doi: 10.11720/wtyht.2026.0079
丁仕豪, 赵阳, 黄勇, 等. 基于几何学特征的 1∶50 000 水系沉积物自动化布点方法[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 762-775. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0079
Ding S H, Zhao Y, Huang Y, et al. A geometry-based method for automated sampling point arrangement in 1∶50,000 stream sediment surveys[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 762-775. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.0079

基于几何学特征的 1∶50 000 水系沉积物自动化布点方法

丁仕豪, 赵阳, 黄勇, 乔锴, 路生全, 杨忠虎
(中国地质调查局 军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036)

摘 要: 目前, 在地球化学水系沉积物勘查工作中, 采样点布设常常依赖人工进行, 但人工布设存在工作量大、主观随意性强、流域控制不充分等问题, 且布设后缺乏有效的质量检查, 致使布设完成后的合理性难以得到保障, 影响野外工作的实施和整个化探解释结果的可靠性。为了解决以上问题, 本研究通过 ArcGIS, 基于水系的几何构型特点(水系级别及长度) 进行计算机自动化科学布点, 并构建设计点合理性检验模型评估自动布点的分布合理性和可采合理性。将该方法运用于 1∶50 000 三河坝幅的马家沟区域水系沉积物样点布设工作中, 自动化布点的结果最近邻比率指数为 1.1, 分布均匀, 无不合理空白区, 其中 1 级水系上布点占比 84.7%, 布点密度 4.6 点/km^2, 布设符合规范要求且具备野外作业的条件。该方法有效提高了室内布设的工作效率和点位的合理性, 具有很高的实际应用价值。

关键词: 水系沉积物; 采样点位; GIS 自动化; 合理性评估模型; 水系分级
中图分类号: P632;P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)04-0762-14

0 引言

地球化学勘查是矿产普查勘探中一项重要的技术方法, 其常用的通过水系沉积物测量确定化探异常的方法为后续进一步找矿工作提供了很好的指示意义。目前在我国众多矿产普查勘探工作中, 尤其是在金矿资源调查中, 水系沉积物测量常作为首选手段被广泛应用, 在实践中取得了很好的找矿效果[1-4]。水系沉积物采样点布设的位置和密度对水域的控制能力有直接作用, 是整个化探工作有效性的保障, 直接影响后续异常区划分的可靠性, 进而影响后续的找矿查证方向[5-9]。

近年来, 不少学者针对设计布样的合理性做过改进, 如曾亮等[10] 利用“协同优化—现场微调法”来增加样点的合理性; 郝帅[11] 利用平面卫星影像等辅助手段进行点位筛选, 并通过多点采样增加样点的有效性; 但这些方案主要针对的是野外实际工作时对采样的改进措施, 对室内点位设计涉及较少。室内采样点设计是保证野外实际采样的基本框架, 没有合理的室内设计, 将会增加野外工作的试错成本, 难以保证化探结果的合理性, 从而影响工作效率。

目前室内布设依赖技术人员借助等高线信息、地图上的河流信息等水文资料人工进行勾绘, 之后根据描绘的水系逐条布设。这样的工作方式存在水系识别依靠平面信息不够直观、识别不够全面、水系样点布设数量多工作强度大、主观随意性强不符合规范要求等问题。即使是经验丰富的技术人员在布设完成后, 由于样点数量大, 部分区域水系的控制不够全面、存在空白区等问题仍难以被发现。前人

收稿日期: 2026-03-25; **修回日期:** 2026-05-07
基金项目: 深地国家科技重大专项“西秦岭(甘肃段)金锑成矿规律与勘查示范”(2025ZD1009607); 中国地质调查局项目“甘肃文县—陕西略阳一带金矿勘查区块优选及调查评价”(DD20240207011); 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金(KC20250007)
第一作者: 丁仕豪(1998-), 男, 2023 年毕业于中国地质大学(北京), 获硕士学位, 助理工程师, 主要从事矿产资源勘探方法研究工作。Email: dsh0067@163.com
通讯作者: 杨忠虎(1990-), 男, 2024 年毕业于成都理工大学, 获博士学位, 工程师, 主要从事矿产资源勘探开发等工作。Email: 407685264@qq.com

对于水系沉积物样点布设这种手工作业的方式也提出了一些方法和改进措施: 早些年的学者多致力于样点自动化命名, 如王海鹏等[12] 和陈可忠[13] 通过布样点位的坐标位置大小关系, 利用 MapGIS 的属性挂接功能给采样点命名并赋予属性; 冯伟华等[14] 基于 VBA 功能计算、设计点位的坐标关系来进行命名赋予属性。后有学者开始针对布点自动化开展研究, 如廖国忠等[15] 基于数字高程模型(DEM)流量信息, 依据不同水系级别的流量值不同作为计算机筛选条件来进行自动布点; 韩治虹等[16] 基于等高线读取水系长度进行自动布点。然而现有方法在实际运用时存在一定程度限制: 一个图幅内不同区域的水系流量有差异, 依据流量布点会使得部分区域的布点数量少, 造成区域的控制能力减弱, 影响整个图幅布点的合理性; 而基于等高线布点时依赖固定长度增加布设容易造成部分位置布点过密或存在不合理空白区。同时现有研究对室内设计的合理性缺乏探讨, 采样点位的布设除了需满足规范上的布点密度需求外, 还需同时满足“可达性”与“作业可行性”双重约束, 即要求点位有路径可达, 还需确保点位自身坡度适宜以支持现场作业, 因此如何预判点位的实际通达能力与作业条件, 仍是室内规划阶段亟待解决的关键难题。

针对以上问题, 笔者提出了一种在 ArcGIS 平台上基于几何学特征的水系沉积物采样点自动布设方法, 以及检验室内设计点合理性的模型, 有效提高了工作效率和样点布设合理性, 具有很高的实际应用价值。

1　水系提取及分级

水系沉积物测量需要对图幅内的汇水区形成有效控制, 因此水系的正确识别、提取是整个工作的基石, 影响着后续样点的分布和化探结果解释的有效性。在水文学科以及地理信息系统等研究领域, 水系常通过 DEM 模型进行自动提取, 目前已经在实际生产中得到了广泛应用[17-21]。但由于水文领域主要观察稳定且大流量的水系, 对一些季节性冲沟或小流量区域的关注并不多, 且 DEM 本身的局限性致使平坦区域的水系和小流量水系识别精度较差[22-24], 因此需要结合卫星影像及 GIS 软件辅助功能识别, 才能更加全面地勾绘研究区的水系。

本文水系识别和自动布点平台选用 ArcGIS Pro3.0.2 软件, 其丰富的地理信息系统库以及可以使用 Python 语言进行二次开发的能力可以非常有效地实现区域内水系的提取及分级工作, 为后续自动布点工作做准备。

1.1　图幅水系提取

水系提取是水文领域中较为常见的工作, 目前应用最多的方式是通过 DEM 来获取, 其主要逻辑是通过对区域进行填洼, 模拟水流如何流动, 并记录这些水流在哪些位置累计水量大, 汇流累计量越大的位置越可能形成稳定河道, 然后再通过设置汇流累计量阈值将其中大于该值的部分判定为河道。整个水系提取流程如图 1 所示, 具体步骤为:

1)使用 ArcGIS 的填洼功能, 基于图幅的 DEM 数据对区域进行填洼处理, 获得新的填洼栅格, 并根据填洼栅格数据获得流向。本文流向计算方法选用的是 D8 算法[25], 其核心是限制中心栅格的水流方向为其周边相邻 8 个栅格方向, 计算中心点到 8 个邻域栅格的坡度, 并选取最大值作为其水流方向, 该方法可以有效表达总体水流趋势。

2)获得流向栅格之后, 使用 ArcGIS 的流量工具计算每个栅格的流量, 其原理是假设每个栅格的初始单位水量为 1, 根据流向栅格的数据确定水流方向, 每经过一个新的栅格就将上一个栅格的水量累计起来, 这样就可以得到一个汇水流量的栅格。通过栅格计算器可以设置一个阈值, 选取区域中大于

