

文章编号:1000-582X(2009)10-1181-06

三峡库区小江流域溶解态氮素污染模拟

龙天渝¹ 吴磊¹ 刘腊美¹ 李崇明²

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;

2. 重庆市环境科学研究院, 重庆 400020)

摘要:小江是三峡库区中部北岸流域面积最大的一级支流, 农田以紫色土坡地为主, 随降雨形成的地表径流和壤中流流失的非点源溶解态氮是水体中氮素污染的主要来源。根据小江流域地形、土壤等特性, 构建流域溶解态氮素污染模型, 并将具有物理机制的 SLURP 分布式水文模型引入污染模型中地表径流和壤中流的模拟, 借助 GIS 技术, 对小江流域 2000~2007 年溶解态氮的输出量与负荷的时空分布进行了模拟与定量计算。结果表明: 土地产生的负荷占总负荷的 68.3%~76.8%, 农村居民点产生的负荷占 23.2%~31.7%; 土地产生的负荷中 85% 以上来源于农田。

关键词:小江流域; 非点源污染; 分布式水文模型; 溶解态氮

中图分类号: X506

文献标志码: A

Simulation of dissolved nitrogen pollution in Xiaojiang river basin of Three Gorges reservoir

LONG Tian-yu¹, WU Lei¹, LIU La-mei¹, LI Chong-ming²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 400020, P. R. China)

Abstract: Xiao-Jiang River is the largest tributary on the north of the middle part in Three Gorges reservoir area, because of predominant hilly cropland with purple soil, the dissolved nitrogen from surface and subsurface runoff caused by raining accounts for most part of the nitrogen pollution in water. This paper develops the annual pollution models based on the characteristics of topography and soil, etc., of the basin in order to study dissolved nitrogen pollution, and introduces a Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes (SLURP) hydrological model into the surface and subsurface runoff simulation which is an important part of non-point source pollution modeling. Integrated with the geography information system technology, the annual temporal-spatial distribution of the dissolved nitrogen in the basin is simulated and the load at the watershed outlet is estimated from 2000 to 2007. The results show that the load from cropland is up to 68.3%~76.8% of the total load, in which over 85% from croplands and then rural settlement is 23.2%~31.7%.

Key words: Xiao-Jiang River basin; non-point source pollution; distributed hydrological model; dissolved nitrogen

收稿日期: 2009-05-22

基金项目: 中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-07); 重庆市科技攻关计划项目(CSTS2008AB7083)

作者简介: 龙天渝(1960-), 女, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为水环境模拟与水污染控制等,

(E-mail)longty128@yahoo.com.cn。

氮是农业生产中最重要的养分限制因子,也是日益增长的环境污染因子。有关专家认为氮污染是仅次于气候变暖和生物多样性衰减的全球性环境威胁^[1]。小江(彭溪河)位于三峡库区,距三峡大坝 300 余公里,是库区中部北岸流域面积最大的一级支流,流域属典型的叶形丘陵山地,在很大程度上集中了三峡水库库中与库尾川东丘陵地区的次级河流域的主要地貌特征,具有很强的代表性。农耕地以旱地为主,旱地中坡耕地、薄土面积多,70%为紫色土,紫色土坡地壤中流极为发育,壤中流为坡地溶解态氮的主要驱动力,随地表径流和壤中流流失的非点源溶解态氮污染十分严重,成为水体中氮污染的主要因素^[2],因此,开展对小江流域非点源溶解态氮素污染的研究,对于小江流域以及三峡库区社会、经济 and 环境的可持续发展以及水环境安全具有重要的意义。

