

矿山土壤特性及其分类研究进展^①

路晓¹, 王金满^{1,2*}, 李博¹, 白中科^{1,2}

(1 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 2 国土资源部土地整治重点实验室, 北京 100035)

摘要: 矿山土分类是认识矿山土壤的基础, 对矿山土壤系统分类研究是进行矿山土壤改良和植被重建的重要基础。本文从物理、化学、生物和污染 4 个方面阐述了矿山土壤特性的变化及其对矿山土壤系统分类的影响, 并对分类名称、依据、指标体系和分类方法的相关研究进展进行了综述。目前, 矿山土壤系统分类大多以其特有属性作为分类指标, 运用光谱技术、模糊均值法和神经网络模型等方法完成分类。但这些方法都有其自身的优缺点, 建议今后因地制宜地选取量化分类指标, 探索将主成分分析等数学模型与光谱等技术相结合的方法进行矿山土壤系统分类, 以期为今后矿山土地复垦与利用提供科学依据。

关键词: 矿山土壤; 土壤分类; 土壤特性; 开采和复垦

中图分类号: S155 **文献标识码:** A

土壤的发育过程受到自然因素和人为因素等多方面的影响, 其中自然因素包括成土母质、气候、环境、地形等, 而人为因素会使这些自然因素发生不同程度的变化, 正如矿山土壤在人类活动的强烈影响下改变了土壤发育的方向、结构、速度和强度, 其成土条件、理化性质和环境质量等也发生了很大的变化, 造成了土壤污染、土地质量退化和生产力衰竭^[1]。矿区活动造成地表不同程度的裂缝和土地塌陷, 改变了地形状况, 进而影响矿山土壤的理化性质^[2]; 矿山开采直接破坏土壤养分等状况, 减少了动植物的数量和土壤微生物的种类, 降低生物多样性^[3]; 固体废渣(煤矸石等)经雨水冲刷淋溶等作用, 改变土壤的酸碱性, 造成矿区污染^[4]。可见, 各种矿区活动都会引起土壤的物理、化学和生物等各方面特性发生改变, 造成土壤养分含量下降, 加速土壤的贫瘠化过程, 从而使矿区农业生态环境严重破坏。

矿山开采不仅对生态环境造成巨大威胁, 而且给土壤质量带来很大影响, 如何对矿山土进行精准分类, 是有针对性地对矿山土壤进行改良、对矿区进行复垦和植被重建的重要基础。近几年来, 为研究和解决矿山开采带来的一系列问题, 许多专家和学者在矿区土地利用^[5-6]、土地复垦^[7-8]、土壤改良^[9-10]等领域展开了深入研究, 但关于矿山土分类研究不足。土壤

分类主要包括土壤发生学分类和土壤系统分类两大类。土壤发生学分类主要是依据土壤的发生演变规律来划分, 而土壤系统分类则是依据土壤本身性质进行分类。矿山土的形成主要是由于人为活动对土壤的特性产生了影响, 因而采用土壤系统分类方法更适宜。为此, 本文对矿山土壤特性, 矿山土分类名称、依据、指标体系以及矿山土分类技术和方法进行综合分析, 以期更好地为矿山土系统分类研究提供理论依据和技术支撑。

1 矿山土特性及其对矿山土系统分类的影响

矿山开采对土壤各方面性质造成不同程度的影响, 使土壤构型、地表形态和植被状况发生变化, 严重影响土壤分类工作。因此, 深入研究和分析矿山土特性及其对矿山土分类的影响是科学合理进行矿山土分类的前提和关键。

1.1 物理特性及其对矿山土系统分类的影响

1.1.1 土壤剖面构型 土壤剖面构型的复杂变异性是矿区土壤的典型特点之一, 定量描述土壤剖面构型对矿区土壤分类有极其重要的作用。邢虹娟^[11]运用矿区沉降预计软件对矿区拟破坏土地面积大小、破坏程度和生态环境影响进行预测分析, 发现土地塌陷使土壤剖面构型破坏严重, 土壤理化性质发生复杂变

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271528)资助。

* 通讯作者(wangjinman2002@163.com)

作者简介: 路晓(1991—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事土地整治与生态恢复研究。E-mail: luxiao002016@163.com

化,依据其预测结果将土壤理化性质作为矿山土分类的一个影响因子,便于矿区土地复垦的可行性分析;李梅和张学雷^[12]、余海铭和樊贵盛^[13]通过分析不同土壤剖面构型对土壤肥力状况和入渗能力的影响,发现土壤剖面构型与土壤肥力关系密切,对土壤的入渗能力也有明显影响,从而依据土壤剖面构型分布状况将土壤肥力和入渗能力作为矿山土分类的另一影响因子,反映矿区土壤的改良状况;檀满枝等^[14]结合普通克里格空间预测方法,发现不同土壤剖面构型在空间上的分布规律,在宏观上为区域矿山土壤分类和利用提供了更加客观、丰富的基础信息。可见,将以上几方面融合起来,将矿区土壤剖面构型作为分类指标,构建指标层,对于矿山土分类、土地复垦与改良有极其重要的作用。

1.1.2 土壤质地 矿山开采改变了原有土壤结构,使土壤水分含量减少、植被盖度降低、风蚀作用增强。莫爱等^[15]用土壤学基本方法和理论发现矿山土壤黏粒物质不断减少、沙化现象严重,且其含量在土壤表层和底层的程度不一;因此,针对矿山土壤质地快速分类的要求,曾庆猛等^[16]运用偏最小二乘法建立质地预测模型和粒级回归模型,从谱线特征、样本漫反射方式、仪器精度和谱区范围不同角度进行对比分析,发现不同条件下近红外光谱分析方法用于土壤质地分类研究的可行性,从而为矿山土壤分类提供依据。

