

基于岩性光谱特征的雄安新区地面古河道识别研究

张 竞¹⁾, 马 震¹⁾, 吴爱民²⁾, 白耀楠¹⁾, 夏雨波¹⁾

1)中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2)中国地质调查局, 北京 100037

摘 要: 雄安新区地面古河道与河漫滩岩性分别以砂土和黏性土为主, 两种岩性所含矿物成分对电磁波的反射率不同。将地表岩性调查与光谱采集分析相结合, 捕捉了这两种岩性在遥感影像中反射光谱的差异, 在此基础上识别了古河道, 并利用钻孔数据加以验证分析。结果表明: 雄安新区表层砂土和黏性土在 TM 影像 B5 波段的 DN 值差值最大, 该波段可作为识别河道砂体的必选波段; 综合考虑波段信息量、波段之间信息重复程度, R(4)G(5)B(1)组合下河道砂体的形迹清晰可辨; 钻孔数据与遥感解译结果吻合, 岩心揭露的古河道发育深度在 3.2~8.7 m 之间; 研究区古河道总体较发育, 河道宽度多在 0.5~2.0 km 之间, 多处分叉和汇聚后呈辫状河形态, 河网密度约 0.26 km/km²; 钻孔剖面显示河道地势高于河漫滩, 属条状高地型古河道, 河道有“游荡”痕迹; 古河道的发育位置控制着区内居民地的分布。

关键词: 古河道; 岩性; 遥感; 钻孔; 雄安新区

中图分类号: P531; T407.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2018.071003

A Study of Paleochannels Interpretation by the Spectrum of Lithology in Xiongan New Area

ZHANG Jing¹⁾, MA Zhen¹⁾, WU Ai-min²⁾, BAI Yao-nan¹⁾, XIA Yu-bo¹⁾

1) Tianjin Centre of China Geological Survey, Tianjin 300170; 2) China Geological Survey, Beijing 100037

Abstract: The paleochannels and floodplains in Xiongan New Area are mainly composed of sand and clay, respectively. Mineral composition of the two kinds of lithology shows difference in their spectral reflectance. In this paper, the approaches of field survey and spectral analysis were combined to detect the difference of spectral reflectance of sand and clay. On such a basis, paleochannels were interpreted and were proved by boreholes. According to results obtained, Landsat TM B5 has the largest difference of DN value between sand and clay, so it could be the preferred band to identify channel sand body. Considering the amount and repeatability of spectral information, optimal bands combination for identifying paleochannel is R(4)G(5)B(1); The boreholes show that the surface sand layer is 3.2~8.7 m thick in the interpreted paleochannel area, which fit together with the RS interpretation; On the whole, paleochannels in the study area are well developed in the form of braided river, the density of paleo river system is about 0.26 km/km², and the width of them ranges from 0.5 to 2.0 km; Borehole profile shows that the terrain of paleochannels is higher than that on both sides, so they could be classified as striped highland paleochannels; There are obvious traces of migration and diversion between rivers. The development of ancient rivers controls the distribution of residential areas.

Key words: paleochannel; lithology; remote sensing; borehole; Xiongan New Area

雄安新区是继深圳经济特区和上海浦东新区之后又一具有全国意义的新区(孟广文等, 2017), 未来数年将面临大规模的工程建设和地下空间开发。

新区总体地质条件优越, 但也存在工程建设的不利因素。区内及周边发育众多地面古河道(吴忱, 1984), 地震时这些古河道存在砂土液化和震害等隐患(胡

本文由中国地质调查局项目“雄安新区水土质量与工程地质调查评价”(编号: DD20189122)资助。为中国地质调查局、中国地质科学院 2017 年度地质科技十大进展第七名“多要素多技术城市地质调查有力支撑雄安新区总体规划编制”的成果之一。

收稿日期: 2018-07-04; 改回日期: 2018-07-08; 网络首发日期: 2017-07-11。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张竞, 男, 1986 年生。工程师。主要从事水文地质研究。E-mail: TJCGSZJ@163.com。

镜荣和石凤英, 1983; 吴忱, 1985, 1987, 2002, 2008; 史玉金等, 2017), 目前, 这些古河道的分布位置和形态尚不清楚, 亟待查明。

