

# 土地覆盖类型变化 对梯度发展流域的土壤侵蚀动态影响\*

苏春生<sup>1</sup>, 吴孝情<sup>2</sup>, 陈晓宏<sup>1,3</sup>, 赖成光<sup>4</sup>, 杨冰<sup>1</sup>, 张力澜<sup>1</sup>

(1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;

2. 环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510535;

3. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州 510275;

4. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641)

**摘要:** 以1990, 2000和2010年3期土地覆盖类型数据为基础, 结合GIS技术利用RUSLE模型分析梯度发展的东江流域土壤侵蚀动态变化, 结果表明: 流域下游地区土地覆盖类型变化较大, 大量水田、旱地、林地和草地转化为城镇用地、工矿建设用地以及园地; 流域在1990, 2000和2010年的平均土壤侵蚀量分别为15.22, 15.41和15.47 t/(hm<sup>2</sup>·a), 均属于Ⅱ级/轻度侵蚀, 但随时间增长而递增; 侵蚀等级属于Ⅰ级和Ⅱ级的面积占全流域面积的90.95%~91.26%; 流域的土壤侵蚀量等级变化不明显, 约有24 328 km<sup>2</sup> (91.14%) 维持原有的侵蚀等级, 而2 365 km<sup>2</sup> (8.86%) 侵蚀等级发生改变。变化等级面积中, 1 286 km<sup>2</sup> (4.82%) 由低等级转变为高等级, 1 079 km<sup>2</sup> (4.04%) 由高等级转换为低等级。东江流域的土壤侵蚀情况与社会经济的梯度发展特征相一致, 从上游到下游呈明显递增趋势。

**关键词:** 侵蚀; 水土保持; 降雨; RUSLE; GIS; 东江流域

**中图分类号:** S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 02-0032-10

## Dynamic impacts of land-cover change on soil erosion in a gradient development basin

SU Chunsheng<sup>1</sup>, WU Xiaoqing<sup>2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,3</sup>, LAI Chengguang<sup>4</sup>, YANG Bing<sup>1</sup>, ZHANG Lilan<sup>1</sup>

(1. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. South China Institute of Environment Sciences, the Ministry of

Environment Protection of PRC, Guangzhou 510535, China;

3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

4. School of civil and transportation engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;)

**Abstract:** This study used GIS technique and RUSLE model to analyze the dynamic impacts on soil erosion in the Dongjiang river basin, a gradient development basin, based on the land-cover data in years 1990, 2000 and 2010. The results showed that the land-cover in the downstream areas presented a large variation with a large number of paddy field, nonirrigated farmland, forestland and grassland converting to

\* 收稿日期: 2016-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 (91547202, 51210013, 51479216, 51509040); 广东省水利科技创新项目 (2016-25, 2015-17)

作者简介: 苏春生 (1983年生), 男; 研究方向: 水文水资源; E-mail: chunsheng660@163.com

通信作者: 陈晓宏 (1963年生), 男; 研究方向: 水文水资源; E-mail: eesexh@mail.sysu.edu.cn

urban land, construction land and garden plot. The average soil erosion amounts reach  $15.22 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,  $15.41 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  and  $15.47 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , all of which belong to Level II but increased over the time. The percentage of the erosion areas belonging to Levels I-II ranges 90.95% to 91.26%. The level change of soil erosion is not significant: approximately  $24328 \text{ km}^2$  (91.14%) areas maintained the original levels, but approximately  $2365 \text{ km}^2$  (8.86%) changed; among the changed areas, approximately  $1286 \text{ km}^2$  (4.82%) was converted from lower levels to higher levels, but approximately  $1079 \text{ km}^2$  (4.04%) was converted from higher levels to lower levels. The spatial distribution and its dynamic variation matched well with the gradation development of social economy, which showed an increasing trend from the upstream to downstream.

**Key words:** erosion; soil conservation; precipitation; RUSLE; GIS; Dongjiang River basin

土壤侵蚀可导致土地退化、土地荒漠化、污染水源等问题,已成为威胁生态安全的重要因素之一<sup>[1]</sup>。评估土壤侵蚀的方法很多,而土壤侵蚀模型是最为有效手段,一般可分为经验模型和物理模型。通用土壤流失方程(USLE)是 Wischmeier 和 Smith 于 1965 年首次系统提出的土壤侵蚀经验模型<sup>[2]</sup>。随后该模型被不断地修正和改善,并于 20 世纪 90 年代形成了修正通用土壤流失方程(RUSLE),被大量应用于农耕地、草地、林地和建设用地土壤流失预报<sup>[3-4]</sup>。由于 USLE/RUSLE 模型结构简单、所需数据量少、易与 GIS 技术结合且结果可靠,使其得到了迅速推广和应用,并在定量评价土壤侵蚀强度、水土保持规划和土地资源合理利用等起到了重要的作用<sup>[5]</sup>。尽管此后众多考虑土壤侵蚀过程的物理模型相继问世,如 WEPP 模型<sup>[6]</sup>、EUROSEM 模型<sup>[7]</sup>、LISEM 模型<sup>[8]</sup>、SEMMED 模型<sup>[9]</sup>等,但由于此类模型涉及众多参数且区域局限性明显,使得应用受到较大限制。就目前来说,由于很多地区资料不够完善,以 USLE/RUSLE 为代表的经验统计模型仍是应用最广泛的模型。

东江是珠江三大水系之一,发源于江西省寻邬县桎髻钵山,河长约 562 km,流域面积约  $2.7 \text{ 万 km}^2$ ,横跨江西(9.9%)和广东(90.1%)两省<sup>[10]</sup>。近几十年来,东江流域社会经济发展呈现明显的梯度特征:下游的广州、东莞、深圳等城市圈是中国境内最发达地区之一,中游惠州属于经济较发达地区,上游的赣州和河源属于经济欠发达水源保护区。受非一致的人类活动影响,近几十年来流域下、中、上游的土地覆盖类型发生较大变化,并形成相应的特点:下游地区的广州、深圳、东莞等城市剧烈人类活动及快速城市化使得建成区面积大大增加导致大量林地、草地和水田消失;随着下游发达城市的众多产业转入,中游地区的惠州经济

