

DOI: 10.11766/trxb202205190263

倪珂, 王小燕, 杨澜, 崔璨, 李佳明, 龙翼. 三峡库区典型农业小流域溶解态养分输移对“源—汇”景观格局的响应[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 408–423.

NI Ke, WANG Xiaoyan, YANG Lan, CUI Can, LI Jiaming, LONG Yi. Response of Dissolved Nutrient Transport to “Source” and “Sink” Landscape Pattern in Typical Agricultural Small Watersheds in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 408–423.

三峡库区典型农业小流域溶解态养分输移对“源—汇”景观格局的响应^{*}

倪 珂¹, 王小燕^{1†}, 杨 澜¹, 崔 璞¹, 李佳明¹, 龙 翼²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆市水土保持工程技术研究中心, 重庆 400715; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: “源—汇”景观格局反映了流域土地利用配置与空间要素分布, 导控流域能源流动与水沙过程, 是影响小流域养分流失的重要因素。为探明景观格局对不同降雨类型下, 农业小流域溶解态养分输移的影响, 以三峡库区石盘丘小流域的传统农业型集水区与农林复合型集水区为研究对象, 监测不同强度侵蚀性次降雨事件中, 两个集水区出口断面处径流溶解态氮、磷浓度, 利用航测数据结合最小累计阻力模型识别“源—汇”景观空间格局, 引用景观空间负荷对比指数 (Location-Weighted Landscape Index, LWLI) 进一步分析小流域溶解态养分输移对“源—汇”景观格局的响应机制。结果表明: (1) 传统农业型集水区内, “源”“汇”景观面积比为 1.8:1, 以“源”景观为主, 景观垂直分异性明显; 农林复合型集水区内“源”“汇”景观比例约 1:1, 且均衡分布, 但高陡坡区域占比高、平均坡度大。(2) 两种类型集水区内, 溶解态氮、磷流失负荷均表现为暴雨>中雨>大雨, 而不同降雨事件中, 传统农业型集水区养分输出负荷及其变异系数均高于农林复合型集水区, 养分输移波动性强, 更易受到降雨强度变化的影响。(3) 农业用地在两种集水区内均是主要的养分流失来源, 但受坡度限制, 其他林地可能是农林复合集水区中重要的养分迁出区域; 传统农业型集水区的 LWLI 高达 0.75, 表征了该集水区的高氮、磷流失风险; 农林复合型集水区 LWLI 为 0.28, 养分输出量低, 这是合理的景观空间格局与农林复合经营模式共同作用的结果。“源—汇”景观格局对小流域养分流失影响显著, 可通过“源—汇”景观空间负荷对比指数对小流域养分流失风险进行判别, 并为“源—汇”景观格局优化及小流域面源污染防控提供依据。

关键词: 三峡库区; 农业小流域; “源—汇”景观格局; 溶解态养分; 景观空间负荷对比指数

中图分类号: X522 文献标志码: A

Response of Dissolved Nutrient Transport to “Source” and “Sink” Landscape Pattern in Typical Agricultural Small Watersheds in the Three Gorges Reservoir Area

NI Ke¹, WANG Xiaoyan^{1†}, YANG Lan¹, CUI Can¹, LI Jiaming¹, LONG Yi²

* 中央高校基本科研业务费专项(XDKJ2017B025)和西南大学大学生创新训练项目(S202110635130)资助 Supported by the Fundamental Research Funds of the Central Universities of China (No.XDKJ2017B025) and the Innovation Training Program for College Students of Southwest University (No.S202110635130)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: youblue@swu.edu.cn

作者简介: 倪 珂 (1996—), 女, 青海西宁人, 硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: 869256180@qq.com

收稿日期: 2022-05-19; 收到修改稿日期: 2022-11-11; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-07-18

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

Abstract: 【Objective】 The “source” and “sink” landscape pattern reflects the land use allocation and spatial element distribution. It equally controls the energy flow and water sediment process of the watershed, which is an important factor affecting nutrient loss in small watersheds. The purpose of this research was to investigate the effect of landscape patterns on the transport of dissolved nutrients in agricultural small watersheds under different rainfall types. 【Method】 The traditional agricultural catchments and agroforestry catchments in the Shipanqiu watershed of the Three Gorges Reservoir Area were selected as the research objects. The concentrations of dissolved nitrogen and phosphorus in the runoff at the outlet section of the catchments were monitored during different intensities of erosive rainfall events. Also, aerial survey data combined with the minimum cumulative resistance model were used to identify the “source” and “sink” landscape spatial pattern. The location-weighted landscape index(LWLI)was used to analyze the impact of the “source” and “sink” landscape pattern on dissolved nutrient transport in the small watershed. On this basis, the response mechanism of dissolved nutrient transport in the small watershed to the “source” and “sink” landscape pattern was further clarified. 【Result】 The results showed that: In the traditional agricultural catchment area, the landscape area ratio of “source” and “sink” was 1.8: 1, which was dominated by “source” landscape, and the vertical differentiation of landscape was obvious. In the agroforestry composite catchments, the landscape ratio of “source” and “sink” was about 1: 1, which was evenly distributed, but the high and steep slope area accounted for a high proportion and the average slope was large. In the two catchments, the loss load of dissolved nitrogen and phosphorus was rainstorm > moderate rain > heavy rain. In different rainfall events, the nutrient output load and its coefficient of variation in the traditional agricultural catchments were higher than those in agroforestry catchments. The nutrient transport had strong volatility and was more vulnerable to the change in rainfall intensity. Agricultural land was the main source of nutrient loss in both catchments, but due to the limitation of a slope, other woodlands may be important nutrient migration areas in the agroforestry composite catchments. The LWLI of the traditional agricultural catchment was as high as 0.75, which indicated the risk of high nitrogen and phosphorus loss in this catchment. Also, the LWLI of the agroforestry catchment area was 0.28 and with a low nutrient output. This was attributed to the joint action of reasonable landscape spatial patterns and the agroforestry management model. 【Conclusion】 The “source” and “sink” landscape patterns had a significant impact on nutrient loss in small watersheds. The risk of nutrient loss in small watersheds can be judged by the “source” and “sink” location-weighted landscape contrast index. Accordingly, it can provide a basis for the optimization of “source” and “sink” landscape pattern and the prevention and control of non-point source pollution in small watersheds.

Key words: Three Gorges Reservoir area; Agricultural watershed; “Source/sink” landscape pattern; Dissolved nutrients; Location-weighted landscape index

小流域的养分流失受到多重因素制约，其中，“源—汇”景观格局反映了流域土地利用配置与空间要素分布，养分输出对“源—汇”景观格局的响应机制已成为当前小流域水环境研究的热点问题之一。景观格局对养分流失的影响一方面体现在其对流域生态水文过程的影响，“源—汇”景观形态和空间分布可改变降雨径流过程，导致产流产沙变化，从而影响流域水质^[1]；另一方面，小流域尺度下的土壤侵蚀过程受到“源—汇”景观格局调控^[2]，而流域养分流失与土壤侵蚀过程显著相关^[3]。三峡库区是世界范围内典型的生态脆弱区，其特殊的生态

环境与战略地位，引起了各领域研究者的广泛关注。因此，研究小流域尺度下，景观格局对养分输移的影响，对构建生态安全、景观协调的流域景观生态模式具有重要意义。

目前，在三峡库区小流域养分流失的成因、负荷、时空变化与分布规律、情景模拟与时序预测以及防控措施体系等方面，均已取得系统性的研究进展^[4-8]。其中，以景观格局为理论基础的研究大致可分为两类：一类以景观格局指数量化景观多样性及空间分布特征，从而判别景观格局的生态作用，如对三峡库区50年间景观格局指数的研究结果发现，

不同景观斑块对生态格局的变化影响显著^[9], 景观格局指数与三峡工程不同阶段的城市发展、水文条件及土地覆盖变化间也存在动态联系^[10]; 另一类则主要是通过对“源—汇”景观格局的研究反映水沙过程, 如对三峡库区 20 年间“源”、“汇”景观面积的监测发现, 景观面积与土壤侵蚀显著相关^[11]。此外, 通过综合了流域内“源”、“汇”景观单元与出水口的相对距离、高程和坡度的景观空间负荷对比指数, 反映景观格局与非点源污染之间的联系也是景观生态理论的重要实践^[12]。然而, 纵观过去的研究成果, 多是以长时间序列监测下, 大尺度范围内景观格局的动态变化为研究基础, 而以典型农业小流域侵蚀性次降雨过程中的养分流失为研究对象, 讨论其基于“源—汇”景观格局理论的研究仍需补充完善。

