

MEIKUANGQU CHONGTIAN FUKEN TURANG
SHENGWUXUE TEXING JIQI BIANHUA YANJIU

煤矿区充填复垦土壤 生物学特性及其变化研究

程 伟◎著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

煤矿区充填复垦土壤 生物学特性及其变化研究

程 伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以中国华东地区采煤沉陷区充填复垦场地为研究对象,从环境土壤学和土壤生物化学的角度,分析了采煤沉陷区煤矸石充填复垦土壤微生物学指标、酶学指标等参数的时空变化特征、充填物料对复垦场地生物学指标的影响、激发效应对复垦场地生物学指标的影响,深入研究了矿区耕地土壤在地下开采后和生态重建过程中土壤生物学性质的时空演变规律和影响因素,以及关键环境要素之间的相互作用关系。书中还列举和推荐了一些重要土壤生物化学指标的测定方法。

本书可供环境、生态、地学、农学、生物、湖泊等学科的科研、教学和矿山企业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿区充填复垦土壤生物学特性及其变化研究 / 程伟著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.12

ISBN 978-7-5646-3424-7

I. ①煤… II. ①程… III. ①矿区—复土造田—土壤微生物—生物学效应 IV. ①TD88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 322949 号

- 书 名 煤矿区充填复垦土壤生物学特性及其变化研究
著 者 程 伟
责任编辑 潘利梅
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 880×1230 1/32 印张 6.5 字数 200 千字
版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
定 价 36.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

可持续发展是当今社会进步的指导原则,也是中国经济发展追求的目标。煤炭资源是中国今后相当长时间内的主要能源,煤炭工业的可持续发展是中国国民经济与社会可持续发展的重要组成部分,也是煤炭产业发展追求的目标。华东地区既是主要的煤炭产区,同时也是重要的粮食作物种植区,煤炭资源与耕地资源复合分布的面积已经占到耕地面积的 40% 以上。煤炭开采使得华东地区土地利用和土地覆被变化强烈,矿区范围内土地大面积沉陷,农业生态系统退化。开展采煤沉陷区土地复垦,增加煤粮复合区耕地面积是矿区可持续发展必由之路。

20 世纪 80 年代末,中国煤矿区土地复垦工作逐步发展,在煤炭开采对土地(耕地)破坏机制、影响周期、土壤重构理论等方面进行了广泛的研究,提出了挖深垫浅、充填复垦、疏排复垦、矸石山绿化等技术,并在两淮地区、徐州地区、济宁地区进行了一系列示范区的建设。笔者认为,在矿区土地复垦工程中,土地结构恢复是基础,土地生态系统功能恢复是目的,土壤生物学功能恢复是核心,也是实现从结构恢复向功能恢复的关键所在,因此对复垦后耕地生物学功能研究是一项极其重要的研究课题。

本书共分为 6 章。第 1 章介绍国内外矿区土壤生物学研究进展。第 2 章介绍了研究区基本状况、研究理论和实验技术体系。第 3 章研究了煤矸石充填复垦场地土壤生物学特征时空变化特征。第 4 章比较了煤矸石、粉煤灰和湖泊底泥为充填物料的复垦场地生物学特征。第 5 章研究了利用激发效应改良复垦场地生物

学功能的可行性。第6章介绍了主要研究成果。

该书内容包括了本人在中国矿业大学攻读博士期间的主要研究成果。在此感谢我的硕士生导师中国科学院研究生院的吴宁研究员和博士生导师中国矿业大学的卞正富教授,是他们为我打开了科研之门,在他们的指导下我进入恢复生态学领域,并将其作为一生的事业。感谢中国矿业大学董霁红教授、冯启言教授、刘汉湖教授、雷少刚教授、闫庆武副教授、单爱琴副教授、裴宗平教授、白向玉讲师,以及刘振国、金丹、申艳琴、张鹏飞、刘万利等同门和同学的帮助和支持。

最后,本书的研究及出版得到了国家“十一五”科技支撑计划重点项目“采煤沉陷区土地复垦与农业生态再塑技术开发与应用”,教育部创新团队“与煤炭开采有关的资源与环境保护”,江苏省“老工业基地资源利用与生态修复协同创新中心”等的联合资助。由于时间和水平有限,书中难免有各种问题,恳请各位专家和读者批评指正。

