

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.09.016

EN-1对砒砂岩固化土抗剪强度特征的影响*

苏涛^{1,2} 张兴昌^{1,3} 王仁君²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 曲阜师范大学生命科学学院, 曲阜 273165;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过直剪试验,对添加 EN-1 后不同 EN-1 掺量、养护龄期、压实度和含水率的砒砂岩固化土的凝聚力和内摩擦角进行了测定。结果表明:在试验设计的 EN-1 掺量、养护龄期、压实度和含水率处理条件下,添加 EN-1 后,随 EN-1 掺量的增大和养护龄期的延长,砒砂岩固化土的抗剪强度较素土有不同程度的增大,当 EN-1 掺量为 0.20% 和养护龄期为 30 d 时,其抗剪强度最大。添加 EN-1 后,砒砂岩固化土的抗剪强度随压实度的增大和含水率的减小而增大。因此,在砒砂岩地区实际应用 EN-1 固土护坡时,为使 EN-1 固化土具有良好的抗剪强度并满足工程需要,建议 EN-1 掺量为 0.20%,养护龄期在 7~15 d 之间,压实度大于 95%,含水率略低于最优含水率为宜。

关键词: 砒砂岩 EN-1 固化剂 抗剪强度 直剪试验

中图分类号: S157.2; TU432 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)09-0086-05

Effect of EN-1 on Shear Strength Characteristics of Pisha Sandstone Solidified Soil

Su Tao^{1,2} Zhang Xingchang^{1,3} Wang Renjun²

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. College of Life Science, Qufu Normal University, Qufu 273165, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, China Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The cohesion and internal friction angle under the different EN-1 contents, curing ages, compaction degrees and water contents treated with EN-1 were determined by using direct shear test. The results showed that the shear strength of Pisha sandstone solidified soil had varying degrees of increase than plain soil with the increase of EN-1 contents and curing ages under the EN-1 contents, curing ages, compaction degrees and water contents in this experiment after EN-1 were added. The shear strength of Pisha sandstone solidified soil was the biggest when EN-1 content was 0.20% and curing age was 30 d. The shear strength of Pisha sandstone solidified soil increased with the increase of compaction degree and the decrease of water content after EN-1 was added. Consequently, in order to make the EN-1 solidified soil have favorable shear strength and satisfy engineering demand, it suggested that EN-1 content was 0.20%, curing age was 7~15 d, compaction degree was greater than 95%, and water content was slightly less than optimum moisture content when EN-1 was used practically to solid and protect slope in Pisha sandstone region.

Key words: Pisha sandstone EN-1 solidified agent Shear strength Direct shear test

收稿日期: 2013-01-31 修回日期: 2013-03-12

* 国家自然科学基金资助项目(31200400)、中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB3-13)、陕西省水保局陕北开发建设和水土流失治理项目、中国科学院水利部水土保持研究所创新培育方向项目和曲阜师范大学科研启动基金资助项目

作者简介: 苏涛, 博士生, 曲阜师范大学讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施研究, E-mail: vincenntao2@163.com

通讯作者: 张兴昌, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施研究, E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

引言

砒砂岩地区土壤侵蚀模数达 3~4 万 t/(km²·a), 其主要产沙物质——砒砂岩是黄河粗沙(粒径大于 0.05 mm)的重要来源之一,其基岩产沙量占总输沙量的 68.5%^[1],成为黄土高原侵蚀最剧烈、治理难度最大的地区。为减轻和治理砒砂岩地区工程边坡的水土流失问题,可在工程边坡中添加土壤固化剂,许多学者对土壤固化剂进行了研究^[2-11]。目前,土壤固化剂正逐渐被应用于道路交通、环保工程、水土保持以及水利工程中的护坡、防渗、集流面等领域^[12-14],但是还未见到有关添加固化剂后砒砂岩地区固化土工程边坡抗剪强度特征的研究结果。本研究通过在砒砂岩集中分布区采集黄绿色砒砂岩风化土样,采用直剪试验,研究添加 EN-1 固化剂后不同 EN-1 掺量、养护龄期、压实度和含水率对砒砂岩固化土抗剪强度特征的影响。