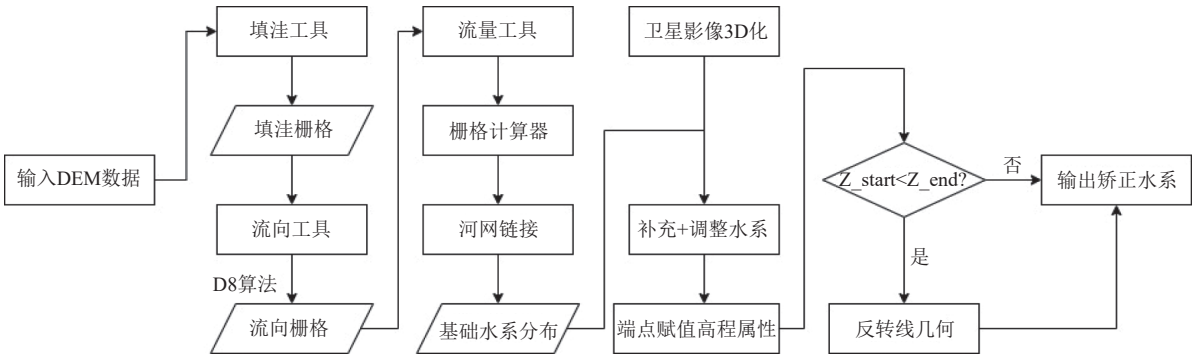
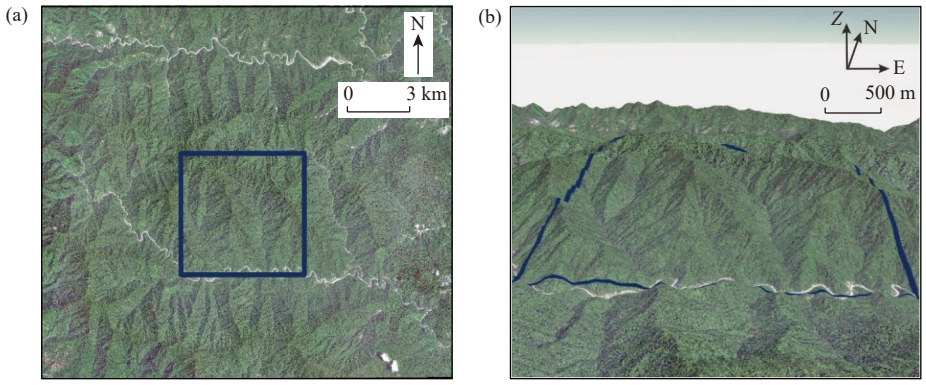


图 1　水系提取流程

Fig. 1　Flowchart for river system extraction workflow

该设置阈值的栅格作为有效栅格，即“水道”，而其他栅格则作为“坡面”。阈值越大则提取的即为主干水流，河网相对更稀疏，可以通过多次尝试得到相对接近实际情况的水系分布特征。

3）前人研究表明，DEM 数据提取的水系是基于高程数据、不考虑额外因素影响下的理想化模型，表达的是区域水系的主要分布趋势，而现实中环境因素的复杂性，如岩石或植被，会影响水系的真实走向，现有的技术难以完全还原真实的水系分布[26-27]，因此需要结合卫星影像图，以机器识别的水系作为参考，根据实际对其进行初步的矫正和补充，后续根据检测结果再做更进一步修改。得益于 ArcGIS 强大的地理信息功能，卫星影像和 DEM 数据结合可以实现三维可视化，直观地显示出地形的特征（图 2），有利于修正出更加接近实际的水系网络分布。在完成调整之后，为避免出现因人工加入的水系出现流向不符合实际水系拓扑关系的情况，还需利用 DEM 高程数据对所有水系的起始节点和终止节点赋予高程属性，分别记录为 Z_start 和 Z_end，并利用 Python 脚本批量比较每条线 Z_start 和 Z_end 的值，如果 Z_start<Z_end，则反转线的几何，保证线的方向与水流方向一致，始终是从高处到低处。



a—三河坝幅平面卫星影像；b—基于 DEM 的三维显示；图中蓝色方框为马家沟区域

a—planar satellite image map of the Sanheba sheet; b—3D terrain view with draped imagery; the blue box indicates the Majiagou area

图 2 基于 DEM 的平面影像三维可视化示意

Fig. 2 Three-dimensional visualization of planar imagery with DEM-based draping

1.2 水系级别划分

ArcGIS 软件提供了两种水系分级法，分别为 Strahler 河流分级法和 Shreve 河流分级法：Strahler 河流分级法是指将直接发源于河源的河流定义为 1 级河流；同级别的两条河流交汇形成的河流级别比原来增加 1 级；不同级别的河流等级等于原来河流中等级较高者。Shreve 河流分级法则是将直接发源于河源的河流定义为 1 级河流；两条 1 级河流交汇形成 2 级河流；一条 2 级河流和一条 3 级河流交汇形成为 5 级河流。

目前，在化探领域主要依据 Strahler 河流分级法进行分级，但由于学科之间的研究目的不同[28-30]，水文的分级方法在自动布点时会产生一个问题：如图 3a 所示，Strahler 分级法因为存在继承级别的问题，当在 2 级水系上布点时，计算机则需要对水系③、④、⑤都进行布点，实际情况是存在有大量的水系④这种情况，如果统一都视为 2 级，会大大增加 2 级水系设计点的数量；而 Shreve 分级法会因为支流数量增大，级别升高，如图 3b 中水系⑤被视为 3 级水系，实际操作中，这种类型的水系作为靠近源头的水系，技术人员为控制流域会对这类水系进行布点（与水系②布点意义等同），该种分级法造成了 2 级水系布点数的减少。

为了解决这两种分级法在自动化布点时存在的问题，笔者提出了一种基于 Strahler 河流分级法的改良方案，用以针对水系沉积物自动布样：将按照 Strahler 河流分级法对河流进行分级的水系级别称为主级别；当河流级别为 2 级及以上时，增加一个副级别，用于计算机对相同主级别的水系进行区分，副级别越低代表其越靠近源头水系；当相同主级别水系汇聚时，汇聚水系的主级别增加 1 级，副级别为 1 级，而不同级别的水系汇聚时，主级别等于原来河流中等级较高者，副级别为继承的河流的副级别上增加 1 级。如图 3c 所示，水系③为两条 1 级水系汇聚而成，因此级别为 2-1，水系④由一条 1 级水系和一条 2 级水系组成，因此主级别为 2 级，副级别增加 1 级，级别为 2-2。该方法对同级别的水系按照汇聚关系做出了区分，有效限制了计算机在自动布点时的水系选择。

实行上述分级方式，需要通过地理处理工具

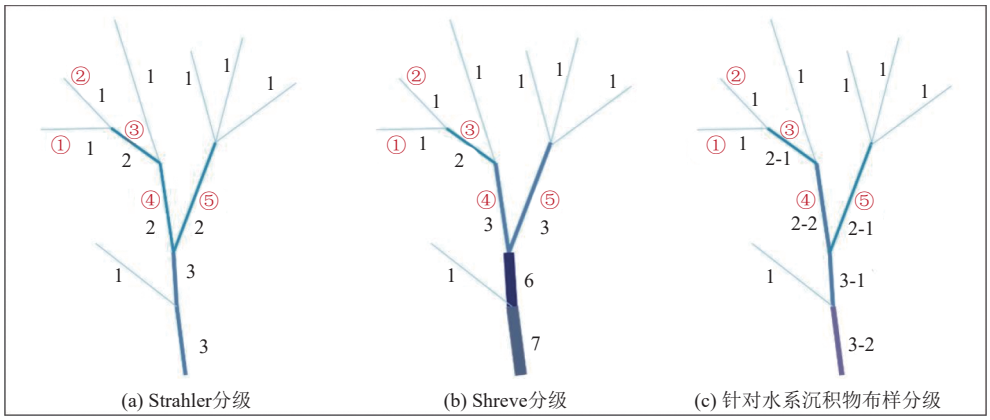


图 3　水系级别划分对比

Fig. 3　Comparison of river system hierarchy classifications

(Geoprocessing Tools)中的 Split Line at Point 工具将所有水系根据交点断开, 用字典库记录每条线的两端节点(首尾节点)的所有坐标, 查询水系的首节点坐标在字典库中出现的次数, 给水系文件添加一个属性 CODE1 记录主级别, 并加入属性 CODE2 记录副级别。由于水系级别是从一级开始逐级传递, 因此需要对整个水系进行拓扑排序, 保证优先处理源头水系。此处采用水文领域中常用的 Kahn 算法进行排序, 它通过不断移除入度为 0 的节点来保证水系在分级时总是从上游往下游进行处理。按照上述针对水系沉积物布样的分级法规则, 依据从上游到下游的拓扑顺序对所有水系进行分级。在实际操作过程中, 通常只会对有限级别的水系布点, 因此可以设定水系的最高级别值, 超过该值不再继续迭代, 统一使用设定的最高级别(图 4)。

2　水系样点自动布设

根据《地球化学普查规范 1∶50 000》[31] 的要求, 采样点要基本满足 4 个条件: 水系沉积物样点主要布设在 1 级水系中, 当 1 级水系长度大于 500 m 则需要增加样点布设; 水系沉积物样点控制面积在 0.125~0.25 km^2, 布点密度为 4~8 点/km^2, 通常一个小格不超过 3 个点, 可根据景观区特征适当调整密度; 采样

