

ICS 73.020
CCS D 01



中华人民共和国国家标准

GB/T 42251—2022

采矿沉陷区生态修复技术规程

Technical regulations for ecological restoration of mining subsidence area

2022-12-30 发布

2023-04-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 通则	2
5 现状调查	4
6 评价与诊断	4
7 生态修复目标与模式	5
8 生态修复设计	6
9 生态修复技术措施	6
10 监测与验收	9
11 管理与维护	10
附录 A (资料性) 采矿沉陷区现状调查内容	11
附录 B (资料性) 土壤养分含量分级	13
附录 C (资料性) 破坏程度分级与修复模式	14
附录 D (资料性) 生态修复方案编制大纲	16
附录 E (资料性) 生态修复利用方向	19
附录 F (资料性) 地形改造技术措施适用条件及一般工作内容	20
参考文献	22

前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国煤炭工业协会提出并归口。

本文件起草单位：国家能源投资集团有限责任公司、中国矿业大学（北京）、国能神东煤炭集团有限责任公司、中煤科工集团北京土地整治与生态修复科技研究院有限公司、北京低碳清洁能源研究院、中国煤炭工业协会生产力促进中心、有研科技集团有限公司、矿冶科技集团有限公司。

本文件主要起草人：李全生、张凯¹⁾、张凯²⁾、于妍、杨英明、胡炳南、白璐、郑厚发、贺安民、任慧君、郭俊廷、杜善周、杨扬、王义、刘舒予、赵勇强、张国军、宋子恒、邢朕国、王菲。



1) 中国矿业大学（北京）

2) 国家能源投资集团有限责任公司

采矿沉陷区生态修复技术规程

1 范围

本文件规定了采矿沉陷区生态修复的通则、现状调查、评价、诊断、生态修复目标与模式、生态修复设计、生态修复技术措施、监测、验收、管理与维护。

本文件适用于矿产资源地下开采活动所形成的稳定沉陷区的生态修复相关技术工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 15163 封山（沙）育林技术规程
- GB/T 15776 造林技术规程
- GB/T 37067 退化草地修复技术规范
- GB/T 38360 裸露坡面植被恢复技术规范
- GB 51018 水土保持工程设计规范
- GB 51411 金属矿山土地复垦工程设计标准
- CJJ 82 园林绿化工程施工及验收规范
- HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
- HJ 19 环境影响评价技术导则 生态影响
- HJ 25.4 建设用地土壤修复技术导则
- HJ 25.6 污染地块地下水修复和风险管控技术导则
- HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
- HJ 964 环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）
- NY/T 1342 人工草地建设技术规程
- SL/T 800 河湖生态系统保护与修复工程技术导则
- TD/T 1036 土地复垦质量控制标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

采矿沉陷区 **mining subsidence area**

因矿产资源地下开采活动导致的地表发生沉降、移动和变形等的区域。

注：一般按下沉 10.0 mm 点划定其范围。

3.2

稳定沉陷区 **stable mining subsidence area**

地表点连续 6 个月下沉值不超过 30.0 mm 的采矿沉陷区。

3.3

沉陷区生态修复 ecological restoration of subsidence area

以生物修复为基础,结合物理、化学及工程技术措施,通过自然恢复、辅助再生和生态重建等修复模式,协助采矿沉陷区退化、受损的生态系统得到改善、恢复或重建的修复过程。

3.4

参照生态系统 reference ecosystem

能够作为生态恢复目标或基准的本地生态系统。

注:通常包括采矿前的生态系统、未因采矿活动而退化的生态系统,以及能够适应正在发生的或可预测的环境变化的生态系统。

3.5

修复单元 restoration unit

结合采矿沉陷区生态现状评价和问题诊断结果,根据沉陷区生态修复目的、所达到的标准或所采用的技术措施一致性的需要而划分的用于生态修复的地理空间单元。

3.6

胁迫因子 stress factor

对土壤、植物和生态系统有害的环境或人为因子(如干旱、盐渍化、养分贫瘠和环境污染等)。

3.7

自然恢复 natural restoration

轻度受损的采矿沉陷区生态系统,在人为适当引导下,消除胁迫因子,加强保护措施,依靠生态系统的自我调节能力和自组织能力使其向有序的方向自然演替和更新恢复的修复模式。

3.8

辅助再生 assisted restoration

中度受损的采矿沉陷区生态系统,在消除胁迫因子的基础上,以地形改造、土壤改良和植物栽(补)种等措施为主,自然恢复措施为辅,引导和促进生态系统逐步恢复并进入良性循环的修复模式。

3.9

生态重建 ecological reconstruction

重度受损的采矿沉陷区生态系统,在消除胁迫因子的基础上,以地貌重塑、土壤重构、植被重建等措施为主,以辅助再生和自然恢复措施为辅,重构生态系统并使其进入良性循环的修复模式。

4 通则

4.1 基本原则

4.1.1 坚持整体布局、协调统一的原则。充分考虑矿区周边生态系统的整体性与周边自然环境和景观的协调性,同时突出地域特色自然文化遗存和区域人文资源特点,保持区域生态系统的整体性、协调性、连通性和多样性。

4.1.2 坚持自然恢复为主、人工修复为辅的原则。充分发挥采矿沉陷区原有生态系统自我调整、自我改善、自我适应和自我恢复的潜力,以自然恢复为主,并匹配人工修复措施,设计具体修复方案,促进生态系统稳定性和功能性的提升。

4.1.3 坚持因地制宜、分类治理的原则。按“宜农则农、宜建则建,宜留则留、宜整则整”的原则,开展采矿沉陷区生态修复,因地制宜、统筹兼顾、分单元规划和实施治理。

4.1.4 坚持要素统筹、综合修复的原则。以系统观念推进采矿沉陷区生态修复工作,统筹考虑生态系

统各要素,系统建设山水林田湖草沙生命共同体,实现采矿沉陷区生态系统功能改善和提升。

4.2 总体要求

- 4.2.1 采矿沉陷区生态修复规划、设计、施工、管理和维护应符合国家标准、行业标准或地方标准的相关规定。
- 4.2.2 根据地方和矿区总体规划,结合采矿沉陷区特点,应制定合理可行、切实改善生态系统结构和功能的生态修复目标,提升生态系统服务价值。
- 4.2.3 对采矿沉陷区的生态环境状况应进行问题诊断和影响分析,有针对性地开展生态修复,提高生态修复技术的修复效率。
- 4.2.4 应充分考虑矿区水资源、土壤资源和固体废弃物等各种可利用资源的种类、数量和可利用程度,开展综合治理利用,实现经济、社会和生态效益的统一。