程 伟

2016年12月

目 录

1	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	国内外研究现状	3
1.3	存在的问题	11
1.4	研究目标、内容与方法	12
1.5	技术路线	14
2	研究区概况与实验方法	17
2.1	研究区概况	17
2.2	实施方案	19
2.3	土壤测试指标	27
2.4	实验区土壤理化性质	31
2.5	数据分析	37
3	复垦土壤生物学特性随时间变化研究	38
3.1	复垦土壤微生物指标随时间变化研究	39
3.2	复垦土壤基础呼吸随时间变化研究	50
3.3	复垦土壤酶活性随时间变化研究	54
3.4	复垦土壤生物学特性和环境因素相关性分析	64
3.5	复垦土壤质量评价	74
3.6	讨论	91
3.7	小结	97

4 充填物料对复垦土壤生物学特性影响的研究	99
4.1 充填物料对复垦土壤微生物学特性影响的研究 ...	100
4.2 充填物料对复垦土壤基础呼吸特性影响的研究 ...	108
4.3 充填物料对复垦土壤酶活特性影响的研究	112
4.4 复垦土壤生物学特性和环境因素相关性分析	121
4.5 充填物料对复垦土壤质量指数影响的研究	134
4.6 讨论	142
4.7 小结	145
5 利用激发效应改良复垦土壤生物学特性研究	148
5.1 煤矸石复垦土壤根系分泌物激发效应的研究	149
5.2 粉煤灰复垦场地根系根系分泌物激发效应的 研究	154
5.3 外源小分子碳源、氮源添加对土壤生物学特性 影响研究	160
5.4 讨论	169
5.5 小结	173
6 结论	175
参考文献	178

1 绪 论

1.1 研究背景

煤炭是我国最重要的能源,在一次能源生产与消费中占 70% 左右。自 1989 年我国煤炭产量突破 10 亿 t 成为世界第一产煤大国后,煤炭产量及进口量逐年攀升。据统计,我国 2012 年煤炭产量达到 36.6 亿 t,净进口量为 2.8 亿 t。煤炭在为我国经济与社会发展提供重要能源保障的同时,其大规模开采及利用也不可避免地对生态环境产生巨大的影响,并带来一系列的生态环境问题^[1]。矿区土地资源的破坏是当前煤炭开采所面临的最突出问题之一。矿区土地资源破坏的主要特征为矿山及周边区域土地被占用、沉陷、压损等。以井工煤矿为例,研究表明每开采 1×10^4 t 原煤平均要沉陷土地 $0.07 \sim 0.3 \text{ hm}^2$ (下沉量 $\geq 10 \text{ mm}$) 左右。截至 2012 年年底,因煤炭开采引起的土地沉陷面积约为 $156 \times 10^4 \text{ hm}^2$,采煤沉陷区面积随着煤炭产量的增加将逐年递增^[2]。我国是世界人口最多的国家,土地资源贫乏,人均耕地面积仅 0.093 hm^2 。我国东部平原煤矿区村庄密集,基本农田与煤炭资源重叠分布,煤炭开采和基本农田保护之间的矛盾尤为突出,严重制约了矿区可持续发展。

矿区土地复垦和可持续发展研究是当今科学研究的热点问题。煤炭开采和资源利用导致矿区土地利用/土地覆盖格局的改变,进而影响矿区农用地结构和功能,土壤生态过程被改变。随着

中国东部煤炭资源的枯竭,矿区经济发展模式面临转型。而矿区可利用土地面积减少的现状直接制约了矿区经济转型和可持续发展。

对采煤沉陷区进行景观重建和土地复垦是解决煤炭开采与土地资源保护之间矛盾的有效途径^[3,4]。把土地复垦纳入矿区可持续发展规划中,对采煤沉陷区进行景观重建和土地复垦有利于改善矿区生态环境,提高矿区土地资源利用价值,促进经济和社会持续健康发展。我国自 20 世纪 70 年代以来,尤其是 1988 年国务院《土地复垦规定》发布以后,开展了大量的土地复垦示范工程建设,通过复垦实践增加了大量可利用土地面积,总结出疏排复垦法、挖深垫浅复垦法、充填复垦法等采煤沉陷区土地复垦技术在全国范围内进行推广。

尽管国内对矿区土地复垦问题进行了研究,但重点主要集中在地形重塑、土壤剖面重构和植被恢复等方面^[5-7]。研究表明,矿区复垦土壤本质上是一种非典型的人造新土,复垦土壤在物理结构、化学组成、物质循环、能量代谢、微生物繁衍和生态系统演替等方面都与岩石风化形成土壤有着显著的区别。目前国内对矿区复垦土壤的物理性质、N、P、K 等营养元素、重金属含量及其变化特征开展了较多的研究^[8-13],但是对矿区复垦土壤恢复过程中的土壤生物学特性时空变化规律及影响因素研究较少,持续监测力度不够^[14,15]。