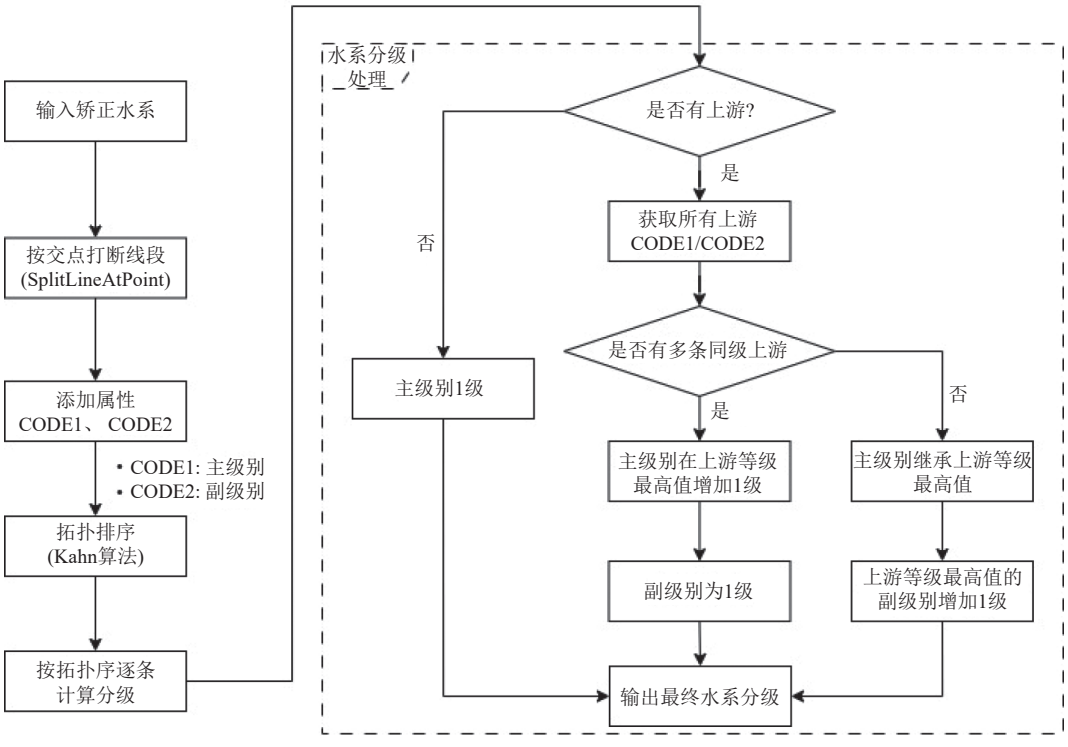


图 4　水系分级工作流程

Fig. 4　Flowchart for river system hierarchy classification

单元格要均匀布设样点,一般不出现连续的3个空白小格;采样点布设要尽量避开工厂、居民点和可能产生污染的地区,尽量布置在可通行之处。因此,样点布设不仅要选择水系级别,还需根据长度布点,同时也需要一套检测措施,保证样点布设的合理性。

2.1 样点自动化布设

由于前述的水系提取的过程中,水系基于几何拓扑关系已经进行了级别划分,根据规范要求优先在1级水系上布设样点,并在水系长度大于500 m的情况下增加样点布设,因此自动化布点选择水系长度和水系级别作为决策参数。经验上,技术人员通常会选择在靠近水系的出口处布置样点。为了满足均匀布点、靠近出口以及优先1级水系原则,要求对计算机自动布点时进行如下限制:根据水系级别分别布点;水系大于500 m时,根据每条水系长度与500 m的比例系数确定样点数量,如果需要加密布点,则可以根据实际需求修改比例系数;根据样点数量将水系进行分段布点,取每一段的靠近水系出口处作为布点位置。

为了均匀布点,首先确定一条水系的布点数量。按照规范的要求将每条水系以500 m间隔进行分段,根据可分的段数来确定水系可布点的数量。ArcGIS为用户提供了获得对象的几何长度办法,在ArcPy库中geom.Length方法可以直接获取线的几何长度属性,因此一条水系的布点数量具有如下数学关系:

$$N=\left\lceil\frac{L}{Z}\right\rceil, \tag{1}$$

式中:⌈·⌉表示向上取整运算;L为水系的长度;Z为布点密度比例系数,在不考虑对区域进行加密时,其值为500 m。例如:当水系小于500 m时,N为1,表明只能分一段,布设一个点;当水系为700 m时,N为2,表示可以分两段,布设两个点。

按照布点数量将水系均分,以增加对流域控制的稳定性。对每一段都取该段的4/5处作为靠近水系出口位置进行布点。ArcGIS中“positionAlongLine”是ArcPy库中处理线几何对象(Polyline)的一个方法,用于根据距离或百分比在线上生成指定位置的点。利用这个方法对每条线的每一段进行批量处理,其形式为:Polyline.positionAlongLine(dist, use_percentage=False),该方法可以按给定长度*dist*返回对应的点位置,其参数可以通过计算获得:

$$seg_len=\frac{L}{N}, \tag{2}$$

$$dist=\left(k+\frac{4}{5}\right)\times seg_len, \tag{3}$$

式中:*seg_len*为按布点数均分水系时每一段的长度;k为处理水系的第k段。通过计算机处理对应级别水系可得到该级别上的设计点位,实行按需求依据长度和水系级别参数执行计算机自动布点。

2.2 设计点位自动编号

标准的1∶50 000图幅可划分为24列、19行的水系沉积物采样大格(基于标准图幅框),采样大格编号为从左至右、从上到下,每个采样大格为1 km^2,每个大格以纵横间距500 m划分成4个小网格,左上角网格为A,右上角网格为B,左下角网格为C,右下角网格为D。最终水系沉积物根据其所在位置进行编号,其组成为:采样大格编号+小格编号+小格中的第k个点,k通常按从左到右、从上到下的顺序来决定同一个小格每个样品的顺序。按照编号组成形式,自动编号由以下步骤获得:

1)每个采样大格的中心之间的间隔为1 km,标准图幅的最大列数为24列,因此所有的设计点位可以根据坐标与大格编号1(起始大格)的左上角顶点坐标位置以及大格间距间的数学关系进行推算,获得设计点所处的大格编号。通过ArcGIS的属性赋予功能将计算值加入属性中,其计算公式如下:

$$T=\lceil(x-X)/1\,000\rceil, \tag{4}$$

$$L=\lceil(Y-y)/1\,000\rceil, \tag{5}$$

$$NUMBER_VAL=T+(L-1)\times MAX_ROW, \tag{6}$$

式中:T为样点所在大格的列数;L为样点所在大格的行数;X和Y为采样大格编号1(起始大格)的左上角坐标;x和y为设计点的坐标;*MAX_ROW*为最大列数;*NUBMER_VAL*为设计点所处的大格编号。

2)小格编号也可以通过设计点位的坐标位置与起始大格的坐标位置的数学关系来推算。根据小格编号的规则,注意到小格编号存在明显的奇偶组合特征,存在如下数学关系:

$$j=\lceil(x-X)/500\rceil, \tag{7}$$

$$i=\lceil(Y-y)/500\rceil, \tag{8}$$

$$f(j,i)=\begin{cases}\text{A},\ if\ j\equiv 1(\bmod 2)\text{and}\ i\equiv 1(\bmod 2),\\ \text{B},\ if\ j\equiv 0(\bmod 2)\text{and}\ i\equiv 1(\bmod 2),\\ \text{C},\ if\ j\equiv 1(\bmod 2)\text{and}\ i\equiv 0(\bmod 2),\\ \text{D},\ if\ j\equiv 0(\bmod 2)\text{and}\ i\equiv 0(\bmod 2)。\end{cases} \tag{9}$$

式中:j为样点所在小格的列数;i为样点所在小格的行数;$a\equiv b(\bmod 2)$形式表示a与b模2同余,当b为1时,则表示a为奇数,b为0时,则表示a为偶数。

当样点所在的行和列为奇数列、奇数行时,样点位置就在小格编号A上;当样点所在的行和列为偶数列、奇数行时,小格编号即为B;当样点所在的行

和列为奇数列、偶数行时, 小格编号即为 C; 当样点所在的行和列为偶数列、偶数行时, 小格编号即为 D。通过上述公式将计算结果作为新属性加入到文件属性表中。

3)上述步骤已经确定了每个设计样点的大格编号和小格编号, 再根据大格编号+小格编号确定前置名称并对点进行分类, 筛选同名称的点, 并用属性计算器对这些点优先从左到右(比较横坐标大小, 横坐标小在前)、从上到下(比较纵坐标大小, 纵坐标大在前)排序并进行依次累计, 第一个同名点为 1, 后续依次往上累计 1, 用一列属性值装入顺序号, 最后将前述的大格编号属性、小格编号属性和顺序号属性连接在一起, 构成设计样点的自动编号。