4.3 修复工作范围

修复工作范围应以采矿稳定沉陷区范围为主体,结合区域生态过程、水文过程和生物地球化学循环过程的相互作用关系,综合考虑生态系统完整性和生物多样性保护等要求而确定。修复工作范围应不小于采矿沉陷区范围。

4.4 基本流程

在明确修复工作范围的前提下,通过现状调查获取相关资料,开展生态评价与诊断;确定生态修复目标和模式,开展生态修复设计;实施生态修复技术措施,开展生态修复的监测与验收,并对采矿沉陷区生态修复成果进行长期的管理和维护。必要时,应针对生态修复工程中的关键问题开展专题研究。采矿沉陷区生态修复流程如图1所示。

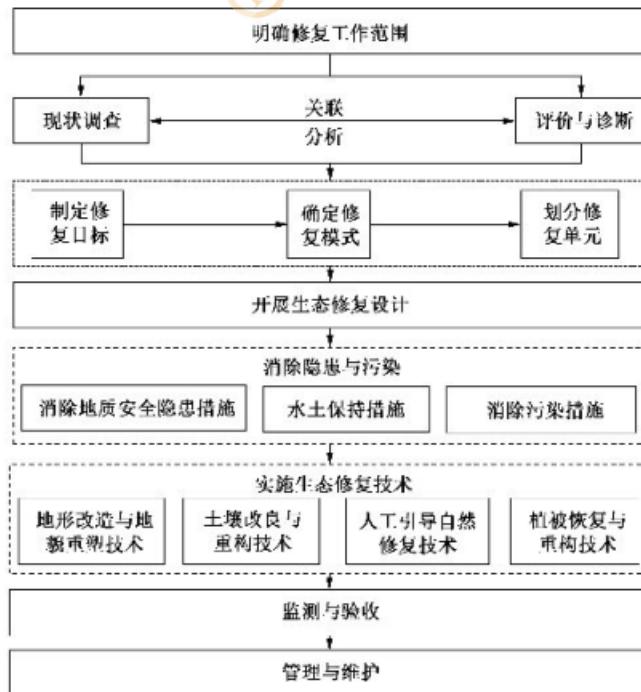


图1 采矿沉陷区生态修复流程图

5 现状调查

5.1 调查范围

以沉陷区生态修复工作范围为核心调查范围,根据矿山地质条件和生态环境条件适当扩展,现状调查的范围不应小于生态修复工作范围。当历史遗留矿山沉陷区生态修复涉及生态敏感区时,还应将生态敏感区纳入调查范围。

5.2 一般要求

5.2.1 开展生态环境现状调查时,应在已有调研资料的基础上开展现场调查,现场调查遵循全面性、代表性和典型性原则。

5.2.2 根据采矿沉陷土地范围、沉陷地形、积水情况、土地利用类型和植被破坏程度,结合自然界限和村级界线将沉陷区域划分若干现状调查单元。

5.2.3 参照生态系统的调查应与现状调查同步进行。

5.2.4 当历史遗留矿山沉陷区修复工作范围涉及生态敏感区时,应开展专项调查。

5.2.5 现状调查成果应采用文字、表格和图件相结合的表现形式。

5.3 调查内容

5.3.1 现状调查包括矿山所在区域基础信息、矿山基础信息、采矿沉陷区环境现状等内容。调查具体内容见附录 A。

5.3.2 矿山所在区域基础信息应包括国家及地方相关政策和规划、区域经济和历史人文情况、区域地形地貌、水文地质、气候条件和生态环境等。

5.3.3 矿山基础信息应包括矿山的地理位置、开采工艺、矿山可利用的水资源、可利用的土壤资源和固体废弃物资源等信息。

5.3.4 采矿沉陷区环境现状包括采矿沉陷区地表变形和土地损毁情况、基础设施损毁情况、地表水和地下水环境质量及污染情况、土壤环境质量、土壤污染和侵蚀状况、生态现状和其他生态环境问题等。

5.4 调查方法

5.4.1 现状调查应采用文献资料收集、现场踏勘、采样、无人机与遥感影像判读、实验室分析测试、软件分析、专家咨询和座谈走访等方法。

5.4.2 宜调阅近 5 年的文献资料,若所调资料不能满足生态修复基础数据要求,应通过现场监测、踏勘和采样等手段补充完整。

6 评价与诊断

6.1 一般要求

通过现状调查,采用类比分析、综合评判等定性和定量或半定量方法评价沉陷区的土地损毁及植被破坏程度,并进行生态评价、胁迫因子识别、破坏程度诊断与分级。

6.2 生态评价与胁迫因子识别

6.2.1 应按照 HJ 19 的规定,对采矿沉陷区的生物多样性和生态系统变化情况进行评价。

6.2.2 应按照 HJ 2.3、HJ 610 和 HJ 964 的规定对采矿沉陷区地表水、地下水和土壤环境质量进行评

价,若评价指数大于1,则表明评价因子超标,该评价因子为胁迫因子。

6.2.3 应对土壤养分指标含量进行分级评价,养分指标含量与参照系统相差一个等级或区域性的土壤贫瘠养分指标为土壤养分胁迫因子。土壤养分含量分级见附录B。

6.3 破坏程度诊断与分级

6.3.1 应对采矿沉陷区范围内的土地损毁程度进行诊断和分级,分级诊断宜考虑地表水平变形、附加倾斜、下沉、沉陷后潜水位埋深和土地生产力降低等因素。分级诊断标准见附录C的表C.1。

6.3.2 应对采矿沉陷区范围内的土壤侵蚀程度进行诊断和分级,分级诊断宜考虑土壤发生层状况以及表层侵蚀状况等因素,缺乏完整的土壤剖面和表层状况资料时,可按照参照生态系统土壤剖面和表层结构作为基准进行评价。分级诊断标准见表C.2。

6.3.3 应对采矿沉陷区范围内的植被破坏程度进行诊断和分级,分级诊断宜考虑生态环境状况、地表植物生长状况和地面鳞片状面蚀程度等因素。分级诊断标准见表C.3。

7 生态修复目标与模式

7.1 一般要求

7.1.1 生态修复目标的确定与修复模式的选择应在生态修复方案中明确体现。生态修复方案应以前期现状调查、评价诊断为基础,紧密衔接矿产资源开发利用方案、矿区土地利用规划,依照现状调查、评价诊断、目标确立、模式选择、单元划分、工程设计、技术措施、监测维护、投资估算、保障措施等内容和逻辑思路进行编写。生态修复方案编制大纲见附录D。

