



基于多元技术方法协同开展的地表基质层调查研究 ——以江苏省泰州市为例

崔艳梅^{1,2}, 王玉军^{1,2}, 杨礼平^{1,2}, 宋珂^{1,2}, 詹雅婷^{1,2}, 李胤^{1,2}

1. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018; 2. 自然资源江苏省卫星应用技术中心, 江苏 南京 210018

摘 要: 以河网密布的冲湖积平原为研究区, 基于多学科体系交叉理念, 应用多源异构数据集成处理方法对已有成果资料进行了充分开发利用, 采用“天-空-地-井-钻-测-试”多技术方法对泰州市地表基质层的类型划分、空间分布、理化性质等内容开展调查研究, 确定了里下河-长江三角洲冲湖积平原地表基质类型划分体系, 查明了支撑区域国土空间生态系统的地表基质层空间分布特征, 摸清了研究区农田、湿地、林地和城乡建设用地等地表基质理化性质。调查研究成果可以为区域国土空间整体规划和生态环境保护修复提供数据支撑服务。

关键词: 自然资源; 地表基质; 勘查技术; 生态环境; 江苏省

Ground substrate survey based on multi-technique collaboration: A case study of Taizhou City in Jiangsu Province

CUI Yan-mei^{1,2}, WANG Yu-jun^{1,2}, YANG Li-ping^{1,2}, SONG Ke^{1,2}, ZHAN Ya-ting^{1,2}, LI Yin^{1,2}

1. Jiangsu Institute of Geological Survey, Nanjing 210018, China;

2. Natural Resources Satellite Application Technology Center of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China

Abstract: Based on the interdisciplinary concept, this study fully utilizes the existing achievements by multi-source heterogeneous data integrated processing methods, as well as multi-techniques of satellite-aero-ground-well-drilling-logging-testing to investigate the ground substrate of Taizhou City in the alluvial lacustrine plain characterized by dense river network. With the classification, spatial distribution, and physicochemical properties, the results have established a classification system for ground substrate types in Lixiahe-Yangtze River delta alluvial lacustrine plain, delineated the spatial distribution characteristics of ground substrate supporting the regional territorial space ecosystem, and clarified the physicochemical properties of ground substrate in farmland, wetland, woodland, and urban-rural construction land in the study area, which can provide data support services for the overall planning of regional territorial space and ecological environmental protection and restoration.

Key words: natural resources; ground substrate; exploration technology; ecological environment; Jiangsu Province

收稿日期:2024-03-01;修回日期:2024-05-13. 编辑:张哲.

基金项目:江苏省自然资源厅“泰州市区自然资源调查试点项目”(TZZCDL2021-55).

作者简介:崔艳梅(1986—),女,硕士,高级工程师,主要从事地质遥感、自然资源调查研究,通信地址 江苏省南京市玄武区珠江路 700 号,E-mail//cym0502@163.com

引用格式:崔艳梅,王玉军,杨礼平,宋珂,詹雅婷,李胤. 基于多元技术方法协同开展的地表基质层调查研究——以江苏省泰州市为例[J]. 地质与资源, 2025, 34(4): 451-460,419.

Cui Y M, Wang Y J, Yang L P, Song K, Zhan Y T, Li Y. Ground substrate survey based on multi-technique collaboration: A case study of Taizhou City in Jiangsu Province [J]. *Geology and Resources*, 2025, 34(4): 451-460,419.

0 引言

地表基质是支撑孕育地球表面森林、草原、水、湿地等门类自然资源的基础物质层,是自然资源三维立体分层分类模型中的重要层位,也是地球关键带的主要载体^[1-6]。作为与“人地关系”最密切、地球表层各圈层物质交换作用最强烈的关键部位,地表基质的种类、空间结构、理化性质、景观属性等特征直接影响自然资源数量和质量,从而影响生态环境质量。

近年来,随着地表基质概念的提出,其相关调查研究工作得以广泛开展,提出各种研究思路和技术方法,获得了大量研究成果和经验^[7-21]。总的来看目前相关研究方法主要基于河北坝上高原、东北松嫩平原、内蒙古低山丘陵、海南岛强风化区、珠三角山地-丘陵等典型区域,但长江中下游平原河湖水系比较发育的地区还未涉及。本文针对河网密布,具有冲湖积平原区域特点的泰州市区,利用多元技术方法“一站式”融合开展地表基质调查研究,以期丰富全国地表基质调查理论体系和规范流程提供技术参考。

1 区域概况

研究区为泰州市城区,包括海陵区、高港区、姜堰区和泰州医药高新区,面积共 1 568 km²,地理坐标:北纬 32°09′00″—32°43′40″、东经 119°48′30″—120°20′00″,南北分别与泰兴市、兴化市接壤。

泰州市位于江苏省中部,长江及淮河下游,南部濒临长江,与苏州、无锡、常州、镇江四市隔江相望,北部与盐城毗邻,东临南通,西接扬州。地处江苏南北及东西水陆交通要冲,地理位置十分优越。区内新老通扬运河、中干河、姜溱河、东西姜黄河等骨干航道纵横交错,水系极其发育。研究区地表皆被晚新生代地层覆盖,沉积地貌属于湖沼积、冲积、冲海积平原。区内第四系松散沉积物分布广泛、连续,沉积厚度在 150~300 m 之间。

泰州地区地质工作起步于 1949 年以后,随着国家建设和发展的需要,各项地质工作迅速展开,地质、煤炭、石油、水文等部门的勘探队伍分别开展了不同精度和内容的地质工作,范围涉及基础地质、水文地质、工程地质、环境地质、地热地质、遥感地质以及地球物理等诸多方面,尤其是 2015—2018 年开展了城市地质调查工作,积累了丰富的成果资料。但截至目前地表基质层调查尚未开展。

2 研究方法

地表基质调查研究内容比较广泛,以地球系统科学和自然资源空间分层分类模型为指导,突出山水林田湖草生命共同体理念,从自然资源管理对地表基质调查的三大需求出发,秉承科学性、经济性和可操作性的原则,在已有基础性调查成果和认识的基础上,采取“综合研究为主、补充调查为辅”的总路线。