2.3　设计点位合理性检验

识别的水系点位是基于水系的几何特征而来, 点位的合理性需要经验验证, 对于化探工作而言, 设计点应当具备对区域有充分的控制作用和可以执行野外工作两个方面的要求。因此本文提出了两个检测模型用于评估机器自动布点的合理性。

2.3.1　设计点位分布检验模型

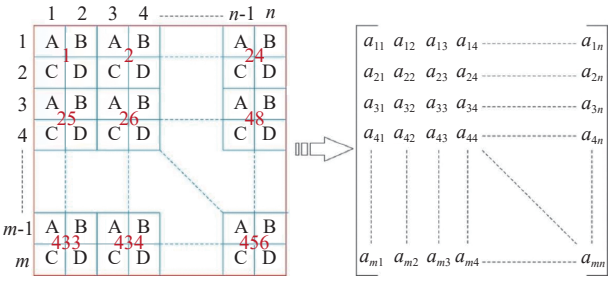
由于一个图幅的数据量较大, 检验设计点位时人工耗时长且很难发现所有的不合理区, 因此为了保证设计点位不出现过密和局部区域空白的情况, 需要依赖模型让计算机对其进行检测。实际的工作过程中, 不同的技术人员对于空白区域或过密区域会根据项目需求和区域特征来决定如何处理, 可能增加或减少样点布设。为了方便技术人员快速定位到这些过密的区域和连续空白区域, 笔者提出了一种检测模型, 具体操作方法如下。

1)将图幅所有小格转换为矩阵表达(图 5), 其优势是多个样点的特征用矩阵中一个元素就可以归纳, 便于计算机的处理和分析计算。根据图幅的小格列数、行数值, 生成一个 n 列、m 行的矩阵(标准图幅为 48 列、38 行), 将每个小格出现的设计点数量映射到对应(行、列)位置, 用点数表达该元素的值。

如图 5 所示, 采样格 1A 是图幅中的第一行第一列, 可以用矩阵中的 a_{11} 来表示。而根据设计点横纵坐标与起始大格(大格号 1)左上角的横纵坐标的数学关系(式(7)、(8)), 即可将设计点数映射到矩阵中, 其数学关系如下所示:

$$a_{ij}=\sum_{k=1}^{N}1_{\{(r_k,c_k)=(i,j)\}}, \tag{10}$$

式中: j 代表列数; i 代表行数; N 为设计点总数; $r_k\in\{1,2,3,\cdots,n\}$ 和 $c_k\in\{1,2,3,\cdots,m\}$ 分别表示第 k 个数据点对应的行号与列号; $1_{\{\cdot\}}$ 为指示函数, 仅当满足括号里的条件时取值为 1, 否则为 0。因此 a_{ij} 的值表示在 j 列、i 行的设计点数量, 实现将多个样点的信息用一个元素归纳。



注: 由于标准图幅的最大列值、最大行值为两位数, 写成 a_{3438} 容易引起误解, 因此图中用 m 代表最大列数, n 代表最大行数

note: since the maximum column and row values of standard map sheets are two-digit integers, their numerical representation a_{3438} may cause misinterpretation. In diagrams, labels 'm' and 'n' are reserved to denote maximum column count and maximum row count respectively

图 5　图幅采样格矩阵化示意

Fig. 5　Schematic diagram of map sheet sampling grid matrixization

2)通过设定每个采样小格的最大可容纳设计点数量(阈值), 可以让计算机返回大于阈值的元素的行、列号。为了方便观测, 需要生成一个过密检测点文件(图 6), 根据元素的行、列号转化输出对应采样小格中心点坐标信息, 用以提醒技术人员该采样小格布点过密。行、列号转换成采样小格中心点坐标信息的计算式为:

$$X_mid=X+250+500\times(j-1), \tag{11}$$

$$Y_mid=Y-250-500\times(i-1), \tag{12}$$

式中: X_mid 和 Y_mid 分别为采样点小格中心点横、纵坐标; 其他参数与式(7)和(8)相同。

3)在实际的采样设计过程中, 存在有因布点设计失误产生的空白区或因该区域水系不发达造成的空白区, 前者属于设计失误, 需要根据水系实际情况增设布点, 后者属于环境条件不允许, 需要考虑实际情况布设土壤样来进行辅助控制。由于这种空白区需要技术人员的主观判断, 因此本文提出了一种空白区搜索方法, 辅助技术人员快速定位到这些空白区。根据规范要求, 如果有连续 3 个以上的空格则视为空白区域。通过计算机找寻矩阵中所有值为零的元素, 对每一个这样的元素往上、下、左、右 4 个方向两个格子的距离进行检索, 当检查方向上的两个格子在矩阵中的元素都为 0 时, 标记这 3 个格子, 重复标记的格子只标记一次(去重)。同样返回这些标记元素并用式(11)、(12)转换为采样小格中心点坐标信息, 生成一个空白区域检测点文件, 实行对采样点分布的合理性评估。

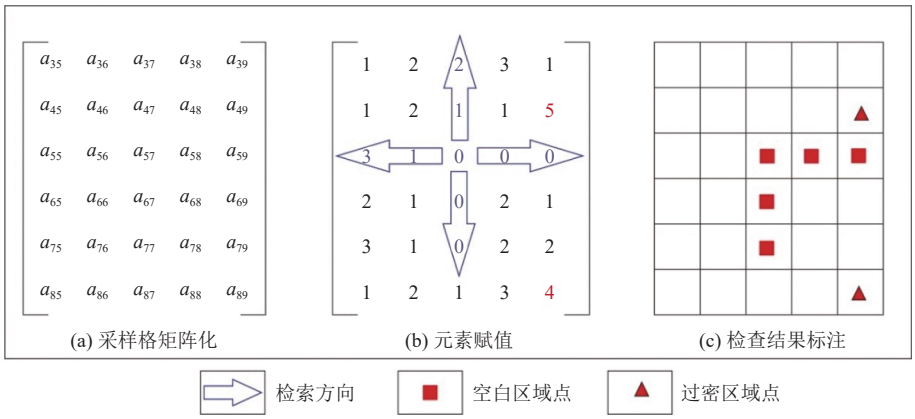


图 6　设计样分布检查模式

Fig. 6　Schematic of sampling point distribution inspection

2.3.2　设计点可采合理性评估

鉴于室内资料局限性难以完全复现真实的野外行进轨迹，本文选择由 D8 算法提取的理论水系流向作为替代指标，D8 算法基于最大坡度下降原理，其生成的流向线可视为区域内的理论最优通行路线。基于“若理论最优路径被判定为不可通行，则该点位在实际野外环境中亦被视为高风险区域”的保守估计策略，笔者建立了一个包含采样点位坡度(θ_k)、最长连续陡坡长度(L_{max})、总累计陡坡长度(L_{diff})以及局部路线陡坡长度(L_{local})的多维地形评价模型(表 1)。

采样点位坡度(θ_k)和最长连续陡坡长度(L_{max})是工作安全性指标，前者计算的是点位处的平均坡度，评价该点是否能够开展工作，后者统计最长连续高危陡坡(坡度大于 45°)的长度，防止陡坡过长造成滑坡和超出人体攀爬极限；总累计陡坡长度(L_{diff})和局部路线陡坡长度(L_{local})是路线通行难度指标，前者统计整个路径中高危陡坡(坡度大于 45°)长度总和，评价路径整体通行难度，后者统计在当前水系上高危陡坡的长度总和，评估有限距离(所在水系)上的通行难度和该条水系上是否可以移点来规避风险。该模型通过在室内阶段对理论路径进行严格的地形阻力分析和安全性分析，有效减少因设计不当造成的野外实际工作中的弃点，提升了采样设计的科学性与执行效率。模型参数的计算通过以下方式获取。

表 1　设计点可采合理性模型评估规则

Table 1　Rationality assessment criteria for computer-automated sampling point deployment

