

基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟

方怒放, 史志华, 李 璐

(华中农业大学 农业部亚热带农业资源与环境重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要:在南水北调中线工程水源地丹江口库区,以1990、2000和2007年3期Landsat TM影像为基础,通过实地考察,解译出土地利用图,辅以DEM、气象数据及相关社会经济资料,在ArcGIS支持下,使用输出系数模型对库区3期非点源污染进行空间模拟。研究结果表明:3年库区非点源污染TN负荷总量依次为3.325万、3.379万和3.710万t;TP负荷总量分别为0.167万、0.169万和0.186万t。TN、TP最大来源分别是旱地和人类生活排放。河南淅川县污染负荷强度最大,应列为重点治理区域。

关键词: 输出系数;非点源污染;丹江口库区

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2011)04-0007-06

丹江口水库作为南水北调中线工程水源地,其水质一直备受关注,确保一江清水向北流是南水北调中线工程成败的关键(沈泽昊等,2006;张全发等,2007)。已有研究表明,非城市湖泊污染负荷至少有50%来自流域内非点源污染(杨育红和阎百兴,2010)。在丹江口库区,尽管国家自“十一五”以来实施了多项节能减排环境政策,非点源污染仍然是威胁库区水质安全的主要因素。定量分析库区非点源污染负荷、了解污染时空分布,对中线调水工程的环境影响评价和科学规划都具有重大意义。

由于非点源污染是间歇性的,随机性、不确定性很强的复杂过程,估算其发生负荷的难度大,使用合适模型进行模拟是最常见的方法(杨育红和阎百兴,2010;郭红岩等,2004)。丹江口库区缺乏长期的监测资料,基于物理的非点源污染模拟难以实现(胡雪涛和陈吉宁,2002)。输出系数模型于20世纪70年代初期在北美地区首先提出,主于要用评价土地利用和湖泊富营养之间的关系(Omernik, 1976)。John等在实际应用中不断改进输出系数模型,加入了牲畜和人口等因素的影响,使其得到了进一步完善和广泛应用(Johnes, 1996)。因此,本文选择适用范围广、基于经验的输出系数模型(蔡明等,2004),采用污染物模型并结合史志华等

(2002a;2002b)的文献确定输出系数,在对研究区大量野外调查的基础上,借助遥感和GIS技术,对库区多年的土地利用格局、人畜排放进行分析,揭示库区的非点源污染时空分布及主要来源,为库区污染治理和水质安全提供一定参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区总面积17 916 km²,界于东经109°25'~111°52',北纬32°14'~33°48'(见图1)。库区流域含河南省境内淅川县和西峡县,含湖北省十堰市区、丹江口市、郧县和郧西县。海拔86~2 212 m,以中、低山和丘陵为主。属北亚热带季风气候,多年平均气温为15.9℃,库区年均降雨量850~950 mm。库区土壤以山地黄棕壤和黄褐土为主,山地棕壤土次之。土壤中N、P和K营养元素水平低,农地种植大量施用肥料。

1.2 数据来源及处理

基础数据包括丹江库区1:5万地形图(DEM)、遥感影像、土壤图、地质图、统计年鉴和历年调查成果等。其中,遥感数据是1990、2000和2007年美国陆地卫星(Landsat)TM影像。除上述资料外,还利用手持GPS、地形图及其他参考资料,在2009年开展了土地利用考察,参考全国的分类标准,应用ERDAS、ArcGIS软件,将土地利用分为9类:水田、旱地、林地、园地、灌丛、草地、城镇用地、荒地和水体。对分类结果进行精度检验,1990、2000和2007年的Kappa指数分别为0.84、0.86和0.87,满足研究需求。

