



基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展

王金亮, 谭少军, 李梦冰, 倪九派, 周丙娟

Research progress in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes in watersheds

WANG Jinliang, TAN Shaojun, LI Mengbing, NI Jiupai, and ZHOU Bingjuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20221001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

城镇化对种植业面源污染影响的中介效应分析

Analysis of the mediation effect of urbanization on non-point source pollution from the planting industry

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1625–1635

福建省农业经济增长、农业结构与面源污染关系研究

Research on the relationship between agricultural economic growth, agricultural structure, and agricultural non-point source pollution in Fujian Province

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(8): 1277–1284

中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测

Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(7): 1079–1092

四川省化肥面源污染环境风险评估及趋势模拟

Environmental risk assessment and trend simulation of non-point source pollution of chemical fertilization in Sichuan Province, China

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1739–1751

农业面源污染防治的难点、问题及对策

Difficulty, problems and countermeasures of agricultural non-point sources pollution control in China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 236–245

联合梯田农业文化遗产地景观特征与景观资源利用

Landscape characteristics and utilization in agro-cultural heritage systems in Lianhe Terrace

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(12): 1752–1760



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20221001

王金亮, 谭少军, 李梦冰, 倪九派, 周丙娟. 基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(10): 1657–1667

WANG J L, TAN S J, LI M B, NI J P, ZHOU B J. Research progress in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes in watersheds[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(10): 1657–1667

基于流域面源污染过程的“源-汇”景观格局分析研究进展^{*}

王金亮^{1,2}, 谭少军³, 李梦冰¹, 倪九派^{3**}, 周丙娟¹

(1. 江西农业大学国土资源与环境学院 南昌 330045; 2. 农业农村部鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室 南昌 330045;
3. 西南大学资源与环境学院 重庆 400716)

摘要:“源-汇”景观理论被推荐为耦合景观格局与面源污染过程的有效途径,合理的“源-汇”景观格局配置有助于减少面源污染物输出,从而降低面源污染风险。论文分别从“源-汇”景观识别、“源-汇”景观格局分析,以及“源-汇”景观对面源污染物的影响3个方面,系统论述了基于面源污染过程的“源-汇”景观格局分析的研究进展。分析认为,针对基于面源污染过程的“源-汇”景观识别,目前研究主要停留在传统景观格局的意义上,需要考虑多要素的空间耦合关系和综合作用,来更好地判别特定面源污染过程的“源-汇”景观归属及其权重贡献。同时,针对“源-汇”景观格局分析,经典的景观空间负荷比指数只适合于环境背景比较相似的流域或地区,因此需要考虑量化更多的景观因子,并构建适合跨流域且具有可比性的“源-汇”景观指数,进而优化“源-汇”景观格局配置,降低流域景观生态安全风险。最后,“源-汇”景观格局研究所针对的主要面源污染物主要是氮磷等传统面源污染物,因此需要扩大“源-汇”景观格局对更多新型面源污染物的指示研究,为更深层次地研究流域景观格局与面源污染过程的耦合关系提供参考。

关键词:“源-汇”景观; 景观指数; 景观格局; 面源污染

中图分类号: F323.22

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Research progress in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes in watersheds^{*}

WANG Jinliang^{1,2}, TAN Shaojun³, LI Mengbing¹, NI Jiupai^{3**}, ZHOU Bingjuan¹

(1. School of Land Resources and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Watershed Agricultural Resources and Ecology of Ministry of Agriculture and Rural Affairs in China, Nanchang 330045, China;
3. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: Source-sink landscape theory is recommended as an effective way to couple landscape pattern and non-point source pollution processes. A reasonable source-sink landscape pattern layout aids in minimizing nonpoint source pollution risk by lowering non-point source pollution production. In this study, based on previous research results and literature reviews, advances in source-sink landscape pattern analysis based on non-point source pollution processes were systematically reviewed from three perspectives, in-

^{*} 国家自然科学基金项目(42207416)资助

^{**} 通信作者: 倪九派, 主要从事水土保持与面源污染研究。E-mail: nijiupai@163.com

王金亮, 主要从事景观格局与面源污染过程耦合机制研究。E-mail: wjlgutu@jxau.edu.cn

收稿日期: 2022-12-18 接受日期: 2023-05-08

^{*} This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (42207416).

^{**} Corresponding author, E-mail: nijiupai@163.com

Received Dec. 18, 2022; accepted May 8, 2023

cluding distinction of source-sink landscapes, quantization of source-sink landscape patterns, and the indication of source-sink landscapes to non-point source pollutants. To investigate the source-sink landscape based on non-point source pollution, the current research primarily maintains the sense of traditional landscape patterns, and it is necessary to consider spatial coupling relationships and comprehensive functions of multiple elements in order to better distinguish the source-sink landscape ownership in non-point source pollution processes. For analysis of source-sink landscape patterns, the classical location-weighted landscape contrast index is only suitable for watersheds or regions with similar environmental backgrounds. Therefore, it is necessary to consider quantifying more landscape factors to construct or improve the source and sink landscape pattern indices more comprehensively and then optimize the source-sink landscape pattern configuration and reduce risks to watershed landscape ecological security. Finally, the main non-point source pollutants in this study of source-sink landscape patterns were mainly traditional non-point source pollutants such as nitrogen and phosphorus. Therefore, it is necessary to expand source-sink landscape pattern analysis to indicate more non-point source pollutants in order to provide reference benchmarks for future research to better reflect coupling relationship between watershed landscape patterns and non-point source pollution processes.

Keywords: Source-sink landscape; Landscape index; Landscape pattern; Non-point source pollution

面源污染是导致水体环境污染的重要因素,不仅威胁水生态系统安全,同时也会影响人类健康生活和社会经济发展,在全球范围内已经越来越成为突出的环境问题^[1-2],因此,有效控制面源污染已成为许多国家和地区水环境治理的关键。从景观生态学视角看,面源污染物在异质斑块间的迁移行为受到不同“源-汇”斑块的影响和控制,不同“源-汇”景观的数量比例和空间格局,均对地表水环境产生影响^[3-4]。因此,在很难控制总体污染物潜力的前提下,优化流域景观结构与空间配置是减少面源污染对水体危害的最重要途径之一^[5-6]。

