

基于流域单元的营养盐输出与景观异质性影响研究

李兆富¹, 刘红玉², 李恒鹏³, 王晓旭¹, 刘焕金¹, 邬明伟¹

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘要: 选择太湖上游西苕溪流域, 利用 GIS、RS 及景观生态方法进行小流域划分和流域景观异质性分析, 基于改进的输出系数模型估算小流域营养盐输出, 并对流域单元主要景观类型空间异质性及多样性指数与营养盐输出的关系进行了分析。结果表明, 西苕溪各小流域 TN、TP 输出强度变化范围分别为 3.01 ~ 15.44 kg/(hm²·a) 与 0.049 ~ 0.355 kg/(hm²·a), 营养盐输出水平空间差异性明显; 小流域单元优势景观类型与营养盐输出关系明显, 小流域林地面积增加 10%, TN、TP 输出强度分别降低 0.203 1、0.015 2 kg/(hm²·a); 小流域耕地面积增加 10%, TN、TP 输出强度分别增加 0.572 6、0.027 3 kg/(hm²·a); 西苕溪小流域景观多样性指数与氮磷输出水平关系呈二次多项式关系, 营养盐输出强度随着 SHDI 增大而增大, 当 SHDI 为 1.5 时, 输出强度达到最大值, 然后随着 SHDI 增大而降低。研究结果将为流域非点源污染治理提供参考。

关键词: 营养盐; 输出强度; 景观异质性; 流域; 西苕溪

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2029-07

Impacts on Nutrient Export by Landscape Heterogeneity Based on Sub-watershed

LI Zhao-fu¹, LIU Hong-yu², LI Heng-peng³, WANG Xiao-xu¹, LIU Huan-jin¹, WU Ming-wei¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. College of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China; 3. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Landscape features of a watershed are important factors affecting non-point source (NPS) pollution. Sub-watershed bounds were delineated and landscape heterogeneity was analyzed based on GIS and RS in Xitiao River watershed which located the upper reach of Taihu Lake area. Nutrient export intensity of sub-watersheds was estimated by revised export coefficient model. Then the relationships between nutrient export and main landscape types, as well as Shannon diversity index (SHDI) in sub-watershed units were analyzed. Results show, TN and TP export intensity have obvious spatial difference, which changed from 3.01 kg/(hm²·a) to 15.44 kg/(hm²·a) and 0.049 kg/(hm²·a) to 0.355 kg/(hm²·a) respectively. The dominated landscape types including cultivated land and forest land quantitatively related with nutrient export intensity. TN and TP export intensity will decrease 0.203 1 kg/(hm²·a) and 0.015 2 kg/(hm²·a) respectively with 10% increased of forest area, and will increase 0.572 6 kg/(hm²·a) and 0.027 3 kg/(hm²·a) with 10% increased of cultivated land area. The relationship between nutrient export intensity and SHDI exhibited second-degree polynomial, export intensity increased by SHDI increasing and to maximum when SHDI equals 1.5, then decreased with SHDI increasing. This research results will provide an important reference value for NPS management.

Key words: nutrient; export intensity; landscape heterogeneity; watershed; Xitiao River

由于非点源污染来源的复杂性、机制的模糊性和形成的潜伏性, 在研究和控制非点源污染方面具有较大的难度^[1], 作为非点源污染重要形式之一的氮磷营养盐输出研究日益受到关注^[2]。已经有研究表明, 景观空间异质性对水环境具有明显的影响^[3]。河流、湖泊等受纳水体的水质与流域景观要素构成及其与空间异质性结构具有密切的关系^[4,5]。流域内景观异质性是引起生态及水文条件的空间差异, 进而影响河流、湖泊的污染物输入负荷的重要原因^[6,7]。深刻理解景观空间异质性特征与地表水质之间的关系, 将为预测流域污染潜力、开展流域综合管理、削减污染风险提供重要的信息。

近年来, 许多研究显示了流域景观结构与格局对河流营养盐浓度变化具有显著的影响^[8~13]。Susanna 等^[11]研究了俄亥俄州的土地利用对水文的影响, 并发现土地利用/覆被类型与河流水质之间关系明显, 尤其是对于氮和磷输出具有重要贡献。Kloiber^[12]构建了明尼苏达州的双城都市区的非点

