

基于 GIS 的溶解态氮磷负荷模型研究

马彦涛^{1,5}, 薛金凤^{2*}, 梁涛³, 夏军^{3,4}, 张秀梅³

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072; 2. 武汉大学动力与机械工程学院水质工程系, 武汉 430072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 武汉大学水利水电学院, 武汉 430072; 5. 中南电力设计院综合设计分公司, 武汉 430071)

摘要: 为了研究妯水河流域的氮磷非点源污染来源, 在官厅水库周围进行了野外人工降雨实验, 结果表明, 氮磷输移率与径流量具有很好的相关性, 溶解态氮、磷的平均相关系数分别是 0.997 8 和 0.988 9, 因此提出了新的溶解态氮磷负荷模型。从妯水河流域的土壤图、土地利用图中提取地理信息, 以数字高程模型为依据, 应用新模型研究了妯水河流域溶解态氮污染负荷的空间分布。结果表明, 溶解态氮主要来自水浇平地, 其次是低山和丘陵。

关键词: 非点源污染; 溶解态氮; 溶解态磷; 负荷模型; 地理信息系统; 官厅水库; 妯水河

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)09-1765-05

Research on Dissolved Nitrogen and Phosphorus Loading Model Based on GIS

MA Yan-tao^{1,5}, XUE Jin-feng², LIANG Tao³, XIA Jun^{3,4}, ZHANG Xiur-me³

(1. Department of Environmental Engineering, College of Resource & Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Department of Water Quality Engineering, College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 5. Comprehensive Design Branch Company, Central South Electric Power Design Institute, Wuhan 430071, China)

Abstract: In order to research the origin of nonpoint source pollution dissolved nitrogen (DN) and dissolved phosphorus (DP), some artificial rainfall experiments was made at Guanting Reservoir. The experimental data show that the correlation between transporting rate of DN (DP) and the runoff is very good, with the average correlation coefficient 0.997 8 and 0.988 9 for DN and DP respectively. Therefore, a new load model of DN (DP) is put forward. While applying it, we studied the spatial distribution of DN (DP) pollution load according to the digital elevation model (DEM) and the information obtained from land use map and soil map. Its results show that DN mainly originated from irrigable land first, mound and hill second.

Key words: nonpoint source pollution; DN; DP; load model; geography information system (GIS); Guanting Reservoir; Guishui River

官厅水库由于污染严重于 1997 年退出了北京市饮用水供水系统, 其中入库河流妯水河中的总氮、总磷含量都很高^[1]。为了研究妯水河流域的溶解态氮磷非点源污染来源, 首先应建立径流溶解态氮磷负荷模型, 以便确立溶解态氮磷输出与输入间的关系。目前建立的溶解态氮磷负荷模型主要有 3 类: 第 1 类是 AGNPS 中使用的统计模型^[2], 第 2 类是根据质量守恒计算得到溶解态氮磷年负荷^[3~6]; 第 3 类是输出系数法^[7~10]。要应用这 3 种方法, 必须先已知径流中氮磷浓度或者土壤中溶解态氮磷含量。如果要用径流中的氮磷浓度计算, 则需要长时期、大量的取样分析, 不仅要耗费大量的人力、物力和时间, 而且在预报或管理和决策中, 也不具备实用性; 如果应用土壤中溶解态氮磷含量计算, 则需要调查土壤中溶解态氮磷含量, 然而土壤中溶解态氮磷含量并不是通用指标, 调查具有很大的难度, 也具有很大的

不确定性。相反, 土壤中总氮、总磷含量不仅是通用指标, 而且从资料中很容易查得。此外, 在模拟流域出口断面氮磷污染物的汇集过程时, 氮磷输移率因具有加和性, 应用起来比浓度更方便。因此, 本文研究了溶解态氮磷输移率和土壤总氮、总磷百分含量、径流量之间的关系, 建立了它们之间的负荷模型, 然后应用其研究了妯水河流域溶解态氮的空间分布。

1 材料与方法

1.1 野外实验

人工降雨模拟装置^[11]由供水的稳压桶、浮子流

收稿日期: 2005-08-04; 修订日期: 2005-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(50279049); 中国科学院“百人计划”项目; 中国科学院知识创新工程项目(CX10G-E01-08)

作者简介: 马彦涛(1972~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水处理和固体废弃物的处理。