1 试验设计与方法

1.1 采样点概况

采样地点在内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗准格尔召镇西召沟内,地理坐标为 E110°07'40.6", N39°36'32.3",海拔高度 1 350 m。该点地处鄂尔多斯高原中东部,属大陆性干旱半干旱气候,年平均气温 7.3℃,10℃以上积温 3 400℃,太阳总辐射量 599 kJ/(cm²·a),年蒸发量 2 100~3 700 mm,降水量年际变化大,多年平均降水量 251.1~522.2 mm,且多以暴雨形式出现,主要集中在 7~8 月份,根据西召沟流域测点 1995—1999 年连续观测平均汛期降水量为 263.0 mm,平均风速 12.3 m/s,春季干旱,冬季寒冷,无霜期仅 140 d。采样点为典型的砒砂岩地貌,多为切割很深的砒砂岩沟谷,间有盖沙黄土和黄土出现。砒砂岩层由灰白、黄绿、紫红、红棕、黄褐色等不同颜色的砂粒构成,层状结构,组织松散,厚度在 100~300 m 之间,粗沙(粒径 0.05 mm 以上)质量分数约 80%;有黄土覆盖层的砒砂岩区黄土厚度多不足 50 cm,平均厚度 10 cm 左右^[15-16]。

1.2 试验设计

1.2.1 供试土壤

供试土壤为在采样点采集的黄绿色砒砂岩风化土,其机械组成如表 1 所示。

1.2.2 供试试剂

供试试剂为美国路邦 EN-1 离子型土壤固化剂,由美国 CSS 技术公司生产,是一种高浓缩的溶于水的酱黑色酸性有机溶液。浓缩状态下无挥发性,有强烈刺激性酸味,不燃烧,有腐蚀性,一经稀释,

表 1 试验土壤机械组成

Tab. 1 Mechanical composition of tested soil

各级颗粒质量分数/%			土壤类别
0~0.002 mm	0.002~0.02 mm	0.02~2 mm	
7.443	10.113	82.444	砂质壤土

则是无毒、无公害、无污染、不破坏生态环境的高分子复合材料。硫酸质量分数大于 1%,表面活性剂质量分数 6%,沸点 282℃,密度 1.709 g/cm³,25℃时密度为 1.70 g/cm³,pH 值 1.05,挥发率在 1% 以内。

1.2.3 试验设计

试验设计 4 个因素,分别为 EN-1 掺量、养护龄期、压实度和含水率,EN-1 掺量设 0、0.02%、0.05%、0.10%、0.20% 和 0.50% 6 个水平,养护龄期设 1、7、15 和 30 d 4 个水平,压实度设 80%、85%、90% 和 95% 4 个水平,含水率设 10.91%、12.91%、14.91% 和 16.91% 4 个水平(通过击实试验确定本试验最优含水率为 14.91%)。当 EN-1 掺量和养护龄期为变量时,压实度和含水率为定量,分别为 95% 和 14.91%;当压实度为变量时,EN-1 掺量、养护龄期和含水率为定量,分别为 0.10%、1 d 和 14.91%;当含水率为变量时,EN-1 掺量、养护龄期和压实度为定量,分别为 0.10%、7 d 和 95%。对不同处理的固化土进行直剪试验,每处理 3 次重复。

1.3 试验方法

1.3.1 土样制备

称取一定量砒砂岩风化土的风干土,测其含水率并计算干土质量,称取试验设计时所需掺量的 EN-1,按试验设计的含水率添加水搅拌并和土样充分混合,配置成试验所需含水率的制样土,静置于密闭容器中润湿 12~24 h,待土壤含水率均匀后按试验设计的压实度制备土样,计算称取相应环刀容积的试验土料,以静力压力法将土料压入环刀中制成试验土样,将制成的试样放在塑料袋内置于室内自然环境中,静置养护到试验所需天数进行直剪试验。

