

# 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析

刘瑞民, 何孟常, 王秀娟

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 为了解土地利用的组合方式对氮磷输出的影响, 在广泛收集土地利用输出系数的基础上, 基于遥感和 GIS 手段, 分析了大伙房水库控制流域内营养物质氮磷的输出风险. 结果表明, 大伙房水库控制流域非点源污染输出的风险概率比较小, 氮素和磷素的风险概率平均为 19.31% 和 8.95%. 但在空间分布上差异很大, 风险概率高的地方一般在主要的河流附近, 沿河流向延伸. 而其它区域的风险概率相对较低. 此外, 营养物质输出风险随着坡度不同差别比较大, 而在行政区内差别不明显.

**关键词:** 大伙房水库控制流域; 非点源污染; 输出系数; 风险分析

中图分类号: X522; X824 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0663-05

## Risk Assessment of Nitrogen and Phosphorus Export in Upper Reach of Daliao River Watershed

LIU Rui-min, HE Meng-chang, WANG Xiu-juan

(State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** With the development of point pollution control, non-point source pollution has become an important environmental and water quality management problem. Land cover composition across a watershed is a dominant factor in controlling the amount of nitrogen and phosphorus exported from a watershed. Generally, urban and agricultural land covers are considered as principal sources of excess loads of nitrogen (N) and phosphorous (P) in receiving waters. A well developed literature of nutrient export coefficients by land-cover class was used to model the risk of equaling or exceeding specified levels of nutrient export in drainage basin of Dahuofang Reservoir. The model was applied to about 513 comparatively small watersheds mapped for the drainage basin of Dahuofang Reservoir for environmental analysis and planning. The results suggest that the probabilities of risk are 19.31% and 8.95% for N and P nutrient respectively. As the spatial distribution concerned, risk estimates generally differed with different slope degrees and districts. Risk estimates generally increased from the places where lies near the rivers to the places where are far from the river, but numerous areas of high variability were evident.

**Key words:** drainage basin of Dahuofang Reservoir; NPS pollution; export coefficient; risk assessment

随着工业和生活污染源等点源污染得到有效控制, 非点源污染已成为水体污染的主要因素, 如在美国, 目前约有 60% 河流和 50% 湖泊的污染与非点源污染有关<sup>[1]</sup>. 在我国, 非点源污染的问题也日益严重, 非点源污染已成为太湖和滇池等重要湖泊水质恶化的主要原因之一<sup>[2]</sup>.

已有研究表明, 几乎所有的非点源污染来源都和土地利用/覆盖变化紧密联系, 在土地利用/覆盖变化和水量/水质之间存在着非常显著的相关性<sup>[3~8]</sup>. 尤其是城市和农业用地, 通常认为是引起水体中氮磷超标的 2 个基本来源<sup>[9]</sup>. 在探讨土地利用/覆盖变化和水量/水质之间关系的研究中, 输出系数模型是主要的模型之一. 经过多年的实地研究, 发表了大量有关土地利用输出系数的研究成果<sup>[10~13]</sup>, 并得到了广泛的应用. Mattikalli 等<sup>[14]</sup>利用输出系数模型对英国 Glen 河流在 1931 ~ 1989 年近 60 年的总氮、总磷负荷进行了估算, 并对化肥施用量和土地利用单个因子变化时的非点源污染负荷进行了情景分

析. 刘瑞民等<sup>[15]</sup>利用输出系数模型, 结合 RS 和 GIS 技术, 对长江上游的非点源污染负荷进行了空间模拟和负荷估算. 在实际应用中, Wickham 等<sup>[16, 17]</sup>将输出系数用来随机模拟某个流域非点源污染超过某个阈值的概率, 然后进行风险评价, 拓展了输出系数的应用领域.