1.1.3 土壤持水能力 矿区土地塌陷造成的土壤裂缝加强了风力挟走土壤水分的能力,增加土壤水的蒸发面积和强度,危及植物生长^[17];土地塌陷对土壤的持水能力构成极大威胁,影响土壤有机物和矿物质的分解、淋溶和沉积^[18],可见土壤持水能力与矿区动植物生长和有机物分解等生物化学反应均有密切关系。此外,史文娟等^[19]和臧荫桐等^[20]利用室内土柱构建土壤母质分层对土壤持水性能的影响实验,发现土壤持水能力的大小同样与分层土壤质地差异相关;任利东等^[21]利用 Hydrus-1D 模型模拟不同类型层状土壤排水过程中水分动态变化,揭示了不同土壤层状类型持水能力的差异,为矿山土壤在持水性能分类中的应用提供理论指导。因此,将土壤持水能力作为矿山土分类的影响因子,可有效了解土壤质量,为矿区土地利用提供依据。

1.1.4 土壤体积质量 土壤体积质量作为矿山土物理特性之一,受到土壤深度、结构等自然因素和人为扰动等人为因素两方面影响。臧荫桐等^[20]发现废弃矿山的坡底、坡中和坡顶受到土地塌陷区的扰动

情况不同、土壤结构破坏程度不同、土壤体积质量的变化也存在很大差异;韩光中等^[22]基于我国现有土壤数据库,利用 SPSS 逐步回归方法确定了土壤体积质量传递函数,说明了土壤体积质量与特殊的人为成土环境与成土过程有关,故从自然和人为两方面综合分析土壤体积质量变化,对矿山土壤类型的确定有很高的实用性。

综上,从土壤剖面构型、土壤质地、持水能力和土壤体积质量 4 个方面分析矿山土的物理特性,可以发现矿山土壤剖面发生层分化较明显,各剖面的有效土层随采矿活动的加强不断变化,进而影响矿山土的生产能力,以其生产力大小为依据,结合矿山土壤物理性质变化特点进行矿山土分类,可服务于矿区系统功能修复工作。

1.2 化学特性及其对矿山土系统分类的影响

1.2.1 土壤有机质 土壤有机质是土壤中营养元素的重要来源,它对促进土壤结构的形成、提高土壤的保肥能力起着非常重要的作用。胡克林等^[23-28]经过多年的连续观测和实验分析土壤有机质时空变异情况,发现土壤类型和土地利用方式是土壤有机质的主控因素;由于土壤有机质对土壤含水量和 pH 等也有一定的影响^[29],分析土壤的有机质情况可以为矿山土壤系统分类和矿区土地利用提供一定的科学依据,并为矿山土地管理和利用提出可行性建议。

1.2.2 土壤酸碱性 采矿活动造成矿区表层土壤盐分积累,交换性钠离子含量增高,土壤 pH 发生变化,影响土壤有机质的分解和营养元素的循环^[30],对此王宁等^[31]从改良土壤状况出发,结合生态效益和经济效益,分析土壤酸碱化的机理和危害,总结管理和改良酸性土壤研究进展,为矿山土快速分类等相关研究提供了借鉴。

1.2.3 营养元素含量 矿区土地塌陷使土壤营养元素缺失,对氮素而言,硝态氮从土壤表层淋至较深土层,水解性有机氮通过矿化作用转化为易流失的无机态氮^[32];对磷素而言,非活性磷素随淋溶作用进入深层土壤,而其他形态磷在降雨集中时期被雨水冲刷流失,造成不同土壤粒级中磷的分布和矿化特征发生变化^[33];为了进一步了解土壤营养元素变化情况,Christensen 等^[34-35]利用超声波分散-沉降法分析氮、磷、钾在不同土壤颗粒中的分布特征及其对土壤养分的影响,发现土壤养分含量与土壤粒径和土壤风化程度均有很大关系。由此可知,了解矿山不同土壤粒级中营养元素组成和含量,可为揭示土壤肥力本质、阐明土壤养分循环状况以及合理进行矿山土分类提供

科学支撑。

由于土壤的有机质含量表现在矿山土壤腐殖质层的厚度上,且其酸碱性和营养元素含量在不同程度上影响土壤中一系列的生物化学反应,并对土地的复垦类型和土地利用起到干扰作用,因此,了解土壤的化学特性亦是矿山土分类的重要前提和基础。

1.3 生物特性及其对矿山土系统分类的影响

1.3.1 土壤微生物区系与数量 土壤微生物对土壤有害物质的分解、生物化学循环和土壤结构的形成起着重要的调节作用,且矿区生态系统不利于有益微生物繁殖和活动,降低了土壤中营养元素循环和能量流动速率^[36]。龙健等^[37]经过研究发现土壤微生物区系可以敏感地反映土壤环境质量的变化,且土壤微生物各主要生理类群直接关系到土壤生态系统的维持和改善。除此之外,在矿山土壤生态系统退化本质与成因的研究中,土壤微生物又被广泛用于土壤污染的生态毒理学诊断中,故以土壤污染的质量评价与修复技术为依据,划分矿山土类型,可达到改良矿山土壤基质和生态修复的目的。

1.3.2 土壤酶活性 在自然状态下酶活性大小不仅影响土壤中生化反应的方向和强度,如蔗糖酶和土壤脲酶等参与土壤中的碳循环和含氮有机物的转化,酸性磷酸酶加速土壤有机磷的脱磷速度等;而且其自身的活性也会发生变化,如土壤的过氧化氢酶、多酚氧化酶和脱氢酶活性在采矿活动下表现为下降趋势^[38]。鉴于此,徐华勤等^[39]将土壤酶活性作为评价土壤肥力指标,发现土壤酶活性大小对土壤营养元素的含量及其存在形态有直接影响,从而影响土壤肥力。可见,对矿山土壤性质和土地生产力作相关性分析,依据矿山土壤植被恢复类型,建立矿山土分类系统是恢复矿山生态系统功能的关键。