2.1 多源异构数据成果融合集成处理

地表基质调查虽然是新的概念和领域,但并不是另起炉灶,以往已实施开展的调查工作或多或少都涉及到地表基质层,如区域地质调查、地球化学调查,水文地质、工程地质、第四纪地质等专项调查,以及国土调查。遵循不重复开展相同工作的原则,以及对以往成果充分利用的原则,在开展研究过程中,基于地球系统科学、自然资源学、土壤学等多学科体系交叉理念,对相关成果首先进行了精准的梳理和可利用性程度分析,并对多源异构数据进行集成处理和开发利用,做到充分吸收应用已有成果。

为使基于收集到的成果资料进行的地表基质改化工作更具有科学性和逻辑性,采用了数学处理层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 进行融合分析,即通过专家对收集的成果资料可利用程度进行主观打分,进而评价各数据源的优先使用以及评价最优改化方法(图 1)。

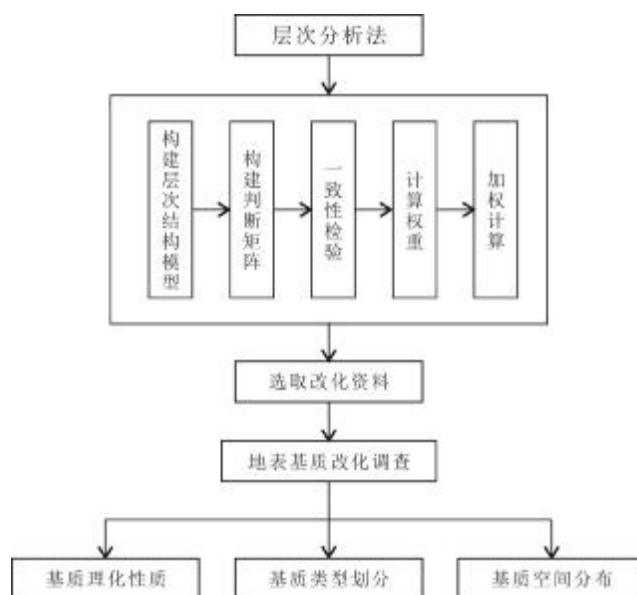


图 1 应用层次分析法处理地表基质数据流程图

Fig. 1 Flow chart of AHP for ground substrate data processing

2.2 多元技术方法协同开展调查研究

针对研究区河网密布的冲湖积平原区域特色,在已有基础性调查成果和认识的基础上,采用“天-空-地-井-钻-测-试”全流程一体化的调查技术方法,首先以高分遥感、多元一体化调查等现代科技手段为支撑,编制统一的工作底图。其次综合考虑地质地貌、基质类型、土地利用等因素,多手段一体化部署开展内外业调查研究,其中内业研究包括已有资料的收集利用、遥感初步解译分析、样品测试等工作。最后开展多要素一站式指标获取数据分析和成果汇总(图2)。

地表基质调查涉及到的要素、属性指标多元复杂,而且主要埋于地下,既要调查对象的物理状态进行观察测量,又要对其组成进行测试分析。因此,要根据不同调查阶段的需要,配套不同的调查方法技术。采用遥感解译自然景观、植被分布,采用地球物理方法揭示基质层的分层与厚度,采用槽探和钻探方法可以揭示基质层的物质组成与空间分布,采用地球化学手段可以分析物质成分组成等。

2.2.1 遥感技术应用

遥感影像数据是地表某一时刻各种自然要素和人文要素的真实再现,具有很强的综合性和可比性。将遥感技术运用在地表基质调查中,可以便捷地开展地表基质调查工作,利用遥感影像数据全面地对研究区内的各项信息进行解译分析,便于进行综合分析,在某种

程度上减少野外调查工作者的负担,提高成果的全面性、宏观性。

研究初期对试点区的多期多源遥感影像原始数据进行了正射校正、融合、镶嵌等处理,进而得到区域高分DOM数据。调查研究过程针对处理后的卫星遥感影像所获取的要素,如耕地、林地、草地、建筑、园地、水系、地形等,不仅为后续的野外地质工作提供一手资料,而且遥感技术能够突破野外调查气候条件、地段的限制,快速、准确、宏观地获取地表、浅地表的信息要素。此外利用不同波段信息,借助光谱特性对土壤成分、水分、湿地分布、植被长势等进行分析,对地表基质类型进行辅助调查。

2.2.2 多手段一体化开展外业调查

在地表基质层的物理状态调查方面,通过实地测量、剖面测量、代表性定点观测等野外调查方法,充分利用已有天然露头进行观测比对和推演分析,同时充分利用区域已开展的地质剖面、土壤垂向剖面测量工作,查明地表基质层理化性质。在地表基质层地下结构状态的调查方面,运用磁法、电法、电磁法、重力等地球物理技术方法,同时施工浅钻、浅槽或浅井辅助观测和验证,查明地表基质层横向和纵向的分类类型、空间分布。

