

刘玖芬, 赵晓峰, 侯红星, 等. 地表基质调查分层及分层测试指标体系设计与构建[J]. 岩矿测试, 2024, 43(1): 16–29. DOI: [10.15898/j.ykcs.202310080157](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202310080157).

LIU Jiufen, ZHAO Xiaofeng, HOU Hongxing, et al. Exploration on the Stratification of the Ground Substrate Survey and the Design and Construction of Its Testing Indicator System[J]. Rock and Mineral Analysis, 2024, 43(1): 16–29. DOI: [10.15898/j.ykcs.202310080157](https://doi.org/10.15898/j.ykcs.202310080157).

地表基质调查分层及分层测试指标体系设计与构建

刘玖芬^{1,2,3}, 赵晓峰^{1,2,3}, 侯红星⁴, 秦天⁴, 陈占生⁵, 徐立明⁶, 杨柯⁶, 孔繁鹏⁷, 刘晓煌^{2,3},
卢兵⁶, 李子奇¹, 刘佳⁸, 包茹意¹, 郝爱兵^{2*}

- (1. 中国地质大学 (北京), 北京 100083;
2. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055;
3. 自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055;
4. 中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 河北 廊坊 065000;
5. 中国地质调查局地球物理调查中心, 河北 廊坊 065004;
6. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150081;
7. 中国地质调查局牡丹江自然资源综合调查中心, 黑龙江 牡丹江 157000;
8. 中国地质大学 (武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 地表基质是地球表层物质与能量循环的主要载体, 地表基质调查是一项创新性工作, 明确地表基质调查分层及分层测试指标是开展地表基质调查的基础。本文基于地表基质调查的内涵和目标定位, 深入分析了多目标区域地球化学调查、全国第三次土壤普查和全国农用地土壤污染详查等调查深度和测试指标; 利用近三年自然资源综合调查指挥中心在吉林省梨树县、辽宁省丹东市、黑龙江省哈尔滨市三个地表基质调查试点项目实测数据, 运用变动系数法分析了不同地区地表基质层的地球化学元素垂向变化特征, 结合表生地质作用 (风化为主) 最大深度、地表植被根系最大深度、浅层地下水位波动下限、基岩顶面深度等因素, 将地表基质在垂向上大致分为三层: 表层 (0~2m)、中层 (2~10m) 和深层 (10~20m), 基岩埋深浅于 20m 则以揭露到基岩为准; 表层 (0~2m), 称为生产层, 包括支撑农业生产的耕作层, 主要服务国家粮食安全, 以收集资料为主; 中层 (2~10m), 称为生态层, 主要支撑植被生长和群落演替, 服务国土空间开发保护与格局优化, 是地表基质调查的重点; 深层 (10~20m), 称为沉积层, 主要研究地表基质从基岩—深层—中层—表饰演替规律和特征, 以部署少量工程控制为宜。基于地表基质分层调查意义, 结合元素在垂向上的变化规律, 提出 4+N 型地表基质分层测试指标体系, 即 4 类必测指标和针对特殊工作需要的 N 类选测指标, 以期加快推进地表基质调查标准化、规范化。

关键词: 地表基质; 地表基质调查; 地表基质调查分层; 分层测试指标

要点:

- (1) 厘清了地表基质的内涵、目标定位与多目标区域地球化学调查等全国性土壤类调查的关系; 结合近三年在东北黑土地开展的地表基质调查试点成果, 系统探讨地表基质调查分层及分层测试指标体系, 以期加

收稿日期: 2023-10-08; 修回日期: 2024-01-29; 接受日期: 2024-02-04

基金项目: 自然资源部生态地球化学重点实验室开放基金项目 (ZSDHJJ202303); 国家重大科技项目课题“新疆典型生态系统综合全参数观测建设”(2021xjkk140104); 中国地质调查局地质调查项目“自然资源观测监测一体化技术体系研究”(DD20230514)

第一作者: 刘玖芬, 硕士, 正高级工程师, 主要从事地球化学和分析测试研究工作。E-mail: 13863858360@163.com。

通信作者: 郝爱兵, 博士, 正高级工程师, 主要从事水文地质、地质环境与自然资源综合调查。E-mail: haoab@cigem.cn。

快推进地表基质调查标准化、规范化。

- (2) 总碳、有机碳、pH值三项指标在约2m处出现明显拐点,而 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO 等矿质元素在2m以浅无明显变化。
- (3) 将地表基质调查大致分为三层:表层(生产层,0~2m);中层(生态层,2~10m);深层(沉积层,10~20m),构建了4+N型地表基质调查分层测试指标体系。

中图分类号: P962

文献标识码: A

2020年1月,自然资源部发布《自然资源调查监测体系构建总体方案》,首次提出“地表基质”概念,地表基质为“地球表层孕育和支撑森林、草原、水、湿地等各类自然资源的基础物质”。2020年12月,自然资源部发布《地表基质分类方案(试行)》,进一步明确了地表基质为“当前出露于地球陆域地表浅部或水域水体底部,主要由天然物质经自然作用形成,正在或可以孕育和支撑森林、草原、水等各类自然资源的基础物质”。地表基质层自地面开始,穿过土壤,一直延伸至基岩顶部或包气带底部,是地球五大圈层相互作用的主要区域^[1]。因此,地表基质层与地表覆盖层各要素间的生物地球化学及水文循环、能量交换决定了生态系统的本底特征^[2],不同的地表基质孕育了不同的植被类型,制约着区域生态系统的空间格局和演化趋势^[3]。地表基质调查运用地球系统科学理论和现代技术方法手段,全面、系统、准确地查明工作区内地表基质类型、空间结构、物质组成、理化性质、地表景观及生态属性,描述其自然性质,掌握地表基质层的时空分布、数量质量、利用状况和动态变化;强调从地质角度出发,研究地表基质与地表覆盖层相互关系和支撑孕育机理,评价地表基质基本状态、预测其变化发展趋势、评估支撑孕育潜力和碳储碳汇能力^[4]。地表基质与土地资源学中的土地、土壤学中的土壤、地质学中的风化壳、林学中的森林立地等概念均存在联系与差异^[5-6]。因此,地表基质调查与地质调查、多目标地球化学调查、全国土壤普查及土壤污染详查等相关调查在目标定位、调查内容、调查深度及精度等方面有所不同^[3]。地质图反映了基岩类型,但不包含残积物或沉积物的厚度信息^[7];土壤图有土层厚度,但缺乏质地信息,而且深度信息反映不够,即使是地质图和土壤图两者配合起来使用,也没有完全反映有残积物或沉积物的地表基质情况^[8];地表基质类型影响着山区土地抗蚀性的强弱、生态修复和土地整治的难易,已有相关调查成果的调查内容、调查深度和精度难以满足国土空间规划、生态保护修复、土地整治

等需求^[5]。因此,开展地表基质调查十分必要。

地表基质调查是一项开创性、基础性、公益性的国情国力调查,以中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心为主,带动全国各省陆续展开。地表基质调查将开展大量野外样品采集与实验测试工作,但目前调查深度与测试指标都还处于探讨阶段,为提高地表基质调查结果的规范性、权威性,构建地表基质分层及分层测试指标体系十分迫切。本文基于地表基质调查的内涵和目标定位,深入分析了多目标区域地球化学调查、全国第三次土壤普查和全国农用地土壤污染详查等调查深度和测试指标,利用近三年自然资源综合调查指挥中心在吉林省梨树县、辽宁省丹东市、黑龙江省哈尔滨市三个地表基质调查试点项目实测数据,运用变动系数法研究了地球化学元素在不同地区地表基质层垂向上的变化规律,结合表生地质作用(风化为主)最大深度、地表植被根系最大深度、浅层地下水位波动下限、基岩顶面深度等因素,提出地表基质垂向分层方案与分层测试指标体系,以期推动地表基质调查标准化、规范化,为开展高质量全国地表基质调查提供参考。

1 地表基质调查分层探讨

1.1 已有相关调查深度

自然资源部、农业农村部、生态环境部等分别开展了多目标区域地球化学调查、全国第三次土壤普查和土壤污染详查等基本国情调查,为摸清中国土地质量、加强土壤环境风险管控、土地资源管理等提供了有力支撑。本文系统梳理了相关调查的目的、深度及测试指标(表1),在充分借鉴已有相关调查经验基础上,继承与发展,研究构建地表基质调查分层及分层测试指标体系。

多目标区域地球化学调查规范(1:250000)(DZ/T 0258—2014)中规定,多目标区域地球化学调查主要针对第四系发育区开展基础性地质调查工作,以土壤地球化学测量为主。多目标区域地球化学调查中,表层土壤采样深度为0~20cm。在平原盆地、

表 1 全国主要土壤类调查汇总

Table 1 General summary of the national survey on soil in China.

