养护龄期对改良膨胀土无侧限抗压强度试验的影响

杨 俊[1,2], 杨 志[1,2], 张国栋[1,2], 唐云伟[3]

(1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 以湖北省宜昌市某公路膨胀土为研究对象,分别采用不同掺量的石灰、水泥、粉煤灰、风化砂对膨胀土进行改良。在经过 7,14 和 28 d 标准条件养生后,进行无侧限抗压强度试验。试验结果表明,上述 4 种材料均能有效地提高改良膨胀土的无侧限抗压强度,在最初的 14 d 内,水泥改良膨胀土的强度增长较为明显,后期随着养护龄期的增长,无侧限抗压强度增长速率较缓慢;石灰改良膨胀土的无侧限抗压强度值随着养护龄期的增加,一直保持近似直线形的增长趋势;粉煤灰改良膨胀土的无侧限抗压强度亦随着养护龄期的增长而呈直线增长,但其值小于石灰改良膨胀土;养护龄期对风化砂改良膨胀土的无侧限抗压强度影响很小。

关键词: 膨胀土; 养护龄期; 风化砂; 无侧限抗压强度

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2014)02-0025-05 **中图分类号**: U414

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.02.006

Experiment on Impact of Curing Period on Unconfined Compressive Strength of Improved Expansive Soils

YANG Jun[1,2], YANG Zhi[1,2], ZHANG Guo-dong[1,2], TANG Yun-wei[3]

(1. *Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 2. *Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 3. *Yichang Transport Bureau, Yichang, Hubei* 443002, *China*)

Abstract: The expansive soil is studied as the object of the research in Yichang City, Hubei Province. Different content of lime, cement, coal fly ash and weathered sand are put into the expansive soil to modify it, then the unconfined compressive strength is tested under standard conditions with the days of 7, 14, 28 d. The research shows that the unconfined compressive strength can be improved in an effective way with the above four materials, the strength of expansive soil with cement grows obviously in the first 14 days, then the growth rate slows down with the curing age goes up; the unconfined compressive strength of expansive soil with lime is nearly in a linear growth trend with the curing age goes up; the unconfined compressive strength of expansive soil with coal fly ash is also in a linear growth trend, but the unconfined compressive strength is smaller than that of expansive soil with lime; the curing age has little effect on the unconfined compressive strength of expansive soil with weathered sand.

Keywords: expansive soils; curing period; weathered sand; unconfined compressive strength

膨胀土主要是由蒙脱石、伊利石和高岭石组成,它是一种特殊的高塑性黏土,含有较多的黏粒,且黏粒中含有大量的亲水性矿物成分,致使其具有明显的胀缩性、超固结性、多裂隙性和强度衰减性,对工程建筑物和公路工程如铁路、公路、堤坝、房屋建筑等的危害极大,极易导致路基边坡滑塌、路面开裂、地基沉陷、挡墙倾倒和墙体开裂等,若把膨胀土直接用以填筑路基或在改良和填筑施工过程中质量控制不当,都会对路基的强度和稳定性带来相当大的危害[1]。

为了改善膨胀土的这些特性,工程施工中常在膨胀土中掺入石灰、水泥、粉煤灰等无机结合料,并通过其与膨胀土中物质成分的化学作用来提高膨胀土的强度,很多学者也对其进行了大量研究[2-8],并取得了丰富的成果。强度是表征膨胀土抵抗剪切破坏,计算

收稿日期:2013-05-13 **修回日期**:2013-05-30

资助项目:湖北省教育厅自然科学研究重点项目"宜昌市风化砂改良膨胀土特性的室内试验研究"(D20131304); 湖北省交通运输厅需求主导性计划项目(2011029)

作者简介:杨俊(1976—),男(汉族),湖北省武汉市人,博士,副教授,主要从事道路与桥梁设计与施工方面的研究工作。E-mail: wangjing750301@163.com。

