

煤矸石回填地基的环境效应研究

李树志, 白国良, 田迎斌

(煤炭科学研究总院 唐山研究院, 河北 唐山 063012)

摘要: 为了弄清楚煤矸石回填地基对复垦区的环境效应, 以开滦矿区吕家坨复垦新村为例, 介绍了地基回填煤矸石工艺, 分析了煤矸石化学成分及其含量; 采用室内淋溶实验, 对 pH、总硬度(CaCO₃)、F⁻、SO₄²⁻、Pb、Cd 和 Cr⁶⁺ 浓度等地下水环境质量指标进行分析, 探讨了煤矸石回填地基对水环境的影响; 讨论了煤矸石回填地基对大气质量的影响; 参照《城市放射性废物管理办法》规定, 评价了回填地基煤矸石的放射性对人体健康的危害。结果表明: 通过现场振动压实试验确定了回填地基分层充填、分层振动压实参数及碾压趟数, 确定按照煤矸石与土体积之比 5 : 2 进行回填, 若回填一层厚 500 mm 煤矸石, 则要回填一层厚 200 mm 粉煤灰或土, 地表覆土厚度确定为 0.5 m; 煤矸石中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量较高, 属基性岩类, 同时煤矸石含有炭、铝和 CaO 等物质, 易发生水解和风化等现象; 地基分层回填压实的复垦工艺减少了煤矸石中有害物质的释放量, 降低了污染物的迁移速度, 不会对水环境造成污染; 地基回填煤矸石也显著减少粉尘和有害气体的排放量, 降低对大气的污染; 研究区煤矸石不属于放射性废物, 不会影响人体健康, 可作为建筑材料使用。

关键词: 煤矸石; 回填地基; 环境效应; 地下水; 放射性; 污染; 开滦矿区

中图分类号: X54; X591 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2011)04-0412-04

Study on Environmental Effect of Foundation Backfilled with Coal Gangue

LI Shu-zhi, BAI Guo-liang, TIAN Ying-bin

(Tangshan Branch of China Coal Research Institute, Tangshan 063012, Hebei, China)

Abstract: In order to find the environmental effect of foundation backfilled with coal gangue on the new village construction, taking the new village construction in Lujiatuo of Kailuan mining area as an example, the process of foundation backfilled with coal gangue was introduced; chemical composition and content of coal gangue were measured; the environmental quality indexes of groundwater including pH, total hardness (CaCO₃) and concentration of F⁻, SO₄²⁻, Pb, Cd and Cr⁶⁺ were measured with the eluviating experiment; effects of foundation backfilled with coal gangue on water and atmosphere environments were discussed; the danger of coal gangue radioactivity to human healthy was evaluated according to *Regulations for Radioactive Waste Management*. The results showed that through the field vibration compaction test, the layered filling and vibratory compaction parameters and rolling number of foundation backfilled were determined; the reasonable proportion for the volume ratio of coal gangue to soil was 5 : 2, if gangue with 500 mm thickness was backfilled, then there were flyash or soil with 200 mm thickness above the gangue, and the optimal thickness of surface soil was 0.5 m; the contents of SiO₂ and Al₂O₃ of coal gangue were higher, and the coal gangue belonged to basic rock, and weathering and hydrolysis easily happened because there were carbon, aluminum and CaO in coal gangue; the reclamation process of foundation backfilled in layer and compacted decreased the hazardous substance release from coal gangue, and reduced the transport velocity of contaminant, and there was no significant influence on water environment; foundation backfilled with coal gangue decreased air pollution significantly; the coal gangue as building material was not radioactive waste, and had no adverse effect on human healthy.

