

世界自然遗产缓冲区养殖场风险评价与管控

李 杰, 李 厦, 李天慧, 秦旭东

四川七丛楼信息技术有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2026年9月1日; 录用日期: 2026年10月2日; 发布日期: 2026年10月19日

摘 要

世界自然遗产缓冲区内已建项目除直接环境威胁, 还存在污染扩散风险。环境影响评价的距离设定忽略了高山环境下地表径流的影响。选取汶川县8家养殖场, 运用3S技术构建风险评价体系, 并根据项目特征识别潜在风险因子, 引入汇水重叠度(HCI)等指标, 计算养分流失潜力(NLP)与修正后的综合风险指数(CRI)。结果表明综合考虑HCI、坡度与植被等因素对风险评估具有一定修正价值。通过“源-径-汇”思路进行水文分析, 量化已建项目污染扩散风险, 同时对消纳地进行适宜性评价, 从单一变量转向空间视角。

关键词

世界自然遗产, 缓冲区, 风险评价, 汇水重叠度, 3S技术

Risk Assessment and Control of Livestock Farms in World Natural Heritage Buffer Zones

Jie Li, Sha Li, Tianhui Li, Xudong Qin

Sichuan Qiconglou Information Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 1, 2026; accepted: October 2, 2026; published: October 19, 2026

Abstract

In the buffer zones of World Natural Heritage sites, constructed projects pose not only direct environmental threats but also risks of pollution diffusion. The distance settings in environmental impact assessments ignore the effects of surface runoff in mountainous environments. Eight farms in Wenchuan County were selected to construct a risk assessment system using 3S technology. Potential risk factors were identified based on project characteristics, and indicators such as the

Hydrological Convergence Index (HCI) were introduced to calculate Nutrient Loss Potential (NLP) and the modified Comprehensive Risk Index (CRI). The results indicate that comprehensively considering factors such as HCI, slope, and vegetation has a certain corrective value for risk assessment. Hydrological analysis following the “source-path-convergence” approach was conducted to quantify the pollution diffusion risk of existing projects, while suitability evaluation of disposal sites was performed, shifting from a single-variable perspective to a spatial perspective.

Keywords

World Natural Heritage, Buffer Zone, Risk Assessment, Hydrological Convergence Index (HCI), 3S Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

世界自然遗产地的生态完整性与突出普遍价值(OUV)备受国际关注[1], 缓冲区是人类活动的保护过渡带, 其生态环境质量直接影响遗产地的保护成效。然而, 现有实践多聚焦于遗产地管控与未建项目, 对缓冲区内已建项目运营期的潜在风险缺乏系统性评价[2]。传统的 EIA 将欧氏距离作为变量来衡量污染风险, 但在汶川这种地形复杂的区域, EIA 缺乏污染物的迁移路径还原、暴雨径流等风险预测, 这导致了面源风险被低估[3]。

四川大熊猫栖息地是全球生物多样性热点地区, 其中汶川段缓冲区属岷江上游高山峡谷区, 现有多家已建规模化养殖场, 尽管各场均配套粪污干湿分离及资源化利用设施, 但在复杂地形条件下, 仍存在粪污滴灌渗漏、转运遗撒及暴雨径流冲刷等潜在环境风险。

鉴于此, 将遗产缓冲区内 8 家已投入运营的养殖场作为研究对象, 运用 3S 技术, 构建基于“源-径-汇”视角的三维环境风险评价体系[4], 将汇水重叠度、坡度与生态脆弱性等多种因素同时纳入考虑范围, 计算综合风险指数 CRI, 修正传统距离评价偏差。此外, 利用 GIS 叠加分析养殖场消纳地选取的合理性, 计算养分流失潜力进而提出消纳地适宜性评价模型。针对现有问题提出优化改进策略, 以提升世界自然遗产地的风险管控水平。为同类世界自然遗产地周边已建项目的环境监管与风险防范提供技术支撑与管理借鉴[5]。