基于 GIS 技术的非点源污染模拟研究是目前流域尺度非点源污染定量研究的重要手段。溶解于径流中的污染物伴随降雨-径流过程输出与流失,因此,降雨-径流水文过程的准确模拟是模拟与分析陆面形成的溶解态污染时空分布以及污染负荷的基础。目前,流域非点源污染研究中地表径流部分的模拟基本上采用美国农业部土壤保持局的曲线数字法(SCS Curve Number Method)^[3],包括目前国内外广泛使用的非点源污染模型,如 AGNPS、SWAT 等^[4-5]。SCS 法是一种统计模型,模型中参数的取值基于北美的地理和气候环境,由于北美和我国的情况存在较大差异,导致在我国流域径流模拟方面存在很大的误差。此外,SCS 法不包含对壤中流的单独模拟,而小江流域农田坡地壤中流为溶解态氮污染的重要因素^[2,6-7],考虑到上述原因,引入一个具有物理机制的分布式水文模型——SLURP(Semi-Distributed Land-use Runoff Process hydrological model)水文模型^[8]替代 SCS 法,用以改善降雨径流的模拟精度,提高非点源溶解态污染量以及负荷估算的准确性。选用 SLURP 水文模型用于非点源溶解态污染模拟研究主要基于两个方面:其一,SLURP 水文模型具有物理机制,它模拟了地表径流和壤中流等形成的物理过程,且适合于大、中型的山地流域,已在加拿大、北美和我国的长江上游等多个山地流域的水文模拟中获得了良好的效果^[8-9],该模型参数有明确的物理意义,可由实测直接得出,或由

流域出口观测的径流量值对其进行率定与优化。该模型不仅可以对过去进行重建,还可对未来气候变化或土地利用类型变化引起的水文变化进行预测;其二,SLURP 水文模型以土地利用类型为基本研究单元,易与同样基于土地利用类型来分析及计算流域溶解态非点源污染的方程相结合,形成完整的溶解态非点源污染模型,模拟因降雨产生的地表径流和壤中流输出的流域溶解态污染量及其负荷。

根据小江流域地形、土壤等特性,考虑壤中流产生的非点源污染,构建流域不同土地利用类型和农村居民点的溶解态氮素污染模型,将 SLURP 水文模型引入流域不同土地利用类型和农村居民点中畜禽养殖与农村生活污水非点源溶解态氮污染的分析与研究,借助 GIS 空间技术,通过建立流域环境空间数据库,对三峡库区小江流域 2000~2007 年各年中不同土地利用类型和农村居民点的非点源溶解态氮的输出量以及产生的负荷进行了模拟与估算,以期对三峡库区小江流域非点源污染的控制和有效治理提供科学的依据。

1 研究区域概况及其环境数据库的建立

1.1 研究区域概况

小江地处四川盆地东部边缘,发源于重庆市开县白泉乡钟鼓村,流域在东经 $107^{\circ}42' \sim 108^{\circ}54'$,北纬 $30^{\circ}41' \sim 31^{\circ}42'$ 之间,流域面积 $5\,276\text{ km}^2$,流域为叶形丘陵山地,主要支流有南河、浦里河、桃溪河,河道平均坡降 1.25% ,干流全长 182.4 km 。流域处于亚热带季风气候区,气候温和湿润,多年平均气温 $18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量 $1\,100 \sim 1\,500\text{ mm}$,多年平均径流量 35.8 亿 m^3 。该流域地跨四川、重庆两省市七县区、77 个乡镇、1 293 个行政村及居民委员会,流域现有人口约 196 万人,其中农业人口 172 万人,人口密度为 369 人/km^2 。

1.2 流域环境数据库的建立

在 IDRISI32、ArcGIS9.0 等地理信息系统软件和数据库管理系统的支持下建立研究区域的环境数据库,并且在 GIS 技术平台下将属性数据与空间数据进行关联,使每一个格网与其多种属性相匹配,并由此计算出新的空间数据与属性数据(表 1 和图 1)。

表 1 研究区域环境基础数据库及其类型

数据层名称	数据类型	数据层说明
DEM	栅格(raster)	90 m 分辨率长江上游数字高程模型
土地利用图	栅格(raster)	城镇、旱田及混合地、水田、荒草地、林地土地利用类型
行政区划图	矢量(vector)	小江流域所属重庆、四川县级行政区划
气象数据	DBF	气象站点降雨、气温、相对湿度、平均风速、日照时数等气象数据
径流数据	Excel	小江流域相关水文站实测日值径流量数据
社会经济数据	DBF	重庆、四川及西部统计年鉴区县行政区划的人口、畜禽养殖等数据
土壤数据	矢量(vector)	1:400 万流域土壤类型及其分布

