文章编号: 1008 - 2786 - (2019) 4 - 518 - 10
DOI: 10.16089/j.cnki.1008 - 2786.000444

基于 GWR 模型的喀斯特地区产流量与土壤侵蚀权衡的时空特征——以贵州省三岔河流域为例

高江波[1,2], 王 欢[3]
(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
3. 北京大学, 北京 100871)

摘 要: 喀斯特地区的土壤保持服务及产流服务对区域可持续发展至关重要, 明晰二者之间的权衡/协同关系是制定生态系统服务管理策略的基础。当前, 针对喀斯特生态系统服务权衡与协同关系的研究多为定性描述, 对于相互关系的定量研究亟待加强。本文以典型喀斯特地区三岔河流域为研究区, 使用 InVEST 模型、RUSLE 模型分别模拟了研究区 2000—2015 年 16 年间的产流量及土壤侵蚀量数据, 借助地理加权回归方法对产流量及侵蚀量的多年均值进行权衡/协同关系的定量刻画与空间分析。结果表明: (1) 流域尺度上产流量与土壤侵蚀量呈现权衡协同关系并存的分布格局, 研究区 63.3% 的面积为权衡关系, 36.7% 的面积为协同关系, 上游、下游大部分地区为权衡关系, 中游呈现协同关系; (2) 土地利用类型的空间分布是导致产流量与土壤侵蚀量权衡/协同关系空间分布的主要原因; (3) 产流量与土壤侵蚀量的空间权衡/协同关系具有较高的空间异质性, 因不同地貌类型区而存在差异, 其中中海拔平原、中海拔台地地区土壤侵蚀与产流量整体上表现为协同关系, 中海拔丘陵、小起伏中山、中起伏中山地区表现为权衡关系。本研究深入剖析了土壤侵蚀及产流量的空间权衡关系, 其结果可为该地区生态系统服务管理提供借鉴意义。

关键词: 产流量; 土壤侵蚀; 权衡/协同关系; 地理加权回归; InVEST 模型; RUSLE 模型; 喀斯特地区
中图分类号: K92 **文献标志码:** A

生态系统服务是生态系统及生态过程所形成和维持的、人类赖以生存和发展必不可少的环境条件与效用, 是人类直接或间接从生态系统中得到的所有收益[1-2], 其服务种类多样, 彼此之间相互影响、相互制约, 存在着复杂的相互关系[2-5]。若一种生态系统服务的增加造成另一种生态系统服务减少, 则视为二者之间具有权衡关系, 如砍伐森林作为燃料增加生态系统的支持功能[6], 却导致调蓄功能和水土保持功能等调节功能下降。若两种服务同增同减, 则视为协同关系[2,6]。中国西南喀斯特地区是世界上最典型的热带—亚热带喀斯特分布区, 是全世界三大喀斯特集中分布区中裸露碳酸盐面积最大的地区[7-8], 该地区地貌破碎、人口超载, 不合理的土地利用方式使得其灾变承受能力低、环境敏感度高, 成为典型的生态脆弱区[9-11]。喀斯特地区土层浅薄、石漠化现象严重, 地下河网发达, 地表保水固土能力差, 土壤保持服务及水源涵养服务对该地区的可持续发展具有重要意义, 因此本文选取土壤侵

收稿日期(Received date): 2019 - 05 - 26; 改回日期(Accepted date): 2019 - 8 - 27
基金项目(Foundation item): 国家重点基础研究发展计划(2015CB452702); 国家自然科学基金项目(41671098)。[National Basic Research Program of China (2015CB452702); National Natural Science Foundation of China (41671098)]
作者简介(Biography): 高江波(1984 -), 男, 山东临沂人, 副研究员, 主要研究方向: 喀斯特土地利用、地表过程、资源环境效应研究。[GAO Jiangbo (1984 -), male, born in Linyi, Shandong province, associate professor, research on land use, surface process, resource and environment effect in karst areas] E-mail: gaojiangbo@igsnrr.ac.cn