收稿日期:2010-08-01

基金项目:公益性行业(水利)专项(200901008);国家自然科学基金(41071190)。

通讯作者:史志华。E-mail: pengshi@mail. hzau. edu. cn

作者简介:方怒放,1985年生,男,汉族,博士,主要从事土地利用与流域保护研究。E-mail: fnf@webmail. hzau. edu. cn

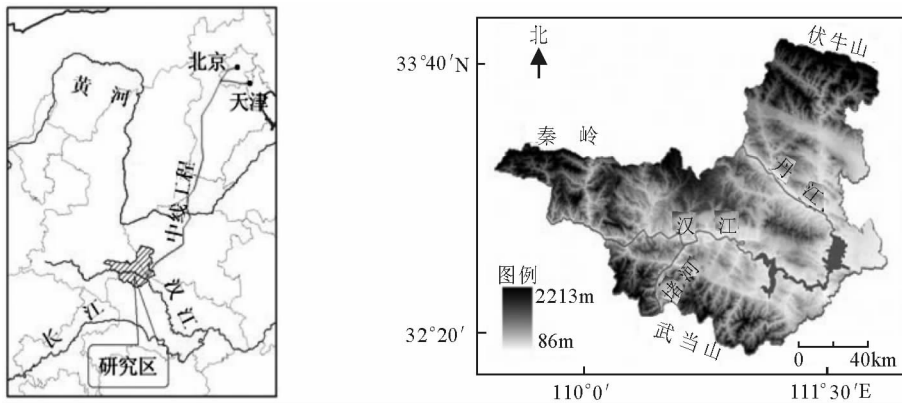


图1 研究区位置及其 DEM

Fig.1 Location of the study area and its DEM

1.3 输出系数模型的数学模型

输出系数模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i \quad (1)$$

式(1)中 j 为污染物类型; m 为流域中土地利用类型的种类或者人口、牲畜; L_j 为污染物 j 在该流域的总负荷, 单位 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或人口牲畜的输出系数, 单位 $\text{kg}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积, 或人口、牲畜的数量。

1.4 输出系数的确定

输出系数模型的关键是输出系数的确定。获取输出系数的常见途径是现场监测和查阅文献值(丁晓雯等, 2006)。现场监测的优点是获取的参数有较高的精度, 缺点是耗时长, 费用高; 参考文献给出的输出系数多为前人在特定条件下得出的结果, 输出系数具有明显的区域特征和不确定性, 精度有限(庄咏涛, 2002; 刘瑞民等, 2008)。输出系数采用模型估算并参考史志华等(2002a; 2002b)的文献, 分别计算各种土地利用中泥沙结合态和溶解态 N、P 二者之和就是 TN 和 TP。

1.4.1 泥沙结合态污染物模型

$$L_s = S_d \sum_i E_{mi} C_{si} X_i \quad (2)$$

式(2)中 L_s 为泥沙结合态污染物负荷量 (kg/a); S_d 为流域泥沙输移比; E_{mi} 为 i 中污染物富集比; C_{si} 为第 i 种土壤污染物含量, 参考文献 12 可得; X_i 为库区第 i 种土壤流失量 (kg/a), 由方程(3)可得:

$$X = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

式(3)中 X 为年土壤流失量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡度坡长因子; C 为植被与经营管理因子; P 为水土保持措施因

子。采用 Roehl 计算 S_d 的统计方程:

$$\log S_d = 3.59253 - 0.23043 \log W + 0.51022 \log (P/L) - 2.78594 \log R_n \quad (4)$$

式(4)中: W 是库区面积, P/L 是起伏度比, R_n 是分支比, 在 ARCGIS 中可由 DEM 提取获得。 E_n 由式(5)确定:

$$E_n = e/m \quad (5)$$

m 为地表土壤粘粒含量; e 为受侵蚀进入径流的土壤粘粒含量, 参考区域土壤调查数据可得。

1.4.2 溶解态污染物负荷模型

$$L_d = C_d \times Q \times A \quad (6)$$

式(6)中: L_d 为溶解态污染物负荷量 (kg/a); C_d 为相应时段径流中溶解态污染物浓度 (mg/L); 根据十堰和南阳市统计年鉴, 确定各地区对年肥料使用量, 得到各地不用土地利用下 C_d 值; A 为计算区域面积 (km^2)。 Q 为该区域相应时段径流深 (mm), 可根据降雨数据使用 SCS 方程求的:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \quad (7)$$

式(7)中: P - 降雨量 (mm); Q - 径流量 (mm); S - 流域最大滞留量 (mm), 由下式计算:

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (8)$$

CN 是土壤性质、植被覆盖及土壤湿度等参数的函数。根据库区土壤和土地覆盖的类型, 参考 SCS 计算方法提供的取值条件。可确定不同土地利用方式 CN 值。

由泥沙结合态和溶解态 N、P 确定研究区不同土地利用输出系数, 人畜输出系数参考已有研究(史志华等, 2002a), 最终确定的输出系数见表 1。

表1 丹江口库区输出系数

Tab.1 Export coefficients of Danjiangkou Reservoir Area

土地利用类型	输出系数	
	TN	TP
水田/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	2 625	182
旱地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	1 921	79
林地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	655	18
灌木/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	1 032	23
草地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	1 135	38
园地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	1 234	98
居民地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	636	36
荒地/kg·km ⁻² ·a ⁻¹	1121	64
人/kg·(ca·10 ⁴) ⁻¹ ·a ⁻¹	1 9547	2 142
大牲畜/kg·(ca·10 ⁴) ⁻¹ ·a ⁻¹	11 3715	2 179
猪/kg·(ca·10 ⁴) ⁻¹ ·a ⁻¹	26 667	1417
羊/kg·(ca·10 ⁴) ⁻¹ ·a ⁻¹	15 134	450
家禽/kg·(ca·10 ⁴) ⁻¹ ·a ⁻¹	459	54

2 结果与分析

2.1 非点源污染负荷时空分布

使用输出系数模型估算库区3期非点源污染空间负荷的结果见图1和图2。1990、2000和2007年,丹江口库区非点源污染TN、TP空间分布总体特点是“东高西低,局部集中,分布不均,靠近水源”,3个时期没有发生明显变化,高负荷区主要分布在水体附近,低负荷区主要为广大水源区。这是由于库区农业活动一直以来都主要集中在地势平缓的水体附近,而在地势较为陡峭区域人类活动相对较少,土地利用类型主要是林地和草地,耕地很少,因此,污染负荷相对较低。

2.2 非点源污染负荷总量分析

丹江口库区非点源污染TN负荷总量1990、2000和2007年分别是3.325万、3.379万和3.710万t;TP负荷总量分别是0.167万、0.169万和0.186万t。可见1990-2000年非点源污染TN、TP负荷总量变化较小,而2000-2007年TN、TP负荷总量上升较快。这种变化趋势和人口、畜禽数量增长密切相关。1990-2007年库区人口从302万增长到335万,禽类数量从1990年的124万头增长到了2007年的1567万头,猪、羊等牲畜数量也成倍增长。因此,库区虽然耕地面积有所减少,但是非点源污染负荷却是逐年上升,且上升趋势加快。

2.3 非点源污染负荷区域分布

在总量估算的基础上进一步分析丹江口库区在6地区的分布(见图3)。河南省淅川县对库区非点源污染TN和TP贡献一直最大,淅川县的人口总数在6地区中最多,人口密度最大,耕地较多,畜禽养殖业发达,导致非点源污染负荷很大。非点源污染负荷TN、TP在区域分布上具有相似性,但并不一致。如十堰城区TN负荷贡献1990-2007年增长缓慢,TP负荷却增长迅速,这可能是由于该区域人口集中,耕地稀少,主要非点源污染来自人畜排放。而丹江口市2000-2007年TP负荷有所降低,可能是受到南水北调移民工程的影响,该地区人口数量减少,畜禽数量增长减缓,使TP负荷排放减少。

