

采煤塌陷对土壤理化性质影响的研究进展^①

祝宇成¹, 王金满^{1,2*}, 白中科^{1,2}, 秦倩¹, 王洪丹¹

(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: 煤矿开采导致地表塌陷, 并改变原有土壤理化性质。为了更好地开展矿区土地复垦, 进行土壤重构, 必须对塌陷区土壤理化性质进行分析研究。本文综述了塌陷对土壤理化性质的影响以及土壤理化性质空间变异的国内外研究现状, 总结当前研究存在的问题, 并提出以后塌陷区土壤理化性质研究方向, 为塌陷区土壤理化特性变化机理揭示提供指导。

关键词: 塌陷; 理化性质; 空间变异

中图分类号: S153

长久以来, 我国的煤炭生产消费量位居世界第一, 同时我国富煤贫油的能源结构, 决定了煤炭在今后相当长时期仍是国内的主体能源。然而, 煤炭开采使开采区的生态环境遭到严重破坏, 土壤结构、地形地貌、景观生态和生物群落等环境要素将发生不可逆转的变化。煤炭开采形成大面积采煤塌陷区, 地表大规模沉降并产生大量塌陷坑和地裂缝, 进而影响到土壤理化性质, 降低土壤质量^[1-2], 然而复垦土壤质量的高低直接关系到复垦的成败和效益, 因此开展采煤塌陷对土壤理化性质影响的研究具有重要意义, 可以为土地复垦工作提供指导与依据。

目前, 国内外学者从采煤塌陷对土壤理化性质的影响以及土壤理化性质空间变异等方面进行研究, 取得了丰硕的成果, 但是依然存在很多问题。首先, 塌陷影响土壤理化性质的高精度获取方法有待突破。国内外学者基本使用空间对比法、时间对比法或者相关性分析来研究塌陷区土壤理化性质的变化规律, 创新性与精确度不足。其次, 分形理论在塌陷区土壤理化性质空间变异规律中的研究有待加强。在土壤理化性质空间变异性的研究中, 分形理论相比地统计学理论有其自身优势, 但是迄今为止较少有学者运用分形理论方法来开展此方面研究。再者, 结合塌陷微地貌对塌陷区土壤理化性质空间变异作用机理的揭示有待完善。塌陷微地貌是导致土壤理化性质变异性的主要原因, 但是结合微地貌揭示空间变异性作用机理的研

究处于空白, 必须对此方面研究进行完善。因此本文从采煤塌陷对土壤理化性质的影响以及土壤理化性质空间变异等方面进行综述, 总结现在国内外研究存在的不足, 并提出以后塌陷区土壤理化性质研究方向, 对改善塌陷区土壤质量以及指导矿区土地复垦具有重要意义。

1 塌陷对土壤物理性质的影响

土壤分析物理性指标有: 土壤质地、土壤体积质量(容重)、土壤孔隙度、土壤含水量、渗透率、土壤温度等^[3-4]。采煤塌陷会扰动土壤结构, 改变剖面土层的垂直序列, 土壤体积质量和孔隙度必然发生变化; 同时在风蚀与水蚀作用下, 土壤砂化趋势加剧, 土壤质地变差; 再者塌陷会降低土壤持水能力, 土壤含水量降低^[5-7]。下面将从土壤质地、土壤体积质量与孔隙度、土壤含水量 3 个方面分析塌陷对土壤物理性质的影响。

1.1 土壤质地

土壤质地是评定土壤生产性能的一种很重要的参数, 理想的土壤质地应具有较好保水保肥的作用。比较塌陷沙丘与非塌陷沙丘土壤质地可知, 塌陷使土壤砂粒含量增加, 粉黏粒含量减少^[8]。塌陷沙丘坡面表层土壤有砂化趋势, 侵蚀作用使上中坡土壤中粉黏粒下移并在坡底汇集^[9-11]。塌陷沙丘在不同塌陷年限的土壤质地是不一样的。随着塌陷时间的增加, 土壤

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271528)、国土资源部公益性行业科研专项(201411007-4)资助。

* 通讯作者(wangjinman2002@163.com)

