

资江尾间集水区景观格局与非点源污染过程关系研究

贾玉雪, 帅红, 韩龙飞

引用本文:

贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 资江尾间集水区景观格局与非点源污染过程关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 833-843.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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, 刘申, 翟丽梅, 张富林, 刘宏斌, 雷秋良, 武淑霞, 华玲玲, 周继文

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 129-138 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.018>

近三十年非点源污染研究发展趋势分析

欧阳威, 刘迎春, 冷思文, 刘宏斌, 王依滴

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2234-2241 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1768>

湖北省三峡库区1991—2014年农业非点源氮磷污染负荷分析

王萌, 王敬贤, 刘云, 李春蕾, 肖文发

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 294-301 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0600>

基于AnnAGNPS模型的苇子沟流域非点源污染模拟研究

涂宏志, 侯鹰, 陈卫平

农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1345-1352 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1562>

磷酸铵镁堆肥产品养分释放特性及其肥效研究

李丹阳, 元传仁, 卫亚楠, 李国学

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2066-2073 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0186>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

贾玉雪, 帅红, 韩龙飞. 资江尾闾集水区景观格局与非点源污染过程关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(4): 833–843.

JIA Yu-xue, SHUAI Hong, HAN Long-fei. Relationship between landscape patterns and non-point source pollution processes in the Zijiang catchment tail, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(4): 833–843.



开放科学 OSID

资江尾闾集水区景观格局与非点源污染过程关系研究

贾玉雪^{1,2}, 帅红^{1,2*}, 韩龙飞¹

(1. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410081; 2. 湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 长沙 410081)

摘要:为识别资江尾闾集水区非点源污染的关键源区并探究非点源污染过程与景观格局之间的关系,利用SWAT模型模拟非点源污染总氮、总磷的时空输出特征,选取景观格局指数定量描述景观格局特征,通过冗余分析(RDA)方法分别从景观、类型两个层次分析子流域尺度上非点源污染过程与景观格局的关系。结果表明:在率定期与验证期径流量、总氮、总磷的 R^2 与 E_{ns} 均大于0.66,表明SWAT模型在研究区的适用性较好;总氮、总磷的关键源区空间分布上不完全一致,在非点源污染输出的关键时期,关键源区分别贡献了研究区非点源总污染的31.64%、43.73%。景观格局与非点源污染过程的联系密切,景观水平上,流域内景观越破碎、景观类型越复杂、人类活动对其影响越大,非点源污染负荷输出值越高;类型水平上,聚集度指数(AI)、最大斑块指数(LPI)、斑块平均面积(AREA-MN)、斑块边缘密度(ED)是对“源”“汇”景观具有显著影响的共性指标,其中“源”景观破碎度越大、斑块面积越大、聚集度越高越会加剧非点源污染负荷的输出,而破碎度小、景观形状复杂、斑块连通度高的“汇”景观则有利于阻截非点源污染物。研究表明,非点源污染过程与“源”“汇”景观格局存在明显的内在联系,合理布设“源”“汇”景观可以降低非点源污染风险,从土地利用角度为非点源污染防治提供了借鉴。

关键词:非点源污染;景观格局;SWAT模型;冗余分析;资江尾闾集水区

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)04-0833-11 doi:10.11654/jaes.2020-1107

Relationship between landscape patterns and non-point source pollution processes in the Zijiang catchment tail, China

JIA Yu-xue^{1,2}, SHUAI Hong^{1,2*}, HAN Long-fei¹

(1. College of Geographic Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In order to identify the critical source areas of non-point source (NPS) pollution and explore the relationship between the NPS pollution process and landscape patterns in the Zijiang catchment tail, the SWAT model was applied to simulate the spatiotemporal output characteristics of NPS pollution for total nitrogen and total phosphorus. The landscape pattern metric was utilized to quantitatively assess the characteristics of the landscape pattern. The relationship between NPS pollution and the landscape pattern was analyzed by the redundancy analysis (RDA) method from the two levels of landscape and patch type at the sub-basin scale. The R^2 and E_{ns} values of runoff, total nitrogen, and total phosphorus were all greater than 0.66 in the periods of calibration and verification, thereby indicating that the SWAT model has good applicability in the study area. The spatial distribution of the critical source areas of total nitrogen and total phosphorus was not completely consistent. In the critical period of NPS pollution, the critical source areas contributed 31.64% and 43.73%

收稿日期:2020-09-22 录用日期:2020-11-23

作者简介:贾玉雪(1996—),女,山东潍坊人,硕士研究生,从事流域水文过程模拟与水污染研究。E-mail:jiayx6427@163.com

*通信作者:帅红 E-mail:56331353@qq.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41501565)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41501565)

of the total NPS pollution in the study area, respectively. The landscape pattern was significantly correlated with the NPS pollution process. At the landscape level, the RDA between the landscape metric and pollution load showed that the more fragmented the landscape, the more complex the landscape type, and the greater the impact of human activities on the landscape, the higher the output value of the NPS pollution load. At the type level, the aggregation index, largest patch index, average patch area, and patch edge density were the common indicators that had a significant influence on the source and sink landscapes; the larger the fragmentation degree, the larger the patch area, and the higher the aggregation degree, the stronger the output of the NPS pollution load. Meanwhile, the sink landscape with small fragmentation, a complex landscape shape, and high patch connectivity could help to intercept NPS pollution. The study shows that there is a clear internal relationship between the process of NPS pollution and the landscape pattern of sources and sinks, and the rational layout of the landscape of sources and sinks can reduce the risk of NPS pollution. This study provides a reference for the prevention and control of NPS pollution from the perspective of land use.

Keywords: non-point source pollution; landscape pattern; SWAT model; redundancy analysis; Zijiang catchment tail

目前世界各国点源污染治理成效显著,使得非点源污染问题在水环境污染治理与管理中的重要性与必要性凸显^[1]。美国、欧洲等国际相关研究显示非点源污染已成为其水质污染的主要组成部分^[2-4];国内学者进行的大量研究表明,北方的黄河、淮河、海河、松花江、辽河流域,以及南方的太湖、巢湖、滇池流域的非点源污染问题突出,由于具有发生的不确定性、难以控制等特点,使得非点源污染实际治理难度较大。非点源污染由自然水循环中的降水-汇流过程驱动,同时也受人类活动的强烈支配,Green等^[5]的研究显示,爱荷华州玉米种植区大量肥料的输入导致地下硝酸盐与亚硝酸盐含量的大幅度变化。气候变化对未来污染影响的加剧^[6]、人为活动对污染贡献程度高^[7]等决定了非点源污染的管理与治理必须以控制人类活动加剧的污染为重点。当前以此为前提的非点源污染研究重点集中在污染物模拟及时空分布^[8-9]、关键源区的识别^[10]、污染削减及最佳管理措施研究^[11]等方面,其中关键源区是非点源污染发生的高风险、高负荷地区,识别关键源区从而对危害较大、范围较小的区域进行重点控制可以大大提高非点源污染治理的效率^[12-13],研究发现农业活动较为频繁的地区往往成为非点源污染的关键源区^[14-15]。