本研究以大辽河上游的大伙房水库控制流域为例, 应用流域输出风险模型估算非点源污染氮素(N)和磷素(P)的输出风险概率, 在此基础上进一步分析非点源污染输出风险随坡度和行政区的变化特征, 旨在为大伙房水库以及大辽河流域水土保持管理和决策部门提供相关科学依据.

### 1 研究区概况

大伙房水库位于大辽河支流浑河的中上游, 水

收稿日期: 2008-03-27; 修订日期: 2008-06-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2004CB418502)

作者简介: 刘瑞民(1975 ~ ), 男, 博士, 主要研究方向为流域水环境、环境信息系统等.

库及其上游流域全部在抚顺地区内,包括清原、新宾、抚顺 3 个县(图 1).大伙房水库是由浑河及其支流苏子河、杜河汇流而成,流域控制面积 5 437 km<sup>2</sup>,多年平均流量 52.3 m<sup>3</sup>/s.对照国家地表水环境质量标准(湖库)(GB 3838-2002),1997~2003 年大伙房水库理化指标的监测表明,入库和库区水体总氮、总磷含量多年平均分别为 1.61 mg/L、0.036 mg/L 和 1.23 mg/L、0.036 mg/L,均超过国家地表水Ⅲ类和库区Ⅱ类水质标准<sup>[18]</sup>.

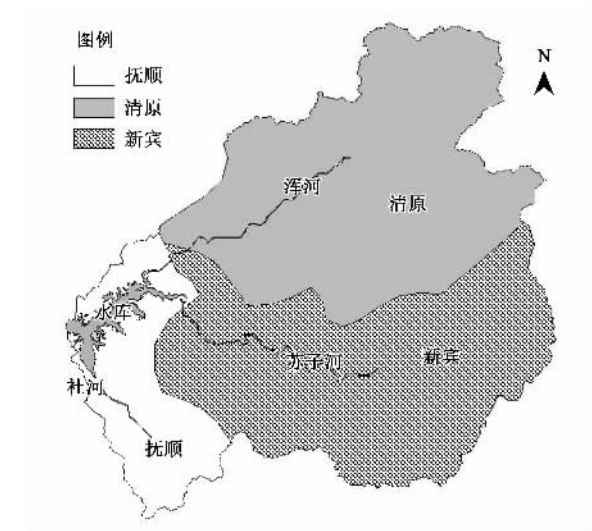


图 1 大伙房水库控制流域示意

Fig.1 Site of drainage basin of Dahuofang Reservoir

## 2 研究方法和数据处理

### 2.1 研究方法

流域非点源污染的输出风险模型在表达形式上与输出系数模型相同,它们的区别在于输出风险模型中用面积百分比代替输出系数中的实际面积大小.20 世纪 70 年代初期,北美地区首先提出了输出

系数模型,主要用来估算土地利用和湖泊富营养之间的关系<sup>[19]</sup>.早期的模型假定所有土地利用类型的输出系数相同,因而限制了模型的应用<sup>[20]</sup>.Johnes 等<sup>[21~23]</sup>对模型进行了不断的改进,使其得到了进一步完善和广泛应用.模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij}A_i \tag{1}$$

式中, $j$  为污染物类型; $i$  为流域中的土地利用类型,共  $m$  种; $L_j$  为污染物  $j$  在流域的总负荷量(kg/a); $E_{ij}$  为污染物  $j$  在流域第  $i$  种土地利用类型中的输出系数[kg/(km<sup>2</sup>·a)]; $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积(km<sup>2</sup>).

公式(1)有 2 种应用方式:①如果  $A$  表示的是不同土地利用的面积,那么  $L$  表示的是非点源污染负荷量,单位是 kg/a;②如果  $A$  表示的是流域内不同土地利用的面积百分比,那么  $L$  表示的是流域内的带权重的平均输出系数,单位是 kg/(km<sup>2</sup>·a).