7.1.2 基于现状调查和评价与诊断结果,依次制定采矿沉陷区生态修复目标,确定生态修复模式,划分修复单元。

7.2 制定修复目标

7.2.1 在确定采矿沉陷区生态修复目标时,应充分考虑相关法律法规、标准、规划、采矿沉陷区土地利用现状等因素,做到目标明确,科学可行。

7.2.2 生态修复目标应与当地的国土空间开发利用规划相衔接,宜结合实际确立短期目标、中长期目标、总体目标和单元分目标。

7.2.3 短期目标为生态修复工程结束后应达到的目标,包括沉陷区土地整治效果、土地利用程度、水和土壤环境污染治理成效、植物存活率和生态环境质量改善程度等。

7.2.4 中长期目标为修复工程结束后三年至五年应达到的目标,包括沉陷区生态环境质量改善效果、植被覆盖度、植物群落和生物多样性提高幅度、生态系统稳定性和生态系统服务功能提升等。

7.2.5 总体目标为沉陷区修复完成后应达到的提质增效目标。重点从沉陷区地质隐患消除、土地利用程度、生态环境质量改善、生态系统结构、功能和生物多样性提升、经济和社会效益等方面设置定量或定性的约束性、引导性目标指标。

7.2.6 单元分目标为对已划分的修复单元修复完工后应达到的质量目标。重点从单元地质隐患消除、土地利用程度、污染及影响因子消除和单元生态环境质量改善等方面确立约束性目标。

7.3 确定修复模式

按照生态环境现状评价结果、土地损毁程度、土壤侵蚀程度和植被破坏程度诊断分级结果确定修复模式,沉陷区生态系统轻度、中度和重度受损分别选择自然恢复、辅助再生和生态重建的修复模式。生态修复模式确定方法见附录C。

7.4 划分修复单元

7.4.1 对辅助再生和生态重建修复模式,应先开展生态修复利用方向适宜性评价,确定生态修复利用方向,最后划分生态工程修复单元。

7.4.2 应以地形地貌、土地利用现状为基础,结合生态现状评价结果和修复目标,划分生态修复利用方向评价单元对修复利用方向适宜性进行评价。生态修复利用方向的选定见附录 E。

7.4.3 依据生态修复利用方向适宜性评价结果,结合采矿沉陷区整体规划确定评价单元最终生态修复利用方向,对于多宜性的评价单元,宜结合当地自然条件、社会条件、土地复垦类比分析和工程施工难易程度等,确定最终修复利用方向。

7.4.4 综合考虑地貌单元的相似性,将修复利用方向、所达到的标准和修复技术措施一致性的评价单元划分为同一类修复单元。

8 生态修复设计

8.1 一般要求

8.1.1 采用辅助再生和生态重建修复模式的修复单元,应根据修复目标和修复单元的特征进行生态修复设计。

8.1.2 应坚持保护优先、充分利用自然恢复的原则进行定位并确立修复思路,按照第 6 章所给方法评价采矿沉陷区现状,依据评价结果核算生态修复所需工程量。

8.1.3 应从矿山所在区域的主体功能区划和主导生态功能定位出发,重点考虑沉陷区植物群落多样性和水土保持等生态功能,同时兼顾美学价值和经济学价值。

8.1.4 应附以总体规划图、重点区域划分图、生态要素分布图、生态竖向设计图、功能单元划分图、植被设计图、地貌特征设计图、辅助设施设计图以及土建施工图和植被施工图等施工图件。

8.2 设计内容

8.2.1 生态修复设计应包括总体生态修复设计、修复单元设计和辅助配套设计。

8.2.2 总体生态修复设计应包括总体平面规划、生态修复单元区划、植被等重点生态要素区划、竖向设计。

8.2.3 修复单元设计在总体生态修复工程设计的基础上应包括修复单元设计主题、地表地形设计、植被设计等。

8.2.4 辅助配套设计应包括交通道路、公共区域、配套设施等,保证生态系统的整体性和修复单元的连通性的辅助措施。

9 生态修复技术措施

9.1 一般要求

9.1.1 在沉陷区生态修复技术实施前,应采取适宜的措施消除地质安全隐患和污染,使塌陷区水土保持稳定状态,为修复技术的实施提供安全保障。

9.1.2 应严格按照第 7 章所述生态修复的目标与模式,选择适宜的生态修复技术或措施,做到修复流程科学规范,修复投入经济可行,修复结果准确达标。

9.1.3 不同的生态修复模式宜选择与其相适应的修复技术或措施。自然恢复修复模式宜选择人工引导自然恢复措施;辅助再生修复模式宜选择地形改造、土壤改良和植被恢复措施;生态重建修复模式宜

选择地貌重塑、土壤重构和植被重建措施。

9.2 地质安全隐患消除措施

地质安全隐患包括地面塌陷、台阶下沉、地裂缝和地面沉降等。为了保障采矿沉陷区生态修复前的地质稳定,应选取回填充填、削坡整形、固坡护坡和疏导排水等工程措施消除地质安全隐患。

9.3 水土保持措施

9.3.1 非积水沉陷区、季节性积水沉陷区周边有地表水或季节性洪水汇入时,应在沉陷区上游设截/排水(洪)沟渠,将汇水引入沉陷区外部自然沟道内。

9.3.2 季节性积水沉陷区内存在塌陷坑时,宜采用地形改造措施对地面进行处理。整形后塌陷坑周边地形仍高于塌陷坑时,应在塌陷坑周边设置截/排水措施,顺接至塌陷坑外自然水系,并布设消能防冲措施。

9.3.3 工作范围内坡面截/排水、引水拦沙造地、小型蓄水工程、农业耕作、防风固沙、沟壑治理,弃渣拦截、土地整治截/排水等水土流失保护措施应按照 GB 51018 的规定设计和执行。

9.4 污染消除措施

9.4.1 应对采矿沉陷区内受污染的地表水、地下水和土壤实施物理、化学或生物的污染消除措施与风险管控,使有毒有害的污染物转化为无害物质或含量降低到可接受水平,或阻断其暴露途径,消除胁迫因子,达到相应的环境质量标准。