面源污染与地表景观格局的耦合关系与调控机理一直是国内外关注的科学问题,也是景观生态学所关注的热点方向以及重难点之一^[7-9],大量研究表明,在影响面源污染的诸多因子中,流域景观的空间特征影响并制约着面源污染的发生发展过程^[10-12],并且大量景观格局指数被创建用来表征流域景观格局对面源污染过程的影响^[13-15]。然而常规景观指数的理论基础基本上可归结为景观格局分析中经典的“斑块-廊道-基质”范式,而这无法很好地耦合特定的生态过程^[16-17],因此需要新的理论范式加以补充和完善。其中,“源-汇”景观理论被推荐为耦合景观格局与生态过程的有效途径,该理论将景观单元根据功能不同分为“源”景观和“汇”景观,并通过生态过程这一“流”动路径,构建“源”与“汇”的联系,将生态过程融入到景观格局分析中,逐渐形成源-流-汇景观格局分析范式^[18]。由此,“源-汇”景观理论的提出,为解读景观格局与生态过程关系研究中的难点和困境提供了一个新的思路,也适用于面源污染过程研究^[19-20],用以解释不同尺度流域景观格局与面源污染过程的源汇关系。尽管如此,由于地表景观的空间异质性,以及地表过程的尺度效应,流域景观格局与面源污

染过程的源汇关系还有许多地方值得深入探究,需要进一步开展流域“源-汇”景观识别及其演变的面源污染响应机理研究。因此,本文通过系统梳理基于面源污染过程的“源-汇”景观识别及其空间格局分析,以及氮磷面源污染物对“源-汇”景观的响应机制,提出现有研究可能存在的问题和发展趋势,从而为流域“源-汇”景观格局与面源污染过程的耦合关系研究提供借鉴和参考。

1 基于面源污染过程的“源-汇”景观识别

1.1 “源-汇”景观的理解

“源-汇”景观这一概念性名词的提出是基于传统景观格局指数无法很好地指示生态学意义的研究背景,将“源”“汇”的概念引入景观生态学研究,并从景观生态功能角度,将景观类型从“源”“汇”角度进行再分类,进而提出一整套理论研究,形成了“源-汇”景观理论。该理论认为,“源”景观是指那些可以促进生态过程发展与正向演变的景观类型,而“汇”景观是指那些可以阻止或延缓生态过程发展与正向演变的景观类型^[21]。在面源污染过程中,“源-汇”景观单元类型的判别需要依据面源污染过程中的养分流失而定,重点在于判断该景观类型在面源污染过程中起到正向推动作用还是负向阻滞作用,如果景观单元对面源污染过程的正向推动作用大于负向阻滞作用,则该景观单元被归为“源”景观单元,反之则为“汇”景观单元,而且“源-汇”景观单元之间可以相互转换,如图 1 所示。从物质和能量平衡角度来看,在面源污染过程中,“源”景观单元上的氮磷等养分输出大于输入,即有物质能量流出该景观单元而补充到周边的景观单元中;相反,“汇”景观单元上的氮磷等养分往往是输入大于输出,将多余的物质能量在该景观单元上富集。

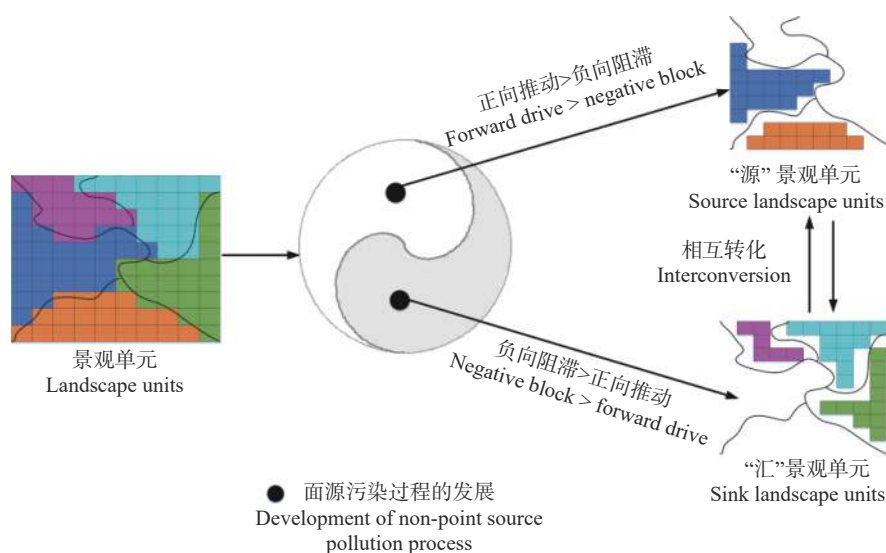


图 1 基于面源污染过程的“源-汇”景观单元示意图

Fig. 1 Concept of “source-sink” landscape units based on the process of non-point source pollution

1.2 “源-汇”景观的判别

由于“源-汇”景观是基于景观的总体属性特征和总体功能特征而分类的,因此在判别景观类型的“源-汇”归属上,现有研究主要以定性为主,主要依据主观经验知识划分“源-汇”景观类型^[22-23]。对于面源污染过程来说,多数研究对“源-汇”景观的判定停留在传统景观格局的意义上。一般认为农田、居民点、果园等均是“源”景观类型,因为这些景观类型较多的养分流失和面源污染物输出导致该地区面源污染加剧和湖泊水体的富营养化;林地、草地、湿地等属于“汇”景观类型,因为这些景观通过有效拦截和吸纳水土流失物质和面源污染物,减缓了流域面源污染发生风险。然而,地表景观仅仅是下垫面在一定时间内的一种静态表现,这种表现相对于面源污染的形成来说并不能完全反映出格局对过程的响应,在宏观尺度上也无法直接识别并判断景观类型对面源污染形成过程的影响程度。

为了避免主观经验所带来的不确定性,已有相关研究提出需要定量判别“源-汇”景观。许申来等^[23]认为“源-汇”景观的判定人为因素较强,缺乏客观的定量标准,且提出不同时刻该流域的侵蚀力和景观阻力的大小是判断该时刻某一点是景观“源”或景观“汇”的关键;也有研究通过对比模型模拟结果进行“源-汇”景观归类,例如 Yang 等^[24]利用泥沙输移分布模型模拟土壤侵蚀率,通过比较不同土地利用的土壤侵蚀率来判定流域景观类型的源汇归属;Wu 等^[25]利用泥沙输移分布模型模拟吸附态有机碳、基于输出系数模型模拟溶解态有机碳,然后通过比较不同土地利用类型的吸附态有机碳、溶解态有机碳和总

有机碳大小来判定流域景观类型的源汇归属。尽管如此,以上定量判别“源-汇”景观的方法仍然是基于地表景观的“斑块-廊道-基质”模式,无法体现“源-汇”景观内部的时空异质性。为此,相关研究从影响面源污染过程的外部环境因子作用机理来识别影响生态过程的“源-汇”景观格局,例如, Wang 等^[26]认为利用静态的镶嵌景观类型进行“源-汇”分类,无法很好地指示动态面源污染过程,因此,将影响面源污染的主要景观因子指标划分为景观阻力系数指标(植被覆盖度、地表粗糙度和曼宁糙率系数)和景观动力系数指标(年均降雨量、坡度、土壤可蚀性和径流曲线数),并构建了景观阻/动力成本模型,然后依据景观单元的景观阻/动力成本大小进行“源-汇”景观单元的识别,若该景观单元的景观动力成本大于景观阻力成本,则属于“源”景观单元,反之,则为“汇”景观单元,如图 2 所示。由此可见,该研究突破了传统景观格局模式——“斑块-廊道-基质”的束缚,在栅格单元尺度上量化了源汇景观单元。

