

# 基于 CSLE 和抽样调查的泰国土壤水蚀评价

杜朝正<sup>1,2</sup>, 杨勤科<sup>1</sup>, 张加琼<sup>3</sup>, 马波<sup>3</sup>, 王春梅<sup>1,4</sup>, 庞国伟<sup>1,4</sup>

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.菏泽学院 城市建设学院, 山东 菏泽 274015; 3.中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 4.旱区生态水文与灾害防治国家林业和草原局重点实验室, 西安 710127)

**摘 要:**通过对泰国区域土壤侵蚀的定量评价,掌握泰国土壤水蚀特征,以期为泰国土壤侵蚀防控和相关研究提供技术和数据支撑。采用 CSLE 模型,基于 30 m 分辨率区域侵蚀因子综合运算完成泰国土壤水蚀速率计算(地图代数法制图),基于亚米级分辨率抽样调查完成抽样单元水蚀速率计算,再以抽样单元计算结果为参考,对地图代数制图结果进行直方图匹配,最终获得研究区土壤水蚀速率专题图。结果表明:(1)直方图匹配制图结果既保留了原有的空间分布特征,又具有准确的统计特征。(2)泰国平均土壤水蚀速率为 687.9 t/(km<sup>2</sup>·a),是全球平均土壤水蚀速率的 2.4 倍,个别地区达到 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)以上(占面积 13.2%,占侵蚀总量 72.0%),与全球平均水蚀速率相比,土壤水蚀较为严重,0.6%的区域年侵蚀量约占研究区侵蚀总量的 21.5%,局部侵蚀剧烈。(3)在各土地利用类型中,耕地水蚀最为严重,平均水蚀速率高达 1 020.2 t/(km<sup>2</sup>·a),水蚀速率>2 500 t/(km<sup>2</sup>·a)的热点地区 84.1%区域为耕地。由此可知,泰国局部区域的土壤水蚀较为剧烈,耕地对区域水土流失的贡献较大。

**关键词:**土壤侵蚀;中国土壤流失方程;直方图匹配;泰国

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0001-09

## Assessment of Soil Water Erosion in Thailand Based on the CSLE Model and Sampling Survey

DU Chaozheng<sup>1,2</sup>, YANG Qinke<sup>1</sup>, ZHANG Jiaqiong<sup>3</sup>, MA Bo<sup>3</sup>, WANG Chunmei<sup>1,4</sup>, PANG Guowei<sup>1,4</sup>

(1.College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2.College of Urban Construction, Heze University, Heze, Shandong 274015, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.Key Laboratory of Eco-hydrology and Disaster Prevention in Arid Areas, State Forestry and Grassland Administration, Xi'an 710127, China)

**Abstract:**Through the quantitative evaluation of soil erosion in Thailand, the characteristics of soil water erosion were mastered in order to provide technical and data support for soil erosion prevention and control and related research in Thailand. The water erosion rate in Thailand was calculated by using the CLSE (Chinese Soil Loss Equation) model. The water erosion rate in Thailand was estimated based on the comprehensive calculation (map algebraic mapping) of the erosion factor from 30 m resolution maps, the water erosion rate for the sampling units was calculated based on the sub-meter resolution sampling survey. The map algebra mapping results were calculated for the sampling units from the reference map using histogram matching. Finally, the thematic map of soil water erosion rate was obtained. The results showed that: (1) the histogram matching results not only retained the original spatial distribution characteristics, but also had accurate statistical characteristics; (2) the average soil water erosion rate in Thailand was 687.9 t/(km<sup>2</sup>·a), which was 2.4 times of the global average soil water erosion rate; in some areas, it reached to more than 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a) (accounting for 13.2% of the total area, and 72.0% of the total erosion); compared with the global average soil water erosion rate, soil water erosion in Thailand was more serious; the annual erosion in 0.6% of the area accounted for about 21.5% of the total erosion in the study area, and local erosion was severe; (3) among the land use types, the water erosion of cultivated land was the most serious, and the average water erosion rate was 1 020.2 t/(km<sup>2</sup>·a). 84.1% of hot spots, soil loss >2 500 t/(km<sup>2</sup>·a), were

收稿日期:2021-05-30

修回日期:2021-06-18

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题“土壤侵蚀定量评价与分区防控对策”(XDA20040202)

第一作者:杜朝正(1984—),男,山东菏泽人,讲师,在读博士,主要从事区域土壤侵蚀评价研究。E-mail:ducz010@stumail.nwu.edu.cn

通信作者:杨勤科(1962—),男,陕西陇县人,教授,博士,博士生导师,主要从事区域土壤侵蚀评价和侵蚀地形分析研究。E-mail:qkyang@nwu.edu.cn

cultivated lands. It can be seen that soil water erosion is severe in some parts of Thailand, and cultivated lands contribute greatly to regional soil erosion.

**Keywords:**soil erosion; Chinese Soil Loss Equation; histogram matching; Thailand

土壤是人类生存与发展的重要自然资源之一<sup>[1]</sup>,土壤可以为人类提供食物、能源、水源,在维持生态系统服务、生物多样性方面也具有重要作用<sup>[2]</sup>。但是,全球大部分地区的土壤受到水蚀的威胁<sup>[3]</sup>。土壤水蚀是粮食生产和可持续农业面临的最严重威胁之一<sup>[4-5]</sup>。土壤水蚀不仅会导致土地退化,生态服务水平降低,还会导致下游河流淤积,从而制约区域的可持续发展<sup>[6]</sup>。

治理土壤水蚀必须以掌握区域土壤水蚀状况为前提<sup>[7-8]</sup>,一般可归纳为 2 种方法:第 1 种是基于区域各侵蚀因子图层相乘,计算区域土壤水蚀速率专题图,可称为地图代数法。该方法计算结果具有较好的空间分布,得到广泛应用,代表性研究有 Borrelli<sup>[9]</sup>、Panagos<sup>[10]</sup>、查良松<sup>[11]</sup>等。第 2 种是抽样调查的方法,在研究区布设基本抽样调查单元,结合土壤水蚀模型,计算各抽样单元水蚀速率,进而推算出研究区土壤水蚀状况,可称为抽样调查法,代表性研究有 Nusser<sup>[12]</sup>、USDA<sup>[13]</sup>、刘宝元等<sup>[7]</sup>、Liu 等<sup>[14]</sup>、Yin 等<sup>[15]</sup>。但如何将地图代数制图结果与抽样调查结果相结合,实现对区域土壤侵蚀的定量评价则鲜见报道。