研究区内开展了大量的物探、钻探工作,其中第四系钻孔14个、基础地质钻孔23个、工程地质钻孔168

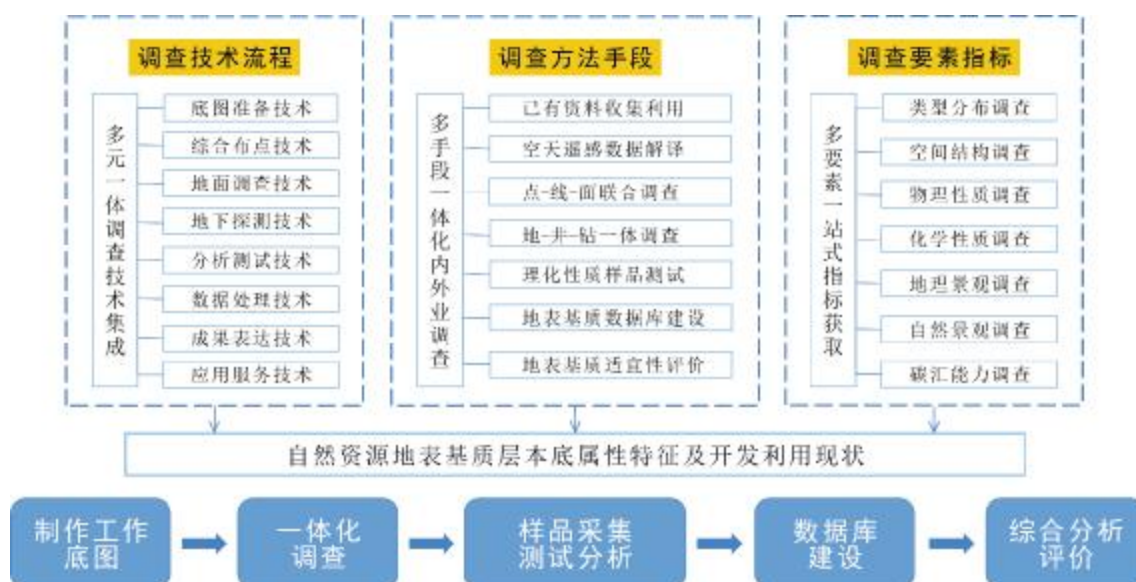


图2 地表基质调查研究方法

Fig. 2 Research methods for ground substrate investigation

个、槽型钻孔 413 个, 共计 618 个钻孔。在调查点布置密度方面, 通过综合考虑区域内地质、地形地貌、土地利用、基质类型和空间结构等因素, 以及图斑数量和种类划分图斑的复杂程度与调查点密度的关系, 试点区复杂程度处于一般以下, 复杂程度比较简单, 调查点密度建议为 1 个调查点/8 km², 根据研究区面积可知需布置 196 个调查点, 因此已实施开展的钻孔调查点能充分满足要求。

在物质成分调查方面, 充分结合野外现场测试, 以及野外采样和实验室系统分析方法, 研究区开展了 1:5 万土壤地球化学调查野外采样工作, 共采集土壤样品 4 399 件。在取样过程中, 根据不同的测试指标采取不同的采样装样设备保存样品, 其中质地、含水率等物理测试指标样品采用塑料自封袋保存, pH 值、微量元素、营养元素等化学测试指标样品采用布袋保存, 污染物有机测试指标样品采用玻璃瓶保存。样品采集后按照相关规范^[22-23]进行各项测试工作。

3 研究结果

地表基质是地质大循环与生物小循环共同作用的产物, 同时受地质作用、气候环境、地形地貌、生物作用等自然因素综合影响。岩石是构成地球岩石圈的主要成分, 它是其他类型地表基质形成、发育和演化的源头, 受到自然风化作用而形成砾石、砂石和土壤等。

在大致相同的气候地理条件下, 土壤质地及其理化性质和营养结构受最初岩石基质的风化-搬运-沉积形成成土母质的过程所控制, 也受成土母质通过复杂化学、生物作用等形成土质基质并最终再成壤的形式与强度所制约。不同成土母岩衍生的土壤在质地和养分含量方面存在差异, 因此地表基质的类型分布和理化性质是有着密切关系的。

3.1 数据集成处理结果

层次分析法是将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次, 在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。该方法具有系统、灵活、简洁的优点。层次结构模型一般包括目标层、准则层和方案层几个基本层次。在递阶层次模型中, 按照对一定客观事实的判断, 对每层的重要性以定量的形式加以反映, 即通过两两比较判断的方式确定每个层次中元素的相对重要性, 并用定量的方法表示, 进而建立判断矩阵; 然后利

用数学方法计算每个层次的判断矩阵中各指标的相对重要性权数; 最后通过在递阶层次结构内各层次相对重要性权数的组合, 得到全部指标相对于目标的重要程度权数。

1) 构建层次结构模型

应用 AHP 分析决策问题时, 首先要把问题条理化、层次化, 构造出一个有层次的结构模型。这些层次可以分为 3 类: 最高层(目的层)、中间层(准则层)、最底层(方案层)。递阶层次结构中的层次数与问题的复杂程度及需要分析的详尽程度有关, 层次数一般不受限制。每一层次中各元素所支配的元素一般不要超过 9 个, 构建的地表基质改化指标结构模型见图 3。

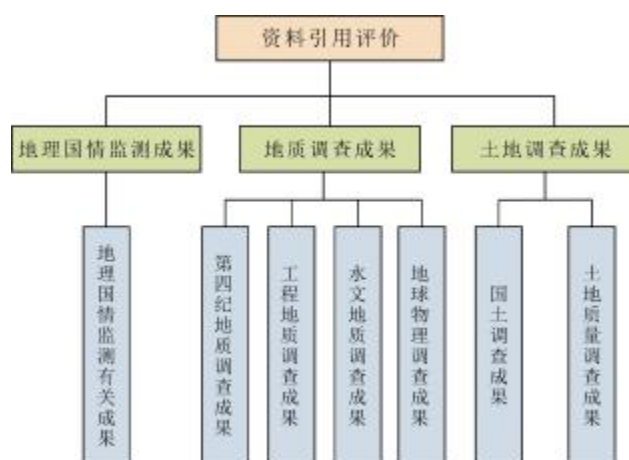


图 3 地表基质改化指标层次分析流程图

Fig. 3 Flow chart of ground substrate modification index hierarchy analysis

2) 构建判断矩阵

准则层中的各准则在目标衡量中所占的比重并不一定相同, 在决策者的心目中, 它们各占有一定的比例。引用数字 1~9 及其倒数作为标度来定义判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ (见表 1)。通过构建矩阵可以分析出地表基质调查与各资料成果之间的重要程度。

3) 一致性检验

计算一致性指标 CI (consistency index):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

其中, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值, n 为矩阵阶数。

计算平均随机一致性指标 RI, 随机性指标 RI 数值见表 2。

表 1 判断矩阵标度定义
Table 1 Scale definition of judgment matrix

标度	含义
1	两个因素相比,具有相同重要性
3	两个因素相比,前者比后者稍重要
5	两个因素相比,前者比后者明显重要
7	两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	两个因素相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 a_{ij} ,那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $a_{ji}=1/a_{ij}$

表 2 平均随机一致性指标
Table 2 Values of average random consistency indexes

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52

计算一致性比例 CR (consistency ratio):

$$CR=\frac{CI}{RI}$$

当 $CR<0.10$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的;否则应对判断矩阵作适当修正,使其满足 $CR<0.10$.