正在快速发展,城区面积正快速扩张,且在未来一段时间内继续快速扩张将会是主旋律;位于上游的山区城市河源经济欠发达,近几十年来城市化水平不高,土地覆盖类型的剧烈变化对流域各梯度区域,特别是中、下游地区带来很大的土壤侵蚀问题。过量的土壤侵蚀会导致土地退化,而流失的水土进入河道水系后也会引起水质恶化,从而威胁流域城市供水安全。因此,东江流域的水土保持工作仍将面临极大的压力。

为应对水土流失带来的挑战,探讨土地覆盖类型动态变化对流域土壤侵蚀时空变化显得尤为重要。鉴于此,本文结合 GIS 技术利用 RUSLE 模型,对典型社会经济梯度发展的东江流域在 1990, 2000 和 2010 年的土壤侵蚀进行定量评估,探讨近 20 年流域土壤侵蚀对土地覆盖类型变化的响应,分析土壤侵蚀的时空变化规律,以期能为流域水土保持规划和水资源保护工作提供科学依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 研究资料

1.1.1 研究区概况 东江流域位于珠江三角洲的东北端,属高温、多雨、湿润的亚热带季风气候区<sup>[11]</sup>。流域年均气温为  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均降雨量为  $1\ 500 \sim 2\ 400 \text{ mm}$ ,其中 4-9 月份占全年降雨量的 80% 以上。为了方便分析,根据经济水平将整个东江流域分为上、中、下游区域(图 1)。

1.1.2 数据来源 本文采用的基础数据包括数字高程模型(DEM)、逐日降雨数据、土壤类型数据和土地覆盖类型数据。数据来源如下:流域的 DEM 数据来源于 CGIAR-CSI(SRTM90m)数据库;流域及其周边地区 34 个雨量观测站 1960-2010 年逐日降雨量数据来源于广东省水文局;土壤类型数据来源于联合国粮食与农业组织网站(<http://www.fao.org/home/en/>);1990, 2000 和

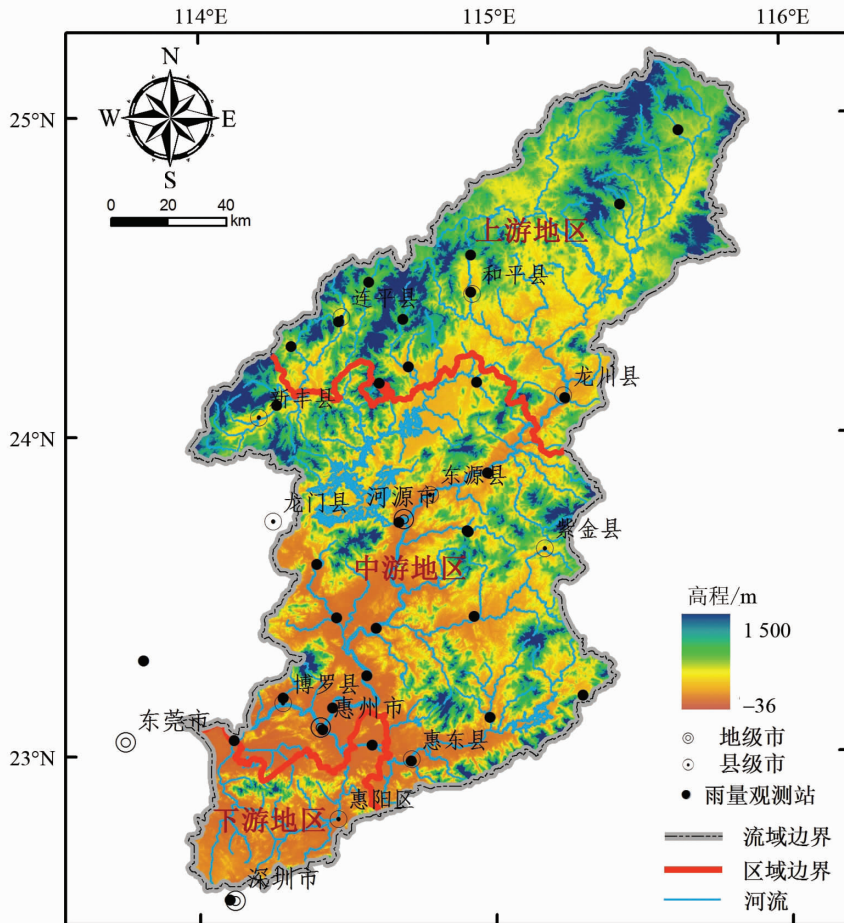


图 1 东江流域地理位置区域及高程图

Fig. 1 Map of Geographical location and elevation in Dongjiang River basin

2010 年 3 期土地覆盖类型数据来源于中国科学院资源与环境研究中心。上述数据被转化为栅格图层, 栅格大小设定为  $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ 。数据处理工具包括 Arc. GIS9.3、Matlab R2009a 以及 Microsoft Excel 等。

## 1.2 研究方法

本文采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 对东江流域 1990 - 2010 年的土壤侵蚀情况进行动态评估。RUSLE 模型基本形式为:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中,  $A$  为单位时间单位面积上的平均土壤流失量,  $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ,  $R$  为降雨侵蚀力因子,  $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ,  $K$  为土壤可蚀性因子,  $\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$ ,  $L$  为坡长因子,  $S$  为坡度因子,  $C$  为作物覆盖管理因子,  $P$  为土壤保持措施因子, 其中  $L$ 、 $S$ 、 $C$  和  $P$  均为无量纲值。