土壤的生物特性是表征土壤系统质量和土壤养分循环的重要指标,它表征了矿山土壤生态系统的稳定性及功能,是矿山土分类及矿区生态平衡的必要条件。

1.4 污染特性及其对矿山土系统分类的影响

1.4.1 矿山大气沉降污染 矿山的大气污染源主要包括采矿作业产生的烟尘、粉尘、悬浮颗粒物及其他有毒气体等。从宏观上看,彭建等^[40]探究了矿山大气污染来源,发现采矿过程中深孔爆破等机械化作业方式,产生大量的有毒有害气体以及颗粒悬浮物,严重危害矿区动植物生长和周边人们的身体健康;王晶等^[41]划分了矿山大气污染类型,将其分为烟尘、工业粉尘、矿井排风有害气体和车辆尾气等多种污染

类型。从微观上看,由矿山大气污染导致酸雨频发、土壤酸化严重、重金属含量超标,高芳蕾等^[42-43]采用 Tessier 五步连续萃取法对矿山土中 Pb、Zn、Cu 的形态分布特征进行研究,发现按照迁移性和生物活性,重金属元素依据其存在形态的不同对矿区生态环境的危害存在差异。可见土壤的理化性质和矿区大气沉降作用等均可影响矿山土中重金属的含量及存在形态,可结合这些性质建立矿山土分类指标体系,划分矿山土类型,从而确定矿山污染修复方法和技术。

1.4.2 矿山废水污染 矿山废水中含有大量的重金属离子、选矿药剂、硫酸盐及其他难溶解的分散杂质等,因其排放量大造成地表水系的污染,引起地表岩溶塌陷、水循环失衡和土地荒漠化等一系列灾害^[44-45]。为了说明这一系列灾害对矿区生态系统造成的影响,刘锦锋等^[46]进行了相关研究发现矿山开采排出的矿井水含有悬浮物和酸性成分,使土壤肥力减退、地面板结,减弱了矿区原有的承载能力。此外矿山废水中大多硫酸盐浓度相对较高,具有很强的溶解性和侵蚀性,严重污染矿区环境,且酸性矿山废水具有低 pH、高氧化还原电位及高重金属等典型污染特征,减弱了矿区周边土壤功能^[47]。为了解决这一系列矿山废水污染问题,严群等^[48]通过研究矿山废水的特点和危害,提出酸碱中和法、混凝沉降法、化学氧化法、生物法等多种矿区废水处理技术,为矿山废水治理提供技术指导。因此探明矿山废水污染周边土壤的状况,依据其潜在风险评价结果,进行矿山土污染类型分类,对于寻求经济实用的矿山废水治理方法、保护矿山环境和节约水资源有重要意义。

1.4.3 矿山固体废弃物污染 矿山固体废弃物的主要来源是矿山开采和加工过程中产生的废石、废渣和尾矿等,由于受到工艺技术和经营方式的限制,把这些固体废弃物堆砌在土地表面,造成土地资源浪费的同时引起水土流失加剧,特别是在酸雨等多种条件的长期作用下,导致部分有害元素经过淋溶作用释放,污染水质,影响矿山生态环境和人体健康^[49-50]。

因此,按污染来源表述矿山土污染特性及其对矿山土分类的影响,可知矿山大气沉降污染、废水污染和固体废弃物污染直接影响到土壤缓冲能力和自我修复能力,同时也为评价土壤保肥能力、建立矿山土壤分类系统和完善矿区土壤复垦方案提供了重要依据。

2 矿山土系统分类名称、依据和指标体系

2.1 矿山土系统分类的名称

土壤分类的名称是分类的基础和表现形式,在中

美和苏联土壤系统分类中采用分段连续命名,即土纲、亚纲、土类、亚类为一段的连续命名法^[51];中国土壤系统分类是多级分类,即土纲、亚纲、土类、亚类 4 级高级分类单元和土族、土系两级基层分类单元。其中土族作为土壤系统分类的基层分类单元,是反映与土地利用管理有关的土壤理化性质发生明显分异的续分单元,同一亚类的土族划分是由地域性差异成土因素引起土壤性质变化的具体体现,不同类别的土壤划分土族所依据的指标各异,导致其划分的依据和指标具有多元性。矿山土依据其特性,土族可根据如剖面控制层段的土壤颗粒大小级别、土壤矿物组成类别、土壤温度状况、土壤酸碱性、盐碱特性、污染特性,以及人为活动导致的其他特性等进行命名,如“壤质云母混合型-弱盐淡色潮湿锥形土”或“砂质硅质混合型非酸性热性-铁聚潜育水耕人为土”^[52-53]。但传统的土族分类命名有一定的局限性和不合理之处,易晨等^[54-55]依据中国土壤系统分类土族和土系划分标准,分析了我国土壤系统分类基层单元中的土族在命名格式上存在的问题,包括描述指标匮乏、顺序选取有误及命名格式不符、矿物学类型有误等。而其下的土系是中国土壤系统分类中最低级别的基层分类单元,它发育在相同母质上,由若干剖面形态相似的单个土体组成的聚合土体单元构成,它的性状变异范围较小,且主要考虑土族内影响土壤利用的性质差异,鉴于地区、土壤类型、利用条件的千差万别,在土系的标准中只列出可能使用的划分标准进行单独命名,在分类上具有直观性和客观性。此外,徐祥明和何毓蓉^[56]应用土壤微形态学总结了我国土壤系统分类中人为土、富铁土、变性土及其他土纲的分类成果,提出加强人为土、土壤基层分类的微形态研究,为矿山土分类的动态定量研究提供了发展方向。