路堑、渠坡、路堤等斜坡稳定性和支挡建筑物土压力的一项重要指标[9]，且很多膨胀土的危害均是因为其吸水导致强度不足而引起的，而表征膨胀土强度的指标有很多，如抗剪强度，回弹模量，加州承载比，无侧限抗压强度等，其中无侧限抗压强度是反映改性膨胀土的物理力学特性的关键指标之一，它能准确地反映改性土的强度特性。而影响改性土无侧限抗压强度的因素很多，如：颗粒级配、粒径、改性材料掺量、压实度、养护龄期等[10]，本研究选取改性材料的掺量和养护龄期作为抗压强度的影响要素，结合宜昌某一级公路改建工程路段的膨胀土，拟采用一种新型的以物理改良为主的方法——风化砂改良，并在室内分别进行了养护龄期对水泥、石灰、粉煤灰、风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度的影响实验，探讨养护龄期和改性材料掺量对无侧限抗压强度的影响规律，且通过这 4 种改性材料的对比试验和分析，对改性材料的处理效果进行研究。

1 原材料基本性质和实验方案

1.1 原材料的基本性质

(1) 膨胀土。此室内试验所用膨胀土取自宜昌市某一级公路改建项目路段，膨胀土的土质均匀，呈黄褐色，有滑感，结构较密致，黏性很强，天然含水率较高。膨胀土液限为 70.53%＞50%，塑性 24.09%，塑性指数 46.44%＞17%，故判定此膨胀土高液限黏土；自由膨胀率 43%，大于 40%且小于 60%，因此判定其膨胀性较弱，为弱膨胀土。

(2) 水泥。试验所用水泥为市场上销售的 C32.5 的普通硅酸盐水泥。

(3) 石灰。试验用的石灰粉为生石灰在空气中自然熟化而成的粉末，属于Ⅱ级镁质石灰。然后在室内过 0.25 mm 的方孔筛后密封待用。

(4) 粉煤灰。粉煤灰选用电厂的排灰，其颜色为暗灰色，手捏无颗粒感，等级为Ⅱ级。

(5) 风化砂。风化砂选用此膨胀土公路沿线路段，此风化砂中的细颗粒较多，其不均匀系数 $C_u=2.84$；曲率系数 $C_c=0.86<1$，因此得出该风化砂为级配不良砂。

1.2 试验方案

本试验的方法和过程均按照《公路土工试验规程(JTG E40—2007)》和《公路工程无机结合料稳定材料试验规程(JTG E51—2009)》进行。其中，水泥掺量 0，3%，5%，7%，9%；石灰掺量 0，4%，6%，8%，10%；粉煤灰掺量 0，10%，12%，14%，16%，18%，20%；风化砂掺量 0，10%，20%，30%，40%，50%。

无侧限抗压强度试模：直径×高＝Φ100 mm×100 mm，试样在万能试验机下成型，脱模后将试件密封，置入养护间内，在恒温恒湿下分别养护 7，14，28 d；养护完成后，将试样放在万能试验机下(图 1)，加载速率 1 mm/min，直至试样破坏，记下破坏时的最大压力值，从而其计算无侧限抗压强度。

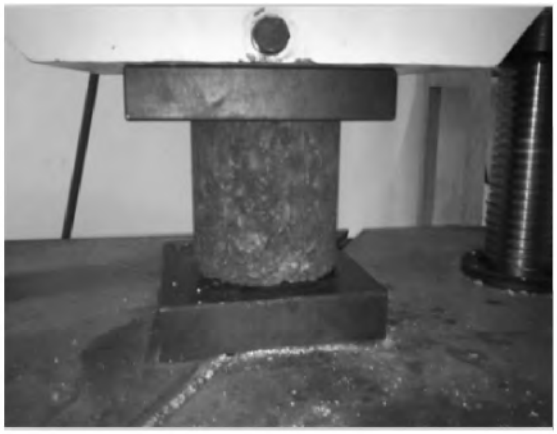


图 1 无侧限抗压强度试验装置(万能试验机)

