

崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 129–138.

CUI Chao, LIU Shen, ZHAI Li-mei, et al. Effect of land use/cover changes on nitrogen and phosphorus losses via non-point source pathway in Xiangxi River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 129–138.

香溪河流域土地利用变化过程对非点源氮磷输出的影响

崔超¹, 刘申¹, 翟丽梅^{1*}, 张富林², 刘宏斌¹, 雷秋良¹, 武淑霞¹, 华玲玲¹, 周继文³

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2.湖北省农业科学院植保土肥研究所, 武汉 430064; 3.湖北省兴山县土壤肥料工作站, 湖北 宜昌 443000)

摘要:选取三峡库区香溪河流域(3150 km²), 根据 1990、2000、2010 年 Landsat TM/ETM 遥感影像, 在 ArcGIS 支持下, 应用景观特征分析和氮磷输出系数模型方法, 在分析流域景观格局转变过程的基础上, 研究了土地利用变化对非点源氮磷输出的影响。结果表明: 1990—2000 年土地利用变化较为缓和, 2000—2010 年土地利用转变较为剧烈, 变化面积占到总面积的 4.3%, 为前 10 年变化量占比的 3 倍之多。1990—2000 年和 2000—2010 年, 土地利用转变最为明显的均为林地转旱地和旱地转林地; 从单位时间土地利用变化率来看, 1990—2000 年旱地变化最为剧烈, 2000—2010 年居民地变化最为剧烈; 从土地利用相对动态度来看, 1990—2000 年和 2000—2010 年旱地均最高。1990—2000 年土地利用的变化对非点源总氮(TN)和总磷(TP)输出影响较小, TN 增加 1.57 t·a⁻¹, TP 减少 0.073 t·a⁻¹; 2000—2010 年土地利用的变化显著降低了 TN、TP 的输出量, 净值分别为 78.5、6.1 t·a⁻¹。土地利用转变方式对 TN、TP 的负荷影响不同, 旱地转变为林地时 TN 负荷表现为消减, 林地转变为旱地时 TN 负荷增加; 水田转变为林地时 TP 负荷减少, 旱地转变为水田时 TP 负荷增加。在输出系数与各土地利用类型面积关系的建立中, 使用土地利用状态量变化面积不能真实计算出其对非点源氮磷负荷输出量的影响, 通过土地利用过程量面积的变增才能真实反映土地利用变化导致的非点源氮磷负荷输出量。

关键词: 香溪河流域; 土地利用变化; 非点源; 输出系数; 状态量和过程量

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)01-0129-10 doi:10.11654/jaes.2016.01.018

Effect of land use/cover changes on nitrogen and phosphorus losses via non-point source pathway in Xiangxi River Basin

CUI Chao¹, LIU Shen¹, ZHAI Li-mei^{1*}, ZHANG Fu-lin², LIU Hong-bin¹, LEI Qiu-liang¹, WU Shu-xia¹, HUA Ling-ling¹, ZHOU Ji-wen³

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Institute of Plant Protection, Soil and Fertilizer Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 3. Xingshan Soil and Fertilizer Station of Hubei Province, Yichang 443000, China)

Abstract: Land use changes greatly influence non-point source nitrogen and phosphorus outputs. Here, the effect of land use/cover changes on non-point source outputs of nitrogen and phosphorus was studied based on remote sensing images (Landsat TM/ETM) in 1990, 2000 and 2010 using the methods of characteristics of landscape analysis, export coefficient model, and ArcGIS in the Xiangxi River basin (3150 km²). Land use/cover changes were relatively moderate from 1990 to 2000, but was severe from 2000 to 2010. The area that land uses had changed from one into another between 2000 to 2010 accounted for 4.3% of the total area, which was three times that from 1990 to 2000. During 1990 to 2000 and 2000 to 2010, the greatest land use/cover type changes were from forest land to dry land or from dry land to forest land. The annual change rates of land use/cover was drastic for dryland from 1990 to 2000 while residential land from 2000 to 2010. The biggest dynamic change area of land use/cover changes was dryland for both 1990 to 2000 and 2000 to 2010. During 1990 to 2000, the land

收稿日期: 2015-08-18

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201303089)

作者简介: 崔超(1990—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事流域氮磷养分管理及面源污染控制研究。E-mail: cuichao5212009@163.com

* 通信作者: 翟丽梅 E-mail: zhailimei@caas.cn

use/cover changes had little effect on total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) loads from non-point source. During 2000 to 2010, however, land use/cover changes significantly reduced the loads of TN and TP, which was 78.5 and 6.1 t·a⁻¹ respectively. The contribution of different land use/cover changes to TN and TP loads varied. The reduction of TN load mainly happened when dry land changed to forestland. The conversion from paddy field to forestland decreased TP load, whereas turning dryland to paddy field increased TP load. In the establishment of the quantitative relationship between export coefficients and different land use/cover type area, the land use/cover changes calculated by static area could not reflect its impact on the TN and TP loads, while the land use/cover changes calculated by process area was a good indicator of TN and TP loads.