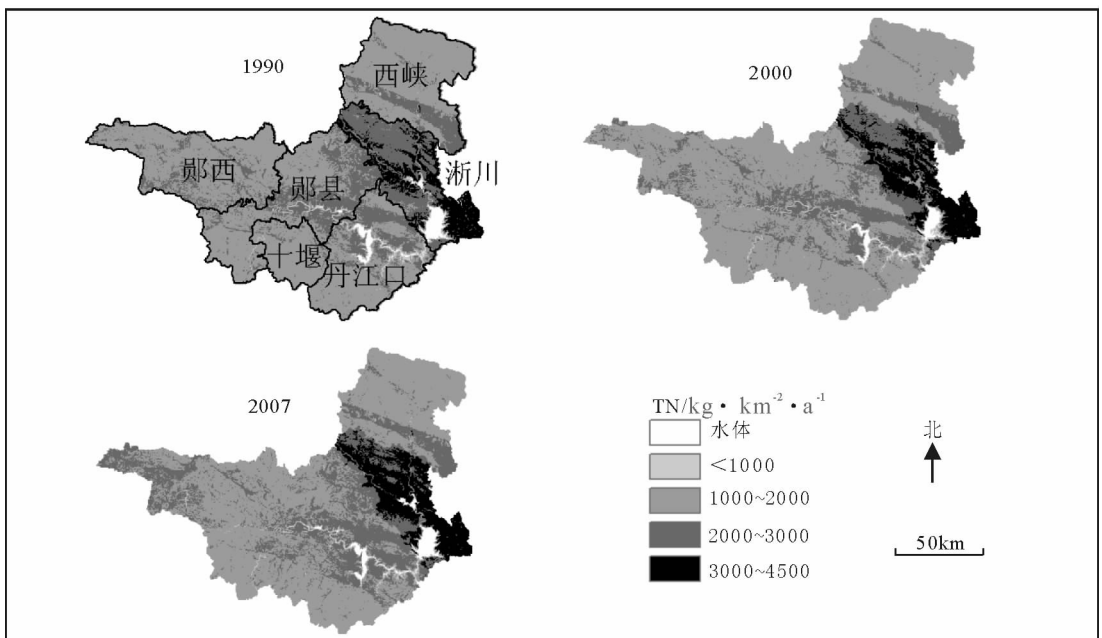


图2 丹江口库区非点源污染TN负荷分布

Fig.2 Spatial distribution of TN pollution load in Danjiangkou Reservoir Area

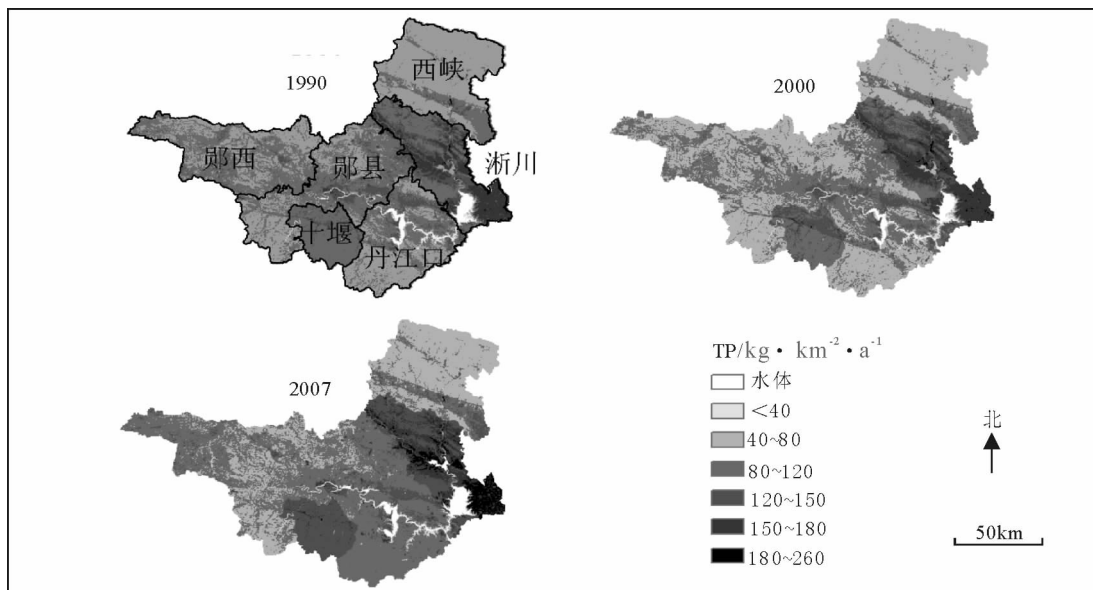


图3 丹江口库区非点源污染 TP 负荷分布

Fig. 3 Spatial distribution of TP pollution load in Danjiangkou Reservoir Area

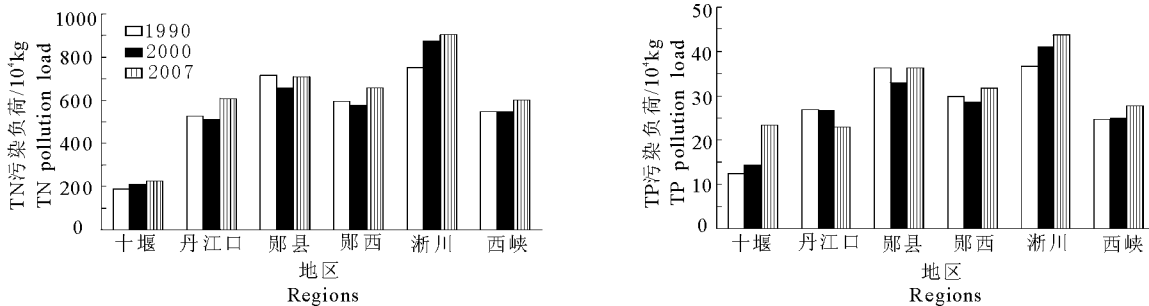


图4 丹江口库区 TN、TP 总量分布

Fig. 4 Intensity histogram of NPS pollution load from 1990 to 2007 in Danjiangkou Reservoir Area

2.4 非点源污染负荷来源分析

丹江口库区最大非点源负荷 TN 来源是旱地, 库区具有人口密度大、土地负荷重的特定, 加上水土

流失严重, 山地灾害多, 农业氮肥大量施用, 导致耕地成为了库区 TN 负荷的主要来源 (见图 4)。自 1989 年启动长江中上游防护林体系建设工程以来,