2 改良膨胀无侧限强度特性及分析

2.1 养护龄期对水泥改良膨胀土无侧限抗压强度的影响

通过实验得到养护龄期对水泥改良膨胀土的无侧限抗压强度影响结果(图 2—3)。由图 2 可知，养护龄期对水泥改性土的无侧限抗压强度有一定的影响，其抗压强度随着龄期的增加缓慢增大。其中当水泥掺量为 0 和 3%时，龄期对其抗压强度的影响很小，最大增长幅度只有 0.11 MPa；而当水泥掺量为 5%，7%，9%时，随着龄期增加抗压强度会先迅速增大后缓慢增大，其在龄期 7～14 d 之间增长速率最快，增长幅度最大达到 0.48 MPa，在龄期 14～28 d 增长最慢，增长幅度最大仅 0.18 MPa，表明对于此膨胀土，水泥可以有效地提高其早期强度。

由图 3 可以看出，水泥掺量对改性土的无侧限抗压强度有着较大的影响，在龄期一定时，改性土的抗压强度随着水泥掺量的增加先缓慢增加后迅速增大。当水泥掺量小于 3%时，各个龄期的改性土抗压强度增长缓慢，抗压强度最大仅增长 0.22 MPa，而当水泥掺量大于 3%时，改性土的抗压强度会迅速增大，在养护龄期为 28 d，水泥掺量为 9%时达到最大；产生这种现象的原因是由于水泥的水化作用、水泥与土中的活性物质之间的硬凝反应以及离子交换作用，生成具有一定强度的凝胶体，从而改变了膨胀土的结构和化学成分，使改性土产生硬化，抗压强度提高；随着水