* 通讯联系人

量计、喷雨器和集流槽等部件组成。降雨面积为 3m^2 ($2\text{m} \times 1.5\text{m}$)。其中, 喷雨器由 1.5m 长带有塑料喷嘴的树脂管制作, 可向上均匀喷出直径 0.7mm 的雨滴。雨强由雨强调节器、浮子流量计控制。四周隔水板用于防止降雨泥沙溅出, 降雨时产生的地表径流将通过集流槽收集并测定径流体积。此装置具有面积小、降雨均匀、雨强易于控制等特点, 野外实验中易于重复, 有利于减少误差。考虑到土地利用类型、土壤类型和坡度等因素对氮磷输出的影响, 实验选择了 4 种典型的土地利用类型和不同坡度、土壤类型在野外做人工降雨实验^[12]。4 种土地利用类型分别为: 不施肥菜地、海棠果果园、施肥玉米地和葡萄园。在每种土地上做 5 场(施肥玉米地为 3 场)平行人工降雨实验。

1.2 样品分析

采集到的水样在中科院地理所环化室进行分析。水样中溶解态磷(磷酸盐)直接用钼锑抗比色法测定; 溶解态氮直接用紫外分光光度计测定^[13]。

2 溶解态氮磷负荷模型

5 场平行野外人工降雨实验得到的溶解态氮磷输移率平均值 $\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}$ 、径流量平均值 Q 随时间变化的结果见图 1, 可以看出, 溶解态氮磷随径流量的增加而增加, 具有一定的相关关系。

假设径流溶解态氮磷输移率 $\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}$ 与土壤中总氮、总磷的百分含量 $\text{TN}(\text{P})_{\text{soil}}$ 、径流量 Q 的关系为:

$$\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}} = \text{TN}(\text{P})_{\text{soil}} \times E_x \times Q^a \quad (1)$$

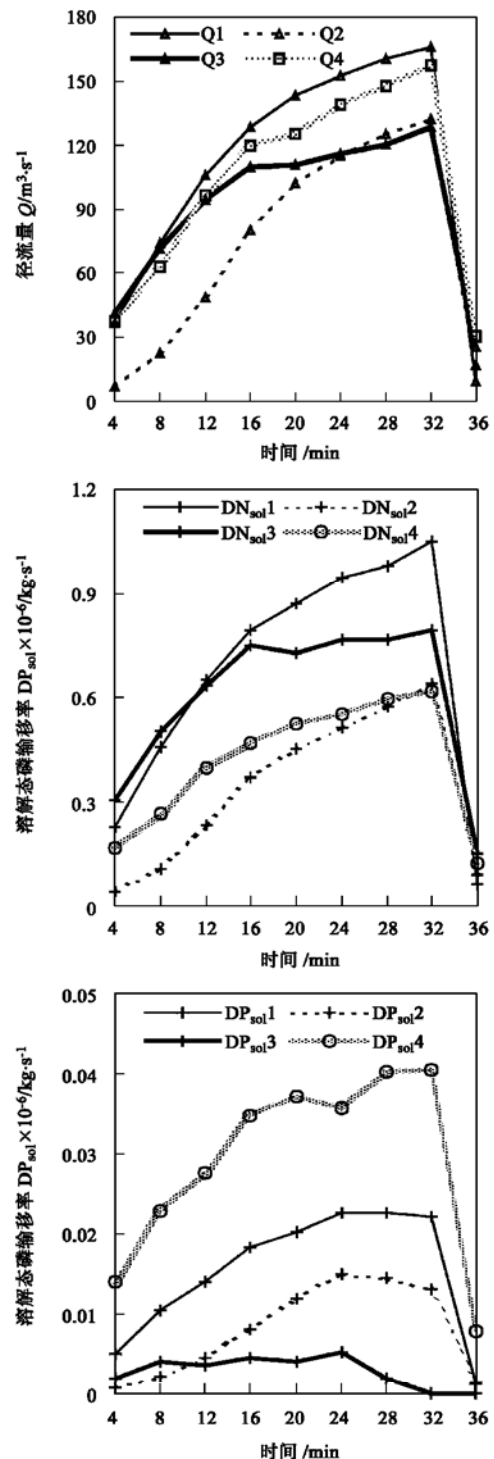
方程(1)两边取对数可得关系式:

$$\lg \frac{\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}}{\text{TN}(\text{P})_{\text{soil}}} = a \lg Q + \lg E_x \quad (2)$$