非点源污染的发生与迁移是重要的生态-水文过程,景观类型组成、空间配置直接影响流域水文循环、泥沙运移从而间接影响污染迁移转化的过程,景观格局与非点源污染过程的关系作为研究的热点,学者们从不同的角度对其进行了探讨。李铸衡等^[16]、毕直磊等^[17]从土地利用类型变化的角度基于模型研究地表景观变化与非点源污染负荷的关系,研究表明在陡坡耕地实行不同水平的退耕还林措施可以不同程度地降低氮磷营养盐负荷;Billmire等^[18]从污染负荷

的植被截留角度建立了基于水流路径的景观指标,结果显示该指标可以较好地指示河流硝酸盐浓度的变化;陈立顶等^[19]从污染物产生与截留的生态过程的角度构建具备生态学意义的景观空间负荷对比指数来衡量景观格局与非点源污染过程的定量关系,并有学者将其应用到桥水库探究景观格局与水质的关系,Zhang等^[20]也认为优化景观格局,利用“汇”景观阻截、吸收污染物,促进“源”产生的污染物转化,是改善非点源污染既经济又有效的方法。目前非点源污染与景观格局关系的研究中,应用最为广泛的是景观格局指数,景观格局指数可以分别从复杂度、破碎度、集中度、多样性等多个角度表征景观特征,因此更能反映景观的结构特性,李明涛等^[21]、韩黎阳等^[22]分别选取景观格局指数分析了潮河流域、三峡库区兰陵溪小流域景观格局与非点源污染输出的总氮、总磷以及氨氮、硝态氮负荷量之间的关系,结果表明非点源污染过程与景观结构、格局间存在密切的关系。但以上研究大多从多个土地利用类型的角度分别剖析土地利用与非点源污染之间的关系,而部分用地类型对非点源污染过程具有相同效应,借鉴“源-汇”思想,将子流域内的景观类型统一划分,合并为“源”与“汇”两类,分析两类景观的空间结构与非点源污染负荷输出的统计关系,可以从整体上把握景观格局与非点源污染之间的响应特征。

洞庭湖为我国第二大淡水湖泊,作为承接湘资沅澧四水、吞吐长江的过水性河道型湖泊,在发挥生态修复、维护生态平衡等方面具有重要作用^[23]。相关研究表明,1991—2015年洞庭湖水质总体呈下降趋势,总磷是影响水质下降的主要因子^[24],农业非点源污染、城镇生活污染成为洞庭湖区总氮、总磷的主要产生来源^[25]。资江水质总体较好,水质评价结果大部分

为Ⅲ类及以上类别,但资江尾间入洞庭湖段支流志溪河的水质评价结果为Ⅳ类,主要超标因子为总磷。随着对工业实行总量控制以及排污削减的开展,农业非点源污染与生活污染成为流域水质规划关注的重点^[26],因此识别研究区域的非点源污染的关键源区并掌握其时空分布特征对流域水污染防治具有重要意义;此外,随着城镇化等人类活动的日益加剧,该区域土地利用覆被变化剧烈,探究景观格局与非点源污染过程的关系对以生态环境保护为前提的土地利用结构调整与优化具有一定的指导意义。

本文为探究资江尾间入湖的非点源污染状况以及非点源污染负荷与景观格局的关系,利用SWAT模型模拟研究区2009—2017年总氮、总磷非点源污染的时空分布特征,并进一步识别非点源污染的关键源区;基于景观生态学思想,从污染产生与阻截的角度,划分“源”“汇”景观,从景观水平与“源”“汇”类型水平上分别计算景观格局指数,探究非点源污染与“源”“汇”景观格局之间的关系,为该地区土地利用结构调整与优化、水环境的保护与治理提供可借鉴的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

资江为湖南省四水之一,流经邵阳、益阳,于益阳市甘溪港注入洞庭湖。资江尾间位于湘中偏北,地理位置为111.95°~112.37°E、28.21°~28.66°N。地形以平原为主,在西南地区兼分布山地,高程范围为18.5~874.6 m,资江的尾水穿过研究区,在流域出口附近注入洞庭湖。研究区内主要支流为桃花江、志溪河,总汇水面积达1 291.14 km²(图1)。流域属于亚热带大陆性季风湿润气候,四季分明,气候温和,多年平均气温为17~19℃;多年平均降水为1 400~1 500 mm,降水充沛,属于湿润区。其土地利用类型以耕地和林地为主,耕地面积占32.1%,林地面积占49.4%,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。第四纪红色黏土母质上发育的红壤是该区域主要的土壤类型,土壤耕性较好,肥力中上。

研究区行政上涉及益阳市的桃江县、赫山区与资阳区,以桃江县面积占比最大,达60.0%,赫山区与资阳区占比分别为2.6%、10.4%。区域生产活动以农业为主,2017年研究区内农业人口占益阳市总人口的14.6%,农作物播种面积、畜禽养殖量分别占全市的5.3%、21.8%。

研究区包括两个水文站点,分别作为研究区入水

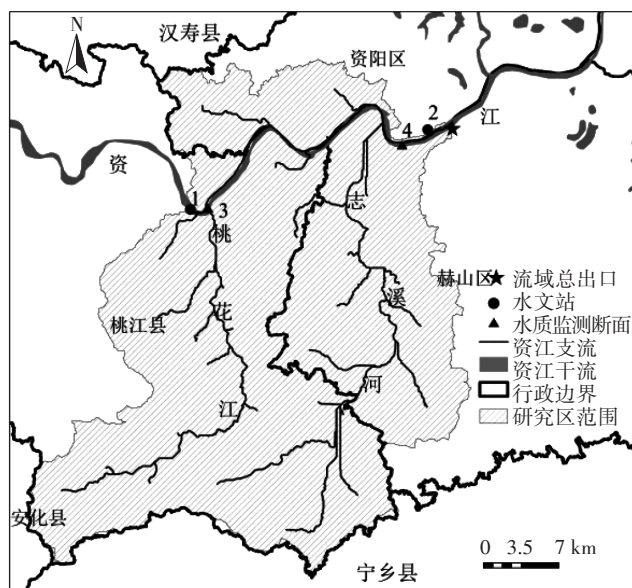
与出水的控制站,桃江水文站是研究区的入水口,主要的支流桃花江、志溪河集水汇入资江干流,最终在益阳(二)水文站附近的流域出口出水(图1)。

1.2 SWAT模型的建立与模拟

SWAT模型的一项基本功能就是非点源污染模拟,目前在国内外应用广泛。模型具有较强的物理基础,可以模拟包括水、沙、化学物质和杀虫剂的输移和转化过程。模型采用水量平衡方程、SCN径流曲线方程、MUSLE方程分别模拟径流、泥沙过程,同时内嵌了天气、土壤温度、作物生长与管理、营养物等组件,可以模拟较为复杂的营养物迁移过程。