泰国属于发展中国家,农作区占全国的 40% 以上,大力发展农业导致农地不断扩张,而森林不断萎缩,加之粗放的耕作和管理方式,土壤侵蚀日益加剧,造成农业地区土地严重退化<sup>[16]</sup>。在农作区,农民习惯将坡面裸露,这使土壤完全暴露于暴雨及径流中,土壤流失现象普遍存在<sup>[17]</sup>。在山区和高原,大规模砍伐森林、陡坡耕种(45°~60°)加之游移耕作,进一步加剧了土壤侵蚀<sup>[18-19]</sup>。目前,虽然已有学者对泰国进行土

壤水蚀评价,如 Rangsiwanichpong 等<sup>[16]</sup>,但数据分辨率较粗,地形因子和水保措施因子计算有待改进。需进一步提高泰国土壤水蚀定量评价的准确性,为泰国土壤水蚀治理提供更为准确的数据支撑。

本研究以泰国为例,在前期工作的基础上<sup>[20]</sup>,采用中国土壤流失方程(Chinese Soil Loss Equation, CSLE)模型,基于各侵蚀因子基础数据和抽样调查数据,定量计算泰国土壤水蚀速率专题图,以期全面准确掌握泰国土壤水蚀基本状况,为该国土壤水蚀治理提供数据支撑。

## 1 研究区域与基础数据

泰国(5°30′—21°N,97°30′—105°30′E)位于东南亚的中南半岛中部,总面积 513 115 km<sup>2</sup>。泰国地势西北高东南低。根据地形特征,可将泰国分为北部(山地为主)、东北部(高原为主)、中部(平原为主)、南部(丘陵地带)4 个自然区域带。泰国地处热带地区,主要受热带季风气候影响,年均降水量约 1 150 mm。由于降雨量大,盲目开垦耕地,并且存在不合理的耕作方式,水土流失问题较为严重<sup>[21]</sup>。泰国是重要的农产品出口国,土壤侵蚀问题已严重制约该国的可持续发展<sup>[22-23]</sup>。

本研究所用基础数据主要包括 2 个部分,一是用于地图代数法制图整体计算的各水蚀因子数据(表 1);二是土壤水蚀抽样调查数据,研究区共计 175 个抽样调查单元(图 1),所有抽样调查单元数据均来自野外调查解译并通过了质量检验<sup>[8,24]</sup>。

表 1 基础数据一览表

基础数据	数据来源	分辨率
降雨侵蚀力因子	项目组	1 km
土壤可蚀性因子	项目组	1 km
坡度坡长因子	项目组	30 m
percent Tree_cover, percent NonTree_vegetate 数据集	NASA 网站,下载网址:https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/	250 m
土地利用类型数据	全球陆地覆盖(Global Land Cover 30 m, GLC30),下载网址:http://data.ess.tsinghua.edu.cn/	30 m
中国农业熟制区划	资源环境科学与数据中心,下载网址:http://www.resdc.cn/	矢量数据
耕作措施因子属性表	《2020 年度水土流失动态监测技术指南》2020 年 08 月版	表格数据
包括详细水保措施的 175 个抽样调查单元	项目组解译并检验数据	矢量数据
矢量数据		

注:项目组指泛第三极土壤侵蚀定量评价与分区防控对策(XDA20040202)项目组,降雨侵蚀力因子和土壤可蚀性因子由项目组的刘宝元教授提供,坡度坡长因子由项目组的张宏鸣教授提供,所有数据均经过了数据可靠性检验。

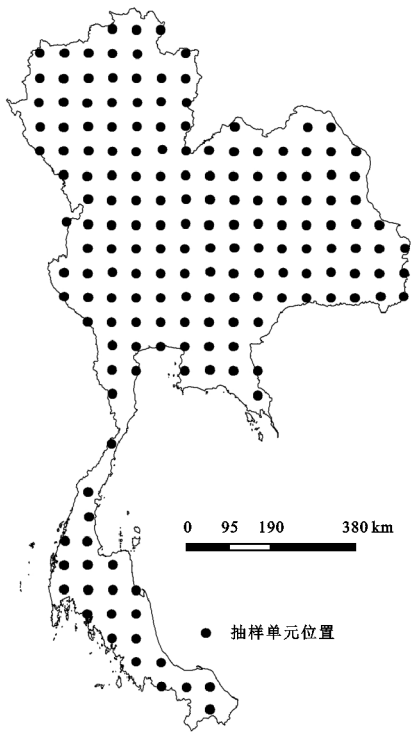


图 1 抽样单元分布图

2 研究方法

本研究首先采用地图代数法计算研究区土壤水蚀速率专题图,再以 175 个抽样调查单元计算结果为参照,对地图代数结果进行直方图匹配,将匹配之后的制图结果作为研究区最终的土壤水蚀速率专题图。

2.1 土壤水蚀评价模型

采用中国土壤流失方程 (Chinese Soil Loss Equation, CSLE),结合 GIS 技术,计算研究区土壤水蚀速率。CSLE 基本形式为:

$$A=R\times K\times L\times S\times B\times E\times T \tag{1}$$

式中: $A$  为土壤水蚀速率 $[t/(hm^2\cdot a)]$ ;  $R$  降雨侵蚀力因子 $[MJ\cdot mm/(hm^2\cdot a\cdot h)]$ ;  $K$  为土壤可蚀性因子 $[t\cdot hm^2\cdot h/(hm^2\cdot MJ\cdot mm)]$ ;  $L$  为坡长因子,无量纲;  $S$  为坡度因子,无量纲;  $B$  为植被覆盖与生物措施因子,无量纲;  $E$  为工程措施因子,无量纲;  $T$  为耕作措施因子,无量纲。