9.4.2 应在排污口整治、面源和内源治理等控源截污措施基础上,采用适宜的地表水污染消除措施,转移、吸收、降解或转化采矿沉陷区地表水的污染物。水域的生态系统保护与修复工程设计按照 SL/T 800 的规定执行。

9.4.3 应采用适宜的地下水污染消除措施,降解、吸附、转移或阻隔采矿沉陷区地下水中的污染物或阻断其暴露途径。地下水修复和风险管控技术措施按照 HJ 25.6 的规定执行。

9.4.4 应采用适宜的土壤污染消除措施,固定、转移、吸收、降解或转化采矿沉陷区污染土壤中的污染物。污染土壤修复方案编制的内容和技术要求按照 HJ 25.4 的规定执行。

9.5 地形改造与地貌重塑技术措施

9.5.1 修复单元的地表地形和土壤条件应符合 TD/T 1036 的规定。不符合标准的地块应根据实际情况采用回填充填、土地平整、挖深垫浅、疏排法等技术措施和其他辅助措施进行地形改造。地形改造技术措施适用条件及一般工作内容见附录 F。

9.5.2 地貌重塑应根据生态修复利用方向要求和修复目标,结合采矿沉陷区地形地貌破坏方式与损毁程度,通过对局部实施挖、填、推、压等土石方和地形改造措施,形成与周边地貌景观相协调的新地貌。

9.6 土壤改良与重构技术措施

9.6.1 根据修复方向所要求的土壤质量标准,不满足条件的修复单元,应进行土壤改良和培肥,以提高土壤养分水平,消除养分胁迫因子。在土壤改良和培肥过程中,应加强生态环境保护,防止造成新的水土污染。

9.6.2 对耕作层土壤紧实或坚硬、不利于生物生存的沉陷区地块,宜通过深耕土壤、疏松土壤、增大土壤孔隙率、提高土壤肥力等措施改善土壤环境条件。

9.6.3 土壤改良与培肥应明确原材料种类、用量、施用方法和改良效果,避免过量施用。

9.6.4 物理改良宜通过引入处理后无污染风险的矿区污泥、粉煤灰等措施改良沉陷区土壤质地。

9.6.5 化学改良宜根据土壤立地条件和理化性质确定,具体措施如下:

- a) 干旱地区或保水不良的沉陷区宜使用保水剂；
- b) 肥力低的土壤宜施用农家肥或商用有机肥；
- c) 酸性土壤宜采用石灰或土壤调理剂施用等措施，碱性土壤宜采用石膏、硫磺或硫酸铁施加等措施。

9.6.6 微生物改良宜通过引入优势微生物，提高土壤肥力，促进枯枝落叶层分解。

9.6.7 鼓励通过种植固氮植物、盐碱植物和堆置绿肥等措施改良盐碱化土壤。

9.6.8 土壤重构应根据生态修复利用方向和修复目标，结合采矿沉陷区土地损毁程度和土壤环境质量，通过工程、物理、化学、生物等改良措施，重新构造土壤基质，形成适宜植被生长的土壤剖面结构与肥力条件。

9.7 人工引导自然恢复技术措施

自然恢复模式的单元，宜采取封育等人工手段，引导恢复形成森林或灌草植被，提高林草质量。封育的方式、年限、措施、作业设计、质量和成效按照 GB/T 15163 的有关规定执行。

9.8 植被恢复与重建技术措施

9.8.1 植物物种选择

物种选择应以沉陷区所在地气候环境适应性和修复单元生态功能定位为前提，避免选择单一物种，宜选择适宜形成植物群落的植被物种。具体要求如下。

- a) 尽量选择沉陷区原生优势植物、乡土树种或先锋植物种，可根据参照生态系统，选择品种优良、植株健壮、侧根多、根系发达、有土壤改良作用的物种。
- b) 慎重引入外来物种。需要引进外来物种时，需经论证确认不具有造成外来物种入侵的风险。
- c) 优先选择生长快、生物量大的乔灌草植物。
- d) 平地宜选择以生态效益为主、兼顾经济效益的物种；坡面宜选择根系发达、生长快的本地植物。
- e) 受到污染或盐碱化的土壤宜根据污染特点优先选择先锋植物或耐性植物，改造并提供适宜生存环境。
- f) 土壤氮素水平缺乏的沉陷区宜优先选择具有固氮能力的物种。

9.8.2 植物群落配置

根据沉陷区生态修复目标，制定植物群落配置计划，植物群落配置应遵循自然演替规律。具体要求如下。

- a) 因地制宜，根据不同的气候、地质条件，选用植物品种、植物配置方式和栽种管护技术，根据所设计的目标植物群落类型，设定草本植物、灌木、乔木和藤本植物的使用量和比例。
- b) 采用一、二年生植物和多年生植物混合配置，以乡土一、二年生植物种作为先锋植物种。选用的植物种子或播种材料可参照 LY/T 2356 的规定执行。
- c) 合理选配植物种类，乔木、灌木、草本植物合理配置，避免种间直接竞争，形成结构合理、功能健全、种群稳定的复层群落结构，且应合理确定常绿与落叶树种的搭配比例和种植密度。
- d) 采矿沉陷区在采矿干扰后形成不同坡向，如塌陷坑、台阶下沉等，应按照不同坡向配置植物。
- e) 若植被恢复目的为改善景观和生态涵养，可适当调整景观林、景观绿地和经济林的比例。
- f) 在保持水库涵养林的背景下，可建设水库景观(生态)系统，包括生态浮岛、水岸涵养林、驳岸景观带等。在沉陷区汇水区域可建设驳岸湖滨景观带。

9.8.3 植物栽(补)种

依据修复方向和修复工程设计的要求，基于现状调查结果，进行植物栽(补)种，具体要求如下：

- a) 在适合植树的季节种植乔、灌木，植苗时宜带土移植，淋浇定根水，根据土壤肥力情况，合理施肥；
- b) 造林初植密度一般以3年～5年内达到郁闭、幼树生长良好为衡量标准，其合理密度则应根据立地条件、树种生物特性和利用的经济价值等确定；
- c) 树木栽植方法及栽植要求按照GB/T 15776的规定执行；
- d) 退化草地和人工种植草地的栽植方法和栽植要求按照GB/T 37067和NY/T 1342的规定执行；
- e) 裸露坡面植被恢复技术措施按照GB/T 38360的规定执行。