1.2.1 数据来源及预处理

根据数据的存储类型,将模型运行需要的数据分为空间数据与属性数据。空间数据主要包括地形数据、土地利用数据、土壤数据三大类,DEM为地理空间数据云ASTER GDEM数据,分辨率为30 m;土地利用数据来源于益阳市国土局,分辨率为30 m;土壤数据采用世界土壤数据库,比例尺为1:100万。属性数据主要包括土壤理化性质、气象数据以及农业管理数据等。模型主要输入数据见表1。由于该研究区域为典型农耕区,点源污染程度小于农业生产、农村生活带来的非点源污染,因此点源污染对模型模拟结果影响较小,同时考虑数据的可获性,因此本研究借鉴陈岩等^[27]的做法,将全国第二次污染普查数据以



1: 桃江水文站; 2: 益阳(二)水文站; 3: 志溪河断面; 4: 龙山港断面
1: Taojiang Hydrological station; 2: Yiyang (Second) Hydrological station; 3: Zhixihe Section; 4: Longshangang Section

图1 研究区基本概况图

Figure 1 Basic situation of the study area

表1 模型输入数据
Table 1 Model input data

数据名称 Data name	获取信息 Information	数据来源 Data source
DEM数字高程	高程、坡度、坡长	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)
土地利用数据	土地利用类型空间分布	益阳市国土局
土壤类型数据	土壤类型空间分布、土壤理化性质	HWSD数据集
气象数据	气温、降水、风速、相对湿度、太阳辐射	CMADS V1.0数据集
水文水质数据	水文站径流、断面总氮、总磷浓度监测数据	益阳市环保局、益阳市水文局
点源数据	工业、城镇生活污水处理厂点位及总氮、总磷年排放数据	益阳市环保局全国第二次污染源普查系统
畜禽养殖数据	点位分布、废物产生量	“长江经济带战略环评益阳市三线一单”项目数据
农业管理措施	作物名称、耕作制度、耕作深度、化肥施用情况	实地考察与查阅地方志

“恒定负荷”的形式输入到模型中。

1.2.2 模型的率定、验证

为保证模型的模拟精度,本研究利用2019版SWAT-CUP软件,利用SUFI-2方法按照径流量、污染物的顺序进行率定、验证,并选取可决系数(R^2)、纳什效率系数(E_{NS})2个指标对率定结果进行评价,评价函数的计算公式如下:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2} \quad (1)$$

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)_i^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2} \quad (2)$$

式中: Q_m 为模拟值, $m^3 \cdot s^{-1}$; Q_s 为实际观测值, $m^3 \cdot s^{-1}$; $\bar{Q}_m$ 为模拟均值, $m^3 \cdot s^{-1}$; $\bar{Q}_s$ 为实测均值, $m^3 \cdot s^{-1}$ 。

在率定之前采用拉丁超立方抽样法进行参数敏感性分析,以确定对径流量、总氮、总磷最为敏感的参数。率定、验证均采用月度数据,本研究以流域出水口附近的益阳(二)水文站2009年1月至2017年12月的径流量实测值进行径流量率定、验证,以龙山港断面2009年1月至2017年12月的水质数据进行总氮、总磷的率定、验证,其中总氮、总磷断面数据为逐月监测值,假定断面月内的水质浓度恒定,模型校准时所用的逐月总氮、总磷实测负荷量计算过程为:

某月污染物月总负荷量(kg)=断面水质监测值($mg \cdot L^{-1}$) $\times$ 流量($m^3 \cdot s^{-1}$) $\times 3\ 600 \times 24 \times$ 月内天数/ 10^3 。

2008年1—12月为模型的预热期,基于实测数据,在率定期利用选择的敏感参数进行多次迭代,不断调整、优化模型。

1.3 景观格局指数的选取

研究区景观格局指数的计算基于2017年土地利用

数据,根据SWAT模型中土地利用数据重分类后耕地、林地、园地、城镇建设用地、水域、未利用地6类分类结果,利用Fragstats 4.2软件进行景观指数的计算。根据相关研究^[28-29],本文选代表景观破碎度、复杂度、聚集度以及多样性的9个指标从景观与类型水平上分别计算景观格局指数,景观格局指数具体的含义见表2。

1.4 冗余分析(RDA)

冗余分析(Redundancy analysis, RDA)是一种约束性直接梯度排序分析方法,能够将多个解释变量和响应变量进行多元回归分析,在两条排序轴上可视化两者的关系,直观地表达响应变量与解释变量之间的关联程度^[30],本文利用冗余分析方法,以SWAT模型模拟得到的非点源总氮、总磷污染输出强度为响应变量,以景观格局指数为解释变量,以60个子流域对应的数据为样本,借助软件Canoco 5.0进行分析,主要的内容包括向前选择分析、蒙特卡罗检验以及轴相关分析等步骤。

2 结果与讨论

2.1 非点源污染模拟结果

2.1.1 SWAT模型的率定、验证结果

径流量、总氮、总磷的敏感参数及取值见表3,利用敏感参数进行率定、验证,结果见图2。在率定期,径流量、总氮、总磷的 R^2 、 E_{NS} 均大于0.85;验证期三者的 R^2 均大于0.78, E_{NS} 大于0.66。验证结果表明,验证期径流量、总氮、总磷的模拟值皆偏小,径流量的模拟效果好于总氮、总磷的模拟效果。

2.1.2 非点源污染季节变化特征

利用校准后的SWAT模型,以●rch文件中流域总出口(8号子流域)的总氮、总磷输出结果分析研究区非点源污染的时间变化特征,本文涉及的污染物统计结果皆为非点源污染部分,在模型模拟过程中已经对

表2 景观格局指数描述及特征

Table 2 Description and characteristics of landscape pattern index

应用尺度 Application scale	指数名称 Index name	描述 Description	表征意义 Representational meaning
景观/类型	斑块密度(PD)	单位面积内斑块数量	破碎度
景观/类型	边缘密度(ED)	揭示景观类型被边界分割的程度	破碎度
类型	平均斑块面积(AREA-MN)	景观或类型中斑块的平均面积	破碎度
景观/类型	最大斑块指数(LPI)	最大斑块占整个景观总面积的百分比	破碎度
景观/类型	景观形状指数(LSI)	反映景观的形状复杂度	复杂度
景观	蔓延度指数(CONTAG)	反映景观的连通性	聚集度
类型	聚集度指数(AI)	反映景观类型的聚集程度	聚集度
景观	散布与并列指数(IJI)	反映不同景观类型的空间分布关系及景观类型的混合程度	多样性
景观	香农多样性指数(SHDI)	描述斑块类型在景观中出现的概率与多样性	多样性