2.2 水蚀因子数据处理

(1)  $R, K, LS$  因子数据处理:根据项目组提供的全球降雨侵蚀力因子  $R$ 、泛第三极土壤可蚀性因子  $K$ ,通过裁剪、重采样处理,获得研究区 30 m 分辨率的  $R, K$  因子栅格数据。将 30 m 分辨率的多幅分块  $LS$  因子基础数据进行拼接,并裁剪出研究区范围。参考中国水利部的关于水土流失动态监测的有关技术文件和 Brychta 等<sup>[25]</sup>的研究,计算  $LS$  因子上限阈

值(坡度  $30^\circ$ 、坡长 100 m 时,  $LS_{\text{上限}}=21.2$ ),最终获得研究区  $LS$  因子专题层数据。

(2)  $B$  因子计算:植被覆盖与生物措施是一种重要的水保措施<sup>[26]</sup>,参考 Borrelli 等<sup>[9]</sup>的研究方法,计算非农业土地类型  $B$  因子值。

下载 MOD44 B 数据,并通过 MRT (MODIS Reprojection Tool, MRT) 工具提取 TC (Tree Cover, TC)、NTV (NonTree Vegetation, NTV) 图层。计算各土地利用类型  $B$  因子值采用如下公式。

林地:  
$$B_{NA}=\text{MIN}_B+(\text{MAX}_B-\text{MIN}_B)\times(1-TC) \tag{2}$$
  
非林地:  
$$B_P=\text{MIN}_B+(\text{MAX}_B-\text{MIN}_B)\times(1-NTV) \tag{3}$$

式中: $B_{NA}$  为林地  $B$  因子值;  $TC$  为林地覆盖度,取值为  $0\sim1$ ;  $B_P$  为非林地(即:草地、灌木、裸地等)的  $B$  因子值,  $NTV$  为植被(除林地外)覆盖度,取值为  $0\sim1$ 。 $\text{max}_B, \text{min}_B$  为对应土地利用类型  $B$  因子值的最大值和最小值,取值如表 2 所示。

根据土地利用类型数据,合并各地类  $B$  因子值,最终获得研究区  $B$  因子图层。

表 2 各土地利用类型 B 因子取值范围		
土地利用代码	土地利用类型	$\text{min}_B\sim\text{max}_B$
1	耕地	1
2	林地	0.0001~0.003
3	草地	0.01~0.15
4	灌丛	
5	湿地	0
6	水域	
8	不透水面	0.1~0.5
9	裸地	

(3)  $E$  因子计算:工程措施是用人工或机械挖掘和修筑完成<sup>[26]</sup>,在前期工作的基础上,依据抽样单元布设原则,将研究区划分为规则矢量网格,确保每个矢量网格内只包括 1 个抽样调查单元,将抽样单元的  $E$  因子平均值作为矢量网格的  $E$  因子值,再将矢量网格数据转换为栅格数据,最终获得研究区的  $E$  因子专题图。

(4)  $T$  因子计算:根据水利部水土保持监测中心编写的《水土流失动态监测技术指南》(2020 年 8 月版),参考中国各农业熟制区  $T$  值表的规则,为 Fischer 等<sup>[27]</sup>制作的全球熟制区赋予  $T$  因子值。再依据研究区土地利用类型数据,将非耕地区域的  $T$  值设置为 1,将耕地区域的  $T$  值取值为全球  $T$  值图的  $T$  值,最终获得研究区的  $T$  因子专题图。

## 2.3 土壤水蚀制图方法

2.3.1 地图代数法制图 地图代数法制图是将事先准备好的每个土壤侵蚀因子栅格数据相乘,获得研究区的土壤水蚀速率专题图。为了确保计算精度及便于显示,本研究采用 WGS84 坐标系,最终获得的区域  $R, K, LS, B, E, T, A$  专题数据分辨率均设定为 30 m。

2.3.2 抽样单元水蚀速率计算 研究区内共解译了 175 个均匀分布的抽样调查单元,根据解译单元点位置的地形特征,确定调查单元的形状为小流域(在山区)或矩形(在平原),面积大小为  $0.2 \sim 3 \text{ km}^2$ 。解译每个抽样单元内的土地利用和详细水土保持措施,其中水土保持措施包括生物措施、工程措施、耕作措施。在研究区范围内,CSLE 模型适用于计算抽样单元水蚀速率<sup>[28]</sup>。

对区域  $R$  因子、区域  $K$  因子、区域  $LS$  因子进行多重采样和裁剪,获得每个抽样单元  $R, K, LS$  因子专题数据。对各土地利用类型的区域  $B$  值图(250 m 分辨率)进行多重采样和裁剪,再根据解译的土地利用类型和生物措施,计算每个抽样单元的  $B$  因子专题数据。根据解译的工程措施,为每个图斑赋  $E$  因子值,再将矢量数据转换为栅格数据,获得每个抽样单元的  $E$  因子专题数据。根据解译的土地利用类型和水保措施信息,计算每个抽样单元的  $T$  因子专题数据。再采用 CSLE 模型计算每个抽样单元的土壤水蚀速率(针对抽样调查单元的每个图斑),借助 python 语言实现数据批量处理,最终获得 175 个以各抽样单元为边界的土壤水蚀速率专题图(2.5 m 分辨率)。

2.3.3 直方图匹配制图 以均匀分布的 175 个抽样调查单元为基础,抽样单元计算结果可全面表达水土保持措施的影响,可真实反映研究区的统计特征;地图代数法制图结果具有较好的空间分布特征。为了结合两者的优点,尝试以 175 个抽样单元水蚀速率专题图结果(针对每个抽样单元的每个栅格值统计)的累积频率为参照,对地图代数制图结果进行累积频率直方图匹配,最终获得研究区新的土壤水蚀速率专题图。

## 3 结果与分析

### 3.1 土壤水蚀因子分析

按照上述方法获得的研究区各水蚀因子专题层如图 2 所示。研究区  $R$  因子空间分布上呈现出由东南向西北逐渐减弱的趋势,主要因为泰国属于热带季风气候,降雨量由东南沿海向西北内陆逐渐减小。 $K$  因子空间分布呈现出与土地利用类型相关的空间格局, $K$  因子值高的区域与耕地分布区域相对应, $K$  因子值低的区域主要对应林地区域。 $LS$  因子呈现由西北向东南逐渐减小的分布格局,主要因为泰国