古河道的识别方法丰富多样, 早期以历史文献查阅、地形图判读、野外考察访问等方法为主, 在不断的创新中发展了航片、卫星影像解译, 钻探, 物探, 取样分析测试等新方法(赵艳霞等, 2013)。卫星遥感技术作为古河道研究的重要手段, 具有快速、宏观性强的优势。印度遥感勘测 IRS 卫星影像被用于圈定印度古 Cauvery 河(Mohammed et al., 2002)和西恒河平原(Samadder et al., 2011)的古河道范围; Landsat ETM+卫星影像发现在沙特阿拉伯和伊拉克南部地区, Shatt Al-Arab 河流的西侧和东侧分别发育 2 条和 3 条蛇曲形古河道, 并认为这些古河道可以解释当地的古灌溉系统(Almulla et al., 2011); Landsat 2 和 Landsat 3 卫星影像识别出永定河的 3 条古河道和对应的 3 个冲积扇(张福堂, 1986); Landsat TM 卫星影像发现了安徽肥西县将军岭附近的一段古河道遗迹, 并认为该古河道是古江淮运河的一部分(高超和金高洁, 2009)。

综观已有研究, 古河道遥感解译的标志主要有 2 类: 第 1 类是河道的微地貌形态, 包括蛇曲形

(王贵明和董裕国, 1997; Almulla et al., 2011), 线状、断续线状(张福堂, 1986), Y 字形河型(Samadder et al., 2011)等; 第 2 种标志是古河道的衍生规律, 如居民地、耕地沿古河道的定向排列(秦磊等, 2008), 古河道区植被长势与周边地区的差异(吴爱琴等, 2002; 高超和金高洁, 2009)等。事实上, 这两种标志均属于间接解译标志, 在雄安新区, 人类活动较强烈, 古河道的微地貌形态不完整, 耕地、植被等的分布受社会经济因素影响, 在该地区利用间接标志难以准确识别古河道。综上, 有必要寻找更直接的古河道解译标志捕捉古河道的痕迹。本文从河道的岩性入手, 分析雄安新区河道与非河道岩性的差异在遥感影像上的光谱反映, 在此基础上对古河道进行识别, 并对解译的古河道进行钻孔验证。

1 研究区概况

雄安新区地处北京、天津、保定腹地, 涉及河北省雄县、容城、安新 3 县及周边部分区域。地势西北高、东南低, 地形坡降小于 2‰。新区西北部距离太行山区不足 30 km, 河流由出山口进入平原后能量得以释放, 形成了发达的水系网。新区北侧发育南拒马河、大清河、白沟河等, 西侧发育萍河、