Keywords: Xiangxi River basin; land use/cover change; non-point source; export coefficient; state and process value

土地利用变化状况是影响全球和区域环境改变的重要指标^[1-2]。非点源污染氮磷负荷输出与土地利用方式密切相关,土地利用变化与水量、水质之间存在非常显著的相关性,土地利用方式转变不仅影响地表径流、基流等水文过程,更影响土壤侵蚀、泥沙以及营养物的运移^[3-5]。不同土地利用类型的变化过程反映了土地利用格局在时间序列上的变化,每种土地利用类型的过程变化包括了时段内过程增长量和过程减少量^[6-7],然而某一土地利用类型状态上的变化,即用 t_1 时刻格局状态量与 t_2 时刻格局状态量的差值并不能很好地反映土地利用类型的转变过程,土地利用动态变化矩阵则能够清晰反映每种土地利用类型 t_1 到 t_2 时段内过程增长量与过程减少量(图1)。土地利用空间信息在时间序列上的动态转变过程,是土地类型转变的内在结果,其过程的转变直接改变了非点源过程量的输出,最终影响非点源状态量的表达。

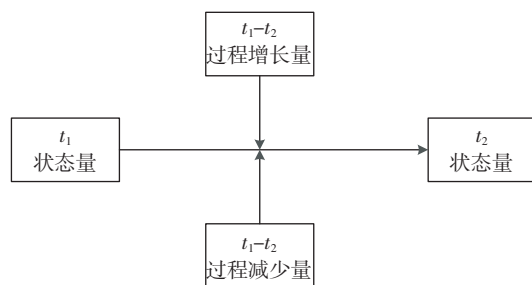


图1 土地利用变化过程量与状态量

Figure 1 Process and state of land use/cover changes

非点源污染的时空不确定性、迁移过程的高度非线性以及过程降解的复杂性等特征^[8-9],增加了其排放量估算、来源解析的难度。根据输出系数模型可以直接建立土地利用与非点源氮磷负荷输出之间的关系,从而避开非点源污染发生的复杂过程,仅根据土地利用现状或变化量估算或预测非点源氮磷负荷输出,该方法简单有效,适合应用于估算缺乏大量监测数据区域非点源氮磷输出负荷。目前大多数研究者^[10-14]只是

通过建立输出系数与土地利用状态量之间的关系,汇算由当年土地利用状态下产生的非点源氮磷输出量,并没有综合考虑土地利用转变过程导致的非点源氮磷输出的响应关系,不能真实反映土地利用变化对非点源氮磷负荷输出的影响。因此,采用土地利用动态变化矩阵,建立输出系数与土地利用净变化量之间的关系,探讨土地利用转变过程对非点源氮磷负荷输出的影响,对流域非点源污染的管控具有重要意义。

本研究基于三峡库区香溪河流域 1990 年、2000 年和 2010 年三个年度遥感解译土地利用数据,运用景观特征分析和氮磷输出系数模型方法,探讨香溪河流域景观格局转变过程和对非点源氮磷负荷输出的影响,进而为三峡库区流域非点源污染的综合治理奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

香溪河流域发源于湖北省宜昌市神农架林区,流域总面积为 3150 km²,干流全长 95 km,途经兴山县(约 78 km)至秭归县,由河口处汇入三峡大坝,是三峡库区坝首的第一大支流。其主要包括高岚河、古夫河和南阳河三大支流,处于上游的南阳河和古夫河在响滩汇流始称香溪,南流 14 km 峡口镇汇高岚河至游家河入秭归境内^[15]。流域属构造地貌,高程 80~3100 m,地形起伏较大,均系高山半高山区(图2)。

香溪河流域是三峡库区典型的农林复合小流域,土地利用类型主要有林地、耕地。土壤类型主要为黄棕壤和石灰土。年均降水量为 900~1200 mm,主要集中在 4—10 月^[16]。流域水土流失较严重,据统计香溪河兴山县范围水土流失面积达 1 122.5 km²,占全县总面积的 61%,年均侵蚀模数为 6488 t·km⁻²,属强度侵蚀区^[16]。

1.2 研究方法

1.2.1 数据来源及处理

研究区土地利用图来自中国科学院资源环境科

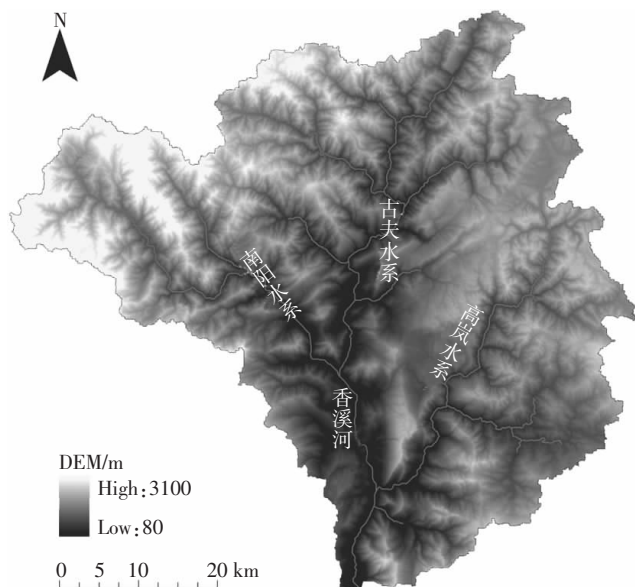


图 2 研究区概况图

Figure 2 Map of studied area

学数据中心, 比例尺为 1:10 万。土地利用图为 1990 年、2000 年和 2010 年各期 Landsat TM/ETM 遥感影像。遥感影像通过人工目视解译生成土地利用信息, 划分水田、旱地、草地、林地、园地、水域和居民地等共 7 种土地利用类型(图 3)。为构建输出系数模型, 通过 ArcGIS 对矢量文件中的土地利用信息栅格化, 栅格规格为 25 m×25 m。土地利用类型面积通过栅格数量及其栅格面积, 汇算所得。

采用 ArcGIS 空间数据分析中叠加分析模块, 对不同年份间, 空间同一点位土地利用类型的栅格属性进行空间信息识别, 确立 1990—2000 年间和 2000—2010 年间土地利用转变的栅格矩阵。

1.2.2 数据分析方法

1.2.2.1 景观动态分析方法

土地的单位时间土地利用变化率是以土地利用类型面积为基础, 关注研究时段内某用地类型面积变化的结果^[18]。其计算公式为:

$$A_i = \frac{S(i, t_2) - S(i, t_1)}{S(i, t_1)} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 种土地类型单位时间土地利用变化率; 当 t 的单位设定为年时, 模型结果表示该土地利用类型的年变化率。

