

珠江三角洲典型流域颗粒态氮磷负荷估算研究

刘晓南, 吴志峰, 程 炯, 刘 平

(广东省生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650)

摘要:珠江三角洲地区菜果花农业发达, 农业化学物质投入量大, 区域 N、P 等养分流失迅速, 水环境问题尤为突出。选取广州流溪河为研究对象, 应用 GIS 和 USLE 模型结合土壤污染实测数据, 采用源类型法估算流溪河流域的颗粒态 N、P 污染负荷。结果表明: (1) 流溪河流域的颗粒态 N、P 总流失量分别为 $582.49 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $424.74 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中 N 流失量中水田贡献最大占 40.02%, 其次为林地占 26.31%; P 流失量中旱地贡献最大占 28.75%, 其次为水田占 26.94%。(2) 流域不同源类型单位面积颗粒态 N、P 流失量差异显著, 旱地的 N、P 单位面积流失量均为最高, 分别是 $7.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 其次为果园, N、P 分别是 $7.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。(3) 流域颗粒态 N、P 流失总量及其单位负荷受农业施肥影响, 农业生产过程产生的过量 N、P 物质是流溪河流域重要的 N、P 负荷污染来源。

关键词:非点源污染; 颗粒污染物负荷; 流溪河流域; 珠江三角洲

中图分类号:X522 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1432-05

Estimation of the Loads of Particulate Nitrogen and Phosphorus in Typical Drainage Area of Pearl River Delta

LIU Xiao-nan, WU Zhi-feng, CHENG Jiong, LIU Ping

(Guangdong Institute of Ecology and Environmental and Soil Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: The output of nitrogen and phosphorus from agricultural activities is the main source for water eutrophication. The fully developed agriculture in vegetables, fruits and flowers in Pearl River Delta gives rise to excessive use of chemical matter such as fertilizer and pesticide and thus bring about the serious water pollution because of the loss of nitrogen(N) and phosphorus(P) from the farmland in the region. Based on Geographic Information System(GIS) and soil pollution data, Universal Soil Loss Equation(USLE) and source type method are used to estimate the loads of particulate N and P from the soil of different land use types in the drainage area of Liuxi River in Guangzhou, China. So the key regions those the NPS pollution occurred can be confirmed and the technical support for the pollution control target and the capital flow concentration can be provided by the results. The study shows that: (1) The total loss of particulate N and P in the drainage area is $582.49 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $424.74 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. Among them the loss of particulate N from paddy soil occupies 40.02% and that of forest 6.31%, while the loss of particulate P from the soil of dry-land accounts for 28.75% and that of paddy soil 26.31%. (2) There are significantly different losses of particulate N and P per unit area from the soils of different source land use types in the drainage area. The losses of particulate N and P per unit area are both the highest from the soil of dry-land, which is $7.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $9.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively, followed by those of orchard, which is $7.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $6.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively. The causes are excessive use of chemical matter, unreasonable cultivation pattern, and the soil erosion of different land use. (3) The excessive N and P come from the loss of particulate N and P from the fertilization in agricultural production, and they are the main source of the pollutants in Liuxi River water.

Keywords: non-point source pollution; loads of particulate nitrogen and phosphorus; Liuxi River; Pearl River Delta

我国有 63.6% 的河流、湖泊富营养化^[1], 在太湖、巢湖和滇池流域, 由于人口密集, 农业生产集约化程

度高, 流域总氮、总磷比 20 a 前分别提高了 10 倍以上, 其中 50% 的污染负荷由农业贡献^[2,3]。珠江三角洲地区属热带、亚热带气候, 降水丰沛且集中, 红色岩系风化物可蚀性高, 是非点源污染的动力因素。同时, 该区菜果花农业发达, 农业化学物质的投入量大(化肥平均用量, 是全国平均水平的 2 倍, 发达国家警戒线的 3.5 倍), 区域土壤养分流失迅速, 水体富营养化严重, 水资源质量严重恶化, 水环境问题尤为突出^[4]。由

收稿日期: 2008-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(40571164); 广东省自然科学基金(06105518); 广东省自然科学基金(04201163-4)

作者简介: 刘晓南(1980—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为水土保持、农业面源污染、数字地貌分析方面。