2 流域溶解态氮污染模型

2.1 SLURP 水文模型

SLURP 模型^[8]是以日为时间步长,模拟从降水到径流的整个水文循环过程,具有物理机制的分布式水文模型。它以 GIS 技术为支撑,以常规水文、气象和空间遥感数据为基础,以区域内土地覆盖/土地利用和气候变化为主线,通过 TOPAZ/SLURPAZ/TOPIIMAGE 程序对区域内数字高程模型和重分类后的土地利用数据进行地形参数化及流域图像化处理,并把气象站点的数据进行由离散点到面分布的处理。在模拟中,对每个子流域细分为多个不同的土地利用类型单元,通过分析降水、植被截留、蒸散发、融雪、下渗等水文物理过程,对每个单元进行逐日垂向水量平衡计算(见图 2),计算不同土地利用上的地表径流量、壤中流流量和地下径流量,然后进行各单元间以及各子流域间的汇流计算,最终获得出口断面的径流量输出。该模型已在多个大流域中获得好的验证。根据研究流域的土地利用状况将土地利用类型分为城镇用地、旱田及混合地、水田、荒草地、林地 5 大类,其中土地利用图来自美国地质勘测局(USGS),并采用《中国土地利用图》进行精度校核优化;根据流域河系与地形情况把流域划分为 7 个子流域(见图 1)。

SLURP 模型需要输入日观测的径流量值对模型进行参数率定与优化。对模型的模拟效果,可以通过 Nash-Sutcliffe 系数来评价,用 2003~2005 年观测的流域出口的日径流量值对模型进行参数率定与优化,用 2006 年观测的日径流量值对模拟效果进行检验,得 Nash-Sutcliffe 系数为 0.88,鉴于月径流量的模拟精度比日径流量的模拟精度对溶解态非点源污染的模拟的影响更大,因此对 2006 年各月的月径流量的模拟效果也进行了检验,得 Nash-Sutcliffe

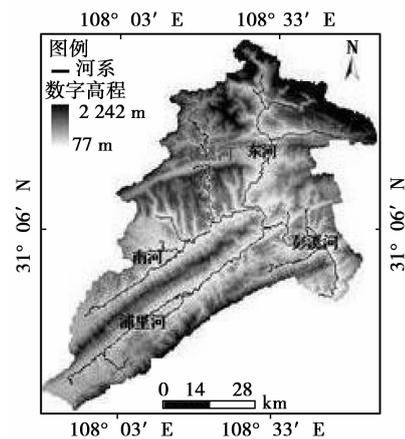


图 1 小江流域地形、河网

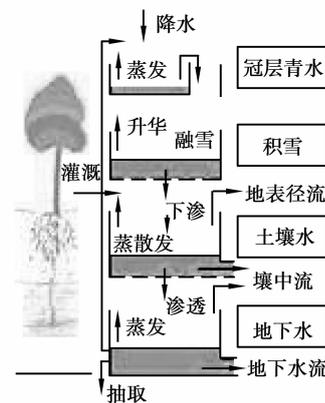


图 2 SLURP 模型水量平衡

系数为 0.83,表明径流量的模拟效果良好,为准确模拟流域溶解态非点源污染奠定了基础^[9]。

2.2 不同土地利用类型溶解态氮污染模型

2.2.1 模型的建立

地表和土壤层中的氮在降雨时溶出,随地表径流和壤中流流入河流形成污染负荷,流域土地输出的溶解态氮因气象条件、土地利用类型、地表质地以

及地表和土壤层氮含量的不同而随时空变化。在有关溶解态非点源污染计算模型的基础上,考虑壤中流产生的污染,采用下式计算流域各年土地输出的溶解态氮

$$W_i = \sum_{j=1}^n (Q_{d,j,i} \cdot Cr_{d,j} + Q_{r,j,i} \cdot Cr_{r,j}), \quad (1)$$