2 基于面源污染过程的“源-汇”景观格局分析

“源-汇”景观概念的提出,其目的在于探讨具有生态学意义的景观格局分析方法,从看似无序的景观格局中,发现潜在的生态学规律,确定产生和控制景观格局的主控因子及其形成机制,探讨区域景观格局优化的途径和方法^[27-28]。针对面源污染过程,“源-汇”景观空间格局的分析是“源-汇”景观理论的核心研究内容,且主要涉及 3 个方面的内容,分别是空间尺度的选择、“源-汇”景观格局指数的构建和“源-汇”景观的贡献权重量化。

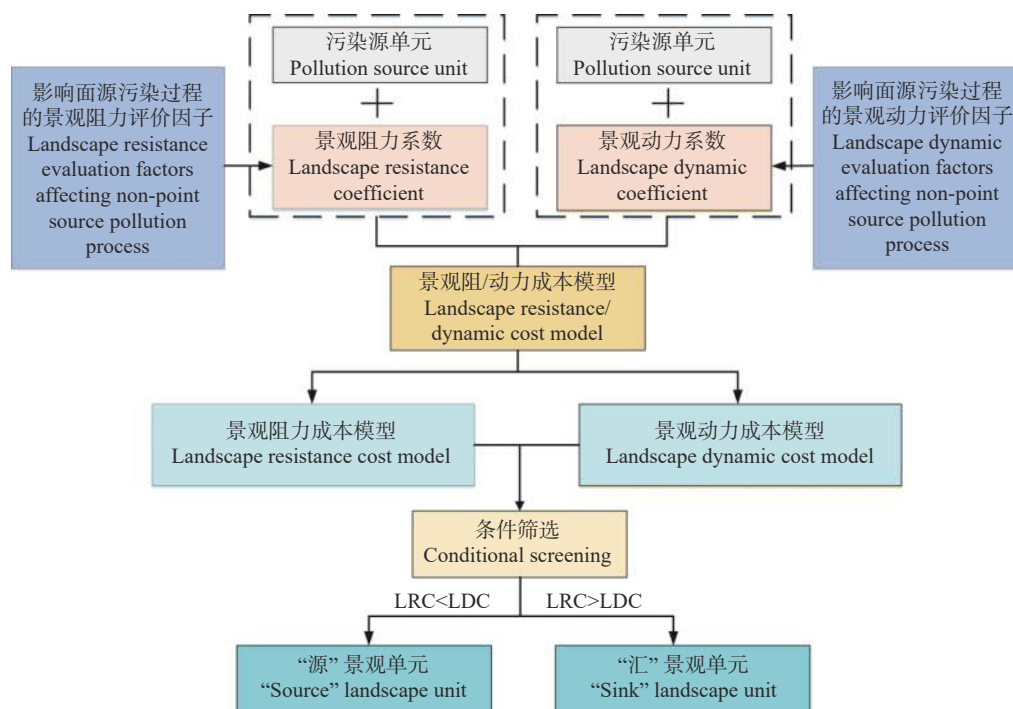


图 2 基于景观阻/动力的“源-汇”景观单元识别

Fig. 2 Identification of “source-sink” landscape units based on landscape resistance and dynamic

LRC 指景观阻力成本, LDC 指景观动力成本。LRC refers to landscape resistance cost. LDC refers to landscape dynamic cost.

2.1 “源-汇”景观的空间尺度选择

面源污染的养分流失是与空间和时间相关的过程,而景观格局动态及其“源-汇”效应也会受尺度的影响,一方面不同尺度景观类型及其空间配置格局对面源污染过程的“源-汇”动态有重要影响;另一方面各景观要素存在显著的交互作用和尺度效应,其作用程度和贡献程度随时空变化而不断发生消长。因此,尺度问题的存在导致“源-汇”景观和过程发生转换的不确定性,进而增加定量识别和有效描述“源-汇”景观格局特征及其对面源污染过程影响的难度。

综合现有文献分析,针对面源污染过程,“源-汇”景观格局分析的空间尺度主要包括流域或子流域尺度、水文响应单元或分室单元尺度、景观单元/像元尺度等,且以流域或子流域为空间尺度单元的居多。“源-汇”景观理论的提出是以景观空间负荷比指数的建立为基础,该指数是计算整个流域所有景观斑块的累计效应,反映整个流域的“源-汇”景观空间布局,即一个流域或子流域为一个指数值;更为重要的是,该指数不受到尺度变化的影响,具有跨尺度的功能,一般适合于流域或集水区范围^[22,29],因此该指数被应用于不同空间尺度的大小流域中。然而,已有研究指出景观空间负荷比指数仅能反映流域“源-汇”景观格局影响面源污染过程的整体情况,只能适用于环境背景相似的流域,不能够反映更小空间尺度的空

间异质性^[13,26]。

因此,需要针对流域内部更小的单元进行“源-汇”景观格局的分析,如水文响应单元^[30-31]、分室单元^[27]等,即利用流域空间离散化技术,综合叠加土地利用单元、土壤类型分布单元和坡度单元等对流域进行离散化分割,在每一个离散化单元内包含有唯一的土地覆盖、土壤和管理措施。例如, Wang 等^[32]利用 AnnAGNPS 模型,以分室单元为统计单元,应用景观空间负荷比指数,模拟了三峡库区小流域的“源-汇”景观对氮磷面源污染的影响; Zhou 等^[33]以水文响应单元为空间尺度,创建了“源-汇”水文响应单元景观格局指数和地形-水文响应单元综合景观指数; Zhang 等^[34]构建了具有唯一土地利用类型和土壤类型的水文响应单元,并构建了基于此的景观负荷比指数。

2.2 “源-汇”景观指数的构建

对“源-汇”景观格局的分析,更多研究是发展景观指数对面源污染过程的表征,其中应用最为广泛的是景观空间负荷比指数(location-weighted landscape contrast index, LWLCI)。该指数的建立是在考虑各类“源-汇”景观对面源污染养分流失过程影响的基础上,从景观单元相对于流域出口的相对距离、相对高度和坡度等方面,提出衡量景观空间分布格局的综合方法^[22,29]。该指数是指促进面源污染过程的地表景观类型在空间上某一个方向的面积累计曲线

积分值与阻滞面源污染过程的地表景观类型在空间上某一方向的面积累计曲线积分值的比值。该指标计算首先分别按照相对距离、相对高程和坡度进行等级划分(例如 100 等分),并统计各等级“源-汇”景观面积,再按照从小到大的顺序计算各等级景观累计面积比例,然后以相对距离、相对高程和坡度等级为横坐标,景观累计面积比例为纵坐标绘制并计算洛伦兹曲线的积分(图 3);其次,确定所有“源-汇”景观对面源污染的贡献权重,然后再计算各“源-汇”景观类型分别占整个流域的面积比例;最后,计算景观空间负荷比指数,具体表达式见表 1。

