

基于信息熵调优的交错瓦片地图符号设计优化方法

丁 茜, 冯 俊, 于 辉

中国电子科技集团公司第二十八研究所, 江苏 南京

收稿日期: 2026年6月20日; 录用日期: 2026年7月13日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

随着矢量瓦片渲染技术的广泛应用, 交错瓦片地图的符号设计面临多比例尺层级交错场景下的视觉一致性挑战。传统方法依赖制图师经验, 缺乏定量评估手段, 在不同比例尺地图数据共存的视图中易产生符号突变与视觉冲突。本文提出一种基于信息熵调优的交错瓦片地图符号设计优化方法。该方法以瓦片为基本计算单元, 构建要素概率分布计算模型与样式熵计算模型, 建立综合瓦片信息熵模型, 通过迭代调优瓦片样式信息熵, 指导地图符号库的持续优化。实验以交错瓦片为例, 按1:1000至1:1000万共9个显示比例尺区间划分测试场景, 配置对应数据比例尺组合并开展渐进加载性能测试。结果表明, 应用本方法后瓦片整体信息熵从0.72降低至0.16, 降幅达77.8%, 显著提升了交错场景下地图符号显示的连续性与稳定性; 可支持跨数据精度1:1000至1:1000万范围内的符号显示, 以S4 (显示1:10万) 场景为例, 视口叠加图幅数 $N = 20$ 时, 平均帧率降至29 fps为性能拐点, 视口内最多支持约20幅数据叠加显示, 有效解决了交错瓦片地图多比例尺符号设计的定量优化难题。

关键词

信息熵, 矢量瓦片, 地图符号设计, 符号库调优, 交错显示, 多比例尺可视化

An Optimization Method for Interleaved Tile Map Symbol Design Based on Information Entropy Tuning

Qian Ding, Jun Feng, Hui Yu

The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing Jiangsu

Received: June 20, 2026; accepted: July 13, 2026; published: July 21, 2026

文章引用: 丁茜, 冯俊, 于辉. 基于信息熵调优的交错瓦片地图符号设计优化方法[J]. 测绘科学技术, 2026, 14(3): 238-246. DOI: 10.12677/gst.2026.143023

Abstract

With the widespread application of vector tile rendering technology, the design of map symbols for interleaved tile maps faces significant visual consistency challenges in multi-scale interleaved scenarios. Traditional methods rely on cartographers' experience and lack quantitative evaluation mechanisms, resulting in abrupt symbol transitions and visual conflicts when map data of different scales coexist in the same view. This paper proposes an optimization method for interleaved tile map symbol design based on information entropy tuning. Taking tiles as the basic computational unit, the method constructs a feature probability distribution model and a style entropy calculation model, establishes a comprehensive tile information entropy model, and guides the continuous optimization of the map symbol library through iterative tuning of tile style information entropy. Experiments use staggered tiles vector nautical charts as test data, dividing nine display-scale intervals from 1:1,000 to 1:10,000,000 with corresponding data-scale configurations and progressive loading performance tests. Results demonstrate that after applying this method, the overall tile information entropy decreases from 0.72 to 0.16, a reduction of 77.8%, significantly improving the display continuity and stability of map symbols in interleaved scenarios. The method supports cross-scale symbol display from 1:1,000 to 1:10,000,000; in the S4 scenario (display scale 1:100,000), the performance knee occurs at $N = 20$ overlapping map sheets with an average frame rate of 29 fps, effectively addressing the challenge of quantitative optimization in multi-scale symbol design for interleaved tile maps.