4)计算合成权重

最终要得到各元素,特别是最底层中各方案对目标的排序权重,从而进行方案选择.对层次总排序也需作一致性检验,计算各层要素对系统总目标的合成权重,并对各备选方案排序(表 3).

表 3 方案层中要素对决策目标的排序权重
Table 3 Ranking weights of factors in scheme layer to decision goal

备选方案	权重
国土调查	0.0560
土壤普查	0.0839
第四纪地质调查	0.3213
工程地质调查	0.1275
水文地质调查	0.0699
物探调查	0.1012
地球化学调查	0.1601
地理国情监测	0.0801

利用层次分析法对收集的成果资料改化指标进行评价分析.从 7 个指标权重总排序中,可得出第四纪地质调查成果所占比重最大,其次为地球化学调查成果.

3.2 类型划分结果

在研究区地表基层层类型划分过程中一级和二级分类完全采用《地表基层层分类方案(试行)》^[2]里的命名规则,三级分类首先依据方案里的指导性建议,比如土质三级类可根据土壤理化性质(如酸碱度、矿物质含量、土壤松软程度等)进行进一步细分,泥质三级分类采用粒径、质地、组成、成因等作为分类依据.其次,充分结合各项调查成果,并参考土地分类、“中国土壤系统分类土族和土系划分标准”^[24]、第四纪沉积物分类等标准规范,在整个分类过程因地制宜地兼顾了研究区域特点.

在具体划分类型时,基于区域内已有的第四纪调查、土壤调查、第三次全国国土调查等相关成果,梳理并参考第四纪沉积物的二元法命名表、碎屑粒级分类(温德华分类)表和中国制土壤粒径大小分级和质地分类表进行分析研究.

不同的调查研究遵循不同的规范,譬如土壤普查分类就是一个错综复杂的体系,涉及到土壤发生分类、系统分类、土壤质地分类等,地质调查里的第四纪沉积物质地分类又遵循着另外一套规范.收集到的成果资料都是在各自领域的规范下定义的,因此迫切需要梳理出各套体系共同的线索.本研究中紧紧遵循“质地分类”这一关键线索,将上述相关标准契合到地表基层层分类标准(表 4),同时将收集到的土壤分类成果、基础地质调查等多源异构成果数据,经过一系列集成处理和融合分析等技术手段,最终得出分类结果.

根据该分类,研究区一级类别仅有土质、泥质 2 种;二级类别包含砂土、壤土、黏土、淤泥 4 种;三级类别包含潮土型壤质砂土、水稻土黏质砂土、潮土型黏质壤土、潮土型壤土、潮土型砂质壤土、水稻土型黏质壤土、水稻土型壤土、潮土型黏土、水稻土型黏土、水稻土型壤质黏土、壤土质淤泥和黏土质淤泥 12 种.

3.3 空间分布结果

1)平面分布情况

在上述类型划分调查成果的基础上,对区域内地表基层层区域分布进行了全面的调查研究,获得各类型分布及面积情况(图 4).研究区地表基层层一级类

表 4 地表基质不同分类标准对应关系表

Table 4 Correlations of different classification criteria for ground substrate

地表基质分类		土质质地分类				第四纪沉积物质地分类		
一级类	二级类	粒级	粒径/mm	质地		粒级		粒径/mm
土质	砂土	砂粒	0.02~2	砂土	粗砂土	砂	极粗砂	1~2
					细砂土		粗砂	0.5~1
					面砂土		中砂	0.25~0.5
							细砂	0.125~0.25
							极细砂	0.0625~0.125
	壤土	粉砂粒	0.002~0.02	壤土	砂粉土	粉砂	粗粉砂	0.031~0.0625
					粉土		中粉砂	0.0156~0.031
					砂壤土		细粉砂	0.0078~0.0156
					壤土		极细粉砂	0.0039~0.0078
					砂黏土			
	黏土	黏粒	<0.002	黏土	粉黏土	黏土	黏土	0.0005~0.0039

别空间分布上除了在大型河流和湖泊区域分布泥质外,其余均为土质.二级类别主要为壤土和黏土,分布面积比较大,淤泥主要分布在大型河流和湖泊区域,砂土零星分布.三级分类是在二级分类的基础上细分,在空间分布上总体特征延续了二级分类特点,但相对来说分布较均匀,其中分布最多的是水稻土型壤质黏土,其次为潮土型砂质壤土,分布最少的为水稻土黏质砂土(图 5).

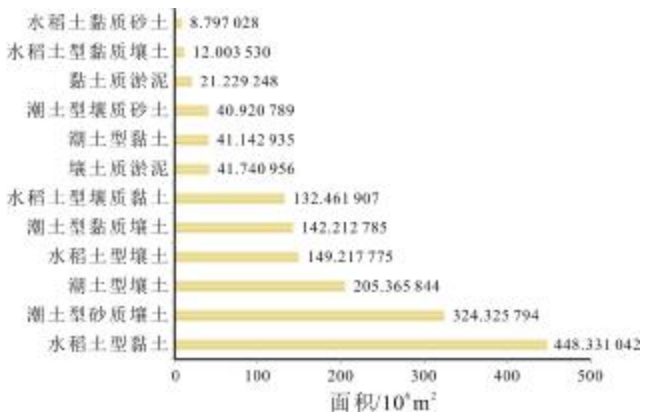


图 4 研究区地表基基层各类别面积统计柱状图

Fig. 4 Area statistics histogram of the third level classification ground substrate in the study area

2)垂向分布情况

由于地质背景具有区域性,不同区域地下结构的演化和形成也不一致,调查深度这个概念具有因地制宜的特性.因此在实际调查研究工作中,围绕地表基质支撑服务方向,综合考虑地表基质种类、地质作用背景、地理地貌单元、支撑孕育的自然资源等因素,建议不能一概而论地设置统一调查深度,应根据实际需要灵活设置科学合理的深度范围区间.