表3 敏感参数排序

Table 3 Ordering of sensitive parameters

参数敏感等级 Parameter sensitivity level	径流量 Runoff		总氮 Total nitrogen		总磷 Total phosphorus	
	参数 Parameters	描述 Discription	参数 Parameters	描述 Discription	参数 Parameters	描述 Discription
1	SOL_AWC	土壤层可利用水含量/ (mm·mm ⁻¹)	SOL_NO ₃	土层中初始 NO ₃ 的浓度/ (mg·kg ⁻¹)	GWSOLP	流域通过地下水排向河道的 的可溶性磷浓度/(mg·L ⁻¹)
2	EPCO	植被吸水补偿系数	NPERCO	氮的渗透系数	RSDCO	植物残留物分解系数
3	CH_K2	主河道水力传导度/ (mm·h ⁻¹)	ERORGN	有机氮富集率	PSP	磷的吸附系数
4	REVAPMN	潜水极限蒸发深/mm	SOL_Z	土表到每个土层底部的厚 度/mm	HRU_SLP	平均坡度
5	CN2	径流曲线数	BIOMIX	生物混合效率	ERORGP	有机磷富集率
6	ALPHA_BF	基流消退系数/d	SHALLST_N	流域通过地下水排向河道的 硝酸盐浓度/(mg·L ⁻¹)	SOL_ORGP	土层中初始有机态磷的浓 度/(mg·kg ⁻¹)
7	SOL_ALB	潮土的地表反射率	SOL_ORGN	土层中初始有机质含量/ (mg·kg ⁻¹)	CH_OPCO	河道中的有机磷浓度/ (mg·L ⁻¹)

点源做过扣减。根据SWAT模型2009—2017年非点源污染物输出值统计处理结果见图3,总氮的年内变化幅度大于总磷,尤其表现为4—6月份非点源氮营养盐输出值的大幅度涨跌变化。时间上,两类营养盐的输出值随降水量、径流量变化的趋势明显,其中径流量与总氮、总磷的可决系数分别为0.56、0.90(图4),由于4—6月份为雨季,也成为非点源总氮、总磷污染物输出的关键期,二者的输出量分别占全年的57.03%、50.55%。降水量是非点源污染最根本的驱动因子,径流量是直接动力^[31],但本研究中降雨量、径流量最大值出现的时间滞后于营养盐输出最高值的月份,由于4月底施用大量农家粪肥与化肥作为底肥,5月份进行水稻种植活动,随着4—5月份降水量以及径流量的递增,非点源污染输出负荷尤其是总氮负荷输出量增加明显,“源”总量的增加以及农耕活动

扰动土壤层的协同作用导致非点源污染负荷输出峰值发生在5月份。

2.1.3 非点源污染空间分布特征及关键源区的识别

本研究中,非点源污染关键源区是指非点源污染输出强度大、单位面积污染负荷产生量、污染物迁移能力都较高的子流域。关键源区识别依据•sub文件中非点源总氮、总磷输出强度,其考虑了子流域尺度上“源”的产生与陆面污染负荷的迁移过程,综合了污染产生强度与迁移削减,将•sub文件中2009—2017年子流域非点源总氮、总磷负荷的单位面积负荷值分别取年平均值,由低到高分1、2、3三个等级,空间分布见图5。根据表4,年均水平上最高等级区18.45%的面积贡献了24.50%的总氮污染负荷,26.70%的面积贡献了37.45%的总磷污染负荷,年均水平上第三等级区的面积占比与输出负荷贡献比例

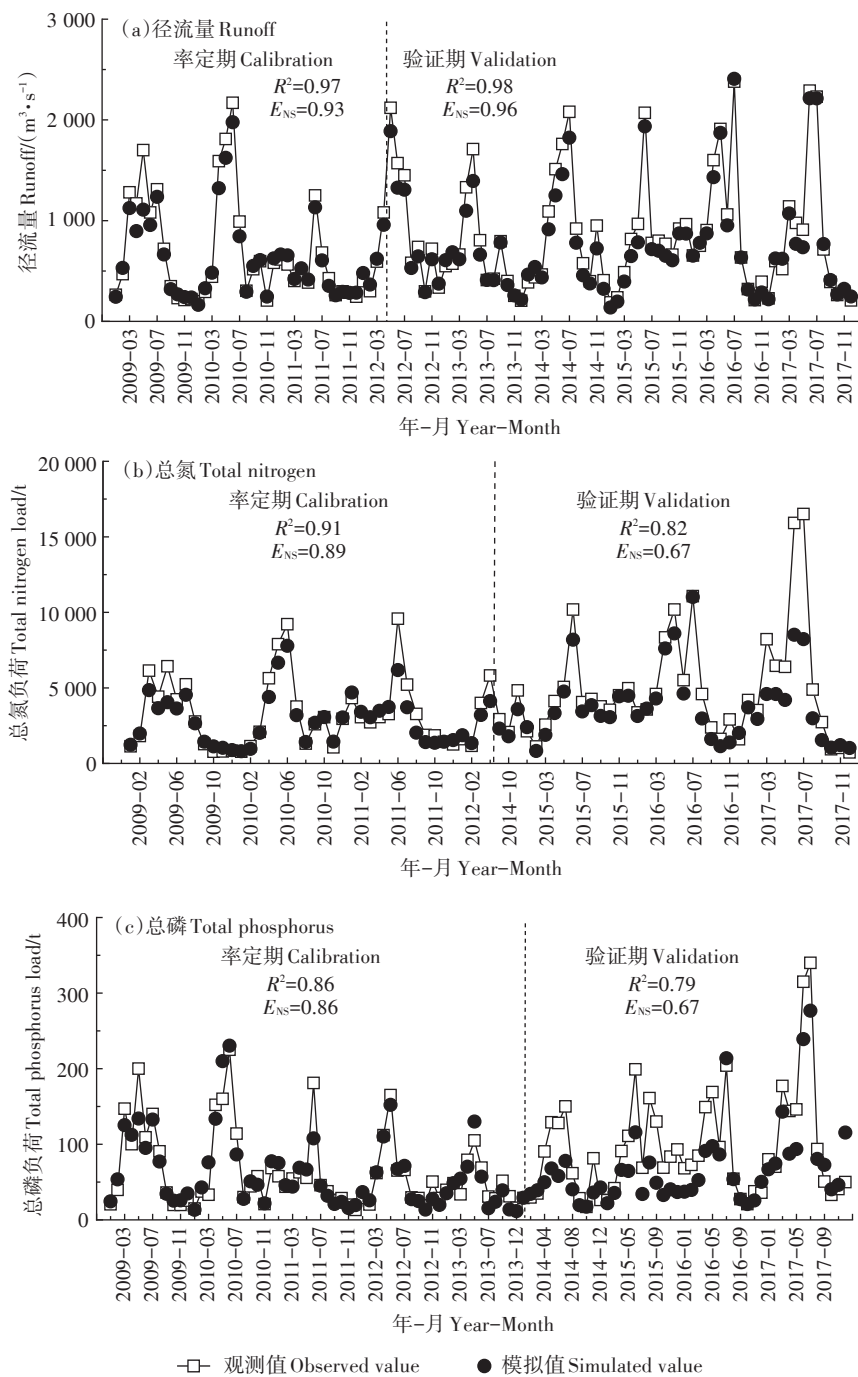


图2 径流量、总氮、总磷率定期与验证期拟合曲线

Figure 2 Fitting chart of runoff, total nitrogen, and total phosphorus in periods of calibration and validation

