

# 基于CSLE模型的珠江流域土壤侵蚀强度评价

陈羽璇<sup>1</sup>, 杨勤科<sup>1, 2†</sup>, 刘宝元<sup>3, 4</sup>, 黄晨璐<sup>1</sup>, 王春梅<sup>1, 2</sup>, 庞国伟<sup>1, 2</sup>

(1. 西北大学城市与环境学院, 710127, 西安; 2. 旱区生态水文与灾害防治国家林业局重点实验室, 710127, 西安;  
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 4. 北京师范大学地理学院, 100875, 北京)

**摘要:** 为探讨珠江流域土壤侵蚀状况, 分析研究区土壤侵蚀的空间格局及主控因子, 本文基于中国土壤侵蚀模型 (Chinese Soil Loss Equation, CSLE), 使用地图代数和空间插值2种方法进行土壤侵蚀制图, 并应用地理探测器方法分析土壤侵蚀的主控因子。结果表明: 1) 研究区土壤侵蚀主要位于研究区内贵州省及云南省、广西中部和广东省沿海区, 其中强烈和极强烈侵蚀分布范围较小且位于较零散的坡耕地上; 2) 地图代数法的制图结果对局地变异表达较好, 而空间插值法则对侵蚀速率的宏观格局表达更好, 因此空间插值法可作为区域土壤侵蚀制图的首选方法; 3) 土地利用类型是影响土壤侵蚀的主控因子, 其次为植被的影响, 其他因素(降雨、地形和土壤等)总体上未表现出控制性影响。因此, 调整土地利用结构、优化植被水土保持功能是今后的主要治理方向, 该研究结果可为该区水土流失治理和生态监视提供科学依据。

**关键词:** 土壤侵蚀; CSLE模型; 主控因子; 地图代数; 空间插值; 珠江流域

中图分类号: S157.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-2673(2021)06-0086-08

DOI: 10.16843/j.sswc.2021.06.011

## Assessment of soil erosion intensity in Pearl River Basin based on CSLE model

CHEN Yuxuan<sup>1</sup>, YANG Qinke<sup>1, 2</sup>, LIU Baoyuan<sup>3, 4</sup>, HUANG Chenlu<sup>1</sup>, WANG Chunmei<sup>1, 2</sup>, PANG Guowei<sup>1, 2</sup>

(1. College of Urban and Environment, Northwest University, 710127, Xi'an, China; 2. Key Laboratory of State Forest Administration on Ecological Hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, 710127, Xi'an, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academic Sciences and Ministry of Water Resources, 712100, Yangling, Shaanxi, China;  
4. College of Geography, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

**Abstract** [Background] Soil erosion has seriously threatened the social and economic development in many regions of the world. The Pearl River Delta is one of the most dynamic economic zones in China and even the world. The Pearl River Basin is located in the south subtropical region, with the disadvantages of heavy precipitation and thin soil. Coupled with the interference of human activities, soil erosion has become more severe. However, it is still insufficient in the current research on the spatial differentiation characteristics and main controlling factors of soil erosion in the Pearl River Basin, which is not suitable for the prosperous economy. Therefore, it is urgent to make use of modern scientific and technological means to systematically study soil erosion in this area. [Methods] In this study, the Pearl River Basin

收稿日期: 2020-10-19 修回日期: 2021-09-13

项目名称: 中国科学院战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”(XDA20040202)

第一作者简介: 陈羽璇(1994—), 女, 硕士研究生。主要研究方向: 区域土壤侵蚀调查与定量评价。E-mail: yxchen@stumail.nwu.edu.cn

† 通信作者简介: 杨勤科(1962—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析。E-mail: qkyang@nwu.edu.cn

was selected as the study area, and China Water Conservancy Survey (WRI) was used to set up sampling survey units. The Chinese Soil Loss Equation (CSLE) was used, based on the sample survey unit data interpreted by high-resolution remote sensing images and thematic data on soil erosion factors. The map algebra and spatial interpolation were used to calculate the soil erosion rate map in the study area, and to analyze the spatial pattern of soil erosion in the Pearl River Basin. Furthermore, the geo-detector method was used to quantitatively identify the main influencing factors. [Results] 1) Among the factors affecting soil erosion rate,  $R$  and  $LS$  are generally higher, which were the main inducing factors of soil erosion. The  $B$  factor value was low, while the  $E$  and  $T$  factor values were high. The study area had good vegetation coverage and was the main inhibitor of soil erosion. 2) The soil erosion in the Pearl River Basin mainly concentrated in Guizhou and Yunnan provinces, central Guangxi and coastal areas of Guangdong province. The areas of intense and extremely intense erosion were relatively small and distributed on relatively scattered sloping farmland. The mean values of soil erosion rate mapped by map algebra and spatial interpolation were  $791.78 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  and  $615.37 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  respectively. The mean values of the two soil erosion rates were relatively close. The average value of soil erosion rate calculated by map algebra method was higher, which might be related to the difficulty of integrating water conservation measures into the calculation. 3) Except for hilly and mountainous area of Zhejiang-Fujian, land use pattern was the main controlling factor of soil erosion, and the influencing factor  $Q$  value was above 47%. Secondly,  $B$  factor had a great influence on soil erosion rate and its spatial distribution.  $T$  factor ranked the third, and  $K$  factor and  $R$  factor had little influence. That was related to the high vegetation coverage in the study area, which was dominated by forest and grass vegetation. [Conclusions] Two methods of map algebra and spatial interpolation are used to map soil erosion in the Pearl River Basin. Soil erosion is mainly controlled by land use and biological measures. Adjusting land use structure and optimizing the soil conservation function of vegetation are the main direction of future management. This study may provide a reliable scientific basis for ecological environment restoration and soil conservation in this region, and promote the development of soil erosion research in subtropical region.