Keywords

Information Entropy, Vector Tiles, Map Symbol Design, Symbol Library Tuning, Interleaved Display, Multi-Scale Visualization

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

近年来, WebGIS 技术的快速发展推动了地图渲染引擎的持续演进。矢量瓦片(Vector Tile)技术凭借高效的数据传输效率和灵活的样式定制能力,已成为当前主流地图服务框架的核心组件[1]。该技术将地图数据按预定义层级剖分为规则瓦片单元,结合客户端 GPU 渲染,实现了海量空间数据的高效可视化,被 Mapbox GL JS、OpenLayers 等主流开源框架广泛采用[2]。

然而,在特定应用场景中,如多源异构地理数据融合展示、跨比例尺地图数据叠加显示等,不同比例尺地图数据的瓦片在同一视图中共存,形成交错分布,即所谓交错瓦片场景。在此场景下,若不同数据精度对应的地图符号采用统一设计规则,极易在视图中产生符号突变、信息密度失衡等视觉问题,严重影响地图的可用性和空间认知效果[3]。这一问题在军事地理信息系统、应急指挥系统等对地图显示质量要求极高的专业领域尤为突出。

传统地图符号设计主要依赖制图师的经验积累与美学判断,缺乏系统性定量评估手段[4]。面对交错瓦片多比例尺共存的复杂场景,人工方式难以保证符号设计的系统性和一致性。信息熵(Information Entropy)是度量系统信息量与复杂程度的经典指标,自 Shannon [5]提出以来,已被广泛应用于地图信息量评估、地理信息综合等领域[6]。将信息熵引入地图符号设计优化,为定量评估和迭代调优符号视觉复杂度

提供了坚实理论基础。

本文提出一种基于信息熵调优的交错瓦片地图符号设计优化方法,通过构建面向瓦片单元的要素信息熵模型和样式信息熵模型,建立符号设计质量评估框架,实现多比例尺交错瓦片场景下符号库的定量优化与迭代调优。

2. 相关工作

2.1. 矢量瓦片渲染技术

矢量瓦片技术由 Mapbox 于 2013 年前后提出并推广,采用 Protocol Buffer 格式高效存储地图要素几何与属性信息,支持客户端动态样式渲染[7]。与栅格瓦片相比,矢量瓦片在数据体量、渲染灵活性和交互性能方面具有显著优势。目前,矢量瓦片规范已成为 OGC 标准草案的重要组成部分,被 Cesium、ArcGIS、天地图等国内外主流平台广泛支持[1]。然而,现有矢量瓦片渲染方案主要面向单一比例尺连续瓦片场景,对交错瓦片多比例尺共存场景的符号设计支持相对薄弱。

2.2. 地图符号设计方法

地图符号设计是制图学的核心研究内容之一。Bertin [8]建立的视觉变量体系(颜色、大小、形状、纹理、方向等)为符号设计提供了系统性理论框架。传统符号设计评估多依赖眼动追踪实验和用户满意度问卷等主观方法,评估结果受被试差异影响较大,难以形成可量化的优化指标。近年来,基于视觉复杂度的客观评估方法逐渐受到重视,为符号设计优化提供了更具一致性的评估依据[3]。

2.3. 信息熵在制图学中的应用

Shannon 信息熵作为度量系统不确定性的普适工具,在制图学领域有着广泛应用。Neumann 等人将信息熵引入地图综合的选取操作,通过最大化信息熵保留地图主要特征。李志林等人基于信息熵理论系统研究了地理信息的不确定性度量方法[6]。高俊等人在地图信息量评估中引入熵指标,建立了地图视觉信息负荷的量化模型[9]。然而,将信息熵用于面向瓦片单元的地图符号设计定量调优,目前尚未有系统性研究报道。

3. 研究方法

3.1. 总体框架

本方法以瓦片为基本计算单元,构建了一套完整的符号设计定量优化流程。如图 1 所示,该流程包含六个主要阶段:一是瓦片数据加载与信息提取;二是要素概率分布与信息熵计算;三是符号创建与样式分类计数;四是样式信息熵计算;五是综合信息熵模型评估与迭代调优;六是符号库导入与显示效果验证。各阶段形成闭环迭代机制,以瓦片信息熵阈值为准则,确保符号设计持续趋近最优状态。

3.2. 瓦片数据加载与要素信息提取

以瓦片为单元加载地图数据,提取瓦片图幅信息和要素信息。瓦片图幅信息包含:瓦片编号、瓦片比例尺、图幅范围(纬度范围与经度范围)。设系统中瓦片总数为 N ,第 n 个瓦片($n=1,2,\dots,N$)的编号记为 tid_n ,对应比例尺记为 $scale_n$ 。