牵头部门	调查名称	调查主要目的	采样深度	主要测试指标
自然资源部	多目标区域地球化学调查 (1 : 25 万)	为土资源规划与利用、土地质量、生态科学管护、农业经济区划、种植结构调整、地方病防治等提供支撑	1.表层土壤: 0 ~ 20cm。 2.深层土壤: ① 平原、盆地、黄土高原及近海滩涂到 150cm。 ② 东部与中部山地丘陵区到 120cm。 ③ 西部及边远森林沼泽、高寒山区、干旱荒漠、岩溶景观区等到 100cm。	Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Br、Cd、Ce、Cl、Co、Cr、Cu、F、Ga、Ge、Hg、I、La、Li、Mn、Mo、N、Nb、Ni、P、Pb、Rb、S、Sb、Sc、Se、Sn、Sr、Th、Ti、Tl、U、V、W、Y、Zn、Zr、SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、TF _e O ₃ 、K ₂ O、Na ₂ O、CaO、MgO、C _{org} 、TC、pH (近岸海域沉积物样品和盐碱土样品应加测含水率)
农业农村部	全国土壤第三次普查	调查土壤资源数量和质量	1.表层土壤: ① 耕地、林地、草地, 采样深度为 0 ~ 20cm。 ② 园地为 0 ~ 40cm。 2.剖面: 120cm。	土壤容重、机械组成、土壤水稳性大团聚体、pH、可交换酸度、阳离子交换量、交换性盐基及盐基总量(交换性钙、交换性镁、交换性钠、交换性钾、盐基总量)、水溶性盐(水溶性盐总量、电导率、水溶性钠离子、钾离子、钙离子、镁离子、碳酸根、碳酸氢根、硫酸根、氯根)、有机质、碳酸钙、N、P、K、S、P、Se、Fe、Mn、Cu、Zn、Mo、Al、Si、Ca、Mg、有效磷、速效钾、缓效钾、有效硫、有效硅、有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、有效硼、有效钼、游离铁、Hg、As、Pb、Cd、Cr、Ni
生态环境部, 自然资源部, 农业农村部	全国土壤污染详查	调查土壤污染情况	1.表层土壤: 0 ~ 20cm。 2.深层土壤: (1) 平原、盆地及黄土高原 150cm。 (2) 山地丘陵区 120cm。 (3) 西部及高寒山区、干旱荒漠、岩溶景观区等地区 100cm。 (4) 特殊情况, 可根据土壤实际深度采样, 并作出标记, 记录采样情况。	土壤无机污染物:总镉、总汞、总砷、总铅、总铬、总铜、总镍、总锌、总钴、总钒、总锑、总铈、总锰、总铍、总钼、氟化物、氰化物; 土壤有机污染物:多环芳烃、有机氯农药、邻苯二甲酸酯类、石油烃、挥发性有机物、酚类、硝基苯类、苯胺类、多氯联苯、二噁英类和呋喃; 土壤理化性质: 水分、pH、有机质、机械组成、阳离子交换量(CEC); 农产品(水稻/小麦污染物): 总砷、总铅、总镉、总汞、总铜、总锌、总镍、总铬;地下水无机污染物: 金属元素(同土壤)、氟化物、氰化物; 地下水有机污染物: 多环芳烃、有机氯农药类、邻苯二甲酸酯类、石油烃、挥发性有机物、酚类、硝基苯类、苯胺类、多氯联苯、二噁英和呋喃

黄土高原及近海滩涂深层采样深度达到 150cm; 东部与中部山地丘陵区深层采样深度达到 120cm; 西部及边远的森林沼泽、高寒山区、干旱荒漠、岩溶景观区等地区, 深层采样深度达到 100cm。

全国第三次土壤普查主要是以完善与校核补充土壤类型为基础, 以土壤理化性状普查为重点^[9]。全国第三次土壤普查采样分为表层、剖面两类, 耕地、林地、草地表层采样深度为 0 ~ 20cm, 园地表层采样深度为 0 ~ 40cm; 根据工作区土壤实际情况布设 120cm 少量剖面。开展全国土壤污染状况详查, 摸清全国土壤环境状况, 掌握土壤污染情况, 是制定土壤污染防治对策、做好土壤污染防治工作的基本前提。全国土壤污染状况详查为推进农用地分类管理和建设用地准入管理, 为管控土壤环境风险、保障群众健康奠定基础^[10]。全国土壤污染状况详查表层

土壤: 0 ~ 20cm; 在平原、盆地及黄土高原区采样深度达到 150cm; 在山地丘陵区采样深度达到 120cm; 在西部及高寒山区、干旱荒漠、岩溶景观区等地区, 采样深度达到 100cm。

已有的多目标区域地球化学调查、全国第三次土壤普查和全国土壤污染状况详查的调查/采样深度均在地表 2m 以浅。根据地表基质的涵义, 地表基质不仅包括 2m 以浅, 还要穿过土壤—母质, 一直延伸至基岩顶部或包气带底部。地表基质调查须全面、系统查明地表基质类型、空间结构、物质组成、理化性质等特征, 以全面掌握地表基质层的时空分布、数量质量, 以研究地表基质对地表覆盖层的支撑孕育作用。

1.2 地表基质调查分层

地表基质不仅包含表层土壤, 更侧重从地质角度研究岩石—母质—土壤成土过程演化及对地表覆

盖层(植被)的约束^[11-12]。前人根据表生地质作用(风化为主)最大深度、地表植被根系最大深度、浅层地下水位波动下限、基岩顶面深度等因素将地表基质分为0~2m表层、2~20m中层、20~50m深层^[3,11,13]。本文在前人研究基础上,结合在吉林省梨树县、辽宁省丹东市、黑龙江哈尔滨市等开展的地表基质调查试点项目成果,运用变动系数法将地表基质在垂向上分为三层:表层(0~2m)、中层(2~10m)和深层(10~20m),土层薄的地区以揭露到基岩为准。

1.2.1 地表基质调查表层(0~2m)

地表基质调查表层(0~2m),命名为生产层^[12]。一般农作物根系到达深度1m以内,少数作物最大根系深度可达2m(如玉米)。这一层包括耕作层,是土壤微生物的主要活动层位,是影响农业生产、人类健康最关键的一层,主要支撑国家粮食安全。这一层主要受气候、地表覆盖(植物根系)及人类活动(耕作)影响。