单一动态度可直观地反映某一土地利用类型相对本身的变化剧烈程度与速度, 也易于通过类型间的比较反映不同类型间变化的差异。为了反映各土地利用类型的变化在区域变化中的贡献大小, 衡量某土地类型的变化是否成为区域土地变化的主要类型, 引进土地相对动

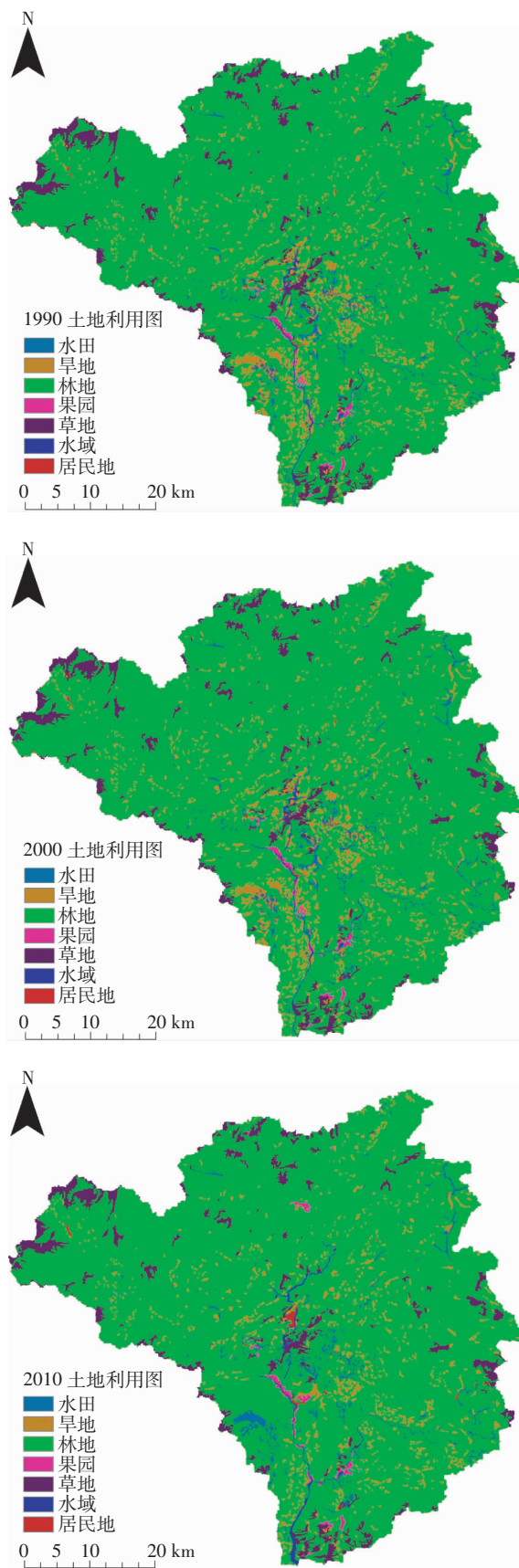


图 3 1990、2000、2010 年土地利用现状图

Figure 3 Land use/cover in 1990, 2000, and 2010

态度概念来表示土地利用的变化速率。其计算公式为:

$$B_i=A_i\times P_i \tag{2}$$

式中: B_i 为第*i*种土地利用相对动态度; P_i 为研究初期第*i*类用地类型占研究区土地总面积的比率。

土地相对动态度的值越大,表明该用地类型的变化在研究区变化中的贡献越大。

1.2.2.2 非点源污染排放分析方法

输出系数模型^[11]表达式:

$$L_j=\sum_{i=1}^n E_{ij}A_i \tag{3}$$

式中: L_j 为污染物*j*在该流域的总负荷量, $\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$; n 为流域中土地利用类型的种类; 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, $\text{kg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; A_i 为第*i*种土地利用类型的面积, km^2 。

1.2.3 输出系数选取

非点源污染的形成主要受流域地形、气候、水文、土地利用类型、农田管理措施、人类活动等因素的影响,因此,合理输出系数的确定是输出系数模型构建的关键。鉴于国内许多研究人员已用输出系数模型做了大量研究^[9-13],方法及系数的确立已相对成熟。考虑到丹江口水库研究区水文、气候、地理位置、植被覆盖等多因素与本研究较接近,引用前人研究使用过的输出系数^[11](表 1)。

2 结果与分析

2.1 不同年度土地利用类型结构及空间变化特征

从三个年份土地利用状况来看(图 4),香溪河流域主要土地利用类型为林地,三个年度均占 85%以上;耕地(水田、旱地)和园地面积小,不足流域总面积的 8%。1990—2000 年 10 年间各土地利用类型的面积基本保持不变。2000—2010 年土地利用变化明显,果园、水域、居民地增长最多,分别为 39.7%、91.7%和

表 1 各土地利用类型输出系数

Table 1 Export coefficients of various land use/cover types

土地类型	输出系数/ $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$	
	TN	TP
水田	2.625	1.820
旱地	1.921	0.079
林地	0.655	0.018
草地	1.135	0.038
园地	1.234	0.098
居民地	0.636	0.036
水域	0	0