作者简介: 祝宇成(1990—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事土地整理复垦与生态恢复研究。E-mail: zhychxsh@163.com

物理性黏粒含量随之减少^[12]。这是因为塌陷扰动了原有土层结构,产生了大量垂直裂隙,土壤中的细小颗粒在地表径流的作用下沿地裂缝流失,使得塌陷区土壤中粉黏粒含量减少,砂粒含量增加。不论是采矿引起的还是地震引起的塌陷都会产生这种现象^[12-13]。

1.2 土壤体积质量与孔隙度

土壤体积质量是表征土壤密实度与土壤质量的重要指标^[14],同时决定土壤透气透水能力、溶质运移能力和抗侵蚀能力^[15]。塌陷区土壤体积质量小于未塌陷区。赵明鹏等^[16]测得阜新矿区塌陷区土壤体积质量一般在 $0.90 \sim 1.32 \text{ g/cm}^3$,而未塌陷区土壤体积质量一般为 $1.3 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$ 。王健等^[11]比较了补连塔煤矿区塌陷沙丘与未塌陷沙丘不同坡位或者不同深度的土壤体积质量,塌陷区均小于未塌陷区。随着塌陷年限的增加,塌陷程度越来越大,塌陷震动使土壤体积质量减小。王健等^[11]比较了不同塌陷年限的土壤体积质量,得出塌陷时间越长,土壤体积质量越小。栗丽等^[12]在离石双柳煤矿区采煤塌陷坡耕地的研究表明,土壤体积质量随着塌陷年限的增加而减小。塌陷地自坡顶到坡中到坡底再到沉陷中心,土壤体积质量一般呈逐渐增大趋势^[16-18]。这主要是由于塌陷导致上覆土体失去支撑而下沉,压实了坡底和塌陷中心的土壤,使土壤体积质量增加。

土壤体积质量与孔隙度存在强相关性,相同质地条件下,土壤总孔隙度和体积质量具有相反的变化规律,即塌陷区的土壤孔隙度大于非塌陷区,塌陷时间长的塌陷区土壤孔隙度大于塌陷时间短的塌陷区,塌陷区土壤孔隙度从坡顶到坡中到坡底到塌陷中心逐渐减小^[8-9,12]。塌陷增加土壤总孔隙度的同时,使毛管孔隙度减少,非毛管孔隙度增加^[10,12]。塌陷疏松土壤导致土壤非毛管孔隙增加,同时在水蚀及风蚀作用下,塌陷地土壤细粒物质流失,致使毛管孔隙逐渐减少。

塌陷区不同土层深度的土壤体积质量与孔隙度的变化规律研究相对较少。栗丽等^[12]通过研究表明非塌陷区和不同塌陷年限的塌陷区土壤体积质量都随着土层深度的增加而增加。王健等^[9]研究表明:塌陷坡地 40 cm 以上土层深度内土壤体积质量和孔隙度变化不显著,但 40 cm 以下 100 cm 以上土层深度内土壤体积质量显著减少,孔隙度显著增加。

1.3 土壤含水量

土壤水分是植被生长发育的必备物质,也是矿质养分运输载体,同时还能够稳定土壤温度。塌陷产生的裂缝会阻断土壤水分和溶剂等的运移和传输,加速

土壤干旱和沙化过程^[19-20]。塌陷对耕地的破坏更加严重,李晓静等^[21-22]在西南山区水田研究表明:塌陷影响水田隔水层的保水作用而导致水田漏水,破坏形式有塌陷田、漏水田、裂缝田 3 种。塌陷在一定程度上降低了土壤的持水能力,土壤含水率、质量含水量、毛管持水量和田间持水量均呈明显下降的变化趋势且表层变化更为明显^[23-26],这是因为塌陷扰动采空区上覆土体,使得土壤毛管孔隙相对减少,毛管悬着力随之减小,而毛管悬着力决定了土壤持水能力。

