

基于 GIS 的南四湖沿岸农业面源氮磷负荷估算研究

成杰民¹, 宋涛¹, 李彦²

(1. 山东师范大学 人口·资源与环境学院, 济南 250014; 2. 山东省农业科学院 土壤肥料研究所, 济南 250014)

摘要:以济宁市沿南四湖县区乡镇为主要研究区,根据降雨径流和土壤侵蚀量,运用遥感(RS)影像和地理信息系统(GIS),确定土壤通用流失方程(USLE)各参数,运用 USLE 对南四湖沿岸氮磷流失模数进行定量估算,为南四湖沿岸农业氮磷流失的消减与控制提供科学依据。结果表明:USLE 模型计算的氮磷流失量主要集中在湖西区域,以喻屯镇、王鲁镇和唐口镇的流失量居于前列,最高的喻屯镇氮、磷流失量分别达 439.9 t/a 和 271 t/a;湖东区域,石桥镇、马坡镇、欢城镇和韩庄镇的氮磷流失量居于前列,最高的石桥镇氮和磷流失分别为 174 t/a 和 120.6 t/a。农田实际调查的氮和磷的流失量与模型计算值趋势较一致,两者呈极显著线性正相关($p < 0.01$)。氮的模型计算流失量略低于实际调查流失量,而磷的模型计算流失量远远高于实际调查流失量。主要是因为南四湖沿岸农田氮的流失是氮的主要流失形式,远高于畜禽养殖和生活排污的氮流失。而磷的流失主要来自畜禽养殖,其次才是农田流失磷。

关键词:GIS; 氮磷流失; 农业面源; 南四湖

中图分类号:X524

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2012)03-0284-05

Estimation of Nitrogen and Phosphorus Loading of Agricultural Non-point Sources along Nansi Lake Based on GIS

CHENG Jie-min¹, SONG Tao¹, LI Yan²

(1. College of Population Resources and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250014, China;

2. Institute of Soil and Fertilizer, Shandong Agricultural Sciences Academy, Ji'nan 250014, China)

Abstract: In this paper, the counties and towns in Ji'ning City along the Nansi Lake shore were selected as the main study area. The factors of Universal Soil Loss Equation (USLE) were determined by runoff and soil erosion, remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS). The loss of nitrogen and phosphorus was calculated by USLE. The objective of this study was to provide a scientific basis for decreasing and controlling loss of nitrogen and phosphorus from agricultural sources. The results indicated that the most loss of nitrogen and phosphorus from the Yutun Town, Wanglu Town and Tangkou Town locating in west coast of Nansi Lake. The maximum value of loss of nitrogen and phosphorus was from Yutun Town and was 439.9 t/a and 271 t/a, respectively. The most loss of nitrogen and phosphorus from the Shiqiao Town, Mapo Town, Huancheng Town and Hanzhuang Town locating in east coast of Nansi Lake. The maximum value of loss of nitrogen and phosphorus was from Shiqiao Town and 174 t/a and 120.6 t/a, respectively. The losses of nitrogen and phosphorus by field survey and USLE were more consistent and both showed a significant linear correlation ($p < 0.01$). The loss of nitrogen calculated by USLE was lower than it by field survey while the loss of phosphorus by estimated by USLE was higher. The reason was that loss of nitrogen was mainly from farm soil erosion along Nansi Lake, while the loss of phosphorus was mainly from livestock and poultry breeding and secondly from farm soil erosion.

Key words: GIS; loss of nitrogen and phosphorus; agricultural sources; Nansi Lake

由于农业面源污染具有来源分散、多样、其地理边界和位置难以识别和确定等特点,加之面源污染影

响因子复杂多样、形成机理尚不明确,给其定量研究带来很大困难^[1]。根据土壤流失量定量研究面源污

收稿日期:2011-10-14

修回日期:2011-12-12

资助项目:国家科技支撑计划(2007BAD87B05)