2. 数据来源

2.1. 研究区概况

研究区位于四川大熊猫栖息地世界自然遗产(汶川范围)缓冲区内, 属于岷江上游高山峡谷区地带, 地形陡峭, 河谷水系发达, 景观破碎度高[6]。区内气候垂直分异明显, 年降雨量集中, 地表径流速度快, 污染物随水迁移能力强。选取的 8 家规模化养殖场均为已建项目, 年出栏总量介于 1500~4800 头, 均具备粪污干湿分离工艺以及落实固态粪污发酵还田、污水经厌氧处理后通过滴灌系统还田。然而, 消纳地布局未经过严谨的分析选址, 受复杂地形制约, 存在通过地表径流间接进入遗产地水体的隐患, 扰动遗产地生境[7]。

2.2. 数据来源与预处理

(1) RS 遥感数据: 选用汶川县 2025 年 Sentinel-2A/B MSI L2A 级影像, 空间分辨率为 10 m [8]。产品

已经做过大气和几何校正,省去预处理环节。在 ArcGIS 中按照研究区矢量边界裁剪,更清晰地辨认河道走向、陡坡位置和植被覆盖情况,作为水文分析的底图,便于后续与水体缓冲带的叠加分析。

(2) GIS 地理数据:水文分析的基础是 ASTER GDEM V3 高程数据,分辨率为 30 m [9] [10],根据填注,提取流向和区划的步骤,在 GIS 中得到养殖场排水子流域栅格;世界自然遗产矢量边界数据、大熊猫廊道、栖息地分布图(汶川范围)来源于汶川县林业和草原局,用于严格界定评价范围。

(3) GPS 定位数据:为了“源”的精准定位,进行实地踏勘,用 GNSS-RTK 实时动态定位,采集场区粪污处理设施及排污口等关键坐标。在 Fix 状态下记录点位,坐标系统一转换至 CGCS2000 高斯投影,平面定位精度可控制在亚米级,为“源-径-汇”空间关系提供相对准确的“源”的位置。

(4) 养殖场基础资料:收集 8 家养殖场的环境影响登记表、粪污排放记录、消纳协议等,重点提取每家养殖场消纳地位置、消纳量及转运信息,便于数据的对比分析、污染路径还原。

3. 研究方法

3.1. 评价体系构建

汶川县漩口镇、水磨镇等地为畜禽养殖聚集区,其污染的“源”多而分散、传播路径复杂不局限于表面。将评价因素分为空间占用、生态扰动和污染扩散三个维度,初步构成已建项目环境风险评价体系(表 1)。

Table 1. Risk factor indicators for existing projects

表 1. 已建项目风险因素指标表

评价维度	核心指标	数据支撑	表征意义
空间占用	距遗产边界距离、缓冲带内占地	GPS 实地坐标、遗产矢量边界	养殖场对遗产地的物理空间挤占程度
生态扰动	植被覆盖度(FVC)、陡坡占比	Sentinel-2 L2A、DEM 坡度分析	养殖活动对周边植被及地形的破坏强度
污染扩散	汇水区重叠度(HCI)、消纳地匹配度	DEM 水文分析、消纳协议、GPS 定位	粪污随径流进入遗产水体的概率(核心修正项)

考虑到 8 家养殖场占地面积较小,项目总面积占遗产保护管理总面积均在 0.00004%以下,且均未占用林地,因此空间占用与维度仅用于背景描述,主要运用生态扰动与污染扩散指标构建风险指数。引入汇水重叠度(HCI)、污染源强度系数(S)、坡度修正系数(K_s)与植被截流系数(V_b)。基于此,得出修正后的综合风险指数 CRI (Comprehensive Risk Index),其计算公式为:

$$CRI = (1 + HCI) \times S \times K_s \times V_b$$

采用连乘算法,其中每个因子的不利条件均会通过乘法显现,符合污染物随暴雨径流迁移的非线性特征。

3.2. 各项指标计算

(1) 汇水重叠度(HCI)