塌陷区的土壤含水量在不同的时间点上均低于非塌陷区,同时塌陷区的土壤含水量在不同的空间位置上均低于非塌陷区^[27]。塌陷区土壤含水量空间变化包括含水量的垂向变化和水平变化,垂向变化上塌陷区各土层深度含水量变异系数均大于非塌陷区,水平变化上含水量较低区域处于塌陷裂缝或者塌陷坑周围^[23]。土壤含水量的时间变化包括不同塌陷年限与不同塌陷季节的土壤含水量的变化。随着塌陷年限的延长,塌陷区各深度土壤田间持水量逐渐减少^[12],而塌陷对表层土壤水季节性动态变化影响甚微^[23]。

土壤含水量的多少受多种因素影响,主要包括降雨、地下水位、土壤质地等。塌陷区土壤含水量的研究,要考虑到土壤含水量各影响因子的作用,含水量的多少取决于影响因子与土壤持水能力共同作用。

降雨产生地表径流入渗会增加土壤水分,土壤含水量在短期时间内快速增加。多数学者都研究过降雨后塌陷区沙丘或者裂缝的水分时空分布特征。塌陷沙丘土壤水分时空变化与降水量有紧密联系^[28]。降水后,塌陷沙丘与对照区沙丘土壤含水量均增加,随着时间推移,由于裂缝的存在增加了土壤水分侧向蒸发,塌陷沙丘相应深度土壤水分蒸发量大于对照沙丘^[29],同时裂缝密度越大,水分损失量越大^[30]。降水后塌陷裂缝两侧土壤水分变化特征也是学者们研究方向之一。裂缝会打破坡面储蓄降水的格局从而加剧坡面局部土壤水分散失^[31-32]。

塌陷会造成潜水位相对上升,地下水会随着土壤毛管作用渗透、移动,从而增加土壤水分含量,下沉量较大的区域土壤含水量较高,甚至会出现积水,所以塌陷区土壤含水量自上坡到塌陷中心逐渐增大^[17]。对比塌陷区与对照区上中下坡土壤含水量可知,处于塌陷边缘的上坡位置土壤含水量低于对照区,处于中下坡位置接近塌陷中心的土壤含水量高于对照区,这是由于塌陷边缘广泛分布的地裂缝会加速土壤水分蒸发,而毛管吸力作用会增加接近地下水位的上中下坡的土壤含水量^[8]。

土壤质地也是影响土壤水分的因子之一,砂壤黏

比例决定土壤保水保肥能力,比例不同的土壤水分也会有所差异。土壤含水量与粉黏粒含量具有较强相关性,塌陷使土壤中粉黏粒含量减少,毛管悬着力随之减小,土壤含水量降低^[9]。

2 塌陷对土壤化学性质的影响

土壤分析化学性指标有:有机质、全碳和氮、矿化氮、磷和钾、pH、电导率等^[3]。在塌陷区土壤化学性质分析研究中,大多数学者通过分析土壤养分来研究塌陷对土壤化学性质的影响。

塌陷形成的凹凸地表和地裂缝使土壤养分在径流作用下迁移至采空区或者低洼地带,造成土壤养分非均匀性分布,会对塌陷区植物生长产生不利影响^[33]。氮、磷、钾是土壤养分的基本指标,土壤养分决定土壤肥力水平。土壤养分中的速效磷和碱解氮由于易被作物吸收,其含量的多少直接反映土壤质量状况^[34]。

对比塌陷区与对照区的土壤养分含量可知:塌陷后土壤全量养分、速效养分与有机质含量的变化并没有一定规律,不同塌陷区的土壤养分变化并不一致。孙文博等^[35]测定百里杜鹃林区采煤塌陷地土壤养分含量可知:塌陷使土壤速效磷、速效钾与有机质含量明显降低,使土壤全量养分与速效氮含量增加。张丽娟等^[36]通过研究表明塌陷使全氮、全磷、速效钾含量显著降低。王琦等^[37]通过研究表明塌陷使土壤全氮与有机质含量降低,全磷含量增加,全钾含量未发生显著变化;速效氮、磷、钾含量均出现不同程度的流失。周瑞平^[38]在鄂尔多斯地区的研究表明:非塌陷区与塌陷区的土壤养分含量差异不显著,但在空间分布上有所差异。

