

基于地质规则驱动的钻孔地层自动标准化方法

花卫华^{1*}, 黄宇², 肖海清¹, 伍昕颖², 侯旭娟¹, 李浩¹

1. 中国地质大学地理与信息工程学院, 湖北武汉 430078

2. 中国地质大学国家地理信息系统工程技术研究中心, 湖北武汉 430078

摘要:随着地质勘探精度要求的不断提高以及数据共享与分析需求的日益增长, 钻孔地层数据的标准化处理变得日益重要。本文提出了一种地质规则驱动的钻孔地层自动标准化方法, 旨在提高地层数据处理的效率和准确性。该方法通过结合地层划分、编码规则和编程技术, 实现了地层编码的自动标准化。研究首先将地层划分为大层、亚层和次亚层, 然后根据地层从属关系、地层排序规则和地层编码规则建立标准地层层序, 最终基于标准地层层序完成地层编码标准化。采用厦门市孚中央西路的测试钻孔数据进行实验, 通过钻孔岩土分层自动标准化平台进行验证。结果表明, 自动标准化方法准确性较好, 且在效率、一致性方面均优于传统手动方法。本研究提出的地层标准化方法, 对于地质数据的自动化处理和智能化分析具有重要的理论和实践意义。

关键词: 钻孔地层数据; 自动标准化; 地质规则; 地层划分; 地层编码。

中图分类号: P534

收稿日期: 2025-04-12

A geological rule-driven method for automatic stratigraphic standardisation of boreholes

Hua Weihua^{1*}, Huang Yu², Xiao Haiqing¹, Wu Xinying², Hou Xujuan¹, Li Hao¹

1. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

2. National Research Centre for Geographic Information System Engineering Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China

Abstract: The standardisation of borehole stratigraphic data has become increasingly important with the increasing requirements for geological exploration accuracy and the growing demand for data sharing and analysis. In this paper, a geological rule-driven method for automatic standardisation of borehole stratigraphy is proposed, aiming to improve the efficiency and accuracy of stratigraphic data processing. The method achieves automatic standardisation of stratigraphic coding by combining stratigraphic division, coding rules and programming techniques. In the study, the stratigraphy is firstly divided into major, sub-stratigraphy and sub-sub-stratigraphy, and then a standard stratigraphic sequence is established based on stratigraphic affiliation, stratigraphic ordering rules and stratigraphic coding rules, and the stratigraphic coding standardisation is finally completed based on the standard stratigraphic sequence. Experiments were conducted using data from test boreholes at Fu Central West Road, Xiamen, and

基金项目: 中国铁建股份有限公司 2021 年重大科技研发项目(2021-A02); 中国铁建股份有限公司 2023 年重大科技研发项目(2023-Z03); 陕西省创新能力支撑计划(2024CX-GXPT-10)

作者简介: 花卫华(1977-), 副教授, 主要从事多约束下复杂地质模型快速构建与定量分析研究。ORCID: 0000-0002-2255-7411. E-mail: huaweihua@cug.edu.cn

verified by an automatic standardised platform for geotechnical stratification of boreholes. The results show that the automatic standardisation method has better accuracy and is better than the traditional manual method in terms of efficiency and consistency. The stratigraphic standardisation method proposed in this study is of great theoretical and practical significance for the automatic processing and intelligent analysis of geological data.

Keywords: borehole stratigraphic data; automatic standardisation; geological rules; stratigraphic division; stratigraphic coding.

0 引言

随着城市化进程的加速和地质勘探技术的不断发展, 钻孔地层数据作为地质研究的核心信息源, 其重要性日益凸显(李锋等, 2019)。这些数据不仅记录了不同深度地层的岩性、厚度等关键信息, 还能够直观、准确地反映地层在垂向上的分布特征, 是解析地下地质结构、评估地质灾害风险、指导城市规划的重要依据(花卫华等, 2023)。然而, 由于不同项目、不同区域采用的钻孔地层数据分层编码方法各异, 导致在统一进行剖面连层和三维地质建模时, 难以直接利用这些零散、孤立的钻孔资料(李清明和唐辉明, 2019; 林晓春, 2019; 梁定勇等, 2021)。此外, 由于编码方法的不统一, 不同来源的地层数据在整合过程中往往需要耗费大量时间进行人工比对和转换, 这不仅增加了工作量, 还容易引入人为错误, 影响地层数据分析的准确性和效率。因此, 钻孔地层数据的标准化处理已成为地质行业内急需解决的问题(李超等, 2022; Muhammad 等, 2024)。

在国内外, 众多学者已针对钻孔标准地层划分展开了研究。例如, 李连详等(2019)基于济南市区的地层数据, 建立了当地的标准地层划分规则, 为该区域地质研究提供了有力支持。苏和明等(2022)和韩博等(2023)则分别针对清远市清城区和雄安新区, 开展了详细的第四纪标准地层分层研究, 推动了当地的地质研究。Didi 等(2025)对尼日利亚科尔马尼油田进行地层研究, 结合钻井数据建立了标准地层, 为该地区的油气勘探提供了更准确的地层框架, 指出了有利的油气勘探层位和构造位置。然而, 尽管这些研究取得了一定的进展, 但仍存在以下局限性:

(1) 当前的地层标准化方法在处理复杂地层中出现的透镜体时, 往往难以充分考虑这种特殊情况对地层连续性和完整性的

影响。若直接应用常规的标准化方法, 可能会导致地层信息的丢失或错误解读, 从而影响地质研究的科学性和可靠性(Seyed Ahmad 和 Taiebeh Esmaeili, 2015; Wu 等, 2021)。

(2) 当前的地层标准化方法主要依赖于人工操作, 地质工作者需要对大量的钻孔地层数据进行检查、对比和修正。这种方法不仅耗时费力, 而且容易受到人为因素的影响, 如经验差异、注意力不集中等, 导致标准化结果的不稳定。此外, 随着城市大规模开发建设, 大量支撑城市规划的勘察钻孔地层数据产生(刘立群等, 2022; 杜亚楠等, 2023), 传统的人工标准化方法已难以满足高效、准确处理海量地层数据的需求。