结合相关专家的研究^[25-28]以及区域特色,本研究区沉积地貌属于湖沼积、冲积、冲海积平原,被第四纪及新近纪松散堆积物覆盖,沉积厚度在 150~300 m 之间.因此调查深度初步确定为:砾质地区 0~10 m,以控制垂向基本特征;土质地区 0~30 m,原则上不超过 50 m;泥质地区为水体以下 0~10 m,如果有特殊需要可以适当增加深度,原则上不超过 50 m.另外在该试点调查开展过程中,经过综合考虑多方面因素,认为调查及关注的重点应该是 0~5 m 深度范围之间的地表基质层.

3.4 理化性质结果

地质建造是土壤形成的物质基础,土壤在形成过程中,其成土母质的许多特性,如质地、颜色、矿物成分

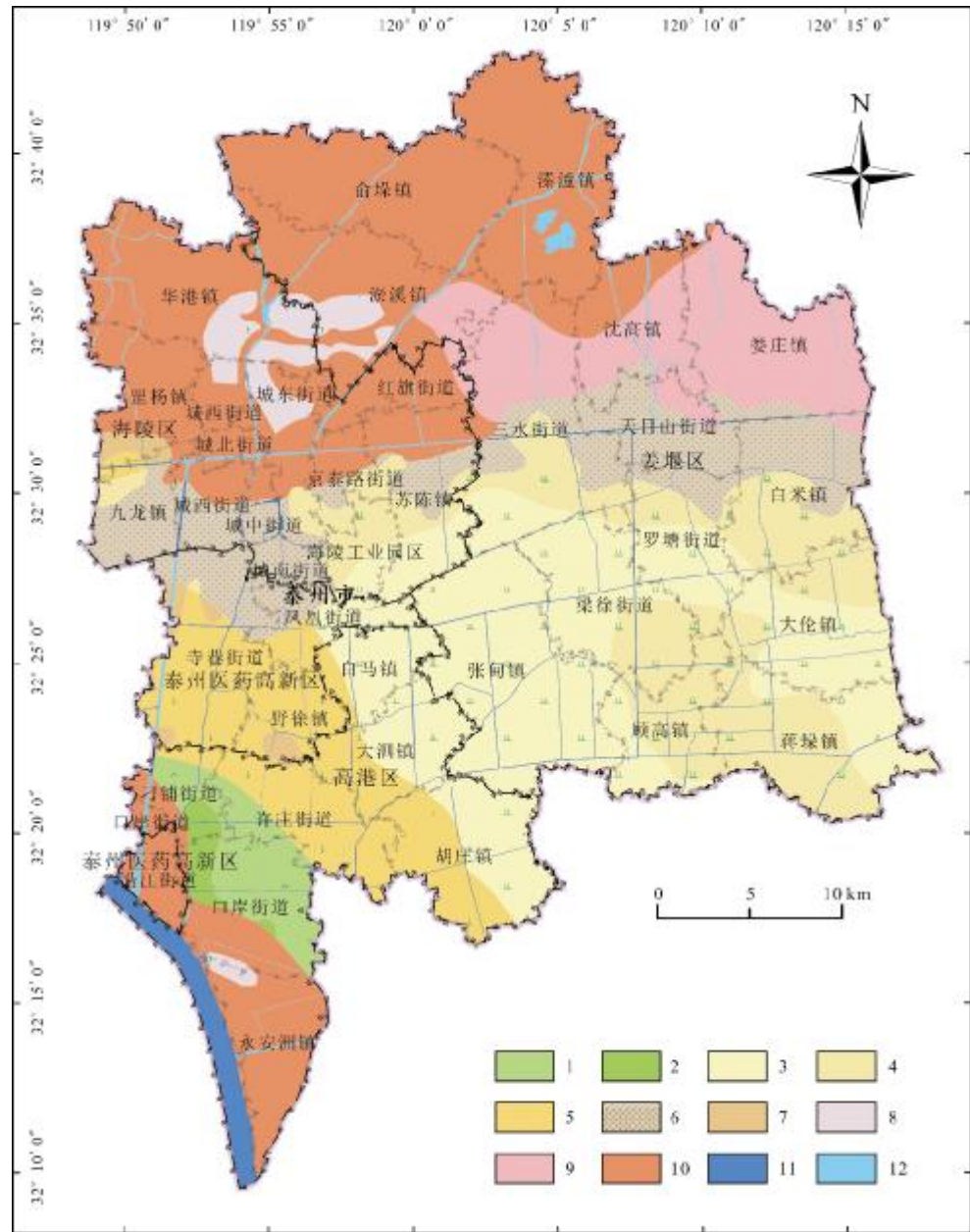


图 5 研究区地表基质三级类别分布图

Fig. 5 Distribution map of the third level classification ground substrate in the study area

1—潮土型壤质砂土(tidal soil type loamy sandy soil); 2—水稻土黏质砂土(paddy soil type clayey sandy soil); 3—潮土型砂质壤土(tidal soil type sandy loam); 4—潮土型壤土(tidal soil type loam); 5—潮土型黏质壤土(tidal soil type clayey loam); 6—水稻土型壤土(paddy soil type loam); 7—水稻土型黏质壤土(paddy soil type clayey loam); 8—潮土型黏土(tidal soil type clay); 9—水稻土型壤质黏土(paddy soil type loamy clay); 10—水稻土型黏土(paddy soil type clay); 11—壤土质淤泥(loamy silt); 12—黏土质淤泥(clayey silt)

等,都被不同程度地继承下来.但不同地质建造单元形成的同一种土壤,其化学组成差别也非常大,同一地质建造上形成的不同土壤,物理化学性质也具有显著差别.