本研究选取石盘丘农业小流域的两个自然集水区为研究区域, 在厘清集水区面积、地形、自然资源、农业生产形式, 明确集水区景观数量特征、景观格局特征的基础上, 通过调查研究、定位监测等研究方式, 综合研究两个集水单元在次降雨事件中氮、磷输出负荷的异同, 分析小流域养分输出对“源—汇”景观格局的响应机制, 以期为促进小流域综合治理和生态环境建设提供思路。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所在的石盘丘小流域位于重庆市忠县石宝镇新政村 ($30^{\circ}24' \sim 30^{\circ}30'N$, $108^{\circ}08' \sim 108^{\circ}12'E$), 地处三峡库区腹地(图 1)。流域属丘陵地貌, 亚热带东南季风区山地气候, 年均气温 $18.0^{\circ}C$, 年降雨量约 1193 mm , 无霜期 314 d , 日照时数 1205 h , 相对湿度 81.1% , 海拔介于 $172 \sim 334\text{ m}$ 之间, 土壤以紫色土为主, 一方面, 石盘丘小流域的地貌、气候等自然条件决定了其在三峡库区中的典型性。另一方面, 根据自然地形及田间管理措施, 将石盘丘小流域划分为两个集水区, 其中, 东侧为传统农业型集水区, 面积约 14.31 hm^2 , 多年来以当地传统农业模式经营, 即在人为条件方面, 石盘丘小流域的传统农业模式及作物类型, 令其具有三峡库区农业小流域的代表性。而西侧的农林复合型集水区, 面积约 13.24 hm^2 , 多年来实行农林复合经营模式, 并于 2021 年引入小流域面源污染景观生态链全程阻控消纳技术, 即上坡位设置林草复合系统, 固持土壤、涵养水源; 中坡位设置生态埂坎—生态塘复合系统, 阻控泥沙, 消纳氮、磷等营养物质; 下坡位设置水田—生态沟渠—人工湿地系统, 滞留并净化

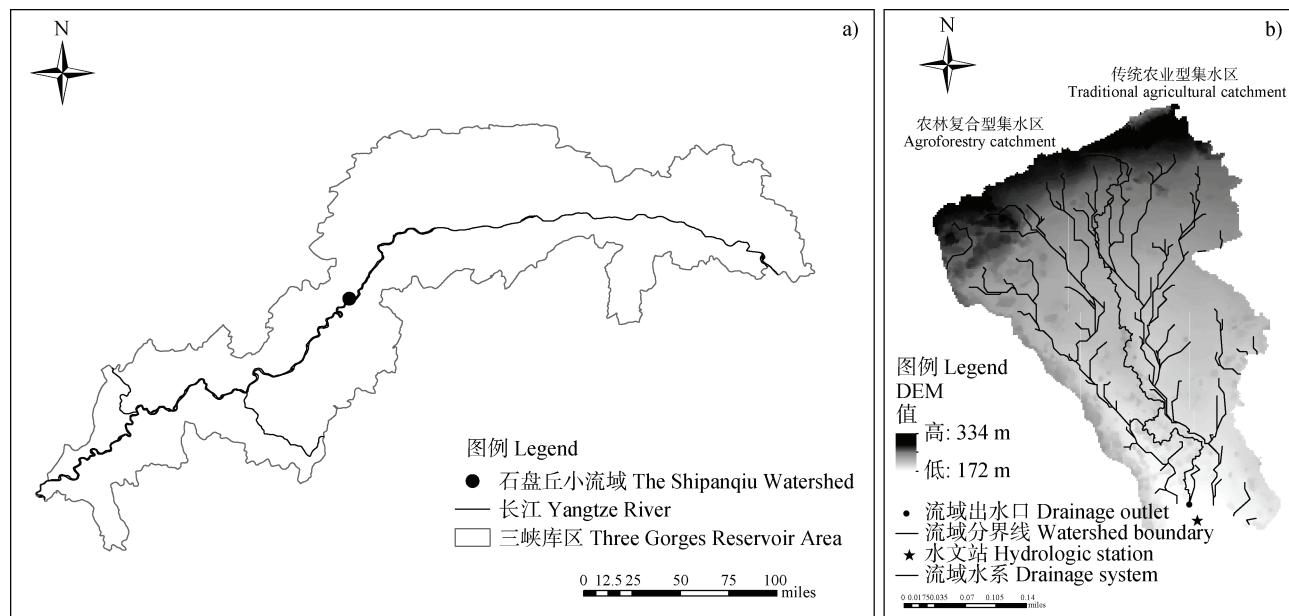


图 1 石盘丘流域地理位置 (a) 及数字高程 (b) 图

Fig. 1 Geographical Location (a) and Digital Elevation (b) of the Shipanqiu Watershed

上方来水, 削减面源污染对流域外环境的输出。此外, 两集水区在面积、土地利用类型、气候、地貌等方面具有可比性。流域内无发育明显沟道, 径流泥沙经坡面汇入沟渠, 流经集水区出口断面处水文站后汇入长江。

1.2 样品采集与测定

研究中各类基础数据来源见表 1。为满足土壤侵蚀模型输入要求, 便于空间分析和计算, 所有空间数据采用统一投影坐标, 并标准化为 1m×1m 栅格。径流样品数据为对 2021 年 8 月 3 场降雨事件的现场采

样。流域出口水文站处设置有巴歇尔水槽, 径流通道上方连接有流量自动监测器。降雨后, 自径流产生开始, 使用 500 mL 水瓶分别在水槽的两个出口断面处采集径流样, 当监测到径流量呈急剧增大或减小趋势时, 按每 10~15 min 时间间隔进行采样, 径流量趋于平缓时则适当延长采样间隔时间, 按 60~120 min 时间间隔进行采样, 以减少采样频率, 直至降雨停止后, 采集 2~3 瓶径流样, 3 场降雨事件中共采集径流水样 82 份。径流水样及时转移至 4℃ 冰柜存放, 并在 48 h 内完成水样养分的测定, 每个样品重复测定 3 次。

表 1 石盘丘小流域基础数据及来源

Table 1 Basic data and sources of the Shipanqiu watershed

数据名称 Data name	数据类型 Data type	数据描述 Data description	数据来源 Data sources
无人机航拍影像 UAV aerial image	栅格 DEM	分辨率 1 m×1 m	2021/8/12 无人机正射影像, 经 Pix4D 软件校正并镶嵌
数字高程图 DEM	栅格	分辨率 1 m×1 m 小流域数字高程模型	航拍影像经 Pix4D 生成 5 m 等高线, 由 ArcGIS 生成 DEM 图层
土地利用图 Land use map	矢量	参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)	经无人机影像目视解译获得
归一化植被指数 NDVI	栅格	归一化植被指数	2021/10/09 GF2 卫星影像使用 ENVI 结合 GIS 计算生成, 分辨率 0.8 m
土壤数据 Soil data	Excel	土壤有机碳、粒径组成等理化性质	采集样品, 实测分析
降雨、流量数据 Rainfall and runoff data	Excel	气象观测站及水文站资料	忠县气象观测站

土壤样品在流域内各土地利用类型下的随机取点采样, 样品经高温催化氧化消解后, 采用 NDIR 法测定有机碳含量; 土壤颗粒分析采用 MICROTRAC S3500 型激光粒度分析仪测定。径流中可溶性总氮 (Total dissolved Nitrogen, TDN)、可溶性总磷 (Total dissolved Phosphorus, TDP)、硝态氮 (Nitrate nitrogen, NN)、铵态氮 (Ammonium nitrogen, AN) 和正磷酸盐 (Dissolved Inorganic Phosphorus, DIP) 采用通过 0.45 μm 滤膜的水样进行测定。

测定方法: 可溶性总氮、可溶性总磷采用碱式过硫酸钾消解—紫外分光光度法、硝态氮采用紫外分光光度法、铵态氮采用靛酚蓝比色法、正磷酸盐采用钼蓝比色法。

1.3 数据处理

景观阻力成本 MCRR: 指某一单元内景观阻力的最小累计成本, 计算公式如下:

$$MCRR = \min \sum [D_{ij} \times (VFC_i + M_i) \times N_i] \quad (1)$$

其中:

$$VFC_i = (NDVI - NDVI_{Min}) / (NDVI_{Max} - NDVI_{Min}) \quad (2)$$

$$M_i = 1 / \cos \theta \quad (3)$$

式中, D_{ij} 为第 i 个单元到流域出水口 j 的距离, m; 通过 ArcGIS 中成本距离模块计算, VFC_i 为第 i 个

单元的植被覆盖度; M_i 为地表粗糙度, 计算如式(3); N_i 为曼宁糙率系数, 参考一级土地利用分类的糙率系数^[13]; $NDVI_{min}$ 和 $NDVI_{max}$ 分别为 5% 及 95% 置信区间下 NDVI 的值, 当 NDVI 小于 $NDVI_{min}$ 时, 则 VFC 取 0, 当 NDVI 大于 $NDVI_{max}$ 时, 则 VFC 取 1; θ 为坡度(弧度制), 通过 ArcGIS 表面分析中的坡度模块计算。