针对以上问题, 本研究提出一种地质规则驱动的钻孔地层自动标准化方法, 旨在通过建立地质规则模型, 自动识别和处理地层数据中的透镜体, 实现地层数据的高效标准化。该方法能够自动识别地层中的透镜体并进行处理, 基于地层划分、排序、编码算法自动地对输入的钻孔地层数据进行标准化处理, 提高地质研究的工作效率。同时, 该方法能够减少人为因素的干扰, 提高地层数据标准化的准确性和一致性, 对地层研究具有重要的理论和实践意义(王林军等, 2023; 田聪等, 2024)。

1 钻孔地层标准化方法的总体技术流程

本研究中的地质规则主要包括地层划分规则、地层从属关系、地层排序规则和地层编码规则。地层划分规则包括粗分规则、细分规则以及透镜体识别规则; 地层从属关系规则定义了地层之间的层级结构, 如大层、亚层和次亚层之间的包含关系; 地层排序规则规定了地层在垂向上的

顺序，即新老地层的排列方式；地层编码规则则详细描述了如何根据地层特征（如地质时代、岩性等）为地层分配唯一编码。

高层是指在地层分层结构中最宏观的分层单元，用于描述整体结构或框架，通常包含多个亚层或次亚层。亚层是高层的下一级分层单元，它比高层更具体，但仍然包含多个更细的层次（次亚层）。次亚层则是亚层的下一级分层单元，是最细的分层层次，用于详细描述具体的地层特征。原始分层是地层结构最初被划分时所形成的分层方式。它是基于初始条件进行的分层，通常未经进一步处理或解释。标准地层是指经过详细研究和标准化处理的地层单元。它通常具有明确的特征、年代和分布规律，可以作为参考标准用于对比和分析其他地层(Mohamed 等, 2023; Li 等, 2024)。

该方法将钻孔基本信息以及原位测试数据作为输入数据输入到程序中，程序根据划分规则将地层划分为高层、亚层和次亚层，划分过程中能够准确识别出透透镜体并进行标记处理，并且对层级自动排序，然后根据编码规则得到标准地层层序，最终基于标准地层层序对钻孔地层编码完成标准化。此外随着输入数据的更新，标准地层层序也随之更新，整个标准化过程是迭代进行的，自动标准化总体流程如图 1 所示。

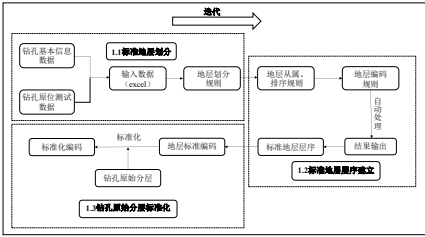


图 1 自动标准化总体流程图

Fig. 1 Overall flow chart for automated standardization

1.1 标准地层划分

地层划分应考虑地层时代、成因、地层特征等多方面因素(王攀, 2021; 许程等, 2022)。本研究提出了一种地层划分的算法思想。该方法首先将地层进行高层分级，然后在高层的基础上进行亚层划分，最终在亚层的基础上划分为次亚层(张友林等, 2023; Wang 等, 2025)。通过对地层进行三级划分，从而确保地层在空间和时间上的层次关系得以准确反映。

1.1.1 地质时代划分地层

首先根据地质时代对地层进行初步划分。通过分析化石种类、分布以及地层中特定地质事件，确定地层形成的地质时期(Ahmad 等, 2021)。地质时代的划分不仅为地层提供了一个明确的时间框架，对于理解地层的沉积环境及地质历史具有重要意义(刘立军等, 2010)。本文的研究聚焦于六个地质时代，如表 1 所示。基于地质时代将钻孔的地层数据划分成多个高层，地质时代相同的地层划分为同一个高层(王建伟等, 2021)。

表 1 地质时代

Table 1 Geological epochs

地质时代	时间范围 (Ma)	描述
人工堆积层	0-0.0001	城市垃圾填埋、建筑施工
新近沉积层	0-0.005	有助于理解现代沉积过程和环境变化
第四纪沉积层	0-2.6	记录了冰期和间冰期的气候变化
新近纪沉积岩	2.6-23	对研究古气候和古环境具有重要价值
古近纪沉积岩	23-66	包含了丰富的生物多样性和沉积环境信息
中生代及以前岩层	66-252 及更早	记录了地球历史上的重要地质事件

1.1.2 粗分规则

地层粗分是指基于地层岩性将高层进一步划分成亚层。地层岩性通常通过分析钻

孔岩芯来确定，常见的地层岩性有素填土、杂填土、黏土、粉质黏土、粉土等(Gibbard 和 Hughes, 2021)。粗分的目的是识别地层中

显著的地质变化,为进一步的细分提供基础。以下是粗分的算法思想(以下地层指钻孔内地层):

- (1)每个钻孔均与其相邻的东、西、南、北四个方向钻孔进行对比,边界钻孔缺少某个方向相邻钻孔可跳过。
- (2)地层分布连续且厚度大于 3m 判定为亚层。
- (3)按照由浅入深,岩性相同的地层自动分为一个亚层。
- (4)相同岩性被分布连续的其他岩性间隔分开时(如图 2a 所示),上下相同岩性分为两个亚层;中间间隔的不同岩性地层厚度大于等于 2m 时也分为一个亚层,否则,则划分为其所在亚层的次亚层。
- (5)被不连续分布的其他岩性间隔分时(如图 2b 所示),上下相同岩性分为同一个亚层,中间间隔的不同岩性地层分为该亚层的次亚层。

