 保证了不同地貌形态类型区之间结果的可比较性。

3 结果与分析

3.1 不同地貌形态类型区土壤侵蚀及地理环境因子统计

2010 年三岔河流域的土壤侵蚀量的范围为 $0 \sim 124.44 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 均值为 $11.37 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 该数值与 Feng 等^[10]应用 ^{137}Cs 方法得到的广西喀斯特峰丛洼地土壤侵蚀结果较为一致, 此外, Zeng 等^[20]应用 RUSLE 模型模拟贵州省印江县土壤侵蚀, 得到 2013 年土壤侵蚀量为 $18.84 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, Febles-Gonzalez 等^[28]在古巴哈瓦那喀斯特地区进行土壤侵蚀模拟, 结果为 $12.3 \sim 13.7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, 与本文土壤侵蚀模拟结果较为接近。三岔河流域土壤侵蚀具有空间异质性 (图 3), 流域上中游的土壤侵蚀较下游严重。由表 3 可知, 不同地貌形态类型分布区的地理环境因子也具有空间异质性, 山地丘陵区平均坡度较大, 平原、台地地区

表 2 自变量对因变量的交互作用方式

Tab. 2 Types of interaction between two covariates

判据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

注: $X1$ 和 $X2$ 代表土壤侵蚀的影响因子。

坡度较小；中起伏中山地区的平均海拔高度显著高于其他地区，降雨量则相反；耕地主要集中于小起伏中山、中起伏中山、中海拔丘陵等地，坡耕地主要分布于小起伏中山及中起伏中山等地。不同地貌形态类型土壤侵蚀均值差异显著，受坡度、地形、降雨及人类活动等因素综合影响中海拔丘陵地区平均土壤侵蚀量最大，小起伏中山次之，中海拔台地地区土壤侵蚀量最小。

3.2 基于地理探测器的不同地貌形态类型下土壤侵蚀定量归因

3.2.1 土壤侵蚀影响因子的显著性研究

因子探测器的运行结果表明，不同地貌形态类型下土壤侵蚀的主导影响因子及其解释力有显著差异（表4）。影响因子的作用显著性受地貌形态类型区域内部特征影响，如海拔在中海拔台地地区对土壤侵蚀的解释力不显著，但在中起伏中山地区却高达19.3%；土地利用类型对土壤侵蚀空间分布的解释力显著高于其他影响因子，各地貌形态类型中均达到51%以上，中海拔台地地区甚至高达68.5%；坡度对土壤侵蚀的解释力呈现如下规律：在山地丘陵区，随着地形起伏度的上升解释力下降，在相对平坦的地区，呈现相反的趋势，具体表现为 q 值在山地丘陵区的排序：中海拔丘陵>小起伏中山>中起伏中山，在平原、台地等相对平坦的地区，中海拔台地的 q 值大于中海拔平原；降雨对土壤侵蚀的解释力在不同地貌形态类型中相差悬殊。生态探测器显示中海拔平原、中海拔台地地区土地利用对土壤侵蚀空间分布的影响显著区别于其他因子；中海拔丘陵、小起伏中山地区土地利用及坡度对土壤侵蚀的影响显著区别于其他因子；中起伏中山地区土地利用、海拔对土壤侵蚀的影响相比于其他因子有显著差异。

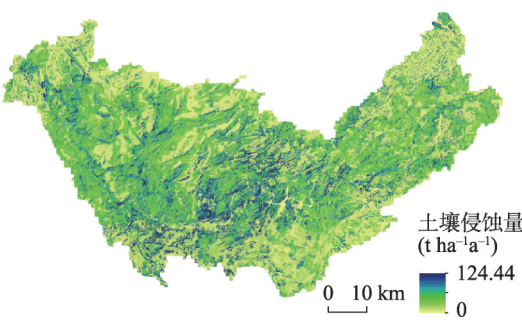


图3 2010年三岔河流域土壤侵蚀空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of soil erosion in the Sancha River Basin in 2010