蚀及产流量两种生态系统服务类型进行空间解析及二者的权衡/协同关系分析，以期为该地区的生态系统管理提供借鉴。

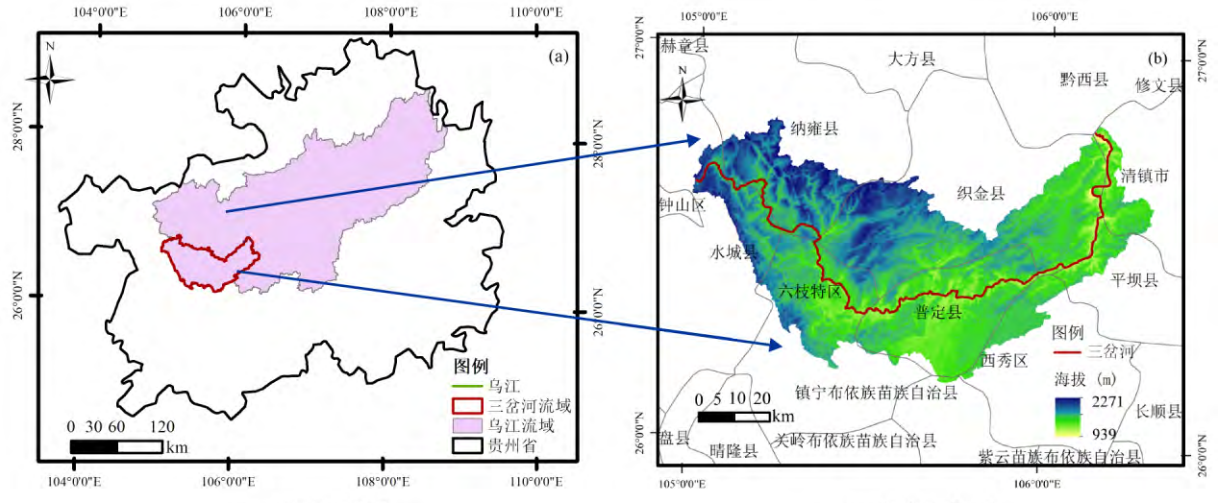
在喀斯特地区，诸多有关石漠化、水土流失、水源涵养的研究相继展开，多为单个生态系统服务类型的研究[8,11,12]，对于多个生态系统服务之间相互关系的研究尚显薄弱，针对喀斯特生态系统服务之间的权衡与协同关系的研究仍处于待发展阶段[13]。对于自然环境与人类活动空间异质性显著的喀斯特地区，多种生态系统服务之间权衡与协同关系的定量化研究亟须加强。本文以喀斯特地区备受关注的两种生态系统服务，土壤侵蚀及产流量为切入点，展开二者的权衡/协同关系研究，识别其空间关系，借助地理探测器探究该空间关系分布的原因。此外，以地貌、岩性类型为变量对空间关系进行统计以明晰喀斯特地区土壤侵蚀及产流量空间关系分布的异质性特征。

喀斯特地区进行生态系统服务权衡/协同关系研究的方法多为传统的相关分析方法[13]，难以准确刻画生态系统服务之间的非线性复杂关系。地理加权回归方法将空间点的位置坐标考虑到算法中，相比于一般的线性回归方法，能够准确地描述相关关系的空间分异特征。因此，本文使用地理加权回归方法量化流域尺度上土壤侵蚀与产流量的权衡/协同关系，并剖析其权衡/协同关系产生的原因，以期为生态系统管理提供参考。由于喀斯特地区降水丰沛、年际波动大，且产流量与侵蚀量的空间关系受降水波动影响较大，因此为减弱降水波动的随机性对结果造成的影响，本文模拟了 2000—2015 年 16 年间的土壤侵蚀及产流量数据，使用多年均值进行侵蚀量与产流量权衡关系的研究，以加强研究结果在流域尺度的代表性。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

本文以位于贵州省西北部的典型喀斯特地区三岔河流域为研究区(图 1)，该流域面积为 4860 km^2。研究区基岩以碳酸盐岩为主，岩溶作用导致该区域形成二元水文结构，水土地下漏失现象显著。喀斯特地区位于亚热带季风气候区，雨量充足，年均降水量大于 1000 mm。研究区地貌类型多样、地质类型复杂，根据周成虎等[14]提出的中国陆地地貌分类体系中的地貌划分方法，研究区共包含五种地貌类型：中海拔平原、中海拔台地、小起伏中山、中起伏中山、大起伏中山等，研究区地貌类型以小起伏中山为主，占据研究区面积的 62.05%，中海拔平原、台地等地貌类型面积较小，二者面积之和仅占研究区总面积的 4.07%。该区域共包含十种岩性类型：碎屑岩夹碳酸盐岩、灰岩与白云岩互层、白云岩与碎屑岩互层、碳酸盐岩与碎屑岩互层、碎屑岩、灰岩夹层、白云岩夹层、灰岩与碎屑岩互层、灰岩、白云岩。其中灰岩与白云岩互层占据了研究区面积的 28.18%，是分布最广泛的岩性类型，灰岩与碎屑岩互层



(a) 三岔河流域位置　　(b) 海拔空间格局

图 1　研究区概况

Fig. 1　Study area overview

(24.56%)、碎屑岩夹碳酸盐岩(16.37%)次之。以2015年为例统计研究区土地利用类型的面积,草地占研究区总面积的43.28%,是分布最广的土地利用类型;耕地次之,占研究区总面积的29.19%;再者为林地,占研究区总面积的26.25%。三岔河流域坡度较陡,平均坡度达到14.18°,坡度小于5°的面积仅为研究区总面积的13.23%,坡度大于15°的面积占研究区总面积的40.64%。

1.2 数据来源

研究所需数据包括气象数据、土地利用数据、土壤类型数据、地形地貌数据、岩性类别数据、NDVI数据、石漠化数据及岩石裸露率数据等。2000—2016年土地利用数据(30 m分辨率)及地貌、岩性类别数据均下载于中国科学院资源环境数据中心(http://www.resdc.cn);土壤机械组成数据及根系深度数据分别来自于联合国粮食及农业组织(FAO)建立的土壤数据库(HWSD)(http://westdc.westgis.ac.cn)及国家地球系统科学数据共享服务平台(http://soil.geodata.cn/data/dataresource.html)。2000—2016年气候数据下载于国家气象信息中心网站http://data.cma.cn,使用ANUSPLIN气象插值软件对气象站点进行插值得到空间栅格化数据。NDVI数据(2000—2015年,250 m分辨率)自美国地质调查局官网(https://glovis.usgs.gov)下载获得;石漠化数据(2005)来源于国家林业局发布的《第一次中国石漠化状况公报》,用于RUSLE模型修正的岩石裸露率数据由不同石漠化等级对应的岩石裸露率的均值获取。由于研究所需的数据来源不同,数据分辨率存在差异,本研究以土地利用类型数据的分辨率为基准分辨率,将其他数据的分辨率在ArcGIS中使用重采样方法采样成30 m分辨率,进而进行后续的模型运算。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST模型