西北部为山地,地形起伏较大,坡度较陡,中部为平原区,地形较为平缓。 $B$  因子值的空间分布与土地利用类型的分布有关,按照林地、草地、耕地依次增大。 $E$  因子的分布与国家政策和当地耕作习惯有关,在泰国范围内工程措施较少。 $T$  因子只针对农地地块, $T$  因子值的大小与轮作方式、管理措施相关,轮作方式、管理措施又存在区域间差异,在南部丘陵地带  $T$  因子值较大,在东北部  $T$  因子值较小。

### 3.2 泰国水蚀速率特征

3.2.1 空间分布特征分析 泰国水蚀速率专题图显示水蚀速率高值区主要集中于泰国北部和东北部,水蚀速率低值区主要分布于中部平原区(图 3)。这与泰国的地形和耕地分布密切相关,泰国北部属于山地,地形起伏较大,降雨容易引起土壤流失;东北部地区存在大量耕地区域,耕地区域  $B$  因子值较大,并且该区域的  $K, R$  因子值也较大。中部水蚀速率较小,主要因为中部地形以平原为主,并且  $R$  因子相对较小。

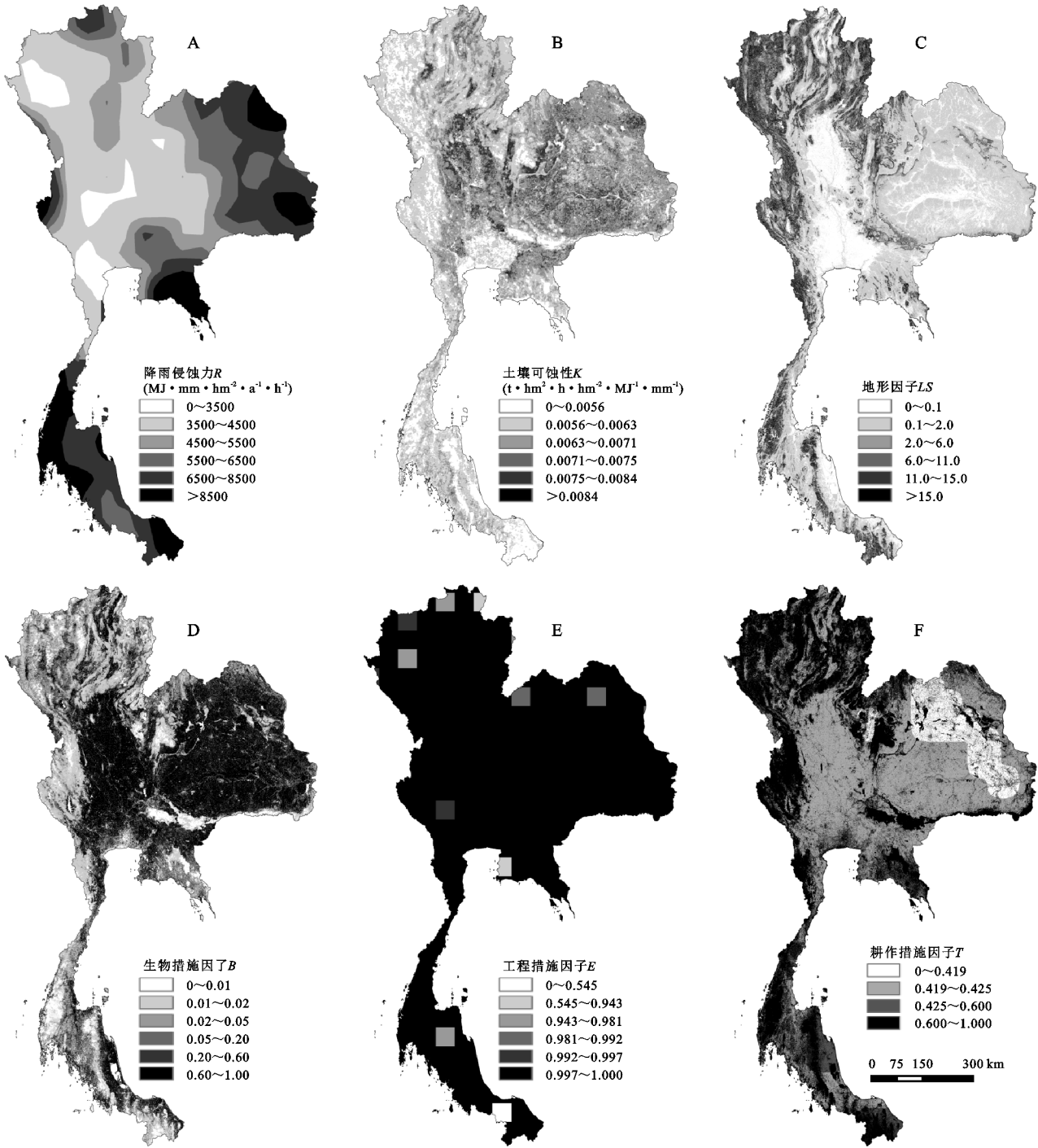
3.2.2 统计特征分析 参考 Bahadur 等<sup>[29]</sup>、Borrelli 等<sup>[9]</sup>的分级方案,结合泰国区域的实际情况,对泰国土壤侵蚀速率的侵蚀等级划分结果显示:泰国侵蚀速率以  $< 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  为主(74.2%),随着侵蚀等级升高,侵蚀面积比率呈减少趋势。土壤侵蚀速率  $> 15\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的面积仅占研究区总面积的 0.6%,但年侵蚀量约占研究区侵蚀总量的 21.5%,可见研究区局部侵蚀剧烈。泰国平均水蚀速率为  $687.9 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,是全球平均土壤水蚀速率 $[287.2 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$ 的 2.4 倍,个别地区达到  $1\,000 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  以上(占面积 13.2%,占侵蚀总量 72.0%)(表 3)。可见,与全球平均水蚀速率相对比,研究区土壤水蚀较为严重。

