

太湖流域非点源污染负荷估算系统的设计与应用

夏敏, 班伟, 赵冰雪

(南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 非点源污染是太湖流域水环境污染的主要来源, 定量研究太湖流域非点源污染负荷, 可为非点源污染的预报与防治提供决策依据。传统非点源污染负荷研究中 GIS 与非点源污染模型松散式结合的方式存在数据管理与转换工作量大的问题, 尝试采用嵌合模式设计和开发太湖流域非点源污染负荷估算系统。介绍了系统的结构与功能, 分析了系统主要功能模块——SCS 模型、USLE 模型和非点源污染负荷模型的实现流程。基于该系统进行了无锡市 2005 年非点源污染 TN 负荷的估算, 结果显示其负荷总量为 8 014.43 t。农业生产和生活污水的排放是该区非点源污染的主要来源。系统的应用表明其简化了模型计算的复杂过程, 结果能够较客观地反映研究区域的非点源污染状况及其与土地利用的关系, 具有较强的实用性。

关键词: 非点源污染; 污染负荷; SCS; USLE; 太湖流域

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2013)03-0197-05

中图分类号: X522

Design and Application of Non-point Source Pollution Load Estimating System in Taihu Lake Basin

XIA Min, BAN Wei, ZHAO Bing-xue

(College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: Non-point source pollution is the main origin of water pollution in the Taihu Lake basin. Quantitative study of non-point source pollution load can provide decision supports to its forecast, prevention and treatment. In traditional study, GIS and non-point source pollution models were integrated in the loose coupling way that has the defects of a large amount of data management and transform works. An estimating system for non-point source pollution load in the Taihu Lake basin was designed and developed using mosaic integration. Structure of the system and its functions were introduced and the realizing flows of three main function modules were discussed, including modules of SCS, USLE and non-point source pollution load models. Using the system, non-point source pollution load of total N in Wuxi City in 2005 was estimated to be 8 014.43 t, which originated mainly from agricultural production and waste water drainage of daily life. Application of the system showed its practicality because the calculating procedures of non-point source pollution models were simplified and the result reflected non-point source pollution situation and its relationship with land use in the study area objectively.

Keywords: non-point source pollution; pollution load; SCS; USLE; Taihu Lake basin

非点源污染是指溶解态或固体颗粒态污染物从非特定的地域, 在降水和径流冲刷作用下, 通过径流过程而汇入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等)引起的水体污染^[1]。由于具有来源广泛、污染负荷时空变化幅度大, 监测控制和处理困难而复杂等特点, 非点源污染已成为水体污染的主要来源^[2]。太湖流域

地处我国华东地区东部, 位于长江下游南岸, 流域面积 36 500 km²。随着流域内经济和人口的快速增长以及水资源保护工作的相对滞后, 流域内水质恶化和富营养化的问题日益严重, 而造成这一问题的主要原因是非点源污染。定量研究太湖流域非点源污染负荷, 可以为非点源污染的预测预报, 以及流域规划和

收稿日期: 2012-05-05

修回日期: 2012-06-15

资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目“太湖流域土地利用管制技术研究”(200811087); 中央高校基本科研业务费自主创新重点研究项目“苏南经济发达地区农村居民点演变与布局优化研究”(KYZ201131); 南京农业大学人文社会科学研究基金项目“农地规模化整理空间集聚效应研究: 以江苏省万顷良田建设工程为例”(SK2010008)

作者简介: 夏敏(1971—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 副教授, 主要从事土地评价和土地信息系统等方面的研究。E-mail: xm@njau.edu.cn。

污染防治政策的制定提供重要依据。

20 世纪 90 年代以来,国内外学者开始研究采用 GIS 与非点源污染模型相结合的方式非点源污染负荷估算。从管理的角度看,希望能使用一些简单模型来估算流域的非点源输出。在众多的非点源污染模型中,通用土壤流失方程(universal soil loss equation,简称 USLE)相对比较简单且运算所需的数据易于获得,因而在国家、区域和流域层面得到广泛的应用^[3-4]。USLE 模型与 GIS 的结合一般有 3 种方式:松散式、紧结合和嵌合模式,其中松散式模式在目前研究中最为常见^[3-7],这种模式下模型与 GIS 相对独立,GIS 的功能只是作为模型参数的生成、输入和模拟结果的显示工具。由于 GIS 操作与模型操作功能分开,松散式模式存在着数据管理和转换工作量大的问题。