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型[15]是一种用于探索生态系统的变化在改变人类福祉方面的影响和可能性有多大的工具。在本研究中InVEST模型主要用来模拟三岔河流域产流量,使用其产流量模块进行产流量模拟。产流量模块所需的数据包括:年平均降水量、年平均参考作物蒸散量,以及植被类型、土壤的最大根系埋藏深度、土地利用/覆被、根系深度、海拔、植物可利用水含量、土壤饱和导水率等因子。

产流量评估模块基于Budyko水热耦合平衡假设和潜在蒸散发、年均降水量等数据。公式如下:

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

式中,$AET(x)$、$P(x)$分别表示栅格x的年实际蒸散量、年降水量,单位均为mm。

上述公式中,土地利用/覆被类型的植被蒸散发计算采用Budyko[16]水热耦合平衡公式计算:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^{\omega}\right]^{1/\omega} \quad (2)$$

式中,$PET(x)$、ω分别表示潜在蒸散量、自然气候—土壤性质的非物理参数,潜在蒸散发基于彭曼公式获得。

1.3.2 RUSLE模型

RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation)模型不仅弥补野外观测在大尺度土壤侵蚀量获取的局限性,在不同尺度的模拟中取得较好效果[17-18],是国际上广为流行的一种模型之一。本文使用Gao和Wang[19]针对喀斯特地区的石漠化现象修正的RUSLE模型进行土壤侵蚀量的模拟,公式如下:

$$A = (1 - 0.076 \times 0.076 \times a) \times R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

式中,A表示年均土壤侵蚀量($t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$);$R$表示降雨侵蚀力($MJ \cdot mm \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$);$K$为土壤可蚀性因子($t \cdot hm^2 \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1} \cdot hm^{-2}$);$a$表示石漠化修正系数,其赋值来源于不同石漠化程度的地表岩石裸露率均值,如表1。LS为坡长坡度因子;C为人为管理与植被覆盖因子;P水土保持措施因子。其中LS、C、P是无量纲。

表1 不同石漠化程度土壤侵蚀修正系数a

Tab.1 Correctional coefficient for different degrees of rocky desertification a

石漠化程度	岩石裸露率/%	a
无	[0,20]	10
潜在	(20,30]	25
轻度	(30,50]	40
中度	(50,70]	60
强度	(70,90]	80
极强	(90,100]	95

本文采用Renard和Freimund[20]提出的降雨侵

蚀力的公式计算降雨侵蚀力; 使用 Williams 等[21]提出的侵蚀力影响计算器(EPIC)来计算 K 因子。由于喀斯特地区二元水文地质结构及严重的石漠化现象,LS 因子对 DEM 精度要求较高,本研究采用 Google earth 提供的高空间分辨率 DEM (9 m)数据计算 LS 因子,采用 Feng 等[18]在喀斯特地区进行土壤侵蚀模拟的 LS 因子计算公式模拟研究区的 LS 因子。C 因子和 P 因子参考前人在喀斯特地区进行的相关研究[18-19,22]进行赋值。

1.3.3　地理加权回归模型

采用地理加权回归方法量化空间尺度上土壤侵蚀与产流量的权衡/协同关系。线性回归模型是基于最小二乘法对参数进行估计,土壤侵蚀与产流量存在空间自相关性,无法满足传统线性回归模型的残差项独立假设,因此线性回归模型不适宜用来估计二者的空间关系。而地理加权回归(Geographically Weighted Regression,简称 GWR)是由 Brunsdon 等[23]提出的一种针对局部空间进行回归的分析方法,是传统线性回归模型的延伸,引入了位置信息作为变量进行计算,通过获取周边数据的观测值来计算二者的空间相互关系。

GWR 模型的基本形式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{k=1}^{p} \beta_k(\mu_i, v_i)\, x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中,(μ_i, v_i) 是指点 i 的地理坐标; p 为自变量的数量; y_i, x_{ik}, ε_i 分别为点 i 的因变量、自变量和随机误差; $\beta_0(\mu_i, v_i)$、$\beta_k(\mu_i, v_i)$ 分别为回归点 i 处模型的截距及斜率。

参数可通过以下公式进行估计:

$$\beta(\mu_i, v_i) = (X^T W(\mu_i, v_i) X)^{-1} X^T W(\mu_i, v_i) Y \quad (5)$$

式中,$\beta(\mu_i, v_i)$、$W(\mu_i, v_i)$ 分别为回归系数的无偏估计、空间权重矩阵,其中空间权重是地理加权回归的核心,距中心点距离越大,权重越大; X、Y 分别是自变量及因变量的矩阵。