表3 不同地貌形态类型土壤侵蚀量及地理环境因子统计

Tab. 3 Soil erosion and geographic environmental factors in different morphological types of geomorphology							
	土壤侵蚀量 (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	坡度 (°)	降雨 (mm)	海拔 (m)	耕地面积 (km ²)	陡坡耕地面积 (km ²)	区域总面积 (km ²)
中海拔平原	8.32	4.80	1233.82	1256.51	17.54	0.06	98.30
中海拔台地	6.49	3.97	1172.98	1445.74	19.92	0.02	99.64
中海拔丘陵	12.62	11.00	1199.28	1383.46	159.60	3.41	717.72
小起伏中山	11.87	14.91	1136.88	1482.15	656.15	51.67	3016.14
中起伏中山	10.22	16.34	1096.33	1775.38	189.62	23.70	928.89

表4 不同地貌形态类型影响因子 q 值统计

Tab. 4 The q values of influencing factors in different morphological types of geomorphology						
	土地利用类型	坡度	降雨	岩性	植被覆盖度	海拔
中海拔平原	0.622	0.082	0.091	—	—	0.028
中海拔台地	0.685	0.086	0.037	—	—	—
中海拔丘陵	0.513	0.126	0.010	0.031	0.059	0.010
小起伏中山	0.567	0.071	0.051	0.01	0.005	0.013
中起伏中山	0.620	0.062	0.089	0.037	0.005	0.193

注：“—”表示 q 值未通过显著性检验。

3.2.2 土壤侵蚀影响因子交互作用研究 交互作用探测结果表明5种地貌形态类型区, 影响因子两两交互作用均会增强对土壤侵蚀的解释力。不同地貌形态类型内主导交互作用类型有差异, 将解释力排在前三位的交互作用方式进行统计, 统计结果如表5所示。除中海拔平原外, 交互作用解释力排在第一位的均为土地利用类型与坡度的协同作用, 是土壤侵蚀的显著控制因子, 解释力均高于70%, 意味着坡度不同的土地利用类型或坡度相同的不同土地利用类型间土壤侵蚀差异大, 如25°的坡耕地和5°的坡耕地, 或25°的坡耕地和25°的林地间土壤侵蚀量相差悬殊。中海拔平原地区, 陡坡开垦较少(表3), 土地利用方式相对合理, 因此土地利用类型叠加坡度对土壤侵蚀的解释力稍微降低, 但仍达到67.1%, 而此地貌形态类型内土地利用类型与降雨的叠加可解释71%的土壤侵蚀空间分布。不同地貌形态类型, 第二、第三主导交互作用均为土地利用类型叠加某一影响因子, 但存在差异(表5)。此外, 坡度与降雨的叠加可大大增加单因子对土壤侵蚀的解释力, 表现为非线性增强, 5种地貌形态类型中解释力最高可达21.3%, 最低为13.8%。

表5 不同地貌形态类型区土壤侵蚀影响因子交互作用探测

Tab. 5 The dominant interactions between two covariates in different morphological types of geomorphology

地貌形态类型	中海拔平原	中海拔台地	中海拔丘陵	小起伏中山	中起伏中山
主导交互作用1	土地利用类型∩降雨	土地利用类型∩坡度	土地利用类型∩坡度	土地利用类型∩坡度	土地利用类型∩坡度
q	0.710	0.764	0.726	0.707	0.742
主导交互作用2	土地利用类型∩植被覆盖度	土地利用类型∩植被覆盖度	土地利用类型∩海拔	土地利用类型∩降雨	土地利用类型∩降雨
q	0.695	0.720	0.567	0.648	0.679
主导交互作用3	土地利用类型∩岩性	土地利用类型∩降雨	土地利用类型∩降雨	土地利用类型∩岩性	土地利用类型∩海拔
q	0.682	0.708	0.566	0.586	0.665