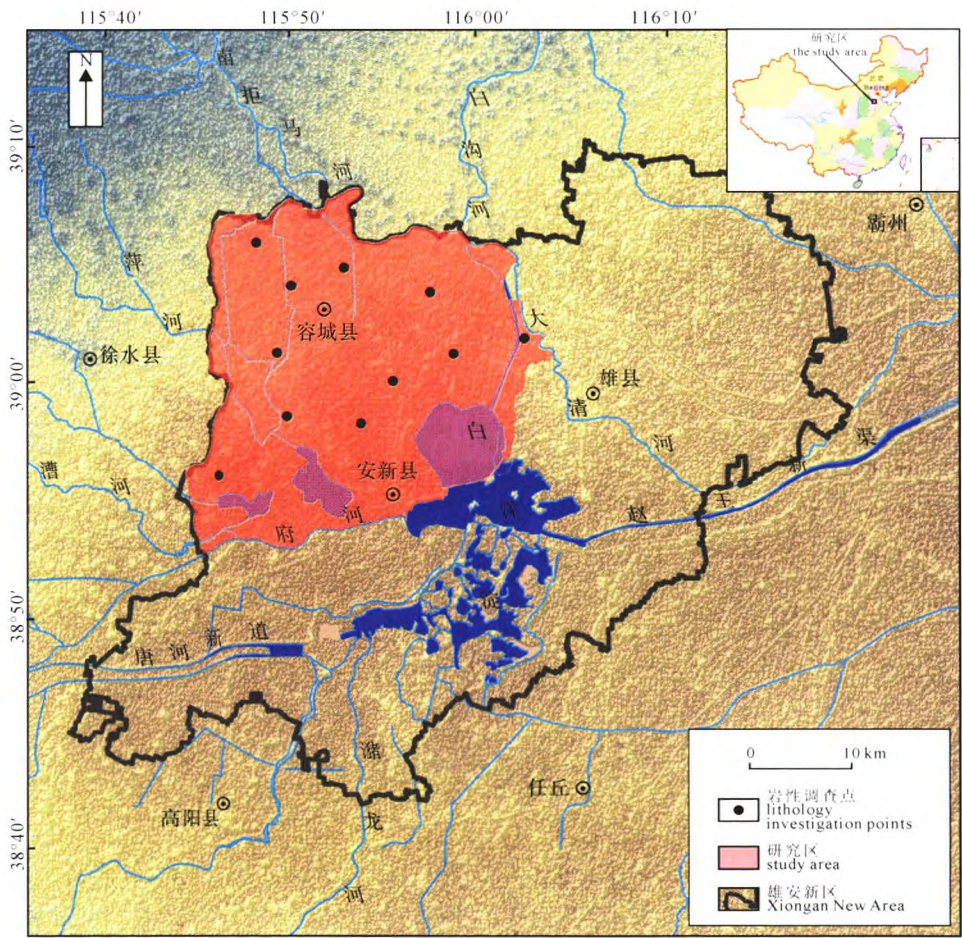


图 1 研究区地理概况及岩性调查点位置
Fig. 1 The characteristics of natural geography in the study area and the location of lithology investigation points

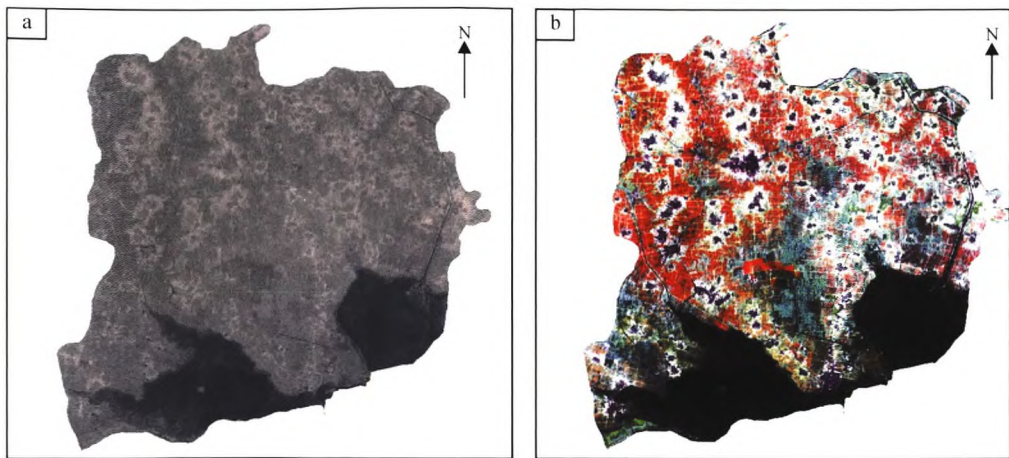


图 2 研究区 Landsat TM 彩色合成影像

Fig. 2 Landsat TM colour composite image of study area

a-Landsat TM R(3)G(2)B(1)真彩色; b-Landsat TM R(4)G(5)B(1)高斯拉伸
a-Landsat TM R(3)G(2)B(1) true colour; b-Landsat TM R(4)G(5)B(1) Gauss stretch

漕河、府河等,数十条河流汇于华北平原最大的淡水湖泊——白洋淀(王凯霖等,2017)(图 1)。本研究选择新区西北部作为研究区开展古河道识别研究,范围包括容城县全境及府河以北的安新县,经度范围 $115^{\circ}44'06''$ — $116^{\circ}04'01''$,纬度范围 $38^{\circ}52'44''$ — $39^{\circ}08'18''$,这一地区水系密集发育,是白洋淀的重要来水区域,区内浅层沉积物主要为第四纪以来冲洪积、冲积和冲湖积形成,岩性以粉质黏土、粉土、粉砂、中细砂和黏土为主(易先进,2015)。

2 古河道的识别

2.1 利用岩性光谱特征识别古河道的理论依据

华北平原的古河道在河道形成阶段,河水与河床相互作用形成厚层砂体(胡镜荣和石凤英,1983),其主要矿物成分为石英、长石等,属浅色矿物,在遥感反射光谱中呈高反射率。古河道两侧是河漫滩,其物源来自河流泛滥、风力等营力形成的黏土、亚黏土,主要矿物成分以铁、镁质深色矿物为主,在遥感反射光谱中呈低反射率(梅安新,2001)。这些矿物成分在反射率上的差异,导致河道与河漫滩在遥感影像中可能存在色差,因此,利用岩性光谱特征对古河道进行遥感识别具有可行性。

2.2 遥感数据的选择和预处理

基于岩性光谱解译古河道的前提条件是裸露的地表,因此,应尽可能选择地表裸露程度高的影像。首先,应选择冬季影像,12月至3月最佳,避免植被对表土的覆盖;其次,应选择早期影像,如上世纪七、八十年代的影像,减少居民地、工业等建设用地大面积扩张的干扰;在此基础上,尽可能选择光谱分辨率和空间分辨率高、云量低的数据,利于分离岩性光谱信息。按以上原则经过大量对比后选择美国 Landsat 卫星 TM 传感器 1989 年 3 月 7 日