权重采用高斯空间权函数确定,其表达形式为:

$$\omega_{ij} = \exp\left(-\frac{d_{ij}^2}{b^2}\right) \quad (6)$$

式中,ω_{ij} 为代表点 j 的权重值; d_{ij} 为点 i 和点 j 的欧几里得距离; b 为带宽,用来判断周边点是否参与计算。当中心点距周边点距离超过带宽时,权重值趋近于 0。

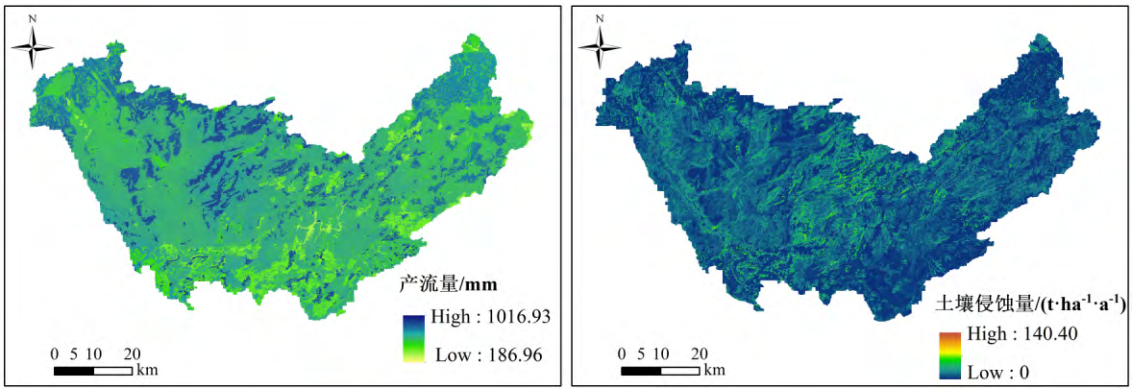
1.3.4　地理探测器方法

已有研究借助地理探测器方法进行土壤侵蚀的定量归因分析[24],为探索土壤侵蚀与产流量的空间权衡/协同关系异质性分布产生的原因,本文借助地理探测器方法对产流量的空间分布进行定量归因分析。该方法可揭示事件的分层异质性,进而揭示驱动力,其大小用 q 值表示[25]。q 值的计算基于方差分析原理,由层内方差之和与层间方差的大小关系决定,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (7)$$

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

式中,h 为自变量的分层; N_h 和 N 为层内和区域内的栅格单元数; σ_h^2 为层内方差之和; σ^2 为单元总方差; SSW 为层内方差之和; SST 为区域总方差,q 为



(a) 产流量均值　　(b) 侵蚀量均值

图 2　研究区产流量与侵蚀量(2000—2015)

Fig. 2　Water yield and soil erosion in study area during 2000 – 2015

自变量对因变量的解释力，q 值越大，自变量对因变量的解释力越大，地理探测器软件会对 q 值进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 产流量及土壤侵蚀模拟与验证

基于 InVEST 模型模拟 2000—2015 年 16 年间产流量数据，受降水丰沛与否影响，2000—2015 年 16 年间年产流量均值数据变动范围为 305.05 ~ 961.83 mm。多年平均产流量取值在 186.96 ~ 1016.93 mm 之间，均值为 643.42 mm，呈现北高南低的分布格局，与前人研究结果一致[26]。2000—2015 年 16 年间三岔河流域土壤侵蚀量均值为 12.90 t·ha^{-1}·a^{-1}，前人研究显示喀斯特地区土壤侵蚀均值为 12.3 ~ 18.84 t·ha^{-1}·a^{-1}[18,27-28]，与本研究结果较为一致。

三岔河流域产流量与侵蚀量存在显著的空间异质性，按照不同地貌类型、岩性类型统计产流量、侵蚀量均值，结果如表 2 所示。产流量在不同地貌类型中的大小排序关系为：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，呈现地形起伏度的大小与产流量的大小表现出同增同减趋势。土壤侵蚀量在不同地貌类型中的大小关系为：中海拔台地 < 中海拔平原 < 中海拔丘陵 < 中起伏中山 < 小起伏中山，在台地、平原等相对平坦地区，土壤侵蚀量远远小于山地丘陵区，且在山地丘陵区，起伏度越高，侵蚀量越大。

表 2 不同地貌类型区多年平均产流量及侵蚀量(2000—2015 年)

Tab. 2 Mean value of water yield in different geomorphological types (2000 – 2015 年)

地貌类型	产流量/mm	侵蚀量/(t·ha^{-1}·a^{-1})
小起伏中山	636.48	13.41
中海拔平原	590.59	7.40
中海拔丘陵	612.68	11.93
中海拔台地	607.22	6.74
中起伏中山	698.53	13.27