3.2.3 土壤侵蚀高风险区域识别及影响因子层间土壤侵蚀量差异性判别 由因子探测器及交互作用探测器可知, 影响因子及其组合的交互作用对土壤侵蚀空间分布解释力不同, 运行风险探测器模块可探测土壤侵蚀空间分布特征, 识别出土壤侵蚀高风险区域(置信水平95%)(表6), 并判断影响因子的层间土壤侵蚀量差异是否显著, 进而可统计有显著差异的分层组合数的百分比(表7)。不同地貌形态类型土壤侵蚀高风险区差异明显(表6), 在小起伏中山地区, 随着坡度的上升土壤侵蚀量上升, 在其余4种地貌形态类型中, 坡度与土壤侵蚀的关系存在拐点, 即为表6中坡度的高风险区域; 旱地的土壤侵蚀最为严重, 但不同地貌形态类型下平均侵蚀量有差异; 三岔河流域的土壤侵蚀随植被覆盖度的变化特征不同于其他非喀斯特地区, 而是存在一个临界值, 低于这个临界值, 土壤侵蚀随植被覆盖度的上升而增加, 高于这个临界值, 土壤侵蚀随植被覆盖度的上升而减小。地质条件是土壤侵蚀发生的背景, 不同岩性的土壤侵蚀量与其所处的地貌区的气候、地形及人为因素有关, 在不同地貌形态类型区内, 发生最大土壤侵蚀的岩性均不相同; 海拔与土壤侵蚀的空间分布不具备显著的正向或负向相关关系, 达到土壤侵蚀最大值的海拔区间亦不相同。不同地貌形态类型中各影响因子的层间土壤侵蚀量有显著差异的组合数百分比相差悬殊(表7), 土地利用在不同地貌形态类型中的层间差异最大, 具有显著差异的百分比达到90%以上; 坡度的层间差异在小起伏中山、中起伏中山、中海拔丘陵等平均坡度较大地区远大于中海拔平原、中海拔台地等平均坡度较小地区; 降雨及海拔的层间差异在中海拔平原地区达到100%, 在小起伏中山及中起伏中山地区高于中海拔丘陵、中海拔台地地区; 岩性及植被覆盖度的层间差异均较低。

表6 不同地貌形态类型土壤侵蚀高风险区域及其平均值($\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$)

Tab. 6 High risk areas of soil erosion and its mean value ($\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$) in different morphological types of geomorphology

	中海拔平原	中海拔台地	中海拔丘陵	小起伏中山	中起伏中山
坡度($^{\circ}$)	20~25	15~20	30~35	>35	25~30
平均值	19.9	19.02	24.38	22.28	14.41
土地利用类型	旱地	旱地	旱地	旱地	旱地
平均值	22.6	15.36	23.43	24.36	21.9
植被覆盖度	0.5~0.6	< 0.3	0.8~0.9	0.9~1	0.5~0.6
平均值	9.35	10.02	14.5	14.17	10.7
岩性	灰岩与碎屑岩互层	灰岩夹层	碎屑岩	白云岩夹层	白云岩
平均值	13.93	9.49	19.52	15.59	20.07
海拔(m)	1087~1235	1531~1679	1383~1531	1383~1531	1235~1383
平均值	11.1	13.13	12.15	12.44	15.84

4 讨论

地貌形态类型从宏观上控制着地表过程的发生和发展,土壤侵蚀作为地表过程的一种,在不同地貌形态类型下的侵蚀特征差异显著。土地利用类型是最为显著的主导因子;坡度对土壤侵蚀的解释力在中海拔平原、丘陵、台地等地形相对平坦的地区显著大于小起伏中山、中起伏中山等地表起伏度相对较大的山地地区,这可能是因为在相对陡峭的地区,地形复杂、气候差异、生态脆弱,土壤侵蚀的影响因素更为复杂,因此坡度对土壤侵蚀的空间解释力降低;相比于其他4种地貌形态类型,海拔在中起伏中山地区对土壤侵蚀的解释力最高,原因为中起伏中山地区内部相对高差较大,植被垂直分异性明显,海拔的分层能够体现植被、气候及地形的综合差异;岩性、植被覆盖度在中海拔平原、中海拔台地地区影响不显著,尽管上述因子在侵蚀发生角度及坡面尺度都是土壤侵蚀至关重要的影响因素,但在特定地貌形态类型下对土壤侵蚀的控制作用不明显。