而俄罗斯土壤系统分类强调成土因素对土壤的影响,将土壤归入 9 个生物气候省,再划分土类,根据土壤水热状况划分亚类,对亚类再按土属、亚属、土种、亚种、土组、土相进一步细分^[57]。由于它忽视了土壤性质在土壤分类中的作用,造成高级分类单元只反映一种自然条件的划分,将许多特性不同的土壤归并在一个土壤单元内;另一方面,它的分类指标不能量化,且分类单元中存在交叉,不利于矿山土系统分类中的野外土壤类型鉴别和统一意见。

由此可知用土族土系标准对土壤信息进行系统分类并建立数据库,可极大地改进对土壤资源的科学管理,由于在鉴定矿山土壤类别并进行命名时,成土条件、成土过程和土壤属性三者难以统一,需要选择

土壤本身的性质作为分类指标,保证分类结果符合形式逻辑规则,提升科学价值。

2.2 矿山土系统分类依据

从 20 世纪 50 年代初开始,美国土壤学方面的专家和学者经过大量的实验和研究,制定了一项土壤分类制,该土壤分类制从土壤属性出发,以诊断层和诊断特性为依据,规定划分标准,并确定其在分类系统中的位置。面对矿山土壤这一人为因素主导下的新情况,其系统分类既要考虑与国际土壤分类相接轨,又要考虑矿山土壤种类复杂这一现实,在过去的矿山土壤分类历史进程中,对分类依据的选择较为灵活,从发生学分类到形态学分类再到诊断学分类,直至目前的自动化数值分类^[58],其分类依据的逐步完善、标准化和量化对土壤科学相关领域的发展具有借鉴意义。目前的美国土壤系统分类常把土壤温度与水分作为重要依据,尤其是表现在亚纲的划分上;而中国土壤系统分类在区域和单个土体等不同层面与发生学分类制作参比,又与国际的美国土壤系统分类(ST)和世界土壤资源参比基础(WRB)制作参比^[59-60],为建立矿山土壤指标化和数值化分类提供了非常重要的实用价值。

之后许多专家和学者又依据土壤性质、指标和模型等建立了土壤系统分类,例如曾庆猛等^[16]对矿山土壤剖面进行研究,并依据土壤粒径、矿物性质、温度等特点把土壤质地划分为 7 级;陈培珠和王芳^[61]又以数种指标确定诊断土层,建立复合指标,并依据这些复合指标进行土壤分类。他们的研究均以定性分类为主;侯彦林^[62]则运用区域土壤数值分类模型(RSCM),对矿山土壤层样本进行主成分分析,实现土体构型的数值化,确定各类型间的界线和指标,得出分类结果,弥补了矿山土定量化分类的短缺。此外安红艳等^[63]结合具体分类条件和要求依据有机质含量、土壤含水量、土壤养分含量等,对土壤形成条件进行调查,并进行土壤理化性质和有机质状态分析,从而使分类结果更加完善。

目前,结合矿区土壤的理化性质及其对矿山土系统分类的影响,计算机技术、3S 技术以及土壤景观模型等技术和方法被广泛应用于矿山土壤形成和分类中,依据土壤微形态学理论和方法开展矿山土壤形成和分类的研究将成为今后土壤科学相关领域研究的重点和方向。

2.3 矿山土分类指标体系

从国内外土壤系统分类来看,土壤分类指标按其性质可大致分为形态学指标(包括大形态及少量微形

态指标)、物理指标、化学指标、矿物指标及土壤气候指标,这些指标都有明确定义和具体的量值,使土壤分类向指标化、定量化的方向逐步发展和完善。比如,许端阳等^[64]选取土壤环境标准结合重金属指标构建指标体系,对土壤环境质量进行综合评价,为土壤依据其环境质量进行分类提供了可行性条件;以此为基础,Arshad 和 Martin^[65]选取表征土壤环境功能且可以测量土壤属性的指标构建指标体系,旨在衡量土壤质量及其功能属性,进而对土壤按照其功能进行分类;而吕川和陈明辉^[66]通过总结前人的土壤环境质量评价指标体系,根据地貌单元、岩石类型、土壤组合和气候特征的生态组合划分评价单元,运用欧洲环境署的 DPSRI 模型,对典型土壤污染问题进行分析,提出土壤类型与环境质量分区管理的对策建议;为了加快矿山生态环境的恢复与重建,尹海魁等^[67]又从微地貌、土壤和植被 3 个层次,选择植物生物量等 9 个指标进行相关分析,得出土壤持水量、粒级组成和植物生物量,找出矿山不同土壤类型间的差异性,从而得出分类结果,对今后的矿区土壤环境保护和区域土地利用具有重要意义。

3 矿山土系统分类技术与方法

3.1 应用光谱技术进行矿山土系统分类

土壤的光谱反射率是土壤特性在光谱信息上的综合体现,研究土壤光谱特性可以为土壤分类提供判别指标,且目前在土壤分类中应用最多的是近红外光谱分析技术,国外也逐渐将紫外、可见光等用于土壤检测的研究中。其中近红外的主要信息基础是被测物质有机分子的各级含氢集团倍频与合频在近红外谱区的吸收,如土壤化学特性主要体现在近红外光谱的谱峰特征上,而土壤质地等物理特性主要反映在光谱的截距参数或斜率上,且不同特性在不同谱区的相对强度有所不同^[68]。随后大量的实验和研究结果表明光谱技术具有测定快速方便、无损、准确等特点,在研究土壤分类方面有很高的应用潜力。如 Frost 等^[69-70]采用近红外光谱技术检测了土壤中氮、磷、钾和有机的含量,实现对土壤养分的快速分析;Linker 等^[71-73]比较了可见-近红外-中红外等波段范围进行土壤质地分类,建立土壤参数定量模型,实现矿山土的快速分类;赵帅群等^[74]则将光谱技术与数学方法相结合,运用傅里叶变换红外光谱技术和主成分分析方法(PCA)对土壤特性进行研究,分析反映样品在该段光谱的主要信息,从而为矿山土壤系统分类提供了科学依据。