收稿日期: 2009-11-01; 修订日期: 2010-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(40701174, 40771089); 江苏省自然科学基金项目(SBK200920953); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目(2008SKL009); 南京农业大学青年科技创新基金项目(KJ07007)

作者简介: 李兆富(1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为流域非点源污染、资源利用与环境效应, E-mail: lizhaofu@njau.edu.cn

源污染产出与景观特征的回归模型,预测该区域进入密西西比河的营养盐和悬浮物等非点源污染贡献. Xiao 等^[13]对景观特征与非点源关系研究表明,景观特征能解释 77% 的水质变量指标,单一景观要素,如比例能用来预测水质.由此可见,流域特征与河流水质的关系是非点源污染研究的重要领域,而且国外已有不少研究进行了景观与水质模型分析^[14],但国内基于流域单元的景观特征与非点源污染研究工作较少^[15-17].本研究选择太湖上游地区的西苕溪流域,通过小流域单元景观特征识别及流域营养盐输出模型估算,对各个小流域单元的景观异质性与营养盐输出关系进行分析,以期为流域景观规划和水环境保护提供科学参考依据.

1 研究区概况

西苕溪流域位于浙江省北部的湖州市境内,太湖流域的西南部,东经 $119^{\circ}14' \sim 120^{\circ}29'$ 与北纬 $30^{\circ}23' \sim 31^{\circ}11'$ 之间(图 1).西苕溪干流总长约 157 km,流域面积约 $2\,350\text{ km}^2$,约占整个太湖流域($36\,500\text{ km}^2$)的 6%,但流域多年平均径流量大,是太湖流域重要的来水支流之一.流域地势西南高、东北低,依次呈山地、丘陵、平原的梯度分布,是一个界限相对完整封闭的流域.西苕溪流域属亚热带季风气候,加之地势相对较高,降雨径流时空差异较大^[18].红壤与黄红壤为流域地带性土壤,土地利用类型以林地和耕地为主,两者的面积占整个流域的 90% 以上.西苕溪水质监测与分析表明,以氮、磷污染为主要形式的非点源污染是影响西苕溪水质的重要因素,其主要非点源是农田、经济竹林和城镇径流及居民生活污水等^[19],这是西苕溪流域非点源污染研究及治理的重点.

2 研究方法

2.1 西苕溪小流域单元划分

本研究采用 ArcGIS 的空间分析及其水文分析工具对西苕溪流域进行小流域单元划分.首先对西苕溪流域 1:50 000 地形图数字化,利用 ArcGIS 的空间分析工具将矢量化的高程点与等高线插值生成不规则三角网(TIN),再转换为单元大小为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的栅格数据.然后,利用 ArcGIS 的水文分析功能,通过填充洼地、计算水流方向以及流水累积量,进一步划分子流域.在进行流域提取时本研究设定流域的最小栅格数为 10 000,把西苕溪流域自动划分为 130 个小流域.由于计算结果与实际流域情况存在

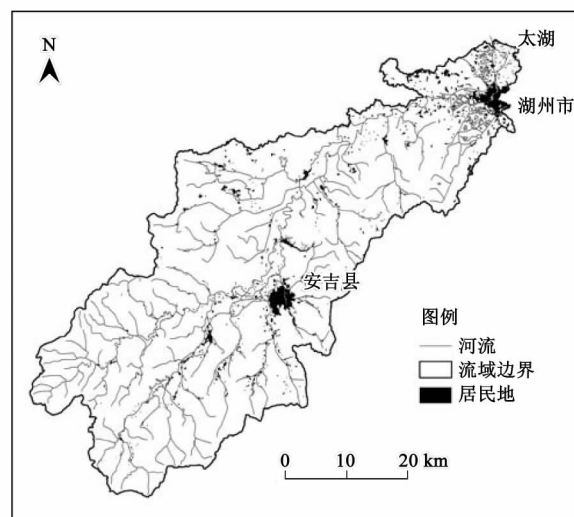


图 1 西苕溪流域地理位置

Fig. 1 Location of Xitiao River watershed

一定误差,而且有的流域面积很小,需要进行合并,因此参考西苕溪流域水系图对自动划分的小流域单元进行人为干预修改,最终把西苕溪流域划分为面积从 $2.5 \sim 101.7\text{ km}^2$ 不等的 108 个小流域单元,以用于进一步分析各小流域单元景观特征及营养盐输出水平.