干土质量计算公式为

$$m_d = \frac{m}{1 + 0.01w_0} \quad (1)$$

式中 m_d ——干土质量, g

m ——风干土质量, g

w_0 ——风干土含水率, %

土样制备时所需加水质量计算公式为

$$m_w = \frac{0.01(w - w_0)m_0}{1 + 0.01w_0} \quad (2)$$

式中 m_w ——土样制备时所需加水质量, g

m_0 ——风干土的土样质量, g

w ——试验所需土样含水率, %

制备试验土样所需的总土质量计算公式为

$$M = (1 + 0.01w_0)\rho_d V \quad (3)$$

式中 M ——制备试验土样所需的总土质量, g

ρ_d ——试验所需土样干密度, g/cm^3

V ——试验容器的容积, cm^3

1.3.2 试验方法

直剪试验应用应变控制式直剪仪进行快剪, 每组试验取 4 个土样, 首先将装有土样的环刀平口向下对准剪切盒口, 在土样顶面放入不透水板, 然后将土样缓慢推入剪切盒, 移去环刀, 调整直剪仪量力环百分表读数为零。分别施加垂直压力 p 为 100、200、300、400 kPa, 秒表开始计时, 剪切速度控制在 12 r/min, 使土样沿剪切盒水平接触面发生剪切位移直至破坏。剪切过程中每隔 15 s 测读相应的土样剪切位移 λ , 并求出施加不同垂直压力 p 下的剪切力, 计算公式为

$$\tau = CR / (10A) \quad (4)$$

式中 τ ——剪切力, kPa

C ——量力环率定系数, N/mm

R ——量力环百分表读数, mm

A ——环刀底面积, cm^2

绘制一定 p 条件下, 以 λ 为横坐标, τ 为纵坐标的关系曲线, 该关系曲线上峰值点或稳定值就是抗剪强度 τ_f , 若无明显峰值点, 则取 $\lambda = 4$ mm 时对应的 τ 作为抗剪强度 τ_f 。以 τ_f 为纵坐标, p 为横坐标, 绘制 τ_f 与 p 的关系曲线, 该直线在纵坐标上的截距就是 c , 倾角为 φ , 即

$$\tau_f = c + p \tan \varphi \quad (5)$$

式中 c ——土的凝聚力, kPa

φ ——土的内摩擦角, ($^\circ$)

式(5)就是土壤抗剪强度规律的数学表达式, 称为库仑定律, 其中 c 和 φ 被称为土的抗剪强度指标。

2 结果与分析

土壤的抗剪强度是表征土力学性质重要的指标, 能直接反映土体在外力作用下发生剪切变形乃至破坏的难易程度, 它与边坡的冲刷稳定性密切相关。衡量土的抗剪强度的 2 个重要参数是凝聚力 c 和内摩擦角 φ , 它们的数值越大, 表明土的抗剪强度越强。 c 主要来源于土壤颗粒之间的胶结作用、电磁引力、静电引力以及毛细管水压力等; φ 与土壤颗粒的滑动、颗粒重新排列、颗粒破裂以及体积变化阻力等因素有关^[17]。

2.1 EN-1 掺量

将不同掺量的 EN-1 固化剂添加到砒砂岩风化土中, 在土壤含水率为 14.91%、土壤压实度为 95% 的条件下养护一定时间, 在不同养护龄期对不同 EN-1 掺量的固化土进行直剪试验, 结果如图 1 所示。

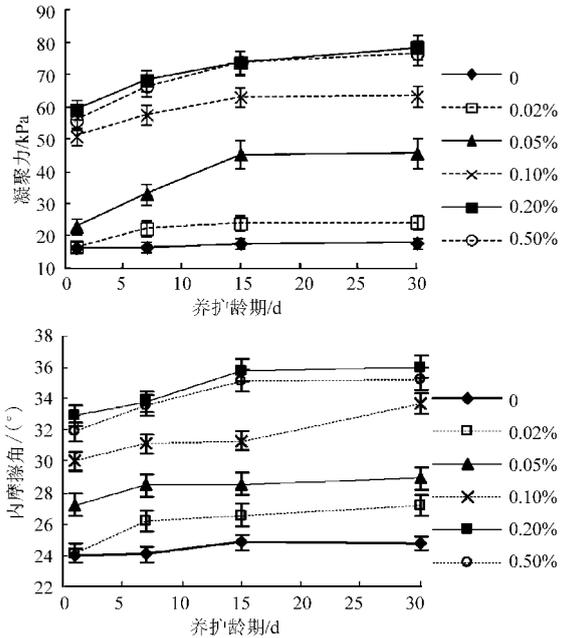


图1 EN-1 掺量和养护龄期对砒砂岩固化土凝聚力和内摩擦角的影响

Fig. 1 Effect of EN-1 content and curing age on cohesion and internal friction angle of Pisha sandstone solidified soil