本文尝试采用嵌合模式,基于 GIS 二次开发组件 ArcEngine 9.3,以地理信息系统数据库 GeoData-Base 为支撑,在 Visual Studio 2005 平台上,运用可视化开发语言 C#.ent 设计和开发太湖流域非点源污染负荷估算系统,并以非点源污染较为严重的无锡市为例,计算其 2005 年非点源污染负荷,验证系统的可行性和实用性。

1 系统结构与功能设计

地表径流的非点源污染形成过程由降雨径流、土壤侵蚀、污染物迁移 3 个过程组成。降雨径流过程是非点源污染物输出的主要动力因素,侵蚀土壤是污染物的转移载体,而污染物的输出量受地表和土壤中污染物的含量、污染物转移过程中所发生的各种情况影响。在太湖流域非点源污染负荷估算中,采用径流曲线方程(soil conservation service number method,简称 SCS)计算年降雨径流量,USLE 模型计算年土壤流失量,在此基础上分别计算溶解态污染物和颗粒态污染物输出,从而得到非点源污染负荷。太湖流域非点源污染负荷估算系统的结构和功能设计即围绕这 3 个过程进行。

1.1 系统结构设计

系统结构采用组件化设计的思想,其逻辑结构如图 1 所示。其中数据层存储非点源污染负荷研究的所有数据,包括基础地理数据、中间过程与最终结果数据。逻辑层采用 C# 语言编写程序,实现系统各功能模块,包括 GIS 基本功能模块和模型计算模块等。操作层主要是在 Visual Studio 2005 环境中嵌入 ArcEngine 组件,调用其中的各个功能控件,构成用户界面并实现系统的开发。

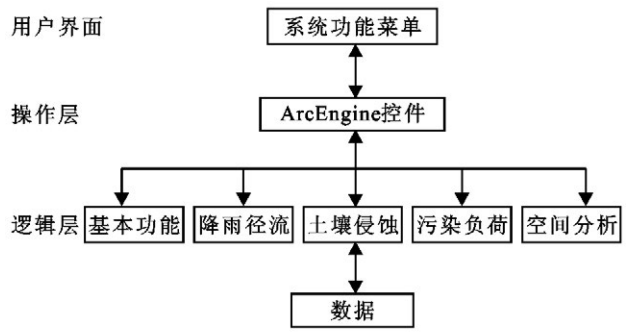


图 1 系统逻辑结构

1.2 系统功能设计

系统包括 5 个功能模块,具体结构如图 2 所示。其中,GIS 基本功能模块完成系统的常规操作,空间分析模块包含进行其他 3 个模块中因子值确定以及统计所需的 GIS 功能,其他 3 个模块分别完成降雨径流量、土壤侵蚀量和污染物输出量的计算。

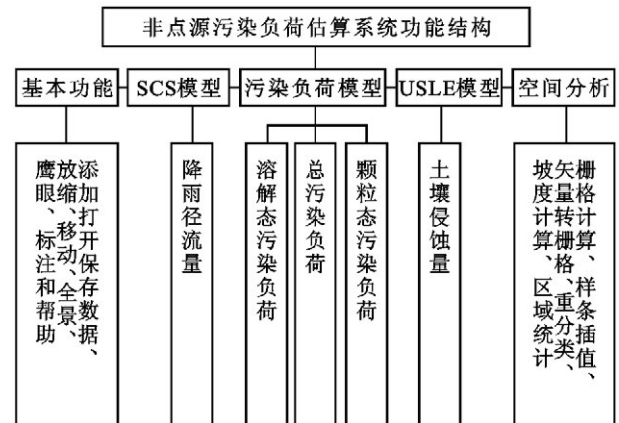


图 2 系统功能结构

2 系统主要功能实现

在以上研究的基础上,本文实现了太湖流域非点源污染负荷估算系统。系统实现的重点是 SCS 模型、USLE 模型、非点源污染负荷估算模型这 3 个功能模块的实现。

2.1 SCS 模型模块

SCS 模型是在流域水量平衡方程式的基础上建立起来的,本文采用黄金良等的计算方法^[6],其计算公式为:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geq 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases} \quad (1)$$