本书以我国东部采煤沉陷区复垦场地土壤为研究对象,在对煤矸石、粉煤灰和湖泊底泥三种充填复垦场地土壤的物理性质、化学性质、重金属含量测试分析与研究的基础上,采用空间序列代替时间序列法、田间实验和室内模拟实验相结合的方法,对充填复垦场地土壤的细菌、真菌、放线菌、微生物量碳、微生物量氮、土壤呼吸、 β -葡萄糖苷酶活性、酸性磷酸酶活性、脲酶活性、芳基硫酸酯酶活性等生物学指标进行研究,分析其时空变化特征及其影响因素,

提出改善复垦土壤生物学特性的措施,旨在为人口密集、土地资源,特别是耕地资源紧缺的东部矿区土地复垦实践及管理提供科学依据。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 复垦场地工程技术研究进展

我国煤炭地下开采量约占到煤炭总产量的 90% 以上^[16]。煤炭开采直接破坏地下岩层结构致使采空区及周围区域岩体的平衡状态受到破坏,岩层和地表产生连续的移动、变形(开裂、冒落等),导致地表大量土地产生沉陷,即通常所称的“采煤沉陷区”^[17,18]。采煤沉陷区内的土地因地表位移出现一定的坡度和地裂缝,严重时甚至出现大范围的沉陷盆地(ground subsidence basins)。华东地区因地下潜水位高,采煤沉陷区甚至出现大面积的积水,积水深度最多可达 10 m 以上,使得土地可利用性消失。矿区土地沉陷使得区域景观被破坏、土壤肥力下降、原有的生态系统受到影响,土地资源受到严重破坏。综上所述,采煤沉陷区的存在使得矿区可利用土地资源严重不足,人地矛盾突出,严重影响了矿区社会经济和生态环境可持续稳定发展^[19,20]。

德国、美国等发达国家自 19 世纪 20 年代起就开始对煤矿区损毁土地进行复垦工作^[3]。如美国印第安纳州从 1918 年起在煤矸石山上进行了植被恢复实验。伊利诺斯、西弗吉尼亚、印第安纳等 39 个州自 1939 年起先后制定土地复垦法,使矿区土地复垦逐步走上正轨^[21,22]。进入 20 世纪 90 年代以来,西方发达国家的矿区生态环境修复更多地强调生态学意义的恢复,即在土地复垦与生态修复实践中综合考虑景观美化、可持续性发展、人与自然的和谐等问题,在矿区生态修复理论和实践中更强调多学科领域综合,

考虑恢复过程经济和社会的综合效益^[23,24]。

我国煤矿复垦科学研究始于 20 世纪 80 年代。首先在安徽淮北矿区开展了煤矸石、粉煤灰充填复垦与挖深垫浅复垦试点研究,并先后在河北、江苏、山东、山西、陕西、河南、湖北、辽宁等省开展了土地复垦试点工作,至 1992 年底已复垦土地 3.3 万 hm^2 ^[4,9,25]。1994 年又先后在江苏铜山、安徽淮北、河北唐山建立了三个国家级复垦示范工程。除此以外,为取得大面积复垦经验和不同复垦方向的技术,各地煤矿也自行建立了复垦试验示范工程(基地)。80 年代末至 90 年代初期国内矿区土地复垦研究重点集中在复垦实施的工程手段、复垦土壤剖面重构技术、植被恢复以及矸石山(排土场)绿化等方面。进入 21 世纪以来,国内的矿山复垦开始重视复垦土地的质量与生态重建,许多学者从土壤学、环境科学、生态工程学的角度对复垦问题进行了深入的研究,这些研究涵盖了煤矿区复垦土壤物理、化学及生物性状研究,复垦土壤质量评价,复垦土壤重金属污染与评价,复垦土壤微生物修复等,为合理、有效地重构、修复煤矿区土壤提供了有力的依据。