作者简介:成杰民(1958—),女,山东济南人,教授,主要从事土壤污染修复研究。Email:jmchengcn@yahoo.com.cn

染中氮磷的发生量是目前常用的方法^[2]。该方法是通过计算土壤流失量、原土壤表层养分含量和流失土壤的养分富集比,得到氮和磷等面源污染物的流失量^[3]。近年来,越来越多的模型与地理信息系统(GIS)技术相结合,推动了对农业面源污染的研究^[4-7]。通用土壤流失方程(USLE)是美国 Wischmeier 和 Smith^[8]于 1960 年根据近万个径流小区试验资料建立的经验公式,是最早将坡度、坡长、气候因子(降雨)、植被因子、土壤可蚀性等引入土壤侵蚀预报的一个简洁模型。通用土壤流失方程(USLE)中运用 GIS 的栅格数据分析与计算功能,按照土地利用、土壤类型、植被分布、地形地貌和降雨强度计算面源污染物的发生量,解决了面源污染空间分布不均的问题,有效提高了估算效率、准确性和结果的显示度,在全世界得到广泛应用。我国已将 USLE 广泛应用于水土流失、环境评价等方面的研究^[9-11]。近年来,GIS 和 RS 技术的应用,保证了源信息的采集、处理和应用^[12],使得模型模拟更加方便快捷。

近几年,南水北调输水沿线点源污染得到良好控制,农业面源污染成为制约东线调水的重要因素。南四湖作为南水北调东线工程的重要通道和调蓄区,其水质的优劣直接关系南水北调工程的成败。而南四湖来自集水水域内的地表径流等面源排放所带入的营养物占入湖总量的 70% 以上^[13],严重影响南四湖水环境质量。因此,开展南四湖沿岸农业面源污染调查研究,明确沿湖农业生产中氮磷的产生量、流失量是加强南四湖农业面源污染防控及综合治理前提。

本文以济宁市沿南四湖县区乡镇为主要研究范围,对沿湖 5 km,河流水系上延至 10 km,两侧 2 km 的研究区开展调查研究。根据降雨径流和土壤侵蚀量,运用遥感(RS)影像和地理信息系统(GIS),确定 USLE

各参数,运用土壤通用流失方程(USLE)对南四湖沿岸土壤流失,氮磷流失模数进行定量计算分析,为沿岸农业氮磷流失的消减与控制提供科学依据。

1 研究区概况

南四湖位于山东省西南部(116°34′—17°21′E, 34°27′—35°20′N)。属于淮河流域泗水河水系,是典型的平原浅水湖。最大水面面积约为 1 266 km²,是我国北方最大的淡水湖。承受东、西、北三面,鲁、苏、豫、皖 4 省 32 个县市区来的水,直接入湖河流 53 条,流域总面积达 31 400 km²。

南四湖流域属于暖温带、半湿润季风气候区,夏季湿热、冬季干冷,季风变化显著,地带性植被为阔叶落叶林。主要成土母质为酸性岩风化物 and 石灰岩风化物,形成地带性土壤为棕壤和褐土,非地带性土壤有砂浆黑土、潮土和水稻土。其中沿湖土壤主要为潮土和水稻土。南四湖农业种植作物 230 多种,主要粮食作物有小麦、水稻、谷子、高粱、豆类及薯类等,经济作物有棉花、花生、芝麻、蔬菜、烟草等。

自 20 世纪 60 年代以来,南四湖流域工农业迅速发展,工农业用水逐年增加,入湖水量逐年减少的同时,污染排放不断增加。南四湖整体水质已经由 80 年代的轻污染型转变到现在的中污染—重污染型,属于蓝藻—隐藻型的中富—富营养湖泊,局部富营养化湖泊^[13]。

南四湖绝大部分处在济宁市管辖,包括济宁市的 2 县 1 区,共 23 个乡镇街道办事处(表 1)。研究区耕地面积 67 572 hm²,人口约 116.37 万人,其中农业人口占 87%,非农业人口占 13%。本文以济宁市沿湖县区乡镇为主要研究对象,沿湖 5 km,河流水系上延至 10 km,两侧 2 km 的区域开展调查研究。

表 1 济宁市主要沿湖行政区

县市区	乡、镇、街道办事处名称
微山县	夏镇街办、昭阳街办、韩庄镇、欢城镇、鲁桥镇、南阳镇、傅村镇、留庄镇、微山岛乡、高楼乡、赵庙乡、两城乡、马坡乡、西平乡、张楼乡
鱼台县	谷亭镇、张黄镇、王鲁镇、老砦乡
任城区	许庄街办、唐口镇、石桥镇、喻屯镇