式中:Q——年降雨径流量(mm); S——潜在入渗量(mm); P——年降雨量(mm)。

通过对不同土地利用类型所对应的径流曲线 CN 值进行赋值可以得到 CN 因子图,对各气象站点年降雨量进行样条插值得到年降雨量分布图,再根据

模型提示的计算公式进行栅格计算,即得到研究区的年降雨径流量。模块的具体实现流程如图 3 所示。

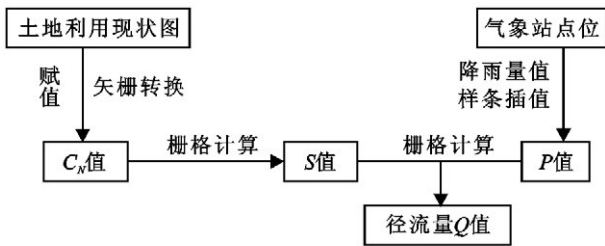


图 3 SCS 模块实现流程

2.2 USLE 模型模块

USLE 模型通过降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、植被覆盖因子和水土保持措施因子 5 大因子计算平均土壤流失量^[3-4],其具体计算公式为:

$$A=R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中: A ——单位面积年平均土壤流失量 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; R ——降雨侵蚀力因子 $[\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{a})]$; K ——土壤可蚀性因子 $(\text{t} \cdot \text{hm}^2 \cdot \text{MJ} \cdot \text{mm})$; L ——坡长因子; S ——坡度因子; C ——植被覆盖因子; P ——水土保持措施因子。

首先获取研究区的数字高程模型、年降雨径流量图、土地利用类型图、土壤类型图、植被覆盖度图等,根据 5 大因子的取值要求进行计算分析,再将各因子图叠加相乘,即获得土壤侵蚀量图。模型计算过程相对复杂,因此各步骤设计提示,通过调用空间分析中的功能分别得到各因子值和土壤侵蚀量值。模型的具体实现流程如图 4 所示。

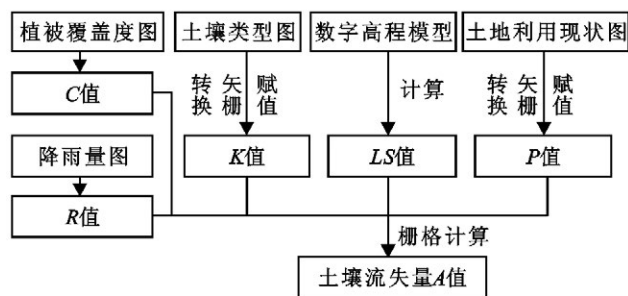


图 4 USLE 模块实现流程

2.3 非点源污染负荷模型

非点源污染物主要可分为溶解态污染和颗粒态污染两大类,溶解态污染物具有水溶性,随着降雨产生汇流过程造成污染,而颗粒态污染则与流域表面上产生的土壤流失过程及土壤中污染物含量有关,本文采用黄金良等^[6],万亚辉等^[7]的研究模型分别进行计算:

$$L_D = a \cdot C_D \cdot Q \cdot T_D \quad (3)$$

式中: L_D ——溶解态污染物负荷 (kg/hm^2) ; a ——单

位换算常数; C_D ——径流溶解态污染物浓度 (mg/L) ; Q ——径流量 (mm) ; T_D ——迁移系数,表示溶解态污染物从地面向流域迁移的百分比,本研究中不考虑迁移故为 1。

$$L_S = b \cdot C_S \cdot X \cdot T_S \cdot S_d \quad (4)$$

式中: L_S ——颗粒态污染物负荷 (kg/hm^2) ; b ——单位换算常数; C_S ——土壤污染物浓度 $(\%)$; X ——土壤流失量 (t/km^2) ; T_S ——污染物富集比; S_d ——流域泥沙输移比。本研究中 T_S 和 S_d 值设为 1。