由图 1 可知, 在砒砂岩风化土中添加 EN-1 后, 固化土的 c 和 φ 均较素土有了不同程度的增大。砒砂岩素土的 c 和 φ 为 16.45 kPa 和 23.97°, 按 EN-1 掺量 0.02%、0.05%、0.10%、0.20% 和 0.50% 养护 1 d 后, 固化土的 c 和 φ 分别为 16.65 kPa 和 24.14°、23.00 kPa 和 27.23°、50.91 kPa 和 30.00°、59.10 kPa 和 32.96°、55.90 kPa 和 31.89°, 固化土的 c 和 φ 分别比素土增大了 1.22% 和 0.71%、39.82% 和 13.90%、209.48% 和 25.16%、259.27% 和 37.51%、239.82% 和 33.04%, 显然并不是 EN-1 掺量越大, 砒砂岩固化土的抗剪强度越大, 当掺量大于 0.20% 时, 抗剪强度反而降低, 表明砒砂岩风化土中 EN-1 掺量并不是越大越好, 它有一个最佳掺入比, 掺入比过高反而会降低土壤抗剪强度, 使 EN-1 的有效利用率降低。EN-1 掺量对砒砂岩固化土 c 的影响程度要大, 而对 φ 的影响程度相对要小。

综合以上分析, 虽然砒砂岩风化土的抗剪强度随着 EN-1 掺量的增大而增强, 但当 EN-1 掺量大于 0.20% 时其有效利用率却随着 EN-1 掺量的增大而减小, 同时考虑大掺量会增加经济开支, 所以在

既能满足边坡安全的抗剪强度要求下,又在经济上可行的前提下,建议在砒砂岩地区工程边坡修筑中 EN-1 的适宜掺量为 0.20%。

2.2 养护龄期

由图 1 还可知养护龄期对掺入 EN-1 后砒砂岩固化土抗剪强度的影响。EN-1 掺量一定时,随着养护龄期的增长,砒砂岩固化土的 c 和 φ 也随之增大。以砒砂岩固化土 0.10% 的 EN-1 掺量为例,养护龄期为 1 d 时 c 和 φ 分别为 50.91 kPa 和 30.00° ,在养护 7、15 和 30 d 时,EN-1 固化土的 c 分别较养护 1 d 增大了 13.20%、23.98% 和 24.59%, φ 分别较养护 1 d 增大了 3.73%、4.37% 和 12.17%。同样,养护龄期对砒砂岩固化土的 c 比 φ 影响要大。

随养护龄期的增长,EN-1 与砒砂岩风化土反应更充分,土壤颗粒间的联结力更大,土体骨架更密实坚硬,加固土体承受外力剪切的能力增大,抵抗边坡失稳变形和破坏的能力也相应提高,最终导致固化土 c 和 φ 增大,即使 EN-1 掺量较小时也能有效提高 EN-1 固化土的抗剪强度。但当养护龄期增长到一定程度(15 d),随着养护龄期的增长,砒砂岩固化土的抗剪强度指标增大也变缓,尤其是 EN-1 掺量在 0.05% 以上时,EN-1 已基本与砒砂岩风化土完全反应,在工期限制条件下可尽量延长砒砂岩固化土的养护龄期,至少要在 7 d 以上,这样才能更有效提高砒砂岩风化土的抗剪强度,但考虑施工时间应以不超过 15 d 为宜。

2.3 土壤压实度和含水率

将掺量为 0.10% 的 EN-1 固化剂添加到砒砂岩风化土中,制备不同土壤含水率和压实度处理的固化土土样,养护 1 d 后分别对其进行直剪试验,结果如图 2 所示。

由图 2 可知,添加 EN-1 后,砒砂岩固化土抗剪强度随着压实度的增大而增大,随着含水率的增大而减小。在土壤含水率为 14.91% 时,压实度从 80% 分别增大到 85%、90% 和 95%,固化土的 c 和 φ 分别增大了 19.99%、2.50%,38.47%、5.40%,73.34%、10.25%;在土壤压实度为 95% 时,含水率从 10.91% 分别增大到 12.91%、14.91% 和 16.91%,固化土 c 和 φ 分别减小了 0.57%、7.42%,4.11%、11.71%,8.29%、12.92%。当土壤压实度在 90% 以内,固化土抗剪强度增强幅度较小(压实度为 80% 和 85% 的个别处理间差异并不显著,但它们与压实度为 90% 和 95% 处理间差异显著),说明砒砂岩风化土添加 EN-1 后,土壤不被压实到很大程度时 EN-1 固化砒砂岩风化土的效果并不明显。