HCI 定义为:污染“源”所属子流域与遗产地水体(“汇”)缓冲带的重叠面积与该子流域(“径”)面积的比值,用来表示污水汇入遗产地水体风险值,修正单一直线距离的偏差,量化水文连通性对污染迁移的决定性作用[11] [12]。

在 ArcGIS Pro 3.0 中，基于 ASTER GDEM V3 数据，利用 Hydrology 工具链进行填注、流向提取，划分每家养殖场所属的子流域单元 $A_i^{\text{watershed}}$ 。以遗产地主要河流及缓冲带 50 m、100 m、200 m 作为受纳“汇”区。综合考虑岷江上游高山峡谷区暴雨集中、地表径流速度快及坡面漫流横向展宽显著的本底特征，同时兼顾 ASTER GDEM V3 (30 m) 存在的 ± 1 栅格(约 30 m)位置误差，最终选取 200 m 作为遗产水体缓冲带阈值[13][14]，该尺度能有效包容暴雨下的洪水漫溢风险，从而更真实地反映粪污随径流汇入遗产水体的潜在概率。

汇水区重叠度 HCI 计算公式如下：

$$HCI_i = \frac{A_i^{\text{overlap}}}{A_i^{\text{watershed}}} \quad [15]$$

式中：

A_i^{overlap} ——第 i 家养殖场所属子流域与遗产地水体缓冲带的重叠面积；

$A_i^{\text{watershed}}$ ——第 i 家养殖场所属子流域的总面积。

式中上标 overlap 表示与遗产水体 200 m 缓冲带交集，计算得出的 HCI 值为[0, 1]，HCI 值越大，表明水文连通性越强[16]，粪污随暴雨径流汇入遗产水体的概率越高。引入汇水重叠度后在 GIS 中的风险修正过程示意图如图 1 所示。