不同岩性类型区产流量与侵蚀量差异显著(表 3)，产流量均值波动范围为 612.76 ~ 673.27 mm，侵蚀量波动范围为 10.15 ~ 19.30 t·ha^{-1}·a^{-1}。产流量在不同岩性类型中的大小排序为：碎屑岩夹碳酸盐岩 < 碎屑岩 < 白云岩 < 白云岩与碎屑岩互层 < 碳酸盐岩与碎屑岩互层 < 灰岩 < 白云岩夹层 < 灰岩夹层 < 灰岩与白云岩互层 < 灰岩与碎屑岩互层。侵蚀量在不同岩性类型区大小排序为白云岩 < 灰岩与白云岩互层 < 灰岩夹层 < 碳酸盐岩与碎屑岩互层 < 白云岩与碎屑岩互层 < 灰岩 < 碎屑岩夹碳酸盐岩 < 灰岩与碎屑岩互层 < 碎屑岩 < 白云岩夹层。

表 3 不同岩性类型区多年平均产流量及侵蚀量(2000—2015 年)

Tab. 3 Mean value of water yield in different lithology types (2000 – 2015 年)

岩性	产流量/mm	侵蚀量/(t·ha^{-1}·a^{-1})
白云岩	620.37	10.15
白云岩夹层	645.24	19.30
白云岩与碎屑岩互层	632.06	12.17
灰岩	642.61	12.20
灰岩夹层	646.60	11.10
灰岩与白云岩互层	648.67	10.87
灰岩与碎屑岩互层	673.27	14.46
碎屑岩	618.99	16.09
碎屑岩夹碳酸盐岩	612.76	14.32
碳酸盐岩与碎屑岩互层	642.06	11.95

2.2 产流量与土壤侵蚀空间权衡—协同关系识别

如图 3 所示，基于 GWR 的模拟结果显示三岔河流域产流量与土壤侵蚀呈现权衡、协同关系同时存在的格局，以权衡关系为主。在空间上呈现上游、下游大部分地区权衡关系，在流域中游大部分区域呈现协同关系。三岔河流域多年平均产流量与多年

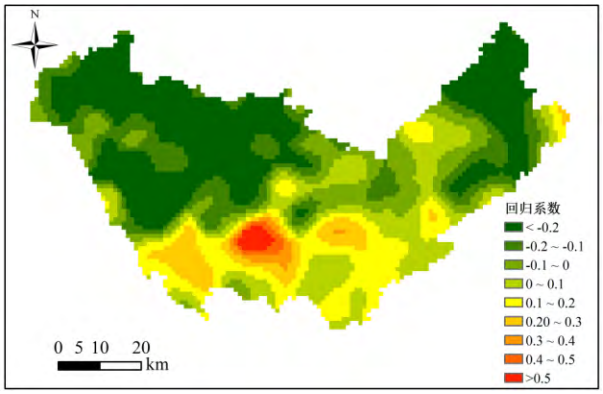


图 3 土壤侵蚀量对产流量响应的 GWR 空间回归系数

Fig. 3 Coefficient of geographically weighted regression between soil erosion and water yield

平均侵蚀量的 GWR 相关系数均值为 -0.08，表现为权衡关系，其中 63.3% 的面积表现为权衡关系，36.7% 的面积表现为协同关系。

已有研究表明土地利用类型是三岔河流域土壤侵蚀空间分布的主导因子[25]，为探究土壤侵蚀及产流量空间权衡/协同关系的作用机制，首先使用地理探测器方法探测多年平均产流量空间分布主导因素，结果如表 4 所示。各影响因子对产流量空间分布的解释力排序为：土地利用 > 潜在蒸散发 > 降水 > 海拔 > 地貌类型 > 植被覆盖度 > 岩性 > 坡度。土地利用是产流量空间分布的主导因子，对产流量空间分布的解释力达到 59.5%。由此可见，土壤侵蚀与产流量空间分布的主导因子均为土地利用类型，而不同土地利用类型的产流及侵蚀机制不一致，如在未利用地、建设用地地区，产流量最高，但土壤侵蚀量却最低，草地的产流量大于耕地，而侵蚀量远远小于耕地（图 4）。例如，若区域中心点为旱地，周边为草地，旱地的侵蚀量大于草地，旱地的产流量小于草地，则表现为空间权衡关系；若区域中心点为旱地，周边为林地，旱地的产流量大于林地，旱地的侵蚀量同样大于林地，则表现为空间协同关系。

表 4　产流量影响因子 q 值及显著性 P

Tab. 4　q value of influencing factors for water yield and its significance P

影响因子	q	P
坡度	0.02	0.00
海拔	0.09	0.00
植被覆盖度	0.04	0.00
潜在蒸散发	0.29	0.00
降水	0.22	0.00
土地利用	0.60	0.00
岩性	0.03	0.00
地貌类型	0.06	0.00

2.3　权衡/协同关系空间异质性统计

产流量与土壤侵蚀的空间权衡关系存在较高的空间异质性，本文统计了不同地貌类型区、不同岩性类型区的 GWR 回归系数。不同地貌类型区，土壤侵蚀与产流量呈现出不同的权衡协同关系（表 5）。中海拔平原、中海拔台地地区，土壤侵蚀与产流量的回归系数为正值，表现为协同关系，意味着区域中心点产流量大于周边地区，侵蚀量同样大于周边地区，反之亦然，即产流量大的地区侵蚀量也大。而在中海拔丘陵、小起伏中山、中起伏中山等山地丘陵区，回归系数均值为负值，且随着地形起伏度的增加，回归系数的绝对值呈现上升趋势，表现为权衡作用增强，受地形、气候、人类活动等多种因素影响，产流量越高的地方土壤侵蚀量反而较低。