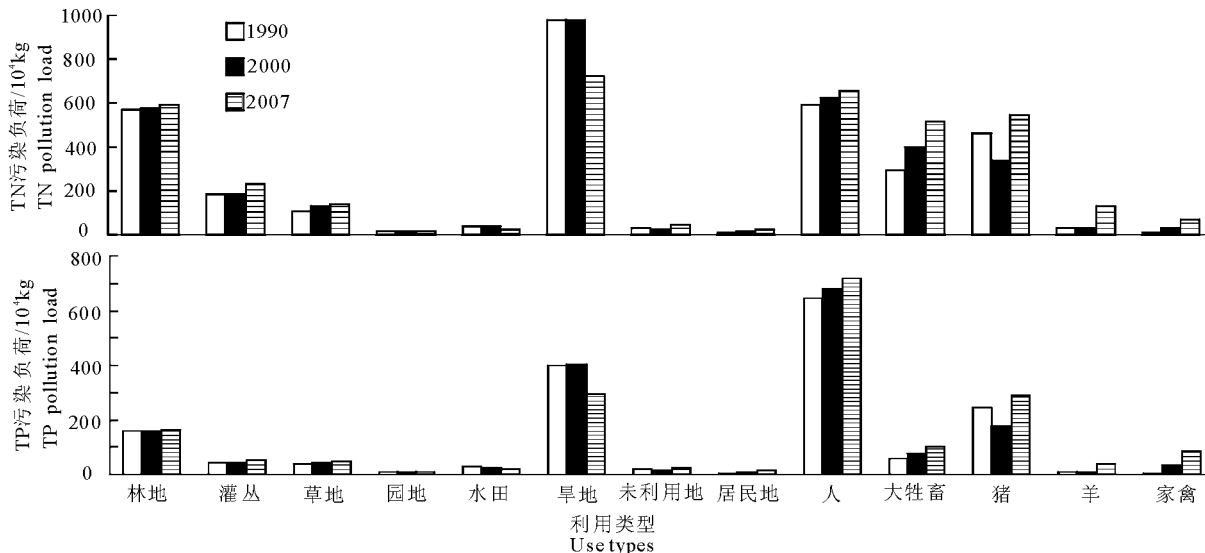


图5 丹江口库区 TN 和 TP 来源

Fig. 5 Sources of TN and TP pollution load in Danjiangkou Reservoir Area

在水源地开展了人工造林、封山育林和退耕还林等生态工程,使林地面积逐步增加(由1990年的1 389 km²增长到2007年的1 559 km²),旱地总量减少(由1990年的865 km²减少到2007年的531 km²),因而导致由土地利用产生的非点源污染负荷TN贡献逐年减少,1990、2000和2007年分别占总量的58.3%、57.9%和48.4%,说明库区的土地利用结构明显改善,防护林体系建设工程有较大成效,库区非点源污染负荷TN主要来源已经从土地转为人畜。库区非点源污染负荷TP主要来源于人类生活的排放,库区人口总数较大,部分区域人口集中,生活中含磷物质的使用对库区TP负荷贡献较大。此外,农业磷肥施用普遍,磷的吸收效率低,再加上水土流失等问题,导致库区旱地对TP贡献也很大。非点源污染TP从1990年到2007年增长幅度较大,人畜数量的增多对库区面源污染影响越来越大。