景观动力成本 MCRC: 指某一单元内景观动力的最小累计成本, 计算公式如下:

$$MCRC = \min \sum D_{ij} \times [(P_i + S_i + K_i) \times CN_i] \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} S_i = 3.85 \sin \theta + 0.011 & (\theta < 5^\circ) \\ S_i = 4.40 \sin \theta + 0.131 & (5^\circ \leq \theta < 10^\circ) \\ S_i = -0.003\theta^2 + 0.1440 - 0.274 & (0^\circ \leq \theta \leq 34.8^\circ) \end{cases} \quad (5)$$

$$K_i = \left\{ 0.2 + 0.3 \text{EXP}[-0.0256Sd(1-St/100)] \right\} \times [St/(Ci+St)]^{0.3} \times \left\{ 1.0 - 0.25C/[C + \text{EXP}(3.72 - 2.95C)] \right\} \times [1.0 - 0.7(1-Sd/100)] / \left\{ 1 - Sd/100 + \text{EXP}[-5.51 + 22.9(1-Sd/100)] \right\} \quad (6)$$

式中, P_i 为各站点降雨量的空间插值, 本研究区域降雨仅受一个站点控制, 因此取年平均降雨量, mm; S_i 为坡度因子; K_i 为土壤可蚀性因子(美制), shortton·ac·h/ (100ft·shortton·ac·in); CN_i 为径流曲线数, 参考三峡库区已有的 CN 数据库^[14]; Sd 为砂粒含量, %; St 为粉粒含量, %; Ci 为黏粒含量, %; C 为有机碳含量, %。计算结果乘以 0.1317 转化为公制单位, 即 t·hm²·h/ (MJ·mm·hm²)。

将以上各因子图层进行归一化处理, 计算出景观阻/动力成本, 通过 ArcGIS 地图代数中 Con 函数, 当 MCRR 大于 MCRC 时定义为“汇”, 当 MCRR 小于 MCRC 时定义为“源”, 完成流域内“源—汇”景观格局的识别。

“源—汇”景观空间负荷对比指数 LWLI: 用于定量评估“源—汇”景观格局在生态过程中的作用, 计算方法如下:

$$LWLI = LWLI'_d \times LWLI'_e / LWLI'_s \quad (7)$$

其中:

$$LWLI'(d, e, s) = \frac{\sum_{i=1}^M \left(P_i \cdot W_i \cdot \int_{x=0}^D A_i d_x \right)}{\sum_{i=1}^M \left(P_i \cdot W_i \cdot \int_{x=0}^D A_i d_x \right) + \sum_{j=1}^N \left(P_j \cdot W_j \cdot \int_{x=0}^D A_j d_x \right)} \quad (8)$$

式中, LWLI 指景观空间负荷对比指数, $LWLI'_d$ 、 $LWLI'_e$ 和 $LWLI'_s$ 分别指相对距离、相对高程和坡度的 LWLI, M 、 N 分别指“源”“汇”景观的类型数目, P_i 和 P_j 指“源”景观 i 和“汇”景观 j 在流域内的面积比例, W_i 和 W_j 分别指“源”景观和“汇”景观的权重, A_i 和 A_j 分别指“源”景观和“汇”景观对距离、高程或坡度基于洛伦兹曲线的累计面积比例, x 表示各景观要素的空间分布值, D 表示景观单元至流域出水口的最大相对距离、相对高程或坡度。

径流平均浓度 EMC: 研究采用次降雨径流平均浓度(event mean concentration, EMC) 来计算单次降雨氮、磷输出浓度平均值, 其计算如公式(9):

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i c_i + Q_{i+1} c_{i+1}}{2} \Delta t}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{Q_i + Q_{i+1}}{2} \Delta t} \quad (9)$$

式中, EMC 为流量加权平均浓度, mg·L⁻¹; Q_i 和 Q_{i+1} 为两个相邻监测时刻的径流量, m³·s⁻¹; c 和 c_{i+1} 为第 i 和 $i+1$ 次取样时刻该养分在径流中的质量浓度, mg·L⁻¹; Δt 为相邻两次取样时间间隔, s; n 为样品数量。

本研究采用 Python3.7 进行 LWLI 指数的计算, 用 Excel 2019 进行相关数据的统计和计算, 用 ArcGIS10.2 和 Origin 2021 制图。

2 结 果

2.1 景观格局

石盘丘小流域“源—汇”景观格局识别结果如下。由图 2 可知, “源”景观在流域上坡位及中、下坡位的东侧广泛且连续分布, 果园、旱地和水田是主要的“源”景观类型, 面积占比达到“源”景观的 67.73%, “汇”景观主要分布在流域中坡位处, 其他草地和其他林地是占比较大的“汇”景观类型, 面积占比达到“汇”景观的 94.47%。

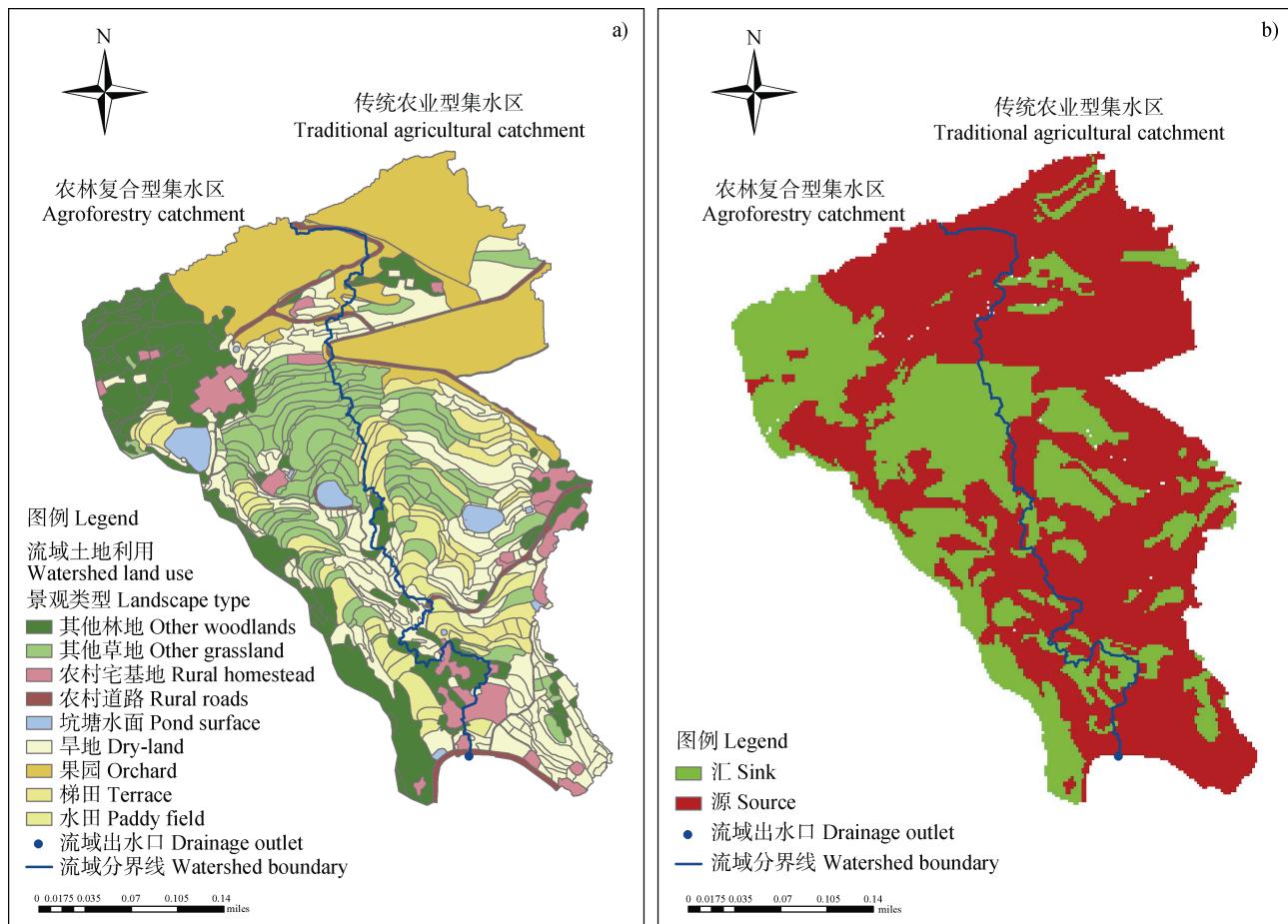


图 2 流域景观类型分布 (a) 及“源—汇”空间格局 (b)