3.2.3 热点地区分析 参考 Borrelli 等<sup>[9]</sup>的研究,结合本研究分级方案,根据水蚀治理的紧迫程度,将水蚀速率以  $500, 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  为阈值设置为热点地区。 $> 500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的热点地区沿泰国周边分布,该热点地区地形  $LS$  因子值(均值为 7.5)是泰国区域  $LS$  因子值(均值为 3.2)的 2.3 倍,降雨侵蚀力也较大[均值为  $6\,419.2 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{h})]$ 。 $> 2\,500 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  的热点地区主要分布于泰国北部和东北部,如此分布主要是地形  $LS$  因子、植被覆盖与生物措施  $B$  因子、土地利用方式等因素共同作用的结果。该热点地区  $LS$  因子值(均值为 7.3)、 $B$  因子值(均值为 0.849)是泰国区域的  $LS$  因子值(均值为 3.2)、 $B$  因子值(均值为 0.507)的 2.3 倍和 1.7 倍,降雨侵蚀力也较大[均值为  $6\,587.6 \text{ MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a} \cdot \text{h})]$ ,这导致该热点地区水蚀较为严重(图 4)。对该热点地区进一步分析发现,热点地区 84.1% 为耕



地,平均坡度为  $13.4^{\circ}$ ,因此,坡耕地进一步加剧了局部土壤水蚀。 $>500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的热点地区面积占研究区面积的 25.8%,年侵蚀量占研究区侵蚀总量的 84.3%,该热点地区需制定长期治理规划,逐步减少

土壤水蚀的影响; $>2\,500\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 的热点地区面积占研究区总面积的 4.7%,但年侵蚀量占研究区侵蚀总量的 53.1%,该热点地区迫切需要尽快治理,并且治理效果显著。



注:耕地区域的  $B$  因子值为 1;无工程措施区域的  $E$  因子值为 1;非耕地区域的  $T$  因子值为 1。

图 2 土壤水蚀因子

3.3 各土地利用类型的土壤水蚀分析

通过比较不同土地利用类型的土壤水蚀状况(表 4),我们发现从耕地到草地、林地的平均水蚀速率明显降低。耕地平均水蚀速率是草地、灌丛、林地平均水蚀速率的 2.0 倍、2.2 倍、2.8 倍,说明相对于耕地,

林草地具有更好的水土保持作用。在泰国区域,耕地面积占研究区面积的比率最大(49.6%),平均水蚀速率最高[ $1\,020.2\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ ],进而耕地侵蚀量占研究区总侵蚀量的比率最大(73.6%),这是研究区平均水蚀速率较高的主要原因。

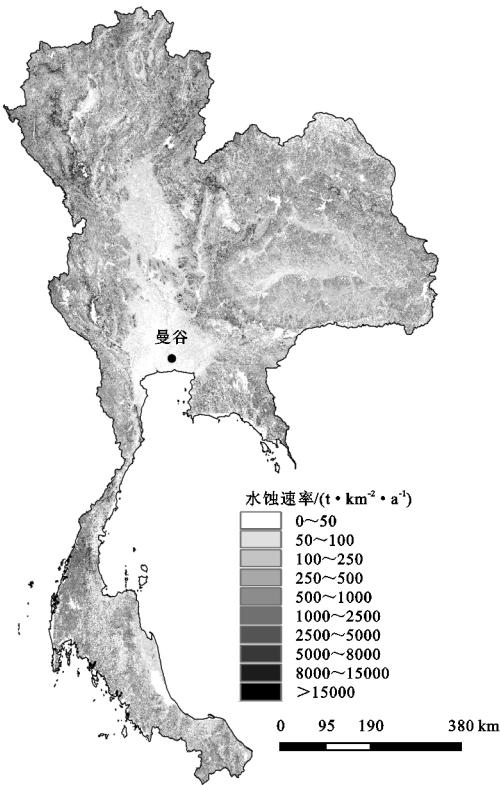


图 3 泰国土壤水蚀速率

表 3 不同侵蚀等级的土壤水蚀面积及水蚀量

侵蚀等级	水蚀速率间隔/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	面积 比率/%	平均水蚀速率/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	年侵蚀量/ $10^4 t$	侵蚀量 比率/%
1	0~50	22.4	18.9	216.6	0.6
2	50~100	15.0	72.7	560.1	1.6
3	100~250	20.2	164.9	1712.2	4.9
4	250~500	16.6	360.4	3066.3	8.7
5	500~1000	12.6	674.9	4354.5	12.3
6	1000~2500	8.5	1524.7	6661.7	18.9
7	2500~5000	2.4	3448.2	4190.3	11.9
8	5000~8000	1.1	6199.6	3446.3	9.8
9	8000~15000	0.6	10856.3	3490.5	9.9
10	>15000	0.6	22870.7	7598.2	21.5

进一步统计后我们发现,在耕地区域中, $>5\,000\,t/(km^2 \cdot a)$ 的区域占耕地总面积的比率高达 4.6%。草地、灌丛、林地 在 $>5\,000\,t/(km^2 \cdot a)$ 的区域占该地类面积的 1.6%,0.6%,0.1%,明显比耕地小。林地、灌丛、草地具有较好的储水固土能力,因此,在有条件的区域,将高侵蚀级别的耕地改变为林地、灌丛、草地,对于减少水土流失具有重要意义。

3.4 主控因子分析

分类决策树状图显示了水蚀因子的重要性,终端节点映射出每个像元值归因于分类决策树中最频繁的节点类(图 5—7)。结合因子节点可视化图以及泰国土地利用类型图可知,节点 11,12,14,15 主要受 R 因子(降雨侵蚀力因子)影响,主要分布于林地区域,在该区域由于降雨量较大而容易发生侵蚀。节点 7,

8 主要受 K 因子(土壤可蚀性因子)影响,主要分布于东北部高原区的耕作区域,该区域常年耕作(包括一年多熟),并且不合理的耕作方式和管理措施而引起土壤可蚀性较强,进而容易引发土壤侵蚀。节点 4,5 主要受 LS 因子(坡度坡长因子)影响,主要分布于中部平原区的耕作区和南部丘陵区 的耕作区,在中部平原区,耕地的坡长较长;在南部丘陵区的 地面起伏较大,容易引发土壤侵蚀。