式中, E_x 为进入径流的氮或磷的提取系数。用线性最小二乘法拟合实验数据, 结果见表 1。可以看出, $\lg[\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}/\text{TN}(\text{P})_{\text{soil}}]$ 与 $\lg Q$ 具有很好的线性关系(施肥玉米地总磷除外), 其中径流中溶解态氮与土壤中总氮、径流量之间对数值的线性相关系数平均为 0.997 8, 径流中溶解态磷与土壤中总磷、径流量之间对数值的线性相关系数平均为 0.988 9(施肥玉米地因实验误差较大, 未参与平均)。根据表中给出的线性方程的斜率可计算得到溶解态氮磷相关关系模型中的平均斜率 a 均为 1.0(施肥玉米地总磷除外), 代入方程(1)中, 可以得到径流中溶解态氮磷的模型:

$$\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}} = E_x \times \text{TN}(\text{P})_{\text{soil}} \times Q \quad (3)$$

式中, $\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}$ 为径流溶解态氮(磷)输移率, kg/s ; $\text{TN}(\text{P})_{\text{soil}}$ 为土壤中总氮(总磷)的百分含量。



1. 不施肥菜地; 2. 海棠果果园; 3. 施肥玉米地; 4. 葡萄园

图 1 溶解态氮磷输移率、径流量随时间的变化

Fig. 1 Change of DN(DP) transporting rate and runoff with time

3 应用研究

3.1 流域地理信息

表 1 线性最小二乘法拟合实验数据结果($n = 5$)¹⁾
Table 1 Results of experimental data fitted by linear least square method($n = 5$)

方程参数	不施肥菜地		海棠果果园		施肥玉米地($n = 3$)		葡萄园	
	DN	DP	DN	DP	DN	DP	DN	DP
a	0.994 3	1.011 0	0.944 4	1.035 9	1.009 6	0.452 3	0.961 7	0.896 2
$\lg E_x$	0.673 5	- 0.617 4	0.332 9	- 0.617 2	0.870 2	- 3.417 3	0.480 5	- 0.796 2
γ	0.999 9	0.999 3	0.999 3	0.993 1	0.993 6	0.451 7	0.998 4	0.974 2

1) DN 为溶解态氮,DP 为溶解态磷, γ 为 $\lg[\text{DN}(\text{P})_{\text{sol}}/\text{TN}(\text{P})_{\text{sol}}]$ 与 $\lg Q$ 的线性相关系数

妯水河流域属暖温带半湿润地区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥.流域面积 850km^2 ,流域内植被条件较差,氮磷和水土流失比较严重,水体富营养化.

氮磷营养物在土壤中的含量、随降雨的输出量等变量与土壤类型和土地利用关系密切.妯水河流域的土地利用、土壤信息从 1:800 000 的京津唐土地利用图和土壤图中提取.为了能够取得较为准确的

土壤类型和土地利用信息,本文以 DEM 中所含的地理编码信息为依据,首先应用 Mapinfo 对妯水河流域的土壤和土地利用 Image 图进行图像配准,然后从土壤图和土地利用图中提取土壤、土地利用信息,建立属性数据库.分辨率为 $1\,000\text{m} \times 1\,000\text{m}$ 的妯水河流域土壤图和土地利用图根据属性数据,应用 ArcView 生成,见图 2、图 3.