数据一景(图 2a),行列号为 123/33,空间分辨率 30 m,包括 3 个可见光波段(B1, B2, B3)、1 个近红外波段(B4)、2 个中红外波段(B5 和 B7)和 1 个热红外波段(B6),本研究中不涉及该波段)(Pardo-Pascual et al., 2012)。利用 1:5 万地形图对遥感影像进行几何校正,并用研究区范围矢量数据裁剪后得到研究区遥感影像。

2.3 砂土、黏性土反射光谱采集和分析

为了在遥感影像上区分砂体和黏性土体,首先开展地表岩性调查,并分析砂土和黏性土在 TM 影像上的反射光谱特征,此步骤对解译结果的准确性至关重要。岩性调查点位置覆盖全区并均匀分布(图 1),利用 GPS 记录调查点的坐标,判定岩性时避开地表耕植土和人工填土,充分利用已有剖面、坑塘露头,必要时开展人工浅钻,确保岩性定名准确。考虑到影像空间分辨率为 30 m,调查点周围 60 m 范围内尽可能空旷,避免混合像元对岩性光谱的干扰。调查点总计 11 个,分为砂土和黏性土两大类,

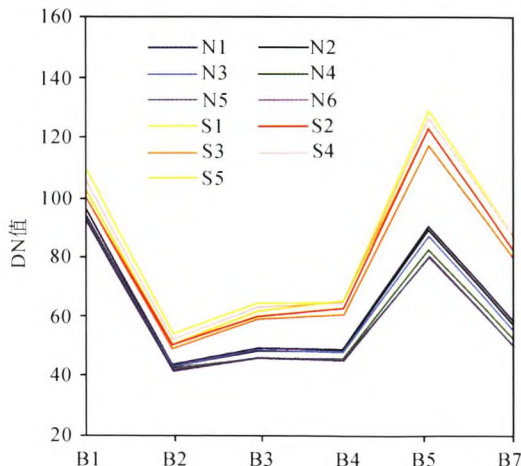


图 3 野外岩性调查点的反射光谱曲线

Fig. 3 The curve of the reflectance spectrum of the field lithology investigation points

表 1 研究区 TM 影像各波段的统计信息
Table 1 Statistics of TM bands of the study area

波段 Band	相关系数 Correlation						标准差 Std
	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band7	
Band1	1.00						3.47
Band2	0.87	1.00					2.16
Band3	0.78	0.91	1.00				3.16
Band4	0.52	0.72	0.87	1.00			3.73
Band5	0.26	0.50	0.69	0.88	1.00		10.41
Band7	0.30	0.53	0.71	0.84	0.96	1.00	7.53

分别 5 个和 6 个。

在 ENVI 5.1 软件中输出调查点在 TM 影像中的反射光谱曲线(图 3, S1-S5 为砂土调查点, N1-N6 为黏性土调查点), 所有调查点的 DN 值呈现一致的变化规律, 即在 B1、B5 呈高值而在 B2、B3、B4、B7 呈相对低值, 这说明所有调查点的物质类型较一致, 均为第四纪松散沉积物。但是, 砂土与黏性土的光谱又呈现出明显的分区规律, 即砂土的 DN 值均大于黏性土, 两者之间差值在 B5 最大, 同时在 B5、B7 的差异明显大于其余 4 个波段, 也就是说, 在这两个波段砂土和黏性土最易于分离。因此, 在利用假彩色影像解译古河道时, B5 为必选波段, 是否选择 B7 需进一步分析波段组合的信息量。

2.4 波段组合的选取

标准差能够表征各波段信息量的大小, 相关系数能够表征各波段之间信息的重复程度(武文波和刘正纲, 2007)。表 1 显示, B5、B7 的信息量最大, 但这两个波段相关系数亦为最大值 0.96, 说明 B5、B7 包含大量重复信息, 故选择 B5 而删除 B7。B2 信息量最小且对砂土和黏性土的可分离度最差(图 3), 亦可删除。剩余的 B1、B3 和 B4 在信息量和岩性可分离度方面差距不明显, 在此采用美国学者 Chavez 等(1982)提出的最佳指数因子 OIF(Optimum index factor)法确定最终的波段组合:

$$OIF = \sum_{i=1}^3 S_i / \sum_{i=1}^3 |R_{ij}| \quad (1)$$

式中 S_i 为第 i 波段的标准差, R_{ij} 为 ij 波段的相关系数。OIF 越大, 则波段组合的有效信息量越大。如表 2 所示, OIF 值最大的波段组合为 B5、B4 和 B1, 即在该波段组合下, 既能使砂土与黏性土的差异最大化, 又不损失过多有效信息, 为完整提取河道砂体奠定基础。