泥掺量的增加,这些作用会继续加强,抗压强度也会随之增大。

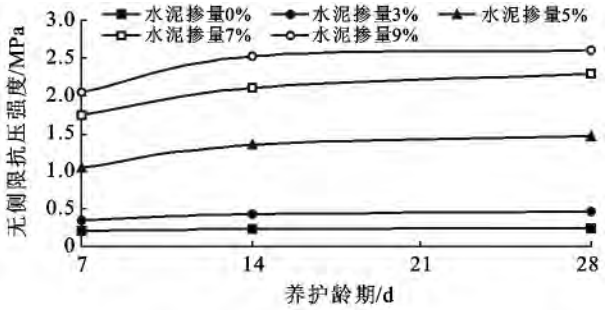


图 2　养护龄期与水泥改性土无侧限抗压强度之间的关系

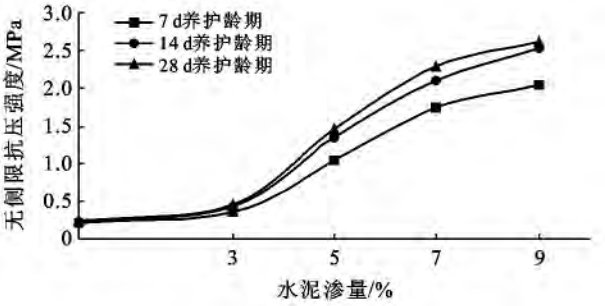


图 3　水泥掺量与改性土无侧限抗压强度之间的关系

2.2　养护龄期对石灰改良膨胀土无侧限抗压强度影响及分析

由室内试验可以得到养护龄期、石灰掺量与改性膨胀土之间的关系曲线(图 4—5)。由图 4 可以看出,养护龄期对石灰改性土的无侧限抗压强度有显著影响,龄期 28 d 的抗压强度是 7 d 的 2 倍左右。在石灰掺量一定时,改性土的抗压强度随着养护龄期的增加明显增大。其中,对于原状土,龄期对抗压强度基本没有影响,当龄期在 7～14 d 之间时,石灰改性土的抗压强度增幅在 0.2 MPa 左右,当龄期在 14～28 d 时,石灰改性土抗压强度在 0.4 MPa 左右,是龄期 7～14 d 的 2 倍;说明石灰可以显著地增加此膨胀土的后期强度。这是因为在膨胀土中掺入石灰,生石灰会迅速消解,并与土颗粒中的低价阳离子发生离子交换作用,从而使膨胀土的塑性指数下降,提高改性土的早期强度;随着龄期的增加,生石灰还会与空气中的二氧化碳发生反应,生成较高强度的固体颗粒以及与土颗粒的凝胶反应,而这一过程的反应较慢、周期很长,故石灰改性土的后期强度会较前期显著增长。

由图 5 可以得到,在龄期一定时,石灰改性土的无侧向抗压随度随着石灰掺量的增加先快速增加后缓慢降低。在石灰掺量为 0～8%之间,改性土的抗压强度快速增大,其中在石灰掺量 0～6%之间增长最快,在 6%～8%之间增长较慢,当石灰掺量为 8%时,抗压强度达到峰值,增长了 1.6 MPa 左右;而当石灰掺量在 8%～10%之间时,改性土的抗压强度会降低;这是由于随着石灰的掺入,石灰中大量的氧化钙将快速的与膨胀土颗粒发生硬凝反应,生成强度较高的胶结物质,使改性土的抗压强度快速增加;而石灰掺量超过一定量时,石灰土中会存在一部分没有反应的消石灰,它会消弱土颗粒之间的联结,当这种消弱作用超过前面生成胶结物质的作用时会导致改性土的强度降低[11]。

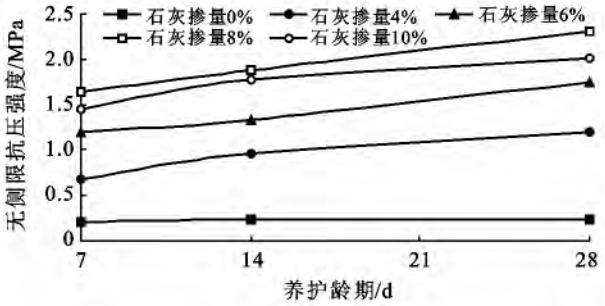


图 4　养护龄期与石灰改性土无侧限抗压强度之间的关系

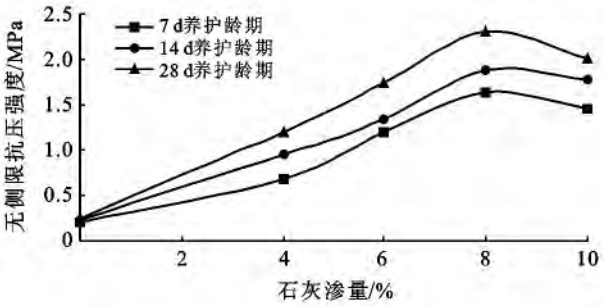


图 5　石灰掺量与改性土无侧限抗压强度之间的关系

2.3　养护龄期对粉煤灰改良膨胀土无侧限抗压强度影响及分析

通过实验可知养护龄期、粉煤灰掺量与改性膨胀土之间的关系曲线(图 6—7)。由图 6 可知,当粉煤灰掺量相同时,改性土的无侧限抗压强度会随着龄期的增加而稳步增大。且抗压强度在养护龄期 14 d 以前增长显著,在 14～28 d 之间的抗压强度逐渐趋于平稳,增长缓慢,这一现象表明粉煤灰可以有效地提高改性土的早期强度。这是因为随着粉煤灰的掺入,粉煤灰中的活性高价阳离子将迅速与膨胀土颗粒发生一系列的化学反应,如:离子交换作用、团聚作用、碳酸化作用等,生成强度较高的胶结物,从而提高改性土的抗压强度;随着龄期的增加,粉煤灰中的活性高价阳离子基本反应完全,导致后期的抗压强度增长缓慢。