Key words: coal gangue; foundation backfilled; environmental effect; groundwater; radioactivity; pollution; Kailuan mining area

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAC09B01)

作者简介: 李树志(1960-), 男, 河北定州人, 工学博士, 从事矿山地质灾害评估与土地复垦研究。E-mail: lsz9686@163.com

0 引言

煤矸石是煤炭开采、洗选加工过程中产生的固体废弃物,也是中国工业固体废物中产生量、累计量、占地面积最大的固体废料。到“十五”末期,中国国有煤矿拥有煤矸石山 1 500 余座,堆积量 30×10^8 t 以上(占中国工业固体废物排放总量的 40% 以上)。煤矸石的大量堆放,不仅压占土地,影响生态环境,其淋溶水污染周围土壤和地下水,而且煤矸石中含有一定的可燃物,在适宜条件下发生自燃,排放二氧化硫、氮氧化物、碳氧化物和烟尘等有害物质污染大气环境^[1-3],此外煤矸石中赋存的放射性元素可能影响矿区居民的身体健康^[4-5]。

研究表明,煤矸石具有良好的工程特性,是较为理想的地基回填材料,已广泛用于中国采煤沉陷区迁村建设工程中^[6-8]。煤矸石回填埋地基的环境效应一直深受社会各界广泛关注,但尚未进行过深入研究。笔者以开滦矿区吕家坨矿业分公司复垦新村为例,探讨了煤矸石回填埋地基对水环境、大气环境以及放射性影响。

1 研究区概况

复垦新村位于吕家坨矿业分公司一、三采区采煤塌陷地。该区域位于燕山南麓山前冲洪积平原区,处于沙河冲洪积扇上部,原地表开阔平坦,略呈北高南低,标高 22~31 m。采矿活动引起地表沉陷,地表形成许多大小不等的沉陷洼地和积水坑等人工地貌,塌陷深度一般为 3~5 m,地面标高多为 25~27 m。

本区上覆地层从上至下分别为第四系冲积层、下二叠统唐家庄组、二叠系石炭统赵各庄组。上述地层中均有含水层发育,其中第四系冲积层含水层厚度约为 34 m,为弱—中等含水层,岩性为卵石,粗、中细沙,上部水质类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$,下部为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$ 。该区地下水埋藏浅,一般在 2.5 m 左右。

本区属东部季风暖温带滨海半湿润气候,四季分明,最高温度 40 °C,最低温度 -20 °C,平均温度 25.6 °C。土壤冻结一般在每年 11 月至次年 3 月,最大冻土深度 800 mm。全年平均降水量 600~700 mm,降水量集中在 7 月至 8 月份。

2 地基回填煤矸石工艺

经过燃烧的煤矸石粒径较小,且比较均匀,孔隙率较小,分层回填,分层碾压,密实度较好,不均匀沉

降较小,适用于充填塌陷区复垦作建筑用地。未自燃的煤矸石,粒径大小不一,孔隙率较小,可采用煤矸石与粉煤灰或土混填,这样既防止了煤矸石自燃,又降低了回填埋地基的孔隙率,减小了煤矸石地基的不均匀沉降。

地基回填煤矸石应进行分区分层回填,采用汽车运输,推土机整平,压路机振动压实。根据采用的振压机能力和煤矸石特性,在现场试验后确定分层充填、分层振动压实参数及碾压趟数。经试验确定煤矸石与土体积之比 5:2 比较合理,即若回填一层厚 500 mm 煤矸石,需回填一层厚 200 mm 粉煤灰或土。煤矸石复垦塌陷区作建筑用地,地表覆土厚度一般为 0.3~0.5 m,为了取得良好的生态环境效应,地表覆土厚度确定为 0.5 m(图 1)。

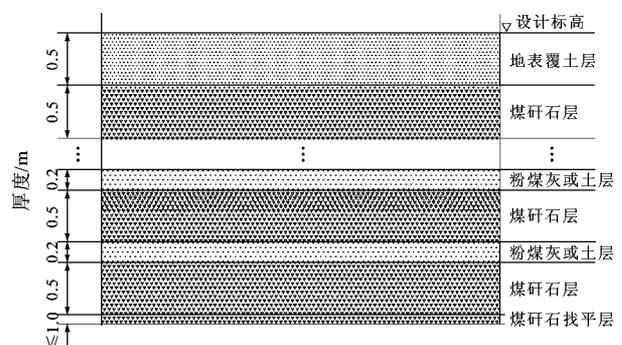


图 1 地基分层回填煤矸石示意图

Fig. 1 Sketch of Foundation Backfilled in Layer with Coal Gangue

3 煤矸石成分分析

煤矸石是在成煤过程中与煤层伴生的一种含碳量较低、比煤坚硬的黑灰色岩石,包括巷道掘进过程中的掘进矸石、采掘过程中从顶板和底板及夹层里采出的矸石以及洗煤过程中挑出的洗选矸石。煤矸石的矿物成分主要为高岭土、石英、蒙脱石、长石、伊利石、石灰石、硫化铁、氧化铝等。