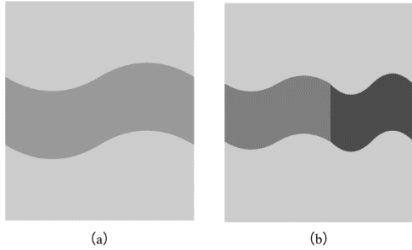


图 2 间隔地层

Fig. 2 Interval stratigraphy

按照粗分规则进行地层的粗分,将钻孔数据在大层划分的基础上进一步划分为亚层,如图 3 所示。

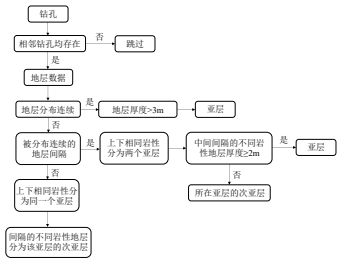


图 3 粗分规则

Fig. 3 Coarse division rule

1.1.3 透镜体的识别规则

透镜体是地层中一种特殊的地质现象,表现为某一地层在垂直方向上被其他地层所包围,但在水平方向上具有一定的延伸性。透镜体的存在会对地层的连续性和完整性

造成影响,是地层标准化过程中需要特别关注和处理的地层(李昌领等,2013)。准确识别透镜体并进行处理,对于确保地层标准化结果的准确性和连续性具有重要意义。

本研究根据透镜体的位置和形态特征,将其分为普通透镜体、嵌套透镜体、顶层透镜体和底层透镜体四类。普通透镜体指的是单个透镜体,其上下地层为同一地层(如图 4a);嵌套透镜体则表现为一个透镜体内部嵌套另一个或多个透镜体(如图 4b);顶层透镜体位于其所在母层序列的顶部(如图 4c);而底层透镜体则位于其所在母层序列的底部(如图 4d)。

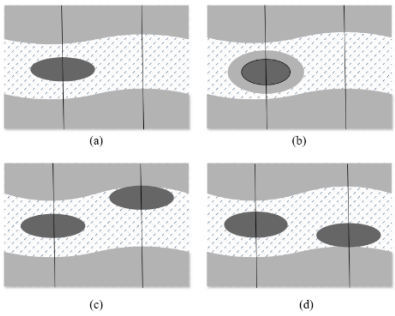


图 4 透镜体类型

Fig. 4 Lens body types

普通透镜体与嵌套透镜体的识别过程如图 5 所示。首先,对钻孔数据自上而下逐层检测地层,若检测到某地层的上下地层为同一地层,则将其标记为透镜体。对于嵌套透镜体,进行迭代检测,即重复检测透镜体地层,直到最后上下地层不相同,将所有连续识别出的地层合并为一个完整的嵌套透镜体。

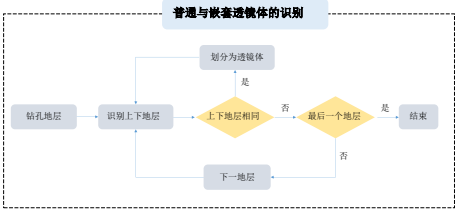


图 5 普通与嵌套透镜体的识别流程

Fig. 5 Recognition flow of normal and nested lens bodies

顶层透镜体与底层透镜体的识别较为复杂,不能通过“上下地层相同”识别出。顶底透镜体的识别需要基于初始透镜体进

行(如图6所示)。对于一个已经识别出的初始透镜体,在其母层范围内,若相邻钻孔中检测出与初始透镜体地层相同的地层,并且出现在母层的顶部,则划分为顶层透镜体;若出现在母层的底部,则划分为地层透镜体。

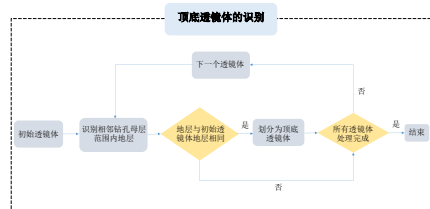


图 6 顶底透镜体的识别流程

Fig. 6 Identification process of top and bottom lens bodies

通过以上透镜体的识别过程,可以较准确地将透镜体识别,本研究将识别出来的普通透镜体、嵌套透镜体、顶底透镜体统一标记为透镜体。

1.1.4 细分规则

地层细分是指在粗分的基础上,进一步考虑颗粒级配(Ip)和工程物理学特性,将亚层进一步细分成次亚层。Ip 是土工试验中的一个重要指标,用于描述土体中不同粒径颗粒的分布情况。“符合颗粒级配”主要是通过对比不同钻孔的颗粒级配数据,判断地层的连续性和一致性,从而决定是否将这些地层归为同一层或进行分层,如图 7 所示。这一过程有助于更准确地进行地层标准化,确保地层分层的科学性和合理性。

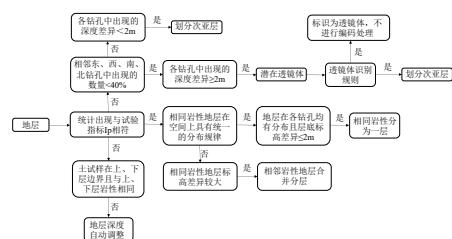
图 7 基于 I_p 的细分规则

Fig. 7 Ip-based segmentation rules

以下是地层根据颗粒级配(Ip)的划分规则:

(1) 统计出现与试验指标 I_p 相符

1)相同岩性地层在空间上具有统一的分布规律时,地层在各钻孔均有分布且层底标高差异小于等于 2m,相同岩性分为一层。

2)相同岩性地层标高差异较大且空间分布无规律,则可将“相邻岩性”的地层进行合并分层。

允许合并分层的“相邻岩性”：粉质黏土和重粉质黏土；重粉质黏土和黏土；黏质粉土和砂质粉土；粉砂和细砂；细砂和中砂；中砂和粗砂；粗砂和砾砂；圆砾和卵石；卵石和漂石；角砾和碎石；碎石和块石。

(2) 统计出现与试验指标 I_p 不符

1)土试样在上、下层边界(距离上、下层边界 1m 以内)且与上、下层岩性相同时,如图 8 红色椭圆区域,可将上地层深度自动调整至该土样取样深度以下 0.3m,或下地层深度自动调整至该土样取样深度处。

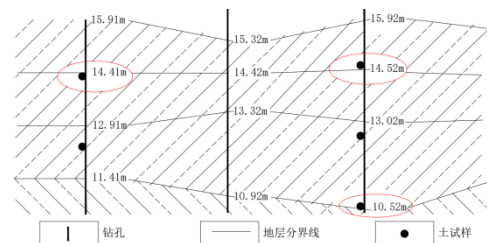


图 8 边界处土试样

Fig. 8 Soil specimen at the boundary

2)个别钻孔出现(相邻东、西、南、北钻孔中出现的数量小于40%)且出现各钻孔中出现的深度差异大于等于2m时,划分为潜在透镜体,如图9所示。对于满足这一条件的地层,将进一步进行透镜体识别。根据透镜体的识别规则,若地层未被识别成透镜体,则划分为次亚层。