1.2.2 复垦土壤物理化学性状研究

在采煤沉陷区进行土地复垦,首先面临的问题就是如何将沉陷区域恢复到设定高度。目前常用的办法是先用煤矸石、粉煤灰或建筑垃圾等固体废弃物作为充填基质将沉陷区域恢复到设定高度。用大型机械将充填基质平整,在充填基质上面覆盖 50~100 cm 左右的风化土作为表土层^[6,8,26]。研究表明,无论是事先剥离下的表土还是挖深垫浅获得的深层土壤,其土壤中的有机质、N、P、K 等表征肥力指标的物质含量与沉陷前的土壤相比都较低^[10,27]。此外,作为充填基质的煤矸石和粉煤灰本身的养分含量也较低,从而导致复垦初期的土壤肥力水平处于较低的水平^[28-31]。随着复垦年份的增加,复垦土壤中植物残渣分解加上外

来肥料施用,土壤中有有机质、总氮、速效磷、速效钾等成分明显增加,使得复垦土壤肥力不断提高。

采煤沉陷区土地复垦在表土构建过程中采用表土剥离回填、机械混推和泥浆泵复垦等手段,这几种复垦手段在实施过程中对土壤的扰动都比较大,结果导致土壤剖面原有空间层次消失、颠倒、混杂,土壤有机质、氮、磷、钾等营养成分流失,土壤微生物数量减少,土壤生产功能衰退,土壤生态系统自维持功能退化甚至丧失。国内外研究表明,在复垦土壤重构过程中,由于大型工程机械的使用,会致使复垦后的矿区土壤一般具有较高的紧实度和容重、较低的孔隙率、较多的粗颗粒含量、较差的土壤结构、土壤层次混乱等特征^[32-36]。此外复垦过程中由于机械的扰动,耕地土壤原有的结构遭到破坏,复垦后的土壤适耕性、酸碱性、保水保肥性等特性发生了较大的变化^[37-41]。

1.2.3 矿区土壤碳循环研究现状

表征土壤性质重要的指标之一是土壤有机碳含量,提高矿区土壤有机碳含量能显著提高土壤质量。此外,土壤总有机碳(TOC)库也是生物圈中主要的碳库,在全球碳循环中占有重要地位,对全球气候变化和温室效应有着重要的调控作用^[42,43]。土壤有机碳库形成的过程是通过植物的光合作用对环境中的碳进行固存,部分碳以凋落物形式输入到土壤中进行储存,而矿区土壤的利用方式改变影响了土壤碳库大小。煤炭开采显著地改变陆地生态系统景观,减少矿区土壤中的碳储量的原因在于:一方面煤炭开采,尤其是露天开采,减少了陆地植被覆盖率,减少了土壤的碳输入;另一方面人为扰动改变土壤周转速率,加速土壤温室气体排放速率,促使土壤碳汇功能减弱,减少土壤碳储量。复垦后矿区土壤通过丰富植物种类、增加植物凋落物输入等途径改变土壤有机碳循环方式和速率,使得复垦后土壤碳储量增加。Akala、Lal、

Jacinthe 等研究表明俄亥俄州矿区复垦土壤利用方式的改变有效增加了有机碳储存速率^[44-48]。K. Lorenz 等研究表明矿区土地复垦能增加土壤有机碳的化学稳定性^[49]。Maharaj 通过同位素等方法研究复垦场地土壤有机碳来源,结果表明矿区复垦土壤中新增加的有机碳主要来源于人工恢复的植物根系分泌物和凋落物分解^[50]。张绍良、渠俊峰、徐占军等研究发现,中国东部高潜水位区的煤炭开采影响了矿区土壤碳库储量^[51,52]。综上所述,煤炭开采、利用导致矿区土壤有机碳含量减少、肥力降低,土地退化严重;在矿区土地复垦中,通过采用保护性耕作、施用有机肥及秸秆还田和生物覆盖等合理的管理措施,可以有效地增加农业土壤有机碳含量^[33,34,49,53]。此外,因处于复垦初始阶段的矿区土壤有机碳含量低于非矿区土壤,因此复垦后矿区土壤具有很大的固碳潜力,可以作为碳汇新的增长点。此外,增加矿区土壤有机碳含量可以进一步改善土壤的结构和保水保肥能力,提高矿区土壤质量和耕地的生产力^[44,54-56]。尽管国内关于土壤碳汇的研究较多,但大多研究集中在森林、草地等自然生态系统碳储量和碳固存能力的变化及影响因素方面,而对复垦后场地土壤的碳储量和碳固存方面研究较少。