许多学者对塌陷造成土壤养分流失变化规律作了相应研究,主要的研究内容为土壤养分在塌陷坡面上和塌陷垂直剖面上的流失变化规律。在塌陷坡面上,不同位置点的土壤养分含量规律呈现为:上坡点<中坡点<下坡点<塌陷中心点^[39-41],表明了土壤养分在塌陷的影响下发生不同程度的流失,其中速效养分流失更为显著。上坡点由于存在大量的裂缝,水肥流失严重,土壤养分最为短缺;而塌陷中心的养分含量情况则不同于上坡点,当塌陷深度较浅时,塌陷中心养分相对短缺,当塌陷深度较深时,上中坡土壤养分随水运移到塌陷中心,造成土壤养分富集^[16-17]。中坡若是发育裂缝并且裂隙较大时,会造成由坡顶向坡底迁移的速效养分在裂缝处中断流失^[42]。在塌陷垂直剖面上,任加国等^[43]测得 40 cm 深度以上土壤中碱

解氮和速效磷流失较大,60 cm 深度以下土壤中养分含量基本不变;王健等^[44]则测得塌陷沙丘 40 cm 以上土壤全氮和全磷含量流失较多,但是全钾含量流失很少。

塌陷区土壤养分含量会随着塌陷时间的延长而发生改变。孙文博等^[45]测得塌陷区土壤有机质、全氮、全磷含量随时间逐渐下降,全钾含量逐渐升高;30 cm 以上土层中土壤速效养分含量逐渐下降,30 cm 以下 60 cm 以上土层中土壤速效养分逐渐升高。臧荫桐^[46]在分析塌陷 3 年后塌陷区内裂缝处土壤养分含量可知,裂缝部位的全氮、全磷含量普遍显著减少。王琦等^[47]则研究了塌陷区与非塌陷区以及塌陷后 17 年土壤养分含量变化,得出土壤养分在塌陷后 12 ~ 17 年才能逐步恢复。Monokrousos 等^[48]研究了采矿后沉积位置的土壤有机质、有机氮、速效磷等化学性质随时间变异规律,得出这些养分元素含量随着时间推移逐渐增加。

3 土壤理化性质空间变异

土壤理化性质空间变异研究的方法很多,主要有地统计学方法、人工神经网络模型法、分形理论方法等。20 世纪 60 年代初至今,地统计学方法一直被国外学者应用于土壤调查分析、土壤制图以及土壤理化性质空间变异研究^[49-51]。我国应用地统计学方法研究土壤理化性质空间变异规律晚于国外 20 年,但是也取得了丰硕成果。目前国内学者把研究的重心放在土壤物理性质空间变异上,土壤化学性质空间变异研究相对较少^[52-54]。地统计学方法研究空间变异时有其一定的局限性,神经网络技术是国内一些学者提出应用于空间变异的新方法,拥有地统计学所不具备的优点^[55-56]。

1983 年,Burrough^[57]开创性地利用分形理论研究土壤性质空间变异特征分维。Folorunso 等^[58]在 1994 年美国土壤学第 58 次大会上的报告将多重分形理论应用到土壤学及土壤性质空间变异研究。此后,国内外学者在不同尺度、不同区域和不同土壤类型上相继开展了大量土壤属性空间变异规律多重分形研究。Uthayakumar 等^[59]运用多重分形理论定量分析了土壤孔隙的空间变异特征;Jesus 等^[60]结合统计分析与多重分形方法计算分析土壤中铜元素空间变异性。多重分形理论也广泛应用于土壤理化性质空间变异研究,Kravchenko 等^[61]利用多重分形分析了 1 600 m × 1 600 m 农田土壤 pH、CEC、有机质、磷、钾、钙和镁含量的空间变异性;Vidal-Vazquez 等^[62]运用多重分形理论研究了田间尺度表层土壤含水量的空间变