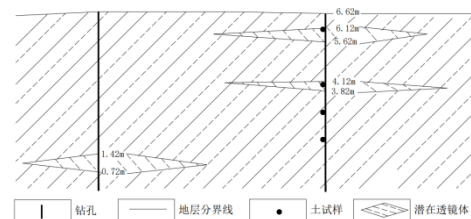


图 9 潜在透镜体

Fig. 9 Potential lens body

3) 亚层内部中相邻东、西、南、北钻孔中出现的数量大于 40%且各钻孔中出现的深度差异小于 2m 时, 划分连续分布或不连续分布的次亚层(如图 10 和图 11 所示), 或根据工程需要单独划分为一层(厚度不大的一层)。

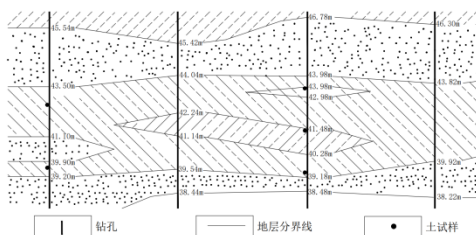


图 10 地层不连续分布

Fig. 10 Distribution of stratigraphic discontinuities

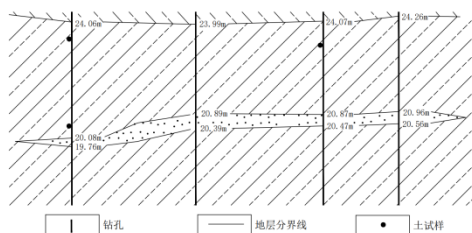


图 11 地层连续分布

Fig. 11 Continuous distribution of strata

工程物理力学特性包括颜色、压缩模量（粉土及黏性土）、标贯击数（砂土）、剪切波速（碎石土）、风化程度等。地层根据工程物理力学特性的划分规则如下：

（1）颜色

黏性土、粉土及砂土，若超过 60% 钻孔呈现棕红、褐黄、灰、黑等颜色差异且厚度大于 1m 时，可根据颜色差异细分。

（2）压缩模量

黏性土和粉土，厚度大于 5m 且由浅到深压缩模量呈现较大差异（压缩模量差异 2 倍以上，或者参照北京规范的压缩性，也可以两级压缩性可合并为一层，如高+中高，中高+中，中+中低，中低+低）时，可根据压缩模量大小（同一层压缩模量大小差异 2 倍以内）进行地层细分。

（3）标贯击数

砂土厚度大于 5m 且由浅到深超过 60% 钻孔标贯击数差异较大（松散、稍密、中密、密实等不同密实程度，或均为密实，标贯击数差异 2 倍以上，或者参照前述的两个等级可合并原则，如松散+稍密，稍密+中密，中密+密实，密实的可以不再细分）时，可将不同密实程度砂层细分。未进行标贯测试钻孔，可根据周边实则标贯钻孔的分层厚度及标高，结合野外记录，遵循上下起伏 2m 的原则进行分层。

（4）剪切波速

碎石类土厚度大于 5m 且实测钻孔剪切波速值差异较大（稍密-波速值小于 300、中密-波速值介于 300 和 400 之间、密实-波速值大于 400）时，可依据实测波速差异，将不同密实程度卵石层细分。未测剪切波速的钻孔，可根据周边实则剪切波速钻孔的分层厚度及标高，结合野外记录，遵循上下起伏 2m 的原则进行分层。

（5）无上述差异

相同岩性土层不具备上述差异且地层厚度较大（大于 10 米）时，可根据野外记录，“均等”分为两大层。

根据以上地层的划分规则对地层划分进行优化调整，在亚层划分的基础上进一步划分为次亚层。

1.2 标准地层层序建立

1.2.1 地层从属关系

在构建标准地层层序的过程中，首先根据地层从属规则对地层之间的从属关系进行分析，规则如下：

（1）地层分布连续且厚度大于 3m 判定为亚层；地层分布不连续或厚度小于 3m 判定为次亚层。

（2）土层内部的亚层从属于该土层；两个土层交界处的亚层，可根据岩性、颜色相近原则，确定与土层的从属关系。原则上存在细粒土与粗粒土差异时，细粒土亚层从属于细粒土土层，粗粒土亚层从属于粗粒土土层；存在颜色差异时，亚层从属于与其颜色相同的土层。

1.2.2 地层层级排序

地层层级排序是实现钻孔地层自动标准化的核心步骤，这一过程对于地质研究至关重要，因为它直接影响地层在地质时间尺度上的逻辑顺序和空间分布的准确性。以下是地层层级排序的详细规则：

（1）处理土层和亚层时，遵照反映地层新老次序的原则进行地层编码，形成时代早的岩土层层序在下，层序序号大，形成时代晚的岩土层层序在上，层序序号小（全霄金等, 2016；谭秀全等, 2024）。

（2）处理同一亚层内的多个次亚层时，根据次亚层的平面分布范围从小到大进行

排序。

通过该排序规则，可以确保地层数据的连续性和一致性，为地质建模和工程应用提供准确的地层信息。

1.2.3 地层层级编码

本研究建立了一套详细的地层编码算法，旨在实现地层数据标准化处理。该编码算法充分考虑了地层的时代、成因、岩性、等特征，确保每个地层都能获得唯一且准确反映其地层特征的编码。以下是编码规则的具体实现：

(1) 编码结构：地层编码采用“**大层编码-亚层编码-次亚层编码**”的三级结构（如图 12 所示），每级编码一般不超过两位数字，确保编码的简洁性和易读性(苟富刚等, 2018)。例如，地质时代为第四纪沉积层，粗分岩性为黏土，细分岩性为淤泥的地层，其编码为“1-2-1”，“1”表示第四纪沉积层大层，亚层编码“2”表示黏土亚层，次亚层编码“1”则代表该亚层中的淤泥次亚层。