**Keywords:** soil erosion; CSLE model; dominant influence factor; map algebra; spatial interpolation; Pearl River Basin

土壤侵蚀已严重威胁世界许多地区的社会经济发展<sup>[1]</sup>, 对其治理受到广泛关注<sup>[2]</sup>, 土壤侵蚀的治理需以区域土壤侵蚀调查制图数据为基础。自20世纪90年代以来, 国内外学者对区域土壤侵蚀评价进行一系列研究<sup>[2]</sup>。Lu等<sup>[3]</sup>和Teng等<sup>[4]</sup>先后用RUSLE对澳洲土壤侵蚀进行评价, Borrelli等<sup>[5]</sup>在全球尺度上进行土壤侵蚀定量分析, 刘宝元等<sup>[6]</sup>基于抽样调查方法进行全国土壤水力侵蚀普查制图, 杨志成等<sup>[7]</sup>在抽样调查基础上进行县域和省域土壤侵蚀评价。目前已初步形成对坡面和小流域尺度土壤侵蚀速率的精度评价方法和对区域尺度侵蚀危险性评价方法, 但区域尺度上实现土壤侵蚀速率的调查和制图方法有待研究。

珠江是中国第三大河流, 珠江三角洲是我国乃至世界最具活力的经济区之一。由于地处南亚热带, 降水量大、土层薄, 加上人类活动干扰, 珠江流域

土壤侵蚀愈发严峻<sup>[8-9]</sup>。自1990年以来, 研究者对珠江流域土壤侵蚀及石漠化等进行一些研究<sup>[9-13]</sup>, 但目前的研究对流域土壤侵蚀空间分异特征和主控因子的认识不足, 与珠江三角洲繁荣的经济不相适应, 不能有效支撑珠江流域水土保持规划和决策。为此, 迫切需要利用现代科学技术手段, 对该区土壤侵蚀进行系统研究。

笔者基于抽样调查单元获取的相关信息和区域土壤侵蚀因子数据, 结合CSLE模型<sup>[14]</sup>与GIS技术, 采用地图代数和空间插值2种方法对研究区土壤侵蚀速率制图并进行土壤侵蚀分析, 以期为该地区生态环境治理及水土保持工作实施提供可靠的科学依据, 同时促进我国亚热带地区土壤侵蚀的研究。

## 1 研究区概况

研究区包括珠江流域及海南省等相邻区

(图1),总面积约 59.14 万 km<sup>2</sup>。珠江流域地貌类型复杂,山地、丘陵占总面积 94.4%,平原面积小且分散;西江中上游地区以石灰岩山地为主,东江流域以花岗岩丘陵为主,北江中上游地区干流西侧为石灰岩山地、东侧为红岩盆地、下游以花岗岩丘陵为主。流域地处亚热带,年平均气温在 14~22℃之间;流域内年平均降水量 1 470 mm,自然植被以常绿阔叶林为主,主要土地利用类型为林地、草地和耕地。

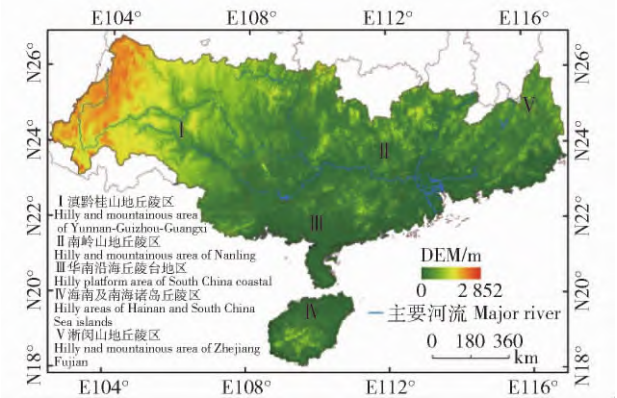


图1 研究区位置图

Fig.1 Location map of the study area

主要土壤类型有赤红壤、红壤、黄壤和水稻土等。

本研究的数据主要包括 2 部分,一是土壤侵蚀抽样调查数据,研究区(包括陆地部分 55 km 缓冲区)共布设抽样调查单元 1 695 个(图2),该数据基于高分辨率影像解译而来,主要包含土地利用类型和水土保持措施 2 部分解译内容,精度优于 1:5 000<sup>[15]</sup>;二是用于计算区域土壤侵蚀因子专题数据。数据及其来源详见表 1。