风险等级	通行难度	多维判别标准 (判定优先级从上至下)	致险因素与作业影响分析
S极高危	无法通行	1.θ_k > 60°; 2.路径存在坡度> 60°; 3.L_{max} ≥ 20 m	环境风险：点位位置位于绝壁(坡度大于60°)，或存在连续陡坡(大于45°)长度过长易造成滑坡崩塌风险，或路径上存在绝壁，风险高，无法沿该路径通行。评估建议：需要绕行或使用无人机开展工作，必要时弃点
A高风险	困难通行	1. 45°≤ θ_k <60°; 2. 15 ≤ L_{max} < 20 m; 3. L_{diff} > 50或L_{local}≥20 m	环境风险：点位位置位于陡坡上，或路径上连续陡坡长，存在一定滑坡崩塌风险，或整体路径陡坡长度过长或局部路径过长造成的通行困难。评估建议：有较长的陡坡段，需准备相应的安全措施并根据采样点位实际情况适当移点或弃点
B中风险	比较困难	1. θ_k <45°; 2. 10≤L_{max} <15 m; 3. L_{diff} >50且L_{local}<20 m	环境风险：路径上存在有较长连续陡坡，或路径上累计陡坡长但局部路径陡坡短，利于根据实际作出调整。评估建议：采样点位可以工作，但存在较短的陡坡，建议适当绕行
C低风险	较易通行	1. θ_k <45°; 2. 5≤L_{max} <10 m; 3. L_{diff} <50且L_{local}<20 m	环境风险：路径上存在较短的连续陡坡，或总路径累计陡坡长度较短。评估建议：采样点位可以开展工作，整条路径通行难度较低，风险可控
D轻微风险	基本通畅	1. θ_k <45°; 2. 0≤L_{max} <5 m; 3. L_{diff} <50且L_{local}=0 m	环境风险：路径上只有非常短的连续陡坡，或总路径陡坡累计较短，且局部路径无陡坡段，易于开展工作。评估建议：采样点位可以开展工作，整条路径通行难度非常低，安全性较高
E极低风险	完全通畅	1. θ_k <45°; 2. L_{diff} =0 m	采样点位可以开展工作，整条路径无高危陡坡段，安全性最高

注：判别优先级序号1最高，并依序降低，符合判别标准则归入此类。其中路径中陡坡的定义和评级的长度参数是参考野外安全工作性以及DEM的精度(通常为5 m×5 m)来确定，参数可根据项目需求和具体环境做调整，通常A级以下的点可采难度是可接受的，而S级和A级的点需要根据情况调整，必要时弃点。

1)设计点位置处的坡度基于高程 DEM 数据通过计算坡向变化率获取, 最常用的算法为三阶反距离平方权差算法[32-33], 其计算公式为:

$$S_{raw}(x,y)=\arctan\left(\sqrt{f_x^2+f_y^2}\right)\times\frac{180}{\pi},\qquad(13)$$

式中: f_x与f_y为点位置在领域内东西和南北方向上的变化率。但仅考虑单点的坡度可能出现因 DEM 数据噪声造成的异常高值, 不能有效反映该位置的实际情况, 通过引入 $w\times w$ 的矩形邻域窗口, 计算该点矩阵范围内的坡度来综合评价该点的坡度 θ_k, 其计算公式为:

$$\theta_k=\frac{1}{w^2}\sum_{i=-k}^{k}\sum_{j=-k}^{k}S_{raw}(x+i,y+i),\qquad(14)$$

式中: k=w/2, w 值取 3。在 DEM 精度为 5 m 的情况下, 覆盖范围为 15 m×15 m, 能有效评估设计点位置处的整体情况。

2)设置坡度阈值为 A, 将路径 L 划分为 n 个微元段, 第 j 段的长度为 Δl_j, 坡度为 s_j。定义指示函数为 $I(s_j)$, 对路径进行分段并计算路径中根据阈值分段的长度总和:

$$I(s_j)=\begin{cases}1, if\ s_j\geqslant A\\0, if\ s_j<A\end{cases},\qquad(15)$$

$$L=\sum_{j=k}^{m}\Delta l_j,\qquad(16)$$

式(15)表示根据阈值分类, 将大于阈值的视为高危陡坡, 记为 1, 低于阈值的记为 0; 式(16)表示从第 k 个微元段一直累计到第 m 个微元段, 这些微元段 $I(s_j)$ 值完全一致(即连续), 实现将原本的路径按照阈值分段拆分并归类。模型参数中最长连续陡坡长度($L_{\max}$)由统计路径中最长的陡坡片段获取, 总累计陡坡长度(L_{diff})由统计总路径上所有陡坡段的总和获取, 局部路线陡坡长度(L_{local})则由统计当前水系的陡坡段总和获取。

3　试验区布设效果及分析

由于一个完整图幅范围较大, 为便于展示, 本文选取甘肃省陇南市康县 1∶50 000 三河坝幅马家沟区域展示自动布点效果。区域以中高地形为主, 山地连绵起伏, 沟壑纵横, 区内雨量充足, 河流水量充沛, 流量稳定, 在实地有多处矿化异常显示, 有较好的勘探潜力, 适宜于布设水系沉积物开展化探测量。

3.1　自动化布点结果

该区域为典型的高山峡谷地区, 通过区域高精度 DEM(5 m×5 m)提取的参考水系, 结合卫星影像三维可视化进行矫正后显示该区域的水系呈现羽状发育, 支流(1 级)水系众多, 对流域控制作用强。根据规范要求, 水系样点主要布设在 1 级水系和 2 级水系上, 根据前述的水系分级改良方案, 计算机自动布设样点的水系主级别定位在 1 级和 2 级, 当水系副级别最高值设定为 2 级时, 此时计算机预估的布点密度已经大于 4 点/km^2。因此该区域需要自动布点的水系选择为 1 级水系和 2-1 级水系, 该级别下的水系对流域有着很强的控制作用, 满足化探工作需求。自动布点结果如图 7 所示。

3.2　合理性检验结果分析

本次设计点位合理性检验中由于不存在点数加密的需求, 因此将小格内允许容纳的最大点数设置为 3, 大于 3 视为过密。根据全区坡度分析结果, 3-1 级水系坡度稳定平缓, 因此将路径的终点设定为沿水系方向上第一条 3-1 级水系的起点处。最终合理性检验分析结果如图 8 所示。

设计点可采合理性评估模型中, A 级以下的点具备人工开展工作的基本条件, 只需根据评估结果准备相应的措施即可, 这部分点占总设计点数的 88%, 而 A 级以上的点在当前路径或采样位置处被视为高危, 是野外实际工作中的重要关注点, 需要人员结合卫星影像等资料进行判断是否有可达路径, 或在设备及环境允许的情况下使用无人机辅助采样, 必要时设置不可采区。

区域内的高危点的各项参数、致险因素及处理方式如表 2 所示, 结合合理性分析结果可以看出, 表格的前 13 个点具有范围聚集的特点, 且都属于被下游同一较长连续陡坡段阻拦造成的高风险点, 但点位坡度参数和累计陡坡参数值较低, 表明如果可以绕路避开这一致险因素即可实现采点。结合卫星影像, 这 13 个点中除 228B1 难以观察到其他可替代路径需考虑弃点外, 其余点位均可以绕路开展工作。剩余点中 252A1 和 252C3 致险因素为点位置过陡, 但沿路径临近处有非高危路段, 可以适当移点开展工作。

设计点分布检验模型中过密检测结果显示有 4 个过密小格, 分别为 203D、206B、255C 和 300C, 这些样点过密位置恰好是多条 1 级水系汇聚的位置, 这种情况不同技术人员有不同处理方式, 此处笔者选择的处理方式为如果有 2-1 级水系上的样点, 则取消这条 2-1 级水系上的样点; 不存在则将两个靠近样点作为一个样点合并采集。空白检测结果显示不合理空白区域有 3 个, 从卫星影像上这 3 个区域都

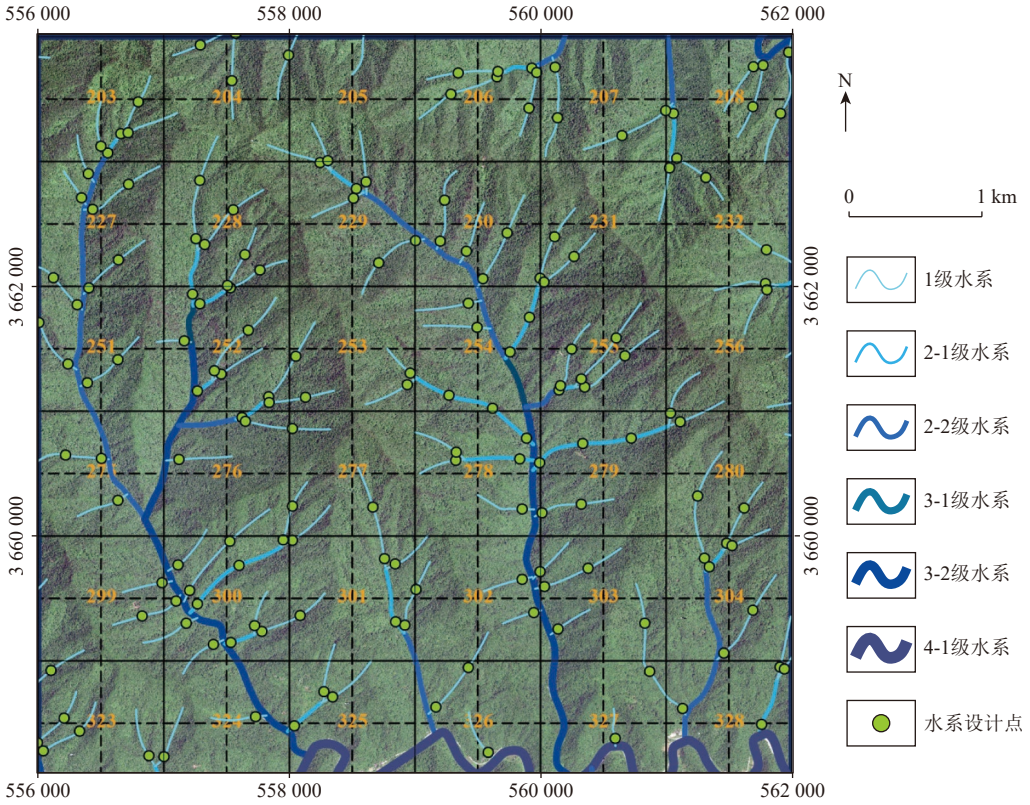


图 7　马家沟区域计算机自动布点位置

Fig. 7　Spatial distribution of computational sampling points in the Majiagou area