E-mail: xnliu@soil.gd.cn

通讯作者: 程 炯 E-mail: chengjiong@soil.gd.cn

水土流失带来的颗粒态氮、磷已成为污染水体的非点源污染物。

选取广州市的流溪河作为珠江三角洲的典型流域,应用 GIS 和通用土壤流失方程(USLE)模型,结合土壤污染实测数据,估算流溪河流域的颗粒态氮、磷污染负荷发生量,以此确定造成非点源污染的关键区域,为非点源污染控制的针对性、资金流向的集中性提供技术支撑。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 流域概况

流溪河流域位于广州市北部,珠江三角洲的中北部,是广州市惟一的“内河”(图 1)。发源于从化市桂峰山,流经从化市、花都区、白云区后汇入珠江,全长 171 km,流域总面积 2 300 km²,流域耕地面积约占广州市的 33%。

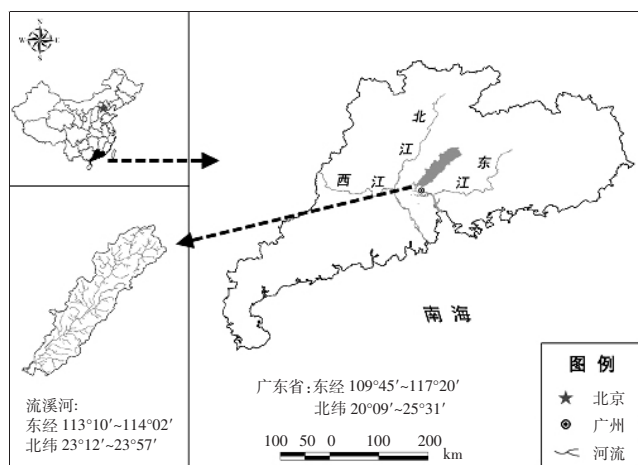


图 1 流溪河流域地理位置

Figure 1 Drainage of Liuxi River, Guangdong, China

作为珠江的一级支流,流溪河除灌溉、防洪、发电外,还担负着广州自来水水源总供水量的 60%,是珠江三角洲结构性生态源的主要组成部分,也是广州北部最主要的生态大通道。流溪河水环境质量,水质健康状况,与珠江三角洲生态源的健康紧密相关。

1.2 研究方法

参照相关研究(焦荔,1991;王晓燕,1996;施为光,2000)^[5-8],流域颗粒态氮、磷污染物输出模型为:

$$LS = a \times CS \times X \times TS \times Sd$$

式中: a 为单位换算常数; LS 为颗粒态氮、磷污染物负荷,kg·hm⁻²; CS 为土壤氮、磷污染物浓度,mg·kg⁻¹; X 为土壤流失量,t·km⁻²; TS 为污染物富集比; Sd 为流域泥沙输移比。本研究仅探讨氮、磷空间分异,未考虑迁

移转化过程,因此污染物富集比和流域泥沙输移比都为 1。

流域的土壤氮、磷污染物浓度由在流溪河流域内采集的土壤样品的测试分析结果,并结合前人的研究来确定(表 1)。50 个采样点是按照“广泛代表性,各种土种类型尽可能兼顾;兼顾均匀性,尽可能考虑样点的位置分布、耕作制度、面积大小等;样点典型性,避免各种非调查因素影响”的原则沿流溪河南北选取的,取集土壤为耕层土样(0~15 cm),代表该流域主要的各土壤类型和土地利用类型,分别为:果园、水田(水稻土)、农村用地、城镇用地、草地、林地、灌木林、旱地、水体与裸地。

表 1 各主要地类土壤颗粒态氮、磷污染物浓度
Table 1 Concentrations of particle N and P in the soil of different land use

地类	CS 值		地类	CS 值	
	氮/%	磷/%		氮/%	磷/%
果园	0.091	0.083	林地	0.072	0.046
水田(水稻土)	0.110	0.054	灌木林	0.069	0.062
农村用地	0.075	0.080	旱地	0.130	0.160
城镇用地	0.058	0.060	水体	0	0
草地	0.068	0.041	裸地	0.012	0.017