非点源污染负荷模型实现流程如下:分别按土地利用类型和土壤类型赋 C_D 和 C_S 值生成栅格图,结合 SCS 模型得到的降雨径流量计算得到溶解态污染负荷量,结合 USLE 模型得到的土壤流失量计算得到颗粒态污染负荷量,加总得到污染物总负荷量。

3 系统应用

3.1 数据来源

研究选用无锡市 2005 年 ETM⁺ 遥感数据,通过解译划分了耕地及其他农用地、园地、城镇建设用地、农村建设用地、水域和林地共 6 种土地利用类型,得到土地利用类型矢量图;土壤资料来源于中国科学院南京土壤所;污染监测资料来源于无锡市环保局;根据无锡市国土局提供的 1:10 万地形图获取了 DEM 数据;降雨量数据则采用无锡市水利局提供的 16 个气象站点年均降雨量。

3.2 模型参数率定

以上模型中涉及多个参数,需根据研究区具体情况加以确定。

(1) 径流曲线参数 C_N 值。决定 C_N 的因素诸多,如土壤类型、植被覆盖类型、管理状况和水文条件。本文根据房孝铎等^[8]的研究,按照土壤水分的最小渗透速率将土壤分为 4 类,即 A(透水),B(较透水),C(较不透水),D(接近不透水)。结合研究区土地利用类型、土壤质地等综合条件确定 C_N 值(表 1)。规定 C_N 值中农村建设用地取 C 值、城镇建设用地取 D 值,其余的用地类型 C_N 值均取 4 值的平均值,以符合区域内各种土地特征。

表 1 无锡市不同土地利用类型 C_N 值, P 值和 C_D 值

土地利用类型	C_N 值				P 值	C_D 值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
	A	B	C	D		
I	69	84	88	92	0.3	2.358
II	38	60	69	78	0.5	0.720
III	76	85	90	92	1	2.902
IV	61	75	82	87	1	4.044
V	100	100	100	100	0	0.182
VI	38	60	69	78	0.8	0.600

注: I. 耕地及其他农用地; II. 园地; III. 城镇建设用地; IV. 农村建设用地; V. 水域; VI. 林地。

(2) 降雨侵蚀力因子 R 值。降雨对土壤的侵蚀力很难直接测定,多数用雨强、雨量等来估算。在缺乏降雨过程资料的情况下,本研究采用由福建农业大学周伏建等^[9]提出的 R 值计算公式:

$$R = \sum_{i=1}^{12} (-1.155 27 + 0.179 2 P_i) \quad (5)$$

式中: P_i ——月降雨量(mm)。

(3) 土壤可蚀性因子 K 值。 K 值的大小反映土壤被冲蚀的难易程度,是影响土壤流失量的内在因素。

本文根据南京土壤所提供的研究区土壤类型和有机质含量,结合王万忠等^[10]的研究,确定研究区不同土壤类型的可蚀性因子值(如表 2 所示)。

表 2 无锡市不同土壤类型 K 值和 C_s 值

土壤类型	C_s 值/ $\%$	土壤质地	K 值			
			有机质含量/ $\%$			
			<0.5	<2	<4	<8
水体	0	水体	0	0	0	—
渗育型水稻土	0.117 9	黏性壤土	0.63	0.56	0.47	—
潜育型水稻土	0.158 1	黏壤土	0.63	0.56	0.47	—
脱潜型水稻土	0.172 9	黏壤土	0.63	0.56	0.47	—
漂洗型水稻土	0.134 0	黏壤土	0.63	0.56	0.47	—
潜育型水稻土	0.120 6	黏壤土	0.63	0.56	0.47	0.138
腐殖质沼泽土	0.069 0	黏壤土	0.63	0.56	0.47	0.138
灰潮土	0.095 8	黏土	0.65	0.47	0.29	—
棕色石灰岩土	0.191 6	黏土	0.65	0.47	0.29	0.244
紫色土	0.142 0	砂质黏壤土	0.6	0.56	0.47	0.343
黄红壤	0.106 5	黏土	0.65	0.47	0.29	—
粗骨黄棕壤	0.150 1	砂质黏土	0.31	0.29	0.27	0.219