第 2 种应用通常称为非点源污染的输出风险模型,其计算步骤包括:首先计算已有土地利用类型输出系数的统计分布形态,然后随机模拟符合统计分布形态的随机数,然后根据流域面积百分比和输出系数随机数计算该流域的平均输出系数,最后设定阈值并计算超过阈值的百分比即风险概率.

### 2.2 输出系数及其分布

输出风险模型计算的关键在于收集已有输出系数,并统计其分布形态.通过查找文献[19],收集到相关输出系数,本研究主要考虑农田、城镇和林地 3 种土地利用方式(表 1).对收集到的输出系数进行分析,发现收集到的输出系数基本上符合当地的自然特点,可以应用这些系数进行输出风险分析.通过检验发现,3 种土地利用方式的输出系数都符合对数正态分布,其参数如表 2 所示.

表 1 输出系数基础统计

Table 1 Characteristics of export coefficients

| 土地类型 | 参数 | 数量 | 最小值  | 25% 值 | 中间值   | 75% 值 | 最大值   |
|------|----|----|------|-------|-------|-------|-------|
| 农田   | N  | 30 | 2.10 | 6.60  | 11.10 | 20.30 | 53.20 |
|      | P  | 27 | 0.08 | 0.49  | 0.91  | 1.34  | 5.40  |
| 城镇   | N  | 19 | 1.50 | 4.00  | 6.50  | 12.80 | 38.50 |
|      | P  | 24 | 0.19 | 0.69  | 1.10  | 3.39  | 6.23  |
| 林地   | N  | 21 | 1.37 | 1.92  | 1.92  | 3.32  | 7.32  |
|      | P  | 62 | 0.01 | 0.04  | 0.08  | 0.22  | 0.83  |

### 2.3 数据处理

研究中用到的数据包括 2000 年大伙房水库控制流域 TM 图像、行政区图和 DEM 等.首先从 TM 图

像中提取土地利用数据,然后根据 DEM 数据提取小流域.在此基础上,根据 DEM 数据得到坡度等级图,再根据重力、动力学原理,以及 2004 年“土地利用更

新调查技术规定”(试行),将坡度分为平地、缓平地、缓地、斜坡、缓陡坡以及陡坡 6 级(表 3).最后根据坡度等级图和行政区划图,进一步分析非点源污染的区域风险特征.

表 2 对数正态分布下的平均值和方差

| Table 2 Mean and variance parameters for fitted log-normal distributions |    |        |       |
|--------------------------------------------------------------------------|----|--------|-------|
| 土地利用                                                                     | 变量 | 平均值    | 方差    |
| 农田                                                                       | N  | 2.406  | 0.914 |
|                                                                          | P  | -0.221 | 1.036 |
| 城镇                                                                       | N  | 1.900  | 0.913 |
|                                                                          | P  | 0.233  | 0.969 |
| 林地                                                                       | N  | 1.024  | 0.506 |
|                                                                          | P  | -2.351 | 1.105 |

表 3 大伙房水库控制流域坡度分级

| Table 3 Slope levels of drainage basin of Dahufang Reservoir |     |     |     |      |       |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|-------|-----|
| 坡度等级                                                         | 1   | 2   | 3   | 4    | 5     | 6   |
| 坡度界限/(°)                                                     | 0~3 | 3~5 | 5~8 | 8~15 | 15~25 | >25 |
| 级别名称                                                         | 平地  | 缓平地 | 缓地  | 斜坡   | 缓陡坡   | 陡坡  |

3 结果与分析

3.1 输出风险计算

根据研究区实际地形特征、DEM 数据的精度结合土地利用精度,并考虑到计算机的运算速度,应用 DEM 数据生成 513 个小流域,然后结合遥感解译形成的土地利用图,计算每个小流域内不同土地利用类型的面积比例,本研究只考虑 3 种土地利用类型.根据表 1 和表 2,应用 MATLAB 随机模拟技术产生 10 000 个满足对数正态分布的每种土地利用类型的随机数,以小流域土地利用类型面积比例为权重计算子流域的平均输出系数.目前还没有非点源污染输出风险的判断标准,通常的做法是以林地的最大输出系数为阈值,超过阈值即认为存在风险,这是因为相对于城镇和农业来说,一般认为林地是污染物的“汇”而不是“源”,因此大于林地输出系数的上限通常被认为是形成污染的最大值.