以近三年在辽河平原梨树地区黑土地地表基质调查项目实施的梨树县50m钻孔SLZK04(以下称梨树地区)、辽河平原东缘辽阳—丹东地区黑土地地表基质调查项目实施的20m钻孔KCZK04(以下称丹东地区)、松嫩平原哈尔滨地区黑土地地表基质调查项目实施的50m钻孔WCZK01(以下称哈尔滨地区)结果为例开展研究。梨树地区处于低山丘陵区黑土区,地势略有起伏,属半湿润大陆季风性气候,年均降水量587mm,年均气温6.1℃;丹东地区处于丘陵平原地带的黑土区,地势平坦,属温带大陆性季风气候,年均降水量900mm,年均气温7.8℃;哈尔滨地

区处于丘陵平原地带的黑土区,地势略有起伏,属温带大陆性季风气候,年均降水量423mm,年均气温5.6℃。在梨树地区垂向等间距每0.5m取一个样,共采集100件样品;在丹东地区根据垂向上土层变化,分层非等间距取样,共采集16件样品;在哈尔滨地区根据垂向上土层变化,分层非等间距取样,共采集30件样品。

土壤总碳、有机碳和pH受气候、地表覆盖(植物根系)及人类活动(耕作)影响较为明显,通过这三个指标在垂向变化规律反映地表基质表层(0~2m)受外界的影响程度。通过分析发现:梨树地区土壤总碳、有机碳、pH值三项指标在约2m处出现明显拐点,而SiO₂、Al₂O₃、CaO和MgO等矿质元素在2m内无明显变化(图1);丹东地区(未测pH值)土壤总碳、有机碳约在0.5m处出现明显拐点,而SiO₂、Al₂O₃、CaO和MgO等矿质元素在2m内亦无明显变化(图2);哈尔滨地区土壤总碳、有机碳、pH值三项指标在约0.42m处出现明显拐点,而SiO₂、Al₂O₃、CaO和MgO等矿质元素在2m内无明显变化(图3)。表明总碳、有机碳、pH值三项指标在表层2m内的变化较为明显,地表基质超过2m后其物理化学性状受地表自然环境、地表覆盖(植物根系)和人类活动(耕作)等影响变弱。相关学者在中国黄土高原的67个样点挖取5m深的土壤剖面,对采集的1648个土壤样本统计结果表明耕地、林地和草地土壤有机碳均在0~2m发生明显变化,而在2~5m变化相对较小^[14],与本文有机碳研究结论一致。综上,地表基质表层调查深度建议为0~2m。

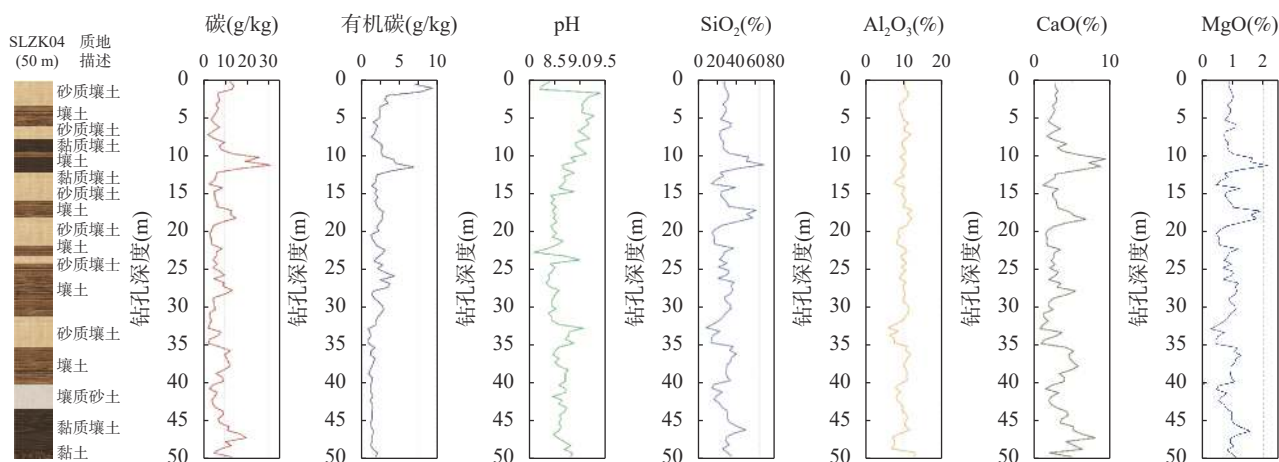


图1 梨树县50m钻孔SLZK04总碳、有机碳、pH、SiO₂、Al₂O₃、CaO和MgO含量与深度的关系

Fig. 1 Total carbon, organic carbon, pH, SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO contents in relation to depth in 50m borehole SLZK04, Lishu County area.

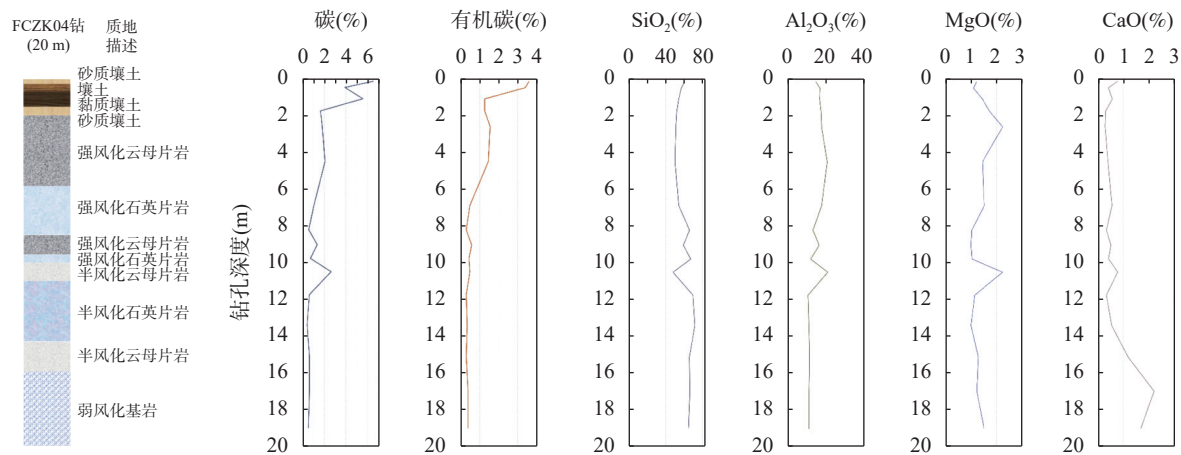


图2 丹东地区 20m 钻孔 FCZK04 总碳、有机碳、SiO₂、Al₂O₃、CaO 和 MgO 含量与深度的关系
Fig. 2 Total carbon, organic carbon, SiO₂, Al₂O₃, CaO and MgO contents in relation to depth in 20m borehole FCZK04, Dandong area.