地理过程的复杂性往往导致影响因子不是单独起作用,而是共同作用的,其作用耦合程度的探讨仍然是尚未解决的难题。本文基于地理探测器进行土壤侵蚀影响因子两两交互作用的探讨,以期发现土壤侵蚀影响因子间作用的规律。结果表明坡度与土地利用类型的交互作用对土壤侵蚀的解释力在各个地貌形态类型中均高达67%以上,王尧等^[5]曾指出乌江流域不同的土地利用类型对土壤侵蚀的影响差异显著,且随着坡度的增加,土壤侵蚀量明显增加,这与本文的坡度与土地利用交互作用可大大增强对土壤侵蚀的控制作用相符合。这一点也论证了退耕还林及禁止陡坡耕地的必要性。此外,坡度与降雨的叠加增强了对土壤侵蚀的解释力,坡度与降雨是土壤侵蚀发生的必要条件及动力基础,降雨遇到陡坡极易造成水力侵蚀;坡度与岩性的叠加也可增强对土壤侵蚀的解释力,岩

表7 各影响因子中有显著差异的分层组合数的百分比(%)

Tab. 7 The percentage of stratification combinations with significant difference in each influencing factor (%)

	中海拔平原	中海拔台地	中海拔丘陵	小起伏中山	中起伏中山
土地利用	90.91	100.00	92.86	100.00	93.33
坡度	40.00	16.67	78.57	92.86	85.71
降雨	100.00	33.33	33.33	91.67	78.57
海拔	100.00	0.00	42.86	69.44	75.00
岩性	0.00	0.00	60.00	64.44	55.56
植被覆盖度	33.33	35.71	75.00	60.71	60.71

性为土壤形成的基础,不同岩性背景决定了地下岩层及地表土壤的特性,喀斯特地区岩石风化成土速度慢、土层浅薄且土壤缺少母质层,土体和岩石之间存在显著的“软硬界面”^[18],在坡度较高的地区极易受到重力及其他外力作用发生土壤侵蚀。

陈思旭等^[29]指出南方土石山区土壤侵蚀随着坡度的上升呈现先增加后减小的趋势,临界值为 $15^{\circ}\sim 25^{\circ}$,本文得到类似结论,中海拔平原地区临界值为 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$,中海拔丘陵地区临界值为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$,中海拔台地地区临界值为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,中起伏中山地区临界值为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$;已有研究表明乌江流域植被覆盖度对土壤侵蚀的作用存在临界值^[5],本文中起伏中山、中海拔平原地区,植被覆盖度的临界值为 $0.5\sim 0.6$,产生此现象的原因为植被覆盖度高的地区往往具有较大坡度;此外,不同的地貌形态类型区高风险土壤侵蚀区域的降雨量、岩性、海拔梯度差异显著。不同地貌形态类型,各影响因子的层间土壤侵蚀量的差异性有显著区别,层间差异最大的因子为土地利用类型,坡度、降雨、海拔、岩性及植被覆盖度等因子的层间差异性参差不齐。因此在制定政策及划分土壤侵蚀重点治理区时,应因地制宜,综合考虑不同地貌形态类型间土壤侵蚀空间分布及影响因子的层间差异性,有针对性的选取治理范围。

国内外研究学者借助不同方法,进行不同尺度的土壤侵蚀研究,研究成果之间对比性差,不利于结果的验证,在众多的研究方法中,RUSLE作为国内外最流行的经验公式在大尺度的侵蚀模拟上得到普遍认可。尽管本文综合考虑了喀斯特地区特有的石林及有效坡长等因素,选取9 m分辨率DEM用于RUSLE模型,大大提高了LS因子的模拟精度,但仍存在一些不足之处,喀斯特部分地区土层浅薄,重度石漠化地区甚至无土可流,RUSLE模型的模拟结果在一定程度上高估了三岔河流域的土壤侵蚀,基于土层厚度的RUSLE模型修正工作是今后研究的重点。

5 结论

本文使用地理探测器方法剖析了不同地貌形态类型区域内土壤侵蚀空间分布的主导影响因子及因子间的交互影响程度,并识别出土壤侵蚀高风险区域及影响因子层间土壤侵蚀量的差异性。主要得到以下结论,以期土壤侵蚀的治理提供参考。

(1) 本文选取的6个影响因子对土壤侵蚀的解释力不同,在5种地貌形态类型中排在第一位的均为土地利用类型;影响因子及因子间对土壤侵蚀影响的差异性在不同地貌形态类型区有差异。