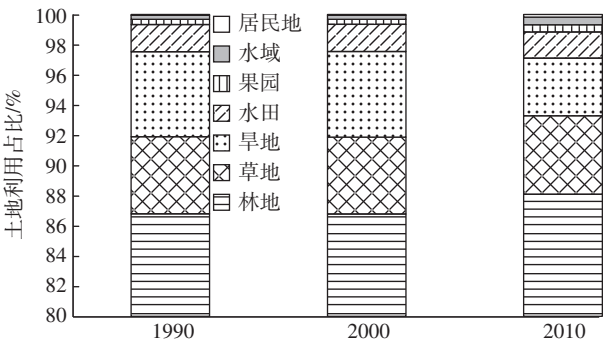


图 4 1990 年、2000 年和 2010 年各土地利用类型占比情况

Figure 4 Percentages of various land use/cover types in 1990, 2000 and 2010

251.0%;水田和旱地分别减少 2.8%和 32.9%。

由 1990—2000 年香溪河流域土地利用转移矩阵得出(表 2),土地转变面积较小,约占总量的 1.4%。林地和旱地转变数量最多,分别占变化总量的 47.3%和 30.8%;水域、旱地和水田参与其他土地利用转变率最高,转变量分别占 1990 年水域、旱地和水田的 8.3%、7.5%和 6.1%。在转变过程中,水田主要转变为旱地和林地;旱地主要转变为林地、草地和水田;林地主要转变为旱地、草地和水田。

表 2 1990—2000 年香溪河流域土地利用转移矩阵(km^2)

Table 2 Transfer matrix of land use/cover in Xiangxi River basin from 1990 to 2000(km^2)

土地利用类型	水田	旱地	林地	果园	草地	水域	居民地	1990 年合计
水田	53.12	0.73	2.60	0.01	0.049	0.07	0.014	56.59
旱地	0.62	164.07	11.72	0.14	0.64	0.11	0.006	177.31
林地	2.59	13.28	2 712.87	0.26	3.83	0.31	0.065	2 733.20
果园	0.025	0.14	0.25	10.32	0.029	0.11	0.00	10.87
草地	0.061	0.34	4.13	0.014	156.01	0.035	0.00	160.59
水域	0.086	0.083	0.41	0.092	0.029	7.72	0.003	8.42
居民地	0.008	0.014	0.06	0.00	0.00	0.008	1.40	1.49
2000 年合计	56.51	178.66	2 732.03	10.84	160.59	8.36	1.49	

据2000—2010年香溪河流域土地利用转移矩阵来看(表3),土地利用变化更加剧烈,变化量占总量的4.3%,为前10年的3倍之多。林地和旱地依然变化最大,分别占变化总量的57.1%和26.4%;水田和旱地转变率最高,转变量分别占2000年水田和旱地总量的24.4%和43.7%。转变过程中,水田主要转变为旱地和林地;旱地主要变为林地、水田;林地主要变为旱地和水域。

2.2 不同时间段景观变化动态度特征

通过表4和表5可知,2000—2010年较1990—2000年变化剧烈程度增加,净变化量最明显的均为

林地和旱地。从单位时间土地利用变化率来看,1990—2000年流域变化最为剧烈的是旱地,变化率为0.076%;2000—2010年为居民地,变化率为25.1%。其中,水域单位时间土地利用变化率,均位居第二,说明水域面积呈不断扩大趋势。从土地利用相对动态度来看,1990—2000年和2000—2010年旱地的相对动态度均最高,分别为0.0043%和-0.1860%,说明旱地的对流域土地利用变化量最大。

2.3 土地利用变化对非点源排放的影响

2.3.1 不同年度土地利用变化对氮磷排放的影响

从表6来看,整个流域由土地利用变化所造成的

表3 2000—2010年香溪河流域土地利用转移矩阵(km²)

Table 3 Transfer matrix of land use/cover in Xiangxi River basin from 2000 to 2010(km²)

土地利用类型	水田	旱地	林地	果园	草地	水域	居民地	2000年合计
水田	42.71	3.37	7.92	0.67	0.245	0.86	0.72	56.51
旱地	7.92	100.52	63.09	1.86	3.00	0.79	1.48	178.66
林地	4.08	15.52	2 695.89	3.21	5.26	6.67	1.40	2 732.03
果园	0.01	0.039	1.71	8.98	0.017	0.091	0.00	10.84
草地	0.17	0.22	4.20	0.33	155.16	0.43	0.088	160.59
水域	0.048	0.26	0.59	0.096	0.02	7.04	0.30	8.36
居民地	0.001	0.011	0.10	0.00	0.00	0.14	1.23	1.49
2010年合计	54.94	119.95	2 773.50	15.15	163.7	16.02	5.22	

表4 1990—2000年各土地利用类型土地动态度分析

Table 4 Land dynamic analysis of various land use/cover types from 1990 to 2000

土地利用类型	1990年 初始面积/km ²	2000年 转出部分/km ²	2000年 转入部分/km ²	净变化量/ km ²	单位时间土地利用 变化率/%	土地利用 相对动态度/%
水田	56.59	3.47	3.39	-0.08	-0.014	-0.0003
旱地	177.31	13.24	14.59	1.35	0.076	0.0043
林地	2 733.2	20.33	19.16	-1.17	-0.004	-0.0037
果园	10.87	0.55	0.52	-0.03	-0.028	-0.0010
草地	160.59	4.58	4.582	0.002	0.000	0.0000
水域	8.42	0.7	0.64	-0.06	-0.071	-0.0002
居民地	1.49	0.09	0.09	0.00	0.000	0.0000

表5 2000—2010年各土地利用类型土地动态度分析

Table 5 Land dynamic analysis of various land use/cover types from 2000 to 2010

土地利用类型	2000年 初始面积/km ²	2010年 转出部分/km ²	2010年 转入部分/km ²	净变化量/ km ²	单位时间土地利用 变化率/%	土地利用 相对动态度/%
水田	56.51	13.8	12.23	-1.57	-0.278	-0.0050
旱地	178.66	78.14	19.43	-58.71	-3.286	-0.1860
林地	2 732.03	36.14	77.61	41.47	0.152	0.1320
果园	10.84	1.87	6.17	4.3	3.967	0.0140
草地	160.59	5.43	8.54	3.11	0.194	0.0100
水域	8.36	1.32	8.98	7.66	9.162	0.0240
居民地	1.49	0.25	3.99	3.74	25.10	0.0120