不同地区的煤矸石由不同种类矿物组成,其含量相差也很悬殊。煤矸石的化学成分较复杂,所包含的元素可多达数十种。一般而言,其常量组分为 C、Si、Na、K、Ca、Mg、S、Fe 等,另外含有数量不等的 Fe_2O_3 、CaO、MgO、 SO_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 P_2O_5 以及多种微量元素,如 Cu、Pb、As、Mn、Cr、Hg、Zn、Ba 等。开滦矿区掘进矸石和洗选矸石试样的主要化学成分见表 1。

由表 1 可知,掘进和洗选矸石试样的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高,属基性岩类,该岩类在矿物成分上

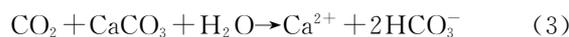
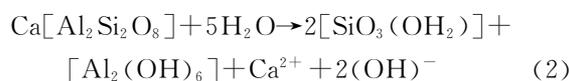
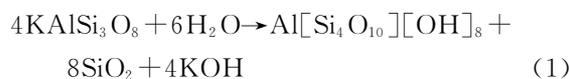
表 1 开滦矿区掘进矸石和洗选矸石试样的化学成分及含量

Tab. 1 Chemical Composition and Content of Tunnelling and Washing Gangues Samples from Kailuan Mining Area

煤矸石类型	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	SO ₃
掘进矸石	53.13	8.15	18.47	4.15	1.50	0.85	0.72
洗选矸石	50.57	4.15	37.93	1.81	1.07	1.60	0.65

注:表中数据为质量分数/%。

以辉石为主,其次为橄榄石、角闪石和黑云母,并含有大量斜长石,又由于煤矸石含有炭、铝和 CaO 等物质,使煤矸石发生水解和风化等现象。强碱弱酸盐矿物(如钾长石、钙长石)遇水后水解还可能发生如下化学反应^[9-10]



上述化学反应使水环境中 pH 值升高,水中 Ca²⁺ 和 Na⁺ 等离子体的质量浓度增加,同时总硬度和溶解性总固体质量浓度升高。

4 煤矸石回填地基的环境效应

4.1 地基回填煤矸石对水环境的影响

由于氧化还原环境的改变,天然堆放的煤矸石在自然风化和雨水淋滤作用下发生一系列的物理化学变化,赋存于煤矸石中的有毒有害物质可能释放出来,最终对水环境造成污染。为了研究煤矸石对水环境的潜在危害性,将开滦矿区采集的煤矸石进行破碎处理,进行淋溶实验。实验时,先在内径为 300 mm 淋溶柱底部铺设一层纺土工布,在其上装入厚 5 cm 的石子,在石子上再放一层纺土工布,接着在其上再装入 10 cm 厚黏土层,黏土层上则装入 60 cm 厚的煤矸石,淋溶柱最上方装入 30 cm 厚的普通土,便于模拟雨水的均匀下渗^[11]。以唐山市历年降雨量平均值作为参考标准,对 1 年内的降雨进行模拟,采用定水头装置控制水位,当淋溶液从底部顶口渗出后,每 0.5 h 取样一次,对煤矸石淋溶液中重金属及氟化物进行测试分析,测试结果最大值见表 2。

从实验结果可以看出,煤矸石淋溶液呈偏碱性,淋溶液中除 Pb 超标外,重金属元素 Cd、Cr⁶⁺、Cu、Ni、Hg 和氟化物的含量均符合《地下水环境质量标准》^[12] III 类标准的要求。

表 2 煤矸石淋溶水中重金属质量浓度

Tab. 2 Mass Concentration of Heavy Metal in Eluviating Water of Coal Gange

分析指标	Cd	Cr ⁶⁺	Cu	Ni
实验值	未检出	0.01	0.03	0.02
III 类标准上限	0.01	0.05	1.00	0.05
分析指标	Pb	Hg	F ⁻	pH
实验值	0.07		0.38	8.34
III 类标准上限	0.05	0.001	1.00	6.5~8.5