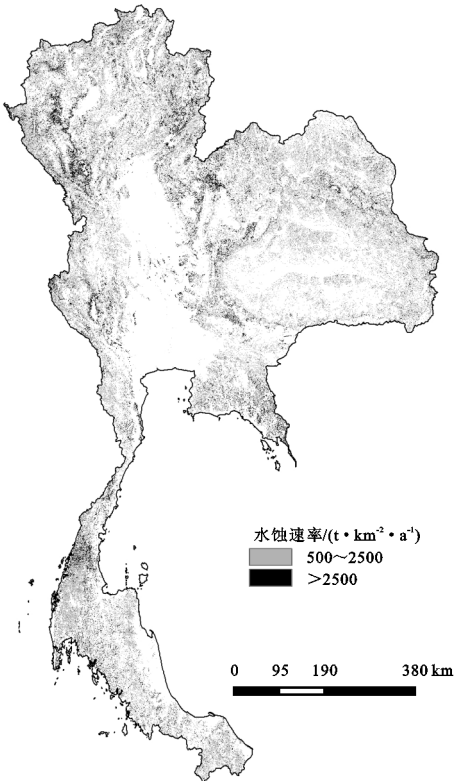


图 4 泰国土壤侵蚀热点

表 4 各土地利用类型平均土壤水蚀速率

土地利用类型	面积 比率/%	平均水蚀速率/ ( $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ )	年侵蚀量/ $10^4 t$	侵蚀量 比率/%
耕地	49.6	1020.2	25964.5	73.6
林地	38.8	368.6	7338.9	20.8
草地	5.0	520.5	1335.3	3.8
灌丛	2.6	472.6	630.5	1.8

4 讨论

4.1 计算结果合理性评估

本研究在 Upper Nam Wa 流域、Nam Chun 流域、Khlong Yai 流域计算的土壤水蚀速率均值[2 154.6, 706.5,223.1  $t/(km^2 \cdot a)$ ]与 Bahadur<sup>[29]</sup>、Shrestha 等<sup>[30]</sup>、Shrestha 等<sup>[31]</sup>计算的均值[2 127,600,200  $t/(km^2 \cdot a)$ ]相近。本研究计算泰国平均土壤水蚀速率的结果为 687.9  $t/(km^2 \cdot a)$ ,与 Borrelli 等<sup>[9]</sup>的结果类似[713.4  $t/(km^2 \cdot a)$ ]而与 Rangsiwanichpong 等<sup>[16]</sup>采用 RUSLE 模型的结果[812.5  $t/(km^2 \cdot a)$ ]存在差异,主要与采

用不同分辨率数据导致  $LS$  因子准确度不同有关。Rangsiwanichpong 等在计算水蚀速率过程中, 采用 1 km 分辨率的 DEM 计算  $LS$  因子, 依据 1 km 的 DEM 提取坡度, 并对坡耕地赋水保措施值, 由于分辨

率较粗, 这使计算的  $LS$  因子、水保措施因子误差较大。而本研究采用 30 m 分辨率的 DEM 数据, 计算结果更贴近真实值。通过对比可知, 本研究计算结果较为合理, 具有一定的可信度。

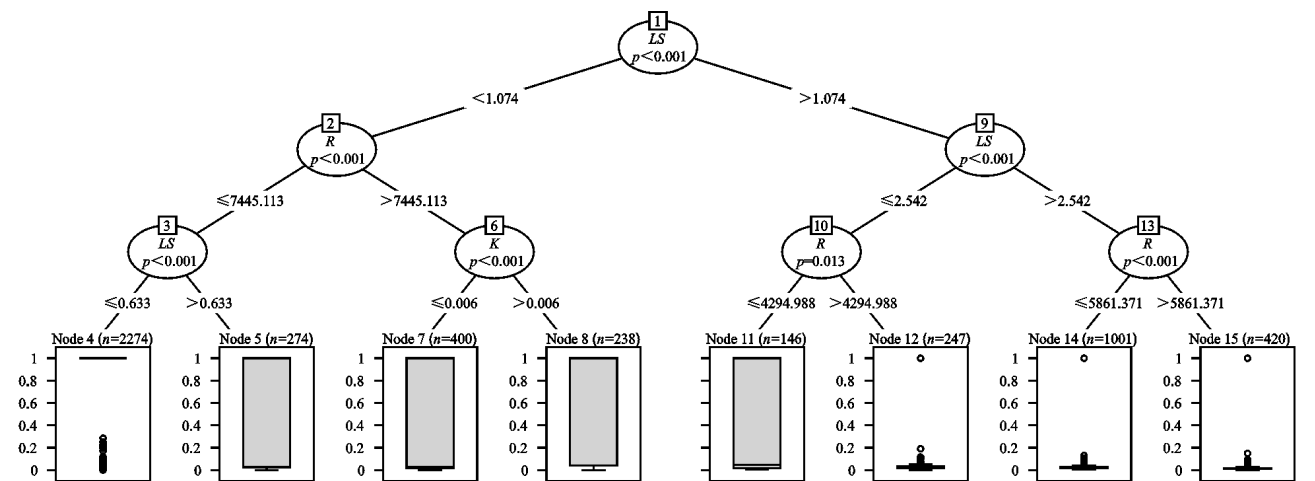


图 5 土壤侵蚀因子重要性分类决策树

与抽样单元结果对比, 泰国区域内 175 个抽样单元土壤侵蚀速率的总体均值为  $706.8 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 研究区计算结果的 175 个相应区域的总体均值为  $642.7 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 两者较为接近, 总体计算精度为 90.9%, 进一步验证了计算结果具有一定的可信度。

与实地考察对比, 2018 年 11 月, 张加琼等<sup>[20]</sup>对泰国北部的土壤侵蚀状况进行了实地考察, 并沿考察路线布设了 18 个抽样单元。其 18 个抽样单元水蚀速率的总

体均值为  $1\,767.7 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 本研究在相应 18 个区域计算的水蚀速率总体均值为  $1\,267.3 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ , 准确度为 71.7%, 差异较大, 主要原因为: 计算方法不同。张加琼等在计算考察的 18 个抽样单元的  $B$  因子值时, 采用 NPV 数据作为林下植被盖度, 这将低估生物措施的作用, 使计算的  $B$  因子值偏高, 进而使计算的水蚀速率偏高。本研究采用 Borrelli 等方法计算  $B$  因子值, 结果更加合理。