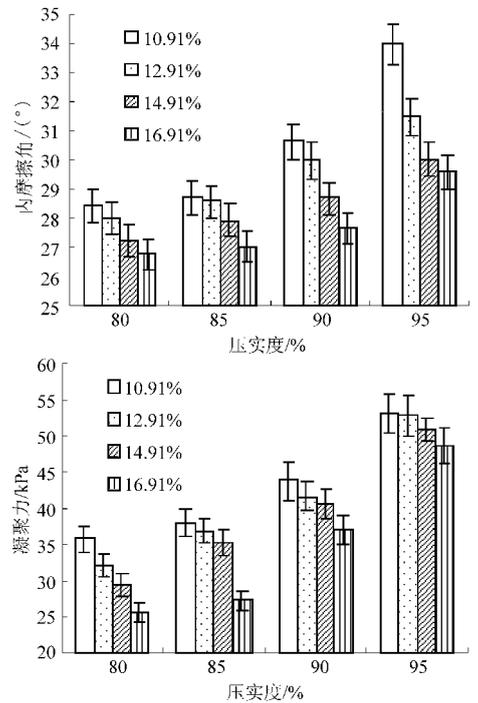


图 2 压实度和含水率对砒砂岩固化土凝聚力和内摩擦角的影响

Fig. 2 Effect of compaction degree and water content on cohesion and internal friction angle of Pisha sandstone solidified soil

砒砂岩风化土中加入 EN-1 后,如果不经过压实(压实度在 85% 以下),即使 EN-1 的掺量再多,其抗剪强度也不会太高,只有将固化土夯实,使土壤颗粒间空隙减少,才能保证 EN-1 和砒砂岩风化土充分反应,使其具有较高的抗剪强度。当土壤压实度较小时,土样较为疏松,土壤颗粒之间结合并不紧密,从而使其抗剪强度指标增大较缓慢;随着压实度的增大,颗粒之间结合逐渐紧密,土样变得密实,土壤颗粒间摩擦力增大,外来剪切力作用于克服土壤颗粒间摩擦力做的功会迅速增大,从而其抗剪强度指标增大较快。在工程边坡实践修筑过程中,应尽可能增大固化土的密度,建议在砒砂岩地区工程边坡实际修筑中土壤压实度应至少控制在 95% 以上。

随着土壤含水率的增大,土壤颗粒周围的水膜厚度会增大,土壤颗粒间的结合力减小,土壤颗粒之间容易移动,导致摩擦力降低, c 和 φ 相应减小,同时固化土含水率增大时,水分子对胶结物质会产生胶溶作用和楔入作用,导致固化土的凝聚力减小,土壤抗剪强度降低。可见土壤含水率在 14.91% 时,固化土的抗剪强度并不是最大的,但由于土壤含水率小于 14.91% 时,分子间的电场力会阻碍土壤颗粒相互靠近,影响土壤的压实度,若要想达到相同的土壤密度,就需要付出较大的击实功而影响土壤的抗剪强度;土壤含水率大于 14.91% 时,多余水分会

在土壤颗粒周围形成比较厚的水膜,使土壤颗粒间的结合强度降低,也会影响土壤压实度。因此在砒砂岩地区工程边坡修筑实践中应严格控制土壤含水率,同时考虑到土壤的压实效果,建议砒砂岩固化土的土壤含水率应略低于14.91%。

3 结论

(1)添加EN-1后,能有效提高砒砂岩风化土的抗剪强度,随着EN-1掺量的增大和养护龄期的延长,EN-1固化土的 c 和 φ 均较素土有不同程度的增大。但并不是EN-1掺量越大,砒砂岩固化土的抗剪强度越大,当掺量为0.20%时,抗剪强度最