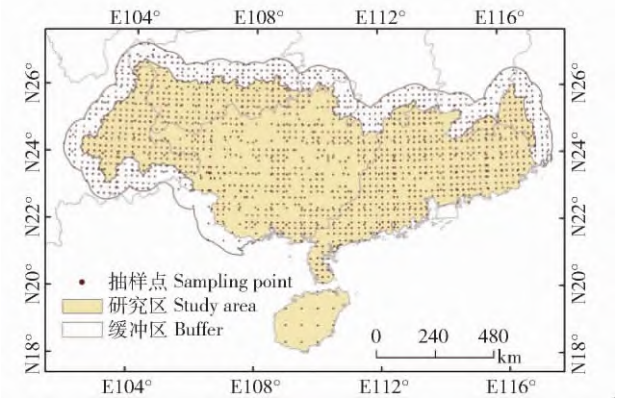


图2 抽样单元分布图

Fig.2 Distribution of sampling units

表1 基础数据一览表

Tab.1 List of basic data

| 编号 No. | 基础数据 Basic data  | 数据来源 Sources of the data  | 分辨率 Resolution                     |
|--------|--|---|------------------------------------|
| 1      | 降雨侵蚀力 Rainfall erosivity   | 项目组提供 From project team   | 1 km                               |
| 2      | 土壤可蚀性 Soil erodibility   | 项目组提供 From project team   | 30 m                               |
| 3      | 坡度坡长因子 Slope steepness and slope length factor   | 项目组提供 From project team   | 30 m                               |
| 4      | 抽样调查单元土地利用和水土保持措施数据 Land use and soil conservation measures data in sampling survey unit | 项目组提供 From project team   | 矢量数据<br>Vector data                |
| 5      | 土地利用数据( GLC30) Land use type   | ( <a href="http://data.ess.tsinghua.edu.cn/">http://data.ess.tsinghua.edu.cn/</a> ) 网站下载 Website download                             | 30 m                               |
| 6      | MODIS 数据集( percent_Tree_cover、percent_NonTree_vegetate) MODIS dataset                    | ( <a href="https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/">https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/</a> ) 网站下载 Website download | 250 m                              |
| 7      | 研究区耕作区划图 Cultivation area map of study area  | 《区域水土流失动态监测技术规定》( 2018 年 8 月版) ①“Technical Rules for Dynamic Monitoring of Regional Water and Soil Erosion ”( August 2018 edition)    | 矢量及表格数据<br>Vector and tabular data |
| 8      | 水土保持分区 Regional divisions by soil and water conservation                                 | 根据赵岩等 <sup>[16]</sup> 附图数字化 Digitizing based on the figure by Zhao Yan et al <sup>[16]</sup>  | 矢量数据<br>Vector data                |

注: 1~4 均系泛第三极土壤侵蚀定量评价与分区防控对策( XDA20040202) 项目组的阶段成果数据。Notes: 1~4 are all the stage result data of the project team for “Quantitative Evaluation of Pan-third Pole Soil Erosion and Regional Prevention and Control Countermeasures” ( XDA20040202) .

① 水利部水土保持监测中心《区域水土流失动态监测技术规定( 试行) 》2018 年 8 月 The Center of Soil and Water Conservation Monitoring , Ministry of Water Resources. Technical rules for dynamic monitoring of regional water and soil erosion ( trial) . ( 2018. 8)

## 2 研究方法

### 2.1 土壤侵蚀因子计算

笔者使用 CSLE 模型<sup>[14]</sup> 计算土壤侵蚀速率。所用参数为全球降雨侵蚀力因子(  $R$  因子)、中国土壤可蚀性因子(  $K$  因子)、全球  $L$  坡长因子与  $S$  坡度因子(  $LS$  因子)。这 3 个因子的计算方法详见第一次全国水利普查<sup>[17]</sup> 和相关文献, 本文主要介绍水土保持措施因子的计算。

植被覆盖与生物措施因子(  $B$  因子): 基于 Borrelli 等的<sup>[5]</sup>  $C$  因子计算方法, 根据研究区实际情况改进。对农业用地  $C$  因子赋值为 1; 对非农业用地  $C$  因子, 结合 GLC30 土地利用分类, 定义相应土地利用  $C$  因子值的约束范围。

$$C_{NA} = \text{MIN}_{CF} + (\text{MAX}_{CF} - \text{MIN}_{CF}) (1 - T_C) \quad (1)$$

式中:  $C_{NA}$  为林地、灌木覆盖  $C$  因子值;  $\text{MIN}_{CF} = 0.0001$ 、 $\text{MAX}_{CF} = 0.003$ ;  $T_C$  为林地覆盖的比例。

$$C_p = \text{MIN}_C + (\text{MAX}_C - \text{MIN}_C) \cdot (1 - N_{VS}) \quad (2)$$