流域的土壤流失量选取美国的通用土壤流失方程(Wischmeier 和 Smith,1978)来进行估算,该模型是最为广泛应用的土壤侵蚀经验模型,是建立在土壤侵蚀理论及大量实地观测数据统计分析的基础上。其表达式为:

$$A = 224.2 \times R \times K \times L \times S \times P \times C$$

式中: A 为年平均土壤流失量; R 为降水侵蚀因子; K 为土壤侵蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子,合称地形因子; P 为保护措施因子; C 为地表植被覆盖因子,合称地表覆盖因子。 L 、 S 、 C 、 P 均为无量纲单位,公式中含 224.2 系数是为了将结果换算为国际通用单位(t·km⁻²·a⁻¹)。在我国,该模型已经被广泛地应用在水土流失的预测和治理工作中^[9-15],且普遍认为水土流失通用方程能够较好地适用于我国的水土流失估算和分析。根据流溪河流域的实际情况分别对各因子的计算公式进行了选取和修正^[9-19]。

2 结果与分析

应用 ArcGIS 软件,按照 USLE 方程各运算公式,进行各因子的估算,经图形叠加分析后得出流溪河流域的土壤流失量(图 2)。结合流域颗粒态氮、磷污染

物输出模型,便可估算出流溪河流域的颗粒态氮、磷污染物年负荷量。而且由于采用了栅格计算,可清楚知道负荷量的空间分布情况,更准确地确定非点源污染的关键区域。

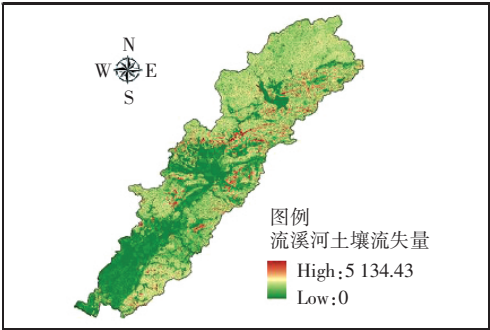


图 2 流溪河流域土壤流失量
Figure 2 Soil erosion in drainage area of Liuxi River

2.1 流域土壤流失量计算

经计算,流溪河流域土壤流失总量为 $62.90 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 年均土壤侵蚀模数为 $344.7 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。总体来说,土壤侵蚀危害比较轻微,侵蚀强度属轻度以下,远小于水利部颁布的土壤允许流失量 $500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。表 2 是流溪河流域不同地类土壤侵蚀统计,表中数据显示,土地利用方式直接影响着土壤流失量。在各类土地中,果园的侵蚀模数最大 ($790.8 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),其次为旱地 ($594.0 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。其原因是当地果农为使果树吸收更多的养分,把果树下的杂草全部去除,使果园的裸露地面增多,从而造成侵蚀模数的加大。而林地由于封山育林等保护措施落实较好,人为干扰相对较少,在湿热的气候条件下,林地比较郁闭,林下灌木草丛覆盖良好,所以流溪河流域林地景观的平均侵蚀模数较低(除水域外,各地类中林地的侵蚀模数最小),由于林地占整个流域面积的

51.4%,因此林地景观对减少流溪河流域的土壤侵蚀起到了重要作用。

2.2 流域颗粒态氮、磷负荷估算

按照研究方法估算得出流溪河流域的颗粒态氮、磷负荷量,统计后得出流溪河流域的氮年总负荷量为 $582.49 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,磷年总负荷量为 $424.74 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。图3显示了流溪河流域的颗粒态氮、磷负荷量空间分布,其分布与流溪河的土壤流失量相似,负荷较高的区域主要在从化市的街口、温泉、神岗、吕田、太平等地,负荷较低的区域主要分布在流溪河中段、下段的两岸,下段主要分布在西岸。

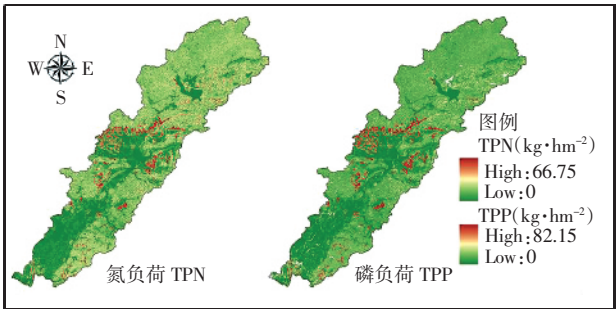


图 3 流溪河流域颗粒态氮、磷负荷量空间分布
Figure 3 Spatial distribution of the loss of particle N and P in Liuxi River