从图 7 可以看出,粉煤灰掺量对膨胀土的无侧限抗压强度有一定影响,在养护龄期一定时,改性土的

抗压强度随粉煤灰掺量的增加而增大，其速率先慢后快再变慢；抗压强度在粉煤灰掺量为 0～14%之间增长较慢，只增长 0.1 MPa 左右；在粉煤灰掺量为 14%～18%之间增长较快，达到 0.4 MPa 左右，在掺量为 18%～20%之间增长又变慢，仅 0.08 MPa 左右。这是因为对于粉煤灰改性土，粉煤灰颗粒与膨胀土颗粒发生化学反应，生成很高强度的胶凝物，提高了改性土抗压强度；当粉煤灰掺量增加，则化学作用加强，使改性土颗粒间的主要结构进一步发生变化，降低膨胀土的塑性，且人为降低了改性土中的黏粒含量，使抗压强度迅速增大。

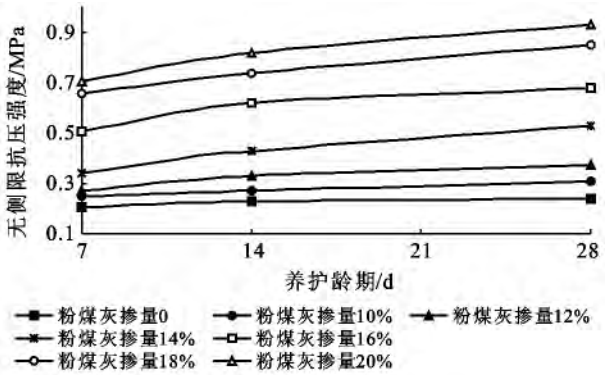


图 6 养护龄期与粉煤灰改性土无侧限抗压强度之间的关系

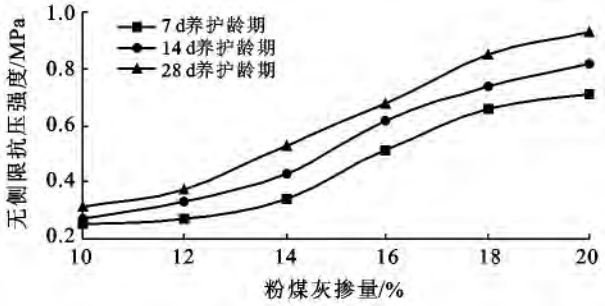


图 7 粉煤灰掺量与改性土无侧限抗压强度之间的关系

2.4 养护龄期对风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度影响及分析

图 8—9 分别为养护龄期与改性土、风化砂掺量与改性土之间的关系曲线。由图 8 可以看出，对于风化砂改良膨胀土，无侧限抗压强度与养护龄期的关系曲线基本上平行于 X 轴，在风化砂掺量一定时，养护龄期 28 d 的改性土其抗压强度较养护龄期 7 d 的改性土仅仅提高了 0.05 MPa 左右。说明养护龄期对风化砂改性土的无侧限抗压强度几乎没有影响，其改良主要是以物理作用为主。

通过图 9 可以看出，风化砂对其改性土的无侧限抗压强度有着很大影响，在相同的养护龄期下，改性土的抗压强度均随着风化砂掺量的增加先迅速增大后迅速减小再缓慢减小。其中，改性土的抗压强度在风化砂掺量小于 10%时快速增大，在风化砂掺量为 10%时达到峰值，增幅为 0.7 MPa 左右；在风化砂掺量 10%～30%之间迅速减小，减小幅度在 0.6 MPa 左右；在风化砂掺量大于 30%时减小速率变缓。产生这种现象的原因是：风化砂有一定的粒径和棱角，将风华砂掺入膨胀土中时，砂颗粒会与土颗粒交叉团聚，给膨胀土形成受力骨架，且砂颗粒强度大于土颗粒，故抗压强度会迅速增加；当掺砂量大于一定量时，土颗粒会明显减少，又由于砂粒没有黏性，使之不能很好地团聚在一起，导致强度迅速降低。