1.2.1 降雨侵蚀力因子 降雨侵蚀力是降水及其产生的径流所具有的引起土壤侵蚀的潜在能力, 是

土壤的水蚀动力<sup>[12]</sup>。用降雨过程资料计算降雨侵蚀力最为可靠, 本文采取章文波等 (2002)<sup>[13]</sup>提出的基于日降雨量的降雨侵蚀力模型计算代表降雨侵蚀力因子  $R$  的年均降雨侵蚀力, 计算公式如下:

$$R_i = \alpha \sum_{j=1}^k (P_j)^\beta \quad (2)$$

式中,  $R_i$  表示第  $i$  个半月时段的侵蚀力值,  $(\text{MJ} \cdot \text{mm}) / (\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})$ ;  $k$  表示该半月时段内的天数,  $P_j$  表示半月时段内第  $j$  天的日雨量, 要求日雨量  $12 \text{ mm}$ , 否则以 0 计算;  $\alpha$  和  $\beta$  是模型参数, 根据以下公式进行估算<sup>[13]</sup>:

$$\alpha = 21.586\beta^{-7.1891} \quad (3)$$

$$\beta = 0.8363 + \frac{18.144}{P_{d12}} + \frac{24.455}{P_{y12}} \quad (4)$$

式中,  $P_{d12}$  表示日雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的日平均雨量;  $P_{y12}$  表示日雨量  $\geq 12 \text{ mm}$  的年平均雨量。利用 (2) - (4) 式计算逐年各半月的降雨侵蚀力, 经汇总可得到各年降雨侵蚀力, 求取各站点多年平均降雨侵蚀力后采用 Kriging 内插方法进行空间内插, 可得东

江流域年均降雨侵蚀力空间分布图（图 2a）。年均降雨侵蚀力取值范围为 7 497.5 ~ 14 469.2 MJ · mm / (hm<sup>2</sup> · h · a), 均值为 10 654 MJ · mm / (hm<sup>2</sup> · h · a), 标准差为 1 547 MJ · mm / (hm<sup>2</sup> · h · a)。

1.2.2 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性是一项评价土壤降雨侵蚀力分离、冲蚀和搬运难易程度的指标。Williams 等<sup>[14]</sup>在 1990 提出用于计算土壤可蚀性的经验修正公式，其既能反映土壤有机质和颗粒组成，也可反映土壤结构和渗透级别。该公式可用于计算土壤可蚀性因子  $K$ ，具体如下：

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256 \text{San}(1 - \text{Sil}/100)]\} \cdot \left(\frac{\text{Sil}}{\text{Cla} + \text{Sil}}\right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95c)}\right] \cdot \left[1 - \frac{0.7\text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9\text{SN}_1)}\right] \quad (5)$$

式中，San 为砂粒含量 (%)；Sil 为粉砂含量 (%)；Cla 为粘粒含量 (%)；C 为有机碳含量 (%)；其中  $\text{SN}_1 = 1 - \text{San}/100$ 。根据东江流域各土壤种类，代入公式计算各类土壤的可侵蚀性因子。值得注意，根据公式 (5) 计算的  $K$  因子为美制单位，需乘系数 0.131 7 转化为国际单位  $\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$ 。表 1 为东江流域各类土壤所占面积比例及  $K$  因子值，取值范围为 0.211 6 ~ 0.416  $\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$ ，均值为 0.265 2  $\text{t} \cdot \text{h}/(\text{MJ} \cdot \text{mm})$ ，图 2b 则为  $K$  因子空间分布图。

1.2.3 坡度因子和坡长因子 坡度因子  $S$  体现了坡度对土壤侵蚀的影响，在一定的坡度范围内，土壤侵蚀随坡度的增加而增大。东江流域为属于丘陵地区，既有地势平坦地区，也有坡度较陡的山区。因此计算坡度因子  $S$  时采取分段计算，缓坡采取 McCool 提出的坡度公式，而陡坡则采取刘宝元的坡度公式，具体如下<sup>[15]</sup>：

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5^\circ \leq \theta < 10^\circ \\ 21.9 \sin \theta - 0.96 & \theta \geq 10^\circ \end{cases} \quad (6)$$

在 RUSLE 中，坡长  $S$  定义为从地表径流源点到坡度减少直至有沉积出现地方之间的距离，或到一个明显的渠道之间的水平距离。本文采用 Wisdmeier 与 Smith 提出的经验公式确定，公式如下<sup>[16]</sup>：

$$L = (\lambda/22.1)^m \quad (7)$$

式中，22.1 是 RUSLE 采用的标准小区坡长  $m$ ； $\lambda$  是水平投影坡长，东江流域的  $\lambda$  的平均值参考潘美慧<sup>[5]</sup>的计算结果（表 2）。

式 (7) 中  $m$  是可变的坡长指数，与细沟侵蚀（由水流引起）和细沟间侵蚀（主要由雨滴打击引

表 1 东江流域土壤类型和土壤可蚀性因子<sup>1)</sup>

Table 1 Soil types and their erodibility factors in the Dongjiang River basin

序号	土壤类型	面积比例	$K$
1	碱性紫色土	0.19	0.416 0
2	山地灌丛草甸土	0.10	0.222 1
3	潮土	0.47	0.222 8
4	酸性石质土	0.10	0.216 2
5	酸性紫色土	0.79	0.204 0
6	潴育水稻土	17.26	0.201 6
7	麻赤红壤	16.21	0.298 8
8	火山灰土	0.07	0.295 8
9	渗育水稻土	0.68	0.281 2
10	耕型赤红壤性土	0.69	0.270 4
11	页赤红壤	20.44	0.266 4
12	麻黄壤	2.77	0.265 7
13	麻红壤	17.25	0.259 0
14	酸性粗质土	0.09	0.256 8
15	页黄色赤红壤	0.24	0.255 5
16	麻(页)黄红壤	2.25	0.249 1
17	漂洗水稻土	0.25	0.248 5
18	侵蚀赤红壤	0.28	0.245 8
19	页黄壤	4.20	0.225 5
20	页红壤	12.42	0.219 5
21	侵蚀红壤	0.01	0.211 6
22	水库	1.74	0