式中, W_i 为流域土地第 i 年的溶解态氮输出量, t; $Q_{d,j,i}$ 和 $Q_{r,j,i}$ 分别为第 i 年第 j 类土地利用类型上的地表径流总量和壤中流总量, 亿 m^3 ; $Cr_{d,j}$ 和 $Cr_{r,j}$ 分别为第 j 类土地利用类型上地表径流和壤中流中溶解态氮的浓度, mg/L; n 为土地利用类别数量。

土地输出的溶解态氮在降雨径流携带下进入河道出口, 形成污染负荷。在输移过程中, 会出现植被截留、生化反应、向大气散发、向地下水渗透、泥沙吸附沉积等现象, 从而产生输移损失, 引入流域输移损失系数 δ_i , 用以表征降水、产流、汇流等将流域上输出的非点源污染物转换成流域出口非点源污染负荷的强弱程度。因此, 流域土地溶解态氮年负荷模型为

$$L_i = \delta_i \cdot W_i = \delta_i \cdot \sum_{j=1}^n (Q_{d,j,i} \cdot Cr_{d,j} + Q_{r,j,i} \cdot Cr_{r,j}). \quad (2)$$

2.2.2 不同土地利用类型溶解态氮的输出浓度

依据三峡库区某些小流域^[2,10], 以及汉江流域^[11]、巢湖流域^[12]等类似流域的实测结果, 确定出三峡库区小江流域不同土地利用类型地表径流中溶解态氮浓度值。库区旱田及混合地壤中流极为发育, 具有旱季累积、雨季淋失的特点, 壤中流中溶解态氮浓度值远高于地表径流中的浓度值^[10], 而其他土地利用类型的壤中流比旱田及混合地的壤中流以及相应的地表径流小得多, 且溶解态氮浓度与地表径流基本相同, 因此, 旱田及混合地的壤中流溶解态氮浓度值取文献^[2]中有关三峡库区典型小流域的实测结果, 而其他土地利用类型的壤中流的溶解态氮浓度值取与地表径流相同的值(见表 2)。

表 2 小江流域不同土地利用径流溶解态氮浓度
mg/L

不同土地利用	城镇用地	旱田及混合地	水田	荒草地	林地
地表径流	1.2	2.8	3.41	0.45	1.25
壤中流	1.2	14.9	3.41	0.45	1.25

2.2.3 输移损失系数

根据余炜敏^[13]对三峡库区的实测得出的土壤

氮的残流量与入河量的比为 3 : 1 的结果, 取各年的流域平均输移损失系数 $\bar{\delta}_i = 0.25$ 。

距流域出口不同位置的空间点, 其输移损失系数有明显的差异, 为反映这种差异, 选用 Kriging 法, 根据空间点到流域出口的距离与相对高差进行空间插值, 求得流域每个点的输移损失系数 δ_i 。

2.3 农村居民点溶解态氮污染模型

2.3.1 模型的建立

参考高祥照^[14]等人的研究成果, 采用下列模型计算流域各年农村居民点输出的溶解态氮

$$W_{r,i} = 10^{-2} \sum_j^m H_{i,j} \lambda_j \omega_j \gamma, \quad (3)$$

其中: $W_{r,i}$ 为第 i 年流域内农村居民点污染物产生量, t; $H_{i,j}$ 为第 i 年第 j 类污染来源的数量, 指流域内农业人口数量或畜禽猪当量头数(万人或万头); λ_j 为猪当量粪便排泄系数(人口取值为 1); ω_j 为农村生活污水、居民及猪当量粪便中污染物平均含量系数(kg/head 或 kg/t); γ 为产污系数; m 为污染来源类别数量。

设农村居民点第 i 年产生的溶解态氮的入河系数为 $\phi_{r,i}$, 则各年农村居民点产生的溶解态氮负荷 $L_{r,i}$ 为

$$L_{r,i} = 10^{-2} \sum_j^m \phi_{r,i} H_{i,j} \lambda_j \omega_j \gamma, \quad (4)$$

据文献^[11,14], 取农村居民点污染物入河系数 $\phi_{r,i} = 0.3$ 。查阅重庆、四川统计年鉴等, 统计出流域的人口数和畜禽养殖数, 并将畜禽养殖数折合成猪当量数。