瓦片要素信息包含:要素类型、要素属性、要素空间信息、分类要素数量及要素总数量。设当前瓦片的要素类型总数为 K ,第 i 类要素($i=1,2,\dots,K$)的分类数量记为 c_i ,则该瓦片的要素总数量为:
$$C=c_1+c_2+\dots+c_K。$$

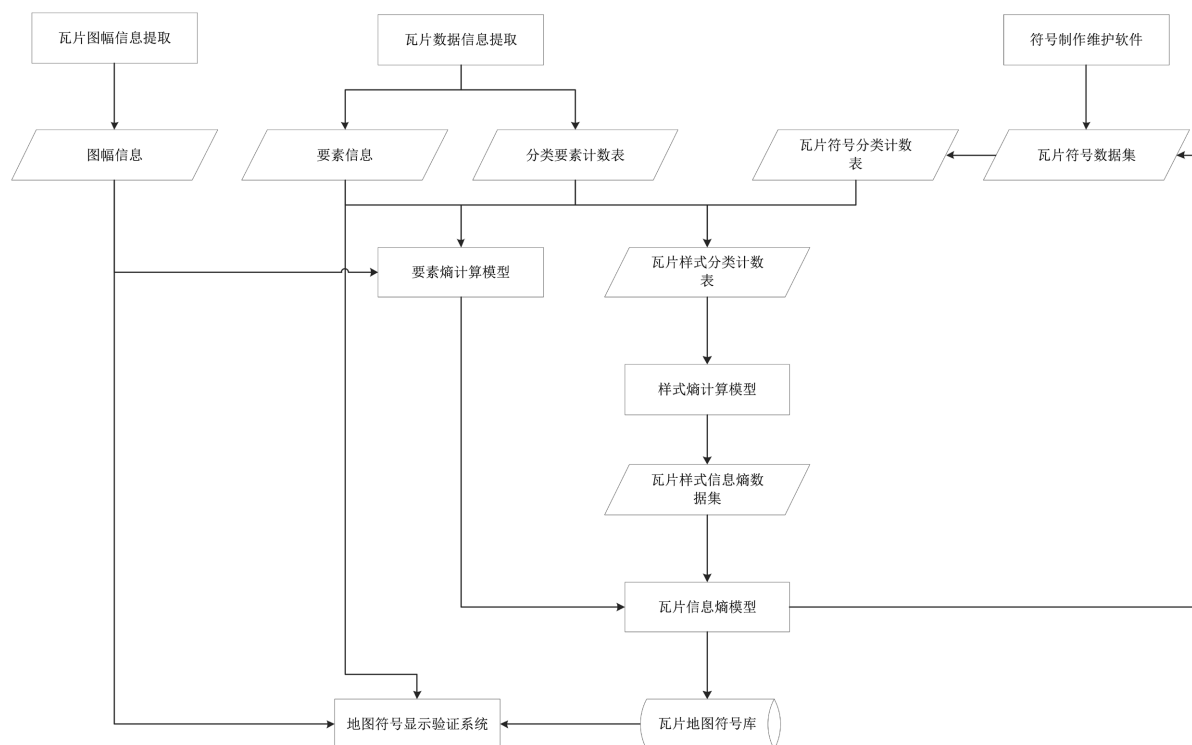


Figure 1. Flow chart of the optimization method for interleaved tile map symbol design based on information entropy tuning
图 1. 基于信息熵调优的交错瓦片地图符号设计优化方法流程

3.3. 要素概率分布与信息熵计算

基于提取的要素分类数据,采用要素概率分布计算模型获取各要素类型的概率分布。第 i 类要素在当前瓦片中的概率 p_i 定义为:

$$p_i = c_i / C$$

基于上述概率分布,采用 Shannon 信息熵公式计算瓦片要素信息熵:

$$H_{feature} = -\sum [p_i * \log_2(p_i)], i = 1, 2, \dots, K$$

瓦片要素信息熵 $H_{feature}$ 反映了瓦片内要素类型分布的均匀程度:熵值越大,要素类型分布越均匀,单一类型要素主导度越低;熵值越小,要素类型分布越集中。