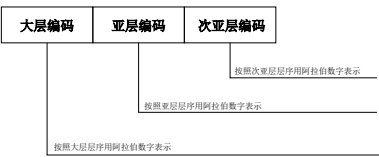


图 12 编码形式

Fig. 12 Coding Forms

(2) 大层编码：根据地层的地质时代进行初步划分，并为每个大层分配一个唯一的大层编码。

(3) 亚层编码：在大层编码的基础上，根据地层的岩性、成因等特征进行亚层划分，并为每个亚层分配一个亚层编码。亚层编码在大层编码后追加，以区分同一大层内的不同亚层。

(4) 次亚层编码：在亚层编码的基础上，进一步根据地层的颗粒级配(Ip)、工程物理力学特性等特征进行次亚层划分，并为每个次亚层分配一个次亚层编码，次亚层编码在亚层编码后追加。

(5) 透镜体处理：透镜体作为独立的地层单元，当程序识别出透镜体时，会对透镜体进行标识。例如，程序在亚层细分

过程中识别出透镜体时，会将该地层标记为透镜体，并且将该地层跳出编码程序，以防止影响其他地层划分的准确性以及连续性。

通过整合编码算法输出的地层编码，按照各级编码的数字大小从小到大进行排序，即可得到标准的地层层序。

1.3 钻孔原始分层标准化

地层编码标准化是指依据标准地层层序，对钻孔原始分层进行更新编码（如图 13 所示）。编码标准化包含以下几个关键环节：

(1) 对照标准地层层序：以标准地层层序作为参考。这个层序通常基于地质时代、成因、岩性等综合因素确定，并具有唯一性。

(2) 更新地层编码：按照标准地层层序，从上至下逐层更新地层编码。对于每个地层，根据其地质特征和标准层序中的对应层，赋予新的编码。这一步骤将传统的、可能不统一的地层编码系统转换为一个标准化的编码系统，以确保地层数据的一致性和可对比性。

(3) 得到标准化结果：最终得到一套更新后的、标准化的地层编码，这些地层编码基于同一套标准地层层序。

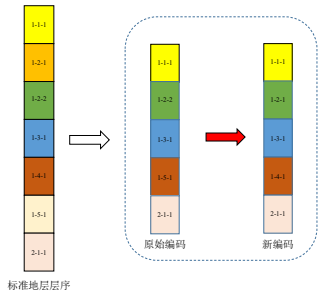


图 13 地层编码标准化

Fig. 13 Standardization of stratigraphic codes

2 实验设计与数据集

2.1 实验数据

本研究采用 34 个均匀分布于厦门市乎中央西路钻孔数据进行实验。钻孔数据包含地质年代、地层岩性、孔口标高等信息，并且以 excel 数据格式输入到程序中进行处理。实验区采用的钻孔地层数据包含了素填土、杂填土、黏土等主要粗分岩性以及残积砾质

粘性土、淤泥、块石杂填土等主要细分岩性，因此具有多样性，能够较好地作为地层自动标准化实验的数据基础。

为了实现地层自动标准化，本研究采用了武汉智图云起科技有限公司的开发平台，使用 TypeScript 语言开发了孔岩土分层自动标准化程序。该程序能够根据钻孔基本信息数据和钻孔原位测试数据自动生成标准地层层序，进而实现地层编码的标准化。特别地，算法针对透镜体地层进行了处理，以满足工程项目对钻孔地层标准化的精确要求。

2.2 实验设计

2.2.1 评估指标

实验的核心是比较程序自动标准化方法与传统手动标准化方法的结果。评估标准包括标准化效率、准确性和一致性。具体如下：

(1) 效率评估：效率评估通过计算两种方法完成标准化所需的时间来衡量。公式表示为：

$$\eta = \frac{T}{N} \times 100\% \quad (1)$$

其中： η 为处理效率， T 为总处理时间（秒）， N 为总钻孔数量。

(2) 准确性评估：准确率评估通过比较标准化结果与专家手动标准化结果的一致性计算。准确率反映了方法标准化结果的正确性。准确率定义为：

$$A = \frac{C}{N} \times 100\% \quad (2)$$

其中： A 为准确率， C 表示编码一致的钻孔数量。

(3) 一致性评估：一致性评估用于衡量标准化结果在不同钻孔数据间的一致性程度。它反映了标准化方法在处理不同钻孔数据时的稳定性和可靠性。进行多次标准化处理（如在不同时间或由不同人员操作），比较每次处理结果的编码一致性。公式表示为：

$$P = \frac{1}{K \times N} \sum_{i=1}^K C_i \times 100\% \quad (3)$$

其中： P 为一致性， C_i 表示第 i 次处理中编码一致的钻孔数量， K 表示处理次数。

2.2.2 实验流程

实验主要分为数据输入、标准化以及结果比较三个步骤。

(1) 数据输入：将预处理后的钻孔地层数据导入到自动标准化程序中。

(2) 自动标准化处理：运行自动标准化程序，记录程序运行的时间和标准化结果。

(3) 手动标准化处理：通过传统的手动标准化方法，对同一地层数据进行地层划分和编码，记录手动处理的时间和结果，分为专家手动标准化与实验手动标准化（专家手动标准化结果为正确的编码结果）。

(4) 结果比较与评估：比较自动标准化结果与手动标准化结果的各项评估指标，分析自动标准化方法的性能和优势。

2.3 实验结果

实验结果如表 2 和图 14 所示。图 14 直观地展示了在效率方面自动标准化方法平均 1 秒钟处理一个钻孔，相比于手动标准化提高了 30 倍，能够大幅缩短处理时间，提高工作效率。

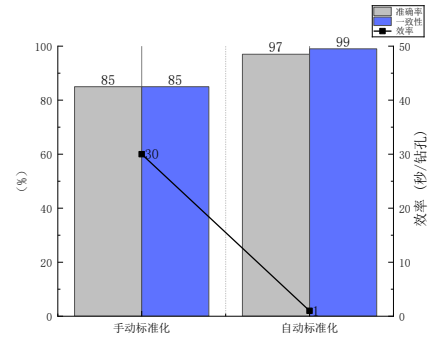


图 14 标准化结果

Fig.14 Standardised results

在准确率方法，自动标准化的准确率达到 97%（如表 3 中两个钻孔的地层为例，各地层标准化后的地层级别编码与专家标准化的编码结果基本一致），相比于手动标准化，提高了 12%，这表明自动标准化能更为准确地反映地层特征。