(4) 坡度坡长因子 LS 值。坡度决定径流冲刷能力,而坡长则直接影响地面径流的速度,从而影响土壤的侵蚀力。其计算方法较多,其中施为光^[11]提出的 LS 关系式应用较为广泛:

$$LS = \sqrt{0.045L(65.41\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065)} \quad (6)$$

式中: θ ——坡度; L ——坡长。

(5) 植被覆盖因子 C 值。 C 值的大小除与地表覆盖度相关外,还取决于具体的植被冠层类型、植被高度等,因此 C 值一般通过植被覆盖度和土地利用类型相结合得出^[12],本文根据遥感影像光谱信息计算得到植被覆盖度,进而计算 C 值。

(6) 水土保持措施因子 P 值。 P 值是指采用水土保持措施后的土壤流失量与自然植被或顺坡种植时的土壤流失量的比值,本文结合研究区土地利用类型及相关的文献确定 P 值^[6](表 1)。其中水田是水土保持措施最好的一种土地利用, P 值取 0.01;而耕地及其他农用地仍然有部分未采取水土保持措施,故取值为 0.3。

(7) 溶解态污染物浓度 C_D 值和土壤污染物浓度 C_S 值。根据无锡市环保局监测数据确定了不同土地利用类型 C_D 值; C_S 值则由南京土壤所提供,如表 1—2 所示。

3.3 结果分析

在系统各模块中,按照提示输入模型参数,完成

了无锡市 2005 年降雨径流量、土壤侵蚀量和污染物输出量的计算,采用系统区域统计分析功能统计,结果如表 3 所示。

从非点源污染总量看,无锡市 2005 年非点源 TN 负荷为 8 014.43 t,其中溶解态 N 负荷占 89.48%。据马倩等^[13]和张红举等^[14]的研究,2005 年江苏省环湖总氮污染物入湖总量为 3.70×10^4 t,而调查表明,进入太湖的污染负荷中,非点源负荷贡献率为 50%~85%,其中无锡地区的贡献为 40%~55%,因此无锡市非点源污染负荷约为 7 400~17 300 t。本文计算结果在此范围之内,系统采用的非点源污染负荷估算模型可行。

据研究,太湖流域来源于农田、农村畜禽养殖业、农村生活面源和城乡结合部的总氮贡献率分别为 30%,23%,10%和 19%^[15]。本文研究的 6 个地类中,耕地及其他农用地、城镇建设用地和农村建设用地对区域非点源 TN 污染贡献较大,分别占总量的 37.4%,37.1%和 17.2%,而从单位面积负荷看,这 3 类用地也排在前 3 位,说明农业生产和生活垃圾的排放是无锡市非点源污染的主要来源。太湖流域纵横交错的河网、渠系连接着陆域农田与主河道、湖泊水体,很容易形成非点源源污染,且水田交错的特殊条件和水旱轮作、粮菜轮作的生产方式也使得这一地区水域、陆域的边界在一个轮作周期中不断变换,加剧

了氮、磷养分用量高的农田对水体的直接影响^[15],因此耕地及其他农用地成为非点源污染主要来源之一。同时,太湖流域是我国经济最发达的流域之一,研究表明,随着城镇用地比例增加,自然生态系统对污染物的降解能力降低,造成其污染负荷增大^[16],这可能是城镇建设用地的污染贡献率较高的原因。此外,经

济发展的同时,居民的生产和生活模式也发生了迅速的变化,基础设施的缺乏造成城乡结合部和农村居民点环境污染水平居高不下,成为面源污染的又一来源。因此,无锡市针对水污染防治的土地利用规划与管制重点应为耕地及其他农用地、城镇建设用地区和农村建设用地。