9.8.4 植被重建

植被重建应根据生态修复利用方向要求和修复目标，综合考虑气候条件、地形条件、土壤资源等条件，选择本地先锋物种、建群种和适地植物物种，实施植物群落配置、植物栽（补）种措施，开展长期管护，重新构建持续稳定的植物群落。

9.9 配套修复措施

9.9.1 生态修复工程配套工程包括灌排工程、机井工程、水工建筑工程、集雨工程、疏排水工程、输电线路工程、道路工程和苗圃工程，其设计要求和一般规定按照GB 51411的规定执行。

9.9.2 集雨工程应结合水土保持截/排水措施系统布置。

9.9.3 生态修复工程中应在相关地区及时设置围栏措施、警示牌和公示牌；积水性沉陷区、季节性积水沉陷区治理改造为湖塘后，水深超过1.5 m时，岸边应设置围栏措施和警示牌。

9.9.4 采用自然恢复模式区应设置围栏和警示牌禁止人类活动。

10 监测与验收

10.1 生态修复监测

10.1.1 监测范围应与沉陷区生态修复工作范围一致。

10.1.2 监测内容包括地质稳定性监测、修复单元监测及生态系统监测。

10.1.3 地质稳定性监测包括边坡稳定性、地面塌陷、地裂缝等内容。

10.1.4 修复单元监测包括地形、水质、土壤质量、生产力水平、配套设施等内容，不同修复单元监测内容具体要求按照GB 51411的规定执行。

10.1.5 生态系统监测包括植被种类、分布、面积和植被成活率、覆盖度、植物群落多样性、动物类型、数量和分布、生物多样性和生态系统服务价值等。

10.2 生态修复项目验收

10.2.1 验收应采取现场考察、资料阅读与专家会议评审相结合的形式。

10.2.2 验收专家组应由包括农业、林业、水利、生态保护、土地复垦、地质环境治理等有关领域的专家组成。进行生态修复工程验收时，应邀请有关专家进行现场踏勘。

10.2.3 验收内容应包括地质环境隐患消除、环境污染治理效果、植被和生态系统多样性等。植被验收宜分期进行，应包括满一个生长季、第三个春季补植、第五个春季补植验收。

10.2.4 验收程序及要求按照CJJ/T 82的规定执行。

11 管理与维护

11.1 档案管理

11.1.1 项目单位应将项目设计、施工和监理过程的投资控制、进度控制、质量控制、施工日志以及合同管理、信息管理等资料分类建档保存。

11.1.2 管护人员应记录每次管护活动情况和管护数据，并建档保存。

11.2 维护措施

11.2.1 沉陷区生态修复工程验收合格后，应根据总体目标和修复单元分目标，做好沉陷区后期管护工作，管护内容包括工程设施维护和植被养护。

11.2.2 工程设施维护主要对微地形改造技术、水土保持工程、土壤改良工程及相关配套附属设施和灌排工程、集雨工程、疏排水工程等辅助措施，按照工程设计和运行要求进行定期检查和维护。

11.2.3 植被养护主要针对修复方向为林地、草地并已种植苗木、草类的区域进行，按照设计要求进行抚育护理，包括补植、修枝、施肥、间伐、病虫害防治、防火，以及对人畜践踏、毁坏和自然灾害造成的损毁修复等。

11.2.4 植被恢复后的3年～5年内应进行未成林管护。未成林管护工程和抚育管理办法应按照GB/T 15776的规定执行；未成林浇水按照GB 51411的规定执行；有害生物防治按照GB/T 15776的规定执行。

附录 A
(资料性)
采矿沉陷区现状调查内容

表 A.1 给出了矿山所在区域基础信息。表 A.2 给出了矿山基础信息。表 A.3 给出了采矿沉陷区环境现状调查信息。

表 A.1 矿山所在区域基础信息

基本内容	具体信息
国家及地方相关政策	国家及矿山所在地国土空间、生态修复及矿山治理等方面的相关政策、法律、法规以及规划、方案等资料
矿山相关规划和方案	《矿产资源开发利用方案》《矿山地质灾害防治规划》《矿产资源开发建设项目建设项目环境影响报告》《矿山地质环境保护与土地复垦方案》《矿山生态环境保护与生态治理方案》《矿山水土保持方案》等与环境保护相关的资料
区域经济	近 3 年的矿山所在区城乡(镇)人口、农业人口、人均耕地、农业总产值、财政收入、人均纯收入、农业生产状况等
历史人文	区域历史文化遗迹类型、分布、人文资源、民族特色、时代、周边景观位置及分布
地形地貌	地质：矿产资源赋存情况，地层、岩性、地质构造等。 地貌：地貌类型、海拔高度、坡度、坡向等
水文地质	地表水系及地下水赋存情况：地表水体类型、地表径流量和水质特征、空间分布、面积、水体的环境质量和水温、水体的水位标高及其动态变化和水资源利用情况等。 地下水赋存情况：主要含水层(浅部)、隔水层、赋存条件、潜水埋深、包气带、成土母质、土壤类型等。 采矿活动影响：受影响的含水层类型、层位、范围、水位变化，地表水空间分布、水量变化等
气候条件	风向、气温、风速、气压、湿度、降水、太阳辐射等
生态环境	生态系统类型、结构功能、生态保护红线、重要生态敏感区、自然保护地等。 采矿活动破坏的地表植被以及由此造成生态系统结构多样性降低和生态系统功能受损情况等

表 A.2 矿山基础信息

基本内容	具体信息
矿山位置	矿山名称、地理位置、交通状况、矿山面积、建矿时间、闭坑或废弃时间。 地理位置及区位图、地层综合柱状图、反映矿山生态环境变化过程的航片或卫片等图片资料
开采工艺	开采矿类与矿种、开采范围、规模、厚度、深度、工艺、年限、矿井开拓系统图
可利用水资源	矿山范围内可利用水资源包括矿井水和循环利用废水、水量、水质及其可利用情况
可利用土壤	是否有外来土源及其数量和土质
可利用固体废弃物	矿山固体废弃物的种类、数量、性质、可利用情况