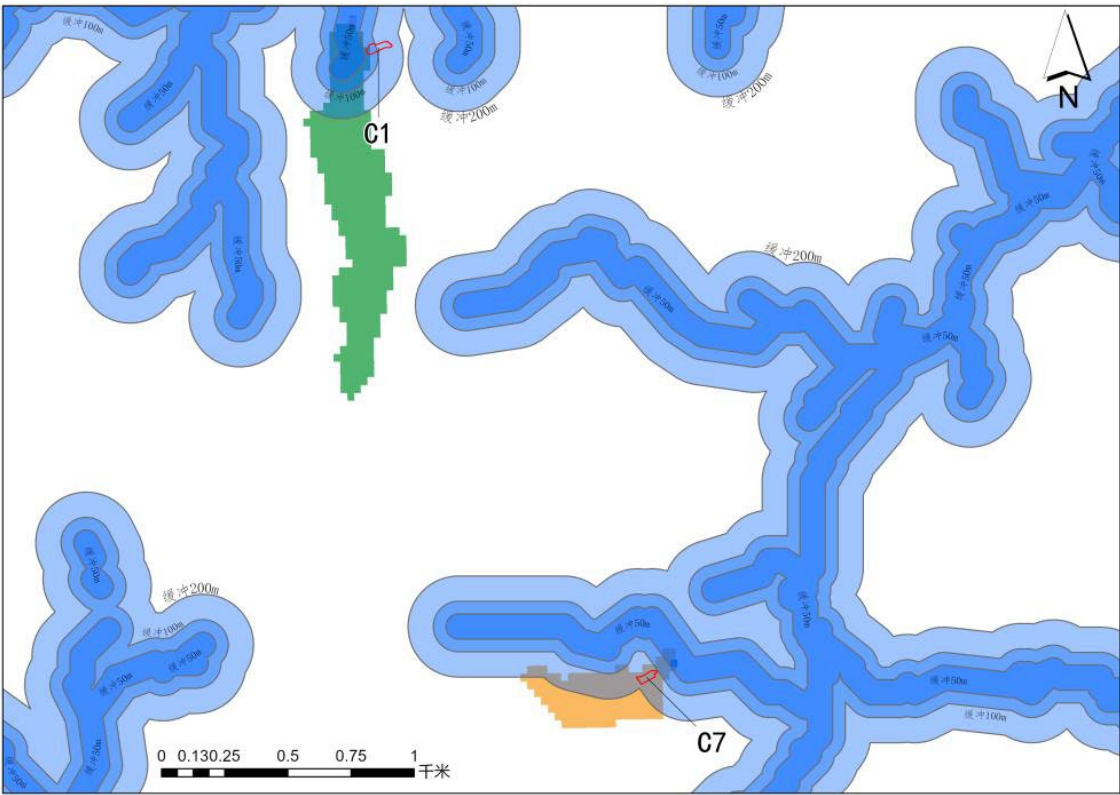


Figure 1. Relationship diagram between sub-basins and river buffer zones (examples: C1, C7)

图 1. 子流域与河流缓冲带关系图(C1、C7 示例)

根据水文连通性特征，将 HCI 划分为高风险、中风险和低风险三个层次：

$HCI \geq 0.5$ 表明“径”区与遗产水体缓冲带高度重叠，污染径流汇入概率大，视为高风险； $0.1 \leq HCI$

<0.5 表明尚存潜在迁移路径, 视为中风险; $HCI < 0.1$ 表明“径”区受地形阻隔显著, 水文连通性弱, 视为低风险。

(2) 污染源强度系数(S)

养殖规模常常用存栏量表达, 粪污产量也由存栏量乘以排泄系数推算[17], 二者存在高度共线性, 故仅选取存栏量作为源强代理变量。采用极差归一法, 将养殖场污染源进行量化并归一化处理, 设养殖场存栏量为 B , 则:

$$S = 1 + \frac{B - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}}$$

(3) 坡度修正系数(K_s)

结合研究区的 DEM 数据提取坡度, 依据 RUSLE 坡度分级, 取 5° 、 15° 、 25° 为转折点。采用分级法设定坡度修正并赋分: $0 \sim 5^\circ$ 赋分 1.00、 $5 \sim 15^\circ$ 赋分 1.15、 $15 \sim 25^\circ$ 赋分 1.35、 25° 以上赋分 1.60。通过坡度修正系数量化出高山峡谷区地形与土壤侵蚀对污染物迁移的效应。

(4) 生态脆弱系数(V_b)

运用植被覆盖度(FVC)数据, 结合模型中的 HCI 空间尺度, 以每个养殖场的子流域作为主要研究区, 定义栅格尺度植被脆弱系数为 V_b , 则:

$$Vb_i = 2 - \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} FVC_j$$

式中, n_i 为第 i 个养殖场子流域栅格数。 Vb 的值域为 $[1, 2]$, 数值越接近于 2 表明植被覆盖越低, 地表裸露与生态脆弱程度高, 植被受粪污径流破坏的风险越大。

3.3. 消纳地污染扩散风险评估

经调查, 为方便运输, 节约成本, 每家养殖户在签署消纳协议时会优先就近选取, 并未将地表径流风险与暴雨等特殊因素纳入考量范围, 尤其在地势较陡、植被稀疏的地带, 养分随降雨间接影响遗产水体的概率增大。因此, 选取污染源强度系数(S)、消纳地坡度修正系数(K_{si})与生态脆弱系数(V_{bi})评估养分流失潜力(NLP), 其计算方式同理。则

$$NLP = S \times K_{si} \times V_{bi}$$

NLP 值越大, 代表养分流失风险越大。结合养殖场环评资料与消纳协议, 获取养殖场消纳区域将协议中规定的消纳地图层与子流域、遗产缓冲带进行叠加分析与计算。

4. 结果与分析

4.1. HCI 与 NLP 分布特征

将直线距离衰减模型作为污染扩散的基准参照, 以“源”距遗产边界直线距离 3.0 km 为界, 将养殖场划分为三个风险等级: 大于 3.0 km 时, 因空间隔离相对充足为低风险; 介于 1.0~3.0 km 之间为中风险; 小于 1.0 km 即紧邻遗产边界, 空间压力显著, 视为高风险。