表 2 不同波段组合的 OIF 值

Table 2 The OIF values of different band combinations

波段组合 RGB	$\sum S_i$	$\sum R_{ij}$	OIF
531	17.04	1.74	9.79
541	17.61	1.67	10.55
543	17.30	2.45	7.06

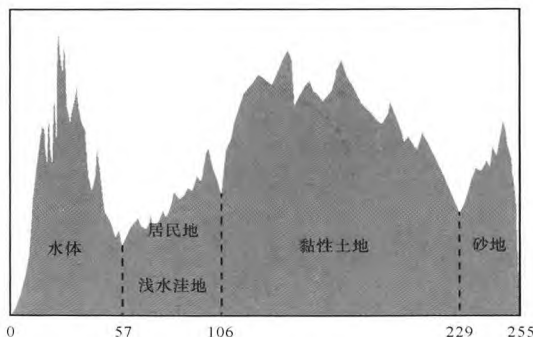


图 4 灰度直方图

Fig. 4 Gray-level histogram

2.5 古河道的识别

B5、B4、B1 按不同顺序进行 RGB 组合, 对比发现 R(4)G(5)B(1)组合视觉效果最好, 用 ENVI 软件中提供的 Guass 方法拉伸后得到假彩色合成图像(图 2b)。图 2b 大致包含 5 种色调: 黑色是水体, 包括白洋淀淀区、河渠、水塘等; 深蓝色斑块是居民地; 青蓝色不规则形状为浅水洼地; 红色为黏性土地; 白色为砂地, 是本次解译的主要目标。计算图 2b 的灰度直方图(图 4), 除了居民地和浅水洼地不易区分外, 砂体、水体和黏性土滩地之间分离度良好, 采用阈值分割方法由计算机自动提取砂体(图 5A)。

图 5A 中砂体的形态显示, 砂体以河道为主, 这些河道与区内的现代水系并不重合, 因此推测为古河道。结合图 2b 判断, 古河道之间发育一些大小不一的浅水洼地, 东部发育一个小型决口扇, 南部则为白洋淀淀区(图 5B)。

3 古河道的验证与分析

3.1 古河道的验证

为验证古河道的解译结果, 开展第四纪地层钻探。在垂直于古河道的方向部署横剖面 AA', 包括 C₁、C₂、C₃、C₄、C₅ 5 个钻孔, 其中 C₂、C₄ 部署在解译古河道上, C₁、C₃、C₅ 部署在古河道间滩地上; 在顺古河道流动的方向部署纵剖面 BB', 包括 L₁、C₄、L₂ 3 个钻孔, 均部署在解译古河道上(图 5B)。钻探采用 XY-150 型钻机, 孔径 110 mm, 采集沉积物岩芯, 取芯深度 10 m, 现场由专业地质人员进行编录, 并整理绘制钻孔柱状图(图 6), 终孔前进行孔口 RTK 高程测量, 以上工作在 2017 年 6 至 7 月完成。

对比图 5B 和图 6, 各钻孔垂向上的岩性特征与其所在的解译分区有较好的对应关系。例如解译古河道上的 4 个钻孔(C₂、C₄、L₁、L₂)岩心均呈砂层/黏性土层二元结构, 表层砂层以细砂、粉砂和黏土质粉砂为主, 厚度 3.2~8.7 m; 古河道间滩地上的 3