此外，自动标准化在一致性方面达到 99%，相比于手动标准化具有较大提升，这

反映出自动标准化方法更具一致性，减少了 题。
人为因素或操作差异导致的编码不一致问

表 2 标准化结果对比表

Table 2 Comparison table of standardised results

指标	自动标准化	手动标准化
η	1	30
A	97	85
P	99	85

表 3 自动标准化结果

Table 3 Automatic standardisation results

钻孔编号	层底标高 (m)	地质时代	粗分岩性	细分岩性	原始地层编 码	地层标准编 码
III-14-45- ZK32_2017-021	-14.1	第四纪沉积层	粘性土	残积砾质粘性 土	11-2	1-1-1
III-14-45- ZK32_2017-021	-1.2	第四纪沉积层	黏土	淤泥	1-1	1-2-1
III-14-45- ZK32_2017-021	-1.9	第四纪沉积层	杂填土	块石杂填土	1-1	1-3-1
III-14-45- ZK32_2017-021	-8.6	第四纪沉积层	粉质粘土	粉质粘土	10-1	1-5-1
III-14-45- ZK32_2017-021	-19.7	中生代及以前 岩石	花岗岩	全风化花岗岩	17-1	2-1-1
III-13-45- ZK26_2017-021	-17.9	第四纪沉积层	粘性土	残积砾质粘性 土	11-2	1-1-1
III-13-45- ZK26_2017-021	-1.2	第四纪沉积层	杂填土	块石杂填土	1-1	1-3-1
III-13-45- ZK26_2017-021	-6.5	第四纪沉积层	素填土	素填土	1-2	1-4-1
III-13-45- ZK26_2017-021	-9.4	第四纪沉积层	粉质粘土	粉质粘土	10-1	1-5-1
III-13-45- ZK26_2017-021	-19.4	中生代及以前 岩石	花岗岩	全风化花岗岩	17-1	2-1-1

综合以上分析结果，自动标准化在效率、准确率和一致性这三个核心指标上均优于手动标准化。自动标准化不仅能够提高处理效率，还能有效提升编码的准确性和一致性，为地层标准化提供了更可靠、更高效的解决方案。

程序成功实现了地层编码标准化，建立了一套完整的地层编码体系，最终输出标准地层层序（如图 15 所示），相比于原始的标准地层层序更加层次有序。

地层编码	地质时代	粗分岩性	细分岩性	地层颜色	原始地层编码	粗分岩性	细分岩性
1-1-1	第四纪沉积层	粘性土	残积砾质粘性土		1-1	杂填土	杂填土
1-2-1	第四纪沉积层	黏土	淤泥		1-2	素填土	素填土
1-3-1	第四纪沉积层	杂填土	块石杂填土		10-1	粉质粘土	粉质粘土
1-3-2	第四纪沉积层	杂填土	杂填土		11-2	粘性土	残积砾质粘性土
1-4-1	第四纪沉积层	素填土	素填土		17-1	花岗岩	全风化花岗岩
1-5-1	第四纪沉积层	粉质粘土	粉质粘土				
2-1-1	中生代及以前岩石	花岗岩	全风化花岗岩				

图 15 标准地层层序

Fig. 15 Standard stratigraphic sequence

2.4 消融实验

2.4.1 实验目的

为了验证本文提出的钻孔地层自动标准化方法中部分关键地质规则的贡献，设计了消融实验，旨在探究去除部分关键规则后，对标准化结果的准确性、效率和一致性的影响。

2.4.2 实验方法

对照组：采用完整的自动标准化方法对测试钻孔数据进行标准化处理。

实验组 1：在自动标准化程序中去除地层粗分规则中的规则（5），即被不连续分布的其他岩性间隔分时，上下相同岩性分为同一个亚层，中间间隔的不同岩性地层分为该亚层的次亚层（记为规则 a），其他处理流程保持不变。

实验组 2：程序中去除细分规则中的一条：相同岩性地层标高差异较大且空间分布无规律，则可将“相邻岩性”的地层进行合并分层（记为规则 b），其他处理流程保持不变。

2.4.3 实验步骤

消融实验包括实验准备、程序修改、标准化处理、结果记录与分析四个步骤。

（1）数据准备：使用与原实验相同的数据集。

（2）程序修改：在自动标准化程序的代码中，注释掉相关地质规则的代码模块。

（3）标准化处理：分别运行对照组和实验组的自动标准化程序，记录处理时间和输出结果。

（4）结果记录与分析：详细记录各实验的标准化结果以及处理时间，再通过对比各评估指标进行分析。

2.4.4 实验结果

消融实验结果如表 4 和图 16 所示。实验组 1 中,移除规则 a 后,准确率下降至 80%，这可能是由于不连续分布岩性间隔的处理方式改变，导致部分地层划分出现偏差。

实验组 2 中,移除规则 b 后，准确率下降至 78%，这可能是由于在处理标高差异较大且空间分布无规律的相同岩性地层时，地层划分过于细致，导致部分地层被错误地划

分为多个亚层。

实验组 1 和 2 中效率与一致性均基本保持不变。这表明自动化的标准化方法能够确保较好的效率以及一致性。

表 4 消融实验结果

Table 4 Results of ablation experiments			
评估指标	对照组	实验组 1	实验组 2
η	1	1	1
A	97	80	78
P	99	98	98

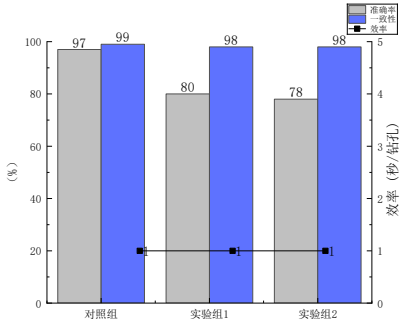


图 16 消融实验结果

Fig. 16 Results of ablation experiments

2.4.5 讨论与分析

通过消融实验，我们验证了规则 a 和规则 b 对地层自动标准化效果的重要贡献。规则 a 在处理不连续分布岩性间隔时起着关键作用，确保了地层划分的连续性和一致性；而规则 b 则在处理标高差异较大且空间分布无规律的相同岩性地层时，有助于简化地层划分。未来研究将进一步探索如何优化这些规则，以适应更复杂的地质条件。