不同岩性类型区，产流量与土壤侵蚀的空间权衡关系差异显著（表 6），白云岩、白云岩夹层、灰岩、

表 5　不同地貌类型区土壤侵蚀与产流量 GWR 回归系数

Tab. 5　Coefficient of geographically weighted regression between soil erosion and water yield in different geomorphological types

地貌类型	回归系数
小起伏中山	-0.065
中海拔平原	0.149
中海拔丘陵	-0.002
中海拔台地	0.05
中起伏中山	-0.227

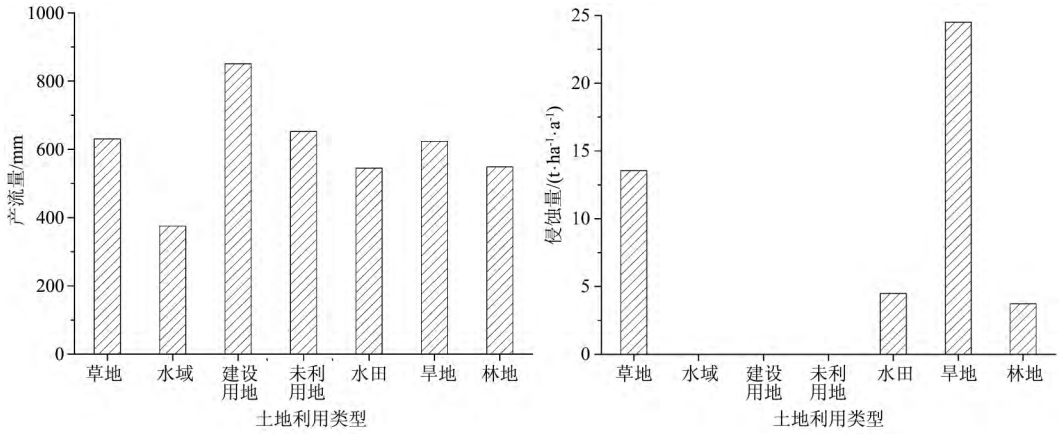


图 4　不同土地利用类型产流量与侵蚀量

Fig. 4　Mean value of water yield and soil erosion in different land use types

灰岩夹层、灰岩与白云岩互层、灰岩与碎屑岩互层、碎屑岩、碳酸盐岩与碎屑岩互层区域，产流量与土壤侵蚀呈现为权衡关系，白云岩与碎屑岩互层、碎屑岩夹碳酸盐岩层，产流量与土壤侵蚀呈现为协同关系。其中，白云岩夹层地区，产流量与土壤侵蚀的空间权衡关系最为显著，GWR 地理加权回归系数为 -0.12，白云岩与碎屑岩互层地区，产流量与土壤侵蚀的空间协同关系最显著，GWR 地理加权回归系数为 0.04。

表 6 不同岩性类型区土壤侵蚀与产流量 GWR 回归系数

Tab. 6 The coefficient of geographically weighted regression between soil erosion and water yield in different lithology types

岩性	回归系数
白云岩	-0.07
白云岩夹层	-0.12
白云岩与碎屑岩互层	0.04
灰岩	-0.1
灰岩夹层	-0.03
灰岩与白云岩互层	-0.09
灰岩与碎屑岩互层	-0.04
碎屑岩	-0.07
碎屑岩夹碳酸盐岩	0.01
碳酸盐岩与碎屑岩互层	-0.09

3 结论与讨论

3.1 结论

本文采用地理加权回归方法识别了研究区土壤侵蚀及产流量的权衡/协同关系的空间分布状况，借助于地理探测器方法分析其相互关系空间分布的形成机制，选取地貌、岩性类别作为空间要素，对二者之间相互关系进行空间异质性探讨，得到的主要结论如下：

(1) 研究区土壤侵蚀与产流量存在复杂的相互关系，土壤侵蚀与产流量在空间尺度上表现为权衡、协同关系共同存在，权衡面积比例较大，占据研究区面积的 63.3%，协同面积比例较小，占据研究区面积的 36.7%，空间分布上呈现上游、下游大部分地区为权衡关系，在流域中游呈现协同关系。

(2) 土地利用类型的空间分布是导致土壤侵蚀及产流量权衡/协同关系空间分布的主导因子。土壤侵蚀与产流量的时空权衡关系受多个要素影响，其影响因素包括：地形、人类活动、气候因子等。