此外,在矿山土壤分类研究中,应用光谱技术可以实现宏观尺度与微观尺度的有效结合,通过卫星等光谱传感器从宏观尺度检测矿山土壤状况,结合地面光谱技术从微观方面对土壤水分、理化特性等进行实时和大批量的微观分析,获取的矿山土信息量大、覆盖面宽;另一方面,光谱技术分析时效性强、分析速度快,可实现实时或在线分析,多组分之间可通过全光谱扫描,获得土壤各特性光谱信息,操作简单、成本低。但是考虑到土壤光谱特征曲线在反映矿山土壤质地信息方面要比化学和物理信息少,若采用常见的光谱图预处理方法对获得的矿山土壤光谱数据进行处理,很有可能会造成光谱特征判断解译错误的情况,可通过先引入正交信号校正方法对谱图进行预处理,然后进行特征分析,即可广泛应用于矿山土系统分类等相关研究中。

3.2 应用模糊均值法进行矿山土系统分类

基于模糊均值算法的土壤数值化分类方法是目前最为常用的矿山土壤数值化分类手段,它作为对多性状事物综合分析的数学分析方法之一,在土壤系统分类过程中,克服了单一因素进行分类的弊端,对成分复杂、界限不清的矿山土壤系统分类尤为适用^[75]。它可以得到较为实际的分类结果,为相关部门提供可靠数据,同时为改良土壤和提高肥力提供有用的价值。如付大友等^[76-77]用动态聚类方法和方差分析方法确定聚类数目和初始聚类中心,通过建立矿山土分类指标体系,用模糊 c-均值法实现矿山土的快速数值化分类;Amini 等^[78-83]把土壤剖面发生亚层的属性数据作为变量,使用主成分分析和非层级聚类方法,根据模糊 c-均值算法将土壤剖面分为不同类型,将此方法与矿山土剖面的各向异性特征相结合,进行矿山土剖面连续分类;Hengl^[84]提出将色彩合成法应用于模糊均值算法获取的地貌类型监督分类结果中,因此在矿山土分类中,可将此方法与 Mcbratney 等^[85-86]提出的模糊性能指数相结合,避免主观因素的干扰,使分类结果更精确。在矿山土连续分类与制图表达中模糊均值法还可以为矿区土壤污染空间分布、土壤质量评价、生态环境规划与保护等提供更精细的信息,使其在矿山土地复垦规划应用领域发挥重要作用,同时在地貌类型和地表植被类型等方面有广阔的应用前景。

虽然模糊均值算法有它自身的优势,比如用模糊理论可以较合理地解决一些问题,且目标函数聚类方法能够准确地用公式表达聚类准则,设计简单、解决范围广、并可以考虑样本的全局特征,转化为最优化

问题求解。但是,模糊均值算法的实时性不太好,尤其当土壤特征点很多时,该算法可能会陷入局部极值点,无法实现全局最优解,使聚类效果受到初始聚类中心和聚类数目的影响。

3.3 应用径向基函数神经网络进行矿山土系统分类

径向基函数神经网络(RBF)是一种多变量插值的3层前向型神经网络模型,它由输入层、隐含层和输出层组成,隐含层神经元传递函数是对中心点径向对称且衰减的非负非线性函数,从输入层空间到隐含层变换,再从隐含层空间到输出层空间变换都是线性的^[87]。它基于遥感图像的土壤自动分类方法,能够有效地提高分类精度,且分类结果可以为矿区土壤分类、农业利用、环境保护和资源可持续利用等方面提供数据支持^[88]。孙福振等^[89]通过仿真实验对矿山土壤分类参数进行选取和深入分析,验证了径向基函数神经网络在基于遥感图像的土壤分类中的应用价值,为今后的矿山土以及其他土壤分类提供技术支持;马海蛟和崔晨风^[90]结合BP神经网络和RBF神经网络技术进行土壤分类研究,探讨基于土壤反射光谱特性的土壤分类技术,提高了土壤分类精度和运行时间,为实现基于遥感方法进行土壤快速分类奠定基础;李启权等^[91-92]采用主成分分析方法和径向基函数神经网络模型建立环境因子间的非线性关系,发现神经网络模型能更准确反映土壤养分与环境因子间的关系,为大尺度的土壤分类提供了参考。

应用径向基函数神经网络具有优秀的离散数据内插特性,可以提供最优逼近功能,结构简单、训练速度快,函数逼近能力和分类能力强,不存在局部最优等问题,这些优点为其在矿山土系统分类中的应用奠定了基础。然而不同输入方式下RBF神经网络对土壤特性信息的空间分布插值的精度差异明显,因此在今后的矿山土壤系统分类研究中,应增加考虑距离因素的临近样点信息作为网络输入,使RBF神经网络能够更好地反映矿山土壤特性的变异信息,从而更精确地进行矿山土壤系统分类。

此外,还有其他土壤分类技术和方法可以被广泛应用于区域矿山土壤系统分类中,Carré和Mcbratney^[93]在人为设置参比土层的前提下,应用VLADIMIR半自动分类将观测剖面分为不同类型,但是此方法只考虑依据土壤剖面类型,不考虑土层厚度及土壤在剖面中的排列组合特征;Carré和Jacobson^[94]、Rayner^[95]以土壤剖面之间相似性计算为基础,采用层级式算法对土壤进行数值分类,但此方

法具有运算复杂的缺点,不适合大批量数据运算。

4 问题与展望

本文从物理、化学、生物和污染等4个方面概括总结了矿山土壤的特性及其对矿山土分类的影响,综述了相关土壤分类依据和方法的研究进展,并指出了当前矿山土分类中存在的突出问题、研究难点和今后的发展方向。当前对矿山土系统分类的研究较少,分类依据和分类方法滞后于实际需求,未形成合理的矿山土系统分析体系。因此进一步发展和优化矿山系统分类方法是当前土壤学等相关领域亟需解决的科学问题。建议今后重点围绕以下关键点,寻求突破,促进相关学科深入发展:

1) 科学设计研究方案,准确诊断矿山土壤特性。不同矿山开采造成的重构土壤特性差异显著,因此要强化不同采矿时空下的土壤系统分类研究,需开展野外长期跟踪监测矿山土壤动态特征,重点关注采矿活动对土壤微生物含量、土壤持水能力、重金属含量以及土壤污染状况等特性的影响,精确了解矿山土壤特性信息,构建矿区土壤属性、植被恢复和土地利用之间的定量关系,深入探讨不同尺度下微观特性和宏观特性间的内在关系,尤其要搞清楚矿山开采前、中、后等不同时期土壤结构及功能的异同,为矿山土壤系统分类奠定基础。

2) 合理确定矿山土壤系统分类依据和量化指标。中国土壤系统分类的最大特点是建立了诊断层和诊断特性系统,确定了土壤系统各级分类的定量指标,而目前的矿山土壤系统分类研究中,并没有依据矿山土壤自身特点形成一套完整的分类指标体系,因此需努力发展基于土壤系统分类的结构特征和量化分异功能的方法,选取科学的分类依据,确定矿山土壤系统分类的生物指标、物理指标、化学指标以及污染指标等,完善矿山土壤系统分类定量指标体系,制定出适用于不同矿区及其治理目标的土地复垦技术导则,为正确评估、筛选和优化矿区土地复垦技术提供科学依据。

3) 科学确定矿山土壤系统分类技术与方法。从目前研究来看,应用光谱技术、模糊聚类和神经网络模型等进行矿山土壤系统分类的技术与方法都有其自身的优势和局限性。由于矿山土壤性质复杂,测量工程量大,要实现对其进行快速、无损地系统分类,需要结合主成分分析和聚类分析等数学模型,综合运用光谱分析和神经网络模型等技术与方法,努力提高土壤系统分类精度和运行时间,实现分类技术与方法

的优势互补,建立与绿色矿山建设相适应的矿山土壤分类系统,为最终优化土地复垦和土地利用技术,实现矿区生态环境良性运转提供科技支撑。

参考文献:

- [1] 李玲, 宋莹, 陈胜华, 等. 矿区土壤环境修复[J]. 中国水土保持, 2007(4): 22-24
- [2] 龚子同, 张甘霖. 人为土壤形成过程及其在现代土壤学上的意义[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 184-191
- [3] 胡振琪, 魏忠义. 煤矿区采动与复垦土壤存在的问题与对策[J]. 能源环境保护, 2003, 17(3): 3-7
- [4] Zielinski R A, Otton J K, Johnson C A. Sources of salinity near a coal mine spoil pile, north-central Colorado[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(30): 1237-1248
- [5] 郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 264-267
- [6] 李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 等. 草被覆盖对坡面流流态影响的人工模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 513-523
- [7] 田凯, 李小青, 鲁帆, 等. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. 中国水土保持, 2010(4): 44-47
- [8] 王协康, 刘同宦, 叶龙, 等. 坡面柔性植被阻水效应及其局部水头损失特性试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(2): 22-27
- [9] 闫旭峰, 周苏芬, 黄尔, 等. 植被条件下坡面薄层水流动力学特性试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(2): 26-30
- [10] 钟强, 雷孝章, 任海若, 等. 柔性植被与刚性植被覆盖下坡面流阻力特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(9): 51-54
- [11] 邢虹娟. 山西省清城煤矿矿区土地破坏分析与复垦措施[D]. 太谷: 山西农业大学, 2013
- [12] 李梅, 张学雷. 基于 GIS 的农田土壤肥力评价及其与土体构型的关系[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 129-136
- [13] 余海铭, 樊贵盛. 影响土壤入渗能力的剖面因素研究[J]. 太原理工大学学报, 2009, 40(3): 307-309
- [14] 檀满枝, 密术晓, 李开丽, 等. 模糊集理论在土壤剖面质地构型中的应用——以河南省封丘冲积平原区土壤为例[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 221-229
- [15] 莫爱, 周耀治, 杨建军, 等. 山地煤矿开采对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(1): 86-89
- [16] 曾庆猛, 孙宇瑞, 严红兵. 土壤质地分类的近红外光谱分析方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1759-1763
- [17] 侯庆春, 汪有科, 杨光. 神府-东胜煤田开发区建设对植被影响的调查[J]. 水土保持研究, 1994(4): 127-137
- [18] 张锦瑞, 陈娟浓, 岳志新, 等. 采煤塌陷引起的地质环境问题及其治理[J]. 中国水土保持, 2007(4): 37-39
- [19] 史文娟, 沈冰, 汪志荣, 等. 高地下水位条件下盐渍土区潜水蒸发特性及计算方法[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 32-35
- [20] 臧荫桐, 汪季, 丁国栋, 等. 采煤沉陷后风沙土理化性质变化及其评价研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 262-269
- [21] 任利东, 黄明斌, 樊军. 不同类型层状土壤持水能力的研究[J]. 农业工程学报, 2013(19): 105-111
- [22] 韩光中, 王德彩, 谢贤健. 中国主要土壤类型的土壤容重传递函数研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 93-102
- [23] 胡克林, 余艳, 张凤荣, 等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2006, 39(4): 764-771
- [24] 荆长伟, 章明奎, 支俊俊, 等. 浙江省土壤发生分类与系统分类参比及制图研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 260-267
- [25] 秦静, 孔祥斌, 姜广辉, 等. 北京典型边缘区 25 年来土壤有机质的时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 124-129
- [26] 于东升, 史学正, 王洪杰, 等. 发生分类淋溶土与系统分类参比特征研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 845-853
- [27] 赵明松, 张甘霖, 吴运金, 等. 江苏省土壤有机质含量时空变异特征及驱动力研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 448-458
- [28] 朱静, 黄标, 孙维侠, 等. 长江三角洲典型地区农田土壤有机质的时空变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2006, 38(2): 158-165
- [29] 李玲, 张少凯, 吴克宁, 等. 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异[J]. 土壤学报, 2015(5): 979-990
- [30] 易杰祥, 吕亮雪, 刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. 华南热带农业大学学报, 2006, 12(1): 23-28
- [31] 王宁, 李九玉, 徐仁扣. 土壤酸化及酸性土壤的改良和管理[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(23): 48-51
- [32] 张丽娟, 王海邻, 胡斌, 等. 煤矿塌陷区土壤酶活性与养分分布及相关研究——以焦作韩王庄矿塌陷区为例[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(1): 126-129
- [33] 章明奎. 应用土壤测试磷评估砂土中磷的可淋洗性[J]. 土壤学报, 2004, 41(6): 996-1000
- [34] Christensen B T. Carbon and nitrogen in particle size fractions isolated from Danish arable soils by ultrasonic dispersion and gravity-sedimentation[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 1985, 35(2): 175-187
- [35] Cameron R S, Posner A M. Mineralisable organic nitrogen in soil fractionated according to particle size[J]. *European Journal of Soil Science*, 1979, 30(3): 565-577
- [36] Prasad P, Basu S, Behera N. A comparative account of the microbiological characteristics of soils under natural forest, grassland and cropfield from Eastern India[J]. *Plant & Soil*, 1995, 175(175): 85-91
- [37] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性[J]. 生态学报, 2003, 23(3): 496-503
- [38] Jordan D, Kremer R J, Bergfield W A, et al. Evaluation of microbial methods as potential indicators of soil quality in historical agricultural fields[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 1995, 19(4): 297-302
- [39] 徐华勤, 章家恩, 冯丽芳, 等. 广东省典型土壤类型和土地利用方式对土壤酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1464-1471