3 结论

本文提出了一种基于地质规则驱动的钻孔地层自动标准化方法，通过建立地质规则模型，自动识别和处理地层数据中的透镜体，实现地层数据的高效标准化。该方法能够自动识别地层中的透镜体并进行处理，基于地层划分、排序、编码算法自动地对输入的钻孔地层数据进行标准化处理。

通过实验验证，该方法能够较好地识别处理透镜体现象，并且排除人为因素的干扰，能有效地提高地层标准化地效率、一致性以及有效性。此外，本研究设置了消融实验，实验验证了本研究提出的粗分规则与细分

规则对标准化准确率提升的有效性。因此,该方法能够为钻孔剖面连层、三维地质建模等钻孔数据利用,提供更科学高效的工具和手段,促进了对地下空间结构的研究。然而,本方法仍存在一些不足之处:

(1) 本研究中实验采用的钻孔数据较少,处理大量钻孔数据时确保标准化的性能仍然存在挑战,需要继续对标准化方法进行优化。

(2) 在地质结构、地层现象更加复杂的区域,方法的适用性仍需验证。因此,需要不断地进行复杂区域的实验以及进行算法完善,以使其更好地识别和处理特殊地层现象。

References

- Ahmad, S., Khan, S., Wadood, B. et al 2021. Late Cretaceous pelagic laminites at the northwestern margin of Indian plate, Pakistan: implications for basin bathymetry and ophiolite emplacement. *Carbonates and Evaporites*, 36(2): 32
- Didi, C. N., Osinowo, O. O., Akpunonu, O. E. et al, 2025. Biostratigraphy, palynostratigraphy, sequence stratigraphy, and structural interpretation of Kolmani field, Gongola sub-basin, Upper Benue Trough, Nigeria. *Marine and Petroleum Geology*, 175: 19
- Du, Y. N., Li, C. J., Zhu, H. Y., et al, 2023. Geotechnical standard stratigraphic sequence delineation in Xiongan New Area. *Geological Bulletin*, 42(09): 1494-1504 (in Chinese with English abstract)
- Gibbard, P. L., Hughes, P. D., 2021. Terrestrial stratigraphical division in the Quaternary and its correlation. *Journal of the Geological Society*, 178(2): 19
- Gou, F. G., Gong, X. L., Mei, Q., 2018. Delineation of engineering geological stratigraphic groups of soils in the north coast of Yangtze River Delta and its application. *Geological Review*, 64(01): 237-245 (in Chinese)
- Han, B., Xia, Y. B., Ma, Z., et al, 2023. Delineation of engineering geological stratigraphic groups, construction of three-dimensional geological structure and its application in urban planning and construction of Xiong'an New Area. *China Geology*, 50(06): 1903-1918(in Chinese with English abstract)
- Hua, W. H., Guo, D. Y., Liu, X. G., et al, 2023. Unified correction and connection method of stratigraphic sequences with complex inversion. *Earth Science*, 48(04): 1532-1542(in Chinese with English abstract)
- Li, C. L., Zhang, H., Zhu, L. F., 2013. Algorithm for true 3D modelling of geological bodies containing lenticular bodies. *Computer Engineering and Design*, 34(09): 3103-3106(in Chinese with English abstract)
- Li, C., Liu, X. L., Han, X. H., 2022. Research and application of stratigraphic sequences delineation and three-dimensional modelling technology for foundation soil. *Journal of Underground Space and Engineering*, 18(S1): 179-186 (in Chinese with English abstract)
- Li, F., Xu, K., Ding, Y. T., et al, 2019. Research on the delineation of Quaternary standard stratigraphy in Xuzhou. *Energy and Environmental Protection*, 41(12): 75-83+87(in Chinese with English abstract)
- Li, L. X., Li, X. X., 2019. Interpretation of Shandong Province Engineering Construction Standard 'Jinan City District Geotechnical Engineering Investigation Stratigraphic Sequence Delineation Standard'. *Engineering Construction Standardisation*(06): 55-57 (in Chinese)
- Li, Q. M., Tang, H. M., 2019. A preliminary framework for a standard geotechnical stratigraphic

- sequence. *Journal of Engineering Geology*, 27(05): 1188-1198 (in Chinese with English abstract)
- Liang, D. Y., Xu, G. Q., Xiao, Y., et al, 2021. Standard Neoproterozoic-Quaternary stratigraphy and assemblage partitioning in Jiangdong New Area, Haikou. *Science, Technology and Engineering*, 21(26): 11052-11063(in Chinese with English abstract)
- Lin, X. C., 2019. Research on geotechnical stratigraphy division standard for municipal engineering investigation - taking the southeast coastal riverside plain area as an example. *China Municipal Engineering* (06): 83-88+108 (in Chinese)
- Liu, L. J., Xu, H. Z., Cui, Q. P., et al. 2010. A study on the delineation of Quaternary stratigraphy in Hebei Plain. *Geography and Geographic Information Science*, 26(02): 54-57 (in Chinese)
- Liu, L. Q., He, Q. L., Ma, Y. F., 2022. Standard stratigraphic delineation of Jinan and its application in municipal engineering. *Urban Surveying* (03): 196-198 (in Chinese)
- Li, J. G., Rao, X., Mu, L. et al, 2024. Jurassic integrative stratigraphy, biotas, and paleogeographical evolution of the Qinghai-Tibetan Plateau and its surrounding areas. *Science China-Earth Sciences*, 67(4): 1195-1228
- Mohamed, T., Abelbaset, S. E.-S., Khaled, A.-K., 2023. Facies Associations and Sequence Stratigraphy of the Toarcian Marrat Formation (Saudi Arabia) and Their Equivalents in Some Gondwanaland Regions. *Journal of Earth Science*, 34(1): 242-259
- Muhammad, A., Bilal, W., Muhammad, I. et al, 2024. Depositional and Bio-Sequence Stratigraphic Framework of Late Cretaceous Kawagarh Formation, Kala-Chitta Range, Pakistan: Equivalent of Gurpi Formation (Iran). *Journal of Earth Science*, 35(2): 332-348
- Seyed Ahmad, B., Taiebeh Esmacili, D., 2015. Stratigraphical Study of the Taft Formation in the Bohruk Area from Yazd Block, Central Iran. *Journal of Earth Science*, 26(5): 729-739
- Su, H. M., Shi, S. M., Xiao, X., et al, 2022. Detailed stratigraphy of Quaternary standard stratigraphy in Qingcheng District, Qingyuan City, China. *Resource Information and Engineering*, 37(05): 12-16(in Chinese with English abstract)
- Tan, X. Q., Hu, B., Xu, S. M., et al, 2024. Standard stratigraphic delineation for geotechnical investigation in the main urban area of Jining City, Shandong Province. *Urban Geology*, 19(04): 521-528(in Chinese with English abstract)
- Tian, C., Lu, X. Z., Liu, Z. J., et al, 2024. Standard stratigraphic delineation of Changsha urban area and its application in urban operation. *Urban Surveying*(06): 200-203+208 (in Chinese)
- Tong, X. J., Cheng, A. H., Fan, H. C., 2016. Research on standard stratigraphic delineation of urban area in Jinan. *Urban Surveying* (02): 165-171 (in Chinese)
- Wang, S., Yan, B., Sun, Y. et al, 2025. Discriminator-based stratigraphic sequence semantic augmentation seismic facies analysis. *Computers & Geosciences*, 196: 105828
- Wu, F., Xie, X. N., Zhu, Y. H. et al, 2021. Sequence stratigraphy of the Late Oligocene carbonate system on the Xisha Islands in the South China Sea. *International Journal of Earth Sciences*, 110(5): 1611-1629
- Wang, J. W., Tong, Z. Q., Song, L. X., et al, 2021. Study on the division and zoning of engineering geological stratigraphic groups in Mudanjiang City. *Urban Geology*, 16(03): 267-275(in Chinese with English abstract)
- Wang, L. J., LIU, X. M., Ye, Q. Q., 2023. Standard stratigraphic delineation and application of Quaternary in Hangzhou. *Foundation Treatment*, 5(S1): 153-160(in Chinese with English abstract)