式中:  $C_p$  为非林地覆盖(草地覆盖等)  $C$  因子值;  $\text{MIN}_C = 0.01$ 、 $\text{MAX}_C = 0.05$ ;  $N_{VS}$  为非林地(草地等)覆盖的比例。

裸土按照式(2)计算,  $\text{MIN}_C$ 、 $\text{MAX}_C$  取值为 0.1、0.5, 其计算结果分辨率为 250 m, 通过重采样得到 30 m 分辨率数据。最后基于 GLC30 土地利用分类合并  $C_{NA}$ 、 $C_p$ 、裸土  $C$  和耕地  $C$ , 得到  $B$  因子图层。

工程措施因子(  $E$  因子): 利用抽样单元土地利用数据, 根据《区域水土流失动态监测技术规定》中计算方法编写程序计算得到抽样单元  $E$  因子均值, 再对  $E$  因子均值的点数据进行反距离权重空间插值得到  $E$  因子图层。

耕作措施因子(  $T$  因子): 根据《区域水土流失动态监测技术规定》, 对抽样单元内耕地的轮作措施属性字段赋值, 非耕地赋值 1, 并基于 Borrelli 等<sup>[5]</sup> 对农业中水田的处理方法, 将水田赋值为 0.15, 最终得到  $T$  因子图层。

### 2.2 流域土壤侵蚀速率图制作

笔者采用 2 种方法: 空间插值法和地图代数法。空间插值法是基于抽样单元的侵蚀速率图<sup>[15]</sup>, 用地统计协同克里金插值方法, 以  $R$ 、 $K$ 、 $B$  因子作为协变量, 对耕、林、草、灌木及裸地分别插值生成不同地图, 并将水体、湿地、不透水面设置为 0, 最终得到土壤侵蚀速率专题图。地图代数法是根据准备好的各因子图层数据, 直接进行各因子相乘得到土壤侵蚀图, 考虑到  $LS$ 、 $K$  因子分辨率均为 30 m, 本研究的运

算将分辨率设置为 30 m。

### 2.3 主控性因子分析方法

基于地理探测器进行土壤侵蚀主控因子分析。

地理探测器是一种通过探测要素的空间分层异质性及揭示背后驱动力的一种统计学方法<sup>[18]</sup>, 其大小由  $q$  来衡量,  $q$  表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \times \delta^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}}; \quad (3)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2, \text{SST} = N \times \delta^2. \quad (4)$$

式中:  $h = 1, 2, \dots, L$  为自变量  $X$  的分层数;  $N_h$  和  $N$  分别为对应层为  $h$  和区域内单元数;  $\delta_h^2$  和  $\delta^2$  分别为对应层  $h$  和全部区域  $Y$  值的方差;  $\text{SSW}$  为层内方差之和;  $\text{SST}$  为区域总方差; 最终计算  $q$  的值域范围为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大, 自变量  $X$  对土壤侵蚀速率  $Y$  的分异性解释力越强。本研究以  $R$ 、 $K$ 、 $LS$ 、 $B$ 、 $E$ 、 $T$ 、植被覆盖度、坡度、土地利用作为影响因子  $X$ 。根据研究区范围及软件可处理容量, 将研究区离散化为  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的网格, 采样其中间点(共 2 万 9 050 个)作为地理探测器的输入数据。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤侵蚀影响因子分布特征

影响土壤侵蚀速率各因子中(图 3),  $R$  因子总体上呈从东至西递减的规律, 其值域为  $1786.81 \sim 16324.18 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ , 平均值为  $6813.56 \text{ MJ} \cdot \text{mm} / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ 。 $K$  因子值域为  $0 \sim 0.0125 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ , 均值为  $0.0048 \text{ t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{h} / (\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{hm}^2)$ , 有从东到西递增趋势。 $LS$  因子值域为  $0.04 \sim 21.24$ , 平均值为 8.70, 高值见于云贵高原、东部山地和海南五指山等地。 $R$ 、 $LS$  因子值普遍较高, 是土壤侵蚀的主要诱发因子。 $B$  因子、 $E$  因子和  $T$  因子, 值域分布范围依次为  $0 \sim 1$ 、 $0.15 \sim 1$ 、 $0.15 \sim 1$ , 其均值依次为 0.21、0.91、0.87。 $B$  因子值较低, 而  $E$  和  $T$  因子值较高, 研究区植被覆盖度较好, 是土壤侵蚀主要抑制因子。

### 3.2 2 种计算方法下土壤侵蚀的对比分析

3.2.1 空间分布特征对比分析 在水利部批准 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[19]</sup> 的基础上进行细分, 编制了土壤侵蚀分级图(图 4 和图 5), 研究区土壤侵蚀均主要集中分布在研究内的贵州省及云南省、广西中部和广东省沿海区, 其中强烈和极强烈侵蚀区域范围较小且分布在较零散