2 研究方法

2.1 USLE 模型

采用通用土壤流失方程(USLE)^[8],其基本形式为:

$$A=0.224RKLSCP$$

式中:A——单位面积土壤流失量[kg/(m²·a)];
R——降雨侵蚀因子;K——土壤可蚀性因子;L——

坡长因子;S——坡度因子;C——植被因子;P——水土保持因子;系数 0.224 是将美国所用英制单位换算为国际通用单位。

2.2 USLE 各参数确定

在确定各因子前,需搜集沿岸区域相关的资料,包括:沿岸地形图、降水数据、植被分布、土壤分布及理化性质(机械组成、养分含量等),以及人类活动对土地的利用、农业施肥现状、种植轮作模式等。运用

ArcGIS 9.2 和 ERDAS 9.2 软件进行分析处理。

2.2.1 降雨侵蚀参数 R 降雨是土壤侵蚀发生的基本动力,降雨侵蚀力因子 R 是评价降雨对土壤侵蚀能力的一个动力指标。其公式为:

$$R = \sum E \cdot I_{30}$$

式中: R ——降雨侵蚀力 $[(m \cdot t \cdot cm)/(hm^2 \cdot h)]$; E ——一次降雨的总动能 $[(m \cdot t)/hm^2]$; I_{30} ——一次降雨过程中连续 30 min 最大降雨强度 (cm/h) 。

上述公式在计算降雨动能和最大雨强时需要详细的降雨过程资料,因目前我国难以获得详细的单次降雨过程及详细雨强,因此本文采用卜兆宏^[14]的年降雨侵蚀力经验公式,利用容易获得的常规降雨资料月雨量与年雨量因子计算 R 。

$$R = \sum_{i=1}^{12} 1.735 \times 10^{(1.5 \lg P_i^2 / P - 0.8188)}$$

式中: P_i ——月平均降雨量 (mm) ; P ——年平均降雨量 (mm) 。

考虑年内各月降雨量的差异,根据 2000—2007 年山东省统计年鉴对济宁地区的降雨量统计,求多年平均降雨量,最终确定 R 值为 $171.73 (m \cdot t \cdot cm)/(hm^2 \cdot h)$ 。

2.2.2 土壤可侵蚀性 K 根据土壤的机械组成和有机质含量确定 K 值^[15]。根据实际调查,以国家 1:100 万土壤数据库的沿岸土壤矢量图为基础,确定南四湖沿岸土壤主要为褐土、潮土和水稻土 3 种类型,结合采样分析和济宁地区土壤普查资料并参考有关文献^[16-17]的研究成果,得出 3 种土壤的 K 值分别为:0.278,0.269,0.431。

2.2.3 坡度因子 S 和坡长因子 L 坡度因子 S 和坡长因子 L 都属于基于 DEM 的地形因子。其计算方法有两种:一是将根据地块平均坡度、坡长的计算值带入地块包含的栅格单元获得^[18];二是直接基于单元的坡度和坡向值进行计算^[19]。由于南四湖沿岸地形平坦,起伏不大,沿岸坡度远小于 1%。因此参考公式:

$$LS = (L/22.19)^m (65.41 \sin^2 \theta + 4.56 \sin \theta + 0.065)$$

式中: L ——坡长 (m) ; θ ——坡度角; m ——常数,当坡度 $\geq 5\%$ 、 $3.5\% \sim 4.5\%$ 、 $1\% \sim 3\%$ 和 $<1\%$ 时, m 分别为 0.5,0.4,0.3 和 0.2^[3]。查阅 M. J. 柯克比的通用土壤流失方程式中地形因子 LS 的图表,确定沿岸的 LS 统一取 0.1。

2.2.4 耕作管理因子 C 与水土保持因子 P 耕作管理因子 C 与水土保持因子 P 通常根据研究区域地表实际情况查表获得。完全没有植被保护的裸露地面 C 值为 1,植被良好的森林地区 C 值接近 0。一般无

任何水土保持措施的土壤 P 值为 1,其它情况 P 值在 0~1 之间。由于 C 值反映植被条件的差异, P 值反映人为耕作方式差异,两者都反映的是地表景观状况,具有较高相似性,在一定程度上反映了人为干扰程度的大小,因此将 C 值和 P 值结合,统一为景观控制因子 CP 。

采用非监督分类 1SODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) 算法,对南四湖遥感影像分类解译,完全按照像元的光谱特性进行统计分类。经过初始分类、专题判别、分类合并、色彩确定、分类后处理、色彩重定义、栅格矢量转换、统计分析,形成景观类型的栅格图。参考王晓辉对巢湖非点源 NP 污染排放负荷估算及控制研究^[20],确定南四湖沿岸耕地的景观控制因子 CP 值(表 2)。