研究区域内沉积物变化具有明显南厚北薄的特

性.南侧处于长江三角洲地层小区,早更新世受近源山前冲积扇物源影响,下蚀作用更强,沉积物更厚,粒度更粗,中更新世之后山前近源碎屑物质影响减弱,气候影响作用增强,以正常曲流河道及漫滩或海侵河谷沉积物为主;北侧处于里下河地层小区,除早更新世发育

少量西部近源粗碎屑沉积物外,之后一直以网状河泛滥平原或海相潟湖沉积为主,沉积水动力相对较弱,粒度偏细,中间过渡带兼具二者特点,但由于其特殊位置,沉积物保存更为丰富完整。

基于样品测试结果数据,利用插值分析和自然间断点分级法进行分析整理,得到研究区地表基质层的营养元素、有机质、酸碱度(pH 值)、重金属等多种元素种类的化学性质相关成果(图 6)。总体来看,研究区土壤营养元素空间分布与第四纪沉积分区相吻合,表现为: N、K、Mg、Fe、Mo、B、Se 等元素在南部长江冲积层土壤含量偏低,在北部里下河湖相地层土壤中偏高; P、Ca 等元素在南部长江冲积层土壤含量偏高,北部里下河湖相地层土壤中偏低; 城镇周边等局部地区出现 N、P 等点块状高含量异常,可能叠加了人类农业生产、生活排污等人为活动影响。

成土母质的类型与土壤质地关系密切。研究区成土母岩主要为粉砂岩和砂砾岩,粉砂岩区内土壤质地为砂质黏壤土,养分含量比较丰富,土壤肥力较好,砂砾岩区内土壤质地为砂质壤土,富含 P 元素,土壤有机质含量较低,土壤浅薄,土壤肥力中等。由上述结果可以看出研究区基质类型空间分布和理化性质特征既具有一定的相关性,也具有一定的差异性。

4 结论

1)地表基质调查虽是新时代自然资源调查监测体系中的全新领域,但与以往区域地质调查、地球化学调查、第四纪地质调查以及国土调查等多项调查工作有着密切联系。在调查研究中应秉持不重复开展相同工作的原则,对以往成果应充分兼容利用。

2)提出了里下河-长江三角洲冲湖积平原区地表基质类型划分体系,按照地表基质发育发展过程,充分参考第四纪沉积物粒级分类表、土壤粒径大小分级以及质地分类表,对研究区地表基质层类型进行了“四类三级”划分。

3)查明了支撑区域国土空间生态系统的地表基质层空间分布特征,从横向和纵向两个维度对研究区地表基质层区域分布开展了全面的调查研究。在平面分布上研究区均是平原地貌,地表基质层一级类别空间分布上除了在大型河流和湖泊区域分布泥质外,其余均为土质。在纵向分布上,被第四纪及新近纪松散堆积

物覆盖,土质地区调查深度为 0~30 m,泥质地区调查深度为水体以下 0~10 m,但重点区域是 0~5 m。

4)本研究成果为相似特征区域的地表基质调查和研究积累了经验,可为江苏省各类地区地表基质调查技术方法体系的探索提供借鉴。

参考文献(References):

- [1]自然资源部. 自然资源调查监测体系构建总体方案[EB/OL]. 2020. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202001/t20200120_2498393.html. Ministry of Natural Resources. General scheme for construction of natural resources survey and monitoring system[EB/OL]. 2020. https://www.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202001/t20200120_2498393.html. (in Chinese)
- [2]自然资源部. 地表基质分类方案(试行)[EB/OL]. 2020. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/23/content_5572445.htm. Ministry of Natural Resources. Classification scheme for surface substrate (trial)[EB/OL]. 2020. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/23/content_5572445.htm. (in Chinese)
- [3]National Research Council, USA. Basic research opportunities in earth science[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2001.
- [4]Richter D D Jr, Mobley M L. Monitoring earth's critical zone[J]. Science, 2009, 326(5956): 1067-1068.
- [5]Banwart S A, Chorver J, Gaillardet G, et al. Sustaining earth's critical zone basic science and interdisciplinary solutions for global challenges[R]. Sheffield: The University of Sheffield, 2013.
- [6]张甘霖, 宋效东, 吴克宁. 地球关键带分类方法与中国案例研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(10): 1681-1692. Zhang G L, Song X D, Wu K N. A classification scheme for earth's critical zones and its application in China[J]. Science China Earth Sciences, 2021, 64(10): 1709-1720.
- [7]葛良胜, 杨贵才. 自然资源调查监测工作新领域: 地表基质调查[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(9): 4-11, 67. Ge L S, Yang G C. New field of natural resources survey and monitoring: Ground substrate survey[J]. Natural Resource Economics of China, 2020, 33(9): 4-11, 67.
- [8]葛良胜, 侯红星, 夏锐. 自然资源地表基质调查技术体系构建[J]. 地理信息世界, 2022, 29(5): 20-27. Ge L S, Hou H X, Xia R. Construction of technical system for ground substrate survey of natural resources[J]. Geomatics World, 2022, 29(5): 20-27.
- [9]殷志强, 秦小光, 张蜀冀, 等. 地表基质分类及调查初步研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(6): 8-14. Yin Z Q, Qin X G, Zhang S J, et al. Preliminary study on classification and investigation of surface substrate[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(6): 8-14.
- [10]殷志强, 陈自然, 李霞, 等. 地表基质综合调查: 内涵、分层、填图与支撑目标[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 144-151.