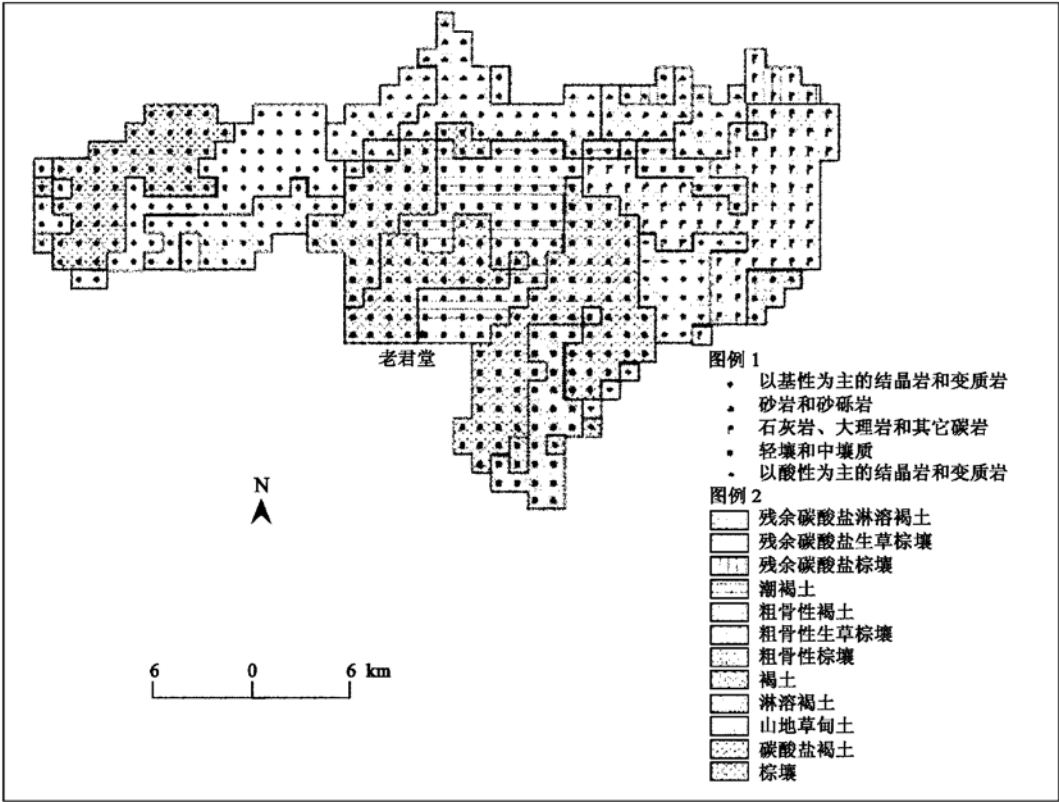


图 2 妯水河流域土壤图($1\,000\text{m} \times 1\,000\text{m}$)

Fig. 2 Soil map in Guishuihe watershed($1\,000\text{m} \times 1\,000\text{m}$)

3.2 流域溶解态氮的空间分布

为了研究溶解态氮磷空间分布,对 2002-07-21 ~ 07-23 的 1 场降雨进行了实地监测.结果表明,妯水河流域溶解态氮流失量远大于溶解态磷,溶解态磷没有检测出来.因此,采用溶解态氮的数据进行模型的检验.

首先根据自建的妯水河流域的土地利用、土壤属性数据库和有关资料^[14, 15],以及实测土壤氮百分含量确定各单元网格的土壤氮百分含量;然后应用本文负荷模型计算单元网格溶解态氮流失量,再应用基于单元网格的汇污模型计算流域出口断面溶解态氮含量,并用监测结果进行检验,用确定性系数 d