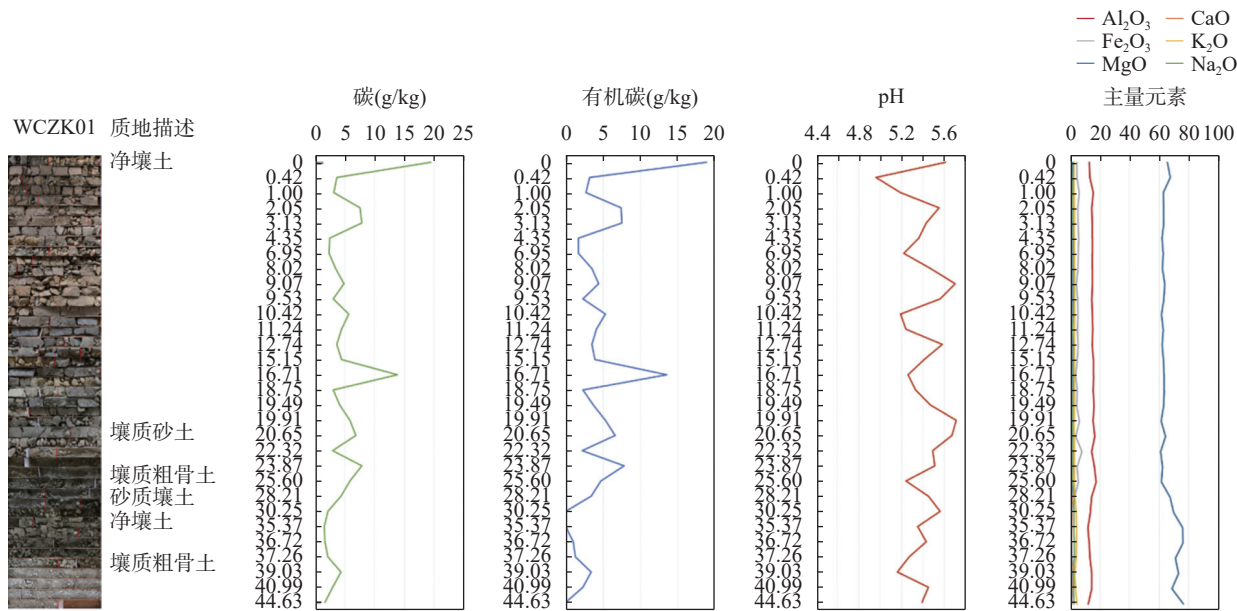


图3 哈尔滨地区 50m 钻孔 WCZK01 总碳、有机碳、主量元素含量与深度的关系
Fig. 3 Total carbon, organic carbon, and major elements contents in relation to depth in 50m borehole FCZK04, Harbin area.

1.2.2 地表基质调查中层 (2 ~ 10m)

已有相关土壤调查(如多目标区域地球化学调查)深度均在 2m 以浅,深度大于 2m 的调查相对较少,因此,地表基质调查中层 (2 ~ 10m) 是地表基质调查的重点,命名为生态层。因大多数植被的根系最大深度为 10m^[15]。该层是地下水与林草湿等植被群落的物质和能量交换层位,主要支撑植被群落生长和演替,服务国土空间开发格局优化、生态保护修复和国土整治等^[16]。

本研究以辽宁丹东 KCZK04 地表基质调查数据为例,运用变异系数法分析元素随深度变化规律,进

一步探讨地表基质调查中层 10m 的依据。

变异系数反映的是一组数据的离散程度^[16]。通过滑动窗口为 3 的变异系数,分析 0 ~ 20m 内地表基质的理化性质、常量元素和微量元素随深度增加的离散程度,滑动窗口为 3 的变异系数计算公式如下:

$$cv3_n = \sqrt{\frac{(x_n - \bar{x}_n)^2 + (x_{n+1} - \bar{x}_n)^2 + (x_{n+2} - \bar{x}_n)^2}{2 \times \bar{x}^2}} \times 100\%$$

式中: $cv3_n$ 为第 n 层的滑动窗口为 3 的变异系数; x_n 为第 n 层土土壤的指标; $\bar{x}_n$ 为 x_n 、 x_{n+1} 和 x_{n+2} 的平均值;

$\bar{x}$ 是该土壤所有层的平均数。

根据各项指标在 10m 深度时是否趋于稳定,可将研究结果分为两类:一类指标在达到某一深度后,其值基本趋于稳定,滑动变异系数 $<10\%$;另一类是土壤指标变化较大,滑动变异系数 $\geq 10\%$ 。对于趋于稳定的指标,从深向浅,根据其滑动变异系数 $<10\%$ 的层位,确定为其调查深度。对辽宁丹东 KCZK04 钻孔中 41 种元素随深度变化进行了统计,结果见表 2、表 3。

从表 2 可以看出,TC、C_{org}、Ba、Be、Bi、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO、K₂O 等 10 项指标,在深度达 11.75m 时,其滑动变异系数均小于 10%,表明其在达到 11.75m 后基本趋于稳定;表 3 表明,其他 31 项指标其滑动变异系数小于 10% 区间均落在 10~16m 之间,说明 31 项指标在 10~16m 后趋于稳定。因此,综合考虑前人研究结果大多数根据最长达 10m 及实际调查时的经济成本,将地表基质调查中层建议确定为 2~10m。

1.2.3 地表基质调查深层 (10~20m)

地表基质调查深层 (10~20m),一般为基岩之上的第四系松散沉积物层,是地下水循环、物质能量循环的通道^[17-18]。主要进行岩石—风化壳—土壤成土演化过程研究。有学者将地表基质调查 0~50m 命名为生活层,认为这一层主要是人类利用地下空间生产生活的层位,主要支撑城市规划建设^[3],本文从地表基质是孕育和支撑森林、草原、水等各类自

然资源的基础物质的涵义出发,命名为沉积层。

丹东地区 41 种元素在 10~20m(最大深度 16m 时)含量基本趋于稳定(表 3);选择梨树地区对人体健康影响较大的有毒有害元素为例,Cu、Hg、Pb、Ni、As、Cd、F、Cl 等在 10~20m 区间的变化情况基本能代表其在 20~50m 区间的变化规律(图 4)。结合深部调查施工困难和经济成本,深层调查部署少量工程控制,建议地表基质深层调查深度为 10~20m。

不同区域、不同地表基质类型的调查深度还应因地制宜,综合考虑研究区地下水深度、风化壳发育程度、冻土区冻土层厚度、岩溶区岩溶表层厚度、黄土区黄土垂直节理发育程度、黑土区黑土层厚度、盐渍区荒漠化和盐渍化程度、矿区采空区深度等个性化问题,视研究区特殊情况适当调整调查深度。

2 地表基质调查测试指标体系设计

2.1 地表基质调查测试指标体系设计原则

为准确反映地表基质不同层类型、理化性质及成土演化特征,揭示地表基质对地表覆盖层林草、作物等支撑孕育机理,地表基质调查测试指标选取须遵循继承性、科学性和经济性原则^[19-21]。

(1) 继承性原则。指标的设计应充分研究已有相关调查,参考对应指标标准、规范与技术要求,借鉴其能够有效地评价土地质量、土壤质量、土壤环境质量等指标,在此基础上根据地表基质调查目标定

表 2 辽宁丹东 KCZK04 钻孔土壤指标 (部分) 随深度变化的滑动为 3 的变异系数

Table 2 Coefficient of variation of soil parameters (partial) sliding as 3 with depth in borehole KCZK04, Dandong, Liaoning, China.

取样深度 (m)	土壤指标及其滑动窗口为 3 的变异系数 (%)									
	TC	C _{org}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Ba	Be	Bi
0.14	55.96	102.32	4.21	6.56	20.17	10.87	3.34	13.99	9.06	13.16
0.48	83.63	97.60	3.33	2.05	20.65	19.27	3.34	24.09	7.77	28.82
1.09	94.39	13.31	2.15	2.94	11.99	23.94	13.67	10.69	2.65	39.70
1.75	8.92	11.74	1.24	9.56	12.40	24.07	24.72	28.36	11.10	26.70
2.59	22.45	46.74	2.92	9.03	19.34	26.25	14.94	20.46	12.71	19.50
4.51	32.69	49.40	11.13	20.33	18.01	15.94	34.00	48.72	26.46	0.79
6.88	16.98	11.74	7.99	12.66	10.62	17.63	20.96	33.49	14.72	2.22
8.22	17.86	11.53	5.97	12.58	2.92	1.26	12.43	23.61	10.82	2.14
9.03	41.60	5.87	13.19	24.36	28.76	42.42	43.05	46.59	29.90	1.65
9.78	48.37	7.90	16.22	30.47	30.20	39.98	47.31	57.28	35.76	3.60
10.50	52.21	7.93	17.97	31.62	36.12	40.80	48.45	60.87	39.75	3.59
11.75	5.33	2.17	4.17	2.4	7.89	8.62	8.09	3.92	3.99	2.54
13.41	5.55	3.84	4.50	1.19	6.60	9.04	7.85	6.01	1.46	0.65
15.13	2.77	4.44	1.13	1.25	3.26	9.05	3.94	2.26	3.53	2.43

注: 滑动变异系数 $<10\%$ 的数据, 表明该指标已趋于稳定。

表 3 辽宁丹东 KCZK04 钻孔随土壤深度增加而趋于稳定的土壤指标及其取样深度 (取整)

Table 3 Soil indicators established with depth in borehole KCZK04 in Dandong, Liaoning, and their sampling depths (rounded).