在具体应用时,先对流域及其子流域的“源-汇”景观进行分类,然后计算每个流域或子流域的景观空间负荷比指数,最后同流域出水口或监测点的氮、磷等污染物监测指标进行相关分析,以此反映流域景观格局与面源污染过程的耦合关系。相关研究表明,景观空间负荷比指数相对于其他景观面积结构指数,能够更有效地表征氮磷等面源污染物的流失量。例如孙然好等^[35]针对海河流域计算了总氮浓度与景观空间负荷比指数、源汇景观面积比例的相关性,并发现“源-汇”景观格局指数(LWLI)与总氮的相关系数要高于简单的景观面积比例。由此,景观空间负荷比指数(LWLCI)的提出创造性地解决了如何将空间性的景观格局与以点为中心的监测数据联系起来的景观生态学问题,并试图将景观空间格局和面源污染过程耦合在一起。

然而,景观空间负荷比指数存在一定的缺陷,主要表现在没有考虑影响养分流失过程形成的其他因子,如养分投入、降雨、土壤、植被覆盖等。因此该评价模型更适合于环境背景比较相似的流域或地区。为了更好地对比多流域、多区域的“源-汇”景观空间差异,相关研究对景观空间负荷比指数进行了改进,或创建了其他“源-汇”景观格局指数。Wang 等^[26]

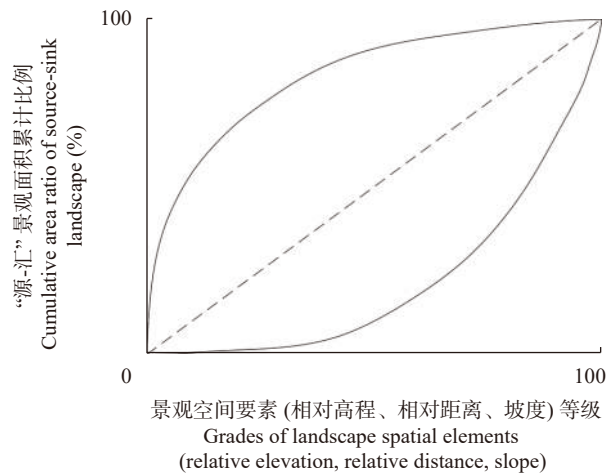


图 3 “源-汇”景观空间分布示意图^[29]

Fig. 3 Sketch map of spatial distribution of source and sink landscape^[29]

提出将面源污染过程的相关影响因子耦合,构建景观阻/动力评价指标,并借鉴最小累计耗费距离模型评价景观阻/动力成本,以此作为“源-汇”景观的贡献权重,构建了新的源汇景观格局指数,具体表达式见表 1。Zhou 等^[33]认为只考虑土地利用单元作为景观单元来划分“源”景观和“汇”景观,就会缺少对坡度和土壤类型的影响,因此提出以水文响应单元为景观单元,相对于某一坡度建立“源-汇”水文响应单元景观格局指数,具体表达式见表 1。如果研究区域小到只有“源”或“汇”景观存在时,景观空间负荷比指数值将是无穷大或无穷小,因此 Jiang 等^[36-37]提出利用栅格尺度最短表面距离代替高程和距离,构建了修正的网格景观空间负荷比指数,具体表达式见表 1。Wan 等^[38]利用输出系数模型计算苹果(*Malus pumila*)园地、耕地和建设用地的输出系数,构建了总污染负荷的源强度;同时,利用景观指数及其权重建立景观组合指数构建了景观汇强度;然后利用总污染负荷源强度和景观汇强度构建景观源汇对比指数,具体表达式见表 1。

表 1 “源-汇”景观指数及其参数意义

Table 1 “Source-sink” landscape indices and meaning of their parameters

“源-汇”景观指数 Source-sink landscape indice	计算公式 Calculation formula	参数意义 Meaning of parameter	文献来源 Literature sources
景观空间负荷比 指数 Location- weighted landscape contrast index (LWLCI)	$LWLCI = \log \left[\frac{\sum_{i=1}^m (S_i \times W_i \times P_i)}{\sum_{j=1}^n (S_j \times W_j \times P_j)} \right]$	S_i和S_j分别是“源”景观i和“汇”景观j的面积累计比例曲线的积分, W_i和W_j分别是“源”景观i和“汇”景观j影响面源污染的权重, P_i和P_j分别是“源”景观i和“汇”景观j的面积比例 S_i and S_j are the integrals of the area cumulative proportion curve of “source” landscape i and “sink” landscape j, respectively. W_i and W_j are the weights of “source” landscape i and “sink” landscape j affecting non-point source pollution, respectively. P_i and P_j are the area ratios of “source” landscape i and “sink” landscape j, respectively	[22,29]