3 小结

丹江口库区非点源污染TN和TP负荷1990-2007年间总量呈增长趋势,2000年以后增长速度加快,整体非点源污染形势恶化。旱地是库区最大TN和主要的TP负荷来源,1990-2007库区土地利用结构有所改善,旱地减少,林地增多,土地利用对库区非点源污染负荷正在逐年减少。人类生活排放是主要TP负荷来源,人口增长、畜禽养殖业对库区TN、TP负荷贡献现已经超过了土地利用。库区河南省淅川县非点源污染最为严重,该县耕地面积最大,人口数量最多,畜禽养殖发达,应列为重点治理区域。

参考文献

蔡明,李怀恩,庄咏涛,等. 2004. 改进的输出系数法在流域非

- 点源污染负荷估算中应用[J]. 水利学报, (7):40-45.
- 丁晓雯,刘瑞民,沈珍瑶. 2006. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. 北京师范大学学报, 42(5):534-538.
- 郭红岩,王晓蓉,朱建国. 2004. 太湖一级保护区非点源磷污染的定量化研究[J]. 应用生态学报 15:136-140.
- 胡雪涛,陈吉宁. 2002. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 23(3):124-128.
- 刘瑞民,沈珍瑶,丁晓雯,等. 2008. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 27(2):677-682.
- 沈晔昊,张全发,岳超,等. 2006. 南水北调中线水源区土地利用/土地覆被的空间格局[J]. 地理学报, 61(6):633-644.
- 史志华,蔡崇法,丁树文,等. 2002a. 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, 22(4):473-477.
- 史志华,张斌,蔡崇法,等. 2002b. 汉江中下游农业面源污染动态监测信息系统的建立与初步应用[J]. 遥感学报, 6(5):382-386.
- 杨育红,阎百兴. 2010. 中国东北地区非点源污染研究进展[J]. 应用生态学报, 21(3):777-784.
- 张全发,苏荣辉,江明喜,等. 2007. 南水北调工程及其生态安全:优先研究领域[J]. 长江流域资源与环境, 16(2):217-221.
- 庄咏涛. 2002. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D]. 西安:西安理工大学.
- Johnes P J. 1996. 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]. Journal of Hydrology, 183: 323-349.
- Omernik J M. 1976. The influence of land use on stream nutrient levels[R]. New York: USEPA Corvallis, O R.

(责任编辑 杨春艳)

Application of Export Coefficient Model in Simulating Pollution Load of Non-point Source in Danjiangkou Reservoir Area

FANG Nu-fang, SHI Zhi-hua, LI Lu

(Key Lab of Subtropical Agriculture & Environment of Ministry of Agriculture,
Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Danjiangkou Reservoir Area (DRA) is the source of water for the Middle Route Project under the South-to-North Water Transfer Scheme in China. Based on remote sensing images (Landsat TM) in 1990, 2000 and 2007, associated with DEM meteorological data and the corresponding socio-economic data, export coefficient model was used in DRA and parameters were obtained from a pollution model and references. Using this method under ArcGIS, the TN pollution load in this area has a small change from 3.325×10^4 t in 1990 to 3.379×10^4 t in 2000, then it increased to 3.710×10^4 t in 2007; the TP pollution load in the 3 years were 0.167×10^4 t, 0.169×10^4 t and 0.186×10^4 t, respectively. The main source of TN pollution load was dry land, and most of the TP pollution load generated from people produce. Intensity analysis showed region of Xichuan country was the highest non-point source pollution load area, then should be gained more attention in the future.

Key words: export coefficient; non-point source pollution; Danjiangkou Reservoir Area