2.2 小流域单元营养盐输出估算

利用改进的输出系数模型及 ArcGIS 空间分析工具估算各小流域营养盐输出水平.输出系数模型是基于非点源污染负荷来源于流域内各种土地利用类型的产出总和的理论提出的^[20],随着输出系数模型的广泛应用^[21-23],许多学者通过全面考虑与输出系数分类密切相关的污染物来源^[24],以及增加对污染物在流域传输过程中的损失及降雨年际变化对污染物输出影响的考虑^[25],对其进行了改进与发展,但仍有不少不足之处.本研究将输出系数模型与地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术相结合,将原本属于经验统计模型的输出系数模型融入地理信息系统空间分析运算,改进成半分布式模型,经验证改进的输出系数模型精度有所提高,能较好地适用于西苕溪流域营养盐输出估算^[26].分别计算出西苕溪 108 个小流域单元 2004 年 TN、TP 的输出负荷及输出强度(单位面积输出负荷).

2.3 流域单元景观结构空间异质性分析

首先对西苕溪流域 2004 年 Spot5 的 10 m 分辨率多光谱影像数据,参考 1:5 万地形图进行几何纠正,再利用人机交互目视解译的方法获得西苕溪流域的土地利用景观数据,并对遥感影像的分类结

果进行精度检验,表明分类结果可信.同时,参考全国区域委员会 1985 年公布的土地利用分类标准,结合西苕溪流域土地利用的特点,将该区景观类型分类为耕地、林地、园地、草地、水域、居民建设用地(城镇居民及工矿用地)等 6 种.利用 ArcGIS 空间分析功能,与划分的小流域单元边界叠加分区统计,计算得到各小流域单元景观类型数据.

流域单元景观结构特征可以用很多指标衡量表达.本研究主要采用各流域单元主要景观类型面积比例,以及香农多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)来分析景观格局与营养盐输出的关系.其中,SHDI 在比较和分析不同景观单元异质性变化时是一个敏感指标,特别对景观中各斑块类型非均衡分布状况较为敏感,因而能反映景观异质性空间差异.香农多样性指数(SHDI)的计算公式^[27]为:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

式中, P_i 表示某种景观类型面积占全流域的比例. SHDI 在景观级别上等于各斑块类型的面积比乘以其值的自然对数之后的和的负值. SHDI = 0 表明整个景观仅由一个斑块组成;SHDI 增大,说明斑块类

型增加或各斑块类型面积在景观中呈均衡化趋势分布.如在一个景观系统中,景观类型越丰富,破碎化程度越高,其不定性的信息含量也越大,计算出的 SHDI 值也就越高.

3 结果与分析

3.1 西苕溪小流域单元营养盐的输出负荷及空间差异

利用改进的西苕溪流域营养盐输出系数模型以及 ArcGIS 的空间分析工具,分别计算出西苕溪 108 个小流域单元 2004 年 TN、TP 的输出负荷及输出强度.由于营养盐输出总负荷受各流域面积影响很大,因此为了分析营养盐输出空间差异,仅分析小流域营养盐输出强度(图 2).

对各小流域营养盐输出强度统计分析表明,各小流域 TN 输出强度变化范围为 3.01 ~ 15.44 kg/(hm²·a),变化范围较大,最大值是最小值的 5 倍左右;各小流域 TP 输出强度变化范围为 0.049 ~ 0.355 kg/(hm²·a),变化范围更大,在 7 倍左右.可以看出,各小流域单元营养盐输出水平在空间上差异很大,TN、TP 输出强度空间异质性较为复杂,这可能与小流域尺度景观异质性影响有关.