的对比差异不大,尤其在总氮水平上表现最为明显,经分析这与研究区的耕地空间分布较为均匀以及在此基础上的农耕活动强度较为一致有关;而在关键期(4—6月),第三等级区18.45%的面积贡献了31.64%的总氮污染负荷,26.70%的面积贡献了43.73%的总磷污染负荷,关键时期的非点源污染负荷的相对贡献率明显高于年均水平,因此认为第三等级区可以作为

非点源污染的关键源区。空间分布上,总氮、总磷负荷的空间分布特征存在差异,关键源区位置不完全一致,这与氮磷营养盐的迁移途径以及土壤本底值、化肥的使用量等因素有关^[32],总氮的关键源区主要分布在志溪河小流域,污染物负荷值在43.76~60.97 kg·hm⁻²;总磷关键源区集中分布在桃花江小流域中游,在志溪河小流域表现为沿干流分布的特征,负荷输出

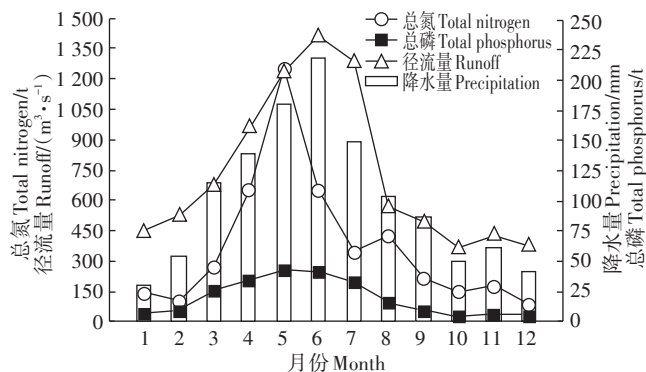


图3 降水、径流量与总氮、总磷年内变化趋势图

Figure 3 Seasonal trends of precipitation, runoff, total nitrogen, and total phosphorus

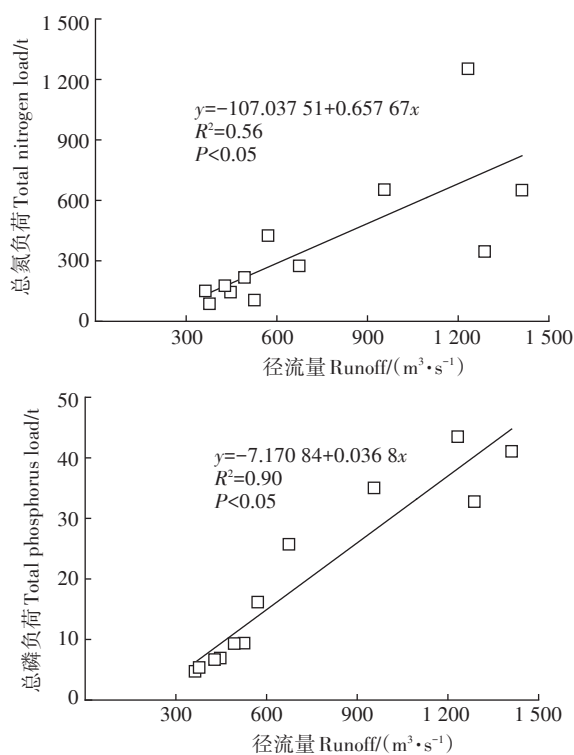


图4 总氮、总磷负荷与径流量线性分析

Figure 4 Linear analysis between total nitrogen, total phosphorus, and runoff

强度在 $2.37 \sim 3.15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.2 非点源污染与景观格局关系分析

2.2.1 景观水平

由表5可知,景观水平上,所有排序轴皆通过了蒙特卡罗显著性检验,表明RDA排序结果可靠,第一、二排序轴分别解释了非点源污染过程变化的48.5%与9.4%,累积解释量为57.9%,表明第一排序轴集中反映了景观格局-非点源污染过程之间的关系。前两个排序轴上格局与过程相关系数皆大于0.68,表明非点源

污染过程与景观格局之间的联系密切。

在景观水平上,参与分析的环境变量为反映景观破碎度、形状复杂度、聚集度、多样性的7个景观格局指数(图6)。子流域尺度上PD、ED、LSI、SHDI与总氮、总磷存在显著的正相关关系($P < 0.05$),表明流域内斑块越破碎、景观形状越复杂、多样性越高,非点源污染负荷的输出量越高,这与李明涛等^[21]、耿润哲等^[33]在潮河流域、密云水库的研究结论一致;总氮、总磷输出强度与LPI、CONTAG呈显著负相关,说明流域

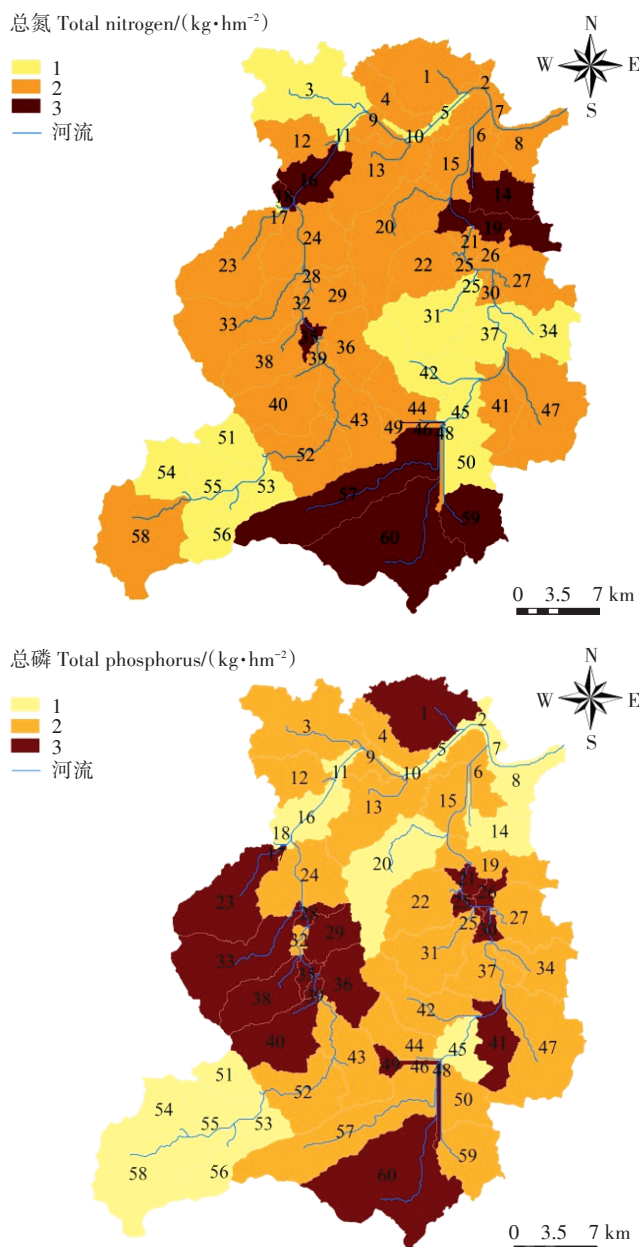


图5 研究区年均总氮、总磷空间分布图

Figure 5 Spatial distribution of annual average total nitrogen and total phosphorus