续表 1

“源-汇”景观指数 Source-sink landscape indice	计算公式 Calculation formula	参数意义 Meaning of parameter	文献来源 Literature sources
“源-汇”景观格局指数 “Source-sink” landscape pattern index (LWLI)	$LWLI = \frac{A_{\text{source}} \times E_{\text{source}} \times AP_{\text{source}}}{A_{\text{source}} \times E_{\text{source}} \times AP_{\text{source}} + A_{\text{sink}} \times R_{\text{sink}} \times AP_{\text{sink}}}$	E_{source} 和 R_{sink} 分别是“源”景观单元的动力成本和“汇”景观单元的阻力成本, A_{source} 和 A_{sink} 分别是“源”景观沿着景观动力成本由低到高方向、“汇”景观沿着景观阻力成本由高到低方向的洛伦兹曲线累计面积, AP_{source} 和 AP_{sink} 分别是“源”景观和“汇”景观面积比例 E_{source} and R_{sink} are the dynamic cost of the source landscape units and the resistance cost of the sink landscape units, respectively. A_{source} and A_{sink} are the cumulative area of the Lorenz curve of the source landscape along the landscape dynamic cost from low to high, and the sink landscape along the landscape resistance cost from high to low, respectively. AP_{source} and AP_{sink} are the area ratio of source landscape units and sink landscape units, respectively	[26]
坡度-水文响应单元景观指数 Slope-hydrological landscape index (SHLI)	$SHLI = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \times P_{\text{source}_i})}{\sum_{i=1}^n (S_i \times P_{\text{sink}_i})}$	P_{source_i} 为第 <i>i</i> 个水文响应景观单元水土流失源的权重; P_{sink_i} 为第 <i>i</i> 个水文响应景观单元水土流失汇的权重; S_i 为第 <i>i</i> 个水文响应景观单元的面积 P_{source_i} is the weight of the soil erosion source of hydrological response landscape unit <i>i</i> . P_{sink_i} is the weight of the soil erosion sink of the hydrological response landscape unit <i>i</i> . S_i is the area of the hydrological response landscape unit <i>i</i>	[33]
水文响应单元景观对比指数 Hydrological response unit landscape contrast index (HRULCI _x)	$W_i = f(L, P, R, D, N, S, F, A)$ $HRULCI_x = \sum_{i=1}^n (W_{ix} \times A_i) - \sum_{j=1}^n (W_{jx} \times A_j)$	W_{ix} 和 W_{jx} 分别是“源”景观单元 <i>i</i> 输出污染物 <i>x</i> 的权重和“汇”景观单元 <i>j</i> 接受污染物 <i>x</i> 的权重, A_i 和 A_j 分别是“源”景观水文响应单元 <i>i</i> 面积和“汇”景观水文响应单元 <i>j</i> 面积。 L 、 P 、 R 、 D 、 N 、 S 、 F 、 A 分别是土地利用/地表覆被、坡度、降雨量、有效距离、植被指数、土壤类型、化学肥料和土壤有效湿容量的修正系数 W_{ix} and W_{jx} are the weights of the output pollutant <i>x</i> of source landscape unit <i>i</i> and the receiving pollutant <i>x</i> of sink landscape unit <i>j</i> , respectively. A_i and A_j are the areas of the source landscape hydrological response unit <i>i</i> and the area of the sink landscape hydrological response unit <i>j</i> , respectively. L , P , R , D , N , S , F , A are the correction coefficients of land use / land cover, slope, rainfall, effective distance, vegetation index, soil type, chemical fertilizer and soil available water capacity, respectively	[34]
修正的网格“源-汇”景观对比指数 Modified grid “source-sink” landscape contrast index (mGLCI)	$mGLCI = \left(1 - \frac{D}{D_{\max}}\right) \times \left(1 + \frac{S}{S_{\max}}\right) \times \left(\sum_{i=1}^m W_x \cdot A_i - \sum_{j=1}^n W_x \cdot A_j\right)$	D 和 $D_{\max}$ 分别是网格距水体的最短地表距离及其最大值, S 和 $S_{\max}$ 分别是网格坡度及其最大值, W_x 是从“源”景观输出污染物 <i>x</i> 的权重, m 和 n 分别是“源”景观和“汇”景观的类型数目, A_i 和 A_j 分别是土地利用类型 <i>i</i> 和土地利用类型 <i>j</i> 的面积比例 D and $D_{\max}$ are the shortest surface distance from the grid to the water body and its maximum value, respectively. S and $S_{\max}$ are the grid slope and its maximum value, respectively. W_x refers to the weight of the pollutant <i>x</i> output from the source landscape. m and n are the number of types of source landscape and sink landscape, respectively. A_i and A_j are the area ratios of land use type <i>i</i> and land use type <i>j</i> , respectively	[36-37]
景观“源-汇” 比指数 Landscape source sink contrast index (LSSCI)	$\text{Source}' = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[C_i \times \left(1 + \frac{\text{slope}_j}{\text{slope}_{\max}} \right) \times \left(1 - \frac{\text{distance}_j}{\text{distance}_{\max}} \right) \times A_i \right] \right\} / \left(\sum_{i=1}^n A_i \right)$ $\text{Sink}' = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[1 - \sum_{i=1}^8 (W_i \times L_i) \right] \times A_j \right\} / \sum_{i=1}^n A_j$ $\text{Source} = \frac{\text{Source}' - \text{Source}'_{\min}}{\text{Source}'_{\max} - \text{Source}'_{\min}}, \quad \text{Sink} = \frac{\text{Sink}' - \text{Sink}'_{\min}}{\text{Sink}'_{\max} - \text{Sink}'_{\min}}$ $\text{LSSCI} = \text{Source} / (\text{Source} + \text{Sink})$	Source'和Sink'分别是子流域的“源”强度和“汇”强度,Source和Sink分别是子流域的归一化“源”强度和归一化“汇”强度, C_i 是土地利用类型 <i>i</i> 的总氮或总磷输出系数, slope_j 和 distance_j 分别是土地利用图斑 <i>j</i> 的坡度和距河流的距离, $\text{slope}_{\max}$ 和 $\text{distance}_{\max}$ 分别是土地利用图斑 <i>j</i> 的坡度最大值和距河流距离最大值, L_i 和 W_i 分别是景观指数 <i>i</i> 的值和权重, A_i 和 A_j 分别是土地利用类型 <i>i</i> 和土地利用类型 <i>j</i> 的面积 Source' and Sink' are the source intensity and sink intensity of the sub-basin, respectively. Source and Sink are the normalized source intensity and normalized sink intensity of the sub-basin, respectively. C_i is the total nitrogen or total phosphorus output coefficient of land use type <i>i</i> . slope_j and distance_j are the slope and distance from the river of land use patch <i>j</i> , respectively. $\text{slope}_{\max}$ and $\text{distance}_{\max}$ are the maximum slope and distance from the river of land use patch <i>j</i> , respectively. L_i and W_i are the value and weight of landscape index <i>i</i> , respectively. A_i and A_j are the areas of land use type <i>i</i> and land use type <i>j</i> , respectively	[38]

2.3 “源-汇”景观的贡献权重量化

构建“源-汇”景观格局指数,最主要的是要量化“源-汇”景观对面源污染的贡献权重,而“源-汇”景观对面源污染的贡献差异是“源”“汇”景观的最大特点^[39],因为“源-汇”景观之间的贡献必然存在差异,即使是同一类“源”或“汇”景观类型,也需要进一步考虑它们对面源污染过程的贡献差异。因此,针对“源-汇”景观对面源污染的贡献,需要设置相应的权重大小。Chen 等^[22]提出选择一种标准的“源”“汇”景观类型,其权重赋值为 1,然后通过比较,可以对其他景观类型赋予一定的权重,例如将居民区作为标准的“源”景观类型,其他地类根据对养分流失的潜在贡献进行权重赋值,其中大豆 (*Glycine max*) 田为 0.5、棉花 (*Gossypium spp.*) 田和水稻 (*Oryza sativa*) 田均为 0.8。相关研究采用了土壤侵蚀通用方程中的植被覆盖与管理因子 (*C* 值) 对不同“源-汇”景观类型的贡献权重进行赋值^[40-41]。例如孙然好等^[35]借鉴 *C* 值对海河流域总氮流失中的“源-汇”景观贡献权重赋值,其中居民地为 1.0、水田为 0.8、旱地为 0.6、林地为 0.8、草地为 0.6。也有相关研究利用不同地类的污染物输出系数进行设置,例如 Wan 等^[38]利用输出系数模型确定苹果园地、建设用地和耕地农业面源污染源强度; Liu 等^[42]利用统计年鉴数据确定农业和农村人口的污染物输出系数,以此作为不同“源-汇”景观的贡献权重。