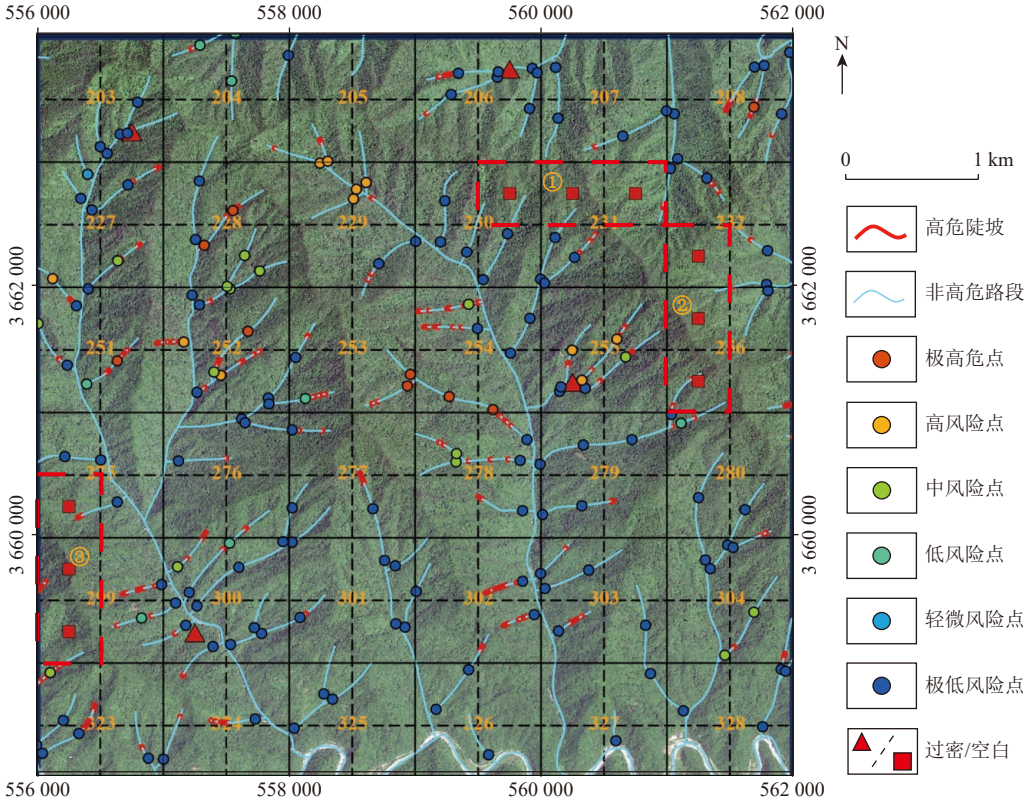


图 8　计算机自动布点合理性分析结果

Fig. 8　Rationality assessment of computational sampling points deployment

表 2　高危设计点可采合理性分析结果及处理方式

Table 2　Rationality assessment results and mitigation measures for high-risk design sampling points

编号	点位坡度/(°)	最长连续陡坡长度/m	总路径累计陡坡长度/m	局部累计陡坡长度/m	等级	致险因素	处理方式
205C1	26.23	15.52	15.52	0.00	A	被同一连续高危陡坡段阻拦	适当绕路
229A1	39.70	15.52	25.99	10.47	A		适当绕路
229B1	29.98	15.52	15.52	0.00	A		适当绕路
229B2	22.25	15.52	15.52	0.00	A		适当绕路
229B3	32.19	15.52	15.52	0.00	A		适当绕路
255B1	27.38	18.01	28.27	28.27	A	被同一连续高危陡坡段阻拦	适当绕路
255C4	45.46	18.01	18.01	18.01	A		适当绕路
228B1	42.32	45.28	77.95	77.95	S	被同一连续高危陡坡段阻拦	考虑弃点
228C2	48.24	25.92	36.26	36.26	S		移点规避危险段
253D1	32.32	23.01	59.03	10.57	S	被同一连续高危陡坡段阻拦	适当绕路
253D2	31.59	23.01	48.46	0.00	S		适当绕路
254C1	36.70	23.01	48.46	48.46	S		适当绕路
254D1	22.83	23.01	48.46	48.46	S		适当绕路
252A1	47.06	8.91	8.91	8.91	A	点位位置坡度过大	移点规避危险段
252C3	47.95	11.38	19.21	7.82	A		移点规避危险段
227C1	31.22	16.23	21.36	21.36	A	长距离连续坡段	适当绕路
255A1	27.79	15.21	23.27	23.27	A		适当绕路
251D1	34.01	38.37	43.56	43.56	S		移点规避危险段
252B2	18.62	42.27	60.19	48.81	S		适当绕路

位于山脊之上, 根据 3 个空白区域周边的水系特征, 区域①可以适当将小格 230D 中靠近小格边缘的样点沿水系往更靠近源头的方向布置; 区域②同理可将 280A 的一个样点移动, 从而避免规范上的不合理; 而区域③周边无水系延伸, 也无靠近的样点, 在实际工作中不适宜布设水系样点, 根据规范这种区域可以布设土壤样作为辅助控制。

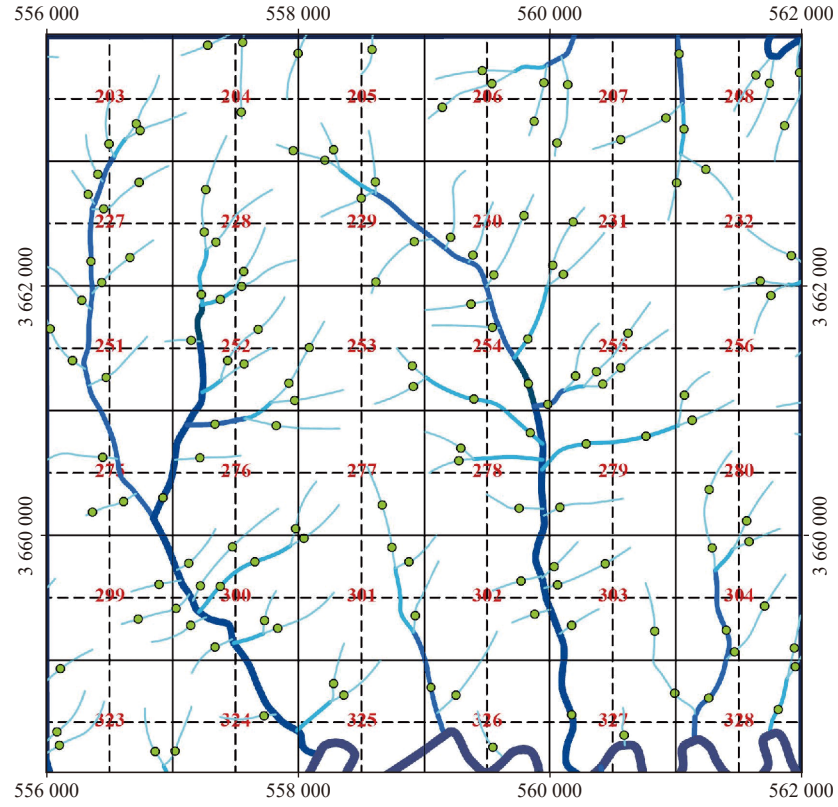
3.3　人工布设对比分析

经合理性检验模型优化后的自动布样最终结果如图 9b 所示, 与人工布设方案(图 9a)相比, 计算机布点不仅大幅缩短了工作时长, 同时在空间分布上整体趋同。人工布设方案的最近邻比率指数 *NNR* 为 1.2, 而自动布设方案为 1.1, 两者 *NNR* 值均大于 1, 表明样点在研究区内均呈现均匀分布特征。在布点密度与控制能力方面, 人工布设密度为 4.1 点/km^2, 自动布设密度为 4.6 点/km^2, 人工布设密度偏低的主要原因在于未能严格依据水系长度加密采样点, 导致对部分流域的控制力度不足。此外, 人工布设存在明显的主观随意性, 如部分点位布设在水系源头以及 3 级水系上, 且存在不合理空白区。相比之下, 自动布设方法严格遵循水系几何特征参数, 依据长度阈值自动加密采样点, 统计显示, 自动布设方案中 1 级水系上的样点占比 84.7%, 区域内无不合理空白区或过密区, 且所有设计点位均按照可采合理性评估结果进行论证, 具备野外开展工作的基本条件。综上所述, 该自动布设方案不仅显著提升了工作效率, 且严格符合地球化学勘查规范标准, 可作为实际采样工作的设计参考图。