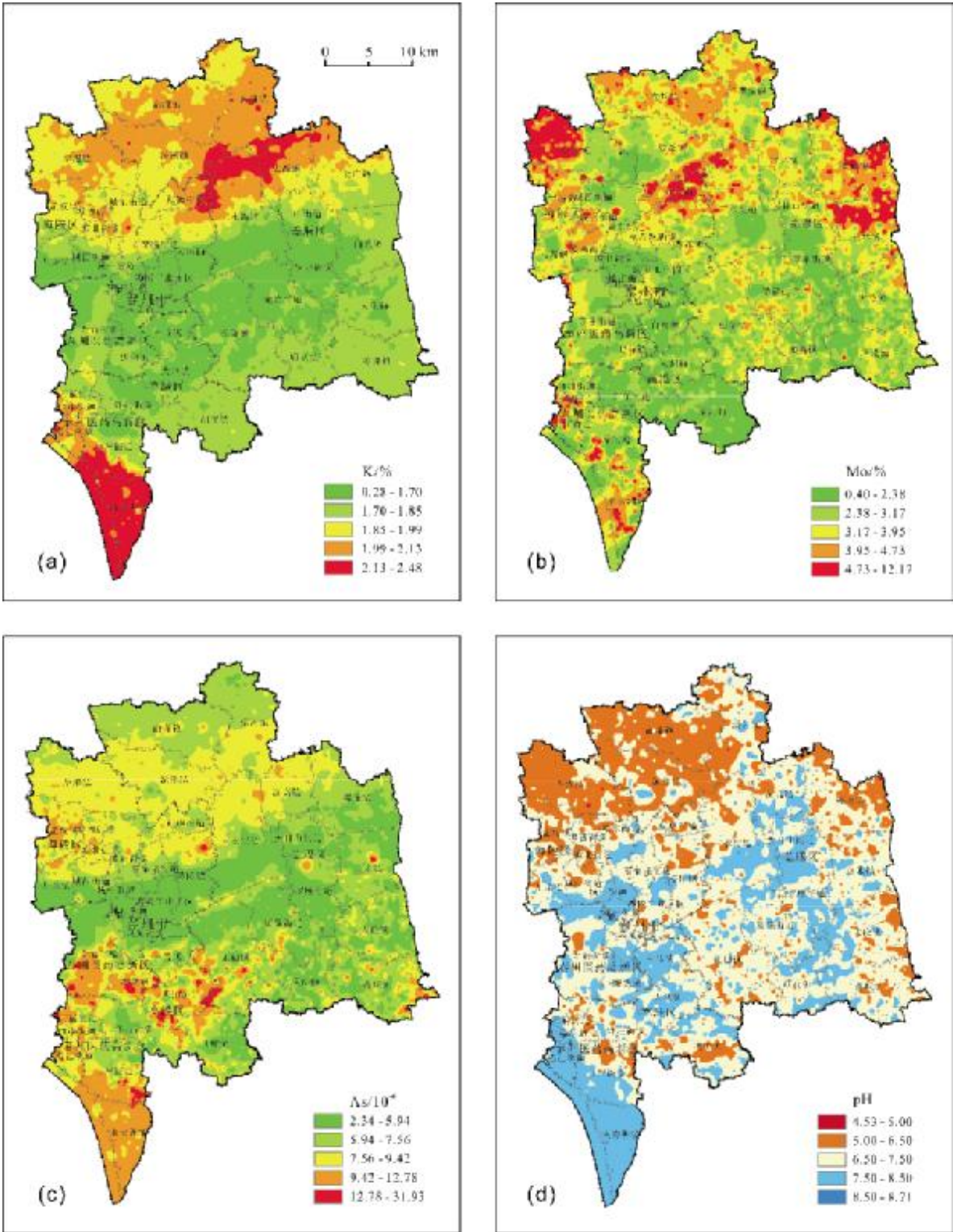


图 6 研究区土壤化学元素含量及酸碱度分布图

Fig. 6 Distribution maps of soil chemical element content and pH in the study area

a—土壤 K 含量分布图(K content in soil); b—土壤 Mo 含量分布图(Mo content in soil); c—土壤 As 含量分布图(As content in soil); d—土壤 pH 分级图 (pH in soil)

- Yin Z Q, Chen Z R, Li X, et al. Connotation, layering, mapping and supporting objectives of the integrated survey of ground substrates[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 144-151.
- [11]袁国礼, 侯红星, 刘建宇, 等. 服务生态文明的生态地质调查工作方法浅析——以地表基质调查为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(3): 30-38.
- Yuan G L, Hou H X, Liu J Y, et al. Introduction to the methods of ecology-geological survey for servicing ecological civilization: Example from ecology-supporting sphere survey [J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(3): 30-38.
- [12]侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基岩层调查技术方法新经验——以保定地区地表基岩层调查为例[J]. *西北地质*, 2021, 54(3): 277-288.
- Hou H X, Zhang S J, Lu M, et al. Technology and method of the ground substrate layer survey of natural resources: Taking Baoding area as an example[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 277-288.
- [13]侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质调查内容及要素-属性指标体系探讨[J]. *自然科学*, 2021, 9(4): 433-442.
- Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. Discussion on the contents of ground substrate investigation and the index system of elements and attributes [J]. *Open Journal of Natural Science*, 2021, 9(4): 433-442.
- [14]侯红星, 葛良胜, 孙肖, 等. 地表基质在中国黑土地资源调查评价中的应用探讨——基于黑龙江宝清地区地表基质调查[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(9): 2264-2276.
- Hou H X, Ge L S, Sun X, et al. A study on the application of ground substrate in the survey and evaluation of China's black soil resources: Based on ground substrate survey in Baoqing, Heilongjiang Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9): 2264-2276.
- [15]白超琨, 侯红星, 付宪军, 等. 综合物探方法在河北保定地区地表基岩层试点调查中的应用[J]. *自然科学*, 2021, 9(4): 414-425.
- Bai C K, Hou H X, Fu X J, et al. Application of comprehensive geophysical method to ground substrate layer pilot survey in the area of Hebei Baoding[J]. *Open Journal of Nature Science*, 2021, 9(4): 414-425.
- [16]张闯, 王苒, 尚晓雨, 等. 水域地表基质调查方法探索——以衡水湖为例[J]. *国土资源导刊*, 2023, 20(2): 109-113.
- Zhang C, Wang R, Shang X Y, et al. Exploration of surface matrix investigation methods in water areas: A case study of Hengshui Lake [J]. *Land & Resources Herald*, 2023, 20(2): 109-113.
- [17]王献, 鲁敏, 侯红星, 等. 山区平原过渡区土质地表基岩空间异质性特征分析——以河北省易县东部地区为例[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(3): 60-66.
- Wang X, Lu M, Hou H X, et al. Analysis of spatial heterogeneity of soil substrate in mountainous plain transition area: A case study of eastern Yi County of Hebei Province[J]. *Geological Survey of China*, 2023, 10(3): 60-66.
- [18]陈彭, 侯红星, 马骏驰, 等. 低山丘陵区黑土地地表基质调查研究思路——以扎兰屯地区为例[J]. *中国国土资源经济*, 2023, 36(2): 81-89.
- Chen P, Hou H X, Ma J C, et al. Investigation and research idea on black soil surface matrix in low mountain and hilly regions: A case study of Zalantun area [J]. *Natural Resources Economics of China*, 2023, 36(2): 81-89.
- [19]李响, 周效华, 相振群, 等. 地表基质调查的工作思路刍议: 以海南岛为例[J]. *地质通报*, 2023, 42(1): 68-75.
- Li X, Zhou X H, Xiang Z Q, et al. Simply discussion on the work of ground substrate survey: Taking Hainan Island as an example [J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1): 68-75.
- [20]姚晓峰, 杨建锋, 左力艳, 等. 地表基质的内涵辨析与调查思路[J]. *地质通报*, 2022, 41(12): 2097-2105.
- Yao X F, Yang J F, Zuo L Y, et al. Discussion on connotation and survey strategy of the ground substrate [J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2097-2105.
- [21]贾磊, 刘洪, 欧阳渊, 等. 基于地质建造的南方山地-丘陵区地表基质填图单元划分方案——以珠三角新会-台山地区为例[J]. *西北地质*, 2022, 55(4): 140-157.
- Jia L, Liu H, Ouyang Y, et al. Division scheme of surface substrate mapping units of mountainous-hilly area in South China based on geological formations research: Example from Xinhui-Taishan area in Pearl River Delta [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 140-157.
- [22]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295—2016 Determination of land quality geochemical evaluation [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [23]中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0258—2014 多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0258—2014 Specification of multi-purpose regional geochemical survey (1:250 000)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [24]张甘霖, 王秋兵, 张凤荣, 等. 中国土壤系统分类土族和土系划分标准[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4): 826-834.
- Zhang G L, Wang Q B, Zhang F R, et al. Criteria for establishment of soil family and soil series in Chinese soil taxonomy [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4): 826-834.
- [25]郭盛乔, 马秋斌, 张祥云, 等. 里下河地区全新世自然环境变迁[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 341-351.
- Guo S Q, Ma Q B, Zhang X Y, et al. Holocene environmental changes in Lixiahe area [J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 341-351.