元素	取样深度 (m)	元素	取样深度 (m)
TC	12	Co	12
C _{org}	10	F	14
SiO ₂	12	Ga	12
Al ₂ O ₃	12	Fe ₂ O ₃	12
Cr	16	Hg	9
MgO	12	K ₂ O	12
Ge	16	I	3
TiO ₂	16	Li	12
Cr	16	Mo	3
As	14	Ni	12
Ba	12	Rb	14
Be	12	Sb	14
Bi	5	Sc	12
Br	14	Tl	12
Cd	16	V	12
Ce	16		

位适当增加相应指标, 实现与已有调查数据的衔接、共享, 提高地表基质调查效率, 降低调查成本。

(2) 科学性原则。聚焦地表基质对林、灌、草、农作物等不同地表覆盖的支撑孕育作用, 地表基质在垂向上不同深度设计分层指标; 针对地表基质特性和成土过程研究, 设计必测指标和针对调查区特殊背景的选测指标两大类; 根据不同分类指标的科学涵义, 设计具体测试指标, 保证指标体系系统、科学、合理。

(3) 经济性原则。指标设计统筹考虑经济成本

和指标测试难易程度。大宗批量面积性调查常规性指标应当是中国大多数取得省级以上资质认定的实验室有能力承担的指标; 同时考虑电感耦合等离子体质谱、电感耦合等离子体发射光谱、X 射线荧光光谱等仪器能多元素同时测试的因素, 最大限度地节省成本。

2.2 地表基质调查与已有相关调查测试指标的区别与联系

已有相关土壤调查因目标任务不同, 选择的测试指标也有差异。其中, 多目标地球化学测试指标侧重反映土地质量的元素及化合物 54 项^[21]。全国第三次土壤普查的目标是为全面查清农用地土壤质量家底, 对耕地: 表层样品测试 33 项, 剖面样品测试 43 项; 对林地、草地: 表层样品仅测试 11 项, 剖面样品仅测试 17 项。全国土壤污染状况详查则侧重土壤污染物指标, 测试指标包含 17 项无机污染物、11 项有机污染物和 5 项理化性质指标 (详见表 1)。

多目标区域地球化学调查在土壤质量各类评价中发挥了重要作用^[22]。如利用 Se、C_{org}、pH 及重金属等指标, 评价了全国耕地地球化学状况; 利用 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、Sb 和 Se 数据, 评价了中国 31 个省会城市的土壤环境质量; 利用 C_{org} 数据分析了中国农耕区 0~20cm、0~100cm 和 0~180cm 不同厚度的土壤有机碳库; 评价了 As、F、I 等与地方性疾病的关系^[9]。借鉴多目标区域调查经验, 将 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、Sb 和 Se 等测试指标纳入地表基质调查样品测试指标体系。

全国第三次土壤普查重点是反映表层土壤质量的理化性状, 对成土过程研究较少。已有覆盖全国

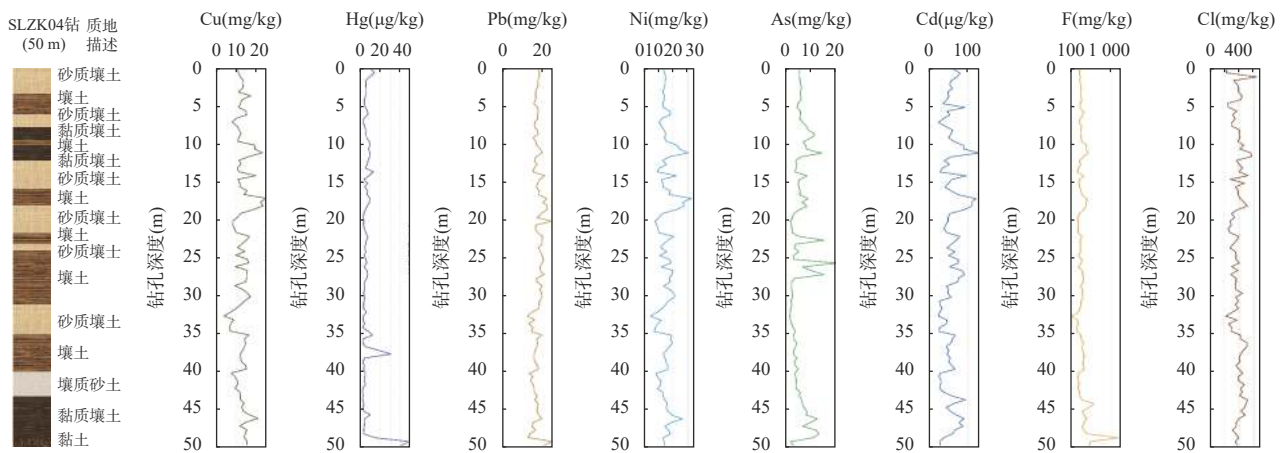


图4 梨树县 50m 钻孔各元素随深度的变化关系

Fig. 4 Relationships between elements with depth in 50m borehole in Lishu County.

的“二普”土种图中,土质、地表基质类型、厚度等信息也不全^[12],且只有0~120cm深度测试数据,对国土空间规划、高标准农田建设的支撑还不足。因此,根据地表基质定位,测试指标在土壤普查表层土壤质量的理化性状基础上,增加表征岩石—母质—土壤成土演化过程的研究性指标。

土壤污染详查侧重土壤污染情况,较少关注土壤其他物理化学性状和成土过程。因此,地表基质调查需要在收集以上资料的基础上,增加表征地表基质特征的指标如质地、营养元素等,以及表征岩石—母质—土壤成土演化过程的指标,如同位素年代、光释光、孢粉等。

2.3 地表基质调查测试指标的筛选与分类

2.3.1 必测指标

必测指标是指大尺度——全国范围内部署的面积性调查采集的大宗批量样品测试指标,主要用于查清地表基质类型、质地、空间结构、理化性质、碳储碳汇等地表基质基本特征。地表基质调查样品必测指标应包括矿质(营养)元素、重金属元素、质地(粒度)、总碳、有机碳、容重、pH值等。

(1) 矿质(营养)元素(15项)。有学者认为植物必需养分元素主要有N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn、Cu、Mo、B、Cl、C、H、O等16项。由于地表基质调查主要考虑深层地质演化对地表覆盖的影响,而Cl、C、H、O等元素的主要供给来源不是土壤,因而这些元素不纳入地表基质矿质(营养)元素测试指标。此外,增加受地表基质影响较大的Si、Se、Sr等指标。因此,为摸清不同基质为上覆植物生长提供的物质基础,筛选出N、P、K、Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn、Cu、Mo、B、Si、Se、Sr共15项指标列为地表基质矿质(营养)元素指标模块。

(2) 重金属元素(7项)。土壤中重金属调查评价与修复,特别是污染耕地的修复治理和有效利用成为各部门和科学家高度关注的热点问题^[23-24]。因此,将土壤中具有累积性强、毒性大、不可逆性、隐蔽性和滞后性强等特点的Cd、Cr、Pb、Ni、Hg、As、Sb等7种元素列为地表基质有毒有害指标模块。