表 2 南四湖沿岸景观控制因子 CP 值

景观类型	农田	水面	居民点
CP 值	0.27	0.000	0.300

2.3 土壤流失量

在确定通用流失方程各因子数值的基础上,将各因子转化为栅格图并以 GIS 为平台通过空间分析的“栅格计算器”对各栅格图形进行叠加分析,得到南四湖沿岸土壤流失模数的空间分布图。由计算结果可知,沿岸土壤流失量 A 为 $0 \sim 497.39 t/(km^2 \cdot a)$,平均土壤流失量(土壤侵蚀模数)为 $352.7 t/(km^2 \cdot a)$ 。

3 结果与分析

3.1 南四湖沿岸农业面源污染氮磷流失量

将土壤流失模数、土壤表层氮或磷的含量和富集比相乘,可以近似获得面源污染物氮或磷的发生模数,进而得到研究区域的氮磷流失量。土壤表层氮磷含量(表 3)数据来源于济宁市土壤志;富集因子通过土壤机械组成计算^[21]获得。据研究,氮磷的富集比一般为 1~4,绝大多数在 2 左右,在缺乏准确的研究数据的情况下,将南四湖沿岸土壤富集比定为 2。

表 3 研究区主要土壤氮磷百分比含量 %

土层	氮磷含量	褐土	潮土	水稻土
表土层	全 N	0.081	0.082	0.091
	全 P	0.041	0.059	0.054
心土层	全 N	0.047	0.042	0.078
	全 P	0.030	0.050	0.050
底土层	全 N	0.036	0.039	0.067
	全 P	0.030	0.047	0.052

在土壤流失 A 栅格图的基础上,结合沿岸土壤氮磷养分含量,进行栅格计算,确定沿岸农业面源污

染中农田氮磷发生模数的空间分布图(图 1)。

南四湖沿岸农业面源污染氮的流失模数为 $0 \sim 0.91 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 均值为 $0.606 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。磷的流失模数为 $0 \sim 0.54 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$, 均值为 $0.392 \text{ t}/$

$(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。用 ArcGIS 软件的空间分析“区类统计”命令,按照南四湖沿岸不同的乡镇为区类进行统计,整理确定 USLE 模型下南四湖沿岸的氮磷流失情况(图 2)。