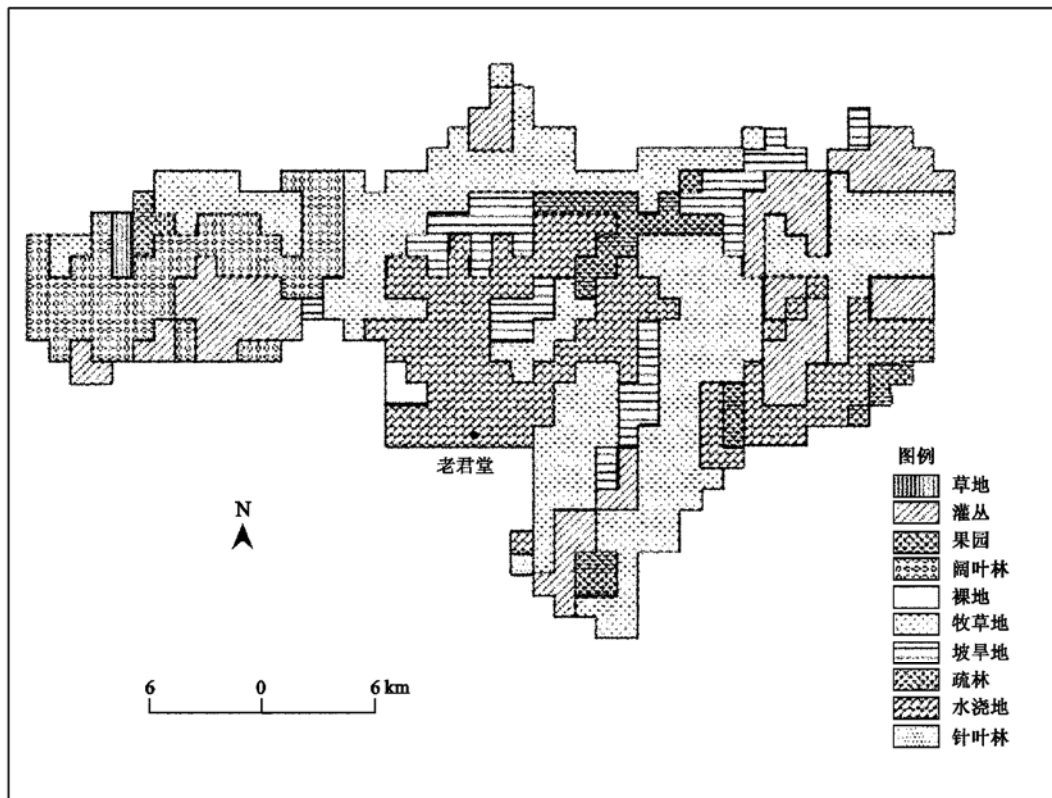


图3 奶水河流域土地利用图(1 000m×1 000m)

Fig. 3 Landuse map in Guishuihe watershed(1 000m×1 000m)

评价结果的可信度. 确定性系数:

$$d = 1 - \frac{S^2}{\sigma^2}$$

其中, S 为模拟浓度误差的均方差:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{i, \text{模拟}} - c_{i, \text{实测}})^2}$$

σ 为实测浓度的均方误差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_{i, \text{实测}} - \bar{c})^2}$$

式中, $c_{i, \text{模拟}}$ 是溶解态氮或磷的第 i 个模拟浓度, $c_{i, \text{实测}}$ 是溶解态氮或磷的第 i 个实测浓度, $\bar{c}$ 是 n 个实测浓度的平均值. 结果表明, 确定性系数为 99%. 最后根据单元网格流失的溶解态氮含量得到了该场降雨流域出口断面溶解态氮污染来源的空间分布, 见图 4. 结果表明, 在老君堂水文站附近溶解态氮流失最严重, 而来自古城河和新华营河集水区的溶解态氮流失量则较少. 首先是因为古城河和新华营河自然植被覆盖较好, 地表产流量较少; 其次这 2 个小集水区多为山地, 施肥量少, 特别是古城河流域内的龙庆峡是众所周知的旅游胜地, 而老君堂附近、西龙湾河集水区多为水浇地, 施肥导致土壤溶解态氮过

剩累积, 降雨发生时极易随地表径流流失. 因此, 溶解态氮流失最多的为水浇平地, 其次是低山丘陵.

3.3 模型的适用性

本文的溶解态氮磷负荷模型是根据官厅库区周围的多次人工降雨试验数据建立的一个统计模型, 并在奶水河流域进行了验证. 之所以应用于奶水河流域, 是因为该流域内的土地利用类型和土壤类型与试验地的大多数类型是相同的, 统计模型中的提取系数 E_x 可直接移用. 如果要应用于其它流域, 土地利用和土壤类型相同时 E_x 亦可直接移用, 不同时需通过实验确定 E_x 后才可应用模型.

4 结论

(1) 根据野外人工降雨实验建立了 1 个新的溶解态氮磷输移率与径流量之间的负荷模型. 其中, 溶解态氮、溶解态磷平均线性相关系数分别为 0.997 8 和 0.988 9. 模型用土壤总氮、总磷百分含量取代以往溶解态氮磷负荷模型中的溶解态氮磷的输入参数, 使得应用更为方便和准确.