3.2 非点源污染输出风险空间分布特征

在 GIS 平台支持下,大伙房水库控制流域非点源污染输出风险评价如图 2 所示.由于没有统一的标准,在这里以风险概率 0.1 为间隔,可以将输出风险划分为 7 个风险等级,等级越高说明产生非点源污染的可能性就大.输出风险等级的累积统计结果见图 3.

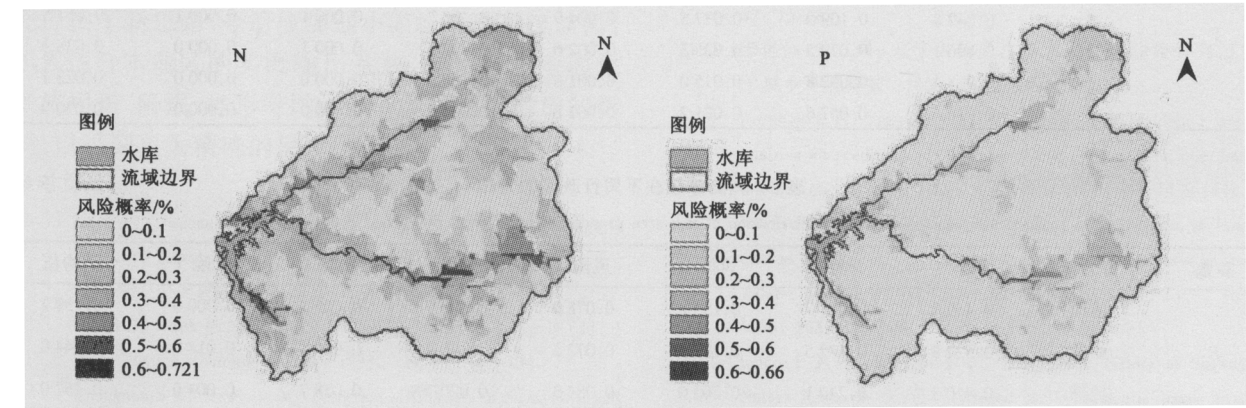


图 2 大伙房水库控制流域非点源污染风险评价

Fig.2 Risk assessment of nitrogen export for drainage basin of Dahufang Reservoir

从图 2 可以看出,总体上来说,2000 年大伙房水库控制流域非点源污染产生的风险概率比较小,氮素和磷素的风险概率平均为 19.31% 和 8.95%.但在空间分布上差异很大,风险概率高的地方一般在主要的河流附近,沿河流流向延伸.而其它区域的风险概率相对较低.

从图 3 可以看出,氮素输出的风险主要集中在 0~30% 之间,面积约占 87%;而磷素输出的风险主要集中在 0~10% 之间,面积超过 83%.因此,相对

于磷素来说,氮素输出的风险更高一些.无论氮素还是磷素,输出风险高于 50% 的区域非常小,分别占总面积的 1.91% 和 0.05%.因此可以推断,从总体上来说,大伙房水库控制流域非点源污染风险概率偏低.

3.3 基于坡度的风险评价分析

在 GIS 平台支持下,结合坡度等级,进一步分析大伙房水库控制流域非点源污染输出风险随坡度的变化特征,统计结果如表 4 所示.