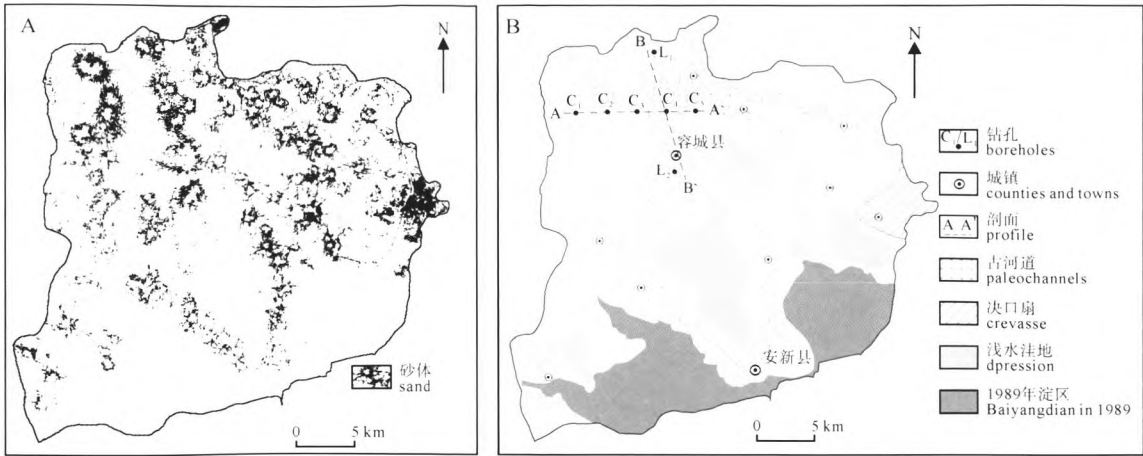


图 5 古河道解译结果及验证钻孔分布
Fig. 5 The interpreted paleochannels and the location of boreholes
A-提取的砂体; B-古河道解译结果及钻孔分布
A-interpreted sand body; B-interpreted paleochannels and verification boreholes

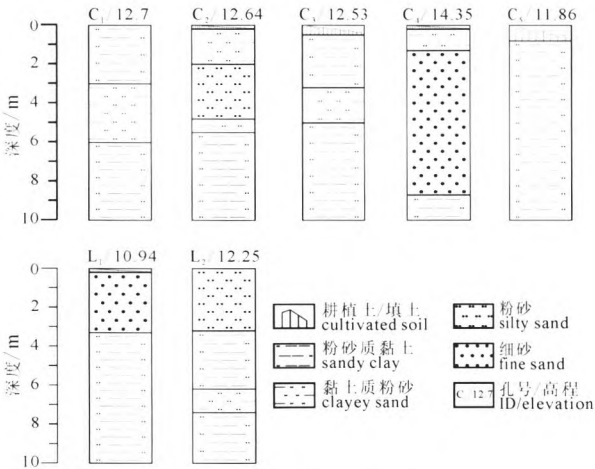


图 6 钻孔柱状图
Fig. 6 The columnar section of boreholes

个钻孔(C₁、C₃、C₅)岩心呈黏性土单层或黏性土夹砂层结构,黏性土层总厚度7.0~10.0 m。综上,钻孔岩心与遥感解译结果吻合。

3.2 古河道的形态特征分析

根据遥感解译和钻孔成果(图 5B 和图 6),研究区古河道较发育,古河网密度约 0.26 km/km²,总体流向自西北向东南。区内古河道宽而浅,河道宽度一般在 0.5~2.0 km 之间,钻孔揭露河道深度 3.2~

8.7 m,宽/深比值均大于 50,河道多次分叉和汇聚,构成辫状。

横剖面 AA'显示,C₄所在古河道地势明显高于河道两侧,C₂孔所在古河道高程虽略低于西侧的 C₁孔,但从 C₁到 C₃的整体地面坡度看,C₂仍表现为微弱凸起,因此推断区内古河道以条状高地型古河道为主,也就是华北平原常见的地上河(胡镜荣和石凤英,1983)(图 7A)。纵剖面 BB'显示,河道高程并非沿着河流流动方向逐渐降低,而是在 C₄处有明显抬升后逐渐降低(图 7B),对比图 5B 推测,C₄-L₂段河道很可能在后期又接受了由东侧贾光乡一带迁移过来河道的沉积而加积变高,造成早期河道在 C₄处“逆流而上”的假象,这也体现出辫状河“游荡性”的特征。古河道成为早期居民依高而就的理想场所,区内主要城镇均位于古河道高地上。

4 结论

河道与河漫滩岩性分别以砂土和黏性土为主,两种岩性的矿物成分对电磁波的反射率不同。在野外控制性岩性调查的基础上,分析了雄安新区表层砂土和黏性土的反射光谱差异,发现 TM B5 对这两种岩性最敏感,R(4)G(5)B(1)经 Guass 拉伸后河道砂