注：水库土壤类型未检测，其值赋为 0；表中的  $K$  值是美制单位  $\text{short ton} \cdot \text{ac} \cdot \text{h}/(100\text{ft} \cdot \text{short ton} \cdot \text{ac} \cdot \text{in})$

表 2 不同坡度段的平均坡长

Table 2 The average slope length of different slope ranges

坡度范围 / (°)	< 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50	50 ~ 60	> 60
平均投影坡长/m	155	133	97	67	33	30	10

起) 的比率  $\gamma$  有关，由以下公式计算：

$$m = \gamma / (1 + \gamma) \quad (8)$$

当土壤对细沟侵蚀和细沟间侵蚀的敏感性相同时，细沟侵蚀与细沟间侵蚀的比率  $\gamma$  由下式计算：

$$\gamma = \left(\frac{\sin \theta}{0.0896}\right) / [3.0 \times (\sin \theta)^{0.8} + 0.56] \quad (9)$$

利用 GIS 的栅格计算器，根据坡度公式 (6) 计算出坡度因子  $L$ ，根据 (7) - (9) 计算坡长因子。为了研究方便，在栅格计算器中将  $L$  和  $S$  因子合并

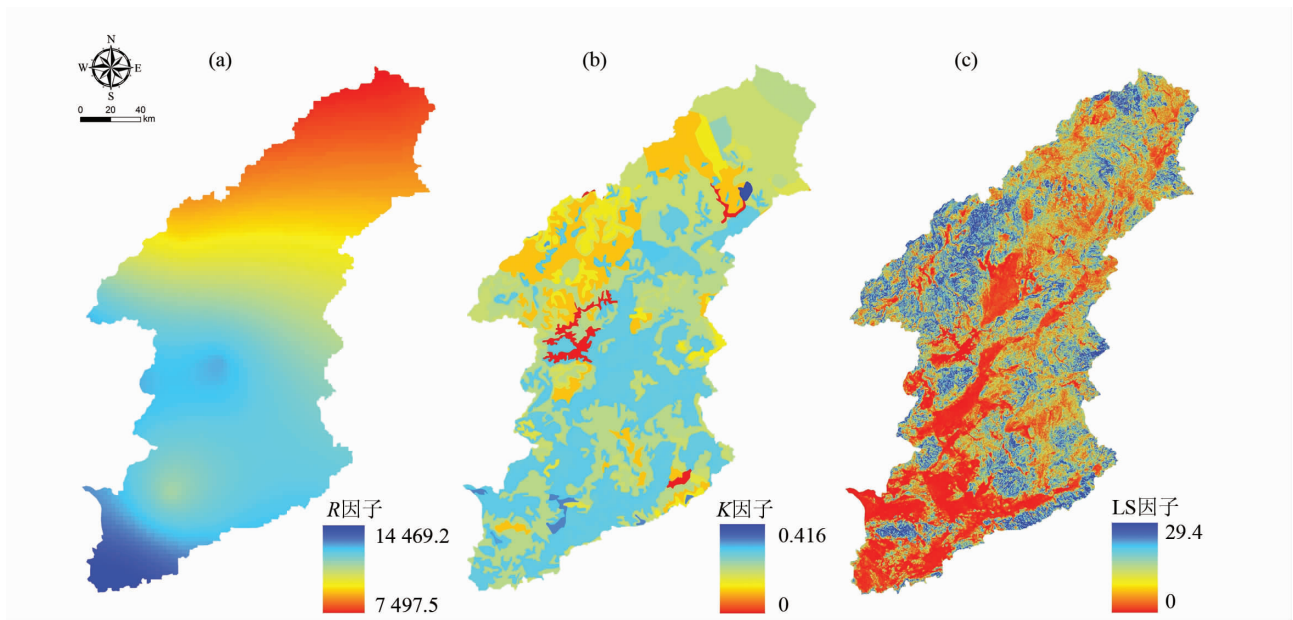


图 2 降雨侵蚀力因子 ( $R$ )、土壤可蚀性因子 ( $K$ ) 和地形因子 ( $LS$ ) 的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of rainfall erosivity factor ( $R$ ), soil erodibility factor ( $K$ ) and terrain factor ( $LS$ )

成一个地形因子  $LS$  并生成空间分布图 (图 2c)。东江流域  $LS$  因子值范围为 0 ~ 29.4, 均值为 8.86, 标准差为 7.7。

1.2.4 植被覆盖与管理因子 植被覆盖与管理因子  $C$  是指在相同的土壤、坡度和降雨条件下, 某一特定作物或者植被情况下土壤流失量与连续休闲的土地土壤流失量的比值<sup>[16]</sup>。 $C$  因子考虑到了植被和土地管理方法变化的情况, 体现了对表层土壤的保护能力, 取值范围介于 0 ~ 1 之间, 其值越大说明所对应土地利用类型对土壤保护能力越弱<sup>[17]</sup>。 $C$  值可由植被覆盖指数 (NDVI)<sup>[18-19]</sup> 或土壤覆盖类型<sup>[20-21]</sup> 来决定。其中, 植被覆盖指数 (NDVI) 更倾向反映植被情况, 而土地覆盖类型则更全面考虑耕地、林地、草地、滩地、城市用地、建设用地、裸地和水体等综合地表情况。因此, 参阅相关文献<sup>[22-23]</sup>, 得出 1990, 2000 和 2010 年 3 期土地覆盖类型综合估算因子  $C$  值 (表 3)。

1.2.5 土壤保持措施因子 土壤保持措施因子  $P$  是采用专门措施后土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值, 反映植被的管理措施差异引起的土壤流失量差别。其范围在 0 ~ 1 之间。未采取任何保护措施的地区取值为 1, 而根本不发生侵蚀的地区取值为 0,  $P$  值越低表明减少侵蚀的水土保持措施越有效。参考相关文献<sup>[24]</sup>, 考虑 1990、2000 和 2010 年 3 期土地覆盖类型以及坡度来确定  $P$  值 (见表 4)。