表 6 1990、2000、2010 年各土地利用类型状态量
输出负荷($t \cdot a^{-1}$)

Table 6 State output loads of various land use/cover types in
1990, 2000 and 2010($t \cdot a^{-1}$)

1990		2000		2010	
TN	TP	TN	TP	TN	TP
2 476.1	173.4	2 477.7	173.3	2 399.0	167.2

非点源 TN 和 TP 负荷从 20 世纪 80 年代末期到 2000 年,变化基本维持平稳,TN 略增,TP 略减,净量分别为 1.57 、 $-0.073 t \cdot a^{-1}$ 。从 2000 年到 2010 年 TN、TP 负荷变化显著(均减小),净值分别为 -78.5 、 $-6.1 t \cdot a^{-1}$ 。

各土地利用类型转变导致的非点源氮磷状态量,是根据不同土地利用类型最终状态面积与输出系数之间的关系计算得出(表 7)。从非点源氮磷状态量输出来看,1990—2000 年氮磷的增加量和减少量基本维持平衡,2000—2010 年非点源氮磷输出总量减少,且 TN 减少更为明显。2000—2010 年与 1990—2000 年相比,氮磷输出变化更为剧烈。从 TN 和 TP 来看,旱地减少量最大,分别减少了 112.8 、 $4.64 t \cdot a^{-1}$;林地增加量最大,增加量分别为 27.2 、 $0.75 t \cdot a^{-1}$;水域对 TN、TP 输出无影响。

非点源氮磷过程输出量,是通过采用土地利用动态变化矩阵,建立相对系数(两土地利用类型输出系数差)与土地利用净变化量之间的关系计算得出(表 8),能够反映不同土地利用类型转变所隐含的内部非点源氮磷负荷输出状况。从过程量来看,1990—2000 年和 2000—2010 年氮磷变化量最大的土地利用类型

均为水田、旱地、林地。其中,水田 TN、TP 均减少,2000—2010 年与 1990—2000 年相比,TN、TP 减少量均增加了 3 倍以上;旱地中 TN 持续减少,从 $-15.2 t \cdot a^{-1}$ 到 $-81.3 t \cdot a^{-1}$,增加 5 倍以上,TP 持续增多,从 $0.32 t \cdot a^{-1}$ 到 $9.73 t \cdot a^{-1}$,增加了 30 倍;林地在两个年度氮磷输出量均增加,且过程量增加在年度间变化相对缓和,TN 为 23.7 、 $27.7 t \cdot a^{-1}$,TP 为 5.57 、 $8.56 t \cdot a^{-1}$ 。

2.3.2 土地利用变化过程对氮磷排放的影响特征

图 5 详细表述了 1990—2000 年和 2000—2010 年两个年限周期,某一土地利用类型在其他土地利用转变为现有土地利用类型和现有土地利用转变为其他土地利用过程变化中,在该土地利用类型上所发生的非点源氮磷负荷的过程净量。正轴表示对某土地利用与其他不同土地利用间参与转变过程,并起到增加氮磷负荷作用的输出净量;负轴表示对某土地利用与其他不同土地利用参与转变过程,并起到消减氮磷负荷作用的输出净量。1990—2000 年各土地利用变化间 TN、TP 负荷净量输出总体相对缓和,林地、旱地、水田的土地利用动态变化对 TN 负荷的贡献较大,水田、林地对 TP 负荷的贡献较大;2000—2010 年较 1990—2000 年,由土地类型转变所导致的 TN、TP 负荷净量变化更为剧烈,对 TN 负荷贡献较大的土地利用方式为旱地、林地、水田,TP 主要是水田、旱地、林地。

从各土地利用转变方式对 TN、TP 的负荷贡献来看,不同土地利用转变对总量增长、消减的贡献能力不同。1990—2000 年水田转变为林地、旱地转变为林

表 7 各土地利用转变氮磷状态量汇算表($t \cdot a^{-1}$)

Table 7 Amount of nitrogen and phosphorous status from various land use/cover transformation($t \cdot a^{-1}$)

年份	污染物	土地利用类型							合计
		水田	旱地	林地	园地	草地	水域	居民地	
1990—2000	TN	-0.224	2.599	-0.770	-0.037	0.002	0.000	-0.001	1.567
	TP	-0.155	0.107	-0.022	-0.003	0.000	0.000	0.000	-0.073
2000—2010	TN	-4.120	-112.788	27.165	5.309	3.528	0.000	2.374	-78.584
	TP	-2.857	-4.638	0.747	0.421	0.119	0.000	0.134	-6.074

表 8 各土地利用转变氮磷过程量汇算表($t \cdot a^{-1}$)

Table 8 Amount of nitrogen and phosphorous from various land use/cover transformation by process($t \cdot a^{-1}$)

年份	污染物	土地利用类型							合计
		水田	旱地	林地	果园	草地	水域	居民地	
1990—2000	TN	-5.936	-15.228	23.707	-0.148	-1.657	0.799	0.031	1.567
	TP	-6.211	0.324	5.571	0.008	0.040	0.180	0.014	-0.073
2000—2010	TN	-22.976	-81.345	27.672	-1.063	-2.151	1.350	-0.069	-78.584
	TP	-24.598	9.732	8.563	-0.130	0.224	0.139	-0.004	-6.074