异,多重分形理论方法在土壤理化性质空间变异研究中使用越来越广泛^[63-65]。

土壤物理性质的空间变异研究主要集中在土壤质地、土壤体积质量以及土壤水分等几个容易测定参数的变异规律研究上。李敏^[66]对土壤颗粒分布分形维数和相关物理属性空间变异性进行了着重研究; Brocca 等^[67]结合遥感与野外实测等方法研究了流域尺度土壤水分时空变异情况;肖波等^[68]使用传统统计学和地统计学方法研究了黄土高原东北缘退耕荒草地土壤体积质量的空间变异特征。

对土壤化学性质的空间变异研究主要集中在对土壤养分的研究,掌握土壤养分空间变异特征有助于农业科学施肥,提高肥料利用效率和增加作物产量等,所以土壤养分空间变异特征是国内外学者研究的热点。Umali 等^[69]研究了地形与管理对澳大利亚南部某果园土壤养分、有机质等化学性质的空间变异性的影响;Roger 等^[70]通过统计学分析研究了瑞士弗里堡州土壤有效磷空间变异性;Liu 等^[71]分析了中国南方水稻土 9 种化学性质指标,并使用地统计学方法研究了各性质的空间变异性。Zhang 等^[72]利用古典和地统计学方法,研究了地块尺度上土壤化学性质的空间格局。

关于土壤理化性质空间变异特征研究的区域多集中在农田、林区、小流域地区,对塌陷区土壤理化性质空间变异的研究还较少,唯有中国地质科学院水文地质环境地质研究所的赵红梅等做过塌陷区的土壤含水量的空间变异研究。赵红梅等^[73]是以大柳塔采煤塌陷区表层土壤(0~60 cm)为研究对象,利用传统统计学方法研究土壤含水量的垂向变异性,并利用地统计学中 kriging 局部插值法研究土壤含水量的平面变异性。因此,开展塌陷区土壤理化性质空间变异性研究是下一步的研究方向。

4 研究问题与展望

1) 塌陷影响土壤理化性质的高精度获取方法有待突破。国内外学者大多利用空间对比法、时间对比法或者相关性分析来比较塌陷区与非塌陷区土壤理化性质的差异,揭示塌陷对土壤理化性质影响的作用机理与规律。获取方法简单,缺乏创新,作用机理与规律分析不足。今后,应该加强塌陷影响土壤理化性质的获取方法的创新,提高获取方法的精度,比如加强地统计学法、分形理论法、神经网络等方法在塌陷区土壤理化性质变异性的运用,也可以将多种方法联合使用以提高精度,突破研究存在的瓶颈。

2) 运用分形理论对塌陷区土壤理化性质空间变异规律的研究有待加强。塌陷区土壤理化性质空间变异研究有助于正确评价塌陷区土地复垦潜力,并指导土壤重构与植被重建工作开展。分形理论被广泛应用于土壤理化性质空间变异性研究,研究区域包括农田、林区、小流域地区等,但并不包括采煤塌陷区。部分学者将地统计学方法应用于塌陷区土壤理化性质空间变异性研究,研究取得一定的成果,但是分形理论相比地统计学理论有其自身优势,今后应该加强分形理论在塌陷区土壤理化性质空间变异研究中的运用。

3) 结合塌陷微地貌对塌陷区土壤理化性质空间变异作用机理的揭示有待完善。多数学者通过比较塌陷区与非塌陷区土壤理化性质之间的差异揭示塌陷区土壤理化性质空间变异作用机理,还有少数学者通过克里金插值法研究土壤理化性质平面变异性并对作用机理进行揭示,但是还没有学者结合塌陷微地貌来揭示塌陷区土壤理化性质空间变异作用机理。塌陷形成的塌陷裂缝、塌陷坑、塌陷盆地等塌陷微地貌是造成土壤理化性质空间变异的主要原因,但是过去由于研究理论、研究方法和研究条件的滞后,使此方面研究处于空白,作用机理的揭示也缺乏说服力。通过叠加塌陷微地貌分布图与塌陷区土壤理化性质含量空间分布图,不仅可以更好地研究不同土壤层土壤理化性质空间变异性,还可以在三维空间上对土壤理化性质的变异性规律进行分析,对作用机理的揭示更加完善。