表 3 东江流域的土壤覆盖类型及其  $C$  值

Table 3 Land-cover type and  $C$ -factor values of the Dongjiang River basin

土地覆盖类型	$C$	土地覆盖类型	$C$
水田	0.06	低覆盖度草地	0.1
旱地	0.1	滩地	0.8
有林地	0.003	城镇用地	0.15
灌木林	0.005	农村居民地	0.2
疏林地	0.01	建设用地	0.3
园地	0.03	裸地	1
高覆盖度草地	0.05	水体	0
中覆盖度草地	0.08		

表 4 东江流域土壤保持措施因子  $P$  值

Table 4  $P$  factor values of the Dongjiang River basin

土地覆盖类型	坡度/%	$P$
水体	/	0
水田、旱地、园地	0 ~ 5	0.11
	5 ~ 10	0.12
	10 ~ 20	0.14
	20 ~ 30	0.19
	30 ~ 50	0.25
	> 50	0.33
林地	0 ~ 200	0.8
其他	0 ~ 200	1

## 2 结果与讨论

### 2.1 土地覆盖类型时间变化

把东江流域的土地覆盖类型简化为水田、旱地、林地、园地、草地、滩地、城镇用地、工矿建设用地、裸地和水体 10 种类型。图 3 反映了东江流域 1990, 2000 及 2010 年土地覆盖类型空间分布情况, 由图可知林地面积约占 70%, 水田约占 11%, 二者主要分布流域中、上游地区, 其余类型所占比例不大。在过去 20 年间, 流域中、上游地区土地覆盖变化不太明显, 而下游地区变化较激烈。总体来说, 流域水田、旱地、林地和草地面积分别减少了 204, 267, 499 和 151 km<sup>2</sup>, 减幅分别为 5.76%、13.90%、2.36%、12.92%; 城镇用地从 1990 年的 523 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 1152 km<sup>2</sup>, 增幅达 120.27%; 工矿建设用地从 1990 年的 64 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 303 km<sup>2</sup>, 增幅达 373.44%; 园地的面积从 1990 年的 1 134 km<sup>2</sup> 增加到 2010 年的 1 354 km<sup>2</sup>, 增幅为 19.40%; 滩地、裸地和水体的面积变化则不大。快速城市化是导致上述变化的主要原因。

### 2.2 土壤侵蚀量时空分析

综合考虑 RUSLE 模型的 6 大因子, 利用 GIS 的栅格计算器根据式 (1) 计算出东江流域在 1990, 2000 和 2010 年的土壤侵蚀量。图 4 显示了基于 3 期土地覆盖类型的土壤侵蚀空间分布, 反映

了 1990 - 2010 年土壤侵蚀空间动态变化情况。1990 年、2000 年和 2010 年土壤侵蚀量分别为 0 ~ 5 465、0 ~ 5 122 和 0 ~ 5 659 t/(hm<sup>2</sup> · a)。根据水利部在 2008 年发布的土壤分类和分级标准 (SL 190 - 2007), 将计算分为 6 个等级, 分类情况如下:  $A < 5$ , I 级/微度;  $5 \leq A < 25$ , II 级/轻度;  $25 \leq A < 50$ , III 级/中度;  $50 \leq A < 80$ , IV 级/强烈;  $80 \leq A < 150$ , V 级/极强烈;  $A > 150$ , VI 级/剧烈。其中,  $A$  为土壤侵蚀量, 单位为 t/(hm<sup>2</sup> · a), 等级越高表明对应的土壤侵蚀量越大。

总体来看, 1990、2000 和 2010 年东江流域的土壤侵蚀量年均值分别为 15.22、15.41 和 15.47 t/(hm<sup>2</sup> · a), 均属于 II 级, 表明在过去的 20 年间, 东江流域的土壤侵蚀情况并不算严重。3 年的土壤侵蚀量标准差分别为 41.23、41.32 和 41.50 t/(hm<sup>2</sup> · a), 表明东江流域土壤侵蚀的空间分布不均匀, 其中上、中游地区水土侵蚀相对较轻, 下游地区侵蚀相对较严重, 其中惠阳西部的区域侵蚀非常强烈。统计表明 (表 5), 绝大部分地区在 1990, 2000 和 2010 年的土壤侵蚀等级均为 I 级和 II 级, 此两等级占全流域面积的 90.95%、91.25% 和 91.26%, 其余 II ~ VI 等级仅占 9.05%、8.75% 和 8.74%。由表 5 可知, 1990 - 2010 年间土壤侵蚀量等级为 I 级的土地面积明显减少, 从 10 930 km<sup>2</sup> 减少至 10 773 km<sup>2</sup>, 降幅达到 1.45%; 而 II ~ VI 级的面积呈不同程度增长。