(3) 质地(粒度)。质地反映地表基质中各种不同粒级土粒所占百分比,可反映不同的地表基质类型、结构。质地反映地表基质最基本的物理特征,是地表基质调查重点指标之一。

(4) 总碳与有机碳。总碳、有机碳用于碳的地质循环及土壤碳汇/源核算评估,如碳储量、碳密度、固碳潜力等评估,为双碳目标提供基础数据。同时,土

壤中的有机物质,包括土壤中的根、茎、叶及动物残体、外来有机肥及经过微生物作用形成的腐植质,是土壤氮磷钾等养分的重要来源,产生二氧化碳供作物光合作用;形成团聚体,改善土壤结构,提高黏质土的通气透水性,提高微生物活度和对金属离子的吸附性(保水保肥)。

(5) 容重。容重是反映土壤孔隙状况和松紧程度等物理性状。容重主要影响表层土壤性状,因此只测表层0~2m。

(6) pH。pH反映土壤酸碱度。该指标影响土壤养分、微量元素硒、铜、镉等有益有害元素植物有效性。因pH受气候、植被、人类活动等影响明显,2m以下较多受岩石性质的影响,变化不明显,因此只测表层0~2m。

2.3.2 选测指标

根据地表基质的地质成因,分析地表基质演化规律及其对表生过程和多圈层相互作用的影响和响应,此类指标取样时需从基岩—母质—土壤连续取样,根据研究区特点和研究目的有针对性地增加选测指标,包括但不限于以下指标。

(1) 碳同位素(¹⁴C)。用于测定第四纪沉积物成土年代(1万年以内)。

(2) 光释光。用于测定第四纪沉积物成土年代(10万年以内)。

(3) 孢粉。用于反映产生它们的母体植物生长时期的各种自然环境条件,可以用来鉴定地层时代,推测古地理环境。

(4) 黏土矿物。用于研究不同层位地表基质中黏土矿物构成、恢复成土时的气候与环境。

(5) 磁化率。用于反映沉积物中磁性矿物的含量,磁化率曲线变化是剖面岩性和沉积旋回,作为古环境/古气候重建的代用指标。

(6) 主量元素。基质中K₂O、Na₂O、CaO、MgO、Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃、MnO₂、P₂O₅、TiO₂含量,用于分析地表基质物质来源、形成条件与演化特征等。

(7) 稀土元素(15项)。基质中稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y)用于揭示基岩与上层土壤的继承、演化关系;通过土壤、半风化层、基岩层不同层位样品中稀土元素含量,可用来判定地质体深化过程中是否有外来物质加入或迁入的重要地球化学方法,从而判定土壤对母质的继承性。还可通过稀土元素地球化学特征,探讨矿床的成矿物质来源、成矿流体演化以及矿床成因。

此外,在特殊地质体分布地区,如盐碱化地区,可增加表征盐碱程度的水溶性盐总量指标,如水溶性盐总量 $\geq 1.0\text{g/kg}$ 时,增加检测 8 大阴阳离子指标;在污染地区,可增加金属元素有效态、有机污染物等测试指标,以及进行污染物来源解析所需同位素等指标;在硫化物矿化区、黑色岩系与碳质泥页岩分布区、煤系地层和磷矿分布区等,可增加饮用水、动植物等影响人体健康的样品采集与有关指标测试;在成矿元素异常区,可根据异常元素与伴生元素种类,增加相应的测试指标;同时,结合测试技术 ICP-MS 适合低含量、ICP-OES 适合高含量、XRF 无需溶样,且均能多元素同时测试等优势^[25-27],选测其他相应指标。

3 地表基质分层测试指标体系构建

根据以上地表基质调查必测指标和选测指标的涵义,结合地表基质调查表层(0~2m)、中层(2~10m)和深层(10~20m)不同质地层与地表覆盖

层的支撑孕育特征和耦合关系,构建“4+N”型测试指标体系(表 4)。“4”指 4 类必测指标模块,包括:表征地表基质的物理性状(3 项)、矿质(营养)元素(15 项)、重金属元素(7 项)、碳(2 项); N 是指 N 类选测指标模块,包括表征地表基质成土年代(5 项)、演化特征(38 项)、盐碱化(9 项)、元素形态(7 项)等主要的特殊性指标。

4 结论

地表基质调查是一项创新性工作,其调查深度和测试指标还处于探索阶段。本文基于地表基质的科学内涵,在梳理多目标区域地质调查等已有相关土壤调查基础上,利用近三年在梨树地区、丹东地区、哈尔滨地区开展的地表基质调查试点项目成果,运用变动系数法、图表法等研究了不同元素在不同地区地表基质层垂向上的变化规律,结合表生地质作用(风化为主)最大深度、地表植被根系最大深度、浅层地下水位波动下限、基岩顶面深度等因素,将地

表 4 地表基质分层测试指标体系

Table 4 Indicator system for ground substrate layering tests.

指标分级	指标分类	具体指标	垂向分层测试指标			
			0~2m	2~10m	10~20m	基岩
必测指标	物理性状(3 项)	容重 质地 pH	√ √ √	— √ —	— √ —	— — —
	矿质(营养)元素(15 项)	氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、锌、铜、钼、硼、硅、硒、锶	√	√	√	—
	重金属元素(7 项)	镉、铬、铅、镍、汞、砷、锑	√	√	√	—
	碳(2 项)	总碳、有机碳	√	√	√	—
选测指标	成土年代类(5 项)	碳同位素(^{14}C)	□	□	□	—
		光释光	□	□	□	—
		孢粉	□	□	□	—
		黏土矿物	□	□	□	—
		磁化率	□	□	□	—
	演化特征类(38 项)	主量元素(10 项): K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 MnO_2 、 P_2O_5 、 TiO_2	□	□	□	□
		微量元素(13 项),包括:植物必需的微量营养元素硫、锌、铜、硼、钼、氯;过量有害元素砷、镉、铅、汞、铬、镍、硒	□	□	□	□
		微量稀土元素(15 项): La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu、Y	□	□	□	□
	盐碱化指标(9 项)	水溶性盐总量 阳离子: Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 阴离子: SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-}	□	□	□	□
	元素形态指标(7 项)	水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、强有机结合态、弱有机结合态、铁锰结合态、残渣态	□	—	—	—

注:“√”代表必测指标;“—”代表不测指标;“□”代表选测指标。

表基质在垂向上分为三层: 表层 (0 ~ 2m)、中层 (2 ~ 10m) 和深层 (10 ~ 20m), 基岩埋深浅则以揭露到基岩为准; 表层 (0 ~ 2m) 主要服务国家粮食安全, 以收集资料为主; 深层 (10 ~ 20m) 主要研究表层—中层—深层—基岩演化规律特征, 以部署少量工程控制为宜; 中层 (2 ~ 10m) 主要服务国土空间开发、生态保护修复和土地整治等, 是地表基质调查的重点。基于地表基质调查涵义和地球化学元素在垂向上的变化规律和, 提出地表基质垂向 4+N 型分层测试指标体系, 以期推动地表基质调查标准化、规范化, 为地表基质调查在全国顺利展开提供参考。

地表基质调查在全国陆续展开, 将采集大量的

样品需要分析测试, 在明确地表基质调查分层及分层测试指标基础上, 需要尽快建立地表基质样品制备、测试技术方法体系和全流程质量控制体系, 以确保全国性地表基质调查数据准确、权威、可比, 经得起后人和历史的检验。