表 2 给出了考虑水文连通性与消纳地适宜性的结果, 划分依据为: $HCI \geq 0.5$ 为高风险, 表明养殖场子流域与遗产水体缓冲带高度连通, 污染径流迁移概率大; $0.1 \leq HCI < 0.5$ 为中风险, 重叠区域不过半但存在潜在迁移路径; $HCI < 0.1$ 为低风险, 受地形阻隔显著, 水文连通性弱。为了进一步分析消纳空间的合理性, 对所选养殖场的消纳地与子流域进行空间分析, 并根据消纳地坡度、植被覆盖率等因素计算 NLP, 将 NLP 划分为四级: $NLP < 2.5$ 为适宜, $2.5 \sim 3.5$ 为较适宜, $3.5 \sim 4.5$ 为临界适宜, 超过 4.5 为不适宜。

Table 2. Environmental risk classification results for livestock farms based on HCI
表 2. 基于 HCI 的养殖场环境风险等级划分结果

编号	距遗产边界距离 /km	距离衰减模型风险 等级	HCI	HCI 风险等级	消纳区是否位于 子流域	养分流失潜力 NLP
C1	4.24	低	0.194	中	部分	2.698
C2	6.42	低	0	低	部分	2.645
C3	0.49	高	0.237	中	是	4.212
C4	0.395	高	0.615	高	是	2.373
C5	3.17	低	1.000	高	是	1.850
C6	1.16	中	0	低	否	2.444
C7	1.78	中	0.497	中	是	4.956
C8	1.64	中	0.635	高	是	3.328

距离评价模式下，风险遵循近高远低规律，C3、C4 紧邻遗产边界，被列为高风险，C1、C2、C5 因距离超过 3 km，统一归为低风险。然而，将汇水区重叠度(HCI)纳入模型后，格局发生明显变化。其中 C5 直线距离遗产边界达 3.17 km，本为低风险，HCI 值高达 1.000，且其消纳区恰好位于子流域内部，这意味着其排水区与遗产水体缓冲带完全重合。换言之，一旦遭遇暴雨，场区粪污极有可能沿着连续的坡面径流直接汇入遗产水系。相反，C3 受地形遮挡影响，HCI 仅为 0.237。污染物很难跨过分水岭进入遗产水系，实际风险反而偏低。这一对比凸显了地形与水文连通性在风险识别中的关键作用。C6 受地形因素影响，HCI 值为 0 且消纳区并未与子流域区重叠，这与距离衰减模型形成较大差异。

4.2. 消纳地空间匹配性分析

养殖场虽然签有正规的粪污消纳协议，从“产生量不超过消纳能力”的数量平衡上看也符合要求，但消纳地的位置恰恰选在了污染物最容易进入水系的通道上。从空间角度看，今后的养殖场风险管控应考虑“径”的影响，且有必要把消纳地布局一并纳入符合性审查中，主要考虑敏感水文路径以及坡度、土壤等因素。

通过分析发现 5 家养殖场消纳地完全落于子流域，其中 C7 的 HCI 值达到 4.956，属于不适宜区间，且其 HCI 无限接近 0.5 临界值，在实际评估中也应纳入考虑范畴。将 HCI 引入评价体系后，不仅能够捕捉到那些被距离掩盖的潜在污染路径，还能为消纳区的空间适宜度分析提供参考。在选取消纳地时首先应考虑避开养殖场子流域区域，其次计算其 NLP 值，优先选择 NLP<2.5 的区域，尽量保证 NLP 值不超过 3.5，此种方式能够在源头上有效降低地表径流与养分流失风险。