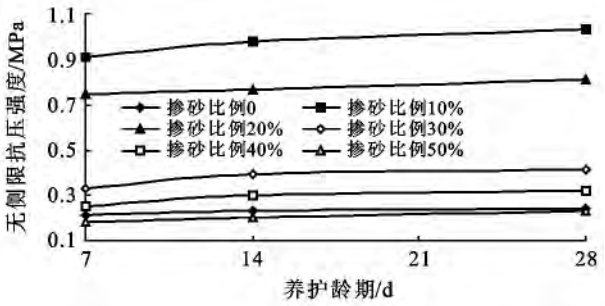


图 8 养护龄期与风化砂改性土无侧限抗压强度之间的关系

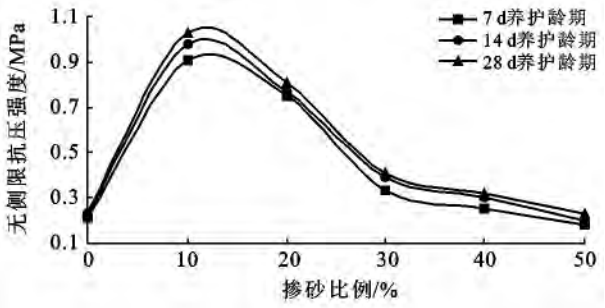


图 9 风化砂掺量与改性土无侧限抗压强度之间的关系

3 养护龄期对不同改性材料无侧限抗压强度影响的对比分析

(1) 由图 2—9 可以看出，水泥、石灰、粉煤灰和风化砂四种改性材料均能提高膨胀土的无侧限抗压强度，使之达到公路的路用标准。从无侧限抗压强度改良效果来看，水泥提高的抗压强度最大，石灰次之，风化砂、粉煤灰随后。

(2) 水泥、石灰、粉煤灰改良膨胀土均是以化学改良为主，养护龄期对其改性土的无侧限抗压强度有较大的影响；而风化砂改良膨胀土主要是以物理改良为主，其改良效果与养护龄期基本没有关系。

(3) 从施工控制的难易程度来看，水泥、石灰、粉煤灰均是粉末状颗粒，与膨胀土现场拌合难度较大，且不易拌合均匀；而且这 3 种改性材料均以化学改良

为主,会对施工人员的健康造成威胁,以及会对环境造成一定的影响。而风化砂具有一定的粒径组成,拌合相对较容易。

(4) 从经济性角度来看,水泥、石灰、粉煤灰单价较高,而此公路沿线分布有大量的风化砂,施工时可以就地取材,节约工程造价。

综合以上分析可以得出,对于此改建公路路段的膨胀土,用风化砂改良较水泥、石灰、粉煤灰要好,此时风化砂掺量为 10%。

4　结 论

(1) 养护龄期对以化学改良为主的水泥、石灰、粉煤灰改性土无侧限抗压强度有很大影响,但是对以物理改良为主的风化砂改性土效果不明显。

(2) 改性材料的掺量与改性土的抗压强度密切相关,水泥掺量较多时其增长速率较快;石灰要控制好最佳掺量才能使改良效果最好;对于粉煤灰改而言,其较多的掺量对改性土的抗压强度不敏感。

(3) 对于此改建公路路段的膨胀土,水泥、石灰、粉煤灰和风化砂 4 种改性材料均能有效的提高其无侧限抗压强度,使其达到路用标准。但是经过综合比较分析,风化砂效果优于其它 3 种改性材料。且通过本次实验可知,对于风化砂改良膨胀土,在养护龄期一定时,改性土的无侧限抗压强度随着掺砂量的增加会快增大后减小,当风化砂掺量为 10%时,抗压强度达到最大值,此时效果最佳。

[参 考 文 献]

[1] 李庆鸿,王炳龙,俞峰. 新建时速 200 公里铁路改良膨胀土路基施工技术[M]. 北京:中国铁道出版社,2007.