Fig. 2 Distribution of watershed landscape types (a) and “source/sink” spatial pattern (b)

将流域内“源—汇”格局结合景观类型进行区域分析,结果如表2。由表可知,石盘丘小流域内“源”“汇”景观面积比约1.8:1,为“源”景观控制流域,流域内任何一个景观类型均同时具有“源”和“汇”的属性。农林复合型集水区的“源”景观面积仅为传统农业型集水区的58.4%,而“汇”景观面积达到了传统农业型集水区的2.2倍,此外,传统农业型集水区的“源”“汇”景观面积比约3.6:1,受“源”景观的强烈影响,而农林复合型集水区的“源”“汇”景观面积比约1:1,且“源”下有“汇”,“源”“汇”交叉均衡分布。

图3a反映了流域内坡度分布,如图所示,传统农业型集水区平均坡度为15.5°,表现为缓坡下的“源”景观主导;农林复合型集水区平均坡度为22.7°,表现为陡坡下的“汇”景观主导。传统农业型集水区的坡顶以陡坡为主,果园、农村宅基地是陡坡地带分布最广的景观类型,中坡位以缓坡为主,

梯田、水田、旱地等景观分布居多;农林复合型集水区的高坡度区域多数分布在集水区上坡位,景观类型以其他林地为主,缓坡主要位于中坡位,景观类型主要是其他草地。

如图3b所示,石盘丘小流域的相对高程值在0~162 m之间,整体呈现北高南低的趋势。其中,最高点出现在传统农业型集水区的东北角,其景观类型为“源”景观下的果园,最低点出现在流域出口断面处,其景观类型为“源”景观下的农村道路。传统农业型集水区的平均相对高程为45.96 m,极差为162 m,农林复合型集水区的平均相对高程为52.68 m,极差为108 m。农林复合型集水区相对高程整体高于传统农业型集水区,但传统农业型集水区的极差更大,垂直分异性更明显。

图3c反映了流域至出水口的相对距离。传统农业型集水区至流域出水口的平均距离与最大距离分别为1 088 m和2 308 m,农林复合型集水区至出水口的平均距离与最大距离分别为1 088 m和2 308 m,农林复合型集水区至出水口的平均距离与最大距离分别为1 088 m和2 308 m。

表2 流域“源—汇”景观类型面积

Table 2 Area of "source/sink" landscape type in the basin

景观类型 Landscape type	传统农业型集水区景观面积 Landscape area of the traditional agricultural catchment/hm ²			农林复合型集水区景观面积 Landscape area of agroforestry catchment/hm ²			合计 Total
	“源” “Source”	“汇” “Sink”	小计 Subtotal	“源” “Source”	“汇” “Sink”	小计 Subtotal	
其他草地 Other grassland	0.02	1.97	1.99	0.06	2.55	2.61	4.60
农村宅基地 Rural homestead	0.65	0.03	0.68	0.69	0.01	0.70	1.38
旱地 Dry-land	3.91	0.02	3.93	2.20	0.07	2.27	6.20
农村道路 Rural roads	0.46	0.01	0.47	0.23	0.02	0.25	0.72
果园 Orchard	3.97	0.19	4.16	1.97	0.02	1.99	6.15
其他林地 Other woodlands	0.04	0.76	0.80	0.12	3.94	4.06	4.86
坑塘水面 Pond surface	0.15	0.01	0.16	0.33	0.02	0.35	0.51
梯田 Terrace	1.34	0.02	1.36	0.25	0.02	0.27	1.63
水田 Paddy field	0.69	0.07	0.76	0.71	0.03	0.74	1.50
合计 Total	11.23	3.08	14.31	6.56	6.68	13.24	27.55

口的平均距离与最大距离分别为 1 061 m 和 2 049 m, 两集水区近出水口处景观类型分别以“源”景观中的旱地和“汇”景观中的其他林地为主。

为进一步描述石盘丘小流域“源—汇”景观的空间分布格局, 引入了“源—汇”景观空间负荷对比指数 (LWLI)。根据 Chen 等^[15]研究, 当 LWLI 值为 0.5 时, “源—汇”景观对面源污染的贡献在流域尺度上基本平衡, 当 LWLI 大于 0.5 时, 说明流域内“源”景观对出水口的面源污染贡献更大, 流域的面源污染风险更高, 而当 LWLI 小于 0.5 时, “汇”景观占主导作用。如表 3 所示, 石盘丘小流域中, 传统农业型集水区与农林复合型集水区的 LWLI

分别为 0.75 和 0.28, 说明传统农业型集水区面临更高的面源污染风险, 此外, 根据 LWLI 的定义公式, 当相对高程 (LWL_e) 或距离 (LWL_d) 景观空间负荷对比指数越高时, 则表明流域内“源”景观的相对位置更低、距离出水口更近, 对面源污染的贡献越高, 而当坡度景观空间负荷对比指数 (LWL_s) 越高时, 则意味着流域内近出水口处高坡度区域的“源”景观面积比例更小, 该流域的面源污染输出负荷反而越低。本研究中, 相比于传统农业型集水区, 农林复合型集水区的 LWL_d、LWL_e、LWL_s 指数均更低, 说明农林复合型集水区的“源”景观相对于流域出水口的距离更远、位置更高, 但近出水口

处陡坡的面积比例也更高。综上所述,传统农业型集水区受“源”景观主导,可能将造成更高的养分输出,而农林复合型集水区虽然坡度更陡、更易诱发面源污染,但“源”“汇”景观均衡错落的分布格局,使集水区对养分输移的缓冲作用更强,表现为“汇”景观主导的生态型集水区。

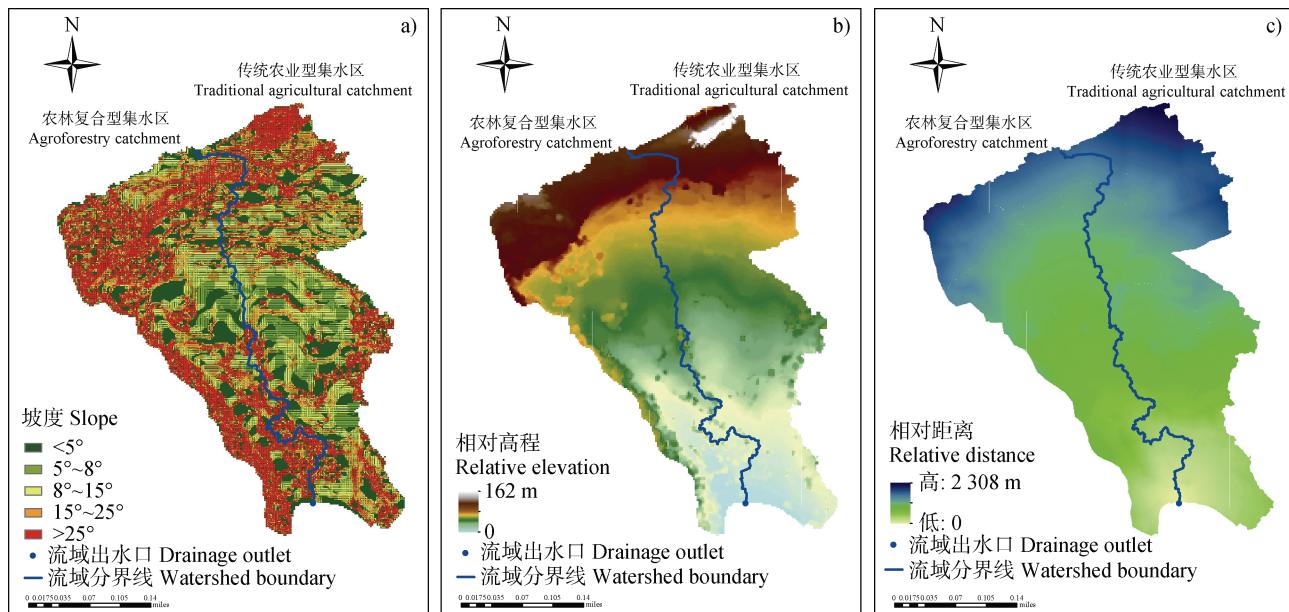


图3 石盘丘小流域坡度(a)、相对高程(b)及相对距离(c)分布

Fig. 3 Distribution of slope (a), relative elevation (b) and relative distance (c) of the Shipanqiu watershed