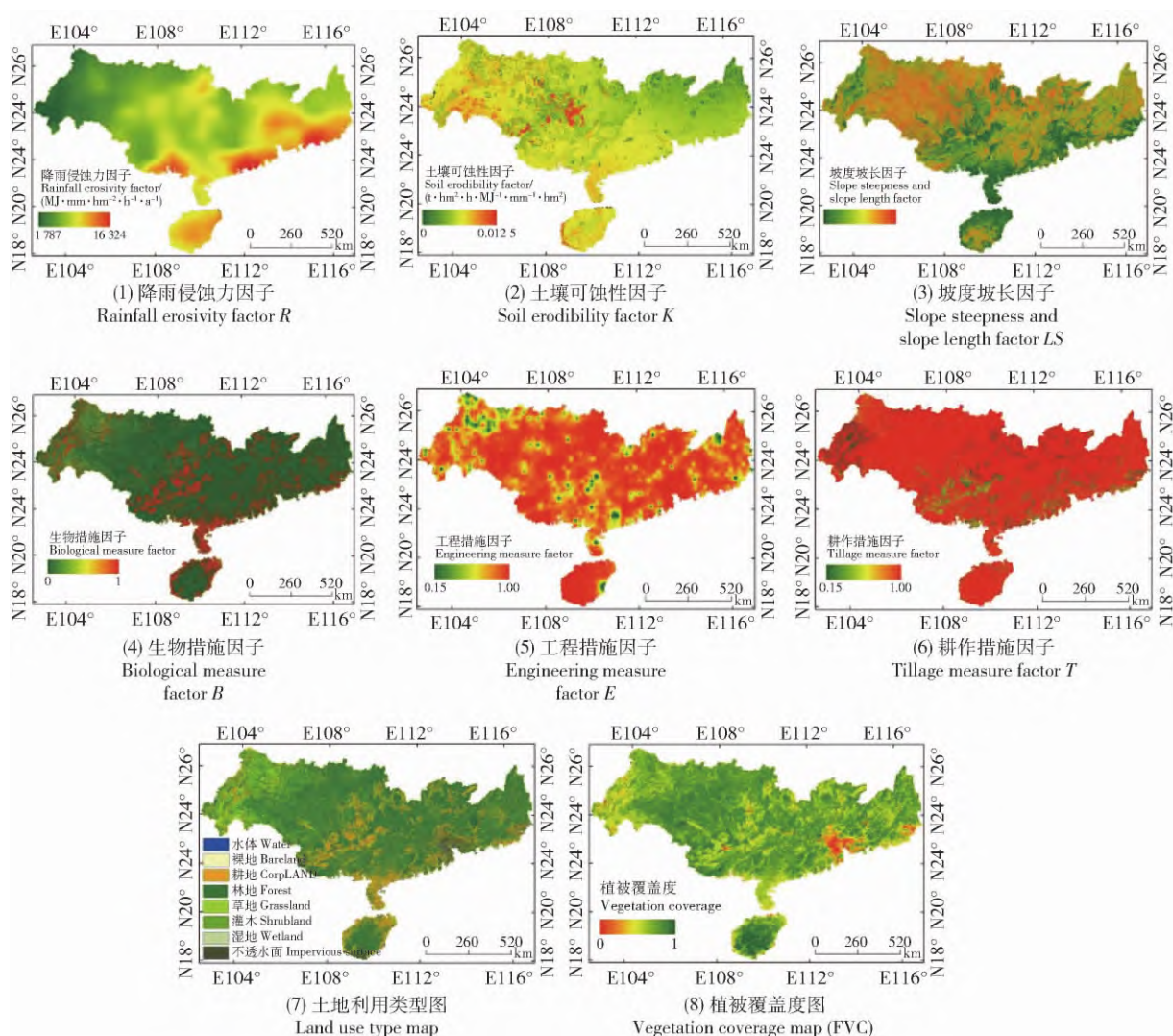


图3 CSLE 各因子空间分布图

Fig.3 Spatial distribution of CSLE factors

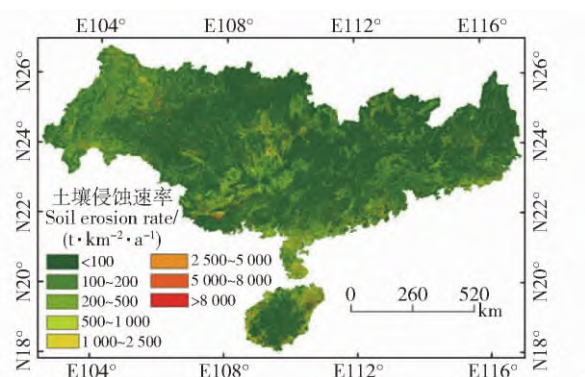


图4 地图代数法土壤侵蚀速率图

Fig.4 Soil erosion rate map based on map algebra method

的坡耕地上。2 张图上土壤侵蚀速率较高的地区与土地利用图的耕地分布较吻合,而林、草地的侵蚀则相对较弱。从微观角度看,2 图在细节纹理结构上略有不同。基于地图代数法的结果局地变化