1.2.4 土壤微生物特性研究

通常意义的土壤微生物一般包括土壤细菌、真菌和放线菌。土壤微生物群落区系研究一方面有助于了解土壤有机质、氮、磷、钾等物质的生物地球化学循环过程。另一方面因土壤微生物是土壤生态系统的重要组成成分,其数量及多样性分布不仅能反映土壤生态系统的现状,而且还影响土壤生态系统的演替方向和演替速度。土壤微生物数量及区系特征作为土壤生态系统最基本、最主要的指标之一,不仅对环境要素变化具有高度的敏感性,能够在土壤物理、化学性质发生变化前就对环境因子的变化做出响应,能

通过微生物区系变化预测土壤生态系统的演替方向。研究表明,以土壤细菌、真菌和放线菌为主的土壤微生物类群的数量及比例变化情况与其在土壤生态系统中的生态功能密切相关。矿山开采、冶炼过程中,土壤微生物数量随着扰动强度的增加而减少^[57,58]。矿区土地在复垦以后其土壤微生物数量及多样性指标随恢复时间而增加^[59]。在土壤微生物三大类群中,土壤真菌能直接影响土壤团聚体的组成和稳定性,是表征复垦土壤质量,预测土壤微生态系统演替方向的最重要指标之一^[60-65]。此外,土壤微生物群落的多样性能表征土壤生态系统受管理措施和环境干扰后的细小变化,可以揭示土壤微生物群落的稳定性、微生物群落生态学机理以及自然或人为干扰对群落的影响而被重点关注。因此土壤微生物多样性指数指标在矿山生态恢复中作为监测、评价土壤健康及分析土壤微生物生态系统演替方向的重要指标^[66-70]。矿区复垦土壤微生物多样性监测指标包括物种多样性、遗传(基因)多样性、生态系统多样性以及功能多样性等^[71-73]。

1.2.5 土壤微生物量碳/氮含量研究

目前对矿区复垦土壤的研究主要集中在复垦前后土壤物理和化学性质变化情况。研究发现,仅研究矿区复垦场地土壤物理、化学指标,往往不能完全体现土壤管理和土地利用变化对土壤发育及演替的影响。土壤微生物量指标,尤其是根际圈微生物量指标是维持土壤质量的重要组成部分,不仅能反映土壤物理化学性质的变化过程,又能体现土壤中物质周转速率和能量流动情况、土壤团聚体的形成和营养组分转化的调控等过程。因此,土壤微生物量指标因其对土壤质量变化敏感而成为土壤质量评价中不可缺少的指标之一。此外,因其对土壤结构和养分循环的重要性、对土壤生态过程的敏感性,土壤微生物量日益成为土壤质量研究和评价中最有潜力的敏感性指标之一^[58,68,74,75]。在常见的微生物量指标

中,微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)是表征土壤微生物量碳库的灵敏指标因子,微生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)能反映微生物氮库的相对大小。由于微生物量碳和微生物量氮能快速地响应土地管理措施及土壤环境要素的变化,它们常被选为指示土壤质量的指标、评价土壤外源干扰和土壤管理措施的效果^[64,65,76-78]。研究发现,微生物量碳、微生物量氮与土壤有机碳的转化过程和运移过程有很好的相关性,并与土壤全磷、有机磷及速效磷含量正相关。土壤微生物代谢熵大小能表示土壤微生物量的大小和活性,并将微生物生物量和微生物的活性以及功能联系起来。土壤微生物代谢熵(Microbial metabolic quotient, qCO_2)反映了土壤微生物对基质的利用效率,同时还可预示土壤的发生过程、生态演变以及对环境胁迫的反应,常用于研究环境变化对微生物群落的影响^[66,79-81]。土壤微生物代谢熵大小随土壤的熟化而降低,随土壤的退化而升高。处于健康、能自我维持的土壤生态系统土壤微生物代谢熵数值相对稳定。如果处于稳定状态的土壤微生物代谢熵数值忽然发生较大范围的变化,则表明有可能有某一环境因子发生变化或出现新的环境因子。微生物量碳、微生物量氮、土壤基础呼吸及其衍生指数微生物熵、土壤微生物代谢熵、微生物量碳氮比以及土壤酶活力等参数均可看作具有潜力的生物指标。综上所述,土壤微生物代谢熵指标可作为研究土壤生态系统质量变化和评价管理措施是否得当的重要指标^[82-86]。

1.2.6 土壤酶活性研究

土壤酶一般分为胞外酶和胞内酶。胞外酶的来源由土壤微生物和植物根系在细胞内产生并分泌到细胞外。常见的土壤酶包括氧化还原酶类、水解酶类、裂合酶类和转移酶等^[87]。在生态系统中,土壤酶、植物根系、土壤微生物共同参与土壤物质代谢、能量传