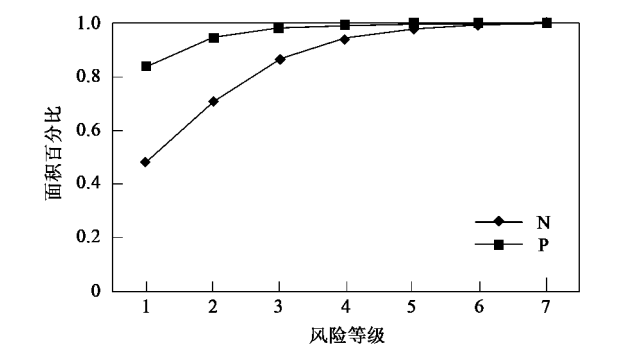


图3 大伙房水库控制流域非点源污染风险评价累积面积百分比

Fig.3 Risk area proportion of nutrient export for drainage basin of Dahuofang Reservoir

从表4可以看出,在不同的坡度等级上,随着坡度的增加氮素输出风险逐渐降低;此外,在不同的坡度等级上,风险等级1所占的面积比例逐渐增加,等级2先增加后降低.同时,在不同的坡度等级上,随着坡度的增加磷素输出风险逐渐降低;此外,在不同的坡度等级上,风险等级1所占的面积比例逐渐增加,其他风险等级则逐渐降低.

### 3.4 基于行政区的风险评价分析

在GIS平台支持下,结合行政区域划分,进一步分析大伙房水库控制流域非点源污染输出风险随行政区的变化特征,统计结果如表5所示.

从表5可以看出,在不同的行政区内,氮素输出

| 表4 风险等级在不同坡度上的分布                                                 |      |        |        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------------------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Table 4 Distribution of risk area proportion on different slopes |      |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 参数                                                               | 坡度等级 | 风险1    | 风险2    | 风险3    | 风险4    | 风险5    | 风险6    | 风险7    | 平均值    |
| N                                                                | 1    | 0.2853 | 0.2431 | 0.2235 | 0.1336 | 0.0659 | 0.0288 | 0.0198 | 0.2072 |
|                                                                  | 2    | 0.4027 | 0.2469 | 0.1857 | 0.0971 | 0.0460 | 0.0146 | 0.0069 | 0.1646 |
|                                                                  | 3    | 0.4582 | 0.2470 | 0.1686 | 0.0771 | 0.0357 | 0.0088 | 0.0047 | 0.1459 |
|                                                                  | 4    | 0.5648 | 0.2181 | 0.1371 | 0.0497 | 0.0232 | 0.0052 | 0.0017 | 0.1171 |
|                                                                  | 5    | 0.6696 | 0.1759 | 0.1015 | 0.0346 | 0.0136 | 0.0038 | 0.0010 | 0.0905 |
|                                                                  | 6    | 0.6786 | 0.1432 | 0.1159 | 0.0345 | 0.0246 | 0.0028 | 0.0006 | 0.0906 |
| P                                                                | 1    | 0.6979 | 0.1880 | 0.0786 | 0.0112 | 0.0227 | 0.0011 | 0.0006 | 0.0864 |
|                                                                  | 2    | 0.7962 | 0.1392 | 0.0453 | 0.0112 | 0.0078 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0612 |
|                                                                  | 3    | 0.8428 | 0.1090 | 0.0375 | 0.0049 | 0.0057 | 0.0001 | 0.0001 | 0.0515 |
|                                                                  | 4    | 0.8961 | 0.0735 | 0.0253 | 0.0026 | 0.0025 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0383 |
|                                                                  | 5    | 0.9281 | 0.0528 | 0.0150 | 0.0018 | 0.0023 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0284 |
|                                                                  | 6    | 0.9166 | 0.0576 | 0.0212 | 0.0018 | 0.0028 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0309 |