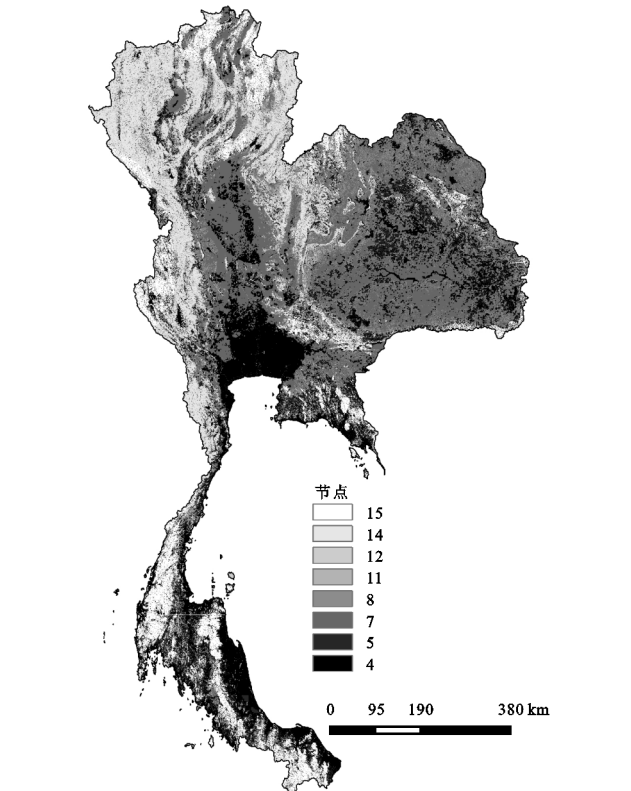


图 6 主控因子节点可视化图

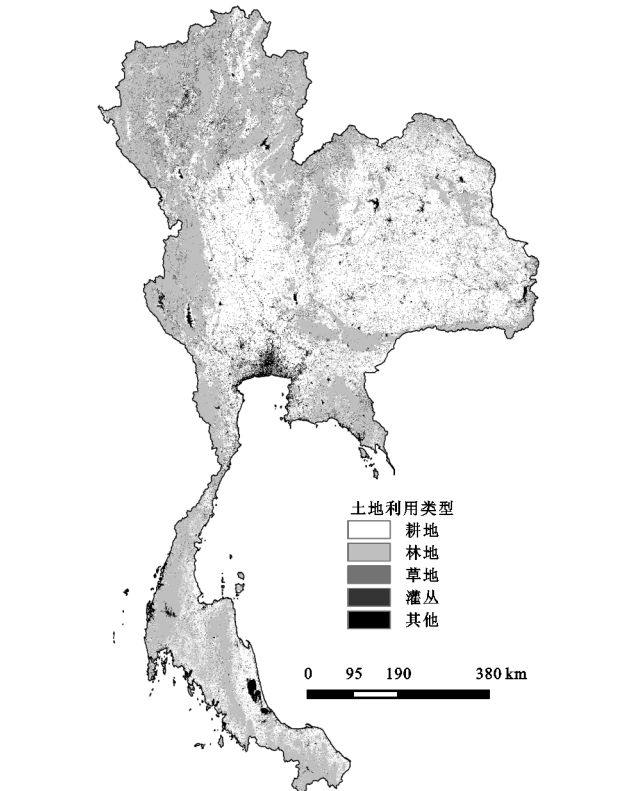


图 7 土地利用类型



## 4.2 治理建议

(1) 进一步加强土壤水蚀的基础理论研究。虽然泰国政府意识到土壤侵蚀的危害,但目前的土壤水蚀观测和调查资料匮乏<sup>[20]</sup>,难以满足土壤侵蚀治理的需求,现有资料也难以支撑准确评价水土保持效益,因此,建议进一步加强土壤侵蚀的基础理论研究,加大人才、科技、经费支持力度,构建土壤侵蚀的学科理论体系,为制定合理的水保措施和防治土壤流失提供理论支撑。

(2) 因地制宜制定土壤侵蚀治理措施。土地利用方式及变化对土壤侵蚀有重要影响<sup>[32]</sup>,经过多年耕作,土壤抗侵蚀能力明显下降<sup>[33]</sup>,合理的水保措施能够提高土壤抗蚀性<sup>[34]</sup>。离散分布于林地内部的耕地大多属于热点地区,侵蚀较为强烈,建议在林地区域内部禁止毁林开垦,并进行退耕还林草。东北部高原区的耕作区域主控因子为土壤可蚀性因子,针对该区域内的耕地,建议制定合理的耕作措施,选择合适的耕作措施类型和轮作制度,减少该区域的土壤流失。南部丘陵区的耕作区主控因子为坡度坡长因子,建议将坡耕地改为林草地或免耕。

(3) 提高作物单位面积产量。耕地的水蚀速率最大,而泰国49.6%区域属于耕地,建议控制耕地面积数量,提高单位面积作物产量。泰国作物单产具有较大提升潜力。如清莱府的稻米单产3 500 kg/hm<sup>2</sup>,而土壤、气候条件类似的云南稻米单产为12 500 kg/hm<sup>2</sup><sup>[35]</sup>。

(4) 加强国际交流,引进切实可行的水土保持措施。从其他国家引进水保措施,并因地制宜加以改进,提高水土保持效益。如在坡面上覆盖的植被及其残留物,能明显减少地表径流和土壤流失,杂草覆盖是一种保护梯田的最便宜、最有效的方法<sup>[19]</sup>,这些方法也适用于泰国局部区域。

## 5 结论

(1) 在泰国区域进行土壤水蚀定量评价,应优先选择直方图匹配方法制图。地图代数法制图结果具有较好的空间分布特征,但由于受到空间数据分辨率的限制,不能精确表达详细水保措施;在抽样单元尺度上,由于包括详细水保措施,计算的抽样单元水蚀速率较为准确,具有较为准确的统计特征,但难以精确表达空间分布。直方图匹配制图结果兼具两者的优点,因此,优先选择直方图匹配方法在泰国区域进行土壤水蚀定量评价制图。

(2) 虽然已有文献(如文献[9]、文献[16])对泰

国进行土壤水蚀定量评价,但采用分辨率较粗,而本研究采用30 m分辨率数据计算泰国土壤水蚀速率,并且通过与175个抽样调查结果对比、与实地考察结果相对比可知,本研究计算结果较为理想。文献[16]未对研究区进行主控因子分析,而本研究通过主控因子分析发现,东北部高原区的耕作区、中部平原区和南部丘陵区的耕作区、林地区域的主控因子分别为土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、降雨侵蚀力因子,针对不同区域的主控因子,可采取更改土地利用方式、制定合理的耕作措施等不同的治理方案,治理研究区土壤流失问题。