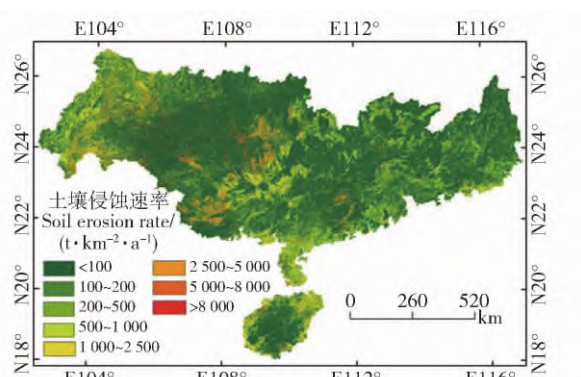


图5 空间插值法土壤侵蚀速率图

Fig.5 Soil erosion rate map based on spatial interpolation method

比较明显,空间插值结果整体较为平滑,主要原因在于插值所用的侵蚀速率为抽样单元均值,且插值过程中有平滑作用。

3.2.2 统计特征对比分析 采用地图代数和空

间插值法制图的土壤侵蚀速率均值分别为 791.78  $t/(km^2 \cdot a)$  和 615.37  $t/(km^2 \cdot a)$ , 两者值较接近。地图代数法计算的土壤侵蚀速率均值较高, 可能与水保措施难以全面纳入计算有关。笔者计算的土壤侵蚀速率值与前人研究<sup>[20-22]</sup>对比(表 2), 比较接近, 可以认为本研究的结果较为可信。对比研究区 2 种方法的主要土地利用类型的土壤侵蚀

速率结果(表 3)发现, 土壤侵蚀速率值较为接近。空间插值法制图结果, 耕地、林地的土壤侵蚀速率均值略小, 这是由于地图代数法是从整个研究区的计算, 分辨率相对较粗, 难以获取详细的水土保持措施, 空间插值法从抽样单元小流域可计算得到准确的水土保持措施值, 计算的土壤侵蚀速率值较小。

表 2 土壤侵蚀速率对比参照表

Tab. 2 Soil erosion rates of this study and extracted from references

 $t/(km^2 \cdot a)$ 

| 编号<br>No. | 研究区域<br>Study area                         | 分析方法<br>Analysis method                         | 分辨率<br>Resolution | 侵蚀速率<br>Erosion rate | 本研究侵蚀速率<br>Erosion rate in this study |                               |
|-----------|--|---|-------------------|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
|           |  |   |                   |                      | 地图代数法<br>Map algebra                  | 空间插值<br>Spatial interpolation |
|           |  |   |                   |                      |                                       |                               |
| 1         | 珠江流域<br>Pearl River Basin                  | 泥沙输 <sup>[19]</sup><br>Sediment transport ratio | —                 | 498.56               | 736.86                                | 655.04                        |
| 2         | 贵州省<br>Guizhou province                    | RUSLE <sup>[20]</sup>                           | 50 m              | 880.81               | 784.02                                | 813.44                        |
| 3         | 广西西北部岩洞区<br>Cave area of northwest Guangxi | RUSLE <sup>[21]</sup>                           | 30 m              | 716.6                | 763.97                                | 683.80                        |

注: —表示无数据。Notes: — refers to no data.

表 3 主要土地利用土壤侵蚀速率对比表

Tab. 3 Average soil erosion rates of land use types

 $t/(km^2 \cdot a)$ 

| 计算方法<br>Calculation method  | 耕地<br>Cropland | 林地<br>Forest | 草地<br>Grassland |
|-----------------------------|----------------|--------------|-----------------|
| 地图代数法 Map algebra           | 2 767.11       | 166.16       | 1 235.63        |
| 空间插值法 Spatial interpolation | 2 090.35       | 79.52        | 1 620.54        |

3.2.3 土壤侵蚀强度对比分析 根据 SL190—2007《土壤侵蚀分类分级标准》<sup>[19]</sup>对土壤侵蚀强度进行统计(表 4) 2 种方法计算的水土流失面积(轻度及其以上侵蚀)差值为 10.17%, 空间插值法略大; 土壤侵蚀均主要集中于微、轻度侵蚀; 但其在微、轻度侵蚀频率分布略有差异, 这可能与空间插值时耕地土壤侵蚀速率值较集中有关; 在中度及以上的侵蚀强度上, 土壤侵蚀速率结果频率相差不大。

总体上看 2 种方法计算的土壤侵蚀速率结果均可表达研究区土壤侵蚀状况, 考虑到土壤侵蚀防控的需要, 优先选用空间插值法。

### 3.3 土壤侵蚀主控因子分析

基于地理探测器的分析结果(表 5)表明, 整个研究区和水土保持区划的各个区, 各因子影响程度从大到小的排序基本为土地利用、水保措施(特别是 B 因子)、地形、土壤和降水。除浙闽山地丘陵区

外, 土地利用方式为土壤侵蚀的主控因子, 影响因子  $q$  值均达到 47% 以上; 其次  $B$  因子对土壤侵蚀速率及其空间分布的影响较大;  $T$  因子的影响排第三, 华南沿海丘陵台地区和海南及南海诸岛丘陵区的  $q$  值达到 40% 以上, 可能与该区复杂的耕作方式有关, 其原因有待进一步探究分析。 $K$  因子和  $R$  因子的影响较小, 这与研究区以林草植被为主、植被覆盖普遍较高有关。