| 表5 风险等级在不同行政区的分布                                                    |     |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------------------------------------------------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Table 5 Distribution of risk area proportion on different districts |     |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 参数                                                                  | 行政区 | 风险1    | 风险2    | 风险3    | 风险4    | 风险5    | 风险6    | 风险7    | 平均值    |
| N                                                                   | 清原  | 0.4591 | 0.2717 | 0.1532 | 0.0789 | 0.0309 | 0.0056 | 0.0006 | 0.1392 |
|                                                                     | 新宾  | 0.5228 | 0.1725 | 0.1597 | 0.0722 | 0.0484 | 0.0094 | 0.0149 | 0.1440 |
|                                                                     | 抚顺  | 0.4103 | 0.2401 | 0.2020 | 0.0843 | 0.0207 | 0.0387 | 0.0040 | 0.1620 |
| P                                                                   | 清原  | 0.8515 | 0.1100 | 0.0316 | 0.0023 | 0.0046 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0479 |
|                                                                     | 新宾  | 0.8207 | 0.1120 | 0.0431 | 0.0089 | 0.0142 | 0.0008 | 0.0004 | 0.0546 |
|                                                                     | 抚顺  | 0.8199 | 0.1081 | 0.0611 | 0.0070 | 0.0038 | 0.0000 | 0.0002 | 0.0635 |

风险差别不大,从清原县的13.92%到抚顺县的16.20%;此外,在不同的行政区内,风险等级1所占面积最大,约50%,随着风险等级的增加,所占面积比例逐渐减小.同时,在不同的行政区内,磷素输出风险差别不大,从清原县的4.79%到抚顺县的6.35%;此外,在不同的行政区内,风险等级1所占面积最大,超过80%,随着风险等级的增加,所占面积比例逐渐减小.

## 4 结论

(1)总体来说,大伙房水库控制流域非点源污染产生的风险概率比较小,氮素和磷素的风险概率平均为19.31%和8.95%.其中氮素输出的风险主要集中在0~30%之间,面积约占87%;而磷素输出的风险主要集中在0~10%之间,面积超过83%.无论氮素还是磷素,输出风险高于50%的区域非常

小,分别占总面积的 1.91%和 0.05%。因此可以推断,从总体上来说,大伙房水库控制流域非点源污染风险概率偏低。在空间分布上,非点源污染输出风险的差异比较大,无论氮素还是磷素,风险概率高的地方一般在主要的河流附近,沿河流流向延伸。而其它区域的风险概率相对较低。在不同的坡度等级上,随着坡度的增加氮素和磷素输出风险都逐渐降低;而在不同的行政区内,差别不明显。

(2)大伙房水库控制流域非点源污染输出风险特征与当地的自然和经济特征密切联系。由于大伙房水库为当地的饮用水源地,植被保护比较好,尤其最近几十年,在植被保护方面尤为重视,森林覆盖率从 20 世纪 80 年代的 55%左右上升到目前的 80%,非点源污染严重的农田比例则较低<sup>[24,25]</sup>。另一方面由于该流域地处低山丘陵区,因此多数的农田都分布在河流附近的比较平缓地带,输出风险概率高的地方一般在河流附近坡度比较缓的地带,并沿河流流向延伸。由于在不同的行政区内,自然和经济特征基本类似,都是低山丘陵,因此在不同的行政区内氮和磷的输出风险差别不大。

(3)模型对土地利用造成的非点源污染输出风险进行了较好的空间模拟和分析,为非点源污染研究提供了新思路。今后应加强小流域降雨径流监测,积累适合本地区的实测输出系数,并进一步考虑化肥施用量、降雨、地形等因子对非点源污染输出的影响,以得到更为精确的模拟结果。