表3 石盘丘小流域“源—汇”景观空间负荷对比指数

Table 3 Comparison index of "source/sink" landscape spatial load in the Shipanqiu watershed

	“源—汇”景观空间负 荷对比指数 LWLI	距离景观空间负荷对比 指数 LWLI _d	相对高程景观空间负荷 对比指数 LWLI _e	坡度景观空间负荷对比 指数 LWLI _s
传统农业型集水区 Traditional agricultural catchment	0.75	0.75	0.81	0.80
农林复合型集水区 Agroforestry catchment	0.28	0.36	0.36	0.46

2.2 径流养分

本研究根据对侵蚀性降雨及次降雨的划分标准^[16-18],选取了2021年8月3场较为典型的侵蚀性次降雨事件,降雨及径流特征如表4。

在中雨、大雨和暴雨3场降雨中,传统农业型集水区可溶性总氮的峰值浓度分别为 $7.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $7.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;农林复合型集水区可溶性总氮的峰值浓度分别为 $3.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $2.48 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。综合比较3场降雨氮浓度的变化特征发现,传统农业型集水区氮流失的平均水平总是

高于农林复合型集水区,大雨、中雨下表现尤为明显,且在这两场降雨中,传统农业型集水区的浓度峰值总是滞后于农林复合型集水区。硝态氮的浓度变化基本与可溶性总氮一致,而铵态氮总是表现出与硝态氮此消彼长的态势。径流峰值与浓度峰值出现的时刻无明显的相关性,在传统农业型集水区中,大雨、中雨洪峰的出现时刻均早于浓度峰值的出现时刻,而在暴雨中径流峰值与浓度峰值基本同步;农林复合型集水区在大雨中的浓度峰值早于洪峰峰值出现,在中雨和暴雨中却晚于洪峰峰值。前两场

表4 侵蚀性次降雨特征及径流特征

Table 4 Characteristics of erosive rainfall and runoff

降雨场次 Rainfall frequency	采样日期 Sampling date	雨型 Rainfall type	降水量 Rainfall/mm	降雨历时 Rainfall duration/h	降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	径流系数-传统 农业型集水区 Runoff coefficient- Traditional agricultural catchment		径流系数-农林 复合型集水区 Runoff coefficient- Agroforestry catchment
1	08-10	中雨	20.20	29.00	0.70	0.02	0.01	
2	08-08	大雨	33.20	36.00	0.92	0.11	1	
3	08-23	暴雨	83.00	12.00	6.92	0.80	0.70	

降雨中，两个集水区均出现了多个 TDN 波峰，暴雨中，传统农业型集水区表现出明显的单峰特征，而农林复合型集水区则表现出两个浓度相近的峰值。

3 场降雨中，传统农业型集水区可溶性总磷的峰值浓度分别为 $0.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.82 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，农林复合型集水区可溶性总磷的峰值浓度分别为 $0.60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $0.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。各形态磷在农林复合型集水区的平均浓度水平均低于传统农业型集水区，传统农业型集水区峰值浓度与浓度最低值的差距更大，波峰较农林复合型集水区更明显，波峰的出现频率更高，说明其对养分的输移更不稳定。传统农业型集水区的浓度峰值仅在大雨中出现在径流峰值之前，其余场次均出现在径流峰值之后，而农林复合型集水区的浓度峰值在大雨、中雨下基本与洪峰同步，暴雨时出现在洪峰之前。

根据对小流域 3 场降雨事件中各次降雨径流平均浓度的计算，农林复合型集水区可溶性总氮和可溶性总磷的平均输出浓度分别为传统农业型集水区的 62.5% 和 85.7%，硝态氮在两个集水区的可溶性氮中分别占比 52.06% 和 47.31%，铵态氮稳定在较低水平，正磷酸盐在两集水区的可溶性磷中分别占比 24.49% 和 28.57%。结果表明，石盘丘小流域径流中，硝态氮是可溶性总氮主要的输出形态，正磷酸盐是可溶性总磷的重要组成部分，农林复合型集水区可溶性氮、磷的径流平均浓度均低于传统农业型集水区。

使用变异系数 (CV) 进一步描述两集水区径

流溶解态总氮、总磷浓度的离散程度。结果表明，同一集水区中，可溶性总氮的变异系数总是表现为中雨>大雨>暴雨，可溶性总磷的变异系数则无明显差异，说明石盘丘小流域径流中溶解态氮对降雨强度的响应更敏感；同一降雨类型下，传统农业型集水区的养分变异系数均大于农林复合型集水区，说明传统农业型集水区的养分流失更不稳定。

3 场降雨事件中，传统农业型集水区内可溶性氮、磷的径流平均浓度关系表现为大雨>中雨>暴雨，而农林复合型集水区则表现为中雨>大雨>暴雨，即流域内暴雨事件中可溶性氮、磷的平均径流浓度更小。这可能是由于暴雨事件中，养分输出受到径流量的主控，从而令养分浓度大幅稀释；同时，大雨事件较中雨事件的降雨强度更大，造成的冲刷效应更强，而传统农业型集水区中不合理的景观空间布局加剧了养分的流失，使大雨事件下各形态的养分浓度均大于中雨事件，但在农林复合型集水区中，景观格局的优化，使由降雨冲刷的土壤颗粒被大幅拦蓄，此外，大雨事件的降雨历时更长，令径流与空气接触的时间延长，增强了径流在农林复合型集水区的林草复合系统、生态塘系统内植物、微生物等对养分的曝气作用，从而减少了溶解性气体的浓度，最终使得大雨对养分的稀释作用强于溶解作用。综上所述，在大雨、中雨事件中，径流一方面表现出对氮、磷等营养物质的浸提作用，提升了径流中养分浓度的水平，另一方面又具有稀释作用，

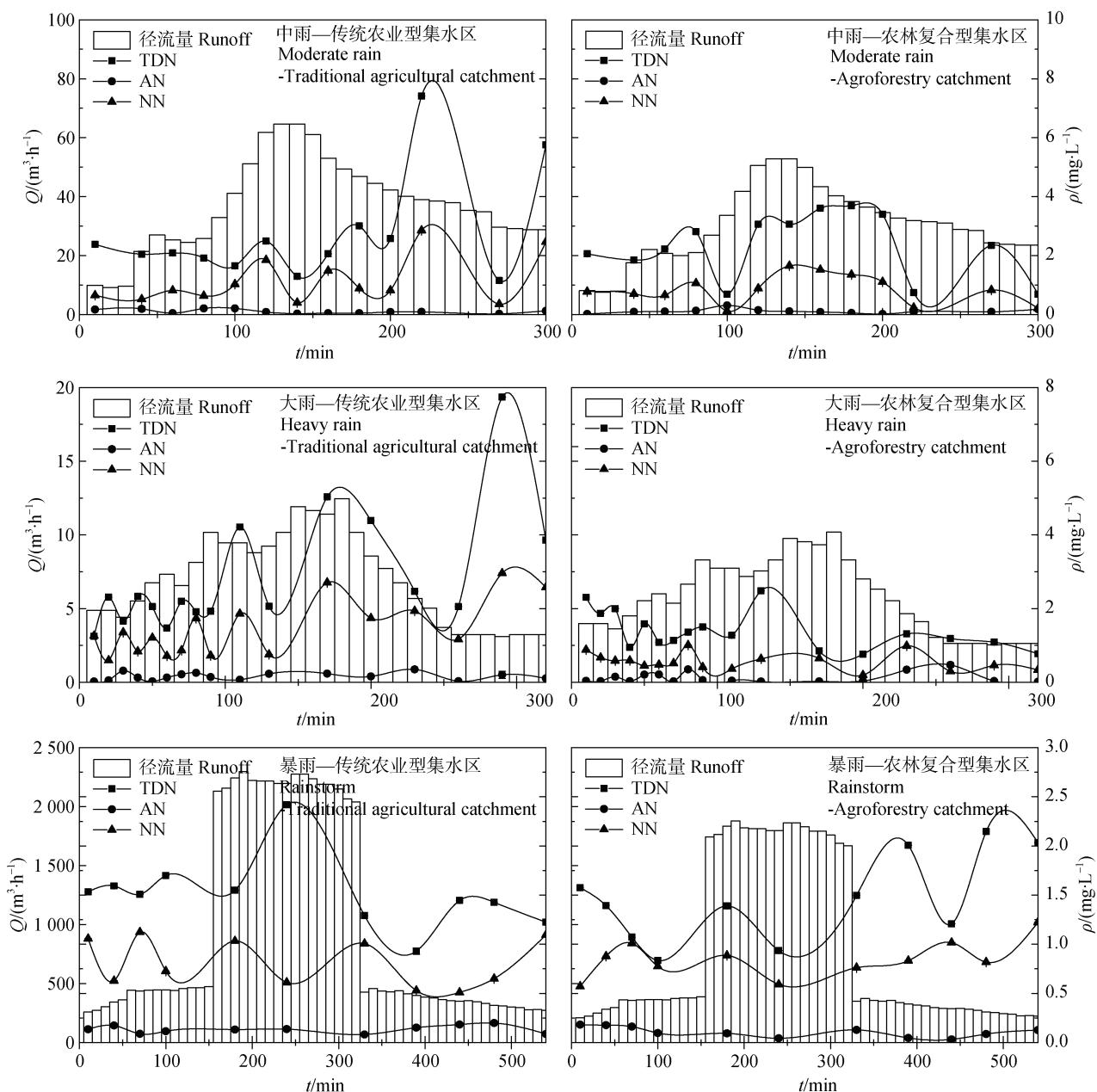


图 4 各形态氮浓度和径流随时间的变化
Fig. 4 Variation of nitrogen concentration and runoff with time