- [40] 彭建, 蒋一军, 吴健生, 等. 我国矿山开采的生态环境效应及土地复垦典型技术[J]. 地理科学进展, 2005, 24(2): 38-48
- [41] 王晶, 王晓磊, 姚海亮. 我国矿山环境与治理对策[J]. 煤炭技术, 2009, 28(8): 1-3
- [42] 高芳蕾, 董岩翔, 王世纪. 矿区土壤重金属元素的形态分布及生物活性[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5614-5616
- [43] 李永华, 杨林生, 王丽珍, 等. 基于BCR和HG-ICP-AES的矿区土壤重金属污染特征分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(9): 1834-1836
- [44] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453
- [45] 雷兆武, 孙颖, 杨高英. 有色金属矿山废水管理与资源化研究[J]. 矿业安全与环保, 2006, 33(4): 40-41
- [46] 刘镇锋, 资锋, 曹运江, 等. 湖南锡矿山环境地质问题及其防治对策研究[J]. 能源与环境, 2015(1): 58-59
- [47] 张春辉, 吴永贵, 付天岭, 等. 矿山废水污染对稻田土壤环境特征及不同形态氮含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2014(1): 122-126
- [48] 严群, 黄俊文, 唐美香, 等. 矿山废水的危害及治理技术研究进展[J]. 金属矿山, 2010(8): 183-186
- [49] 黄宝萍. 浅谈矿山固体废弃物的处理与利用[J]. 中国科技博览, 2015(3): 352-352
- [50] 于素红, 魏永齐, 尹红美. 露天采矿矿山地质环境治理与恢复的意义[J]. 地下水, 2011, 33(1): 142
- [51] 张凤荣, 王秀丽, 梁小宏, 等. 对全国第二次土壤普查中土类、亚类划分及其调查制图的辨析[J]. 土壤, 2014, 46(4): 761-765
- [52] 顾也萍, 冯学钢. 安徽省石灰岩风化物发育土壤的特性和系统分类[J]. 土壤学报, 1998(3): 303-312
- [53] 史学正, 于东升, 孙维侠, 等. 中美土壤分类系统的参比基准研究: 土类与美国系统分类土纲间的参比[J]. 科学通报, 2004, 49(13): 1299-1303
- [54] 易晨, 马渝欣, 杨金玲, 等. 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题[J]. 土壤学报, 2015(5): 1166-1172
- [55] 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
- [56] 徐祥明, 何毓蓉. 应用于土壤系统分类的土壤微形态学研究进展及展望[J]. 世界科技研究与发展, 2009, 31(1): 107-111
- [57] 张学雷, 龚子同, 骆国保, 等. 俄罗斯新土壤分类的研究现状和特点[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 161-164
- [58] 关欣, 李巧云, 张凤荣. 新疆平原土壤发生分类与系统分类的参比[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2011, 37(3): 312-317
- [59] 龚子同, 张甘霖. 中国土壤系统分类: 我国土壤分类从定性向定量的跨越[J]. 中国科学基金, 2006, 20(5): 293-296
- [60] 中国科学院南京土壤研究所土壤地理研究室. 国际土壤分类述评[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- [61] 陈培珠, 王芳. 土壤分类的指标化及数值分类的推动作用[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(9): 72-73
- [62] 侯彦林. 土壤数值分类模型的建立及应用——RSCM的建立[J]. 土壤学报, 1995, 32(3): 266-270
- [63] 安红艳, 龙怀玉, 刘颖, 等. 承德市坝上高原典型土壤的系统分类研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(3): 448-458
- [64] 许端阳, 姜小三, 潘剑君, 等. 无公害农产品产地土壤环境质量综合评价——以江苏省溧水县为例[J]. 土壤, 2006, 38(3): 282-286
- [65] Arshad M A, Martin S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2002, 88: 153-160
- [66] 吕川, 陈明辉. 典型黑土区土壤环境质量综合评价指标体系与分区管理对策研究[J]. 中国农学通报, 2016(8): 108-112
- [67] 尹海魁, 许峰, 李大伟, 等. 露天铁矿山典型立地类型划分与主导因子分析[J]. 金属矿山, 2016(6): 173-179
- [68] 马赵扬, 杜昌文, 周健民, 等. 黄土的红外反射光谱与红外光声光谱特征及其差异研究[J]. 土壤, 2012, 44(5): 862-867
- [69] Frost R L, Xi Y, Scholz R, et al. Vibrational spectroscopic characterization of the phosphate mineral series eosphorite-childrenite-(Mn,Fe)Al(PO₄)(OH)₂·(H₂O)[J]. Vibrational Spectroscopy, 2013, 67: 14-21
- [70] 高洪智, 卢启鹏. 土壤主要养分近红外光谱分析及其测量系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(5): 1245-1249
- [71] Linker R, Shmulevich I, Kenny A, et al. Soil identification and chemometrics for direct determination of nitrate in soils using FTIR-ATR mid-infrared spectroscopy[J]. Chemosphere, 2005, 61(5): 652-658
- [72] Rossel R A V, Mcglynn R N, Mcbratney A B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. Geoderma, 2006, 137(1/2): 70-82
- [73] 王遵义, 金春华, 刘飞, 等. 基于光谱技术的土壤快速分类方法研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2010, 36(3): 282-286
- [74] 赵帅群, 刘刚, 欧全宏, 等. 不同土壤 FTIR 分类研究[J]. 光散射学报, 2014, 26(2): 193-197
- [75] 王改粉, 赵玉国, 杨金玲, 等. 流域尺度土壤厚度的模糊聚类与预测制图研究[J]. 土壤, 2011, 43(5): 835-841
- [76] 付大友, 袁东. 聚类分析在土壤研究中的应用[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2005, 18(2): 66-72
- [77] 郭琨. 模糊聚类分析算法的 MATLAB 语言实现[J]. 农业网络信息, 2004(5): 44-45
- [78] Amini M, Afyuni M, Fathianpour N, et al. Continuous soil pollution mapping using fuzzy logic and spatial interpolation[J]. Geoderma, 2005, 124(3/4): 223-233
- [79] Chen J, Tan M. Application of fuzzy logic in landuse classification based on remote sensing data[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 775
- [80] Tan M, Chen J, Zheng H. Spatial prediction of soil heavy metal pollution using fuzzy c-mean algorithm[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(12): 2086-2092
- [81] Tan M Z, Chen J. Visualization of uncertainty associated with spatial prediction of continuous variables using HSI color model: A case study of prediction of pH for topsoil in