多数研究的“源-汇”景观贡献权重是对不同“源-汇”景观类型进行简单赋值,而这无法体现面积较大的“源-汇”景观斑块内部的贡献差异。同时,多数研究也较少考虑面源污染过程受地表景观要素的叠加影响。地表景观由诸多景观要素组成,存在空间异质性,不同景观单元由于土地利用、地形地貌、土壤条件、降雨径流等景观要素的空间差异,对面源污染的贡献差异也很大^[26]。尽管如此,也有相关研究对源汇景观输出污染物权重的设置考虑了较多景观要素,例如王金亮等^[30]以水文响应单元为源汇景观单元,考虑了景观类型、土壤可蚀性和坡度,综合评价源汇景观单元权重。Zhang 等^[43]认为“源-汇”景观输出污染物权重确定需要考虑土地利用类型、坡度、降雨、有效距离、植被指数、土壤类型、化学肥料投入和土壤有效含水量的校正系数等景观要素。

3 “源-汇”景观对面源污染的影响

面源污染的发生过程实质上是面源污染物通过径流等路径汇集累积的过程,从“源-汇”景观的角度

去识别景观对面源污染物的影响,主要是利用景观空间负荷比指数及其他“源-汇”景观指数反映“源-汇”景观及其格局特征,并建立指数与流域出水口或监测断面的面源污染物指标的统计关系。

3.1 “源-汇”景观对氮磷等传统面源污染物的指示

传统面源污染物主要为氮和磷,也是“源-汇”景观格局研究中所针对的主要面源污染物。在“源-汇”景观对氮磷面源污染物的影响研究中,涉及到的传统水质指标为总氮 (TN)、氨态氮、硝态氮、总磷 (TP)、正磷酸盐等。多数研究表明,反映“源-汇”景观格局的景观空间负荷比指数同氮、磷相关指标存在一定的相关性^[44];李崇巍等^[27]研究发现“源-汇”景观空间格局的改变引发了于桥库全流域 TP 污染负荷的明显上升;王瑛等^[45]对太湖的入湖港口小流域景观空间特征与水质关系进行了探讨,发现景观空间负荷比指数的降低对氨氮浓度影响较大;Yu 等^[46]统计分析结果表明 4 种景观空间负荷比指数与硝态氮和 TN 的关系为显著正相关性,而与氨态氮和 TP 的相关性较弱。由此可见,该指数能够将点状的定量观测数据与面状的景观格局数据结合起来,很好地表征不同空间尺度的景观格局与氮磷面源污染过程之间的关系,受空间尺度影响较小。然而,已有研究指出景观空间负荷比指数只适合于环境背景整体差异不大的地区,对于地理环境差异大的不同流域,该指数并不能够很好地指示面源污染物的空间分布,例如孙然好等^[35]研究结果表明海河流域不同地理单元景观空间负荷比指数与 TN 的相关性存在差异,这主要与不同区域的地理特征和土地利用格局有关系。景观空间负荷比指数作为一种比重结果,可以通过比较来判定其所在区域景观格局对面源污染过程的潜在影响或者风险程度,但不能计算具体污染数值。针对景观空间负荷比指数在大尺度区域的不可对比性, Wang 等^[26]、Tan 等^[47]利用植被覆盖度、地表粗糙度、曼宁糙率系数构建景观阻力系数,利用年降雨量、坡度、土壤可蚀性和径流曲线系数构建景观动力系数,然后利用耗费距离工具计算景观阻力和动力成本,进而作为“源-汇”景观的权重贡献,从而构建了新的源汇景观格局指数,并应用在三峡库区中,结果表明不同流域该指数与水质指标 (化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、TN、TP) 的相关系数均通过 *t* 分布的显著性检验。

在时间尺度上,相关研究针对不同水文时期,分析探讨流域景观格局对氮磷面源污染过程的影响,表明氮、磷两种面源污染物对“源-汇”景观格局在不

同水文时期的响应规律存在区域差异。例如张亚娟等^[40]在于桥水库流域的研究发现,从平水期到丰水期,景观空间负荷比指数与磷污染的相关性增加,而与氮污染相关性降低;刘鹏等^[41]在普者黑流域的研究发现枯水期和丰水期景观空间负荷比指数与水体 TN 的相关性不明显,而对氮、磷输出的解释能力在平水期相较于传统景观格局指数则更强。这主要是由于两者的研究区域地理特征差异较大,普者黑流域属于喀斯特岩溶地貌,地表水系支离破碎,地表水与地下水交互频繁,导致“源-汇”景观格局指数(LWLI)与氮磷浓度的相关性不及于桥水库流域高。

3.2 “源-汇”景观对新型面源污染物的指示

相比于氮磷等传统面源污染物的大量研究,“源-汇”景观对诸如持久性有机污染物、环境持久性药物、微塑料等新型面源污染物的指示研究较少。例如 Wu 等^[25]探讨了半城市化流域不同“源-汇”景观结构对非点源有机碳流失的贡献,认为景观格局对大多数子流域的吸附态有机碳损失总体上是不利的,而对整个流域的溶解态有机碳和总有机碳损失是有利的,这些损失形态的差异很大程度上归因于不同源汇结构,其中沿河网分布的稻田和农村居民点的水流长度是影响有机碳源汇空间配置的最不利因素。李敏等^[48]探讨了城郊流域“源-汇”景观格局特征对水体抗生素的影响,通过相关分析和冗余分析发现源汇景观负荷比指数与水体抗生素浓度呈正相关关系。针对新型面源污染物的研究相对较少的原因是目前现有例行环境监测仍以化学需氧量、生化需氧量、TP、TN 等总量型指标为主,对新型污染物产生风险的排放源不明确,而且新型面源污染物种类繁多,其环境赋存介质未知,因此无法用常规监测手段去定量解析新型面源污染物来源,及其与地表景观的源汇关系。

4 问题与展望

4.1 问题讨论

4.1.1 现有“源-汇”景观指数的不具可比性问题

对于“源-汇”景观格局与面源污染的耦合关系,大多数研究是将一个流域划分为多个子流域,以此解释流域内部不同子流域的面源污染物流失对景观源汇属性变化的响应规律。在同一个流域内,环境背景是相似的,不同子流域“源-汇”景观指数具有可比性,该指数越大,则该子流域景观格局对子流域出口贡献应该越大;相反,贡献越小。然而,现有研究对于跨流域源汇景观格局与面源污染过程耦合研究

相对较少,因为对于环境背景差异较大的不同流域,“源-汇”景观指数则不具有可比性,而这主要是由于不同流域之间的土地利用、地形地貌、土壤条件、降雨径流、社会经济活动等影响因子的时空差异,对养分流失的影响很大,进而导致“源-汇”景观对面源污染物流失贡献的时空分异。因此,如何构建跨流域且具有可比性的“源-汇”景观指数,以此增加指数的表征可信度,是值得深入探讨的问题。