4.3. 综合风险指数 CRI 分析

基于 8 家养殖场的空间与基础数据，CRI 计算结果见表 3。CRI 取值范围为 2.12~5.45，离散度适中，具备风险分级的区分能力。C3 由于主要受源强 S 影响综合风险指数较高；C5 主要由于 HCI 与陡坡形成的较高 CRI，好在其 NLP 值较低，并未使得风险升级；而 C7、C8 的风险高是受到了综合因素的影响，且 C7 的 NLP 值最大，应作为重点关注改造对象，其消纳地的选址合理性也应当重新分析。

Table 3. Analysis of factor data and CRI risk assessment
表 3. 各因子数据与 CRI 风险分析

编号	HCI	HCI 风险等级	S	K_s	V_b	CRI	NLP
C1	0.194	中	1.1875	1.35	1.35	2.58	2.698
C2	0	低	1.1875	1.6	1.57	2.98	2.645
C3	0.237	中	2	1.35	1.43	4.78	4.212
C4	0.615	高	1.1875	1.15	1.36	3	2.373
C5	1.000	高	1	1.6	1.29	4.13	1.850
C6	0	低	1.1875	1.15	1.55	2.12	2.444
C7	0.497	中	1.75	1.35	1.54	5.45	4.956
C8	0.635	高	1.53125	1.15	1.46	4.2	3.328

5. 消减措施的优化方案

5.1. 基于 HCI 的优化措施

(1) 高风险阻断转运：在高重叠区，粪污随暴雨径流直接入河风险极高，须采取工程阻断措施。现行就地消纳模式在水文路径上存在失效风险，改变就地消纳思路，推行异地转运处置。依托汶川县粪污转运中心，将高风险管理区的粪污转运至缓冲区外或水文连通性弱的安全区域进行资源化利用，切断污染向遗产地水体的传输路径。

(2) 中风险生态缓冲：在养殖场的径流路径上，选择适宜地带构建廊道，改建或新建生态沟渠[18]。植物优先选择耐污湿地种，如菖蒲、灯芯草等。利用植物根系物理吸附截留悬浮物，根际效应降解有机物，径流中的 COD、氨氮和总磷负荷得到一定削减。优先将粪污施用于位于径流路径下游的经果林，如汶川猕猴桃、青脆李基地。利用经果林发达的林草系统作为植物措施过滤带[19]，通过土壤渗透和植物吸收，拦截氮磷污染物，实现种养循环。

(3) 低风险监测预警：对于 HCI 值趋近于 0 的养殖场，因分水岭存在，污染物会受到阻隔。然而，不能排除极端降雨、设施损坏等特殊情况，应严格落实防渗措施，规范粪污干湿分离工艺，定期开展环保设施运行维护检查。同时设立一定的检测频率，例如每季度对场区周边的地表水和地下水开展一次抽检，重点关注 pH、总氮和总磷等指标。长期跟踪相关数据，有助于在问题恶化前及时预警。

5.2. 基于子流域与 NLP 的消纳地布局优化

仅靠粪污供需的数量平衡，不足以保障遗产缓冲区的环境安全[20]。建议在修订畜禽养殖准入与监管办法时，把空间因素摆在更突出的位置。对于已经建在高重叠区的养殖场，也可以探索通过土地流转，将消纳地调整至分水岭另一侧或连通性较低的区域，从布局上降低污染风险。

(1) 严禁重叠区消纳，重新签署位于高 HCI 值子流域内的粪污消纳协议，严禁在遗产水系上游及周边高连通性区域进行沼液地表漫灌或滴灌作业。修建导流与截污工程，在场区外围及粪污储存池周边修建高标准防渗导流沟[21]，将场区初期雨污水及可能的渗漏液收集后导入应急收集池，严防其进入自然径流。建立养殖与消纳的定向配对和专用收运路线，运输路径主动规避高水文连通性子流域，从空间上压缩泄漏风险。

(2) 综合考虑坡度与土壤等因素针对 NLP > 4.5 的养殖场应限制或禁止粪污施用；而 NLP 较低的属适宜区域，可作为优先还田区域。此外，在高山地区的项目环评环节，可以增加一项针对水文连通性与土壤流失潜力的专项评估，避免在 HCI 与 NLP 较高的区域新建排污口或消纳地。