大;当养护龄期为30d时,砒砂岩固化土抗剪能力最强。

(2)添加EN-1后,砒砂岩固化土的 c 和 φ 随着压实度的增大而增大,随着含水率的增大而减小,说明其抗剪强度随压实度的增大而增大,随含水率的增大而减小。

(3)在砒砂岩地区实际应用EN-1固土护坡时,为使EN-1固化土具有良好的抗剪强度并满足工程需要,建议EN-1适宜掺量为0.20%,而且应尽可能延长养护龄期,增大压实度,控制含水率,养护龄期在7~15d之间为宜,压实度应控制在95%以上,含水率应略低于14.91%。

参 考 文 献

- 张平仓,刘玉民,张仲子. 皇甫川流域侵蚀产沙特征及成因分析[J]. 水土保持通报,1992,12(2):15~24.
Zhang Pingcang, Liu Yumin, Zhang Zhongzi. The features of sediment production and the analysis of genesis by erosion in Huangfuchuan watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1992,12(2):15~24. (in Chinese)
- 王银梅,杨重存,堪文武,等. 新型高分子材料SH加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2554~2559.
Wang Yinmei, Yang Chongcun, Kan Wenwu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 24(14):2554~2559. (in Chinese)
- 杜应吉,朱建宏. 土壤固化剂对不同土质固化性能影响的试验研究[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):229~231.
Du Yingji, Zhu Jianhong. Impact on soil solidifying agent to different soil characteristics[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4):229~231. (in Chinese)
- 王生俊,韩文峰,王银梅. LD岩土胶结剂加固黄土试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(增刊2):2888~2893.
Wang Shengjun, Han Wenfeng, Wang Yinmei. Testing study on loess consolidated by LD serial rock-soil cemedin[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 22(Supp.2):2888~2893. (in Chinese)
- 张丽萍,张兴昌,孙强. 2种离子固化剂改善黄土抗剪强度和抗渗性的研究[J]. 节水灌溉,2009(5):35~38.
Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Study on capacity of improving loess anti-shear strength and anti-permeability of two kinds of ionic soil solidified agent[J]. Water Saving Irrigation, 2009(5):35~38. (in Chinese)
- 张丽萍,张兴昌,孙强. EN-1固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):60~65.
Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(4):60~65. (in Chinese)
- 张丽萍,张兴昌,孙强. SSA土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(7):45~49.
Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Effect of SSA soil stabilizer on compaction, shear strength and permeability characteristics of loess[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7):45~49. (in Chinese)
- 单志杰,张兴昌,赵伟霞,等. EN-1固化剂对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(5):6~9.
Shan Zhijie, Zhang Xingchang, Zhao Weixia, et al. Effects of EN-1 soil stabilizer on soil anti-erodibility[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(5):6~9. (in Chinese)
- 苏涛,张兴昌. EN-1对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):68~75.
Su Tao, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on slope runoff hydraulic characteristics of pisha sandstone stabilized soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):68~75. (in Chinese)
- Miller G A, Zaman M. Field and laboratory evaluation of cement kiln dust as a soil stabilizer[J]. Transportation Research Record, 2000, 1714:25~32.
- Saboundjian S. Subbase treatment using EMC2 soil stabilizer-final rept 1997—2001[R]. Juneau: Alaska Dept of Transportation and Public Facilities, Research and Technology Transfer,2002.
- Katz L E, Rauch A F, Liljestrand H M, et al. Mechanisms of soil stabilization with liquid ionic stabilizer[J]. Transportation Research Record,2001,1757:50~57.
- Bell F G. An assessment of cement-PFA and time-PFA used to stabilize clay-size materials[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment,1994,49(1):25~32.
- 樊恒辉,高建恩,吴普特,等. 土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J]. 农业工程学报,2006,22(10):73~77.
Fan Henghui, Gao Jianen, Wu Pute, et al. Comparison of different construction techniques for the catchment area with soil stabilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006,22(10):73~77. (in Chinese)