表 A.3 采矿沉陷区环境现状调查信息

基本内容	具体信息
地表变形和土地损毁	<p>沉陷区基本情况:类型、位置、权属、范围和面积、边坡高度、边坡坡度、边坡稳定性、沉陷时间、沉陷最大深度、是否继续沉陷、开采稳沉程度。</p> <p>土地变形情况:地表变形种类、地表变形程度及分布。</p> <p>土地损毁情况:损毁地类和程度、地表水平变形程度、附加倾斜程度、下沉量、土地生产力降低程度、土地利用现状。</p> <p>土地利用情况:损毁土地位置、权属、面积、现状利用类型等。</p> <p>沉陷区已治理情况:已治理面积、范围、工程措施、治理效果及利用情况等。</p> <p>沉陷区积水情况:沉陷区积水情况、积水面积、积水最大深度、积水水质、沉陷后潜水位埋深</p>
基础设施损毁	<p>道路设施损毁调查:已损毁道路的损毁时间、裂缝位置、宽度、长度、路面材料、损毁情况等。</p> <p>水利设施损毁调查:已损毁水利设施的损毁时间、位置、类型、规格及材料、长度(线状)、数量(非线状)、损毁情况等。</p> <p>林网损毁调查:已损毁林网的损毁时间、位置、数量、类型、规格等。</p> <p>其他基础设施损毁调查:已损毁电力、通信等设施的损毁时间、位置、等级、数量等</p>
地表水质量及污染	调查指标参照 GB 3838 的相关条款,依据不同采矿类型产生的特殊污染物为选测项
地下水质量及污染	调查指标参照 GB/T 14848 的相关条款,依据不同采矿类型产生的特殊污染物为选测项
水土流失	水土流失类型、面积、强度、分布及成因
土壤质量、污染与侵蚀状况	<p>土壤环境质量指标参照 GB 15618 和 GB 36600 的相关条款,依据不同采矿类型产生的特殊污染物为选测项。</p> <p>土壤表层性状指标:鳞片状面蚀状况、土壤表层侵蚀状况、生境状况、地表植被生长状况。</p> <p>土壤剖面发育指标:有效土层厚度、剖面发育程度、外来物入侵。</p> <p>土地侵蚀指标:侵蚀比例、面积、鳞片状面蚀大小</p>
生态系统	调查指标参照 HJ 19 的相关条款
其他生态环境问题	沙漠化、石漠化、盐渍化、生物入侵等环境问题及其影响面积和程度

附录 B
(资料性)
土壤养分含量分级

表 B.1 给出了土壤养分含量分级。

表 B.1 土壤养分含量分级

有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	碱解氮 mg/kg	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg	丰缺	级别
≥40.0	≥2.0	≥1.0	≥150.0	≥40.0	≥200.0	很高	一级
30.0~<40.0	1.5~<2.0	0.8~<1.0	120.0~<150.0	20.0~<40.0	150.0~<200.0	高	二级
20.0~<30.0	1.0~<1.5	0.6~<0.8	90.0~<120.0	10.0~<20.0	100.0~<150.0	中上	三级
10.0~<20.0	0.75~<1.0	0.4~<0.6	60.0~<90.0	5.0~<10.0	50.0~<100.0	中	四级
6.0~<10.0	0.5~<0.75	0.2~<0.4	30.0~<60.0	3.0~<5.0	30.0~<50.0	低	五级
<6.0	<0.5	<0.2	<30.0	<3.0	<30.0	极低	六级

注：引自全国第二次土壤普查养分分级。

附录 C

(资料性)

破坏程度分级与修复模式

表 C.1 给出了土地损毁程度分级与修复模式。表 C.2 给出了土壤侵蚀程度分级与修复模式。表 C.3 给出了地表植被破坏程度分级与修复模式。

表 C.1 土地损毁程度分级与修复模式

水平变形 mm/m	附加倾斜 mm/m	下沉 m	沉陷后潜水位埋深 m	生产力降低 %	损毁程度分级	推荐修复模式
水田						
<3.0	<4.0	<1.0	>1.0	<20.0	轻度	自然恢复为主
3.0~6.0	4.0~10.0	1.0~2.0	0.0~1.0	20.0~60.0	中度	辅助再生为主
>6.0	>10.0	>2.0	<0.0	>60.0	重度	生态重建为主
水浇地						
<4.0	<6.0	<1.5	>1.5	<20.0	轻度	自然恢复为主
4.0~8.0	6.0~12.0	1.5~3.0	0.5~1.5	20.0~60.0	中度	辅助再生为主
>8.0	>12.0	>3.0	<0.5	>60.0	重度	生态重建为主
旱地						
<8.0	<20.0	<2.0	>1.5	<20.0	轻度	自然恢复为主
8.0~16.0	20.0~40.0	2.0~5.0	0.5~1.5	20.0~60.0	中度	辅助再生为主
>16.0	>40.0	>5.0	<0.5	>60.0	重度	生态重建为主
林地、草地						
<8.0	<20.0	<2.0	>1.0	<20.0	轻度	自然恢复为主
8.0~20.0	20.0~50.0	2.0~6.0	0.3~1.0	20.0~60.0	中度	辅助再生为主
>20.0	>50.0	>6.0	<0.3	>60.0	重度	生态重建为主
注 1：附加倾斜指受采矿沉陷影响而增加的倾斜(坡度)；任何一项指标达到相应标准即认为土地损毁达到该损毁等级。						
注 2：该表格引自 TD/T 1031.3。						

表 C.2 土壤侵蚀程度分级与修复模式

土壤发生层状况	土壤表层侵蚀状况	土壤侵蚀程度分级	推荐修复模式
土壤腐殖质层、淀积层、母质层剖面保持完整	土壤表层完整	无明显侵蚀	自然恢复为主
土壤腐殖质层保留厚度超过 1/2, 淀积层和母质层剖面保持完整	土壤表层少部分被侵蚀	轻度侵蚀	自然恢复为主

表 C.2 土壤侵蚀程度分级与修复模式(续)

土壤发生层状况	土壤表层侵蚀状况	土壤侵蚀程度分级	推荐修复模式
土壤腐殖质层保留厚度小于1/2,淀积层和母质层剖面保持完整	土壤表层50%以上被侵蚀	中度侵蚀	辅助再生修复为主
土壤腐殖质层无保留,淀积层开始裸露,母质层剖面保持完整	土壤表层全部被侵蚀	重度侵蚀	生态重建为主
土壤腐殖质层和淀积层无保留,母质层剖面裸露	母质层受到侵蚀	重度侵蚀	生态重建为主