5.3. 基于 CRI 综合风险的管控

(1) 准入管理：针对类似已建项目，主要针对未来可能的改扩建行为。建议将 CRI 综合风险指数纳入遗产地缓冲区养殖项目变更审批的技术依据：任何涉及存栏量增加的改扩建申请，须重新核算 CRI 值，不予批准改扩建后 $CRI > 3.0$ 的任何行为。同时，缓冲区内禁止新建任何规模化养殖设施[22]，现有养殖场的附属配套设施须通过 CRI 复核。

(2) 多维度控制：污染源强(S)扩散风险的首要源头，应将存栏量管控作为防控工作的核心切入点。对存栏规模居前的养殖场优先纳入减排清单，通过退养补偿、出栏周期调控或品种结构调整等方式逐步压减规模；汇水重叠度直接反映粪污随暴雨径流汇入遗产水体的概率，极端暴雨条件下的地表径流流速快，不容忽视，应针对不同 HCI 值的项目采取差异化防控措施；坡度较陡的场址地土壤侵蚀潜力大，应配套等高植物篱或梯级沉沙池以削减坡面冲刷强度；植被覆盖偏低、地表裸露的区域需优先恢复乡土植被缓冲带，利用冠层截留和根系固土作用降低流失潜力，在场址工程设计中发挥生态作用。

6. 讨论

6.1. 对传统风险评价的修正价值

EIA 的核心判定依据为“源”与“汇”的直线距离，这在平原地区具有一定合理性。而在地形复杂的高山峡谷区，地表径流产生的间接影响不容忽视。综合来看，HCI 与 CRI 的引入在一定程度上修正了传统距离衰减模型的局限性。这一结果在汶川县养殖场的案例中得到印证，考虑多种因素情况下风险等级发生了不同程度的改变。在地形复杂的遗产缓冲区，仅依靠欧几里得距离来判断风险，很容易低估真实隐患。相比之下，将山地地形和水文路径划入考虑范畴，更能反映污染物迁移的实际可能性，具有修正价值。

6.2. 对遗产地环境管理的启示

根据无人机航拍影像、消纳地 GPS 定位与养殖场提供资料发现，养殖户虽与当地农户签署了合法的粪污消纳协议，但部分消纳地空间布局不合理，没有将潜在污染风险纳入考虑范围，尚存地表径流隐患。这一现象揭示了当前遗产缓冲区风险管控中的短板：侧重量平衡，即消纳地承载力大于粪污产生量，轻空间的匹配，即消纳地是否避开污染扩散路径。污染路径叠加分析为这类问题提供了改进思路。特别是在高山峡谷地区，未来的风险评估不应止步于“产污量与消纳量平衡”，还需要把水文连通性与土壤流失潜力作为空间审查的重要内容[23]。从实际操作来看，选取消纳区时，应避开径流汇集区，同时选择坡度较缓、植被覆盖率适宜的地带，有效切断氮磷污染物的迁移通道，降低其间接进入遗产水体的风险。

6.3. 有待进一步研究的因素

需要指出的是，本研究使用的 30 m DEM 在刻画微小沟道时仍有一定局限。通过与 12.5 m ALOS 数据及 RTK 实测沟道比对发现，分水岭位置的中值偏移约为 ± 1 个栅格(即 ± 30 m)，对应的 HCI 波动大约在 ± 0.03 之间。总体来看，HCI 更适合用于识别“污染有没有可能过去”的结构性问题，而要进一步回答“会有多少污染物过去”，还需要引入降雨侵蚀力、土壤可蚀性、粪污荷载量等更多影响因素，为建立更精细的定量风险估算模型提供支撑。

参考文献

- [1] UNESCO World Heritage Centre (2023) Operational Guidelines for the Implementation of the World Heritage Convention. IUCN.