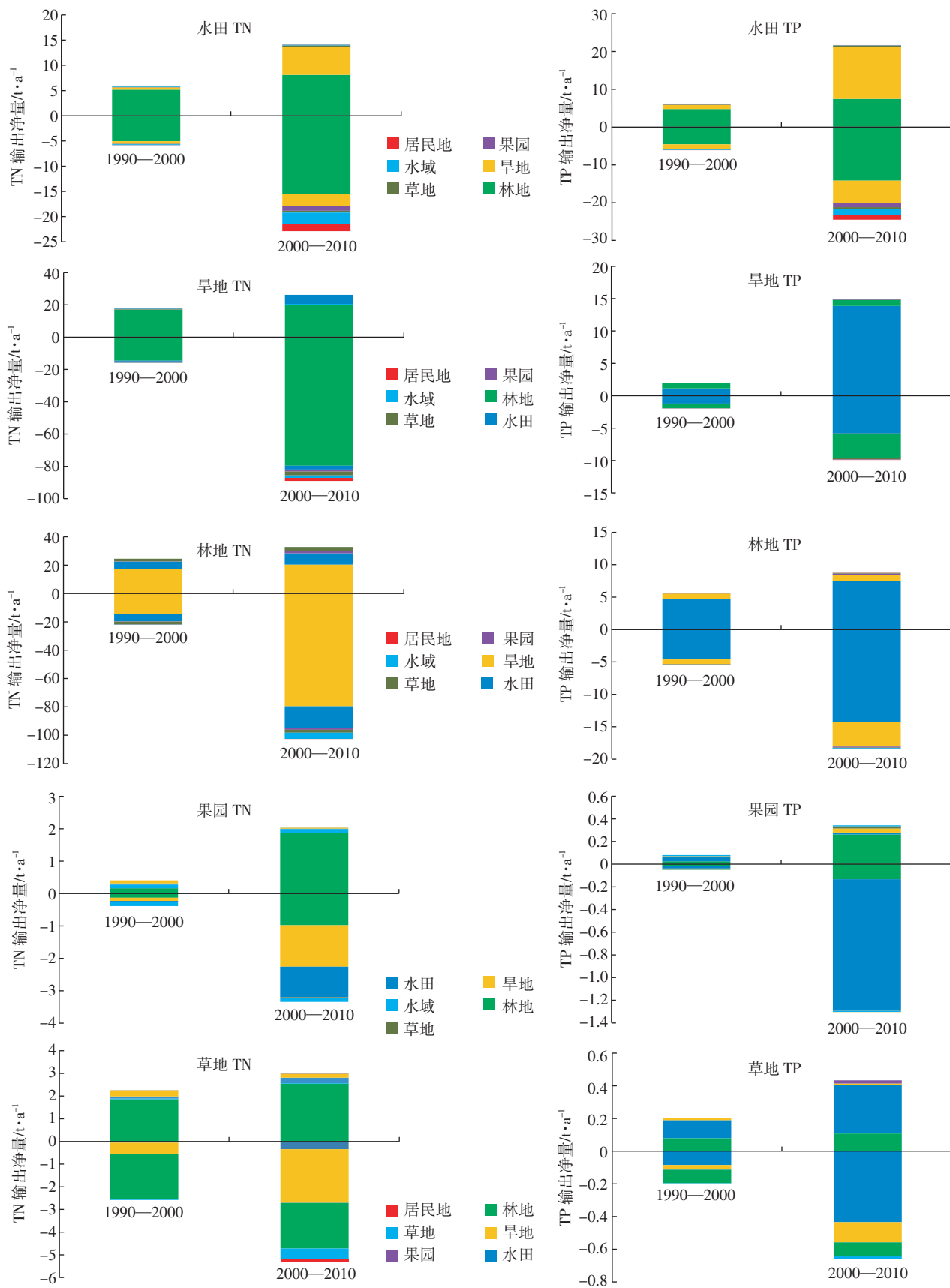
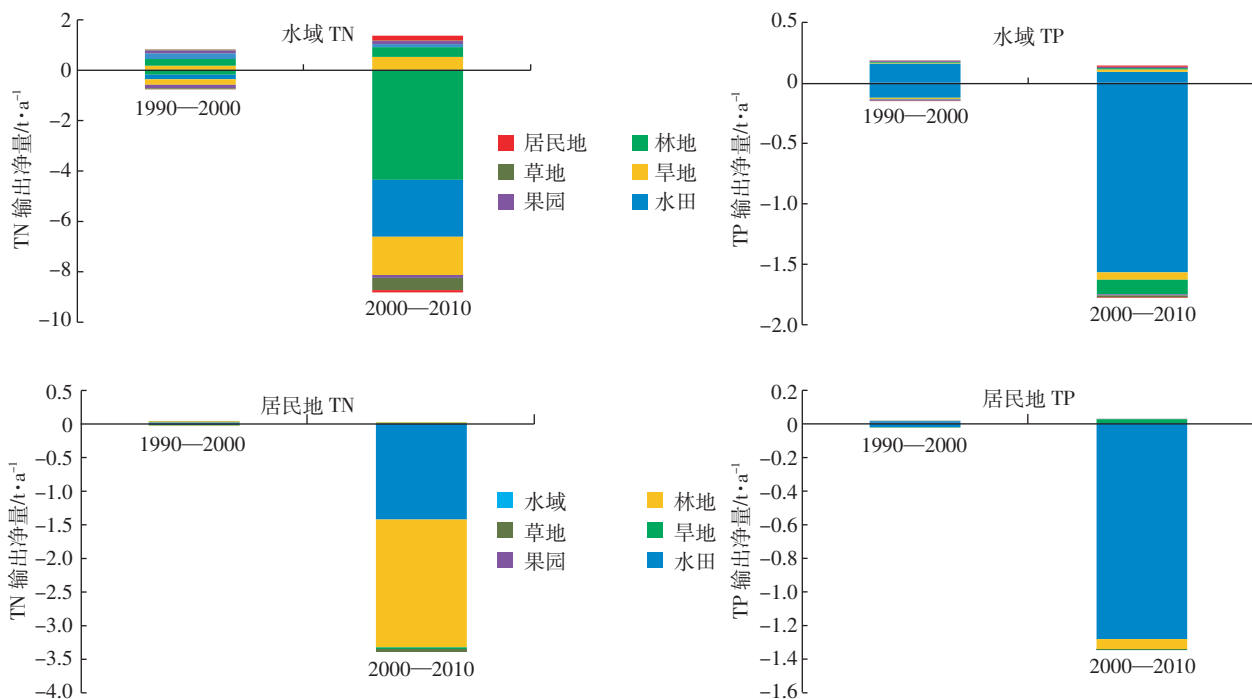