今后研究中应当重视塌陷微地貌对塌陷区土壤理化性质空间变异性的影响,完善塌陷区土壤理化性质空间变异作用机理,从而为塌陷后土地复垦工程顺利实施提供理论参考和技术指导,以便进一步提高土地复垦的效率和质量;同时还可以根据塌陷造成土地理化性质变化的根本原因,来改善采矿工艺,从而减弱矿区塌陷的危害。

参考文献:

- [1] 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
- [2] Smith J L, Halvorson J J, Papendick R I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluating soil quality[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(3): 743-749
- [3] 赵其国,孙波.土壤质量与持续环境: I.土壤质量的定义及评价方法[J].土壤,1997,29(3):113-120
- [4] Dexter A R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth[J]. Geoderma, 2004, 120(3): 201-214

- [5] 史同广. 平原地区采煤塌陷对土地的影响及复垦治理[J]. 农业环境保护, 1998, 17(4): 181-183
- [6] 张发旺, 侯新伟, 韩占涛, 等. 采煤塌陷对土壤质量的影响效应及保护技术[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 67-70
- [7] Zhang C, Chen H S, Zhang W, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content, bulk density and saturated hydraulic conductivity on Karst slopes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1 585-1 591
- [8] 陈龙乾, 邓喀中, 赵志海, 等. 开采沉陷对耕地土壤物理特性影响的空间变化规律[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 586-590
- [9] 王健. 半干旱区采煤塌陷对沙质土壤理化性质影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007: 1-12
- [10] 何金军, 魏江生, 贺晓, 等. 采煤塌陷对黄土丘陵区土壤物理特性的影响[J]. 煤炭科学技术, 2008, 35(12): 92-96
- [11] 王健, 武飞, 高永, 等. 风沙土机械组成, 容重和孔隙度对采煤塌陷的响应[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2007, 27(4): 37-41
- [12] 栗丽, 王曰鑫, 王卫斌. 采煤塌陷对黄土丘陵区坡耕地土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(5): 1 237-1 240
- [13] 吴聪, 王金牛, 卢涛, 等. 汶川地震对龙门山地区山地土壤理化性质的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(6): 911-916
- [14] 王莉, 张强, 牛西午, 等. 黄土高原丘陵区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(4): 53-56
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 2-8
- [16] 赵明鹏, 周立岱. 阜新矿区地面塌陷灾害对土地生产力的影响[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(1): 77-80
- [17] 胡振琪, 胡锋. 华东平原地区采煤沉陷对耕地的破坏特征[J]. 煤矿环境保护, 1997, 11(3): 6-10
- [18] 王辉, 刘德辉. 平原高潜水位地区采煤沉陷地农业土壤退化的空间变化规律[J]. 火山地质与矿产, 2000, 21(4): 296-300
- [19] 吴艳茹. 半干旱地区采煤塌陷对土壤性质影响进展研究[J]. 内蒙古师范大学学报: 哲学社会科学版, 2011, 40(5): 109-112
- [20] 张发旺, 赵红梅, 宋亚新, 等. 神府东胜矿区采煤塌陷对水环境影响效应研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 521-527
- [21] 李晓静, 胡振琪, 赵艳玲, 等. 我国西南地区采煤塌陷水田漏水探测及机理分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(11): 125-128
- [22] 李晓静, 胡振琪, 张国强, 等. 西南山地区采煤塌陷地破坏水田土壤水分特征分析[J]. 煤矿开采, 2012, 16(6): 48-50