表 C.3 地表植被破坏程度分级与修复模式

生境状况	植物生长状况	地面鳞片状面蚀程度	植被破坏程度分级	推荐修复模式
生境没有受到干扰;植被保持原有状态;对野生动物栖息繁衍没有影响	地表植物生长良好,分布均匀,一般覆盖度大于70%	无鳞片状面蚀	无	自然恢复为主
生境受到一定干扰;植被基本保持原有状态;对野生动物栖息繁衍影响不大	地表植物生长一般,分布不均匀,但土壤尚能连接成片,覆盖度为50%~70%	弱度鳞片状面蚀	轻度	自然恢复为主
生境受到干扰;植被部分消失,但干扰消失后,植被仍可恢复;野生动物栖息繁衍受到一定程度影响,但仍可以栖息繁衍	地表植物生长较差,分布不均匀,鳞片状部分因面蚀已明显凹下,覆盖度为30%~50%	中度鳞片状面蚀	中度	辅助再生修复为主
生境受到严重干扰;植被基本消失;野生动物难以栖息繁衍	地表植物生长极差,鳞片状部分已扩大连片,鳞片间土地反而缩小成斑点状,覆盖度小于30%	强度鳞片状面蚀	重度	生态重建为主

注:该表格部分引自环境保护部2017年第84号《关于发布县域生物多样性调查与评估技术规定》。

附录 D
(资料性)
生态修复方案编制大纲

D.1 任务来源及编制目的

说明委托单位,阐明编写方案的目的。

D.2 编制工作概况

说明编制本方案的编制单位或个人或联合体。

D.3 编制依据

说明本方案的编制依据及理由,如国家和地方相关法律法规、标准规范与其他相关资料。

D.4 编制范围

说明工作范围,与生态修复工作范围一致。

D.5 现状调查

D.5.1 矿山所在区域基础信息

包括矿山所在区域生态续费相关政策和规划、区域经济和人文状况、区域地形地貌、水文、气候和生态环境等。

D.5.2 矿山基本信息调查

包括矿山的地理位置、开采工艺、矿山可利用的水资源、可利用的土壤资源和固体废弃物资源等。

D.5.3 沉陷区损毁及生态现状调查

包括沉陷区损毁调查、已治理情况、沉陷区积水情况,沉陷区其他损毁概况,以及沉陷区水环境、土壤环境和生态系统现状。

D.5.4 调查结果表达

调查成果以调查数据表、现状监测过程及结果、地形图、多年水位过程线图、风玫瑰图、土地利用规划图、土地利用现状图、植被类型图、植被物种分布图、调查照片、音频、视频等形式表达。

D.6 评价与诊断

D.6.1 生态评价与胁迫因子识别

沉陷区生态环境状况评价与胁迫因子识别。

D.6.2 破坏程度诊断与分级

包括土地损毁程度、土壤侵蚀程度、植被破坏程度诊断与分级。

D.7 生态修复目标与模式

D.7.1 确定修复目标

生态修复目标包括短期修复目标和中长期修复目标,还包括总体目标和修复单元分目标。

D.7.2 确定修复模式

依据土地受损程度和地表植被破坏程度分级结果,选择合理适宜的生态修复模式。生态修复模式分为自然恢复、辅助再生和生态重建。

D.7.3 划分修复单元

对辅助再生和生态重建修复模式,开展生态修复利用方向适宜性评价,根据评价结果确定生态修复利用方向,相同的沉陷区生态修复目的、所达到的标准或所采用的技术措施一致性地理空间单元为一个修复单元。

D.8 生态修复工程设计

D.8.1 整体设计

包括总体平面规划、生态修复单元区划、植被等重点生态要素区划、竖向设计。

D.8.2 单元设计

包括修复单元设计主题、地表地形设计、植被设计等。

D.8.3 辅助设计

包括交通道路、公共区域、配套设施等,保证生态系统的整体性和修复单元的连通性的辅助措施。

D.9 安全隐患与污染消除措施

包括地质安全隐患的消除、水土保持措施、水体污染治理措施以及土壤污染治理措施。

D.10 生态修复技术措施

依据修复目标和修复单元特点,自然恢复、辅助再生和生态重建修复模式分别选择必要的生态修复技术开展沉陷区生态修复工作。

自然恢复修复单元一般采取人工引导自然恢复措施,辅助再生修复单元一般采取地形改造、土壤改良和植被恢复措施,生态重建修复单元一般采取地貌重塑、土壤重构和植被重建措施。

D.11 监测与管护

D.11.1 生态监测

包括地质稳定性监测、修复单元监测和生态系统监测。

D.11.2 管护

包括工程设施维护和植被养护。

D.12 投资估算

包括估算依据、收费标准、经费估算计算方法、过程和估算结果等,详细列表说明。

D.13 保障措施

包括报账组织保障、技术保障和资金保障等。

D.14 附表

包括工程量表、工程预算表、重要事项说明表等。

D.15 附图

D.15.1 调查成果附图

包括矿山生态问题现状图、矿山生态修复工程规划部署图、工程部署图、工程设计平面(剖面)图、工程实施效果图、工程量计算图、重点工程设计图和其他附图。

D.15.2 设计与施工阶段附图

包括总体规划图、重点区域划分图、生态要素分布图、生态竖向设计图、功能单元划分图、植被设计图、地貌特征设计图、辅助设施设计图等图件。施工一般含有土建施工图、植被施工图等图件。

附录 E
(资料性)
生态修复利用方向

表 E.1 给出了生态修复利用方向。

表 E.1 生态修复利用方向

序号	生态修复利用方向	适用性	一般工程措施
1	农林草修复方向	适宜耕地、林地和草地的非积水沉陷区,优先考虑农林草治理模式的农业种植、林业和牧草业方向	采用必要的回填充填和地面平整的地形改造技术措施
2	渔业(养殖业)和水库方向	适宜形成封闭水域的常年积水沉陷区,发展渔业(养殖业)和建设水库作为蓄水调节站	采用必要的挖深垫浅和疏排法的地形改造技术措施
3	景观生态建设方向	适宜治理为园地、人工湿地、旅游观光园等景观生态方向的各种类型沉陷区,建成乔木-灌木-草地、人工湿地、旅游业的综合景观模式	采用必要的回填充填、地表平整、挖深垫浅、疏排法等地形改造技术措施
4	新能源方向	风能或光照条件好的沉陷区,优先发展新能源模式。非积水沉陷区,优先发展风力发电和光伏发电产业模式,或农业-光伏发电互补模式	积水沉陷区,采用固定式或漂移式光伏发电装置发展新能源产业,或采用渔业-光伏发电互补模式,采用必要的回填充填、地表平整、挖深垫浅、疏排法等地形改造技术措施
5	城镇建设方向	适宜用于建设用地且依当地规划用于建设用地的非积水沉陷区,优先发展城镇建设模式	采取必要的回填充填和地表平整的地形改造技术措施,土地质量满足 TD/T 1036 和 GB 36600 的质量标准