使养分浓度表现出动态变化。

以一场降雨事件中,各形态养分随径流的流失量表示氮、磷输出负荷,结果表明,3场降雨事件中,各形态氮在传统农业型集水区的输出负荷均高于农林复合型集水区,可溶性总氮和可溶性总磷在农林复合型集水区的输出负荷分别为传统农业型的57.8%和49.0%。如表7所示,在两个集水区中,3场降雨对可溶性氮、磷的输出负荷量均表现为暴雨>中雨>大雨,即暴雨事件中,养分输出负荷最大。这

是由于在本研究中,暴雨所造成的径流量最大,大雨事件前则为72 h的无降水时段,而中雨事件前48 h内分别发生了大雨事件与另一场非侵蚀性降雨事件,导致中雨事件下流量自动监测仪所监测的径流量大于发生在其之前的大雨事件,从而表现出更大的输出负荷。

使用变异系数进一步判断不同降雨强度下,两集水区径流过程中各形态氮、磷输出的稳定性。如表8所示,除硝态氮外,农林复合型集水区中所有

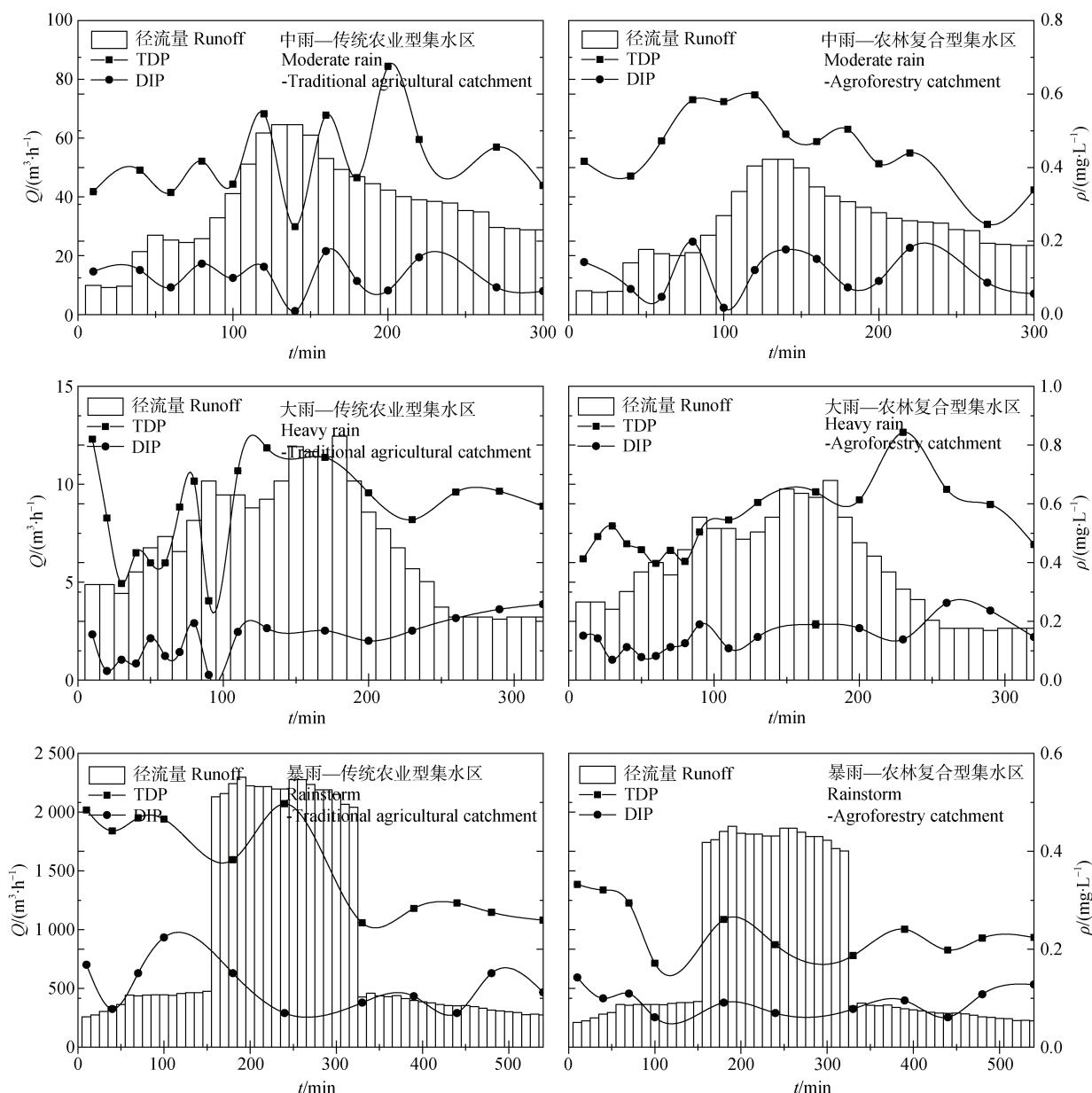


图5 各形态磷浓度和径流随时间的变化

Fig. 5 Variation of phosphorus concentration and runoff with time

表5 小流域3场降雨径流过程中可溶性总氮、总磷变异系数

Table 5 Variation coefficients of dissolved total nitrogen and total phosphorus in three rainfall-runoff processes in a small watershed

降雨类型 Rainfall type	传统农业型集水区变异系数 Variation coefficient of traditional agricultural catchment/%		农林复合型集水区变异系数 Variation coefficient of agroforestry catchment/%	
	TDN	TDP	TDN	TDP
中雨 Moderate rain	63	26	45	21
大雨 Heavy rain	56	27	36	21
暴雨 Rainstorm	23	25	29	21

表 6 小流域 3 场降雨径流过程中各形态氮、磷次降雨径流平均浓度

Table 6 Average concentration of various forms of nitrogen and phosphorus in three rainfall-runoff processes in a small watershed

养分指标 Nutrient	中雨		大雨		暴雨		平均	
	Moderate rain		Heavy rain		Rainstorm		Average value	
	index/ (mg·L ⁻¹)	传统农业型 集水区 ^①	农林复合型 集水区 ^②	传统农业 集水区 ^①	农林复合型 集水区 ^②	传统农业 集水区 ^①	农林复合型 集水区 ^②	传统农业 集水区 ^①
TDN	2.83	2.43	3.37	1.32	1.80	1.26	2.67	1.67
NN	1.41	0.91	1.91	0.57	0.85	0.78	1.39	0.75
AN	0.09	0.11	0.18	0.10	0.13	0.08	0.13	0.10
TDP	0.44	0.46	0.62	0.58	0.41	0.23	0.49	0.42
DIP	0.10	0.11	0.15	0.16	0.11	0.09	0.12	0.12

① Traditional agricultural catchment, ② Agroforestry composite catchment

表 7 小流域 3 场降雨径流过程中各形态氮、磷输出负荷

Table 7 Output load of various forms of nitrogen and phosphorus in three rainfall runoff processes in a small watershed

养分指标 Nutrient	中雨		大雨		暴雨		平均	
	Moderate rain		Heavy rain		Rainstorm		Average value	
	index/g	传统农业型集 水区 ^①	农林复合型集 水区 ^②	传统农业型集 水区 ^①	农林复合型集 水区 ^②	传统农业型集 水区 ^①	农林复合型集 水区 ^②	传统农业型集 水区 ^①
TDN	23.10	16.23	6.32	2.03	230.71	132.13	86.71	50.13
NN	11.51	6.08	3.58	0.88	108.95	81.80	41.35	29.59
AN	0.73	0.73	0.34	0.15	16.66	8.39	5.91	3.09
TDP	3.59	3.07	1.16	0.89	52.55	24.12	19.10	9.36
DIP	0.82	0.73	0.28	0.25	14.10	9.44	5.07	3.47