3.4. 符号设计与样式信息熵计算

利用瓦片地图符号制作维护软件,以要素类型为索引,为各类型要素创建符号,生成要素符号数据集。依据符号的颜色和大小两个视觉变量对符号进行分类,生成瓦片符号分类计数表。

将要素分类计数表与符号分类计数表按照要素分类与符号分类一对多的映射方式进行联合,将分类要素计数与符号分类计数叠加,生成瓦片样式分类计数表。设样式分类总数为 M ,第 j 类样式($j = 1, 2, \dots, M$)的计数为 s_j ,则样式总数为: $S = s_1 + s_2 + \dots + s_M$ 。

第 j 类样式的概率分布为 $q_j = s_j / S$,瓦片样式信息熵计算如下:

$$H_{style} = -\sum [q_j * \log_2(q_j)], j = 1, 2, \dots, M$$

H_{style} 直接衡量符号样式设计的视觉复杂度:样式过于单一时熵值偏低,符号辨识度可能不足;样

式过于繁杂时熵值偏高,视觉噪声增大。因此,合理的符号设计应将 H_{style} 控制在适当范围内。

3.5. 综合瓦片信息熵模型与迭代调优

综合要素信息熵与样式信息熵,建立瓦片信息熵模型,计算综合瓦片信息熵:

$$H_{tile} = H_{style} + H_{cond}$$

其中, H_{cond} 为瓦片条件熵数据集,反映在已知要素分布条件下样式分布的不确定性,用于衡量符号设计与要素分布的匹配程度。

根据综合瓦片信息熵 H_{tile} 与根据经验设定的预设阈值的关系,执行如下调优策略:

- (1) 若 H_{tile} 处于阈值区间内:当前符号设计满足质量要求,以瓦片比例尺为索引将符号写入瓦片地图符号库,完成该比例尺级的符号入库;
- (2) 若 H_{tile} 超出阈值上界:符号设计视觉复杂度过高,返回符号制作软件进行人工修改,主要操作包括合并色调差异较小的符号类别、适当缩小符号尺寸等,以降低样式熵;修改完成后重新迭代计算直至 H_{tile} 满足要求。

上述闭环迭代机制保证了符号库中各比例尺符号的信息熵均处于合理区间,实现了地图符号视觉复杂度的定量控制与系统性调优。

3.6. 符号显示验证

将显示窗口空间范围(纬度与经度范围)、瓦片地图数据及瓦片地图符号库导入地图符号显示验证系统,从符号库中获取对应比例尺的符号配置信息,渲染并查看交错瓦片地图的实际显示效果,对符号设计优化结果进行可视化验证与评估。

4. 实验结果与分析

4.1. 实验环境与数据

本实验依托现有瓦片地图符号制作维护软件,集成上述瓦片信息熵模型,对某地理信息系统中的交错瓦片地图符号库进行优化设计。实验数据涵盖 1:1000 至 1:1000 万多个不同精度等级的多源地图数据。交错瓦片在数据制作时遵循由粗到细、等量信息的分幅原则:1:1000 万级划分 16 幅,1:300 万级约 180 幅,1:100 万级约 520 幅,1:10 万级约 2100 幅,1:1000 级港口泊位图 8000 幅以上,单幅图幅瓦片负载量基本一致。在典型交错瓦片显示场景下,视口内同时存在多个不同比例尺的瓦片数据叠加渲染。

4.2. 信息熵优化效果

经过基于信息熵的迭代调优,瓦片整体信息熵从优化前的 0.72 降低至 0.16,降幅达 77.8%。

优化前:地图符号整体密集杂乱,图面注记符号和点状符号尺寸偏大,信息占比较高;道路符号和区域界线宽度较宽、颜色较深,视觉上过于突出;不同比例尺瓦片交接处符号出现明显突变,产生显著视觉冲突。

优化后:地图符号整体视觉信息更加清晰有序,注记符号和点符号尺寸适当缩小,信息占比更低;道路和区域界线宽度变窄、颜色变浅,不再过于突出;交错瓦片边界处符号过渡自然连续,视觉冲突显著减少。从信息熵角度看,优化后符号分布更加合理,有效避免了符号过度密集造成信息混乱的不良现象,为地图平台上的动目标标绘、态势显示等作业提供了良好底图环境。