- 2 Cornelis W M, Ronsyn J, Meirvenne M. Evaluation of pedo-transfer functions for predicting the soil moisture retention curve [J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 638 ~ 648.
- 3 Wosten J H M, Pachepsky Y A, Rawls W J. Pedo-transfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics [J]. Journal of Hydrology, 2001, 251(3~4): 123 ~ 150.
- 4 缴锡云, 王文焰, 雷志栋, 等. 估算土壤入渗参数的改进 Maheshwari 法 [J]. 水利学报, 2001, 32(1): 62 ~ 66.
Jiao Xiyun, Wang Wenyan, Lei Zhidong, et al. Improved Maheshwari method for estimating infiltration parameters of soil [J]. Hydraulic Engineering, 2001, 32(1): 62 ~ 66. (in Chinese)
- 5 李雪转, 樊贵盛. 土壤入渗积水时间预测模型研究 [J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 269 ~ 274.
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Models of forecasting infiltration-waterlogging time in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(2): 269 ~ 274. (in Chinese)
- 6 王改改, 张玉龙. 土壤传递函数模型的研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 99 ~ 101.
Wang Gangan, Zhang Yulong. Advances in model of soil pedo-transfer functions [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(1): 99 ~ 101. (in Chinese)
- 7 王黎军, 丁小刚. 土壤含水率的预测模型 [J]. 中国农村水利水电, 2010(4): 79 ~ 80.
Wang Lijun, Ding Xiaogang. Predictive model of soil moisture [J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(4): 79 ~ 80. (in Chinese)
- 8 王维汉, 缴锡云. 畦灌土壤入渗参数估算的线性回归法 [J]. 水利学报, 2007, 38(4): 468 ~ 471.
Wang Weihai, Jiao Xiyun. Linear regression approach for estimating soil infiltration parameters of border irrigation [J]. Hydraulic Engineering, 2007, 38(4): 468 ~ 471. (in Chinese)
- 9 张晓文, 杨煜普, 许晓鸣. 神经网络传输函数的功能分析与仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2005, 22(10): 176 ~ 178.
Zhang Xiaowen, Yang Yupu, Xu Xiaoming. Genetic optimization for neural network evolving with function based coding [J]. Computer Simulation, 2005, 22(10): 176 ~ 178. (in Chinese)
- 10 曹崇文. 利用土壤传输函数确定入渗参数的方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
Cao Congwen. Method study on determining soil infiltration parameters with pedo-transfer functions [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007. (in Chinese)
- 11 李雪转, 樊贵盛. 非充分供水与充分供水入渗模型参数间关系试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 44 ~ 49.
Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Experiment on relations of infiltration model parameter in non-sufficient and sufficient water supplies [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 44 ~ 49. (in Chinese)
- 12 王改改, 张玉龙, 虞娜. 多数据源土壤传递函数模型在水分模拟中的不确定性 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 45 ~ 50.
Wang Gaigai, Zhang Yulong, Yu Na. Soil pedotransfer function of multiple data source and its uncertainty in water simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 45 ~ 50. (in Chinese)
- 13 刘继龙, 马孝义, 张振华, 等. 基于联合多重分形的土壤水分特征曲线土壤传递函数 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 51 ~ 56.
Liu Jilong, Ma Xiaoyi, Zhang Zhenhua, et al. Pedotransfer functions of soil water retention curve based on joint multifractal [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 51 ~ 56. (in Chinese)

(上接第 90 页)

- 15 李怀恩, 同新奇, 张康, 等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 69 ~ 73.
Li Huaien, Tong Xinqi, Zhang Kang, et al. Experimental research on the soil moisture regulation of seabuckthorn plant flexible dams [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 69 ~ 73. (in Chinese)
- 16 胡建忠, 杜文嫣, 殷丽强, 等. 砒砂岩区沙棘人工林的萌蘖能力 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(4): 26 ~ 30.
Hu Jianzhong, Du Wenyan, Yin Liqiang, et al. Sprouting capacity of artificial hippophae rhamnoides forest in soft sandstone areas [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 26 ~ 30. (in Chinese)
- 17 唐朝生, 施斌, 高玮, 等. 含沙量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 2 968 ~ 2 973.
Tang Chaosheng, Shi Bin, Gao Wei, et al. Study on effects of sand content on strength of polypropylene fiber reinforced clay soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 26(Supp. 1): 2 968 ~ 2 973. (in Chinese)
- 18 刘月梅, 张兴昌. EN-1 对黄土性固化土水分垂直入渗特征的影响 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 65 ~ 73.
Liu Yuemei, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on water vertical infiltration characteristics for loess stabilized soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 65 ~ 73. (in Chinese)