① Traditional agricultural catchment, ② Agroforestry composite catchment

表 8 不同降雨强度下各形态氮、磷输出负荷变异系数

Table 8 Variation coefficients of output load of various forms of nitrogen and phosphorus under different rainfall intensities

	TDN	NN	AN	TDP	DIP
传统农业型集水区	1.02	1.00	1.11	1.07	1.09
Traditional agricultural catchment					
农林复合型集水区	1.01	1.08	1.05	0.97	1.05
Agroforestry composite catchment					

类型养分输出负荷的变异系数均低于传统农业型集水区,说明传统农业型集水区的养分输移更容易受到降雨强度的影响,而农林复合型集水区则具有更稳定的养分输移模式。此外,农林复合型集水区硝

态氮较高的变异系数,可能是由于集水区内硝化作用与反硝化作用的转化更频繁,这在一定程度上表明农林复合型集水区的微生物活性更高,集水区的生态功能更强。

3 讨论

研究结果表明,传统农业型集水区“源”景观分布更广且 LWLI 指数更高,农林复合型集水区“源”、“汇”景观面积及分布均较均衡,LWLI 指数较低。同时,农林复合型集水区在不同降雨类型下的养分输出负荷均低于传统农业型集水区。由此可以推断,石盘丘小流域养分流失受到“源”“汇”景观面积及分布格局的强烈影响,即传统农业型集水区养分流失受“源”景观控制,养分流失量大,而农林复合型集水区以“汇”景观为主,面源污染风险小。此外,农林复合型集水区具有更低的 LWLI_s 值,说明在集水区近出水口处高坡度景观的面积占比更大,而这些景观可能是农林复合型集水区面源污染的主要迁出区域。

首先,已有大量研究表明,LWLI 与流域的养分输出显著正相关,当 LWLI 越大时,流域的养分流失通常更严重^[19-22],与本研究结果一致。同时,在本研究中,地形是石盘丘小流域两个集水区差异最为显著的自然因素,流域的高陡坡区域在农林复合型集水区集中分布。有研究发现,当坡度从 5°增加至 25°时,径流将从 2.45 mm 增加至 6.43 mm,产沙量也相应增加^[23]。也有研究表明,同一管理模式下,径流中总氮、总磷、氨氮及硝态氮的平均含量随坡度升高而增加^[24],坡度越陡,污染物的迁移能力越强,但也有研究认为,坡位越高,污染物的富集性越弱^[25]。本研究中,两个集水区高陡坡区域的“源”景观均以果园为主,经果林大量的农药化肥投入,提供了稳定的养分来源,削弱了由海拔及坡位造成的富集度减弱趋势,同时加剧了坡度对养分输出的迁移作用。此外,陈利顶等^[26]对景观空间负荷对比指数的解释表明,坡度景观空间负荷对比指数 LWLI_s 越低,养分流失的危险性越高。根据 Wang 等^[27]对三峡库区“源—汇”景观格局的研究成果,在低海拔地区,“源”景观产生的非点源污染水平明显高于“汇”景观,而在高海拔地区,“汇”景观对非点源污染的贡献水平显著增高。李海防等^[28]对定西关川河流域的研究同样表明,在高海拔区域,水土流失贡献以“汇”景观为主。以上研究结果均表明,高陡坡区域更易形成由“汇”景观造成的养分流失,究其本质,是地形因素产生的养分输出作用大于由景观自身生态属性所产生的养分消纳作用,

因此,农林复合型集水区中“汇”景观具有截留效应的同时也承担了养分迁出源。

其次,土地利用及其空间配置是引起流域径流水质变化的关键因素。Zhang 等^[29]对全球氮流失潜在风险的预测表明,全球氮素流失风险表现为农田>人工林>草地>沼泽>森林,且农田和人工林中施用氮肥会加剧氮的潜在流失风险。而 Wang 等^[30]对三峡库区“源—汇”景观与非点源污染评价的研究中发现,“源”景观中的坡耕地与流域养分流失显著正相关,“汇”景观中的林地与流域养分流失显著负相关。Park 和 Lee 等^[31]研究表明,农业用地普遍对水质指标有负面影响,而林区则对水质指标有正面影响。以上研究结果说明,流域氮、磷流失与农业用地和林地均呈显著相关,但其与林地相关性的正负并不唯一,当林地为人工林时,可能反而表现出正相关关系。石盘丘小流域 2007—2009 年的监测数据显示,总氮和总磷的排放浓度均表现为果园>坡耕地>水田>林地,2018 年总氮的流失通量表现为水田>果园>旱地>林地,总磷的流失通量表现为果园>水田>林地>旱地^[32-33]。其一,农业用地在传统农业型集水区与农林复合型集水区“源”景观中的占比分别为 88.2% 和 78.2%,这意味着两个集水区的养分流失可能都受到农业用地的强烈影响,但不同降雨条件下,具有更加不利地形因素的农林复合型集水区中,氮、磷输出负荷反而显著低于传统农业型集水区。一方面,农林复合型集水区的低氮、磷输出,一定程度上证明集水区引入的小流域面源污染景观生态链全程阻控消纳技术,对农业用地的养分流失起到了积极防控作用;另一方面,受景观空间配置影响,传统农业型集水区的农业用地存在集中连片的开发现象,“源”景观分布面广且连续,而农林复合型集水区草地、梯田、水域等生态景观斑块的错落镶嵌,阻隔了“源”景观的蔓延,使得集水区对降雨侵蚀的系统缓冲作用增强,同时,在近流域出水口区域,传统农业型集水区以旱地、农村宅基地等“源”景观为主,氮、磷等营养物质随径流直接向外输出,而农林复合型集水区“源”、“汇”景观均衡分布,营养物质向外环境输出前,能够在集水区内逐层消纳。其二,其他林地在传统农业型集水区与农林复合型集水区的“汇”景观面积中分别占比 24.7% 和 59.0%,而受空间位置及坡度的影响,林地起到的作用较为复杂。石盘丘小流域两个集水区的林地虽均

以天然林为主,但农林复合型集水区的林地占据了流域内大部分高陡坡地带,同时,上坡位的林地环绕农村宅基地,受到人类活动的强烈干扰,可能已成为流域内养分流失的“源”,而中、下坡位的林地作为阻控消纳技术中的养分“汇”,当其容纳能力小于上坡流失能力时,也可能将转变为养分迁出的“源”。综上,农业用地在两个集水区中均是养分流失的主要来源,但由于“源—汇”景观面积及空间分布的优化,农林复合型集水区的溶解态氮、磷输出负荷更低,更有利于面源污染的阻控。

此外,流域养分流失是多因子协同作用下的动态过程,而“源”、“汇”景观是基于这一过程的相对概念,因此,一定条件下,“源”景观和“汇”景观之间存在相互转换。有研究表明,污水域在旱季是污染物的最大贡献源,贡献率达26.2%,但在雨季时受到强烈稀释,污染减弱反而变为“汇”^[34],坡改梯作为三峡库区典型水土保持治理措施,一方面可以减流减沙,控制养分输出^[35],同时,新修梯田的填土性质不稳定,修筑初期,部分理化特性反而会发生劣化,从而增加水土流失风险^[36]。本研究所用于识别石盘丘小流域“源—汇”景观格局的累计最小阻力模型,一方面综合反映了流域植被覆盖、下垫面情况、降水及土壤特性,描述了空间阻力及动力格局对流域非点源污染过程的影响,另一方面,模型中流域农业活动和化肥农药的干扰仅体现在土壤特性因子中,农林复合型集水区引用的水土保持技术体系无法量化,且“源”、“汇”景观存在动态转化过程,因此对“源—汇”景观格局判别存在局限性。

综上所述,基于最小累计阻力模型的“源—汇”景观识别方法虽然存在一定的局限性,但由此推导出的LWLI指数仍然可以在一定程度上帮助判别小流域养分流失风险。传统农业型集水区的高LWLI表征着高负荷的养分输移,而农林复合型集水区占据的高陡坡区域虽然存在养分流失的风险,但其“源”、“汇”景观面积均衡、近流域出水口处具有缓冲斑块,同时“源”、“汇”景观单元交互式布局,避免了“源”景观密集开发,从而使“源—汇”空间分布更合理,更低的LWLI值,反映了面源污染的低输出风险;此外,农业用地是“源”景观中主要的养分输出来源,而受景观位置与坡度的影响,“汇”景观中的其他林地可能是农林复合型集水区中重要