(3) 土地利用空间分布的区域差异性导致不同区域的土壤侵蚀与产流量具有不同的权衡/协同关系，二者空间相互关系的空间异质性差异显著。

3.2 讨论

基于地理加权回归及地理探测器的归因结果判断土地利用类型是影响土壤侵蚀与产流量空间关系分布的主要原因。地理探测器结果显示土地利用是影响土壤侵蚀、产流量空间分布差异的主导因子，不同土地利用类型对土壤侵蚀和产流量的影响存在较大差异。例如，土地利用类型的土壤侵蚀量大小关系如下：旱地 > 草地 > 水田 > 林地 > 建筑用地，而产流量在不同土地利用类型中的大小关系与其不一致，为建设用地 > 未利用地 > 草地 > 旱地 > 林地 > 水田。由于不同土地利用类型对产流量及土壤侵蚀的作用机制不同，因此土壤侵蚀与产流量在空间上权衡与协同关系并存。二者的空间关系呈现高度的空间异质性特征。例如，不同地貌类型区中，地形相对平坦的区域，土壤侵蚀与产流量表现为协同关系，地形相对陡峭的地方，受复杂的地形、气候、人类活动等条件影响，土壤侵蚀与产流量表现为权衡关系。中海拔平原、中海拔台地地区，土壤侵蚀与产流量整体上表现为协同关系，中海拔丘陵、小起伏中山、中起伏中山地区表现为权衡关系。不同岩性类型区中，白云岩、白云岩夹层、灰岩、灰岩夹层、灰岩与白云岩互层、灰岩与碎屑岩互层、碎屑岩、碳酸盐岩碎屑岩互层分布区中产流量与土壤侵蚀表现为权衡关系，白云岩与碎屑岩互层、碎屑岩夹碳酸盐岩分布区中产流量与土壤侵蚀表现为协同关系。

由于喀斯特地区地表地下高度连通的水文结构导致其侵蚀特征、产流过程极其复杂，对于地下漏失的侵蚀机理尚不明确，本文仅考虑了 RUSLE 模型模拟的土壤侵蚀量及 InVEST 模型模拟的产流量间的关系，针对地下漏失及地下漏失对产流量及侵蚀量之间关系的研究仍需加强，将是下一步研究工作的重点内容。尽管已有大量研究针对喀斯特地区生态系统服务进行定量估算、机制剖析、动态监测，但多为单个生态系统的研究，对多个生态系统之间复杂相互关系的研究亟须加强。深入研究生态系统服务

之间的相互作用关系，并揭示土地利用变化、气候变化等因子对生态系统服务单要素及生态系统服务之间的相互作用关系的影响，对制定生态系统服务管理政策具有重要意义。

致谢：感谢中国科学院成都山地灾害与环境研究所邓伟研究员、中国科学院地理科学与资源研究所戴尔阜研究员、中国科学院亚热带农业生态研究所陈洪松研究员等给予的帮助！

参考文献(References)

[1] 欧阳志云，王如松，赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报，1999，**10**(5)：635－640. [OU YANG Zhiyun，WANG Rusong，ZHAO Jingzhu. Ecosystem services and their economic valuation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology，1999，**10**(5)：635－640]

[2] 戴尔阜，王晓莉，朱建佳，等. 生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J]. 地球科学进展，2015，**30**(11)：1250－1259. [DAI Erfu，WANG Xiaoli，ZHU Jianjia，et al. Progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. Advances in Earth Science，2015，**30**(11)：1250－1259]

[3] HOLLING C S，MEFFE G K. Command and control and the pathology of natural resource management [J]. Conservation Biology，1996，**10**(2)：328－337.

[4] CARPENTER S R，DEFRIES R，DIETZ T，et al. Millennium ecosystem assessment：research needs [J]. Science，2006，314：257－258.

[5] CHAN K A，SHAW M R，Cameron D R，et al. Conservation planning or ecosystem services [J]. PLOS Biology，2006，**4**(11)：2138－2152.

[6] RODRIGUEZ J P，BEARD T D，BENNETT E M，et al. Trade-offs across space，time，and ecosystem services [J]. Ecology and Society，2006，**11**(1)：28－41.

[7] 刘春，吕殿青，陈洪松，等. 中国西南岩溶地区生态环境脆弱性及成因分析[J]. 地质灾害与环境保护，2014，**25**(2)：49－53. [LIU Chun，LV Dianqing，Chen Hongsong，et al. Causes for the eco-environmental vulnerability of the karst areas in Southwest China [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation，2014，**25**(2)：49－53]

[8] 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[J]. 地理学报，2012，**67**(7)：878－888. [XIONG Kangning，LI Jin，LONG Mingzhong. Features of soil and water loss and key issues in demonstration areas for combating karst rocky desertification [J]. Acta Geographica Sinica，2012，**67**(7)：878－888]

[9] 吕明辉，王红亚，蔡运龙. 西南喀斯特地区土壤侵蚀研究综述[J]. 地理科学进展，2007，**26**(2)：87－96. [LV Minghui，WANG Hongya，CAI Yunlong. General review of soil erosion in the Karst area of southwest China [J]. Progress in geography，2007，**26**(2)：87－96]

[10] 陈佑启，VERBURG P H. 中国土地利用/土地覆盖的多尺度空间分布特征分析[J]. 地理科学，**20**(3)：197－202. [CHEN Youqi，VERBURG P H. Multi-scale spatial characterization of land use/land cover in China [J]. Scientia geographica sinica，2000，**20**(3)：197－202]

[11] PENG Tao，WANG Shijie. Effects of land use，land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China [J]. Catena，2012，**90**(1)：53－62.

[12] DAI Quanhou，PENG Xudong，YANG Zhi，et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst rocky desertification Area [J]. Catena，2017，152：218－226.