(3) 泰国土壤水蚀较为严重,局部侵蚀较为剧烈。在各土地利用类型中,耕地水蚀最为严重,林草地水蚀速率较小,应因地制宜地制定不同区域的土壤流失治理措施,建议控制耕地面积数量,提高耕地单位面积产量。水蚀速率 $>2\ 500\ \text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的热点地区主要分布于泰国北部和东北部,该热点地区84.1%区域为耕地,在有条件的区域,将该热点地区的耕地改变为林草地,对于减少水土流失具有显著效果。

### 参考文献:

- [1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348(6235): 647-654.
- [2] Montanarella L. Govern our soils[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 32-33.
- [3] Panagos P, Borrelli P, Robinson D. FAO calls for actions to reduce global soil erosion[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(5): 789-790.
- [4] Pimentel D, Burgess M. Soil erosion threatens food production[J]. *Agriculture*, 2013, 3(3): 443-463.
- [5] Montgomery D R. Soil erosion and agricultural sustainability[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(33): 13268-13272.
- [6] Olorunfemi I E, Komolafe A A, Fasinmirin J T, et al. A GIS-based assessment of the potential soil erosion and flood hazard zones in Ekiti State, Southwestern Nigeria using integrated RUSLE and HAND models[J]. *Catena*, 2020, 194: 1-15.
- [7] 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, 34(10): 26-34.
- [8] Yang Q K, Zhu M Y, Wang C M, 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):440-451.
- [9] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21 st century land use change on soil erosion[J]. Nature Communications, 2017,8(1):1-13.
- [10] Panagos P, Borrelli P, Poesen J, et al. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe[J]. Environmental Science and Policy, 2015,54:438-447.
- [11] 查良松,邓国徽,谷家川.1992—2013年巢湖流域土壤侵蚀动态变化[J].地理学报,2015,70(11):1708-1719.
- [12] Nusser S M, Goebel J J. The national resources inventory: A long-term multi-resource monitoring programme[J]. Environmental and Ecological Statistics, 1997,4(3):181-204.
- [13] USDA. Summary Report:2015 National Resources Inventory[R]. Washington D C: USDA Natural Resources Conservation Service, 2018.
- [14] Liu B Y, Xie Y, Li Z G, et al. The assessment of soil loss by water erosion in China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020,8(4):430-439.
- [15] Yin S Q, Zhu Z Y, Wang L, et al. Regional soil erosion assessment based on a sample survey and geostatistics[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(3):1695-1712.
- [16] Rangsiwanichpong P, Kazama S, Gunawardhana L. Assessment of sediment yield in Thailand using revised universal soil loss equation and geographic information system techniques[J]. River Research and Applications, 2018,34(9):1113-1122.
- [17] 陈海生,崔绍荣.泰国的农业非点源污染[J].世界农业, 2003(4):46-47.
- [18] 波哥皮特,朱末东.利用陆地卫星影像调查泰国土壤侵蚀[J].云南林业调查规划,1983(3):43-44.
- [19] Sang-Arun J, Mihara M, Horaguchi Y, et al. Soil erosion and participatory remediation strategy for bench terraces in northern Thailand[J]. Catena, 2006,65(3):258-264.
- [20] 张加琼,马波,税军峰,等.泰国北部山区土壤侵蚀调查报告[J].水土保持通报,2019,39(1):1-8,333.
- [21] 李中魁.泰国水土保持动态[J].林业与社会,1999(5):20.
- [22] Niemmanee T, Kaveeta R, Potchanasin C. Assessing the economic, social, and environmental condition for the sustainable agricultural system planning in Ban Phaeo district, Samut Sakhonn province, Thailand[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2015,197:2554-2560.
- [23] Amekawa Y. Rethinking sustainable agriculture in Thailand:a governance perspective[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2010,34(4):389-416.
- [24] 朱梦阳,杨勤科,王春梅,等.区域土壤侵蚀遥感抽样调查方法[J].水土保持学报,2019,33(5):64-71.
- [25] Brychta J, Brychtova M. Possibilities of including surface runoff barriers in the slope-length factor calculation in the GIS environment and its integration in the user-friendly LS-RUSLE tool [J]. Soil and Water Research, 2020,15(4):246-257.
- [26] 刘宝元,刘瑛娜,张科利,等.中国水土保持措施分类[J].水土保持学报,2013,27(2):80-84.
- [27] Fischer G, Velthuisen H, Shah M, et al. Global agro-ecological assessment for agriculture in the 21st century: methodology and results [M]. Vienna : Rema Print, 2002.
- [28] 杜朝正,杨勤科,王春梅,等.基于CSLE模型的全球抽样单元土壤水蚀速率计算方法初探[J].土壤通报, 2020,51(1):50-57.
- [29] Bahadur K C K. Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS:a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand[J]. Environmental Geology, 2009,57:695-705.
- [30] Shrestha D P, Suriyaprasit M, Prachansri S. Assessing soil erosion in inaccessible mountainous areas in the tropics:The use of land cover and topographic parameters in a case study in Thailand[J]. Catena, 2014,121:40-52.
- [31] Shrestha R P, Schmidt-Vogt D, Gnanavelrajah N. Relating plant diversity to biomass and soil erosion in a cultivated landscape of the eastern seaboard region of Thailand [J]. Applied Geography, 2010,30(4):606-617.
- [32] Wijitkosum S. Impacts of land use changes on soil erosion in Pa Deng sub-district, adjacent area of Kaeng Krachan national park, Thailand[J]. Soil and Water Research, 2012,7(1):10-17.
- [33] 朱立安,李定强,魏秀国,等.广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析[J].亚热带水土保持,2007,19(4):4-7,16.
- [34] 张高玲,谢红霞,盛浩,等.亚热带山区红壤可蚀性对土地利用变化的响应[J].长江科学院院报,2021(4):1-8.
- [35] 李贵勇,宁加朝,陈书,等.云南水稻精确定量栽培百亩连片亩产吨粮的原因分析[J].中国稻米,2009(4):57-58.