#### 参考文献:

- [1] USEPA. National Water Quality Inventory: Report to Congress Executive Summary[R]. Washington: USEPA, 1995.
- [2] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995.
- [3] Wu R S, Haith D A. Land Use, Climate, and Water Supply[J]. J Water Resour Planning Manage, 1993, **119**(6): 685-704.
- [4] Changnon S A, Demissie M. Detection of Changes in Streamflow and Floods Resulting from Climate Fluctuations and Land Use Drainage Changes[J]. Climatic Change, 1996, **32**: 411-421.
- [5] Mander U, Kull A, Tamm V, *et al.* Impact of Climatic Fluctuations and Land Use Change on Runoff and Nutrient Losses in Rural Landscape[J]. Landscape and Urban Planning, 1998, **41**: 229-238.
- [6] Perry J, Vanderklein E. Water Quality Management of a Natural Resource[M]. Blackwell Science, Cambridge, USA, 1996.
- [7] Gburek W J, Folmar G J. Flow and Chemical Contributions to Streamflow in an Upland Basin: a Baseflow Survey[J]. J Hydrol, 1999, **217**: 1-18.
- [8] 许书军,魏世强,谢德体. 非点源污染影响因素及区域差异[J]. 长江流域资源与环境, 2004, **13**(4): 389-393.
- [9] Parry R. Agricultural Phosphorus and Water Quality: A U. S.

- Environmental Protection Agency Perspective [J]. Journal of Environmental Quality, 1998, **27**: 258-261.
- [10] Urromark P D, Chapin J D, Green K M. Estimating Nutrient Loading of Lakes from Nonpoint Sources [M]. USEPA/660/12-74/020, 1974.
- [11] Reckhow K H, Beaulac M N, Simpson J T. Modeling Phosphorus Loading and Lake Response under Uncertainty: a Manual and Compilation of Export Coefficients [M]. USEPA/4401 580/011, 1980.
- [12] Beaulac M N, Reckhow K H. An Examination of Land Use-Nutrient Export Relationship [J]. Water Resources Bulletin, 1982, **18** (6): 1013-1024.
- [13] Frink C R. Estimating Nutrient Exports to Estuaries [J]. J Environ Quality, 1991, **20**: 717-724.
- [14] Mattikalli N M, Richards K S. Estimation of Surface Water Quality Changes in Response to Land Use Change: Application of the Export Coefficient Model Using Remote Sensing and Geographical Information System [J]. J Environ Manage, 1996, **48**: 263-282.
- [15] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27** (12): 2407-2414.
- [16] Wickham J D, Riitters K H, O'Neill R V, *et al.* Land Cover as a Framework for Assessing Risk of Water Pollution [J]. J Am Water Res As, 2000, **36** (6): 1417-1422.
- [17] Wickham J D, Wade T G. Watershed Level Risk Assessment of Nitrogen and Phosphorus Export [J]. Comput Electron Agric, 2002, **37**: 15-24.
- [18] 宋世伟,史玉强. 辽宁大伙房水库水质变化趋势研究[J]. 辽宁城乡环境科技, 2006, **26**(1): 36-38.
- [19] Reckhow K H, Simpson J J. A procedure using modeling and error analysis for prediction of lake phosphorus concentration from land use information [J]. Can J Fish Aquat Sci, 1980, **37**: 1439-1448.
- [20] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach [J]. J Hydrol, 1996, **183**: 323-349.
- [21] Johnes P J, O'Sullivan P E. The natural history of Slapton Ley Nature Research XVIII: nitrogen and phosphorus losses from the catchment-an export coefficient approach [J]. Field Studies, 1989, **7**: 285-309.
- [22] Johnes P J. An investigation of the effects of land use upon water quality in the windrush catchment [D]. Oxford: Uni Oxford, 1990.
- [23] Heathwaite A L, Burt T P, Trudgill S T. The effect of land use on nitrogen, phosphorus and suspended sediment delivery to streams in a small catchment in Southwest England [A]. In: Thornes J B (Ed). Vegetation and Erosion: Processess and Environments[C]. Wiley, Chichester: 1990. 161-178.
- [24] 黎峰. 大伙房水库流域森林植被亟待保护[J]. 中国环境管理, 1984, **2**: 34-35.
- [25] 崔双发,李树潜,史玉强,等. 大伙房水库上游流域生态环境现状及防治对策研究[J]. 水利渔业, 2004, **24**(3): 46-48.