- [23] 赵红梅. 采矿塌陷条件下包气带土壤水分分布与动态变化特征研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006: 2-9
- [24] 谢元贵, 车家骧, 孙文博, 等. 煤矿矿区不同采煤塌陷年限土壤物理性质对比研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 26-29
- [25] 谢元贵, 孙文博, 潘高潮, 等. 采煤塌陷对贵州百里杜鹃林区土壤水分-物理性质的影响[J]. 中国水土保持, 2012(4): 42-44
- [26] 徐友宁, 李智佩, 陈社斌, 等. 大柳塔煤矿采煤塌陷对土地沙漠化进程的影响[J]. 中国地质, 2008, 35(1): 157-162
- [27] 崔向新, 高永, 刘彩云. 采煤塌陷对风沙土含水量的影响[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(4): 491-496
- [28] 吕晶洁, 胡春元, 贺晓. 采煤塌陷对固定沙丘土壤水分动态的影响研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(1): 152-156
- [29] 魏江生, 贺晓, 胡春元, 等. 干旱半干旱地区采煤塌陷对沙质土壤水分特性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 84-88
- [30] 刘彩云, 刘军, 王健, 等. 采煤塌陷对土壤水分损失影响及其机理研究[J]. 内蒙古水利, 2008(1): 68-70
- [31] 马迎宾, 黄雅茹, 王淮亮, 等. 采煤塌陷对土壤水分损失影响及其机理研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 497-504
- [32] 王云强, 张兴昌, 朱元骏, 等. 次降雨后不同时段坡地表层土壤水分和容重的空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 242-246
- [33] 匡文龙, 邓义芳. 采煤塌陷地区土地生态环境的影响与防治研究[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 116-120
- [34] 俞海防, 高良敏, 李玉, 等. 淮南潘三采煤塌陷区土壤的养分分布特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 40(12): 143-145
- [35] 孙文博, 田凡, 廖小锋, 等. 百里杜鹃林区采煤塌陷前后土壤养分状况对比研究[J]. 农业灾害研究, 2014, 4(3): 51-54
- [36] 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
- [37] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 采煤塌陷对风沙区土壤性质的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(6): 110-118
- [38] 周瑞平. 鄂尔多斯地区采煤塌陷对风沙土壤性质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008: 5-6
- [39] 李成刚, 任加国, 温汉超, 等. 采煤塌陷对水养流失及生态环境的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10): 4 343-4 344
- [40] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 采煤塌陷区不同地貌类型植物群落多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北植物学报, 2014, 34(8): 1 642-1 651
- [41] 聂小军, 胡斌, 赵同谦. 焦作韩王矿塌陷区土壤质量变化规律[J]. 干旱环境监测, 2006, 20(2): 87-92
- [42] 贺明辉, 高永, 陈曦, 等. 采煤塌陷裂缝对土壤速效养分的影响[J]. 北方园艺, 2014(9): 186-188
- [43] 任加国, 李成刚, 武倩倩, 等. 采煤塌陷区土壤养分流失规律研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8): 3 433-3 435
- [44] 王健, 高永, 魏江生, 等. 采煤塌陷对风沙区土壤理化性质影响的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 52-55
- [45] 孙文博, 廖小锋, 田凡, 等. 贵州百里杜鹃林区不同采煤塌陷年限土壤化学性质对比研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(9): 55-59
- [46] 臧荫桐. 采煤塌陷后风沙土理化性质变异性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 8-12