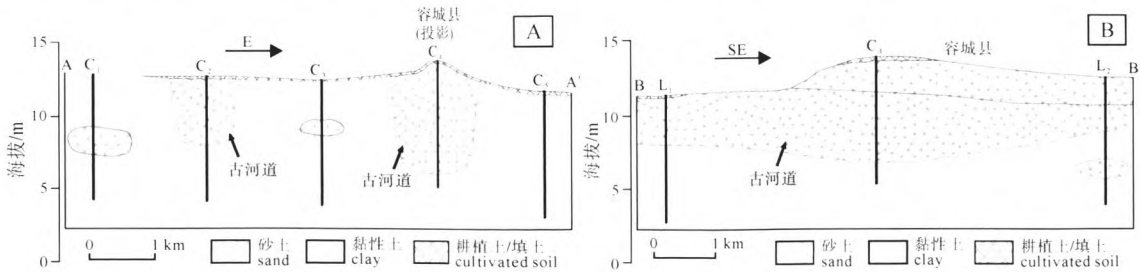


图 7 古河道剖面图
Fig. 7 The profiles of the paleochannels

体的形迹清晰可辨。利用钻孔岩心对遥感解译结果进行验证,两者吻合,岩心揭露的古河道发育深度在 3.2~8.7 m 之间。研究区古河道总体较发育,河道宽度多在 0.5~2.0 km 之间,多处分叉和汇聚后呈辫状河形态,河网密度约 0.26 km/km²。剖面显示古河道形态属条状高地型古河道,河道有“游荡”痕迹。古河道的发育位置控制着区内居民地的分布。可见,利用岩性光谱可以有效地解译古河道,该方法为今后古河道的遥感解译提供借鉴。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20189122).

参考文献:

- 高超,金高洁. 2009. 基于遥感图像处理对“古江淮运河”的研究[J]. 遥感技术与应用, 24(3): 357-361.
- 胡镜荣,石凤英. 1983. 华北平原古河道发育的环境条件及其沉积特征[J]. 地理研究, 2(4): 48-59.
- 梅安新. 2001. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社: 225-227.
- 孟广文,金凤君,李国平,曾刚. 2017. 雄安新区: 地理学面临的机遇与挑战[J]. 地理研究, 36(6): 1003-1013.
- 秦磊,詹华明,宋小军,宋广明,王志刚. 2008. 基于遥感技术的静海县浅埋古河道分析[J]. 地质调查与研究, 31(4): 321-327.
- 史玉金,严学新,陈大平. 2017. 上海海陆一体工程地质结构构建及地质条件评价[J]. 水文地质工程地质, 44(2): 96-101.
- 王贵明,董裕国. 1997. 珠江韩江三角洲海岸变迁遥感解译对比研究[J]. 海洋科学, 21(4): 50-53.
- 王凯霖,赵凯,李海涛,张宝匀,李文鹏. 2017. 基于综合识别方法的河北白洋淀湿地提取研究[J]. 现代地质, 31(6): 1294-1300.
- 吴爱琴,赵红杰,杨瑞霞,刘春迎,郭仰山,王超. 2002. 开封市古城址和古河道遥感考古试验研究[J]. 地域研究与开发, 21(3): 85-88.
- 吴忱. 1984. 河北平原的地面古河道[J]. 地理学报, (3): 268-276.
- 吴忱. 1985. 古河道在经济建设中的作用[J]. 地理学与国土研究, 1(2): 17-23.
- 吴忱. 1987. 河北平原的地貌与震害分区预测[J]. 华北地震科学, 5(S1): 231-238.
- 吴忱. 2002. 论“古河道学”的研究对象、内容与方法[J]. 地理学与国土研究, 18(4): 82-85.
- 吴忱. 2008. 华北平原古河道开发利用面临的新问题及对策[J]. 地理与地理信息科学, 24(3): 83-85, 99.
- 武文波,刘正纲. 2007. 一种基于地物波谱特征的最佳波段组合选取方法[J]. 测绘工程, 16(6): 22-24, 33.
- 易先进. 2015. 河北白洋淀地区晚更新世以来环境演变研究[D]. 北京: 中国地质大学.
- 张福堂. 1986. 永定河冲积扇及古河道在卫星图象上的显示特征[J]. 水文地质工程地质, (1): 58, 57.
- 赵艳霞,徐全洪,刘芳圆,秦彦杰,吴忱,陈利江,崔俊辉. 2013.

近 20 年来中国古河道研究进展[J]. 地理科学进展, 32(1): 3-19.