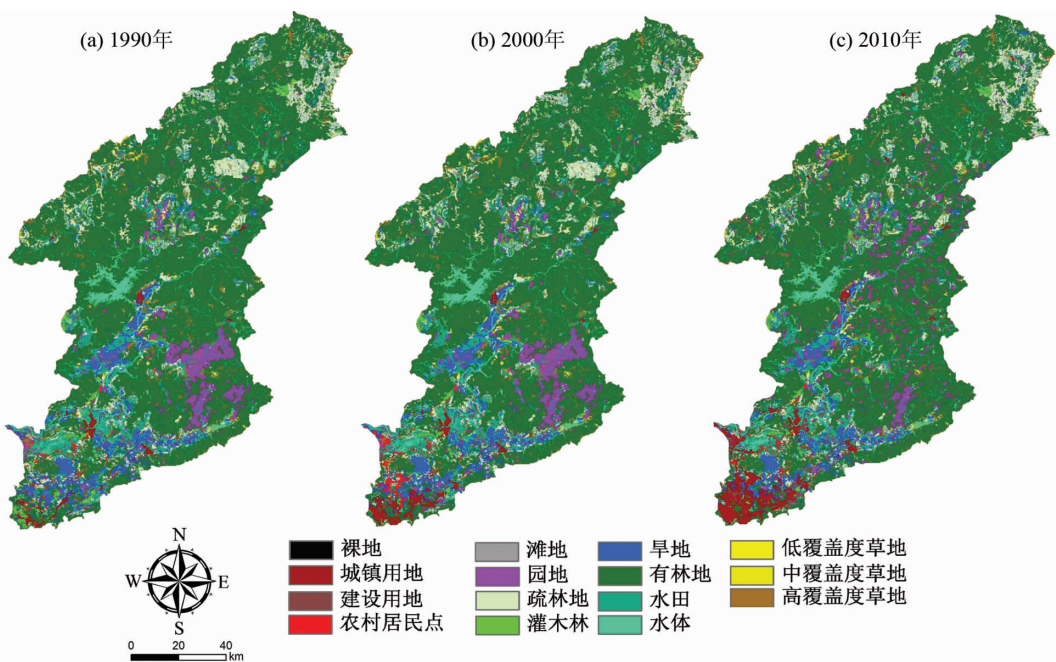


图 3 1990, 2000 和 2010 年东江流域的土地覆盖类型图

Fig. 3 Land-cover maps of Dongjiang River basin in 1990, 2000 and 2010

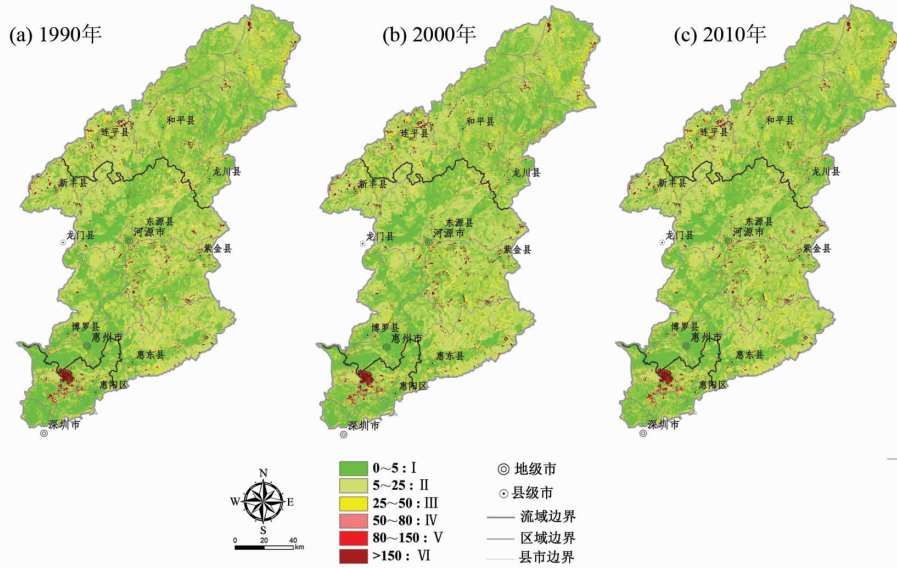


图 4 1990, 2000 和 2010 年东江流域土壤侵蚀空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of soil erosion in 1990, 2000 and 2010 in Dongjiang River basin

表 5 土壤侵蚀各等级面积及比例

Table 5 Areas and ratios of different levels of soil erosion

年份	I		II		III	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
1990	10 930	40.92	13 361	50.02	1 267	4.75
2000	10 827	40.22	13 737	51.03	1 211	4.50
2010	10 773	40.02	13 792	51.23	1 208	4.49
年份	IV		V		VI	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
1990	459	1.72	247	0.92	445	1.67
2000	409	1.52	261	0.97	475	1.76
2010	407	1.51	262	0.97	478	1.78

为分析东江流域土壤侵蚀区域梯度特征, 分别统计了 1990, 2000 和 2010 年上、中、下游侵蚀情况 (表 6)。时间尺度来看, 流域的上、中、下游在 1990-2010 年期间土壤侵蚀量平均值均呈上升趋势, 其中下游地区上升特别明显; 空间尺度来看, 从上游到下游, 流域的土壤侵蚀情况呈梯度加剧趋势, 其中下游地区在 2010 年侵蚀等级已经达到 III 级。总体来说, 东江流域的土壤侵蚀情况与社

会经济的梯度发展特征相一致, 即经济越发达区域其产生的土壤侵蚀量越大, 经济越落后地区产生的土壤侵蚀量反而越小。造成下游地区土壤侵蚀量偏大的主要原因是城镇用地和工矿建设用地所占比例不断扩大, 且在使用 RUSLE 模型过程中对此两类土地覆盖类型的  $C$  和  $P$  因子赋予较大值, 从而使总侵蚀量偏大。