的养分迁出区域,但其具体的作用机制有待进一步实验研究。

4 结 论

本研究以石盘丘小流域的两个集水区为研究对象,综合土地利用、地形地貌、降水特征等属性,借助最小累计阻力模型对“源—汇”景观格局进行了识别。结果表明,流域内传统农业型集水区具有广泛且连续的“源”景观,且垂直分异性更明显,而农林复合型集水区“源”、“汇”景观的面积及分布相对均衡,从而导致不同降雨强度下,农林复合型集水区溶解态氮、磷的输出负荷及变异系数均低于传统农业型集水区,系统缓冲性更强。

“源—汇”景观空间负荷对比指数(LWLI)可在一定程度上判别小流域氮、磷流失风险,LWLI值越高,小流域养分流失风险越高,传统农业型集水区的LWLI值高达0.75,是面源污染高风险区,农林复合型集水区LWLI值仅为0.28,是面源污染低风险区,农林复合型集水区内高“汇”景观占比,“源”、“汇”景观均衡分布,近出水口处设置缓冲区,同时避免集中连片“源”景观开发的“源—汇”景观空间布局模式对面源污染防控更具优势,是小流域景观格局优化行之有效的途径。“源—汇”景观格局可作为小流域养分流失风险识别的重要依据,“源—汇”景观空间负荷对比指数LWLI值的模拟计算可为三峡库区农业小流域面源污染防治措施的布局提供参考。

参 考 文 献 (References)

- [1] Miller J D, Stewart E, Hess T, et al. Evaluating landscape metrics for characterising hydrological response to storm events in urbanised catchments[J]. Urban Water Journal, 2020, 17 (3): 247—258.
- [2] Brini I, Alexakis D, Kalaitzidis C. Linking soil erosion modeling to landscape patterns and geomorphometry: An application in Crete, Greece[J]. Applied Sciences, 2021, 11 (12): 5684.
- [3] Yohannes H, Soromessa T, Argaw M, et al. Impact of landscape pattern changes on hydrological ecosystem services in the Beressa watershed of the Blue Nile Basin in Ethiopia[J]. Science of the Total Environment, 2021, 793: 148559.
- [4] Li S Z, Chen M, Wang Y C, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of soil nitrogen and

- phosphorus in Three Gorges water level fluctuation zone in last decade[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33 (11): 2448—2457. [李姗泽, 陈铭, 王雨春, 等. 近10年来三峡消落带土壤氮、磷时空分布特征研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33 (11): 2448—2457.]
- [5] Shi D M, Jiang G Y, Peng X D, et al. Relationship between the periodicity of soil and water loss and erosion-sensitive periods based on temporal distributions of rainfall erosivity in the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Catena, 2021, 202: 105268.
- [6] Zhang S Y, Zeng Y H, Zha W, et al. Spatiotemporal variation of phosphorus in the Three Gorges Reservoir: Impact of upstream cascade reservoirs[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29 (37): 56739—56749.
- [7] Xiao Y, Xiao Q, Xiong Q L, et al. Effects of ecological restoration measures on soil erosion risk in the Three Gorges reservoir area since the 1980s[J]. GeoHealth, 2020, 4 (12): 22—34.
- [8] Tong X, Zhou Y, Liu J, et al. Non-point source pollution loads estimation in Three Gorges Reservoir Area based on improved observation experiment and export coefficient model[J]. Water Science and Technology, 2022, 85 (1): 27—38.
- [9] Huang Z Q, Zhou W C, Zhou J M, et al. Land use of the Three Gorges Reservoir Area and the effect on its landscape pattern in the recent 50 years[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11 (4): 910—914.
- [10] Zhang Q, Chen C L, Wang J Z, et al. The spatial granularity effect, changing landscape patterns, and suitable landscape metrics in the Three Gorges Reservoir Area, 1995—2015[J]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106259.
- [11] Sun T C, Liu T T, Chu L, et al. Effects of temporal and spatial variations in source-sink landscape patterns on soil erosion and sediment yield from typical watershed in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (20): 7476—7492. [孙天成, 刘婷婷, 褚琳, 等. 三峡库区典型流域“源”“汇”景观格局时空变化对侵蚀产沙的影响[J]. 生态学报, 2019, 39 (20): 7476—7492.]
- [12] 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.
- [13] Xie H, Du J K, Hu Y J, et al. Study on spatially distributed hydrological model based on routing time method[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27 (12): 75—78. [谢华, 都金康, 胡裕军, 等. 基于汇流时间方法的空间分布式水文模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27 (12): 75—78.]
- [14] Zheng C, Ni J P, Wei C F. Study of local scale runoff in hilly regions of Sichuan Basin based on DEM and SCS model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (5): 73—77. [郑畅, 倪九派, 魏朝富. 基于DEM和SCS模型的四川盆地丘陵区局地径流研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22 (5): 73—77.]
- [15] 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.
- [16] Xie Y, Liu B Y, Zhang W B. Study on standard of erosive rainfall[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14 (4): 6—11. [谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14 (4): 6—11.]
- [17] Sun J Z, Dong Z R, Zhao B, et al. Study on relations of erosive rainfall and soil erosion[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, 17 (13): 133—136. [孙家振, 董召荣, 赵波, 等. 侵蚀性降雨与土壤侵蚀关系的研究[J]. 安徽农学通报, 2011, 17 (13): 133—136.]
- [18] Sun Q Z, Wang C J, Zhao J, et al. Research evolution of rainfall erosivity (R) in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (4): 1—5. [孙泉忠, 王朝军, 赵佳, 等. 中国降雨侵蚀力R指标研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (4): 1—5.]
- [19] 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.
- [20] 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. [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.]
- [21] Yuan R J. Location-weighted landscape index of non-point source pollution in Songhuaba Reservoir watershed[J]. Resources Science, 2019, 41 (2): 405—413. [袁睿佳. 松华坝水库流域非点源污染景观空间负荷[J]. 资源科学, 2019, 41 (2): 405—413.]
- [22] 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. [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. 环境学科, 2020, 41 (5): 2264—2271.]
- [23] Jourgholami M, Karami S, Tavankar F, et al. Effects of slope gradient on runoff and sediment yield on machine-induced compacted soil in temperate forests[J]. Forests, 2020, 12 (1): 49—61.
- [24] Li T T, Wei C H, Dong W B, et al. Effects of sod culture

- and slope on losses of nitrogen and phosphorus in the surface runoff of orchards of northeast Guangxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28 (3): 59—64, 73. [李婷婷, 韦彩会, 董文斌, 等. 生草栽培与坡度对桂东北坡地果园地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28 (3): 59—64, 73.]
- [25] 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.
- [26] 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. [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.]
- [27] 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.
- [28] Li H F, Wei W, Chen J, et al. Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River Basin, Dingxi, Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (14): 4460—4467. [李海防, 卫伟, 陈瑾, 等. 基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究[J]. 生态学报, 2013, 33 (14): 4460—4467.]
- [29] Zhang Y S, Pan B B, Lam S K, et al. Predicting the ratio of nitrification to immobilization to reflect the potential risk of nitrogen loss worldwide[J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55 (11): 7721—7730.
- [30] 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.
- [31] Park S R, Lee S W. Spatially varying and scale-dependent relationships of land use types with stream water quality[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17 (5): 1673.
- [32] Zhu B, Wang T, Wang J C, et al. Source and load of non-point source nitrous and phosphorus pollution of typical small watersheds in the Three Gorges reservoir area[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010 (10): 34—36, 71. [朱波, 汪涛, 王建超, 等. 三峡库区典型小流域非点源氮磷污染的来源与负荷[J]. 中国水土保持, 2010 (10): 34—36, 71.]
- [33] Deng H, Gao M, Long Y, et al. Characteristics of soil nitrogen and phosphorus losses under different land-use schemes in the Shipanqiu watershed[J]. Environmental Science, 2021, 42 (1): 251—262. [邓华, 高明, 龙翼, 等. 石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量[J]. 环境科学, 2021, 42 (1): 251—262.]
- [34] Xu J, Jin G Q, Tang H W, et al. Response of water quality to land use and sewage outfalls in different seasons[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 134014.
- [35] Xiao L, Wang Z W, Yin Q Y, et al. Effect of terracing slope cropland on soil and water conservation in dry-hot valley of Jinsha River Basin, southwest China[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32 (12): 2856—2861. [肖理, 王章文, 殷庆元, 等. 金沙江干热河谷坡改梯对水土保持的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32 (12): 2856—2861.]
- [36] Han Q, Yu X X, Wang W, et al. Effect of terracing project on temporal-spatial variation of non-point source pollution load in Huijishan watershed, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28 (4): 1344—1351. [汉强, 于兴修, 王伟, 等. 坡改梯工程对胡家山小流域非点源污染负荷时空变化的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (4): 1344—1351.]

(责任编辑: 檀满枝)