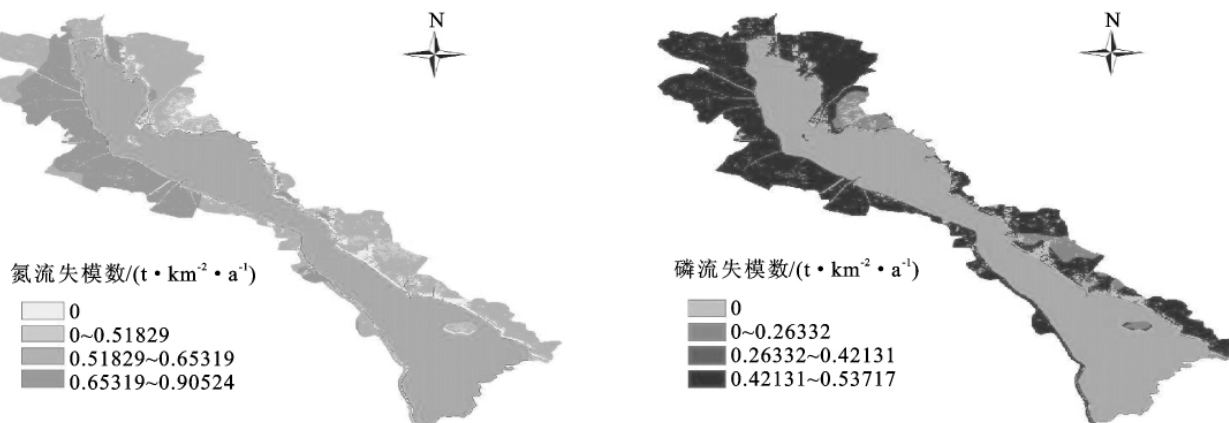


图 1 南四湖沿岸氮磷的流失模数

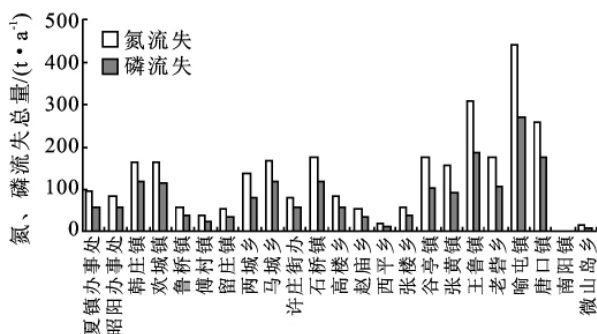


图 2 USLE 模型计算的氮磷流失量

由 USLE 模型计算的氮磷流失量可知(图 2),氮和磷的流失量密切相关,都主要集中在湖西区域,以喻屯、王鲁和唐口的流失量居于前列,最高的喻屯氮磷流失量达 439.9 t/a 和 271 t/a ;湖东区域,石桥、马坡、欢城和韩庄的氮磷流失量居于前列,最高的石桥氮和磷流失分别为 174 t/a 和 120.6 t/a 。

南四湖沿岸氮磷流失量主要集中在湖西区域,这是由于南四湖西岸耕地比重较大,景观类型比较一致。尤其是喻屯、王鲁、唐口、石桥镇等区域经济发展较其他区域滞后,农田耕地面积大,种植业所占比重高,多以小麦—水稻轮作的种植模式为主,农业活动相对频繁,化肥施用量大。不论是农业废水、畜禽养殖废弃物还是生活污水,几乎没有进行收集处理,使得这些区域氮磷的流失量明显高于其他乡镇。

3.2 USLE 模型计算的氮磷流失量与实际调查计算值比较

通过 USLE 模型计算的氮磷流失(以下简称模型计算氮或磷流失量)与实地调查、模拟试验^[22]、结合前人研究中确定的农田氮磷流失量(以下简称实际调查氮或磷流失量)进行比较(图 3—4)。

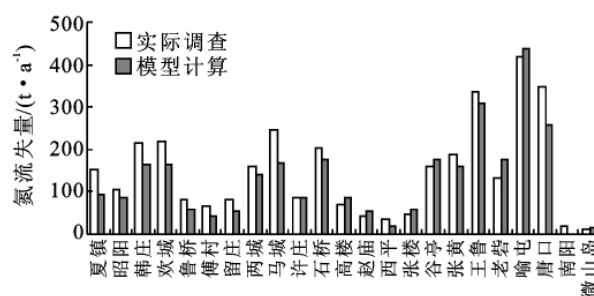


图 3 实际调查农田氮流失量和模型计算值比较

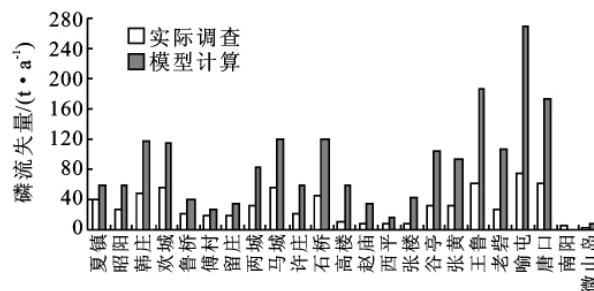


图 4 实际调查农田磷流失量和模型计算值比较

结果表明:农田实际调查的氮和磷的流失量与模型计算值趋势较为一致,两者呈极显著线性正相关,其中氮的流失量 $Y_{\text{模型}} = 0.8902X_{\text{实际}} - 2.8955, R^2 = 0.9152 (p < 0.01)$,磷的流失量 $Y_{\text{模型}} = 2.7815X_{\text{实际}} - 3.6497, R^2 = 0.8376 (p < 0.01)$,说明误差具有一致性。除南阳镇外,氮的模型计算流失量略低于实际调查流失量,相对相差为 $-12.49 \pm 30.43\%$ 。而磷的模型计算流失量除南阳镇外,其他各镇远远高于实际调查流失量,相对相差为 $113.53 \pm 169.85\%$,高楼、张楼两镇相对相差高达 400% 。

究其原因:沿岸土壤氮主要来自化学肥料的施用,农田氮的流失远高于畜禽养殖和生活排污的氮流失,是氮的主要流失形式^[22]。面源磷的流失主要来

自畜禽养殖,其次才是农田磷流失^[22]。而 USLE 模型是将坡度、坡长、气候因子(降雨)、植被因子、土壤可蚀性等引入土壤侵蚀预报的一个简洁模型。通过 USLE 模型计算仅考虑颗粒态氮磷流失量,因此对以农田流失为主的氮流失计算较为准确,对畜禽养殖和生活污水排放为主的磷流失计算误差较大。且模型分析中既有对遥感影像的解译,又有对 USLE 各参数的评估,这些都会在一定程度上影响模型的计算精度。