4.1.2 影响面源污染的关键景观因子耦合问题

流域不同影响因子对面源污染的作用存在差别,表现为自然生态因子是面源污染发生和发展的潜在固有条件,人为干扰因子则是催化剂。一方面,多数研究基于独立同分布假设的经典统计学对面源污染影响因子的识别结果,所选取面源污染影响因子的指标数目往往较少,能够识别出的关键因子数目更少,较少的影响因子意味着很难全面理解面源污染过程的影响机制,因此无法给出防控流域面源污染的具体指导意见。另一方面,面源污染作为一个自然与社会交叉的综合问题,所涉及影响因子数量众多,会影响到地表“源-汇”景观格局对污染物流失的贡献关系,而且指标数量的增多容易造成分析的维数灾难。因此,在解析流域“源-汇”景观格局与面源污染过程的耦合关系中,需要有效识别面源污染过程的关键影响因子及其作用方式。但是如何从“源-汇”景观理论角度耦合关键景观因子对非点源污染的作用机理,并以此构建“源-汇”景观指数来量化“源-汇”景观格局对非点源污染的贡献的相关探究较少。

4.1.3 “源-汇”景观格局优化及其应用不足问题

景观生态学研究的核心在于景观格局与生态过程的相互作用及其尺度效应,目的在于通过改变和优化景观空间格局来维持景观功能、物质流和能量流的安全,而“源-汇”景观格局分析的目的也在于通过分析“源”“汇”景观在空间上的配置格局是否合理与平衡,进而探讨有利于调控面源污染过程的途径和方法。例如,基于相对距离的景观空间负荷比指数过大,表明更多的“源”景观的分布接近出水口或水体,污染风险会更高,因此需要根据到流域水体距离,由近到远依次设置“汇”景观、低负荷“源”景观、高负荷“源”景观,并且在“源”景观中镶嵌“汇”景观。尽管当前基于“源-汇”理论进行以非点源污染控制为目标的景观格局调控与优化思路已得到普遍认可,但是基于面源污染过程的“源-汇”景观格局优化配置实践研究相对较少,仅局限于由最佳管理措施(BMPs)延伸的微观尺度景观调控,以及流域尺度的“源-汇”

景观格局调控框架的建立, 相关调控理论的研究与案例实践仍处在探索阶段。

4.2 研究展望

流域景观及其空间格局与面源污染过程之间存在必然联系, 但两者之间的耦合关系异常复杂。借助“源-汇”景观理论方法可以改变该领域研究多局限于传统景观指数与污染物监测指标的统计性分析, 可以在不同空间尺度上对土地利用及其景观格局进行“源”“汇”的识别, 构建“源-汇”景观指数, 并建立与河流断面、流域出水口、监测点等指示氮、磷等指标的相关关系, 定量判断区域、流域和坡面的“源-汇”景观格局对面源污染过程的影响。

为此, 当前和未来在以下几个方面需要得到加强和深入研究: 1) 由于地表景观的诸多因子使得不同尺度空间景观存在空间异质性, 而面源污染过程中的污染物迁移与能量流动必然会受到这些景观因子的综合影响, 因此需要识别影响面源污染的关键因子, 才能更好地去判别影响面源污染过程的“源-汇”景观归属及其影响面源污染的权重贡献, 以此构建具有可比性的“源-汇”景观指数, 以便适合于跨流域的研究。2) 构建或改进的指数能否有效反映不同空间尺度景观格局对生态过程的影响, 需要结合对氮磷等污染物负荷相关的监测与模型模拟进行验证并修正, 以方便对比环境背景差异大的区域或流域景观格局与面源污染过程的耦合关系。3) 构建的“源-汇”景观指数需要更好地应用到不同流域以及区域尺度的景观格局优化与景观生态规划中, 真正发挥景观指数的实践效用和功能。4) 扩大“源-汇”景观理论在地表景观影响新型面源污染物研究的应用领域, 从“源-汇”景观角度去揭示更多面源污染物的流失过程机理。

参考文献 References

- [1] ONGLEY E D, ZHANG X L, YU T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1159–1168
- [2] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96–101
YANG L Z, FENG Y F, SHI W M, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 96–101
- [3] 陈利顶. 源汇景观格局分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015
CHEN L D. Source-sink Landscape Pattern Analysis and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2015
- [4] LOREAU M, DAUFRESNE T, GONZALEZ A, et al. Unifying sources and sinks in ecology and Earth sciences[J]. *Biological Reviews*, 2013, 88(2): 365–379
- [5] LEE S W, HWANG S J, LEE S B, et al. Landscape ecological approach to the relationships of land use patterns in watersheds to water quality characteristics[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2009, 92(2): 80–89
- [6] SHEN Z Y, HOU X S, LI W, et al. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in a typical urbanized watershed in the municipality of Beijing[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 96–107
- [7] BASNYAT P, TEETER L D, FLYNN K M, et al. Relationships between landscape characteristics and nonpoint source pollution inputs to coastal estuaries[J]. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539–549
- [8] 赵军, 杨凯, 邵俊, 等. 区域景观格局与地表水环境质量关系研究进展[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3180–3189
ZHAO J, YANG K, TAI J, et al. Review of the relationship between regional landscape pattern and surface water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(11): 3180–3189
- [9] STEPHENS C M, LALL U, JOHNSON F M, et al. Landscape changes and their hydrologic effects: interactions and feedbacks across scales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 212: 103466
- [10] OUYANG W, SONG K Y, WANG X L, et al. Non-point source pollution dynamics under long-term agricultural development and relationship with landscape dynamics[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 579–589
- [11] SHEN Z Y, HOU X S, LI W, et al. Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: a case study in a typical urbanised watershed in China[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 417–427
- [12] LIU H Y, MENG C, WANG Y, et al. Multi-spatial scale effects of multidimensional landscape pattern on stream water nitrogen pollution in a subtropical agricultural watershed[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 321: 115962
- [13] LAUSCH A, BLASCHKE T, HAASE D, et al. Understanding and quantifying landscape structure—A review on relevant process characteristics, data models and landscape metrics[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 31–41
- [14] LI X Z, JONGMAN R H G, HU Y M, et al. Relationship between landscape structure metrics and wetland nutrient retention function: a case study of Liaohe Delta, China[J]. *Ecological Indicators*, 2005, 5(4): 339–349
- [15] WU J H, LU J. Spatial scale effects of landscape metrics on stream water quality and their seasonal changes[J]. *Water Research*, 2021, 191: 116811
- [16] 郭建国. 景观生态学中的十大研究论题[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 2074–2076
WU J G. The key research topics in landscape ecology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2074–2076
- [17] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5521–5531