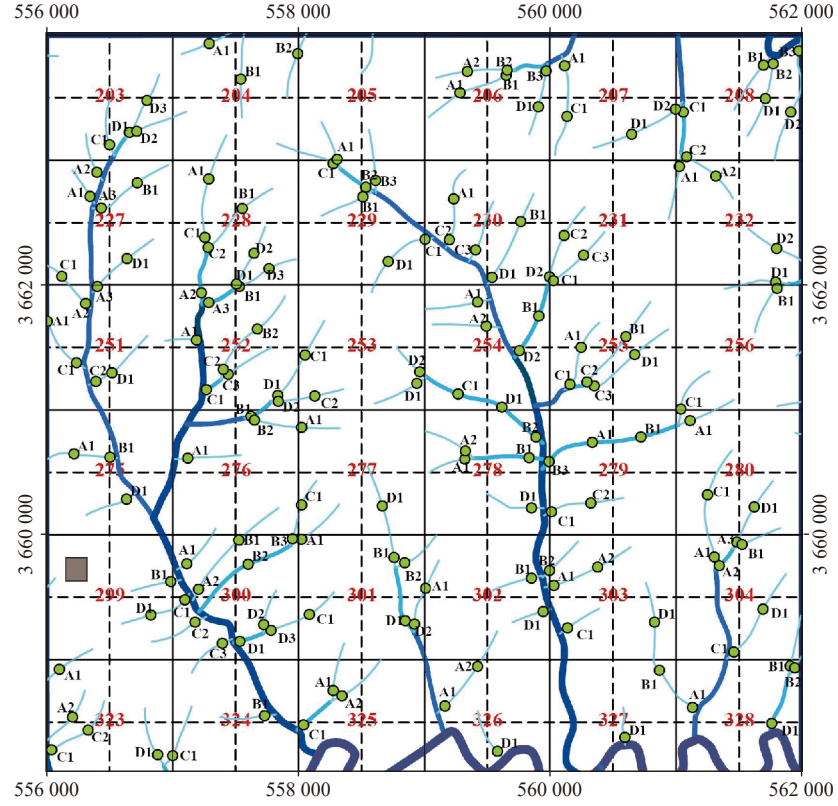
4　结论

针对传统室内水系沉积物布设工作量大、主观随意性强、布设完成后缺乏相应的合理性检验等问题, 本文结合 GIS 和水文科学知识, 依据地球化学勘查规范标准提出了一种在 ArcGIS 平台上使用的自动化布点方法。该方法通过三维卫星影像修正 DEM 提取的水系, 并在 Strahler 河流分级法基础上创新性地引入副级别限制计算机自动布设时的水系选择, 实现了以水系的几何学特征作为参数进行自动化布点; 同时, 构建合理性检验模型对点位的可采性与规范性进行了评估。在三河坝幅马家沟区域应用中, 该方法布设样点最近邻比率指数为 1.1, 分布均匀且无不合理空白区, 布点密度 4.6 点/km^2, 布点主要位于 1 级水系上, 符合规范标准且按照可采合理性评估结果进行论证, 具备野外开展工作的基本条件。该方法不仅提高了技术人员的样点布设效率和合理性, 也具备根据区域特征和项目需求灵活修改水系几何学特征参数实行针对性布点的特点, 具备很高的自适应能力。

尽管该方法数据依赖性低, 仅需基础水系几何



(a) 人工布设样点



(b) 计算机自动布设

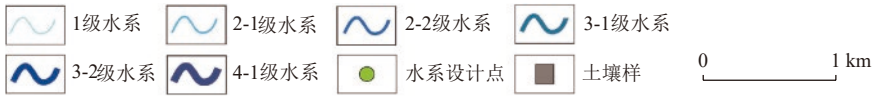


图 9　马家沟区域人工布设(a)与计算机自动布设(b)方案对比

Fig. 9　Comparison of manual(a) and computational automated(b) sampling points deployment in the Majiagou area

特征, 但受限于 DEM 数据在平缓地形下水系提取精度有限的问题, 需要更多依赖人工借助卫星影像进行校正; 同时, 鉴于室内资料对野外实际工作的局限性以及不同区域的差异性, 合理性检验模型还需进一步完善。未来研究可以通过机器学习以及人工智能等先进技术, 完善合理性检验模型和水系识别精度, 进一步优化自动化布点。

参考文献(References):

[1] 陈永耀. 水系沉积物测量在北山拾金坡地区找矿中的应用 [J]. 世界有色金属, 2021(18): 69−70.
Chen Y Y. Application of stream sediment survey to ore prospecting in Shijinpo area, Beishan[J]. World Nonferrous Metals, 2021(18): 69−70.

[2] 李旭东, 李成禄, 杨元江, 等. 黑龙江省嫩江—黑河地区水系沉积物测量地球化学特征及成矿预测 [J]. 地质与勘探, 2024, 60(6): 1153−1167.
Li X D, Li C L, Yang Y J, et al. Geochemical characteristics of stream sediments in the Nenjiang-Heihe area, Heilongjiang Province and the metallogenic prognosis[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(6): 1153−1167.

[3] 王磊, 杨建国, 王小红, 等. 甘肃北山炭山子—黄草泉一带水系沉积物地球化学特征及找矿远景 [J]. 现代地质, 2016, 30(6): 1276−1284.
Wang L, Yang J G, Wang X H, et al. Geochemical characteristics of stream sediments and prospecting direction in the tanshanzi-Huangcaoquan area of Beishan, Gansu Province[J]. Geoscience, 2016, 30(6): 1276−1284.

[4] 崔晓亮, 刘婷婷, 王文恒, 等. 东昆仑布青山地区水系沉积物测量地球化学特征及找矿方向 [J]. 物探与化探, 2011, 35(5): 573−578.
Cui X L, Liu T T, Wang W H, et al. Geochemical characteristics and ore search prospects of buqingshan area in Qinghai Province based on stream sediment survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(5): 573−578.

[5] 史长义, 冯斌, 彭敏, 等. 勘查地球化学现状与展望 [J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(6): 671−697.
Shi C Y, Feng B, Peng M, et al. Present status and prospects of exploration geochemistry[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 44(6): 671−697.

[6] 赵娟, 孙泽坤, 贾研慧, 等. 青海省祁漫塔格地区 1∶5 万水系沉积物测量衬值异常圈定实例 [J]. 地质与勘探, 2016, 52(3): 518−523.
Zhao J, Sun Z K, Jia Y H, et al. Delineation of contrast value anomalies of 1 ∶ 50, 000 drainage sediment survey data: An example of the qimantage area, Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(3): 518−523.

[7] 陈国光, 马振东, 奚小环, 等. 矿产地球化学勘查体系的探讨 [J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 437−442.
Chen G G, Ma Z D, Xi X H, et al. A tentative discussion on the mineral geochemical prospecting system[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 437−442.

[8] 杨少平, 弓秋丽, 文志刚, 等. 地球化学勘查新技术应用研究 [J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1844−1877.
Yang S P, Gong Q L, Wen Z G, et al. Application research of the new technologies for geochemical survey[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1844−1877.

[9] 王学求. 巨型矿床与大型矿集区勘查地球化学 [J]. 矿床地质, 2000, 19(1): 76−87.
Wang X Q. Exploration geochemistry for giant ore deposits or world-class camps in concealed terrains[J]. Mineral Deposits, 2000, 19(1): 76−87.

[10] 曾亮, 杨明龙, 庞咏, 等. 高山峡谷区地球化学普查采样点协同优化布设与现场微调方法 [J]. 物探与化探, 2025, 49(6): 1343−1352.
Zeng L, Yang M L, Pang Y, et al. Synergistic optimization and on-site fine-tuning methods for sampling point arrangement for geochemical survey in an alpine gorge area, Southwest China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(6): 1343−1352.

[11] 赫帅. 湖南古台山 1∶5 万水系沉积物采样点位设计及实地采样经验 [J]. 四川地质学报, 2024, 44(S1): 153−156.
He S. Sampling site design and field sampling experience of 1 ∶ 50, 000 stream sediments in Gutaishan, Hunan Province[J]. Acta Geologica Sichuan, 2024, 44(S1): 153−156.