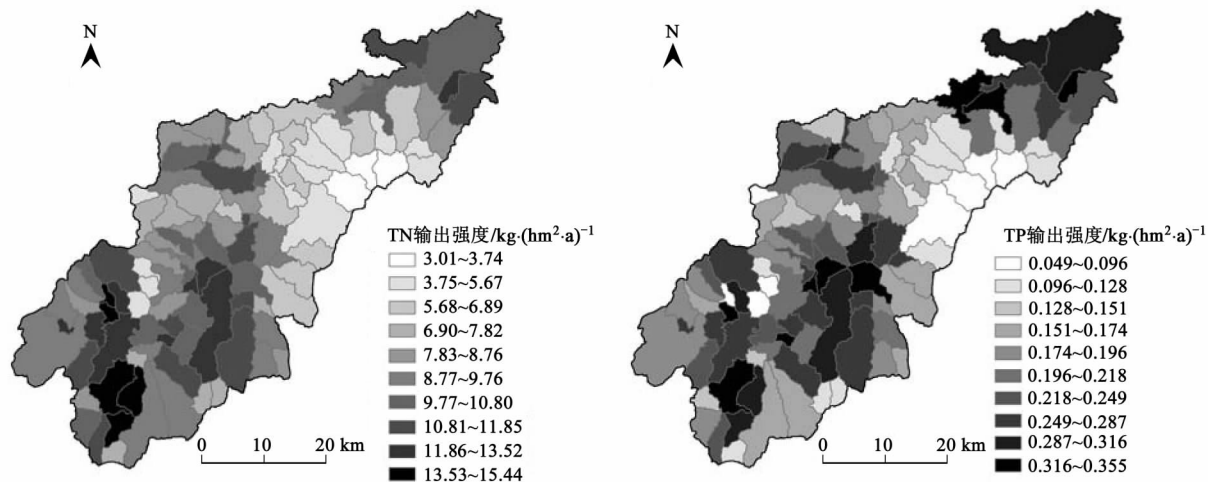


图 2 西苕溪 2004 年 108 个小流域 TN、TP 输出强度

Fig. 2 TN and TP export intensities from 108 sub-watersheds in 2004

3.2 西苕溪小流域单元景观异质性分析

3.2.1 小流域单元主要景观类型空间差异

利用 GIS 空间分析功能,把 2004 年西苕溪流域景观类型数据与 108 个小流域边界叠加,并分别计算各个小流域主要景观类型构成.结果表明,西苕溪流域景观类型总体以耕地、林地为主,分别占流域土地总面积的 29.9% 与 59.5%,其它类型面积比例较

小,城镇居民用地、园地、草地、水域面积比例分别占 3.4%、4.1%、0.7%、2.4%.但在小流域单元尺度上,各小流域景观类型面积比例变化较大,尤其是耕地和林地空间变化差异很大.其中耕地面积占各自小流域总面积的比例变化范围为 0.5% ~ 78.1%,空间上表现为从上游到下游不断增大;林地面积比例变化范围为 0.1% ~ 98.6%,空间上表现为从上

游到下游逐渐减少(如图3);其它类型面积比例变化范围相对较小,其中园地面积比例变化范围为0~27.1%,空间上表现为中游最大;草地面积比例变化范围为0~19.1%,中下游最大;水域面积比例变

化范围为0~26.6%,上游到下游不断增大;居民建设用地面积比例变化范围为0~21.2%,中游和下游最大。

3.2.2 小流域单元景观异质性空间差异

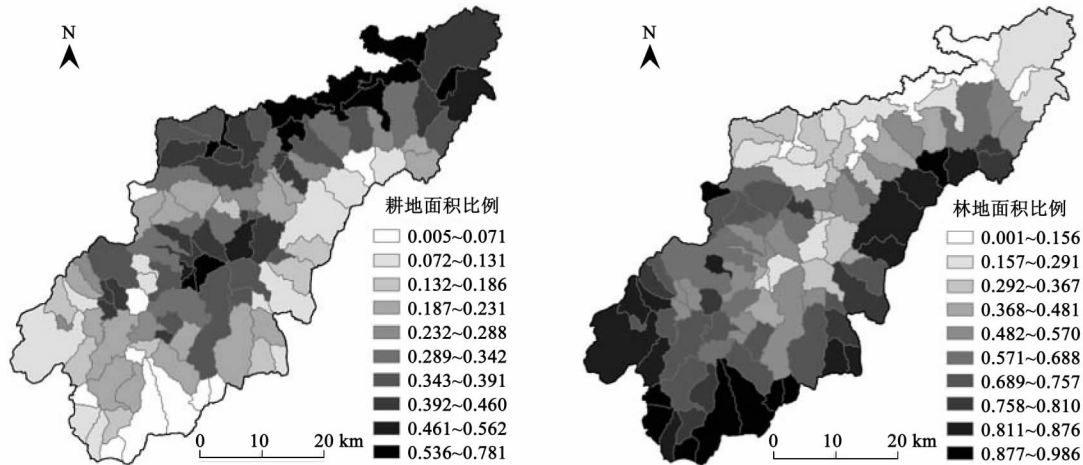


图3 西苕溪流域108个小流域2004年主要景观类型面积比例

Fig. 3 Percentage of cultivated land and forest area for 108 sub-watersheds in 2004 of Xitaoxi watershed