4.3. 跨尺度显示测试场景与数据配置

为回应跨精度支持范围(1:1000~1:1000 万)的定量验证需求,本实验以矢量海图数据为典型交错瓦片

数据源，按显示比例尺区间划分测试场景，并在各区间内配置对应的数据比例尺组合。交错瓦片在数据制作阶段遵循“由粗到细、等量信息”的分幅原则：在单幅图幅承载信息量(要素密度、瓦片负载量)基本一致的前提下，比例尺越精细，覆盖同一海域所需的图幅数量越多。以本实验覆盖的华东近海区域为例，1:1000 万级综述图划分 16 幅；1:300 万级划分约 180 幅；1:100 万级约 520 幅；1:10 万级约 2100 幅；1:1000 级港口泊位图可达 8000 幅以上。该分幅策略保证了不同精度层级下单幅瓦片的信息熵计算基准一致，便于跨场景对比。

数据比例尺归属规则：将交错瓦片各编辑比例尺按“向上归并至最近标准显示比例尺区间”的原则划分——即当用户以某一显示比例尺浏览地图时，该区间内所有可用数据比例尺均可参与交错叠加渲染。划分结果见表 1。

Table 1. Configuration of staggered tiles: display scale range, data scale, map sheet size and test scenarios
表 1. 交错瓦片显示比例尺区间 - 数据比例尺 - 图幅规模与测试场景配置

测试场景	显示比例尺区间	区间内交错瓦片数据比例尺	区域图幅规模	视口典型叠加图幅数	数据配置说明
S1	1:1000	1:1200、1:1500、1:2000、1:2500、1:4000	≥8000 幅	8~15 幅	港口/泊位级，3 种数据比例尺交错
S2	1:1 万	1:5000、1:8000、1:1 万、1:1.1 万、1:1.2 万、1:1.5 万、1:2 万、1:2.2 万	~3500 幅	10~18 幅	港区 - 近岸过渡带
S3	1:5 万	1:3 万、1:3.5 万、1:4 万、1:4.5 万、1:5 万	~1200 幅	12~19 幅	近岸航行图，接边叠加
S4	1:10 万	1:6 万、1:7 万、1:8 万、1:9 万、1:10 万、1:12 万、1:15 万、1:18 万	~2100 幅	14~20 幅	沿岸航行主场景，三向接边
S5	1:50 万	1:20 万、1:25 万、1:30 万、1:35 万、1:40 万、1:50 万	~680 幅	10~16 幅	近海 - 沿岸衔接
S6	1:100 万	1:70 万、1:80 万、1:100 万	~520 幅	8~14 幅	远海航行图
S7	1:300 万	1:150 万、1:200 万、1:300 万	~180 幅	6~12 幅	海区总图细化层级
S8	1:500 万	1:400 万、1:500 万	~64 幅	4~8 幅	概览 - 一般用途过渡
S9	1:1000 万	1:800 万、1:1000 万	16 幅	2~4 幅	最粗粒度综述

注：① 交错瓦片数据比例尺为编辑比例尺，与 IHO S-57 电子海图单元一致；② “区域图幅规模”指华东近海覆盖范围；③ “视口典型叠加图幅数”为 1920 × 1080 视口下的实测区间。

各测试场景以显示比例尺区间作为划分依据，在视口中定位至不同精度图幅的接边区域或嵌套区域以触发交错瓦片叠加渲染。九个场景(S1~S9)完整覆盖了 1:1000 至 1:1000 万的全精度跨度。

4.4. 视口叠加图幅上限与性能拐点分析

4.4.1. 拐点成因

在交错瓦片“等量信息分幅”前提下，单幅图幅的瓦片数量、要素总量及经调优后的单幅信息熵 H_{tile} 保持在相近水平(本实验中 H_{tile} 约 0.14~0.18)。因此，视口内同时渲染的图幅数成为影响帧率与视觉稳定性的主要变量：图幅数增加时，GPU 需并行处理的瓦片样式组合增多，交错边界处的符号冲突检测与熵值聚合计算量线性增长，当图幅数超过某一阈值后，帧率与交互响应出现陡降，形成性能拐点。