图 5 各土地利用过程量转变 TN、TP 输出净量结构图

Figure 5 Structure chart for land use/cover change effects on TN and TP net losses by process



续图5 各土地利用过程量转变 TN、TP 输出净量结构图

Continue figure 5 Structure chart for land use/cover change effects on TN and TP net losses by process

地时对 TN 主要表现为消减,林地转变旱地、林地转变水田时 TN 负荷增加;而对 TP 负荷而言,水田转变林地、水田转变旱地表现为消减,而林地转变水田、旱地转变水田表现为增加。2000—2010 年内部土地利用转换间对氮磷负荷贡献量相比 1990—2000 年变化更加剧烈,起主要负荷贡献作用的土地转化方式与 1990—2000 年的类似。旱地转变林地、水田转变林地对 TN 负荷表现为消减,林地转变旱地、林地转变水田、旱地转变水田时表现为增加;对 TP 来说,水田转变林地、水田转变旱地、旱地转变林地时表现为消减,旱地转变水田、林地转变水田时表现为增加。

3 讨论

3.1 土地利用景观格局变化特点及成因

本文通过香溪河流域土地利用结构、景观动态变化、空间转移分析得出,20 年间,2000—2010 年土地利用变化最为剧烈,林地、旱地净量变化最大,居民地单位时间土地利用变化率最高,旱地的相对动态度最大。整个流域 1990—2000 年退耕还林、毁林复垦和水域扩增面积分别为 14.6、16.1、0.6 km²,2000—2010 年分别为 72.7、22.8、8.9 km²,20 年间退耕还林、水域扩增显著。

分析发生以上景观格局转变特点的成因,主要为

三峡大坝 1993 年开始修建,2009 年正式完工^[19],2000 年之前为大坝建设前期,土地格局变化小,2000 年以后随着大坝建设工程的推进,大坝蓄水后主要支流形成库湾,水域面积扩增,流域周边肥沃的农田被淹没,据统计^[19]三峡库区大约有 240 km² 农用地被淹没,加之大量河谷居民迁移,新的农用地急需开垦,人地矛盾日益凸显^[20],且国家 1999 年开始试点“退耕还林”政策落实,2003 年正式颁布了《退耕还林条例》,退耕还林进入全面依法实施的阶段,生态退耕减少的耕地主要为坡耕地,且主要分布在坡度大于 25° 的丘陵地区^[7]。以上复杂原因造成香溪河流域土地利用转变格局加剧。

3.2 土地利用变化对非点源氮磷输出的影响

在非点源氮磷负荷估算上,由英国学者 Johns 等^[21]提出的输出系数模型为非机理的“黑箱”模型,基于数据要求简单、氮磷负荷估算高效等优势,被国内学者广泛应用,其最大的缺陷在于忽略了水文过程对污染物的自净功能。该模型在国内的应用中,研究者更多是针对其影响因素带来的不确定性进行优化^[22-23],提高输出系数模型负荷估算的准确性。

刘瑞民等^[10]运用输出系数模型,根据 1970 年、1980 年、1990 年和 2000 年土地利用状态量,对长江上游的各土地利用导致的非点源氮磷负荷进行了估

算;方怒放等^[11]以1990、2000、2007年遥感影像解译的土地利用图为基础,使用其三期土地利用状态量,运用输出系数模型对库区非点源污染进行空间模拟。但是研究者只是通过建立输出系数与土地利用面积状态量之间的关系,汇算不同土地利用引起的非点源氮磷负荷输出量,并没有考虑不同年份间各土地利用转化过程发生的实际非点源氮磷输出量。从实际情况来看,各土地利用面积状态量的变增并不能真实反映出其对非点源氮磷负荷输出的影响,汇算不同时间下土地利用过程的变化量才能使用输出系数模型准确计算出各土地利用转变的实际非点源氮磷发生量。从土地利用面积状态量和过程量所产生的非点源氮磷负荷汇总结果看出,由各土地利用变化导致的非点源氮磷输出总量相同:1990—2000年TN、TP分别为 1.567 、 $-0.073 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$;2000—2010年分别为 -78.584 、 $-6.074 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。但各土地利用类型在状态量和过程量下的非点源氮磷负荷输出在贡献方向和贡献量上均表现出显著差异,各土地利用类型实际的非点源氮磷负荷输出量并不是其两状态量汇算结果之差。在土地利用状态量的变化中,水域的非点源氮磷输出显示为零,但在实际的变化中水域也参与了向其他土地利用转化的过程,对非点源氮磷负荷的输出量不应该为零;在林地状态量的变化中,结果显示1990—2000年非点源氮磷净输出负荷减少,2000—2010年表现为增加,且2000—2010年较1990—2000年变化更为显著。但从过程量汇算结果来看,林地在两个时段均对非点源氮磷负荷输出表现增加,且变化量差异较小,变化剧烈程度相当。