为了反映流域景观结构空间差异,引入景观生态学中的香农多样性指数.以西苕溪各小流域土地利用数据为基础,利用 ArcGIS 空间分析功能与统计软件,计算获得西苕溪 108 个小流域的香农多样性指数(如图4).对香农多样性指数分析可知,西苕溪 108 个小流域单元的 SHDI 较为敏感,其变化范围为 0.121~2.150,空间上表现为从上游到中下游景观异质性增强趋势.从图4可以看出,由于流域上游以

林地为主,景观类型相对较少,因此 SHDI 指数较小.而位于中下游地区的小流域景观类型相对较多,相应的 SHDI 指数也较大。

3.3 西苕溪小流域单元主要景观类型空间异质性与营养盐输出的关系

在对 2004 年西苕溪 108 个小流域景观类型构成及小流域氮磷营养盐输出统计的基础上,分别对耕地、林地等主要景观类型空间异质性与氮磷营养盐输出的关系进行分析.为了便于统计分析,尽量减少个别小流域误差,首先对各种景观类型面积比例按照图3中图例所示的分级标准进行分级(表1),然后再对每级内小流域单元的景观类型比例以及相应 TN、TP 的输出强度取平均,进而分析它们之间的关系。

3.3.1 小流域耕地面积比例与营养盐输出关系

图5显示的是小流域单元内主要景观类型耕地面积比例与 TN、TP 输出强度之间的关系.可以看出,氮磷营养盐的输出水平与耕地面积比例均具有明显的正相关关系,即随着耕地面积比例的增大, TN、TP 的输出水平增大.利用图5中所示的 TN、TP 输出强度与耕地面积比例定量关系模型推算,小流域单元内耕地面积每增加 10%, TN 输出强度则增加 $0.5726 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, TP 输出强度增加 $0.0273 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$.

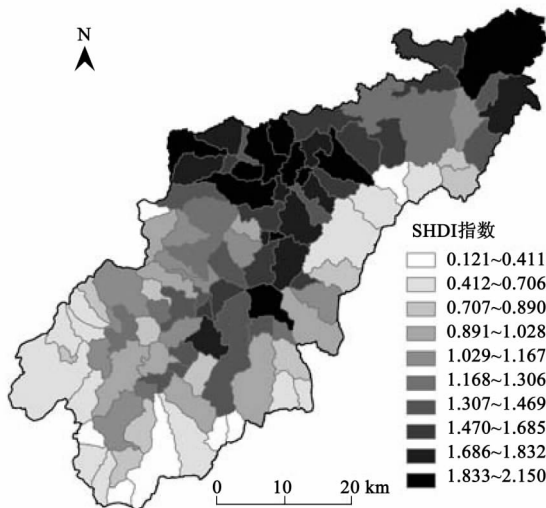


图4 西苕溪小流域2004年SHDI指数空间差异

Fig. 4 SHDI spatial difference of sub-watersheds in Xitaoxi watershed in 2004

表 1 西苕溪小流域单元主要景观类型空间异质性及 SHDI 分级体系

Table 1 Classification system of major landscape types heterogeneity and SHDI of sub-watersheds

分级	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
耕地面积比例分级	0.5 ~ 7.1	8.6 ~ 13.1	14.6 ~ 18.6	19.0 ~ 23.1	26.2 ~ 28.2	30.4 ~ 34.2	34.7 ~ 39.1	39.9 ~ 46.0	48.9 ~ 56.2	60.2 ~ 78.1
小流域个数	10	12	8	16	6	10	15	17	3	11
耕地面积平均值	3.8	11.2	16.2	21.5	27.6	32.3	36.7	43	52.7	66.3
林地面积比例分级	0.1 ~ 15.6	17.5 ~ 29.1	30.3 ~ 36.7	41.7 ~ 48.1	50.4 ~ 57.0	61.3 ~ 68.8	70.3 ~ 75.7	77.4 ~ 81.0	82.5 ~ 87.6	91.0 ~ 98.6
小流域个数	8	11	10	5	17	13	14	9	12	9
林地面积平均值	9.8	24.1	34.6	45	54	65	73.6	78.5	85.7	94.9
SHDI 分级	0.121 ~ 0.411	0.411 ~ 0.706	0.706 ~ 0.89	0.89 ~ 1.028	1.028 ~ 1.167	1.167 ~ 1.306	1.306 ~ 1.469	1.469 ~ 1.685	1.685 ~ 1.832	1.832 ~ 2.150
小流域个数	7	13	11	8	11	12	13	12	10	11
SHDI 平均值	0.271	0.618	0.839	0.978	1.102	1.235	1.39	1.613	1.768	1.979