表 3 是流域内不同源类型的颗粒态氮、磷总流失量和贡献率。在氮流失量中,水田的贡献率最大占 40.02%,其次是林地占 26.31%;在磷流失量中,旱地的贡献率最大占 28.75%,其次是水田占 26.94%。

表 4 是流域内不同源类型的单位面积颗粒态氮、磷负荷量,由表可见,流溪河流域各土地利用类型的单位面积颗粒态氮、磷负荷分别在 $0.63 \sim 7.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.89 \sim 9.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。各源类

表 2 流溪河流域不同地类土壤侵蚀统计

Table 2 Soil erosion of different land use in drainage area of Liuxi River

利用类型	面积/km ²	面积百分比/%	流失量/t·a ⁻¹	流失量百分比/%	侵蚀模数/t·km ⁻² ·a ⁻¹
水田	496.50	22.93	211 957.3	33.70	426.9
旱地	128.40	5.93	76 271.0	12.13	594.0
林地	1 261.07	58.24	224 218.4	35.65	177.8
果园	51.10	2.36	40 410.7	6.43	790.8
草地	41.14	1.90	18 208.9	2.90	442.6
城镇居民用地	128.84	5.95	57 434.8	9.13	445.8
未利用地	0.87	0.04	454.5	0.007	524.8
水域	57.38	2.65	0	0	0
总计	2 165.30	100	628 955.5	100	

表 3 流溪河流域各土地利用类型的颗粒态氮、磷负荷
Table 3 Total loss and contribution rate of particle N and P by different land use in drainage area of Liuxi River

土地利用类型	氮 N		磷 P	
	流失量/kg	贡献率/%	流失量/kg	贡献率/%
水田	233 103.94	40.02	114 432.84	26.94
林地	153 279.08	26.31	97 928.30	23.06
旱地	99 204.79	17.03	122 098.21	28.75
果园	36 797.70	6.32	33 562.74	7.90
农村用地	28 787.90	4.94	30 707.09	7.23
草地	12 379.61	2.13	7 464.18	1.76
城镇用地	11 056.85	1.90	11 438.13	2.69
灌木林	7 833.96	1.34	7 039.21	1.66
裸地	47.78	0.01	67.69	0.02
合计	582 491.61	100.00	424 738.38	100.00

表 4 流溪河流域各土地利用类型的单位面积颗粒态氮、磷负荷
Table 4 Loss of particle N and P per unit area of each land use type in drainage area of Liuxi River

土地利用类型	氮/kg·hm ⁻²	磷/kg·hm ⁻²
水田	4.70	2.31
旱地	7.72	9.50
灌木林	1.23	1.10
林地	1.28	0.82
水体	0	0
果园	7.20	6.56
草地	3.01	1.81
城镇用地	2.59	2.67
农村用地	3.34	3.57
裸地	0.63	0.89

型间的单位面积流失量差异显著,与总流失量有明显的差别。旱地的氮、磷单位面积流失量均为最高,分别是 7.72 kg·hm⁻² 和 9.50 kg·hm⁻²;其次为果园,氮、磷单位面积流失量分别是 7.20 kg·hm⁻² 和 6.56 kg·hm⁻²。在氮、磷总流失量中负荷较大的林地景观类型,其氮、磷单位面积流失量负荷很少,分别是 1.28 kg·hm⁻² 和 0.82 kg·hm⁻²。

2.3 各土地利用类型氮、磷流失量差异分析

结果显示,流域内各土地利用类型的单位面积颗粒态氮、磷流失量差异明显,其中以旱地和果园流失污染最大,其主要原因有 3 方面。

一是化肥施用量过大。近年来,随着农业结构的调整,流溪河流域内的蔬菜、水果、花卉产业发展迅速,农民为提高产量而获取更多经济利益,对果园和蔬菜地(本研究中将蔬菜地归入旱地分类中)投入了大量的化学肥料和有机肥料。根据从化市耕地地力调查结果显示,菜地、果园的施肥用量都较其他土地利

用类型多,菜地的氮、磷施肥用量分别达到了 981.00 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 982.50 kg·hm⁻²·a⁻¹,大量作物和果树未能吸收的肥料残留在土壤中,导致这些地类的污染浓度高,氮、磷负荷高。