- CHEN L D, LIU Y, LYU Y H, et al. Landscape pattern analysis in landscape ecology: current, challenges and future[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5521–5531
- [18] 孙然好, 孙龙, 苏旭坤, 等. 景观格局与生态过程的耦合研究: 传承与创新[J]. *生态学报*, 2021, 41(1): 415–421
- SUN R H, SUN L, SU X K, et al. Study on the coupling of landscape pattern and ecological process: inheritance and innovation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(1): 415–421
- [19] CHEN L D, FU B J, ZHAO W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Frontiers of Biology in China*, 2008, 3(2): 131–136
- [20] ZHAO W W, JIA L Z, DARYANTO S, et al. Source-sink landscape[M]//Encyclopedia of Ecology. Amsterdam: Elsevier, 2019: 467–473
- [21] 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 L D, FU B J, ZHAO W W. Source-sink landscape theory and its ecological significance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444–1449
- [22] CHEN L D, TIAN H Y, FU B J, et al. Development of a new index for integrating landscape patterns with ecological processes at watershed scale[J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(1): 37–45
- [23] 许申来, 周昊. 景观“源、汇”的动态特性及其量化方法[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(6): 64–67, 71
- XU S L, ZHOU H. The landscape dynamics of ‘source’ and ‘sink’ and its quantification method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(6): 64–67, 71
- [24] YANG M, LI X Z, HU Y M, et al. Assessing effects of landscape pattern on sediment yield using sediment delivery distributed model and a landscape indicator[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 22: 38–52
- [25] WU Z P, LIN C, SU Z H, et al. Multiple landscape “source-sink” structures for the monitoring and management of non-point source organic carbon loss in a peri-urban watershed[J]. *CATENA*, 2016, 145: 15–29
- [26] WANG J L, SHAO J A, WANG D, et al. Identification of the “source” and “sink” patterns influencing non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(10): 1431–1448
- [27] 李崇巍, 胡婕, 王飒, 等. 流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例[J]. *生态学报*, 2012, 32(8): 2430–2438
- LI C W, HU J, WANG S, et al. The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2430–2438
- [28] 刘宇. 景观指数耦合景观格局与土壤侵蚀的有效性[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 4923–4935
- LIU Y. Effectiveness of landscape metrics in coupling soil erosion with landscape pattern[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(15): 4923–4935
- [29] 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 L D, FU B J, XU J Y, 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
- [30] 王金亮, 谢德体, 倪九派, 等. 基于源汇景观单元的流域土壤侵蚀风险格局识别[J]. *生态学报*, 2017, 37(24): 8216–8226
- WANG J L, XIE D T, NI J P, et al. Identification of soil erosion risk patterns in a watershed based on source-sink landscape units[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(24): 8216–8226
- [31] 李晶, 周自翔. 延河流域景观格局与生态水文过程分析[J]. *地理学报*, 2014, 69(7): 933–944
- LI J, ZHOU Z X. Landscape pattern and hydrological processes in Yanhe River Basin of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 933–944
- [32] WANG J L, CHEN C L, NI J P, et al. Assessing effects of “source-sink” landscape on non-point source pollution based on cell units of a small agricultural catchment[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(9): 2048–2062
- [33] ZHOU Z X, LI J. The correlation analysis on the landscape pattern index and hydrological processes in the Yanhe watershed, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 524: 417–426
- [34] ZHANG X, LIU Y Q, CHEN Y X. Development of a location-weighted landscape contrast index based on the minimum hydrological response unit[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018, 36(4): 1236–1243
- [35] 孙然好, 陈利顶, 王伟, 等. 基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1784–1788
- SUN R H, CHEN L D, WANG W, et al. Evaluation of total nitrogen loss in Haihe River Basin based on landscape pattern index of source and sink[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(6): 1784–1788
- [36] JIANG M Z, CHEN H Y, CHEN Q H. A method to analyze “source-sink” structure of non-point source pollution based on remote sensing technology[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 135–140
- [37] JIANG M Z, CHEN H Y, CHEN Q H, et al. Study of landscape patterns of variation and optimization based on non-point source pollution control in an estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 87(1/2): 88–97
- [38] WAN W, HAN Y W, WU H Q, et al. Application of the source-sink landscape method in the evaluation of agricultural non-point source pollution: first estimation of an orchard-dominated area in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: 106910
- [39] WANG R J, WANG Y, SUN S Y, et al. Discussing on “source-sink” landscape theory and phytoremediation for non-point source pollution control in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(36): 44797–44806
- [40] 张亚娟, 李崇巍, 胡蓓蓓, 等. 城镇化流域“源-汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响——以天津于桥水库流域为

- 例[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2437–2446
- ZHANG Y J, LI C W, HU B B, et al. Impact of a “source-sink” landscape pattern in an urbanized watershed on nitrogen and phosphorus spatial variations in rivers: a case study of Yuqiao Reservoir watershed, Tianjin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(7): 2437–2446
- [41] 刘鹏, 张紫霞, 王妍, 等. 普者黑流域土地利用及“源-汇”景观的氮磷输出响应研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1332–1341
- LIU P, ZHANG Z X, WANG Y, et al. Effect of land use and the source-sink landscape on nitrogen and phosphorus export in the Puzhehei watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1332–1341
- [42] LIU Y P, YANG C F, YU X Y, et al. Monitoring the landscape pattern and characteristics of non-point source pollution in a mountainous river basin[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(21): 11032
- [43] ZHANG X, CUI J T, LIU Y Q, et al. Geo-cognitive computing method for identifying “source-sink” landscape patterns of river basin non-point source pollution[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2017, 10(5): 55–68
- [44] 刘芳, 沈珍瑶, 刘瑞民. 基于“源-汇”生态过程的长江上游农业非点源污染[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3271–3277
- LIU F, SHEN Z Y, LIU R M. The agricultural non-point sources pollution in the upper reaches of the Yangtze River based on source-sink ecological process[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3271–3277
- [45] 王瑛, 张建锋, 陈光才, 等. 基于“源-汇”景观的太湖宜兴段入湖港口水质时空变化[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 399–405
- WANG Y, ZHANG J F, CHEN G C, et al. Spatiotemporal characteristics of water quality in Taihu Lake watershed based on ‘source-sink’ landscape change[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(2): 399–405
- [46] YU W Q, ZHANG J, LIU L J, et al. A source-sink landscape approach to mitigation of agricultural non-point source pollution: validation and application[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 314: 120287
- [47] TAN S J, XIE D T, NI J P, et al. Identification of nonpoint source pollution source/sink in a typical watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China: A case study of the Qijiang River[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 330: 129694
- [48] 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 等. 城郊流域源汇景观格局与水体抗生素的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(5): 2264–2271
- LI M, TANG J F, CHEN L D, et al. Relationship between source-sink landscape pattern and antibiotics in surface water in peri-urban watershed[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2264–2271