- Wang, P., 2021. Analysis of stratigraphic delineation criteria and principles in geotechnical investigation. *West Prospecting Engineering*, 33(02): 26-28 (in Chinese)
- Xu, C., Xu, W. H., Wu, S. L., 2022. Application of soil layer standardisation in Zhenjiang area. *Urban Surveying* (05): 194-199 (in Chinese)
- Zhang, Y. L., Pang, C., Hu, J. B., et al, 2023. Research on geotechnical stratigraphy classification standard for engineering investigation - A case study of Jiao Lai Plain denudation quasi-plain area. *Western Resources* (04): 6-11. (in Chinese)
- 附中文参考文献
- 杜亚楠, 李传金, 朱辉云, 等, 2023. 雄安新区岩土标准地层序列划分. *地质通报*, 42(09): 1494-1504
- 苟富刚, 龚绪龙, 梅芹芹, 2018. 长江三角洲北岸土体工程地质层组划分及其应用. *地质论评*, 64(01): 237-245
- 韩博, 夏雨波, 马震, 等, 2023. 雄安新区工程地质层组划分、三维地质结构构建及其在城市规划建设中的应用. *中国地质*, 50(06): 1903-1918
- 花卫华, 郭丹阳, 刘修国, 等, 2023. 含复杂倒转的地层层序统一修正与连接方法. *地球科学*, 48(04): 1532-1542
- 李昌领, 张虹, 朱良峰, 2013. 含透镜体的地质体真三维建模算法. *计算机工程与设计*, 34(09): 3103-3106
- 李超, 刘晓磊, 韩晓辉, 2022. 地基土层序划分及三维建模技术研究与应用. *地下空间与工程学报*, 18(S1): 179-186
- 李锋, 徐坤, 丁运涛, 等, 2019. 徐州市第四纪标准地层划分研究. *能源与环保*, 41(12): 75-83+87
- 李连祥, 李欣欣, 2019. 山东省工程建设标准《济南市区岩土工程勘察地层层序划分标准》解读. *工程建设标准化*(06): 55-57
- 李清明, 唐辉明, 2019. 一个标准岩土地层序列的初步框架. *工程地质学报*, 27(05): 1188-1198
- 梁定勇, 许国强, 肖瑶, 等, 2021. 海口江东新区新近纪-第四纪标准地层与组合分区. *科学技术与工程*, 21(26): 11052-11063
- 林晓春, 2019. 市政工程勘察岩土地层划分标准研究——以东南沿海滨江平原地区为例. *中国市政工程*(06): 83-88+108
- 刘立军, 徐海振, 崔秋苹, 等, 2010. 河北平原第四纪地层划分研究. *地理与地理信息科学*, 26(02): 54-57
- 刘立群, 何巧灵, 马玉飞, 2022. 济南标准地层划分及其在市政工程中的应用. *城市勘测*(03): 196-198
- 苏和明, 师胜梅, 肖熙, 等, 2022. 清远市清城区第四纪标准地层详细分层研究. *资源信息与工程*, 37(05): 12-16
- 谭秀全, 胡波, 徐书名, 等, 2024. 山东省济宁市主城区岩土工程勘察标准地层划分. *城市地质*, 19(04): 521-528
- 田聪, 陆新卓, 刘子捷, 等, 2024. 长沙市区标准地层划分及其在城市运营中的应用. *城市勘测*(06): 200-203+208
- 仝霄金, 程爱华, 樊祜传, 2016. 济南市市区标准地层划分研究. *城市勘测*(02): 165-171
- 王建伟, 佟智强, 宋林旭, 等, 2021. 牡丹江市工程地质层组划分与分区研究. *城市地质*, 16(03): 267-275
- 王林军, 刘雪梅, 叶向前, 2023. 杭州第四纪标准地层划分及应用. *地基处理*, 5(S1): 153-160
- 王攀, 2021. 岩土工程勘察作业中地层划分的标准及原则分析. *西部探矿工程*, 33(02): 26-28
- 许程, 徐为海, 吴晓亮, 2022. 镇江地区土层标准化应用. *城市勘测*(05): 194-199
- 张友林, 逢程, 胡建波, 等, 2023. 工程勘察岩土地层划分标准研究——以胶莱平原剥蚀准平原区为例. *西部资源*(04): 6-11