4 结论

USLE 模型计算的氮磷流失量主要集中在湖西区域,以喻屯镇、王鲁镇和唐口镇的流失量居于前列,最高的喻屯镇氮磷流失量分别达 439.9 t/a 和 271 t/a;湖东区域,石桥镇、马坡镇、欢城镇和韩庄镇的氮磷流失量居于前列,最高的石桥镇氮和磷流失分别为 174 t/a 和 120.6 t/a。农田实际调查的氮和磷的流失量与模型计算值趋势较一致,两者呈极显著线性正相关($p < 0.01$),说明误差具有一致性。氮的模型计算流失量略低于实际调查流失量,而磷的模型计算流失量远远高于实际调查流失量。主要是因为南四湖沿岸农田氮的流失是氮的主要流失形式,远高于畜禽养殖和生活排污的氮流失。而磷的流失主要来自畜禽养殖,其次才是农田磷流失。虽然模型计算存在一定的误差,但是通过模型的空间模拟,能明确反映出南四湖沿岸农业面源污染的氮磷流失空间特征、空间分异规律,为沿岸氮磷流失的防控提供了明确的目标和方向。

参考文献:

- [1] 张维理,徐爱国,冀宏杰,等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策:Ⅲ. 中国农业面源污染控制中存在问题分析[J]. 中国农业科学,2004,37(7):1026-1033.
- [2] 高龙华. 遥感和 GIS 支持下非点源污染模型研究[D]. 南京:河海大学,2005.
- [3] 刘枫,王华东,刘培桐. 流域非点源污染的量化识别方法及其在桥水库流域的应用[J]. 地理学报,1988,43(4):329-340.
- [4] Walsh S J. Geographic information system for natural resource management[J]. Soil and Water Conservation, 1985,40(2):202-205.
- [5] Christopher C, Chnadra M. Application of geographic information systems in watershed management planning in St. Lucia[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1998,20(3):229-250.
- [6] Rensehler C S, Mnnaaerts C, Diekkruiger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain[J]. Catena, 1999,34(3/4):209-225.
- [7] Shi Z H, Cai C F, Ding S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China[J]. Catena, 2004,55:33-48.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Agricultural Handbook [M]. Washington: Science and Education Administration, United States Department of Agriculture, 1978.
- [9] 黄金良,洪华生,张路平,等. 基于 GIS 和 USLE 的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.
- [10] 史志华,蔡崇法,丁树文,等. 基于 GIS 和 RUSLE 的小流域农地水土保持规划研究[J]. 农业工程学报,2002,18(4):172-175.
- [11] 胥彦珍,李怀恩,倪永明,等. 基于 USLE 的黑河流域非点源污染定量研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(3):138-142.
- [12] 宋根鑫,翟石艳. 基于 GIS、RS 的黄土高原 USLE 模型改进方法[J]. 地理空间信息,2009,7(2):48-50.
- [13] 贾德旺,孙英波,张敏,等. 南水北调东线工程南四湖调蓄区地表水环境质量评价及环境地质问题浅析[J]. 南水北调与水利科技,2008,6(2):20-22.
- [14] 卜兆宏,唐万龙. 降雨侵蚀力(R)最佳算法及其应用的研究成果简介[J]. 中国水土保持,1999(6):16-17.
- [15] 卜兆宏,李全英. 土壤可蚀性(K)值图编制方法的初步研究[J]. 农村生态环境学报,1995,11(1):5-9.
- [16] 刘文耀. 云南昭通盆地降雨侵蚀性与土壤可蚀性的初步研究[J]. 云南地理环境研究,1999,11(2):76-82.
- [17] 邓良基,侯大斌,王昌全,等. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J]. 中国水土保持,2008(7):23-25.
- [18] 陈克平,宁大同. 基于非点源污染模型的地形因子分析[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,1997,33(2):281-284.
- [19] 卜兆宏,刘绍清. 土壤流失量及其参数实测的新方法[J]. 土壤学报,1995,32(2):210-220.
- [20] 王晓辉. 巢湖非点源 N、P 污染排放负荷估算及控制研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [21] Novotny V, Chesters G. 面源污染管理与控制手册[M]. 林芳容,译. 广州:科学普及出版社广州分社,1987.
- [22] 宋涛. 南四湖沿岸农业面源污染研究[D]. 济南:山东大学,2009.