附录 F

(资料性)

地形改造技术措施适用条件及一般工作内容

表 F.1 给出了地形改造技术措施适用条件及一般工作内容。

表 F.1 地形改造技术措施适用条件及一般工作内容

技术措施	适用条件	一般工作内容
回填充法	适用于永久性裂缝或较深的沉陷区,沉陷地标高距离可利用高程较大时,采用充填法,并用机械压实和整平,直至达到设计高程,再覆表土,潜水位高的地区一般修建截/排水沟	<p>按照剥离表土,充填、压实,覆土的先后顺序进行构筑,表土充足时在充填层中间填充一段心土层,覆土的有效土层厚度参照 TD/T 1036 的相关条款。</p> <p>在表土剥离前开展沉陷区土壤调查、评价工作。</p> <p>剥离的表土集中堆放到指定的区域,采用覆盖措施,四周布设排水沟,避免雨水冲刷流失。</p> <p>充填材料选择煤矸石、废石、河泥、粉煤灰、炉渣和土壤等固体废物,充填时考虑各种充填材料粒径组合,沉陷区充填时进行必要的防渗处理。</p> <p>永久性裂缝的充填技术工作内容如下:</p> <p>宽度较小(一般小于等于 10.0 cm)的裂缝,一般未贯穿土层,就地取小粒沙石和(或)表土填补裂缝,夯实平整,然后采用人工整治的方法;</p> <p>宽度较大(一般大于 10.0 cm)的裂缝,先用粗砾石或砾石填堵孔隙,再用次粗砾,最后用砂、土填堵,表层填土逐层夯实,直至达到设计高程,然后采用机械充填和人工充填相结合方式;</p> <p>裂缝分布密度较大的区域,在整个区域内剥离表土并挖深至设计标高,再统一充填并铺垫,表土填补逐层夯实,直至达到设计高程,然后采用机械充填和人工充填相结合方式</p>
地表平整法	适用于中低潜水位的非充填沉陷区域或高潜水位的充填沉陷区域,且地面高差不大的田块,削高垫低,逐步达到平整	<p>非积水而起伏不平的沉陷地,通过地表平整法进行挖补平整,保证整个沉陷区海拔标高基本一致。</p> <p>基本不积水或干旱地带形成丘陵地貌,先对局部沉陷地进行土地平整后,根据有效土层厚度和修复方向,确定是否需要添加表土。</p> <p>平整后的地面坡度和平整度参照 TD/T 1036 的相关条款,用于耕地的田块,地表整形参照 TD/T 1033 的相关条款。</p> <p>水平地或台地,采用穴状整地;坡面沿等高线带状整地;地形破碎、土层较薄的,采用穴状或鱼鳞坑整地</p>
挖深垫浅法	适用于积水较深的沉陷区域,挖深取土充填到沉陷较浅无积水区域直至达到设计高程。适用于沉陷较深,有积水的高、中潜水位的季节性积水沉陷区和常年积水沉陷区	<p>依据当地条件,因地制宜,季节性积水地带一般综合实施“挖深垫浅”和“疏排法”等措施,常年积水地带一般综合实施“挖深垫浅”和“回填充”等措施。挖深区域保留水面,集中开挖水库、蓄水池、鱼塘或人工湖等,若位于城镇附近,优先治理为人工水域、人工湿地和公园,“垫浅”后场地改造为水平梯田或水田等,塘边坡地栽树种草。</p> <p>地下水位埋藏较浅的区域(地下水位小于等于 2 m),一般在 1.5 m~3.0 m 之间的沉陷区内进行挖深垫浅。地下水位埋藏较深的区域(地下水位大于 2.0 m),一般在 2.0 m~4.0 m 之间进行挖深垫浅,其挖深和垫浅一般小于 2.0 m。</p> <p>治理成渔业(养殖业)用途的积水沉陷区,池塘的水深、水源达到当地养殖一种或多种水产品的要求,水质参照 NY 5051 的相关条款;治理成景观、娱乐用水域,水质参照 GB 3838 中Ⅲ类、Ⅳ类、Ⅴ类水域功能水域水质相关条款</p>

表 F.1 地形改造技术措施适用条件及一般工作内容（续）

技术措施	适用条件	一般工作内容
疏排法	适用于开采沉陷积水区通过强排或自排的方式,将水引入到附近的河流、湖泊。适用于地表沉陷不大,通过正常的排水设施可排出季节性积水,且通过地表修整措施能够达到土地恢复利用的地块	疏排系统一般包括排水沟和蓄水设施、排水区外的承泄区和排水枢纽等部分。排出的积水一般满足承泄区受纳水体对水质的要求,必要时加临时处理池进行达标处理。疏排法一般设有防洪、除涝和降渍等辅助工程。 与“挖深垫浅法”综合使用可集中成片开挖成塘田相隔的基塘系统;与“地表平整”综合使用有利于水土保持

IA
CLOUD

参 考 文 献

- [1] GB 3838 地表水环境质量标准
- [2] GB/T 14848 地下水质量标准
- [3] GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)
- [4] GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)
- [5] LY/T 2356 矿山废弃地植被恢复技术规程
- [6] NY 5051 无公害食品 淡水养殖用水水质
- [7] TD/T 1031.3 土地复垦方案编制规程 第3部分:井工煤矿
- [8] TD/T 1033 高标准基本农田建设标准
- [9] TD/T 1036 土地复垦质量控制标准
- [10] 县域植被多样性调查与评估技术规定(环境保护部2017年第84号公告)
- [11] 山水林田湖草生态保护修复工程指南(试行)(自然资办发〔2020〕38号)
- [12] 国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南(试行)(自然资办发〔2020〕51号)
- [13] 白中科,师学义,周伟,等.人工如何支持引导生态系统自然修复[J].中国土地科学,2020,34(9):1-9.
- [14] 章家恩,徐琪.退化生态系统的诊断特征及其评价指标体系[J].长江流域资源与环境,1999,8(2):215-220.
- [15] 于昊辰,卞正富,陈淳,等.矿山土地生态系统退化:内涵、诊断及其调控[J].煤炭科学技术,2020,48(12):214-223.