- Dongjin rare metal mineralized intrusion in the northern margin of the North China Craton[J]. *Minerals*, 2023, 13(12): 1477.
- [18]鞠楠,施璐,杨高,等. 华北板块北缘东段稀有-稀土成矿作用综述[J]. *地质与资源*, 2024, 33(4): 537-550.
- Ju N, Shi L, Yang G, et al. Rare metal and rare earth element mineralization in the eastern section of the north margin of North China Plate: A review[J]. *Geology and Resources*, 2024, 33(04): 537-550.
- [19]Wu H H, Huang H, Zhang Z C, et al. Geochronology, geochemistry, mineralogy and metallogenic implications of the Zhaojinggou Nb-Ta deposit in the northern margin of the North China Craton, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 125: 103692.
- [20]吕燕,周家云,惠博,等. 吉林某铌钽多金属矿石中元素的赋存状态及对选矿工艺的影响[J]. *矿产综合利用*, 2019(2): 83-88.
- Lv Y, Zhou J Y, Hui B, et al. The occurrence state of elements in a Nb-Ta polymetallic ore and its influence on mineral processing in Jilin Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2): 83-88.
- [21]夏建明,陈邦建. 苏州富铌钽花岗岩的物质组成及钽的赋存状态研究[J]. *江苏地质*, 1999, 23(4): 236-240.
- Xia J M, Chen B J. Material composition of niobium and tantalum-rich granite and study of tantalum's occurrence state in Suzhou of Jiangsu Province[J]. *Journal of Geology*, 1999, 23(4): 236-240.
- [22]朱恩异,王雷,任涛,等. 湘南长城岭超大型铌钽矿金属元素赋存状态及规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(3): 1040-1047.
- Zhu N Y, Wang L, Ren T, et al. Occurrence and regularity of ore-forming elements in the Changchengling super-large Rb-Nb-Ta deposit, southern Hunan[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(3): 1040-1047.
- [23]王红军. 我国铌钽等稀有金属矿特征及找矿研究[J]. *科技创新导报*, 2017, 14(17): 74-75.
- Wang H J. Characteristics and prospecting of niobium-tantalum and other rare metal deposits in China [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2017, 14(17): 74-75. (in Chinese)
- [24]张培善,杨主明,陶克捷,等. 我国铌钽稀土矿物学及工业利用[J]. *稀有金属*, 2005, 29(2): 206-210.
- Zhang P S, Yang Z M, Tao K J, et al. Niobian-tantalum and rare earth mineralogy in China and their industrial utilization[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(2): 206-210.

(上接第 460 页/Continued from Page 460)

- [26]程瑜,李向前,张平,等. 长江三角洲北翼泰州地区早更新世地层序列的厘定[J]. *地层学杂志*, 2019, 43(1): 89-95.
- Cheng Y, Li X Q, Zhang P, et al. Revision of the early Pleistocene lithostratigraphy in the northern Yangtze River Delta [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2019, 43(1): 89-95.
- [27]程瑜,李向前,赵增玉,等. 全新世以来苏北平原里下河南部地区的沉积记录和环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(1): 49-58.
- Cheng Y, Li X Q, Zhao Z Y, et al. Sedimentary and environment evolutionary records of the southern Lixiahe area in the Subei Plain during Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(1): 49-58.
- [28]胡健民,闫纪元,程瑜,等. 中国晚新生代构造-沉积-古气候事件的地质记录[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 303-330.
- Hu J M, Yan J Y, Cheng Y, et al. Geological records of Late Cenozoic tectono-sedimentary-Paleoclimatic events in China [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 303-330.

(上接第 503 页/Continued from Page 503)

- [28]谭金芳. 河南省土壤钾素状况研究[J]. *土壤通报*, 1996, 27(4): 165-167.
- Tan J F. Study on soil potassium status in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 165-167. (in Chinses)
- [29]薛濡壕. 多元主体协同下东北黑土区耕地轮作生态补偿机制研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- Xue R H. Research on ecological compensation mechanism of cultivated land rotation in northeast black soil region under multi-subject cooperation [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [30]李雪利. 添加腐熟秸秆调节土壤碳氮比对烤烟碳氮代谢及品质影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011.
- Li X L. Effects of soil C/N with increasing compost wheat straw on the carbon and nitrogen metabolism and the quality of flue-cured tobacco leaves[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011.