由于本文实测数据来源于黑土地表基质调查试点项目成果, 在分层和分层测试指标设计上存在一定的局限性, 后期需根据不同类型地表基质调查成果进一步完善。

致谢: 感谢中国地质大学 (北京) 地球科学与资源学院杨忠芳教授给予的指导和帮助。

Exploration on the Stratification of the Ground Substrate Survey and the Design and Construction of Its Testing Indicator System

LIU Jiufen^{1,2,3}, ZHAO Xiaofeng^{1,2,3}, HOU Hongxing⁴, QIN Tian⁴, CHEN Zhansheng⁵, XU Liming⁶, YANG Ke⁶, KONG Fanpeng⁷, LIU Xiaohuang^{2,3}, LU Bing⁶, LI Ziqi¹, LIU Jia⁸, BAO Ruyi¹, HAO Aibing^{2*}

(1. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

2. Command Center for Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Beijing 100055, China;

3. Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Beijing 100055, China;

4. Langfang Center for General Survey of Natural Resources, China Geological Survey, Langfang 065000, China;

5. Center for Geophysical Survey, China Geological Survey, Langfang 065004, China;

6. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150081, China;

7. Mudanjiang Natural Resources Survey Center, China Geological Survey, Mudanjiang 157000, China;

8. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

HIGHLIGHTS

- (1) To accelerate the standardization and normalization of the ground substrate survey, the connotation and targeting of ground substrate in relation to national soil surveys (such as Multi-Objective Regional Geochemical Surveys) were clarified; the stratification of ground substrate survey and testing index systems were systematically discussed based on the pilot results of the ground substrate survey carried out in the Northeast black soil in the past three years.
- (2) Total carbon, organic carbon, and pH showed obvious inflection points at about 2m, while mineral elements such as SiO₂, Al₂O₃, CaO, and MgO showed no obvious changes at shallow depths of 2m.
- (3) The ground substrate survey was roughly divided into three layers: the surface layer (production layer, 0-2m), the middle layer (ecological layer, 2-10m), and the deep layer (sedimentary layer, 10-20m). A 4+N-type stratified testing index system for the ground substrate survey was constructed.

ABSTRACT: The ground substrate layer is the main carrier of the material and energy cycle of the earth's surface. At present, it is essential to have a suitable ground substrate stratification and testing index system for conducting an effective ground substrate survey. Based on the pilot results of the ground substrate survey project in the past three years, and the links between ground substrate with Multi-Objective Regional Geochemical Surveys, the Third National Soil Census and the National Detailed Survey of Soil Pollution on Agricultural Land, the ground substrate can be vertically divided into three layers: the surface production layer (0-2m), the middle ecological layer (2-10m) and the deep sedimentary layer (10-20m). If the depth of the base layer is less than 20m, the ground substrate is exposed to the bedrock. The surface layer mainly serves the national food security, and mainly collects data; the middle layer focuses on territorial space planning, and is the focus of investigation; the deep layer is mainly to explore the ground substrate from bedrock-deep layer-middle layer-surface layer succession pattern, a small amount of engineering control is appropriate. The proposed vertical stratified test index system for ground substrate includes 4 required indices and N selected indices. The established stratification and stratification test index system of ground substrate can provide reference for standardizing the ground substrate survey and promote the high-quality development of the ground substrate survey. The BRIEF REPORT is available for this paper at <http://www.ykcs.ac.cn/en/article/doi/10.15898/j.ykcs.202310080157>.

KEY WORDS: ground substrate; ground substrate survey; the stratification of the ground substrate survey; testing indicators for layers

BRIEF REPORT

Significance: The ground substrate is defined as “the base material currently exposed at the shallow surface of the Earth's landmass or at the bottom of a body of water. It is formed mainly by natural materials through natural action and can be nurtured and supported by various types of natural resources, such as forests, grasslands, and water”^[1]. Therefore, the biogeochemistry and hydrological cycles, as well as energy exchanges between the elements of the ground substrate layer and the surface cover layer, determine the fundamental characteristics of ecosystems^[2]. Various ground substrates support different types of vegetation and influence the spatial pattern and evolutionary trajectory of regional ecosystems^[3]. In this study, we propose a set of indicators for vertical stratification and testing of ground substrate, with the aim of standardizing and normalizing the ground substrate survey. This will provide a reference for the efficient and high-quality development of the national ground substrate survey.

Methods: Firstly, we referred to the Multi-Objective Regional Geochemical Surveys, the Third National Soil Census and the National Detailed Survey of Soil Pollution on Agricultural Land, and other survey stratification and testing indices. Secondly, the data was based on three pilot projects of ground substrate surveys in Lishu County of Jilin Province, Dandong City of Liaoning Province and Harbin City of Heilongjiang Province. These surveys were conducted by the Command Center for Comprehensive Survey of Natural Resources over the past three years and were analyzed using statistical methods to assess the vertical characteristics. Thirdly, the minimum depth that can be reached by epigenetic geological processes (where weathering is dominant), the depth that surface vegetation roots can penetrate, the lowest fluctuation of the shallow water table or the irregular top surface of bedrock, and other related factors were considered. Finally, the index system for vertical stratification and testing of ground substrate stratification was proposed.

Data and Results: (1) Ground substrate stratification. On the basis of previous research, this paper combines the results of the pilot project of ground substrate investigation and utilizes statistical methods such as the chart method and coefficient of variation method to classify the ground substrate into three layers vertically: the surface layer (0-2m), the middle layer (2-10m), and the deep layer (10-20m), and the area with a thin layer of soil is subject to the disclosure to bedrock. The ground substrate investigation of the surface layer (0-2m), is named as the production

layer. Generally, the root system of crops reaches a depth of 1m or less, and the maximum depth of the root system of a few crops can reach 2m (e.g., corn). This layer includes the tillage layer, which is the main activity layer of soil microorganisms, it is the most critical layer affecting the agricultural production and human health, and it mainly supports the food security of the country. This layer mainly contains the information for the contents and indicators affected by climate, ground cover (plant roots) and human activities (tillage). The middle layer of the ground substrate survey (2-10m) is the focus of the ground substrate survey and named as the ecological layer, because the maximum depth of the root system of most vegetation is 10m^[15]. This layer is the material and energy exchange layer between groundwater and vegetation communities such as forest, grass and wetland, which mainly supports the growth and succession of vegetation communities and serves the optimization of the development and protection pattern of land space^[16]. Ground substrate investigation of the deep layer (10-20m), is generally the Quaternary loose sediment layer above the bedrock, and is the channel of groundwater circulation, driving the material energy cycle^[17-18]. The main research is conducted on the evolutionary process of rock-weathered crust-soil formation. Some scholars named the ground substrate investigation 0-50m as the living layer, which is considered to be the layer mainly for human production and living by using the underground space, and mainly supports urban planning and construction^[3].

(2) Test indices of the ground substrate survey. In order to accurately reflect the different layers of the ground substrate type, physical and chemical properties and evolutionary characteristics of soil formation, and to reveal the surface substrate on the surface cover layer of forests and grasses, crops, etc. to support the nurturing mechanism, the surface substrate survey and test index selection must follow the principles of inheritance, science and economy^[19-21]. It is divided into mandatory indicators and optional indicators. Required indicators refer to the large-scale-nationwide deployment of area-based survey collection of bulk sample test indicators, mainly used to identify the surface substrate type, texture, spatial structure, physical and chemical properties, carbon storage and sinks and other basic characteristics of the surface substrate. Surface substrate survey samples must be measured and indicators should include mineral (nutrient) elements, heavy metal elements, texture (particle size), bulk density, pH, total carbon, organic carbon and other indicators. The indices should include mineral (nutrient) elements, heavy metal elements, texture (particle size), bulkiness, pH, total carbon, organic carbon, etc. According to the geological genesis of the ground substrate, analysis of the evolution law of the ground substrate and its influence and response to the epigenetic process and multi-circle interactions, such indicators need to be sampled continuously from bedrock-motherland-soil, and the selected indicators increased according to the characteristics of the study area and the purpose of the study.