4 结论

1990—2000年不同土地利用类型间转变相对缓和,2000—2010年土地利用间转变较为剧烈,空间位置变化量为前10年变化量占比的3倍之多,土地利用转变主要发生在林地、旱地、水田、水域之间。由于土地利用所造成的非点源TN、TP从1990到2010年基本上呈逐渐下降的趋势,这种变化趋势和土地利用变化紧密相关。在输出系数与各土地利用类型面积关系的建立中,使用土地利用状态量变化面积不能真实计算出其对非点源氮磷负荷输出量,通过土地利用过程量面积的变增才能真实反映出土地利用变化导致的非点源氮磷负荷输出量。因此,讨论土地利用时间序列上的动态演变对非点源氮磷负荷输出的影响,应使用各土地利用转变过程发生量换算各土地利用变

化导致的非点源氮磷负荷输出量。

参考文献:

- [1] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 3(4):385-390.
- [2] Lindquist E J, Hansen M C, Roy D P, et al. The suitability of decadal image data sets for mapping tropical forest cover change in the Democratic Republic of Congo: Implications for the global land survey[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(23-24):7269-7275.
- [3] Lin Y P, Hong N M, Wu P J, et al. Impacts of land use change scenarios on hydrology and land use patterns in the Wu-Tu watershed in Northern Taiwan[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80:111-126.
- [4] Bieger K, Hörmann G, Fohrer N. The impact of land use change in the Xiangxi Catchment (China) on water balance and sediment transport[J]. *Regional Environmental Change*, 2015, 15:485-498.
- [5] 王秀娟,刘瑞民,宫永伟,等. 香溪河流域土地利用格局演变对非点源污染的影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(5):1194-1200.
WANG Xiu-juan, LIU Rui-min, GONG Yong-wei, et al. Simulation of the effect of land use/cover change on non-point source pollution load in Xiangxi River watershed[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(5):1194-1200.
- [6] 赵安玖,胡庭兴,罗龙海,等. 典型退耕还林区景观格局变化特征[J]. 林业资源管理, 2008, 12(6):85-91.
ZHAO An-jiu, HU Ting-xing, LUO Long-hai, et al. Characteristics of landscape pattern changes in typical region of cropland conversion to forest land[J]. *Forest Resources Management*, 2008, 12(6):85-91.
- [7] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 2014, 69(1):3-14.
LIU Ji-yuan, KUANG Wen-hui, ZHANG Zeng-xiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1):3-14.
- [8] 张召喜. 基于SWAT模型的风羽河流域农业面源污染特征研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
ZHANG Zhao-xi. Study on characteristics of agricultural non-point source pollution in Fengyu River Basin based on SWAT model[D]. Beijing: the Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [9] 李文超. 凤羽河流域农业面源污染负荷估算及关键区识别研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
LI Wen-chao. Evaluating the loads of agricultural non-point source pollution and identifying critical source areas in Fengyu Basin[D]. Beijing: the Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [10] 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.
LIU Rui-min, YANG Zhi-feng, DING Xiao-wen, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-Point source in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(12):2407-2414.
- [11] 方怒放,史志华,李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4):7-12.
FANG Nu-fang, SHI Zhi-hua, LI Lu. Application of export coefficient

- model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou Reservoir Area[J]. *Journal of Hydroecology*, 2011, 32(4):7-12.
- [12] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(3):574-581.
- LONG Tian-yu, LIANG Chang-de, LI Ji-cheng, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(3):574-581.
- [13] 张立坤, 香宝, 胡钰, 等. 基于输出系数模型的呼兰河流域非点源污染输出风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1):148-154.
- ZHANG Li-kun, XIANG Bao, HU Yu, et al. Risk Assessment of non-point source pollution in Hulan River Basin using an output coefficient model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1):148-154.
- [14] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 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*, 2008, 27(2):677-682.
- LIU Rui-min, SHEN Zhen-yao, DING Xiao-wen, et al. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):677-682.
- [15] 崔超, 刘申, 翟丽梅, 等. 兴山县香溪河流域农业源氮磷排放估算及时空特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(5):937-946.
- CUI Chao, LIU Shen, ZHAI Li-mei, et al. Estimation of agricultural non-point sources of nitrogen and phosphorus discharges in Xiangxi River Basin based on pollutant discharge coefficient approach and analysis of their temporal and spatial characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):937-946.
- [16] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(8):990-996.
- SONG Lin-xu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin. Experimental study on non-point source nutrient output from Xiangxi Basin in Three Gorges Reservoir[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(8):990-996.
- [17] 张超. 非点源污染模型研究及其在香溪河流域的应用[D]. 北京:清华大学, 2008.
- ZHANG Chao. Distributed non-point sources pollution modeling and its application in Xiangxi watershed[D]. Beijing:Tsinghua University, 2008.
- [18] 施志国. 涪源县土地利用景观格局变化研究[D]. 北京:北京林业大学, 2009.
- SHI Zhi-guo. Study on the dynamic changes of land use and landscape pattern in Guyuan County[D]. Beijing:Beijing Forestry University, 2009.
- [19] Zhang J X, Liu Z J, Sun X X. Changing landscape in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River from 1977 to 2005:Land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2009(6):403-412.
- [20] 徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏. 三峡库区 1980—2005 年农业用地氮平衡时空变化研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(8):2228-2233.
- XU Xi-bao, YANG Gui-shan, LI Heng-peng. Spatiotemporal changes of nitrogen balance in 1980—2005 for agricultural land in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(8):2228-2233.
- [21] 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]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183:323-349.
- [22] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004(7):40-45.
- CAI Ming, LI Huai-en, ZHUANG Yong-tao. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(7):40-45.
- [23] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(2):306-309.
- DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao, LIU Rui-min, et al. Improved export coefficient model considering precipitation as well as terrain and its accuracy analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(2):306-309.