注:除 pH 外,其他为质量浓度/(mg·L⁻¹);III 类标准上限来自《地下水环境质量标准》。

煤矸石经破碎处理增加了煤矸石与淋溶水的接触面积,同时淋溶液与降雨相比,相对比较集中。这些措施增强了溶质的淋出量,因此该条件下淋溶液实验值应大于野外条件下的实际值。

为了进一步检验煤矸石回填地基对复垦区水环境的影响,在吕家坨矿尖角新村煤矸石回填地基复垦区地下水径流下游方向对地表水(开采沉陷影响浅层地下水渗出形成)和地下水进行了取样,对 pH 值、总硬度(CaCO₃)、F⁻、SO₄²⁻、Pb、Cd 和 Cr⁶⁺ 浓度等水环境指标进行分析,分析结果见表 3。由分析结果可知,地下水分析指标中除总硬度存在超标现象外,其他各指标均符合《地下水环境质量标准》III 类标准要求。

表 3 煤矸石回填地基复垦区水样分析结果

Tab. 3 Results of Water Samples from the Reclamation Zone of Foundation Backfilled with Coal Gange

分析指标	地表水			地下水	
	A 处	B 处	C 处	A 处	B 处
地基处理时间/年	3~5	5~10	施工区	3~5	5~10
pH	8.36	7.96	8.07	7.62	7.87
F ⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	0.310	0.286	0.196	0.234	0.564
SO ₄ ²⁻ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	12.6	6.7	1.4	156.8	104.1
总硬度(CaCO ₃)/(mg·L ⁻¹)	465	461	1 516	580	456
Pb 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
Cd 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出
Cr ⁶⁺ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	未检出	未检出	未检出	未检出	未检出

对比淋溶实验,Pb、Cr⁶⁺ 均未检出,表明复垦后 Pb、Cr⁶⁺ 等重金属污染物溶出量降低,这是由于煤矸石与土分层回填振动压实后,地基孔隙度降低,显著减小了煤矸石与空气的接触面积,降低了煤矸石的风化速度。根据前人对煤矸石堆的研究及煤矸石在工业中应用情况,证实煤矸石在 0.5 m 至几米的覆层下不会风化,因此,煤矸石中重金属析出量降

低;压实的土壤与煤矸石相比孔隙度更低,淋溶液组分在土壤中迁移的速度降低;土壤本身具有一定的自净能力,吸附解吸作用对淋溶液中重金属污染物起到净化作用;淋溶液的 pH 值对重金属元素的渗出具有重要影响,重金属极易在酸性环境下渗滤,并且酸性越强,渗滤液中重金属浓度增加越快,同样条件下,初始渗滤液 pH 值的微小变化会导致渗滤后溶液中重金属浓度差异很大^[13],开滦矿区岩性为基性岩类,淋溶液显偏碱性,这也在很大程度上抑制了重金属元素的渗出。

上述研究表明,在开滦矿区将煤矸石作为充填材料不会对水环境造成污染,采用煤矸石与土分层回填振动压实的复垦工艺对减少赋存在煤矸石中污染物的释放量以及降低煤矸石对水环境的影响效果显著。

4.2 煤矸石回填对大气环境的影响

由于风化作用,露天堆积的煤矸石表层(尤其是黏土岩类煤矸石)不断风化。其中干燥和湿润是最重要的因素,潮湿的煤矸石处于冷热交替环境下会加速风化,最初风化物的粒度大多数大于 2 mm,经过反复风化,粒度不断减小。在风力作用下,这些粉尘会进入大气环境,使附近大气和土壤受到污染。根据有关矿区环境影响评价的现状监测,大气环境中主要污染物总悬浮颗粒物都已超标。

此外,煤矸石自燃对大气环境的污染也是非常严重的问题,煤矸石自燃不仅影响区域气候,而且自燃后产生的 SO₂ 等有毒有害气体对大气环境构成巨大危害。地基回填煤矸石分层压实降低了煤矸石与空气的接触面积,有效避免了煤矸石自燃现象的发生,将煤矸石作为地基回填材料,不仅使大量煤矸石得以消耗,使大面积压占的土地得以利用,而且煤矸石被分层压实后,显著减少了粉尘和有害气体的排放量,减少了对大气和土壤的污染,因此煤矸石回填地基使复垦新村大气环境得到明显改善。