- peri-urban Beijing, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2008, 19(4): 319–322
- [82] Verheyen K, Adriaens D, Hermy M, et al. High-resolution continuous soil classification using morphological soil profile descriptions[J]. *Geoderma*, 2001, 101(3/4): 31–48
- [83] 刘鹏飞, 宋轩, 刘晓冰, 等. 基于 K-均值算法模型的区域土壤数值化分类及预测制图[J]. *生态学报*, 2012, 32(6): 1846–1853
- [84] Hengl T, Walvoort D J J, Brown A. A double continuous approach to visualisation and analysis of categorical maps. *Int. J. Geographical Information Science*, 2004, 18(2): 183–202
- [85] Mcbratney A B, Gruijter J J D, Brus D J. Spatial prediction and mapping of continuous soil classes[J]. *Geoderma*, 1992, 54(1-4): 39–64
- [86] Pawlowsky V, Olea R A, Davis J C. Estimation of regionalized compositions: A comparison of three methods[J]. *Mathematical Geology*, 1995, 27(27): 105–127
- [87] 孙艳俊, 张甘霖, 杨金玲, 等. 基于人工神经网络的土壤颗粒组成制图[J]. *土壤*, 2012, 44(2): 312–318
- [88] 罗红霞. 基于土壤系统分类的土壤遥感自动识别分类系统的设计[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2003, 28(4): 622–626
- [89] 孙福振, 李艳, 李业刚. 基于 RBF 神经网络的土壤分类设计[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(13): 6293–6294
- [90] 马海姘, 崔晨风. 基于可见-近红外光谱和神经网络的土壤类型鉴别[J]. *江苏农业科学*, 2014(4): 284–286
- [91] 李启权, 王昌全, 岳天祥, 等. 基于神经网络模型的中国表层土壤有机质空间分布模拟方法[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(2): 175–184
- [92] 李启权, 王昌全, 张文江, 等. 基于神经网络模型和地统计学方法的土壤养分空间分布预测[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 459–466
- [93] Carré F, Mcbratney A B. Digital terrain mapping[J]. *Geoderma*, 2005, 128(3/4): 340–353
- [94] Carré F, Jacobson M. Numerical classification of soil profile data using distance metrics[J]. *Geoderma*, 2009, 148(3): 336–345
- [95] Rayner J H. Classification of soils by numerical methods[J]. *Journal of Soil Science*, 2006, 17(1): 79–92

Progresses in Soil Properties and Classification of Mining Soils

LU Xiao¹, WANG Jinman^{1,2*}, LI Bo¹, BAI Zhongke^{1,2}

(1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2 Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China)

Abstract: Classification is one of the foundation in studying mining soils, which is particularly important for the improvement and vegetation reconstruction of mining soils. This paper described the changes of mining soil characteristics and their influences on the classification of mining soils from four aspects of physics, chemistry, biology and pollution, summarized the research advances in the name, basis, index system and method of the classification in mining soils. At present, mining soils were classified by using spectral technology, fuzzy c-mean method and neural network model on the bases of their unique attributes, but these methods have their own advantages and disadvantages, thus, it was recommended for future study to select quantitative classification index according to the local conditions to combine principal component analysis and other mathematical models with spectral techniques for mining soil classification in order to provide further scientific basis for land reclamation and utilization.

Key words: Mining soil; Soil classification; Soil characteristics; Exploitation and reclamation