(3) Construction of the index system for stratified testing of the ground substrate. According to the meanings of compulsory and optional indicators of the ground substrate survey, combined with the supportive and nurturing characteristics and coupling relationship between different texture strata and surface cover layers in the surface layer (0-2m), middle layer (2-10m) and deep layer (10-20m) of ground substrate survey, a “4+N” type testing indicator system was constructed (see Table 4). The “4” refers to four types of mandatory testing index modules, including characterization of the physical properties of the ground substrate (3 items), mineral (nutrient) elements (15 items), heavy metal elements (7 items), and carbon (2 items); *N* refers to *N* types of optional testing index modules, including characterization of the age of soil formation of the ground substrate (5 items), the evolutionary characteristics of the ground substrate (38 items), salinity (9 items), element morphology (7 items), the relationship of the ground substrate with the surface cover, the support and breeding characteristics and coupling of the different textures of the ground substrate (38 items), salinization (9 items), elemental morphology (7 items) and other specificity indicators.

参考文献

- [1] 侯红星, 张蜀冀, 鲁敏, 等. 自然资源地表基质层调查技术方法新经验——以保定地区地表基质层调查为例[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.
- [2] 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.
- [3] 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.
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.
- [4] 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.
- [5] 董天钰, 刘晓煌, 常铭, 等. 浅析地表基质的本质内涵及研究方向[J]. *西北地质*, 2023, 56(4): 213–217.
Dong T Y, Liu X H, Chang M, et al. Analysis on the essential connotation and research direction of surface substrate[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 213–217.
- [6] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859–1869.
Zhu Y G, Li G, Zhang G L, et al. Soil security: From Earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(12): 1859–1869.
- [7] 肖春蕾, 聂洪峰, 刘建宇, 等. 生态-地质作用模式: 诠释表生地质过程与生态特征的耦合[J]. *中国地质调查*, 2021, 8(6): 9–24.
Xiao C L, Nie H F, Liu J Y, et al. Ecological and geological interaction model: The coupling of supergene geological processes and ecological characteristics[J]. *Geological Survey of China*, 2021, 8(6): 9–24.
- [8] 张贺, 王绍强, 王梁, 等. 自然资源要素综合观测指标体系探讨[J]. *资源科学*, 2020, 42(10): 1883–1899.
Zhang H, Wang S Q, Wang L, et al. Discussion on the indicator system of comprehensive observation of natural resource elements[J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 1883–1899.
- [9] 中华人民共和国人民政府. 国务院关于开展第三次全国土壤普查的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5678068.htm, 2023-8-18.
The State Council, The People's Republic of China. State council on the conduct of the Third National Soil Census[EB/OL]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5678068.htm, 2023-8-18.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 关于印发全国土壤污染状况详查样品分析测试方法系列技术规定的通知[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201711/t20171106_425226.htm, 2023/08/18.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Circular on the issuance of a series of technical regulations on analytical test methods for samples from the national detailed investigation of soil pollution situation[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgth/201711/t20171106_425226.htm, 2023/08/18.
- [11] 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. Earth's critical zone classification methodology and case study of China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2021, 51(10): 1681–1692.
- [12] 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.
- [13] 王京彬, 卫晓锋, 张会琼, 等. 基于地质建造的生态地质调查方法——以河北省承德市国家生态文明示范区综合地质调查为例[J]. *中国地质*, 2020, 47(6): 1611–1624.
Wang J B, Wei X F, Zhang H Q, et al. The eco-geological survey based on geological formation, exemplified by integrated geological survey of national ecological civilization demonstration area in Chengde

- City, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 2020, 47(6): 1611–1624.
- [14] Zhou J, Wang Y, Tong Y, et al. Regional spatial variability of soil organic carbon in 0–5m depth and its dominant factors[J]. *Catena*, 2023, 231: 107326.
- [15] 殷志强, 郝爱兵, 吴爱民, 等. 承德自然资源综合调查主要进展与全国自然资源综合调查总体思路[J]. *地质通报*, 2022, 41(12): 2087–2096.
- Yin Z Q, Hao A B, Wu A M, et al. The key progress in Chengde and the national proposal of the integrated survey of natural resources[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2087–2096.
- [16] 陶志富, 葛璐璐, 陈华友. 基于滑动窗口的一类非负可变权组合预测方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1446–1452.
- Tao Z F, Ge L L, Chen H Y. Non-negative variable weight combination forecasting method based on sliding window[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(6): 1446–1452.
- [17] 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. Research ideas for investigating the surface substrate of black soil in low hilly areas[J]. *Chinese Land Resources Economy*, 2023, 36(2): 81–89.
- [18] 张凤荣. 岩石土壤土地通识[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2022: 99–103.
- Zhang F R. Rock-soil-land general knowledge[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2022: 99–103.
- [19] 张凤荣. 论地表基质层重点调查内容和优先调查区域[J]. *中国土地*, 2023(2): 40–41.
- Zhang F R. On key survey elements and priority areas for the surface substrate layer[J]. *Chinese Land*, 2023(2): 40–41.
- [20] 杨娜娜, 张新长, 朱紫阳, 等. 广东省自然资源调查监测分类标准体系研究[J]. *测绘通报*, 2021, 534(9): 145–150.
- Yang N N, Zhang X C, Zhu Z Y, et al. Classification standard system of natural resources survey and monitoring in Guangdong Province[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021, 534(9): 145–150.
- [21] 张勤. 多目标地球化学填图中的 54 种指标配套分析方案和分析质量监控系统[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 292–297.
- Zhang Q. A complete set of analytical schemes and analytical data monitoring systems for determinations of 54 components in multi-purpose geochemical mapping[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 292–297.
- [22] 李括, 彭敏, 赵传冬, 等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. *地学前缘*, 2019, 26(6): 128–158.
- Li K, Peng M, Zhao C D, et al. Vicennial implementation of geochemical survey of land quality in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 128–158.
- [23] Zhao X F, Lei M, Wei C H, et al. Assessing the suitable regions and the key factors for three Cd-accumulating plants (*Sedum alfredii*, *Phytolacca americana*, and *Hylotelephium spectabile*) in China using MaxEnt model[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158202.
- [24] 赵晓峰, 雷梅, 陈同斌. 中国镉超富集植物的物种、生境特征和筛选建议[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2786–2798.
- Zhao X F, Lei M, Chen T B. Species, habitat characteristics, and screening suggestions of cadmium hyperaccumulators in China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2786–2798.
- [25] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 四川成都市唐昌镇土壤硒分布特征及影响因素[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(3): 437–450.
- Gong C, Wang L, Wang S X, et al. Distribution characteristics of soil selenium and its influencing factors in Tangchang Town of Chengdu City, Sichuan Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(3): 437–450.
- [26] 龚仓, 丁洋, 陆海川, 等. 五酸溶样-电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中的稀土等 28 种金属元素[J]. *岩矿测试*, 2021, 40(3): 340–348.
- Gong C, Ding Y, Lu H C, et al. Simultaneous determination of 28 elements including rare earth elements by ICP-MS with five-acid dissolution[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2021, 40(3): 340–348.
- [27] 李迎春, 张磊, 尚文郁. 粉末压片-X 射线荧光光谱法分析富硒土壤样品中的硒及主次量元素[J]. *岩矿测试*, 2022, 41(1): 145–152.
- Li Y C, Zhang L, Shang W Y. Determination of selenium, major and minor elements in selenium-rich soil samples by X-ray fluorescence spectrometry with powder pellet preparation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41(1): 145–152.