4.3 回填煤矸石放射性的影响

如果煤矸石中的放射性元素及放射性水平达到一定限值,便会对人体产生放射性危害^[14]。《城市放射性废物管理办法》规定:含人工放射性核素、比活度大于 2×10⁴ Bq/kg,或含天然放射性核素、比活度大于 7.4×10⁴ Bq/kg 的污染物,应作为放射性废物看待;小于此水平的放射性污染物应妥善处置^[15]。

煤矸石作为建筑材料,其放射性水平应满足以下要求^[16]

$$I_{Ra} = \frac{C_{Ra}}{200} \leq 1.0 \quad (4)$$

$$I_T = \frac{C_{Ra}}{370} + \frac{C_{Th}}{260} + \frac{C_K}{4200} \leq 1.0 \quad (5)$$

式中: I_{Ra} 为内照指数; I_T 为外照指数; C_{Ra} 、 C_{Th} 、 C_K 分别为建筑材料中天然放射性核素²²⁶Ra、²²³Th 和⁴⁰K 的放射性比活度。

吕家坨矿尖角新村回填的煤矸石放射性检验结果见表 4^[17]。从检验结果来看,该矿区煤矸石不属于放射性废物,符合国家对建筑材料放射性核素限量标准的要求,其产销与使用范围不受限制。因此,该矿区煤矸石的放射性对人体健康没有影响,不论是堆放还是回填利用,都不会对人居环境产生放射性污染。

表 4 回填的煤矸石放射性检验结果

Tab. 4 Results of Radioactivity of Coal Gangue Backfilled into Foundation

放射性核素	比活度/(Bq·kg ⁻¹)	内照指数	外照指数
²²⁶ Ra	46.1		
²³² Th	65.3	0.2	0.5
⁴⁰ K	363.8		

5 结语

(1)淋溶实验和现场取样水化学分析表明,煤矸石回填地基不会对复垦区地表水和地下水造成污染。

(2)地基回填煤矸石释放了煤矸石压占的土地,减少了粉尘和有害气体的排放量,使复垦区大气质量得到明显改善。

(3)放射性检验结果表明,该研究区煤矸石不属于放射性废物,不会影响人体健康,可作为建筑材料使用,使用范围不受限制。

(4)研究区地基分层回填的复垦工艺不会对环境造成污染,改善了矿区生态环境。

参考文献:

- [1] 惠润堂. 煤矸石的环境影响及发生条件[J]. 煤矿环境保护, 2001, 15(1): 56-58.
- [2] 王俊桃, 谢娟, 张益谦. 矿山废石淋溶对水环境的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(4): 92-96.
- [3] 李龙清, 马彩莲, 郭振兴. 煤矸石发电项目综合效益评价指标体系构建[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(2): 132-136.
- [4] 刘福东, 潘自强, 刘森林, 等. 全国煤矿中煤、矸石天然放射性核素含量调查分析[J]. 辐射防护, 2007, 27(3): 171-180.
- [5] 唐跃刚, 常春祥, 张义忠. 河北开滦矿区煤洗选过程中 15 种主要有害微量元素迁移和分配特征[J]. 地球化学, 2005, 34(4): 366-372.

(下转第 420 页)

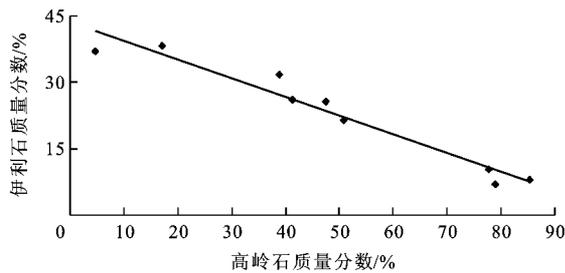


图 6 高岭石与伊利石含量之间的关系

Fig. 6 Relationship Between the Contents of Kaolinite and Illite

度也随着石漠化程度而加深。因此,特定黏土矿物的含量可以作为划分石漠化阶段的一个重要参考指标。

3 结语

(1)受地带性规律的影响,西南喀斯特地区不同石漠化阶段黏土矿物和粉粒、砂粒矿物的组成是相同的。黏土矿物主要为伊利石、蒙脱石和高岭石;粉粒中的矿物主要为石英和白云母;砂砾中的主要矿物为石英。