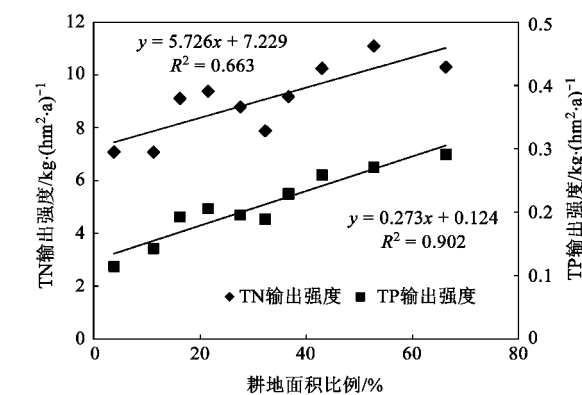


图 5 西苕溪小流域耕地面积比例与氮磷营养盐输出关系

Fig. 5 Relationship between nutrient export intensity and the percentage of cultivated land of sub-watersheds

3.3.2 林地面积比例与营养盐输出的关系

图 6 显示小流域单元内另一主要景观类型林地面积比例与 TN、TP 输出强度之间的关系. 可以看出小流域单元林地面积比例与 TN 输出强度、TP 输出强度相关性虽然稍差,但也呈较明显负相关关系,即随着小流域林地面积比例的增大,流域 TN、TP 输出水平逐渐降低. 利用图 6 所示林地面积比例与 TN、TP 输出强度定量关系模型推算,小流域单元内林地面积增加 10%, TN 输出强度则降低 0.203 1 kg/(hm²·a), TP 输出强度降低 0.015 2 kg/(hm²·a).

3.4 小流域单元景观多样性指数空间差异对营养盐输出影响

为了揭示小流域单元总体景观异质性差异对氮素输出影响,按照图 4 图例所示 2004 年各小流域 SHDI 指数范围的自然断点对 108 个小流域重新分为 10 个级别(表 1),并分别计算各级小流域的 SHDI 与 TN、TP 输出强度等指标的均值,以分析小

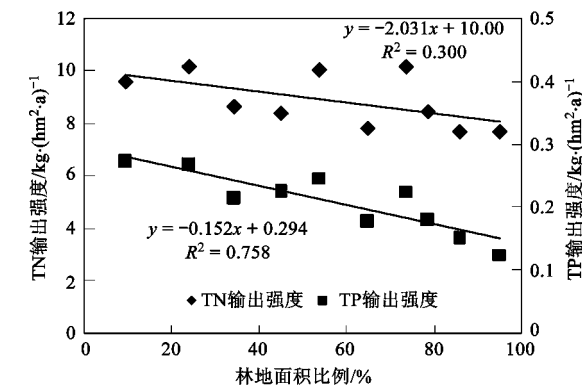


图 6 西苕溪小流域林地面积比例与氮磷营养盐输出关系

Fig. 6 Relationship between nutrient export intensity and forest percentage of sub-watersheds

流域单元香农多样性指数对氮磷营养盐输出的影响.

图 7 显示了西苕溪小流域单元 2004 年香农多样性指数与 TN、TP 输出强度的关系. 可以看出, SHDI 比单一景观要素类型与氮磷营养盐输出关系复杂. 从拟合曲线上看,两者符合二次多项式模型,表明小流域单元景观结构越复杂,对营养盐输出影响越复杂. 就流域氮、磷输出强度而言,由图 7 可见,在一定范围内(0 < SHDI < 1.5),随着 SHDI 增大,输出强度增大,而当到达最大值(SHDI = 1.5)后又开始降低,显示了小流域景观多样性指数对氮、磷输出影响的复杂性. 通过分析 SHDI 与主要景观要素类型构成的关系显示,随着 SHDI 的增大,小流域景观结构由林地为主的简单结构转向以林地、耕地、居民地、园地组合的复杂结构,当 SHDI 增大到 1.5 时,此类小流域景观结构都是以耕地类型为主,而当 SHDI > 1.5 时,虽然仍以耕地为主,但耕地比例有所降低,相应 TN 输出水平也有所降低,这应是导致 SHDI 与氮、磷输出强度呈二次多项式关系的原因.