表 6 不同区域和不同年份的土壤侵蚀量的特征值

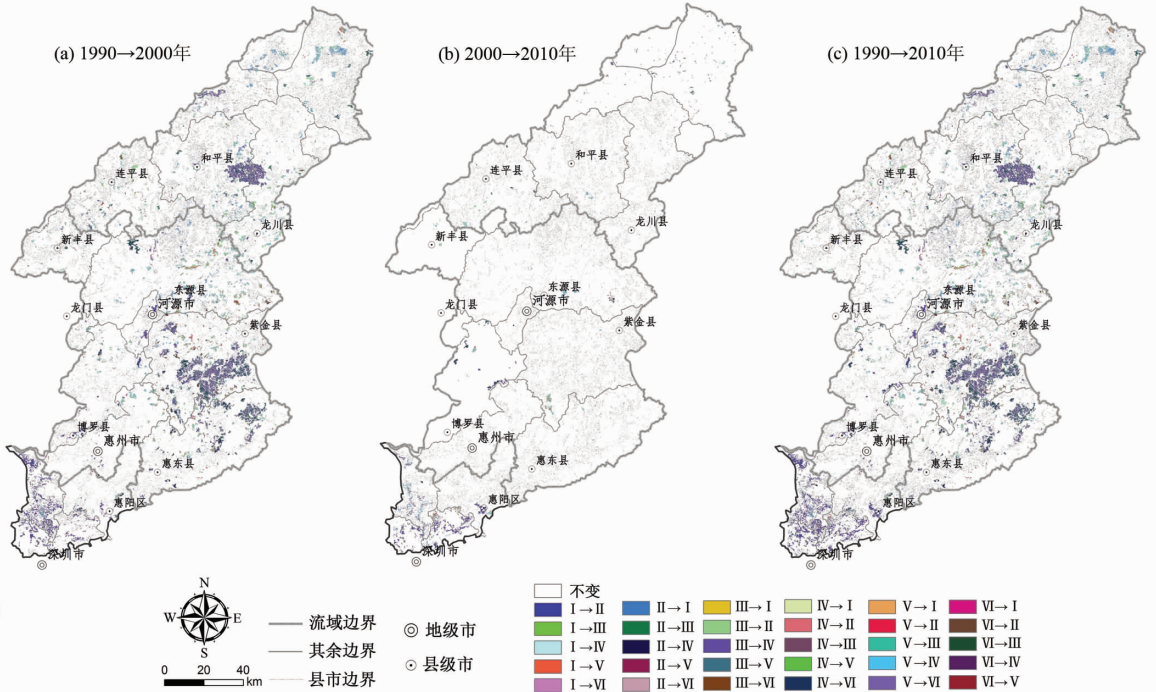
Table 6 Characteristic values of soil erosion in different regions and years

t/(hm<sup>2</sup>·a)

年份	上游		中游		下游		全流域	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
1990	14.15	35.97	15.07	43.89	20.54	58.49	15.22	41.23
2000	14.25	34.58	15.32	43.34	21.23	54.02	15.41	41.32
2010	14.79	34.44	15.40	44.37	25.48	50.62	15.47	41.50

为分析土壤侵蚀量等级的变化情况，基于 GIS 分别生成 1990 - 2000 年、2000 - 2010 年以及 1990 - 2010 年三阶段土壤侵蚀等级转化图（图 5）。这表明，在过去的 20 年间，东江流域的土壤侵蚀量等级总体变化不明显，24 328 km<sup>2</sup>（91.14%）面

积维持原有的侵蚀等级，仅 2 365 km<sup>2</sup>（8.86%）侵蚀等级发生改变。在等级变化的面积中，1 286 km<sup>2</sup>（4.82%）从低等级转变为高等级，1 079 km<sup>2</sup>（4.04%）高等级转换为低等级。



注：“→” 左边与右边罗马数字分别代表首尾年土壤侵蚀等级

图 5 东江流域土壤侵蚀等级转化图

Fig. 5 Conversion map of soil erosion level in Dongjiang River basin

### 2.3 讨论

上述结果表明，东江流域在 1990 - 2010 年间土壤侵蚀总体不算严重，大部分地区属于 I 级/微度和 II 级/轻度，主要原因如下：首先，流域地处华南亚热带湿润区，丰沛的雨量、温暖的气候以及肥沃土地的使得流域植被繁茂，即便部分地区发生剧烈侵蚀，当地生态系统能在如此适宜的自然条件下迅速修复，使得土壤侵蚀不会继续恶化。因此，这种植被自我修复的能力对减少东江流域土壤侵蚀起到重要作用。其次，在过去几十年间，人们对流域采取了大量水土保持措施，如划定 45 个一级水源保护区和 41 个二级水源保护区，在这些保护区范围内，一些诸如矿山开发、厂房建设、耕地开垦等人类活动受到严格限制，这极大地提高了流域内水土的抗侵蚀性。另外，针对局部土壤侵蚀较严重地区，政府部门采取了大量工程措施、生物措施以及农业技术防治性措施，有效缓解和治理土壤侵蚀

问题。

尽管近 20 年来东江流域的土壤侵蚀问题总体不算严重，但仍需要值得注意：首先，从时间角度来看，年均土壤侵蚀量值、侵蚀高等级（IV - VI 级）面积、侵蚀的低等级转换为高等级的面积均呈逐年增长趋势，表明 1990 - 2010 年间流域的土壤侵蚀量在逐年增加。随着城市化进程推进，大量农田、草地、林地被侵占，使得东江流域尤其是下游地区的土壤生态系统发生重大改变，尽管采取了一定的水土保持措施，但仍不能阻止加剧趋势，这将对流域内水土保持工作带来严峻的挑战。其次，从空间角度来看，非一致的人类活动导致流域土壤侵蚀的空间分布极不均衡，呈明显的梯度特征，从上游到下游呈明显递增趋势。下游地区更为剧烈的人类活动和更高的城市化水平使得水土侵蚀量更大，个别地区（如惠阳西部）在 2010 年侵蚀量甚至高达 5 000 t/(hm<sup>2</sup> · a)。因此，面对东江流域土壤侵蚀

的难题,需要准确把握流域的土壤侵蚀时空变化规律,需要立足过去、现在和将来的发展趋势,全面了解流域梯度发展的特征,才能制定科学的水土保持计划。

### 3 结 论

结合 GIS 技术利用 RUSLE 经验模型,探讨 1990-2010 年土地覆盖类型时空变化对梯度发展的东江流域的土壤侵蚀影响,得到如下结论:

1) 东江流域中、上游地区土地覆盖类型变化不太明显,而下游地区受快速城市化影响变化较剧烈,大量水田、旱地、林地和草地转化为城镇用地、工矿建设用地以及园地。

2) 1990 年、2000 年和 2010 年的土壤侵蚀等级均属于 II 级/轻度侵蚀;绝大部分地区的土壤侵蚀等级为 I 级和 II 级,此两等级面积之和在 1990, 2000 和 2010 年占到全流域面积的 90.95%、91.25% 和 91.26%;流域的土壤侵蚀量等级变化不明显,约有 91.14% 维持原有的侵蚀等级,而 8.86% 侵蚀等级发生改变。变化等级面积中,4.82% 由低等级转变为高等级,4.04% 由高等级转换为低等级。东江流域的土壤侵蚀情况与社会经济的梯度发展特征相一致,经济越发达区域其产生的土壤侵蚀量越大,经济越落后地区产生的土壤侵蚀量反而越小。尽管东江流域在 1990-2010 年间土壤侵蚀总体上并不算严重,但其侵蚀形势存在逐渐加剧的迹象,未来仍需继续加强土壤侵蚀的防治工作。