(2)随着石漠化程度的加深,伊利石逐渐向蒙脱石和高岭石转化,土壤酸碱度在这一过程中起了重要作用。

(3)伊利石、蒙脱石和高岭石的含量之间呈极显著的线性负相关关系,相关系数分别为 -0.9703 和 -0.9456 。

(4)石漠化阶段的划分标准尚不统一,特定黏土矿物在不同土层深度的含量可以作为划分石漠化阶

段的一个重要依据。

参考文献:

(上接第 415 页)

- [6] 唐志新,黄乐亭,戴华阳.采动区煤矸石地基理论研究及实践[J].煤炭学报,1999,24(1):43-47.
- [7] 王乐杰.矸石地基回填分层压实处理施工技术[J].矿山测量,2006(3):81-83.
- [8] 全炳炎,卫建军,袁广林,等.煤矸石地基承载力与变形的试验研究[J].西安科技大学学报,2009,29(6):718-721.
- [9] Office Water. Economic and Environmental Impact Assessment of Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Coal Mining Industry-remining and Western Alkaline Subcategories[R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency,2001.
- [10] Hem J D. Study and Interpretation of the Chemical Character-

- [1] 龙健,江新荣,邓启琼,等.贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究[J].土壤学报,2005,42(3):419-427.
- [2] 蒋忠诚.广西弄拉峰丛石山生态重建经验及生态农业结构优化[J].广西科学,2001,8(4):308-312.
- [3] 周炼川,陈效民,李孝良,等.西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤物理参数的变异研究[J].地球科学与环境学报,2010,32(2):195-199.
- [4] 周炼川,陈效民,李孝良,等.西南喀斯特地区不同石漠化阶段土壤有效磷变异研究[J].地球科学与环境学报,2009,31(4):418-422.
- [5] 李阳兵,谢德体,魏朝富.岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性[J].土壤学报,2004,41(2):196-202.
- [6] 张清海.贵州喀斯特石漠化地区土壤磷素变异特征及生态恢复研究[D].贵阳:贵州大学,2007.
- [7] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,1999.
- [8] 彭琴,林昌虎,何腾兵.贵州省喀斯特山区不同石漠化等级土壤粒级特征研究[J].水土保持通报,2007,27(2):29-32.
- [9] 周运超,张平究,潘根兴,等.表层岩溶系统中土-气-水界面碳流通的短尺度效应——以贵州茂兰国家喀斯特森林公园的秋季日动态监测为例[J].第四纪研究,2002,22(3):258-265.
- [10] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等.人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究[J].应用生态学报,2002,13(5):529-532.
- [11] 梅再美,王代懿,熊康宁,等.不同强度等级石漠化土地植被恢复技术初步研究——以贵州花江试验示范区查尔岩试验小区为例[J].中国岩溶,2004,23(3):253-258.
- [12] Gorbunov N I. Mineralogy and Physical Chemistry of Soils [M]. Moscow: Russian Science Press, 1978.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [14] 熊毅.中国土壤中黏粒矿物的分布规律[C]//中国科学院南京土壤研究所.熊毅文集.北京:科学出版社,2003:187-192.

istics of Natural Water[M]. Honolulu: University Press of the Pacific, 2005.

- [11] 张辉,张新,邓寅生.煤矿塌陷区煤矸石复垦及其污染控制试验研究[J].环境卫生工程,2008,16(5):4-6.
- [12] GB/T 14848—93.地下水环境质量标准[S].
- [13] 陆胜勇,池涌,严建华,等.初始pH值、液固比对某焚烧炉灰重金属渗滤的影响[J].环境科学学报,2003,23(1):48-52.
- [14] 任秀莲.煤矸石中放射性核素对环境的影响评价[J].能源技术与管理,2005(2):52-53.
- [15] 国家环境保护总局.城市放射性废物管理办法[S].
- [16] GB 6566—2001.建筑材料放射性核素限量[S].
- [17] 国家建筑材料测试中心.煤矸石放射性检验报告[R].北京:国家建筑材料测试中心,2008.