表4 非点源污染高度污染区面积及污染负荷统计

Table 4 Statistics of area and pollution load in highly polluted non-point source pollution zone

污染物 Pollutants	面积 Area/km ²	面积占比 Proportion of area/%	年均负荷量 Average annual load/t	年均负荷占比 Annual average load percentage/%	关键期负荷量 Load during critical period/t	关键期负荷占比 Load percentage during critical period/%
总氮	238.23	18.45	1 189.77	24.50	338.25	31.64
总磷	344.67	26.70	93.48	37.45	152.70	43.73

表5 景观水平RDA分析参数描述

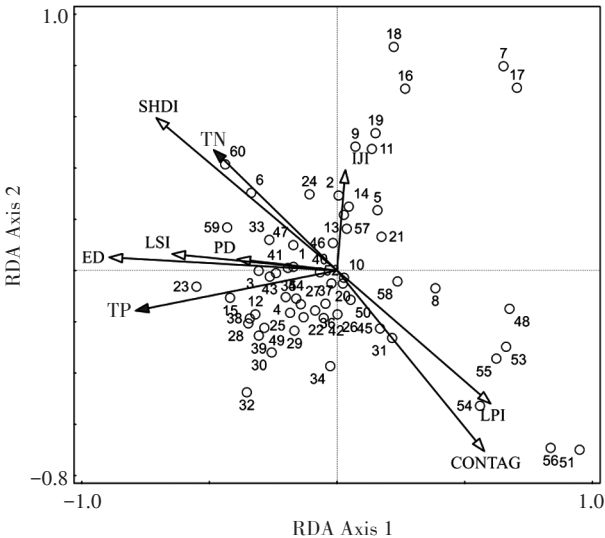
Table 5 Description of RDA analysis parameter at landscape level

描述 Statistic	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴3 Axis 3	轴4 Axis 4
特征值	0.485	0.094	0.334	0.087
过程特征累积特征值	0.485	0.579	0.913	1.000
格局-过程特征相关性	0.779	0.684	0.000	0.000
格局-过程关系累积特征值	0.838	1.000	0.000	0.000
第一典范轴的显著性测验	$F=48.000; P=0.002$			
所有典范轴的显著性测验	$F=10.000; P=0.002$			

内斑块的聚集度越高、连通性越好、人类活动对景观的影响越小,非点源污染所输出的营养盐越少。Hao等^[34]关于非点源与景观格局关系的研究表示,景观越分散、越复杂的流域会导致更多的营养盐的流失,这与本研究结论一致。

2.2.2 类型水平

非点源污染与景观格局类型水平上的研究大多分别以林地、耕地等具体的土地利用类型为研究对象展开^[16],单一的某类景观与非点源污染之间的关系往往受限于空间尺度,出现景观指数不能科学地反映景观格局的情况。“源”“汇”景观类型是按照不同土地利用类型对非点源污染产生与输移的贡献程度进行分类的结果,从对非点源污染过程促进与阻碍的角度发展出的景观分类,每个空间单元只划分为“源”与“汇”两种景观类型可以有效地避免相对面积较小的景观类型与景观指标之间的不合理解释,因此探究“源”“汇”景观类型水平格局与非点源污染过程的关系,可以从宏观上把握非点源污染治理与改善的方向。根据陈立顶等^[35]提出的“源-汇”概念,将耕地、园地、城镇建设用地归类为“源”景观,林地、水域属于“汇”景观,由于研究区的未利用地主要为裸岩,对非点源污染的产生与阻截皆不产生作用,因此不将其纳入“源-汇”景观分类中。RDA分析中前两个排序轴分别可以解释非点源污染变化的71.91%、75.09%,因此“源”“汇”类型水平上的解释能力明显高于景观水平。根据各环境变量与排序轴之间的相关关系(表6),对



序号1~60表示子流域编号
No.1~60 represent the subbasin numbers

图6 景观水平非点源污染负荷与景观格局的RDA分析

Figure 6 RDA analysis between nonpoint source pollution load and landscape pattern at landscape level

于“源”景观,第一排序轴集中反映了景观的破碎程度(LPI、ED、AREA_MN>0.6);“汇”景观类型的排序结果表明,LPI、ED、LSI、AREA_MN、AI与第一排序轴的相关系数皆大于0.6,因此第一排序轴反映了包括斑块破碎度、复杂度、聚集度等大部分景观特征。

结合图7,在“源”景观中,AI、LPI、AREA-MN、ED等大部分景观指数皆与营养盐输出强度存在正相关关系,表明耕地、城镇建设用地等“源”景观破碎程度越大、面积越大、聚集程度越高,非点源污染营养盐输出的风险越高;本研究中,“汇”景观水平上LPI、AI、AREA-MN与总氮、总磷呈负相关关系,LPI与AREA-MN越大,表示人类活动对景观的影响越小,景观仍保留原来的大面积连通度,即大面积“汇”景观斑块的集聚降低了非点源污染的输出;ED、LSI与总氮、总磷输出量存在正相关关系,表明“汇”景观斑块的破碎程度越小、形状越复杂,越有利于阻截非点源污染物,这与已有的研究“林地、草地斑块密度越小,分布越集中,越有利于污染物的削减^[21]”相符。景观

表6 排序轴与景观格局指数的相关性分析及特征值描述

Table 6 Characteristic value description and correlation analysis between the ordination axis and landscape pattern index

变量 Variables	源景观 Source landscape		汇景观 Sink landscape	
	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2	轴1 Axis 1	轴2 Axis 2
PD	0.404	0.076	-0.011	0.053
LPI	-0.871	0.281	0.930	-0.270
ED	-0.662	-0.510	-0.662	-0.585
LSI	-0.272	-0.416	-0.670	-0.285
AREA_MN	-0.660	0.165	0.615	-0.248
AI	-0.554	0.196	0.677	0.074
特征值(<i>E</i>)	0.665	0.055	0.642	0.043
显著性测验(<i>P</i>)	0.002		0.002	

格局通过影响非点源污染的输出强度进一步制约着水质净化服务,刘怡娜等^[29]对长江流域水质净化服务与景观格局之间关系的研究表明,以农田为代表的“源”景观平均斑块面积、边缘密度与水质净化服务存在负相关,以森林为代表的“汇”景观的平均面积越大,分布越集中,水质净化服务越高,也印证了本文研究结果的合理性。