[13] 韩会庆，苏志华. 喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J]. 中国岩溶，2017，**36**(3)：352－358. [HAN Huiqing，SU Zhihua. Research progress and prospects of karst ecosystem services [J]. Carsologica Sinica，2017，**36**(3)：352－358]

[14] 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[J]. 地球信息科学学报，2009，**11**(6)：707－724. [ZHOU Chenghu，CHENG Weiming，QIAN Jinka，et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1∶ 1000000 in China [J]. Geo-information Science，2009，**11**(6)：707－724]

[15] SHARP R，TALLIS H. T，RICKETTS T，et al. InVEST User's Guide Chinese Version [M]. The Natural Capital Project，Stanford University，University of Minnesota，The Nature Conservancy，and World Wildlife Fund. 2016，123－143.

[16] ZHANG L，HICKEL K，DAWES W R，et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. Water Resources Research，2004，**40**(2)：W02502(1－14).

[17] 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[J]. 水土保持研究，2013，**20**(3)：11－18. [WANG Yao，CAI Yunlong，PAN Mao. Analysis on the relationship between soil erosion and land use in Wujiang River Basin in Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation，2013，**20**(3)：11－18]

[18] FENG Teng，CHEN Hongsong，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 [J]. Geomorphology，2016，**253**：217－224.

[19] GAO Jiangbo，WANG Huan. Temporal analysis on quantitative attribution of karst soil erosion：A case study of a peak-cluster depression basin in Southwest China [J]. Catena，2019，**172**：369－377.

[20] RENARD K G，FREIMUND J R. Using monthly precipitation data to estimate the R factor in the revised USLE [J]. Journal of Hydrology，1994，**157**(1/4)：287－306.

[21] WILLIAMSJ R，JONES C A，KINIRY J R，et al. The EPIC crop growth-model [J]. TRANSACTIONS OF THE ASAE，1989，**32**

(2): 497 – 511.

[22] 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[J]. 北京林业大学学报,2006,28(4): 67 – 71. [XU Yueqing, SHAO Xiaomei. Estimation of soil erosion supported by GIS and RUSLE: a case study of Maotiaohe Watershed, Guizhou Province [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 67 – 71]

[23] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281 – 298.

[24] 王欢,高江波,侯文娟. 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[J]. 地理学报,2018,73(09): 66 – 78. [WANG Huan, GAO Jiangbo, HOU Wenjuan. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different morphological types of geomorphology in karst areas: Based on the geographical detector method [J]. Acta Geographica Sinica, 2018,73(09): 66 – 78]

[25] 王劲峰,徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017,72(1): 116 – 134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116 – 134]

[26] 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[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320 – 330. [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 [J]. Progress in Geography, 2016, 35(3): 320 – 330]

[27] ZENG Cheng, WANG Shijie, BAI Xiaoyong, et al. Soil erosion evolution and spatial correlation analysis in a typical karst geomorphology using RUSLE with GIS [J]. Solid Earth, 2017, 8(4): 721 – 736.

[28] Febles - González, M J, Vega - Carre? o, et al. Soil loss from erosion in the nest 50 years in karst regions of Mayabeque province, Cuba [J]. Land Degradation & Development, 2015, 25(6): 573 – 580

Spatio-temporal Tradeoff of Karst Water Yield and Soil Erosion Based on GWR Model: A Case Study in Sancha River Basin of Guizhou Province, China

GAO Jiangbo[1,2*], WANG Huan[3]

(1. *Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, CAS, Beijing* 100101, *China*;
2. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing* 100101, *China*;
3. *Peking University, Beijing* 100871, *China*)

Abstract: Quantitative assessment of ecosystem services in karst areas, such as soil conservation and water yield, is essential for regional sustainable development. Identifying the antagonistic/synergistic relationship of these services could provide the scientific basis for ecosystem-based management. Currently, most research on karst ecosystem services trade-offs and synergies were conducted qualitatively. However, quantitative studies on the spatial and temporal variability of the relationship are still lacking, especially at the basin scale. In this study, the Sancha River Basin in Guizhou Province of China, a typical karst-peak cluster depression area, was selected as the study area. The Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) model and Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model were applied to quantitatively assess water yield and soil erosion from 2000 to 2015, respectively. The Geographically Weighted Regression (GWR) method was used to quantify the relationships of trade-offs/synergies between water yield and soil erosion services and to further display their spatial variability. The results showed that: (1) both anatagonistic and synergistic relationships existed between the two ecosystem services and were found in 63.3% and 36.7% of the study area, respectively. At the basin scale, the trade-offs between soil erosion and water yield were mainly found in the upstream and downstream areas. While the

areas with synergistic relationship mainly located in the middle reaches. (2) The land use types were the main cause of the spatial distribution of trade-offs and synergies relationships between the two services. The distribution of land use types determined the spatial heterogeneity of the relationships in the study area. (3) The spatial heterogeneity of relationships were categorized based on the local geomorphological conditions. For example, in the middle elevation plain and terrace areas, soil erosion and water yield generally showed synergistic relationships. However, the relationships changed to trade-offs in the areas of middle elevation hill, small relief mountain and middle relief mountain. This study can provide scientific references for karst ecosystem services management.

Key words: water yield; soil erosion; trade-offs and synergies relationship; GWR; InVEST model; RUSLE model; karst area