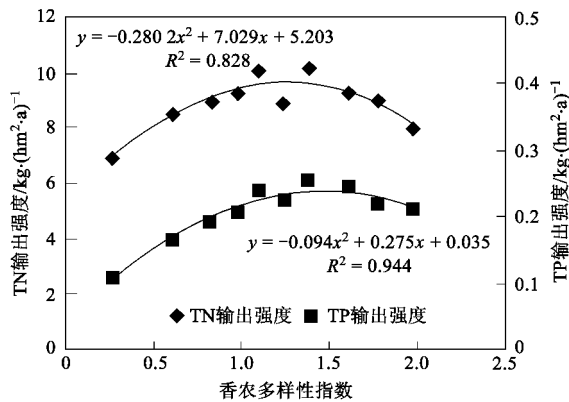


图7 西苕溪小流域香农多样性指数
与氮磷营养盐输出关系

Fig. 7 Relationship between nutrient export intensity
and SHDI of sub-watersheds

4 讨论

采用改进的输出系数模型估算营养盐输出强度,能够较准确评估流域尺度营养盐输出水平的空间差异性.输出系数模型充分利用相对容易得到的土地利用状况等资料,直接建立了土地利用与接纳水体营养盐输出负荷的关系,得到了广泛的应用^[20],而且不同学者也针对模型不足进行了多方面的改进^[21-25].本研究采用野外实测数据获取西苕溪流域主要土地利用类型营养盐输出系数,并考虑流域降雨径流的空间差异,通过遥感影像获取土地利用数据,把模型与地理信息系统技术结合,将经验型估算模型改进为考虑空间差异的半分布式模型.利用改进的输出系数模型对2004年西苕溪流域营养盐输出进行估算,并以实测数据的计算结果对模型进行检验分析,对有关重要参数进行了必要的修正和调整,最后确定了西苕溪流域2004年氮磷营养盐输出系数模型,模型估算结果可信^[26].

对小流域分级统计分析景观异质性与营养盐输出关系,有利于减少误差,突出规律性.由于西苕溪流域土地利用景观数据来自遥感影像目视解译,在整个流域尺度精度是能保证的,但在划分为108个小流域后,小流域单元土地利用景观类型空间差异很大,个别小流域土地利用景观数据误差有所放大.因此在进行小流域单元主要景观类型空间异质性与营养盐输出关系研究中,没有采用全部108个小流域的耕地、林地面积比例及景观多样性指数,而是将小流域分为10级,并对各级相应参数进行了平均,有利于分析景观异质性与营养盐输出关系,而要提

高小流域尺度土地利用景观数据质量还依赖于高空间分辨率遥感数据源.

氮、磷营养盐在流域中的迁移过程有着显著的差异,而且受到多种因素的影响.但本研究中TN、TP输出强度与耕地、林地面积比例及多样性指数关系图中表现出相对一致的变化关系,主要是受限于模型结构的影响.由于改进的输出系数模型仅考虑了不同土地利用类型的面积、输出系数、降雨及径流空间差异等,而对诸如地形、植被、土壤等下垫面因素的考虑不够全面细致,也缺乏氮磷营养盐输移机制差异的考虑,无法模拟营养盐物质在坡面、河道中的传输过程.因此流域营养盐输出强度估算模型还有待改进,构建分布式营养盐输出过程机制模型对于研究营养盐输移过程以及景观异质性的影响具有重要的意义,这也是将来研究的方向.

5 结论

(1)流域景观结构对营养盐输出具有重要的影响,河流或湖泊的水质与景观类型面积及比例、景观格局等景观特征具有密切的关系.

(2)本研究基于小流域单元尺度,利用遥感影像与GIS方法识别景观特征,利用输出系数模型估算营养盐输出水平,进而分析小流域单元景观空间异质性与营养盐输出关系,为流域尺度景观特征与物质输移研究提供了遥感、GIS、模型方法结合的新思路.