表 3 无锡市非点源 TN 污染负荷

土地利用类型	I	II	III	IV	V	VI	总量
面积/hm ²	97 983.80	16 961.20	74 224.50	25 749.90	38 217.70	37 273.55	290 410.65
TN 负荷/t	2 999.77	213.07	2 977.22	1 375.64	90.27	358.46	8 014.43
溶解态 N 负荷/t	2 867.35	110.89	2 595.06	1 325.11	28.67	244.42	7 171.49
颗粒态 N 负荷/t	132.43	102.17	382.16	50.53	61.60	114.04	842.93
单位面积负荷/(kg·hm ⁻²)	30.62	12.56	40.11	53.42	2.36	9.62	27.60

注: I. 耕地及其他农用地; II. 园地; III. 城镇建设用地; IV. 农村建设用地; V. 水域; VI. 林地。

此外,从非点源 TN 负荷空间分布看,宜兴市高值点相对较多,分析认为与地形变化相对较大有一定关系,这也说明丘陵地区更应加强水土保持措施,以减少土壤流失,防止非点源污染的发生。

4 结论

(1) 通过建立独立的、具有针对性的非点源污染负荷估算系统,简化了非点源污染模型计算的复杂过程,大大节省了计算时间。同时,系统可以引导操作人员完成模型参数的设置等工作,操作人员对模型机理只需略有了解就可以完成该过程,因而增强了非点源污染模型的实用性,推动了非点源污染模型在实际中的应用。

(2) 受基础数据的限制,本文只研究了 6 种土地利用类型,分析的结果稍显粗糙,但仍较客观地反映了研究区域的非点源污染状况及造成污染的主要土地利用类型,能够很好地为研究区针对水污染防治的土地利用规划与管制提供参考。

(3) 在未来研究区基础数据充足的情况下,系统可考虑引入 RUSLE, SWAT 等模型,为非点源污染负荷估算的研究提供更多的选择。

[参 考 文 献]

- [1] 张淑荣,陈利顶,傅伯杰. 农业区非点源污染敏感性评价的一种方法[J]. 水土保持学报,2001,15(2):56-59.
- [2] 全为民,严力蛟. 农业面源污染对水体富营养化的影响及其防治措施[J]. 生态学报,2002,22(3):291-299.
- [3] 庞靖鹏,徐宗学,刘昌明,等. 基于 GIS 和 USLE 的非点源污染关键区识别[J]. 水土保持学报,2007,21(2):170-174.
- [4] Ozcan A U, Erpul G, Basaran M, et al. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Cankiri, Turkey[J]. Environ. Geol., 2008, 53: 1731-1741.
- [5] 胡连伍,王学军,罗定贵,等. 基于 GIS 的流域非点源污染潜在风险区识别[J]. 水土保持通报,2007,27(3):107-110.
- [6] 黄金良,洪华生,张珞平,等. 基于 GIS 的九龙江流域农业面源氮磷负荷估算研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(5):866-871.
- [7] 万亚辉,周文斌,章茹. 基于 USLE 模型的南昌大学非点源污染负荷预测[J]. 中国水土保持,2009(7):28-30.
- [8] 房孝铎,王晓燕,欧洋. 径流曲线数法(SCS 法)在降雨径流量计算中的应用:以密云石匣径流试验小区为例[J]. 首都师范大学学报;自然科学版,2007,28(2):89-92.
- [9] 周伏建,陈明华,林福兴,等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J]. 福建水土保持,1989(2):58-60.
- [10] 王万忠,焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [11] 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.
- [12] 张岩,袁建平,刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报,2002(8):1033-1036.
- [13] 马倩,刘俊杰,高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998—2007 年)[J]. 湖泊科学,2010,22(1):29-34.
- [14] 张红举,陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护,2010,26(3):87-90.
- [15] 张维理,武淑霞,冀宏杰. 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.
- [16] 史培军,潘耀忠,陈晋,等. 深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析[J]. 自然资源学报,1999,14(4):293-299.