- [47] 王琦, 全占军, 韩煜, 等. 风沙区采煤塌陷不同恢复年限土壤理化性质变化[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 118–122
- [48] Monokrousos N, Boutsis G, Diamantopoulos J D. Development of soil chemical and biological properties in the initial stages of post-mining deposition sites[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(12): 9 065–9 074
- [49] Sheikh M, Fazle R, Bina R, et al. Spatial variability of physical soil quality index of an agricultural field[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2014, 5(2): 38–42
- [50] Sarmadian F, Keshavarzi A, Odagiu A, et al. Mapping of spatial variability of soil organic carbon based on radial basis functions method[J]. Proenvironment Promediu, 2014, 7(17): 55–58
- [51] Sana R S, Anghinoni I, Brandão Z N, et al. Spatial variability of physical-chemical attributes of soil and its effects on cotton yield[J]. Rev. bras. eng. agric. ambient, 2014, 18(10): 994–1 002
- [52] 张勇, 陈效民, 杜臻杰, 等. 典型红壤区田间尺度下土壤养分和水分的空间变异研究[J]. 土壤通报, 2011(1): 7–12
- [53] 刘璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1 667–1 673
- [54] 张伟, 刘淑娟, 叶莹莹, 等. 典型喀斯特林地土壤养分空间变异的影响因素[J]. 农业工程学报, 2013(1): 93–101
- [55] 沈掌泉, 周斌, 孔繁胜. 应用广义回归神经网络进行土壤空间变异研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 471–475
- [56] 沈掌泉, 施洁斌, 王珂. 应用集成 BP 神经网络进行田间土壤空间变异研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 35–39
- [57] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil. I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation[J]. Journal of Soil Science, 1983, 34(3): 577–597
- [58] Folorunso O A, Puente C E, Rolston D E, et al. Statistical and fractal evaluation of the spatial characteristics of soil surface strength[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(2): 284–294
- [59] uthayakumar R, Arockiaprabakar G, Abdulaziz S. Fractal analysis of soil pore variability with two dimensional binary images[J]. Fractals-complex Geometry Patterns & Scaling in Nature & Society, 2012, 19(4): 401–406
- [60] Jesus A P, Mateus A, Gonçalves M A, et al. Multi-fractal modelling and spatial Cu-soil anomaly analysis along the southern border of the Iberian Terrane in Portugal[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 126–127(2): 23–44
- [61] Kravchenko A N, Boast C W, Bullock D G. Multifractal analysis of soil spatial variability[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(6): 1 033–1 041
- [62] Vidal-Vázquez E, Paz-Ferreiro J, Vieira S, et al. Fractal description of the spatial and temporal variability of soil water content across an agricultural field[J]. Soil Science, 2012, 177(2): 131–138
- [63] Wang Y, Shao M, Gao L. Spatial variability of soil particle size distribution and fractal features in water-wind erosion crisscross region on the loess plateau of china[J]. Soilence, 2010, 175(12): 579–585
- [64] Ibáñez J J, Pérez-Gómez R, San José Martínez F. The spatial distribution of soils across Europe: A fractal approach[J]. Ecological Complexity, 2009, 6(3): 294–301
- [65] Bicalho E S, Teixeira D B, Panosso A R, et al. Spatial variability structure of soil CO₂ emission and soil physical and chemical properties characterized by fractal dimension in sugarcane areas[J]. Egu. General Assembly, 2012, 14: 8 439
- [66] 李敏. 土壤颗粒分布分形及物理性质的空间变异性[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010: 3–6
- [67] Brocca L, Tullo T, Melone F, et al. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability[J]. Journal of Hydrology, 2012, 422(1): 63–75
- [68] 肖波, 王庆海, 尧水红, 等. 黄土高原东北缘退耕坡地土壤养分和容重空间变异特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 92–96
- [69] Umali B P, Oliver D P, Forrester S, et al. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard[J]. Catena, 2012, 93(2): 38–48
- [70] Roger A, Libohova Z, Rossier N, et al. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland[J]. Geoderma, 2014, 217(3): 26–36
- [71] Liu Z, Zhou W, Shen J, et al. A simple assessment on spatial variability of rice yield and selected soil chemical properties of paddy fields in South China[J]. Geoderma, 2014, s 235–236(4): 39–47
- [72] Zhang Z H, Hu B Q, Hu G. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a subtropical karst forest, Southwest China[J]. The Scientific World Journal, 2014, 7(3): 10–23
- [73] 赵红梅, 张发旺, 宋亚新, 等. 大柳塔采煤塌陷区土壤含水量的空间变异特征分析[J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 753–760

Recent Research Progresses of Influences of Coal Mining Subsidence on Soil Physical and Chemical Properties

ZHU YUcheng¹, WANG Jinman^{1,2*}, BAI Zhongke^{1,2}, QIN Qian¹, WANG Hongdan¹

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

2 *Key Laboratory of Land Regulation Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China*)

Abstract: Coal mining causes subsidence and changes of soil physical and chemical properties. It is necessary to analyze soil physical and chemical properties in subsidence area for land reclamation and soil reconstruction. This paper reviewed the recent research progresses in the influences of coal mining subsidence on soil physical and chemical properties as well as on their spatial variability, summarized the present research problems, put forward the future study directions. It can provide guidance to the mechanism researches on soil physical and chemical changes in the subsidence area.

Key words: Subsidence; Soil physical and chemical properties; Spatial variability