(2) 因子间交互作用均能增强对土壤侵蚀的解释力,土地利用类型和坡度的协同作用最为显著,禁止陡坡耕地及退耕还林等措施可有效防治当地的水土流失;坡度与降雨的叠加大大增强对土壤侵蚀的解释力,因此在强降雨陡坡地区应当采取必要的防治措施,以减缓灾害事件造成的经济损失。

(3) 在土壤侵蚀治理工作中,应综合考虑地貌类型的宏观控制作用,根据土壤侵蚀的空间分布特征及其影响因子定量归因结论,本文明确了不同地貌形态类型区土壤侵蚀的重点治理区域。在小起伏中山地区的重点治理区域为:坡度大于 35° 的陡坡、海拔1383~1531 m、旱地、白云岩夹层分布的地区;中起伏中山:坡度 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、海拔1235~1383 m、旱地、白云岩分布的区域;中海拔平原地区:坡度 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 、海拔1087~1235 m、旱地、灰岩与碎屑岩互层分布的区域;中海拔丘陵:坡度 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 、海拔1383~1531 m、旱地、碎屑岩分布的区域;中海拔台地:坡度 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 、海拔1531~1679 m、旱地、灰岩夹层分布的区域。

参考文献(References)

- [1] Li Zhiguang. Current status and developing trend of soil erosion in China. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 57-62. [李智广. 我国水土流失状况与发展趋势研究. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 57-62.]
- [2] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, landuse, impact and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(2): 115-121.
- [3] Hou Wenjuan, Gao Jiangbo, Peng Tao, et al. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework. *Progress in Geography*, 2016, 35(3): 320-330. [侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 320-330.]
- [4] Zhang Xinbao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Relationships between the spatial distribution of karst land desertification and geomorphology, lithology, precipitation, and population density in Guizhou Province. *Earth and Environment*, 2013, 41(1): 1-6. [张信宝, 王世杰, 白晓永, 等. 贵州石漠化空间分布与喀斯特地貌、岩性、降水和人口密度的关系. *地球与环境*, 2013, 41(1): 1-6.]
- [5] Wang Yao, Cai Yunlong, Pan Mao. Analysis on the relationship between soil erosion and land use in Wujiang River Basin in Guizhou Province. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3): 11-18. [王尧, 蔡运龙, 潘懋. 贵州省乌江流域土地利用与土壤侵蚀关系研究. *水土保持研究*, 2013, 20(3): 11-18.]
- [6] Xu Yueqing, Shao Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: A case study of Maotiaohe Watershed, Guizhou Province. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 67-71. [许月卿, 邵晓梅. 基于GIS和RUSLE的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 67-71.]
- [7] Zhang Xinbao, Wang Shijie, He Xiubin, et al. Soil creeping in weathering crusts of carbonate rocks and underground soil losses on karst slopes. *Earth and Environment*, 2007, 35(3): 202-206. [张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失. *地球与环境*, 2007, 35(3): 202-206.]
- [8] Xiong Kangning, Li Jin, Long Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 878-888. [熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. *地理学报*, 2012, 67(7): 878-888.]
- [9] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, et al. Use of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ measurements on deposits in a karst depression to study the erosional response of a small karst catchment in Southwest China to land-use change. *Hydrological Processes*, 2013, 27(6): 822-829.
- [10] Feng T, Chen H S, Polyakov V O, et al. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: Comparison of the RUSLE model with ^{137}Cs measurements. *Geomorphology*, 2016, 253: 217-224.
- [11] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China. *Catena*, 2012, 90: 53-62.
- [12] Li Jiaming, Lu Dadao, Xu Chengdong, et al. Spatial heterogeneity and its changes of population on the two sides of Hu Line. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 148-160. [李佳铭, 陆大道, 徐成东, 等. 胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化. *地理学报*, 2017, 72(1): 148-160.]
- [13] Zhan Dongsheng, Zhang Wenzhong, Yu Jianhui, et al. Analysis of influencing mechanism of residents' livability satisfaction in Beijing using geographical detector. *Progress in Geography*, 2015, 34(8): 966-975. [湛东升, 张文忠, 余建辉, 等. 基于地理探测器的北京市居民宜居满意度影响机理. *地理科学进展*, 2015, 34(8): 966-975.]
- [14] Hu Y, Wang J F, Li X H, et al. Geographical detector-based risk assessment of the under-five mortality in the 2008 Wenchuan Earthquake, China. *Plos One*, 2011, 6(6): e21427.
- [15] Luo W, Jasiewicz J, Stepinski T, et al. Spatial association between dissection density and environmental factors over the entire conterminous United States. *Geophysical Research Letters*, 2015, 43(2): 692-700.
- [16] Tong Laga, Xu Xinliang, Fu Ying et al. Impact of environmental factors on snail distribution using geographical detector model. *Progress in Geography*, 2014, 33(5): 625-635. [通拉嘎, 徐新良, 付颖, 等. 地理环境因子对螺情影响的探测分析. *地理科学进展*, 2014, 33(5): 625-635.]
- [17] Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134. [王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [18] Cai Yunlong, Wan Jun, Wang Yao, et al. Study on Land Change in Guizhou Karst Plateau Mountain Area. Beijing: Science Press, 2015: 61-62. [蔡运龙, 万军, 王尧, 等. 贵州喀斯特高原山区土地变化研究. 北京: 科学出版社, 2015: 61-62.]