### 参考文献:

- [1] 许月卿,蔡运龙. 贵州省猫跳河流域土壤侵蚀量计算及其背景空间分析 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 50-54.
- XU Y Q, CAI Y L. Estimation of soil erosion and its spatial analysis in Maotiaohe watershed, Guizhou Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(5): 50-54.
- [2] WISCHMEIER W H, SMITH D D. Predicting rainfall-erosion losses from crop land and east of the Rocky Mountains [R]. Washington: Agriculture Handbook, 1965.
- [3] RENARD K G, FERREIRA V A. RUSLE model description and database sensitivity [J]. Journal of Environmental Quality, 1992, 22: 458-466.
- [4] RENARD K G, FOSTER G A, WEESIES G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with RUSLE [R]. Washington: Agriculture Handbook, 1997.
- [5] 潘美慧,伍永秋,任斐鹏,等. 基于 USLE 的东江流域土壤侵蚀量估算 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164.
- PAN M H, WU Y Q, REN F P, et al. Soil erosion estimation in Dongjiang River basin based on USLE [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [6] FOSTER G R, LANE L J. 1987 User requirements, USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) [R]. West Lafayette: NSERL Report No. 1, 1987.
- [7] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 22: 527-544.
- [8] De ROO A P J, WESSELING C G, RITSEMA C J. LISEM: A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins [J]. Hydrol Process, 1996, 10: 1107-1118.
- [9] De JONG S M, PARACCHINI M L, BERTOLO F, et al. Regional assessment of soil erosion using the distributed model SEMMED and remotely sensed data [J]. Catena, 1999, 27: 291-208.
- [10] 赖成光,陈晓宏,赵仕威,等. 基于随机森林的洪灾风险评价模型及其应用 [J]. 水利学报, 2015, 46(1): 58-66.
- LAI C G, CHEN X H, ZHAO S W, et al. The flood risk evaluation model based on Random Forest and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(1): 58-66.
- [11] 石教智,陈晓宏,林汝颜. 东江流域降水时间序列的混沌特征分析 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2006, 45(4): 111-115.
- SHI J Z, CHEN X H, LIN R Y. Analysis of middle-headed characteristics in Dongjiang River basin Rainfall time series [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2006, 45(4): 111-115.
- [12] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等. 珠江流域 1960-2012 年降雨侵蚀力时空变化特征 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-167.
- LAI C G, CHEN X H, WANG Z L, et al. Spatial and temporal variations of rainfall erosivity on Pearl River basin during 1960-2012 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 159-167.
- [13] 章文波,谢云,刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究 [J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- ZHANG W B, XIE Y, LIU B Y. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts [J]. Scientia Geo-

- graphica Sinica, 2002, 22(6):705-711.
- [14] WILLIAMS J R, SHARPLY A N. EPIC-erosion productivity impact calculator: model documentation [R]. Washington DC: USDA of Agricultural Technical Bulletin, 1990: 1768
- [15] 黄金良, 洪华生, 张路平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究 [J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- HUANG J L, HONG H S, ZHANG L P, et al. Study on Predicting soil erosion in Jiulong River Watershed Based on GIS and USLE [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(5): 75-79.
- [16] 俱战省, 文安邦, 严冬春, 等. 三峡库区小流域修正通用土壤流失方程适用性分析 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 121-131.
- JU Z S, WEN A B, YAN D C, et al. Adaptability analysis on revised universal soil loss equation in small catchment of Three Gorges Reservoir Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(5): 121-131.
- [17] XIAO L L, YANG X H, CHEN S X, et al. An assessment of erosivity distribution and its influence on the effectiveness of land use conversion for reducing soil erosion in Jiangxi, China [J]. Catena, 2015, 125: 50-60.
- [18] KOULI M, SOUPIOS P, VALLIANATOS F. Soil erosion prediction using the revised universal soil loss equation (RUSLE) in a GIS framework, Chania, Northwestern Crete, Greece [J]. Environ Geol, 2009, 57: 482-497.
- [19] CHEN T, NIU R Q, LI P X. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China [J]. Environ Earth Sci, 2011, 62: 522-541.
- [20] XU Y Q, SHAO X M, Kong Xiangbin, et al. Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a mountains karst watershed, Guizhou Province, China [J]. Environ Monit Assess, 2008, 141: 275-286.
- [21] PAN, J H, WEN Y. Estimation of soil erosion using RUSLE in Caijiamiao watershed, China [J]. Nat Hazards, 2014, 71: 2187-2205.
- [22] 陈燕红, 潘文斌, 蔡莞滨. 基于 RS/GIS 和 RUSLE 的流域土壤侵蚀定量研究——以福建省吉溪流域为例 [J]. 地质灾害与环境保护, 2007, 18(3): 5-10.
- CHEN Y H, PAN W B, CAI Y B. Quantitative research on soil Erosion in catchment based on RS/GIS and RUSLE——Take JiXi river basin in Fujian Province as an example [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2007, 18(3): 5-10.
- [23] LIU D D, CHEN X H, LIAN Y Q, et al. Impacts of climate change and human activities on surface runoff in the Dongjiang River Basin of China [J]. Hydrol Process, 2010, 24: 1487-1495.
- [24] 陆建忠, 陈晓玲, 李辉, 等. 基于 GIS/RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化 [J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 337-344.
- LU J Z, CHEN X L, LI H, et al. Soil erosion changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 337-344.