2.3.2 排泄系数、污染物平均含量系数与产污系数

参考国家环保总局发布并实施的 GB 18596—2001《畜禽养殖业污染排放标准》中的畜禽养殖排放标准以及文献^[14]等, 确定出排泄系数(见表 3)、污染物平均含量系数与产污系数(见表 4)。

表 3 猪当量粪便排泄系数

项目	粪/(kg · a ⁻¹)	尿/(kg · a ⁻¹)	饲养周期/a
猪	398	656.7	199

表 4 农村生活污水、居民及猪当量粪便中污染物平均含量系数与产污系数

猪粪	猪尿	农村生活 污水污染/ (kg · head ⁻¹)	人粪尿	产污 系数 γ
/(kg · t ⁻¹)	/(kg · t ⁻¹)	/(kg · head ⁻¹)	/(kg · head ⁻¹)	
5.88	3.3	0.584	4.0	0.145

3 结果及分析

3.1 流域溶解态氮的输出量

借助 GIS 技术,应用式(1)和式(3)分别计算

2000~2007 年不同土地利用类型和农村居民点非点源溶解态氮的输出量,也要式(1)时,各年不同土地利用类型对应的地表和壤中流经流量值来自 SLURP 水文模型的模拟结果,计算结果见表 5。

表 5 各年流域不同土地利用类型和农村居民点溶解态氮的输出量 t

年份	城镇用地	旱田及混合地	水田	荒草地	林地	农村居民点	总计
2000	3.81	6 955.75	565.97	378.73	106.65	2 332	10 343
2001	1.80	4 662.71	341.44	196.14	65.43	2 369	7 637
2002	3.25	6 348.32	530.24	334.34	101.17	2 425	9 742
2003	3.51	7 229.02	618.03	381.16	116.87	2 486	10 835
2004	3.16	5 970.54	499.24	329.37	98.50	2 539	9 439
2005	3.96	6 634.98	514.32	358.62	97.35	2 572	10 181
2006	2.47	5 229.19	336.59	220.76	63.50	2 569	8 422
2007	3.86	7 060.36	557.64	368.77	105.47	2 572	10 668

由表 5 可见,三峡库区小江流域溶解态氮输出量年际差异变化明显,差异来源于降雨径流量的年际变化。流域输出溶解态氮主要来自占流域面积约 60%的农田(旱田及混合地和水田),占土地总输出的 86.5%~89.3%,占流域总输出的 61.2%~67.3%;其次是农村居民点,占流域总输出的 22.5%~31.0%。因此,控制流域农田特别是坡耕地水土流失、实施田间施肥管理减污技术、对畜禽粪便进行处理与资源化利用、对村落生活污水集中净化与处理等是减少小江流域溶解态氮污染的关键。

尽管各年流域土地溶解态氮的输出量因降雨-径流条件的不同有明显的差异,但由于流域内 2000~2007 年各年土地利用空间分布情况相对稳定,因此各年溶解态氮输出的空间分布情况大体相似,限于篇幅,这里仅列出具有代表性的 2007 年的分布图(见图 3)。从图中可以看到:由于土地有不同的利用类型,流域溶解态氮输出的空间分布差异也十分明显。

3.2 流域出口溶解态氮负荷

应用式(2)和式(4),计算出流域出口溶解态氮污染负荷(见表 6)。

表 6 2000~2007 年流域出口溶解态非点源污染负荷 t

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
土地	2 323	1 528	2 122	2 421	2 001	2 207	1 697	2 348
农村居民点	700	711	728	746	762	772	771	772
合计	3 023	2 238	2 850	3 167	2 763	2 978	2 468	3 119

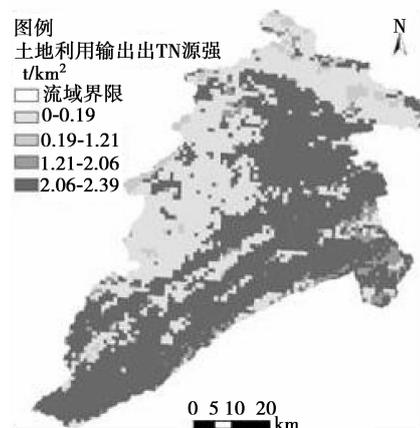


图 3 溶解态氮土地输出量分布

由表 6 可见,小江流域出口溶解态氮负荷中,土地产生的负荷最大,占总量 68.3%~76.8%,这部分负荷绝大部分来自农田;农村居民点产生的负荷占总量的 23.2%~31.7%。