[12] 王海鹏, 孙海龙, 鲁红峰, 等. MAPGIS 条件下完美实现不规则网化探采样点自动编号 [J]. 吉林地质, 2015, 34(1): 90−92, 105.
Wang H P, Sun H L, Lu H F, et al. Irregular network geochemical exploration sample points number automatically by MAPGIS[J]. Jilin Geology, 2015, 34(1): 90−92, 105.

[13] 陈可忠. 化探采样点自动编号及航点自动生成的方法 [J]. 四川地质学报, 2014, 34(S1): 60−65.
Chen K Z. Automatic numbering of geochemical sampling points and automatic generation of waypoints[J]. Acta Geologica Sichuan, 2014, 34(S1): 60−65.

[14] 冯伟华, 陈恩科, 张随安, 等. 基于 VBA 实现设计点位编号和坐标提取 [J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(2): 247−251.
Feng W H, Chen E K, Zhang S A, et al. Based on the VBA realization the design point site number and extraction coordinate[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(2): 247−251.

[15] 廖国忠, 张伟, 吴文贤, 等. 1∶50 000 水系沉积物地球化学勘查采样点位自动设计的方法研究 [J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(5): 689−694.
Liao G Z, Zhang W, Wu W X, et al. Research on the method of automatic design of sampling location in stream sediment geochemistry[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(5): 689−694.

[16] 韩治虹, 黄帅, 花卫华, 等. 基于等高线的水系沉积物采样点自动布设方法 [J]. 地质学刊, 2018, 42(3): 470−475.
Han Z H, Huang S, Hua W H, et al. Contour-based automatic layout method of stream sediment sampling sites[J]. Journal of Geology, 2018, 42(3): 470−475.

[17] 朱洪涛, 高强, 缪腾峰, 等. 化探异常的分流域提取与应用: 以东昆仑浩特洛洼地区 1∶5 万水系沉积物地球化学测量数据为例 [J]. 矿物学报, 2025, 45(5): 955−966.

Zhu H T, Gao Q, Miao T F, et al. The sub-watershed extraction and application of geochemical anomalies: A case study of the geochemical survey data of 1∶50,000 stream sediments in the Haoteluowa area of the Eastern Kunlun Orogeny[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2025, 45(5): 955−966.

[18] 宁忠瑞, 李虹彬, 刘亚婷, 等. 基于 DEM 的塔里木河流域数字河网提取与分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 54−61.
Ning Z R, Li H B, Liu Y T, et al. DEM-based extraction and analysis of digital river network of Tarim River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(8): 54−61.

[19] 宋晓猛, 张建云, 占车生, 等. 基于 DEM 的数字流域特征提取研究进展 [J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 31−40.
Song X M, Zhang J Y, Zhan C S, et al. Advances in digital watershed features extracting based on DEM[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 31−40.

[20] 孙庆艳, 余新晓, 胡淑萍, 等. 基于 ArcGIS 环境下 DEM 流域特征提取及应用 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S2): 144−147.
Sun Q Y, Yu X X, Hu S P, et al. Extraction and application of hydrological information based on DEM in arcgis environment[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(S2): 144−147.

[21] 李丽, 郝振纯. 基于 DEM 的流域特征提取综述 [J]. 地球科学进展, 2003, 18(2): 251−256.
Li L, Hao Z C. The automated extraction of catchment properties from digital elevation models[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(2): 251−256.

[22] 朱旭, 周玉良, 周平, 等. 面向水文过程模拟的 DEM 子流域划分优化方法 [J]. 湖泊科学, 2025, 37(5): 1759−1770.
Zhu X, Zhou Y L, Zhou P, et al. Optimization method of DEM subwatershed division for hydrological process simulation[J]. Journal of Lake Sciences, 2025, 37(5): 1759−1770.

[23] 蒋好忱, 雷宝佳, 李昕, 等. 空间分辨率对 DEM 流域特征提取的影响 [J]. 测绘技术装备, 2023, 25(3): 8−12.
Jiang H C, Lei B J, Li X, et al. The influence of spatial resolution on watershed feature extraction from DEM[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2023, 25(3): 8−12.

[24] Tran T N D, Nguyen B Q, Vo N D, et al. Quantification of global Digital Elevation Model (DEM)–A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 45: 101282.

[25] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3): 323−344.

[26] 王莹, 杨玫, 庞海熔, 等. 不同 DEM 分辨率下山西省数字河网阈值分析 [J]. 水利水电技术: 中英文, 2024, 55(9): 71−84.
Wang Y, Yang M, Pang H R, et al. Threshold analysis of digital river network in Shanxi Province under different DEM resolutions[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(9): 71−84.

[27] 邢轩玮, 薛源, 张永显, 等. 基于多源遥感和几何特征的间歇性河流提取方法——以无定河流域为例 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2025, 65(8): 1569−1582.
Xing X W, Xue Y, Zhang Y X, et al. Intermittent river morphology extraction method based on multisource remote sensing and river characteristics: A case study in Wuding River Basin[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2025, 65(8): 1569−1582.

[28] 郝延海, 欧阳佳岑, 苏鸽, 等. 基于汇水盆地法化探异常信息提取的综合应用——以西昆仑赞坎地区 1∶5 万水系沉积物地球化学测量为例 [J]. 地质与勘探, 2025, 61(1): 100−110.
Hao Y H, Ouyang J C, Su G, et al. Comprehensive application of geochemical anomaly extraction based on the catchment basin method: An example of the 1∶50, 000 stream sediment measurements in the zankan area of west Kunlun[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(1): 100−110.

[29] 孙崇亮, 王卷乐. 基于 DEM 的水系自动提取与分级研究进展 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 118−124.
Sun C L, Wang J L. The progress on automatic basin streamline extracting & classifying methods based on DEM[J]. Progress in Geography, 2008, 27(1): 118−124.

[30] 孙世友, 郭微, 付蔚. 基于高精度 DEM 的水系空间图谱提取、分级及可视化方法研究 [J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2025, 61(5): 710−720.
Sun S Y, Guo W, Fu W. Visualizing water system spatial mapping by high-resolution DEM[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2025, 61(5): 710−720.

[31] DZ/T 0011—2015 地球化学普查规范(1∶50 000)[S].2015.
DZ/T 0011—2015 Geological prospecting specifications (1∶50,000) [S]. 2015.

[32] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. 基于 DEM 坡度坡向算法精度的分析研究 [J]. 测绘学报, 2004, 33(3): 258−263.
Liu X J, Gong J Y, Zhou Q M, et al. A study of accuracy and algorithms for calculating slope and aspect based on grid digital elevation model(DEM)[J]. Acta Geodaetica et Cartographic Sinica, 2004, 33(3): 258−263.

[33] 胡光辉, 熊礼阳, 汤国安. DEM 地表坡向变率的向量几何计算法 [J]. 测绘学报, 2019, 48(11): 1404−1414.
Hu G H, Xiong L Y, Tang G A. Vector geometry based method for the extraction of slope of aspect by using DEMs[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(11): 1404−1414.

A geometry-based method for automated sampling point arrangement in 1∶50,000 stream sediment surveys

DING Shi-Hao, ZHAO Yang, HUANG Yong, QIAO Kai, LU Sheng-Quan, YANG Zhong-Hu

(*Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu* 610036, *China*)

Abstract: In current geochemical surveys of stream sediments, manual sampling point arrangement predominates. However, manual arrangement faces several challenges, including heavy workload, high subjectivity, and insufficient control over river basin coverage. Moreover, the lack of effective quality inspection after sampling point arrangement renders it difficult to ensure the rationality of the arrangement. These issues affect field operations and the reliability of subsequent geochemical interpretations. Using the ArcGIS system, this study implemented computer automation-based scientific sampling point arrangement as per the geometric characteristics (e.g., order and length) of streams. Furthermore, a model for the verification of sampling point rationality was developed to assess the rationality of the distribution and sampleability of the automatically arranged sampling points. The proposed method was applied to the sampling point arrangement of stream sediments in the Majiagou area within the 1∶50,000 Sanheba map sheet. The results indicate that the automated arrangement achieved a nearest neighbor index of 1.1. This finding suggests a uniform sampling point distribution, with an absence of unreasonable gaps. Notably, 84.7% of the sampling points were distributed along the first-order streams, with a sampling density of 4.6 points/km^2. The resulting sampling point layout complies with the requirements in relevant specifications and satisfies the prerequisites for field operations. Therefore, the method of automated sampling point arrangement significantly enhances the efficiency and reasonableness of indoor sampling point arrangement, holding high practical value.

Key words: stream sediment; sampling point; GIS-based automation; rationality assessment model; stream hierarchy

（本文编辑: 蒋实）