References:

- ALMULLA S T, ALBADRAN B N, AKA AL-ALI. 2011. Application of remote Sensing Techniques to Map the Paleochannels of Shatt Al-Arab and Khor Al-Zubair, Southern Iraq[J]. Marsh Bulletin, 6(1): 23-31.
- CHAVEZ P S, BERLIN G L, SOWERS L B. 1982. Statistical method for selecting landsat MSS ratios[J]. Journal of Applied Photographic Engineering, 1(8): 23-30.
- GAO Chao, JIN Gao-jie. 2009. Study of the Jianghuai Ancient Canal Base on the Remote Sensing image processing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 24(3): 357-361(in Chinese with English abstract).
- HU Jing-rong, SHI Feng-ying. 1983. The environmental conditions of the development of paleochannels in the Hua Bei(North China) plain and their sedimental characteristics[J]. Geographical Research, 2(4): 48-59(in Chinese with English abstract).
- SAMADDER R K, KUMAR S, GUPTA R P. 2011. Paleochannels and their potential for artificial groundwater recharge in the western Ganga plains[J]. Journal of Hydrology, 400(1-2): 154-164.
- MEI An-xin. 2001. Introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press: 225-227(in Chinese with English abstract).
- MENG Guang-wen, JIN Feng-jun, LI Guo-ping, ZENG Gang. 2017. Xiongan New Area: opportunities and challenges for geography[J]. Geographical Research, 36(6): 1003-1013(in Chinese with English abstract).
- MOHAMMED AMA, BALASUBRAMANIAN. 2002. Delineation of paleochannels using remote sensing and geophysical data around talakad in Cauvery River Basin, India[J]. Journal of Geophysics, 23(2): 43-50.
- PARDO-PASCUAL J E, ALMONACID-CABALLER J, RUIZ LA, PALOMAR-VÁZQUEZ J. 2012. Automatic extraction of shorelines from Landsat TM and ETM+ multi-temporal images with subpixel precision[J]. Remote Sensing of Environment, 123(6): 1-11.
- QIN Lei, ZHAN Ha-ming, SONG Xiao-jun, SONG Guang-ming, WANG Zhi-gang. 2008. Research on the distribution and characteristic of the shallow buried ancient channel in Jinghai County[J]. Geological Survey and Research, 31(4): 321-327(in Chinese with English abstract).
- SHI Yu-jin, YAN Xue-xin, CHEN Da-ping. 2017. Engineering geological structure establishment and conditions assessment integrating land and sea in Shanghai coastal area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 44(2): 96-101(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ming, DONG Yu-guo. 1997. Interpretation and study of remote sensing of coastal-line migration in the pearl river

- and the Hanjiang River delta[J]. *Marine Sciences*, 21(4): 50-53(in Chinese with English abstract).
- WANG Kai-lin, ZHAO Kai, LI Hai-tao, ZHANG Bao-yun, LI Wen-peng. 2017. Study on wetland extraction based on the synthetic identification method in the Baiyangdian Wetland, Hebei Province[J]. *Geoscience*, 31(6): 1294-1300(in Chinese with English abstract).
- WU Ai-qin, ZHAO Hong-jie, YANG Rui-xia, LIU Chun-ying, GUO Yang-shan, WANG Chao. 2002. Test study on remote sensing archaeology of ancient river course and city in Kaifeng[J]. *Areal Research and Development*, 21(3): 85-88(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 2008. New problems and countermeasures in utilizing the ancient river channels of North China Plain[J]. *Geography and Geo-information Science*, 24(3): 83-85, 99(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 1984. Surface ancient channels in Hebei Plain[J]. *Acta Geographica Sinica*, (3): 268-276(in Chinese with English abstract).
- WU Chen. 1985. The function of ancient channels in economy and construction[J]. *Geography and Territorial Research*, 1(2): 17-23 (in Chinese).
- WU Chen. 1987. The geomorphology in the North China Plain and the prediction of its earthquake damage[J]. *North China Earthquake Sciences*, 5(S1): 231-238(in Chinese).
- WU Chen. 2002. The object, content and methods of studying cultural "Ancient River Science"[J]. *Geography and Territorial Research*, 18(4): 82-85(in Chinese with English abstract).
- WU Wen-bo, LIU Zheng-gang. 2007. A method of the best band combination selection based on spectral characteristics of surface features[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 16(6): 22-24, 33(in Chinese with English abstract).
- YI Xian-jin. 2015. The Study on the characteristics of Paleoenvironmental Evolution since Late Pleistocene in Baiyangdian Area, Hebei Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Fu-tang. 1986. Characteristics of Yongding River alluvial fan and paleochannels in remote sensing images[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (1): 58, 57(in Chinese).
- ZHAO Yan-xia, XU Quan-hong, LIU Fang-yuan, QIN Yan-jie, WU Chen, CHEN Li-jiang, CUI Jun-hui. 2013. Progresses of palaeochannel studies in China in the past 20 years[J]. *Progress in Geography*, 32(1): 3-19(in Chinese with English abstract).