由于小江仅有水质监测数据,而无单独的非点源监测数据,由实验得出的溶解态氮负荷约占由水质监测数据应用水文分割法^[9]得出的非点源总氮负荷的 50%~60%,这与有关研究结果和局部区域的实测结果基本一致^[15]。

4 结束语

根据小江流域地形、土壤等特性,考虑壤中流形成的溶解态氮污染,构建流域不同土地利用类型和农村居民点的溶解态氮素污染模型,该模型与 SLURP 分布式水文模型结合,应用 GIS 技术,对三

峡库区小江流域溶解态氮负荷进行了估算,模拟了小江流域不同土地利用类型的溶解态氮输出的时空分布规律。

三峡库区小江流域出口溶解态氮输出量年际变化差异明显,差异来源于降雨径流量的年际变化。由于土地有不同的利用类型,流域溶解态氮输出的空间分布差异也十分明显。流域输出的溶解态氮主要来自占流域面积约 60% 农田(旱田及混合地和水田),占土地总输出的 86.5%~89.3%,占流域总输出 61.2%~67.3%;其次是农村居民点,占流域总输出 22.5%~31.0%。形成的负荷中土地产生的负荷占总量的 68.3%~76.8%;农村居民点产生的负荷占 23.2%~31.7%。因此,控制流域农田特别是坡耕地水土流失、实施田间施肥管理减污技术、对畜禽粪便进行处理与资源化利用、对村落生活污水集中净化与处理等是减少小江流域溶解态氮污染的关键。

参考文献:

- [1] GILES J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. Nature, 2005, 433: 791.
- [2] 朱波,汪涛,况福虹,等. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 525-533.
ZHU BO, WANG TANG, KUANG FU-HOUGY, et al. Characteristics of nitrate leaching from hilly crop land of purple soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 525-533.
- [3] MISHRA S K, SINGH V P. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] POLYAKOV V, FARES A, KUBO D, et al. Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed [J]. Environmental Modeling & Software, 2007, 22: 1617-1627.
- [5] EASTON Z M, FUKA D R, WALTER M T, et al. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas[J]. Journal of Hydrology, 2008, 348: 279-291.
- [6] HINKLE S R, BOHLKE JK, DUFF JH, et al. Aquifer-scale controls on the distribution of nitrate and ammonium in groundwater near La Pine, Oregon, USA [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333 (2-4): 486-503.
- [7] SILVA R G, HOLUB S M, JORGENSON E E, et al. Indications of nitrate leaching loss under different land use of clayey and sandy soils in southeastern Oklahoma [J]. Agr Ecosyst Envir, 2005, 93: 121-130.
- [8] GEOFF KITE. Manual for the SLURP Hydrological Model Version 12.2 [M]. Canada: NHRI Publ, 2002.
- [9] 吴磊. 三峡库区小江流域非点源污染负荷模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2008, 35-37.
- [10] XIAOHONG CHEN, YONGQIN DAVID CHEN, JUN XIA, et al. Hydrological Sciences for Managing Water Resources in the Asian Developing World [C]. [S. l.]: Publ, 2008, 319, 93-100.
- [11] 史志华, 蔡崇法. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究 [J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 473-477.
SHI ZHI-HUA, CAI CHONG-FA. Research on nitrogen and phosphorus load of agricultural non-point sources in middle and lower reaches of Hanjiang River based on GIS [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(4): 473-477.
- [12] 王晓辉. 巢湖流域非点源 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, 38-41.
- [13] 余炜敏. 三峡库区农业非点源污染及其模型模拟研究 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2006, 48-63.
- [14] 高祥照. 肥料实用手册 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [15] 邓春光. 三峡库区富营养化研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

(编辑 陈移峰)