- [2] Lin, D.Y., Liu, F.Y., Zhang, J.P., Hao, H.G., Zhang, Q. (2021) Research Progress on Ecological Risk Assessment Based on Multifunctional Landscape. *Journal of Resources and Ecology*, **12**, 260-267. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2021.02.012>
- [3] 安婧, 丁子明, 高程程, 等. 畜禽粪便污染的环境风险与资源化处理技术分析[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4764-4774.
- [4] 朱艳媚. 3S 技术在生态环境监测中的应用实践研究[J]. 资源节约与环保, 2019, 34(2): 32.
- [5] 曹杰, 熊康宁, 陈丽莎, 等. 梵净山世界遗产提名地环境问题空间分布及整治研究[J]. 中国园林, 2020, 36(3): 115-119.
- [6] 李悦, 姚杨鑫, 王纪杰. 四川大熊猫国家公园区域景观生态系统特征与国家公园适宜性研究[J]. 四川林业科技, 2022, 43(4): 38-44.
- [7] 周世强, 张晋东, Hull, V., 等. 野生大熊猫与放牧家畜利用生境的特征比较[J]. 生态环境学报, 2023, 32(2): 309-319.
- [8] European Space Agency (2024) Sentinel-2. Copernicus Data Space Ecosystem. <https://documentation.dataspace.copernicus.eu/Data/SentinelMissions/Sentinel2.html>
- [9] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [10] NASA/METI (2023) ASTER Global Digital Elevation Model Version 3 (ASTER GDEM V3). <https://doi.org/10.5067/ASTER/ASTGTM.003>
- [11] Bracken, L.J. and Croke, J. (2007) The Concept of Hydrological Connectivity and Its Contribution to Understanding Runoff-Dominated Geomorphic Systems. *Hydrological Processes*, **21**, 1749-1763. <https://doi.org/10.1002/hyp.6313>
- [12] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 步青松, 郑玲芳. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383.
- [13] 李雪涵, 王阳阳, 崔旭辉, 等. 滦河流域水文连通性时空变化及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 28-35, 54.
- [14] Epps, T.H. and Hathaway, J.M. (2018) Establishing a Framework for the Spatial Identification of Effective Impervious Areas in Gauged Basins: Review and Case Study. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, **4**, Article ID: 04018001. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000853>
- [15] Sahoo, S.N. and Sreeja, P. (2016) Determination of Effective Impervious Area for an Urban Indian Catchment. *Journal of Hydrologic Engineering*, **21**, No. 4. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001346](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001346)
- [16] 杨柳, 刘丹, 冯畅, 等. 考虑水系三维连通特征的湘江流域洪水风险评价[J]. 地理科学, 2025, 45(3): 627-639.
- [17] 生态环境部. GB 18596-2001 畜禽养殖业污染物排放标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [18] 谢晖, 董建玮, 李玉凤, 等. 多水塘系统水文连通及其对磷输移影响研究进展[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 848-858.
- [19] 姜海, 雷昊, 白璐, 等. 我国畜禽养殖污染多中心治理典型案例与优化路径[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(2): 235-239.
- [20] 蔡文博, 陈雨菲, 彭婉婷, 等. 中国世界自然遗产地社区正负生态效应与调控对策[J]. 自然保护地, 2025, 5(4): 12-25.
- [21] 农业农村部. NY/T 4754-2025 畜禽养殖场粪污资源化利用设施技术要求[S]. 北京: 中国农业出版社, 2025.
- [22] 四川省世界遗产保护条例[EB/OL]. <https://flk.npc.gov.cn/detail?title=%E5%9B%9B%E5%B7%9D%E7%9C%81%E4%B8%96%E7%95%8C%E9%81%97%E4%BA%A7%E4%BF%9D%E6%8A%A4%E6%9D%A1%E4%BE%8B&id=ff8081819014efb40190398c98a071f6>, 2024-05-29.
- [23] 肖时珍, 容丽, 肖华, 等. 中国丹霞赤水世界自然遗产地监测体系构建[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(6): 8-19.