表 4 空间插值法与地图代数法土壤侵蚀强度统计

Tab. 4 Soil erosion intensity statistics by spatial interpolation and map algebra

%

| 侵蚀强度<br>Soil erosion intensity | 空间插值法<br>Spatial interpolation | 地图代数法<br>Map algebra | 二者差值<br>Difference value |
|--------------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------|
| 微度侵蚀 Micro erosion             | 71.87                          | 82.04                | -10.17                   |
| 轻度侵蚀 Mild erosion              | 20.95                          | 11.34                | 9.61                     |
| 中度侵蚀 Moderate erosion          | 5.91                           | 2.99                 | 2.92                     |
| 强度侵蚀 Serious erosion           | 0.98                           | 1.33                 | -0.35                    |
| 极强度侵蚀 Extreme erosion          | 0.29                           | 1.26                 | -0.97                    |
| 剧烈侵蚀 Severe erosion            | 0.00                           | 1.04                 | -1.04                    |

## 4 结论

1) 研究区土壤侵蚀特征环境是降雨侵蚀力较

表 5 各影响因子  $q$  值统计表Tab. 5 Statistical table of  $q$  values of each impact factor

| 水土保持分区<br>Regional division by soil and water conservation    | $R$   | $K$   | $LS$  | $B$   | $E$   | $T$   | FVC   | SLP   | 土地利用类型<br>Landuse type |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| 滇黔桂山地丘陵区 Hilly and mountainous area of Yunnan-Guizhou-Guangxi | 0.004 | 0.008 | 0.109 | 0.458 | 0.002 | 0.260 | 0.062 | 0.091 | 0.570                  |
| 南岭山地丘陵区 Hilly and mountainous area of Nanling                 | 0.002 | 0.036 | 0.208 | 0.483 | 0.001 | 0.172 | 0.137 | 0.209 | 0.579                  |
| 华南沿海丘陵台地区 Hilly platform area of South China coastal          | 0.028 | 0.021 | 0.096 | 0.355 | 0.011 | 0.426 | 0.110 | 0.101 | 0.532                  |
| 浙闽山地丘陵区 Hilly and mountainous area of Zhejiang-Fujian         | 0.006 | 0.028 | 0.113 | 0.549 | 0.011 | 0.319 | 0.086 | 0.118 | 0.383                  |
| 海南及南海诸岛丘陵区 Hilly areas of Hainan and South China Sea islands  | 0.048 | 0.039 | 0.161 | 0.515 | 0.010 | 0.404 | 0.235 | 0.152 | 0.565                  |
| 研究区 Study area  | 0.018 | 0.023 | 0.082 | 0.370 | 0.002 | 0.206 | 0.069 | 0.075 | 0.470                  |

注: SLP 为坡度。Notes: SLP refer to slope.

大、坡度较陡及植被覆盖度较高,前 2 项是土壤侵蚀的主要诱发因子,后者则是土壤侵蚀的主要抑制因子。

2) 本文通过地图代数和空间插值 2 种方法制图得到土壤侵蚀速率均值分别为  $791.78 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 、 $615.37 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,研究区土壤侵蚀广泛分布,坡耕地是土壤侵蚀主要的发生部位。

3) 土地利用类型为影响土壤侵蚀速率的主控因素,  $B$  因子对土壤侵蚀速率及其空间分布影响较大,总体上讲,由于研究区植被覆盖度普遍较高,因而土壤和降雨的影响较小。调整土地利用结构、不断优化植被的水土保持生态功能是值得注意的问题。