[2] 贾厚华. 化学改良土无侧限抗压强度的试验研究[J]. 土工基础,2010,24(3):84-87.

[3] 游波,王保田,李治朋,等. 水泥土无侧限抗压强度影响因素试验研究[J]. 现代交通技术,2010,7(5):4-7.

[4] 张铁军,洪振舜,邓东升,等. 水泥固化粉质土的无侧限抗压强度预测[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008,38(5):839-843.

[5] 陈涛,顾强,郭院成. 石灰、水泥、粉煤灰改良膨胀土对比试验[J]. 公路,2008(6):164-167.

[6] 郭灿辉. 石灰粉煤灰混合料无侧限抗压强度试验研究[J]. 中国市政工程,2010(6):11-13.

[7] 肖杰,王保田,孙衣春,等. 水泥石灰复合改良膨胀土试验[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(2):9-13.

[8] 查甫生,刘松玉,杜延军. 石灰—粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报:自然科学版,2007,37(2):339-344.

[9] 陈爱军,张家生. 石灰改良膨胀土的强度特性试验研究[J]. 湖南工程学院学报,2010,20(2):63-67.

[10] 黄辉. 红黏土无侧限抗压强度试验影响因素研究[J]. 湖南工业大学学报,2010,24(4):22-26.

[11] 陈爱军,张家生,刘君. 石灰改良膨胀土无侧限抗压强度试验[J]. 桂林理工大学学报,2011,31(1):91-95.

(上接第 25 页)

[15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[16] 袁志发, 孟德顺. 多元统计分析[M]. 陕西 西安:天则出版社,1993:133-220.

[17] 张治国,姚多喜,郑永红,等. 煤矿塌陷复垦区 6 种菊科植物土壤重金属污染修复潜力研究[J]. 煤炭学报,2010,35(10):1741-1747.

[18] 刘慧力,崔龙鹏. 淮南矿区水体沉积物中金属污染及环境现状评价[J]. 环境科学研究,2009,22(5):601-606.

[19] 蔡峰,刘泽功,林柏泉,等. 淮南矿区煤矸石中微量元素的研究[J]. 煤炭学报,2008,33(8):892-897.

[20] 王兴明,董众兵,刘桂建,等. Zn,Pb,Cd,Cu 在淮南新庄孜煤矿矸石山附近土壤和作物中分布特征[J]. 中国科学技术大学学报,2012,42(1):17-25.

[21] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010,26(17):310-315.

[22] 李海霞,胡振琪,李宁,等. 淮南某废弃矿区污染场的土壤重金属污染风险评价[J]. 煤炭学报,2008,33(4):423-426.

[23] 王学军,席爽. 北京东郊污灌土壤重金属含量的克立格插值及重金属污染评价[J]. 中国环境科学,1997,17(3):225-228.

[24] 杨芳,张江山,王菲凤. 基于熵权的属性识别模型在土壤重金属污染评价中的应用[J]. 环境保护科学,2008,34(6):57-60.

[25] 王从陆,吴超,段瑜. 基于主成分综合模型的矿区农田重金属污染评价[J]. 中国工程科学,2008,10(7):180-183.

[26] 何厅厅,赵艳玲,李建华,等. 基于 GCM_CB 模型的土壤重金属污染评价[J]. 环境工程学报,2012,6(10):3781-3786.

[27] 彭再德. 模糊综合评判法在区域土壤环境重金属污染评价中的应用[J]. 化工环保,1993,15(4):235-238.

[28] 孔健健,张阳,张江山. 属性识别理论模型应用于土壤重金属评价评价[J]. 环境工程,2012,30(1):100-102.