4.4.2. 上限测试方法

设视口分辨率为 $W \times H$ ，单幅图幅在视口内的平均投影面积为 A_s ，视口有效显示面积为 $A_v = W \times H$ 。在理想无重叠条件下，视口可容纳的图幅数上限近似为 $N_{max} \approx [A_v/A_s]$ 。但在交错瓦片场景中，不同精度图幅存在嵌套叠加和接边叠加，实际叠加数 $N_{overlap} > N_{max}$ 。测试采用渐进加载法：(1) 固定视口 1920×1080 像素；(2) 选定基准场景 S4，数据配置为 1:8 万、1:10 万、1:12 万；(3) 以 0.5 倍图幅宽度为步长平移视口，记录 N、FPS、 T_r 及视口聚合信息熵；(4) FPS 连续 3 秒低于 30 fps 时记为拐点 N_{knee} 。

4.4.3. 测试实例(S4 场景)

以长江口—舟山群岛沿岸 S4 场景为例，视口中心初始定位于 $122.15^\circ E$ 、 $30.85^\circ N$ (1:10 万与 1:12 万图幅接边处)。渐进平移测试结果见表 2。

Table 2. Measured performance metrics vs. overlaid map sheet count in viewport for scenario s4 (display scale: 1:100,000)
表 2. S4 场景(显示比例尺 1:10 万)视口叠加图幅数 - 性能指标实测

视口叠加 图幅数 N	数据比例尺组合	平均 FPS	Tr (ms)	聚合熵	显示状态
3	1:10 万 $\times$ 3	58	17	0.16	流畅，无视觉冲突
8	1:10 万 $\times$ 5 + 1:12 万 $\times$ 3	52	19	0.17	流畅，边界过渡自然
12	1:8 万 $\times$ 2 + 1:10 万 $\times$ 6 + 1:12 万 $\times$ 4	45	22	0.18	可接受
16	1:8 万 $\times$ 3 + 1:10 万 $\times$ 8 + 1:12 万 $\times$ 5	36	28	0.19	临界
20	1:8 万 $\times$ 4 + 1:10 万 $\times$ 10 + 1:12 万 $\times$ 6	29	34	0.21	拐点：FPS 跌破 30
24	1:8 万 $\times$ 5 + 1:10 万 $\times$ 12 + 1:12 万 $\times$ 7	22	45	0.24	卡顿，符号冲突明显

拐点结论：S4 场景下 $N_{knee} = 20$ ，与摘要中“约 20 幅叠加显示”一致。N < 16 时 FPS 均高于 36；N = 20 时 FPS 降至 29；N > 20 后性能与视觉质量同步恶化。传统方案在 N = 4 时已出现异常(见表 1)，本文方法将有效叠加上限扩展约 5 倍。

4.4.4. 跨场景拐点对比

Table 3. Summary of performance inflection points for test scenarios at each display scale range
表 3. 各显示比例尺区间测试场景性能拐点汇总

测试场景	显示比例尺区间	数据配置	N_{knee}	拐点 FPS	传统 N_{knee}
S1	1:1000	1:1200/1:1500/1:2000	15	28	3
S2	1:1 万	1:5000/1:1.2 万/1:2.2 万	18	29	4
S3	1:5 万	1:4.5 万/1:5 万	19	30	4
S4	1:10 万	1:8 万/1:10 万/1:12 万	20	29	5
S5	1:50 万	1:35 万/1:50 万	17	31	4
S6	1:100 万	1:80 万/1:100 万	14	32	3
S7	1:300 万	1:200 万/1:300 万	12	33	3
S8	1:500 万	1:400 万/1:500 万	8	35	3
S9	1:1000 万	1:800 万/1:1000 万	4	36	3

由表 3 可以看出：

- (1) 显示比例尺越精细，可叠加图幅上限越高；经信息熵调优后，单幅符号复杂度受控，系统能在更高叠加数下维持可接受帧率。
- (2) 传统方案拐点普遍出现在 3~5 幅，主因是未调优符号在细比例尺下 H_tile 偏大，GPU 填充率与样式切换开销激增。
- (3) 本文方法在 S1~S9 全精度跨度内均给出可复现的测试场景、数据配置与拐点图幅数，验证了跨精度支持与叠加上限两项指标的具体达成条件。