(2) 实际应用结果表明, 本文建立的溶解态氮磷负荷模型可用于计算单元网格的氮磷流失量, 研究

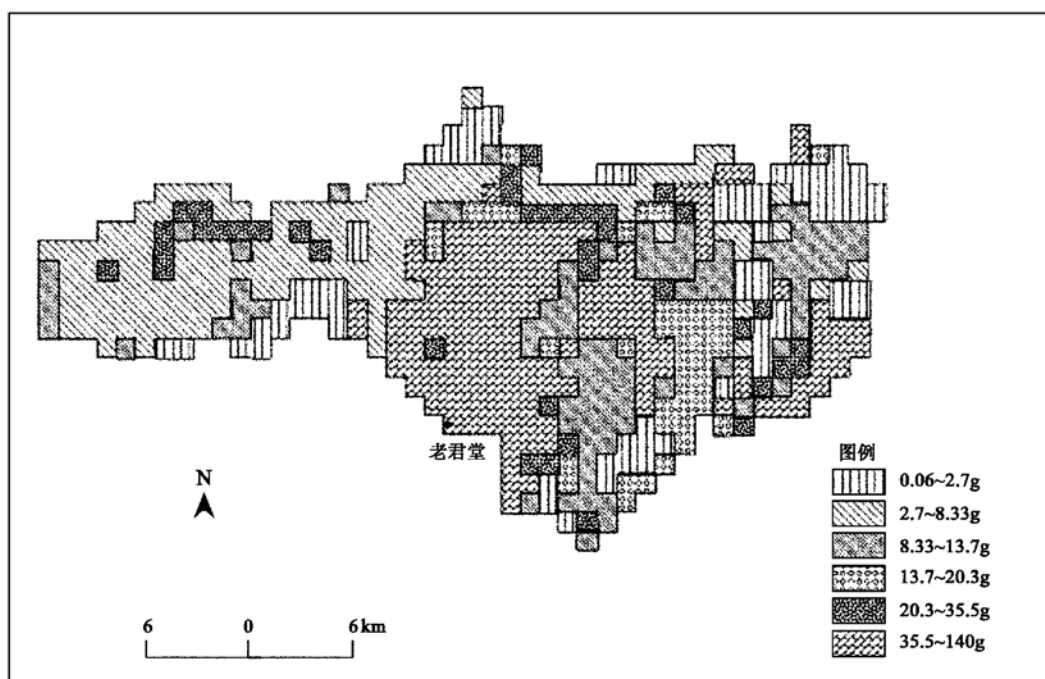


图 4 径流溶解态氮污染负荷的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution map of DN pollution load in runoff

流域内溶解态氮磷的空间分布。

(3) 奶水河流域溶解态氮污染负荷主要来自西龙湾河集水区的水浇平地, 其次是低山丘陵。

参考文献:

- [1] 梁涛, 张秀梅, 章申. 官厅水库及永定河枯水期水体氮、磷和重金属含量分布规律[J]. 地理科学进展, 2001, **20**(4): 341~346.
- [2] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS, Agricultural Nonpoint Source Pollution Model: A Large Watershed Analysis Tool[R]. Conservation Research Report 35, Washington D C: USDA-ARS, 1987.
- [3] Muscutt A D, Withers P J A. The Phosphorus Content of Rivers in England and Wales[J]. Water Research, 1996, **30**(5): 1258~1268.
- [4] Chiew F H S, McMahon T A. Modelling Runoff and Diffuse Pollution Loads in Urban Areas[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **39**(12): 241~248.
- [5] House W A, Warwick M S. Hysteresis of the Solute Concentration Discharge Relationship in Rivers during Storms[J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2279~2290.
- [6] Stapleton C M, Kay D, Jackson G F, *et al.* Estimated Inorganic Nutrient Inputs to the Coastal Waters of Jersey from Catchment and Waste Water Sources[J]. Water Research, 2000, **34**(3): 787~796.

- [7] Johnes P J. Evaluation and Management of the Impact of LandUse Change on the Nitrogen and Phosphorus Load Delivered to Surface Waters: the Export Coefficient Modelling Approach[J]. J. of Hydrology, 1996, **183**: 323~349.
- [8] Whiterhead P G, Johnes P J, Butterfield D. Steady State and Dynamic Modelling of Nitrogen in the River Kennet: Impacts of Land Use Change Since the 1930s[J]. The Science of the Total Environment, 2002, **282-283**: 417~434.
- [9] May L, House W A, Michael B, *et al.* Seasonal Export of Phosphorus from a Lowland Catchment[J]. The Science and Total Environment, 2001, **269**: 117~130.
- [10] Worrall F, Burt T P. The Impact Land-use Change on Water Quality at the Catchment Scale: the Use of Export Coefficient and Structural Models[J]. J. of Hydrology, 1999, **221**: 75~90.
- [11] 梁涛, 张秀梅, 章申, 等. 西苕河流域不同土地类型下氮元素输移过程[J]. 地理学报, 2002, **57**(4): 389~396.
- [12] 薛金凤, 夏军, 梁涛, 等. 颗粒态氮磷负荷模型研究[J]. 水科学进展, 2005, **16**(3): 334~337.
- [13] 中国标准出版社第二编辑室编. 水质分析方法国家标准汇编(1996)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [14] 河北省土壤普查办公室. 河北土壤[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 1990.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1978.