4) 地图代数和空间插值两种方法制图结果相比,空间插值法的结果更接近土壤侵蚀的实际情况,可作为区域土壤侵蚀制图首选方法,但两者之间的差异和相互结合有待讨论。

中国科学院水利部水土保持研究所张晓萍研究员、水利部水土保持监测中心王爱娟高工、珠江水利委员会水土保持监测中心金平伟主任对本研究给予多方支持,一并致谢。

## 5 参考文献

- [1] PENNOCK D. Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 2019: 1.
- [2] PENNOCK D. Outcome document of the global symposium on soil erosion [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations 2019: 3.
- [3] LU HUA, PROSSER I P, MORAN C J, et al. Predicting sheetwash and rill erosion over the Australian continent [J]. Soil Research 2003 41(6): 1037.
- [4] TENG H F, ROSSEL R A V, SHI Z, et al. Assimilating satellite imagery and visible-near infrared spectroscopy to model and map soil loss by water erosion in Australia [J]. Environmental Modelling and Software 2016(77): 156.
- [5] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. Nature Communications, 2017 8(1): 1.
- [6] 刘宝元, 郭索彦, 李智广, 等. 中国水力侵蚀抽样调查 [J]. 中国水土保持 2013(10): 26.
- [7] 杨志成, 张卓栋, 张科利, 等. 基于普查样点的贵州省耕地土壤侵蚀空间分布 [J]. 中国水土保持科学, 2020 18(2): 66.
- [8] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [9] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [10] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [11] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [12] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [13] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [14] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [15] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [16] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [17] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [18] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [19] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [20] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [21] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [22] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [23] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [24] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [25] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [26] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [27] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [28] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [29] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [30] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [31] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [32] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [33] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [34] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [35] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [36] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [37] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [38] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [39] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [40] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [41] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [42] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [43] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [44] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [45] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [46] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [47] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [48] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [49] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [50] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [51] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [52] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [53] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [54] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [55] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [56] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [57] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [58] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [59] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [60] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [61] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [62] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [63] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [64] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [65] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [66] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [67] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [68] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [69] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [70] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [71] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [72] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [73] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [74] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [75] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [76] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [77] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [78] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [79] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [80] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [81] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [82] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [83] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [84] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [85] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [86] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [87] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [88] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [89] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [90] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [91] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [92] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [93] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [94] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [95] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [96] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [97] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [98] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [99] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.
- [100] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报 [J]. 中国水土保持 2013(10): 58.

- Conservation in China 2013(10): 58.
- [9] 杨德生. 珠江流域土壤侵蚀现状及其特点 [J]. 人民珠江, 1990(4): 38.  
YANG Desheng. Soil erosion and its characteristics of the Pearl River Basin [J]. Pearl River, 1990(4): 38.
- [10] DAI Shibao, YANG Shilun, CAI Aimin. Impacts of dams on the sediment flux of the Pearl River, southern China [J]. Catena 2009, 76(1): 36.
- [11] 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51 年来珠江流域输沙量的变化 [J]. 地理学报 2007 62(5): 545.  
DAI Shibao, YANG Shilun, CAI Aimin. Variation of sediment discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005 [J]. Acta Geographica Sinica 2007 62(5): 545.
- [12] 马永, 范建友, 胡惠方, 等. 珠江流域水土保持区划 [J]. 人民珠江 2016 37(7): 44.  
MA Yong, FAN Jianyou, HU Huifang, et al. Soil and water conservation planning of Pearl River drainage area [J]. Pearl River 2016 37(7): 44.
- [13] 王敬贵, 杨德生, 余顺超, 等. 珠江上游喀斯特地区土地石漠化现状遥感分析 [J]. 中国水土保持科学, 2007 5(3): 1.  
WANG Jinggui, YANG Desheng, YU Shunchao, et al. Analysis on Karst rocky desertification in upper reaches of Pearl River based on remote sensing [J]. Science of Soil and Water Conservation 2007 5(3): 1.
- [14] LIU Baoyuan, ZHANG Keli, XIE Yun. An empirical soil loss equation [M]. 12th ISCO Conference, Beijing: Tsinghua Press 2002: 21.
- [15] YANG Qinke, ZHUMengyang, WANGChunmei, et al. Study on a soil erosion sampling survey in the Pan-Third Pole region based on higher-resolution images [J]. International Soil and Water Conservation Research 2020, 8(4): 440.
- [16] 赵岩, 王治国, 孙保平, 等. 中国水土保持区划方案初步研究 [J]. 地理学报 2013 68(3): 21.  
ZHAO Yan, WANG Zhiguo, SUN Baoping, et al. A primary study on scheme of soil and water conservation regionalization in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2013 68(3): 21.
- [17] 国务院第一次全国水利普查领导小组办公室. 水土保持情况普查 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
Office of the First National Water Resources Survey Leading Group under the State Council. General survey of soil and water conservation [M]. Beijing: China Water and Power Press 2010.
- [18] 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.  
WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116.
- [19] 中华人民共和国水利部. SL190—2007 土壤侵蚀分类分级标准 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 8.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL190—2007 Standards for classification and gradation of soil erosion [S]. Beijing: China Water and Power Press 2008: 8.
- [20] 李智广, 刘秉正. 我国主要江河流域土壤侵蚀量测算 [J]. 中国水土保持科学 2006 4(2): 1.  
LI Zhiguang, LIU Bingzheng. Calculation on soil erosion amount of main river basin in China [J]. Science of Soil and Water Conservation 2006 4(2): 1.
- [21] 孙德亮, 赵卫权, 李威, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 模型的喀斯特地区土壤侵蚀研究—以贵州省为例 [J]. 水土保持通报 2016 36(3): 271.  
SUN Deliang, ZHAO Weiquan, LI Wei, et al. Research on soil erosion in Karst area based on GIS and RUSLE model: A case study in Guizhou province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 2016 36(3): 271.
- [22] 王珊, 史明昌, 赵丹丹, 等. 广西岩溶地区土壤侵蚀变化遥感监测—以“珠治”工程广西项目区河池片区为例 [J]. 中国水土保持 2012(3): 32.  
WANG Shan, SHI Mingchang, ZHAO Dandan, et al. Comparison of pilot area modes of soil and water conservation of Karst region in Guangxi [J]. Soil and Water Conservation in China 2012(3): 32.