递等生理生化过程。土壤酶活力大小与土壤生态系统的演替、土壤微生态环境健康状况紧密相关。土壤酶种类、活性大小可以作为重要的评价指标来研究土壤生态系统目前所处的状态,能够反映土壤管理措施、环境因子对土壤生态系统的影响。研究表明,随着矿产资源开采及冶炼过程,退化的矿区土壤酶活性会有较大幅度的下降,最终导致土壤营养物质循环和微生物数量减少^[59,88]。土壤酶活性不仅可以反映土壤中物质能量循环速度,同时也可以反映土壤质量健康与否^[89]。不少研究者认为,土壤酶学指标是表征土壤质量变化最敏感的指标^[90-92]。国外研究表明,在矿区土地复垦完成后,复垦土壤中酶活性处于较低水平。随着恢复年限的延长,土壤酶数量和活性与生态恢复过程成正相关^[93]。进一步研究表明在植被恢复过程中,土壤酶活力增加有助于提高土壤有机碳、有机氮、速效磷、速效钾等营养成分的转化^[67]。在土壤生态系统演替过程中,土壤酶活性和有机质、氮等营养指标、土壤基础呼吸速率、土壤微生物代谢熵等生物学指标间存在显著相关性^[71,94,95]。而适当的土壤紧实度(机械强度)、容重、含水率、pH值有利于土壤酶发挥作用^[92,96]。

1.2.7 土壤重金属对土壤生物学特征影响研究

矿区土壤重金属污染也是引起矿区土地可利用率下降的原因之一。资源开采、冶炼和运输过程导致重金属进入到矿区环境中,引起矿区土壤重金属含量增加。矿区土壤重金属含量过高可能造成现存的或潜在的土壤质量退化、生态与环境恶化等现象^[12,92]。尽管土壤生态系统能通过物理、化学和生物过程对进入生态系统内的重金属进行稀释、转化,降低其含量和活性,如果进入土壤的重金属含量超过土壤生态系统的自净能力,则会引起土壤在组成、结构及功能方面发生改变,诱使土壤微生物数量及种类发生改变,土壤酶活性受到抑制,土壤物质代谢、能量循环等生理生化功能受

到影响^[97]。土壤某些重金属周转持续时间长,重金属及其衍生物在土壤中逐渐积累,可以通过食物链和食物网进入人体,进而危害人体健康^[13,98,99]。董霁红等研究发现煤矸石、粉煤灰充填物影响了复垦土壤中重金属含量,并发现重金属进入到小麦籽实中去^[12];国内外对金属冶炼区土壤重金属污染特征研究结果表明,有色金属矿区土壤容易受到 Cd、Cr、Sb、Pb、As、Zn 和 Cu 重金属元素的污染。污染程度往往与距离冶炼区远近呈负相关。在中国东部,煤矿及其下游工业区附近土壤多为农用耕地,重金属被作物吸收后通过食物链进入动物和人体内,从而影响食品安全和人类健康^[92,100]。重金属 As、Cr、Co、Ni、Cd 和 Zn 等已被证明有致癌、致畸变作用;已经证明 Pb 会对人体中枢神经系统造成损失;长期接触 Mn 容易诱发帕金森病^[101]。环境中的重金属对植物生长也有抑制作用,影响植物的生长发育及正常生理功能,严重的甚至可以造成植物死亡^[102-105]。

1.2.8 复垦土壤质量评价及改良

土壤生态系统由土壤生物群落和周边无机环境构成。就土壤组成而言,主要包括土壤动物、植物、微生物以及土壤物理、化学等无机和有机环境等生物与环境因子。就土壤过程而言,主要有物质循环、能量代谢、信息传递、土壤生态系统的进化、退化等演替过程等^[106,107]。对土壤质量进行评价,一般通过选取合适的物理、化学和生物学指标,通过建立合适的评价方法和评价模型对土壤现状进行分析,定性或定量描述土壤生态系统现状及对管理措施、环境因子的响应^[108-110]。

土壤生态系统的特征监测与质量评价是评价土壤现状、预测土壤演替方向的重要工作,也是促进土壤生态系统可持续利用和建立土壤管理评估框架体系(Soil Management Assessment Framework, SMAF)的重要组成部分^[111,112]。尽管土壤质量评价