- [19] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地 1:100 万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [20] Zeng C, Wang S J, Bai X Y, et al. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS. *Solid Earth*, 2017, 8(4): 721-736.
- [21] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*, 1997.
- [22] Arnoldus H M J. An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation//De Boodt M, Gabriels D. *Assessment of Erosion*. Chichester UK: Wiley, 1980: 127-132.
- [23] Williams, J R, Jones, C A, Kiniry J R, et al. The EPIC crop growth-model. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32: 497-511.
- [24] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the Asae*, 1987, 30(5): 1387-1396.
- [25] McCool D K, Foster G R, Mutchler C K, et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. *Transactions of the Asae*, 1989, 32: 1571-1576.
- [26] Zhang H M, Yang Q K, Li R, et al. Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equation LS factor. *Computers & Geosciences*, 2013, 52: 177-188.
- [27] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [28] Febles-Gonzalez J M, Vega-Carreno M B, Tolon-Becerra A, et al. Assessment of soil erosion in karst regions of Havana, Cuba. *Land Degradation & Development*, 2012, 23(5): 465-474.
- [29] Chen Sixu, Yang Xiaohuan, Xiao Linlin, et al. Study of soil erosion in the southern hillside area of China based on RUSLE model. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1288-1297. [陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 等. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.]

Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method

WANG Huan^{1,2}, GAO Jiangbo¹, HOU Wenjuan¹

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The formation mechanism and influencing factors identification of soil erosion are the core and frontier issues of current research. However, studies on the multifactor synthesis are still insufficient. In this study, the simulation of soil erosion and its quantitative attribution analysis have been conducted in different morphological types of geomorphology in a typical karst basin based on the RUSLE model and the geographical detector method. The influencing factors, such as land use type, slope, rainfall, elevation, lithology and vegetation cover, have been taken into consideration. Results show that the strength of association between the six influencing factors and soil erosion was notably different in various morphological types of geomorphology. Land use type and slope were the dominant factors of soil erosion in the Sancha River Basin, especially for land use type whose power of determinant (q value) for soil erosion was much higher than that of other factors. The q value of slope declined with the increase of relief in mountainous areas, namely it was ranked as follows: middle elevation hill > small relief mountain > middle relief mountain. Multi-factor interactions were proven to significantly strengthen soil erosion, particularly for the combination of land use type with slope, which can explain 70% of soil erosion distribution. It can be found that soil erosion in the same land use type with different slopes (such as dry land with a slope of 5° and dry land with slopes above 25°) or in the diverse land use types with the same slopes (such as dry land with a slope of 5° and forest with a slope of 5°), varied greatly. This indicates that prohibiting steep slope cultivation and the Grain for Green Project are reasonable measures to harness soil erosion in karst areas. Based on statistics of soil erosion difference between diverse stratifications of each influencing factor, results of risk detector suggest that the amount of stratification combinations with significant difference accounted for 55% at least in small and middle relief mountains. Therefore, the spatial heterogeneity of soil erosion and its influencing factors in different morphological types of geomorphology should be investigated to control karst soil loss more effectively.

Keywords: soil erosion distribution; influencing factor; RUSLE model; geographical detector; Sancha River Basin