3 结论

(1)SWAT模型的率定、验证结果表明其在资江尾间集水区的适用性较好,可以准确地模拟研究区非

点源污染的时空分布特征:非点源总氮、总磷负荷总体上与降水、径流的变化一致,受人类活动影响个别月份存在时滞,空间上非点源总氮、总磷分布存在异质性。输出关键时期(4—6月)的污染负荷占全年总负荷的一半以上,同时,在关键期总氮、总磷的关键源区分别贡献了研究区非点源总污染的31.64%、43.73%,在关键时期对关键源区的非点源污染进行控制与治理是降低污染、改善水质的高效途径。

(2)景观格局与非点源污染过程的联系密切。景观水平上,景观格局可以累积解释非点源污染过程变化的57.9%;PD、ED、LSI、SHDI、LPI、CONTAG表征景观破碎度、复杂度、聚集度以及多样性的指数对非点源污染的指示程度较高,流域内景观越破碎、景观类型越复杂、人类活动对其影响越大,非点源污染越严重。

(3)“源”“汇”类型水平上,排序轴上景观格局对非点源污染过程的累积解释量分别为71.91%、75.09%,明显高于景观水平。景观格局指数对二者非点源污染的表征能力不一致,AI、LPI、AREA-MN、ED对“源”景观格局与非点源污染关系的指示最为显著;破碎度大、聚集程度高的“源”景观会加剧非点源污染的发生风险,而破碎度小、景观形状复杂、景观连通度高的“汇”景观可以提高阻截非点源污染的能力。

(4)根据景观格局与非点源污染之间的关系,在

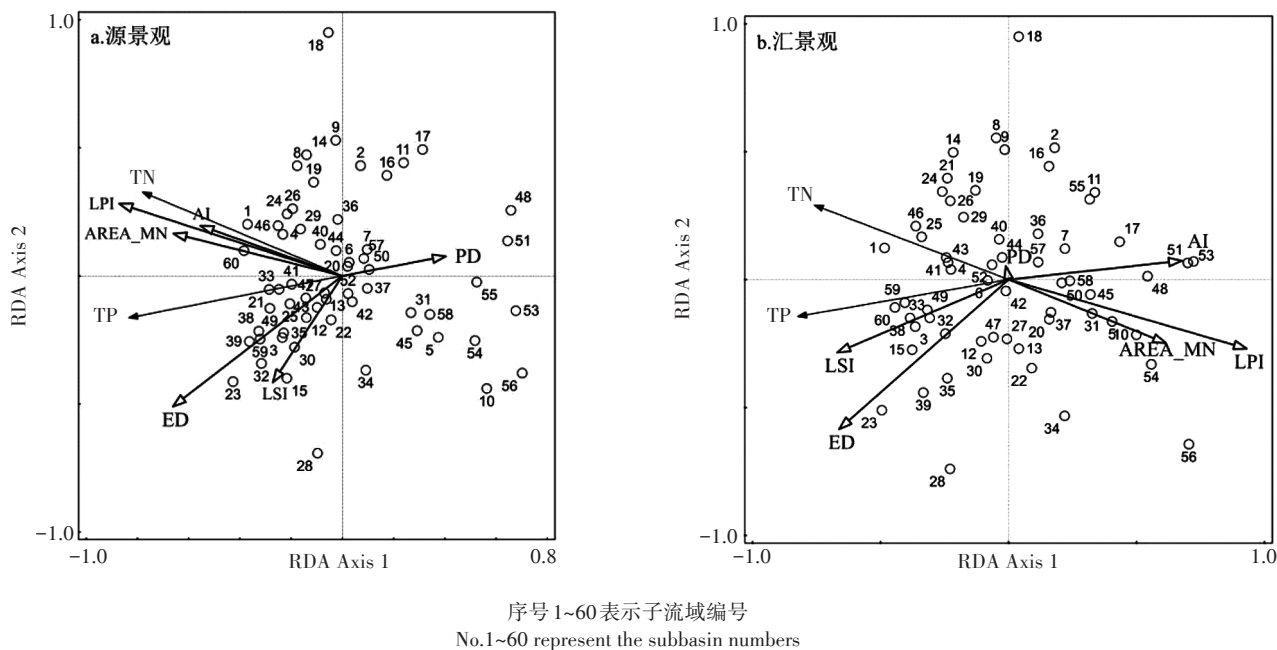


图7 类型水平上污染负荷与景观格局的RDA分析

Figure 7 RDA analysis between landscape pattern and pollution load at the type level

连片的“源”景观内布设“汇”景观,如在耕地与河岸带间设置植被缓冲带,城镇用地内增加城市绿地景观的面积,避免人为活动对大范围“汇”景观的破坏,提高林地、草地、水域等“汇”景观的连通性等措施可以有效地降低非点源污染输出的风险。

参考文献:

- [1] 苑韶峰, 吕军. 流域农业非点源污染研究概况[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 507-511. YUAN Shao-feng, LÜ Jun. A general introduction of agricultural nonpoint source pollution in watersheds[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 507-511.
- [2] Van der Molen D T, Portielje R, De Noble W T, et al. Nitrogen in Dutch freshwater lakes: Trends and targets[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1): 553-557.
- [3] Miller G T. Living in the environmental: An introduction to environmental science[M]. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992.
- [4] 彭畅, 朱平, 牛红红, 等. 农田氮磷流失与农业非点源污染及其防治[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 508-512. PENG Chang, ZHU Ping, NIU Hong-hong, et al. Nitrogen and phosphorus loss of farmland agricultural non-point source pollution and its prevention[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 508-512.
- [5] Green C T, Bekins B A, Kalkhoff S J, et al. Decadal surface water quality trends under variable climate, land use, and hydrogeochemical setting in Iowa, USA[J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(3): 2425-2443.
- [6] Yi H, Lee B, Jang S, et al. Nonpoint pollution loading forecast and assessment of optimal area of constructed wetland in dam watershed considering climate change scenario uncertainty[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 153: 105910.
- [7] Lian H S, Lei Q L, Zhang X Y, et al. Effects of anthropogenic activities on long-term changes of nitrogen budget in a plain river network region: A case study in the Taihu Basin[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 645: 1212-1220.
- [8] 汤洁, 刘畅, 杨巍, 等. 基于SWAT模型的大伙房水库汇水区农业非点源污染空间特性研究[J]. 地理科学, 2012, 32(10): 1247-1253. TANG Jie, LIU Chang, YANG Wei, et al. Spatial distribution of non-point source pollution in Dahuofang Reservoir catchment based on SWAT model[J]. *Chinese Geographical Science*, 2012, 32(10): 1247-1253.
- [9] 盛盈盈, 赖格英, 李世伟. 基于SWAT模型的梅江流域非点源污染时空分布特征[J]. 热带地理, 2015, 35(3): 306-314. SHENG Ying-ying, LAI Ge-ying, LI Shi-wei. Temporal-spatial distribution of non-point source pollution in Meijiang River watershed based on SWAT model[J]. *Tropical Geography*, 2015, 35(3): 306-314.
- [10] 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 等. 降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(10): 4564-4571. GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, et al. Impact of spatial heterogeneity of precipitation on area change of critical source area of non-point sources pollution[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(10): 4564-4571.
- [11] 徐华山, 徐宗学, 刘品. 漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 882-891. XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin. Estimation of nonpoint source pollutant loads and optimization of the best management practices (BMPs) in Zhangweinan River Basin[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 882-891.
- [12] Lee S, Sadeghi A M, McCarty G W, et al. Assessing the suitability of the Soil Vulnerability Index (SVI) on identifying croplands vulnerable to nitrogen loss using the SWAT model[J]. *Catena*, 2018, 167: 1-12.
- [13] 邓欧平, 孙嗣阳, 吕军. 长乐江流域非点源氮素污染的关键源区识别[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2307-2313. DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun. Identification of critical non-point source areas of nitrogen in Changle River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8): 2307-2313.
- [14] Özdemir A. Determination of non-point pollution critical areas to provide sustainable river basin management, Gördes Dam Basin, Turkey [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 544: 12013.
- [15] Uribe N, Srinivasan R, Corzo G, et al. Spatio-temporal critical source area patterns of runoff pollution from agricultural practices in the Colombian Andes[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 149: 105810.
- [16] 李铸衡, 刘森, 李春林, 等. 土地利用变化情景下浑河-太子河流域的非点源污染模拟[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2891-2898. LI Zhu-heng, LIU Miao, LI Chun-lin, et al. Non-point source pollution simulation under land use change scenarios in the Hun-Taizi River watershed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 2891-2898.
- [17] 毕直磊, 张妍, 张鑫, 等. 土地利用和农业管理对丹江流域非点源氮污染的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 135-141. BI Zhi-lei, ZHANG Yan, ZHANG Xin, et al. The impact of land use and agricultural management on non-point source nitrogen pollution in Dan River watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 135-141.
- [18] Billmire M, Koziol B W. Landscape and flow path-based nutrient loading metrics for evaluation of in-stream water quality in Saginaw Bay, Michigan[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(5): 1068-1080.
- [19] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数[J]. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413. CHEN Li-ding, FU Bo-jie, XU Jian-ying, et al. Location-weighted landscape contrast index: A scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “source-sink” ecological processes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [20] Zhang L, Lu W, Hou G, et al. Coupled analysis on land use, landscape pattern and nonpoint source pollution loads in Shitoukoumen Reservoir watershed, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101788.
- [21] 李明涛, 王晓燕, 刘文竹. 潮河流域景观格局与非点源污染负荷关系研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(8): 2296-2306. LI Ming-tao, WANG Xiao-yan, LIU Wen-zhu. Relationship between landscape

- pattern and non-point source pollution load in Chaohe River watershed[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(8):2296-2306.
- [22] 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 等. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(3):1091-1097. HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, et al. Effects of land use and landscape pattern on the nitrogen and phosphorus exports in Lanlingxi watershed of Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3):1091-1097.
- [23] 杨芳, 杨盼, 卢路, 等. 基于主成分分析法的洞庭湖水水质评价[J]. 人民长江, 2019, 50(增刊2):42-45, 58. YANG Fang, YANG Pan, LU Lu, et al. Water quality evaluation of Dongting Lake based on principal component analysis[J]. *Yangtze River*, 2019, 50(Suppl 2):42-45, 58.
- [24] 林日彭, 倪兆奎, 郭舒琨, 等. 近25年洞庭湖水水质演变趋势及下降风险[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12):4636-4643. LIN Ri-peng, NI Zhao-kui, GUO Shu-kun, et al. The trend and downside risk of water quality evolution in Dongting Lake in recent 25 years[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(12):4636-4643.
- [25] 秦迪岚, 罗岳平, 黄哲, 等. 洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8):193-198. QIN Di-lan, LUO Yue-ping, HUANG Zhe, et al. Pollution status and source analysis of water environmental in Dongting Lake[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(8):193-198.
- [26] 胡海英, 包为民, 余德华, 等. 资水流域益阳段水质现状分析与评价[J]. 中国农村水利水电, 2008(2):41-44. HU Hai-ying, BAO Wei-min, YU De-hua, et al. Water quality assessment in Yiyang reach of Zishui Basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(2):41-44.
- [27] 陈岩, 赵琰鑫, 赵越, 等. 基于SWAT模型的江西八里湖流域氮磷污染负荷研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(6):1112-1118. CHEN Yan, ZHAO Yan-xin, ZHAO Yue, et al. Estimating on nitrogen and phosphorus pollution load in Bali Lake Basin of Jiangxi province based on SWAT model[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(6):1112-1118.
- [28] 王小平, 张飞, 李晓航, 等. 艾比湖区域景观格局空间特征与地表水质的关联分析[J]. 生态学报, 2017, 37(22):7438-7452. WANG Xiao-ping, ZHANG Fei, LI Xiao-hang, et al. Correlation analysis between spatial characteristics of land use/cover landscape pattern and surface water quality in the Ebinur Lake area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22):7438-7452.
- [29] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 等. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系[J]. 生态学报, 2019, 39(3):844-852. LIU Yi-na, KONG Ling-qiao, XIAO Yi, et al. Relationship between landscape pattern and ecosystem water purification services in the Yangtze River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3):844-852.
- [30] 于小娟, 薛振山, 张仲胜, 等. 潮沟对黄河三角洲湿地典型景观格局的影响[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12):2504-2515. YU Xiao-juan, XUE Zhen-shan, ZHANG Zhong-sheng, et al. Impacts of tidal channels on the typical landscape of wetland in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(12):2504-2515.
- [31] 葛怀风, 秦大庸, 周祖昊, 等. 基于污染迁移转化过程的海河干流天津段污染关键源区及污染类别分析[J]. 水利学报, 2011, 42(1):61-67. GE Huai-feng, QIN Da-yong, ZHOU Zu-hao, et al. Analysis of key source areas and pollution type in the lower Haihe River based on pollution loading movement and transformation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(1):61-67.
- [32] 李振伟, 于兴, 姚孝友, 等. 农业非点源污染关键源区识别方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2907-2914. LI Zhen-wei, YU Xing, YAO Xiao-you, et al. Identification approaches of critical source areas of agricultural non-point source pollution: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12):2907-2914.
- [33] 耿润哲, 李明涛, 王晓燕, 等. 基于SWAT模型的流域土地利用格局变化对面源污染的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16):241-250. GENG Run-zhe, LI Ming-tao, WANG Xiao-yan, et al. Effect of land use/landscapes changes on diffuse pollution load from watershed based on SWAT model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16):241-250.
- [34] Hao F H, Zhang X, Wang X, et al. Assessing the relationship between landscape patterns and nonpoint-source pollution in the Danjiangkou reservoir basin in China[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2012, 48(6):1162-1177.
- [35] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5):1444-1449. CHEN Li-ding, FU Bo-jie, ZHAO Wen-wu. "source" and "sink" landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1444-1449.