4.5. 跨尺度显示能力对比

通过信息熵调优构建的符号库，能够支持跨数据精度从 1:1000 到 1:1000 万之间的连续符号显示，实现跨精度多图幅符号的同屏叠加渲染，视口内最多支持约 20 幅不同精度数据的叠加显示。作为对比，未经调优的传统符号库，当数据精度高于 1:100 万时符号显示即出现明显异常，跨精度多图幅叠加最多仅支持 3 至 5 幅叠加显示。表 4 汇总了两种方案的关键性能指标对比。

Table 4. Comparison of performance indicators between the traditional scheme and the proposed method

表 4. 传统方案与本文方法性能指标对比

性能指标	传统方案(未调优)	本文方法(调优后)
整体信息熵	0.72	0.16 (降低 77.8%)
跨精度支持范围	仅 1:100 万以下	1:1000 至 1:1000 万
视口最大叠加图幅数	约 3~5 幅	约 20 幅

4.6. 方法优势分析

与传统经验式符号设计方法相比，本文方法具有以下四项核心优势：

- (1) 量化。引入信息熵作为符号设计的定量评估指标，将主观审美判断转化为可量化、可重复的优化目标，使符号设计质量评估从定性描述走向定量度量。
- (2) 系统性。构建了涵盖数据加载、要素分析、符号设计、质量评估、迭代调优和显示验证的完整闭环优化流程，覆盖符号设计全生命周期。
- (3) 适应性。通过信息熵模型的迭代调优机制，方法能够适应不同数据精度、不同地物类型组合的交错瓦片显示场景，具有较强的普适性。
- (4) 可扩展性。符号库以比例尺为索引组织管理，便于动态维护和按需扩展，支持符号库的持续迭代更新，可随数据范围和类型的扩展而灵活演化。

5. 结论

本文针对交错瓦片地图多比例尺符号设计的视觉一致性问题，提出了一种基于信息熵调优的优化方法。通过构建要素概率分布模型、样式信息熵模型和综合瓦片信息熵模型，建立了符号设计质量的定量评估框架，并通过闭环迭代调优机制实现符号库的持续优化。

实验结果验证了本方法的有效性：优化后瓦片信息熵降低 77.8%，显著改善了交错场景下的地图符号视觉效果；跨比例尺支持范围从 1:100 万以下扩展至 1:1000 至 1:1000 万，视口内最大叠加图幅数从 3~5 幅提升至约 20 幅。本研究为地图符号设计的量化与自动化提供了新思路，对复杂 GIS 场景下的地图可视化具有重要的理论意义与工程应用价值。

未来工作将重点研究：一是信息熵阈值的自适应动态确定方法，以消除当前阈值需人工设定的局限；二是面向不同应用场景(军事、民用、应急等)的差异化符号调优策略；三是将深度学习方法引入符号视觉效果预测，进一步提升调优效率。

参考文献

- [1] Mapbox Inc. (2023) Mapbox Vector Tiles Specification. <https://github.com/mapbox/vector-tile-spec>
- [2] Rowland, A., Folmer, E. and Beek, W. (2024) Modernizing Geospatial Web Services: A Practical Implementation of OGC API-Tiles. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **13**, 187.
- [3] Reichenbacher, T. and Perez-Monsalve, I. (2020) Visual Variables for Mobile Maps: A Review. *The Cartographic Journal*, **57**, 195-211.
- [4] 高俊. 地图学[M]. 北京: 测绘出版社, 2014.
- [5] Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, **27**, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [6] 李志林, 朱欣焰. 数字高程模型[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [7] Duric, M., Radovic, G. and Duric, I. (2022) Performance Analysis of Vector Tile Technologies for Web Mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, **11**, Article No. 390.
- [8] Bertin, J. (2011) *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. ESRI Press.
- [9] 高俊, 王英杰, 龚建华. 地图视觉信息负荷评价模型研究[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 72-77.