(3)景观异质性对营养盐输出影响复杂,有待于引入或构建新的参数分析景观格局对营养盐输出的影响.今后的研究还需要考虑这些参数如何通过遥感数据直接获取,以及流域营养盐输移过程机制的分布式模型构建等问题.

参考文献:

- [1] 贺继生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制[J].环境科学,1998,19(5):87-91.
- [2] William F R, Adel S. Agricultural nonpoint source pollution, watershed management and hydrology [M]. New York: Lewis Publishers, 2001. 59-110.
- [3] Turner M G, Gardner R H, O'Neill R V. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process [M]. New York: Springer, 2001. 251-279.
- [4] Kahl J S, Nelson S J, Fernandez I, et al. Watershed nitrogen and mercury geochemical fluxes integrate landscape factors in long-term research watersheds at Acadia National Park, Maine, USA[J]. Environ Monit Assess, 2007, 126(1-3):9-25.
- [5] Rao N S, Easton Z M, Schneiderman E M, et al. Modeling

- watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading[J]. *J Environ Manage*, 2009, **90**(3):1385-1395.
- [6] Diebel M W, Maxted J T, Nowak P J, *et al.* Landscape planning for agricultural nonpoint source pollution reduction I: a geographical allocation framework[J]. *Environ Manage*, 2008, **42**(5):789-802.
- [7] Tomer M D, Dosskey M G, Burkart M R, *et al.* Methods to prioritize placement of riparian buffers for improved water quality[J]. *Agroforest Syst*, 2009, **75**(1):17-25.
- [8] Johnson L B, Richards C, Host G E, *et al.* Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems[J]. *Freshwater Biol*, 1997, **37**(1):193-208.
- [9] Basnyat P, Teeter L D, Flynn K M, *et al.* Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. *Environ Manage*, 1999, **23**(4):539-549.
- [10] Johnson G D, Myers W L, Patil G P. Predictability of surface water pollution loading in Pennsylvania using watershed-based landscape measurements[J]. *J Am Water Resour As*, 2001, **37**(4):821-835.
- [11] Susanna T Y, Chen W L. Modeling the relationship between land use and surface water quality[J]. *J Environ Manage*, 2002, **66**(4):377-393.
- [12] Kloiber S M. Estimating nonpoint source pollution for the twin cities metropolitan area using landscape variables[J]. *Water Air Soil Poll*, 2006, **172**(1-4):313-335.
- [13] Xiao H G, Ji W. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques[J]. *J Environ Manage*, 2007, **82**(1):111-119.
- [14] 金卫斌,李百炼. 流域尺度的景观-水质模型研究进展[J]. *科技导报*, 2008, **26**(7):72-77.
- [15] 陈利顶,丘君,张淑荣,等. 复杂景观中营养型非点源污染物时空变异特征分析[J]. *环境科学*, 2003, **24**(3):85-90.
- [16] 张洪,单保庆,尹澄清. 六叉河小流域不同景观结构中径流磷形态差异分析[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3):550-557.
- [17] 唐艳凌,章光新. 流域单元景观格局与农业非点源污染的关系[J]. *生态学杂志*, 2009, **28**(4):740-746.
- [18] 许朋柱,姜彤,曹文清,等. 太湖地区西苕溪流域水文模型的设计与验证[J]. *地域研究与开发*, 1996, **15**(3):49-54.
- [19] 于兴修,杨桂山,欧维新. 非点源污染对太湖上游西苕溪流域水环境的影响[J]. *湖泊科学*, 2003, **15**(1):49-55.
- [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**(3):323-349.
- [21] Bennion H, Johnes P, Ferrier R, *et al.* A comparison of diatom phosphorus transfer functions and export coefficient models as tools for reconstructing lake nutrient histories[J]. *Freshwater Biol*, 2005, **50**(10):1651-1670.
- [22] Zobrist J, Reichert P. Bayesian estimation of export coefficients from diffuse and point sources in Swiss watersheds[J]. *J Hydrol*, 2006, **329**(1-2):207-223.
- [23] Shrestha S, Kazama F, Newham L T H. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data[J]. *Environ Modell Softw*, 2008, **23**(2):182-194.
- [24] 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**(3):263-282.
- [25] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models[J]. *J Hydrol*, 1999, **221**(1-2):75-90.
- [26] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3):668-672.
- [27] 肖笃宁,李秀珍,高峻,等. 景观生态学[M]. 北京:科学出版社, 2003. 56.