二是不合理的耕作方式。由于流域地处珠三角经济发达地区,农民工需求量大,务工收入高于种田收入,导致劳动力大量流失,而种田的农民在劳动力不足的情况下出现了省工省时的心理。由于化肥比有机肥省工,撒施比深施省工,于是出现了重视化肥、普遍撒施,轻视有机肥、很少深施等等“懒种田”的现象。实地调查发现,菜农大都喜欢撒施化肥在作物的根部培土上,当降雨发生时,暴露在土壤表面的氮、磷极易被冲刷掉。

三是流域内的旱地、果园地类土质疏松,冲刷作用明显。实地调查发现,果农为了使果树吸收更多的肥料,除掉果树下的杂草。同时,流溪河流域多为丘陵山地地貌,部分旱地及大多数的果园位于山坡上,在南方暴雨季节时土壤流失量非常大,导致这些地类的单位面积氮、磷流失量增大。

流域内各土地利用类型的颗粒态氮、磷总流失量差异明显,且与单位面积的氮、磷负流失量的差异不同。水田的颗粒态氮总流失量最大,输出贡献率占整个流域的 40.02%,其次是林地 26.31% 及旱地 17.03%;旱地的颗粒态磷总流失量最大,输出贡献率占整个流域的 28.75%,其次是水田 26.94% 及林地 23.06%。其原因主要与各土地利用类型的化肥投入比例、各地类的土壤流失量有关。根据实地调查,水稻田的氮、磷投入比例约为 1:0.44,氮素养分的投入比例较菜地的 1:1 和果园的 1:0.85 大很多,故流失的氮也较多。林地虽然单位面积氮的流失量非常少,却因其面积较大、土壤流失量大而导致了氮的总流失量较大。可见,流溪河流域的非点源污染关键区域是流域内施肥过度的水田、旱地区域,和水保措施未实施好的坡地果园、林场区域。

3 结论

(1)流溪河流域的颗粒态 N、P 总流失量分别为 582.49 t·a⁻¹ 和 424.74 t·a⁻¹,其中 N 流失量中水田贡献最大占 40.02%,其次为林地占 26.31%;P 流失量中旱地贡献最大占 28.75%,其次为水田占 26.94%。流失量较大的区域主要在从化市的街口、温泉、神岗、吕田、太平等地,流失量较小的区域主要分布在流溪河中段、下段的两岸,下段主要分布在西岸。

(2)流域不同源类型单位面积颗粒态 N、P 流失量差异显著,旱地的 N、P 单位面积流失量均为最高,分别是 $7.72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $9.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$;其次为果园,N、P 分别是 $7.20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $6.56 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

(3)流域颗粒态 N、P 流失总量及其单位负荷受农业施肥影响,农业生产过程产生的过量 N、P 物质是流溪河流域重要的 N、P 负荷污染来源。要减少不同土地利用类型的颗粒态氮磷流失量,可以从两方面入手。一是采用合理的耕作方式,实施作物平衡施肥,避免农业生产中过量施放化肥,从而减少土壤中的氮、磷流失含量;二是开展流域内水土保持工作,减少土壤流失量,从而控制附着在土壤颗粒中的氮、磷流失。

参考文献:

- [1] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995.
JIN Xiang-can. Environment of Chinese Lakes[M]. Beijing: China Ocean Press, 1995.
- [2] 鲍全盛, 王华东. 我国水环境非点源污染研究与展望[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 66-71.
BAO Quan-sheng, WANG Hua-dong. The research and prospect on non-point source pollution of water environment in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(1): 66-72.
- [3] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 34(7): 1008-1017.
- [4] 程 炯, 王继增, 刘 平, 等. 珠江三角洲地区水环境问题及其对策[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 91-93.
CHENG Jiong, WANG Ji-zeng, LIU Ping, et al. Problems and counter-measures of water-environment in Pearl Delta Region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2006, 26(2): 91-93.
- [5] 吴志峰, 卓幕宁, 王继增, 等. 珠海正坑小流域土壤与氮、磷养分流失估算[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 100-114.
WU Zhi-feng, ZHUO Mu-ning, WANG Ji-zeng, et al. Estimation of soil and N, P nutrient loss in Zhengkeng small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(1): 100-114.
- [6] 焦 荔. USLE 模型及营养物流失方程在西湖非点源污染调查中的应用[J]. 环境污染与防治, 1991, 13(6): 5, 8, 17.
JIAO Li. Application of USLE and nutrient loss equation in Lake West non-point source pollution investigation[J]. *Environmental Pollution and Control*, 1991, 13(6): 5, 8, 17.
- [7] 王晓燕. 非点源污染定量研究的理论及方法[J]. 首都师范大学(自然科学版), 1996, 17(1): 91-95.
WANG Xiao-yan. Theory and methods of quantitative study on non-point pollution[J]. *Journal of Capital Normal University (natural science edition)*, 1996, 17(1): 91-95.
- [8] 施为光. 四川省清平水库流域非点源污染负荷计算[J]. 重庆环境科学, 2000, 22(2): 33-36.
SHI Wei-guang. Estimation of non-point source pollution in drainage of Qingping Reservoir Sichuan Province[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2000, 22(2): 33-36.
- [9] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究 [J]. 水土保持学报, 2000, 14(2): 19-24.
CAI Chong-fa, DING Shu-wen, SHI Zhi-hua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2): 19-24.
- [10] 余炜敏, 漆智平. SOTER 支持下海南土壤侵蚀量估算[J]. 水土保持学报, 2003, 17(6): 51-54.
YU Wei-min, QI Zhi-ping. Assessment of soil erosion in Hainan island on basis of SOTER [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(6): 51-54.
- [11] 钟 霞, 薛重生. 基于栅格模块地形因子提取及其水土流失评价中的应用—以湖北省房县水土流失评价为例 [J]. 水土保持研究, 2004, 11(1): 92-94.
ZHONG Xia, XUE Zhong-sheng. The processing of terrain factors based on the Grid Module and its applying to estimating soil erosion[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(1): 92-94.
- [12] 倪九派, 傅 涛, 李瑞雪, 等. 应用 ARC/INFO 预测茅子沟小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(4): 29-32, 50.
NI Jiu-pai, FU Tao, LI Rui-xue, et al. Supplying geographical information system ARC/INFO to predict soil erosion of watershed[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001, 15(4): 29-32, 50.
- [13] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算—以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, 14(1): 62-68.
YOU Song-cai, LI Wen-qing. Estimation of soil erosion supported by GIS a case study in Guanxi Township, Taihe, Jiangxi[J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(1): 62-68.
- [14] 肖 寒, 欧阳志云, 王效科, 等. GIS 支持下的海南岛土壤侵蚀空间分布特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 75-80.
XIAO Han, OUYANG Zhi-yun, WANG Xiao-ke, et al. Spatial distribution characteristics of soil erosion in Hainan Island by GIS [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 1999, 5(4): 75-80.
- [15] 刘 康, 康 艳, 曹明明, 等. 基于 GIS 的陕西省水土流失敏感性评价[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 168-170.
LIU Kang, KANG Yan, CAO Ming-ming, et al. GIS-Based assessment on sensitivity to soil and water loss in Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2004, 18(5): 168-170.
- [16] 王小丹, 钟祥浩, 范建容. 西藏水土流失敏感性评价及其空间分异规律[J]. 地理学报, 2004, 59(2): 183-188.
WANG Xiao-dan, ZHONG Xiang-hao, FAN Jian-rong. Assessment and spatial distribution of sensitivity of soil erosion in Tibet[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(2): 183-188.
- [17] 于书霞, 王 宁, 朱颜明, 等. 基于地理信息系统的土壤侵蚀研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 20-23.
YU Shu-xia, WANG Ning, ZHU Yan-ming, et al. Applications of GIS in soil erosion research[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3): 20-23.
- [18] 蒋 平. 石瓮小流域土壤侵蚀遥感定量和制图研究[J]. 国土与自然资源研究, 1994, 2: 27-31.
JIANG Ping. Study on quantitative remote sensing and cartography of soil erosion in drainage of Shiweng[J]. *Territory and Natural Resources*, 1994, 2: 27-31.
- [19] 章文波, 等. 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.
ZHANG Wen-bo, et al. Rainfall erosivity estimation using daily rainfall amounts[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(6): 705.